

RMXplorer

LAB2 : Brushed DC Motor and Stepper Report

สมาชิก

- นายศิริวัช ใจดี 66340500054
- นายภานุกร ชนปราชาญา 66340500066

วัตถุประสงค์

- เพื่อให้สามารถออกแบบการทดลองโดยใช้ทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ โดยประยุกต์ใช้ร่วมกับโปรแกรม MATLAB เพื่อเก็บผลการทดลอง วิเคราะห์ความเที่ยงตรง ความแม่นยำ ได้อย่างถูกต้อง และมีเหตุผลรองรับตรวจสอบความถูกต้องเทียบกับทฤษฎีที่น่าเชื่อถือ
- เพื่อให้สามารถอธิบายความสามารถในการรับรู้ปริมาณทางฟิสิกส์ของเซ็นเซอร์ทั้งหมดแต่ต้นจนจบกระบวนการได้ เช่น การอธิบายการวัดกระแสไฟฟ้าของ Current Sensor
- เพื่อให้สามารถกำหนดตัวแปรในการทดลองได้อย่างถูกต้องและสมเหตุสมผล ไม่ว่าจะเป็น ตัวแปรต้น ตัวแปรตาม ตัวแปรควบคุม รวมถึงอธิบายจุดประสงค์การทดลองและอธิบายสมมติฐานให้สอดคล้องกับตัวแปรที่กำหนด นิยามเชิงปฏิบัติการ และมีทฤษฎีที่น่ารองรับเชื่อถือ
- เพื่อให้สามารถออกแบบวิธีการทดลองเพื่อให้สอดคล้องกับผลการเรียนรู้ย่อยทั้งหมดอย่างถูกต้องตามหลักวิทยาศาสตร์ รวมทั้งบันทึกผล สรุปผล อภิปรายผล ตามความเป็นจริง มีกระบวนการทำข้อ อธิบายที่มาของผลการทดลองนั้นได้ โดยใช้อุปกรณ์ เครื่องมือไฟล์ Simulink, mlx ฯลฯ และชุดการทดลองที่ TA จัดเตรียมให้เบื้องต้น
- เพื่อให้สามารถเขียนรายงาน สัญลักษณ์ และสมการทางวิทยาศาสตร์ ได้อย่างถูกต้อง ทั้งขนาด และรูปแบบตัวอักษร การเว้นช่องไฟ การเว้นขอบกระดาษ การเว้นระยะพิมพ์ ให้ได้ระยะที่เหมาะสมตามหลักสากล

Brushed DC Motor

การทดลองที่ 1 การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมและหลักการทำงานของ Brushed DC Motor

จุดประสงค์

- เพื่อให้สามารถอธิบายหลักการทำงานของ DC Motor และความสามารถของ Motor Torque Constant และ Back EMF Constant ของ DC Motor ได้
- เพื่อให้สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของ Speed, Torque, Current, Power, %Efficiency ได้เมื่อ แรงดันเปลี่ยนไป
- เพื่อให้สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของ Speed, Torque, Current, Power, %Efficiency ได้ เมื่อ แรงดันไฟฟ้า Input จากการปรับ Duty Cycle, Frequency ของ PWM ที่จ่ายเข้า DC Motor เปลี่ยนแปลงไป
- เพื่อให้สามารถอธิบายกระบวนการ Signal Conditioning, Signal Processing ทั้งหมดได้ตั้งแต่ต้นจน จบกระบวนการ รวมถึงหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้จริงกับแรงดันไฟฟ้าที่ ออกมายจาก Hall Current Sensor และอธิบายกระบวนการ Unwrap ค่า

สมมติฐาน

- เมื่อแรงดันเปลี่ยนไป ค่าของ Speed, Torque, Current, Power, %Efficiency ก็จะเปลี่ยนไปด้วย
- เมื่อ Duty Cycle และ Frequency ของ PWM ที่จ่ายเข้า DC Motor เปลี่ยนไป ค่าของ Speed, Torque, Current, Power, %Efficiency ก็จะเปลี่ยนไปด้วย

ตัวแปร

ตัวแปรต้น

- ค่าความถี่หรือสัญญาณ PWM
- แรงดันขาเข้า

ตัวแปรตาม

- แรงบิดของมอเตอร์
- ความเร็วของมอเตอร์
- กระแสไฟฟ้าเข้ามอเตอร์

- %Efficiency ของมอเตอร์

ตัวแปรควบคุม

- Power Supply
- สภาพแวดล้อมอุณหภูมิในห้อง
- การตั้งค่าไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32G474RE

นิยามศัพท์เฉพาะ

- DC Motor : มอเตอร์ที่ใช้กระแสตรงในการหมุน ทำงานโดยการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล
- WCS1700 Hall Current Sensor : เซ็นเซอร์ที่ใช้วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอเตอร์
- H-Bridge : วงจรที่ใช้ในการควบคุมทิศทางของมอเตอร์ โดยการสลับการให้流ของกระแสไฟไปยังมอเตอร์
- Duty Cycle : สัดส่วนของเวลาที่สัญญาณ PWM อยู่ในสถานะ HIGH ซึ่งส่งผลต่อความเร็วของมอเตอร์

นิยามเชิงปฏิบัติการ

- Duty Cycle ของมอเตอร์ : ความยาวของการเปิดสัญญาณ PWM ระยะเวลาสูงสุดในหนึ่งช่วงเวลา โดยจะตั้งค่าความยาวของการเปิดปิดในค่าต่างๆ เพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์
- Torque ที่มอเตอร์ผลิต : แรงบิดที่มอเตอร์สามารถสร้างได้ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ โดยการวัดจากกระแสไฟที่ Hall Current Sensor วัดได้
- น้ำหนักที่โหลดเซลล์วัด : ค่าแรงที่มอเตอร์สามารถถกได้ วัดโดยโหลดเซลล์ที่ใช้ตรวจสอบน้ำหนัก
- แรงดันขาเข้า : แรงดันที่ Power Supply จ่ายเข้าตัวบอร์ด

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. DC Motor



รูปที่ 1 DC Motor

DC Motor หรือ มอเตอร์กระแสตรง (Direct Current Motor) เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ให้เป็นพลังงานกล ซึ่งมักใช้ในการหมุนเพลาหรือวัตถุในงานต่าง ๆ

DC Motor ทำงานโดยใช้หลักการทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Principle) ซึ่งเมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านชุดลวดในสนามแม่เหล็ก จะเกิดแรงแม่เหล็กที่ทำให้ชุดลวดหรือส่วนที่หมุน (Rotor) เกิดการเคลื่อนที่ โดยส่วนประกอบหลักที่สำคัญมีดังนี้:

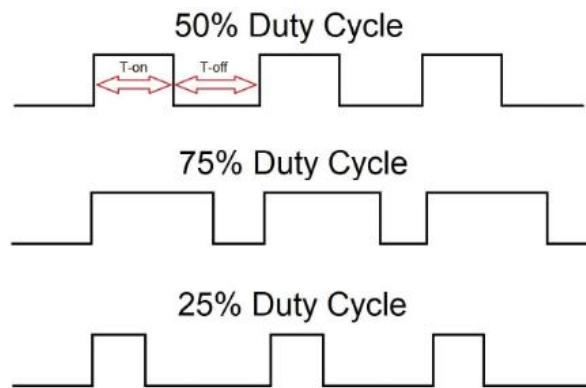
1. ส่วนหมุน (Rotor) หรือ Armature: เป็นส่วนที่หมุนได้ภายในมอเตอร์
2. สนามแม่เหล็ก (Magnetic Field): สามารถเกิดจากแม่เหล็กถาวรหรือชุดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า (Field Winding)
3. คอมมิวเตเตอร์ (Commutator): ทำหน้าที่เปลี่ยนทิศทางกระแสในชุดลวดเพื่อให้เกิดการหมุนต่อเนื่อง
4. แปรงถ่าน (Brush): ติดต่อกับคอมมิวเตเตอร์เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ชุดลวดใน Rotor
5. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Source): เป็นแหล่งพลังงานให้มอเตอร์

ประเภทของ DC Motor

1. Series DC Motor: ขดลวดสนามแม่เหล็กและขดลวด Armature ต่อแบบอนุกรม มีแรงบิดเริ่มต้นสูง
เหมาะสมกับงานที่ต้องการแรงบิดมาก เช่น รถไฟฟ้า
2. Shunt DC Motor: ขดลวดสนามแม่เหล็กและขดลวด Armature ต่อแบบขนาน มีความเร็วคงที่ เหมาะ
สำหรับงานที่ต้องการความเสถียร
3. Compound DC Motor: รวมคุณสมบัติของ Series และ Shunt เหมาะสำหรับงานที่ต้องการทั้งแรงบิด
สูงและความเร็วคงที่
4. Permanent Magnet DC Motor (PMDC): ใช้แม่เหล็กถาวรสักการสร้างสนามแม่เหล็ก มีขนาดเล็กและ
ประสิทธิภาพสูง ใช้ในอุปกรณ์พกพาหรือของเล่น

DC Motor มีข้อดีคือควบคุมง่ายและตอบสนองรวดเร็ว แต่ข้อเสียคือต้องการการบำรุงรักษาแปร่งถ่านและ
คอมมิวเตเตอร์ที่สีกหรือเมื่อใช้งานเป็นเวลานาน

2. Duty Cycle



รูปที่ 2 Duty Cycle

Duty Cycle หรือ รอบการทำงาน เป็นค่าที่แสดงสัดส่วนระหว่างช่วงเวลาที่อุปกรณ์หรือสัญญาณทำงาน (เปิด) กับ
ช่วงเวลาทั้งหมดของรอบการทำงานนั้น โดยปกติจะแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ ค่านี้มีความสำคัญในหลายสาขา เช่น
อิเล็กทรอนิกส์ การสื่อสาร และการใช้งานเครื่องจักร

การคำนวณ Duty Cycle:

$$\text{Duty Cycle}(\%) = (\text{เวลาที่ทำงาน} / \text{เวลารอบการทำงานทั้งหมด}) \times 100$$

ตัวอย่าง:

หากสัญญาณมีรอบการทำงานทั้งหมด 10 วินาที และในช่วงนี้สัญญาณเปิด (ทำงาน) เป็นเวลา 4 วินาที

$$\text{Duty Cycle} = (4 \text{ วินาที} / 10 \text{ วินาที}) \times 100 = 40\%$$

การประยุกต์ใช้:

- ในสัญญาณดิจิทัล: Duty Cycle แสดงสัดส่วนเวลาที่สัญญาณอยู่ในสถานะสูง (High) ต่อรอบการทำงานทั้งหมด เช่น สัญญาณที่มี Duty Cycle 50% หมายถึงสัญญาณอยู่ในสถานะสูงครึ่งหนึ่งของเวลาทั้งหมด
- ในเครื่องเชื่อมไฟฟ้า: Duty Cycle บ่งบอกระยะเวลาที่เครื่องสามารถทำงานต่อเนื่องได้ภายในช่วงเวลา 10 นาที เช่น เครื่องที่มี Duty Cycle 60% ที่กระแส 150 แอมป์ หมายความว่าสามารถเชื่อมต่อเนื่องได้ 6 นาที และต้องพัก 4 นาที เพื่อป้องกันความร้อนเกินและยืดอายุการใช้งานของเครื่อง

การทราบค่า Duty Cycle ช่วยในการวางแผนการใช้งานอุปกรณ์ให้เหมาะสม ป้องกันการทำงานเกินขีดจำกัดที่อาจทำให้อุปกรณ์เสียหายหรือมีอายุการใช้งานสั้นลง

3. การวัดแนวโน้มเข้าสู่ศูนย์กลาง

การวัดแนวโน้มเข้าสู่ศูนย์กลาง (Central Tendency) เป็นการหาค่ากลางที่ใช้แทนข้อมูลทั้งหมดในชุดข้อมูล เพื่อสรุปและอธิบายลักษณะทั่วไปของข้อมูลนั้น โดยการเลือกใช้ค่ากลางที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับลักษณะของข้อมูลและวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์ การวัดแนวโน้มเข้าสู่ศูนย์กลางช่วยให้เข้าใจลักษณะทั่วไปของข้อมูลและเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างชุดต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.1. การหาค่าเฉลี่ย

การหาค่าเฉลี่ย หรือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Arithmetic Mean) เป็นวิธีการหาค่ากลางของชุดข้อมูล เพื่อแสดงแนวโน้มของข้อมูลทั้งหมด โดยคำนวณจากผลรวมของข้อมูลทั้งหมด แล้วหารด้วยจำนวนข้อมูล

วิธีการคำนวณค่าเฉลี่ย:

1. รวมค่าของข้อมูลทั้งหมด: นำค่าของข้อมูลทุกตัวมาบวกกัน
2. หารด้วยจำนวนข้อมูล: นำผลรวมที่ได้มาหารด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมด

สูตรคำนวณ:

$$\text{ค่าเฉลี่ย} = (\text{ผลรวมของข้อมูลทั้งหมด}) / (\text{จำนวนข้อมูลทั้งหมด})$$

ตัวอย่าง:

หากมีข้อมูล 5 ค่า ได้แก่ 2, 4, 6, 8, และ 10

- ผลรวมของข้อมูล = $2 + 4 + 6 + 8 + 10 = 30$
- จำนวนข้อมูล = 5

$$\text{ดังนั้น ค่าเฉลี่ย} = 30 / 5 = 6$$

3.2. การหาค่าเฉลี่ยยกกำลังสอง

ค่าเฉลี่ยกำลังสอง หรือ Root Mean Square (RMS) เป็นการวัดทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา โดยเฉพาะในสัญญาณไฟฟ้าหรือคลื่น การคำนวณค่า RMS ช่วยให้เราเข้าใจขนาดเฉลี่ยของสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วิธีการคำนวณค่า RMS:

1. ยกกำลังสอง: นำค่าของข้อมูลแต่ละตัวมายกกำลังสอง
2. หาค่าเฉลี่ย: คำนวณค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ที่ได้จากการยกกำลังสอง
3. ถอดรากที่สอง: นำค่าที่ได้จากการยกกำลังสองมาถอดรากที่สอง

สูตรคำนวณ:

สำหรับชุดข้อมูลที่มี N ค่า คือ $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ค่า RMS สามารถคำนวณได้ดังนี้:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$$

การประยุกต์ใช้:

- วิศวกรรมไฟฟ้า: ใช้ในการวัดขนาดเฉลี่ยของแรงดันหรือกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกับค่าไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ได้อย่างถูกต้อง
- สถิติ: ใช้ในการวัดความแปรปรวนของข้อมูล โดยเฉพาะเมื่อข้อมูลมีหัวใจค่าบวกและลบ

การใช้ค่า RMS ช่วยลดผลกระทบจากค่าลับในชุดข้อมูล ทำให้สามารถวัดขนาดเฉลี่ยของข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงได้อย่างแม่นยำมากขึ้น

4. Back EMF Constant

Back EMF Constant หรือ ค่าคงที่ของแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ เป็นค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (Back EMF) ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์กับความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ โดยที่จะไปค่านี้มักถูกแทนด้วยสัญลักษณ์ K_e หรือ K_b และมีหน่วยเป็นโวลต์ต่อเรเดียนต่อวินาที ($V \cdot s/rad$) หรือโวลต์ต่อพันรอบต่อนาที ($V/krpm$)

ในมอเตอร์ไฟฟ้า เมื่อมีการหมุนของมอเตอร์ จะเกิดแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับที่มีค่าสัดส่วนกับความเร็วในการหมุนค่าคงที่นี้ช่วยให้เราสามารถคำนวณแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับที่เกิดขึ้นที่ความเร็วต่าง ๆ ได้ ซึ่งมีความสำคัญในการออกแบบและควบคุมมอเตอร์ เพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับที่สูงเกินไป

นอกจากนี้ ค่าคงที่ของแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับยังมีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ของแรงบิด (Torque Constant) ของมอเตอร์ ซึ่งสามารถใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. %Efficiency

%Efficiency หรือ เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพ เป็นการวัดประสิทธิภาพของระบบหรืออุปกรณ์ โดยแสดงเป็น เปอร์เซ็นต์ของพลังงานหรือผลลัพธ์ที่ได้รับจริงเมื่อเทียบกับพลังงานหรือผลลัพธ์ที่คาดหวังหรือป้อนเข้าไป

สูตรการคำนวณ:

$$\text{Efficiency}(\%) = \left(\frac{\text{ผลลัพธ์ที่ได้รับจริง}}{\text{ผลลัพธ์ที่คาดหวังหรือพลังงานที่ป้อนเข้า}} \right) \times 100$$

ความสำคัญของ %Efficiency:

- การประเมินประสิทธิภาพ: ช่วยในการประเมินว่าระบบหรืออุปกรณ์ทำงานได้ดีเพียงใด และมีการสูญเสียพลังงานหรือทรัพยากรในกระบวนการมากน้อยแค่ไหน
- การปรับปรุง: ช่วยระบุส่วนที่สามารถปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ลดการสูญเสีย และเพิ่มผลผลิต

หมายเหตุ:

- ประสิทธิภาพที่ 100% หมายถึงไม่มีการสูญเสียพลังงานหรือทรัพยากรเลย ซึ่งในทางปฏิบัติมักเป็นไปไม่ได้ เนื่องจากการสูญเสียที่เกิดขึ้นในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ความร้อน แรงเสียดทาน เป็นต้น
- การวัดประสิทธิภาพควรพิจารณาปัจจัยหลาย ๆ ด้านเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องและเป็นประโยชน์ในการปรับปรุงระบบหรืออุปกรณ์

6. Power

กำลัง (Power) ในทางฟิสิกส์ หมายถึงอัตราที่พลังงานถูกถ่ายโอนหรือแปลงสภาพต่อหน่วยเวลา หน่วยวัดในระบบหน่วยสากล (SI) คือ วัตต์ (W) ซึ่งเท่ากับหนึ่งจูลต่อวินาที

สูตรการคำนวณกำลัง:

$$P = \frac{E}{t}$$

โดยที่:

- P คือ กำลัง (วัตต์)
- E คือ พลังงาน (จูล)

- t คือ เวลา (วินาที)

ความสำคัญของกำลัง:

- การวัดประสิทธิภาพ: กำลังช่วยในการประเมินว่าอุปกรณ์หรือระบบสามารถทำงานได้มากน้อยเพียงใดในช่วงเวลาที่กำหนด
- การออกแบบระบบ: ในการออกแบบเครื่องจักรหรือระบบไฟฟ้า การคำนวณกำลังเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้แน่ใจว่าอุปกรณ์สามารถรองรับภาระงานได้อย่างเหมาะสม

หมายเหตุ:

- กำลังเป็นปริมาณสเกลาร์ ซึ่งหมายความว่ามีขนาดแต่ไม่มีทิศทาง
- ในระบบไฟฟ้า กำลังสามารถคำนวณได้จากผลคูณของแรงดันไฟฟ้า (โวลต์) และกระแสไฟฟ้า (แอม培ร์)

7. PWM

PWM (Pulse Width Modulation) หรือ การ-modulate ความกว้างพัลล์ เป็นเทคนิคที่ใช้ในการควบคุมพลังงานไฟฟ้าหรือสัญญาณอนาล็อกผ่านการปรับความกว้างของพัลส์ในสัญญาณดิจิทัล โดยการสลับสถานะระหว่างเปิด (HIGH) และปิด (LOW) อย่างรวดเร็ว การปรับความกว้างของพัลส์นี้ทำให้สามารถจำลองค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้า หรือกระแสไฟฟ้าได้ตามต้องการ

หลักการทำงานของ PWM:

- Duty Cycle: คือสัดส่วนของเวลาที่สัญญาณอยู่ในสถานะเปิด (HIGH) ต่อรอบเวลาทั้งหมด โดยคำนวณ เป็นเปอร์เซ็นต์ เช่น Duty Cycle 50% หมายถึงสัญญาณเปิด 50% และปิด 50% ของรอบเวลา การปรับ Duty Cycle จะเปลี่ยนค่าเฉลี่ยของสัญญาณที่ส่งออกมา

การประยุกต์ใช้ PWM:

- การควบคุมความเร็วมอเตอร์: ปรับความเร็วของมอเตอร์ DC โดยการเปลี่ยน Duty Cycle เพื่อควบคุม พลังงานที่ส่งไปยังมอเตอร์
- การหรีแสง LED: ปรับความสว่างของ LED โดยการเปลี่ยน Duty Cycle เพื่อควบคุมค่าเฉลี่ยของ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ LED
- การแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก (DAC): ใช้ PWM เพื่อสร้างสัญญาโนนาล็อกจากสัญญาณดิจิทัล
- การสื่อสารดิจิทัล: ใช้ PWM ในการส่งข้อมูลในระบบสื่อสารดิจิทัล

PWM เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพและประหยัดพลังงาน เนื่องจากการสลับสถานะเปิด-ปิดของสัญญาณทำให้การสัญญาณเสียงงานน้อยลง และสามารถควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้อย่างแม่นยำ

8. วัสดุและอุปกรณ์

8.1. Load Cell



รูปที่ 3 Load Cell

โหลดเซลล์ (Load Cell) คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงแรงหรือน้ำหนักที่กระทำต่อตัวมันให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า สัญญาณไฟฟ้านี้สามารถนำไปประมวลผลหรือแสดงผลเป็นค่าน้ำหนักหรือแรงที่กระทำได้

โหลดเซลล์มักประกอบด้วยสเตตเรนเกจ (Strain Gauge) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างหรือการยืดหุ้นของวัสดุ เมื่อมีแรงหรือน้ำหนักมากระทำ การเปลี่ยนแปลงนี้จะถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าผ่านวงจรวิชสถาโน บริดจ์ (Wheatstone Bridge)

ประเภทของโหลดเซลล์:

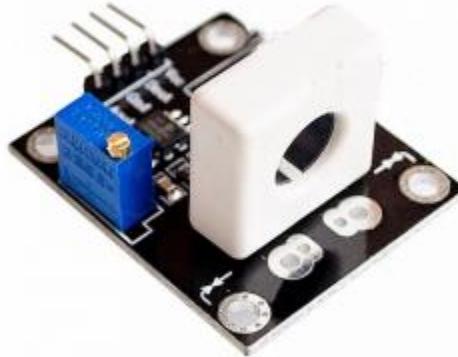
- โหลดเซลล์แบบสเตตเรนเกจ: ใช้สเตตเรนเกจในการวัดการเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง
- โหลดเซลล์แบบเพียวโซอิเล็กทริก: ใช้คุณสมบัติของวัสดุเพียวโซอิเล็กทริกในการสร้างสัญญาณไฟฟ้าเมื่อมีแรงกระทำ
- โหลดเซลล์แบบไฮดรอลิก: ใช้การเปลี่ยนแปลงของความดันในของเหลวในการวัดแรง
- โหลดเซลล์แบบนิวแมติก: ใช้การเปลี่ยนแปลงของความดันในอากาศในการวัดแรง

การประยุกต์ใช้:

โหลดเซลล์ถูกนำมาใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น

- เครื่องซั่งน้ำหนัก
- การวัดแรงในกระบวนการผลิต
- การทดสอบวัสดุ
- การควบคุมคุณภาพ

8.2. WCS1700 Hall Current Sensor



รูปที่ 4 WCS1700 Hall Current Sensor

WCS1700 เป็นเซ็นเซอร์กระแสไฟฟ้าแบบโซล์ (Hall Effect Current Sensor) ที่ใช้เทคโนโลยีโซล์ เอฟเฟกต์ในการวัดกระแสไฟฟ้า สามารถวัดกระแสไฟฟ้าได้ทั้งกระแสตรง (DC) และกระแสสลับ (AC) โดยไม่ต้องตัดวงจรหรือสัมผัสกับสายไฟ

คุณสมบัติหลักของ WCS1700:

- ช่วงการวัดกระแส: รองรับการวัดกระแสสูงสุดถึง 70 แอมเปอร์
- ความแม่นยำสูง: มีความแม่นยำในการวัดกระแส
- การติดตั้งง่าย: มีรูขนาด 9.0 มิลลิเมตรสำหรับการติดตั้งผ่านรู

- การซัดเซยอุณหภูมิ: มาพร้อมวงจรซัดเซยอุณหภูมิ เพื่อรักษาความแม่นยำในการวัดในสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

การประยุกต์ใช้งาน:

- การตรวจจับกระแสไฟฟ้า: ใช้ในการตรวจจับกระแสไฟฟ้าในระบบต่าง ๆ เช่น ระบบพลังงานทดแทนระบบไฟฟ้าในยานยนต์ และระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรม
- การป้องกันกระแสเกิน: ใช้ในการตรวจจับและป้องกันกระแสเกินในวงจรไฟฟ้า เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น
- การวัดกระแสในงานวิจัยและพัฒนา: ใช้ในการวัดกระแสไฟฟ้าในงานวิจัยและพัฒนาต่าง ๆ ที่ต้องการความแม่นยำสูง

WCS1700 เป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับการวัดกระแสไฟฟ้าในงานที่ต้องการความแม่นยำและความน่าเชื่อถือสูง

8.3 STM32G474RE



รูปที่ 5 STM32G474RE

STM32G474RE เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) จากตระกูล STM32G4 ของบริษัท STMicroelectronics ที่ใช้แกนประมวลผล ARM® Cortex®-M4 32 บิต ทำงานที่ความเร็วสูงสุด 170 MHz พร้อมหน่วยประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (DSP) และหน่วยประมวลผลฟlotติ้งพอยต์ (FPU) ซึ่งเหมาะสมสำหรับแอปพลิเคชันที่ต้องการประสิทธิภาพสูงและการประมวลผลสัญญาณ

คุณสมบัติหลักของ STM32G474RE:

- หน่วยความจำ:
 - Flash memory ขนาด 512 Kbytes
 - SRAM ขนาด 128 Kbytes
 - รองรับการเชื่อมต่อ กับหน่วยความจำภายนอกผ่าน FSMC (Flexible Static Memory Controller)
- พอร์ต I/O:
 - รองรับพอร์ต I/O ความเร็วสูงถึง 107 พอร์ต
 - รองรับการทำงานร่วมกับสัญญาณดิจิตอลและแอนะล็อก
- พอร์ตการสื่อสาร:
 - รองรับการสื่อสารหลายรูปแบบ เช่น CAN, I2C, SPI, UART/USART
 - รองรับการเชื่อมต่อ กับหน่วยความจำภายนอกผ่าน Quad-SPI
- ตัวแปลงสัญญาณ:
 - ADC ความละเอียด 12 บิต จำนวน 5 ตัว
 - DAC ความละเอียด 12 บิต จำนวน 7 ช่อง
 - ตัวแปลงสัญญาโนนาล็อกเป็นดิจิตอล (ADC) ความเร็วสูงถึง 5 Msps
- คุณสมบัติพิเศษ:
 - CORDIC accelerator สำหรับการคำนวณตรีโกณมิติ
 - FMAC (Filter Mathematical Accelerator) สำหรับการประมวลผลฟิลเตอร์
 - รองรับการทำงานในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิ -40°C ถึง 85°C

STM32G474RE เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ต้องการประสิทธิภาพสูง เช่น ระบบควบคุมมอเตอร์, ระบบสื่อสาร, และการประมวลผลสัญญาณดิจิตอลสำหรับการพัฒนาและทดลองใช้งาน STM32G474RE สามารถใช้บอร์ดพัฒนา STM32 Nucleo-G474RE ซึ่งรองรับการเชื่อมต่อ กับ Arduino และ ST morpho

8.4 Incremental Encoder AMT103-V



รูปที่ 6 Incremental Encoder AMT103-V

MT103-V เป็นอินครีเมนทัลโรเตารีเอ็นโคเดอร์ (Incremental Rotary Encoder) แบบโมดูลาร์ที่ใช้เทคโนโลยีแคปاكิติฟ (Capacitive) จากบริษัท Same Sky (เดิมคือ CUI Devices)

คุณสมบัติหลักของ AMT103-V:

- ความแม่นยำสูง: มีความแม่นยำในการวัดการหมุนของเพลาที่ดี
- ทนทานต่อสภาพแวดล้อม: ทนทานต่อฝุ่น สะปรก และน้ำมัน
- การติดตั้งง่าย: มีตัวเลือกขนาดเพลาหลายขนาด (2 มม. ถึง 8 มม.) และฐานรองที่มีรูยึดหลายแบบ เพื่อรองรับมอเตอร์ที่หลากหลาย
- การปรับความละเอียด: สามารถปรับความละเอียดได้ผ่านสวิตช์ DIP บนบอร์ด โดยมีความละเอียดตั้งแต่ 48 ถึง 2048 PPR (Pulses Per Revolution)
- ช่วงอุณหภูมิการทำงาน: ทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิ -40°C ถึง +100°C
- การใช้พลังงานต่ำ: ใช้กระแสไฟฟ้าต่ำ

- การติดตั้ง: มีรุ่นที่มีการติดตั้งแบบขวาง (Axial) และแบบตรง (Radial) เพื่อความยืดหยุ่นในการใช้งาน AMT103-V เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการความแม่นยำสูงและทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่มีฝุ่น สาปกร และน้ำมัน เช่น ระบบควบคุมมอเตอร์ ระบบอัตโนมัติในอุตสาหกรรม และเครื่องจักรที่ต้องการการวัดการหมุนที่แม่นยำ

8.5 Cytron MDD20A Motor Driver



รูปที่ 7 Cytron MDD20A Motor Driver

Cytron MDD20A เป็นไดเรเวอร์มอเตอร์ DC แบบสองช่องสัญญาณที่ออกแบบมาเพื่อควบคุมมอเตอร์ DC ที่มีแปรงถ่าน (Brushed DC Motors) กำลังสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ รองรับแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 6V ถึง 30V และสามารถรับกระแสสูงสุด 20A ต่อช่องสัญญาณ

คุณสมบัติหลักของ MDD20A:

- การควบคุมทิศทางสองทิศทาง: สามารถควบคุมมอเตอร์ DC ที่มีแปรงถ่านสองตัวได้อย่างอิสระ
- แรงดันไฟฟ้าทำงาน: รองรับแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 6V ถึง 30V
- กระแสสูงสุดต่อช่องสัญญาณ: รองรับกระแสสูงสุด 20A ต่อช่องสัญญาณ
- การป้องกัน: มีระบบป้องกันกระแสเกิน (Overcurrent Protection) และการป้องกันอุณหภูมิสูง (Overtemperature Protection) เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น
- อินพุต PWM และ DIR: รองรับการควบคุมด้วยสัญญาณ PWM และ DIR ที่มีช่วงแรงดันอินพุตตั้งแต่ 1.8V ถึง 12V
- การทดสอบด้วยปุ่มและ LED: มาพร้อมปุ่มสำหรับการทดสอบและ LED แสดงสถานะการทำงานของมอเตอร์
- ความถี่ PWM: รองรับความถี่ PWM ได้ถึง 20kHz

- การป้องกันแรงดันต่ำ: มีระบบป้องกันการทำงานเมื่อแรงดันไฟฟ้าต่ำเกินไป

MDD20A เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการควบคุมมอเตอร์ DC กำลังสูง เช่น ระบบหุ่นยนต์อัตโนมัติ (AGV), ระบบติดตามแสงอาทิตย์ (Solar Tracker), และเครื่องจักรอัตโนมัติ

วิธีดำเนินการทดลอง

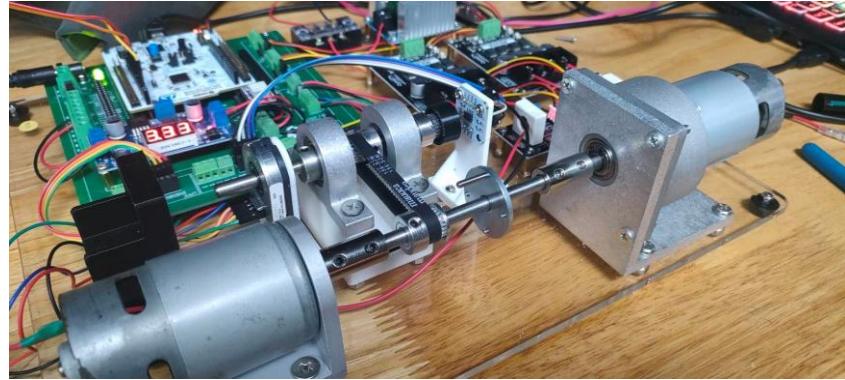
ในการทดลองเพื่อศึกษาพัฒนาระบบและหลักการทำงานของ DC Motor ได้ทำการทดลองโดยใช้ Incremental Encoder รับสัญญาณที่มาจากการหมุน DC motor เพื่ออ่านค่าความไว ในการปรับแรงดันในแต่ละระดับ โดยทำการปรับค่าสัญญาณที่รับใน Simulink จากสัญญาณ Bit เป็น rpm โดยค่าจะถูกเก็บไว้ใน Workspace โดยอีกส่วนนั้นจะอ่านค่า Current ได้จาก Power Supply และนำค่าจากสองส่วนนี้มาคำนวณเพื่อหา Power และ %Efficiency ต่อไป

อุปกรณ์การทดลอง

1. Nidec Components Geared DC Geared Motor,	
12 V dc, 20 Ncm, 70 rpm, 6mm Shaft Diameter	จำนวน 1 อัน
2. Incremental Encoder AMT103-V	จำนวน 1 อัน
3. Warner Electric Magnetic Particle Clutches MPB12	จำนวน 1 อัน
4. WCS1700 Hall Current Sensor	จำนวน 1 อัน
5. Cytron MDD20A Motor Driver	จำนวน 1 อัน
6. Nucleo STM32G474RE พร้อมสายอัปโหลด	จำนวน 1 ชุด
7. MotorXplorer	จำนวน 1 ชุด

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เชื่อมต่อ Incremental Encoder AMT 103-V กับ Analog Pin, VCC และ Ground บน STM32G474RE ด้วยสายจัมเปอร์



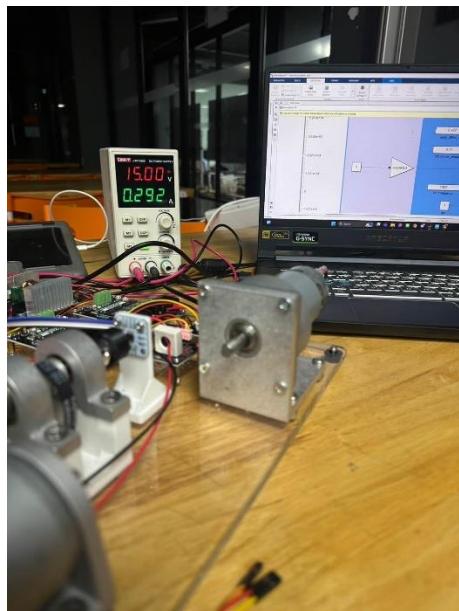
รูปที่ 8 การติดตั้งบอร์ดสำหรับการทดลอง

2. การปรับจูนค่าของ DC Motor ให้มีแรงดันตรงกับในโปรแกรม Simulink
3. ทำการเก็บค่าความเร็วรอบ โดยได้จากแรงดัน 0-3.3 V โดยเพิ่มทีละ 0.5 V โดยเก็บค่าที่อ่านได้จาก Simulink นำไปใส่ตารางระดับละ 500 ค่า
4. ทำการเก็บค่า Torque โดยได้จากแรงดัน 0-3.3 V โดยเพิ่มทีละ 0.5 V โดยเก็บค่าที่อ่านได้จาก Simulink นำไปใส่ตารางระดับละ 500 ค่า
5. นำค่าที่ได้ทั้งหมดมาทำการหาค่าเฉลี่ยยกกำลังสอง สังเกตและบันทึกผล
6. ทำการเก็บค่า Current จาก Power Supply โดยได้จากแรงดัน 0-3.3 V โดยเพิ่มทีละ 0.5 V สังเกตและบันทึกผล

ผลการทดลอง

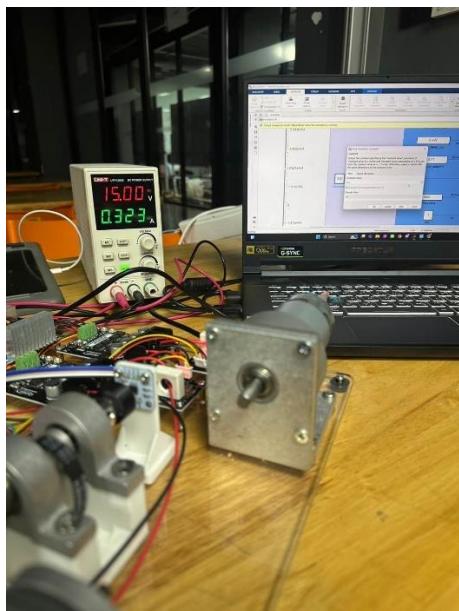
1. Current ที่อ่านได้จาก Power Supply

- ที่ 0 V



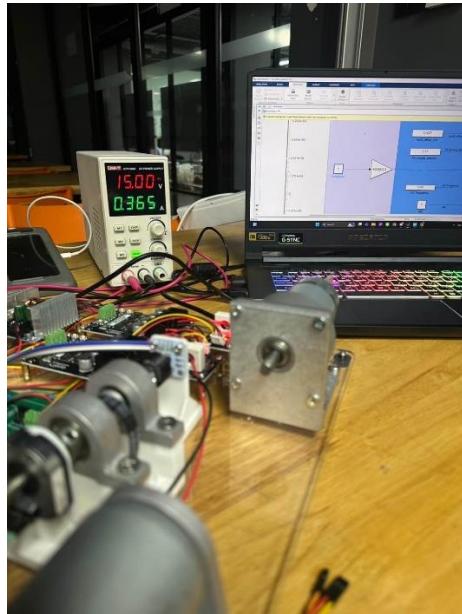
รูปที่ 9 Current ที่อ่านได้จากระดับแรงดัน 0 V

- ที่ 0.5 V



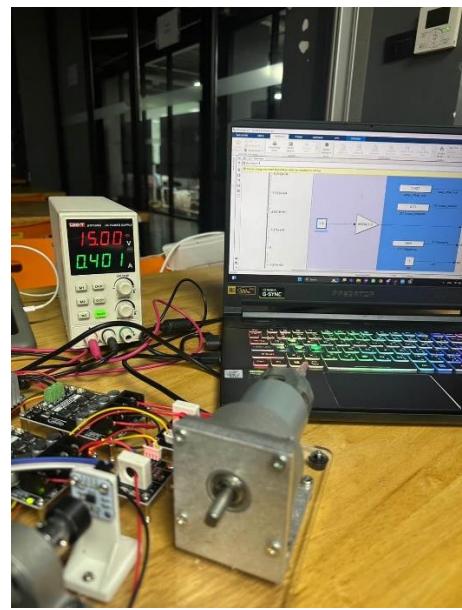
รูปที่ 10 Current ที่อ่านได้จากระดับแรงดัน 0.5 V

- ที่ 1 V



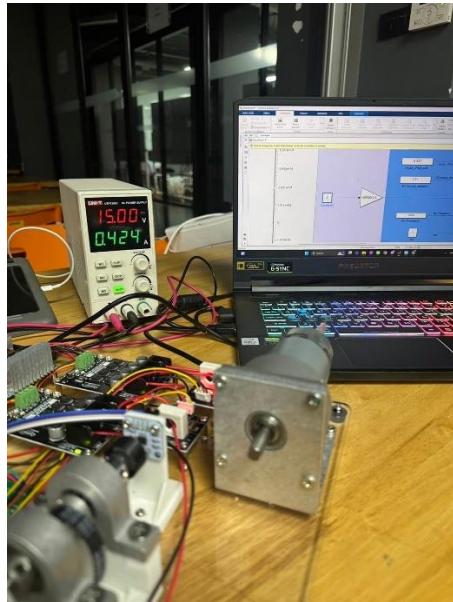
รูปที่ 11 Current ที่อ่านได้จากการตั้งแรงดัน 1 V

- ที่ 1.5 V



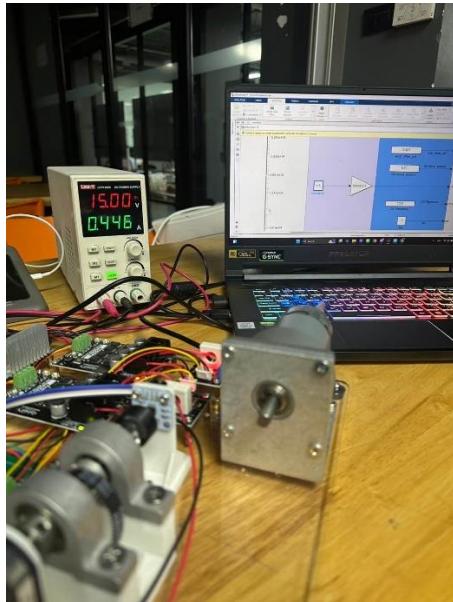
รูปที่ 12 Current ที่อ่านได้จากการตั้งแรงดัน 1.5 V

- ที่ 2 V



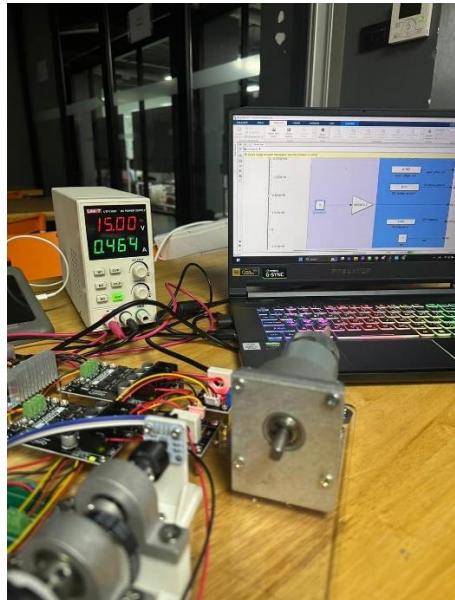
รูปที่ 13 Current ที่อ่านได้จากระดับแรงดัน 2 V

- ที่ 2.5 V



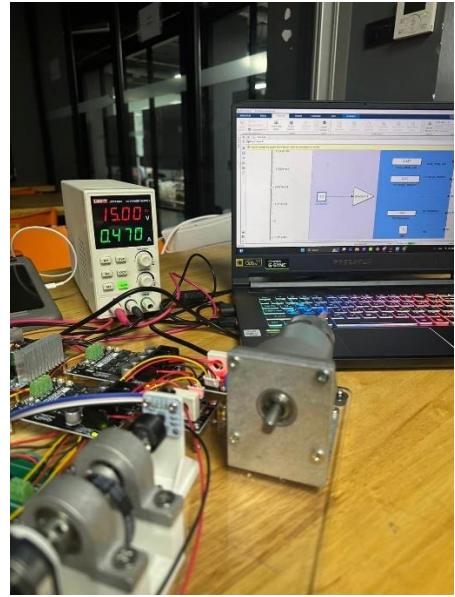
รูปที่ 14 Current ที่อ่านได้จากระดับแรงดัน 2.5 V

- ที่ 3 V

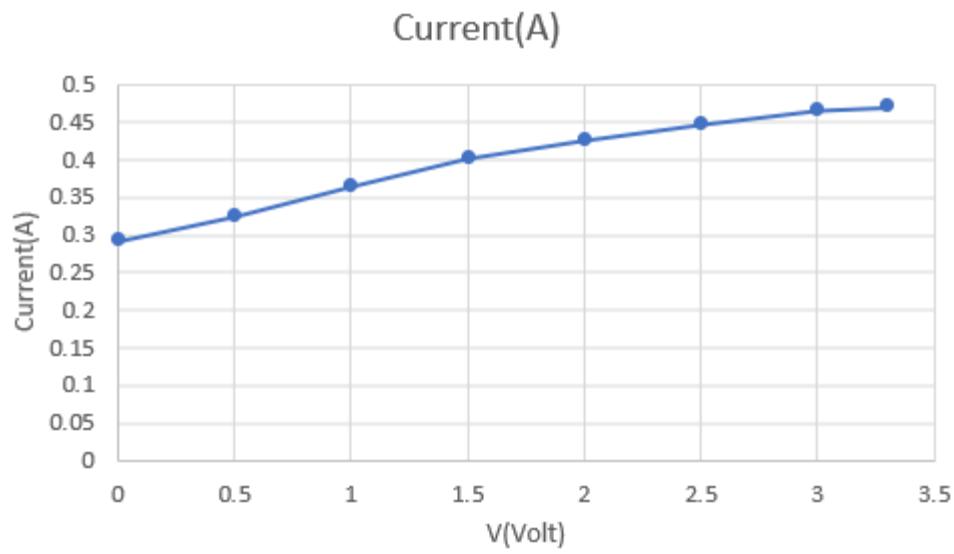


รูปที่ 15 Current ที่อ่านได้จากระดับแรงดัน 3 V

- ที่ 3.3 V



รูปที่ 16 Current ที่อ่านได้จากระดับแรงดัน 3.3 V

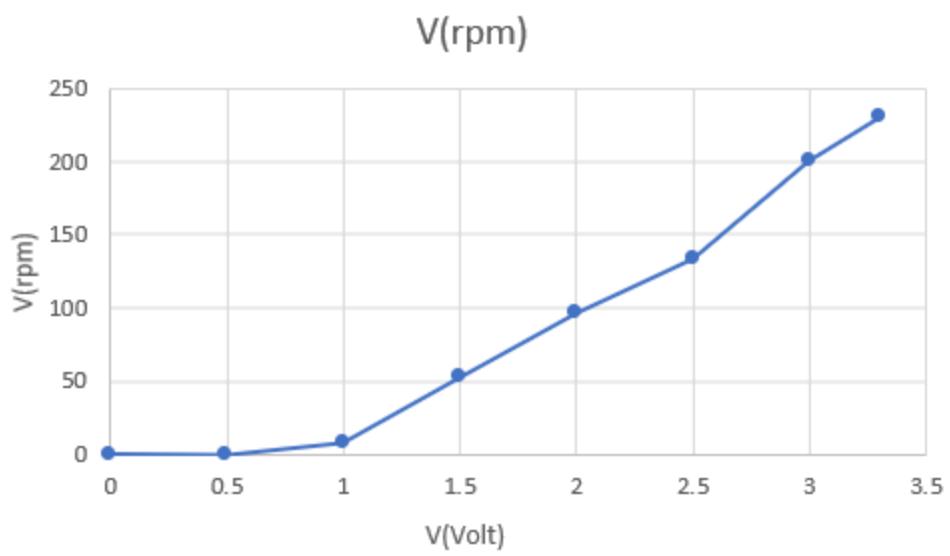


รูปที่ 17 กราฟ Current เมื่อเทียบกับแรงดัน

2. ความเร็วรอบที่อ่านได้จากโปรแกรม

V(Volt)	V(rpm)
0	0
0.5	0.225495
1	7.765011
1.5	52.77814
2	96.07936
2.5	133.9902
3	200.3272
3.3	230.0128

ตารางที่ 1 แรงดันเมื่อเทียบกับความเร็ว

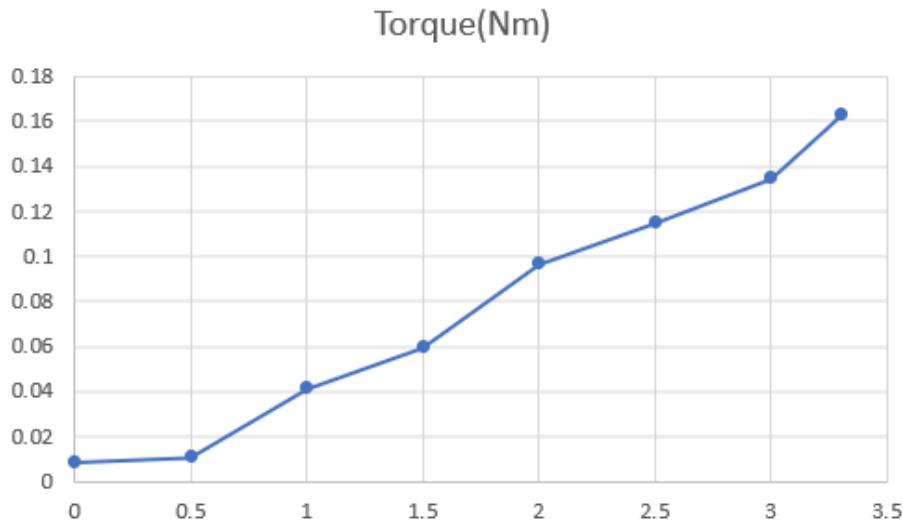


รูปที่ 18 กราฟแรงดันเมื่อเทียบกับความเร็ว

3. ค่า Torque ที่อ่านได้จากโปรแกรม

V(Volt)	Torque(Nm)
0	0.008132
0.5	0.010374
1	0.041364
1.5	0.059057
2	0.096745
2.5	0.11476268
3	0.13441
3.3	0.16236

ตารางที่ 2 แรงดันเมื่อเทียบกับ Torque



รูปที่ 19 กราฟแรงดันเมื่อเทียบกับ Torque

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมและหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแปรรูป (Brushed DC Motor) พบว่า เมื่อปรับระดับแรงดันไฟฟ้า ความเร็วรอบ (Speed) ค่าแรงบิด (Torque) และกระแสไฟฟ้า (Current) จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยมีความสัมพันธ์เป็นกราฟกึ่งเส้นตรง ยกเว้นในช่วงที่แรงดันไฟฟ้ายังไม่ถึง 1 โวลต์ ซึ่งความเร็วรอบยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

การเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบและแรงบิดตามลำดับนี้สอดคล้องกับหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแปรรูป ที่ความเร็วรอบจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ และแรงบิดจะเพิ่มขึ้นตามกระแสไฟฟ้าที่ให้ผ่านมอเตอร์

สรุปได้ว่า มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแปรรูปมีพฤติกรรมที่ความเร็วรอบและแรงบิดเพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า โดยมีความสัมพันธ์เป็นกราฟกึ่งเส้นตรง ยกเว้นในช่วงที่แรงดันไฟฟ้ายังไม่ถึง 1 โวลต์ ซึ่งความเร็วรอบยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

อภิปรายผลการทดลอง

- ความเร็วรอบ (Speed): ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแปรรูปถ่านมีความสัมพันธ์โดยตรงกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ เมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ความเร็วรอบของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม ในช่วงที่แรงดันไฟฟ้ายังไม่ถึง 1 โวลต์ ความเร็วรอบยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง อาจเนื่องมาจากมอเตอร์ยังคงหมุนได้แม้จะมีแรงดันไฟฟ้าต่ำ และแรงเสียดทานภายในมอเตอร์ยังไม่ส่งผลกระหบมากนัก
- แรงบิด (Torque): แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแปรรูปถ่านมีความสัมพันธ์โดยตรงกับกระแสไฟฟ้าที่แหล่งผ่านมอเตอร์ เมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แรงบิดจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับสมการ $T = Kt * I$ ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด (T) กับกระแสไฟฟ้า (I) โดยที่ Kt เป็นค่าคงที่ของมอเตอร์
- กระแสไฟฟ้า (Current): กระแสไฟฟ้าที่แหล่งผ่านมอเตอร์มีความสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าและความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น กระแสไฟฟ้าที่แหล่งผ่านมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เพื่อรักษาความเร็วรอบที่ต้องการ

สรุปได้ว่า มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแปรรูปถ่านมีพฤติกรรมที่ความเร็วรอบและแรงบิดเพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า โดยมีความสัมพันธ์เป็นกราฟกึ่งเส้นตรง ยกเว้นในช่วงที่แรงดันไฟฟ้ายังไม่ถึง 1 โวลต์ ซึ่งความเร็วรอบยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

ข้อเสนอแนะ

ควรออกแบบการทดลองให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ตั้งแต่การตั้งค่าบอร์ด ควรอยู่ในสภาพที่เท่ากับโปรแกรมที่ตั้งไว้จะช่วยลดผลกระทบคลาดเคลื่อน และในส่วนของการเก็บผลการทดลองควรที่จะเก็บผลได้อย่างละเอียดมากกว่านี้ เพื่อจ่ายต่อการวิเคราะห์และสรุปผลต่อไป

เอกสารอ้างอิง

<https://www.walmart.com/ip/DC-Motor-12V-11000-12000RPM-0-8A-Electric-Motor-Round-Shaft/146496637>

<http://products.carolinascaling.com/viewitems/rice-lake-load-cells-2/rl1380-stainless-steel-single-point-load-cells>

<https://www.firgelliauto.com/blogs/news/what-is-a-duty-cycle-in-a-linear-actuator>

<https://www.flyrobo.in/wcs1700-hall-current-sensor-with-over-current-protection>

https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-g474re.html?widgetSearchBar=STM32G4&widgetSearchAction=1&_charset_=UTF-8&filter-search=products

https://www.automationdirect.com/adc/shopping/catalog/sensors_z_encoders/encoders/modular_kit_encoders_for_stepper_motors/amt103-v

<https://botland.store/motor-drivers-modules/18881-cytron-mdd20a-two-channel-motor-driver-30v20a-5904422384180.html>

การทดลองที่ 2 การทดลองศึกษาพฤติกรรมเมื่อ Load Torque ของ Brushed DC Motor เปลี่ยนแปลงไป จุดประสงค์

- เพื่อให้สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของ Speed, Torque, Current, Power, %Efficiency ได้ เมื่อ Load Torque ที่กระทำต่อ DC motor ที่ปรับ Load Torque ด้วย Magnetic Particle Clutches เปลี่ยนแปลงไป

สมมติฐาน

- เมื่อมีแรงบิดมากระทำกับตัว DC Motor จะทำให้ความเร็วนั้นมีค่าลดลง
- ที่แรงบิดสูงสุดกระและจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันที่จ่ายเข้า
- เมื่อความเร็วสูงขึ้นค่าที่วัดได้จาก Load Torque จะสูงขึ้น

ตัวแปร

ตัวแปรต้น

- ค่าความถี่หรือสัญญาณ PWM
- แรงดันขาเข้า
- Load Torque

ตัวแปรตาม

- น้ำหนักที่โหลดเซลล์วัดได้
- แรงบิดของมอเตอร์
- กระแสไฟฟ้า

ตัวแปรควบคุม

- แหล่งจ่ายไฟ
- Load cell
- สภาพแวดล้อมอุณหภูมิในห้อง
- การตั้งค่าไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32G474RE

นิยามศัพท์เฉพาะ

- DC Motor : มอเตอร์ที่ใช้กระแสตรงในการหมุน ทำงานโดยการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล
- WCS1700 Hall Current Sensor : เซ็นเซอร์ที่ใช้วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอเตอร์
- H-Bridge : วงจรที่ใช้ในการควบคุมทิศทางของมอเตอร์ โดยการสลับการไหลของกระแสไปยังมอเตอร์
- Duty Cycle : สัดส่วนของเวลาที่สัญญาณ PWM อยู่ในสถานะ HIGH ซึ่งส่งผลต่อความเร็วของมอเตอร์

นิยามเชิงปฏิบัติการ

- Duty Cycle ของมอเตอร์ : ความยาวของการเปิดสัญญาณ PWM ระยะเวลาสูงสุดในหนึ่งช่วงเวลา โดยจะตั้งค่าความยาวของการเปิดปิดในค่าต่างๆ เพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์
- Torque ที่มอเตอร์ผลิต : แรงบิดที่มอเตอร์สามารถสร้างได้ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ โดยการวัดจากกระแสไฟที่ Hall Current Sensor วัดได้
- น้ำหนักที่โหลดเซลล์วัด : ค่าแรงที่มอเตอร์สามารถกดได้ วัดโดยโหลดเซลล์ที่ใช้ตรวจสอบน้ำหนัก
- แรงดันขาเข้า : แรงดันที่ Power Supply จ่ายเข้าตัวบอร์ด

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

9. DC Motor



รูปที่ 20 DC Motor

DC Motor หรือ มอเตอร์กระแสตรง (Direct Current Motor) เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ให้เป็นพลังงานกล ซึ่งมักใช้ในการหมุนเพลาหรือวัตถุในงานต่าง ๆ

DC Motor ทำงานโดยใช้หลักการทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Principle) ซึ่งเมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดในสนามแม่เหล็ก จะเกิดแรงแม่เหล็กที่ทำให้ขดลวดหรือส่วนที่หมุน (Rotor) เกิดการเคลื่อนที่ โดยส่วนประกอบหลักที่สำคัญมีดังนี้:

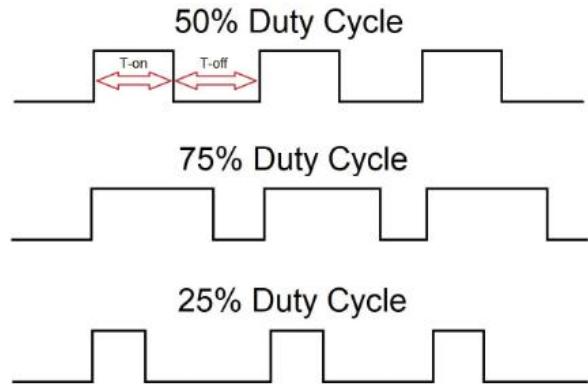
6. ส่วนหมุน (Rotor) หรือ Armature: เป็นส่วนที่หมุนได้ภายในมอเตอร์
7. สนามแม่เหล็ก (Magnetic Field): สามารถเกิดจากแม่เหล็กถาวรหรือขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า (Field Winding)
8. คอมมิวเตเตอร์ (Commutator): ทำหน้าที่เปลี่ยนทิศทางกระแสในขดลวดเพื่อให้เกิดการหมุนต่อเนื่อง
9. แปรงถ่าน (Brush): ติดต่อกับคอมมิวเตเตอร์เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ขดลวดใน Rotor
10. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Source): เป็นแหล่งพลังงานให้มอเตอร์

ประเภทของ DC Motor

5. Series DC Motor: ขดลวดสนามแม่เหล็กและขดลวด Armature ต่อแบบอนุกรม มีแรงบิดเริ่มต้นสูง เหมาะสมกับงานที่ต้องการแรงบิดมาก เช่น รถไฟฟ้า
6. Shunt DC Motor: ขดลวดสนามแม่เหล็กและขดลวด Armature ต่อแบบขนาน มีความเร็วคงที่ เหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการความเสถียร
7. Compound DC Motor: รวมคุณสมบัติของ Series และ Shunt เหมาะสำหรับงานที่ต้องการทั้งแรงบิดสูงและความเร็วคงที่
8. Permanent Magnet DC Motor (PMDC): ใช้แม่เหล็กถาวรสร้างสนามแม่เหล็ก มีขนาดเล็กและประสิทธิภาพสูง ใช้ในอุปกรณ์พกพาหรือของเล่น

DC Motor มีข้อดีคือควบคุมง่ายและตอบสนองรวดเร็ว แต่ข้อเสียคือต้องการการบำรุงรักษาเปรngถ่านและคอมมิวเตเตอร์ที่สักหรอเมื่อใช้งานเป็นเวลานาน

10. Duty Cycle



รูปที่ 21 Duty Cycle

Duty Cycle หรือ รอบการทำงาน เป็นค่าที่แสดงสัดส่วนระหว่างช่วงเวลาที่อุปกรณ์หรือสัญญาณทำงาน (เปิด) กับช่วงเวลาทั้งหมดของรอบการทำงานนั้น โดยปกติจะแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ ค่านี้มีความสำคัญในหลายสาขา เช่น อิเล็กทรอนิกส์ การสื่อสาร และการใช้งานเครื่องจักร

การคำนวณ Duty Cycle:

$$\text{Duty Cycle}(\%) = (\text{เวลาที่ทำงาน} / \text{เวลารอบการทำงานทั้งหมด}) \times 100$$

ตัวอย่าง:

หากสัญญาณมีรอบการทำงานทั้งหมด 10 วินาที และในช่วงนี้สัญญาณเปิด (ทำงาน) เป็นเวลา 4 วินาที

$$\text{Duty Cycle} = (4 \text{ วินาที} / 10 \text{ วินาที}) \times 100 = 40\%$$

การประยุกต์ใช้:

- ในสัญญาณดิจิทัล: Duty Cycle แสดงสัดส่วนเวลาที่สัญญาณอยู่ในสถานะสูง (High) ต่อรอบการทำงานทั้งหมด เช่น สัญญาณที่มี Duty Cycle 50% หมายถึงสัญญาณอยู่ในสถานะสูงครึ่งหนึ่งของเวลาทั้งหมด
- ในเครื่องเขื่อนไฟฟ้า: Duty Cycle บ่งบอกระยะเวลาที่เครื่องสามารถทำงานต่อเนื่องได้ภายในช่วงเวลา 10 นาที เช่น เครื่องที่มี Duty Cycle 60% ที่กระแส 150 แอมป์ หมายความว่าสามารถเขื่อนต่อเนื่องได้ 6 นาที และต้องพัก 4 นาที เพื่อป้องกันความร้อนเกินและยืดอายุการใช้งานของเครื่อง

การทราบค่า Duty Cycle ช่วยในการวางแผนการใช้งานอุปกรณ์ให้เหมาะสม ป้องกันการทำงานเกินขีดจำกัดที่อาจทำให้อุปกรณ์เสียหายหรือมีอายุการใช้งานสั้นลง

11. การวัดแนวโน้มเข้าสู่ศูนย์กลาง

การวัดแนวโน้มเข้าสู่ศูนย์กลาง (Central Tendency) เป็นการหาค่ากลางที่ใช้แทนข้อมูลทั้งหมดในชุดข้อมูล เพื่อสรุปและอธิบายลักษณะทั่วไปของข้อมูลนั้น โดยการเลือกใช้ค่ากลางที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับลักษณะของข้อมูลและวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์ การวัดแนวโน้มเข้าสู่ศูนย์กลางช่วยให้เข้าใจลักษณะทั่วไปของข้อมูลและเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างชุดต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

11.1. การหาค่าเฉลี่ย

การหาค่าเฉลี่ย หรือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Arithmetic Mean) เป็นวิธีการหาค่ากลางของชุดข้อมูล เพื่อแสดงแนวโน้มของข้อมูลทั้งหมด โดยคำนวณจากผลรวมของข้อมูลทั้งหมด แล้วหารด้วยจำนวนข้อมูล

วิธีการคำนวณค่าเฉลี่ย:

4. รวมค่าของข้อมูลทั้งหมด: นำค่าของข้อมูลทุกตัวมาบวกกัน
5. หารด้วยจำนวนข้อมูล: นำผลรวมที่ได้มาหารด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมด

สูตรคำนวณ:

$$\text{ค่าเฉลี่ย} = (\text{ผลรวมของข้อมูลทั้งหมด}) / (\text{จำนวนข้อมูลทั้งหมด})$$

ตัวอย่าง:

หากมีข้อมูล 5 ค่า ได้แก่ 2, 4, 6, 8, และ 10

- ผลรวมของข้อมูล = $2 + 4 + 6 + 8 + 10 = 30$
- จำนวนข้อมูล = 5

$$\text{ดังนั้น ค่าเฉลี่ย} = 30 / 5 = 6$$

11.2. การหาค่าเฉลี่ยยกกำลังสอง

ค่าเฉลี่ยยกกำลังสอง หรือ Root Mean Square (RMS) เป็นการวัดทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา โดยเฉพาะในสัญญาณไฟฟ้าหรือคลื่น การคำนวณค่า RMS ช่วยให้เราเข้าใจขนาดเฉลี่ยของสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วิธีการคำนวณค่า RMS:

6. ยกกำลังสอง: นำค่าของข้อมูลแต่ละตัวมายกกำลังสอง
7. หาค่าเฉลี่ย: คำนวณค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนแรก
8. ถอดรากที่สอง: นำค่าที่ได้จากขั้นตอนที่สองมาถอดรากที่สอง

สูตรคำนวณ:

สำหรับชุดข้อมูลที่มี N ค่า คือ $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ค่า RMS สามารถคำนวณได้ดังนี้:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$$

การประยุกต์ใช้:

- วิศวกรรมไฟฟ้า: ใช้ในการวัดขนาดเฉลี่ยของแรงดันหรือกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกับค่าไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ได้อย่างถูกต้อง
- สกิติ: ใช้ในการวัดความแปรปรวนของข้อมูล โดยเฉพาะเมื่อข้อมูลมีหักค่าบวกและลบได้อย่างแม่นยำมากขึ้น

การใช้ค่า RMS ช่วยลดผลกระทบจากค่าลับในชุดข้อมูล ทำให้สามารถวัดขนาดเฉลี่ยของข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงได้อย่างแม่นยำมากขึ้น

12. Back EMF Constant

Back EMF Constant หรือ ค่าคงที่ของแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ เป็นค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (Back EMF) ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์กับความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ โดยทั่วไป ค่านี้มักถูกแทนด้วยสัญลักษณ์ K_e หรือ K_b และมีหน่วยเป็นโวลต์ต่อเรเดียนต่อวินาที ($V \cdot s/rad$) หรือโวลต์ต่อพันรอบต่อนาที ($V/kgpm$)

ในมอเตอร์ไฟฟ้า เมื่อมีการหมุนของมอเตอร์ จะเกิดแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับที่มีค่าสัดส่วนกับความเร็วในการหมุนค่าคงที่นี้ช่วยให้เราสามารถคำนวณแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับที่เกิดขึ้นที่ความเร็วต่าง ๆ ได้ ซึ่งมีความสำคัญในการออกแบบและควบคุมมอเตอร์ เพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับที่สูงเกินไป

นอกจากนี้ ค่าคงที่ของแรงดันไฟฟ้าข้อนกลับบังมีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ของแรงบิด (Torque Constant) ของมอเตอร์ ซึ่งสามารถใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

13. %Efficiency

%Efficiency หรือ เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพ เป็นการวัดประสิทธิภาพของระบบหรืออุปกรณ์ โดยแสดงเป็น เปอร์เซ็นต์ของพลังงานหรือผลลัพธ์ที่ได้รับจริงเมื่อเทียบกับพลังงานหรือผลลัพธ์ที่คาดหวังหรือป้อนเข้าไป

สูตรการคำนวณ:

$$\text{Efficiency}(\%) = \left(\frac{\text{ผลลัพธ์ที่ได้รับจริง}}{\text{ผลลัพธ์ที่คาดหวังหรือพลังงานที่ป้อนเข้า}} \right) \times 100$$

ความสำคัญของ %Efficiency:

- การประเมินประสิทธิภาพ: ช่วยในการประเมินว่าระบบหรืออุปกรณ์ทำงานได้ดีเพียงใด และมีการสูญเสียพลังงานหรือทรัพยากรในกระบวนการมากน้อยแค่ไหน
- การปรับปรุง: ช่วยระบุส่วนที่สามารถปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ลดการสูญเสีย และเพิ่มผลผลิต

หมายเหตุ:

- ประสิทธิภาพที่ 100% หมายถึงไม่มีการสูญเสียพลังงานหรือทรัพยากรเลย ซึ่งในทางปฏิบัติมักเป็นไปไม่ได้ เนื่องจากการสูญเสียที่เกิดขึ้นในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ความร้อน แรงเสียดทาน เป็นต้น
- การวัดประสิทธิภาพควรพิจารณาปัจจัยหลาย ๆ ด้านเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องและเป็นประโยชน์ในการปรับปรุงระบบหรืออุปกรณ์

14. Power

กำลัง (Power) ในทางฟิสิกส์ หมายถึงอัตราที่พลังงานถูกถ่ายโอนหรือแปลงสภาพต่อหน่วยเวลา หน่วยวัดในระบบหน่วยสากล (SI) คือ วัตต์ (W) ซึ่งเท่ากับหนึ่งจูลต่อวินาที

สูตรการคำนวณกำลัง:

$$P = \frac{E}{t}$$

โดยที่:

- P คือ กำลัง (วัตต์)
- E คือ พลังงาน (จูล)
- t คือ เวลา (วินาที)

ความสำคัญของกำลัง:

- การวัดประสิทธิภาพ: กำลังช่วยในการประเมินว่าอุปกรณ์หรือระบบสามารถทำงานได้มากน้อยเพียงใดในช่วงเวลาที่กำหนด
- การออกแบบระบบ: ในการออกแบบเครื่องจักรหรือระบบไฟฟ้า การคำนวณกำลังเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้แน่ใจว่าอุปกรณ์สามารถรับภาระงานได้อย่างเหมาะสม

หมายเหตุ:

- กำลังเป็นปริมาณสเกลาร์ ซึ่งหมายความว่ามีขนาดแต่ไม่มีทิศทาง
- ในระบบไฟฟ้า กำลังสามารถคำนวณได้จากผลคูณของแรงดันไฟฟ้า (โวลต์) และกระแสไฟฟ้า (แอมป์)

15. PWM

PWM (Pulse Width Modulation) หรือ การมอดูเลตความกว้างพัลส์ เป็นเทคนิคที่ใช้ในการควบคุมพลังงานไฟฟ้าหรือสัญญาณอนาล็อกผ่านการปรับความกว้างของพัลส์ในสัญญาณดิจิทัล โดยการสลับสถานะระหว่างเปิด (HIGH) และปิด (LOW) อย่างรวดเร็ว การปรับความกว้างของพัลส์นี้ทำให้สามารถจำลองค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้า หรือกระแสไฟฟ้าได้ตามต้องการ

หลักการทำงานของ PWM:

- Duty Cycle: คือสัดส่วนของเวลาที่สัญญาณอยู่ในสถานะเปิด (HIGH) ต่อรอบเวลาทั้งหมด โดยคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ เช่น Duty Cycle 50% หมายถึงสัญญาณเปิด 50% และปิด 50% ของรอบเวลา การปรับ Duty Cycle จะเปลี่ยนค่าเฉลี่ยของสัญญาณที่ส่งออกมา

การประยุกต์ใช้ PWM:

- การควบคุมความเร็วมอเตอร์: ปรับความเร็วของมอเตอร์ DC โดยการเปลี่ยน Duty Cycle เพื่อควบคุมพลังงานที่ส่งไปยังมอเตอร์
- การหรีส์แส LED: ปรับความสว่างของ LED โดยการเปลี่ยน Duty Cycle เพื่อควบคุมค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ LED

- การแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก (DAC): ใช้ PWM เพื่อสร้างสัญญาโนนาล็อกจากสัญญาณดิจิทัล
- การสื่อสารดิจิทัล: ใช้ PWM ใน การส่งข้อมูลในระบบสื่อสารดิจิทัล

PWM เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพและประหยัดพลังงาน เนื่องจากการสลับสถานะเปิด-ปิดของสัญญาณทำให้การสูญเสียพลังงานน้อยลง และสามารถควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้อย่างแม่นยำ

16. วัสดุและอุปกรณ์

16.1. Load Cell



รูปที่ 22 Load Cell

โหลดเซลล์ (Load Cell) คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงแรงหรือน้ำหนักที่กระทำต่อตัวมันให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า สัญญาณไฟฟ้านี้สามารถนำไปประมวลผลหรือแสดงผลเป็นค่าน้ำหนักหรือแรงที่กระทำได้

โหลดเซลล์มักประกอบด้วยสเตตอเอนเกจ (Strain Gauge) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างหรือการยืดหุ้นของวัสดุ เมื่อมีแรงหรือน้ำหนักมากระทำ การเปลี่ยนแปลงนี้จะถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าผ่านวงจรวิชลีโคน บริดจ์ (Wheatstone Bridge)

ประเภทของโหลดเซลล์:

- โหลดเซลล์แบบสเตตอเอนเกจ: ใช้สเตตอเอนเกจในการวัดการเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง
- โหลดเซลล์แบบเพียวโซอิเล็กทริก: ใช้คุณสมบัติของวัสดุเพียวโซอิเล็กทริกในการสร้างสัญญาณไฟฟ้าเมื่อมีแรงมีกระทำ

- โหลดเซลล์แบบไฮดรอลิก: ใช้การเปลี่ยนแปลงของความดันในของเหลวในการวัดแรง
- โหลดเซลล์แบบนิวแมติก: ใช้การเปลี่ยนแปลงของความดันในอากาศในการวัดแรง

การประยุกต์ใช้:

โหลดเซลล์ถูกนำมาใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น

- เครื่องซั่งน้ำหนัก
- การวัดแรงในกระบวนการผลิต
- การทดสอบวัสดุ
- การควบคุมคุณภาพ

16.2. WCS1700 Hall Current Sensor



รูปที่ 23 WCS1700 Hall Current Sensor

WCS1700 เป็นเซ็นเซอร์กระแสไฟฟ้าแบบฮอลล์ (Hall Effect Current Sensor) ที่ใช้เทคโนโลยีฮอลล์ เอฟเฟกต์ในการวัดกระแสไฟฟ้า สามารถวัดกระแสไฟฟ้าได้ทั้งกระแสตรง (DC) และกระแสสลับ (AC) โดยไม่ต้องตัดวงจรหรือสัมผัสกับสายไฟ

คุณสมบัติหลักของ WCS1700:

- ช่วงการวัดกระแส: รองรับการวัดกระแสสูงสุดถึง 70 แอมเปอร์

- ความแม่นยำสูง: มีความแม่นยำในการวัดกระแส
- การติดตั้งง่าย: มีรูขนาด 9.0 มิลลิเมตรสำหรับการติดตั้งผ่านรู
- การซัดเซยอุณหภูมิ: มาพร้อมวงจรซัดเซยอุณหภูมิ เพื่อรักษาความแม่นยำในการวัดในสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

การประยุกต์ใช้งาน:

- การตรวจจับกระแสไฟฟ้า: ใช้ในการตรวจจับกระแสไฟฟ้าในระบบต่าง ๆ เช่น ระบบพลังงานทดแทน ระบบไฟฟ้าในบ้านยนต์ และระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรม
- การป้องกันกระแสเกิน: ใช้ในการตรวจจับและป้องกันกระแสเกินในวงจรไฟฟ้า เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น
- การวัดกระแสในงานวิจัยและพัฒนา: ใช้ในการวัดกระแสไฟฟ้าในงานวิจัยและพัฒนาต่าง ๆ ที่ต้องการความแม่นยำสูง

WCS1700 เป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับการวัดกระแสไฟฟ้าในงานที่ต้องการความแม่นยำและความน่าเชื่อถือสูง

8.6 STM32G474RE



รูปที่ 24 STM32G474RE

STM32G474RE เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) จากตระกูล STM32G4 ของบริษัท STMicroelectronics ที่ใช้แกนประมวลผล ARM® Cortex®-M4 32 บิต ทำงานที่ความเร็วสูงสุด 170 MHz

พร้อมหน่วยประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (DSP) และหน่วยประมวลผลฟlotติ้งพอยต์ (FPU) ซึ่งหมายความว่าสำหรับแอปพลิเคชันที่ต้องการประสิทธิภาพสูงและการประมวลผลสัญญาณ

คุณสมบัติหลักของ STM32G474RE:

1. หน่วยความจำ:

1. Flash memory ขนาด 512 Kbytes
2. SRAM ขนาด 128 Kbytes
3. รองรับการเชื่อมต่อ กับหน่วยความจำภายนอกผ่าน FSMC (Flexible Static Memory Controller)

2. พอร์ต I/O:

1. รองรับพอร์ต I/O ความเร็วสูงถึง 107 พอร์ต
2. รองรับการทำงานร่วมกับสัญญาณดิจิตอลและแอนะล็อก

3. พอร์ตการสื่อสาร:

1. รองรับการสื่อสารหลายรูปแบบ เช่น CAN, I2C, SPI, UART/USART
2. รองรับการเชื่อมต่อ กับหน่วยความจำภายนอกผ่าน Quad-SPI

4. ตัวแปลงสัญญาณ:

1. ADC ความละเอียด 12 บิต จำนวน 5 ตัว
2. DAC ความละเอียด 12 บิต จำนวน 7 ช่อง
3. ตัวแปลงสัญญาโนนาล็อกเป็นดิจิตอล (ADC) ความเร็วสูงถึง 5 Msps

5. คุณสมบัติพิเศษ:

1. CORDIC accelerator สำหรับการคำนวณตรีโกณมิติ
2. FMAC (Filter Mathematical Accelerator) สำหรับการประมวลผลฟิลเตอร์
3. รองรับการทำงานในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิ -40°C ถึง 85°C

STM32G474RE เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ต้องการประสิทธิภาพสูง เช่น ระบบควบคุมมอเตอร์, ระบบสื่อสาร, และการประมวลผลสัญญาณดิจิตอลสำหรับการพัฒนาและทดลองใช้งาน STM32G474RE สามารถใช้บอร์ดพัฒนา STM32 Nucleo-G474RE ซึ่งรองรับการเชื่อมต่อ กับ Arduino และ ST morpho

8.7 Incremental Encoder AMT103-V



รูปที่ 25 Incremental Encoder AMT103-V

MT103-V เป็นอินครีเมนทัลโรเตารีเอ็นโคเดอร์ (Incremental Rotary Encoder) แบบโมดูลาร์ที่ใช้เทคโนโลยีแคปاكิฟิฟ (Capacitive) จากบริษัท Same Sky (เดิมคือ CUI Devices)

คุณสมบัติหลักของ AMT103-V:

- ความแม่นยำสูง: มีความแม่นยำในการวัดการหมุนของเพลาที่ดี
- ทนทานต่อสภาพแวดล้อม: ทนทานต่อฝุ่น สะปรก และน้ำมัน
- การติดตั้งง่าย: มีตัวเลือกขนาดเพลาหลายขนาด (2 มม. ถึง 8 มม.) และฐานรองที่มีรูยึดหลายแบบ เพื่อรองรับมอเตอร์ที่หลากหลาย
- การปรับความละเอียด: สามารถปรับความละเอียดได้ผ่านสวิตช์ DIP บนบอร์ด โดยมีความละเอียดตั้งแต่ 48 ถึง 2048 PPR (Pulses Per Revolution)
- ช่วงอุณหภูมิการทำงาน: ทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิ -40°C ถึง +100°C
- การใช้พลังงานต่ำ: ใช้กระแสไฟฟ้าต่ำ

- การติดตั้ง: มีรุ่นที่มีการติดตั้งแบบขวาง (Axial) และแบบตรง (Radial) เพื่อความยืดหยุ่นในการใช้งาน AMT103-V เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการความแม่นยำสูงและทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่มีฝุ่น สากราก และน้ำมัน เช่น ระบบควบคุมมอเตอร์ ระบบอัตโนมัติในอุตสาหกรรม และเครื่องจักรที่ต้องการการวัดการหมุนที่แม่นยำ

8.8 Cytron MDD20A Motor Driver



รูปที่ 26 Cytron MDD20A Motor Driver

Cytron MDD20A เป็นไดรเวอร์มอเตอร์ DC แบบสองช่องสัญญาณที่ออกแบบมาเพื่อควบคุมมอเตอร์ DC ที่มีแปรงถ่าน (Brushed DC Motors) กำลังสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ รองรับแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 6V ถึง 30V และสามารถรองรับกระแสสูงสุด 20A ต่อช่องสัญญาณ

คุณสมบัติหลักของ MDD20A:

- การควบคุมทิศทางสองทิศทาง: สามารถควบคุมมอเตอร์ DC ที่มีแปรงถ่านสองตัวได้อย่างอิสระ
- แรงดันไฟฟ้าทำงาน: รองรับแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 6V ถึง 30V
- กระแสสูงสุดต่อช่องสัญญาณ: รองรับกระแสสูงสุด 20A ต่อช่องสัญญาณ
- การป้องกัน: มีระบบป้องกันกระแสเกิน (Overcurrent Protection) และการป้องกันอุณหภูมิสูง (Overtemperature Protection) เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น
- อินพุต PWM และ DIR: รองรับการควบคุมด้วยสัญญาณ PWM และ DIR ที่มีช่วงแรงดันอินพุตตั้งแต่ 1.8V ถึง 12V

- การทดสอบด้วยปุ่มและ LED: มาพร้อมปุ่มสำหรับการทดสอบและ LED แสดงสถานะการทำงานของมอเตอร์
- ความถี่ PWM: รองรับความถี่ PWM ได้ถึง 20kHz
- การป้องกันแรงดันต่ำ: มีระบบป้องกันการทำงานเมื่อแรงดันไฟฟ้าต่ำเกินไป

MDD20A เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการควบคุมมอเตอร์ DC กำลังสูง เช่น ระบบหุ่นยนต์อัตโนมัติ (AGV), ระบบติดตามแสงอาทิตย์ (Solar Tracker), และเครื่องจักรอัตโนมัติ

วิธีดำเนินการทดลอง

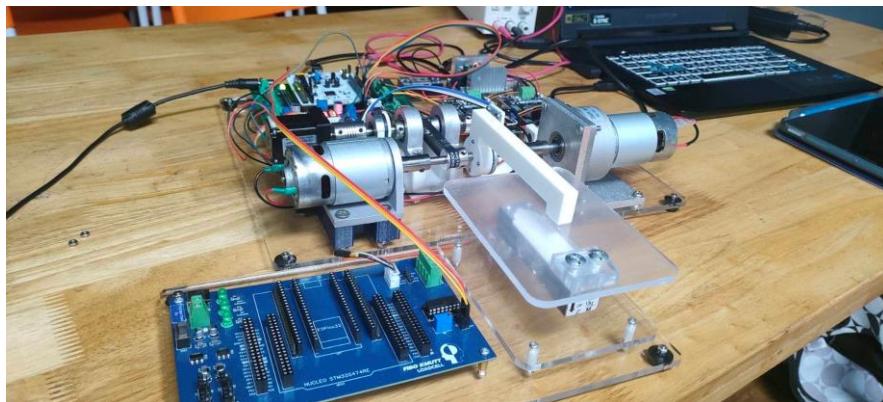
ในการทดลองศึกษาพัฒนาระบบที่มี Load Torque ของ Brushed DC Motor เป็นอย่างไร ได้ทำการทดลองโดยใช้ STM32G474RE รับสัญญาณที่มาจาก Load Cell เพื่ออ่านค่าหนักที่รับได้ โดยค่าที่ได้จาก Load Cell คือค่า Torque สูงสุดที่ DC Motor ที่เราทำการศึกษานั้นรับได้ จากนั้นจะทำการใช้ DC Motor อีกด้วยทำการหน่วงตัวหลักเพื่อดูว่าที่ Torque ตำแหน่งต่าง ๆ นั้นส่งผลต่อความไวอย่างไร

อุปกรณ์การทดลอง

1. Nidec Components Geared DC Geared Motor,	
12 V dc, 20 Ncm, 70 rpm, 6mm Shaft Diameter	จำนวน 1 อัน
2. Incremental Encoder AMT103-V	จำนวน 1 อัน
3. Warner Electric Magnetic Particle Clutches MPB12	จำนวน 1 อัน
4. WCS1700 Hall Current Sensor	จำนวน 1 อัน
5. Cytron MDD20A Motor Driver	จำนวน 1 อัน
6. Nucleo STM32G474RE พร้อมสายอัปโหลด	จำนวน 1 ชุด
7. MotorXplorer	จำนวน 1 ชุด

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เชื่อมต่อ Incremental Load Cell กับ Analog Pin, VCC และ Ground บน STM32G474RE ด้วยสายจัมเปอร์ ดังรูป



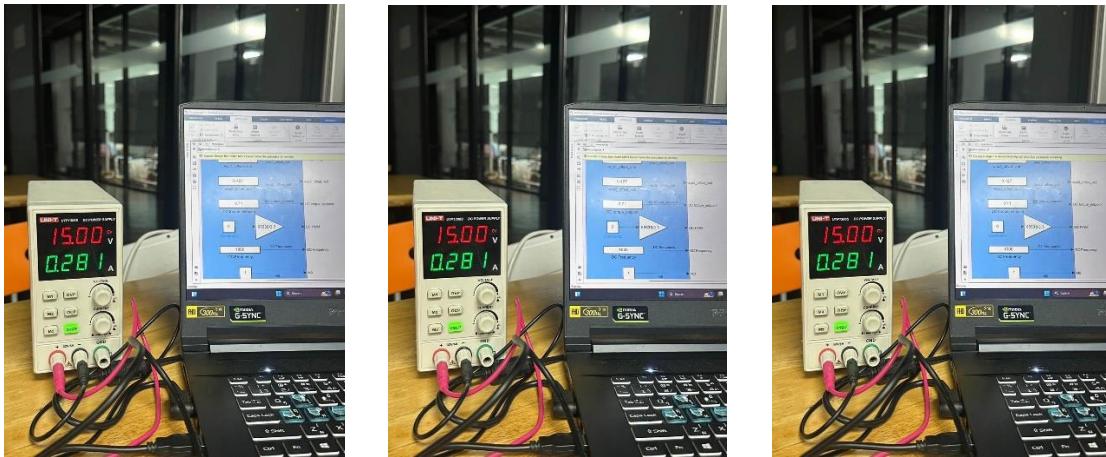
รูปที่ 27 การตั้งค่าบอร์ดสำหรับการทดลอง

2. การปรับจุนค่าของ DC Motor ให้มีแรงดันตรงกับในโปรแกรม Simulink
3. ทำการปรับจุนค่า Load Cell โดยตั้งค่าการหาแรงดันจากน้ำหนักน้ำหนักสูงสุดที่ Load Cell จะรับได้จากนั้นนำมาเทียบบัญชีต่อร่างศ์ เพื่อแสดงผลที่อ่านได้
4. สร้าง Block Simulink เพื่อเก็บค่า Torque จากสูตร $\tau = Fr$
5. เปิดการใช้งาน DC Motor และเก็บค่า Torque ที่อ่านได้ สังเกตและบันทึกผล
6. ทำการเปิดใช้งาน DC Motor ตัวใหญ่เพื่อทำการหน่วง โดยเริ่มจากปรับระดับให้ Torque อยู่ที่ 0.71 (Stall Torque)
7. ทำการเก็บค่าความเร็วของ DC Motor จากการปรับระดับ Torque ของตัวหน่วงโดยเพิ่มขึ้นทีละ 0.1 (0.71-0.76) สังเกตและบันทึกผล
8. ทำการเก็บค่าความเร็วของ DC Motor จากการปรับระดับ Torque ของตัวหน่วงโดยลดลงทีละ 0.1 (0.71-0.65) สังเกตและบันทึกผล

ผลการทดลอง

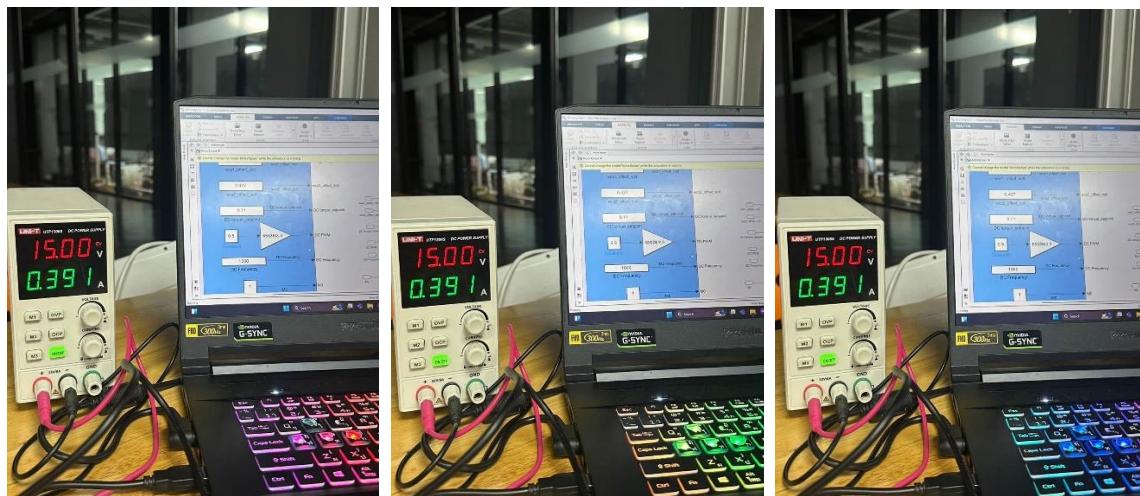
1. Current ที่อ่านได้จาก Power Supply ในรูปแบบ Full Load

- ที่ 0 V



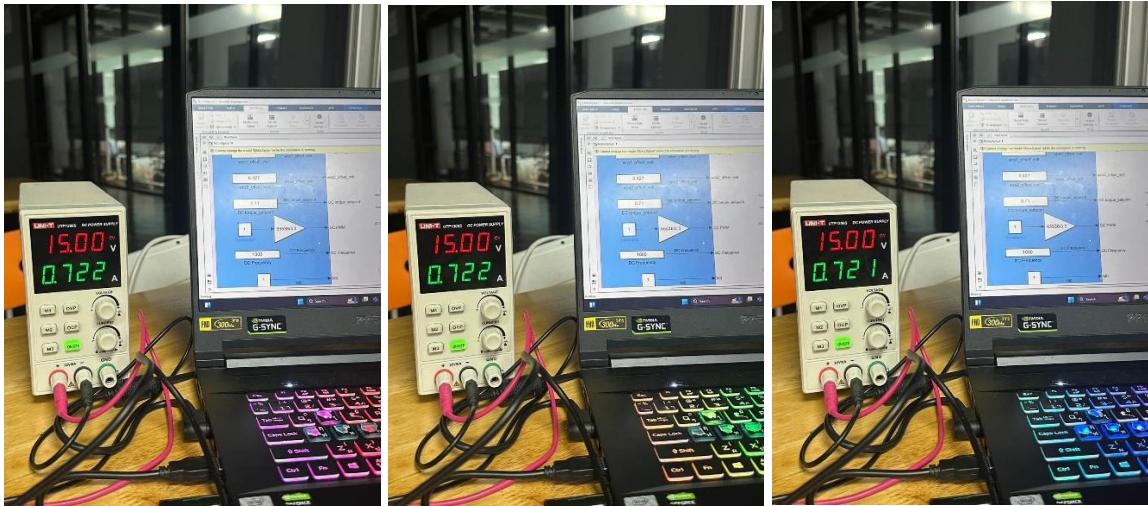
รูปที่ 28 Current ที่อ่านได้จากการดับแรงดัน 0 V

- ที่ 0.5 V



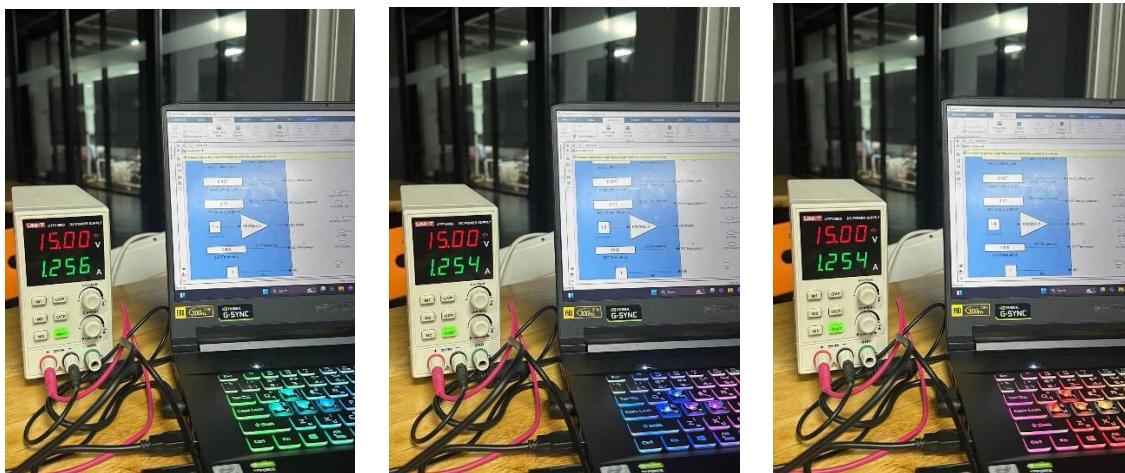
รูปที่ 29 Current ที่อ่านได้จากการดับแรงดัน 0.5 V

- ที่ 1 V



รูปที่ 30 Current ที่อ่านได้จากระดับแรงดัน 1 V

- ที่ 1.5 V



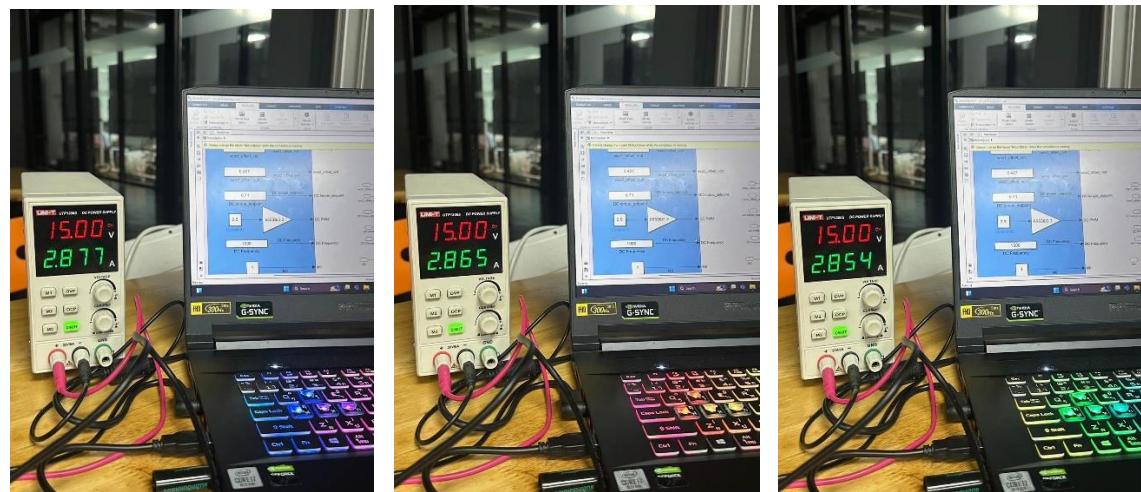
รูปที่ 31 Current ที่อ่านได้จากระดับแรงดัน 1.5 V

- ที่ 2 V



รูปที่ 32 Current ที่อ่านได้จากระดับแรงดัน 2 V

- ที่ 2.5 V



รูปที่ 33 Current ที่อ่านได้จากระดับแรงดัน 2.5 V

- ที่ 3 V



รูปที่ 34 Current ที่อ่านได้จากการดับแรงดัน 3 V

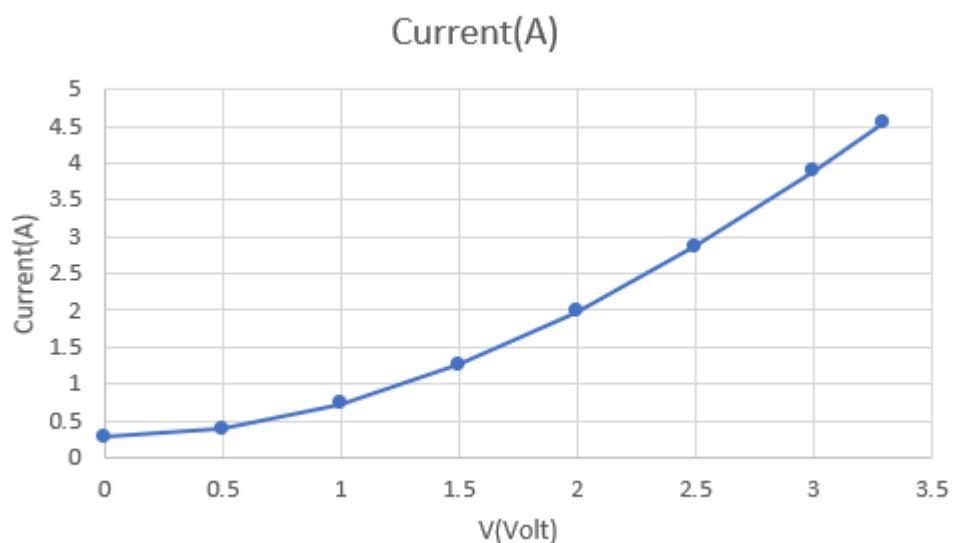
- ที่ 3.3 V



รูปที่ 35 Current ที่อ่านได้จากการดับแรงดัน 3.3 V

V(Volt)	Current(A)
0	0.281
0.5	0.391
1	0.72167
1.5	1.25467
2	1.97367
2.5	2.86533
3	3.87967
3.3	4.54667

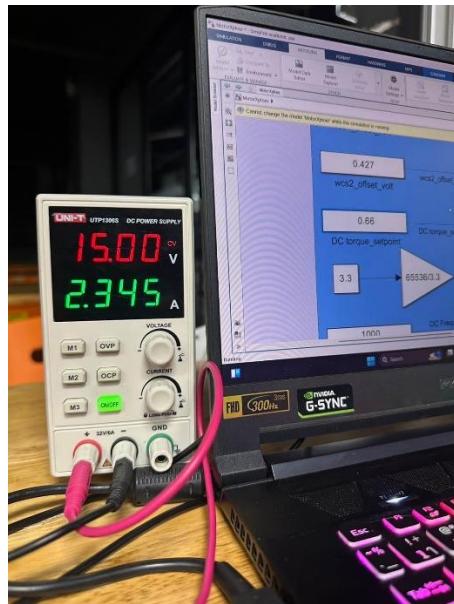
ตารางที่ 3 เปรียบเทียบ Current กับแรงดัน ใน Load Torque สูงสุด



รูปที่ 36 กราฟเปรียบเทียบ Current กับแรงดัน ใน Load Torque สูงสุด

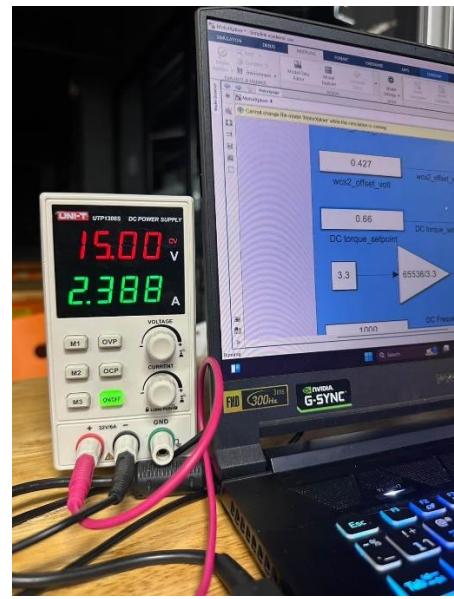
2. กระแสที่อ่านได้ที่แรงดัน 3.3 V ที่การหน่วงของ DC Motor ตัวใหม่ที่ระดับต่าง ๆ

- ที่ Load Torque 0.6 Nm



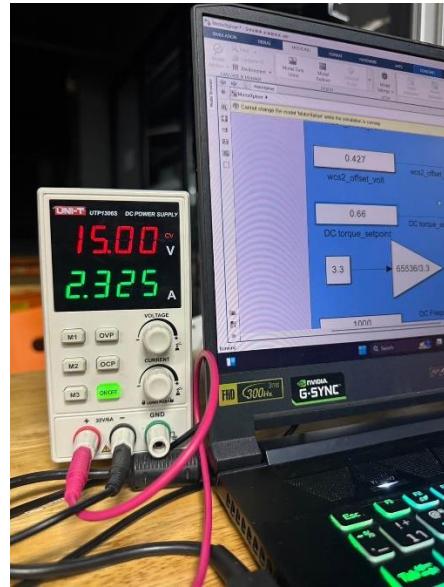
รูปที่ 37 Current ที่อ่านได้จากการปรับ Load Torque 0.6 Nm

- ที่ Load Torque 0.61 Nm



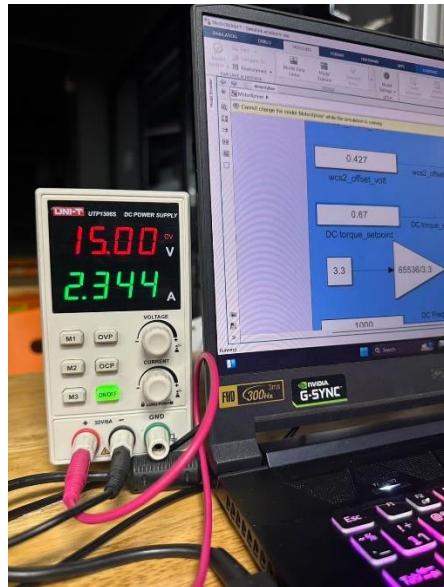
รูปที่ 38 Current ที่อ่านได้จากการปรับ Load Torque 0.61 Nm

- ที่ Load Torque 0.62 Nm



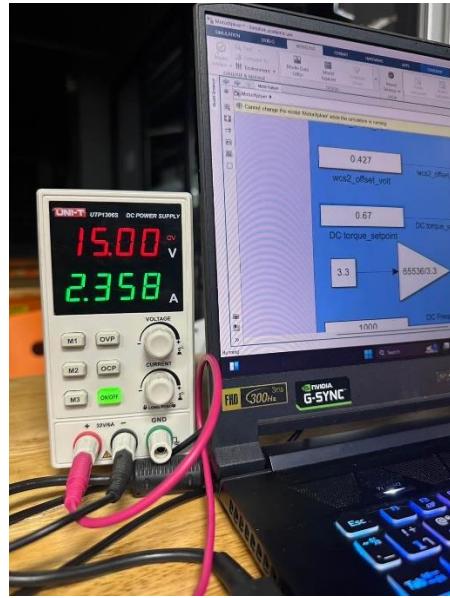
รูปที่ 39 Current ที่อ่านได้จากการปรับ Load Torque 0.62 Nm

- ที่ Load Torque 0.63 Nm



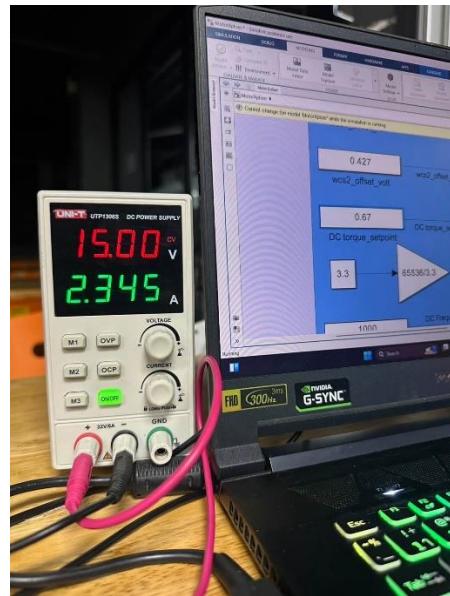
รูปที่ 40 Current ที่อ่านได้จากการปรับ Load Torque 0.63 Nm

- ที่ Load Torque 0.64 Nm



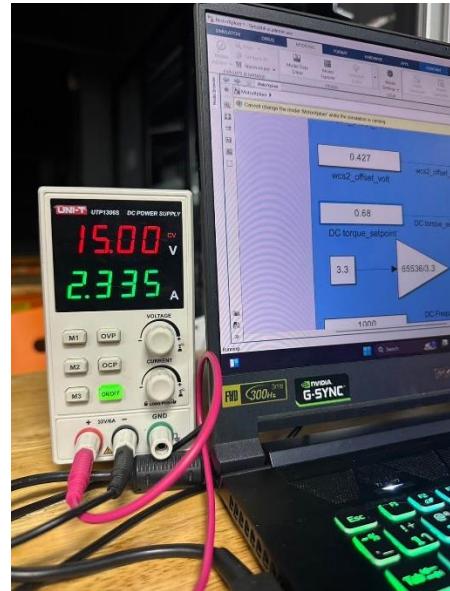
รูปที่ 41 Current ที่อ่านได้จากการปรับ Load Torque 0.64 Nm

- ที่ Load Torque 0.65 Nm



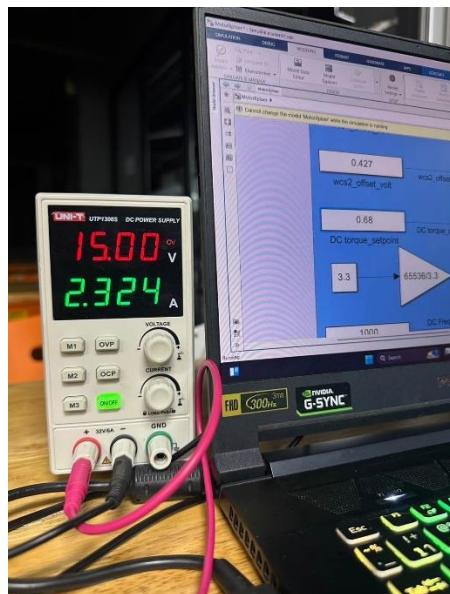
รูปที่ 42 Current ที่อ่านได้จากการปรับ Load Torque 0.65 Nm

- ที่ Load Torque 0.66 Nm



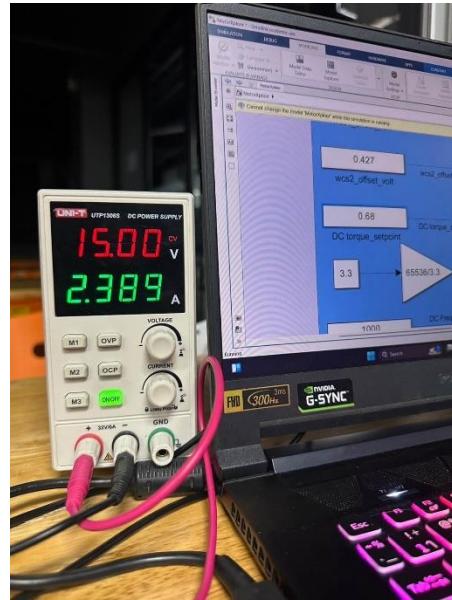
รูปที่ 43 Current ที่อ่านได้จากการปรับ Load Torque 0.66 Nm

- ที่ Load Torque 0.67 Nm



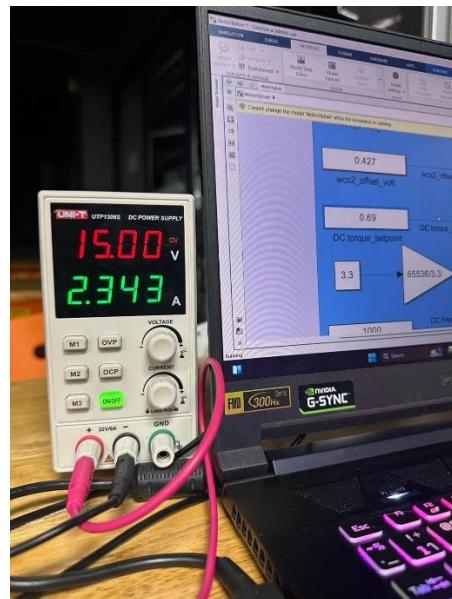
รูปที่ 44 Current ที่อ่านได้จากการปรับ Load Torque 0.67 Nm

- ที่ Load Torque 0.68 Nm



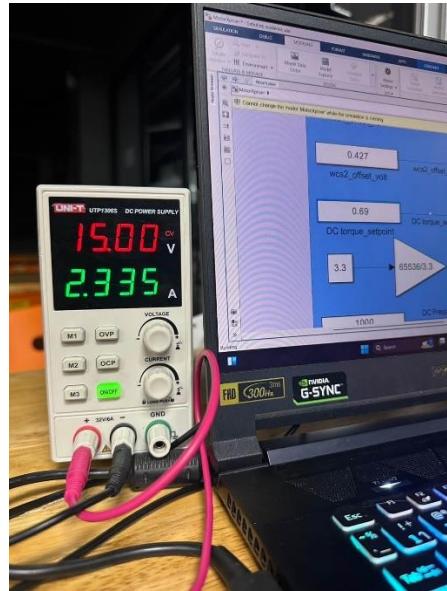
รูปที่ 45 Current ที่อ่านได้จากการปรับ Load Torque 0.68 Nm

- ที่ Load Torque 0.69 Nm



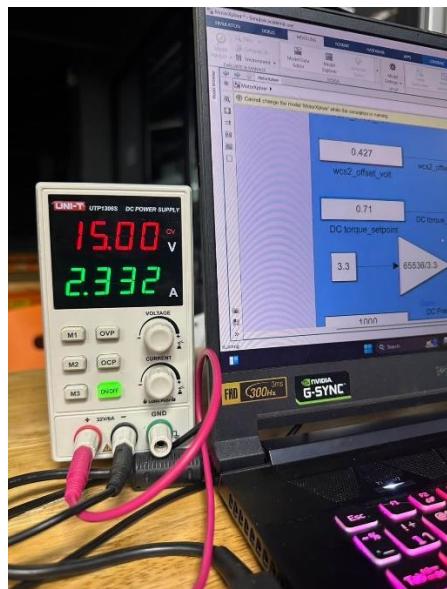
รูปที่ 46 Current ที่อ่านได้จากการปรับ Load Torque 0.69 Nm

- ที่ Load Torque 0.70 Nm



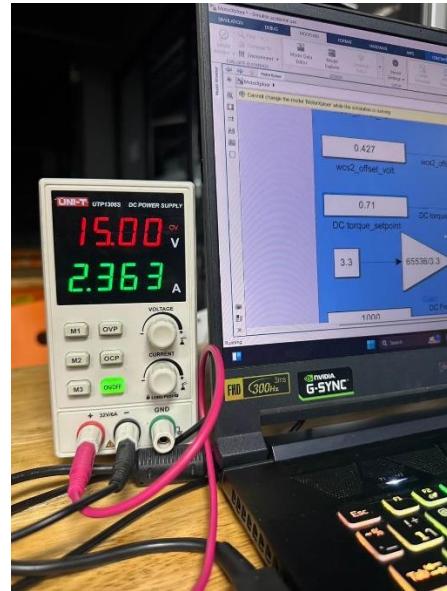
รูปที่ 47 Current ที่อ่านได้จากการปรับ Load Torque 0.70 Nm

- ที่ Load Torque 0.71 Nm



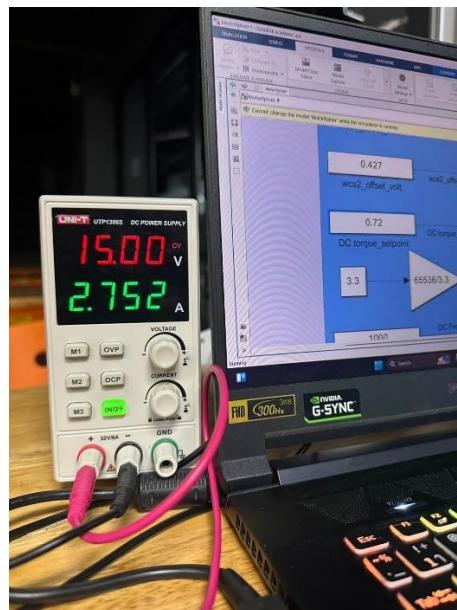
รูปที่ 48 Current ที่อ่านได้จากการปรับ Load Torque 0.71 Nm

- ที่ Load Torque 0.72 Nm



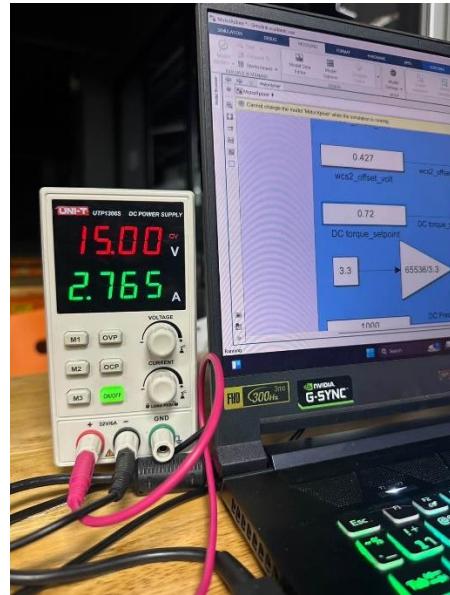
รูปที่ 49 Current ที่อ่านได้จากการปรับ Load Torque 0.72 Nm

- ที่ Load Torque 0.73



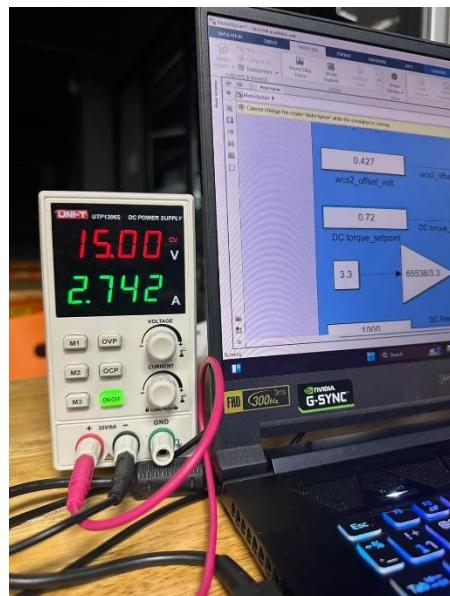
รูปที่ 50 Current ที่อ่านได้จากการปรับ Load Torque 0.73 Nm

- ที่ Load Torque 0.74



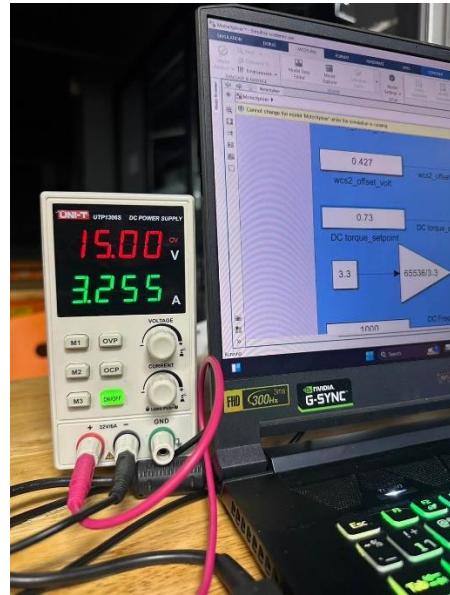
รูปที่ 51 Current ที่อ่านได้จากการปรับ Load Torque 0.74 Nm

- ที่ Load Torque 0.75



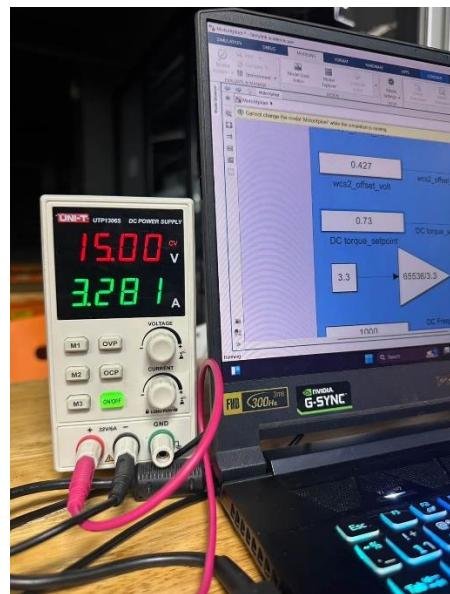
รูปที่ 52 Current ที่อ่านได้จากการปรับ Load Torque 0.75 Nm

- ที่ Load Torque 0.76



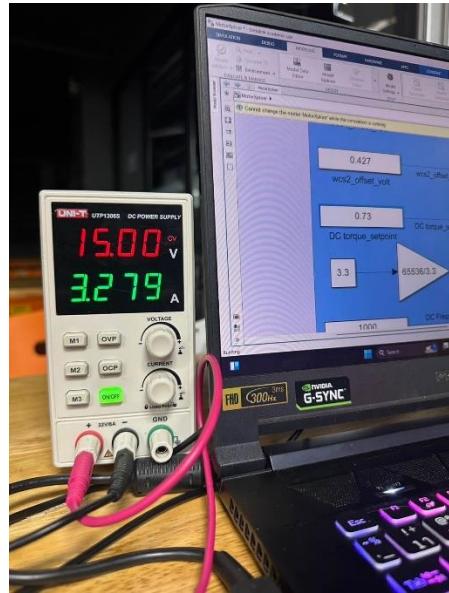
รูปที่ 53 Current ที่อ่านได้จากการปรับ Load Torque 0.76 Nm

- ที่ Load Torque 0.77



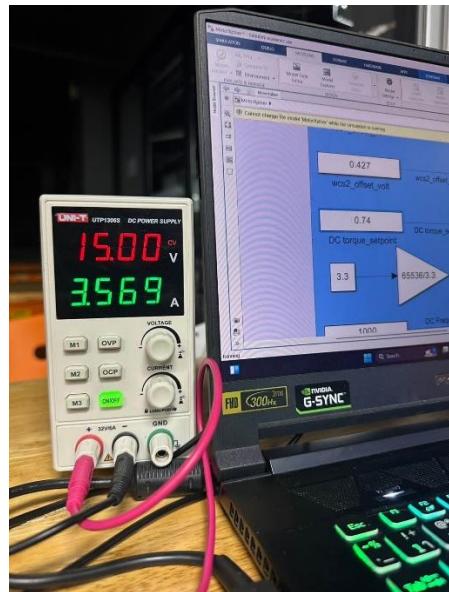
รูปที่ 54 Current ที่อ่านได้จากการปรับ Load Torque 0.77 Nm

- ที่ Load Torque 0.78



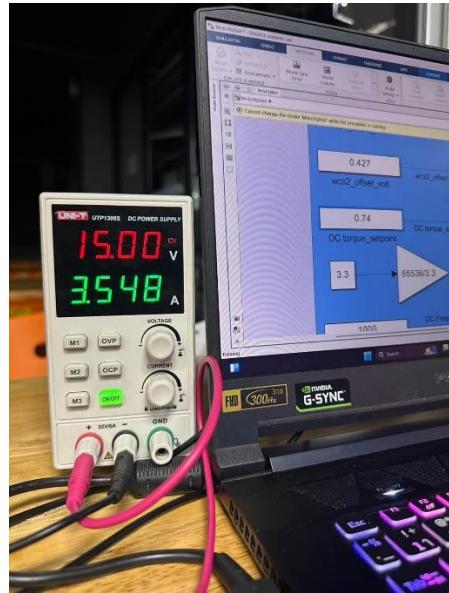
รูปที่ 55 Current ที่อ่านได้จากการปรับ Load Torque 0.78 Nm

- ที่ Load Torque 0.79



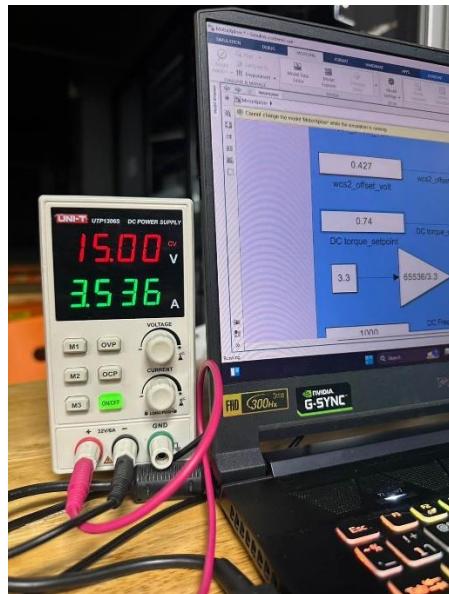
รูปที่ 56 Current ที่อ่านได้จากการปรับ Load Torque 0.79 Nm

- ที่ Load Torque 0.80



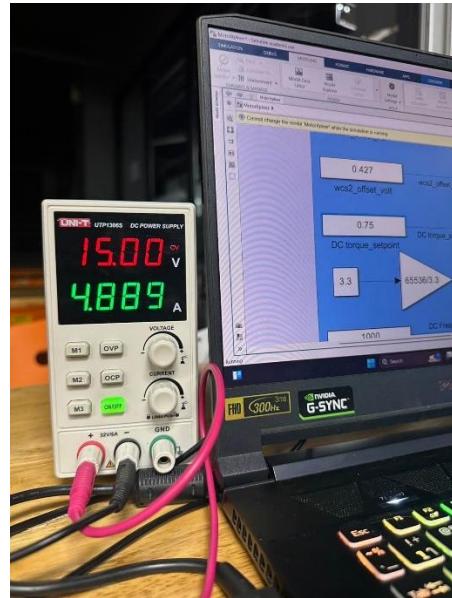
รูปที่ 57 Current ที่อ่านได้จากการปรับ Load Torque 0.80 Nm

- ที่ Load Torque 0.81



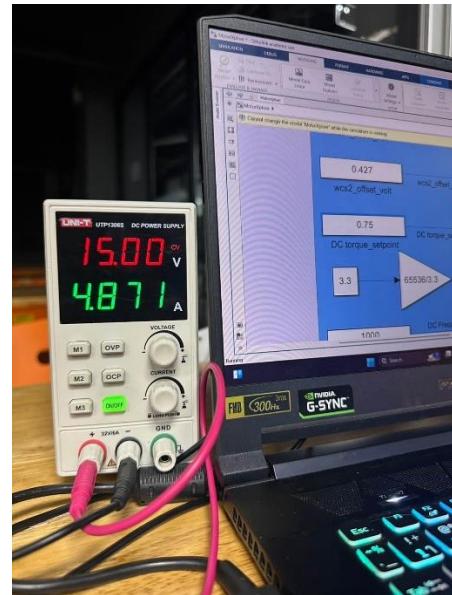
รูปที่ 58 Current ที่อ่านได้จากการปรับ Load Torque 0.81 Nm

- ที่ Load Torque 0.82



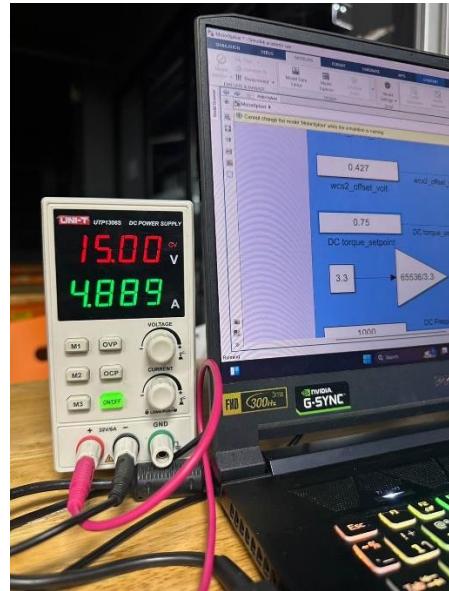
รูปที่ 59 Current ที่อ่านได้จากการปรับ Load Torque 0.82 Nm

- ที่ Load Torque 0.83



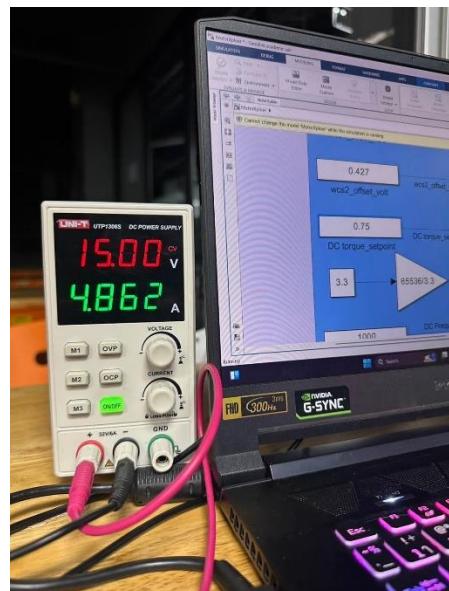
รูปที่ 60 Current ที่อ่านได้จากการปรับ Load Torque 0.83 Nm

- ที่ Load Torque 0.84



รูปที่ 61 Current ที่อ่านได้จากการปรับ Load Torque 0.84 Nm

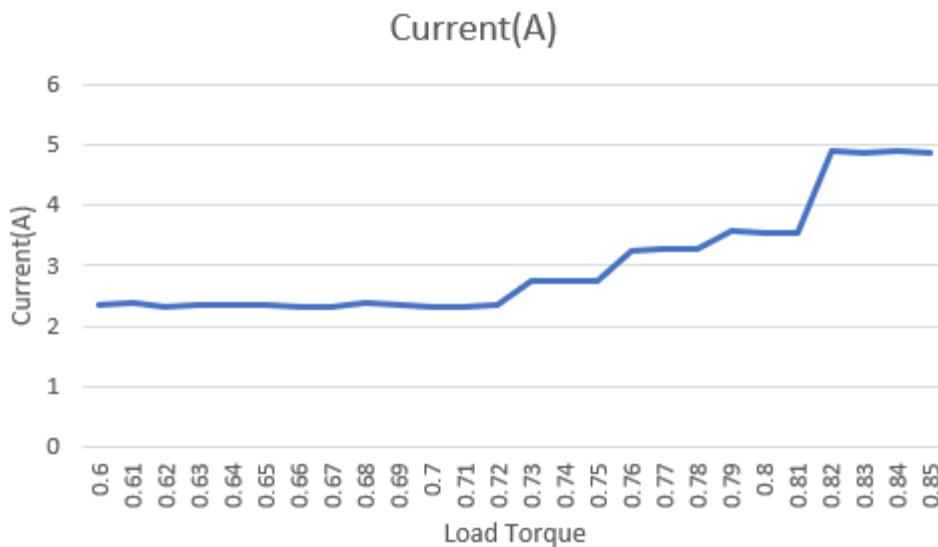
- ที่ Load Torque 0.85



รูปที่ 62 Current ที่อ่านได้จากการปรับ Load Torque 0.85 Nm

Load Torque(Nm)	Current(A)
0.6	2.345
0.61	2.388
0.62	2.325
0.63	2.344
0.64	2.358
0.65	2.345
0.66	2.335
0.67	2.324
0.68	2.389
0.69	2.343
0.7	2.335
0.71	2.332
0.72	2.363
0.73	2.752
0.74	2.765
0.75	2.742
0.76	3.255
0.77	3.281
0.78	3.279
0.79	3.569
0.8	3.548
0.81	3.536
0.82	4.889
0.83	4.871
0.84	4.889
0.85	4.862

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบ Current ที่ Load Torque ต่าง ๆ



รูปที่ 63 กราฟเปรียบเทียบ Current ที่ Load Torque ต่าง ๆ

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองศึกษาพฤติกรรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแปรรูปถ่าน (Brushed DC Motor) เมื่อแรงบิดโหลด (Load Torque) เปลี่ยนแปลง พบว่า:

- เมื่อเพิ่มแรงบิดโหลด: กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ต้องการจะเพิ่มขึ้น เพื่อสร้างแรงบิดที่สูงขึ้นในการต่อต้านโหลดที่มากขึ้น
- เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้า: กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตาม เนื่องจากมอเตอร์ต้องการพลังงานมากขึ้นเพื่อรักษาความเร็วและแรงบิดที่สูงขึ้น

สรุปได้ว่า การเพิ่มแรงบิดโหลดทำให้มอเตอร์ต้องการกระแสไฟฟ้ามากขึ้นเพื่อสร้างแรงบิดที่เพียงพอ และการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ตามลำดับ

อภิปรายผลการทดลอง

1. ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและกระแสไฟฟ้า:

- ในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแปรรูปถ่าน แรงบิด (Torque) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับกระแสไฟฟ้า (Current) ที่เหล่านาร์เมเจอร์ (Armature)
- เมื่อแรงบิดโหลดเพิ่มขึ้น มอเตอร์ต้องสร้างแรงบิดมากขึ้นเพื่อรักษาความเร็ว robust ทำให้กระแสไฟฟ้าที่เหล่านาร์เมเจอร์เพิ่มขึ้นตาม

- สมการที่แสดงความสัมพันธ์นี้คือ $T \propto I_a$ ซึ่งหมายความว่า แรงบิดแปรผันตรงกับกระแสไฟฟ้าในอาร์เมเจอร์

2. ผลของการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า:

- การเพิ่มแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ที่จ่ายให้กับมอเตอร์จะเพิ่มความเร็วรอบ (Speed) ของมอเตอร์
- อย่างไรก็ตาม เมื่อมีโหลดที่ต้องการแรงบิดสูงขึ้น มอเตอร์จะต้องการกระแสไฟฟ้ามากขึ้นเพื่อสร้างแรงบิดที่เพียงพอในการต่อต้านโหลด
- ดังนั้น การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าในขณะที่มีโหลดสูงจะทำให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตาม เนื่องจากมอเตอร์ต้องการพลังงานมากขึ้นเพื่อรักษาความเร็วและแรงบิดที่สูงขึ้น

การทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดโหลด แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแปรรูป โดยการเพิ่มแรงบิดโหลดทำให้มอเตอร์ต้องการกระแสไฟฟ้ามากขึ้นเพื่อสร้างแรงบิดที่เพียงพอ และการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

- ควรตรวจสอบและควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอเตอร์ให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากการกระแสไฟฟ้าที่สูงเกินไป
- การเลือกใช้มอเตอร์ที่มีขนาดและกำลังเหมาะสมกับโหลดจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและยืดอายุการใช้งานของมอเตอร์
- ควรพิจารณาการใช้มอเตอร์ไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor) ในกรณีที่ต้องการลดการบำรุงรักษาและเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน

การทำความเข้าใจพฤติกรรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแปรรูปถ่านในสภาพโหลดที่แตกต่างกันจะช่วยให้สามารถออกแบบและควบคุมระบบที่ใช้มอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

<https://www.walmart.com/ip/DC-Motor-12V-11000-12000RPM-0-8A-Electric-Motor-Round-Shaft/146496637>

<http://products.carolinascaling.com/viewitems/rice-lake-load-cells-2/rl1380-stainless-steel-single-point-load-cells>

<https://www.firgelliauto.com/blogs/news/what-is-a-duty-cycle-in-a-linear-actuator>

<https://www.flyrobo.in/wcs1700-hall-current-sensor-with-over-current-protection>

https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-g474re.html?widgetSearchBar=STM32G4&widgetSearchAction=1&_charset_=UTF-8&filter-search=products

https://www.automationdirect.com/adc/shopping/catalog/sensors_z_encoders/encoders/modular_kit_encoders_for_stepper_motors/amt103-v

<https://botland.store/motor-drivers-modules/18881-cytron-mdd20a-two-channel-motor-driver-30v20a-5904422384180.html>

Stepper Motor

การทดลองที่ 2 การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมและหลักการทำงานของ Stepper Motor

จุดประสงค์

- เพื่อศึกษาหลักการทำงานของ Stepper Motor ได้
- เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของ Speed เมื่อ Frequency ของสัญญาณที่จ่ายเข้า Stepper Motor เปลี่ยนแปลงไป
- เพื่อศึกษาหลักการทำงานของรูปแบบการ Drive แบบ Full-Step, Half-Step และ Micro-Step ว่าส่งผลต่อการควบคุมความเร็วและตำแหน่งของ Stepper Motor อย่างไร
- เพื่อศึกษาระบวนการ Signal Conditioning, Signal Processing
- เพื่อศึกษาการเขียนโปรแกรม โดยประยุกต์ใช้ MATLAB และ Simulink ในการสั่งการควบคุมความเร็วของ Stepper Motor ในรูปแบบของความถี่ ความเร็วเฉลี่ย และรับค่าร่วมกับบอร์ด Nucleo STM32G474RE

ตัวแปร

ตัวแปรต้น

- โหนดของ Stepper Driver DRV8825
- ความถี่

ตัวแปรตาม

- ความเร็วในการหมุนของมอเตอร์
- ตำแหน่งของมอเตอร์
- แรงบิดหรือกระแสที่ใช้

ตัวแปรควบคุม

- แหล่งจ่ายไฟให้มอเตอร์ลักษณะวงจรควบคุม
- การตั้งค่าไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32G474RE

นิยามศัพท์เฉพาะ

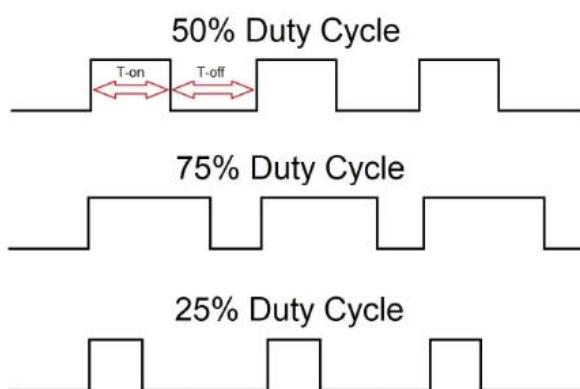
- Stepper Motor : มอเตอร์ที่ทำงานโดยการหมุนเป็นขั้นๆ โดยสามารถควบคุมการหมุนได้อย่างแม่นยำ
- Incremental Encoder : อุปกรณ์ที่ใช้วัดการหมุนของมอเตอร์และแปลงเป็นสัญญาณดิจิตอลเพื่อการประมวลผล
- Hall Current Sensor : เซ็นเซอร์ที่ใช้ในการวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรเพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์
- Signal Conditioning : กระบวนการปรับปรุงสัญญาณให้มีความแม่นยำและเสถียรในการอ่านข้อมูล
- STM32G474RE : ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในการควบคุมระบบโดยใช้การคำนวณและการสื่อสารกับอุปกรณ์ต่างๆ

นิยามเชิงปฏิบัติการ

- ความเร็วของมอเตอร์ : วัดโดยการใช้การตั้งค่าในตัวควบคุมการขับมอเตอร์ (Driver) และตรวจสอบการหมุนที่ได้จาก Encoder
- ตำแหน่งมอเตอร์ : คำนวณจากการหมุนของมอเตอร์ที่บันทึกจาก Encoder
- กระแสไฟฟ้า : วัดจาก Hall Current Sensor โดยเชื่อมต่อกับ STM32G474RE เพื่อประมวลผลข้อมูล

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. Stepper Motor
2. รูปแบบการ Drive
3. Signal Conditioning
4. Duty Cycle



รูปที่ 64 Duty Cycle

Duty Cycle หรือ รอบการทำงาน เป็นค่าที่แสดงสัดส่วนระหว่างช่วงเวลาที่อุปกรณ์หรือสัญญาณทำงาน (เปิด) กับช่วงเวลาทั้งหมดของรอบการทำงานนั้น โดยปกติจะแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ ค่านี้มีความสำคัญในหลายสาขา เช่น อิเล็กทรอนิกส์ การสื่อสาร และการใช้งานเครื่องจักร

การคำนวณ Duty Cycle:

$$\text{Duty Cycle}(\%) = (\text{เวลาที่ทำงาน} / \text{เวลารอบการทำงานทั้งหมด}) \times 100$$

ตัวอย่าง:

หากสัญญาณมีรอบการทำงานทั้งหมด 10 วินาที และในช่วงนี้สัญญาณเปิด (ทำงาน) เป็นเวลา 4 วินาที

$$\text{Duty Cycle} = (4 \text{ วินาที} / 10 \text{ วินาที}) \times 100 = 40\%$$

การประยุกต์ใช้:

- ในสัญญาณดิจิทัล: Duty Cycle แสดงสัดส่วนเวลาที่สัญญาณอยู่ในสถานะสูง (High) ต่อรอบการทำงานทั้งหมด เช่น สัญญาณที่มี Duty Cycle 50% หมายถึงสัญญาณอยู่ในสถานะสูงครึ่งหนึ่งของเวลาทั้งหมด
- ในเครื่องเชื่อมไฟฟ้า: Duty Cycle บ่งบอกระยะเวลาที่เครื่องสามารถทำงานต่อเนื่องได้ภายในช่วงเวลา 10 นาที เช่น เครื่องที่มี Duty Cycle 60% ที่กระแส 150 แอมป์ หมายความว่าสามารถเชื่อมต่อเนื่องได้ 6 นาที และต้องพัก 4 นาที เพื่อป้องกันความร้อนเกินและยืดอายุการใช้งานของเครื่อง

การทราบค่า Duty Cycle ช่วยในการวางแผนการใช้งานอุปกรณ์ให้เหมาะสม ป้องกันการทำงานเกินขีดจำกัดที่อาจทำให้อุปกรณ์เสียหายหรือมีอายุการใช้งานสั้นลง

5. การวัดแนวโน้มเข้าสู่ศูนย์กลาง

การวัดแนวโน้มเข้าสู่ศูนย์กลาง (Central Tendency) เป็นการหาค่ากลางที่ใช้แทนข้อมูลทั้งหมดในชุดข้อมูล เพื่อสรุปและอธิบายลักษณะทั่วไปของข้อมูลนั้น โดยการเลือกใช้ค่ากลางที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับลักษณะของข้อมูลและวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์ การวัดแนวโน้มเข้าสู่ศูนย์กลางช่วยให้เข้าใจลักษณะทั่วไปของข้อมูลและเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างชุดต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.1 การหาค่าเฉลี่ย

การหาค่าเฉลี่ย หรือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Arithmetic Mean) เป็นวิธีการหาค่ากลางของชุดข้อมูล เพื่อแสดงแนวโน้มของข้อมูลทั้งหมด โดยคำนวณจากผลรวมของข้อมูลทั้งหมด แล้วหารด้วยจำนวนข้อมูล

วิธีการคำนวณค่าเฉลี่ย:

4. รวมค่าของข้อมูลทั้งหมด: นำค่าของข้อมูลทุกตัวมาบวกกัน
5. หารด้วยจำนวนข้อมูล: นำผลรวมที่ได้มาหารด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมด

สูตรคำนวณ:

$$\text{ค่าเฉลี่ย} = (\text{ผลรวมของข้อมูลทั้งหมด}) / (\text{จำนวนข้อมูลทั้งหมด})$$

ตัวอย่าง:

หากมีข้อมูล 5 ค่า ได้แก่ 2, 4, 6, 8, และ 10

- ผลรวมของข้อมูล = $2 + 4 + 6 + 8 + 10 = 30$
- จำนวนข้อมูล = 5

$$\text{ดังนั้น ค่าเฉลี่ย} = 30 / 5 = 6$$

5.2 การหาค่าเฉลี่ยยกกำลังสอง

ค่าเฉลี่ยยกกำลังสอง หรือ Root Mean Square (RMS) เป็นการวัดทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา โดยเฉพาะในสัญญาณไฟฟ้าหรือคลื่น การคำนวณค่า RMS ช่วยให้เราเข้าใจขนาดเฉลี่ยของสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วิธีการคำนวณค่า RMS:

1. ยกกำลังสอง: นำค่าของข้อมูลแต่ละตัวมายกกำลังสอง
2. หาค่าเฉลี่ย: คำนวณค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ที่ได้จากการยกกำลังสอง
3. ถอดรากที่สอง: นำค่าที่ได้จากขั้นตอนที่สองมาถอดรากที่สอง

สูตรคำนวณ:

สำหรับชุดข้อมูลที่มี N ค่า คือ $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ค่า RMS สามารถคำนวณได้ดังนี้:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$$

การประยุกต์ใช้:

- วิศวกรรมไฟฟ้า: ใช้ในการวัดขนาดเฉลี่ยของแรงดันหรือกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกับค่าไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ได้อย่างถูกต้อง
- สถิติ: ใช้ในการวัดความแปรปรวนของข้อมูล โดยเฉพาะเมื่อข้อมูลมีทั้งค่าบวกและลบ

การใช้ค่า RMS ช่วยลดผลกระทบจากค่าลับในชุดข้อมูล ทำให้สามารถวัดขนาดเฉลี่ยของข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงได้อย่างแม่นยำมากขึ้น

6 Back EMF Constant

Back EMF Constant หรือ ค่าคงที่ของแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ เป็นค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (Back EMF) ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์กับความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ โดยทั่วไป ค่านี้มักถูกแทนด้วยสัญลักษณ์ K_e หรือ K_b และมีหน่วยเป็นโวลต์ต่อเรเดียนต่อวินาที ($V \cdot s/rad$) หรือโวลต์ต่อพันรอบต่อนาที ($V/krpm$)

ในมอเตอร์ไฟฟ้า เมื่อมีการหมุนของมอเตอร์ จะเกิดแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับที่มีค่าสัดส่วนกับความเร็วในการหมุนค่าคงที่นี้ช่วยให้เราสามารถคำนวณแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับที่เกิดขึ้นที่ความเร็วต่าง ๆ ได้ ซึ่งมีความสำคัญในการออกแบบและควบคุมมอเตอร์ เพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับที่สูงเกินไป

นอกจากนี้ ค่าคงที่ของแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับยังมีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ของแรงบิด (Torque Constant) ของมอเตอร์ ซึ่งสามารถใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบควบคุมมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

7 %Efficiency

%Efficiency หรือ เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพ เป็นการวัดประสิทธิภาพของระบบหรืออุปกรณ์ โดยแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของพลังงานหรือผลลัพธ์ที่ได้รับจริงเมื่อเทียบกับพลังงานหรือผลลัพธ์ที่คาดหวังหรือป้อนเข้าไป

สูตรการคำนวณ:

$$\text{Efficiency}(\%) = \left(\frac{\text{ผลลัพธ์ที่ได้รับจริง}}{\text{ผลลัพธ์ที่คาดหวังหรือพลังงานที่ป้อนเข้าไป}} \right) \times 100$$

ความสำคัญของ %Efficiency:

- การประเมินประสิทธิภาพ: ช่วยในการประเมินว่าระบบหรืออุปกรณ์ทำงานได้ดีเพียงใด และมีการสูญเสียพลังงานหรือทรัพยากรในกระบวนการมากน้อยแค่ไหน
- การปรับปรุง: ช่วยระบุส่วนที่สามารถปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ลดการสูญเสีย และเพิ่มผลผลิต

หมายเหตุ:

- ประสิทธิภาพที่ 100% หมายถึงไม่มีการสูญเสียพลังงานหรือทรัพยากรเลย ซึ่งในทางปฏิบัติมักเป็นไปไม่ได้ เนื่องจากการสูญเสียที่เกิดขึ้นในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ความร้อน แรงเสียดทาน เป็นต้น
- การวัดประสิทธิภาพควรพิจารณาปัจจัยหลาย ๆ ด้านเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องและเป็นประโยชน์ในการปรับปรุงระบบหรืออุปกรณ์

8 Power

กำลัง (Power) ในทางฟิสิกส์ หมายถึงอัตราที่พลังงานถูกถ่ายโอนหรือแปลงสภาพต่อหน่วยเวลา หน่วยวัดในระบบหน่วยสากล (SI) คือ วัตต์ (W) ซึ่งเท่ากับหนึ่ง焦耳ต่อวินาที

สูตรการคำนวณกำลัง:

$$P = \frac{E}{t}$$

โดยที่:

- P คือ กำลัง (วัตต์)
- E คือ พลังงาน (焦耳)
- t คือ เวลา (วินาที)

ความสำคัญของกำลัง:

- การวัดประสิทธิภาพ: กำลังช่วยในการประเมินว่าอุปกรณ์หรือระบบสามารถทำงานได้มากน้อยเพียงใดในช่วงเวลาที่กำหนด
- การออกแบบระบบ: ในการออกแบบเครื่องจักรหรือระบบไฟฟ้า การคำนวณกำลังเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้แน่ใจว่าอุปกรณ์สามารถรองรับภาระงานได้อย่างเหมาะสม

หมายเหตุ:

- กำลังเป็นปริมาณสเกลาร์ ซึ่งหมายความว่ามีขนาดแต่ไม่มีทิศทาง
- ในระบบไฟฟ้า กำลังสามารถคำนวณได้จากผลคูณของแรงดันไฟฟ้า (โวลต์) และกระแสไฟฟ้า (แอมป์)

9 PWM

PWM (Pulse Width Modulation) หรือ การ-modulate ความกว้างพัลส์ เป็นเทคนิคที่ใช้ในการควบคุมพลังงานไฟฟ้าหรือสัญญาณอนาล็อกผ่านการปรับความกว้างของพัลส์ในสัญญาณดิจิทัล โดยการสลับสถานะระหว่างเปิด (HIGH) และปิด (LOW) อย่างรวดเร็ว การปรับความกว้างของพัลสนี้ทำให้สามารถจำลองค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้า หรือกระแสไฟฟ้าได้ตามต้องการ

หลักการทำงานของ PWM:

- Duty Cycle: คือสัดส่วนของเวลาที่สัญญาณอยู่ในสถานะเปิด (HIGH) ต่อรอบเวลาทั้งหมด โดยคำนวณ เป็นเปอร์เซ็นต์ เช่น Duty Cycle 50% หมายถึงสัญญาณเปิด 50% และปิด 50% ของรอบเวลา การปรับ Duty Cycle จะเปลี่ยนค่าเฉลี่ยของสัญญาณที่ส่งออกมา

การประยุกต์ใช้ PWM:

- การควบคุมความเร็วมอเตอร์: ปรับความเร็วของมอเตอร์ DC โดยการเปลี่ยน Duty Cycle เพื่อควบคุม พลังงานที่ส่งไปยังมอเตอร์
- การหรี่แสง LED: ปรับความสว่างของ LED โดยการเปลี่ยน Duty Cycle เพื่อควบคุมค่าเฉลี่ยของ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ LED
- การแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก (DAC): ใช้ PWM เพื่อสร้างสัญญาณอนาล็อกจากสัญญาณดิจิทัล
- การสื่อสารดิจิทัล: ใช้ PWM ในการส่งข้อมูลในระบบสื่อสารดิจิทัล

PWM เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพและประหยัดพลังงาน เนื่องจากการสลับสถานะเปิด-ปิดของสัญญาณทำให้การ สูญเสียพลังงานน้อยลง และสามารถควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้อย่างแม่นยำ

10 วัสดุและอุปกรณ์

10.1 Load Cell



รูปที่ 65 Load Cell

โหลดเซลล์ (Load Cell) คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงแรงหรือน้ำหนักที่กระทำต่อตัวมันให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า สัญญาณไฟฟ้านี้สามารถนำไปประมวลผลหรือแสดงผลเป็นค่าน้ำหนักหรือแรงที่กระทำได้

โหลดเซลล์มักประกอบด้วยสเตตอโนเจ (Strain Gauge) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างหรือการยืดหุ้นของวัสดุ เมื่อมีแรงหรือน้ำหนักมากระทำ การเปลี่ยนแปลงนี้จะถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าผ่านวงจรวิชสถาตน บริดจ์ (Wheatstone Bridge)

ประเภทของโหลดเซลล์:

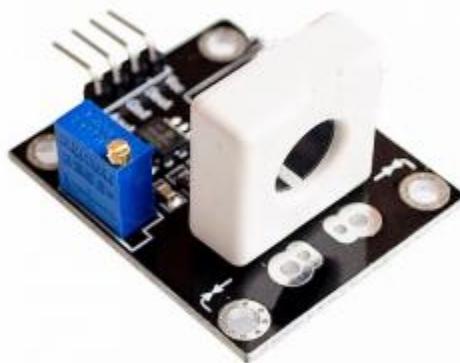
- โหลดเซลล์แบบสเตตอโนเจ: ใช้สเตตอโนเจในการวัดการเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง
- โหลดเซลล์แบบเพียวโซอิเล็กทริก: ใช้คุณสมบัติของวัสดุเพียวโซอิเล็กทริกในการสร้างสัญญาณไฟฟ้าเมื่อมีแรงกระทำ
- โหลดเซลล์แบบไฮดรอลิก: ใช้การเปลี่ยนแปลงของความดันในของเหลวในการวัดแรง
- โหลดเซลล์แบบนิวแมติก: ใช้การเปลี่ยนแปลงของความดันในอากาศในการวัดแรง

การประยุกต์ใช้:

โหลดเซลล์ถูกนำมาใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น

- เครื่องชั่งน้ำหนัก
- การวัดแรงในกระบวนการผลิต
- การทดสอบวัสดุ
- การควบคุมคุณภาพ

10.2 WCS1700 Hall Current Sensor



รูปที่ 66 WCS1700 Hall Current Sensor

WCS1700 เป็นเซ็นเซอร์กระแสไฟฟ้าแบบไฮอล์ล์ (Hall Effect Current Sensor) ที่ใช้เทคโนโลยีไฮอล์ล์ เอฟเฟกต์ในการวัดกระแสไฟฟ้า สามารถวัดกระแสไฟฟ้าได้ทั้งกระแสตรง (DC) และกระแสสลับ (AC) โดยไม่ต้องติดวงจรหรือสัมผัสกับสายไฟ

คุณสมบัติหลักของ WCS1700:

- ช่วงการวัดกระแส: รองรับการวัดกระแสสูงสุดถึง 70 แอมเปอร์
- ความแม่นยำสูง: มีความแม่นยำในการวัดกระแส
- การติดตั้งง่าย: มีรูขนาด 9.0 มิลลิเมตรสำหรับการติดตั้งผ่านรู
- การซัดเชยอุณหภูมิ: มาพร้อมวงจรซัดเชยอุณหภูมิ เพื่อรักษาความแม่นยำในการวัดในสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

การประยุกต์ใช้งาน:

- การตรวจจับกระแสไฟฟ้า: ใช้ในการตรวจจับกระแสไฟฟ้าในระบบต่าง ๆ เช่น ระบบพลังงานทดแทนระบบไฟฟ้าในยานยนต์ และระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรม
- การป้องกันกระแสเกิน: ใช้ในการตรวจจับและป้องกันกระแสเกินในวงจรไฟฟ้า เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น
- การวัดกระแสในงานวิจัยและพัฒนา: ใช้ในการวัดกระแสไฟฟ้าในงานวิจัยและพัฒนาต่าง ๆ ที่ต้องการความแม่นยำสูง

WCS1700 เป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับการวัดกระแสไฟฟ้าในงานที่ต้องการความแม่นยำและความน่าเชื่อถือสูง

10.3 STM32G474RE



รูปที่ 67 STM32G474RE

STM32G474RE เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) จากตระกูล STM32G4 ของบริษัท STMicroelectronics ที่ใช้แกนประมวลผล ARM® Cortex®-M4 32 บิต ทำงานที่ความเร็วสูงสุด 170 MHz พร้อมหน่วยประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (DSP) และหน่วยประมวลผลฟlotติ้งพอยต์ (FPU) ซึ่งเหมาะสมสำหรับแอปพลิเคชันที่ต้องการประสิทธิภาพสูงและการประมวลผลสัญญาณ

คุณสมบัติหลักของ STM32G474RE:

- หน่วยความจำ:
 - Flash memory ขนาด 512 Kbytes

- SRAM ขนาด 128 Kbytes
 - รองรับการเข้ามต่อ กับหน่วยความจำภายในอกผ่าน FSMC (Flexible Static Memory Controller)
- พอร์ต I/O:
 - รองรับพอร์ต I/O ความเร็วสูงถึง 107 พอร์ต
 - รองรับการทำงานร่วมกับสัญญาณดิจิตอลและแอนะล็อก
- พอร์ตการสื่อสาร:
 - รองรับการสื่อสารหลายรูปแบบ เช่น CAN, I2C, SPI, UART/USART
 - รองรับการเข้ามต่อ กับหน่วยความจำภายในอกผ่าน Quad-SPI
- ตัวแปลงสัญญาณ:
 - ADC ความละเอียด 12 บิต จำนวน 5 ตัว
 - DAC ความละเอียด 12 บิต จำนวน 7 ช่อง
 - ตัวแปลงสัญญาโนนาล็อกเป็นดิจิตอล (ADC) ความเร็วสูงถึง 5 Msps
- คุณสมบัติพิเศษ:
 - CORDIC accelerator สำหรับการคำนวณตรีโกณมิติ
 - FMAC (Filter Mathematical Accelerator) สำหรับการประมวลผลฟิลเตอร์
 - รองรับการทำงานในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิ -40°C ถึง 85°C

STM32G474RE เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการประสิทธิภาพสูง เช่น ระบบควบคุมมอเตอร์, ระบบสื่อสาร, และการประมวลผลสัญญาณดิจิตอลสำหรับการพัฒนาและทดลองใช้งาน STM32G474RE สามารถใช้บอร์ดพัฒนา STM32 Nucleo-G474RE ซึ่งรองรับการเข้ามต่อ กับ Arduino และ ST morpho

10.4 Incremental Encoder AMT103-V



รูปที่ 68 Incremental Encoder AMT103-V

MT103-V เป็นอินคิรีเม้นทัลโรตารีเอ็นโค้ดเดอร์ (Incremental Rotary Encoder) แบบโมดูลาร์ที่ใช้ เทคโนโลยีแคปاكซิฟ (Capacitive) จากบริษัท Same Sky (เดิมคือ CUI Devices)

คุณสมบัติหลักของ AMT103-V:

- ความแม่นยำสูง: มีความแม่นยำในการวัดการหมุนของเพลาที่ดี
- ทนทานต่อสภาพแวดล้อม: ทนทานต่อผุน สะปรก และน้ำมัน
- การติดตั้งง่าย: มีตัวเลือกขนาดเพลาหลายขนาด (2 มม. ถึง 8 มม.) และฐานรองที่มีรูยึดหลายแบบ เพื่อ รองรับมอเตอร์ที่หลากหลาย
- การปรับความละเอียด: สามารถปรับความละเอียดได้ผ่านสวิตช์ DIP บนบอร์ด โดยมีความละเอียดตั้งแต่ 48 ถึง 2048 PPR (Pulses Per Revolution)
- ช่วงอุณหภูมิการทำงาน: ทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิ -40°C ถึง +100°C
- การใช้พลังงานต่ำ: ใช้กระแสไฟฟ้าต่ำ
- การติดตั้ง: มีรุ่นที่มีการติดตั้งแบบขวาง (Axial) และแบบตรง (Radial) เพื่อความยืดหยุ่นในการใช้งาน

AMT103-V เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการความแม่นยำสูงและทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่มีฝุ่น สาปกร และน้ำมัน เช่น ระบบควบคุมมอเตอร์ ระบบอัตโนมัติในอุตสาหกรรม และเครื่องจักรที่ต้องการการวัดการหมุนที่แม่นยำ

10.5 Cytron MDD20A Motor Driver



รูปที่ 69 Cytron MDD20A Motor Driver

Cytron MDD20A เป็นไดเรเวอร์มอเตอร์ DC แบบสองช่องสัญญาณที่ออกแบบมาเพื่อควบคุมมอเตอร์ DC ที่มีแปรงถ่าน (Brushed DC Motors) กำลังสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ รองรับแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 6V ถึง 30V และสามารถรองรับกระแสสูงสุด 20A ต่อช่องสัญญาณ

คุณสมบัติหลักของ MDD20A:

- การควบคุมทิศทางสองทิศทาง: สามารถควบคุมมอเตอร์ DC ที่มีแปรงถ่านสองตัวได้อย่างอิสระ
- แรงดันไฟฟ้าทำงาน: รองรับแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 6V ถึง 30V
- กระแสสูงสุดต่อช่องสัญญาณ: รองรับกระแสสูงสุด 20A ต่อช่องสัญญาณ
- การป้องกัน: มีระบบป้องกันกระแสเกิน (Overcurrent Protection) และการป้องกันอุณหภูมิสูง (Overtemperature Protection) เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น
- อินพุต PWM และ DIR: รองรับการควบคุมด้วยสัญญาณ PWM และ DIR ที่มีช่วงแรงดันอินพุตตั้งแต่ 1.8V ถึง 12V
- การทดสอบด้วยปุ่มและ LED: มาพร้อมปุ่มสำหรับการทดสอบและ LED แสดงสถานะการทำงานของมอเตอร์
- ความถี่ PWM: รองรับความถี่ PWM ได้ถึง 20kHz

- การป้องกันแรงดันต่ำ: มีระบบป้องกันการทำงานเมื่อแรงดันไฟฟ้าต่ำเกินไป

MDD20A เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการควบคุมมอเตอร์ DC กำลังสูง เช่น ระบบหุ่นยนต์อัตโนมัติ (AGV), ระบบติดตามแสงอาทิตย์ (Solar Tracker), และเครื่องจักรอัตโนมัติ

10.6 RS PRO Hybrid, Permanent Magnet Stepper Motor,

มอเตอร์สเต็ปเปอร์แบบไฮบริดแม่เหล็กถาวร RS PRO เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่เคลื่อนที่เป็นขั้นตอน (step) โดยใช้เทคโนโลยีไฮบริดที่รวมคุณสมบัติของมอเตอร์แม่เหล็กถาวรและมอเตอร์แบบบริลลัคแทนซ์ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในอุปกรณ์ขนาดเล็ก

คุณสมบัติหลัก:

- ความแม่นยำสูง: มอเตอร์นี้มีมุมก้าว (step angle) ที่เล็ก เช่น 1.8° หรือ 0.9° ทำให้สามารถควบคุมตำแหน่งได้อย่างแม่นยำ
- แรงบิดสูงที่ความเร็วต่ำ: มอเตอร์สเต็ปเปอร์มีแรงบิดสูงแม้ที่ความเร็วต่ำ ทำให้เหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการการควบคุมความเร็วและตำแหน่งที่แม่นยำ
- การควบคุมง่าย: การควบคุมมอเตอร์สเต็ปเปอร์ทำได้โดยการส่งพัลส์ไฟฟ้าไปยังชุดลวด ทำให้สามารถควบคุมการหมุนและตำแหน่งได้อย่างง่ายดาย

มอเตอร์สเต็ปเปอร์แบบไฮบริดแม่เหล็กถาวร RS PRO เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการความแม่นยำในการควบคุมตำแหน่งและความเร็ว เช่น เครื่องพิมพ์สามมิติ เครื่อง CNC ระบบอัตโนมัติในงานอุตสาหกรรม และอุปกรณ์ที่ต้องการการควบคุมการเคลื่อนที่ที่ละเอียดอ่อน

อุปกรณ์การทดลอง

1. RS PRO Hybrid, Permanent Magnet Stepper Motor,
2. 0.22Nm Torque, 2.8 V, 1.8° , 42.3 x 42.3mm Frame, 5mm Shaft จำนวน 1 อัน
3. Incremental Encoder AMT103-V จำนวน 1 อัน
4. WCS1700 Hall Current Sensor จำนวน 1 อัน
5. Cytron MDD20A Motor Driver จำนวน 1 อัน
6. Nucleo STM32G474RE พร้อมสายอัปโหลด จำนวน 1 ชุด

วิธีดำเนินการทดลอง

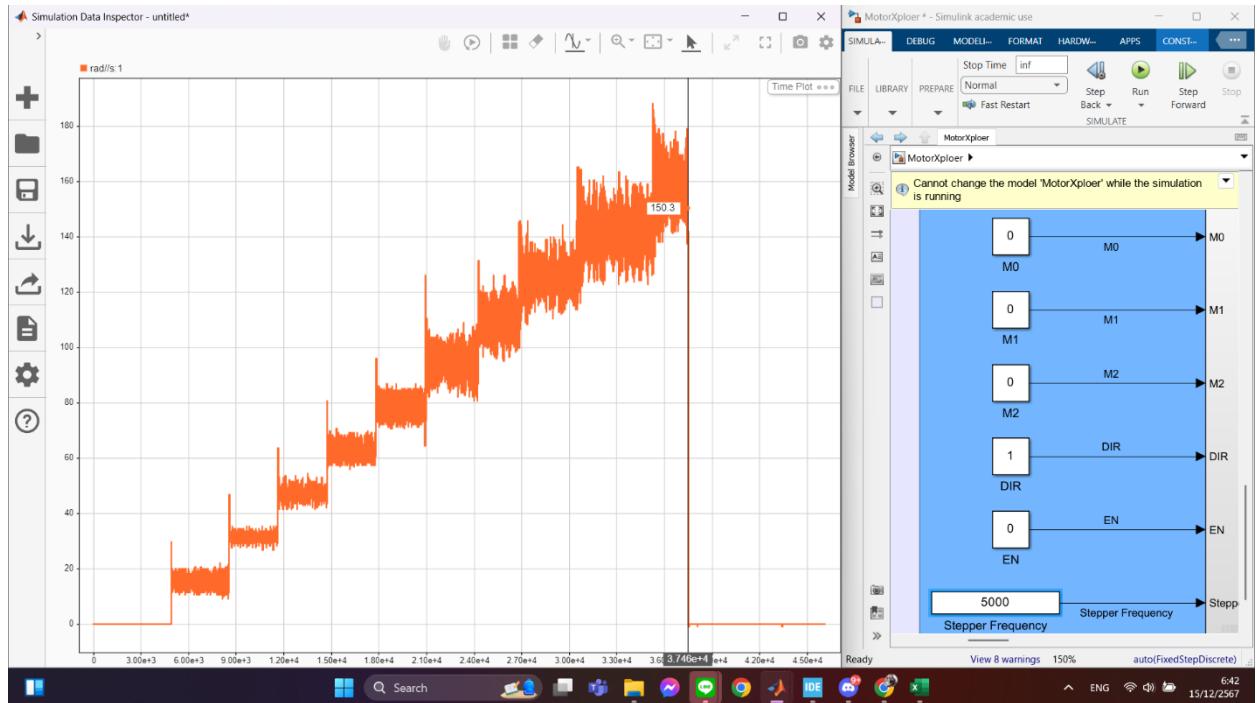
ในการทดลองเพื่อศึกษาพัฒนาระบบและหลักการทำงานของ Brushed DC Motor ได้ทำการทดลองโดยใช้ STM32G474RE รับสัญญาณที่มาจาก Stepper Driver เพื่ออ่านค่าความเร็ว โดยจะสังเกตความเร็ว Motor จากการปรับโหมดแต่ละโหมด รวมถึงดูว่าแต่ละโหมดนั้นมีความถี่ที่รับได้อยู่ที่เท่าไหร่

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เชื่อมต่อ Nucleo STM32G474RE เข้ากับบอร์ด MotorXplorer
2. จับโหลดโค้ดลงบอร์ด Nucleo STM32G474RE
3. ปรับโหมดของ Stepper Motor Driver ใน MATLAB Simulink
4. ปรับความถี่ของ Stepper Motor ใน MATLAB Simulink
5. สังเกตผลการทดลองและบันทึกผลผ่านกราฟจาก Data Inspector ใน MATLAB Simulink

ผลการทดลอง

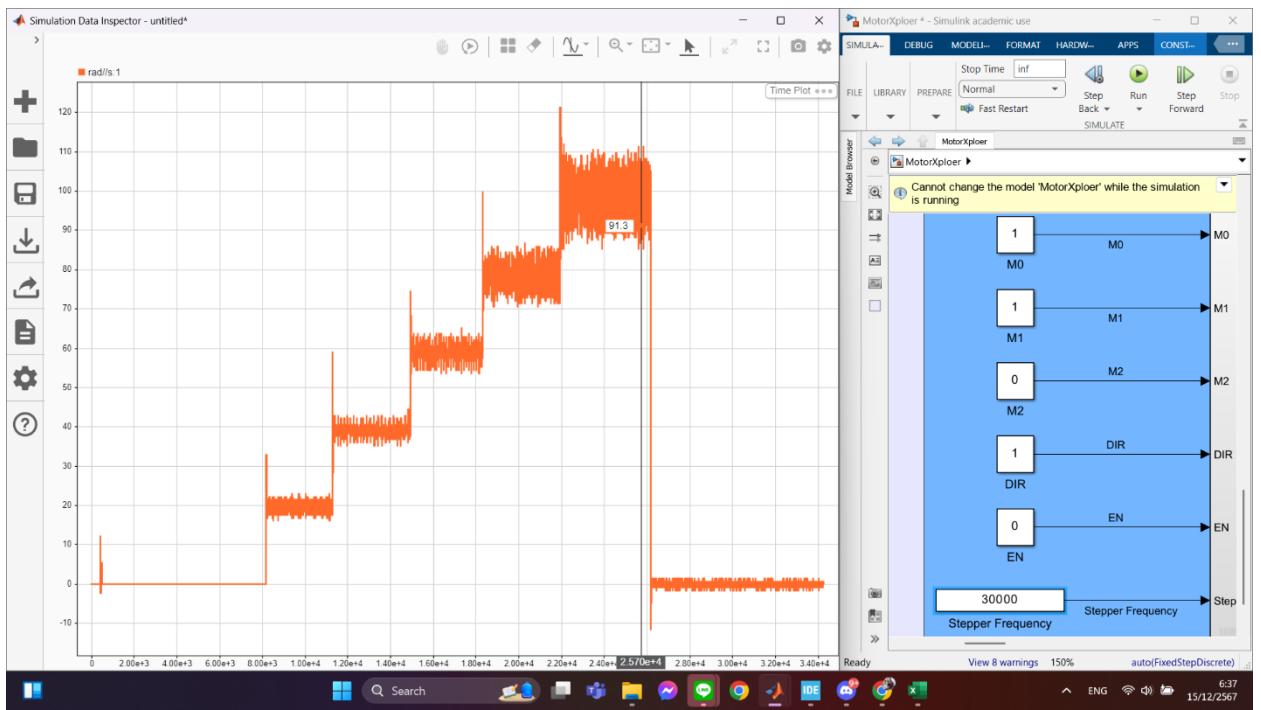
- โหมด 000



รูปที่ 70 โหมด 000 (Micro Step 1/32)

จากรูปแสดงให้เห็นว่าที่โหมด 000 (Micro Step 1/32) มีความเร็วสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 160 rpm และความถี่ที่ปรับได้สูงสุดอยู่ที่ 5000 bits

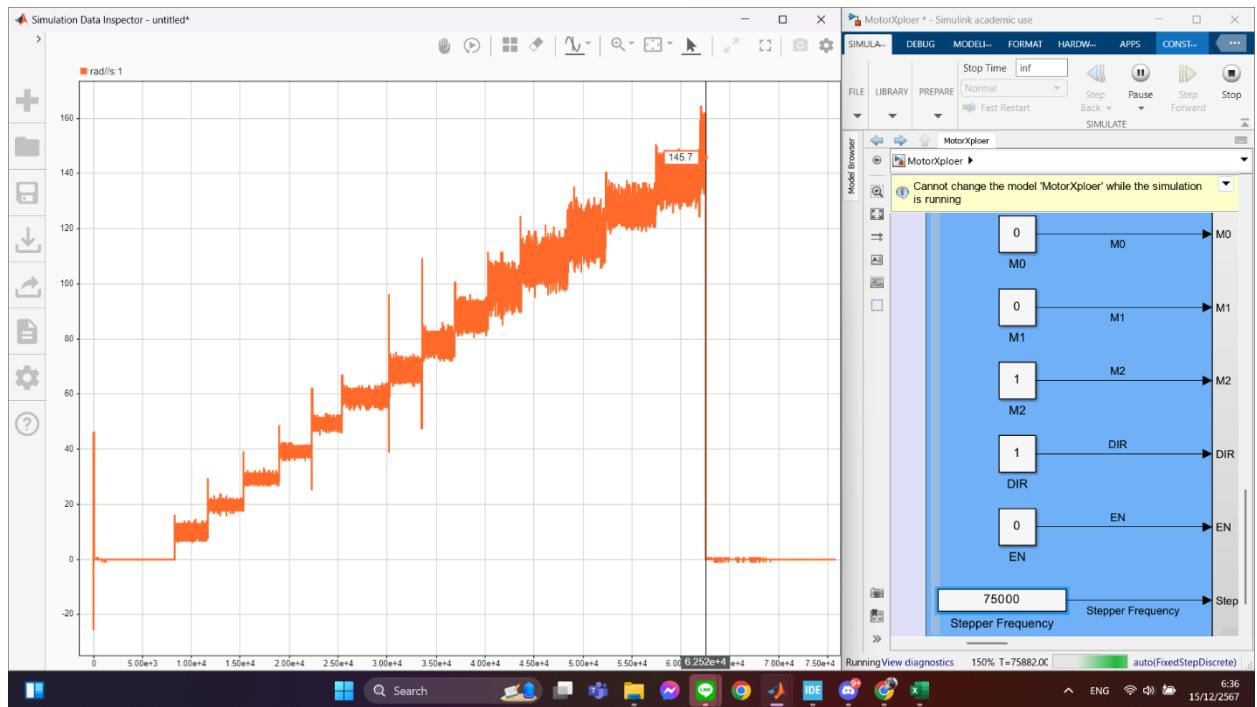
- โหมด 110



รูปที่ 71 โหมด 110 (Micro Step 1/16)

จากรูปแสดงให้เห็นว่าโหมด 110 (Micro Step 1/16) มีความเร็วสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 110 rpm และความถี่ที่ปรับได้สูงสุดอยู่ที่ 30000 bits

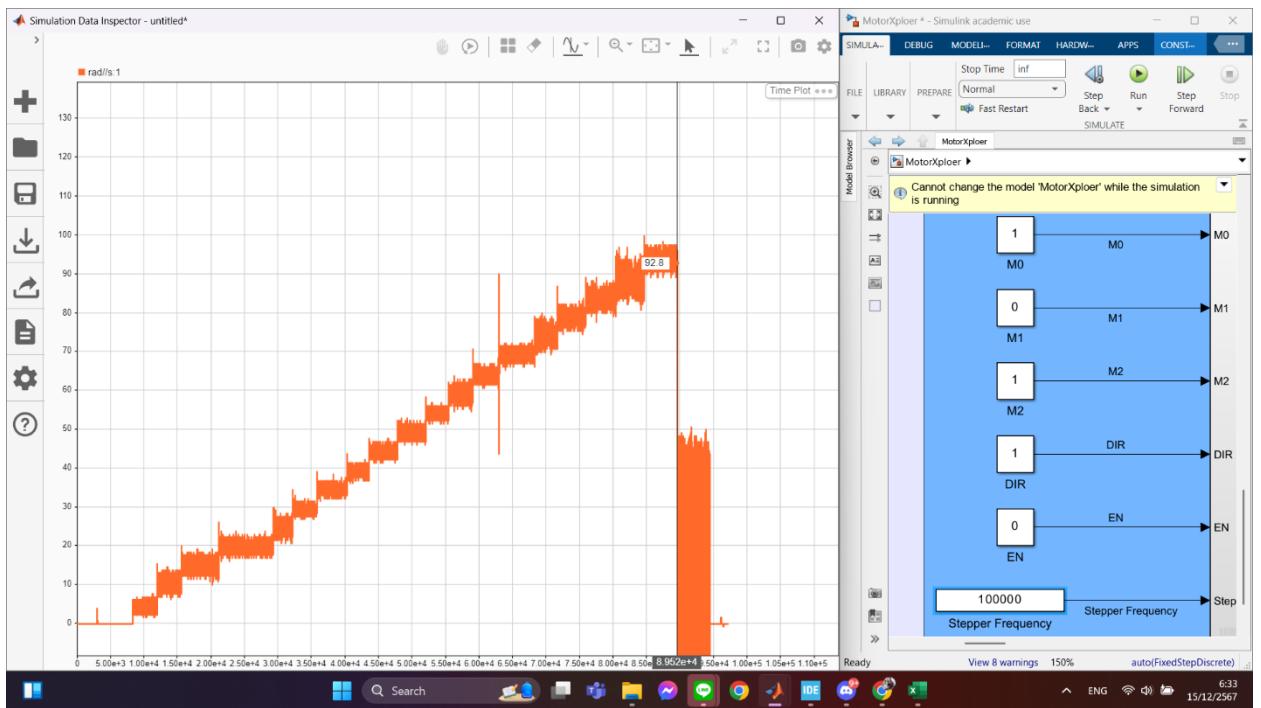
- ใหมด 001



รูปที่ 72 ใหมด 001 (Micro Step 1/8)

จากรูปแสดงให้เห็นว่าที่ใหมด 001 (Micro Step 1/8) มีความเร็วสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 130 rpm และความถี่ที่ปรับได้สูงสุดอยู่ที่ 75000 bits

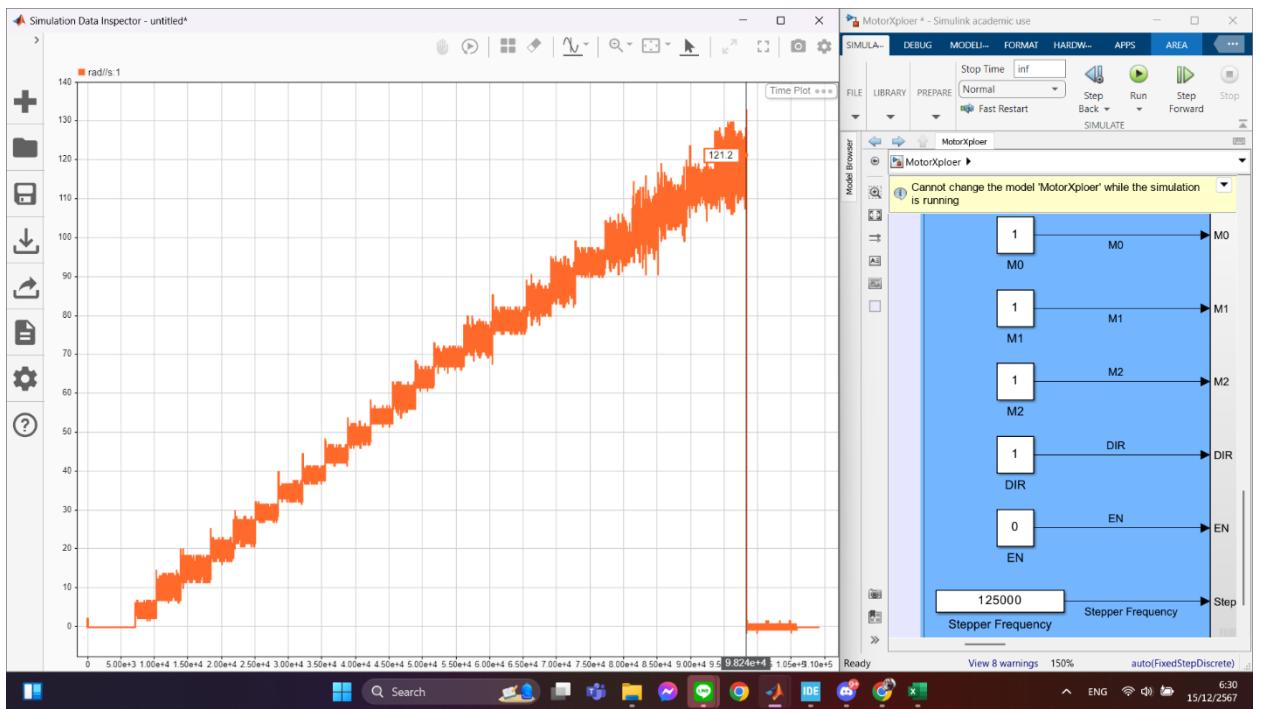
- โหมด 101



รูปที่ 73 โหมด 101 (Micro Step 1/4)

จากรูปแสดงให้เห็นว่าที่โหมด 101 (Micro Step 1/4) มีความเร็วสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 95 rpm และความถี่ที่ปรับได้สูงสุดอยู่ที่ 100000 bits

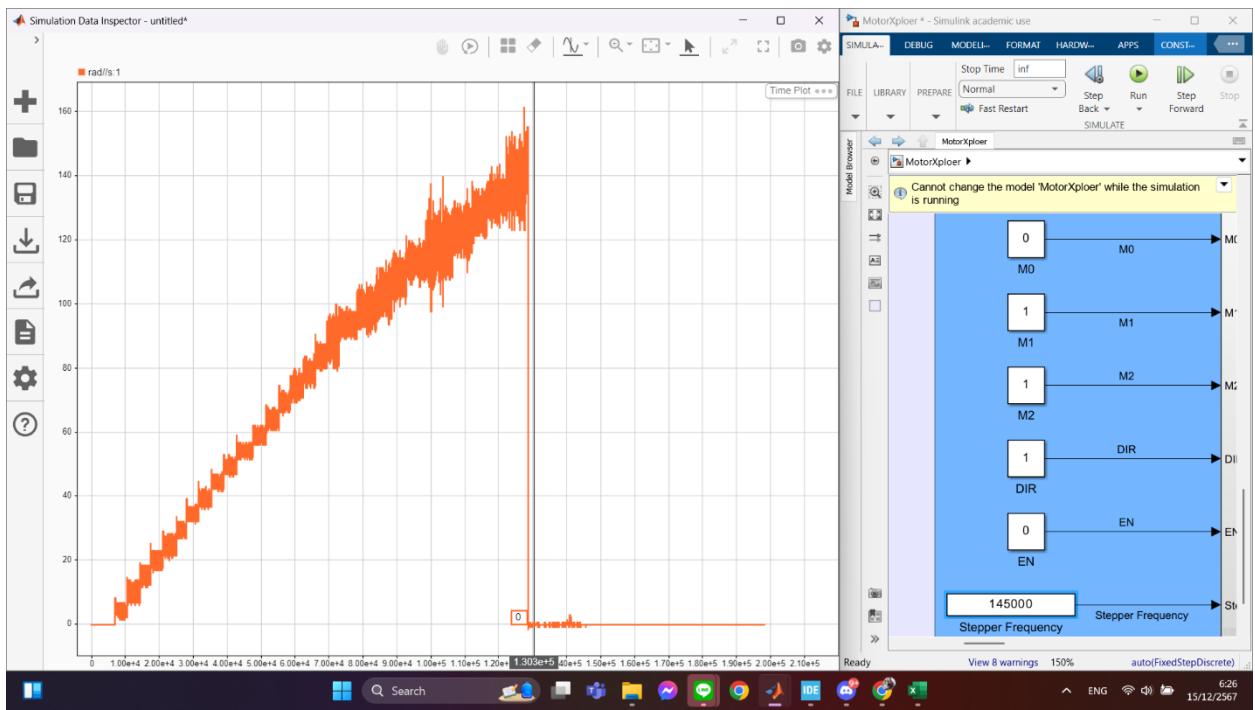
- โหมด 011



รูปที่ 73 โหมด 011 (Half Step 1/2)

จากรูปแสดงให้เห็นว่าที่โหมด 011 (Half Step 1/2) มีความเร็วสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 140 rpm และความถี่ที่ปรับได้สูงสุดอยู่ที่ 125000 bits

- โหมด 111

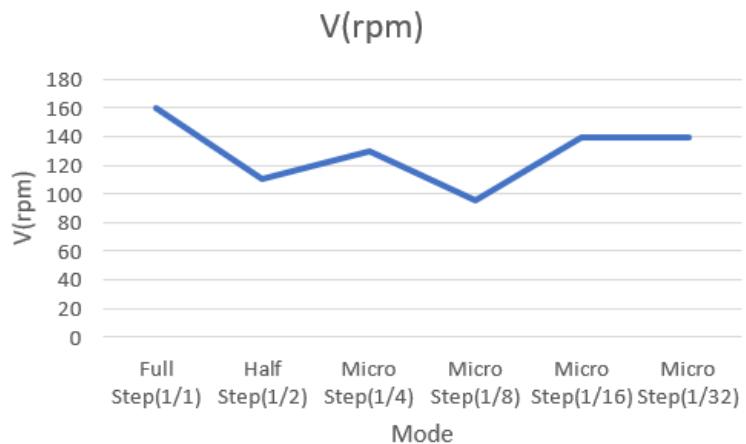


รูปที่ 74 โหมด 111 (Full Step 1/1)

จากรูปแสดงให้เห็นว่าที่โหมด 111 (Full Step 1/1) มีความเร็วสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 140 rpm และความถี่ที่ปรับได้สูงสุดอยู่ที่ 145000 bits

Mode	V(rpm)
Full Step(1/1)	160
Half Step(1/2)	110
Micro Step(1/4)	130
Micro Step(1/8)	95
Micro Step(1/16)	140
Micro Step(1/32)	140

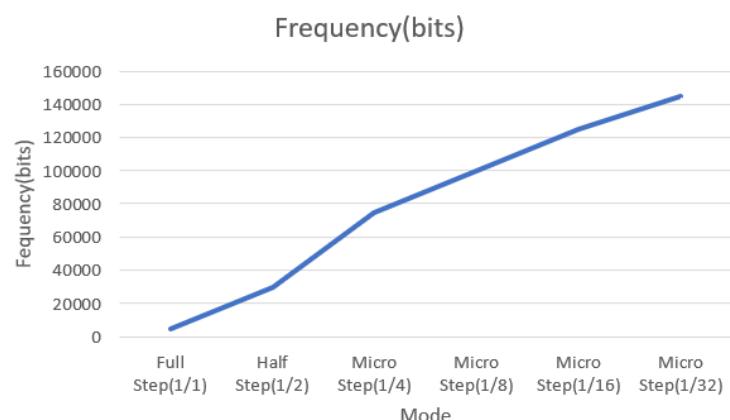
ตารางที่ 5 แสดงความเร็วเทียบกับโหมดต่าง ๆ



รูปที่ 75 แสดงความเร็วเทียบกับโหมดต่าง ๆ

Mode	Frequency(bits)
Full Step(1/1)	5000
Half Step(1/2)	30000
Micro Step(1/4)	75000
Micro Step(1/8)	100000
Micro Step(1/16)	125000
Micro Step(1/32)	145000

ตารางที่ 6 แสดงความถี่สูงสุดเทียบกับโหมดต่างๆ



รูปที่ 76 กราฟแสดงความถี่สูงสุดเทียบกับโหมดต่างๆ

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองศึกษาพัฒนาระบบและหลักการทำงานของสเต็ปเพอร์ฟอร์มอเตอร์ พบร่วมกับการปรับเปลี่ยนจาก Full Step ไปยัง Micro Step 1/32 มีผลต่อความเร็วและความถี่ของมอเตอร์ดังนี้:

- ความเร็วรอบ (RPM): มีค่าไม่คงที่ โดยอยู่ในช่วงประมาณ 90-160 RPM
- ความถี่สูงสุด: เมื่อใช้โหมดที่มีการแบ่งย่อยมากขึ้น (เช่น Micro Step 1/32) ความถี่สูงสุดที่มอเตอร์สามารถทำได้จะลดลงตามลำดับ

อภิปรายผลการทดลอง

1. ความไม่คงที่ของความเร็วรอบ:

- สเต็ปเพอร์ฟอร์มอเตอร์มีลักษณะการเคลื่อนที่เป็นขั้นตอน ซึ่งอาจทำให้เกิดการสั่นสะเทือนหรือความไม่ราบรื่นในการหมุน ส่งผลให้ความเร็วรอบไม่คงที่
- การใช้โหมด Micro Stepping ช่วยลดขนาดของแต่ละขั้นตอน ทำให้การเคลื่อนที่ราบรื่นขึ้น แต่ยังคงมีปัจจัยอื่น ๆ เช่น แรงบิดและโหลดที่อาจส่งผลต่อความเร็วรอบ

2. การลดลงของความถี่สูงสุดในโหมด Micro Stepping:

- ในโหมด Micro Stepping มอเตอร์ถูกควบคุมให้เคลื่อนที่ด้วยขั้นตอนที่เล็กลง ทำให้ต้องการสัญญาณควบคุมที่มีความละเอียดและความถี่สูงขึ้น
- อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความละเอียดของการควบคุมทำให้ระบบต้องประมวลผลสัญญาณมากขึ้น ซึ่งอาจทำให้ความถี่สูงสุดที่มอเตอร์สามารถตอบสนองได้ลดลง
- นอกจากนี้ การใช้โหมด Micro Stepping ยังส่งผลให้แรงบิดของมอเตอร์ลดลง ซึ่งอาจจำกัดความเร็วสูงสุดที่มอเตอร์สามารถทำได้

การปรับเปลี่ยนการขับเคลื่อนของสเต็ปเพอร์ฟอร์มอเตอร์จาก Full Step ไปยัง Micro Step 1/32 ส่งผลให้ความถี่สูงสุดที่มอเตอร์สามารถทำได้ลดลง และความเร็วรอบมีความไม่คงที่ การเลือกโหมดการขับเคลื่อนที่เหมาะสมควรพิจารณาถึงความต้องการด้านความละเอียดของการเคลื่อนที่ ความเร็ว และแรงบิดที่ต้องการในงานนั้น ๆ

ข้อเสนอแนะ

ในการทดลองนี้ควรเก็บค่าความถี่โดยให้ออกแบบตัวแopoulosลิเคชันให้ความถี่ค่อนข้างต่ำ ไม่ควรเก็บค่าจากการปรับด้วยมือ รวมถึง ควรตั้งค่าอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับการทดลองและตรงกับค่าที่ควรจะได้จริง ๆ

เอกสารอ้างอิง

<https://www.walmart.com/ip/DC-Motor-12V-11000-12000RPM-0-8A-Electric-Motor-Round-Shaft/146496637>

<http://products.carolinascaling.com/viewitems/rice-lake-load-cells-2/rl1380-stainless-steel-single-point-load-cells>

<https://www.firgelliauto.com/blogs/news/what-is-a-duty-cycle-in-a-linear-actuator>

<https://www.flyrobo.in/wcs1700-hall-current-sensor-with-over-current-protection>

https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-g474re.html?widgetSearchBar=STM32G4&widgetSearchAction=1&_charset_=UTF-8&filter-search=products

https://www.automationdirect.com/adc/shopping/catalog/sensors_z_encoders/encoders/modular_kit_encoders_for_stepper_motors/amt103-v

<https://botland.store/motor-drivers-modules/18881-cytron-mdd20a-two-channel-motor-driver-30v20a-5904422384180.html>

Brushless DC Motor

การทดลองที่ 3 การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมและหลักการทำงานของ Brushless DC Motor

จุดประสงค์

- เพื่อศึกษาการออกแบบการทดลองโดยใช้ทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ ในการ สืบเสาะพฤติกรรม ปรากฏการณ์ ทดลอง บันทึกผลการทดลอง สรุปผล และอภิปรายผลการทดลอง และเข้าใจหลักการทำงานของเซ็นเซอร์ และอุปกรณ์ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องได้
- เพื่อศึกษาหลักการทำงานของ Brushless DC Motor ได้
- เพื่อศึกษาวิธีการตั้งค่า Motor ในโปรแกรม Motor Workbench 6.3.2
- เพื่อศึกษาวิธีการตั้งค่า PWM Generation Frequency และ Speed Sensing
- เพื่อศึกษา Electrical parameters, Mechanical parameters, และ Motor magnetic structure ของ BLDC Motor
- เพื่อศึกษา BLDC motor control types ทั้งในรูปแบบ Sensorless Control และ Sensor-based Control
- เพื่อศึกษากราฟสัญญาณของ BLDC Motor ทั้ง 3 Phases ว่ามาจากการควบคุมแบบไหน และสาเหตุที่กราฟมีลักษณะเช่นนี้
- เพื่อศึกษาวิธีการคำนวณหาความเร็วของ BLDC Motor จาก Frequency ของสัญญาณที่อ่านได้จาก Oscilloscope
- เพื่อศึกษา วิธีการใช้งาน Oscilloscope 4 Channels ในการจับสัญญาณของ BLDC Motor ทั้ง 3 Phases

ตัวแปร

ตัวแปรต้น

- แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้า BLDC Motor
- ค่าความถี่ PWM

ตัวแปรตาม

- ความเร็วรอบของมอเตอร์

- ทิศทางการหมุน
 - ตัวแปรควบคุม
 - การตั้งค่ามอเตอร์ใน Motor Workbench
 - ลักษณะวงจรควบคุม

นิยามศัพท์เฉพาะ

- BLDC Motor : มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่ใช้แม่เหล็กถาวรในการสร้างสนามแม่เหล็กและควบคุมด้วยสัญญาณ PWM
 - PWM : สัญญาณควบคุมที่ใช้ปรับความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์โดยเปลี่ยนความกว้างของพลั๊ส

นิยามเชิงปฏิบัติการ

- การทดสอบ BLDC Motor : การเขื่อมต่อมอเตอร์กับวงจรควบคุม และวัดค่าความเร็วของตามแรงดันและความถี่ PWM ที่ปรับแต่งใน Motor Workbench และ Motor Pilot
 - การวัดแรงดันไฟฟ้า : ใช้ Oscilloscope วัดค่าที่ได้จากการทดลองปรับค่าต่าง ๆ

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. BLDC Motor



រូបទី 77 BLDC Motor

BLDC Motor (Brushless DC Motor) คือมอเตอร์กระแสตรงรีไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้ในงานต่าง ๆ เช่น เครื่องใช้ไฟฟ้า ยานยนต์ และอุตสาหกรรมอัตโนมัติ มีข้อดีหลายประการ เช่น ความทนทานสูง ประสิทธิภาพดี และเสียงรบกวนน้อย

คุณสมบัติหลักของ BLDC Motor

1. โครงสร้างภายใน

- ไม่มีแปรงถ่าน (Brush) ซึ่งแตกต่างจากมอเตอร์ DC แบบดั้งเดิม
- สเตเตอร์ (Stator): ชุดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก
- โรเตอร์ (Rotor): แม่เหล็กถาวรหมุน

2. การทำงาน

- ใช้ตัวควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Controller) เพื่อควบคุมกระแสและสร้างสนามแม่เหล็กที่หมุนรอบโรเตอร์
- ตัวควบคุมจะส่งกระแสไฟไปยังชุดลวดตามลำดับที่กำหนดเพื่อทำให้โรเตอร์หมุน

3. ข้อดี

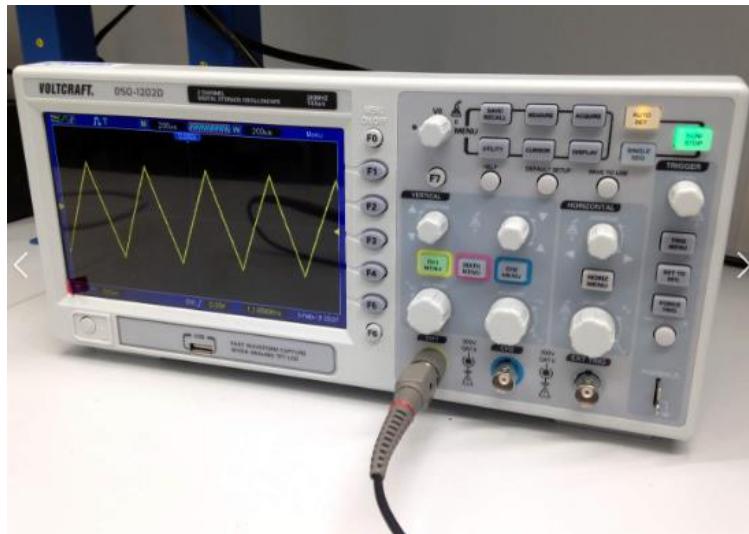
- ประสิทธิภาพสูง: การแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลมีประสิทธิภาพกว่า
- เสียงรบกวนน้อย: ไม่มีการสัมผัสของแปรงถ่านกับคอมมิเตเตอร์
- ความทนทานสูง: ไม่มีชิ้นส่วนที่สึกหรอเร็ว เช่น แปรงถ่าน
- การบำรุงรักษาต่ำ

4. การใช้งาน

- ยานยนต์ไฟฟ้า (EV): เช่น 摩托อร์ไฟฟ้าสำหรับรถยนต์และจักรยานไฟฟ้า
- อุปกรณ์อุตสาหกรรม: หุ่นยนต์ แขนกล และเครื่องจักร CNC
- เครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้าน: เช่น พัดลม เครื่องซักผ้า และเครื่องปรับอากาศ

ข้อจำกัดของ BLDC Motor คือ ต้นทุนสูงกว่าเมื่อเทียบกับมอเตอร์กระแสสลับ ต้องพึงพาตัวควบคุมที่ซับซ้อน BLDC Motor จึงเป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับงานที่ต้องการความแม่นยำ ประสิทธิภาพ และอายุการใช้งานที่ยาวนาน

2. Oscilloscope



รูปที่ 78 Oscilloscope

Oscilloscope (ออสซิลโลสโคป) คือเครื่องมือวัดที่ใช้แสดงสัญญาณไฟฟ้าในรูปแบบของกราฟเวลา (Time Domain) โดยแกน X แสดงเวลา และแกน Y แสดงแรงดันไฟฟ้า เครื่องมือชนิดนี้มีความสำคัญในงานด้านอิเล็กทรอนิกส์ไฟฟ้า และงานวิจัยต่าง ๆ

3. PWM

PWM (Pulse Width Modulation) หรือ การ-modulate ความกว้างพัลส์ เป็นเทคนิคที่ใช้ในการควบคุมพัลส์งานไฟฟ้าหรือสัญญาณอนาล็อกผ่านการปรับความกว้างของพัลส์ในสัญญาณดิจิทัล โดยการสลับสถานะระหว่างเปิด (HIGH) และปิด (LOW) อย่างรวดเร็ว การปรับความกว้างของพัลส์นี้ทำให้สามารถจำลองค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าได้ตามต้องการ

หลักการทำงานของ PWM:

- Duty Cycle: คือสัดส่วนของเวลาที่สัญญาณอยู่ในสถานะเปิด (HIGH) ต่อรอบเวลาทั้งหมด โดยคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ เช่น Duty Cycle 50% หมายถึงสัญญาณเปิด 50% และปิด 50% ของรอบเวลา การปรับ Duty Cycle จะเปลี่ยนค่าเฉลี่ยของสัญญาณที่ส่งออกมา

การประยุกต์ใช้ PWM:

- การควบคุมความเร็วมอเตอร์: ปรับความเร็วของมอเตอร์ DC โดยการเปลี่ยน Duty Cycle เพื่อควบคุม พลังงานที่ส่งไปยังมอเตอร์
- การหรี่แสง LED: ปรับความสว่างของ LED โดยการเปลี่ยน Duty Cycle เพื่อควบคุมค่าเฉลี่ยของ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ LED
- การแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก (DAC): ใช้ PWM เพื่อสร้างสัญญาณอนาล็อกจากสัญญาณดิจิทัล
- การสื่อสารดิจิทัล: ใช้ PWM ในการส่งข้อมูลในระบบสื่อสารดิจิทัล

PWM เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพและประหยัดพลังงาน เนื่องจากการสลับสถานะเปิด-ปิดของสัญญาณ ทำให้การสูญเสียพลังงานน้อยลง และสามารถควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้อย่างแม่นยำ

4. Speed Sensing

Speed Sensing หรือการตรวจจับความเร็ว หมายถึงกระบวนการวัดหรือคำนวณความเร็วของวัตถุหรือ เครื่องจักร เช่น มอเตอร์ ยานพาหนะ หรือส่วนประกอบเชิงกลในระบบอุตสาหกรรม โดยทั่วไปจะใช้เซ็นเซอร์ หรือเทคนิคเฉพาะเพื่อเก็บข้อมูลความเร็วเพื่อการควบคุมหรือวิเคราะห์ระบบ

5. อุปกรณ์ที่ใช้

5.1 STMICROELECTRONICS X-NUCLEO-IHM08M1



รูปที่ 79 STMICROELECTRONICS X-NUCLEO-IHM08M1

STMICROELECTRONICS X-NUCLEO-IHM08M1 เป็นบอร์ดขยาย (expansion board) ที่ออกแบบโดย STMicroelectronics เพื่อใช้ในการพัฒนาและทดสอบการควบคุมมอเตอร์แบบ Brushless DC (BLDC) และ Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการใช้งานร่วมกับแพลตฟอร์ม STM32 Nucleo

5.2 Nucleo STM32G474RE



รูปที่ 80 Nucleo STM32G474RE

STM32G474RE เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) จากตระกูล STM32G4 ของบริษัท STMicroelectronics ที่ใช้แกนประมวลผล ARM® Cortex®-M4 32 บิต ทำงานที่ความเร็วสูงสุด 170 MHz พร้อมหน่วยประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (DSP) และหน่วยประมวลผลฟlotทิ่งพอยต์ (FPU) ซึ่งหมายความว่ามีความสามารถในการประมวลผลสัญญาณ

คุณสมบัติหลักของ STM32G474RE:

1. หน่วยความจำ:
 1. Flash memory ขนาด 512 Kbytes
 2. SRAM ขนาด 128 Kbytes

3. รองรับการเชื่อมต่อ กับหน่วยความจำภายในอกผ่าน FSMC (Flexible Static Memory Controller)
 2. พอร์ต I/O:
 1. รองรับพอร์ต I/O ความเร็วสูงถึง 107 พอร์ต
 2. รองรับการทำงานร่วมกับสัญญาณดิจิตอลและแอนะล็อก
 3. พอร์ตการสื่อสาร:
 1. รองรับการสื่อสารหลายรูปแบบ เช่น CAN, I2C, SPI, UART/USART
 2. รองรับการเชื่อมต่อ กับหน่วยความจำภายในอกผ่าน Quad-SPI
 4. ตัวแปลงสัญญาณ:
 1. ADC ความละเอียด 12 บิต จำนวน 5 ตัว
 2. DAC ความละเอียด 12 บิต จำนวน 7 ช่อง
 3. ตัวแปลงสัญญาโนนาล็อกเป็นดิจิตอล (ADC) ความเร็วสูงถึง 5 Msps
 5. คุณสมบัติพิเศษ:
 1. CORDIC accelerator สำหรับการคำนวณตรีโกณมิติ
 2. FMAC (Filter Mathematical Accelerator) สำหรับการประมวลผลฟิลเตอร์
 3. รองรับการทำงานในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิ -40°C ถึง 85°C
- STM32G474RE เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการประสิทธิภาพสูง เช่น ระบบควบคุมมอเตอร์, ระบบสื่อสาร, และการประมวลผลสัญญาณดิจิตอลสำหรับการพัฒนาและทดลองใช้งาน STM32G474RE สามารถใช้บอร์ดพัฒนา STM32 Nucleo-G474RE ซึ่งรองรับการเชื่อมต่อ กับ Arduino และ ST morpho
6. ความเร็วรอบ

$$\text{สูตรคือ} \quad \text{RPM} = 60 \times \text{frequency} \div \text{Pulse per revolution}$$

อุปกรณ์การทดลอง

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

วิธีดำเนินการทดลอง

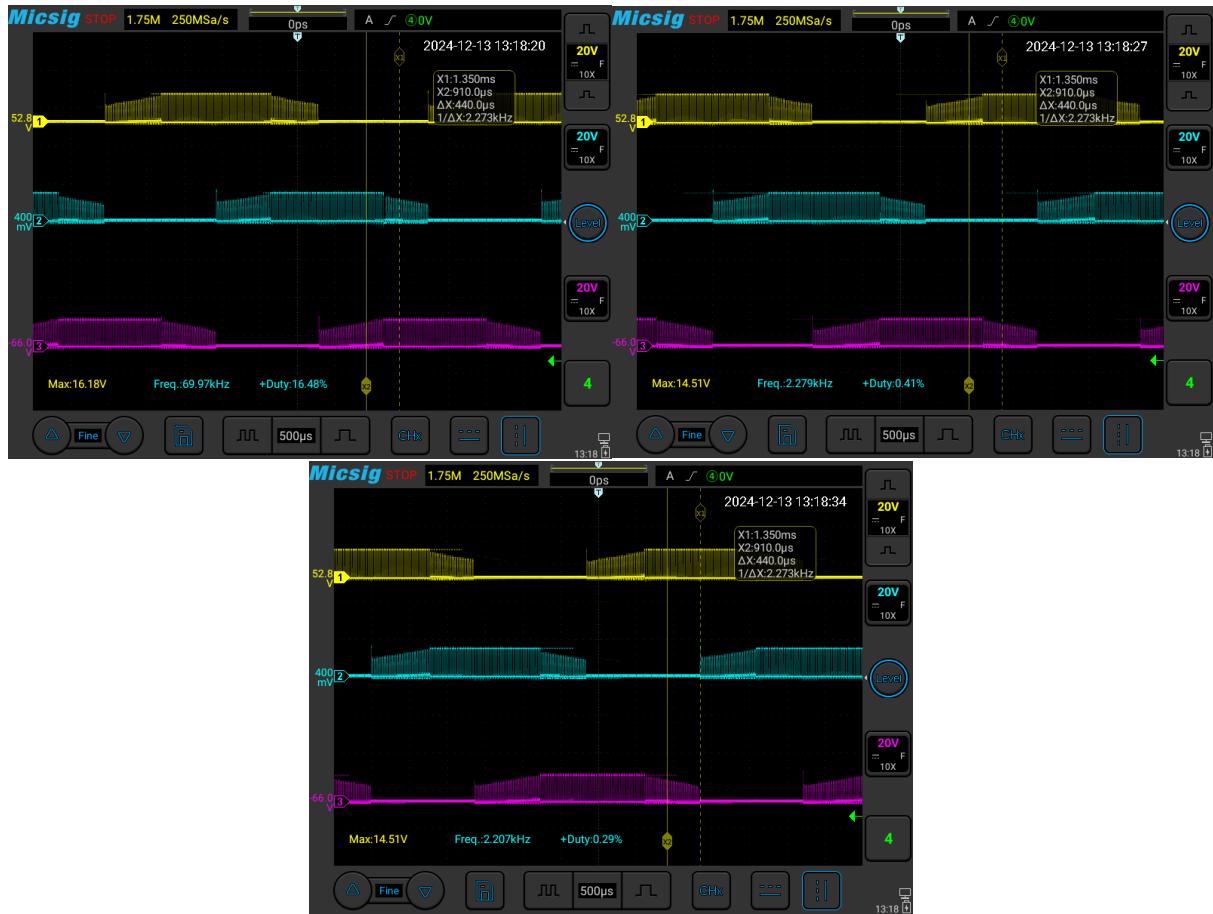
1. เชื่อมต่อ Nucleo STM32G474RE เข้ากับบอร์ด BLDCXplorer
2. ตั้งค่า BLDC Motor
3. ปรับค่าความถี่ PWM
4. วัดค่าที่ได้จากการทดลองปรับค่าความถี่
5. บันทึกผลและสังเกตพฤติกรรมการทำงานของมอเตอร์

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เชื่อมต่อ Nucleo STM32G474RE เข้ากับบอร์ด BLDCXplorer
2. ตั้งค่า BLDC Motor ในโปรแกรม Motor Workbench
3. ปรับค่าความถี่ PWM ผ่านโปรแกรม Motor Pilot
4. ใช้ Oscilloscope วัดค่าที่ได้จากการทดลอง
5. บันทึกค่าความเร็วรอบในแต่ละความถี่และสังเกตพฤติกรรมการทำงานของมอเตอร์

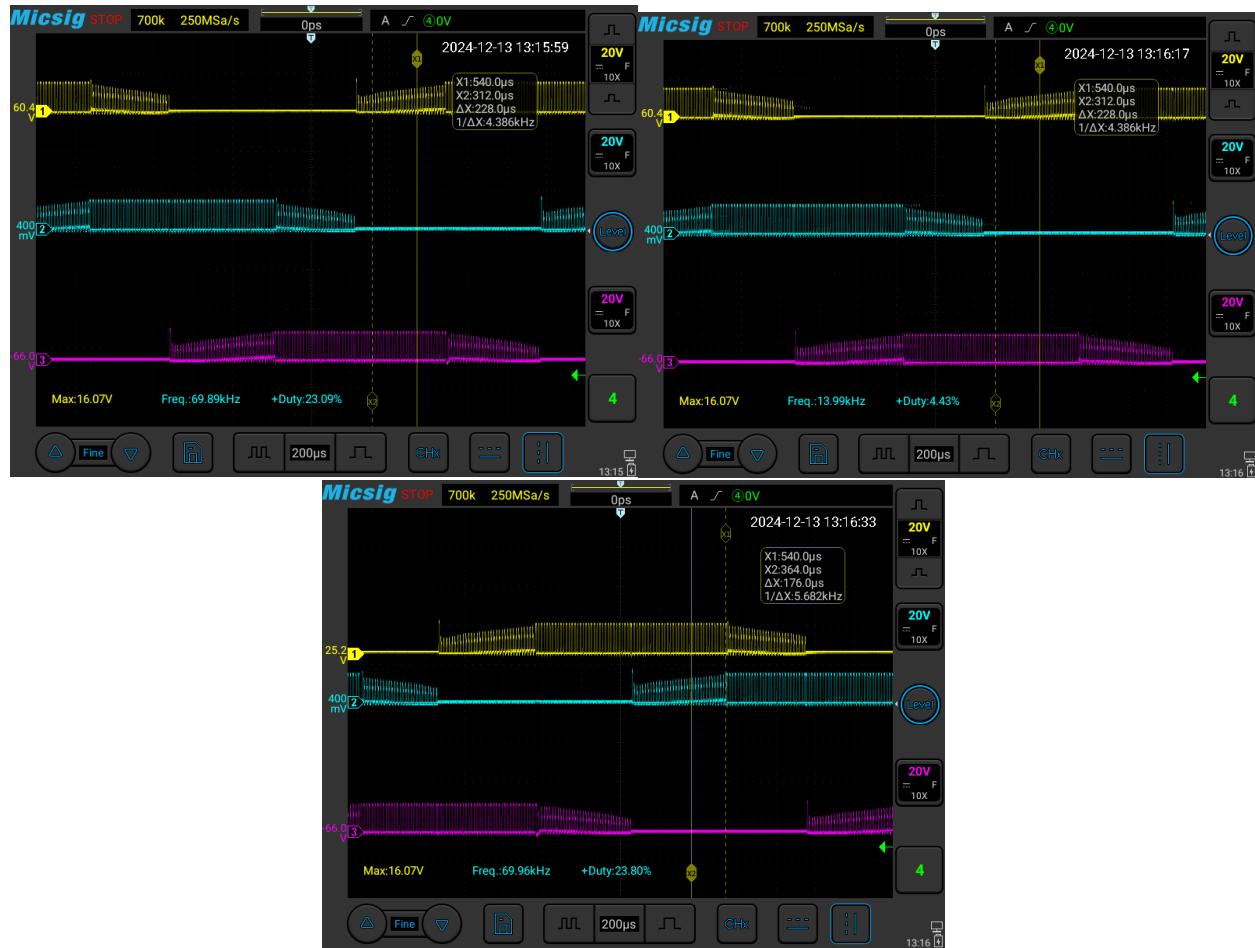
ผลการทดลอง

- ที่ความเร็ว 2000 rpm



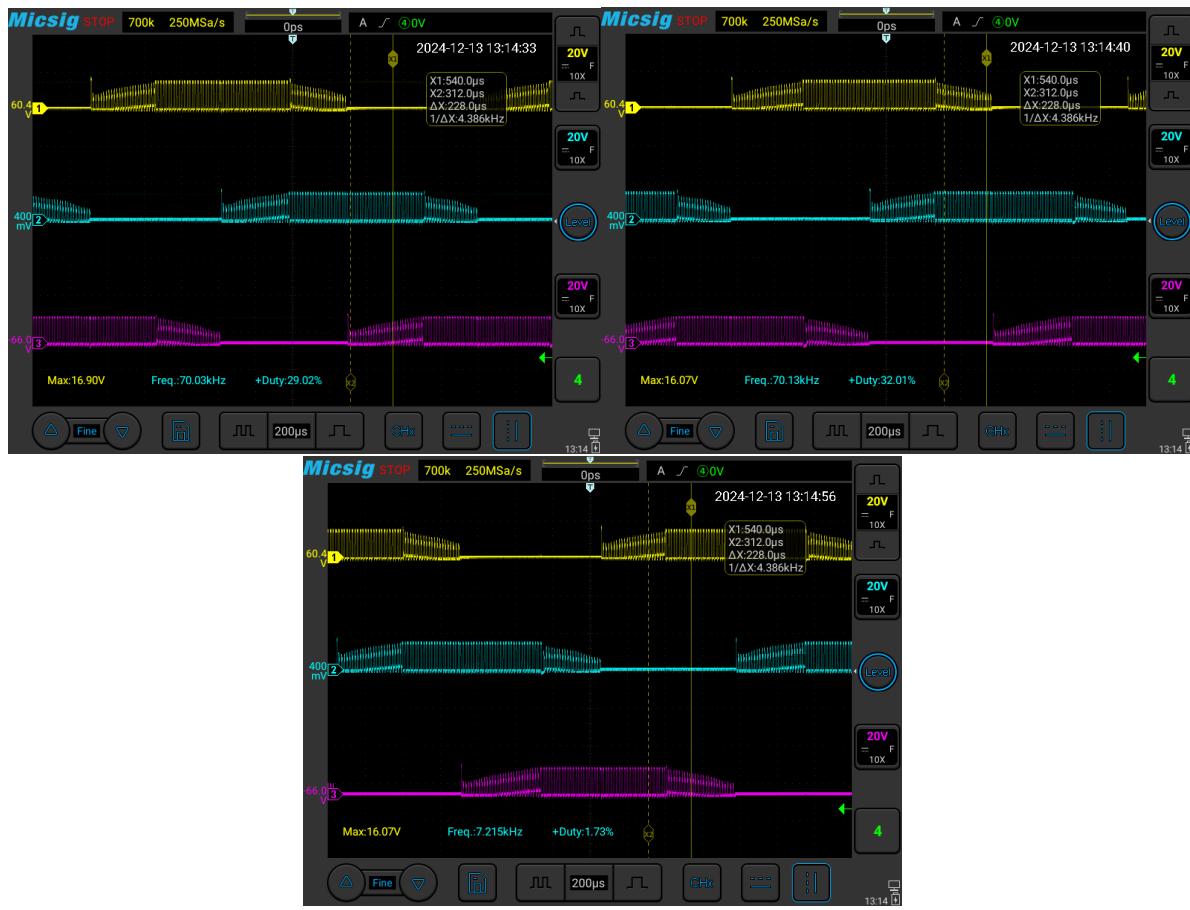
รูปที่ 81 กราฟที่ได้จากการเร็ว 2000 rpm

- ที่ความเร็ว 3000 rpm



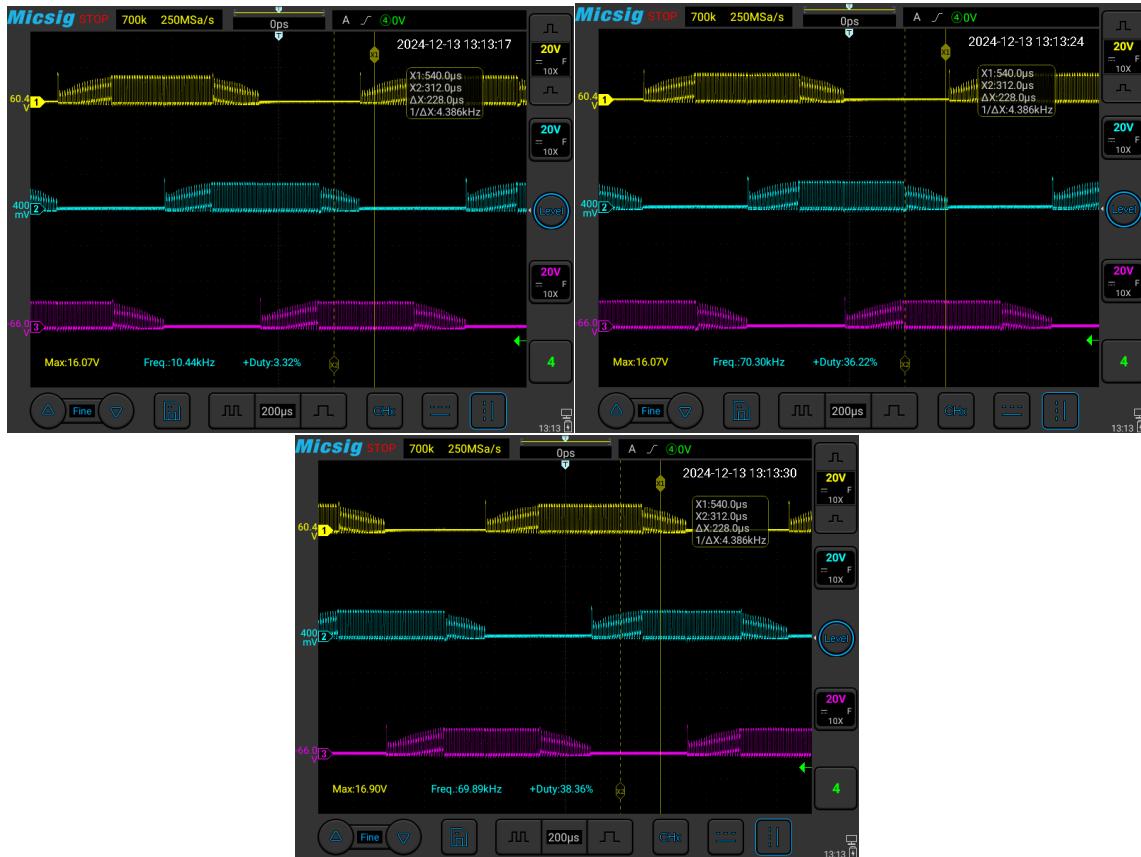
รูปที่ 82 กราฟที่ได้จากความเร็ว 3000 rpm

- ที่ความเร็ว 4000



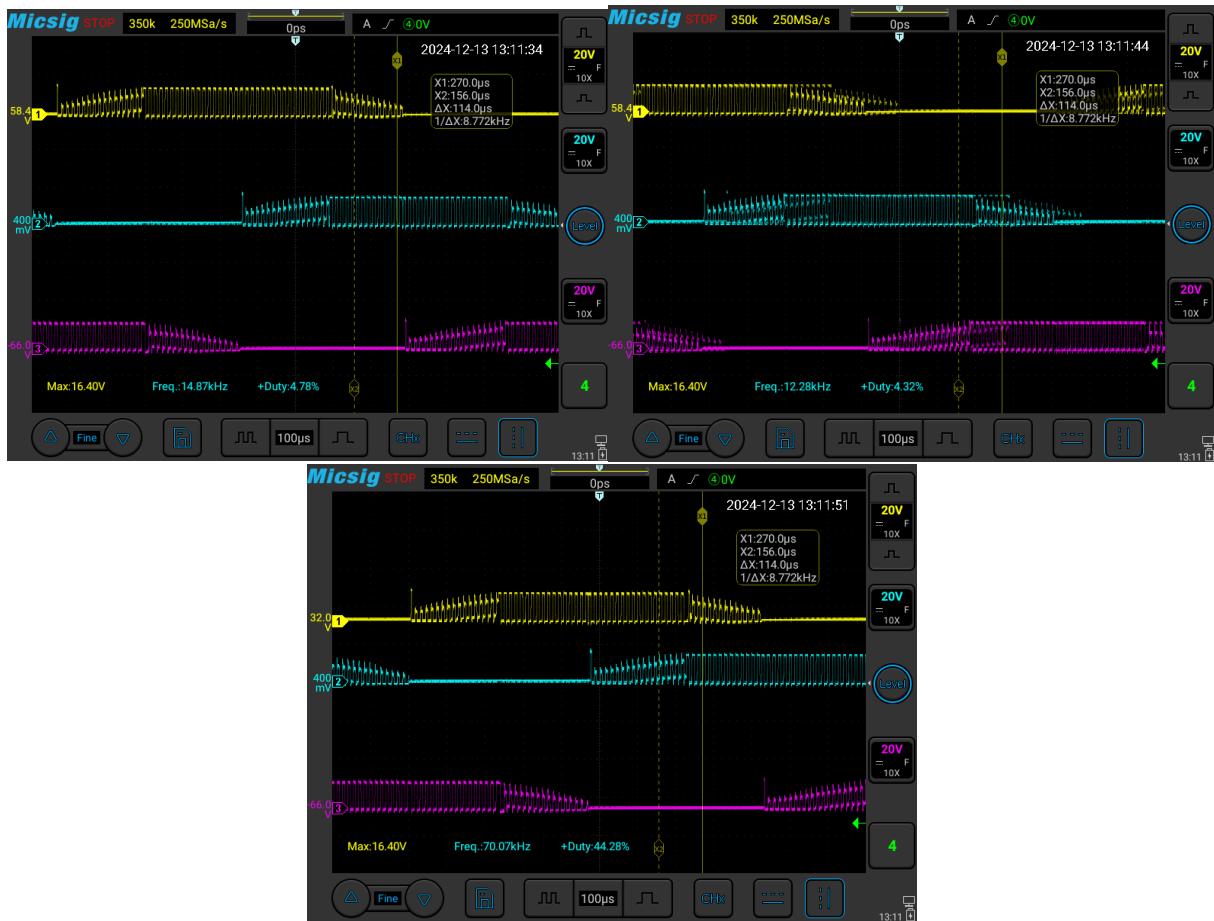
รูปที่ 83 กราฟที่ได้จากความเร็ว 4000 rpm

- ที่ความเร็ว 5000 rpm



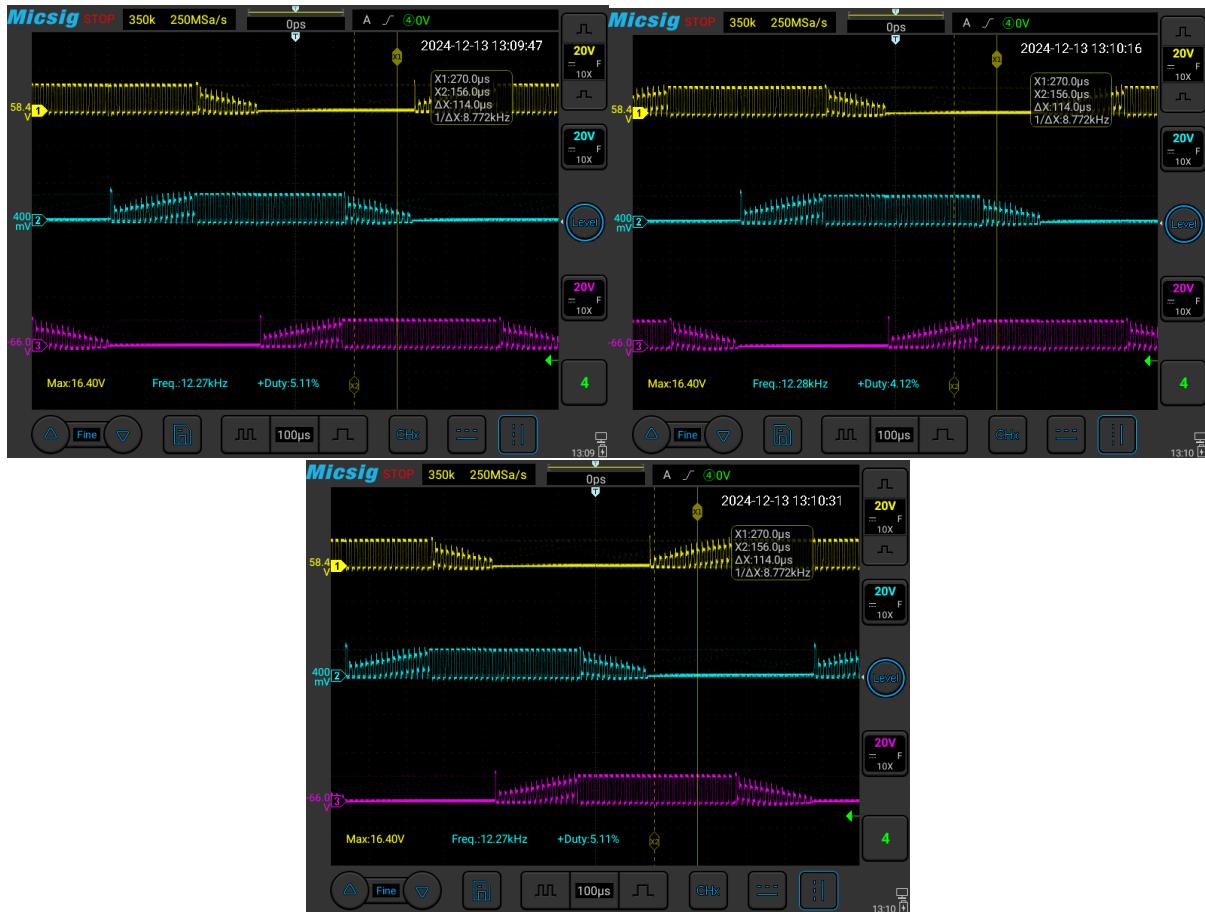
รูปที่ 84 กราฟที่ได้จากความเร็ว 5000 rpm

- ที่ความเร็ว 6000 rpm



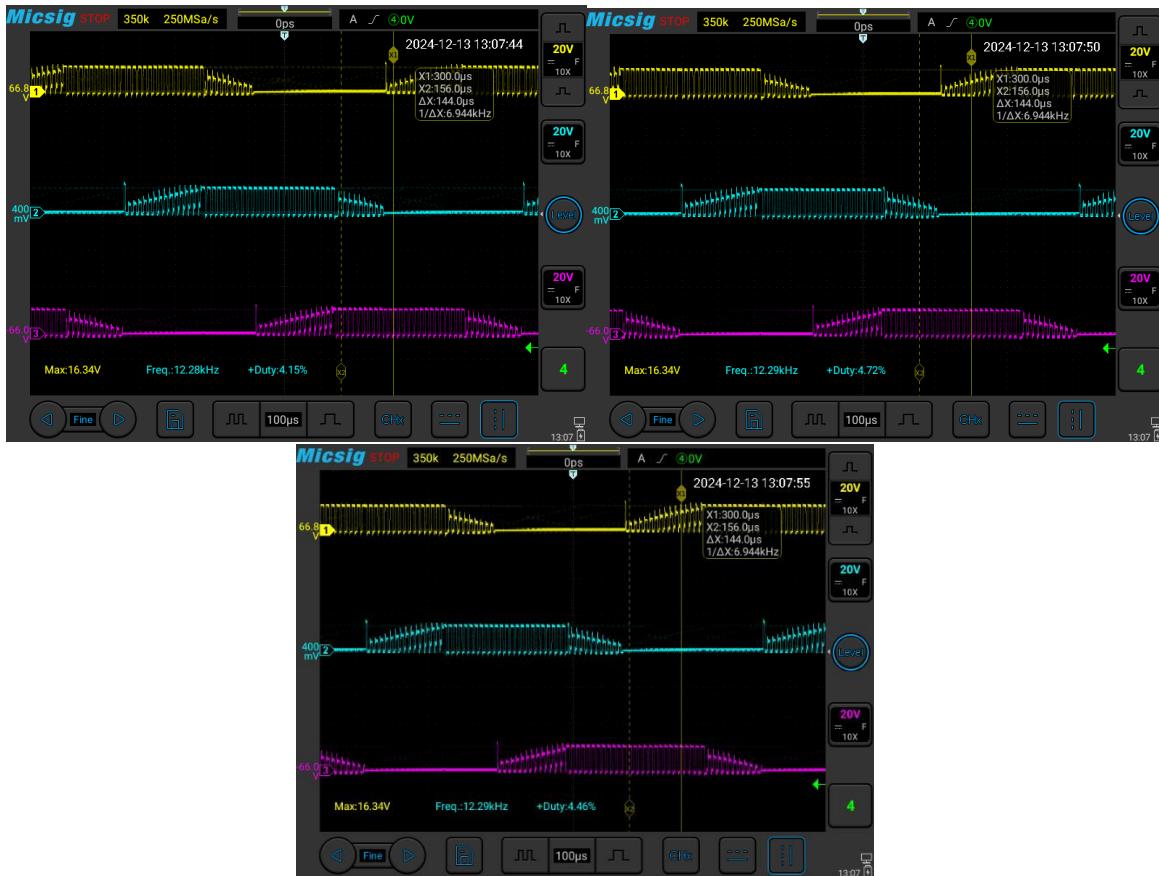
รูปที่ 85 กราฟที่ได้จากความเร็ว 6000 rpm

- ที่ความเร็ว 7000 rpm



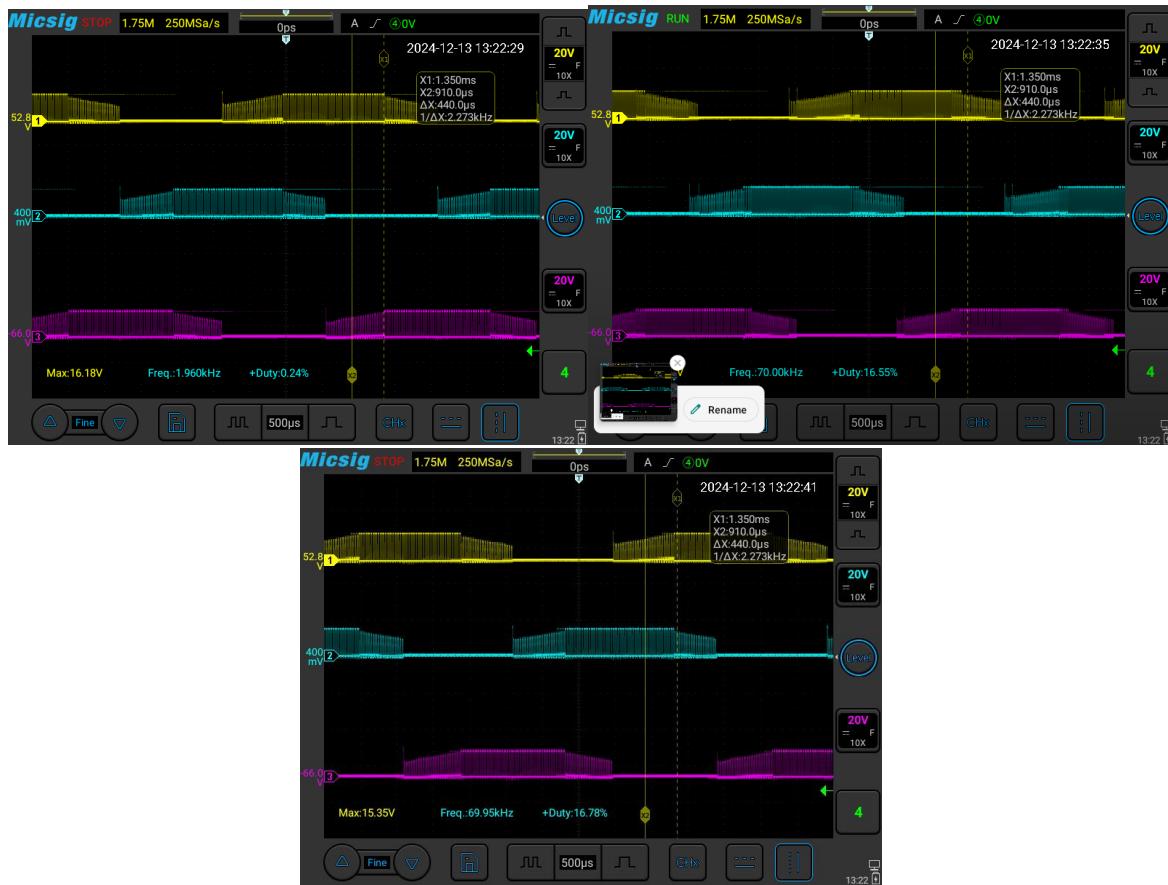
รูปที่ 86 กราฟที่ได้จากการวัดความเร็ว 7000 rpm

- ที่ความเร็ว 8000 rpm



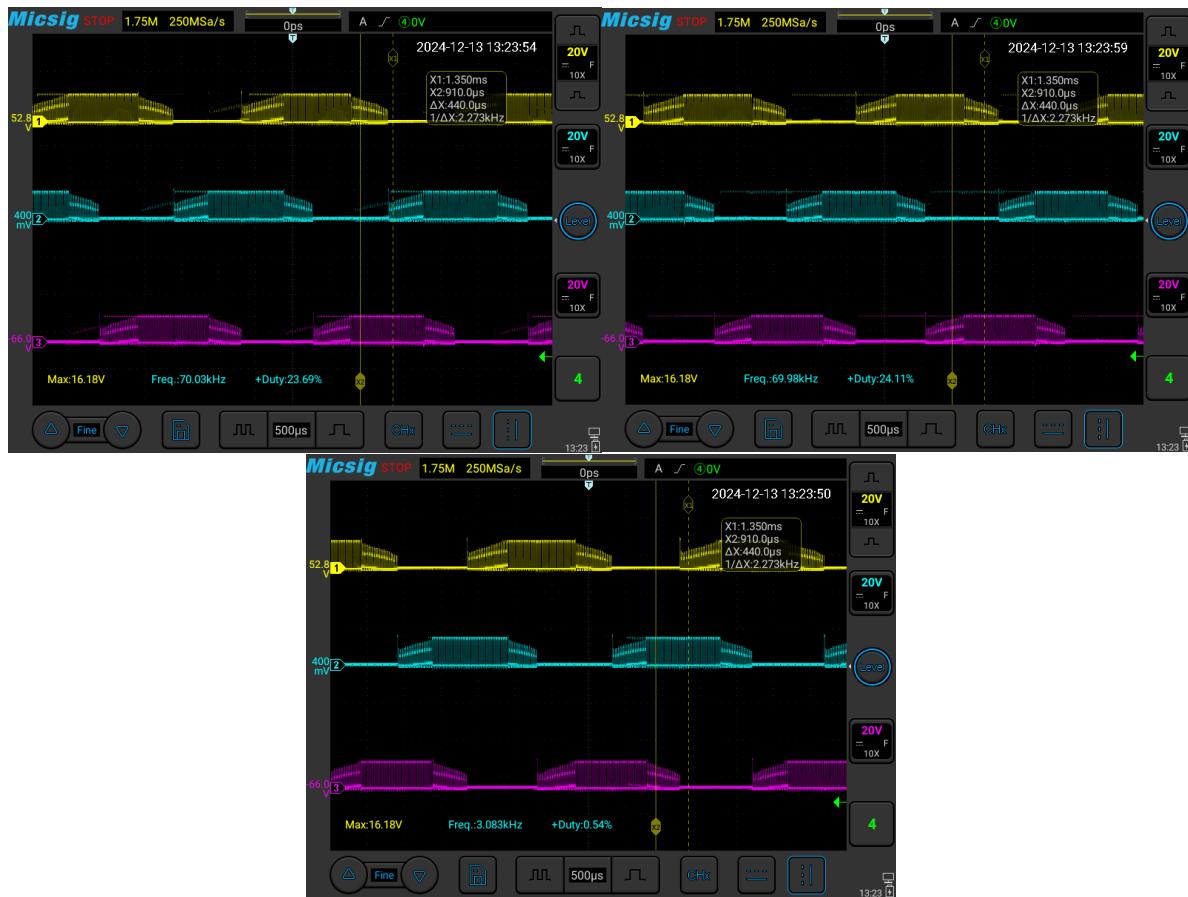
รูปที่ 87 กราฟที่ได้จากความเร็ว 8000 rpm

- ที่ความเร็ว -2000 rpm



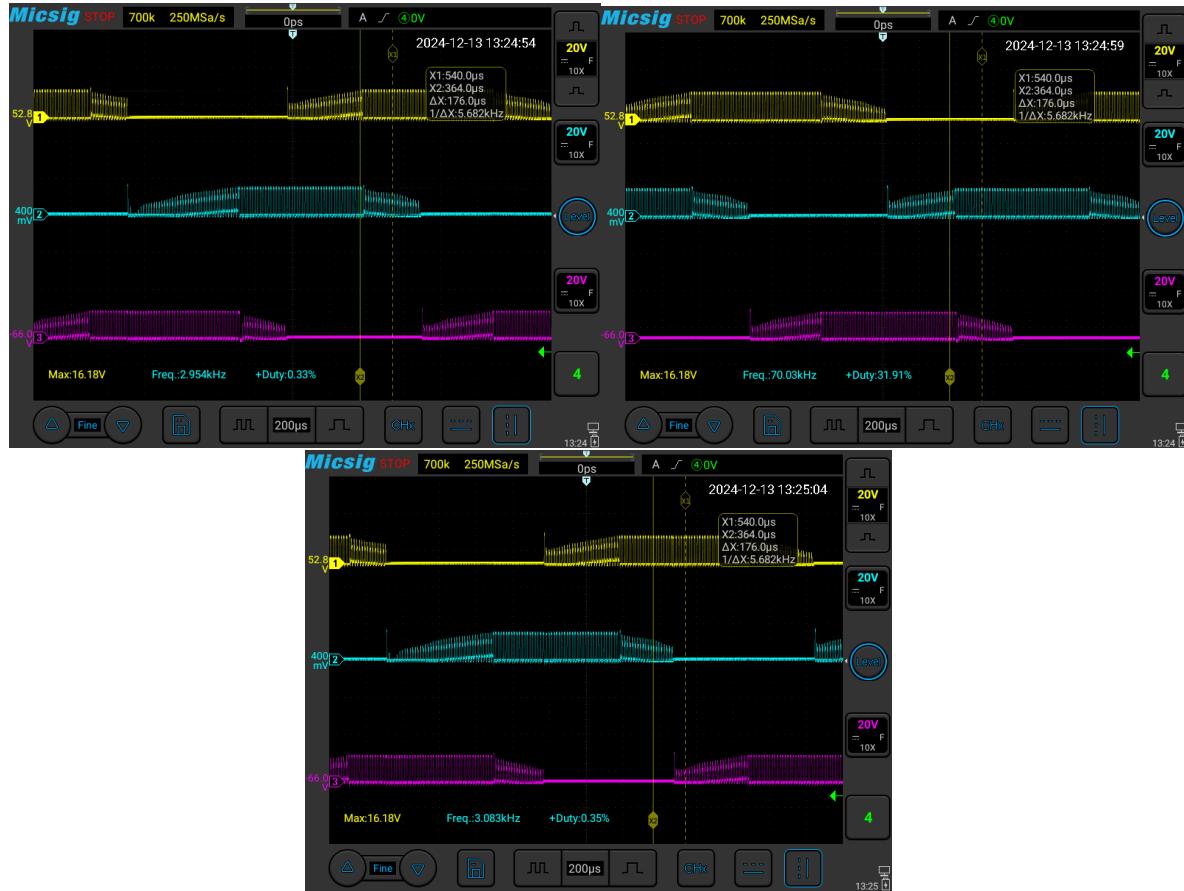
รูปที่ 88 กราฟที่ได้จากการวัดความเร็ว -2000 rpm

- ที่ความเร็ว -3000 rpm



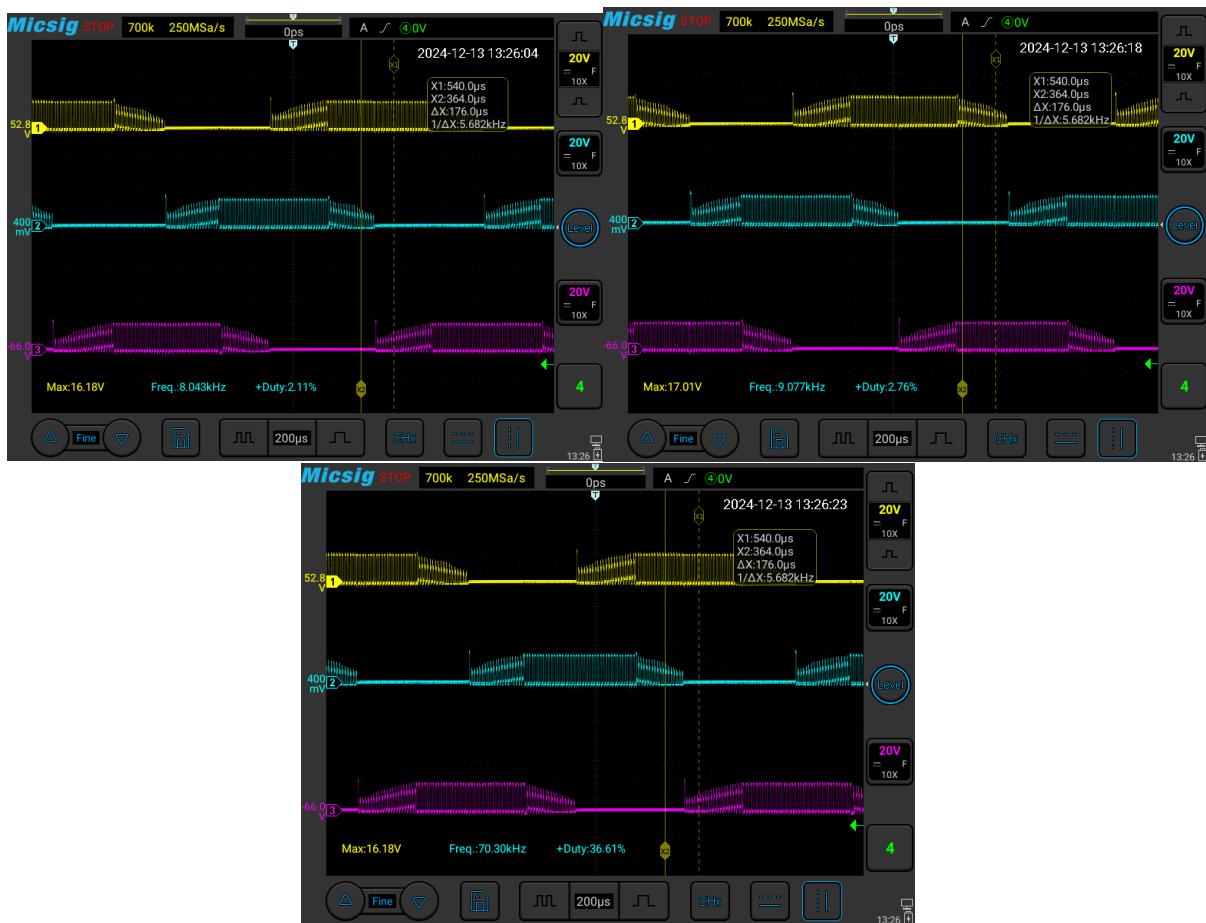
รูปที่ 89 กราฟที่ได้จากความเร็ว -3000 rpm

- ที่ความเร็ว -4000 rpm



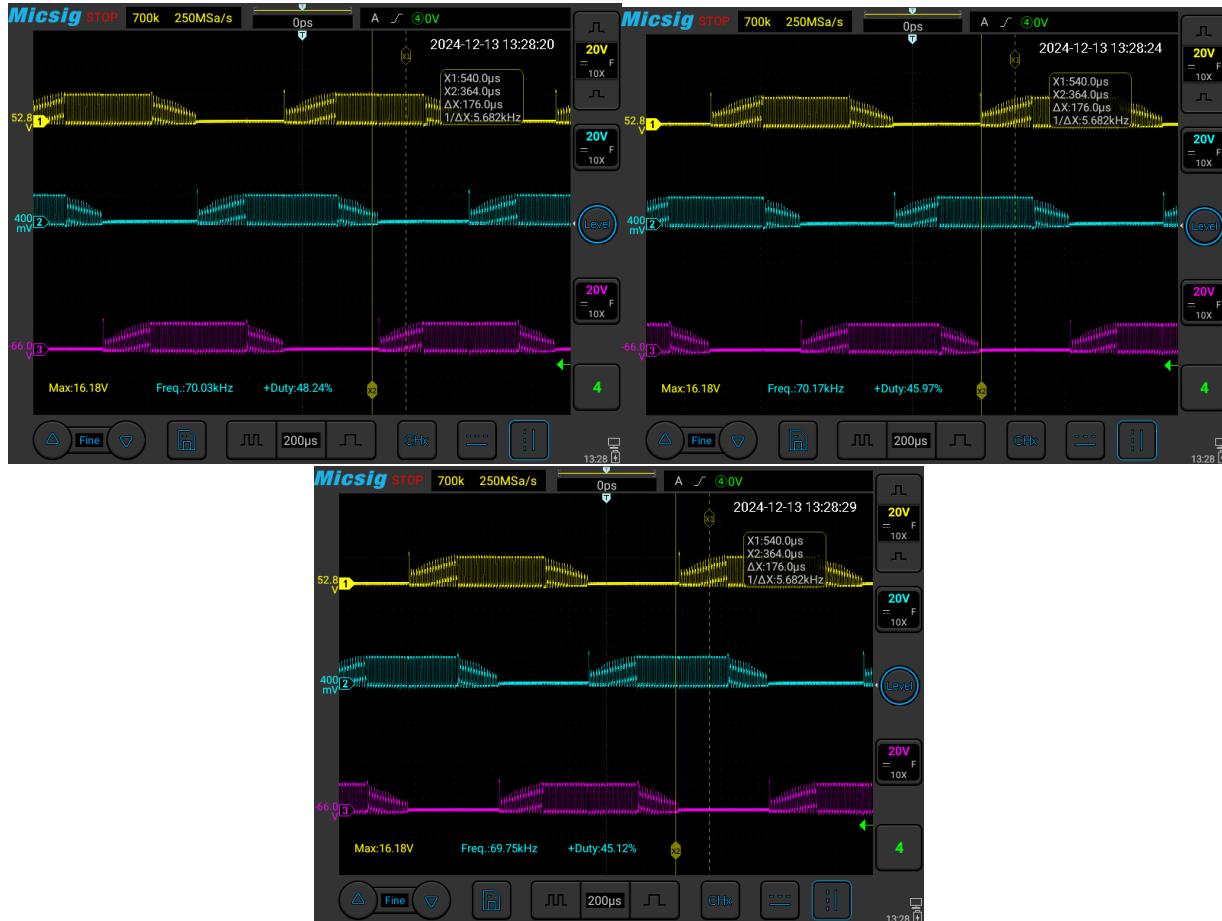
รูปที่ 90 กราฟที่ได้จากความเร็ว -4000 rpm

- ที่ความเร็ว -5000 rpm



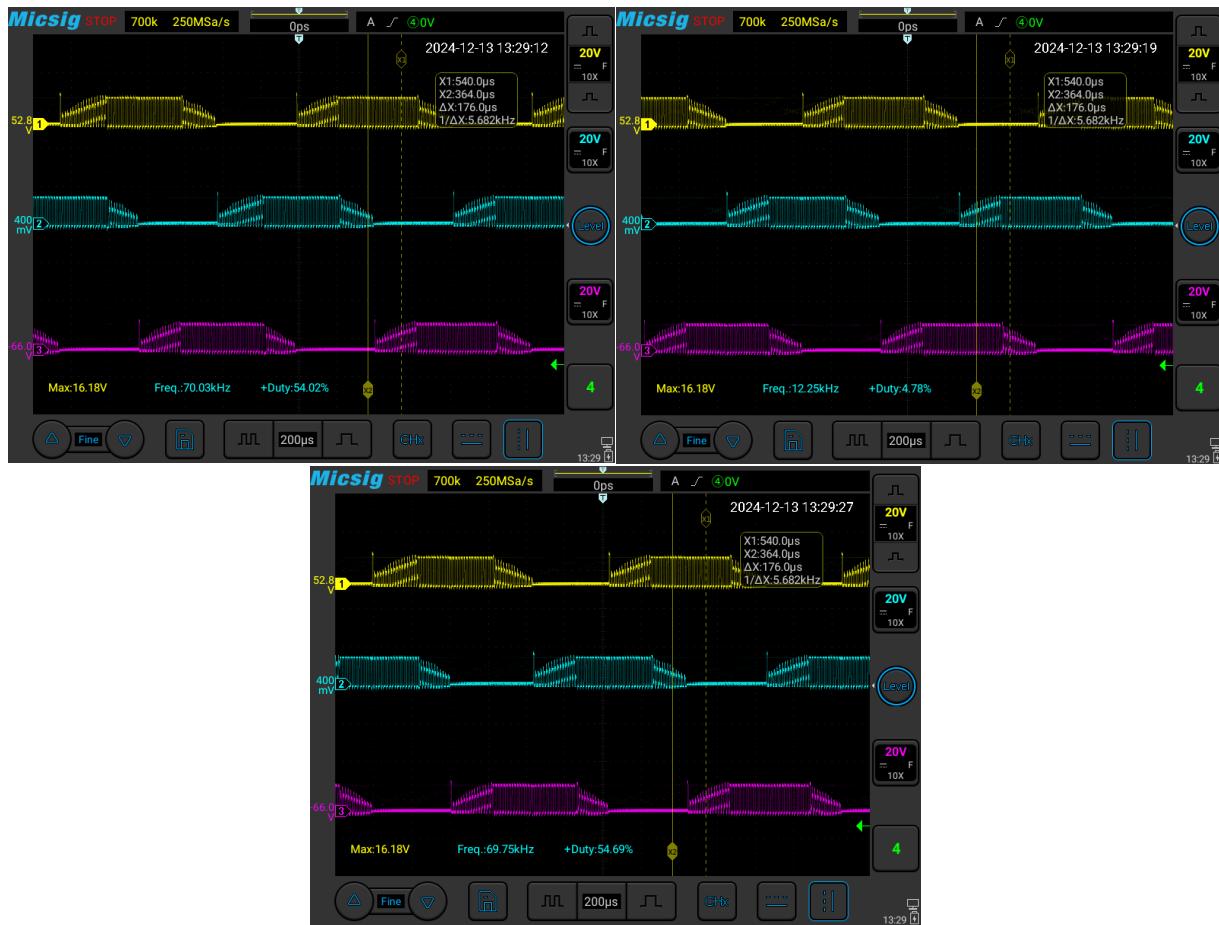
รูปที่ 91 กราฟที่ได้จากความเร็ว -5000 rpm

- ที่ความเร็ว -6000 rpm



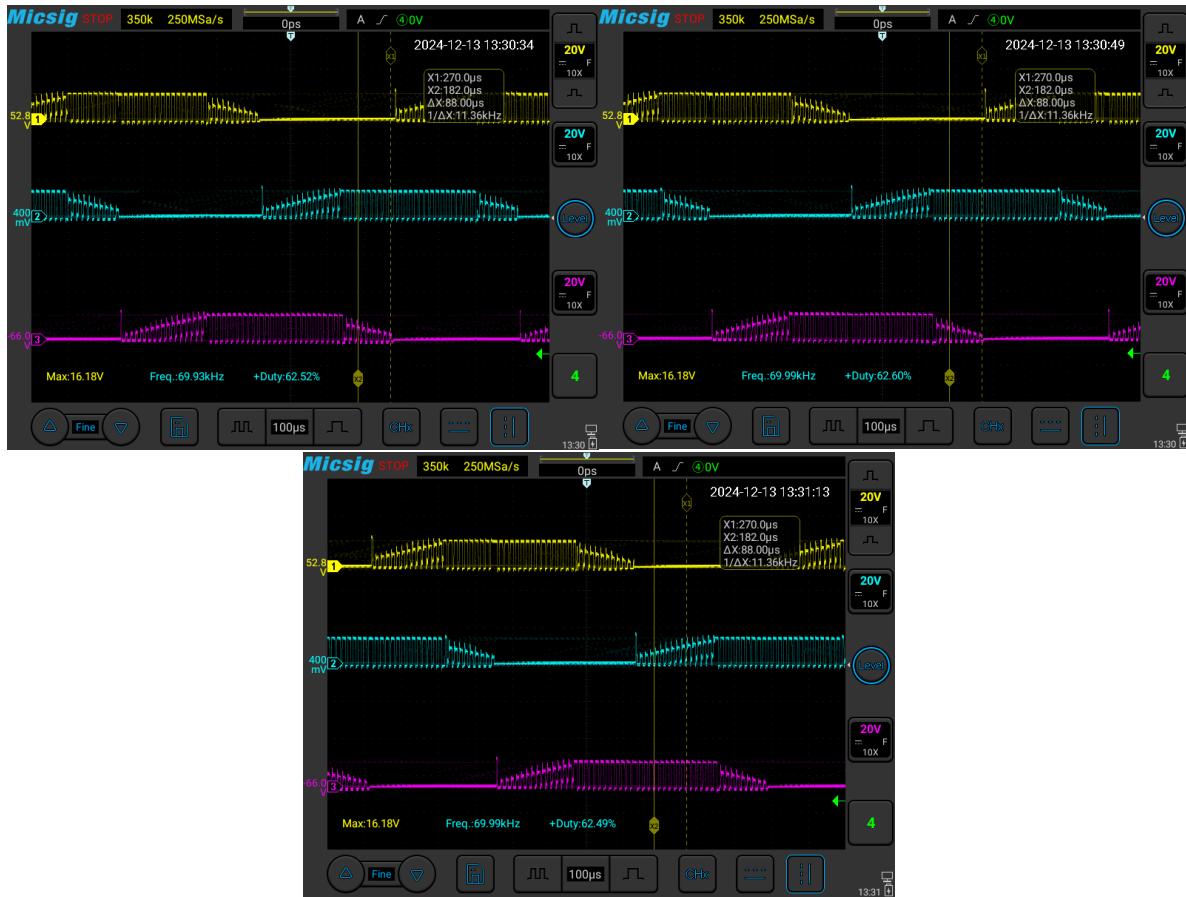
รูปที่ 92 กราฟที่ได้จากการความเร็ว -6000 rpm

- ที่ความเร็ว -7000 rpm



รูปที่ 93 กราฟที่ได้จากการความเร็ว -7000 rpm

- ที่ความเร็ว -8000 rpm



รูปที่ 94 กราฟที่ได้จากความเร็ว -8000 rpm

สรุปผลการทดลอง

การทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า Brushless DC Motor จะมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ตามความเร็วรอบของโรเตอร์ โดยความถี่จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น และจะสูงสุดที่ประมาณ 8000 RPM หลังจากนั้นความถี่จะเริ่มไม่คงที่ ซึ่งอาจจะเกิดจากข้อจำกัดในระบบมอเตอร์หรือจรควบคุม เมื่อมอเตอร์ทำงานที่ความเร็วสูงสุดที่สามารถทำได้

อภิปรายผลการทดลอง

การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมและหลักการทำงานของ Brushless DC Motor (BLDC Motor) นั้นได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ (RPM) กับความถี่ของสัญญาณที่อ่านจากการ โดยจากการทดลองพบว่า:

1. การเพิ่มขึ้นของความถี่เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น: เมื่อความเร็วของมอเตอร์เพิ่มขึ้น (เช่น จาก 0 RPM ไปจนถึง 8000 RPM) ความถี่ที่ได้จากการฟrequency เพิ่มขึ้นตามลำดับ ซึ่งเป็นผลจากการที่มอเตอร์ BLDC ใช้สัญญาณไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นจากการกระแสลับที่เกิดจากการหมุนของโรเตอร์ ซึ่งเมื่อความเร็วหมุนของโรเตอร์สูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นบ่อยขึ้น ส่งผลให้เกิดความถี่ของสัญญาณที่สูงขึ้นตามไปด้วย
2. จุดสูงสุดที่ความเร็วประมาณ 8000 RPM: จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความเร็วของมอเตอร์อยู่ที่ประมาณ 8000 RPM ความถี่จะสูงสุด นี่อาจจะเป็นจุดที่มอเตอร์มีการหมุนในจังหวะที่มีความสมดุลระหว่างการหมุนของโรเตอร์กับการตอบสนองของเซ็นเซอร์ Hall หรือจรควบคุมการจ่ายกระแสที่พอดีซึ่งสามารถตรวจสอบได้ชัดเจนที่สุดในช่วงความเร็วนี้
3. การไม่คงที่ของความถี่หลังจาก 8000 RPM: หลังจากที่ความเร็วเกิน 8000 RPM ไปแล้ว ความถี่ที่ได้จากกราฟจะเริ่มไม่คงที่หรือไม่เพิ่มขึ้นอย่างเป็นระเบียบ นี่อาจเกิดจากข้อจำกัดของมอเตอร์ เช่น ความสามารถในการปรับกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์รับได้ การเกินขีดจำกัดการควบคุมของวงจรควบคุม หรือปัจจัยอื่นๆ เช่น ความต้านทานของมอเตอร์หรือการสูญเสียทางกล (mechanical losses) ที่ทำให้การหมุนไม่สมูท หรือการเกิดการหน่วง (lag) ในระบบ

ข้อเสนอแนะ

การทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมที่น่าสนใจของมอเตอร์ BLDC ที่จำเป็นต้องมีการควบคุมและตรวจสอบอย่างละเอียดในระบบที่ทำงานที่ความเร็วสูง เพื่อให้การทำงานของมอเตอร์มีความเสถียรและมีประสิทธิภาพสูงสุด

เอกสารอ้างอิง

<https://www.zd-motor.de/en/Products/Planetary-garmotors/BLDC-planetary-garmotor-15W-BLDC-motor-with-planetary-gearbox-oxid-15.html>

https://www.bing.com/aclick?ld=e8_a5tj2yddXV--_kpy-dhzzVUCUzTBy5X7Yk534gC0tryyuV8guFGSPfP8Oe-je_n6L4K9qgfDhbZNBEb3TPGdvATD_m_vziFBwJMetTtww8-UcuWn3bH-Gr4JpRf8V42xyAS9mQLGNWq2AqBfBiwue0veWB_0pyVahdJd53DCL9AZHe&u=aHR0cHMlM2ElMmYlMmZ3d3cucm9oZGUtc2Nod2Fyei5jb20lMmZwcm9kdWN0cyUyZnRlc3QtYW5kLW1lYXN1cmVtZW50JTJmb3NjaWxsb3Njb3BlcyUyZm92ZXJ2aWV3XzYzNjYzLmh0bWwlM2ZtaWQlM2QxMDkxNyUyNm1pZHglM2RnZW5lcmFsX29zY2lsbG9zY29wZS1pbmRpdmIkdlWFsX3NlYXJjaF90ZXh0LWFkX3ltYXBfJTI2a3clM2Rvc2NpbGxvc2NvcGULmjZtc2NsaklkJTNkMjVmZTVmODAzNTEzMTBiY2ExZWMzOGU4YjU1MjI1Y2QlMjZ1dG1fc291cmNUTNkYmluZyUyNnV0bV9tZWdpdW0lM2RjcGMLmjZ1dG1fdGVybSUzZG9zpZ24lM2RSLUFQX0dlbmVyaWNfT3NjaWxsb3Njb3BlX0luZGl2aWR1YWwlMjZ1dG1fdGVybSUzZG9zY2lsbG9zY29wZSUyNnV0bV9jb250ZW50JTNkUi1BUF9HZW5lcmljX09zY2lsbG9zY29wZV9JbmRpdmIkdlWFsX0dlbmVyYWw&rlid=25fe5f80351310bca1ec38e8b55225cd&ntb=1

<https://th.element14.com/stmicroelectronics/x-nucleo-ihm08m1/expansion-board-bldc-motor-driver/dp/2809320>

https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-g474re.html?widgetSearchBar=STM32G4&widgetSearchAction=1&_charset_=UTF-8&filter-search=product