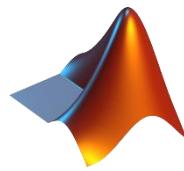


RMXplorer



LAB 2 : Actuators

LAB 2 ประกอบไปด้วย Actuators ทั้งหมด 3 ประเภท ได้แก่ Brushed DC Motor, Stepper Motor และ Brushless DC Motor

Name

- นายนิธิชติ เสนอคำ 67340500024
- นายศุภวัตร จิตต์จำนงค์ 67340500041
- นายสมภู ทองเนื้อแปด 67340500044

Objectives

- เพื่อศึกษาการออกแบบการทดลองตามหลักการทำงานทางวิทยาศาสตร์
- เพื่อศึกษาหลักการทำงานของ Actuators ทั้ง 3 ประเภท ได้แก่ Brushed DC Motor, Stepper Motor และ Brushless DC Motor
- เพื่อศึกษาและฝึกการใช้โปรแกรมและอุปกรณ์จากการทดลอง เช่น MATLAB Simulink และ STM32
- เพื่อศึกษาการเขียนรายงานเชิงวิทยาศาสตร์

1. LAB Brushed DC Motor

การทดลองที่ 1 Motor Characteristics ของ Brushed DC Motor

จุดประสงค์

- เพื่อทดลองหาค่า แรงบิดสูงสุดของ Brushed DC Motor
- เพื่อทดลองหาค่า Torque Constant ของ Brushed DC Motor
- เพื่อทดลองหาค่า ความเร็วเชิงมุมแบบไม่มีโหลดของ Brushed DC Motor
- เพื่อสร้างกราฟ Motor Characteristic ของ Brushed DC Motor จากการทดลอง
- เพื่อหาค่าที่ทำให้ Brushed DC Motor มีประสิทธิภาพสูงสุด

สมมติฐาน

แรงบิดของมอเตอร์ตามทฤษฎีจะมีพุติกรรมเปรียบพื้นตรงตามกระแสไฟฟ้า และความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์จะเปรียบกับแรงบิด ในส่วนของกำลังของมอเตอร์จะสามารถหาได้จากผลคูณระหว่างแรงบิดกับความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ โดยในอุดมคติกำลังของมอเตอร์จะมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้ ความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ควรมีค่ามากขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเนื่องจากมีกำลังไฟฟ้ามากขึ้น คาดว่าพุติกรรมของมอเตอร์จากการทดลองจะมีผลการทดลองใกล้เคียงกับพุติกรรมในทางทฤษฎีตามเอกสารอ้างอิง

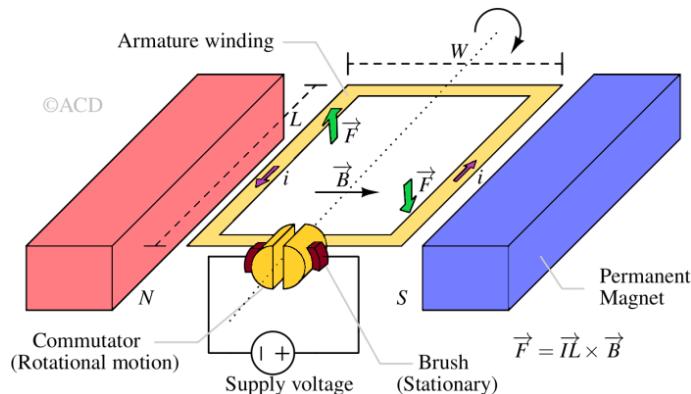
ตัวแปร

- ตัวแปรต้น:
 - Load ที่กระทำต่อ Brushed DC Motor (No Load และ Stall Load)
 - Duty Cycle (การทดลอง Duty Cycle)
- ตัวแปรตาม:
 - กระแสไฟฟ้าที่ให้หล่อผ่าน Brushed DC Motor
 - ความเร็วเชิงมุมของ Brushed DC Motor
 - แรงบิดสูงสุดของ Brushed DC Motor
- ตัวแปรควบคุม:
 - แรงดันไฟเฉลี่ย Brushed DC Motor 12 V
 - DC Motor Driver MD20A ควบคุม Brushed DC Motor
 - Brushed DC Motor
 - สัญญาณควบคุม DC Motor 100% Duty Cycle @20KHz
 - Hall Current Sensor WCS1600
 - Single Point Load cell และ Instrumental Amplifier INA125

- Rotary Incremental Encoder AMT103V
- ทิศทางการหมุน
- Mode การทำงานของ DC Motor Driver

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. หลักการทำงานของ Brushed DC Motor



รูปที่ 1 หลักการทำงานของ Brushed DC Motor

Brushed DC Motor ทำงานโดยอาศัยหลักการพื้นฐานทางไฟฟ้าและแม่เหล็กไฟฟ้าได้แก่ Lorentz Force Law และ Electromagnetic Induction เพื่อนำเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ามาเป็นพลังงานกล โดยอาศัยแรง洛伦兹 จากการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ผ่านชุดลวดที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็ก จะเกิดแรงตั้งฉากกับทิศทางของกระแสและสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดแรงผลักที่สร้างแรงบิดให้ Rotor หมุน กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านแปรถ่านเข้าสู่ Commutator และส่งไปยังชุดลวดของ Rotor ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีขั้วเหนือ-ใต้ ที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กถาวรของ Stator ซึ่งจำทำให้เกิดแรงดูดและผลักระหว่าง Stator และ Rotor โดย Commutator จะสลับทิศทางกระแสในชุดลวดทันที ทำให้ขั้วแม่เหล็กกลับด้านเพื่อให้ทิศทางแรงบิดคงเดิมส่งผลให้การหมุนเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง

จากสมการของแรง洛伦兹ทำให้สามารถคำนวณหาแรงบิดของมอเตอร์ได้ ซึ่งสามารถย่อสมการในรูปแบบนี้ได้

$$\tau = K_m i$$

โดยที่

τ คือ แรงบิดของมอเตอร์ [Nm]

K_m คือ Torque Constant [Nm/A]

i คือ กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้ [A]

2. การแปลงพลังงานและประสิทธิภาพของมอเตอร์

Brushed DC Motor อาศัยหลักการการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลโดยพลังงานโดยในอุดมคติ มอเตอร์จะสามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลได้ 100% จากกฎอนุรักษ์พลังงาน แต่ในเชิงปฏิบัติจะเกิด การสูญเสียพลังงานไปในรูปแบบอื่นทำให้มอเตอร์ไม่สามารถทำงานได้ตามประสิทธิภาพซึ่งสามารถคำนวณได้จาก สมการดังนี้

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{\tau\omega}{VI}$$

โดยที่

η	คือ	ประสิทธิภาพของมอเตอร์ [%]
P_{out}	คือ กำลังของมอเตอร์ [W]	
P_{in}	คือ กำลังไฟฟ้า [W]	
τ	คือ แรงบิดของมอเตอร์ [Nm]	
ω	คือ ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ [rad/s]	
V	คือ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ [V]	
I	คือ กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้ [A]	

3. Motor Characteristic

Motor Characteristics เป็นสิ่งที่บ่งบอกประสิทธิภาพเชิงไฟฟ้าและเชิงกลของมอเตอร์ โดยจะแสดง ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติเชิงกลและเชิงไฟฟ้าของมอเตอร์ตัวนั้นๆ ได้แก่ แรงบิด ความเร็วเชิงมุม กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้ากำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพของมอเตอร์ คือเราสามารถสร้างกราฟ Motor Characteristics ได้ดัง สมการดังนี้

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

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

$$i = \frac{i_{ST} - i_{NL}}{\tau_{ST}}\tau_L + i_{NL}$$

$$\eta = \frac{-\frac{\omega_{NL}}{\tau_{ST}}\tau_L^2 + \omega_{NL}\tau_L}{\frac{i_{ST} - i_{NL}}{\tau_{ST}}\tau_L v_{in} + i_{NL}v_{in}}$$

โดยที่

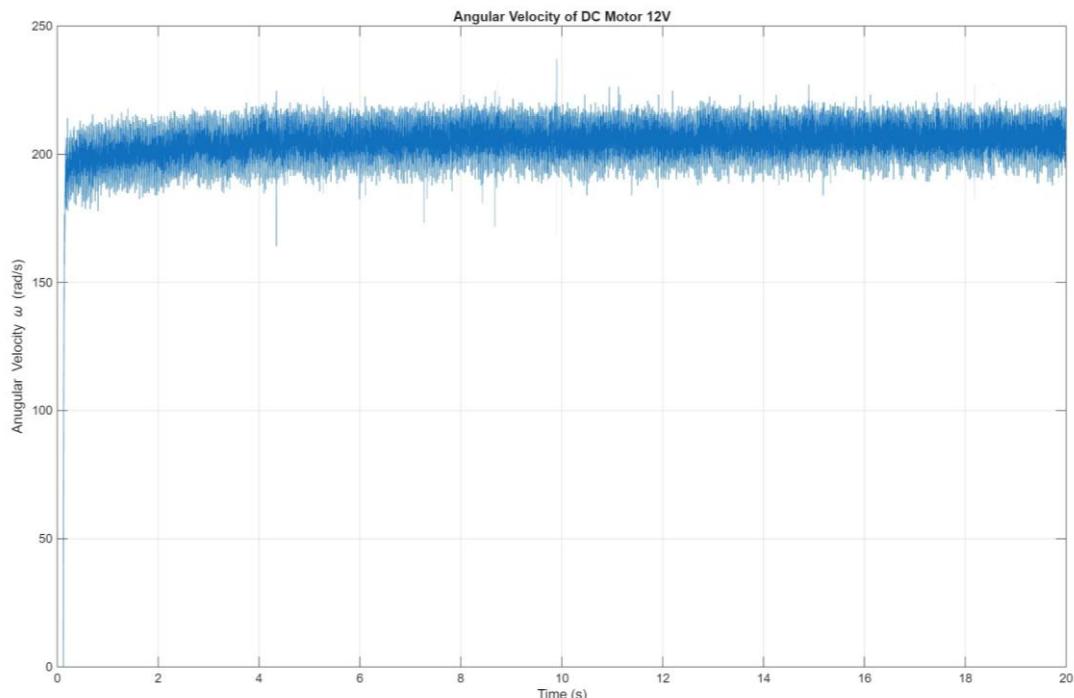
η	คือ	ประสิทธิภาพของมอเตอร์	[%]
P	คือ	กำลังของมอเตอร์	[W]
τ_L	คือ	แรงบิดของมอเตอร์	[Nm]
τ_{ST}	คือ	แรงบิดสูงสุดของมอเตอร์	[Nm]
ω	คือ	ความเร็วเชิงมุขของมอเตอร์	[rad/s]
ω_{NL}	คือ	ความเร็วเชิงมุขสูงสุดของมอเตอร์	[rad/s]
v_{in}	คือ	แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์	[V]
i	คือ	กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้	[A]
i_{NL}	คือ	กระแสไฟฟ้าที่ขณะไม่มีโหลด	[A]
i_{ST}	คือ	กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่มอเตอร์ใช้	[A]

ขั้นตอนการดำเนินงาน

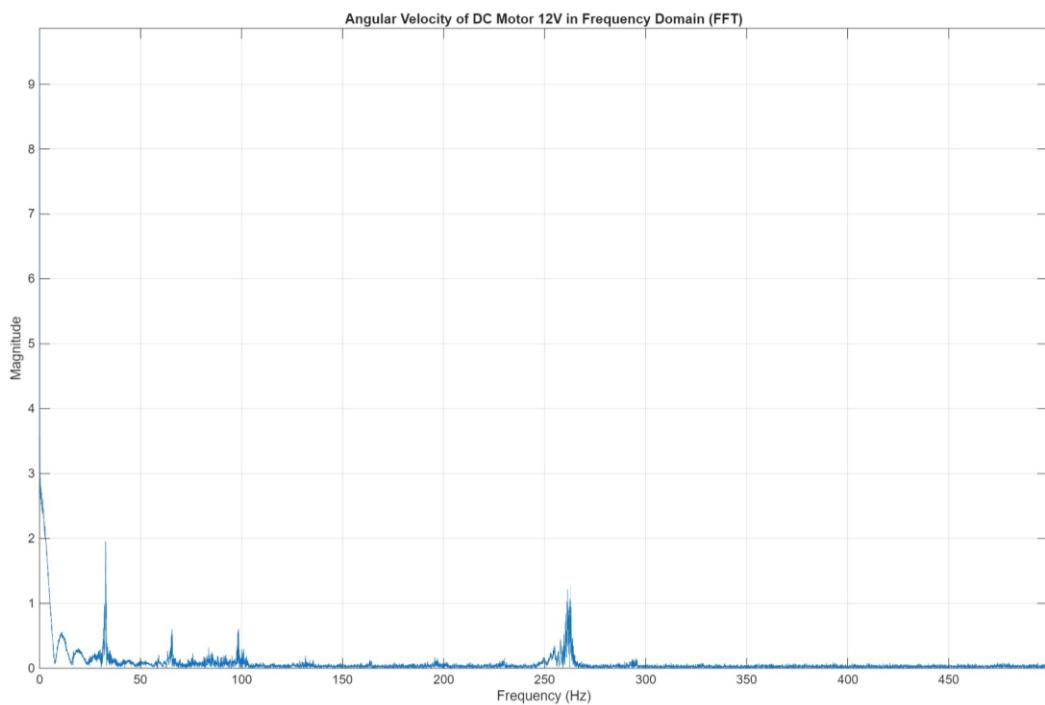
1. ตั้งค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดผลและเก็บข้อมูล
 - a. ตั้งค่า Load cell ให้สามารถอ่านค่าในช่วงตั้งแต่ 0 - 700 กรัม
 - b. ทำการ Signal conditioning Load cell ผ่านกระบวนการ Linearization
 - c. ทำการ Signal conditioning Hall Current Sensor
2. ทดลองหาค่าแรงบิดสูงสุดของและ Torque Constant ของ Brushed DC Motor
 - a. เขียนโปรแกรมใน Simulink เพื่อสั่งให้มอเตอร์หมุนคนไปกด Load cell ค้างไว้เป็นเวลา 5 วินาที และหมุนกลับไปยังตำแหน่งเริ่มต้นเป็นเวลา 1 วินาทีและรอเป็นเวลา 1 วินาทีจากนั้นทำซ้ำไปเรื่อยๆ เป็นจำนวน 10 ครั้ง โดยจ่าย Duty Cycle 100% @20KHz
 - b. บันทึกผลนำหนัก ที่ Load cell และวัดกระแสไฟฟ้าที่อ่านผ่าน Hall Current Sensor
 - c. คำนวณแรงบิดสูงสุด กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้ และ Torque Constant

3. ทดลองหาค่า ความเร็วเชิงมุมแบบปั่นจั่งให้ลดของ Brushed DC Motor
 - a. ทำการทดสอบที่ติดอยู่กับเพลาของ Brushed DC Motor ให้ได้มากที่สุด
 - b. จ่าย Duty Cycle 100% @20KHz เวลา 10 วินาที 1 ครั้ง
 - c. ทำ Fourier Analysis ของชุดข้อมูลความเร็วรวมอเตอร์ที่เก็บมาได้เพื่อนำไปทำการ Signal Conditioning โดยใช้ Low Pass filter เพื่อตัดสัญญาณรบกวนจากการอ่านความเร็วเชิงมุมของ Encoder
 - d. ทำการทดลอง จ่าย Duty Cycle 100% @20KHz เวลา 10 วินาที 1 ครั้ง
 - e. บันทึกผลความเร็วเชิงมุมผ่าน Encoder และกระแสไฟฟ้าผ่าน Hall Current Sensor
4. ทดลองหาค่าความเร็วเชิงมุมและกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้ในแต่ละโหลดตั้งแต่ 100g – 1300g ผ่านการดึงด้วยรอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm
 - a. ทำการทดลอง จ่าย Duty Cycle 100% @20KHz เวลา 1 วินาที โหลดละ 4 ครั้ง
 - b. บันทึกผลความเร็วเชิงมุมผ่าน Encoder และกระแสไฟฟ้าผ่าน Hall Current Sensor
5. ทดลองหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วเชิงมุม ในแรงดัน 12V 9V และ 6V @5000Hz
6. สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

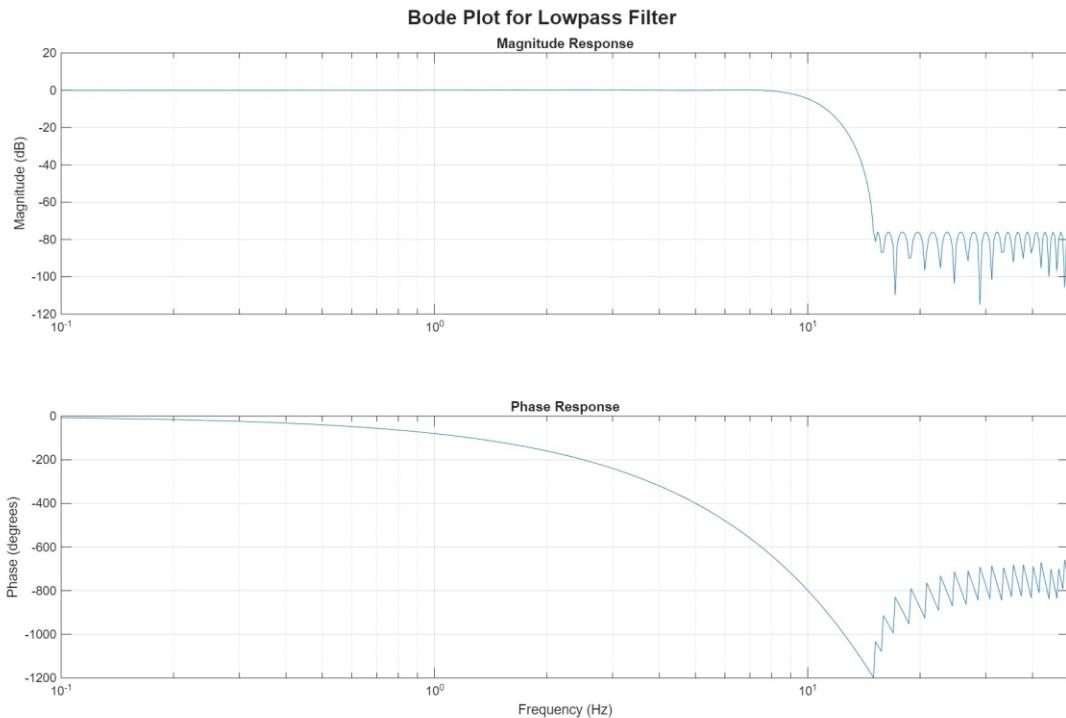
ผลการทดลอง



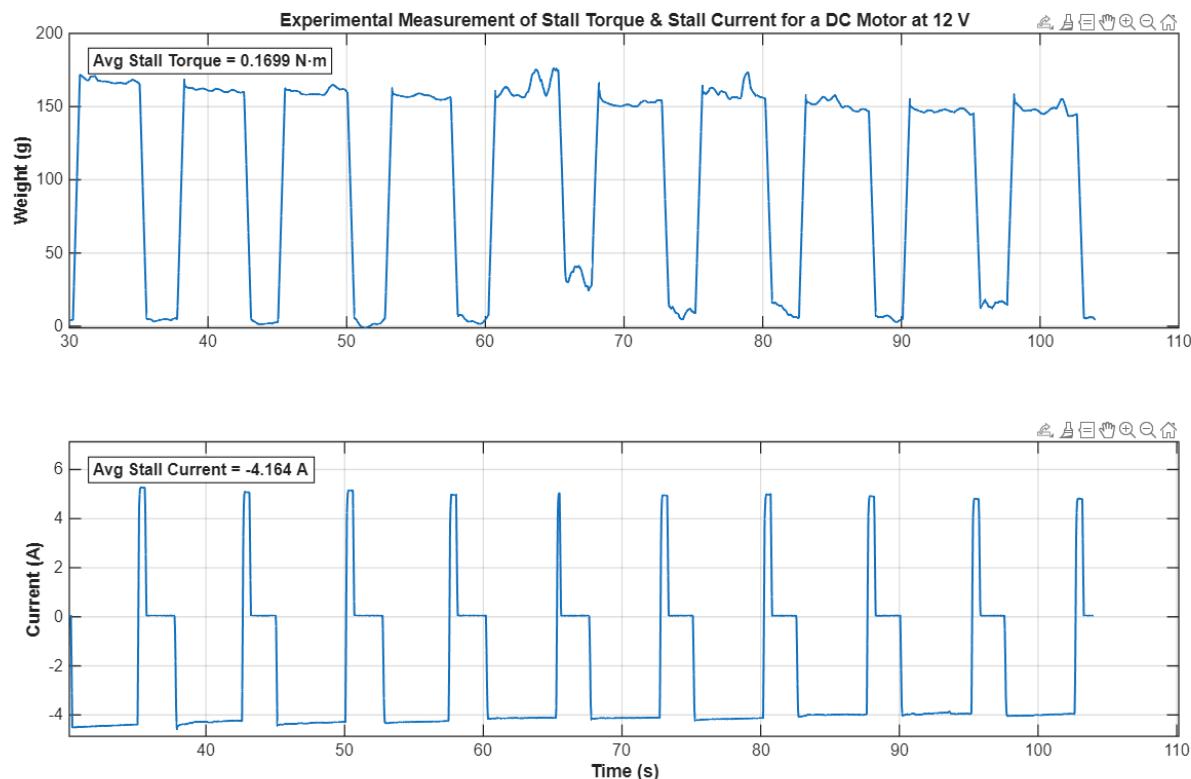
รูปที่ 2 ความเร็วเชิงมุมของ DC Motor 12V ในโหมดเม้นของเวลา



รูปที่ 3 ความเร็วเชิงมุมของ DC Motor 12V ในโดเมนของความถี่



รูปที่ 4 Bode Plot ของ Lowpass Filter ที่ผู้ทดลองได้ใช้



รูปที่ 5 ผลการทดลองหาค่าแรงบิดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดของ DC Motor

จากผลการทดลองจะได้ว่า

$$\tau_{st} = K_m i$$

$$0.1699 = K_m 4.164$$

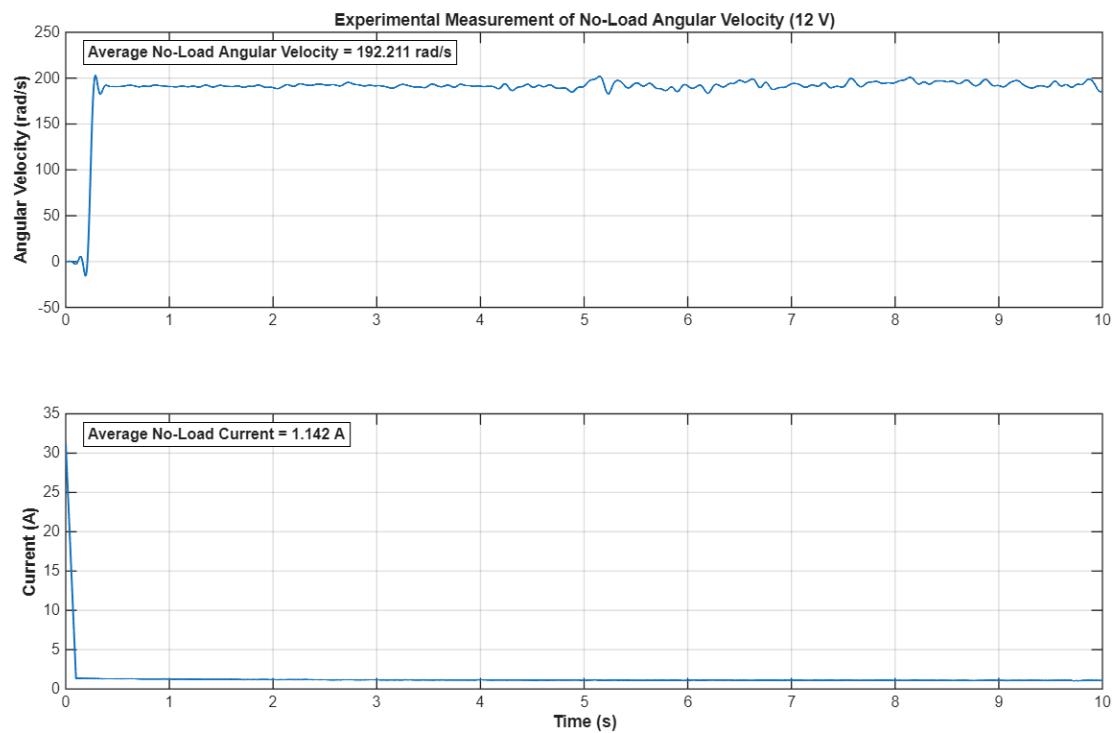
$$K_m = 0.0408$$

โดยที่

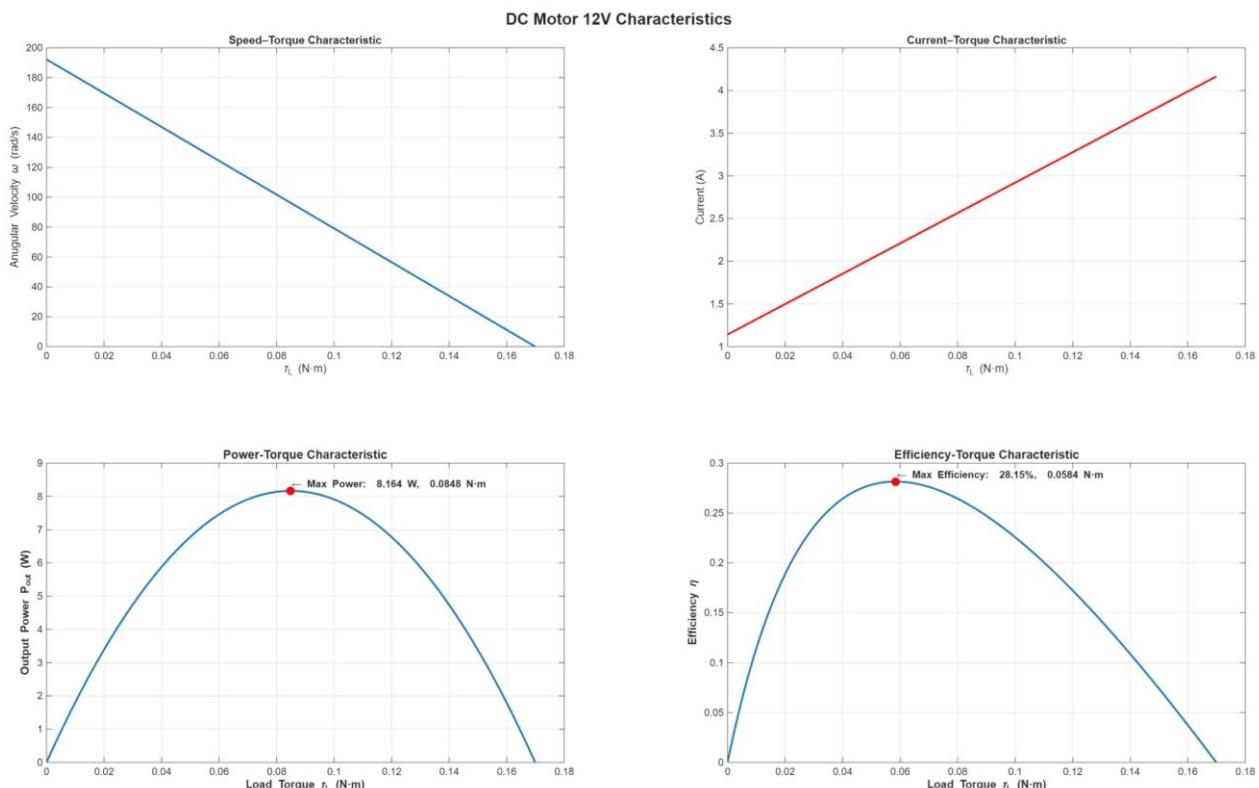
τ_{st} คือ แรงบิดสูงสุดของมอเตอร์ [Nm]

K_m คือ Torque Constant [Nm/A]

i คือ กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้ [A]

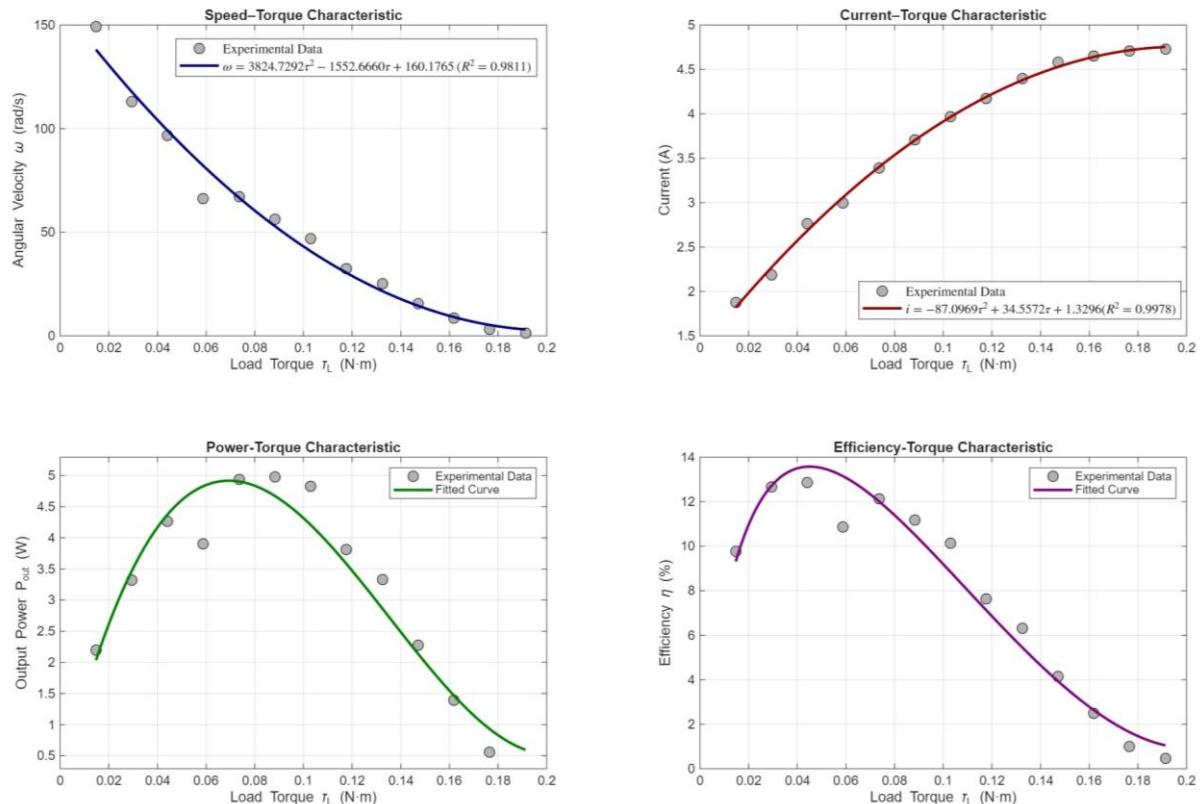


รูปที่ 6 ผลการทดลองหาค่าความเร็วสูงสุดและกระแสไฟฟ้าขณะไม่มีโหลดของ DC Motor



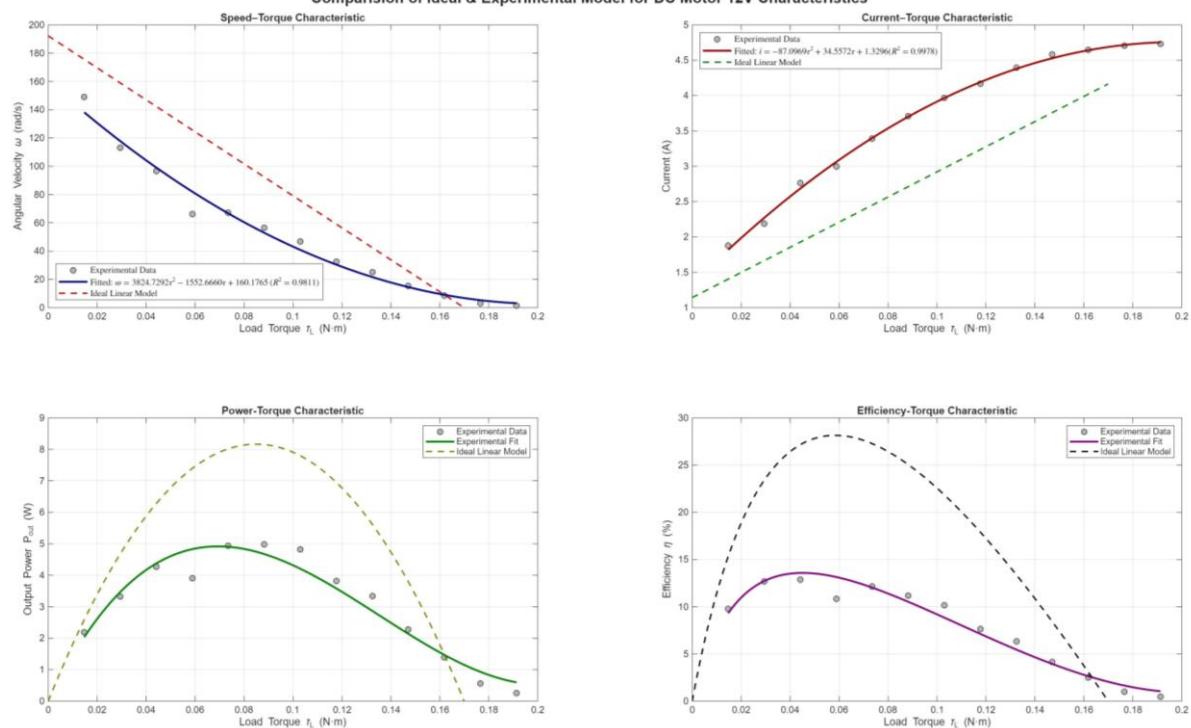
รูปที่ 7 12V DC Motor Ideal Characteristics

DC Motor 12V Experimental Characteristics

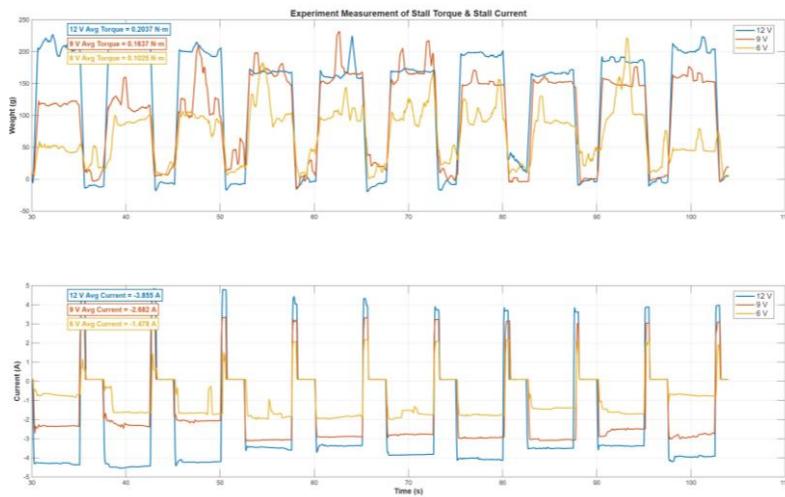


ສູ່ມື້ 8 12V DC Motor Experimental Characteristics

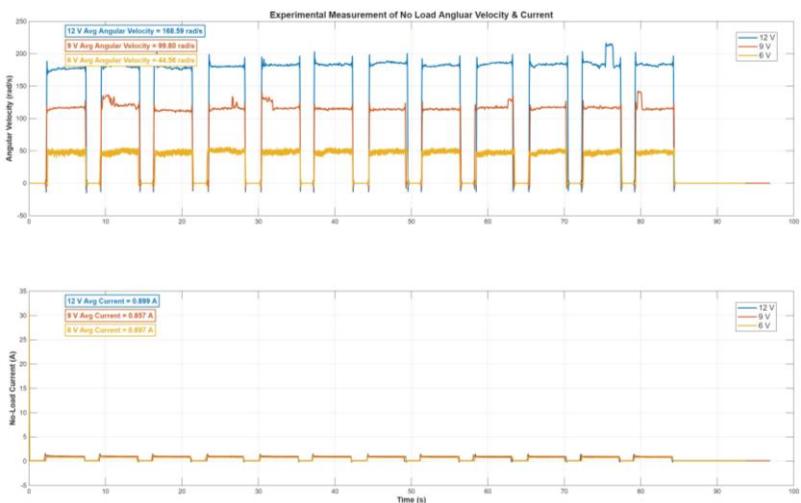
Comparision of Ideal & Experimental Model for DC Motor 12V Characteristics



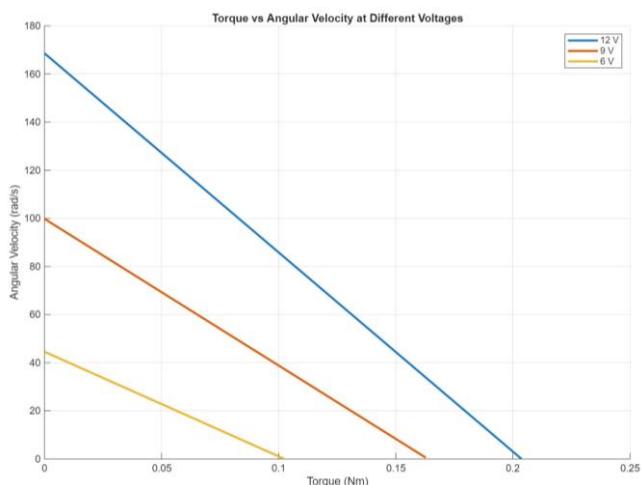
ສູ່ມື້ 9 Comparison of 12V DC Motor Ideal & Experimental Characteristics



รูปที่ 10 ผลการทดลองหาค่าแรงบิดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดของ DC Motor ในแรงดันเฉลี่ยที่ต่างกัน



รูปที่ 11 ผลการทดลองหาค่าความเร็วและกระแสไฟฟ้าขั้นต่ำไม่มีโหลดของ DC Motor ในแรงดันเฉลี่ยที่ต่างกัน



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมและแรงบิดของมอเตอร์ในแรงดันเฉลี่ยที่ต่างกัน

สรุปผลการทดลอง

- จากการทดลองวิเคราะห์สัญญาณความถี่ความเร็วเชิงมุมของ DC Motor พบร่วมกับสัญญาณรบกวนตั้งแต่ความถี่ 7.5 Hz เป็นต้นไป ซึ่งทางผู้ทดลองได้เลือกกำหนดให้ Transition Band อยู่ในช่วง 7.5 - 15 Hz ใน Lowpass Filter ใน Simulink ซึ่งจะทำให้สัญญาณความถี่ใดๆ ที่เข้ามาจะทำให้แอมเพลจูดลดลงและเกิดการ Phase Shift ขึ้น ตามรูปที่ 4 Bode Plot ของ Lowpass Filter
- Torque Constant ของ Brushed DC Motor มีค่าอยู่ที่ 0.0408 Nm/A
- จากการทดลองพบว่า DC Motor 12V มีแรงบิดสูงสุดอยู่ที่ 0.1699 Nm กระแสสูงสุดที่ 4.164 A ความเร็วสูงสุดอยู่ที่ 192.211 rad/s และกระแสไฟฟ้าขณะไม่มีโหลดอยู่ที่ 1.142 A จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถไปสร้างกราฟ Motor Characteristics ได้ในเชิงทฤษฎี โดยความเร็วเชิงมุมจะมีความสัมพันธ์แบบ非線性 กับแรงบิดของมอเตอร์ ส่วนกระแสไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์แบบ非線性 ตรงกับแรงบิดของมอเตอร์ กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์จะมีความสัมพันธ์แบบ Non-Linear กับแรงบิดซึ่งกำลังสูงสุดของมอเตอร์อยู่ที่ 8.164 W ที่แรงบิด 0.0848 Nm ส่วนประสิทธิภาพของมอเตอร์สามารถหาได้โดยเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังของมอเตอร์กับกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ ซึ่งประสิทธิภาพสูงสุดของมอเตอร์จะมีค่าอยู่ที่ 28.15% ที่แรงบิดที่ 0.0584 Nm
- จากการทดลองการสร้างกราฟ Motor characteristic จากผลการทดลองจริงพบว่าความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงมุมกับแรงบิดและกระแสไฟฟ้ากับแรงบิดนั้นเป็นความสัมพันธ์แบบ Non-Linear ซึ่งให้ผลลัพธ์แตกต่างจาก Motor characteristics ตามทฤษฎี ดังผลการทดลองรูปที่ 8 และรูปที่ 9
- จากการทดลองการหาความเร็วเชิงมุมกับแรงบิดของมอเตอร์ในแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่แตกต่างกันพบว่า ความเร็วสูงสุดและแรงบิดสูงสุดของมอเตอร์ที่ทำได้จะมีค่าแปรผันกับแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ดังผลการทดลองรูปที่ 12

อภิปรายผล

- จากการทดลองการหาสัญญาณความถี่ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์โดยใช้ Fourier Transform ซึ่งพบว่ามีความถี่สัญญาณรบกวนในหลายๆ ช่วงตั้งแต่ 7.5 Hz เป็นต้นไป ทางผู้ทดลองจึงเลือกกำหนดให้ Transition Band อยู่ในช่วง 7.5 – 15 Hz เพื่อใช้ในการตั้งค่า Block low pass filter ใน Simulink ซึ่งผลของ Lowpass Filter จะทำให้สัญญาณความถี่ตั้งแต่ 7.5 Hz เป็นต้นไปมีแอมเพลจูดลดลงและเกิดการ Phase Shift ขึ้นดังผลลัพธ์ในกราฟ Bode Plot รูปที่ 4 ของผลการทดลอง
- จากการทดลองการหาแรงบิดสูงสุดและกระแสสูงสุดของมอเตอร์ภายใต้แรงดัน 12 V จากการทดลองควบคุ่มให้มอเตอร์หมุนคานไปก่อตัวให้ลดเซลล์เป็นจำนวน 10 ครั้งพบว่าแรงบิดที่กระทำต่อโหลดเซลล์มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.1699 Nm และในช่วงเวลาหนึ่งจะมีกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.164 A ซึ่งความสามารถหาค่าของ Torque Constant ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงบิดสูงสุดกับกระแสไฟฟ้าณขณะนั้น ซึ่งจะได้ว่า Torque Constant มีค่า 0.0408 Nm/A
- จากการทดลอง Motor Characteristics ในรูปแบบตามทฤษฎีกับผลการทดลองจริง พบร่วมกับความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับแรงบิดของมอเตอร์มีความสัมพันธ์แบบ Exponential decay และความสัมพันธ์

ของกระแสไฟฟ้าเทียบกับแรงบิดของมอเตอร์มีความสัมพันธ์แบบ Logarithm ซึ่งเป็นความสัมพันธ์แบบ Non-Linear และทำให้ความสัมพันธ์ของกำลังและประสิทธิภาพของมอเตอร์ไม่ตรงตามทฤษฎี คาดว่าการที่ผลดังกล่าวที่เกิดขึ้น อาจเป็นเพราะแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นภายในระบบการทดลองทำให้โหลดที่กำหนดในการทดลองไม่ตรงกับโหลดที่กระทำกับมอเตอร์ในความเป็นจริงทำให้การเก็บผลเกิดการผิดเพี้ยนไป หรืออาจเป็นผลของเครื่องมือวัดในการทดลองที่ไม่มีความแม่นยำ หรืออาจเป็นเพราะความร้อนของมอเตอร์ที่เกิดขึ้นในช่วงการทำงาน ซึ่งทำให้ค่าความหนึ่งปานกลางและความต้านทานของมอเตอร์เปลี่ยนไปซึ่งส่งผลกระทบต่อพัฒนาการของมอเตอร์โดยตรง

- จากการทดลองความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงมุมกับแรงบิดของมอเตอร์ภายใต้แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่แตกต่างกันพบว่าแรงบิดและความเร็วเชิงมุมมีค่าเบรปันตามแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย เนื่องจากการมีแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยมากขึ้นจะทำให้กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์มีมากขึ้นซึ่งส่งผลให้มอเตอร์มีแรงบิดและความเร็วเชิงมุมเพิ่มขึ้นตามซึ่งขึ้นอยู่กับค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์นั้นๆ

ข้อเสนอแนะ

ชุดการทดลองควรปรับปรุงในเรื่องของการออกแบบแบบเชิงกลเนื่องจากผู้ทดลองพบปัญหา Misalignment และควรออกแบบชุดการทดลองให้สามารถกำหนดโหลดที่กระทำต่อมอเตอร์ได้โดยตรงเลยไม่จำเป็นต้องทำระบบครอบขึ้นมาเพิ่มเพื่อทดสอบในส่วนนี้

ควรปรับปรุงเรื่องอุปกรณ์เครื่องมือวัดผล ได้แก่ Hall Current Sensor ที่มีช่วงในการวัดกระแสไฟฟ้าที่มากเกินไป ทำให้กระแสไฟฟ้าที่วัดได้อาจคลาดเคลื่อนกับผลความเป็นจริงได้มาก และ Load cell ควรใช้ตัวต้านทานคงที่ เพราะว่าในช่วงการทำงานของมอเตอร์ที่เกิดการสั่นสะเทือนส่งผลให้ตัวต้านทานปรับค่าได้เกิดการเปลี่ยนค่าในช่วงการทดลอง หรือเปลี่ยนอุปกรณ์วัดในรูปแบบอื่น

อ้างอิง

https://www.monolithicpower.com/en/learning/mpscholar/electric-motors/dc-motors/fundamentals?srsltid=AfmBOor_Z2xw-rfnUMdxkj8Opqw6MCIFxBoph5sVmCrJXEoRXT8yv53v
<https://ww2.mathworks.cn/help/sps/ref/dcmotor.html>

การทดลองที่ 2 พฤติกรรมของ Brushed DC Motor ภายใต้สัญญาณ PWM ที่ความถี่ต่างๆ

จุดประสงค์

- เพื่อทดลองพฤติกรรมความเร็วเชิงมุ่งของ Brushed DC Motor ณ ความถี่ PWM, Duty Cycle ต่างๆ
- เพื่อทดลองพฤติกรรมกระแสไฟฟ้าของ Brushed DC Motor ณ ความถี่ PWM, Duty Cycle ต่างๆ
- เพื่อทดลองหาประสิทธิภาพของ Brushed DC Motor ณ ความถี่ PWM, Duty Cycle ต่างๆ

สมมติฐาน

ความเร็วเชิงมุ่งและกระแสไฟฟ้าของ Brushed DC Motor จะมีค่าแปรผันตาม Duty Cycle ของสัญญาณ PWM เนื่องจากการเพิ่ม Duty Cycle ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์สูงขึ้น ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าและแรงบิดเฉลี่ยของมอเตอร์เพิ่มตามไปด้วย ดังนั้นเมื่อ Duty Cycle สูงขึ้น ความเร็วเชิงมุ่งและกระแสเฉลี่ยของมอเตอร์จึงเพิ่มขึ้นตาม

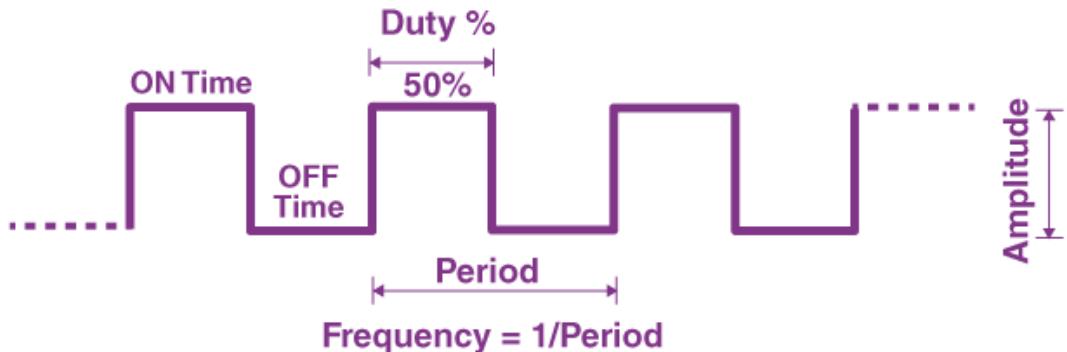
สำหรับผลของความถี่ PWM จะทำให้ความเร็วและกระแสของมอเตอร์แปรผันกับความถี่ เนื่องจากชด漉ดของมอเตอร์มีคุณสมบัติเป็นตัวหนีบนำ ทำให้กระแสไม่สามารถเปลี่ยนค่าได้ทันทีแต่มีการเพิ่มหรือลดตามรูปแบบของ Exponential ในวงจร RL เมื่อความถี่ PWM สูงขึ้น ระยะเวลาของ Pulse แต่ละช่วงจะสั้นลง ส่งผลให้กระแสในชด漉ดไม่ทันลดลงมากระหว่างช่วง OFF ทำให้กระแสเกิดการ Ripple ทำให้กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยลดลง เป็นผลให้ความเร็วและประสิทธิภาพของมอเตอร์ลดลงเช่นกัน

ตัวแปร

- ตัวแปรต้น:
 - Duty Cycle ของสัญญาณ PWM
 - ความถี่ของสัญญาณ PWM
- ตัวแปรตาม:
 - ความเร็วเชิงมุ่งของ Brushed DC Motor
 - พฤติกรรมกระแสไฟฟ้าของ Brushed DC Motor
 - ประสิทธิภาพของ Brushed DC Motor
- ตัวแปรควบคุม:
 - แรงดันไฟฟ้า 12 V
 - DC Motor Driver MD20A ควบคุม Brushed DC Motor
 - Hall Current Sensor WCS1600
 - Rotary Incremental Encoder AMT103V
 - ทิศทางการหมุน
 - Mode การทำงานของ DC Motor Driver

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. Pulse Width Modulation



รูปที่ 13 Pulse Width Modulation

PWM (Pulse Width Modulation) เป็นเทคนิคในการควบคุม ค่าของสัญญาณเฉลี่ยโดยมีหลักการทำงานที่ควบคุมเวลาเปิดปิดด้วยสัญญาณ High - Low ตัวอย่างที่ไม่เท่ากัน โดยอัตราส่วนเวลาเปิด-ปิดนี้เรียกว่า Duty Cycle การควบคุมระยะเวลาในการเปิดปิดจะทำให้สามารถควบคุมค่าสัญญาณเฉลี่ยที่ต้องการออกมาได้

$$\text{Duty Cycle (\%)} = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \times 100$$

โดยที่

T_{on} คือ ระยะเวลาในการเปิดสัญญาณ High [s]

T_{off} คือ ระยะเวลาในการเปิดสัญญาณ Low [s]

และสัญญาณ PWM จะมีความถี่ขึ้นอยู่กับคาบของสัญญาณ

$$f = \frac{1}{T_{on} + T_{off}}$$

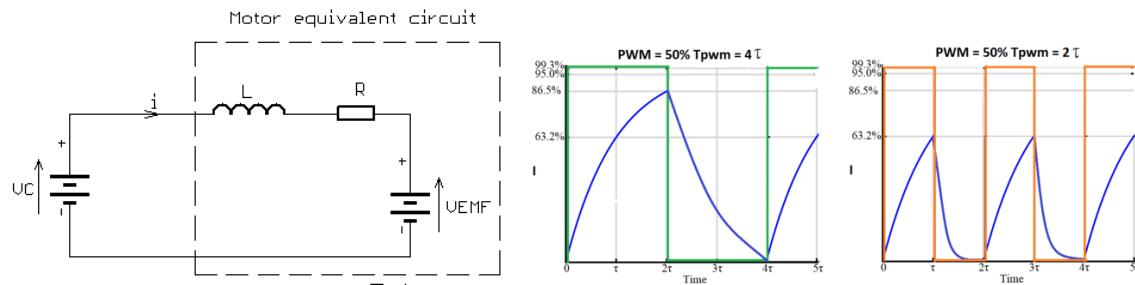
โดยที่

T_{on} คือ ระยะเวลาในการเปิดสัญญาณ High [s]

T_{off} คือ ระยะเวลาในการเปิดสัญญาณ Low [s]

f คือ ความถี่ของสัญญาณ PWM [Hz]

2. PWM Frequency in Motor Control Circuit



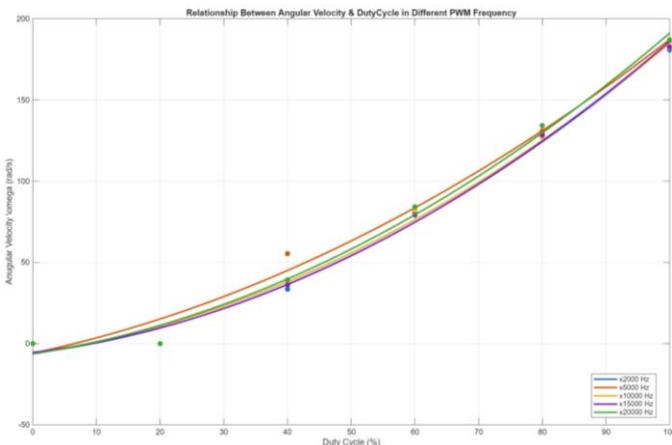
รูปที่ 14 PWM Frequency in RL Circuit

เนื่องจากนอเตอร์เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าประเภทตัวเหนี่ยววนทำให้เมื่อย้ายสัญญาณ PWM ในความถี่ที่แตกต่างกันในวงจรไฟฟ้า RL ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ที่ใช้เป็นพุติกรรมแบบ Exponential Function ทำให้มีความถี่ของสัญญาณเพิ่มขึ้นกราฟกระแสไฟฟ้าที่ใช้โดยเฉลี่ยจะลดลง

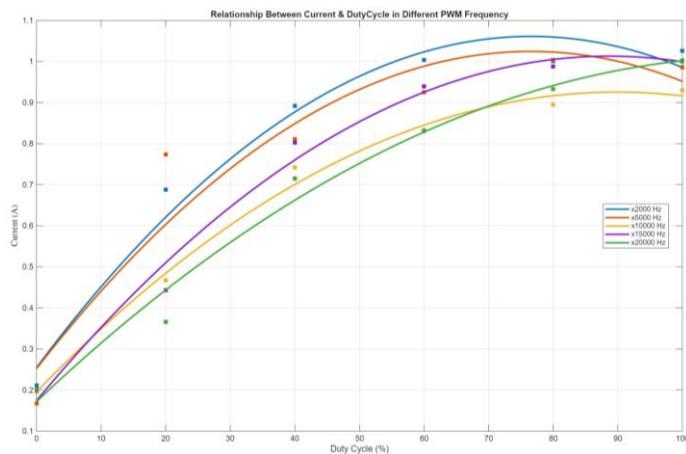
ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ตั้งค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดผลและเก็บข้อมูล
 - a. ทำการ Signal conditioning Hall Current Sensor
2. ทดลองพุติกรรม Brushed DC Motor ณ ความถี่ PWM, Duty Cycle ต่างๆ
 - a. ทำการทดสอบโหลดที่ติดอยู่กับเพลาของ Brushed DC Motor ให้ได้มากที่สุด
 - b. กำหนดความถี่ในการจ่ายสัญญาณ PWM ให้กับ DC Motor ในแต่ละครั้ง ซึ่งมีค่า 2KHz 5kHz 10kHz 15kHz และ 20kHz
 - i. จ่ายสัญญาณ PWM ให้กับมอเตอร์ด้วยความถี่ที่เลือก ด้วย Duty Cycle 0% 20% 40% 60% 80% 100% Duty Cycle ละ 10 วินาที
 - ii. บันทึกผลความเร็วเชิงมุมผ่าน Encoder และกระแสไฟฟ้าผ่าน Hall Current Sensor
 - iii. ทำการทดลองซ้ำความถี่ละ 4 ครั้ง
3. สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

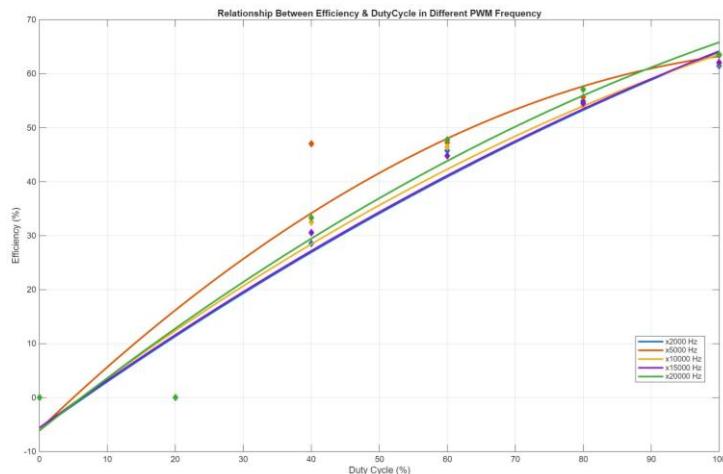
ผลการทดลอง



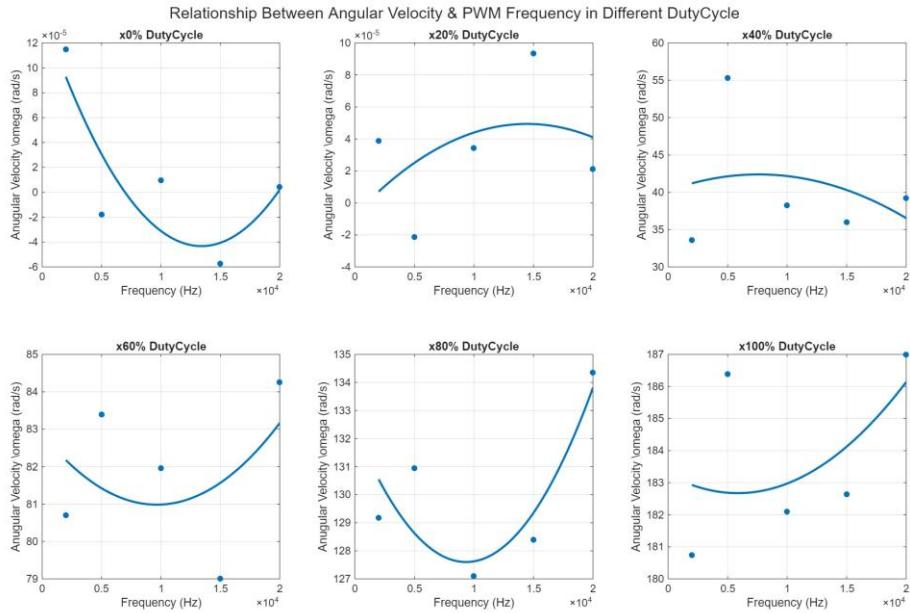
รูปที่ 15 Relationship Between Angular Velocity & Duty Cycle in Different PWM Frequency



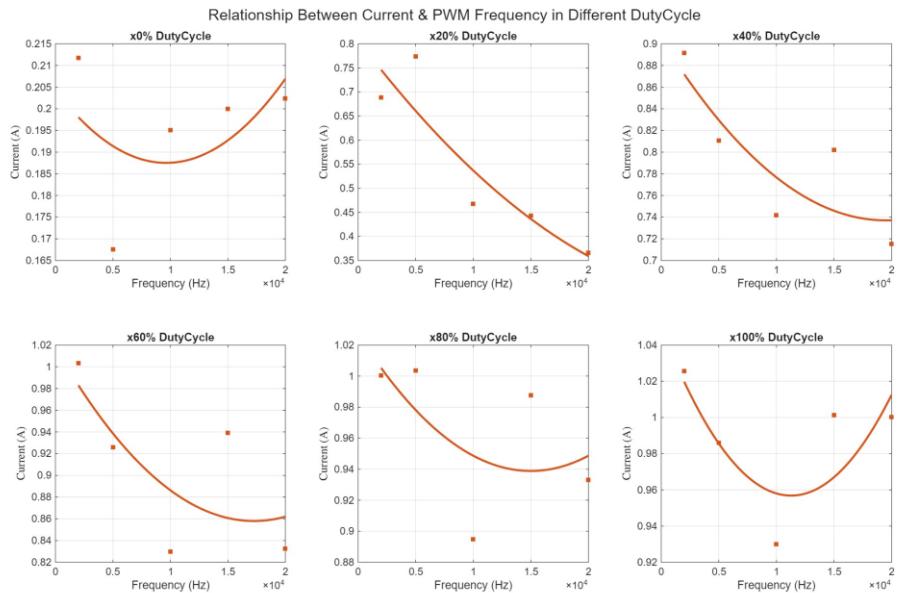
รูปที่ 16 Relationship Between Current & Duty Cycle in Different PWM Frequency



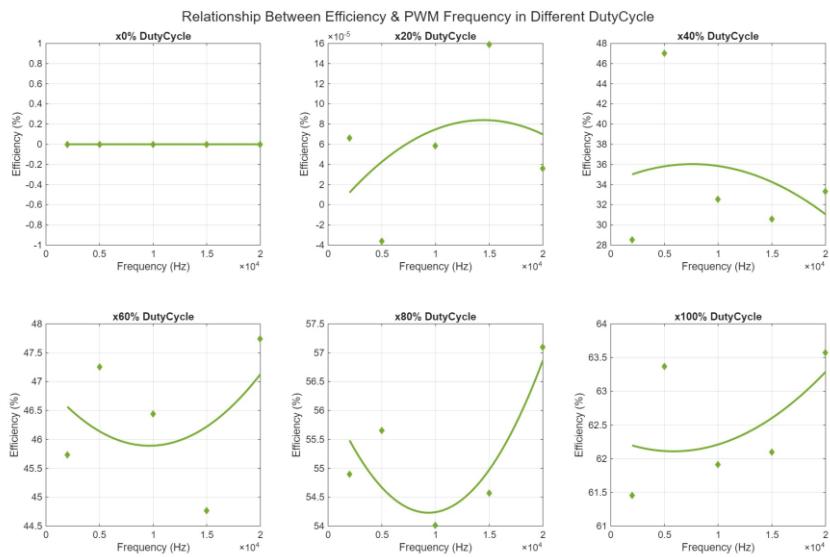
รูปที่ 17 Relationship Between Efficiency & Duty Cycle in Different PWM Frequency



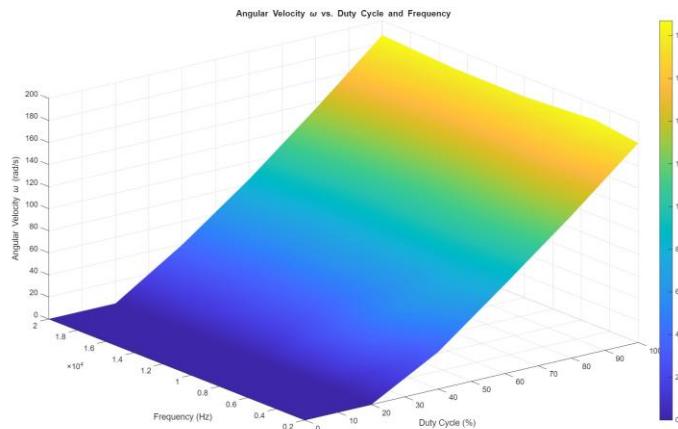
ຮູບທີ 18 Relationship Between Angular Velocity & PWM Frequency in Different Duty Cycle



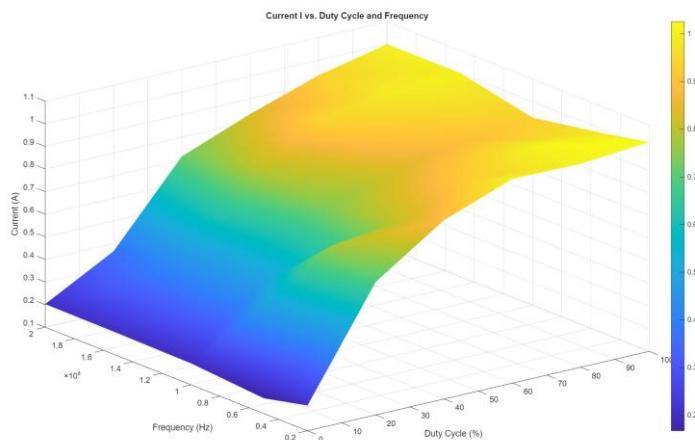
ຮູບທີ 19 Relationship Between Current & PWM Frequency in Different Duty Cycle



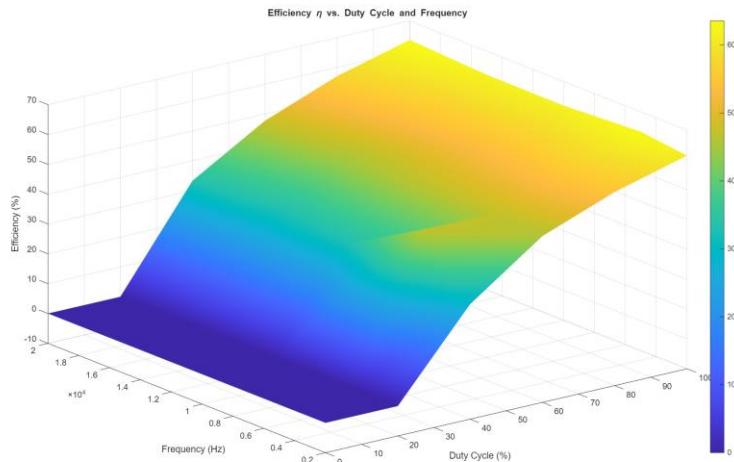
ສະບັບທີ 20 Relationship Between Efficiency & PWM Frequency in Different Duty Cycle



ສະບັບທີ 21 Relationship Between Angular Velocity & PWM Frequency & Duty Cycle



ສະບັບທີ 22 Relationship Between Current & PWM Frequency & Duty Cycle



รูปที่ 23 Relationship Between Efficiency & PWM Frequency & Duty Cycle

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าความเร็วเชิงมุม กระแสไฟฟ้าและประสิทธิภาพของมอเตอร์ มีแนวโน้มลดลงภายใต้สัญญาณความถี่ PWM ที่สูงขึ้น ใน Duty Cycle ต่างๆ

อภิปรายผล

จากการทดลองส่วนใหญ่พบว่าความเร็วเชิงมุมกระแสไฟฟ้าและประสิทธิภาพของมอเตอร์มีแนวโน้มลดลงภายใต้สัญญาณความถี่ PWM ที่สูงขึ้นภายใต้ Duty Cycle ต่างๆ แต่ก็มีผลการทดลองบางส่วนที่พฤติกรรมมีความสัมพันธ์แบบ Polynomial Function ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากการอุปกรณ์วัดผลที่ไม่แม่นยำ

ข้อเสนอแนะ

ในбор์ดการทดลองควรเลือกอุปกรณ์ในการวัดค่ากระแสไฟฟ้าให้เหมาะสมมากกว่านี้เนื่องจาก Hall Current Sensor สามารถอ่านค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงที่กว้างมาก อาจส่งผลให้การวัดค่ากระแสไฟฟ้าผิดเพี้ยนไปได้

ข้างอิง

<https://www.precisionmicrodrives.com/ab-022>

การทดลองที่ 3 Mode การทำงานของ DC Motor Driver

จุดประสงค์

- เพื่อเปรียบพุทธิกรรมของ Brushed DC Motor ในแต่ละโหมดการแบบ Sign-Magnitude และ Locked Anti-Phase

สมมติฐาน

โหมดของ Sign-Magnitude จะเป็นโหมดที่ควบคุมมอเตอร์ผ่านการควบคุมสัญญาณ 2 รูปแบบได้แก่ Direction และ PWM เพื่อควบคุมทิศทางและความเร็วของมอเตอร์ โดยสามารถจ่าย PWM ได้ตั้งแต่ 0 -100% Duty Cycle เพื่อกำหนดอัตราเร็วของมอเตอร์และควบคุมทิศทางของมอเตอร์ด้วยสัญญาณ Direction

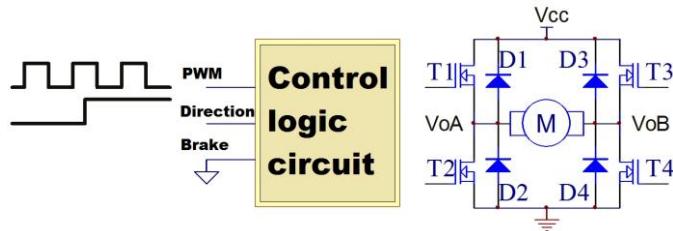
แต่ในโหมดของ Locked Anti-Phase เป็นโหมดที่จะควบคุมมอเตอร์ด้วยสัญญาณรูปแบบเดียวนั่นก็คือ PWM โดยการจ่าย PWM ตั้งแต่ 50% จนถึง 100% จะทำให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วเพิ่มขึ้นในทิศทางนึง และหากจ่าย PWM ด้วย Duty Cycle 50% ลงมาจะพบว่ามอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วเพิ่มขึ้นในทิศทางที่ตรงกันข้าม กัน และเมื่อจ่ายสัญญาณ PWM ที่ 50% จะทำให้มอเตอร์หยุดนิ่ง

ตัวแปร

- ตัวแปรต้น:
 - Mode การทำงานของ DC Motor Driver
 - Duty Cycle ของสัญญาณ PWM
 - ความถี่ของสัญญาณ PWM
- ตัวแปรตาม:
 - ความเร็วเชิงมุมของ Brushed DC Motor
 - พุทธิกรรมกระแสไฟฟ้าของ Brushed DC Motor
 - ประสิทธิภาพของ Brushed DC Motor
- ตัวแปรควบคุม:
 - แรงดันไฟเลี้ยง Brushed DC Motor 12 V
 - DC Motor Driver MD20A ควบคุม Brushed DC Motor
 - Hall Current Sensor WCS1600
 - Rotary Incremental Encoder AMT103V
 - ทิศทางการหมุน

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

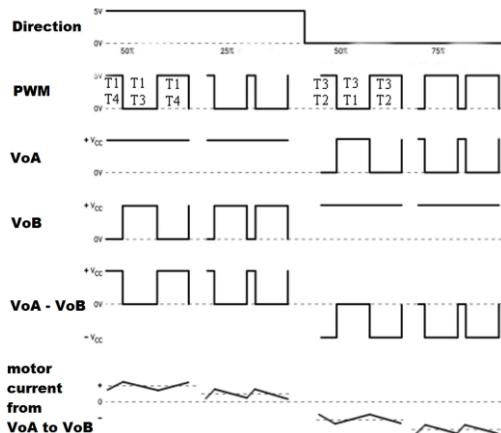
1. H-Bridge Drive



รูปที่ 24 H-Bridge Drive

วงจร H-Bridge เป็นวงจรสำหรับควบคุมการทำงาน DC Motor โดยเป็นโครงสร้างสวิตช์สี่ตัวที่จัดเรียงเป็นรูปตัว “H” เพื่อควบคุมทิศทางและความเร็วของมอเตอร์กระแสตรง โดยสวิตช์จะทำงานเป็นคู่ๆ แยกเพื่อสลับขั้วแรงดันทีต่อกันร่วมกันของมอเตอร์ เช่น เมื่อเปิด T1 และ T4 กระแสจะไหลจากแหล่งจ่ายผ่านมอเตอร์ลงสู่ GND ทำให้มอเตอร์หมุนไป逆时针 แต่ถ้าเปิด T2 และ T3 กระแสจะไหลกลับทิศ ทำให้มอเตอร์หมุนย้อนกลับ วงจรนี้ต้องระวังไม่เปิดสวิตช์ด้านเดียวกันสองตัวพร้อมกัน เพราะจะทำให้เกิดการลัดวงจร

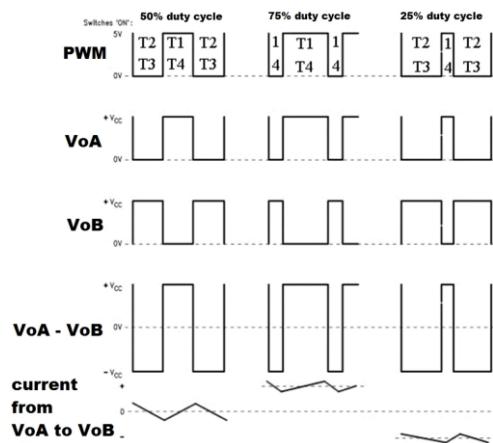
2. Sign-Magnitude



รูปที่ 25 Sign-Magnitude Mode

หลักการของ Sign-Magnitude ใน H-Bridge คือการใช้สัญญาณ PWM และ Direction เพื่อกำหนดทิศทาง และแรงขับของมอเตอร์ DC โดยทิศทางการหมุนถูกกำหนดด้วยสัญญาณ Direction เพื่อเลือกว่าจะเปิด MOSFET คู่ใด จากนั้นสัญญาณ PWM จะถูกจ่ายให้ MOSFET 1 ตัวจาก 1 คู่ เพื่อควบคุมแรงดันเฉลี่ยที่ต่อกันร่วมกันของ MOSFET 2 ตัวเพื่อป้องกัน กระแสจะไหลกระระยะห่างจ่ายผ่านมอเตอร์ลงสู่ GND ส่งผลให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วและทิศทางที่ต้องการ

3. Locked Anti-Phase



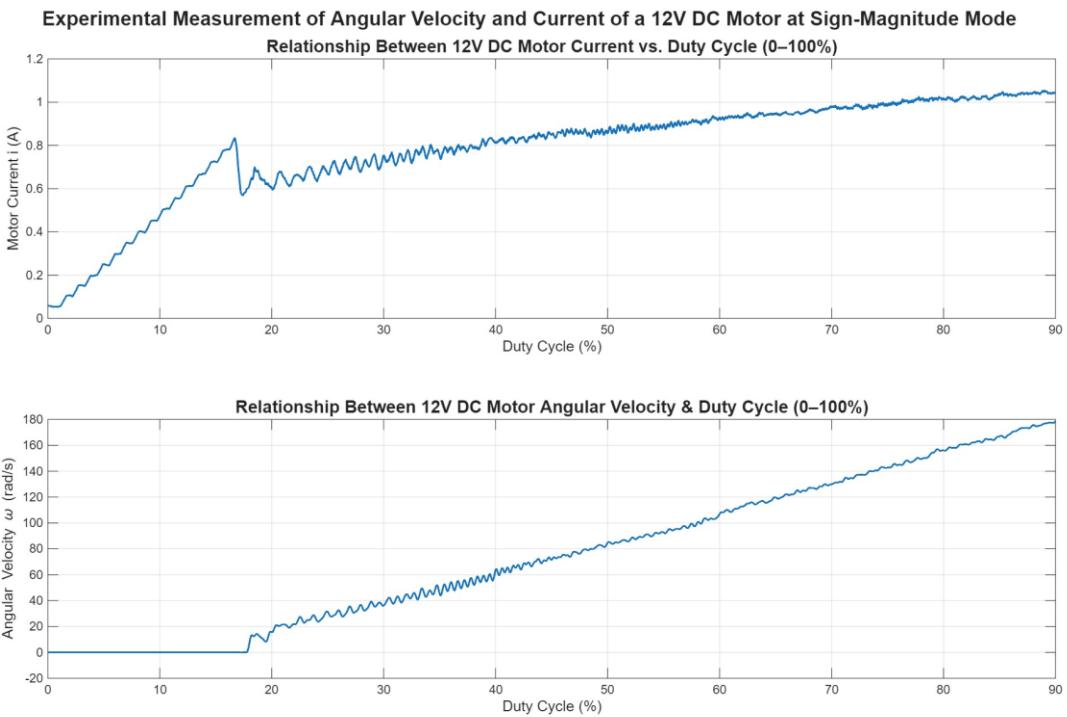
รูปที่ 26 Locked Anti-Phase Mode

Locked Anti-Phase เป็นวิธีควบคุมมอเตอร์ DC ที่ใช้สัญญาณ PWM เพียงสัญญาณเดียวในการกำหนดทั้งความเร็วและทิศทาง โดย Duty Cycle ของ PWM จะถูกนำไปใช้ควบคุม Logic ที่สลับสถานะของ MOSFET ใน H-bridge เพื่อให้แรงดันที่ต่อกลับร่วมมอเตอร์สลับไปมาระหว่าง +V และ -V ตลอดเวลา เพื่อควบคุม Duty Cycle และทิศทาง พร้อมกัน โดยการเพิ่ม Duty Cycle มากกว่า 50% ทำให้มอเตอร์หมุนไปทิศหนึ่ง การลดต่ำกว่า 50% ทำให้มุนย้อนกลับ และการจ่ายที่ 50% จะทำให้มอเตอร์หยุดนิ่ง

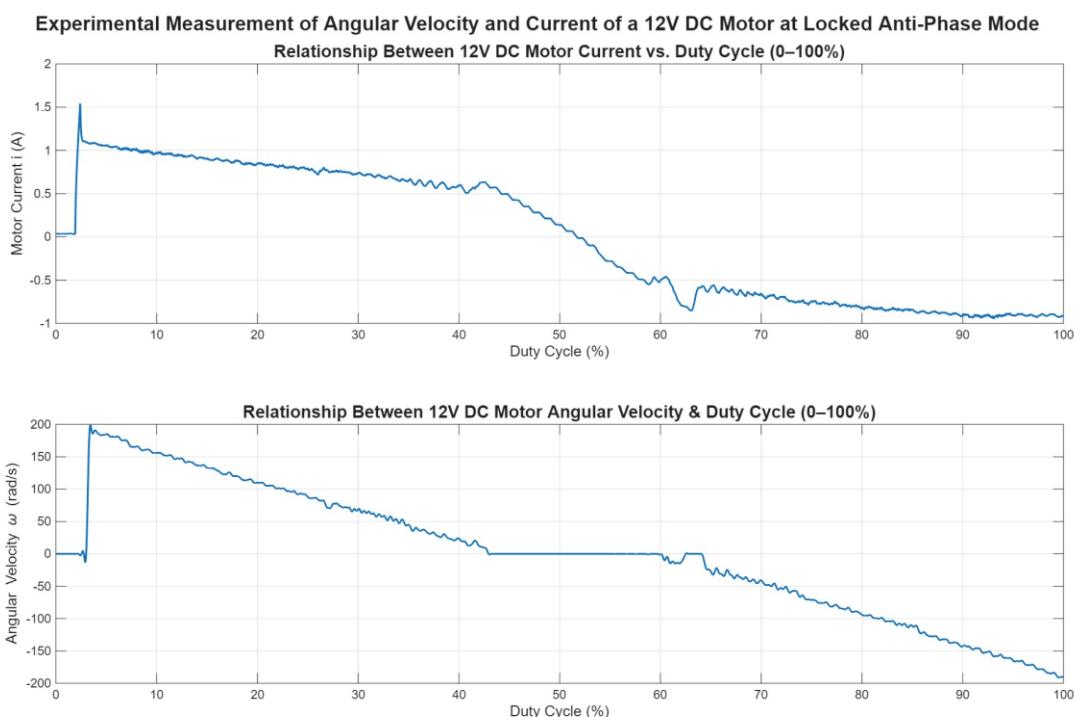
ขั้นตอนการดำเนินงาน

- ตั้งค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดผลและเก็บข้อมูล
 - ทำการ Signal conditioning Hall Current Sensor
- ทดลองพัฒนาระบบ Brushed DC Motor ณ ความถี่ PWM, Duty Cycle ต่างๆ ในแต่ละ Mode ของ Sign-Magnitude และ Locked Anti-Phase
 - ทำการทดสอบที่ติดอยู่กับเพลาของ Brushed DC Motor ให้ได้มากที่สุด
 - กำหนดความถี่ในการจ่ายสัญญาณ PWM ให้กับ DC Motor ซึ่งมีค่า 2kHz
 - จ่ายสัญญาณ PWM ให้กับมอเตอร์ด้วยความถี่ที่เลือก ด้วย Duty Cycle ตั้งแต่ 0 – 100% เป็นเวลา 10 วินาที
 - บันทึกผลความเร็วเชิงมุมผ่าน Encoder และกระแสไฟฟ้าผ่าน Hall Current Sensor
- สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

ผลการทดลอง



รูปที่ 27 พฤติกรรมของมอเตอร์ในโหมดของ Sign-Magnitude เมื่อจ่าย Duty Cycle ตั้งแต่ 0 ถึง 100%



รูปที่ 28 พฤติกรรมของมอเตอร์ในโหมดของ Locked Anti-Phase เมื่อจ่าย Duty Cycle ตั้งแต่ 0 ถึง 100%

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าใน Mode ของ Sign-Magnitude Motor จะหมุนในทิศทางเดียว และจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตาม Duty Cycle ที่จ่ายไป แต่ในส่วนของโหมด Locked Anti-Phase พบว่ามอเตอร์มีการหมุนใน 2 ทิศทางโดยในช่วงแรกมอเตอร์จะมีค่าอัตราเร็วสูงที่สุดและลดลงเรื่อยๆ จนหยุดนิ่งในช่วง 50% จากนั้นมอเตอร์ก็จะค่อยๆ หมุนด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้นในทิศทางตรงกันข้ามกับช่วงแรกและมีอัตราเร็วสูงสุดเมื่อ Duty Cycle อยู่ที่ 100%

อภิปรายผล

จากการทดลองพบว่าพกติกรรมของมอเตอร์เป็นไปตามสมมติฐานและเอกสารอ้างอิงโดยมีหลักการทำงานดังนี้

โหมดของ Sign-Magnitude จะเป็นโหมดที่ควบคุมมอเตอร์ผ่านการควบคุมสัญญาณ 2 รูปแบบได้แก่ Direction และ PWM เพื่อควบคุมทิศทางและความเร็วของมอเตอร์ โดยสามารถจ่าย PWM ได้ตั้งแต่ 0 - 100% Duty Cycle เพื่อกำหนดอัตราเร็วของมอเตอร์และควบคุมทิศทางของมอเตอร์ด้วยสัญญาณ Direction ในโหมดนี้จะมีข้อเสียคือต้องใช้สายสัญญาณถึง 2 เส้นในการควบคุมมอเตอร์แต่รู้ว่าดีคือสามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ได้ละเอียดมากกว่าโหมด Locked Anti-Phase

แต่ในโหมดของ Locked Anti-Phase เป็นโหมดที่จะควบคุมมอเตอร์ด้วยสัญญาณรูปแบบเดียนันกีคือ PWM โดยการจ่าย PWM ด้วย Duty Cycle ตั้งแต่ 50% จนถึง 100% จะทำให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วเพิ่มขึ้นในทิศทางนึง และหากจ่าย PWM ด้วย Duty Cycle 50% ลงมาจะพบว่ามอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วเพิ่มขึ้นในทิศทางที่ตรงกันข้าม และเมื่อจ่ายสัญญาณ PWM ที่ 50% จะทำให้มอเตอร์หยุดนิ่ง โดยในโหมดนี้จะมีข้อดีคือจะใช้สัญญาณเพียงเส้นเดียวในการควบคุมมอเตอร์ แต่รู้ว่าความละเอียดในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์จะต่ำกว่าโหมด Sign-Magnitude และหากจ่ายสัญญาณความถี่ต่ำในโหมดนี้พบว่ามอเตอร์เกิดการสั่นอย่างรุนแรง

ข้อเสนอแนะ

อ้างอิง

<https://www.pcb-3d.com/wordpress/tutorials/what-is-a-h-bridge-sign-magnitude-and-locked-anti-phase-control-of-a-dc-motor/>

2. LAB Stepper Motor

การทดลองที่ 1 Mode การทำงานของ Stepper Motor และ ความเร่งกับการเกิด Loss Step

จุดประสงค์

- เพื่อแสดงการทำงานของ Stepper Motor ในแต่ละโหมด Full Step Half Step และ Micro Step
- เพื่อทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณกับความเร็วเชิงมุมในแต่ละโหมด
- เพื่อศึกษาพฤติกรรมความเร่งและการเกิด Loss Step ของ Stepper Motor

สมมติฐาน

โหมดการขับแบบ Full Step, Half Step และ Micro Step จะให้ความละเอียดของการหมุนแตกต่างกัน โดยที่ Full Step ให้ความละเอียดต่ำที่สุด Half Step ให้ความละเอียดเพิ่มขึ้น Micro Step ให้ความละเอียดสูงที่สุด ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของมอเตอร์มีความต่อเนื่องและนุ่มนวลมากขึ้นตามระดับความละเอียดที่เพิ่มขึ้น ความเร็วเชิงมุมของ Stepper Motor จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความถี่ของสัญญาณ เมื่อความถี่ของสัญญาณเพิ่มขึ้น มอเตอร์จะหมุนเร็วขึ้นในทุกโหมดการขับ แต่ความสัมพันธ์อาจแตกต่างกันในแต่ละโหมดเนื่องจากจำนวน Step ต่อการหมุน 1 รอบไม่เท่ากัน

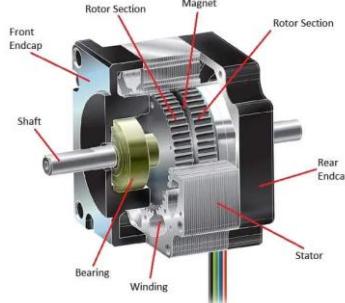
ความเร่ง Stepper Motor จะขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณที่จ่ายให้และ Mode ในการขับของ Stepper Motor

ตัวแปร

- ตัวแปรต้น:
 - Mode ในการควบคุม Stepper Motor
 - ความถี่ของสัญญาณ
- ตัวแปรตาม:
 - ความเร็วเชิงมุมของ Stepper Motor
- ตัวแปรควบคุม:
 - แรงดันไฟเลี้ยง Stepper Motor 12 V
 - Stepper Motor Driver
 - Rotary Incremental Encoder AMT103V
 - ทิศทางการหมุน
 - ความเร่งของ Stepper Motor

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. หลักการทำงานของ Stepper Motor

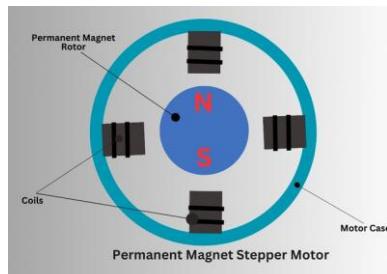


รูปที่ 29 Stepper Motor

Stepper Motor ทำงานโดยการหมุนเป็น Step โดยอาศัยหลักการสร้างสนามแม่เหล็กแบบเป็นลำดับโดย Stator ที่มีขั้ดลวดหลาย Phase เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ขั้ดลวดแต่ละ Phase สนามแม่เหล็กจะก่อตัวและทำให้ Rotor จัดแนวตามทิศของสนามแม่เหล็กนั้น การสลับการจ่ายกระแสจาก Phase หนึ่งไปยังอีก Phase หนึ่ง ตามลำดับที่ออกแบบไว้ ทำให้ Rotor หมุนทีละ Step angle เกิดการควบคุมตำแหน่งและความเร็วที่แม่นยำ โดย มุ่งหมุนต่อ Step ขึ้นอยู่กับจำนวนฟันของ Stator Rotor และจำนวน Phase ที่ใช้ควบคุม

2. ประเภทของ Stepper Motor

- Permanent Magnet Stepper Motor (PM)



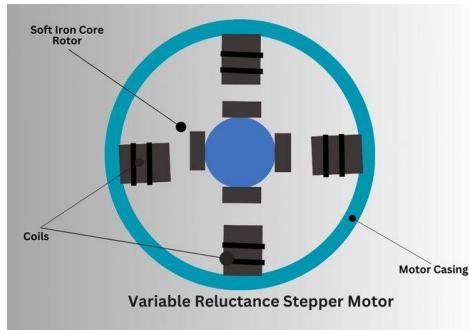
รูปที่ 30 Permanent Magnet Stepper Motor

Permanent Magnet Stepper Motor มีลักษณะเฉพาะด้วยการมีแม่เหล็กถาวรผึ้งอยู่ใน Rotor ซึ่งทำให้เกิด สนามแม่เหล็กที่มีปฏิกิริยา กับสนามแม่เหล็กของ Stator และทำให้มอเตอร์เคลื่อนที่เป็นมุ่งอย่างแม่นยำตาม จำนวน Step ที่กำหนด หนึ่งในข้อดีสำคัญของ PM Stepper Motor คือความสามารถในการกำหนดตำแหน่งได้ อย่างแม่นยำโดยไม่จำเป็นต้องใช้เซนเซอร์

มอเตอร์ชนิดนี้ใช้แม่เหล็กถาวรภายใน Rotor และ Stator เพื่อให้ตำแหน่งมีความคงที่ แม้จะมีแรงภายนอกมา กระทำก็ตาม คุณลักษณะนี้ช่วยให้การออกแบบมอเตอร์มีความเรียบง่ายขึ้น ข้อดีอีกประการหนึ่งของมอเตอร์ PM Stepper คือความสามารถในการรักษาแรงบิดสูงในช่วงความเร็วต่ำ ซึ่งแตกต่างจากมอเตอร์ทั่วไปที่อาศัย

สนานแม่เหล็กจากขดลวดไฟฟ้า มอเตอร์ PM ใช้แม่เหล็กถาวรในการสร้างสนานแม่เหล็ก จึงทำให้สามารถรักษาแรงบิดสูงได้แม้ในความเร็วต่ำ อีกทั้งให้ตำแหน่งที่แม่นยำและการทำงานที่ราบรื่น แม้ว่ามอเตอร์ชนิดนี้จะมีข้อจำกัดบางประการ เช่น ความต้องการกำลังไฟฟ้าที่ต่ำและการสร้างแรงบิดที่เหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการความแม่นยำสูง

- Variable Reluctance Stepper Motor (VR)



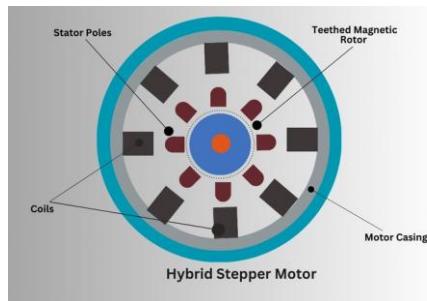
รูปที่ 31 Variable Reluctance Stepper Motor

Variable Reluctance Stepper Motor เป็นมอเตอร์ที่มี Rotor ทำจาก Soft Iron และ Stator ที่มีขดลวดพันไว้ Stator ประกอบด้วยฟันหลายชุด โดยแต่ละฟันมีขดลวดของตนเอง เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดเหล่านี้ จะเกิดสนานแม่เหล็กซึ่งมีปฏิกิริยา กับ Rotor และทำให้ Rotor หมุนตามลำดับการกระตุ้นของขดลวด หนึ่งในข้อดีสำคัญของ VR Stepper Motor คือการมี Cogging Torque ต่ำเมื่อเทียบกับ Stepper Motor ชนิดอื่น อันเป็นผลมาจากการสร้างเฉพาะตัวของมอเตอร์ประเภทนี้ แตกต่างจาก Stepper ที่ใช้แม่เหล็กถาวรสร้างสนานแม่เหล็ก VR Stepper Motor ใช้ Soft Iron ใน Rotor เพื่อสร้างสนานแม่เหล็กแทน คุณสมบัตินี้ช่วยให้มอเตอร์ VR สามารถสร้างการเคลื่อนที่ที่ราบรื่น ลดการสั่นสะเทือนและเสียงรบกวน ส่งผลให้มีการทำงานที่เน้นความเรียบและความแม่นยำยิ่งขึ้น ข้อดีอีกประการหนึ่งคือความสามารถในการให้แรงบิดสูงที่ความเร็วต่ำ มอเตอร์ VR ใช้ Rotor ที่มีขั้วแม่เหล็กนูน (salient poles) และ Stator ที่มีขดลวดเพื่อให้ได้แรงบิดสูง

การทำงานของมอเตอร์ VR Stepper Motor ทำงานตามหลักการของรีลัคเคนซ์แม่เหล็ก เมื่อขดลวดของ Stator ถูกจ่ายกระแส จะสร้างสนานแม่เหล็กและดึงดูดขั้วของ Rotor ทำให้ Rotor หมุนไปยังตำแหน่งที่มีรีลัคเคนซ์ต่ำที่สุด มอเตอร์ VR ถูกควบคุมด้วย Drive สองประเภท คือแบบ Uni-Polar และ Bi-Polar

ใน Uni-Polar ขดลวดของ Stator จะเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายเดียว ขณะที่ในแบบ Bi-Polar ขดลวดจะเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายสองชุด โดยทิศทางการหมุนถูกควบคุมด้วยการสลับขั้วของกระแสที่ให้ในขดลวด นอกจากนี้ มอเตอร์ VR ยังสามารถทำงานได้ทั้งแบบ Open Loop และ Closed Loop ในโหมด Open Loop มอเตอร์จะถูกควบคุมด้วยลำดับพัลส์ที่กำหนดไว้ล่วงหน้า ขณะที่ในโหมด Closed Loop ตำแหน่งของมอเตอร์จะถูกตรวจสอบด้วย Encoder

- Hybrid Synchronous Stepper Motor (HS)

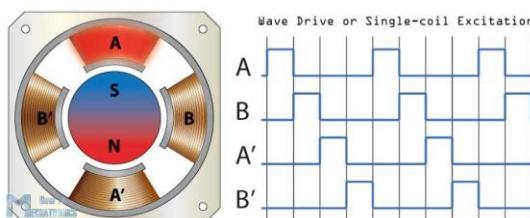


รูปที่ 32 Hybrid Synchronous Stepper Motor

Hybrid Synchronous Stepper Motor) เป็นมอเตอร์ที่ผสมผสานคุณลักษณะของ PM Stepper Motor และ VR Stepper Motor มอเตอร์ชนิดนี้มีโครงสร้างแบบไฮบริด โดยใช้ Rotor ที่เป็นแม่เหล็กถาวรและ Stator ที่ทำงานตามหลักการของรีลักแทนซ์แปรผัน Rotor ที่เป็นแม่เหล็กถาวรช่วยให้มอเตอร์สามารถสร้างแรงบิดและแรงยึดตัวแน่น (holding torque) ที่สูง ทำให้มอเตอร์สามารถรักษาตำแหน่งได้แม่นในขณะที่ไม่มีการจ่ายพลังงาน ขณะเดียวกัน Stator แบบรีลักแทนซ์แปรผันทำให้สามารถควบคุมความเร็วและตำแหน่งของมอเตอร์ได้อย่างแม่นยำ หนึ่งในข้อดีสำคัญของ HS Stepper Motor คือความสามารถในการให้แรงบิดหรือแรงยึดตัวแน่นสูงที่ความเร็ว ข้อดีอีกประการหนึ่งคือความสามารถในการรักษาตำแหน่งอย่างแม่นยำ แตกต่างจากมอเตอร์สตีปเปอร์ชนิดอื่นที่พึ่งพาระบบโอลูปโดยสมบูรณ์ มอเตอร์ไฮบริดประกอบด้วย Rotor แม่เหล็กถาวรและ Stator ที่มีฟันซึ่งสามารถสร้างระบบที่เทียบได้กับ Closed Loop โดยอาศัยปฏิสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กระหว่าง Stator และ Rotor ทำให้สามารถควบคุมตำแหน่งได้อย่างแม่นยำโดยไม่ต้องใช้เซนเซอร์ และให้การเคลื่อนที่ที่ลisse และราบรื่น

3. โหมดการทำงานของ Stepper Motor

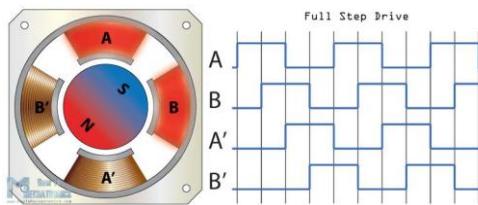
- Wave Drive



รูปที่ 33 Wave Drive

Wave Drive เป็นโหมดการขับที่ใช้ลำดับการกระตุนชุดๆ โดยการจ่ายกระแสไฟเพียงหนึ่งค่อยๆ ในแต่ละช่วงเวลา ทำให้ Rotor เคลื่อนที่ทีละหนึ่ง Step ตามลำดับของสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นใน Stator ลักษณะการขับแบบนี้ทำให้มอเตอร์เคลื่อนที่ด้วยจำนวน Step เท่ากับโหมด Full Step การกระตุนเพียงหนึ่งค่อยๆ ในแต่ละช่วงส่งผลให้แรงบิดที่ได้ลดลงเมื่อเทียบกับ Full Step

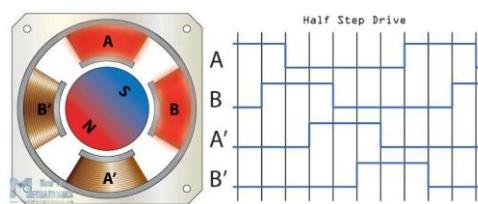
- Full Step



รูปที่ 34 Full Step

Full Step เป็นโหมดในการควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ ในโหมดนี้ มอเตอร์จะหมุน 1 Step สำหรับทุก Pulse ที่ส่งไปยังชุดลวด โดยการควบคุมลำดับและระยะเวลาของพัลส์ที่ส่งเข้าไป มอเตอร์จะหมุนตามเข็มนาฬิกาหรือ วนเข็มนาฬิกา และความเร็วในการหมุนได้

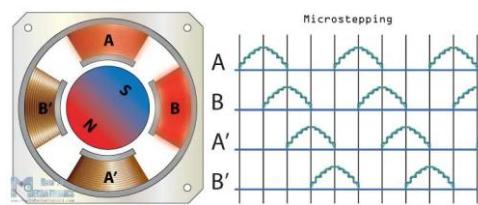
- Half Step



รูปที่ 35 Half Step

Half Step ในโหมดนี้ มอเตอร์จะเคลื่อนที่ครึ่งหนึ่งของขนาด Step ชุดลวดจะถูกกระตุ้นในลักษณะที่เริ่มจากการ เปิดใช้งานชุดลวดหนึ่งชุด และตามด้วยการเปิดใช้งานสองชุดลวดพร้อมกันที่กระแสต่อ ทำให้เคลื่อนที่ครึ่งมุต่อพัลส์ ทำให้จำนวน Step ต่อรอบเพิ่มเป็นสองเท่า เมื่อเทียบกับ Full Step ส่งผลให้การเคลื่อนที่ราบรื่นขึ้นและมีความ ละเอียดมากกว่า

- Micro Step



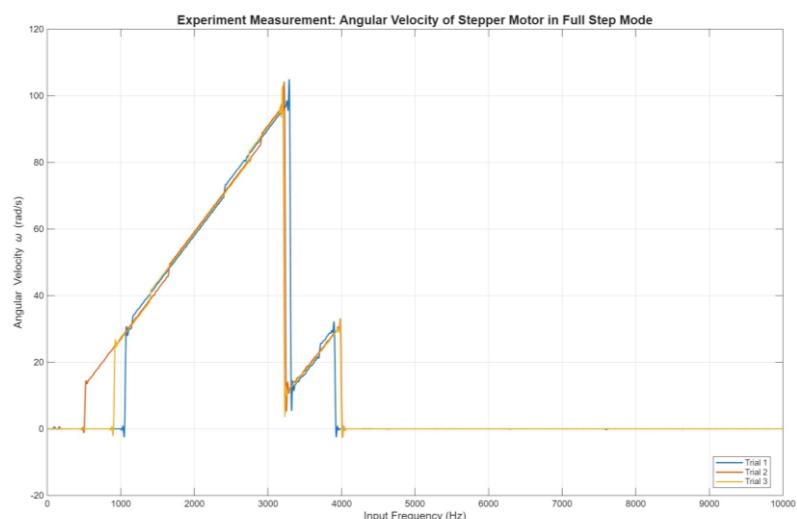
รูปที่ 36 Micro Step

Micro Step เป็นโหมดที่ใช้เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์อย่างแม่นยำมาก ในโหมดนี้ ทุก Step จะถูก แบ่งเป็น Micro Step จำนวนมาก โดยขึ้นอยู่กับกำหนดซึ่งมีได้ตั้งแต่ 1/4, 1/8, 1/16 และ 1/32 โดยไม่เพียงกระตุ้น ชุดลวดแบบเดิมหรือสลับกัน แต่จะปรับระดับกระแสที่ส่งเข้าไปยังชุดลวดอย่างละเอียด ทำให้สามารถเคลื่อนที่ด้วย ความละเอียดที่มากขึ้นได้ แต่ทำให้จำนวน Step ต่อรอบเพิ่มเป็นหลายเท่าขึ้นอยู่กับ Micro Step

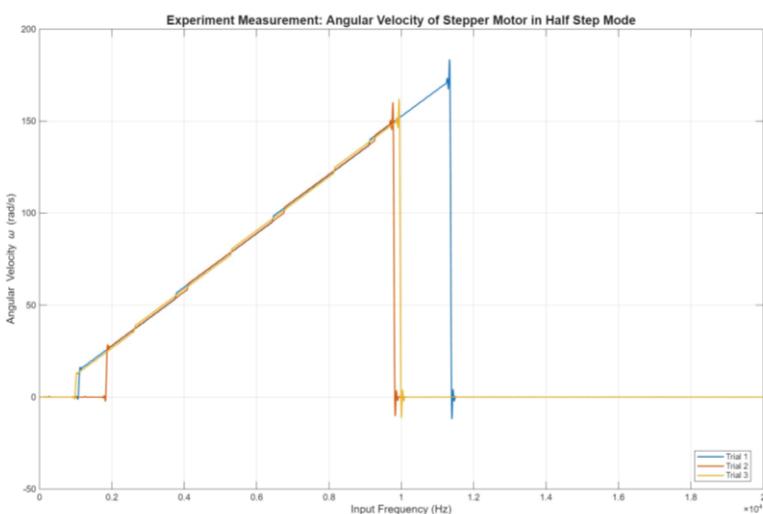
ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ทดลองพัฒนาระบบ Stepper Motor และความถี่สัญญาณต่างๆ ในแต่ละความถี่
 - a. กำหนด Mode ในการควบคุมการทำงานของ Stepper Motor ในแต่ละรูปแบบ Full Step Half Step และ Micro Step
 - i. จ่ายสัญญาณให้กับมอเตอร์ด้วยความเร่งคงที่ที่เลือก ด้วย Duty Cycle ตั้งแต่ 0 – 100% เป็นเวลา 10 วินาที
 - ii. บันทึกผลความเร็วเชิงมุมผ่าน Encoder และกระแสไฟฟ้าผ่าน Hall Current Sensor
 - iii. ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง
2. สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

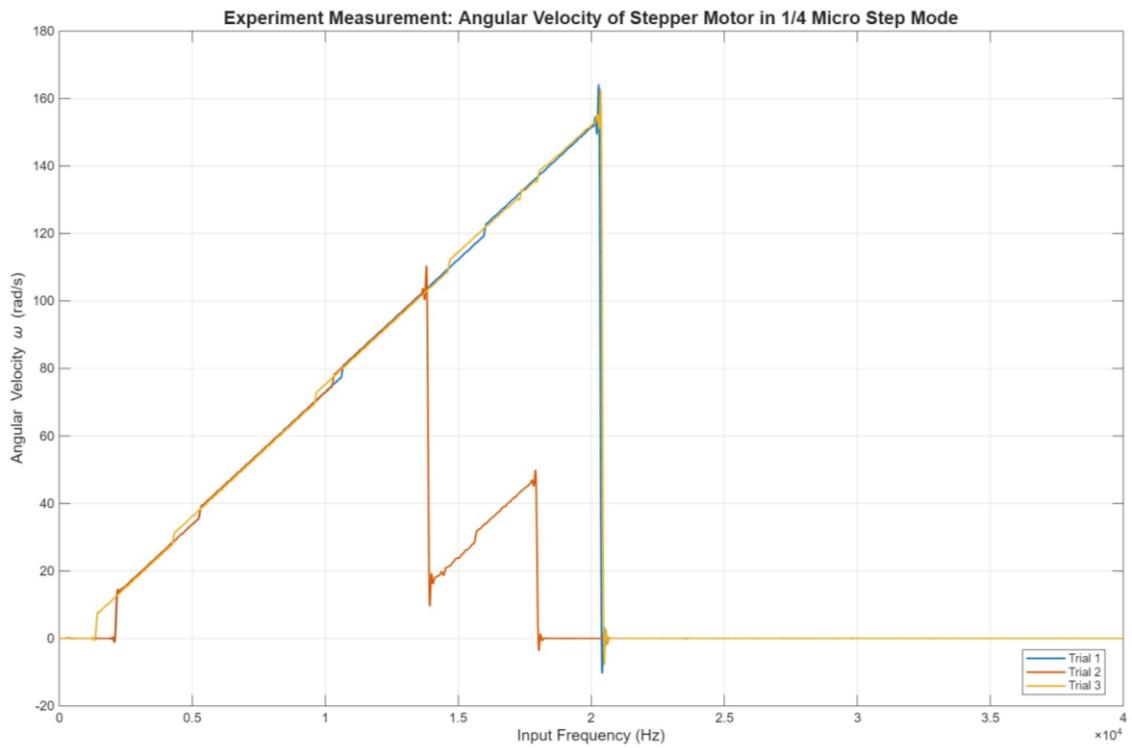
ผลการทดลอง



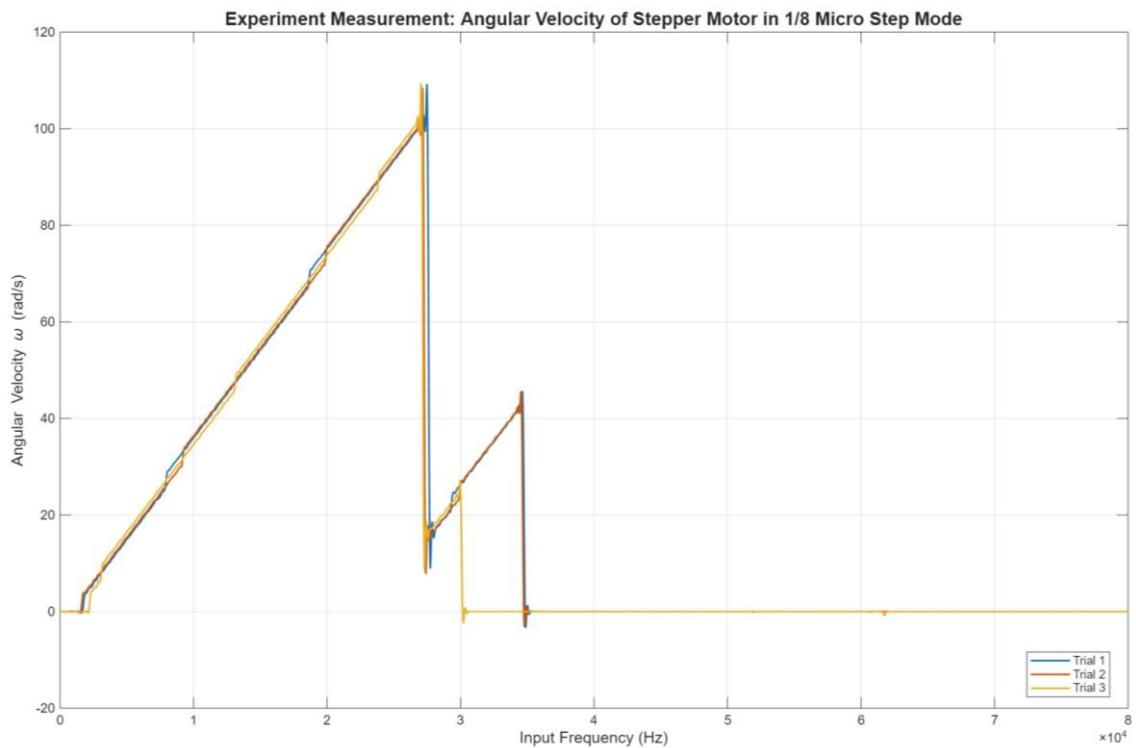
รูปที่ 37 Angular Velocity of Stepper Motor in Full Step Mode



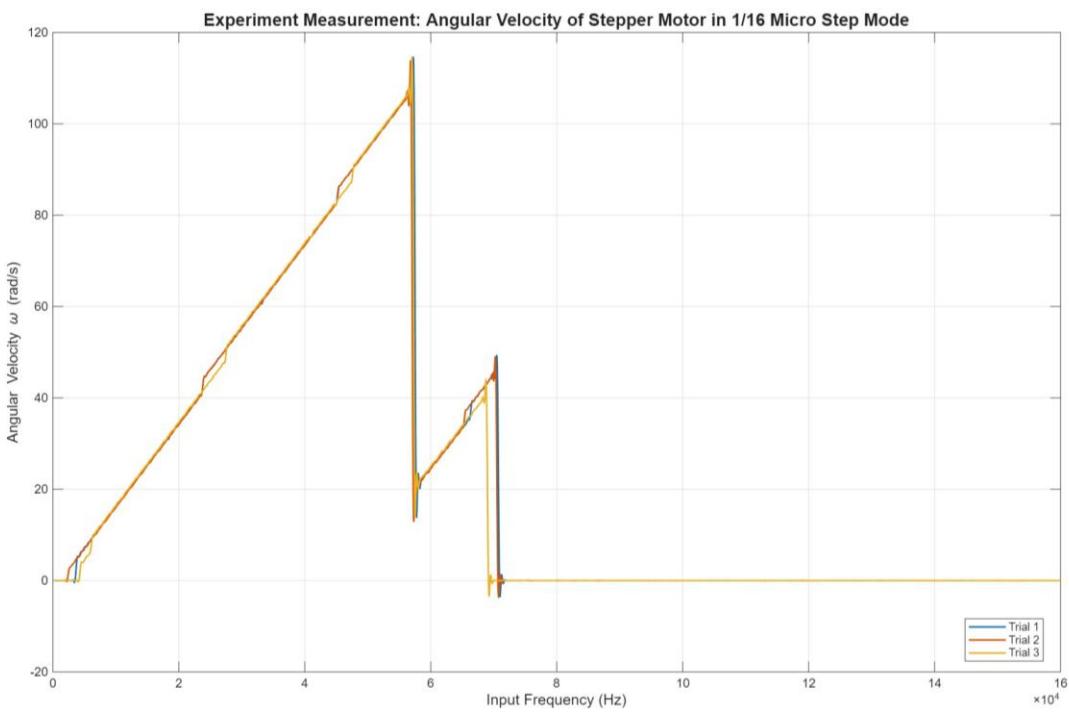
รูปที่ 38 Angular Velocity of Stepper Motor in Half Step Mode



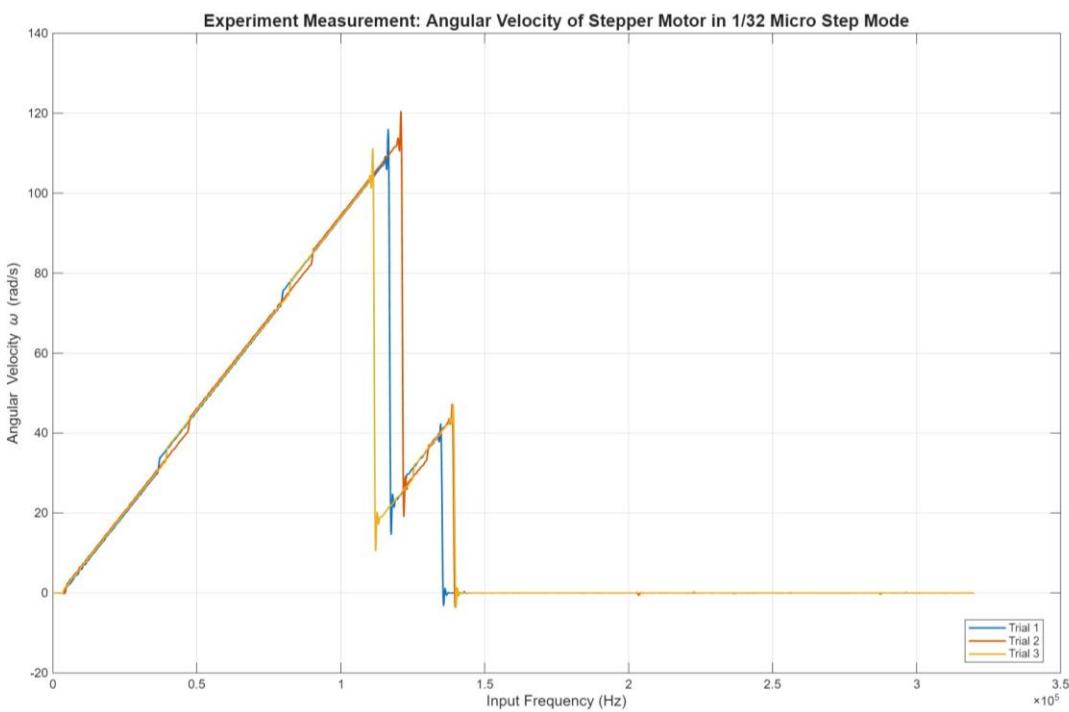
รูปที่ 39 Angular Velocity of Stepper Motor in 1/4 Micro Step Mode



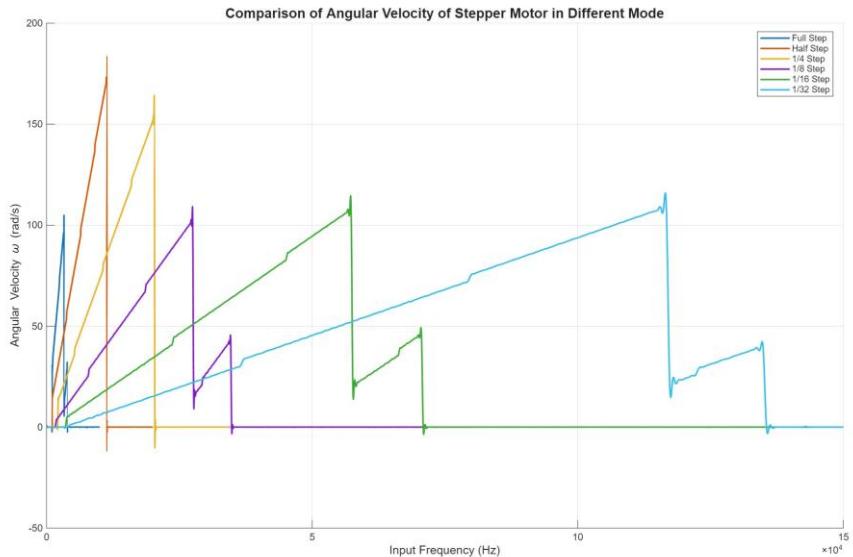
รูปที่ 40 Angular Velocity of Stepper Motor in 1/8 Micro Step Mode



รูปที่ 41 Angular Velocity of Stepper Motor in 1/16 Micro Step Mode



รูปที่ 42 Angular Velocity of Stepper Motor in 1/32 Micro Step Mode



รูปที่ 43 Comparison of Angular Velocity of Stepper Motor in Different Mode

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่า ในแต่ละโหมดการทำงานของ Stepper Motor ภายใต้การจ่ายสัญญาณความถี่และอัตราการเปลี่ยนแปลงสัญญาณความถี่ที่เท่ากัน Stepper Motor มีความเร็วและความเร่งที่ไม่เท่ากัน โดย Half Step จะสามารถทำความเร็วได้สูงสุด โดยสามารถดูผลลัพธ์ได้จากรูปที่ 43

ในระหว่างการทดลองพบว่าในแต่ละโหมดจะเกิดการ Loss Step ที่ความถี่ไม่เท่ากัน โดยยิ่งโหมดมีความละเอียดสูง ความถี่ที่ทำให้เกิด Loss Step ก็จะสูง

อภิปรายผล

ในการควบคุมความเร็วของ Stepper Motor จะสามารถจ่ายความถี่ด้วยสมการดังนี้

$$f = \frac{N_{steps}\omega}{2\pi}$$

โดยที่

f คือ ความถี่ของสัญญาณที่จ่าย [Hz]

N_{steps} คือ Steps per Revolute [step]

ω คือ ความเร็วเชิงมุมที่ต้องการ [rad/s]

ในการควบคุมความเร็วของ Stepper Motor จะสามารถจ่ายความถี่ด้วยสมการดังนี้

$$a_f = \frac{N_{steps}}{2\pi} a$$

โดยที่

a_f	คือ	อัตราการเพิ่มความถี่	[Hz/s]
N_{steps}	คือ	Steps per Revolute	[step]
a	คือ	ความเร่งเชิงมุมที่ต้องการ	[rad/s ²]

จากการทดลองพบว่า ในโหมด Half Step สามารถทำความเร็วได้สูงสุด คาดว่าเป็นโหมดที่มีแรงบิดเยอะที่สุด ทำให้มีแรงเพียงพอในการเร่งความเร็วได้มากกว่าโหมดอื่นๆ

และการเกิด Loss Step นั้นเกิดจากการที่ จ่ายสัญญาณความถี่สูงเกินไปในแต่ละโหมดส่งผลให้ในโหมดนั้นมีแรงไม่พอสำหรับการเร่งให้หมุนด้วยความเร็วนั้นๆ ให้ทันใน captions ที่กำหนดไว้ได้

Mode	ข้อดี	ข้อเสีย
Wave Drive	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้พลังงานต่ำที่สุด - วงจรควบคุมง่าย - ความร้อนในชุดลวดต่ำ 	<ul style="list-style-type: none"> - แรงบิดต่ำที่สุด - ความนิ่งของตำแหน่งต่ำ - ไม่เหมาะสมกับโหลดสูง
Full Step	<ul style="list-style-type: none"> - แรงบิดสูง - โครงสร้างควบคุมง่าย - คงตำแหน่งได้ดี 	<ul style="list-style-type: none"> - ความละเอียดต่ำ - การสั่นและเสียงรบกวนสูง - การเคลื่อนที่ไม่เรียบ
Half Step	<ul style="list-style-type: none"> - ความละเอียดสูงกว่า - เคลื่อนที่เรียบกว่า - แรงบิดปานกลาง 	<ul style="list-style-type: none"> - แรงบิดไม่คงที่ - ควบคุมซับซ้อนกว่า Full Step
Micro Step	<ul style="list-style-type: none"> - ความละเอียดสูงที่สุด - เคลื่อนที่ราบรื่นมาก - เสียงและการสั่นต่ำมาก 	<ul style="list-style-type: none"> - แรงบิดต่ำ - Driver มีความซับซ้อนและราคาแพงกว่า - แรงบิดค้างตำแหน่งลดลง

ข้อเสนอแนะ

อ้างอิง

<https://mechtex.com/blog/types-of-stepper-motor>

<https://mechtex.com/blog/explore-the-different-stepping-modes-of-a-stepper-motor>

3. LAB Brushless DC Motor

การทดลองที่ 1 ลักษณะสัญญาณ Back EMF จาก Brushless DC Motor

จุดประสงค์

- เพื่อแสดงลักษณะของสัญญาณ Back EMF แบบ Trapezoidal ของ Brushless DC Motor
- เพื่อแสดงการเกิด Phase Shift ระหว่างสัญญาณแต่ละ Phase ของ Back EMF
- เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของมอเตอร์กับความถี่ของสัญญาณ Back EMF

สมมติฐาน

ลักษณะของคลื่นสัญญาณ Back EMF ที่วัดได้จาก Brushless DC มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมคงที่เรียบ ความถี่ของสัญญาณ Back EMF มีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับความเร็วของมอเตอร์โดยแต่ละช่องสัญญาณมีความต่างเฟสที่ 120 องศา

ตัวแปร

ตัวแปรต้น:

- ความเร็วรอบที่ต้องการ (8000, 6000, 4000, 2000, 0, -2000, -4000, -6000, -8000 RPM)

ตัวแปรตาม:

- คาบของสัญญาณ Back EMF
- ความถี่ของสัญญาณ Back EMF
- ความต่างเฟส ระหว่าง Channel 1, 2, 3
- ลักษณะรูปคลื่นของสัญญาณ Back EMF

ตัวแปรควบคุม:

- แรงดันไฟเลี้ยง Stepper Motor 12 V
- Brushless DC Motor

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. The Relationship Between Motor Speed and Number of Poles

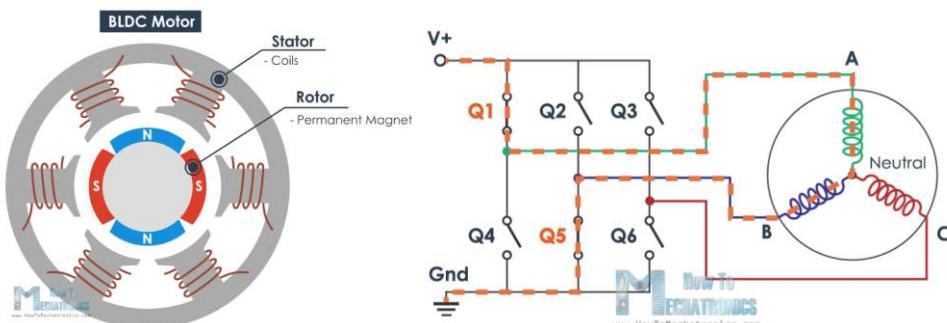
$$N_s = \frac{120 \times f}{P}$$

โดยที่

N_s	คือ	ความเร็วของมอเตอร์ [RPM]
f	คือ	ความถี่ [Hz]
P	คือ	จำนวน Pole ในมอเตอร์

BLDC

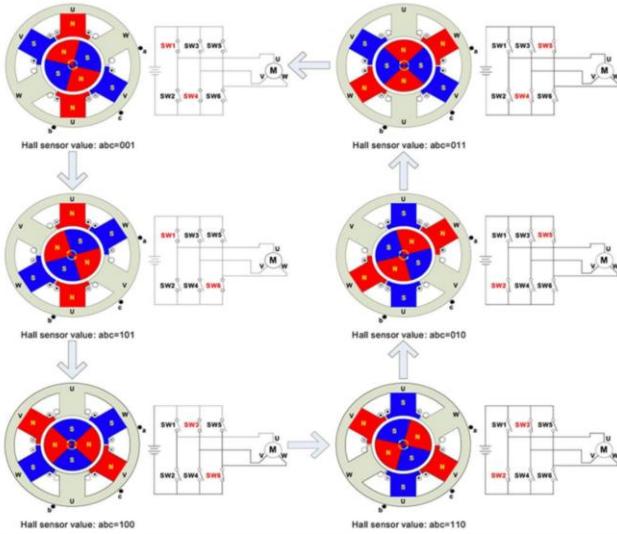
ส่วนประกอบของ BLDC นั้นจะประกอบไปด้วย Rotor หรือส่วนของแม่เหล็กถาวร และ Stator ส่วนที่เป็น Coil ภายใน BLCD จะถูกแบ่งทั้งหมด 3 ส่วน U,V และ W โดยปลายของแต่ coil นั้นจะถูกรวบเอาไว้ที่จุด Neutral ซึ่งการควบคุม BLDC นั้นจะใช้วงจร Haf Bridge ในการควบคุมขั้วของแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านทิศทางการให้流ของกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 44 BLDC Principle

โดยการขับเคลื่อน BLDC นั้นมีวิธีการสั่งการทำงานได้ทั้งหมด 2 วิธี

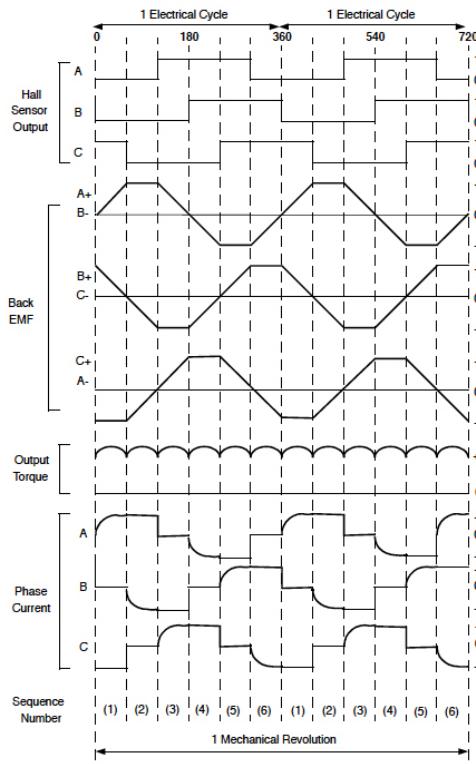
6 Step Commutation คือการควบคุมการหมุนของ BLDC ผ่านการควบคุมทิศทางของขั้วแม่เหล็กทั้งหมด 6 ขั้นตอน โดยแต่ละขั้นตอนนั้นจะมี Phase ต่างกัน 60 องศา



รูปที่ 45 BLDC 6 Step Commutation

สถานะของขดลวด (Coil States) ในแต่ละขั้นตอน การทำงานของขดลวดทั้ง 3 Phase (U, V, W) จะมีสถานะที่เป็นไปได้ 3 รูปแบบ คือ

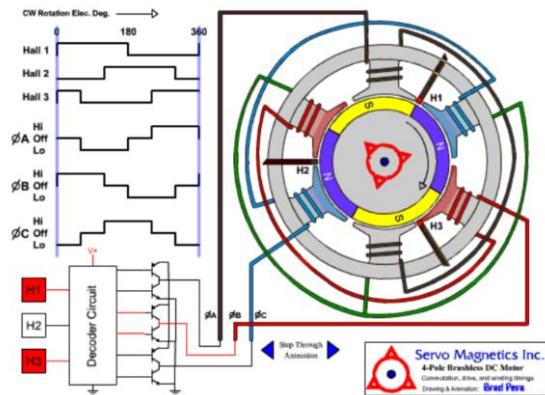
- บวก (+): กระแสไฟหลักเข้า (High side switch ON)
- ลบ (-): กระแสไฟหลอก (Low side switch ON)
- Float (ลอย): ไม่มีการจ่ายไฟ (High/Low switches OFF) เพื่อรอจังหวะหรือวัดค่า Back EMF



รูปที่ 46 BLDC Signals

การตรวจจับตำแหน่ง Rotor (Rotor Position Sensing) เพื่อควบคุมการหมุนให้ไปในตำแหน่งถัดไป มีอยู่ 2 วิธี ได้แก่

- Hall effect sensor คือการนำ sensor ตัวจับแม่เหล็กที่ติดตั้งห่างกันทำมุม 60 หรือ 120 องศา เข้ามาบอกตำแหน่ง ณ เวลาหนึ่ง



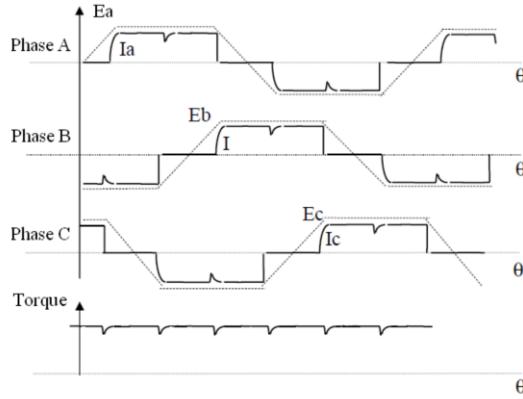
รูปที่ 46 Hall effect sensor

- Back Emf Sensing คือการที่ขั้วแม่เหล็กผ่านขดลวดที่มีสถานะ Float จึงทำให้เกิด Back Emf แล้วนำสัญญาณนั้นมาบอก Position ของ BLDC ณ ขณะนั้น โดยเมื่อนำกฎของ Kirchhoff อธิบายจะได้สมการดังนี้

$$V_s = R i_s + L \frac{di_s}{dt} + e_s$$

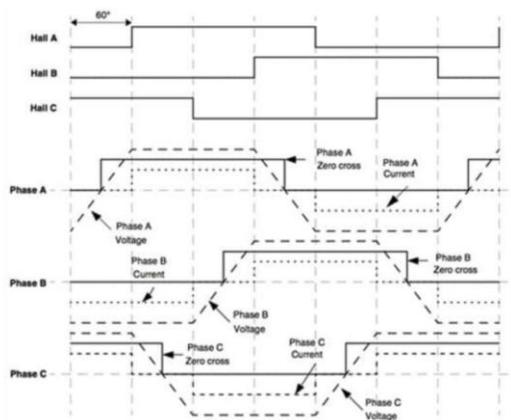
โดยที่

V_s	คือ	แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย	[V]
R	คือ	Steps per Revolute	[Ω]
L	คือ	ค่าความเหนี่ยววน	[H]
i_s	คือ	กระแสไฟฟ้าในวงจร	[A]
e_s	คือ	แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ	[V]



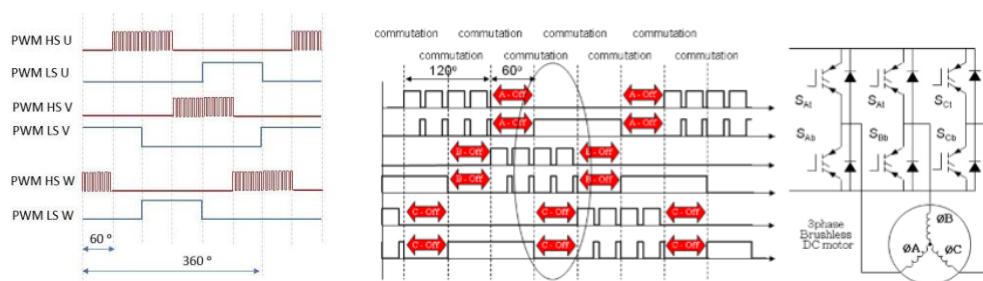
รูปที่ 46 Back EMF

โดยจะใช้ Zero Crossing detection หรือการ detect จุดที่เป็น 0 ของ Signal ที่ออกมานี้เพื่อในบ่อกว่าขั้วแม่เหล็กนั้นอยู่ตรงกึ่งกลางของชด漉วนนั้นพอตี



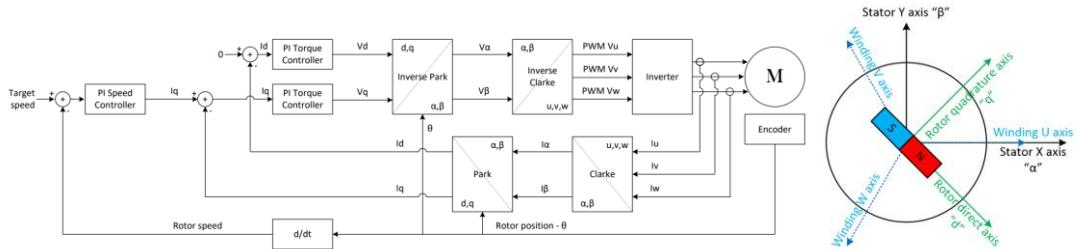
รูปที่ 47 Zero Crossing Detection

การควบคุมความเร็วและ Torque นั้นจะใช้ Duty cycle โดยจะทำส่งสัญญาณ PWM ในฝั่งของ HIGH side ของ Half bridge



รูปที่ 48 FOC Control Signal

FOC (Field-Oriented Control) คือการควบคุม BLDC ผ่านสมการ โดยมีการนำ Torque, ความเร็ว, Flux และ Feed back สัญญาณมาทำการคำนวณและจ่ายกระแสไฟฟ้าในรูปแบบของ Sine Wave



รูปที่ 49 FOC Control System

ประเภท	ข้อดี	ข้อเสีย
6 Step Commutation	<ol style="list-style-type: none"> มีความเร็วสูงสุด ส่ง Torque ได้ดี นำไปใช้งานได้ง่าย มีการสูญพลังงานจาก Switch ที่น้อย (Switching Losses) 	<ol style="list-style-type: none"> Efficiency น้อย มีเสียงรบกวน
FOC (Field-Oriented Control)	<ol style="list-style-type: none"> มี Efficiency สูง มีกำลังสูง มีเสียงรบกวนต่ำ มี Torque ripple ที่ต่ำที่สุด ที่ความเร็วสูง 	<ol style="list-style-type: none"> มีการคำนวณที่ซับซ้อน จำเป็นต้องการเขียนโปรแกรม มีการสูญพลังงานจาก Switch (Switching Losses)

ขั้นตอนการดำเนินงาน

- ตั้งค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดผลและเก็บข้อมูล
 - เชื่อมต่อ Probe จากบอร์ดการทดลองเข้ากับ Oscilloscope
- ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ผ่าน MC Workbench
 - ปรับความเร็วของ Brushless DC Motor เป็น -8000, -6000, -4000, -2000, 0, 2000, 4000, 6000, 8000 ตามลำดับ
 - รอจนกว่าความเร็วของ Brushless DC Motor จะใกล้เคียงความเร็วที่ต้องการ

c. บันทึกข้อมูล ควบ ของสัญญาณ

3. สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

ผลการทดลอง



Target Speed 2000 RPM



Target Speed -2000 RPM



Target Speed 4000 RPM



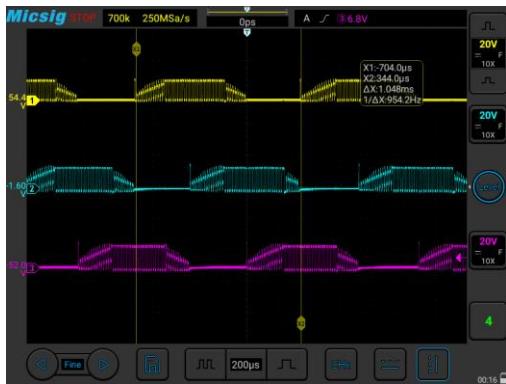
Target Speed -4000 RPM



Target Speed 6000 RPM



Target Speed -6000 RPM



Target Speed 8000 RPM

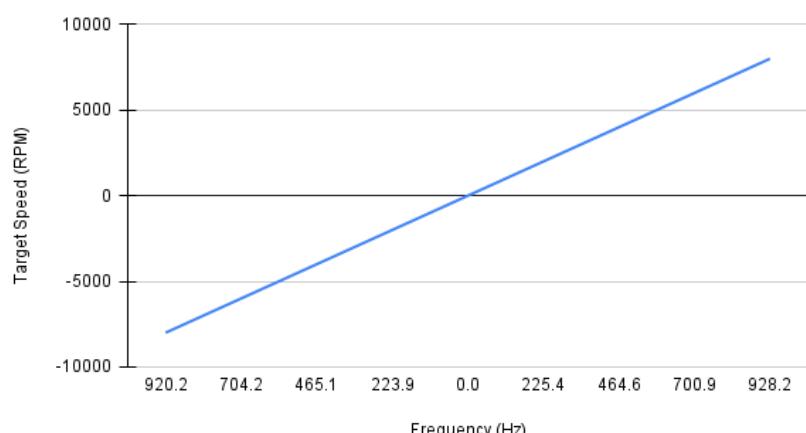


Target Speed -8000 RPM



Target Speed 0 RPM

Relationship Between Speed (RPM) & Frequency (Hz)



รูปที่ 50 Relationship Between Speed (RPM) & Frequency (Hz)

ตารางแสดงค่าเฉลี่ยของคาบและความถี่ของแต่ละความเร็วรอบที่ต้องการ

Target Speed (RPM)	Average Period	Average frequency	Average Period	Average frequency	Average Period	Average frequency

	Channel 1 (ms)	Channel 1 (Hz)	Channel 2 (ms)	Channel 2 (Hz)	Channel 3 (ms)	Channel 2 (Hz)
8000	1.071	933.779	1.076	929.368	1.085	921.376
6000	1.427	700.935	1.427	700.935	1.427	700.935
4000	2.143	466.563	2.160	462.963	2.153	464.396
2000	4.447	224.888	4.421	226.210	4.42	225.124
0	0	0	0	0	0	0
-2000	4.467	223.881	4.467	223.881	4.467	223.881
-4000	2.150	465.116	2.150	465.116	2.150	465.116
-6000	1.420	704.225	1.420	704.225	1.420	704.225
-8000	1.087	920.245	1.087	920.245	1.087	920.245

ตารางแสดง Phase Shift ระหว่างช่องที่ 1-2 และ 2-3 ความเร็วรอบที่ต้องการ

Target Speed (RPM)	The difference in periods between Channel 1–2 (ms)	Degree (°)	The difference in periods between Channel 2-3 (ms)	Degree (°)
8000	0.359	122.804	0.355	118.515
6000	0.487	120.929	0.460	116.075
4000	0.723	120.929	0.713	119.319
2000	1.507	122.107	1.447	117.391
0	0	0	0	0
-2000	-1.467	-118.209	-1.473	-118.746
-4000	-0.707	-118.326	-0.683	-114.419
-6000	-0.463	-117.465	-0.467	-118.310
-8000	-0.347	-114.847	-0.357	-118.160

สรุปผลการทดลอง

- จากการทดลองพบว่าสัญญาณจากการดูผ่าน Oscilloscope พบรูปคลื่นจากแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 Channel เป็นลักษณะสี่เหลี่ยมคงที่ (Trapezoidal) ซึ่งตรงกับลักษณะของสัญญาณ Back EMF ใน Brushless DC Motor

2. จากการทดลองปรับค่าความเร็วรอบที่ต้องการตั้งแต่ -8000 ถึง 8000 RPM พบว่า ความถี่สัญญาณ Back EMF มีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรง กับความเร็วของมอเตอร์ โดยสามารถคำนวณได้จากสูตร ซึ่งใกล้เคียงกับค่าตามทฤษฎี

$$N_s = \frac{120 \times f}{P}$$

โดยที่

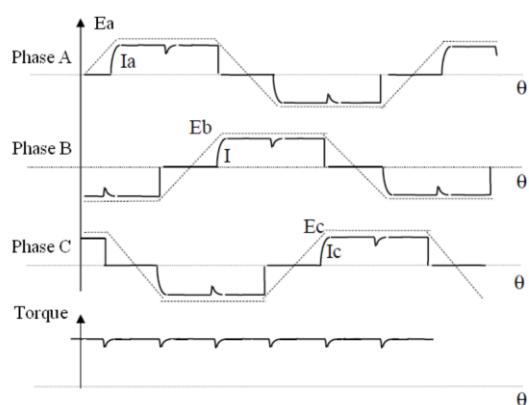
N_s	คือ	ความเร็วของมอเตอร์ [RPM]
f	คือ	ความถี่ [Hz]
P	คือ	จำนวน Pole ในมอเตอร์

3. จากการทดลองและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณทั้ง 3 ช่อง พบว่าสัญญาณแต่ละช่องเมื่อกำหนดความเร็วรอบเป็นบวก Phase Shift ที่เกิดขึ้นประมาณ 116° - 118° โดยเรียงสัญญาณจาก Channel 1 ไป 2 และ 3 ตามลำดับ แต่เมื่อกำหนดความเร็วรอบเป็นลบ Phase Shift ที่เกิดขึ้นประมาณ -114° - (-118°) โดยเรียงสัญญาณจาก Channel 3 ไป 2 และ 1 ตามลำดับ

อภิรายผล

จากการทดลองพบว่าสัญญาณ Back EMF นั้นมีลักษณะเป็น Trapezoid และมี phase ที่ต่างกันอยู่ 120° องศา เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้า และการเหนี่ยวนำของสามารถแม่เหล็ก โดยสามารถอธิบายผ่านสมการดังนี้

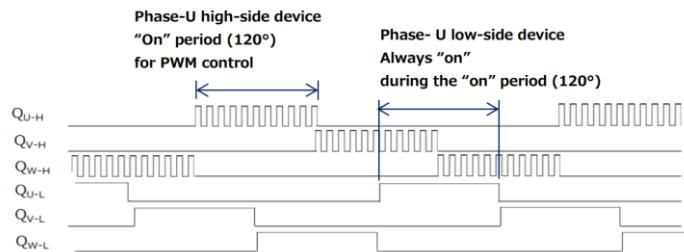
$$V_s = R_i s + L \frac{di_s}{dt} + e_s$$



รูปที่ 51 Back EMF

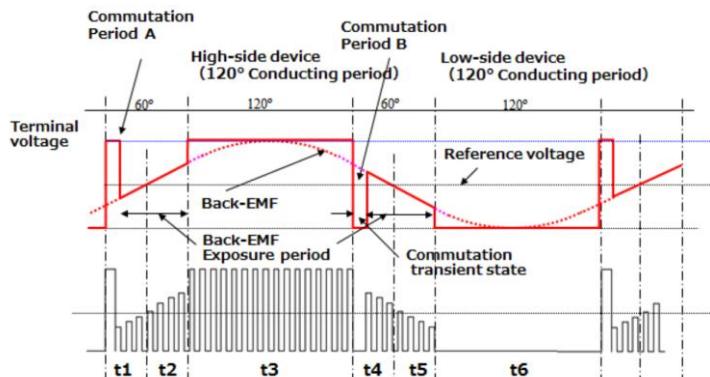
โดยตามทฤษฎีแล้วควรเป็น Trapezoid แบบเส้นเรียบ แต่ลักษณะของสัญญาณที่วัดนั้นเป็นลักษณะคล้าย pulse เนื่องสาเหตุดังนี้

1. ในทางทฤษฎีรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้า (Back EMF) ควรจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมคงที่เรียบ แต่การที่ใช้ PWM ในการควบคุม Torque และความเร็ว ของ BLDC จึงส่งผลให้สัญญาณที่วัดได้จริงมีลักษณะเป็น Pulse



รูปที่ 52 FOC Control System

2. การเกิด Commutation Period ในจังหวะที่มีการเปลี่ยนสถานะการทำงานของสวิตซ์ระหว่างด้าน High-Side และ Low-Side ส่งผลให้เกิดสัญญาณในช่วงการเปลี่ยน Step



รูปที่ 53 FOC Control System

อ้างอิง

https://www.researchgate.net/figure/Hall-Effect-sensor-vs-Phase-waveform-of-BLDC-motor_fig3_338582249

<https://www.digikey.pl/pl/articles/how-to-power-and-control-brushless-dc-motors>

https://toshiba.semicon-storage.com/info/application_note_en_20180803_AKX00303.pdf?did=61176

<https://electronics.stackexchange.com/questions/474200/bldc-motor-pwm-commutation-scheme>

<https://www.ti.com/lit/ml/slyp711/slyp711.pdf>

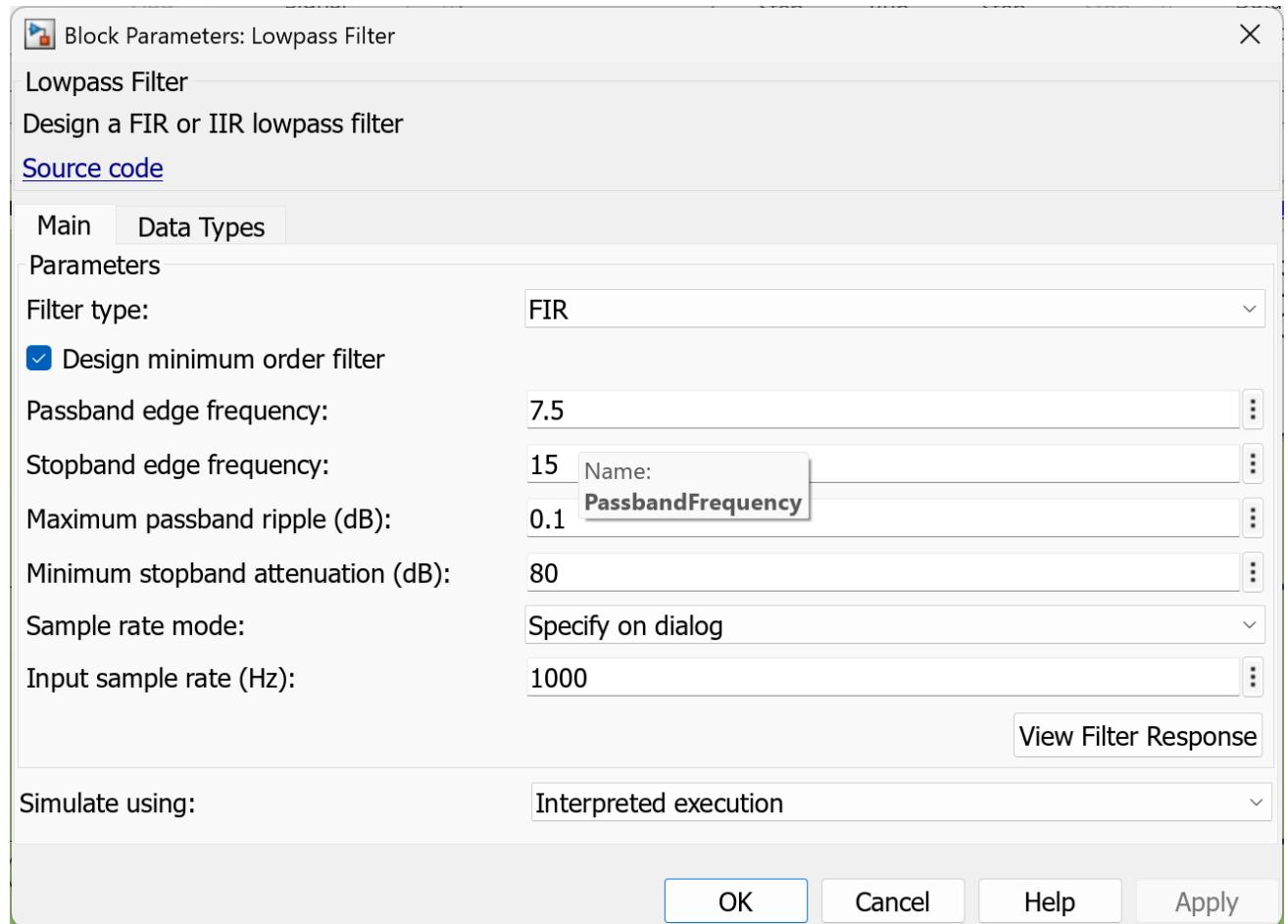
<https://www.germanatj.com/blog/determine-the-number-of-poles-by-motor-speed.html>

การ Set up Sensor

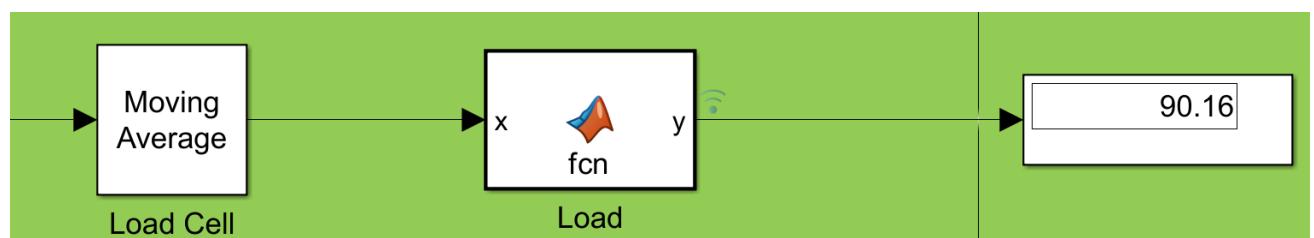
Encoder



เนื่องจากการความเร็วเชิงมุมที่ออกนั้นมี Nosie อญญาติวายจึงได้มีการทำ Fourier transform เพื่อดูว่าควรจะตั้ง cut off frequency ที่โดยเมื่อวิเคราะห์ได้มีการ Set up Lowpass Filter Block ดังนี้

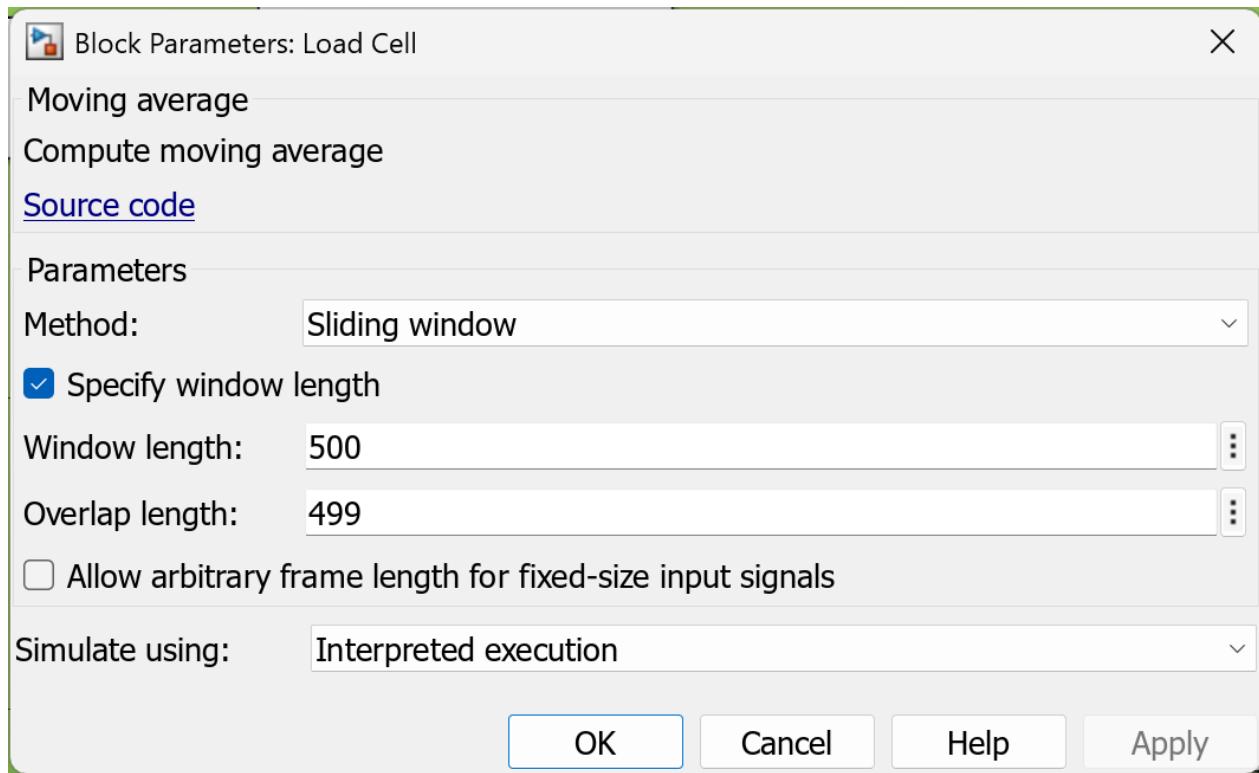


Load Cell



ได้มีการทำ signal conditioning ทั้งหมด 2 อย่าง Moving Average และ การทำ linearization

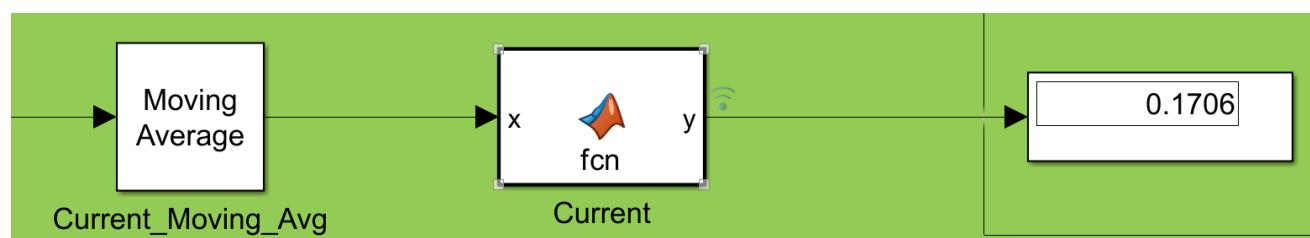
Set up ใน Moving Average



โปรแกรมภายใน MATLAB function

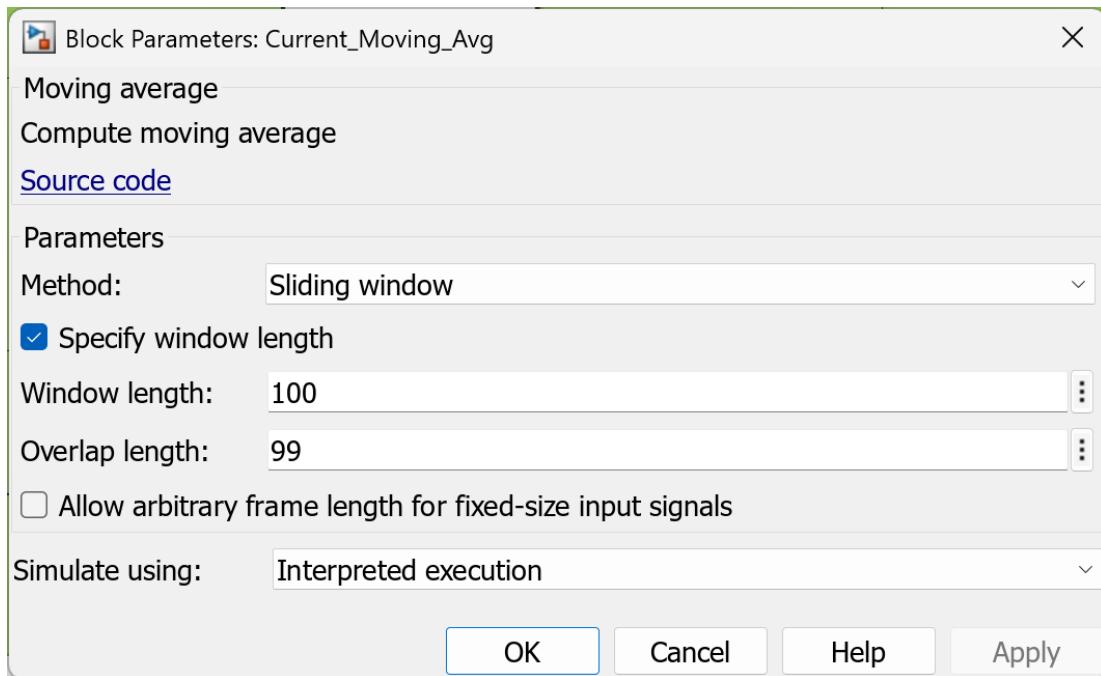
```
function y = fcn(x)
y= 0.2556*x-163.04-60;
```

Current Sensor



ได้มีการทำ signal conditioning ทั้งหมด 2 อย่าง Moving Average และ การทำ linearization

Set up ใน Moving Average



โปรแกรมภายใน MATLAB function

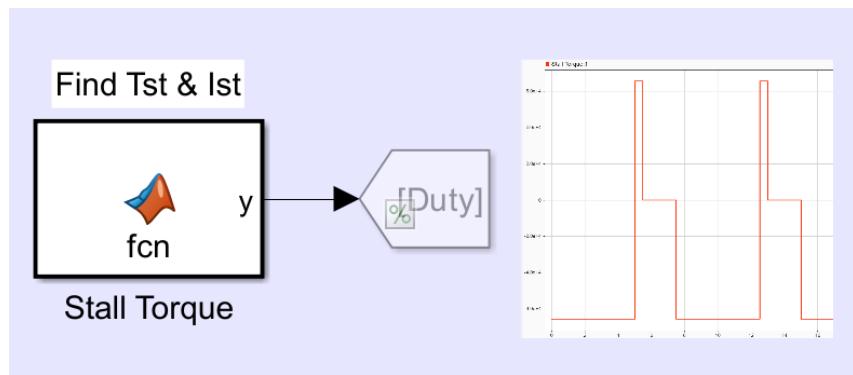
```
function y = fcn(x)
y= -0.0148*x+31.4+0.2;
```

LAB Brushed DC Motor

การทดลองที่ 1 Motor Characteristics ของ Brushed DC Motor

Ideal Case

Simulink สำหรับการหา Stall Torque และ Stall Current



โปรแกรมภายใน MATLAB function

```

function y = fcn()
% --- 1. ตั้งค่า Sample Time (สำคัญมาก!) ---
% ให้ใส่ค่า Fixed-step size ของโมเดลคุณที่นี่
Ts = 0.001; % <--- !!! ต้องเปลี่ยนค่านี้นะครับ !!!

% --- 2. ค่านิวนิจารณ์ Step ที่ต้องการสำหรับแต่ละสถานะ
STEPS_1 = round(5.0 / Ts); % 5 วินาที
STEPS_2 = round(0.5 / Ts); % 2 วินาที
STEPS_3 = round(2.0 / Ts); % 2 วินาที

val = -65536; % 2^16

% --- 3. สร้างตัวแปรเก็บสถานะ (State) และตัวนับ (Count
persistent state;
persistent counter;
persistent y_out; % <--- เพิ่มตัวแปรนี้เข้ามา

% --- 4. ตรวจสอบค่าเริ่มต้น (ถ้ายังไม่เคยรัน) ---
if isempty(state)
    % เริ่มต้นที่สถานะ 1
    state = 1;
    counter = 0;
    y_out = val; % <--- กำหนดค่าเริ่มต้นให้ y_out
end

% --- 5. ตรรกะ State Machine ---
switch state
    case 1 % --- สถานะที่ 1 ---
        y_out = val; % อัปเดต y_out
        counter = counter + 1;
        % ตรวจสอบว่าครบ 5 วิ หรือยัง
        if counter >= STEPS_1
            state = 2; % ไปสถานะ 2
            counter = 0; % รีเซ็ตตัวนับ
        end

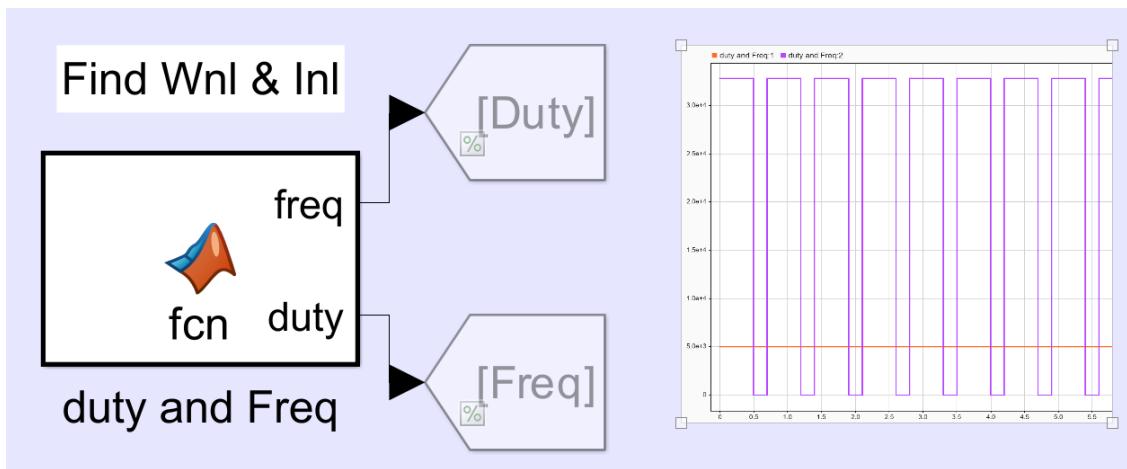
    case 2 % --- สถานะที่ 2 ---
        y_out = -val; % อัปเดต y_out
        counter = counter + 1;
        % ตรวจสอบว่าครบ 2 วิ หรือยัง
        if counter >= STEPS_2
            state = 3; % ไปสถานะ 3
            counter = 0; % รีเซ็ตตัวนับ
        end

    case 3 % --- สถานะที่ 3 ---
        y_out = 0; % อัปเดต y_out
        counter = counter + 1;
        % ตรวจสอบว่าครบ 2 วิ หรือยัง
        if counter >= STEPS_3
            state = 1; % วนกลับไปสถานะ 1
            counter = 0; % รีเซ็ตตัวนับ
        end
end

% --- 6. ส่งค่าออก (รับประกันว่า y มีค่าเสมอ) ---
y = y_out; % <--- 'y' จะถูกกำหนดค่าในบรรทัดนี้เสมอ|

```

Simulink สำหรับการหาความเร็วเชิงมุมแบบ No load



โปรแกรมภายใน MATLAB function

```

function [freq, duty] = fcn()
% --- 1. ตั้งค่าพื้นฐาน ---
% *** สำคัญมาก: ตั้งค่า Ts ให้ตรงกับ Fixed-step size ของโมเดล ***
Ts = 0.01; % ( เช่น 0.01, 0.001) ต้องตรงกับ Model Settings > Solver

% ค่าคงที่
FREQ_VAL = 5000;
DUTY_ON = 32768; % (2^16) * 0.5
DUTY_OFF = 0;
TOTAL_CYCLES = 10; % จำนวนรอบที่ต้องการวน

% --- 2. คำนวณจำนวน Step ที่ต้องนับ (อิงจาก Ts) ---
STEPS_ON = round(5.0 / Ts); % 5 วินาที
STEPS_OFF = round(2.0 / Ts); % 2 วินาที

% --- 3. สร้างตัวแปร persistent (ตัวแปรที่จำค่าตัวเองได้) ---
persistent state_duty; % สถานะ (1=ON, 2=OFF, 3=DONE)
persistent count_step; % ตัวนับ step ภายในสถานะ
persistent count_cycle; % ตัวนับรอบ (0 ถึง 9)

% ตัวแปรสำหรับ output (ป้องกัน error 'undefined')
persistent freq_out;
persistent duty_out;

% --- 4. Initialization (ทำงานครั้งเดียวตอนเริ่ม Simulation) ---
if isempty(state_duty)
    % กำหนดค่าเริ่มต้นทั้งหมด
    state_duty = 1; % เริ่มที่สถานะ ON
    count_step = 0; % เริ่มที่ step ที่ 0
    count_cycle = 0; % เริ่มที่รอบที่ 0

    % กำหนดค่า output เริ่มต้น
    freq_out = FREQ_VAL;
    duty_out = DUTY_ON;
end

```

```

% --- 5. State Machine หลัก ---
switch state_duty
    case 1 % --- สถานะ ON (5 วินาที) ---
        freq_out = FREQ_VAL;
        duty_out = DUTY_ON;

        count_step = count_step + 1;
        % ตรวจสอบว่าครม 5 วิ หรือยัง
        if count_step >= STEPS_ON
            state_duty = 2;      % เปลี่ยนไปสถานะ OFF
            count_step = 0;      % รีเซ็ตตัวนับ step
        end

    case 2 % --- สถานะ OFF (2 วินาที) ---
        freq_out = FREQ_VAL;
        duty_out = DUTY_OFF;

        count_step = count_step + 1;
        % ตรวจสอบว่าครม 2 วิ หรือยัง
        if count_step >= STEPS_OFF
            count_cycle = count_cycle + 1; % เพิ่มตัวนับรอบ (จน 1 รอบ)

            % ตรวจสอบว่าครม 10 รอบหรือยัง
            if count_cycle < TOTAL_CYCLES
                state_duty = 1;      % ยังไม่ครบ -> กลับไปสถานะ ON
            else
                state_duty = 3;      % ครบ 10 รอบแล้ว -> ไปสถานะ DONE
            end
            count_step = 0;      % รีเซ็ตตัวนับ step
        end

    case 3 % --- สถานะ DONE (หลังจากครบ 10 รอบ) ---
        % ค้างค่าสุดท้ายไว้ (freq=200, duty=0)
        % ไม่ต้องทำอะไร ปล่อยให้ค่า freq_out, duty_out เป็นค่าเดิม
        freq_out = FREQ_VAL;
        duty_out = DUTY_OFF;
end

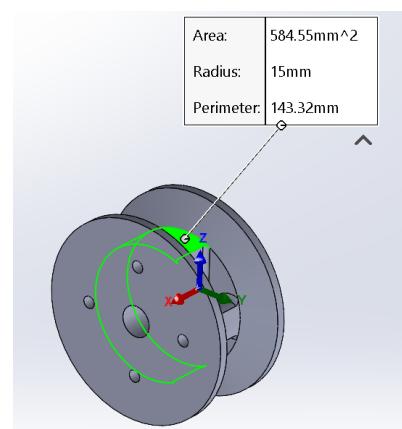
% --- 6. 送出 Output ---
% (รีเซ็ตประกันว่า freq และ duty มีค่าเสมอ)
freq = freq_out;
duty = duty_out;

```

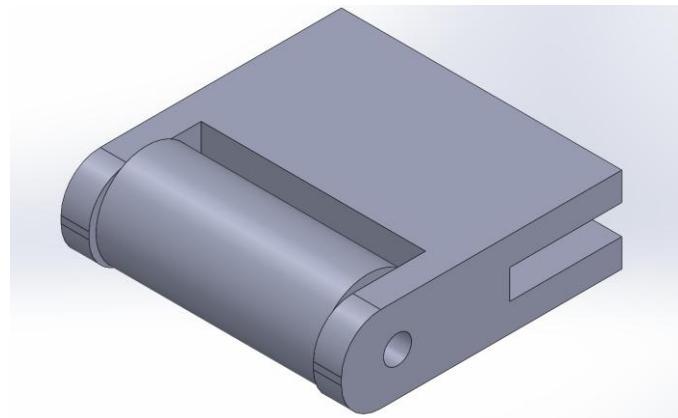
Experiment Case

Hardware Setup

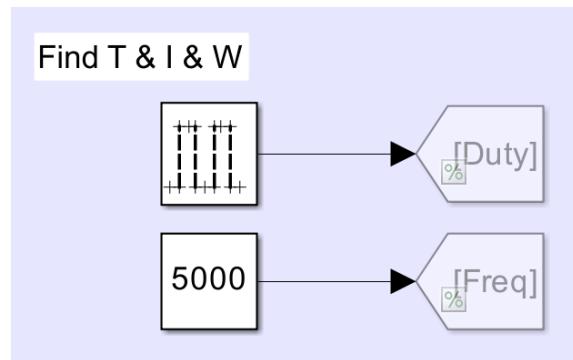
Pulley ที่ติดกับชีอก



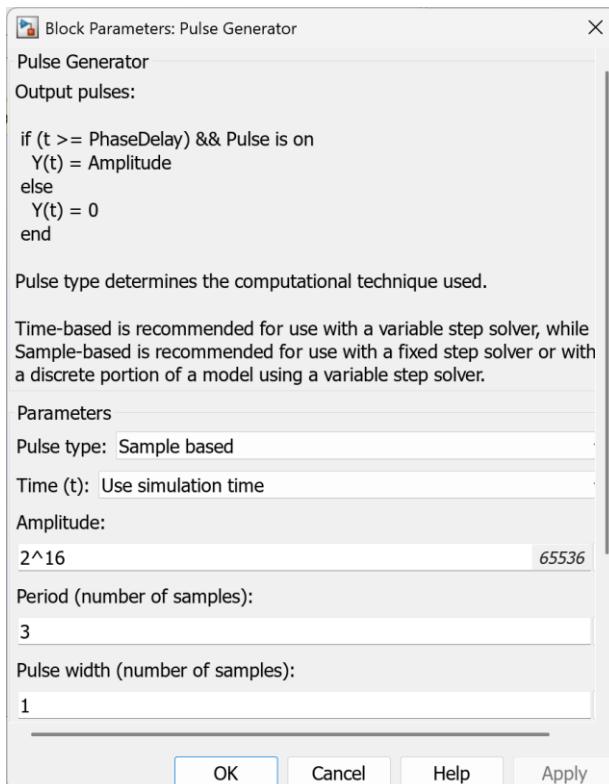
Idler ที่ช่วยประคองเข็อก



Simulink สำหรับการหาความเร็วเข็งมุมแบบ No load

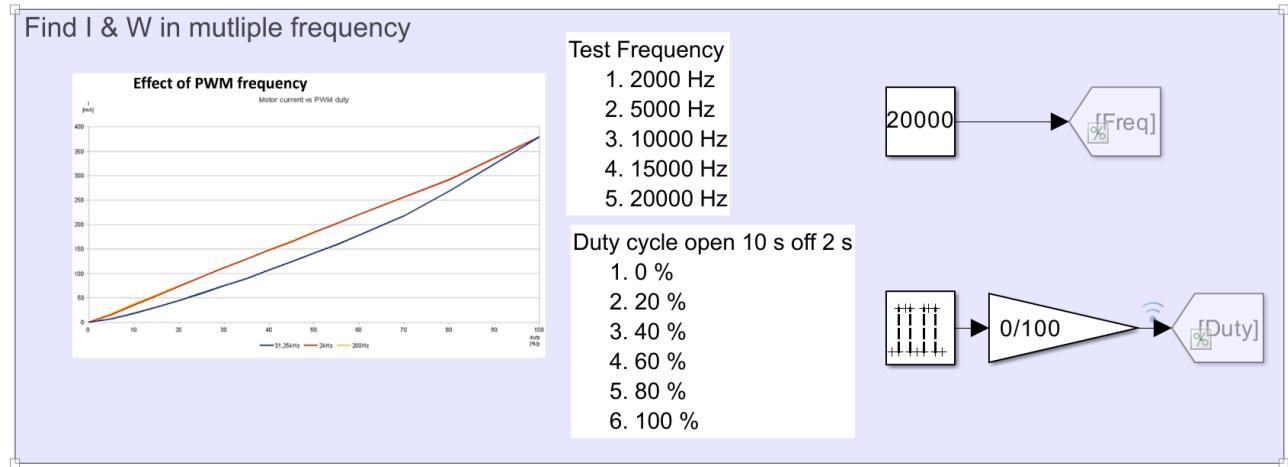


Set up ใน Pulse block

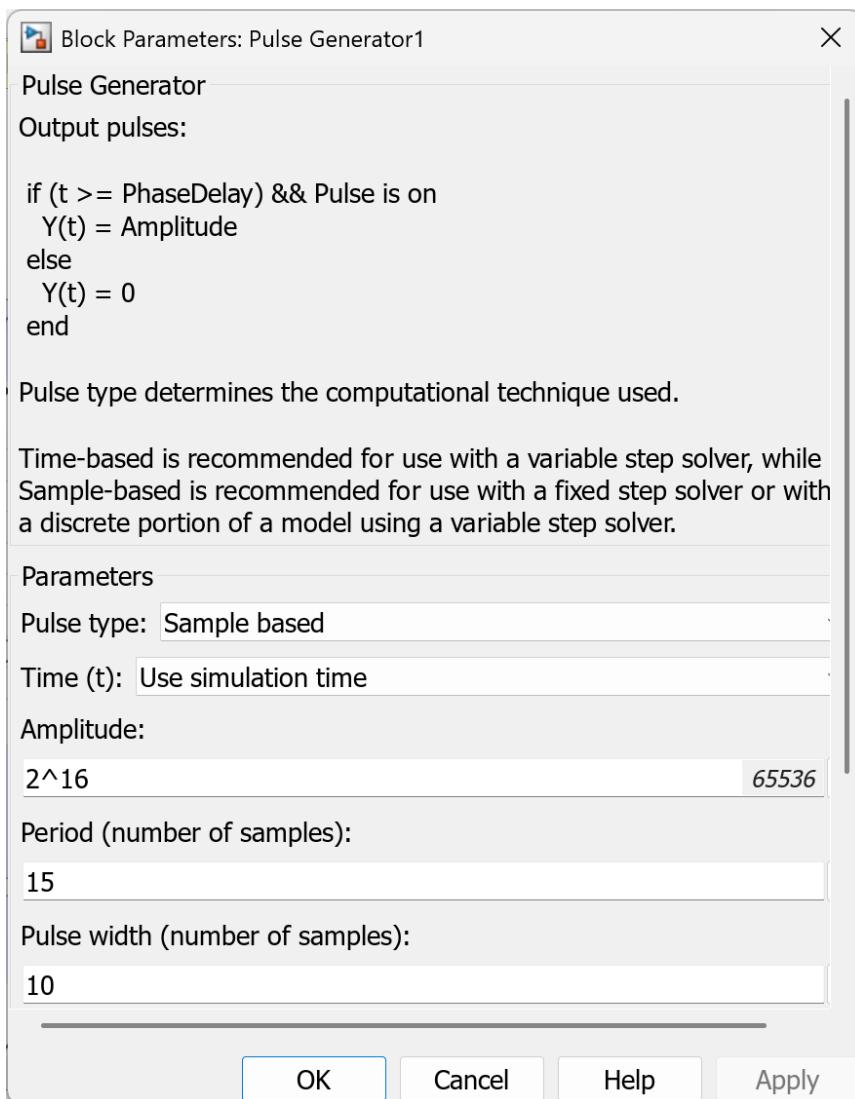


การทดลองที่ 2 พฤติกรรมของ Brushed DC Motor ภายใต้สัญญาณ PWM ที่ความถี่ต่างๆ

Simulink สำหรับการหาความเร็วเฉลี่ม และ Current เมื่อเปลี่ยน Frequency

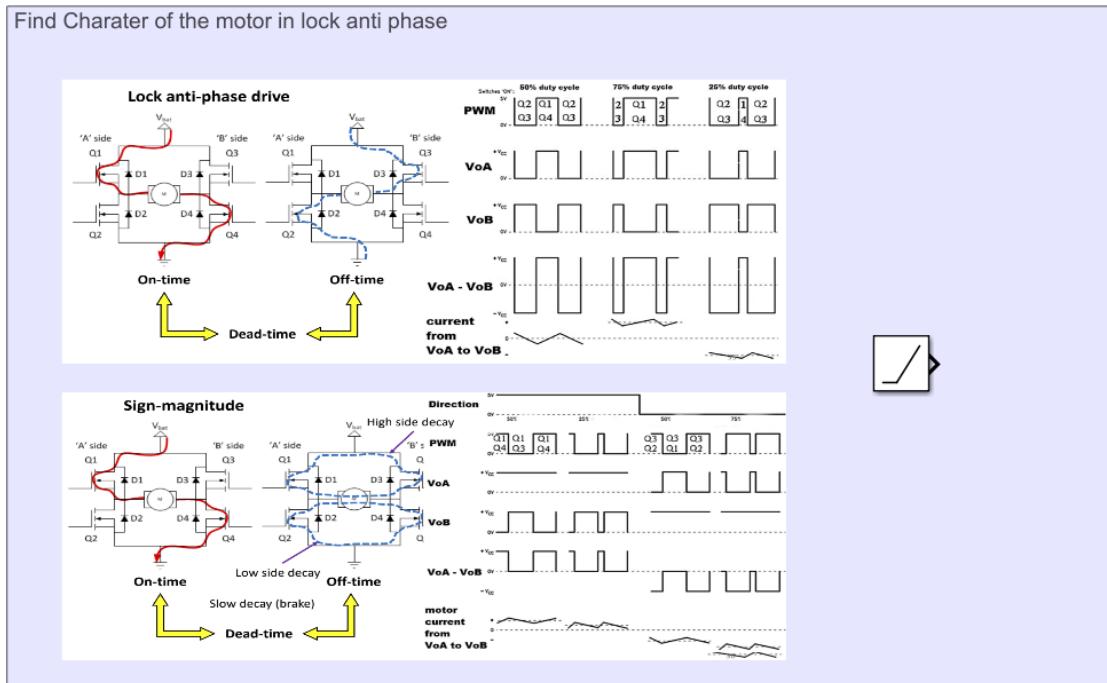


Set up ใน Pulse block

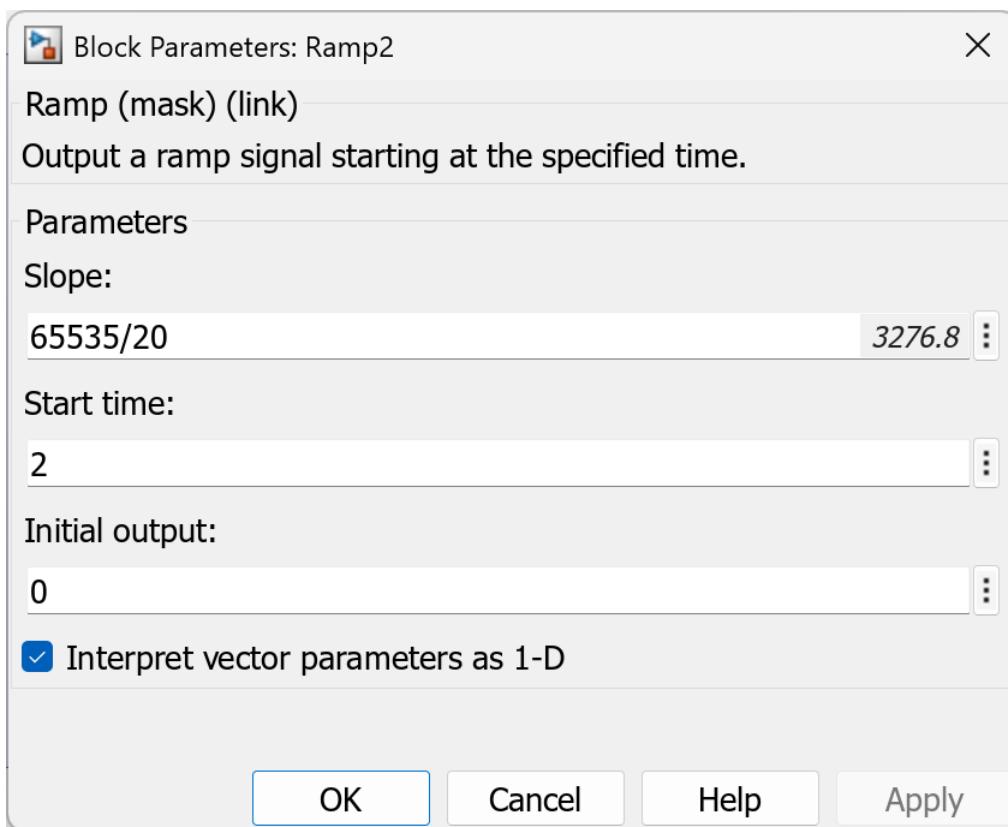


การทดลองที่ 3 Mode การทำงานของ DC Motor Driver

Simulink สำหรับการหาความเร็วเชิงมุม และ Current



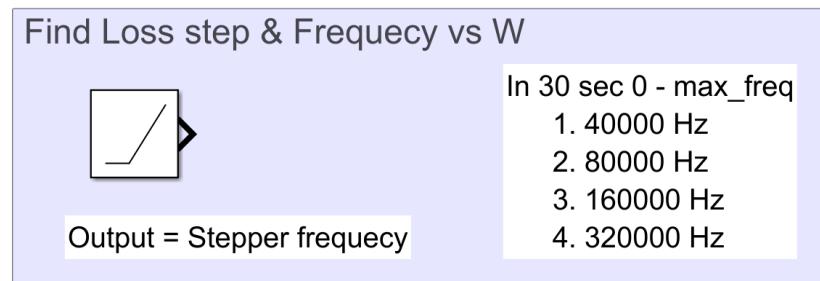
Set up ใน Ramp



Lab 2 Stepper Motor

การทดลองที่ 2 Mode การทำงานของ Stepper Motor และ ความรุ่งกับการเกิด Loss Step

Simulink สำหรับการหา Loss Step และ การหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและ Frequency



Set up ใน Ramp Block

