RMXplorer

LAB 2 : Actuator

Name

- นายสมัชญ์ ช้อยหิรัญ 67340500043
- นายก้องภพ ไก่แก้ว 67340500048
- นายภิรภัทร กล่อมจิต 67340500061

Objective

- เพื่อการเรียนรู้การออกแบบการทดลองทางวิทยาศาสตร์ในการสำรวจพฤติกรรมของ Actuator อันประกอบด้วย 1. การออกแบบการทดลองด้วยตนเอง
- เพื่อการประยุกต์ใช้ MATLAB ในการเก็บข้อมูล รวมทั้งวิเคราะห์ความเที่ยงตรง (Precision) และความแม่นยำ (Accuracy)
- เพื่อการตรวจสอบผลการทดลองเทียบกับทฤษฎีและแหล่งข้อมูลที่เชื่อถือได้เช่น Datasheet ของอุปกรณ์
- เรียนรู้การแสดงผลการทดลองในรูปแบบกราฟและตารางที่เหมาะสม
- สามารถอธิบายกระบวนการแปลงสัญญาณระหว่างปริมาณทางฟิสิกส์และสัญญาไฟฟ้าได้ครบถ้วน
- มีการแสดงตัวอย่างการวัดกระแสไฟฟ้าของ Current Sensor (จากแรงดันไฟฟ้าแปลงเป็นกระแสไฟฟ้า) และการวัดความเร็วของ Brushless DC Motor จาก Hall Sensor (จากคลื่นสัญญาณไฟฟ้าแปลงเป็นความเร็ว)

1. DC Motor

การทดลองที่ 1: การหาคุณลักษณะของมอเตอร์ (Motor Characterization)

จุดประสงค์:

1. เพื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Speed, Torque, Current และ Efficiency
2. เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมจริงกับทฤษฎี
3. หาค่า Stall Torque ที่แท้จริง

สมมติฐาน:

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Speed และ Torque ของมอเตอร์จริงจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงโค้งลงคล้าย Ideal Case แต่อยู่ต่ำกว่าเส้น Ideal Case เนื่องจากแรงเสียดทานและความสูญเสียในระบบ

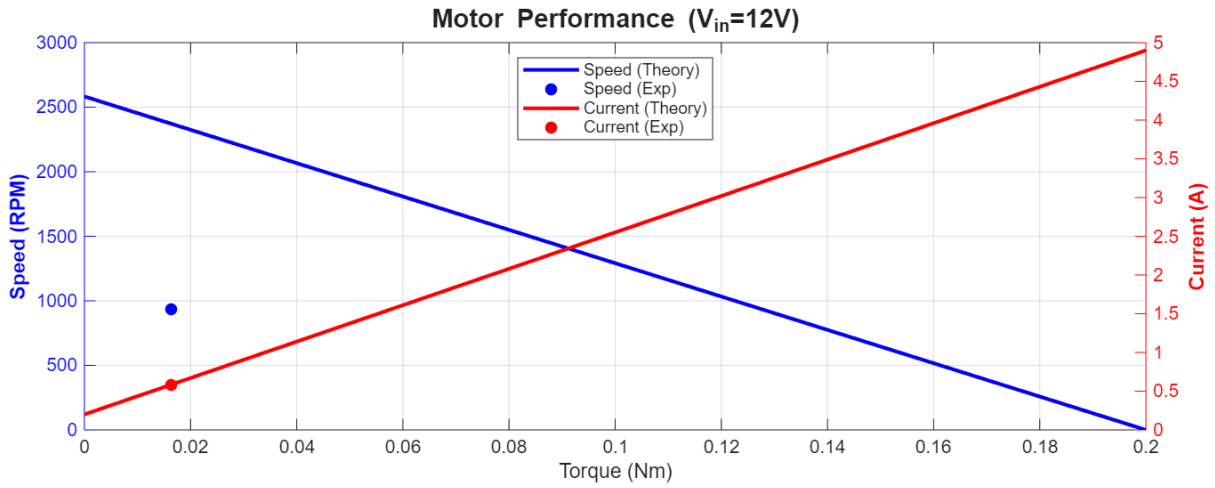
ตัวแปร:

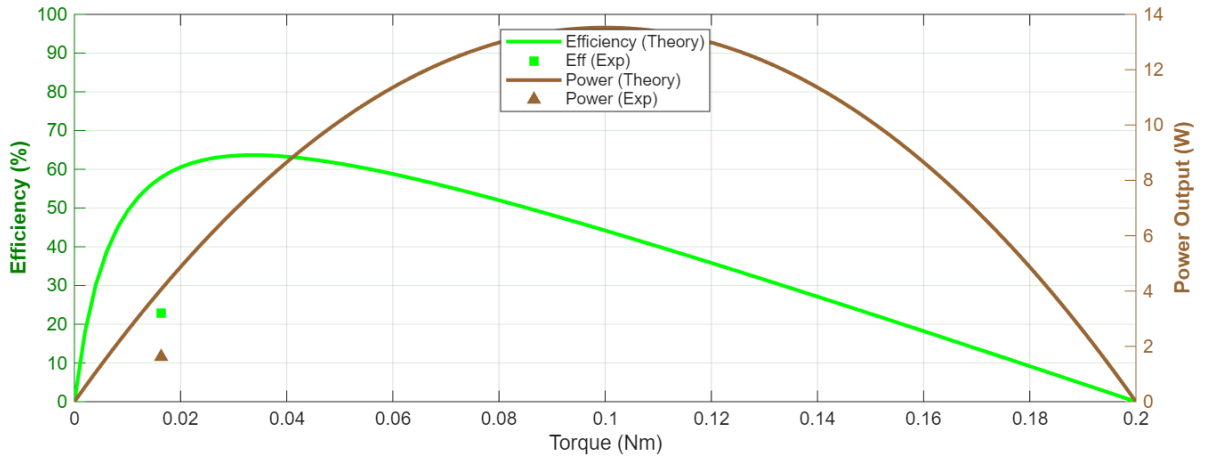
- **ตัวแปรต้น:** ภาระโหลด (Load Torque) ที่กระทำต่อมอเตอร์ (0g, 200g, 400g, 600g, 800g)
- **ตัวแปรตาม:** ความเร็วรอบ (RPM), กระแสไฟฟ้า (Current)
- **ตัวแปรควบคุม:** แรงดันไฟฟ้า (Duty Cycle 100%), ความถี่ PWM (2000 Hz)

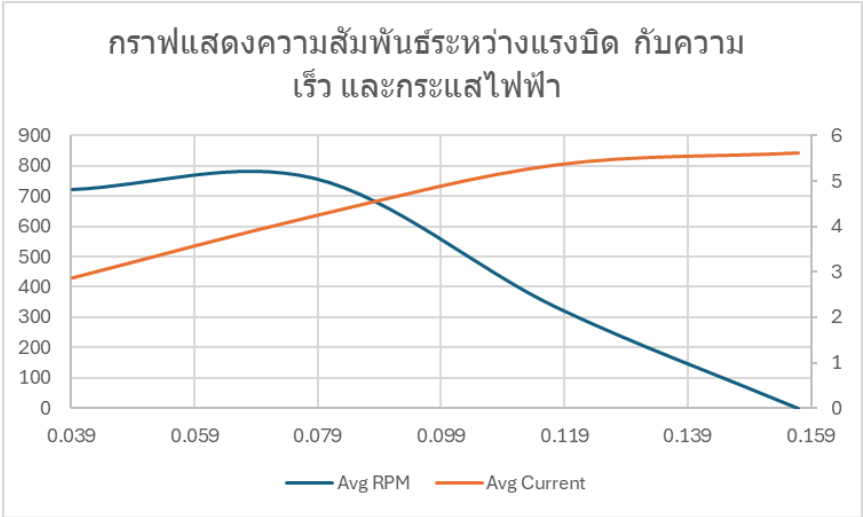
ขั้นตอนการดำเนินงาน:

1. ติดตั้งมอเตอร์เข้ากับชุดทดสอบและรอก (รัศมี r=0.02m)
2. Stall Test (Ideal): ใช้คาน (Lever Arm) กดตาชั่งเพื่อวัดแรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์หยุดหมุน บันทึกค่า Stall Torque และ Stall Current จากนั้นใช้ค่านี้ Plot
3. Load Test (Real): แขวนตุ้มน้ำหนักขนาดต่างๆ (200g - 800g) กับรอก แล้วสั่งมอเตอร์หมุนที่ 100% Duty Cycle
4. บันทึกค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและคอมเร็วรอบเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว (Steady State) ของแต่ละโหลด

ผลการทดลอง:


Motor Performance (V_{in}=12V)
Speed (Theory)
Speed (Exp)
Current (Theory)
Current (Exp)
Speed (RPM)
Current (A)
Torque (Nm)


Efficiency (Theory)
Eff (Exp)
Power (Theory)
Power (Exp)
Efficiency (%)
Power Output (W)
Torque (Nm)


กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด กับความเร็ว และกระแสไฟฟ้า
Avg RPM
Avg Current

สรุปผลการทดลอง:

จากการทดลองพบว่า มอเตอร์มีพฤติกรรมสอดคล้องกับทฤษฎี โดยความเร็วรอบลดลงเมื่อแรงบิดเพิ่มขึ้น ค่า Stall Torque ทางทฤษฎี (Ideal) ที่วัดได้คือ 0.247 Nm แต่ในการใช้งานจริง (Real) มอเตอร์หยุดหมุนที่แรงบิด 0.157 Nm (โหลด 800g)

อภิปรายผล:

กราฟความสัมพันธ์ Speed vs Torque ของมอเตอร์จริงอยู่ต่ำกว่าเส้นอุดมคติอย่างเห็นได้ชัด และเกิดการ Stall ก่อนถึงค่าทฤษฎีถึง 36% สาเหตุหลักเกิดจาก:

1. Friction Loss: แรงเสียดทานในแกนหมุนและแปรงถ่านที่ต้านการหมุน
2. Voltage Drop: เมื่อกระแสสูงขึ้น แรงดันตกคร่อมในสายไฟและวงจรขับ (Driver) ทำให้แรงดันจริงที่ขั้วมอเตอร์ต่ำกว่า 12V
3. Thermal Effect: ความร้อนสะสมในขดลวดทำให้ความต้านทานเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กระแสและแรงบิดลดลง

การทดลองที่ 2: การเปรียบเทียบโหมดการขับเคลื่อน (Drive Mode Comparison)

วัตถุประสงค์ (Objectives)

1. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบคุณลักษณะการตอบสนอง (Response Characteristic) ของมอเตอร์ระหว่างโหมดการขับเคลื่อนแบบ Sign-Magnitude และ Locked Anti-Phase
2. เพื่อวิเคราะห์ความเป็นเชิงเส้น (Linearity) ของความเร็วรอบต่อค่า Duty Cycle และผลกระทบของ Dead Zone ในแต่ละโหมด
3. เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของกระแสไฟฟ้า (Current Consumption) ขณะมอเตอร์เคลื่อนที่และหยุดนิ่ง เพื่อประเมินประสิทธิภาพพลังงาน

สมมติฐาน:

โหมด Locked Anti-Phase จะให้การควบคุมที่เป็นเชิงเส้นดีกว่าในช่วงความเร็วต่ำและจุดกลับทิศทาง แต่จะมีการกินกระแสไฟฟ้าสูงกว่าโหมด Sign-Magnitude เมื่อมอเตอร์หยุดนิ่ง

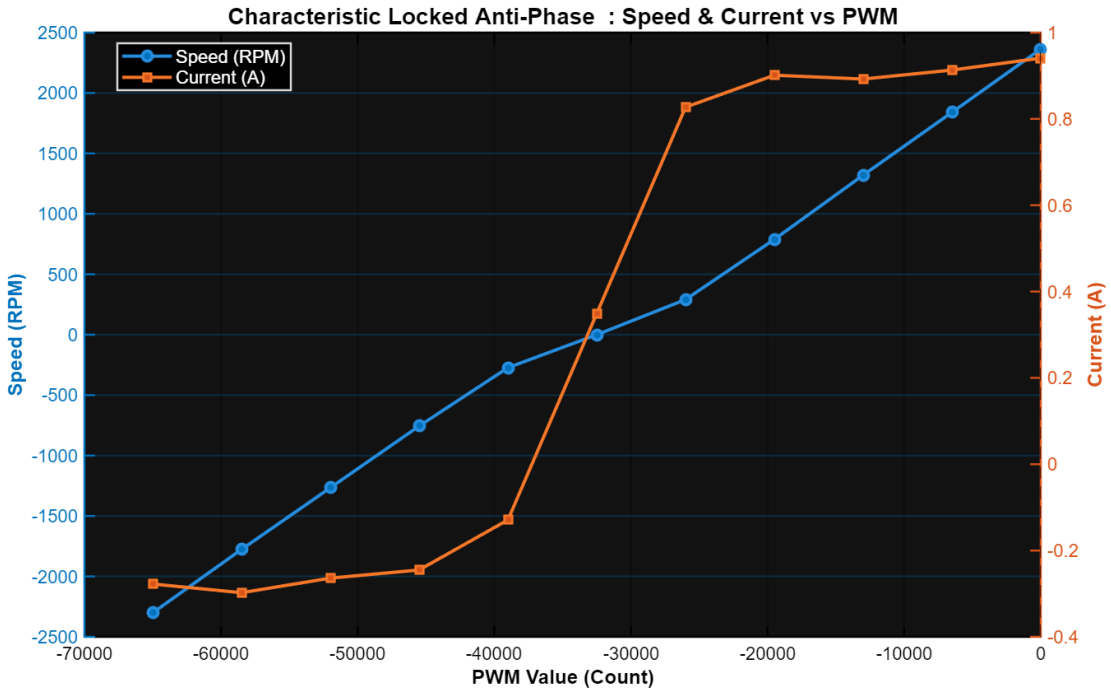
ตัวแปร:

- **ตัวแปรต้น:** Duty Cycle (0% - 100%), Drive Mode (Sign-Mag, Locked-Anti)
- **ตัวแปรตาม:** ความเร็วรอบ (RPM), กระแสไฟฟ้า (Current)
- **ตัวแปรควบคุม:** ความถี่ PWM (2000 Hz)

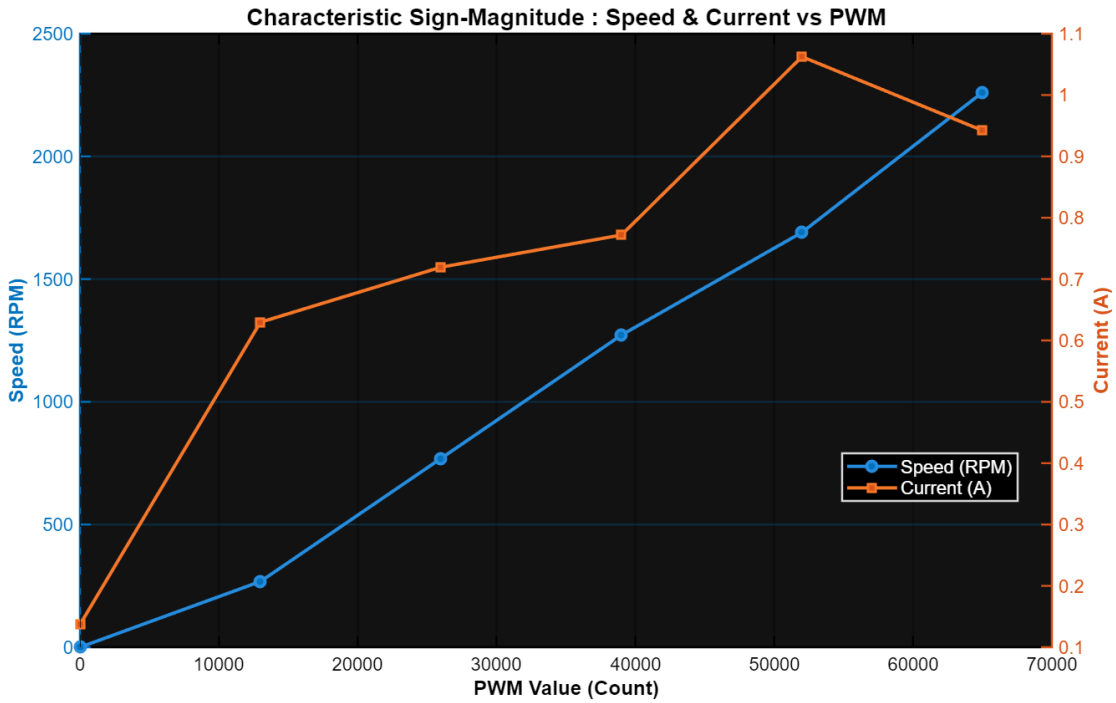
ขั้นตอนการดำเนินงาน:

1. ตั้งค่า Driver เป็นโหมด Sign-Magnitude โดยการสลับสายที่เสียบที่ Motor Driver ปรับ Duty Cycle จาก 0% ถึง 100% บันทึกค่า RPM และ Current
2. ตั้งค่า Driver เป็นโหมด Locked Anti-Phase ปรับ Duty Cycle จาก 0% (-Max Speed) ถึง 100% (+Max Speed) บันทึกค่า
3. นำข้อมูลทั้งสองชุดมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบ

ผลการทดลอง:



กราฟแสดง Characteristic ของมอเตอร์โดยเทียบSpeed , Current และ PWM ในโหมด Locked Anti-Phase



กราฟแสดง Characteristic ของมอเตอร์โดยเทียบSpeed , Current และ PWM ในโหมด Sign-Magnitude

สรุปผลการทดลอง:

จากการทดลองพบว่า โหมด Locked Anti-Phase มีความสัมพันธ์ระหว่าง Duty Cycle และความเร็วรอบเป็นเส้นตรงตลอดช่วงการทำงาน (0-100%) และสามารถควบคุมการกลับทิศทางผ่านจุดศูนย์ได้อย่างต่อเนื่อง โดยไม่มีช่วงไม่ตอบสนอง (Dead Zone) ในขณะที่โหมด Sign-Magnitude จะปรากฏช่วง Dead Zone ที่ Duty Cycle ต่ำ (0-10%) ซึ่งมอเตอร์ยังไม่เริ่มหมุน

อภิปรายผล:

1. Linearity: Locked Anti-Phase โหมด Locked Anti-Phase มีการตอบสนองในช่วงความเร็วต่ำได้ดีกว่าและไม่มี Dead Zone เนื่องจากมีการสลับขั้วจ่ายแรงดันตลอดเวลา ทำให้เกิดกระแสกระเพื่อม (Ripple Current) ช่วยหล่อเลี้ยงขดลวดและเอาชนะแรงเสียดทานสถิต (Static Friction) ได้ง่ายกว่าโหมด Sign-Magnitude
2. Energy Consumption: ที่ตำแหน่งหยุดนิ่ง (Locked: 50%, Sign-Mag: 0%) พบข้อแตกต่างสำคัญ คือ โหมด Locked Anti-Phase ยังคงมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมอเตอร์ (Ripple Current) เพื่อสร้างแรงบิดหน่วง (Holding Torque) ส่งผลให้เกิดความร้อนและการกินพลังงานมากกว่าโหมด Sign-Magnitude ที่ตัดกระแสเป็นศูนย์

ข้อเสนอแนะ:

ควรเลือกใช้ Sign-Magnitude สำหรับงานที่เน้นประหยัดพลังงาน และใช้ Locked Anti-Phase สำหรับงาน Servo ที่ต้องการความแม่นยำสูงและการตอบสนองไวๆ

2. Stepper Motor

การทดลองที่ 1 การทดลองพฤติกรรมของ Stepper Motor ในแต่ละโหมดการทำงาน โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่มอเตอร์ได้รับ

จุดประสงค์

1. เพื่อสังเกตุพฤติกรรมของ Stepper Motor ในแต่ละโหมดการทำงาน โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่มอเตอร์ได้รับ

2. สามารถวิเคราะห์หาข้อดีและข้อเสียของแต่ละโหมดการทำงานของ Motor ได้

3. เพื่ออธิบายหลักการทำงานและประเภทของ Stepper Motor

สมมติฐาน

ที่การทำงานของจะได้ทำงานที่ความถี่มากที่สุดจะเป็น Micro Step Mode รองลงไปก็จะเป็น Half Step Mode และสุดท้ายก็จะเป็น Full Step Mode ส่งผลให้แรงบิดจะตรงข้ามการความถี่ ส่งผลให้เราเลือกใช้งานที่เหมาะสมแต่ละโหมดของ Stepper Motor ได้

ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น

- ความถี่ที่มอเตอร์ได้รับในแต่ละโหมดการทำงาน
- โหมดการทำงานที่ต่างกัน

2. ตัวแปรตาม

- ความเร็วเชิงมุม (**ω**)

3. ตัวแปรควบคุม

- แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ (V)
- กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟ 6 แอมแปร์ (A)

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เตรียมพร้อมบอร์ดการทดลอง

2. ทำการแปลงค่า Angular Velocity ไปเป็น RPM โดยใช้ MATLAB Function มีสูตรคำนวณดังนี้

$$RPM = \omega \times \frac{60}{2\pi}$$

RPM คือ ความเร็วรอบในหน่วย รอบต่อนาที

ω คือ ความเร็วเชิงมุมในหน่วย เรเดียนต่อวินาที (rad/s)

2π คือ จำนวนเรเดียนในหนึ่งรอบการหมุนที่สมบูรณ์

60 คือ จำนวนวินาทีในหนึ่งนาที

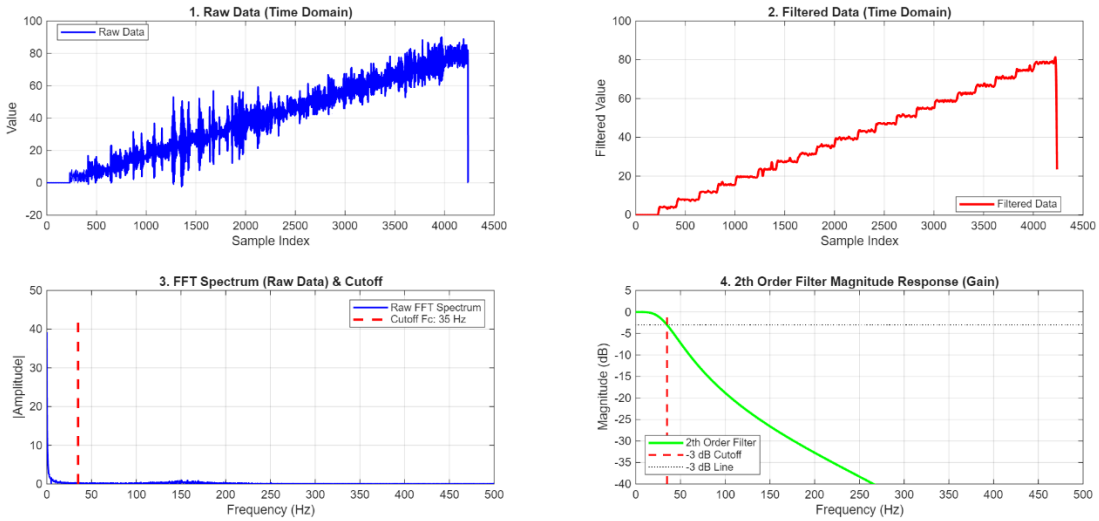
3. เก็บผลการทดลองโดยการใช้ MATLAB Function โดยโปรแกรมมีหลักการมีความถี่เริ่มต้นที่ $0\ Hz$ จนถึง $65000\ Hz$ โดยเพิ่มทีละ $250\ Hz$

4. นำค่า Raw Signal ที่ได้มาทำการ Signal Conditioning เพื่อหาความเร็วที่แท้จริงจากการวัด

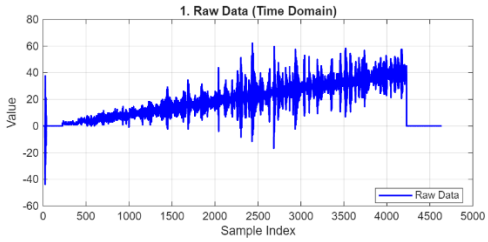
ผลการทดลอง

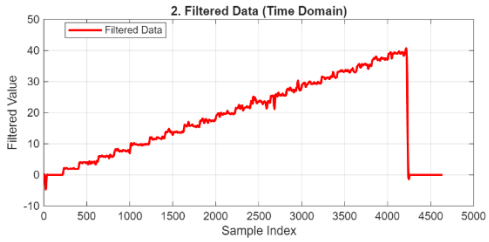
Signal Conditioning

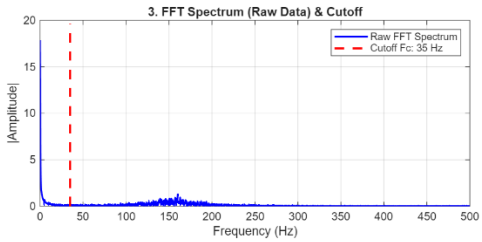
Micro Step Mode 1/4

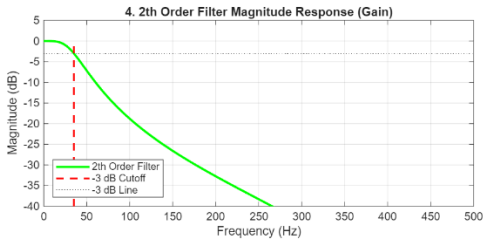


Micro Step Mode 1/8

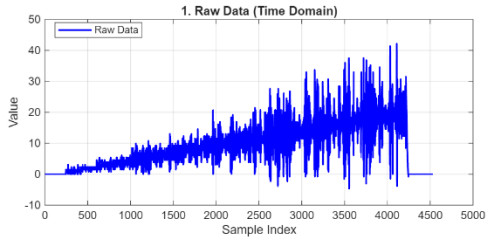


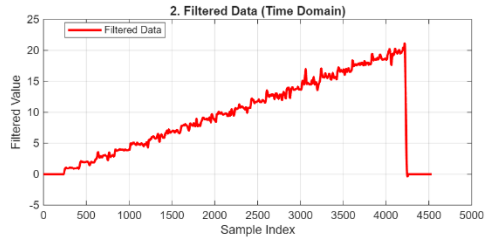


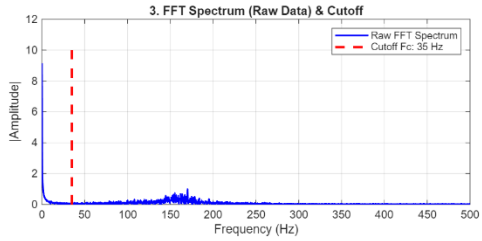


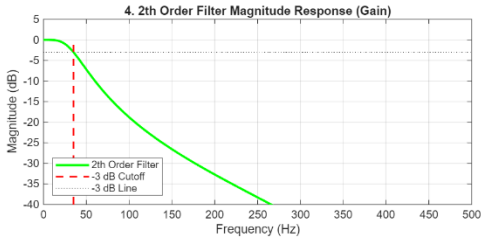


Micro Step Mode 1/16

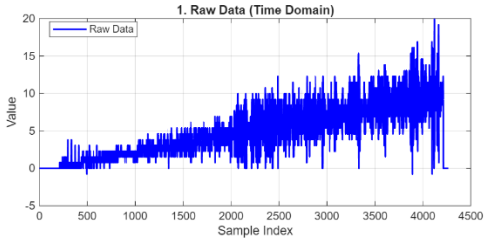


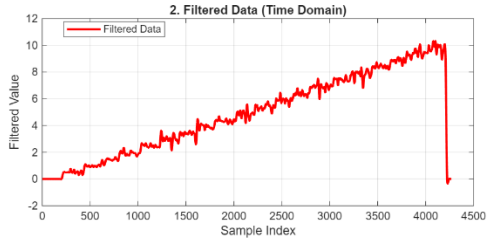


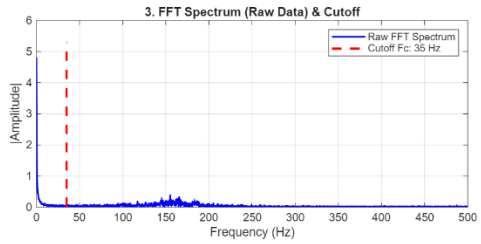


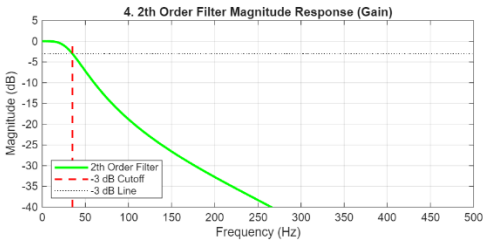


Micro Step Mode 1/32

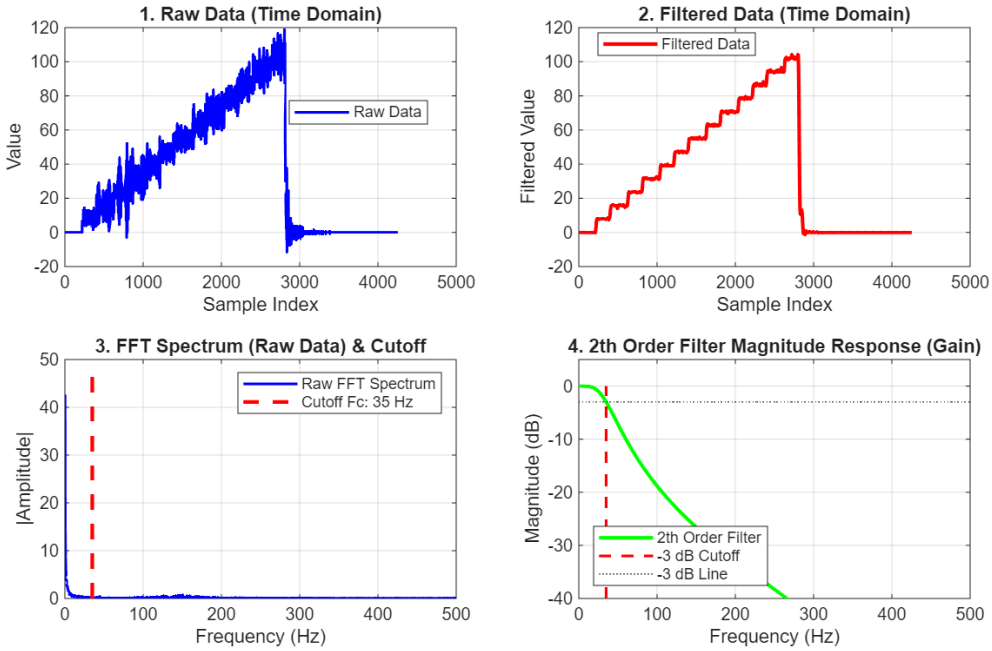




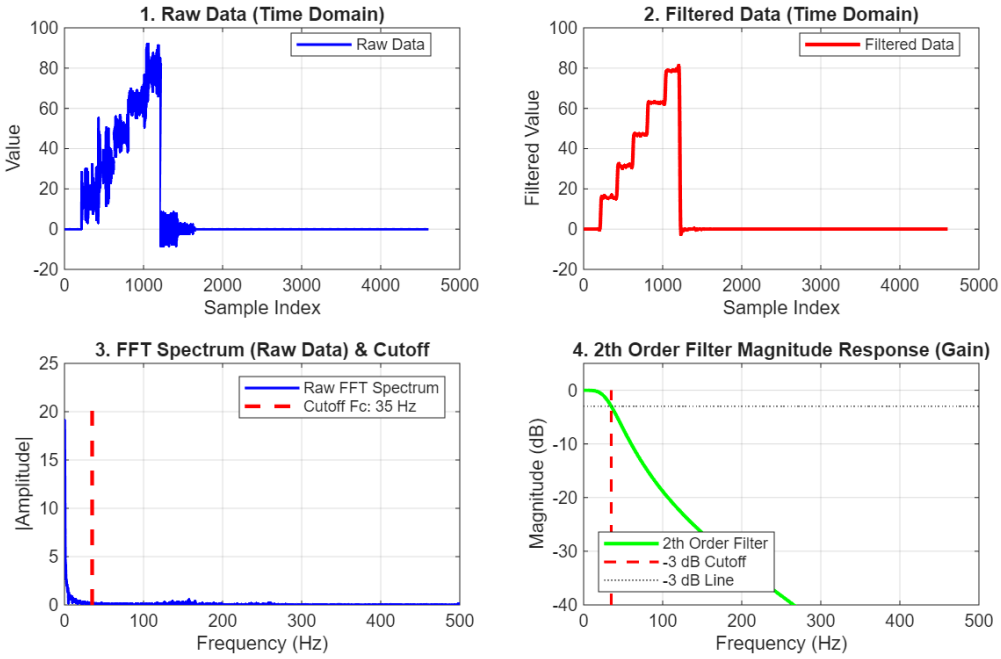




Half Step Mode

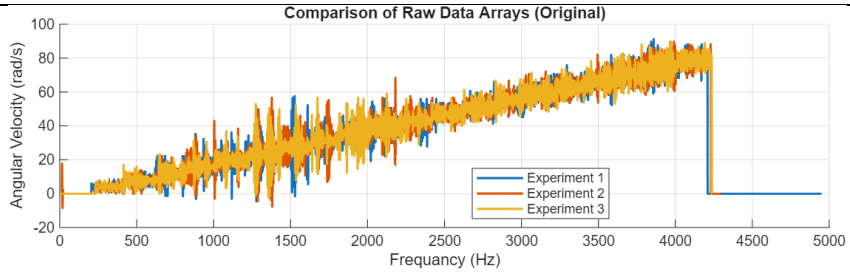
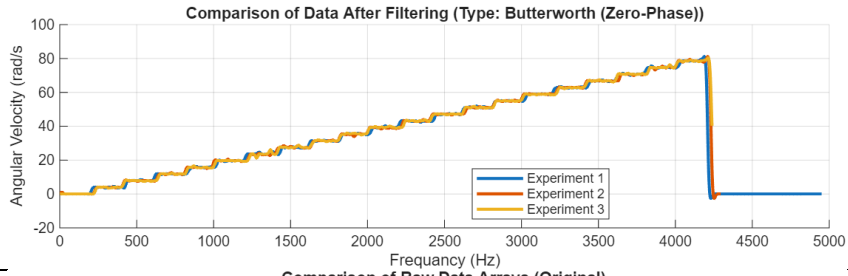
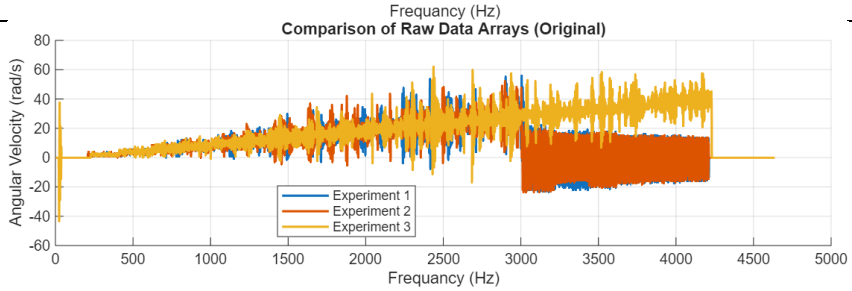
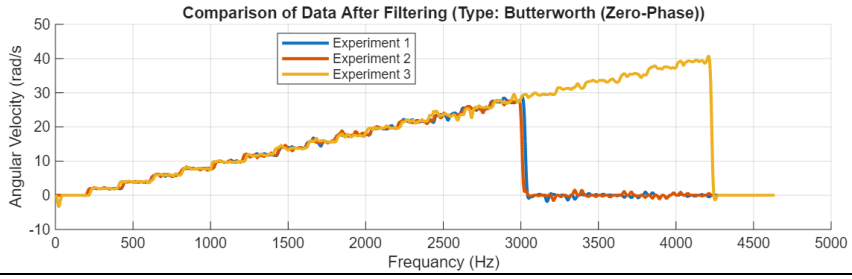


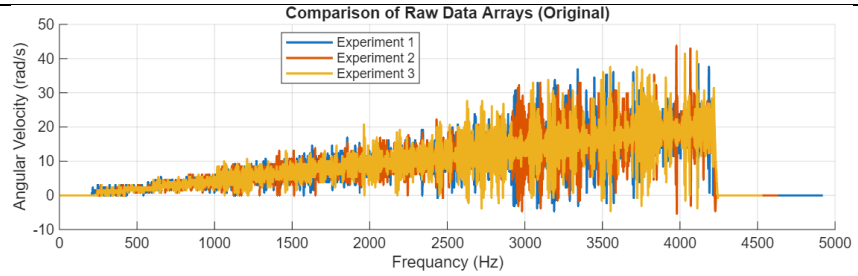
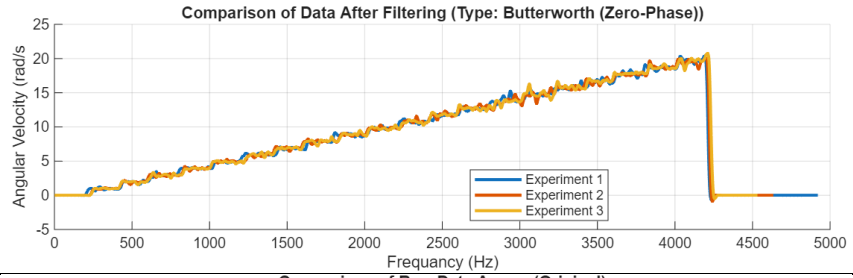
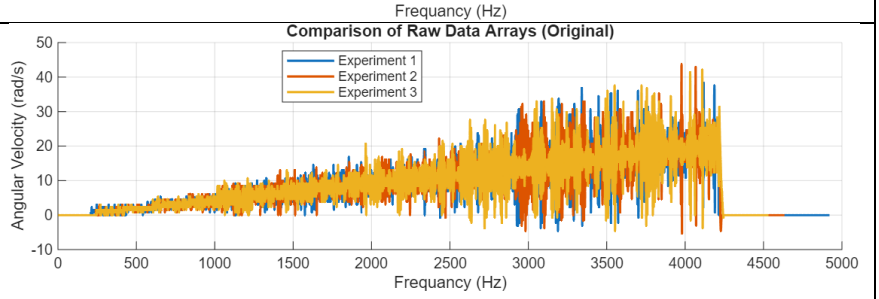
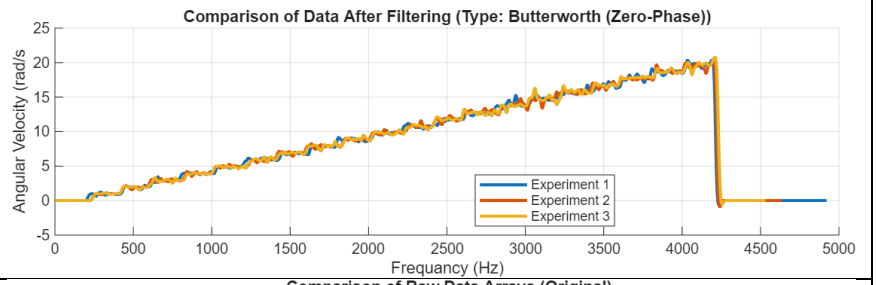
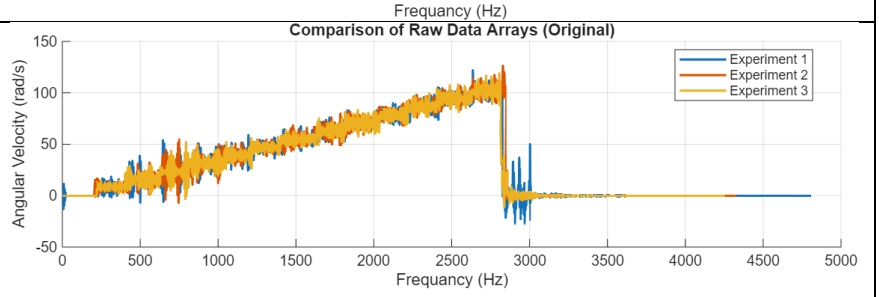
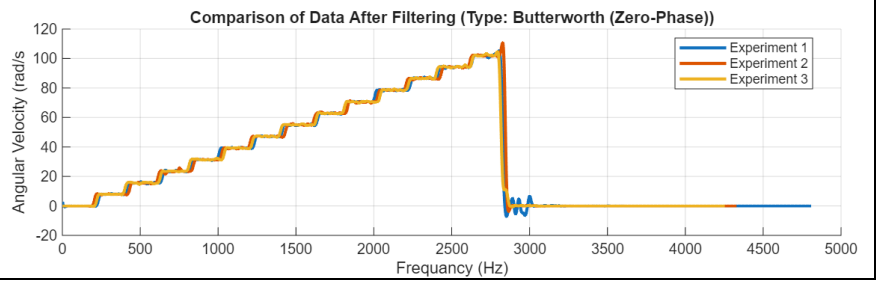
Full Step Mode

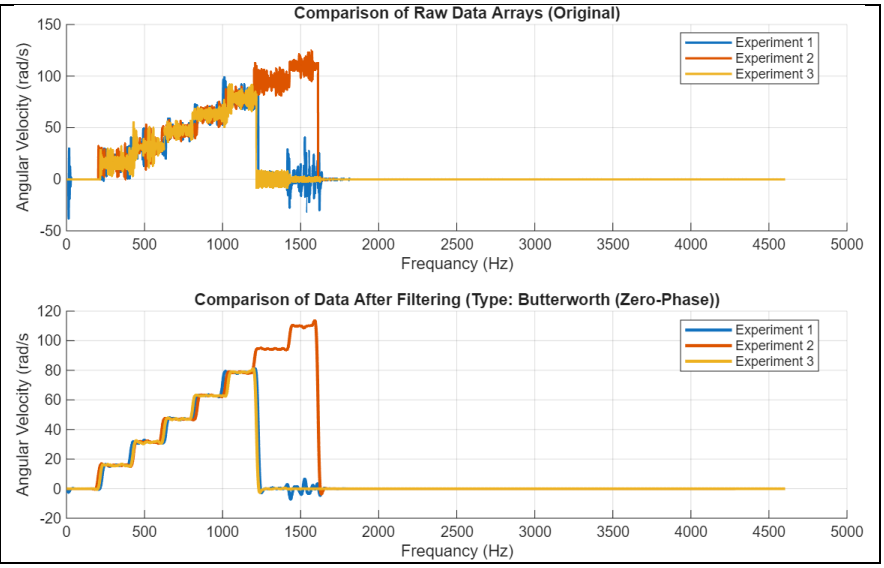


ตารางผลการทดลอง

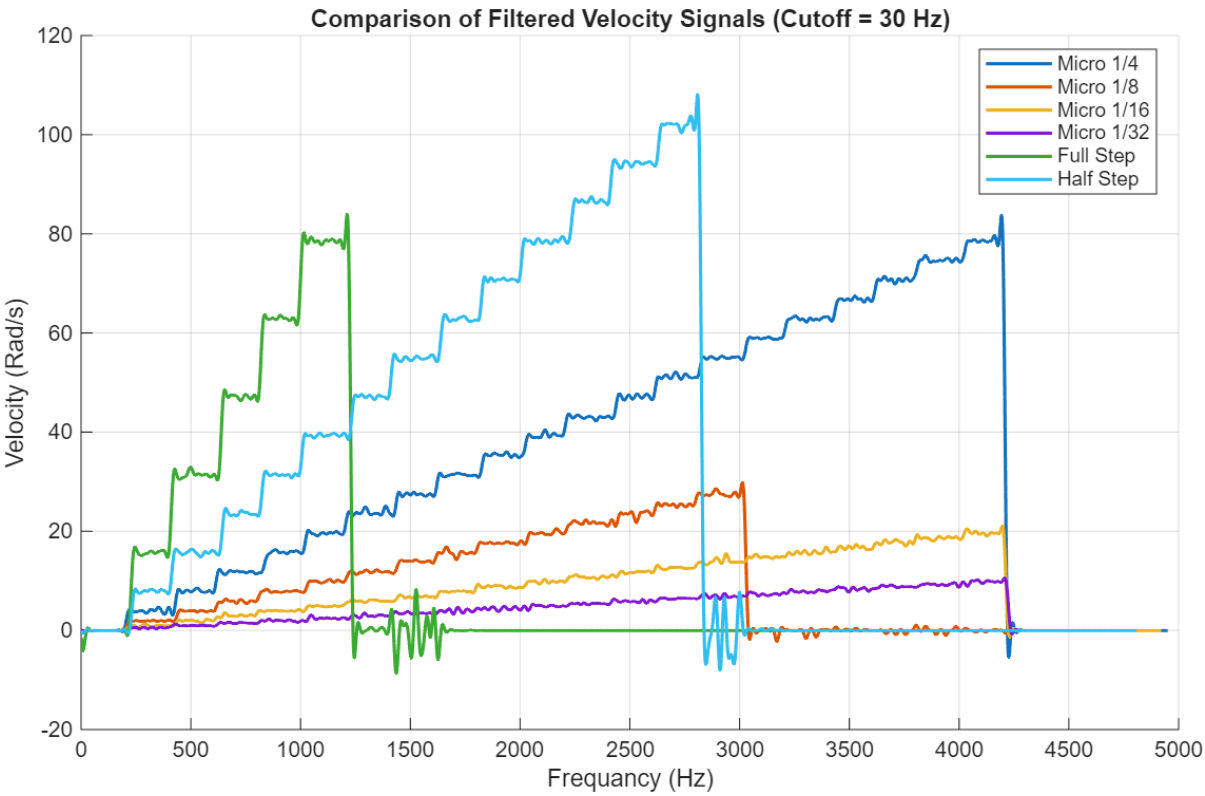
ตารางผลการทดลองที่โหมดการทำงานเดียวกัน

Stepper Motor Mode	Result
Microstepping 1/4	 
Microstepping 1/8	 

Microstepping 1/16	 
Microstepping 1/32	 
Half Step Mode	 

Full Step Mode	

ตารางผลการทดลองที่โหมดการทำงานต่างกัน



การทำงานใน Micro Step 1/4 Mode, Full Step, Half Step มีความละเอียดของสเต็ปต่ำจะมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมต่อการเพิ่มขึ้นของความถี่ที่สูงกว่า (ความชันสูงกว่า) ทำให้สามารถทำความเร็วสูงสุดได้สูงกว่า ส่งผลให้ความละเอียดต่ำให้ความเร็วสูง ส่วนการทำงานใน Micro 1/16, Micro 1/32 จะเป็นการทำงานแบบความละเอียดสูงให้ความเร็วต่ำ ต้องการจำนวนไมโครสเต็ปที่มากขึ้นเพื่อหมุนครบหนึ่งรอบ

สรุปได้ว่ายิ่งเป็นโหมดการทำงานที่ละเอียดจะทำให้ Stepper Motor ทำงานที่ความถี่สูงๆ ได้

การทำงานที่โหมดที่มีความละเอียดในการก้าวเดินต่ำ (**Micro 1/4** และ **Full Step**) สามารถทำความเร็วเชิงมุมสูงสุดได้สูงกว่า โดยที่ความเร็วเหล่านี้มีขีดจำกัดเพราะไม่สามารถทำงารที่ความถี่สูงได้ เนื่องจากมอเตอร์สูญเสียความสามารถในการรักษาแรงบิดและเกิดการสูญเสียการซิงโครไนซ์ (Synchronization Loss)

อภิปรายผลการทดลอง

1. ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเร็วเชิงมุม

ความเร็วและอัตราส่วนสเต็ป (Step Ratio): ค่าความชันของกราฟความเร็วเชิงมุมเทียบกับความถี่ ถูกกำหนดโดยอัตราส่วนของสเต็ป (Step Resolution) ที่ใช้ในการขับเคลื่อน (เช่น Full Step, Micro 1/4, Micro 1/32)

- **ความละเอียดต่ำให้ความเร็วสูง: โหมดที่มีความละเอียดของสเต็ปต่ำ (เช่น Micro 1/4, Full Step, และ Half Step) จะมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมต่อการเพิ่มขึ้นของความถี่ที่สูงกว่า (ความชันสูงกว่า) ทำให้สามารถทำความเร็วสูงสุดได้สูงกว่า**
- **ความละเอียดสูงให้ความเร็วต่ำ: โหมด Microstepping ที่มีความละเอียดสูง (เช่น Micro 1/16 และ Micro 1/32) ต้องการจำนวนไมโครสเต็ปที่มากขึ้นเพื่อหมุนครบหนึ่งรอบ จึงให้ความเร็วเชิงมุมที่ต่ำกว่า ณ ความถี่สัญญาณนาฬิกาเดียวกัน ซึ่งแสดงเป็นความชันของกราฟที่ต่ำกว่า**

2. สมรรถนะที่ขีดจำกัดความถี่ (High-Frequency Limits)

การสูญเสียการซิงโครไนซ์ (Out-of-step Condition): ที่ความถี่สูง สัญญาณความเร็วเชิงมุมเกิดการตกอย่างรวดเร็ว (Sudden Drop) ในโหมดที่ให้ความเร็วสูง (Micro 1/4 ที่ประมาณ $2,900\ Hz$ และ Full Step ที่ประมาณ $4,200\ Hz$ ปรากฏการณ์นี้บ่งชี้ว่าแรงบิดของมอเตอร์ไม่เพียงพอ ที่จะเอาชนะความเฉื่อย (Inertia) และแรงเสียดทาน (Friction) ของระบบเพื่อรักษาการหมุนตามสัญญาณนาฬิกาได้ ส่งผลให้มอเตอร์สูญเสียสเต็ปและหยุดทำงาน (Stall)

- **สมรรถนะของ Micro 1/4: เป็นที่น่าสนใจว่าโหมด Micro 1/4 ทำความเร็วสูงสุดได้สูงกว่าโหมด Full Step ซึ่งอาจอธิบายได้ว่าการขับกระแสแบบ Microstepping ที่เหมาะสมสามารถเพิ่มแรงบิดในการเร่งความเร็ว (Acceleration Torque) ได้ดีกว่า Full Step ในช่วงความถี่ปฏิบัติการดังกล่าว**

ข้อเสนอแนะ

การทำมให้บอร์ดการทดลอง Stabilization มากกว่านี้

3. BLDC Motor

จุดประสงค์

1. เพื่อศึกษาการตอบสนองของ Brushless Motor ต่อ RPM ที่เปลี่ยนไป

2. เพื่อศึกษาความแตกต่างระหว่างการใช้ Hall Effect Sensor และ Back EMF Sensing

3. เพื่อศึกษาการเกิด Phase shift ระหว่างสัญญาณแต่ละ Phase

สมมติฐาน

สันนิฐานว่า การเกิด Phase shift ของสัญญาณ 3-Phase จะต่างกันที่ความถี่มอเตอร์ไม่เท่ากัน และกราฟ Trapezoidal จะมีลักษณะที่ต่างกัน โดยยิ่งความถี่มากคาบของกราฟจะยิ่งสั้นลง

ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น

-ความเร็วมอเตอร์ที่กำหนดในโปรแกรม

-Phase ของ Motor

2. ตัวแปรตาม

-ความถี่ Back-EMF

3. ตัวแปรควบคุม

- แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ (V)

- กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟ 6 แอมแปร์ (A)

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การขับเคลื่อนด้วยสัญญาณ 3 Phase

ใช้สัญญาณไฟฟ้าสามเฟสในการสร้างสนามแม่เหล็กหมุน (Rotating Magnetic Field) ในสเตเตอร์ เพื่อให้โรเตอร์หมุนตามไปอย่างต่อเนื่อง สัญญาณ 3 Phase ได้แก่ Phase A, Phase B และ Phase C โดยแต่ละ Phase จะ Shift กันอยู่ 120 องศา

ถ้าใช้เพียง 1 เฟสสนามแม่เหล็กจะไม่นิ่งมอเตอร์หมุนไม่ได้ ถ้าใช้ 2 เฟสสนามหมุนได้แต่ไม่สมบูรณ์แรงบิดต่ำ 3 เฟสสมดุลที่สุดและให้แรงบิดสูงต่อกำลังไฟ

Hall Effect sensor VS Back EMF sensing

ในการควบคุม Blushless DC Motor เราจำเป็นต้องตำแหน่งโรเตอร์เพื่อให้วงจรขับเคลื่อนสามารถสับเปลี่ยนเฟส (Commutation) ได้ถูกต้อง วิธีระบุตำแหน่งโรเตอร์มี 2 แนวทางหลัก

ใช้ Hall Effect Sensor (มีเซนเซอร์ติดในมอเตอร์) Hall Sensor คือเซนเซอร์ที่ตรวจจับสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรบนโรเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุน สนามแม่เหล็กผ่านเซนเซอร์แต่ละตัว ทำให้ได้สัญญาณดิจิทัล 3 บิท ค่า 3 บิทนี้จะกำหนดตำแหน่งมอเตอร์ทุกๆ 60 องศา

ใช้ Back-EMF Sensing (ไม่ใช้เซนเซอร์ Sensorless Control) คือการใช้แรงเหนี่ยวนำจากการหมุนผ่านขดลวด เมื่อจ่ายไฟเข้า 2 Phase อีก 1 Phase จะ Float และเกิด Zero Crossing ทำให้

ขั้นตอนการทดลอง

1. ตั้งค่าความเร็วมอเตอร์ (1500 / 3000 / 4500 / 6000 RPM)

2. วัดสัญญาณ BEMF ทั้ง 3 เฟสบน Oscilloscope

3. บันทึกความถี่, duty cycle, amplitude

4. เปรียบเทียบ phase A/B/C

5. คำนวณความเร็วจากความถี่ผ่านสมการ

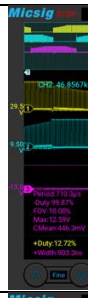
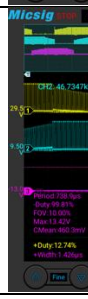
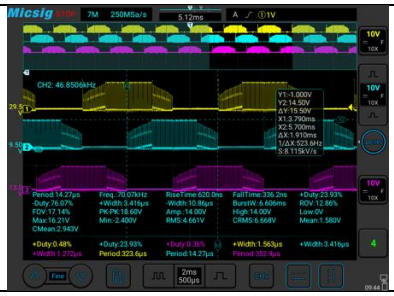
$$n_{(rpm)} = \frac{60 f_{BEMF}}{p}$$

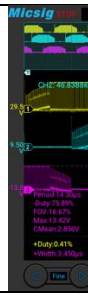
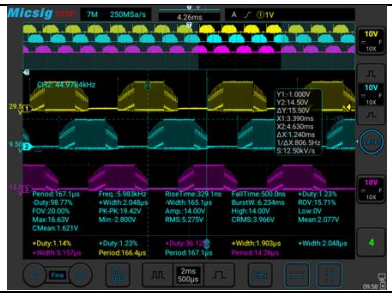
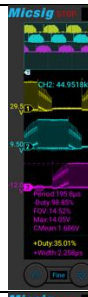
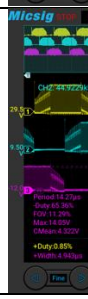
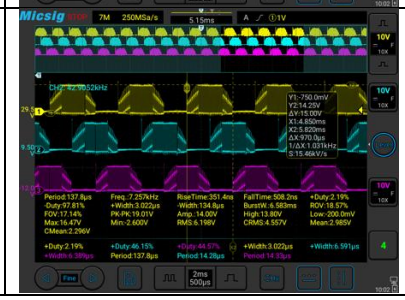
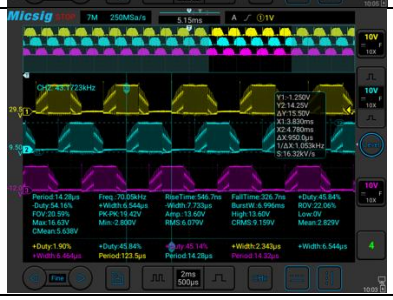
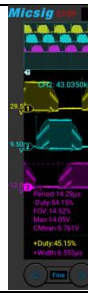
n ความเร็วในการหมุน หน่วยเป็น rpm

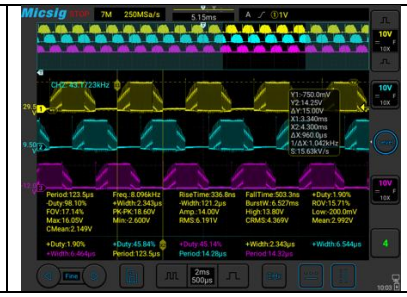
f_{BEMF} ความถี่สัญญาณ Back-EMF

p จำนวน Pole-pair ของมอเตอร์

การทดลอง

RPM	กราฟ A (สีฟ้า)	กราฟ B (สีม่วง)	กราฟ C (สีเหลือง)
1500			
			
			
3000			

				
4500				
				
				
6000				
				



สรุปผลการทดลอง

สรุปพบว่าเป็น Brushless DC Motor ชนิด 8 Poles จากการทดลองขับเคลื่อนมอเตอร์ BLDC ด้วยวิธี Back-EMF Sensing โดยกำหนดความเร็วรอบอ้างอิงที่ 1500, 3000, 4500 และ 6000 rpm และทำการวัดสัญญาณ Back-EMF ของเฟส A, B และ C ด้วยออสซิลโลสโคป พบว่าสามารถสังเกตสัญญาณแรงดันเหนี่ยวนำในแต่ละเฟสได้อย่างชัดเจนในทุกระดับความเร็ว โดยรูปคลื่นที่ได้มีลักษณะเป็น Trapezoidal Waveform และเฟสทั้งสามมีการเหลื่อมกันโดยประมาณ 120 องศาทางไฟฟ้า ตามหลักการของมอเตอร์ BLDC แบบสามเฟสและการคอมมิวเตชันแบบ 6-Step ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่ศึกษาไว้ล่วงหน้า

อภิปรายผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่า แม้สัญญาณ Back-EMF จะมีรูปแบบใกล้เคียงกับทฤษฎี แต่ยังสังเกตได้ว่าบริเวณจุดเปลี่ยนช่วงของสัญญาณ (Commutation Region) มี overshoot, noise และ ringing ค่อนข้างชัดเจน โดยเฉพาะในช่วงความเร็วสูง เช่น 4500–6000 rpm

ซึ่งมีสาเหตุหลักมาจาก

- การสลับตำแหน่งเฟส (Switching Transient)
- ผลของอินดักแตนซ์ของขดลวด
- แรงดันกลับของมอเตอร์ในช่วงสลับทิศทางกระแส
- Noise จากวงจรขับและอุปกรณ์วัด

นอกจากนี้ ข้อมูลความถี่ที่วัดได้จาก Oscilloscope แม้จะมีทิศทางสอดคล้องกับความเร็วรอบ แต่มีความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับค่าที่ตั้งไว้บางช่วง ซึ่งสามารถอธิบายได้จากปัจจัย เช่น การอ่านค่าความถี่ในช่วงที่ยัง

ไม่สมดุล การตั้ง Sampling Rate และความละเอียดในการ Trigger ของ Oscilloscope รวมถึงผลของ PWM หรือแรงดันรบกวนที่เกิดขึ้นระหว่างการขับเคลื่อน

ในเชิงเปรียบเทียบกับทฤษฎี สัญญาณอุดมคติของ BLDC จะมีรูปคลื่น Trapezoidal ที่สมมาตรและไม่มี noise แต่ในทางปฏิบัติสัญญาณมีการบิดเบือนจากทางวงจรและสภาพโหลดจริง ซึ่งเป็นเรื่องปกติในระบบ Sensorless BLDC โดยเฉพาะเมื่อความเร็วเพิ่มสูงขึ้น

ข้อเสนอแนะ

- ควรเพิ่มการฟิลเตอร์สัญญาณ Back-EMF เช่น การใช้ Low-Pass Filter หรือ Snubber เพื่อช่วยลด noise และ overshoot ระหว่างช่วงสลับเฟส
- ควรตั้งค่าการ Trigger, Sampling Time และ Bandwidth ของ Oscilloscope ให้เหมาะสมกับช่วงความเร็วที่ต้องการวัด เพื่อให้ค่าความถี่มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น
- ในงานทดลองเพิ่มเติม อาจทำการเปรียบเทียบกับการวัดความเร็วด้วย Hall Effect Sensor เพื่อตรวจสอบความแตกต่างของความแม่นยำ และประเมินข้อดี-ข้อจำกัดของ Sensorless Control ในช่วงความเร็วต่ำ

อ้างอิง

https://dadaoenergy.com/th/blog/back-emf

https://equipmake.co.uk/knowledge-base/understanding-3-phase-electric-motors