

LAB 2 : Actuators

Name

- นางสาวญาณิศา รอดเจริญ 67340500009
- นายณัฐพงศ์ หวังจิ 67340500010
- นางสาวบุญสิตา สุดศักดิ์ดา 67340500025
- นางสาวรัฐชิตา แข็งขัน 67340500035

Objectives

- เพื่อให้เข้าใจหลักการทำงานของ Motor อธิบายกระบวนการแปลงสัญญาณระหว่างปริมาณทางฟิสิกส์และสัญญาณไฟฟ้าได้ครบถ้วน เช่น การวัดกระแสไฟฟ้าของ Current Sensor (จากแรงดันไฟฟ้าแปลงเป็นกระแสไฟฟ้า) การวัดความเร็วของ Brushless DC Motor จาก Hall Sensor (จากคลื่นสัญญาณไฟฟ้าแปลงเป็นความเร็ว)
- เพื่อให้เข้าใจการออกแบบการทดลองตามหลักวิทยาศาสตร์ ใช้กระบวนการทางวิทยาศาสตร์ในการสำรวจพฤติกรรมและปรากฏการณ์ของ Sensor บันทึก สรุป และอภิปรายผลการทดลองอย่างเป็นระบบ โดยใช้ MATLAB และตรวจสอบผลการทดลองกับทฤษฎีและแหล่งข้อมูลที่เชื่อถือได้ เช่น Datasheet ของอุปกรณ์
- เพื่อให้มีการกำหนดตัวแปรและสมมติฐาน ระบุตัวแปรต้น ตัวแปรตาม และตัวแปรควบคุมได้อย่างถูกต้อง ตั้งสมมติฐานที่สอดคล้องกับตัวแปรและมีทฤษฎีรองรับ อ้างอิงข้อมูลจากทฤษฎีทางฟิสิกส์หรือ Datasheet ของอุปกรณ์
- เพื่อให้มีการดำเนินการทดลอง โดยมีการออกแบบขั้นตอนการทดลองด้วยตนเองตามหลักวิทยาศาสตร์ ใช้ Simulink, MATLAB Live Script (.mlx) และบอร์ดทดลองที่จัดเตรียมไว้ มีทำการทดลองซ้ำเพื่อความน่าเชื่อถือของข้อมูล อธิบายที่มาและเหตุผลของผลการทดลองที่ได้
- เพื่อให้สามารถเขียนรายงานทางวิทยาศาสตร์ ใช้สัญลักษณ์และสมการทางวิทยาศาสตร์อย่างถูกต้อง จัดรูปแบบเอกสารตามมาตรฐานสากล (การเว้นวรรค ขอบกระดาษ ระยะบรรทัด) นำเสนอข้อมูลอย่างเป็นระเบียบและอ่านง่าย

1. Lab DC Motor

การทดลองที่ 1 ศึกษา Motor Characteristic และคุณสมบัติของ Motor ในการใช้งานจริง

จุดประสงค์ (การทดลองนี้สร้างขึ้นเพื่ออะไร)

1. เพื่อศึกษาหลักการทำงานของ DC Motor
2. เพื่อสร้างและทำความเข้าใจ Motor Characteristic Curves ของ DC Motor ทั้งจากการทดลองและในอุดมคติ
3. เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์และค่า Stall Torque ของมอเตอร์

สมมติฐาน (ข้อสันนิษฐานเบื้องต้น)

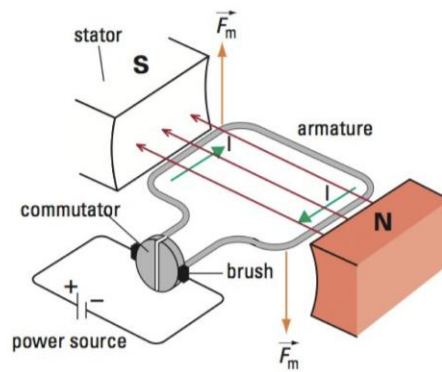
Motor Characteristic ของ DC Motor ที่ทดลองจริงกับในอุดมคติจะไม่เท่ากันเนื่องด้วยปัจจัยและสภาพแวดล้อมภายนอกต่าง ๆ และความสัมพันธ์ของความเร็วและแรงบิดแปรผกผันกัน คือเมื่อความเร็วของมอเตอร์ลดลงจะส่งผลและต่อแรงบิดที่เพิ่มขึ้น

ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น:
 - แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์
 - แรงบิดมอเตอร์จากการถ่วงน้ำหนัก
2. ตัวแปรตาม:
 - ความเร็วของมอเตอร์ (RPM)
 - กระแสไฟฟ้าที่ใช้
3. ตัวแปรควบคุม:
 - บอร์ด MotorXplorer
 - DC Motor

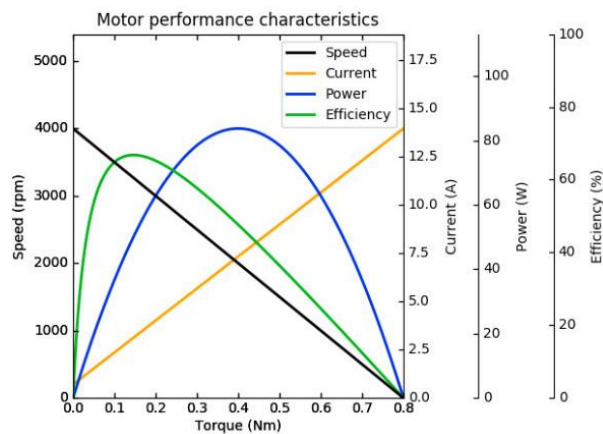
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการทำการทดลอง หรือเนื้อหาที่นำมาอธิบายผลการทดลอง)

Brushed DC Motor หรือมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน ทำงานโดยการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลด้วยหลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า ภายในมอเตอร์จะมีส่วนประกอบที่เป็น Permanent Magnet เมื่อจ่ายไฟเข้าไปก็จะผ่านแปรงถ่าน Stator ก็จะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมา Rotor จึงเกิดการหมุนซึ่งภายในจะมีขดลวดอยู่ ทำให้เกิดการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องจากกระแสจะไหลสลับขั้วไปมาจึงต้องมี Commutator ในการสับเปลี่ยนขั้วเพื่อให้มอเตอร์สามารถหมุนได้ครบรอบในทิศทางเดิม



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของ Brushed DC Motor

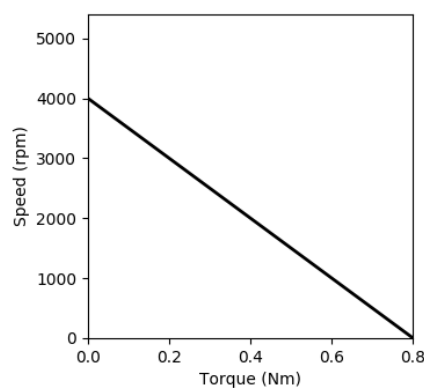
Motor Characteristic เป็นการแสดงความสามารถในการทำงานของ DC Motor จากค่าแรงบิดของมอเตอร์ ความเร็วรอบการหมุน กระแสไฟฟ้า พลังงาน และประสิทธิภาพของการทำงาน ซึ่งมาจากสมการทางไฟฟ้าและสมการทางกลของมอเตอร์



รูปที่ 2 Motor Characteristic Curves

กราฟเปรียบเทียบความเร็วและแรงบิดมอเตอร์ มาจากสมการดังนี้

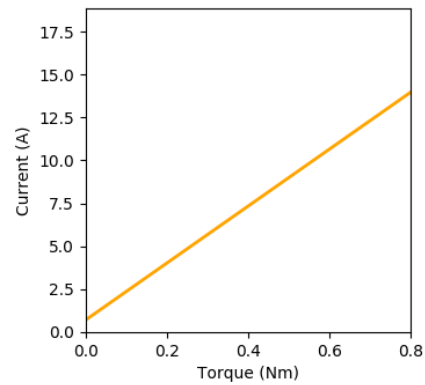
$$\omega = \left(\frac{0 - \omega_{NL}}{\tau_{ST}} \right) \tau_L + \omega_{NL}$$



รูปที่ 3 Motor Characteristic Curve Speed-Torque

กราฟเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าและแรงบิดมอเตอร์ มาจากสมการดังนี้

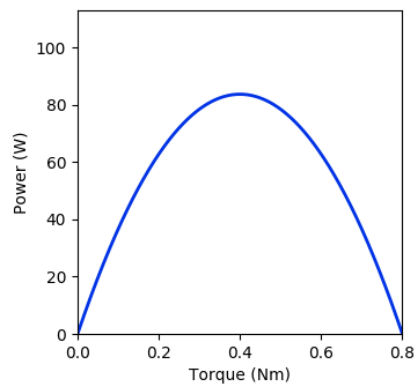
$$i = \left(\frac{i_{ST} - i_{NL}}{\tau_{ST}} \right) \tau_L + i_{NL}$$



รูปที่ 4 Motor Characteristic Curve Current-Torque

กราฟเปรียบเทียบพลังงานและแรงบิดมอเตอร์ มาจากสมการดังนี้

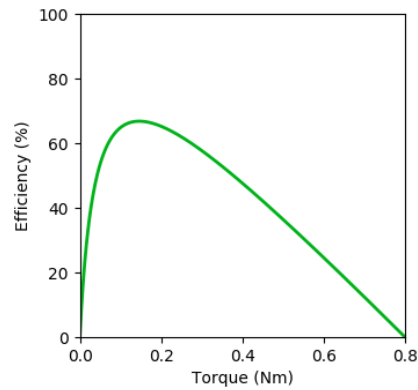
$$P = -\frac{\omega_{NL}}{\tau_{ST}} \tau_L^2 + \omega_{NL} \tau_L$$



รูปที่ 5 Motor Characteristic Curve Power-Torque

กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพและแรงบิดมอเตอร์ มาจากสมการดังนี้

$$\eta = \frac{-\frac{\omega_{NL}}{\tau_{ST}} \tau_L^2 + \omega_{NL} \tau_L}{\left(\frac{i_{ST} - i_{NL}}{\tau_{ST}} \right) \tau_L v_{in} + i_{NL} v_{in}}$$



รูปที่ 6 Motor Characteristic Curve Efficiency-Torque

โดยที่ :

ω = ความเร็วเชิงมุม (RPM)

i = กระแสไฟฟ้า (A)

P = พลังงาน (W)

η = ประสิทธิภาพการทำงาน (%)

ω_{NL} = ความเร็วเชิงมุมเมื่อไม่มี Load (RPM)

τ_{ST} = แรงบิดเมื่อมอเตอร์เกิดการ Stall (Nm)

τ_L = แรงบิดเมื่อมอเตอร์มี Load (Nm)

i_{ST} = กระแสไฟฟ้าเมื่อมอเตอร์เกิดการ Stall (A)

i_{NL} = กระแสไฟฟ้าเมื่อมอเตอร์มี Load (A)

v_{in} = แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ (V)

Torque Constant (K_m) เป็นค่าคงที่ของแรงบิดมอเตอร์ ที่มาจากลักษณะในทางกลและทางไฟฟ้าของมอเตอร์ ซึ่งขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น การออกแบบ ขนาด หรือวัสดุของมอเตอร์ สามารถพบได้ใน Datasheet ของมอเตอร์นั้น ๆ หรือสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\tau = K_m I$$

โดยที่ :

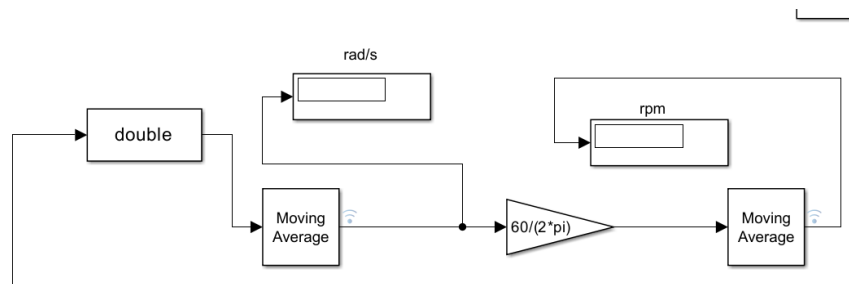
τ = แรงบิด (Nm)

K_m = Torque Constant (Nm/A)

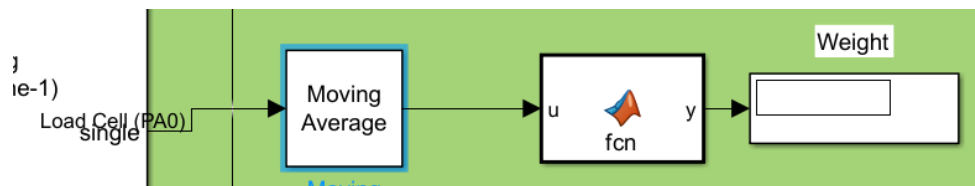
I = กระแสไฟฟ้า (A)

ขั้นตอนการดำเนินงาน (อธิบายขั้นตอนการทดลอง ใส่เฉพาะขั้นตอนที่จำเป็น)

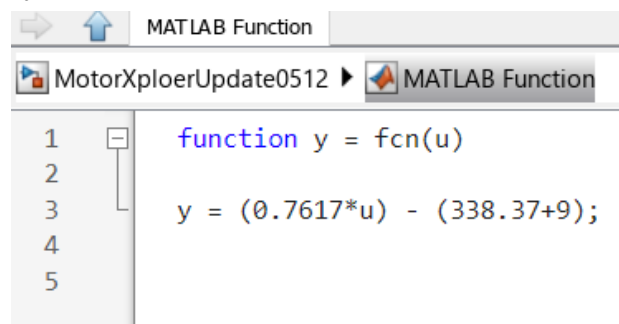
1. กำหนด Load ที่จะใส่โดยเริ่มตั้งแต่ 0-400 g เพื่อการหาค่า Torque โดยผูกติดไว้กับรอกที่มีระยะห่างจากแรงบิด 8.8 cm
2. ทำการขับ Motor แบบเต็มประสิทธิภาพ Duty Cycle 100% และทำการบันทึกค่ากระแสและความเร็วรอบที่ได้
3. ทำการทดลองในข้อที่ 1 และ 2 ซ้ำโดยเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ตั้งแต่ 0-12 V
4. นำ Load ออกเพื่อการนำมอเตอร์มาใช้กับตัวคานที่มีให้ในการหา Stall Torque โดยใช้ตัวคานกดลงน้ำหนักลงบน Load Cell ที่ให้มา



รูปที่ 7 โปรแกรมแปลงค่าและอ่านค่าของความเร็วรอบ



รูปที่ 8 โปรแกรมอ่านค่าจาก Load Cell เพื่อแปลงเป็นน้ำหนัก



รูปที่ 9 Matlab Function ที่ให้สำหรับการแปลงค่าที่ได้จาก Load Cell กลับเป็นน้ำหนัก

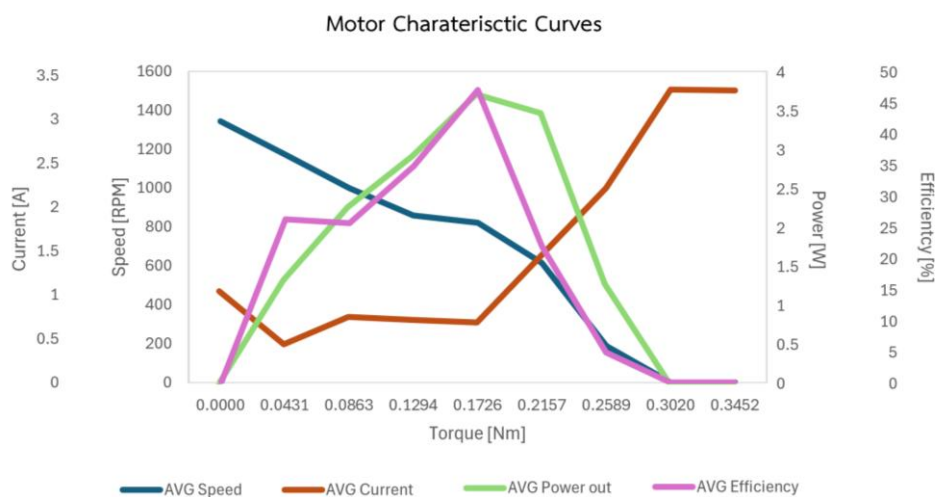
ผลการทดลอง (สิ่งที่เกิดขึ้นจริงในการทดลอง)

จากการทดลองโดยการเปลี่ยนแรงบิดด้วย Load ที่เพิ่มให้กับมอเตอร์ ทำให้สามารถเก็บค่าความเร็วและกระแสไฟฟ้าจากโปรแกรม MATLAB ได้แล้วจึงนำมาคำนวณหาพลังงานที่ได้และประสิทธิภาพของมอเตอร์ต่อไป ซึ่งได้ค่าเฉลี่ยของค่าต่าง ๆ ออกมา ดังนี้

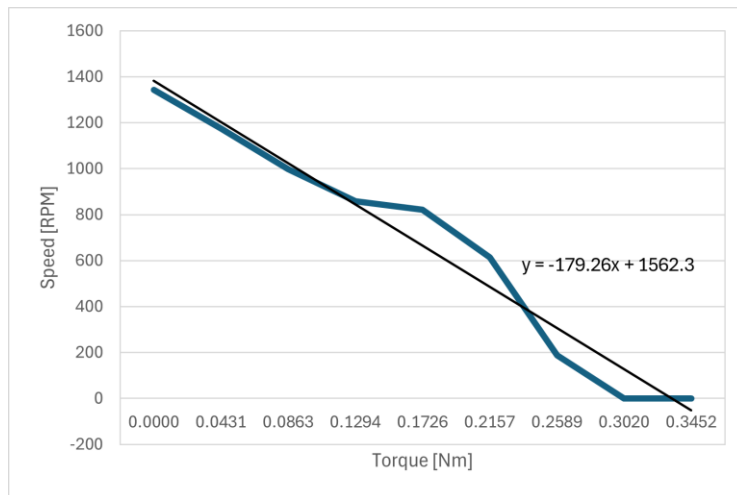
ตารางที่ 1 ผลการทดลองเพื่อสร้าง Motor Characteristic Curves

Torque [g-cm]	Speed [RPM]	Current [mA]	Power out [W]	Efficiency [%]
0	1342.31279	1026.333333	0	0
440	1173.385733	421.3166667	1.325509309	26.25208507
880	998.6017749	734.3566667	2.256130975	25.63385559
1320	857.9088052	701.1466667	2.907397139	34.72029165
1760	820.4437316	673.0466667	3.707240588	46.97422504
2200	613.5423056	1435.183333	3.465424944	21.91104791
2640	187.6118469	2203.066667	1.271608692	4.829020396
3080	0	3321.196667	0	0
3520	0	3313.25	0	0

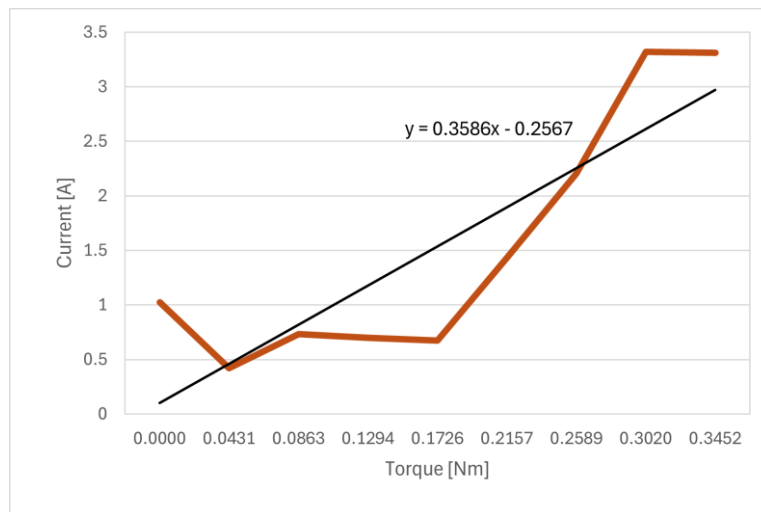
สามารถนำมาสร้างกราฟ Motor Characteristic Curves ที่เกิดจากการทดลองได้ ดังนี้



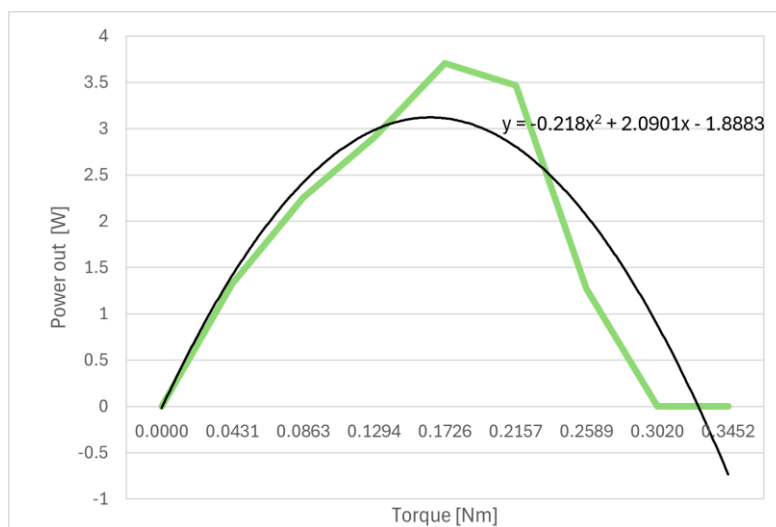
รูปที่ 10 Motor Characteristic Curves จากการทดลอง



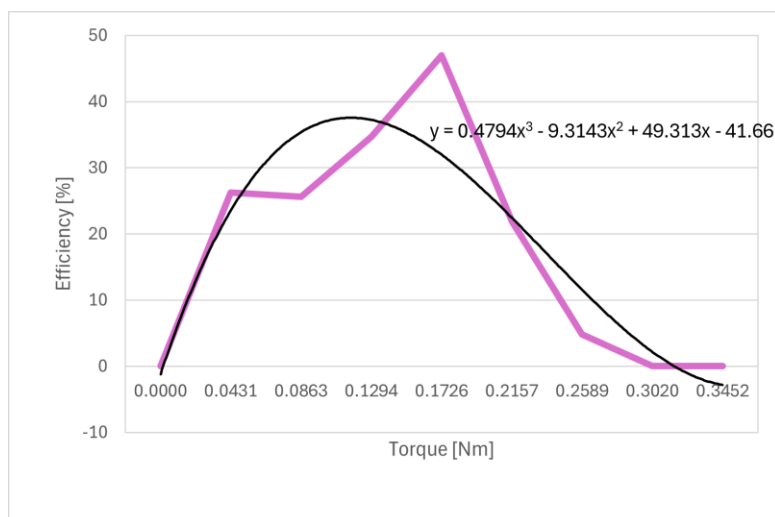
รูปที่ 11 Motor Characteristic Curves จากการทดลอง



รูปที่ 12 Motor Characteristic Curves จากการทดลอง



รูปที่ 13 Motor Characteristic Curves จากการทดลอง



รูปที่ 14 Motor Characteristic Curves จากการทดลอง

ตารางที่ 2 ผลการทดลองความเร็วของมอเตอร์แต่ละแรงบิดเมื่อเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า

	Torque [g-cm]							
Volt	0	50	100	150	200	250	300	350
0	-	-	-	-	-	-	-	-
1	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-
9	304.909	-	-	-	-	-	-	-
10	1105.808	880.636	571.334	531.322	652.694	278.934	-	-
11	1200.346	1058.921	577.923	721.353	783.233	403.362	156.130	-
12	1287.245	4243.707	977.656	843.871	844.062	626.051	177.903	-

สรุปผลการทดลอง (อธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นในการทดลอง)

จากการทดลองพบว่าการทดลองเพื่อเก็บค่าความเร็วรอบ กระแสไฟฟ้า พลังงาน และประสิทธิภาพทำให้พบว่ากราฟที่เป็นในอุดมคติ กับกราฟที่เกิดขึ้นจริงไม่เหมือนกัน และแนวโน้มของ Motor Characteristic Curves พบว่า

มอเตอร์จะมีประสิทธิภาพหรือ Efficiency ที่สูงที่สุด เมื่อมอเตอร์มีความเร็วที่ประมาณ 900 RPM เมื่อทำงานที่ 12 V และสามารถสรุปได้ว่าความเร็วและแรงบิดมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกัน

อภิปรายผล (วิเคราะห์สิ่งที่เกิดขึ้นในการทดลอง)

Motor Characteristic Curves จากการทดลองมีเส้นแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับในอุดมคติ คือความเร็วของมอเตอร์แปรผกผันกับแรงบิด ซึ่งเมื่อเพิ่มแรงบิดความเร็วจะยิ่งลดลงเรื่อย ๆ ในแรงดันที่เท่ากัน แต่ในชีวิตจริงมอเตอร์นั้นไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพหรือที่ 100% ได้ เนื่องจากลักษณะทั้งทางกลและทางไฟฟ้า การสูญเสียพลังงาน ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดความร้อน สูญเสียพลังงานในเชิงกลจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ส่งผลให้สนามแม่เหล็กไม่ทำงานเต็มประสิทธิภาพ นอกจากนี้การเกิด Stall Torque สามารถหาได้ทั้งจากการคำนวณและการทดลองโดยทางผู้จัดทำได้ใช้การทดลองใส่ Torque ให้กับมอเตอร์จนกระทั่งเกิดค่า Saturation ซึ่งอยู่ที่แรงบิดประมาณ 1595 g-cm เมื่อทำงานที่ 12 V

ข้อเสนอแนะ

- ต้องเช็คหรือ Calibrate ค่าจากโปรแกรม MATLAB ให้ถูกต้องก่อนการทดลองเพื่อให้ได้การทดลองที่ถูกต้องที่สุด
- ควรทำให้การออกแบบ mechanic ขณะทำมีหลายครั้งมากที่ Belt หย่อนเลยทำให้เก็บค่าไม่ได้ตามที่ต้องการ
- Encoder มีปัญหาบ่อยทำให้ต้องถอด ๆ ต่อมาแก้ไขอยู่บ่อย ๆ
- ระบบของ DC Shaft Bending การวางระบบมี Misalignment ทำให้ค่าที่ได้จะคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง

อ้างอิง (ใส่แค่ Link)

<https://th.vsdmotor.com/info/brushed-dc-motor-basics-102180834.html>

<https://nrsyed.com/2018/01/21/how-to-read-a-dc-motor-datasheet/>

<https://naichangmashare.com/2021/05/28/electric-motor-ep-1/>

<https://www.monolithicpower.com/en/learning/mpscholar/electric-motors/dc-motors/fundamentals>

<https://nit-edu.org/wp-content/uploads/2021/09/ch-29-Dc-motor.pdf>

[https://jecrcfoundation.com/wp-](https://jecrcfoundation.com/wp-content/uploads/notes/btech/Electrical%20Engineering/6th%20Semester/Electric%20Drives/Unit-2.pdf)

[content/uploads/notes/btech/Electrical%20Engineering/6th%20Semester/Electric%20Drives/Unit-2.pdf](https://jecrcfoundation.com/wp-content/uploads/notes/btech/Electrical%20Engineering/6th%20Semester/Electric%20Drives/Unit-2.pdf)

การทดลองที่ 2 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ PWM, Duty Cycle กับความเร็วรอบของมอเตอร์ กระแสไฟฟ้า และประสิทธิภาพของมอเตอร์

จุดประสงค์ (การทดลองนี้สร้างขึ้นเพื่ออะไร)

1. เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ ระหว่างความถี่ PWM และ Duty Cycle กับความเร็วรอบของมอเตอร์ กระแสไฟฟ้า และประสิทธิภาพของมอเตอร์
2. เพื่อแสดงให้เห็นถึงหลักการทำงานของ Signal Conditioning สำหรับการแปลงสัญญาณกระแสไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแรงดันที่เหมาะสม
3. เพื่อการวิเคราะห์ Fast Fourier Transform (FFT) ของสัญญาณความเร็วรอบมอเตอร์ ด้วยความถี่ PWM ที่แตกต่างกัน

สมมติฐาน (ข้อสันนิษฐานเบื้องต้น)

การปรับ Duty Cycle ของสัญญาณ PWM ที่ความถี่คงที่ จะส่งผลให้ความเร็วรอบเฉลี่ยของมอเตอร์เพิ่มขึ้น กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพของมอเตอร์ต่ำในช่วงแรก ขึ้นสูงในช่วงกลาง กลับลงต่ำอีกครั้งในช่วงท้าย และแสดงให้เห็นถึง Signal Conditioning สำหรับการแปลงสัญญาณกระแสไฟฟ้าเป็นสัญญาณแรงดันที่เหมาะสม และวงจร Low-Pass Filter สามารถกำจัดสัญญาณรบกวนได้

ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น:
 - Duty Cycle ของสัญญาณ PWM
 - ความถี่ PWM
2. ตัวแปรตาม:
 - ความเร็วรอบของมอเตอร์
 - กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอเตอร์
 - ประสิทธิภาพของมอเตอร์
3. ตัวแปรควบคุม:
 - มอเตอร์ที่ใช้เป็นมอเตอร์ตัวเดิม
 - แรงดันไฟฟ้าที่จ่าย 12V

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการทำการทดลอง หรือเนื้อหาที่นำมาอธิบายผลการทดลอง)

หลักการของ PWM (Pulse Width Modulation) และ Duty Cycle PWM (Pulse Width Modulation) คือเทคนิคการควบคุมกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่จ่ายให้กับโหลด เช่น มอเตอร์ โดยการเปิด-ปิดแหล่งจ่ายไฟด้วยความถี่ที่คงที่ แต่เปลี่ยนความกว้างของ Pulse ในแต่ละรอบ

อัตราส่วนระหว่างเวลาที่สัญญาณอยู่ในสถานะ เปิด T_{on} ต่อคาบเวลาทั้งหมด (T) เรียกว่า **Duty Cycle**

$$\text{Duty Cycle(\%)} = \frac{T_{on}}{T} \times 100\%$$

แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่มอเตอร์ได้รับจะแปรผันตามค่า Duty Cycle ดังสมการ

$$V_{avg} = V_{peak} \times \text{Duty Cycle}$$

ดังนั้น การเปลี่ยนค่า Duty Cycle จึงสามารถใช้ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเกิดความสูญเสียน้อยกว่าการควบคุมด้วยตัวต้านทาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน (อธิบายขั้นตอนการทดลอง ใส่เฉพาะขั้นตอนที่จำเป็น)

- 1.ปรับความถี่ PWM ของมอเตอร์ตั้งแต่0%-100% เก็บผลการทดลองเป็นความเร็วมอเตอร์และกระแสที่ใช้
- 2.ทำข้อ1ซ้ำ 3 ครั้ง
- 3.วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

ผลการทดลอง (สิ่งที่เกิดขึ้นจริงในการทดลอง)

ตารางที่ 2 ผลการทดลองเปรียบเทียบ RPM และ Current(mA) ที่ Duty cycle ต่าง ๆ

Duty cycle	RPM	Current(mA)
10%	0.0	46.44
20%	0.0	414.8
30%	0.0	740
40%	0.0	1034
50%	464.4	690.8
60%	679.3	640.3
70%	877.9	669.7
80%	1077.0	701.7
90%	1249.0	788.1
100%	1519.0	707.3

ตารางที่ 3 ผลการทดลองเปรียบเทียบ RPM และ Current(mA) Duty cycle ต่าง ๆ

Duty cycle	RPM	Current(mA)
10%	0.0	32.66
20%	0.0	322.6
30%	0.0	654.4
40%	0.0	938.8
50%	313.3	501.6
60%	431.9	551.2
70%	720.5	571.7

80%	798.4	619.5
90%	1328.0	616.7
100%	1518.0	643.3

ตารางที่ 4 ผลการทดลองเปรียบเทียบ RPM และ Current(mA) Duty cycle ต่าง ๆ

Duty cycle	RPM	Current(mA)
10%	0.0	76.49
20%	0.0	441.3
30%	0.0	818.8
40%	344.9	672.7
50%	605.4	698.5
60%	861.4	695.5
70%	1107.0	699.8
80%	1362.0	709.6
90%	1605.0	734.7
100%	1860.0	745.7

สรุปผลการทดลอง (อธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นในการทดลอง)

จากการทดลองปรับค่า Duty Cycle ของสัญญาณ PWM ตั้งแต่ 0% – 100% พบว่า ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ (RPM) มีความสัมพันธ์แบบเพิ่มขึ้นโดยตรงตามการเพิ่มของ Duty Cycle ซึ่งเป็นผลจากการที่มอเตอร์ได้รับพลังงานเฉลี่ยต่อรอบสัญญาณมากขึ้น ส่งผลให้แรงบิดและความเร็วมอเตอร์สูงขึ้นตามลำดับ

นอกจากนี้ยังพบว่า ค่ากระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้งานเพิ่มขึ้นตามค่า Duty Cycle โดยเฉพาะช่วง Duty Cycle ต่ำถึงกลาง (10 – 50%) กระแสไฟเพิ่มขึ้นค่อนข้างชัน เนื่องจากแรงเสียดทานเริ่มต้นและโหลดของระบบสายพาน (Belt) ต้องใช้กระแสในช่วงเร่งรอบเริ่มต้นสูง หลังจากรอบเครื่องนิ่งแล้วอัตราการเพิ่มของกระแскоนข้างคงที่

จากการทดลองที่ Duty Cycle ต่ำ (<30%) มอเตอร์ยังไม่สามารถหมุนได้ หรือหมุนช้า เนื่องจากแรงบิดไม่เพียงพอ ที่ Duty Cycle ประมาณ 50–90% ความเร็วของมอเตอร์เพิ่มขึ้นค่อนข้างเป็นเส้นตรงตามสัดส่วนของ Duty Cycle ที่ Duty Cycle สูง (>90%) ความเร็วเริ่มเสถียรขึ้นและการเพิ่มขึ้นของกระแสมีอัตราช้าลง สะท้อนถึงการถึงจุดใกล้ความสามารถสูงสุดของมอเตอร์

อภิปรายผล (วิเคราะห์สิ่งที่เกิดขึ้นในการทดลอง)

ความสัมพันธ์ของ PWM มีแนวโน้มที่จะแปรผันตรงกันกับความเร็วและกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์

ข้อเสนอแนะ

- ควรทำให้การออกแบบ mechanic ขณะทำมีหลายครั้งมากที่ Belt หย่อนเลยทำให้เก็บค่าไม่ได้ตามที่ต้องการ

- Encoder มีปัญหาลittleทำให้ต้องถอด ๆ ต่อมาแก้ไขอยู่บ่อย ๆ
- ระบบของ DC Shaft Bending การวางระบบมี Misalignment ทำให้ค่าที่ได้จะคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง

อ้างอิง (ใส่แค่ Link)

<https://www.arduitronics.com/article/24/arduino-and-motor-control-part-2>

<https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/arduino-dc-motor-control-tutorial-l298n-pwm-h-bridge/>

การทดลองที่ 3 วิเคราะห์และเปรียบเทียบโหมต Sign-Magnitude กับ Locked Anti-Phase

จุดประสงค์ (การทดลองนี้สร้างขึ้นเพื่ออะไร)

1. เพื่อทำความเข้าใจและอธิบายหลักการทำงานของโหมตการขับเคลื่อน PWM แบบ Sign-Magnitude และ Locked Anti-Phase
2. เพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ข้อดี-ข้อเสีย ของการขับเคลื่อนมอเตอร์ระหว่างโหมต Sign-Magnitude และ Locked Anti-Phase ในด้านต่าง ๆ เช่น ประสิทธิภาพ, ความเป็นเชิงเส้นของการควบคุม, และการเกิดฮาร์มอนิก

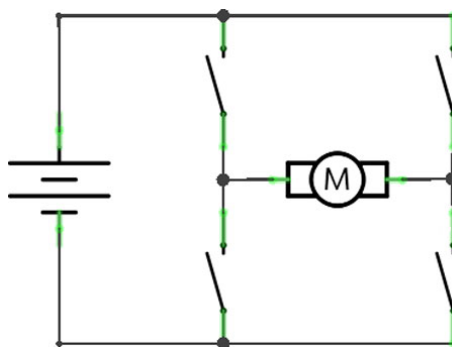
สมมติฐาน (ข้อสันนิษฐานเบื้องต้น)

การขับเคลื่อนมอเตอร์แบบ Locked Anti-Phase จะให้ความสามารถในการควบคุมที่มีความเป็นเชิงเส้นดีกว่า และมีความเรียบของกระแสต่ำกว่าเมื่อเทียบกับโหมต Sign-Magnitude โดยเฉพาะ Duty Cycle ต่ำ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมที่สูงกว่าและฮาร์มอนิกที่ต่ำกว่าในโหมต Locked Anti-Phase

ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น:
 - โหมตการขับเคลื่อน PWM
 - Duty Cycle ของสัญญาณ PWM
2. ตัวแปรตาม:
 - ความเร็วรอบของมอเตอร์
 - กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอเตอร์
 - ประสิทธิภาพของมอเตอร์
3. ตัวแปรควบคุม:
 - มอเตอร์ที่ใช้เป็นมอเตอร์ตัวเดิม
 - แรงดันไฟฟ้าที่จ่าย 12V

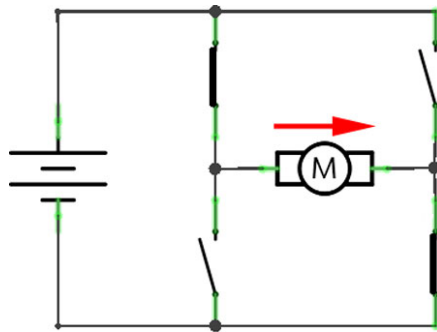
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการทำการทดลอง หรือ เนื้อหาที่นำมาอธิบายผลการทดลอง)



รูปที่ 15 วงจร H-Bridge

H-Bridge เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ควบคุมทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอุปกรณ์ เพื่อการควบคุมทิศทางและความเร็วของ DC Motor โดยประกอบด้วยสวิตช์ทรานซิสเตอร์ เช่น MOSFET จำนวน 4 ตัว จัดเรียงในลักษณะคล้ายตัว H

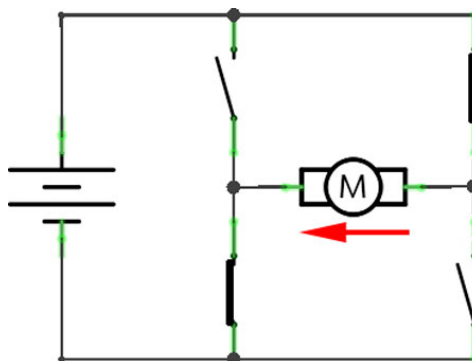
การทำงานของ H-Bridge เกิดจากการ "เปิด-ปิด" สวิตช์เป็นคู่ๆ เพื่อบังคับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า ดังนี้



รูปที่ 16 การเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าเมื่อเปิดสวิตช์ S1 และ S4

1. หมุนไปข้างหน้า (Forward)

- เราจะปิดสวิตช์ S1 และ S4 (คู่ทแยงมุม)
- กระแสไฟฟ้าจะไหลจากแหล่งจ่ายผ่าน S1 -> เข้ามอเตอร์ (ซ้ายไปขวา) -> ผ่าน S4 -> ลงกราวด์
- ผลลัพธ์: มอเตอร์หมุนในทิศทางหนึ่ง (เช่น ตามเข็มนาฬิกา)



รูปที่ 17 การเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าเมื่อเปิดสวิตช์ S3 และ S2

2. หมุนกลับทาง (Reverse)

- เราจะปิดสวิตช์ S3 และ S2 (คู่ทแยงมุมอีกฝั่ง)
- กระแสไฟฟ้าจะไหลจากแหล่งจ่ายผ่าน S3 -> เข้ามอเตอร์ (ขวาไปซ้าย) -> ผ่าน S2 -> ลงกราวด์
- ผลลัพธ์: กระแสไหลกลับทิศ ทำให้มอเตอร์หมุนในทิศทางตรงกันข้าม

3. เบรก (Brake)

- เกิดจากการปิดสวิตช์ด้านล่างทั้งคู่ (S2 และ S4) หรือด้านบนทั้งคู่ (S1 และ S3) พร้อมกัน
- ขั้วทั้งสองของมอเตอร์จะถูกลัดวงจรถึงกัน (Short Circuit) ทำให้เกิดแรงต้านทางไฟฟ้า (Back EMF)
- ผลลัพธ์: มอเตอร์จะหยุดหมุนอย่างรวดเร็ว

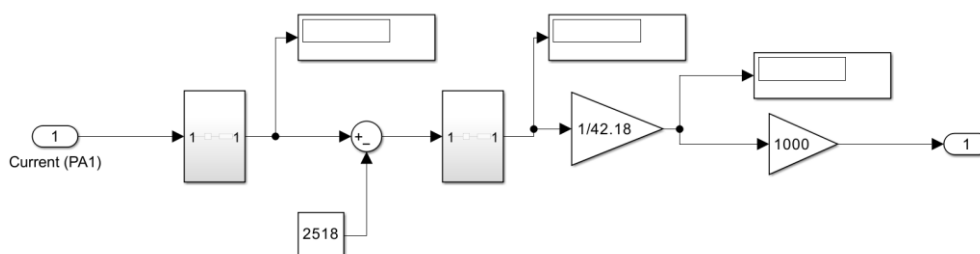
4. ปลอยไหลอิสระ (Coast / Free Running)

- เปิดสวิตช์ทุกตัว (S1, S2, S3, S4) ออกทั้งหมด
- ไม่มีกระแสไหลเข้ามอเตอร์
- ผลลัพธ์: มอเตอร์จะหมุนฟรีต่อไปเรื่อย ๆ ด้วยแรงเฉื่อยจนกว่าจะหยุดเอง

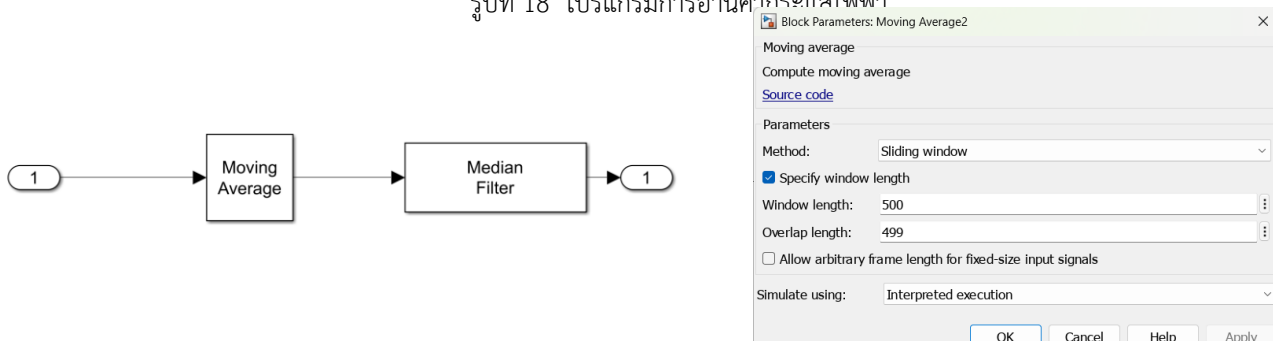
ห้ามเปิดสวิตช์ในฝั่งเดียวกันพร้อมกัน เช่น ห้ามเปิด S1 และ S2 พร้อมกัน (หรือ S3 และ S4 พร้อมกัน) เพราะกระแสไฟจะไหลจากแหล่งจ่าย (VCC) ลงสู่กราวด์ (GND) โดยตรงโดยไม่ผ่านมอเตอร์ ทำให้เกิดการลัดวงจร ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์เสียหาย

ขั้นตอนการดำเนินงาน (อธิบายขั้นตอนการทดลอง ใส่เฉพาะขั้นตอนที่จำเป็น)

1. เลือกโหมดที่ต้องการ Drive มอเตอร์ด้วยการต่อบนบอร์ดของมอเตอร์ ถ้าเป็น Sign-Magnitude ให้ต่อปกติ แต่ถ้าต้องการ Locked Anti-Phase ให้ต่อโดยการนำเอา DIR ต่อกับสัญญาณ PWM และนำช่อง PWM ต่อ GND
2. ปรับค่า Duty Cycle จาก 0-100% โดยเพิ่มขึ้นทีละ 10% บันทึกค่า RPM, Current, และสังเกตทิศทางการหมุนไป โดยใช้โปรแกรมด้านล่างนี้สำหรับการทำ Signal Conditioning สำหรับการอ่านค่ากระแสไฟฟ้า และส่วนของ Subsystem ที่ทำการหาค่ากลางของค่าต่าง ๆ เพื่อนำมาใช้งาน โดยใช้ค่า 500 sample ในการหา



รูปที่ 18 โปรแกรมการอ่านค่ากระแสไฟฟ้า



รูปที่ 19 โปรแกรมหาค่ากลางสำหรับการนำไปใช้โดยใช้ตัวอย่างที่ 500 ตัวอย่าง

3. วิเคราะห์ผล

ผลการทดลอง (สิ่งที่เกิดขึ้นจริงในการทดลอง)

ตารางที่ 5 ผลการทดลอง Sign-Magnitude Average จากการทดลอง 3 ครั้ง

Sign-Magnitude Average จากการทดลอง 3 ครั้ง				
Duty Cycle	Direction	RPM	Current [mA]	
0%		Not Move	0	51.86
10%		Not Move	0	392.9
20%		Not Move	0	737.73
30%		Not Move	0	881.83
40%		CW	763.16	630.3
50%		CW	1022.96	639.14
60%		CW	1272.66	647.06
70%		CW	1508.33	676.93
80%		CW	1768.33	713.16
90%		CW	2021	734.7
100%		CW	2255.33	765.43

ตารางที่ 6 ผลการทดลอง Locked Anti-Phase Average จากการทดลอง 3 ครั้ง

Locked Anti-Phase Average จากการทดลอง 3 ครั้ง			
Duty Cycle	Direction	RPM	Current [mA]
0%	CW	2233	612.56
10%	CW	1741	586.56
20%	CW	1251	557.4
30%	CW	745.03	529.66
40%	CW	266.53	597.73
50%	Not Move	0	188.73
60%	CCW	223.93	140.95
70%	CCW	536.73	167.93
80%	CCW	1202.66	205.26
90%	CCW	1677.66	254.3
100%	CCW	2189	262.53

สรุปผลการทดลอง (อธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นในการทดลอง)

เนื่องจากความผิดพลาดในการวัดกระแสที่เกิดขึ้นจึงทำให้ค่ากระแสที่ได้ไม่ตรงกับค่าจริงที่เกิดขึ้น แต่ยังสามารถใช้ดูแนวโน้มของกระแสได้แบบเดียวกัน

Sign-Magnitude Drive มีการเคลื่อนที่ในทิศทางเดียว คือ CW หรือตามเข็มนาฬิกา เมื่อมีการเปลี่ยน Duty Cycle จะทำให้ RPM และ Current เปลี่ยนไปด้วย โดยหลังจากเริ่มหมุนแล้วเมื่อ Duty Cycle เพิ่มมากขึ้นค่ากระแสและความเร็วรอบก็จะเพิ่มขึ้นตามด้วยเช่นกัน

Locked Anti-Phase Drive มีการเคลื่อนที่ในสองทิศทางเดียว คือ CW หรือตามเข็มนาฬิกา และ CCW หรือทวนเข็มนาฬิกา ซึ่งขึ้นอยู่กับ Duty Cycle ซึ่งจะทำให้ทิศทางและความเร็ว โดยที่เมื่อ Duty Cycle เป็น 0 จะหมุนในทิศ CW และ RMP กับ Current ได้กระแสกับความเร็วยกเว้นกับการจ่ายเต็มของ Sign-Magnitude และเมื่อมีการเปลี่ยน Duty Cycle เพิ่มมากขึ้นค่ากระแสและความเร็วยกเว้นก็จะลดลง (Duty Cycle < 50%) จนเมื่อถึง 50% จะหยุดหมุน และเมื่อ Duty Cycle เป็น 60% จะหมุนกลับทิศ CCW เมื่อมีการเปลี่ยน Duty Cycle เพิ่มมากขึ้นค่ากระแสและความเร็วยกเว้นก็จะเพิ่มขึ้น (Duty Cycle > 50%)

อภิปรายผล (วิเคราะห์สิ่งที่เกิดขึ้นในการทดลอง)

Sign-Magnitude Drive ทำงานแยกสัญญาณควบคุมออกเป็น 2 ส่วน คือ สัญญาณทิศทาง (Sign) และ สัญญาณขนาดแรงดัน (Magnitude/PWM) ในขณะที่ PWM เป็น ON กระแสจะไหลเข้ามอเตอร์ แต่ช่วง OFF มอเตอร์จะอยู่ในสถานะ ปล่อยไหล ผลที่ได้คือ ความสัมพันธ์ระหว่าง Duty Cycle และความเร็วยกเว้นมีความเป็นเชิงเส้นที่ต่ำกว่า โดยเฉพาะในช่วงความเร็วต่ำหรือจุดเริ่มออกตัว เนื่องจากแรงเสียดทานในระบบมีผลกระทบชัดเจนเมื่อไม่มีแรงบิดต้าน ประสิทธิภาพสูงกว่า และเกิดความร้อนน้อยกว่า เนื่องจากในช่วง OFF กระแสไฟฟ้าจะลดลงหรือหยุดไหล ทำให้การสูญเสียพลังงานในรูปความร้อน (Switching Loss และ Conduction Loss) น้อยกว่า การจ่ายไฟเป็นช่วงๆ และหยุด ทำให้กระแสมีความเรียบกว่า (เมื่อใช้ความถี่ที่เหมาะสม) และมี Ripple Current น้อยกว่า จึงสร้างสัญญาณรบกวนน้อยกว่า

Locked Anti-Phase Drive โหมดนี้ใช้สัญญาณ PWM เพียงเส้นเดียวในการควบคุมทั้งทิศทางและความเร็ว โดยที่ Duty Cycle 50% มอเตอร์จะหยุดนิ่ง (แรงดันเฉลี่ยเป็น 0) หาก >50% หมุนทางหนึ่ง และ <50% หมุนอีกทางหนึ่ง การทำงานลักษณะนี้ทำให้อัตราการรับแรงดันและกระแสไฟฟ้าตลอดเวลา (สลับทิศไปมาอย่างรวดเร็ว) ผลที่ได้คือ ความเป็นเชิงเส้น (Linearity) ที่ดีเยี่ยม สามารถควบคุมได้แม่นยำแม้ที่ความเร็วรอบต่ำ และสามารถเบรก (Active Braking) ได้ในตัวเมื่อลด Duty Cycle ลงอย่างรวดเร็ว มีการเกิด Ripple Current (กระแสกระเพื่อม) ที่สูงมาก เนื่องจากกระแสไฟฟ้าต้องไหลสลับทิศทางตลอดเวลาแม้ในขณะที่มอเตอร์หยุดนิ่ง (Duty Cycle 50%) ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานในขดลวด และในตัวทรานซิสเตอร์สูงกว่า ส่งผลให้อัตราการรับแรงดันและอุณหภูมิของมอเตอร์สูงกว่าโหมด Sign-Magnitude สวิตช์ที่กระแสไหลสลับชั่วเวลาด้วยความถี่ PWM ทำให้เกิด Ripple ของกระแสที่รุนแรง (High Ripple Current) ซึ่งส่งผลให้เกิดสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า (Harmonics) สูงกว่า และอาจทำให้เกิดเสียงรบกวนในตัวมอเตอร์ได้มากกว่า

ข้อเสนอแนะ

- ควรทำให้การออกแบบ mechanic ขณะทำมีหลายครั้งมากที่ Belt หย่อนเลยทำให้เก็บค่าไม่ได้ตามที่ต้องการ
- Encoder มีปัญหาบ่อยทำให้ต้องถอด ๆ ต่อมาแก้ไขอยู่บ่อย ๆ
- ระบบของ DC Shaft Bending การวางระบบมี Misalignment ทำให้ค่าที่ได้จะคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง

อ้างอิง (ใส่แค่ Link)

<https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/arduino-dc-motor-control-tutorial-l298n-pwm-h-bridge/>

<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/h-bridge-dc-motor-control-complementary-pulse-width-modulation-pwm-shoot-through-dead-time-pwm/>

<https://surl.li/kslabw>

2. Stepper Motor

การทดลองที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณขับและความเร็วของมอเตอร์

จุดประสงค์ (การทดลองนี้สร้างขึ้นเพื่ออะไร)

1. เพื่อศึกษาหลักการทำงานและประเภทของ Stepper Motor
2. เพื่อเปรียบเทียบโหมดการทำงาน ความแตกต่างของผลที่เกิดขึ้น และข้อดีข้อเสียของ Stepper Motor แต่ละแบบ
3. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณขับและความเร็วของมอเตอร์ในแต่ละโหมด

สมมติฐาน (ข้อสันนิษฐานเบื้องต้น)

Stepper Motor แต่ละโหมดมีลักษณะการทำงานที่ต่างกัน โดยโหมดการทำงานจะส่งผลต่อความละเอียดขององศาในการหมุนของมอเตอร์ ซึ่งส่งผลให้สัญญาณขับมีความถี่ที่แปรผันตามความละเอียดขององศา และส่งผลให้ความเร็วของมอเตอร์แตกต่างกันออกไป

ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น:
 - โหมดการทำงานของมอเตอร์ ได้แก่ Full Step, Half Step และ Micro Step
 - Frequency
2. ตัวแปรตาม:
 - ลักษณะการเคลื่อนที่และการทำงานของมอเตอร์
 - ความเร็วของมอเตอร์
3. ตัวแปรควบคุม:
 - Stepper Motor ที่ใช้เป็นตัวเดิม
 - ทำงานโดยใช้ไฟ 12 V

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการทำการทดลอง หรือเนื้อหาที่นำมาอธิบายผลการทดลอง)

หลักการทำงานของ Stepper Motor ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณพัลส์ทางไฟฟ้าให้เป็นการเคลื่อนที่เชิงมุม โดยมอเตอร์จะหมุนเป็นจังหวะ หรือ Step ที่แน่นอน โดยประกอบไปด้วย Stator ขดลวดที่อยู่กับที่ ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อได้รับกระแส , Rotor ส่วนที่หมุน มักเป็นแม่เหล็กถาวรหรือเหล็กที่มีฟันเฟือง ประเภทของ Stepper Motor สามารถแบ่งตามโครงสร้างภายใน ได้ 3 ประเภทหลัก

1. Permanent Magnet ตัว Rotor ทำจากแม่เหล็กถาวร มีขั้วเหนือ-ใต้ ให้แรงบิดดี แต่ความละเอียดต่ำ Step Angle ประมาณ 90 องศา

2. Variable Reluctance ตัว Rotor ทำจากเหล็กอ่อนที่มีฟันเฟือง ไม่มีแม่เหล็กถาวร หมุนโดยอาศัยแรงดึงดูดทางแม่เหล็กในตำแหน่งที่มีความต้านทานแม่เหล็กต่ำสุดเพราะเป็นโลหะ ตอบสนองรวดเร็ว ไม่มีแรงดูดตกค้างเมื่อหยุดจ่ายไฟ แรงบิดต่ำกว่าแบบอื่น และความละเอียดปานกลาง

3. Hybrid เป็นการรวมข้อดีของแบบ PM และ VR เข้าด้วยกัน Rotor เป็นแม่เหล็กถาวรที่มีฟันเฟืองละเอียด * ให้แรงบิดสูง และมีความละเอียดสูงมาก

และสามารถแบ่งตามการขับเคลื่อนหลักได้ 3 รูปแบบ

1. Full Step Drive เป็นการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าขดลวดทีละ 2 เฟสพร้อมกัน (Two-phase on) เพื่อให้เกิดแรงบิดสูงสุด โรเตอร์จะหมุนไปตาม Step Angle ปกติของมอเตอร์ 1.8 องศา/Step ซึ่งทำให้ได้แรงบิดที่สูง แต่การหมุนอาจมีการกระตุกที่ความเร็วต่ำ
2. Half Step Drive เป็นการป้อนกระแสสลับกันระหว่าง 1 เฟส และ 2 เฟส ทำให้โรเตอร์หยุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่าง Step ปกติได้ความละเอียดจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า Step Angle ลดลงครึ่งหนึ่ง เหลือ 0.9 องศา/Step การหมุนสมบูรณ์กว่าแบบ Full Step และลดปัญหาการสั่น แต่แรงบิดอาจไม่สม่ำเสมอสลับระหว่างแรงบิดมากและน้อย
3. Micro Step Drive เป็นการควบคุมกระแสไฟฟ้าในขดลวดให้เป็นรูปคลื่นไซน์ (Sine Wave) โดยใช้วงจรขับที่ละเอียด (PWM Current Control) ทำให้สามารถจำลองตำแหน่งแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างขั้วได้ละเอียดมาก สามารถแบ่ง Step ย่อยได้ละเอียดมาก 1/4, 1/8, 1/16, 1/32 ของ Step ปกติ การเคลื่อนที่ที่นุ่มนวลที่สุด เสียงเงียบ และมีความแม่นยำสูงมาก วงจรขับมีความซับซ้อน และแรงบิดรวมอาจลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ Full Step

เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความเร็วเพิ่มขึ้น แรงบิดของ Stepper Motor จะลดลง เนื่องจากผลของค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) ในขดลวด ทำให้กระแสไหลเข้าขดลวดไม่ทันในช่วงที่สวิตช์ความถี่สูง ส่งผลให้กำลังขับลดลง ซึ่งเป็นข้อจำกัดที่ต้องศึกษาในการทดลองว่ามอเตอร์สามารถรับความถี่ได้สูงสุดเท่าใดก่อนที่จะหยุดหมุน (Stall) และความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเร็วรอบ ความเร็วของ Stepper Motor แปรผันตรงกับความถี่ของสัญญาณพัลส์ (Frequency) โดยมีความสัมพันธ์ตามสมการนี้

$$N = \frac{f \times 60}{S}$$

โดยที่ :

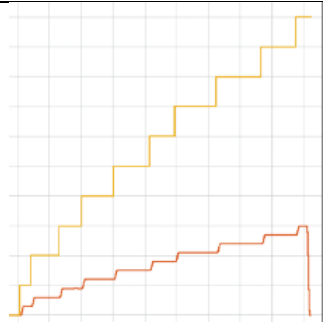
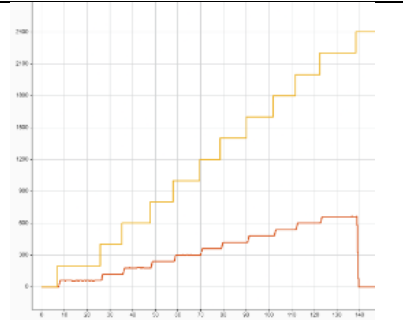
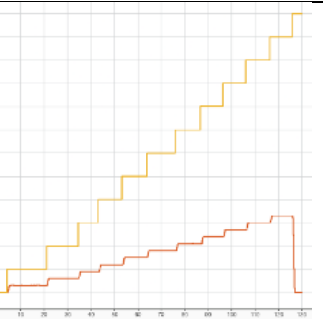
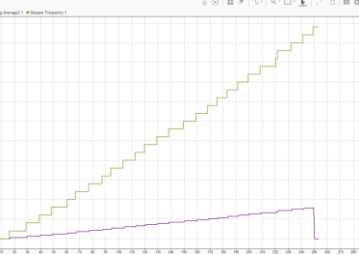
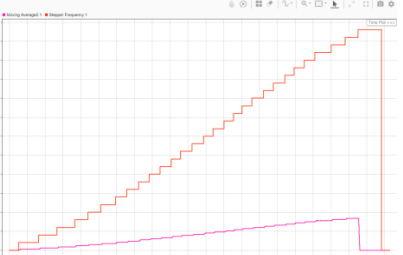
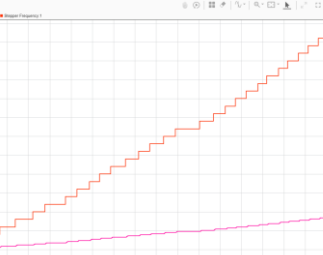
- N = ความเร็วรอบของมอเตอร์ (RPM)
- f = ความถี่ของสัญญาณพัลส์ (Hz)
- S = จำนวนสเต็ปต่อการหมุนหนึ่งรอบ (Steps per Revolution)

ขั้นตอนการดำเนินงาน (อธิบายขั้นตอนการทดลอง ใส่เฉพาะขั้นตอนที่จำเป็น)

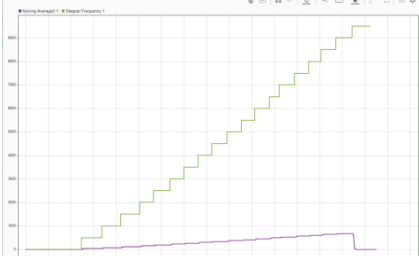
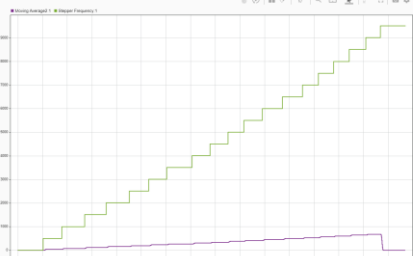
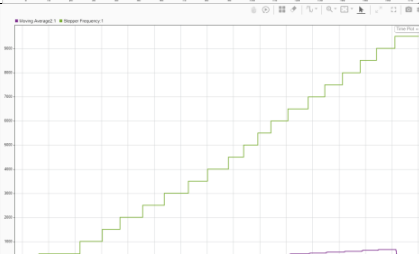
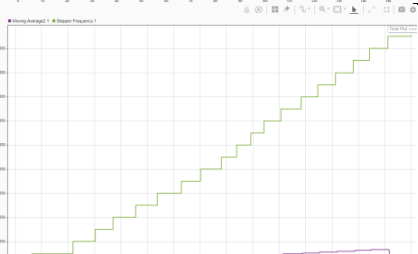
1. ตั้งค่า Mode Drive ของมอเตอร์ตาม Stepper Driver ที่ต้องการโดยเริ่มจาก Full Step, Half Step, Micro Step 1/4, Micro Step 1/8, Micro Step 1/16, Micro Step 1/32 ตามลำดับ
2. ปรับค่า Frequency จากน้อยไปมากเพื่อสังเกตพฤติกรรมและบันทึกผลของความเร็รรอบ
3. นำผลที่ได้มาวิเคราะห์

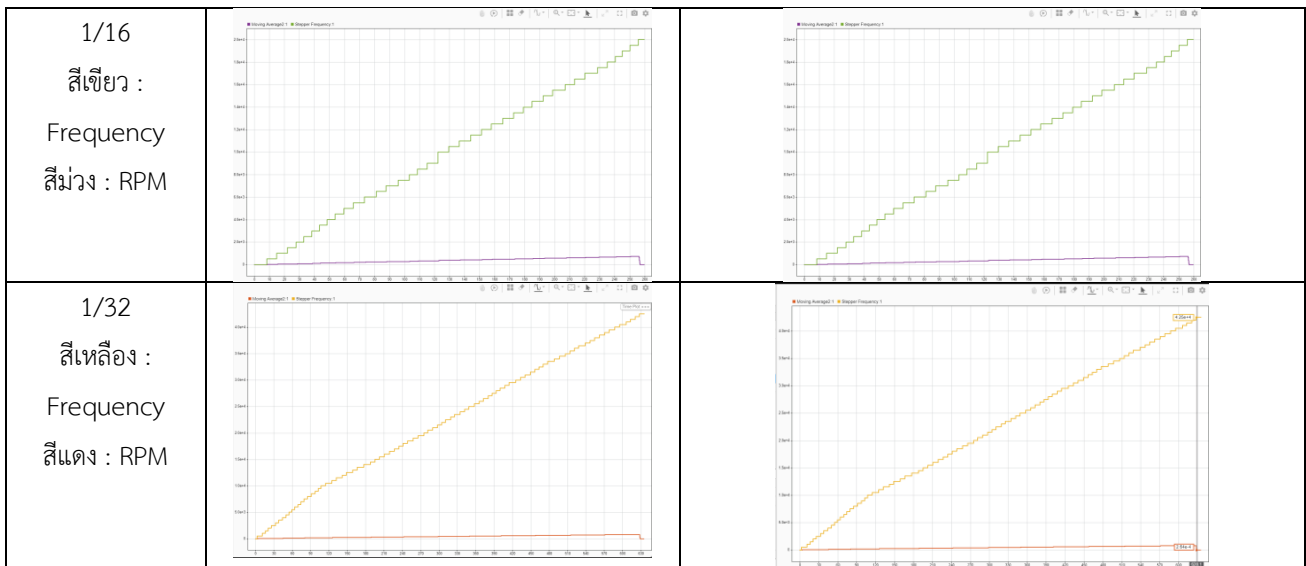
ผลการทดลอง (สิ่งที่เกิดขึ้นจริงในการทดลอง)

ตารางที่ 7 ผลการทดลองลักษณะความถี่ของสัญญาณขับกับความเร็รรอบที่ Full Step และ Half Step

Drive Mode	ลักษณะความถี่ของสัญญาณขับกับความเร็รรอบ		
Full Step สีเหลือง : Frequency สีแดง : RPM			
Half Step สีเขียว,แดง : Frequency สีม่วง,ชมพู : RPM			

ตารางที่ 8 ผลการทดลองลักษณะความถี่ของสัญญาณขับกับความเร็รรอบที่ Micro Step

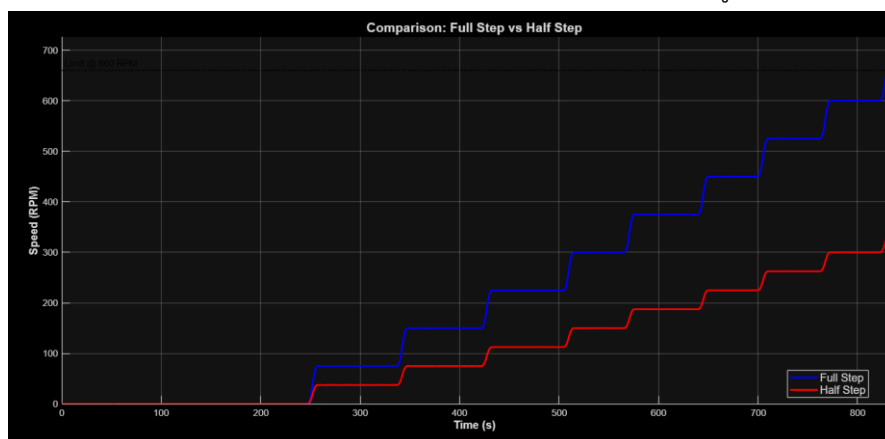
	Micro Step	ลักษณะความถี่ของสัญญาณขับกับความเร็รรอบ
1/4 สีเขียว : Frequency สีม่วง : RPM		
1/8 สีเขียว : Frequency สีม่วง : RPM		



สรุปผลการทดลอง (อธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นในการทดลอง)

จากการวัดค่าความถี่ของสัญญาณขับกับความเร็รรอบพบว่า เมื่อเพิ่มค่าความถี่ของสัญญาณขับขึ้นเรื่อย ๆ จะทำให้ได้ความเร็รรอบที่มากขึ้น กล่าวคือค่า Frequency มีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับค่า RPM เมื่อค่า Frequency เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่า RPM เพิ่มขึ้นไปด้วย โดยที่ในแต่ละโหมดที่ความถี่เท่ากันจะให้ผลของความเร็รรอบไม่เท่ากัน

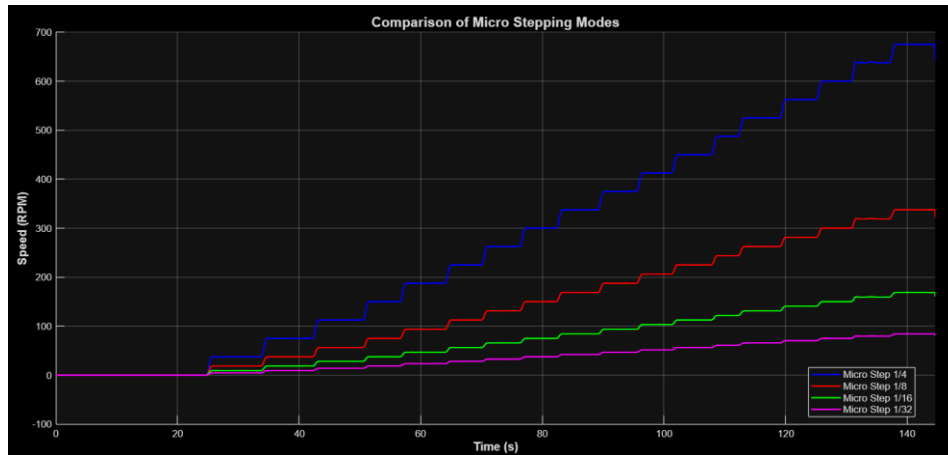
เมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาทำการเปรียบเทียบ RPM ของโหมด Full Step และ Half Step ในกรณีที่จ่ายค่า Frequency เท่ากัน พบว่าความเร็รรอบที่ได้ของโหมด Full Step จะมีค่ามากกว่า Half Step อยู่ครึ่งหนึ่งในกรณีที่ความถี่ของสัญญาณขับที่จ่ายมีขนาดเท่ากัน เช่น เมื่อ Frequency มีค่าเท่ากับ 200 การขับด้วยโหมด Full Step จะได้ความเร็รรอบอยู่ที่ 60 RPM และ การขับด้วยโหมด Half Step จะได้ความเร็รรอบอยู่ที่ 30 RPM



รูปที่ 20 กราฟเปรียบเทียบ RPM ของโหมด Full Step และ Half Step

และเมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาทำการเปรียบเทียบ RPM ของโหมด Micro Step ในกรณีที่จ่ายค่า Frequency เท่ากัน พบว่าความเร็รรอบที่ได้ของโหมด Micro Step 1/4 จะมีค่ามากที่สุด รองลงมาเป็น Micro Step 1/8, 1/16, 1/32 ตามลำดับ โดยที่สังเกตอย่างเป็นชัดเป็นส่วนในกรณีที่ความถี่ของสัญญาณขับที่จ่ายมีขนาดเท่ากัน เช่น เมื่อ Frequency มีค่าเท่ากับ 500 การขับด้วยโหมด Micro Step 1/4 จะได้ความเร็รรอบอยู่ที่ 37.48 RPM และการ

ขับด้วยโหมด Micro Step 1/8 จะได้ความเร็วรอบอยู่ที่ 18.73 RPM และการขับด้วยโหมด Micro Step 1/16 จะได้ความเร็วรอบอยู่ที่ 9.37 RPM และการขับด้วยโหมด Micro Step 1/32 จะได้ความเร็วรอบอยู่ที่ 4.68 RPM



รูปที่ 21 กราฟเปรียบเทียบ RPM ของโหมด Micro Step

ทำให้สามารถสรุปผลการทดลองได้ว่า เมื่อเราปรับโหมดให้ Stepper Motor มีความละเอียดที่มากขึ้น จะทำให้ค่าความเร็วรอบลดน้อยลงเมื่อเทียบกับโหมดที่มีความละเอียดต่ำกว่าในกาจ่ายความถี่ของสัญญาณขับเท่ากัน

อภิปรายผล (วิเคราะห์สิ่งที่เกิดขึ้นในการทดลอง)

เมื่อเราเพิ่มความถี่ของสัญญาณพัลส์ ขดลวด Stator จะเกิดการสลับขั้วแม่เหล็กเร็วขึ้น ส่งผลให้ Rotor หมุนเปลี่ยนตำแหน่ง Step ได้เร็วขึ้น กล่าวคือค่า Frequency มีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับค่า RPM เมื่อค่า Frequency เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่า RPM เพิ่มขึ้นไปด้วย โดยในแต่ละโหมดที่ความถี่ของสัญญาณขับที่เท่ากัน จะได้ค่าความเร็วรอบที่ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับ Step Angle ของแต่ละโหมดโดยที่โหมดที่มีความละเอียดต่ำกว่าจะหมุนได้เร็วกว่าโหมดที่มีความละเอียดสูง ตามสมการ

$$N = \frac{f \times 60}{S}$$

โหมด Full Step ที่มีความละเอียด 1.8 องศา/สเต็ป ทำให้จะมีความเร็วรอบเป็น 2 เท่า ของโหมด Half Step 0.9 องศา/สเต็ป เนื่องจากในเวลาเท่ากัน Full Step เคลื่อนที่ได้ระยะทางเชิงมุมมากกว่า Micro Step ยิ่งแบ่งสเต็ปย่อยละเอียดมากเท่าไร ($1/4 > 1/8 > 1/16 > 1/32$) ความเร็วรอบยิ่งลดลงตามสัดส่วน ตัวอย่างเช่น ที่ความถี่ 500 Hz โหมด 1/4 Step หมุนได้ 37.48 RPM ในขณะที่โหมด 1/32 Step หมุนได้เพียง 4.68 RPM ซึ่งลดลงตามความละเอียดที่เพิ่มขึ้น

การเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ตามความถี่เกิดจากกลไกทางไฟฟ้าและแม่เหล็กภายในมอเตอร์ การสลับขั้วแม่เหล็ก สัญญาณพัลส์ทำหน้าที่สั่งการวงจรขับ (Driver) ให้จ่ายกระแสเข้าขดลวด Stator เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กดึงดูด Rotor ให้เคลื่อนที่ ความถี่ที่สูงขึ้นหมายถึงการสั่งให้เปลี่ยนตำแหน่งสนามแม่เหล็กเร็วขึ้น Rotor จึงต้องหมุนตามให้ทัน

จากการเปรียบเทียบพฤติกรรมของแต่ละโหมด สามารถสรุปได้ดังนี้

1. Full Step Drive ให้ความเร็วรอบสูงสุด และแรงบิดสูงที่สุดที่ความถี่เท่ากัน เหมาะกับงานที่ต้องการความเร็วและการส่งกำลังเต็มที่ การเคลื่อนที่อาจมีความกระตุกโดยเฉพาะที่ความเร็วต่ำ และมีความละเอียดตำแหน่งน้อยที่สุด (1.8 องศา)
2. Half Step Drive ความละเอียดเป็น 2 เท่าจาก Full Step (0.9 องศา) และลดอาการสั่นค้างได้ดีกว่า Full Step การหมุนราบรื่นขึ้น ความเร็วลดลงครึ่งหนึ่งเทียบกับ Full Step และแรงบิดอาจไม่สม่ำเสมอในบางจังหวะการสลับเฟส
3. Micro Step Drive (1/4, 1/8, 1/16, 1/32) ให้ความละเอียดสูงมาก และการเคลื่อนที่ ราบรื่นที่สุด เสียงเงียบ ลดการสั่นสะเทือนได้ดีเยี่ยม เหมาะกับงานความแม่นยำสูง ความเร็วรอบต่ำที่สุดที่ความถี่สัญญาณเท่ากัน หากต้องการความเร็วสูงต้องใช้อุปกรณ์ควบคุมที่สร้างความถี่ได้สูงมาก และแรงบิดรวมอาจลดลงเล็กน้อย

ข้อเสนอแนะ

- ควรให้ระบบของ Stepper แยกกับบอร์ดของ DC Motor เพราะขณะทำงานมีหลายครั้งมากที่ Belt หย่อนเลยทำให้เก็บค่าไม่ได้ตามที่ต้องการ
- ต้องถอดอุปกรณ์ตัวอื่นที่ไม่ได้ใช้ก่อนทำ ทำให้เพิ่มขั้นตอนและความยุ่งยากในการทำงานเพิ่ม
- ควรเช็คบอร์ดทดลองให้ดีกว่าก่อนให้มาทำการทดลอง เนื่องจากบอร์ดเขามีปัญหา ทำให้ตอนแรกไม่สามารถใช้ Stepper Motor ได้ เพราะไฟไม่เชื่อมกัน ต้องแก้ไขปัญหาด้วยการเอาสายไฟมาต่อเอง รวมถึงตัว Stepper Driver ที่ได้มาตอนแรกต่อกลับด้านกับทิศทางที่ควรจะเป็นจริง

อ้างอิง (ใส่แค่ Link)

https://www.researchgate.net/publication/332835189_Stepper_Motor

<https://www.monolithicpower.com/en/learning/resources/stepper-motors-basics-types-uses?srsltid=AfmBOorgC4tX3ecMDo4HyvzJxXJzK28dNjdi6ml49J4QIXBb7HxvEdK7>

https://www.orientalmotor.eu/system/files/document/tech/technicalmanual_stepping_10e.pdf

การทดลองที่ 2 หลักการ Loss Step

จุดประสงค์ (การทดลองนี้สร้างขึ้นเพื่ออะไร)

1. เพื่อศึกษาหลักการของ Loss Step และเงื่อนไขในการเกิด Loss Step ที่มีต่อ Stepper Motor
2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง Acceleration และ Loss Step ที่เกิดขึ้น
3. เพื่อศึกษาถึงผลลัพธ์ของ Loss Step ที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของ Stepper Motor

สมมติฐาน (ข้อสันนิษฐานเบื้องต้น)

ความถี่ของสัญญาณพัลส์ (Pulse Frequency) เป็นปัจจัยหลักที่กำหนดความเร็วรอบและเสถียรภาพในการหมุนของ Stepper Motor โดยมีความสัมพันธ์ในลักษณะที่ว่า เมื่อเพิ่มความถี่สูงขึ้น ความเร็วรอบของมอเตอร์จะสูงขึ้น แต่แรงบิด (Torque) ของมอเตอร์จะลดต่ำลง เนื่องจากผลของความเหนียวในขดลวด ดังนั้น หากความถี่สูงเกินไปกว่าขีดจำกัดที่มอเตอร์จะสร้างแรงบิดได้ทัน จะส่งผลให้มอเตอร์เกิดการสูญเสียตำแหน่ง (Loss Step) หรือหยุดหมุน (Stall)

ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น:
 - ความถี่ของสัญญาณขับ
2. ตัวแปรตาม:
 - ลักษณะการเคลื่อนที่และการทำงานของมอเตอร์
 - Loss Step ของมอเตอร์
3. ตัวแปรควบคุม:
 - Stepper Motor ที่ใช้เป็นตัวเดิม
 - ทำงานโดยใช้ไฟ 12 V

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการทำการทดลอง หรือเนื้อหาที่นำมาอธิบายผลการทดลอง)

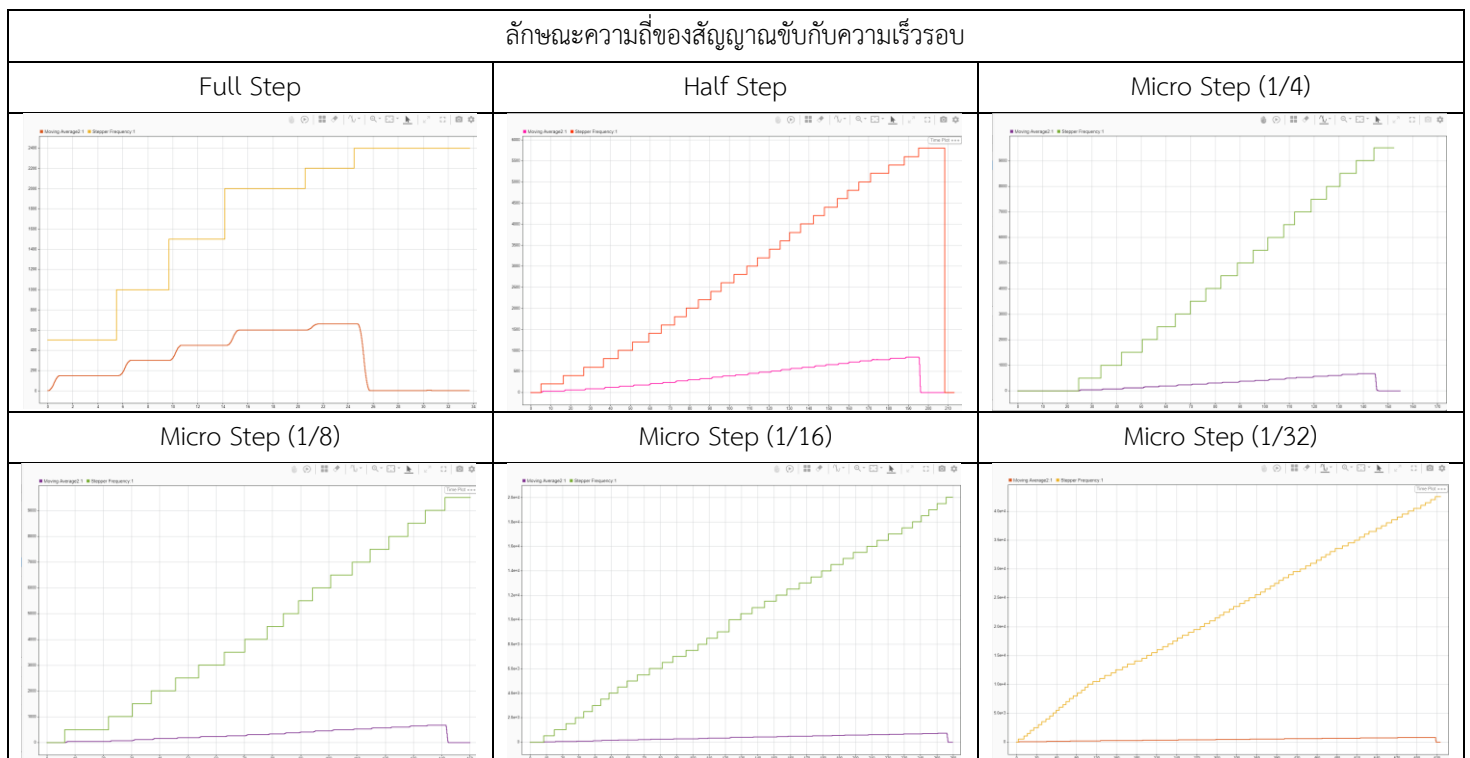
Loss Step คือปรากฏการณ์ที่ Stepper Motor ไม่สามารถหมุนตาม สัญญาณ Pulse ที่ถูกป้อนเข้ามา ทำให้มอเตอร์ สูญเสียตำแหน่งเชิงมุม (Positional Error) ไปจากตำแหน่งที่ควรจะเป็น เมื่อเกิด Loss Step โรเตอร์ของมอเตอร์จะไม่สามารถไปถึงตำแหน่งสมดุลถัดไปได้ทันเวลา และจะแกว่งไปกลับในตำแหน่งเดิม หรือข้ามไปหลายๆ ขั้นตอนการเคลื่อนที่ที่ละเอียดอย่างถูกต้อง ซึ่งอาจเกิดได้จาก 1. ความถี่สัญญาณพัลส์สูงมากเกินไป ความสามารถของมอเตอร์มอเตอร์จะไม่มีเวลาเพียงพอในการเปลี่ยนจากตำแหน่งหนึ่งไปยังตำแหน่งถัดไปก่อนที่พัลส์ใหม่จะมาถึง 2. แรงบิดโหลดสูงเกินไป หาก Load มีค่าสูงเกินไปกว่า Torque สูงสุดที่มอเตอร์สามารถสร้างได้ ณ ความเร็วที่กำหนด มอเตอร์ก็จะสูญเสียตำแหน่งได้

ขั้นตอนการดำเนินงาน (อธิบายขั้นตอนการทดลอง ใส่เฉพาะขั้นตอนที่จำเป็น)

1. ตั้งค่า Mode Drive ของมอเตอร์ตาม Stepper Driver ที่ต้องการโดยเริ่มจาก Full Step, Half Step, Micro Step 1/4, Micro Step 1/8, Micro Step 1/16, Micro Step 1/32 ตามลำดับ
2. ปรับค่า Frequency จากน้อยไปมากเพื่อสังเกตพฤติกรรมตอน Lost Step และบันทึกผลของความถี่รอบ
3. นำผลที่ได้มาวิเคราะห์

ผลการทดลอง (สิ่งที่เกิดขึ้นจริงในการทดลอง)

ตารางที่ 9 ผลการทดลองลักษณะความถี่ของสัญญาณขับกับความถี่รอบของโหมดต่าง ๆ เพื่อหาช่วง Lost Step



สรุปผลการทดลอง (อธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นในการทดลอง)

จากการทดลองขับเคลื่อน Stepper Motor ด้วยสัญญาณความถี่ที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เพื่อหาจุดที่เกิด Loss Step ในโหมดต่าง ๆ ได้ผลดังนี้

1. Full Step จุดที่เกิด Loss Step คือ จุดที่มีความเร็วประมาณ 660 RPM โดยมี Frequency อยู่ที่ 2400 Hz มอเตอร์เกิดการหยุดหมุนกะทันหัน (Speed Drop)
2. Half Step จุดที่เกิด Loss Step คือ จุดที่มีความเร็วประมาณ 870 RPM โดยมี Frequency อยู่ที่ 6000 Hz มอเตอร์เกิดการหยุดหมุนกะทันหัน (Speed Drop)
3. Micro Step (1/4) จุดที่เกิด Loss Step คือ จุดที่มีความเร็วประมาณ 675 RPM โดยมี Frequency อยู่ที่ 9500 Hz มอเตอร์เกิดการหยุดหมุนกะทันหัน (Speed Drop)

4. Micro Step (1/8) จุดที่เกิด Loss Step คือ จุดที่มีความเร็วประมาณ 735 RPM โดยมี Frequency อยู่ที่ 20000 Hz มอเตอร์เกิดการหยุดหมุนกะทันหัน (Speed Drop)
5. Micro Step (1/16) จุดที่เกิด Loss Step คือ จุดที่มีความเร็วประมาณ 787 RPM โดยมี Frequency อยู่ที่ 42500 Hz มอเตอร์เกิดการหยุดหมุนกะทันหัน (Speed Drop)
6. Micro Step (1/32) จุดที่เกิด Loss Step คือ จุดที่มีความเร็วประมาณ 830 RPM โดยมี Frequency อยู่ที่ 81500 Hz มอเตอร์เกิดการหยุดหมุนกะทันหัน (Speed Drop)

ทำให้พบว่าการเกิด Loss Step มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเร่ง (Acceleration) และความถี่ของสัญญาณขับ (Frequency) จุดเกิด Loss Step: มอเตอร์จะทำงานได้ปกติในช่วงความถี่ต่ำ แต่เมื่อเพิ่มความถี่ (เพิ่มความเร็ว/ความเร่ง) ไปถึงจุดวิกฤตจุดหนึ่ง มอเตอร์จะไม่สามารถสร้างแรงบิด (Torque) ได้ทันกับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก ส่งผลให้โรเตอร์หมุนไม่ทันและหลุดตำแหน่ง (Loss Step) จนหยุดหมุนในที่สุด

อภิปรายผล (วิเคราะห์สิ่งที่เกิดขึ้นในการทดลอง)

ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับแรงบิด (Frequency-Torque Relationship) การเพิ่มความถี่ของสัญญาณขับ มีผลโดยตรงต่อความเร็วรอบของมอเตอร์และแรงบิด (Torque) หากความถี่ยิ่งสูงขึ้นจะทำให้ แรงบิดยิ่งต่ำ สาเหตุเกิดจากผลของ ค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) ในขดลวดของมอเตอร์ ซึ่งต้านทานการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า เมื่อเราป้อนความถี่สูง ๆ (Pulse มาเร็วมาก) กระแสไฟฟ้าจะมีเวลาในการไหลเข้าสู่ขดลวดน้อยลง ทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีกำลังอ่อนลง ส่งผลให้แรงบิดที่มอเตอร์ผลิตได้ลดต่ำลงอย่างต่อเนื่องตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดความถี่วิกฤตและการเกิด Loss Step

เมื่อเราเพิ่มความถี่ขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงจุดที่แรงบิดของมอเตอร์ลดลงต่ำกว่าแรงบิดที่ต้องการเพื่อเอาชนะโหลด (Load Torque) หรือแรงเฉื่อย (Inertia) ของโรเตอร์ มอเตอร์จะไม่สามารถหมุนตามจังหวะพัลส์ได้ทัน ทำให้เกิดปรากฏการณ์ Loss Step (การข้ามสเต็ป) หรือหยุดหมุน (Stall) ในที่สุด เรียกว่าความถี่สูงสุดที่มอเตอร์สามารถตอบสนองได้

ในโหมด Micro Step (เช่น 1/16, 1/32) การจะทำให้มอเตอร์หมุนที่ความเร็วเท่ากับโหมด Full Step จำเป็นต้องใช้ ความถี่ที่สูงกว่ามาก (เช่น 1/32 ต้องใช้ความถี่สูงกว่า Full Step ถึง 32 เท่า) การที่ต้องป้อนความถี่สูงขนาดนี้ ทำให้มอเตอร์เข้าสู่สภาวะ "แรงบิดตก" (Torque Drop) ได้เร็วกว่าและง่ายกว่าโหมด Full Step จึงเป็นสาเหตุว่าทำไมในโหมด Micro Step มอเตอร์จึงเกิด Loss Step ได้ง่ายแม้จะหมุนที่ความเร็วรอบไม่สูงมากนัก เพราะความถี่สัญญาณที่ป้อนเข้าไปนั้นสูงจนกระแสไหลเข้าขดลวดไม่ทัน

ข้อเสนอแนะ

- ควรให้ระบบของ Stepper แยกกับบอร์ดของ DC Motor เพราะขณะทำงานมีหลายครั้งที่ Belt หย่อนเลยทำให้เก็บค่าไม่ได้ตามที่ต้องการ
- ต้องถอดอุปกรณ์ตัวอื่นที่ไม่ได้ใช้ก่อนทำ ทำให้เพิ่มขั้นตอนและความยุ่งยากในการทำงานเพิ่ม
- ควรเช็คบอร์ดทดลองให้ดีก่อนให้มาทำการทดลอง เนื่องจากบอร์ดเคยมีปัญหา ทำให้ตอนแรกไม่สามารถใช้ Stepper Motor ได้ เพราะไฟไม่เชื่อมกัน ต้องแก้ไขปัญหาด้วยการเอาสายไฟมาต่อเอง รวมถึงตัว Stepper Driver ที่ได้มาตอนแรกต่อกลับด้านกับทิศทางที่ควรจะเป็นจริง

อ้างอิง (ใส่แค่ Link)

<https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-13/stepper-motors/>

https://www.researchgate.net/publication/269812398_Dynamic_Performance_Analysis_of_Permanent_Magnet_Hybrid_Stepper_Motor_by_Transfer_Function_Model_for_Different_Design_Topologies

3. BLDC Motor

การทดลองที่ 1 การศึกษาสัญญาณ Back EMF แบบ Trapezoidal และความสัมพันธ์ของ Phase ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ BLDC แบบ 6-Step

จุดประสงค์ (การทดลองนี้สร้างขึ้นเพื่ออะไร)

1. เพื่อสังเกตการทำงานจริงของมอเตอร์แบบ 6-Step โดยใช้ Back EMF Sensing (TH Sarabun New, 16)
2. เพื่อวิเคราะห์ลักษณะของสัญญาณ BEMF แบบ Trapezoidal
3. เพื่อสังเกตการเกิด Phase Shift ระหว่างสัญญาณแต่ละ Phase ของ BEMF
4. เพื่อวิเคราะห์การเรียงลำดับ Phase ตามทิศทางการหมุนของมอเตอร์

สมมติฐาน (ข้อสันนิษฐานเบื้องต้น)

สัญญาณ Back EMF ของมอเตอร์ BLDC จะมีรูปคลื่นแบบ Trapezoidal และเฟสทั้งสามจะเหลื่อมกัน 120° ในโหมดขับเคลื่อนแบบ 6-Step แต่ละเฟสจะสลับสถานะระหว่าง Floating และ Conducting เป็นช่วง ๆ ตามมุมไฟฟ้า 60° และจุด Zero-crossing ของ Back EMF จะสัมพันธ์กับจังหวะการเปลี่ยนสเต็ป เมื่อเปลี่ยนทิศทางการหมุนของมอเตอร์ ลำดับ Phase ของสัญญาณ Back EMF จะกลับทิศตามไปด้วย แต่รูปร่างคลื่นยังคงเป็น Trapezoidal เหมือนเดิม

ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น
 - ทิศทางการหมุนของมอเตอร์
2. ตัวแปรตาม:
 - รูปร่างของสัญญาณ Back EMF 3 เฟส (Phase U, V, W) ที่วัดได้นออสซิลโลสโคป
3. ตัวแปรควบคุม:
 - บอร์ด BLDCXplorer Setup
 - แรงดันไฟฟ้าคงที่ 24 V

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการทำการทดลอง หรือเนื้อหาที่นำมาอธิบายผลการทดลอง)

หลักการของสัญญาณ 3-Phase สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ คือ การจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบสลับไปยังขดลวดสามเฟสของสเตเตอร์ในลำดับที่ถูกต้อง เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กหมุนที่ทำให้โรเตอร์ซึ่งมีแม่เหล็กถาวรหมุนตาม ในระบบนี้จะสลับพลังงานไปยังขดลวดตามตำแหน่งของโรเตอร์ที่ตรวจจับได้จากเซ็นเซอร์ เพื่อให้การหมุนของมอเตอร์เป็นไปอย่างราบรื่นและต่อเนื่อง โดยสัญญาณ 3-Phase จะมีลักษณะเป็นพัลส์พลังงานที่สลับกันเข้าไปยังขดลวดสองใน

สามเฟส ซึ่งทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนที่ดึงดูดแม่เหล็กถาวรบนโรเตอร์ให้หมุนตาม การควบคุมความเร็วและทิศทางของมอเตอร์ทำได้โดยการปรับความถี่และช่วงเวลาของพัลส์ที่ส่งให้กับขดลวด

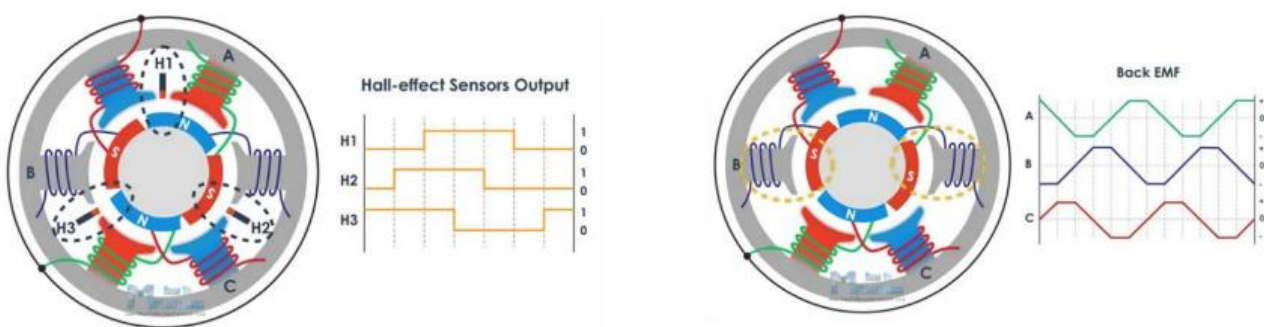
Rotor position sensing

Hall Effect Sensor การตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ในมอเตอร์โดยใช้การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก ซึ่งเซ็นเซอร์จะเปลี่ยนพัลส์แม่เหล็กเป็นสัญญาณไฟฟ้าแบบดิจิทัล ช่วยให้ตัวควบคุมมอเตอร์รู้ตำแหน่งโรเตอร์ได้อย่างแม่นยำ ซึ่งจำเป็นต่อการกำหนดเวลาสลับเฟสของมอเตอร์ได้ถูกต้อง ทำให้มอเตอร์ทำงานที่ความเร็วต่ำได้ดีและแรงบิดนุ่มนวลขึ้น เนื่องจาก Hall sensor จะส่งสัญญาณตำแหน่งแบบเรียลไทม์

Back EMF Sensing การวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่เกิดขึ้นในขดลวดของมอเตอร์เองเมื่อโรเตอร์หมุน โดยไม่ต้องใช้เซ็นเซอร์ภายนอก แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้จะถูกนำมาใช้คำนวณตำแหน่งและความเร็วของโรเตอร์

ความแตกต่างระหว่าง Hall Effect Sensor และ Back EMF Sensing

Hall Effect Sensor ใช้เซ็นเซอร์แม่เหล็กตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์โดยตรง ส่งสัญญาณดิจิทัล และสามารถควบคุมมอเตอร์ได้แม่นยำทั้งที่ความเร็วต่ำและสูง ส่วน Back EMF Sensing ใช้วัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เองโดยไม่ต้องใช้เซ็นเซอร์ เพิ่มความเรียบง่ายและประหยัดต้นทุน แต่การทำงานที่ความเร็วต่ำมีประสิทธิภาพน้อยกว่า



รูปที่ 22 ความแตกต่างระหว่าง Hall Effect Sensor และ Back EMF Sensing

ดังนั้น Hall Effect Sensor เหมาะกับการใช้งานที่ต้องการความแม่นยำสูงที่ความเร็วต่ำ ในขณะที่ Back EMF Sensing เหมาะสำหรับระบบที่ต้องการลดจำนวนฮาร์ดแวร์และต้นทุน โดยยอมแลกกับข้อจำกัดในความเร็วต่ำ

เทคนิคการควบคุม BLDC

6-Step การสลับกระแสไฟฟ้าไปยังขดลวดของมอเตอร์แบบ BLDC หรือ Brushless DC ให้สร้างสนามแม่เหล็กหมุนที่ทำให้โรเตอร์หมุนตามได้ เห็นได้จากการจ่ายกระแสสลับเป็นลำดับ 6 สเต็ปใน 1 รอบ ของการหมุน มี 3 เฟส แต่ละเฟสจะถูกจ่ายกระแสตามลำดับเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กหมุนสลับไปมา

FOC การแปลงสัญญาณกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์สามเฟสเป็นแกนตรง (direct axis) และแกนแทยง (quadrature axis) เพื่อควบคุมแรงบิดและสนามแม่เหล็กแยกกันได้ ทำให้การขับเคลื่อนมีประสิทธิภาพสูงสุด ทั้งในเรื่องความนุ่มนวลของการหมุน, ความแม่นยำในการควบคุมความเร็วและแรงบิด และลดการสูญเสียพลังงาน

ตารางที่ 10 ข้อดี-ข้อเสียของ 6 Step

6-Step	
ข้อดี	ข้อเสีย
<p>ออกแบบโครงสร้างวงจรและโค้ดได้ง่าย</p> <p>ต้นทุนต่ำ ทั้งฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์</p> <p>การปรับจูนง่าย</p>	<p>สั่นมี Torque Ripple สูง</p> <p>มีเสียงดัง</p> <p>ประสิทธิภาพพลังงานต่ำ</p> <p>ความแม่นยำความเร็วและตำแหน่งต่ำ</p>

ตารางที่ 11 ข้อดี-ข้อเสียของ 6 FOC

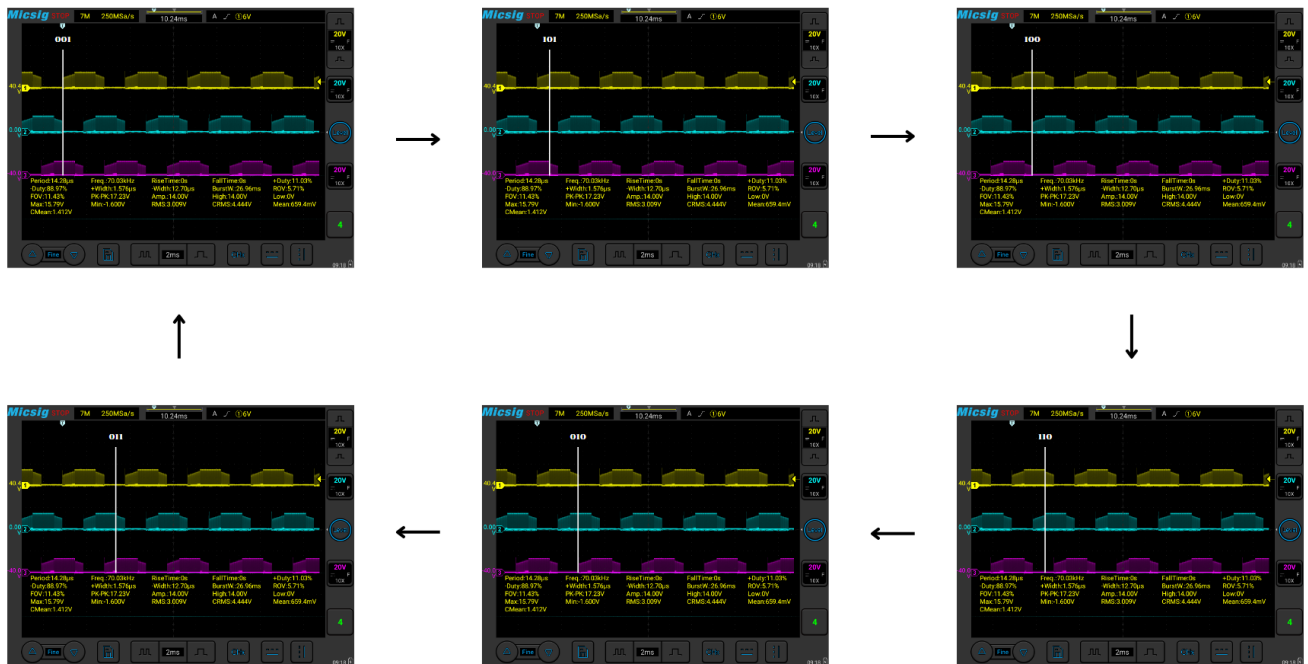
FOC	
ข้อดี	ข้อเสีย
<p>นิ่งมีแรงบิดเรียบมาก</p> <p>เงียบมี Noise ต่ำ</p> <p>ได้ประสิทธิภาพสูง</p> <p>ควบคุมแรงบิด Real-time</p> <p>ลดความร้อนของมอเตอร์</p> <p>ควบคุมความเร็วได้ละเอียด</p>	<p>ต้องการ MCU ประสิทธิภาพสูง</p> <p>อัลกอริทึมซับซ้อนมาก</p> <p>ต้องมี Hall + Encoder หรือ Sensorless Observer</p> <p>พัฒนายาก ต้องมีความรู้ด้านคณิตศาสตร์การแปลงพิกัด</p>

ขั้นตอนการดำเนินงาน (อธิบายขั้นตอนการทดลอง ใส่เฉพาะขั้นตอนที่จำเป็น)

- 1.สั่งมอเตอร์หมุน CW ที่ความเร็ว1500RPM และบันทึกผล
- 2.สั่งมอเตอร์หมุน CCW ที่ความเร็ว1500RPM และบันทึกผล
- 3.วิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการทดลอง (สิ่งที่เกิดขึ้นจริงในการทดลอง)

การทำงานจริงของ 6-step เกิดขึ้นดังต่อไปนี้



รูปที่ 23 ผลการทดลอง 6 Step

ตารางที่ 12 การเคลื่อนที่แบบ CW และ CCW



การทำงานจริงของ 6-step เกิดขึ้นดังต่อไปนี้ ลักษณะการเกิดphase shift ระหว่างสัญญาณแต่ละ Phase ของ BEMF เกิดดังต่อไปนี้ การเรียงลำดับของ Phase ตามทิศทางการหมุนของมอเตอร์



รูปที่ 24 ผลการทดลอง Phase Shift

ตารางที่ 13 การเคลื่อนที่แบบ CW และ CCW

CW	CCW
<p>เปลี่ยน phase เรือจาก phase 1 → 2 → 3 → 1 → ...</p>	<p>เปลี่ยน phase เรือจาก phase 1 → 3 → 2 → 1 → ...</p>

สรุปผลการทดลอง (อธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นในการทดลอง)

BEMF แบบ Trapezoidal เป็นสัญญาณแรงดันย้อนกลับ 3 เฟส ที่รูปคลื่นเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู มีช่วง 1.มุลาดขึ้น 2.ช่วงบนตัดแบบ Flat 3.มุลาดลง

การทำงานจริงของ 6-step มีการเรียงphase 001,101,100,110,010และ011 ตามลำดับโดยตลอด ระหว่างสัญญาณแต่ละ Phase ของ BEMF มีการเกิดphase shiftอยู่ที่ประมาณ 120°

การเรียงphaseตามการหมุนของมอเตอร์ทิศทางCWมีการเรียงphaseจาก1,2และ3 ตามลำดับโดยตลอด ส่วนการหมุนในทิศทางCWมีการเรียงphaseจาก1,3และ2 ตามลำดับโดยตลอด

อภิปรายผล (วิเคราะห์สิ่งที่เกิดขึ้นในการทดลอง)

จากผลการทดลองพบว่าสัญญาณ BEMF มีรูปคลื่นแบบ Trapezoidal และมี phase shift 120° ระหว่างเฟส สอดคล้องกับทฤษฎีของมอเตอร์ BLDC แบบ 3 เฟส การเรียงลำดับการสวิตช์เฟสแบบ 6-Step แสดงผลที่ถูกต้องตามลำดับ 001,101,100,110,010 และ 011 ซึ่งทำให้มอเตอร์หมุนอย่างต่อเนื่องในทิศทาง CW โดยเรียงลำดับ phase 1,2,3 และเมื่อกลับลำดับเป็น 1,3,2 จะทำให้มอเตอร์หมุนย้อนกลับเป็น CCW สัญญาณ Zero-Crossing มีความสัมพันธ์กับตำแหน่งของโรเตอร์ ทำให้สามารถใช้ BEMF เป็นตัวอ้างอิงตำแหน่งได้

ข้อเสนอแนะ

- วัดมุม Phase Shift จริงโดยใช้ cursors ของ Oscilloscope วัดระยะเวลา (Δt) ระหว่างยอดสัญญาณของสองเฟส และนำคำนวณตามสูตร $\theta = \Delta t / T \times 360^\circ$ แล้วเทียบกับค่าทฤษฎี

อ้างอิง (ใส่แค่ Link)

<https://mechtex.com/blog/working-of-bldc-motor>

<https://www.renesas.com/en/support/engineer-school/brushless-dc-motor-02-inverter-pmw>

การทดลองที่ 2 การหาความเร็วรอบของมอเตอร์ BLDC จากความถี่ของสัญญาณ Back EMF และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณกับความเร็วรอบ

จุดประสงค์ (การทดลองนี้สร้างขึ้นเพื่ออะไร)

1. เพื่อคำนวณความเร็วของมอเตอร์จากความถี่ของสัญญาณ BEMF ที่อ่านได้
2. เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณและความเร็วของมอเตอร์

สมมติฐาน (ข้อสันนิษฐานเบื้องต้น)

ความถี่ของสัญญาณ Back EMF มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความเร็วรอบของมอเตอร์ BLDC เมื่อเพิ่มค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ และความถี่ของสัญญาณ Back EMF จะเพิ่มขึ้นในแนวโน้มเดียวกัน

ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น:
 - ความเร็วของมอเตอร์ BLDC
2. ตัวแปรตาม:
 - ความถี่ของสัญญาณ BEMF
3. ตัวแปรควบคุม:
 - บอร์ด BLDCXplorer Setup
 - แรงดันไฟฟ้าคงที่ 24 V

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการทำการทดลอง หรือเนื้อหาที่นำมาอธิบายผลการทดลอง)

สูตรคำนวณความเร็วมอเตอร์ BLDC

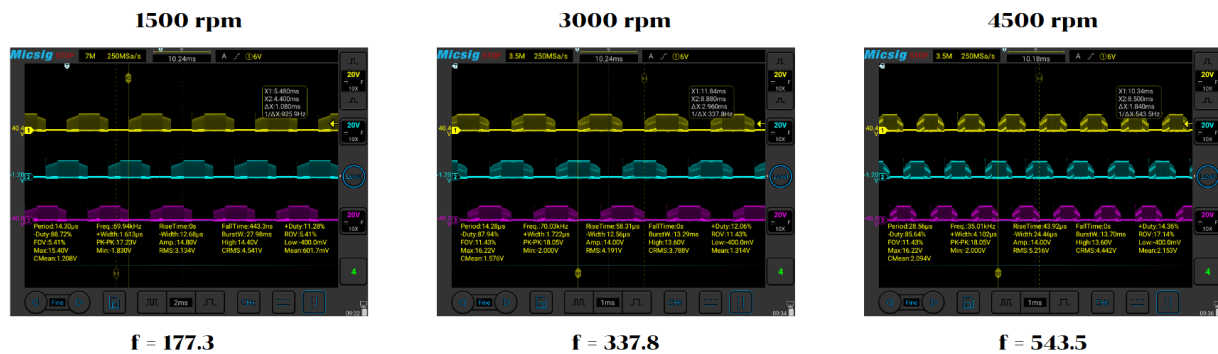
$$RPM = \frac{f \times 60}{\text{pole pairs}}$$

$f =$ ความถี่ (Frequency) $\text{pole pairs} =$ จำนวน Pole มอเตอร์ / 2

ขั้นตอนการดำเนินงาน (อธิบายขั้นตอนการทดลอง ใส่เฉพาะขั้นตอนที่จำเป็น)

1. สั่งมอเตอร์หมุน 1500RPM และบันทึกผล
2. สั่งมอเตอร์หมุน 3000RPM และบันทึกผล
3. สั่งมอเตอร์หมุน 4500RPM และบันทึกผล
4. วิเคราะห์ผลการทดลองหาความถี่
5. นำความถี่ที่ได้มาแทนสูตร $RPM = f \times 60 / \text{pole pairs}$

ผลการทดลอง (สิ่งที่เกิดขึ้นจริงในการทดลอง)



รูปที่ 25 กราฟเปรียบเทียบ RPM และ Frequency

เมื่อได้ค่าความถี่แล้วนำมาแทนสูตร $RPM = f \times 60 / \text{pole pairs}$ เพื่อคำนวณย้อนกลับหาความเร็ว (RPM)

ตารางที่ 14 เปรียบเทียบค่า Frequency กับ RPM ที่สั่งและ RPM ที่ได้

RPM ที่สั่ง	Frequency	RPM ที่ได้จากการคำนวณ
1500	177.3	1519.71
3000	337.8	2895.43
4500	543.5	4658.57

สรุปผลการทดลอง (อธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นในการทดลอง)

ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณและความเร็วของมอเตอร์เมื่อความเร็ว 1500 ความถี่ 177.3 Hz, ที่ความเร็ว 3000 RPM ความถี่ 337.8 Hz และความเร็ว 4500 RPM ความถี่ 543.5 Hz จะสังเกตได้ว่าเมื่อความเร็วของมอเตอร์เพิ่มขึ้นความถี่ของสัญญาณก็เพิ่มขึ้นด้วย RPM ที่คำนวณจากความถี่ของสัญญาณ BEMF ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่า RPM ที่สั่งมอเตอร์

อภิปรายผล (วิเคราะห์สิ่งที่เกิดขึ้นในการทดลอง)

จากผลการทดลองที่กำหนดความเร็วรอบที่ 1500, 3000 และ 4500 RPM พบว่าเมื่อความเร็วรอบของมอเตอร์เพิ่มขึ้น ความถี่ของสัญญาณ BEMF ก็เพิ่มขึ้นตามไปในทิศทางเดียวกัน คือประมาณ 177.3 Hz, 337.8 Hz และ 543.5 Hz ตามลำดับ แสดงให้เห็นความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเร็วเชิงกลของโรเตอร์กับความถี่เชิงไฟฟ้าของสัญญาณ BEMF ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของมอเตอร์ BLDC ที่ว่า

$$RPM = \frac{f \times 60}{\text{pole pairs}}$$

เมื่อแทนค่า pole pairs = 7 ลงไป จะได้ค่า RPM ที่คำนวณจาก BEMF ประมาณ 1519.71, 2895.43 และ 4658.57 RPM ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ RPM ที่สั่งจากตัวควบคุม แสดงให้เห็นว่า การใช้ความถี่ของ BEMF สามารถนำมาคำนวณย้อนกลับหาความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ค่อนข้างแม่นยำ

สาเหตุของความคลาดเคลื่อนระหว่าง RPM ที่สั่งกับ RPM ที่คำนวณจาก BEMF อาจเกิดขึ้นได้จาก RPM ที่สั่งจากตัวควบคุมไม่คงที่, ความคลาดเคลื่อนจากการวัดความถี่บนออสซิลโลสโคปหรือเกิดจากการตรวจจับสัญญาณความเร็วด้วย BEMF มีการคลาดเคลื่อนกับค่าความเร็วจริง

ข้อเสนอแนะ

- ทดลองที่ความเร็วหลายจุดกว่านี้เพื่อเพิ่มข้อมูลในการ plot กราฟ เพื่อดูความสัมพันธ์ของ Frequency กับ RPM ที่ละเอียดกว่านี้

อ้างอิง (ใส่แค่ Link)

https://www.gotrading.co.th/Article/Article_detail/ELECTRICMOTOR

https://www.rhydolabz.com/documents/26/BLDC_A2212_13T.pdf