

RMXplorer

LAB2 : Actuator

Name

- | | | |
|-----------------|----------|-------------|
| ● นางสาวณัฐณิชา | ณัดกิจ | 66340500016 |
| ● นายณัฐพล | อินคาดำ | 66340500017 |
| ● นางสาวเพลงพิณ | ขวัญจิรา | 66340500036 |

Objective

- เพื่อออกแบบการทดลองโดยใช้การบวนการทางวิทยาศาสตร์ในการทดลองและวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้อง สมเหตุสมผล และน่าเชื่อถือ โดยสามารถเข้าใจหลักการทำงานของแอกซูเอเตอร์ และอุปกรณ์ทั้งหมดที่เกี่ยวข้อง
- เพื่อศึกษาความสามารถในการสร้างและควบคุมปริมาณทางฟิสิกส์ที่ส่งออกโดยแอกซูเอเตอร์
- เพื่อออกแบบการทดลอง บันทึกผลการทดลอง สรุป และอภิปรายผลการทดลอง ให้สอดคล้องกับการเรียนรู้ อย่าง โดยใช้อุปกรณ์เครื่องมือไฟล์ Simulink, mlx ฯลฯ และชุดการทดลองพร้อมบอร์ด Microcontroller

สารบัญ

สารบัญภาพ

สารบัญสารทั่วไป

การทดลองที่ 1 Brushed DC Motor

1.1 วัตถุประสงค์

- 1.1.1 เพื่อศึกษาหลักการทำงานของ DC Motor และความสามารถของ Motor-Torque Constant และ Back EMF Constant ของ Motor
- 1.1.2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของ Speed, Torque, Current, Power, %Efficiency ได้ เมื่อ Load Torque ที่กระทำต่อ DC Motor ผ่านการปรับ Load Torque ด้วย Magnetic Particle Clutches เปลี่ยนแปลงไป และแรงดันไฟฟ้า input จากการปรับ Duty Cycle, Frequency ของ PMW ที่จ่ายเข้า DC Motor เปลี่ยนแปลงไป
- 1.1.3 เพื่อศึกษาหลักการทำงานของ H-Bridge Drive Mode ทั้ง 3 Mode (Sign-Magnitude, Locked Anti-Phase, Async Sign-Magnitude) และควบคุม DC Motor ได้ทั้ง 2 Mode (Sign-Magnitude, Locked Anti-Phase)

1.2 สมมุติฐาน

1.2.1

1.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

1.3.1 ตัวแปรต้น :

1.3.2 ตัวแปรตาม :

1.3.3 ตัวแปรควบคุม :

1.4 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.4.1

1.5 นิยามเชิงปฏิบัติการ

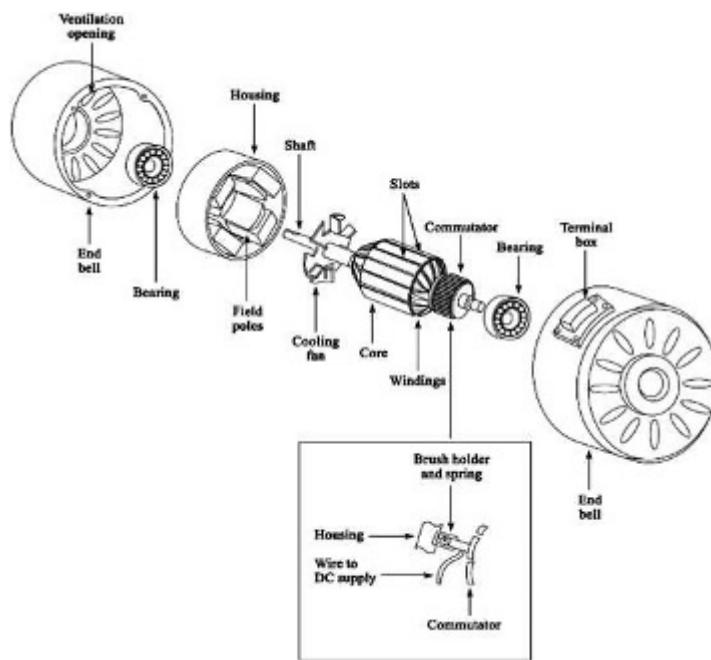
1.5.1

1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.6.1 DC Motor

DC Motor (Direct Current Motor) คือมอเตอร์ที่ทำงานด้วยกระแสไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งแปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกลเพื่อขับเคลื่อนอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น พัดลมไฟฟ้า รถยนต์ไฟฟ้า หุ่นยนต์ และเครื่องจักรในอุตสาหกรรม โดยมีองค์ประกอบหลัก ดังนี้

- โรเตอร์ (Armature, Rotor) ส่วนที่หมุนได้ ประกอบด้วยชุดลวดที่รับกระแสไฟฟ้า
- สเตเตอร์ (Stator) ส่วนที่อยู่กับที่ ใช้สร้างสนามแม่เหล็ก (อาจเป็นแม่เหล็กถาวรหรือชุดลวดสนามแม่เหล็ก)
- คอมมิวเตเตอร์ (Commutator) ช่วยเปลี่ยนทิศทางกระแสไฟในชุดลวดโรเตอร์
- แปรงถ่าน (Brushes) ตัวนำไฟฟ้าที่สัมผัสกับ Commutator ส่งกระแสไฟจากแหล่งจ่ายไฟไปยังโรเตอร์
- ชุดลวดสนามแม่เหล็ก (Field Winding) สร้างสนามแม่เหล็กเมื่อมีกระแสไฟไหลผ่าน
- เพลามอเตอร์ (Shaft) แกนกลางของมอเตอร์ ใช้ถ่ายโอนพลังงานกลไปยังโหลด
- ตลับลูกปืน (Bearing) ช่วยลดแรงเสียดทานในระหว่างการหมุน

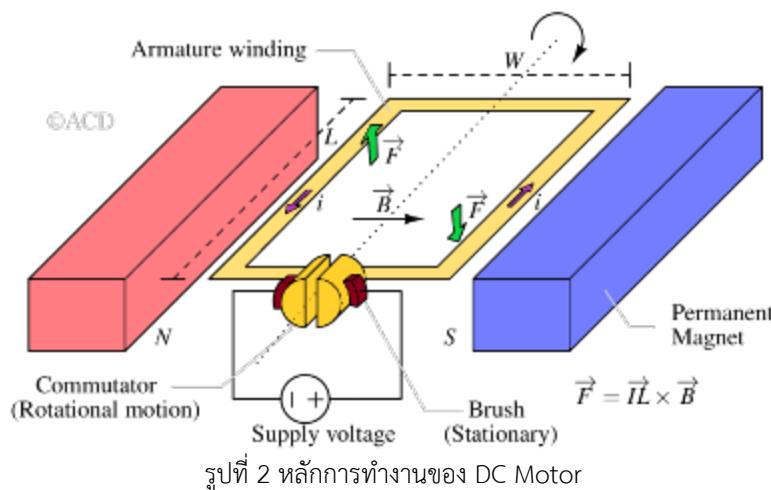


รูปที่ 1 องค์ประกอบของ DC Motor

DC Motor สามารถแบ่งออกได้เป็น Core DC Motor และ Coreless DC Motor โดย Core DC Motor มีแกนเหล็ก (Iron Core) อยู่ในโรเตอร์ซึ่งช่วยเสริมสร้างความเข้มของสนามแม่เหล็กและเพิ่มแรงบิดทำให้มอเตอร์ชนิดนี้เหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการกำลังสูงและความทนทาน เช่น เครื่องจักรในโรงงานหรือระบบขับเคลื่อนที่ต้องการแรงบิดมาก แต่การมีแกนเหล็กทำให้มอเตอร์มีน้ำหนักมากและมีแรงเสื่อยสูง ซึ่งส่งผลให้การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วช้าลง นอกจากนี้การทำงานของแกนเหล็กยังทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานในรูปของ Eddy Current และ Hysteresis Loss ซึ่งลดประสิทธิภาพการทำงาน อีกทั้ง

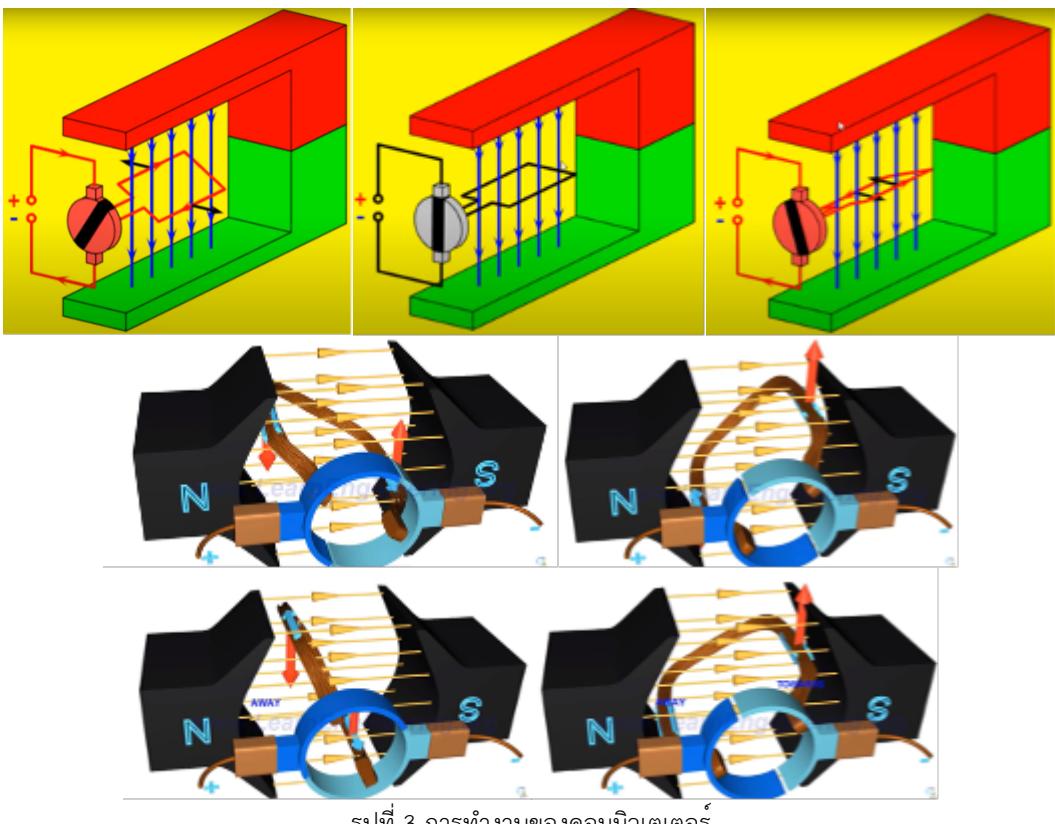
ยังมีเสียงรบกวนขณะทำงานมากกว่า Coreless DC Motor ที่ถูกออกแบบมาเพื่อลดข้อจำกัดเหล่านี้ โดย Coreless DC Motor ใช้โครงสร้างชุดลวดแบบลอยตัว (Hollow Structure) หรือพันรอบวัสดุเบาแทนแกนเหล็ก ทำให้มอเตอร์มีน้ำหนักเบาและแรงเฉียบต่ำ ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วได้รวดเร็วกว่า และไม่มีการสูญเสียพลังงานในแกนเหล็ก ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานสูงขึ้นและทำงานได้เงียบกว่า แต่ข้อเสียของ Coreless DC Motor คือแรงบิดต่ำกว่า ไม่นทันทานเท่ากับ Core DC Motor และมีราคาสูงกว่า เนื่องจากกระบวนการผลิตที่ซับซ้อน

หลักการทำงานของ DC motor คือการแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงให้กลายเป็นพลังงานกล ผ่านการทำงานของสนามแม่เหล็กและแรงแม่เหล็กที่เกิดจากการกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านชุดลวดในโรเตอร์ (Rotor Winding) ซึ่งชุดลวดนี้จะสร้างสนามแม่เหล็กที่ทำปฏิกิริยา กับสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์ทำให้เกิดแรงบิด (Torque) ที่หมุนชุดลวดในโรเตอร์ซึ่งจะถ่ายโอนแรงบิดนี้ไปยังเพลาของมอเตอร์ผ่านคอมมิวเตอร์ และแรงบิดที่เกิดขึ้นจะทำให้โรเตอร์หมุนไปตามทิศทางของสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้น โดยที่ความเร็วของการหมุนและแรงบิดนั้นจะสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายไปและความต้านทานในวงจร ทำให้ DC motor มีลักษณะการทำงานที่สามารถควบคุมความเร็วและแรงบิดได้่ายตามความต้องการของการใช้งานในอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น พัดลม, เครื่องมือไฟฟ้า, หรือในระบบขับเคลื่อนหุ่นยนต์และยานพาหนะต่าง ๆ



รูปที่ 2 หลักการทำงานของ DC Motor

การทำงานของมอเตอร์จะต้องมีการใช้คอมมิวเตอร์ที่คอยสลับทิศทางของกระแสไฟฟ้าในชุดลวด เพื่อให้แรงบิดที่เกิดขึ้นยังคงทิศทางเดียวกัน และไม่ให้การหมุนหยุดนิ่งหรือย้อนกลับ โดยเมื่อโรเตอร์หมุนไปถึงจุดหนึ่ง คอมมิวเตอร์จะทำหน้าที่สลับขั้วของกระแสในชุดลวดโรเตอร์โดยการหมุนผ่านแปรรูปถ่านที่สัมผัสกับคอมมิวเตอร์ ทำให้การหมุนของโรเตอร์สามารถดำเนินต่อไปอย่างราบรื่นและต่อเนื่อง

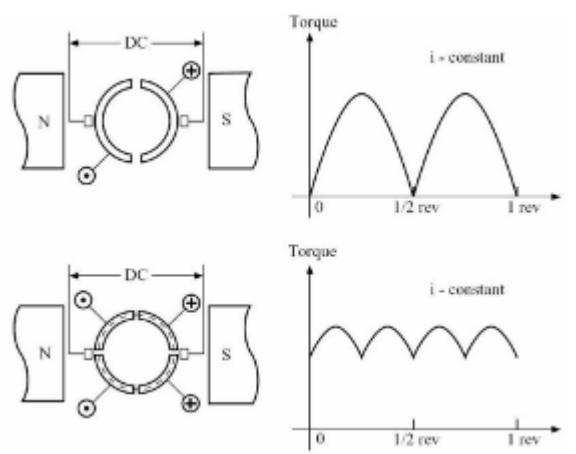


รูปที่ 3 การทำงานของคอมมิวเตเตอร์

จำนวนของชด漉ดในโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นจะช่วยลดความผันผวนของแรงบิด (Torque Ripple) และลดผลกระทบของ Cogging Effect ซึ่งเป็นแรงต้านระหว่างสนามแม่เหล็กในชด漉ดกับสนามแม่เหล็กจาก Field Winding ที่ทำให้การหมุนสุดดุดหรือไม่ราบรื่น นอกจากนี้ยังส่งผลให้แรงบิดที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำงานมีความต่อเนื่องมากขึ้น ซึ่งช่วยลดการสั่นสะเทือนและเสียงรบกวนระหว่างการทำงาน โดยมอเตอร์ที่มีจำนวนชด漉ดมากจะสามารถสร้างแรงบิดที่เสถียรและราบรื่นมากกว่าเนื่องจากมีจำนวนจุดที่กระแทกไฟฟ้าให้ลดลง ในแต่ละช่วงเวลามากขึ้น ทำให้การหมุนของมอเตอร์สมดุลและลดการสูญเสียพลังงานจากการร้อนที่เกิดในชด漉ด อย่างไรก็ตาม การเพิ่มจำนวนชด漉ดมักจะเพิ่มขนาดและน้ำหนักของมอเตอร์ ซึ่งอาจเป็นข้อจำกัดในบางการใช้งานที่ต้องการมอเตอร์ขนาดเล็กหรือเบา แต่โดยรวมแล้ว การเพิ่มจำนวนชด漉ดในโรเตอร์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์ในแง่ของความราบรื่น ความแม่นยำ และความเสถียรในการทำงานอย่างมีนัยสำคัญ

ซึ่งในมอเตอร์ยังมีปัญหาเกี่ยวกับ Cogging Effect และความผันผวนของแรงบิดโดย Cogging Effect คือแรงต้านที่เกิดจากปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กของชด漉ดสนามแม่เหล็กกับชด漉ดในโรเตอร์ ทำให้การหมุนของมอเตอร์เกิดการสะดุดหรือไม่ต่อเนื่อง ในขณะเดียวกันความผันผวนของแรงบิดเป็นความไม่ราบรื่นของแรงบิดที่เกิดขึ้นในแต่ละรอบการหมุน ส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนและเสียงรบกวนระหว่างการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งปัญหาเหล่านี้ส่งผลต่อประสิทธิภาพ ความแม่นยำ และอายุการใช้งานของมอเตอร์ อย่างมาก ดังนั้นจึงมีการเพิ่มจำนวนชด漉ดในโรเตอร์ในมอเตอร์ เนื่องจากเมื่อมีจำนวนชด漉ดมากขึ้น

สนามแม่เหล็กที่เกิดในโรเตอร์จะมีความต่อเนื่องและสมดุลมากขึ้น ทำให้แรงบิดที่ผลิตออกมามีความราบรื่นลดการสะดุดจาก Cogging Effect และลดความผันผวนของแรงบิดในแต่ละรอบการหมุน นอกจากนี้ยังช่วยลดการสั่นสะเทือนและเสียงรบกวนในระหว่างการทำงาน ทำให้มอเตอร์มีความเสถียรและเหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการความแม่นยำสูง อย่างไรก็ตามการเพิ่มจำนวนชุดลวดอาจทำให้มอเตอร์มีขนาดและน้ำหนักเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4 การเพิ่ม Rotor Winding และ Torque Ripple

1.6.2 การอ่านความเร็วมอเตอร์จากค่าตำแหน่งที่มี Wrap-around และการใช้ Unwrap

การอ่านความเร็วมอเตอร์จากค่าตำแหน่งที่มีลักษณะ Wrap-around นั้นสามารถทำได้โดยใช้เซนเซอร์เชิงมุม เช่น Encoder ซึ่งจะทำหน้าที่ตรวจจับค่าตำแหน่งเชิงมุมของมอเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามการหมุนโดยค่าตำแหน่งที่ได้จะอยู่ในรูปแบบของมุมที่จำกัดภายในช่วงหนึ่งรอบ เช่น 0 ถึง 360 องศาหรือ 0 ถึง 2π เรเดียน ซึ่งในการนี้ที่ตำแหน่งเชิงมุมมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจนเกิดการ Wrap-around เช่น การเปลี่ยนจาก 359 องศาไปเป็น 0 องศา จะทำให้ค่าที่ได้ไม่ต่อเนื่อง และอาจส่งผลต่อการคำนวณความเร็วที่ผิดพลาด ดังนั้นจึงต้องใช้กระบวนการ Unwrap ซึ่งเป็นการแก้ไขค่า Wrap-around ให้กลายเป็นค่าที่ต่อเนื่องโดยการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่เกินกว่าค่าที่กำหนด เช่น การเปลี่ยนแปลงเชิงมุมที่มากกว่า π เรเดียน และทำการปรับเพิ่มหรือลดค่า 2π ตามทิศทางของการเปลี่ยนแปลงมุม เพื่อให้ค่าตำแหน่งมีความต่อเนื่อง ซึ่งทำได้โดย

- รับค่าตำแหน่งจากเซนเซอร์ ซึ่งมักเป็นค่าภายในขอบเขต $[0, 2\pi]$ หรือ $[0, 360^\circ]$
- หากความแตกต่างระหว่างค่าปัจจุบันกับค่าก่อนหน้า จากสมการ

$$\Delta\theta = \theta_{ปัจจุบัน} - \theta_{ก่อนหน้า}$$

เมื่อ $\Delta\theta$ คือ การเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งเชิงมุม หน่วย rad

$\theta_{ปัจจุบัน}$ คือ ตำแหน่งเชิงมุม ณ ปัจจุบัน หน่วย rad

$\theta_{ก่อนหน้า}$ คือ ตำแหน่งเชิงมุมก่อนทำการหมุน หรือก่อนหน้าตำแหน่งปัจจุบัน หน่วย rad

- ตรวจจับ Wrap-around

หาก $\Delta\theta > \pi$ หมายถึงเกิดการ Wrap-around ในทิศทางบาก

$$\Delta\theta = \Delta\theta - 2\pi$$

หาก $\Delta\theta < -\pi$ หมายถึงเกิดการ Wrap-around ในทิศทางลับ

$$\Delta\theta = \Delta\theta + 2\pi$$

- เพิ่มค่าที่ปรับปรุงเข้าไปในตำแหน่งสั่ง

$$\theta_{unwrap} = \theta_{unwrap} + \Delta\theta$$

เมื่อ θ_{unwrap} คือ ตำแหน่งเชิงมุมที่ผ่านกระบวนการ Unwrap หน่วย rad

จากนั้นสามารถคำนวณตำแหน่งที่ผ่านการ Unwrap มาคำนวณความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ได้โดยใช้สมการ

$$\omega = \frac{\theta_{unwrap}}{\Delta t}$$

เมื่อ ω คือ ความเร็วเชิงมุม หน่วย rad/s

Δt คือ ช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลง หน่วย วินาที (s)

1.6.3 DC Motor Equation

1.6.3.1 ประสิทธิภาพของ DC Motor

คืออัตราส่วนระหว่างกำลังงานกลที่มอเตอร์ผลิตได้ (Output Power) ต่อกำลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้มอเตอร์ (Input Power) โดยแสดงในรูปแบบเปอร์เซ็นต์เพื่อป้องกันความสามารถของมอเตอร์ในการแปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100$$

$$\eta = \frac{\tau\omega}{Vi} \times 100$$

เมื่อ η คือ ประสิทธิภาพ (Efficiency) ของมอเตอร์ หน่วย เปอร์เซ็นต์ (%)

P_{out} คือ กำลังงานกลที่มอเตอร์ส่งออก หน่วย วัตต์ (W)

P_{in} คือ กำลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ หน่วย วัตต์ (W)

τ คือ แรงบิด (Torque) ที่มอเตอร์ผลิตได้ หน่วย นิวตัน-เมตร ($N \cdot m$)

ω คือ ความเร็วเชิงมุม (Angular Velocity) ของมอเตอร์ หน่วย rad/s

V คือ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ (Voltage) หน่วย โวลต์ (V)

i คือ กระแสไฟฟ้า หน่วย แอมเปอร์ (A)

1.6.3.2 การหาแรงบิด (Torque) ผ่าน Lorentz Force

$$\tau_m = (2rBln)i$$

$$\tau_m = K_m i$$

เมื่อ	τ_m	คือ แรงบิด หน่วย นิวตัน-เมตร ($N \cdot m$)
	r	คือ รัศมีของขดลวดในมอเตอร์ หน่วย เมตร (m)
	B	คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก หน่วย เทสลา (T)
	l	คือ ความยาวของตัวนำในสนามแม่เหล็ก หน่วย เมตร (m)
	n	คือ จำนวนรอบของขดลวด หน่วย รอบ
	K_m	คือ ค่าคงที่แรงบิด (Motor Torque Constant) หน่วย $N \cdot m/A$

1.6.3.3 การหา Motional EMF ผ่าน Faraday's Law

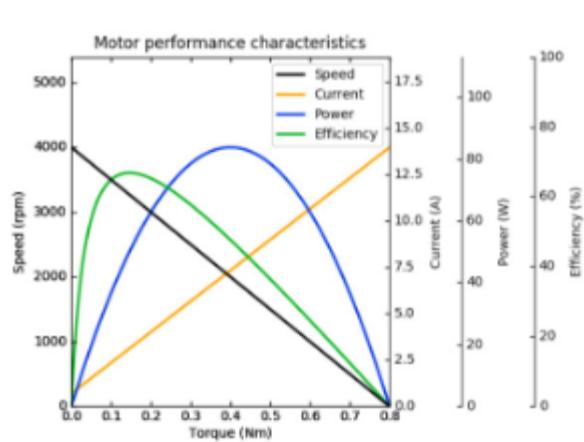
$$V_{emf} = (-nBlr)\omega$$

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

เมื่อ	V_{emf}	คือ Motional EMF หรือ แรงดันไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำ หน่วย โวลต์ (V)
	K_b	คือ ค่าคงที่แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Back EMF Constant) หน่วย ($V \cdot s/rad$)

1.6.4 Motor Characteristic

Motor Characteristic หมายถึง คุณสมบัติหรือพฤติกรรมของมอเตอร์ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ เช่น แรงบิด (Torque), ความเร็ว (Speed), กระแสไฟฟ้า (Current) และแรงดัน (Voltage) ในการทำงานของมอเตอร์ โดยการศึกษาลักษณะของมอเตอร์ช่วยให้เข้าใจวิธีการทำงานและการควบคุมมอเตอร์ในระบบต่าง ๆ ได้ดีขึ้น



รูปที่ 5 Motor Characteristic

1.6.4.1 Motor's dynamics represented in the time domain

การแสดงพฤติกรรมของมอเตอร์ในรูปแบบสมการที่ขึ้นกับเวลา ซึ่งใช้เพื่อวิเคราะห์การตอบสนองของมอเตอร์ต่อสัญญาณต่าง ๆ ในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ โดยสมการของ DC motor ได้แก่

จาก Kirchhoff's Voltage Law

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

เมื่อ L คือ ความเหนี่ยวนำภายใน (Internal Inductance) หน่วย H

R คือ ความต้านทานภายใน หน่วย Ω

v_{in} คือ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้า หน่วย โวลต์ (V)

จาก Newton-Euler's Law

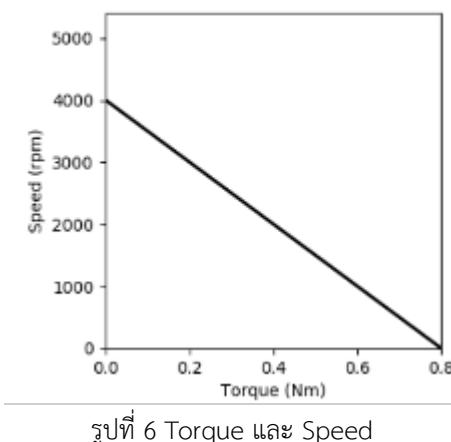
$$J \frac{d\omega}{dt} + B\omega - K_m i = -\tau_L$$

เมื่อ J คือ ความเฉื่อยของชด漉ด หน่วย $kg \cdot m^2$

B คือ การเสียดทานภายใน (Internal Damping) หน่วย Ns/rad

τ_L คือ แรงบิดจากโหลด หน่วย $N \cdot m$

1.6.4.2 Torque และ Speed



รูปที่ 6 Torque และ Speed

สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\tau_L = -B\omega + \frac{K_m v_{in}}{R} - \frac{K_m K_b \omega}{R}$$

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

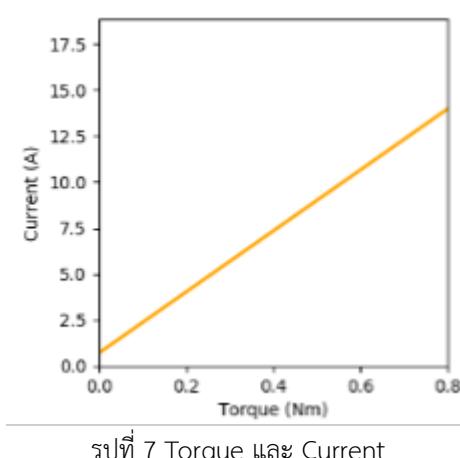
ชื่อความเร็วที่มากที่สุดหาได้จาก (No-Load Condition)

$$\omega_{NL} = \frac{K_m v_{in}}{BR + K_m K_b}$$

และแรงบิดที่มากที่สุดหาได้จาก (Stall Torque Condition)

$$\tau_{ST} = \frac{K_m v_{in}}{R}$$

1.6.4.3 Current



สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$i = \left(\frac{K_b}{BR + K_m K_b} \right) \tau_L + \left(\frac{B v_{in}}{BR + K_m K_b} \right)$$

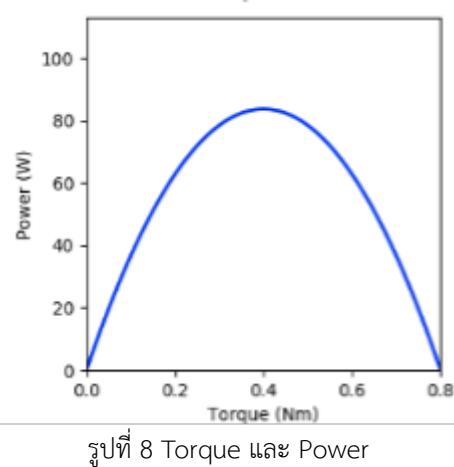
ชื่อกระแสไฟฟ้าที่มากที่สุดหาได้จาก (Stall Torque Condition)

$$i_{ST} = \frac{v_{in}}{R}$$

และกระแสไฟฟ้าที่น้อยที่สุดหาได้จาก (No-Load Condition)

$$i_{NL} = \frac{B v_{in}}{BR + K_m K_b}$$

1.6.4.4 Power



รูปที่ 8 Torque และ Power

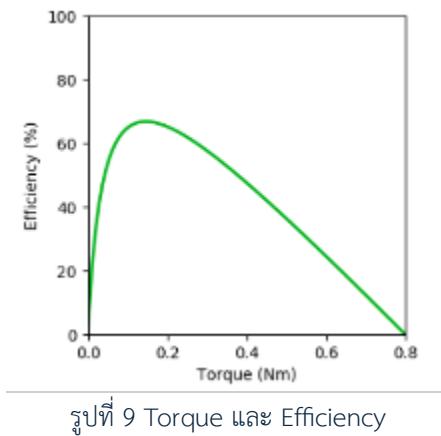
สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

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

ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่มากที่สุดหาได้จาก

$$P_{max} = \frac{\tau_{ST} \omega_{NL}}{4}$$

1.6.4.5 Efficiency



รูปที่ 9 Torque และ Efficiency

สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100$$

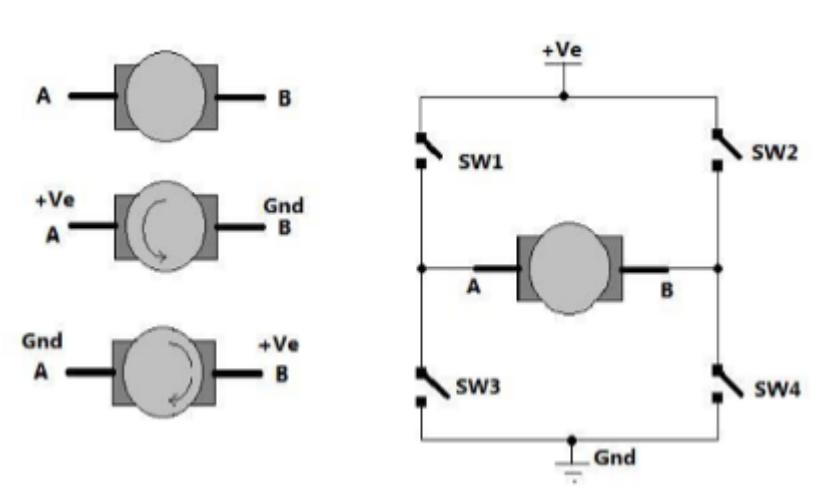
1.6.5 Motor Specification

ข้อมูลที่บ่งบอกถึงลักษณะและคุณสมบัติที่สำคัญของมอเตอร์ที่ช่วยในการเลือกใช้มอเตอร์ในแอปพลิเคชันต่าง ๆ โดยรวมถึงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพและการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งสามารถแยกเป็นหมวดหมู่หลัก ๆ ดังนี้

- Operating Voltage แรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์สามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ
- Rated Voltage แรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์ได้รับการออกแบบให้ทำงานได้ดีที่สุด
- No-Load Current กระแสที่มอเตอร์ใช้เมื่อไม่มีการโหลดหรือไม่ต้องขับเคลื่อนสิ่งใด ๆ
- No-Load Speed ความเร็วในการหมุนของมอเตอร์เมื่อไม่ได้ขับเคลื่อนหรือมีโหลดใด ๆ
- Stall Current กระแสที่มอเตอร์ใช้เมื่อโรเตอร์หยุดหมุน (Stall condition) หรือเมื่อมอเตอร์ไม่สามารถหมุนได้เนื่องจากแรงต้านจากโหลดหรืออุปสรรค
- Stall Torque แรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์สามารถสร้างได้ในขณะที่โรเตอร์หยุดหมุนหรือไม่สามารถหมุนได้
- Rated Speed ความเร็วที่มอเตอร์จะหมุนได้เมื่อทำงานภายใต้การทำงานที่มีประสิทธิภาพสูงสุด
- Rated Torque แรงบิดที่มอเตอร์สามารถสร้างได้ภายใต้การทำงานที่มีประสิทธิภาพสูงสุด
- Rated Power กำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์สามารถผลิตได้เมื่อทำงานภายใต้แรงดันและกระแสที่ระบุ
- Size and Weight ขนาดและน้ำหนักของมอเตอร์ที่มีผลต่อการติดตั้งและการใช้งานในแอปพลิเคชันต่าง ๆ
- Shaft Diameter ขนาดหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลามอเตอร์ ซึ่งใช้ในการเชื่อมต่อมอเตอร์กับโหลดหรือส่วนประกอบอื่น ๆ

1.6.6 การควบคุมทิศทางของ Motor ด้วย H-Bridge Drive

การควบคุมทิศทางของมอเตอร์ด้วย H-Bridge Drive คือการใช้งาน H-Bridge เพื่อควบคุมการหมุนของมอเตอร์ โดยสามารถสลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ได้ง่าย ๆ ผ่านการสลับการเปิด-ปิดของสวิตช์ในวงจร H-Bridge

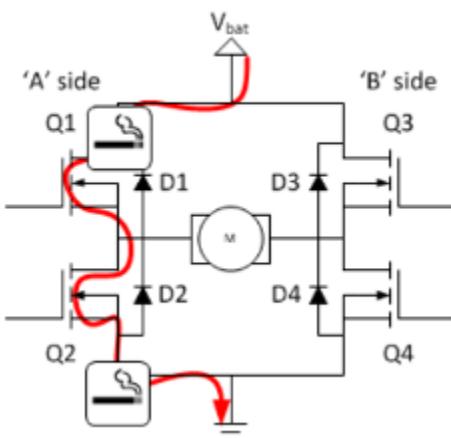


รูปที่ 10 Motor and H-Bridge Drive

เมื่อเปิด SW1 และ SW4 motor จะหมุนไปในทิศทางหนึ่ง ในทางกลับกันหากเปิด SW2 และ SW3 motor จะหมุนในทิศทางตรงกันข้ามกับการหมุนก่อนหน้า นอกจากนี้ motor จะหยุดหมุนเมื่อไม่มีสวิตช์ใดถูกเปิด หรือทำการเปิดทุกสวิตช์

1.6.7 การป้องกันการการ Shoot-Through ภายใน H-Bridge Drive

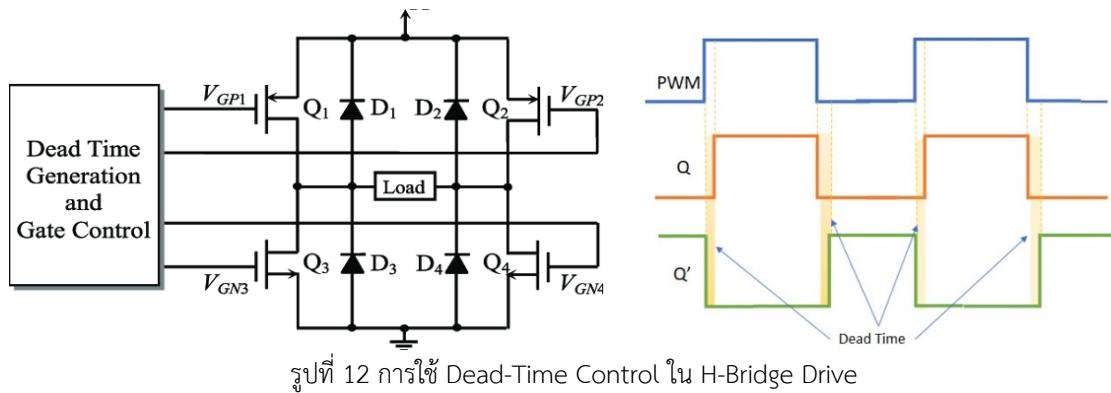
การป้องกันการ Shoot-Through ในวงจร H-Bridge Drive เป็นสิ่งสำคัญเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับวงจรเมื่อมีการเปิดสวิตช์ทั้งสองตัวในด้านเดียวกันของແ Pang วงจร H-Bridge พร้อมกัน ซึ่งจะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลจากแหล่งจ่ายไฟไปสู่กราว์ดโดยตรง สร้างการลัดวงจรที่ทำให้ทรานซิสเตอร์หรือ MOSFET ในวงจรเสียหายได้



รูปที่ 11 Shoot-Through in H-Bridge Drive

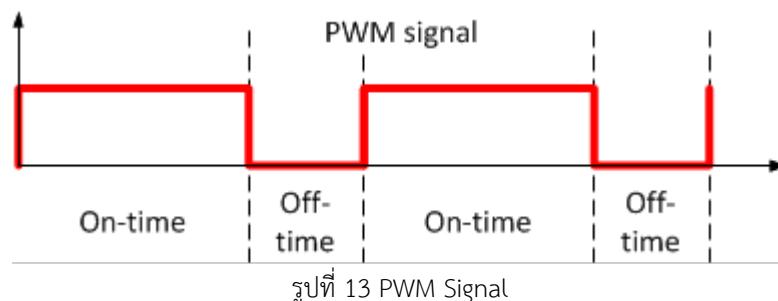
สามารถป้องกันได้โดยการใช้ Dead-Time Control ซึ่ง Dead-time คือ ช่วงเวลาสั้น ๆ ที่วงจรจะหยุดทำงานก่อนที่สวิตช์ตัวถัดไปจะถูกเปิด การใส่เวลา Dead-time ระหว่างการเปลี่ยนสถานะของสวิตช์ใน

วงจร H-Bridge จะช่วยให้มั่นใจว่าไม่มีการเปิดสวิตช์สองตัวพร้อมกัน เช่น การใช้ PWM (Pulse Width Modulation) เพื่อควบคุมสวิตช์ให้เพิ่มช่วงเวลาที่หักสองสวิตช์จะไม่เปิดพร้อมกัน



1.6.8 การควบคุมความเร็วของ Motor ด้วย Pulse Width Modulation

การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ด้วย Pulse Width Modulation (PWM) คือการควบคุมระยะเวลาของสัญญาณดิจิตอลที่ส่งไปยังมอเตอร์ โดยการปรับความกว้างของพลัส (Duty Cycle) ทำให้มอเตอร์ได้รับพลังงานในปริมาณที่เปลี่ยนแปลงได้ เมื่อ Duty Cycle สูงขึ้น มอเตอร์จะหมุนเร็วขึ้น ในขณะที่ Duty Cycle ต่ำลงจะทำให้มอเตอร์หมุนช้าลง วิธีนี้ช่วยให้การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ทำได้ง่ายและมีประสิทธิภาพโดยไม่ต้องใช้วงจรที่ซับซ้อน



โดยสามารถหาค่า (Period) จาก

$$\text{Period} = T_{on} + T_{off}$$

เมื่อ Period คือ เวลาทั้งหมดในรอบหนึ่ง หน่วย วินาที (s)

T_{on} คือ เวลาที่สัญญาณเปิด หน่วย วินาที (s)

T_{off} คือ เวลาที่สัญญาณปิด หน่วย วินาที (s)

ความถี่ (Frequency)

$$\text{Frequency} = \frac{1}{\text{Period}}$$

เมื่อ Frequency คือ จำนวนรอบในหน่วยเวลาหนึ่ง หน่วย เฮิรตซ์ (Hz)

Duty Cycle

$$\text{Duty Cycle} = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \cdot 100$$

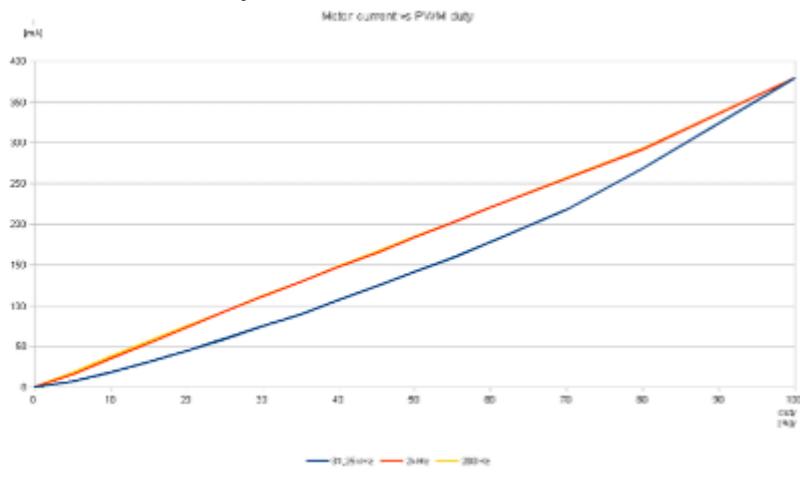
เมื่อ **Duty Cycle** คือ สัดส่วนระหว่างเวลาที่สัญญาณ PWM อยู่ในสถานะเปิดเทียบกับเวลาทั้งหมด ในหนึ่งรอบ (Period)

Output Voltage

$$v_{out} = \text{Duty Cycle} \cdot v_{dd}$$

เมื่อ v_{dd} คือ แรงดันไฟฟ้าที่มาจากการแหล่งจ่ายไฟ หน่วย โวลต์ (V)

ซึ่งความสัมพันธ์ของ Frequency กับความเร็ว และกระแสไฟฟ้า สามารถเปรียบเทียบได้ ดังนี้ เมื่อเพิ่มความถี่ PWM จะทำให้มอเตอร์หมุนเร็วขึ้น และเมื่อความเร็วของมอเตอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นโดยเฉพาะเมื่อมอเตอร์ทำงานภายใต้โหลดที่มากขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบ PWM และกระแสไฟฟ้าจะพบว่า กระแสไฟฟ้าจะเกิดความไม่เป็นเชิงเส้นมากขึ้น ซึ่งอาจทำให้เกิดเสียงรบกวนและการสั่นที่ไม่ต้องการ เมื่อมี PWM หรือความถี่สูงขึ้น



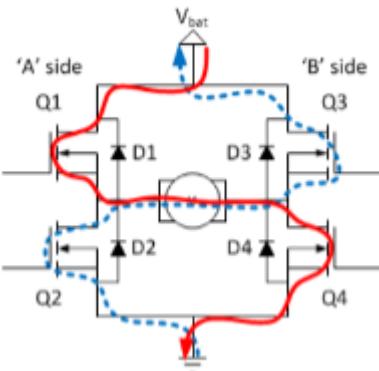
รูปที่ 14 Motor current vs PWM Duty at different frequencies

1.6.9 โหมดการทำงานของ Motor Driver

1.6.9.1 Lock Anti-phase Drive

ในโหมดนี้ สวิตช์ทั้งสี่ตัวใน H-Bridge จะเปิดและปิดสลับกันในทุก ๆ รอบ โดยคู่สวิตช์ที่อยู่ตรงข้ามกันจะทำงานพร้อมกัน เช่น Q1 และ Q4 เปิดพร้อมกัน ในขณะที่ Q2 และ Q3 ปิด และในครึ่งรอบถัดไป Q2 และ Q3 จะเปิดพร้อมกัน ในขณะที่ Q1 และ Q4 ปิด การควบคุมทิศทางและความเร็วของมอเตอร์จะทำการปรับค่า Duty Cycle ของสัญญาณ PWM ที่ส่งไปยังสวิตช์เหล่านี้ การเพิ่มค่า Duty Cycle จะทำให้มอเตอร์หมุนเร็วขึ้นและในทิศทางที่ต้องการ แต่การเปลี่ยนทิศทางทำได้ช้า

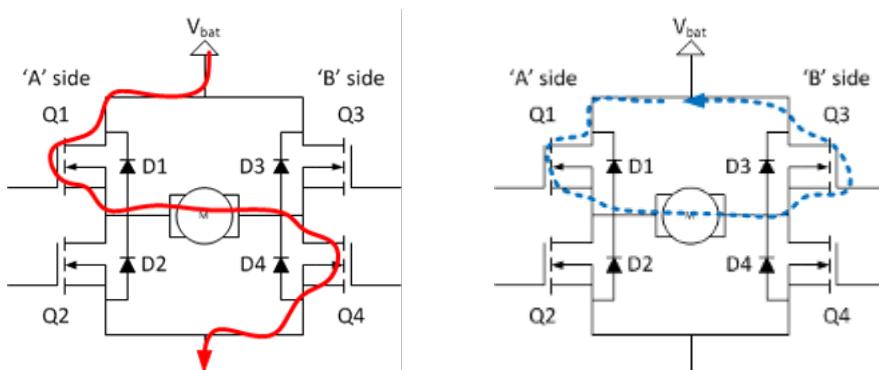
เนื่องจากการสลับสวิตช์ที่ต้องการเวลา และอาจทำให้เกิดการสั่นสะเทือนหรือเสียงรบกวนที่ไม่พึงประสงค์ในบางสถานการณ์



รูปที่ 15 Lock Anti-phase Drive

1.6.9.2 Sign-magnitude Drive

ในโหมดนี้ การควบคุมทิศทางและความเร็วของมอเตอร์จะทำโดยการปรับแรงดันที่ใช้กับมอเตอร์ โดยการใช้สวิตช์สองตัวใน H-Bridge เพื่อเชื่อมต่อขั้วบวกและขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟกับขั้วของมอเตอร์ การปรับค่า Duty Cycle ของสัญญาณ PWM ที่ส่งไปยังสวิตช์เหล่านี้จะควบคุมความเร็วของมอเตอร์ ในขณะที่การสลับการเชื่อมต่อของสวิตช์จะควบคุมทิศทางของมอเตอร์ แต่มีการใช้พลังงานมากกว่าการควบคุมด้วยโหมดอื่น ๆ เนื่องจากต้องคำนึงถึงการควบคุมทิศทางและความเร็วในเวลาเดียวกัน



รูปที่ 16 Sign-magnitude Drive

1.6.10 การควบคุม Motor ผ่าน Mode Lock Anti-Phase และ Sign-Magnitude ใน Cytron MD20A

Cytron MD20A เป็น motor driver ที่สามารถควบคุมมอเตอร์ DC ด้วยการใช้สัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) ซึ่งรองรับโหมดการขับมอเตอร์ต่างๆ เช่น Lock Anti-phase และ Sign-magnitude โดยใช้ PWM signals ที่ได้รับจากไมโครคอนโทรลเลอร์ หรือระบบควบคุมอื่น ๆ ที่สามารถให้

สัญญาณ PWM ได้ ซึ่งการปรับ Duty Cycle ของ PWM จะควบคุมความเร็วของมอเตอร์ และการสลับการเปิดปิดสวิตช์ใน H-Bridge จะช่วยในการควบคุมทิศทางของมอเตอร์

ในการใช้งาน Lock Anti-phase Drive ให้กำหนดค่าของ PWM signal สำหรับการเปิด/ปิดสวิตช์ใน H-Bridge

สำหรับ Sign-magnitude Drive ควบคุมการเปิด/ปิดสวิตช์ใน H-Bridge ตามลำดับและปรับ PWM Duty Cycle เพื่อควบคุมความเร็ว

1.7 วิธีดำเนินการทดลอง

1.7.1

1.7.2

1.8 วัสดุอุปกรณ์

1.8.1 Nidec Components Geared DC Geared Motor, 12 V dc, 20 Ncm, 70 rpm, 6mm Shaft Diameter จำนวน 1 อัน

1.8.2 Incremental Encoder AMT103-V จำนวน 1 อัน

1.8.3 Warner Electric Magnetic Particle Clutches MPB12 จำนวน 1 อัน

1.8.4 WCS1700 Hall Current Sensor จำนวน 1 อัน

1.8.5 Cytron MDD20A Motor Driver จำนวน 1 อัน

1.8.6 Nucleo STM32G474RE พร้อมสายอัปโหลด จำนวน 1 ชุด

1.8.7 MotorXplorer จำนวน 1 ชุด - ฐานสามารถบรรจุบอร์ดควบคุม, Breadboard, 3D-Print ใช้สำหรับการประกอบกับ DC Motor

1.9 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.9.1

1.10 ผลการทดลอง

1.10.1

1.11 สรุปผล

1.11.1

1.12 อกิจกรรมผล

1.12.1

1.13 ข้อเสนอแนะ

1.13.1

1.14 เอกสารอ้างอิง

1.14.1 <http://www.electrical-knowhow.com/2012/05/electrical-motors-basic-components.html>

1.14.2 <https://analogcircuitdesign.com/dc-motors/>

1.14.3 <https://www.youtube.com/watch?v=VInnEsyKeTc>

1.14.4 https://zahurul.buet.ac.bd/ME475/ME475_dcmotors.pdf

1.14.5 https://nuir.lib.nu.ac.th/dspace/bitstream/123456789/1515/1/Kiatsuriyavej%20Rojthanapun_yakul.pdf

1.14.6 <https://en.wikipedia.org/wiki/Angle>

1.14.7 <https://www.motioncontrolltips.com/encoder-basic-working-principles/>

1.14.8 <https://blog.rmutl.ac.th/montri/assets/dc06.pdf>

1.14.9 <https://www.electricleeasy.com/2014/07/characteristics-of-dc-motors.html>

1.14.10 <https://homepages.laas.fr/lzaccari/seminars/DCmotors.pdf>

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

1.14.12 <https://www.rvstcc.ac.in/assets/img/pdf/H-bridge%20driver.pdf>

1.14.13 <https://www.modularcircuits.com/blog/articles/h-bridge-secrets/h-bridges-the-basics/>

1.14.14 https://www.researchgate.net/figure/CMOS-H-bridge-driver-with-dead-time-generation_fig1_275632511

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

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

1.14.17 https://www.modularcircuits.com/blog/articles/h-bridge-secrets/lock-anti-phase-drive/?utm_source=chatgpt.com

1.14.18 <https://www.modularcircuits.com/blog/articles/h-bridge-secrets/sign-magnitude-drive/>

การทดลองที่ 2 Stepper Motor with A07

2.1 วัตถุประสงค์

- 2.1.1 เพื่อศึกษาหลักการทำงานของ Stepper Motor
- 2.1.2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของ Speed เมื่อ Frequency ของสัญญาณที่จ่ายเข้า Stepper Motor เปลี่ยนแปลงไป
- 2.1.3 เพื่อศึกษาหลักการทำงานของรูปแบบการไดร์ฟแบบ Full-Step และ Half-Step ต่อการควบคุมความเร็วและตำแหน่งของ Stepper Motor
- 2.1.4 เพื่อศึกษาหลักการทำงานของ Open-Loop Speed Control ในการควบคุมการทำงานของ Stepper Motor

2.2 สมมุติฐาน

- 2.2.1 Stepper Motor สามารถให้แรงบิดที่แปรผันตามความถี่เมื่อทำงานในช่วงความถี่ที่กำหนด กล่าวคือ เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นแรงบิดจะลดลง
- 2.2.2 การควบคุม Stepper Motor แบบ Full Step จะมีความแม่นยำน้อยที่สุด แต่ให้แรงบิดสูงสุด และการควบคุมแบบ Half Step จะมีความแม่นยำและแรงบิดปานกลาง ในขณะที่การควบคุมแบบ Microstepping จะมีความแม่นยำสูงที่สุด แต่ให้แรงบิดต่ำที่สุด

2.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

- 2.3.1 ตัวแปรต้น : โหนดการควบคุม Stepper Motor และความถี่ของสัญญาณควบคุม Stepper Motor
- 2.3.2 ตัวแปรตาม : แรงบิดของ Stepper Motor, ความเร็วรอบของ Stepper Motor และความแม่นยำของตำแหน่ง
- 2.3.3 ตัวแปรควบคุม : แรงดันไฟฟ้าและแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายให้กับ Stepper Motor, โหลดที่ Stepper Motor แบกรับ, สภาพแวดล้อมขณะทดลอง, วิธีการและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

2.4 นิยามศัพท์เฉพาะ

- 2.4.1 แรงบิด (Torque) หมายถึง การคำนวณแรงบิดของมอเตอร์โดยใช้ สูตรพื้นฐานทางฟิสิกส์
- 2.4.2 ความเร็วรอบ (Speed) หมายถึง การใช้ Encoder เชิงเซอร์วัตความเร็วรอบเพื่อวัดจำนวนรอบที่มอเตอร์หมุน
- 2.4.3 Stepper Frequency หมายถึง ความถี่ที่จ่ายให้กับ Stepper Motor สามารถ input ค่าได้จากโปรแกรมที่เขียนไว้

2.5 นิยามเชิงปฏิบัติการ

- 2.5.1 โหลด (Load) หมายถึง น้ำหนักหรือแรงที่มอเตอร์ต้องแบกรับในระหว่างการทำงาน เช่น น้ำหนักของวัตถุ หรือแรงด้าน
- 2.5.2 ความแม่นยำ (Accuracy) หมายถึง ความใกล้เคียงระหว่างตำแหน่งที่ควรอยู่และตำแหน่งที่วัดได้ของ Stepper Motor
- 2.5.3 PWM (Pulse Width Modulation) หมายถึง เทคนิคควบคุมความเร็วและกระแสผ่านการเปลี่ยน Duty Cycle ของสัญญาณ
- 2.5.4 แรงดันไฟฟ้าจ่าย (Voltage Supply) หมายถึง แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุม Stepper Motor เช่น 5V, 12V หรือ 24V
- 2.5.5 สัญญาณควบคุม (Control Signal) หมายถึง สัญญาณที่ใช้ในการควบคุม Stepper Motor เช่น PWM, สัญญาณดิจิทัล หรือสัญญาณแอนะล็อก
- 2.5.6 ไดรเวอร์มอเตอร์ (Motor Driver) หมายถึง วงจรหรืออุปกรณ์ที่ควบคุมการทำงานของ Stepper Motor เช่น การจ่ายไฟ, ทิศทางการหมุน หรือความเร็วของ Stepper Motor

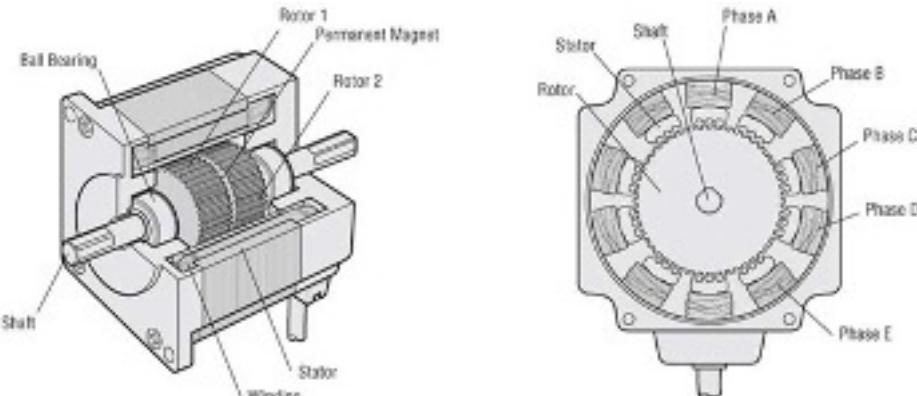
2.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 Stepper Motor

Stepper motor เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่แปลงสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นการเคลื่อนที่แบบขั้น (Step) โดยไม่ต้องใช้เซ็นเซอร์ในการควบคุมการหมุน สามารถควบคุมการหมุนให้หมุนทีละขั้นได้อย่างแม่นยำ โดยการหมุนของมอเตอร์จะเป็นการแบ่งการหมุนรอบเดียวออกเป็นส่วนย่อย ๆ ที่เรียกว่าสเต็ปหรือขั้น ซึ่งมักใช้ในงานที่ต้องการความแม่นยำในการควบคุมมุมหรือการเคลื่อนไหวที่มีความละเอียดสูง เช่น ในเครื่องพิมพ์ 3D หุ่นยนต์ หรือในเครื่องจักรที่ต้องการการควบคุมที่แม่นยำ โดยมีองค์ประกอบหลัก ดังนี้

- โรเตอร์ (Rotor) เป็นส่วนที่หมุนได้ อาจมีแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) หรือทำจากวัสดุแม่เหล็กไฟฟ้าแบบเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic)
- สเตเตอร์ (Stator) เป็นส่วนที่มีขดลวด (Winding) พันรอบ ขดลวดจะสร้างสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน โดยขดลวดแต่ละตัวจะเชื่อมต่อกันขาดของขัวที่อยู่ตรงข้ามกัน เพื่อให้ห้องขัวลูกทำให้เป็นขัวแม่เหล็กที่มีขัวเดียวกันเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ขดลวด คู่ขัวแม่เหล็กที่อยู่ตรงข้ามกันนี้เรียกว่า หนึ่งเฟส (One Phase) ซึ่งจะดึงดูดหรือผลักดันโรเตอร์ให้หมุนเป็นขั้น ๆ
- ลูกปืน (Ball Bearing) ใช้รองรับแกนหมุน (Shaft) ของโรเตอร์ เพื่อให้หมุนได้อย่างราบรื่นและลดแรงเสียดทาน

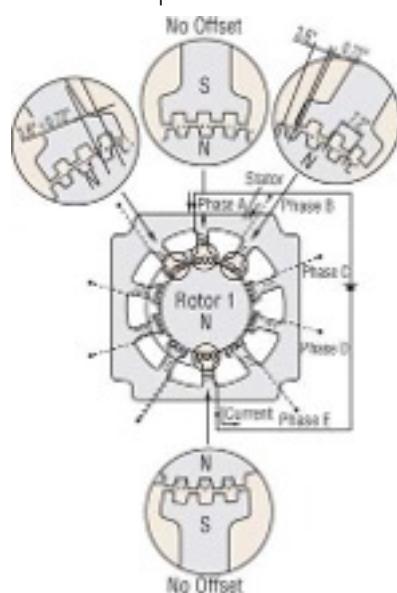
- แกนหมุน (Shaft) เป็นส่วนที่ถ่ายทอดการหมุนออกไปใช้งาน เช่น การหมุนพินเฟือง (Gear) หรือสายพาน (Belt)
- ชด漉ัด เป็นชด漉ัดที่พันรอบสเตเตอร์ เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าควบคุมการเคลื่อนที่ของโรเตอร์



Motor Structural Diagram: Cross-Section Parallel to Shaft Motor Structural Diagram: Cross-Section Perpendicular to Shaft

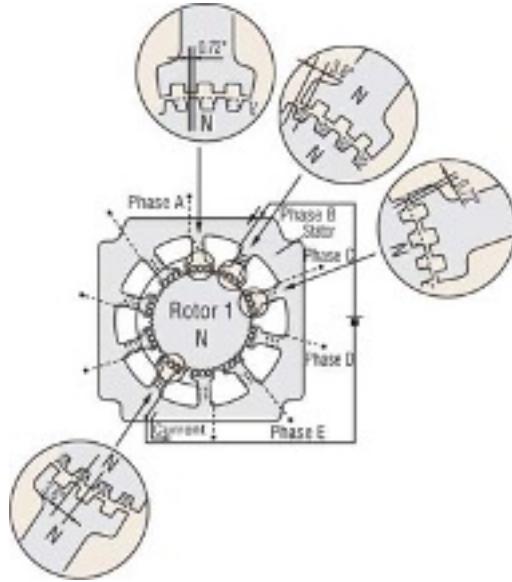
รูปที่ 17 องค์ประกอบของ Stepper Motor

Stepper motor มีหลักการทำงาน ดังนี้ โดยยกตัวอย่างการทำงานของ 5-phase stepper motor ซึ่งเมื่อเฟส A ถูกกระตุ้น (Excited) ขั้วของเฟสนี้จะกล้ายเป็นขั้วใต้ (South Pole) ซึ่งจะดึงดูดฟันของโรเตอร์ 1 ที่เป็นขั้วเหนือ (North Pole) และผลักฟันของโรเตอร์ 2 ที่เป็นขั้วใต้ (South Pole) ทำให้แรงดึงดูดและแรงผลักที่สมดุลกันช่วยให้โรเตอร์หยุดนิ่งในตำแหน่งที่มั่นคง ขณะเดียวกันฟันของขั้วในเฟส B ซึ่งไม่ได้ถูกกระตุ้น จะไม่ตรงแนวกับฟันของโรเตอร์ 2 ที่เป็นขั้วใต้ โดยฟันของเฟส B จะเยื่องกันเล็กน้อยเป็นระยะ 0.72° ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างฟันเล็กๆ ของสเตเตอร์และโรเตอร์เมื่อเฟส A ทำงาน



รูปที่ 18 การทำงานของ Phase A

เมื่อการกระตุ้นเปลี่ยนจากเฟส A ไปยังเฟส B ขั้วของเฟส B จะกลับเป็นขั้วเหนือ (North Pole) ซึ่งจะดึงดูดฟันของโรเตอร์ 2 ที่เป็นขั้วใต้ (South Pole) และผลักฟันของโรเตอร์ 1 ที่เป็นขั้วเหนือ (North Pole)



รูปที่ 19 การทำงานของ Phase B

และจะทำการหมุนเปลี่ยนเฟสไปต่อออด ซึ่ง Stepper Motor จะหมุนอย่างแม่นยำในมุม 0.72° ต่อแต่ละสเต็ป หากต้องการหมุนย้อนกลับ เพียงแค่เปลี่ยนลำดับการกระตุ้นเป็นเฟส A, E, D, C, B และวนกลับมาที่เฟส A

2.6.2 การ Loss Step

การ Loss Step ใน Stepper motor คือ การที่มอเตอร์ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปตามจำนวนขั้นตอนที่กำหนด หรือที่ควรจะเป็น ซึ่งอาจเกิดจากหลายสาเหตุที่ทำให้มอเตอร์ไม่สามารถถักขาความแม่นยำในการหมุนได้ โดยที่ปัญหานี้จะทำให้การควบคุมมอเตอร์เสียหาย เช่น การเคลื่อนที่ที่ไม่ตรงตำแหน่งที่ต้องการ หรือ การเคลื่อนที่ไม่スマ่เสมอ สาเหตุหลักที่ทำให้เกิด Loss Step มีดังนี้ การจ่ายกระแสไม่เพียงพอ โหลดที่หนักเกินไป การควบคุมที่ไม่แม่นยำ หรือการตั้งค่าความเร็วที่สูงเกินไป

2.6.3 การสั่งความเร็วด้วยความเร่งของ Stepper Motor

การสั่งความเร็วของ Stepper Motor ด้วยความเร่ง (acceleration) หมายถึงการเพิ่มความเร็วของมอเตอร์จากสถานะหยุดนิ่งไปยังความเร็วสูงสุดตามลำดับ โดยมักใช้กราฟทราพีซอยดัล (Trapezoidal) ที่มีลักษณะเป็นการเร่งความเร็วในช่วงแรกจนถึงความเร็วคงที่ ซึ่งช่วยให้มอเตอร์ทำงานได้อย่างราบรื่นและลดความเสียจกจากการสูญเสียขั้นตอน (step loss) หรือการสั่นสะเทือนที่อาจเกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วอย่างรวดเร็ว

Stepper Motor ทำงานโดยการรับสัญญาณพลัสร์ไฟฟ้าที่มีความถี่ซึ่งเรียกว่า pulse rate (จำนวนพลัสร์ต่อวินาที) การหมุนของมอเตอร์จะเป็นสัดส่วนกับจำนวนพลัสร์ที่ได้รับ และสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\theta = \text{step angle} \times n$$

เมื่อ θ คือ มุมที่มอเตอร์หมุน หน่วย deg

n คือ จำนวนพลัสร์ หน่วย Pulses

step angle คือ มุมของ 1 step หน่วย deg

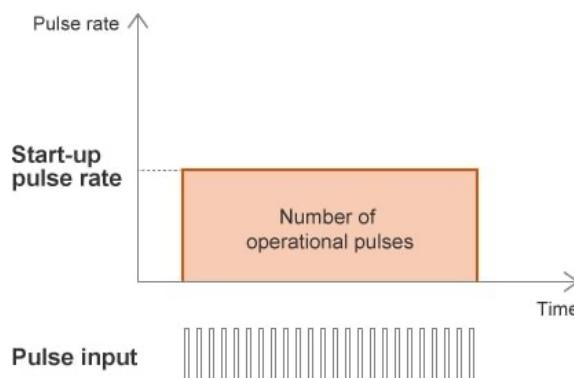
ความเร็วของมอเตอร์จะเป็นสัดส่วนกับอัตราการป้อนพลัสร์ โดยสามารถคำนวณได้จาก

$$\omega = \frac{\text{step angle}}{360} \times \text{pulse rate} \times 60$$

เมื่อ ω คือ ความเร็วของมอเตอร์ หน่วย รอบต่อนาที (RPM)

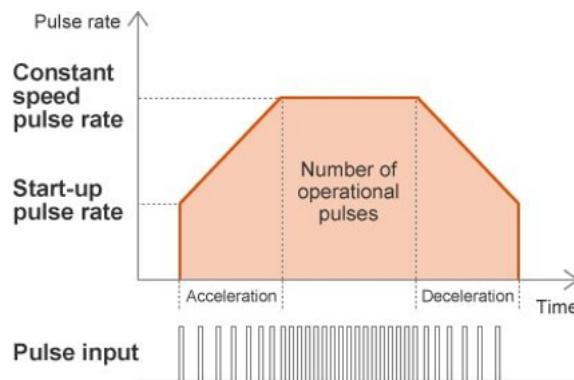
pulse rate คือ จำนวนพลัสร์ที่มอเตอร์ได้รับในแต่ละวินาที หน่วย เฮิรตซ์ (Hz)

Stepper Motor มีสองโหมดการทำงานหลัก คือ โหมดความเร็วคงที่ (Constant velocity) ซึ่งเปลี่ยนความเร็วของมอเตอร์ทันที



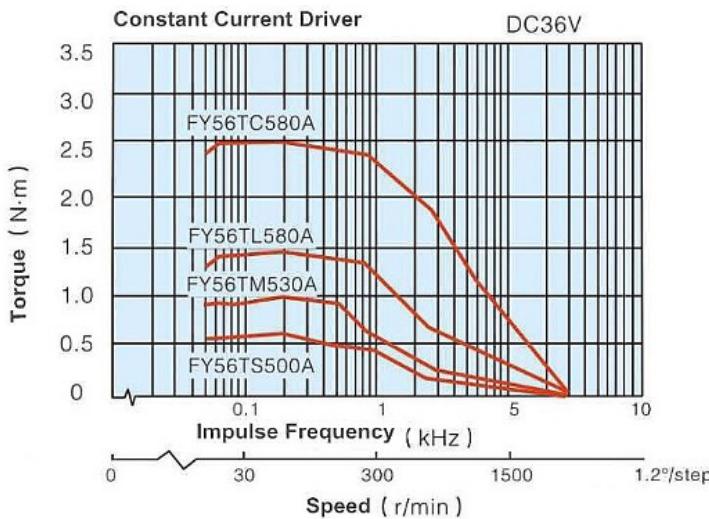
รูปที่ 20 Constant velocity Motion Profile

โหมดการเร่งและลดความเร็ว (Acceleration/deceleration) ซึ่งค่อย ๆ เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสเพื่อให้มีเวลาในการเร่งและชะลอความเร็ว



รูปที่ 21 Acceleration/Deceleration Motion Profile

2.6.4 Stepper Motor Characteristic



รูปที่ 22 Nema 23 Stepper Motor, 3 Phase, 5.8A, 2.5N·m Characteristic

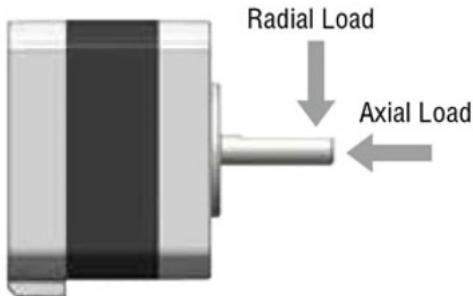
มอเตอร์สเต็ปเปอร์มีแรงบิดสูงในช่วงความเร็วต่ำ แต่แรงบิดจะลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ซึ่งมีความแตกต่างกับ DC motor โดยมอเตอร์สเต็ปเปอร์จะมีแรงบิดที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อความเร็วหรือความถี่เพิ่มขึ้นในระดับหนึ่งแรงบิดจะลดลงอย่างรวดเร็ว

2.6.5 Stepper Motor Specification

ข้อมูลที่บ่งบอกถึงลักษณะและคุณสมบัติที่สำคัญของมอเตอร์ที่ช่วยในการเลือกใช้มอเตอร์ในแอปพลิเคชันต่าง ๆ โดยรวมถึงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพและการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งสามารถแยกเป็นหมวดหมู่หลัก ๆ ดังนี้

- NEMA (National Electrical Manufacturers Association) หมายถึงขนาดของมอเตอร์ เป็นมาตรฐานสำหรับระบุขนาดทางกายภาพของมอเตอร์
- Current/Phase กระแสสูงสุดที่ขัดลวดในแต่ละเฟสของมอเตอร์สามารถรองรับได้
- Resistance/Phase ค่าความต้านทานในขดลวดของแต่ละเฟส มีผลต่อการจ่ายพลังงานและความร้อนที่เกิดขึ้นในมอเตอร์
- Inductive/Phase ค่าความเหนี่ยวนำต่อเฟส ส่งผลต่อความเร็วในการตอบสนองของมอเตอร์และการออกแบบวงจรขับ
- AWG (American Wire Gauge) ขนาดสายไฟ
- Max Voltage แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่มอเตอร์สามารถทำงานได้อย่างปลอดภัย
- Holding Torque แรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์สามารถต้านแรงภายนอกในขณะหยุดหมุน
- Detent torque แรงบิดที่เกิดจากแม่เหล็กในโรเตอร์เมื่อไม่มีการจ่ายไฟ
- Rotor Inertia ความเฉื่อยของโรเตอร์ ส่งผลต่อความเร็วในการตอบสนองและการเร่งของมอเตอร์

- Bearing Load แรงสูงสุดที่สามารถรองรับในแต่ละแนวแรง ซึ่งแบ่งออกเป็น Axial และ Radial



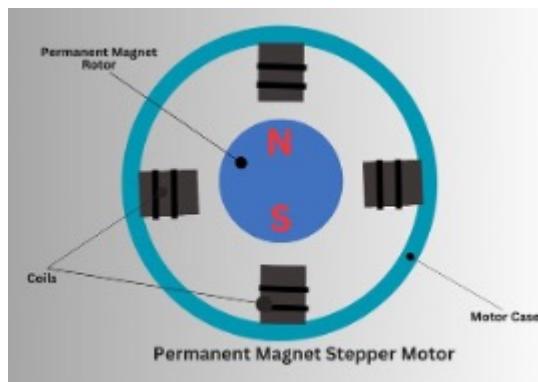
รูปที่ 23 Radial Load and Axial Load

2.6.6 Stepper Motor Rotor Type

Stepper Motor สามารถแบ่งประเภทของโรเตอร์ (Rotor Type) ออกเป็น 3 ประเภทหลัก ๆ ตามลักษณะของโครงสร้างและการทำงาน ดังนี้

2.6.6.1 Permanent Magnet Stepper Motor

โรเตอร์ทำจากวัสดุแม่เหล็กถาวร ซึ่งสร้างสนามแม่เหล็กที่คงที่ โดยการหมุนเกิดจากการดึงดูดและผลักกันระหว่างสนามแม่เหล็กของโรเตอร์และสนามแม่เหล็กที่สร้างจากขดลวดสเตเตอเรอร์ ซึ่งให้แรงบิดสูงเมื่อเทียบกับขนาด และประยุกต์พลังงาน เนื่องจากใช้สนามแม่เหล็กถาวรแทนการสร้างสนามแม่เหล็กจากไฟฟ้าทั้งหมด แต่ความละเอียด (Resolution) จำกัด เมื่อเทียบกับ Hybrid Stepper Motor

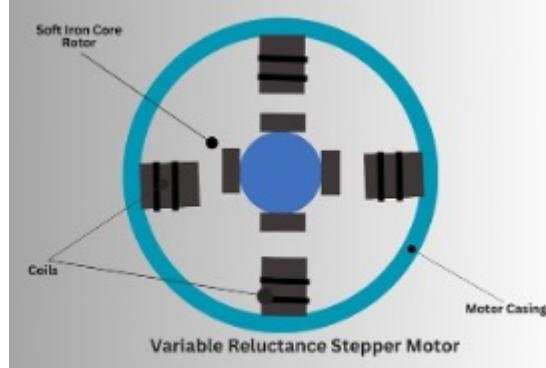


รูปที่ 24 Permanent Magnet Stepper Motor

2.6.6.2 Variable Reluctance Stepper Motor

โรเตอร์ทำจากวัสดุแม่เหล็กอ่อน (Soft Magnetic Material) ไม่มีแม่เหล็กถาวร โดยการหมุนของโรเตอร์เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของแรงแม่เหล็กที่สร้างขึ้นจากขดลวดในสเตเตอเรอร์ และช่องว่างอากาศ (Air Gap) ระหว่างโรเตอร์และสเตเตอเรอร์เปลี่ยนแปลงเพื่อให้โรเตอร์จัดแนวกับสนามแม่เหล็ก ซึ่ง

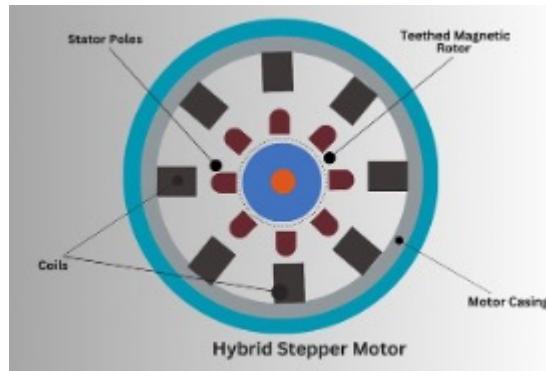
มีความละเอียดสูง เนื่องจากสามารถออกแบบให้มีจำนวนฟัน (Teeth) ของโรเตอร์ที่ละเอียดมากขึ้น แต่แรงบิดต่ำกว่า Permanent Magnet และ Hybrid Stepper Motor



รูปที่ 25 Variable Reluctance Stepper Motor

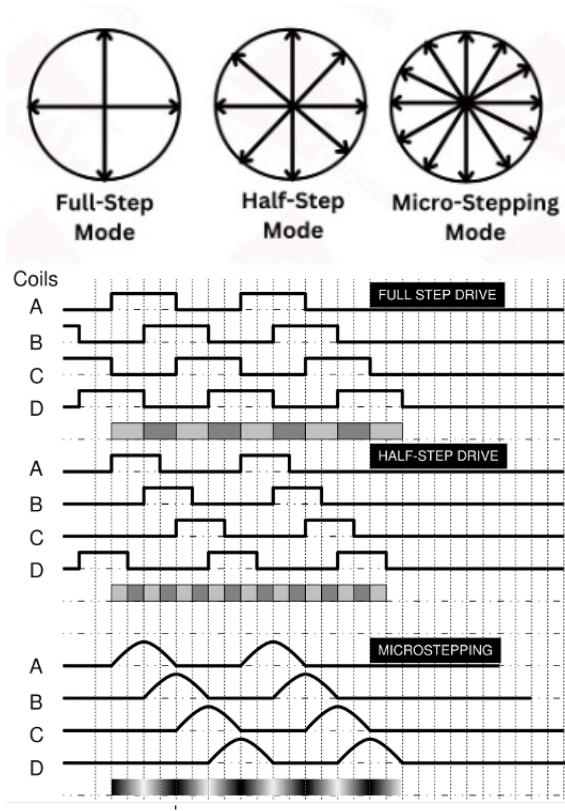
2.6.6.3 Hybrid Synchronous Stepper Motor

เป็นการผสมผสานคุณสมบัติของ Permanent Magnet และ Variable Reluctance ประกอบด้วยแม่เหล็กถาวร และฟัน (Teeth) ที่ช่วยเพิ่มความละเอียดและแรงบิด โดยการเคลื่อนที่ของโรเตอร์สัมพันธ์กับการสลับพลังงานไฟฟ้าในขดลวดของสเตเตอร์ ซึ่งมีแรงบิดสูงและความละเอียดสูง



รูปที่ 26 Hybrid Synchronous Stepper Motor

2.6.7 Stepper Drive Mode



รูปที่ 27 Stepper Drive Mode

Stepper Drive Mode คือรูปแบบการควบคุมหรือขับเคลื่อน Stepper Motor ซึ่งมีผลต่อความละเอียด (Resolution) ความแม่นยำ และความลื่นไหลของการเคลื่อนที่ Stepper Motor สามารถขับเคลื่อนด้วยโหนดที่แตกต่างกัน โดยแต่ละโหนดมีคุณสมบัติและการใช้งานเฉพาะ ดังนี้

2.6.7.1 Full Step Mode

ขดลวดแต่ละเฟสจะถูกกระตุ้นทีละหนึ่งเฟส (Single-phase excitation) หรือสองเฟสร่วมกัน (Two-phase excitation) โดยการเคลื่อนที่แต่ละครั้งจะข้ามหนึ่งขั้น (Step) ตามจำนวนสเต็ปต่อรอบของมอเตอร์ เช่น มอเตอร์ 200 สเต็ปต่อรอบ จะมีมุ่งหมุน 1.8° ต่อขั้น ซึ่งให้แรงบิดสูงสุดเนื่องจากกระตุ้นทั้งสองเฟสร่วมกันในบางจังหวะ แต่การเคลื่อนที่ไม่ลื่นไหล

2.6.7.2 Half Step Mode

ขดลวดของมอเตอร์จะถูกกระตุ้นสลับกันระหว่างการกระตุ้นเฟสเดียวและสองเฟส ทำให้ได้สเต็ปปายอย (Half Step) ระหว่างตำแหน่งปกติ โดยความละเอียดจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า เช่น มอเตอร์ 200 สเต็ปต่อรอบ จะกลายเป็น 400 สเต็ปต่อรอบ หรือมุ่งหมุน 0.9° ต่อขั้น ซึ่งการเคลื่อนที่จะลื่นไหลกว่า Full Step แต่แรงบิดลดลงเล็กน้อยเมื่อกระตุ้นเฟสเดียว

2.6.7.3 Microstepping Mode

ขดลวดจะถูกกระตุ้นด้วยกระแสที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องในรูปแบบไซน์ (Sine Wave) และโคไซน์ (Cosine Wave) ทำให้เกิดการแบ่งสเต็ปอย่างได้ละเอียดมาก เช่น การแบ่งเป็น 16, 32 หรือมากกว่า 256 ไมโครสเต็ป ส่งผลให้ความละเอียดเพิ่มขึ้นหลายเท่า เช่น มอเตอร์ 200 สเต็ปต่อรอบ อาจกล่าวเป็น 3200 ไมโครสเต็ปต่อรอบ ซึ่งการเคลื่อนที่จะลื่นไหลมาก ลดการสั่นสะเทือน (Vibration) และเสียงรบกวน แต่แรงบิดลดลงเมื่อเพิ่มความละเอียดและการควบคุมชั้บช้อนขึ้น

2.6.8 Stepper Drive Type

ประเภทของไดรเวอร์ที่ใช้ควบคุมการทำงานของ Stepper Motor โดยการเลือกประเภทของไดรเวอร์ขึ้นอยู่กับลักษณะของมอเตอร์และการทำงานที่ต้องการ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นประเภทหลัก ๆ ได้ดังนี้

2.6.8.1 L/R Drive (Constant Voltage Drive)

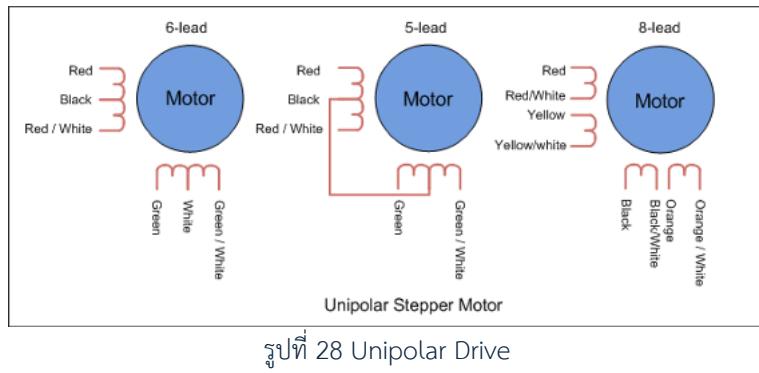
ใช้แรงดันไฟฟ้าคงที่ (Constant Voltage) จ่ายให้กับขดลวดของมอเตอร์ ควบคุมกระแสผ่านขดลวดทำได้ด้วยการปรับค่าความต้านทาน (Resistor) ภายในวงจร ซึ่งประสิทธิภาพต่ำที่ความเร็วสูงเนื่องจากเวลาในการตอบสนองของกระแสเมื่อจำกด และสิ้นเปลืองพลังงานเนื่องจากมีการใช้ตัวต้านทาน

2.6.8.2 Chopper Drive (Constant Current Drive)

ควบคุมกระแสที่จ่ายเข้าสู่ขดลวดมอเตอร์ให้คงที่ (Constant Current) โดยใช้การสับเปลี่ยน (Chopping) กระแสผ่านไดรฟ์ ใช้การ Pulse Width Modulation (PWM) เพื่อรักษากระแสให้เสถียร ประสิทธิภาพสูง โดยเฉพาะที่ความเร็วสูง สามารถรักษากระแสได้แม้แรงดันไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลง และช่วยลดการสูญเสียพลังงานในวงจร แต่ชั้บช้อนกว่าระบบ L/R Drive

2.6.8.3 Unipolar Drive

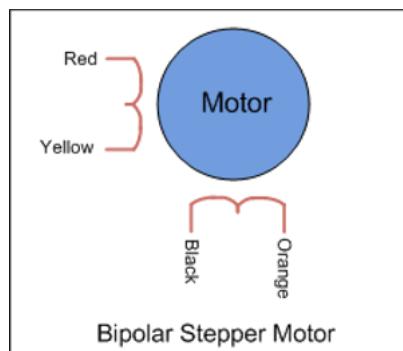
มอเตอร์ถูกออกแบบให้แต่ละขดลวดแบ่งออกเป็นสองส่วน โดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระตุ้นขดลวดในทิศทางเดียว ใช้ไดโอดหรือตัวสลับเพื่อตัดต่อกระแสในแต่ละเฟส ซึ่งการใช้ขดลวดเพียงครึ่งเดียวในแต่ละจังหวะ ทำให้แรงบิดต่ำกว่า Bipolar Drive



รูปที่ 28 Unipolar Drive

2.6.8.4 Bipolar Drive

ขดลวดของมอเตอร์ถูกกระตุนทั้งสองทิศทาง โดยใช้ H-Bridge Circuit เพื่อเปลี่ยนทิศทาง กระแส ทำให้สามารถใช้พลังงานจากขดลวดได้เต็มที่ ส่งผลให้มีแรงบิดสูง เนื่องจากใช้ขดลวดทั้งหมด ในแต่ละจังหวะ และประสิทธิภาพสูงกว่าระบบ Unipolar Drive แต่ การออกแบบจะซับซ้อนกว่า Unipolar Drive



รูปที่ 29 Bipolar Drive

2.6.8.5 Microstepping Drive

ขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยการจ่ายกระแสในลักษณะคลื่นไส้ (Sine Wave) หรือโคไซน์ (Cosine Wave) เพื่อแบ่งสเตปของมอเตอร์ให้เล็กลง (Microstep) เพิ่มความละเอียดและความลื่นไหลในการเคลื่อนที่ แต่แรงบิดลดลงเมื่อแบ่งสเตปไปหลายเอียดมาก

2.7 วิธีดำเนินการทดลอง

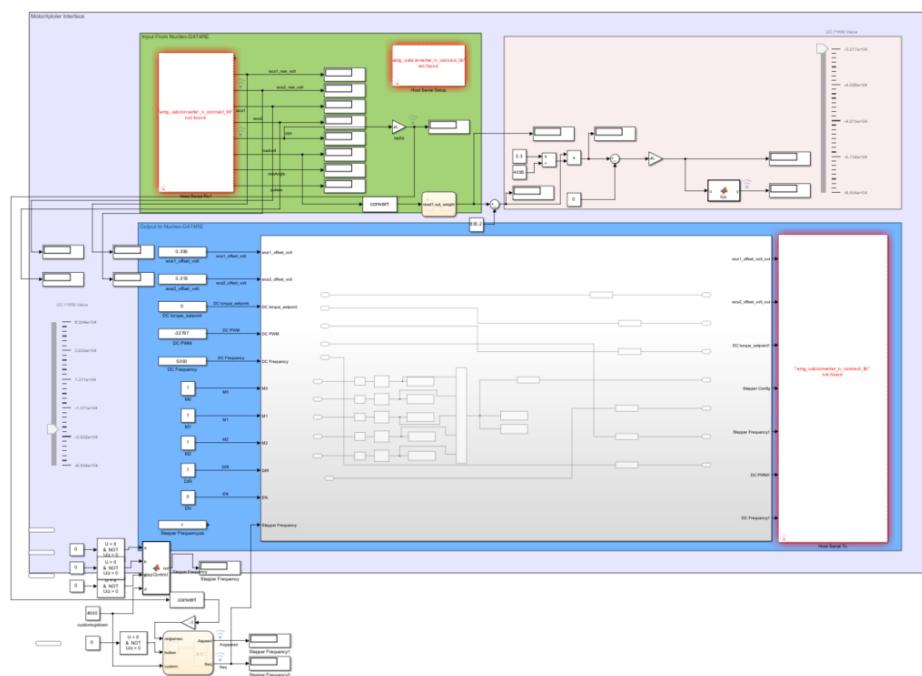
จากการทดลองเพื่อศึกษาคุณลักษณะของ Stepper Motor และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณ Back EMF ต่อลักษณะการทำงานของ Stepper Motor จึงทำการหาค่า Loss Step จากการเพิ่มค่า Stepper Frequency ขึ้นไปทุก ๆ 1 วินาที ซึ่งเป็นการเพิ่มความเร่งของ Step ซึ่งส่งผลให้ Stepper Motor มีความเร็วเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามความเร่งของค่า Stepper Frequency และเมื่อ Stepper Motor เกิดการ Loss Step จึงสามารถอธิบายและยืนยันได้ว่า ความเร่งมีผลกับการเกิด Loss Step จำนวนนั้นจึงทำการเปลี่ยน Driver Mode แต่ละแบบ เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของแต่ละโหมดที่ใช้ในการควบคุม Stepper Motor

2.8 วัสดุอุปกรณ์

- 2.8.1 RS PRO Hybrid, Permanent Magnet Stepper Motor, 0.22Nm Torque, 2.8 V, 1.8°, 42.3 x 42.3mm Frame, 5mm Shaft จำนวน 1 อัน
- 2.8.2 Incremental Encoder AMT103-V จำนวน 1 อัน
- 2.8.3 WCS1700 Hall Current Sensor จำนวน 1 อัน
- 2.8.4 Cytron MDD20A Motor Driver จำนวน 1 อัน
- 2.8.5 Nucleo STM32G474RE พร้อมสายอัปโหลด จำนวน 1 ชุด
- 2.8.6 MotorXplorer จำนวน 1 ชุด - ฐานสามารถบรรจุบอร์ดควบคุม, Breadboard, 3D-Print ใช้สำหรับการประกอบกับ Stepper Motor

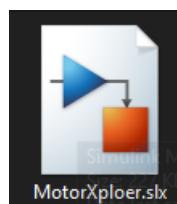
2.9 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 2.9.1 ตั้งค่าโปรแกรม Simulink เพื่อใช้ในการอ่านค่าสัญญาณและเก็บค่าสัญญาณต่าง ๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้



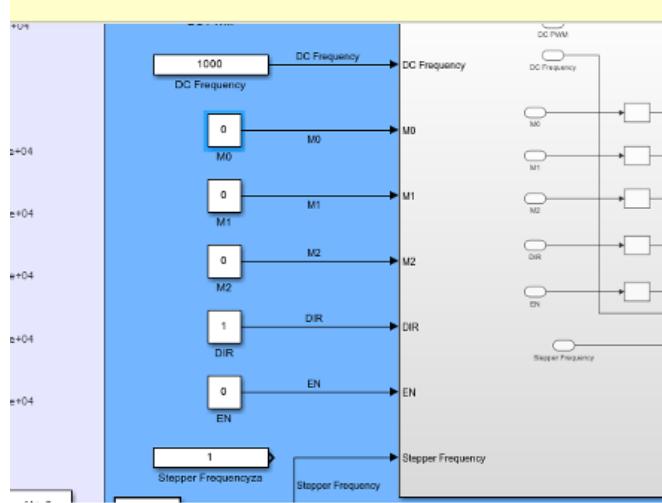
รูปที่ 30 การตั้งค่า Simulink สำหรับการอ่านค่าสัญญาณต่าง ๆ

2.9.1.1 เปิดโปรแกรม Simulink ในไฟล์ MotorXplorer.slx



รูปที่ 31 ไฟล์ MotorXpler.slx

2.9.1.2 ตั้งค่า Stepper Driver ให้ทำงานในโหมดต่าง ๆ ผ่านการเขียนโปรแกรม Simulink นั่นคือ Full Step Drive, Half Step Drive, Micro Step Drive โดยสามารถกำหนดโหมดต่าง ๆ ได้ตามรูปที่ 33

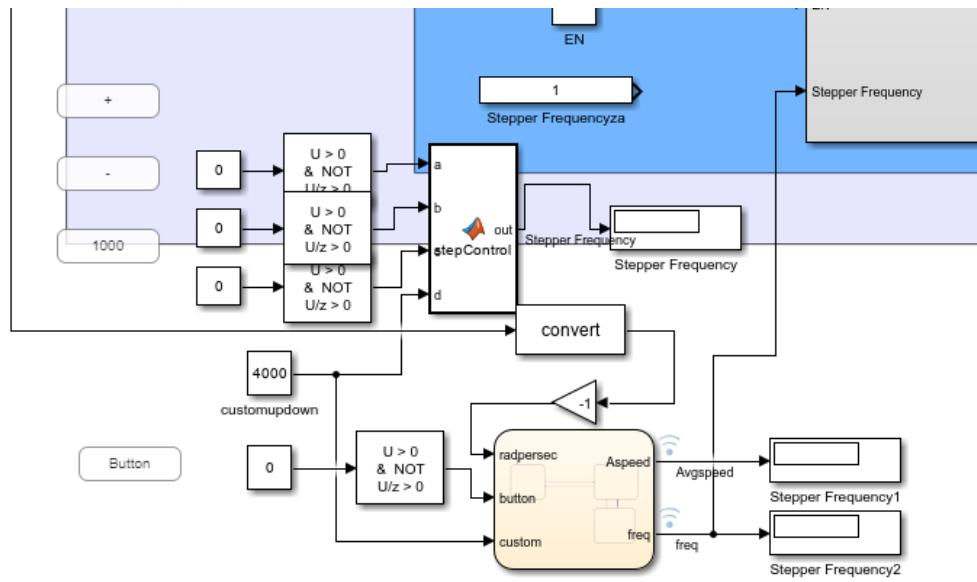


รูปที่ 32 การตั้งค่า Stepper Driver ผ่านการเขียนโปรแกรม Simulink

M0	M1	M2	Microstepping Mode
LOW	LOW	LOW	Full Step
HIGH	LOW	LOW	Half Step
LOW	HIGH	LOW	1/4 Step
HIGH	HIGH	LOW	1/8 Step
LOW	LOW	HIGH	1/16 Step
HIGH	LOW	HIGH	1/32 Step
LOW	HIGH	HIGH	1/32 Step
HIGH	HIGH	HIGH	1/32 Step

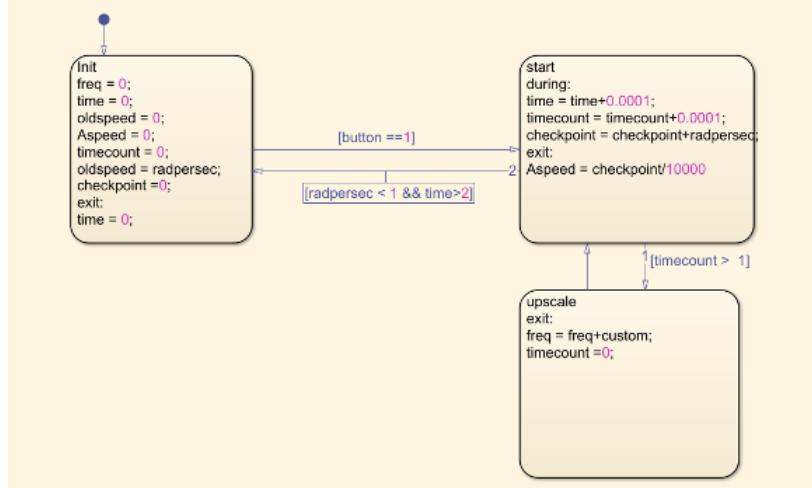
รูปที่ 33 การกำหนดโหมดการทำงานของ Stepper Driver

2.9.1.3 เขียนโปรแกรมเพื่อทดสอบการเกิด Loss Step โดยจะทำการเพิ่มความถี่ตามที่ระบุไว้ที่ตัวแปร custom ขึ้นไปทุก ๆ 1 วินาที จากนั้นให้ output ไปยัง Stepper Frequency



รูปที่ 34 การทดสอบการเกิด Loss Step ผ่านโปรแกรม Simulink

2.9.1.4 กำหนดให้ Chart ทำงานโดยการรับค่าจาก custom เข้าไปใน Chart ทำการบวกเลขตัวแปร freq ขึ้นไปเรื่อยตามจำนวนเลข custom ในทุก ๆ 1 วินาทีและ freq จะ output ไปยัง Stepper Frequency

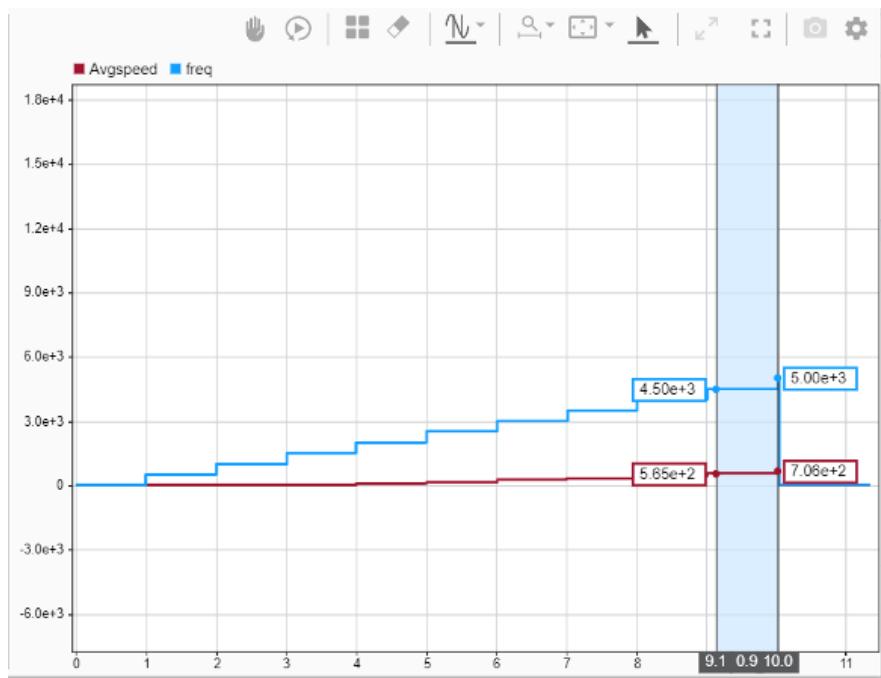


รูปที่ 35 Chart ในการคำนวณและสั่ง Stepper Frequency

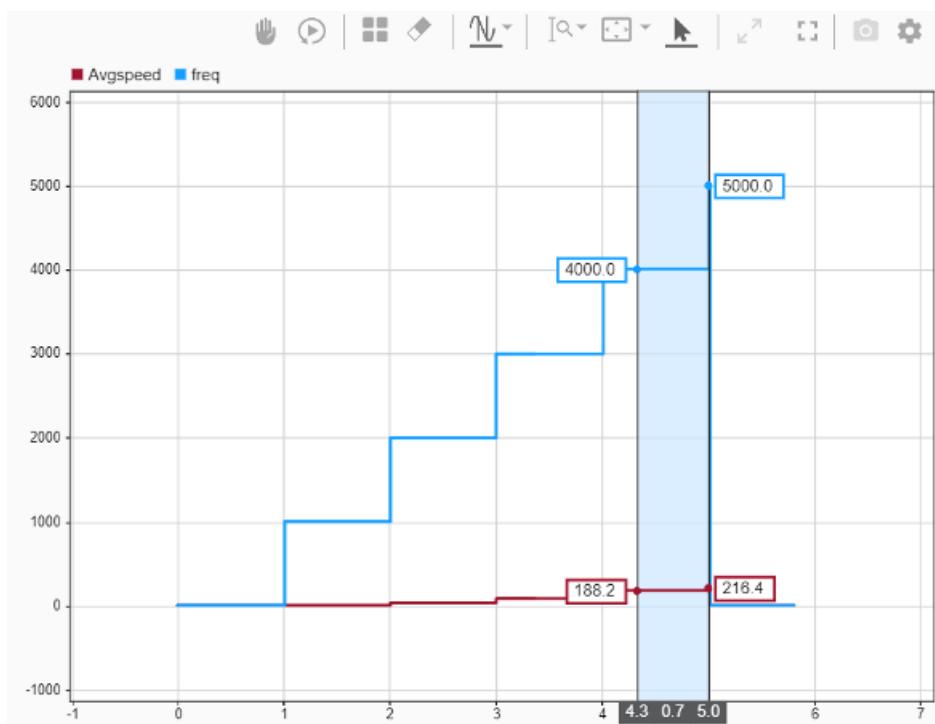
2.9.1.5 เก็บค่าความเร็ว rad/s จำนวน 10,000 ค่าให้ output ออกมา 1 ค่า เพื่อให้ค่าความเร็วที่คงตัว แล้วนำค่า ความเร็ว เวลา และ Stepper Frequency นำมาทำเป็นกราฟ โดยที่ค่า Stepper Frequency/second คือค่าความเร็ว หน่วยเป็น Hz/s จากสมการ $a = \frac{\Delta V}{t}$ และค่า ความเร็วคือค่าที่อ่านได้จาก Encoder และค่า Stepper Frequency เพราะใน 1 Hz จะทำให้ Stepper Motor หมุน 1 Step ทำให้เมื่อค่า Stepper Frequency สูงความเร็ว ก็จะสูงตาม

2.10 ผลการทดลอง

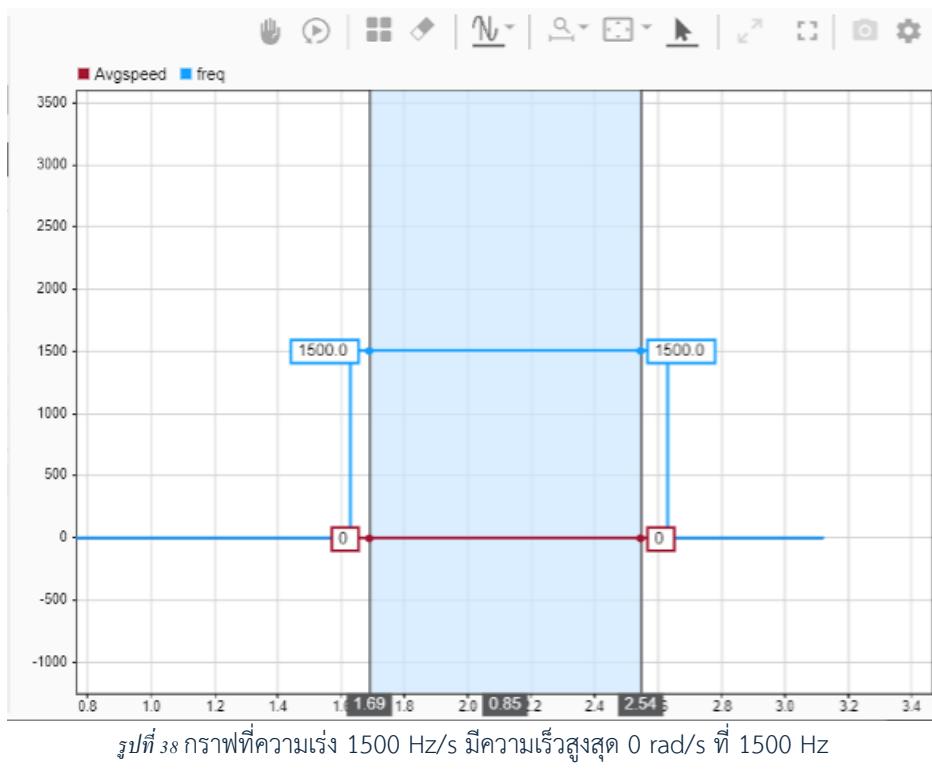
2.10.1 การควบคุมด้วยโหมด Full-Step



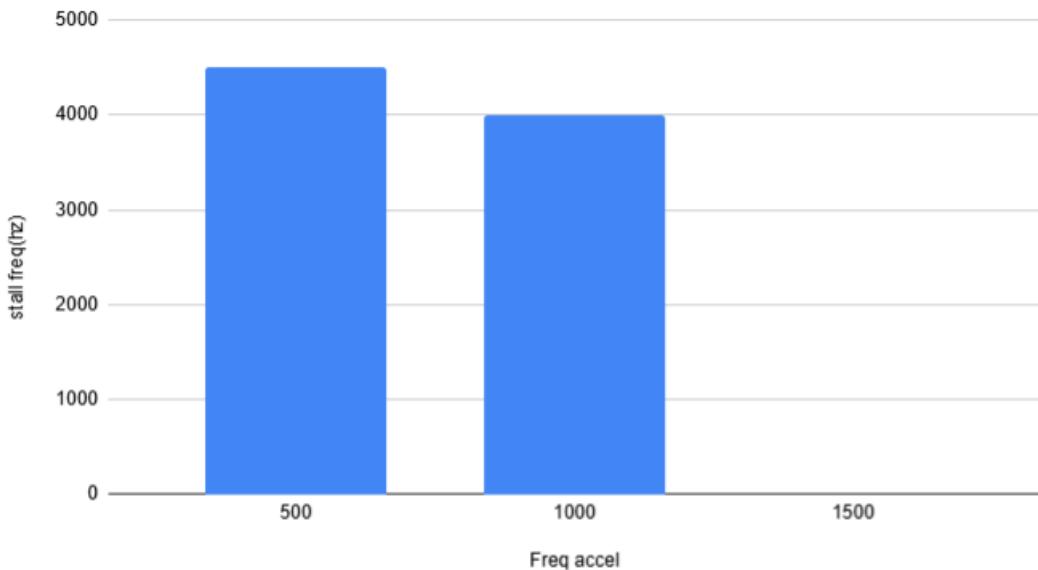
รูปที่ 36 กราฟที่ความเร่ง 500 Hz/s มีความเร็วสูงสุด 700 rad/s ที่ 4500 Hz



รูปที่ 37 กราฟที่ความเร่ง 1000 Hz/s มีความเร็วสูงสุด 216.4 rad/s ที่ 4000 Hz

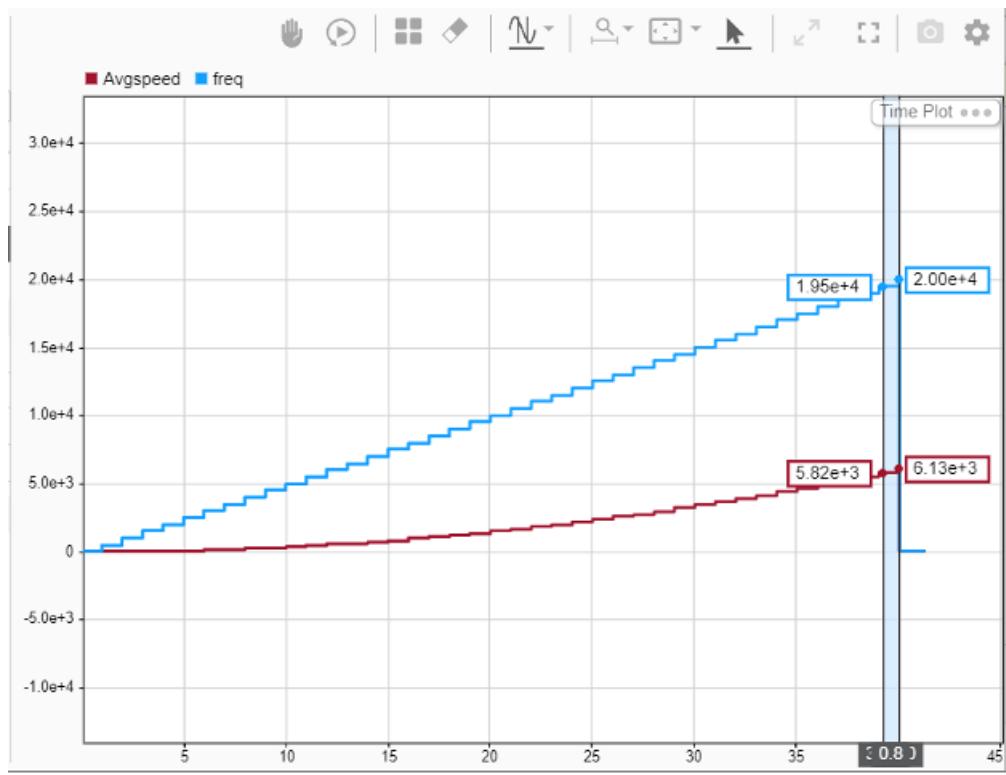


stall freq(hz) กับ Freq accel

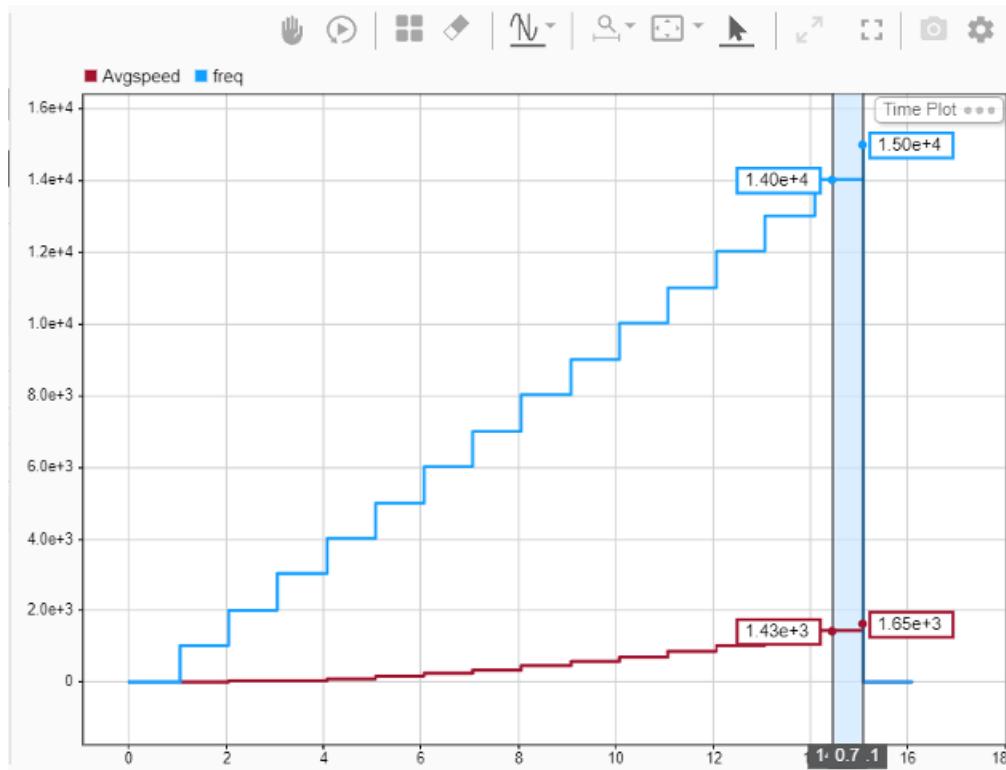


กราฟบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร่ง ความเร็ว และ Step Loss ของโหมด Full Step

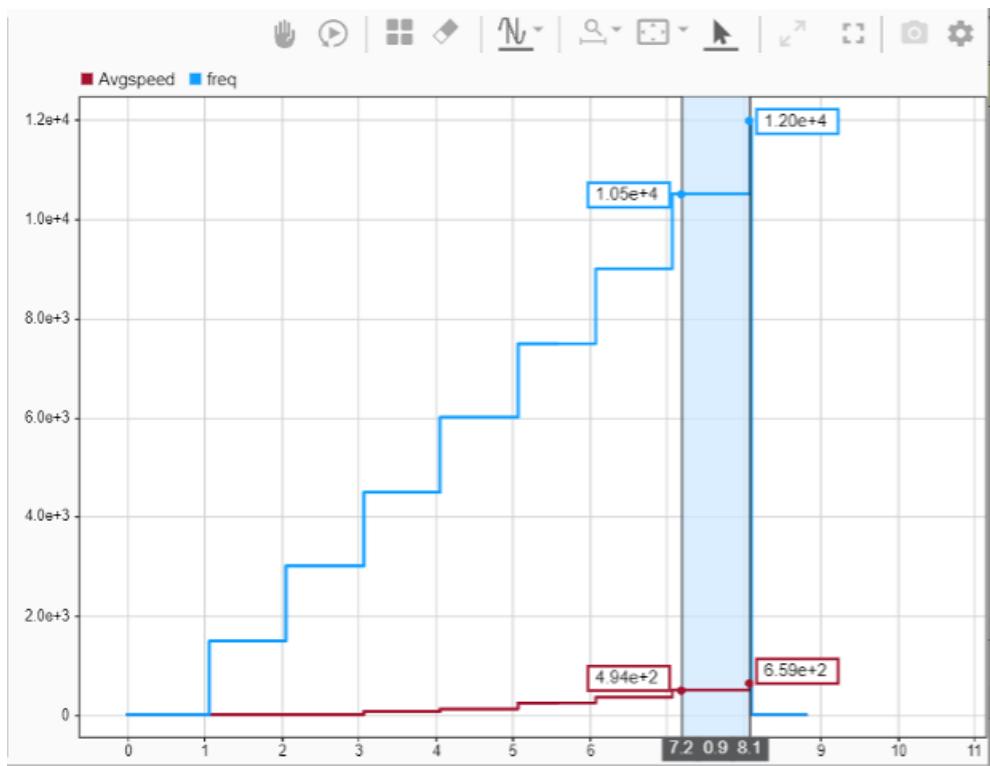
2.10.2 การควบคุมด้วยโหมด Half Step



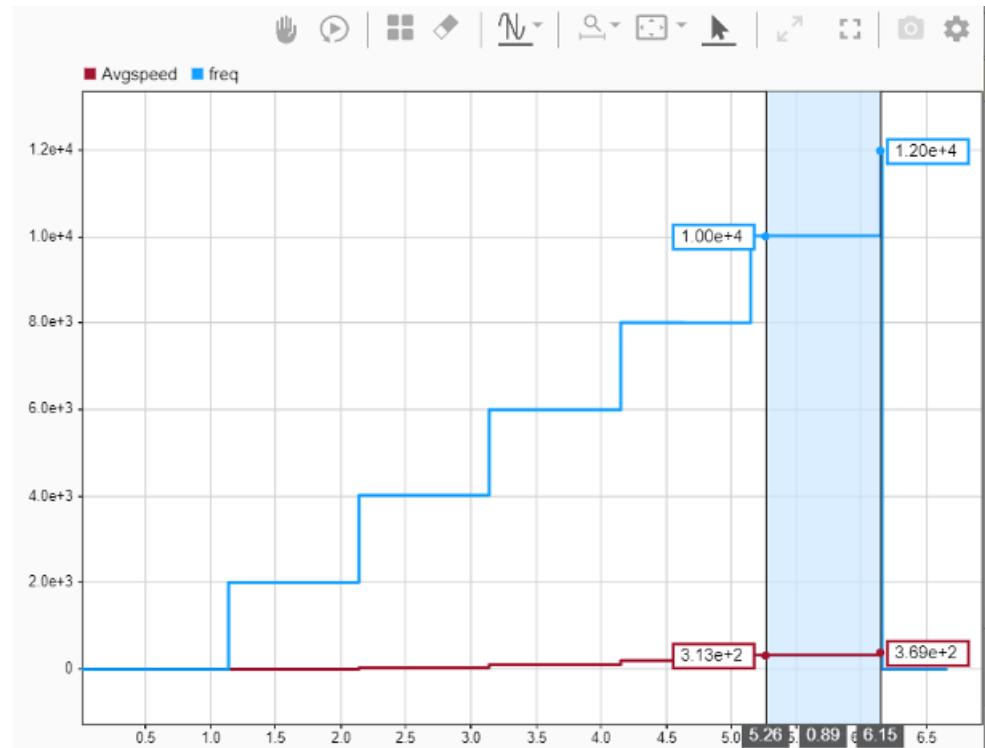
กราฟที่ความเร่ง 500 Hz/s มีความเร็วสูงสุด 6,130 rad/s ที่ 19500 Hz



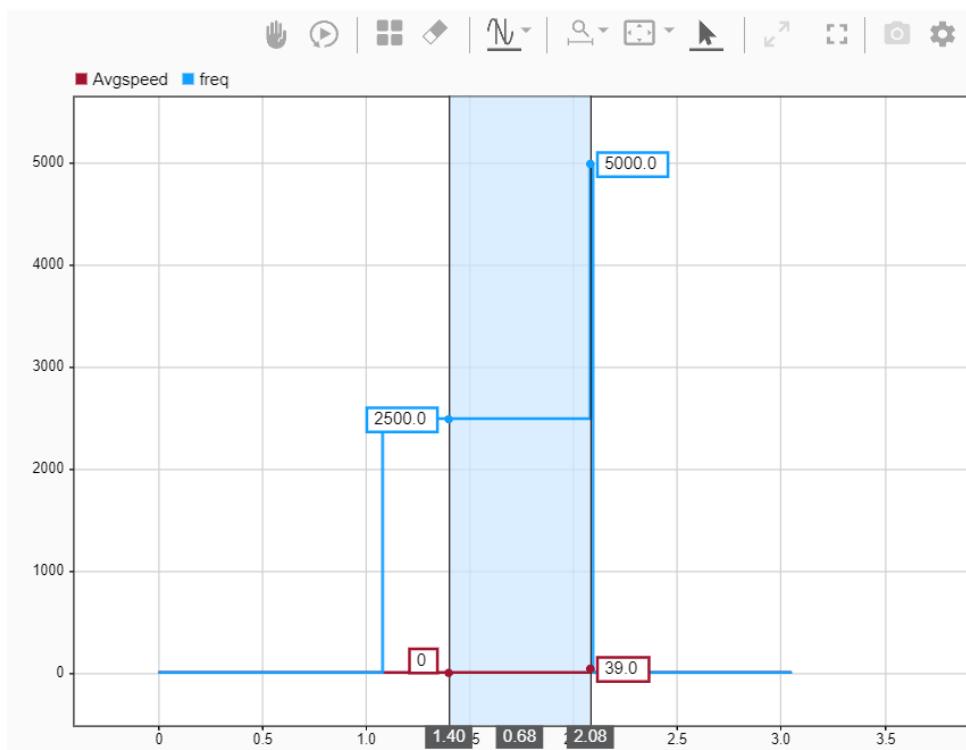
กราฟที่ความเร่ง 1000 Hz/s มีความเร็วสูงสุด 1650 rad/s ที่ 14000 Hz



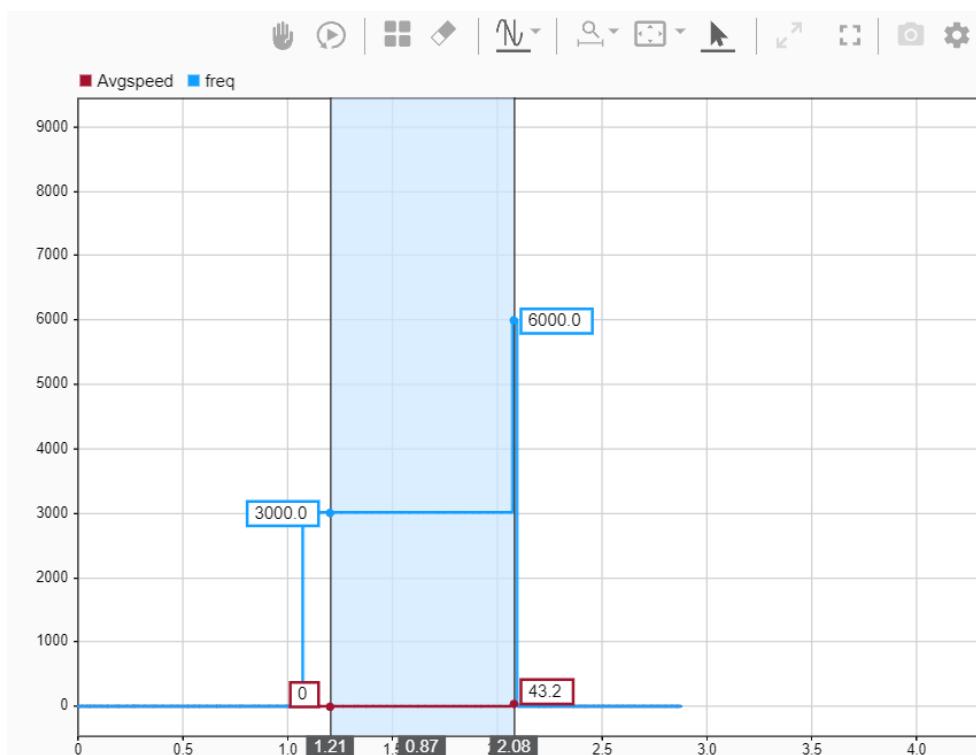
กราฟที่ความเร่ง 1500 Hz/s มีความเร็วสูงสุด 6590 rad/s ที่ 10500 Hz



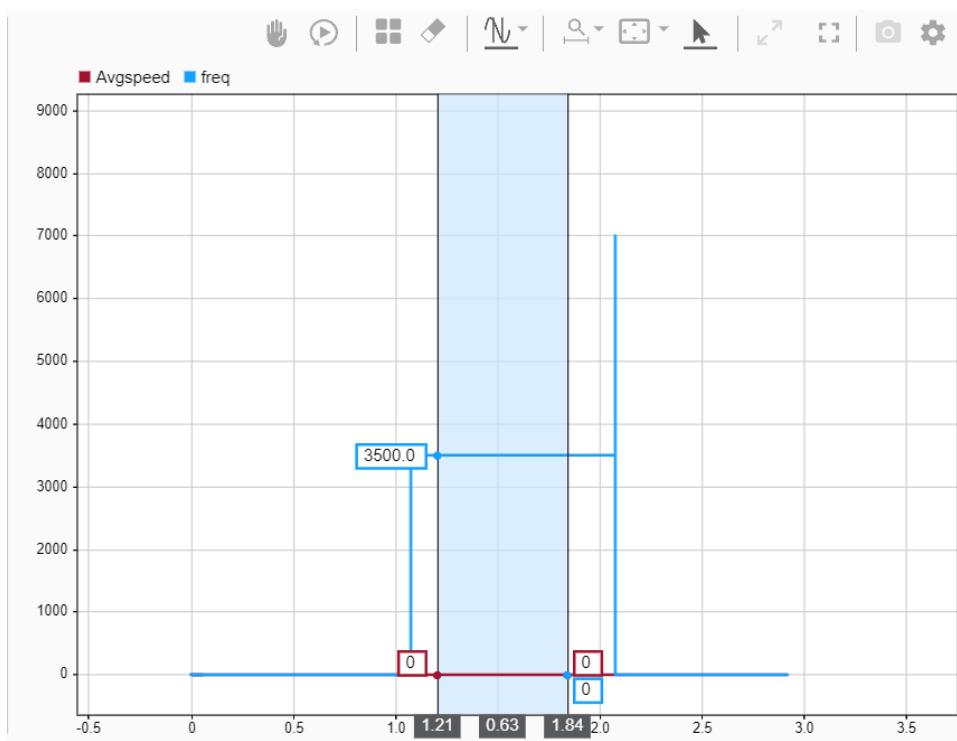
กราฟที่ความเร่ง 2000 Hz/s มีความเร็วสูงสุด 3690 rad/s ที่ 10000 Hz



กราฟที่ความเร่ง 2500hz/s มีความเร็วสูงสุด 39 rad/s ที่ 2500hz

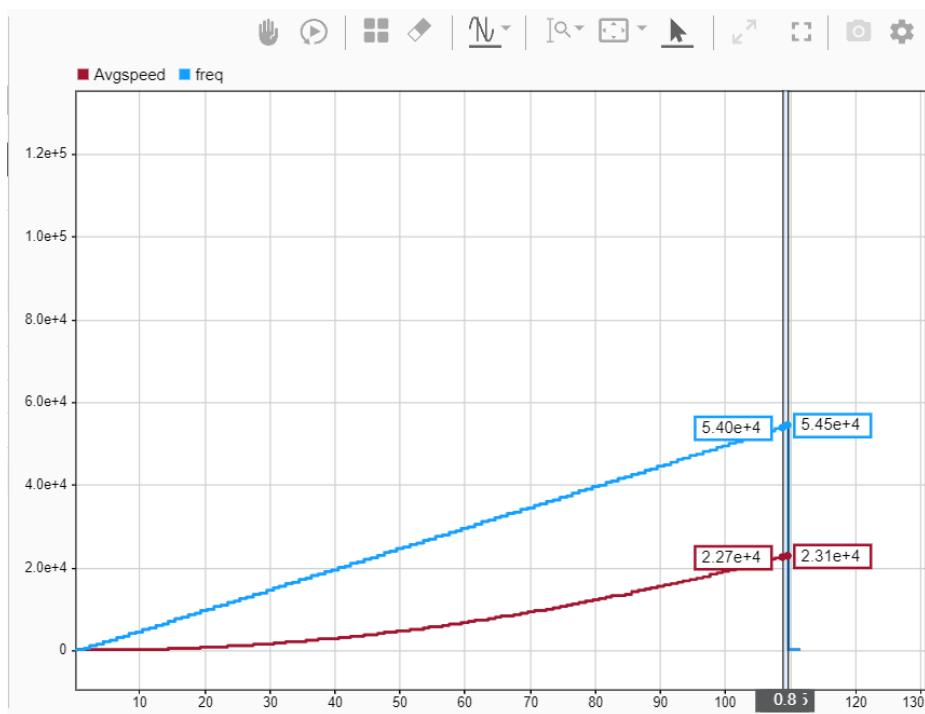


กราฟที่ความเร่ง 3000hz/s มีความเร็วสูงสุด 43 rad/s ที่ 3000hz

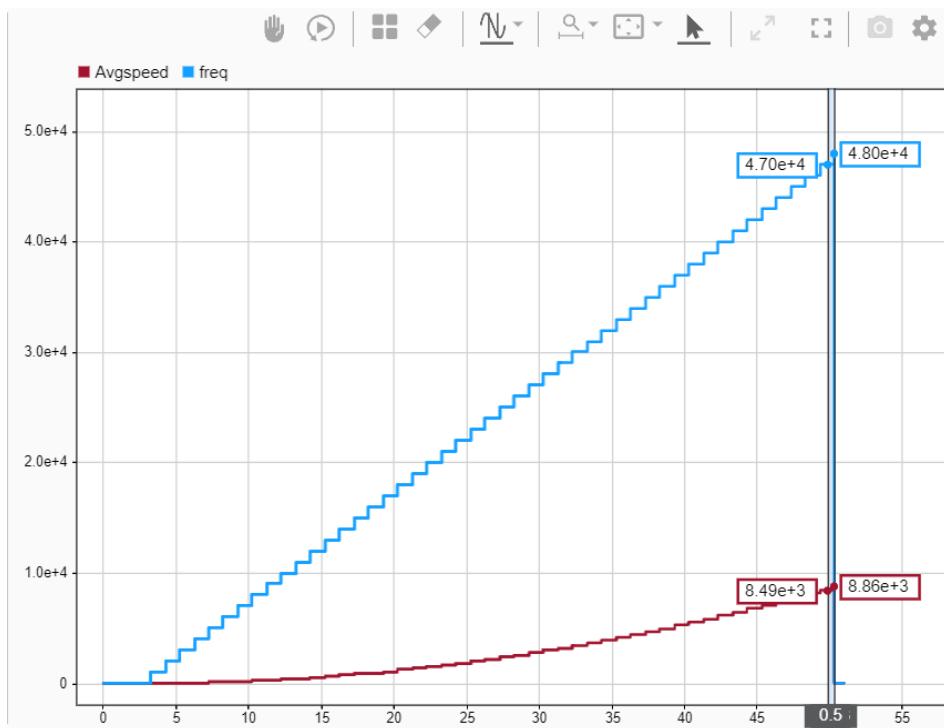


กราฟที่ความเร่ง 3500hz/s มีความเร็วสูงสุด 0 rad/s ที่ 3500hz

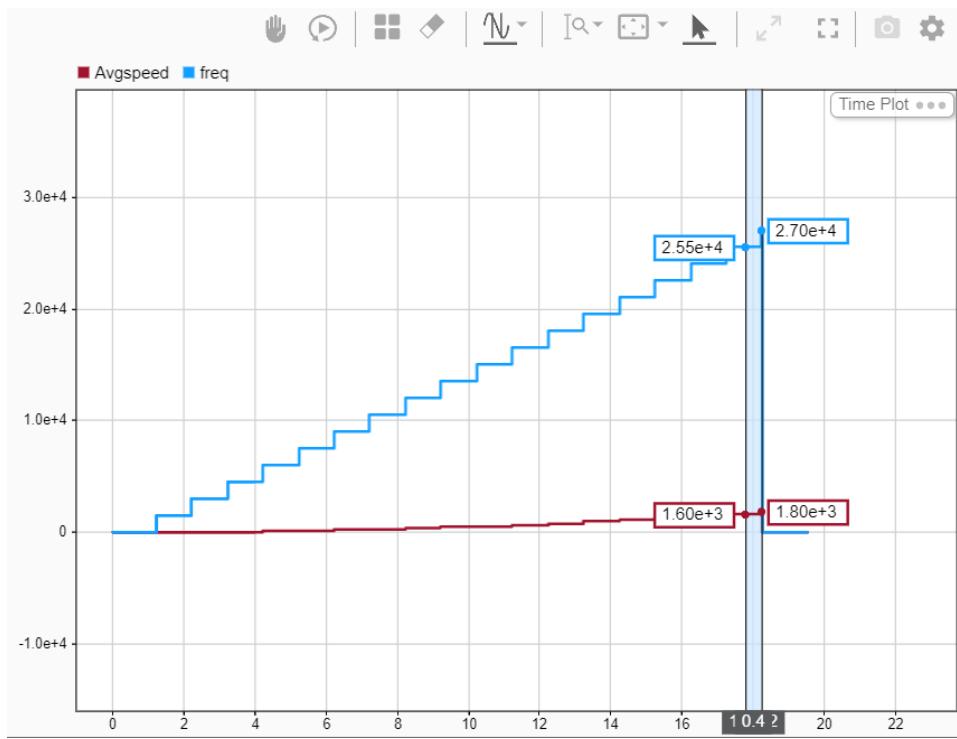
2.10.3 การขับแบบโหมด Microstepping 1/4



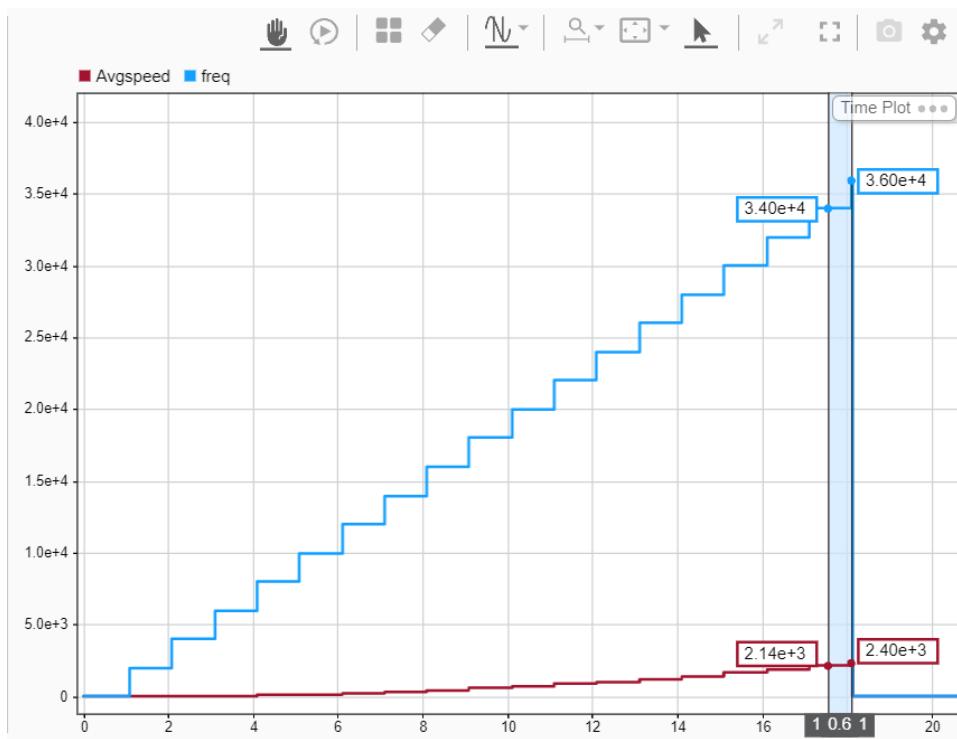
กราฟที่ความเร่ง 500hz/s มีความเร็วสูงสุด 23100 rad/s ที่ 54000hz



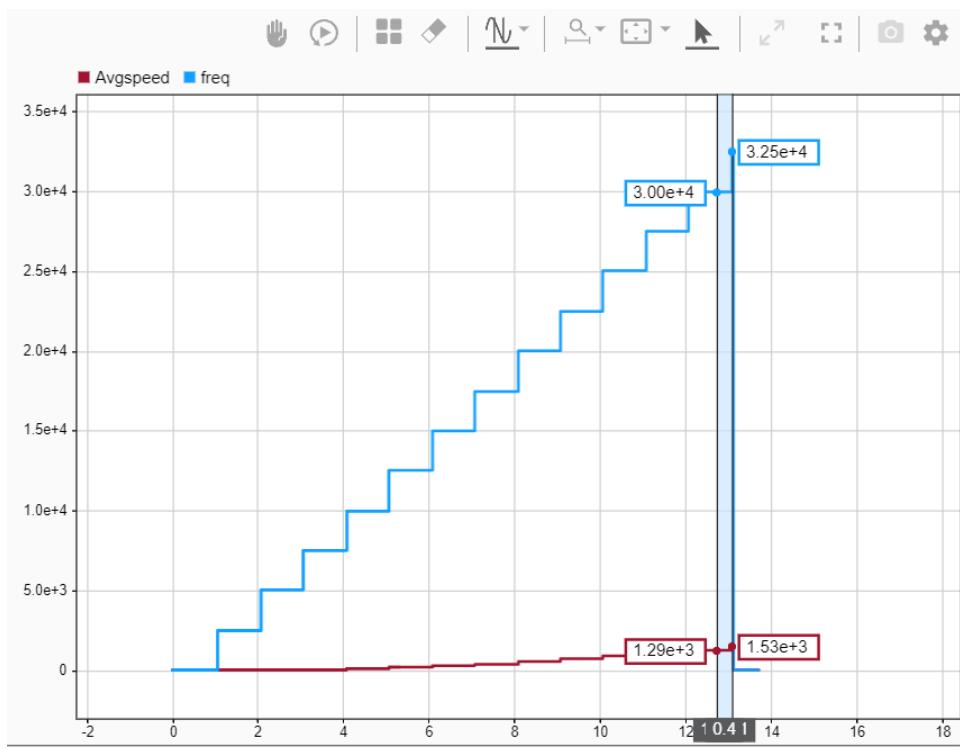
กราฟที่ความเร่ง 1000hz/s มีความเร็วสูงสุด 8860 rad/s ที่ 47000hz



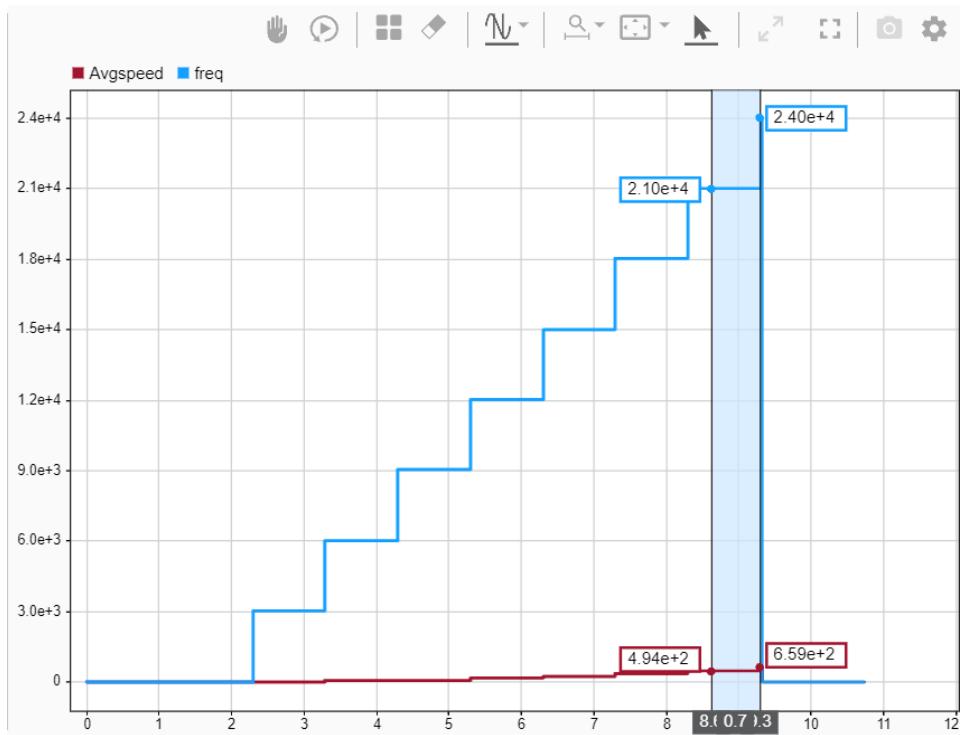
กราฟที่ความเร่ง 1500hz/s มีความเร็วสูงสุด 1800 rad/s ที่ 25500hz



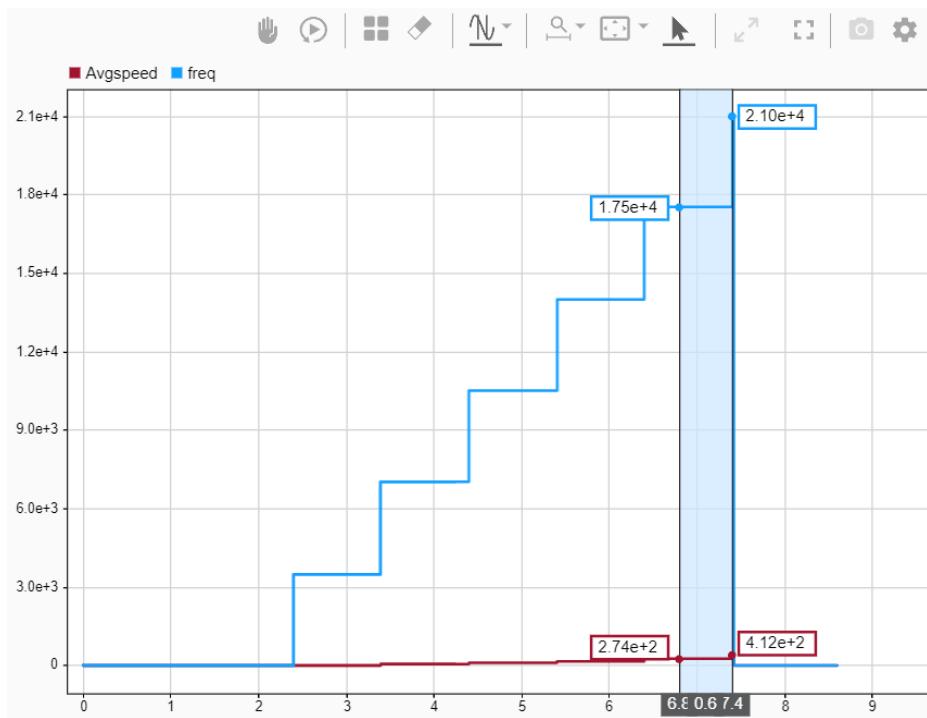
กราฟที่ความเร่ง 2000hz/s มีความเร็วสูงสุด 2400 rad/s ที่ 34000hz



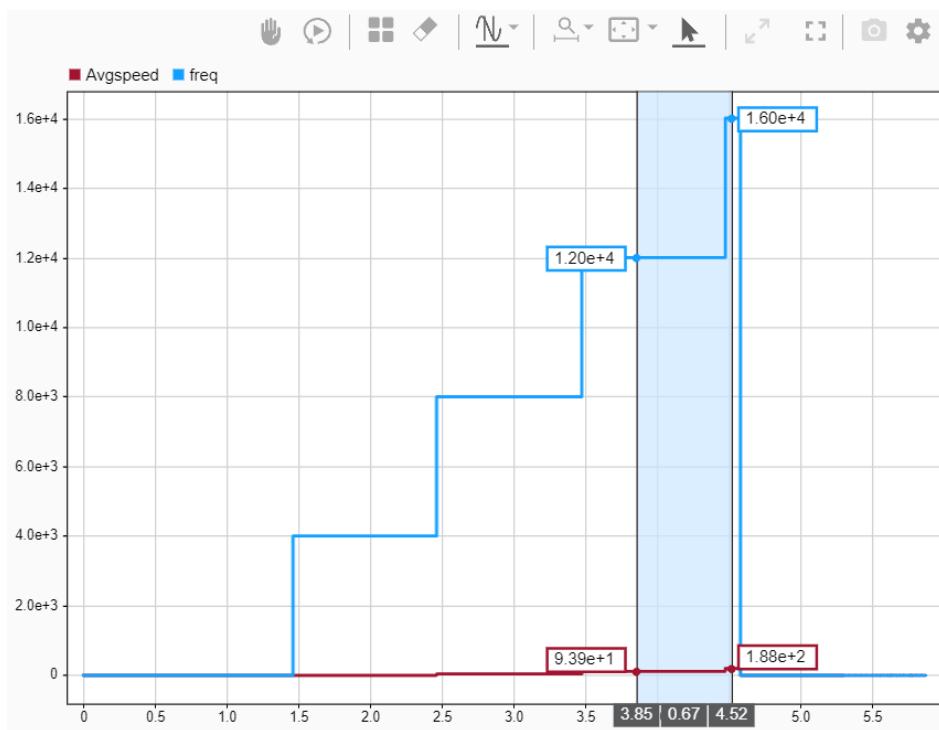
กราฟที่ความเร่ง 2500hz/s มีความเร็วสูงสุด 1530 rad/s ที่ 30000hz



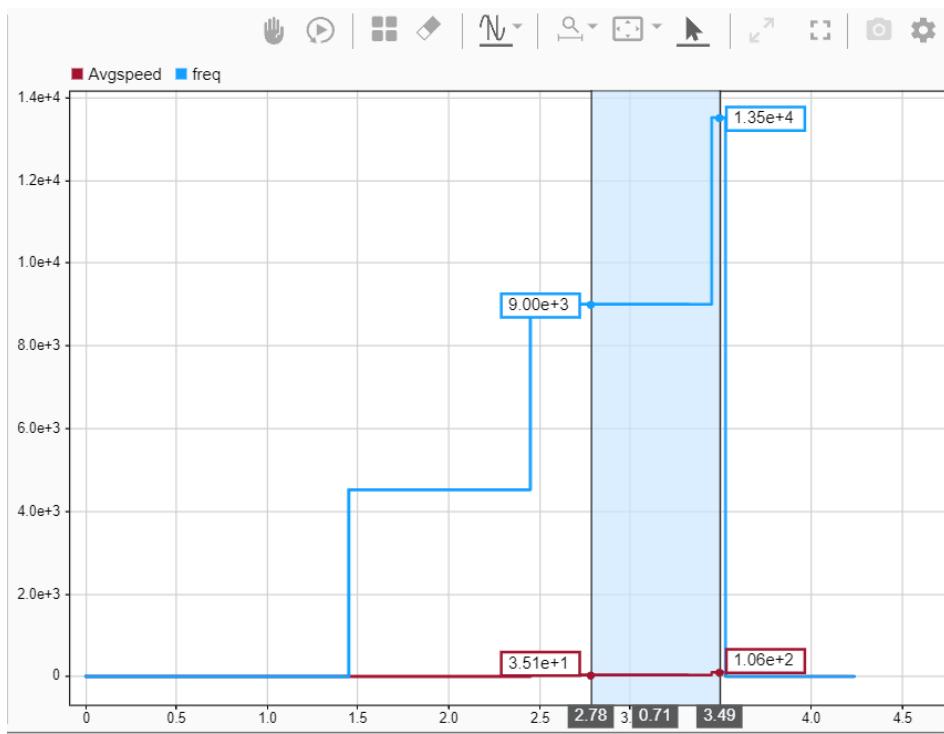
กราฟที่ความเร่ง 3000hz/s มีความเร็วสูงสุด 659 rad/s ที่ 21000hz



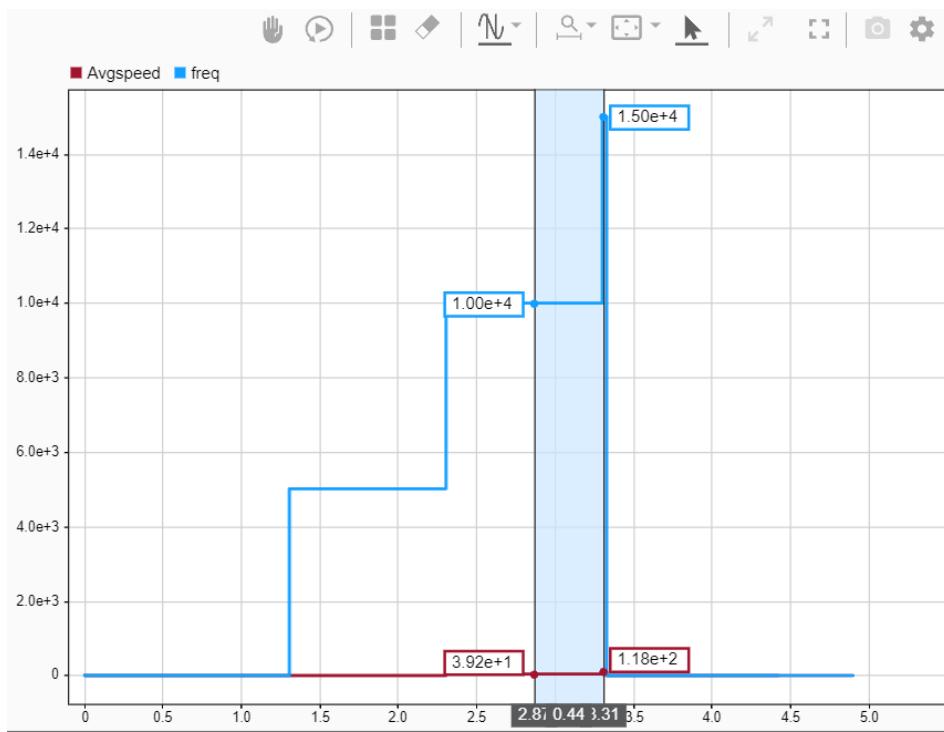
กราฟที่ความเร่ง 3500hz/s มีความเร็วสูงสุด 412 rad/s ที่ 17500hz



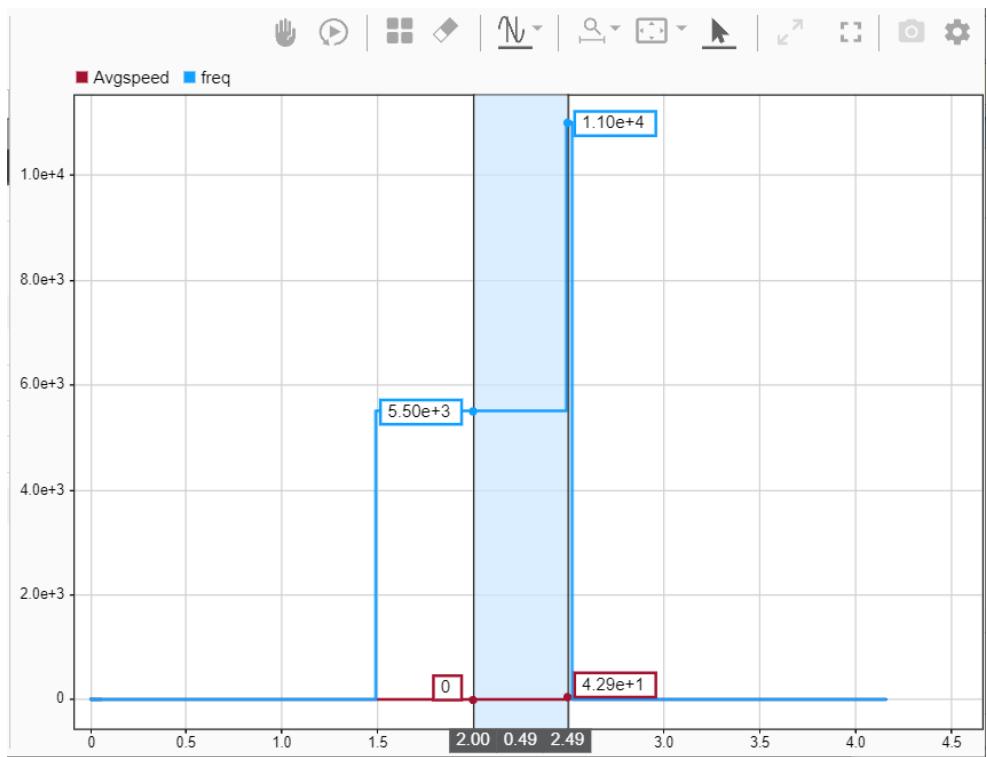
กราฟที่ความเร่ง 4000hz/s มีความเร็วสูงสุด 188 rad/s ที่ 12000hz



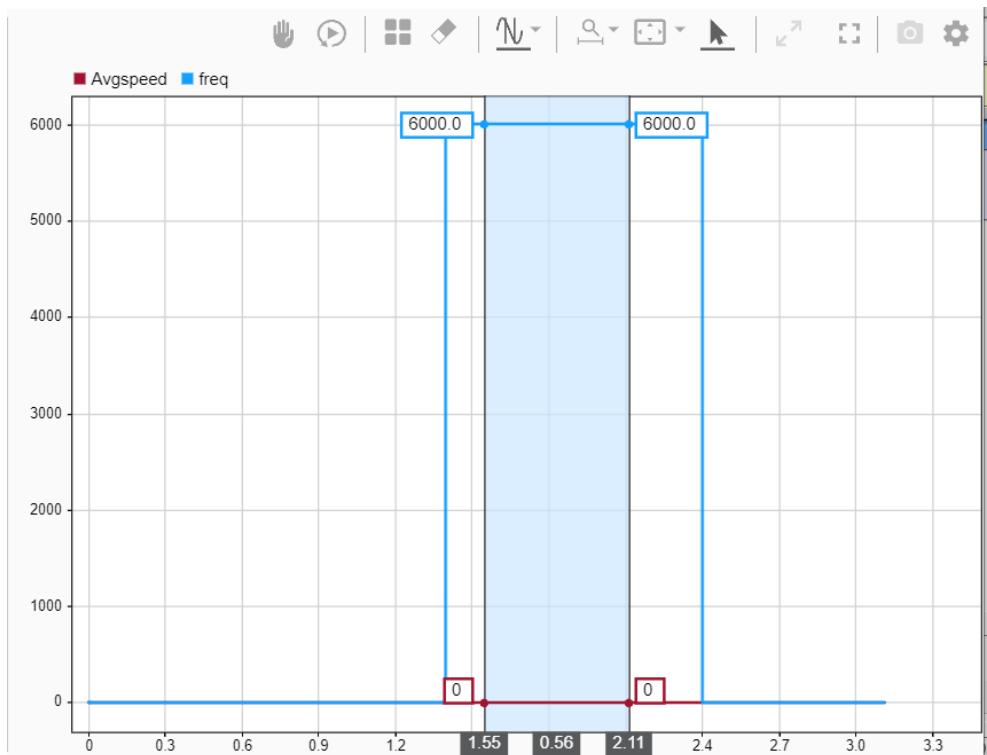
กราฟที่ความเร่ง 4500hz/s มีความเร็วสูงสุด 106 rad/s ที่ 9000hz



กราฟที่ความเร่ง 5000hz/s มีความเร็วสูงสุด 118 rad/s ที่ 10000hz

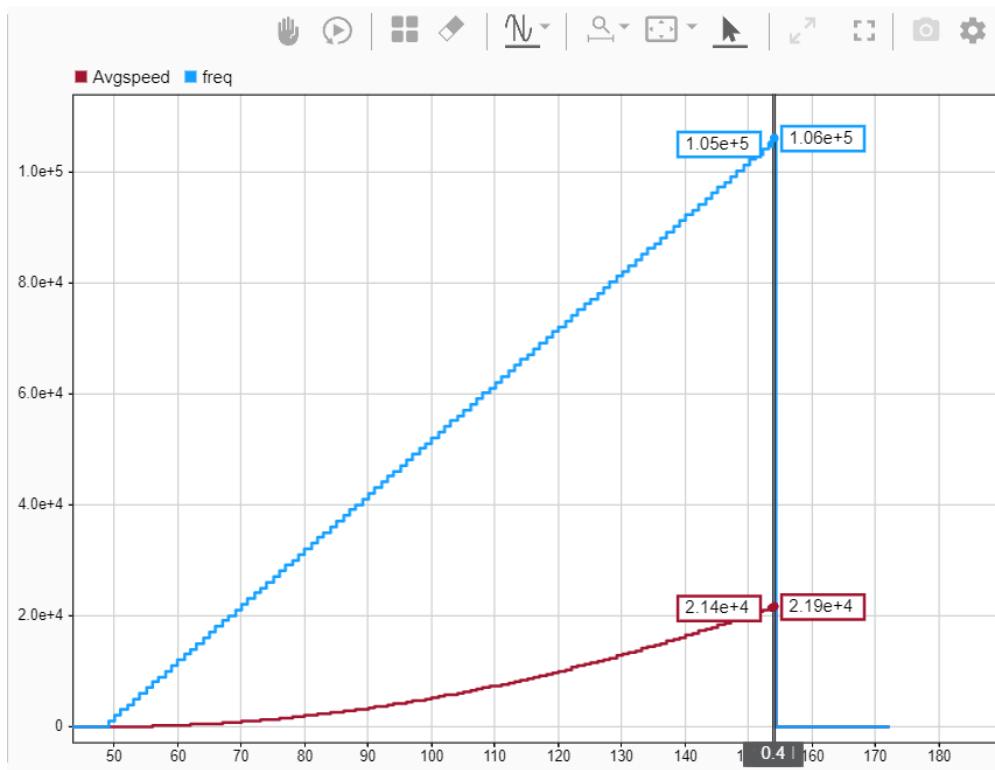


กราฟที่ความเร่ง 5500hz/s มีความเร็วสูงสุด 42 rad/s ที่ 5500hz

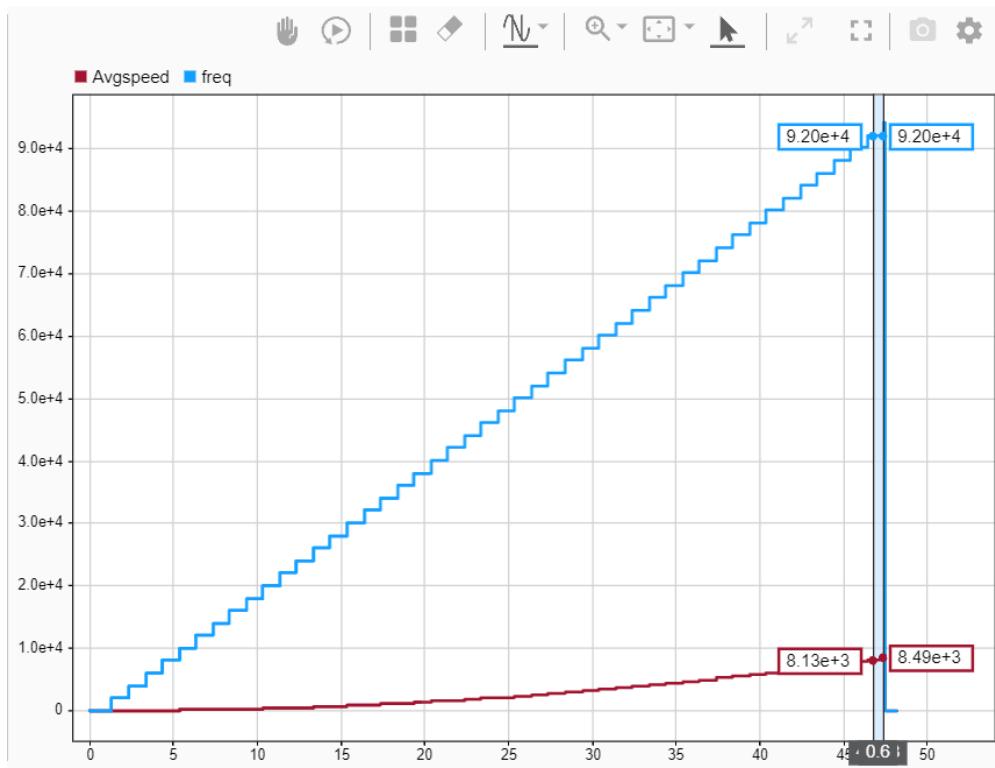


กราฟที่ความเร่ง 6000hz/s มีความเร็วสูงสุด 0 rad/s ที่ 6000hz

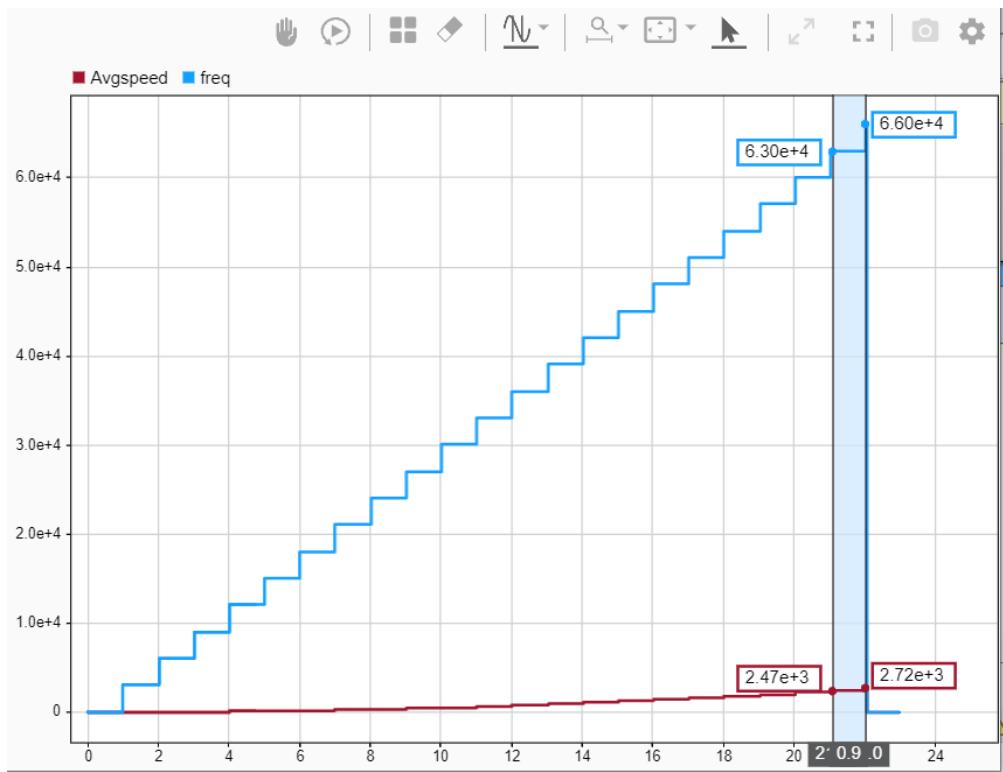
2.10.4 การขับแบบโหมด Microstepping 1/8



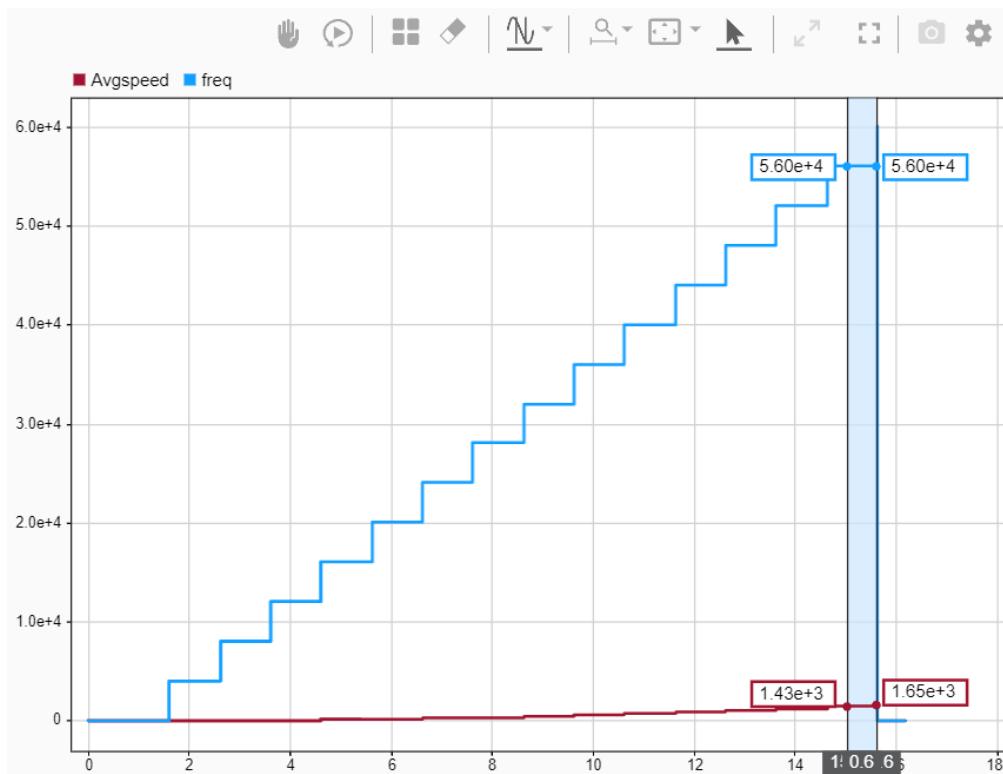
กราฟที่ความเร่ง 1000hz/s มีความเร็วสูงสุด 21900 rad/s ที่ 105000hz



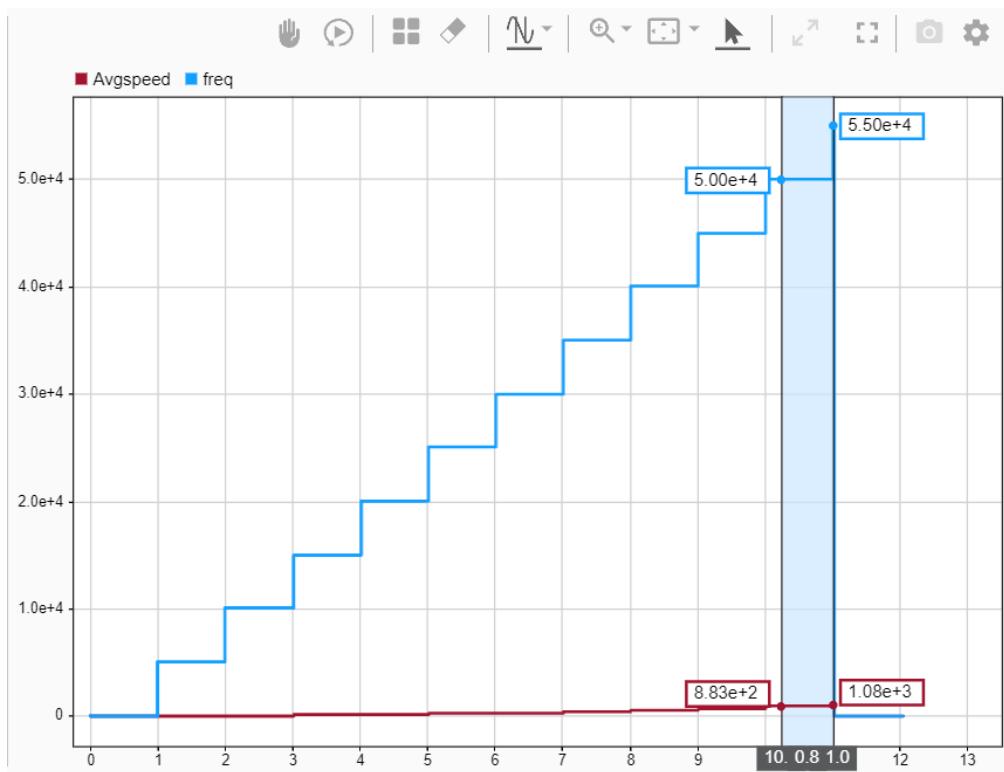
กราฟที่ความเร่ง 2000hz/s มีความเร็วสูงสุด 8490 rad/s ที่ 92000hz



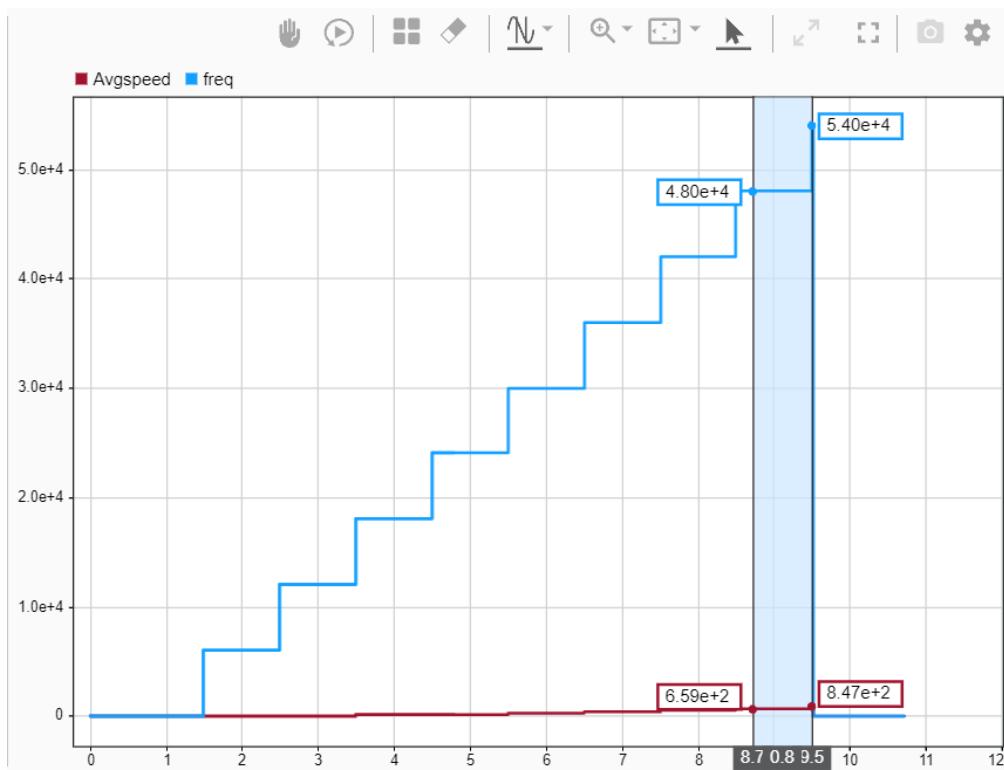
กราฟที่ความเร่ง 3000hz/s มีความเร็วสูงสุด 2720 rad/s ที่ 63000hz



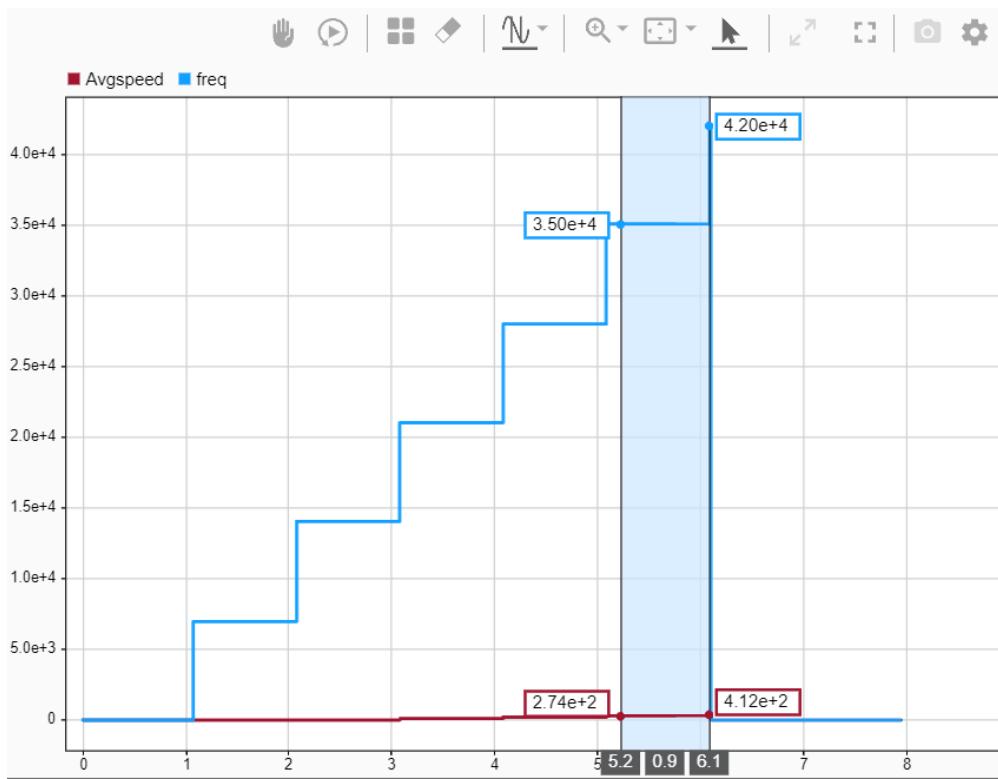
กราฟที่ความเร่ง 4000hz/s มีความเร็วสูงสุด 1650 rad/s ที่ 56000hz



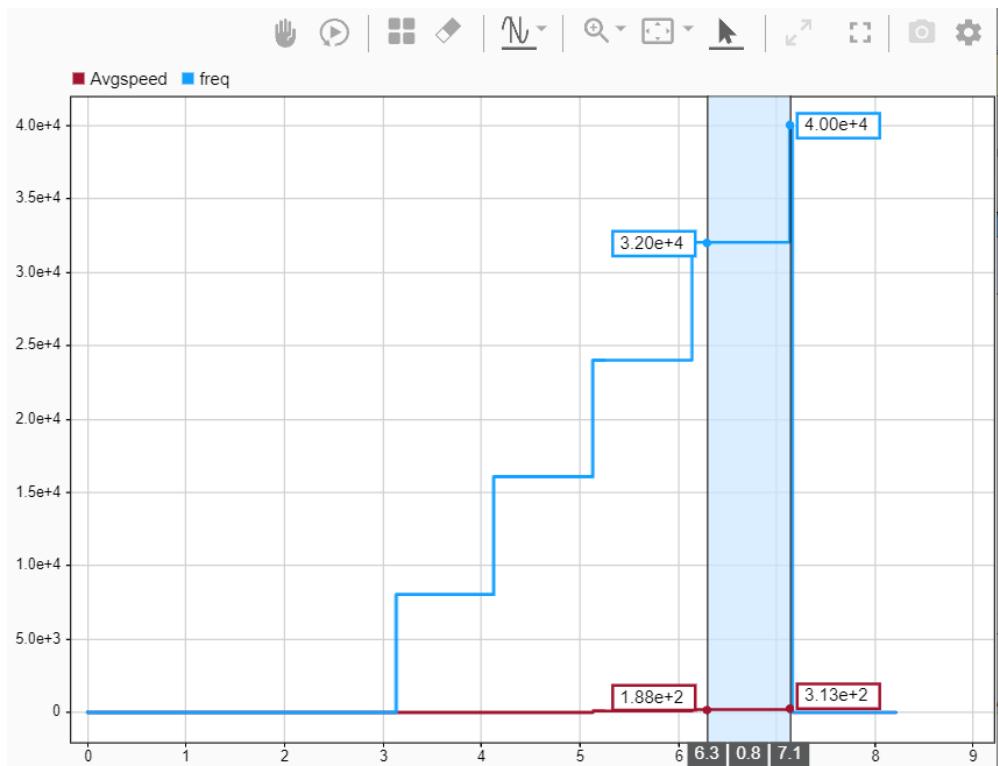
กราฟที่ความเร่ง 5000hz/s มีความเร็วสูงสุด 1080 rad/s ที่ 50000hz



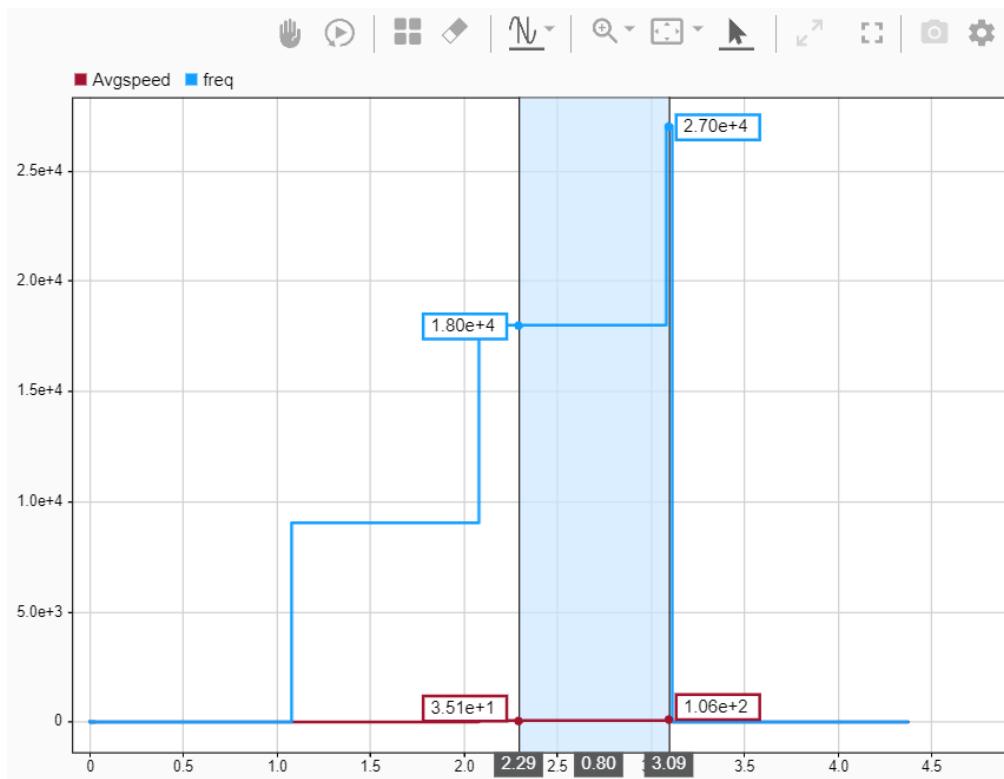
กราฟที่ความเร่ง 6000hz/s มีความเร็วสูงสุด 847 rad/s ที่ 48000hz



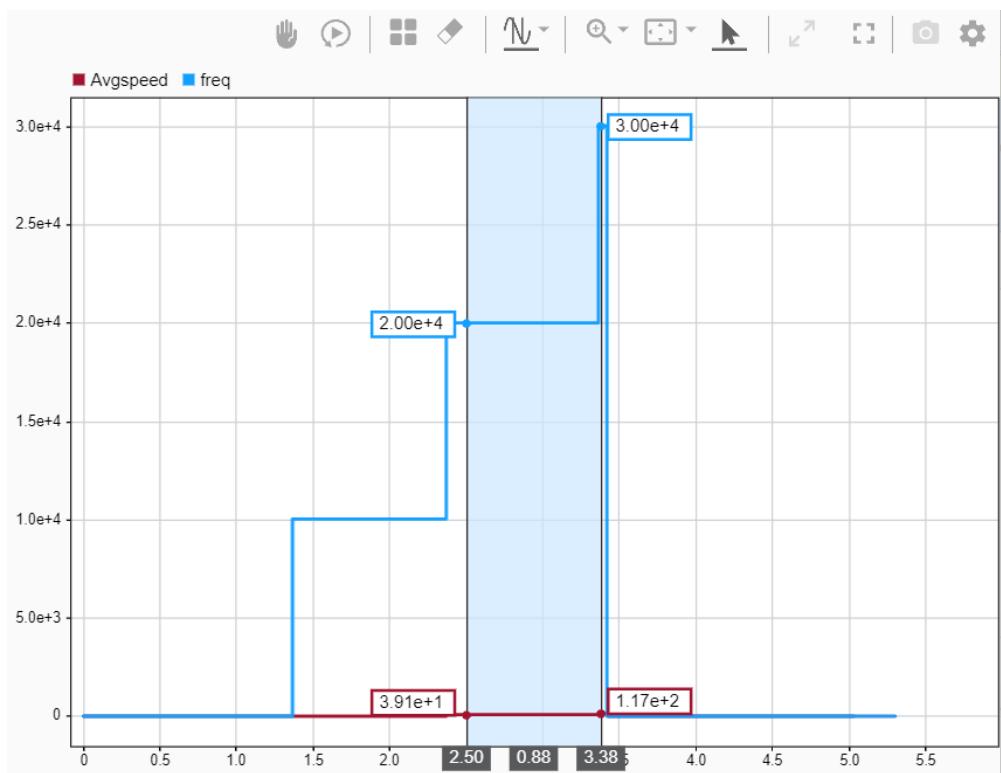
กราฟที่ความเร่ง 7000hz/s มีความเร็วสูงสุด 412 rad/s ที่ 35000hz



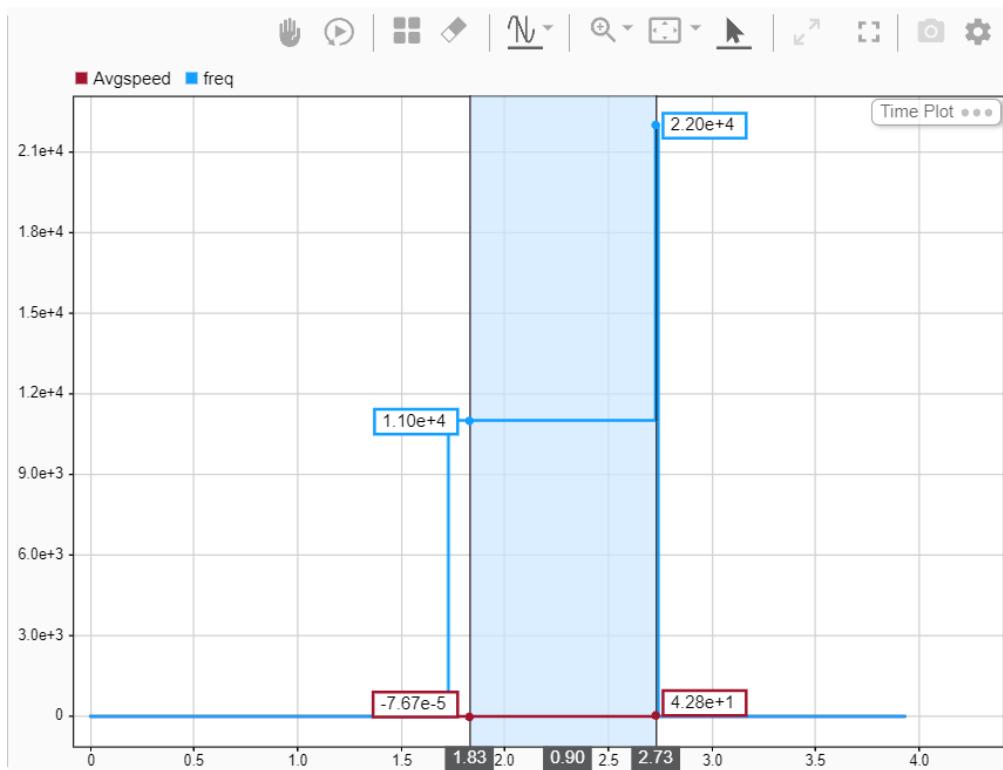
กราฟที่ความเร่ง 8000hz/s มีความเร็วสูงสุด 313 rad/s ที่ 32000hz



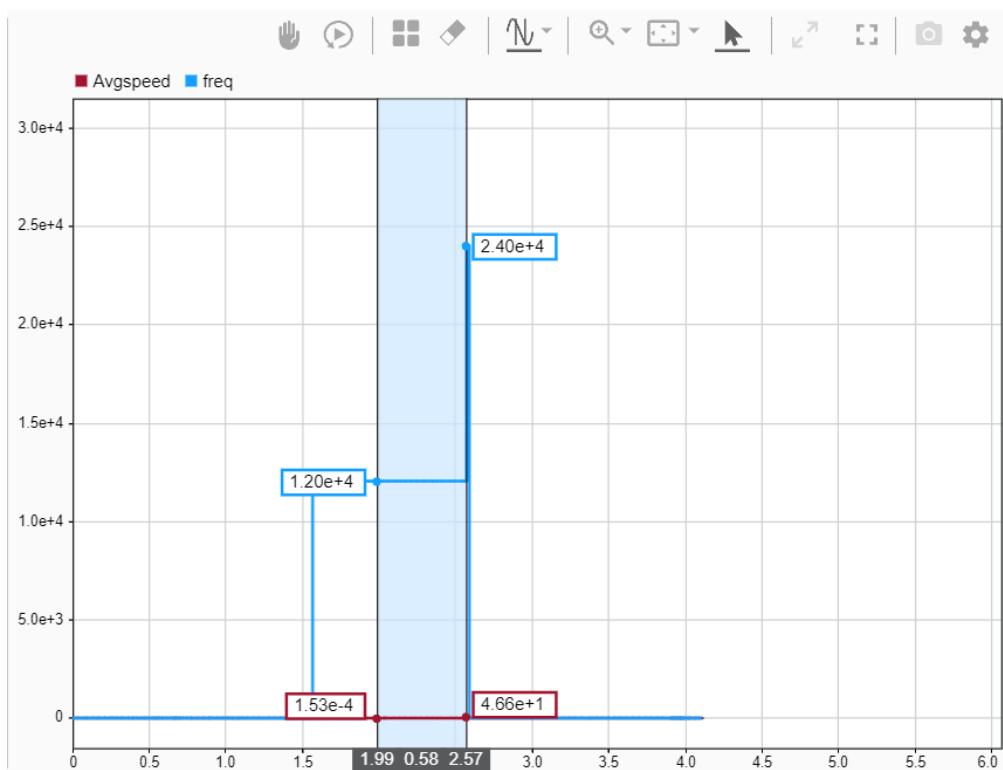
กราฟที่ความเร่ง 9000hz/s มีความเร็วสูงสุด 106 rad/s ที่ 18000hz



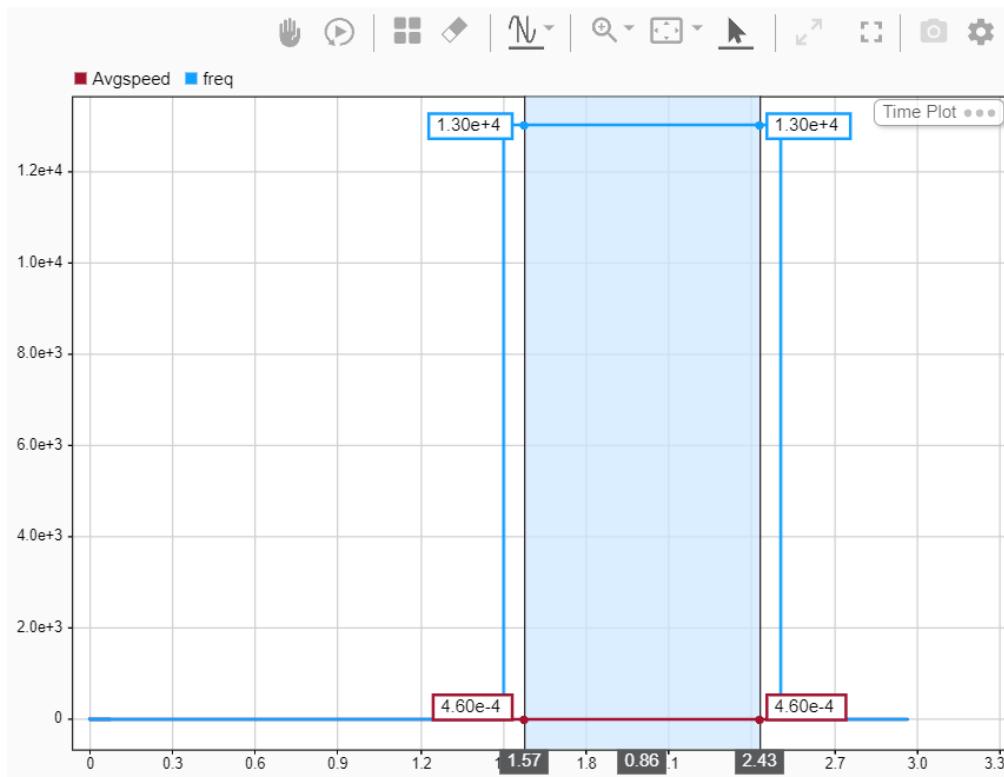
กราฟที่ความเร่ง 10000hz/s มีความเร็วสูงสุด 117 rad/s ที่ 20000hz



กราฟที่ความเร่ง 11000hz/s มีความเร็วสูงสุด 4.2 rad/s ที่ 11000hz

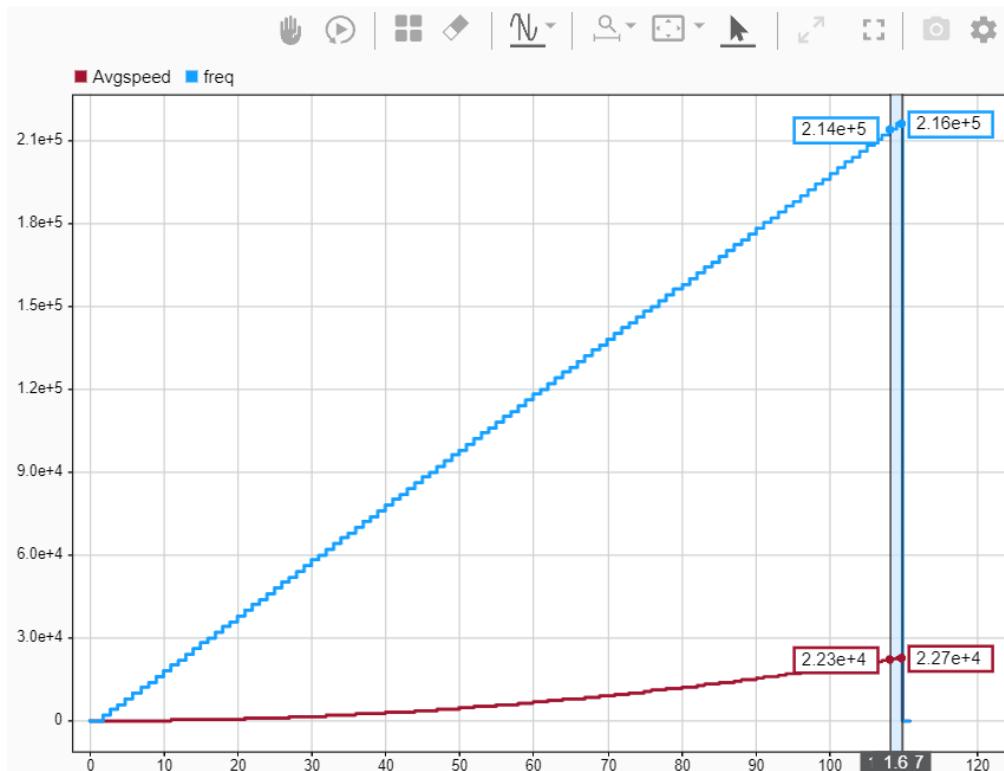


กราฟที่ความเร่ง 12000hz/s มีความเร็วสูงสุด 4.66 rad/s ที่ 12000hz

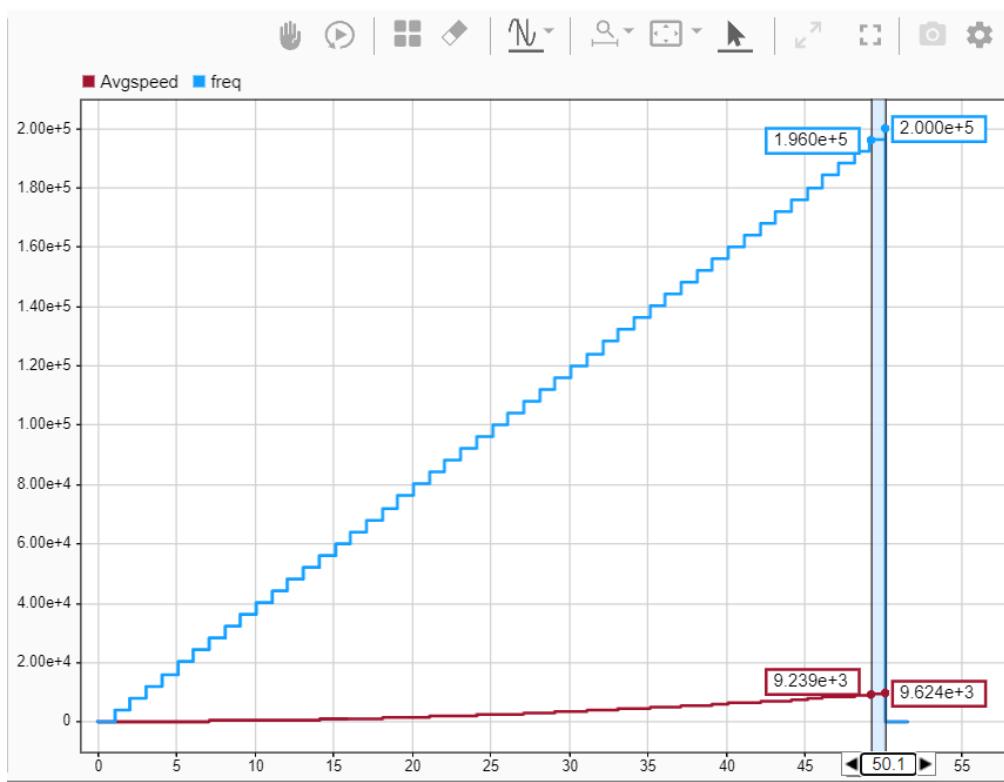


กราฟที่ความเร่ง 13000hz/s มีความเร็วสูงสุด 0 rad/s ที่ 13000hz

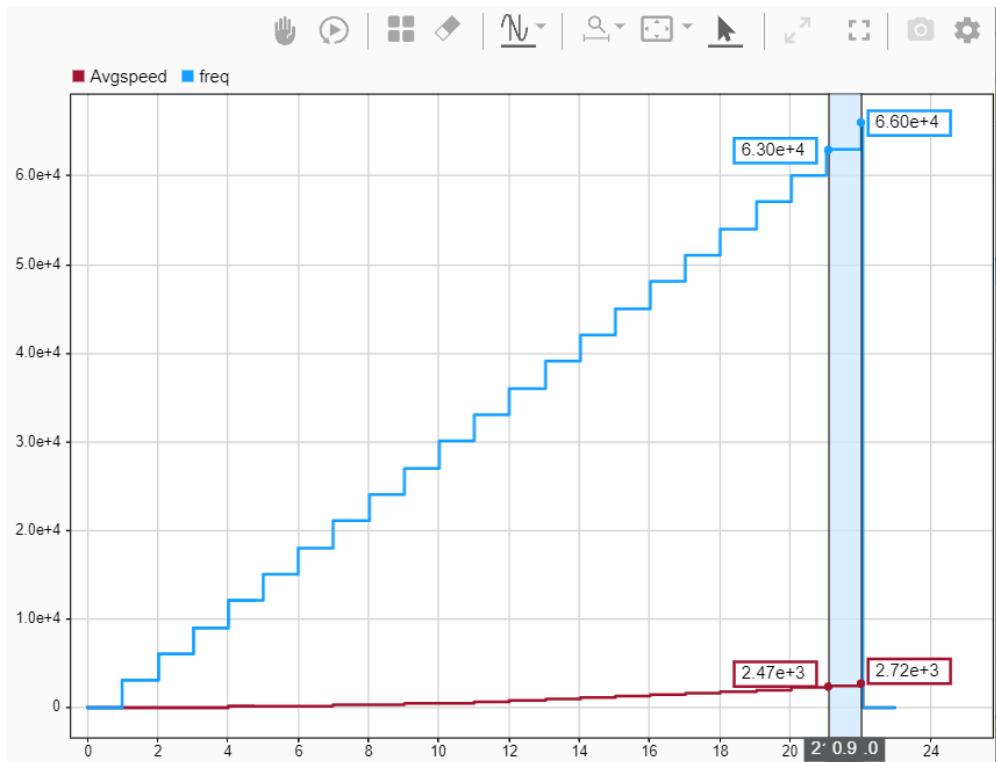
2.10.5 การขับแบบโหนด Microstepping 1/16



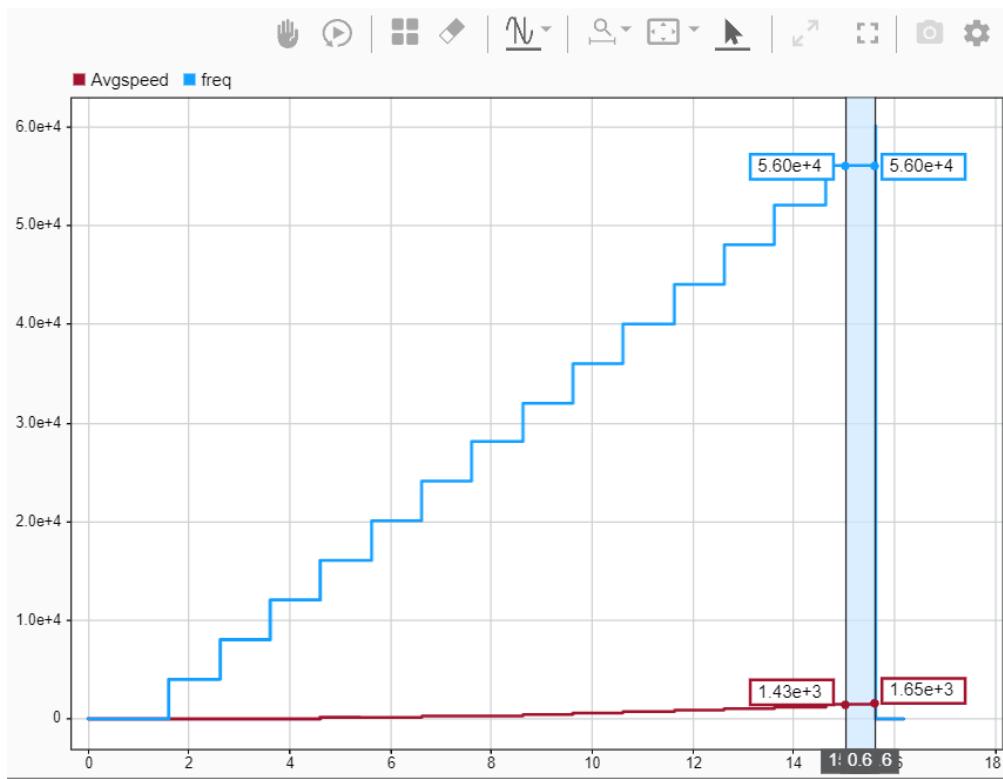
กราฟที่ความเร่ง 1000hz/s มีความเร็วสูงสุด 22700 rad/s ที่ 214000hz



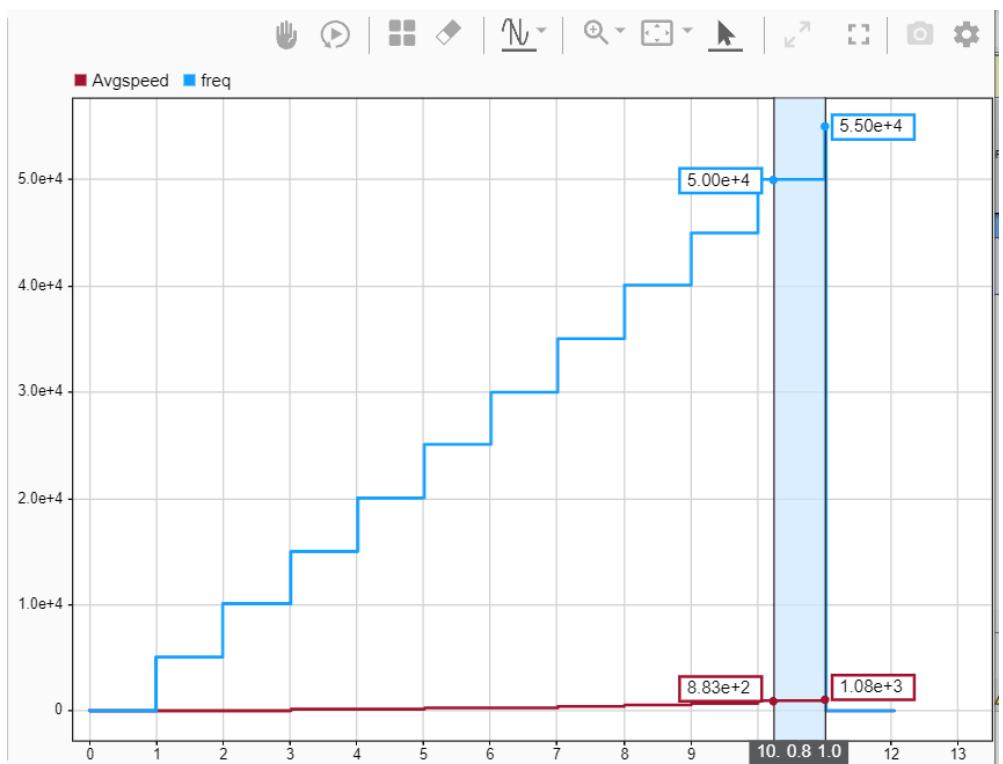
กราฟที่ความเร่ง 2000hz/s มีความเร็วสูงสุด 9624 rad/s ที่ 196000hz



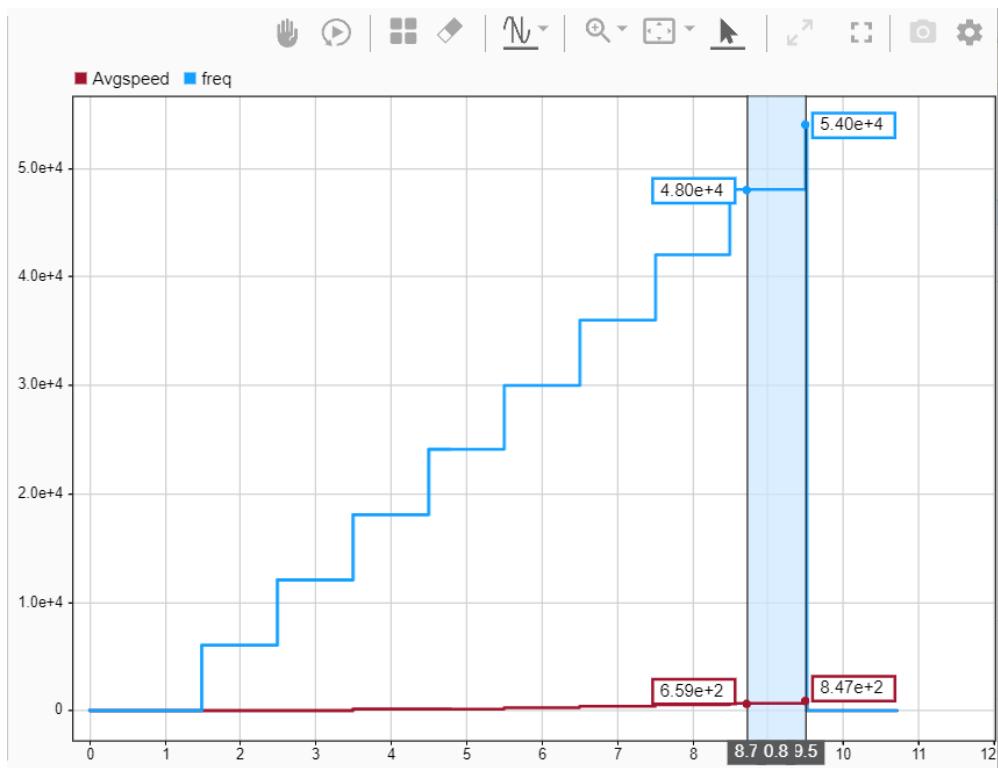
กราฟที่ความเร่ง 3000hz/s มีความเร็วสูงสุด 2720 rad/s ที่ 63000hz



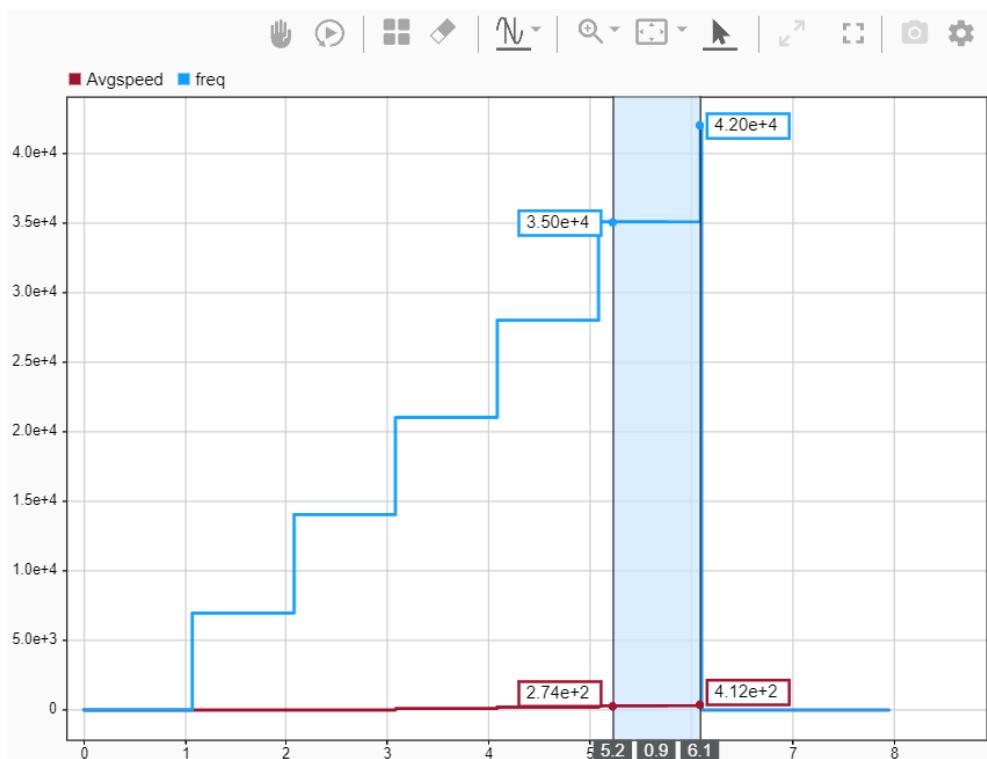
กราฟที่ความเร่ง 4000hz/s มีความเร็วสูงสุด 1650 rad/s ที่ 56000hz



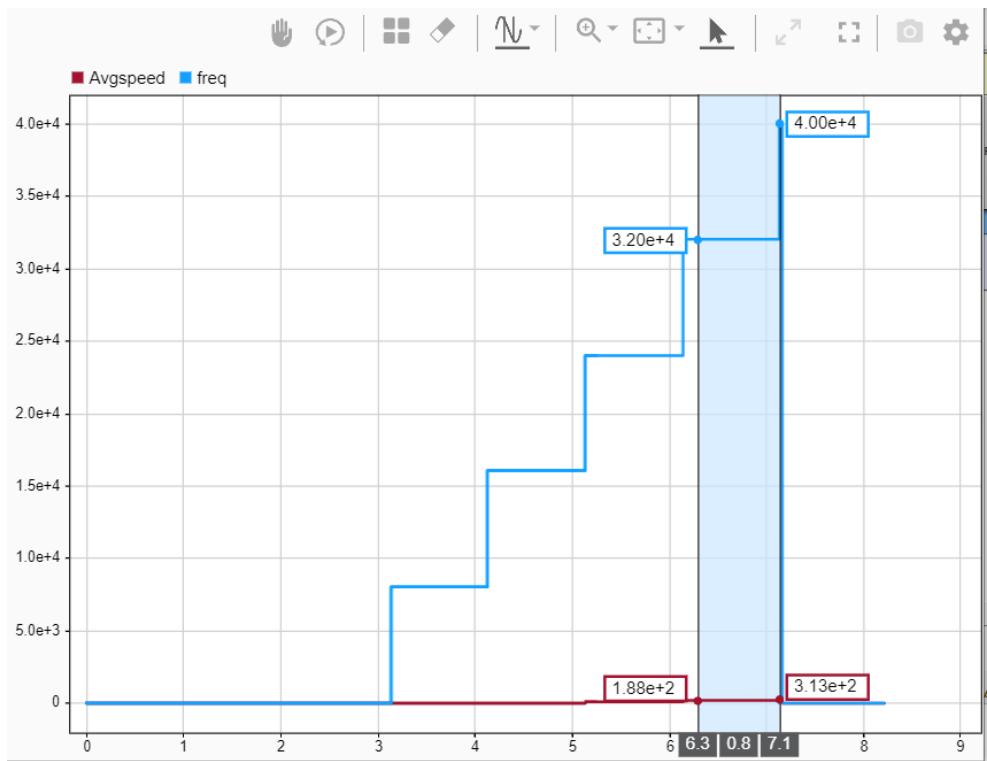
กราฟที่ความเร่ง 5000hz/s มีความเร็วสูงสุด 1080 rad/s ที่ 50000hz



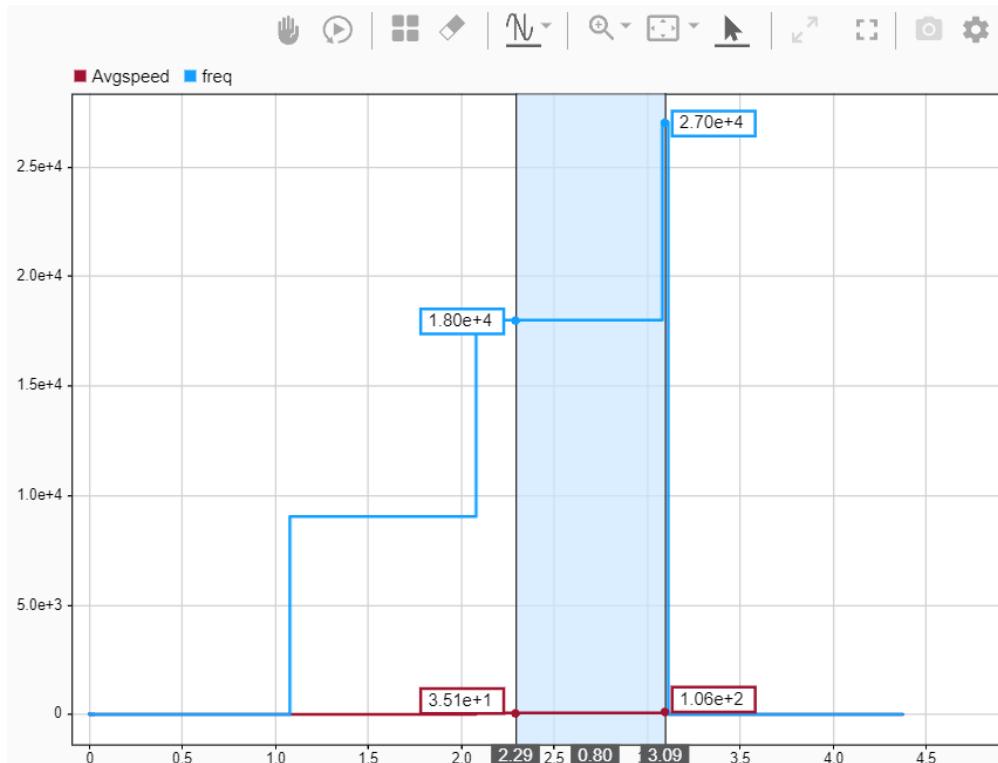
กราฟที่ความเร่ง 6000hz/s มีความเร็วสูงสุด 847 rad/s ที่ 4800hz



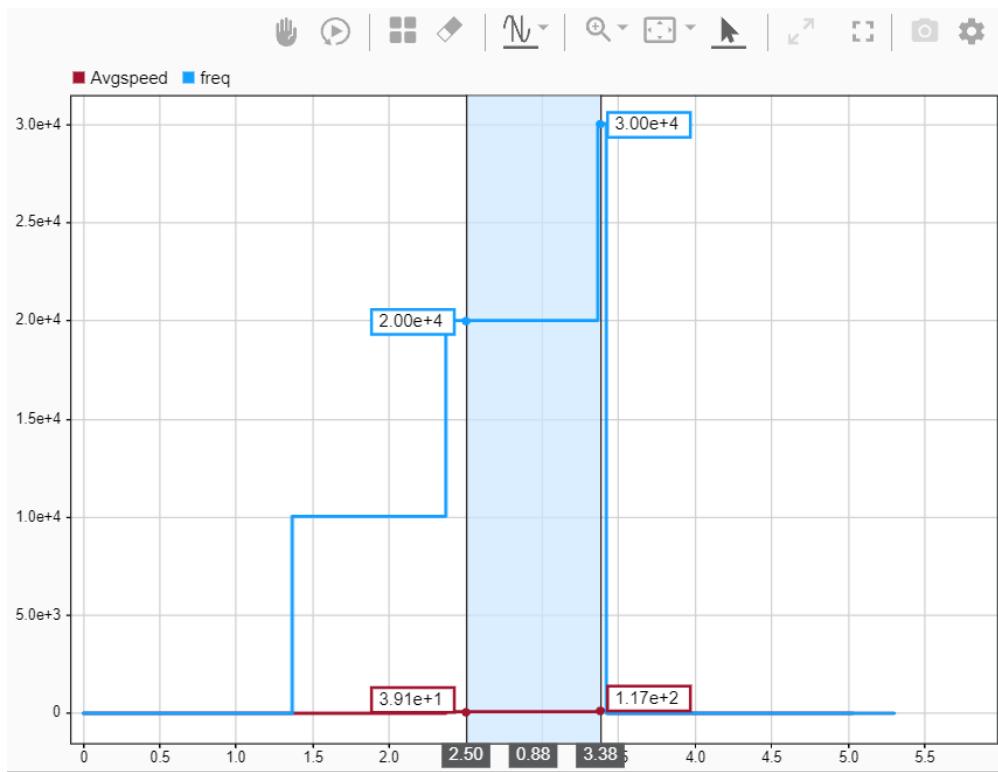
กราฟที่ความเร่ง 7000hz/s มีความเร็วสูงสุด 412 rad/s ที่ 3500hz



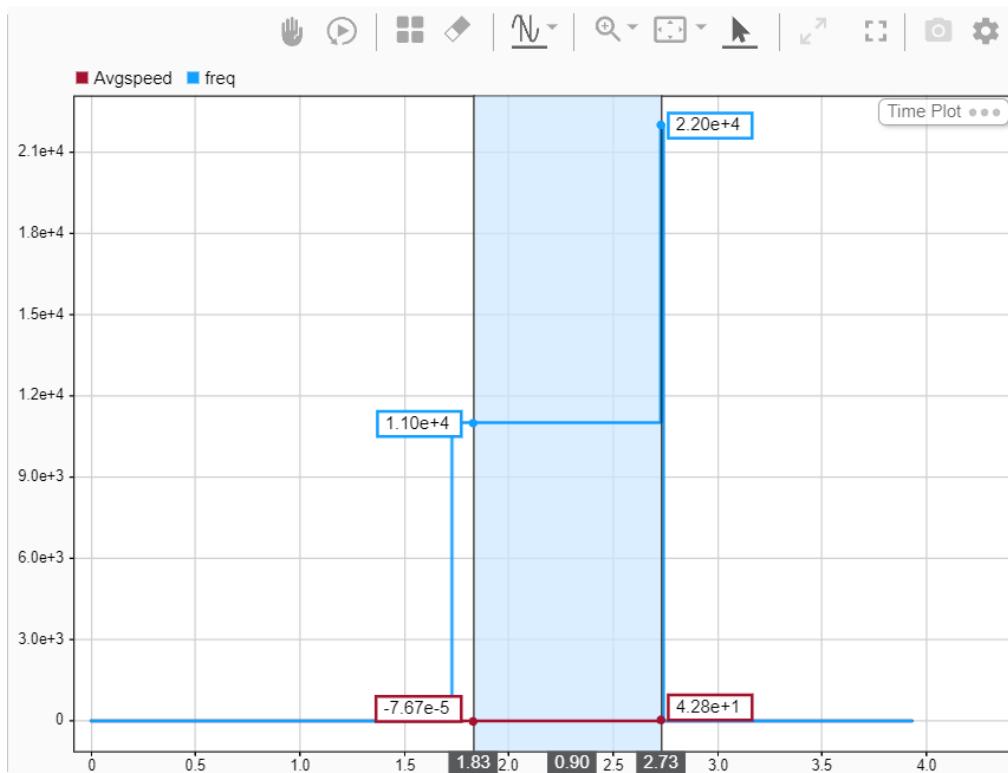
กราฟที่ความเร่ง 8000hz/s มีความเร็วสูงสุด 313 rad/s ที่ 32000hz



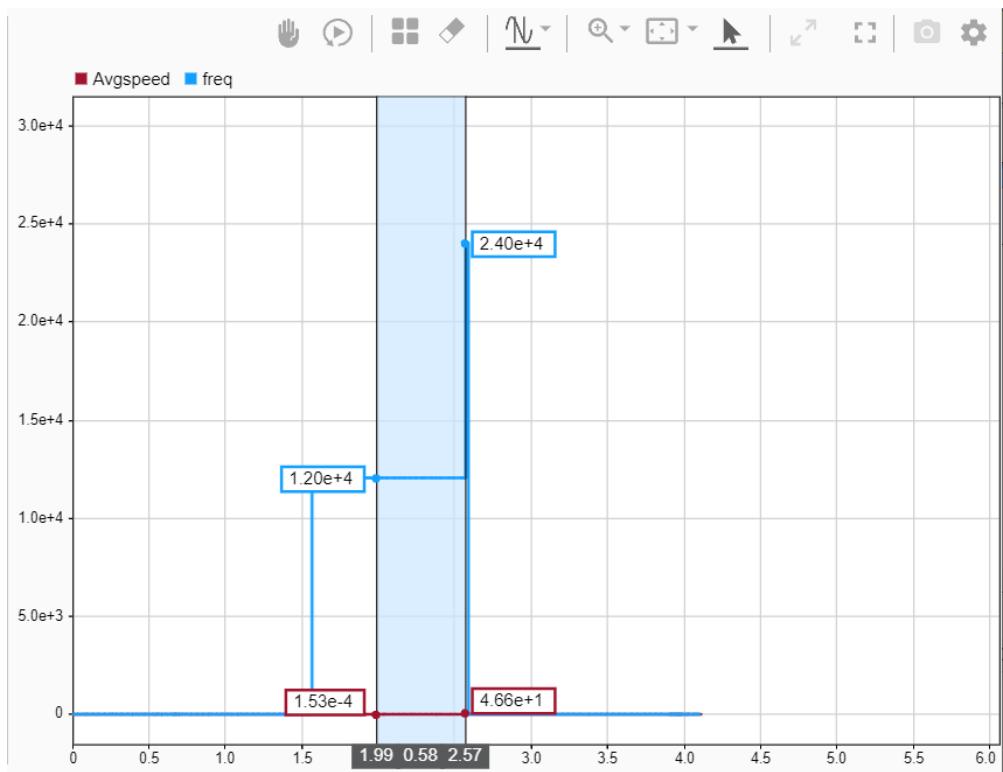
กราฟที่ความเร่ง 9000hz/s มีความเร็วสูงสุด 106 rad/s ที่ 27000hz



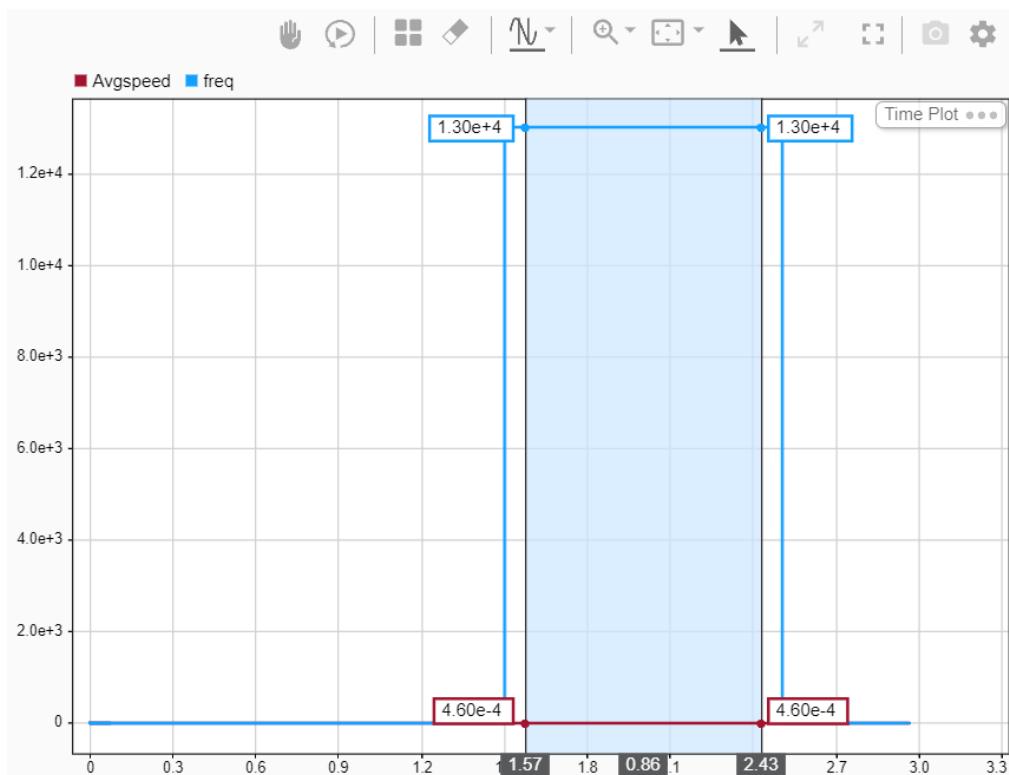
กราฟที่ความเร่ง 10000hz/s มีความเร็วสูงสุด 117 rad/s ที่ 20000hz



กราฟที่ความเร่ง 11000hz/s มีความเร็วสูงสุด 4.2 rad/s ที่ 11000hz

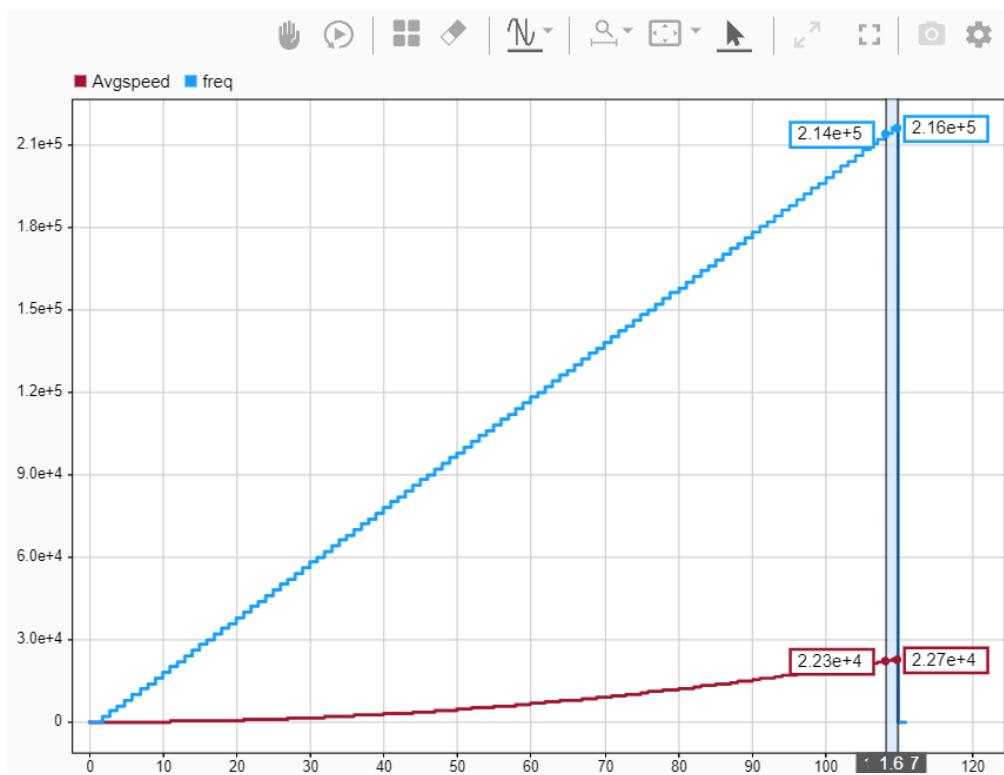


กราฟที่ความเร่ง 12000hz/s มีความเร็วสูงสุด 4.66 rad/s ที่ 12000hz

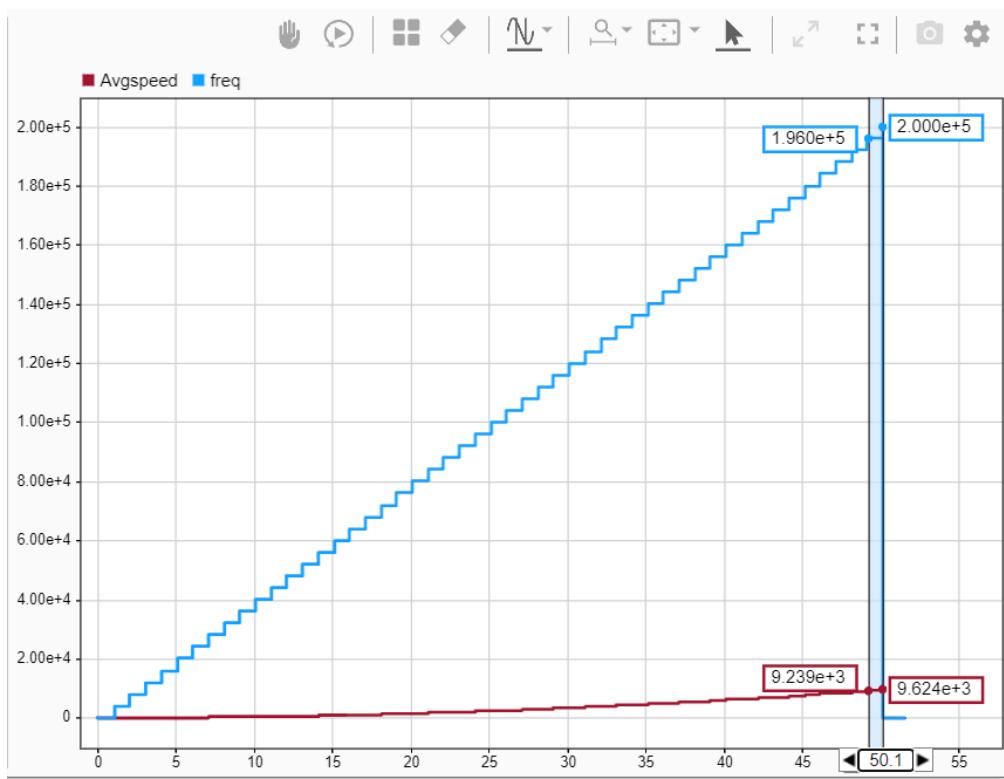


กราฟที่ความเร่ง 13000hz/s มีความเร็วสูงสุด 0 rad/s ที่ 13000hz

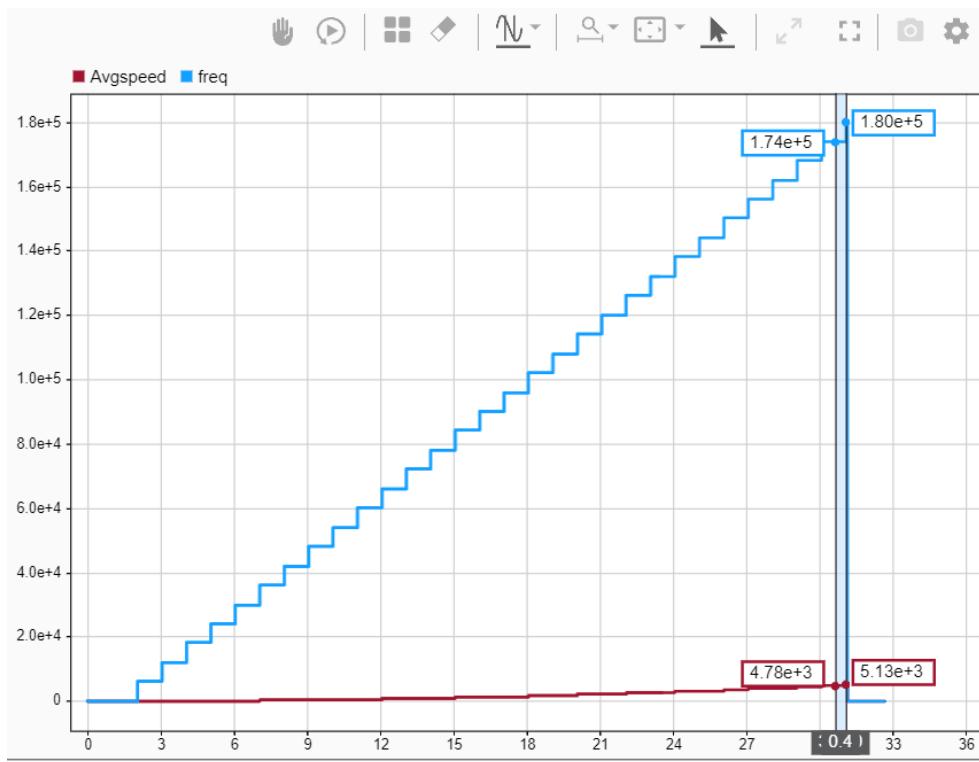
2.10.6 การขับแบบไมโครสตีป์ปิ้ง Microstepping 1/16



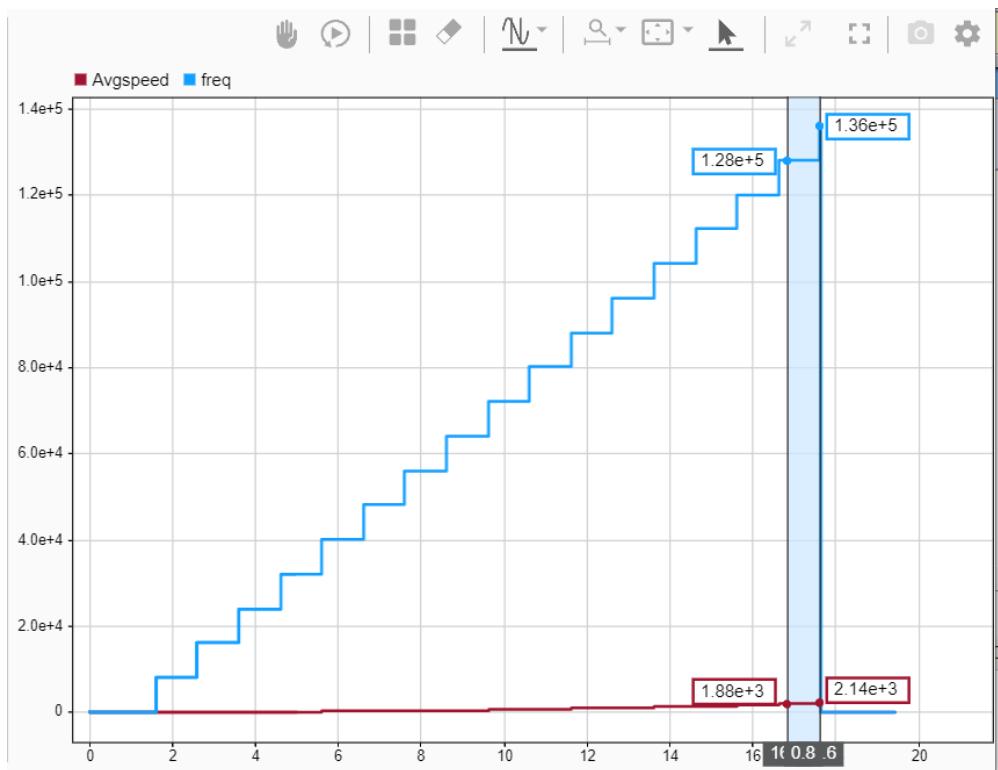
กราฟที่ความเร่ง 2000hz/s มีความเร็วสูงสุด 22700 rad/s ที่ 214000hz



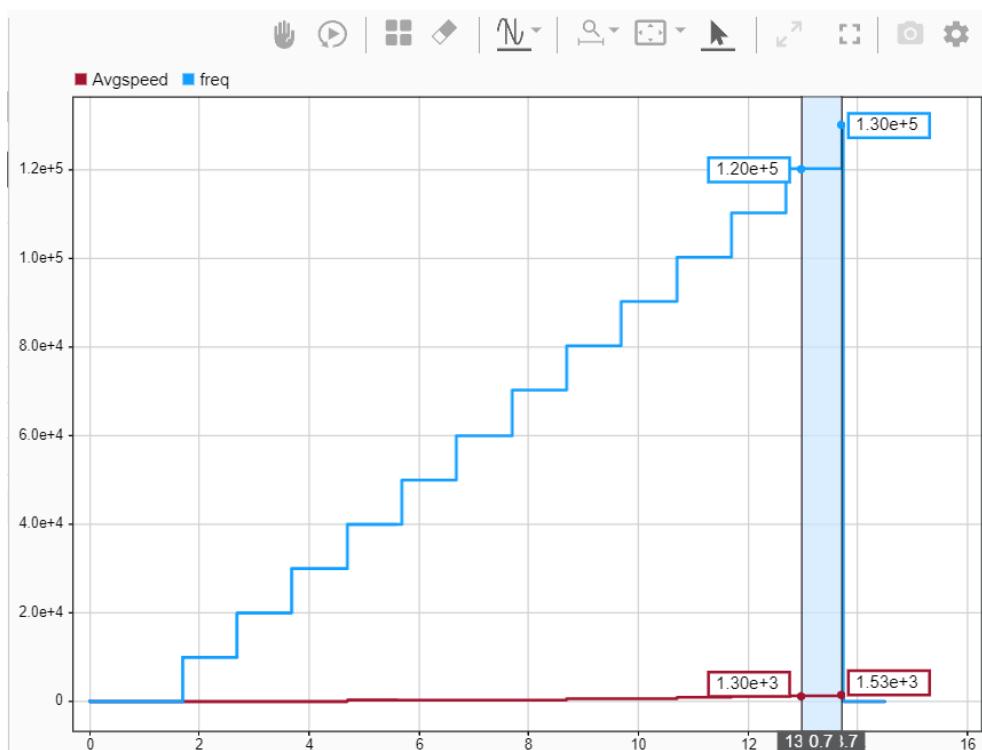
กราฟที่ความเร่ง 4000hz/s มีความเร็วสูงสุด 9624 rad/s ที่ 196000hz



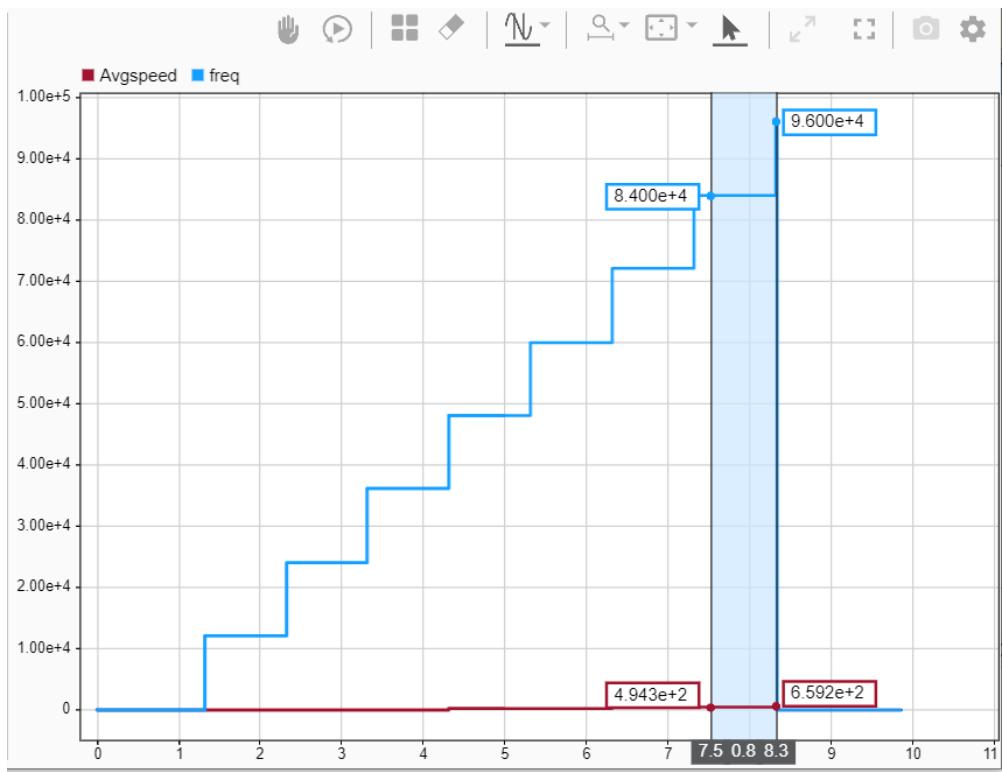
กราฟที่ความเร่ง 6000hz/s มีความเร็วสูงสุด 5130 rad/s ที่ 174000hz



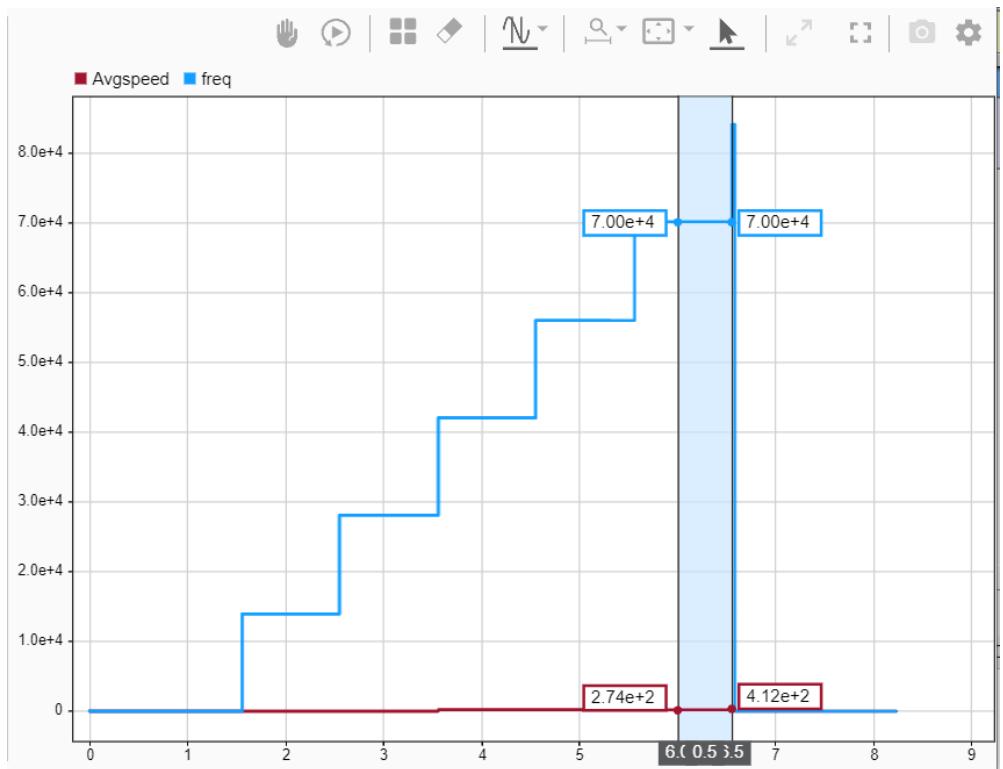
กราฟที่ความเร่ง 8000hz/s มีความเร็วสูงสุด 2140 rad/s ที่ 128000hz



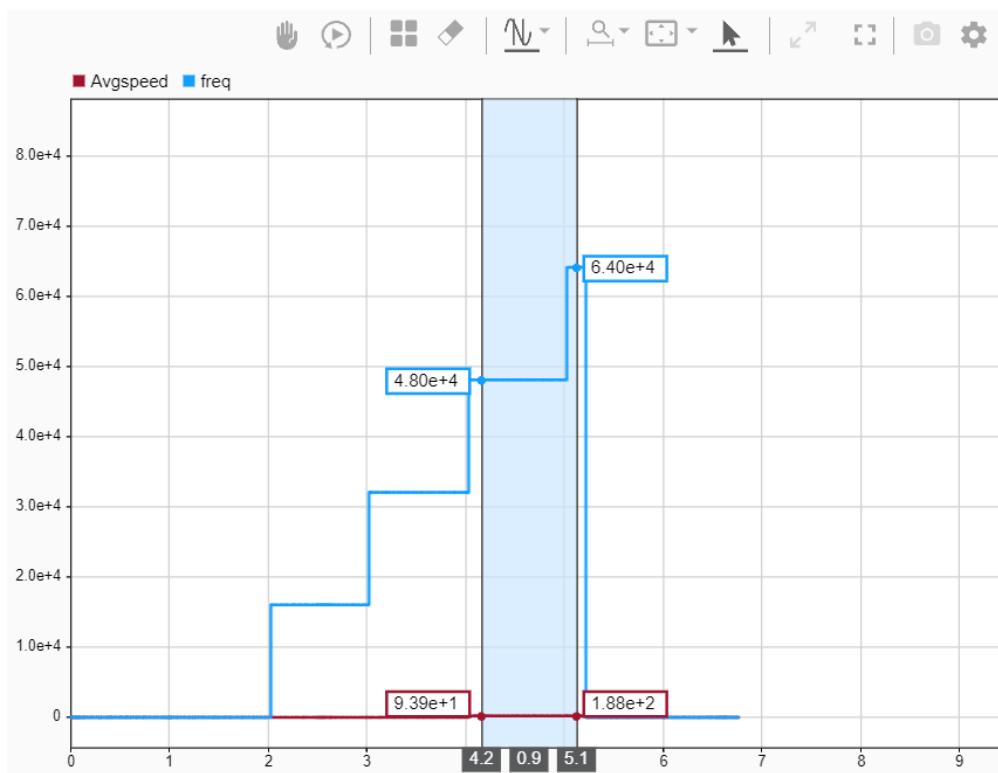
กราฟที่ความเร่ง 10000hz/s มีความเร็วสูงสุด 1530 rad/s ที่ 120000hz



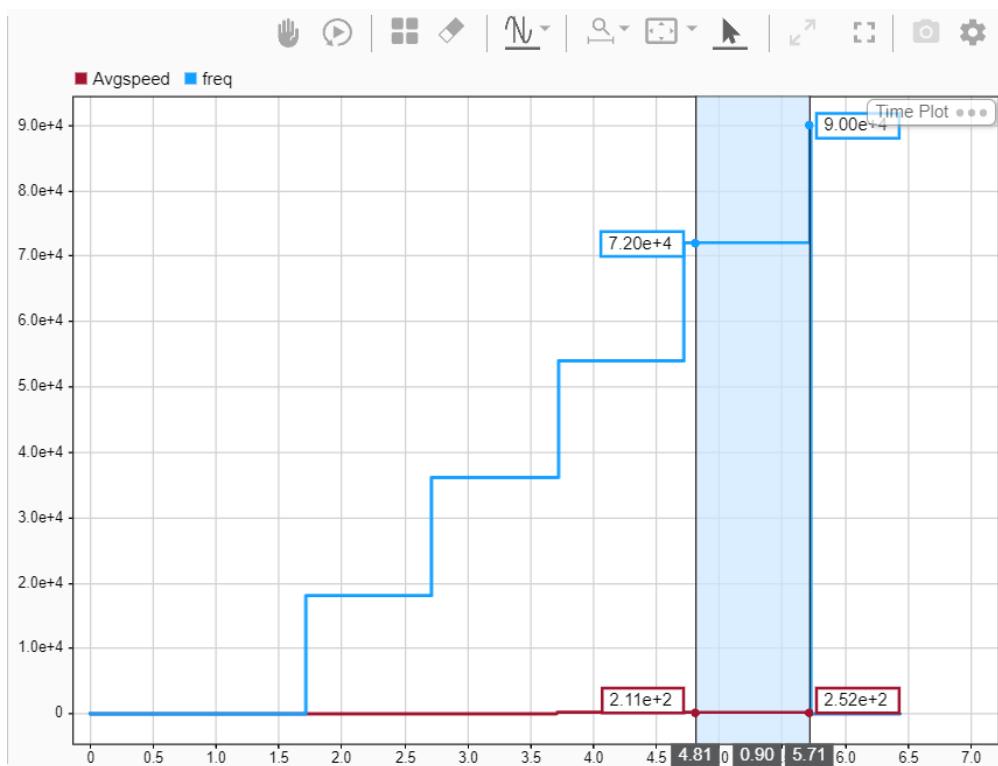
กราฟที่ความเร่ง 12000hz/s มีความเร็วสูงสุด 659 rad/s ที่ 84000hz



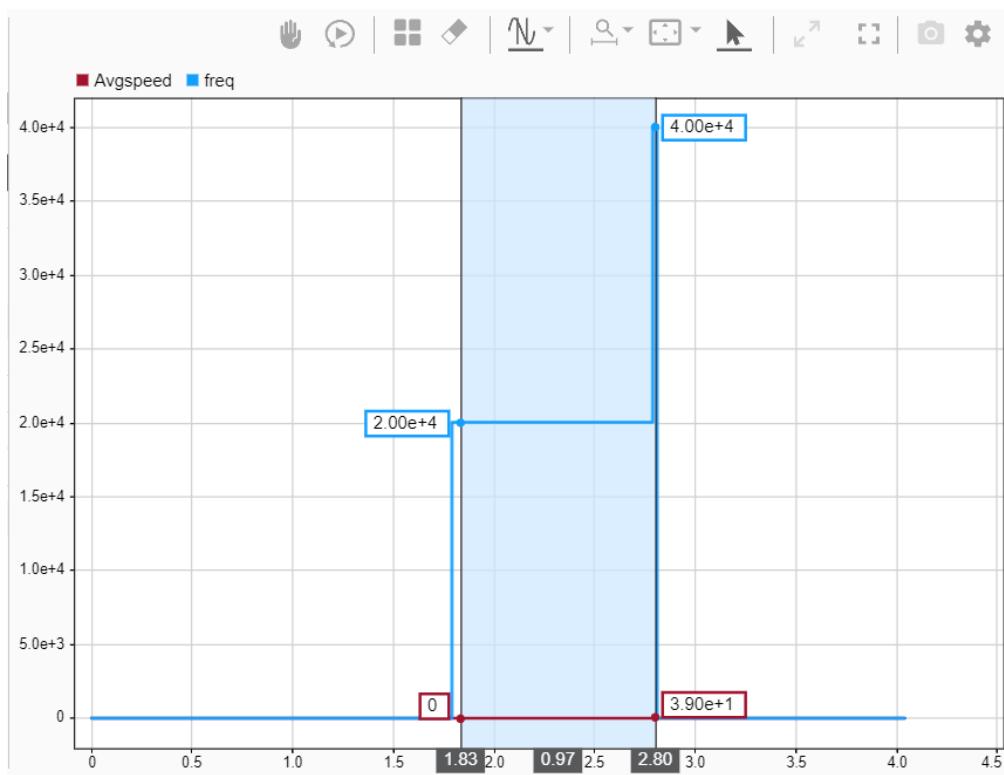
กราฟที่ความเร่ง 14000hz/s มีความเร็วสูงสุด 412 rad/s ที่ 70000hz



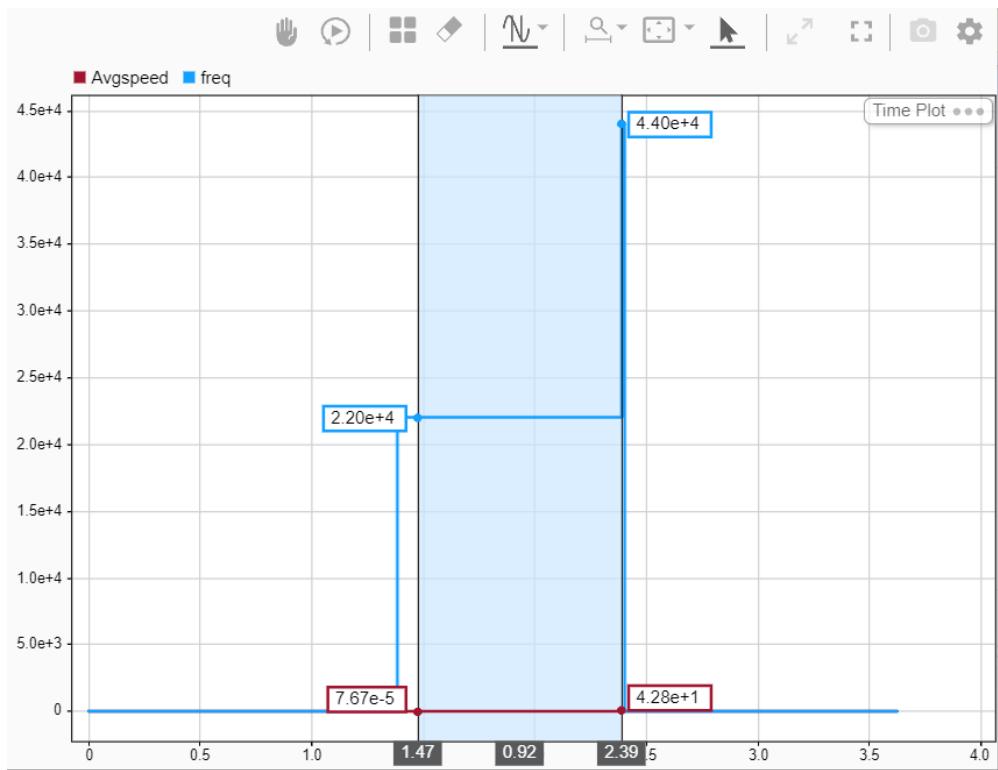
กราฟที่ความเร็ว 16000hz/s มีความเร็วสูงสุด 188 rad/s ที่ 48000hz



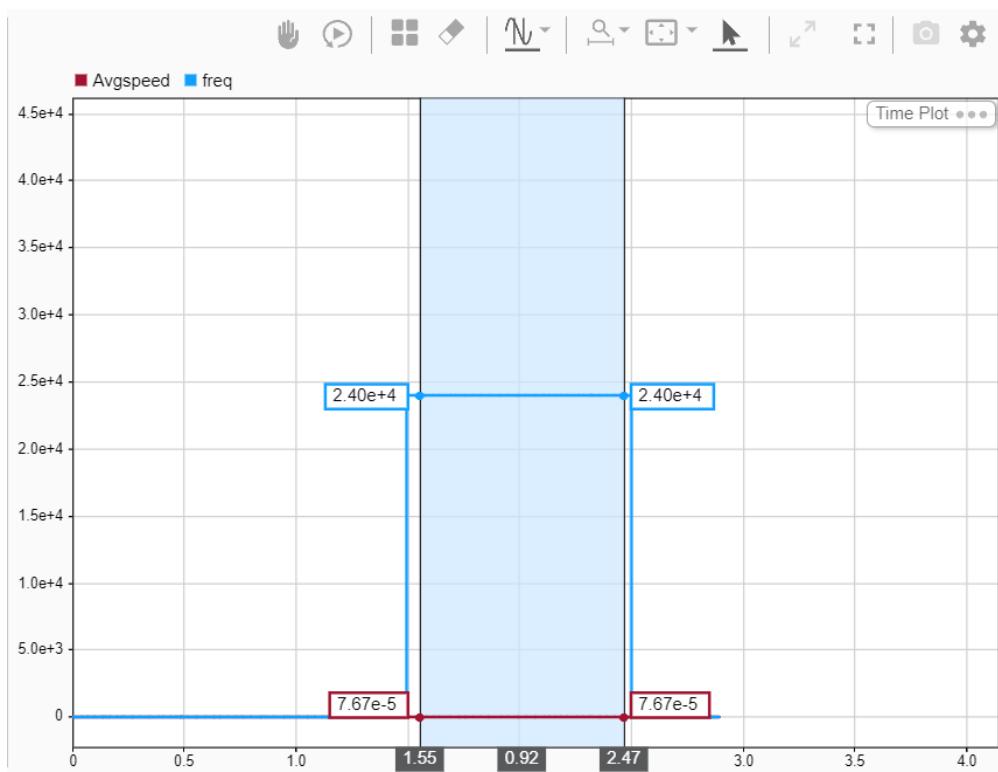
กราฟที่ความเร่ง 18000hz/s มีความเร็วสูงสุด 252 rad/s ที่ 72000hz



กราฟที่ความเร่ง 20000hz/s มีความเร็วสูงสุด 390 rad/s ที่ 20000hz

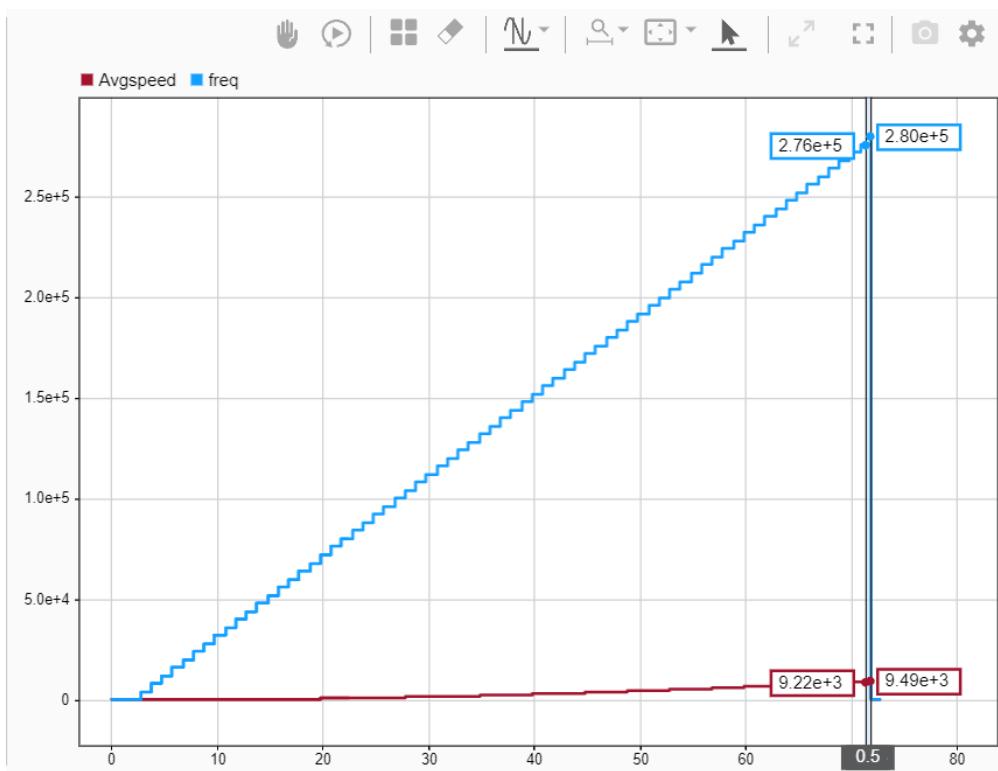


กราฟที่ความเร่ง 22000hz/s มีความเร็วสูงสุด 4.2 rad/s ที่ 22000hz

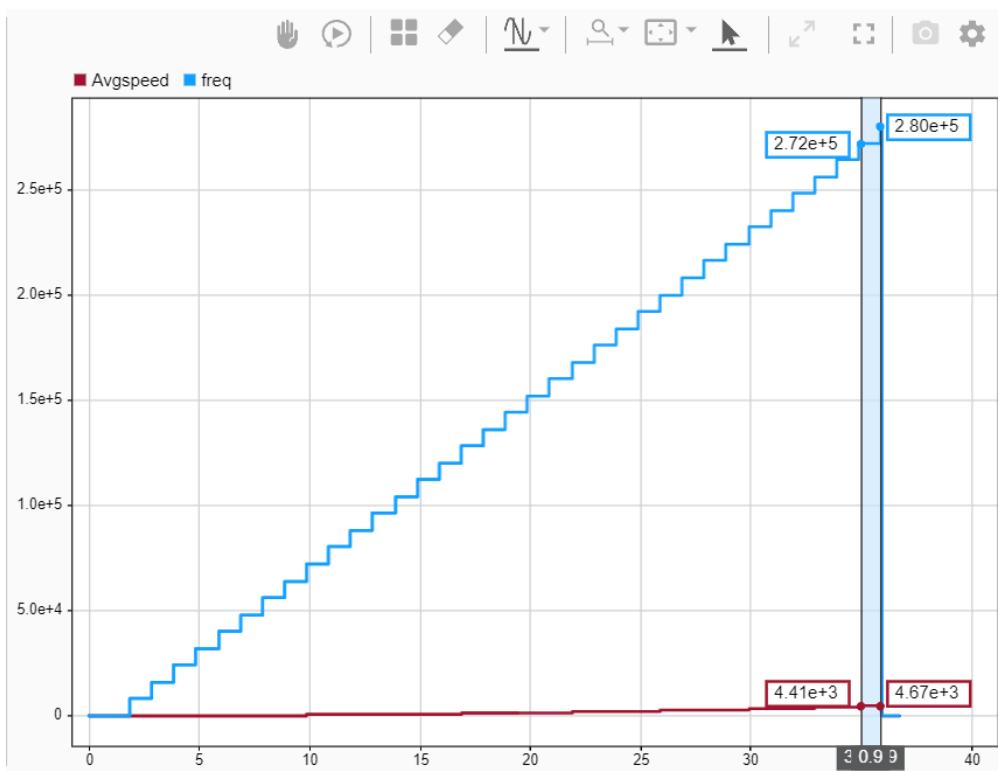


กราฟที่ความเร่ง 24000hz/s มีความเร็วสูงสุด 0 rad/s ที่ 24000hz

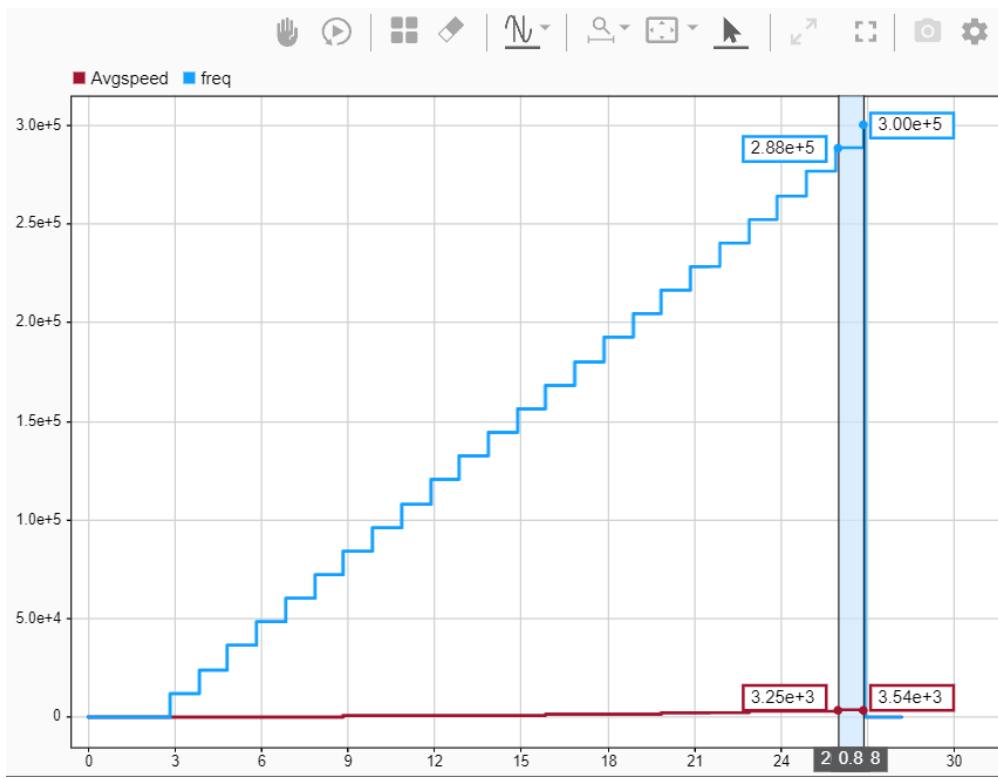
2.10.7 การขับแบบไมโครสตีปิง Microstepping 1/32



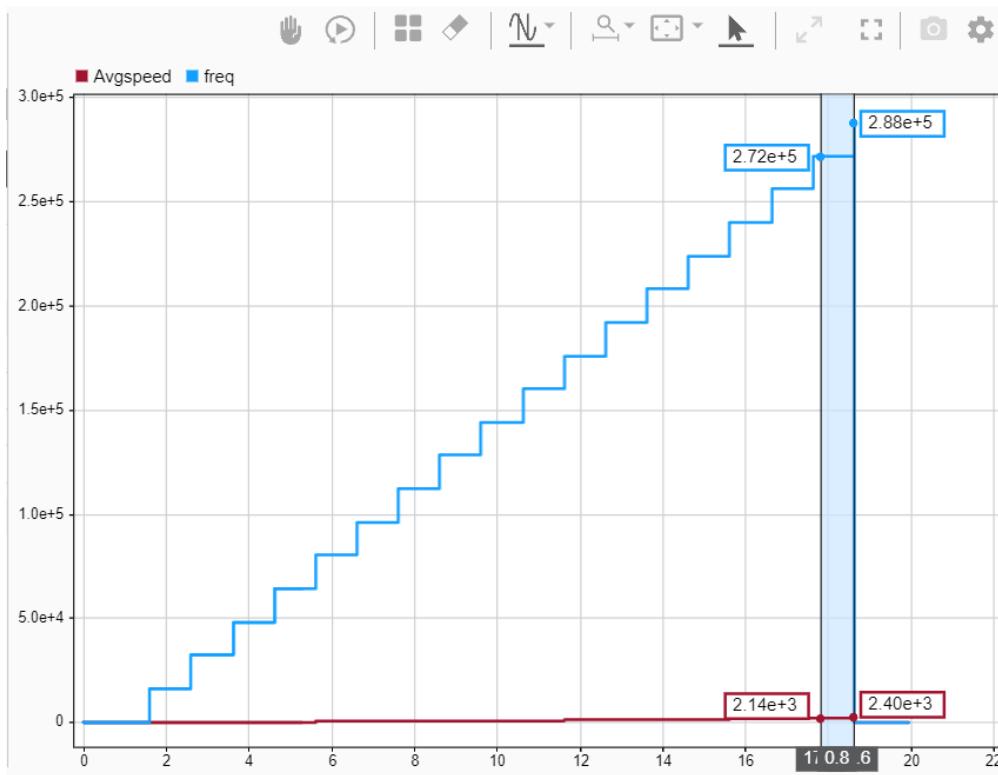
กราฟที่ความเร่ง 4000hz/s มีความเร็วสูงสุด 9490 rad/s ที่ 276000hz



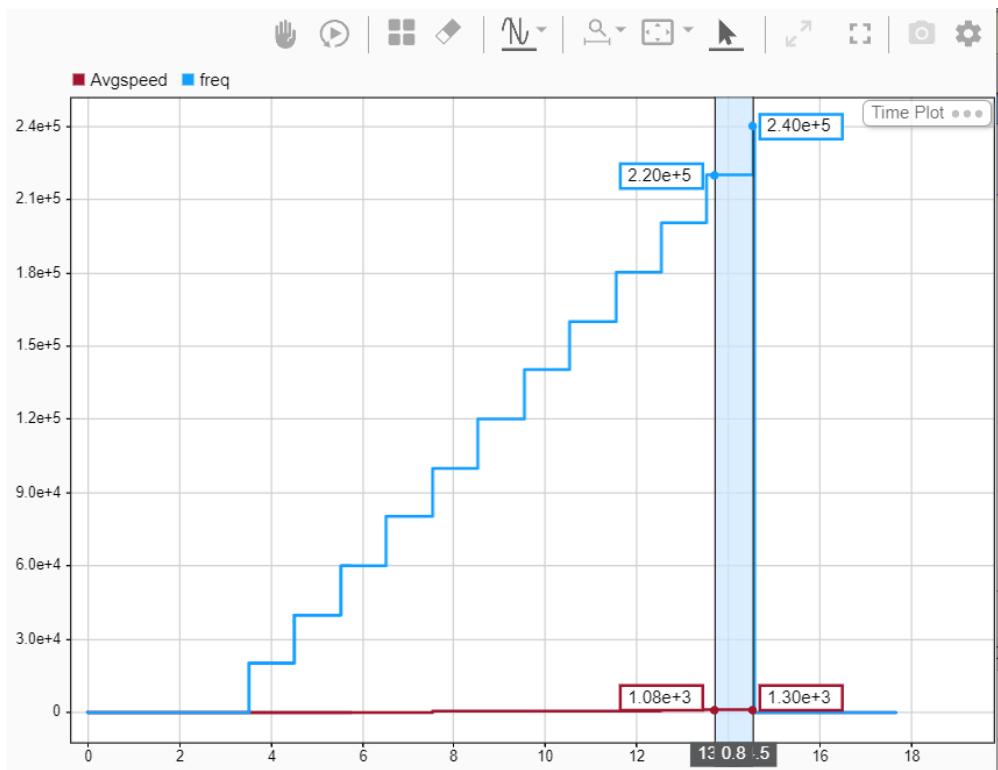
กราฟที่ความเร่ง 8000hz/s มีความเร็วสูงสุด 4670 rad/s ที่ 272000hz



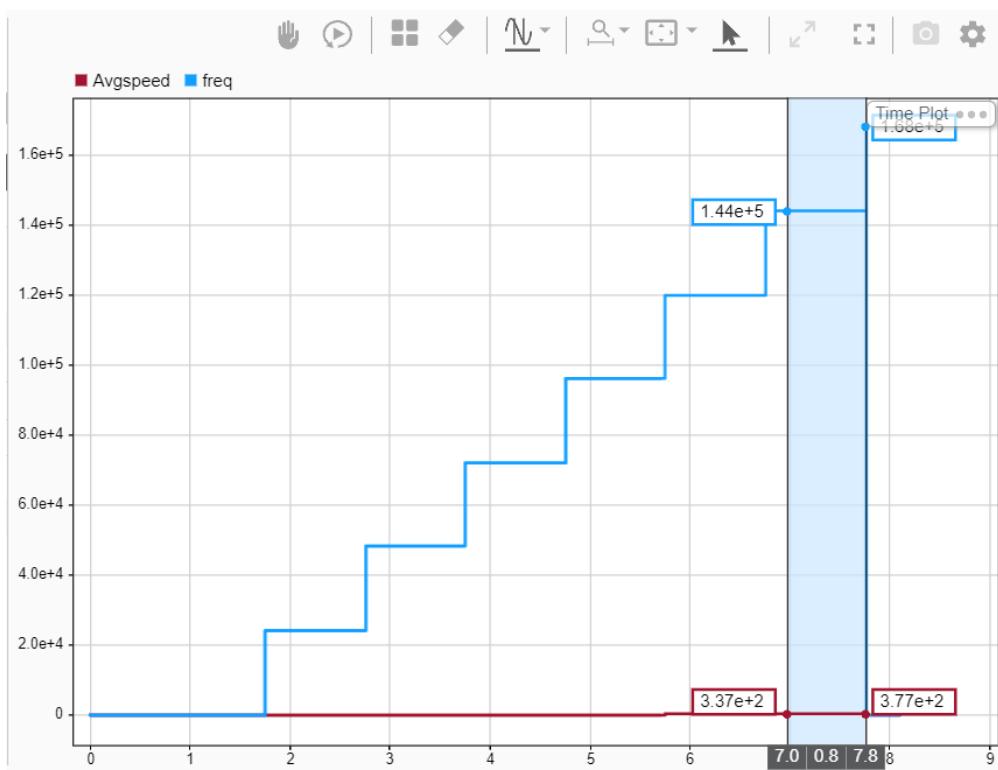
กราฟที่ความเร่ง 12000hz/s มีความเร็วสูงสุด 3540 rad/s ที่ 288000hz



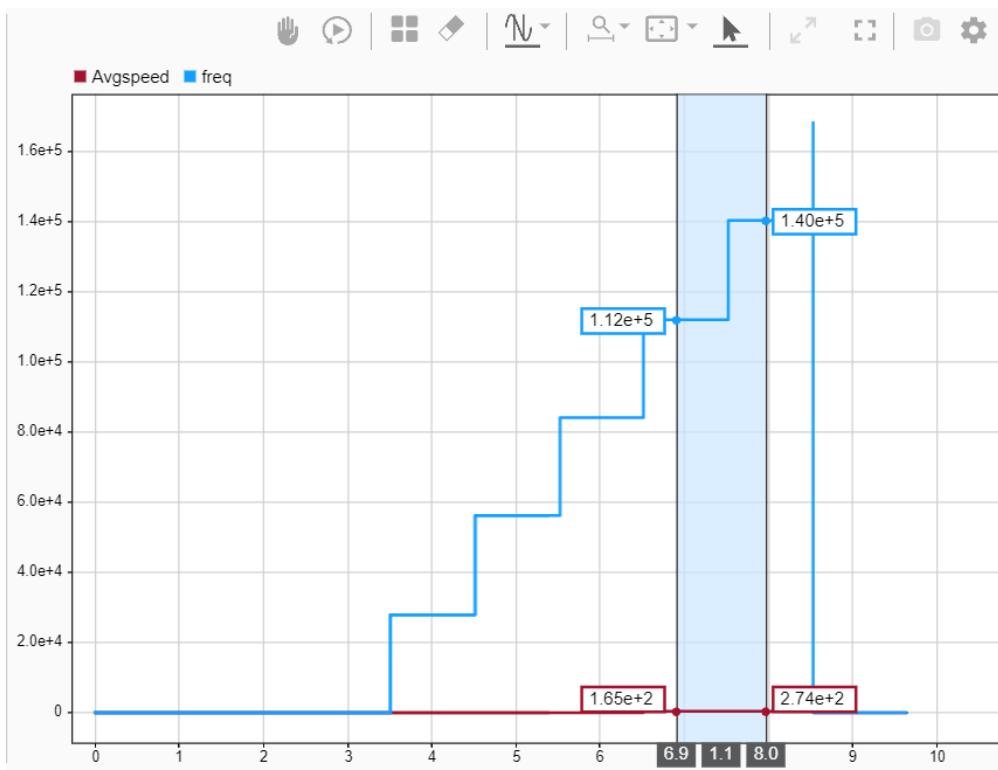
กราฟที่ความเร่ง 16000hz/s มีความเร็วสูงสุด 2140 rad/s ที่ 272000hz



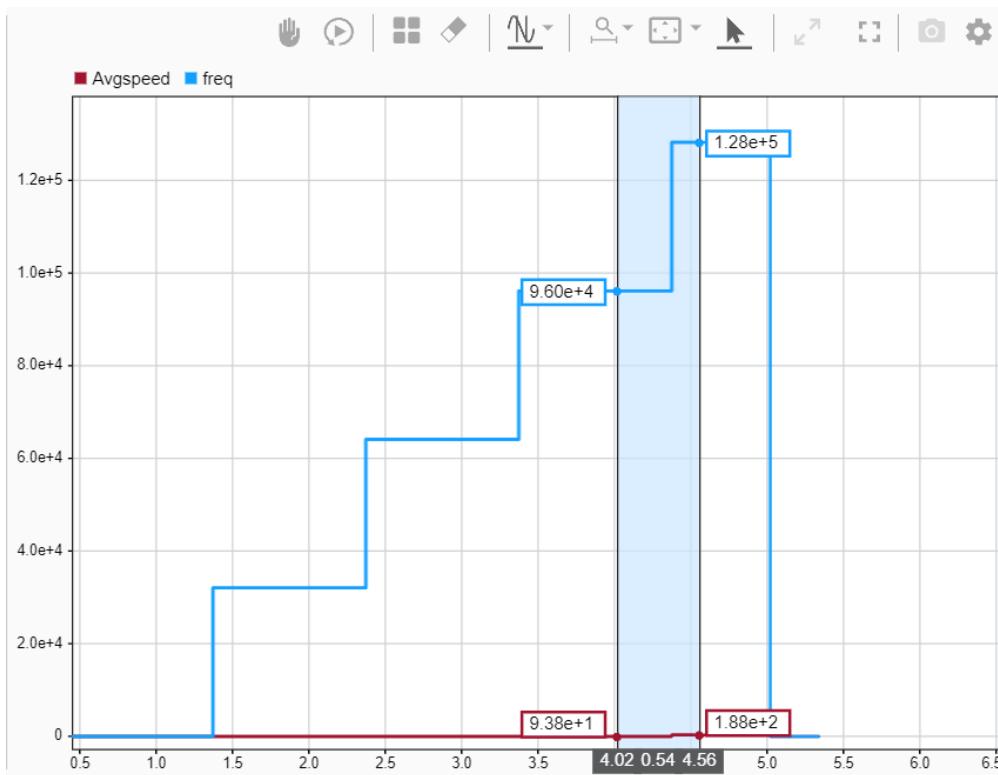
กราฟที่ความเร่ง 20000hz/s มีความเร็วสูงสุด 1300 rad/s ที่ 22000hz



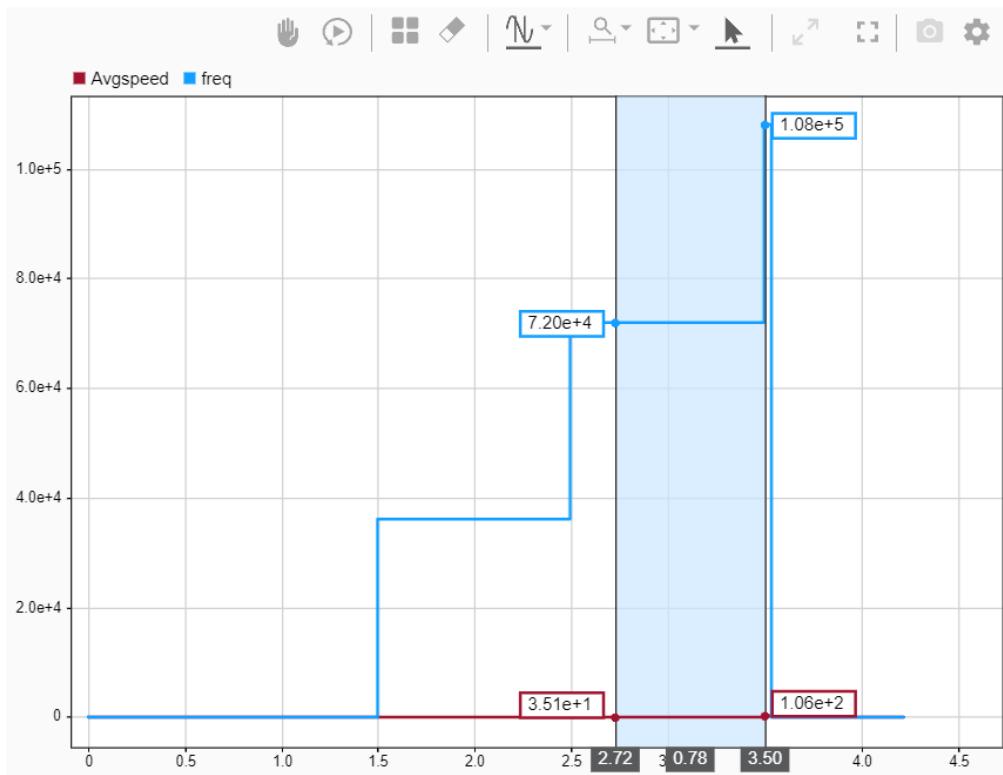
กราฟที่ความเร่ง 24000hz/s มีความเร็วสูงสุด 377 rad/s ที่ 14400hz



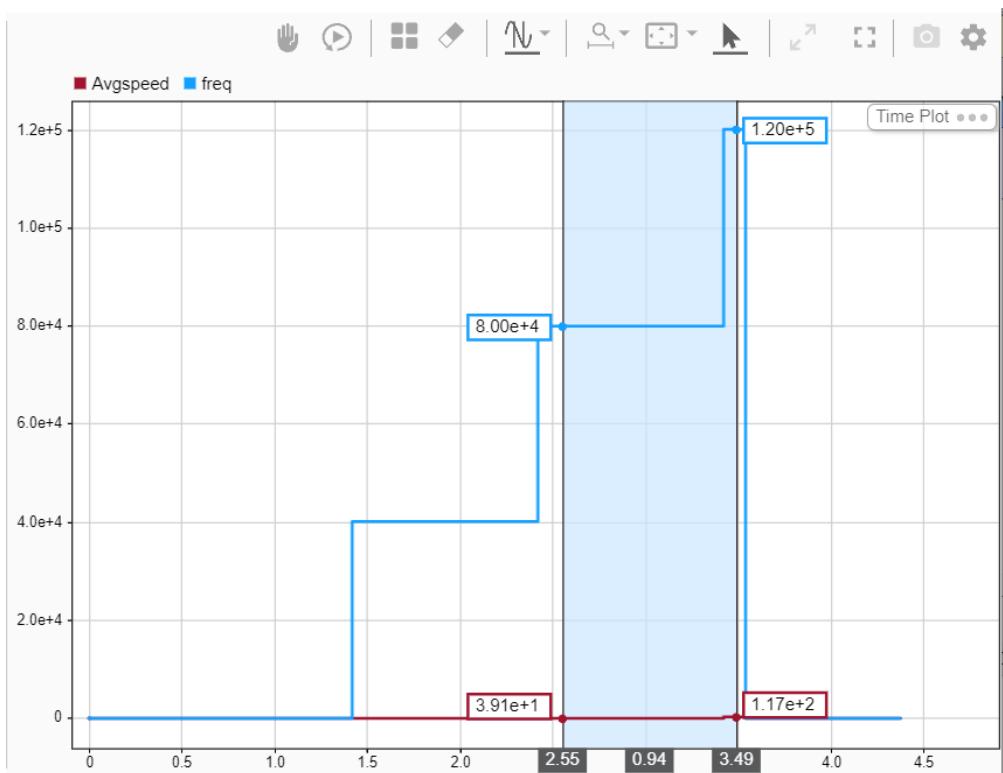
กราฟที่ความเร่ง 28000hz/s มีความเร็วสูงสุด 274 rad/s ที่ 112000hz



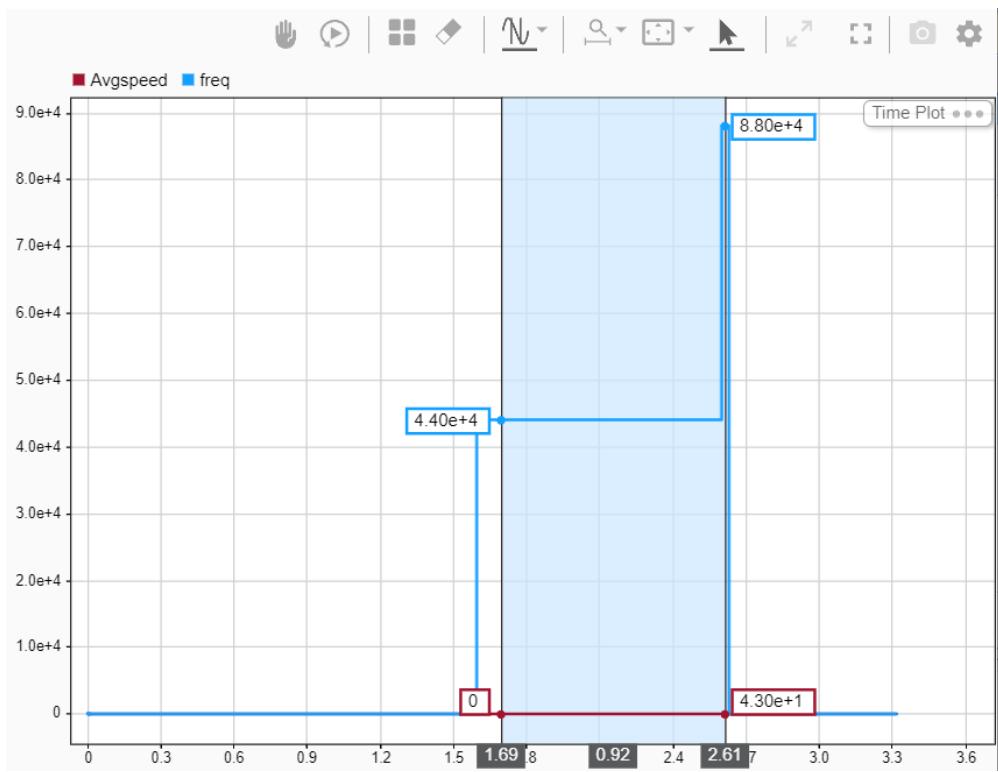
กราฟที่ความเร่ง 32000hz/s มีความเร็วสูงสุด 188 rad/s ที่ 96000hz



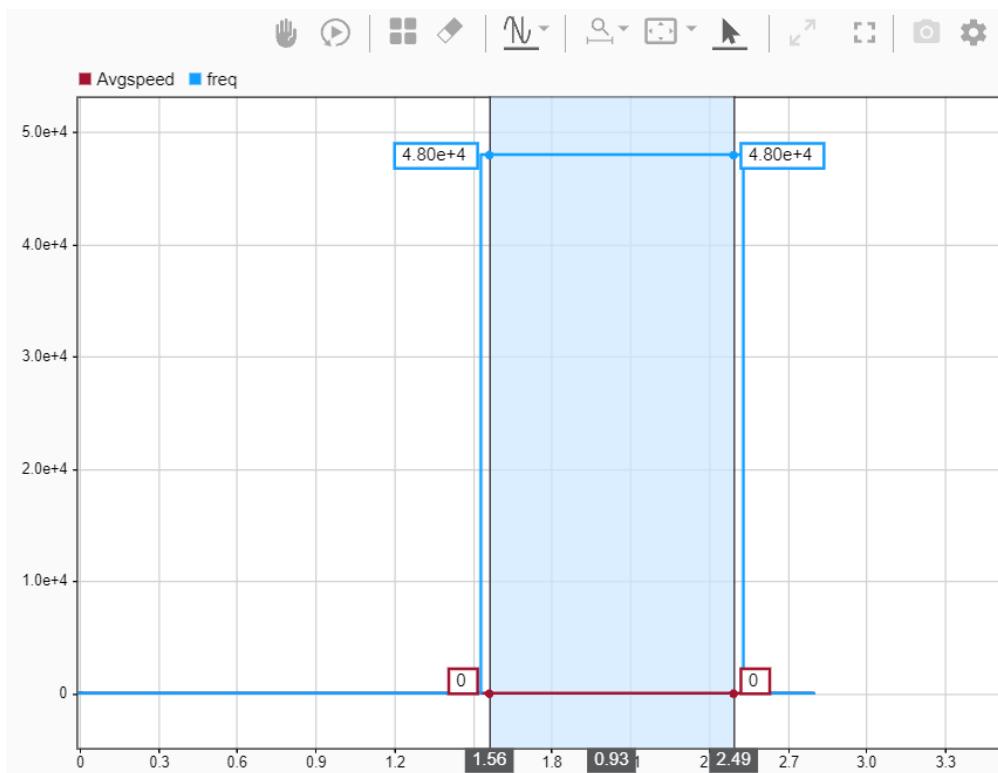
กราฟที่ความเร่ง 36000hz/s มีความเร็วสูงสุด 106 rad/s ที่ 72000hz



กราฟที่ความเร่ง 40000hz/s มีความเร็วสูงสุด 117 rad/s ที่ 80000hz



กราฟที่ความเร่ง 44000hz/s มีความเร็วสูงสุด 4.3 rad/s ที่ 44000hz



กราฟที่ความเร่ง 48000hz/s มีความเร็วสูงสุด 0 rad/s ที่ 48000hz

2.11 สรุปผล

2.11.1 ค่า Stepper Frequency/second คือค่าความเร่ง หน่วยเป็น hz/s จากสูตร $a = \Delta v/t$

2.11.2 ค่าความเร็วคือค่าที่อ่านได้จาก encoder และค่า Stepper Frequency เพราะใน 1hz จะทำให้ Stepper Motor หมุน 1 Step ทำให้มีค่า Stepper Frequency สูงความเร็วจะสูงตาม

2.11.3 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของกราฟจะเห็นว่า เมื่อความเร่งต่ำนั้นความเร็วที่ Stepper Motor ทำได้นั้นมีค่าความเร็วที่สูงที่สุด เพราะที่ค่าความเร่งน้อยที่สุด จะทำให้แรงบิด (Holding Torque) ของ Stepper Motor ต่ำที่สุด

2.11.4 จุดที่เกิด Step Loss คือจุดที่มีความเร่งสูงที่สุด เพราะที่ค่าความเร่งมากที่สุด ทำให้ใช้แรงบิด (Holding Torque) ของ Stepper Motor มากที่สุด จึงเกิด Step Loss เนื่องจากต้องใช้แรงบิดมากเกินกว่าที่แรงบิด (Holding Torque) ของ Stepper Motor จะทำได้

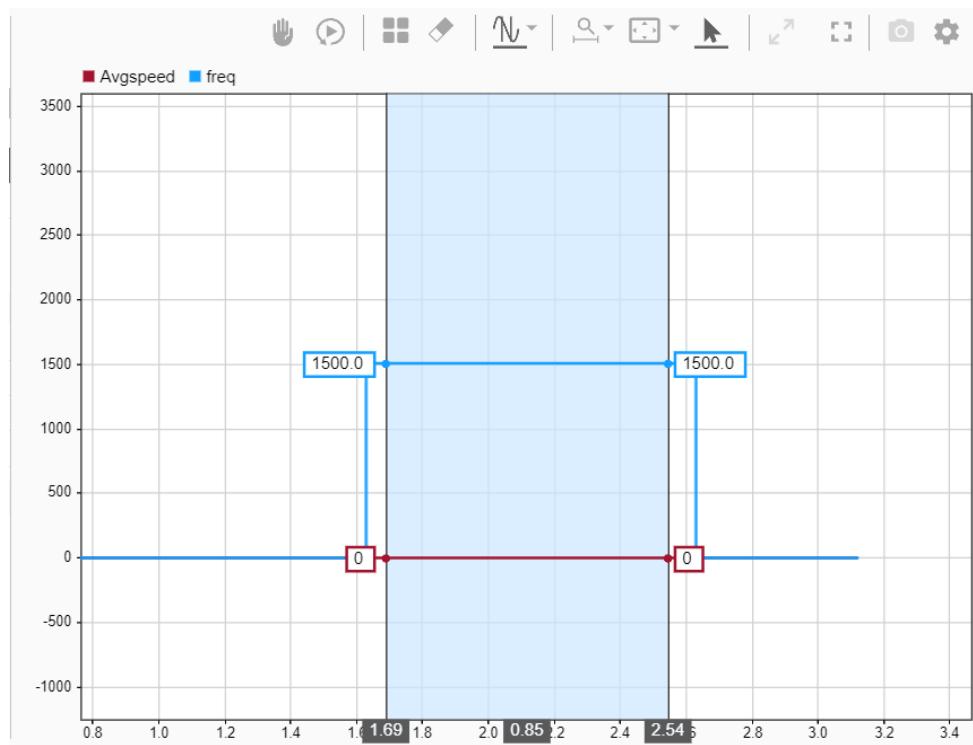
2.11.5 การขับแบบโหมด Full-Step จะทำให้ได้ความเร็วต่ำที่สุด เพราะในการสั่งให้เคลื่อนที่แต่ละ Step ใช้ความเร่งที่สูงกว่าการขับโหมดอื่นๆ

2.11.6 การขับแบบโหมด Half-Step จะทำให้ได้ความปานกลาง เพราะในการสั่งให้เคลื่อนที่แต่ละ Step ใช้ความเร่งเป็นครึ่งหนึ่งของโหมด Full-Step ทำให้ใช้แรงบิดของ Stepper Motor ที่ต่ำกว่าโหมด Full-Step ได้

2.11.7 การขับแบบโหมด Microstepping จะทำให้ได้ความเร็วที่สูงที่สุด เพราะในการสั่งให้เคลื่อนที่แต่ละ Step ใช้ความเร่งที่ต่ำกว่าการขับโหมดอื่นๆ จึงสามารถลดค่าอย่างเร่งความเร็วได้ทำให้ใช้แรงบิดที่ต่ำกว่าการขับโหมดอื่นๆ

2.12 ภาระรายผล

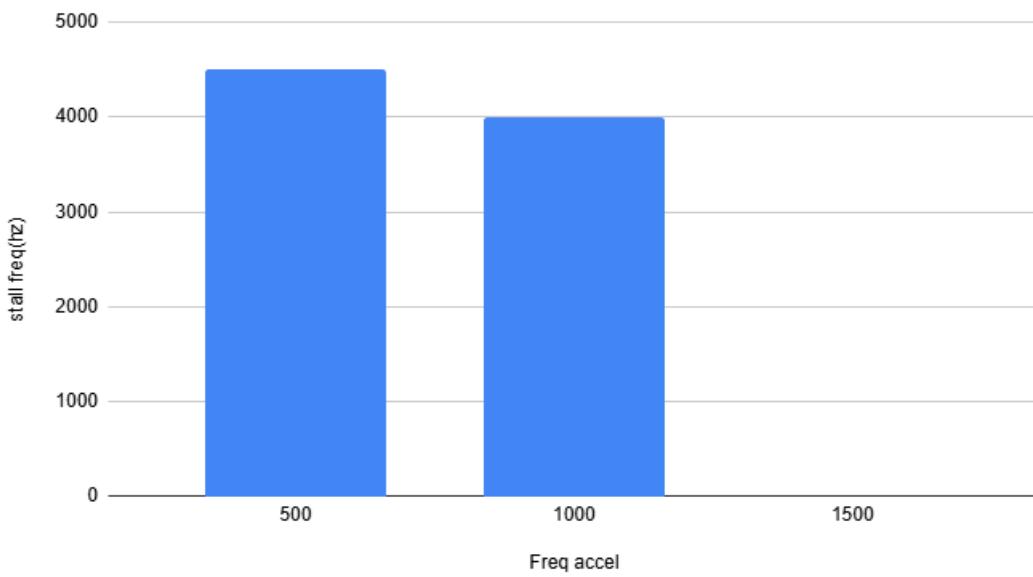
2.12.1 จุดเกิด step loss ของการขับในโหมด Full-step คือจุดที่ความเร่งเท่ากับ 1500hz/s



กราฟที่ความเร่ง 1500hz/s

กราฟจะบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร่ง ความเร็วและ จุดStep Loss ของหมุด Full-Step

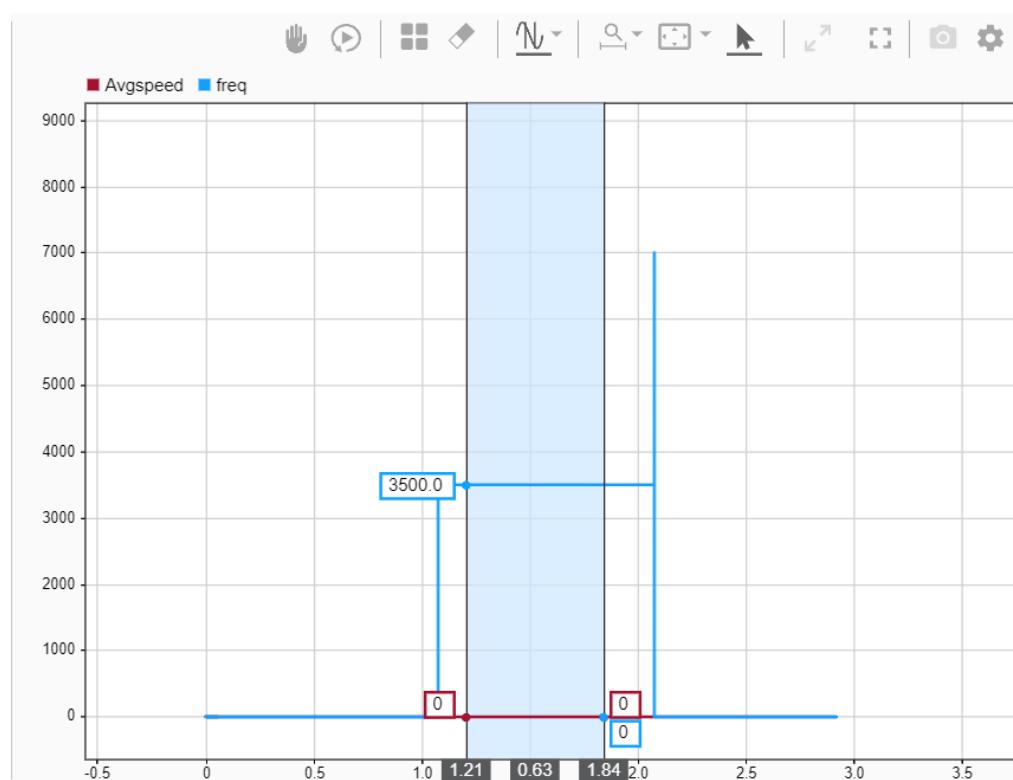
stall freq(hz) กับ Freq accel



เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของกราฟจะเห็นได้ว่าที่ความเร่ง 500hz/s ความเร็วที่ Stepper Motor ทำได้นั้นมีค่าความเร็วที่สูงที่สุด เพราะค่าความเร่งน้อยที่สุด ทำให้ใช้แรงบิดของ Stepper Motor ต่ำที่สุด

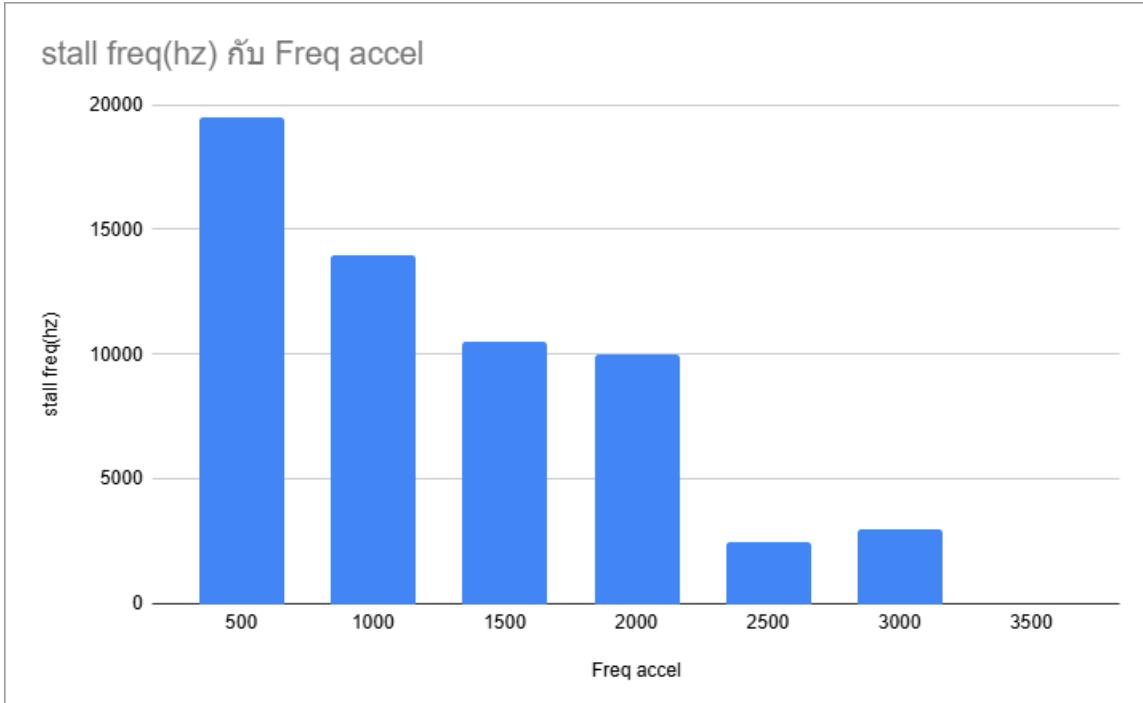
และจุดที่เกิด Step Loss คือที่ความเร่ง 1500hz/s เพราะค่าความเร่งมากที่สุด ทำให้ใช้แรงบิดของ Stepper Motor มากที่สุด จึงเกิด Step Loss เนื่องจากต้องใช้แรงบิดมากเกินกว่าที่แรงบิดของ Stepper Motor จะทำได้

2.12.2 จุดเกิด step loss ของการขับในโหมด Half-step คือจุดที่ความเร่งเท่ากับ 3500hz/s



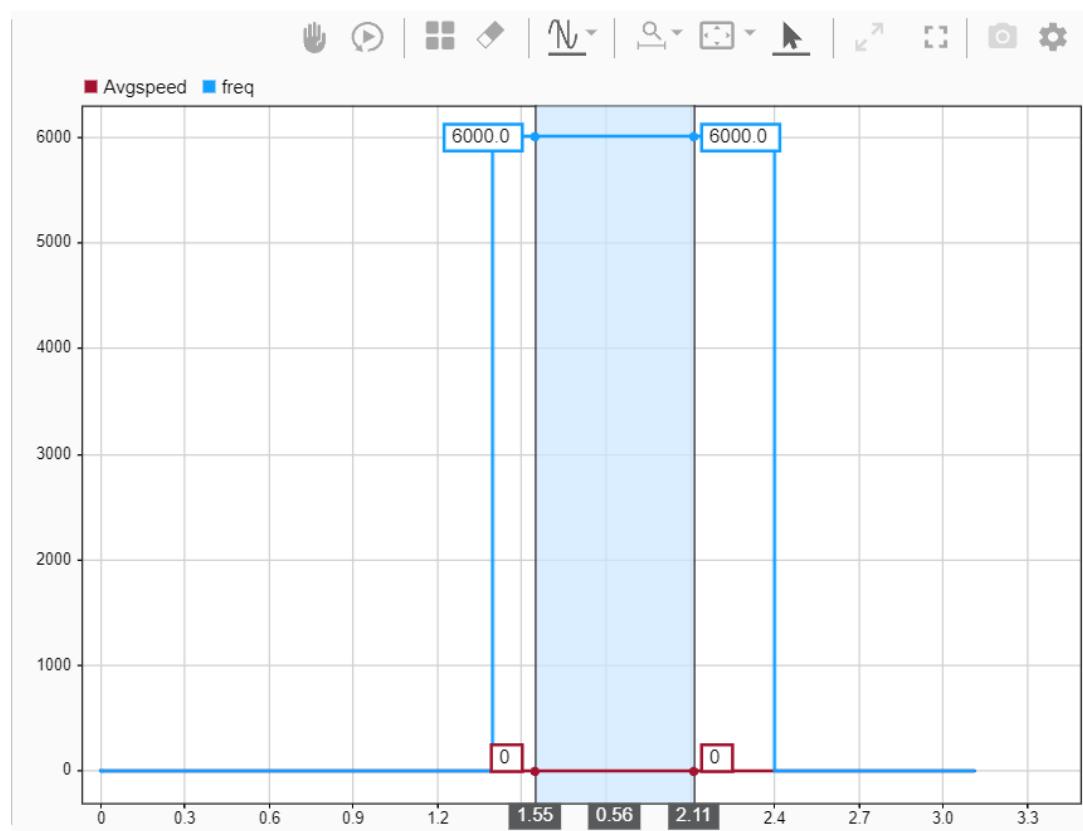
กราฟที่ความเร่ง 3500hz/s

กราฟจะบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร่ง ความเร็วและ จุดStep Loss ของโหมด half-Step



เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของกราฟจะเห็นได้ว่าที่ความเร่ง 500hz/s ความเร็วที่ Stepper Motor ทำได้นั้นมีค่าความเร็วที่สูงที่สุด เพราะค่าความเร่งน้อยที่สุด ทำให้ใช้แรงบิดของ Stepper Motor ต่ำที่สุด และจุดที่เกิด Step Loss คือที่ความเร่ง 3500hz/s เพราะค่าความเร่งมากที่สุด ทำให้ใช้แรงบิดของ Stepper Motor มากที่สุด จึงเกิด Step Loss เนื่องจากต้องใช้แรงบิดมากเกินกว่าที่แรงบิดของ Stepper Motor จะทำได้

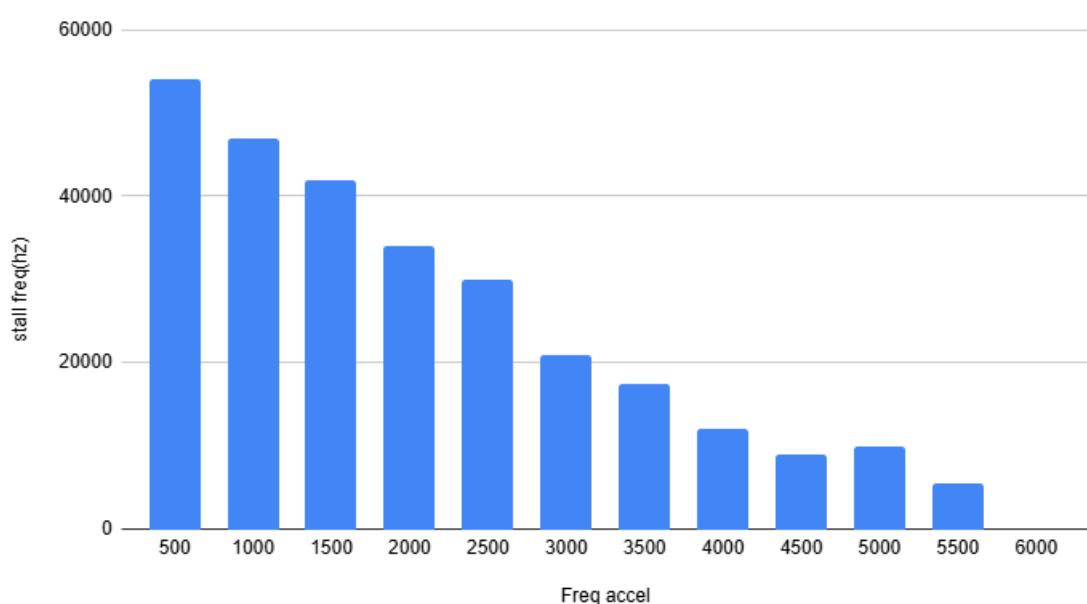
2.12.3 จุดเกิด step loss ของการขับในโหมด Microstepping 1/4 คือจุดที่ความเร่งเท่ากับ 6000hz/s



กราฟที่ความเร่ง 6000hz/s

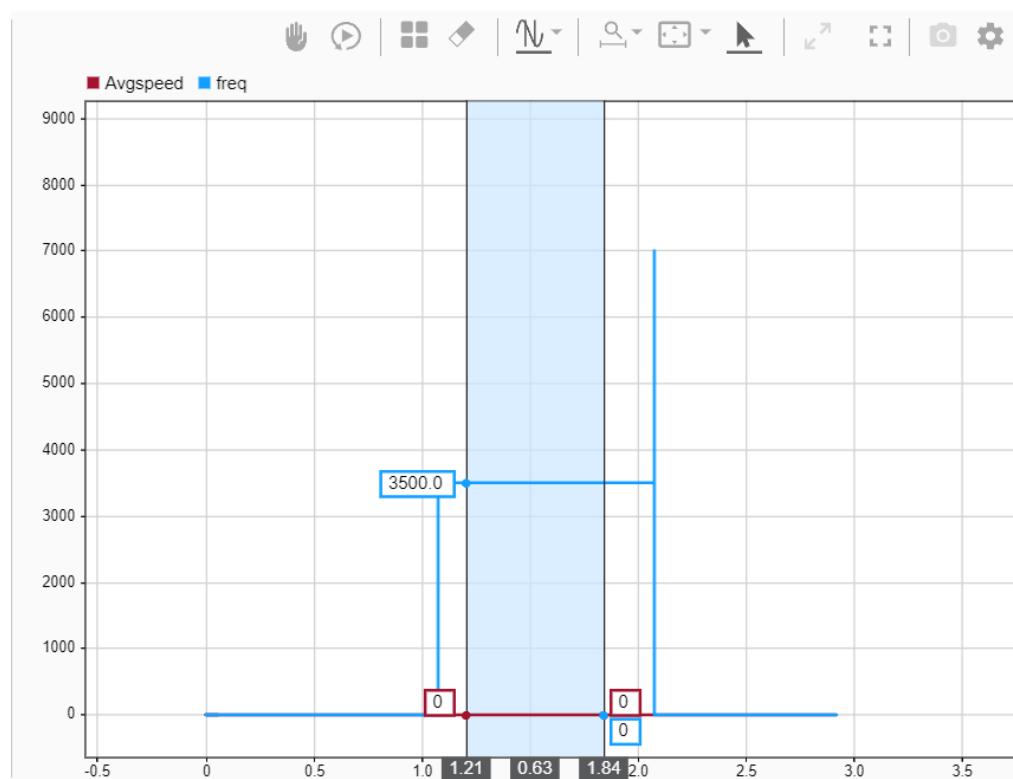
graf จะบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร่ง ความเร็วและ จุดStep Loss ของโหมด Microstepping
1/4

stall freq(hz) กับ Freq accel



เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของกราฟจะเห็นได้ว่าที่ความเร่ง 500hz/s ความเร็วที่ Stepper Motor ทำได้นั้นมีค่าความเร็วที่สูงที่สุด เพราะค่าความเร่งน้อยที่สุด ทำให้แรงบิดของ Stepper Motor ต่ำที่สุด และจุดที่เกิด Step Loss คือที่ความเร่ง 6000hz/s เพราะค่าความเร่งมากที่สุด ทำให้แรงบิดของ Stepper Motor มากที่สุด จึงเกิด Step Loss เนื่องจากต้องใช้แรงบิดมากเกินกว่าที่แรงบิดของ Stepper Motor จะทำได้

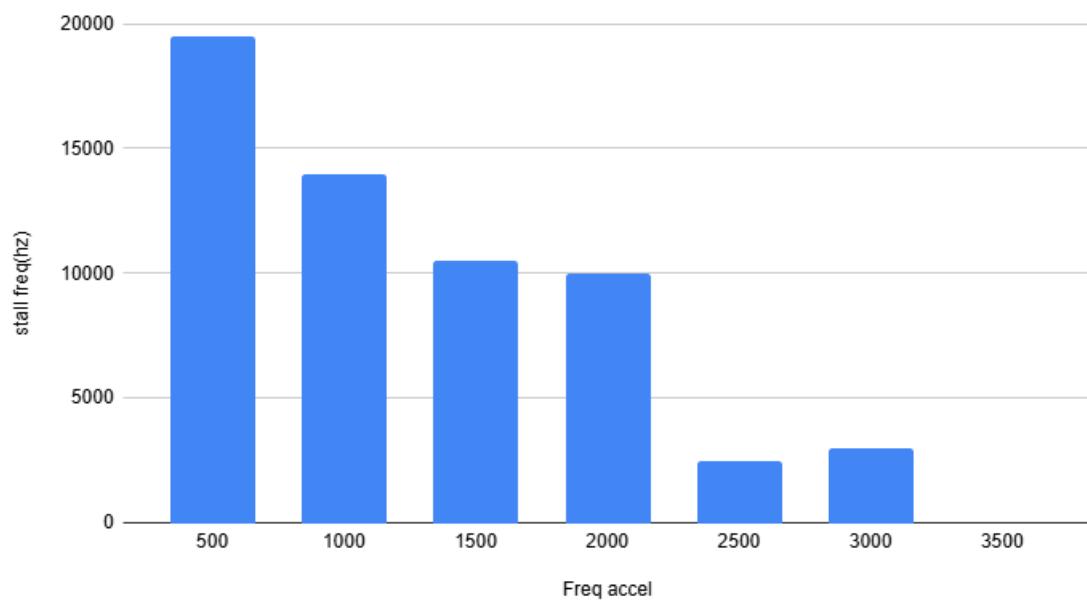
2.12.4 จุดเกิด step loss ของการขับในโหมด Half-step คือจุดที่ความเร่งเท่ากับ 3500hz/s



กราฟที่ความเร่ง 3500hz/s

กราฟจะบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร่ง ความเร็วและ จุดStep Loss ของโหมด half-Step

stall freq(hz) กับ Freq accel



เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของกราฟจะเห็นได้ว่าที่ความเร่ง 500hz/s ความเร็วที่ Stepper Motor ทำได้นั้นมีค่าความเร็วที่สูงที่สุด เพราะค่าความเร่งน้อยที่สุด ทำให้ใช้แรงบิดของ Stepper Motor ต่ำที่สุด

และจุดที่เกิด Step Loss คือที่ความเร่ง 3500hz/s เพราะค่าความเร่งมากที่สุด ทำให้ใช้แรงบิดของ Stepper Motor มากที่สุด จึงเกิด Step Loss เนื่องจากต้องใช้แรงบิดมากเกินกว่าที่แรงบิดของ Stepper Motor จะทำได้

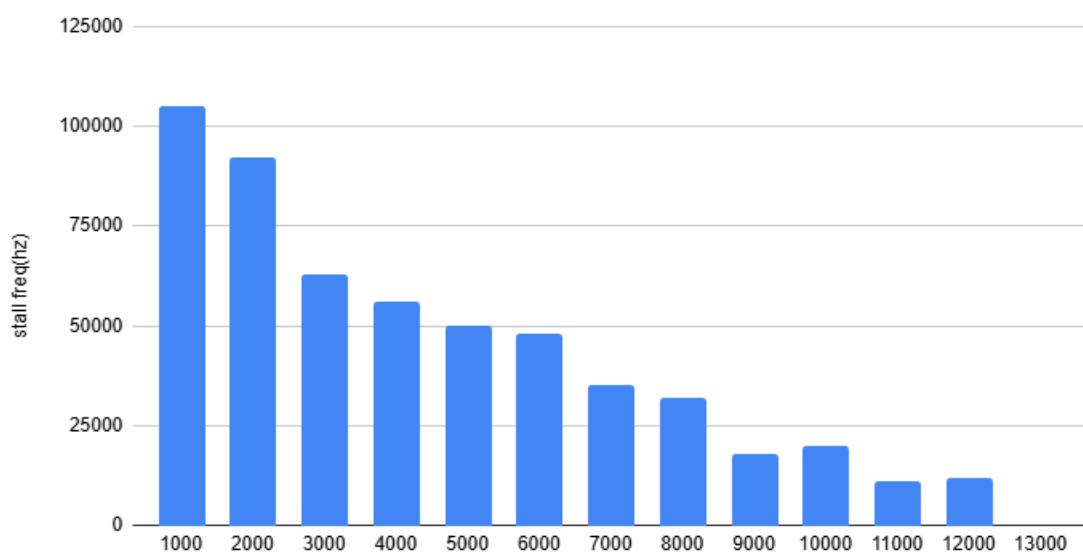
2.12.5 จุดเกิด step loss ของการขับในโหมด Microstepping 1/8 คือจุดที่ความเร่งเท่ากับ 13000hz/s



กราฟที่ความเร็ว 13000hz/s

กราฟจะบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็ว ความเร็ว และ จุด Step Loss ของโหมด Microstepping 1/8

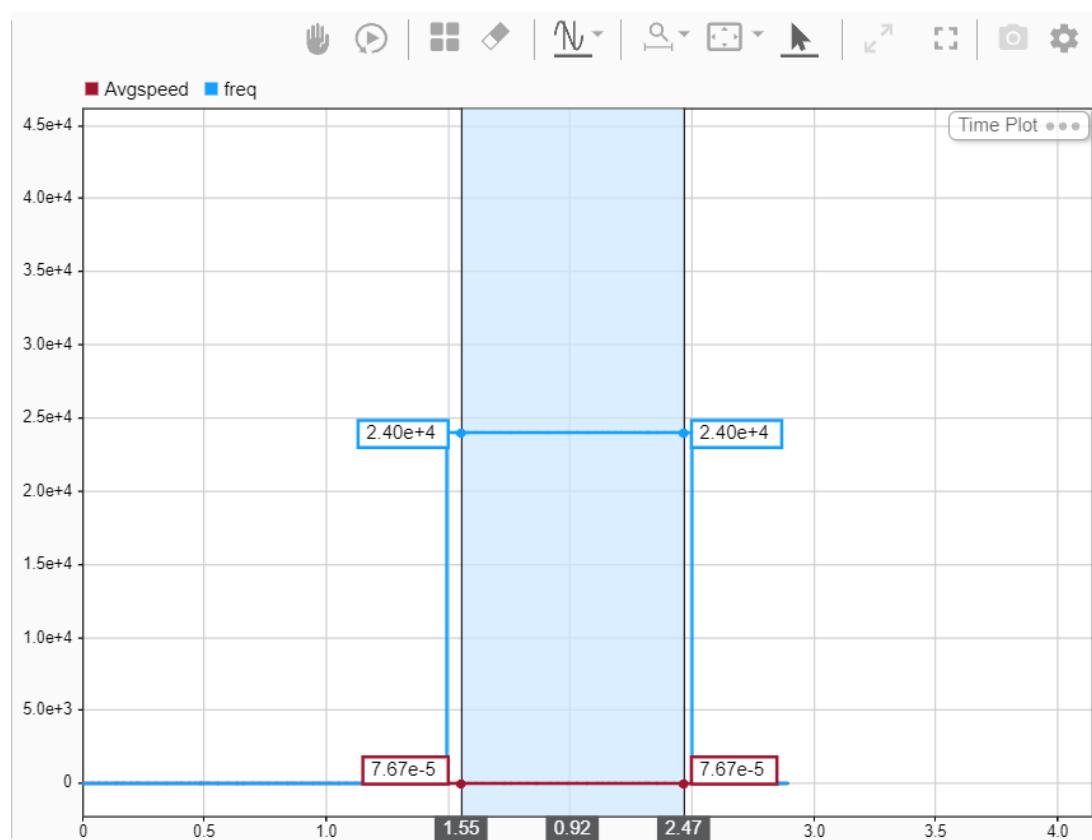
stall freq(hz) กับ Freq accel



เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของกราฟจะเห็นได้ว่าที่ความเร่ง 1000hz/s ความเร็วที่ Stepper Motor ทำได้นั้นมีค่าความเร็วที่สูงที่สุด เพราะค่าความเร่งน้อยที่สุด ทำให้แรงบิดของ Stepper Motor ต่ำที่สุด

และจุดที่เกิด Step Loss คือที่ความเร่ง 13000hz/s เพราะค่าความเร่งมากที่สุด ทำให้แรงบิดของ Stepper Motor มากที่สุด จึงเกิด Step Loss เนื่องจากต้องใช้แรงบิดมากเกินกว่าที่แรงบิดของ Stepper Motor จะทำได้

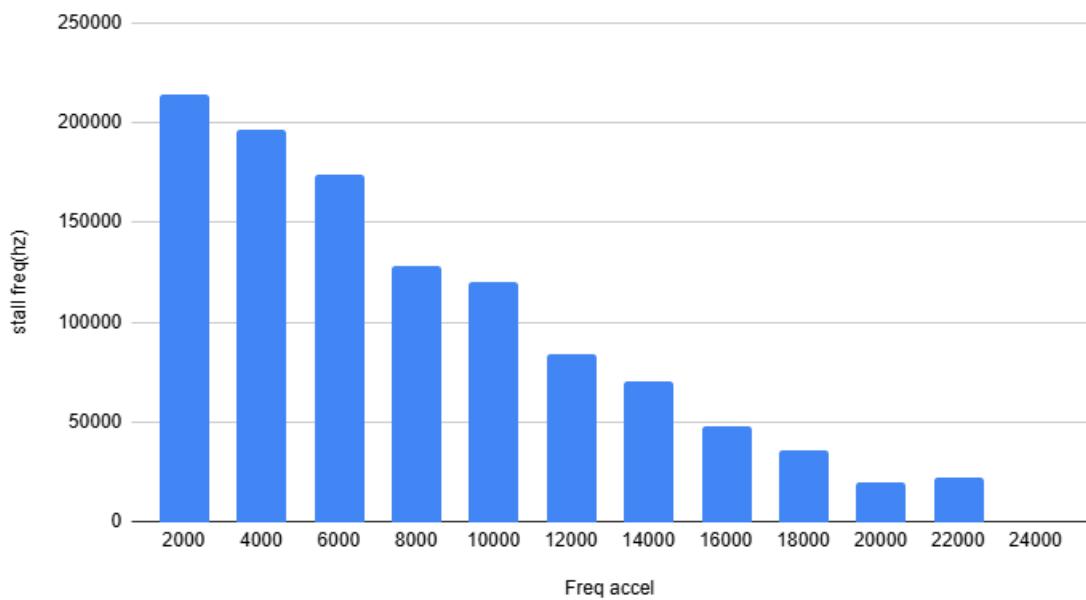
2.12.6 จุดเกิด step loss ของการขับในโหมด Microstepping 1/16 คือจุดที่ความเร่งเท่ากับ 24000hz/s



กราฟที่ความเร่ง 24000hz/s

กราฟจะบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร่ง ความเร็วและ จุดStep Loss ของโหมด Microstepping 1/16

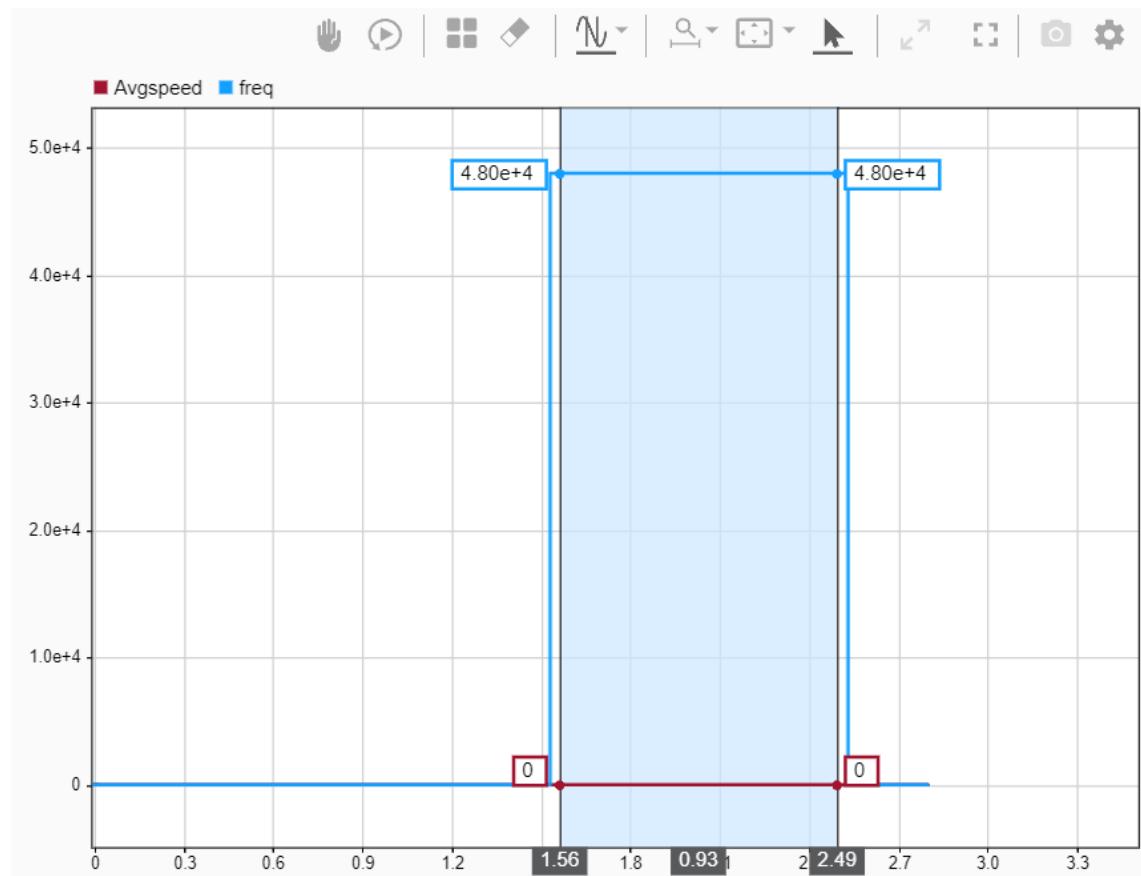
stall freq(hz) กับ Freq accel



เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของกราฟจะเห็นได้ว่าที่ความเร่ง 2000hz/s ความเร็วที่ Stepper Motor ทำได้นั้นมีค่าความเร็วที่สูงที่สุด เพราะค่าความเร่งน้อยที่สุด ทำให้ใช้แรงบิดของ Stepper Motor ต่ำที่สุด

และจุดที่เกิด Step Loss คือที่ความเร่ง 24000hz/s เพราะค่าความเร่งมากที่สุด ทำให้ใช้แรงบิดของ Stepper Motor มากที่สุด จึงเกิด Step Loss เนื่องจากต้องใช้แรงบิดมากเกินกว่าที่แรงบิดของ Stepper Motor จะทำได้

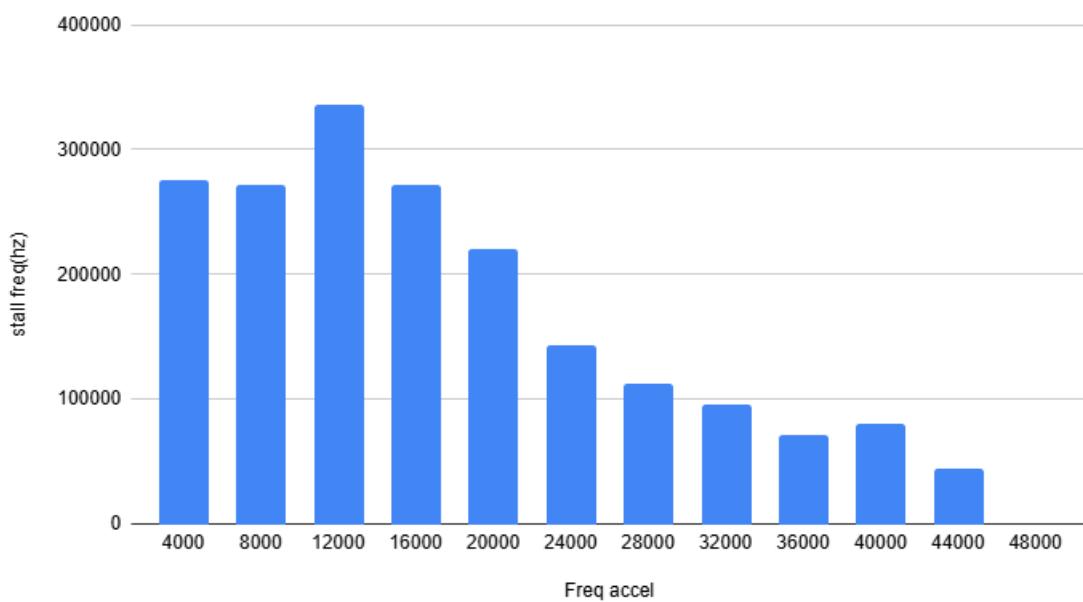
2.12.7 จุดเกิด step loss ของการขับในโหมด Microstepping 1/32 คือจุดที่ความเร่งเท่ากับ 48000hz/s



กราฟที่ความเร็ว 48000hz/s

กราฟจะบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็ว ความเร็วและ จุดStep Loss ของโหมด Microstepping
1/32

stall freq(hz) กับ Freq accel



เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของกราฟจะเห็นได้ว่าที่ความเร็ว 4000hz/s ความเร็วที่ Stepper Motor ทำได้นั้นมีค่าความเร็วที่สูงที่สุด เพราะค่าความเร็วน้อยที่สุด ทำให้แรงบิดของ Stepper Motor ต่ำที่สุด

และจุดที่เกิด Step Loss คือที่ความเร็ว 48000hz/s เพราะค่าความเร็วมากที่สุด ทำให้แรงบิดของ Stepper Motor มากที่สุด จึงเกิด Step Loss เนื่องจากต้องใช้แรงบิดมากเกินกว่าที่แรงบิดของ Stepper Motor จะทำได้

2.13 ข้อเสนอแนะ

หลังจากการทดลองเกี่ยวกับการขับเคลื่อน Step Motor และการตั้งค่าต่าง ๆ ต่อไปนี้คือข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุงการทำงานและการออกแบบระบบให้มีประสิทธิภาพและเสถียรภาพมากขึ้น

2.14 เอกสารอ้างอิง

- 2.14.1 <https://www.orientalmotor.com/stepper-motors/technology/stepper-motor-overview.html>
- 2.14.2 <https://www.motionsolutions.com/stepper-motors-and-the-myth-of-lost-steps/>
- 2.14.3 <https://cdn.faulhaber.com/media/DAM/Documents/Tutorials/faulhaber-tutorial-stepper-motor-step-loss-prevention.pdf>
- 2.14.4 <https://eu.aspina-group.com/en/learning-zone/columns/what-is/017/>
- 2.14.5 <https://www.ato.com/nema-23-stepper-motor-5-8a-250ncm>
- 2.14.6 <https://mechtex.com/blog/types-of-stepper-motor>
- 2.14.7 <https://mechtex.com/blog/explore-the-different-stepping-modes-of-a-stepper-motor>
- 2.14.8 <https://www.instructables.com/How-to-use-a-Stepper-Motor/>
- 2.14.9 <https://techexplorations.com/blog/arduino/blog-the-difference-between-unipolar-and-bipolar-stepper-motors/>

การทดลองที่ 3 Brushless DC Motor

3.1 วัตถุประสงค์

- 3.1.1 เพื่อศึกษาหลักการทำงานของ Brushless DC Motor
- 3.1.2 เพื่อศึกษาการควบคุม Brushless DC Motor แบบ Sensor Based, Sensorless และ Control Waveform
- 3.1.3 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของ Speed เมื่อ Frequency ของสัญญาณที่จ่ายเข้า Brushless DC Motor เปลี่ยนแปลงไป
- 3.1.4 เพื่อศึกษาการควบคุม Brushless DC Motor ด้วยโหมด Six-Step Control และ Field Oriented Control (FOC) โดยเน้นถึงวิธีการเปลี่ยนและจัดการกับ Vector ของกระแสไฟฟ้าผ่านการอธิบายด้วย Space Vector Modulation (SVM)
- 3.1.5 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบ Trapezoidal และ Sinusoidal
- 3.1.6 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของ Six-Step Control และ Pulse-width Modulation (PWM)
- 3.1.7 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของ PWM และ Frequency Output (Back EMF และ Hall Sensor)
- 3.1.8 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบ Feedback ของ Back EMF และ Hall Sensor
- 3.1.9 เพื่อศึกษาการจัดการกับ Feedback ของ Sensorless Control เพื่อหาตำแหน่งเมื่อเทียบกับ Feedback ของ Sensor-based Control บน Electronic Speed Control (ESC) และ Motor Control Unit (MCU)
- 3.1.10 เพื่อศึกษาความเร็วจาก Feedback ของ Trapezoidal Control
- 3.1.11 เพื่อศึกษาการควบคุม Permanent Magnet Synchronous (PMSM) แบบ FOC

3.2 สมมุติฐาน

- 3.2.1 เมื่ออัตราเร็วเฉิงมุ่งของ BLDC เพิ่มขึ้น ความถี่ของสัญญาณ Back EMF จะเพิ่มขึ้นด้วย
- 3.2.2 ทิศทางการหมุนของ BLDC และความถี่ของสัญญาณ Back EMF เป็นอิสระต่อกัน

3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

- 3.3.1 ตัวแปรต้น : ความเร็วเฉิงมุ่งของ BLDC
- 3.3.2 ตัวแปรตาม : ความถี่ของสัญญาณ Back EMF
- 3.3.3 ตัวแปรควบคุม : แรงดันไฟฟ้าและแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายให้กับ BLDC, สัญญาณ EMI, ความคลาดเคลื่อนจาก Speed Constant ของ BLDC, สภาพแวดล้อมขณะทดลอง, วิธีการและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.4 นิยามศัพท์เฉพาะ

- 3.4.1 BLDC หมายถึง Brushless DC Motor รุ่น A2212/13T
- 3.4.2 อัตราเร็วเฉิงมุ่ง หมายถึง ขนาดมุ่งที่จุดศูนย์กลางของ BLDC ที่รัศมีกว้างໄปได้ในหนึ่งหน่วยเวลา หน่วย rad/s

3.4.3 ความเร็วเชิงมุม หมายถึง การกระจัดเชิงมุมต่อหนึ่งหน่วยเวลา โดยมีการกำหนดทิศทางการหมุนของ BLDC หน่วย rad/s

3.4.4 PID หมายถึง ระบบการควบคุมแบบ Feedback Control ที่ทำการควบคุมความเร็วในการหมุนของ BLDC โดยกำหนดผ่านโปรแกรม Motor Control WorkBench

3.4.5 8FE Predicted หมายถึง การใช้ FEA (Finite Element Analysis) เพื่อคำนวณการสูญเสียพลังงาน และพฤติกรรมทางไฟฟ้า-แม่เหล็กในมอเตอร์ BLDC

3.5 นิยามเชิงปฏิบัติการ

3.5.1 จุด หมายถึง ตำแหน่งบนคลื่นที่ใช้ในการวัดค่า Back EMF

3.5.2 ลูกคลื่น หมายถึง ตำแหน่งจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในช่วงเวลาของ 1 คาบ

3.5.3 อัตราเร็ว หมายถึง อัตราเร็วเชิงมุมของ BLDC

3.5.4 ความเร็ว หมายถึง ความเร็วเชิงมุมของ BLDC โดยค่าบวกและลบแสดงถึงทิศทางของการเคลื่อนที่ของ BLDC โดยที่ความเร็วมีค่าบวกแสดงถึงมีการเคลื่อนที่แบบตามเข็มนาฬิกา และความเร็วมีค่าติดลบแสดงถึงมีการเคลื่อนที่แบบวนเข็มนาฬิกา

3.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

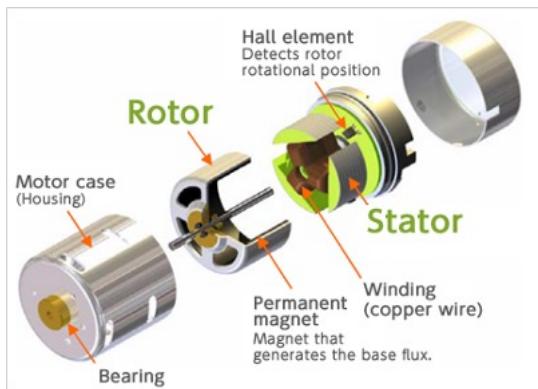
3.6.1 BLDC (Brushless DC Motor)

BLDC คือ มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ทำงานโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง ต่างจากมอเตอร์ DC แบบมีแปรงถ่านแบบดั้งเดิม โดย BLDC ทำงานโดยใช้แม่เหล็กถาวรและขดลวดในส่วนสเตเตอร์ (Stator) ไม่จำเป็นต้องใช้แปรงถ่านเพื่อสับเปลี่ยนขดลวดมอเตอร์ แต่สามารถควบคุมได้ด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ผ่านตัวควบคุมหรือระบบขับเคลื่อนที่เรียกว่า อินเวอร์เตอร์ (Inverter) โดยอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมนี้จะทดแทนฟังก์ชันของตัวสับเปลี่ยนทิศทางและให้พลังงานกับขดลวดที่เหมาะสม ขดลวดจะได้รับพลังงานในรูปแบบซึ่งหมุนรอบสเตเตอร์ ขดลวด สเตเตอร์ที่ได้รับพลังงานจะส่งไปยังแม่เหล็กของมอเตอร์และสลับเมื่อโรเตอร์ (Rotor) มีแนวตรงกับสเตเตอร์

BLDC สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามตำแหน่งของโรเตอร์และสเตเตอร์ คือ Outer Rotor Type และ Inner Rotor Type

3.6.1.1 Outer Rotor Type

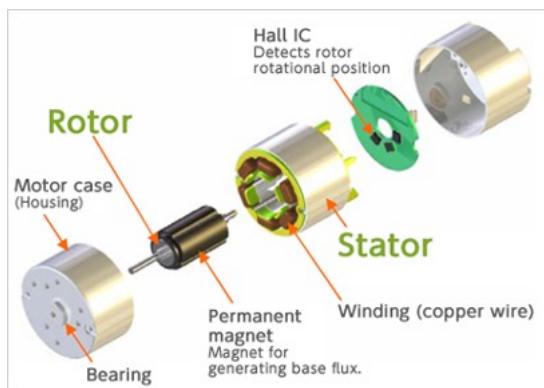
โรเตอร์อยู่ภายนอกและล้อมรอบสเตเตอर สเตเตอร์ซึ่งมีขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่ด้านใน และโรเตอร์ที่อยู่ภายนอกมีแม่เหล็กถาวรติดอยู่ มีแรงบิดสูงเนื่องจากโรเตอร์ที่อยู่นอกมีรัศมีที่ใหญ่ขึ้น ทำให้สร้างแรงบิดได้มากกว่า และความเร็วรอบมักจะต่ำกว่า Inner Rotor Type



รูปที่ 39 Outer Rotor Type

3.6.1.2 Inner Rotor Type

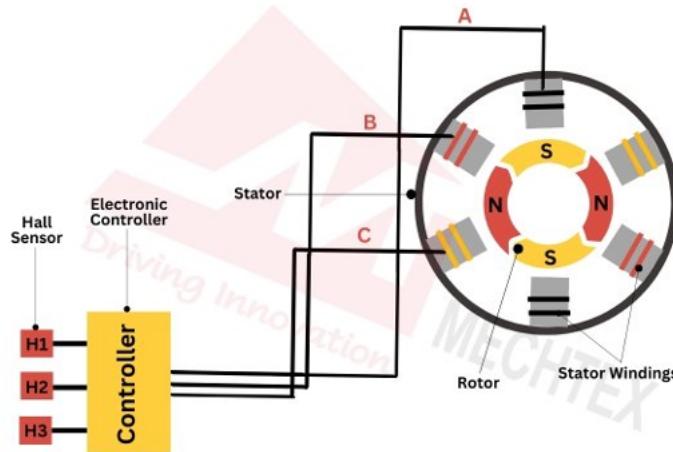
โรเตอร์อยู่ด้านในและล้อมรอบด้วยสเตเตอร์ที่มีขดลวด คล้ายกับมอเตอร์กระแสสลับทั่วไป ซึ่งความเร็วรอบสูงเนื่องจากโรเตอร์ที่อยู่ในมิวนัลหมุนน้อยกว่า ทำให้ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วได้เร็วแม่นยำกว่าในงานที่ต้องการความเร็วรอบสูง และขนาดโดยรวมมักเล็กกว่า Outer Rotor Type ในแรงบิดที่เท่ากัน



รูปที่ 40 Inner Rotor Type

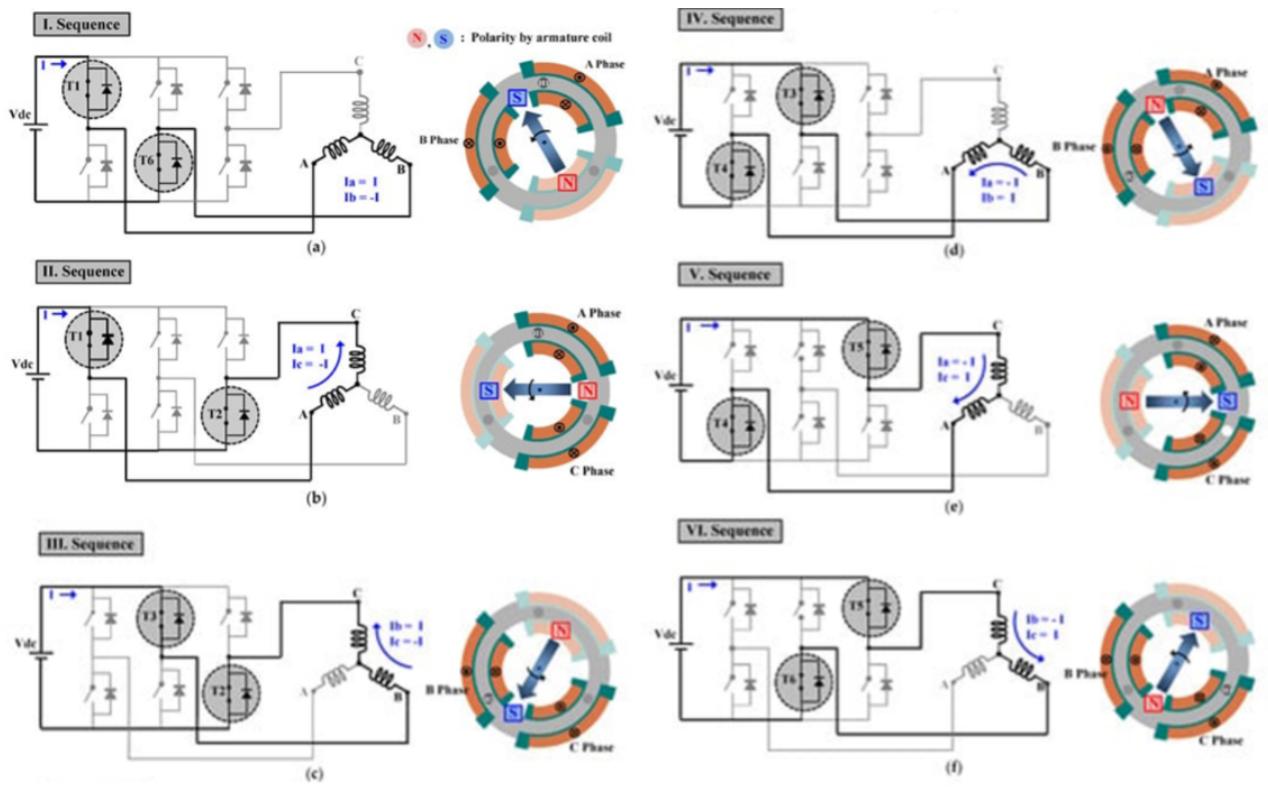
หลักการทำงานของ BLDC ขึ้นอยู่กับกฎของแรง lorentz (Lorentz Force Law) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการโต้ตอบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับส่วนประกอบต่าง ๆ เพื่อการเคลื่อนไหวของมอเตอร์ โดยมีส่วนประกอบหลักสามส่วน ได้แก่ โรเตอร์, สเตเตอร์ และตัวควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Controller) ซึ่งสเตเตอร์เป็นส่วนที่อยู่นิ่งและประกอบด้วยขดลวดที่เรียงตัวในรูปแบบเฉพาะเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก ขณะที่โรเตอร์ซึ่งเป็นส่วนที่หมุนได้ มีแม่เหล็กถาวรเรียงตัวเป็นชั้วหนึ่งและใต้ เมื่อตัวควบคุมจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังขดลวดสเตเตอร์ในลำดับที่กำหนด สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับแม่เหล็กถาวรของโรเตอร์ ทำให้เกิดการ

หมุนและสร้างพลังงานกล ทั้งนี้ ตัวควบคุมมีบทบาทสำคัญในการปรับการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้เหมาะสม ทั้งในเรื่องเวลาและลำดับของกระแสไฟ รวมถึงใช้เซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์เพื่อให้การหมุนมีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพ ซึ่งตัวควบคุมยังสามารถปรับกระแสและแรงดันไฟฟ้าได้เพื่อรักษาความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ให้คงที่ แม้ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของการ ทำให้ BLDC เป็นตัวเลือกที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานหลากหลายรูปแบบที่ต้องการความแม่นยำ ความทนทาน และประสิทธิภาพที่สูงขึ้น



รูปที่ 41 หลักการทำงานของ BLDC Motor

ตัวควบคุมความเร็วอิเล็กทรอนิกส์มักใช้การสลับกระแสใน BLDC ซึ่งเป็นรูปแบบที่เรียกว่า Six-step Commutation ซึ่งหมายถึงการเปลี่ยนขั้วกระแสไฟฟ้าใน 6 ขั้นตอนต่อรอบการหมุนของมอเตอร์



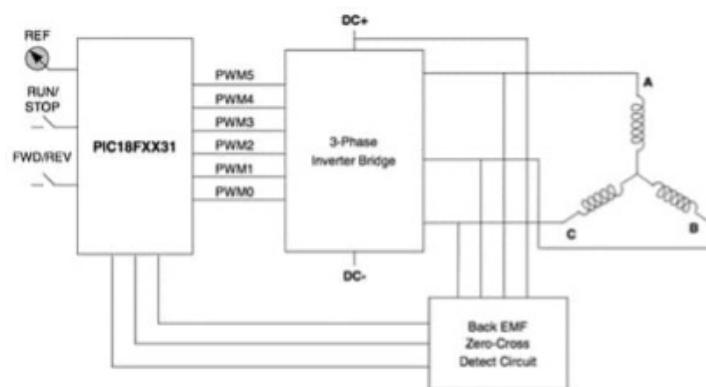
รูปที่ 42 Six-step Commutation

3.6.2 Sensorless Control และ Sensor-based Control

Sensorless Control และ Sensor-based Control เป็นสองวิธีการควบคุม BLDC ซึ่งมีข้อดีและข้อจำกัดต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับความต้องการและลักษณะการใช้งานของมอเตอร์

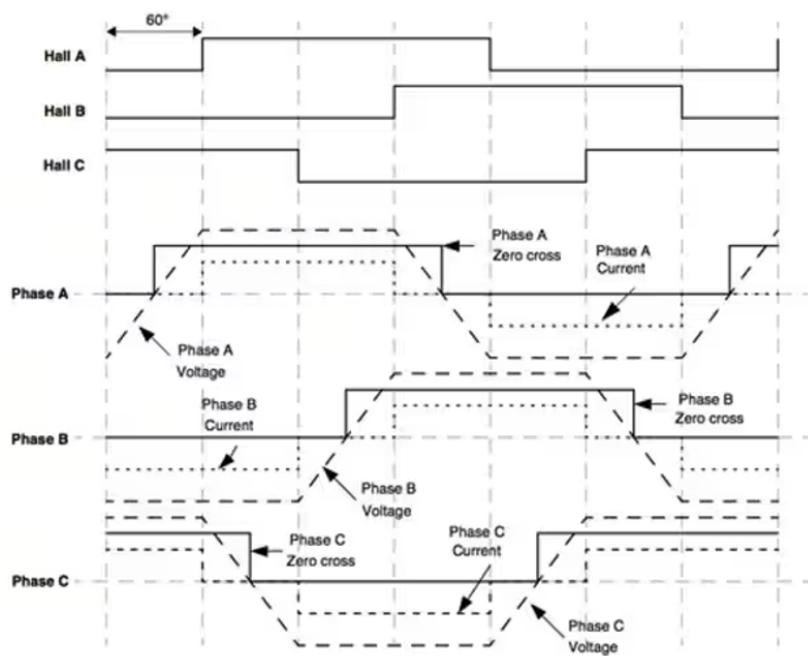
3.6.2.1 Sensorless Control

การควบคุมแบบนี้ไม่ใช้เซนเซอร์ใด ๆ เพื่อตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ แต่ใช้การตรวจสอบแรงดันกลับ (Back EMF - Electromotive Force) ที่เกิดขึ้นในชุดลวดของมอเตอร์ขณะทำงาน โดยตัวควบคุมจะคำนวณตำแหน่งของโรเตอร์โดยวัดแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นและประเมินลำดับการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังชุดลวด



รูปที่ 43 Control circuit for sensorless

ซึ่ง Back EMF จะเปลี่ยนแปลงในรูปแบบคลื่นทรงสี่เหลี่ยมคงที่ (Trapezoidal Waveform)



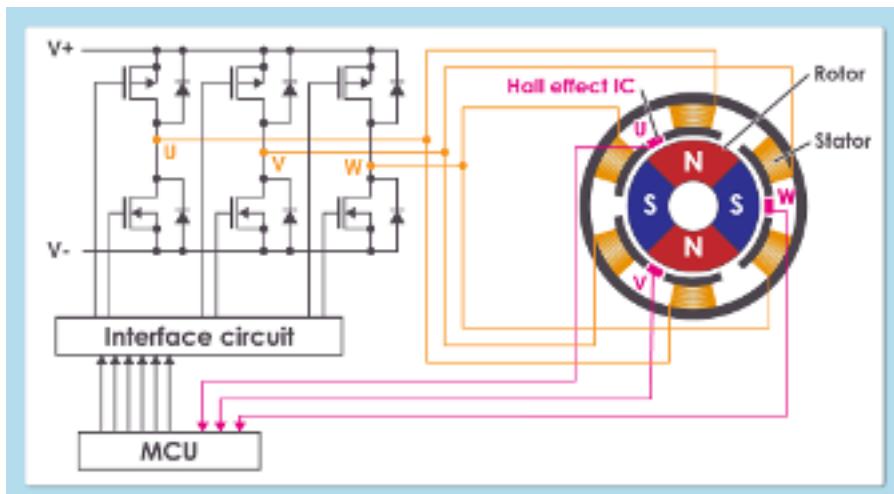
รูปที่ 44 Trapezoidal Waveform

สำหรับมอเตอร์แบบรีเซนเซอร์ ระบบจะตรวจจับจุดที่ Back EMF ตัดผ่านศูนย์ (Zero-Crossing Point) ในขดลวดทั้งสามเฟส และใช้ข้อมูลนี้กำหนดลำดับการจ่ายพลังงานไปยังขดลวด แต่เนื่องจากจุด Zero-Crossing ของ Back EMF ในมอเตอร์รีเซนเซอร์มีระยะห่างทางเฟส 30 องศา เมื่อเทียบกับจุดที่ Hall Sensor เปลี่ยนสถานะในมอเตอร์แบบมีเซนเซอร์ จึงต้องมีการหน่วงเวลา 30 องศา หลังจากตรวจจับจุด Zero-Crossing เพื่อให้การจ่ายพลังงานเกิดขึ้นในจังหวะที่เหมาะสม หรือเมื่อระบบตรวจจับว่า Back EMF ในขดลวดเฟสหนึ่งตัดผ่านศูนย์ (Zero-Crossing Point) ระบบจะรอเวลาสั้น ๆ (ประมาณ 30 องศาของการหมุน) ก่อนที่จะจ่ายพลังงานไปยังขดลวดถัดไป เพื่อให้มอเตอร์หมุนได้อย่างราบรื่นและมีประสิทธิภาพ

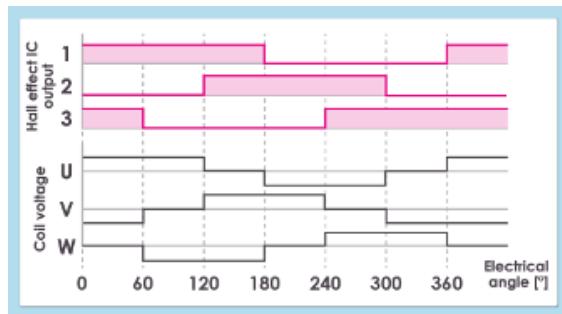
3.6.2.2 Sensor-based Control

ใช้เซนเซอร์ เช่น Hall Sensor หรือ Encoders เพื่อตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์แบบเรียลไทม์ ตัวควบคุมจะรับข้อมูลตำแหน่งจากเซนเซอร์และจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังขดลวดของมอเตอร์ในลำดับที่เหมาะสม ซึ่งสามารถตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ได้อย่างแม่นยำในทุกช่วงความเร็ว

สำหรับการใช้ Hall Sensor จะทำงานโดยตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กถาวรบนโรเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนแปลงไป Hall Sensor จะสร้างสัญญาณไฟฟ้าเพื่อบอกตำแหน่งปัจจุบันของโรเตอร์ ซึ่งใน BLDC แบบสามเฟส เซนเซอร์ Hall Sensor จะถูกติดตั้งในตำแหน่งที่มีระยะห่างกันทางมุมไฟฟ้า 120° รอบตัวมอเตอร์



รูปที่ 45 Control circuit for Hall Sensor



รูปที่ 46 สัญญาณจาก Hall Sensor

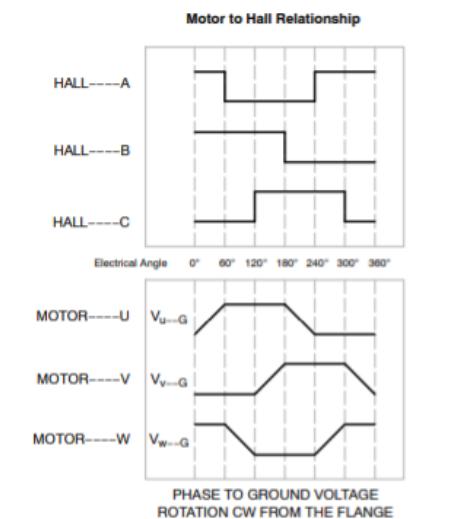
เมื่อโรเตอร์หมุนไป 60° สัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์ทั้งสามจะเปลี่ยนแปลงไป และการเปลี่ยนแปลงนี้จะส่งผลต่อการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังขดลวดในแต่ละเฟส (U, V, W) โดยในแต่ละเฟส จะมีการจ่ายพลังงานให้โรเตอร์หมุนไป 120° เพื่อสร้างขั้วแม่เหล็ก S และ N เมื่อมีการดึงดูดและผลักกันระหว่างแม่เหล็กของโรเตอร์และขดลวด จะทำให้โรเตอร์หมุนไปตามลำดับ การควบคุมการหมุนจึงทำได้โดยการจ่ายพลังงานให้กับขดลวดตามจังหวะเวลาของสัญญาณที่ได้จาก Hall Sensor

3.6.3 BLDC Motor Control Techniques

เทคนิคการควบคุม BLDC มีหลายวิธีการ ซึ่งสองวิธีหลัก ๆ คือ Trapezoidal Control และ Field Oriented Control (FOC) โดยทั้งสองวิธีนี้มีลักษณะการควบคุมที่แตกต่างกันในการจัดการกับสนามแม่เหล็กและการหมุนของมอเตอร์

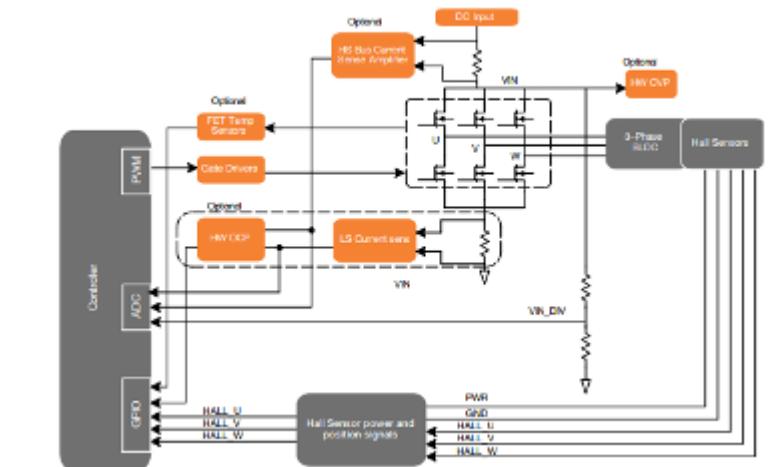
3.6.3.1 Trapezoidal Control

Trapezoidal Control เป็นวิธีที่ใช้ใน BLDC มักใช้ในมอเตอร์ที่มีการควบคุมแบบง่าย ๆ และไม่ซับซ้อน โดยการสร้างสนามแม่เหล็กที่มีลักษณะเป็น Trapezoidal Waveform ในแต่ละเฟสของมอเตอร์



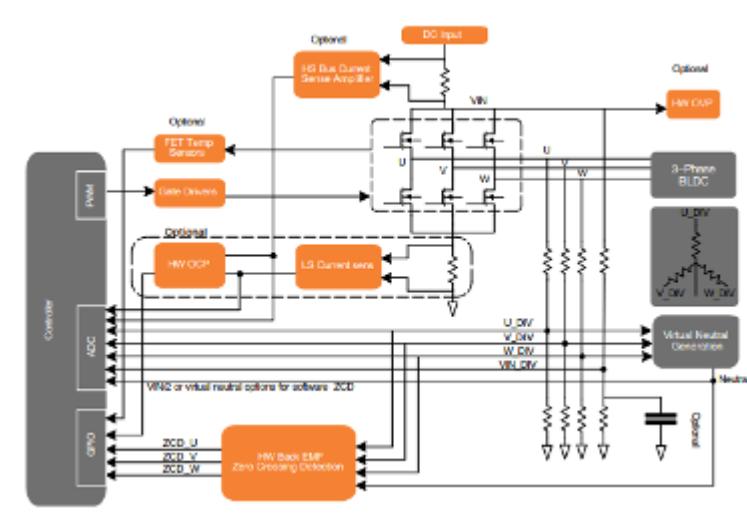
รูปที่ 47 Trapezoidal Control Waveform

การควบคุมนี้จะใช้สัญญาณจาก Hall Sensor เพื่อตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์และเปลี่ยนแปลงกระแสในชุดลวดตามลำดับที่กำหนด โดยกระแสจะถูกจ่ายไปยังชุดลวดในลำดับที่เหมาะสมตามตำแหน่งของโรเตอร์ เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กทรายโดยตลอด ซึ่งควบคุมง่ายและประหยัดค่าใช้จ่าย เหมาะกับการใช้งานที่ไม่ต้องการความซับซ้อนสูง แต่ประสิทธิภาพไม่สูงเท่ากับวิธีอื่น ๆ เพราะสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นไม่ร้าบปริ่นและอาจมีการสั่นสะเทือน



รูปที่ 48 Sensed Trapezoidal Control System Diagram

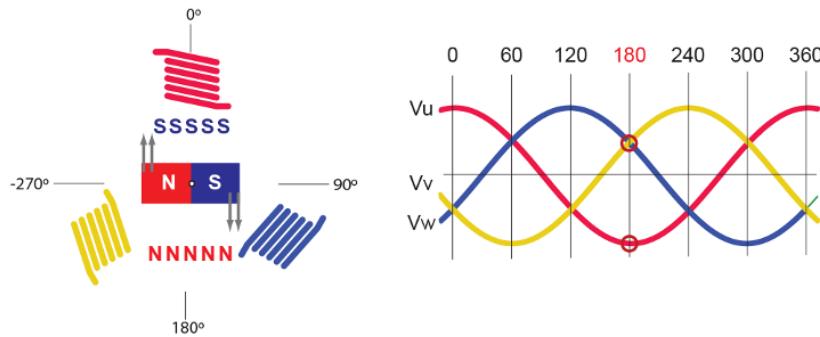
และสามารถใช้ Back EMF ที่เกิดจากการหมุนของโรเตอร์เพื่อช่วยในการจ่ายพลังงานให้กับชุดลวดในแต่ละเฟสตามตำแหน่งของโรเตอร์ โดย Back EMF จะมีลักษณะเป็น Trapezoidal Waveform ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปในทุก ๆ การหมุนของโรเตอร์



รูปที่ 49 Sensorless Trapezoidal Control System Diagram

3.6.3.2 Field Oriented Control (FOC)

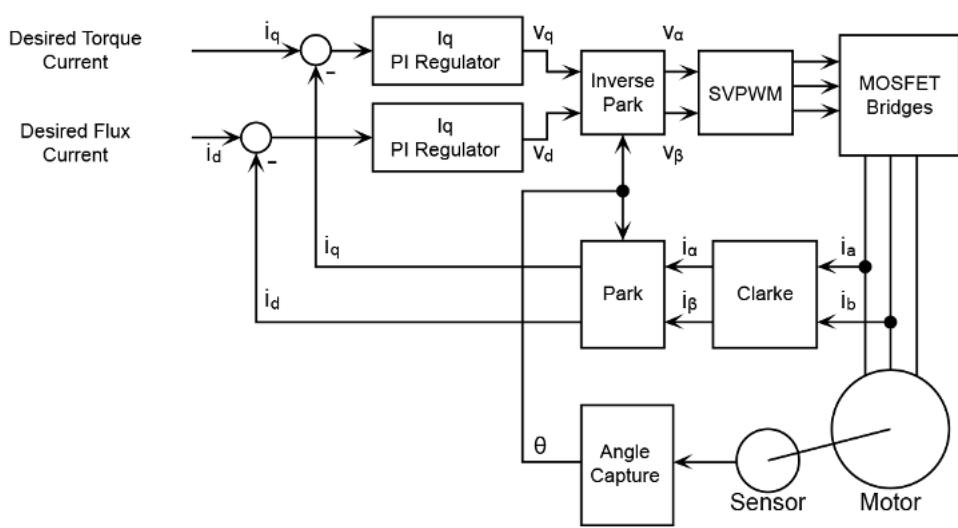
FOC เป็นวิธีการควบคุมที่ซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งใช้การแยกการควบคุมของกระแสในแกนแม่เหล็ก (d-axis) และแกนที่ตั้งฉากกับมัน (q-axis) เพื่อให้มอเตอร์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยวิธีนี้จะสร้างสนามแม่เหล็กที่رابรื่นและสามารถควบคุมแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์ได้อย่างแม่นยำ



รูปที่ 50 FOC Waveform

ซึ่งกระแสไฟฟ้าจะถูกจ่ายให้กับทั้งสามชุด漉อดอย่างต่อเนื่องในรูปแบบ Sinusoidal โดยแต่ละชุด漉อดจะมีการชาร์จไฟที่ห่างกัน 120 องศา ซึ่งจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเนื่องและให้ที่หมุนในมอเตอร์ เมื่อมีแม่เหล็กถูกติดตั้งบนโรเตอร์รายในมอเตอร์ ข้าวเหนือและเดียวของแม่เหล็กจะถูกดึงดูดไปยังข้าวใต้และข้าวเหนือของสนามแม่เหล็กที่หมุน การหมุนของสนามแม่เหล็กนี้จะดึงให้โรเตอร์หมุนตาม

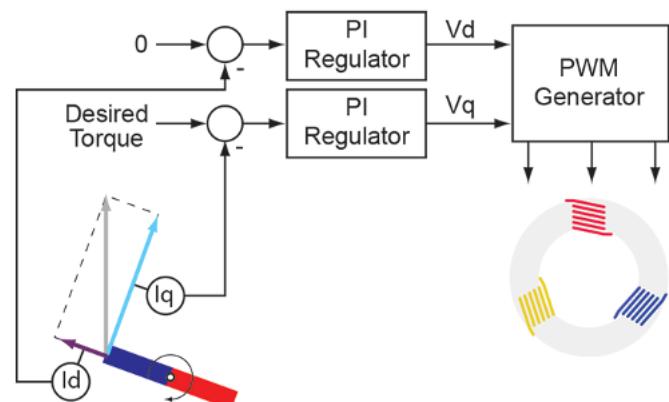
การสร้างแรงบิดสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อแม่เหล็กของโรเตอร์ห่างจากสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์ 90 องศา หากแม่เหล็กของโรเตอร์ตรงกับสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์ (ตรงข้ามกัน) จะทำให้เกิดแรงดึงที่แรงมาก แต่จะไม่สามารถสร้างแรงบิดหรือการหมุนได้ ดังนั้นเพื่อให้มอเตอร์หมุนได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ต้องรู้ตำแหน่งของโรเตอร์ในเวลาจริง จากนั้นจะต้องจ่ายพลังงานให้กับชุด漉อด U, V และ W ให้สนามแม่เหล็กในสเตเตอร์ห่างจากโรเตอร์ 90 องศา



รูปที่ 51 FOC Diagram 1

เนื่องจากสนามแม่เหล็กเกิดจากกระแสไฟฟ้าในชุดลวด กระแสไฟฟ้าจึงสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ กระแสที่ทำให้เกิดแรงดึงในทิศทางตั้งฉาก (เรียกว่า กระแสแรงบิดหรือ Torque current) และกระแสที่ทำให้เกิดแรงดึงในทิศทางของกอกมอเตอร์ (เรียกว่า กระแสเฟลักซ์หรือ Flux current) การควบคุมสนามแม่เหล็กเชิงพื้นที่ (Field Oriented Control - FOC) คือการวัดสองส่วนนี้และปรับการส่งกระแสไฟฟ้าให้กระแสเฟลักซ์ (Direct current) เป็นศูนย์ เพื่อให้มีกระแสแรงบิด (Torque current) เหลืออยู่

ในระบบการนี้ กระแสที่วัดได้จากข้อมูลมอเตอร์เป็นกระแสสลับ (AC) ขณะที่ในสเตเตอเร็จเป็นสนามแม่เหล็กหมุนแบบ 3 เพส ซึ่งทำให้ที่โรเตอร์จะเห็นแรงที่คงที่อยู่ตลอดเวลา บล็อก Clarke & Park จะทำการคำนวณทางคณิตศาสตร์และใช้ข้อมูลนี้ในการแยกกระแสออกเป็นส่วนที่เกี่ยวข้องกับแรงบิด (I_q) และกระแสที่เกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็ก (I_d) ซึ่งจะทำให้กระแสทั้งสองนี้เป็นค่าคงที่ที่ประมวลผลได้ง่ายขึ้น



รูปที่ 52 FOC Diagram 2

จากนั้นจะมีตัวควบคุมแบบ Proportional-Integral (PI) ส่งตัวที่ทำงานเพื่อควบคุมเพสและแรงดันที่ส่งไปยังชุดลวดให้ได้กระแสที่ต้องการ ทั้งกระแส Quadrature (I_q) และ Direct (I_d) โดยปกติแล้วจะตั้งให้กระแส Direct เป็นศูนย์ และตัวควบคุมจะทำงานเพื่อกำจัดกระแส Direct ออกไปให้หมด

ในแผนภาพที่แสดง กระแส Direct และ Quadrature จะถูกวัดจากมุมมองของโรเตอร์ ตัวควบคุม PI จะปรับการทำงานของ PWM เพื่อทำให้กระแส Direct หายไปและเพื่อให้ได้กระแสแรงบิด (Torque current) ที่ต้องการ

3.6.4 ความแตกต่างของการควบคุม Six-Step Control และ FOC

3.6.4.1 Six-Step Control

การควบคุมแบบ Six-Step Control (หรือที่เรียกว่า Trapezoidal Control) ใช้แนวทางที่ค่อนข้างตรงไปตรงมา โดยการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าในชุดลวดทั้งสามเฟส (U, V, W) จะทำในลำดับที่ติดตัวและมีการสลับไฟในช่วง 60 องศาของการหมุนโรเตอร์ ซึ่งกระแสที่ถูกจ่ายให้แต่ละชุดลวดจะทำให้เกิดการหมุนของโรเตอร์ในรูปแบบที่ค่อนข้างหยาบ (เหมือนรูปทรงปีกผีเสื้อหรือ Trapezoidal Waveform) โดยการเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นในลำดับที่เป็นมุ่งมองเดียว (fixed pattern) ของเฟสทั้งสาม

3.6.4.2 FOC

FOC หรือ Vector Control เป็นการควบคุมที่ซับซ้อนและมีประสิทธิภาพสูงกว่าในเรื่องของการจัดการกับการหมุนของมอเตอร์ BLDC ใน FOC กระแสจะถูกแยกออกเป็น Torque current (I_q) และ Flux current (I_d) ซึ่งจะถูกควบคุมแยกกันในช่วงเวลาที่แตกต่างกันโดยใช้ Space Vector Modulation (SVM) เพื่อให้การควบคุมแรงบิดและสนามแม่เหล็กในมอเตอร์มีความละเอียดและแม่นยำสูงขึ้น

3.6.4.3 การใช้ Space Vector Modulation (SVM)

SVM เป็นเทคนิคที่ใช้ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าในระบบสามเฟสโดยการแปลงข้อมูลแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสในมอเตอร์ให้กลายเป็นเวกเตอร์ในเชิงพื้นที่ (Space Vector) ซึ่งจะช่วยในการคำนวณช่วงของการควบคุมที่ต้องการ

ใน SVM, Vector ของกระแส (หรือแรงดันไฟฟ้า) จะถูกแสดงในรูปของเวกเตอร์ในระบบพิกัดสองมิติ ซึ่งจะมีการหมุนไปรอบๆ จุดศูนย์กลาง (ที่มักจะเป็นจุดที่แรงดันหรือกระแสเป็นศูนย์) จากนั้นจะมีการใช้มุมและขนาดของเวกเตอร์ที่คำนวณมาเพื่อเลือกเฟสที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละช่วงเวลาของการหมุนโรเตอร์

คุณสมบัติ	Six-Step Control	FOC
การเปลี่ยนเฟส	เกิดขึ้นในช่วงเวลา 60 องศาแบบต้ายตัว	ถูกควบคุมด้วย SVM
การจัดการ Vector	กระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสจะเปลี่ยนแปลงตามลำดับที่กำหนด ซึ่งไม่มีการแยกแยะและควบคุมโดยตรงที่มุ่งของโรเตอร์	SVM จะใช้การแปลงเวกเตอร์ที่มีมุ่งที่กำหนดเพื่อควบคุมกระแสและแรงบิดโดยการแยก Torque current และ Flux current ทำให้สามารถจัดการกับมุ่งและช่วงการหมุนได้อย่างแม่นยำ
การควบคุมแรงบิด	แรงบิดไม่สามารถควบคุมได้อย่างแม่นยำและราบรื่น	แรงบิดจะถูกควบคุมอย่างละเอียดและแม่นยำ โดยการแยกกระแสที่มีผลต่อแรงบิดและการหมุน ทำให้การหมุนมีความนุ่มนวลและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

ตารางที่ 1 ความแตกต่างระหว่าง Six-Step Control และ FOC ด้วย SVM

3.6.5 ความแตกต่างระหว่าง Trapezoidal และ Sinusoidal

3.6.5.1 Trapezoidal

กระแสที่จ่ายให้กับขดลวดในแต่ละเฟสจะเป็น รูปทรงลิมหรือสี่เหลี่ยมคงที่ (Trapezoidal waveform) ซึ่งเป็นรูปทรงที่มีความยาวด้านข้างตรงและค่อย ๆ ลดลงหรือเพิ่มขึ้น รูปทรงนี้จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กในสเตเตอเรอร์ที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงเป็นลิมในช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งการหมุนของโรเตอร์จะไม่رابลีนเท่ากับรูปแบบของกระแสแบบ Sinusoidal โดยการควบคุมนี้ง่ายและมีต้นทุนต่ำ แต่ความนุ่มนวลในการหมุนมอเตอร์ต่ำและอาจมีการสั่นสะเทือนในบางช่วง

การควบคุมแรงบิดในระบบนี้จะไม่رابลีนเท่า Sinusoidal เพราะการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าในเฟสต่างๆ ไม่มีความนุ่มนวล แรงบิดที่ได้จะมีการกระตุกหรือมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ต่อเนื่อง ซึ่งอาจทำให้ประสิทธิภาพลดลงในบางสถานการณ์

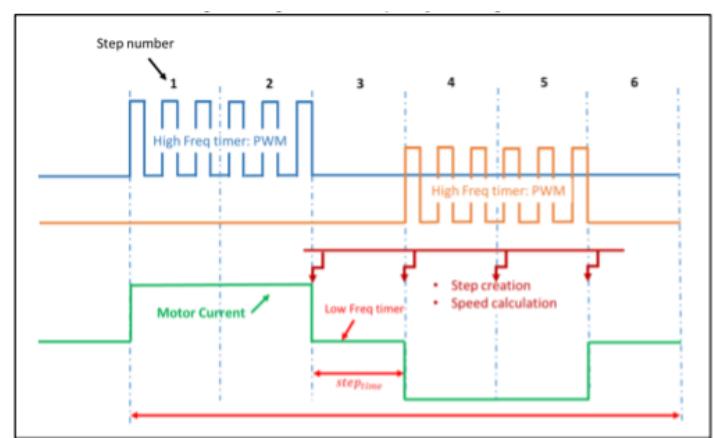
3.6.5.2 Sinusoidal

กระแสที่จ่ายให้กับขดลวดในแต่ละเฟสจะเป็น รูปคลื่นไอน์ (Sinusoidal waveform) ซึ่งเป็นการจ่ายกระแสที่เปลี่ยนแปลงอย่างนุ่มนวลและมีการสลับเฟสที่ต่อเนื่อง กระแสที่เป็นรูปคลื่นไอน์จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่หมุนได้อย่างราบลีน ซึ่งช่วยให้การหมุนของมอเตอร์เป็นไปอย่างราบรื่น ไม่มีการกระตุกหรือสั่นสะเทือนมาก

การควบคุมแรงบิดในรูปแบบนี้จะให้แรงบิดที่ต่อเนื่องและราบลื่นกว่ามาก เนื่องจากกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดมีความนุ่มนวล แรงบิดจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอและไม่เกิดการกระตุก ทำให้มีประสิทธิภาพสูงในการขับเคลื่อนมอเตอร์

3.6.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Six-Step Control และ PWM

PWM สามารถนำมาใช้ร่วมกับ Six-Step Control เพื่อควบคุมพลังงานที่จ่ายให้กับแต่ละเฟสของมอเตอร์ได้ ในกรณีของ Six-Step Control การสลับกระแสไฟฟ้าแบบ 6 ขั้นตอนจะทำให้กระแสผ่านขดลวดในแต่ละเฟสในช่วง 120° โดยที่สามารถปรับความกว้างของ pulse (PWM) ในแต่ละเฟสเพื่อควบคุมระดับกระแสได้ การใช้ PWM จะช่วยให้การควบคุมกระแสในแต่ละเฟสมีความละเอียดและสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความต้องการ เช่น การปรับความเร็วของมอเตอร์หรือแรงบิดที่มอเตอร์ต้องการ



รูปที่ 53 การปรับ PWM ใน Six-Step Control

3.6.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง PWM และ Frequency Output (Back EMF และ Hall Sensor)

3.6.7.1 Back EMF

เมื่อ PWM เพิ่มขึ้น จะทำให้มอเตอร์หมุนเร็วขึ้น เพราะมีการจ่ายกระแสไฟฟ้ามากขึ้น ซึ่งความถี่ของ Back EMF จะสัมพันธ์กับความเร็วของมอเตอร์ โดยความถี่ที่สูงขึ้นแสดงถึงความเร็วที่มากขึ้น ซึ่งเมื่อมอเตอร์หมุนไปข้างหน้าและสร้าง Back EMF ค่าของ Back EMF จะส่งผลต่อกระแสที่ไหลผ่านมอเตอร์ เพื่อให้มอเตอร์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ PWM จะต้องถูกปรับค่าตาม Back EMF ที่เกิดขึ้น โดยการปรับค่า Duty Cycle ของ PWM เพื่อให้การจ่ายพลังงานเข้ากับมอเตอร์ได้อย่างเหมาะสม หาก Back EMF มากเกินไป (ในกรณีที่มอเตอร์หมุนเร็ว) จะมีผลต่อกระแสไฟฟ้าและอาจทำให้มอเตอร์หยุดหมุนหรือมีการทำงานที่ไม่ราบรื่นได้ ดังนั้น PWM จึงมีบทบาทในการปรับค่าเพื่อคงความเหมาะสมของกระแสไฟฟ้า

3.6.7.2 Hall Sensor

เมื่อ PWM เพิ่มขึ้น สัญญาณจาก Hall Sensor จะมีความถี่ที่สูงขึ้น เพราะโรเตอร์หมุนเร็วขึ้น เนื่องจากการหมุนของโรเตอร์จะทำให้สนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละช่วงเวลา และสัญญาณที่ส่งออกจาก Hall Sensor จะมีความถี่ตรงกับจำนวนรอบที่โรเตอร์หมุนในแต่ละวินาที โดยความถี่ของสัญญาณจาก Hall Sensor จะใช้ในการควบคุมการหมุนของมอเตอร์ผ่านการปรับค่าของ PWM เพื่อให้มอเตอร์หมุนที่ความเร็วที่ต้องการ โดยที่การควบคุมความเร็วจะขึ้นอยู่กับจำนวนพลั๊สที่ Hall Sensor ส่งออกมา ในขณะที่การควบคุมทิศทางจะถูกกำหนดโดยการจัดเรียงสัญญาณ PWM ที่จ่ายไปยังชุดลวด

3.6.8 ความแตกต่างระหว่าง Feedback จาก Back EMF และ Hall Sensor

ในมอเตอร์ Brushless DC (BLDC) การควบคุมการหมุนของโรเตอร์สามารถทำได้ผ่าน Feedback จากแหล่งข้อมูลต่าง ๆ ที่จะบอกตำแหน่งและความเร็วของโรเตอร์ Back EMF และ Hall Sensor เป็นสองแหล่งข้อมูลที่ใช้ในระบบควบคุมมอเตอร์ BLDC แต่มีลักษณะการทำงานและการใช้งานที่แตกต่างกัน ดังนี้

คุณสมบัติ	Back EMF	Hall Sensor
ข้อมูลที่ได้รับ	ความเร็วและการหมุนของโรเตอร์	ตำแหน่งของโรเตอร์
การทำงานที่ความเร็วต่ำ	ใช้งานไม่ได้ดีในความเร็วต่ำ	ทำงานได้ดีในทุกความเร็ว
การใช้งานในระบบ	ใช้ในระบบ Sensorless Control	ใช้ในระบบ Sensor-based Control
ข้อดี	ไม่ต้องใช้เซ็นเซอร์ภายนอก, ค่าใช้จ่ายต่ำ	แม่นยำ, ใช้ได้ดีในทุกช่วงความเร็ว
ข้อจำกัด	ใช้งานได้ยากในช่วงความเร็วต่ำ	ต้องการการติดตั้งเพิ่มเติมและแหล่งจ่ายไฟพิเศษ
การตรวจจับตำแหน่ง	ไม่สามารถตรวจจับตำแหน่งได้โดยตรง	ตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ได้แม่นยำ

ตารางที่ 2 ความแตกต่างระหว่าง Feedback จาก Back EMF และ Hall Sensor

3.6.9 การจัดการกับ Feedback ของ Sensorless Control เพื่อหาตำแหน่งเทียบกับ Feedback ของ Sensor-based Control บน ESC และ MCU

การจัดการกับ Feedback ของ Sensorless Control และ Sensor-based Control ในการหาตำแหน่งของโรเตอร์บน ESC และ MCU มีความแตกต่างกันในลักษณะการทำงานและการใช้เทคโนโลยีต่างๆ เช่น Op-Amp และ Zero Crossing โดยทั้งสองวิธีนี้มีบทบาทสำคัญในการช่วยให้ระบบสามารถคำนวณและควบคุมตำแหน่งของโรเตอร์ได้อย่างแม่นยำ

3.6.9.1 Op-Amp

Op-Amp (Operational Amplifier) เป็นวงจรที่ใช้ในการขยายสัญญาณที่อ่อนแอ และมีบทบาทสำคัญในการจัดการกับ Feedback จาก Back EMF หรือ Hall Sensor เพื่อช่วยให้ MCU สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ใน Sensorless Control การใช้ Op-Amp จะช่วยในการขยายสัญญาณ Back EMF เพื่อให้สามารถตรวจจับการข้ามศูนย์ (Zero Crossing) ได้ชัดเจน ทำให้ MCU สามารถประมวลผลได้อย่างแม่นยำ

ใน Sensor-based Control Op-Amp จะใช้ในการขยายสัญญาณจาก Hall Sensor เพื่อให้สัญญาณสามารถส่งไปยัง MCU ได้อย่างแม่นยำ

3.6.9.2 Zero Crossing

ใน Sensorless Control จะใช้ Zero Crossing ที่เกิดจาก Back EMF ของมอเตอร์เพื่อคำนวณตำแหน่งของโรเตอร์ เนื่องจากในระบบนี้ไม่มีเซ็นเซอร์ภายนอก เช่น Hall Sensor การตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์จึงเกิดจากการตรวจสอบการข้ามศูนย์ของ Back EMF ในแต่ละเฟสของมอเตอร์

Zero Crossing คือจุดที่ Back EMF ของมอเตอร์เปลี่ยนจากบวกเป็นลบ หรือจากลบเป็นบวก เมื่อ Back EMF ข้ามจุดศูนย์ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่สามารถใช้ในการคำนวณตำแหน่งของโรเตอร์ โดยในแต่ละรอบการหมุนของโรเตอร์ จะมีจุด Zero Crossing สำหรับแต่ละเฟส ซึ่งจะช่วยให้ ESC และ MCU สามารถกำหนดช่วงเวลาที่เหมาะสมในการกระตุ้นกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟส

โดย MCU จะใช้ข้อมูลจาก Zero Crossing เพื่อตรวจสอบตำแหน่งของโรเตอร์และคำนวณการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟส

ESC จะควบคุมกระแสไฟฟ้าให้หมุนโรเตอร์ไปในทิศทางที่ต้องการ โดยอ้างอิงจากข้อมูลที่ได้รับจาก Zero Crossing

3.7 วิธีดำเนินการทดลอง

จากการทดลองเพื่อศึกษาคุณลักษณะของ BLDC และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณ Back EMF ต่อพฤติกรรมการทำงานของ BLDC จึงทำการเก็บข้อมูลความถี่ของสัญญาณ Back EMF ที่เกิดจากการหมุนของ BLDC ด้วยการควบคุมผ่านโปรแกรม Motor Control WorkBench โดยความเร็วเชิงมุมที่ใช้ในการเก็บข้อมูลคือ -9864 rpm, -7500 rpm, -5000 rpm, 5000 rpm, 7500 rpm และ 9864 rpm แล้วนำความถี่ของสัญญาณ Back EMF ที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อหาอัตราเร็วเชิงมุมที่ได้จาก BLDC และนำข้อมูลมาวิเคราะห์หาความคลาดเคลื่อนจากอัตราเร็วเชิงมุมที่ต้องการ

3.8 วัสดุอุปกรณ์

3.8.1 BLDC Motor จำนวน 1 อัน

3.8.2 STMICROELECTRONICS X-NUCLEO-IHM08M1 จำนวน 1 อัน

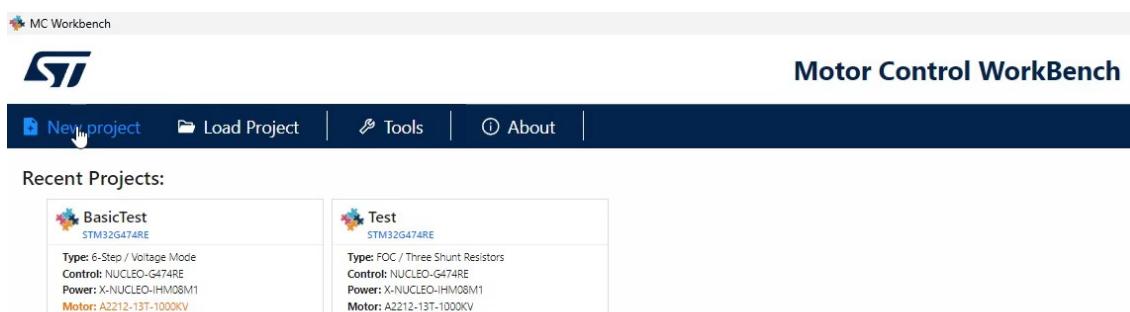
3.8.3 Nucleo STM32G474RE พร้อมสายอัปโหลด จำนวน 1 ชุด

3.8.4 BLDCXplorer จำนวน 1 ชุด - ฐานสามารถบรรจุบอร์ดควบคุม, Breadboard, 3D-Print ใช้สำหรับการประกอบกับ BLDC Motor

3.9 ขั้นตอนการดำเนินงาน

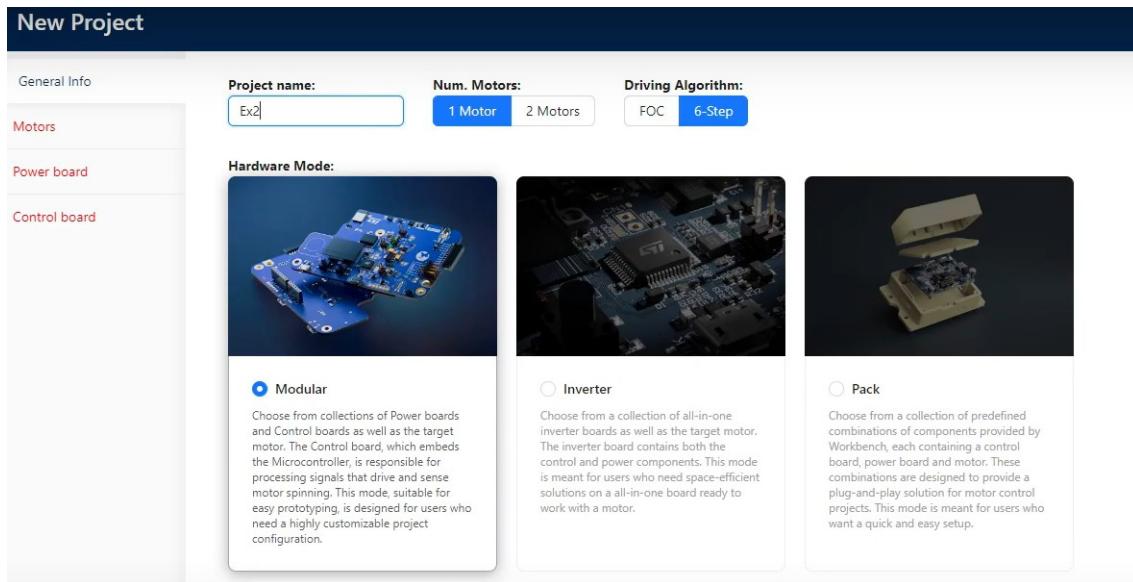
3.9.1 ตั้งค่าโปรแกรม Motor Control WorkBench เพื่อใช้ในการควบคุม BLDC

3.9.1.1 สร้างโปรเจคใหม่ในโปรแกรม Motor Control WorkBench ด้วยการกดปุ่ม New Project เมื่อเปิดโปรแกรม



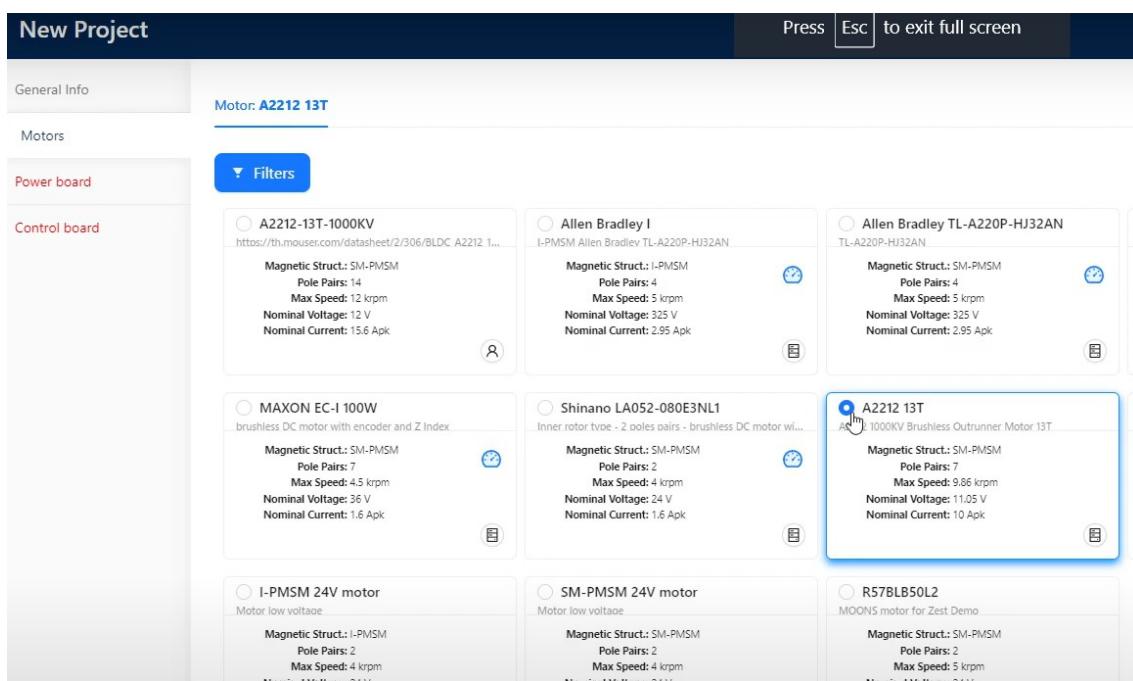
รูปที่ 54 การสร้างโปรเจคใหม่ในโปรแกรม Motor Control WorkBench

3.9.1.2 ตั้งชื่อไฟล์โครงการ เลือก Num. Motor เป็น 1 Motor จากนั้นเลือก Driving Algorithm เป็น 6-Step และ Hardware Mode เป็น Modular



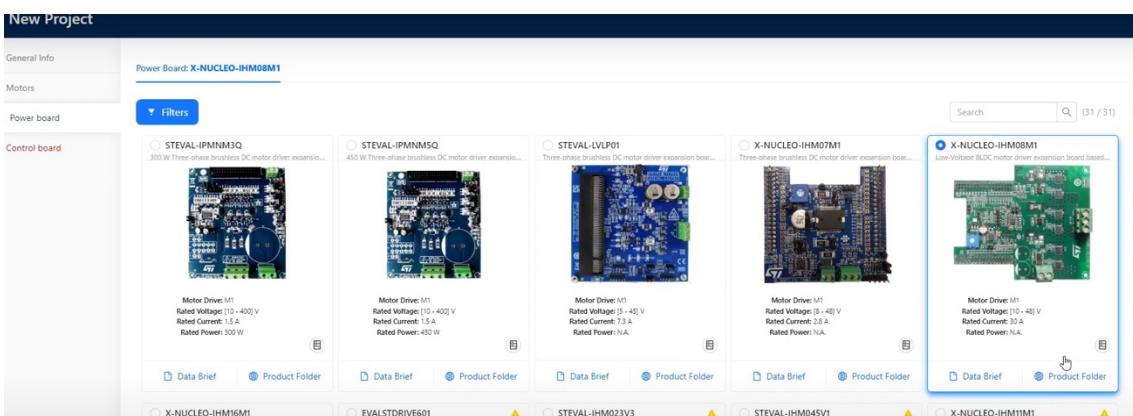
รูปที่ 55 การตั้งค่าในหน้า General Info ภายใต้โปรแกรม Motor Control WorkBench

3.9.1.3 ไปที่หน้า Motors เพื่อเลือกประเภทของมอเตอร์โดยเลือกเป็น A2212/13T



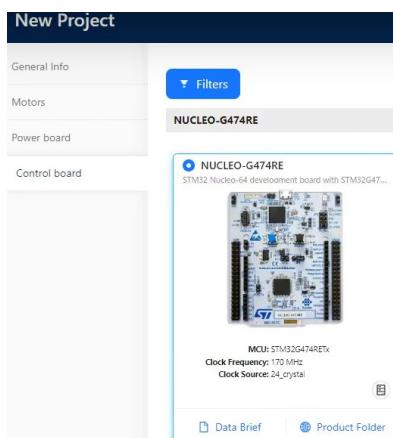
รูปที่ 56 การเลือกประเภทของมอเตอร์ภายใต้โปรแกรม Motor Control WorkBench

3.9.1.4 ไปที่หน้า Power board และเลือก X-NUCLEO-IHM08M1



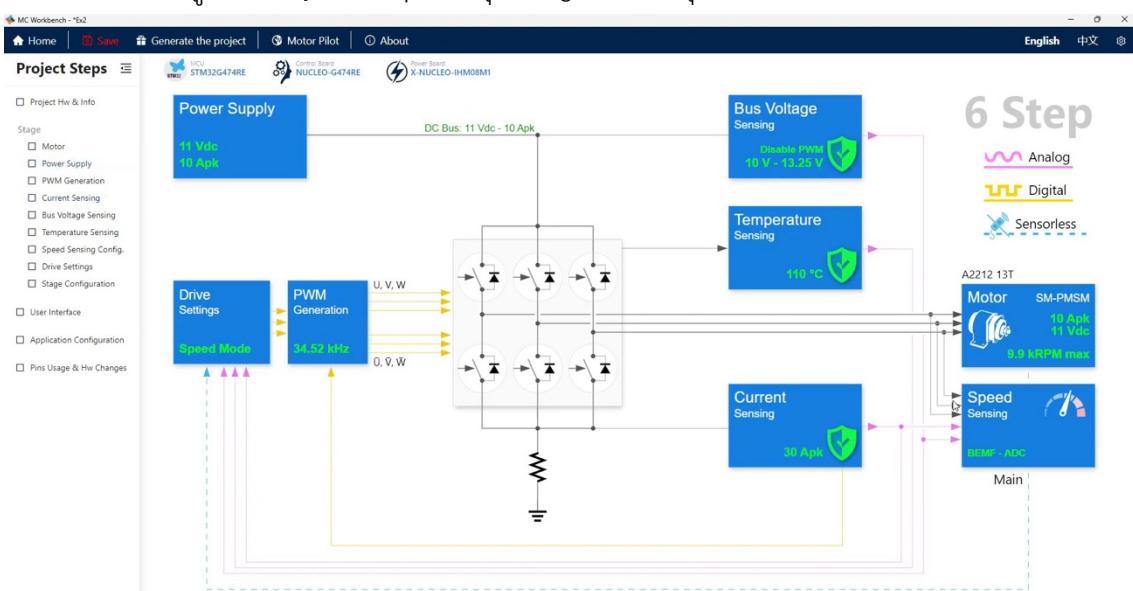
รูปที่ 57 การเลือกประเภทของ Power board ภายใต้โปรแกรม Motor Control WorkBench

3.9.1.5 ไปที่หน้า Control board และเลือก NUCLEO-G474RE และกดปุ่ม OK



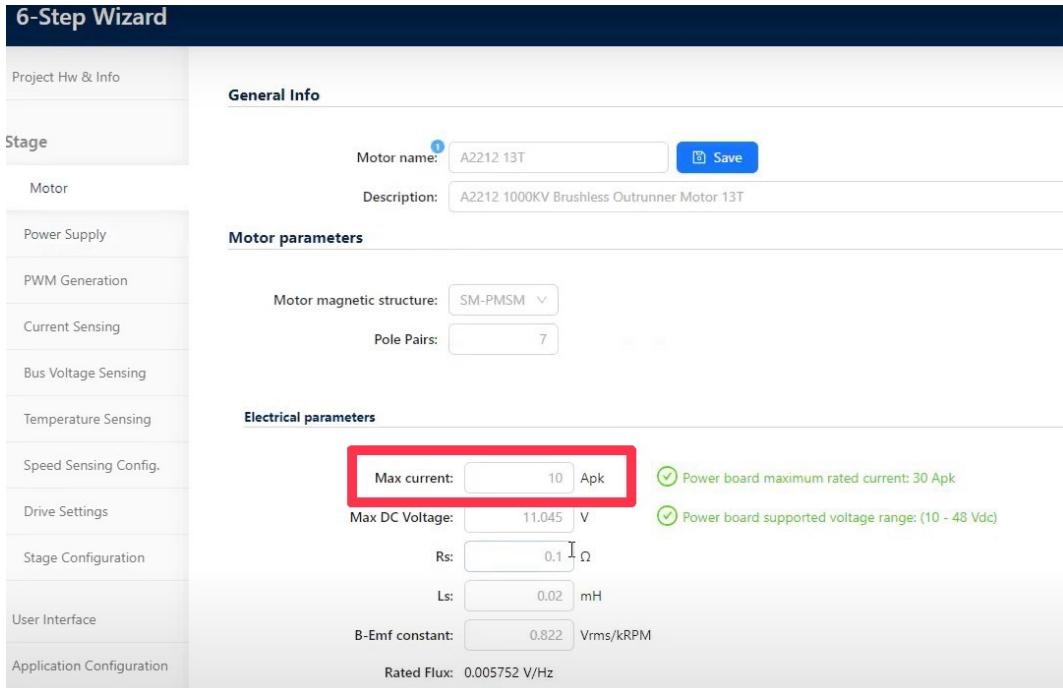
รูปที่ 58 การเลือกประเภทของ Control board ภายใต้โปรแกรม Motor Control WorkBench

3.9.1.6 เมื่อเข้าสู่หน้า Project Steps กดปุ่ม Stage แล้วกดปุ่ม Motor



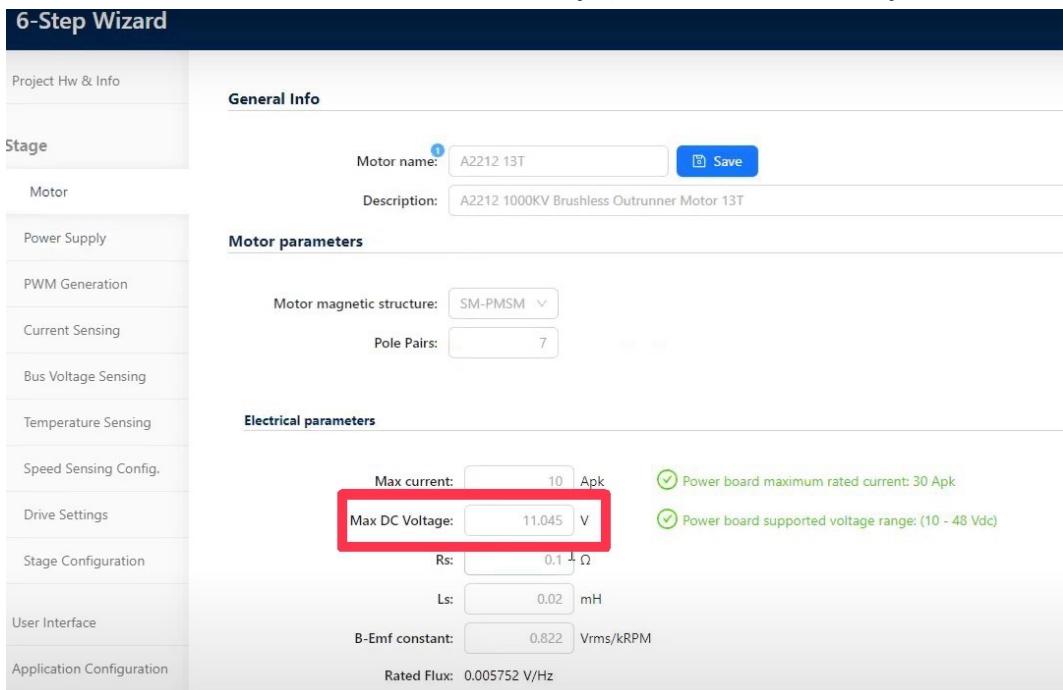
รูปที่ 59 หน้า Project Steps ภายใต้โปรแกรม Motor Control WorkBench

3.9.1.7 ไปที่ Electrical parameters และตั้งค่า Max Current เป็น 13 Apk เนื่องจาก Datasheet ของ A2212/12T กำหนดว่าสามารถรับกระแสสูงสุดได้ 13A



รูปที่ 60 การตั้งค่า Max current ของ Motor ในหน้า 6-Step Wizard ภายในโปรแกรม Motor Control WorkBench

3.9.1.8 ตั้งค่า Max DC Voltage อยู่ที่ 12V เนื่องจาก Datasheet ของ A2212/13T กำหนดว่าสามารถรับความต่างศักย์ไฟฟ้าของ 10 NiCd ได้ ซึ่งโดยทั่วไป 1 cell ของ NiCd มีความต่างศักย์อยู่ที่ 1.2V ดังนั้น A2212/13T สามารถรับความต่างศักย์สูงสุดที่ยังสามารถใช้งานได้อยู่ที่ $1.2 \times 10 = 12V$



รูปที่ 61 การตั้งค่า Max DC Voltage ของ Motor ในหน้า 6-Step Wizard ภายในโปรแกรม Motor Control WorkBench

3.9.1.9 กดไปที่ Power Supply และตั้งค่าให้สอดคล้องกับที่ตั้งค่าใน Motor นั่นคือ Max. application Current ที่ 13A และ Bus Voltage ที่ 12V

6-Step Wizard

Project Hw & Info

Provide here below the Max Current and the Bus Voltage levels that will be used by this application.
Please note that these values have to be provided by your Power Supply and they have to be compatible

Stage

Motor

Power Supply

PWM Generation

Current Sensing

Bus Voltage Sensing

Temperature Sensing

Power board Info:

- Maximum rated current: 30 Apk
- Supported voltage range: (10 - 48) Vdc

Motor Info:

- Max current: 10 Apk
- Max DC Voltage: 11.05 Vdc

รูปที่ 62 การตั้งค่า Power Supply ในหน้า 6-Step Wizard ภายในโปรแกรม Motor Control WorkBench

3.9.1.10 กดไปที่ PWM Generation และตั้งค่า PWM Frequency ที่ 70,000 Hz

6-Step Wizard

Project Hw & Info

Config

Stage

Motor

Power Supply

PWM Generation

Current Sensing

PWM Frequency: 70000 Hz from 2 kHz to 100 kHz

Driving topology: U, V, W, Uneg, Vneg, Wneg

PWM idle state high side: Turn off

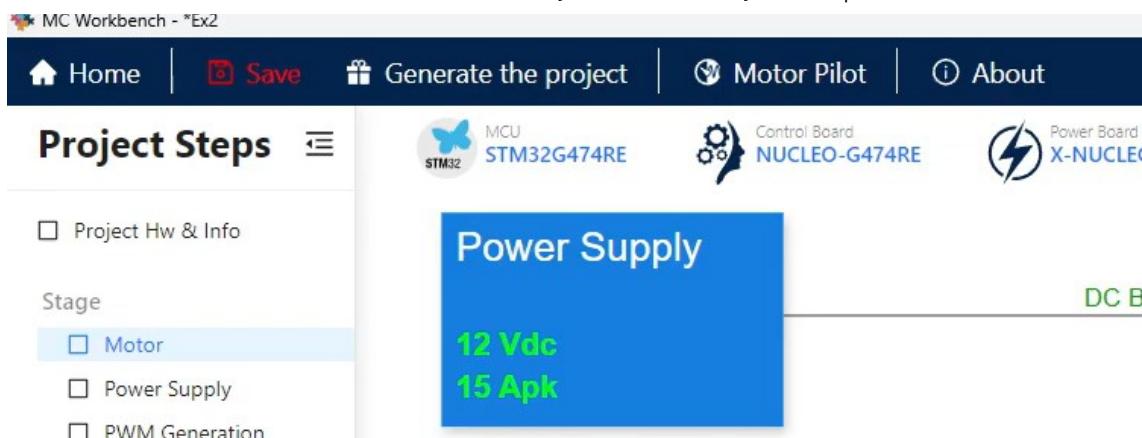
PWM idle state low side: Turn off

SW dead-time: 850 ns from 700 ns to 1000 ns

dead-time: 1000 ns

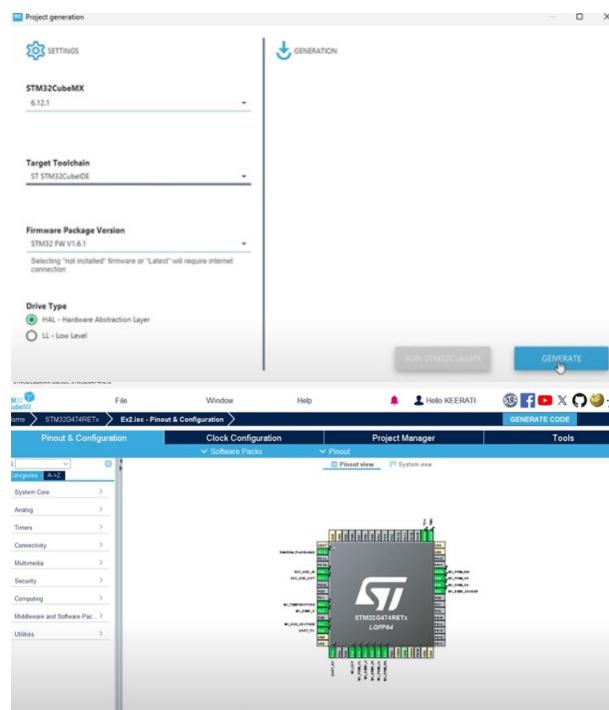
รูปที่ 63 การตั้งค่า PWM Frequency ในหน้า 6-Step Wizard ภายในโปรแกรม Motor Control WorkBench

3.9.1.11 กด OK จากนั้นกด Generate the Project ในหน้า Project Steps



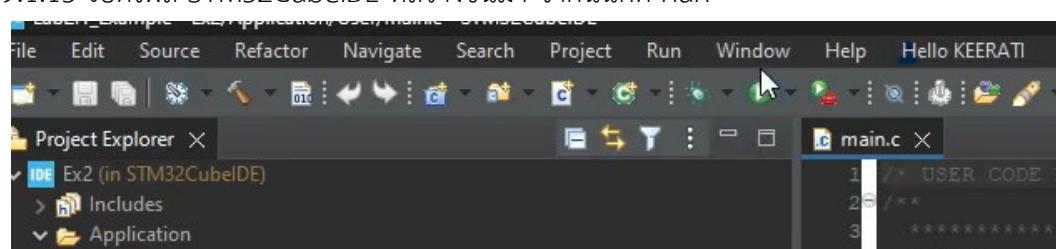
รูปที่ 64 การ Generate the Project ในหน้า Project Steps ภายในโปรแกรม Motor Control WorkBench

3.9.1.12 เปิดโปรแกรม STM32CubeMX แล้วเปิดไฟล์ที่สร้างขึ้นมาแล้วกด GENERATE CODE



รูปที่ 65 การ Generate Code ภายในโปรแกรม STM32CubeIDE

3.9.1.13 เปิดไฟล์ STM32CubeIDE ที่สร้างขึ้นมา จากนั้นกด Run



รูปที่ 66 การ Run โปรแกรม STM32CubeIDE

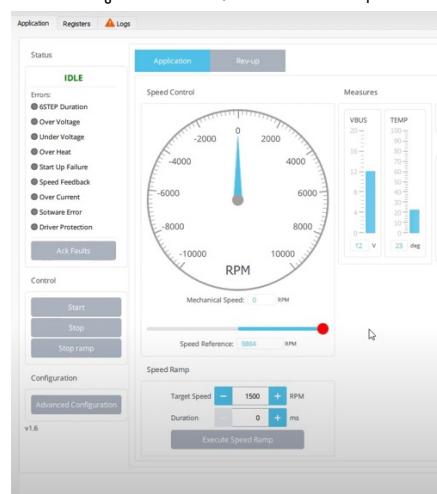
3.9.1.14 เปิดโปรแกรม Motor Control WorkBench และไปที่ Motor Pilot



3.9.1.15 กดปุ่ม Discover Board



3.9.2 ตั้งค่าความเร็วเชิงมุมของ BLDC ให้อยู่ที่ 9864 rpm และกดปุ่ม Start



รูปที่ 69 การตั้งค่าความเร็วเชิงมุมของ BLDC ภายในโปรแกรม Motor Control WorkBench

3.9.3 วัดค่าสัญญาณที่ได้จาก BLDC โดยใช้ Oscilloscope ผ่านขาที่มาพร้อมกับชุดอุปกรณ์ทดลอง BLDC



รูปที่ 70 หน้าจอของ Oscilloscope ในวัดค่าสัญญาณที่ได้จาก BLDC

3.9.4 ตั้งค่า Oscilloscope โดยให้ 1 ช่องในแกน X บนหน้าจอของ Oscilloscope มีค่า 1 ms

3.9.5 ตั้งค่า Oscilloscope โดยให้ 1 ช่องในแกน Y บนหน้าจอของ Oscilloscope มีค่า 10V

3.9.6 กดปุ่ม Run/Stop เพื่อทำการหยุดภาพบน Oscilloscope ให้นิ่ง หรือทำการกดปุ่ม Trigger อย่างใดอย่างหนึ่ง

3.9.7 กดปุ่ม Cursor ในแนวแกน X (เส้นแนวตั้ง) เพื่อดูค่าในช่วงเวลาที่ต้องการ โดยวัดบนกราฟของ Back EMF ของขั้วสายไฟ P โดยใช้ Cursor X1 อยู่ในตำแหน่งจุดที่ 1 และ Cursor X2 อยู่ในตำแหน่งจุดที่ 1 ของลูกคลีนอีกถูกหนึ่ง โดยมีคาบห่างกัน 1 คาบ

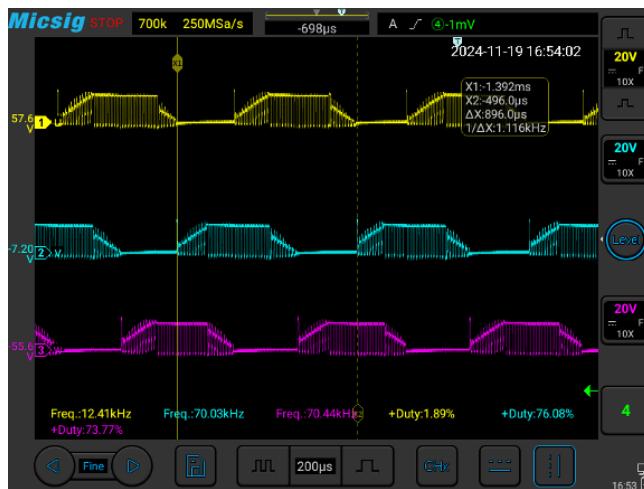
3.9.8 บันทึกความถี่ของ Back EMF ที่ได้ โดยที่ $1/\Delta x$ ความถี่ของสัญญาณ Back EMF ที่อ่านได้

3.10 ผลการทดลอง

จากการเก็บค่าความถี่ของสัญญาณ Back EMF ที่ได้จาก BLDC ด้วยความเร็วเชิงมุมของ BLDC ที่แตกต่างกันไป และนำค่าที่ได้ไปคำนวนหาความเร็วเชิงมุม

3.10.1 ข้อของสายไฟ U เมื่อหมุนด้วยความเร็ว -9864

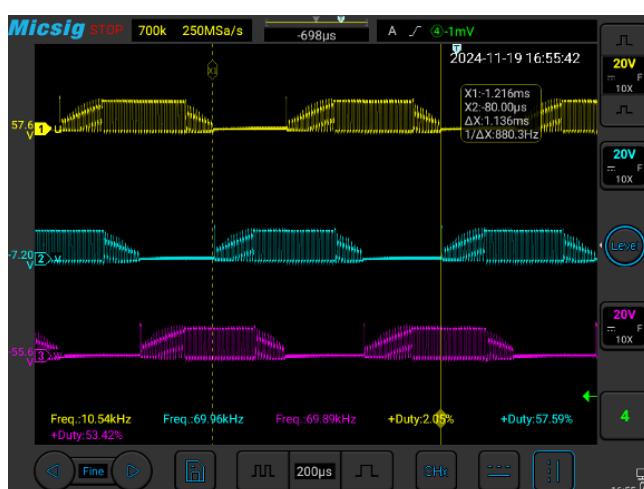
ความถี่ของ Back EMF (kHz)	1.116
อัตราเร็วเฉลี่ย	rpm
	rad/s



รูปที่ 71 การวัดความถี่ของ Back EMF บนกราฟ U เมื่อหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม -9864

3.10.2 ข้อของสายไฟ U เมื่อหมุนด้วยความเร็ว -7500

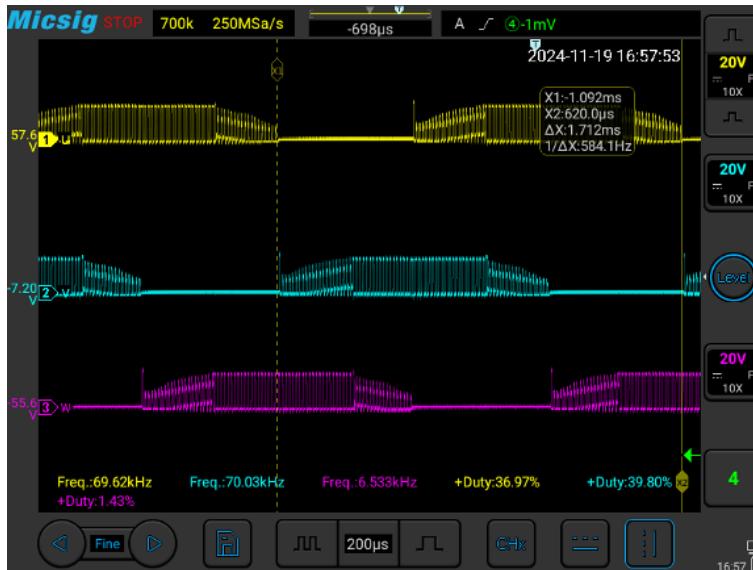
ความถี่ของ Back EMF (kHz)	0.880
อัตราเร็วเฉลี่ย	rpm
	rad/s



รูปที่ 72 การวัดความถี่ของ Back EMF บนกราฟ U เมื่อหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม -7500

3.10.3 ข้าของสายไฟ U เมื่อหมุนด้วยความเร็ว -5000

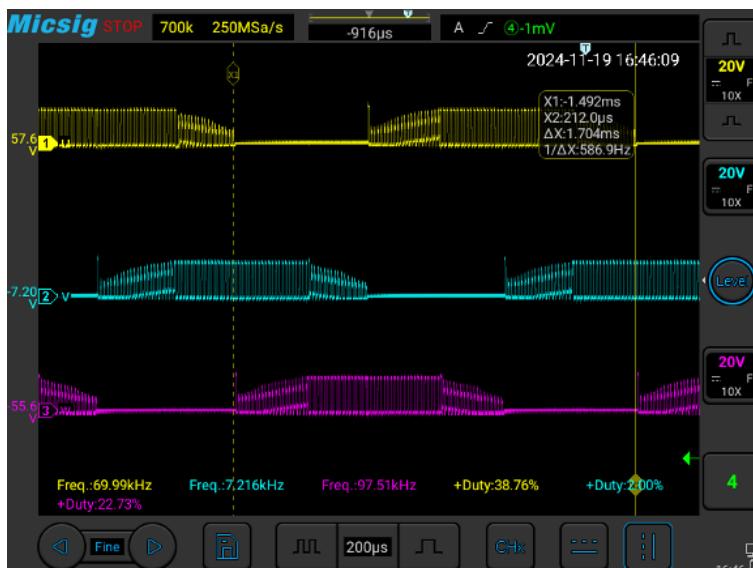
ความถี่ของ Back EMF (kHz)		0.584
อัตราเร็วเฉลี่ย	rpm	5,006.571
	rad/s	524.287



รูปที่ 73 การวัดความถี่ของ Back EMF บนกราฟ U เมื่อหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม -5000

3.10.4 ข้าของสายไฟ U เมื่อหมุนด้วยความเร็ว 5000

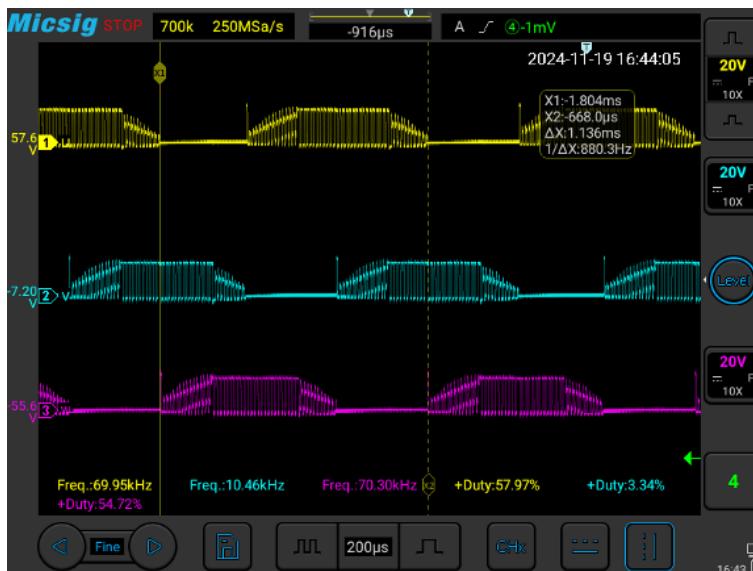
ความถี่ของ Back EMF (kHz)		0.587
อัตราเร็วเฉลี่ย	rpm	5,030.571
	rad/s	526.800



รูปที่ 74 การวัดความถี่ของ Back EMF บนกราฟ U เมื่อหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม 5000

3.10.5 ข้าวของสายไฟ U เมื่อหมุนด้วยความเร็ว 7500

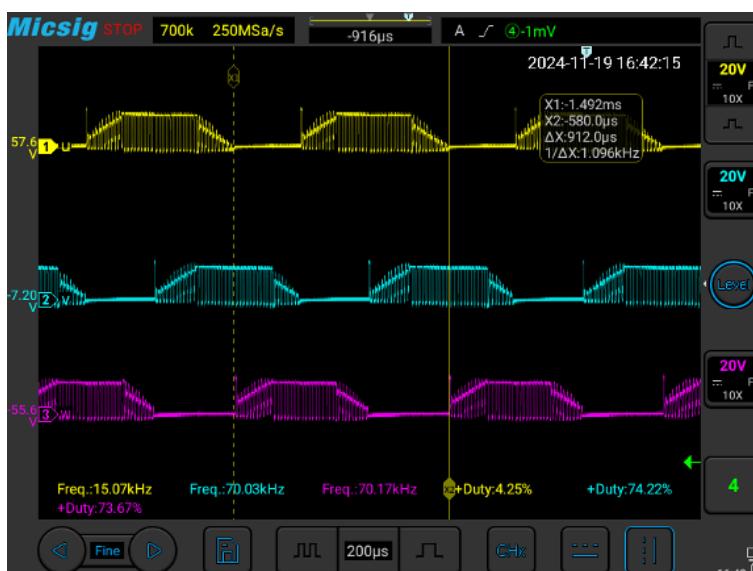
ความถี่ของ Back EMF (kHz)		0.880
อัตราเร็วเฉลี่ย	rpm	7,545.429
	rad/s	790.155



รูปที่ 75 การวัดความถี่ของ Back EMF บนกราฟ U เมื่อหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม 7500

3.10.6 ข้าวของสายไฟ U เมื่อหมุนด้วยความเร็ว 9864

ความถี่ของ Back EMF (kHz)		1.096
อัตราเร็วเฉลี่ย	rpm	9,394.286
	rad/s	983.767



รูปที่ 76 การวัดความถี่ของ Back EMF บนกราฟ U เมื่อหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม 9864

3.11 สรุปผล

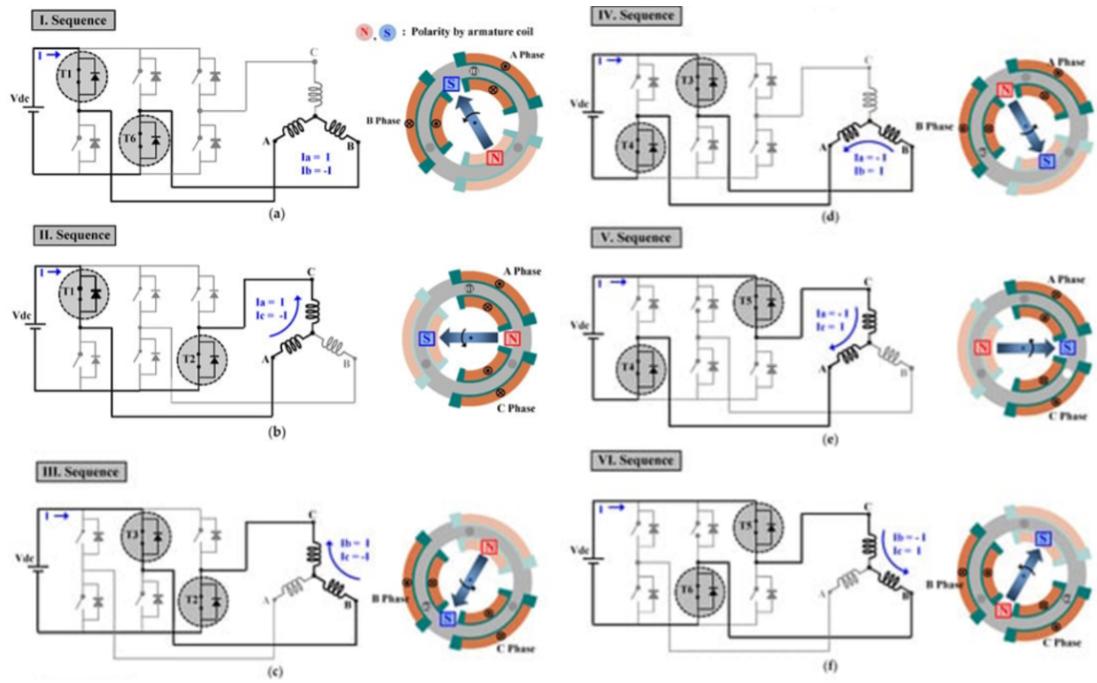
จากการทดลองเพื่อศึกษาคุณลักษณะของ BLDC และความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณ Back EMF ต่อพฤติกรรมการทำงานของ BLDC พบว่ามีความคาดเคลื่อนดังนี้

- 3.11.1 ใช้ความเร็ว -9864 rpm จะได้ความเร็วจากการคำนวน 9565.714 rpm ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 3.024
- 3.11.2 ใช้ความเร็ว -7500 rpm จะได้ความเร็วจากการคำนวน 7545.429 rpm ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 0.606
- 3.11.3 ใช้ความเร็ว -5000 rpm จะได้ความเร็วจากการคำนวน 5006.571 rpm ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 0.131
- 3.11.4 ใช้ความเร็ว 5000 rpm จะได้ความเร็วจากการคำนวน 5030.571 rpm ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 0.611
- 3.11.5 ใช้ความเร็ว 7500 rpm จะได้ความเร็วจากการคำนวน 7545.429 rpm ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 0.606
- 3.11.6 ใช้ความเร็ว 9864 rpm จะได้ความเร็วจากการคำนวน 9394.286 rpm ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 4.762

3.12 อภิปรายผล

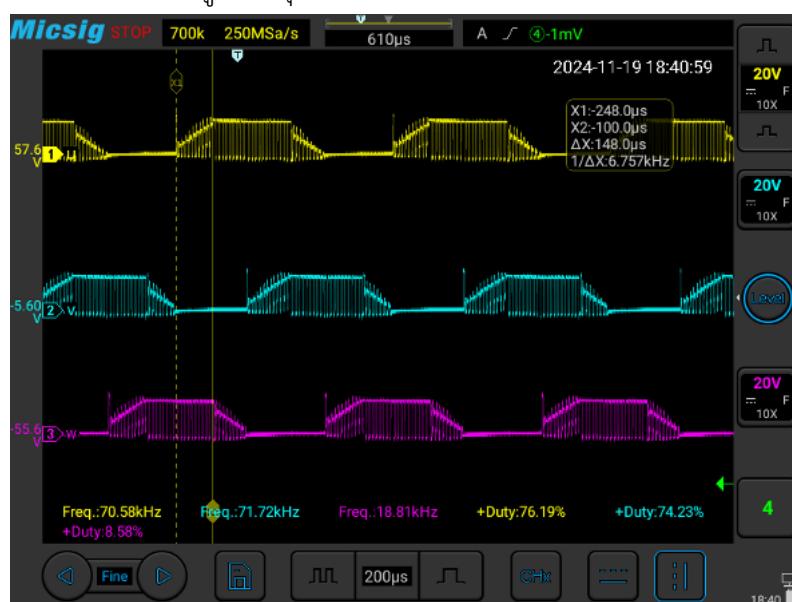
จากการทดลองพบว่า เมื่อความเร็วเชิงมุมมากขึ้นความคลาดเคลื่อนจะมากขึ้น โดยที่ความเร็วสูงสุดจะคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณร้อยละ 3.893 สาเหตุหลักมาจากการควบคุมมอเตอร์ BLDC ผ่านโปรแกรม Motor Pilot ซึ่งใช้ระบบควบคุมแบบ PID เป็นหลัก ส่งผลให้อัตราเร็วเชิงมุมที่เกิดขึ้นจริงไม่ตรงกับค่าที่ตั้งเป้าหมายไว้อย่างไรก็ตาม เมื่อตรวจสอบค่าอัตราเร็วเชิงมุมในกรณีที่มีความเร็วใกล้เคียงกัน พบว่าค่าที่คำนวนจากความถี่ BEMF จะมีความสอดคล้องและใกล้เคียงกันมาก

และจากการทดลองจะพบว่า Phase ของ U, V และ W จะห่างกัน Phase ละ 60 องศา เป็นผลมาจากการควบคุมด้วยวิธี Six-Step Control ซึ่งเป็นรูปแบบการขับเคลื่อนมอเตอร์ BLDC ที่แบ่งการทำงานออกเป็น 6 ชั้นตอนในหนึ่งรอบการหมุนของมอเตอร์ ทำให้เกิดการสลับสัญญาณแรงดันระหว่างเฟสอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เฟสของสัญญาณไฟฟ้าในแต่ละเฟสถูกปรับให้มีระยะห่างเท่ากันที่ 60 องศาไฟฟ้า

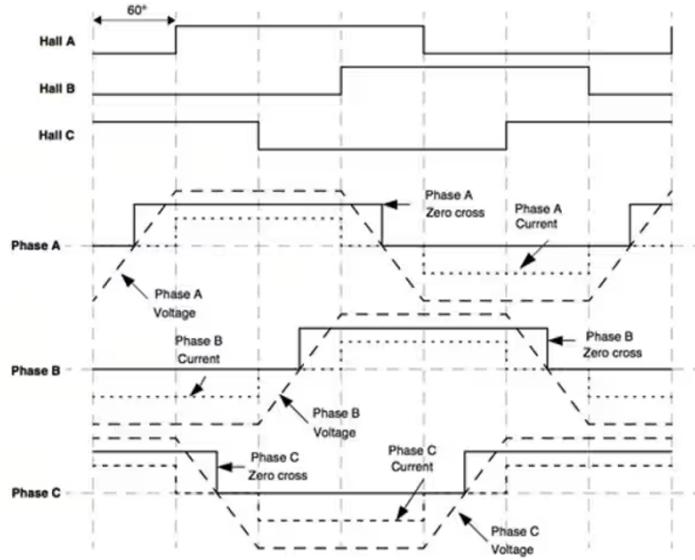


รูปที่ 77 Six-Step Control

ในการทำงานของ Six-Step Control แต่ละขั้นตอนจะกระตุ้นแรงดันใน 2 เฟสของมอเตอร์ และปล่อยให้เฟสที่เหลืออิ่กหนึ่งเฟสลอย (floating phase) ส่งผลให้เกิดแรงบิด (torque) ที่เหมาะสมต่อการหมุนของมอเตอร์ สัญญาณของแต่ละเฟสจะถูกควบคุมให้มีระยะเลี้ยง (phase shift) ระหว่างกัน 120 องศาไฟฟ้า โดยหากพิจารณาสัญญาณในแต่ละเฟสจะแบ่งออกเป็นสองช่วงหลักคือช่วงที่ MOSFET อยู่ในสถานะเปิด และช่วงที่ MOSFET อยู่ในสถานะปิด ซึ่งแต่ละช่วงนี้ครอบคลุม 60 องศาไฟฟ้าต่อหนึ่งขั้นตอน โดยระยะ 60 องศาไฟฟ้าที่พบร่วงๆ ของเฟส U, V และ W เป็นผลมาจากการแบ่งลำดับการทำงานใน 6 ขั้นตอน ($360 \text{ องศา} / 6 = 60 \text{ องศา}$) ทำให้ในแต่ละขั้นตอนแต่ละเฟสจะถูกกระตุ้นแรงดันในลำดับที่สอดคล้องกัน



รูปที่ 78 กราฟที่ได้จากการทดลอง



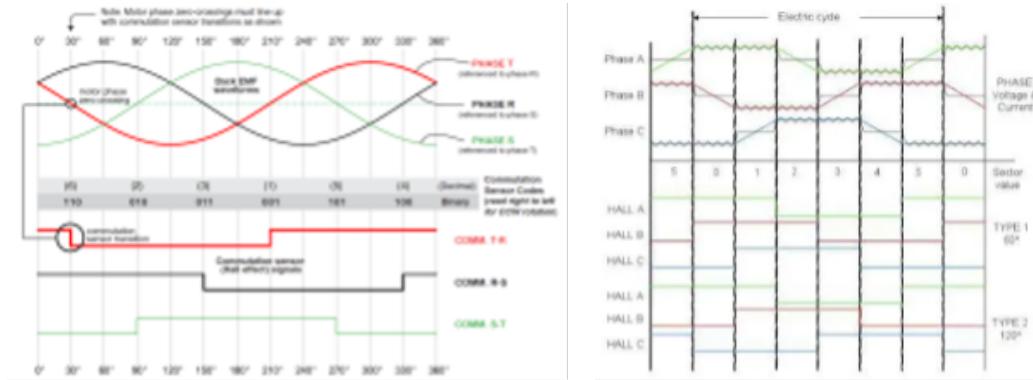
รูปที่ 79 กราฟจากทฤษฎี

จากการทดลองพบว่ากราฟของแรงดัน Back EMF ที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับรูปคลื่น Trapezoidal Waveform หรือรูปสี่เหลี่ยมคงหู ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของ BLDC แบบ Six-Step Control ซึ่งเป็นการควบคุมการทำงานที่เน้นการสร้างรูปคลื่นแรงดันที่ไม่ใช่รูปไซน์ (Sinusoidal) แต่เป็นแบบตราเปโซอยด์ โดยประกอบด้วยช่วงคงที่ (Flat Region) ที่เกิดจากการที่แรงดันไฟฟ้าถูกกระตุนในสองเฟสพร้อมกัน โดยปล่อยให้เฟสที่สามลอย (floating phase) ช่วงเปลี่ยนผ่าน (Rising/Falling Edges) เป็นช่วงที่แรงดันเปลี่ยนจากค่าต่ำไปสูง (หรือจากสูงไปต่ำ) จะมีลักษณะเป็นเส้นเอียงและมีช่วง Zero Crossing เนื่องจากการเปลี่ยนสถานะของแรงดันระหว่างเฟสที่ทำงาน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในสนามแม่เหล็กที่ผลักดันโรเตอร์ให้หมุนต่อไป และมีความสมมาตรในเชิงเวลาและแรงดัน โดยแต่ละรอบ (Cycle) จะประกอบด้วย 6 ขั้นตอน (หรือ 6 ส่วนของคลื่น) ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนสถานะของแต่ละเฟสที่ห่างกัน 60 องศาไฟฟ้า

การควบคุม PMSM ด้วย FOC ซึ่ง FOC เป็นเทคนิคที่ออกแบบมาเพื่อจัดการกับกระแสไฟฟ้าแบบ 3 เฟส (U_a , V_a และ W_a) โดยเริ่มจากการแปลงกระแส 3 เฟสให้อยู่ในรูปของกระแส 2 เฟสผ่านการใช้ Clarke Transform และ Park Transform ซึ่งทำให้ได้กระแสในรูปแบบใหม่ที่เรียกว่า I_q (Torque) และ I_d (Flux) กระแสในรูปแบบนี้จะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณ DC ทำให้การควบคุมด้วย PID Control มีความง่ายและแม่นยำมากขึ้น เพื่อควบคุมแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์ หลังจากนั้น สัญญาณกระแส DC จะถูกแปลงกลับเป็นแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง V_a และ V_b ผ่านกระบวนการ Inverse Park Transform เมื่อได้แรงดันไฟฟ้า V_a และ V_b แล้ว จะนำค่าดังกล่าวเข้าสู่กระบวนการ SVM (Space Vector Modulation) เพื่อแปลงเป็น Duty Cycles ที่เหมาะสม ก่อนส่งสัญญาณไปยัง PWM Driver ซึ่งจะสร้างสัญญาณ PWM ที่นำไปใช้ควบคุม Three-Phase Inverter เพื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดของมอเตอร์ PMSM

การควบคุม BLDC ด้วย Six-Step Control มีโครงสร้างการทำงานที่ง่ายกว่า FOC โดยใช้ PID Control เพื่อจัดการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ให้ได้ความเร็วของมอเตอร์ตามที่ต้องการ โดยกระบวนการทำงาน คือ

แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะถูกส่งไปยัง Three-Phase Inverter จากนั้นกระแส 3 เฟส (U, V, W) จะถูกป้อนเข้าสู่ชุดควบคุมของมอเตอร์ตามลำดับที่สอดคล้องกับตำแหน่งของโรเตอร์ การควบคุมแบบนี้ไม่ได้แปลงกระแสเป็น I_d และ I_q เมื่อ FOC แต่เน้นการควบคุมแรงดันไฟฟ้า DC ที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์เพื่อสร้างแรงบิดตามลำดับการทำงานของเฟสในระบบ 6 ขั้นตอน โดยสัญญาณที่สร้างขึ้นมีลักษณะเป็นรูปคลื่น Trapezoidal ซึ่งต่างจากรูปคลื่น Sinusoidal ที่ได้จากการควบคุมแบบ FOC



รูปที่ 80 FOC และ Six-Step Control

3.13 ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้ความเร็วของมอเตอร์มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด ควรเน้นการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ PID (K_p และ K_i) เพิ่มความแม่นยำของ Feedback พิจารณาใช้วิธีควบคุมที่เหมาะสม เช่น FOC และเสริมความเสถียรในระบบจ่ายพลังงาน พร้อมทั้งทดสอบภัยใต้สภาพการทำงานจริงเพื่อให้มั่นใจว่าระบบสามารถตอบสนองได้ตามความต้องการ

3.14 เอกสารอ้างอิง

- 3.14.1 <https://th.huahaomotors.com/info/what-is-a-bldc-motor--89476688.html>
- 3.14.2 https://www.9engineer.com/index.php?m=article&a=print&article_id=2606
- 3.14.3 <https://www.nidec.com/en/technology/capability/brushless/>
- 3.14.4 <https://mechtex.com/blog/working-of-bldc-motor>
- 3.14.5 <https://www.mdpi.com/2227-9717/9/11/1881>
- 3.14.6 <https://www.ablic.com/en/semicon/applications/bldc-motor/hall-ic-role/>
- 3.14.7 https://www.ti.com/lit/an/sprabz4/sprabz4.pdf?ts=1734886199481&ref_url=https%253A%252F%252Fchatgpt.com%252F
- 3.14.8 <https://my.avnet.com/wcm/connect/24951488-b954-4583-9ed6-ddf758ed5141/tnd6385-d-trapezoidal-control-of-bldc-motors.pdf?MOD=AJPERES&CVID=oDW8Sz>
- 3.14.9 <https://www.pmdcorp.com/resources/type/articles/get/field-oriented-control-foc-a-deep-dive-article>

3.14.10 <https://www.pmdcorp.com/resources/type/articles/get/field-oriented-control-foc-a-deep-dive-article>

3.14.11 <https://www.roboteq.com/applications/all-blogs/13-field-oriented-control-foc-made-ultra-simple>