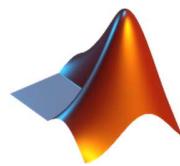


# *RMXplorer*



+++++

---

## LAB 1: Sensors

### Name

- |       |           |                 |             |
|-------|-----------|-----------------|-------------|
| • นาย | คุณสนันท์ | วาสุเทพรังสรรค์ | 67340500004 |
| • นาย | ราาราคิน  | ขอบทำกิจ        | 67340500021 |
| • นาย | ธีรวัฒร์  | แลเลิศ          | 67340500022 |
| • นาย | พุทธิพงศ์ | หวานสนิท        | 67340500032 |

### Objectives

- เพื่อให้เข้าใจหลักการทำงานของเซนเซอร์พื้นฐานและสามารถอธิบายการแปลงสัญญาณทางฟิสิกส์เป็นสัญญาณไฟฟ้าได้อย่างถูกต้อง
- เพื่อให้สามารถออกแบบและดำเนินการทดลองตามหลักวิทยาศาสตร์โดยใช้เครื่องมือและอุปกรณ์วัดได้อย่างเหมาะสมและปลอดภัย
- เพื่อให้ผู้เรียนสามารถใช้โปรแกรม MATLAB หรือ Simulink ในการเก็บ วิเคราะห์ และแสดงผลข้อมูลจากเซนเซอร์ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ
- เพื่อให้เข้าใจวิธีการกำหนดตัวแปรต้น ตัวแปรตาม และตัวแปรควบคุม รวมถึงการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในการทดลองเซนเซอร์
- เพื่อให้ผู้เรียนสามารถวิเคราะห์ เปรียบเทียบผลการทดลองกับข้อมูลเชิงทฤษฎีได้อย่างมีเหตุผล
- เพื่อให้สามารถสรุปผลการทดลองและนำเสนอข้อมูลเชิงวิทยาศาสตร์ในรูปแบบรายงานได้อย่างถูกต้อง

## 1. DC Motor

### การทดลองที่ 1 Sensor Calibration & Signal Conditioning

#### จุดประสงค์

- เพื่อ Calibration Current Sensor สำหรับการสร้าง Motor Characteristic Curve ในการทดลองถัดไป
- เพื่อวิเคราะห์ความถี่(FFT) ของความเร็วรอบมอเตอร์ที่ความถี่ PWM ต่าง ๆ และ ทำ Low-Pass Filter สำหรับ การวัดความเร็วรอบมอเตอร์
- เพื่อให้ได้ค่าที่วัดจากเซนเซอร์ที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด และมีความใกล้เคียงค่าจริงมากที่สุด หลังการทำ Signal Conditioning และ Calibration

#### สมมติฐาน

- Current Sensor แนวโน้ม เพิ่มขึ้นเป็น Linear
- เมื่อ Calibration Current Sensor แล้วมีค่าเท่ากับค่าจริง
- ความเร็วรอบ(rad/s)ที่เข้ามาเมื่อผ่าน Low-Pass Filter จะลดTHON สัญญาณรบกวนความถี่สูงได้ตามทฤษฎีของ RC Filter โดยมีอัตราการลดลงประมาณ -20 dB/decade หลังCut off frequency
- เมื่อเพิ่มค่า PWM ความเร็วรอบของมอเตอร์จะสูงขึ้น และผล FFT จะปรากฏ frequency peak ที่สูงขึ้นตาม ความเร็วรอบ

#### ตัวแปรในการทดลอง

##### ตัวแปรต้น:

- กระแสที่ไฟฟ้าผ่านมอเตอร์
- PWM ที่จ่ายให้มอเตอร์

##### ตัวแปรตาม:

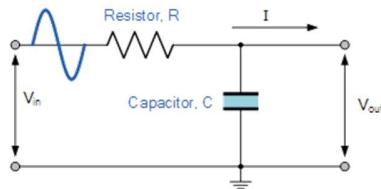
- ค่าแรงดันออกจาก Hall sensor
- ความเร็วรอบที่ได้ (rad/s)

##### ตัวแปรควบคุม:

- Sampling rate ของการเก็บข้อมูล
- ความถี่ของสัญญาณ PWM 2 kHz

## เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1. หลักการของวงจร RC Low-Pass Filter

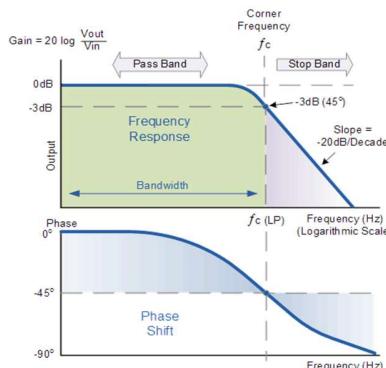


ภาพที่ 1 วงจร RC Low-Pass Filter

วงจร RC Low-Pass Filter เป็นฟิลเตอร์ลำดับหนึ่งที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน (R) และตัวเก็บประจุ (C) ต่อ อนุกรมกัน ทำหน้าที่ให้สัญญาณความถี่ต่ำผ่านได้ ขณะที่สัญญาณความถี่สูงถูกลดTHONลง เนื่องจากตัวเก็บประจุ มีค่ารีแอคเคนซ์ลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ทำให้สัญญาณความถี่สูงไหลดลงกราวด์แทนที่จะผ่านออกไปที่เอาต์พุต

คำนวณได้จากการ  $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$  โดยที่ความถี่นี้เป็นจุดที่สัญญาณเอาต์พุตลดลง  $-3 \text{ dB}$  และเป็นพุทธิกรรม เฉพาะของฟิลเตอร์ลำดับหนึ่ง

### 2. พุทธิกรรมของวงจรในเชิงความถี่ Bode Plot



ภาพที่ 2 bode plot

จาก Bode Plot ของวงจร RC Low-Pass Filter จะเห็นว่าในย่านความถี่ต่ำ สัญญาณสามารถผ่านได้เกือบทั้งหมด เนื่องจากค่าการลดTHON (magnitude) ใกล้  $0 \text{ dB}$  เมื่อความถี่เพิ่มเข้าใกล้ความถี่ตัด ขนาดสัญญาณจะลดลง ประมาณ  $-3 \text{ dB}$  ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของฟิลเตอร์อันดับหนึ่ง หลังจากนั้น magnitude จะลดลงด้วยอัตรา  $-20 \text{ dB/decade}$  ทำให้สัญญาณความถี่สูงถูกตัดTHONอย่างต่อเนื่องในส่วนของ phase พบร่วมต้นใกล้  $0^\circ$  ที่ความถี่ต่ำ จากนั้นจะค่อย ๆ ลดลงจนถึงประมาณ  $-45^\circ$  ที่ความถี่ตัด และเข้าใกล้  $-90^\circ$  ที่ความถี่สูงมาก พุทธิกรรมนี้แสดงให้เห็นว่าหากจากฟิลเตอร์จะลดTHONความถี่สูงแล้ว ยังทำให้เกิดการหน่วงเวลา (phase lag) ต่อสัญญาณเอาต์พุต

### 3. หลักการของ Current Sensor แบบ Hall-effect

Current Sensor ประเภท Hall-effect ตรวจจับกระแสโดยใช้สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านตัวนำ สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะถูกตรวจวัดโดย Hall element และแปลงเป็นแรงดัน Hall ซึ่งมีค่าแปรผันตรงกับขนาดกระแสเด้งนั้นสัญญาณ Output จะมีความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear Response) ตามธรรมชาติของ Hall-effect Sensor

### 4. ความสัมพันธ์ PWM และ frequency peak

เมื่อเพิ่ม PWM แรงดันเฉลี่ยที่จ่ายให้มอเตอร์สูงขึ้น ส่งผลให้ความเร็วตอบเพิ่มขึ้นตามสมบัติของมอเตอร์กระแสตรง เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ความถี่ของสัญญาณที่ตรวจวัดจากเซนเซอร์ก็เพิ่มขึ้นตาม ทำให้ผลการวิเคราะห์ FFT ปรากฏตำแหน่งของ frequency peak เคลื่อนไปยังค่าความถี่ที่สูงขึ้น พฤติกรรมนี้สอดคล้องกับความสัมพันธ์พื้นฐานระหว่างความเร็วเชิงกลและความถี่ของสัญญาณที่เกิดจากการหมุนของมอเตอร์

### 5. Linearization

การทำให้เป็นเชิงเส้น (Linearization) คือกระบวนการหาอนุพันธ์เชิงเส้นตามจุดทำงานของฟังก์ชันไม่เชิงเส้น โดยคำนวณความชัน (gradient) ของฟังก์ชันที่ไม่เชิงเส้นตามตัวแปรทั้งหมด แล้วนำมาสร้างเป็นแบบจำลองเชิงเส้น

### 6. FFT (Fast Fourier Transform)

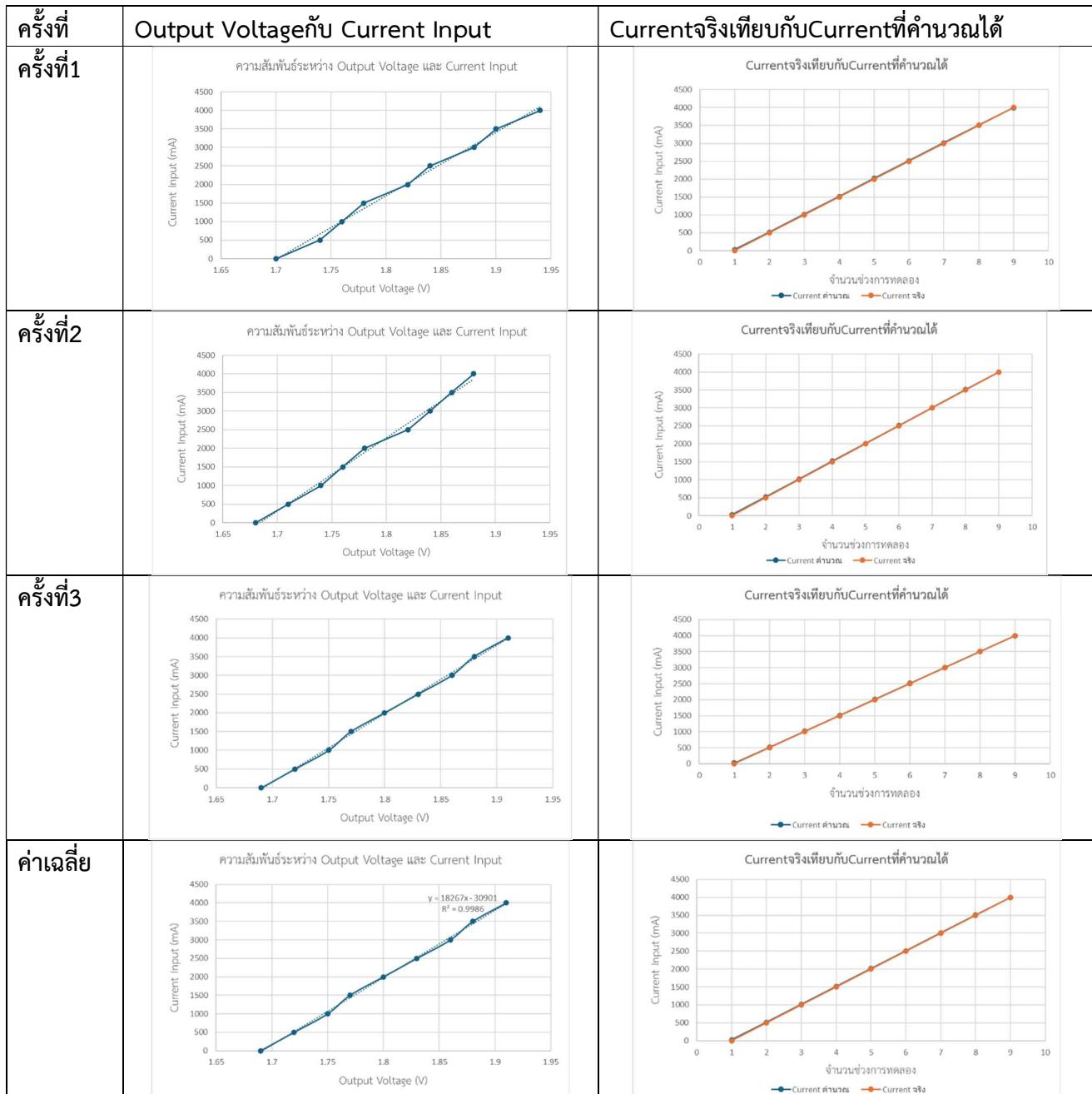
Fast Fourier Transform คือรูปแบบการคำนวณที่ได้รับการปรับให้มีประสิทธิภาพสูงของการแปลงฟูรีเยร์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier Transform: DFT) ซึ่งใช้ในการแปลงสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่องจากโดเมนเวลาไปสู่โดเมนความถี่

#### ขั้นตอนการดำเนินงาน

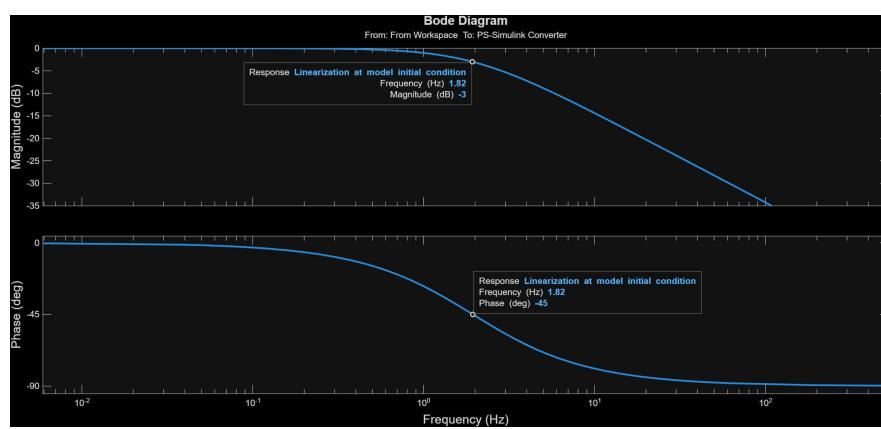
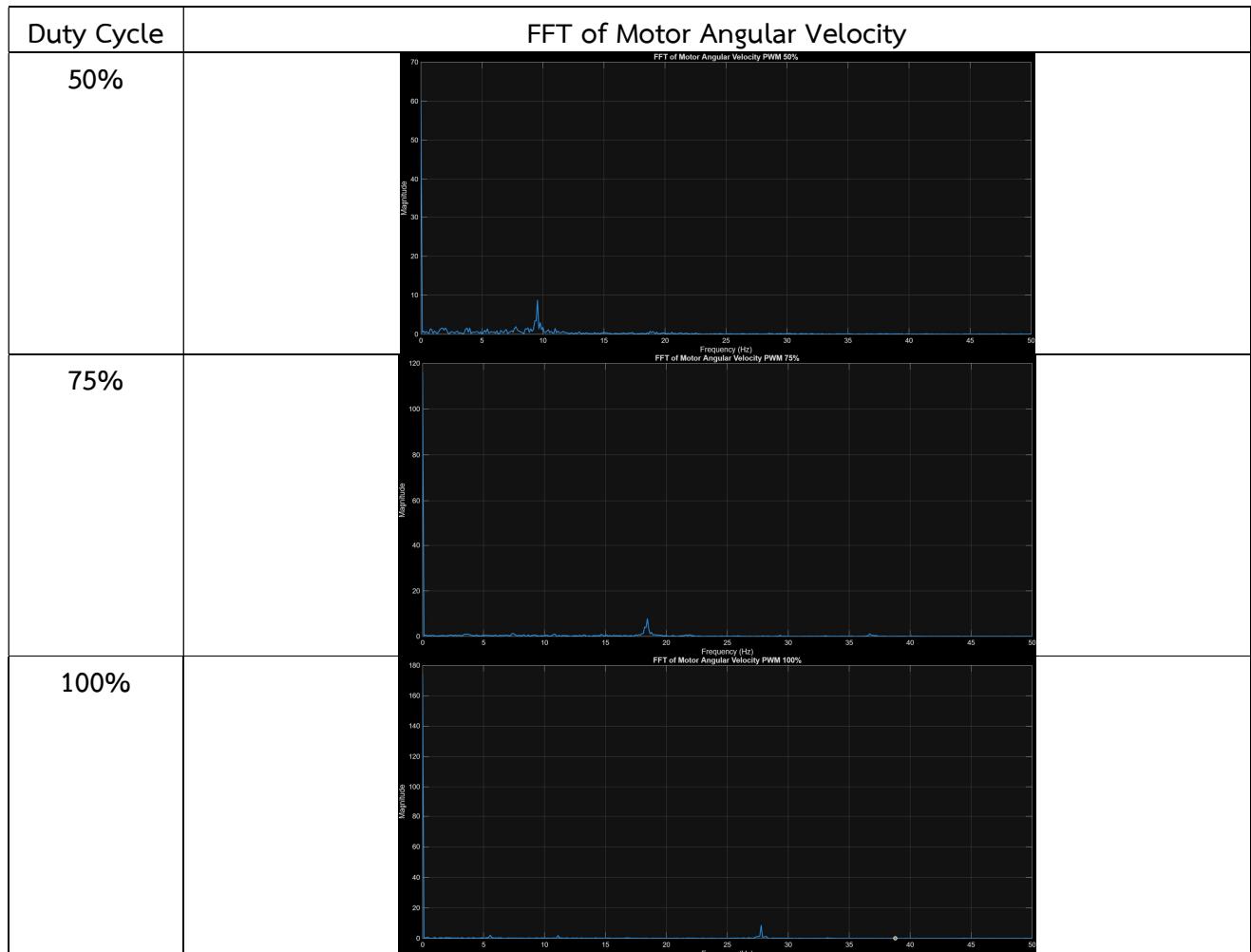
1. เชื่อมบอร์ดเข้ากับโปรแกรม และตั้งค่าบอร์ด
2. ทดสอบ Current Sensor โดยใช้ Power Supply จ่ายกระแสผ่านสายไฟที่ ลอดผ่านตัวเซนเซอร์ แล้ว Short Circuit เพื่อให้กระแสไฟสูงสุด จากนั้นปรับจูนค่ากระแสตั้งแต่ 0-4000mA และบันทึกแรงดันจาก ADC ทำ 3 ครั้ง หลังจากนั้นทำ Moving Average และจึงนำค่าที่ได้ไปทำ Linearization
3. นำค่าที่ได้ จาก Current Sensor ไป Calibration หาสมการแล้วเทียบกับค่าจริงเพื่อดูค่าความคลาดเคลื่อน ทดสอบความเร็วของมอเตอร์ เมื่อปรับ PWM 50% 75% และ 100% โดยไม่ใส่ Load หลังจากนั้นนำไปเข้า FFT เพื่อหา Magnitude ที่แท้จริงของความเร็วในแต่ละ PWM ต่าง ๆ
4. หาจุด Cut off frequency จาก FFT ว่า Magnitude ไหนสูงสุดและความถี่น้อย ของ PWM 100% ได้ 2 Hz
5. จากสูตร  $f_c = \frac{1}{2\pi R}$  จึงได้ค่า  $R = 82k\Omega$  และ  $1\mu F$  หลังจากนั้นจึงสร้างวงจร RC Filter ใน Simulink และ Export Bode plot diagram เพื่อดูขนาดของสัญญาณที่ลดไป และ Phase ที่เปลี่ยนไป
6. เก็บข้อมูลแต่ละเซนเซอร์ 1000 sample points

## ผลการทดลอง

จากการทดลองจะได้ตารางเปรียบเทียบระหว่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Output Voltage กับ Current Input และ กราฟความสัมพันธ์ Current จริงเทียบกับ Current ที่คำนวณได้ในแต่ละครั้งที่ทำการทดลองได้ดังตาราง ตาราง 1 ตารางแสดง ความสัมพันธ์ ระหว่าง Output Voltage กับ Current Input จริง กับที่คำนวณได้



จากการทดลองได้ตารางเปรียบเทียบสเปกตัมความถี่ (FFT) ของความเร็วรอบมอเตอร์ภายใต้ PWM Duty Cycle ต่างๆ ตาราง 2 ตารางแสดง FFT of Motor Angular Velocity ที่ Duty Cycle ต่างๆ



ภาพที่ 3 bode diagram จากการทำ Low-pass filter

## สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่า Current Sensor มีพัฒนาระบบเชิงเส้น โดยแรงดันเออต์พูตเพิ่มขึ้นตามกระแสที่ป้อนเข้า และหลังทำ Calibration ค่ากระแสที่วัดได้ใกล้เคียงค่าจริงมากขึ้น ความคลาดเคลื่อนลดลงเหลือประมาณ 20 mA ผลการทำ FFT แสดงว่าเมื่อเพิ่ม PWM ตำแหน่งของ frequency peak ขยับไปยังความถี่สูงขึ้นตามความเร็วรอบของมอเตอร์ สำหรับ RC Low-Pass Filter พบว่าสัญญาณความถี่สูงถูกลดthonลงตามลักษณะของฟิลเตอร์ลำดับหนึ่ง โดยมีจุดตัดที่ประมาณ 1.82 Hz และมี slope ลดลงใกล้ -20 dB/decade ตาม Bode Plot

## อภิปรายผลการทดลอง

ผลการทดลองพบว่าสัมพันธ์เชิงเส้นของ Current Sensor สอดคล้องกับหลักการ Hall-effect ที่แรงดัน Hall แปรผันตามสนามแม่เหล็กจากกระแสไฟฟ้า ทำให้กราฟ Output-Current เป็นเส้นตรง การทำ Calibration ช่วยลดค่า Offset จึงทำให้ค่าที่วัดได้แม่นยำขึ้น การที่ FFT แสดง peak ความถี่สูงขึ้นเมื่อเพิ่ม PWM เกิดจากแรงดันเฉียบของมอเตอร์เพิ่มขึ้น ทำให้รอบหมุนเพิ่มตาม ทฤษฎี RC Low-Pass Filter อธิบายได้ว่าสัญญาณความถี่สูงถูกลดthonและเกิด phase lag ใกล้ -45° ที่ความถี่ตัด ซึ่งตรงกับผลที่ได้จาก Bode Plot ดังภาพที่ 3

## ข้อเสนอแนะ

- ควรเก็บ Duty Cycle ที่ละเอียดกว่านี้
- ควรเก็บค่าที่ละเอียดกว่านี้ในส่วนของ Current Sensor และหาสมการที่ได้ค่ามาลดความคลาดเคลื่อนน้อยมากๆ

## อ้างอิง

- [https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter\\_2.html](https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_2.html)
- <https://www.winson.com.tw/uploads/images/WCS1600.pdf>
- <https://apmonitor.com/pdc/index.php/Main/ModelLinearization>
- <https://www.mathworks.com/discovery/fft.html>

## การทดลองที่ 2 วิเคราะห์หาค่า Torque Constant และสร้าง Motor Characteristic Curves

### จุดประสงค์

1. เพื่ออธิบายหลักการทำงานของ DC Motor
2. เพื่ออธิบายสมการ DC Motor ที่ใช้ในการสร้าง Motor Characteristic Curve
3. เพื่อวัดและคำนวนหาค่า Torque Constant (Nm/A)
4. เพื่อสรุปค่าที่ทำให้มอเตอร์ทำงานได้มีประสิทธิภาพสูงสุดที่แรงดันไฟฟ้า 12V

5. เพื่อสร้างกราฟ Motor Characteristic จากมอเตอร์บนบอร์ดการทดลองและเปรียบเทียบค่าจริงกับทฤษฎี

### สมมติฐาน

1. กราฟ Motor Characteristic ที่ได้จากการทดลอง จะมีแนวโน้มใกล้เคียงกับกราฟ Ideal Case
2. เมื่อโหลดเพิ่มขึ้น ความเร็วรอบของมอเตอร์จะลดลงอย่างเชิงเส้น
3. ความเร็วรอบจะลดลงเมื่อโหลดเพิ่มขึ้นตามลักษณะเส้น Speed-Torque ของมอเตอร์ DC
4. แรงบิดของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นตามกระแสอย่างเป็นเชิงเส้น ทำให้สามารถหาค่า Torque Constant ได้จากการ Torque vs Current

### ตัวแปรในการทดลอง

ตัวแปรต้น:

- น้ำหนักของ Load ที่เปลี่ยนไป

ตัวแปรตาม:

- กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ดึง ความเร็วรอบของมอเตอร์

ตัวแปรควบคุม:

- แรงดันจ่ายให้คงที่ คือ 12V
- ความถี่ดูของระบบ (รอก/จุดหมุน)
- ความถี่ของสัญญาณ PWM 2 kHz

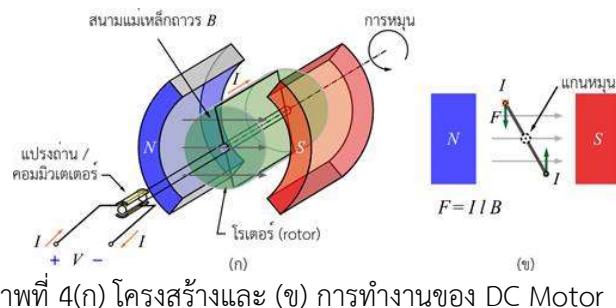
### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 1. หลักการทำงานของ Motor

หลักการทำงานของ Motor เมื่อเราจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปที่ชุดลวดทองแดง กระแสไฟฟ้าก็จะไหลผ่านชุดลวดผ่านขั้วบวกวิ่งไปยังขั้วลบครบรอบจาร เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นแร่แม่เหล็กถาวร ก็จะทำให้เกิดแรงผลักตามกฎมีอ ขว โดยให้นิวเคลียสเป็นทิศทางของสนามแม่เหล็กนิวเคลียสเป็นทิศทางกระแสไฟฟ้าวิ่งตามชุดลวดทองแดงนิวเคลียสเป็นทิศทางของแรงที่เกิดขึ้นเมื่อเราจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านชุดลวดทองแดงอย่างต่อเนื่อง ก็จะทำให้เกิดการหมุน

## 2. หลักการทำงานของ Brushed DC Motor

มอเตอร์จะอาศัยแรงดูดและแรงผลักที่เกิดจากสนามแม่เหล็กเมื่อมีกระแสไฟผ่านลวดตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบตัวนำนั้น ถ้าเรานำตัวนำดังกล่าวไปวางไว้ในสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวรก็จะเกิดการต้านและเสริมกับเส้นแรงแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวร ทำให้เกิดแรงดูดและแรงผลักขึ้นที่ขดลวด รูปที่ 4(ก) แสดงลักษณะโครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟาร์ที่ใช้แม่เหล็กถาวรในส่วนของสเตเตอร์และมีการป้อนกระแสผ่านคอมมิวเตเตอร์ไปยังโรเตอร์ เพื่อให้แกนเหล็กที่โรเตอร์เป็นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4(ข) โดยกระแสไฟฟ้า I จะทำให้เกิดแรง F ขึ้น



ภาพที่ 4(ก) โครงสร้างและ (ข) การทำงานของ DC Motor

จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่า เมื่อจ่ายกระแสผ่านขั้วต่อที่เรียกว่าแปรงถ่าน (brushes) ไปยังวงแหวนพิเศษที่เรียกว่า คอมมิวเตเตอร์ (commutator) ซึ่งต่อเข้ากับวงรอบตัวนำกระแทกที่แหล่งผ่านตัวนำจะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำโดยด้านหนึ่งจะเกิดเป็นแรงผลักขึ้น ทำให้วงรอบตัวนำมีการหมุน โดยแรงที่เกิดจะประมาณ กระแสที่แหล่งผ่าน । ความยาวของตัวนำ และความเข้มของสนามแม่เหล็กถาวร B

## 3. สมการ DC Motor ที่ใช้ในการสร้าง Motor Characteristic Curve

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลัง (Power) และแรงบิด (Torque) ได้สมการ  $P_{mech} = T\omega$

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลัง (Power) กับแรงดันไฟฟ้า(Voltage)และกระแสไฟฟ้า(Current) ได้  $P_{in} = VI_a$

ประสิทธิภาพของมอเตอร์ เกิดจากอัตราส่วนของกำลังทางกล กับกำลังทางไฟฟ้า มีหน่วยเป็น (%)

$$\eta = \frac{P_{mech}}{P_{in}} * 100\%$$

จากกฎของ Newton-Euler's :

$$\sum \tau = J\dot{\omega}$$

จาก From Kirchhoff's Voltage Law :

$$-v_{in} + v_L + v_R + v_{emf} = 0$$

$$L \frac{di}{dt} + Ri + K_b \omega = v_{in}$$

สมการเชิงพลวัตของมอเตอร์ DC (DC Motor Dynamic Equations) ประกอบด้วย

1. สมการวงจรไฟฟ้าของคลอดาร์มาเจอร์ (Electrical Dynamics)

$$L \frac{di}{dt} + Ri + K_b \omega = v_{in}$$

ความหมาย:

- $L \frac{di}{dt}$  = แรงดันไฟฟ้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงกระแส (inductive voltage)
- $Ri$  = แรงดันไฟฟ้าต่อกลุ่มที่ความต้านทานอาร์มาเจอร์
- $K_b \omega$  = Back EMF ที่เกิดจากการหมุนของมอเตอร์
- $v_{in}$  = แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้า

2. สมการโมเดลทางกลของโรเตอร์ (Mechanical Dynamics)

$$J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + K_m i = -\tau_L$$

ความหมาย:

- $J \frac{d\omega}{dt}$  = โมเมนต์ความเรื้อยของโรเตอร์ (inertia)
- $B\omega$  = แรงหน่วงเชิงความหนึด (viscous friction)
- $K_m i$  = แรงบิดที่มอเตอร์สร้าง (motor torque)
- $\tau_L$  = แรงบิดโหลดจากภายนอก

### ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เชื่อมบอร์ดเข้ากับโปรแกรม และตั้งค่าบอร์ด
2. หากำ Stall Torque โดยการ ที่ให้ก้านที่ติดกับMotor กดลง Load cell จะกว่าจะไม่หมุน จากนั้นอ่านค่า Torque และ current เพื่อจะได้ Stall Torque และ current stall
3. หากำ  $\omega$  No load และ Current No load โดยการไม่ใส่ load แล้วเก็บค่ามา จากนั้นนำค่าข้อ 2และ3 ไปสร้าง Motor Characteristic Curve ได้ใน Ideal case โดยจะได้กราฟ Speed vs Torque และ Current vs Torque ส่วน Power vs Torque และ Efficiency vs Torque คำนวณ จากสมการในเอกสารเกี่ยวข้อง
4. หากำ Torque Constant จาก  $\frac{T_{st}}{I_{st}}$
5. เก็บค่า แบบจริงโดยการที่ ทำรอกขึ้นมา นิรศมี 38mm และใส่โหลดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆแล้วกดตึงโหลดนั้นแล้วเก็บค่า Current ,Angular Velocity และคำนวณ Torque จาก  $T = F \cdot r$  ซึ่ง  $F$  คือ น้ำหนักคูณด้วย ความเร่งโน้มถ่วง ของโลกคือ  $9.81 m/s^2$  และใส่น้ำหนักไปเรื่อยๆ จน Motor ไม่หมุน
6. ทำทั้งหมด 3 ครั้งแล้วหากา่เฉลี่ยเก็บข้อมูลแต่ละเซนเซอร์ 1000 sample points

## ผลการทดลอง

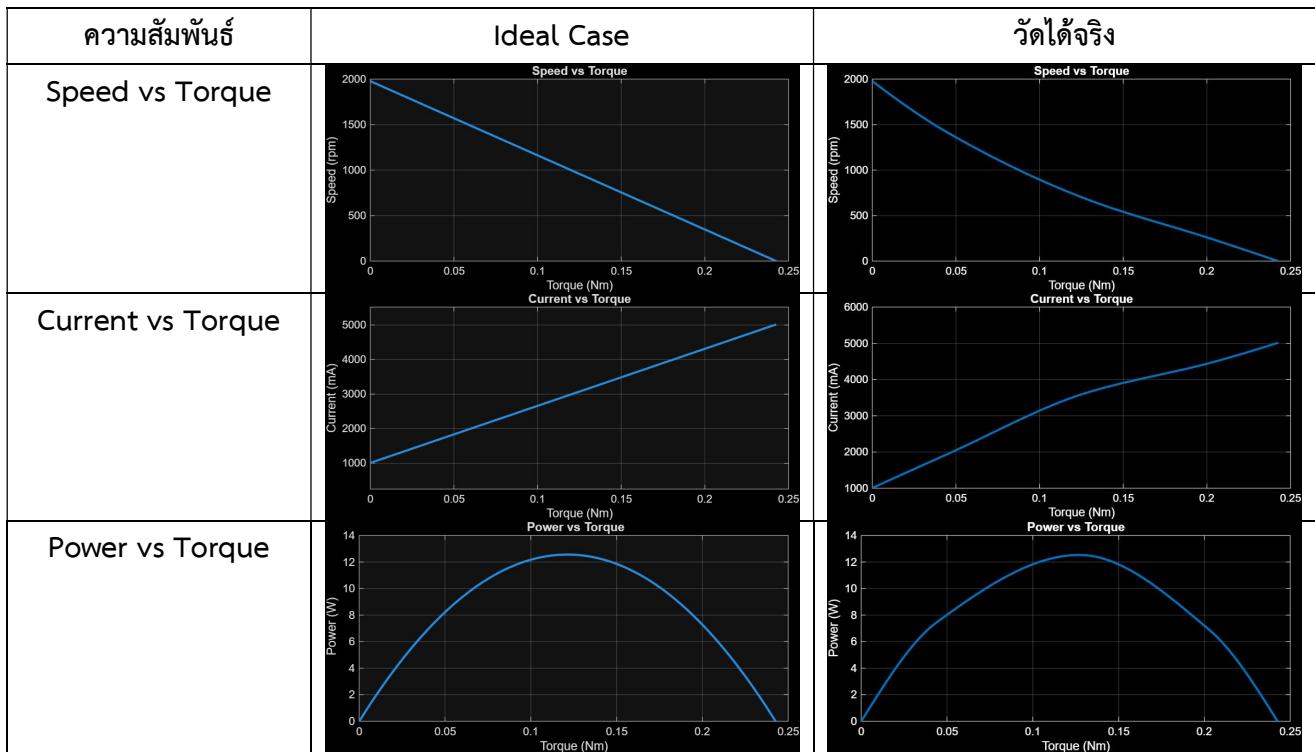
จากการทดลองได้ค่าที่ใช้สร้างตารางสรุปผลการวัดค่า Stall Torque, No-load Speed และ Torque Constant ดังแสดงในตารางต่อไปนี้

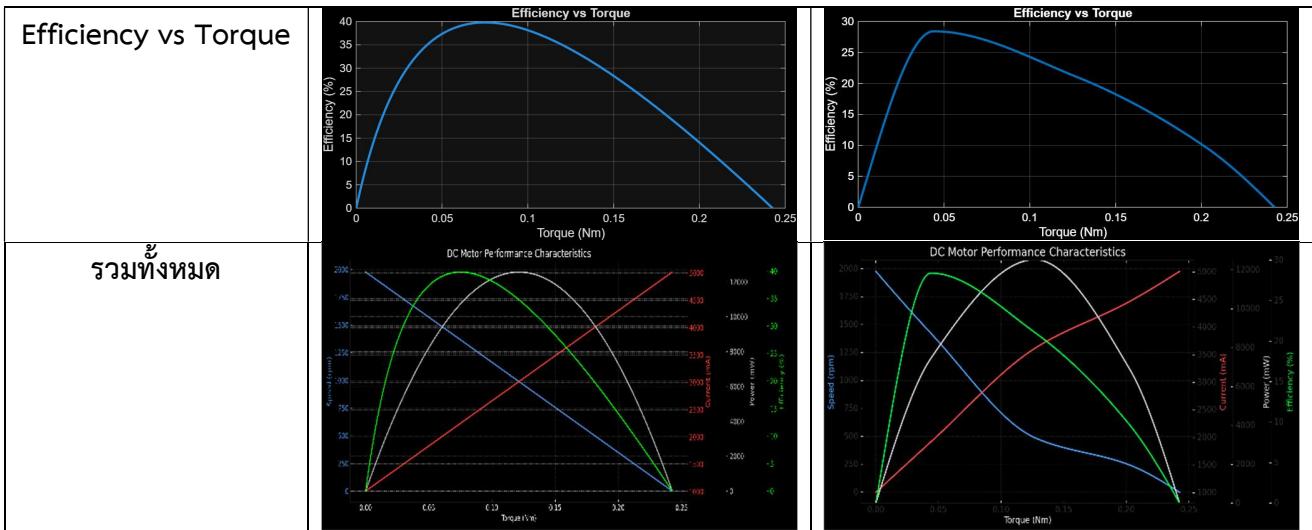
ตาราง 3 ตารางแสดงค่า Torque ,Current และ Angular Velocity ของ Motor

ครั้งที่	Torque Stall(Nm)	Current stall(A)	Current No load(A)	$\omega$ No load(rpm)	Torque Constant (Nm/A)
1	0.2373	5.010	1.010	1994.881	0.047
2	0.2399	5.020	1.007	1969.024	0.048
3	0.2507	5.015	1.008	1968.363	0.050
ค่าเฉลี่ย	0.2466	5.015	1.008	1977.423	0.048

จากผลการทดลองสามารถเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ของมอเตอร์ได้ โดยจัดแสดงในรูปตารางระหว่างกรณี Ideal Case และค่าที่วัดได้จริงดังนี้

ตาราง 4 ตารางแสดง Characteristic ของ Motor Ideal Case เทียบกับที่วัดได้จริง





### สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อหาค่า Stall Torque, No-load Speed และ Torque Constant ของมอเตอร์ DC พบว่า:

- ค่า Stall Torque เฉลี่ย = 0.2466 Nm
- ค่า Stall Current  $\approx 5.015$  A
- ค่า No-load Speed  $\approx 1977.4$  rpm
- ค่า No-load Current  $\approx 1.008$  A
- ค่า Torque Constant เฉลี่ย = 0.048 Nm/A

ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองมีแนวโน้มสอดคล้องกับทฤษฎีของมอเตอร์ DC กล่าวคือ เมื่อภาระโหลดเพิ่มขึ้น ความเร็วตอบ จะลดลง และแรงบิดจะเพิ่มขึ้นตามกราฟเส้นไฟฟ้าในลักษณะความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear) ซึ่งข้อมูลนี้สามารถนำไปสร้างกราฟคุณลักษณะของมอเตอร์ (Motor Characteristic Curves) ได้แก่ Speed–Torque, Current–Torque, Power–Torque และ Efficiency–Torque เพื่อใช้เปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีได้

สรุปค่าสามารถทำให้มอเตอร์ทำงานได้ประสิทธิภาพสูงสุดที่แรงดันไฟฟ้า 12V มีดังนี้:

- Torque ที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด (ประมาณ):  $T_{opt} \approx 0.071$  Nm  
ประมาณ 29% ของ Stall Torque; Stall Torque เฉลี่ยจากการทดลอง = 0.2466 Nm
- ความเร็วตอบที่สอดคล้อง (ประมาณ):  $\omega_{opt} \approx 1,408$  rpm

คำนวณจากสมการ Speed–Torque ที่ใช้ในรายงาน โดยอิง  $\omega_{no\_load} \approx 1977.4$  rpm

- กระแสไฟฟ้าผ่านมอเตอร์:  $I_{opt} \approx 2.49$  A
- กำลังกลที่เพลา (ประมาณ):  $P_{mech} \approx 10.5$  W

- กำลังไฟฟ้าที่ป้อน (ประมาณ):  $P_{in} \approx 29.9 \text{ W}$
- ประสิทธิภาพสูงสุดที่ประมาณได้จากข้อมูลนี้:

$$\eta_{max} \approx 30\% \text{ (คำนวณจาก } \frac{P_{mech}}{Pin} \text{ ภายใต้สมมติฐานการประเมินกระแสจากข้อมูลการทดลอง)}$$

## อภิปรายผลการทดลอง

ผลการทดลองมีความสอดคล้องกับสมมติฐานของทฤษฎีมอเตอร์ DC ได้แก่:

### 1. กราฟ Speed-Torque มีรูปแบบเป็นเส้นตรงลดลง

มอเตอร์มีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\omega = \omega_{nl} \left(1 - \frac{T}{T_{stall}}\right)$$

ซึ่งตรงกับข้อมูลที่เก็บได้จริงว่าความเร็วลดลงตามแรงบิดที่เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรง ยืนยันจากตารางที่ 4

### 2. ค่า Torque Constant มีความใกล้เคียงกันทั้ง 3 ครั้ง

แสดงถึงความเสถียรของกระแสและเซนเซอร์ที่วัดแรงบิด ถือว่าผลลัพธ์มีความน่าเชื่อถือ

### 3. ค่าที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยจาก Ideal Case

สาเหตุอาจมาจากการ

- ความผิดในระบบ rotor และจุดหมุน
- ความหน่วงทางกล ( $B_w$ )
- ความคลาดเคลื่อนของเซนเซอร์ Hall effect

### 4. No-load Speed ต่ำกว่าทฤษฎีเล็กน้อย

เกิดจากความผิดพลาดในชุดทดลอง และการสูญเสียเชิงกลอื่น ๆ

โดยรวมแล้ว การทดลองสามารถสร้างกราฟ Motor Characteristic ได้ตรงตามคุณสมบัติของ DC Motor และยืนยันความสัมพันธ์พื้นฐานระหว่าง Torque vs Current และ Speed vs Torque ตามทฤษฎีได้

## ข้อเสนอแนะ

- ควรออกแบบชุดการทดลองให้มีความเสถียร และมี Misalignment ที่น้อยกว่าที่น้ำหนักเพื่อลดความคลาดเคลื่อนของผลการทดลอง

## อ้างอิง

- [suwatkiravittaya.eng.chula.ac.th/B2i2019BookWeb/dcmotor.html](http://suwatkiravittaya.eng.chula.ac.th/B2i2019BookWeb/dcmotor.html)

- DC Motor Control Speed Kit : 1 มาเรียนรู้วิธีการกลับทิศทางการหมุน และปรับความเร็วของมอเตอร์ด้วย PWM อย่างง่ายกัน – Maker Asia
- กำลังมอเตอร์และแรงบิด (Power & Torque) — วิธีเลือกมอเตอร์เกียร์อย่างถูกต้อง - Vanich
- ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้า – Hinergy Co., Ltd.

การทดลองที่ 3 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง Speed และ Torque ที่ Duty Cycle ต่าง ๆ

#### จุดประสงค์

1. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วrotate (Speed) และแรงบิด (Torque) ของมอเตอร์ภายใต้ PWM Duty Cycle ต่างๆ และสร้างกราฟ Torque–Speed Curve ที่แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว

#### สมมติฐาน

1. เมื่อเพิ่มแรงดันหรือ Duty Cycle ความเร็วrotate สูงสุดและ Torque Stall จะเพิ่มขึ้น โดยกราฟ Torque vs Speed ยังคงเป็นเส้นตรงแต่มีจุดตัดแกนต่างกันตามระดับแรงดัน

#### ตัวแปรในการทดลอง

ตัวแปรต้น:

- ค่า PWM Duty Cycle ที่ควบคุมความเร็วมอเตอร์ (50%, 75%, 100%)

ตัวแปรตาม:

- ความเร็วrotate ของมอเตอร์ (RPM)
- Torque ของมอเตอร์ (N·m)

ตัวแปรควบคุม:

- อุณหภูมิขณะทดลอง
- บอร์ดการทดลองเดียวกัน
- ความถี่ของสัญญาณ PWM 2 kHz

## เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1. หลักการของ Pulse Width Modulation (PWM) และ Duty Cycle

PWM ย่อมาจาก Pulse Width Modulation คือเทคนิคการควบคุมปริมาณแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าโดยการปรับความกว้างของพัลส์ในสัญญาณ ในระบบ PWM สัญญาณจะสลับระหว่างสถานะเปิดและปิดที่ความถี่คงที่ระยะเวลาที่สัญญาณอยู่ในสถานะ “เปิด” ของแต่ละรอบ ซึ่งเรียกว่า Duty Cycle จะเป็นตัวกำหนดกำลังเฉลี่ยที่ส่งให้โหลดในส่วนของ Duty Cycle คือสัดส่วนของเวลาที่สัญญาณอยู่ในสถานะ “เปิด (ON)” ต่อหนึ่งรอบพัลส์ มีหน่วยเป็นเปอร์เซนต์ ยิ่ง Duty Cycle สูง แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ส่งให้โหลดก็ยิ่งมาก

$$\text{Duty Cycle} = \frac{\text{เวลา ON}}{\text{ช่วงเวลาหนึ่งรอบพัลส์}} \times 100\%$$

จุดเด่นของ PWM คือประสิทธิภาพสูงและการสูญเสียพลังงานต่ำ เนื่องจากส่วนควบคุมทำงานเพียงสองสถานะแบบดิจิทัลคือ เปิดเต็มที่ หรือ ปิดสนิท ทำให้ความร้อนและการสูญเสียพลังงานในวงจรสวิตช์น้อย นอกจากนี้ PWM ยังให้การควบคุมที่ละเอียดแม่นยำ

### 2. สมการเชิงเส้นของมอเตอร์ทำให้เส้นกราฟเลื่อนแบบไหน

แรงบิดของมอเตอร์ DC มีความสัมพันธ์โดยตรงกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านชุดลวด ตามหลักการของมอเตอร์

$$T \propto I$$

เมื่อเพิ่มแรงดัน กระแสเริ่มต้น (Starting Current) จะมากขึ้น เพราะความต่างศักย์เพิ่มขึ้น ทำให้แรงบิดเริ่มต้นเพิ่มขึ้นตามไปด้วย มอเตอร์ DC มีความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างแรงบิดและความเร็ว :

$$T = T_{\text{stall}} \left(1 - \frac{\omega}{\omega_{\text{no-load}}}\right)$$

- $T_{\text{stall}}$  เพิ่ม (กระแสกระแสเพิ่ม)
- $\omega_{\text{no-load}}$  เพิ่ม (แรงดันสูงขึ้น)

ทั้งสองค่าจะเพิ่มเป็นอัตราส่วนเท่า ๆ กัน จึงทำให้เส้นกราฟใหม่เป็นเส้นตรงที่นาน

## ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เชื่อมบอร์ดเข้ากับโปรแกรม และตั้งค่าบอร์ด
2. หาค่า Stall Torque โดยการ ที่ให้ก้านที่ติดกับ Motor กดลง Load cell จนกว่าจะไม่หมุน อ่านค่า Torque จากนั้นเปลี่ยน Duty cycle เป็น 50% 75% และ 100% ตามลำดับ ทำ Duty Cycle ละ 3ครั้ง 1000sample point
3. หาค่า  $\omega$  No load (ผ่าน Low Pass filter แล้ว) โดยการไม่ใส่ load และเก็บค่าจากนั้นเปลี่ยน Duty cycle เป็น 50% 75% และ 100% ตามลำดับ ทำ Duty Cycle ละ 3ครั้ง 1000sample point

## ผลการทดลอง

ตาราง ๕ ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Torque และ Speed ที่ Duty Cycle ต่าง ๆ

ครั้งที่	ความสัมพันธ์ระหว่าง Torque และ Speed ที่ Duty Cycle ต่าง ๆ																
ครั้งที่ 1	<p>ความสัมพันธ์ระหว่าง Torque และ Speed ครั้งที่ 1</p> <table border="1"> <caption>Data for Graph: ความสัมพันธ์ระหว่าง Torque และ Speed ครั้งที่ 1</caption> <thead> <tr> <th>Torque (Nm)</th> <th>Duty cycle 50% (rad/s)</th> <th>Duty cycle 75% (rad/s)</th> <th>Duty cycle 100% (rad/s)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.0</td> <td>80</td> <td>210</td> <td>145</td> </tr> <tr> <td>0.1</td> <td>20</td> <td>110</td> <td>75</td> </tr> <tr> <td>0.2</td> <td>0</td> <td>20</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	Torque (Nm)	Duty cycle 50% (rad/s)	Duty cycle 75% (rad/s)	Duty cycle 100% (rad/s)	0.0	80	210	145	0.1	20	110	75	0.2	0	20	0
Torque (Nm)	Duty cycle 50% (rad/s)	Duty cycle 75% (rad/s)	Duty cycle 100% (rad/s)														
0.0	80	210	145														
0.1	20	110	75														
0.2	0	20	0														
ครั้งที่ 2	<p>ความสัมพันธ์ระหว่าง Torque และ Speed ครั้งที่ 2</p> <table border="1"> <caption>Data for Graph: ความสัมพันธ์ระหว่าง Torque และ Speed ครั้งที่ 2</caption> <thead> <tr> <th>Torque (Nm)</th> <th>Duty cycle 50% (rad/s)</th> <th>Duty cycle 75% (rad/s)</th> <th>Duty cycle 100% (rad/s)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.0</td> <td>90</td> <td>150</td> <td>205</td> </tr> <tr> <td>0.1</td> <td>0</td> <td>20</td> <td>75</td> </tr> <tr> <td>0.2</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	Torque (Nm)	Duty cycle 50% (rad/s)	Duty cycle 75% (rad/s)	Duty cycle 100% (rad/s)	0.0	90	150	205	0.1	0	20	75	0.2	0	0	0
Torque (Nm)	Duty cycle 50% (rad/s)	Duty cycle 75% (rad/s)	Duty cycle 100% (rad/s)														
0.0	90	150	205														
0.1	0	20	75														
0.2	0	0	0														
ครั้งที่ 3	<p>ความสัมพันธ์ระหว่าง Torque และ Speed ครั้งที่ 3</p> <table border="1"> <caption>Data for Graph: ความสัมพันธ์ระหว่าง Torque และ Speed ครั้งที่ 3</caption> <thead> <tr> <th>Torque (Nm)</th> <th>Duty cycle 50% (rad/s)</th> <th>Duty cycle 75% (rad/s)</th> <th>Duty cycle 100% (rad/s)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.0</td> <td>80</td> <td>150</td> <td>205</td> </tr> <tr> <td>0.1</td> <td>20</td> <td>100</td> <td>125</td> </tr> <tr> <td>0.2</td> <td>0</td> <td>20</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	Torque (Nm)	Duty cycle 50% (rad/s)	Duty cycle 75% (rad/s)	Duty cycle 100% (rad/s)	0.0	80	150	205	0.1	20	100	125	0.2	0	20	0
Torque (Nm)	Duty cycle 50% (rad/s)	Duty cycle 75% (rad/s)	Duty cycle 100% (rad/s)														
0.0	80	150	205														
0.1	20	100	125														
0.2	0	20	0														
ค่าเฉลี่ย	<p>ความสัมพันธ์ระหว่าง Torque และ Speed ค่าเฉลี่ย</p> <table border="1"> <caption>Data for Graph: ความสัมพันธ์ระหว่าง Torque และ Speed ค่าเฉลี่ย</caption> <thead> <tr> <th>Torque (Nm)</th> <th>Duty cycle 50% (rad/s)</th> <th>Duty cycle 75% (rad/s)</th> <th>Duty cycle 100% (rad/s)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.0</td> <td>80</td> <td>150</td> <td>205</td> </tr> <tr> <td>0.1</td> <td>20</td> <td>100</td> <td>125</td> </tr> <tr> <td>0.2</td> <td>0</td> <td>20</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	Torque (Nm)	Duty cycle 50% (rad/s)	Duty cycle 75% (rad/s)	Duty cycle 100% (rad/s)	0.0	80	150	205	0.1	20	100	125	0.2	0	20	0
Torque (Nm)	Duty cycle 50% (rad/s)	Duty cycle 75% (rad/s)	Duty cycle 100% (rad/s)														
0.0	80	150	205														
0.1	20	100	125														
0.2	0	20	0														

## สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองขึ้นให้เห็นว่า PWM Duty Cycle มีผลโดยตรงต่อ Characteristics ของมอเตอร์ DC โดยเมื่อเพิ่ม Duty Cycle จะเพิ่มทั้งแรงบิดและความเร็วรอบสูงสุด ทำให้กราฟ Torque–Speed Shift ขึ้นแบบขาน ซึ่งตรงกับสมมติฐานที่ตั้งไว้และสอดคล้องกับทฤษฎีของมอเตอร์ DC อย่างชัดเจน การทดลองนี้จึงช่วยยืนยันความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง Torque และ Speed ภายใต้แรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปตาม Duty Cycle ของ PWM

## อภิปรายผลการทดลอง

ผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มค่า Duty Cycle ของสัญญาณ PWM ทั้งความเร็วรอบและแรงบิดสูงสุดของมอเตอร์ เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของมอเตอร์ DC ที่ระบุว่าแรงดันเฉียบที่สูงขึ้นจะทำให้กระแสและ Back-EMF เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเร็วและแรงบิดสูงขึ้นตามลำดับ กราฟ Torque–Speed ในแต่ละ Duty Cycle ยังคงเป็นเส้นตรงและเลื่อนขึ้นแบบขาน แสดงถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นตามแบบจำลองของมอเตอร์ DC

### ข้อเสนอแนะ

- ควรทำ Duty Cycle ที่มอเตอร์เริ่มหมุนตอนแรก และทำละเอียดกว่านี้

## อ้างอิง

- [What is PWM \(Pulse Width Modulation\)? - Fly Eye](#)

การทดลองที่ 4 ศึกษาผลของการปรับค่า PWM Duty Cycle ต่อความเร็ว กระแสไฟฟ้า และประสิทธิภาพของมอเตอร์ ที่ความถี่ของสัญญาณต่างกัน

## จุดประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนค่า PWM Duty Cycle (0–100%) ต่อความเร็วของมอเตอร์ กระแสไฟฟ้า และประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ความถี่ของสัญญาณต่างกัน (200 Hz, 2 kHz, 31.25 kHz)
2. เพื่อสร้างกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Duty Cycle กับความเร็ว กระแสไฟฟ้า และประสิทธิภาพ ที่แตกต่างกัน รวมถึงความถี่ของสัญญาณ และวิเคราะห์ความแตกต่าง

## สมมติฐาน

1. เมื่อ PWM Duty Cycle เพิ่มขึ้น ความเร็วของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นในทุกความถี่ และที่ความถี่ PWM สูงจะให้ความเร็วที่رابเรียบกว่าและมีแรงบิดสั่นน้อยกว่า เมื่อเทียบกับความถี่ต่ำ
2. กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้จะเพิ่มขึ้นตาม PWM Duty Cycle โดยที่ความถี่ต่ำอาจทำให้กระแสเมื่อการแกว่งมากกว่าในขณะที่ความถี่สูงทำให้กระแสไฟฟ้าหลning และราบเรียบกว่า

## ตัวแปร

ตัวแปรต้น:

- ค่าความถี่ของสัญญาณที่ 200 Hz, 2 kHz, 31.25 kHz

ตัวแปรตาม:

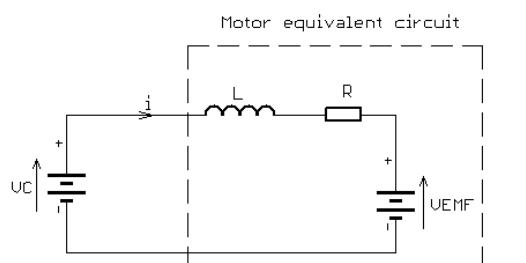
- ความเร็ว, กระแสไฟฟ้า และประสิทธิภาพของมอเตอร์ ที่ PWM Duty Cycle (0% ถึง 100%)

ตัวแปรควบคุม:

- แรงดันไฟฟ้าอินพุตที่จ่ายจาก Power Supply คงที่
- ประเภทของมอเตอร์และโหลด

## เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1. ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณ Pulse และกระแส



ภาพที่ 5 วงจรเทียบเท่ามอเตอร์กระแสตรงแบบแบ่งค่าน้ำหนัก

จากการวิเคราะห์ DC Motor จะสามารถอธิบายได้ว่า วงจร RL อนุกรมจะมีค่าคงตัวเวลา (Time Constant) เสมอ ซึ่งกำหนดด้วยสมการ

$$\tau = \frac{L}{R}$$

ค่าคงตัวเวลาเป็นช่วงเวลาที่แรงดันหรือกระแสในวงจรเปลี่ยนแปลงจนถึงสัดส่วน  $\frac{1}{e}$  ของค่าปลายทาง (Final Value) สำหรับแรงดันที่ตัวหน่วยนำ  $V_L$  ซึ่งจะลดลงสู่ 0 V เมื่อเวลาผ่านพอดีคงตัวเวลา  $\tau$  คือเวลาที่  $V_L$  ลดลงเหลือเพียง

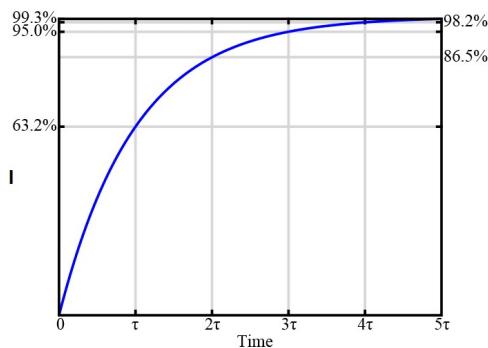
$$V_L = V \left( \frac{1}{e} \right)$$

ในทางกลับกัน แรงดันที่ตัวต้านทาน  $V_R$  จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนเข้าใกล้แรงดันอินพุต  $V$  ดังนั้น  $\tau$  คือเวลาที่  $V_R$  เพิ่มขึ้นถึง

$$V_R = V \left( 1 - \frac{1}{e} \right)$$

สาเหตุที่แรงดันกระแสเปลี่ยนแปลงไม่ทันทีเมื่อมีแรงดันมาป้อน เกิดจากตัวหน่วยนำ ( $L$ ) ที่สร้างแรงคลื่นไฟฟ้าขึ้นกลับ (Back EMF) เพื่อต้านการเปลี่ยนแปลงของกระแส ส่งผลให้กระแสและแรงดันในวงจรเปลี่ยนแปลงได้มีรูปร่างกว่าค่าคงตัวเวลา  $\tau$  ของวงจร

ดังนั้น เมื่อเปิดแหล่งจ่าย กระแสจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นโค้ง และต้องใช้เวลา  $5\tau$  จึงจะเข้าใกล้ค่าสภาวะคงที่ เพื่อให้แน่ใจว่ากระแสเมื่อเวลามากพอที่จะหลบชนะค่าสภาวะคงที่ในแต่ละพัลส์ ซึ่งเป็นเงื่อนไขสำคัญสำหรับการควบคุมให้มีความเสถียรและเชิงเส้น

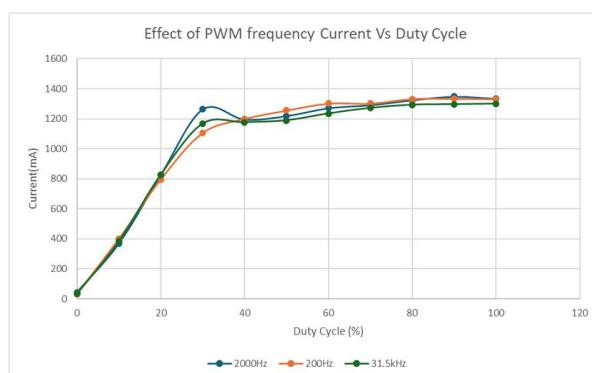


ภาพที่ 6 การใช้เวลา  $5\tau$  ในการเข้าสู่สภาวะคงที่ของกระแส

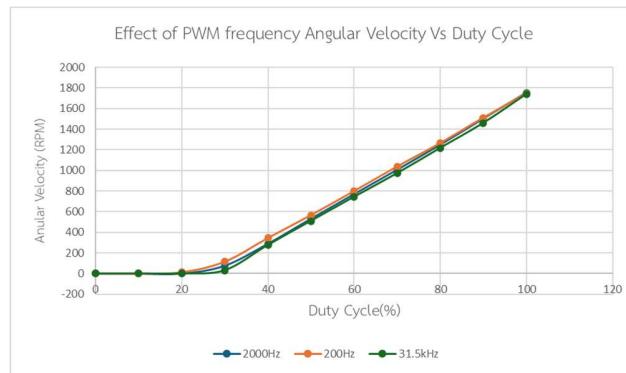
### ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เชื่อมบอร์ดเข้ากับโปรแกรม และตั้งค่าบอร์ด
2. เปลี่ยนความถี่ PWM แต่ละ Duty cycle จาก 0%-100% เพิ่มทีละ 10% แล้วเก็บค่า Current และ angular velocity ทดลอง 3 ครั้ง เก็บ Duty cycle ละ 1000 sampling point และหา moving average

### ผลการทดลอง



ภาพที่ 7 Effect of PWM frequency Current Vs Duty Cycle



ภาพที่ 8 Effect of PWM frequency Angular Velocity Vs Duty Cycle

## สรุปผลการทดลอง

### 1. ความเร็วของมอเตอร์ (Angular Velocity)

- ความเร็ว เพิ่มขึ้นตาม PWM Duty Cycle ในทุกความถี่ของสัญญาณ
- ที่ความถี่สูงกว่า (โดยเฉพาะ 31.25 kHz) ความเร็วจะ ขึ้นได้ราบรื่นกว่า ไม่มีอาการสะดุดหรือสั่น
- ที่ความถี่ต่ำ เช่น 200 Hz มีการแปรผันของความเร็วมากกว่า เนื่องจากแรงบิดเป็นพัลซ์ชัดเจน

### 2. กระแสไฟฟ้า (Current Consumption)

- กระแสเพิ่มขึ้นตาม PWM Duty Cycle เช่นกัน
- ที่ความถี่ต่ำ (200 Hz) พบว่ากระแส แกว่งมาก และมี ripple สูงกว่า
- ที่ความถี่สูง (31.25 kHz) กระแสมีรูปแบบที่ นิ่งกว่าและราบรื่นกว่า เพราะมอเตอร์มีเวลา\_n อ้อยลงในการตอบสนองกับกระแสไฟฟ้าต่อพัลส์ sine แต่ละรอบ

### 3. ประสิทธิภาพของมอเตอร์ (Motor Efficiency)

- ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นตาม Duty Cycle แต่จนถึงจุดหนึ่งเท่านั้น
- ที่ความถี่สูง (31.25 kHz) ประสิทธิภาพโดยรวม สูงกว่า เนื่องจากแรงบิดสั่นน้อยและกำลังสูญเสียเชิงไฟฟ้าน้อยลง
- ความถี่ต่ำ (200 Hz) ให้ประสิทธิภาพต่ำกว่า เพราะเกิดแรงบิดสั่นมาก กระแสของมอเตอร์จะเป็นคลื่นขึ้น-ลงมาก กระแส RMS สูงขึ้น → ขาด漉ดร้อนขึ้น → สูญเสียพลังงานมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพต่ำลง

## อภิปรายผลการทดลอง

### 1. ความถี่ PWM ส่งผลต่อความราบรื่นของแรงบิดและความเร็ว

- ความถี่ต่ำ (200 Hz) ทำให้เกิดแรงบิดแบบเป็นช่วง ๆ (Pulsating torque)  
ทำให้ความเร็วและกระแสเกิดการแกว่งมาก  
ซึ่งเป็นผลจาก time constant ( $\tau$ ) ของมอเตอร์ที่ยังตอบสนองไม่ทันต่อการเปิด–ปิดของพัลส์แต่ละรอบ
- ความถี่สูง (31.25 kHz) ทำให้พัลส์ PWM มีความถี่มากพอที่รีเตอร์และวงจร RL ของมอเตอร์จะเฉลี่ยแรงดันได้ดี  
จึงทำให้ ความเร็วและกระแสราบรื่นกว่า

## 2. ความถี่ PWM และ Time Constant ( $\tau = L/R$ )

จากทฤษฎี วงจร RL ต้องการเวลาประมาณ  $5\tau$  เพื่อให้กระแสเข้าใกล้ค่าคงที่  
ถ้าความถี่ PWM สูงเกินไป แต่ละพัลส์ยังไม่ทันขึ้นถึงกระแสคงตัวก่อนจะเปลี่ยนสถานะ

ผลคือ:

- กระแสเฉลี่ยต่ำลง
- แรงบิดลดลงและไม่สม่ำเสมอ
- ความเร็วแกว่ง

ดังนั้นความถี่สูงจึงเหมาะสมกว่าในการควบคุมมอเตอร์

## 3. ความสัมพันธ์ระหว่าง Duty Cycle กับความเร็วเป็นเชิงเส้น

ในทุกความถี่ ค่าความเร็วเพิ่มขึ้นตามสมการเชิงเส้นของมอเตอร์ DC:

$$\omega \propto V_{avg} = Duty \times V_{supply}$$

แต่ที่ความถี่สูง ความเป็นเชิงเส้นจะเห็นชัดกว่า เพราะแรงดันเฉลี่ยที่เกิดขึ้นใกล้เคียงค่าทฤษฎีมากกว่า

## 4. ประสิทธิภาพสูงสุดเกิดที่ความถี่สูง

เพราะ:

- แรงบิดสั่นลดลง
- กระแสต้าน RMS ต่ำกว่า
- สัญญาณ PWM ใกล้ลักษณะ DC มากกว่า

ดังนั้นที่ 31.25 kHz ให้ประสิทธิภาพสูงสุดตามผลทดลอง

## ข้อเสนอแนะ

- ควรออกแบบชุดการทดลองให้มีความเสถียร และมี Misalignment ที่น้อยกว่านี้เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของผลการทดลอง

## อ้างอิง

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

การทดลองที่ 5 การศึกษาการควบคุมความเร็วและทิศทางของมอเตอร์ด้วยวงจร H-Bridge และโหมด Sign Magnitude / Locked Anti Phase

#### จุดประสงค์

1. เพื่อศึกษาหลักการทำงานของวงจร H-Bridge และการควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์
2. เพื่อทดลองใช้และเปรียบเทียบเทียบโหมดการควบคุม Sign-Magnitude PWM และ Locked Anti-Phase PWM
3. เพื่อวิเคราะห์ข้อดี-ข้อเสียของแต่ละโหมดในการควบคุมความเร็วและการเคลื่อนที่ของมอเตอร์

#### สมมติฐาน

1. โหมด Sign-Magnitude: ความเร็วของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นตาม Duty Cycle แม้ในช่วงต้นอาจมีความเร็วต้านทานหรือหยุดนิ่งจากแรงต้านเริ่มต้น (Dead zone) แต่เมื่อ Duty สูงขึ้น มอเตอร์จะหมุนไปทิศทางที่กำหนดด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น
2. โหมด Locked Anti-Phase: ความเร็วและทิศทางของมอเตอร์จะขึ้นกับสัดส่วน Duty Cycle โดยที่ Duty < 50% มอเตอร์หยุดหมุน (ความเร็วเป็นลบ), Duty = 50% มอเตอร์หยุดหมุน (ความเร็วเป็นศูนย์), และ Duty > 50% มอเตอร์หมุนอีกทิศทางหนึ่ง (ความเร็วเป็นบวก)

#### ตัวแปร

##### ตัวแปรต้น:

- โหมดการควบคุม PWM Sign-Magnitude และ Locked Anti-Phase
- ค่า Duty Cycle ของ PWM (0–100%)

##### ตัวแปรตาม:

- ความเร็วของมอเตอร์ (RPM)
- กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ดึงใช้ (mA)

- ความเรียบของแรงบิด (Torque ripple)

ตัวแปรควบคุม:

- ความถี่ของสัญญาณ PWM 2 kHz
- แหล่งจ่ายไฟสำหรับวงจรขั้มมอเตอร์
- อุณหภูมิและสภาพแวดล้อมของห้องทดลอง

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1. หลักการทำงานของ H-bridge

วงจร H-Bridge เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ควบคุมทิศทางและความเร็วของมอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) โดยใช้สวิตซ์สี่ตัว (เช่น ทรานซิสเตอร์หรือ MOSFET) จัดเรียงในลักษณะคล้ายตัวอักษร “H”

โดยมีมอเตอร์ต่ออยู่ระหว่างสวิตซ์ด้านซ้ายและด้านขวาในตำแหน่งกึ่งกลาง การควบคุมทิศทางของมอเตอร์เกิดจากการเปิด–ปิดสวิตซ์สองตัวที่อยู่ตรงข้ามกันเสมอ เช่น

- เมื่อปิดสวิตซ์ชุดซ้ายบนและขวาล่าง กระแสจะไหลในทิศทางหนึ่ง ทำให้มอเตอร์หมุนไปข้างหน้า
- เมื่อปิดสวิตซ์ชุดขวาบนและซ้ายล่าง กระแสจะไหลกลับทิศ ทำให้มอเตอร์หมุนย้อนกลับ

หากเปิดสวิตซ์ทั้งหมด มอเตอร์จะหยุดแบบหมุนฟรี (Coasting) และหากทำให้ขั้วมอเตอร์ลัดวงจรเข้าหากัน มอเตอร์จะหยุดแบบเบรกทันที (Dynamic Braking) นอกจากนี้ H-Bridge ยังสามารถควบคุมความเร็วได้โดยการใช้สัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) ส่งเข้าไปยังสวิตซ์ในแขนของวงจร การปรับ Duty Cycle ของ PWM ทำให้แรงดันเฉลี่ยที่จ่ายให้มอเตอร์เปลี่ยนไป ส่งผลให้สามารถควบคุมความเร็วรอบได้อย่างละเอียด

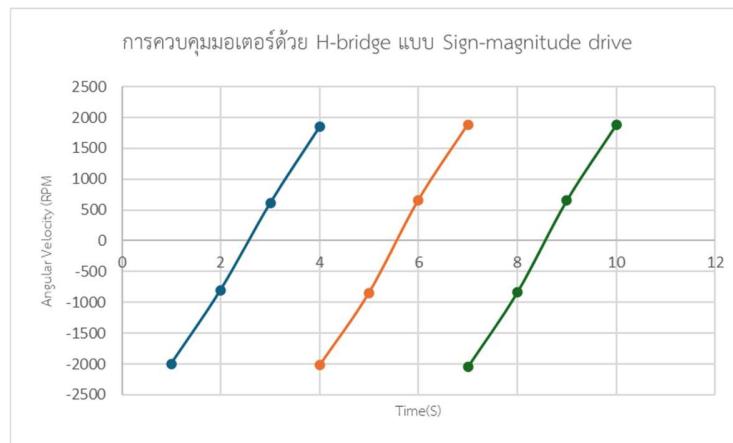
ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. การเตรียมอุปกรณ์และการเชื่อมต่อ
2. การตั้งค่าเริ่มต้น
  - ตั้งค่าความถี่ของสัญญาณ PWM (Frequency) ไปที่ 2000 Hz
  - ทำการเซ็ตบอร์ดให้พร้อมใช้งานโปรแกรม
3. การทดลอง โหมด Sign-Magnitude Drive
  - ทำการเซ็ตบอร์ดให้พร้อมใช้งานโปรแกรม
  - ปรับสายไฟให้สาย PWM อยู่กับ PWM และ Dir อยู่กับ Dir ของไดร์มอเตอร์

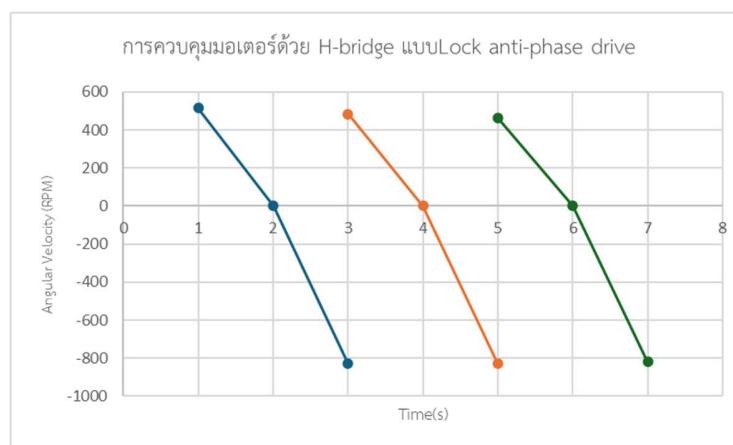
- ปรับค่า Duty Cycle ที่ 50, 25, -25, -50
- บันทึกค่า ความเร็วรอบ (RPM) และ กระแสไฟฟ้า (Current) ที่อ่านได้ในทุกช่วง Duty Cycle ลงในตาราง บันทึกผล

#### 4. การทดลอง โหมด Locked Anti-Phase Drive

##### ผลการทดลอง



ภาพที่ 9 การควบคุมมอเตอร์ด้วย H-bridge แบบ Sign-magnitude drive



ภาพที่ 10 การควบคุมมอเตอร์ด้วย H-bridge แบบLock anti-phase drive

##### สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวงจร H-Bridge ทั้งสองโหมด พบว่าเป็นไปตามสมมติฐาน ดังนี้

1. โหมด Sign-Magnitude Drive ความเร็วรอบของมอเตอร์แปรผันตรง กับค่า Duty Cycle ที่ป้อนให้ โดยต้องมีการกำหนดสัญญาณควบคุมทิศทางแยกต่างหาก การเพิ่ม Duty Cycle ทำให้แรงดันเฉลี่ยสูงขึ้นและมอเตอร์หมุนเร็วขึ้นในทิศทางที่กำหนด
2. โหมด Locked Anti-Phase Drive ความเร็วและทิศทางขึ้นอยู่กับค่า Duty Cycle เพียงค่าเดียว โดยที่ Duty Cycle 50% มอเตอร์หยุดนิ่ง (ความเร็วศูนย์), Duty Cycle > 50% มอเตอร์หมุนในทิศทางหนึ่ง และ Duty Cycle < 50% มอเตอร์หมุนในทิศทางตรงกันข้าม ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและ Duty Cycle มีลักษณะเป็นเชิงเส้น ต่อเนื่องผ่านจุดศูนย์

#### อภิปรายผลการทดลอง

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองทั้งสองโหมด พบทะเบียนต่างและประเด็นที่น่าสนใจดังนี้

1. ความเป็นเชิงเส้น ทั้งสองโหมดให้ผลตอบสนองความเร็วที่เป็นเชิงเส้นต่อ Duty Cycle แต่ในโหมด Locked Anti-Phase จะมีความต่อเนื่องของการเปลี่ยนทิศทางที่ระบุรีบกว่าเนื่องจากไม่มีการตัดวงจรช่วงศูนย์เหมือน Sign-Magnitude ที่ต้องสลับสัญญาณ Direction
2. การตอบสนองที่ความเร็วต่ำ
  - Locked Anti-Phase: มอเตอร์สามารถเข้าชานะแรงเสียดทานได้ดีกว่าในช่วงความเร็วต่ำ เนื่องจากที่จุดหยุดนิ่ง (50% Duty) มอเตอร์ไม่ได้ถูกตัดไฟ แต่มีการสลับขั้วแรงดันบวก/ลบด้วยความถี่สูงตลอดเวลา ทำให้เกิดกระแสกระแสเพื่อม เล็กน้อยที่ช่วย "เขย่า" โรเตอร์ ทำให้มอเตอร์ออกตัวได้ง่ายและไม่มี Dead Zone ที่ชัดเจน
  - Sign-Magnitude: ที่ Duty Cycle ต่ำมากๆ แรงดันเฉลี่ยอาจไม่เพียงพอที่จะเข้าชานะแรงเสียดทาน ทำให้มอเตอร์ไม่หมุนจนกว่าจะถึงค่า Duty Cycle ค่าหนึ่ง
3. การเบรก โหมด Locked Anti-Phase มีคุณสมบัติการเบรกแบบ Regenerative/Dynamic Braking ในตัว เมื่อลด Duty Cycle อย่างรวดเร็ว มอเตอร์จะสร้างแรงต้านกลับ ทำให้หยุดได้กระชับกว่าโหมด Sign-Magnitude (ถ้า Sign-Magnitude ปล่อยลอย 0% จะเป็น Coasting แต่ถ้า Set 0 แบบ Brake ก็จะหยุดได้เช่นกัน แต่ Locked Anti-Phase ทำงานนี้โดยธรรมชาติของสัญญาณ)
4. ประสิทธิภาพพลังงาน โหมด Sign-Magnitude มีประสิทธิภาพดีกว่าในขณะหยุดนิ่งหรือความเร็วต่ำ เพราะไม่มีกระแสไฟหล่อผ่านมอเตอร์เมื่อ Duty = 0% ในขณะที่ Locked Anti-Phase จะมีกระแสไฟหล่อผ่านชด漉ตลอดเวลา แม้ขณะหยุดนิ่ง (50% Duty) ทำให้มอเตอร์ร้อนและกินไฟมากกว่าหากไม่ได้ออกแบบตัวเหนี่ยววนนำให้เหมาะสม

#### ข้อเสนอแนะ

- ให้ใช้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณ PWM เพื่อบกบ孱ดันมอเตอร์ เพื่อให้เห็นรูปคลื่นของโหมด Locked Anti-Phase ชัดเจนขึ้น
- ให้ทดสอบภายใต้โหลดจริง เพื่อประเมิน Torque Ripple และความสามารถในการรักษาแรงบิดที่ความเร็วต่ำ
- ให้ตรวจวัดอุณหภูมิของมอเตอร์และไดรเวอร์ เมื่อหยุดนิ่งในโหมด Locked Anti-Phase เพื่อตรวจสอบการสูญเสียพลังงานเป็นความร้อน

#### อ้างอิง

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

## 2. Stepper Motor

การทดลองที่ 1 การทดลองการทำงานพื้นฐานและโหมดการขับ Stepper Motor

### จุดประสงค์

1. เพื่อศึกษาหลักการทำงานของ Stepper Motor และประยุกต์ใช้หลักขณะการหมุนในแต่ละโหมดการขับ (Full Step, Half Step, Micro step)

### สมมติฐาน

1. หากเปลี่ยนโหมดการขับเคลื่อนของ Stepper Motor จาก Full Step ไปเป็น Half Step และ Micro step ตามลำดับ จะทำให้การหมุนมีความเรียบขึ้น ความเร็วสูงสุดมากขึ้น แต่การสั่นสะเทือนลดลงและแรงบิดจะลดลง

### ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น:
  - โหมดการขับของ Stepper Motor (Full Step, Half Step, Micro step)
2. ตัวแปรตาม:
  - ความเร็วของมอเตอร์ (rpm)
  - ความเรียบของการหมุน
3. ตัวแปรควบคุม:
  - แรงดันจ่ายให้มอเตอร์ (12 V)
  - จำนวนสัญญาณ Frequency ที่ 1000 Hz
  - อุณหภูมิห้อง

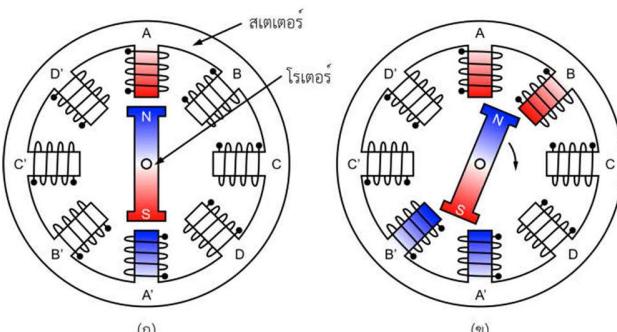
- การตั้งกระแสขับ (Current Limit จากแหล่งจ่ายไฟ)

## เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1. หลักการทำงานของ Stepper Motor

หลักการทำงานของสเต็ปปิงมอเตอร์คือ เราจะ จ่ายกระแสไฟฟ้า ให้แก่ชุดลวดที่ติดตั้งอยู่บน สเตเตอร์ (Stator) เพื่อให้สร้าง สนามแม่เหล็กออกมา ขณะที่ส่วนที่ หมุน หรือ โรเตอร์ (Rotor) จะมีแกนเป็น แม่เหล็กถาวร การจ่ายกระแสเข้าสู่ ชุดลวดจะ เหนี่ยวนำให้เกิดแรงดึงดูด จากสนามแม่เหล็ก ระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ ทำให้โรเตอร์หมุน เมื่อเราทำการ จ่ายกระแสให้กับชุดลวดแต่ละชุดอย่าง ต่อเนื่องตามลำดับ จะทำให้มอเตอร์หมุนได้อย่างต่อเนื่อง และหากเราต้องการให้ มอเตอร์หมุนไปตามจำนวน องศา หรือ จำนวนสเต็ป (Steps) ที่กำหนด ก็สามารถทำได้โดยการ ป้อนสัญญาณพัลส์ ผ่าน ชุดลวดตามจำนวนสเต็ปที่ต้องการ

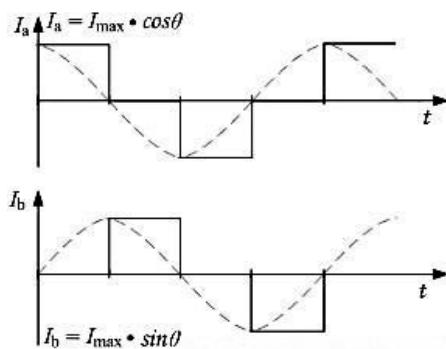
กรณีตัวอย่าง: รูปที่ 11 แสดงการทำงานของสเต็ปปิงมอเตอร์ โดยเมื่อ จ่ายกระแส ให้แก่ชุดลวดชุด A-A' ก็จะทำให้แกน หมุนถูก ยึดล็อก (Holding) อุปกรณ์ที่ติดตั้งนั้น อย่างมั่นคง ทำให้ ไม่เคลื่อนที่ เมื่อเริ่มกระทำจากภายนอก



ภาพที่ 11 การทำงานของสเต็ปปิงมอเตอร์ (g) ขณะล็อกให้หยุดนิ่ง และ (x) ขณะกำลังหมุนไปครึ่งสเต็ป

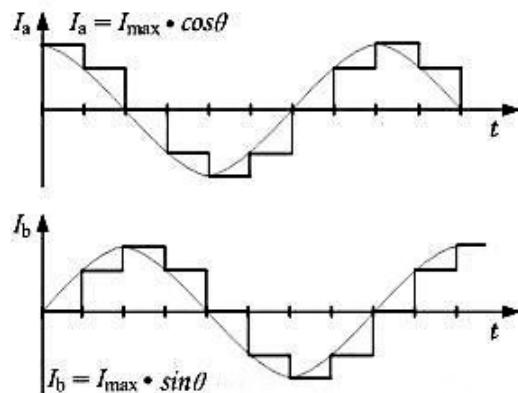
### 2. พื้นฐานความรู้เรื่องหมุดการขับของ Stepper Driver

Full Stepping คือโหมดการทำงานพื้นฐานที่ให้แรงบิดสูงสุด หลักการคือการจ่ายกระแสเต็มที่ไปยัง ชุดลวดสองชุด พร้อมกัน (Two-Phase On) หรือ ชุดลวดชุดเดียว (One-Phase On) ลักษณะเป็นไปตามลำดับในการนี้ที่นิยมใช้ คือ Two-Phase On ไดเรอร์จะจ่ายกระแสให้ชุดลวดทั้งสอง (เช่น ชุดลวด A และ B) ตลอดเวลา และจะเปลี่ยนขั้วการจ่ายกระแส ตามลำดับ (Sequence) เพื่อให้สนามแม่เหล็กของสเตเตอร์เปลี่ยนทิศทางไป 90 องศาทางไฟฟ้าในแต่ละสเต็ป การเปลี่ยน ทิศทางนี้จะดึงดูดให้โรเตอร์หมุนไปตาม มุมสเต็ปพื้นฐาน (Base Step Angle) ที่กำหนดของมอเตอร์ (เช่น 1.8 องศาต่อส เต็ป) เนื่องจากการเปลี่ยนตำแหน่งเป็นการ กระโดดๆ ขนาดใหญ่และรวดเร็ว ทำให้มอเตอร์เกิดการสั่นสะเทือนและเสียง รบกวนได้ง่าย โดยเฉพาะที่ความเร็วต่ำ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากชุดลวดรับกระแสเต็มที่ ทำให้หมุดนี้มี แรงบิดยึดล็อก (Holding Torque) และ แรงบิดวิ่ง (Running Torque) ที่สูงที่สุด



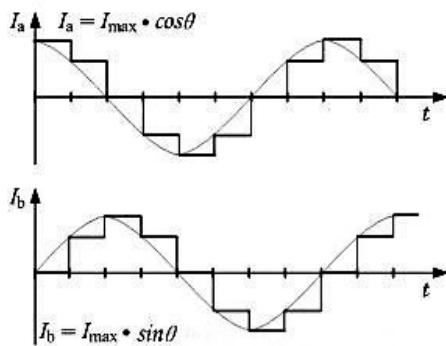
ภาพที่ 12 การควบคุมมอเตอร์ด้วย H-bridge แบบ Lock anti-phase drive

Half Stepping หลักการคือการเพิ่มสเต็ปการหมุนให้มีจำนวนเป็นสองเท่า ของ Full Stepping (เช่น จาก 1.8 องศาเป็น 0.9 องศาต่อสเต็ป) โดยใช้ลำดับการจ่ายกระแสแบบผสม สลับกันระหว่างการจ่ายกระแสเต็มที่ให้ ขาด漉อดชุดเดียว และการจ่ายกระแสเต็มที่ให้ ขาด漉อดสองชุดลำดับการทำงานจะสลับกันดังนี้ (ขาด漉อด A On) -> (ขาด漉อด A และ B On) -> (ขาด漉อด B On) -> (ขาด漉อด B และ A' On) การจ่ายกระแสแบบสลับนี้ทำให้ rotor ถูกดึงดูดไปสู่ตำแหน่งที่อยู่กึ่งกลางระหว่างตำแหน่ง Full Step ทั้งสอง ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ที่ละเอียดขึ้น การเคลื่อนที่แบบ Half Stepping จะมีความ ราบรื่นกว่า Full Stepping และลดเสียงรบกวนได้ในระดับหนึ่ง แต่เนื่องจากในบางสเต็ปมีการจ่ายกระแสเพียงขาด漉อดเดียว จึงส่งผลให้ แรงบิดสูงสุด ในสเต็ปเหล่านั้นลดลงเล็กน้อย



ภาพที่ 13 กราฟการจ่ายกระแสให้ Stepper Motor (Half Stepping Mode)

Microstepping เป็นโหมดที่ซับซ้อนที่สุดแต่ให้ ความแม่นยำและความราบรื่นสูงสุด หลักการคือการ แบ่งมุมสเต็ปพื้นฐาน ออกเป็นส่วนย่อย ๆ เล็ก ๆ ตั้งแต่ 4 เท่าไปจนถึงหลายร้อยเท่า (เช่น 1/16, 1/32 ของ Full Step) ไดเรเวอร์ Microstepping จะไม่จ่ายกระแสแบบเปิด-ปิด (On-Off) เมื่อносูงโหมดแรก แต่จะควบคุมกระแสที่ให้ผลผ่านขาด漉อดทั้งสอง (A และ B) ให้แปรผันตาม คลื่นไซน์ (Sine Wave) และ คลื่นโคไซน์ (Cosine Wave) ที่มีความต่างเฟสกัน 90 องศา การควบคุมกระแสอย่างละเอียดนี้ทำให้ สนามแม่เหล็กสุทธิ (Resultant Magnetic Field) ของสเตเตอร์หมุนเปลี่ยนทิศทางไปอย่าง ต่อเนื่องและราบรื่น เหมือนเข็มนาฬิกา แทนที่จะเป็นการกระโดด

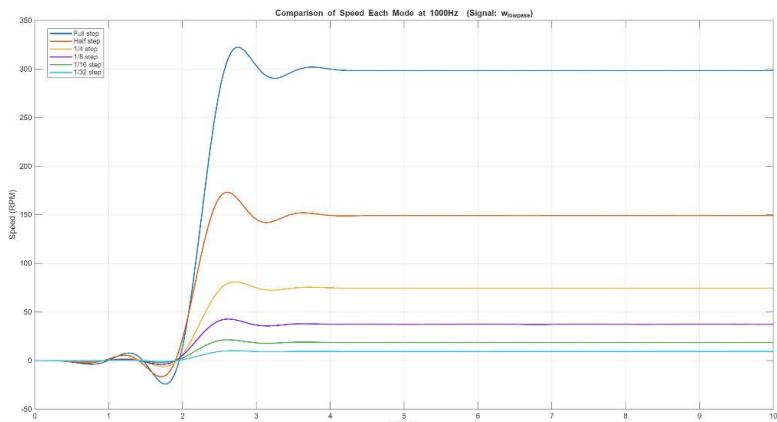


ภาพที่ 14 กราฟการจ่ายกระแสให้ Stepper Motor (Microstepping Mode)

### ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เทิ่อมบอร์ดเข้ากับโปรแกรม
2. เปลี่ยน Mode แต่ละ Mode และเก็บค่า ความเร็ว ว่าแต่ละ mode มีความเร็วต่างกันเท่าไหร่ทำการทดลอง 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยมา

### ผลการทดลอง



ภาพที่ 15 กราฟแสดงความเร็วเทียบกับเวลาของโหมดต่าง ๆ ที่ Frequency 1000Hz

จากการทดลองวัดความเร็วของ Stepper Motor ที่ความถี่สัญญาณ Input คงที่ 1000 Hz ในโหมด Full Step, Half Step, 1/4 Step, 1/8 Step, 1/16 Step และ 1/32 Step ได้ผลการทดลองดังกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว (RPM) และเวลา (Time) ซึ่งสรุปค่าความเร็วของที่สภาวะคงตัว ดังนี้

1. **Full Step:** ความเร็วของคงที่ประมาณ 300 RPM

- ลักษณะการเคลื่อนที่: ในช่วงเริ่มต้น มีการแกว่งตัวสูงที่สุดเมื่อเทียบกับโหมดอื่น ก่อนจะเข้าสู่สภาวะคงตัว

2. **Half Step:** ความเร็วของคงที่ประมาณ 150 RPM

- ลักษณะการเคลื่อนที่: ความเร็วลดลงเป็นครึ่งหนึ่งของ Full Step การแกว่งตัวลดลงเล็กน้อย

3. **1/4 Step:** ความเร็วรอบคงที่ประมาณ 75 RPM
4. **1/8 Step:** ความเร็วรอบคงที่ประมาณ 37.5 RPM
5. **1/16 Step:** ความเร็วรอบคงที่ประมาณ 18.75 RPM
6. **1/32 Step:** ความเร็วรอบคงที่ต่ำที่สุด ประมาณ 9.375 RPM
  - ลักษณะการเคลื่อนที่: กราฟมีความเรียบมากที่สุด แบบไม่มีการแกว่งตัวในช่วงเริ่มต้น

### สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่า ที่ความถี่สัญญาณอินพุต (Input Frequency) เท่ากันที่ 1000 Hz โหมดการขับแบบ Full Step ให้ความเร็วรอบมอเตอร์สูงที่สุด (300 RPM) รองลงมาคือ Half Step และ Micro step ตามลำดับ โดยความเร็วรอบจะลดลงเป็นสัดส่วนผกผันกับความละเอียดของ Micro step (ยิ่งความละเอียดสูง ความเร็วยิ่งลดลง)

นอกจากนี้ ยังพบว่าโหมด Micro step (เช่น 1/16, 1/32 step) ช่วยลดการสั่นสะเทือนและการแกว่งตัวของมอเตอร์ ในช่วงออกตัวได้อย่างชัดเจน ทำให้การเคลื่อนที่มีความราบรื่นมากกว่าโหมด Full Step อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีเรื่องความละเอียดของมุมสเต็ป

### อภิรายผล

ผลการทดลองที่ความถี่คงที่ 1000 Hz แสดงให้เห็นว่าความเร็วรอบแปรผกผันกับความละเอียดของ Micro step โดยโหมด Full Step มีความเร็วสูงสุด (300 RPM) และลดลงเมื่อความละเอียดเพิ่มขึ้นตามหลักการคำนวณจำนวนพัลส์ต่อรอบ ด้านเสียงภาพพบว่า Micro step ช่วยลดการแกว่งตัว และแรงสั่นสะเทือนในช่วงออกตัวได้อย่างชัดเจน ทำให้การหมุนราบเรียบกว่า Full Step อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งผลลัพธ์นี้ สอดคล้องกับสมมติฐานเรื่องความเรียบของการหมุน แต่ ข้อเสีย คือความเร็วสูงสุด เนื่องจากการทดลองควบคุมความถี่ให้คงที่ ทำให้ความเร็วลดลงตามสัดส่วนการแบ่งสเต็ป ไม่ได้เพิ่มขึ้นตามที่คาดการณ์ไว้ในสมมติฐานแรก

### ข้อเสนอแนะ

- ให้ปรับความถี่ให้ได้ Output RPM เท่ากันแล้วเบรียบเทียบความเรียบและแรงบิด
- เพิ่มการวัดแรงบิด เพื่อประเมินผลของ Microstepping ต่อกำลังมอเตอร์

### อ้างอิง

- <https://suwitkiravittaya.eng.chula.ac.th/B2i2019BookWeb/pdf/stepmotor.pdf>
- [Case Studies: What is the difference between full-stepping, the half-stepping, and the micro-drive?](#)

## การทดลองที่ 2 ความถี่พัลส์และอัตราการเร่งต่อความเร็วและการเกิด Loss Step

### จุดประสงค์

- เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณ STEP กับความเร็วของมอเตอร์
- เพื่อศึกษาผลของการเร่งความเร็ว และหาจุดวิกฤตที่ทำให้เกิดการสูญเสียตำแหน่ง (Loss Step) ในโหมดการขับต่าง ๆ

### สมมติฐาน

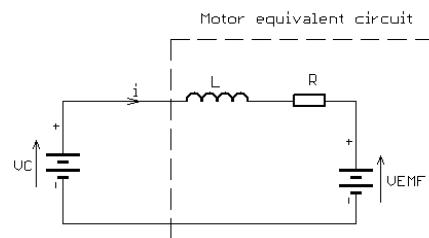
เมื่อทำการเร่งความถี่ของสัญญาณ STEP (Acceleration) ความเร็วของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตามความถี่ที่ป้อน แต่เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่ง แรงบิดของมอเตอร์จะลดลงจนไม่สามารถอาชานะโหลดได้ ส่งผลให้เกิดภาวะ Loss Step (มอเตอร์หยุดหมุนหรือหมุนไม่เป็นสิ่ง) โดยโหมดการขับที่ละเอียดขึ้น อาจมีผลต่อเสียงรบกวนและความเร็วสูงสุดที่ทำได้

### ตัวแปร

- ตัวแปรต้น:
  - ความถี่ของสัญญาณ STEP (250 Hz) ที่เพิ่มขึ้นตามเวลา
  - โหมดการขับ (Full, Half, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32 Step)
- ตัวแปรตาม:
  - ความเร็วรอบของมอเตอร์ (RPM)
  - จุดที่เกิดการ Loss Step (ความเร็วสูงสุดก่อนหยุดหมุน)
- ตัวแปรควบคุม:
  - แรงดันจ่าย (12 V)
  - อัตราการเร่งความถี่ (Acceleration Rate): 250 Hz/s
  - โหลดคงที่
  - อุณหภูมิห้อง
  - ทิศหมุน

## เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1. ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณ Pulse และกระแส



ภาพที่ 16 วงจรเทียบเท่ามอเตอร์กระแสตรงแบบแบ่งถ่านพื้นฐาน

จากภาพวงจร DC Motor จะสามารถอธิบายได้ว่า วงจร  $RL$  อนุกรมจะมีค่าคงตัวเวลา (Time Constant) เสมอ ซึ่งกำหนดด้วยสมการ

$$\tau = \frac{L}{R}$$

ค่าคงตัวเวลาเป็นช่วงเวลาที่แรงดันหรือกระแสในวงจรเปลี่ยนแปลงจนถึงสัดส่วน  $\frac{1}{e}$  ของค่าปลายทาง (Final Value) สำหรับแรงดันที่ตัวหนี้ยวนำ  $V_L$  ซึ่งจะลดลงสู่  $0 \text{ V}$  เมื่อเวลาผ่านพอดีคงตัวเวลา  $\tau$  คือเวลาที่  $V_L$  ลดลงจนเหลือเพียง

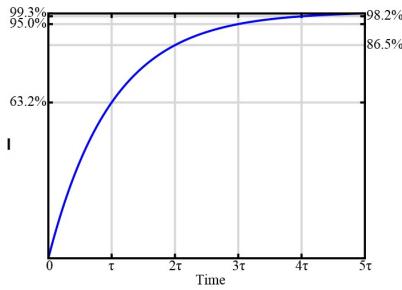
$$V_L = V \left( \frac{1}{e} \right)$$

ในทางกลับกัน แรงดันที่ตัวต้านทาน  $V_R$  จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนเข้าใกล้แรงดันอินพุต  $V$  ดังนั้น  $\tau$  คือเวลาที่  $V_R$  เพิ่มขึ้นถึง

$$V_R = V \left( 1 - \frac{1}{e} \right)$$

สาเหตุที่แรงดันกระแสเปลี่ยนแปลงไม่ทันทีเมื่อมีแรงดันมาป้อน เกิดจากตัวหนี้ยวนำ ( $L$ ) ที่สร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นกลับ (Back EMF) เพื่อต้านการเปลี่ยนแปลงของกระแส ส่งผลให้กระแสและแรงดันในวงจรเปลี่ยนแปลงได้มีรูวากันกว่าค่าคงตัวเวลา  $\tau$  ของวงจร

ดังนั้น เมื่อเปิดแหล่งจ่าย กระแสจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างเป็นอีกซูเปอร์เอนเซย์ล และต้องใช้เวลา  $5\tau$  จึงจะเข้าใกล้ค่าสภาวะคงที่ เพื่อให้แน่ใจว่ากระแสเมื่อเวลามากพอที่จะให้ลงใกล้ค่าสภาวะคงที่ในแต่ละพัลส์ ซึ่งเป็นเงื่อนไขสำคัญสำหรับการควบคุมให้มีความเสถียรและเชิงเส้น



ภาพที่ 17 การใช้เวลา  $5\tau$  ในการเข้าสู่ภาวะคงที่ของกระแส

## 2. หลักการของ Loss Step

เกิดเมื่อมอเตอร์สตีปไม่สามารถสร้างแรงบิดได้มากพอให้รоторตามตำแหน่งที่กำหนด ทำให้ก้าวการหมุนหายไปหนึ่งหรือหลายสตีป มักเกิดจากความถี่สตีปสูงเกินไป โหลดมากเกิน หรืออัตราเร่งเร็วเกินจนรоторตามไม่ทัน สนามแม่เหล็ก

### ขั้นตอนการดำเนินงาน

#### 1. การเตรียมการ

- ต่อวงจรขับ Stepper Motor เข้ากับบอร์ดทดลองและ Encoder สำหรับวัดความเร็ว
- ตั้งค่าแหล่งจ่ายไฟมอเตอร์ที่ 12 V

#### 2. การตั้งค่าโปรแกรม

- กำหนดค่า Acceleration ในโปรแกรมควบคุมไว้ที่ 250 Hz/s (เพิ่มความถี่ 250 Hz ทุกๆ 1 วินาที)
- ตั้งค่าความถี่เริ่มต้นที่ 0 Hz และให้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกว่ามอเตอร์จะหยุดหมุน

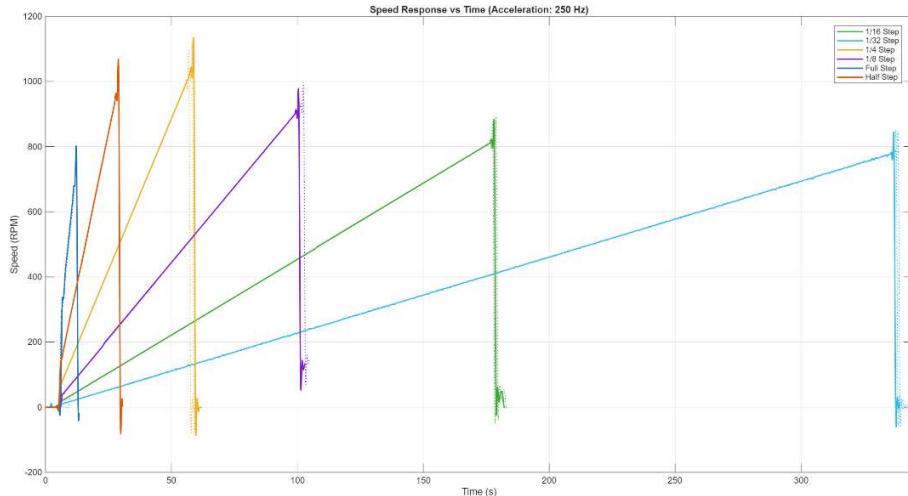
#### 3. การทดลอง (ทำขั้นในแต่ละโหมด)

- เริ่มที่โหมด Full Step สั่งให้มอเตอร์หมุนด้วยอัตราเร่งที่กำหนด บันทึกค่าความเร็วรอบ (RPM) เทียบกับเวลา
- สังเกตจุดที่กราฟความเร็วตกลงสู่ศูนย์ทันที (Loss Step Point) บันทึกค่าความเร็วสูงสุดที่ทำได้
- เปลี่ยนโหมดการขับเป็น Half Step, 1/4, 1/8, 1/16, และ 1/32 Step ตามลำดับ และทำการทดลองซ้ำ

#### 4. การเก็บข้อมูล

- นำข้อมูลความเร็วเทียบกับเวลาของทุกโหมดมาplotกราฟรวมกันเพื่อเปรียบเทียบ

## ผลการทดลอง



ภาพที่ 18 กราฟแสดงการตอบสนองความเร็ว (Speed Response) เทียบกับเวลา ที่อัตราเร่ง 250 Hz/s ในโหมดต่าง ๆ สรุปผลการทดลอง

โmodeการขับ (Step Mode)	ความเร็วสูงสุดโดยประมาณ (Max RPM)	ลักษณะกราฟ
Full Step	~800 RPM	ความชันสูง, เกิด Loss Step เร็ว
Half Step	~1,060 RPM	ความชันสูง, ความเร็วสูงสุดสูงกว่า Full Step
1/4 Step	~1,120 RPM	ความชันปานกลาง, ให้ความเร็วสูงสุดมากที่สุด
1/8 Step	~980 RPM	ความชันเริ่มลดลง
1/16 Step	~820 RPM	ความชันต่ำ, ใช้เวลานานกว่าจะถึงจุด Loss Step
1/32 Step	~780 RPM	ความชันต่ำมาก, ใช้เวลานานที่สุด และความเร็วสูงสุดต่ำสุด

จากการทดลองพบว่า อัตราเร่งและความถี่พัลส์มีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเกิด Loss Step โดยเมื่อเร่งความถี่ขึ้นไปเรื่อยๆ มอเตอร์จะหมุนเร็วขึ้นจนถึง จุดวิกฤต (Cut-off frequency) ที่แรงบิดไม่เพียงพอ ทำให้เกิดการ Loss Step (ความเร็วตกเป็น 0) ทันที

- โหมด 1/4 Step ให้ผลลัพธ์ความเร็วสูงสุด (Top Speed) ได้ดีที่สุดในการทดลองนี้ (ประมาณ 1,120 RPM)
- โหมด Full Step เกิด Loss Step ที่ความเร็วต่ำกว่า (ประมาณ 800 RPM) เนื่องจากปัญหาการสั่นพ้อง (Resonance)

- โหมด Microstepping ความละเอียดสูง (1/16, 1/32) มีอัตราการเพิ่มของความเร็ว (Slope of RPM) ช้ากว่ามากเนื่องจากตัวแปรควบคุมคืออัตราเร่งของ ความถี่ (Hz) ไม่ใช่ความเร็วรอบ (RPM) และมีจุด Loss Step ที่ความเร็วรอบต่ำกว่าโหมด 1/4 Step เนื่องมาจากการข้อจำกัดด้านแบบวิดท์ความถี่ของระบบหรือแรงบิดที่ลดลงที่ความถี่สูงมากๆ

## อภิรายผล

ผลของโหมดการขับต่อความเร็วสูงสุด: จากการกราฟจะเห็นว่า Half Step และ 1/4 Step สามารถทำความเร็วรอบได้สูงกว่า Full Step ก่อนที่จะเกิด Loss Step สาเหตุหลักน่าจะมาจาก ความราบเรียบในการหมุน (Smoothness) ที่ดีกว่า ทำให้ลดแรงสั่นสะเทือน (Vibration/Resonance) ที่มักเกิดขึ้นรุนแรงในโหมด Full Step ซึ่งการสั่นนี้เป็นตัวการสำคัญที่ทำให้มอเตอร์หลุดสเต็ปที่ความเร็วปานกลาง

## ข้อเสนอแนะ

-

## อ้างอิง

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

### 3. Brushless DC Motor

การทดลองที่ 1 ศึกษาหลักการทำงานของ Brushless DC Motor

#### จุดประสงค์

- ศึกษาหลักการของสัญญาณ 3 Phase ในการขับเคลื่อน Motor
- ศึกษาเกี่ยวกับการหลักการและความแตกต่างระหว่างการใช้ Hall Effect Sensor และ Back EMF Sensing
- ศึกษาหลักการของการขับเคลื่อนแบบ 6-Step และการควบคุมแบบ FOC
- เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะของสัญญาณ BEMF แบบ Trapezoidal
- ศึกษาการเกิด Phase Shift และทิศทางการหมุนของ Motor ระหว่างสัญญาณแต่ละ Phase ของ BEMF
- เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณและความเร็วของ Motor

#### สมมติฐาน

- ลักษณะของสัญญาณจะมีลักษณะคล้ายกับรูปสี่เหลี่ยมคงที่ และ Phase Shift ของแต่ละเฟส (U, V, W) จะมี มุมต่างเฟส (Phase Shift) ห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้าอย่างคงที่
- ความสัมพันธ์ของทิศทางการหมุนของ Motor ขึ้นอยู่กับลำดับการป้อนเฟส
- ความถี่ของสัญญาณ BEMF จะแปรผันตรงกับความเร็วรอบของ Motor
- การใช้ Hall Effect Sensor จะสามารถระบุตำแหน่ง Rotor ได้ทันทีแม้ในขณะหยุดนิ่งหรือความเร็วต่ำ ในขณะที่ การใช้ Back EMF Sensing จะต้องอาศัยความเร็วรอบระดับหนึ่งจึงจะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำที่เพียงพอต่อการ ตรวจจับ

#### ตัวแปร

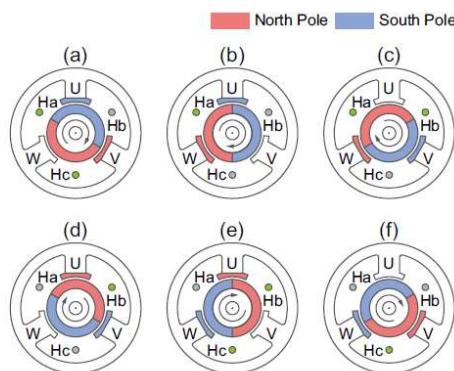
- ตัวแปรต้น:
  - ความเร็วรอบที่สั่งผ่านโปรแกรม Motor Pilot (Reference Speed หรือ Measured Speed จากโปรแกรม) หน่วยเป็น RPM
- ตัวแปรตาม:
  - ค่าตอบเวลาของสัญญาณ BEMF ที่ได้จากการ Oscilloscope หน่วยเป็น millisecond (ms)
- ตัวแปรควบคุม:
  - แรงดันไฟเลี้ยง (Supply Voltage) 12V/24V
  - โหลดของมอเตอร์ปล่อยฟรี
  - Scale บน Oscilloscope

## เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1. หลักการทำงานสัญญาณ 3-Phase ของ Brushless DC Motor

Brushless DC Motor เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้แม่เหล็กการติดตั้งอยู่บนส่วนของ Rotor และมีขดลวดตัวนำไฟฟ้าพันอยู่บนแกนเหล็กของ Stator ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ส่งผลให้มอเตอร์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูง สูญเสียพลังงานต่ำ และต้องการการบำรุงรักษาอย่างน้อย

โดยที่ Stator ของมอเตอร์ BLDC จะประกอบด้วยขดลวดไฟฟ้า 3 ชุด ได้แก่ เฟส U, V และ W ซึ่งถูกจัดวางให้ทำมุมเหลี่อมกัน 120 องศาทางไฟฟ้า เมื่อระบบควบคุมจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขดลวดในแต่ละเฟสตามลำดับ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุน (Rotating Magnetic Field) ภายใน Stator สนามแม่เหล็กดังกล่าวจะดึงดูดและผลักดันแม่เหล็กทราบบน Rotor ให้หมุนตามทิศทางของสนามแม่เหล็ก ส่งผลให้เกิดการหมุนของมอเตอร์อย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 19 3-Phase ของ Brushless DC Motor

### 2. วิธีการควบคุมและขั้บเคลื่อนมอเตอร์ Brushless DC Motor

วิธีการขับมอเตอร์ BLDC ที่นิยมใช้งานสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลัก ได้แก่ แบบ 6-Step และแบบ Field Oriented Control (FOC)

#### 2.1. การขับมอเตอร์แบบ 6-Step (Trapezoidal Control)

การขับแบบ 6-Step เป็นวิธีที่ไม่ต่อตัวกัน ใช้เวลาจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเพียง 2 เฟสจากทั้งหมด 3 เฟส ส่วนอีก 1 เฟสจะถูกปล่อยให้อยู่ในสถานะโลຍ การสลับการจ่ายไฟจะเกิดขึ้นทั้งหมด 6 ครั้งต่อหนึ่งรอบทางไฟฟ้า โดยแต่ละครั้งจะหมุนเวกเตอร์สนามแม่เหล็กไปทีละ 60 องศาทางไฟฟ้า การขับแบบ 6-Step เป็นวิธีที่ไม่ต่อตัวกัน ใช้เวลาจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเพียง 2 เฟสจากทั้งหมด 3 เฟส

#### 2.2. การขับมอเตอร์แบบ Field Oriented Control (FOC)

Field Oriented Control (FOC) เป็นวิธีการขับมอเตอร์แบบควบคุมเวกเตอร์ โดยใช้การแปลงคณิตศาสตร์แบบ Clarke และ Park เพื่อแยกกระแสออกเป็นแกน d สำหรับควบคุมสนามแม่เหล็ก และแกน q สำหรับควบคุมแรงบิด

### 3. การตรวจจับตำแหน่ง Rotor (Rotor Position Detection)

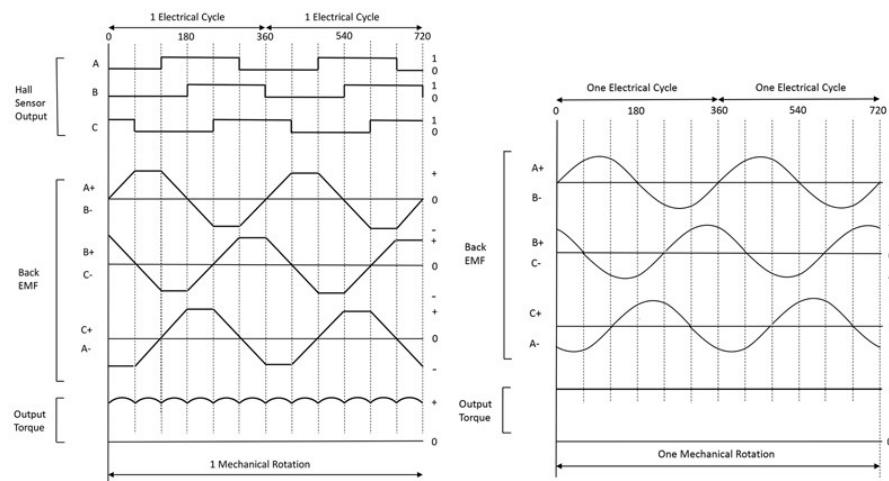
การควบคุมการทำงานของมอเตอร์ BLDC จำเป็นต้องทราบตำแหน่งเชิงมุมของ Rotor อย่างถูกต้อง เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการสั่งการจ่ายกระแสให้กับชุดลวด Stator วิธีการตรวจจับตำแหน่ง Rotor สามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลัก ได้แก่ การใช้ Hall Effect Sensor และการใช้ Back EMF Sensing

#### 3.1. การตรวจจับด้วย Hall Effect Sensor

Hall Effect Sensor เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่ติดตั้งอยู่ภายในมอเตอร์ BLDC มีหน้าที่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กการที่อยู่บน Rotor เมื่อ Rotor หมุนผ่านตำแหน่งต่าง ๆ สัญญาณดิจิทัลจาก Hall Sensor จะถูกส่งกลับไปยังชุดควบคุมเพื่อนำไปใช้ระบุตำแหน่งของ Rotor โดยตรง

#### 3.2. การตรวจจับด้วย Back EMF Sensing

Back EMF Sensing เป็นการตรวจจับตำแหน่ง Rotor แบบไม่ใช้เซนเซอร์ (Sensor less Control) โดยอาศัยแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (Back Electromotive Force) ที่เกิดขึ้นในชุดลวดของเฟสที่ถูกปล่อยลอย เมื่อ Rotor หมุนผ่านชุดลวด จะเกิดแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากกฎของฟาราเดีย



ภาพที่ 20 BLDC motor six-step trapezoidal compared with sinusoidal drive waveforms

#### 4. ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณและความเร็วของมอเตอร์

ในการควบคุมแบบ 6-Step Sensor less ความเร็วของมอเตอร์มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความถี่ของการสลับเฟส (Commutation Frequency) ซึ่งวัดได้จากสัญญาณ Back EMF บนอสซิลโลสโคป โดยมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (Linear Relationship) โดยใช้สมการ

$$N = \frac{120 \times f_{elec}}{P}$$

โดยที่:

$N$  คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ (Revolutions Per Minute: RPM)

$f_{elec}$  คือ ความถี่ของสัญญาณ Back EMF ที่วัดได้จากอสซิลโลสโคป (Hz)

$P$  คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก (Magnetic Poles) ของมอเตอร์

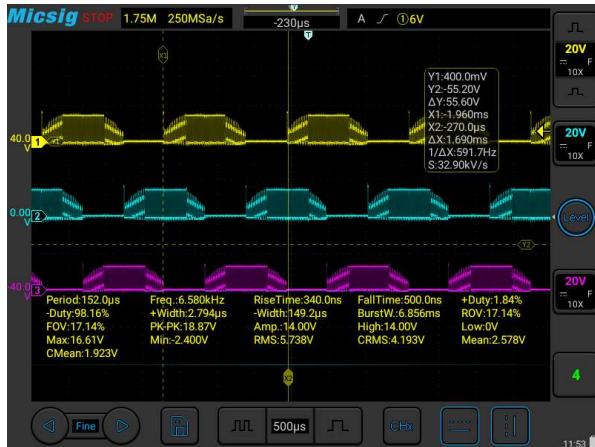
120 คือ ค่าคงที่สำหรับการแปลงหน่วย (มาจาก 60 วินาที  $\times$  2 ของคุณแม่เหล็ก)

#### ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เชื่อมบอร์ดเข้ากับโปรแกรม Motor Pilot และ ตั้งค่าบอร์ดเชื่อต่อ กับ Oscilloscope นำสาย Probe ของ Oscilloscope ต่อเข้ากับจุดวัดสัญญาณ Phase 1, 2, 3 บนบอร์ดทดลอง และต่อสาย Ground (GND)
2. ที่โปรแกรม Motor Pilot ให้รับ Speed Reference (ตัวแปรต้น) โดยเริ่มจากความเร็วต่ำ เช่น 492 RPM
3. กดปุ่ม Start หรือ Execute Speed Ramp เพื่อให้มอเตอร์หมุนจนถึงความเร็วที่ตั้งไว้
4. ที่เครื่อง Micsig Oscilloscope กดปุ่ม Channel Selection และ Scaling เพื่อปรับขนาดกราฟให้เห็นรูปคลื่น BEMF
5. กดปุ่ม Run-Stop เพื่อให้สัญญาณภาพหยุดนิ่งเพื่อย่อจ่ายต่อการวัด
6. ใช้พังก์ชัน Vertical Cursor เลื่อนเส้น Cursor ไปวัดระยะเวลาของ 1 คาบการทางไฟฟ้า (1 Electrical Cycle) ของสัญญาณ Phase ใด Phase หนึ่ง
7. Screen Shot บน Oscilloscope เพื่ออ่านค่า Delta X ( $\Delta X$ ) หรือ Period ที่แสดงบนหน้าจอ (หน่วยเป็น ms) บันทึกค่านี้ลงตารางบันทึกผล
8. นำค่า Period ( $\Delta X$ ) ที่วัดได้ มาคำนวณหาความเร็วรอบ
9. นำค่าที่คำนวณมาเปรียบเทียบกับ Speed Reference เพื่อดูความสัมพันธ์ว่าเป็นเส้นตรงตามทฤษฎี

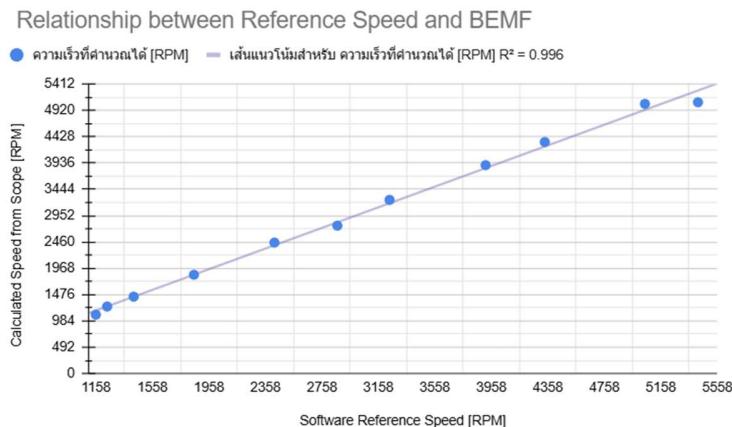
## ผลการทดลอง

จากการทดลองความคุณภาพของ BLDC แบบ 6-Step Commutation และวัดสัญญาณ Back EMF ด้วย Oscilloscope ได้ดังนี้:



ภาพที่ 21 ลักษณะสัญญาณ Back EMF ที่วัดได้จาก Oscilloscope

จากการทดลองได้ตารางความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของมอเตอร์ [RPM] แกน X: ความเร็วของมอเตอร์ [Software RPM] [หน่วย RPM] แกน Y: ความเร็วที่คำนวณได้จาก Scope (Calculated RPM) [หน่วย RPM]



ภาพที่ 22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของมอเตอร์จากโปรแกรมและความเร็วที่คำนวณได้

## สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองข้างต้นสามารถสรุปผลได้ว่า

- ลักษณะสัญญาณที่วัดได้จากทั้ง 3 เฟส มีการเลื่อนเฟส (Phase Shift) ห่างกันเพียง 120 องศาตามลำดับ ซึ่งใช้ระบบพิเศษการหมุนได้ และหน้าตาของคลื่นเป็นรูปสี่เหลี่ยมคงที่ (Trapezoidal)

2. สามารถหาความเร็วของมอเตอร์ได้จริงจากการวัด "ค่าเวลา" (Period) ของสัญญาณ BEMF ซึ่งค่าที่คำนวณได้มีความแม่นยำสูงมาก เมื่อเทียบกับค่าที่อ่านได้จากโปรแกรม (Software RPM) โดยมีความคลาดเคลื่อน (Error) ต่ำ ส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0.1% - 1.5% เท่านั้น

3. กราฟระหว่างความเร็วของมอเตอร์ที่สั่ง และความเร็วที่คำนวณได้ เป็นเส้นตรงโดยที่  $R^2 \approx 0.996$  ยืนยันว่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าแปรผันตรงกับความเร็วการหมุนของมอเตอร์

## อภิรายผล

1. กราฟความสัมพันธ์ที่ได้เป็นเส้นตรง (ค่า  $R^2$  เกือบท่ากับ 1) แสดงว่าสมการที่ใช้คำนวณแสดงแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของมอเตอร์ แต่จะมี Error สูงขึ้นเล็กน้อยในช่วงความเร็วต่ำและสูงมากๆ เพราะ ส่วนที่ความเร็วสูง ค่าเวลาจะสั้นมาก ทำให้การวางแผนเครื่องเซอร์วอร์ดค่าใน Oscilloscope สามารถคลาดเคลื่อนได้

2. ลำดับการ pragmatics ของลูกคอลินบนหน้าจอ Oscilloscope (เช่น สีเหลือง, สีฟ้า, สีม่วง) เป็นตัวบ่งชี้ทิศทางการหมุนของสนามแม่เหล็กมอเตอร์ทำให้มอเตอร์หมุนตามเข็ม หากต้องการกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ สามารถตั้ง RPM Reference ในทิศลับ ซึ่งจะทำให้ลำดับการเกิดสัญญาณบนหน้าจอเปลี่ยนไป และมอเตอร์หมุนวนเข็ม

3. ขอบสัญญาณมีลักษณะลาดเอียง เกิดจาก ค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) ภายในชุด漉ของมอเตอร์ ซึ่งมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงของกระแส ทำให้กระแสไฟไม่สามารถพุ่งขึ้นหรือลดลงได้ในทันทีทันใด

## ข้อเสนอแนะ

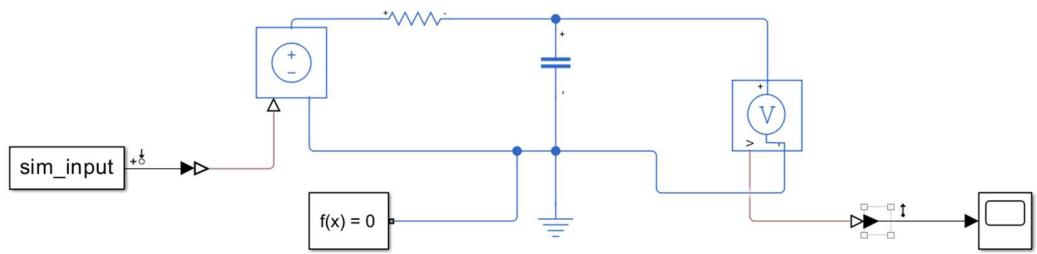
- ควรเพิ่มรอบในการเก็บค่ามากขึ้นเพื่อทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความแม่นยำมากขึ้น
- ใช้วงจร Low Pass Filter ในการทดลองครั้งหน้า เพื่อลดสัญญาณรบกวนจาก PWM ทำให้รูปคลื่นคมชัด
- ควรวาง Cursor ให้ใกล้เคียงมากที่สุด เนื่องจากความเร็วของสูง ค่าเวลาจะสั้นมาก การวาง Cursor คลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย จะส่งผลให้ค่าความเร็วของมอเตอร์ที่คำนวณได้

## อ้างอิง

- <https://www.powersystemsdesign.com/articles/field-oriented-control-of-brushless-dc-motors/30/19990>
- <https://blog.orientalmotor.com/technical-manual-series-brushless-motor-structure-and-rotation-principles>
- <https://howtomechatronics.com/how-it-works/how-brushless-motor-and-esc-work/>



ภาคผนวก ก  
DC MOTOR



ภาพที่ 23 วงจร RC Low-pass filter

ภาคผนวก ข  
STEPPER MOTOR

## ภาคผนวก C

### BRUSHLESS DC MOTOR

การทดลองป้อนความเร็วอ้างอิงทั้งในทิศทางบวกและลบ แสดงให้เห็นถึงการเลื่อนเฟส (Phase Shift) และค่าบ



การทดลองความสัมพันธ์ความเร็วและความถี่ของสัญญาณ

RPM REF	ความเร็วจากโปรแกรม Software RPM	ค่าเบลาจาก Scope [ms]	ความเร็วจากโปรแกรม Software RPM	ค่าเบลาจาก Scope [ms]	ความเร็วจากโปรแกรม Software RPM	ค่าเบลาจาก Scope [ms]	Avg Software RPM	Avg Scope [ms]	ความเร็วที่คำนวณได้ [RPM]	ERROR
492	1086	7.78	1212	7.78	1176	7.78	1158	7.78	1102	5.182
984	1224	6.84	1260	6.84	1230	6.84	1238	6.84	1253	1.236
1476	1404	5.96	1428	5.96	1446	5.96	1426	5.96	1438	0.866
1968	1804	4.64	1800	4.64	1954	4.64	1852.67	4.64	1847	0.298
2460	2342	3.5	2492	3.5	2434	3.5	2422.67	3.5	2449	1.124
2952	2910	3.1	2743	3.1	2952	3.1	2868.33	3.1	2765	3.552
3444	3360	2.64	3210	2.64	3144	2.64	3238	2.64	3247	0.261
3936	3828	2.2	4068	2.2	3858	2.2	3918	2.2	3896	0.572
4428	4380	1.98	4400	1.98	4232	1.98	4337.33	1.98	4329	0.190
4920	5034	1.7	5000	1.7	5105	1.7	5046.33	1.7	5042	0.086
5412	5450	1.69	5436	1.69	5380	1.69	5422.00	1.69	5072	6.425

ภาพที่ 24 ตารางการทดลองความสัมพันธ์ความเร็วและความถี่ของสัญญาณ