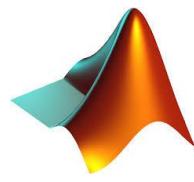


RMXplorer



LAB2-3 : Brushed DC Motor ,Stepper Motor และ Brushless DC Motor

Name

- นายฉัตรพัฒน์ สุขพันธ์อํา 66340500010
- นายนันทพงศ์ เสนียรพงศ์ 66340500025
- นายศตายุ ชำนาญศรีชูภูล 66340500075

Objectives

1. เพื่อประยุกต์การทดลองโดยใช้ทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ในการ สืบเสาะพัฒนรม ปรากฏการณ์ ทดลอง บันทึกผลการทดลอง สรุปผล และอภิปรายผลการทดลอง วิธีการใช้งาน Motor ผ่านการใช้บอร์ด Nucleo-G474RE และอ่านค่าที่ได้ผ่านโปรแกรม MATLAB เพื่อนำมา วิเคราะห์หลักการทำงานบันทึกผลการทดลองเก็บเป็นหลักฐาน มีเหตุผลรองรับ และ ตรวจสอบ ความถูกต้องเทียบกับทฤษฎีที่น่าเชื่อถือ
2. เพื่อให้เข้าใจปริมาณทางฟิสิกส์ของ Sensor ทั้งหมดตั้งแต่ต้นจนจบกระบวนการได้ เช่น การ อธิบายหลักการวัดความเร็วเชิงมุมของ
3. เพื่อเขียนรายงาน สัญลักษณ์ และสมการทางวิทยาศาสตร์ ได้อย่างถูกต้อง ทั้งขนาด และรูปแบบ อักษร การเว้นช่องไฟ การเว้นขอบกระดาษ การเว้นระยะพิมพ์ ให้ได้ระยะที่เหมาะสมตามหลัก สถาณ

1.Brushed DC Motor

1.1. จุดประสงค์

- 1.1.1. เพื่อเข้าใจหลักการทำงานและวิธีการควบคุม Brushed DC Motor ประสิทธิภาพของ DC Motor
- 1.1.2. เพื่อเข้าใจวิธีการอ่านและวิธีการหาของ Motor Characteristic และ Motor Specification ของ motor แต่ละชนิด
- 1.1.3. เพื่อเข้าใจกระบวนการอ่านค่าความเร็วจากค่าตำแหน่งที่ Wrap-around ด้วยการ Unwrap จากแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจาก Hall Current Sensor
- 1.1.4. การควบคุมทิศทางของ Motor ด้วย H Bridge Drive และ เข้าใจวิธีการใช้งานทั้ง 3 Mode (Sign-Magnitude, Locked Anti-Phase, Async Sign-Magnitude) และ การป้องกันการการ Shoot-Though ภายใน H Bridge Drive
- 1.1.5. เพื่อเข้าใจการควบคุมความเร็วของ Motor ด้วย Pulse Width Modulation(PWM) และ ความสัมพันธ์ของ Speed, Torque, Current, Power, %Efficiency ทั้งในเงื่อนไขแบบ No Load และ Full Load
- 1.1.6. เพื่อวิเคราะห์ผลการทดลอง หลักการทำงานของ DC Motor และความสามารถของ Motor-Torque Constant และ Back-EMF Constant ของ DC motor
- 1.1.7. สามารถอธิบายกระบวนการ Signal Conditioning, Signal Processing ทั้งหมดได้ตั้งแต่ต้นจนจบกระบวนการ ว่าค่าที่อ่านได้จาก Incremental Encoder, Hall Current Sensor มีที่มาอย่างไร อธิบายให้เห็นถึงวิธีคิดและขั้นตอนทั้งหมด ทั้งก่อนและ หลัง Calibrate Sensor
- 1.1.8. สามารถเขียนโปรแกรม โดยประยุกต์ใช้ MATLAB และ Simulink ในการสั่งการหรือรับค่าร่วมกับบอร์ด Nucleo STM32G474RE โดยใช้สัญญาณจาก Incremental Encoder, Hall Current Sensor เป็น Input และ และแสดงสัญญาณ Output จากการ Log สัญญาณ และแสดงผลเป็นกราฟจาก Data Inspector ใน MATLAB Simulink และให้เห็นว่าสัญญาณ Output แปรผันตามสัญญาณ Input แบบ Real Time โดยมี Output เป็นความเร็วเชิงมุม และกระแสไฟฟ้าในหน่วย SI derived

1.2. สมมติฐาน

1.2.1. จากสมการหา Motor Characteristic ที่ได้มา หากได้ค่าที่ต้องการสามารถสร้างกราฟ Motor Characteristic ได้

1.2.2. การจ่ายความถี่ที่สูงจะทำให้กระแสคงที่มากขึ้น

1.3. ตัวแปร

- ตัวแปรต้น : ความถี่ และ PWM
ตัวแปรตาม : ความเร็ว, กระแส และ ทอร์ค
ตัวแปรควบคุม : บอร์ด Nucleo STM32G474RE
load ที่เกิดจากบอร์ด
current calibrate
สายจัมเปอร์

1.4. นิยามศัพท์เฉพาะ

ศัพท์เฉพาะ	ความหมาย

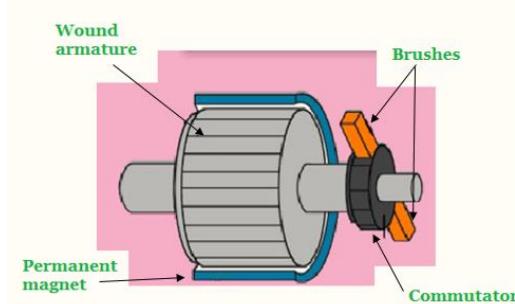
1.5. นิยามเชิงปฏิบัติการ

ศัพท์เฉพาะ	ความหมาย
ขาดลวดอาร์เมเจอร์	

1.6. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Brushed DC Motor คือ มอเตอร์ DC ประเภทหนึ่งที่เรียบง่ายที่สุด ใช้แปรรูป (Brushed) ในการส่งกระแสไฟฟ้าไปยังชุดลวดมอเตอร์ผ่านการสับเปลี่ยนเชิงกล

โครงสร้างของ Brushed DC Motor โดยทั่วไปประกอบด้วยแม่เหล็กถาวรคู่เรียกว่า สเตเตอร์(stator) และชุดลวดมอเตอร์ที่เรียกว่าโรเตอร์(rotor) เชื่อมต่อ กับคอมมิวเตเตอร์(commutator) ในมอเตอร์นี้ชุดลวดอาร์เมเจอร์จะอยู่บนโรเตอร์และแม่เหล็กถาวรจะอยู่บน สเตเตอร์เสมอ ตัวนำเหล่านี้ได้รับพลังงานจากแหล่งพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งใช้แปรรูปโลหะ (ซึ่ง หมุนไปพร้อมกับโรเตอร์) เพื่อถ่ายโอนกระแสไฟฟ้าไปยังชุดลวด แม้ว่ามอเตอร์เหล่านี้จะมี ประสิทธิภาพค่อนข้างสูง แต่ก็ต้องบำรุงรักษาแปรรูปเป็นระยะๆ



การทำงานของ Brushed DC Motor เมื่อจ่ายไฟให้กับมอเตอร์ผ่านแบตเตอรี่ หรือ แหล่งจ่ายไฟกระแสกระแสไฟฟ้าจะหากจากแหล่งจ่ายไฟยังอาร์เมเจอร์ผ่านแปรรูป แปรรูป จะส่งกระแสไฟฟ้าไปยังอาร์เมเจอร์โดยสัมผัสกับคอมมิวเตเตอร์ ทันทีที่ชุดลวดอาร์เมเจอร์ได้รับ พลังงาน ชุดลวดจะเริ่มมีพุติกรรมเหมือนแม่เหล็ก และทำให้ขั้วของชุดลวดจะเริ่มผลักข้าวของ แม่เหล็กทราบที่ประกอบเป็นสเตเตอร์ เมื่อขั้วผลักกัน เพลาของมอเตอร์ที่ชุดลวดอาร์เมเจอร์ติดอยู่จะ เริ่มหมุนด้วยความเร็วและแรงบิด ความเร็วและแรงบิดขึ้นอยู่กับความแรงของสนามแม่เหล็กรอบๆ อาร์เมเจอร์

ประสิทธิภาพของ DC Motor คืออัตราส่วนของกำลังขาออก(output power)ต่อกำลังขาเข้า(input power)แสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ ยิ่งประสิทธิภาพสูงก็จะยิ่งมีกำลังมากขึ้น โดย DC Motor ขึ้นชื่อ ในเรื่องแรงบิดเริ่มต้นสูงและการควบคุมแต่ประสิทธิภาพต่ำ โดยทั่วไปประสิทธิภาพจะอยู่ระหว่าง 50-80%

โดยมีสมการหาค่าประสิทธิภาพของ DC Motor ดังนี้

$$\text{Efficiency, } \eta = \frac{\text{Power Output}}{\text{Power Input}} \times 100\% = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

โดย

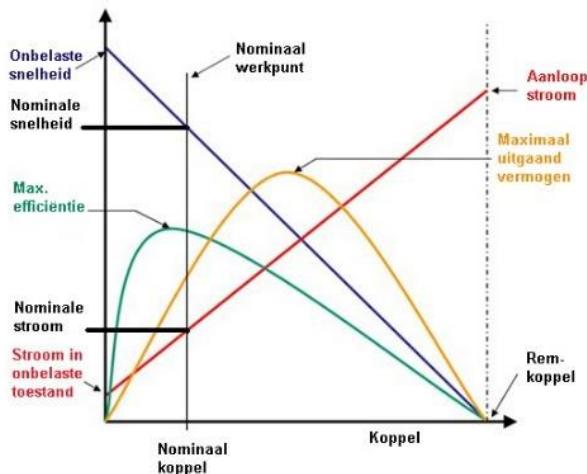
$$\text{Power input, } P_{in} = \text{Power Output}(P_{out}) + \text{Losses}$$

ซึ่งทำให้สมการ

$$\text{Efficiency, } \eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \text{losses}} \times 100\%$$

Motor Characteristic คือ เป็นกราฟแสดงคุณลักษณะระหว่างปริมาณต่างๆของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรง กราฟนี้จะอธิบายลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ DC และวิธีใช้กราฟดังกล่าวเพื่อเลือกมอเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน โดยกราฟดังกล่าว

กราฟ Motor Characteristic ที่พบได้บ่อยจะมีแกนนอนเป็น ความเร็ว (Speed,) และแกนตั้ง เป็น แรงบิด (Torque) หรือปริมาณอื่นๆ เช่น Torque-Speed Characteristic (กราฟแรงบิด-ความเร็ว) , Power-Speed Characteristic (กราฟกำลัง-ความเร็ว) , Efficiency-Speed Characteristic (กราฟประสิทธิภาพ-ความเร็ว) และ Current-Speed Characteristic (กราฟกระแส-ความเร็ว)



การทำกราฟ motor characteristics สามารถทำโดยผ่านสมการทั้งหมด 4 สมการและ จะหาได้ จำเป็นที่ต้องมีค่าเหล่านี้จากการทดลองและเก็บผล

- 1.No-load current (i_{NL})
 - 2.No-load speed (ω_{NL})
 - 3.Stall current (i_{ST})
 - 4.Stall torque (τ_{ST})
- 1.สมการหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็ว

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

หรือ

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

2. สมการหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความเร็ว

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

หรือ

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

3. สมการหาแรงบิดที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า

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

4. สมการหากำลังของมอเตอร์

$$P_{max} = \frac{\tau_{ST} \omega_{NL}}{4}$$

หรือ

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

Dynamic torque คือแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาและวัดได้จากหลายสาขา เช่น การสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์และมอเตอร์ และการวัดแรงบิดแรงกระแทกด้วยเครื่องมือวัดแรงบิดแบบมือ

Motor Specifications คือความสามารถของมอเตอร์แต่ละตัวคร่าวๆ แรงดันไฟฟ้าเท่าไหร่ แรงบิดสูงสุดคือเท่าไหร่ อัตราเร็วสูงสุดคือเท่าไหร่ ฯลฯ

Gear ratio		1/10	1/30	1/60	1/120	1/150	1/200	1/300
Tolerance torque	mN·m	44	147	294	588			
Rated torque	mN·m	29	98	196	392	490	588	
Rated speed	min ⁻¹	460	140	70	33	27	22	14.5
Rated current	mA	DC12 V : 280			DC24 V : 140			DC12 V : 180 DC24 V : 90
No load speed	min ⁻¹	570	173	87	41	33	26	16.3
Starting current	mA	DC12 V : 1200			DC24 V : 600			

"Wrap-around" คือ สภาพที่กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดของอาร์มาเจอร์ ทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นขยายหรือเบี่ยงเบนออกจากเส้นทางที่ต้องการ ซึ่งมักเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการคอมมิวเตชันโดยเฉพาะในกรณีที่มอเตอร์ทำงานด้วยความเร็วสูงหรือมีปฏิกิริยาของอาร์มาเจอร์มากเกินไป

Wrap-around สามารถเกิดได้จากเหตุการณ์ดังนี้

1. มีกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดสูง
2. คอมมิวเตชันไม่เหมาะสมหรือเกิดความล่าช้า
3. ปฏิกิริยาของอาร์มาเจอร์ทำให้สนามแม่เหล็กบิดเบือน

Wrap-around จะส่งผลทำให้เกิด

1. เกิดการสปรัคที่แปรถ่าน มากขึ้น
2. เกิด ความร้อนสูงเกินไป ในคอมมิวเตอร์และขดลวด
3. ประสิทธิภาพของมอเตอร์ลดลงและอาจทำให้คอมมิวเตอร์เสียหายได้

และสามารถแก้ไข้อาการ Wrap-around ได้จาก

1. ใช้ อินเทอร์โพล (Interpoles) เพื่อช่วยปรับการคอมมิวเตชันให้เหมาะสม
2. ปรับ ตำแหน่งแปรถ่าน ให้ถูกต้อง
3. เพิ่มขดลวดชดเชย (Compensating Windings) เพื่อลดผลกระทบจากปฏิกิริยาของอาร์มาเจอร์

"Un-wrap" หมายถึง การแก้ไขหรือการควบคุมการไหลของกระแสและการคอมมิวเตชันให้เหมาะสม เพื่อให้สนามแม่เหล็กในขดลวดอาร์มาเจอร์อยู่ในเส้นทางที่ถูกต้อง ซึ่งเป็นการ ลดหรือป้องกันปัญหา Wrap-around

Un-wrap สามารถเกิดได้จากเหตุการณ์ดังนี้

1. ปรับกระบวนการคอมมิวเตชันให้เหมาะสม
2. ใช้ อินเทอร์โพล เพื่อช่วยในการสับเปลี่ยนกระแสในขดลวดอย่างราบรื่น
3. ปรับแต่งการออกแบบอาร์มาเจอร์หรือขดลวดสนามแม่เหล็กให้สมดุล

Un-wrap มีประโยชน์

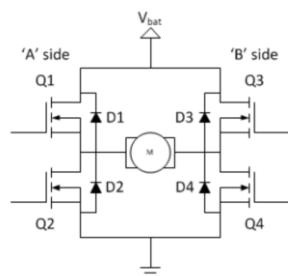
1. ลดการเกิดสปรัคที่แปรถ่าน

2. เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์
3. ลดความเสี่ยงในการเกิดความร้อนสูงเกินไปและความเสียหายของคอมมิวเตอร์และแปรร้งถ่าน

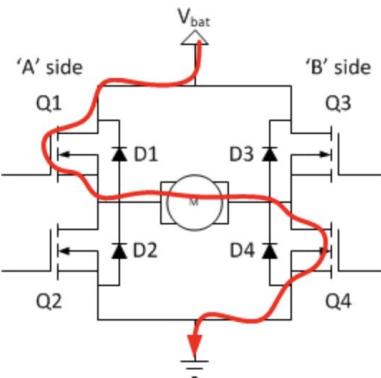
H Bridge Drive คือ วงจรที่ประกอบด้วย MOSFET สี่ตัวที่ควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าไปยัง motor โดยมีวัตถุประสงค์ 2 ประการ ดังนี้

1. แปลงแรงดันไฟฟ้าอินพุตเป็นระดับที่เหมาะสมเพื่อขับเคลื่อน MOSFET
 2. ให้กระแสไฟฟ้าเพียงพอในการ charge และ discharge อย่างรวดเร็วเพียงพอ
- นอกจากนี้ วงจรไดรฟ์จำนวนมากยังมีฟังก์ชันเพิ่มเติม ได้แก่
1. แปลงคำสั่ง Output เป็นสัญญาณ gate-drive ตาม drive mode
 2. ป้องกัน shoot-through
 3. สร้างแรงดันไฟฟ้าสำหรับวงจร gate-drive ด้านสูง (สำหรับ Driver N-channel)
 4. ให้ฟังก์ชันความปลอดภัยเพิ่มเติม เช่น การป้องกันกระแสเกิน
 5. ควบคุมเวลาเปิดและปิดของ FET

วงจรไดรฟ์มีหลายรูปแบบ มีด้วยกันทั้งหมด 4 Mode (Sign-Magnitude, Locked Anti-Phase, Free (high impedance) และ Async Sign-Magnitude)



Sign-Magnitude



Mapping 1	Q1	Q2	Q3	Q4
on-time state	close	open	open	close
off-time state	close	open	close	open

Mapping 2	Q1	Q2	Q3	Q4
on-time state	close	open	open	close
off-time state	open	close	open	close

Mapping 5	Q1	Q2	Q3	Q4
on-time state	open	close	close	open
off-time state	close	open	close	open

Mapping 6	Q1	Q2	Q3	Q4
on-time state	open	close	close	open
off-time state	open	close	open	close

Sign-Magnitude มีหลักการตามนี้ จำกัดตารางจะจับคู่สถานะของสวิตซ์ทั้งสี่เข้ากับ "เวลาเปิด" และ "เวลาปิด" ของสัญญาณควบคุม PWM หาก PWM มีค่า 0% มอเตอร์จะหยุดทำงานโดยไม่มีกระแสไฟฟ้าผ่านมอเตอร์ โดยโหมดนี้จะใช้สัญญาณ 2 สัญญาณในการควบคุม สัญญาณที่ 1 กำหนดทิศทางการหมุน (เช่น สถานะสูง/ต่ำ) สัญญาณที่ 2 เป็นสัญญาณ PWM ที่กำหนดความเร็วของมอเตอร์

โดยมีข้อดีดังนี้

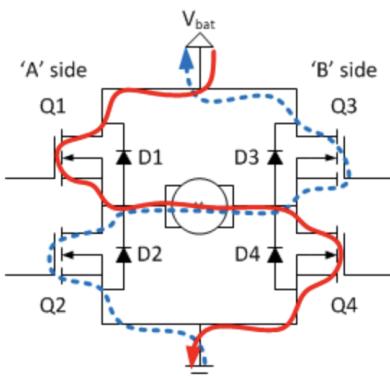
1. ประหยัดพลังงาน เพราะมอเตอร์ไม่กินไฟเมื่อสัญญาณ PWM เป็น 0%

2. ควบคุมได้ง่าย สำหรับการกำหนดความเร็วและทิศทาง

3. ข้อจำกัด: การเบรกมอเตอร์ทำได้ไม่ดีนัก มักจะหยุดแบบไอล (Coasting)

ส่วนมากหมายสำคัญที่ต้องการควบคุมความเร็วและทิศทางอย่างแม่นยำโดยใช้พลังงานน้อย เช่น รถควบคุมวิทยุ หรือเครื่องใช้ไฟฟ้าขนาดเล็ก

Locked Anti-Phase



เมื่อสะพานถูกขับเคลื่อนในโหมดล็อก *Locked Anti-Phase* สถานะของสวิตซ์ทั้งสี่ (Q1...Q4) จะถูกแมปไปยังสัญญาณควบคุม PWM ในสองวิธีที่เป็นไปได้ดังต่อไปนี้

Mapping 3	Q1	Q2	Q3	Q4
on-time state	close	open	open	close
off-time state	open	close	close	open

Mapping 4	Q1	Q2	Q3	Q4
on-time state	open	close	close	open
off-time state	close	open	open	close

โดยมีหลักการทำงานโดยการส่งสัญญาณ PWM โดยสามารถควบคุมสลับทิศทางไปมาระหว่างตามเข็มและทวนเข็มโดยกำหนดค่าความกว้างของ PWM (Duty Cycle) จะกำหนดความเร็วและทิศทางดังนี้

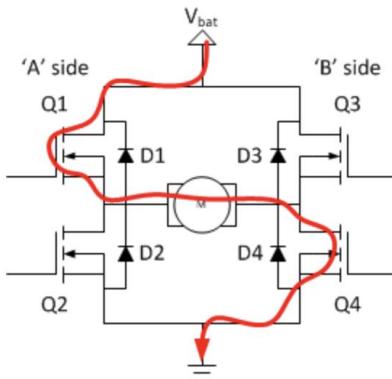
- 1.50% Duty Cycle หมายถึงมอเตอร์หยุดนิ่ง (สลับทิศทางเท่า ๆ กัน)
- มากกว่า 50% หมายถึงหมุนทิศทางหนึ่ง

โดยมีข้อดีดังนี้

- 1.เบรคแบบdynamic เพราะมอเตอร์มีการจ่ายไฟตลอดเวลา
- 2.การตอบสนองเร็ว เนื่องจากมีการเปลี่ยนทิศทางอย่างรวดเร็ว
- 3.กินไฟมากขึ้น เพราะมอเตอร์จ่ายไฟตลอดเวลา

ส่วนมากหมายความว่าทำงานเหมือนกันที่ต้องการเปลี่ยนทิศทางบ่อยและต้องการเบรกอย่างรวดเร็ว เช่น หุ่นยนต์, แขนกลอัตโนมัติ

Async Sign-Magnitude



Mapping A	Q1	Q2	Q3	Q4
on-time state	close	open	open	close
off-time state	close	open	open	open
Mapping B	Q1	Q2	Q3	Q4
on-time state	close	open	open	close
off-time state	open	open	open	close
Mapping C	Q1	Q2	Q3	Q4
on-time state	open	close	close	open
off-time state	open	open	close	open
Mapping D	Q1	Q2	Q3	Q4
on-time state	open	close	close	open
off-time state	open	close	open	open

Async Sign-Magnitude มีหลักการตามนี้จากตารางจะจับคู่สถานะคล้ายกับ sign-magnitude โดยจะปิดสวิตซ์เพียงตัวเดียวจากทั้งหมดสี่ตัว แทนที่จะเป็นสองตัวเหมือนกับไดรฟ์แบบ Sign-Magnitude วิธีนี้จะทำให้กระแสไฟฟ้าในเวลาปิดไฟผ่าน catch-diodes ตัวใดตัวหนึ่ง โดยมีหลักการทำงานคล้ายกับ Sign-Magnitude แต่สัญญาณ PWM และสัญญาณทิศทางสามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างอิสระ ไม่ต้องประสานกันโดยตรง

โดยมีข้อดีดังนี้

1. ความยืดหยุ่นสูง ในการควบคุมทิศทางและความเร็ว
2. ประหยัดพลังงาน เมื่อใช้ PWM ที่มี Duty Cycle ต่ำ
3. ซับซ้อนขึ้น เพราะต้องควบคุมสัญญาณแยกจากกัน

หมายเหตุระบบที่ต้องการควบคุมทิศทางและความเร็วแยกจากกัน เช่น ระบบควบคุมการขับเคลื่อนที่ซับซ้อน

Pulse Width Modulation เป็นเทคนิคที่ใช้กันทั่วไปในการควบคุมพลังงานที่จ่ายไปยังอุปกรณ์ไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าหรือระดับพลังงานเฉลี่ยที่ต้องการ หลักการมอดูเลตความกว้างพัลส์ (PWM) จะใช้กับสัญญาณเป็นระยะ ซึ่งโดยปกติจะเป็นคลื่นสี่เหลี่ยม

ส่วนประกอบสำคัญของการปรับความกว้างพัลส์ (PWM) คือรอบหน้าที่ ซึ่งกำหนดเป็นอัตราส่วนของความกว้างพัลส์ต่อช่วงเวลาทั้งหมด การเพิ่มขึ้นของรอบหน้าที่แปลเป็นการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ส่งออก โดยทั่วไปแล้ว PWM ใช้ในการรับสัญญาณ analog จากบริการดิจิทัล เช่น ไมโครคอนโทรลเลอร์ และเป็นตัวแทนของ amplitude ของสัญญาณ input สัญญาณ analog

การควบคุมแรงบิด (Torque Control) ใน Brushed DC Motor เป็นเทคนิคที่ช่วยให้สามารถควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ได้อย่างแม่นยำ ซึ่งมีประโยชน์อย่างยิ่งในงานที่ต้องการให้มอเตอร์รักษาแรงบิดคงที่หรือตอบสนองตามความต้องการของโหลดที่เปลี่ยนแปลงไป เช่น งานในระบบขับเคลื่อน, หุ่นยนต์, เครื่องจักรและเครื่องมือไฟฟ้าต่าง ๆ

ใน Brushed DC Motor แรงบิด (Torque) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับ กระแสไฟฟ้า (Current) ที่จ่ายให้กับ motor ตามสมการดังนี้

$$\tau = Km \cdot i$$

โดยที่:

$$\tau = \text{แรงบิด (Nm)}$$

$$K_m = \text{Torque Constant (Nm/A)}$$

$$i = \text{กระแสไฟฟ้า (A)}$$

Torque Constant จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของมอเตอร์ เช่น การออกแบบขดลวดและสนามแม่เหล็ก

back-emf constant คือค่าคงที่ที่ใช้บอกความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าแบบย้อนกลับ (Back Electromotive Force, Back-EMF) ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์และความเร็วเชิงมุม (Angular Velocity) ของมอเตอร์ ในการจะวัดได้จำเป็นต้องใช้ R_{shunt} เพื่อหาระยะแสงที่กลับมาโดยมีสมการดังนี้

$$v_{EMF} = K_e \cdot \omega$$

$$V_{EMF} = \text{Back-EMF (โวลต์)}$$

$$K_e = \text{Back-EMF Constant (โวลต์/เรเดียนต่อวินาที หรือ โวลต์/รอบต่อนาที)}$$

$$\omega = \text{ความเร็วเชิงมุม (เรเดียนต่อวินาที หรือ รอบต่อนาที)}$$

1.7.วิธีดำเนินการทดลอง

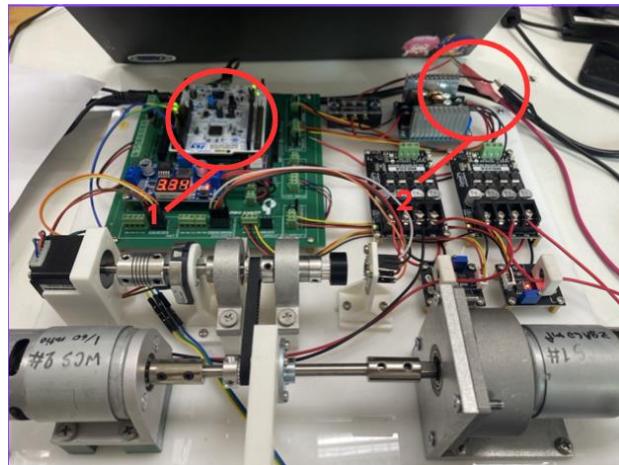
1. ประกอบ board Nucleo STM32G474RE เข้ากับ MotorXplorer และ LoadCellXplorer
2. เชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อใช้งานผ่าน matlab
3. เก็บผลการทดลอง 4 ค่า
 - 3.1.No-load current (i_{NL})
 - 3.2.No-load speed (ω_{NL})
 - 3.3.Stall current (i_{ST})
 - 3.4.Stall torque (τ_{ST})
4. เก็บผลความถี่เทียบกับความเร็ว และ กระแส
5. นำเข้าโปรแกรม Excel เพื่อสร้างกราฟต่างๆ

1.8.วัสดุอุปกรณ์

1. มอเตอร์ที่ใช้ในการหา Motor Characteristic จำนวน 1 อัน
2. มอเตอร์ (ZGA60FM) จำนวน 1 อัน
3. Incremental Encoder AMT103-V จำนวน 1 อัน
4. Warner Electric Magnetic Particle Clutches MPB12 จำนวน 2 อัน
5. WCS1700 Hall Current Sensor จำนวน 1 อัน
6. Cytron MDD20A Motor Driver จำนวน 2 อัน
7. Nucleo STM32G474RE จำนวน 1 อัน
8. MotorXplorer จำนวน 1 ชุด
9. LoadCellXplorer จำนวน 1 ชุด
10. Power supply จำนวน 1 เครื่อง

1.9. ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.9.1. ขั้นตอนการติดตั้งบอร์ด



1.9.1.1. ติดตั้ง board Nucleo STM32G474RE ลง MotorXplorer

1.9.1.2. เชื่อมต่อ power supply 12V ที่ MotorXplorer

1.9.1.3. เชื่อมต่อ LoadCellXplorer กับ MotorXplorer

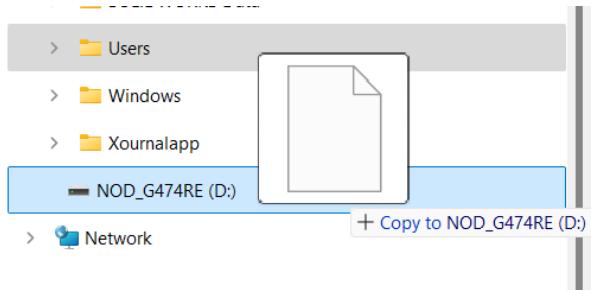
1.9.2. ขั้นตอนการติดตั้งโปรแกรมในการใช้งาน

1.9.2.1. ติดตั้งโปรแกรมจาก github

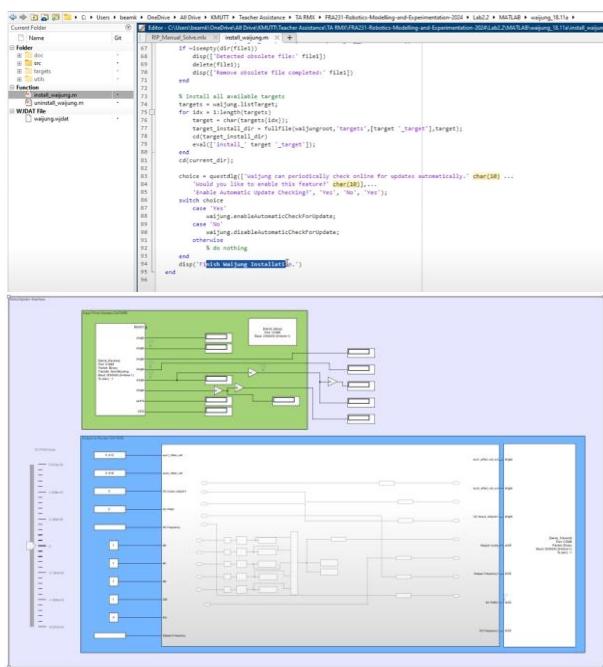
A screenshot of a GitHub repository page titled 'Nucleo G474RE MotorXploer with Matlab ...'. The page contains a 'Getting Started with MotorXploer Board .' section with a bulleted list of supported motors: DC Motor, Stepper Motor, Cytron MD20A, WC1700, and AS5600. Below this is a 'MATLAB 2024b' section with a link to 'https://github.com/beamkeerati/FRA231-Robotics-Modelling-and-Experimentation-2024'. At the bottom, there is a 'FRA231 Robotics Modelling & Experimentation FIBO, KMUTT' section with a YouTube video thumbnail and a link to 'GitHub - beamkeerati/FR... https://github.com/beamkeerati'. A red box highlights the GitHub link.

1.9.2.2. โอนไฟล์ RMX_MOTOR.bin ลงใน board Nucleo STM32G474RE

Name	Date modified	Type	Size
MatlabDataDCMotor	18/12/2567 11:34	File folder	
slprj	18/12/2567 4:56	File folder	
waijung_18.11a	17/12/2567 11:58	File folder	
Fortest_Motorlab	18/12/2567 7:56	Simulink Model	150 KB
MotorXploer	18/12/2567 16:31	Simulink Model	230 KB
RMX_Motor.bin	17/12/2567 9:46	BIN File	44 KB
RMX_Motor.hex	17/12/2567 9:46	HEX File	121 KB
Waijang 1 Download Link	17/12/2567 9:46	Internet Shortcut	1 KB
MotorXploer.stx.autosave	18/12/2567 16:36	AUTOSAVE File	202 KB

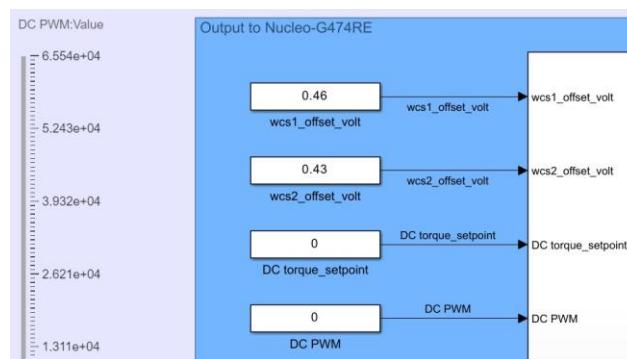


1.9.2.3.ดาวน์โหลด Waijung



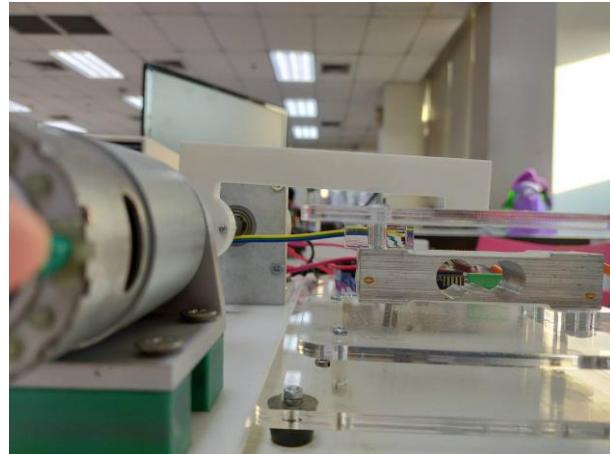
1.9.2.4. caribrate ค่าoffset เพื่อทำให้กระสุนได้แม่นยำที่

$Wrcs1_offset_volt = 0.46$ และ $Wrcs2_offset_volt = 0.43$

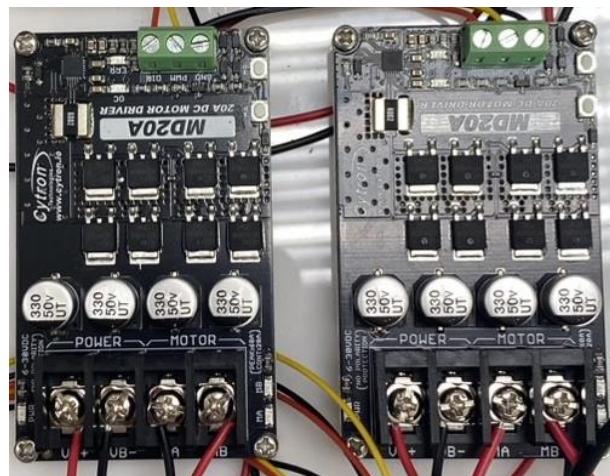


1.9.3.การทดลอง

1.9.3.1.ทดสอบ load ที่ส่งผลทำให้แรงบิดที่มอเตอร์ทำต่อ loadcell ออกหักหมุดเหล็กเฉพาะที่ความกด loadcell กับ Warner Electric Magnetic

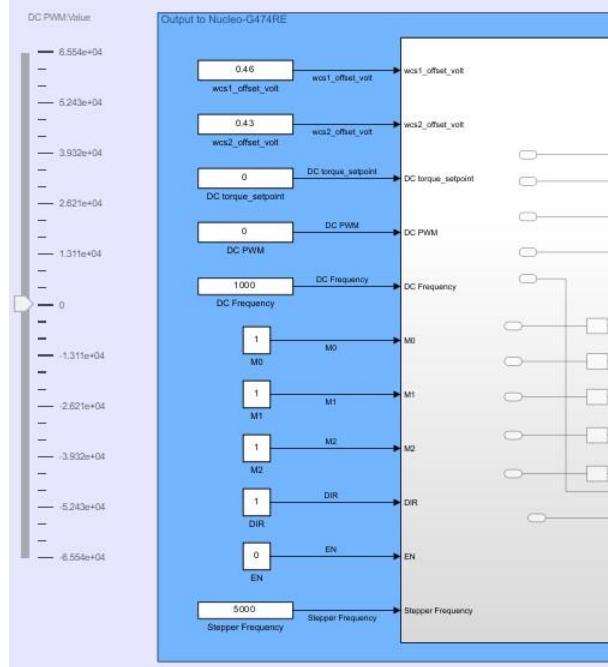


1.9.3.2.กดไปที่ Cytron MDD20A Motor Driver ให้กดที่ค้างที่ loadcell เพื่อเก็บค่า stall torque และ stall current



1.9.3.3. ทดสอบ load ที่ส่งผลทำให้ความเร็วที่encoder อ่านได้กับที่อ่านกระแทก Warner Electric Magnetic

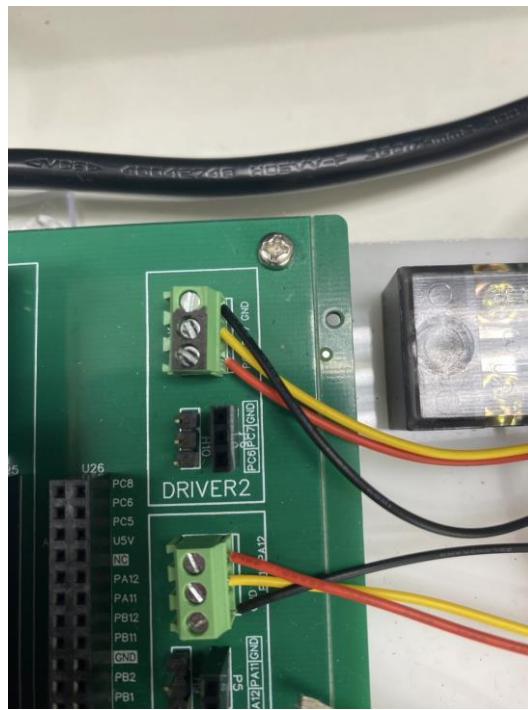
1.9.3.4. ปรับ PWM ให้อยู่ที่ 65535 PWM และทำการเก็บ no load speed และหา no load current



1.9.3.5. นำค่าที่ได้มามาทำเป็นกราฟ Motor Characteristic ผ่านโปรแกรม excel

	speed	current	power	n
0	184.1	0.87	0	0
0.00001	183.6606	0.878635	0.001837	0.000174191
0.00002	183.2212	0.88727	0.003664	0.000344167
0.00003	182.7819	0.895905	0.005483	0.000510048
0.00004	182.3425	0.904539	0.007294	0.000671953
0.00005	181.9031	0.913174	0.009095	0.000829995
0.00006	181.4637	0.921809	0.010888	0.00098428
0.00007	181.0243	0.930444	0.012672	0.001134916
0.00008	180.585	0.939079	0.014447	0.001282001
0.00009	180.1456	0.947714	0.016213	0.001425633
0.0001	179.7062	0.956348	0.017971	0.001565906
0.00011	179.2668	0.964983	0.019719	0.00170291
0.00012	178.8274	0.973618	0.021459	0.001836731
0.00013	178.3881	0.982253	0.02319	0.001967454
0.00014	177.9487	0.990888	0.024913	0.002095159
0.00015	177.5093	0.999523	0.026626	0.002219926
0.00016	177.0699	1.008158	0.028331	0.002341829
0.00017	176.6305	1.016792	0.030027	0.002460941
0.00018	176.1912	1.025427	0.031714	0.002577333
0.00019	175.7518	1.034062	0.033393	0.002691073
0.0002	175.3124	1.042697	0.035062	0.002802227
0.00021	174.873	1.051332	0.036723	0.002910859
0.00022	174.4337	1.059967	0.038375	0.003017029
0.00023	173.9943	1.068601	0.040019	0.003120799
0.00024	173.5549	1.077236	0.041653	0.003222225
0.00025	173.1155	1.085871	0.043279	0.003321364
0.00026	172.6761	1.094506	0.044896	0.003418269
0.00027	172.2368	1.103141	0.046504	0.003512994
0.00028	171.7974	1.111776	0.048103	0.003605588
0.00029	171.358	1.120411	0.049694	0.003696102
0.0003	170.9186	1.129045	0.051276	0.003784583

1.9.3.6.ทดสอบ lock anti โดยการลับสาย สีเหลืองและสีแดง



1.9.3.7.เก็บค่าความถี่เทียบ ความเร็ว และ กระแสไฟฟ้า

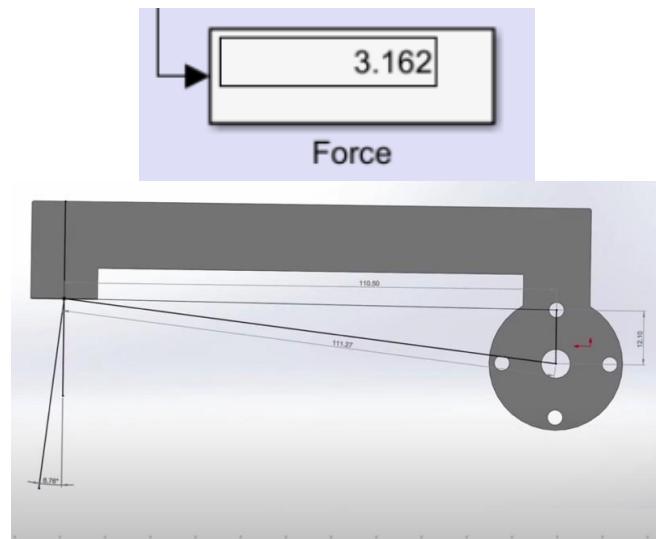


1.9.3.8.นำมาทำเป็นกราฟในโปรแกรม MATLAB

```
f> >> hold off;
figure;
hold on;
grid on;
xlabel('Time (ms)'); % แก้ X
ylabel('Y-axis (Levels)'); % แก้ Y
zlabel('Velocity'); % แก้ Z
title('3D Plot: Time vs Velocity with Custom Y Levels');
view(45, 30); % ปรับมุมมอง
legend(arrayfun(@(x) sprintf('Dataset at Y = %d', x), y_levels, 'UniformOutput', false), ...
    'Location', 'best');
Warning: Ignoring extra legend entries.
> In legend>process_inputs (line 567)
In legend>make_legend (line 294)
In legend (line 245)
for i = 1:10
    % ?plot3 โดยทั้ง Y เป็นระดับ (1000, 2000, ...)
    plot3(time, y_levels(i) * ones(size(time)), velo(:, i), 'LineWidth', 1.5);
end
hold off;
```

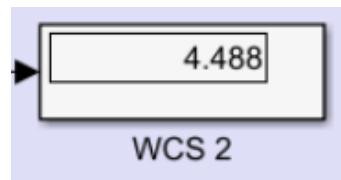
1.10.ผลการทดลอง

ค่า stall torque



$$\begin{aligned}\tau_{ST} &= F \cdot r \sin \theta \\ \tau_{ST} &= 3.162 \cdot 11.27 \sin (6.8) \\ \tau_{ST} &= 0.00419 \text{ N}\cdot\text{m}\end{aligned}$$

ค่า stall current



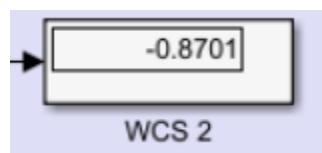
$$i_{ST} = 4.488 \text{ A}$$

ค่า no load speed



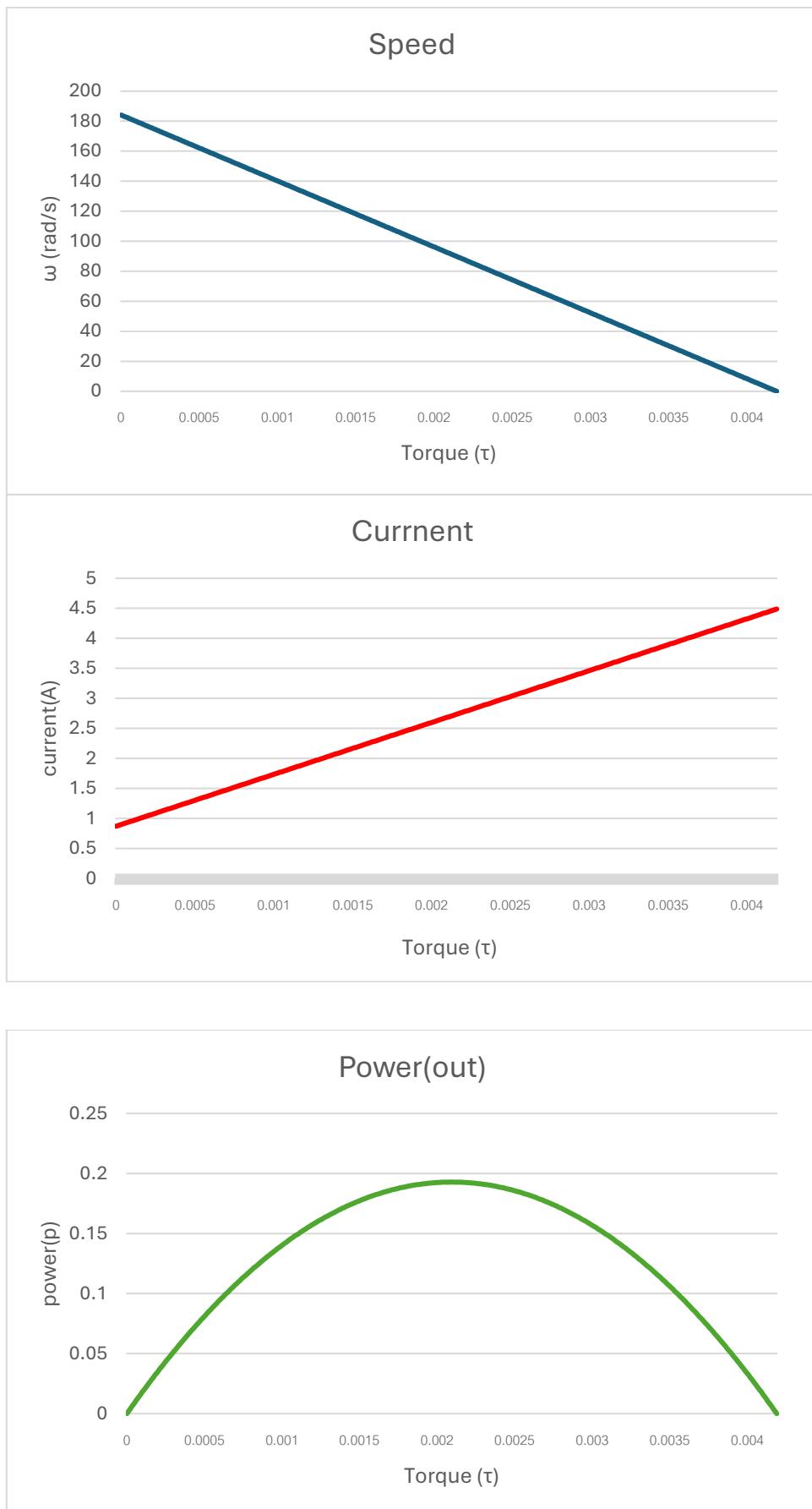
$$\omega_{NL} = 184.1 \text{ A}$$

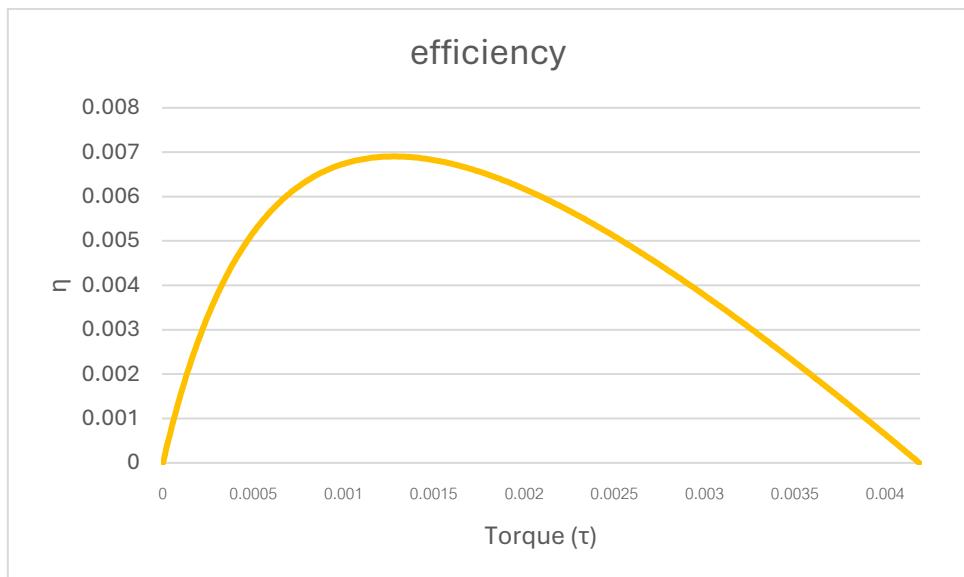
ค่า no load current



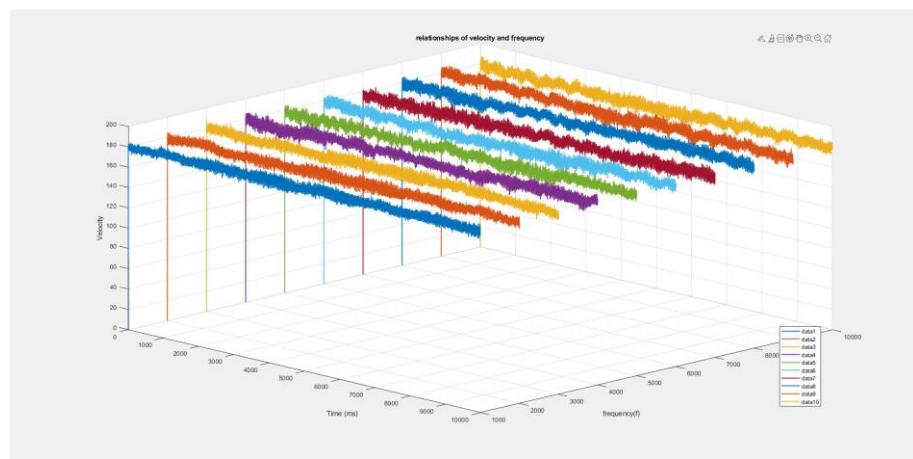
$$i_{NL} = 0.8701 \text{ A}$$

గ్రాఫ Motor Characteristic

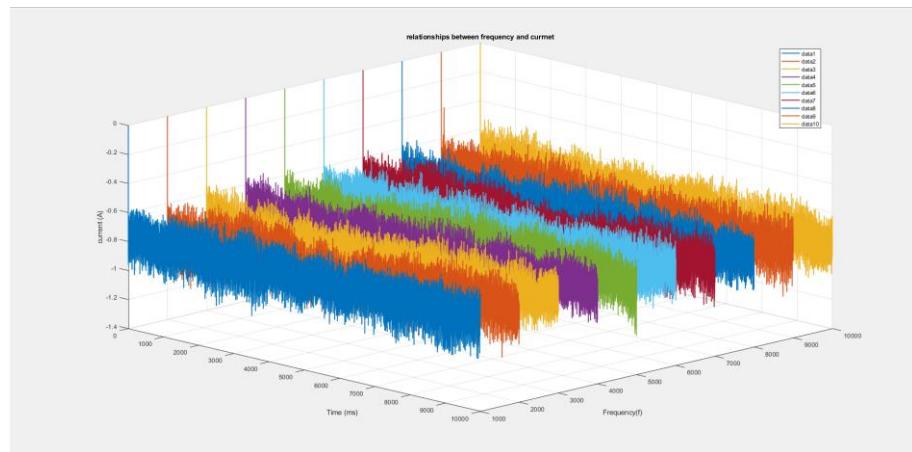




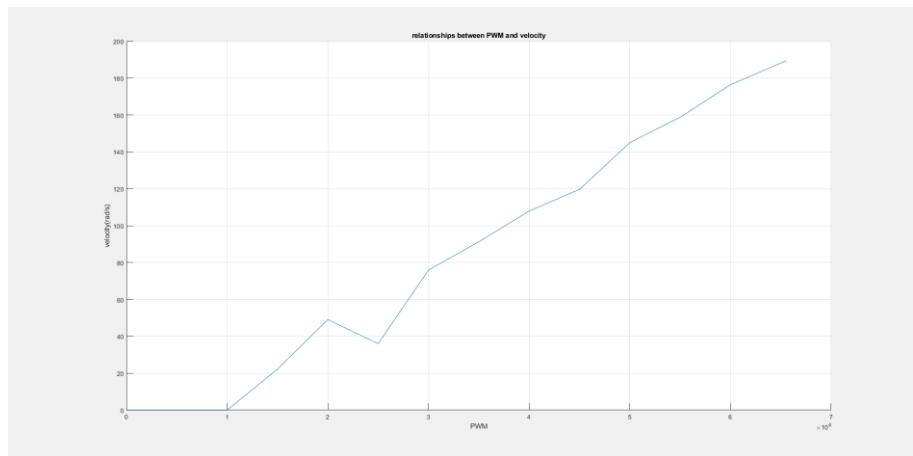
ความถี่เทียบความเร็วในช่วงเวลา 10 วินาที



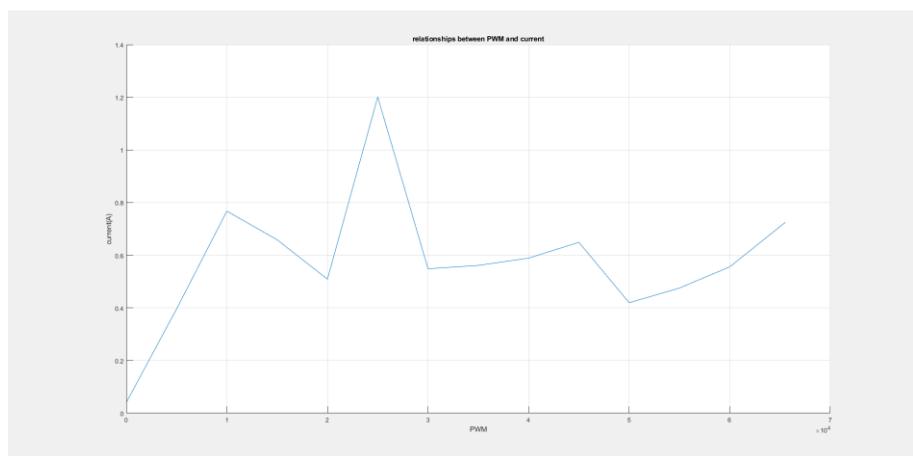
ความถี่เทียบกระแสในช่วงเวลา 10 วินาที



PWM เทียบกับความเร็ว

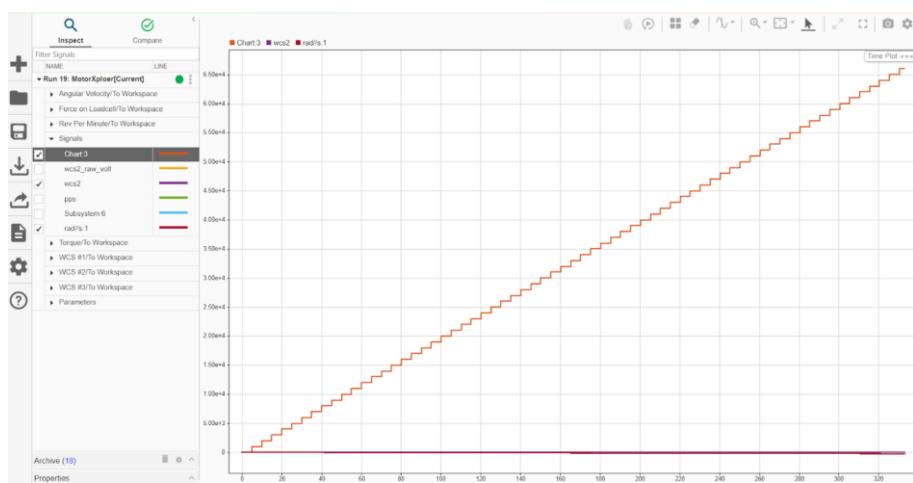


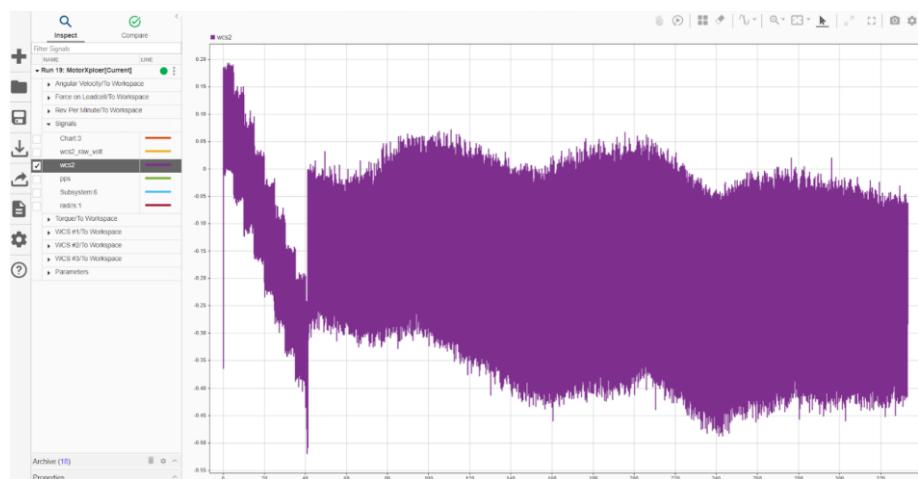
PWM เทียบกับกระแสไฟฟ้า



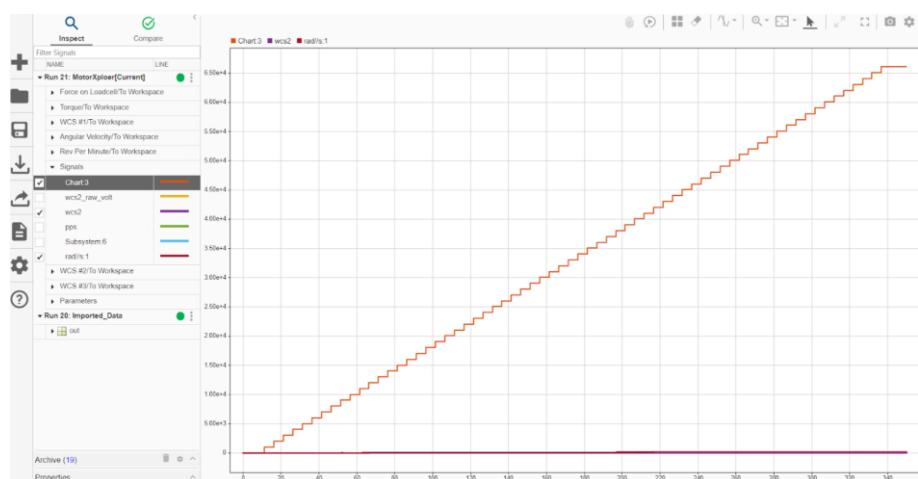
Output จากการ Log สัญญาณ

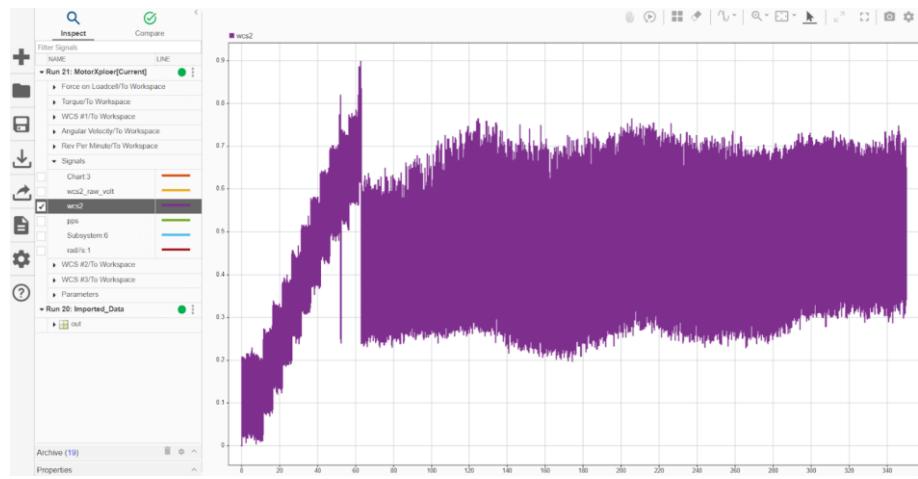
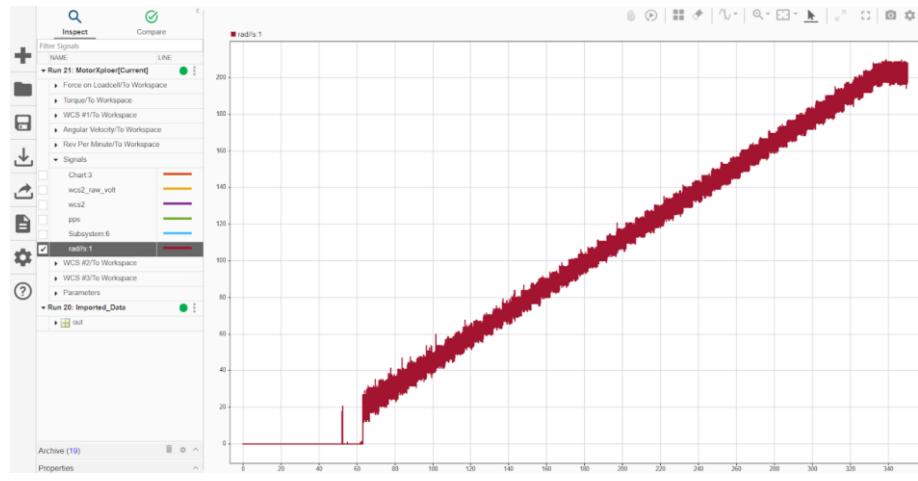
Round 1



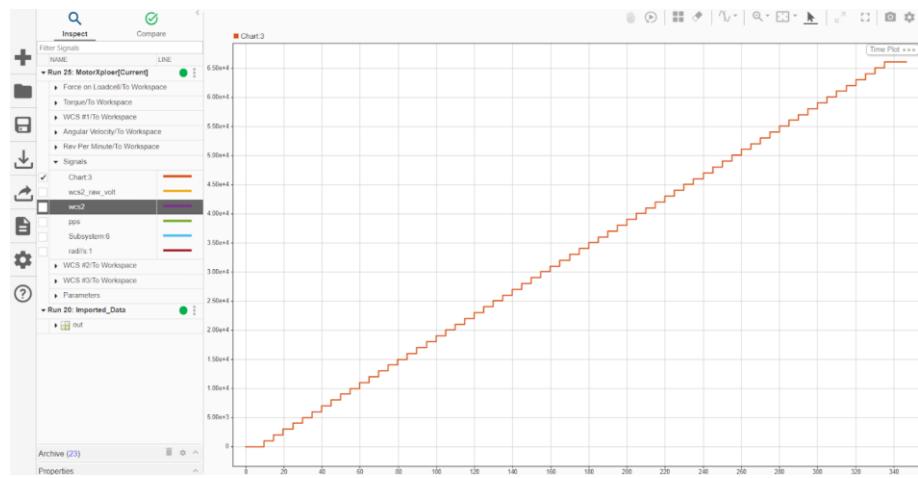


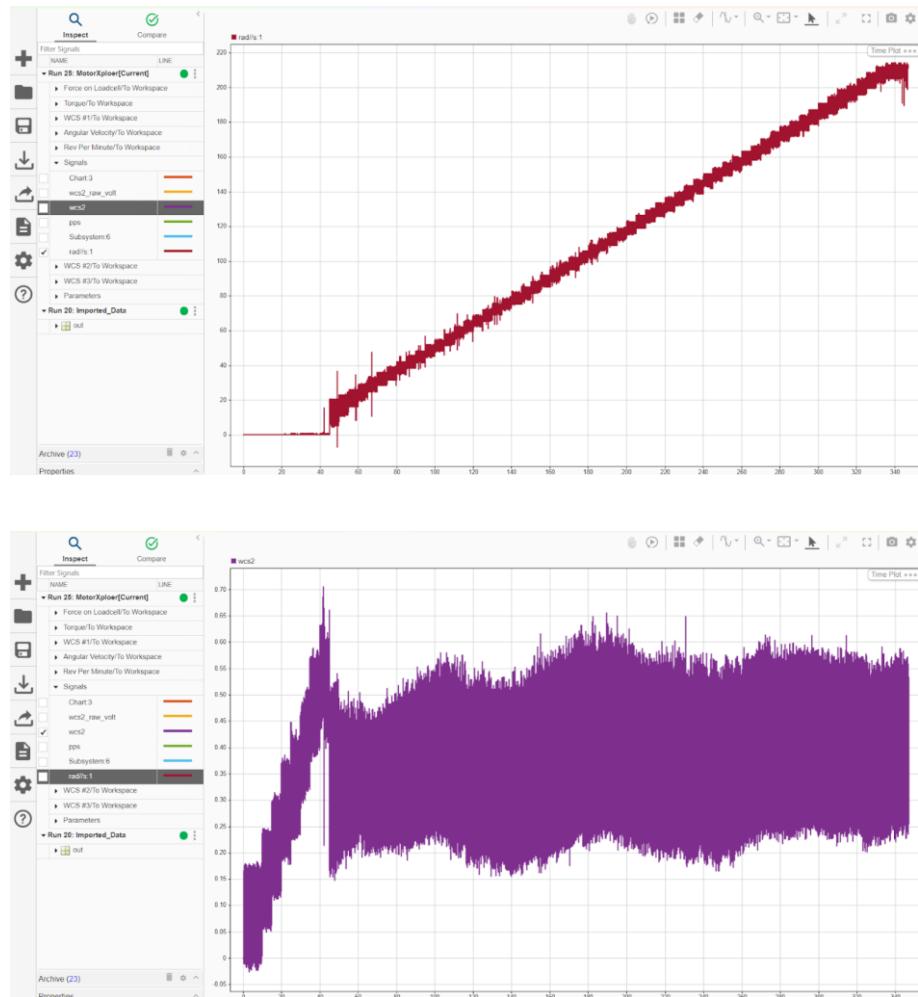
Round 2





Round 3





1.11. สรุปผล

จากราฟ Motor Characteristic จะทำให้เห็นว่าค่าที่ได้ออกมา มีลักษณะคล้ายคลึงกับ กราฟ Motor Characteristic ตามที่มีมาจากการอ้างอิง

จากราฟเปรียบเทียบความถี่กับความเร็ว จะแสดงให้เห็นว่า ยิ่งความถี่สูง ความเร็วของเตอร์จะ เหวี่ยงน้อยลง

จากราฟเปรียบเทียบความถี่กับกระแส จะแสดงให้เห็นว่า ยิ่งความถี่สูง กระแสอัตโนมัติจะ เหวี่ยงน้อยลง

จากราฟเปรียบเทียบระหว่างความเร็ว กับ PWM นั้นมีลักษณะของกราฟเป็น exponential เพราะฉนั้น PWM ยิ่งเยื่อจะความเร็วจะยิ่งสูง

จากราฟเปรียบเทียบระหว่างกระแส กับ PWM นั้นมีลักษณะของกราฟเป็นในช่วงแรกและตอน หลังค่อยๆ คงที่ เพราะฉนั้นหาก PWM สูงถึงจุดที่กำหนดเอาไว้จะทำให้กระแสคงที่

1.12. อภิปรายผล

จากจุดประสงค์ในการหา dynamic torque เนื่องจากความร้อนที่มากเกินไปของมอเตอร์ที่เราสนใจ จึงไม่สามารถที่จะหาค่าอุปกรณ์ได้จำเป็นที่จะต้องตัวระบายความร้อนของมอเตอร์ที่ ซึ่งอาจส่งผลทำให้ค่าที่ได้ออกมาผิดเพี้ยนเราจึงไม่ได้ใส่การทดลองนี้ลงไปในรายงาน

จากจุดประสงค์ในการหา back-emf constant ในการจะหา back-emf constant จำเป็นจะต้องมี R_{shunt} ในการทำ back-emf แต่เนื่องจากบอร์ดไม่ได้มีมาให้ทำให้ไม่สามารถหา back-emf ได้

จากการทดลองการเปลี่ยนโหมดในการควบคุมเป็น lock anti-phase สามารถทำงานได้ตามปกติโดยเปลี่ยนจากการสั่งการ Sign-Magnitude (-65535 ถึง 65535) เป็น lock anti-phase (-65535 ถึง -32767) เป็นทวนเข็ม (-32765 ถึง -1) เป็นตามเข็ม และ (-32766) หยุดได้ตามปกติ และจากเก็บผลและค่าต่างๆที่ได้รับมาจะทำให้เห็นว่า แรงบิดที่ได้ออกมาจาก mode นี้ไม่ได้ต่างจาก Sign-Magnitude จึงไม่ได้เก็บค่ามา

1.13. ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากปัญหาเดิกที่อุปกรณ์การทดลองหากจะทำการทดลองควรจะมีอุปกรณ์ที่ครบถ้วนมากกว่านี้เมื่อจะว่าจะเป็นพัดลมระบายอากาศหรือ R_{shunt} ที่ทำหน้าที่หา back-emf constant

2. จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าบอร์ดที่ได้รับมา มีความไม่สมประกอบในการใช้งานเป็นส่วนมาก เพราะฉันนี้ควรจะมี 3Dprint ในการทดลองครั้งนี้ เพราะหากเกิด load ในการใช้มอเตอร์ ค่าต่างๆที่ได้อาจไม่ใช้ค่าจริงและทำให้งานที่ได้ออกมาไม่มีคุณภาพ

1.14. เอกสารอ้างอิง(แนบ link)

What is Brushed DC Motor

<https://robu.in/brushed-dc-motor-working-principle-construction-applications/>

What is Motor Efficiency

<https://www.tytorobotics.com/blogs/articles/ac-vs-dc-motor-efficiency>

formula of Motor Efficiency

[Efficiency of a DC Motor – Condition for Maximum Efficiency \(tutorialspoint.com\)](https://www.tutorialspoint.com/dc_motors/dc_motors_efficiency.htm)

What is Motor characteristic and how to use

<https://rotero.com/en/blog/how-to-read-the-characteristics-of-a-dc-motor>

Motor characteristic ของ HG37

<https://docs.rs-online.com/2c85/A70000006724430.pdf>

what is dynamic torque

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266591742100146X>

what is motor specification

<https://www.telcointercon.com/blog/guide-to-motor-specifications-and-what-they-do/>

what is warp-around and un-warp

<https://www.integrasources.com/blog/dc-motor-controller-design-principles/>

H-Bridge drive และ mode ຕ່າງໆ

<http://www.modularcircuits.com/blog/>

Pulse Width Modulation

<https://www.geeksforgeeks.org/pulse-width-modulation-pwm/>

2. Stepper Motor

2.1. จุดประสงค์

- 2.1.1. เพื่อเข้าใจหลักการทำงาน ส่วนประกอบของ และวิธีการควบคุม Stepper Motor
- 2.1.2. เพื่อเข้าใจหลักการทำงาน การ Loss Step
- 2.1.3. เพื่อเข้าใจหลักการทำงาน Stepper Motor ด้วยการสั่งความเร็วด้วยความเร่ง
- 2.1.4. เพื่อเข้าใจวิธีการอ่านและวิธีการหาของ Stepper Motor Characteristic และ Stepper Motor Specification ของ Stepper motor แต่ละชนิด
- 2.1.5. เพื่อเข้าใจหลักการของ Stepper Drive Mode , Stepper Drive Type และ หลักการทำงานของรูปแบบการ Drive (แบบ Full-Step, Half-Step และ Micro-Step) ว่าส่งผลต่อการควบคุมความเร็วและตำแหน่งของ Stepper Motor อย่างไร
- 2.1.6. เพื่อเข้าใจความสัมพันธ์ของ Speed กับ Frequency ของสัญญาณที่จ่ายเข้า Stepper Motor
- 2.1.7. สามารถอธิบายกระบวนการ Signal Conditioning, Signal Processing ทั้งหมดได้ตั้งแต่ต้นจนจบกระบวนการ ว่าค่าที่อ่านได้จาก Incremental Encoder, Hall Current Sensor มีที่มาอย่างไร อธิบายให้เห็นถึงวิธีคิดและขั้นตอนทั้งหมด ทั้งก่อนและหลัง Calibrate Sensor
- 2.1.8. สามารถเขียนโปรแกรม โดยประยุกต์ใช้ MATLAB และ Simulink ในการสั่งการควบคุม ความเร็วของ Stepper Motor ในรูปแบบของความถี่ ความเร็วเชิงมุม และรับค่า ร่วมกับบอร์ด Nucleo STM32G474RE โดยใช้สัญญาณจาก Incremental Encoder, Hall Current Sensor เป็น Input และแสดงสัญญาณ Output จากการ Log สัญญาณ และแสดงผลเป็นกราฟจาก Data Inspector ใน MATLAB Simulink แสดงให้เห็นว่าสัญญาณ Output แปร์เซ็นตาม สัญญาณ Input แบบ Real Time โดยมี Output เป็นความเร็วเชิงมุม และกระแสไฟฟ้า ในหน่วย SI derived

2.2 สมมติฐาน

1. ยิ่ง step สูงจะทำให้จะทำให้ความละเอียดในการสั่น PWM สูงตาม
2. การต่อรัฐดับ PWM กับ สั่งให้ PWM สูงตั้งแต่ต้นของ stepper motor จะทำงานได้เมื่อกัน

2.3. ตัวแปร

- ตัวแปรต้น : หลักการทำงานของรูปแบบการ Drive
- ตัวแปรตาม : ความละเอียดในการสั่งความเร็วモเตอร์ผ่าน PWM
- ตัวแปรควบคุม : กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า สายไฟ load ปัจจัยภายนอกที่ส่งผลต่อ stepper motor

2.4.นิยามคัพเพลพา

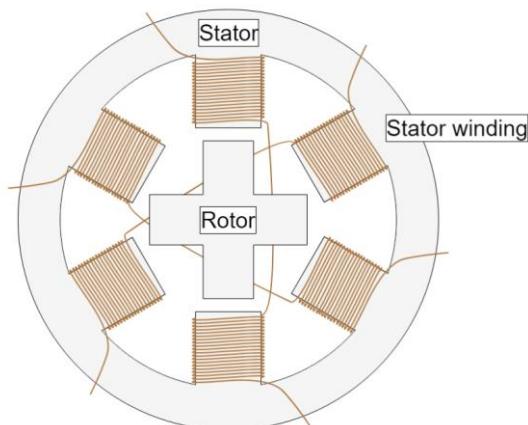
1. ต่อรีดับ frequency คือ การสั่งเพิ่มค่า frequency จน stepper motor ถึงช่วง loss step
2. load ปัจจัยภายนอก คือ สิ่งที่ส่งผลกระทบต่อการทดลองภายในบอร์ด

2.5.นิยามเชิงปฏิบัติการ

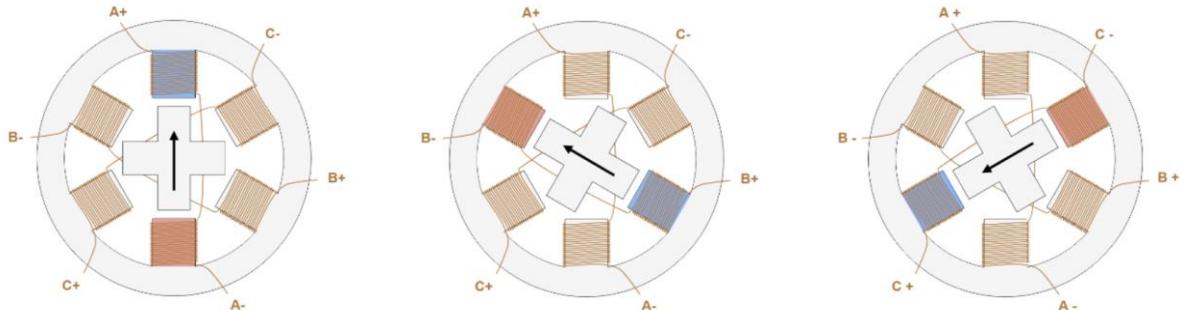
2.6.เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Stepper motor คือ เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติหลักคือเพลาหมุนเป็นขั้นบันได ซึ่งจะเคลื่อนที่เป็นองศาคงที่ คุณสมบัตินี้เกิดจากโครงสร้างภายในของมอเตอร์ และทำให้ทราบตำแหน่งเชิงมุมที่แน่นอนของเพลาได้ง่ายๆ เพียงนับจำนวนขั้นบันไดที่เคลื่อนที่ไป โดยไม่ต้องใช้เซ็นเซอร์ คุณสมบัตินี้ยังทำให้เหมาะสมกับการใช้งานที่หลากหลายอีกด้วย

ส่วนประกอบของ Stepper motor เช่นเดียวกับ brushed DC Motor Stepper motor มีชิ้นส่วนที่อยู่นิ่งอย่าง stator(สเตเตอร์) และชิ้นส่วนเคลื่อนไหว rotor(โรเตอร์) บน stator จะมีฟันที่ใช้สำหรับพันชุดลวด ในขณะที่ rotor อาจเป็นแม่เหล็กถาวรหรือแกนแม่เหล็กแบบแปรผันได้



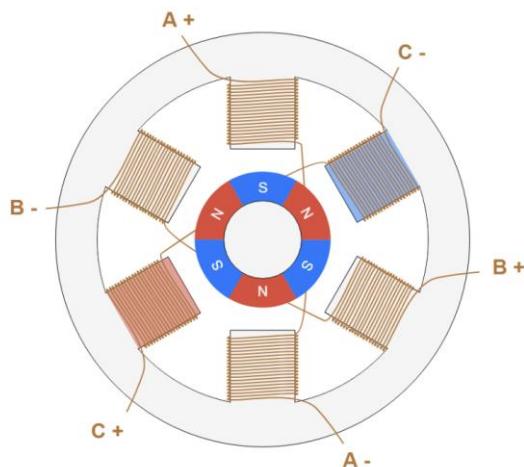
การทำงานของ Stepper motor จะเริ่มจากการจ่ายพลังงานให้กับ stator 1 phase จากนั้น สนำมแม่เหล็กจะถูกสร้างขึ้นโดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลในชุดลวดและ rotor จะเริ่งตัวตามสนำมแม่เหล็กนี้ และจ่ายพลังงานให้กับ phase อื่นๆตามลำดับไปเลย rotor จะหมุนได้ในปริมาณที่เรากำหนดเอาไว้เพื่อให้ได้ตำแหน่งสุดท้ายที่ต้องการ



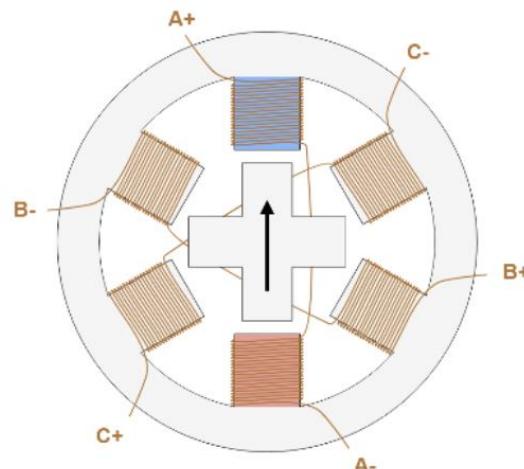
ประเภทโครงสร้างของ Stepper Motor รายละเอียดของภายในโครงสร้างมอเตอร์จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการใช้งาน อย่างเช่น ความเร็ว แรงบิด และ อาจส่งผลต่อการควบคุมมอเตอร์ โครงสร้างมอเตอร์กำหนดจากโรเตอร์และสเตเตอร์ที่แตกต่างกัน

ประเภทของ rotor มีด้วยกันทั้งหมด 3 ประเภท

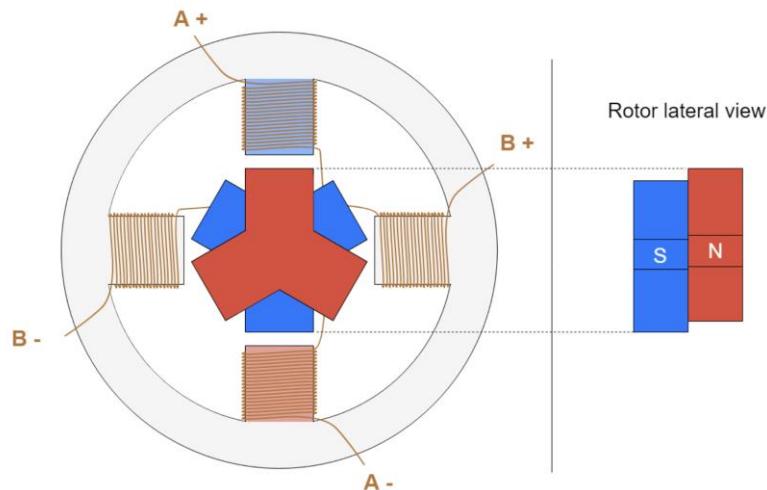
1. Permanent magnet rotor(โรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร) เป็น Stepper Motor ที่โรเตอร์เรียงตัวตามสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นโดยวงจรสเตเตอร์ ข้อดีของ rotor ประเภทนี้มีแรงบิดที่ดีและแรงบิดที่ยืดแหน่งหมายความว่ามอเตอร์จะต้านทานการเปลี่ยนตำแหน่งได้แม่แรงบิดจะไม่ได้สูง ไม่ว่าขดลวดจะได้รับกระแสไฟฟ้าหรือไม่ ข้อเสียของ rotor ประเภทนี้คือมีความเร็วต่ำและความละเอียดต่ำกว่าเมื่อเทียบกับประเภท



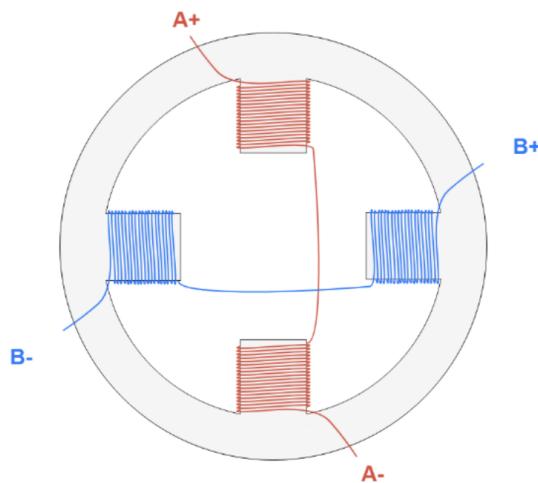
2. Variable reluctance rotor(โรเตอร์รีลักเคนซ์) เป็น Stepper Motor ที่โรเตอร์ทำจากแกนเหล็กและมีรูปร่างเฉพาะที่ช่วยให้ปรับตำแหน่งให้ตรงกับสนามแม่เหล็ก ข้อดีของ rotor ประเภทนี้มีความเร็วและความละเอียดที่สูง แต่ ข้อเสียของ rotor ประเภทนี้มีแรงบิดที่ต่ำ และ ไม่มีแรงยึดตำแหน่ง



3. Hybrid rotor(ไฮบริดโรเตอร์) เป็น Stepper Motor ที่โรเตอร์ประเภทนี้มีโครงสร้างเฉพาะโดยผสมระหว่าง permanent magnet กับ variable reluctance versions โดย rotor อันนี้จะประกอบไปด้วย永久磁石 (permanent magnet) กับ แม่เหล็กตามแนวแกนการกำหนดค่าที่ทำให้มอเตอร์มี ข้อดีของ rotor ทั้ง 2 ประเภท แต่จะมีข้อเสีย คือ ราคานั้นทุนสูง โดยโครงสร้างจะมีหลักการดังนี้ เมื่อชุดลวดได้รับพลังงาน พิมพ์ของ永久磁石ที่มีแม่เหล็กขั้วเหนือจะเรียงตัวกับพิมพ์ที่มีแม่เหล็กขั้วใต้ของ rotor และในขนาดเดียวกัน พิมพ์ที่มีแม่เหล็กขั้วใต้จะเรียงตัวกับพิมพ์ที่มีแม่เหล็กขั้วเหนือของ rotor



Stator คือ ส่วนหนึ่งของมอเตอร์ที่รับผิดชอบในการสร้างสนามแม่เหล็กลักษณะสำคัญของวงจร Stator ได้แก่ จำนวน phase และ pole pair รวมถึงการกำหนดค่าของสายไฟ จำนวน phase คือจำนวนชุดลวดอิสระ ในขณะที่จำนวน pole pair จะบวกกว่าแต่ละ phase มีคุณลักษณะสำคัญของวงจร Stepper motors แบบ 2 phase

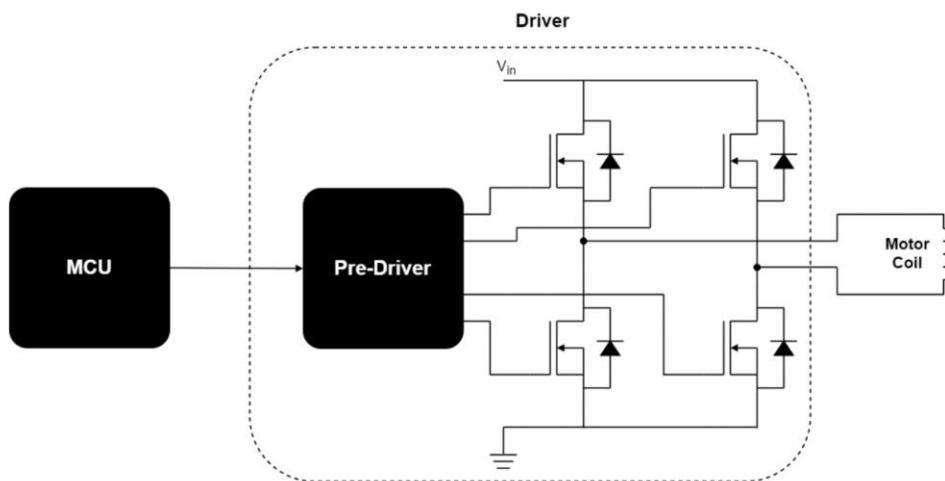


การควบคุม Stepper motor ขาด漉ดของมอเตอร์จำเป็นต้องได้รับพลังงานในลำดับที่เฉพาะเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่ rotor จะเรียงตัวจึงทำให้ใช้อุปกรณ์เฉพาะเพื่อย้ายแรงดันไฟฟ้าที่จำเป็นให้กับขด漉ด ดังนี้

1. transistor bridge(ทรานซิสเตอร์บริดจ์) คือ อุปกรณ์ที่ควบคุมการเชื่อมต่อไฟฟ้าของขด漉ดของมอเตอร์ ทำหน้าที่เป็นตัวตัดวงจรที่ควบคุมด้วยไฟฟ้า ซึ่งเมื่อปิดจะทำให้ขด漉ดเชื่อมต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟได้ จึงทำให้มีการไหลของกระแสไฟฟ้าในขด漉ดต้องใช้ transistor bridge หนึ่งตัวสำหรับแต่ละ phase ของมอเตอร์

2. pre-driver คือ อุปกรณ์ที่ควบคุมการเปิดใช้งาน transistor โดยให้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ต้องการ ซึ่งจะถูกควบคุมโดย MCU

3. MCU คือ หน่วย microcontroller ซึ่งโดยปกติแล้วผู้ใช้มอเตอร์จะเขียนโปรแกรมและสร้างสัญญาณเฉพาะสำหรับ pre-driver เพื่อให้ได้พฤติกรรมของมอเตอร์ที่ต้องการ



ประเภทของ Stepper Motor Driver มีหลายประเภทด้วยกัน ซึ่งจะเป็นตัวเลือกในการใช้งานเฉพาะทางโดยส่วนมากจะมีสัญญาณที่ค่อนข้างสอดคล้องกัน เช่น Step/Direction, Phase/Enable และ PWM โดยมีประเภทของ Stepper Motor Driver ทั้งหมด 2 แบบ

1. unipolar stepper motors

มีโครงสร้างเป็นขด漉ดภายใน 2 ชุด โดยแต่ละขด漉นมีขั้วกลาง (Center Tap) โดยทั่วไปแล้ว Unipolar Stepper Motor จะมี 6 สาย หรือ 5 สาย ซึ่งทำให้กระแสจะไหลในทิศทางเดียวเท่านั้น และสามารถขับขด漉ดแต่ละครั้งได้แยกจากกัน ทำให้ไม่ต้องเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแส

ข้อดีของ Unipolar Stepper Motor มีดังนี้

1. วงจรควบคุมง่าย
2. ไม่ต้องใช้ไดร์เวอร์ที่ซับซ้อน
3. มีประสิทธิภาพในการทำงานที่ความเร็วต่ำถึงปานกลาง

ข้อเสียของ Unipolar Stepper Motor มีดังนี้

1. แรงบิดต่ำกว่า Bipolar Stepper Motor เพราะใช้ขด漉ดเพียงครึ่งเดียวในแต่ละช่วง

2. Bipolar Stepper Motors

Bipolar Stepper Motors มีโครงสร้างเป็นขดลวดภายใน 2 ชุดเช่นกัน แต่มีมีขั้วกลาง (Center Tap) และมีทั้งหมด 4 สาย โดยการใช้งานต้องใช้ H-Bridge ในการสลับทิศทาง เพราะ กระแสต้องเปลี่ยนทิศทางการให้ผลผ่านขดลวด

ข้อดีของ Bipolar Stepper Motors มีดังนี้

1. ให้แรงบิดสูงกว่า Unipolar Stepper Motor เนื่องจากใช้ขดลวดเต็มจำนวน
2. ประสิทธิภาพสูงขึ้นในการทำงานที่ความเร็วสูง

ข้อเสียของ Bipolar Stepper Motors มีดังนี้

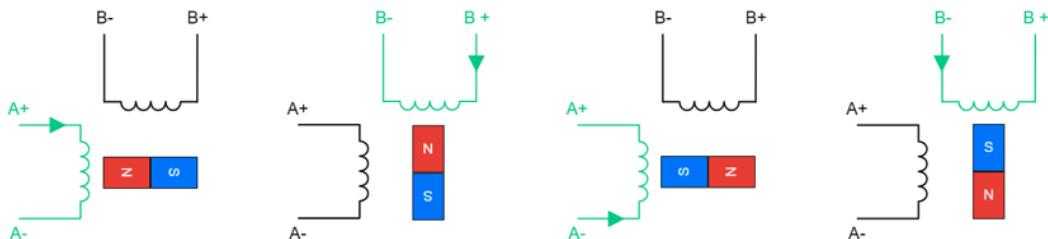
1. วงจรควบคุมซับซ้อนกว่า เพราะต้องมีการสลับทิศทางการให้ผลของกระแส

ตารางเปรียบเทียบ Unipolar และ Bipolar Stepper Motors

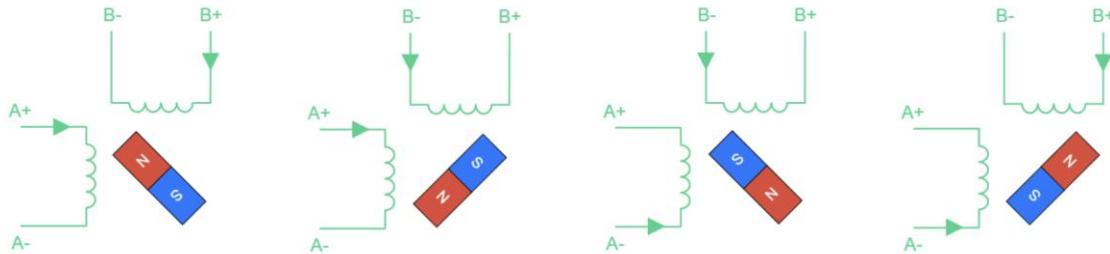
คุณสมบัติ	Unipolar Stepper Motor	Bipolar Stepper Motors
จำนวนสายไฟ	5 – 6 สาย	4 สาย
ทิศทางกระแส	ให้ทางเดียว	ต้องสลับทิศ
แรงบิด	น้อยกว่า	มากกว่า
การควบคุม	ง่าย	ซับซ้อน

หลักการทำงานของรูปแบบการ Stepper Motor Drive

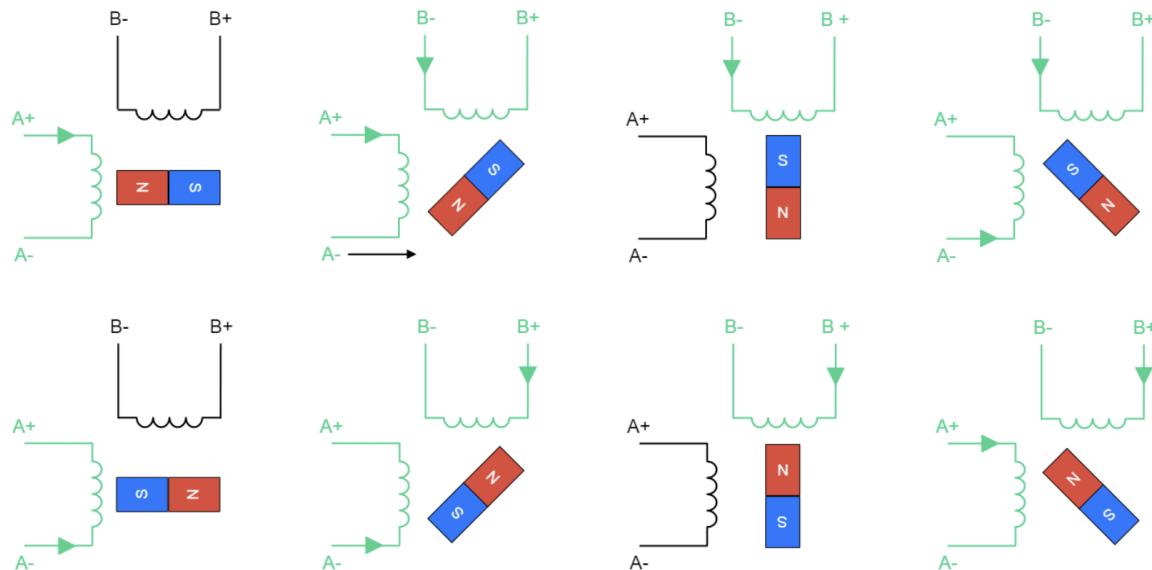
Wave mode จ่ายพลังงานให้ phase เดียวในแต่ละครั้ง เพื่อความเรียบง่าย หากให้จากสายบวกไปยังสายลบของเฟส (เช่น จาก A+ ไปยัง A-) มีฉะนั้น ทิศทางจะเป็นลบ เริ่มจากด้านซ้าย กระแสไหลเฉพาะในเฟส A ในทิศทางบวก และโรเตอร์ซึ่งแสดงด้วยแม่เหล็กจะจัดตำแหน่งให้ตรงกับสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นโดยโรเตอร์ ในขั้นตอนถัดไป กระแสไหลเฉพาะในเฟส B ในทิศทางบวก และโรเตอร์จะหมุนตามเข็มนาฬิกา 90° เพื่อจัดตำแหน่งให้ตรงกับสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นโดยเฟส B ในภายหลัง เฟส A จ่ายพลังงานอีกครั้ง แต่กระแสไหลในทิศทางลบ และโรเตอร์จะหมุนอีกครั้ง 90° ในขั้นตอนสุดท้าย กระแสไหลลบในเฟส B และโรเตอร์จะหมุนอีกครั้ง 90°



full-step mode phase หั้งสองจะได้รับพลังงานในเวลาเดียวกันเสมอ แสดงขั้นตอนต่างๆ ของโหนมด ขั้ปเคลื่อนนี้ ขั้นตอนต่างๆ จะคล้ายกับขั้นตอนของโหนมคลื่น โดยความแตกต่างที่สำคัญที่สุดคือในโหนมนี้ มอเตอร์จะสามารถสร้างแรงบิดที่สูงขึ้นได้ เนื่องจากมีกระแสไฟฟ้าไหลในมอเตอร์มากขึ้นและสร้าง สนามแม่เหล็กที่แรงขึ้น

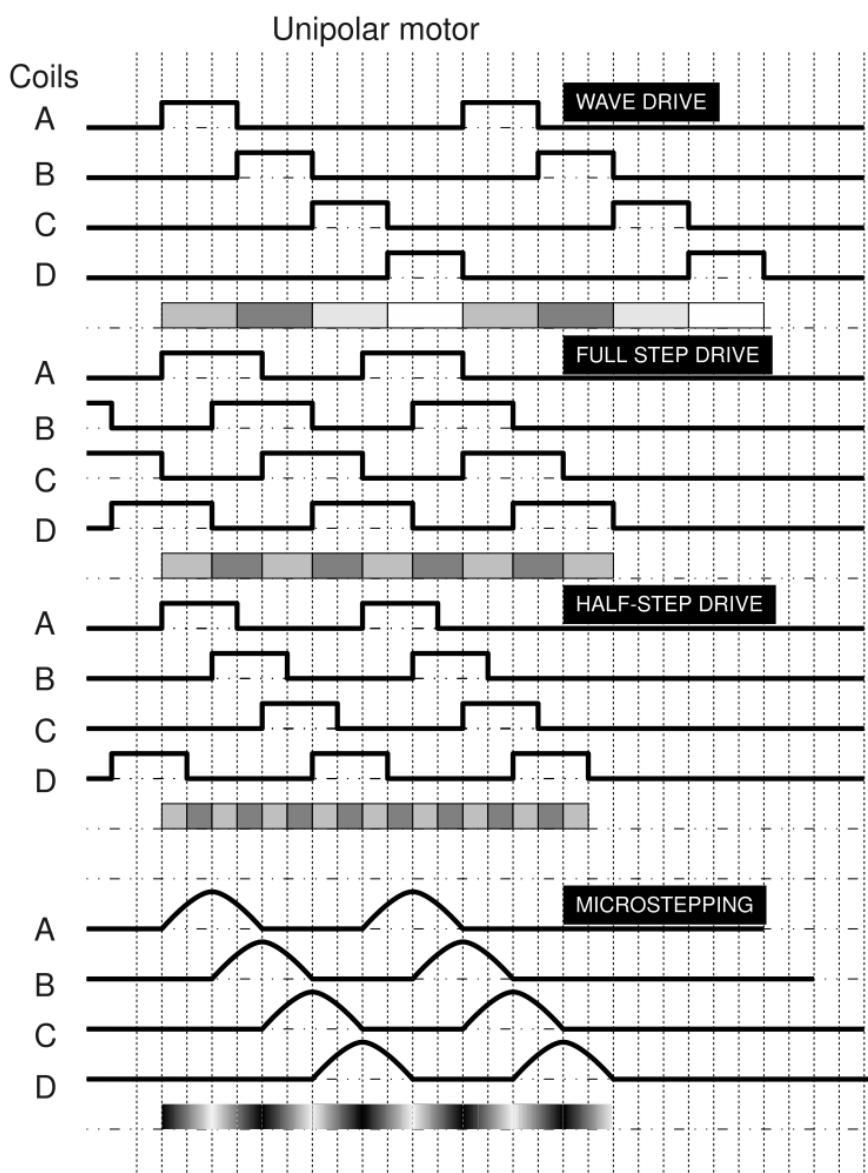
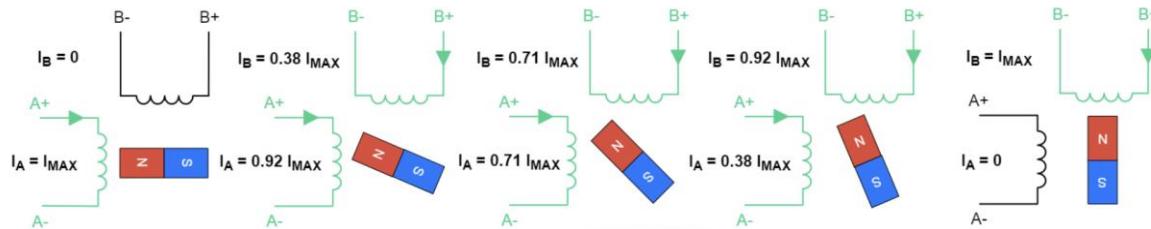


Half-step mode เป็นการผสานระหว่างโหนมคลื่นและโหนมเต็มสเต็ป (ดูรูปที่ 12) การใช้การ ผสานนี้ทำให้สามารถลดขนาดสเต็ปลงได้ครึ่งหนึ่ง (ในกรณีนี้คือ 45° แทนที่จะเป็น 90°) ข้อเสียอย่างเดียว คือแรงบิดที่สร้างโดยมอเตอร์ไม่คงที่ เนื่องจากจะสูงขึ้นเมื่อยิ่งพลังงานให้เพสทั้งสอง และจะอ่อนลงเมื่อยิ่ง พลังงานให้เพสเดียวเท่านั้น



Microstepping สามารถมองได้ว่าเป็นการปรับปรุงเพิ่มเติมของโหนมครึ่งขั้น เพราะช่วยลดขนาดขั้น ได้มากขึ้นและให้แรงบิดคงที่ ซึ่งทำได้โดยการควบคุมความเข้มของกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟส การใช้โหนมนี้ ต้องใช้ไดเรอرمอเตอร์ที่ซับซ้อนกว่าโซลูชันก่อนหน้า รูปที่ 14 แสดงวิธีการทำงานของไมโครสเต็ปปิ้ง หาก $IMAX$ คือกระแสสูงสุดที่สามารถไหลในเฟส เริ่มจากซ้ายในรูปแรก $IA = IMAX$ และ $IB = 0$ ในขั้นตอนถัดไป กระแสจะถูกควบคุมเพื่อให้ได้ $IA = 0.92 \times IMAX$ และ $IB = 0.38 \times IMAX$ ซึ่งสร้างสนามแม่เหล็กที่หมุนตาม เท็มนาฬิกา 22.5° เมื่อเทียบกับก่อนหน้านี้ ขั้นตอนนี้จะทำซ้ำด้วยค่ากระแสที่แตกต่างกันเพื่อให้ได้ตำแหน่ง $45^\circ, 67.5^\circ$ และ 90° วิธีนี้ทำให้สามารถลดขนาดขั้นได้ครึ่งหนึ่งเมื่อเทียบกับโหนมครึ่งขั้น แต่ก็สามารถนำไปกล กว่าันนี้ได้ การใช้ไมโครสเต็ปปิ้งช่วยให้เข้าถึงความละเอียดของตำแหน่งที่สูงมากได้ แต่ขอได้เปรียบนี้ต้องแลก มาด้วยอุปกรณ์ที่ซับซ้อนกว่าในการควบคุมมอเตอร์ และแรงบิดที่น้อยลงในแต่ละสเต็ป แรงบิดนั้นแปรผันตาม

ไข่น์ของมุนระห่วงสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์และสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ ดังนั้น เมื่อสเตปเล็กลง แรงบิดก็จะเล็กลงด้วย ซึ่งอาจทำให้สเตปบางสีพ่ายไป ซึ่งหมายความว่าตำแหน่งของโรเตอร์จะไม่เปลี่ยนแปลง แม้ว่ากระแสในขดลวดสเตเตอร์จะเปลี่ยนแปลงไปแล้วก็ตาม



Loss step คือ การสูญเสียสเตป เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นกับ Stepper Motor เมื่อมอเตอร์ไม่สามารถหมุนตามคำสั่งที่ป้อนได้อย่างถูกต้อง หรือไม่สามารถรักษาตำแหน่งที่ถูกต้องตามจำนวนก้าว (Step) ที่ควรจะเป็น ส่งผลให้ตำแหน่งของมอเตอร์ผิดพลาดหรือคลาดเคลื่อนจากที่ต้องการ ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องหลีกเลี่ยงในงานที่ต้องการความแม่นยำสูง เช่น หุ่นยนต์, เครื่อง CNC, หรือเครื่องพิมพ์ 3D

โดยมีสาเหตุจาก

- 1.โหลดเกินกำลัง (Overload)
- 2.ความเร่งหรือความเร็วสูงเกินไป (High Acceleration/Speed)
- 3.แรงเฉื่อยของโหลด (Inertia of Load)
- 4.การกระตุก (Vibration/Resonance)
- 5.กระแสไม่เพียงพอ (Insufficient Current)

และวิธีป้องกัน Loss Step ดังนี้

- 1.ลดความเร็วและความเร่งของมอเตอร์
- 2.ใช้มอเตอร์ที่มีกำลังและแรงบิดสูงขึ้น
- 3.ใช้ระบบ Feedback (Closed-Loop System)
- 4.เพิ่มกระแสให้กับมอเตอร์
- 5.ลดแรงเฉื่อยของโหลด
- 6.หลีกเลี่ยงการทำงานในย่านเรโซแนนซ์

การตรวจสอบ Loss Step

- 1.การใช้ Encoder ติดตั้ง Encoder เพื่อวัดการหมุนและตรวจสอบว่ามอเตอร์หมุนครบตามที่สั่งหรือไม่
- 2.การรัดตำแหน่ง เปรียบเทียบตำแหน่งจริงกับตำแหน่งที่สั่งให้มอเตอร์ไป
- 3.การสังเกตการทำงาน พังเสียงหรือสังเกตการกระตุกขณะมอเตอร์ทำงาน ซึ่งอาจบ่งบอกถึงการสูญเสียสเตป

DRV8825 คือ bipolar stepper motor driver คือบอร์ดที่ทำหน้าที่จ่ายไฟให้แก่มอเตอร์โดยสามารถปรับความละเอียดได้โดยใช้ MODE ทั้งหมด 3 ตัวในการเปลี่ยน โดยมีตารางบอกรายละเอียดโดยใช้ MODE ในการปรับดังนี้

Table 2. Stepping Format

MODE2	MODE1	MODE0	STEP MODE
0	0	0	Full step (2-phase excitation) with 71% current
0	0	1	1/2 step (1-2 phase excitation)
0	1	0	1/4 step (W1-2 phase excitation)
0	1	1	8 microsteps / step
1	0	0	16 microsteps / step
1	0	1	32 microsteps / step
1	1	0	32 microsteps / step
1	1	1	32 microsteps / step

OK28STH32-0674A คือ bipolar stepper motor ที่ใช้ในการทดลอง โดยมี motor specification ดังนี้

Electrical Specification	
Bipolar/Unipolar	Bipolar
Holding Torque (Ncm)	5.88
Holding Torque (oz.in)	8.32
No. of Phase	2
Step Angle(deg.)	1.8
Open-loop/Closed-loop	Open-loop
Phase Current(A)	0.67
Phase Voltage(V)	3.75

Physical Specification	
Body Length(mm)	32.2
Frame Size(mm)	28 x 28
No. of Lead	4
Shaft Diameter(mm)	5
Shaft Length(mm)	20
Shaft Type	D-cut
Single Shaft/Dual Shaft	Dual Shaft
Weight(g)	110

2.7.วิธีดำเนินการทดลอง

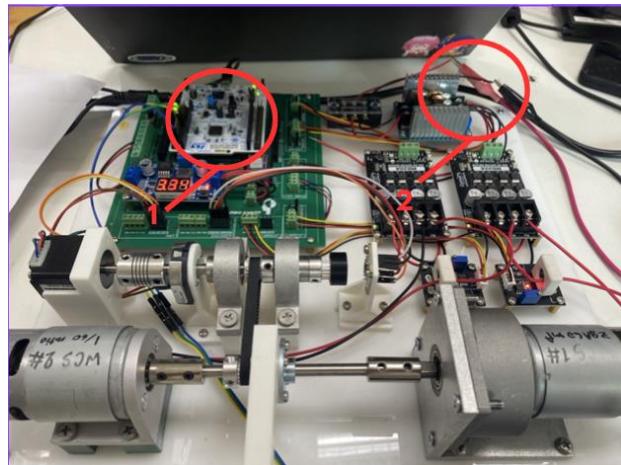
1. ประกอบ board Nucleo STM32G474RE เข้ากับ MotorXplorer
2. เชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อใช้งานผ่าน matlab
3. เก็บผลความเร็ว กับ กระแสไฟฟ้าทุก step
5. นำเข้าโปรแกรม MATLAB เพื่อสร้างกราฟต่างๆ

2.8.วัสดุอุปกรณ์

1. RS PRO Hybrid, Permanent Magnet Stepper Motor จำนวน 1 อัน
2. Incremental Encoder AMT103-V จำนวน 1 อัน
3. stepper driver DRV8825 จำนวน 1 อัน
5. Nucleo STM32G474RE จำนวน 1 อัน
6. MotorXplorer จำนวน 1 ชุด

2.9. ขั้นตอนการดำเนินงาน

2.9.1. ขั้นตอนการติดตั้งบอร์ด



2.9.1.1. ติดตั้ง board Nucleo STM32G474RE ลง MotorXplorer

2.9.1.2. เชื่อมต่อ power supply 12V ที่ MotorXplorer

2.9.1.2. เชื่อมต่อ stepperdriver และ Encouder เข้ากับ board Nucleo STM32G474RE

ดังนี้

วงจรที่ใช้ในการทดสอบ

1. Incremental Encoder AMT103-V

5V -> 3V3

GND -> GND

A -> PA6

B -> PA7

2. Magnetic Encoder

SCL -> PB8

SDA -> PB9

DIR -> GND

VCC -> 3V3

GND -> GND

3. Stepper Motor Driver

M0 -> PB15

M1 -> PB14

M2 -> PB13

EN -> PB1

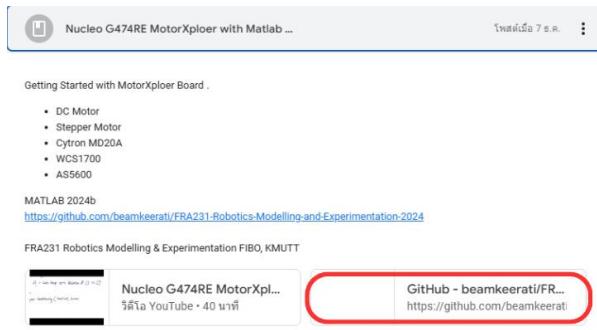
DIR -> PB2

STEP -> PC8

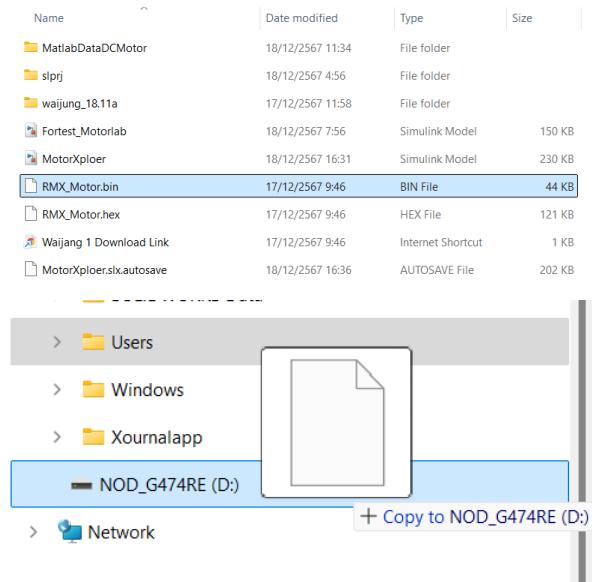


2.9.2. ขั้นตอนการติดตั้งโปรแกรมในการใช้งาน

2.9.2.1. ติดตั้งโปรแกรมจาก github



2.9.2.2. โynไฟล์ RMX_MOTOR.bin ลงใน board Nucleo STM32G474RE



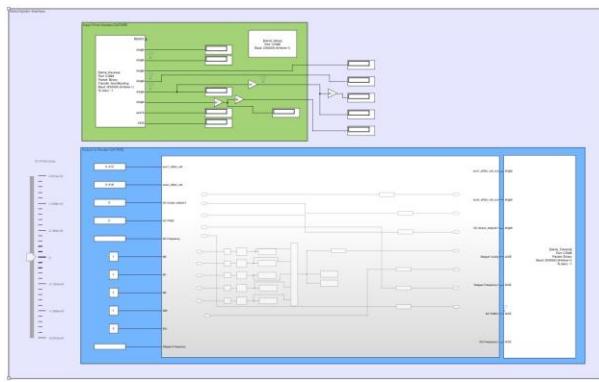
2.9.2.3. ดาวน์โหลด Waijung

```
 87 if (isempty(str2num(file)))
 88     disp(['Warning: File ' file ' does not exist or is an empty file']);
 89 else
 90     delete('file');
 91 end
 92 disp(['File ' file ' has been deleted.']);

 93 % Install all available targets
 94 targets = uiging.listtargets;
 95 for i=1:length(targets)
 96     target = targets(i);
 97     target_id = str2num(target);
 98     cd(target_install_dfr);
 99     eval(['targetInstall(' target_id ',targets)']);
100 end
101 cd(current_dfr);

102 choice = question('Would you like to enable this feature? (Yes|No|...)');
103 if choice == 'Yes'
104     % Enable Automatic Updates Checking.
105     switch choice
106         case 'Yes'
107             % Call org.enableAutomaticCheckForUpdates();
108             org.disableAutomaticCheckForUpdates();
109         case 'No'
110             % Call org.disableAutomaticCheckForUpdates();
111             org.enableAutomaticCheckForUpdates();
112         otherwise
113             % Do nothing
114     end
115 end
116 disp(['Wiz-Img Installatin...'])

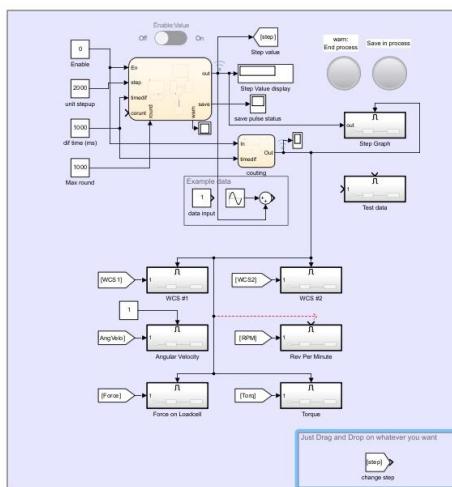
end
```



2.9.3.การทดลอง

2.9.3.1. ทดสอบ load ที่ส่งผลทำให้ความเร็วลดลงออกให้หมดเหลือเฉพาะ encoder กับ stepper motor

2.9.3.2. สร้าง algorithm เพื่อเก็บค่าผลการทดลองที่ต้องการ



2.9.3.3. ตั่ร率ดับ frequency จนกว่าจะหาค่าที่ stepper motor loss step

2.9.3.4. ปรับ frequency ให้ครบ 10 ดูว่าการทำงานถ้าไม่ตั่ร率ดับ stepper motor จะทำงานได้เหมือนเดิม

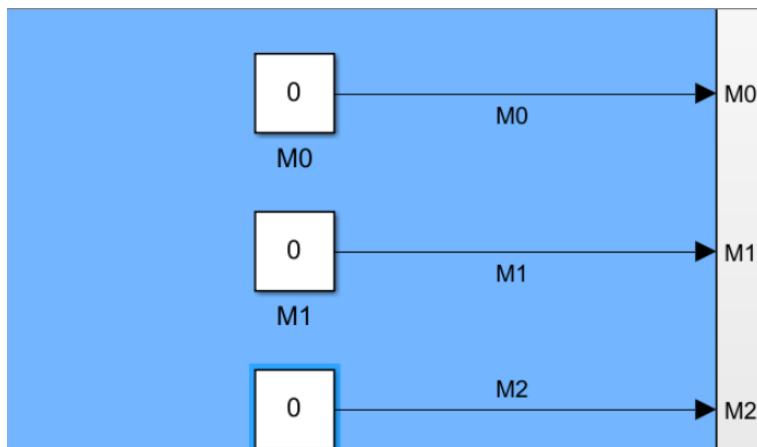
2.9.3.5. นำมาทำเป็นกราฟในโปรแกรม MATLAB

```
>> figure
>> hold on;
>> xlabel('Frequency(f)');
>> ylabel('velocity (rad/s)');
>> title('relationship between Frequency and velocity');
>> plot(freq,valo);
>>
```

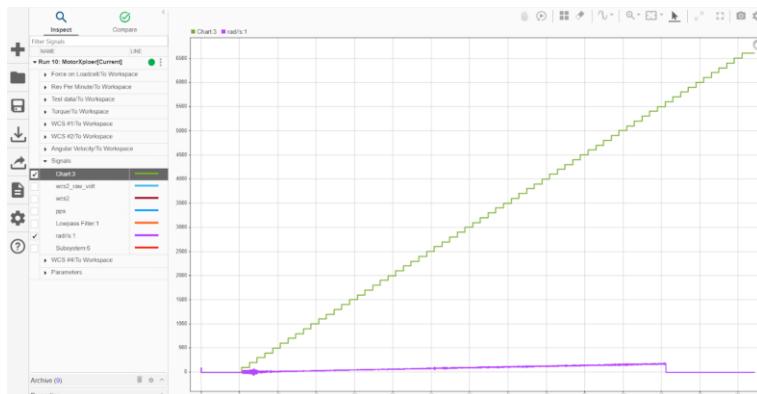
2.10.ผลการทดลอง

2.10.1. Full step

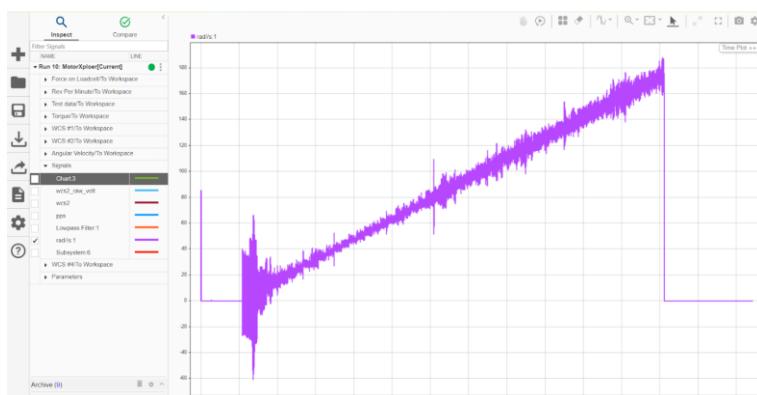
2.10.1.1.การตั้งค่า mode Full step



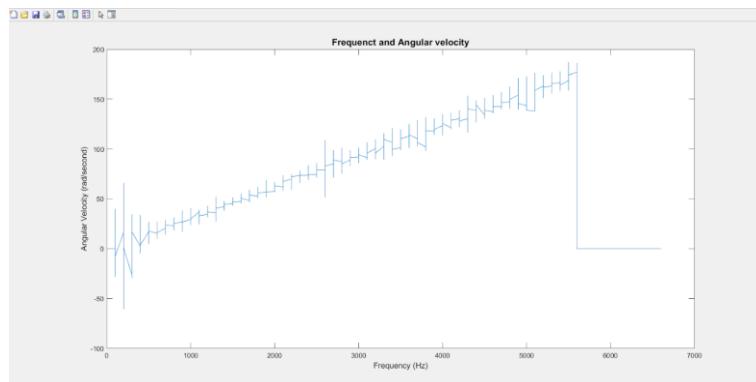
2.10.1.2. Outputจากการ Log สัญญาณ(กระแส) mode Full step



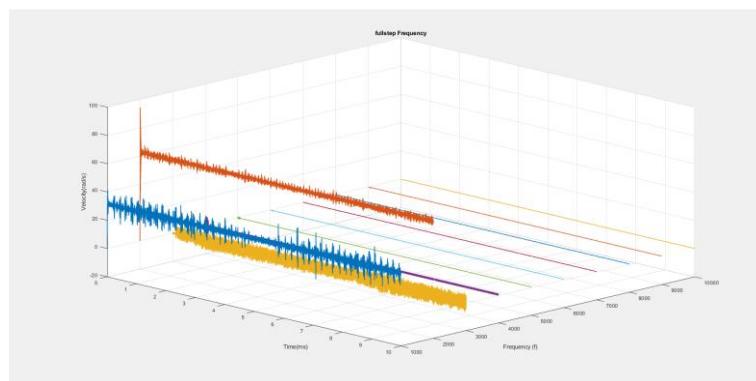
2.10.1.3. Outputจากการ Log สัญญาณ(ความเร็ว) mode Full step



2.10.1.4. กราฟแสดงความเร็วเทียบความถี่ mode Full step

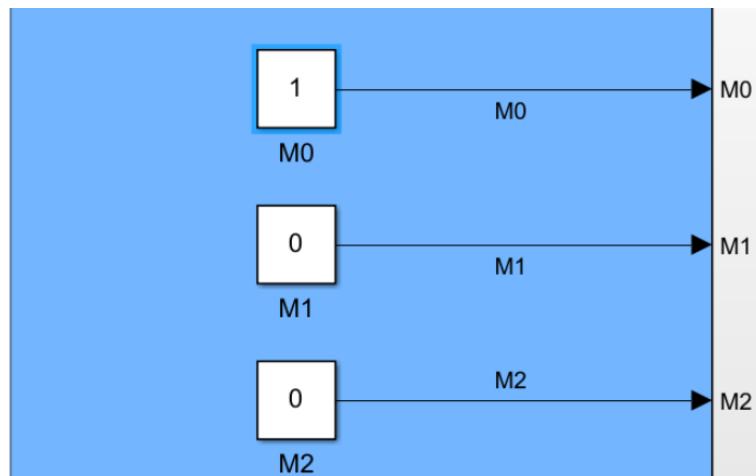


2.10.1.5. กราฟแสดงความถี่ทั้งหมดใน mode Full step

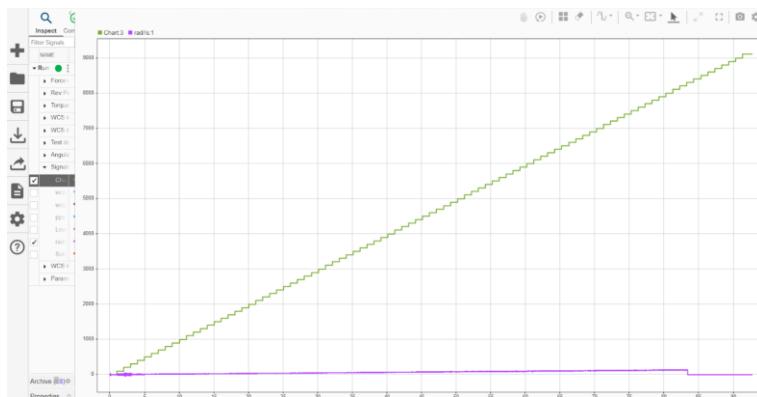


2.10.2. Half Step

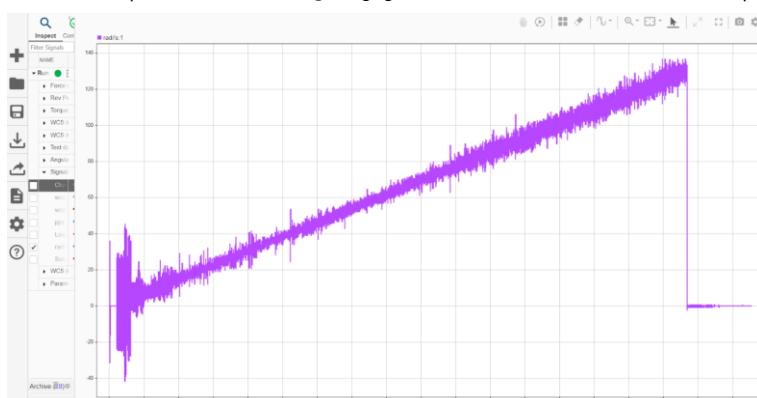
2.10.2.1. การตั้งค่า mode Half Step



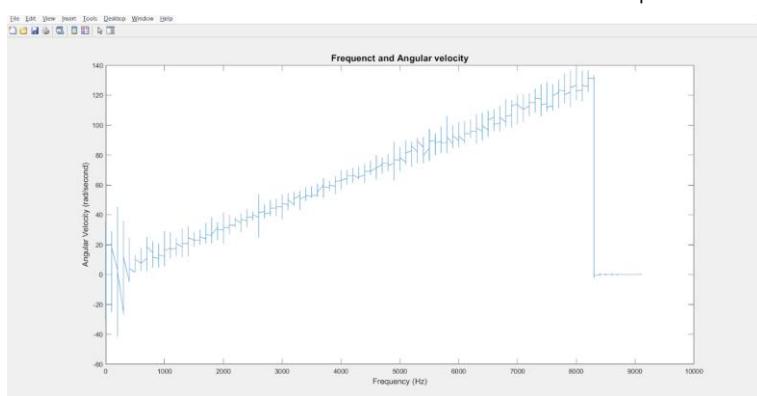
2.10.2.2.Output จากการ Log สัญญาณ(กระแส) mode Half Step



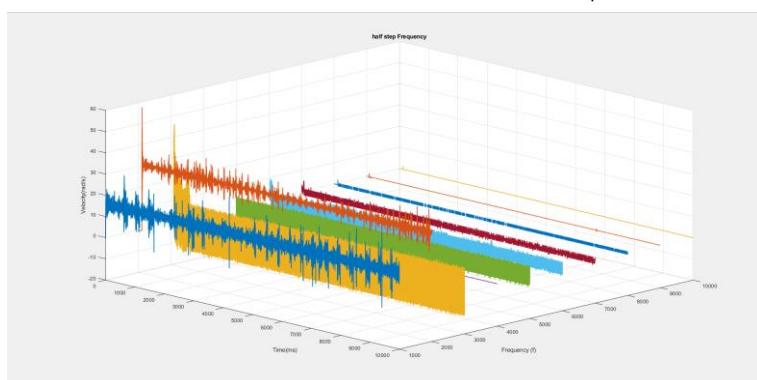
2.10.2.3.Output จากการ Log สัญญาณ(ความเร็ว) mode Half Step



2.10.2.4.กราฟแสดงความเร็วเทียบความถี่ mode Half Step

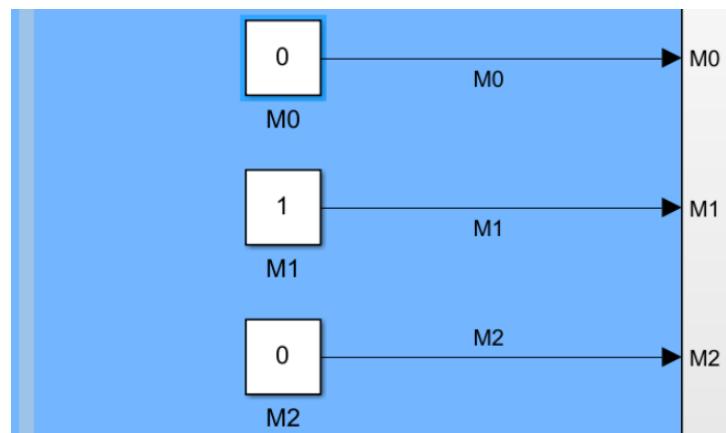


2.10.1.5.กราฟแสดงความถี่ทั้งหมดใน mode Half Step



2.10.3. Quarter Step

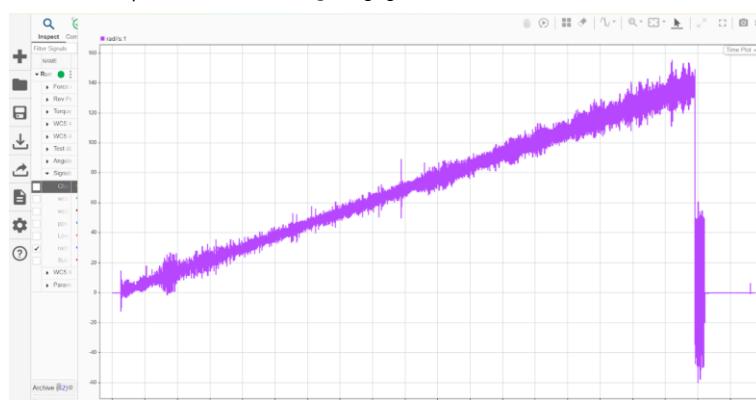
2.10.3.1. การตั้งค่า mode Quarter Step



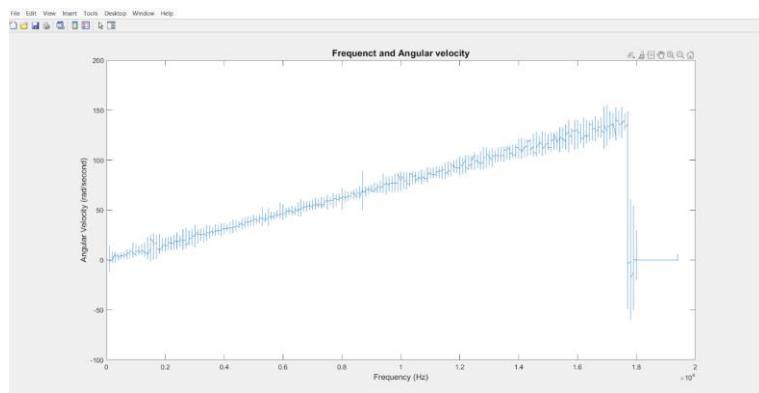
2.10.3.2. Output จากการ Log สัญญาณ(กระแส) mode Quarter Step



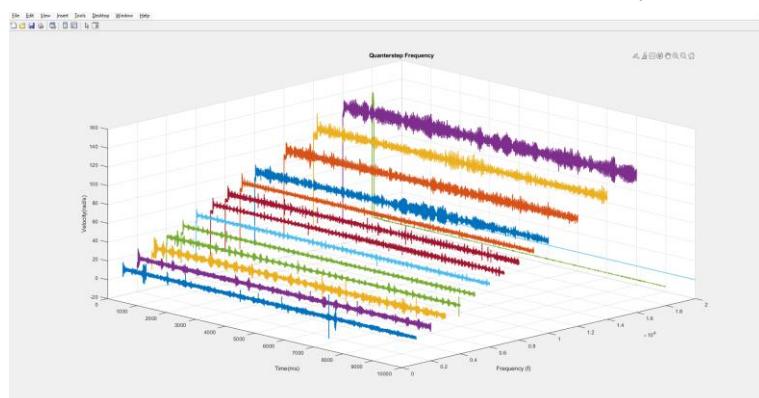
2.10.3.3. Output จากการ Log สัญญาณ(ความเร็ว) mode Quarter Step



2.10.1.4. กราฟแสดงความเร็วเทียบความถี่ mode Quarter Step

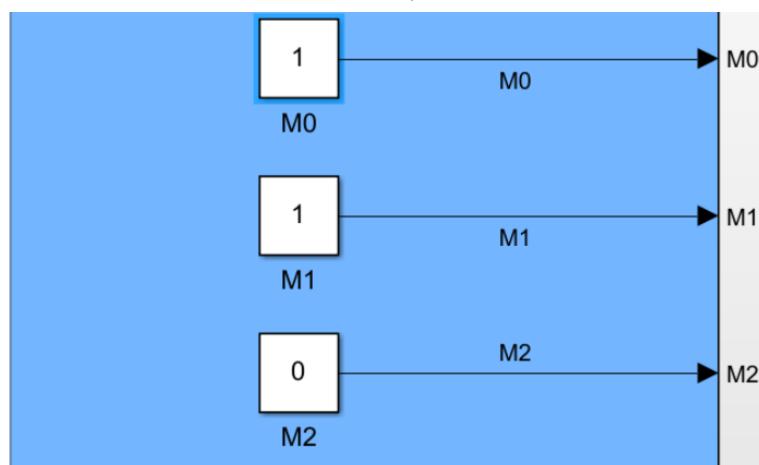


2.10.1.5. กราฟแสดงความถี่ทั้งหมดใน mode Quarter Step



2.10.4. 8 microStep

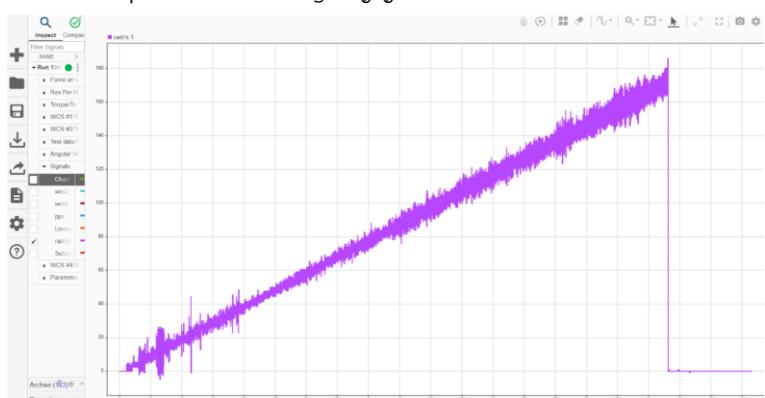
2.10.4.1. การตั้งค่า mode 8 microStep



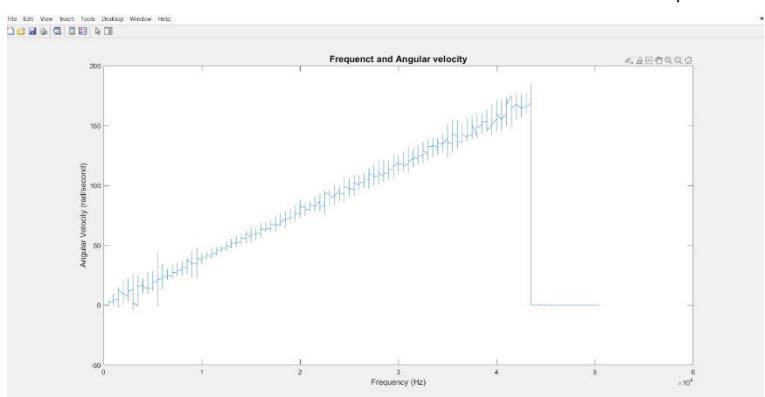
2.10.4.2.Output จากการ Log สัญญาณ(กระแส) mode 8 microStep



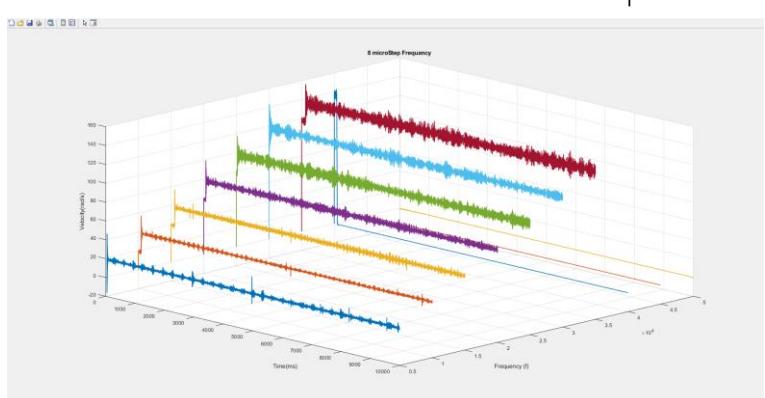
2.10.4.3.Output จากการ Log สัญญาณ(ความเร็ว) mode 8 microStep



2.10.4.4.กราฟแสดงความเร็วเทียบความถี่ mode 8 microStep

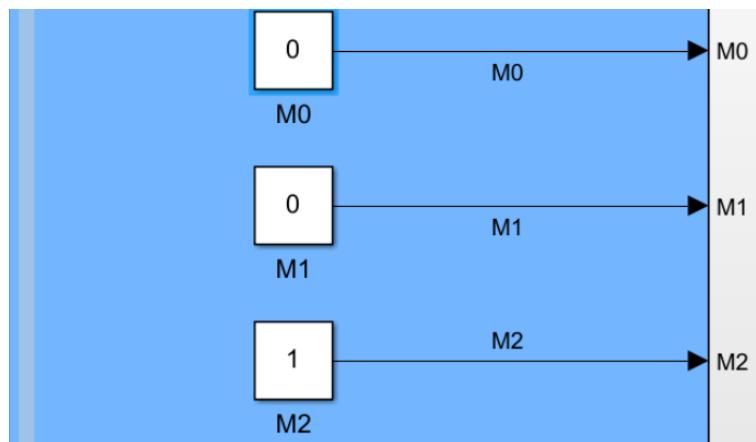


2.10.4.5.กราฟแสดงความถี่ทั้งหมดใน mode 8 microStep

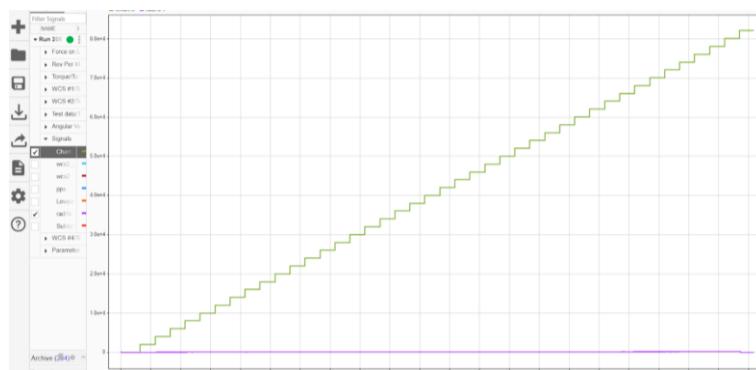


2.10.5. 16 microStep

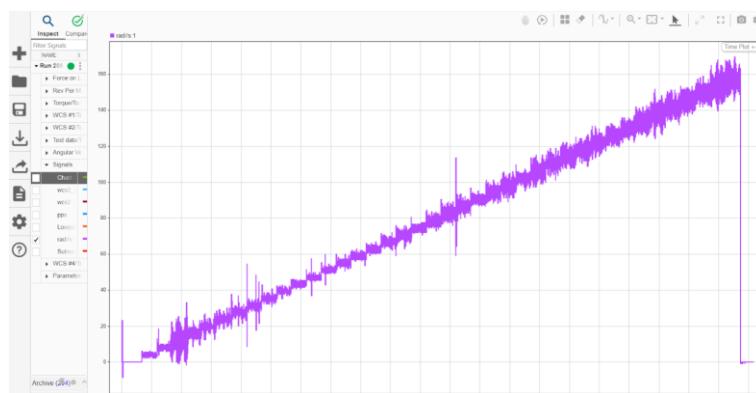
2.10.5.1. การตั้งค่า mode 16 microStep



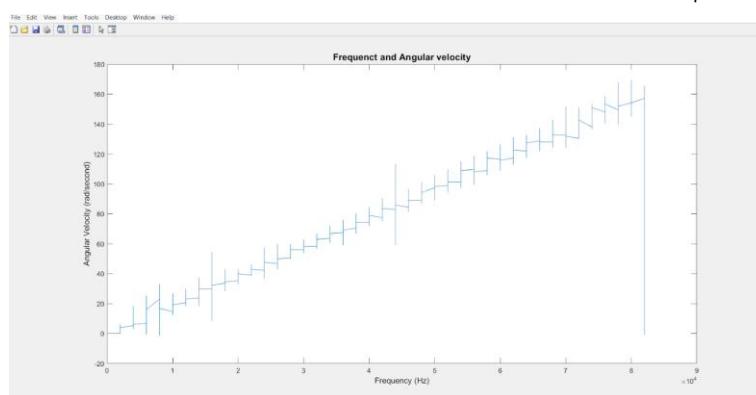
2.10.5.2. Output จากการ Log สัญญาณ(กระแส) mode 16 microStep



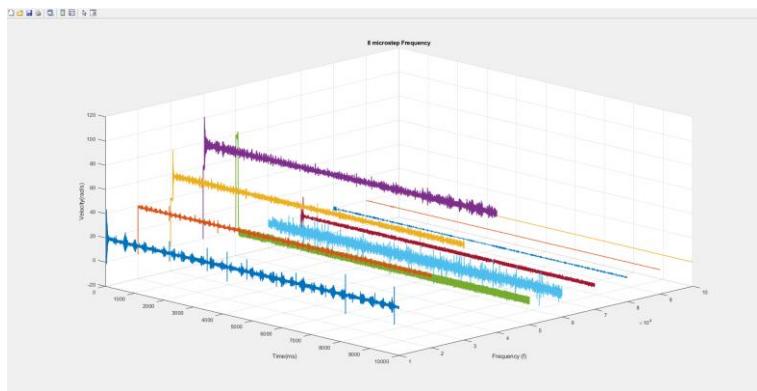
2.10.5.3. Output จากการ Log สัญญาณ(ความเร็ว) mode 16 microStep



2.10.5.4. กราฟแสดงความเร็วเทียบความถี่ mode 16 microStep

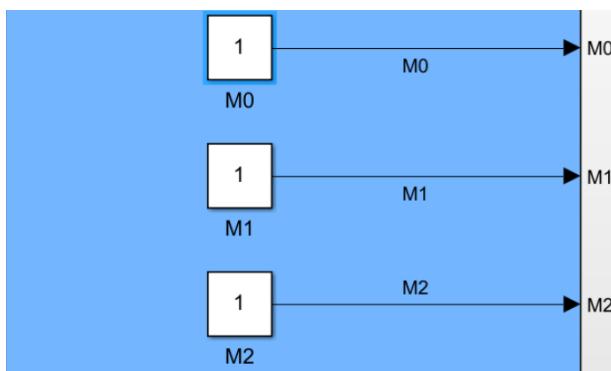


2.10.5.5. กราฟแสดงความถี่ทั้งหมดใน mode 16 microStep



2.10.6. 32 microStep

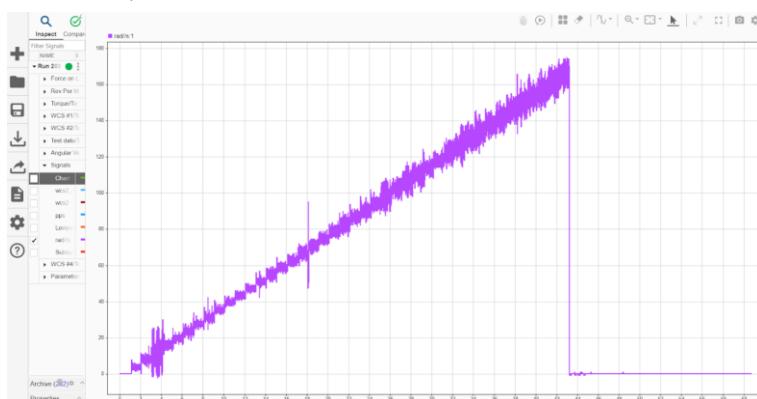
2.10.6.1. การตั้งค่า mode 32 microStep



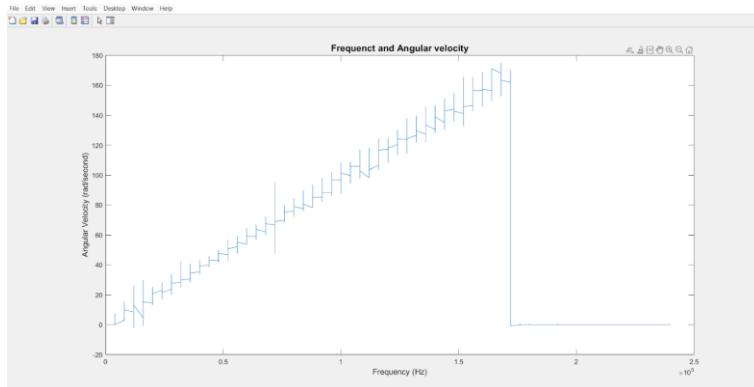
2.10.6.2. Output จากการ Log สัญญาณ(กระแส) mode 32 microStep



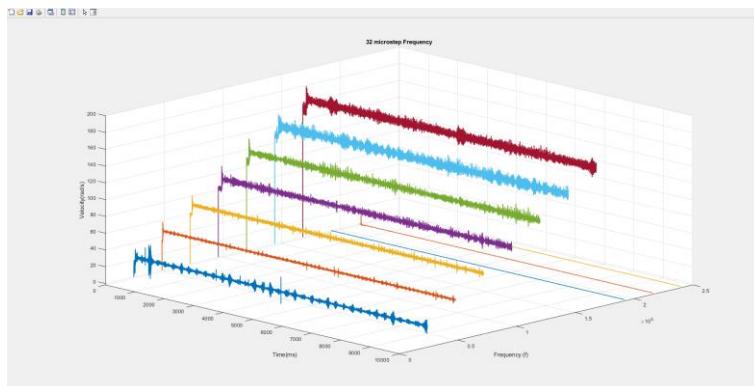
2.10.6.3. Output จากการ Log สัญญาณ(ความเร็ว) mode 32 microStep



2.10.6.4.กราฟแสดงความเร็วเทียบความถี่ mode 32 microStep



2.10.6.5.กราฟแสดงความถี่ทั้งหมดใน mode 32 microStep



2.11.สรุปผล

2.11.1.จากการทดลองหา loss step ของรูปแบบการ Driveแบบต่างแสดงให้เห็นว่า ying microstep ยิ่งสูง Frequency ที่ใช้ในการจ่ายเพื่อใช้ในการสั่งการมอเตอร์จะมากขึ้นเลย ซึ่งจะสูงขึ้นมากกว่า 2 เท่า แล้วแต่ตัว stepper driver motor แต่ละตัว

2.11.2.จากการใช้ทดลองใช้งาน รูปแบบการ Driveแบบต่างแสดงให้เห็นว่า stepper motor ตัวนี้ ควรใช้แบบ Quarter Step ,8 microstep และ 32 microstep เนื่องจากในช่วงระหว่างที่ใช้งานของการ ทำงานรูปแบบอื่น จะเห็นว่ามีบาง Frequency ที่ความเร็วต่ำกว่าปกติหรือไม่คงที่ต่อการใช้งาน

2.11.3.จากการทดลองในช่วงที่เกิด loss step กระแสที่ได้มาจะลดลงเหลือแค่ 0 A

2.11.4.จากการทดลองในช่วงที่เกิด loss step ความเร็วที่ได้มาจะมีการเหวี่ยงเป็นอย่างมาก เนื่องจากมอเตอร์พยายามที่จะทำงานต่อให้ทันตามความถี่ที่ได้มา

2.12.อภิปรายผล

จากการทดลองใช้งาน stepper motor ด้วยรูปแบบทำงานแบบต่างๆ แสดงให้เห็นว่าการ ควบคุมแบบ Bipolar Stepper Motors แสดงให้เห็นว่าเราสามารถใช้ความถี่ในการสั่งการได้ โดยจากการ ทดลองพบว่า ying ความถี่สูงความเร็ว ying เหวี่ยงมากขึ้นและความเร็วสูง

2.13. ข้อเสนอแนะ

- จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าบอร์ดที่ได้รับมา มีความไม่สมประกอบในการใช้งานเป็นส่วนมาก เพราะฉะนั้นควรจะมี 3Dprint ในการทดลองครั้งนี้ เพราะหากเกิด load ในการใช้มอเตอร์ ค่าต่างๆที่ได้อ่านจะไม่ใช้ค่าจริงและทำให้งานที่ได้ออกมาไม่มีคุณภาพ
- หากจะเก็บค่าควรเก็บค่าที่ระยะเอียงมากกว่า 45° เพื่อที่จะหาว่า เรายังคงใช้ mode ได้มากที่สุด

2.14. เอกสารอ้างอิง(แบบ link)

Stepper motor and stepper motor drive

https://www.monolithicpower.com/en/learning/resources/stepper-motors-basics-types-uses?srsltid=AfmBOooo4LnAFSJRJAeE_Cjkp4s4zq_A__NAB_nD7JuulW7r2YqutAYw

stepper motor Specification

oyostepper.com/goods-1490-NEMA11-Stepper-Motor-with-Brake-18-Deg-588Ncm-375V-067A-28-x-28mm-2-Phase-D-Cut.html?srsltid=AfmBOoqWQLM9AP6xE86eTgDfzQQLVBSMfpZzk-iK5kgS0AqzaXLqEOW

DRV8825 Datasheet

DRV8825 Datasheet(PDF) - Texas Instruments (alldatasheet.com)

3.Brushless DC Motor

3.1.จุดประสงค์

1.เพื่อเข้าใจหลักการทำงานของการควบคุม Brushless DC Motor แบบ Sensorless Control และ Sensor-based Control

2.เพื่อเข้าใจหลักการ BLCD Motor Control Technique และทำความเข้าใจวิธีการควบคุมอย่างละเอียด Trapezoidal หรือ 6-Step Control กับ Sinusoidal หรือ Field Oriented Control (FOC)

3.เพื่อเข้าใจความแตกต่างของการควบคุม 6-Step Control และ FOC โดยเน้นถึงความแตกต่างในวิธีการเปลี่ยนและจัดการกับ Vector ของกระแสไฟฟ้า ผ่านการอธิบายด้วย Space Vector Modulation (SVM)

4.เพื่อเข้าใจความแตกต่างระหว่าง Trapezoidal และ Sinusoidal

5.เพื่อเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่าง 6-Step Control และ PWM

6.เพื่อเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่าง PWM และ Frequency Output (Back EMF และ Hall Sensor)

7.เพื่อเข้าใจความแตกต่างระหว่าง Feedback จาก Back EMF และ Hall Sensor

8.เพื่อเข้าใจการจัดการกับ Feedback ของ Sensorless Control เพื่อหาตำแหน่งเทียบกับ Feedback ของ Sensor-based Control บน ESC และ MCU

9. การหาความเร็วรูปแบบต่างๆของ Brushless DC Motor

10.เพื่อเข้าใจวิธีการคำนวณหาความเร็วของ BLDC Motor จาก Frequency ของสัญญาณที่อ่านได้จาก Oscilloscope

11.เพื่อเข้าใจวิธีการใช้งาน Oscilloscope 4 Channels ในการจับสัญญาณของ BLDC Motor ทั้ง 3 Phases

3.2.สมมตฐาน

1.แรงดันที่ได้จาก Back EMF จะเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบของมอเตอร์

2.เราสามารถนำ Back EMF มาหาตำแหน่งโดยใช้หลักการ Zero Crossing Detection

3.3.ตัวแปร

ตัวแปรต้น : ความเร็วเชิงมุม

ตัวแปรตาม : สัญญาณไฟฟ้าของชุดลวด U, V, W ความเร็วรอบ, แรงดัน Back EMF

ตัวแปรควบคุม : ชนิดของมอเตอร์ และ บอร์ดที่ใช้ในการควบคุม
แรงดันไฟฟ้าที่จ่าย Motor

3.4.นิยามศัพท์เฉพาะ

3.5.นิยามเชิงปฏิบัติการ

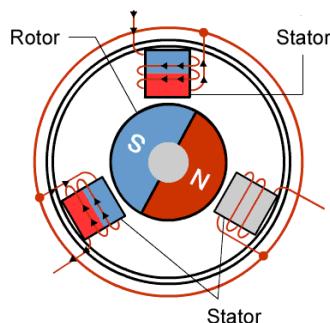
แปรงถ่าน

คอมมิวเตเตอร์

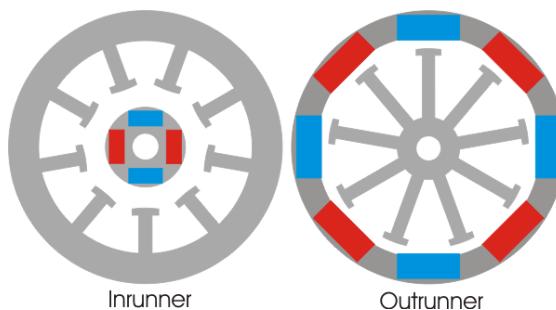
3.6.เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Brushless DC Motor คือ มอเตอร์ที่ไม่มีแปรงถ่านเนื่องจาก Brushed DC motors มีข้อเสียหนึ่งอย่างคือ หากใช้ไปเรื่อยแปรงถ่าน และ คอมมิวเตเตอร์จะเกิดการสึกหรอค่อนข้างเร็วเนื่องจากการสัมผัสถอยย่างต่อเนื่อง ทำให้ต้องเปลี่ยนบอยและบำรุงรักษาเป็นระยะ

จากการที่ Brushed DC motors แปรงถ่านจะส่งกระแสไฟฟ้าไปยังชุดลวดโรเตอร์ แล้วถ้าไม่มีแปรงถ่านจะทำยังไง ในการทำงานของ Brushless DC Motor โรเตอร์จะกลایเป็นแม่เหล็กถาวร และ ชุดลวดไม่หมุนแต่จะยึดกับสเตเตอร์ เนื่องจากชุดลวดไม่เคลื่อนที่ จึงไม่จำเป็นต้องใช้แปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์



โครงสร้างของ BLDC Motor แบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลัก Inrunner โรเตอร์อยู่ด้านในและสเตเตอร์อยู่ด้านนอก พบในมอเตอร์ที่ต้องการความเร็วสูง และ Outrunner สเตเตอร์อยู่ด้านในและโรเตอร์อยู่ด้านนอก พบในมอเตอร์ที่ต้องการแรงบิดสูง



ตัวควบคุมมอเตอร์ ทำหน้าที่เป็นตัวกลางระหว่างแหล่งจ่ายไฟและมอเตอร์ โดยแปลงสัญญาณควบคุมให้เป็นการทำงานของมอเตอร์ที่เหมาะสม ซึ่งสามารถควบคุมความเร็ว แรงบิด และตำแหน่งได้อย่างแม่นยำ ตัวควบคุมมอเตอร์มี 2 ประเภทที่นิยมใช้กันทั่วไป ได้แก่ sensored และ sensorless

Sensored ทำงานโดยใช้ sensor ในการให้ข้อมูลป้อนกลับเกี่ยวกับตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ เช่นเซอร์ เซ็นเซอร์ sensor hall effect sensor จะตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์และส่งข้อมูลกลับไปยังตัวควบคุม จากข้อมูลป้อนกลับนี้ ทำให้สามารถควบคุมความเร็ว แรงบิด และตำแหน่งของมอเตอร์ได้อย่างแม่นยำ

ข้อดีของ Sensored

- การควบคุมที่แม่นยำ : ด้วยการตอบสนองจากเซ็นเซอร์ ตัวควบคุมเหล่านี้จึงให้การควบคุมที่แม่นยำ
- การทำงานที่ราบรื่น : ข้อมูลเซ็นเซอร์ช่วยให้มอเตอร์ทำงานราบรื่นขึ้น ลดการสั่นสะเทือน และปรับปรุงประสิทธิภาพโดยรวม
- การ starters ที่ราบรื่นและการควบคุมความเร็วต่ำ : ควบคุมที่แม่นยำแม้ในความเร็วต่ำ
- การควบคุมแรงบิดสูง : เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการการส่งแรงบิดที่แม่นยำ
- ความเสถียร : การตอบสนองของเซ็นเซอร์ช่วยเพิ่มความเสถียรและช่วยให้ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดหรือการระบุภาระยกได้ดีขึ้น

ข้อจำกัดของ Sensored

- การติดตั้งที่ซับซ้อน : การติดตั้งและกำหนดค่าเซ็นเซอร์ภายนอกทำให้กระบวนการติดตั้งมีความซับซ้อนมากขึ้น
- การบำรุงรักษา : ต้องมีการบำรุงรักษาเป็นระยะเพื่อให้แน่ใจว่าการอ่านค่าแม่นยำ
- ความไวต่อปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม : เซ็นเซอร์ภายนอกอาจได้รับผลกระทบจากปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม
- ต้นทุน : ยังต้องการความแม่นยามากขึ้น ราคาก็จะสูงขึ้นตามข้อกำหนดทางเทคนิคอื่นๆ Sensorless ทำงานโดยใช้ back electromotive force (back - Emf) ของมอเตอร์หรือลักษณะภายนอกอื่นๆ เพื่อประมาณตำแหน่งของโรเตอร์และควบคุมมอเตอร์แทน

ข้อดีของ Sensorless

- ความเรียบง่าย : ลดความยุ่งยากในการเดินสายไฟและความพยายามในการติดตั้ง
- ความคุ้มต้นทุน : Sensorless ราคาถูกกว่า Sensored
- ความน่าเชื่อถือ : ด้วยส่วนประกอบที่น้อยลง ทำให้ความน่าเชื่อถือและความต้องการบำรุงรักษาลดลง
- ความทนทานต่อสิ่งภายนอก Sensorless ได้รับผลกระทบจากปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมน้อยกว่า

ข้อจำกัดของ Sensorless

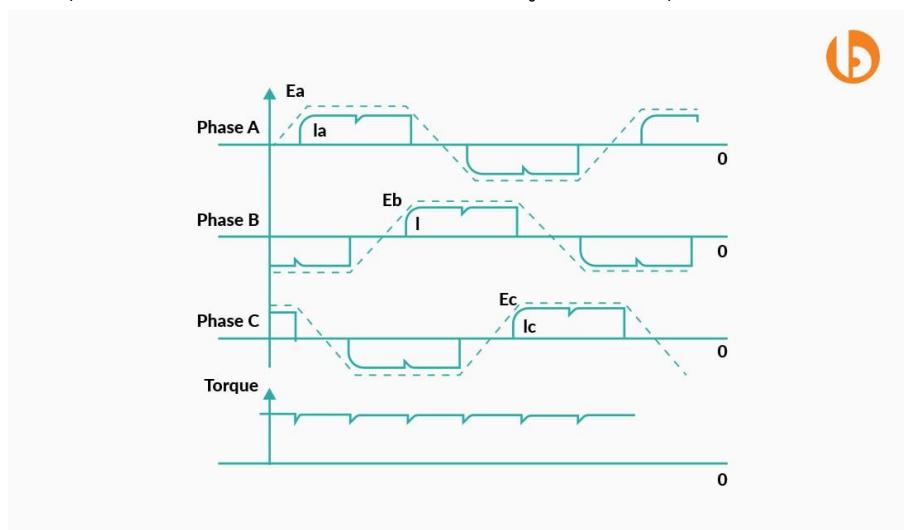
- ช่วงการควบคุมความเร็วและแรงบิดที่ต่ำกว่า : ความเร็วและแรงบิดอาจถูกจำกัดเมื่อเทียบกับตัว Sensored
- ความแม่นยำน้อยลง : การไม่มีการตอบรับตำแหน่งอาจส่งผลให้การควบคุมมีความแม่นยำน้อยลง

- แรงบิดเริ่มต้นที่จำกัด : ต้องสร้างแรงบิดเริ่มต้นที่เพียงพอโดยไม่มีข้อมูลตำแหน่ง

การเปรียบเทียบแบบมี Sensored และ Sensorless

	Sensored	Sensorless
ประสิทธิภาพ	T	
ราคา		T
วิธีการใช้งาน		T
คุณภาพ	T	
การลดเสียงและการสั่น	T	

Trapezoidal Control จะกำหนดรูปปั่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย้อนกลับและรูปคลื่นกระแสขับเคลื่อน เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่เหมาะสมที่สุดจากมอเตอร์ กระแสขับเคลื่อนควรตรงกับรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย้อนกลับของมอเตอร์ BLDC มีรูปปั่น Trapezoidal (สี่เหลี่ยมคงที่) จึงควรขับเคลื่อนด้วยกระแส Trapezoidal เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด การสับเปลี่ยนรูป Trapezoidal เรียกว่า “6 Step Commutation” เนื่องจากมีกระแสขับเคลื่อนทั้งหมดหกขั้นตอนที่ใช้เพื่อให้มอเตอร์หมุนครบหนึ่งรอบ และ รูปเปลี่ยนแรงบิดจะมีอยู่ในมอเตอร์ทุกครั้งที่มีการสับเปลี่ยน (60 องศา)



ข้อดีของ Trapezoidal Control

- อัลกอริทึมการควบคุมนั้นเรียบง่าย
- ต้องใช้เพียง 2 เฟสเท่านั้นจึงจะใช้งานได้ในเวลา
- การสูญเสียการสลับน้อยลง

ข้อเสียของ Trapezoidal Control

- แรงบิดกระแสเพื่อมที่ทุกการสับเปลี่ยน
- แรงบิดที่เกิดขึ้นน้อยลง

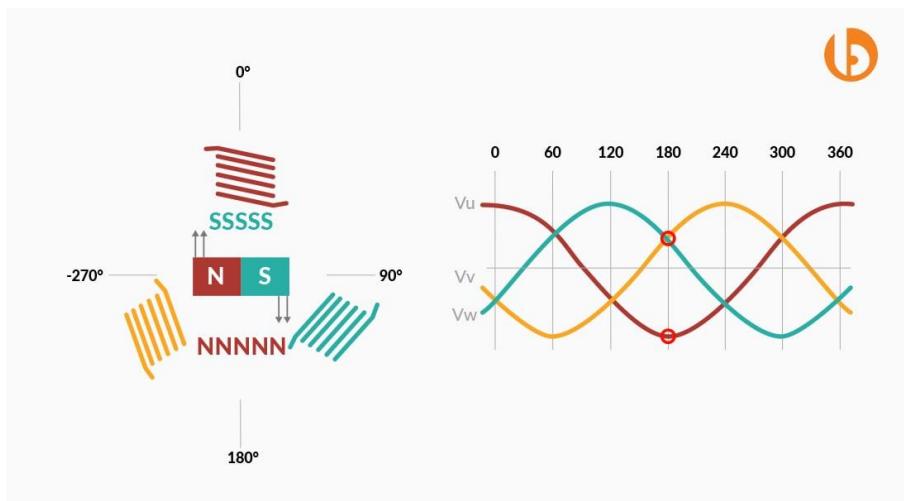
- เสียงรบกวนจากอิเลคทรอนิกส์และไฟฟ้า

6-Step Control เป็นวิธีการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรง (Brushless DC Motor: BLDC) ที่ใช้การจ่ายแรงดันไปยังชุดลวดมอเตอร์ที่ละ 2 เฟสในแต่ละช่วงเวลา (phase commutation) โดยใช้ลำดับที่กำหนดไว้ล่วงหน้า ซึ่งเรียกว่า 6 ขั้นตอน เนื่องจากมี 6 ช่วงในหนึ่งรอบไฟฟ้า (Electrical Cycle)

หลักการทำงานของ 6-Step Control

- การสร้างลำดับการจ่ายไฟฟ้า:** แรงดันไฟฟ้าถูกส่งไปยังชุดลวดของมอเตอร์ที่ละคู่ (2 เฟสเปิดใช้งาน, 1 เฟสปล่อยโลยก) ตามลำดับการทำงาน 6 ขั้นตอน เพื่อให้เกิดการหมุนของสนามแม่เหล็ก
- การควบคุมตำแหน่งโรเตอร์:** การตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ทำได้โดยใช้ เช็นเซอร์ฮอลล์ (Hall Sensor) หรือวิธีการตรวจจับตำแหน่งโดยไม่ใช้เช็นเซอร์ (Sensorless Control) เช่น การวัดแรงดันย้อนกลับ (Back-EMF)
- แรงบิดแบบไม่ต่อเนื่อง:** สนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นจะทำให้เกิดแรงบิดในลักษณะขั้นๆ (Trapezoidal) ซึ่งอาจมีการกระตกหรือแรงบิดที่ไม่เรียบเนียน

Sinusoidal Control ใช้ในมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรเนื้องจากมอเตอร์ PMSM มีแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับแบบ sinusoidal การควบคุมแบบนี้จะขัดรัศมอกแรงบิดและทำให้การเคลื่อนไหวราบรื่น หลักการพื้นฐานของ Sinusoidal commutation คือการให้กระแสแบบ sinusoidal current แตกต่างกันไปตามตำแหน่งของโรเตอร์ กระแสจะถูกเลื่อนเฟสไป 120 องศา หลักการพื้นฐานของ Sinusoidal Control นี้คือ แรงบิดสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อสนามแม่เหล็กของโรเตอร์และสเตเตอร์ตั้งฉากกัน ทำให้ได้แรงบิดสูงสุดและการเคลื่อนไหวราบรื่น มีความเกี่ยวข้องกับ FOC Field-Oriented Control (FOC) เนื่องจาก FOC ใช้การสร้างสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ให้มีรูปแบบเป็นคลื่นไอน์



ข้อดีของ Sinusoidal Control

- ไม่มีแรงบิดกระเพื่อมในการเปลี่ยนแปลง
- การเคลื่อนไหวที่ราบรื่น
- แรงบิดสูงสุดที่ผลิตได้

ข้อเสียของ Sinusoidal Control

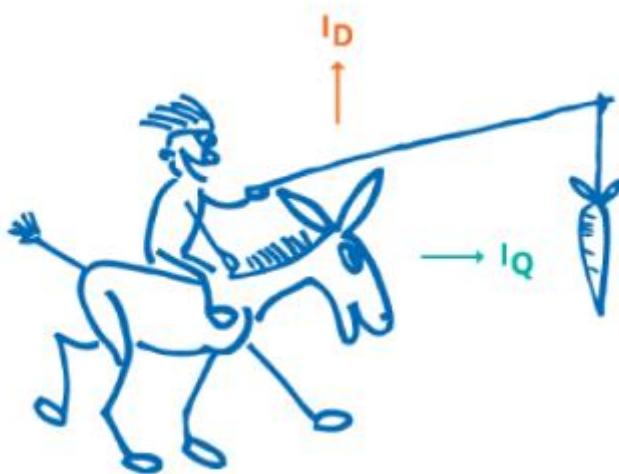
- สามารถมีสามเฟสในเวลาเดียวกันได้
- การสูญเสียการสับเปลี่ยนที่สูงขึ้น
- อัลกอริทึมการควบคุมมีความซับซ้อนและต้องใช้คณิตศาสตร์มาก

ปกติรูปคลื่นแรงแม่เหล็กไฟฟ้ากลับของมอเตอร์ BLDC จะเป็นทรง Trapezoidal แต่ความเห็นยังนำในมอเตอร์ทำให้รูปคลื่นเรียบเป็น sinusoidal นี้คือเหตุผลที่มอเตอร์ BLDC สามารถใช้การสับเปลี่ยนแบบสี่เหลี่ยมคงที่หรือไชน์ได้ทั้งสองแบบ

Field Oriented Control (FOC) หรือเรียกอีกอย่างว่าการควบคุมเวกเตอร์(vector control) ใช้การควบคุมกระแสเพื่อจัดการแรงบิดของมอเตอร์ 3 เฟสและมอเตอร์สเต็ปเปอร์ด้วยความแม่นยำและแบนด์วิดท์สูง(bandwidth) ใช้กระแสไฟฟ้าที่ตั้งฉากเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า ถือเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพที่สุดในการควบคุมมอเตอร์งyroscopic synchronous) แม่เหล็กถาวร เช่น มอเตอร์ BLDC 3 เฟสหรือมอเตอร์สเต็ปเปอร์ 2 เฟส

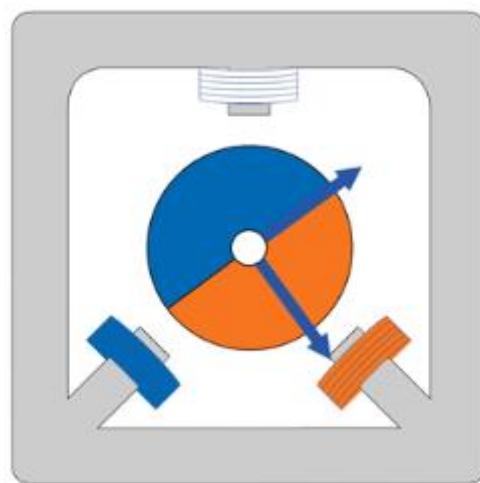
ในการสร้างแรงบิดในปริมาณที่แม่นยำนั้น การควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จำเป็นในการสร้างแรงบิดเป้าหมายที่เฉพาะเจาะจงนั้นไม่เพียงพอ จำเป็นต้องปรับเฟสสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กในโรเตอร์ด้วย การใช้กระแสไฟฟ้าในเฟสกับสนามแม่เหล็กจะไม่ก่อให้เกิดแรงบิด แต่กระแสไฟฟ้าที่จ่ายในแนวตั้งจากจะสร้างแรงบิดได้

ในมอเตอร์ไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วย FOC ลากีโรเตอร์ และตำแหน่งที่แน่นอนของลากจะกำหนด IQ ของกระแสไฟฟ้าที่ตั้งฉาก (แครอท) ที่ต้องใช้เพื่อควบคุมขั้นตอนต่อไปอย่างแม่นยำ กล่าวอีกนัยหนึ่ง IQ ของกระแสไฟฟ้าที่ตั้งฉากจะควบคุมมอเตอร์โดยทราบตำแหน่งที่แน่นอนของโรเตอร์



การควบคุมแบบเน้นสนามแม่เหล็กเรียกอีกอย่างว่าการควบคุมแบบวงแหวน เนื่องจากสามารถใช้ใน การรับ IQ และให้ค่าควบคุมที่ใช้งานง่ายในวงแหวนเดียว โรเตอร์จะถูกควบคุมโดยการใช้แรงดันไฟฟ้ากับ เพสกระแสงของมอเตอร์ไซน์สามเฟส หรือในกรณีของมอเตอร์สเต็ปเปอร์โดยการใช้แรงดันไฟฟ้ากับเฟส กระแสแสงของมอเตอร์ Sinusoidal phase แรงดันไฟฟ้าที่ใช้จะส่งผลให้กระแสไฟหล่อผ่านมอเตอร์ ทำให้เกิด สนามแม่เหล็ก และดึงดูดโรเตอร์แม่เหล็กไปยังตำแหน่งที่ต้องการ FOC ทำให้แนวทางนี้ง่ายขึ้นโดยการ แปลงกระแสและแรงดันไฟฟ้า

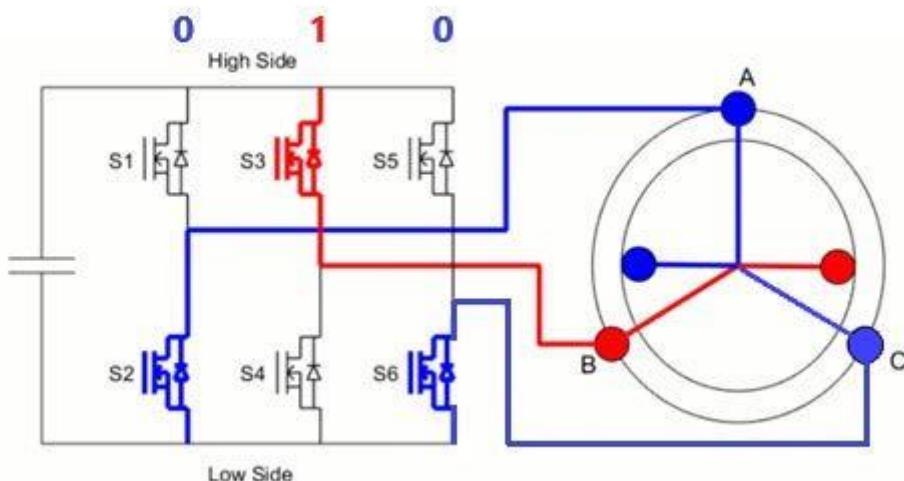
ผลลัพธ์คือการแสดงกระแสเป็นวงแหวนเดียวที่กำหนดโดยองค์ประกอบบัมบุกจาก IQ และ ID การแปลง ทางคณิตศาสตร์สองแบบที่เรียกว่า Clarke และ Park ถูกใช้เพื่อค้นหาวงแหวนนี้โดยการแปลงกระแสเฟส จริงจากระบบพิกัดที่คงที่ของสเตเตอร์เป็นระบบพิกัดที่ซิงโครนัสของสนาม



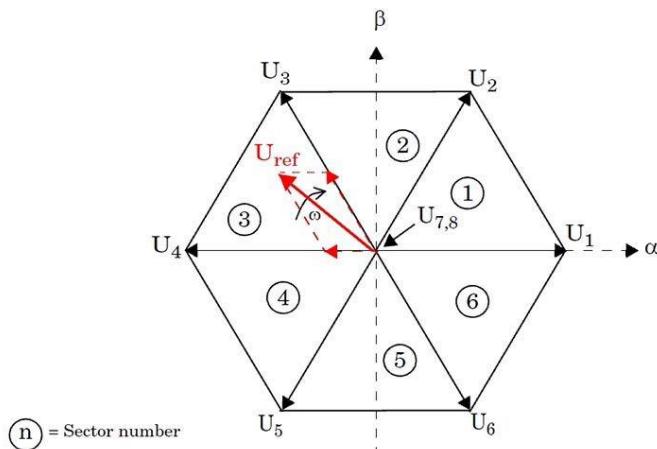
ความแตกต่างระหว่าง 6-Step Control และ FOC

คุณสมบัติ	6-Step Control	FOC
แรงบิด (Torque)	มีแรงบิดแบบไม่ต่อเนื่อง (Trapezoidal)	แรงบิดเรียบเนียน (Sinusoidal)
การตอบสนอง	ง่ายและรวดเร็วในการควบคุม	ช้าช้อนและต้องใช้การคำนวณมากขึ้น
เซ็นเซอร์	ใช้เซ็นเซอร์ฮอลล์หรือวิธี Back-EMF	ต้องการข้อมูลตำแหน่งที่แม่นยำ (Encoder/Resolver)
ประสิทธิภาพ	ต่ำกว่าที่แรงบิดสูง	สูงกว่าและเหมาะสมกับงานที่ต้องการประสิทธิภาพสูง
การใช้งาน	เหมาะสมสำหรับงานทั่วไปที่ไม่ต้องการความแม่นยำ	เหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการประสิทธิภาพสูง เช่น หุ่นยนต์ หรือ EV
ต้นทุน	ต้นทุนต่ำและง่ายต่อการพัฒนา	ต้นทุนสูงและซับซ้อนกว่า

Space Vector Modulation (SVM) เป็นเทคนิคที่นำไปในการควบคุมแบบวางแผนสามลำหัว มอเตอร์เหนี่ยวนำและมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร (PMSM) แนวคิดของการ modulation เตือนเวลาของแต่ละหัวที่ต้องการ ตามที่ต้องการโดยวิธีการตัดต่อตัวตัดต่อที่ต้องการ ทำให้มีการสลับที่หัวที่ต้องการ แบบต่อเนื่อง



การกำหนดค่าการสลับแต่ละแบบจะส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเฉพาะที่จ่ายไปยังขั้วของมอเตอร์ แรงดันไฟฟ้าเป็นเวกเตอร์ของภาคพื้นฐานและแสดงขนาดและทิศทางในรูปแบบเวกเตอร์หากเปลี่ยนของอุปกรณ์



Space Vector	S1	S3	S5
U1	1	0	0
U2	1	1	0
U3	0	1	0
U4	0	1	1
U5	0	0	1
U6	1	0	1
U7	0	0	0
U8	1	1	1

สถานะการสลับที่สอดคล้องกับเวกเตอร์พื้นฐาน space vectors (สำหรับทิศทาง) และ null vectors (สำหรับขนาด) จะถูกนำมารวมกันเพื่อประมาณเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดใดๆ ในตำแหน่งใดๆ ก็ได้ภายใน the space vector 6 เหลี่ยม

ด้วยการควบคุมลำดับการสลับ และด้วยเหตุนี้ ระยะเวลาเปิดของพัลส์ เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าใดๆ ที่มีขนาดและทิศทางที่เปลี่ยนแปลงจึงสามารถทำได้สำหรับช่วงเวลา PWM ทุกช่วง วัตถุประสงค์ของเทคนิคการมอตเตอร์ใน space vector คือการสร้างลำดับการสลับที่สอดคล้องกับเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง สำหรับช่วงเวลา PWM ทุกช่วงเพื่อให้ได้เวกเตอร์ในอว拉斯ที่หมุนอย่างต่อเนื่อง

การทำตำแหน่งของ Brushless DC Motor (BLDC) แบบ Sensorless โดยใช้ Back EMF เป็นวิธีที่นิยมใช้ในระบบควบคุมมอเตอร์ เนื่องจากลดต้นทุนการติดตั้งเซ็นเซอร์ตำแหน่ง เช่น Hall Sensor หรือ Encoder โดยใช้แรงดันย้อนกลับ (Back Electromotive Force, Back EMF) ในการคำนวณตำแหน่งแทน

หลักการทำงาน

รูปแบบที่ 1 Back EMF ใน BLDC Motor

ใน BLDC Motor แบบ 3 เฟส เมื่อโรเตอร์หมุน ขดลวดสเตเตอร์จะสร้างแรงดันย้อนกลับ (Back EMF) ซึ่งมีค่าแปรผันตามตำแหน่งและความเร็วของโรเตอร์

แรงดัน Back EMF สามารถคำนวณได้จากสมการ:

$$E = K_E \cdot \omega$$

โดย

E: Back EMF

K_E : ค่าคงที่ Back EMF (Back EMF constant)

ω : ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์

รูปแบบที่ 2 การตรวจจับ Zero Crossing

แรงดัน Back EMF ของขดลวดที่ไม่มีการจ่ายกระแส (Freewheeling phase) จะเปลี่ยนจากบวกเป็นลบหรือจากลบเป็นบวกในช่วงเวลาเฉพาะ เรียกว่า Zero Crossing Point (ZCP)

ด้วยการวิเคราะห์กราฟแรงดัน Back EMF ที่เกิด Zero Crossing จะบ่งบอกถึงตำแหน่ง ของ Rotor ในแต่ละองศาไฟฟ้า ดังตารางต่อไปนี้ โดยใช้หลักการ Zero Crossing Detection ด้วยการวิเคราะห์กราฟ

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

3.7. วิธีดำเนินการทดลอง

1. ประกอบ board Nucleo STM32G474RE เข้ากับ BLDCXplore
2. เชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อใช้งานผ่าน MotorControl Workbench
3. ทดลองหาความเร็วของ Brushless DC Motor ด้วย Back EMF
4. นำเข้าโปรแกรม MATLAB เพื่อสร้างกราฟต่างๆ

3.8. วัสดุอุปกรณ์

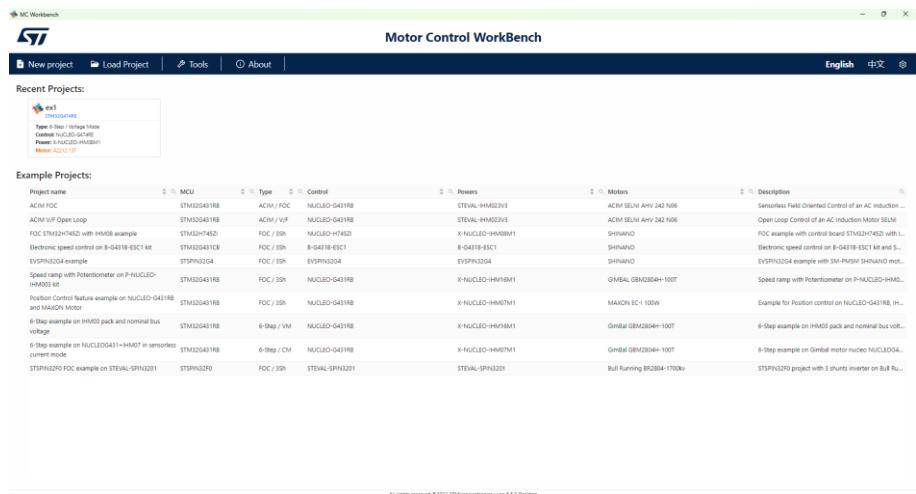
1. BLDC Motor จำนวน 1 อัน

2. STMICROELECTRONICS X-NUCLEO-IHM08M1 จำนวน 1 อัน
3. Nucleo STM32G474RE จำนวน 1 อัน
4. BLDCXplorer จำนวน 1 ชุด

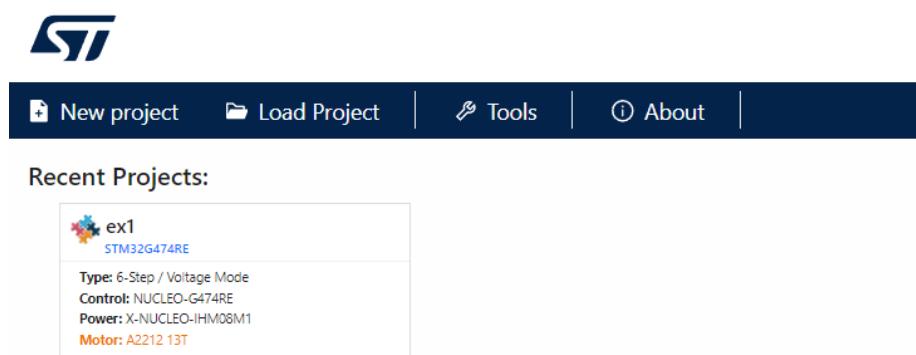
3.9. ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.9.1. setup โปรแกรม MotorControl Workbench ในการทำการทดลองของมอเตอร์ไม่มีแปรรูปถ่าน

3.9.1.1. ทำการเปิดโปรแกรม MotorControl Workbench เพื่อทำการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไม่มีแปรรูปถ่าน

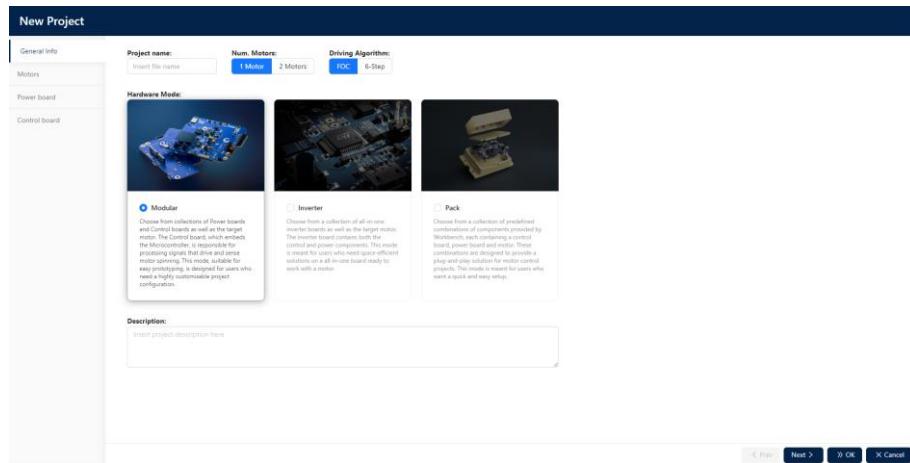


3.9.1.2. กดที่ New project เพื่อสร้างไฟล์ใหม่



Example Projects:

Project name	MCU	Type	Control	Powers	Motors	Description
ACM FOC	STM32G411RB	ACM / FOC	X-NUCLEO-G411RB	STEVAL-IHM08V3	ACM SELN1 Arny 242 N08	Sensorless Field Oriented Control of an AC Induction...
ACM V/F Open Loop	STM32G411RB	ACM / V/F	X-NUCLEO-G411RB	STEVAL-IHM08V3	ACM SELN1 Arny 242 N08	Open Loop Control of an AC Induction Motor SELN1
FOC STM32H743Z with IHM08 example	STM32H743Z	FOC / 3Ph	X-NUCLEO-H743Z	B-G411B-ESC1	SHINANO	FOC example with control board STM32H743Z with L...
Electronic speed control on B-G411B-ESC1 kit	STM32G411RB	FOC / 3Ph	B-G411B-ESC1	EVSPIN204	SHINANO	Electronic speed control on B-G411B-ESC1 kit and S...
EVSPIN204 example	STM32G411RB	FOC / 3Ph	EVSPIN204	EVSPIN204	SHINANO	EVSPIN204 example with 3M-PMSM SHINANO mot...
Speed ramp with Potentiometer on P-NUCLEO-IHM08M1	STM32G411RB	FOC / 3Ph	X-NUCLEO-G411RB	GIMBAL GBM0304H+100T	GIMBAL	Speed ramp with Potentiometer on P-NUCLEO-IHM08...
Position control feature example on NUCLEO-G411RB and MAXON motor	STM32G411RB	FOC / 3Ph	X-NUCLEO-G411RB	MAXON EC-1 100W	MAXON	Example for Position control on NUCLEO-G411RB, IH...
6-Step example on IHM08 pack and nominal bus voltage	STM32G411RB	6-Step / VM	X-NUCLEO-IHM08M1	GIMBAL GBM0304H+100T	GIMBAL	6-Step example on IHM08 pack and nominal bus volt...
6-Step example on NUCLEO-G411+IHM07 in sensorless current mode	STM32G411RB	6-Step / CM	X-NUCLEO-IHM07M1	GIMBAL GBM0304H+100T	GIMBAL	6-Step example on Gimbal motor nucleo NUCLEO-G...
STSPIN20F0 FOC example on STEVAL-SPIN201	STSPIN20F0	FOC / 3Ph	STEVAL-SPIN201	STEVAL-SPIN201	Bull running BR204-1700kv	STSPIN20F0 project with 3 phase inverter on Bull Ru...



3.9.1.3. ตั้งชื่อโปรเจกต์ใหม่สำหรับการทดลองครั้งนี้ เลือกมอเตอร์ตัวเดียวเนื่องจากบอร์ดที่ได้รับทำ การควบคุมมอเตอร์เพียงตัวเดียว และเลือกแบบ 6-step เพราะในการทดลองครั้งนี้เราจะทำการหาความเร็ว จาก Trapezoidal Control

Project name:

lab 3 brushless DC motor

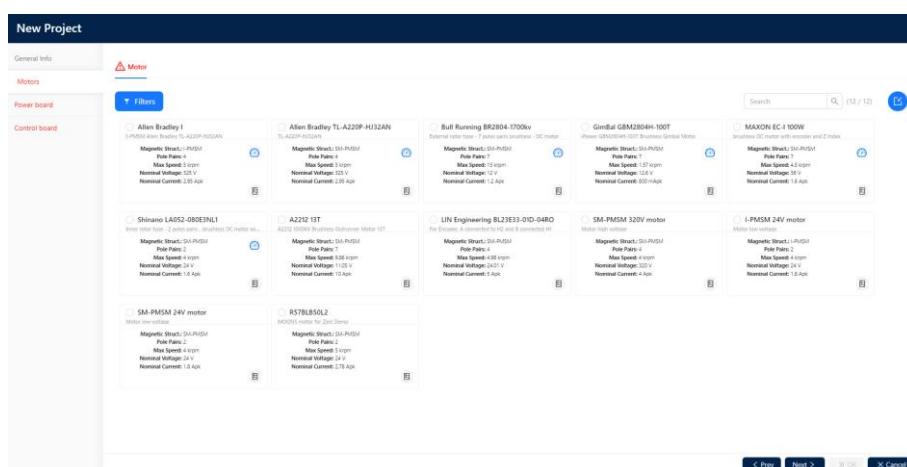
Num. Motors:

1 Motor 2 Motors

Driving Algorithm:

FOC 6-Step

3.9.1.4. ทำการเลือกมอเตอร์ที่จะใช้งาน คือ A2212 13T





A2212 13T

A2212 1000KV Brushless Outrunner Motor 13T

Magnetic Struct.: SM-PMSM

Pole Pairs: 7

Max Speed: 9.86 krpmp

Nominal Voltage: 11.05 V

Nominal Current: 10 Apk



3.9.1.5 จานวนทำการเลือกพารามิเตอร์ที่ใช้ในการ drive motor บอร์ดที่ได้รับมาคือบอร์ด

X-NUCLEO-IHM08M1

New Project

General Info
Motors
Power board
Control board

Filters

STEVAL-IPM001 STEVAL-CTM009V1 STEVAL-IPM005F STEVAL-IPM07 STEVAL-IPM08B

STEVAL-IPM10B STEVAL-IPM05F STEVAL-IPM15B STEVAL-IPM20B STEVAL-IPM30B

Search: (31 / 31)

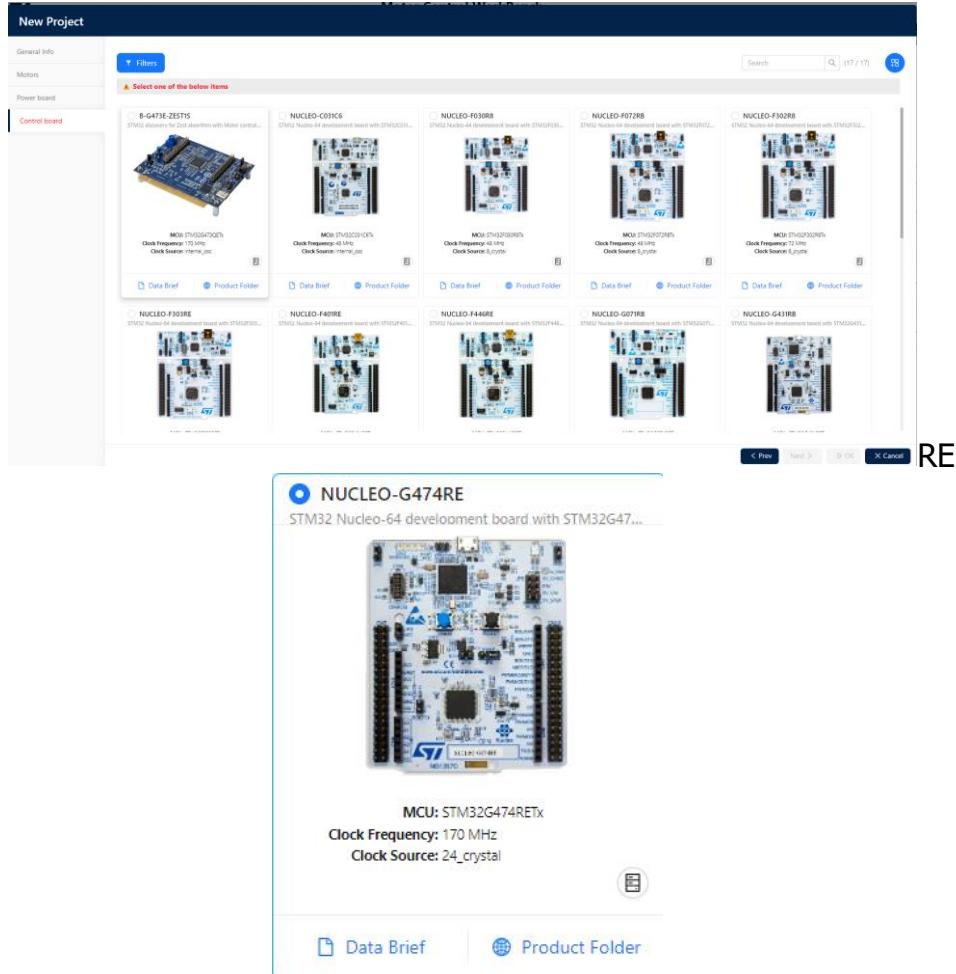


X-NUCLEO-IHM08M1
Low-Voltage BLDC motor driver expansion board based...

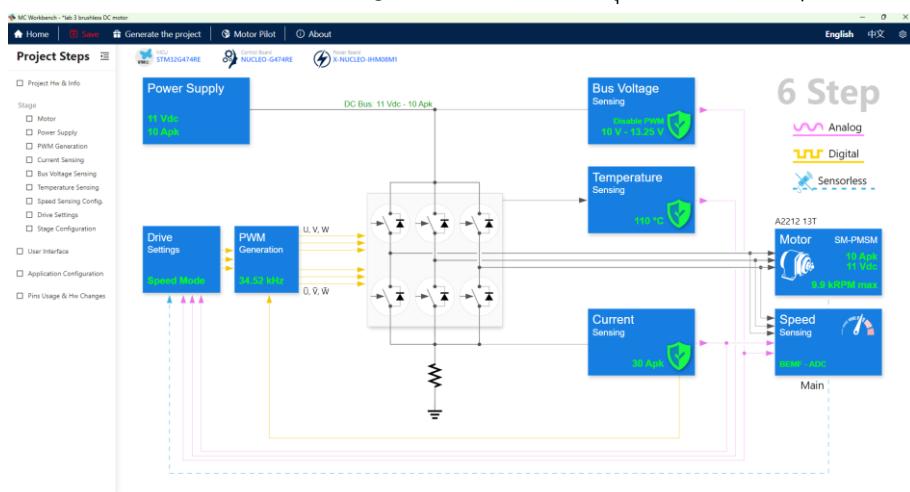
Motor Drive: M1
Rated Voltage: [10 - 48] V
Rated Current: 30 A
Rated Power: N.A.

Data Brief Product Folder

3.9.1.6. จานนั้นทำการเลือกค่อนโหร์บอร์ดที่ใช้ในการควบคุมกระแสควบคุมพาราเวอร์บอร์ด บอร์ดที่ได้รับมาคือบอร์ด NUCLEO-G474



3.9.1.7. กด next จะขึ้นหน้า Block Diagram ของระบบควบคุมมอเตอร์ 6-step ขั้นมา



3.9.1.8. กดที่คำว่า motor ทางด้านขวา และเปลี่ยนรูปไฟมากที่สุดเป็น 12 V และ กระแสไฟมากที่สุด 15 Apk

6-Step Wizard

Project Hw & Info

Stage

- Motor
- Power Supply
- PWM Generation
- Current Sensing
- Bus Voltage Sensing
- Temperature Sensing
- Speed Sensing Config.
- Drive Settings
- Stage Configuration
- User Interface
- Application Configuration
- Pins Usage & Hw Changes

General Info

Motor name: A2212 13T

Description: A2212 1000KV Brushless Outrunner Motor 13T

Motor parameters

Motor magnetic structure: SPM-PMSM
Pole Pairs: ?

Max current:	10	Apk	<input checked="" type="checkbox"/> Power board maximum rated current: 30 Apk
Max DC Voltage:	11.045	V	<input checked="" type="checkbox"/> Power board supported voltage range: (10 - 48 Vdc)
Rs:	0.1	Ω	
Ls:	0.02	mH	
B-Emf constant:	0.822	Vrms/kRPM	
Rated Flux:	0.005752	V/Hz	

Electrical parameters

Inertia: 0.15 μNm²

< Prev

Electrical parameters

Max current:	15	Apk	<input checked="" type="checkbox"/> Power board maximum rated current: 30 Apk
Max DC Voltage:	12	V	<input checked="" type="checkbox"/> Power board supported voltage range: (10 - 48 Vdc)
Rs:	0.1	Ω	
Ls:	0.02	mH	
B-Emf constant:	0.822	Vrms/kRPM	

Rated Flux: 0.005752 V/Hz

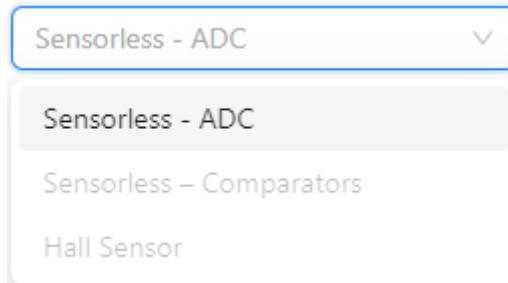
3.9.1.9.กดที่ PWM Generation เพื่อทำการเปลี่ยนความถี่เป็น 70000 Hz

The screenshot shows the 'Config' step of the 6-Step Wizard. The left sidebar lists project stages: Project File & Info, Stage, Motor, Power Supply, PWM Generation (selected), Current Sensing, Bus Voltage Sensing, Temperature Sensing, Speed Sensing Config, Drive Settings, Stage Configuration, User Interface, Application Configuration, Pins Usage & Hw Changes. The main area is titled 'Config' and contains the following settings:

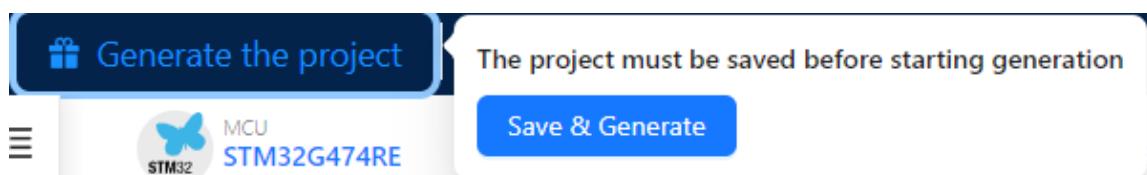
- PWM Frequency: 70000 Hz (from 2 kHz to 100 kHz)
- Driving topology: U, V, W, Uneg, Vneg, Wneg
- PWM idle state high side: Turn off
- PWM idle state low side: Turn off
- SW dead-time: 850 ns (from 700 ns to 1000 ns)
- dead-time: 1000 ns
- Charge Boot Capacitor Time: 10 ms
- Charge Boot Capacitor Duty: 0 %
- Modulation flags: Fast Demagnetization Quasi-synchronous rectification

Below these settings is the 'MCU pin mapping' section, which lists pins for Timer1 (PA0, PA9, PA10) and Active Polarity (Active high). At the bottom are buttons: < Prev, Next >, < Ok >, < Cancel >, and Z.

3.9.1.10.เลือกโหมดในการควบคุมเป็น Sensorless



3.9.1.11.กด Generate the project



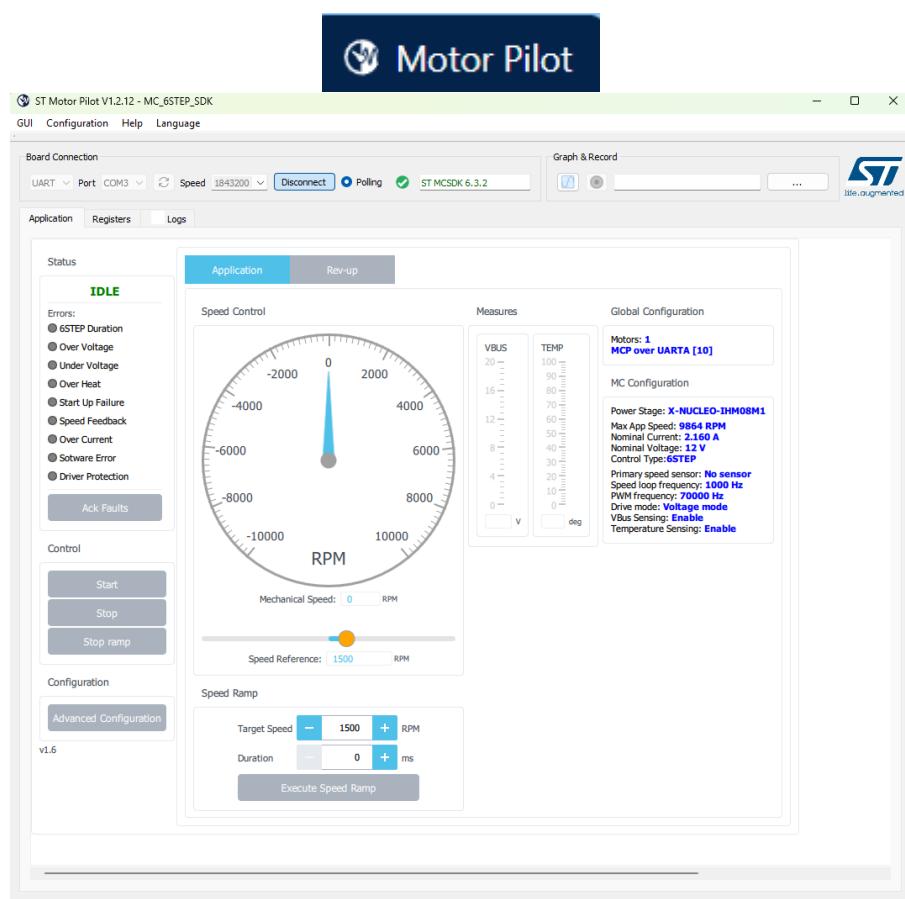
3.9.1.12. เปิด STM32CubeMX

Name	Date modified	Type	Size
ftl	12/11/2567 16:57	File folder	
Inc	18/11/2567 0:47	File folder	
MXTmpFiles	18/11/2567 0:47	File folder	
Src	18/11/2567 0:47	File folder	
.extSettings	18/11/2567 0:46	EXTSETTINGS File	1 KB
lab 3 brushless DC motor	18/11/2567 0:47	STM32CubeMX	38 KB
lab 3 brushless DC motor.ioc.wb	18/11/2567 0:46	WB File	81 KB
lab 3 brushless DC motor.log	18/11/2567 0:46	LOG File	2 KB
lab 3 brushless DC motor.settings	18/11/2567 0:46	SETTINGS File	1 KB
lab 3 brushless DC motor.wbdef	18/11/2567 0:46	WBDEF File	20 KB
common.ftl	13/9/2567 5:19	FTL File	224 KB
mw_common.ftl	13/9/2567 5:19	FTL File	22 KB

3.9.1.13. Generate Code บนโปรแกรม STM32CubeMX

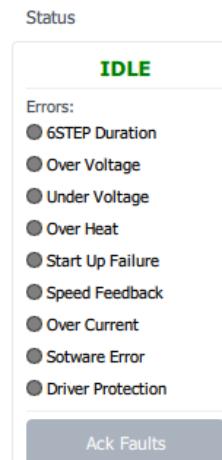
GENERATE CODE

3.9.1.14. กด Motor Pilot เพื่อเริ่มการทำงาน

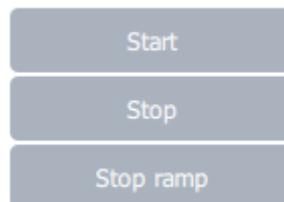


3.9.2.การทดลอง

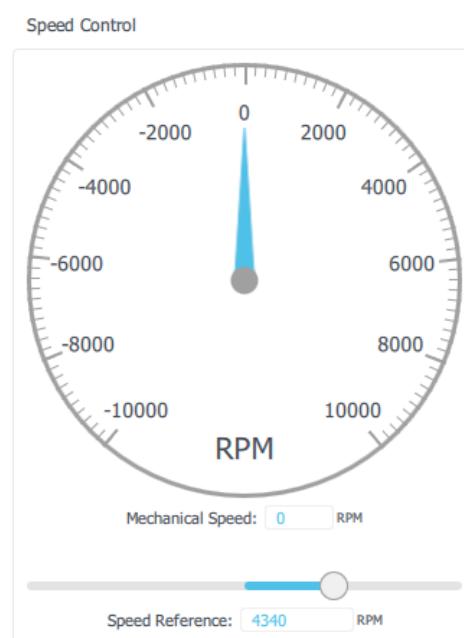
3.9.2.1.เช็คว่าการเชื่อมต่อหรือเกิดอะไรใหม่หากไม่เกิดให้กด Ack Faults



3.9.2.2.กดปุ่ม Start เพื่อเริ่มการทำงาน



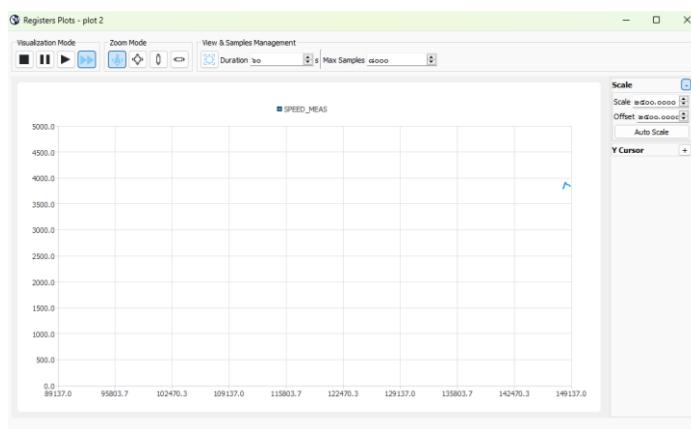
3.9.2.3.ปรับ RPM ในการเริ่มทำงาน



3.9.2.4. กดไปที่ Configure ของ SPEED_REF และกดไปที่ Send to new plot เพื่อดูกราฟในการปรับความเร็ว

<input checked="" type="checkbox"/>	บล๊อค	FAULTS_FLAGS	0	R	-	U32FLAGS	อ	Configure	OK	Faults Flags
<input checked="" type="checkbox"/>	ผู้ใช้	SPEED_MEAS	2964	R	RPM	S32	อ	Configure	OK	Average Mechanical Speed measure
<input checked="" type="checkbox"/>	ผู้ใช้	SPEED_REF	4338	R	RPM	S32	อ	Configure	OK	Mechanical speed reference

<input checked="" type="checkbox"/>	ผู้ใช้	SPEED_MEAS	3510	R	RPM	S32	อ	Configure	OK	Average Mechanical Sp
<input checked="" type="checkbox"/>	ผู้ใช้	SPEED_REF	4338	R	RPM	S32	อ	Config		
<input type="checkbox"/>	ซอฟต์แวร์	FW_NAME	ST MC SDK...	R		STRING	อ			
<input type="checkbox"/>	ผู้ใช้	CTRL_STAGE_NAME	NUCLEO....	R		STRING	อ			
<input type="checkbox"/>	ผู้ใช้	PWR_STAGE_NAME	X-NUCLEO....	R		STRING	อ			



3.9.2.5. ต่อสายสัญญาณจากเครื่อง Oscilloscope เข้ากับชุดการทดลอง

3.9.2.6. ต่อสายส่งข้อมูลจากเครื่อง Oscilloscope เข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บข้อมูลการทดลองจาก Oscilloscope และสายส่งข้อมูลของชุดการทดลอง

3.9.2.7. เก็บข้อมูลกราฟแรงดันไฟฟ้าเทียบกับเวลา ณ ขณะที่มอเตอร์ท างานที่ความเร็วต่างๆ จากชุดการทดลองผ่าน Oscilloscope

3.10. ผลการทดลอง

ทดลองหาตำแหน่งของ Brushless DC Motor แบบ Sensorless ด้วย Back EMF

PWM 1500





PWM 3000



Pwm4500



Pwm6000

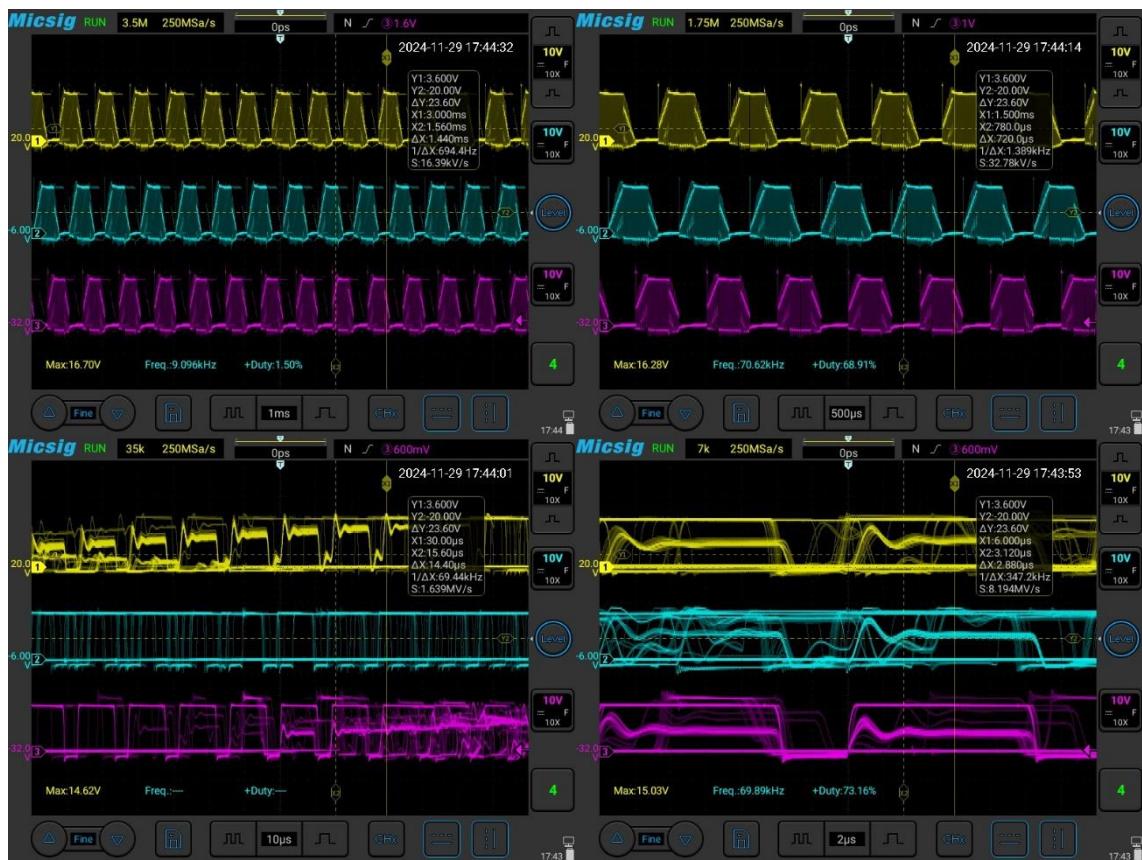


Pwm7500





Pwm9000



3.11.ສູງປົກ

3.12.ອົກປາຍຜລ

3.13.ຂໍ້ເສນອແນະ

3.14.ເອກສາຮ້າງອີງ(ແນບ link)

- **What are Brushless DC Motors**

https://www.renesas.com/en/support/engineer-school/brushless-dc-motor-01-overview?srsltid=AfmBOoqu0c3wDxD0lzfVP_VlzC5j7Xb2KexawkNtuaYdGWkqaDM2Nh

- **Sensor vs Sensorless Motor Controllers: A Head-to-Head Comparison**

<https://www.solomotorcontrollers.com/blog/sensor-vs-sensorless/?srsltid=AfmBOoo6E272m4XOaETOlUWLzaisRTeV-BQ35T5CCA5m8ZjvnqVDt2Fl>

- **Trapezoidal & Sinusoidal: Two BLDC Motor Controls**

<https://bacancysystems.com/blog/trapezoidal-and-sinusoidal-bldc-motors>

- **Field Oriented Control (FOC) as a Hardware Building Block**

<https://www.analog.com/en/lp/001/field-oriented-control.html>