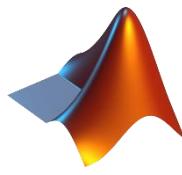


RMXplorer



LAB 2: Actuators

Name

- นายชวนกร เจนกิจ 67340500007
- นายธวรรธน์ คุ้มแพน 67340500019
- นางสาวปกรวรรณ เหลืองเกษมนิทัย 67340500027

Objectives

- เพื่อให้สามารถอธิบายหลักการทำงานของ Stepper Motor และประเภทของ Stepper Motor ได้
- เพื่อให้สามารถอธิบายหลักการขับเคลื่อนของ Stepper Motor ในแต่ละโหมดการทำงานได้ (Wave Drive, Full Step, Half Step, Micro step)
- เพื่อให้สามารถแสดงการทำงานจริงของ Stepper Motor ในแต่ละโหมดที่สามารถทำได้ และอธิบายความแตกต่างของการเคลื่อนที่ได้
- เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณขับกับความเร็วของมอเตอร์ในแต่ละโหมดได้
- เพื่อให้สามารถอธิบายสาเหตุที่ความเร็วของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงตามความถี่ของสัญญาณได้
- เพื่อให้สามารถอธิบายข้อดี-ข้อเสียของแต่ละ Drive Mode ได้อย่างเหมาะสมกับการใช้งานจริง
- เพื่อให้สามารถอธิบายหลักการของ Loss Step และเงื่อนไขที่ทำให้เกิด Loss Step ได้อย่างถูกต้อง
- เพื่อให้สามารถแสดงผลการทดลองเกี่ยวกับ Acceleration และ Loss Step ได้อย่างชัดเจน
- เพื่อให้สามารถอธิบายหลักการของสัญญาณ 3-Phase สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ได้
- เพื่อให้สามารถอธิบายหลักการและความแตกต่างระหว่างการใช้ Hall Effect Sensor และ Back EMF Sensing ได้
- เพื่อให้สามารถอธิบายหลักการของการขับเคลื่อนแบบ 6-Step และการควบคุมแบบ FOC ได้
- เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของ 6-Step กับ FOC ได้อย่างชัดเจน
- เพื่อให้สามารถแสดงให้เห็นถึงการทำงานจริงของมอเตอร์แบบ 6-Step โดยใช้ Back EMF Sensing ได้
- เพื่อให้สามารถวิเคราะห์และอธิบายลักษณะของสัญญาณ BEMF แบบ Trapezoidal ได้
- เพื่อให้สามารถอธิบายและแสดงการเกิด Phase Shift ระหว่างสัญญาณแต่ละ Phase ของ BEMF ได้
- เพื่อให้สามารถระบุและอธิบายการเรียงลำดับ Phase ตามทิศทางการหมุนของมอเตอร์ได้

- เพื่อให้สามารถคำนวณความเร็วของมอเตอร์จากความถี่ของสัญญาณ BEMF ที่อ่านได้ ได้อย่างถูกต้อง
- เพื่อให้สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณและความเร็วของมอเตอร์ได้
- เพื่อให้สามารถวิเคราะห์สาเหตุที่ทำให้เกิดผลการทดลองที่ไม่เหมือนกับ Ideal Case ทางทฤษฎีได้
- เพื่อให้สามารถอธิบายหลักการทำงานของ DC Motor ได้
- เพื่อให้สามารถอธิบายสมการ DC Motor ที่ใช้ในการสร้าง Motor Characteristic Curve ได้
- เพื่อให้สามารถอธิบายวิธีการวัดและคำนวณหาค่า Torque Constant (Nm/A) ได้
- เพื่อให้สามารถสร้างกราฟ Motor Characteristic จากมอเตอร์บนบอร์ดการทดลองได้
- เพื่อให้สามารถวิเคราะห์สาเหตุที่ทำให้ได้กราฟ Motor Characteristic คลาดเคลื่อนจาก Ideal Case ได้
- เพื่อให้สามารถสรุปค่าที่ทำให้มอเตอร์ทำงานได้มีประสิทธิภาพสูงสุดที่แรงดันไฟฟ้า 12V ได้
- เพื่อให้สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง Speed และ Torque ที่แรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ ได้
- เพื่อให้สามารถอธิบายวิธีการวัดและคำนวณหาค่า Stall Torque เพื่อนำไปใช้งานต่อได้
- เพื่อให้สามารถอธิบายหลักการทำงานของ PWM และ Duty Cycle ได้
- เพื่อให้สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ PWM, Duty Cycle และความเร็วของมอเตอร์ได้
- เพื่อให้สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ PWM, Duty Cycle และกระแสไฟฟ้าได้
- เพื่อให้สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ PWM, Duty Cycle และประสิทธิภาพของมอเตอร์ได้
- เพื่อให้สามารถแสดงให้เห็นถึงขั้นตอนการทำ Signal Conditioning สำหรับการอ่านค่ากระแสไฟฟ้าได้
- เพื่อให้สามารถอธิบายหลักการทำงานของ H-Bridge ได้
- เพื่อให้สามารถอธิบายและเปรียบเทียบหมวด Sign-Magnitude กับ Locked Anti-Phase ได้
- เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ข้อดี-ข้อเสียระหว่างการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบ Sign-Magnitude กับ Locked Anti-Phase จากการทดลองได้
- เพื่อให้สามารถทำการวิเคราะห์ความถี่ (FFT) ของสัญญาณความเร็วรอบมอเตอร์ที่ความถี่ PWM ต่าง ๆ ได้
- เพื่อให้สามารถออกแบบและสร้าง Low-Pass Filter สำหรับการวัดความเร็วรอบมอเตอร์ได้
- เพื่อให้สามารถแสดงให้เห็นผลของการกรองสัญญาณและวิเคราะห์ Bode Plot ได้
- เพื่อให้สามารถแสดงให้เห็นถึงการทำซ้ำ และความสมเหตุสมผลของการทดลอง
- เพื่อให้ความเหมาะสมของการตั้งจุดประสงค์ สมมติฐาน ตัวแปร และเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- เพื่อให้สามารถแสดงผลการทดลอง สรุปผลการทดลอง และอภิปรายผล ได้อย่างสมเหตุสมผลและครบถ้วน
- เพื่อให้ความเหมาะสมของข้อเสนอแนะและเอกสารอ้างอิง
- เพื่อให้สามารถอธิบายโปรแกรมหรือวงจรควบคุมที่ใช้ในแต่ละ Mode ได้อย่างครบถ้วน เข้าใจถึงแนวคิดและหลักการทำงาน

1. Stepper Motor

การทดลองที่ 1 ทดลองเปรียบเทียบการทำงานของ Stepper Motor ในแต่ละโหมดการทำงาน โดยเทียบความแตกต่างการทำงานในแต่ละโหมดต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณ เพื่อหาความเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบมอเตอร์

จุดประสงค์

- เพื่อให้สามารถอธิบายหลักการทำงานของ Stepper Motor และประเภทของ Stepper Motor ได้
- เพื่อให้สามารถอธิบายหลักการขับเคลื่อนของ Stepper Motor ในแต่ละโหมดการทำงานได้ (Wave Drive, Full Step, Half Step, Micro step)
- เพื่อให้สามารถแสดงการทำงานจริงของ Stepper Motor ในแต่ละโหมดที่สามารถทำได้ และอธิบายความแตกต่างของการเคลื่อนที่ได้
- เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณขับกับความเร็วรอบของมอเตอร์ในแต่ละโหมดได้
- เพื่อให้สามารถอธิบายสาเหตุที่ความเร็วของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงตามความถี่ของสัญญาณได้
- เพื่อให้สามารถอธิบายข้อดี-ข้อเสียของแต่ละ Drive Mode ได้อย่างเหมาะสมกับการใช้งานจริง

สมมติฐาน

เมื่อความถี่ของสัญญาณที่จ่ายให้มอเตอร์เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความเร็วของมอเตอร์เพิ่มขึ้นด้วย โดยในโหมด Full step ที่ความถี่เดียวกัน จะมีความเร็วรอบของมอเตอร์สูงที่สุดเมื่อเทียบกับโหมดอื่น ๆ

ตัวแปร

- ตัวแปรต้น:
 - ความถี่ของสัญญาณ
 - โหมดของ Stepper Motor
- ตัวแปรตาม:
 - ค่าความเร็วรอบของ Stepper Motor
- ตัวแปรควบคุม:
 - ความถี่ของสัญญาณเพิ่มขึ้นครั้งละ 200 Hz ถึง 3800 Hz (ความถี่ก่อนที่ Full step จะเกิด Loss step)
 - นำค่าความเร็วรอบมาเฉลี่ยจาก 500 ค่าที่เก็บได้

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- สูตรในการหาค่า RPM และ frequency ของ Stepper Motor

วิธีคำนวณ

หา RPM ที่ล้อและนำเออต่อบบ

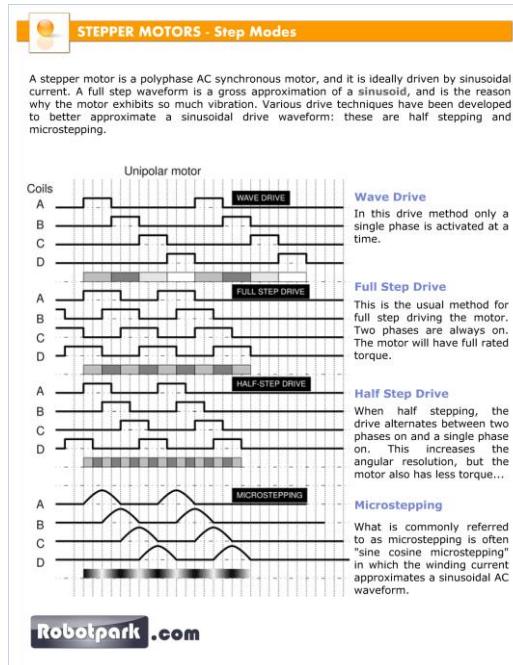


รูปที่ X แสดงสูตรในการหา RPM และ frequency ของ Stepper Motor

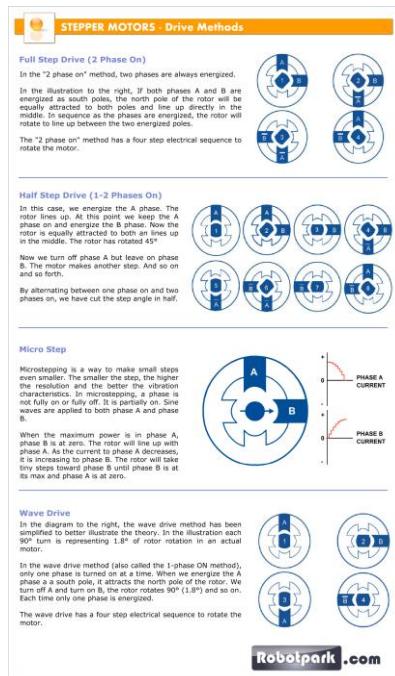
2. โหมดของ Stepper Motor

M0	M1	M2	Microstep Resolution
Low	Low	Low	Full step
High	Low	Low	Half step
Low	High	Low	1/4 step
High	High	Low	1/8 step
Low	Low	High	1/16 step
High	Low	High	1/32 step
Low	High	High	1/32 step
High	High	High	1/32 step

รูปที่ X แสดงวิธีการตั้งค่าโหมด เพื่อเปลี่ยน Wave Drive ของ Stepper Motor



รูปที่ X แสดงโหมดในการตั้งค่า Stepper Motor



รูปที่ X แสดงการทำงานในแต่ละโหมดของ Stepper Motor

2.1 Wave Drive โหมดนี้จะจ่ายกระแสให้ทีละชุดลวดเท่านั้น โดยเป็นโหมดที่ใช้พลังงานน้อยที่สุด แต่ให้แรงบิดต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับโหมดอื่น ๆ

2.2 Full step

แบ่งเป็นสองประเภท ได้แก่

- แบบเดลวดเดียวทำงาน (one-phase-on): จ่ายกระแสทีละชุดลวด
- แบบสองชุดลวดทำงานพร้อมกัน (two-phase-on): จ่ายกระแสสองชุดลวดพร้อมกัน ให้แรงบิดเพิ่มขึ้นร้า 30–40%

โดย Full step จะขยับมอเตอร์ครั้งละ 1.8 องศา ต่อ Pulse ให้แรงบิดสูง และสม่ำเสมอ

2.3 Half step โหมดนี้จะสลับการจ่ายระหว่างหนึ่งชุดลวด และสองชุดลวด ทำให้จำนวน step ต่อรอบเพิ่มเป็นสองเท่า ทำให้การหมุนลื่นกว่า Full step แต่ให้แรงบิดจะน้อยกว่าแบบ Full step เล็กน้อย

2.4 Micro step เป็นโหมดที่ซับซ้อนที่สุด แบ่งหนึ่ง step ออกเป็น Micro step ย่อย ๆ (สามารถแบ่งสูงสุดได้ 256 ส่วน) โดยปรับกระแสชุดลวดให้เป็นลักษณะคลื่นไส้ เพื่อให้มอเตอร์หมุนได้อย่าง smooth เนียนแม่นยำ และลดการสั่นสะเทือน มีแรงบิดที่ค่อนข้างต่ำ แต่แรงบิดจะ smooth มากร

3. ประเภทของ Stepper Motor

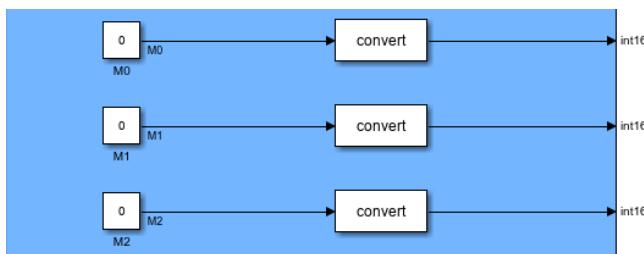
3.1 แบบ Variable Reluctance (VR Stepper Motor) เป็นแบบดั้งเดิมที่สุด Rotor ทำจาก Soft Iron มีชีพนไฟอง แต่ไม่มีแม่เหล็ก หมุนโดยอาศัยแรงดึงดูดทางแม่เหล็กในตำแหน่งที่มีความต้านทานแม่เหล็กน้อยที่สุด (Minimum Reluctance) Step Angle มากจะอยู่ที่ 15 องศา ให้แรงบิดต่ำ และไม่มีแรงบิดล็อกแกนเมื่อไม่มีการจ่ายไฟ

3.2 แบบ Permanent Magnet (PM Stepper Motor) Rotor ทำจากแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) ใช้การผลักและดูดระหว่างสนามแม่เหล็กของชุดลวด Stator กับแม่เหล็กถาวรที่ตัว Rotor ให้แรงบิดสูงกว่าแบบ VR แต่ความละเอียดต่ำ มี Step Angle อุปกรณ์ที่ 7.5 - 15 องศา

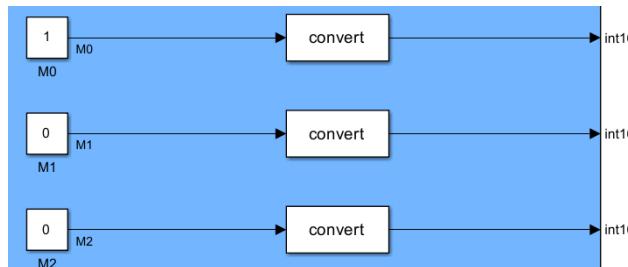
3.3 แบบ Hybrid (HB Stepper Motor) เป็นการผสม ข้อดีของแบบ VR และ PM เข้าด้วยกัน โดย Rotor เป็นแม่เหล็กถาวรที่มีชีพนไฟองเพื่อลงทะเบียนใช้ทั้งแรงดึงดูดของชีพนไฟอง (เหมือน VR) และแรงแม่เหล็กถาวร (เหมือน PM) ช่วยเสริมแรงกัน ให้แรงบิดสูงที่สุด และมีความเร็วสูง มีความละเอียดสูงมาก มี Step Angle อุปกรณ์ที่ 1.8 องศา (หรือ 0.9 องศา) เป็นที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรม หุ่นยนต์ และเครื่องจักร CNC

ขั้นตอนการดำเนินงาน

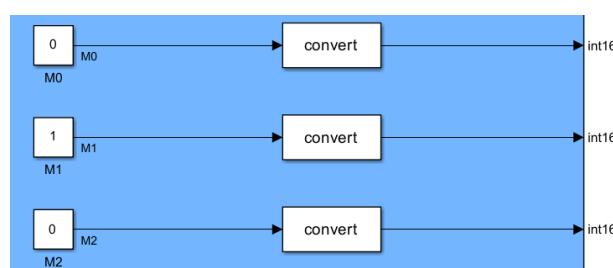
1. ติดตั้งบอร์ด และต่อสายไฟตามใน LAB 2 Instruction
2. ตั้งค่าเพื่อทดลองวัดโหนด



รูปที่ X แสดงการตั้งค่าโหนด Full step

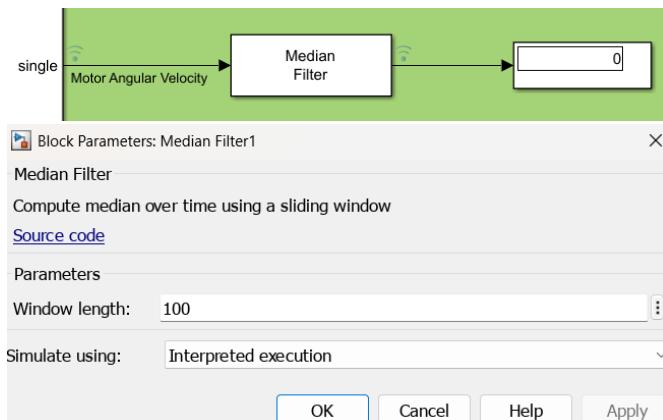


รูปที่ X แสดงการตั้งค่าโหนด Half step



รูปที่ X แสดงการตั้งค่าโหนด Micro step

3. ปรับค่าความถี่ของสัญญาณ โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 200 Hz ถึง 3800 Hz (ความถี่ก่อนที่ Full step จะเกิด Loss step)
4. อ่านค่าความเร็วของ Stepper Motor ผ่าน Block Simulink โดยใช้ Median Filter เพื่ออ่านค่าเฉลี่ยใน 100 ครั้ง



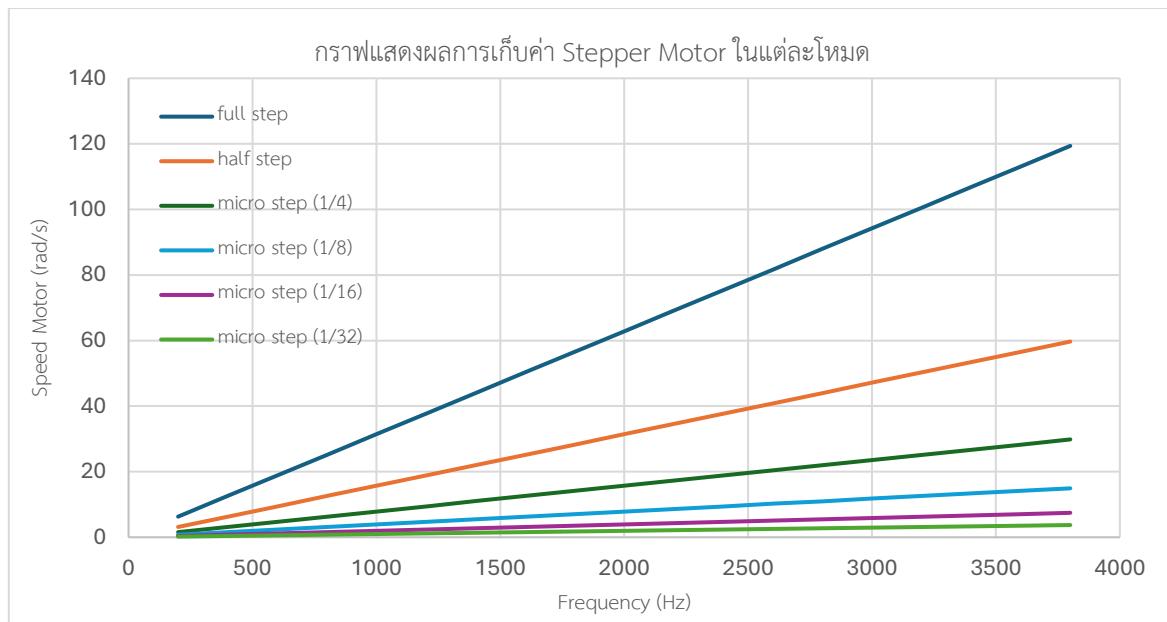
รูปที่ X แสดงการติดตั้ง Median Filter เพื่ออ่านค่าเฉลี่ยของความเร็วเชิงมุมของเตอร์จากการอ่านค่า 100 ครั้ง

5. เมื่อบันทึกค่าความเร็วรอบครบทุกความถี่แล้ว ทำการเปลี่ยนโหมดเป็น Half Step, Micro step ตามลำดับ
6. ทำข้อ 1-5 ทั้งหมด 5 ครั้งในแต่ละโหมด

ผลการทดลอง

Hz	Speed motor (rad/s) เฉลี่ยทั้งหมด 500 ค่า					
	full step	half step	micro step (1/4)	micro step (1/8)	micro step (1/16)	micro step (1/32)
200	6.29	3.14	1.57	0.79	0.39	0.20
400	12.57	6.28	3.14	1.57	0.79	0.39
600	18.85	9.42	4.71	2.36	1.18	0.59
800	25.07	12.57	6.28	3.14	1.57	0.78
1000	31.35	15.71	7.85	3.93	1.96	0.98
1200	37.70	18.85	9.42	4.71	2.36	1.18
1400	43.98	21.99	11.00	5.50	2.75	1.37
1600	50.27	25.13	12.57	6.28	3.14	1.57
1800	56.55	28.27	14.14	7.07	3.53	1.76
2000	62.77	31.39	15.69	7.85	3.93	1.96
2200	69.12	34.56	17.28	8.64	4.32	2.16
2400	75.40	37.70	18.85	9.42	4.71	2.36
2600	81.68	40.84	20.42	10.21	5.10	2.55
2800	87.96	43.95	21.99	11.00	5.50	2.75
3000	94.25	47.12	23.55	11.78	5.89	2.94
3200	100.53	50.27	25.13	12.57	6.28	3.14
3400	106.81	53.40	26.70	13.35	6.68	3.34
3600	113.10	56.55	28.27	14.14	7.07	3.53
3800	119.39	59.66	29.85	14.92	7.46	3.73

ตารางที่ X แสดงผลการเก็บค่าจาก Stepper Motor ในแต่ละโหมดเฉลี่ยทั้งหมด 500 ค่า



รูปที่ X กราฟแสดงผลการเก็บค่าจาก Stepper Motor ในแต่ละโหมดเฉลี่ยทั้งหมด 500 ค่า

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า เมื่อจ่ายความถี่ให้กับ Stepper Motor มากขึ้น ส่งผลให้ความเร็วของมอเตอร์มากขึ้นตามไปด้วยในทุก ๆ โหมดการทำงาน เนื่องจากความถี่สัญญาณเป็นตัวกำหนดอัตราการสลับขั้วแม่เหล็ก ยิ่งความถี่สูง มอเตอร์จึงต้องเปลี่ยนตำแหน่ง step ถี่ขึ้นตามไปด้วย แต่มีความแตกต่างกันคือความชันของข้อมูลจะเปลี่ยนไปตามแต่ละโหมด โดยมีความชันมากที่สุด คือ โหมด Full step และน้อยที่สุดที่โหมด Micro step (1/32) แสดงให้เห็นว่า ที่ความถี่เท่ากัน โหมด Full step จะสามารถให้ความเร็ว obt ได้สูงที่สุด เนื่องจากในโหมด Full step เป็นการจ่ายไฟเต็มให้กับขดลวด แล้วเลื่อนไปตามลำดับ ทำให้มอเตอร์มี Step Angle อよู่ที่ 1.8 องศา/pulse และในโหมด Micro step (1/32) ที่ความถี่เท่ากัน จะสามารถให้ความเร็ว obt ได้ต่ำที่สุด เนื่องจากในโหมด Micro step (1/32) ใช้การควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในแต่ละ step ทำให้มอเตอร์มีความละเอียดมากกว่า และมี Step Angle อよู่ที่ 1.8/32 องศา/pulse ซึ่งทำให้ในโหมด Micro step (1/32) มอเตอร์หมุนได้ smooth มากกว่าในโหมด Full step สังเกตได้จากระหว่างการทดลองมอเตอร์โหมด Micro step (1/32) จะเกิดการสั่นน้อยกว่าในโหมด Full step อย่างเห็นได้ชัด

อภิปรายผล

Stepper Motor เป็นมอเตอร์ที่เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้า (Pulse) เป็นการเคลื่อนที่เชิงมุม โดยอาศัยหลักการดูดและปลักของสนามแม่เหล็กระหว่าง Stator และ Rotor และจากการทดลองความคุ้ม Stepper Motor และเก็บค่าความสัมพันธ์ระหว่างความถี่สัญญาณกับความเร็ว obt ในโหมดต่าง ๆ ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นและพหุตigrumของมอเตอร์ที่เปลี่ยนไปตามโหมด ดังนี้

- ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณและความเร็ว obt ของมอเตอร์

ผลการทดลองในทุกโหมดแสดงลักษณะกราฟเป็นเส้นตรง (Linear) ที่มีความชันเป็นบวก ซึ่งหมายความว่าความเร็วรอบของมอเตอร์แปรผันตรงกับความถี่ของ pulse ซึ่งสอดคล้องกับสูตรการคำนวณความเร็วรอบของ Stepper Motor

$$RPM = \frac{a * f}{360}$$

โดย a = Step Angle และ f = Frequency

2. การเปรียบเทียบพฤติกรรมในแต่ละโหมดการทำงาน

2.1 โหมด Wave Drive และ Full Step (Step Angle = 1.8 องศา)

จากการทดลอง โหมด Full Step ให้ค่าความชันของกราฟสูงที่สุด แสดงว่าที่ความถี่สัญญาณเดียวกัน มอเตอร์สามารถทำความเร็วรอบได้สูงที่สุด ทั้งโหมด Wave Drive และ Full Step มี Step Angle อยู่ที่ 1.8 องศา/pulse การเคลื่อนที่หนึ่ง step จึงได้ระยะทางมากที่สุด แต่ถึงจะได้ความเร็วเท่ากัน แต่ใน Wave Drive จะจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ตลอด ทำให้ใช้พลังงานน้อย ให้แรงบิดต่ำ ในขณะที่ Full Step จ่ายกระแสสองชด漉ดพร้อมกัน ทำให้ได้แรงบิดสูงขึ้น 30-40% แต่มี Step Angle ที่ค่อนข้างกว้างทำให้การหมุนมีความไม่ smooth เกิดแรงสั่นสะเทือนสูงที่สุดเมื่อเทียบกับโหมดอื่น

2.2 โหมด Half Step (Step Angle = 0.9 องศา)

กราฟของโหมด Half Step มีความชันลดลงประมาณครึ่งหนึ่งเมื่อเทียบกับ Full Step โดยโหมดนี้จะทำงานโดยการสลับจ่ายไฟระหว่าง 1 ชด漉ด และ 2 ชด漉ด สลับกันไป ส่งผลให้มุมก้าวลดลงเหลือ 0.9 องศา ทำให้ที่ความถี่เท่ากัน ความเร็วรอบจะลดลงครึ่งหนึ่งจาก Full step แต่ได้ความละเอียดของตำแหน่งเพิ่มขึ้น 2 เท่า และการเคลื่อนที่มีความ smooth กว่า Full Step เนื่องจากกระบวนการเคลื่อนที่ของแกนลดลง

2.3 โหมด Micro step (1/4, 1/8, 1/16, 1/32)

กราฟของโหมด Micro step มีความชันที่ลดต่ำลงเรื่อยๆ ตามลำดับความละเอียด ($1/4 > 1/8 > 1/16 > 1/32$) โดยโหมดนี้ใช้การควบคุมกระแสไฟฟ้าในชด漉ดให้มีลักษณะเป็น Sine Wave แทนที่จะเป็น Square Wave เพื่อจำลองสนามแม่เหล็กให้หยุดในตำแหน่งย่อยระหว่าง step ยิ่งความละเอียดมากมอเตอร์ยิ่งหมุนได้ช้าลงมากที่ความถี่เดิม แต่การเคลื่อนที่จะมีความต่อเนื่อง smooth เสียงเงียบที่สุด และลดการสั่นสะเทือนได้ดีสุด หมายความว่าการทำงานที่ต้องการความแม่นยำสูง

ข้อเสนอแนะ

ใช้สายไฟที่มีคุณภาพมากขึ้นเพื่อความเสถียรของข้อมูล

อ้างอิง

<https://how2electronics.com/control-stepper-motor-with-drv8825-driver-arduino/>

<https://www.craneprofessional.in.th/power-ratio-rpm-for-crane-motor/>

<https://www.robotpark.com/Stepper-Motor-Working>

<https://www.jkongmotor.com/th/types-of-stepper-motor.html>

การทดลองที่ 2 ทดลองการเกิด Loss step ของ Stepper Motor

จุดประสงค์

- เพื่อให้สามารถอธิบายหลักการของ Loss Step และเงื่อนไขที่ทำให้เกิด Loss Step ได้อย่างถูกต้อง
- เพื่อให้สามารถแสดงผลการทดลองเกี่ยวกับ Acceleration และ Loss Step ได้อย่างชัดเจน

สมมติฐาน

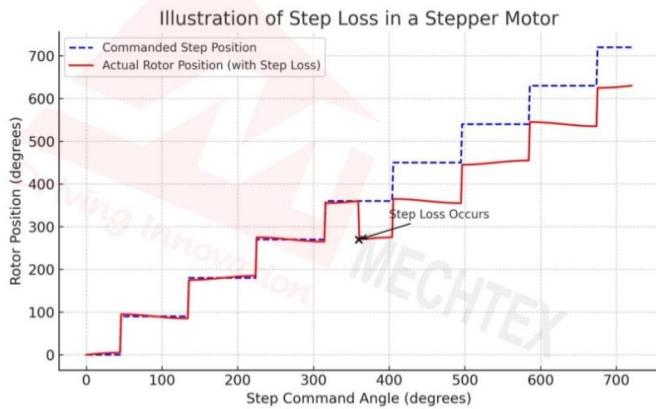
ความถี่ในการเกิด Loss step ของแต่ละโหนดจะไม่เท่ากัน โดยในโหนด Full step จะเกิด Loss step ที่ความถี่ต่ำสุด และที่ความถี่เดียวกัน จะมีความเร็วเชิงมุ่งมากที่สุด และโหนด Micro step (1/32) จะเกิด Loss step ที่ความถี่สูงสุด และที่ความถี่เดียวกัน จะมีความเร็วเชิงมุ่งน้อยที่สุด

ตัวแปร

- ตัวแปรต้น:
 - ความถี่ของสัญญาณ
 - โหนดของ Stepper Motor
- ตัวแปรตาม:
 - การเกิด Loss step ของแต่ละโหนดการทำงาน
 - ค่าความเร่งเชิงมุ่ง
- ตัวแปรควบคุม:
 - สภาพแวดล้อมการทดลอง

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- Loss step



รูปที่ X แสดงการเกิด Loss step ใน Stepper Motor

คือสภาวะที่มอเตอร์ไม่สามารถหมุนไปยังตำแหน่งที่กำหนดได้ตาม pulse ที่ป้อนเข้าไป นั่นคือ มอเตอร์อาจจะหมุนไม่ทันหรือข้ามตำแหน่งที่ควรจะเป็นไป ส่งผลให้ตำแหน่งจริงของมอเตอร์ไม่ตรงกับตำแหน่งตามระบบควบคุม ซึ่งมีสาเหตุหลัก ได้แก่

- โหลดมากเกินไป (Excessive Load Torque)
แรงบิดที่ต้องการใช้ในการหมุนโหลด มีค่ามากกว่าแรงบิดที่มอเตอร์ทำได้ ณ ความเร็วนั้นๆ
- เร่ง/ลดความเร็วไวเกินไป (Rapid Acceleration/Deceleration)
หากสั่งให้มอเตอร์เปลี่ยนความเร็วเร็วเกินไป Rotor จะหมุนตามสนำมแม่เหล็กไม่ทัน
- การสั่นพ้อง (Resonance Effects)
เมื่อมอเตอร์หมุนที่ความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) จะเกิดการสั่นและแรงบิดตก ทำให้เสียจังหวะการเดิน
- กระแสขับไม่พอ (Inadequate Drive Current)
หาก Driver จ่ายกระแสไฟให้ขาด漉ดไม่พอ แรงแม่เหล็กจะไม่มากพอที่จะดึง Rotor ให้หมุนไปตามตำแหน่ง
- ปัญหาทางกล (Mechanical Binding/Friction)
เช่น แกนเบี้ยว ตลัดลูกปืนฟีด ซึ่งเป็นการเพิ่มภาระให้มอเตอร์โดยไม่จำเป็น

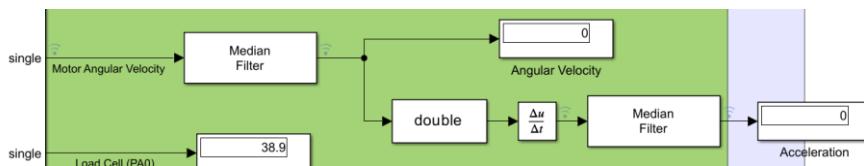
ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ใช้ Ramp 在การช่วยให้ความถี่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงช่วงที่เกิด Loss step



รูปที่ X แสดงการใช้ Ramp 在การช่วยให้ความถี่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงช่วงที่เกิด Loss step

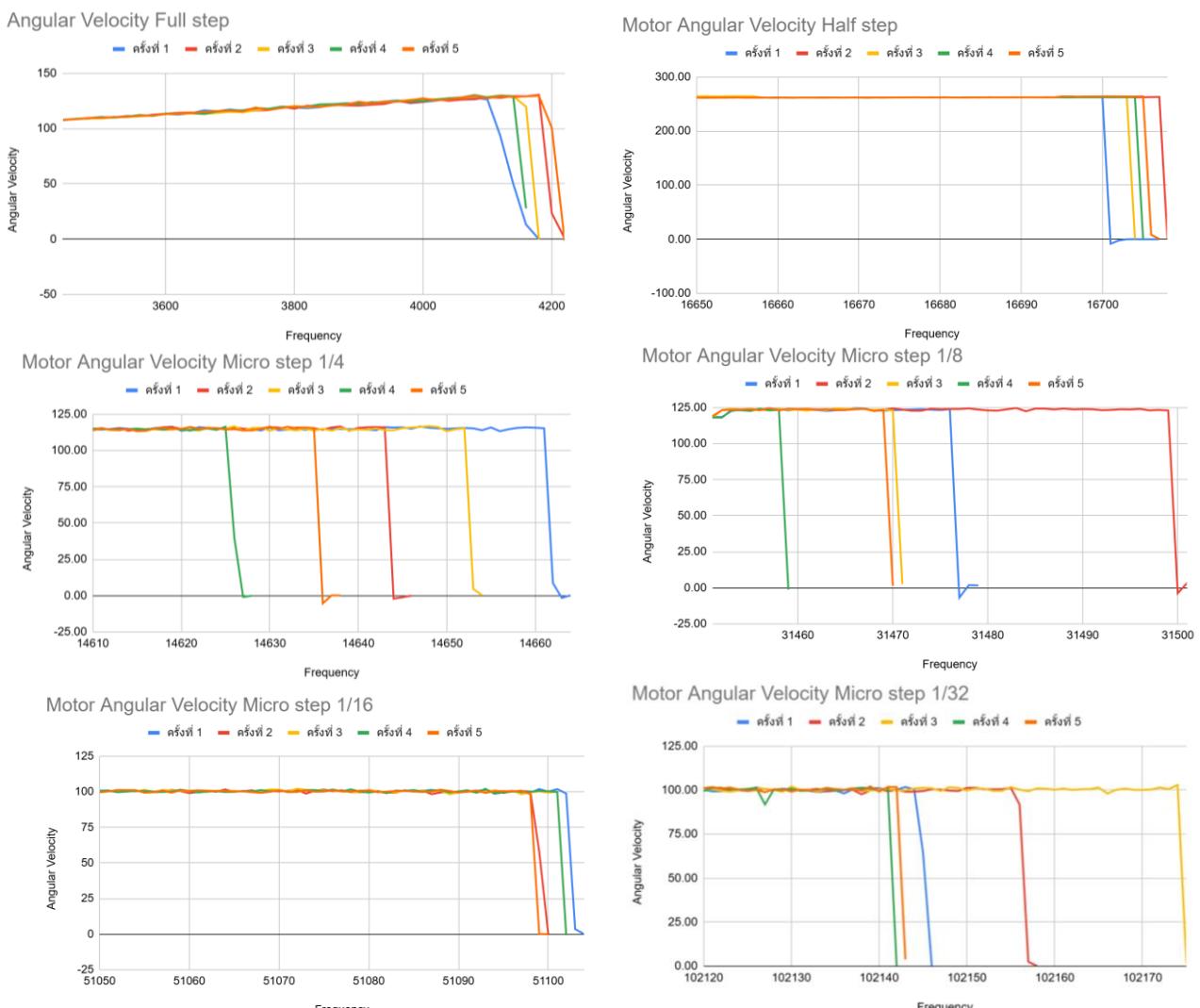
2. ตั้งค่าแต่ละโหมดตามการทดลองที่ 1
3. ทดลองรันเก็บค่าในแต่ละโหมด โดยเริ่มรันตั้งแต่ความถี่ 0 Hz ไปจนถึงความถี่ที่แต่ละโหมดเกิด Loss step โดยเริ่มจากการทดลองในโหมด Full step ก่อน
4. บันทึกค่าที่เกิด Loss step และบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงของความเร่งเชิงมุมของมอเตอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณ โดยทำขั้นตอนเดิมทั้งหมด 5 ครั้ง และทำการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้



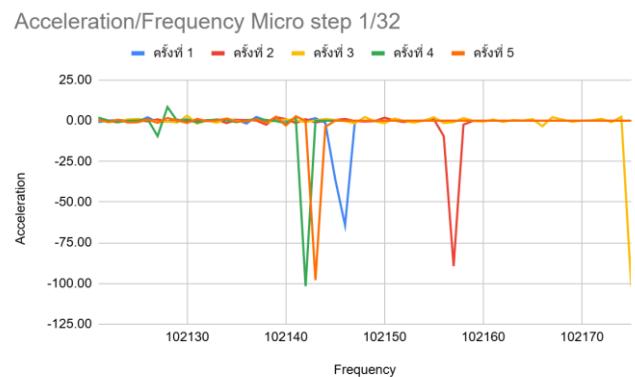
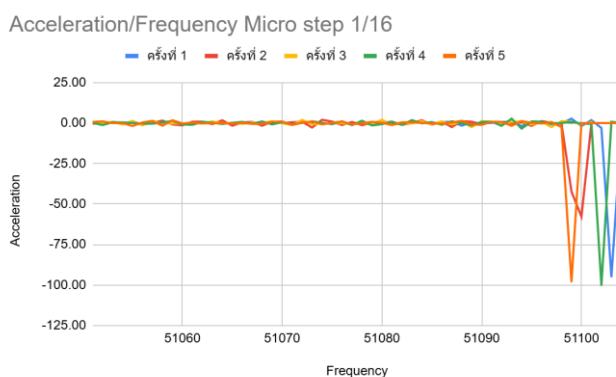
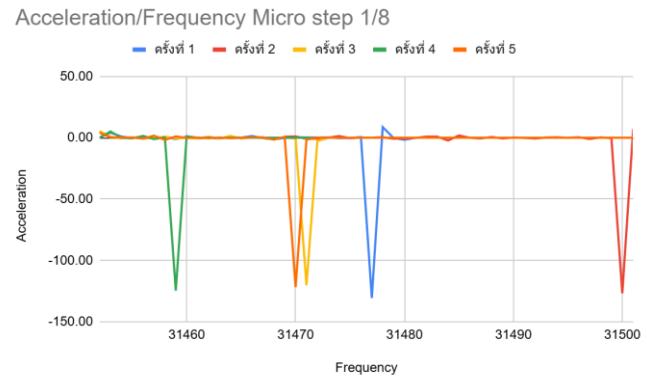
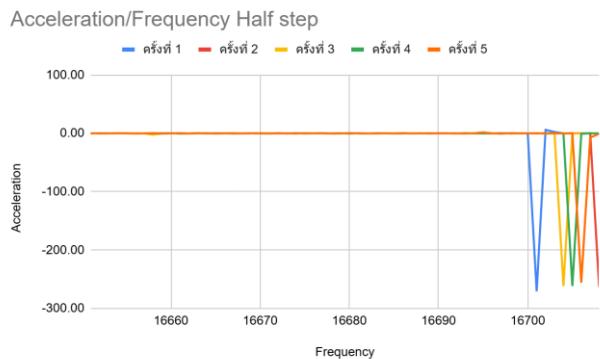
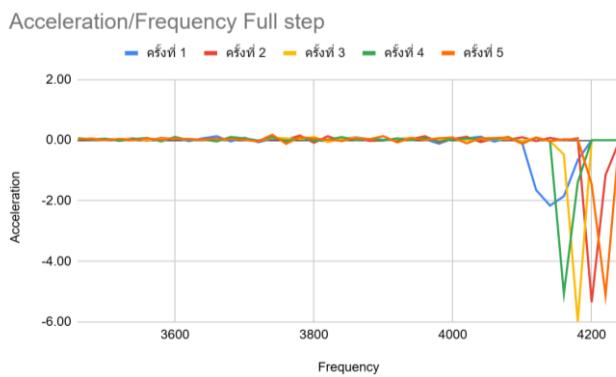
รูปที่ X แสดงการหาค่าความเร่งเชิงมุมโดยใช้ Derivative Block

5. ทำขั้นตอน 3-5 โดยทำการเปลี่ยนโหมดเป็น Half Step, Micro step ตามลำดับ

ผลการทดลอง



รูปที่ X แสดงกราฟการเกิด Loss step ของ Stepper Motor ในแต่ละโหมดที่ความถี่ค่าต่าง ๆ



รูปที่ X แสดงกราฟค่าของความเร่งเชิงมุม เมื่อเกิด Loss step ของ Stepper Motor ในแต่ละโหมด

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อเปรียบเทียบจุดเกิด Loss Step ในกราฟแต่ละโหมด พบร่วมกันว่า ขีดจำกัดความถี่สัญญาณที่มอเตอร์รับได้ก่อนจะสูญเสียการควบคุมมีค่าปรับนั้นตรงกับความละเอียดของการขับเคลื่อน โดยเรียงลำดับความถี่ที่เกิด Loss Step จากมากไปน้อย ได้แก่ Micro step 1/32 > 1/16 > 1/8 > Half Step > 1/4 > Full Step โดย Micro step 1/32 เกิด Loss Step ที่ความถี่สูงที่สุดราว 102,150 Hz ในขณะที่ Full Step เกิดที่ความถี่ต่ำที่สุดราว 4,200 Hz สาเหตุหลักเนื่องจากโหมด Micro step จำเป็นต้องใช้จำนวน Pulse ที่หนาแน่นกว่ามากในการสร้างการหมุนที่ความเร็วเท่ากัน ทำให้ตัวเลขความถี่บนกราฟสูงกว่าโหมดอื่นอย่างชัดเจน แต่พฤติกรรมของกราฟยืนยันเหมือนกันทุกโหมดว่า เมื่อความถี่สูงเกินกว่าแรงบิดที่มอเตอร์ทำได้ ความเร็วรอบจะทิ้งดึงลงสู่ศูนย์ทันที

แต่จากการทดลองพบสิ่งพิเศษคือ โดยทั่วไป Micro step จะให้ความละเอียดสูงกว่า แต่จากการทดลองเก็บค่า Micro step 1/4 ควรจะมีค่าความถี่ในการเกิด Loss step 多 กว่า Half step แต่จากการเก็บผลการทดลองหลายครั้งพบว่า ค่าความถี่ในการเกิด Loss step ของ Micro step 1/4 กลับมีค่าน้อยกว่า Half step ซึ่งอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น อาจเกิดจาก Incremental Torque ที่ลดลงในการแบ่ง step ที่เล็กลง ทำให้แรงแม่เหล็กไม่เพียงพอที่จะเข้าชันแรงเสียดทานของระบบกลไก หรืออาจเกิดจาก Resonance (การสั่นพ้อง) ในย่านความเร็วตั้งกล่าว ซึ่งส่งผลให้แรงบิดของมอเตอร์ลดลงช้าครรда และเกิดการสูญเสียการควบคุมทำให้ผลการทดลองที่ออกแบบไม่ได้ตรงไปตามทฤษฎี

อภิปรายผล

จากการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรม Loss Step ของ Stepper Motor ในโหมดการขับเคลื่อน 6 รูปแบบ ได้แก่ Full step, Half step, Micro step 1/4, 1/8, 1/16 และ 1/32 ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่าง การเปลี่ยนแปลงของความถี่ ความเร็วเชิงมุม และความเร่งเชิงมุมของมอเตอร์ ดังนี้

1. ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณกับความละเอียด และการเกิด Loss Step

ความถี่ที่ทำให้เกิด Loss Step แปรผันตรงกับความละเอียดของการขับเคลื่อน โดย Micro step 1/32 สามารถรับความถี่ได้สูงที่สุด (ประมาณ 102,150 Hz) และ Full Step รองรับความถี่ได้ต่ำที่สุด (ประมาณ 4,200 Hz) แต่ความถี่ที่สูงในโหมด Micro step ไม่ได้หมายความว่ามอเตอร์หมุนเร็วกว่า แต่เป็น เพราะต้องใช้จำนวน Pulse ที่มากกว่ามากในการสร้างการหมุน 1 รอบ

2. การวิเคราะห์กลไกการเกิด Loss Step ผ่านความเร็วเชิงมุม และความเร่งเชิงมุม

2.1 พฤติกรรมจากการฟรiction ความเร็ว

ในสภาวะปกติ ความเร็วรอบจะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามความถี่ที่ป้อนเข้าไป แต่เมื่อถึงจุดวิกฤตกราฟความเร็วจะทิ้งตัวลงสู่ศูนย์ทันที แสดงให้เห็นว่า Loss Step ไม่ใช่การที่มอเตอร์ค่อย ๆ หมุนช้าลง แต่เป็นการหยุดชะงักเนื่องจากสูญเสียการจับคู่กับสนามแม่เหล็ก

2.2 พฤติกรรมจากการฟรiction ความเร่ง

- ช่วงทำงานปกติ ความเร่งมีค่ากว่าตัวอยู่ที่ 0 แสดงถึงการหมุนด้วยความเร็วคงที่ตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นทีละน้อย

- ช่วงเกิด Loss Step จะเกิด Spike ขนาดใหญ่ทันทีที่ความเร็วตก เข่น ในโหมด Half Step ค่าความเร่งดิ่งลงไปที่ -250 ถึง -300 rad/s²

3. การวิเคราะห์ความผิดปกติในโหนด Micro step 1/4

ตามทฤษฎีแล้ว Micro step 1/4 (ความละเอียดสูงกว่า) ควรมีความเสถียรมากกว่า แต่ผลการทดลองพบว่า เกิด Loss Step ที่ความเร็วน้อยกว่า Half Step หาก โดยที่ Half Step หมุนได้เร็วสูงสุดประมาณ 270 rad/s และเมื่อ เกิด Loss Step มีแรงกระชากระยะ -300 แต่ Micro step 1/4 หมุนได้เร็วสูงสุดเพียงประมาณ 115 rad/s และ เมื่อเกิด Loss Step แรงกระชากระยะมีความรุนแรงน้อยกว่า -100 ซึ่งอาจเกิดได้จาก

3.1 Incremental Torque

ในโหนด Micro step 1/4 แม้จะมีความละเอียดสูง แต่แรงบิดระหว่าง step ย่อมมีค่าน้อย กว่า Half Step หาก ทำให้มอเตอร์ไม่มีแรงพอที่จะอาชนะแรงเสียดทานได้แม้ที่ความเร็วรอบต่ำกว่า (สังเกตได้จากการความเร่งที่ Spike ต่ำกว่า เพราะมอเตอร์ไม่มีพลังงานจนน้ำหนักเท่า Half step ตอนที่หยุด)

3.2 Resonance (การสั่นพ้อง)

ช่วงความถี่การทำงานของ Micro step 1/4 อาจตรงกับย่านความถี่ธรรมชาติของระบบ ทำ ให้เกิดการสั่นสะเทือนซึ่งลดทอนแรงบิด ส่งผลให้เกิด Loss Step ก่อนเวลาที่ควรจะเป็น

ข้อเสนอแนะ

- ใช้สายไฟที่มีคุณภาพมากขึ้นเพื่อความเสถียรของข้อมูล
- ควรทำการทดลองช้าโดยการ ติดตั้งตัวหน่วยการสั่นสะเทือน (Mechanical Damper) หรือเพิ่ม Inertial Load เช่น Flywheel เข้าไปที่แกนมอเตอร์ เพื่อดูว่าหากเปลี่ยนความถี่ธรรมชาติของระบบแล้ว จุด Loss Step ของ Micro step 1/4 จะยับสูงขึ้นหรือไม่ หากใช่ แสดงว่าปัญหานั้นเกิดจาก Resonance จริง

อ้างอิง

<https://mechtex.com/blog/step-loss-in-stepper-motors-causes-and-how-to-prevent-it>

<https://www.orientalmotor.com/stepper-motors/technology/speed-torque-curves-for-stepper-motors.html>

2. DC Motor

การทดลองที่ 1 การทดลองเพื่อสร้าง Motor Characteristic Curves

จุดประสงค์

1. เพื่อสร้าง Motor Characteristic Curves ที่แรงดันไฟฟ้า 12V
2. เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง Speed และ Torque ของมอเตอร์
3. เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง Current และ Torque ของมอเตอร์
4. เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง Power และ Torque ของมอเตอร์
5. เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง Efficiency และ Torque ของมอเตอร์
6. เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง Speed, Current, Power และ Efficiency ของมอเตอร์ กับ ความถี่ PWM และ Duty cycle

สมมติฐาน

1. Speed ของมอเตอร์จะแปรผันกับ Torque
2. Current ที่ไหลผ่านมอเตอร์จะแปรผันตรงกับ Torque
3. Power output ของมอเตอร์จะอยู่ในช่วงตຽนกลางของ Stall torque
4. Efficiency สูงที่สุดของมอเตอร์จะอยู่ในช่วงตຽนกลางของ Stall torque
5. เมื่อ Torque คงที่ Speed ของมอเตอร์จะแปรผันตรงกับ แรงดัน PWM
6. เมื่อ Torque คงที่ Current ของมอเตอร์จะแปรผันตรงกับ แรงดัน PWM
7. เมื่อ Torque คงที่ Power output ของมอเตอร์จะแปรผันตรงกับ แรงดัน PWM
8. เมื่อ Torque คงที่ Efficiency ของมอเตอร์จะแปรผันตรงกับ แรงดัน PWM
9. เมื่อความถี่ของ PWM สูงขึ้น จะส่งผลให้กระแสและแรงบิดมี ripple น้อยลง
ทำให้การหมุนเรียบขึ้นและเสียงรบกวนน้อยลง
10. เมื่อความถี่ของ PWM สูงขึ้น จะส่งผลให้เกิดการสวิตชิ่งบ่อยขึ้น ส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานในตัว MOSFET และอาจลด efficiency ของส่วนขึ้นได้

ตัวแปร

1. ตัวแปรตัว:

 - Torque
 - ความถี่ PWM
 - Duty Cycle

2. ตัวแปรตาม:

- Speed
- Current
- Power
- Efficiency

3. ตัวแปรควบคุม:

- ชนิดของมอเตอร์
- แรงดัน
- ความยาวก้านแขวนโหลด

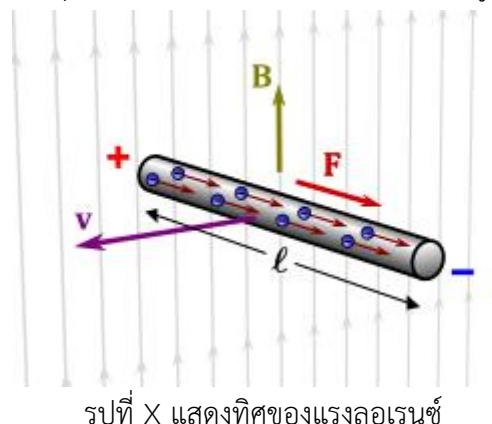
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. หลักการทำงานของ Brush DC Motor

มอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล โดยอาศัยแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นตัวขับเคลื่อนการหมุนของเพลาของมอเตอร์ หลักการทำงานพื้นฐานสามารถอธิบายได้จาก 3 กฎสำคัญ ได้แก่ Lorentz Force, Faraday's Law และ Kirchhoff's Law ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1.1 Lorentz Force

แรงลอเรนซ์เป็นแรงที่กระทำต่อประจุไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าเมื่อเคลื่อนที่อยู่ในสนามแม่เหล็ก



รูปที่ X แสดงทิศของแรงลอเรนซ์

โดยมีสมการพื้นฐานคือ

$$F = i \times B \cdot l \cdot n$$

F คือแรงลอเรนซ์ (N)

i คือกระแสไฟฟ้า (A)

B คือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (T)

l คือความยาวของตัวนำ (m)

n คือจำนวนรอบของขดลวด

แรง洛อเรนซ์นี้จะทำให้เกิดแรงบิด (Torque) กับขดลวดภายในมอเตอร์ โดยแรงบิดที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนตรง ดังสมการ

$$\tau_m = K_m i$$

โดยที่ K_m คือค่าคงที่แรงบิดของมอเตอร์ (Torque Constant) หน่วยเป็น Nm/A ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น แรงบิดของมอเตอร์ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

1.2 Faraday's Law

กฎของฟาราเดียอธิบายการเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Electromotive Force: EMF) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กในขดลวด สำหรับมอเตอร์กระแสตรง เมื่อโรเตอร์หมุนในสนามแม่เหล็ก จะเกิดแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับหรือ Back-EMF ขึ้น ซึ่งมีสมการ

$$v_{emf} = K_b \omega$$

v_{emf} คือแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (V)

K_b คือค่าคงที่ Back-EMF (Vs/rad)

ω คือความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ (rad/s)

แรงดัน Back-EMF นี้จะต้านแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป ทำให้กระแสลดลงเมื่อมอเตอร์หมุนเร็วขึ้น ส่งผลให้ความเร็วของมอเตอร์ไม่เพิ่มขึ้นอย่างไม่มีเส้นสุด

1.3 Kirchhoff's Law

กฎของเคอร์ชอฟฟ์ด้านแรงดัน (KVL) ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าภายในของ DC Motor โดยมีสมการ

$$v_{in} = L (di/dt) + R i + K_b \omega$$

v_{in} คือแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์

L คือค่าความเหนี่ยววน้ำของขดลวด (H)

R คือความต้านทานของขดลวด (Ω)

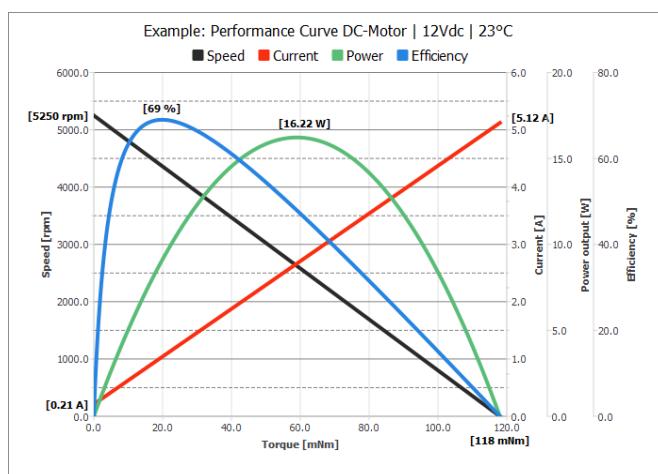
i คือกระแสไฟฟ้า (A)

$K_b \omega$ คือแรงดัน Back-EMF

สมการนี้แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า กระแส และความเร็วรอบของมอเตอร์ ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญในการสร้างแบบจำลองเชิงพลวัตของ DC Motor

2. สมการ DC Motor ที่ใช้ในการสร้าง Motor Characteristic Curves

DC Motor Characteristic Curve สามารถอธิบายผ่านกราฟคุณลักษณะต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์สมการทางไฟฟ้าและกลศาสตร์ของมอเตอร์ในสภาพคงที่ (Steady State)



รูปที่ X แสดงกราฟ Performance ของ DC Motor

ซึ่งประกอบด้วยกราฟ

1. Torque/Speed curve

สามารถอธิบายได้จากสมการ

$$\omega = -(R / (BR + K_m K_b)) \tau_L + (K_m v_{in} / (BR + K_m K_b))$$

จะเห็นความสัมพันธ์ว่า แรงบิด (Torque) และความเร็วรอบ (Speed)

มีความสัมพันธ์แบบเส้นตรงในลักษณะผกผันกัน

เมื่อ Torque สูง ส่งผลให้ Speed ต่ำ

เมื่อ Torque ต่ำ ส่งผลให้ Speed สูง

ที่ Torque = 0 จะได้ความเร็วสูงสุด (No-load Speed)

ที่ Speed = 0 จะได้แรงบิดสูงสุด (Stall Torque)

2. Torque/Current curve

$$\tau = K_m i$$

แสดงให้เห็นว่า แรงบิดแปรผันตรงกับกระแสไฟฟ้า กล่าวคือเมื่อมอเตอร์รับโหลดมากขึ้น กระแสที่เหล่าจะเพิ่มขึ้นตาม ทำให้แรงบิดเพิ่มขึ้นด้วย กราฟนี้จึงเป็นเส้นตรงผ่านจุดกำเนิด

3. Torque/Power curve

กำลังเชิงกลของมอเตอร์คำนวณได้จาก

$$P = \tau \omega$$

เมื่อแทนความสัมพันธ์ระหว่าง τ และ ω จะได้กราฟพาราโบลา โดย

- กำลังมีค่าเป็นศูนย์ที่ No-load และที่ Stall
- กำลังสูงสุดเกิดขึ้นที่แรงบิดประมาณครึ่งหนึ่งของ Stall Torque

$$P_{max} = (\tau_{ST} \omega_{NL}) / 4$$

4. Torque/Efficiency curve

ประสิทธิภาพของมอเตอร์คำนวณจาก

$$\eta = P_{out} / P_{in}$$

ประสิทธิภาพจะมีค่าสูงสุดที่ช่วงแรงบิดปานกลาง ไม่ใช่ที่ No-load และไม่ใช่ที่ Stall เนื่องจากในช่วง No-load มีการสูญเสียกำลังจากแรงเสียดทานและความต้านทานภายใน ส่วนที่ Stall จะเกิดการสูญเสียพลังงานในรูปความร้อนสูงมาก

5. หลักการทำงานของ PWM และ Duty cycle

5.1 PWM

PWM คือเทคนิคการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่จ่ายให้กับมอเตอร์ โดยการปรับช่วงเวลาการเปิด (ON-Time) และ ช่วงเวลาการปิด (OFF-Time)

โดยสามารถนิยามค่าพื้นฐานได้ดังนี้

- คาบสัญญาณ (Period)

$$T = T_{ON} + T_{OFF}$$

- ความถี่ของสัญญาณ

$$f = 1 / T$$

แม้ว่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายจริงจะเป็นลักษณะสี่เหลี่ยม (เปิด–ปิด)

แต่เนื่องจากข้อดีของการใช้ในมอเตอร์มีคุณสมบัติเป็นตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)

ทำให้กระแสไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลงทันที ส่งผลให้มอเตอร์รับรู้เป็นแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยแทน

แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่จ่ายให้มอเตอร์สามารถประมาณได้จาก

$$V_{out} = \text{Duty Cycle} \times V_{dd}$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเร็วของมอเตอร์สามารถควบคุมได้โดยการเปลี่ยนค่า Duty Cycle ของสัญญาณ PWM และการเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าโดยตรง

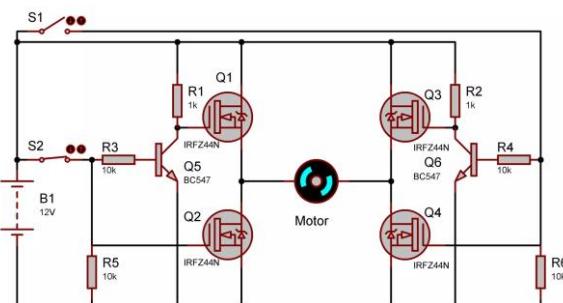
3.2 Duty cycle

Duty Cycle คืออัตราส่วนของช่วงเวลาที่สัญญาณอยู่ในสถานะ “เปิด (ON)” ต่อหนึ่งคาบสัญญาณ มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (%)

$$\text{Duty Cycle} = (T_{ON} / (T_{ON} + T_{OFF})) \times 100$$

6. หลักการทำงานของ H-Bridge Drive

1.



2.

3. รูปที่ X แสดงวงจร H-Bridge Drive

4. H-Bridge เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้สำหรับควบคุม ทิศทางการหมุนของ DC Motor โดยอาศัยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น MOSFET หรือทรานซิสเตอร์ จำนวน 4 ตัว จัดเรียงเป็นลักษณะคล้ายตัวอักษร “H” โดยมอเตอร์จะถูกต่อไว้ตรงกลางของสะพาน H-Bridge

5. หลักการทำงานพื้นฐานคือ การควบคุมการrotate มอเตอร์ ปีด-ปิดของสวิตช์แต่ละตัวเพื่อเปลี่ยนทิศทางของกระแสไฟฟ้านมอเตอร์ ซึ่งมีผลต่อทิศทางการหมุนของมอเตอร์โดยตรง โดย

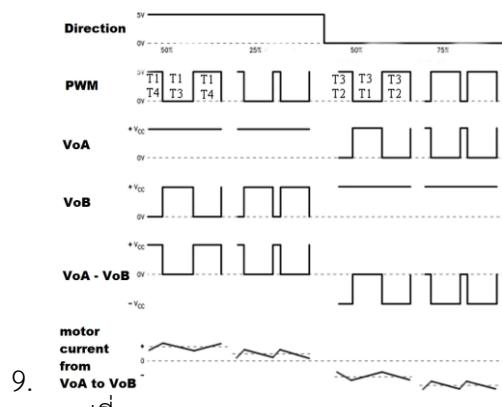
6. - เมื่อเปิดสวิตช์ผ่านขวางและขวากลางพร้อมกัน กระแสจะไหลจากซ้ายไปขวา ทำให้มอเตอร์หมุนทิศทางหนึ่ง

7. - เมื่อเปิดสวิตช์ผ่านขวาและซ้ายกลับพร้อมกัน กระแสจะไหลในทิศทางตรงกันข้าม ทำให้มอเตอร์หมุนกลับทิศทาง

8. - หากเปิดสวิตช์ในแนวเดียวกันจะทำให้แหล่งจ่ายไฟลัดวงจร (Shoot-through)

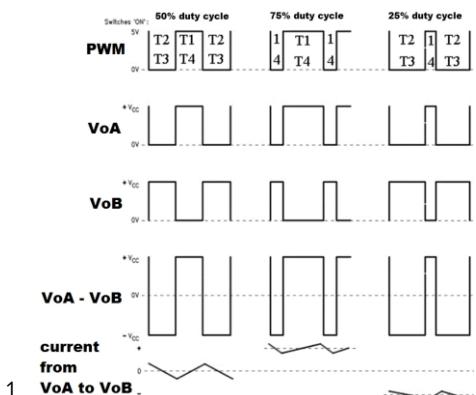
7. H-Bridge Drive Mode

a. Sign-Magnitude Mode



9. รูปที่ X แสดง Sign-Magnitude Mode

b. Locked Anti-Phase Mode



10. รูปที่ X แสดง Locked Anti-Phase Mode

8. ค่าที่ต้องหาก่อนทำการทดลอง

a. Torque Constant

Torque Constant (K_m) คือค่าคงที่ที่บอกรความสามารถของมอเตอร์ในการสร้างแรงบิดต่อกระ杂质ไฟฟ้า 1 แอมเปอร์ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\tau = K_m i$$

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. Calibrate Hall current sensor และ Loadcell

1.1 Hall current sensor

- ต่อ Hall current sensor ล็อ้มรอบสายไฟเลี้ยงมอเตอร์
- ต่อ multimeter แบบอนุกรมกับมอเตอร์
- เก็บค่า adc จาก Hall current sensor และ กระแสจาก multimeter ที่แรงดัน 12V ADC และ กระแสต่อนที่มอเตอร์ยังไม่หมุน
- ADC และ กระแสต่อนที่มอเตอร์ Stall
- นำค่าที่เก็บได้มาแทนลงในสูตร

1.2 Loadcell

- ใช้มัลติมิเตอร์ วัดขา A+ และขา A- ที่เป็นขา IN ของ Comparator
 - ใช้มัลติมิเตอร์ วัดขา Vo ของ INA125
 - นำค่าที่ได้มาแทนลงในสูตร

$$V_o = (V_{IN} - V_{IN})G$$

เพื่อหาค่า Gain

จากนั้นนำค่า Gain มาแทนลงในสูตร

$$G = 4 + 60k\Omega R_G G = 4 + 60k\Omega RG$$

เพื่อหา R_G

- หมุน Trimpot ให้ได้ตามค่า R ที่คำนวณออกมาก

- 13. - เขียน Matlab function เพื่อ map ค่าจาก ADC เป็น กรัม

ใช้เครื่องซั่งดิจิตอลซั่งน้ำหนักนื้อตแล้ววางลงบน Load cell ทีละถุง แล้ววางแข็งไว้ ทำจนครบ 360 กรัม และทำซ้ำ 3 รอบ

- 14. - นำค่าแต่ละช่วงมาหาค่าเฉลี่ยแล้วนำมา plot กราฟ

- 15. - เขียนฟังก์ชัน Linearization

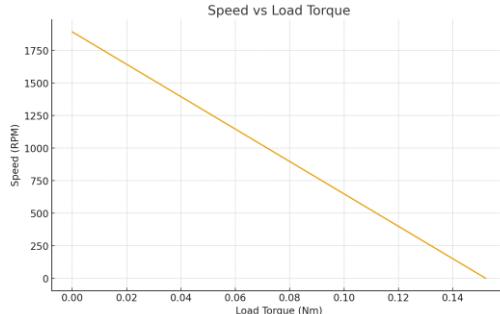
2. เก็บค่า No load speed และกระแสของ Motor ที่ ความถี่ PWM 10000Hz, 20000Hz, 30000Hz และ 40000Hz ที่ Duty cycle 0% ถึง 100% โดยเก็บค่าทุกๆ 5% ทำซ้ำ 3 รอบ

3. เก็บค่า Stall torque และ Stall current ของแต่ละแรงดัน PWM
โดยใช้ก้านกดต่อเข้าเพลามอเตอร์แล้วให้มอเตอร์หมุนกันไปกด Loadcell ทำซ้ำ 3 รอบ
4. นำค่า motor angular velocity ที่เก็บมาเข้า Fourier Transform เพื่อหาจุด cut off frequency
5. ทำ Low pass filter จากจุด cut off frequency ที่ได้มา
6. ทำ Bode plot
7. นำค่า Angular velocity, Stall current, Stall torque มาทำการวิเคราะห์ เพื่อทำ Motor Characteristic curve, คำนวนหาค่า torque constant และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่ PWM, Duty Cycle กับ ความเร็ว, กระแส และ ประสิทธิภาพของ motor
8. สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

ผลการทดลอง

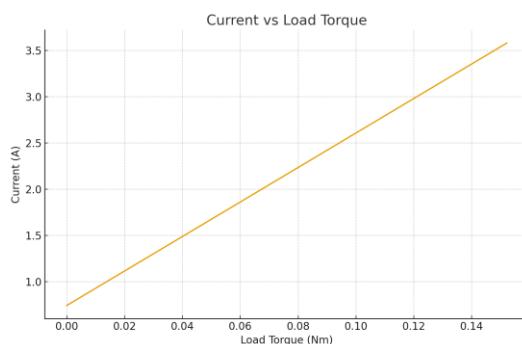
1. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Speed, Current, Power และ Efficiency เทียบกับ Torque ที่แรงดัน 12V

- Speed vs Torque



รูปที่ X แสดงกราฟ Speed vs Torque

- Current vs Torque



รูปที่ X แสดงกราฟ Current vs Torque

- Output Power vs Torque



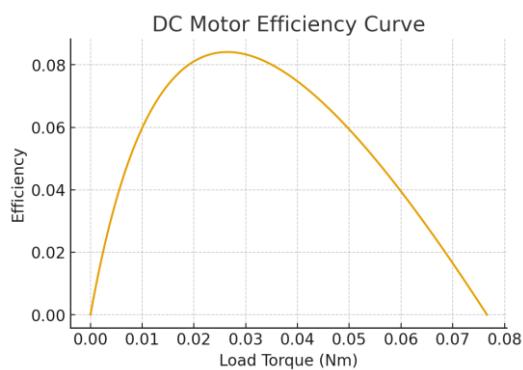
รูปที่ X แสดงกราฟ Output Power vs Torque

- Efficientcy vs Torque



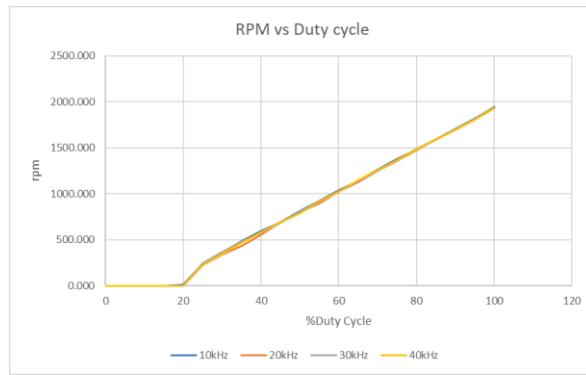
รูปที่ X แสดงกราฟ Efficientcy vs Torque

- Efficientcy vs Torque (6V)



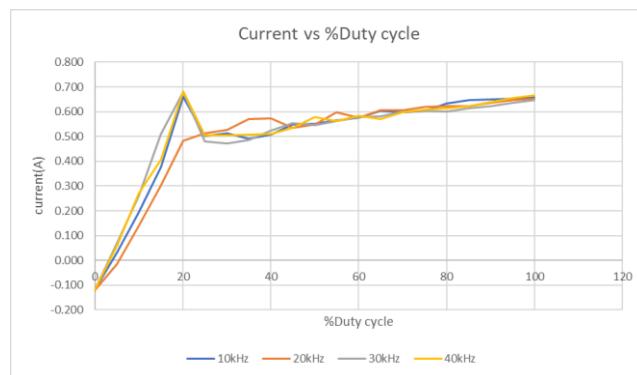
รูปที่ X แสดงกราฟ Efficientcy vs Torque (6V)

2. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Speed เทียบกับ ความถี่ PWM 10000Hz, 20000Hz, 30000Hz, 40000Hz ที่ Duty cycle 25%, 50%, 75% และ 100%



16.

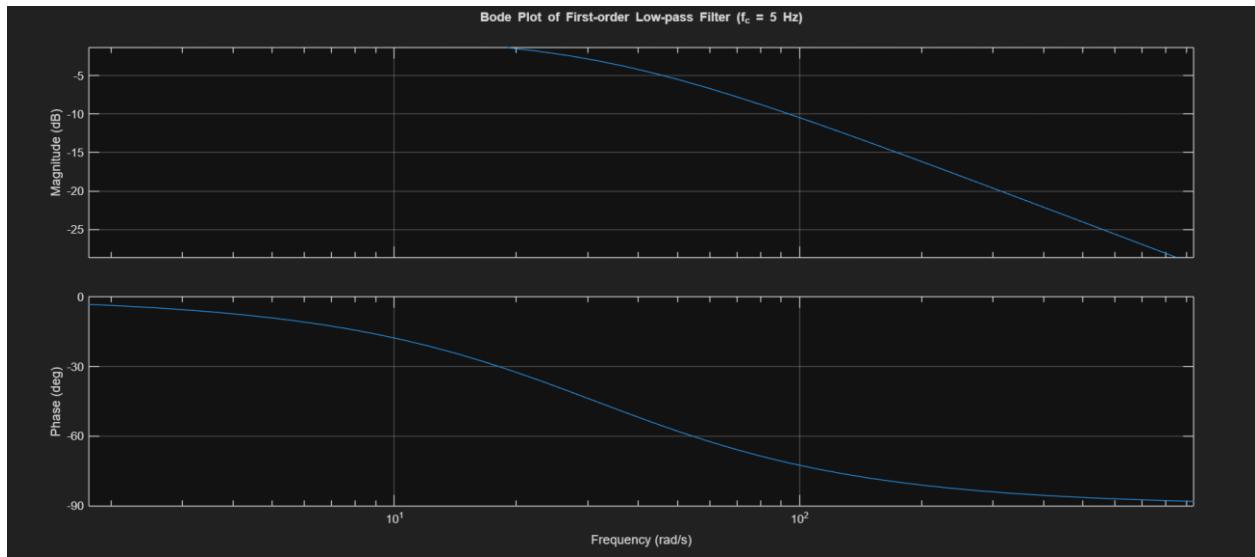
3. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Current เทียบกับ ความถี่ PWM 10000Hz,20000Hz,30000Hz, 40000Hz ที่ Duty cycle 25%, 50%, 75% และ 100%



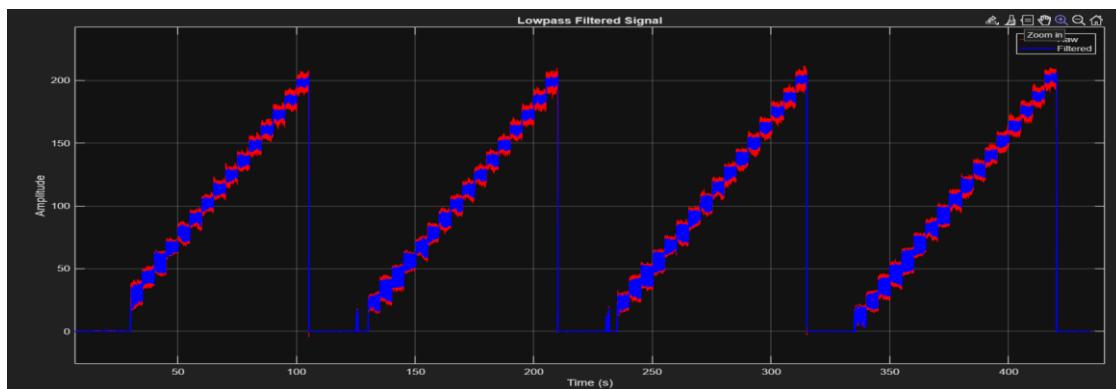
4. ตารางบันทึกผลการทดลองหา Stall torque, Stall current และ Torque constant

การทดลองครั้งที่	mass(g)	Stall torque(Nm)	Stall current(A)	Torque constant(Nm/A)
1	141	0.1521531	3.58	0.042500866
2	137	0.1478367	3.6	0.04106575
3	130	0.140283	3.53	0.039740227
AVG	136	0.1467576	3.57	0.041108571

5. กราฟ Bode Plot first order ที่ cut off frequency 5 Hz



6. ตัวอย่างกราฟเปรียบเทียบผลของการทำ lowpass filter



สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองศึกษาคุณลักษณะของมอเตอร์กระแสตรง (DC Motor Characteristic Curve) และผลของสัญญาณ PWM ต่อสมรรถนะของมอเตอร์ สามารถสรุปผลที่เกิดขึ้นจริงได้ดังนี้

1. ความสัมพันธ์ระหว่าง Speed และ Torque

พบว่าความเร็วรอบของมอเตอร์ลดลงตามแรงบิดที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น

โดยมีค่าความเร็วสูงสุดที่ไม่มีโหลด (No-load speed) และลดลงจนเป็นศูนย์ที่ค่า Stall torque

ซึ่งมีลักษณะสอดคล้องกับทฤษฎี Torque-Speed ของมอเตอร์กระแสตรง

2. ความสัมพันธ์ระหว่าง Current และ Torque

กระแสที่ไหลผ่านมอเตอร์เพิ่มขึ้นตามแรงบิดอย่างเป็นสัดส่วน ซึ่งสอดคล้องกับสมการ $\tau = K_m i$

แสดงว่ามอเตอร์ตอบสนองต่อโหลดได้ถูกต้องตามหลักของแรง洛เรนซ์

3. ความสัมพันธ์ระหว่าง Output Power และ Torque

กำลังเชิงกลมีค่ามากที่สุดที่ช่วงประมาณครึ่งหนึ่งของ Stall torque ตามทฤษฎี $P_{max} = (\tau_{ST} \omega_{NL})/4$ และมีค่าลดลงเมื่อแรงบิดต่ำมากหรือสูงมาก

ผลลัพธ์สอดคล้องกับลักษณะของพาราโบลาตามทฤษฎี

4. ความสัมพันธ์ระหว่าง Efficiency และ Torque

ประสิทธิภาพของมอเตอร์เพิ่มขึ้นตามแรงบิดและมีค่าสูงสุดในช่วงแรงบิดระดับกลาง ก่อนจะลดลงเมื่อเข้าใกล้ Stall torque เมื่อจากการสูญเสียพลังงานในรูปความร้อนและการแสวงหาสูงเกินไป

5. ผลของความถี่ PWM ต่อ Speed, Current และ Efficiency

a. ที่ Duty cycle เท่ากัน เมื่อเพิ่มความถี่ PWM มอเตอร์มีความเร็วสูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากแรงดันเฉลี่ยมีความเสถียรมากขึ้น

b. กระแสเมื่อ ripple ลดลง ทำให้การหมุนของมอเตอร์เรียบขึ้น

c. อย่างไรก็ตาม เมื่อความถี่ PWM สูงมาก Efficiency ลดลงเล็กน้อย จากการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์สวิตซ์ของวงจร H-Bridge

6. ผลของ Signal Conditioning (FFT และ Low-Pass Filter)

ผลการทำ FFT ของสัญญาณความเร็วพบว่าช่วงความถี่ที่เกิน 5 Hz เป็น noise จึงเลือก cutoff frequency ที่ 5 Hz เพื่อสร้าง Low-pass filter

และพบว่าสามารถลดสัญญาณรบกวนและการสวิงของค่าความเร็วได้ย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ข้อมูลที่ใช้คำนวณค่าต่าง ๆ มีความเที่ยงตรงขึ้น

อภิปรายผล

ผลการทดลองมีแนวโน้มตรงกับสมการพื้นฐานของ DC Motor ได้แก่

- ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง Torque-Speed
- ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง Torque-Current
- ลักษณะพาราโบลาของกราฟ Power
- ประสิทธิภาพสูงสุดที่ช่วงแรงบิดปานกลาง สิ่งเหล่านี้ยืนยันว่าพกติกรรมของมอเตอร์ในสภาพ steady state มีความถูกต้องตามแบบจำลองทางทฤษฎี

ข้อเสนอแนะ

- ควรเก็บ Ideal case เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลได้

อ้างอิง

<https://wwwpcb-3d.com/wordpress/wp-content/uploads/p/dc-motor-driver/06-current-and-voltage-waveforms-of-a-dc-motor-during-sign-magnitude-control.webp>

<https://docs.google.com/document/d/1eKpt66z1qLMJkaXrHU1AfKqSVelpEnM43vECpkYuWA/edit?usp=sharing>

<https://www.winson.com.tw/uploads/images/WCS1600.pdf>

3. Brushless DC Motor

การทดลองที่ 3 Brushless DC Motor

จุดประสงค์

- เพื่อศึกษาการใช้งานมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน (BLDC)
- เพื่อศึกษาวิธีการหาความเร็วรอบของมอเตอร์ไร้แปรงถ่านจากสัญญาณ Back-EMF
- เพื่อศึกษาการใช้งาน MC Workbench และ Oscilloscope 4 Channel MICSIG

สมมติฐาน

หากปรับเพิ่มความเร็วอ้างอิงของมอเตอร์ใน MC Workbench ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่วัดจากความถี่ของสัญญาณ Back-EMF ก็ควรจะเพิ่มขึ้นตาม และควรมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วอ้างอิงนั้น

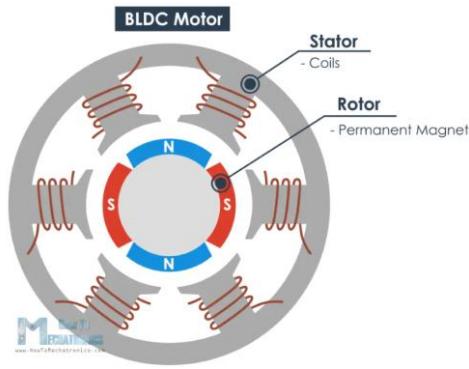
ตัวแปร

- ตัวแปรต้น:
 - ความเร็วอ้างอิงของมอเตอร์ใน MC Workbench
- ตัวแปรตาม:
 - ความถี่ของสัญญาณ Back-EMF
- ตัวแปรควบคุม:
 - Nucleo STM32G474RE
 - BLDCXplorer
 - Adapter 24V
 - STMICROELECTRONICS X-NUCLEO-IHM08M1
 - A2212 1000KV Brushless Outrunner Motor 13T
 - ค่าต่างๆ ที่ตั้งค่าใน MC Workbench (รายละเอียดเพิ่มเติมในขั้นตอนการดำเนินงาน)

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

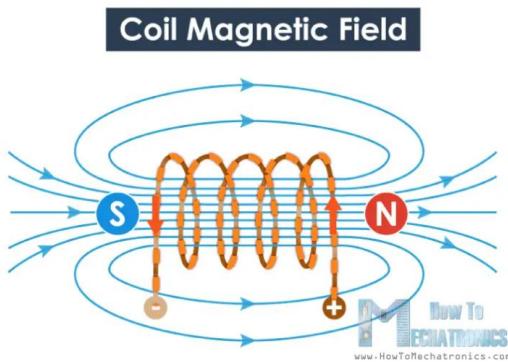
- How Brushless DC Motor Works?

มอเตอร์ไร้แปรงถ่าน (BLDC) ประกอบด้วยชิ้นส่วนหลักสองชิ้น ได้แก่ สเตเตอร์ (Stator) และโรเตอร์ (Rotor) ในภาพนี้ โรเตอร์เป็นแม่เหล็ก trwałที่มี 2 ชั้ว ในขณะที่สเตเตอร์ประกอบด้วยชุดลวดที่จัดเรียงดังแสดงในภาพด้านล่าง



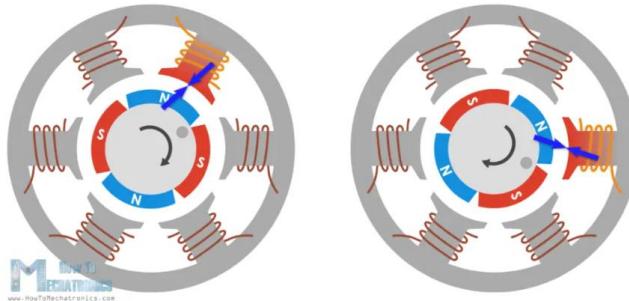
รูปที่ X แสดงมอเตอร์รีเเปรงถ่าน (BLDC)

ซึ่งหากเราจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านชุดลวด จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก และเส้นสนามแม่เหล็กหรือขั้วแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับทิศทางของกระแสไฟฟ้า ดังภาพด้านล่าง



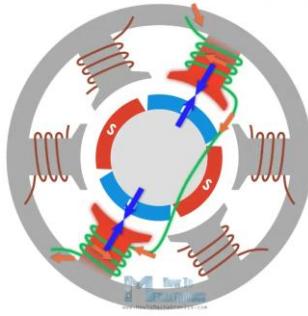
รูปที่ X แสดงเส้นสนามแม่เหล็ก

ดังนั้น หากเราจ่ายกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม ชุดลวดจะสร้างสนามแม่เหล็กที่จะดึงดูดแม่เหล็กการของโรเตอร์ หากเรากระตุนชุดลวดแต่ละตัวเท่าๆ กัน โรเตอร์จะยังคงหมุนต่อไปเนื่องจากปฏิกิริยาสัมพันธ์ของแรงระหว่างแม่เหล็ก การและแม่เหล็กไฟฟ้า ดังภาพด้านล่าง



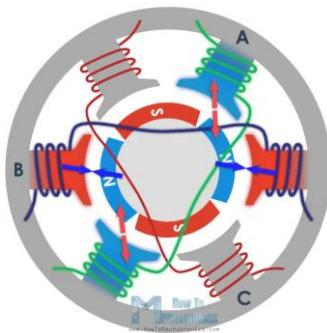
รูปที่ X แสดงการจ่ายกระแสไฟฟ้า

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์ เราสามารถพันชุดลวดที่อยู่ตรงข้ามกัน 2 อันเป็นชุดลวดตัวเดียว โดยจะสร้างขั้วตรงข้ามกับขั้วของโรเตอร์ ซึ่งจะทำให้ได้แรงดึงดูด 2 เท่า ดังภาพด้านล่าง



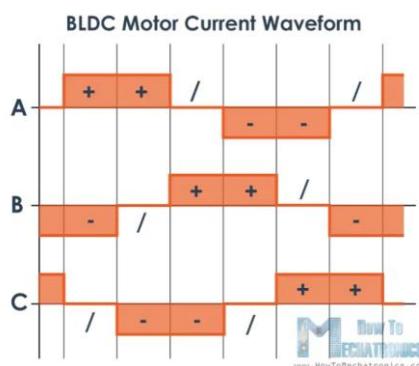
รูปที่ X แสดงการพันขดลวดที่อยู่ตรงข้ามกัน 2 อันเป็นขดลวดตัวเดียว

ด้วยการทำแบบนี้ เราสามารถสร้างขั้วไฟฟ้า 6 ขั้วนบนสเตเตอร์ได้โดยใช้ขดลวดหรือเฟสเพียง 3 ตัว (A, B, C) ซึ่งเราสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้อีกด้วยการจ่ายไฟให้กับขดลวดสองตัวพร้อมกัน วิธีนี้จะทำให้ขดลวดตัวหนึ่งดึงดูดกัน และอีกตัวผลักกัน ดังภาพด้านล่าง



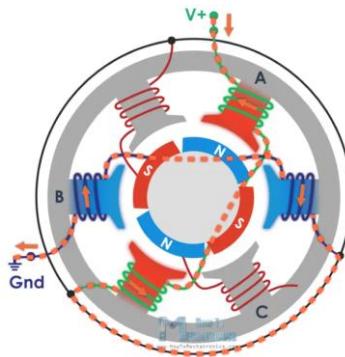
รูปที่ X แสดงการสร้างขั้วไฟฟ้า 6 ขั้วนบนสเตเตอร์ได้โดยใช้ขดลวดหรือเฟสเพียง 3 ตัว

เพื่อให้โรเตอร์หมุนได้ครบ 360 องศา จำเป็นต้องมี 6 ขั้นตอน (6-Step Commutation) ดังภาพด้านล่าง



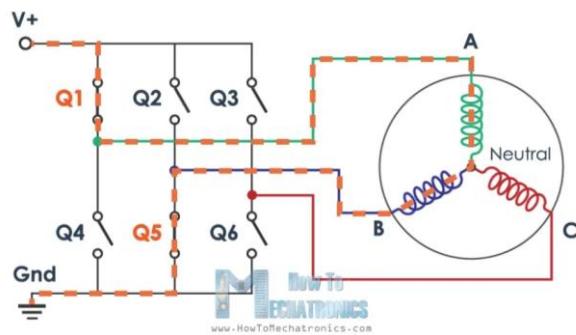
รูปที่ X แสดงขั้นตอนในการทำให้โรเตอร์หมุนได้ครบ 360 องศา

หากพิจารณารูปคลื่น เราจะสังเกตเห็นว่าในแต่ละช่วงจะมีเฟสหนึ่งที่มีกระแสลบ, เฟสหนึ่งที่มีกระแสลบ, และอีกเฟสหนึ่งที่ปล่อยอิสระ ซึ่งทำให้เราสามารถเขื่อมต่อจุดปลายที่อิสระของแต่ละเฟสทั้ง 3 เข้าด้วยกัน เพื่อให้สามารถใช้ไฟเส้นเดียวเพื่อจ่ายไฟให้กับทั้ง 2 เฟสในเวลาเดียวกันได้ ดังภาพด้านล่าง



รูปที่ X แสดงการเชื่อมต่อจุดปลายท่ออิสระของแต่ละเฟสทั้ง 3 เข้าด้วยกัน

ด้วยการทำแบบนี้ จึงเป็นเหตุผลว่าทำไม่มอเตอร์แบบไร้แปรรูปถ่านจึงมีสายออกมา 3 เส้น ซึ่งก็คือสายเฟส A, สายเฟส B, และสายเฟส C



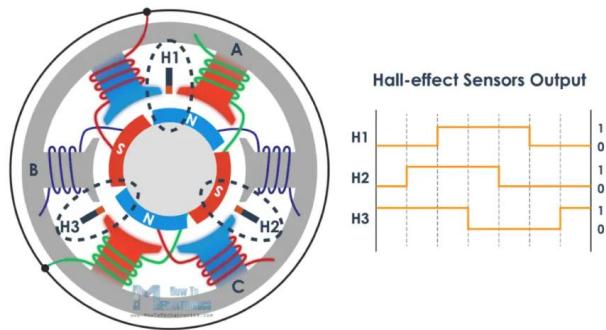
รูปที่ X แสดงผังการเชื่อมต่อของมอเตอร์แบบไร้แปรรูปถ่าน

ดังนั้น เพื่อให้มอเตอร์ทำงานครบวงจร เราต้องเปิดใช้งาน Q ที่ถูกต้อง 2 ตัวในแต่ละช่วงจากทั้งหมด 6 ช่วง ซึ่ง เป็นหน้าที่ของตัวควบคุมความเร็วอิเล็กทรอนิกส์ (ESC)

2. How ESC Works?

ESC หรือตัวควบคุมความเร็วอิเล็กทรอนิกส์จะควบคุมความเร็วของมอเตอร์โดยการ กระตุ้น MOSFET (Q) ที่เหมาะสมเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กหมุนเพื่อให้มอเตอร์หมุน ยิ่งความถี่สูง ความเร็วของ มอเตอร์ก็จะยิ่งสูงขึ้นเท่านั้น โดยเราจะรู้ได้อย่างไรว่าควรเปิดใช้งานเฟสใดเมื่อใด คำตอบคือ เราจำเป็นต้อง ทราบตำแหน่งของโรเตอร์ และมี 2 วิธีที่นำไปใช้ในการระบุตำแหน่งของโรเตอร์ ดังนี้

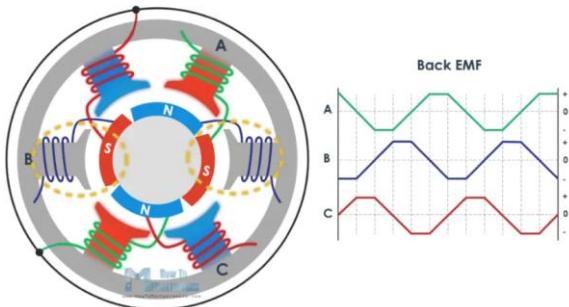
1. การใช้เซ็นเซอร์ Hall-effect ที่ผังอยู่ในสเตเตอრ โดยวงตำแหน่งห่างกัน 120 หรือ 60 องศา เท่าๆ กัน



รูปที่ X แสดงเซ็นเซอร์ Hall-effect

เมื่อแม่เหล็กถาวรของโรเตอร์หมุน เซ็นเซอร์ Hall-effect จะตรวจจับสนามแม่เหล็กและสร้างสัญญาณ “สูง” สำหรับขั้วแม่เหล็กหนึ่ง หรือสัญญาณ “ต่ำ” สำหรับขั้วตรงข้าม จากข้อมูลนี้ ESC จะรู้ว่าเมื่อใดควรเปิดใช้งานลามดับหรือช่วงเวลาการสับเปลี่ยนถัดไป

2. การตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับหรือ Back-EMF (BEMF) และเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับเกิดขึ้นจากการกระบวนการที่ตระกันข้ามกับการสร้างสนามแม่เหล็ก หรือเมื่อสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่หรือเปลี่ยนแปลงผ่านชุดลวด จะเห็นได้ว่าให้เกิดกระแสไฟฟ้าในชุดลวด



รูปที่ X แสดง Back-EMF (BEMF)

ดังนั้น เมื่อสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ของโรเตอร์ผ่านชุดลวดอิสระ หรือชุดลวดที่ไม่ได้ทำงาน มันจะเห็นได้ว่าให้เกิดกระแสไฟฟ้าในชุดลวด ส่งผลให้เกิดแรงดันตกในชุดลวดนั้น ซึ่ง ESC จะบันทึกแรงดันตกเหล่านี้ทันทีที่เกิดขึ้น และคำนวณการณ์หรือคำนวณจากค่าเหล่านี้เพื่อคำนวณ หรือคำนวณว่าช่วงเวลาถัดไปควรเกิดขึ้นเมื่อใด

3. How to Calculate the RPM of BLDC motor?

ในการคำนวณความเร็วรอบต่อนาทีของมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน BLDC จะต้องเข้าใจว่าความเร็วของมอเตอร์ขึ้นอยู่กับจำนวนรอบทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นต่อวินาทีและจำนวนคู่ขั้วที่มอเตอร์มี โดยแต่ละรอบทางไฟฟ้าจะสอดคล้องกับหนึ่งก้าวทางกลต่อคู่ขั้ว ดังนั้นยิ่งมอเตอร์มีคู่ขั้วมากเท่าไหร่ ก็ยิ่งต้องใช้รอบทางไฟฟ้ามากขึ้นเท่านั้นเพื่อให้มอเตอร์หมุนครบรอบหนึ่งรอบทางกล ซึ่งความถี่ไฟฟ้าจะลดเป็นเอียงต์ (รอบต่อวินาที) โดยจะ

ถูกวัดโดย ESC หรือตัวควบคุมความเร็วอิเล็กทรอนิกส์ จากนั้นจะสามารถหารอบต่อนาทีได้โดยการแปลงรอบทางไฟฟ้าเหล่านี้เป็นรอบทางกลโดยใช้สูตร ดังนี้

$$Motor Speed (RPM) = \frac{60 \times Electrical\ frequency\ (Hz)}{pairs\ of\ poles}$$

ซึ่งหมายความว่าการเพิ่มความถี่ทางไฟฟ้าจะเพิ่มความเร็วรอบต่อนาทีของมอเตอร์ ในขณะที่การเพิ่มจำนวนขั้วของมอเตอร์จะทำให้ความเร็วรอบต่อนาทีลดลงสำหรับความถี่เดียวกัน

4. Faraday's Laws

กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ (Faraday's Law of Electromagnetic Induction) อธิบายว่า การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า (EMF) หรือแรงดันไฟฟ้าในตัวนำได้ ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Induction) โดยกฎของฟาราเดย์ สามารถแบ่งอธิบายได้เป็นสองส่วน ดังนี้

1. กฎข้อแรกของฟาราเดย์ ระบุว่าเมื่อฟลักซ์แม่เหล็กที่เชื่อมโยงกับชุดลวดเกิดการเปลี่ยนแปลง จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในชุดลวดนั้น และหากเป็นวงจรปิด กระแสไฟฟ้าจะไหลในวงจรทันที
2. กฎข้อที่สองของฟาราเดย์ ระบุว่าขนาดของ EMF ที่เหนี่ยวนำจะมีค่าตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$EMF\ (E) = -N \frac{d\emptyset}{dt}$$

โดยที่:

E = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

N = จำนวนรอบของชุดลวด

\emptyset = ฟลักซ์แม่เหล็ก

$\frac{d\emptyset}{dt}$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กตามเวลา

5. Field-Oriented Control (FOC)

Field-Oriented Control (FOC) หรือ Vector Control เป็นเทคนิคการควบคุมที่ใช้กับมอเตอร์กระแสตรงแบบปรับแรงถ่วง (BLDC) และมอเตอร์ซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร (PMSM) เพื่อให้สามารถ

ควบคุมแรงบิดและฟลักช์แม่เหล็กได้อย่างแม่นยำ โดยอาศัยการควบคุมกระแสในชุดลวดสเตเตอร์ในรูปของ เวกเตอร์ หลักการสำคัญของ FOC คือการแยกกระแสของมอเตอร์ออกเป็น 2 แกน ได้แก่

1. กระแสแกน d (d-axis current) : ใช้ควบคุมฟลักช์แม่เหล็กในสเตเตอร์ หรือฟลักช์ของโรเตอร์ สำหรับ PMSM
2. กระแสแกน q (q-axis current) : ใช้สร้างแรงบิดหมุนของมอเตอร์

โดย FOC ใช้การแปลงพิกัดทางคณิตศาสตร์ ได้แก่

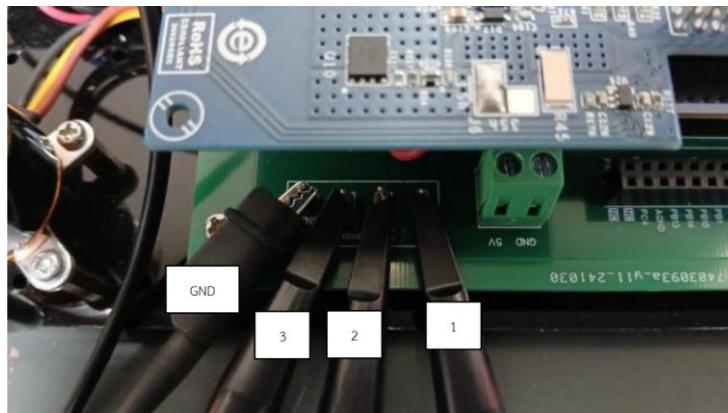
1. Clarke Transform: แปลงสัญญาณกระแส 3 เฟส (A, B, C) ให้อยู่ในพิกัดสองแกนคงที่ α - β
2. Park Transform: แปลงจากพิกัด α - β ไปเป็นพิกัดหมุน d-q ที่หมุนตามโรเตอร์

การทำเช่นนี้ช่วยให้ระบบควบคุมสามารถจัดการกับแรงบิดและฟลักช์ได้โดยตรงและเป็นอิสระต่อกัน จากนั้น การควบคุมแบบ PI หรือ PID จะถูกใช้ในการควบคุมกระแส d และ q เพื่อคำนวณให้ได้แรงบิดและความเร็ว ตามที่ต้องการ เมื่อได้ค่าที่คำนวณแล้ว จะทำการแปลงย้อนกลับผ่าน Inverse Park Transform และ Inverse Clarke Transform เพื่อให้ได้แรงตัน 3 เฟสที่เหมาะสม ก่อนจะส่งสัญญาณไปยัง อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ผ่าน PWM (Pulse Width Modulation) เพื่อขับมอเตอร์ โดยจะมีข้อดี ข้อเสียเมื่อเทียบกับการควบคุมแบบ 6-Step Commutation ดังตารางนี้

	6-Step	FOC
ความซับซ้อนของระบบ	ต่ำ	สูง
ความเรียบของแรงบิด	ไม่เรียบ, มีแรงกระชาก	เรียบ, ไม่มีแรงกระชาก
ต้นทุนระบบ	ต่ำ	สูง
การควบคุมแรงบิดและความเร็ว	ควบคุมได้จำกัด	แม่นยำสูง
การทำงานที่ความเร็วต่ำ	ประสิทธิภาพต่ำ	ควบคุมได้ดี

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. นำ Adapter 24V ต่อเข้ากับช่อง DC Jack บนบอร์ด BLDCXplorer
2. นำ Probe ของ Oscilloscope 4 Channel MICSIG มาเกี่ยวกับตัววัดที่บอร์ด BLDCXplorer โดยเรียง ช่องให้ถูกต้องตามเลขที่กำหนด พร้อมกับเกี่ยว GND ตามภาพดังนี้



รูปที่ X แสดงการต่อ probe ของ Oscilloscope

โดยช่อง 1, 2, 3 คือ Phase A, B, C ตามลำดับ

3. ตั้งค่า Scaling ของ Oscilloscope 4 Channel MICSIG ในแกนตัว (Voltage) ทั้ง 3 Channel เป็น 20V และแกนนอน (Time) เป็น 1 ms
4. สร้างโปรเจกใน MC Workbench โดยกำหนดข้อมูลเบื้องต้น ตามตารางดังนี้

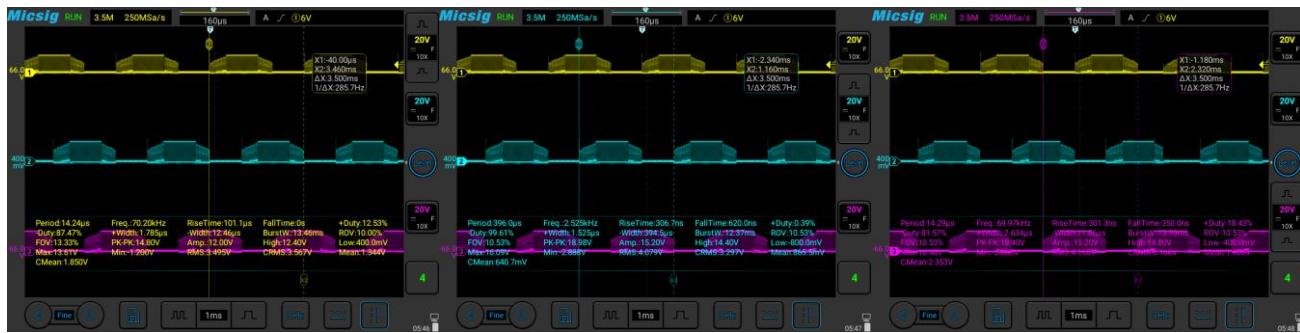
Driving Algorithm	6-Step
Hardware Mode	Modular
Motor	A2212 13T
Power Board	X-NUCLEO-IHM08M1
Control board	NUCLEO-G474RE

5. แก้ไขค่าเริ่มต้นต่างๆ ที่ MC Workbench ตั้งค่ามาให้ ตามตารางดังนี้

Motor: Max DC Voltage	12 V
PWM Generation: PWM Frequency	70000 Hz

6. เปิด Motor Pilot ใน MC Workbench เพื่อใช้ในการควบคุมความเร็วอ้างอิงของมอเตอร์
7. ทำการทดลองโดยการเพิ่มความเร็วอ้างอิงใน Motor Pilot ครั้งละ 2466 RPM โดยทดสอบทั้งทิศทางบวก และทิศทางลบ ทิศทางละ 4 ครั้ง รวมทั้งหมด 8 ครั้ง
8. เก็บผลการทดลองในแต่ละครั้งโดยการกดปุ่ม Run-Stop บน Oscilloscope 4 Channel MICSIG เพื่อทำให้ภาพหยุดนิ่ง แล้วใช้ Vertical Cursor สำหรับวัดความถี่และความถี่ของสัญญาณ Back-EMF และทำการกด Screen Shot สำหรับเก็บรูปหน้าจอในขณะนั้น ทำซ้ำทั้ง 3 Channel แล้วจึงนำค่าต่างๆ ที่วัดได้จากการนำไปใส่ใน Excel เพื่อวิเคราะห์ต่อ

ผลการทดลอง



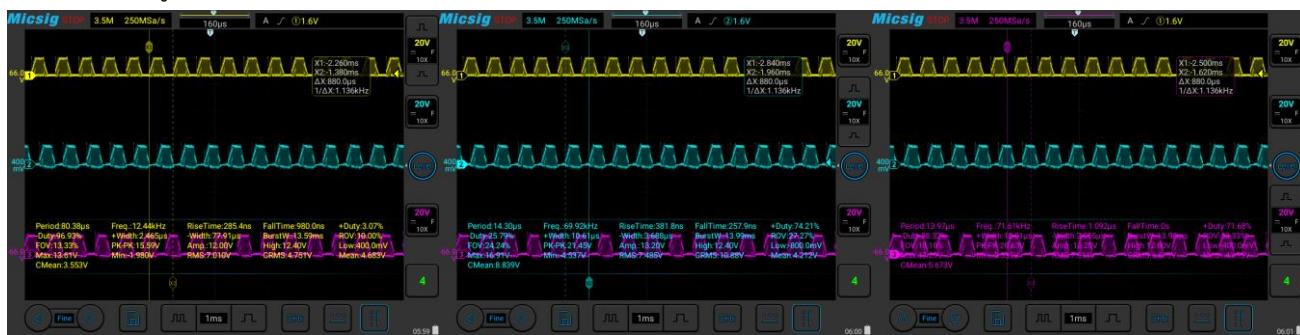
รูปที่ X แสดงผลลัพท์ที่ได้จากการจำกัดความเร็วอ้างอิงเป็น +2466 RPM ทั้ง 3 Channel



รูปที่ X แสดงผลลัพท์ที่ได้จากการจำกัดความเร็วอ้างอิงเป็น +4932 RPM ทั้ง 3 Channel



รูปที่ X แสดงผลลัพท์ที่ได้จากการจำกัดความเร็วอ้างอิงเป็น +7398 RPM ทั้ง 3 Channel



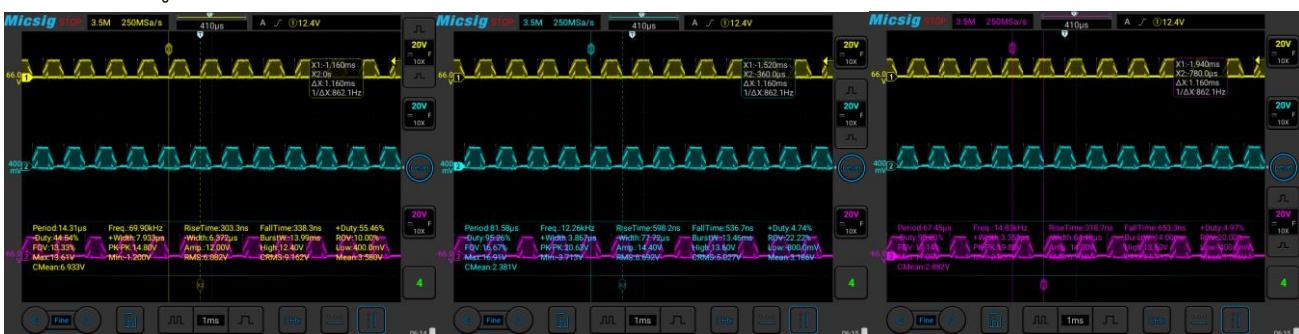
รูปที่ X แสดงผลลัพท์ที่ได้จากการจำกัดความเร็วอ้างอิงเป็น +9864 RPM ทั้ง 3 Channel



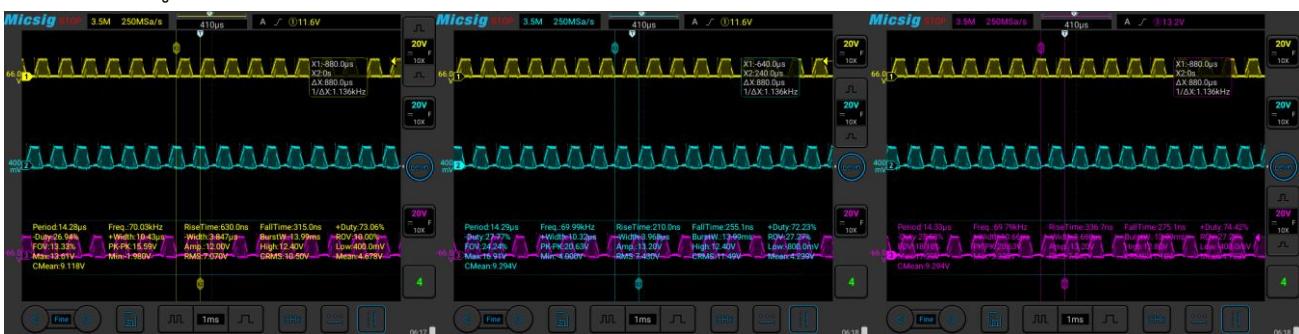
รูปที่ X แสดงผลลัพท์ที่ได้จากการกำหนดความเร็วอ้างอิงเป็น -2466 RPM ทั้ง 3 Channel



รูปที่ X แสดงผลลัพท์ที่ได้จากการกำหนดความเร็วอ้างอิงเป็น -4932 RPM ทั้ง 3 Channel



รูปที่ X แสดงผลลัพท์ที่ได้จากการกำหนดความเร็วอ้างอิงเป็น -7398 RPM ทั้ง 3 Channel



รูปที่ X แสดงผลลัพท์ที่ได้จากการกำหนดความเร็วอ้างอิงเป็น -9864 RPM ทั้ง 3 Channel

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองและสังเกตพฤติกรรมของมอเตอร์ สามารถสรุปได้ว่าความเร็วอ้างอิง (RPM) ที่มีค่าเป็นบวกจะเป็นการหมุนแบบตามเข็มนาฬิกา ส่วนค่าเป็นลบจะเป็นการหมุนแบบวนเข็มนาฬิกา โดยจากการทดลองจะทำให้

เห็นได้ว่าลักษณะของสัญญาณ Back-EMF ที่ได้จะมีลักษณะเป็นแบบ Trapezoidal และมีลำดับการเกิด Phase ของแต่ละ Channel ตามทิศทางการหมุนของมอเตอร์ ตามตารางดังนี้

ทิศการหมุน	ลำดับการเกิดของแต่ละ Phase
ตามเข็มนาฬิกา	A -> B -> C
วนเข็มนาฬิกา	C -> B -> A

โดยแต่ละ Phase ที่เกิดจะมี Phase ต่างกันอยู่ที่ 120° คือ Phase A และ Phase B ต่างกัน 120° และ Phase B และ Phase C ต่างกัน 120° เนื่องจากเป็นสัญญาณ 3 Phase ดังนั้นเพื่อที่จะให้หมุนครบ 360° ต้องนำไปหารสามจะทำให้ได้ 120°

อภิปรายผล

สัญญาณ Back-EMF ที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นรูปคลื่นแบบ Trapezoidal ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงเพิ่มขึ้น, ช่วงคงที่, และช่วงลดลง ซึ่งการเกิดรูปคลื่นดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) ซึ่งระบุว่าการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น เมื่อขั้วของโรเตอร์เคลื่อนที่เข้าใกล้ขั้วของสเตเตอร์ พลักดีแม่เหล็กที่ผ่านขดลวดจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าของ Back-EMF เพิ่มขึ้นตามอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลักดีแม่เหล็กต่อเวลา โดยยิ่งขั้วของโรเตอร์เข้าใกล้ขั้วของสเตเตอร์ด้วยความเร็วมากเท่าใด อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลักดีแม่เหล็กก็จะยิ่งสูง ทำให้ค่าของ Back-EMF เพิ่มขึ้นมากตามไปด้วย และจากการนำค่าที่ได้จากการทดลองมาสรุปลงในตารางใน Excel จะทำให้ได้ผลลัพธ์ดังนี้

Reference Speed (RPM)	A				B				C			
	ΔX (ms)	$1/\Delta X$ (Hz)	RMS (V)	Mean (V)	ΔX (ms)	$1/\Delta X$ (Hz)	RMS (V)	Mean (V)	ΔX (ms)	$1/\Delta X$ (Hz)	RMS (V)	Mean (V)
9864	0.880	1136.364	7.010	4.683	0.880	1136.364	7.485	4.212	0.880	1136.364	7.511	4.695
7398	1160	862.069	6.069	3.553	1160	862.069	6.710	3.155	1160	862.069	6.713	3.604
4932	1740	574.713	4.943	2.481	1740	574.713	5.557	1.946	1740	574.713	5.609	2.453
2466	3500	285.714	3.495	1.344	3500	285.714	4.079	0.866	3500	285.714	4.168	1.306
-2466	3500	285.714	3.479	1.300	3500	285.714	4.070	0.832	3500	285.714	4.141	1.290
-4932	1760	568.182	4.934	2.457	1760	568.182	5.573	1.966	1760	568.182	5.515	2.465
-7398	1160	862.069	6.082	3.580	1160	862.069	6.692	3.186	1160	862.069	6.704	3.586
-9864	0.880	1136.364	7.070	4.678	0.880	1136.364	7.430	4.239	0.880	1136.364	7.540	4.703

ตารางที่ X แสดงการเปลี่ยนแปลงของ Back-EMF ต่อความเร็วของมอเตอร์

ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าค่า Back-EMF มีพัฒนารูปเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ นอกจากนี้ยังสามารถนำค่าความถี่ไฟฟ้าที่ได้มาคำนวณความเร็วของมอเตอร์ได้จากการดึงต่อไปนี้

$$\text{Motor Speed (RPM)} = \frac{60 \times \text{Electrical frequency (Hz)}}{\text{pairs of poles}}$$

ทำให้ได้คำนวณความเร็วของมอเตอร์ในแต่ละ Channel และมีผลต่างในแต่ละ Channel ดังนี้

Calculation			Error		
Speed (RPM)			Speed (RPM)		
A	B	C	A	B	C
9740.260	9740.260	9740.260	123.740	123.740	123.740
7389.163	7389.163	7389.163	8.837	8.837	8.837
4926.108	4926.108	4926.108	5.892	5.892	5.892
2448.980	2448.980	2448.980	17.020	17.020	17.020
2448.980	2448.980	2448.980	17.020	17.020	17.020
4870.130	4870.130	4870.130	61.870	61.870	61.870
7389.163	7389.163	7389.163	8.837	8.837	8.837
9740.260	9740.260	9740.260	123.740	123.740	123.740

ตารางที่ X แสดงค่าความเร็วของมอเตอร์จากการคำนวณ และค่าที่เกิด error

ค่าที่คำนวณได้มีความใกล้เคียงกับความเร็วอ้างอิงที่กำหนด อย่างไรก็ตามบังพบความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าสาเหตุเกิดจากการตั้งตำแหน่ง Vertical Cursor ที่ไม่แม่นยำมากพอ ส่งผลให้ค่าความถี่ที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนตามไปด้วย

ข้อเสนอแนะ

- ควรหาริปในการวัดความถี่สัญญาณ Back-EMF ที่แม่นยำกว่านี้
- หากต้องการแปลงสัญญาณ Back-EMF ที่มีลักษณะเป็นรูปคลื่นแบบ Trapezoidal ให้เป็นสัญญาณรูปคลื่นแบบ Square สามารถทำได้โดยใช้ริป Zero-Crossing Detection ร่วมกับ Comparator เพื่อสร้างสัญญาณดิจิทัลที่สลับสถานะเมื่อแรงดัน Back-EMF เปลี่ยนผ่านจุดศูนย์

อ้างอิง

<https://howtomechatronics.com/how-it-works/how-brushless-motor-and-esc-work/>

<https://www.geeksforgeeks.org/electrical-engineering/difference-between-bldc-motor-and-pmsm-motor/>

<https://www.electrical4u.com/field-oriented-control/>

https://www.st.com/resource/en/product_presentation/x-nucleo-ihm08m1_quick_start.pdf

<https://simple-circuit.com/arduino-sensorless-bldc-motor-controller-esc/>

<https://www.dosupply.com/tech/2021/10/11/how-to-calculate-the-rpm-of-a-motor/>

<https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/MCU16/ApplicationNotes/ApplicationNotes/AN1160-Sensorless-BLDC-Control-with-Back-EMF-Filtering-Using-a-Majority-Function-DS00001160.pdf>

<https://www.youtube.com/watch?v=7kfcpXhO19Q>

<https://electricalampere.com/faradays-induction-law/>