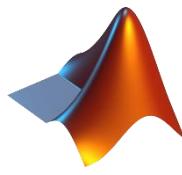


RMXplorer



LAB 2: Actuators

Name

- | | |
|-------------------------------|-------------|
| • นางสาวกิตติณัฐ์ ช่างทำ | 67340500003 |
| • นายยศพัฒน์ บูรณศิลสุนทร | 67340500033 |
| • นายรัชชานนท์ อนุรักษ์ทรัพย์ | 67340500034 |
| • นายวรวิทย์ ภัทรเปรมเจริญ | 66340500049 |

Objectives

- เพื่อให้นักศึกษาสามารถทำความเข้าใจหลักการทำงานของ Actuators ประเภทต่างๆ ได้แก่ DC Motor, Stepper Motor และ Brushless DC Motor ว่าแต่ละชนิดมีลักษณะการหมุน การสร้างแรงบิด และรูปแบบการควบคุมที่แตกต่างกันอย่างไร
- เพื่อให้นักศึกษาสามารถเรียนรู้การใช้เซนเซอร์ในการวัดพฤติกรรมของมอเตอร์ เช่น การใช้ Incremental Encoder ในการวัดความเร็วและตำแหน่ง และการใช้ Current Sensor ในการวัดการใช้พลังงานหรือโหลดที่เกิดขึ้นระหว่างการหมุน
- เพื่อให้นักศึกษาสามารถทำความเข้าใจการเชื่อมต่อ กับวงจรขับมอเตอร์ (Motor Driver) ทำให้สามารถควบคุมทิศทาง ความเร็ว และความแม่นยำของการเคลื่อนที่ได้ โดยอาศัยการส่งสัญญาณจาก STM32 Microcontroller
- เพื่อให้นักศึกษาสามารถควบคุมและสั่งงานมอเตอร์ผ่านโปรแกรม MATLAB/Simulink และซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้เห็นการตอบสนองของมอเตอร์แบบ Real-time และสามารถเก็บข้อมูลอุณหภูมิเคราะห์ได้
- เพื่อให้นักศึกษาสามารถวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อนำไปเชื่อมโยงกับทฤษฎี เช่น ความสัมพันธ์ระหว่าง PWM กับความเร็วของ DC Motor, ความถี่ของสัญญาณ STEP กับตำแหน่งใน Stepper Motor หรือรูปแบบสัญญาณไฟฟ้าใน BLDC Motor
- เพื่อให้นักศึกษาสามารถเปรียบเทียบความเหมาะสมของ การเลือกใช้มอเตอร์แต่ละชนิดในงานจริง โดยพิจารณาเกณฑ์ เช่น ความเร็ว ความแม่นยำ แรงบิด ความลื่นไหลของ การเคลื่อนที่ และความซับซ้อนในการควบคุม

1. Actuators (4 LABS)

การทดลองที่ 1 DC Motor

จุดประสงค์

- เพื่อให้นักศึกษาสามารถอธิบายหลักการทำงานของ DC Motor รวมถึงความหมายและบทบาทของ Motor Torque Constant (Kt) และ Back-EMF Constant (Ke) ใน การสร้างแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์
- เพื่อให้นักศึกษาสามารถตรวจสอบและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง Speed, Torque, Current, Power และ Efficiency ได้อย่างถูกต้อง เมื่อมีการปรับเปลี่ยน Load Torque ผ่าน Magnetic Particle Clutch และปรับแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยผ่าน Duty Cycle และความถี่ของสัญญาณ PWM
- เพื่อให้นักศึกษาสามารถควบคุมการทำงานของ H-Bridge Motor Driver ได้ทั้ง 3 รูปแบบ ได้แก่ Sign-Magnitude, Locked Anti-Phase และ Asynchronous Sign-Magnitude พร้อมทั้งสามารถเปรียบเทียบผลการทำงานระหว่างโหมด Sign-Magnitude และ Locked Anti-Phase จากการปฏิบัติจริง
- เพื่อให้นักศึกษาสามารถแสดงขั้นตอนการทำ Signal Conditioning และ Signal Processing ของสัญญาณ Feedback จาก Incremental Encoder และ Hall Current Sensor ได้อย่างถูกต้อง รวมถึงการ Calibrate Sensor, การจัดการข้อมูล และการ Unwrap ค่า Encoder เพื่อให้ได้ค่าความเร็วเชิงมุ่งที่ถูกต้อง
- เพื่อให้นักศึกษาสามารถใช้งาน MATLAB และ Simulink ร่วมกับ STM32G474RE เพื่อควบคุมและบันทึกผลการทดลองแบบ Real-Time โดยแสดงผลความเร็วเชิงมุ่งและกระแสไฟฟ้าในหน่วย SI-derived ผ่าน Data Inspector ได้อย่างถูกต้อง

สมมติฐาน

เมื่อมีการปรับ Duty Cycle และความถี่ของสัญญาณ PWM ที่ป้อนเข้าสู่ H-Bridge จะสามารถควบคุมแรงดันเฉลี่ยที่เข้าสู่มอเตอร์ได้ ส่งผลให้ความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงไปตามทิศทางเดียวกัน และเมื่อมีการเพิ่ม Load Torque ผ่าน Magnetic Particle Clutch มอเตอร์จะต้องใช้กระแสมากขึ้นเพื่อรักษาการหมุน ทำให้ความเร็วลดลง ซึ่งกระแสที่วัดได้จาก Hall Current Sensor จะสะท้อนพฤติกรรมของแรงบิดอย่างสอดคล้อง และคาดว่า ประสิทธิภาพของมอเตอร์จะมีค่าที่เหมาะสมที่สุดในช่วงการทำงานบางช่วง ก่อนลดลงเมื่อโหลดเพิ่มขึ้นมากเกินไป

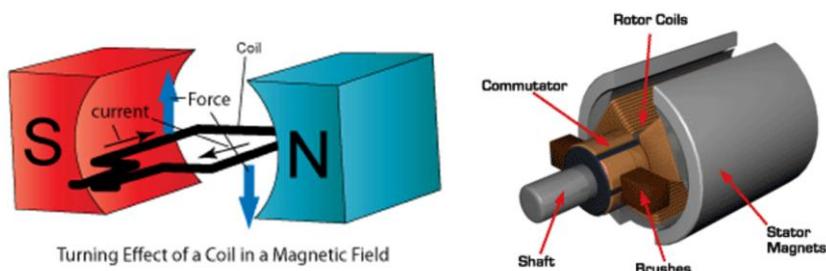
ตัวแปร

- ตัวแปรต้น:
 - ค่า Duty Cycle และความถี่ของสัญญาณ PWM ที่ใช้ควบคุม DC Motor
 - ค่า Load Torque ที่ปรับเปลี่ยนผ่าน Magnetic Particle Clutch
- ตัวแปรควบคุม:
 - แรงดันไฟฟ้า INPUT ของ DC Motor
 - ชนิดและคุณลักษณะของ DC Motor และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
- ตัวแปรตาม:
 - ความเร็วเชิงมุ่งของ DC Motor
 - กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้
 - ค่าแรงบิดของมอเตอร์
 - ค่าเบอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของการทำงานของมอเตอร์

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

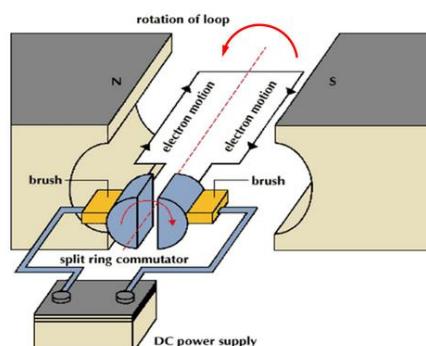
หลักการทำงานของ DC Motor

มอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล โดยอาศัยหลักการของแม่เหล็กไฟฟ้า มอเตอร์ประกอบด้วยสองส่วนหลัก ได้แก่ สเตเตอร์ (Stator) ซึ่งสร้างสนามแม่เหล็กคงที่ และโรเตอร์หรืออาร์มาเจอร์ (Rotor/Armature) ที่หมุนภายในสนามแม่เหล็ก เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านชุดลวดอาร์มาเจอร์ จะเกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Force) ทำให้โรเตอร์หมุน โดยทิศทางของแรงจะตั้งฉากกับทิศทางของกระแสและสนามแม่เหล็ก ซึ่งสอดคล้องกับกฎของโล伦เช็ต (Lorentz's Force Law) การหมุนของอาร์มาเจอร์สร้างแรงบิด (Torque) ซึ่งสามารถควบคุมได้โดยการปรับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านชุดลวด การควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกระแสนี้ช่วยให้สามารถปรับความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ได้อย่างแม่นยำ



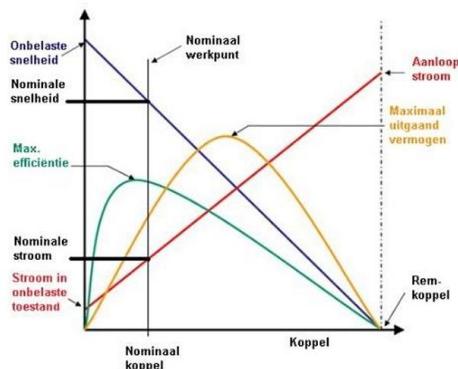
รูปที่ 1 ส่วนประกอบภายใน DC Motor

การกลับทิศทางของกระแสในชุดลวดอาร์มาเจอร์ทำได้โดยใช้คอมมิวเตเตอร์แบบแบ่งแหวน (Split-ring Commutator) และแปรง (Brush) ซึ่งช่วยให้แรงบิดหมุนในทิศทางเดียวอย่างต่อเนื่อง โดยคอมมิวเตเตอร์จะกลับทิศทางกระแสในชุดลวดทุกครึ่งรอบ ทำให้มอเตอร์สามารถหมุนได้อย่างราบรื่น ข้อได้เปรียบของการออกแบบนี้คือสามารถสร้างแรงบิดที่ต่อเนื่องและมีความเสถียร นอกจากนี้ มอเตอร์กระแสตรงยังมีความสมดุลมาก เชิงเส้นระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์และแรงบิด โดยกระแสอาร์มาเจอร์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้แรงบิดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และความเร็วของมอเตอร์จะขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้า INPUT และโหลดที่ต่อกับมอเตอร์



รูปที่ 2 การทำงานของ DC Motor

เมื่อรวมสนามแม่เหล็กจากสเตเตอเร่อร์และกระแสที่เหลื่อนในอาร์มาเจอร์ จะเกิดแรงหมุนที่ทำให้โรเตอร์เคลื่อนที่ นี่คือหลักการพื้นฐานที่ทำให้มอเตอร์กระตุ้นสามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ การออกแบบของชุดลวดและจำนวนรอบของชุดลวดยังมีผลต่อขนาดของแรงบิดและประสิทธิภาพของมอเตอร์ ทำให้สามารถปรับให้เหมาะสมกับการใช้งานที่แตกต่างกันได้



รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดและมอเตอร์กระตุ้น

นอกจากหลักการพื้นฐานแล้ว แรงบิดของมอเตอร์กระตุ้นยังขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยร่วมกัน ปัจจัยที่สำคัญที่สุดคือกระแสไฟฟ้าที่ให้ผลผ่านชุดลวดอาร์มาเจอร์ โดยมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับแรงบิด ซึ่งหมายความว่าการเพิ่มกระแสไฟฟ้าจะทำให้แรงบิดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สนามแม่เหล็กของมอเตอร์เอง ไม่ว่าจะมาจากชุดลวดสนามหรือแม่เหล็กถาวร ก็สามารถเพิ่มแรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์สร้างได้ การออกแบบทางกลของมอเตอร์ เช่น ขนาดของอาร์มาเจอร์ จำนวนรอบของชุดลวด และการจัดเรียงชุดลวด ก็มีผลต่อแรงบิดและความสามารถในการรองรับโหลด

นอกจากนี้ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์มีผลต่อกระแสสูงสุดที่อาร์มาเจอร์สามารถให้ได้ ซึ่งจะส่งผลต่อแรงบิดโดยอ้อม และยังเป็นตัวกำหนดความเร็วของมอเตอร์โดยตรง ดังนั้น การควบคุมกระแสและแรงดันไฟฟ้าร่วมกับการออกแบบสนามแม่เหล็กและโครงสร้างของมอเตอร์ จึงสามารถปรับแรงบิดและความเร็วให้เหมาะสมกับการใช้งานต่าง ๆ ได้อย่างแม่นยำ

ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระตุ้น (DC Motor) สามารถใช้อัตราสัมพันธ์พื้นฐานระหว่างแรงดัน กระแส ความเร็วรอบ และแรงบิด เพื่อสร้างกราฟแสดงคุณลักษณะการทำงานของมอเตอร์หรือ Motor Characteristic Curve ได้ โดยสมการสำคัญที่ใช้ประกอบด้วย

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็ว

สมการกำลังของมอเตอร์ (Motor Output Power)

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

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความเร็ว

$$P_{out} = - \frac{\omega_{NL}}{\tau_{ST}} \tau_L + \omega_{NL} \tau_L$$

สมหาแรงบิดที่เกิดจากการกระแสไฟฟ้า

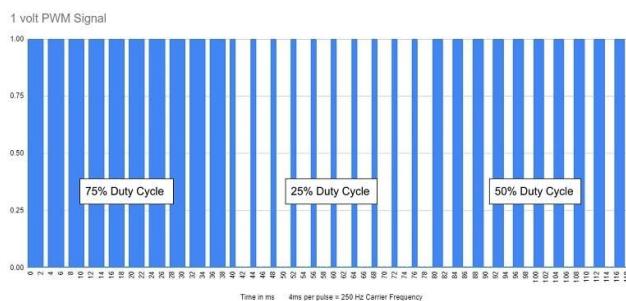
$$i = \left(\frac{i_{ST} - i_{NL}}{\tau_{ST}} \right) \tau_L + i_{ST}$$

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

หลักการของ PWM และ Duty Cycle

PWM (Pulse Width Modulation) คือเทคนิคที่ใช้ ควบคุมแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยคงที่ เพื่อให้ได้ค่าแรงดันไฟฟ้า หรือระดับพลังงานเฉลี่ยตามต้องการ ด้วยการ Modulate ความกว้างของพัลส์(PWM) จะใช้สัญญาณที่ส่งเป็นช่วง ๆ โดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของ สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม (Square Wave)

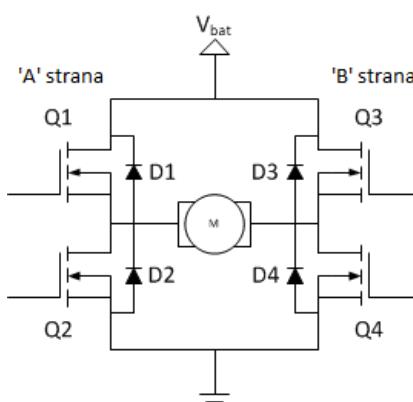
การปรับความกว้างพัลส์ (PWM) ใช้ Duty Cycle กำหนดเป็นอัตราส่วนระหว่างช่วงเวลาที่สัญญาณอยู่ในสถานะ High ต่อช่วงเวลาของสัญญาณทั้งหมด เมื่อ Duty Cycle เพิ่มขึ้น จะทำให้พลังงานเฉลี่ยที่ส่งออกไปยังอุปกรณ์เพิ่มขึ้นตามไปด้วยหากความถี่ต่ำเกินไปจะเกิดเสียงรบกวนการสั่น ทำให้ประสิทธิภาพลดลง และยัง สามารถนำมาใช้แทนสัญญาณแอนะล็อกได้ เนื่องจากค่าเฉลี่ยของสัญญาณที่ถูกเปิด – ปิดอย่างรวดเร็วจะให้ผลลัพธ์คล้ายกับแรงดันแอนะล็อกที่เปลี่ยนแปลงต่อเนื่อง ด้วยเหตุนี้ PWM จึงถูกใช้ในไมโครคอนโทรลเลอร์ เช่น STM32 เพื่อควบคุมความเร็ว ความแรง และทิศทางของ DC Motor โดยไม่ต้องสร้างแรงดันแอนะล็อกจริง ทำให้ควบคุมได้อย่างแม่นยำ



รูปที่ 4 สัญญาณ PWM แสดง Duty Cycle ที่แตกต่างกัน ที่ความถี่ 250 Hz

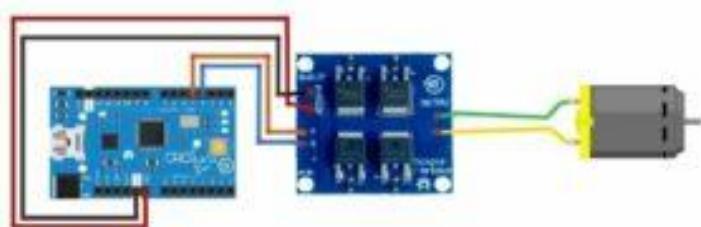
หลักการการทำงานของ H-Bridge

H-Bridge เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ควบคุมทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าไปมอเตอร์ DC หรือ荷ลดื่น ๆ โดยทั่วไป H-Bridge ประกอบด้วย MOSFET 4ตัว ดังรูปที่ 5 สำหรับมอเตอร์ DC หากเปิดสวิตช์คู่ Q1 และ Q4 กระแสจะไหลจากแหล่งจ่ายไปยังมอเตอร์ในทิศทางหนึ่ง ทำให้เพลาของมอเตอร์หมุนไปในทิศทางเดียวกัน และหากเปิดสวิตช์คู่ Q2 และ Q3 กระแสจะไหลในทิศทางตรงกันข้าม ทำให้มอเตอร์หมุนกลับทิศทาง ซึ่งการควบคุมสวิตช์แบบนี้ช่วยให้สามารถสลับทิศทางของมอเตอร์ได้โดยไม่ต้องสลับสายไฟด้วยตนเอง



รูปที่ 5 วงจร H-Bridge

เพื่อป้องกันไม่ให้เกิด วงจรลัด (short circuit) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อสวิตช์ด้านบนและด้านล่างของฝั่งเดียวกันถูกเปิดพร้อมกัน โมดูล H-Bridge ส่วนใหญ่จึงออกแบบให้มี พินควบคุมเพียงสองพิน (A และ B) โดยแต่ละพินจะควบคุมสวิตช์คู่หนึ่งในลักษณะที่ไม่สามารถเปิดทั้งคู่พร้อมกันได้ ทำให้ผู้ใช้สามารถควบคุมมอเตอร์ได้ง่ายและปลอดภัย การกำหนดสัญญาณสูง/ต่ำที่พิน A และ B จะกำหนดทิศทางการหมุนของมอเตอร์ เช่น เมื่อ A=HIGH และ B=LOW มอเตอร์จะหมุนไปในทิศทางหนึ่ง และเมื่อ A=LOW และ B=HIGH มอเตอร์จะหมุนกลับทิศทาง



รูปที่ 6 ตัวอย่างการต่อ H-Bridge กับบอร์ด microcontroller

หลักการทำงานของ H-Bridge ยังสามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ต้องการเปลี่ยนทิศทางกระแส เช่น มอเตอร์สเต็ปเปอร์ หรือวงจรแปลงแรงดัน DC/AC, AC/AC และ DC/DC โดยหลักการพื้นฐานจะเหมือนกันคือ การสลับสวิตช์เพื่อควบคุมทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า การออกแบบวงจรที่ดีจะมี ไดโอดป้องกัน (เช่น Schottky diode) เพื่อป้องกันกระแสเสียงขณะสวิตช์เปลี่ยนสถานะ ลดความเสียหายต่อโหลดและอุปกรณ์ H-Bridge ยังสามารถใช้ร่วมกับสัญญาณ PWM เพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์ได้ โดย PWM จะกำหนดแรงดันเฉลี่ยที่มอเตอร์ได้รับ ทำให้ปรับรอบหมุนได้อย่างแม่นยำ

วงจร H-BRIDGE มีอยู่ทั้งหมด 4 Mode (Sign-Magnitude, Locked Anti-Phase, Free (high impedance) และ Async Sign-Magnitude)

หลักการการทำงาน Lock Anti-Phase Drive

โหมด Lock Anti-Phase ของ H-bridge ส่งสัญญาณ PWM ที่สามารถควบคุมทิศทางได้โดยกำหนดความกว้างของพัลส์ หากขับที่ duty cycle 50% แรงดันเฉลี่ยที่มอเตอร์จะเป็น 0 ทำให้มอเตอร์อยู่ในสภาพพัก หาก duty cycle เพิ่มขึ้น มอเตอร์จะหมุนไปข้างหน้า และหากลดลงต่ำกว่า 50% มอเตอร์จะหมุนยกหลัง กระแสไฟฟ้าผ่านมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงตามแรงดันและความต้านทานของชุดลวด ทำให้เกิด ripple current มากที่สุดเมื่อ duty cycle = 50% ใน การขับจริงต้องใส่ตัวเก็บประจุที่ด้านจ่ายไฟเพื่อรับกระแสเสียงกลับ มีฉันนั่นแรงดันจ่ายอาจพุ่งสูงและเป็นอันตราย เมื่อมอเตอร์เริ่งหรือเบรก กระแสจะเปลี่ยนจากการอบต่อรอบ และในกรณีเบรก หาก V_D สูงกว่าแรงดันเฉลี่ยของมอเตอร์ มอเตอร์จะสร้างกระแสเสียงกลับไปยังแบตเตอรี่ เกิดการเบรกแบบ dynamic ซึ่งอยู่กับทิศทางของกระแส

การขับแบบ Lock Anti-Phase แม้จะง่ายในเชิงควบคุมสวิตช์ แต่มีความซับซ้อนหลายประการ เช่น การจัดการพลังงานย้อนกลับ การรักษา PWM ในช่วงเริ่มต้น และการควบคุมความเร็วและแรงบิดที่เหมาะสม

หลักการการทำงาน Sign-Magnitude Drive

โหมด Sign-Magnitude ใช้สัญญาณ 2 ตัว หนึ่งตัวเลือกทิศทาง (sign) และอีกตัวควบคุมความเร็วโดยถ้า สัญญาณ PWM เป็น 0% มอเตอร์จะหยุด ถ้า Duty สูงมอเตอร์จะหมุนเร็ว สรุปแล้วสามารถควบคุมมอเตอร์ให้หมุนไป ข้างหน้าหรือถอยหลังได้ ในช่วง on-time กระแสไฟหลั่นของมอเตอร์ตามแรงดัน $V_{bat}-V_g$ และในช่วง off-time มอเตอร์ถูก short-circuit กระแสไฟหลั่นเนื่อง Ripple current เกิดสูงสุดที่ duty cycle 50% และหากพิจารณา internal resistance ของมอเตอร์ กระแสจะลดลงตามแรงดันต่ำครึ่อมขาดลวด การใส่ตัวเก็บประจุที่ด้านจ่ายไฟเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อรับรับกระแสเสียงกลับเข้าเดียวกับ Lock Anti-Phase ในช่วง transient หรือ acceleration กระแสเปลี่ยนจาก รอบต่อรอบจนกว่าจะถึงสภาวะ steady-state ส่วนการเบรกจะเกิดกระแสเสียงกลับ ถ้า V_g สูงกว่าแรงดันเฉลี่ยของ มอเตอร์ กระแสอาจชาญแบบเตอร์ (regenerative braking) หรือจ่ายออก (dynamic braking) ข้อจำกัดของ regenerative braking คือไม่สามารถใช้เพื่อเบรกแรง ๆ ได้ เพราะ torque จะลดลงเมื่อความเร็วลด การจัด การพลังงานจึงซับซ้อนเข้าเดียวกับ Lock Anti-Phase

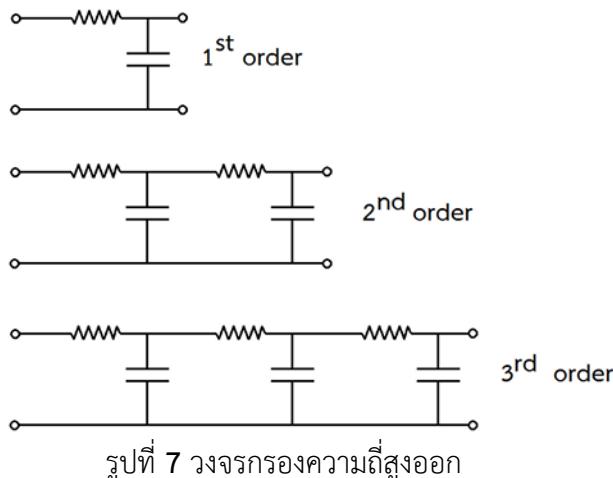
คุณสมบัติ / ข้อสังเกต	Lock Anti-Phase Drive	Sign-Magnitude Drive
สัญญาณควบคุม	ใช้สัญญาณ PWM ตัวเดียว ควบคุมคู่สวิตซ์ ท้าย	ใช้สองสัญญาณ: 1 ตัวกำหนดทิศทาง (sign), 1 ตัวควบคุมแรงดันเฉลี่ย (magnitude)
การทำงานของ H-bridge	คู่สวิตซ์ท้ายทำงานสลับกัน ด้านซ้าย-ขวาเฟส ตรงข้าม	การสลับทิศทางขึ้นกับสัญญาณ sign, PWM ควบคุมขนาดแรงดัน
ทิศทางการหมุนมอเตอร์	duty cycle >50% → หมุนไปข้างหน้า, <50% → ถอยหลัง	กำหนดด้วยสัญญาณ sign, magnitude ควบคุม ความเร็ว
แรงดันเฉลี่ยที่มอเตอร์	duty cycle 50% → แรงดันเฉลี่ย 0 → มอเตอร์หยุด	แรงดันเฉลี่ยขึ้นกับ magnitude, sign กำหนด ทิศทาง
Ripple current	สูงสุดที่ duty cycle 50%	สูงสุดที่ duty cycle 50%
กระแสขณะเบรก	อาจเกิด regenerative หรือ dynamic braking ขึ้นอยู่กับทิศทางของกระแส	เกิด regenerative หรือ dynamic braking ถ้า $V_g >$ แรงดันมอเตอร์, torque ลดลงเมื่อใช้ regenerative เป็นเบรกแรง
การใส่ตัวเก็บประจุ	จำเป็นเพื่อรับรับกระแสเสียงกลับ	จำเป็นเข่นกันเพื่อรับรับกระแสเสียงกลับ
ความซับซ้อนในการควบคุม	ง่ายต่อการสวิตซ์ แต่ต้องจัดการกระแสเสียงกลับและ PWM ในช่วงเริ่มต้น	ควบคุมทิศทางซัดเจน แต่ต้องจัดการกระแสและ regenerative braking
ข้อดี	ใช้สัญญาณน้อย, การสลับคู่สวิตซ์ง่าย	ควบคุมทิศทางซัดเจน, PWM ควบคุมแรงดันและ ความเร็วแม่นยำ
ข้อจำกัด	Ripple current สูง, regenerative braking ใช้ได้เบา ๆ, ต้องระวังแรงดันย้อนกลับ	Ripple current สูง, regenerative braking ใช้แรง ๆ ไม่ได้, การจัดการพลังงานซับซ้อน

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบโหมดการ Drive H-Bridge

โหมด Sign-Magnitude Drive เป็นวิธีควบคุมที่แยกการกำหนดทิศทางและความเร็วออกจากกันอย่างชัดเจน ทำให้มอเตอร์ทำงานนิ่งกว่า มีประสิทธิภาพสูงกว่า และสัญญาณพลังงานต่ำกว่า ขณะที่ Lock Anti-Phase ใช้เพียง สัญญาณ PWM เดียว แต่มีการสลับแรงดันบวก-ลบในทุกช่วงของสัญญาณ จึงตอบสนองเร็วกว่าแต่มี ripple สูงและใช้ พลังงานมากกว่า ทั้งสองโหมดจึงเหมาะสมกับงานที่มีลักษณะต่างกันตามความต้องการของระบบควบคุม

การกรองสัญญาณความถี่สูงออก (Low-Pass-Filter)

วงจรกรองความถี่สูงออกเป็นวงจรที่ยอมให้สัญญาณความถี่ตั้งแต่ 0 Hz จนถึงความที่ที่กำหนดผ่านไปได้ โดย ที่ความถี่ที่สูงกว่านั้นจะถูกลดthonไปตามลำดับ สามารถทำได้โดยการต่อตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ และค่านวนหา ความถี่ตัด (cutoff frequency) ในวงจรกรองความถี่สูงออก (low pass filter, LPF) สามารถทำได้โดยใช้สมการที่ 1.0



รูปที่ 7 วงจรกรองความถี่สูงออก

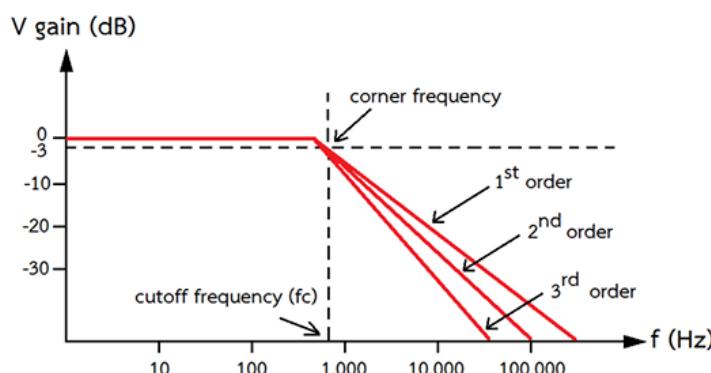
$$w_c = \frac{1}{RC} = 2\pi f_c \quad (1.0)$$

ω_c คือความถี่ตัดเชิงมุม (rad/s)

f_c คือ ความถี่ตัดเชิงเส้น (Hz)

R คือ ความต้านทานไฟฟ้า (Ω)

C คือ ความจุของตัวเก็บประจุ (F)



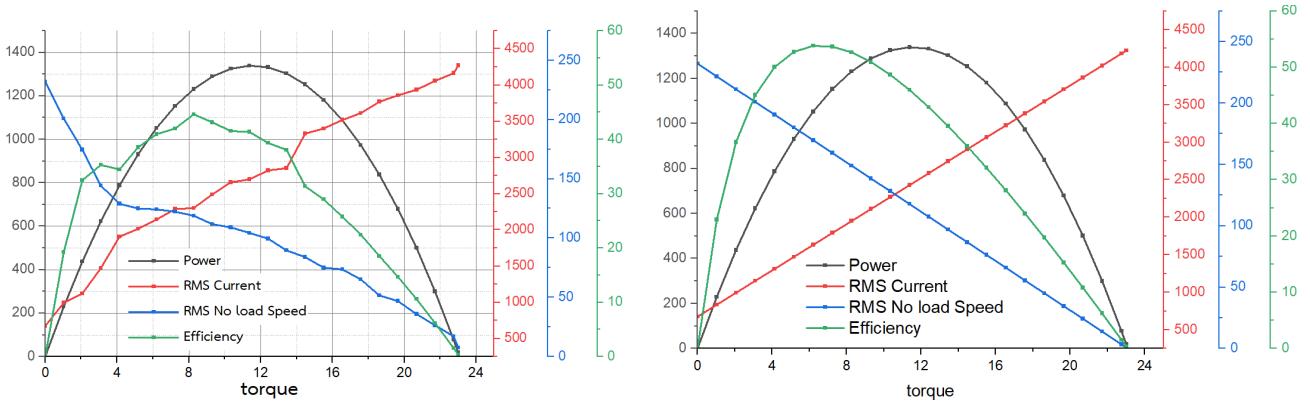
รูปที่ 8 กราฟแสดงการลดTHONความถี่ในวงจรกรองความถี่สูงออก ใน order ต่างๆ

ขั้นตอนการดำเนินงาน (อธิบายขั้นตอนการทดลอง ใส่เฉพาะขั้นตอนที่จำเป็น)

1. Set Up โดยการทำตามไฟล์ Instruction
2. เชื่อม power supply เข้ากับ terminal box เพื่อแปลงแรงดัน 24 V ให้เป็น 12 V เพื่อเลี้ยงมอเตอร์ เนื่องจากมีแรงดันที่จะ drop ณ step down 12V

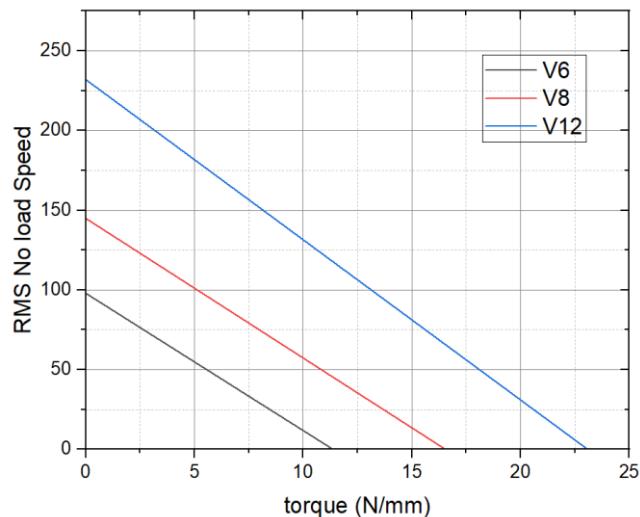
ผลการทดลอง (สิ่งที่เกิดขึ้นจริงในการทดลอง)

1. ผลการทดลองคุณสมบัติของมอเตอร์ใน Motor Characteristic จากคลาดเคลื่อน Ideal Case



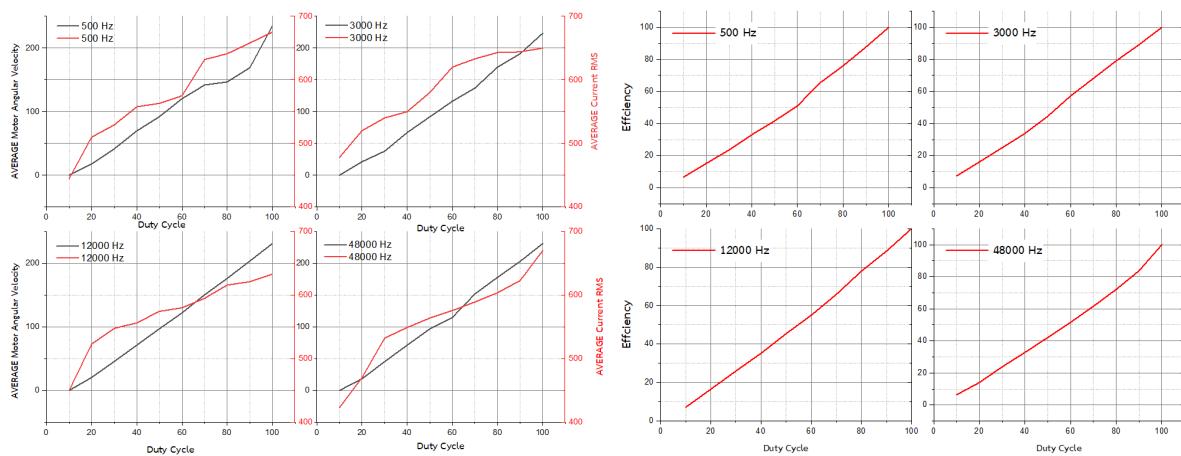
รูปที่ 8 กราฟแสดงคุณสมบัติของมอเตอร์

2. ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่าง Speed และ Torque ที่แรงดันไฟฟ้า (PWM) ต่าง ๆ



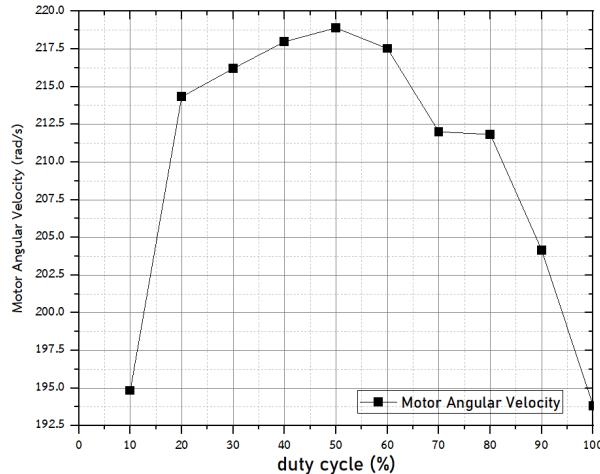
รูปที่ 9 RMS ณ แรงดันต่างๆ

3. ผลการทดลอง PWM,Duty Cycle ของ ความเร็วของมอเตอร์, กระแสไฟฟ้า และประสิทธิภาพของมอเตอร์

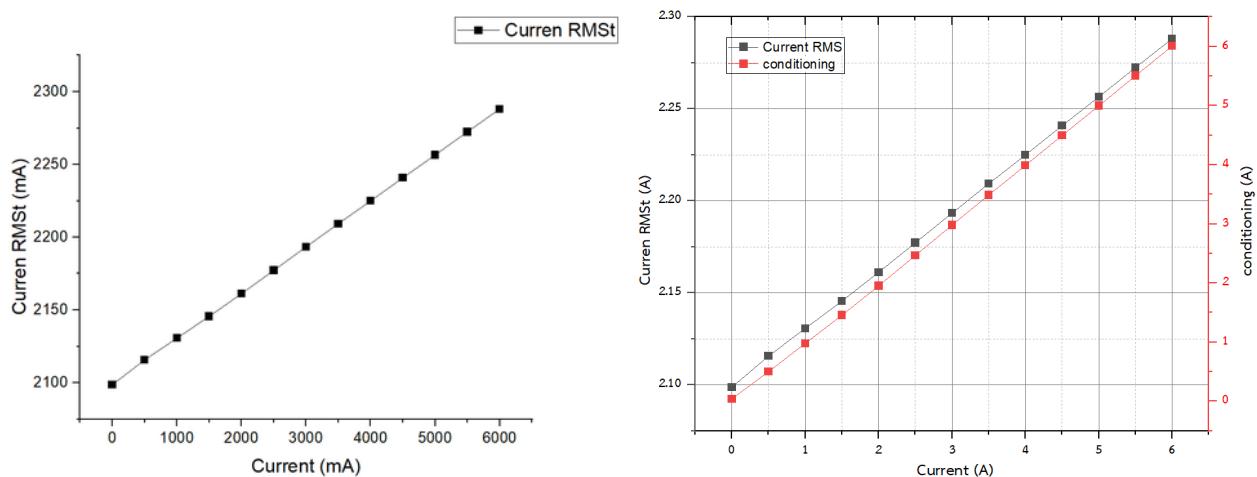


รูปที่ 10 Duty Cycle ของความถี่ช่วงต่างๆ

4. ผลการเปรียบเทียบโหนด Sign-Magnitude กับ Locked Anti-Phase

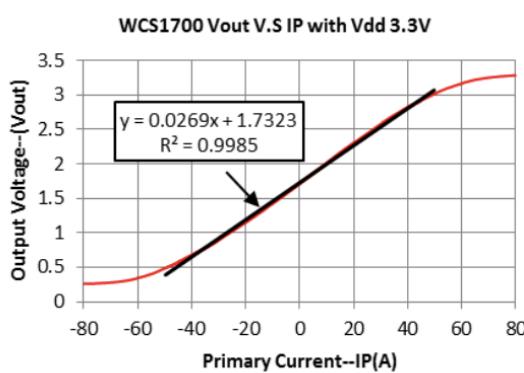
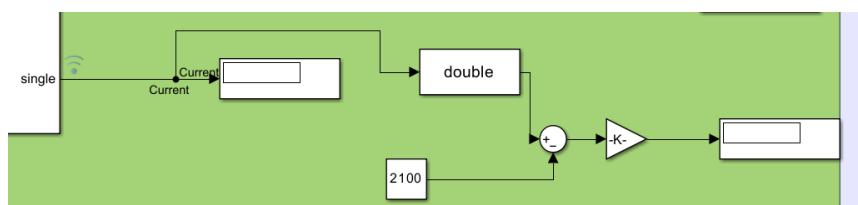


5. ผลการทดลองการทำ Signal conditioning ของ Current sensor



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ RMS กับแรงดัน

กราฟที่ได้จากการทดลองเก็บค่า และกราฟที่ผ่าน signal conditioning แล้ว

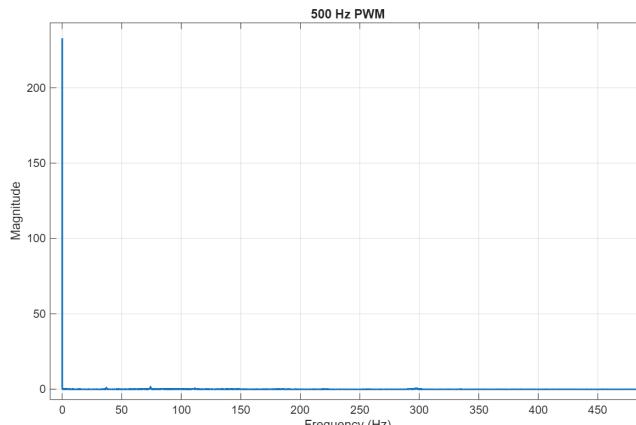


กราฟแสดงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นที่มีความซัมเป็นบวกระหว่างกระแสเฉลี่ย (Current DC) และกระแส RMS โดยพบว่าค่ากระแส RMS สูงกว่าค่ากระแสเฉลี่ยเล็กน้อยในทุกช่วง ซึ่งเกิดจากส่วนประกอบของกระแสกระแสเพิ่อม (Ripple Current) ที่เกิดขึ้นจากการควบคุมแบบ PWM หรือภาระเชิงกลของมอเตอร์ ความแตกต่างนี้มีความสำคัญเนื่องจากกระแสเฉลี่ยเกี่ยวข้องกับแรงบิด ขณะที่กระแส RMS เป็นตัวบ่งชี้การสูญเสียพลังงานและความร้อนภายในมอเตอร์ จึงเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการตัดสินใจต่อไป

ประสิทธิภาพในการทดลองอื่น ๆ โดยเฉพาะในรูปที่ 4 ซึ่งต้องการสะท้อนพฤติกรรมความ

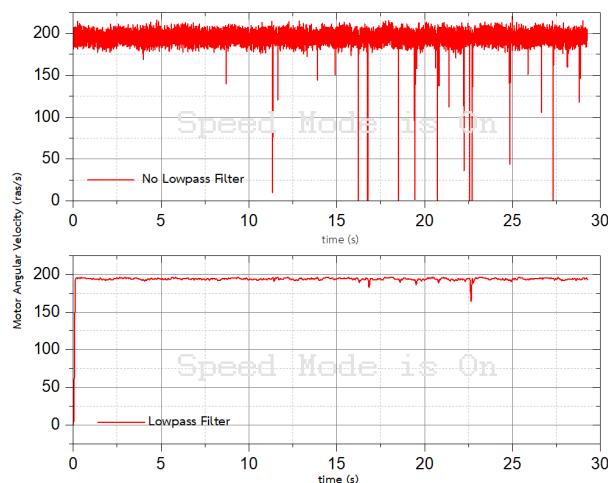
ร้อนและสมรรถนะจริงของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์อย่างถูกต้อง.

6. ผลการทดลองความถี่ (FFT) ของสัญญาณความเร็วตอบสนองมอเตอร์ที่ความถี่ PWM ต่าง ๆ



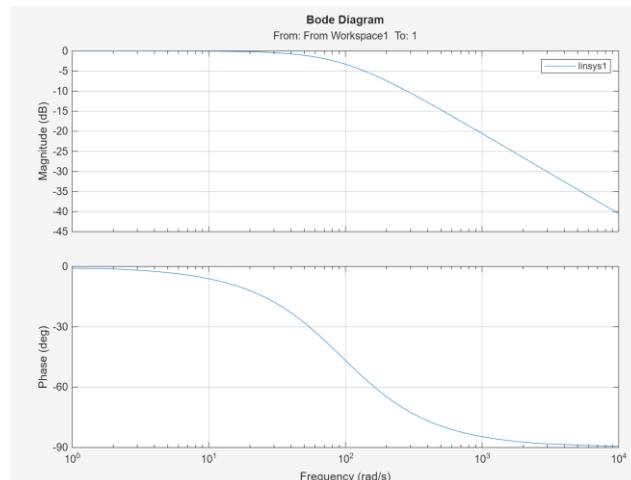
รูปที่ 12 ภาพแสดง FFT ที่ PWM 500 Hz

7. ผลการทดลองการสร้าง Low-Pass Filter สำหรับการวัดความเร็วตอบสนองมอเตอร์



รูปที่ 13 ภาพแสดง Low-Pass Filter ที่ความถี่ PWM 500 Hz

8. ผลของการกรองสัญญาณและวิเคราะห์ Bode Plot Diagram



รูปที่ 14 Bode Plot

สรุปผลการทดลอง (อธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นในการทดลอง)

1. ผลการทดลองคุณสมบัติของมอเตอร์ใน Motor Characteristic จากคลาดเคลื่อน Ideal Case

จากราฟพบว่าพารามิเตอร์หลักทั้งหมดได้แก่ ความเร็วรอบ กระแสไฟฟ้า กำลังข้ออ ก และประสิทธิภาพมีความสัมพันธ์โดยตรงกับแรงบิดซึ่งเป็นภาระของมอเตอร์ ความเร็วรอบจะลดลงเป็นเชิงเส้นเมื่อแรงบิดเพิ่มขึ้น ขณะที่กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นเพื่อต้านทานภาระดังกล่าว กำลังข้ออ กของมอเตอร์เพิ่มขึ้นจนถึงค่ามากที่สุดแล้วลดลง ซึ่งสะท้อนจุดขีดจำกัดของสมรรถนะเชิงกล ส่วนประสิทธิภาพจะสูงสุดในช่วงแรงบิดต่ำถึงปานกลาง ซึ่งเป็นบริเวณที่มอเตอร์ใช้พลังงานได้คุ้มค่าที่สุด

เมื่อเปรียบเทียบกราฟพฤติกรรมจริง (Real-World Behavior) กับกราฟพฤติกรรมในอุดมคติ (Ideal Behavior) พบว่าในอุดมคติ เส้นกราฟทั้งหมดเป็นเชิงเส้นและสมมาตร แต่ในสภาพจริงรูปกราฟจะมีความไม่เป็นเส้น โดยเฉพาะค่าประสิทธิภาพสูงสุดและกำลังสูงสุดที่เหลือมจากค่าทางทฤษฎี สะท้อนผลของการสูญเสียทางกล การเกิดความร้อน และพฤติกรรมกระแสที่ไม่คงที่ซึ่งเกิดขึ้นจริงระหว่างการทำงานของมอเตอร์

2. ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่าง Speed และ Torque ที่แรงดันไฟฟ้า (PWM) ต่าง ๆ

กราฟทั้งสามเส้นแสดงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear Relationship) โดยมีค่าความชันเป็นลบ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของเส้นโค้งพุติกรรมความเร็ว–กระแส (Speed–Current Characteristic) ของมอเตอร์กระแสตรง จุดตัดแกนตั้ง (ความเร็วสูงสุด) และจุดตัดแกนนอน (กระแสสูงสุด) เพิ่มขึ้นอย่างสังเกตได้เมื่อระดับแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์เพิ่มจาก V6 ไปเป็น V12 ขณะที่ค่าความชันของเส้นกราฟ—which สัมพันธ์กับความต้านทานของชล漉ดยังคงมีค่าใกล้เคียงเดิม แสดงให้เห็นว่าความต้านทานภายในไม่ได้เปลี่ยนแปลงเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้น

ข้อมูลจากการพยัญชนะว่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเป็นปัจจัยหลักที่กำหนดทั้งความเร็วรอบสูงสุดและกระแสตัวรัหสูงสุดของมอเตอร์ เมื่อมอเตอร์ทำงานและความเร็วลดลงจะพบว่ากระแสเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้น ซึ่งสอดคล้องกับแรงบิดที่เพิ่มขึ้นตามภาระที่มอเตอร์ต้องรับ พฤติกรรมนี้สะท้อนความเชื่อมโยงโดยตรงระหว่างกระแสไฟฟ้า แรงบิด และโหลดของมอเตอร์ ซึ่งจะถูกนำไปใช้เป็นฐานในการวิเคราะห์เส้นโค้งประสิทธิภาพเทียบกับแรงบิดในส่วนต่อไป

3. ผลการทดลอง PWM,Duty Cycle ของ ความเร็วของมอเตอร์, กระแสไฟฟ้า และประสิทธิภาพของมอเตอร์

ผลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการปรับ Duty Cycle และค่าความถี่ PWM ส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะของมอเตอร์กระแสตรง โดยเมื่อ Duty Cycle เพิ่มขึ้น ความเร็วรอบและกระแส RMS ของมอเตอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระดับแรงดันเฉลี่ยที่สูงขึ้นซึ่งถูกส่งไปยังชล漉ดของมอเตอร์ ขณะเดียวกันประสิทธิภาพของมอเตอร์ก็เพิ่มขึ้นตามการทำงานที่เสถียรมากขึ้นในช่วง Duty Cycle สูง โดยเฉพาะเมื่อใช้ความถี่ PWM สูง เช่น 12 kHz และ 48 kHz ซึ่งให้กราฟที่ราบรื่นกว่าและลดผลกระทบจากกระแสเพื่อมและแรงบิดไม่สม่ำเสมอที่พบในความถี่ต่ำอย่าง 500 Hz พฤติกรรมนี้สะท้อนให้เห็นว่าความถี่ PWM ที่สูงช่วยให้ระบบควบคุมแรงดันเฉลี่ยมีความต่อเนื่องมากขึ้น ส่งผลให้มอเตอร์สร้างแรงบิดและความเร็วได้เสถียรภาพและมีประสิทธิภาพสูงกว่า การเพิ่ม Duty Cycle จึงเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้สมรรถนะโดยรวมของมอเตอร์ดีขึ้นเสมอ ในขณะที่ความถี่ PWM ทำหน้าที่กำหนด

ระดับความเรียบและคุณภาพของสัญญาณขับเคลื่อน ซึ่งล้วนเป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบและปรับจูนระบบขับมอเตอร์ให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

4. ผลการเปรียบเทียบโหมด Sign-Magnitude กับ Locked Anti-Phase

ผลการเปรียบเทียบพบว่าโหมด Sign-Magnitude ให้สมรรถนะของมอเตอร์ที่มีความเสถียรสูงกว่าอย่างชัดเจน ทั้งในด้านความเร็วรอบ การกินกระแส และประสิทธิภาพ โดยลักษณะของแรงดันเฉลี่ยที่ไม่สลับพิศทางทำให้มอเตอร์ตอบสนองแบบเชิงเส้นต่อ Duty Cycle เกิดแรงบิดที่ร้าบเรียบ กระแส RMS ต่ำ และมีแนวโน้มสูญเสียน้อยกว่า ในทางตรงกันข้าม โหมด Locked Anti-Phase ซึ่งสลับแรงดันระหว่าง +V และ -V ตลอดเวลา ส่งผลให้แรงดันเฉลี่ยลดลงใน Duty Cycle สูง เกิดกระแทกกระเพื่อมและแรงบิดกระเพื่อมมากขึ้น ทำให้ความเร็วไม่คงที่และลดลงหลังจุดพีคของกราฟ จึงมีประสิทธิภาพโดยรวมต่ำกว่า โดยเฉพาะในงานที่ต้องการความเร็วสูงหรือโหลดมาก อย่างไรก็ตาม Locked Anti-Phase ยังมีข้อดีด้านการควบคุมแรงบิดละเอียดใกล้รอบศูนย์ แม้สมรรถนะโดยรวมจะด้อยกว่า ดังนั้น Sign-Magnitude จึงเหมาะสมสำหรับงานควบคุมความเร็วและประสิทธิภาพสูง ขณะที่ Locked Anti-Phase เหมาะกับงานควบคุมแรงบิดระดับละเอียดมากกว่า

5. ผลการทดลองการทำ Signal conditioning ของ Current sensor

เก็บค่าดิบในช่วงกระแส 0–6 แอมป์ พบว่าในสภาวะไม่มีโหลดเซนเซอร์ให้ค่าออฟเซตประมาณ 2100 และเพิ่มขึ้นเป็น 2288 เมื่อกระแสเท่ากับ 6 แอมป์ ซึ่งสะท้อนความเป็นเชิงเส้นของการตอบสนองของเซนเซอร์ในช่วงการทำงานดังกล่าว จากนั้นจึงทำการลบค่าออฟเซต 2100 ออกจากค่าดิบทั้งหมดเพื่อให้ค่าที่ได้เริ่มนับที่ศูนย์เมื่อกระแสเป็นศูนย์ ก่อนจะนำค่าที่ได้มาลบออกจาก ADC ทำให้ได้สัญญาณที่ผ่านการปรับเทียบแล้ว ซึ่งสามารถแปลงเป็นค่ากระแสจริงได้อย่างแม่นยำมากขึ้น และเหมาะสมสมต่อการนำไปใช้ในระบบควบคุมมอเตอร์หรือการวิเคราะห์ผลในขั้นตอนถัดไป

6. ผลการทดลองความถี่ (FFT) ของสัญญาณความเร็วรอบมอเตอร์ที่ความถี่ PWM ต่าง ๆ

แสดงให้เห็นว่าในทุกความถี่ PWM พลังงานหลักของสัญญาณความเร็วกระเจิงอยู่ที่ย่านความถี่ต่ำใกล้ศูนย์ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการหมุนของมอเตอร์ที่มีความถี่เชิงกลต่ำกว่าความถี่ PWM หาก อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความถี่ PWM จะพบว่าที่ความถี่ต่ำ เช่น 500 Hz มีค่าสเปกตรัมรบกวนสูงกว่าเล็กน้อยในย่านความถี่ 0–100 Hz ซึ่งเกิดจากแรงบิดกระเพื่อม (Torque Ripple) และผลของการสวิตช์ที่ใหญ่กว่า ขณะที่เมื่อเพิ่มความถี่ PWM เป็นระดับ 6 kHz, 15 kHz, 30 kHz และ 24 kHz ค่าสเปกตรัมย่านความถี่สูงลดลงอย่างชัดเจนและแนบไม่ปราฏ สัญญาณรบกวนในย่านความถี่ที่ตรวจวัดได้ บ่งชี้ว่าการใช้ PWM ความถี่สูงช่วยลดการส่งผ่านฮาร์มอนิกของสัญญาณสวิตช์เข้าสู่ความเร็วของมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้การหมุนมีความเรียบและนิ่งมากขึ้น โดยสรุป ความถี่ PWM ที่สูงให้สัญญาณความเร็วที่มีความเสถียรและมีสเปกตรัมรบกวนต่ำกว่าอย่างเด่นชัด เมื่อเทียบกับความถี่ PWM ต่ำซึ่งก่อให้เกิด torque ripple และ noise ในระบบมากกว่า

7. ผลการทดลองการสร้าง Low-Pass Filter สำหรับการวัดความเร็วรอบมอเตอร์

การวัดความเร็วรอบมอเตอร์สามารถลดสัญญาณรบกวนและค่าเกินจริง (spikes) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสัญญาณความเร็วที่ไม่ผ่านการกรอง (กราฟบน) มีความผันผวนสูงและเกิดการกระชากของค่าความเร็วลงต่ำเป็นช่วง ๆ ซึ่งเป็นผลมาจากการ noise ของเซนเซอร์ กระแส ripple จากวงจร PWM และความไม่สม่ำเสมอของแรงบิดในระบบ ทำให้ข้อมูลความเร็วมีความไม่นิ่งและไม่เหมาะ ในทางกลับกัน เมื่อใช้ Low-Pass Filter (กราฟล่าง) สัญญาณความเร็วมีความเรียบต่อเนื่องและเสถียรขึ้น โดย noise ความถี่สูงถูกตัดออก เหลือเพียงสัญญาณเชิงกลที่สัมพันธ์กับความเร็วจริงของมอเตอร์ ทำให้ระบบควบคุมสามารถประเมินความเร็วได้แม่นยำและตอบสนองได้มีเสถียรภาพมากกว่า โดยตัดที่ความถี่ 20 Hz

8. ผลของการกรองสัญญาณและวิเคราะห์ Bode Plot Diagram

Bode Plot นี้ได้จากการประมวลผลข้อมูลด้วย MATLAB โดยนำค่า raw signal และ time stamp ที่เก็บจาก การรับสัญญาณโหลดเซลล์บนระบบมอเตอร์ DC มาสร้างแบบจำลองเป็นระบบ First-Order สำหรับการออกแบบ ฟิลเตอร์ได้เลือกใช้ตัวต้านทานค่า $1 \text{ k}\Omega$ ร่วมกับตัวเก็บประจุ $10.61 \mu\text{F}$ เพื่อกำหนดค่า cutoff frequency ประมาณ 15 Hz ซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องการรองรับสัญญาณสูงสุดราว 20 Hz และช่วยลดสัญญาณรบกวนความถี่สูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อภิปรายผล (วิเคราะห์สิ่งที่เกิดขึ้นในการทดลอง)

9. พฤติกรรมจริงของมอเตอร์แตกต่างจาก Ideal Case อย่างมีนัยสำคัญ

กราฟ Motor Characteristics แสดงให้เห็นว่าความเร็วรอบ กระแส กำลัง และประสิทธิภาพมีแนวโน้มตรงตามทฤษฎี โดยรวม แต่ค่าที่วัดได้จริงมีความไม่เป็นเชิงเส้นมากกว่า เนื่องจากผลกระทบของความสูญเสียทางกล ความร้อน และกระแสกระแสเพื่อน ทำให้จุดกำลังสูงสุดและประสิทธิภาพสูงสุดเหลือมีขนาดต่ำกว่าตามทฤษฎี

10. แรงดันไฟฟ้าเป็นปัจจัยหลักที่กำหนดความเร็วสูงสุดและกระแสstarทของมอเตอร์

กราฟ Speed–Current ที่ระดับแรงดันต่างกัน (PWM ต่างค่า) แสดงเส้นเชิงเส้นที่มีความชันติดลบเหมือนกัน แต่จุดตัด แกนเปลี่ยนไปตามแรงดัน ซึ่งยืนยันว่าเมื่อแรงดันสูงขึ้น ความเร็วสูงสุดและกระแสสูงสุดเพิ่มขึ้น โดยความต้านทานของชุดวงล้อไม่เปลี่ยนแปลง

11. Duty Cycle และความถี่ PWM ส่งผลโดยตรงต่อความเร็ว กระแส และประสิทธิภาพของมอเตอร์
เมื่อ Duty Cycle เพิ่มขึ้น มอเตอร์ได้รับแรงดันเฉลี่ยสูงขึ้น ทำให้ความเร็วและกระแสเพิ่มขึ้นตาม ขณะที่ประสิทธิภาพก็เพิ่มขึ้น โดยความถี่ PWM ที่สูง เช่น 12–48 kHz ช่วยให้สัญญาณขั้นบันจิงขึ้น ลด Torque Ripple และเพิ่มเสถียรภาพของความเร็วเมื่อเทียบกับ PWM ต่ำ เช่น 500 Hz

12. Sign-Magnitude ให้ประสิทธิภาพดีกว่า Locked Anti-Phase อย่างชัดเจน

โหมด Sign-Magnitude ให้ความเร็วราบรื่น กระแส RMS ต่ำ และสมรรถนะโดยรวมสูงกว่า เนื่องจากไม่มีการสลับ แรงดันทิศทางตลอดเวลา ในขณะที่ Locked Anti-Phase เกิดแรงดันกลับขั้วตลอดรอบการทำงาน ทำให้กระแสเพื่อมและแรงบิดกระแสเพื่อมสูง ส่งผลให้ความเร็วไม่นิ่งและลดลงใน Duty Cycle สูง ซึ่งหมายความว่าความเร็วจะลดลงเมื่อเทียบกับโหมด Sign-Magnitude

13. ค่ากระแสจาก Current Sensor หลัง Signal Conditioning มีความเป็นเชิงเส้นและแม่นยำสูง
ค่าดิบจากเซนเซอร์ถูกชดเชยของเซตและปรับสเกลด้วยความชันที่ได้จากการคลาลิเบรต ผลลัพธ์แสดงความเป็นเชิงเส้นตลอดช่วงกระแส 0–6 A ข้อมูลหลังผ่าน Signal Conditioning มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5% เมื่อเทียบกับค่ากระแสจริง ซึ่งเพียงพอสำหรับใช้ในระบบควบคุมและการวิเคราะห์กำลัง

14. ผล FFT ยืนยันว่าความถี่ PWM สูงช่วยลดการรบกวนของสัญญาณความเร็วได้จริง
ในความถี่ต่ำ เช่น 500 Hz พบรหัส Torque Ripple และ Noise ที่ความถี่ต่ำมากกว่า ขณะที่ความถี่สูงตั้งแต่ 6 kHz ขึ้นไปให้สเปกตรัมที่นิ่งและลดการรบกวน ทำให้การหมุนของมอเตอร์ราบรื่นและสัญญาณความเร็วเสถียรมากขึ้น

15. Low-Pass Filter ช่วยเพิ่มความเสถียรในการวัดความเร็วอย่างชัดเจน
สัญญาณความเร็วที่ไม่ผ่านฟิลเตอร์มี Noise สูงและมี Spike จำนวนมาก ในขณะที่สัญญาณที่ผ่านฟิลเตอร์ (Cutoff ~20 Hz) มีความเรียบและต่อเนื่อง ทำให้ระบบ Speed Control สามารถทำงานได้แม่นยำและตอบสนองได้ดีขึ้น

16. การออกแบบฟิลเตอร์ด้วย Bode Plot ช่วยกำหนด Cutoff Frequency ได้เหมาะสมกับงานมอเตอร์
จากการวิเคราะห์ที่ใน MATLAB พบว่าการใช้วงจร RC ($1 \text{ k}\Omega + 10.61 \mu\text{F}$) ให้ความถี่ตัดประมาณ 15 Hz ซึ่งเหมาะสมสำหรับตัดสัญญาณรบกวนความถี่สูง ขณะยังคงข้อมูลความเร็วเชิงกลที่ต้องการไว้ครบถ้วน

ข้อเสนอแนะ

1. จำเป็นต้องใช้การวัดจริงเพื่อยืนยันสมรรถนะของมอเตอร์ เนื่องจากแบบจำลองอุดมคติอาจประเมินผลคลาดเคลื่อน
2. ควรมีเซนเซอร์ภายนอก เช่น Encoder หรือ Tachometer เพื่อเก็บข้อมูลความเร็วและแรงบิดได้แม่นยำ
3. การวิเคราะห์พฤติกรรมโค้งจริงช่วยลดความเสี่ยงในการออกแบบระบบโหลด เช่น ปั๊ม พัดลม หรือระบบเคลื่อนที่

อ้างอิง

- <https://scienceready.com.au/pages/operation-of-a-simple-dc-motor>
<https://www.monolithicpower.com/en/learning/mpscholar/electric-motors/dc-motors/fundamentals>
<https://www.szcomponents.com/blog/detailed-explanation-of-pulse-width-modulation-pwm-basic-principles-and-wide-applications/308>
<https://control.com/technical-articles/understanding-the-basics-of-pulse-width-modulation-pwm/>
<https://soldered.com/learn/hum-the-simple-h-bridge/>
<https://www.modularcircuits.com/blog/articles/h-bridge-secrets/lock-anti-phase-drive/>
<https://www.modularcircuits.com/blog/articles/h-bridge-secrets/sign-magnitude-drive/>

การทดลองที่ 2 Stepper Motor

จุดประสงค์

- เพื่อให้นักศึกษาสามารถอธิบายหลักการทำงานของ Stepper Motor รวมถึงความหมายและบทบาทของโหมดการขับ (Full-Step, Half-Step, Microstep) ต่อการควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์
- เพื่อให้นักศึกษาสามารถตรวจสอบและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณ PWM กับความเร็วรอบของ Stepper Motor ได้อย่างถูกต้อง
- เพื่อให้นักศึกษาสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้กับความเร็วรอบของ Stepper Motor ในแต่ละโหมดการขับ
- เพื่อให้นักศึกษาสามารถควบคุมการทำงานของ Stepper Motor ด้วย MATLAB และ Simulink ร่วมกับบอร์ด Nucleo STM32G474RE และสามารถแสดงผลข้อมูลแบบ Real-Time ของความเร็วเชิงมุมและกระแสไฟฟ้าในหน่วย SI-derived ผ่าน Data Inspector ได้อย่างถูกต้อง
- เพื่อให้นักศึกษาสามารถทำ Signal Conditioning และ Signal Processing ของสัญญาณ Feedback จาก Incremental Encoder และ Hall Current Sensor ได้อย่างครบถ้วน รวมถึงการ Calibrate Sensor, การจัดการข้อมูล และการ Unwrap ค่า Encoder เพื่อให้ได้ค่าความเร็วเชิงมุมที่ถูกต้อง
- เพื่อให้นักศึกษาสามารถเปรียบเทียบผลการทำงานของ Stepper Motor ในโหมด Full-Step, Half-Step และ Microstep และวิเคราะห์ข้อดี-ข้อเสียของแต่ละโหมดได้

สมมติฐาน

- ความเร็วเชิงมุมของ Stepper Motor ขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณที่จ่ายให้
- การเคลื่อนที่ในแต่ละโหมดการทำงานของ Stepper Motor (Full-Step, Half-Step, Micro-Step) มีผลต่อการวัดตำแหน่งความเร็วของ Stepper Motor
- Loss Step จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อความถี่ของสัญญาณสูงกว่าที่ Stepper Motor ตอบสนองได้
- การใช้ Micro-Step อาจทำให้ Loss Step ลดลง เพราะกระแสสูงแบ่งลงเลือด

ตัวแปร

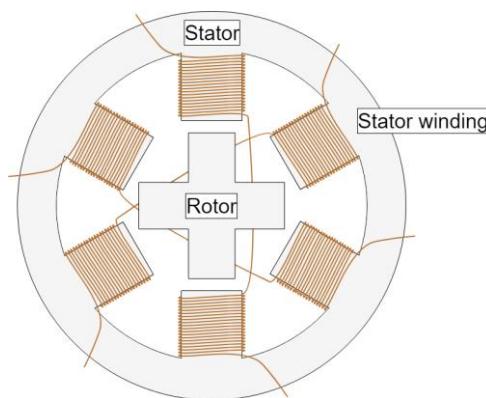
- ตัวแปรต้น:
 - ความถี่ของสัญญาณ PWM ที่จ่ายให้กับ Stepper Motor
- ตัวแปรตาม:
 - ความเร็วเชิงมุมของ Stepper Motor
- ตัวแปรควบคุม:
 - แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่มอเตอร์

- โหมดการขับมอเตอร์ (Full-Step, Half-Step, Microstep)
- ระยะเวลาทดลอง

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. Stepper Motor

Stepper Motor หรือมอเตอร์แบบสเต็ป โดยแกนของมอเตอร์จะหมุนทีละขั้น (Step) โดยแต่ละขั้นนั้นถูกกำหนดหมุนตามทิศทาง ซึ่งแต่ละพัลส์ไฟฟ้าที่จ่ายไปยังมอเตอร์จะทำให้แกนหมุนไปตามมุมที่กำหนด เป็นเพราะโครงสร้างภายในของมอเตอร์ทำให้รู้ตำแหน่งของเพลาได้จากจำนวนสเต็ปที่มอเตอร์ขับไป ไม่จำเป็นต้องมีเซ็นเซอร์เสริม นอกจากนี้ความเร็วของมอเตอร์สามารถควบคุมได้โดยตรงจากการส่งพัลส์ ทำให้ Stepper Motor เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความแม่นยำสูง เช่น หุ่นยนต์ เครื่องพิมพ์ 3D และเครื่อง CNC



รูปที่ 15 องค์ประกอบภายใน Stepper Motor

ตารางที่ 2 แสดงส่วนประกอบของ Stepper Motor

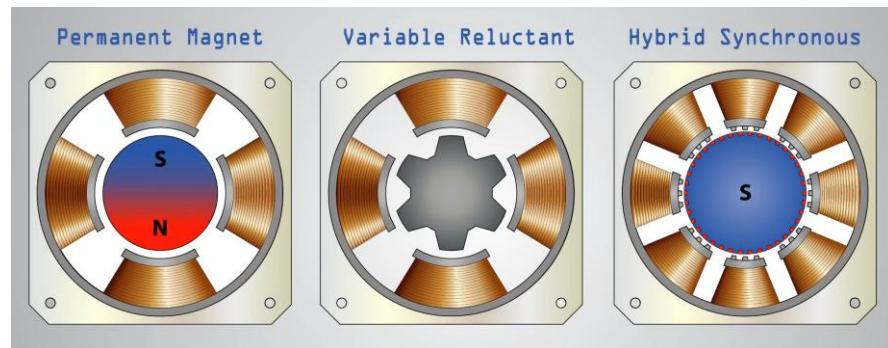
ชื่อ	คำอธิบาย	หน้าที่
Stator	ส่วนที่เม่หมนภายในมีชิดลวดพันอยู่	สร้างสนามแม่เหล็กเมื่อยกระเเส
Rotor	ส่วนหมุนตรงกลางมี 3 ชนิด	หมุนตามลำดับสนามแม่
Stator Winding	ชิดลวดทองแดง	รับกระเเสไฟฟ้าและสร้างสนามแม่เหล็ก

2. การทำงานของ Stepper Motor

การทำงานของ Stepper Motor ขึ้นอยู่กับการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อค้อยล์ของ Stator ถูกจ่ายกระเเสไฟฟ้า จะสร้างสนามแม่เหล็กที่ทำให้ Rotor หมุนไปในตำแหน่งที่สอดคล้องกับสนามแม่เหล็กนั้น การจ่ายกระเเสไฟฟ้าไปยังค้อยล์แต่ละเฟสตามลำดับที่กำหนดจะทำให้ Rotor เคลื่อนที่เป็นขั้น ๆ ไปจนถึงตำแหน่งที่ต้องการ

3. ชนิดของ Stepper Motor

Stepper Motor สามารถแบ่งประเภทได้ตามรูปแบบของโรเตอร์ โดยหลัก ๆ จะมีอยู่ 3 ชนิด คือ Permanent Magnet, Variable Reluctance และ Hybrid Synchronous ซึ่งแบบ Hybrid จะถูกใช้งานมากที่สุด เพราะรวมข้อดีของสองแบบแรกไว้ด้วยกัน ทำให้โรเตอร์มีแรงบิดตี ความละเอียดสูง และควบคุมได้เสถียรกว่าแบบอื่น

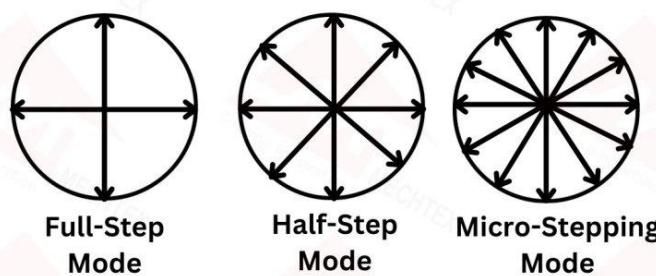


รูปที่ 16 ชนิดของ Stepper Motor

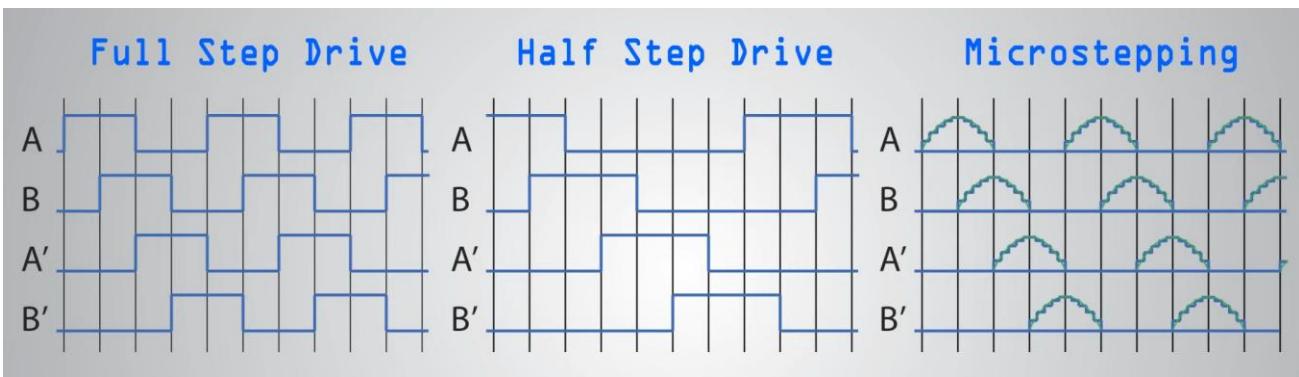
ตารางที่ 3 เปรียบเทียบชนิดของ Stepper Motor

ประเภท Stepper Motor	ลักษณะของ Rotor	ข้อดี	ข้อเสีย
Permanent Magnet	แม่เหล็กถาวร	แรงบิดเริ่มต้นดีที่มุนเป็นขั้นคงที่	ความละเอียดตำแหน่งไม่สูง
Variable Reluctance	โรเตอร์เป็นแกนเหล็ก มีฟัน ใช้หลักการลดความสนามแม่เหล็ก	ความละเอียดสูงตอบสนองไว	แรงบิดต่ำไม่มีแรงยึดตำแหน่งเมื่อไม่มีกระแส
Hybrid Synchronous	แม่เหล็กถาวรและฟันโรเตอร์ร่วมกัน	แรงบิดตี ความละเอียดสูง	-

4. Stepper Motor Drive Mode



รูปที่ 17 Stepper Motor Driver Mode



รูปที่ 18 เปรียบเทียบการขับ Stepper Motor ในแต่ละโหมด

4.1 Full-Step

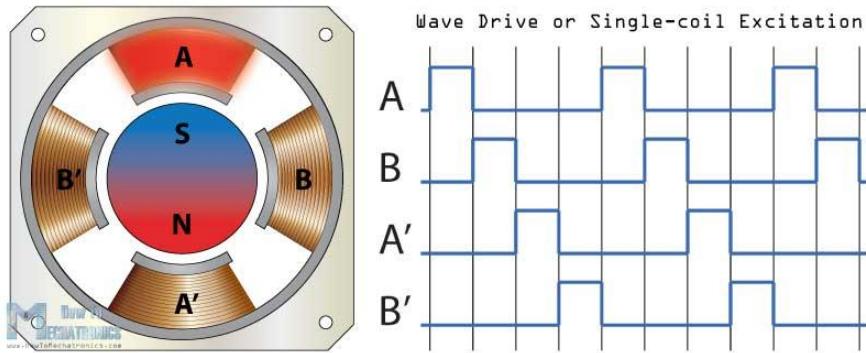
มอเตอร์จะหมุนครั้งละหนึ่งก้าวเต็มต่อแต่ละพัลส์สัญญาณ โดยในมอเตอร์สองเฟสจะมีการจ่ายกระแสสลับกันระหว่างชุดลวดของแต่ละเฟสเป็นลำดับ ทำให้มอเตอร์ขับไปทีละก้าวตามทิศที่เลือก ทั้งหมุนตามเข็ม หรือต้านเข็มได้ ข้อดีของการขับแบบนี้คือให้แรงบิดสูง เพราะมีการกระตุนหลายชุดลวดพร้อมกัน แต่การเคลื่อนที่จะเป็นช่วงค่อนข้างใหญ่และอาจเกิดแรงสั่นสะเทือนหรือเสียงขณะทำงาน จึงเหมาะสมกับงานที่ต้องการแรงบิดมากกว่าเน้นความละเอียดของการหมุน

4.2 Half-Step

มอเตอร์จะหมุนครึ่งก้าวต่อสัญญาณพัลส์ ทำให้จำนวนก้าวต่อรอบเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า การจ่ายกระแสจะสลับระหว่างการเปิดชุดลวดทีละตัวและเปิดสองชุดลวดพร้อมกัน ส่งผลให้มอเตอร์เคลื่อนที่ได้ละเอียดกว่าและมีการสั่นลดลง ข้อดีคือให้ความละเอียดสูงขึ้นและการหมุนราบรื่นกว่า Full-Step แต่แรงบิดจะไม่คงที่—จะมากเมื่อเปิดสองชุดลวด และลดลงเมื่อเปิดเพียงชุดลวดเดียว โหมดนี้จึงเหมาะสมกับงานที่ต้องการความแม่นยำและการเคลื่อนที่เรียบ โดยเฉพาะในช่วงความเร็วต่ำหรือการจัดตำแหน่งที่ต้องการความเที่ยงตรง

4.3 Micro-Stepping

เป็นโหมดขั้นสูงที่สุด โดยแบ่งแต่ละ Full-Step ออกเป็นก้าวเล็ก ๆ หลายขั้น เช่น $1/2$, $1/8$, $1/16$ หรือ $1/32$ ของ Full-Step ทำให้สามารถควบคุมการหมุนของมอเตอร์ได้อย่างแม่นยำมากที่สุด การทำงานคือแทนที่จะจ่ายกระแสเต็มให้ชุดลวด จะมีการปรับระดับกระแสในแต่ละชุดลวดอย่างละเอียด เพื่อให้มอเตอร์หมุนไปในตำแหน่งก้าวเล็ก ๆ ตามที่กำหนด ข้อดีคือมอเตอร์หมุนเรียบสุด เสียงและแรงสั่นต่ำมีความแม่นยำสูงเมื่อเทียบกับโหมด Full-Step และ Half-Step โหมดนี้เหมาะสมกับงานที่ต้องการความละเอียดสูง เช่น เครื่อง CNC เครื่องพิมพ์ 3 มิติ และระบบอัตโนมัติ ข้อเสียคือแรงบิดน้อย เนื่องจากกระแสไฟฟ้าจะถูกกระจายไปทั่วชุดลวดทั้งสองชุดอย่างเท่าเทียมกันในแต่ละ Micro-Step



รูปที่ 19 Wave Drive Stepper Motor

4.4 Wave Drive

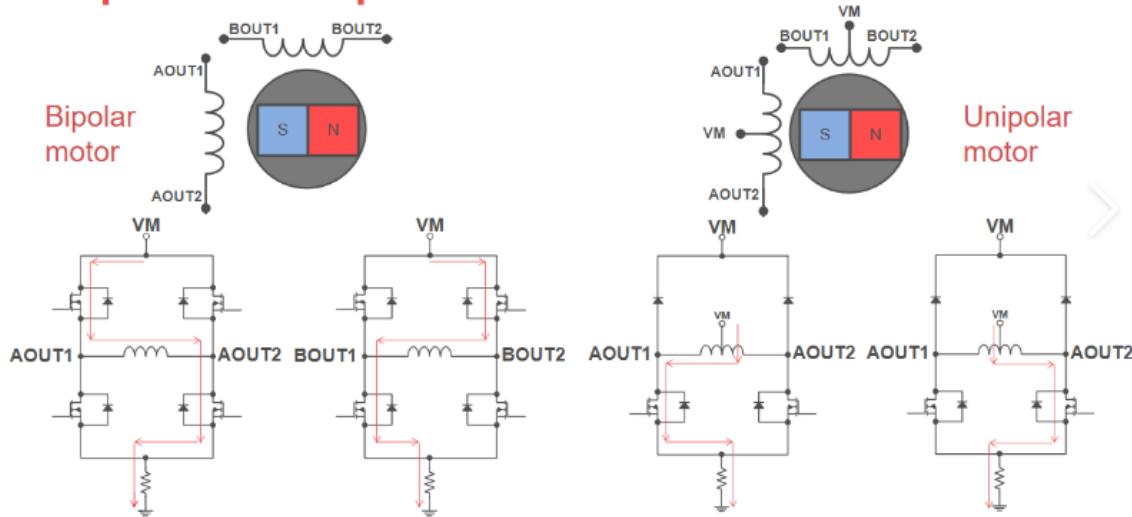
เป็นรูปแบบการขับ Stepper Motor ขั้นพื้นฐานที่สุด โดยลักษณะการทำงานคือมีการจ่ายกระแสไฟเพียงหนึ่งเฟสในแต่ละช่วงเวลาเท่านั้น เช่น เมื่อจ่ายกระแสไฟเฟส A สนามแม่เหล็กของเฟสันจะดึงให้โรเตอร์หมุนไปยังตำแหน่งที่สอดคล้องกัน จนนั้นจึงสลับไปจ่ายเฟส B และวิทยุต่อร์กจะหมุนต่อไปอีกหนึ่งก้าว การกระตุนขดลวดแบบที่ลงทะเบียนนี้ทำให้มอเตอร์เคลื่อนที่เป็นขั้น ๆ อย่างต่อเนื่อง ข้อดีของ Wave Drive คือโครงสร้างการขับที่เรียบง่ายและใช้พลังงานน้อย เพราะมีการปิดใช้งานเพียงเฟสเดียวในแต่ละช่วง แต่ข้อเสียคือแรงบิดต่ำกว่าการขับแบบอื่น เนื่องจากไม่ได้ใช้ขดลวดมากกว่าหนึ่งชุดพร้อมกัน จึงไม่เหมาะสมกับงานที่ต้องการแรงบิดสูง แม้ว่ามอเตอร์ 4 เฟสจะยังให้การหมุนครบหนึ่งรอบเช่นเดิม แต่ประสิทธิภาพแรงบิดจะน้อยกว่า Full-Step หรือ Half-Step อย่างชัดเจน

ตารางที่ 4 ข้อดีข้อเสียของแต่ละ Drive Mode

Drive Mode	ข้อดี	ข้อเสีย
Wave Drive	วงจรง่าย, ประหยัดพลังงาน	แรงบิดต่ำ, กระตุก
Full-Step	แรงบิดสูงสุด, ควบคุมง่าย	เสียงดัง, สั่นมาก, ความละเอียดต่ำ
Half-Step	ความละเอียดมากขึ้น, การหมุนลื่นกว่า Full-Step	แรงบิดไม่คงที่
Microstepping	ละเอียดที่สุด, การเคลื่อนที่นิ่มนวล	แรงบิดลดลงเมื่อแบ่ง step มากรัวเร็วซับซ้อน

5. Stepper Motor Type

Bipolar vs. unipolar



รูปที่ 20 stepper motor type

ใน Stepper Motor Driver การจ่ายกระแสให้ขาดลวดสามารถทำได้สองรูปแบบคือ Unipolar และ Bipolar ซึ่งแต่ละแบบมีผลต่อวิธีควบคุมมอเตอร์โดยตรงดังนี้

5.1 Unipolar

มอเตอร์ชนิดนี้มีขาดลวดแต่ละเฟสแบ่งเป็นสองส่วนและมีจุดกึ่งกลาง (Center Tap) อยู่ตั้งกลาง ทำให้กระแสไฟหลักได้เพียงทิศทางเดียวในแต่ละครึ่งขาดลวด การควบคุมจึงทำได้ง่าย วงจรไม่ซับซ้อน แต่เนื่องจากใช้งานเพียงครึ่งขาดลวดในแต่ละช่วง แรงบิดที่ได้จะค่อนข้างต่ำกว่าแบบอื่น

5.2 Bipolar

มอเตอร์แบบ Bipolar จะไม่มี Center Tap อยู่กลางขาดลวด ทำให้กระแสต้องสลับทิศทางไป-กลับ ภายในขาดลวดเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กให้เรตอร์หมุนต่อเนื่อง แม้วิธีควบคุมจะซับซ้อนกว่าแบบ Unipolar แต่ข้อดีคือสามารถใช้ขาดลวดได้เต็มช่วง จึงให้แรงบิดสูงกว่า และเหมาะสมกับงานที่ต้องการกำลังมาก

6. Loss Step

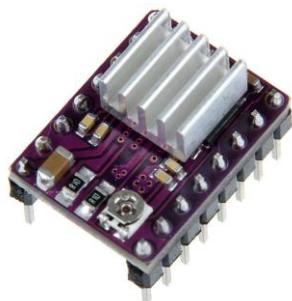
Loss Step คือภาวะที่ Stepper Motor ไม่สามารถหมุนตามจำนวนสเต็ปที่ถูกสั่งให้จริง ทำให้ตำแหน่งของโรเตอร์คลาดเคลื่อนจากตำแหน่งที่ควรจะเป็น สาเหตุเกิดจากแรงบิดที่มอเตอร์สร้างได้ไม่เพียงพอ

ต่อโหลด หรือความเร็วในการเปลี่ยนสัญญาณสูงกว่าที่โรเตอร์จะตามทัน ส่งผลให้มอเตอร์ “ข้ามสเต็ป” หรือ “ไม่หมุน” ตามลำดับพัลส์ที่สั่ง ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในงานที่ต้องการความแม่นยำ

Loss Step มักเกิดขึ้นจากปัจจัยต่อไปนี้

- 6.1 โหลดเกินกำลัง (Overload) โหลดมีแรงต้านมากกว่าที่มอเตอร์สามารถสร้างแรงบิดได้ ทำให้โรเตอร์ไม่สามารถขับตามสเต็ปที่สั่ง
- 6.2 ความเร็วสูงเกินไป หากเพิ่มความถี่ของพัลส์เร็วเกินไป โรเตอร์จะหมุนตามไม่ทันและข้ามสเต็ป
- 6.3 แรงเฉียบของโหลดสูง โหลดที่มีแรงเฉียบมากต้องใช้แรงบิดสูงในการเร่งเบื่องต้นทำให้เกิด loss step
- 6.4 กระแสที่จ่ายไม่เพียงพอ กระแสต่ำทำให้แรงบิดลดลงจึงไม่สามารถหมุนให้ครุบสเต็ปตามที่ต้องการ

7. DRV8825 Stepper Motor Driver



รูปที่ 21 DRV8825 Stepper Motor Driver

DRV8825 เป็นไดรเวอร์สำหรับบังคับ Stepper Motor แบบ Bipolar โดยจุดเด่นคือสามารถปรับความละเอียดของสเต็ป ได้หลายระดับผ่านขา MODE 0, MODE 1 และ MODE 2 ซึ่งแต่ละขาจะรับสัญญาณ High/Low เพื่อกำหนดรูปแบบการขับมอเตอร์

สามารถกำหนดโหมดการทำงานได้ดังนี้

7.1 Full Step: ตั้งค่า $M0 = 0, M1 = 0, M2 = 0$

7.2 Half Step (1/2 Step): ตั้งค่า $M0 = 1, M1 = 0, M2 = 0$

7.3 Micro 8 Step (1/8 Step) : ตั้งค่า $M0 = 1, M1 = 1, M2 = 0$

7.4 Micro 16 Step (1/16 Step) : ตั้งค่า $M0 = 0, M1 = 0, M2 = 1$

7.5 Micro 32 Step (1/32 Step) : ตั้งค่า $M0 = 1, M1 = 0, M2 = 1$

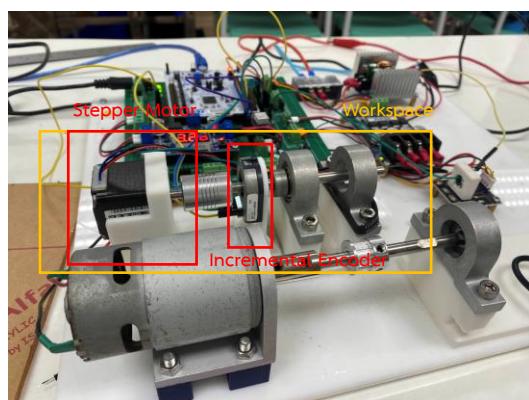
ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ติดตั้งบอร์ด Nucleo-STM32 ลงบน MotorXplorer
2. ติดตั้ง DRV8255 และ Incremental Encoder AMT-103V ลงบน MotorXplorer
3. ต่อไฟจาก Adapter 24VDC 10A เพื่อจ่ายไฟให้มอเตอร์ และต่อ Power supply 12VDC 2.5A เลี้ยงไฟบอร์ด Nucleo-STM32 จากนั้นต่อ Ground ร่วมกันหมุด
4. เชื่อมต่อบอร์ด Nucleo-STM32 เข้ากับคอมพิวเตอร์ผ่านสาย USB
5. โอนไฟล์เฟิร์มแวร์ .bin ซึ่งกำหนดฟังก์ชันพื้นฐาน เช่น การอ่านค่าการส่งสัญญาณลงบอร์ด Nucleo
6. ปรับโหมดการทำงานของ ไดเรเวอร์
7. ปรับค่าความถี่ตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงจนถึงจุด Cut-off frequency
8. ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยและเพิ่มความแม่นยำของข้อมูล

1. การเตรียมความพร้อมของบอร์ดสำหรับการทำงานทดลอง

เตรียมระบบควบคุม Stepper Motor ให้พร้อมก่อนเริ่มเก็บข้อมูล โดยใช้ชุด MotorXplorer ที่ทาง TA ติดตั้งและตั้งค่ามาให้ล่วงหน้า ทั้งในส่วนของการส่งสัญญาณควบคุมไปยัง Stepper Motor และการอ่านค่ามุ่งจาก Incremental Encoder บนบอร์ดเดียวกัน เพื่อให้สามารถตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่ป้อนเข้าและความเร็วของมอเตอร์ได้อย่างถูกต้อง

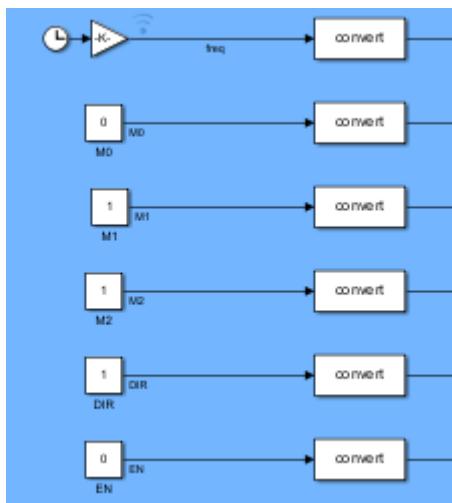
ในส่วนของ Hardware ทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ เข้ากับบอร์ด MotorXplorer ตามตำแหน่งที่กำหนด รวมถึงตรวจสอบการยึดมอเตอร์ให้แน่นเพื่อป้องกันการสั่น และทดสอบอุปกรณ์ที่ส่งผลกระทบจากแรงเสียดทานหรือ Noise ที่อาจเกิดจากอุปกรณ์ภายนอก เมื่อทั้งหมดถูกตั้งค่าพร้อมแล้ว จึงเริ่มขั้นตอนการใช้งาน MATLAB เพื่อสั่งงานมอเตอร์และอ่านค่าที่ encoder วัดได้



รูปที่ 22 เตรียมบอร์ด Motor Xplorer ให้พร้อม

2. ตั้งค่าโปรแกรม MATLAB สำหรับเก็บผลการทดลอง

ในการตั้งค่า MATLAB สำหรับควบคุม Stepper Motor ทำใน Simulink โดยเริ่มจากการกำหนดโหมดการทำงานของไดรเวอร์ DRV8825 ได้แก่ M0, M1 และ M2 ซึ่งเป็นพินที่ใช้เลือก Drive Mode ของ Stepper Motor เช่น Full Step, Half Step หรือ Microstep ต่าง ๆ

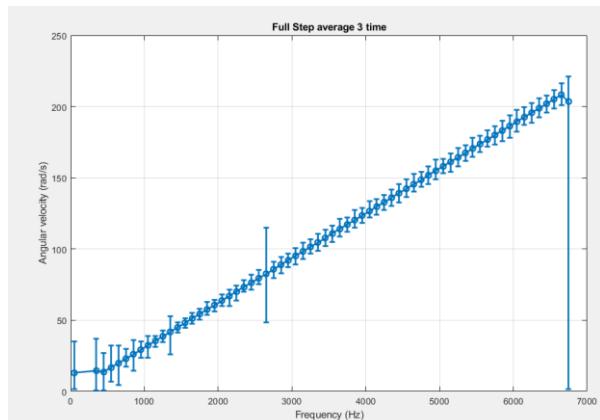


รูปที่ 23 ตัวอย่างการปรับโหมดใน Simulink

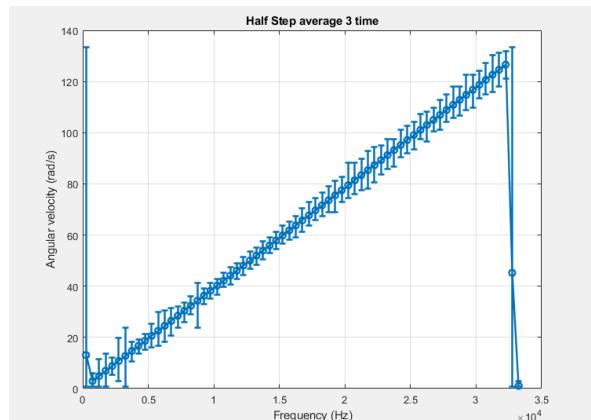
โดยการทดลองนี้จะตั้งค่าทิศทาง (DIR) เป็น 1 เสมอ และเนื่องจาก DRV8825 ทำงานแบบ Active-Low จึงตั้งค่า Enable Pin เป็น 0 เพื่อให้สามารถขับ Stepper Motor ได้ การกำหนดความถี่ของ Stepper โดยจะต่อ Block Clock ต่อเข้า กับ Block Gain เพื่อให้ความถี่เพิ่มขึ้นตามเวลาที่ผ่านไป โดยสำหรับการทดลองนี้จะตั้งค่า gain ไว้ที่ 200 หมายความว่าความถี่จะเพิ่มขึ้นทีละ 200 ต่อวินาที และเก็บค่าความเร็วและความถี่ผ่าน Data Inspector แบบ Real-Time

จากนั้นนำค่าความถี่ (Pulse) และความเร็วเชิงมุ่งที่ได้จากการทดลองในแต่ละโหมดมาบันทึกไว้ทั้งหมด 3 รอบ และทำการ เฉลี่ยผลการวัดทั้ง 3 รอบ เพื่อให้ค่าที่ได้มีความเสถียรและลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวน ก่อนจะนำค่าที่เฉลี่ยแล้วไปพล็อตกราฟเปรียบเทียบใน MATLAB

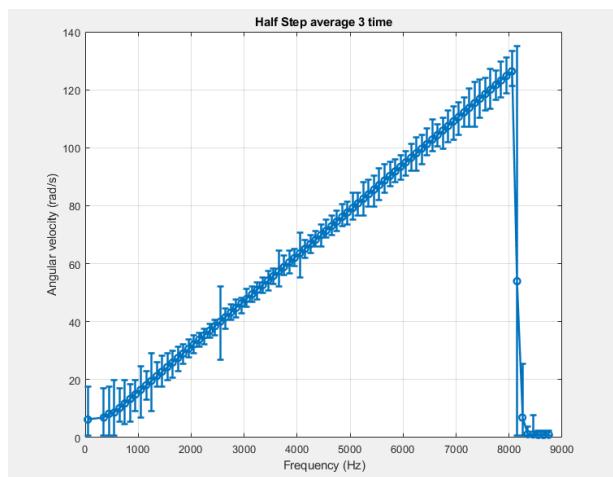
ผลการทดลอง



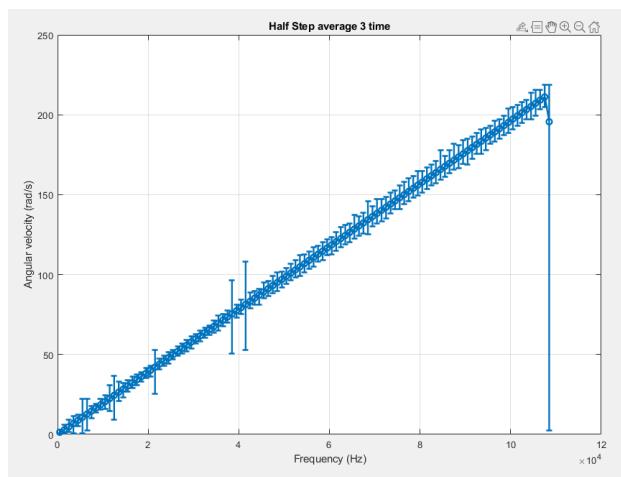
รูปที่ 24 ปรับโหมด Full Step



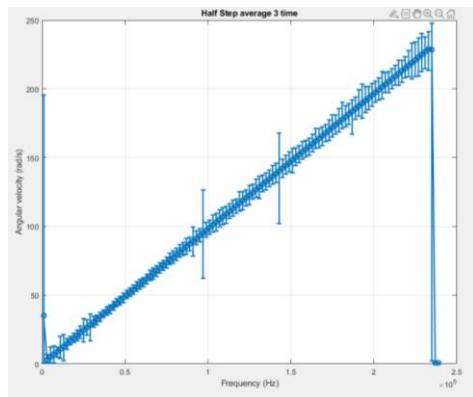
รูปที่ 26 ปรับโหมด 1/8 MicroStep



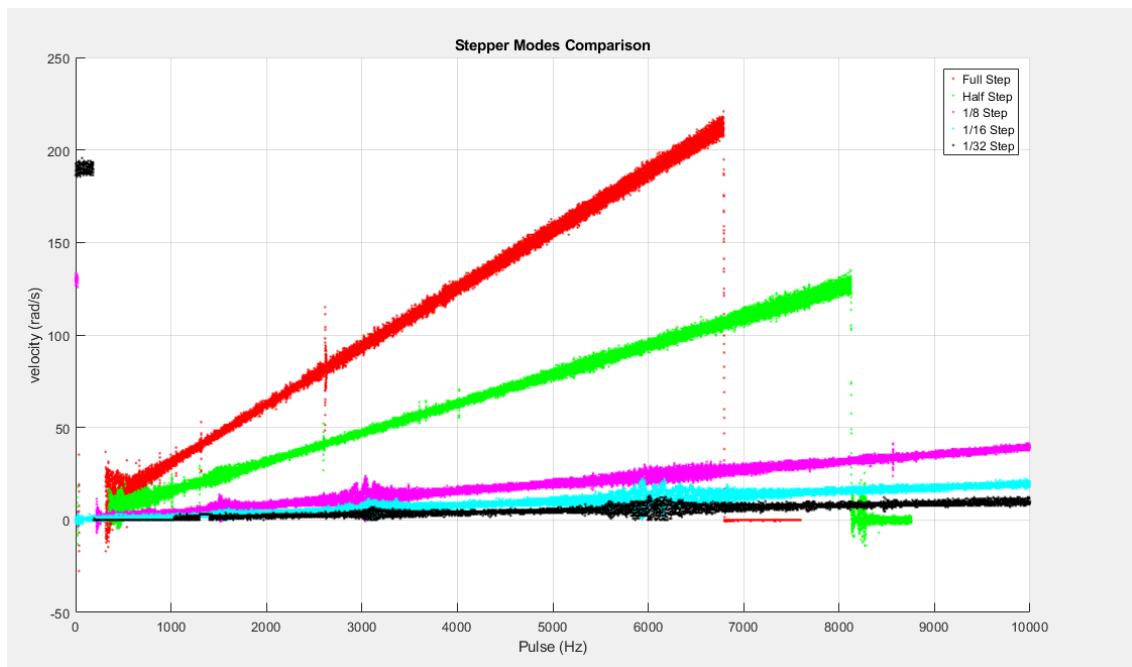
รูปที่ 25 ปรับโหมด Half Step



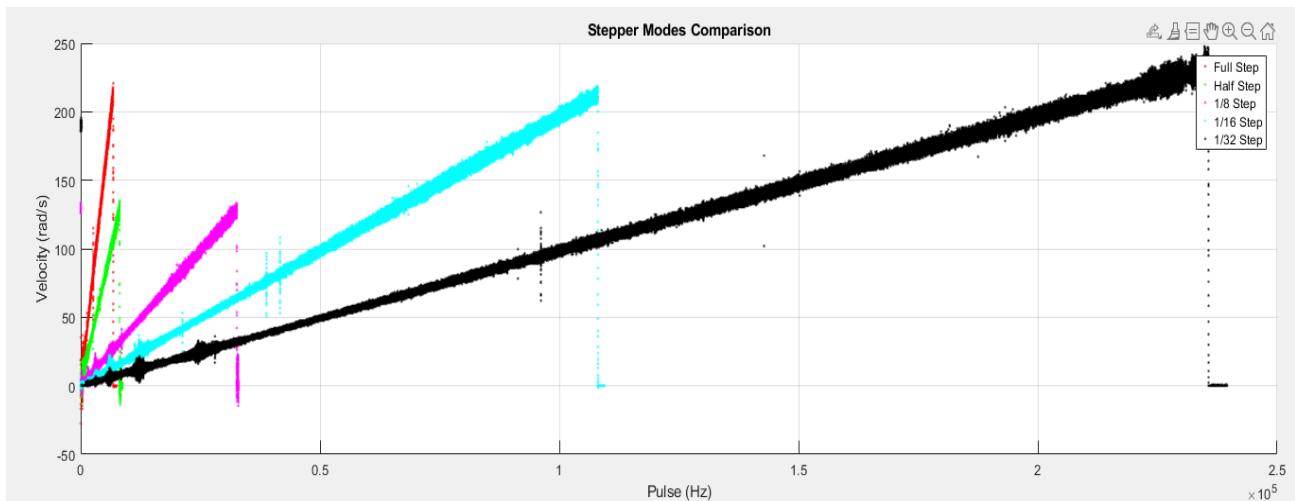
รูปที่ 27 ปรับโหมด 1/16 Micro Step



รูปที่ 28 ปรับโหมด 1/32 Micro Step



รูปที่ 29 ความถี่ของสัญญาณที่จ่ายให้กับ Stepper Motor ช่วง 0-10,000 Hz



รูปที่ 30 ความถี่ของสัญญาณที่จ่ายให้กับ Stepper Motor จนทุกช่วงเกิด Loss Step

จะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณที่จ่ายให้กับมอเตอร์และความเร็วที่มอเตอร์หมุนไปแปรผัน ตรงกันแบบ Linear อยู่เสมอ ทั้งนี้ Drive Mode จะส่งผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของ ความเร็ว

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณพัลส์ที่จ่ายให้ Stepper Motor และความเร็ว เชิงมุม เห็นได้ว่า ความเร็วเพิ่มขึ้นตามความถี่ของสัญญาณแบบเป็นเส้นตรงความถี่มากขึ้นความเร็ว ก็มากขึ้นตาม จาก รูปในช่วงความถี่ประมาณ 0–10,000 Hz

เมื่อเปรียบเทียบ Drive Mode ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง พบร้า荷德ที่มีความละเอียดสูงกว่า เช่น 1/16 หรือ 1/32 Step จะให้ความเร็วที่เพิ่มขึ้นมากกว่า荷德ที่มีความละเอียดต่ำกว่า เช่น Full Step หรือ Half Step เนื่องจาก

จำนวนสเตปที่ต้องขยับเพิ่มขึ้นในหนึ่งรอบ ทำให้ความเร็วชิงมุ่งต่อพัลส์ลดลง อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความละเอียดของ Drive Mode ช่วยให้มอเตอร์หมุนได้เรียบและเสถียรขึ้น แม้ความเร็วรวมจะน้อยลงก็ตาม

จากผลที่ได้สามารถสรุปได้ว่า Stepper Motor มีพฤติกรรมตอบสนองต่อความถี่ของสัญญาณขับในลักษณะ เชิงเส้น และ Drive Mode ที่เลือกใช้จะมีผลโดยตรงต่อทั้งความละเอียดของการเคลื่อนที่ ความนุ่มนวล และความเร็ว สูงสุดที่สามารถทำได้ ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการเลือกโหมดการขับให้เหมาะสมกับลักษณะงานที่ต้องการ

อภิปรายผล

จากการทดลองพบว่า Stepper Motor มีความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณและความเร็วชิงมุ่งที่สอดคล้องตาม สมมุติฐาน กล่าวคือเมื่อเพิ่มความถี่พัลส์ความเร็วของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นตามลักษณะเชิงเส้น อย่างไรก็ตามพบว่ามีช่วงความถี่ที่มอเตอร์เริ่มเกิดความไม่เสถียรหรือเกิด Loss Step ซึ่งขึ้นอยู่กับโหมดการขับที่ใช้

Drive Mode ที่มีความละเอียดสูง เช่น 1/16 และ 1/32 Step ให้การเคลื่อนที่นิ่งและเรียบกว่า แต่ทำให้ความเร็ว สูงสุดลดลง ในขณะที่ Full Step และ Half Step สามารถทำความเร็วได้สูงกว่าแต่มีอาการสั่นมากขึ้น แสดงให้เห็นว่า ความละเอียดของการขับและแรงบิดที่มอเตอร์สามารถให้ได้มีผลต่อเสถียรภาพของการเคลื่อนที่โดยตรง

ข้อเสนอแนะ

- ควบคุมโหมดและแรงเสียดทานให้คงที่ระหว่างการทดลองเนื่องจากปัจจัยเหล่านี้ส่งผลโดยตรงต่อแรงบิด และการเกิด Loss Step โดยตรง
- MotorXplorer Interface ไม่สามารถควบคุมสัญญาณ Enable ของ DRV8825 ได้แบบ Real-Time ทำให้ Stepper Motor จ่ายแรงดันไฟฟ้าตลอดเวลาทำให้เกิดความร้อนสะสมซึ่งอาจลดประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ได้

อ้างอิง

<https://mechtex.com/blog/explore-the-different-stepping-modes-of-a-stepper-motor>

<https://mechtex.com/blog/types-of-stepper-motor>

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

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

<https://youtu.be/TWMai3oirnM?si=oOzyKLJA0TXCMNxk>

<https://youtu.be/TWMai3oirnM?si=szNnFLKH4WnKWFFD>

[Unipolar vs. Bipolar drive for stepper motors, Part 1: principles - Power Electronic Tips](#)

การทดลองที่ 3 Brushless DC Motor

จุดประสงค์

- เพื่อศึกษาหลักการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงรีเპรงถ่าน (Brushless DC Motor: BLDC) และโครงสร้างระบบขั้บเคลื่อนแบบ 3 เฟส
- เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการควบคุมแบบมีเซนเซอร์ (Hall Sensor) และแบบไรเซนเซอร์ (Back EMF Sensing)
- เพื่อทำความเข้าใจเทคนิคการควบคุม BLDC Motor ได้แก่ Trapezoidal Drive, Sinusoidal Drive และ Field-Oriented Control (FOC)
- เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างการขั้บแบบ 6-Step (Trapezoidal) และแบบ FOC ในมุมมองของการจัดการเวลาของมอเตอร์
- เพื่อศึกษาผลของความถี่สัญญาณ PWM ต่อความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์
- เพื่อทำความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ Back EMF และผลตอบสนองจาก Hall Sensor ต่อการกำหนดลำดับการจ่ายไฟของมอเตอร์
- เพื่อฝึกทักษะการใช้งาน Oscilloscope 4 Channel เพื่อจับสัญญาณ 3 เฟสและสัญญาณ Back EMF
- เพื่อวิเคราะห์และตีความรูปคลื่นของสัญญาณไฟฟ้า พร้อมเปรียบเทียบผลการทดลองกับทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สมมติฐาน

การควบคุมแบบ Field-Oriented Control (FOC) คาดว่าจะให้แรงบิดที่เรียบและสม่ำเสมอกว่าแบบ 6-Step เนื่องจากสามารถจัดการทิศทางและขนาดของกระแสให้สมพันธ์กับตำแหน่งของโรเตอร์ได้แม่นยำกว่า ส่วนการใช้ Hall Sensor ในการระบุตำแหน่งโรเตอร์คาดว่าจะให้ข้อมูลที่เสถียรและแม่นยำกว่าการประเมินจาก Back EMF โดยเฉพาะในช่วงความเร็วต่ำ สุดท้าย ความถี่ของสัญญาณ PWM คาดว่าจะส่งผลโดยตรงต่อความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ โดยความถี่ที่สูงขึ้นจะช่วยให้การควบคุมกระแทกและการตอบสนองของมอเตอร์มีประสิทธิภาพมากขึ้น

ตัวแปร

- ตัวแปรต้น:
 - ความถี่ของสัญญาณ PWM
- ตัวแปรตาม:
 - ความเร็วรอบของมอเตอร์
 - รูปแบบของสัญญาณไฟฟ้า (เช่น Back EMF, กระแสไฟ)
- ตัวแปรควบคุม:
 - ประเภทและพารามิเตอร์ของมอเตอร์ BLDC
 - แรงดันไฟเลี้ยง

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

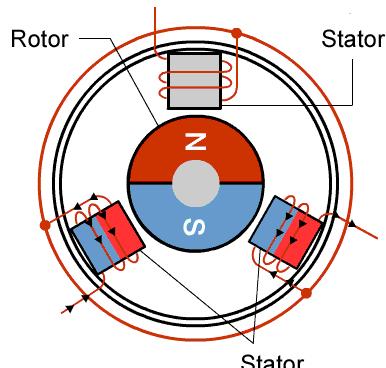
หลักการการทำงานของ BLDC และ BLDC คืออะไร

มอเตอร์ไร้แปรงถ่านเป็นมอเตอร์กระแสตรงที่ ไม่มีแปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์แบบกลไก แต่ใช้ วงจร อิเล็กทรอนิกส์ เป็นตัวสลับกระแสให้กับชุดลวดสเตเตเตอร์แทน ทำให้ลดการเสียดสี ความร้อน และการสึกหรอของ ข้อส่วนภายนอกอย่างมาก

โครงสร้างหลักมีสองส่วน

- **โรเตอร์ (Rotor):** แม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet)
- **สเตเตอร์ (Stator):** ชุดลวดสามเฟส

เมื่อควบคุมกระแสให้หลอดสัมภับในชุดลวดอย่างถูกลำดับ จะเกิด สนามแม่เหล็กหมุน (Rotating Magnetic Field) ที่ดึงให้โรเตอร์หมุนไปตามนั้น



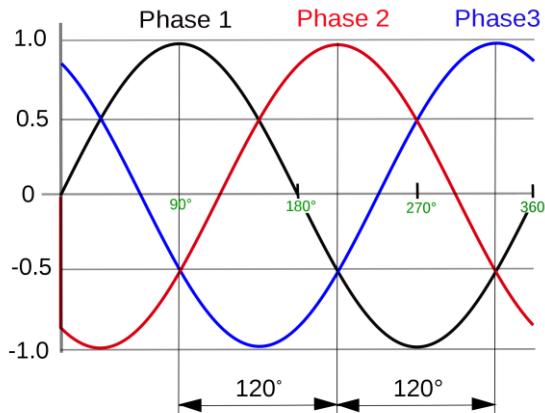
รูปที่ 31 ส่วนประกอบภายใน BLDC Motor

ทำงานโดยให้กระแสไฟสามเฟสไหลสลับกันในชุดลวดสเตเตเตอร์เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กหมุน และสนามนี้จะดึง โรเตอร์ที่เป็นแม่เหล็กถาวรให้หมุนตาม การสลับเฟสทั้งหมดถูกควบคุมโดยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (ESC) ซึ่งต้องรู้ตำแหน่ง โรเตอร์ก่อนสั่งจ่ายกระแส จึงมีทั้งแบบมีเซนเซอร์ (ใช้ Hall Sensor) และแบบไม่มีเซนเซอร์ (อาศัย Back-EMF) การ ควบคุมอาจเป็นแบบ Six-Step ที่ง่ายแต่มีแรงบิดเป็นคลื่น หรือแบบ FOC ที่ให้แรงบิดเรียบและประสิทธิภาพสูง

หลักการของสัญญาณ 3-Phase

สัญญาณ 3-Phase ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ BLDC เป็นชุดของกระแสไฟฟ้าสามเฟสที่มีเฟสต่างกัน 120 องศาไฟฟ้า โดยเฟสทั้งสามนี้จะถูกจ่ายเข้าสู่ชุดลวดสเตเตเตอร์ของมอเตอร์ในรูปแบบสลับ (AC) ที่ได้จากการแปลงกระแส DC ผ่านตัวควบคุมหรืออินเวอร์เตอร์ เมื่ออินเวอร์เตอร์จ่ายสัญญาณทั้งสามเฟสเนื้อๆตามลำดับอย่างต่อเนื่อง จะเกิด สนามแม่เหล็กหมุนภายในสเตเตเตอร์ สนามแม่เหล็กที่หมุนนี้จะดึงให้โรเตอร์ซึ่งมีแม่เหล็กถาวรที่ยึดติดอยู่หมุนตามไป ทำ ให้เกิดการหมุนเชิงกลของเพลาของมอเตอร์ การจัดเรียงรูปคลื่นของสัญญาณแต่ละเฟสอาจเป็นรูป Sine Wave หรือ Trapezoidal ขึ้นกับการออกแบบและรูปแบบการควบคุม หากต้องการการหมุนที่เรียบและแรงบิดคงที่มากจะใช้คลื่น

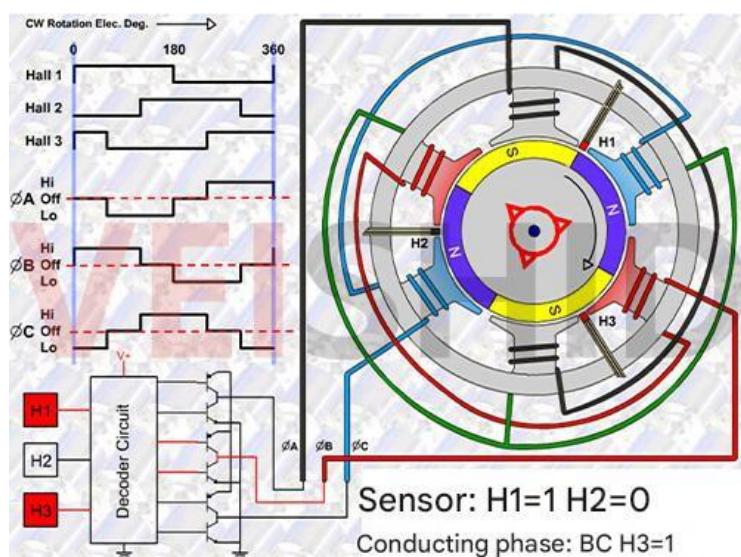
ไซน์ แต่ถ้าต้องการโครงสร้างวงจรที่ง่ายขึ้นก็อาจใช้สัญญาณตราไฟโซ่อิດ นอกจากนี้ หากต้องการเปลี่ยนทิศการหมุนของมอเตอร์ เพียงแค่สลับลำดับของเฟสสองเฟสได้ ก็ได้ เช่น U-V-W เป็น U-W-V ก็จะทำให้มอเตอร์หมุนกลับทิศทันที



รูปที่ 32 Example of 3 Phase Signal

หลักการของ Hall Effect Sensor

เซ็นเซอร์ฮอลล์ทำงานจากหลักการของ **Hall Effect** คือเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำหรือชิ้นกาวตัวนำและสัมผัสกับ สนามแม่เหล็กแบบตั้งฉาก จะเกิดแรงดัน Hall (Hall Voltage) ขึ้นข้ามตัวนำ ซึ่งแรงดันนี้จะเปลี่ยนแปลงตามทิศทางและความเข้มของสนามแม่เหล็ก ในมอเตอร์ BLDC เซ็นเซอร์ฮอลล์ติดตั้งรอบสเตเตเตอร์เพื่อ ตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์แบบเรียลไทม์ เมื่อแม่เหล็กถูกหูรบบนโรเตอร์หมุนผ่าน เซ็นเซอร์จะส่งสัญญาณดิจิทัล (มักมี 3 สัญญาณ a, b, c) ไปยังตัวควบคุม มอเตอร์จะใช้ข้อมูลนี้กำหนด ลำดับการจ่ายกระแสไฟไปยังชุดลวด เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กหมุน ผลลัพธ์คือการหมุนของโรเตอร์อย่างราบรื่นและแม่นยำ โดยเฉพาะในความเร็วต่ำหรือช่วงเริ่ม-start



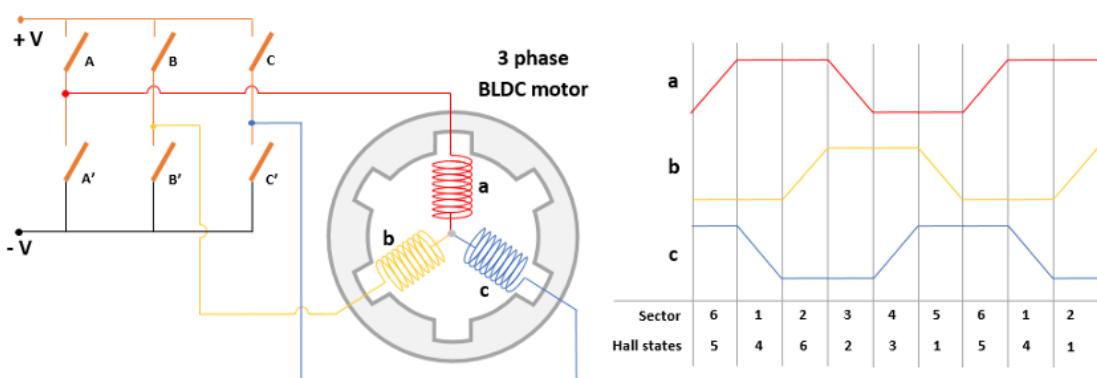
รูปที่ 33 Hall Effect Sensor ภายใน BLDC Motor

หลักการของ Back-EMF Sensor

การควบคุมแบบ sensorless ใช้หลักการ แรงเคลื่อนย้อนกลับ (Back Electromotive Force, BEMF) ที่เกิดขึ้นเมื่อโรเตอร์หมุนตัดผ่านสนามแม่เหล็กในชุดลวดสเตเตอร์ แรงดัน BEMF จะมีเฟสสัมพันธ์กับตำแหน่งโรเตอร์ ตัวควบคุมจะรับหรือประมวลผล BEMF (เช่น ตรวจ zero-crossing หรือใช้ observer/PLL/SMO) เพื่อ ประมาณตำแหน่งและเฟสของโรเตอร์ แล้วจึงสั่งคอมมิวเตชันแบบอิเล็กทรอนิกส์ ข้อจำกัดคือ ที่ความเร็วต่ำหรือขณะ starters ที่ BEMF มีค่าน้อยมากหรือแทบไม่มี ดังนั้นต้องใช้อัลกอริทึม starters แบบ open-loop หรือ observer ช่วย เพื่อให้มอเตอร์เริ่มหมุนและสามารถใช้ BEMF สำหรับคอมมิวเตชันเมื่อความเร็วเพียงพอ

การขับเคลื่อนแบบ 6-Step

การควบคุมมอเตอร์แบบ Six-Step เป็นเทคนิคที่ขับกระแสให้กับชุดลวดสามเฟสของมอเตอร์ BLDC ที่ละสองเฟสในแต่ละช่วงการหมุน โดยแบ่งตำแหน่งโรเตอร์ออกเป็น 6 ช่วง (60° ต่อหนึ่งช่วง) และใช้สัญญาณจาก Hall Sensor หรือ Back-EMF Sensing เพื่อกำหนดช่วงการสั่งงานสวิตซ์ในลำดับที่ถูกต้อง การสั่งงานแบบนี้ทำให้สนามแม่เหล็กของสเตเตอร์ “ก้าว” ไปทีละตำแหน่ง ทำให้โรเตอร์หมุนตาม แต่ในลักษณะที่มีการเปลี่ยนกระแสแบบขั้นบันได (Trapezoidal Current) ซึ่งส่งผลให้เกิดแรงบิดไม่คงที่ หรือ Torque Ripple สูง รูปแบบนี้มีข้อดีคือโครงสร้างง่าย ไม่ต้องการการประมวลผลซับซ้อน และต้นทุนต่ำ จึงมักใช้ในงานที่ไม่ต้องการความเรียบของแรงบิดมาก เช่น พัดลม เครื่องดูดฝุ่น และเครื่องมือไฟฟ้า

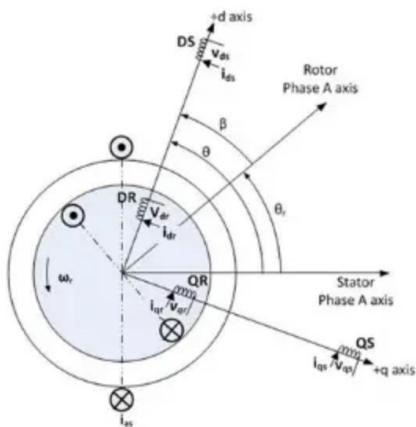
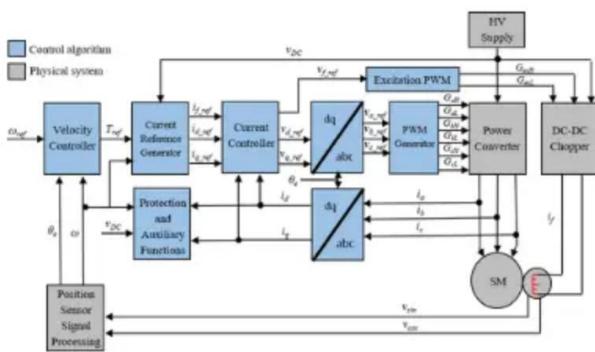


รูปที่ 34 6-Step Commutation พร้อม Hall State to Phase Drive Table

การควบคุมแบบ FOC

Field-Oriented Control เป็นเทคนิคควบคุมกระแสในมอเตอร์ให้เกิดแรงบิดอย่างมีประสิทธิภาพและเรียบต่อเนื่อง โดยอาศัยการแปลงพิกัดกระแสสามเฟสให้อยู่ในแกนหมุนเดียวกับสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ ผ่าน Clarke Transform และ Park Transform ซึ่งทำให้สามารถแยกกระแสออกเป็นสองแกนคือ i_d สำหรับควบคุมฟลักซ์แม่เหล็ก และ i_q สำหรับควบคุมแรงบิดโดยตรง แล้วใช้ PI Controller จัดการค่าทั้งสองก่อนแปลงกลับและสร้างสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์ผ่าน Space Vector PWM (SVM) เนื่องจาก FOC รู้ตำแหน่งโรเตอร์แบบ Real-Time (จาก Hall Sensor/Encoder หรือประเมินด้วย Observer ในระบบ Sensorless) จึงสามารถรักษามุมแรงบิดให้เหมาะสมได้ตลอด ส่งผลให้แรงบิดเรียบมาก ประสิทธิภาพสูง และตอบสนองดี เหมาะกับงานควบคุมความแม่นยำสูง เช่น หุ่นยนต์ระบบเชอร์โว และยานยนต์ไฟฟ้า

What is Field Oriented Control?



Electrical 4 U

รูปที่ 35 เวกเตอร์กระแสบนแกน dq + โครงสร้างบล็อกໄດ้อะแกรม FOC

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบ 6-Step Commutation กับ Field-Oriented Control (FOC)

หัวข้อ	6-Step Commutation	Field-Oriented Control (FOC)
หลักการ	ขั้บกระแสไปยังชุดลวดสองเฟสต่อครั้ง 6 ช่วง (60° ต่อช่วง) \rightarrow กระแสเป็นแบบขั้นบันได (Trapezoidal)	แปลงกระแสสามเฟสไปแกน dq (Clarke & Park Transform) \rightarrow แยกแกน id ควบคุมฟลักซ์, iq ควบคุมแรงบิด \rightarrow ใช้ PI Controller + Space Vector PWM
ความเรียบแรงบิด (Torque Ripple)	สูง เนื่องจากกระแสเปลี่ยนแบบขั้นบันได	ต่ำมาก แรงบิดเรียบต่อเนื่อง
ประสิทธิภาพ	ปานกลาง	สูง เนื่องจากควบคุมแรงบิดได้แม่นยำ
การตอบสนองต่อโหลด/ความเร็ว	จำกัด การควบคุมแรงบิดและความเร็ว	ดีมาก ตอบสนองเร็วแม่โหลดเปลี่ยนหรือความเร็วสูง
ความซับซ้อนของวงจร	ต่ำ ง่ายต่อการออกแบบและติดตั้ง	สูง ต้องมีไมโครคอนโทรลเลอร์, การแปลงพิกัด, PI Controller, PWM SVM
ความแม่นยำ	ปานกลาง แม่นพอสำหรับงานทั่วไป	สูง สามารถควบคุมมุ่งแรงบิดและความเร็วแบบเรียลไทม์
ต้นทุน	ต่ำ เนื่องจากการจราจ่ายและใช้ส่วนประกอบน้อย	สูง ต้องใช้ MCU และเซ็นเซอร์/อัลกอริทึมซอฟต์แวร์
เหมาะสมกับงานประเภท	งานทั่วไปที่ไม่ต้องการแรงบิดเรียบ เช่น พัดลม, เครื่องดูดฝุ่น, เครื่องมือไฟฟ้า	งานความแม่นยำสูง เช่น หุ่นยนต์, เซอร์โว, ยานยนต์ไฟฟ้า
ข้อจำกัด	Torque Ripple สูง, ประสิทธิภาพต่ำเมื่อโหลดเปลี่ยน	ขับซ้อน, ต้นทุนสูง, ต้องมีตัวแทน Rogator แบบ Real-Time หรือ Observer ใน Sensorless

ขั้นตอนการดำเนินงาน

- ติดตั้งซอฟต์แวร์ MC Workbench
- โอนไฟล์ .bin เข้าบอร์ด:
 - Clone Repository (https://github.com/pboon09/FRA271_Lab2_Actuators)
 - โynn bin file ที่แนบมาเข้าไปใน Directory NOD_G474RE ที่ปรากฏในคอมพิวเตอร์ (หากพื้นที่ไม่พอ ให้อัปโหลด Empty Project เข้าไปก่อน)
- เชื่อมต่อฮาร์ดแวร์:
 - นำ Adapter 24V ต่อเข้ากับช่อง DC Jack บนบอร์ด BLDCXplorer

- ตรวจสอบความแม่นยำของสายไฟทุกเส้นที่ติดตั้ง

4. เปิด MC Workbench และเชื่อมต่อ:

- เปิดไฟล์ MC Workbench ที่ได้จาก GitHub
- กดปุ่ม Motor Pilot เพื่อเปิดແນບควบคุม
- เลือก Com Port ที่เชื่อมต่อ กับบอร์ด STM32G474RE جانวนกด Connect

5. ต่อ Oscilloscope Probe:

- นำที่ครอบซ่องเสียบสายออกจาก Oscilloscope Port และต่อสายสัญญาณ (Probe) เข้ากับพอร์ตทั้ง 3 ช่อง
- นำ Probe เกี่ยวเข้ากับจุดวัดบนบอร์ด โดยเรียงตามเลขที่กำกับ (1, 2, 3) พร้อมทั้งเกี่ยว GND ด้วย

6. ควบคุมและเริ่มอัตโนมัติ:

- เลื่อน Slider Bar ใน Motor Pilot เพื่อปรับความเร็วที่ต้องการ
- กดปุ่ม Start เพื่อให้มอเตอร์เริ่มหมุน และความเร็วจะ Ramp ขึ้นไป

7. วิเคราะห์สัญญาณด้วย Oscilloscope:

- ใช้ Trigger Level (4) เพื่อทำให้สัญญาณหยุดนิ่ง
- ใช้ Scaling (6) เพื่อปรับ Scale แกนตั้ง (Volt) และแกนนอน (เวลา) ให้มองเห็นสัญญาณชัดเจน
- ใช้ Vertical Cursor (3) เพื่อวัดความถี่และคาบของสัญญาณ
- ใช้ Run-Stop (1) เพื่อยุดภาระนิ่งสำหรับการวิเคราะห์

8. บันทึกภาพสัญญาณ:

- กดปุ่ม Screen Shot (2) บน Oscilloscope เพื่อบันทึกรูปภาพ
- กดปุ่ม Home (7) และเข้าไปที่ File
- รูปภาพจะถูก Save อยู่ใน Folder Images/Screenshots

ผลการทดลอง (สิ่งที่เกิดขึ้นจริงในการทดลอง)

1 การเรียงลำกับเฟสตามทิศทางการหมุน

ผลการทดลอง



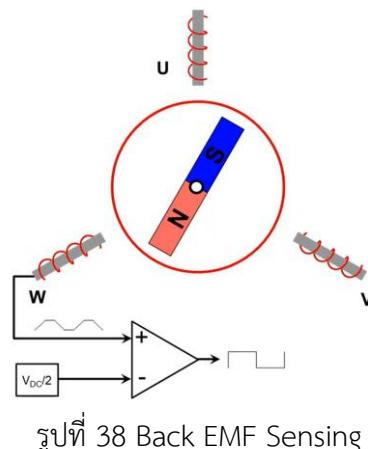
รูปที่ 36 CCW



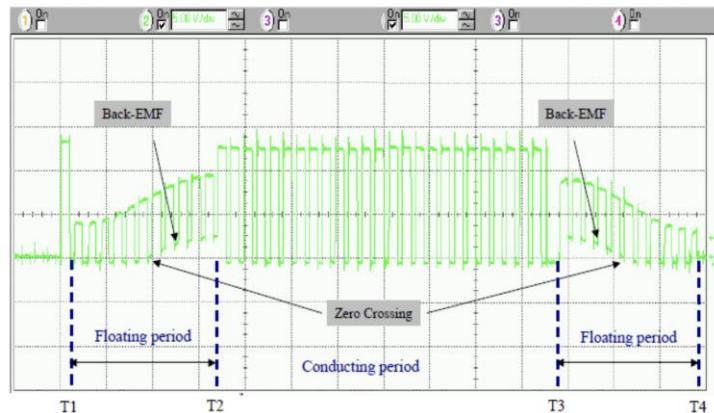
รูปที่ 37 CW

2. สามารถแสดงให้เห็นถึงการทำงานจริงของมอเตอร์แบบ 6-Step โดยใช้ Back EMF Sensing ได้

Six-Step Commutation เป็นการควบคุมการสลับลำดับการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ชุดลวดของมอเตอร์ BLDC โดยการจ่าย 2 เฟสพร้อมกัน และปล่อยอีกเฟสให้ float ซึ่ง Back EMF Sensing จะใช้เฟส Float ในการวัด แรงดัน Back EMF และใช้จุด Zero crossing ในการสั่งการให้สลับเฟสในการจ่ายกระแสไฟฟ้าในอีก 30 องศา เพราะ สัญญาณ Back EMF เกิดขึ้นก่อน Hall Effect อยู่ 30 องศา



รูปที่ 38 Back EMF Sensing



รูปที่ 39 Phase



รูปที่ 40 Back EMF Oscilloscope

3. สามารถวิเคราะห์และอธิบายลักษณะของสัญญาณ BEMF แบบ Trapezoidal ได้ & สามารถอธิบายและแสดงการเกิด Phase Shift ระหว่างสัญญาณแต่ละ Phase ของ BEMF ได้ สัญญาณ Back EMF ที่เกิดเป็นรูปแบบ Trapezoidal เนื่องจากการใช้ 6 step commutation และการพัฒนาดัด หรือโครงสร้างภายในของมอเตอร์ เมื่อrotate หมุนผ่านสเตเตอร์จุดที่ขาด漉ด float อยู่จะทำให้เกิดสัญญาณ back EMF ขึ้นโดยค่าที่ได้ขึ้นอยู่กับความเร็วและระยะห่างของชั้วของแม่เหล็กกับขาด漉ด และการเกิด Phase shift ขึ้นอยู่กับทิศทางการหมุน

4. สามารถคำนวณความเร็วของมอเตอร์จากความถี่ของสัญญาณ BEMF ที่อ่านได้ ได้อย่างถูกต้อง

$$N_s = \frac{120 \times f}{P}$$

N_s = ความเร็วรอบ

f = ความถี่ไฟฟ้า (Hz)

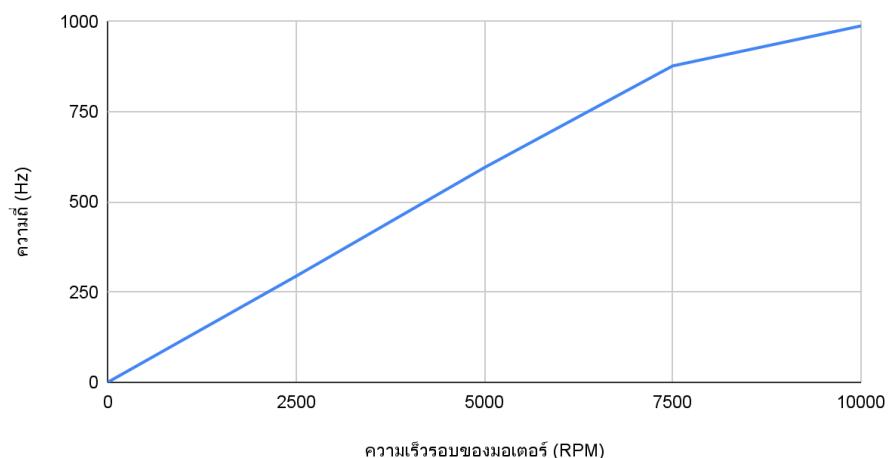
P = จำนวนชั้วแม่เหล็กทั้งหมด (Poles)



รูปที่ 41 ค่าสัญญาณที่ได้จริง

จากรูปความถี่คือ 294.1 Hz มอเตอร์ที่ใช้มี 14 ข้อ จึงคำนวณได้ 2520 rpm ซึ่งถูกต้อง

กราฟแสดงความถี่ของสัญญาณและความเร็วของมอเตอร์



รูปที่ 42 กราฟแสดงความถี่ของสัญญาณและความเร็วของมอเตอร์

สามารถวิเคราะห์สาเหตุที่ทำให้เกิดผลการทดลองที่ไม่เหมือนกับ Ideal Case ทางทฤษฎีได้

ตารางที่ 6 ตารางเปรียบเทียบ Six Step Commutation & FOC

หัวข้อ	Six-Step Commutation	Field-Oriented Control (FOC)
การควบคุมแรงบิด	แรงบิดไม่เสถียรเนื่องจากมีการกระเพื่อม (Torque Ripple)	แรงบิดเสถียรและราบรื่น เนื่องจากควบคุมฟลักซ์ และแรงบิดแยกกันได้
ความเสถียรของความเร็ว	ความเร็วอาจไม่สม่ำเสมอ โดยเฉพาะที่ความเร็วต่ำและสูงสุด	ความเร็วสม่ำเสมอและเสถียรในทุกช่วงการหมุน
การคำนวณที่ใช้	การคำนวณไม่ซับซ้อน ใช้แค่สัญญาณจาก Hall Sensors และวงจรเบิด-ปิด	ต้องใช้การคำนวณที่ซับซ้อน เช่น การแปลงพิกัด d-q และการควบคุมแรงบิด
การประหยัดพลังงาน	ประสิทธิภาพพลังงานต่ำในบางกรณีที่มีการกระเพื่อมของแรงบิด	ประสิทธิภาพพลังงานสูง เนื่องจากการควบคุมฟลักซ์และแรงบิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ
การควบคุมที่ความเร็วต่ำ	ความเร็วต่ำมีการกระตุกและการสั่นสะเทือน	ควบคุมที่ความเร็วต่ำได้ดี ไม่มีการกระตุกหรือสั่นสะเทือน
ความยืดหยุ่นในการใช้งาน	เหมาะสมกับการใช้งานที่ไม่ต้องการความแม่นยำสูง	เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ต้องการความแม่นยำสูงและการควบคุมที่ละเอียด
ความซับซ้อนในการออกแบบ	ออกแบบง่ายและมีต้นทุนต่ำ เนื่องจากใช้ Hall Sensors และวงจรจ่าย ๆ	การออกแบบซับซ้อนและต้องใช้ชาร์ดแวร์เพิ่มเติม เช่น เช็นเซอร์ตำแหน่งโรเตอร์และคอนโทรลเลอร์ที่มีความสามารถ
เสียงและการสั่นสะเทือน	เสียงและการสั่นสะเทือนสูงจากการกระเพื่อมของแรงบิด	เสียงและการสั่นสะเทือนต่ำ เนื่องจากการควบคุมที่ราบรื่น
การใช้งานในระบบที่ต้องการความแม่นยำ	ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ต้องการความแม่นยำสูง	เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ต้องการความแม่นยำ เช่น รถไฟฟ้า หรือหุ่นยนต์
การควบคุมมอเตอร์สามเฟส	สามารถใช้งานได้กับมอเตอร์สามเฟสแต่ไม่สามารถควบคุมได้อย่างละเอียด	การควบคุมมอเตอร์สามเฟสได้อย่างละเอียดและมีประสิทธิภาพสูง

สรุปผลการทดลอง

กราฟสัญญาณ Back EMF ที่ได้จากการหมุนทวนเข็มนาฬิกา จะเห็นว่าจะมีการเรียงลำดับเฟส 3 จะนำ และตามด้วยเฟส 2 และ 1 ตามลำดับ ส่วนการหมุนตามเข็มนาฬิกา จะเรียงลำดับโดยเฟส 1 จะเริ่มก่อนและตามด้วยเฟส 2 และ 3 ตามลำดับ โดยสังเกตจาก phase shift

อกีประยุผล

หมนูทวนเข็มจะเรียงเฟสจาก 3 ไป 1 ส่วนตามเข็มจะเรียงจาก 1 ไป 3 ซึ่งตรงข้ามกับ และ สัญญาณจะมี phase shift ที่ 120 องศา

ข้อเสนอแนะ

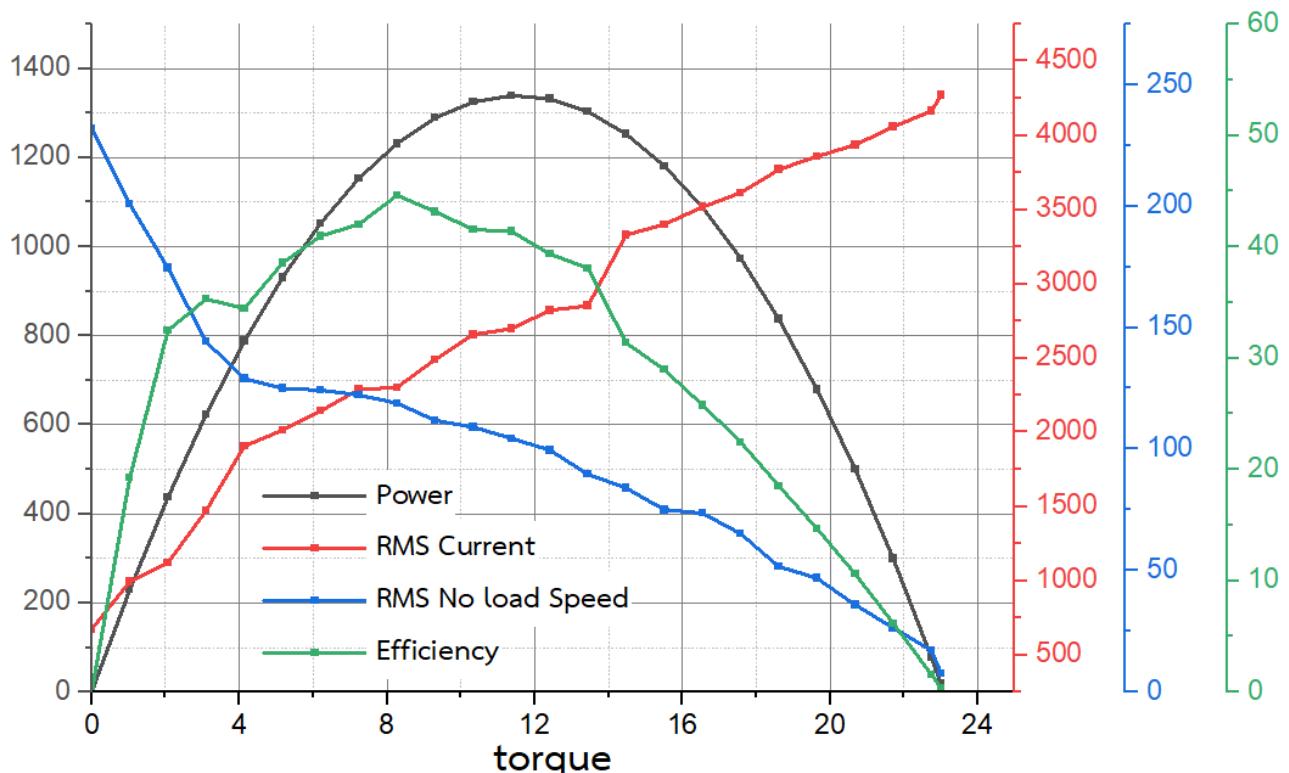
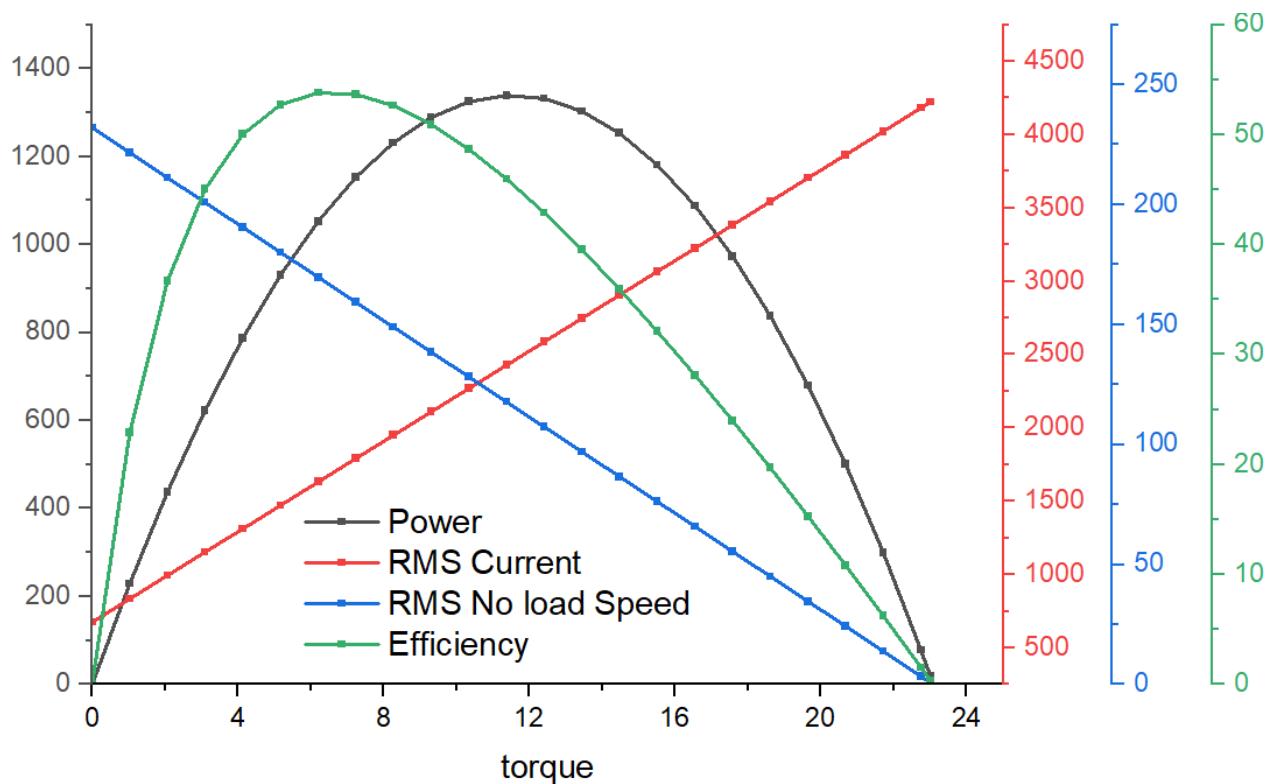
1. การวัดความเร็วของมอเตอร์ BLDC ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันอาศัยสมการและการคำนวณย้อนหลัง ซึ่งอาจก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนหรือความผิดพลาดของข้อมูลได้ ดังนั้น ควรมีการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร็วภายนอกเพิ่มเติม เช่น เครื่องวัดความเร็วรอบมอเตอร์ (Tachometer) หรือ Encoder ที่สามารถรองรับความเร็วรอบสูง เพื่อให้ได้ค่าความเร็วที่แม่นยำและเชื่อถือได้มากขึ้น
2. นอกจากนี้ เพื่อให้สามารถศึกษาพฤติกรรมของมอเตอร์ BLDC ได้อย่างครบถ้วนและครอบคลุม ควรมีอุปกรณ์ที่สามารถขับมอเตอร์ BLDC ด้วยวิธีการควบคุมที่หลากหลายและซับซ้อนกว่าเดิม รวมถึงการรองรับมอเตอร์ BLDC ที่มี Hall Sensor ในตัว และรูปแบบขดลวดที่เหมาะสมต่อการควบคุมขั้นสูง เพื่อให้สามารถทดลองวิเคราะห์ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบขั้บเคลื่อนได้อย่างละเอียดและครบถ้วน

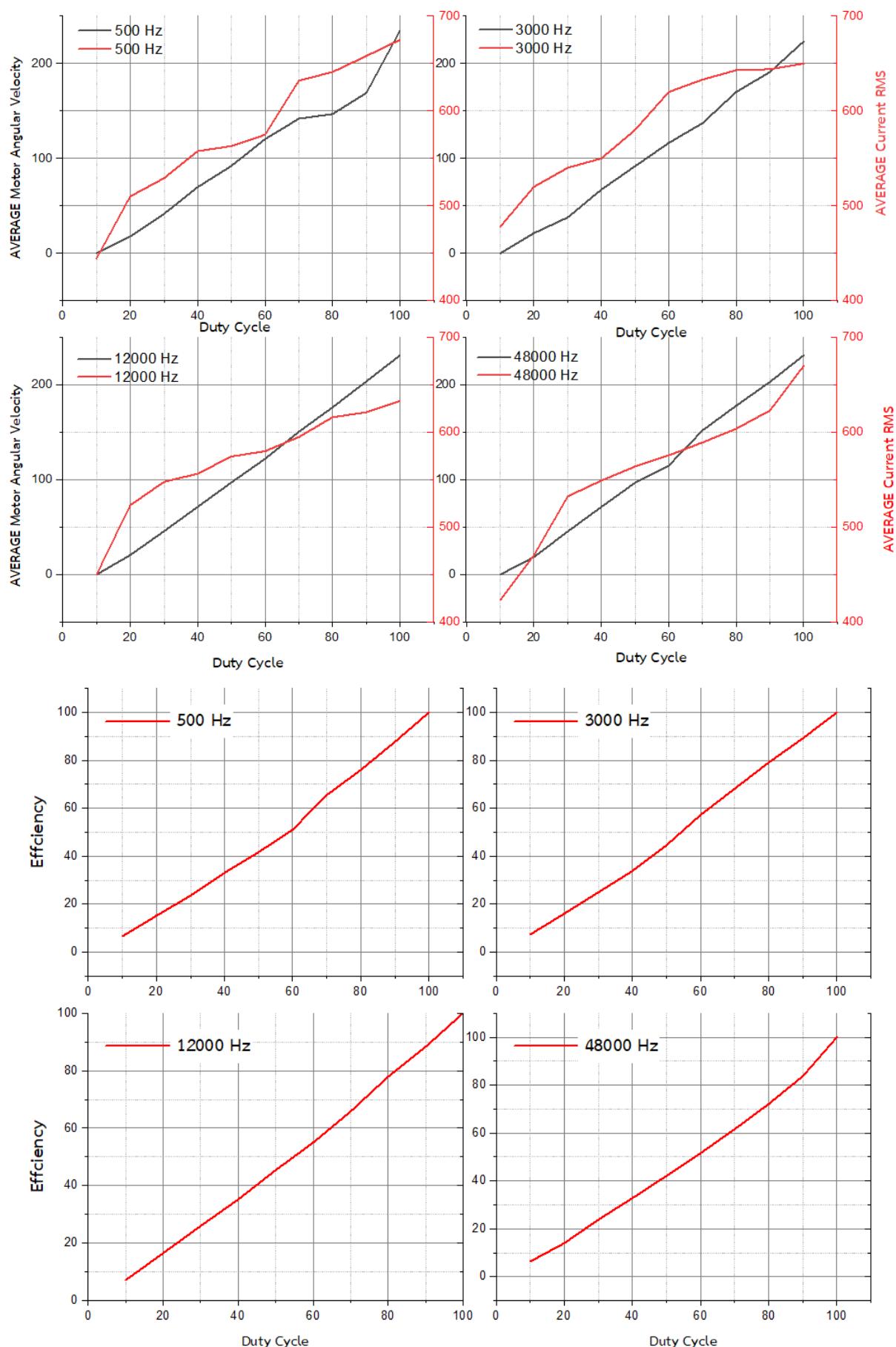
อ้างอิง

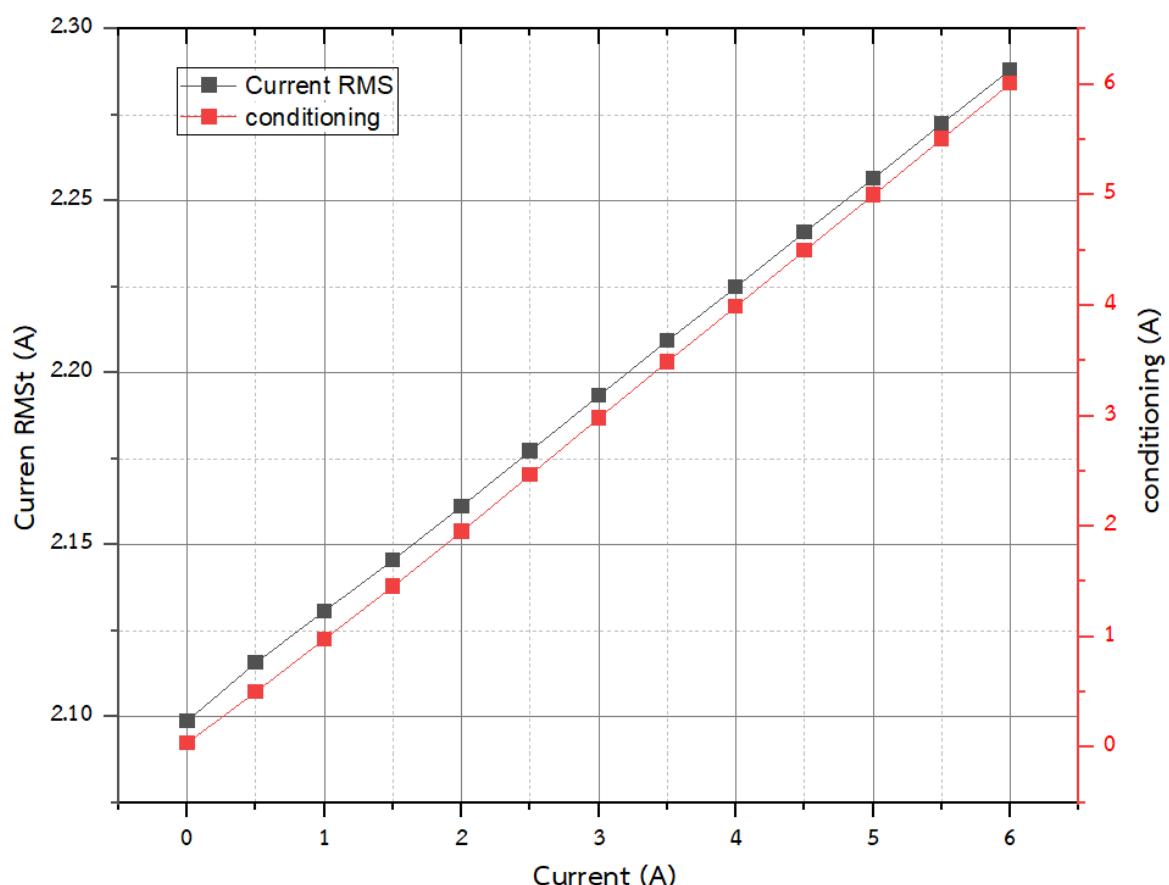
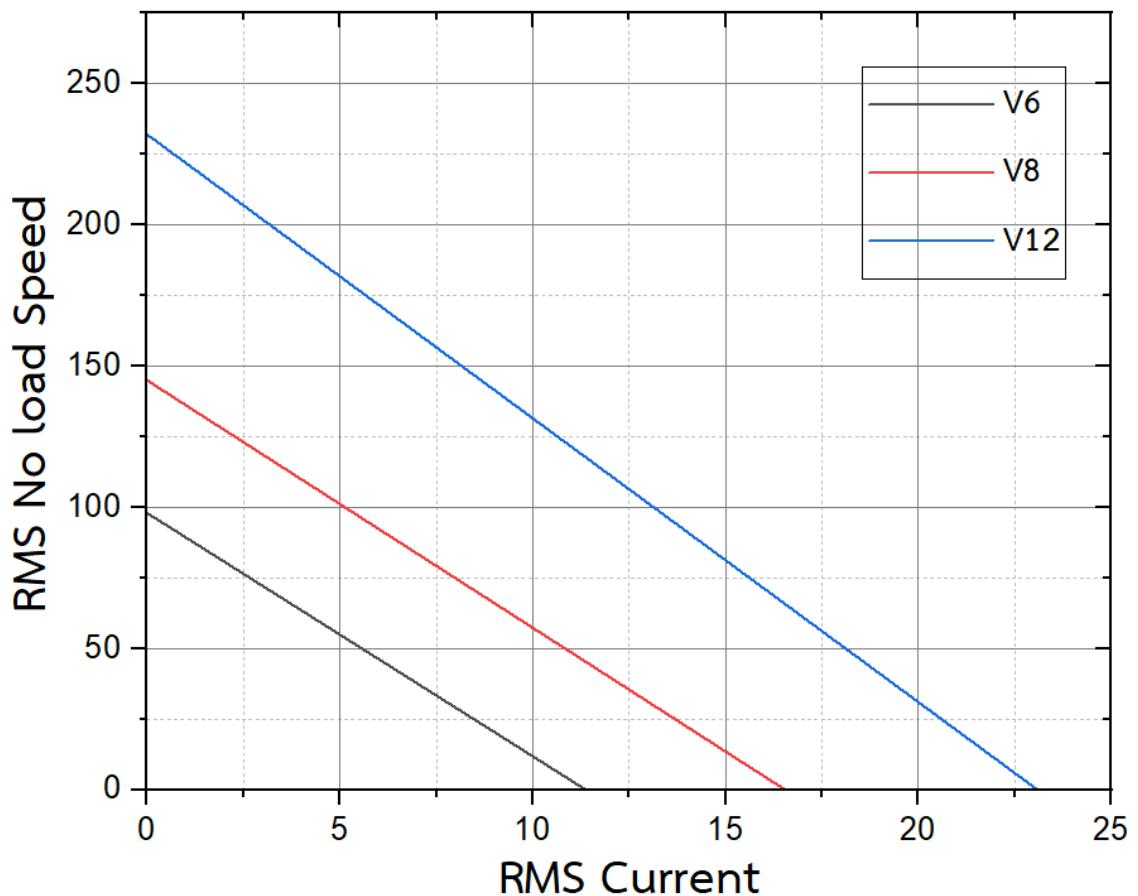
- <https://electronics.stackexchange.com/questions/232174/determining-current-in-individual-phase-for-a-3-phase-winding-brushless-dc-motor>
- <https://www.jkongmotor.com/comprehensive-introduction-to-3-phase-bldc-motors.html>
- <https://www.gian-transmission.com/three-phase-bldc-motor-wiring-what-you-need-to-know/>
- <https://www.electrical4u.com/field-oriented-control/>
- <https://www.mathworks.com/help/mcb/ref/sixstepcommutation.html>
- <https://th.vsdmotor.com/info/detailed-explanation-of-the-role-of-hall-sensor-17361180101518336.html>
- https://media.monolithicpower.com/document/Brushless_DC_Motor_Fundamentals.pdf
- <https://mechtex.com/blog/hall-sensor-vs-sensorless-bldc-drivers>
- <https://www.t-drones.com/blog/brushless-motor.html>
- <https://equipmake.co.uk/knowledge-base/understanding-brushless-motors/>
- <https://www.ijert.org/research/optimized-design-of-the-bldc-motor-for-higher-efficiency-IJERTV2IS50171.pdf>
- <https://www.youtube.com/watch?v=xIORHY8li90>

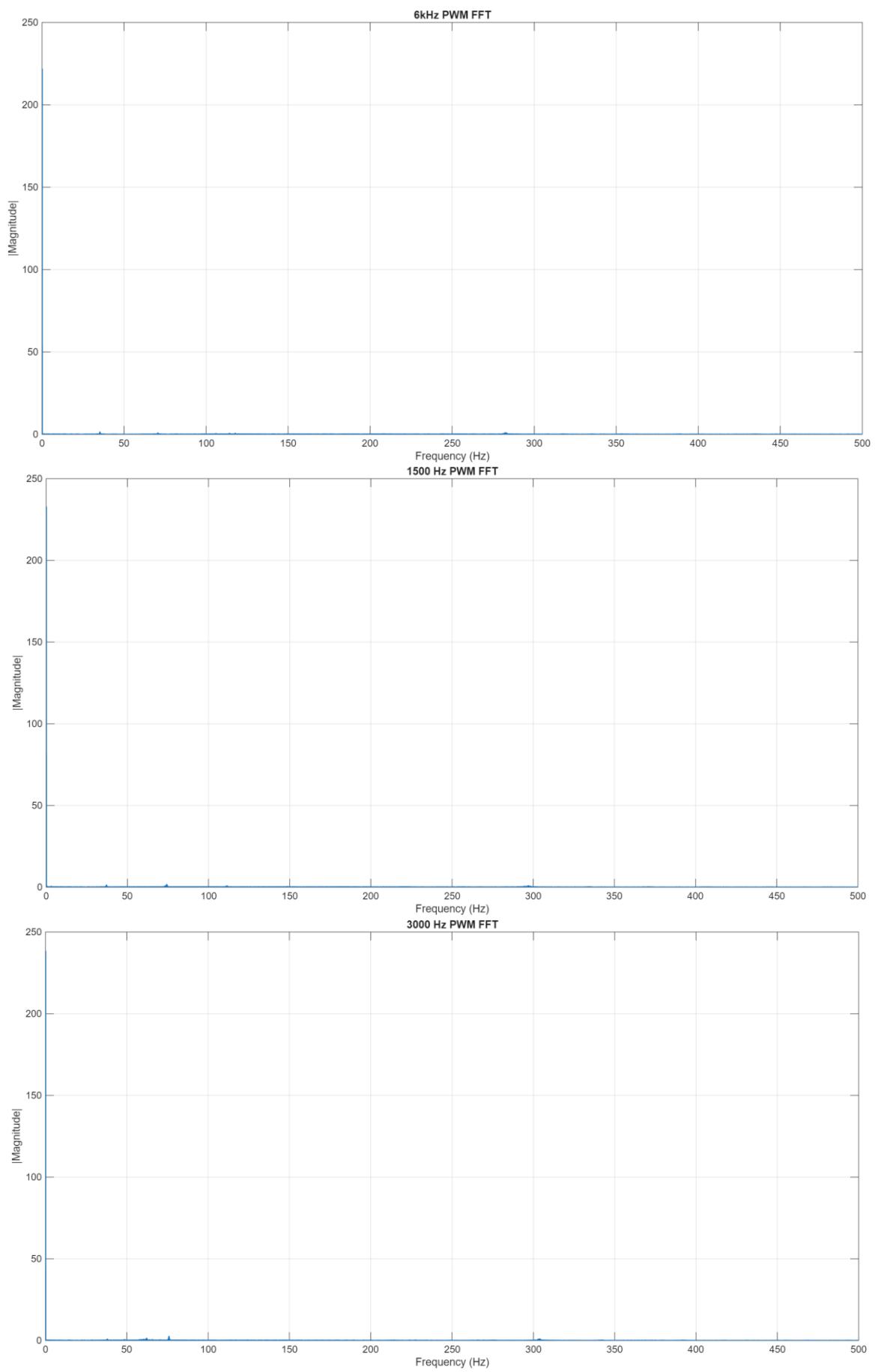
ภาคผนวก

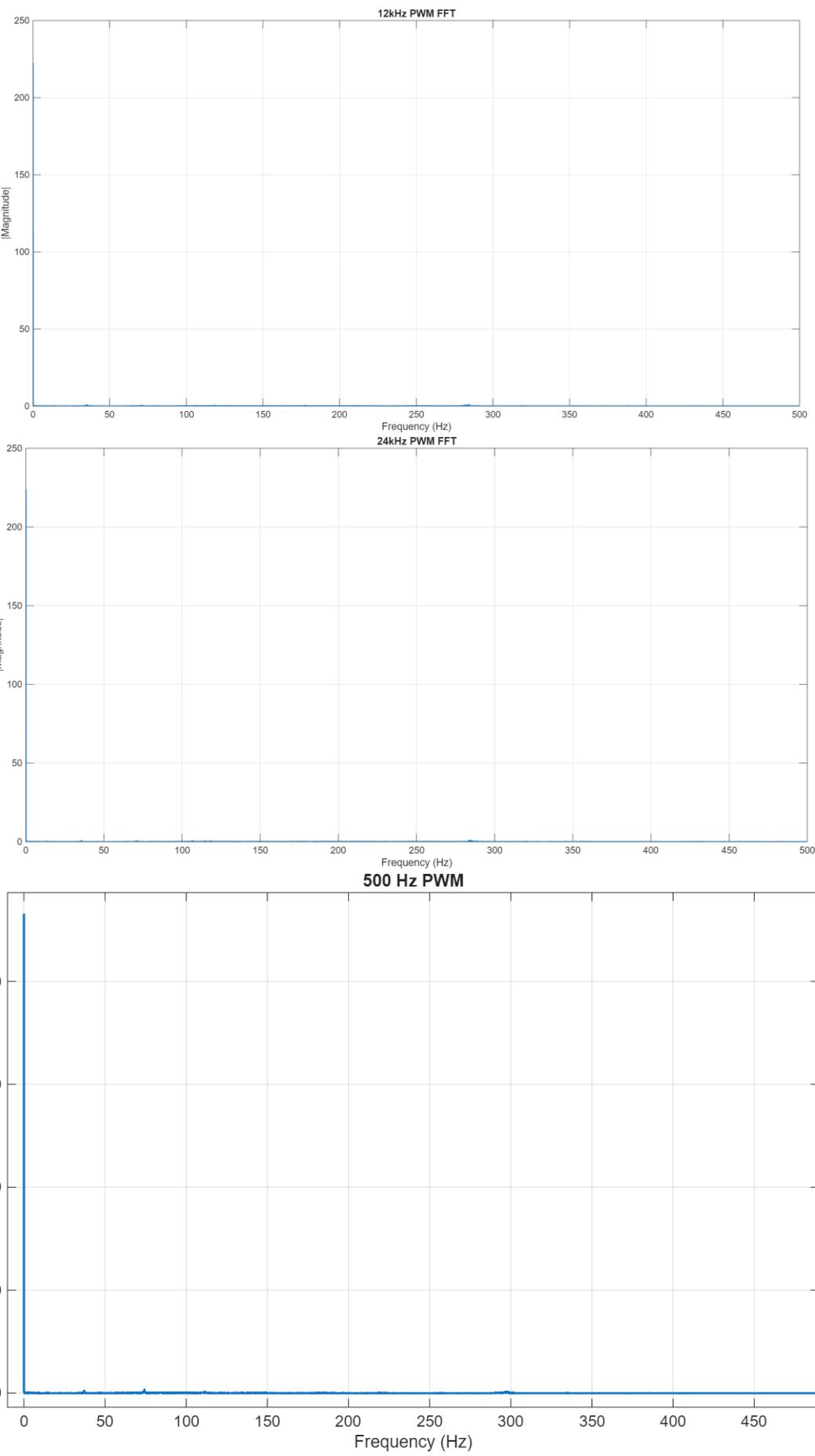
DC motor

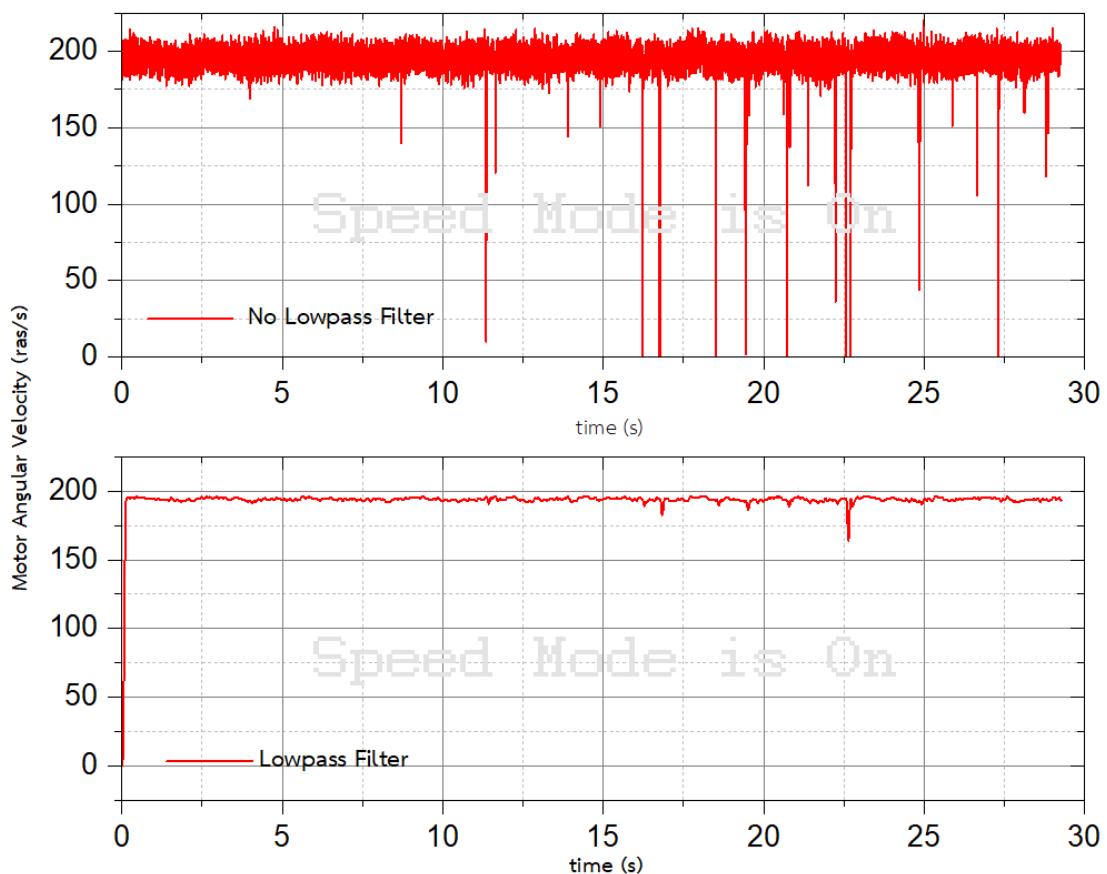
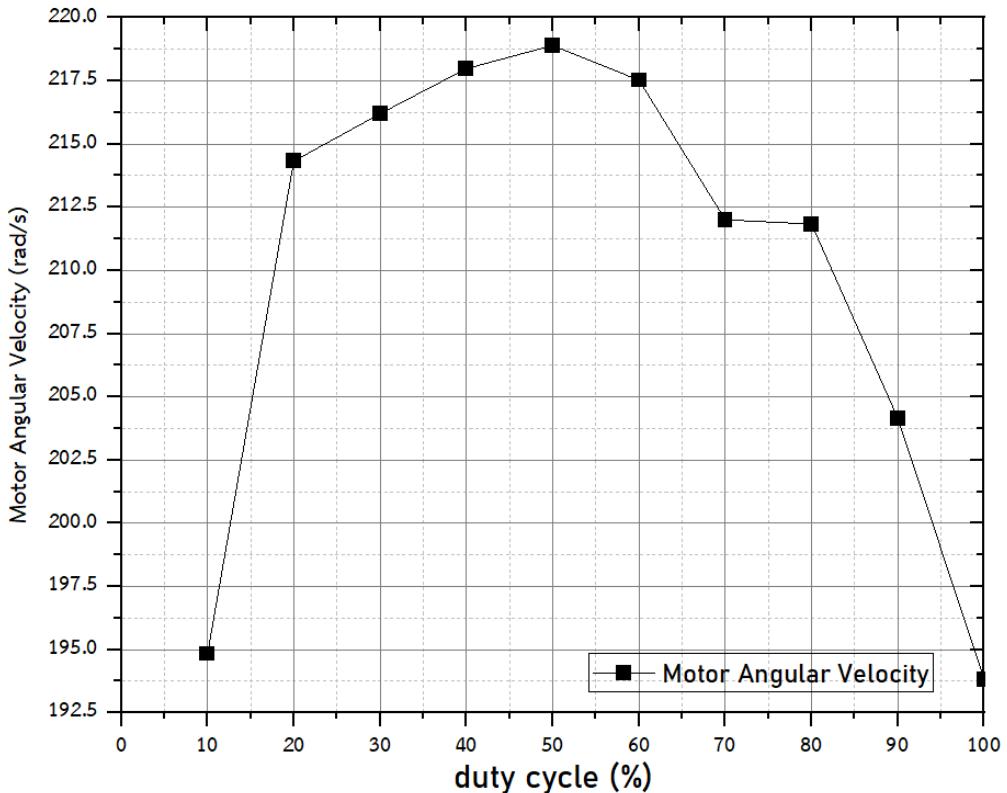












ได้ดีสำหรับการดึงค่าจากไฟล์ excel มาเข้า matlab และเข้า Simulink เพื่อหา bode plot :

```
PATH = "D:\Bode-plot\48000Hz\48000Hz_100__labDC.xlsx";
excel = readtable(PATH);
% Reading
raw = excel.Gain1_1(1:10000);
times = excel.time_1(1:10000);
% Vaildate
outliers = [];
for index = 1:length(raw)
    if any(isnan(raw(index))) || any(isnan(times(index)))
        outliers = [outliers, index];
    end
end
raw(outliers) = [];
times(outliers) = [];
result = [times, raw];
```

