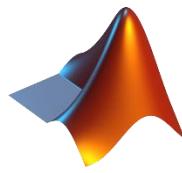


# RMXplorer



## LAB 2: Actuators

### Name

- นายกิตติ์เนศ พาติสว่างพันธ์ 67340500049
- นายภูมวไนย ทินสมุทร 67340500062
- นางสาววิชชาดา แสงระวี 67340500064
- นายปองกพ ปั้นเฉย 67340500072

### Objectives

- เพื่อให้สามารถเข้าใจและอธิบายหลักการทำงานและสมการที่ใช้สร้าง Motor Characteristic ของ DC Motor ได้
- เพื่อให้สามารถอธิบายหลักการของ PWM และ Duty Cycle และความสัมพันธ์ระหว่าง PWM ,Duty cycle กับความเร็วของมอเตอร์ กระแสไฟฟ้า ประสิทธิภาพของมอเตอร์ได้
- เพื่อให้สามารถเข้าใจและอธิบายหลักการทำงานของ H-Bridge ในโหมด Sign magnitude และ Locked-anti phase
- เพื่อให้สามารถเข้าใจและอธิบายหลักการทำงานของ Stepper Motor และประเภทของ Stepper Motor และสามารถอธิบายโหมดการทำงานในแต่ละแบบและบอกข้อดีข้อเสียของแต่ละโหมดได้
- เพื่อให้สามารถอธิบายหลักการและเงื่อนไขการเกิด Loss Step ได้
- เพื่อให้สามารถอธิบายหลักการของสัญญาณ 3 Phase สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ได้
- สามารถอธิบายหลักการและความแตกต่างระหว่างการใช้ Hall Effect Sensor และ Back EMF Sensing ได้
- สามารถอธิบายหลักการและเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของการขับเคลื่อน 6 Step และการควบคุมแบบ FOC ได้

## นิยามตัวแปร

$V_{in}$  (Input Voltage) มีหน่วยเป็น Volt

$i$  (Current) มีหน่วยเป็น Ampere

$R$  (Resistance) มีหน่วยเป็น Ohm

$i_{NL}$  (No-load Current) มีหน่วยเป็น mA

$i_{ST}$  (Stall toque Current) มีหน่วยเป็น mA

$\tau_m$  (Output torque of a motor) มีหน่วยเป็น Nm

$\tau_L$  (Load) มีหน่วยเป็น Nm

$\tau_{ST}$  (Stall Torque) มีหน่วยเป็น Nm

$\omega$  (ความเร็วเชิงมุม) มีหน่วยเป็น Rad/s

$\omega_{NL}$  (ความเร็วเชิงมุมขณะไม่มีโหลด) มีหน่วยเป็น Rad/s

$B$  (Damping) มีหน่วยเป็น Ns/rad

$K_m$  (Motor Torque constant) มีหน่วยเป็น Nm/A

$P$  (Power) มีหน่วยเป็น W

$P_{out}$  (Output Power) มีหน่วยเป็น W

$P_{in}$  (Input Power) มีหน่วยเป็น W

$P_{max}$  (Maximum Power) มีหน่วยเป็น W

## LAB 2.1 : DC Motor

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 1. หลักการทำงานของ DC Motor

ใน Rotor จะมีชุดลวดที่ได้รับกระแสตรงอยู่ และใน Stator จะมี Permanent Magnets หรือชุดลวดที่มีไฟฟ้า流์ที่สามารถสร้างสนามแม่เหล็กอยู่ เมื่อมอเตอร์มีกระแสตรงเข้ามา จะทำให้ใน Stator จะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นมาทำให้ไปเกิดดูดและผลักกันกับแม่เหล็กใน Rotar ทำให้ Rotar เริ่มหมุนและเพื่อให้หมุนได้ต่อเนื่อง จึงต้องมี Commutator ไว้ค่อยสลับทิศทางของกระแส โดยเมื่อ Rotar หมุนจนแนวของมันไปตรงกับสนามแม่เหล็กมันก็จะหยุดหมุนแต่ Commutator จะทำหน้าที่สลับทิศทางของกระแสทำให้เกิด Reverse Magnetic Field เพราเหตุนี้จึงทำให้ Rotar หมุนต่อไปได้

#### 2. Motor Characteristic Curve

##### 2.1 Derivation of motors Torque/Speed curved

$$\text{ที่ } \frac{d\omega}{dt} = 0 \text{ และ } \frac{di}{dt} = 0$$

$$\text{สมการทางไฟฟ้าได้แก่ } v_{in} = R \cdot i + K_b \cdot \omega \text{ เมื่อนำสมการมาจัดเรียงใหม่จะได้ } i = \frac{v_{in} - K_b \omega}{R}$$

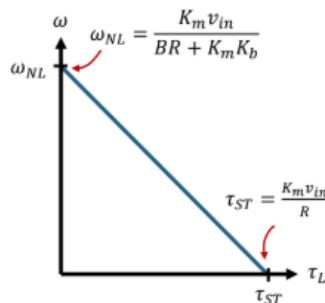
$$\text{สมการทางกล } \tau_L = K_m \cdot i - B \cdot \omega$$

นำสมการทางกลและทางไฟฟ้ามาจัดเรียงใหม่เพื่อหาสมการ steady state condition จะได้ว่า

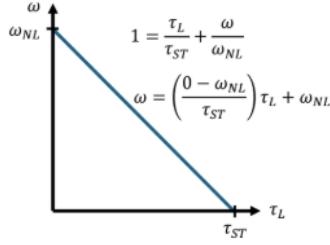
$$\omega = - \left( \frac{R}{BR + K_m K_b} \right) \tau_L + \left( \frac{K_m V_{in}}{BR + K_m K_b} \right)$$

$$\text{ที่ No load condition ให้ } \tau_L = 0 \text{ จะได้ว่า } \omega_{NL} = \frac{K_m V_{in}}{BR + K_m K_b}$$

$$\text{ที่ Stall Torque condition ให้ } \omega = 0 \text{ จะได้ว่า } \tau_{ST} = \frac{K_m V_{in}}{R}$$



รูปที่ 1 กราฟแสดง Motor Characteristics เมื่อเทียบ Torque กับ Speed



รูปที่ 2 แสดงสมการที่ใช้ในการทำกราฟเส้นตรงเมื่อเทียบเมื่อเทียบ Torque กับ Speed

## 2.2 Derivation of motors Torque/Current curved

$$\text{ที่ } \frac{d\omega}{dt} = 0 \text{ และ } \frac{di}{dt} = 0$$

สมการทางไฟฟ้าได้แก่  $v_{in} = R \cdot i + K_b \cdot \omega$  เมื่อนำสมการมาจัดเรียงใหม่จะได้  $\omega = \frac{v_{in} - Ri}{K_b}$

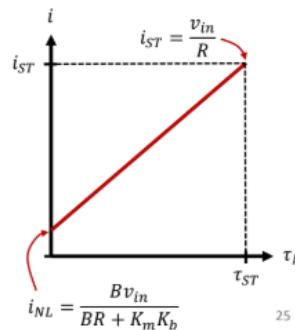
$$\text{สมการทางกล } \tau_L = K_m \cdot i - B \cdot \omega$$

นำสมการทางกลและทางไฟฟ้ามาจัดเรียงใหม่เพื่อหาสมการ steady state condition จะได้ว่า

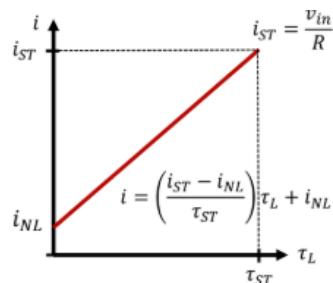
$$i = \left( \frac{K_b}{BR + K_m K_b} \right) \tau_L + \left( \frac{BV_{in}}{BR + K_m K_b} \right)$$

$$\text{ที่ No load condition ให้ } \tau_L = 0 \text{ จะได้ว่า } i_{NL} = \frac{BV_{in}}{BR + K_m K_b}$$

$$\text{ที่ Stall Torque condition ให้ } \omega = 0 \text{ และ } i = i_{st} \text{ จะได้ว่า } i_{st} = \frac{V_{in}}{R}$$

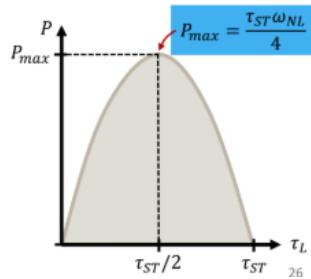


รูปที่ 3 กราฟแสดง Motor Characteristics เมื่อเทียบ Torque กับ Current



รูปที่ 4 แสดงสมการที่ใช้ในการทำกราฟเส้นตรงเมื่อเทียบ Torque กับ Current

### 2.3 Derivation of motors power curved



รูปที่ 5 กราฟแสดง Motor Characteristics ของ Power

$$\text{สมการทางกล } i = \frac{\tau_L - B\omega}{K_m}$$

$$\text{สมการทางไฟฟ้า } v_{in} = R \cdot i + K_b \cdot \omega$$

นำสมการทางกลและทางไฟฟ้ามาจัดเรียงใหม่เพื่อหาสมการ steady state condition จะได้ว่า

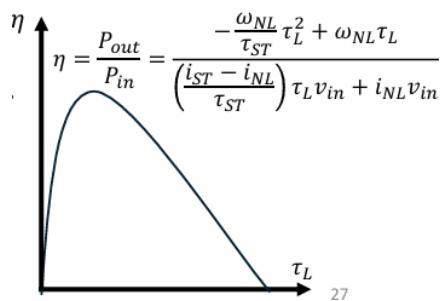
$$1 = \frac{\tau_L}{\tau_{ST}} + i = \frac{\omega}{\omega_{NL}}$$

จากสมการกำลัง  $P = \tau_L \cdot \omega$  เพราะฉะนั้นนำสมการกำลังมาจัดเรียงใหม่กับ steady state condition จะได้สมการที่สามารถนำไปหากำลังสูงสุดได้ ได้แก่  $P = -\frac{\omega_{NL}}{\tau_{ST}} \tau_L^2 + \omega_{NL} \tau_L$  โดยสามารถหากำลังสูงสุดได้จากช่วงที่  $\tau_{ST}/2$  เพราะฉะนั้นจะได้ว่า  $P_{max} = \frac{\tau_{ST} \omega_{NL}}{4}$

### 3. Efficiency

$$\text{สมการที่ใช้หาประสิทธิภาพการทำงาน คือ Efficiency(\%) = } \frac{\tau \omega}{V_i} \times 100 = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \text{ และ}$$

$$\text{สมการที่ใช้สร้างกราฟ คือ Efficiency(\%) = } \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{-\frac{\omega_{NL}}{\tau_{ST}} \tau_L^2 + \omega_{NL} \tau_L}{\left( \frac{i_{ST} - i_{NL}}{\tau_{ST}} \right) \tau_L V_{in} + i_{NL} V_{in}}$$



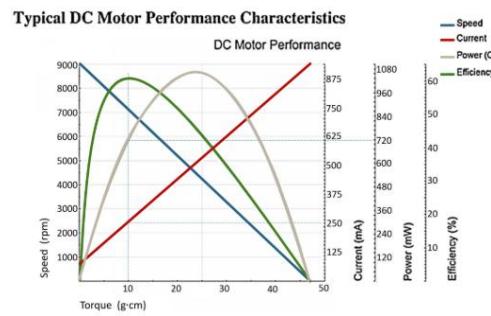
รูปที่ 6 กราฟแสดงลักษณะของกราฟและสมการที่นำไปใช้ในการหา Efficiency

### 4. Torque Constant

$$\tau_m = K_m i$$

สามารถคำนวณหา  $K_m$  (Motor Torque Constants) ได้จากนำ  $\tau$  ที่ได้จากการทดลองมาหาค่าเฉลี่ยและนำไปหารกับ  $i$  ที่ได้จากการทดลองและนำมาหาค่าเฉลี่ยเช่นกัน

## 5. Motor Characteristic



รูปที่ 7 กราฟแสดง Motor Characteristics

จากการแสดงให้เห็นว่า เส้นความเร็ว(speed)-เส้นสีเขียว จะเห็นได้ว่าความเร็วแปรผันกับ Torque และมีลักษณะเป็นเส้นตรง ที่แรงบิดต่ำสุด(No load) มอเตอร์จะมีความเร็วสูงสุด เมื่อ Torque เพิ่มขึ้น ความเร็วจะลดลงอย่างสม่ำเสมอจนเมื่อ Torque สูงสุดความเร็วจะเป็นศูนย์ เส้นกระแส(Current)-เส้นสีแดง เห็นได้ว่าความเร็วแปรผันต่ำกับ Torque และมีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยเมื่อแรงบิดมากขึ้นก็จะกินกระแสมากขึ้นตาม กำลัง(Power)-เส้นสีเทา มีลักษณะเป็นกราฟพาราโบลา สามารถอธิบายกราฟนี้ได้โดย  $P_{out} = \tau \cdot \omega$  ที่จุดแรกที่เป็นจุดต่ำสุดของกราฟความเร็วมีค่าสูงมากในขณะเดียวกัน Torque มีค่าเป็นศูนย์ ทำให้กำลังที่ออกมากเป็นศูนย์

เข่นเดียวกับในจุดสุดท้ายของกำลังที่มีค่าเป็นศูนย์เนื่องด้วยเหตุผลคล้ายกันที่ Torque สูงแต่ความเร็วมีค่าเป็นศูนย์ ทำให้กำลังที่ออกมากเป็นศูนย์ ที่จุดสูงสุดของกราฟมีค่าจะเห็นได้ว่าทั้งความเร็วและ Torque มีค่าประมาณครึ่งหนึ่งส่งผลให้มีอนามัยกันจะให้กำลังสูงสุด ประสิทธิภาพ(Efficiency)-เส้นสีเขียว มีลักษณะของกราฟคล้ายกราฟพาราโบลา โดยค่าประสิทธิภาพสูงสุดจะเกิดขึ้นระหว่าง No-load และ Stall torque มักจะเกิดช่วงที่แรงบิดไม่สูงมาก

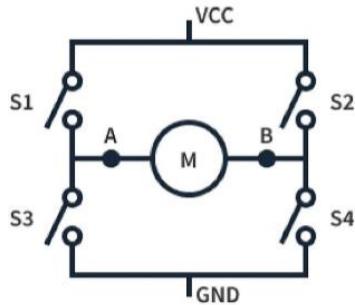
## 6. Stall Torque

สมการที่ใช้ในการหาคือ  $\tau_{ST} = \frac{K_m V_{in}}{R}$  โดยเราสามารถหา Stall Torque ได้จากการคำนวณ Torque Constants มาคูณกับ  $V_{in}$  และนำทั้งหมดมาหารด้วย  $R$

## 7. PWM และ Duty Cycle

PWM ทำงานโดยการสับเปลี่ยน สัญญาณระหว่างสถานะ ON และสถานะ OFF ซ้ำ ๆ ด้วยความถี่คงที่ และ Duty Cycle คือสัดส่วนของเวลาที่สัญญาณอยู่ในสถานะ ON ต่อหนึ่งรอบเวลาทั้งหมด โดยแสดงในรูป เปอร์เซ็นต์ มีวิธีการคำนวณดังนี้  $Duty Cycle = \frac{T_{on}}{T_{on}-T_{off}} \times 100\%$

## 8. H-Bridge

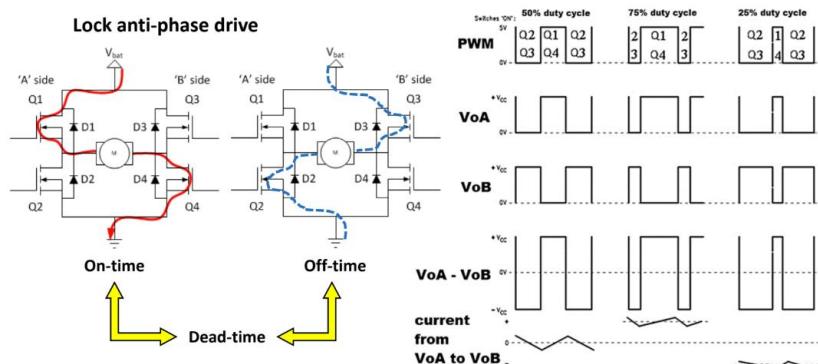


รูปที่ 9 H bridge circuit

วงจร H-Bridge ประกอบด้วย Switch 4 ตัวโดยปัจจุบันนิยมใช้ Mosfets โดยมี Load ซึ่งอยู่ต่อวงจร ระหว่าง Switch ทั้ง 2 ข้าง ซึ่งในการทดลองใช้เป็น Motor โดยหลักการทำงานของวงจร H-Bridge จะควบคุมทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าโดยการปิด Switch 2 ตัวที่อยู่ในแนวทางเดียวกันและเปิด Switch 2 ตัวที่อยู่ในแนวทางเดียวกัน ทำให้ Motor สามารถหมุนไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกาได้ ใน การควบคุมความเร็วของ Motor สามารถทำได้โดยการใช้สัญญาณ PWM โดยการเปลี่ยนแปลง Duty cycle ของสัญญาณ PWM ที่ควบคุมการปิด-เปิดสวิตช์ จะเป็นการเปลี่ยนแปลง แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่จ่ายให้กับ มอเตอร์

## 9. โหมดของ Motor drive

### 9.1 Lock anti-phase drive



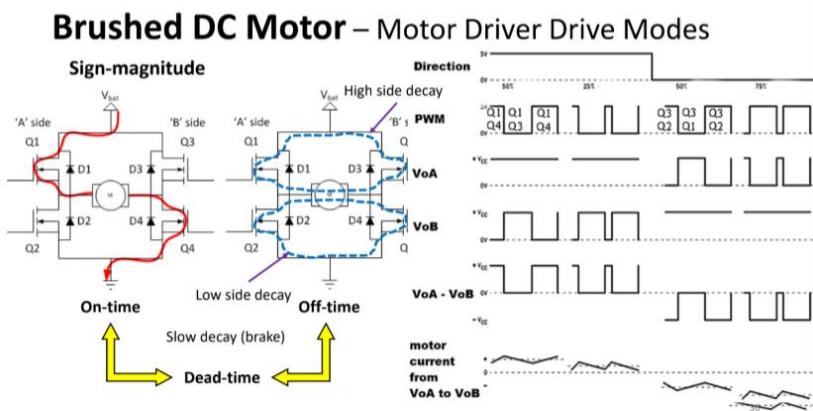
รูปที่ 10 แสดงการทำงานของ Motor Drive โหมด Lock anti-phase

ในโหมด Lock anti-phase เป็นโหมดที่สามารถควบคุมการทำงานของ H-Bridge Drive ได้ผ่าน การใช้สายสัญญาณเพียงสายเดียวคือ PWM โดยสัญญาณ PWM จะถูกส่งไปที่ Pin direction และ Pin PWM จะถูกตั้งค่าคงที่ที่ Vcc เสมอ ส่งผลให้เมื่อ Duty Cycle = 50% แรงดันเฉลี่ยที่มอเตอร์เป็น 0 Volt ทำให้ Motor หยุดนิ่ง ถ้า Duty Cycle > 50% จะทำให้ Motor หมุนในหนึ่งทิศทาง และ ถ้า Duty Cycle <

50% Motor จะหมุนในทิศทางตรงข้าม โดยสรุปคือ แกนหมุนทิศทางและความเร็วควบคุมโดย PWM เพียงอย่างเดียว

ข้อดีของการใช้โหมด Lock anti-phase คือ ใช้สายควบคุมเพียงเส้นเดียว และเหมาะสมสำหรับการสับเปลี่ยนทิศทางของ Motor อย่างรวดเร็ว ข้อเสียคือ เมื่อมีการสับเปลี่ยนทิศทางอย่างรวดเร็ว กระแสจะไหลใน Mosfet ทั้ง 4 ตัว ใน Motor drive ที่ดิน Brake แบบกะทันหัน จะทำให้เกิดความร้อนสูง

## 9.2 Sign-magnitude



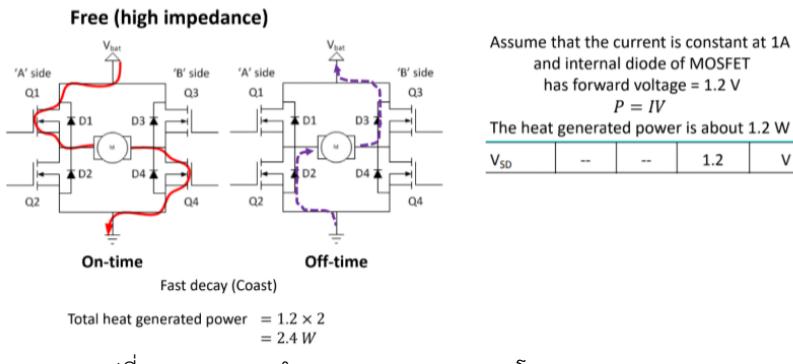
รูปที่ 11 แสดงการทำงานของ Motor Drive โหมด Sign-magnitude

เป็นการควบคุมที่ต้องใช้สัญญาณ Input 2 สัญญาณ ได้แก่ สัญญาณที่เป็น PWM ที่ควบคุม Duty Cycle และ Direction ซึ่งควบคุมทิศทางการหมุนของ Motor โดยหลักการควบคุมคือเมื่อต้องการหมุนในทิศทางใดทิศทางหนึ่งให้ จ่าย Vcc ให้ กับขั้วของ Motor ข้างหนึ่ง ส่วนอีกข้างหนึ่งของ Motor จ่ายด้วยสัญญาณ PWM ทำให้สามารถควบคุมความเร็วของ Motor ได้ ในการนี้ที่อยากให้ Motor หยุดหมุน จะต้องจ่าย PWM = 0%

ข้อดีของโหมด Sign-magnitude คือ สามารถควบคุมความเร็วและทิศทางแยกกันได้ หมายความว่า ทำงานที่ต้องการความแม่นยำทั้งสองด้าน มีการจัดการกระแสที่แหล่งผ่านขาดลวด ส่วนข้อเสียคือ ต้องใช้สายสัญญาณ 2 เส้น และในขณะที่ Brake อาจเกิดกระแสสูงชั่วขณะ เพราะเป็นการ Brake แบบ Short-Circuit braking

### 9.3 Free (high impedance)

#### Brushed DC Motor – Motor Driver Drive Modes

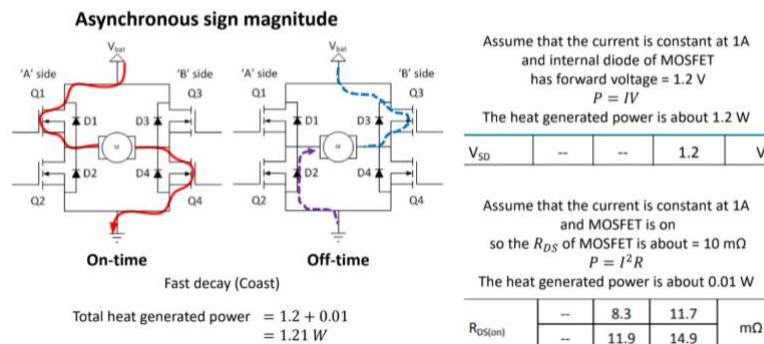


รูปที่ 12 แสดงการทำงานของ Motor Drive ใน模式 Free (high impedance)

ในโหมดนี้ H-bridge จะเปิดสวิตช์ทั้งหมด ทำให้มอเตอร์อยู่ในสภาพ Floating กระแสในขดลวดมอเตอร์จะค่อยๆ ลดลงตามธรรมชาติจากแรงเฉือนของมอเตอร์และแรงเสียดทาน คุณสมบัติสำคัญคือ ไม่เกิดการเบรกมอเตอร์แบบ Active แต่ปล่อยมอเตอร์ให้หมุนต่อจนหยุดเองตามแรงต้านภายใน

### 9.4 Asynchronous sign magnitude

#### Brushed DC Motor – Motor Driver Drive Modes



รูปที่ 13 แสดงการทำงานของ Motor Drive ใน模式 Asynchronous sign magnitude

โหมด Asynchronous sign magnitude ใช้ประโยชน์จาก Diodes ภายใน H-bridge เพื่อป้องกันการไฟล์ย้อนของกระแสกลับไปยังแหล่งจ่าย ในโหมดนี้ ระหว่างช่วง off-time ซึ่งคือช่วงที่ไม่มี PWM ON จะมี Switch เพียงตัวเดียวใน H-bridge ที่ปิด แทนที่จะเป็นสองตัวแบบใน sign-magnitude drive ผลคือ กระแสที่ไหลผ่าน Motor จะถูกส่งผ่าน Diode เมื่อ Off-Time แทนการใช้ Mosfet การ Short-Circuit แบบนี้ ทำให้ Motor Brake ได้โดยไม่ต้องให้พลังงานย้อนกลับเข้าที่แหล่งจ่าย

ข้อดีของโหมดนี้คือ ป้องกัน Regenerative Breaking ทำให้ความร้อนที่ H-bridge น้อย และสามารถ Brake ได้อย่างปลอดภัย ข้อเสียคือ กระแสระหว่าง Off-Time ขึ้นกับโครงสร้างของ Circuit และจังหวะ ซึ่งอาจทำให้ Motor หยุดช้ากว่าที่คิด

## อ้างอิง

- <https://www.magneticinnovations.com/faq/dc-motor-how-it-works/>
- <https://www.circuitbread.com/ee-faq/how-does-an-h-bridge-work>
- <https://www.modularcircuits.com/blog/articles/h-bridge-secrets/asynchronous-sign-magnitude-drive/>
- <https://www.pcb-3d.com/tutorials/what-is-a-h-bridge-sign-magnitude-and-locked-anti-phase-control-of-a-dc-motor/>
- [https://www.electricaleeasy.com/2014/01/losses-in-dc-machine.html#google\\_vignette](https://www.electricaleeasy.com/2014/01/losses-in-dc-machine.html#google_vignette)
- [https://drive.google.com/file/d/1eaVDJCINAuK8\\_ygFBt\\_WOPF\\_XOD4tjJI/view](https://drive.google.com/file/d/1eaVDJCINAuK8_ygFBt_WOPF_XOD4tjJI/view)

การทดลองที่ 2.1.1: เปรียบเทียบการทำงานของ Motor drive ในโหมด Sign-Magnitude และ Locked Anti-Phase

## จุดประสงค์

1. เพื่อศึกษาหลักการทำงานของ H-Bridge
2. เพื่ออธิบายและเปรียบเทียบโหมด Sign-Magnitude กับ Locked Anti-Phase
3. เพื่อวิเคราะห์ข้อดี - ข้อเสียระหว่างการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบ Sign-Magnitude กับ Locked Anti-Phase จากการทดลอง

## สมมติฐาน

ในการควบคุม Motor โดยใช้โหมด Sign-Magnitude จะสามารถควบคุมการทำงานของ Motor ได้จากการ จ่าย PWM ให้ขา PWM และจ่ายไฟ 0 – 3.3 V ให้กับขา Direction ซึ่งจะทำงานตาม Data sheet ในขณะที่โหมด Locked Anti-Phase จะสามารถควบคุมการทำงานของ Motor ได้จากการจ่าย PWM ให้ขา Direction และจ่ายไฟ 0 – 3.3 V ให้กับขา PWM ซึ่งส่งผลให้ Direction ทำงานตาม Duty cycle ของ PWM

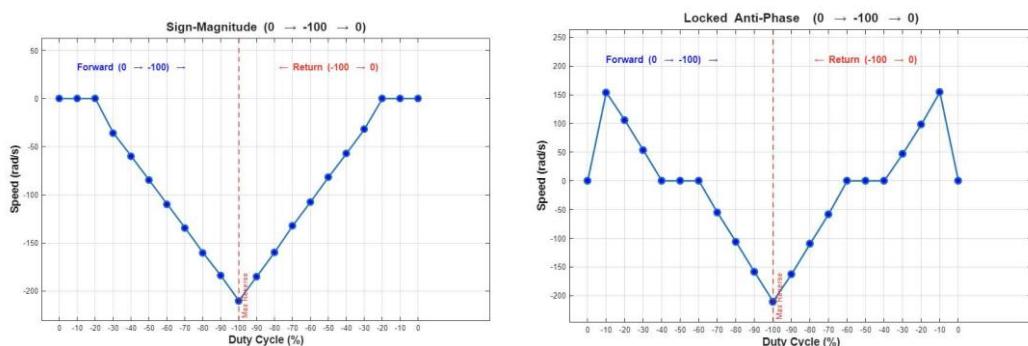
## ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น
  - โหนดที่ใช้ในการควบคุม Motor drive
2. ตัวแปรตาม
  - ความสามารถในการสั่งงานของ Motor drive
  - พฤติกรรมการทำงานของ Motor
3. ตัวแปรควบคุม
  - บอร์ดที่ใช้ในการทดลอง
  - ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ Motor drive
  - ความถี่
  - Load

## ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เชื่อมบอร์ดในโหนด Sign-Magnitude โดยจ่าย PWM เข้าขา PWM และจ่ายไฟ 3.3 V เข้าขา Direction ทดลองปรับค่า PWM เพื่อมั่นใจว่า 10% สังเกตการทำงานของ motor
2. บันทึกผลการทดลอง
3. เชื่อมบอร์ดในโหนด Locked Anti-Phase โดยจ่าย PWM ให้ขา Direction และจ่ายไฟ 0 – 3.3 V ให้กับขา PWM
4. ทดลองปรับค่า PWM เพื่อมั่นใจว่า สังเกตการทำงานของ motor
5. บันทึกผลการทดลอง

## ผลการทดลอง



รูปที่ 14 เปรียบเทียบการทำงานของ Motor drive ในโหนด Sign-Magnitude และ Locked Anti-Phase

## สรุปผลการทดลอง

จากราฟข้างต้นแสดงผลการทำงานของ Motor drive ในโหมด Sign-Magnitude และ Locked Anti-Phase โดยข้างซ้ายจะเป็นกราฟจากผลการทดลองในโหมด Sign-Magnitude ส่วนข้างขวาเป็นผลการทดลองในโหมด Locked Anti-

ในโหมด Sign-Magnitude จะเห็นว่าในช่วงของการจ่าย PWM ในช่วงของ PWM 0% ถึง -100% ค่าของความเร็วจะเปลี่ยนแปลงตามค่า ของ PWM จะเห็นได้ว่าหากจ่าย PWM เป็น 0% ค่าของความเร็ว Motor จะอยู่ที่ 0 rad/s และค่าของความเร็ว Motor มีค่าที่เพิ่มขึ้นมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งจ่าย PWM เป็น -100% ค่าของความเร็ว Motor จะหยุดที่อยู่ที่ประมาณ -230 rad/s ในขณะที่กราฟของการเปลี่ยนแปลงความเร็วในโหมด Locked Anti-Phase มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่ต่างจากโหมด Sign-Magnitude คือ เมื่อเริ่มจ่าย PWM ที่ 0% ความเร็วของ Motor จะยังคงเป็น 0 rad/s อยู่จนกระทั่งจ่าย PWM ที่ -10% ความเร็วของ Motor จะเพิ่มขึ้นเป็น +150 rad/s และจะมีค่าความเร็วที่ลดลงเรื่อยๆ ตามค่า PWM ที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่ง ค่า PWM เพิ่มขึ้นเป็นช่วง -40% ถึง -60% ความเร็วของ Motor จะกับไปคงที่เป็น 0 rad/s ก่อนจะมีความเร็วที่เพิ่มขึ้นเมื่อเริ่มจ่าย PWM ที่อยู่ในช่วง -60% ถึง -100% โดยความเร็วที่เพิ่มขึ้นจะเกิดในขณะที่ความเร็วที่เกิดขึ้นในช่วงก่อนหน้า ก่อนจะมีความเร็วสูงสุดเมื่อจ่าย PWM เป็น -100% ซึ่งความเร็วสูงสุดจะหยุดที่อยู่ที่ประมาณ -230 rad/s

## อภิปรายผล

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อจ่าย PWM ในช่วง 0% ถึง -100% พฤติกรรมของความเร็วของ Motor drive ที่ควบคุมด้วยโหมด Sign-Magnitude และ Locked Anti-Phase มีความแตกต่างกัน คือในโหมด Sign-Magnitude ผลการทดลองคือความเร็วมีการเปลี่ยนแปลงแค่ค่าของความเร็วแต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางของความเร็วในขณะที่ Locked Anti-Phase มีการเปลี่ยนแปลงทั้งค่าของความเร็วและทิศทางของความเร็ว สาเหตุที่เป็นแบบนี้เกิดจากการที่ในการทดลอง โหมด Sign-Magnitude จ่ายขา Direction ด้วย Logic 0 และ 1 เพื่อควบคุมทิศทาง และจ่ายขา PWM ด้วยสัญญาณ PWM ทำให้การเปลี่ยนแปลงทิศทางของ Sign-Magnitude จะต้องจ่าย จ่าย PWM ในช่วง 0% ถึง 100% ในทิศทางหนึ่งและจ่าย PWM ในช่วง 0% ถึง -100% ในอีกทิศทางหนึ่ง ในขณะที่ในการทดลองในโหมด Locked Anti-Phase จ่ายขา Direction เพื่อควบคุมทิศทางด้วยสัญญาณ PWM และจ่ายขา PWM ด้วย Logic 0 และ 1 จึงทำให้ในโหมดนี้สามารถเปลี่ยนแปลงความเร็วได้แค่ในช่วง ในช่วง 0% ถึง -100% เพราะเป็นช่วงที่ขา PWM กำลังรับ Logic 1 และสาเหตุที่ทำให้ช่วงนี้สามารถเปลี่ยนแปลงทิศทางและความเร็วของ Motor ได้เกิดจากการที่จ่าย PWM ให้ขา Direction ซึ่งทำให้ขา Direction รับ Logic 0 และ 1 สลับกัน จาก PWM ทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ทั้งความเร็วและทิศทางของ Motor

## ข้อเสนอแนะ

- ควรบันทึกผลการทดลอง PWM ในช่วง 0% ถึง 100% เพิ่มเพื่อให้เห็นความแตกต่างที่ชัดเจน

## การทดลองที่ 2.1.2: ความสัมพันธ์ระหว่าง Speed และ Torque ที่แรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ

### จุดประสงค์

- เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง Speed และ Torque ที่แรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ
- เพื่ออธิบายวิธีการวัดและคำนวณหาค่า Stall Torque เพื่อนำไปใช้งาน

### สมมติฐาน

ค่าของ Speed และ Torque ขึ้นอยู่กับระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ Motor โดย แรงดันไฟฟ้าที่มีค่าสูงจะส่งผลให้ค่าของ Speed และ Torque สูงไปด้วย ในขณะเดียวกันเมื่อลดแรงดันไฟฟ้าลงจะทำให้ค่า Speed และ Torque ลดลงไปด้วย

### ตัวแปร

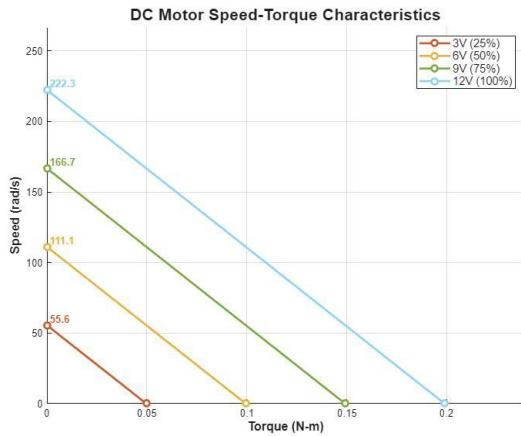
- ตัวแปรต้น
  - แรงดันที่จ่ายให้กับ Motor
- ตัวแปรตาม
  - ความเร็วรอบของมอเตอร์
  - แรงบิดของมอเตอร์
- ตัวแปรควบคุม
  - Load ที่ใช้โดยแบ่งออกเป็นช่วงที่มีโหลดกับไม่มีโหลด
  - ค่าของ Torque constants โดยใช้ค่าที่ 0.050535

### ขั้นตอนการดำเนินงาน

- เริ่มการทดลองโดยจะทดลองที่ duty cycle 25%, 50%, 75%, 100% ตามลำดับ (แรงดัน 3V, 6V, 9V, 12V)
- บันทึกค่าใน 2 ช่วง ได้แก่ No-load กับ Stall โดยค่าที่เก็บเป็นกระแสที่วัดได้, แรงบิดและความเร็ว
- นำค่าที่บันทึกไว้มาเข้าสมการเพื่อพิสูจน์เป็นกราฟความเร็ว กับ แรงบิดที่ระดับแรงดันต่างๆ

## ผลการทดลอง

2.1.2.1 ผลการทดลองเพื่อดูค่า Speed และ Torque ที่เกิดขึ้นในสภาวะ Steady state Condition



รูปที่ 15 ภาพแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Speed และ Torque ที่แรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ

## สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของความเร็วระหว่างช่วงที่มี Load และ No-Load จะเห็นได้ว่า เมื่อ Torque load มีค่ามากขึ้นจะส่งผลกระทบกับความเร็วรอบที่ลดลงและแรงดันที่จ่ายเข้าไปมีผลกับความเร็วรอบและ Torque ของมอเตอร์ที่เกิดขึ้น โดยความเร็วรอบที่เกิดขึ้นเมื่อโหลดเป็น 0 จะเห็นได้ว่าเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าไป 3 Volt จะมีความเร็วรอบเป็น 55.6 rad/s และเพิ่มเป็น 111.1 166.7 และ 222.3 rad/s ที่แรงดัน 6 9 และ 12 Volt ตามลำดับ ส่วน Stall Torque ซึ่งเป็น Torque สูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อความเร็วรอบเป็น 0 และจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ 3 6 9 และ 12 Volt จะได้ค่า Stall Torque ออกมากเท่ากับ 0.05 0.10 0.15 และ 0.20 Nm ตามลำดับ โดยทั้งหมดสามารถแสดงให้เห็นได้ว่าทั้งความเร็วรอบและ Torque ที่เกิดขึ้นแปรผันตรงกับ Vin ที่จ่ายเข้าไปซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี

## อภิปรายผล

จากสมการ Steady state condition สามารถนำสมการนี้มาอธิบายลักษณะของกราฟที่เกิดขึ้นได้จาก  $\omega = -\left(\frac{R}{BR+K_m K_b}\right)\tau_L + \left(\frac{K_m V_{in}}{BR+K_m K_b}\right)$  เมื่อนำมาเทียบกับสมการเส้นตรง  $y = mx + c$  จะเห็นว่า  $m = -\left(\frac{R}{BR+K_m K_b}\right)\tau_L$  หมายความว่าความชันที่ได้จะค่อย ๆ ลดลงเมื่อ Load มีค่ามากขึ้น และสมการที่จะนำมาระบายนี้จะเห็นได้ว่าความเร็วรอบ ณ จุดที่ไม่มีโหลดมีการแปรผันตรงกับ Vin ที่จ่ายเข้าไป จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อจ่าย Vin เข้าไปที่ 3.3 Volt(Duty cycle = 25%) จะมีความเร็วรอบเป็น 55.6 rad/s และเพิ่มเป็น 111.1 166.7 และ 222.3 rad/s เป็นการคูณที่ละ 2 3 4 เท่าตามลำดับของ Vin สุดท้ายสมการที่จะนำมาระบายนี้คือ  $\omega = \frac{K_m V_{in}}{R}$  ในกรณีที่  $V_{in} = 0$  คือ  $\omega = 0$

จากสมการนี้แสดงให้เห็นว่า Stall Torque และผันตรงกับ Vin ทำให้ผลการทดลอง Stall torque มีค่าเพิ่มเป็นสัดส่วนเดียวกัน สามารถสรุปได้ว่าผลการทดลองมีค่าเป็นไปตามทฤษฎี

### ข้อเสนอแนะ

- หากต้องการค่าที่มีความแม่นยำมากขึ้นระหว่างช่วงที่มีโหลดกับไม่มีโหลดทางผู้ทำการทดลองอาจจะต้องมีการจุน Load cell ก่อนทุกครั้งเพื่อให้ค่าอุกมาแม่นยำมากที่สุด

การทดลองที่ 2.1.3: ความสัมพันธ์ระหว่าง Torque , Speed , Current , Power and Efficiency จากมอเตอร์แบบบอร์ดการทดลอง

### จุดประสงค์

1. เพื่อศึกษาและสร้างกราฟ Motor Characteristic จากมอเตอร์แบบบอร์ดการทดลอง
2. เพื่ออธิบายสาเหตุที่ทำให้ได้กราฟ Motor Characteristic คลาดเคลื่อนจาก Ideal Case

### สมมติฐาน

ค่า Speed จะแปรผันกับค่า Torque แต่ว่าค่าที่ได้จากการทดลองจะต่ำกว่า ideal เพราะว่าตัวอุปกรณ์ทดลองมีแรงเสียดทานและอุณหภูมิห้องที่เปลี่ยนแปลงไปทำให้ Load cell มีค่า Error เล็กน้อย

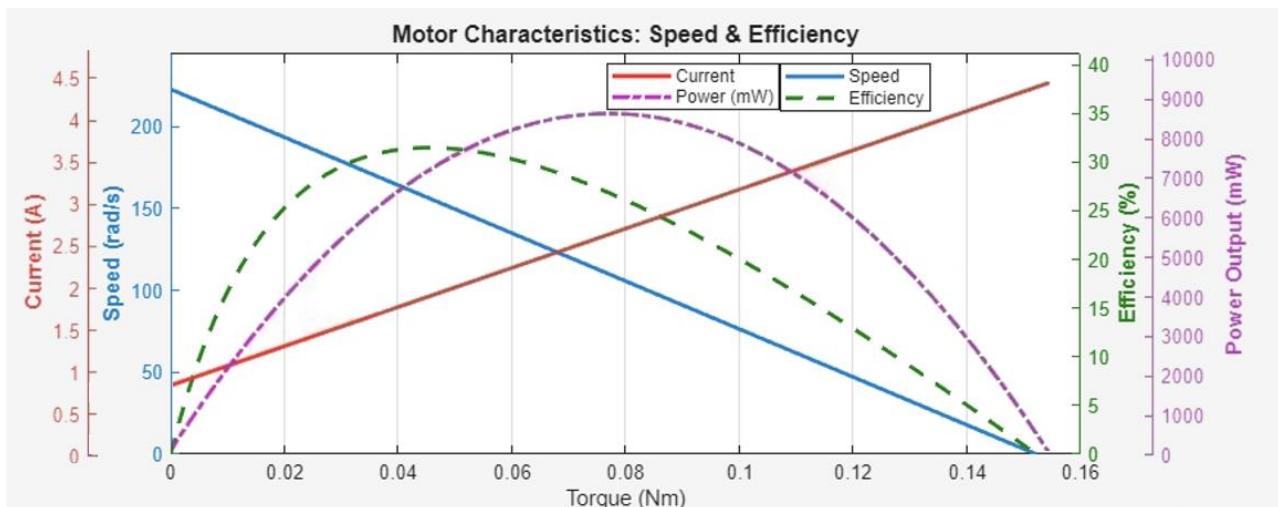
### ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น
  - แรงบิดของมอเตอร์
2. ตัวแปรตาม
  - ความเร็วของมอเตอร์
  - กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้
  - กำลังที่ใช้ในการขับมอเตอร์
  - ประสิทธิภาพของมอเตอร์
3. ตัวแปรควบคุม
  - Load ที่ใช้โดยแบ่งออกเป็นช่วงที่มีโหลดกับไม่มีโหลด
  - ค่าของ Torque constants โดยใช้ค่าที่ 0.050535

## ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ค่า Load Cell เพื่อใช้ในการวัด Torque โดยนำ IC ออกจากบอร์ดและต่อด้วย Resistor และ Trimpot เพื่อต้องการความแม่นยำในการตั้งค่า Gain ของ load Cell
2. เก็บค่าการทดลองโดยทำการขั้นตอนดังนี้
  - 2.1 ตั้งค่าให้ Motor ทำงานด้วยโหมด sign magnitude เพราะว่า มีความเหมาะสมและจะได้ค่าที่ตรงตามทฤษฎีมากที่สุด
  - 2.2 ตั้งค่าความถี่ของมอเตอร์ไว้ที่ 2000Hz
  - 2.3 ตั้งค่า PWM ไว้ที่ 100
  - 2.4 เก็บค่าโดยไม่มี load โดยทำการขั้นตอนออกไปที่ติดกับ shaft
  - 2.4. ปุ่มเริ่มแล้วเก็บค่าเป็นค่า Speed, Current, Torque, Efficiency
  - 2.5 เก็บค่าแบบมี load โดยทำการขั้นตอนตกลับเข้าไปที่ติดกับ shaft
  - 2.6 ปุ่มเริ่มแล้วเป็นค่าปลาย
3. นำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟของ Power และ Efficiency โดยมีขั้นตอนดังนี้
  - 3.1 นำค่าที่ได้จากการเก็บ เริ่มต้นและปลายของ Speed, Current, Torque ไปใส่ในสมการที่... เพื่อสร้างสมการ Power และนำค่าที่ได้ไปใส่สมการที่... เพื่อสร้างสมการ Efficiency

## ผลการทดลอง



รูปที่ 16 Motor Characteristic

## สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองกราฟที่ได้เป็นไปตาม Ideal โดยมอเตอร์มีจุดที่ระบบทำงานได้ดีที่สุดเมื่อ Torque มีค่า 0.04Nm.

## อภิปรายผล

ค่า Torque ที่ plot นั้นมีค่าต่ำกว่าทางทฤษฎีเล็กน้อย ตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ โดยสาเหตุที่คาดเอาไว้คือแรงเสียดทานระหว่างขดลวดตอนหมุน และโมเมนต์ที่เกิดขึ้นระหว่างก้านทดสอบกับตัว LoadCell มีระยะมุนกัดที่คล้ายเคลื่อนจากที่คำนวณ และ อุณหภูมิห้องที่ทดลองนั้นส่งผลต่อค่าที่อ่านได้จาก LoadCell

**การทดลองที่ 2.1.4: ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ PWM และ Duty Cycle ซึ่งส่งผลต่อ ความเร็ว กระแสไฟฟ้า และประสิทธิภาพของมอเตอร์**

## จุดประสงค์

1. เพื่อศึกษาหลักการของ PWM และ Duty Cycle
2. เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ PWM, Duty Cycle และความเร็วของมอเตอร์
3. เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ PWM, Duty Cycle และกระแสไฟฟ้า
4. เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ PWM, Duty Cycle และประสิทธิภาพของมอเตอร์
5. เพื่อศึกษาขั้นตอนการทำ Signal Conditioning สำหรับการอ่านค่ากระแสไฟฟ้า
6. เพื่อวิเคราะห์ความถี่ (FFT) ของสัญญาณความเร็วรอบมอเตอร์ที่ความถี่ PWM ต่าง ๆ
7. เพื่อศึกษาการสร้าง Low-Pass Filter สำหรับการวัดความเร็วรอบมอเตอร์

## สมมติฐาน

ที่ Duty cycle ต่างๆ มอเตอร์จะยังไม่เริ่มหมุนเนื่องจาก Torque ไม่พอ เมื่อเพิ่มค่า Duty Cycle และความถี่ความเร็วของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้น และใช้กระแสไฟมากขึ้นประสิทธิภาพของมอเตอร์จะสูงขึ้นตามที่กำหนด

## ตัวแปร

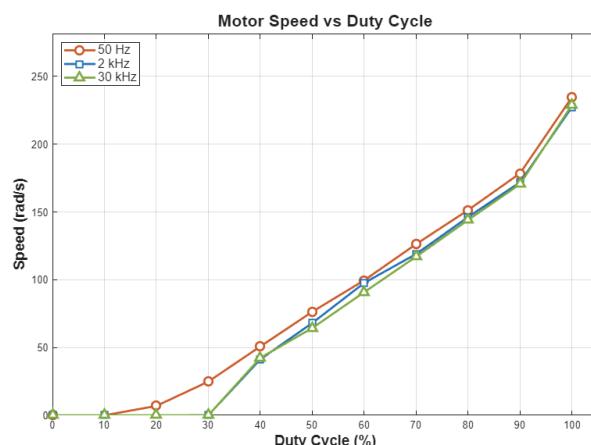
1. ตัวแปรต้น
  - ความถี่ PWM มีหน่วยเป็น Duty cycle
2. ตัวแปรตาม
  - ความเร็wmอเตอร์
  - กระแสไฟของมอเตอร์

- ประสิทธิภาพของมอเตอร์
3. ตัวแปรควบคุม
    - แรงดันไฟฟ้า 12 V
    - ไม่มีโหลด

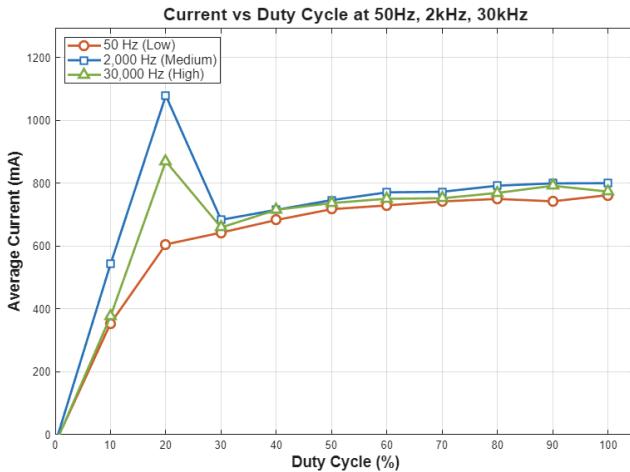
### ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ทำการทดลองด้วยการปรับ duty cycle เป็น 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100% ที่ 3 ระดับความถี่ ได้แก่ 50Hz , 2000Hz , 30000Hz
2. บันทึกผลความเร็ว, กระแสที่ความถี่ต่างๆ ในช่วง No-load
3. ในการคิดประสิทธิภาพมอเตอร์จะเก็บค่ากระแสและความเร็วในช่วง No-load และ Stall ที่ความถี่ต่างๆ
4. นำค่าที่ได้มาพล็อตเป็นกราฟกระแสที่ความถี่ต่างๆ กับความเร็วที่ความถี่ต่างๆ และ ประสิทธิภาพที่ความถี่ต่างๆ

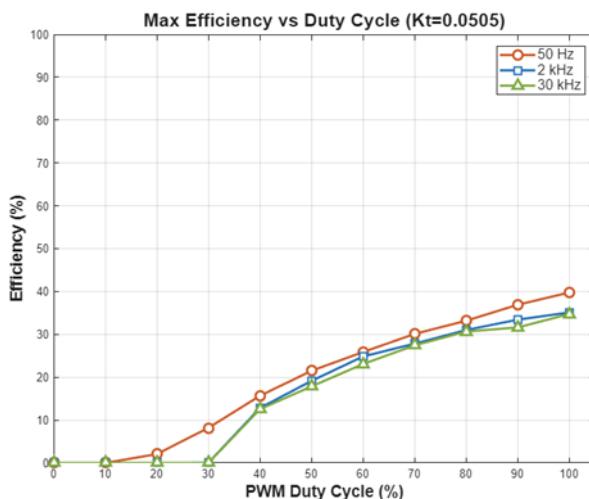
### ผลการทดลอง



รูปที่ 17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Duty cycle ที่เพิ่มขึ้นกับความเร็วของ Motor



รูปที่ 18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Duty cycle ที่เพิ่มขึ้นกับกระแสไฟของ Motor



รูปที่ 19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Duty cycle ที่เพิ่มขึ้นกับประสิทธิภาพของ Motor

## สรุปผลการทดลอง

จากการภาพของความเร็วจะเห็นได้ว่าในช่วงแรก Motor หมุน แต่หลังจากค่าของ Duty cycle ค่าหนึ่ง Motor จะเริ่มหมุนซึ่งความเร็วของ Motor โดยมีความสัมพันธ์แปรผันโดยตรงกับ Duty cycle โดยในขณะเดียวกันในช่วงที่ ความเร็วของ Motor เพิ่มขึ้นกระแทกเพิ่มขึ้นตาม Duty cycle ที่เพิ่มขึ้น ในส่วนของ ประสิทธิภาพของ Motor จะมีการเปลี่ยนแปลงตาม Duty cycle และความถี่ ซึ่งความถี่ที่ต่ำมีแนวโน้มว่าจะให้ประสิทธิภาพที่กว่า

## อภิปรายผล

ที่ Duty cycle น้อยกว่าค่าหนึ่ง Motor จะยังไม่หมุน เนื่องจากแรงบิดที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยยังไม่เพียงพอที่จะเอาชนะแรงเสียดทานภายในมอเตอร์ได้ จากผลการทดลองจะพบว่า Duty cycle ส่งผลต่อ แรงดันไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ Duty cycle เป็นตัวกำหนดแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย ซึ่งส่งผลให้ความเร็วที่เกิดขึ้นแปรผันตรงกับ

กระแสไฟฟ้าที่จ่าย โดยจากการทดลองจะเห็นได้ว่าความถี่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของ Motor โดย Motor ที่ทำงานโดยใช้ความถี่ที่ต่ำกว่ามีโอกาสให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าซึ่งขัดแย้งกับทฤษฎีว่า Motor ที่ทำงานโดยใช้ความถี่ PWM ที่สูงกว่า มักจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าเนื่องจาก เมื่อใช้ความถี่ที่ต่ำ จะทำให้เกิด Current Ripple ที่สูงมาก ส่งผลให้ค่ากระแส RMS สูงขึ้น และเกิดการสูญเสียพลังงานความร้อน ในชุดลวดเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ลดลง แต่จากการทดลองสิ่งที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากความถี่ที่ใช้เกินขอบเขตของความถี่ที่ควรใช้ทำให้เกิดจากการสูญเสียพลังงานจากสลับของตัวขับ Motor ทำให้ประสิทธิภาพลดลง

### ข้อเสนอแนะ

- ในขั้นตอนการทำ Signal Conditioning สำหรับการอ่านค่ากระแสไฟฟ้า ควรมีการบันทึกและแสดง การเบรียบเทียบสัญญาณกระแสที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพสัญญาณ

## LAB 2.2 : Stepper Motor

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 1. หลักการทำงานของ Stepper Motor

Stepper motor อาศัยการเปลี่ยนสัญญาณแบบพัลส์ โดยมีการหมุนแบบ Step angle โดยมีหลักการพื้นฐานคือการใช้สนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นจากชุดชุดลวดใน Stator เพื่อดึงดูดหรือผลัก Rotar ซึ่งเป็นแม่เหล็กทราบ โดยจะจ่ายไฟไปยังชุดลวด Stator ตามลำดับที่กำหนด การสลับลำดับการจ่ายไฟนี้จะทำให้ตำแหน่งของสนามแม่เหล็กเปลี่ยนทิศทางไป ทำให้ Rotar ต้องหมุนไปยัง Alignment ถัดไป โดยตำแหน่งจะถูกควบคุมด้วยจำนวน Pulse และความเร็วควบคุมโดย Frequency ของ Pulse

#### 2. ประเภทของ Stepper Motor

##### 2.1 Permanent Magnet

สร้าง Torque โดยอาศัยแรงดึงดูดระหว่างสนามแม่เหล็กทราบบน Rotar และสนามเหล็กบน Stator โดยสร้างนี้จะให้ผลลัพธ์คือปริมาณ Torque ที่ดีและยังมี Detent Torque โดย Detent Torque คือแรงบิดด้านการหมุนที่เกิดขึ้นแม่ไม่ได้จ่ายไฟ ข้อเสียของ Permanent Stepper Motor คือมีความเร็วสูงสุดและ Resolution ต่ำกว่าประเภทอื่น ๆ

##### 2.2 Variable reluctance

โดย Rotar เป็นแบบความต้านทานแปรผัน โดย Rotar ทำจาก iron core และมีรูปทรงเฉพาะที่ทำให้สามารถ Align กับสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นโดย Stator ได้ ด้วยโครงสร้างนี้ทำให้ความเร็วและ Resolution สูงขึ้นแต่ Torque ที่สร้างขึ้นต่ำและไม่มี Detent Torque

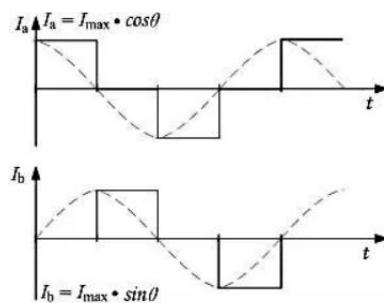
### 2.3 Hybrid Rotar

เป็นประเภทที่ดึงคุณสมบัติของมอเตอร์แบบ Permanent และ Variable เข้ามารวมกัน โดยนำหลักการใช้แม่เหล็กถาวร จาก Permanent เพิ่มค่าแรงบิด และนำ โครงสร้างฟันเพื่อละเอียด ของ Variable มาสร้างความละเอียดในการหมุนทำให้เพิ่มความเร็ว ของมอเตอร์ โครงสร้างแบบนี้ทำให้มอเตอร์มี Resolution, ความเร็วและ Torque ที่สูง

### 3. หลักการขับเคลื่อนของ Stepper Motor

#### 3.1 Full Step

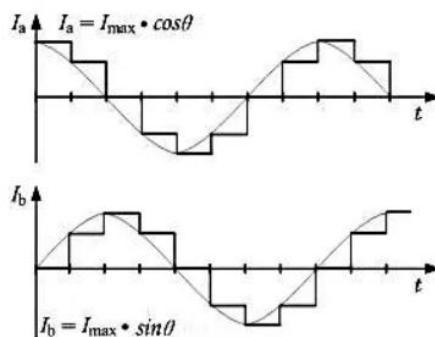
Motor Driver จะจ่ายพลังงานให้กับ ชุดลวดเฟส A และเฟส B ของ Step Motor ตาม Pulse และทิศทางที่จ่ายไป โดยแต่ละพัลส์ที่จ่ายไปจะทำให้มอเตอร์หมุนไปด้วย Basic Step Angle โดยลักษณะกราฟจะแบ่งออกเป็น สี่ส่วนเท่ากัน



รูปที่ 20 แสดงลักษณะกราฟของ Stepper Motor โหมด Full-step drive

#### 3.2 Half Step

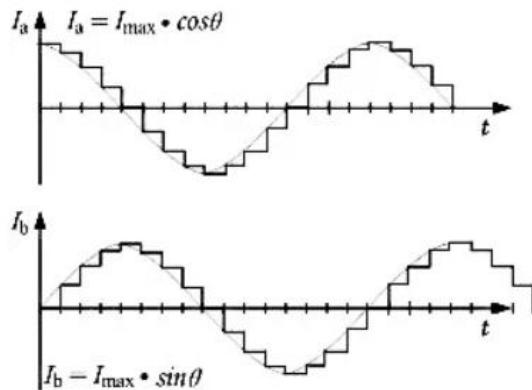
ใช้หลักการสลับรูปแบบการจ่ายกระแสไฟให้แต่ละชุดลวด โดยจะเป็นการจ่ายไฟเข้าชุดลวดหนึ่ง ชุด สลับกับการจ่ายไฟเข้าอีกสองชุดพร้อมกันอย่างต่อเนื่อง การสลับโหมดจะทำให้ Rotor สามารถหยุดในตำแหน่งกึ่งกลาง ระหว่าง Stator ได้ จะเคลื่อนที่ด้วยมุมที่ละเอียดขึ้นช่วยเพิ่มความละเอียดเป็นสองเท่าเมื่อเทียบกับ Full Step



รูปที่ 21 แสดงลักษณะกราฟของ Stepper Motor โหมด Half-step drive

### 3.3 Micro Step

ใช้หลักการควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่ชุดลวด 2 ชุดลวด ให้มีความละเอียดulatory ระดับ โดย Motor Driver จะทำหน้าที่แปลงสัดส่วนของกระแสไฟของชุดลวด เมื่อกระแสไฟของชุดลวดที่ 1 ลดลง กระแสของอีกชุดลวดจะเพิ่มขึ้น ในอัตราส่วนที่สัมพันธ์กัน ทำให้สามารถขับ Rotor ให้หยุดในตำแหน่งอย่างได้



รูปที่ 22 แสดงลักษณะกราฟของ Stepper Motor โดย Micro-step drive

### 4. Loss Step

Loss Step เกิดขึ้นเมื่อมอเตอร์ไม่สามารถเร่งความเร็วหรือรักษาความเร็วการหมุนของ Rotar ให้ทัน กับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กใน Stator ได้ โดยสาเหตุที่พบบ่อยได้แก่ แรงบิดไม่เพียงพอเมื่อโหลดที่มอเตอร์ต้องขับมีค่าเกินกว่าแรงบิดที่มีอยู่ ณ ความเร็วที่กำหนด Rotar เคลื่อนที่ไม่สอดคล้องกับสนามแม่เหล็กใน Stator หรืออาจเกิดได้จากอัตราเร่งสูงเกินไป หากมอเตอร์ถูกสั่งให้เร่งเร็วมากเกินไปในเวลาสั้น ๆ Rotar จะไม่สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กได้ทัน หรือรับความถี่พลังงานพุ่งสูงเกินกว่าที่มอเตอร์จะตอบสนองได้

### อ้างอิง

- <https://www.monolithicpower.com/en/learning/resources/stepper-motors-basics-types-uses>
- <https://mechtex.com/blog/step-loss-in-stepper-motors-causes-and-how-to-prevent-it>
- <https://www automate.org/motion-control/case-studies/what-is-the-difference-between-full-stepping-the-half-stepping-and-the-micro-drive>
- <https://mechtex.com/blog/explore-the-different-stepping-modes-of-a-stepper-motor>
- <https://drive.google.com/file/d/1FDNP7cmAZjPlyCe7LkCg8NYwdRyl3y9p/view>

## การทดลองที่ 2.2.1: ศึกษาพฤติกรรมของ Loss Step

### จุดประสงค์

- เพื่อศึกษาพฤติกรรมของ Loss Step
- เพื่อจัดการเปลี่ยนของ Loss Step เมื่อกำหนดความเร่งที่แตกต่างกัน
- เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณขับกับความเร็วรอบของมอเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงตามความเร่ง

### สมมติฐาน

ยิ่งความเร่งเพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อการทำงานของมอเตอร์ โดยมอเตอร์อาจต้องการแรงบิดที่มากกว่าเดิมในหมุนให้ทันความเร่งที่จ่ายเข้าไปซึ่งหากหมุนไม่ทันก็อาจทำให้เกิด Loss step และหากจ่ายความเร่งมากเกินไปมอเตอร์อาจไม่หมุนในช่วงต้น

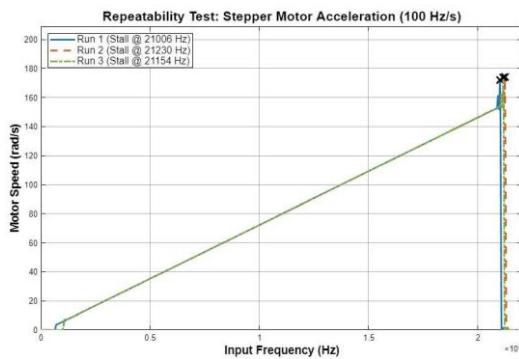
### ตัวแปร

- ตัวแปรต้น
  - การความถี่ในการทำงานของ Stepper Motor ในแต่ละโหมด
- ตัวแปรตาม
  - ช่วงที่เกิด Loss step ของแต่ละโหมด
- ตัวแปรควบคุม
  - กำหนดอัตราการเพิ่มขึ้นของความถี่ โดยให้เพิ่มทีละ 500 Hz/sec

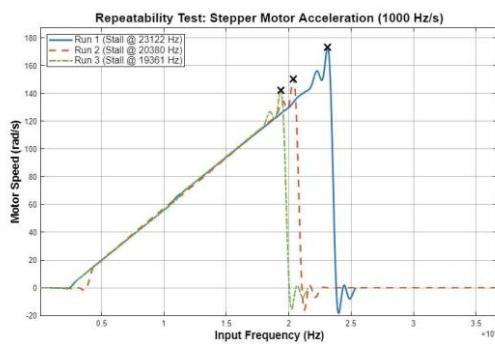
### ขั้นตอนการดำเนินงาน

### ผลการทดลอง

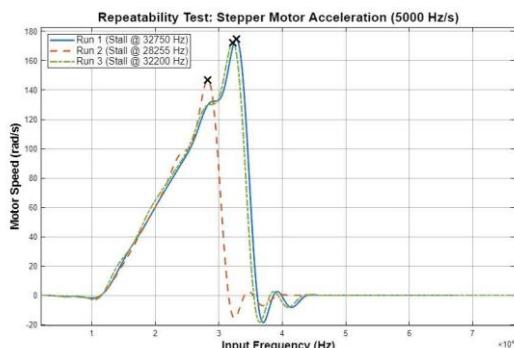
2.2.1.1 ผลการทดลองเพื่อหา Loss Step ที่เกิดขึ้นเมื่อกำหนดความเร่งที่ต่างกันที่ 100 1000 และ 5000 Hz/s โดยทำขั้นตอนทั้งหมดค่าละ 3 ครั้งแล้วนำผลกราฟเพื่อดูประสิทธิภาพในการทำข้า



รูปที่ 23 แสดงลักษณะกราฟของ Stepper Motor ในตอนที่เกิด Loss Step ที่ความเร่ง 100 Hz/s โดยทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง

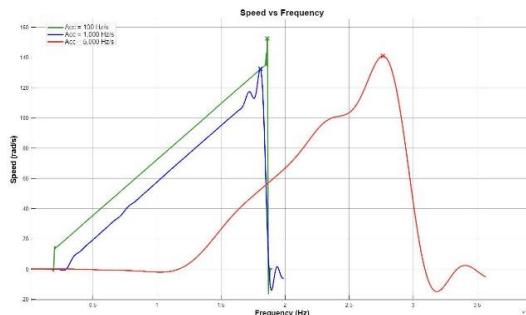


รูปที่ 24 แสดงลักษณะกราฟของ Stepper Motor ในตอนที่เกิด Loss Step ที่ความเร่ง 1000 Hz/s โดยทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง



รูปที่ 25 แสดงลักษณะกราฟของ Stepper Motor ในตอนที่เกิด Loss Step ที่ความเร่ง 5000 Hz/s โดยทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง

2.2.1.2 ผลการทดลองเพื่อหา Loss Step ที่เกิดขึ้นเมื่อกำหนดความเร่งที่ต่างกันที่ 100 1000 และ 5000 Hz/s และนำมารวบรวมของกราฟที่เกิดขึ้นและนำมาเปรียบเทียบกัน



รูปที่ 26 แสดงลักษณะกราฟของ Stepper Motor ในตอนที่เกิด Loss Step ที่ความเร่งต่างๆ

### สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองที่ 2.2.1.1 แสดงให้เห็นว่าที่ความเร่ง 100 Hz/s Motor speed จะแปรผันตามความถี่สัญญาณที่ป้อนเข้าและทั้ง 3 ครั้งเกิด Loss step ที่ความถี่ประมาณ 21000 Hz และทำความเร็วสูงสุดประมาณ 170 rad/s แสดงให้เห็นถึงความสม่ำเสมอในการทำงาน ที่ความเร่ง 1000 Hz จะเกิด Loss step ที่ช่วงความถี่ 19631 ถึง 23122 Hz และแสดงให้เห็นถึงความคาดเคลื่อนที่ ณ จุดที่เกิด Loss step ที่ไม่เท่ากัน และแสดงให้เห็นถึงความคาดเคลื่อนที่สูงขึ้น ความเร่งที่ 5000 Hz มอเตอร์จะเริ่มหมุนที่ความถี่ประมาณ 10000 Hz นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าก่อนจะเกิด Loss step ความเร็วจะพุ่งสูงขึ้นตลอดทั้ง 3 ครั้ง ความถี่ที่เกิด Loss step ทั้ง 3 ครั้งมีความคาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย

จากผลการทดลองที่ 2.2.1.2 จะเห็นได้ว่าที่ความเร่ง 100 Hz/s – เส้นสีเขียว กราฟที่ได้เป็นไปในลักษณะเชิงเส้น โดยความเร็วสูงสุดจะอยู่ที่ 150 rad/s ที่ความถี่ 18000 Hz ก่อนจะเกิด Loss step ที่อัตราเร่ง 1000 Hz/s – เส้นสีแดง จะเห็นได้ว่าความเร็วที่เกิดขึ้นจะเกิดช้ากว่าที่ 100 Hz/s เล็กน้อยและความเร็วสูงสุดจะอยู่ประมาณ 135 rad/s และความถี่ของช่วงที่เกิด Loss Step ก็ช้ากว่าเพียงเล็กน้อย เช่นกัน และที่ความเร่ง 5000 Hz/s – เส้นสีแดง จะสามารถเห็นได้ชัดว่าความเร็วที่เกิดขึ้นเกิดที่ช่วงความถี่ประมาณ 12500 Hz พบว่าความเร็วที่เกิดขึ้นจะช้ากว่าที่ความถี่ต่ำกว่า และความเร็วสูงสุดจะอยู่ที่ 140 rad/s และเกิด Loss step ที่ความถี่ประมาณ 32000 Hz

### อภิปรายผล

จากการทดลองสามารถนำมารวบรวมได้ว่า Loss step ที่เกิดขึ้นเกิดจากการที่ Rotar ทำการเคลื่อนที่ของ Stator ไม่ทันเนื่องจาก Torque ไม่พอที่จะทำให้มอเตอร์หมุนให้ทันความเร่งที่จ่ายเข้ามา ที่ความเร่ง 100 Hz/s ความเร็วแปรผันตามความถี่เป็นเส้นตรง เพราะมอเตอร์มี Torque เพียงพอในการเร่งความเร็วให้สามารถรักษาสภาพการเคลื่อนที่ให้สอดคล้องกับ Stator ได้ ที่ความเร่ง 1000 Hz/s มอเตอร์ต้องใช้ Torque มากขึ้นให้สามารถหมุนผ่านแรง Inertia เพื่อเร่งความเร็วให้ทันความถี่ที่เพิ่มขึ้นเร็วมากกว่าเดิม ทำให้เกิด Loss step ในช่วงแรกเล็กน้อย การใช้ Torque ไปส่วนนึงในช่วงต้นนี้ส่งผลให้ความเร็วสูงสุดที่ทำได้ลดลง สุดท้ายที่ความเร่ง 5000 Hz/s จะสามารถเห็นได้ชัดว่าช่วงแรกเกิด Loss step จนถึงความถี่ประมาณ 12500 Hz เนื่องจากความเร่งสูงส่งผลให้ความถี่พัลส์สูงตาม ทำให้

Motor ต้องใช้ Torque ในการเร่งสูงเกิน ผลลัพธ์คือมอเตอร์ไม่หมุนเนื่องจากไม่สามารถสร้างแรงบิดได้ทันความเร่งในตอนต้น ดังนั้นในช่วงความถี่ตั้งแต่ 0 ถึง 12500 Hz มอเตอร์จึงอยู่ในสภาพหยุดนิ่ง(Stall) จะกระแทกความถี่สูงขึ้นมากพอจะมี Torque พอดีเริ่มหมุนตาม Stator ได้ สาเหตุที่เกิด Loss Step หลังจากไปถึงความเร็วรอบสูงสุดของแต่ละความถี่เป็นเพราะว่า Pull-out torque ของมอเตอร์ไม่เพียงพอ

### ข้อเสนอแนะ

- ในการนำค่าความเร่งที่ต่างกันทั้งสามค่ามา subplot ภาพเพื่อดูความต่างของช่วงที่เกิด Loss Step ควรนำค่าที่จากการทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้งมาเฉลี่ยกันแล้ว subplot ภาพเพื่อดูช่วงที่เกิด Loss Step เนื่องจากในการทดลองนี้ทางผู้จัดทำไม่ได้ทำการทดลองทั้ง 2 ครั้งต่อเนื่องกัน ซึ่งอาจทำให้ค่าที่ได้มีไม่ตรงกัน เนื่องจากการประสิทธิภาพของมอเตอร์ในการทดลองทั้งสองครั้งไม่เท่ากัน

การทดลองที่ 2.2.2: เปรียบเทียบการทำงานของ Stepper Motor ในแต่ละโหมด Wave Drive, Full Step, Half Step และ Micro step

### จุดประสงค์

1. เพื่อศึกษาหลักการทำงานของ Stepper Motor
2. เพื่อธิบายและเปรียบเทียบโหมด Wave Drive, Full Step, Half Step และ Micro step
3. ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณขับกับความเร็วรอบของมอเตอร์ในแต่ละโหมด

### สมมติฐาน

- การเปลี่ยนวิธีการ Drive ในแต่ละโหมดจะส่งผลต่อความละเอียดในการเคลื่อนที่ของ Stepper Motor โดยยิ่งความละเอียดสูงขึ้นความเร็ว ก็จะลดลง
- การ Drive แบบ Full Step จะมีความกระตุกมากกว่าการ Drive โหมด Half Step และ Micro step

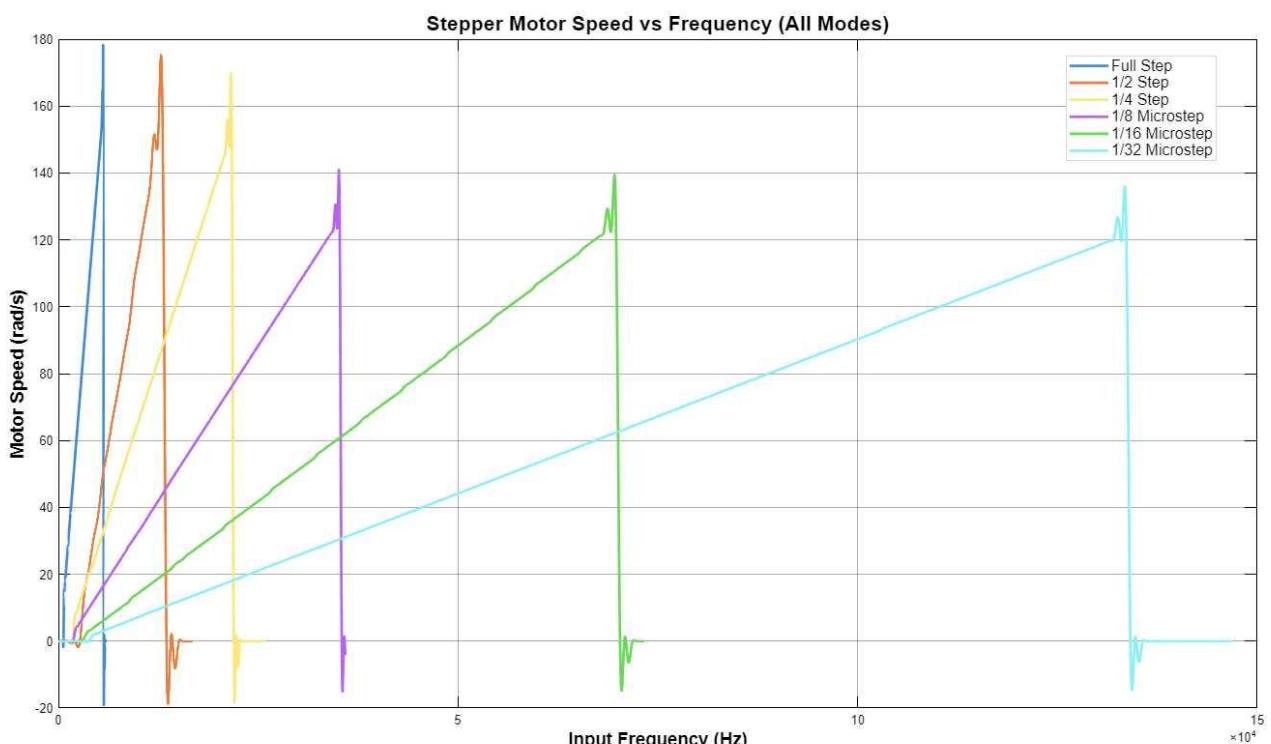
### ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น
  - การความถี่ในการทำงานของ Stepper Motor ในแต่ละโหมด
2. ตัวแปรตาม
  - ความเร็วที่เกิดขึ้น
3. ตัวแปรควบคุม
  - กำหนดอัตราการเพิ่มขึ้นของความถี่ โดยให้เพิ่มทีละ 500 Hz/sec

## ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. set Block Rap ใน Simmulink ให้มีค่า 500
2. Set mode ที่ต้องการทดสอบตามData Sheet โดยลำดับการทดสอบมีดังนี้ Full Step, 1/2Step, 1/4Step, 1/8Step, 1/16Step และ 1/32Step ตามลำดับ
3. เมื่อเก็บค่าจะทำการ Set Block EN ให้มีค่าเป็น0 ก่อนจะกดปุ่ม Run เมื่อ Stepper Motor เกิดการ Cut off จะเปลี่ยนค่า EN กลับมาเป็น 1 เพื่อหยุดการทำงาน
4. เมื่อเก็บค่าเสร็จแต่ละโหมดจะทำการเปลี่ยนโหมดตามขั้นตอนที่2 และเก็บค่าตามขั้นตอนที่3

## ผลการทดลอง



รูปที่ 27 แสดงลักษณะกราฟของ Stepper Motor

จากการทดลองเราได้กราฟของแต่ละโหมดเข้ามาร่วมกันเพื่อเปรียบเทียบซึ่งสังเกตได้ชัดเจนว่า กราฟมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มสูงขึ้น โดย Drive mode ที่ละเอียดขึ้นจะมีความถี่ที่สูงขึ้นด้วย

## สรุปผลการทดลอง

เมื่อทำการทดลองในโหมด Full Step มีความกระตุกมากที่สุดและการเร่งความเร็วในช่วงแรกสูงกว่าโหมดอื่นๆ แต่ช่วงที่ cutoff จะมี 2 แบบคือหยุดนิ่งไปเลยกับหมุนต่อแบบติดพร้อมกับมีเสียงที่ชัดเจนและหยุดนิ่ง

โหมด Half Step เป็นโหมดที่เคลื่อนที่ได้ให้ลีนมากกว่า Full Step และกราฟมีการ CutOff ที่นิ่มค่าความถี่ห่างจาก Full Step ไม่นักมีความเรียบมากกว่า

โหมด Micro step เป็นโหมดที่ไม่มีการกระตุกของมอเตอร์ มีช่วง CutOff ที่นานกว่า Mode อื่นๆ และช่วง cutoff มีการหยุดหมุนพร้อมกับเสียงแหลมหูที่ชัดเจน

### อภิปรายผล

จากราฟ Mode ที่เกิดความเร็วสูงที่สุดคือ Mode คือ Full Step เนื่องจากมีขนาดมุมต่อสเต็ปการหมุนมากที่สุด เมื่อเทียบกับโหมดอื่นที่ใช้ความถี่ในการ Drive เหมือนกัน และเนื่องจากมีมุมในการบิดที่เยอะกว่าส่งผลให้ Torque เยอะกว่าโหมดอื่นๆ การอาชนัชแรงเรียบของ แกนหมุนจะทำได้กว่าทำให้มีค่า Speed ที่สูงด้วย

โหมดที่มีความเร็วต่ำที่สุดในกราฟคือ Microstep แต่ก็เป็นโหมดที่ใช้ความถี่ในการ Drive ที่เยอะกว่าโหมดอื่น เช่นกัน โดยช่วงที่ CutOff จะกำหนดความถี่ที่ตัว Drive สามารถทำได้ หมายความว่า ยิ่งโหมดที่รับความถี่ได้เยอะก็จะยิงจ่าย Pulse ที่ละเอียดขึ้นได้ ทำให้สามารถควบคุมได้ละเอียดขึ้น

### ข้อเสนอแนะ

- ทางผู้ทำได้เลือกเห็นว่าแต่ละโหมดถ้า Drive ด้วยการเพิ่มความถี่แบบ Ramp ที่ต่างกันจะส่งผลต่อความเร็วของ Stepper Motor ซึ่งจะมีช่วงที่ Drive ได้ดีที่สุดแต่ด้วยเวลาที่จำกัดเลยยังไม่สามารถทำตารางเปรียบเทียบช่วงที่ Efficiency มากที่สุดได้

## LAB 2.3 : BLDC Motor

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

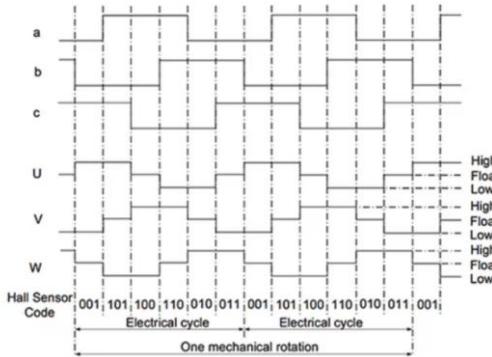
#### 1. โครงสร้างของมอเตอร์ BLDC



รูปที่ 28 โครงสร้างของ Outer rotor BLDC motor

โครงสร้างของ motor BLDC ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญสองส่วน ได้แก่

- 1.1 Rotor เป็นส่วนที่หมุนได้ ซึ่งติดตั้ง แม่เหล็กถาวร (Permanent Magnets) ไว้
  - 1.2 Stator เป็นส่วนที่อยู่กับที่ ซึ่งพันด้วย ขดลวด (Winding) ตามจำนวนขั้ว (Poles) ที่ เลือกมา
  - 1.3 วงจรควบคุม ซึ่งจะเชื่อมต่อ กับ ขดลวด stator ทำหน้าที่จ่ายไฟ 3 เฟสไปยังขดลวด stator ซึ่ง จะทำให้ motor สามารถหมุนไปตามมุมต่าง ๆ ที่ต้องการได้
2. หลักการของสัญญาณ 3-Phase ในการขับเคลื่อน motor BLDC



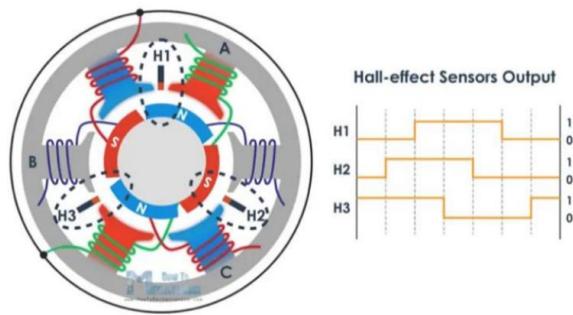
รูปที่ 29 สัญญาณ 3-Phase ในการขับเคลื่อน motor BLDC

ในการขับเคลื่อน motor BLDC จะอาศัยการใช้หลักการของไฟ 3-Phase คือ จะจ่าย แรงดันไฟฟ้าสัมภากัน 3 ชุด (a b c) ซึ่งแต่ละ Phase จะมีมุม Phase ต่างกันที่ 120 องศา โดยจ่าย แรงดันให้กับขดลวด 3 ชุด (U V W) ที่อยู่ภายใน stator ซึ่งเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดจะสร้าง สนามแม่เหล็กขึ้น โดยไฟที่ต่างกันทั้ง 3 Phase จะทำให้ขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นใน stator เปลี่ยน ตำแหน่งไป ซึ่งส่งผลให้ Rotor ที่เป็นขั้วแม่เหล็กหมุนตามสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นจึงทำให้ motor หมุน

### 3. การใช้ Hall Effect Sensor และ Back EMF Sensing ในการรัดมุม

#### 3.1 Hall Effect Sensor

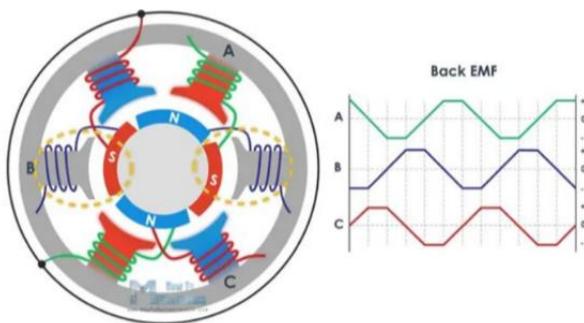
เป็นเซนเซอร์ ซึ่งติดตั้งอยู่ใน Stator เพื่ออ่านตำแหน่งแม่เหล็กของ Rotor โดยทั่วไปมีสามตัว ได้แก่ U V W ซึ่งจะถูกเรียกเป็นช่วง ๆ เพื่อให้ controller รู้ว่าปัจจุบัน motor หมุนไปตำแหน่งไหน และควรจ่ายไฟไปขดลวดไหนตอนไหน



รูปที่ 30 แสดงสัญญาณที่เกิดจาก Hall Effect Sensor

### 3.2 Back EMF Sensing

เป็นวิธีการหาตำแหน่งของ Rotor โดยการใช้สัญญาณ back-EMF ที่เกิดในชด漉ัดเมื่อ Rotor หมุน โดยไม่ต้องจ่ายไฟให้ชด漉ัดนั้นโดยตรง โดยหลักการคือเมื่อ Rotor หมุนผ่านชด漉ัดจะเห็นว่ามีไฟฟ้าไหลกลับคืนมา หรือ Back Electromotive Force ขึ้นลักษณะของแรงดันที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับ ความเร็วของการหมุน ตำแหน่งของ Rotor ผลลัพธ์แม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร แรงดัน BEMF เป็นตัวแทนตำแหน่ง Rotor โดยตรง โดยวิธีการนี้จะ มี Phase ที่ซักว่าแบบ Hall Effect Sensor 60 องศา



รูปที่ 31แสดงสัญญาณที่เกิดจาก Back EMF Sensing

### 3.3 ความแตกต่างระหว่างการใช้วิธี Hall Effect Sensor กับ Back EMF Sensing

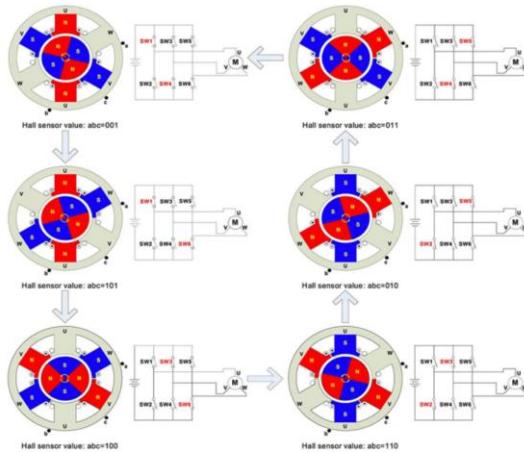
ข้อดีของ Hall Effect Sensor คือให้สัญญาณที่เร็วกว่า สามารถอ่านตำแหน่งได้โดยที่ไม่ต้องหมุน ทำให้มีความแม่นยำในการระบุตำแหน่งมากกว่า ส่วนข้อเสียของ Hall Effect Sensor คือมีค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม และต้องติดตั้งตัว Sensor เพิ่มเติม ส่วนข้อดีของ Back EMF Sensing คือ ไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์เพิ่ม ทำให้นิยมใช้ริบบินมากกว่า แต่ข้อเสียคือ สัญญาณมีความแรงน้อย ซักว่าตัว Hall Effect Sensor และไม่สามารถมีสัญญาณหาก Motor ไม่หมุน

## 4. หลักการของการขับเคลื่อนแบบ 6-Step และการควบคุมแบบ FOC

### 4.1 หลักการของการขับเคลื่อนแบบ 6-Step

หลักการคือเพื่อให้ Rotor หมุนตามสนามแม่เหล็กที่หมุนได้ Stator ต้องสลับ Phase ทุกช่วงเวลา ซึ่งการสลับ Phase นั้นจะถูกควบคุมด้วย Motor controller โดย Controller จะสลับ 6-

Step โดยใช้ไฟที่ต่ำกันห้อง 3 Phase ส่งผลให้สนามแม่เหล็กที่เกิดจาก Stator เกิดการเปลี่ยนแปลง และทำให้ Rotor หมุนตาม ส่งผลให้ Motor หมุน



รูปที่ 32 แสดง 6-Step สำหรับการเปลี่ยนมอเตอร์ BLDC

#### 4.2 การควบคุมแบบ FOC

FOC ใช้วิธีการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดัน 3 Phase ซึ่งเป็น rotating reference frame ไปเป็นแกนพิกัดที่หมุนตามสนามแม่เหล็กของ Rotor ทำให้สามารถแยกการควบคุมแรงบิดและพลัง磁 แม่เหล็กออกจากกัน ให้เหมือนการควบคุม Motor DC ทำให้ควบคุมแรงบิด ความเร็ว และตำแหน่งได้แม่นยำสูง มีประสิทธิภาพดี และตอบสนองรวดเร็ว เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความแม่นยำสูง

#### 4.3 ความแตกต่างระหว่างการควบคุมแบบ 6-Step กับ FOC

FOC มีแรงบิดที่สม่ำเสมอมากกว่า 6-Step แต่ FOC มีจีนตอนที่ยุ่งยากมากกว่าในการใช้งานและต้องอาศัยการคำนวณสูง 6-Step นิยมใช้ในงานที่ต้องการความแม่นยำต่ำในขณะที่ FOC ใช้งานในงานที่ต้องการความแม่นยำของแรงบิดสูง

### 5. ทิศทางการหมุนของมอเตอร์

ปัจจัยที่มีผลต่อทิศทางการหมุนของ BLDC คือ ลำดับของขดลวดใน Stator ใน Motor 3 Phase โดยลำดับการให้流ของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านขดลวดจะกำหนดทิศทางสนามแม่เหล็กที่กำลังหมุน โดยเมื่อตัวควบคุมจ่ายไฟให้กับ Phase ตามลำดับ U → V → W มอเตอร์จะหมุนในทิศทางเดียว โดยปกติจะ หมุนตามเข็มนาฬิกา (CW) และเมื่อลำดับกลับด้านไปที่ U → W → V สนามแม่เหล็ก—และการหมุนของมอเตอร์—จะกลับด้านเป็น ทวนเข็มนาฬิกา (CCW)

## การทดลองที่ 2.3.1: ความสัมพันธ์ระหว่างการเรียงลำดับ Phase และทิศทางการหมุนของมอเตอร์

### จุดประสงค์

- เพื่อศึกษาหลักการทำงานของ BLDC แบบ 6-Step
- อธิบายการเรียงลำดับ Phase ตามทิศทางการหมุนของมอเตอร์
- เพื่อศึกษาวิเคราะห์และอธิบายลักษณะของสัญญาณ BEMF แบบ Trapezoidal
- เพื่อศึกษาอธิบายและแสดงการเกิด Phase Shift ระหว่างสัญญาณแต่ละ Phase ของ BEMF

### สมมติฐาน

เมื่อเปลี่ยนทิศทางการหมุนของ Motor ลำดับ Phase ของสัญญาณ BEMF ที่เกิดขึ้นจะสลับลำดับกัน แต่รูปทรงคลื่นของ BEMF และ Phase shift  $120^\circ$  จะยังคงเดิม

### ตัวแปร

- ตัวแปรต้น
  - ทิศทางการหมุนของ Motor
- ตัวแปรตาม
  - การเรียงลำดับ Phase ของสัญญาณ BEMF
- ตัวแปรควบคุม
  - ความเร็วที่กำหนด
    - แหล่งจ่ายไฟ
    - Load

### ขั้นตอนการดำเนินงาน

- ตั้งความเร็วในโปรแกรมให้เท่ากันโดยตั้งไว้ที่  $5000 \text{ rpm}$  แล้วบันทึกค่า
- เพื่อดูค่าในอิกทิศตั้งความเร็วในโปรแกรมเป็น  $-5000 \text{ rpm}$  หมายถึงความเร็วเท่าเดิมแต่ในทิศตรงกันข้ามแล้วบันทึกค่า
- นำค่าที่บันทึกไว้มาดูความแตกต่างและเปรียบเทียบกันว่าการเปลี่ยนทิศการหมุนส่งผลอย่างไรบ้าง

### ผลการทดลอง



รูปที่ 33 การเรียงลำดับ Phase ของสัญญาณ BEMF เมื่อทิศทางการหมุนของ Motor เปลี่ยน



รูปที่ 34 การเกิด Phase Shift ระหว่างสัญญาณแต่ละ Phase ของ BEMF

## สรุปผลการทดลอง

จากรูป การเรียงลำดับ Phase ของสัญญาณ BEMF เมื่อทิศทางการหมุนของ Motor เปลี่ยน จะเห็นได้ว่าภาพซ้ายมีสัญญาณของ BEMF มีการเลียงลำดับคือ  $U \rightarrow V \rightarrow W$  ซึ่งส่งผลให้มอเตอร์จะหมุนในทิศทางเดียวคือ หมุนตามเข็มนาฬิกา (CW) และจะเห็นได้จากภาพด้านขวาคือสัญญาณของ BEMF มีการกลับลำดับโดยเรียงเป็น  $W \rightarrow V \rightarrow U$  ซึ่งส่งผลให้มอเตอร์จะหมุนในทิศทางเดียวคือ หมุนตามทวนเข็มนาฬิกา (CCW) และทั้งสองภาพ Phase Shift ระหว่างสัญญาณแต่ละ Phase ของ BEMF ยังคงมีระยะห่างที่เท่ากัน คือ 120 องศา

## อภิปรายผล

สาเหตุที่เมื่อมีการกลับทิศทางการหมุนของ Motor แล้วทำให้การเรียงลำดับ Phase ของสัญญาณ BEMF เปลี่ยนเกิดจากการการทำงานของ BLDC แบบ 6-Step ซึ่งมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ขาด漉วทีลักษ์ โดยใช้การสลับ Phase เพื่อดัน Rotor ไปข้างหน้าทำให้ Motor หมุน โดยเมื่อ Rotor สนามแม่เหล็กจะตัดกับขาด漉วแต่ละ Phase ซึ่งทำให้เกิด BEMF ซึ่งมีลักษณะ เป็นรูปเหลี่ยมคงหมุน สาเหตุเกิดจากการที่จำนวนขั้ว Rotor และรูปทรงแม่เหล็กที่ออกแบบมาให้ค่าแรงดันคงที่ในช่วงหนึ่งของการหมุน โดยแต่ละ Phase มีความต่างที่ 120 องศา เกิดจากการออกแบบให้แรงบิดรวมของ Motor มีความต่อเนื่อง.

## ข้อเสนอแนะ

- ควรวัด Phase Shift ระหว่างสัญญาณแต่ละ Phase ของ BEMF เพิ่มเติมในทิศทางทวนเข็ม

## อ้างอิง

- <https://www.electicaleeasy.com/2015/05/brushless-dc-blcd-motor.html>
- <https://www.digikey.pl/pl/articles/how-to-power-and-control-brushless-dc-motors>
- <https://www.jkongmotor.com/th/which-direction-does-a-blcd-motor-rotate.html>
- <https://drive.google.com/file/d/16LlW4zSe0mVIE3Ru0Qs3XEpCE4hBeGwo/view>
- <https://www.digikey.co.th/th/articles/a-better-way-to-commutate-blcd-motors>
- <https://www.pmdcorp.com/resources/type/articles/get/field-oriented-control-focus-a-deep-dive-article>

## การทดลองที่ 2.2.2: ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณและความเร็วของมอเตอร์

### จุดประสงค์

1. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณขับกับความเร็worobของมอเตอร์
2. ศึกษาการคำนวณความเร็วของมอเตอร์จากความถี่ของสัญญาณ BEMF ที่อ่านได้

### สมมติฐาน

ความเร็วที่กำหนดในโปรแกรมจะมีค่าที่ใกล้เคียงกับความเร็วที่ได้จากการคำนวณด้วยความถี่ที่วัดได้ และความเร็วที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความถี่สูงขึ้น

### ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น
  - ความเร็worobเป้าหมายที่ตั้งในโปรแกรม
2. ตัวแปรตาม
  - ค่าความถี่ของสัญญาณ Back EMF ที่วัดได้จาก Oscilloscope
  - คาบเวลาของสัญญาณ

## ขนาดแรงดันของ Back EMF

### 3. ตัวแปรควบคุม

-BLDC motor ตัวเดิมตลอดการทดลอง, แหล่งจ่ายไฟคงที่จาก adapter, ทดสอบในสภาพ No load ตลอด, ใช้ Oscilloscope ตัวเดิมในการวัด, ทิศทางการหมุนของมอเตอร์,

## ขั้นตอนการดำเนินงาน

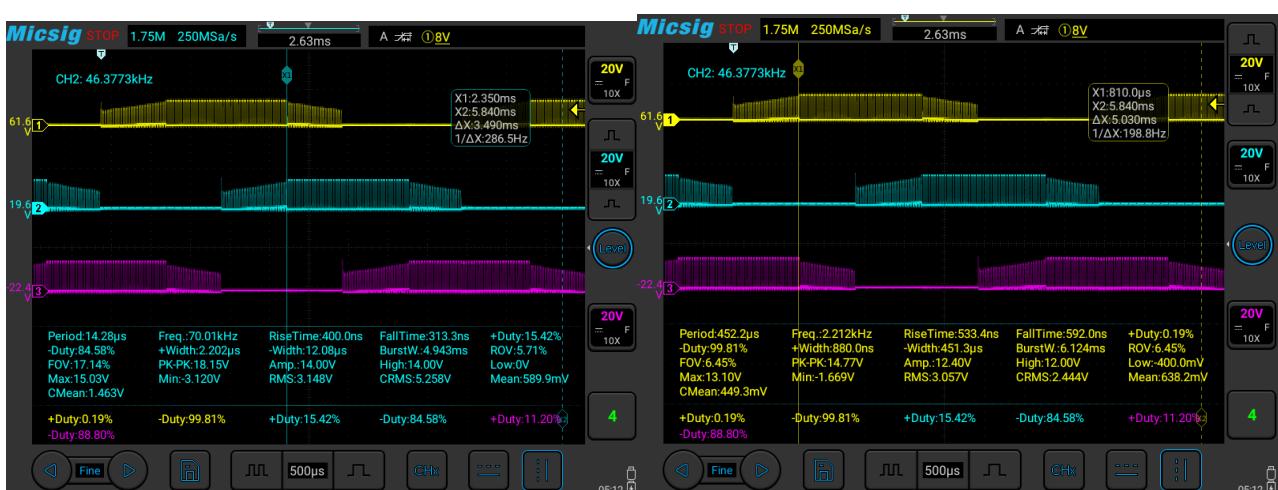
1. กำหนดค่าความเร็ว rob ในโปรแกรมควบคุมไปที่ 2,000 RPM

2. ใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณ Back EMF ของมอเตอร์ และบันทึกค่า ความถี่ (Frequency, Hz) ที่อ่านได้จากหน้าจอ

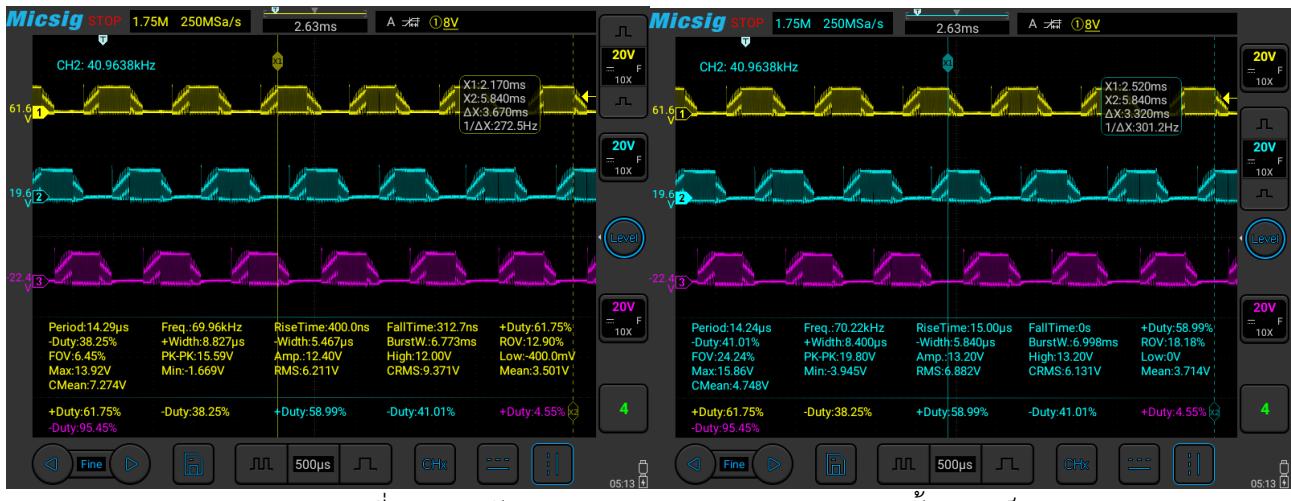
3. ทำขั้นตอนการทดลองเดิม โดยปรับเพิ่มความเร็ว rob ในโปรแกรมเป็น 8,000 RPM

4. นำค่าความถี่ที่วัดได้ทั้งสองกรณี มาคำนวณกลับเป็นความเร็ว rob ตามทฤษฎี และเปรียบเทียบกับค่าที่ตั้งไว้เพื่อวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน

## ผลการทดลอง



รูปที่ X แสดงลักษณะกราฟของ BLDC Motor ตอนตั้งความเร็ว 2000 RPM



รูปที่ X แสดงลักษณะกราฟของ BLDC Motor ตอนตั้งความเร็ว 8000 RPM

### สรุปผลการทดลอง (อธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นในการทดลอง)

จากการทดลองจะพบว่าในช่วง 2000 RPM จะวัดระยะเวลาจาก rising edge ไปถึง falling edge ได้ดังนี้  $\Delta X = 2.350 - 0.810 = 1.540\text{ms}$

$$\text{นำไปคำนวนหา frequency จาก } f = \frac{1}{\Delta X} = \frac{1}{(1540)(10^{-6})} = 649.350649 \text{ Hz}$$

แล้วนำไปคำนวนหา frequency ในช่วง 8000 RPM ต้องจะได้  $\Delta X = 0.540 - 0.190 = 0.350\text{ms}$

$$\text{และ } f = \frac{1}{(350)(10^{-6})} = 2857.14286 \text{ Hz}$$

เมื่อรู้ความถี่แล้วจึงนำมาคำนวนย้อนกลับหาความเร็วเพื่อเทียบกับค่าที่ตั้งในโปรแกรมว่ามีความคลาดเคลื่อนมากน้อยแค่ไหน และทราบว่า BLDC Motor ของเราเป็นแบบ 14 Pole นะเราจึงมีสูตรคำนวนดังนี้  $RPM = \frac{120 \cdot f_{elec}}{14}$

แต่  $f$  ของเราไม่ใช่  $f_{elec}$  และเราต้องคำนวณระหว่าง Rising Edge to falling Edge จึงรู้ว่าเท่า 120องศาหรือ  $1/3T$

$$\text{ทำให้ } RPM = \frac{120 \cdot \left(\frac{f}{3}\right)}{14}$$

นำความถี่ที่เคยคิดได้มาคำนวนได้ ดังนี้

$$\text{กรณีตั้งโปรแกรมเป็น 2000 RPM : } RPM = \frac{120 \cdot \left(\frac{649.350649}{3}\right)}{14} = 1857 \text{ RPM}$$

$$\text{คิดความคลาดเคลื่อน Error : } \frac{1857 - 2000}{2000} \times 100 = -7.15$$

$$\text{กรณีตั้งโปรแกรมเป็น 8000 RPM : } RPM = \frac{120 \cdot \left(\frac{2857.14286}{3}\right)}{14} = 8171 \text{ RPM}$$

$$\text{คิดความคลาดเคลื่อน Error : } \frac{8171 - 8000}{8000} \times 100 = +2.41$$

### อภิปรายผล

จากการทดลองศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณ Back EMF และความเร็วรอบของมอเตอร์ BLDC (14 Poles) โดยทำการทดสอบที่ความเร็วรอบเป้าหมาย 2,000 RPM และ 8,000 RPM พบร่วมเป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ กล่าวคือ ความถี่ของสัญญาณมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ (ความเร็วรอบสูงขึ้น ความถี่จะสูงขึ้น)

ในการคำนวณหาความเร็วรอบจากสัญญาณ Oscilloscope ผู้ทดลองได้วัดค่าเวลา  $\Delta X$  ระหว่างจุด Rising Edge ถึง Falling Edge ของสัญญาณ ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าระยะเวลาตั้งกล่าวเทียบเท่ากับระยะเวลาไฟฟ้า 120 องศา หรือ  $1/3$  ของค่าเวลาสัญญาณไฟฟ้า  $f_{elec}$  ดังนั้นความถี่ที่คำนวณได้จากช่วงเวลา  $f$  จึงมีค่าเป็น 3 เท่าของความถี่ไฟฟ้าจริง ผู้ทดลองจึงปรับปรุงสูตรการคำนวณโดยใช้สมการ:

$$RPM = \frac{120 \cdot \left(\frac{f}{3}\right)}{14}$$

เมื่อนำค่าที่วัดได้มาคำนวณเปรียบเทียบกับค่าที่ตั้งไว้พบผลดังนี้:

- ที่ความเร็ว 2,000 RPM: คำนวณความเร็วได้ 1,857 RPM เกิดค่าความคลาดเคลื่อน (Error) -7.15% (ต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้)
- ที่ความเร็ว 8,000 RPM: คำนวณความเร็วได้ 8,171 RPM เกิดค่าความคลาดเคลื่อน (Error) +2.41% (สูงกว่าค่าที่ตั้งไว้)

ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจมีสาเหตุมาจากปัจจัยหลัก 2 ประการ:

- **ความแม่นยำในการวัด :** การกำหนดจุด Cursor บนหน้าจอ Oscilloscope ด้วยสายตา โดยเฉพาะที่ความเร็วสูงซึ่งลักษณะคลื่นมาก อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยในการอ่านค่าเวลา  $\Delta X$
- **การตอบสนองของระบบควบคุม :** ในกรณีที่ความเร็วต่ำกว่าเป้าหมาย (-7.15%) อาจเกิดจากแรงเสียดทานภายในมอเตอร์ที่ส่งผลมากกว่าที่ความเร็วต่ำ หรือ Open-loop control ยังรักษาความเร็วได้ไม่แม่นยำเป็น ส่วนกรณีที่ความเร็วสูงกว่าเป้าหมาย (+2.41%) อาจเกิดจากลักษณะการทำงานของอัลกอริทึมการสลับเฟสที่ความเร็วสูง

ค่าความคลาดเคลื่อนที่อยู่ในระดับ  $\pm 10\%$  ถือว่ายอมรับได้ในการทดลองนี้ แสดงให้เห็นว่าความสามารถใช้วิธีการวัดความถี่จากสัญญาณ Back EMF เพื่อตรวจสอบหรือคำนวณความเร็วรอบของมอเตอร์ได้อย่างถูกต้องตามทฤษฎี

## ข้อเสนอแนะ

ควรขยายสเกลเวลาให้กว้างขึ้นเพื่อให้เห็นลูกคลื่น 1 ลูกเต็มจอพอดี จะช่วยให้วางตำแหน่ง Cursor ได้ง่ายและสะดวกมากยิ่งขึ้น

- การวัดด้วย Cursor โดยใช้มือปรับอาจมีความคลาดเคลื่อนจากผู้สังเกต

ควรเปลี่ยนไปวัดแบบอัตโนมัติ ซึ่งจะมีความแม่นยำและเที่ยงตรงสูงกว่าการวัดด้วยมือ

ควรวัดค่าบเวลาให้ครบ 1 รอบคลื่นพอดี เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวนและนำมารวเคราะห์ก็คือ Rising Edge ถึง Rising Edge

ภาคผนวก