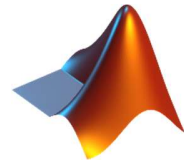


RMXplorer



++++++

LAB 1: Sensors

Name

- นาย คุณสนั่นท์ วาสุเทพรังสรรค์ 67340500004
- นาย ธราคิน ชอบทำกิจ 67340500021
- นาย ชีรภัทร แลเลิศ 67340500022
- นาย พุทธิพงษ์ 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

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

สมมติฐาน

1. Current Sensor แนวโน้ม เพิ่มขึ้นเป็น Linear
2. เมื่อ Calibration Current Sensor แล้วมีค่าเท่ากับค่าจริง
3. ความเร็วรอบ(rad/s)ที่เข้ามาเมื่อผ่าน Low-Pass Filter จะลดทอนสัญญาณรบกวนความถี่สูงได้ตามทฤษฎีของ RC Filter โดยมีอัตราการลดลงประมาณ -20 dB/decade หลัง Cut off frequency
4. เมื่อเพิ่มค่า PWM ความเร็วรอบของมอเตอร์จะสูงขึ้น และผล FFT จะปรากฏ frequency peak ที่สูงขึ้นตามความเร็วรอบ

ตัวแปรในการทดลอง

ตัวแปรต้น:

- กระแสที่ไหลผ่านมอเตอร์
- PWM ที่จ่ายให้มอเตอร์

ตัวแปรตาม:

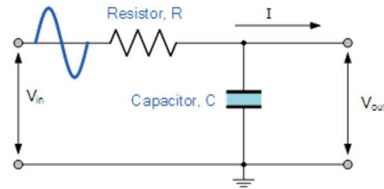
- ค่าแรงดันออกจาก Hall sensor
- ความเร็วรอบที่ได้ (rad/s)

ตัวแปรควบคุม:

- Sampling rate ของการเก็บข้อมูล
- ความถี่ของสัญญาณ PWM 2 kHz

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

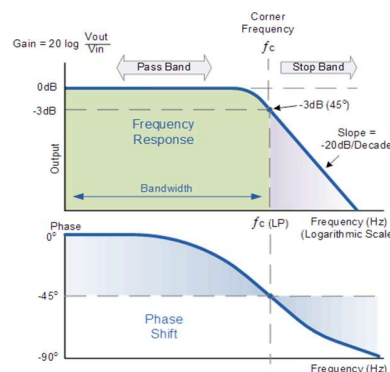
1. หลักการของวงจร RC Low-Pass Filter



ภาพที่ 1 วงจร RC Low-Pass Filter

วงจร RC Low-Pass Filter เป็นฟิลเตอร์ลำดับหนึ่งที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน (R) และตัวเก็บประจุ (C) ต่ออนุกรมกัน ทำหน้าที่ให้สัญญาณความถี่ต่ำผ่านได้ ขณะที่สัญญาณความถี่สูงถูกลดทอนลง เนื่องจากตัวเก็บประจุมีค่ารีแอกแตนซ์ลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ทำให้สัญญาณความถี่สูงไหลลงกราวด์แทนที่จะผ่านออกไปที่เอาต์พุต คำนวณได้จากสมการ $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$ โดยที่ความถี่นี้เป็นจุดที่สัญญาณเอาต์พุตลดลง -3 dB และเป็นพฤติกรรมเฉพาะของฟิลเตอร์ลำดับหนึ่ง

2. พฤติกรรมของวงจรในเชิงความถี่ Bode Plot



ภาพที่ 2 body plot

จาก Bode Plot ของวงจร RC Low-Pass Filter จะเห็นว่าในย่านความถี่ต่ำ สัญญาณสามารถผ่านได้เกือบทั้งหมด เนื่องจากค่าการลดทอน (magnitude) ใกล้ 0 dB เมื่อความถี่เพิ่มเข้าใกล้ความถี่ตัด ขนาดสัญญาณจะลดลงประมาณ -3 dB ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของฟิลเตอร์อันดับหนึ่ง หลังจากนั้น magnitude จะลดลงด้วยอัตรา -20 dB/decade ทำให้สัญญาณความถี่สูงถูกตัดทอนอย่างต่อเนื่องในส่วนของ phase พบว่าเริ่มต้นใกล้ 0° ที่ความถี่ต่ำ จากนั้นจะค่อย ๆ ลดลงจนถึงประมาณ -45° ที่ความถี่ตัด และเข้าใกล้ -90° ที่ความถี่สูงมาก พฤติกรรมนี้แสดงให้เห็นว่านอกจากฟิลเตอร์จะลดทอนความถี่สูงแล้ว ยังทำให้เกิดการหน่วงเวลา (phase lag) ต่อสัญญาณเอาต์พุต

3. หลักการของ Current Sensor แบบ Hall-effect

Current Sensor ประเภท Hall-effect ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า เมื่อกระแสไหลผ่านตัวนำ สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะถูกตรวจวัดโดย Hall element และแปลงเป็นแรงดัน Hall ซึ่งมีค่าแปรผันตรงกับขนาดกระแส ดังนั้นสัญญาณ Output จะมีความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear Response) ตามธรรมชาติของ Hall-effect Sensor

4. ความสัมพันธ์ PWM และ frequency peak

เมื่อเพิ่ม PWM แรงดันเฉลี่ยที่จ่ายให้มอเตอร์สูงขึ้น ส่งผลให้ความเร็วรอบเพิ่มขึ้นตามสมบัติของมอเตอร์กระแสตรง เมื่อความเร็วเชิงกลเพิ่มขึ้น ความถี่ของสัญญาณที่ตรวจวัดจากเซนเซอร์ก็เพิ่มขึ้นตาม ทำให้ผลการวิเคราะห์ FFT ปรากฏตำแหน่งของ frequency peak เคลื่อนไปยังค่าความถี่ที่สูงขึ้น พฤติกรรมนี้สอดคล้องกับความสัมพันธ์พื้นฐานระหว่างความเร็วเชิงกลและความถี่ของสัญญาณที่เกิดจากการหมุนของมอเตอร์

5. Linearization

การทำให้เป็นเชิงเส้น (Linearization) คือกระบวนการหาอนุพันธ์เชิงเส้นตามจุดทำงานของฟังก์ชันไม่เชิงเส้น โดยคำนวณความชัน (gradient) ของฟังก์ชันที่ไม่เชิงเส้นตามตัวแปรทั้งหมด แล้วนำมาสร้างเป็นแบบจำลองเชิงเส้น

6. FFT (Fast Fourier Transform)

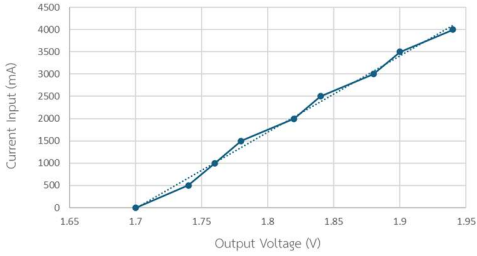
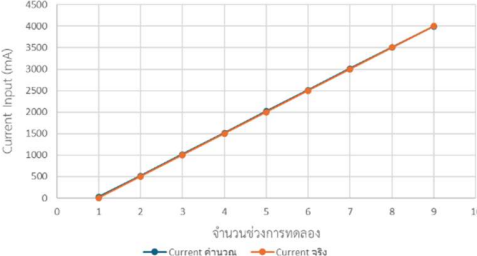
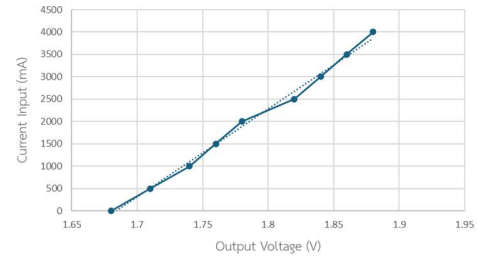
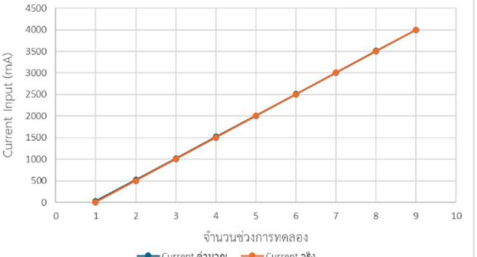
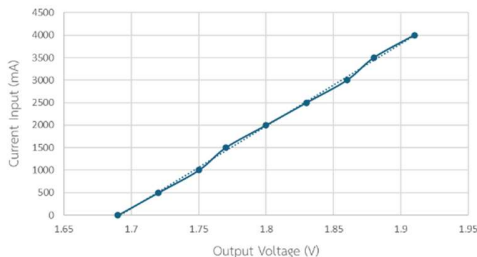
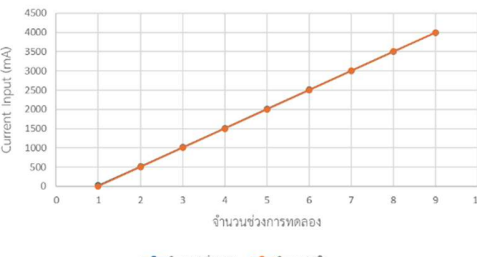
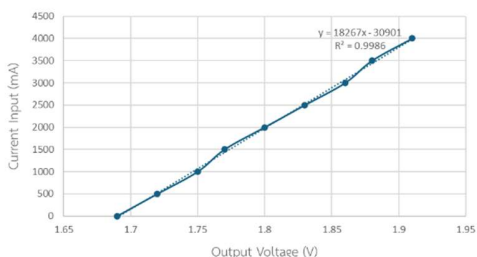
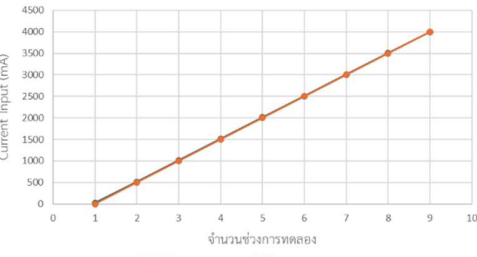
Fast Fourier Transform คือรูปแบบการคำนวณที่ได้รับการปรับให้มีประสิทธิภาพสูงของการแปลงฟูริเยร์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier Transform: DFT) ซึ่งใช้ในการแปลงสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่องจากโดเมนเวลาไปสู่โดเมนความถี่

ขั้นตอนการดำเนินงาน

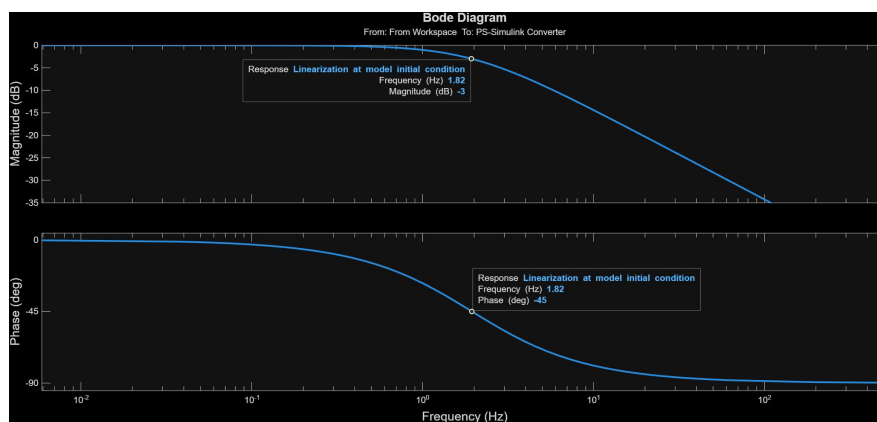
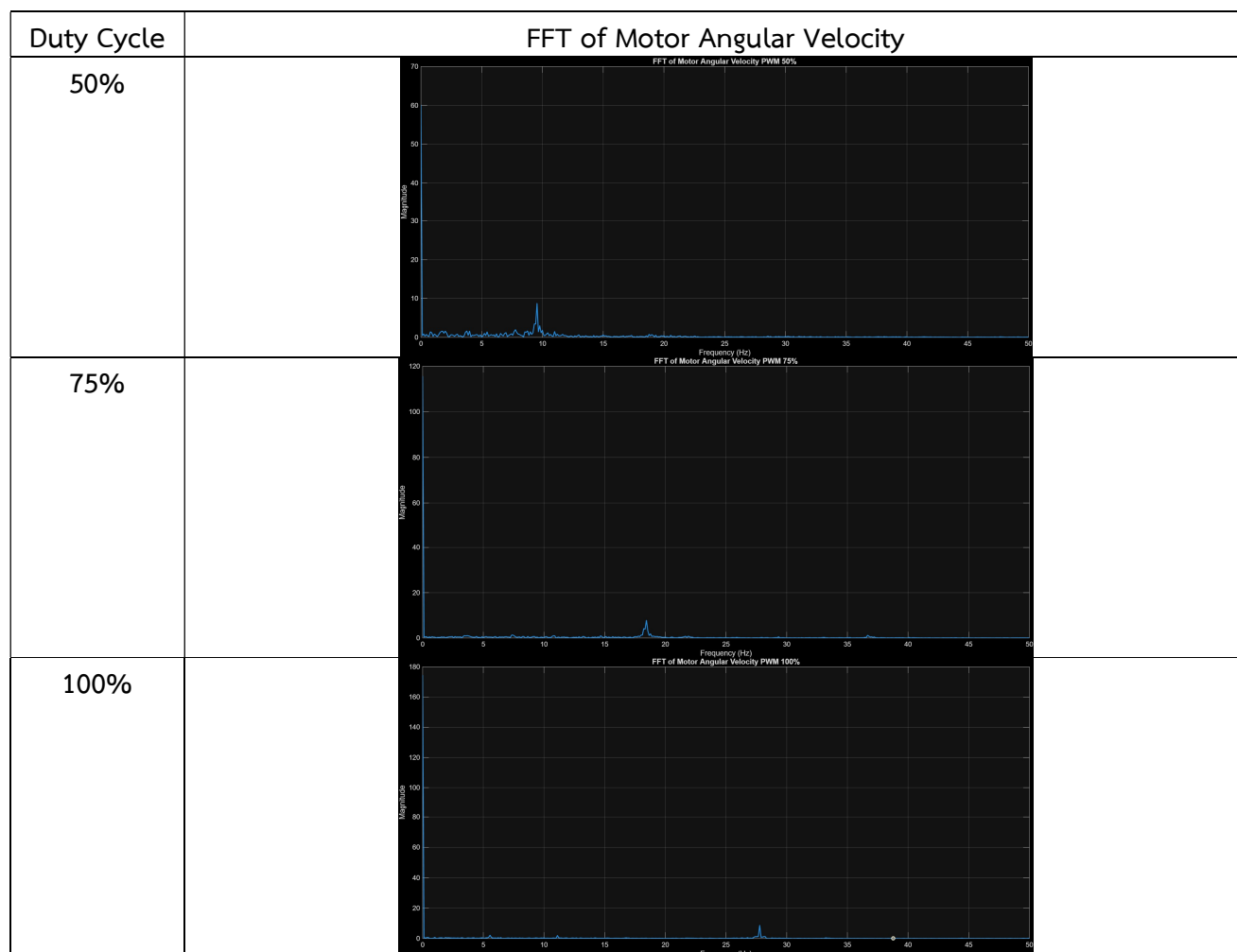
1. เชื่อมบอร์ดเข้ากับโปรแกรม และตั้งค่าบอร์ด
2. ทดสอบ Current Sensor โดยใช้ Power Supply จ่ายกระแสผ่านสายไฟที่ ลอดผ่านตัวเซนเซอร์ แล้ว Short Circuit เพื่อให้กระแสไหลสูงสุด จากนั้นปรับจูนค่ากระแสตั้งแต่ 0-4000mA และบันทึกแรงดันจาก ADC ทำ 3 ครั้ง หลังจากนั้นทำ Moving Average แล้วจึงนำค่าที่ได้ไปทำ Linearization
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 แล้ว Export Bode plot diagram เพื่อดูขนาดของสัญญาณที่ลดไป และ Phase ที่เปลี่ยนไป
6. เก็บข้อมูลแต่ละเซนเซอร์ 1000 sample points

ผลการทดลอง

จากการทดลองจะได้ตารางเปรียบเทียบระหว่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Output Voltage กับ Current Input และกราฟความสัมพันธ์ CurrentจริงเทียบกับCurrent ที่คำนวณได้ในแต่ละครั้งที่ทำการทดลองได้ดังตาราง ตาราง / ตารางแสดง ความสัมพันธ์ ระหว่างOutput Voltage กับ Current Input จริง กับที่คำนวณได้

| ครั้งที่ | Output Voltage กับ Current Input | CurrentจริงเทียบกับCurrentที่คำนวณได้ |
|-----------|---|---|
| ครั้งที่1 | <p>ความสัมพันธ์ระหว่าง Output Voltage และ Current Input</p>  | <p>CurrentจริงเทียบกับCurrentที่คำนวณได้</p>  |
| ครั้งที่2 | <p>ความสัมพันธ์ระหว่าง Output Voltage และ Current Input</p>  | <p>CurrentจริงเทียบกับCurrentที่คำนวณได้</p>  |
| ครั้งที่3 | <p>ความสัมพันธ์ระหว่าง Output Voltage และ Current Input</p>  | <p>CurrentจริงเทียบกับCurrentที่คำนวณได้</p>  |
| ค่าเฉลี่ย | <p>ความสัมพันธ์ระหว่าง Output Voltage และ Current Input</p>  | <p>CurrentจริงเทียบกับCurrentที่คำนวณได้</p>  |

จากการทดลองได้ตารางเปรียบเทียบสเปกตรัมความถี่ (FFT) ของความเร็วรอบมอเตอร์ภายใต้PWM Duty Cycleต่างๆ ตาราง 2 ตารางแสดง FFT of Motor Angular Velocity ที่Duty Cycle ต่างๆ



ภาพที่ 3 bode diagram จากการทำLow-pass filter

สรุปผลการทดลอง

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

อภิปรายผลการทดลอง

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

ข้อเสนอแนะ

- ควรเก็บ Duty Cycle ที่ละเอียดกว่านี้
- ควรเก็บค่าที่ละเอียดกว่านี้ในส่วน of Current Sensor และหาสมการที่ได้ค่ามาละความคลาดเคลื่อนน้อยมากๆ

อ้างอิง

- 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 Constantและสร้าง Motor Characteristic Curves

จุดประสงค์

1. เพื่ออธิบายหลักการทำงานของ DC Motor
2. เพื่ออธิบายสมการ DC Motor ที่ใช้ในการสร้าง Motor Characteristic Curve
3. เพื่อวัดและคำนวณหาค่า 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 ได้จากกราฟ Torque vs Current

ตัวแปรในการทดลอง

ตัวแปรต้น:

- น้ำหนักของ Load ที่เปลี่ยนไป

ตัวแปรตาม:

- กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ดึง, ความเร็วรอบของมอเตอร์

ตัวแปรควบคุม:

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

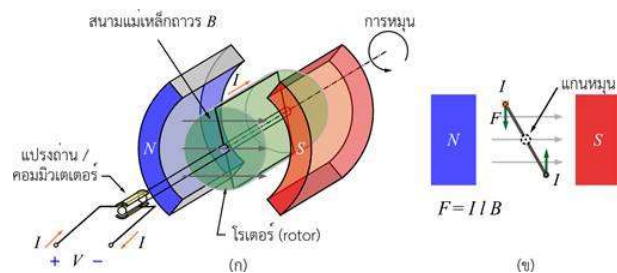
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. หลักการทำงานของ Motor

หลักการทำงานของ Motor เมื่อเราจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปที่ขดลวดทองแดง กระแสไฟฟ้าก็จะไหลผ่านขดลวดผ่านขั้วบรูกว้างไปยังขั้วลวดครบวงจร เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นแรงแม่เหล็กถาวร ก็จะทำให้เกิดแรงผลักตามกฎมือขวา โดยให้นิ้วกลางเป็นทิศทางของสนามแม่เหล็ก นิ้วชี้เป็นทิศทางกระแสไฟฟ้าวิ่งตามขดลวดทองแดง นิ้วโป้งเป็นทิศทางของแรงที่เกิดขึ้นเมื่อเราจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดทองแดงอย่างต่อเนื่องก็จะทำให้เกิดการหมุน

2. หลักการทำงานของ Brushed DC Motor

มอเตอร์จะอาศัยแรงดูดและแรงผลักที่เกิดจากสนามแม่เหล็กเมื่อมีกระแสไหลผ่านลวดตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบตัวนำนั้น ถ้าเรานำตัวนำดังกล่าวไปวางไว้ในสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวรก็จะเกิดการต้านและเสริมกับเส้นแรงแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวร ทำให้เกิดแรงดูดและแรงผลักขึ้นที่ขดลวด รูปที่ 4(ก) แสดงลักษณะโครงสร้างของมอเตอร์ไฟตรงที่ใช้แม่เหล็กถาวรในส่วนของสเตเตอร์และมีการป้อนกระแสผ่านคอมมิวเตเตอร์ไปยังโรเตอร์ เพื่อให้แกนเหล็กที่โรเตอร์เป็นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4(ข) โดยกระแสไฟฟ้า I จะทำให้เกิดแรง F ขึ้น



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

จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าเมื่อจ่ายกระแสผ่านขั้วต่อที่เรียกว่าแปรงถ่าน (brushes) ไปยังวงแหวนพิเศษที่เรียกว่า คอมมิวเตเตอร์ (commutator) ซึ่งต่อเข้ากับวงรอบตัวนำกระแสที่ไหลผ่านตัวนำจะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำโดยด้านหนึ่งจะเป็นแรงผลักขึ้น ทำให้วงรอบตัวนำมีการหมุน โดยแรงที่เกิดจะแปรตาม กระแสที่ไหลผ่าน I 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. สมการวงจรไฟฟ้าของขดลวดอาร์มาเจอร์ (Electrical Dynamics)

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

ความหมาย:

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

2. สมการโมเดลทางกลของโรเตอร์ (Mechanical Dynamics)

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

ความหมาย:

- $J \frac{d\omega}{dt}$ = โมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ (inertia)
- $B\omega$ = แรงหน่วงเชิงความหนืด (viscous friction)
- $K_m i$ = แรงบิดที่มอเตอร์สร้าง (motor torque)
- τ_L = แรงบิดโหลดจากภายนอก

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เชื่อมบอร์ดเข้ากับโปรแกรม และตั้งค่าบอร์ด
2. หาค่า Stall Torque โดยการ ที่ให้ก้านที่ติดกับMotorkดลงLoad cell จนกว่าจะไม่หมุน จากนั้นอ่านค่า Torque และ current เพื่อจะได้ Stall Torque และ current stall
3. หาค่า ω No load และ Current No load โดยการไม่ใส่ load แล้วเก็บค่ามา จากนั้นนำค่าข้อ 2และ3 ไปสร้าง Motor Characteristic Curve ได้ใน Ideal case โดยจะได้กราฟSpeed vs Torque และCurrent vs Torque ส่วนPower vs Torque และEfficiency vs Torque คำนวณ จากสมการในเอกสารเกี่ยวข้อง
4. หาค่า Torque Constant จาก $\frac{T_{st}}{I_{st}}$
5. เก็บค่า แบบจริงโดยการที่ ทำรอกขึ้นมา มีรัศมี 38mm แล้วใส่โหลดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆแล้วกดตั้งโหลดนั้นแล้วเก็บค่า Current ,Angular Velocity และคำนวณ Torque จาก $T = F \cdot r$ ซึ่ง F คือ น้ำหนักคูณด้วย ความเร่งโน้มถ่วงของโลกคือ 9.81 m/s^2 แล้วใส่น้ำหนักไปเรื่อยๆ จน Motor ไม่หมุน
6. ทำทั้งหมด3 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ยเก็บข้อมูลแต่ละเซนเซอร์ 1000 sample points

ผลการทดลอง

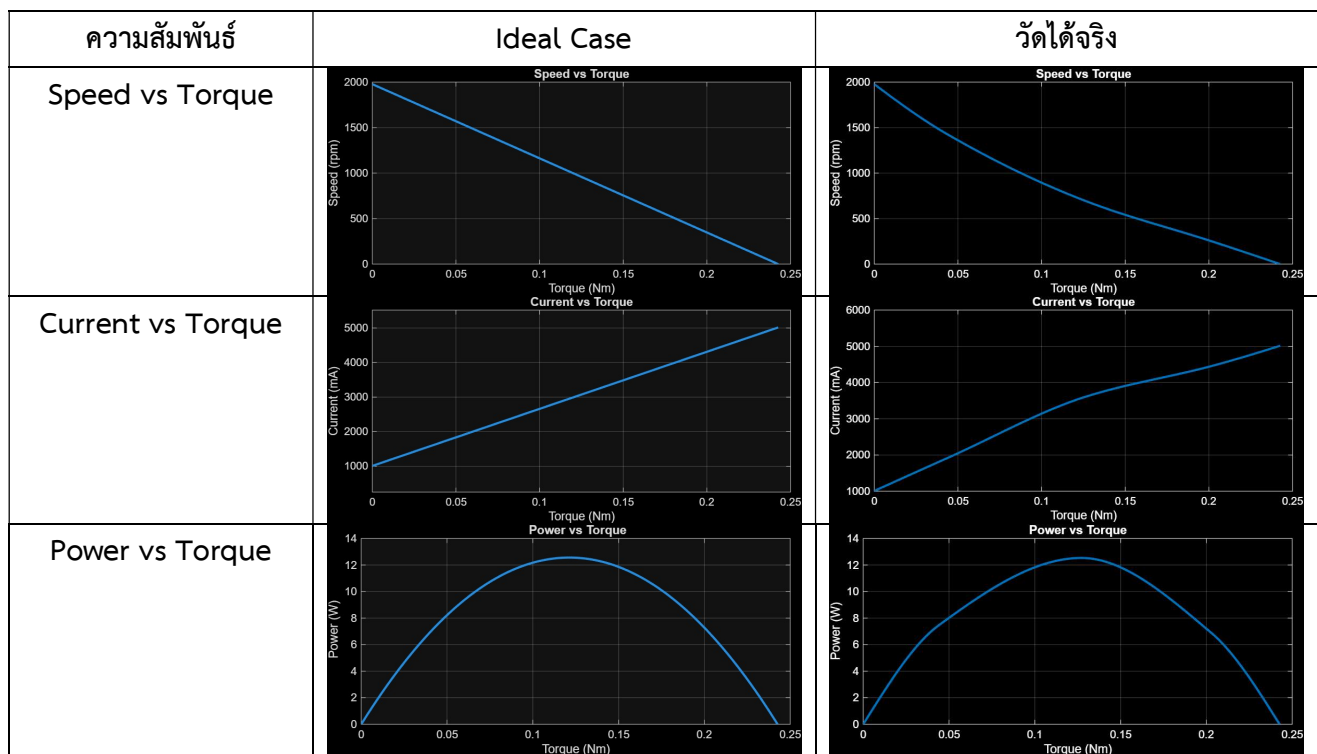
จากการทดลองได้ค่าที่ใช้สร้างตารางสรุปผลการวัดค่า Stall Torque, No-load Speed และ Torque Constant ดังแสดงในตารางต่อไปนี้

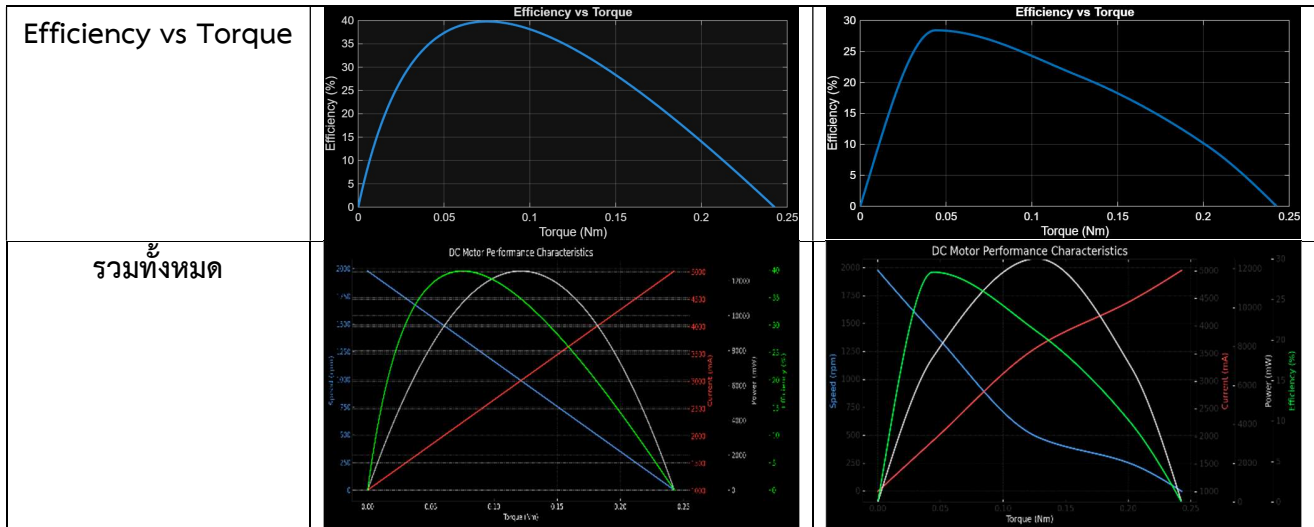
ตาราง 3 ตารางแสดงค่า Torque ,Current และAngular Velocity ของ Motor

| ครั้งที่ | Torque Stall(Nm) | Current stall(A) | Current No load(A) | ω 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 ของMotor 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 ≈ 5.015 A
- ค่า No-load Speed ≈ 1977.4 rpm
- ค่า No-load Current ≈ 1.008 A
- ค่า Torque Constant เฉลี่ย = 0.048 Nm/A

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

สรุปค่าสามารถทำให้มอเตอร์ทำงานได้มีประสิทธิภาพสูงสุดที่แรงดันไฟฟ้า 12V มีดังนี้:

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

คำนวณจากสมการ Speed–Torque ที่ใช้ในรายงาน โดยอิง $\omega_{no_load} \approx 1977.4$ rpm

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

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

- ประสิทธิภาพสูงสุดที่ประมาณได้จากข้อมูลนี้:

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

อภิปรายผลการทดลอง

ผลการทดลองมีความสอดคล้องกับสมมติฐานของทฤษฎีมอเตอร์ DC ได้แก่:

1. กราฟ Speed-Torque มีรูปแบบเป็นเส้นตรงลดลง

มอเตอร์มีความสัมพันธ์ตามสมการ

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

ซึ่งตรงกับข้อมูลที่เก็บได้จริงว่าความเร็วลดลงตามแรงบิดที่เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรง ยืนยันจากตารางที่ 4

2. ค่า Torque Constant มีความใกล้เคียงกันทั้ง 3 ครั้ง

แสดงถึงความเสถียรของกระแสและเซนเซอร์ที่วัดแรงบิด ถือว่าผลออกมาน่าเชื่อถือ

3. ค่าที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยจาก Ideal Case

สาเหตุอาจมาจาก

- ความผิดในระบบบรอกและจุดหมุน
- ความหน่วงทางกล ($B\omega$)
- ความคลาดเคลื่อนของเซนเซอร์ Hall effect

4. No-load Speed ต่ำกว่าทฤษฎีเล็กน้อย

เกิดจากความผิดภายในชุดทดลอง และการสูญเสียเชิงกลอื่น ๆ

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

ข้อเสนอแนะ

- ควรออกแบบชุดการทดลองให้มีความเสถียร และมี Misalignment ที่น้อยกว่านี้เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของผล

การทดลอง

อ้างอิง

- suwitkiravittaya.eng.chula.ac.th/B2i2019BookWeb/dcmotor.html

- [DC Motor Control Speed Kit : 1 มาเรียนรู้วิธีการกลับทิศทางการหมุน และปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วย 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. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ (Speed) และแรงบิด (Torque) ของมอเตอร์ภายใต้ PWM Duty Cycle ต่างๆ และสร้างกราฟ Torque-Speed Curve ที่แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว

สมมติฐาน

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

ตัวแปรในการทดลอง

ตัวแปรต้น:

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

ตัวแปรตาม:

- ความเร็วรอบของมอเตอร์ (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 สัญญาณจะสลับระหว่างสถานะเปิดและปิดที่ความถี่คงที่ ระยะเวลาที่สัญญาณอยู่ในสถานะ “เปิด” ของแต่ละรอบ ซึ่งเรียกว่า Duty Cycle จะเป็นตัวกำหนดกำลังเฉลี่ยที่ส่งให้โหลด ในส่วนของ Duty Cycle คือสัดส่วนของเวลาที่สัญญาณอยู่ในสถานะ “เปิด (ON)” ต่อหนึ่งรอบพัลส์ มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ ยิ่ง Duty Cycle สูง แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ส่งให้โหลดก็ยิ่งมาก

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

จุดเด่นของ PWM คือประสิทธิภาพสูงและการสูญเสียพลังงานต่ำ เนื่องจากส่วนควบคุมทำงานเพียงสองสถานะ แบบดิจิทัลคือ เปิดเต็มที่ หรือ ปิดสนิท ทำให้ความร้อนและการสูญเสียพลังงานในวงจรสวิตช์น้อย นอกจากนี้ PWM ยังให้การควบคุมที่ละเอียดแม่นยำ

2. สมการเชิงเส้นของมอเตอร์ทำให้เส้นกราฟเลื่อนแบบขนาน

แรงบิดของมอเตอร์ DC มีความสัมพันธ์โดยตรงกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด 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_{stall} เพิ่มขึ้น (เพราะกระแสเพิ่ม)
- $\omega_{\text{no-load}}$ เพิ่มขึ้น (เพราะแรงดันสูงขึ้น)

ทั้งสองค่าจะเพิ่มเป็นอัตราส่วนเท่า ๆ กัน จึงทำให้เส้นกราฟใหม่เป็นเส้นตรงที่ขนาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เชื่อมบอร์ดเข้ากับโปรแกรม และตั้งค่าบอร์ด
2. หาค่า Stall Torque โดยการ ที่ให้ก้านที่ติดกับMotorกดลงLoad cell จนกว่าจะไม่หมุน อ่านค่า Torque จากนั้น เปลี่ยน Duty cycle เป็น 50% 75% และ 100% ตามลำดับ ทำDuty Cycle ละ3ครั้ง 1000sample point
3. หาค่า ω No load (ผ่านLow Pass filterแล้ว) โดยการไม่ใส่ load แล้วเก็บค่าจากนั้นเปลี่ยน Duty cycle เป็น 50% 75% และ 100% ตามลำดับ ทำDuty Cycle ละ3ครั้ง 1000sample point

ผลการทดลอง

ตาราง 5 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Torque และ Speed ที่ Duty Cycle ต่าง ๆ

| ครั้งที่ | ความสัมพันธ์ระหว่าง Torque และ Speed ที่ Duty Cycle ต่าง ๆ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|--|--|-------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|---|----|-----|-----|-------|---|-----|-----|------|---|---|---|
| ครั้งที่1 | | <div>ความสัมพันธ์ระหว่าง Torque และ Speed ครั้งที่1</div> <table><caption>Data for Graph 1: Angular Velocity vs Torque</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</td><td>80</td><td>210</td><td>150</td></tr><tr><td>0.125</td><td>0</td><td>105</td><td>75</td></tr><tr><td>0.25</td><td>-</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 | 80 | 210 | 150 | 0.125 | 0 | 105 | 75 | 0.25 | - | 0 | 0 |
| Torque (Nm) | Duty cycle 50% (rad/s) | Duty cycle 75% (rad/s) | Duty cycle 100% (rad/s) | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 80 | 210 | 150 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.125 | 0 | 105 | 75 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.25 | - | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | |
| ครั้งที่2 | | <div>ความสัมพันธ์ระหว่าง Torque และ Speed ครั้งที่2</div> <table><caption>Data for Graph 2: Angular Velocity vs Torque</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</td><td>80</td><td>150</td><td>210</td></tr><tr><td>0.125</td><td>0</td><td>0</td><td>105</td></tr><tr><td>0.25</td><td>-</td><td>-</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 | 80 | 150 | 210 | 0.125 | 0 | 0 | 105 | 0.25 | - | - | 0 |
| Torque (Nm) | Duty cycle 50% (rad/s) | Duty cycle 75% (rad/s) | Duty cycle 100% (rad/s) | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 80 | 150 | 210 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.125 | 0 | 0 | 105 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.25 | - | - | 0 | | | | | | | | | | | | | | | |
| ครั้งที่3 | | <div>ความสัมพันธ์ระหว่าง Torque และ Speed ครั้งที่3</div> <table><caption>Data for Graph 3: Angular Velocity vs Torque</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</td><td>80</td><td>150</td><td>210</td></tr><tr><td>0.125</td><td>0</td><td>0</td><td>105</td></tr><tr><td>0.25</td><td>-</td><td>-</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 | 80 | 150 | 210 | 0.125 | 0 | 0 | 105 | 0.25 | - | - | 0 |
| Torque (Nm) | Duty cycle 50% (rad/s) | Duty cycle 75% (rad/s) | Duty cycle 100% (rad/s) | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 80 | 150 | 210 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.125 | 0 | 0 | 105 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.25 | - | - | 0 | | | | | | | | | | | | | | | |
| ค่าเฉลี่ย | | <div>ความสัมพันธ์ระหว่าง Torque และ Speed ค่าเฉลี่ย</div> <table><caption>Data for Graph 4: Angular Velocity vs Torque (Average)</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</td><td>80</td><td>150</td><td>210</td></tr><tr><td>0.125</td><td>0</td><td>0</td><td>105</td></tr><tr><td>0.25</td><td>-</td><td>-</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 | 80 | 150 | 210 | 0.125 | 0 | 0 | 105 | 0.25 | - | - | 0 |
| Torque (Nm) | Duty cycle 50% (rad/s) | Duty cycle 75% (rad/s) | Duty cycle 100% (rad/s) | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 80 | 150 | 210 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.125 | 0 | 0 | 105 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.25 | - | - | 0 | | | | | | | | | | | | | | | |

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า PWM Duty Cycle มีผลโดยตรงต่อ Characteristics ของมอเตอร์ DC โดยเมื่อเพิ่ม Duty Cycle จะเพิ่มทั้งแรงบิดและความเร็วรอบสูงสุด ทำให้กราฟ Torque-Speed Shift ขึ้นแบบขนาน ซึ่งตรงกับสมมติฐานที่ตั้งไว้และสอดคล้องกับทฤษฎีของมอเตอร์ DC อย่างชัดเจน การทดลองนี้จึงช่วยยืนยันความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง Torque และ Speed ภายใต้แรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปตาม Duty Cycle ของ PWM

อภิปรายผลการทดลอง

ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มค่า Duty Cycle ของสัญญาณ PWM ทั้งความเร็วรอบและแรงบิดสูงสุดของมอเตอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของมอเตอร์ DC ที่ระบุว่าแรงดันเฉลี่ยที่สูงขึ้นจะทำให้กระแสและ Back-EMF เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเร็วและแรงบิดสูงขึ้นตามลำดับ กราฟ Torque-Speed ในแต่ละ Duty Cycle ยังคงเป็นเส้นตรงและเลื่อนขึ้นแบบขนาน 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 ที่แต่ละความถี่ของสัญญาณ และวิเคราะห์ความแตกต่าง

สมมติฐาน

1. เมื่อ PWM Duty Cycle เพิ่มขึ้น ความเร็วมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นในทุกความถี่ และที่ความถี่ PWM สูงจะให้ความเร็วที่ราบเรียบกว่าและมีแรงบิดสั่นน้อยกว่า เมื่อเทียบกับความถี่ต่ำ
2. กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้จะเพิ่มขึ้นตาม PWM Duty Cycle โดยที่ความถี่ต่ำอาจทำให้กระแสมีการแกว่งมากกว่า ในขณะที่ความถี่สูงทำให้กระแสไหลนิ่งและราบเรียบกว่า

ตัวแปร

ตัวแปรต้น:

- ค่าความถี่ของสัญญาณที่ 200 Hz, 2 kHz, 31.25 kHz

ตัวแปรตาม:

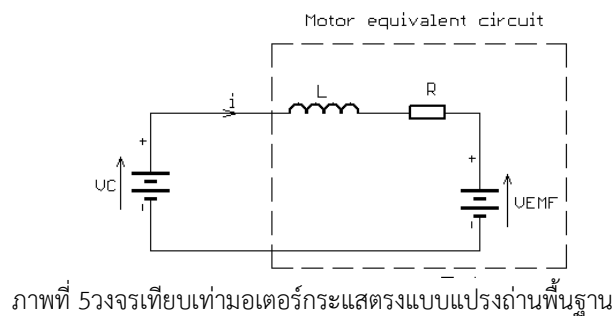
- ความเร็ว, กระแสไฟฟ้า และประสิทธิภาพของมอเตอร์ ที่ PWM Duty Cycle (0% ถึง 100%)

ตัวแปรควบคุม:

- แรงดันไฟฟ้าอินพุตที่จ่ายจาก Power Supply คงที่
- ประเภทยของมอเตอร์และโหลด

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณ Pulse และกระแส



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

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

ค่าคงตัวเวลาเป็นช่วงเวลาที่แรงดันหรือกระแสในวงจรเปลี่ยนแปลงจนถึงสัดส่วน $\frac{1}{e}$ ของค่าปลายทาง (Final Value) สำหรับแรงดันที่ตัวเหนี่ยวนำ V_L ซึ่งจะลดลงสู่ 0 V เมื่อเวลานานพอ ค่าคงตัวเวลา τ คือเวลาที่ V_L ลดลงจนเหลือเพียง

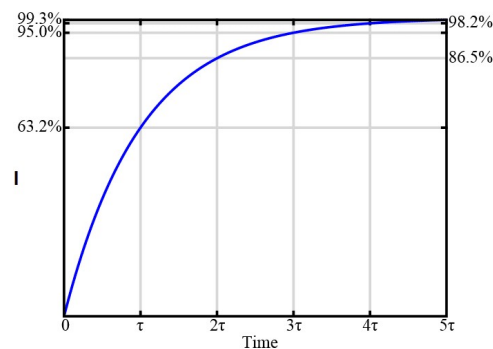
$$V_L = V\left(\frac{1}{e}\right)$$

ในทางกลับกัน แรงดันที่ตัวต้านทาน V_R จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนเข้าใกล้แรงดันอินพุต V ดังนั้น τ คือเวลาที่ V_R เพิ่มขึ้นจนถึง

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

สาเหตุที่แรงดันและกระแสเปลี่ยนแปลงไม่ทันทีเมื่อมีแรงดันมาป้อน เกิดจากตัวเหนี่ยวนำ (L) ที่สร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (Back EMF) เพื่อดำเนินการเปลี่ยนแปลงของกระแส ส่งผลให้กระแสและแรงดันในวงจรเปลี่ยนแปลงได้ไม่เร็วกว่าค่าคงตัวเวลา τ ของวงจร

ดังนั้น เมื่อเปิดแหล่งจ่าย กระแสจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเอ็กซีโพเนนเชียล และต้องใช้เวลา 5τ จึงจะเข้าใกล้ค่าสถานะคงที่ เพื่อให้แน่ใจว่ากระแสมีเวลามากพอที่จะไหลจนใกล้ค่าสถานะคงที่ในแต่ละพัลส์ ซึ่งเป็นเงื่อนไขสำคัญสำหรับการควบคุมให้มีความเสถียรและเชิงเส้น

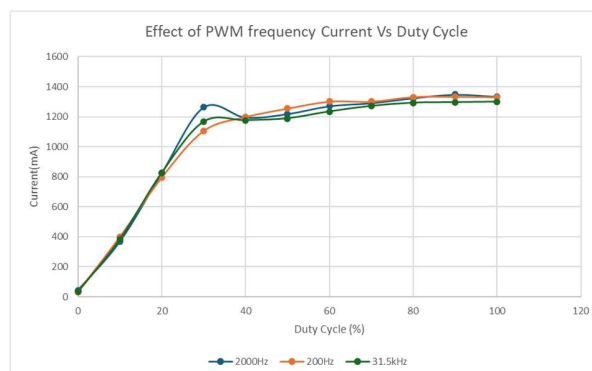


ภาพที่ 6 การใช้เวลา 5τ ในการเข้าสู่สภาวะคงที่ของกระแส

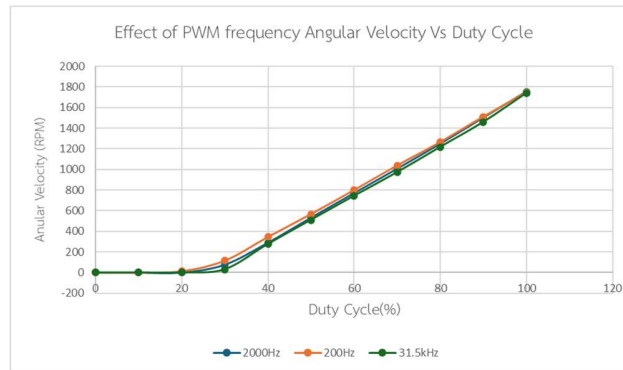
ขั้นตอนการดำเนินงาน

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 แล้วหา 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 ขึ้นได้ราบเรียบกว่า ไม่มีอาการสะดุดหรือสั่น
- ที่ความถี่ต่ำ เช่น 200 Hz มีการแกว่งของความเร็วมากกว่า เนื่องจากแรงบิดเป็นพัลส์ชัดเจน

2. กระแสไฟฟ้า (Current Consumption)

- กระแสเพิ่มขึ้นตาม PWM Duty Cycle เช่นกัน
- ที่ความถี่ต่ำ (200 Hz) พบว่ากระแส แกว่งมาก และมี ripple สูงกว่า
- ที่ความถี่สูง (31.25 kHz) กระแสมีรูปแบบที่ นิ่งกว่าและราบเรียบกว่า เพราะมอเตอร์มีเวลาน้อยลงในการตอบสนองกับกระแสไฟฟ้าต่อพัลส์ในแต่ละรอบ

3. ประสิทธิภาพของมอเตอร์ (Motor Efficiency)

- ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นตาม Duty Cycle แต่จนถึงจุดหนึ่งเท่านั้น
- ที่ความถี่สูง (31.25 kHz) ประสิทธิภาพโดยรวม สูงกว่า เนื่องจากแรงบิดสั่นน้อยและกำลังสูญเสียเชิงไฟฟ้าน้อยลง
- ความถี่ต่ำ (200 Hz) ให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าเพราะเกิดแรงบิดสั่นมาก กระแสของมอเตอร์จะเป็นคลื่นขึ้น-ลงมาก กระแส RMS สูงขึ้น → ขดลวดร้อนขึ้น → สูญเสียพลังงานมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพต่ำลง

อภิปรายผลการทดลอง

1. ความถี่ PWM ส่งผลต่อความราบรื่นของแรงบิดและความเร็ว

- ความถี่ต่ำ (200 Hz) ทำให้เกิดแรงบิดแบบเป็นช่วง ๆ (Pulsating torque) ทำให้ความเร็วและกระแสเกิดการแกว่งมาก ซึ่งเป็นผลจาก time constant (τ) ของมอเตอร์ที่ยังตอบสนองไม่ทันต่อการเปิด-ปิดของพัลส์แต่ละรอบ
- ความถี่สูง (31.25 kHz) ทำให้พัลส์ PWM มีความถี่มากพอที่โรเตอร์และวงจร RL ของมอเตอร์จะเฉลี่ยแรงดันได้ดี จึงทำให้ ความเร็วและกระแสราบเรียบกว่า

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

จากทฤษฎี วงจร RL ต้องการเวลาประมาณ 5τ เพื่อให้กระแสเข้าใกล้ค่าคงตัว

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:

- แรงบิดสั้นลดลง
- กระแสด้าน 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. เพื่อทดลองใช้และเปรียบเทียบโหมดการควบคุม Sign-Magnitude PWM และ Locked Anti-Phase PWM
3. เพื่อวิเคราะห์ข้อดี-ข้อเสียของแต่ละโหมดในการควบคุมความเร็วและการเคลื่อนที่ของมอเตอร์

สมมติฐาน

1. โหมด Sign-Magnitude: ความเร็วของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นตาม Duty Cycle แม้ในช่วงต้นอาจมีความเร็วด้านลบหรือหยุดนิ่งจากแรงต้านเริ่มต้น (Dead zone) แต่เมื่อ Duty สูงขึ้น มอเตอร์จะหมุนไปทิศทางที่กำหนดด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น
2. โหมด Locked Anti-Phase: ความเร็วและทิศทางของมอเตอร์จะขึ้นกับสัดส่วน Duty Cycle โดยที่ Duty < 50% มอเตอร์หมุนทิศทางหนึ่ง (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
- แหล่งจ่ายไฟสำหรับวงจรขับมอเตอร์
- อุณหภูมิและสภาพแวดล้อมของห้องทดลอง

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. หลักการทำงานของ H-bridge

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

โดยมีมอเตอร์ต่ออยู่ระหว่างสวิตช์ด้านซ้ายและด้านขวาในตำแหน่งกึ่งกลาง การควบคุมทิศทางของมอเตอร์เกิดจากการเปิด-ปิดสวิตช์สองตัวที่อยู่ตรงข้ามกันเสมอ เช่น

- เมื่อเปิดสวิตช์ชุดซ้ายบนและขวาล่าง กระแสจะไหลในทิศทางหนึ่ง ทำให้มอเตอร์หมุนไปข้างหน้า
- เมื่อเปิดสวิตช์ชุดขวบนและซ้ายล่าง กระแสไหลกลับทิศ ทำให้มอเตอร์หมุนย้อนกลับ

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

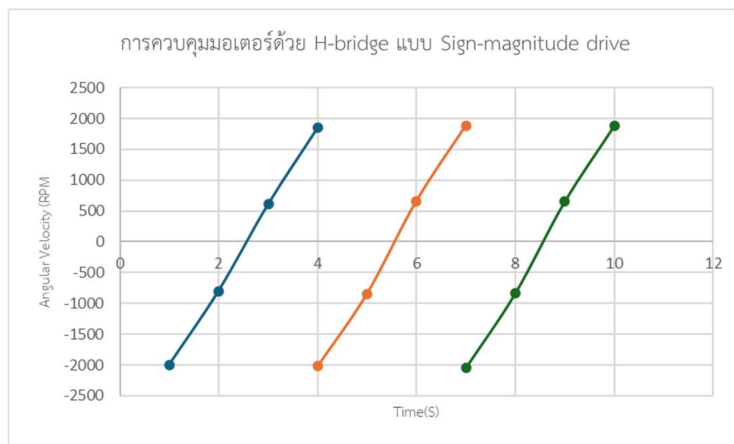
ขั้นตอนการดำเนินงาน

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

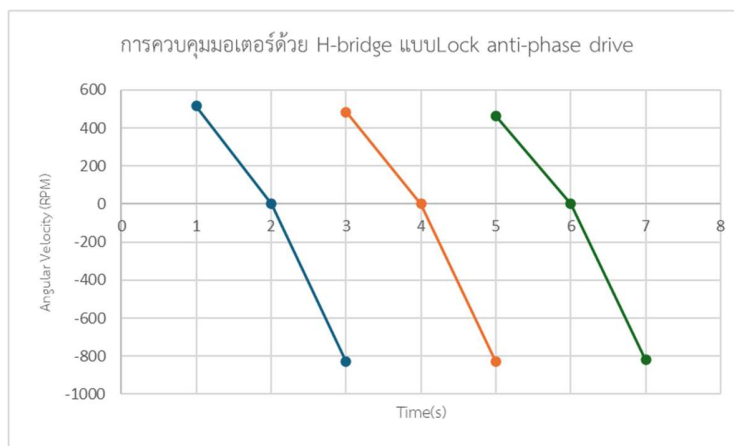
- ปรับค่า Duty Cycle ที่ 50, 25, -25, -50
- บันทึกค่า ความเร็วรอบ (RPM) และ กระแสไฟฟ้า (Current) ที่อ่านได้ในทุกช่วง Duty Cycle ลงในตารางบันทึกผล

4. การทดลอง โหมด Locked Anti-Phase Drive

ผลการทดลอง



ภาพที่ 9 การควบคุมมอเตอร์ด้วย H-bridge แบบ Sign-magnitude drive



ภาพที่ 10 การควบคุมมอเตอร์ด้วย H-bridge แบบ Lock 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 มีลักษณะเป็นเชิงเส้นต่อเนื่องผ่านจุดศูนย์

อภิปรายผลการทดลอง

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองทั้งสองโหมด พบข้อแตกต่างและประเด็นที่น่าสนใจดังนี้

1. ความเป็นเชิงเส้น ทั้งสองโหมดให้ผลตอบสนองความเร็วที่เป็นเชิงเส้นต่อ Duty Cycle แต่ในโหมด Locked Anti-Phase จะมีความต่อเนื่องของการเปลี่ยนทิศทางที่ราบรื่นกว่าเนื่องจากไม่มีการตัดวงจรช่วงศูนย์เหมือน Sign-Magnitude ที่ต้องสลับสัญญาณ Direction
2. การตอบสนองที่ความเร็วต่ำ
 - Locked Anti-Phase: มอเตอร์สามารถเอาชนะแรงเสียดทาน ได้ดีกว่าในช่วงความเร็วต่ำ เนื่องจากที่จุดหยุดนิ่ง (50% Duty) มอเตอร์ไม่ได้ถูกตัดไฟ แต่มีการสลับขั้วแรงดันบวก/ลบด้วยความถี่สูงตลอดเวลา ทำให้เกิดกระแสกระเพื่อม เล็กน้อยที่ช่วย "เขย่า" โรเตอร์ ทำให้มอเตอร์ออกตัวได้ง่ายและไม่มี Dead Zone ที่ชัดเจน
 - Sign-Magnitude: ที่ Duty Cycle ต่ำมากๆ แรงดันเฉลี่ยอาจไม่เพียงพอที่จะเอาชนะแรงเสียดทาน 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 ปลอยลอย 0% จะเป็น Coasting แต่ถ้า Set 0 แบบ Brake ก็หยุดได้เช่นกัน แต่ Locked Anti-Phase ทำงานนี้โดยธรรมชาติของสัญญาณ)
4. ประสิทธิภาพพลังงาน โหมด Sign-Magnitude มีประสิทธิภาพดีกว่าในขณะหยุดนิ่งหรือความเร็วต่ำ เพราะไม่มีกระแสไหลผ่านมอเตอร์เมื่อ Duty = 0% ในขณะที่ Locked Anti-Phase จะมีกระแสไหลผ่านขดลวดตลอดเวลา แม้ขณะหยุดนิ่ง (50% Duty) ทำให้มอเตอร์ร้อนและกินไฟมากกว่าหากไม่ได้ออกแบบตัวเหนี่ยวนำให้เหมาะสม

ข้อเสนอแนะ

- ให้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณ PWM เทียบกับแรงดันมอเตอร์ 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 และเปรียบเทียบลักษณะการหมุนในแต่ละโหมดการขับ (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

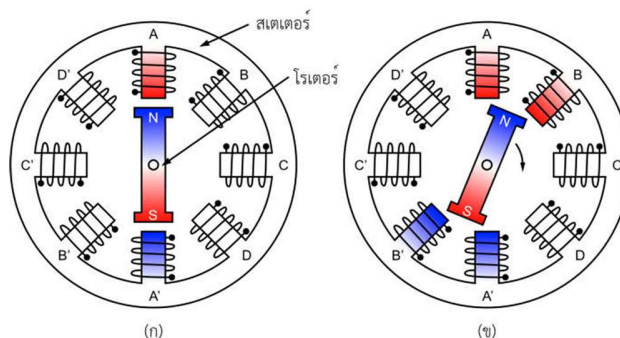
- การตั้งกระแสขั้ว (Current Limit จากแหล่งจ่ายไฟ)

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. หลักการทำงานของ Stepper Motor

หลักการทำงานของสเต็ปมอเตอร์คือ เราจะ จ่ายกระแสไฟฟ้า ให้แก่ขดลวดที่ติดตั้งอยู่บน สเตเตอร์ (Stator) เพื่อสร้าง สนามแม่เหล็กออกมา ขณะที่ส่วนที่ หมุน หรือ โรเตอร์ (Rotor) จะมีแกนเป็น แม่เหล็กถาวร การจ่ายกระแสเข้าสู่ขดลวดจะ เหนี่ยวนำให้เกิดแรงดึงดูด จากสนามแม่เหล็ก ระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ ทำให้โรเตอร์หมุน เมื่อเราทำการจ่ายกระแสให้กับขดลวดแต่ละชุดอย่าง ต่อเนื่องตามลำดับ จะทำให้มอเตอร์หมุนได้อย่างต่อเนื่องและหากเราต้องการให้มอเตอร์หมุนไปตามจำนวน องศา หรือ จำนวนสเต็ป (Steps) ที่กำหนด ก็สามารถทำได้โดยการ ป้อนสัญญาณพัลส์ ผ่านขดลวดตามจำนวนสเต็ปที่ต้องการ

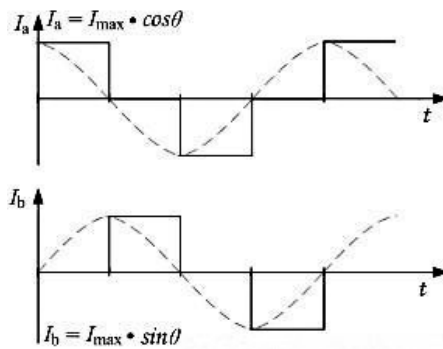
กรณีตัวอย่าง: รูปที่ 11 แสดงการทำงานของสเต็ปมอเตอร์ โดยเมื่อ จ่ายกระแส ให้แก่ขดลวดชุด A-A' ก็จะทำให้แกน หมุนถูก ยึดล็อก (Holding) อยู่ที่ตำแหน่งนั้น อย่างมั่นคง ทำให้ ไม่เคลื่อนที่ แม้มีแรงกระทำจากภายนอก



ภาพที่ 11 การทำงานของสเต็ปมอเตอร์ (ก) ขณะล็อกให้หยุดนิ่ง และ (ข) ขณะกำลังหมุนไปครึ่งสเต็ป

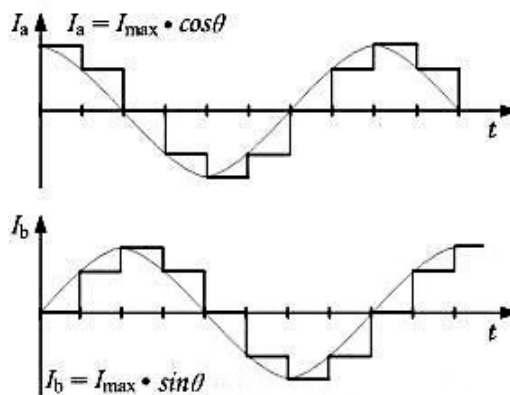
2. พื้นฐานความรู้เรื่องโหมดการขับของ Stepper Driver

Full Stepping คือโหมดการทำงานพื้นฐานที่ให้แรงบิดสูงสุด หลักการคือการจ่ายกระแสเต็มที่ไปยัง ขดลวดสองชุดพร้อมกัน (Two-Phase On) หรือ ขดลวดชุดเดียว (One-Phase On) สลับกันไปตามลำดับในกรณีที่นิยมใช้ คือ Two-Phase On ไดรเวอร์จะจ่ายกระแสให้ขดลวดทั้งสอง (เช่น ขดลวด A และ B) ตลอดเวลา และจะเปลี่ยนชั่วคราวการจ่ายกระแสตามลำดับ (Sequence) เพื่อให้สนามแม่เหล็กของสเตเตอร์เปลี่ยนทิศทางไป 90 องศาทางไฟฟ้าในแต่ละสเต็ป การเปลี่ยนทิศทางนี้จะดึงดูดให้โรเตอร์หมุนไปตาม มุมสเต็ปพื้นฐาน (Base Step Angle) ที่กำหนดของมอเตอร์ (เช่น 1.8 องศาต่อสเต็ป) เนื่องจากการเปลี่ยนตำแหน่งเป็นการ กระโดดมุม ขนาดใหญ่และรวดเร็ว ทำให้มอเตอร์เกิดการสั่นสะเทือนและเสียงรบกวนได้ง่าย โดยเฉพาะที่ความเร็วต่ำ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากขดลวดรับกระแสเต็มที่ ทำให้โหมดนี้มี แรงบิดยึดล็อก (Holding Torque) และ แรงบิดวิ่ง (Running Torque) ที่สูงที่สุด



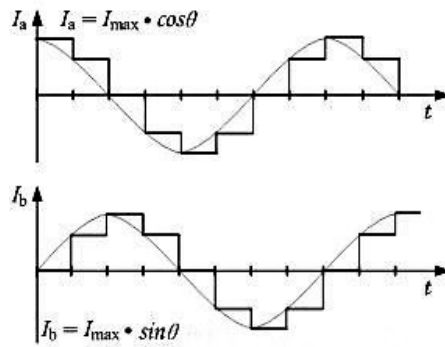
ภาพที่ 12 การควบคุมมอเตอร์ด้วย H-bridge แบบ Lock anti-phase drive

Half Stepping หลักการคือการเพิ่มสเต็ปการหมุนให้มีจำนวนเป็น สองเท่า ของ Full Stepping (เช่น จาก 1.8 องศาเป็น 0.9 องศาต่อสเต็ป) โดยใช้ลำดับการจ่ายกระแสแบบผสม สลับกันระหว่างการจ่ายกระแสเต็มที่ทำให้ ขดลวดชุดเดียว และการจ่ายกระแสเต็มที่ทำให้ ขดลวดสองชุดลำดับการทำงานจะสลับกันดังนี้ (ขดลวด A On) -> (ขดลวด A และ B On) -> (ขดลวด B On) -> (ขดลวด B และ A' On) การจ่ายกระแสแบบสลับนี้ทำให้โรเตอร์ถูกดึงดูดไปสู่ตำแหน่งที่อยู่กึ่งกลางระหว่างตำแหน่ง Full Step ทั้งสอง ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ที่ละเอียดขึ้น การเคลื่อนที่แบบ Half Stepping จะมีความ ราบรื่นกว่า Full Stepping และลดเสียงรบกวนได้ในระดับหนึ่ง แต่เนื่องจากในบางสเต็ปมีการจ่ายกระแสเพียงขดลวดชุดเดียว 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) ไตรเวอร์ Microstepping จะไม่จ่ายกระแสแบบเปิด-ปิด (On-Off) เหมือนสองโหมดแรก แต่จะควบคุมกระแสที่ไหลผ่านขดลวดทั้ง สอง (A และ B) ให้แปรผันตาม คลื่นไซน์ (Sine Wave) และ คลื่นโคไซน์ (Cosine Wave) ที่มีความต่างเฟสกัน 90 องศา การควบคุมกระแสอย่างละเอียดนี้ทำให้ สนามแม่เหล็กสุทธิ (Resultant Magnetic Field) ของสเตเตอร์หมุนเปลี่ยน ทิศทางไปอย่าง ต่อเนื่องและราบเรียบ เหมือนเข็มนาฬิกา แทนที่จะเป็นการกระโดด

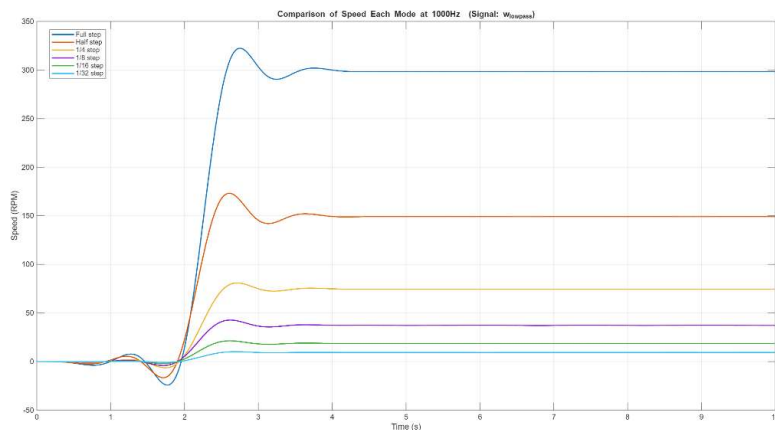


ภาพที่ 14 กราฟการจ่ายกระแสให้ Stepper Motor (Microstepping Mode)

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เชื่อมบอร์ดเข้ากับโปรแกรม
2. เปลี่ยน Mode แต่ละ Mode แล้วเก็บค่า ความเร็ว ว่าแต่ละmode มีความเร็วต่างกันเท่าไรทำการทดลอง 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยมา

ผลการทดลอง



ภาพที่ 15 กราฟแสดงความเร็วเทียบกับเวลาของโหมดต่าง ๆ ที่ Frequency 1000Hz

จากการทดลองวัดความเร็วรอบของ 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) ซึ่งสรุปค่าความเร็วรอบที่สภาวะคงตัว ดังนี้

1. **Full Step:** ความเร็วรอบคงที่ประมาณ 300 RPM
 - ลักษณะการเคลื่อนที่: ในช่วงเริ่มต้น มีการแกว่งตัวสูงที่สุดเมื่อเทียบกับโหมดอื่น ก่อนจะเข้าสู่สภาวะคงตัว
2. **Half Step:** ความเร็วรอบคงที่ประมาณ 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 แทบไม่มีการแกว่งตัวในช่วงเริ่มต้น

สรุปผลการทดลอง

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

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

อภิปรายผล

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

ข้อเสนอแนะ

- ให้ปรับความถี่ให้ได้ Output RPM เท่ากันแล้วเปรียบเทียบความเรียบและแรงบิด
- 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

1. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณ STEP กับความเร็วของมอเตอร์
2. เพื่อศึกษาผลของการเร่งความเร็ว และหาจุดวิกฤตที่ทำให้เกิดการสูญเสียตำแหน่ง (Loss Step) ในโหมดการขับต่าง ๆ

สมมติฐาน

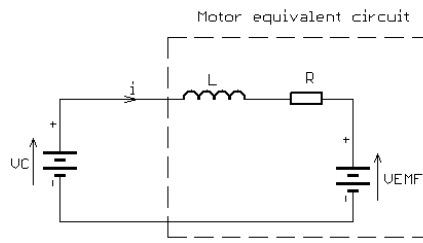
เมื่อทำการเร่งความถี่ของสัญญาณ STEP (Acceleration) ความเร็วของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตามความถี่ที่ป้อน แต่เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่ง แรงบิดของมอเตอร์จะลดลงจนไม่สามารถเอาชนะโหลดได้ ส่งผลให้เกิดภาวะ Loss Step (มอเตอร์หยุดหมุนหรือหมุนไม่ไปตามสั่ง) โดยโหมดการขับที่ละเอียดขึ้น อาจมีผลต่อเสถียรภาพและย่านความเร็วสูงสุดที่ได้

ตัวแปร

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

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณ Pulse และกระแส



ภาพที่ 16 วงจรเทียบเท่ามอเตอร์กระแสตรงแบบแปรปรวนพื้นฐาน

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

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

ค่าคงตัวเวลาเป็นช่วงเวลาที่แรงดันหรือกระแสในวงจรเปลี่ยนแปลงจนถึงสัดส่วน $\frac{1}{e}$ ของค่าปลายทาง (Final Value) สำหรับแรงดันที่ตัวเหนี่ยวนำ V_L ซึ่งจะลดลงสู่ 0 V เมื่อเวลานานพอ ค่าคงตัวเวลา τ คือเวลาที่ V_L ลดลงจนเหลือเพียง

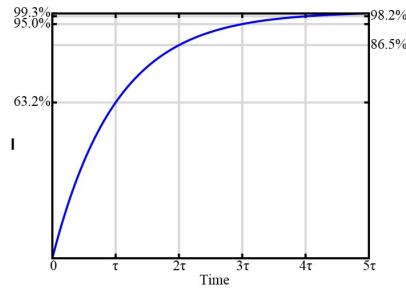
$$V_L = V\left(\frac{1}{e}\right)$$

ในทางกลับกัน แรงดันที่ตัวต้านทาน V_R จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนเข้าใกล้แรงดันอินพุต V ดังนั้น τ คือเวลาที่ V_R เพิ่มขึ้นจนถึง

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

สาเหตุที่แรงดันและกระแสเปลี่ยนแปลงไม่ทันทีเมื่อมีแรงดันมาป้อน เกิดจากตัวเหนี่ยวนำ (L) ที่สร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (Back EMF) เพื่อดำเนินการเปลี่ยนแปลงของกระแส ส่งผลให้กระแสและแรงดันในวงจรเปลี่ยนแปลงได้ไม่เร็วเกินกว่าค่าคงตัวเวลา τ ของวงจร

ดังนั้น เมื่อเปิดแหล่งจ่าย กระแสจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเอ็กซ์โปเนนเชียล และต้องใช้เวลา 5τ จึงจะเข้าใกล้ค่าสถานะคงที่ เพื่อให้แน่ใจว่ากระแสมีเวลามากพอที่จะไหลจนใกล้ค่าสถานะคงที่ในแต่ละพัลส์ ซึ่งเป็นเงื่อนไขสำคัญสำหรับการควบคุมให้มีความเสถียรและเชิงเส้น



ภาพที่ 17 การใช้เวลา $5t$ ในการเข้าสู่สภาวะคงที่ของกระแส

2. หลักการของ Loss Step

เกิดเมื่อมอเตอร์สเต็ปไม่สามารถสร้างแรงบิดได้มากพอให้โรเตอร์ตามตำแหน่งที่กำหนด ทำให้ก้าวการหมุนหายไปหนึ่งหรือหลายสเต็ป มักเกิดจากความถี่สเต็ปสูงเกินไป โหลดมากเกินไป หรืออัตราเร่งเร็วเกินไปจนโรเตอร์ตามไม่ทันสนามแม่เหล็ก

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. การเตรียมการ

- ต้องวงจรขับ 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

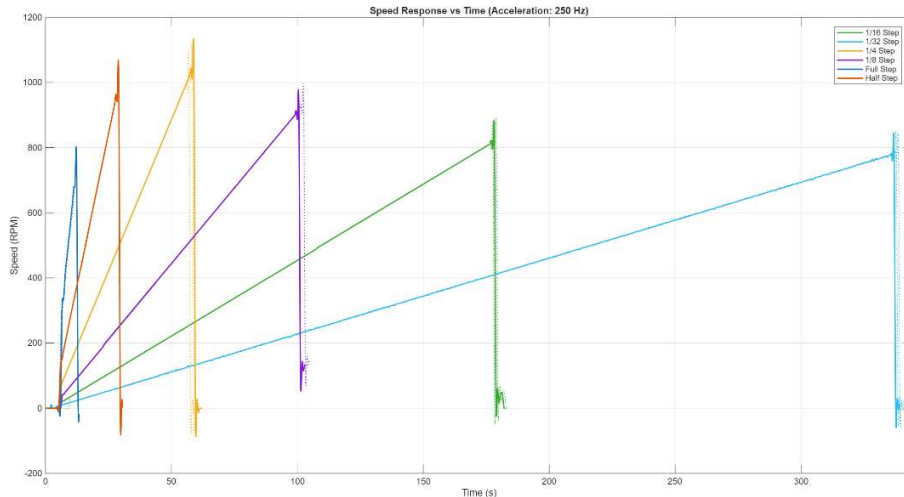
3. การทดลอง (ทำซ้ำในแต่ละโหมด)

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

4. การเก็บข้อมูล

- นำข้อมูลความเร็วเทียบกับเวลาของทุกโหมดมาพลอตกราฟรวมกันเพื่อเปรียบเทียบ

ผลการทดลอง



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

สรุปผลการทดลอง

| โหมดการขับ (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 เนื่องมาจากข้อจำกัดด้านแบนด์วิดท์ความถี่ของระบบหรือแรงบิดที่ลดลงที่ความถี่สูงมากๆ

อภิปรายผล

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

ข้อเสนอแนะ

-

อ้างอิง

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

3. Brushless DC Motor

การทดลองที่ 1 ศึกษาหลักการทำงานของ Brushless DC Motor

จุดประสงค์

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

สมมติฐาน

1. ลักษณะของสัญญาณจะมีลักษณะคล้ายกับรูปสี่เหลี่ยมคางหมู และ Phase Shift ของแต่ละเฟส (U, V, W) จะมีมุมต่างเฟส (Phase Shift) ห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้าอย่างคงที่
2. ความสัมพันธ์ของทิศทางการหมุนของ Motor ขึ้นอยู่กับลำดับการป้อนเฟส
3. ความถี่ของสัญญาณ BEMF จะแปรผันตรงกับความเร็วยรอบของ Motor
4. การใช้ Hall Effect Sensor จะสามารถระบุตำแหน่ง Rotor ได้ทันทีแม้ในขณะหยุดนิ่งหรือความเร็วต่ำ ในขณะที่การใช้ Back EMF Sensing จะต้องอาศัยความเร็วรอบระดับหนึ่งจึงจะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำที่เพียงพอต่อการตรวจจับ

ตัวแปร

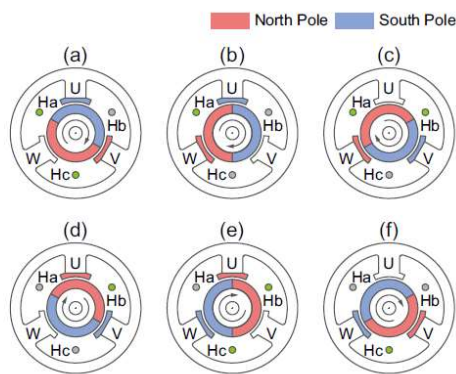
1. ตัวแปรต้น:
 - ความเร็วรอบที่สั่งผ่านโปรแกรม Motor Pilot (Reference Speed หรือ Measured Speed จากโปรแกรม) หน่วยเป็น RPM
2. ตัวแปรตาม:
 - ค่าคาบเวลาของสัญญาณ BEMF ที่วัดได้จาก Oscilloscope หน่วยเป็น millisecond (ms)
3. ตัวแปรควบคุม:
 - แรงดันไฟเลี้ยง (Supply Voltage) 12V/24V
 - โหลดของมอเตอร์ปล่อยฟรี
 - Scale บน Oscilloscope

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. หลักการทำงานสัญญาณ 3-Phase ของ Brushless DC Motor

Brushless DC Motor เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้แม่เหล็กถาวรติดตั้งอยู่บนส่วนของ Rotor และมีขดลวดตัวนำไฟฟ้าพันอยู่บนแกนเหล็กของ Stator ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ส่งผลให้มอเตอร์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูง สูญเสียพลังงานต่ำ และต้องการการบำรุงรักษาน้อย

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



ภาพที่ 19 3-Phase ของ Brushless DC Motor

2. วิธีการควบคุมและขับเคลื่อนมอเตอร์ Brushless DC Motor

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

2.1. การขับเคลื่อนแบบ 6-Step (Trapezoidal Control)

การขับเคลื่อนแบบ 6-Step เป็นวิธีที่ในแต่ละช่วงเวลาจะจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเพียง 2 เฟสจากทั้งหมด 3 เฟส ส่วนอีก 1 เฟสจะถูกปล่อยให้อยู่ในสถานะลอย การสลับการจ่ายไฟจะเกิดขึ้นทั้งหมด 6 ครั้งต่อหนึ่งรอบทางไฟฟ้า โดยแต่ละครั้งจะหมุนเวกเตอร์สนามแม่เหล็กไปทีละ 60 องศาทางไฟฟ้า การขับเคลื่อนแบบ 6-Step เป็นวิธีที่ในแต่ละช่วงเวลาจะจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเพียง 2 เฟสจากทั้งหมด 3 เฟส

2.2. การขับเคลื่อนแบบ Field Oriented Control (FOC)

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

3. การตรวจจับตำแหน่ง Rotor (Rotor Position Detection)

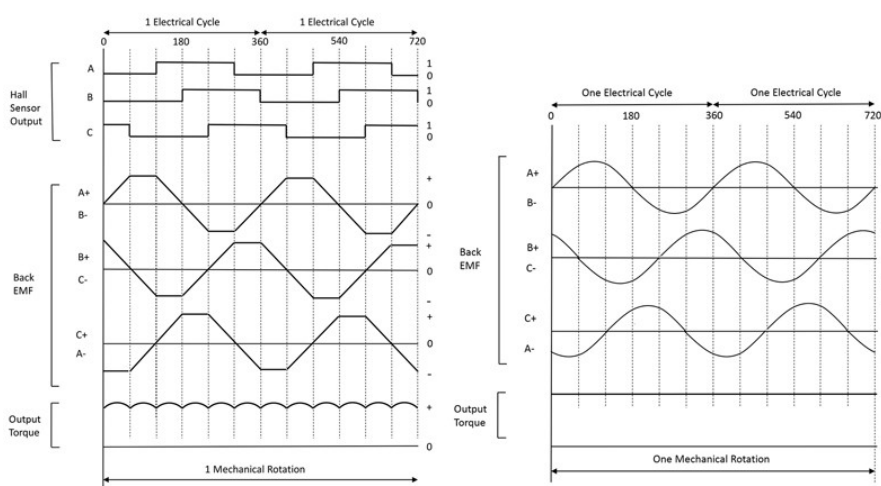
การควบคุมการทำงานของมอเตอร์ BLDC จำเป็นต้องทราบตำแหน่งเชิงมุมของ Rotor อย่างถูกต้อง เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการสลับการจ่ายกระแสให้กับขดลวด Stator วิธีการตรวจจับตำแหน่ง Rotor สามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลัก ได้แก่ การใช้ Hall Effect Sensor และการใช้ Back EMF Sensing

3.1. การตรวจจับด้วย Hall Effect Sensor

Hall Effect Sensor เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่ติดตั้งอยู่ภายในมอเตอร์ BLDC มีหน้าที่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวรที่อยู่บน 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) ที่เกิดขึ้นในขดลวดของเฟสที่ถูกปล่อยลอย เมื่อ Rotor หมุนผ่านขดลวด จะเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นตามกฎของฟาราเดย์



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 บนออสซิลโลสโคป 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 ที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป (Hz)

P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก (Magnetic Poles) ของมอเตอร์

120 คือ ค่าคงที่สำหรับการแปลงหน่วย (มาจาก 60 วินาที x 2 ของคู่ขั้วแม่เหล็ก)

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เชื่อมบอร์ดเข้ากับโปรแกรม Motor Pilot และ ตั้งค่าบอร์ดเชื่อมต่อกับ Oscilloscope นำสาย Probe ของ Oscilloscope ต่อเข้ากับจุดวัดสัญญาณ Phase 1, 2, 3 บนบอร์ดทดลอง และต่อสาย Ground (GND)
2. ที่โปรแกรม Motor Pilot ให้ปรับ 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 เพื่อให้สัญญาณภาพหยุดนิ่งเพื่อง่ายต่อการวัด
6. ใช้ฟังก์ชัน Vertical Cursor เลื่อนเส้น Cursor ไปวัดระยะเวลาของ 1 คาบการทางไฟฟ้า (1 Electrical Cycle) ของสัญญาณ Phase ใด Phase หนึ่ง
7. Screen Shot บน Oscilloscope เพื่ออ่านค่า Delta X (ΔX) หรือ Period ที่แสดงบนหน้าจอ (หน่วยเป็น ms) บันทึกค่านี้ลงตารางบันทึกผล
8. นำค่า Period (ΔX) ที่วัดได้ มาคำนวณหาความเร็วรอบ
9. นำค่าที่คำนวณมาเปรียบเทียบกับ Speed Reference เพื่อดูความสัมพันธ์ว่าเป็นเส้นตรงตามทฤษฎี

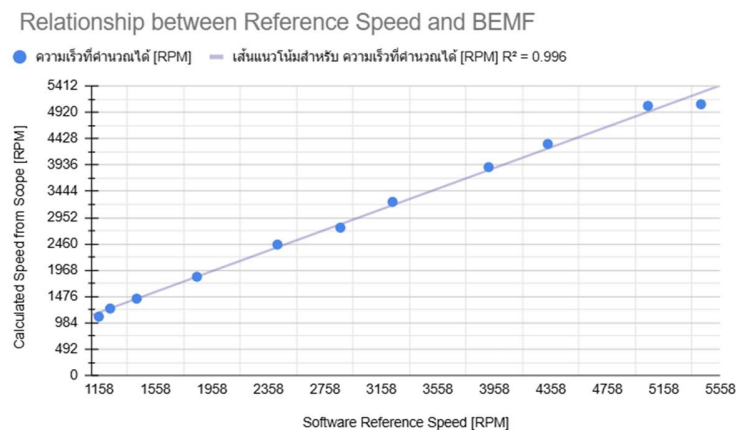
ผลการทดลอง

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



ภาพที่ 21 ลักษณะสัญญาณ Back EMF ที่วัดได้จาก Oscilloscope

จากการทดลองได้ตารางความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณและความเร็วของมอเตอร์ แกน X: ความเร็วรอบจากโปรแกรม (Software RPM) [หน่วย RPM] แกน Y: ความเร็วรอบที่คำนวณได้จาก Scope (Calculated RPM) [หน่วย RPM]



ภาพที่ 22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบจากโปรแกรมและความเร็วที่คำนวณได้

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองข้างต้นสามารถสรุปผลได้ว่า

1. ลักษณะสัญญาณที่วัดได้จากทั้ง 3 เฟส มีการเลื่อนเฟส (Phase Shift) ห่างกันเฟสละ 120 องศาตามลำดับ ซึ่งใช้ระบุทิศทางการหมุนได้ และหน้าตาของคลื่นเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal)

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

3. กราฟระหว่างความเร็วรอบที่สั่ง และความเร็วที่คำนวณได้ เป็นเส้นตรงโดยที่ $R^2 \approx 0.996$ ยืนยันว่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าแปรผันตรงกับความเร็วมอเตอร์

อภิปรายผล

1. กราฟความสัมพันธ์ที่ได้เป็นเส้นตรง (ค่า R^2 เกือบเท่ากับ 1) แสดงว่าสมการที่ใช้คำนวณแสดงแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของมอเตอร์ แต่จะมี Error สูงขึ้นเล็กน้อยในช่วงความเร็วต่ำและสูงมากๆ เพราะ ส่วนที่ความเร็วสูง คาบเวลาจะสั้นมาก ทำให้การวางเคอร์เซอร์วัดค่าใน Oscilloscope สามารถคลาดเคลื่อนได้

2. ลำดับการปรากฏของลูกคลื่นบนหน้าจอ Oscilloscope (เช่น สีเหลือง ,สีฟ้า ,สีม่วง) เป็นตัวบ่งชี้ทิศทางการหมุนของสนามแม่เหล็กมอเตอร์ทำให้มอเตอร์หมุนตามเข็ม หากต้องการกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ สามารถตั้ง RPM Reference ในทีสลิป ซึ่งจะทำการเปลี่ยนสัญญาณบนหน้าจอเปลี่ยนไป และมอเตอร์หมุนทวนเข็ม

3. ขอบสัญญาณมีลักษณะลาดเอียง เกิดจาก ค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) ภายในขดลวดของมอเตอร์ ซึ่งมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงของกระแส ทำให้กระแสไฟไม่สามารถพุ่งขึ้นหรือลดลงได้ในทันทีทันใด

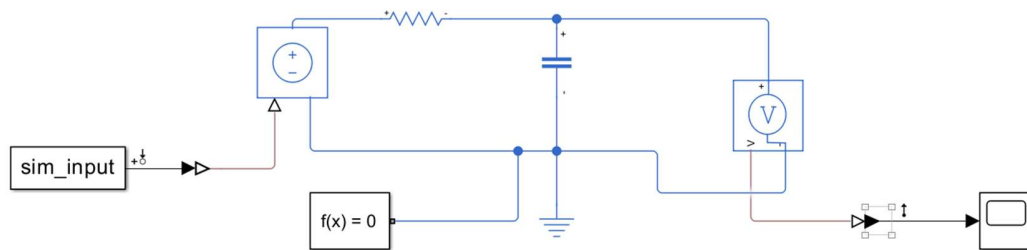
ข้อเสนอแนะ

- ควรเพิ่มรอบในการเก็บค่ามากขึ้นเพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความแม่นยำมากขึ้น
- ใช้วงจร Low Pass Filter ในการทดลองครั้งหน้า เพื่อลดสัญญาณรบกวนจาก PWM ทำให้รูปคลื่นคมชัด
- ควรวาง Cursor ให้ใกล้เคียงมากที่สุด เนื่องจากความเร็วรอบสูง คาบเวลาจะสั้นมาก การวาง Cursor คลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย จะส่งผลให้ค่าความเร็วรอบที่คำนวณได้

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

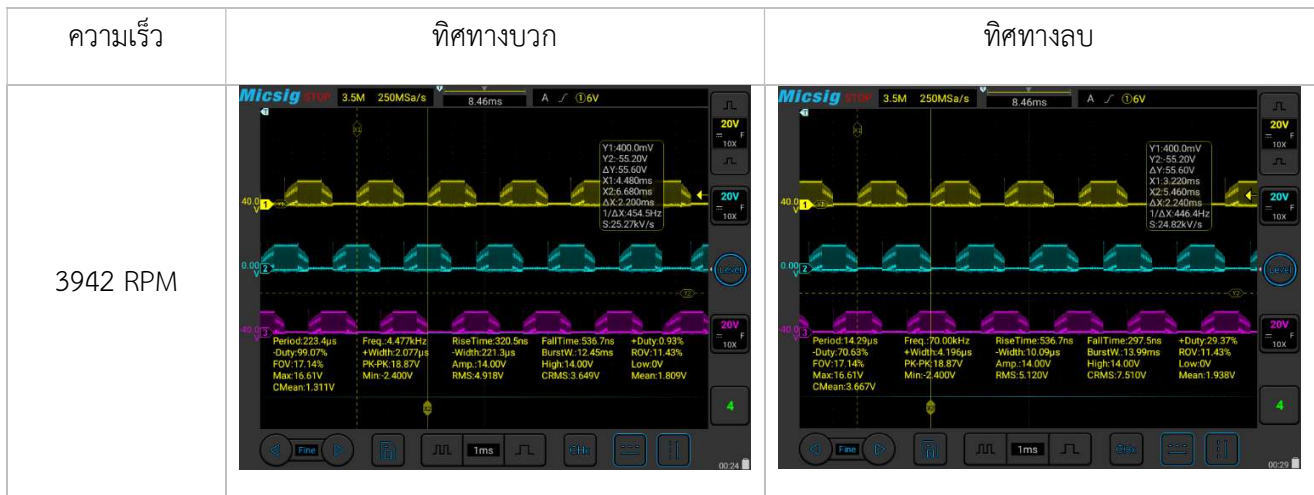


ภาพที่ 23 วงจร RC Low-pass filter

ภาคผนวก ข
STEPPER MOTOR

ภาคผนวก ค
BRUSHLESS DC MOTOR

การทดลองป้อนความเร็วอ้างอิงทั้งในทิศทางบวกและลบ แสดงให้เห็นถึงการเลื่อนเฟส (Phase Shift) และคาบ



การทดลองความสัมพันธ์ความเร็วและความถี่ของสัญญาณ

| RPM REF | ความเร็วจากโปรแกรม Software RPM | คาบเวลาจาก Scope [ms] | ความเร็วจากโปรแกรม Software RPM | คาบเวลาจาก Scope [ms] | ความเร็วจาก โปรแกรม Software RPM | คาบเวลาจาก Scope [ms] | AVG Software RPM | AVG Scope [ms] | ความเร็วที่คำนวณ ได้ [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 24ตารางการทดลองความสัมพันธ์ความเร็วและความถี่ของสัญญาณ