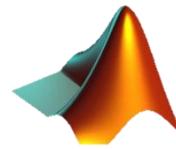


RMXplorer



LAB2 : Brushed DC Motor ทำการทดลองร่วมกับ B09

สมาชิก

- | | | |
|------------------|-------------|-------------|
| ● นายศักดิ์ชัย | ธนาภาสวัฒน์ | 66340500052 |
| ● นางสาวศุภพิชญ์ | เทพกร | 66340500057 |

วัตถุประสงค์หลัก

- เพื่อศึกษาความสามารถในการรับรู้ปริมาณทางพิสิกส์ของ Sensor ทั้งหมดตั้งแต่ต้นจนจบกระบวนการได้
- เพื่อศึกษาหลักการทำงานของ Sensor ตั้งแต่การตรวจจับจนถึงการแสดงผล
- เพื่อศึกษาทฤษฎีทางพิสิกส์ หรือข้อมูลจาก Datasheet ที่สามารถอธิบายการทำงานของ Sensor
- เพื่อศึกษาการออกแบบวิธีการทดลองให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์และผลการเรียนรู้ย่อย โดยใช้อุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงเครื่องมืออย่าง Simulink, MATLAB mlx file และบอร์ด Microcontroller ที่จัดไว้เตรียมให้

สมมติฐาน

- สามารถอธิบายความสามารถในการรับรู้ปริมาณทางฟิสิกส์ของ Sensor ทั้งหมดตั้งแต่ต้นจนจบกระบวนการได้
- สามารถเข้าใจหลักการทำงานของ Sensor โดยต้องเข้าใจทุกขั้นตอนของการทำงานของเซ็นเซอร์ ตั้งแต่การตรวจจับจนถึงการแสดงผล
- สามารถกำหนดตัวแปรในการทดลองได้อย่างเหมาะสมโดย มีทฤษฎีรองรับจากฟิสิกส์ หรือข้อมูลจาก Datasheet ที่นำเข้ามาอ้างอิง
- สามารถออกแบบวิธีการทดลองให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์และผลการเรียนรู้ย่ออย โดยใช้อุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงเครื่องมืออย่าง Simulink, MATLAB mlx file และบอร์ด Microcontroller ที่จัดเตรียมให้

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. แบ่งหน้าที่และความรับผิดชอบของสมาชิกในทีม
2. กำหนดสมมติฐานสำหรับแต่ละการทดลอง
3. เตรียมอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับการทดลอง
4. ดำเนินการทดลองตามขั้นตอนที่วางไว้
5. บันทึกผลการทดลองอย่างละเอียด
6. วิเคราะห์และสรุปผลจากข้อมูลที่บันทึกไว้
7. จัดทำรายงานสรุปผลการทดลอง

จุดประสงค์

- สามารถปฏิบัติตามการวิเคราะห์ผลการเรียนรู้หลักได้
- สามารถอธิบายหลักการทำงานของ DC Motor และความสามารถของ Motor-Torque Constant และ Back-EMF Constant ของ DC motor ได้
- สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของ Speed, Torque, Current, Power, %Efficiency ได้ เมื่อ Load Torque ที่กระทำต่อ DC Motor ผ่านการปรับ Load Torque ด้วย Magnetic Particle Clutches เปลี่ยนแปลงไป และแรงดันไฟฟ้า Input จากการปรับ Duty Cycle, Frequency ของ PWM ที่จ่ายเข้า DC Motor เปลี่ยนแปลงไป
- สามารถอธิบายหลักการทำงาน H-Bridge Drive Mode ทั้ง 3 Mode ได้ (Sign-Magnitude, Locked Anti-Phase, Async Sign-Magnitude) และควบคุม DC Motor ได้ทั้ง 2 Mode (Sign-Magnitude, Locked Anti-Phase)
- สามารถอธิบายกระบวนการ Signal Conditioning, Signal Processing ทั้งหมดได้ตั้งแต่ต้นจนจบกระบวนการ ว่าค่าที่อ่านได้จาก Incremental Encoder, Hall Current Sensor มีที่มาอย่างไร อธิบายให้เห็นถึงวิธีคิดและขั้นตอนทั้งหมด ทั้งก่อนและหลัง Calibrate Sensor หรือ วิธีจัดการข้อมูลที่ได้มา จัดการอย่างไร รวมถึงหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้จริง กับแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจาก Hall Current Sensor และอธิบายกระบวนการ Unwrap ค่า
- สามารถเขียนโปรแกรม โดยประยุกต์ใช้ MATLAB และ Simulink ในการสั่งการหรือรับค่า ร่วมกับบอร์ด Nucleo STM32G474RE โดยใช้สัญญาณจาก Incremental Encoder, Hall Current Sensor เป็น Input และแสดงสัญญาณ Output จากการ Log สัญญาณ และแสดงผลเป็นกราฟจาก Data Inspector ใน MATLAB Simulink และแสดงให้เห็นว่าสัญญาณ Output แปรผันตามสัญญาณ Input แบบ Real Time โดยมี Output เป็นความเร็ว เชิงมุม และกระแสไฟฟ้า ในหน่วย SI derived

สมมติฐาน

- สมมติฐานพื้นฐานเกี่ยวกับมอเตอร์
 - ความเร็วเชิงมุม (ω) ของ Brushed DC Motor จะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับแรงดันไฟฟ้า (V) ที่จ่ายเข้าสู่ มอเตอร์เมื่อโหลดคงที่
 - แรงบิด (T) มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับกระแสไฟฟ้า (I) ตามสมการ

$$T = Kt \cdot I$$

- สมมติฐานเกี่ยวกับผลกระทบจาก Load Torque

2.1 เมื่อ Load Torque เพิ่มขึ้น ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์จะลดลง กระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่มอเตอร์จะเพิ่มขึ้น เพื่อชดเชย Load Torque

2.2 Efficiency (η) ของมอเตอร์จะมีค่าสูงสุดเมื่อ Load Torque อยู่ในช่วงที่เหมาะสม

3. สมมติฐานเกี่ยวกับการควบคุมด้วย PWM

3.1 การปรับ Duty Cycle ของ PWM ส่งผลต่อค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่จ่ายเข้าสู่มอเตอร์ ซึ่งส่งผลต่อความเร็ว เชิงมุม

3.2 การปรับความถี่ (Frequency) ของ PWM ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมจะไม่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมเชิงเส้น ของมอเตอร์

4. สมมติฐานเกี่ยวกับ H-Bridge Drive Mode

4.1 โหมดการควบคุม Sign-Magnitude และ Locked Anti-Phase สามารถควบคุมความเร็วและทิศทางของ มอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.2 โหมด Locked Anti-Phase อาจมีการสูญเสียพลังงานมากกว่าเนื่องจากการสลับทิศทางกระแสไฟฟ้าอย่าง ต่อเนื่อง

5. สมมติฐานเกี่ยวกับการวิเคราะห์สัญญาณ

5.1 ค่าที่อ่านได้จาก Incremental Encoder และ Hall Current Sensor มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความเร็ว เชิงมุมและกระแสไฟฟ้าหลังผ่านกระบวนการ Calibration

5.2 การใช้ Signal Conditioning และ Processing สามารถลดสัญญาณรบกวนและปรับค่าที่อ่านได้ให้เหมาะสม สำหรับการวิเคราะห์

6. สมมติฐานเกี่ยวกับผลลัพธ์ของระบบ

6.1 Output ที่ได้จากระบบจะสอดคล้องกับ Input และ Duty Cycle ของ PWM แบบ Real-Time

ตัวแปร

- ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างแรงดันไฟฟ้า, ความเร็ว, แรงบิด และกระแสไฟฟ้า

ตัวแปรต้น : แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่มอเตอร์

ตัวแปรตาม : ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ แรงบิด

ตัวแปรควบคุม : อุณหภูมิของมอเตอร์ Load Torque (ใช้ค่าโหลดคงที่)

- ผลกระทบของ Load Torque ต่อความเร็วและกระแสไฟฟ้า

ตัวแปรต้น : Load Torque ที่กระทำต่อมอเตอร์

ตัวแปรตาม : ความเร็วเชิงมุม กระแสไฟฟ้า

ตัวแปรควบคุม : แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่มอเตอร์ Duty Cycle และ Frequency ของ PWM

3. ผลของ Duty Cycle และ Frequency ของ PWM ต่อพฤติกรรมมอเตอร์

ตัวแปรต้น : Duty Cycle และ Frequency ของ PWM

ตัวแปรตาม : แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย ความเร็วเชิงมุม

ตัวแปรควบคุม: Load Torque (ใช้ค่าคงที่) อุณหภูมิของมอเตอร์

4. ผลของโหนด H-Bridge Drive ต่อพฤติกรรมมอเตอร์

ตัวแปรต้น : โหนดการควบคุม

ตัวแปรตาม : ความเร็วเชิงมุม การสูญเสียพลังงาน

ตัวแปรควบคุม : Load Torque (ใช้ค่าคงที่) Duty Cycle และ Frequency ของ PWM

5. การวิเคราะห์สัญญาณจาก Sensor และการปรับปรุงความแม่นยำ

ตัวแปรต้น : ข้อมูลสัญญาณดิบจาก Incremental Encoder และ Hall Current Sensor

ตัวแปรตาม : ความเร็วเชิงมุม กระแสไฟฟ้า

ตัวแปรควบคุม : กระบวนการ Calibration

6. ผลลัพธ์ของระบบภายใต้เงื่อนไขการควบคุมที่เปลี่ยนแปลง

ตัวแปรต้น : แรงดันไฟฟ้า หรือ Duty Cycle ที่จ่ายเข้าสู่มอเตอร์

ตัวแปรตาม : ความเร็วเชิงมุม กระแสไฟฟ้า

ตัวแปรควบคุม : Load Torque อุณหภูมิของมอเตอร์

นิยามคัพท์เฉพาะ

1. Duty Cycle คือ อัตราส่วนระหว่างช่วงเวลาที่สัญญาณมีสถานะ เปิดหรือ Active ต่อช่วงเวลาทั้งหมดของรอบ สัญญาณ โดยแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ (%). Duty Cycle ใช้ในการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ
2. No load คือ สภาพที่ไม่มีโหลดภายนอกหรือแรงต้านทานทางกลไก
3. Full Load คือ สภาพที่อุปกรณ์หรือเครื่องจักร เช่น มอเตอร์, เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือมอแปลงไฟฟ้า ทำงานภายใต้ ภาระสูงสุด
4. Sign-Magnitude เป็นวิธีการแทนค่าตัวเลขในรูปแบบ เลขฐานสองที่ใช้เพื่อแสดงจำนวนบวกและลบ โดยใช้บิตหนึ่งบิตเพื่อระบุเครื่องหมาย (Sign) และส่วนที่เหลือของบิตใช้แทนขนาด (Magnitude) ของตัวเลข
5. H-Bridge Drive เป็นวงจรที่ใช้สำหรับควบคุมทิศทางและความเร็วของมอเตอร์ DC หรือโหลดที่ต้องการการจ่ายแรงดันแบบสองทิศทาง โดยลักษณะของวงจร มีการจัดเรียงทรานซิสเตอร์ (หรือสวิตซ์) เป็นรูปตัวอักษร H
6. Shoot Through เป็นสถานการณ์ที่เกิดขึ้นในวงจร H-Bridge หรือวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีสวิตซ์หลายตัว ซึ่งกระแสไฟฟ้าไหลตรงผ่านวงจรโดยไม่ผ่านโหนลด อันเป็นผลมาจากการเปิดสวิตซ์ที่อยู่ในขณะเดียวกันของ H-Bridge พร้อมกัน สถานการณ์นี้ถือว่า อันตราย เนื่องจากสามารถทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าสูงผิดปกติและความเสียหายต่อส่วนประกอบของวงจร

นิยามเชิงปฏิบัติการ

1. PWM เป็นเทคนิคการควบคุมสัญญาณโดยการปรับ Duty Cycle ของ pulse ในสัญญาณดิจิทัลเพื่อควบคุม พลังงานเฉลี่ยที่ส่งไปยังโหลด
2. Locked Anti-Phase เป็นเทคนิคการสร้างสัญญาณในระบบควบคุมมอเตอร์หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้การสลับสถานะของสัญญาณควบคุมเพื่อปรับกำลังงานที่ส่งให้กับโหลด เทคนิคนี้มักใช้ร่วมกับ PWM เพื่อควบคุมแรงดัน, กระแส, หรือกำลังในระบบไฟฟ้า โดยมีลักษณะเด่นคือการสลับเฟสสัญญาณ 180 องศา

เอกสารอ้างอิงและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน (Brushed DC Motor) เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีต้นทุนต่ำและโครงสร้างเรียบง่าย ประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้ : สเตเตอร์ที่ประกอบด้วยแม่เหล็กถาวรติดตั้งอยู่ภายในโครงสร้างภายนอกของมอเตอร์ ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็ก, อาร์มาเจอร์ซึ่งเป็นชุดลวดติดตั้งบนแกนหมุนทำหน้าที่หมุนภายนอกสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์, คอมมิเตเตอร์ที่เชื่อมต่อกับอาร์มาเจอร์ มีหน้าที่สลับทิศทางกระแสไฟฟ้าใน

ขาด漉ดเพื่อสร้างแรงบิดต่อเนื่อง และแปรรูปค่าที่สัมผัสกับคอมมิวเตเตอร์ ทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเข้าสู่อาร์มาเจอร์

หลักการทำงานของมอเตอร์ชนิดนี้เริ่มจากการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่มอเตอร์ กระแสจะไหลผ่านแปรรูปค่าและคอมมิวเตเตอร์เข้าสู่อาร์มาเจอร์ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กในขาด漉ดอาร์มาเจอร์ สนามแม่เหล็กนี้จะทำปฏิกิริยากับสนามแม่เหล็กของสเตเตเตอร์ ส่งผลให้เกิดแรงบิดที่ทำให้อาร์มาเจอร์หมุนอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ คอมมิวเตเตอร์จะทำหน้าที่สับทิศทางกระแสไฟฟ้าในขาด漉ดของอาร์มาเจอร์อย่างสม่ำเสมอ เพื่อรักษาแรงบิดและการหมุน

มอเตอร์ชนิดนี้ถูกใช้งานในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เครื่องมือไฟฟ้า และเครื่องจักรอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เนื่องจากข้อดีที่มีอยู่อย่างหลากหลาย ได้แก่ โครงสร้างที่เรียบง่าย ต้นทุนการผลิตต่ำ ให้แรงบิดเริ่มต้นสูง และสามารถควบคุมความเร็วได้ง่าย อย่างไรก็ตามมอเตอร์ชนิดนี้ยังมีข้อจำกัดบ้าง เช่น แปรรูปค่าที่สึกหรอเร็วและต้องการการบำรุงรักษา รวมถึงประสิทธิภาพที่อาจต่ำกว่ามอเตอร์แบบไร์ลีฟรันในบางกรณี

วิธีดำเนินการทดลอง

1. การตั้งค่าระบบ

- 1.1 เชื่อมต่อ Brushed DC Motor กับ Magnetic Particle Clutch เพื่อสร้างโหลดที่ปรับเปลี่ยนได้
- 1.2 เชื่อมต่อ Incremental Encoder กับแกนของมอเตอร์เพื่อวัดความเร็วเชิงมุม
- 1.3 ติดตั้ง Hall Current Sensor ที่วงจรเพื่อวัดกระแสไฟฟ้า
- 1.4 เชื่อม STM32 Nucleo Board กับ H-Bridge Circuit เพื่อควบคุม PWM
- 1.5 ใช้ MATLAB/Simulink สร้างแบบจำลองควบคุม และตั้งค่าให้เก็บข้อมูลแบบ Real-Time

2. การทดลองตามสมมติฐาน

2.1 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับความเร็วเชิงมุม

- 2.1.1 ป้อนแรงดันไฟฟ้าคงที่ให้มอเตอร์ โดยปรับค่า Duty Cycle ของ PWM
- 2.1.2 วัดความเร็วเชิงมุมที่ได้จาก Incremental Encoder
- 2.1.3 บันทึกข้อมูล และแสดงผลในรูปกราฟแบบต่างๆ

2.2 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงบิด

- 2.2.1 ปรับ Load Torque โดยใช้ Magnetic Particle Clutch ในค่าต่าง ๆ
- 2.2.2 วัดกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ และคำนวณแรงบิด
- 2.2.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์

2.3 วิเคราะห์ผลของ PWM

2.3.1 ปรับ Duty Cycle และ Frequency ของ PWM โดยเริ่มจากค่าต่ำสุดถึงสูงสุดพร้อมเก็บข้อมูล

2.3.2 แสดงผลในรูปกราฟต่างๆ

2.4 เปรียบเทียบโหมด H-Bridge Drive

2.4.2 ทดสอบโหมด Sign-Magnitude และ Locked Anti-Phase

2.4.2 วิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบ เช่น กราฟ Mode-Efficiency Mode

2.5 การวิเคราะห์สัญญาณจากเซนเซอร์

2.5.2 เก็บข้อมูลดิบจาก Incremental Encoder และ Hall Current Sensor

2.4.3 ทำการ Signal Conditioning เช่น ลบสัญญาณรบกวน (Noise Filtering) และการ Unwrap ค่า Encoder

2.4.4 เปรียบเทียบค่าที่ได้ก่อนและหลัง Calibration

3. การวิเคราะห์ผลลัพธ์

วัสดุอุปกรณ์

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

ผลการทดลอง

เนื่องจากมีความผิดพลาดเกี่ยวกับอร์ดที่ Shaft บิดเบี้ยว ทำให้เกิดแรงบิดที่เพิ่มขึ้นกับมอเตอร์ ทำให้มอเตอร์นั้นทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ โดยเมื่อทำการเพิ่ม PWM ไปถึงจุดๆหนึ่งมอเตอร์จะไม่สามารถหมุนได้ จึงทำให้ไม่สามารถทำการทดลองได้

สรุปผล

อภิปรายผล

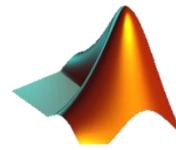
ข้อเสนอแนะ

1. ปรับเปลี่ยน shaft เพื่อให้สามารถทำการทดลองได้
2. ตรวจสอบตัวบอร์ดให้ดีก่อนลงมือทำการทดลอง

เอกสารอ้างอิง(แนบ link)

1. [Fundamentals of Brushed DC Motors](#)
2. [Lock Anti-Phase Drive](#)
3. [H-Bridge](#)

RMXplorer



LAB2 : Stepper Motor ทำการทดลองร่วมกับ B09

สมาชิก

- | | | |
|------------------|-------------|-------------|
| ● นายศักดิ์ชัย | ธนาภาสวัฒน์ | 66340500052 |
| ● นางสาวศุภพิชญ์ | เทพกร | 66340500057 |

วัตถุประสงค์หลัก

- เพื่อศึกษาความสามารถในการรับรู้ปริมาณทางพิสิเก็ตของ Sensor ทั้งหมดตั้งแต่ต้นจนจบกระบวนการได้
- เพื่อศึกษาหลักการทำงานของ Sensor ตั้งแต่การตรวจจับจนถึงการแสดงผล
- เพื่อศึกษาทฤษฎีทางพิสิเก็ต หรือข้อมูลจาก Datasheet ที่สามารถอธิบายการทำงานของ Sensor
- เพื่อศึกษาการออกแบบวิธีการทดลองให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์และผลการเรียนรู้ย่อย โดยใช้อุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงเครื่องมืออย่าง Simulink, MATLAB mlx file และบอร์ด Microcontroller ที่จัดไว้เตรียมให้

สมมติฐาน

- สามารถอธิบายความสามารถในการรับรู้ปริมาณทางฟิสิกส์ของ Sensor ทั้งหมดตั้งแต่ต้นจนจบกระบวนการได้
- สามารถเข้าใจหลักการทำงานของ Sensor โดยต้องเข้าใจทุกขั้นตอนของการทำงานของเซ็นเซอร์ ตั้งแต่การตรวจจับจนถึงการแสดงผล
- สามารถกำหนดตัวแปรในการทดลองได้อย่างเหมาะสมโดย มีทฤษฎีรองรับจากฟิสิกส์ หรือข้อมูลจาก Datasheet ที่นำเข้ามาอ้างอิง
- สามารถออกแบบวิธีการทดลองให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์และผลการเรียนรู้ย่ออย โดยใช้อุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงเครื่องมืออย่าง Simulink, MATLAB mlx file และบอร์ด Microcontroller ที่จัดเตรียมให้

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. แบ่งหน้าที่และความรับผิดชอบของสมาชิกในทีม
2. กำหนดสมมติฐานสำหรับแต่ละการทดลอง
3. เตรียมอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับการทดลอง
4. ดำเนินการทดลองตามขั้นตอนที่วางไว้
5. บันทึกผลการทดลองอย่างละเอียด
6. วิเคราะห์และสรุปผลจากข้อมูลที่บันทึกไว้
7. จัดทำรายงานสรุปผลการทดลอง

จุดประสงค์

- สามารถวิเคราะห์ผลการเรียนรู้หลักได้
- สามารถอธิบายหลักการทำงานของ Stepper Motor
- สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของ Speed เมื่อ Frequency ของสัญญาณที่จ่ายเข้า Stepper Motorเปลี่ยนแปลงไป
- สามารถอธิบายหลักการทำงานของการไดร์ฟแบบ Full-Step และ Half-Step รวมถึงผลกระทบต่อการควบคุมความเร็วและตำแหน่งของ Stepper Motor
- สามารถอธิบายกระบวนการ Signal Conditioning และ Signal Processing ตั้งแต่ต้นจนจบ โดยอธิบายที่มาของข้อมูลจาก Incremental Encoder และ Hall Current Sensor รวมถึงวิธีการคำนวณและขั้นตอนก่อนและหลังการปรับค่า (Calibrate) Sensor และการจัดการข้อมูล
- สามารถอธิบายกระบวนการ Signal Conditioning และ Signal Processing โดยละเอียด รวมถึงการหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้จริงกับแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจาก Hall Current Sensor และกระบวนการการ Unwrap ค่า
- สามารถเขียนโปรแกรมโดยใช้ MATLAB และ Simulink ในการควบคุมความเร็วของ Stepper Motorโดยใช้ความถี่และความเร็วเชิงมุ่ง พร้อมทั้งรับค่าจาก Incremental Encoder และ Hall Current Sensor เป็น Input และแสดงผล Output ผ่านการ Log สัญญาณใน Data Inspector ของ MATLAB Simulink เพื่อให้เห็นการแปลงของสัญญาณ Output ตามสัญญาณ Input แบบ Real Time โดยมี Output เป็นความเร็วเชิงมุ่งและกระแสไฟฟ้าในหน่วย SI derived

สมมติฐาน

เมื่อความถี่ของสัญญาณเพิ่มขึ้นความเร็วของ Stepper Motorเพิ่มขึ้น ค่า torque ก็จะลดลง เมื่อลดลงจนถึงจุดๆหนึ่ง มอเตอร์ก็จะหยุดทำงาน (Stall point) โดยความถี่ของสัญญาณก็จะขึ้นอยู่กับ Driver types ซึ่ง ความถี่ ณ Stall point ของ Half-Step จะเป็น 2 เท่าของ Full-Step และ ความถี่ของ Micro-Step จะเป็น 2 เท่าของ Half-Step

ตัวแปร

ตัวแปรต้น : Stepper Frequency, Driver types

ตัวแปรตาม : Stall point

ตัวแปรควบคุม : ชนิดของ Stepper Motor, แรงดันไฟฟ้า

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. Full-Step คือ การควบคุม Stepper Motorให้หมุนทีละตำแหน่งเต็ม (Step) โดยกระตุนชุดลวด 1 หรือ 2 เฟส พร้อมกัน มีแรงบิดสูงและควบคุมง่าย แต่ความละเอียดต่ำกว่าโหนดอื่น
2. Half-Step คือ โหนดการควบคุม Stepper Motorที่เพิ่มความละเอียดของการหมุน โดยแบ่ง 1 Step หลัก ออกเป็น 2 ตำแหน่งย่อย ผ่านการกระตุน coils ของมอเตอร์ทั้งแบบทีละชุด (เหมือน Full-Step) และแบบพร้อมกัน (Intermediate Step) สลับกัน
3. Micro-Step คือ โหนดการควบคุม Stepper Motorที่แบ่ง 1 Step หลัก ออกเป็นหลายตำแหน่งย่อย (เช่น 4, 8, 16, 32, หรือมากกว่านั้น) โดยการปรับกระแสไฟฟ้าที่ส่งไปยัง coils ในลักษณะ แปรผันต่อเนื่อง (Proportional Current) เพื่อให้การเคลื่อนที่ของมอเตอร์เรียบเนียนและแม่นยำยิ่งขึ้น
4. Step Frequency คือ ความถี่ของ Step ที่ส่งไปควบคุมการทำงานของ Stepper Motorในหนึ่งวินาที มีหน่วย เป็น เฮิรตซ์ (Hz)
5. Stall point คือ จุดที่ Stepper Motorไม่สามารถหมุนต่อไปได้ แม้ว่าจะมีการส่งสัญญาณควบคุมให้มอเตอร์ก็ตาม
6. No load คือ สภาวะที่ไม่มีโหลดภายนอกหรือแรงต้านทางกลใด

นิยามเชิงปฏิบัติการ

การ Drive Step หมายถึงวิธีการควบคุมการทำงานของ Stepper Motorโดยส่งสัญญาณไฟฟ้าเพื่อกำหนดการหมุนของ มอเตอร์ในลักษณะเป็น ขั้น (Step) ตามลำดับที่แน่นอน สัญญาณควบคุมเหล่านี้ส่งไปยังชุดลวด (Coils) ของมอเตอร์ผ่าน Stepper MotorDriver เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่หมุนเวียน ทำให้ Rotor ของมอเตอร์เคลื่อนที่ไปทีละ Step

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการอ่านเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า Stepper Motorเป็นมอเตอร์ชนิดหนึ่งที่สามารถหมุนได้ทีละขั้น (Step) ซึ่งแตกต่างจากมอเตอร์ทั่วไปที่หมุนต่อเนื่องได้ การหมุนของ Stepper Motorเกิดจากการส่งกระแสไฟฟ้าไปยัง ชุดลวดภายในมอเตอร์ในลำดับที่กำหนด ทำให้เกนหมุนทีละขั้นอย่างแม่นยำ ความสามารถนี้ทำให้ Stepper Motorเหมาะสม สำหรับงานที่ต้องการการควบคุมตำแหน่งทีละ步เดียวและเที่ยงตรง

Stepper Motorสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่ Permanent Magnet Stepper (PM Stepper) ซึ่งใช้ แม่เหล็กถาวรในโรเตอร์เพื่อเพิ่มความแม่นยำ Variable Reluctance Stepper (VR Stepper) ที่ใช้การเปลี่ยนแปลงของ

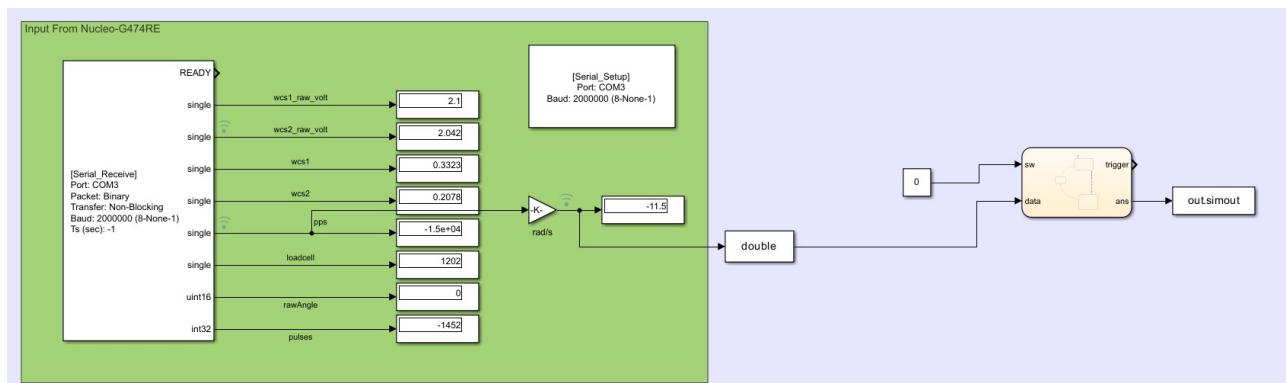
ความต้านทานแม่เหล็กเพื่อควบคุมการหมุน และ Hybrid Stepper ซึ่งรวมข้อดีของทั้ง PM Stepper และ VR Stepper เพื่อให้ได้มอเตอร์ที่มีความแม่นยำสูงและเร็วมากขึ้น

ด้วยคุณสมบัติที่สามารถควบคุมตำแหน่งได้อย่างแม่นยำและไม่ต้องใช้ระบบป้อนกลับ (feedback) ทำให้ Stepper Motor ถูกใช้อย่างแพร่หลายในงานที่ต้องการความแม่นยำ เช่น เครื่อง CNC เครื่องพิมพ์ 3D และระบบหุ่นยนต์ อุปกรณ์เหล่านี้สามารถทำงานได้อย่างน่าเชื่อถือและมีอายุการใช้งานยาวนาน ซึ่งเป็นข้อดีที่สำคัญของ Stepper Motor ในการใช้งานในอุตสาหกรรมและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ

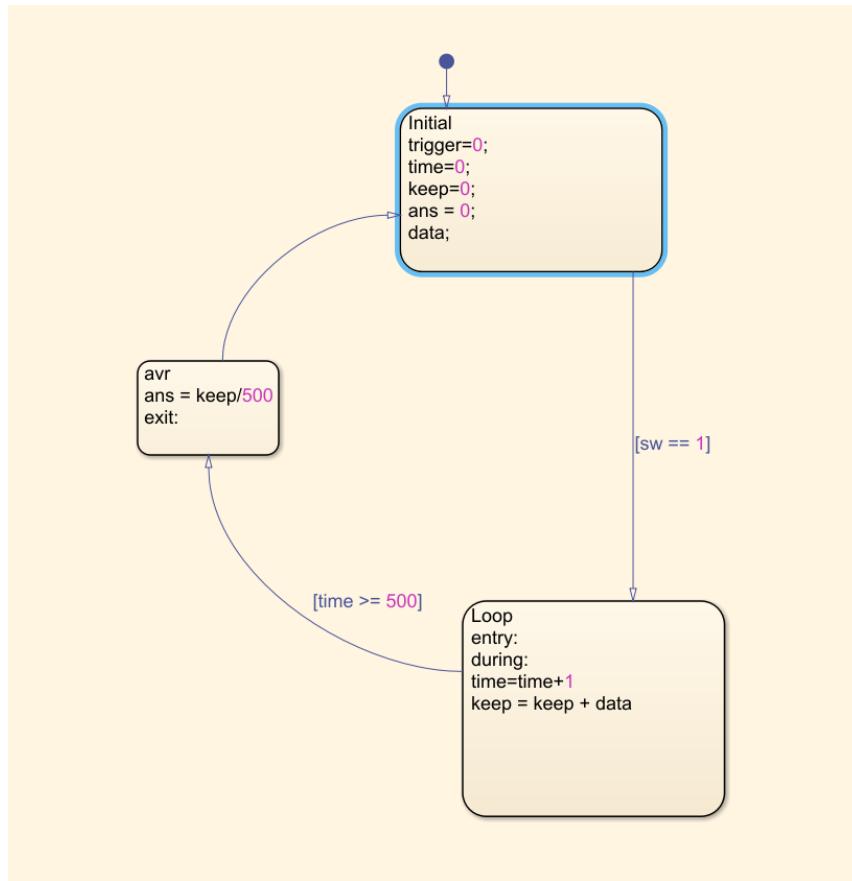
วิธีดำเนินการทดลอง

1. การทดลองแบบ no load

1.1 ทางตอนผู้จัดทำได้ทำการเขียนโปรแกรมและสร้าง Simulink เพื่อเก็บค่าข้อมูล 500 ค่า ตามที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งจะได้ diagram ออกแบบตามภาพด้านล่าง โดยเมื่อใส่เลข 1 ลงในบล็อก Constant ก็จะเริ่มเก็บค่า 500 ค่า เล้านำมาหาค่าเฉลี่ย จากนั้นนำค่าเฉลี่ยมา plot เป็นกราฟ



รูปที่ 1 Simulink แสดงการเก็บค่า



รูปที่ 2 chart แสดงการเก็บและคำนวณข้อมูล

1.2 ในการทดลองเก็บข้อมูลการทำงานของ Stepper Motorแบ่งออกเป็น 3 โหมด ได้แก่ Full-Step, Half-Step และ Micro-Step โดยรายละเอียดการเก็บข้อมูลในแต่ละโหมดมีดังนี้

M0	M1	M2	Microstepping Mode
LOW	LOW	LOW	Full Step
HIGH	LOW	LOW	Half Step
LOW	HIGH	LOW	1/4 Step
HIGH	HIGH	LOW	1/8 Step
LOW	LOW	HIGH	1/16 Step
HIGH	LOW	HIGH	1/32 Step
LOW	HIGH	HIGH	1/32 Step
HIGH	HIGH	HIGH	1/32 Step

รูปที่ 3 ตารางการปรับ drive step

1.2.1 Full-Step

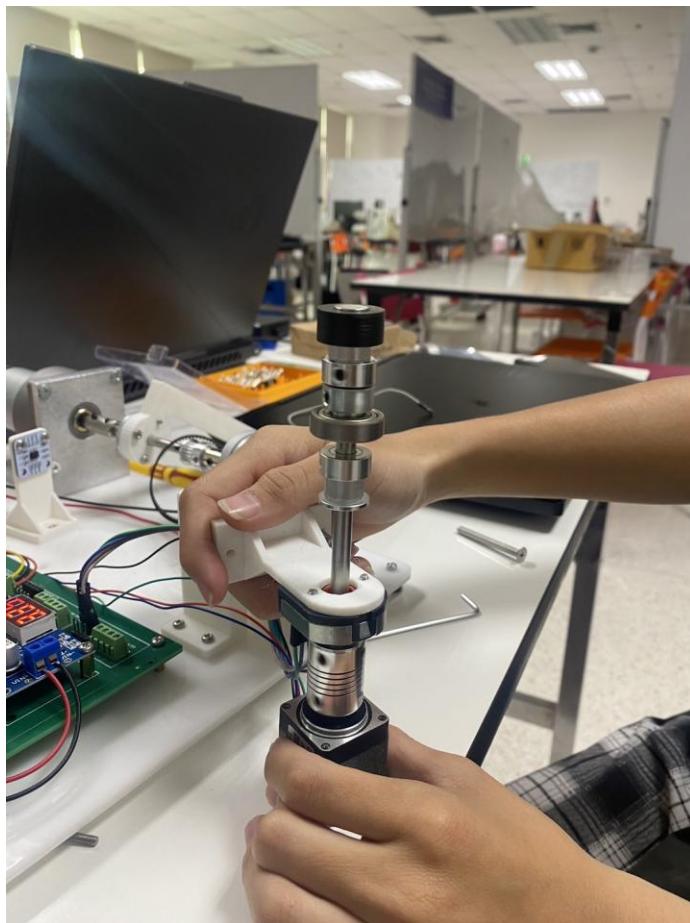
ทำการเก็บข้อมูลทั้งหมด 2 รอบการหมุน รวมเป็นจำนวน 15 ค่า เริ่มจากค่า Step Frequency ที่ 0 Hz ไปจนถึง 1200 Hz โดยเพิ่มค่าทีละ 100 Hz ในแต่ละครั้ง

1.2.2 Half-Step

ทำการเก็บข้อมูลทั้งหมด 2 รอบการหมุน รวมเป็นจำนวน 28 ค่า เริ่มจากค่า Step Frequency ที่ 0 Hz ไปจนถึง 2500 Hz โดยเพิ่มค่าทีละ 100 Hz ในแต่ละครั้ง

1.2.3 Micro-Step

ทำการเก็บข้อมูลทั้งหมด 2 รอบการหมุน รวมเป็นจำนวน 15 ค่า เริ่มจากค่า Step Frequency ที่ 0 Hz ไปจนถึง 5000 Hz โดยเพิ่มค่าทีละ 500 Hz ในแต่ละครั้ง แต่ในระหว่างการทดลองครั้งที่ 2 ในโหมด Micro-Step พบร่วมกับกำหนดค่า Step Frequency เกิน 5000 Hz มอเตอร์ก็ยังสามารถหมุนต่อไปได้ ทางผู้จัดทำจึงทดลองเพิ่มค่า Step Frequency ทีละน้อย พบว่าเมื่อกำหนดที่ 5300 Hz มอเตอร์จะหยุดทำงาน ไม่สามารถดำเนินการหมุนต่อได้



รูปที่ 4 การทดลองแบบ no load

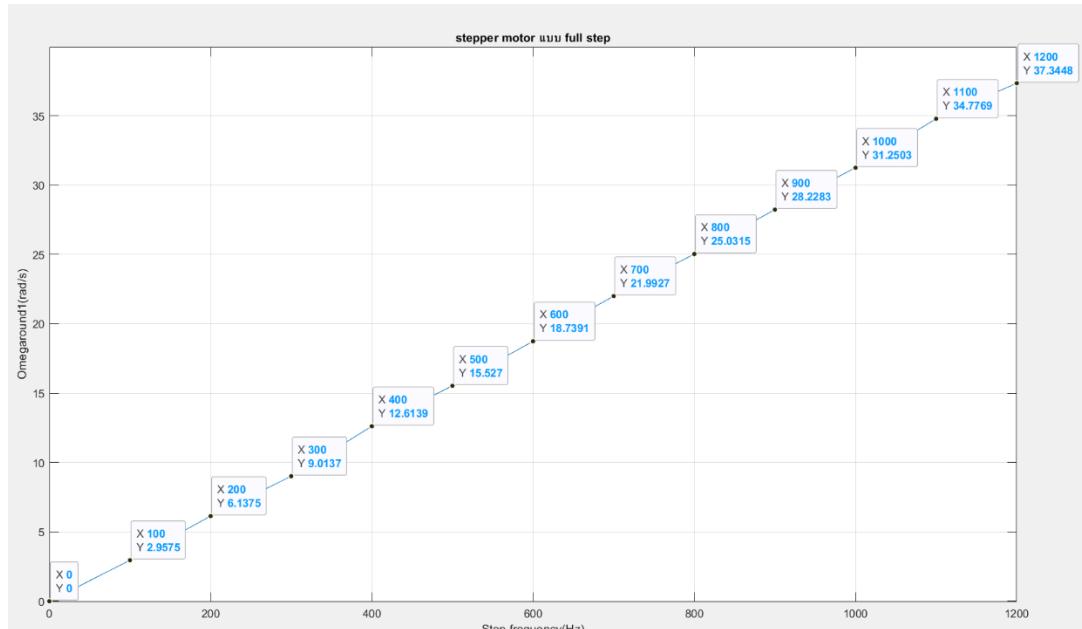
2. การทดลองแบบมี load เนื่องจากในระหว่างการทดลองพบว่า Stepper Motor ไม่สามารถหมุนได้ตามที่ต้องการ เมื่อทำการตรวจสอบพบว่าเนื่องจากมีความผิดพลาดเกี่ยวกับอร์ดที่ Shaft บิดเบี้ยว ทำให้เกิดแรงบิดที่เพิ่มขึ้นกับ มอเตอร์ ทำให้มอเตอร์นั้นทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ โดยเมื่อทำการเพิ่ม Step Frequency ไปถึงจุดหนึ่ง มอเตอร์จะไม่สามารถหมุนได้ (Full-Step : 20 Hz, Half-Step : 40 Hz, Micro-Step : 400 Hz) ดังนั้นทางคณะผู้จัดทำจึงไม่สามารถทำการทดลองในส่วนนี้ได้

วัสดุอุปกรณ์

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

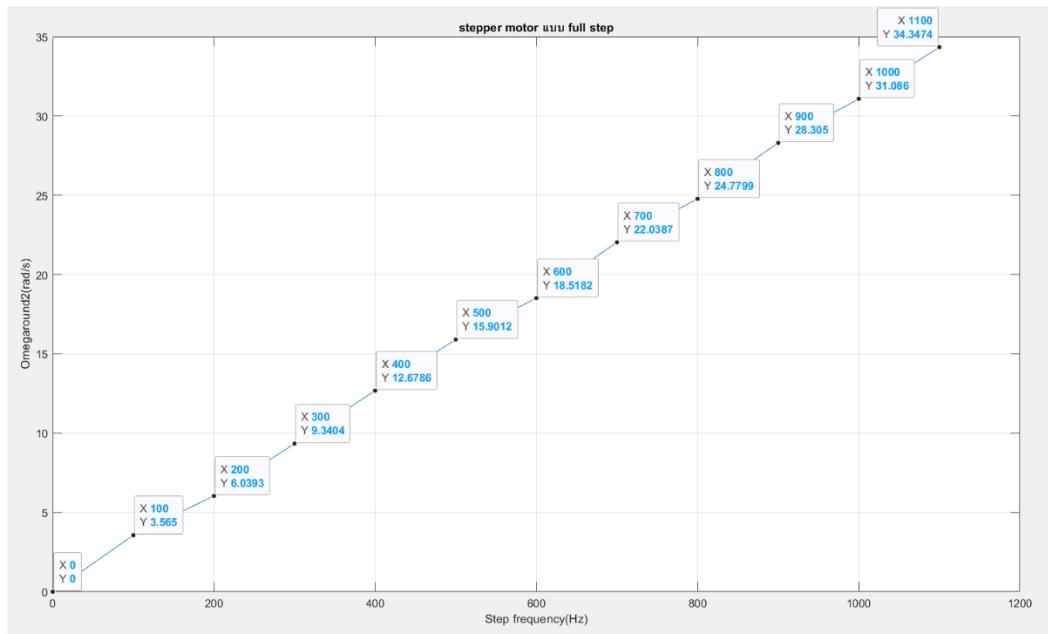
ผลการทดลอง

1. ในโหมด Full-Step



รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมและ Step Frequency จากผลการทดลองในรอบที่ 1

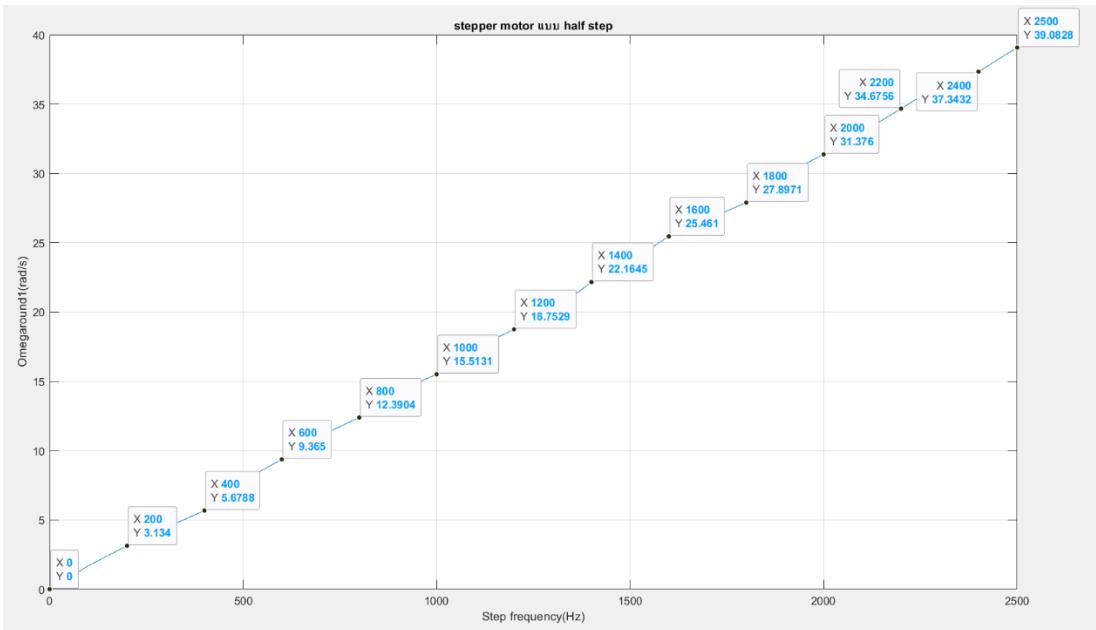
จากราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อนำผลการทดลองในรอบที่ 1 ไปวาดเป็นกราฟ จะได้กราฟแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง Step Frequency (Hz) และ ความเร็วเชิงมุมของ Stepper Motor โดยมีรายละเอียดดังนี้ คือเมื่อมีการเพิ่มความถี่ของ Step Frequency จาก 0 Hz ถึง 1200 Hz ความเร็วเชิงมุมจะเพิ่มขึ้นตามลำดับ ทำให้ลักษณะกราฟที่ได้เป็นเส้นตรง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของมอเตอร์สเต็ปเป็นไปตามการปรับสตีปที่ลักษณะ แต่เมื่อมีการใส่ค่า Step Frequency มากกว่า 1200 Hz ปรากฏว่า Stepper Motor ไม่สามารถหมุนต่อไปได้ หรือก็คือเป็นจุดที่เรียกว่า Stall Point ของโหมดนี้



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมและ Step Frequency จากผลการทดลองในรอบที่ 2

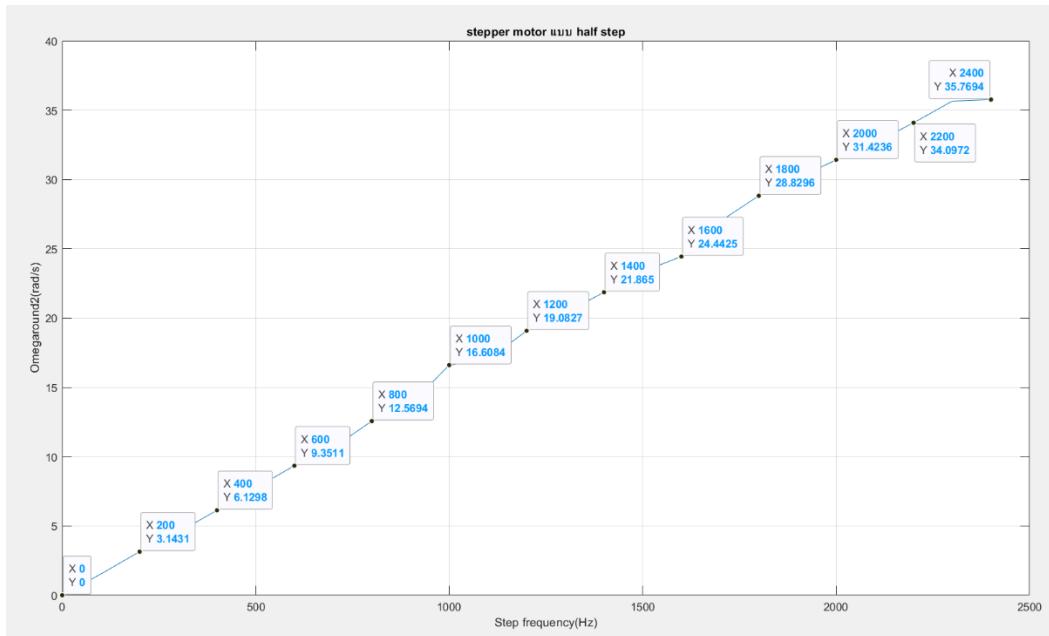
ในส่วนของการทดลองรอบที่ 2 นั้น ได้มีการทำเหมือนกับการทดลองที่ 1 ทุกประการ แต่ผลปรากฏว่าจุด Stall Point ในครั้งนี้อยู่ที่ค่า 1100 Hz แทน

2. ในโหมด Half-Step



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุ่งและ Step Frequency จากผลการทดลองในรอบที่ 1

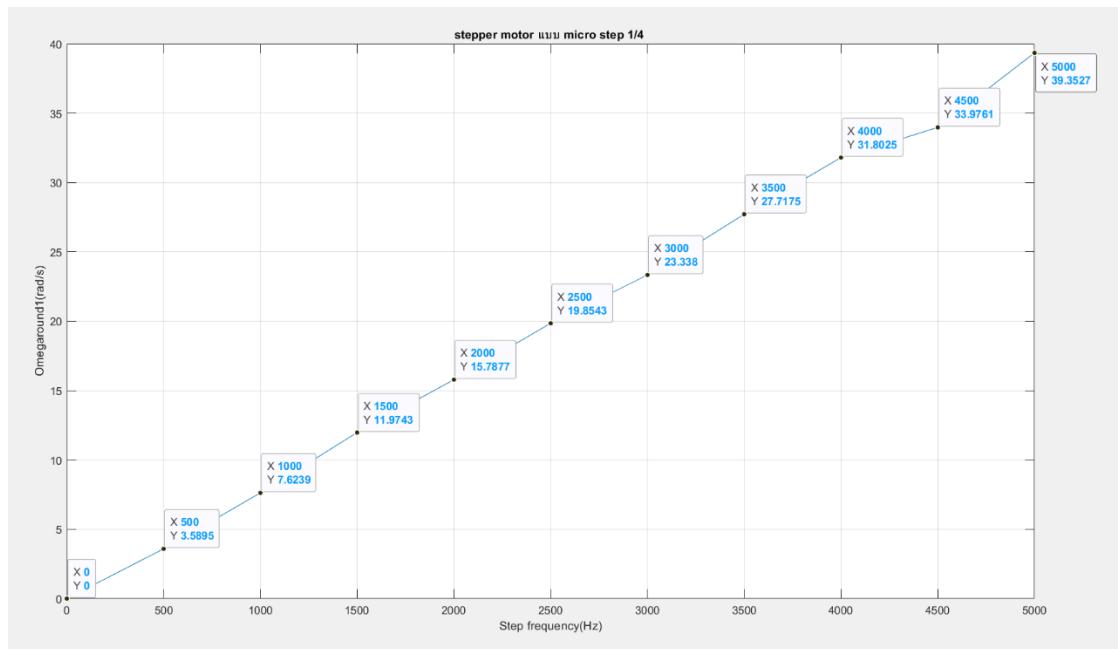
จากการจะเห็นได้ว่าเมื่อนำผลการทดลองในรอบที่ 1 ไปวาดเป็นกราฟ จะได้กราฟแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง Step Frequency (Hz) และ ความเร็วเชิงมุ่งของ Stepper Motor โดยมีรายละเอียดดังนี้ คือเมื่อมีการเพิ่มความเร็วของ Step Frequency จาก 0 Hz ถึง 2500 Hz ความเร็วเชิงมุ่งจะเพิ่มขึ้นตามลำดับ ทำให้ลักษณะกราฟที่ได้เป็นเส้นตรง เนื่องจาก การเปลี่ยนแปลงของมอเตอร์สเต็ปเป็นไปตามการปรับสเต็ปทีลีช่วง แต่เมื่อมีการใส่ค่า Step มากกว่า 2600 Hz ปรากฏว่า Stepper Motor ไม่สามารถหมุนต่อไปได้ หรือก็คือเป็นจุดที่เรียกว่า Stall Point ของ荷重นี้



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมและ Step Frequency จากผลการทดลองในรอบที่ 2

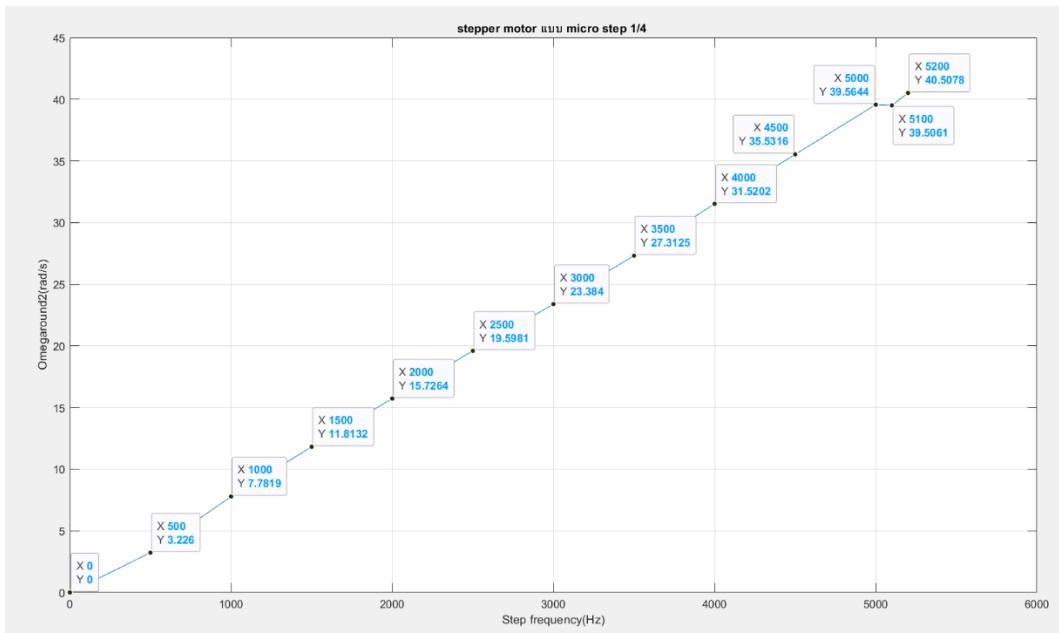
ในส่วนของการทดลองรอบที่ 2 นั้น ได้มีการทำเหมือนกับการทดลองที่ 1 ทุกประการ แต่ผลปรากฏว่าจุด Stall Point ในครั้งนี้อยู่ที่ค่า 2400 Hz แทน

3. ในโหมด Micro-Step แบบ 1/4



รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมและ Step Frequency จากผลการทดลองในรอบที่ 1

จากการจะเห็นได้ว่าเมื่อนำผลการทดลองในรอบที่ 1 ไปวัดเป็นกราฟ จะได้กราฟแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง Step frequency (Hz) และ ความเร็วเชิงมุมของ Stepper Motorโดยมีรายละเอียดดังนี้ คือเมื่อมีการเพิ่มความถี่ของ step frequency จาก 0 Hz ถึง 5000 Hz ความเร็วเชิงมุมจะเพิ่มขึ้นตามลำดับ ทำให้ลักษณะกราฟที่ได้เป็นเส้นตรง เนื่องจาก การเปลี่ยนแปลงของมอเตอร์สตีปเป็นไปตามการปรับสตีปทีละช่วง แต่เมื่อมีการใส่ค่า step frequency มากกว่า 5000 Hz ปรากฏว่า Stepper Motorไม่สามารถหมุนต่อไปได้ หรือก็คือเป็นจุดที่เรียกว่า Stall Point ของโหนดนี้ จากการจะเห็นได้ว่าเมื่อนำผลการทดลองในรอบที่ 1 ไปวัดเป็นกราฟ จะได้กราฟแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง Step Frequency (Hz) และ ความเร็วเชิงมุมของ Stepper Motorโดยมีรายละเอียดดังนี้ คือเมื่อมีการเพิ่มความถี่ของ Step Frequency จาก 0 Hz ถึง 5000 Hz ความเร็วเชิงมุมจะเพิ่มขึ้นตามลำดับ ทำให้ลักษณะกราฟที่ได้เป็นเส้นตรง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ มอเตอร์สตีปเป็นไปตามการปรับสตีปทีละช่วง แต่เมื่อมีการใส่ค่า Step Frequency มากกว่า 5000 Hz ปรากฏว่า Stepper Motorไม่สามารถหมุนต่อไปได้ หรือก็คือเป็นจุดที่เรียกว่า Stall Point ของโหนดนี้



รูปที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมและ Step Frequency จากผลการทดลองในรอบที่ 2

ในส่วนของการทดลองรอบที่ 2 นั้น ได้มีการทำเหมือนกับการทดลองที่ 1 ทุกประการ แต่ผลปรากฏว่าจุด Stall Point ในครั้งนี้อยู่ที่ค่า 5200 Hz แทน

สรุปผล

จากสมมติฐานที่ว่าความถี่ที่ Stall Point ใน Half-Step จะเป็น 2 เท่าของ Full-Step และ Micro-Step จะเป็น 2 เท่าของ Half-Step ถูกต้องในเชิงทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัติอาจมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น เช่น ประสิทธิภาพของ Driver, คุณสมบัติของ Stepper Motor, และเงื่อนไขการทำงาน (โหลด, กระแส, ฯลฯ)

อภิปรายผล

จากการทดลองพบว่า ความถี่ที่ Stall Point ในการขับเคลื่อน Stepper Motorแบบ Half-Step มีค่าเป็นประมาณ 2 เท่าของ Full-Step คือ และในกรณีของ Micro-Step มีค่าเป็นประมาณ 2 เท่าของ Half-Step โดย การ drive แบบ Full-Step ณ Stall point คือ 1100 Hz และ 1200 Hz การ drive แบบ Half-Step ณ Stall point คือ 2600 Hz และ 2400 Hz และ การ drive แบบ Micro-Step ณ Stall point คือ 5000 Hz และ 5200 Hz ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับสมมติฐาน เนื่องจากการเพิ่มความละเอียดของ Step จะทำให้มอเตอร์สามารถเคลื่อนที่ด้วยความถี่สูงขึ้นกว่าในจุด Stall Point อย่างไรก็ตาม เมื่อวิเคราะห์ผลการทดลองในเชิงปฏิบัติ พบร่วมความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยจากค่าทฤษฎีที่คาดการณ์ไว้ ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้อาจมีสาเหตุมาจากการปัจจัยต่าง ๆ เช่น

1. ประสิทธิภาพของ Driver : ตัว Driver ที่ใช้ในการควบคุม Stepper Motorอาจมีข้อจำกัดในเรื่องการสร้างสัญญาณที่มีความละเอียดและเสถียรภาพสูง
2. คุณสมบัติของ Stepper Motor: การตอบสนองของ Stepper Motorแต่ละรุ่นต่อการควบคุมด้วยใหม่ต่าง ๆ (Full-Step, Half-Step, Micro-Step) อาจแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับการออกแบบและคุณภาพของมอเตอร์
3. เงื่อนไขการทำงาน : ปัจจัยอื่น เช่น โหลดของมอเตอร์ กระแสที่จ่ายให้มอเตอร์ และแรงเสียดทานของระบบ อาจส่งผลกระทบต่อความสามารถของมอเตอร์ในการรักษาความถี่การทำงาน

ดังนั้นผลการทดลองในครั้งนี้จึงสนับสนุนสมมติฐานในเชิงทฤษฎี แต่ยังต้องคำนึงถึงปัจจัยภายนอกที่ส่งผลกระทบต่อความถูกต้องและความแม่นยำในเชิงปฏิบัติตัวอย่างมาก

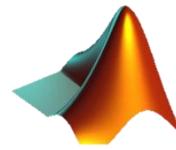
ข้อเสนอแนะ

- ควรตรวจสอบความพร้อมของอุปกรณ์ในบอร์ดก่อนการใช้งาน เพื่อให้สามารถดำเนินการทดลองได้อย่างราบรื่น และมีประสิทธิภาพเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำยิ่งขึ้น
- ควรพิจารณาทดลองซ้ำในสภาพแวดล้อมและเงื่อนไขที่หลากหลาย รวมถึงการวิเคราะห์เชิงลึกถึงผลกระทบจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวข้างต้น

เอกสารอ้างอิง(แบบ link)

1. [Stepper Driver Datasheet](#)
2. https://www.researchgate.net/publication/273448791_Simple_Discussion_on_Stepper_Motors_for_the_Development_of_Electronic_Device
3. [Basics of Stepper Motors](#)
4. [Stepper Motors](#)

RMXplorer



LAB3 : Brushless DC Motor

สมาชิก

- | | | |
|------------------|-------------|-------------|
| ● นายศักดิ์ไชย | ธนาภาสวัฒน์ | 66340500052 |
| ● นางสาวศุภพิชญ์ | เทพกร | 66340500057 |

วัตถุประสงค์หลัก

- เพื่อศึกษาความสามารถในการรับรู้ปริมาณทางพิสิเก็ตของ Sensor ทั้งหมดตั้งแต่ต้นจนจบกระบวนการได้
- เพื่อศึกษาหลักการทำงานของ Sensor ตั้งแต่การตรวจจับจนถึงการแสดงผล
- เพื่อศึกษาทฤษฎีทางพิสิเก็ต หรือข้อมูลจาก Datasheet ที่สามารถอธิบายการทำงานของ Sensor
- เพื่อศึกษาการออกแบบวิธีการทดลองให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์และผลการเรียนรู้ย่อย โดยใช้อุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงเครื่องมืออย่าง Simulink, MATLAB mlx file และบอร์ด Microcontroller ที่จัดไว้เตรียมให้

สมมติฐาน

- สามารถอธิบายความสามารถในการรับรู้ปริมาณทางฟิสิกส์ของ Sensor ทั้งหมดตั้งแต่ต้นจนจบกระบวนการได้
- สามารถเข้าใจหลักการทำงานของ Sensor โดยต้องเข้าใจทุกขั้นตอนของการทำงานของเซ็นเซอร์ ตั้งแต่การตรวจจับจนถึงการแสดงผล
- สามารถกำหนดตัวแปรในการทดลองได้อย่างเหมาะสมโดย มีทฤษฎีรองรับจากฟิสิกส์ หรือข้อมูลจาก Datasheet ที่นำเข้ามา
- สามารถออกแบบวิธีการทดลองให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์และผลการเรียนรู้อย่าง โดยใช้อุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงเครื่องมืออย่าง Simulink, MATLAB mlx file และบอร์ด Microcontroller ที่จัดเตรียมให้

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. แบ่งหน้าที่และความรับผิดชอบของสมาชิกในทีม
2. กำหนดสมมติฐานสำหรับแต่ละการทดลอง
3. เตรียมอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับการทดลอง
4. ดำเนินการทดลองตามขั้นตอนที่วางไว้
5. บันทึกผลการทดลองอย่างละเอียด
6. วิเคราะห์และสรุปผลจากข้อมูลที่บันทึกไว้
7. จัดทำรายงานสรุปผลการทดลอง

จุดประสงค์

- สามารถอธิบายการทำงานของ Brushless DC Motor ได้
- มีความเข้าใจเกี่ยวกับประเภทการควบคุมของ Brushless DC Motor ทั้งแบบมีเซนเซอร์ (Sensor Based) และแบบไม่มีเซนเซอร์ (Sensorless) รวมถึงรูปแบบของ Control Waveform
- สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของความเร็วเมื่อความถี่ของสัญญาณที่จ่ายเข้า BLDC Motor มีการเปลี่ยนแปลงในโหมด Six-step control
- สามารถอธิบายกระบวนการ Signal Conditioning และ Signal Processing ตั้งแต่ต้นจนจบ โดยอธิบายถึงที่มาของข้อมูลจาก Incremental Encoder และ Hall Current Sensor รวมถึงวิธีการคำนวณและขั้นตอนก่อนและหลังการปรับค่า (Calibrate) Sensor และการจัดการข้อมูล
- สามารถหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้จริงและแรงดันที่ได้จาก Hall Current Sensor รวมถึงการอธิบายกระบวนการ Unwrap ค่า
- สามารถเขียนโปรแกรมโดยใช้ MATLAB และ Simulink ในการควบคุมความเร็วของ Stepper Motor และแสดงผลการเปลี่ยนแปลงสัญญาณ Input และ Output แบบ Real-Time โดยใช้บอร์ด Nucleo STM32G474RE ควบคู่กับสัญญาณจาก Incremental Encoder และ Hall Current Sensor

สมมติฐาน

1. Trapezoidal Back EMF

รูปคลื่นของ Back EMF ที่ได้จากการวัดจะมีลักษณะเป็นรูปทรงที่คล้ายกับสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal) เมื่อพล็อตกราฟแรงดันไฟฟ้ากับเวลา

2. Permanent Magnet Rotor

โรเตอร์ที่ใช้แม่เหล็กถาวรจะสามารถสร้างสนามแม่เหล็กที่จำเป็นสำหรับการทำงานของมอเตอร์ได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้ชุดลวดไฟฟ้าในโรเตอร์

3. Commutation Logic

Commutation Logic จะมีผลต่อการสลับกระแสในชุดลวดของมอเตอร์ ซึ่งจะทำให้โรเตอร์หมุนในทิศทางที่ต้องการ

4. Rising Edge และ Falling Edge

เมื่อเกิด Rising Edge (แรงดันจากต่ำไปสูง) จะเพิ่มกระแสหรือพลังงานที่จ่ายให้กับมอเตอร์ และเมื่อเกิด Falling Edge (แรงดันจากสูงไปต่ำ) จะลดกระแสหรือพลังงานที่จ่ายให้กับมอเตอร์

5. Zero Crossing

เมื่อสัญญาณข้ามศูนย์ (Zero Crossing) จะเป็นจุดที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสในมอเตอร์ ซึ่งอาจส่งผลต่อทิศทางการหมุนของโรเตอร์

ตัวแปร

1. Trapezoidal Back EMF

ตัวแปรต้น : ความเร็วในการหมุนของโรเตอร์

ตัวแปรตาม : การเปลี่ยนแปลงของ Back EMF

ตัวแปรควบคุม : แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ลักษณะของมอเตอร์ สภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ

2. Permanent Magnet Rotor

ตัวแปรต้น : ประเภทของโรเตอร์

ตัวแปรตาม : ความสามารถในการหมุนของโรเตอร์

ตัวแปรควบคุม : แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ความเร็วในการหมุน การตั้งค่าของ Commutation Logic

3. Commutation Logic

ตัวแปรต้น : Commutation Logic

ตัวแปรตาม : ทิศทางการหมุนของโรเตอร์

ตัวแปรควบคุม : แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ความเร็วในการหมุนของโรเตอร์ รูปแบบของมอเตอร์

4. Rising Edge และ Falling Edge

ตัวแปรต้น : ช่วงเวลาในการเปลี่ยนแปลงจากสถานะต่ำไปสูง (Rising Edge) และจากสูงไปต่ำ (Falling Edge)

ตัวแปรตาม : กระแสหรือพลังงานที่จ่ายให้กับมอเตอร์

ตัวแปรควบคุม : แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ความเร็วในการหมุนของโรเตอร์ ความถี่ของสัญญาณ

5. Zero Crossing

ตัวแปรต้น : Zero Crossing Point (จุดที่สัญญาณผ่านจากบวกไปลบหรือจากลบไปบวก)

ตัวแปรตาม : ทิศทางหรือการหมุนของโรเตอร์

ตัวแปรควบคุม : แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ความเร็วในการหมุนของโรเตอร์ ความถี่ของสัญญาณ

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. Trapezoidal Back EMF คือรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้ากลับ (Back EMF) ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ซึ่งมีลักษณะคล้ายรูปทรงของกับดักสี่เหลี่ยมคงที่ เมื่อพล็อตกราฟแรงดันไฟฟ้ากลับเทียบกับเวลา
2. Permanent Magnet Rotor หมายถึงโรเตอร์ของมอเตอร์ที่ใช้แม่เหล็กถาวรในการสร้างสนามแม่เหล็กที่จำเป็นสำหรับการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งต่างจากมอเตอร์ทั่วไปที่สร้างสนามแม่เหล็กด้วยขดลวดไฟฟ้าในโรเตอร์
3. Commutation Logic คือ กระบวนการที่ใช้ในการควบคุมการสลับกระแสไฟฟ้าในขดลวดของมอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อให้โรเตอร์หมุนได้ในทิศทางที่ต้องการ
4. Permanent Magnet Synchronous Machine (PMSM) คือ มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ใช้แม่เหล็กถาวรในโรเตอร์ และมีการทำงานแบบซิงโครนัส ซึ่งหมายความว่าโรเตอร์หมุนที่ความเร็วเดียวกันกับสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์ ตาม律ของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังขดลวดในสเตเตอร์
5. Rising Edge เป็นช่วงเวลาที่สัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงจากสถานะต่ำไปเป็นสูง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจากระดับแรงดันต่ำไปสูงในช่วงนี้จะเกิดการเพิ่มกระแสหรือเพิ่มพลังงานไปยังมอเตอร์
6. Falling Edge เป็นช่วงเวลาที่สัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงจากสถานะสูงไปเป็นต่ำ หรือแรงดันลดลง ในช่วงนี้จะมีการลดกระแสหรือพลังงานที่จ่ายไปยังมอเตอร์
7. Zero Crossing คือ จุดที่สัญญาณผ่านจากค่าบวกไปยังค่าลบ หรือจากค่าลบไปยังค่าบวกในช่วงเวลาที่ค่าของสัญญาณนั้นเป็นศูนย์

นิยามเชิงปฏิบัติการ

1. FOC (Field-Oriented Control) คือ เทคนิคการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า ที่ช่วยให้การควบคุมแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์ทำได้อย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำ โดยการแยกการควบคุมสนามแม่เหล็กและการควบคุมแรงบิดออกจากกัน

2. Six-step control ใช้การสลับสัญญาณไฟฟ้าไปยังชุดลวดของมอเตอร์ในลำดับที่กำหนดไว้ 6 ลำดับ เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กหมุนและควบคุมการหมุนของโรเตอร์
3. PWM เป็นเทคนิคการควบคุมสัญญาณโดยการปรับ Duty Cycle ของ pulse ในสัญญาณดิจิทัลเพื่อควบคุมพลังงานเฉลี่ยที่ส่งไปยังโหลด

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor หรือ BLDC) เป็นมอเตอร์ที่แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลโดยใช้แม่เหล็กไฟฟ้าในสเตเตอร์ (stator) เพื่อหมุนแม่เหล็กทราบที่อยู่บนโรเตอร์ (rotor) โดยไม่ต้องพึ่งแปรงถ่าน มอเตอร์ BLDC ไม่มีแปรงถ่านภายใน จึงไม่มีชุดลวดบนโรเตอร์ แต่ใช้แม่เหล็กทราบแทน และย้ายชุดลวดไปยังสเตเตอร์ที่ติดอยู่กับตัวมอเตอร์ เมื่อชุดลวดไม่ต้องหมุน ระบบจึงไม่ต้องใช้แปรงถ่าน การสลับขั้วแม่เหล็กของชุดลวดสเตเตอร์จะถูกควบคุมด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อสร้างการหมุนของมอเตอร์

มอเตอร์ BLDC มีข้อดีหลายประการ เช่น ประสิทธิภาพสูง เนื่องจากไม่มีการสูญเสียพลังงานจากการเสียดสีของแปรงถ่าน, การบำรุงรักษาน้อย เพราะไม่มีแปรงถ่านที่สึกหรอจึงไม่ต้องเปลี่ยน, เสียงรบกวนต่ำ เพราะไม่มีประกายไฟหรือเสียงจากการเสียดสี และควบคุมได้อย่างแม่นยำ ทำให้ปรับความเร็วและตำแหน่งได้อย่างละเอียด เมื่อมอเตอร์ BLDC จะมีข้อเสีย เช่น ราคาสูงกว่าเนื่องจากต้องใช้ตัวควบคุม และระบบซับซ้อนกว่า มอเตอร์แบบมีแปรงถ่าน แต่ด้วยข้อดีที่โดดเด่นในด้านประสิทธิภาพ ทำให้มอเตอร์ BLDC ได้รับความนิยมและถูกนำมาใช้ในหลากหลายแอปพลิเคชัน เช่น ยานยนต์ไฟฟ้า เครื่องใช้ไฟฟ้า และอุปกรณ์อุตสาหกรรม

วิธีดำเนินการทดลอง

1. Trapezoidal Back EMF
 - 1.1 เตรียมอุปกรณ์: ใช้มอเตอร์ไร้แปรงถ่านที่เข้ามต่อ กับแหล่งจ่ายไฟที่ควบคุมได้ และเซ็นเซอร์ Hall Effect เพื่อตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์
 - 1.2 การตั้งค่าเครื่องมือ: เชื่อมต่อเครื่องมืออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) เพื่อตรวจสอบแรงดันไฟฟ้ากลับ (Back EMF) จากขั้วของมอเตอร์
 - 1.3 การหมุนมอเตอร์: เปิดมอเตอร์และหมุนด้วยความเร็วที่คงที่
 - 1.4 การวัด Back EMF: ใช้อสซิลโลสโคปวัดสัญญาณ Back EMF ระหว่างการหมุนของโรเตอร์

- 1.5 การวิเคราะห์ผล: พล็อตกราฟ Back EMF เทียบกับเวลาและสังเกตลักษณะของคลื่นว่าเป็นรูปทรงคล้ายกับสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal) หรือไม่
2. Permanent Magnet Rotor
 - 2.1 เตรียมอุปกรณ์: ใช้มอเตอร์ที่มี Permanent Magnet Rotor และเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็ก
 - 2.2 การตั้งค่าเครื่องมือ: ใช้เครื่องมือวัดสนามแม่เหล็ก (เช่น Gaussmeter) เพื่อวัดสนามแม่เหล็กที่เกิดจากโรเตอร์
 - 2.3 การหมุนมอเตอร์: หมุนมอเตอร์ให้หมุนด้วยความเร็วคงที่
 - 2.4 การวัดสนามแม่เหล็ก: วัดความแรงของสนามแม่เหล็กในพื้นที่รอบๆ โรเตอร์โดยใช้ Gaussmeter
 - 2.5 การวิเคราะห์ผล: สังเกตว่ามีสนามแม่เหล็กที่คงที่และไม่ต้องใช้ขดลวดไฟฟ้าในการสร้างสนามแม่เหล็กในโรเตอร์
3. การทดลองเพื่อตรวจสอบ Commutation Logic
 - 3.1 เตรียมอุปกรณ์: ใช้มอเตอร์ไร้แปรงถ่านและตัวควบคุม Commutation Logic
 - 3.2 การตั้งค่าเครื่องมือ: เชื่อมต่อมอเตอร์กับตัวควบคุมที่สามารถสลับกระแสไฟฟ้าในขดลวด
 - 3.3 การหมุนมอเตอร์: ใช้ตัวควบคุมเพื่อหมุนมอเตอร์ในทิศทางที่กำหนด
 - 3.4 การตรวจสอบการหมุน: ใช้เครื่องมือวัดความเร็ว (Tachometer) เพื่อตรวจสอบทิศทางและความเร็วของการหมุน
 - 3.5 การวิเคราะห์ผล: ประเมินว่าการสลับกระแสตาม Commutation Logic ทำให้โรเตอร์หมุนในทิศทางที่ต้องการ
4. การทดลองเพื่อตรวจสอบ Rising Edge และ Falling Edge
 - 4.1 เตรียมอุปกรณ์: ใช้มอเตอร์ไร้แปรงถ่านที่เชื่อมต่อกับตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า
 - 4.2 การตั้งค่าเครื่องมือ: ใช้เครื่องมือออสซิลโลสโคปเพื่อตรวจสอบสัญญาณแรงดันที่จ่ายไปยังมอเตอร์
 - 4.3 การตรวจจับสัญญาณ: วิเคราะห์สัญญาณไฟฟ้าที่จ่ายไปยังมอเตอร์เพื่อหาจุด Rising Edge และ Falling Edge
 - 4.4 การวัดพลังงาน: ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ในช่วง Rising Edge และ Falling Edge
 - 4.5 การวิเคราะห์ผล: สังเกตการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของพลังงานในช่วงที่เกิด Rising Edge และ Falling Edge
5. การทดลองเพื่อตรวจสอบ Zero Crossing
 - 5.1 เตรียมอุปกรณ์: ใช้มอเตอร์ไร้แปรงถ่านที่เชื่อมต่อกับตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าและเครื่องมือออสซิลโลสโค

- 5.2 การตั้งค่าเครื่องมือ: ใช้เครื่องมือออสซิลโลสโคปเพื่อวัดสัญญาณที่จ่ายไปยังมอเตอร์
- 5.3 การตรวจจับ Zero Crossing: ตรวจสอบจุดที่สัญญาณข้ามจากบวกไปลบหรือจากลบไปบวก
- 5.4 การตรวจสอบกระแส: ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของกระแสหรือพังงานที่จ่ายไปยังมอเตอร์ที่จุด Zero Crossing
- 5.5 การวิเคราะห์ผล: ประเมินว่า Zero Crossing ส่งผลต่อการหมุนของโรเตอร์และการเปลี่ยนแปลงของกระแส

วัสดุอุปกรณ์

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

ผลการทดลอง

เมื่อทำการทดลองแล้ว กราฟจะให้รูปร่างคล้ายสี่เหลี่ยมคงที่ (Trapezoidal) อกมา ซึ่งกราฟสีเหลืองจะหมายถึง สัญญาณ U กราฟสีฟ้าจะหมายถึงสัญญาณ V และกราฟสีม่วงจะหมายถึงสัญญาณ W

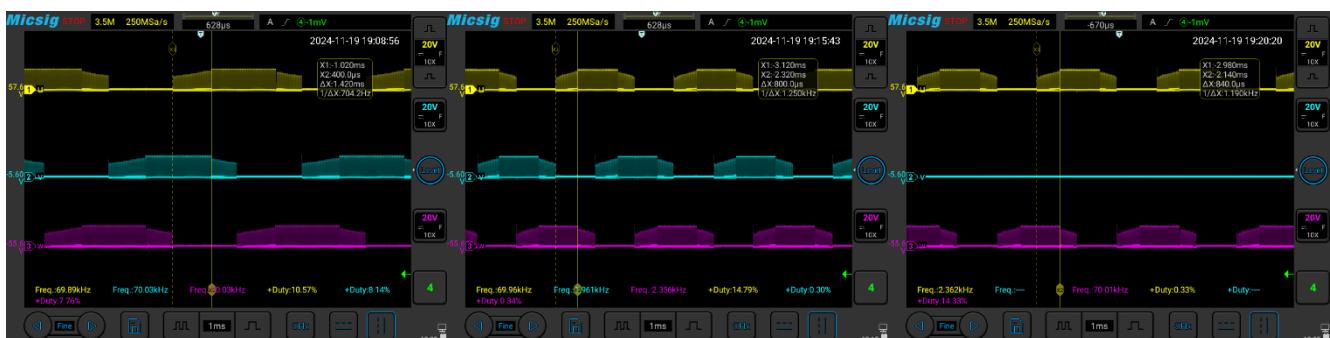
1. ทดลองด้วยความเร็ว 2000 rpm โดยประกอบไปด้วยกราฟแสดงสัญญาณUVW, กราฟFalling Edge, กราฟRasing Edge, กราฟPWN, กราฟค่า และกราฟความเร็วเทียบกับเวลา



รูปที่ 1 สัญญาณ UVW



รูปที่ 2 Falling Edge



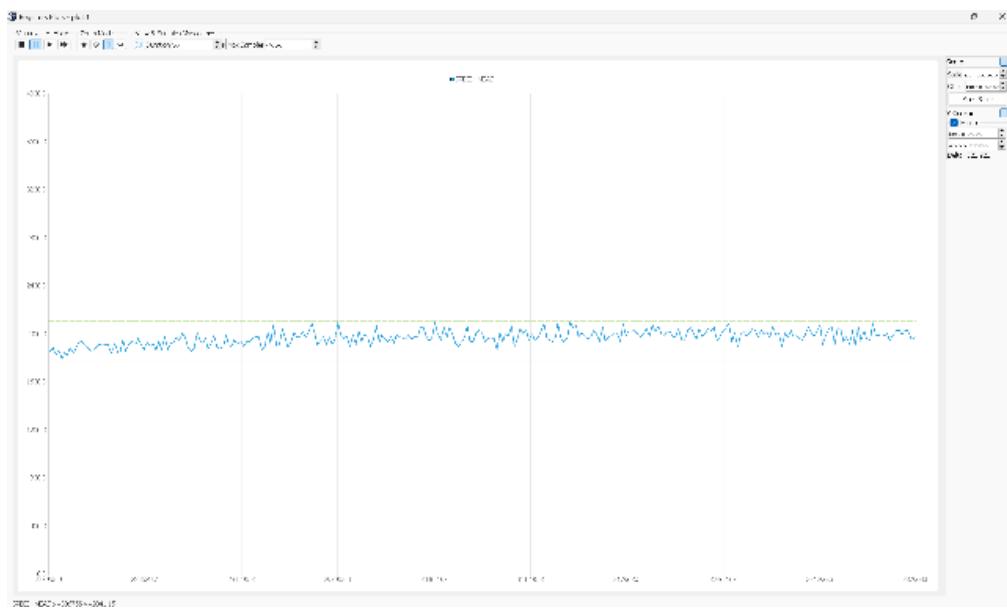
รูปที่ 3 Rasing Edge



รูปที่ 4 PWM



รูปที่ 5 ค่าบ



รูปที่ 6 กราฟความเร็ว

- ทดลองด้วยความเร็ว -2000 rpm โดยประกอบไปด้วยกราฟแสดงสัญญาณ UVW, กราฟ Falling Edge, กราฟ Rasing Edge, กราฟ PWN, กราฟค่า และกราฟความเร็วเทียบกับเวลา



รูปที่ 7 สัญญาณ UVW



รูปที่ 8 Falling Edge



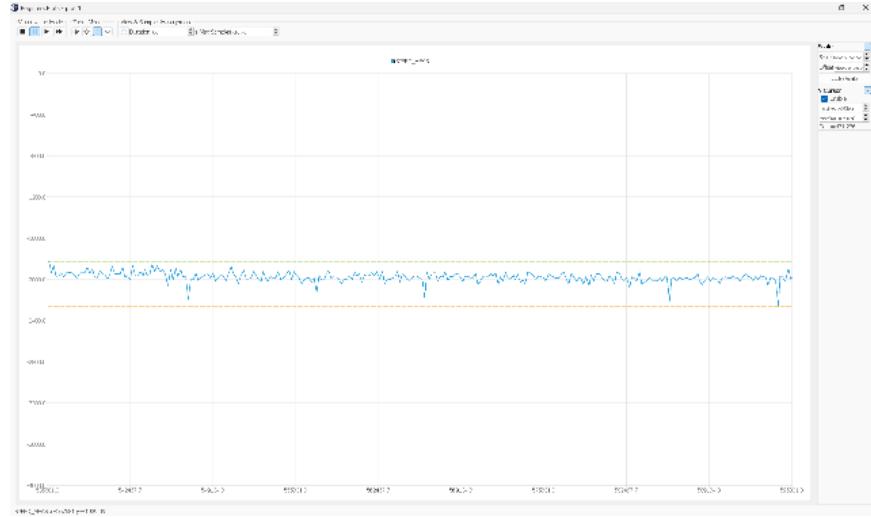
รูปที่ 9 Rasing Edge



รูปที่ 10 PWM



รูปที่ 11 ค่าป

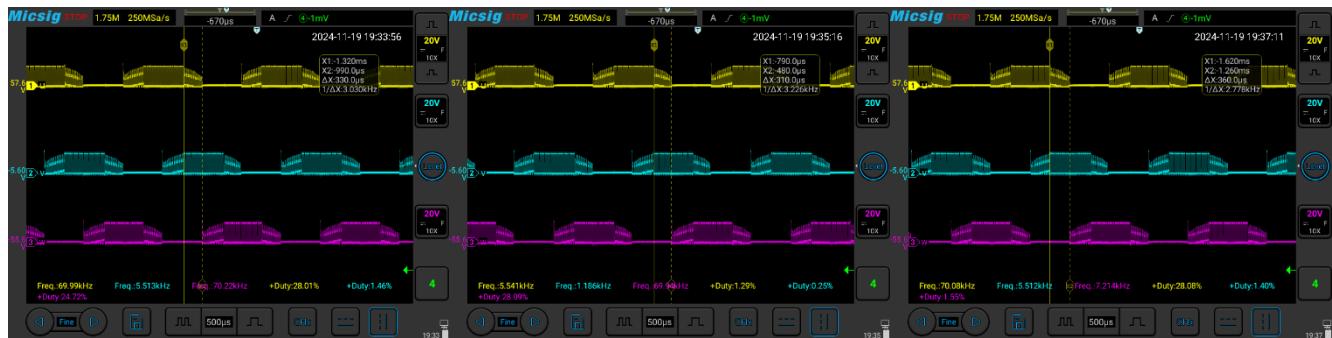


รูปที่ 12 กราฟความเร็ว

3. ทดลองด้วยความเร็ว 4000 rpm โดยประกอบไปด้วยกราฟแสดงสัญญาณ UVW, กราฟ Falling Edge, กราฟ Rasing Edge, กราฟ PWN, กราฟค่า และกราฟความเร็วเทียบกับเวลา



รูปที่ 13 สัญญาณ UVW



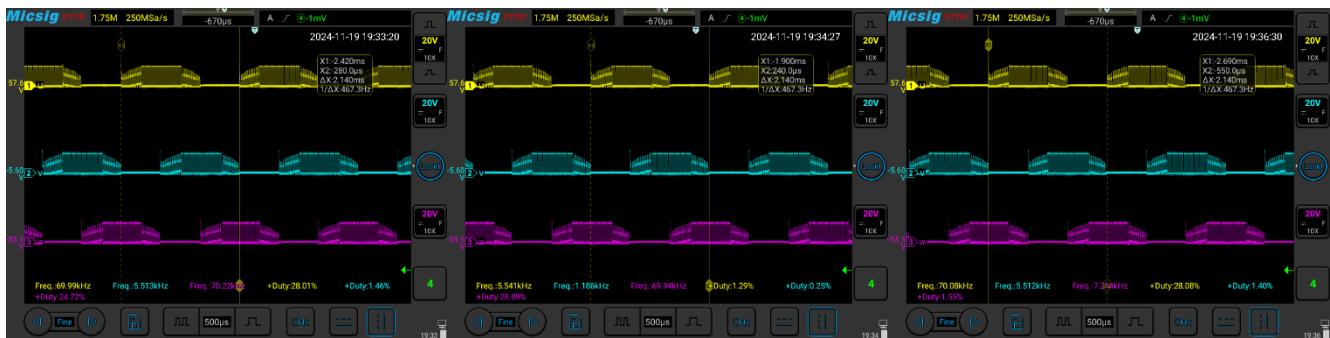
รูปที่ 14 Falling Edge



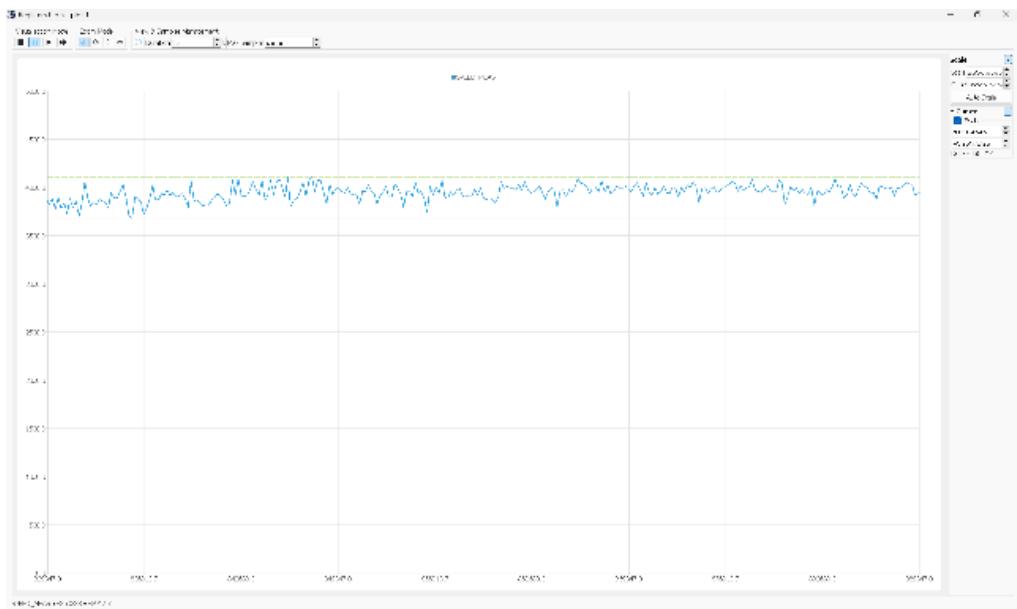
รูปที่ 15 Rasing Edge



รูปที่ 16 PWM



รูปที่ 17 ค่าบ



รูปที่ 18 กราฟความเร็ว

- ทดลองด้วยความเร็ว -4000 rpm โดยประกอบไปด้วยกราฟแสดงสัญญาณUVW, กราฟFalling Edge, กราฟRasing Edge, กราฟPWN, กราฟค่าบ และกราฟความเร็วเทียบกับเวลา



รูปที่ 19 สัญญาณ UVW



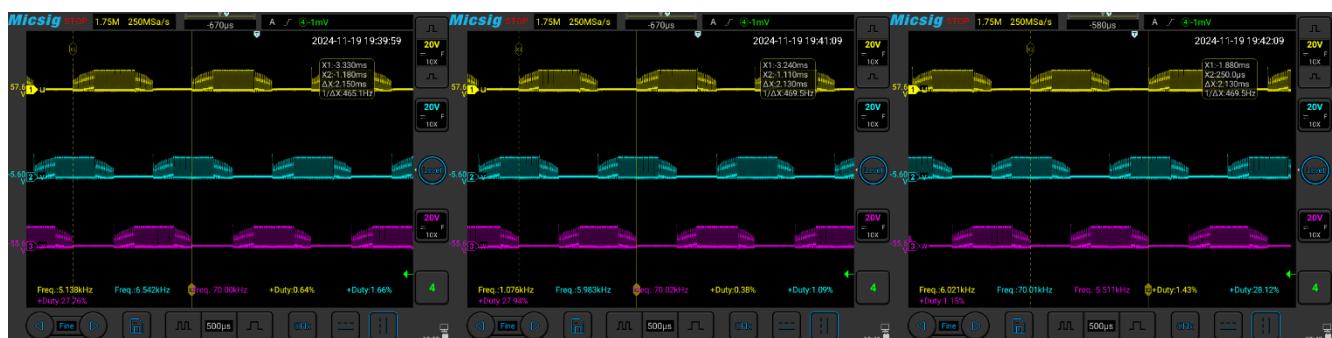
รูปที่ 20 Falling Edge



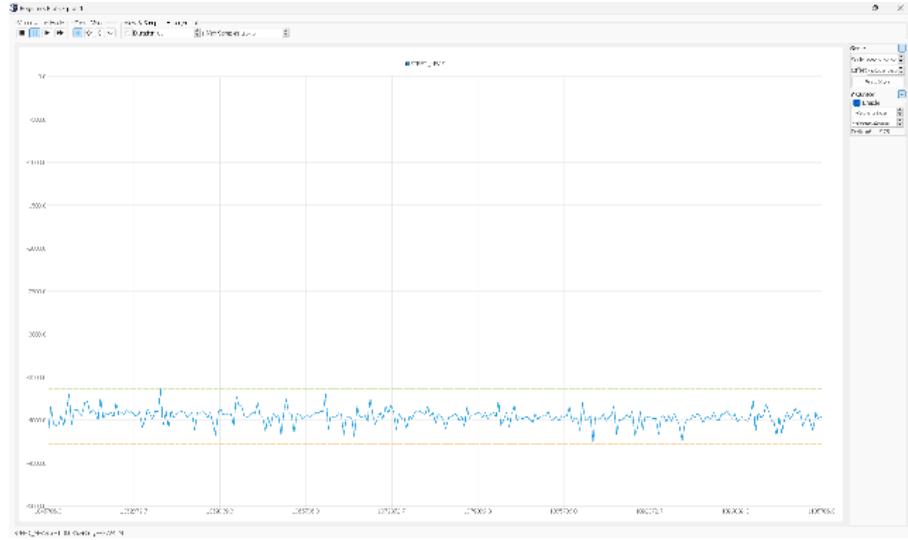
รูปที่ 21 Rasing Edge



รูปที่ 22 PWM

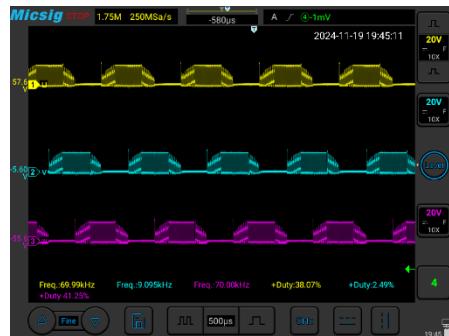


รูปที่ 23 ค่าบ



รูปที่ 24 กราฟความเร็ว

5. ทดลองด้วยความเร็ว 6000 rpm โดยประกอบไปด้วยกราฟแสดงสัญญาณUVW, กราฟFalling Edge, กราฟRasing Edge, กราฟPWN, กราฟค่า และกราฟความเร็วเทียบกับเวลา



รูปที่ 25 สัญญาณ UVW



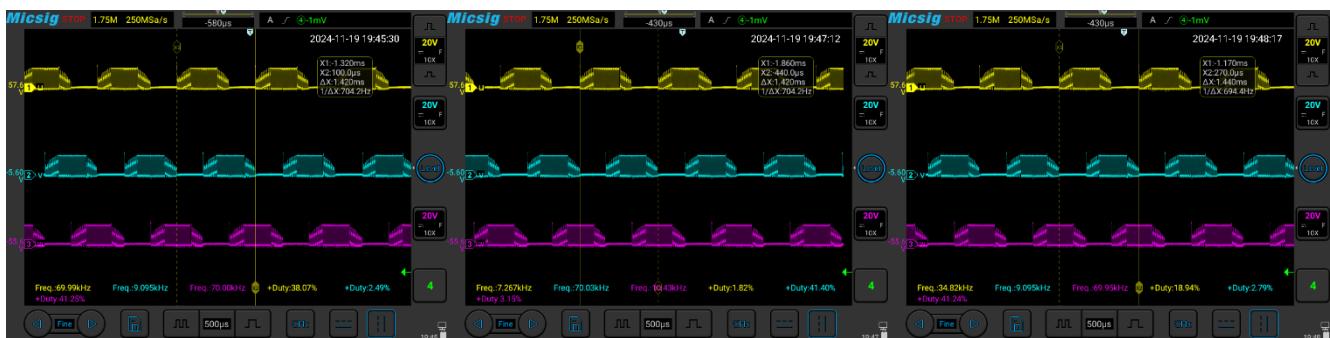
รูปที่ 26 Falling Edge



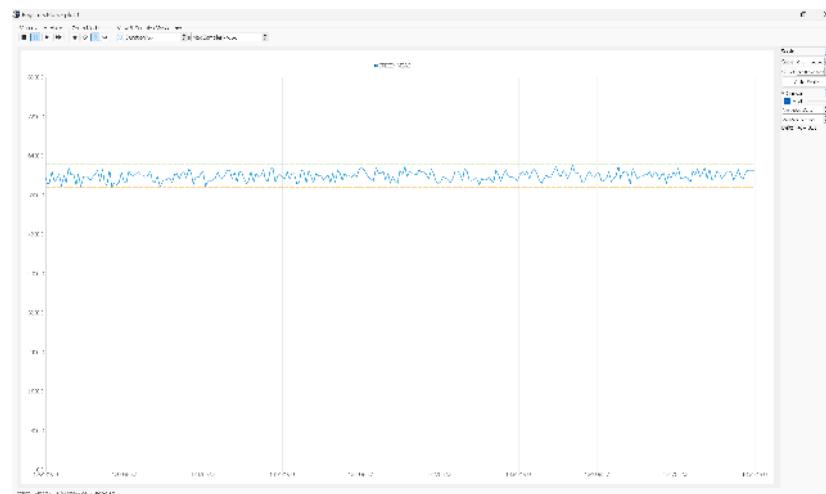
รูปที่ 27 Rasing Edge



รูปที่ 28 PWM



รูปที่ 29 ค่าบ



รูปที่ 30 กราฟความเร็ว

- ทดลองด้วยความเร็ว -6000 rpm โดยประกอบไปด้วยกราฟแสดงสัญญาณUVW, กราฟFalling Edge, กราฟRasing Edge, กราฟPWN, กราฟค่าบ และกราฟความเร็วเทียบกับเวลา



รูปที่ 31 สัญญาณ UVW



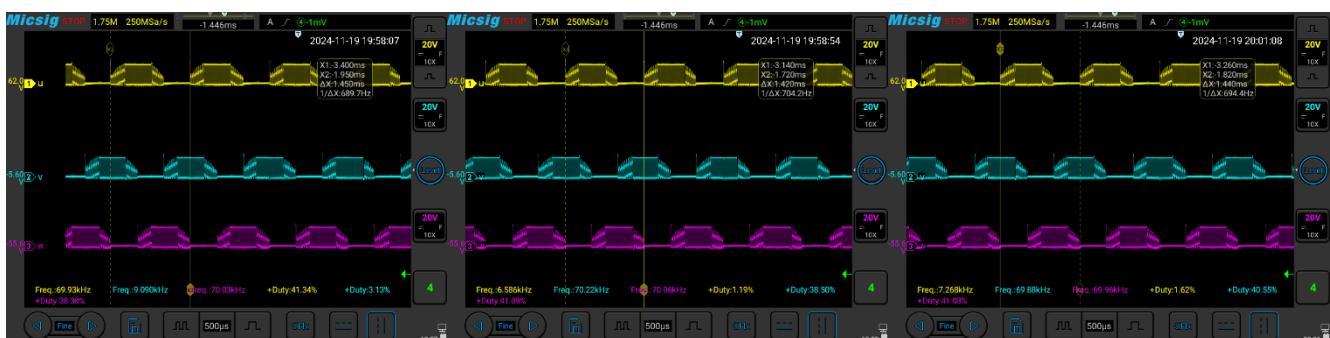
รูปที่ 32 Falling Edge



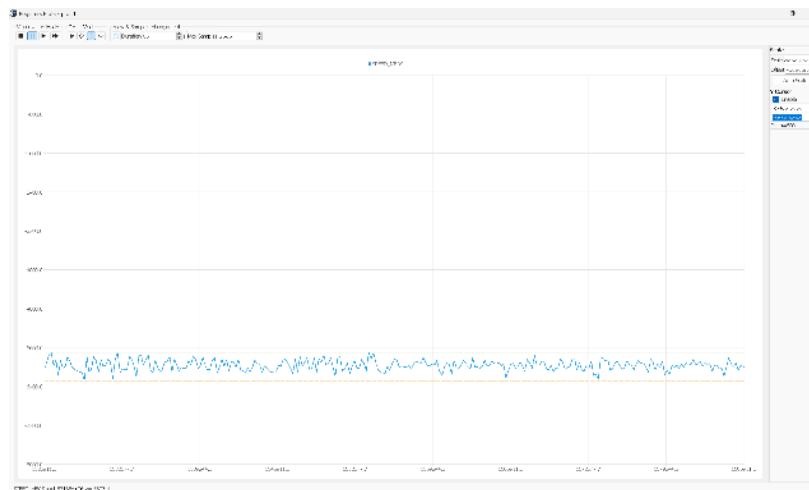
รูปที่ 33 Rasing Edge



รูปที่ 34 PWM

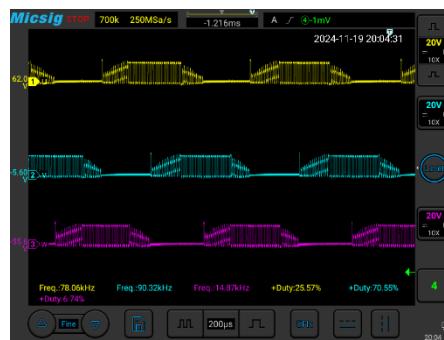


รูปที่ 35 ค่าบ

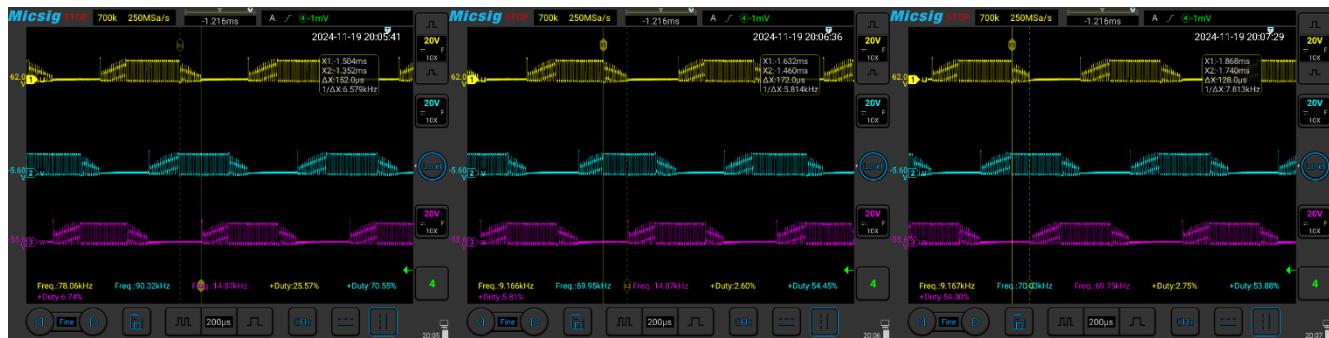


รูปที่ 36 กราฟความเร็ว

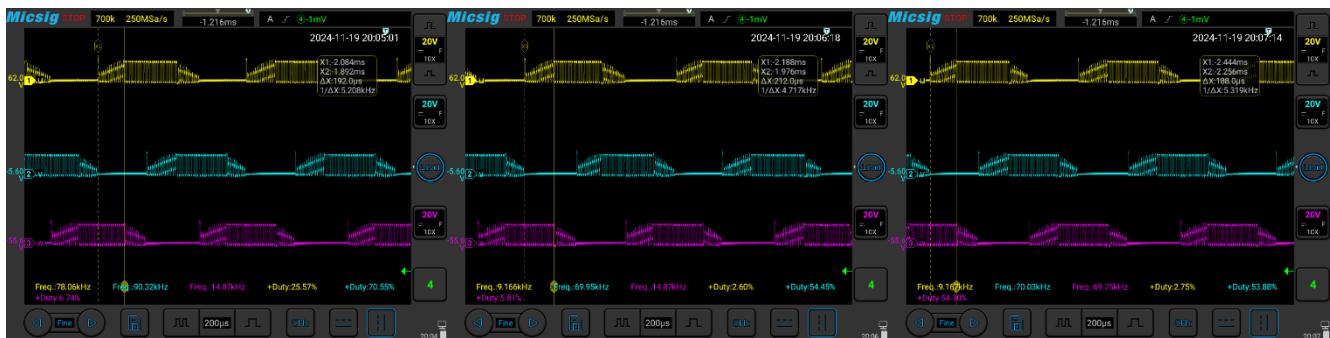
7. ทดลองด้วยความเร็ว 8000 rpm โดยประกอบไปด้วยกราฟแสดงสัญญาณ UVW, กราฟ Falling Edge, กราฟ Rasing Edge, กราฟ PWN, กราฟค่า และกราฟความเร็วเทียบกับเวลา



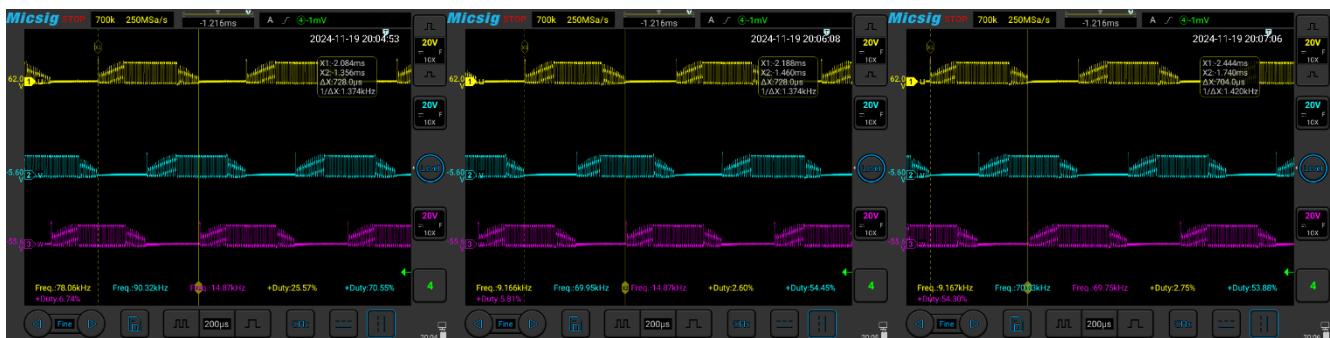
รูปที่ 37 สัญญาณ UVW



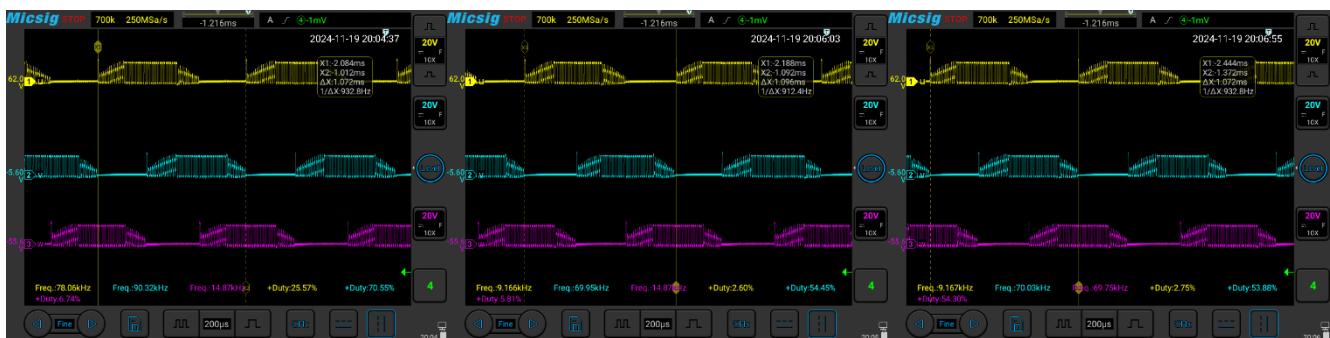
รูปที่ 38 Falling Edge



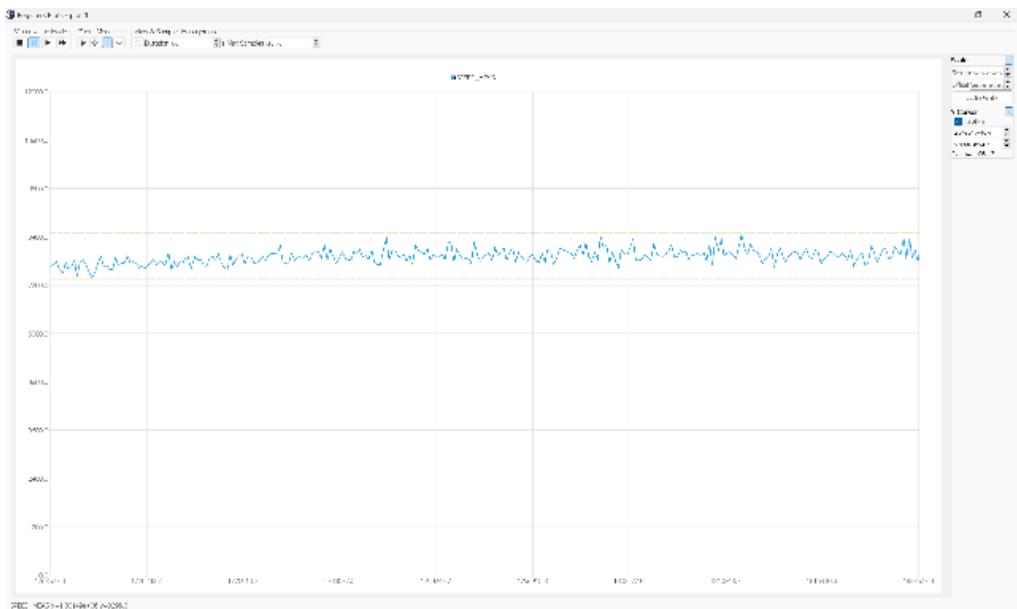
รูปที่ 39 Rasing Edge



รูปที่ 40 PWM

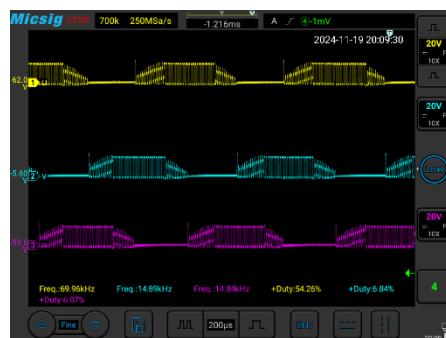


รูปที่ 41 ค่าบ

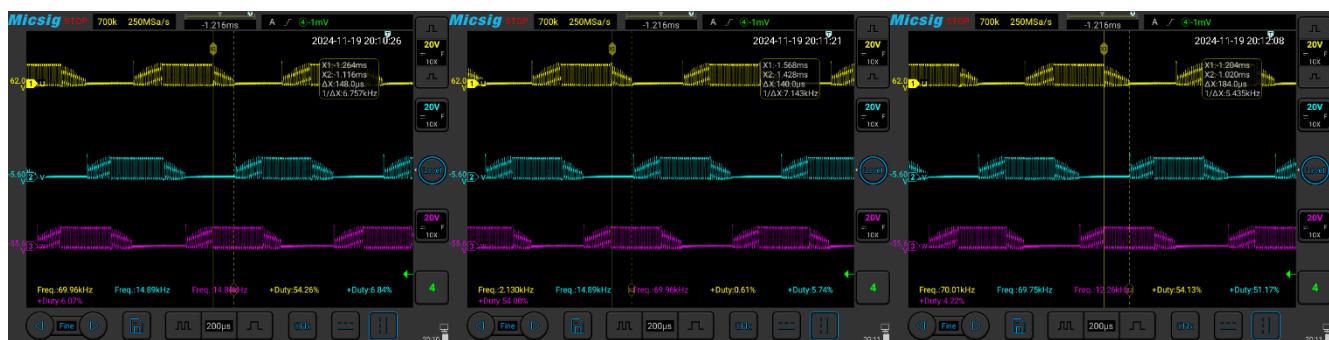


รูปที่ 42 กราฟความเร็ว

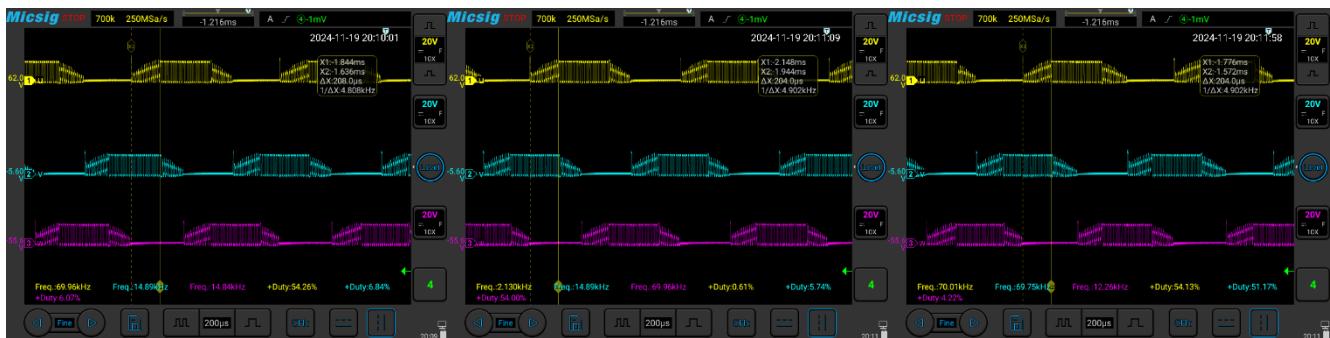
8. ทดลองด้วยความเร็ว -8000 rpm โดยประกอบไปด้วยกราฟแสดงสัญญาณUVW, กราฟFalling Edge, กราฟRasing Edge, กราฟPWN, กราฟค่า และกราฟความเร็วเทียบกับเวลา



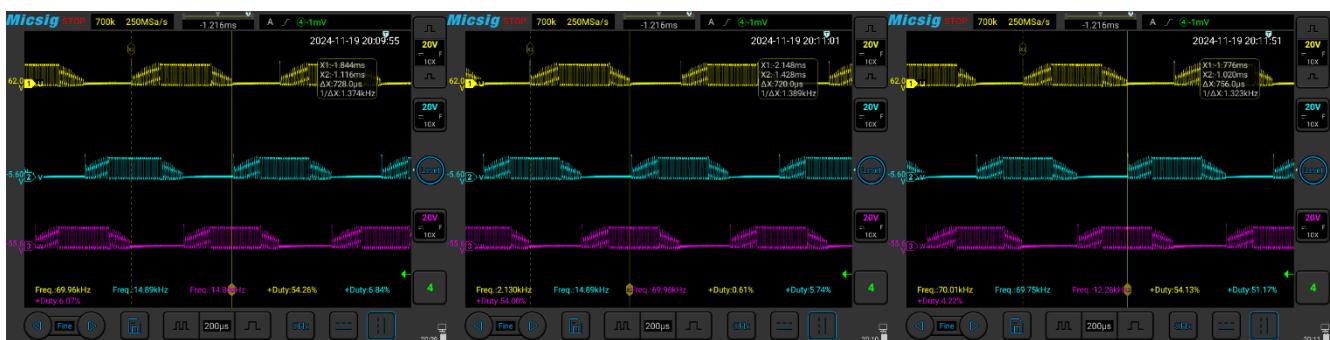
รูปที่ 43 สัญญาณ UVW



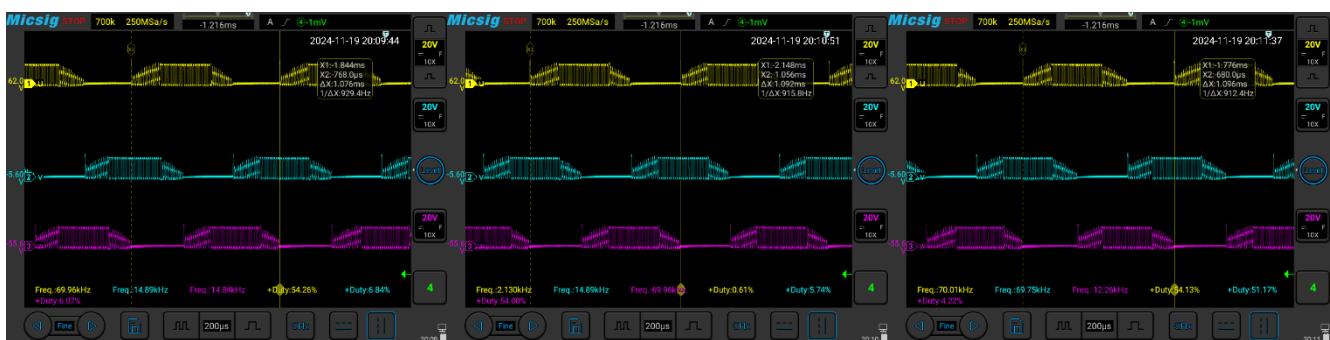
รูปที่ 44 Falling Edge



รูปที่ 45 Rasing Edge



รูปที่ 46 PWM



รูปที่ 47 Cgap



รูปที่ 48 กราฟความเร็ว

สรุปผล

การทดลองทั้งหมดยืนยันว่าแต่ละสมมติฐานที่ตั้งไว้นั้นถูกต้องหรือใกล้เคียงตามทฤษฎี โดยการวิเคราะห์กราฟและผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของแต่ละกระบวนการ เช่น การสร้าง Back EMF ในรูปแบบ Trapezoidal, การใช้ Permanent Magnet Rotor, การควบคุม Commutation Logic, การเพิ่มและลดพลังงานในช่วง Rising Edge และ Falling Edge, และการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจาก Zero Crossing ซึ่งทั้งหมดนี้ช่วยให้มอเตอร์ไร้แปรงถ่านทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถควบคุมทิศทางการหมุนของโรเตอร์ได้ตามที่ต้องการ

อภิปรายผล

1. Trapezoidal Back EMF

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่ารูปคลื่น Back EMF ที่ได้จากการมอเตอร์ไร้แปรงถ่านมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal) ตามที่คาดการณ์ไว้ โดยมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าในแต่ละช่วงของการหมุนของโรเตอร์ ซึ่งการที่กราฟมีลักษณะเป็น Trapezoidal Waveform นั้นเกิดจากการหมุนของโรเตอร์ในมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน ที่ทำให้สนามแม่เหล็กในสเตเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงและเกิด Back EMF โดยสัญญาณในแต่ละเฟส (U, V, W) จะมีลักษณะเหมือนกันแต่แตกต่างกันตามช่วงเวลาการหมุน

2. Permanent Magnet Rotor

ผลการทดลองยืนยันว่าโรเตอร์ที่ใช้แม่เหล็กถาวรสามารถสร้างสนามแม่เหล็กที่จำเป็นสำหรับการทำงานของมอเตอร์ได้จริง โดยไม่ต้องใช้ชุดลวดไฟฟ้าในโรเตอร์ เพราะแม่เหล็กถาวรในโรเตอร์ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กที่คงที่ ซึ่งช่วยให้มอเตอร์สามารถหมุนได้ตามความเร็วที่กำหนดโดยสนามแม่เหล็กจากสเตเตอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างจากมอเตอร์ที่ใช้ชุดลวดไฟฟ้าในโรเตอร์ที่ต้องมีการจ่ายไฟฟ้าเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก

3. Commutation Logic

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า Commutation Logic มีผลอย่างมากต่อการสลับกระแสในชุดลวดของมอเตอร์ ซึ่งการสลับกระแสที่ถูกต้องตาม Commutation Logic ช่วยให้โรเตอร์หมุนไปในทิศทางที่แม่นยำและมีประสิทธิภาพ

4. Rising Edge และ Falling Edge

ผลการทดลองยืนยันว่าในช่วง Rising Edge จะเกิดการเพิ่มกระแสหรือพลังงานไปยังมอเตอร์ และในช่วง Falling Edge จะลดกระแสหรือพลังงานที่จ่ายไป ซึ่งทั้ง 2 อย่างเป็นสิ่งสำคัญในการควบคุมพลังงานที่จ่ายให้กับมอเตอร์ การควบคุมจังหวะนี้ช่วยให้มอเตอร์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่เกิดความสูญเสียพลังงาน

5. Zero Crossing

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อสัญญาณขั้มจากค่าบวกไปค่าลบหรือจากค่าลบไปค่าบวก จะมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสในมอเตอร์ เพราะจุด Zero Crossing เป็นจุดสำคัญที่สามารถใช้ในการควบคุมทิศทางของกระแสไฟฟ้า และการหมุนของโรเตอร์ โดยสามารถใช้ในการสั่งให้มอเตอร์หมุนตามทิศทางที่ต้องการ

ข้อเสนอแนะ

ทำการทดลองซ้ำมากขึ้นเพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนและเพิ่มความแม่นยำในผลลัพธ์ เนื่องจากผลการทดลองแต่ละครั้งอาจมีความแปรปรวนจากหลายปัจจัย เช่น เครื่องมือที่ใช้ หรือข้อผิดพลาดจากการวัด การทำการทดลองซ้ำหลายครั้งจะช่วยให้สามารถลดความผิดพลาดที่เกิดจากปัจจัยเหล่านี้ได้ และช่วยให้ได้ผลลัพธ์ที่เชื่อถือได้มากขึ้น การหาค่าเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำจะช่วยลดผลกระทบจากความแปรปรวนในแต่ละครั้งและทำให้ค่าผลลัพธ์ที่ได้มีความใกล้เคียงกับค่าที่แท้จริงมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง(แนบ link)

1. [Back EMF in DC Motor](#)
2. [Brushless Motor](#)
3. [Zero Crossing](#)
4. [Signal Edge](#)

5. Communication Logic
6. Understanding permanent magnet motor