

LAB 2 : Actuators

Name

- นาย ปรธร จันทร์จำรัส 67340500056
- นายอัครศักดิ์ณรงค์ แสงสมี 67340500068
- นายศิริภพ สิทธิวงษ์ 67340500074
- นางสาวศรินภา สุขบุญส่ง 67340500078

Objectives

- เพื่อศึกษาวิธีการออกแบบการทดลองตามหลักการทางวิทยาศาสตร์
- เพื่อพัฒนาทักษะการเขียนรายงานทางวิทยาศาสตร์
- เพื่อศึกษาและอธิบายหลักการทำงานและความแตกต่างของโครงสร้างระหว่าง DC Motor, Stepper Motor และ Brushless DC Motor
- เพื่อทดลองควบคุมการทำงานของมอเตอร์แต่ละประเภท และวิเคราะห์สัญญาณทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้อง
- เพื่อศึกษาคุณลักษณะการตอบสนองต่อความเร็ว แรงบิด และความแม่นยำในการระบุตำแหน่งของมอเตอร์แต่ละชนิด

1. DC Motor

การทดลองที่ 1 การหาค่า Motor Characteristic และ Torque Constant ของ DC Motor

จุดประสงค์

1. เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง Speed และ Torque ของ DC motor ที่แรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ
2. เพื่อหาค่า Torque constant (Nm/A) และ Stall torque ของมอเตอร์
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่แรงดัน 12 V และหาจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด
4. เพื่อเปรียบเทียบ Motor characteristic จากทฤษฎี (ideal) กับค่าที่วัดจริงจากมอเตอร์บนบอร์ด

สมมติฐาน

- ความสัมพันธ์ระหว่าง Speed กับ Torque เป็นเส้นตรงลดลง (linear) จาก no-load speed ไปจนถึง stall
- Torque แปรผันเป็นเส้นตรงกับกระแส ($T \propto I$) เมื่อมอเตอร์ทำงานในช่วงปกติ
- ประสิทธิภาพสูงสุดจะอยู่ที่ torque ค่าประมาณอยู่ระดับกลาง ไม่ใช่ที่ no-load หรือ stall

ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น
 - แรงที่แขน 3D print กดบน load cell
 - แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์
 - ความถี่ที่จ่ายให้ DC motor 100 Hz
 - แรงดัน supply หลัก 12 V
 - PWM 100% duty cycle
2. ตัวแปรตาม
 - Torque ของมอเตอร์ (N·m)
 - ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ (rad/s)
 - กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ (A)
 - ประสิทธิภาพของมอเตอร์ (%)

3. ตัวแปรควบคุม

- ความยาวแขน 3D print
- ทิศทางการหมุนของมอเตอร์

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1 หลักการทำงานของมอเตอร์กระแสตรง (DC Motor)

มอเตอร์กระแสตรงเป็นเครื่องจักรไฟฟ้าที่ทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นพลังงานกลในการหมุนของเพลลา การทำงานอาศัยแรงแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์กับกระแสที่ไหลในขดลวดอาร์มาเจอร์ของโรเตอร์ เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้ขดลวดอาร์มาเจอร์ กระแสอาร์มาเจอร์จะไหลผ่านตัวนำซึ่งวางอยู่ในสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดแรงตามกฎของแรงลอเรนซ์ แรงบนตัวนำนับจำนวนมารวมกันเป็นแรงบิดที่กระทำต่อเพลลา มอเตอร์และทำให้เพลลาเริ่มหมุน

เมื่อเพลลามอเตอร์หมุนอยู่ในสนามแม่เหล็ก การเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างตัวนำกับสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ หรือแบ็กอีเอ็มเอฟ (back electromotive force) ภายในขดลวดอาร์มาเจอร์ แรงดันนี้มีทิศทางตรงข้ามกับแรงดันจ่ายที่ขับเคลื่อนมอเตอร์ ทำให้ขนาดกระแสอาร์มาเจอร์ลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น แบ็กอีเอ็มเอฟมีค่าแปรผันตรงกับความเร็วจึงมุมของเพลลา และสามารถเขียนในรูป

$$E_b = K_e \omega$$

โดยที่ E_b คือแบ็กอีเอ็มเอฟ K_e คือค่าคงที่แบ็กอีเอ็มเอฟ และ ω คือความเร็วเชิงมุมของเพลลา เมื่อมอเตอร์อยู่ในสภาวะคงที่ แรงดันจ่าย แบ็กอีเอ็มเอฟ และแรงดันตกคร่อมความต้านทานอาร์มาเจอร์จะเข้าสู่สมดุล ทำให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วคงที่ตามภาระที่ต่ออยู่

สำหรับมอเตอร์กระแสตรงชนิดใช้แปรงถ่าน จะมีคอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่านทำหน้าที่สลับขั้วกระแสในขดลวดอาร์มาเจอร์ให้สัมพันธ์กับตำแหน่งของสนามแม่เหล็กอยู่ตลอดเวลา ส่งผลให้ทิศทางแรงบิดต่อเพลลามีทิศทางเดียวกันอย่างต่อเนื่อง จึงได้การหมุนในทิศทางคงที่ แม้ว่าแต่ละขดลวดจะหมุนผ่านตำแหน่งต่าง ๆ รอบวงจรของโรเตอร์หนึ่ง กระแสในขดลวดอาร์มาเจอร์ที่อยู่ในสนามแม่เหล็กถูกกระทำด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้าและสร้างแรงบิดต่อเพลลาสอง การหมุนของเพลลาทำให้เกิดแบ็กอีเอ็มเอฟซึ่งมีขนาดแปรผันกับความเร็วและทำหน้าที่จำกัดกระแส ช่วยให้ระบบเข้าสู่ความเร็วคงที่ที่เหมาะสมกับแรงดันและโหลด

2. สมการของมอเตอร์กระแสตรงที่ใช้สร้าง Motor Characteristic Curve

การวิเคราะห์ลักษณะการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงมักใช้แบบจำลองเชิงเส้นที่แยกส่วนไฟฟ้าออกจากส่วนกล แล้วเชื่อมสองส่วนเข้าหากันด้วยค่าคงที่ของมอเตอร์ ได้แก่ค่าคงที่แบ็กอีเอ็มเอฟ K_e และค่าคงที่แรงบิด K_t ซึ่งในระบบหน่วยเอสไอจะมีค่าเชิงตัวเลขเท่ากันสำหรับมอเตอร์ฟลักซ์คงที่

2.1 สมการด้านไฟฟ้า

สมการแรงดันของขดลวดอาร์มาเจอร์เขียนได้เป็น

$$V = E_b + I_a R_a$$

โดยที่

- V คือแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวดอาร์มาเจอร์
- E_b คือแบ็กอีเอ็มเอฟในอาร์มาเจอร์
- I_a คือกระแสอาร์มาเจอร์
- R_a คือความต้านทานอาร์มาเจอร์

เมื่อมอเตอร์เป็นชนิดฟลักซ์คงที่ แบ็กอีเอ็มเอฟจะแปรผันตรงกับความเร็วจึงมุมของเพลานินรูป

$$E_b = K_e \omega$$

แทนลงในสมการแรงดันจะได้

$$V = K_e \omega + I_a R_a$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วเพิ่มสูงขึ้น แบ็กอีเอ็มเอฟจะสูงขึ้น ทำให้ส่วนต่างแรงดันที่เหลือสำหรับขับกระแสผ่านอาร์มาเจอร์ลดลง กระแสจึงลดลงตามไปด้วย

2.2 สมการด้านกล

ในด้านกล มอเตอร์กระแสตรงฟลักซ์คงที่มีความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกระแสอาร์มาเจอร์ในรูป

$$T = K_t I_a$$

โดยที่ T คือแรงบิดที่เพลามอเตอร์ และ K_t คือค่าคงที่แรงบิด หน่วยนิวตันเมตรต่อแอมแปร์ สมการนี้มาจากการรวมแรงแม่เหล็กไฟฟ้าบนตัวนำทุกเส้นในอาร์มาเจอร์ภายใต้สนามแม่เหล็กคงที่ เมื่อจัดกลุ่มค่าพารามิเตอร์เชิงโครงสร้างทั้งหมดไว้ในค่าคงที่เพียงตัวเดียว การวิเคราะห์จะง่ายขึ้นมาก

2.3 การสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงบิด

เริ่มจากสมการแรงดัน

$$V = K_e \omega + I_a R_a$$

และสมการด้านกล

$$T = K_t I_a$$

จากสมการด้านกลได้ว่า

$$I_a = \frac{T}{K_t}$$

จากนั้นแทนค่าเข้าไปในสมการแรงดัน

$$V = K_e \omega + \frac{T}{K_t} R_a$$

จัดรูปเพื่อหา ω เป็นฟังก์ชันของ T

$$K_e \omega = V - \frac{R_a}{K_t} T$$

$$\omega = \frac{V}{K_e} - \frac{R_a}{K_e K_t} T$$

สมการนี้เป็นสมการเชิงเส้นของความเร็วเชิงมุมเทียบกับแรงบิด เมื่อแรงดันและฟลักซ์คงที่ จะเห็นว่าความเร็วลดลงเป็นเส้นตรงเมื่อแรงบิดเพิ่มขึ้น จึงเป็นพื้นฐานของกราฟลักษณะมอเตอร์ (Speed-Torque Characteristic Curve) สำหรับมอเตอร์กระแสตรงฟลักซ์คงที่

ในรูปกราฟ สามารถมองว่า

- เมื่อแรงบิดเท่ากับศูนย์ จะได้ความเร็วที่ไม่มีโหลด เรียกว่า no load speed
- เมื่อความเร็วเท่ากับศูนย์ จะได้แรงบิดที่สูงสุด เรียกว่า stall torque

จากสองจุดนี้สามารถเขียนกราฟและสมการลักษณะความเร็วต่อแรงบิดในรูปเส้นตรงสำหรับใช้อธิบายและประมาณพฤติกรรมของมอเตอร์จริง

3. วิธีการวัดและคำนวณค่าคงที่แรงบิดของมอเตอร์ (Torque Constant, Nm/A)

ค่าคงที่แรงบิดของมอเตอร์ K_t นิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงบิดที่มอเตอร์สร้างได้กับกระแสอาร์มาเจอร์ที่ไหลอยู่ในขดลวด ในระบบหน่วยเอสไอ หน่วยของ K_t คือ นิวตันเมตรต่อแอมแปร์ ความสัมพันธ์เชิงนิยามเขียนได้เป็น

$$K_t = \frac{T}{I_a}$$

หรือในรูปสมการเชิงเส้นของแรงบิด

$$T = K_t I_a$$

นิยามนี้ใช้แพร่หลายในงานออกแบบและงานทดสอบมอเตอร์กระแสตรงและมอเตอร์แม่เหล็กถาวร รวมทั้งมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน โดยผู้ผลิตมักระบุค่า K_t นี้ไว้ในข้อมูลจำเพาะของมอเตอร์

3.1 หลักการทดลองสำหรับการหาค่า Torque Constant

การหาค่า K_t เชิงทดลองสามารถทำได้โดยสร้างภาระเชิงกลที่ทราบค่าให้มอเตอร์ แล้ววัดแรงบิดกับกระแสที่เกี่ยวข้องในสถานะคงที่ ขึ้นตอนทั่วไปประกอบด้วย

หนึ่ง ต่อมอเตอร์เข้ากับระบบวัดแรงบิด เช่น ใช้เซนยื่นต่อจากเพลามอเตอร์ไปกดหรือดึงบนโหลดเซลล์ที่สอบเทียบแล้ว โดยทราบระยะจากศูนย์กลางเพลายังจุดออกแรงอย่างชัดเจน

สอง จ่ายแรงดันคงที่ให้มอเตอร์ เพื่อให้ฟลักซ์ของสนามแม่เหล็กคงที่และอยู่ในช่วงที่มอเตอร์ทำงานเชิงเส้น

สาม ปรับค่าภาระเชิงกลหลายระดับ ตัวอย่างเช่น เพิ่มน้ำหนักที่ปลายแขนทีละขั้น และในแต่ละระดับปล่อยให้มอเตอร์เข้าสู่สภาวะคงที่ แล้ววัดกระแสอาร์มาเจอร์ I_a และแรงที่โหลดเซลล์รับได้ เพื่อนำไปคำนวณแรงบิดที่เพลาลูก จากแรงที่วัดได้และระยะแขน หาค่าแรงบิดด้วยความสัมพันธ์

$$T = Fr$$

เมื่อ F คือแรงที่โหลดเซลล์วัดได้ และ r คือระยะตั้งฉากจากเพลามอเตอร์ถึงจุดออกแรง

เมื่อทำซ้ำหลายค่าภาระ จะได้ชุดข้อมูลคู่ (I_a, T) สำหรับใช้วิเคราะห์หาค่า K_t

3.2 การคำนวณค่า Torque Constant จากข้อมูลทดลอง

วิธีที่เหมาะสมในการหาค่า K_t จากข้อมูลทดลองคือการสร้างกราฟแรงบิดเทียบกับกระแส จากนั้นใช้วิธีถดถอยเชิงเส้น เพื่อหาความชันของกราฟ

ตั้งแกนนอนเป็นกระแสอาร์มาเจอร์ I_a และแกนตั้งเป็นแรงบิดที่เพลามอเตอร์ T สำหรับข้อมูลแต่ละจุดจะได้คู่ (I_a, T) ในช่วงการทำงานเชิงเส้นของมอเตอร์ กราฟควรมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง สามารถประมาณด้วยสมการ

$$T = K_t I_a + c$$

ค่าคงที่ c มักเกี่ยวข้องกับแรงบิดสูญเสียเพื่อเอาชนะแรงเสียดทานและการสูญเสียภายในอื่น ๆ ซึ่งมักมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับช่วงแรงบิดที่สนใจ ดังนั้นค่าความชันของเส้นตรงจึงเป็นตัวประมาณค่าของ K_t ได้ดี

$$K_t \approx \frac{\Delta T}{\Delta I_a}$$

โดย ΔT และ ΔI_a คือความแตกต่างของแรงบิดและกระแสระหว่างจุดสองจุดใดจุดหนึ่งบนกราฟ หรืออาจใช้ผลลัพธ์จากการถดถอยเชิงเส้นแบบกำลังสองน้อยที่สุดเพื่อให้ได้ค่าคงที่ที่แทนจุดข้อมูลทั้งหมด

หากมีข้อมูลกระแสที่ไม่มีโหลด (no load current) I_0 ที่เชื่อถือได้ สามารถปรับปรุงความแม่นยำโดยพิจารณาว่ากระแสส่วน I_0 ใช้เอาชนะแรงเสียดทานและการสูญเสียภายใน ส่วนของแรงบิดที่ได้ผลจริงจึงมาจากกระแสส่วนที่มากกว่า I_0 ทำให้สามารถเขียนได้ประมาณว่า

$$T \approx K_t (I_a - I_0)$$

และหาค่า K_t จากจุดทดสอบที่มีโหลดหนึ่งจุดหรือหลายจุดได้จาก

$$K_t \approx \frac{T}{I_a - I_0}$$

อย่างไรก็ตาม การใช้ข้อมูลหลายจุดรวมกับการถดถอยเชิงเส้นมักให้ค่าที่มีความน่าเชื่อถือสูงกว่าในทางปฏิบัติ

3.3 บทบาทของค่า Torque Constant ในการวิเคราะห์มอเตอร์

เมื่อได้ค่า K_t จากการทดลองแล้ว สามารถใช้ค่าดังกล่าวในการ

หนึ่ง ประมาณค่าแรงบิดสูงสุดของมอเตอร์จากกระแสสตอล หากทราบค่ากระแสสตอลหรือสามารถวัดได้ในช่วงเวลาสั้น

สอง ใช้ร่วมกับสมการแรงดันและสมการแบ็กอีเอ็มเอฟเพื่อสร้างกราฟความเร็วต่อแรงบิดและตรวจสอบความสอดคล้องระหว่างแบบจำลองกับผลการทดลอง

สาม คำนวณกำลังกลออกจากมอเตอร์ในสถานะต่าง ๆ ด้วยสมการ $P_{out} = T\omega$ แล้วเปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าเข้า $P_{in} = VI_a$ เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์ในช่วงโหลดที่สนใจ

4 วิธีการวัดและคำนวณหาค่า Stall Torque โดยใช้ตราชั่งเพื่อนำไปใช้งานต่อ

4.1 นิยามของ Stall Torque และความสำคัญ

Stall Torque ของมอเตอร์กระแสตรงหมายถึงแรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์สามารถสร้างได้เมื่อเพลามอเตอร์หยุดนิ่ง หรือมีความเร็วเชิงมุมเท่ากับศูนย์ ภายใต้แรงดันจ่ายค่าหนึ่งที่กำหนดคงที่ จุดนี้ปรากฏบนกราฟสมรรถนะมอเตอร์ในรูปกราฟ Torque-Speed เป็นจุดตัดของเส้นความเร็วกับแกนแรงบิด เมื่อความเร็วเท่ากับศูนย์ และเป็นปลายด้านหนึ่งของเส้นโค้งลักษณะ Torque-Speed สำหรับมอเตอร์กระแสตรงซึ่งโดยทั่วไปมีลักษณะเกือบเป็นเส้นตรงที่แรงบิดลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น

Stall Torque เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้บ่งบอกขีดความสามารถของมอเตอร์ในการต้านทานโหลด เนื่องจากสะท้อนระดับแรงบิดสูงสุดที่เพลามอเตอร์สามารถสร้างได้ก่อนที่การหมุนจะหยุดลงจริง เอกสารด้านมอเตอร์จำนวนมากระบุว่าการปล่อยให้มอเตอร์อยู่ในสถานะ Stall เป็นเวลานานทำให้กระแสไหลสูงสุดและเกิดความร้อนสะสม ซึ่งอาจนำไปสู่ความเสียหายของขดลวดและภาคขับเคลื่อน หากไม่มีการจำกัดกระแสหรือการป้องกันที่เหมาะสม

4.2 หลักการวัด Stall Torque ด้วยตราชั่ง

การใช้ตราชั่งร่วมกับแขนที่ยึดกับเพลามอเตอร์เป็นวิธีการวัด Stall Torque ที่อาศัยหลักการคานอย่างง่าย โดยมีมอเตอร์ทำหน้าที่เป็นจุดหมุน แขนทำหน้าที่เป็นแขนคาน และตราชั่งทำหน้าที่รับแรงที่ปลายแขน แนวคิดนี้ถูกใช้ทั้งในตัวอย่างเชิงปฏิบัติและงานอดิเรกด้านหุ่นยนต์หรือยานกล โดยมักติดแขนหรือประแจเข้ากับเพลามอเตอร์ ให้ปลายแขนกดลงบนตราชั่ง แล้วใช้ค่าที่อ่านได้จากตราชั่งร่วมกับระยะแขนคำนวณแรงบิดจากความสัมพันธ์พื้นฐานของแรงบิด

ในเชิงกลศาสตร์ แรงบิดรอบเพลาดังกล่าวเขียนได้เป็น

$$T = Fr$$

โดยที่

- T คือแรงบิดที่เพลามอเตอร์
- F คือแรงที่กดลงบนตราชั่งในทิศทางตั้งฉากกับแขน
- r คือระยะตั้งฉากจากศูนย์กลางเพลามอเตอร์ถึงจุดที่แขนสัมผัสกับตราชั่ง

ตราชั่งดิจิทัลมักแสดงค่ามวลในหน่วยกิโลกรัม ทำให้สามารถแปลงค่ามวลที่อ่านได้เป็นแรงกระทำในแนวดิ่งได้ด้วย

$$F = mg$$

เมื่อ m คือค่ามวลที่ตราซังแสดง และ g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงจากนั้นนำค่า F ไปใช้ในสมการแรงบิดเพื่อคำนวณค่า Stall Torque ที่เพลลา

หากทิศทางแรงไม่ตั้งฉากกับแกนโดยสมบูรณ์ ต้องคำนึงถึงมุมระหว่างทิศแรงและแกนโดยใช้สมการทั่วไป

$$T = Fr \sin \theta$$

อย่างไรก็ตาม ในการทดลองนี้สามารถลดความซับซ้อนและความคลาดเคลื่อนได้โดยจัดให้แกนอยู่ในระนาบแนวนอน และให้ตราซังรับแรงในแนวตั้ง ทำให้มุม θ ใกล้เคียง 90 องศา และค่า $\sin \theta$ ใกล้กับ 1

4.3 ขั้นตอนการทดลองและการคำนวณ Stall Torque โดยใช้ตราซัง

4.3.1 การเตรียมอุปกรณ์และการตั้งค่าทั่วไป

1. ติดตั้งแกนที่สร้างด้วยการพิมพ์สามมิติยึดกับเพลลามอเตอร์ให้แน่นหนา จัดให้แกนยื่นออกในแนวระนาบ
2. วัดระยะตั้งฉากจากศูนย์กลางเพลลามอเตอร์ถึงจุดที่แกนจะสัมผัสกับพื้นผิวของตราซัง กำหนดให้เป็นระยะ r หน่วยเป็นเมตร
3. วางตราซังที่ตำแหน่งปลายแกน เพื่อให้เมื่อมอเตอร์สร้างแรงบิด แกนจะกดลงบนพื้นผิวตราซังในแนวตั้ง
4. ตั้งค่าตราซังให้อยู่ในสถานะศูนย์ก่อนเริ่มการทดลอง และตรวจสอบให้ชุดติดตั้งมีความมั่นคง
5. ตั้งค่าระบบขับมอเตอร์ให้ใช้แรงดันจ่ายหรือ Duty Cycle คงที่ ในระดับที่ต้องการประเมิน Stall Torque เช่น ค่า Duty Cycle ที่ใช้จริงหรือระดับสูงที่อยู่ภายใต้ข้อจำกัดความปลอดภัยของมอเตอร์และภาคขับ

4.3.2 การวัดค่า Stall Torque โดยตรง

1. สั่งให้มอเตอร์หมุนในทิศทางที่ทำให้แกนกดลงบนตราซังเมื่อเกิดแรงบิด
2. ภายใต้อาณัติการขับหรือ Duty Cycle ที่กำหนด ปรับสภาพการสัมผัสระหว่างแกนและตราซังให้มอเตอร์ไม่สามารถหมุนต่อได้ หรือให้ค่าความเร็วเชิงมุมที่วัดได้ลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์
3. ในสถานะที่เพลลามอเตอร์หยุดนิ่ง อ่านค่ามวลที่ตราซังแสดง กำหนดให้เป็น m_{stall} หน่วยกิโลกรัม
4. คำนวณแรงที่แกนกดลงบนตราซังจาก

$$F_{\text{stall}} = m_{\text{stall}} g$$

5. คำนวณค่า Stall Torque ที่เพลลามอเตอร์

$$T_{\text{stall}} = F_{\text{stall}} r$$

ได้ค่า Stall Torque ในหน่วยนิวตันเมตร

หากมีการวัดกระแสมอเตอร์ในสถานะเดียวกัน สามารถบันทึกค่า Stall Current I_{stall} เพื่อใช้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและกระแส หรือใช้ในการกำหนดขอบเขตการทำงานและการป้องกันกระแสเกิน ทั้งนี้ควรจำกัด

ระยะเวลาที่มอเตอร์อยู่ในสถานะ Stall ให้สั้นที่สุด เพื่อลดความเสี่ยงจากการเกิดความร้อนเกินในขดลวดและอุปกรณ์ขับเคลื่อน ซึ่งเป็นข้อแนะนำที่ปรากฏอย่างชัดเจนในเอกสารผู้ผลิตและบทความทางเทคนิคเกี่ยวกับ Stall Torque

4.3.3 การประมาณ Stall Torque จากกราฟ Torque-Speed

นอกจากการวัด Stall Torque โดยตรงด้วยตราชั่งแล้ว ยังสามารถใช้ข้อมูลจากการทดลองลักษณะมอเตอร์เพื่อประมาณค่าดังกล่าวทางอ้อม โดยพิจารณาจากกราฟ Torque-Speed ที่ได้จากการทดลอง Motor Characteristic ภายใต้งานจ่ายค่าหนึ่ง

1. ใช้ชุดข้อมูลแรงบิด T_i (ที่ได้จากค่ามวลบนตราชั่งและระยะแขน) และความเร็วเชิงมุม ω_i หลายจุดที่วัดได้ในสถานะโหลดต่างกัน แต่แรงดันจ่ายคงที่
2. ทำการฟิตเส้นตรงของความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงบิดในรูป

$$\omega = mT + c$$

3. คำนวณค่า Stall Torque จากจุดที่ความเร็วเป็นศูนย์

$$T_{\text{stall}} = -\frac{c}{m}$$

วิธีนี้อาศัยข้อเท็จจริงที่ว่าเส้นโค้ง Torque-Speed ของมอเตอร์กระแสตรงที่แรงดันคงที่มีลักษณะใกล้เคียงเส้นตรงระหว่างจุดความเร็วขณะไร้โหลดกับจุด Stall Torque ตามที่อธิบายในเอกสารทางเทคนิคเกี่ยวกับสมรรถนะของมอเตอร์หลายแหล่ง

4.4 การนำค่า Stall Torque ที่วัดด้วยตราชั่งไปใช้งานต่อ

เมื่อได้ค่า Stall Torque จากการวัดด้วยตราชั่งแล้ว สามารถนำค่าเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ดังนี้

1. การสร้างและตรวจสอบกราฟ Torque-Speed
เมื่อทราบทั้งค่า Stall Torque และ No Load Speed สามารถสร้างเส้น Torque-Speed เชิงเส้นของมอเตอร์ภายใต้งานจ่ายหนึ่งค่า และใช้เปรียบเทียบกับกราฟสมรรถนะมอเตอร์ที่ปรากฏในเอกสารอ้างอิง เพื่อยืนยันว่าผลการทดลองมีแนวโน้มสอดคล้องกับทฤษฎีและข้อมูลสเปกของมอเตอร์
2. การตั้งค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองมอเตอร์ในซอฟต์แวร์จำลอง
แบบจำลองมอเตอร์ในซอฟต์แวร์เช่น MATLAB/Simulink มักใช้ค่า Stall Torque และ No Load Speed ในการกำหนดพารามิเตอร์พื้นฐานของมอเตอร์ การใช้ค่าที่ได้จากการทดลองทำให้แบบจำลองสะท้อนพฤติกรรมจริงของมอเตอร์บนบอร์ดทดลองได้แม่นยำยิ่งขึ้น
3. การประเมินขอบเขตการทำงานที่ปลอดภัย
เมื่อทราบ Stall Torque และ Stall Current สามารถกำหนดขอบเขตการทำงานของมอเตอร์ไม่ให้เข้าใกล้สถานะ Stall เกินกว่าระยะเวลาที่ปลอดภัย และสามารถออกแบบระบบจำกัดกระแสหรือระบบป้องกันความ

ร้อนได้เหมาะสม เพื่อลดโอกาสการเสื่อมสภาพของฉนวนขดลวดและความเสียหายของภาคขับเคลื่อนในระยะยาว

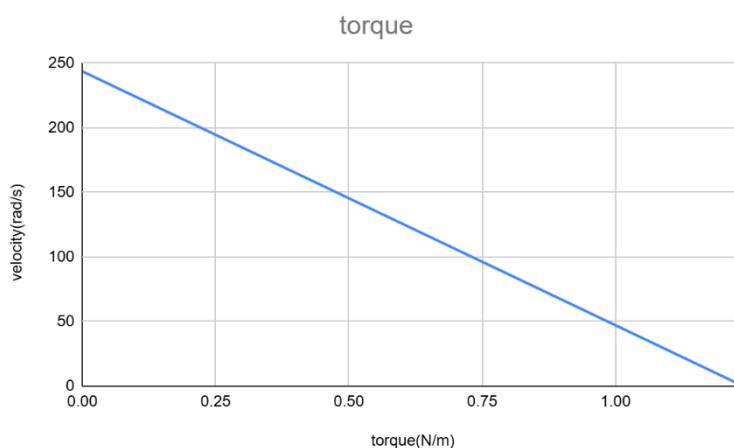
4. การเลือกมอเตอร์และออกแบบชุดส่งกำลัง

ค่า Stall Torque ที่วัดได้ช่วยให้สามารถเปรียบเทียบกับความต้องการแรงบิดสูงสุดของโหลดในระบบจริง หากโหลดต้องการแรงบิดเข้าใกล้หรือเกินค่าดังกล่าว แสดงว่ามอเตอร์อาจไม่เหมาะสมต่อการใช้งานในระยะยาว และอาจต้องเลือกมอเตอร์ที่มี Stall Torque สูงขึ้น หรือปรับอัตราทดของชุดส่งกำลังใหม่ให้เหมาะสม ซึ่งแนวทางนี้สอดคล้องกับคำแนะนำในการอ่านกราฟสมรรถนะมอเตอร์และการเลือกมอเตอร์ที่เหมาะสมกับงานในเอกสารทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้อง

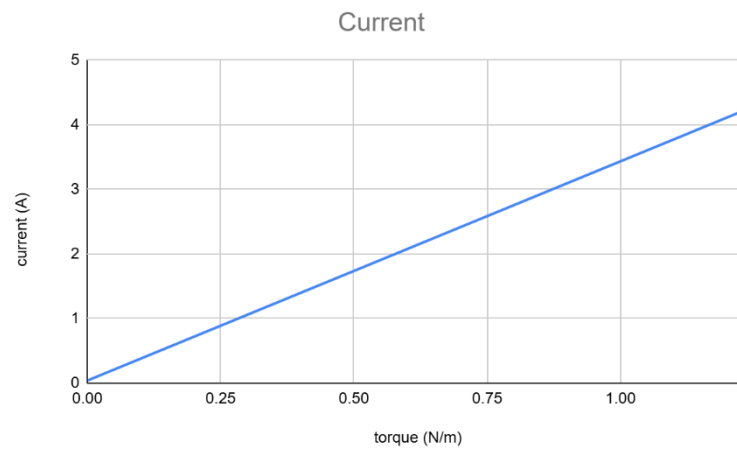
ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ตรวจสอบการจ่ายไฟของบอร์ดและ STM32 ให้ถูกต้อง (5V, 3.3 V, 24 V)
2. Step down แรงดันที่ 12 v และจ่ายไฟให้ motor และ motor driver
3. ใช้ตราซิ่งในการหาค่า torque โดยให้ไม้ 3D print หมุนกดเข้ามา
4. Calibrate ค่า amp ใน Simulink ให้ตรงกับความเป็นจริง
5. เปิด Simulink model MotorXplorer ตั้งค่า Stop time ให้ 0.99 วินาที และ step ที่ 0.01 เก็บ 100 sample ทำซ้ำ 3 แล้วนำค่ามาเฉลี่ย เก็บค่ากระแส, torque และความเร็วเชิงมุมที่เกิดขึ้น โดยการปรับ PWM range และ motor frequency
6. นำข้อมูลที่ได้จาก Simulink ทั้งหมดมาคำนวณและสร้างกราฟ

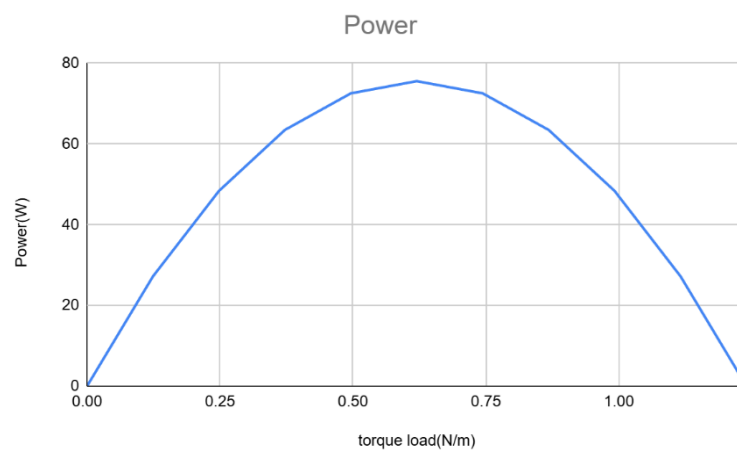
ผลการทดลอง



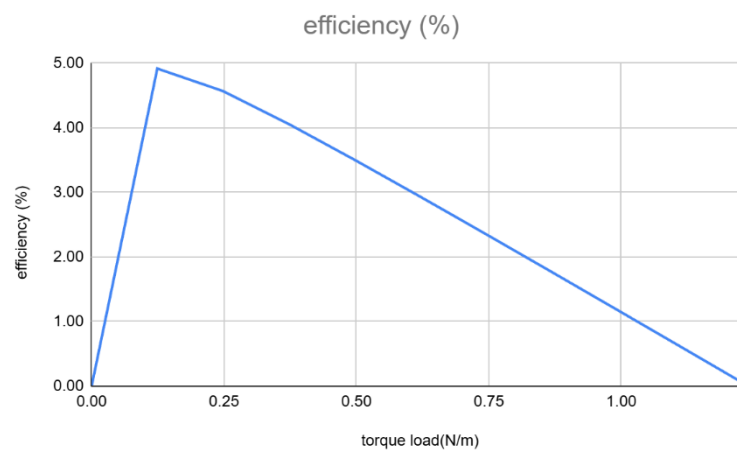
กราฟ 1: motor characteristic (torque)



กราฟ 2: motor characteristic (current)



กราฟ 3: motor characteristic (power)



กราฟ 4: motor characteristic (efficiency)

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองหาลักษณะมอเตอร์และ Torque Constant ของ DC motor โดยใช้แขน 3D print กดลงบนตราช้าง สามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Torque-Speed, Torque-Current, Power และ Efficiency ได้ครบถ้วน พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมและแรงบิดมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงลดลงตามสมมติฐาน และแรงบิดมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับกระแสในช่วงการทำงานปกติ ค่า Torque Constant ที่คำนวณได้อยู่ในช่วงสอดคล้องกับทฤษฎีและค่ามาตรฐานของมอเตอร์ขนาดใกล้เคียงกัน ทั้งนี้จุดที่มอเตอร์มีประสิทธิภาพสูงสุดจากข้อมูลทดลองอยู่ที่ความเร็วเชิงมุมประมาณ 52.4 rad/s แรงบิดประมาณ 0.12 N-m กำลังกลออก 27.2 W และกระแสประมาณ 0.99 A ซึ่งยืนยันว่าประสิทธิภาพสูงสุดไม่ได้เกิดที่ no-load หรือ stall แต่เกิดในช่วงแรงบิดระดับกลางของกราฟลักษณะมอเตอร์

อภิปรายผล

รูปทรงของกราฟ Torque-Speed ที่ได้สอดคล้องกับแบบจำลองเชิงเส้นของมอเตอร์กระแสตรงในช่วงการทำงานปกติ แม้ว่าจุดข้อมูลบางส่วนอาจเบี่ยงเบนจากเส้นตรงเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของตราช้าง แรงเสียดทานเชิงกล และความคลาดเคลื่อนในการตั้งระยะแขน 3D print การใช้ตราช้างแทนโหลดเซลล์โดยตรงช่วยให้การวัดแรงบิดทำได้ง่ายขึ้น แต่ต้องอาศัยสมมติฐานว่ามุมของแขนและทิศแรงใกล้เคียง 90 องศา เพื่อให้การแปลงค่ามวลไปเป็นแรง และแรงบิดมีความถูกต้องเพียงพอ สำหรับจุดประสิทธิภาพสูงสุด ค่าแรงบิดและกระแสที่ได้ใกล้เคียงกับค่ากลางของช่วงการทำงาน ยืนยันภาพรวมของทฤษฎีที่ว่ามอเตอร์มักมีประสิทธิภาพสูงสุดที่โหลดระดับกลาง ไม่ใช่ปลายกราฟทั้งสองด้าน

ข้อเสนอแนะ

- ควรตรวจสอบมุมระหว่างแขน 3D print กับทิศแรงที่กดลงบนตราช้างให้ใกล้เคียง 90 องศามากที่สุด และบันทึกค่าระยะแขนอย่างชัดเจน เพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการคำนวณแรงบิด
- แนะนำให้เก็บข้อมูลที่หลายระดับแรงดันหรือตั้งค่าการขับหลายแบบเพิ่มเติม เพื่อเปรียบเทียบ Motor Characteristic ภายได้สภาวะต่างกัน และใช้ตรวจสอบความสอดคล้องของ Torque Constant ในช่วงการทำงานที่กว้างขึ้น

อ้างอิง

- <https://www.monolithicpower.com/en/learning/mpscholar/electric-motors/dc-motors/fundamentals?srltid=AfmBOopeQjzKa9q1dmMh4uxWkl8omxbcAZfgxvKXCPmhwmNOhTX0ECzA&>
- <https://circuitglobe.com/what-is-back-emf-in-dc-motor.html>
- <https://electrical-engineering-portal.com/the-direct-current-dc-motor-principle-of-operation>
- <https://lancet.mit.edu/motors/motors3.html>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Motor_constants

- <https://www.pmwodynamics.com/news/what-is-torque-constant-in-a-motor/>
- <https://www.tytorobotics.com/blogs/articles/how-to-calculate-electric-motor-torque?srsId=AfmBOor8uTMOlyUM2zU-jKMtZJiMD8ykxtjAeErCp4LUdm4wwZNld83u>
- <https://www.mosrac.com/resources/blog/motor-constant.html>

การทดลองที่ 2 ผลของ PWM Frequency และ Duty Cycle ต่อการทำงานของ DC Motor และการประมวลผลสัญญาณ

จุดประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของความถี่ PWM และ Duty cycle ต่อความเร็วและกระแสของ DC motor
2. เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอเตอร์เมื่อควบคุมด้วย PWM ค่าแตกต่างกัน
3. เพื่อวิเคราะห์ความถี่ (FFT) ของสัญญาณความเร็วรอบมอเตอร์ที่ PWM ต่างกัน
4. เพื่อออกแบบและทดสอบ low-pass filter สำหรับสัญญาณความเร็ว และวิเคราะห์ Bode plot

สมมติฐาน

- ที่ PWM frequency สูงขึ้น สัญญาณความเร็วจะเรียบขึ้น และ harmonic จาก PWM จะเคลื่อนไปความถี่สูง
- Duty cycle ที่มากขึ้นจะทำให้ความเร็วและกระแสเพิ่มขึ้น แต่ efficiency ไม่ได้เพิ่มแบบ linear
- Low-pass filter ที่ออกแบบเหมาะสมจะลด ripple จาก PWM ได้ โดยไม่ทำให้ dynamic ช้าจนเกินไป

ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น
 - PWM duty cycle (%)
 - motor frequency (Hz)
2. ตัวแปรตาม
 - Speed เฉลี่ยของมอเตอร์ (rad/s)
 - Current เฉลี่ย (A)
 - Efficiency (%)
 - Spectral components ในสัญญาณ speed (FFT magnitude)
3. ตัวแปรควบคุม

- แรงดัน supply 12 V

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. หลักการของ Pulse Width Modulation (PWM)

Pulse Width Modulation หรือ PWM เป็นวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการสวิตช์สัญญาณแรงดันให้เปิดและปิดด้วยความถี่คงที่ แล้วปรับระยะเวลาที่สัญญาณอยู่ในสถานะเปิดภายในหนึ่งคาบ เพื่อควบคุมค่าเฉลี่ยของแรงดันและกระแสที่ส่งไปยังโหลด เช่น มอเตอร์ หรือหลอดไฟชนิดต่างๆ

ในเชิงเวลา สัญญาณ PWM เป็นสัญญาณดิจิทัลแบบคลื่นสี่เหลี่ยมที่สลับระหว่างระดับแรงดันสูงและระดับแรงดันต่ำในทุกคาบ เมื่อโหลดมีคุณสมบัติหน่วง เช่น ความเหนียวของมอเตอร์หรือการกรองของตัวเก็บประจุ โหลดจะตอบสนองต่อตัวค่าเฉลี่ยของแรงดันมากกว่ารูปคลื่นทันที ทำให้มองเห็นผลเหมือนกับได้รับแรงดันเฉลี่ยค่าหนึ่งแทนที่จะเป็นการเปิดปิดด้วยรูปคลื่นสี่เหลี่ยมโดยตรง

ข้อดีสำคัญของ PWM คือสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าได้โดยที่ช่วงที่สัญญาณเปิดยังคงใช้แรงดันเต็มของแหล่งจ่าย จึงลดการสูญเสียกำลังในอุปกรณ์ควบคุมเมื่อเทียบกับการลดแรงดันแบบเชิงเส้น และเหมาะกับการใช้งานในวงจรกำลังและการควบคุมมอเตอร์เป็นพิเศษ

2 ความหมายของ Duty Cycle

Duty Cycle เป็นปริมาณที่ใช้บอกสัดส่วนเวลาที่สัญญาณอยู่ในสถานะเปิดภายในหนึ่งคาบของสัญญาณแบบคาบต่อเนื่อง โดยนิยามเป็นอัตราส่วนระหว่างระยะเวลาเปิดกับระยะเวลาทั้งคาบ และมักแสดงผลเป็นร้อยละให้กำหนด

- T เป็นคาบของสัญญาณ (วินาที)
- T_{on} เป็นระยะเวลาที่สัญญาณอยู่ในสถานะเปิดภายในหนึ่งคาบ

สามารถเขียน Duty Cycle ในรูปสมการได้ดังนี้

$$D = \frac{T_{on}}{T}$$

และหากต้องการแสดงเป็นร้อยละ

$$D(\%) = \frac{T_{on}}{T} \times 100$$

ตัวอย่างเช่น หากสัญญาณอยู่ในสถานะเปิดครึ่งหนึ่งของหนึ่งคาบ Duty Cycle จะเท่ากับห้าสิบเปอร์เซ็นต์ หมายถึงสัญญาณเปิดครึ่งเวลาและปิดอีกครึ่งเวลาในทุกคาบของสัญญาณ

3 ความสัมพันธ์ระหว่าง PWM Duty Cycle และแรงดันเฉลี่ย

เมื่อใช้ PWM เพื่อขับโหลดด้วยแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ เช่น แหล่งจ่ายกระแสตรงที่มีค่าแรงดันสูงสุดเท่ากับ V_{\max} หากสัญญาณ PWM มี Duty Cycle เท่ากับ D และความถี่ PWM สูงพอเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของโหลด ค่าแรงดันเฉลี่ยที่โหลดได้รับสามารถประมาณได้เป็น

$$V_{\text{avg}} = D V_{\max}$$

สมการดังกล่าวใช้ทั่วไปในงานควบคุมมอเตอร์กระแสตรง และงานควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบสวิตชิง โดยถือว่าในช่วงเวลาที่สัญญาณเปิด โหลดได้รับแรงดันเต็ม V_{\max} และในช่วงสัญญาณปิดไม่รับแรงดัน ทำให้ค่าเฉลี่ยตามคาบสัญญาณขึ้นอยู่กับสัดส่วนเวลาที่สัญญาณเปิด

สำหรับการควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรง หากใช้ PWM ที่มี Duty Cycle เพิ่มขึ้น ค่าแรงดันเฉลี่ยที่จ่ายให้มอเตอร์จะเพิ่มขึ้น จึงทำให้ความเร็วและกำลังของมอเตอร์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในทางกลับกัน การลด Duty Cycle จะลดแรงดันเฉลี่ยและลดความเร็วของมอเตอร์ ขณะที่ยังคงใช้แรงดันเต็มในช่วงเวลาที่เปิดสวิตช์ ซึ่งเป็นเหตุผลที่ PWM เป็นวิธีมาตรฐานในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ในงานอุตสาหกรรมและหุ่นยนต์

4 บทบาทของความถี่ PWM

แม้ Duty Cycle จะเป็นตัวกำหนดค่าแรงดันเฉลี่ยโดยตรง แต่ความถี่ของ PWM ก็มีผลต่อพฤติกรรมของระบบเช่นกัน ความถี่ PWM คืออัตราที่สัญญาณหนึ่งคาบเกิดขึ้นในหนึ่งวินาที และมีความสัมพันธ์กับคาบ T โดย

$$f = \frac{1}{T}$$

เมื่อความถี่ PWM สูงเพียงพอเมื่อเทียบกับลักษณะพลวัตของโหลด เช่น ความเฉื่อยของมอเตอร์หรือค่าคงตัวเวลาเชิงกล สัญญาณแรงดันแบบสวิตช์จะถูกเฉลี่ยโดยคุณสมบัติของโหลด ทำให้กระแสและความเร็วเปลี่ยนแปลงอย่างราบรื่นมากขึ้น หากความถี่ต่ำเกินไป รูปคลื่น PWM อาจทำให้เกิดการสั่นและเสียงรบกวนทางกลมากขึ้น เนื่องจากโหลดตอบสนองทันต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแต่ละคาบ

4. หลักการทำงานของวงจร H-Bridge

วงจร H-Bridge เป็นวงจรขับกำลังที่ประกอบด้วยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ที่จัดเรียงในลักษณะคล้ายตัวอักษร H โดยมีมอเตอร์ต่ออยู่ที่ขาทางเดินกระแสตรงกลางของสะพาน ทั้งสี่สวิตช์มักเป็นทรานซิสเตอร์กำลังชนิด MOSFET หรือ BJT และมักมีไดโอดแบบ free-wheel ต่อขนานเพื่อรองรับกระแสจากสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เมื่อมีการสับสวิตช์อย่างรวดเร็ว

หลักการพื้นฐานคือ

- เมื่อเปิดสวิตช์ฝั่งทแยงมุมด้านหนึ่ง เช่น Q1 และ Q4 มอเตอร์จะถูกต่อกับแหล่งจ่ายในทิศทางหนึ่ง ทำให้เพลอาหมุนไปด้านหน้า
- เมื่อเปิดสวิตช์อีกคู่หนึ่ง เช่น Q2 และ Q3 ทิศทางแรงดันคร่อมมอเตอร์จะกลับ ทำให้มอเตอร์หมุนย้อนกลับ

- หากปิดสวิตช์คู่ล่างหรือคู่บนพร้อมกัน ขั้วมอเตอร์ทั้งสองข้างจะถูกลัดวงจรเข้าด้วยกัน เกิดเป็นโหมดเบรกแบบ dynamic braking
- หากสวิตช์ทุกตัวปิด หรือเปิดเพียงด้านเดียวโดยไม่ให้เกิดทางเดินกระแสครบวงจร มอเตอร์จะอยู่ในสถานะลอย (coast)

การจัดวงจรแบบ H-Bridge จึงทำให้สามารถควบคุมทั้งทิศทางและความเร็วของมอเตอร์ด้วยแรงดันไฟแบบแหล่งจ่ายคงที่เพียงชุดเดียว และเป็นโครงสร้างพื้นฐานของตัวขับมอเตอร์ดีซีส่วนใหญ่ในงานควบคุมสมัยใหม่

5. โหมดการขับ H-Bridge ด้วย PWM

ในการควบคุมความเร็วและทิศทางของมอเตอร์ มักใช้การปรับความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation; PWM) ร่วมกับวงจร H-Bridge โดยสามารถเลือกโหมดการขับหลักสองแบบคือ Sign-Magnitude และ Locked Anti-Phase

5.1 โหมด Sign-Magnitude

ในโหมด Sign-Magnitude มีสัญญาณควบคุมแยกเป็นสองส่วนคือ

1. สัญญาณบอกทิศทาง (sign) ใช้กำหนดว่าขั้วใดของมอเตอร์จะต่อกับแหล่งจ่ายและขั้วใดจะต่อกราวด์
2. สัญญาณ PWM ที่บอกขนาด (magnitude) ใช้กำหนด duty cycle ระหว่าง 0 ถึง 1 เพื่อควบคุมค่าเฉลี่ยของแรงดันคร่อมมอเตอร์

โดยทั่วไป หนึ่งข้างของสะพานจะถูกเปิดค้าง ส่วนอีกข้างถูกสับตามสัญญาณ PWM

- ให้ V_s เป็นแรงดันแหล่งจ่ายของ H-Bridge
- ให้ D เป็นค่า duty cycle ของสัญญาณ PWM ระหว่าง 0 ถึง 1

แรงดันเฉลี่ยคร่อมมอเตอร์ในโหมดนี้ประมาณได้เป็น

$$V_{avg} = s D V_s$$

โดย s มีค่าเป็น $+1$ หรือ -1 ตามสัญญาณทิศทาง

เมื่อ D เท่ากับศูนย์ มอเตอร์ไม่ถูกจ่ายแรงดันเฉลี่ย (โหมดหยุดหรือเบรก ขึ้นอยู่กับการจัดสวิตช์)

เมื่อ D เข้าใกล้หนึ่ง มอเตอร์จะได้รับแรงดันใกล้เคียงกับ V_s ทำให้หมุนด้วยความเร็วสูงสุดในทิศทางที่กำหนด

ในช่วง off-time ของ PWM สามารถเลือกให้มอเตอร์

- ถูกลัดวงจร (drive-brake) ซึ่งให้แรงเบรกสูง
- หรือถูกปล่อยลอย (drive-coast) ซึ่งทำให้มอเตอร์หมุนต่อด้วยโมเมนตัมและสูญเสียพลังงานน้อยลง

5.2 โหมด Locked Anti-Phase

ในโหมด Locked Anti-Phase ใช้สัญญาณ PWM เพียงเส้นเดียวเข้าควบคุม H-Bridge โดยให้แขนสองฝั่งของสะพานทำงานสลับเฟสกันตลอดเวลา มอเตอร์จึงเห็นแรงดันสลับระหว่าง $+V_s$ และ $-V_s$ ที่ความถี่ PWM แทนที่จะเป็นระหว่าง 0 และ V_s แบบ Sign-Magnitude

แนวคิดคือ

- เมื่อ duty cycle D เท่ากับ 0.5 แรงดันเฉลี่ยคร่อมมอเตอร์เป็นศูนย์ เพราะมอเตอร์ถูกขับเท่าๆ กันในทั้งสองทิศ
- เมื่อ D มากกว่า 0.5 มอเตอร์ได้รับแรงดันเฉลี่ยเป็นบวกและหมุนไปทิศทางหนึ่ง
- เมื่อ D น้อยกว่า 0.5 แรงดันเฉลี่ยเป็นลบและหมุนกลับทิศ

แรงดันเฉลี่ยในโหมดนี้สามารถเขียนได้เป็น

$$V_{avg} = (2D - 1) V_s$$

ดังนั้นช่วง D ตั้งแต่ศูนย์ถึงหนึ่งจะถูกแปลงเป็นแรงดันเฉลี่ยตั้งแต่ $-V_s$ ถึง $+V_s$ อย่างต่อเนื่อง โดยจุดศูนย์อยู่ที่ D เท่ากับ 0.5

คุณลักษณะที่สำคัญของ Locked Anti-Phase คือ สวิตช์สองตัวใน H-Bridge จะเปิดอยู่เสมอ ทำให้มีเส้นทางกระแสสำหรับทั้งทิศทางปกติและทิศทางย้อนกลับ จึงรองรับการถ่ายเทพลังงานกลับจากโหลดไปยังแหล่งจ่าย (regenerative braking) ได้ดี และแรงดันคร่อมมอเตอร์ถูกกำหนดตลอดเวลาโดยสถานะของสวิตช์

5.3 การเปรียบเทียบเชิงแนวคิด

สรุปเชิงแนวคิดระหว่างสองโหมดได้ดังนี้

- Sign-Magnitude
 - ใช้สัญญาณทิศทางแยกต่างหากจากสัญญาณ PWM
 - ในช่วง off-time สามารถเลือกให้มอเตอร์ลอยหรือถูกลัดวงจร ทำให้ควบคุมลักษณะการเบรกได้ยืดหยุ่น
 - สวิตช์เพียงสองตัวต้องสับที่ความถี่ PWM อีกสองตัวเปิดค้าง ส่งผลให้การสูญเสียจากการสวิตช์และสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้ามีต่ำกว่า
- Locked Anti-Phase
 - ใช้สัญญาณ PWM เส้นเดียวควบคุมทั้งทิศทางและขนาด จึงใช้ขา I/O จากไมโครคอนโทรลเลอร์น้อยกว่า และมักทำให้วงจรควบคุมง่ายขึ้นในระดับฮาร์ดแวร์
 - ความสัมพันธ์ระหว่าง duty cycle กับแรงดันเฉลี่ยมีลักษณะสมมาตรและต่อเนื่องรอบจุดศูนย์ ทำให้การควบคุมในบริเวณความเร็วต่ำและการกลับทิศทำได้ราบรื่น

โปรแกรมและวงจรควบคุมในโหมด Sign-Magnitude

ในโหมด Sign-Magnitude ไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณควบคุมไปยังวงจร H-bridge ซึ่งประกอบด้วย สวิตช์กำลังสี่ตัว โดยใช้บิตกำหนดทิศทางร่วมกับสัญญาณสวิตช์ที่มีความถี่ตามค่าที่กำหนดในช่อง Motor Frequency หลักการคือ ขาหนึ่งของมอเตอร์จะถูกต่อกับแหล่งจ่ายหรือกราวด์แบบคงที่ตามบิตทิศทาง (กำหนด “ขั้ว” ของมอเตอร์) ส่วนอีกขาหนึ่งจะถูกสวิตช์ติด-ดับด้วยความถี่ที่ตั้งจาก Motor Frequency ผ่านสวิตช์ของ H-bridge เพียงชุดเดียว ทำให้มอเตอร์เห็นแรงดันสลับระหว่างค่าคงที่และศูนย์โวลต์ในจังหวะที่กำหนด ส่งผลให้ค่าแรงดันเฉลี่ยที่มอเตอร์รับมีสัดส่วนสัมพันธ์กับช่วงเวลาที่มี H-bridge เปิดนำกระแสในแต่ละคาบสวิตช์ โครงสร้างแบบนี้สอดคล้องกับนิยามของการ ขับแบบ sign-magnitude ที่ให้สวิตช์ด้านหนึ่งทำงานคงที่และสวิตช์อีกด้านถูกสับด้วยสัญญาณ PWM เพื่อควบคุม ขนาดแรงดันเฉลี่ยและแรงบิดของมอเตอร์

โปรแกรมและวงจรควบคุมในโหมด Locked Anti-Phase

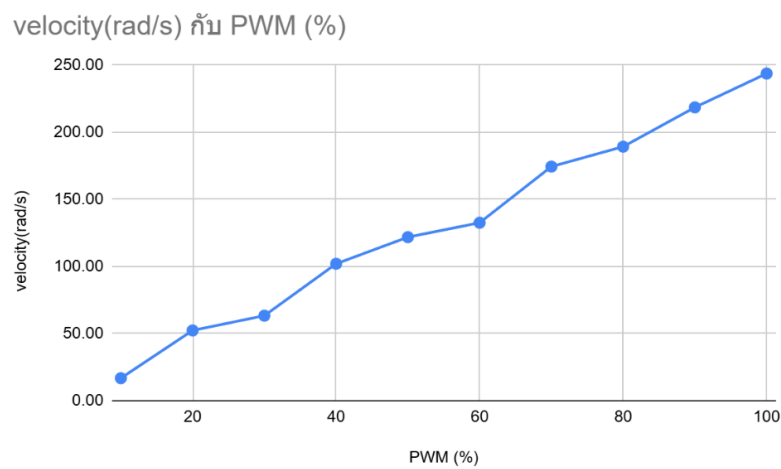
ในโหมด Locked Anti-Phase โปรแกรมจะสร้างแบบรูปสวิตช์ให้ขาทั้งสองด้านของ H-bridge ถูกสลับขั้ว ระหว่างคู่สวิตช์ที่แยงมุมสองชุดอย่างต่อเนื่อง โดยใช้สัญญาณที่มีความถี่ตามค่าที่กำหนดใน Motor Frequency เป็น ตัวกำหนดจังหวะการสลับ เมื่ออยู่ในครึ่งคาบแรกของสัญญาณ สวิตช์ชุดหนึ่งจะทำให้มอเตอร์เห็นแรงดันในทิศทางบวก (+Vs) และในครึ่งคาบถัดมาจะสลับเป็นชุดสวิตช์ตรงข้าม ทำให้มอเตอร์เห็นแรงดันในทิศทางลบ (-Vs) ดังนั้นแรงดันบน มอเตอร์จะสลับไปมาระหว่าง +Vs และ -Vs ด้วยความถี่ที่กำหนดโดย Motor Frequency ตลอดเวลา การควบคุม ความแรงและทิศทางของแรงบิดจึงเกิดจากสัดส่วนช่วงเวลาที่จะจเลือกขั้วบวกหรือลบในแต่ละคาบ ซึ่งตรงกับหลักการ ของโหมด locked anti-phase ที่ใช้การสลับขั้วของ H-bridge อย่างต่อเนื่องเพื่อควบคุมทั้งทิศทางและความเข้มของ แรงบิดผ่านสัญญาณควบคุมเพียงชุดเดียว

ขั้นตอนการดำเนินงาน

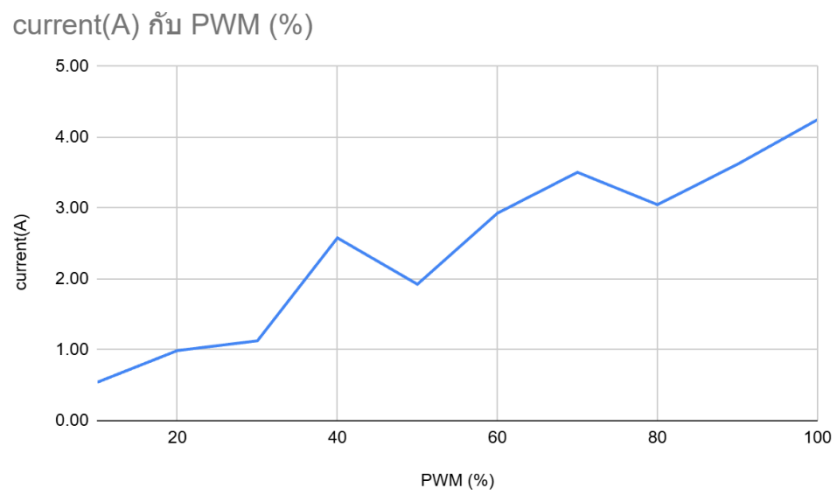
1. จ่ายไฟให้มอเตอร์ที่ 12 V
2. ตั้งค่าระบบ Simulink ให้พร้อมอ่าน speed, current และส่ง PWM ไปยังมอเตอร์
3. เปิด Simulink model MotorXplorer ตั้งค่า Stop time ให้ 0.99 วินาที และ step ที่ 0.01 เก็บ 100 sample เป็นจำนวน 3 ครั้ง
4. สำหรับความถี่ PWM แต่ละค่า:
 - 2.1 ปรับ duty หลายค่า
 - 2.2 ทุก run ให้รอจน speed คงที่แล้วค่อยบันทึก speed, current เฉลี่ย
 - 2.3 log สัญญาณ speed(t) ช่วงวินาทีที่ค่านี้
5. นำข้อมูลมาคำนวณ Pout, Pin, efficiency สำหรับทุก combination

6. Calibrate ค่า amp โดยวัด bit ที่ค่า 0 และลบจำนวนนั้นทิ้งกับวัดค่า bit สูงสุดที่ motor หยุดหมุนและค่า amp ที่วัดได้จาก multimeter มาหาอัตราส่วน
7. ทำ FFT ของ speed(t) สำหรับแต่ละ PWM frequency
8. ออกแบบ low-pass filter และ plot Bode
9. ส่งสัญญาณความเร็วผ่าน filter เปรียบเทียบกราฟก่อน/หลังกรอง

ผลการทดลอง

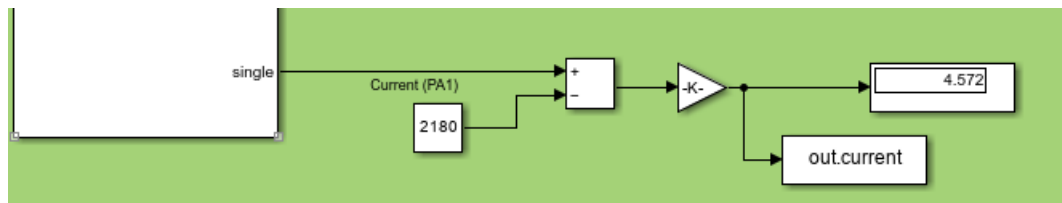


กราฟที่ 5: Duty vs Speed สำหรับ PWM frequency



กราฟที่ 6: Duty vs Current สำหรับ PWM frequency

กราฟที่ 7: Duty vs Efficiency สำหรับ PWM frequency



รูปที่ 1: Calibrate เพื่อหาค่า amp ที่เกิดขึ้นจริงในระบบ

รูปที่ 2: การวัด amp ด้วย multimeter โดยต่อแบบอนุกรม

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของ PWM frequency และ Duty Cycle ต่อการทำงานของมอเตอร์ พบว่าเมื่อเพิ่ม Duty Cycle ความเร็วเฉลี่ยของมอเตอร์และกระแสเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นตามแนวคิดแรงดันเฉลี่ยจาก PWM ขณะที่ประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นจนถึงช่วงหนึ่งแล้วไม่เพิ่มแบบเชิงเส้น และอาจเริ่มลดลงที่ Duty สูงมากบางจุด การเปลี่ยน PWM frequency ส่งผลต่อรูปคลื่นความเร็วและสเปกตรัมความถี่ โดยที่ความถี่สูงทำให้สัญญาณความเร็วเรียบขึ้นและฮาร์มอนิกจาก PWM ถูกดันไปที่ย่านความถี่สูงตามสมมติฐาน การออกแบบ low-pass filter ที่กำหนดความถี่ตัดเหมาะสมช่วยลด ripple ของสัญญาณความเร็วได้โดยยังคงรูปร่างการเปลี่ยนแปลงหลักของระบบไว้ได้ในระดับที่ยอมรับได้

อภิปรายผล

ผลของ Duty Cycle ต่อความเร็วและกระแสมีแนวโน้มตามทฤษฎีของ PWM อย่างชัดเจน ขณะที่ผลของ PWM frequency จะเห็นเด่นในเชิงคุณภาพของสัญญาณ เช่น ระดับ ripple และองค์ประกอบความถี่ใน FFT มากกว่าการเปลี่ยนค่าเฉลี่ยของความเร็วโดยตรง ในทางปฏิบัติ ความถี่ที่สูงเกินไปอาจทำให้การสูญเสียจากการสวิตช์ใน H-bridge เพิ่มขึ้น ส่วนความถี่ที่ต่ำเกินไปทำให้เกิด ripple ทางกลและเสียงรบกวนมากขึ้น การออกแบบ low-pass filter ช่วยปรับสมดุลระหว่างการลด ripple ของสัญญาณความเร็วกับการรักษาการตอบสนองพลวัตของระบบ แต่ตัวกรองที่คมเกินไปอาจทำให้เกิดเฟสเลตและทำให้ระบบตอบสนองช้าลง จึงต้องพิจารณา trade-off ระหว่างความเรียบของสัญญาณและความเร็วในการตอบสนองร่วมกัน

ผลของ Duty Cycle ต่อความเร็วและกระแสมีแนวโน้มตามทฤษฎีของ PWM อย่างชัดเจน ขณะที่ผลของ PWM frequency จะเห็นเด่นในเชิงคุณภาพของสัญญาณ เช่น ระดับ ripple และองค์ประกอบความถี่ใน FFT มากกว่าการเปลี่ยนค่าเฉลี่ยของความเร็วโดยตรง ในทางปฏิบัติ ความถี่ที่สูงเกินไปอาจทำให้การสูญเสียจากการสวิตช์ใน H-bridge เพิ่มขึ้น ส่วนความถี่ที่ต่ำเกินไปทำให้เกิด ripple ทางกลและเสียงรบกวนมากขึ้น การออกแบบ low-pass filter ช่วยปรับสมดุลระหว่างการลด ripple ของสัญญาณความเร็วกับการรักษาการตอบสนองพลวัตของระบบ แต่ตัวกรองที่คม

เกินไปอาจทำให้เกิดเฟสเลตและทำให้ระบบตอบสนองช้าลง จึงต้องพิจารณา trade-off ระหว่างความเรียบของสัญญาณและความเร็วในการตอบสนองร่วมกัน

ข้อเสนอแนะ

- ในการศึกษา PWM frequency ควรเลือกความถี่อย่างน้อย 3–4 ค่าในย่านต่ำ กลาง และสูง พร้อมกันกับ Duty หลายระดับ เพื่อให้เห็นผลของความถี่ต่อ ripple และประสิทธิภาพได้ชัดเจนขึ้น
- การออกแบบ low-pass filter อาจทดลองค่าความถี่ตัดและอันดับของฟิลเตอร์หลายแบบ แล้วเปรียบเทียบทั้งกราฟเวลาและ Bode plot เพื่อหาจุดสมดุลที่เหมาะสมระหว่างการลด noise และการรักษาการตอบสนองของระบบ

อ้างอิง

- <https://www.pcb-3d.com/wordpress/tutorials/what-is-a-h-bridge-sign-magnitude-and-locked-anti-phase-control-of-a-dc-motor/>
- <https://www.ti.com/lit/pdf/snoa170>
- <https://www.modularcircuits.com/blog/articles/h-bridge-secrets/lock-anti-phase-drive/>
- https://img.machinedesign.com/files/base/ebm/machinedesign/document/2020/07/2004_MD_Controlling_Brushed_DC_Motors.5f1ef5f1b5bd5.pdf
- <https://www.controleng.com/articles/understanding-the-effect-of-pwm-when-controlling-a-brushless-dc-motor/>
- <https://forum.pololu.com/t/h-bridge-dc-motor-pwm-drive-modes/5610>

ในการศึกษา PWM frequency ควรเลือกความถี่อย่างน้อย 3–4 ค่าในย่านต่ำ กลาง และสูง พร้อมกันกับ Duty หลายระดับ เพื่อให้เห็นผลของความถี่ต่อ ripple และประสิทธิภาพได้ชัดเจนขึ้น

การออกแบบ low-pass filter อาจทดลองค่าความถี่ตัดและอันดับของฟิลเตอร์หลายแบบ แล้วเปรียบเทียบทั้งกราฟเวลาและ Bode plot เพื่อหาจุดสมดุลที่เหมาะสมระหว่างการลด noise และการรักษาการตอบสนองของระบบ

<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/low-pass-filter-a-pwm-signal-into-an-analog-voltage/>

LAB 2.2 : Stepper Motor

การทดลองที่ 1 การทดลองวิเคราะห์ความแตกต่างของ Stepper Motor ในแต่ละโหมดการทำงาน (Wave Drive, Full Step, Half Step, Micro Step)

จุดประสงค์

1. เพื่อศึกษาลักษณะการทำงานของแต่ละ Drive Mode ของ Stepper Motor (Wave Drive, Full Step, Half Step, Micro Step)
2. เพื่อวิเคราะห์ข้อดีและข้อเสียของและความเหมาะสมกับการใช้งานจริงในแต่ละ Drive Mode ของ stepper motor

สมมติฐาน

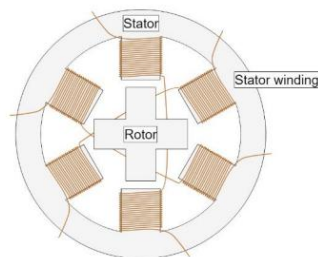
1. ในช่วงของความเร็วของสัญญาณที่เท่า ๆ กัน Angular Velocity [rad/s] ของ Stepper motor โหมด Full Step จะมีความเร็วสูงที่สุดในโหมด Half Step จะมีความเร็วรองลงมา และในโหมด Micro Step จะมีความเร็วต่ำสุด โดยอัตราส่วนของความเร็ว Half Step จะมีความเร็วเป็น $1/2$ ของ Full Step และ Micro Step จะมีความเร็วตามอัตราส่วนของความเร็วที่ได้ทอดไว้ เช่น $1/4$ $1/8$ $1/16$ และ $1/32$
2. ลักษณะของสัญญาณ Step ที่ส่งไปให้ Stepper motor แต่ละโหมด มีลักษณะของสัญญาณที่แตกต่างกัน
3. การ Drive Motor ในโหมด Full Step จะให้ Torque ที่สูงกว่าโหมด Half Step และ Micro Step แต่ Half Step และ Micro Step จะให้ความละเอียดของ Step มากกว่า Full Step โดย Micro Step จะให้ความละเอียดได้สูงที่สุด

ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น:
 - รูปแบบการ Drive mode ของ Stepper Motor (Wave Drive, Full Step, Half Step, Micro Step)
 - ความถี่ของสัญญาณ Pulse ที่จ่ายให้กับ Stepper Motor
2. ตัวแปรตาม:
 - Angular Velocity [rad/s] ของ Stepper Motor
3. ตัวแปรควบคุม:
 - แรงดันไฟฟ้าของทั้งระบบการทำงาน
 - วิธีการเก็บผลการทดลอง (การ Setup การเก็บข้อมูลจาก Simulink)
 - อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

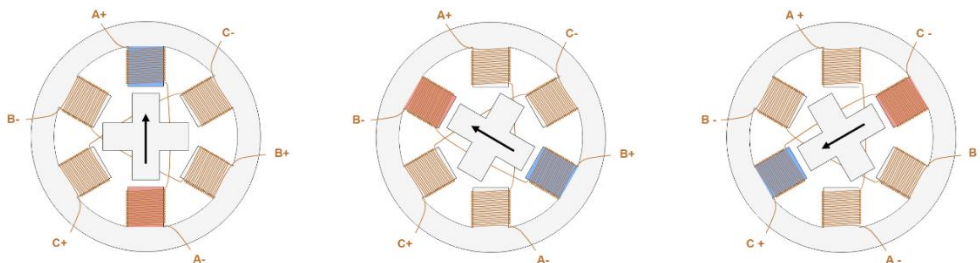
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Stepper Motor คือ มอเตอร์ที่มีคุณสมบัติหลักที่สามารถเคลื่อนที่ได้เป็น Step สามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยจำนวนองศาที่คงที่ คุณสมบัติหลักนี้มาจาก โครงสร้างภายใน ที่มีส่วนประกอบหลักคือ Rotor และ Stator



รูปที่ 3 แสดงส่วนประกอบของ Stepper Motor

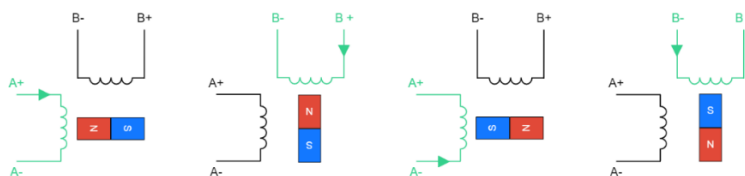
Stepper Motor สามารถทำงานได้โดย การจ่ายพลังงานให้กับ Phase ของ Stator ทีละ 1 Phase หรือ มากกว่า ซึ่งทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่ขั้วลวด เมื่อเกิดสนามแม่เหล็กที่ขั้วลวดในช่วงของ Phase ที่แตกต่างกัน จะทำให้ Rotor ที่อยู่ภายในของ Stepper Motor สามารถเคลื่อนที่ได้ตามตำแหน่งที่ต้องการ



รูปที่ 4 แสดงกระบวนการทำงานของ Stepper Motor

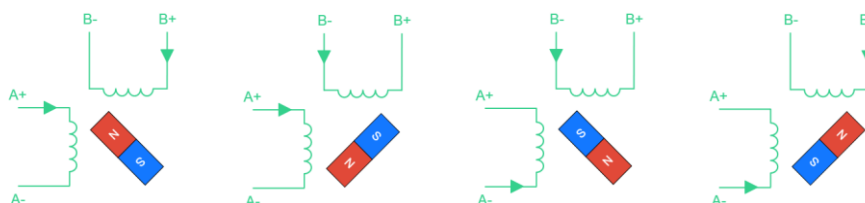
ภาพแสดงการทำงานของ Stepper Motor ที่จุดเริ่มต้น ขดลวด A ได้รับพลังงานทำให้ Rotor เรียงกันตามทิศทางของสนามแม่เหล็ก เมื่อขดลวด B ได้รับพลังงาน Rotor หมุนตามเข็มนาฬิกา 60 องศา ตามทิศทางของสนามแม่เหล็ก ซึ่งเหมือนกัน เมื่อขดลวด C ได้รับพลังงาน ทำให้ Rotor หมุนตามเข็มนาฬิกาอีก 60 องศา ลักษณะดังกล่าว ทำให้ Stepper Motor มีคุณสมบัติในการเคลื่อนที่แบบเป็น Step

การ Drive Stepper Motor ในโหมดต่าง ๆ



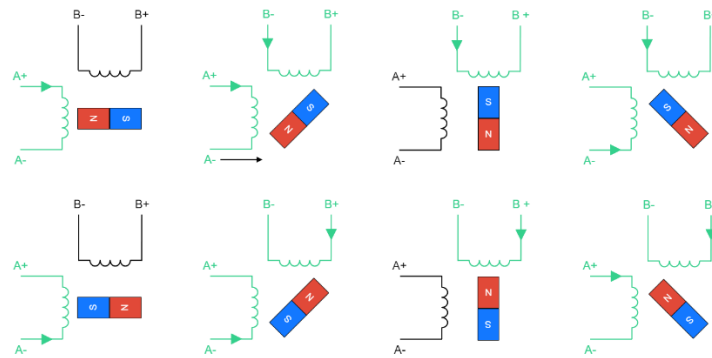
รูปที่ 5 Characteristics of Wave Mode Drive

ใน Wave Mode มีแค่ 1 Phase ของขดลวดเท่านั้นที่จะได้รับพลังงาน แล้วทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก



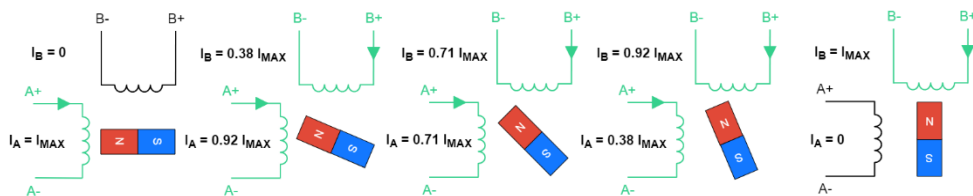
รูปที่ 6 Characteristics of Full-Step Mode Drive

ใน Full Step จะมี 2 Phase ที่ได้รับพลังงานเสมอ ในเวลาเดียวกัน ข้อแตกต่างสำหรับโหมดนี้คือ โหมดนี้จะให้ Torque ที่สูงที่สุด เนื่องจากกระแสไฟที่เกิดที่ Phase มีจำนวนที่มากขึ้น จึงทำให้สามารถสร้างสนามแม่เหล็กได้แข็งแรงกว่า



รูปที่ 7 Characteristics of Half-Step Mode Drive

ใน Half Step เปรียบเสมือนการรวมระหว่าง Wave Mode Drive และ Full-Step Mode Drive คือจะมี Phase ที่ได้รับพลังงานสลับกันไปมา ระหว่าง 1 และ 2 ขดลวดเสมอ ซึ่งทำให้มุมที่ Rotor ภายในสามารถเคลื่อนที่ได้มีความละเอียดขึ้น 2 เท่า ข้อเสียของโหมดนี้ก็คือ จะให้ Torque และความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ที่น้อยกว่า Full -Step Mode Drive



รูปที่ 8 Characteristics of Half-Step Mode Drive

ใน Micro Step เปรียบเสมือนโหมดที่ได้เพิ่มประสิทธิภาพมาจาก Half-Step Mode Drive เนื่องจากการแบ่ง Step ภายในที่มีความละเอียดมากขึ้น เช่น $\frac{1}{4}$ $\frac{1}{8}$ $\frac{1}{16}$ และ $\frac{1}{32}$ ซึ่งทำให้มีความละเอียดในการเคลื่อนที่ของ Rotor ที่เพิ่มมากขึ้น แต่ในทางกลับกัน ในช่วงความถี่เดียวกันจะมีความเร็วและ Torque ที่ได้รับน้อยลง

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ทำการ Set up อุปกรณ์การทดลองทั้งหมดตาม Instruction
2. ตั้งค่า Low-pass filter เพื่อใช้สำหรับการกรองสัญญาณ Angular Velocity ของ Stepper Motor
3. ตั้งค่า Stop Time ให้มีค่าเท่ากับ 5 วินาทีสำหรับการเก็บค่า Angular Velocity ของ Stepper Motor (ใช้ 5 วินาที เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่พบว่า สามารถอ่านค่า Angular Velocity ได้ความเสถียรมากที่สุด)
4. ทำการเก็บค่า Angular Velocity ของ Stepper Motor โดยทดลองในทุก ๆ โหมดของ Stepper Motor และทดลอง ในทุก ๆ ความถี่ที่ห่างกันอยู่ที่ 200 Hz

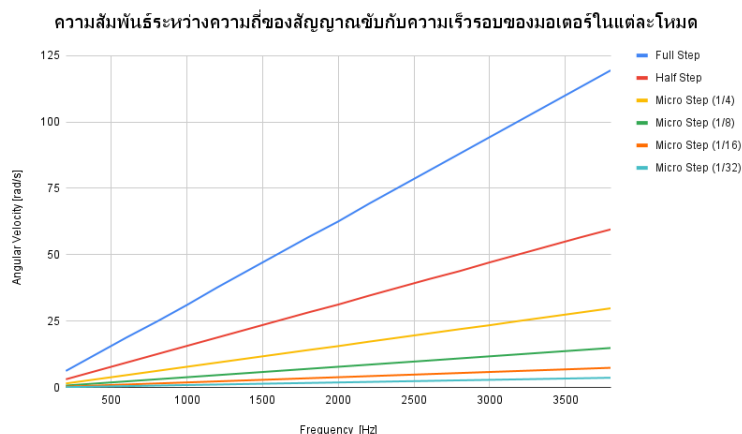
5. นำผลการทดลองที่เก็บได้มาทำการวิเคราะห์ และอภิปรายผล

ผลการทดลอง

1. ผลการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณขับกับความเร็วนรอบของมอเตอร์ในแต่ละโหมด

Frequency [Hz]	Angular Velocity [rad/s] จากการเฉลี่ยของผลการทดลอง 5 ครั้ง					
	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	0.78	0.39	0.2
400	12.56	6.29	3.14	1.57	0.79	0.39
600	18.85	9.42	4.71	2.36	1.18	0.59
800	25.13	12.57	6.28	3.14	1.57	0.78
1000	31.42	15.71	7.85	3.93	1.96	0.98
1200	37.7	18.85	9.43	4.71	2.36	1.18
1400	43.98	21.99	11	5.5	2.75	1.37
1600	50.26	25.13	12.57	6.28	3.14	1.57
1800	56.55	28.27	14.14	7.07	3.53	1.77
2000	62.83	31.42	15.71	7.86	3.93	1.96
2200	69.12	34.56	17.28	8.64	4.32	2.16
2400	75.4	37.7	18.85	9.42	4.71	2.36
2600	81.68	40.84	20.42	10.2	5.11	2.55
2800	87.97	43.98	21.99	11	5.5	2.75
3000	94.25	47.12	23.56	11.78	5.89	2.94
3200	100.53	50.27	25.13	12.57	6.28	3.14
3400	106.81	53.41	26.7	13.35	6.68	3.34
3600	113.1	56.55	28.27	14.14	7.07	3.53
3800	119.38	59.69	29.84	14.92	7.46	3.73

ตารางที่ 1 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณขับกับความเร็วนรอบของมอเตอร์ในแต่ละโหมด



รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณขับกับความเร็วนรอบของมอเตอร์ในแต่ละโหมด

สรุปผลการทดลอง

1. จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณขับกับความเร็วนรอบของมอเตอร์ในแต่ละโหมด มีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกัน เมื่อ Frequency [Hz] ของ Pulse ที่ส่งให้กับมอเตอร์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ความเร็วมอเตอร์ก็จะเพิ่มสูงขึ้นด้วยพร้อม ๆ กัน
2. จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณขับกับความเร็วนรอบของมอเตอร์ในแต่ละ

โหมต มีความสัมพันธ์ที่อย่างถูกต้องตามที่ได้ตั้งในสมมติฐาน นั่นคือ ในช่วงของความถี่ของสัญญาณที่เท่า ๆ กัน Angular Velocity [rad/s] ของ Stepper motor โหมต Full Step จะมีความเร็วสูงที่สุด ในโหมต Half Step จะมีความเร็วรองลงมา และในโหมต Micro Step จะมีความเร็วต่ำที่สุด ซึ่งอัตราส่วนของความเร็วจะไปเป็นตามการ ทดของ Step ในแต่ละโหมต

อภิปรายผล

1. ความเร็วของมอเตอร์มีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับความถี่ของ Pulse ของ Step เนื่องจาก ความถี่ Pulse ที่สั่งให้กับตัว Stepper Motor คือค่าของความเร็วที่สั่งให้ Phase ภายในของ Stepper Motor มีการเปลี่ยน กล่าวคือ เมื่อ Frequency ของ Pulse ที่สั่ง Step มีค่าสูงขึ้น Phase ของขดลวดที่ได้รับพลังงานภายในมีการเปลี่ยน Phase ที่รวดเร็วมากขึ้น ทำให้ความเร็วของ Stepper Motor สูงขึ้น และในทางกลับกันเมื่อ Frequency ของ Pulse ที่สั่ง Step จะทำให้ ความเร็วของ Stepper Motor ลดลง
2. ความเร็วและ Torque ของ Stepper Motor ในแต่ละโหมตมีค่าที่แตกต่างกันเนื่องจาก ในแต่ละโหมตมีจำนวน Phase ของขดลวดที่ให้พลังงาน และปริมาณของพลังงานที่จ่ายให้กับขดลวด แตกต่างกัน ซึ่งทำให้เกิดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กในการดึงดูด Rotor ที่เปลี่ยนไป Full-Step Mode มีการให้พลังงานกับ Phase ของขดลวด พร้อมกัน 2 ขดลวด ทำให้มีแรงของสนามแม่เหล็กสูง จึงทำให้เกิด Torque และความเร็วในการหมุนของ Rotor ภายในสูง Half-Step Mode มีการให้พลังงานกับ Phase ของขดลวดพร้อมกันสลับ 1 และ 2 ขดลวด ทำให้มีแรงของสนามแม่เหล็กที่ลดลง จึงทำให้ Torque และความเร็วในการหมุนของ Rotor ภายในที่ได้น้อยลง ซึ่งก็ทำนองเดียวกันในมุมของ Micro-Step Drive ที่มี Torque และความเร็วในการหมุนของ Rotor ที่ได้น้อยที่สุด

ข้อเสนอแนะ

1. ในการวัดความเร็วรอบของ Stepper ควรที่จะถอดอุปกรณ์เกี่ยวกับ DC Motor ทั้งหมดออก เพื่อให้สามารถวัดความเร็วรอบของ Stepper Motor เพียงตัวเดียวได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด และไม่มีการสูญเสียพลังงานให้กับระบบอื่น ๆ

อ้างอิง

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

https://en.wikipedia.org/wiki/Stepper_motor

<https://www.orientalmotor.com/stepper-motors/technology/stepper-motor-basics.html>

การทดลองที่ 2 การทดลองเพื่อวิเคราะห์ปัญหา Loss Step ที่เกิดใน Stepper Motor

จุดประสงค์

1. เพื่อวิเคราะห์และหาสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหา Loss Step ใน Stepper Motor
2. เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของการเกิด Loss Step ใน Stepper Motor
3. เพื่อหาวิธีป้องกันการเกิด Loss Step ใน Stepper Motor

สมมติฐาน

1. ปัญหา Loss Step ใน Stepper Motor เกิดจากการใช้งาน Stepper Motor ใน Frequency ที่สูงเกินไป จนทำให้ตัว Rotor ภายใน Stepper Motor ไม่สามารถทำงานตามได้ทัน
2. เมื่อเกิด Loss Step หรือการเสีย Step ใน Stepper มอเตอร์จะทำให้ Stepper Motor ไม่สามารถทำงานต่อได้ Rotor มีการทำงานที่ผิดเพี้ยนและ Angular Velocity [rad/s] ลดลงเหลือ 0 ทันที

ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น:
 - ความถี่ Pulse ในการขับ Stepper Motor ที่เพิ่มขึ้นในแต่ละโหมดการทำงาน
2. ตัวแปรตาม:
 - Angular Velocity [rad/s]
3. ตัวแปรควบคุม:
 - แรงดันไฟฟ้าของทั้งระบบการทำงาน
 - วิธีการเก็บผลการทดลอง (การ Setup การเก็บข้อมูลจาก Simulink)
 - อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การ Loss Step หรือ การเสีย Step ใน Stepper Motor คือการที่ตัว Rotor ภายในของ Stepper ไม่สามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง Rotor กับ Phase ของพลังงานที่จ่ายให้กับขดลวดบริเว Stator มีการทำงานที่ไม่สัมพันธ์กัน

สาเหตุที่ทำให้เกิด Loss Step ใน Stepper Motor

1. Load ที่มากเกินไป: Stepper Motor จะมี Load งานบางอย่างในระหว่างการทำงานปกติอยู่แล้ว เช่น Load ที่ Phase ของ Stator ดึงตัว แต่หากภาระ Load หนักเกินไป และเกินขีดความสามารถของ Stepper Motor จะทำให้เกิดการ Loss Step ได้ ในกรณีนี้ Stepper Motor ไม่สามารถให้แรงบิดเพียงพอในการขับเคลื่อนให้สัมพันธ์กับ Stator ส่งผลให้เกิดการ Loss Step หรือสูญเสียสเต็ป

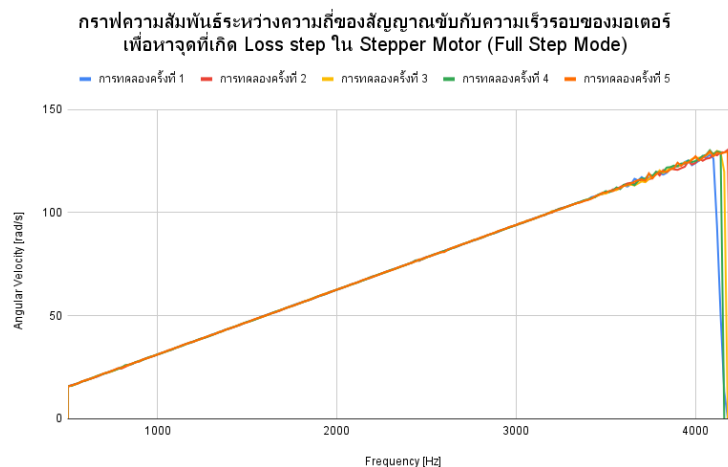
2. แรงดันไฟฟ้าไม่เสถียร: Stepper Motor ต้องการแรงดันไฟฟ้าที่เสถียรในการทำงานมากเนื่องจาก ต้องการความแม่นยำของ Step และ Pulse ต่าง ๆ หาก แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งกำเนิดไม่เสถียร หรือมีการดรอปลในบางจังหวะ ก็ จะทำให้เกิดการ Loss Step ได้

3. ความถี่ Pulse ของ Step ที่มากเกินไป: เมื่อ Pulse ของ Step มีความถี่ที่สูงมาก ทำให้ Phase ของขดลวด ที่มีการให้พลังงาน มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเร็วมาก ๆ ซึ่งในบางจังหวะจะทำให้ การเคลื่อนที่ของ Rotor ภายใน Stepper Motor เคลื่อนที่ตามไม่ทัน จนทำให้เกิด Loss Step

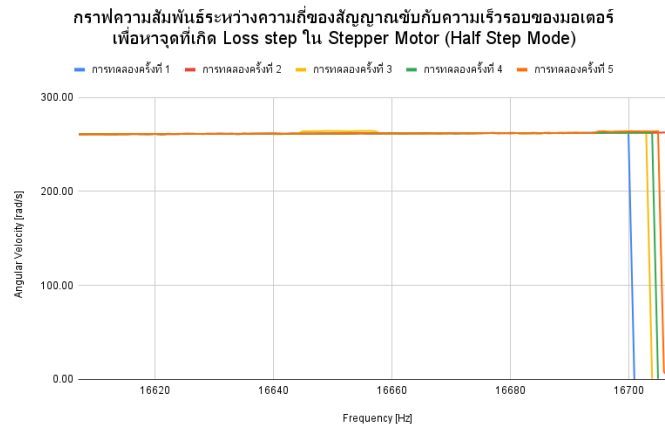
ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ทำการ Set up อุปกรณ์การทดลองทั้งหมดตาม Instruction
2. ตั้งค่า Low-pass filter เพื่อใช้สำหรับการกรองสัญญาณ Angular Velocity ของ Stepper Motor
3. ทำการทดลองเพิ่มค่าความถี่ Pulse ในการขับ Stepper Motor โดยทดลองค่อย ๆ เพิ่มขึ้นทีละ 1 Hz ในทุก ๆ 1 วินาที เพิ่มไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะเกิด Loss Step
4. นำผลการทดลองที่เก็บได้มาทำการวิเคราะห์ และอภิปรายผล

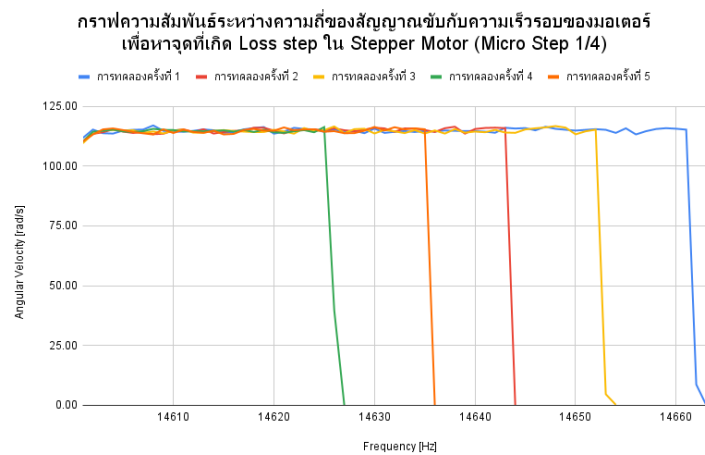
ผลการทดลอง



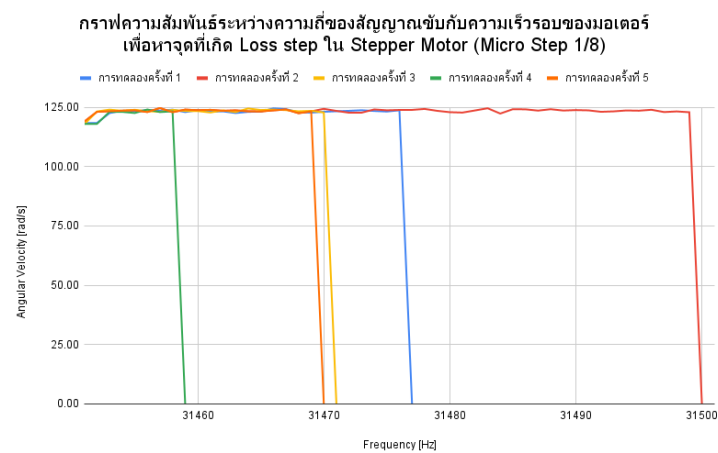
รูปที่ 10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณขับกับความเร็วรอบของมอเตอร์ เพื่อหาจุดที่เกิด Loss step ใน Stepper Motor (Full Step Mode)



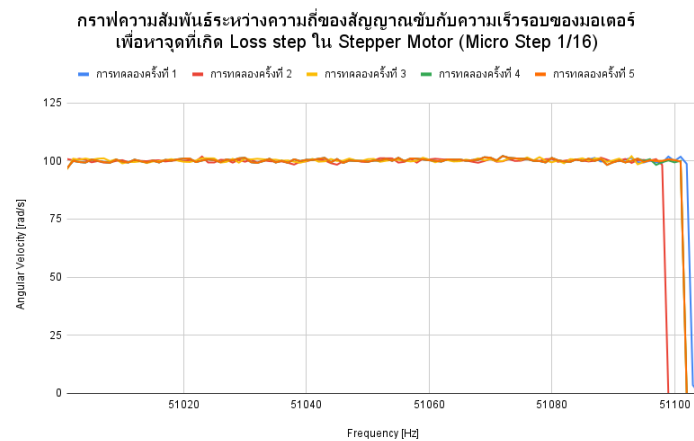
รูปที่ 11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณเข้ากับความเร็วรอบของมอเตอร์ เพื่อหาจุดที่เกิด Loss step ใน Stepper Motor (Half Step Mode)



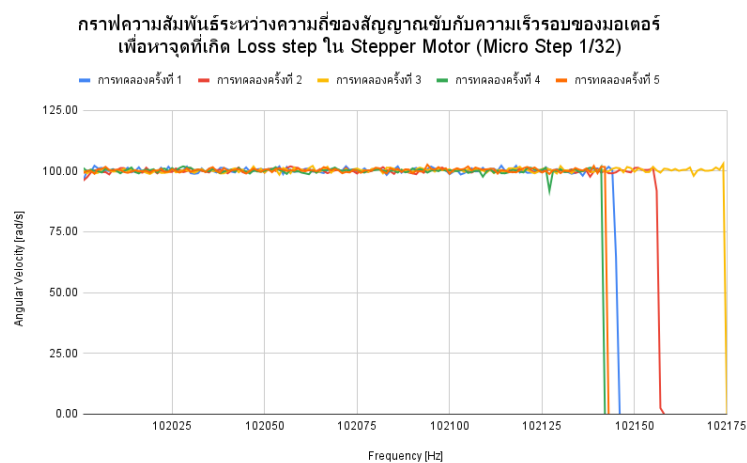
รูปที่ 12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณเข้ากับความเร็วรอบของมอเตอร์ เพื่อหาจุดที่เกิด Loss step ใน Stepper Motor (Micro Step 1/4 Mode)



รูปที่ 13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณเข้ากับความเร็วรอบของมอเตอร์ เพื่อหาจุดที่เกิด Loss step ใน Stepper Motor (Micro Step 1/8 Mode)



รูปที่ 14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณเข้ากับความเร็วรอบของมอเตอร์ เพื่อหาจุดที่เกิด Loss step ใน Stepper Motor (Micro Step 1/16 Mode)



รูปที่ 15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณเข้ากับความเร็วรอบของมอเตอร์ เพื่อหาจุดที่เกิด Loss step ใน Stepper Motor (Micro Step 1/32 Mode)

ช่วงความถี่ของ Pulse ที่เกิด Loss Step ใน Drive Mode ต่าง ๆ

- Full-Step Mode Drive (4160 - 4220 Hz)
- Half-Step Mode Drive (16701 - 16708 Hz)
- Micro-Step Mode Drive (1/4) (14627 - 14663 Hz)
- Micro-Step Mode Drive (1/8) (31459 - 31500 Hz)
- Micro-Step Mode Drive (1/16) (51100 - 51104 Hz)
- Micro-Step Mode Drive (1/32) (102142 - 102175 Hz)

สรุปผลการทดลอง

- จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าในแต่ละโหมดมีการเกิด Loss Step ในช่วงของความเร็ว Pulse ที่แตกต่างกัน ซึ่ง Full-Step Mode Drive จะเกิด Loss Step ในช่วงความเร็วที่น้อยที่สุด และจะมากที่สุด ใน Micro-Step Mode Drive (1/32)

อภิปรายผล

- สาเหตุที่ทำให้เกิด Loss Step เมื่อความเร็วของ Pulse ใน Stepper Motor เพิ่มขึ้นเกิดจากการที่ Phase ที่จ่ายพลังงานให้กับขดลวด ภายใน Stepper Motor มีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วมากเกินไป จนทำให้ Rotor ที่อยู่ภายใน Stepper Motor ไม่สามารถหมุนหรือเคลื่อนที่ตามได้ทัน ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ที่ไม่สัมพันธ์กันระหว่าง Rotor และ Phase ของ Stator
- Loss Step ในแต่ละ Drive Mode เกิดในช่วง Angular Velocity 100-125 [rad/s] ซึ่งเป็นช่วงเดียวกันทั้งหมด ยกเว้น Half-Step Mode Drive สาเหตุในช่วงความเร็วที่กว้างผิดปกติ เพราะโหมด Half-Step มีการสลับจ่ายไฟระหว่าง 1 เฟส และ 2 เฟส ทำให้เกิด แรงบิดที่ไม่เท่ากัน ในแต่ละช่วง ส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนสะสมรุนแรงจนมอเตอร์หลุดสแต็ปต่อเนื่องเป็นย่านความเร็วที่กว้างกว่าโหมดอื่น

ข้อเสนอแนะ

1. การทดลองเพื่อหา Loss Step ใน Stepper Motor ต้องใช้การค่อย ๆ เพิ่มค่า Pulse ของ Step ที่ Drive Stepper Motor ไม่ควรเพิ่มความเร็วของ Pulse สูงเกินไปในช่วงเวลาสั้น ๆ เพราะจะทำให้เกิด Loss Step ในทันที เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงของ Pulse ของความเร็ว ที่เร็วเกินไป

อ้างอิง

<https://en.eeworld.com.cn/news/qrs/eic690584.html>

<https://www.omc-stepperonline.com/support/why-is-my-stepper-motor-skipping-steps-and-how-to-deal-with-it#:~:text=Due%20to%20the%20inertia%20of,it%20will%20lose%20the%20step.>

LAB 2.3 : Brushless DC Motor

การทดลองที่ 1 การขับเคลื่อนแบบ 6-Step (Trapezoidal) โดยใช้ BEMF

จุดประสงค์

1. เพื่อศึกษาและทำความเข้าใจหลักการทำงานของ BLDC Motor ภายใต้การควบคุมแบบ 6-Step (Trapezoidal)
2. เพื่อวิเคราะห์ Waveform และคุณลักษณะของสัญญาณ Back EMF
3. เพื่อพิสูจน์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ BEMF กับความเร็วและทิศทางการหมุนของมอเตอร์
4. เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการเรียงลำดับ Phase กับทิศทางการหมุนของมอเตอร์

สมมติฐาน

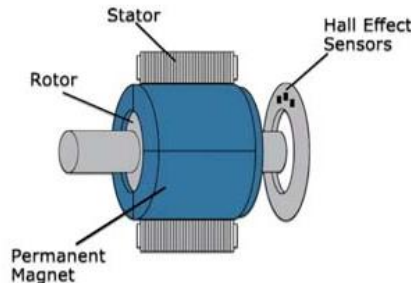
1. รูปคลื่น BEMF ที่วัดได้จะมีลักษณะใกล้เคียงกับสี่เหลี่ยมคางหมู
2. ความถี่ของสัญญาณ BEMF จะแปรผันตรงกับความเร็วมอเตอร์
3. ลำดับเฟสของ BEMF จะเปลี่ยนไปเมื่อมอเตอร์หมุนกลับทิศ

ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น :
 - ความเร็วมอเตอร์
 - ทิศทางการหมุนของมอเตอร์
2. ตัวแปรตาม :
 - แอมพลิจูด ความถี่ และ Phase shift ของทั้ง 3 เฟส
 - ความถี่ของสัญญาณ
3. ตัวแปรควบคุม :
 - แรงดันอินพุต
 - รูนมอเตอร์
 - ชุดคอนโทรลเลอร์ (โหมด 6-Step)

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- BLDC Motor (Brushless Motor) คือ มอเตอร์ที่ไม่มีแปรงถ่าน (Brushes) ซึ่งทำหน้าที่ส่งกระแสไฟฟ้าไปยังขดลวดภายในมอเตอร์เพื่อให้เกิดการหมุน โดยมอเตอร์ไร้แปรงถ่านจะใช้ระบบแม่เหล็กถาวรและสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ในการควบคุมการหมุนของมอเตอร์แทนที่แปรงถ่าน



รูปที่ 16 Brushless Motor

- หลักการของสัญญาณ 3 เฟส ใน BLDC Motor จะมีขดลวดทั้งหมด 3 ชุด (U, V, W) การจ่ายไฟ 3 เฟสทำให้เกิด “สนามแม่เหล็กหมุน (Rotating Magnetic Field - RMF)”

1. เมื่อไฟเข้าเฟส A --> แม่เหล็กถูกดึงไปที่ขดลวด A
2. เมื่อไฟเข้าเฟส B (ต่อจาก A) --> แม่เหล็กถูกดึงให้หมุนตามไปที่ขดลวด B
3. เมื่อไฟเข้าเฟส C (ต่อจาก B) --> แม่เหล็กถูกดึงหมุนต่อไปที่ขดลวด C

การไล่ลำดับแบบนี้ (A --> B --> C) อย่างต่อเนื่อง ทำให้โรเตอร์หมุนตามสนามแม่เหล็กไปเรื่อยๆ

- Hall Effect Sensor and Back Emf Sensing

- Hall Effect Sensor - โดยทั่วไปมอเตอร์ BLDC จะใช้ เซ็นเซอร์ Hall Effect สามตัว ซึ่งวางตำแหน่ง ห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า รอบๆ สเตเตอร์ การกำหนดค่านี้ช่วยให้มั่นใจได้ว่าตำแหน่งของโรเตอร์จะได้รับการตรวจสอบอย่างต่อเนื่องตลอดการหมุนเต็มจำนวน โดยหลักการทำงานคือ เมื่อแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่ผ่าน เซ็นเซอร์ สนามแม่เหล็กจะกระตุ้นให้เซ็นเซอร์ส่งสัญญาณ Logic (0 or 1) ออกมา และ Controller จะอ่านค่าจากเซ็นเซอร์ทั้ง 3 ตัว เช่น 1-0-1 เพื่อดูว่าโรเตอร์อยู่ที่มุมไหน แล้วสั่งจ่ายไฟ
- Back Emf Sensing - อาศัยปรากฏการณ์ Electromotive Force (EMF) โดยเมื่อมอเตอร์หมุน สนามแม่เหล็กจะตัดผ่านขดลวดทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Back EMF) โดยหลักการทำงานคือ ในระบบ 3 เฟส จะมีการจ่ายไฟแค่ 2 เฟสเสมอ อีก 1 เฟสจะถูกปล่อยลอย (Floating Phase) โดยวงจรจะวัดแรงดันเฟสลอยนี้ เพื่อหาจุดที่แรงดันตัดผ่านศูนย์กลาง เรียกว่า Zero Crossing Point (ZCP) ซึ่งจะบอกว่า จะต้องสลับเฟสในอีก 30 องศา โดยจะสั่งให้ Controller หน่วงเวลารอให้โรเตอร์หมุนไปอีก 30 องศาแล้วสั่งให้สลับเฟส
- ความแตกต่างระหว่าง Hall Effect Sensor และ Back Emf Sensing

คุณสมบัติ	Hall Effect Sensor	Back EMF
-----------	--------------------	----------

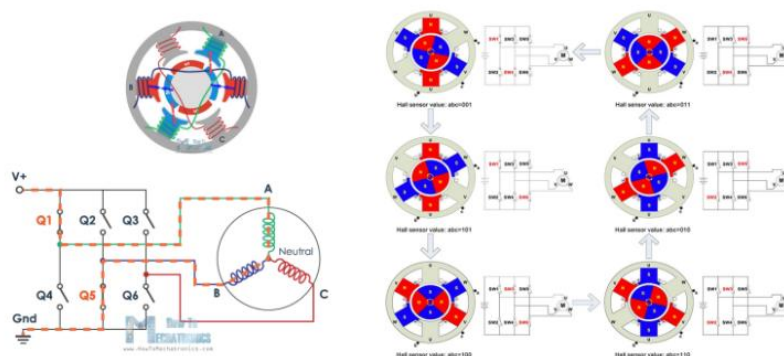
หลักการทำงาน	เป็นวิธีการทาง "กายภาพ" ใช้ตัวตรวจจับแม่เหล็ก (Hall Sensor) ฝังอยู่ที่ตัวมอเตอร์เพื่ออ่านตำแหน่งขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์โดยตรง	เป็นวิธีการทาง "ไฟฟ้า" ใช้วงจรวัดแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (Voltage) ที่เกิดขึ้นในขดลวดขณะหมุนเพื่อคำนวณหาตำแหน่ง
การทำงาน	ทำงานได้ดีแม้มอเตอร์กำลังหมุนด้วยความเร็วต่ำ	ทำงานไม่ได้ที่ความเร็วต่ำ เพราะแรงดัน Back EMF จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมอเตอร์หมุนเร็วพอเท่านั้น
ฮาร์ดแวร์และการเดินสายไฟ	ต้องมีสายไฟเพิ่มอีก 5 เส้น (ไฟเลี้ยง, GND, และสัญญาณ A, B, C) รวมกับสายมอเตอร์หลัก 3 เส้น เป็นทั้งหมด 8 เส้น	ใช้สายไฟมอเตอร์หลักแค่ 3 เส้น (U, V, W) ต่อเข้ากับบอร์ดควบคุมได้เลย
ความซับซ้อนของโปรแกรมควบคุม	เขียนโปรแกรมง่ายกว่า เพราะสัญญาณที่ได้เป็น Digital (0 หรือ 1) ที่บอกตำแหน่งชัดเจน ไม่ต้องคำนวณซับซ้อน	ซับซ้อนกว่ามาก ต้องใช้วงจรเปรียบเทียบแรงดัน (Comparator), ต้องมีการกรองสัญญาณรบกวน (Filter Noise), และต้องคำนวณการหน่วงเวลา 30 องศาหลังจากเจอจุดตัดศูนย์ (Zero Crossing) รวมถึงต้องเขียนอัลกอริทึมพิเศษสำหรับการออกตัว
ความทนทานและราคา	ต้นทุนสูงกว่า และมีโอกาสเสียได้ง่ายกว่าถ้ามอเตอร์ร้อนหรือมีความชื้น เพราะเซนเซอร์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	ต้นทุนต่ำ ใช้แค่มอเตอร์เปล่าๆ และทนทานมาก เหมาะกับงานที่ต้องเจอสภาพแวดล้อมแย่ ๆ

ตารางที่ 2 ตารางเปรียบเทียบ Hall Effect Sensor กับ Back EMF

- หลักการของการขับเคลื่อนแบบ 6 Step – ในหนึ่งรอบทางไฟฟ้า (360 องศา) จะแบ่งช่วงออกเป็น 6 ช่วง ช่วงละ 60 องศา โดยในแต่ละ Step จะจ่ายไฟขดลวดเพียง 2 เฟสเท่านั้น และจะมี 1 เฟสที่ถูกปล่อยลอย (Floating) เสมอ วงจรขับเคลื่อนประกอบด้วยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ (MOSFET) 6 ตัว แบ่งเป็น ตัวบน (High-side) ที่ต่อกับไฟบวก และตัวล่าง (Low-side) ที่ต่อกับกราวด์

Brushless DC Motor – Working principle

Coil exciting sequences using a electrical switch



รูปที่ X หลักการขับเคลื่อนแบบ 6-Step

ใน 1 Step จะมีเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น 3 อย่าง คือ

- 1.High-side ON (1 ตัว): จ่ายกระแสไฟเข้าเฟสหนึ่ง (เช่น เฟส U)
- 2.Low-side ON (1 ตัว): ดึงกระแสไฟออกจากอีกเฟสหนึ่งลงกราวด์ (เช่น เฟส V)

3. OFF (1 เฟส): เฟสที่เหลือ (เช่น เฟส W) ไม่มีการจ่ายไฟ (ลอยอยู่) ใช้ตรวจจับ Back EMF

- ตารางการทำงาน 6 จังหวะ

ตารางที่ 3

- หลักการของการควบคุมแบบ FOC – เป็นวิธีการควบคุมขั้นสูงที่ควบคุมสนามแม่เหล็กและกระแสของมอเตอร์เพื่อให้ได้การทำงานที่ราบรื่นและมีประสิทธิภาพ โดยหลักการทำงานคือ จัดแนวกระแสของสเตเตอร์ให้ตรงกับสนามแม่เหล็ก

Step	ไฟเข้า (+Vcc)	ไฟออก (GND)	เฟสที่ลอย (Float)	ทิศทางสนามแม่เหล็ก (องศา)
1	U	V	W	0
2	U	W	V	60
3	V	W	U	120
4	V	U	W	180
5	W	U	V	240
6	W	V	U	300

ของโรเตอร์เพื่อปรับความเร็วและควบคุมแรงบิดให้เหมาะสม

ส่วนประกอบของ FOC ในมอเตอร์ BLDC

- การแปลง Clarke Transform คือการแปลงกระแส 3 เฟส (a,b,c) ให้กลายเป็น 2 แกน (α, β)
- แปลง Park Transform คือการนำตำแหน่งโรเตอร์มาคำนวณเพื่อแปลงแกน α, β ให้หมุนตามโรเตอร์ ไปเป็นแกน d,q ขึ้นตอนนี้ทำให้กระแสสามเฟส (AC) กลายเป็นค่าคงที่ (DC)
- ควบคุมด้วย PID (PI Controllers) ควบคุมกระแสแกน d และ q โดยเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงกับกระแสมอเตอร์จริง ตัวควบคุม PI จะปรับการมอดูเลตความกว้างพัลส์ (PWM) เพื่อรักษาระดับกระแสไฟที่ต้องการ
- แปลงกลับ นำค่าแรงดัน DC แปลงย้อนกลับกระบวนการเดิมให้กลายเป็นสัญญาณ AC 3 เฟส
- สร้างสัญญาณด้วย SVM นำค่าที่ได้ไปสร้างสัญญาณ PWM ขั้นสูงที่เรียกว่า SVPWM เพื่อขับ Inverter ให้จ่ายไฟเข้ามอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

- ข้อดี-ข้อเสียของ 6-Step และ FOC

คุณสมบัติ	6-Step (Trapezoidal)	FOC (Field Oriented Control)
รูปคลื่นกระแส	สี่เหลี่ยม (Block)	ไซน์ (Sine Wave)
การหมุน	มีแรงกระตุก (Ripple)	ราบเรียบมาก (Smooth) ไม่มีกระตุก
เสียงการทำงาน	มีเสียงดังเล็กน้อย	เสียงเงียบ
ประสิทธิภาพ	ต่ำกว่า มีการสูญเสียพลังงาน	สูงกว่า
ความซับซ้อน	ง่าย ใช้ MCU 8-bit ได้	ยาก ต้องใช้ MCU 32-bit
การตอบสนอง	ปานกลาง	เร็วมาก

ตารางที่ 4

- สัญญาณ BEMF แบบ Trapezoidal ประกอบด้วยโครงสร้างดังนี้

1. ช่วงยอตราเรียบ

- ลักษณะสัญญาณ: แรงดันพุ่งขึ้นสู่จุดสูงสุดแล้ว "รักษาระดับคงที่" เป็นเส้นตรงแนวนอน
- สาเหตุทางกายภาพ:
 - แม่เหล็กถาวร (Rotor Magnets): ถูกออกแบบและจัดวางให้มีความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Flux Density) สม่ำเสมอเป็นบริเวณกว้าง ตลอดหน้าสัมผัสของขั้วแม่เหล็ก
 - ขดลวด (Stator Windings): มีการพันแบบ Concentrated Winding (พันกระจุกอยู่ในร่อง Slot เดียว) ไม่ได้กระจายตัว

2. ช่วงขอบลาดเอียง

- ลักษณะสัญญาณ: ช่วงรอยต่อที่แรงดันเปลี่ยนจากบวกไปลบ (หรือลบไปบวก) จะมีความชันเป็นเส้นตรง (Linear Slope)
- สาเหตุทางกายภาพ:
 1. เกิดจากช่วง "ช่องว่างระหว่างขั้วแม่เหล็ก (Inter-polar gap)" บนโรเตอร์ ขณะที่ขดลวดกำลังเคลื่อนที่ออกจากขั้วแม่เหล็กขั้วหนึ่ง (เช่น ขั้ว N) เพื่อเข้าไปยังอีกขั้วหนึ่ง (เช่น ขั้ว S) ความเข้มของสนามแม่เหล็กจะค่อยๆ เปลี่ยนกลับทิศทางอย่างเป็นเชิงเส้น

- การแปลงคาบเป็นความถี่:

$$f = \frac{1}{T}$$

- การแปลงความถี่เป็นความเร็วการหมุนของมอเตอร์:

$$N_{RPM} = \frac{60 \times f}{P}$$

ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนของชุดที่ 1

1. set up อุปกรณ์ตาม instruction
2. สั่งให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็ว 1000 RPM
3. สังเกตและเก็บภาพสัญญาณของมอเตอร์จาก Oscilloscope
4. เพิ่มความเร็วของมอเตอร์อีก 1000 RPM และทำซ้ำขั้นตอนที่ 3
5. ทำข้อที่สี่ซ้ำอีก จนมอเตอร์มีความเร็วถึง 5000 RPM
6. ทำซ้ำข้อ 2-5 อีกสองครั้ง

ขั้นตอนของชุดที่ 2

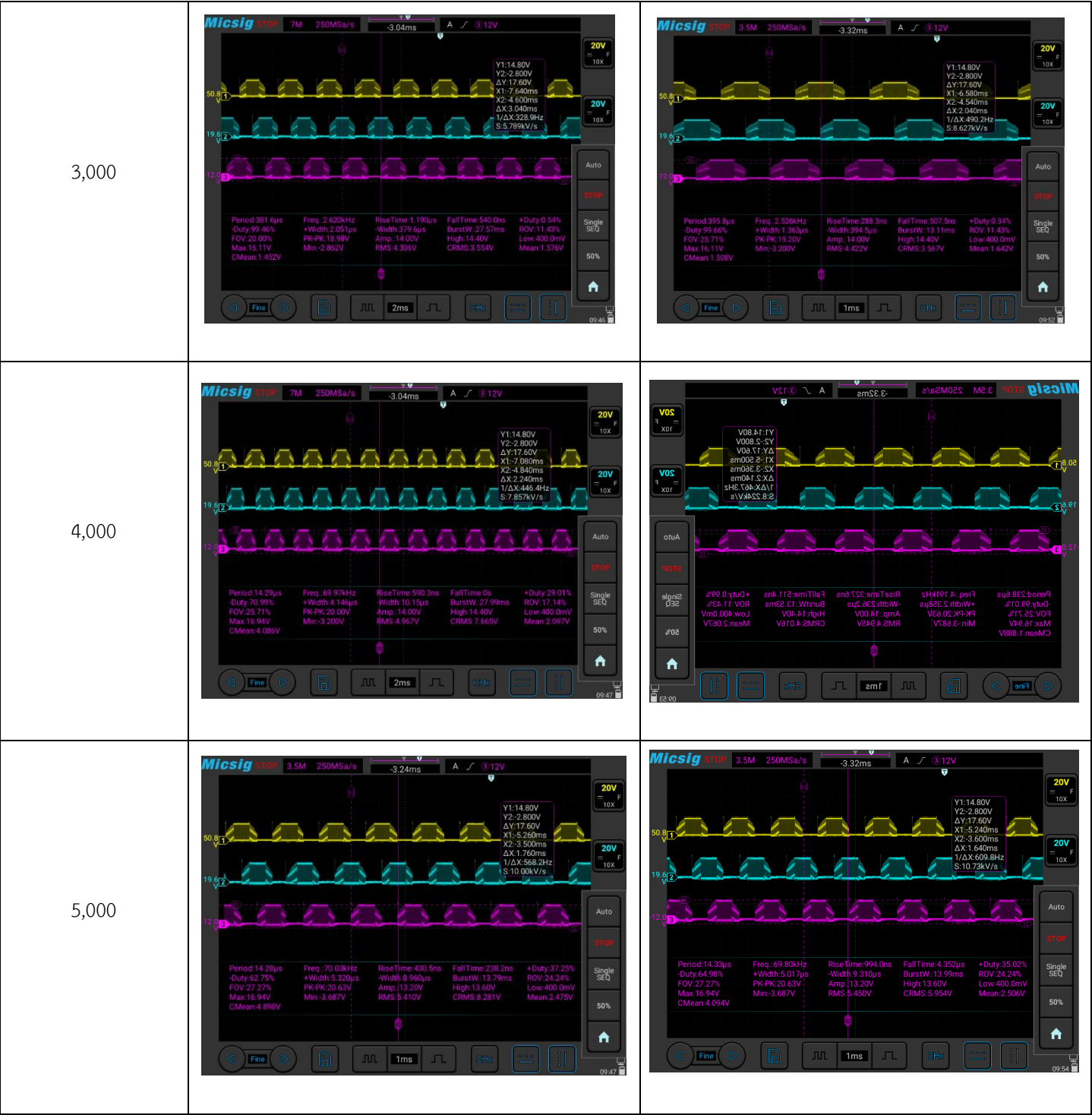
1. set up อุปกรณ์ตาม instruction
2. สั่งให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็ว 1500 RPM
3. สังเกตและเก็บภาพสัญญาณของมอเตอร์จาก Oscilloscope

4. สั่งให้มอเตอร์หมุนกลับด้าน
5. สังเกตและเก็บภาพสัญญาณของมอเตอร์จาก Oscilloscope
6. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2-5 โดยเพิ่มความเร็วมอเตอร์เป็น 3500 RPM
7. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2-5 โดยเพิ่มความเร็วมอเตอร์เป็น 5000 RPM

ผลการทดลอง (สิ่งที่เกิดขึ้นจริงในการทดลอง)

- ผลการทดลองของชุดที่ 1

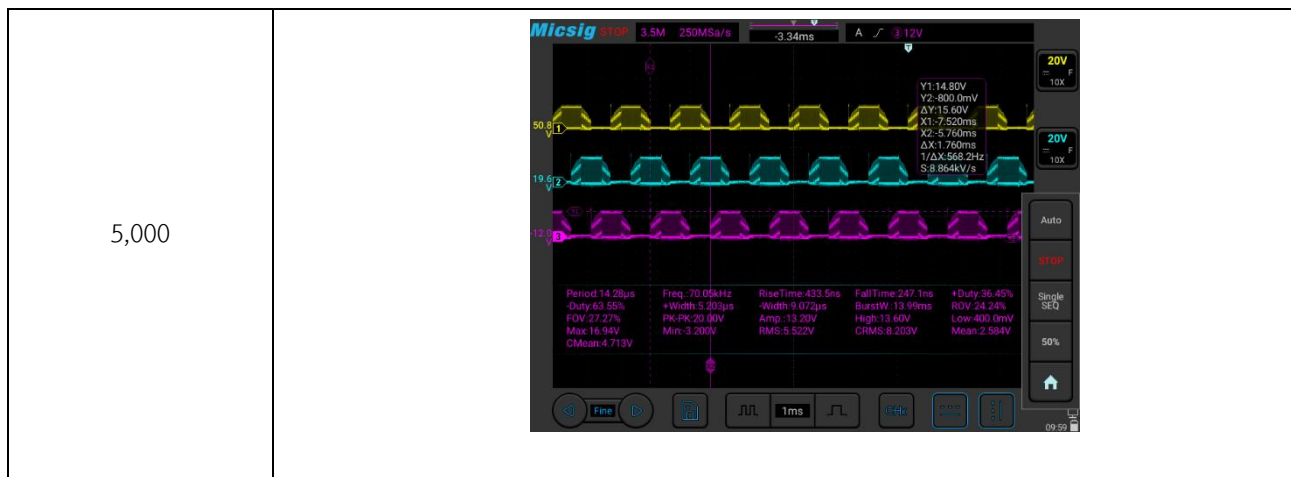
Speed Motor(RPM)	กราฟสัญญาณมอเตอร์จาก Oscilloscope (ครั้งที่ 1)	กราฟสัญญาณมอเตอร์จาก Oscilloscope (ครั้งที่ 2)
1,000		
2,000		



ตารางที่ 5

Speed Motor(RPM)	กราฟสัญญาณมอเตอร์จาก Oscilloscope (ครั้งที่ 3)
------------------	--

1,000	<p>Y1:14.80V Y2:-2.800V ΔY:17.60V X1:-9.060ms X2:-3.980ms ΔX:5.080ms 1/ΔX:196.9Hz S:3.465kV/s</p> <p>Period:1.082ms Duty:99.91% FOV:14.25% Max:15.20V CMean:6.913mV</p> <p>Freq.:924.4Hz +Width:983.5ns PK-PK:16.80V Min:-1.600V</p> <p>RiseTime:427.5ns -Width:1.081ms Amp.:14.00V RMS:2.976V</p> <p>FallTime:502.4ns BurstW:11.80ms High:14.40V CRMS:2.614V</p> <p>+Duty:0.99% ROV:5.71% Low:400.0mV Mean:673.8mV</p>
2,000	<p>Y1:14.80V Y2:-2.800V ΔY:17.60V X1:-8.820ms X2:-5.820ms ΔX:3.000ms 1/ΔX:333.3Hz S:5.867kV/s</p> <p>Period:610.2μs Duty:99.73% FOV:25.71% Max:16.11V CMean:1.041V</p> <p>Freq.:1.639kHz +Width:1.633μs PK-PK:19.20V Min:-3.200V</p> <p>RiseTime:291.1ns -Width:668.4ps Amp.:14.00V RMS:3.555V</p> <p>FallTime:543.3ns BurstW:13.03ms High:14.40V CRMS:3.137V</p> <p>+Duty:0.27% ROV:11.43% Low:400.0mV Mean:1.099V</p>
3,000	<p>Y1:14.80V Y2:-2.800V ΔY:17.60V X1:-8.420ms X2:-5.680ms ΔX:2.740ms 1/ΔX:365.0Hz S:6.423kV/s</p> <p>Period:14.30μs Duty:77.50% FOV:20.00% Max:16.11V CMean:3.024V</p> <p>Freq.:69.94kHz +Width:3.047μs PK-PK:18.96V Min:-2.862V</p> <p>RiseTime:518.0ns -Width:11.06μs Amp.:14.00V RMS:4.438V</p> <p>FallTime:263.3ns BurstW:13.99ms High:14.40V CRMS:6.731V</p> <p>+Duty:22.70% ROV:11.43% Low:400.0mV Mean:1.662V</p>
4,000	<p>Y1:14.80V Y2:-2.800V ΔY:17.60V X1:-7.620ms X2:-5.460ms ΔX:2.160ms 1/ΔX:463.0Hz S:8.148kV/s</p> <p>Period:193.3μs Duty:96.74% FOV:25.71% Max:16.94V CMean:1.629V</p> <p>Freq.:5.173kHz +Width:2.43μs PK-PK:19.80V Min:-3.200V</p> <p>RiseTime:274.2ns -Width:190.5μs Amp.:14.00V RMS:4.935V</p> <p>FallTime:536.7ns BurstW:13.44ms High:14.40V CRMS:3.766V</p> <p>+Duty:1.26% ROV:11.43% Low:400.0mV Mean:2.062V</p>



ตารางที่ 6

- การทดลองครั้งที่ 1

Speed Motor (RPM)	คาบ (ms)	ความถี่ (Hz)	ความเร็วการหมุนของมอเตอร์จากการคำนวณ (RPM)
1000	8.24	121.36	1040.23
2000	4.48	223.21	1913.23
3000	2.74	364.96	3128.23
4000	2.16	462.96	3968.23
5000	1.76	568.18	4870.11

ตารางที่ 7

- การทดลองครั้งที่ 2

Speed Motor (RPM)	คาบ (ms)	ความถี่ (Hz)	ความเร็วการหมุนของมอเตอร์จากการคำนวณ (RPM)
1000	7.82	127.88	1096.11
2000	4.20	238.10	2040.86
3000	2.04	490.20	4201.71
4000	2.14	467.29	4005.34
5000	1.64	609.76	5226.51

ตารางที่ 8

- การทดลองครั้งที่ 3

Speed Motor (RPM)	คาบ (ms)	ความถี่ (Hz)	ความเร็วการหมุนของมอเตอร์จากการคำนวณ (RPM)
1000	7.80	128.21	1098.94
2000	4.36	229.36	1965.94
3000	3.04	328.95	2819.57
4000	2.24	446.43	3826.54
5000	1.76	568.18	4870.11



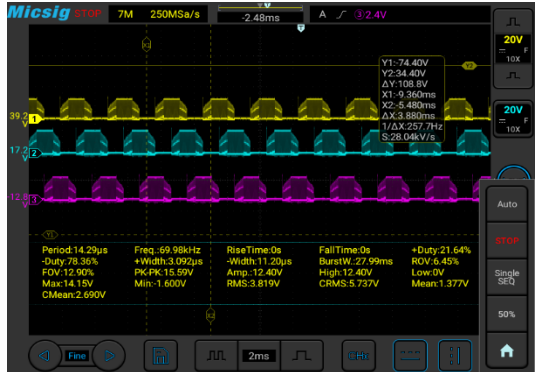
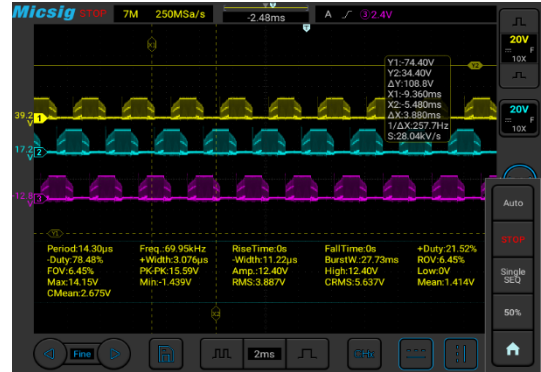
ตารางที่ 9

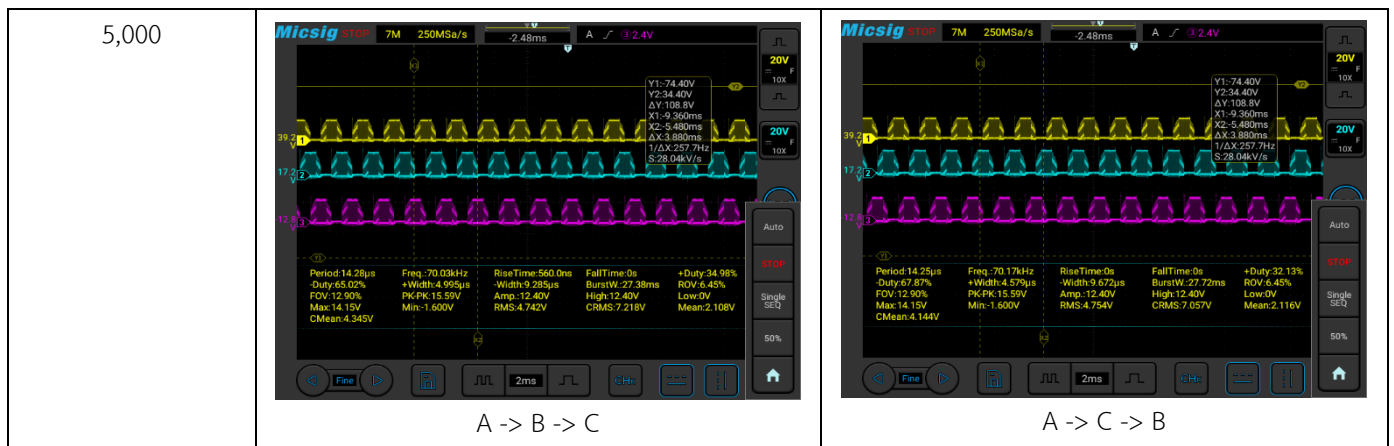
- ค่าเฉลี่ย

Speed Motor (RPM)	คาบ (ms)	ความถี่ (Hz)	ความเร็วการหมุนของมอเตอร์จากการคำนวณ (RPM)
1000	7.95	125.79	1078.17
2000	4.35	229.89	1970.44
3000	2.67	374.53	3210.27
4000	2.18	458.72	3931.85
5000	1.72	581.40	4983.39

ตารางที่ 10

- ผลการทดลองของชุดที่ 2

Speed Motor (RPM)	กราฟสัญญาณเมื่อมอเตอร์หมุนทิศ CW	กราฟสัญญาณเมื่อมอเตอร์หมุนทิศ CCW
1,500	 <p>A -> B -> C</p>	 <p>A -> C -> B</p>
3,500	 <p>A -> B -> C</p>	 <p>A -> C -> B</p>



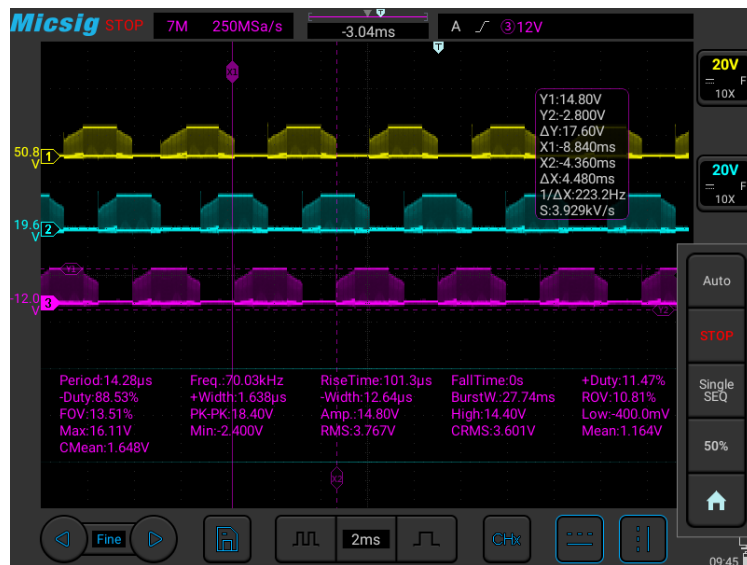
ตารางที่ 11

สรุปผลการทดลอง (อธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นในการทดลอง)

- จากการทดลองสัญญาณจากเฟส A, B และ C ไม่ได้เกิดขึ้นพร้อมกัน แต่มีการเลื่อนเฟส (Phase Shift) เกิดขึ้นตามลำดับเวลา โดยแต่ละเฟสมีมุมต่างเฟสห่างกันเท่ากับ 120 องศาทางไฟฟ้า หรือคิดเป็นเวลาเท่ากับ 1 ใน 3 ของคาบเวลาการหมุน
- จากผลการทดลองชุดที่ 1 พบว่า เมื่อเราเพิ่มความเร็วให้กับมอเตอร์ (RPM) ความถี่ของสัญญาณที่จะเพิ่มขึ้นตามอย่างมีนัยสำคัญ
- จากผลการทดลองชุดที่ 2 พบว่า เมื่อมีการสลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์จะส่งผลให้ลำดับของสัญญาณเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยเมื่อมอเตอร์หมุนไปทางทิศ CW ลำดับของสัญญาณจะเรียงตัวเป็น A -> B -> C และเมื่อมอเตอร์หมุนไปทางทิศ CCW ลำดับของสัญญาณจะเรียงตัวเป็น A -> C -> B และต่อให้มีการเปลี่ยนความเร็วและลองกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ พฤติกรรมของสัญญาณที่วัดจากมอเตอร์ก็ยังคงเหมือนเดิมในทุก ๆ ความเร็ว

อภิปรายผล (วิเคราะห์สิ่งที่เกิดขึ้นในการทดลอง)

จากการทดลองพบว่าสัญญาณ Back EMF ของทั้ง 3 เฟส (เส้นสีเหลือง, ฟ้า, ม่วง บนหน้าจอ) ปรากฏขึ้นในเวลาที่ไม่เท่ากัน เกิดจากโครงสร้างทางกายภาพของสเตเตอร์ (Stator) ที่มีการจัดวางกลุ่มขดลวดทั้ง 3 ชุด (Phase A, B, C) ให้ทำมุมห่างกัน 120 องศาในเชิงกลรอบแกนหมุน



โดยเราสามารถพิสูจน์ว่ามุมต่างเฟสมีค่า 120 องศาจริง โดยคำนวณจากคาบเวลา (Period) ดังนี้:

จากการวัดคาบเวลา 1 รอบของสัญญาณมีค่าเท่ากับ 4.48 ms ซึ่งเมื่อนำไปคำนวณตามทฤษฎี ระยะห่างเฟส ควรเป็น 120 องศา หรือ 1/3 ของคาบเวลา ดังนั้น $4.48/3$ ประมาณ 1.49 ms เมื่อพิจารณาระยะห่างระหว่างจุดเริ่มต้นของลูกคลื่นสีเหลือง ไปยังลูกคลื่นสีฟ้า พบว่ามีระยะห่างประมาณ 1.49 ms ซึ่งตรงกับค่าที่คำนวณได้ ดังนั้นยืนยันได้ว่าสัญญาณจากมอเตอร์มีการเลื่อนเฟส 120 องศาทางไฟฟ้า

จากการทดลองชุดที่ 1 เมื่อเราเพิ่มความเร็วให้กับมอเตอร์และวัดคาบของสัญญาณจาก Oscilloscope แล้ว เราได้ทำการนำคาบที่วัดได้ไปคำนวณเป็นความถี่ เพื่อดูแนวโน้มการแปรผันกันระหว่างความเร็วการหมุนของมอเตอร์ (RPM) กับ ความถี่ของสัญญาณ (Hz) โดยความถี่ที่ได้จากการคำนวณมีค่าดังนี้ 1000 RPM – ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 125.79 Hz, 2000 RPM ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 229.89 Hz, 3000 RPM ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 374.53 Hz, 4000 RPM ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 458.72 Hz, 5000 RPM ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 581.40 Hz จากผลการทดลองนี้พบว่า ความเร็วการหมุนของมอเตอร์จะแปรผันตรงกับ ความถี่ของสัญญาณอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อนำความถี่ที่คำนวณได้ไปคำนวณเพื่อหาความเร็วการหมุนของมอเตอร์จะมีค่าดังนี้ ที่ความถี่ 125.79 Hz ความเร็วการหมุนของมอเตอร์มีค่า 1078.17 RPM, ที่ความถี่ 229.89 Hz ความเร็วการหมุนของมอเตอร์มีค่า 1970.44 RPM, ความถี่ 374.53 Hz ความเร็วการหมุนของมอเตอร์มีค่า 3210.27 RPM, ความถี่ 458.72 Hz ความเร็วการหมุนของมอเตอร์มีค่า 3931.85 RPM, ความถี่ 581.40 Hz ความเร็วการหมุนของมอเตอร์มีค่า 4983.39 RPM ซึ่งค่าที่คำนวณมีความใกล้เคียงกับค่าจริงที่มอเตอร์หมุนและบางครั้งค่าที่คำนวณได้อาจมีความคลาดเคลื่อนซึ่งเกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัย เช่น แอปพลิเคชันที่ใช้มีข้อจำกัดด้านการคุมความเร็วการหมุนของมอเตอร์ หรือ อาจเกิดจากมอเตอร์ที่ทำงานไม่เต็มประสิทธิภาพ เป็นต้น

จากการทดลองชุดที่ 2 เมื่อสั่งให้มอเตอร์หมุนทางทิศ CW พบว่า การเรียงลำดับของสัญญาณจะเรียงเป็น A -> B -> C และเมื่อมอเตอร์หมุนไปทางทิศ CCW ลำดับของสัญญาณจะเรียงตัวเป็น A -> C -> B โดยต่อให้เปลี่ยนความเร็วเพื่อลองพิสูจน์ว่าความเร็วไม่ส่งผลต่อลำดับของสัญญาณพบว่า ต่อให้เปลี่ยนความเร็ว การหมุนของมอเตอร์

พฤติกรรมของการเรียงลำดับสัญญาณยังคงเป็นเหมือนเดิมคือ เมื่อมอเตอร์หมุนไปทางทิศ CW ลำดับของสัญญาณจะเรียงตัวเป็น A -> B -> C และเมื่อมอเตอร์หมุนไปทางทิศ CCW ลำดับของสัญญาณจะเรียงตัวเป็น A -> C -> B

ข้อเสนอแนะ

- แอปพลิเคชันที่ใช้สำหรับคุม BLDC Motor ไม่สามารถกรอกเลขเพื่อเปลี่ยนความเร็วได้ ต้องใช้เมาท์เลื่อนเท่านั้น ส่งผลให้การควบคุมความเร็วมอเตอร์มีความคลาดเคลื่อน ส่งผลให้เมื่อทำการวัดสัญญาณและคำนวณความเร็วออกมาแล้วไม่ได้เท่ากันทุกรอบการทดลอง

อ้างอิง (ใส่แค่ Link)

- <https://www.digikey.co.th/th/articles/a-better-way-to-commutate-blcdc-mot>
- <https://www.jkongmotor.com/th/how-does-the-hall-effect-sensor-work-on-a-blcdc-motor.html>
- <https://www.digikey.co.th/en/articles/controlling-sensorless-blcdc-motors-via-back-emf?msockid=34c4cbc31e6e68f2077cdefa1fa9699c>
- <https://onlinedocs.microchip.com/oxy/GUID-04B5982F-17EC-4A6E-B7FE-72DF0A5463B9-en-US-3/GUID-A1DD3CA4-D59F-45CF-AA9F-EBBCB9EF37BA.html>
- <https://mechtex.com/blog/field-oriented-control-foc-for-blcdc-motors-a-beginners-guide>