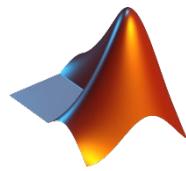


# *RMXplorer*

---



## LAB 2: Actuators

### Name

- นาย ธรรมิทธส์ เพ็งนาม 67340500018
- นางสาว เบญญา บูรณะบัญชี 67340500026
- นางสาว วัชรนันทน์ เจนพิพัฒน์สิริกุล 67340500039
- นางสาว ชุติกาณุจัน กองการกำแพง 67340500069

### Objectives

- เพื่อให้ สามารถวิเคราะห์หลักการทำงาน DC Motor ได้
- เพื่อให้ เข้าใจพฤติกรรมของ DC Motor
- เพื่อให้ สามารถวิเคราะห์หลักการทำงาน Stepper Motor ได้
- เพื่อให้ เข้าใจพฤติกรรมของ Stepper Motor
- เพื่อให้ สามารถวิเคราะห์หลักการทำงาน Brushless DC Motor ได้
- เพื่อให้ เข้าใจพฤติกรรมของ Brushless DC Motor

## 2.1 DC Motor

### การทดลองที่ 1 การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของ DC Motor

#### จุดประสงค์

- เพื่อศึกษาการสร้างและอธิบายกราฟ Motor Characteristic จากมอเตอร์บนบอร์ดการทดลอง รวมทั้งศึกษาสาเหตุที่ทำให้กราฟคลาดเคลื่อน
- เพื่อศึกษาและอธิบายวิธีการวัด คำนวนหาค่า Torque Constant (Nm/A)
- เพื่อศึกษาและอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง Speed, Current, Power และ Efficiency กับ Torque
- เพื่อศึกษาวิธีการวัดและคำนวนหาค่า Stall Torque เพื่อนำไปใช้งานต่อไป
- เพื่อศึกษาและแสดงขั้นตอนการทำ Signal Conditioning สำหรับการอ่านค่ากระแสไฟฟ้า
- เพื่อศึกษาการออกแบบและสร้าง Low-Pass Filter สำหรับการวัดความเร็วรอบมอเตอร์
- เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ความถี่ (FFT) ของสัญญาณความเร็วรอบมอเตอร์ที่ความถี่ PWM ต่างๆ ได้

#### สมมติฐาน

- สามารถสร้างเครื่องชั่งจาก Load Cell เพื่อนำมาใช้ในการเก็บค่า Torque ของมอเตอร์ได้ โดยมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 50 กรัม
- สามารถคำนวนหาค่าคงที่ของมอเตอร์ได้
- สามารถแสดงขั้นตอนการทำ Signal Conditioning สำหรับการอ่านค่ากระแสไฟฟ้าได้ และสามารถออกแบบและสร้าง Low-Pass Filter สำหรับการวัดความเร็วรอบมอเตอร์ได้
- กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมและ Torque ของมอเตอร์จะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นแบบเพิ่มขึ้น
- Torque มีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับค่าของ กระแสไฟฟ้า, กำลัง และ ประสิทธิภาพ

#### ตัวแปร

- ตัวแปรต้น:
  - แรงดันที่ใส่เข้าไปในบอร์ด
  - Torque
- ตัวแปรตาม:
  - ความเร็วรอบที่ Output
  - กระแสไฟฟ้าที่ Output
  - กำลังที่ Output
  - Efficiency ของมอเตอร์

### 3. ตัวแปรควบคุม:

- แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์
- บอร์ดและเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง

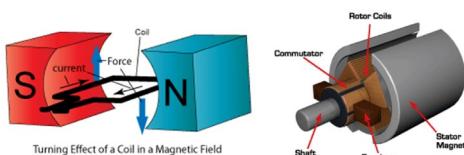
## เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1. DC Motor

DC Motor ประกอบด้วยชุดลวดสองชุด ซึ่งมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงมาจากการหมุนแรงดันไฟฟ้าที่เดียวกัน ได้แก่

- Stator ชุดลวดสนามทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กถาวรแต่บางครั้งมอเตอร์ขนาดเล็กๆจะใช้แม่เหล็กถาวรแทน การใช้ชุดลวด

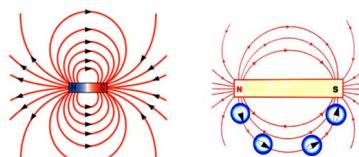
1.2 Rotor เรียกว่าชุดลวดอาร์เมเจอร์ โดยจะจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าชุดลวดอาร์เมเจอร์ผ่านแปรงถ่าน (Brush) และ ชุด Commutator ชุดลวดนี้จะทำให้เกิด Torque ในการหมุนของ Rotor ที่เกิดจากการกระทำระหว่างขั้วแม่เหล็กของชุดลวด Stator และ Rotor ที่ต่างขักกันและผลักกันทำให้เกิดการหมุนขึ้นในที่สุด



ภาพที่ 1 DC motor

### 2. แรงแม่เหล็ก

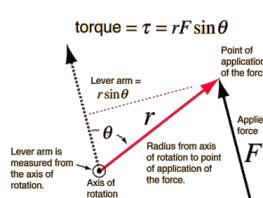
แรงแม่เหล็กคือแรงที่เกิดจากการดูดหรือผลักกันระหว่างแม่เหล็กสองแท่ง หรือระหว่างแม่เหล็กกับวัสดุที่เป็นสารแม่เหล็ก แรงนี้มีทิศทางและขนาดขึ้นอยู่กับ สนามแม่เหล็ก ที่เกิดขึ้นรอบ ๆ แท่งแม่เหล็ก



ภาพที่ 2 สนามแม่เหล็ก

### 3. แรงบิด

แรงบิด(Torque) คือ แรงที่บันวัตถุ โดยทำให้วัตถุหมุนรอบแกนบิด นั่นคือแรงที่กระทำโดยให้วัตถุหมุนรอบจุดศูนย์กลางหรือแกนกลาง มีหน่วยเป็น Nm



ภาพที่ 3 แรงบิด

#### 4. กฎของ Faraday

ในวงปิดใดๆ จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านวงจรปิดนั้น โดยแรงเคลื่อนไฟฟ้าเนื่องจากมีการเปลี่ยนฟลักซ์แม่เหล็กที่ Motional EMF เกิดขึ้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าในสนามแม่เหล็ก อิเล็กตรอนอิสระในตัวนำจะถูกแรงแม่เหล็กกระทำ เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนรวมตัวกันที่ปลายด้านหนึ่งของแรงดันไฟฟ้า

### ขั้นตอนการดำเนินงาน

#### 1. การ Calibrate Loadcell

- 1.1. นำน้ำหนักขนาด 500 กรัม วางลงบน Loadcell ปรับ Trim Pot ให้ค่า ADC เข้าใกล้ Saturation
- 1.2. นำค่าที่ได้มาแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้า
- 1.3. นำน้ำหนักที่ได้ออก แล้วอ่านค่าที่ได้ แล้วนำค่าที่อ่านได้ตอนที่น้ำหนักกลับด้วยค่าที่อ่านได้ตอนไม่มีน้ำหนักแล้วนำ 500 ไปหาร เอาค่าที่ได้ไปใส่เป็น Gain ก็จะได้ Loadcell ที่ใช้งานได้

#### 2. การ Calibrate Encoder

- 2.1. รันมอเตอร์ที่ ความเร็วสูงสุด เก็บค่าความเร็วเทียบเวลา
- 2.2. นำค่าเฉลี่ยมาทำ FFT เพื่อหา Cutoff Frequency และนำไปใช้ในบล็อก Lowpass Filter ที่กรองสัญญาณความเร็วติด จะได้ Encoder ที่ใช้งานได้

#### 3. การ Calibrate Current Sensor

- 3.1. นำสายไฟ 1 เส้นลอดผ่าน Current Sensor แล้วต่อ Power Supply ข้าบวกและลบเข้ากับทั้งสองข้างของสายไฟ อ่านค่าที่ได้แล้ว เอาค่าปั๊บจุบันลบด้วยค่านั้น ถือว่าตั้ง Offset นำมาแปลงเป็นหน่วยโวลต์
- 3.2. ตั้ง Power Supply ที่ 1 โวลต์ Current Limit 0.5 A บันทึกค่านี้และค่าแรงดันที่อ่านได้ แล้วเพิ่ม Current Limit ครั้งละ 0.5 A จนถึง 10 A บันทึกค่าที่อ่านได้
- 3.3. นำค่าจริงมาหารด้วยของแต่ละช่วงกระแส และหาค่าเฉลี่ย แล้วนำค่าเฉลี่ยนั้นมาคูณด้วยค่าที่อ่านได้จะได้ Current Sensor ที่ใช้งานได้

#### 4. การทำ Motor Characteristic

##### 4.1. การเก็บค่าแบบ No Load

- 4.1.1. คลายตัวหนอนที่ล็อกกับก้านตีออก เพื่อให้มอเตอร์หมุนได้อย่างอิสระ
- 4.1.2. สั่ง PWM Range ที่ 65535 (สูงสุด) และเก็บค่าความเร็ว กระแสที่ใช้ ทำ 3 ครั้ง

##### 4.2. การเก็บค่าแบบ Stall

- 4.2.1. ยืดตัวหนอนที่ล็อกกับก้านตีให้แน่น
- 4.2.2. นำ Loadcell ที่ Calibrate แล้วมาวางไว้ด้านหน้าของบอร์ดทดลองเพื่อรับก้านตี
- 4.2.3. สั่ง PWM Range ที่ 65535 (สูงสุด) และเก็บค่าที่อ่านได้จาก Loadcell และ กระแสที่ใช้ ทำ 3 ครั้ง

##### 4.3. การเก็บค่าช่วงกลาง

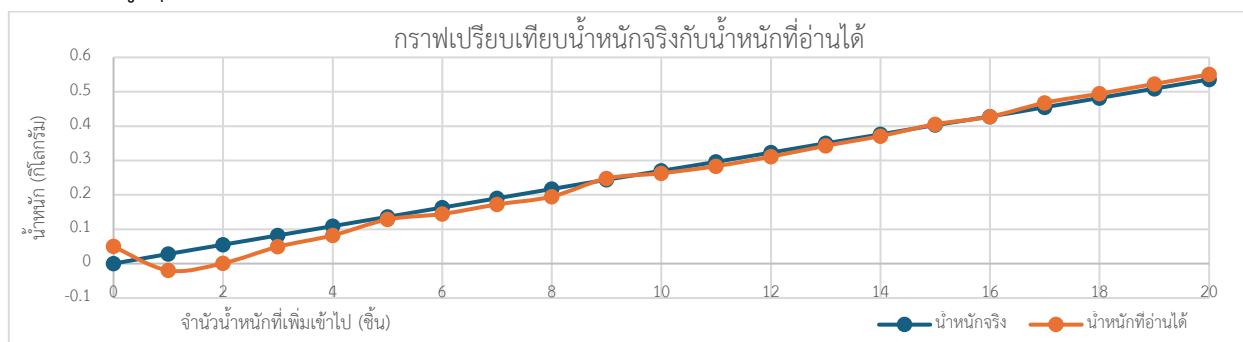
4.3.1.เปลี่ยนก้านตีให้เป็นรอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร นำเชือกด้านหนึ่งผูกกับรอก อีกด้านหนึ่งผูกกับน้ำหนัก 1000 กรัม

4.3.2.สั่งมอเตอร์ให้ดึงน้ำหนักนั้นขึ้นมากกว่าจะดึงไม่ขึ้น หรือ เสือกสุด แล้วบันทึกค่า ความเร็วเชิงมุม กระแสที่ใช้ และน้ำหนักที่ใช้

4.3.3.นำน้ำหนักออกประมาณ 50 กรัมแล้ว ทำการขันตอนก่อนหน้าจนไม่เหลือน้ำหนักแล้ว ทำการทั้งหมด 3 ครั้ง

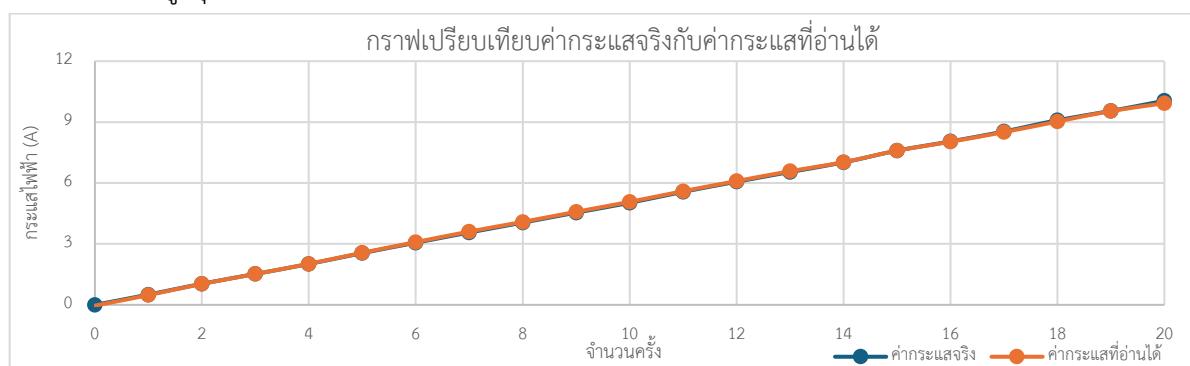
#### ผลการทดลอง

จากการการทดลองทำให้ได้ค่า Gain ที่ 0.300 และนำมาใช้ในการทดลองเทียบค่าได้ผลดังนี้ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 20 กรัม



ภาพที่ 4 กราฟเปรียบเทียบน้ำหนักจริงกับน้ำหนักที่อ่านได้

จากการการทดลองทำให้ได้ค่าตัวคูณที่  $-15.675557911$  และนำมาใช้ในการทดลองเทียบค่าได้ผลดังนี้ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 0.122 แอมป์



ภาพที่ 5 กราฟเปรียบเทียบกระแสจริงกับกระแสที่อ่านได้

จากการทำการทดลองพบว่าได้ค่าต่างๆสำหรับการหา Motor Characteristic ดังนี้

ตัวแปร	ค่าเฉลี่ยของค่าที่เก็บได้	ตัวแปร	ค่าเฉลี่ยของค่าที่เก็บได้
Stall Current	4.8 A	No – Load Speed	21.2895 rad/s
Stall Torque	0.22254 Nm	No – Load Torque	1.461 A

ตารางที่ 1 ค่าต่างๆสำหรับการหา Motor Characteristic

จากสมการการหาค่า Torque ในภาวะ Stall-Torque ว่าด้วย

$$\tau_{st} = \frac{K_m V_{in}}{R} \text{ และสมการ } i = \frac{V}{R}$$

$$\tau_{st} = K_m i_{st}$$

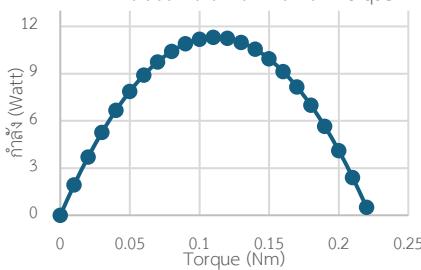
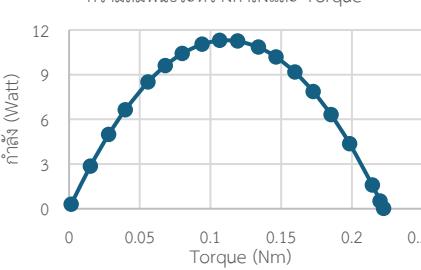
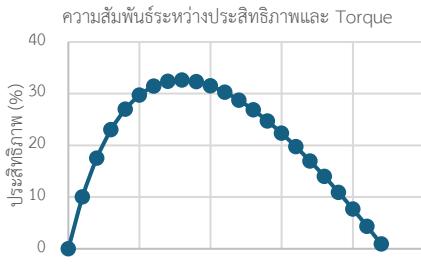
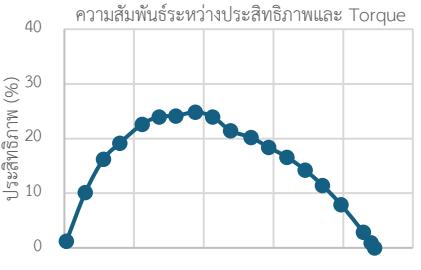
$$K_m = \frac{\tau_{st}}{i_{st}}$$

$$\text{จะได้ } K_m = \frac{0.22254}{4.8} = 0.046363 \text{ Nm/A}$$

และเมื่อนำค่าที่ได้จากตารางที่ 1 มาคำนวณตามสูตรและสร้างกราฟความสัมพันธ์ซึ่งเป็น Motor

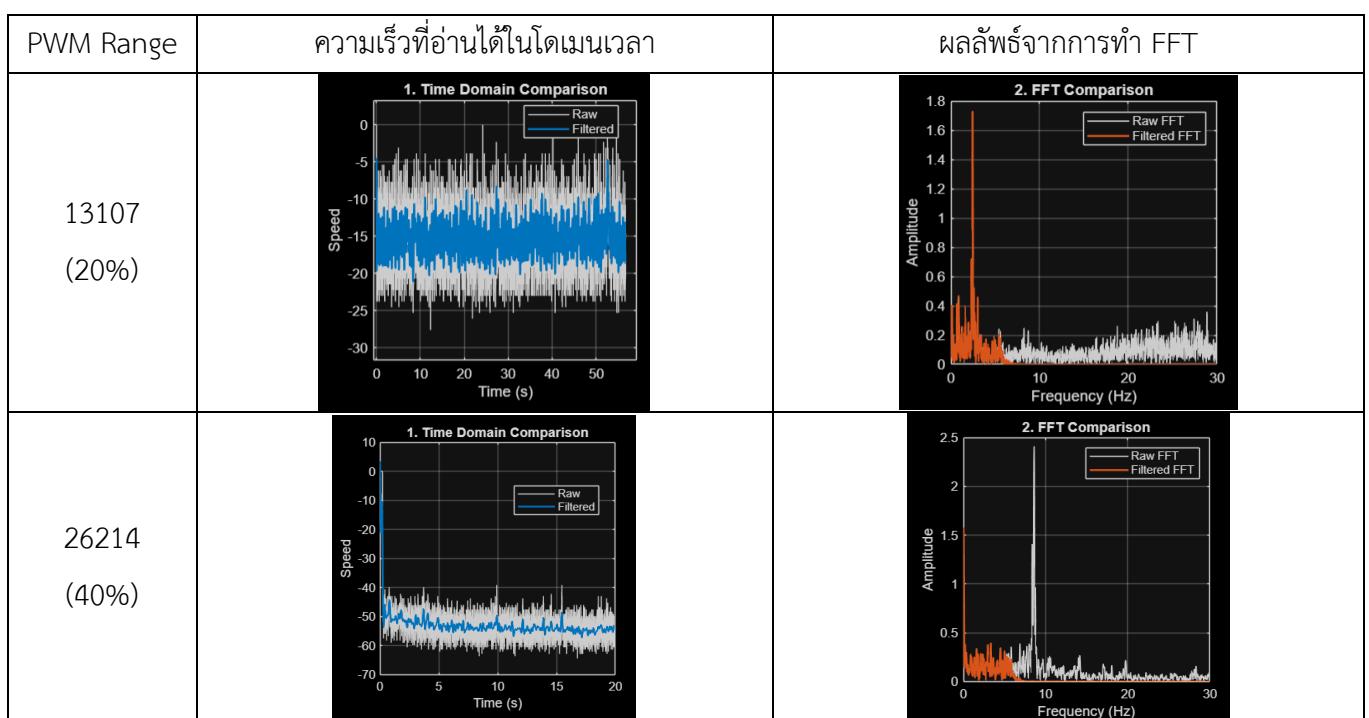
Characteristics แบบ Ideal Case และเทียบกับกราฟความสัมพันธ์ของมอเตอร์ที่สร้างจากค่าที่ได้ทำการทดลอง  
ได้ดังตาราง

กราฟ ความสัมพันธ์	ค่าที่คำนวณได้ในกรณี Ideal Case	ค่าที่เก็บได้	คำอธิบาย																																																												
ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมและ Torque	<p>ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมและ Torque</p> <table border="1"> <caption>Data points for Velocity vs Torque (Ideal Case)</caption> <thead> <tr> <th>Torque (Nm)</th> <th>Velocity (rad/s)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.00</td><td>22.0</td></tr> <tr><td>0.02</td><td>20.5</td></tr> <tr><td>0.04</td><td>19.0</td></tr> <tr><td>0.06</td><td>17.5</td></tr> <tr><td>0.08</td><td>16.0</td></tr> <tr><td>0.10</td><td>14.5</td></tr> <tr><td>0.12</td><td>13.0</td></tr> <tr><td>0.14</td><td>11.5</td></tr> <tr><td>0.16</td><td>10.0</td></tr> <tr><td>0.18</td><td>8.5</td></tr> <tr><td>0.20</td><td>7.0</td></tr> <tr><td>0.22</td><td>5.5</td></tr> <tr><td>0.24</td><td>4.0</td></tr> <tr><td>0.25</td><td>0.0</td></tr> </tbody> </table>	Torque (Nm)	Velocity (rad/s)	0.00	22.0	0.02	20.5	0.04	19.0	0.06	17.5	0.08	16.0	0.10	14.5	0.12	13.0	0.14	11.5	0.16	10.0	0.18	8.5	0.20	7.0	0.22	5.5	0.24	4.0	0.25	0.0	<p>ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมและ Torque</p> <table border="1"> <caption>Data points for Velocity vs Torque (Measured)</caption> <thead> <tr> <th>Torque (Nm)</th> <th>Velocity (rad/s)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.00</td><td>22.0</td></tr> <tr><td>0.02</td><td>20.5</td></tr> <tr><td>0.04</td><td>19.0</td></tr> <tr><td>0.06</td><td>17.5</td></tr> <tr><td>0.08</td><td>16.0</td></tr> <tr><td>0.10</td><td>14.5</td></tr> <tr><td>0.12</td><td>13.0</td></tr> <tr><td>0.14</td><td>11.5</td></tr> <tr><td>0.16</td><td>10.0</td></tr> <tr><td>0.18</td><td>8.5</td></tr> <tr><td>0.20</td><td>7.0</td></tr> <tr><td>0.22</td><td>5.5</td></tr> <tr><td>0.24</td><td>4.0</td></tr> <tr><td>0.25</td><td>0.0</td></tr> </tbody> </table>	Torque (Nm)	Velocity (rad/s)	0.00	22.0	0.02	20.5	0.04	19.0	0.06	17.5	0.08	16.0	0.10	14.5	0.12	13.0	0.14	11.5	0.16	10.0	0.18	8.5	0.20	7.0	0.22	5.5	0.24	4.0	0.25	0.0	พบว่าค่าที่เก็บได้มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ที่ค่า Torque ตั้งแต่ 0.15 Nm เป็นต้นไป จะมีความเร็วเชิงมุมเป็น 0
Torque (Nm)	Velocity (rad/s)																																																														
0.00	22.0																																																														
0.02	20.5																																																														
0.04	19.0																																																														
0.06	17.5																																																														
0.08	16.0																																																														
0.10	14.5																																																														
0.12	13.0																																																														
0.14	11.5																																																														
0.16	10.0																																																														
0.18	8.5																																																														
0.20	7.0																																																														
0.22	5.5																																																														
0.24	4.0																																																														
0.25	0.0																																																														
Torque (Nm)	Velocity (rad/s)																																																														
0.00	22.0																																																														
0.02	20.5																																																														
0.04	19.0																																																														
0.06	17.5																																																														
0.08	16.0																																																														
0.10	14.5																																																														
0.12	13.0																																																														
0.14	11.5																																																														
0.16	10.0																																																														
0.18	8.5																																																														
0.20	7.0																																																														
0.22	5.5																																																														
0.24	4.0																																																														
0.25	0.0																																																														
ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและ Torque	<p>ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและ Torque</p> <table border="1"> <caption>Data points for Current vs Torque (Ideal Case)</caption> <thead> <tr> <th>Torque (Nm)</th> <th>Current (A)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.00</td><td>1.5</td></tr> <tr><td>0.02</td><td>1.6</td></tr> <tr><td>0.04</td><td>1.7</td></tr> <tr><td>0.06</td><td>1.8</td></tr> <tr><td>0.08</td><td>1.9</td></tr> <tr><td>0.10</td><td>2.0</td></tr> <tr><td>0.12</td><td>2.1</td></tr> <tr><td>0.14</td><td>2.2</td></tr> <tr><td>0.16</td><td>2.3</td></tr> <tr><td>0.18</td><td>2.4</td></tr> <tr><td>0.20</td><td>2.5</td></tr> <tr><td>0.22</td><td>2.6</td></tr> <tr><td>0.24</td><td>2.7</td></tr> <tr><td>0.25</td><td>2.8</td></tr> </tbody> </table>	Torque (Nm)	Current (A)	0.00	1.5	0.02	1.6	0.04	1.7	0.06	1.8	0.08	1.9	0.10	2.0	0.12	2.1	0.14	2.2	0.16	2.3	0.18	2.4	0.20	2.5	0.22	2.6	0.24	2.7	0.25	2.8	<p>ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและ Torque</p> <table border="1"> <caption>Data points for Current vs Torque (Measured)</caption> <thead> <tr> <th>Torque (Nm)</th> <th>Current (A)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.00</td><td>1.5</td></tr> <tr><td>0.02</td><td>1.6</td></tr> <tr><td>0.04</td><td>1.7</td></tr> <tr><td>0.06</td><td>1.8</td></tr> <tr><td>0.08</td><td>1.9</td></tr> <tr><td>0.10</td><td>2.0</td></tr> <tr><td>0.12</td><td>2.1</td></tr> <tr><td>0.14</td><td>2.2</td></tr> <tr><td>0.16</td><td>2.3</td></tr> <tr><td>0.18</td><td>2.4</td></tr> <tr><td>0.20</td><td>2.5</td></tr> <tr><td>0.22</td><td>2.6</td></tr> <tr><td>0.24</td><td>2.7</td></tr> <tr><td>0.25</td><td>2.8</td></tr> </tbody> </table>	Torque (Nm)	Current (A)	0.00	1.5	0.02	1.6	0.04	1.7	0.06	1.8	0.08	1.9	0.10	2.0	0.12	2.1	0.14	2.2	0.16	2.3	0.18	2.4	0.20	2.5	0.22	2.6	0.24	2.7	0.25	2.8	พบว่าค่าที่เก็บได้นั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง แต่มีค่าที่มากกว่า Ideal Case ที่ Torque ตั้งแต่ 0.15 Nm เป็นต้นไปจะมีกระแสไฟฟ้าที่คงที่
Torque (Nm)	Current (A)																																																														
0.00	1.5																																																														
0.02	1.6																																																														
0.04	1.7																																																														
0.06	1.8																																																														
0.08	1.9																																																														
0.10	2.0																																																														
0.12	2.1																																																														
0.14	2.2																																																														
0.16	2.3																																																														
0.18	2.4																																																														
0.20	2.5																																																														
0.22	2.6																																																														
0.24	2.7																																																														
0.25	2.8																																																														
Torque (Nm)	Current (A)																																																														
0.00	1.5																																																														
0.02	1.6																																																														
0.04	1.7																																																														
0.06	1.8																																																														
0.08	1.9																																																														
0.10	2.0																																																														
0.12	2.1																																																														
0.14	2.2																																																														
0.16	2.3																																																														
0.18	2.4																																																														
0.20	2.5																																																														
0.22	2.6																																																														
0.24	2.7																																																														
0.25	2.8																																																														

กราฟ ความสัมพันธ์	ค่าที่คำนวณได้ในกรณี Ideal Case	ค่าที่เก็บได้	คำอธิบาย
ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและ Torque	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและ Torque 	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและ Torque 	พบว่ากำลังที่วัดออกมากได้นั้นคล้ายกับค่าที่คำนวณได้โดยมีแนวโน้มเป็นเส้นโค้งแบบ Parabola
ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและ Torque	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและ Torque 	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและ Torque 	พบว่าค่าประสิทธิภาพที่วัดได้จริงนั้นของลดลงจากค่าที่ได้จากการคำนวณ

ตารางที่ 2 ตารางเปรียบเทียบ Motor Characteristics แบบ Ideal Case และจากค่าที่ได้ทำการทดลอง

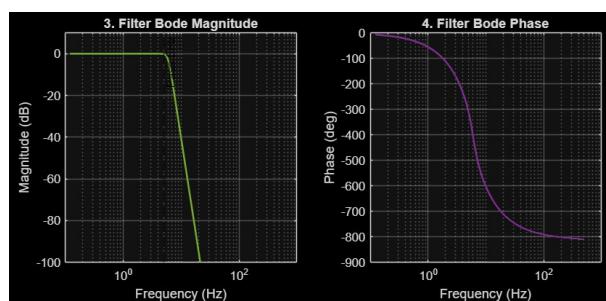
จากการทดลองได้ตารางเปรียบเทียบความเร็วที่อ่านได้ในโดเมนเวลา กับผลลัพธ์ที่ได้จากการทำ FFT ดังตารางนี้



PWM Range	ความเร็วที่อ่านได้ในโอดเมนเวลา	ผลลัพธ์จากการทำ FFT
39321 (60%)		
52428 (80%)		
65535 (100%)		

ตารางที่ 3 ตารางเปรียบเทียบความเร็วที่อ่านได้ในโอดเมนเวลา กับผลลัพธ์ที่ได้จากการทำ FFT

และเมื่อนำมาผลจากตารางที่ 3 มาสร้าง Bode Plot ของ Low – Pass Filter จะได้ดังภาพ



ภาพที่ 6 Bode Plot ของ Low – Pass Filter

## สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าเครื่องซั่งที่สร้างจาก Load Cell เพื่อนำมาใช้ในการเก็บค่า Torque ของมอเตอร์ได้ โดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุด 20 กรัม

จากการคำนวณค่า Torque Constant โดยใช้ค่า Torque และกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ในขณะขาดอยู่ใน Stall Torque Condition คือ  $0.046363 \text{ Nm/A}$

จากการทดลองพบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุม และ Torque ของมอเตอร์จะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นแบบลดลง

Torque มีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับค่าของ กระแสไฟฟ้า โดยแนวโน้มของกราฟความสัมพันธ์ของ Torque และกระแสไฟฟ้าเป็นเชิงเส้นแบบเพิ่มขึ้น และ Torque มีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับ กำลัง และประสิทธิภาพ จนถึงค่าหนึ่งจากนั้นจะแปรผกผัน แนวโน้มของกราฟความสัมพันธ์ของ Torque และกำลังเป็นเส้นโค้งแบบพาราโบลาคว่า และ แนวโน้มของกราฟความสัมพันธ์ของ Torque และประสิทธิภาพเป็น

Duty Cycle จะมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับ Noise เกิดขึ้น และแปรผันตรงกับมอเตอร์จะยิ่งมีความไฟลลี่น (Smooth) และ Low – Pass Filter นี้มี Cut – off Frequency อยู่ที่  $4.88281 \text{ Hz}$

## อภิปรายผล

เมื่อเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและ Torque ที่ได้จากการคำนวณ และ ได้จากการเก็บค่าการทดลอง พบร่วมกับค่าที่ได้จากการเก็บค่ามีค่าที่น้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ รวมถึงค่าความเร็วเชิงมุม และประสิทธิภาพ ที่มีค่าน้อยกว่าค่าที่จากการคำนวณเสมอ โดยสิ่งเหล่านี้เกิดจากความไม่สมบูรณ์ของการทดลอง อันเกิดจากทรัพยากรและสภาพแวดล้อมที่มีจำกัดในการทำการทดลอง และแรงกระทำอื่นในระบบนอกเหนือจากที่กำหนดได้ ซึ่งมาจากแรงเสียดทานภายใน Bearing, Misalignment , การแกว่งของเชือกที่ทำให้เกิดโมเมนตัม เป็นต้น สิ่งเหล่านี้ทำให้เกิด Torque เพิ่มขึ้นในระบบส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของค่าที่เก็บได้

จากร่างที่ 5 พบว่าเมื่อเมื่อเพิ่มค่า Duty Cycle มาขึ้น Noise จะยิ่งน้อยลง ดังนั้น Duty Cycle จะมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับ Noise เกิดขึ้น ซึ่งหมายความว่าเมื่อ Duty Cycle เพิ่มขึ้น มอเตอร์จะยังมีความไฟลลี่น (Smooth) มาอย่างขึ้นตามไปด้วย และจากภาพที่ 5 พบว่า Low – Pass Filter นี้มี Cut – Off Frequency อยู่ที่  $4.88281 \text{ Hz}$

และการสร้างกราฟ Motor Characteristic แบบ Ideal Case จากการคำนวณพบว่า เมื่อใช้ Torque ที่  $0.08 \text{ Nm}$  ความเร็วเชิงมุม  $13.63621 \text{ rad/s}$  และกระแสไฟฟ้าที่  $2.66132 \text{ A}$  จะทำให้มีประสิทธิภาพสูงสุด และเมื่อพิจารณาค่าจากการทดลองเก็บค่าจริงพบว่า เมื่อใช้ Torque ที่  $0.094 \text{ Nm}$  ความเร็วเชิงมุม  $7.25184 \text{ rad/s}$  และกระแสไฟฟ้าที่  $3.706 \text{ A}$  จะทำให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

## ข้อเสนอแนะ

- ควรใช้บอร์ดที่มีประสิทธิภาพมากกว่าในปัจจุบัน มีการวาง Component ที่ทำให้ไม่เกิด Misalignment ที่ส่งผลต่อการทำงานของมอเตอร์

## 2. ควรสลับสายนำเตอร์เรซิสเซนเซอร์ไฟ流ผ่าน Current Sensor ได้ถูกทิศทาง

### อ้างอิง

- <https://www.yilmazthailand.com/dcmotors>
- <https://www.scimath.org/lesson-physics/item/7238-2017-06-11-14-17-45>
- <https://www.kenatchengineeringSupply.com/blog/5702/torque>
- <https://scienceready.com.au/pages/operation-of-a-simple-dc-motor?srsltid=AfmBOopUTbwGloHhMvRGdoRG5OEuVgyw8EsRld7suN7HxMlkNaOyM8zX>

## การทดลองที่ 2 การทดลองการแสดงเพื่อความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ PWM, Duty Cycle กับ ความเร็ว กระแสไฟฟ้า และประสิทธิภาพของมอเตอร์

### จุดประสงค์

- เพื่อให้สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ PWM, Duty Cycle และความเร็วของมอเตอร์ได้
- เพื่อให้สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ PWM, Duty Cycle และกระแสไฟฟ้าได้
- เพื่อให้สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ PWM, Duty Cycle และประสิทธิภาพของมอเตอร์ได้

### สมมติฐาน

- ค่าความถี่ PWM Duty Cycle แปรผันตรงกับความเร็วของมอเตอร์ โดยมีแนวโน้มกราฟความสัมพันธ์แบบเส้นตรง
- ค่าความถี่ PWM Duty Cycle แปรผันตรงกับกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้ โดยมีแนวโน้มกราฟความสัมพันธ์แบบ Logarithm
- การปรับ Duty Cycle และ PWM จะทำให้แนวโน้มของประสิทธิภาพไม่คงที่ และเมื่อใช้ค่า ๆ หนึ่งที่เหมาะสมจะทำให้ประสิทธิภาพเป็นเชิงเส้น

### ตัวแปร

- ตัวแปรต้น:
  - Duty Cycle (%)
  - ความถี่ PWM (Hz)
- ตัวแปรตาม:
  - ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ย (Average Angular Velocity, rad/s)
  - กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (Average Current, Amp)
  - ประสิทธิภาพ (Efficiency, %)
  - สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณความเร็ว (Speed Signal FFT)
- ตัวแปรควบคุม:
  - แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์
  - มอเตอร์และ Driver
  - บอร์ดอยู่ในสภาพ No – Load
  - H-Bridge เป็นใหม่

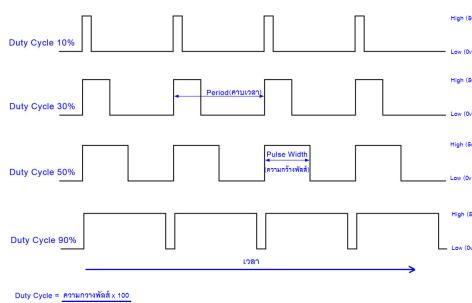
## เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1. PWM

PWM ย่อมาจาก Pulse Width Modulation เป็นเทคนิคการควบคุมพลังงานไฟฟ้าโดยการปรับความกว้างของพัลส์ (สัญญาณเปิด-ปิด) ในการส่งสัญญาณดิจิทัลไปยังอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อควบคุมอุปกรณ์อนามัย เช่น ปรับความเร็วของมอเตอร์, ความสว่างของหลอดไฟ หรือควบคุมอินเวอร์เตอร์ PWM จะสร้างสัญญาณดิจิทัลแบบคลื่นสี่เหลี่ยมที่สลับระหว่างสถานะเปิด (HIGH) และปิด (LOW) อย่างรวดเร็ว

ค่าความถี่ (frequency) คือจำนวนลูกคลื่น (cycle) ต่อ 1 หน่วยเวลา (time period)

Duty Cycle คือสัดส่วนเวลาเปิดเทียบกับเวลาทั้งหมดของสัญญาณนั้นๆ



ภาพที่ 7 Pulse Width Modulation

### 2. ประสิทธิภาพของ DC Motor

ประสิทธิภาพของมอเตอร์คืออัตราส่วนของกำลังที่มอเตอร์สามารถนำไปใช้งานได้เทียบกับกำลังไฟฟ้าที่รับเข้ามา มอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงจะสูญเสียพลังงานน้อยกว่า ทำให้ประหยัดไฟฟ้าและลดความร้อน

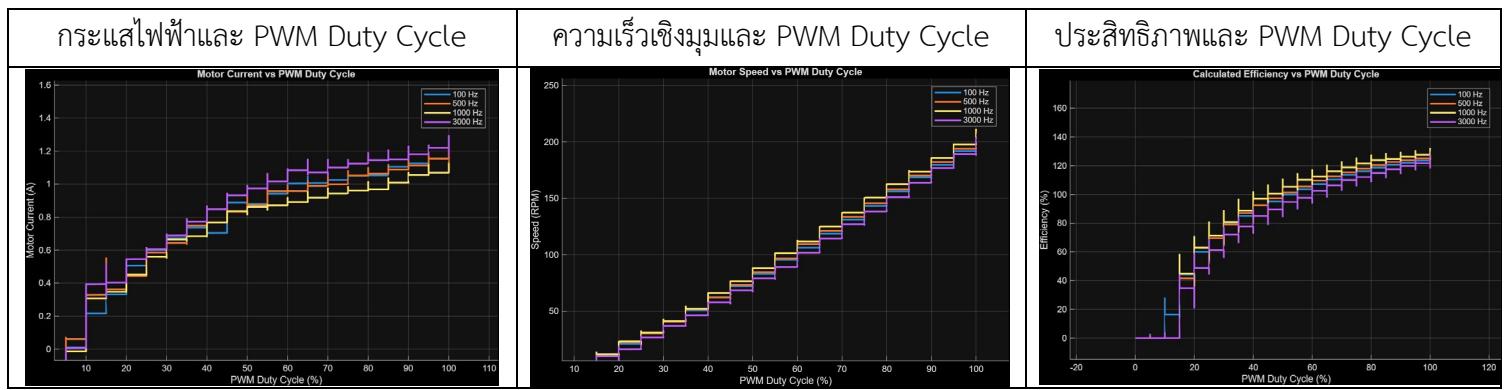
$$\text{ตามสมการดังนี้ } \text{Eff}(\%) = \frac{\text{OUTPUT}}{\text{INPUT}} \times 100$$

### ขั้นตอนการดำเนินงาน

- เลือกค่าความถี่ที่สนใจ 4 ความถี่ (100 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 3000 Hz)
- ทำให้มอเตอร์อยู่ใน状況 No Load
- ตั้งความถี่ 100 Hz และค่อยๆ เพิ่ม PWM Range ทีละ 10 % ทุกๆ 1 วินาที แล้วเก็บค่ากระแสที่ใช้และความเร็วเชิงมุม
- ทำซ้ำ 3 ครั้ง
- ทำขั้นตอนที่ 3 และ 4 โดยเปลี่ยนความถี่จนครบทั้ง 4 ความถี่

### ผลการทดลอง

จากการทำการทดลองที่ความถี่ 100 Hz, 500 Hz, 1000 Hz และ 3000 Hz ได้ผลความสัมพันธ์ของค่ากระแสไฟฟ้า, ความเร็วเชิงมุม, ประสิทธิภาพ และ PWM Duty ดังตาราง



ตารางที่ 44 ความสัมพันธ์ของค่าต่างๆ และ PWM Duty ที่ความถี่ 100 Hz , 500 Hz , 1000 Hz และ 3000 Hz

### สรุปผลการทดลอง

กระแสไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับค่า Duty Cycle, แปรผันผิดกับกระแสไฟฟ้า ที่ความถี่ 100 Hz ,500 Hz ,1000 Hz แต่แปรผันตรงที่ความถี่ 3000 Hz และแนวโน้มของกราฟกระแสไฟฟ้าและ PWM Duty Cycle เป็นแบบ Logarithm

ความเร็วเชิงมุมจะแปรผันตรงกับค่า Duty Cycle, แปรผันตรงกับความเร็วเชิงมุม ที่ความถี่ 100 Hz ,500 Hz ,1000 Hz แต่แปรผันที่ความถี่ 3000 Hz และแนวโน้มของกราฟความเร็วเชิงมุมและ PWM Duty Cycle เป็นเชิงเส้น

ประสิทธิภาพจะแปรผันตรงกับค่า Duty Cycle, แปรผันตรงที่ความถี่ 100 Hz, 500 Hz, 1000 Hz และแปรผันที่ความถี่ 3000 Hz และแนวโน้มของกราฟประสิทธิภาพและ PWM Duty Cycle เป็นแบบ Anti-Logarithm โดยยิ่ง Duty Cycle มากขึ้นก็จะยิ่งเข้าสู่ประสิทธิภาพค่านึง

ดังนั้น จากการทดลองสรุปได้ว่า ควรใช้ PWM ที่ 1000 Hz จึงจะมีประสิทธิภาพสูงสุด

### อภิปรายผล

จากการทดสอบความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและ PWM Duty Cycle ที่ความถี่ 100 Hz, 500 Hz, 1000 Hz พบร่วมกับความถี่เพิ่มขึ้นกระแสไฟฟ้าจะลดลง จนกระทั่งมีความถี่ที่ 3000 Hz จะใช้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จนมากกว่าที่ความถี่ที่ผ่านมาและพบว่าเมื่อเพิ่ม Duty Cycle กระแสไฟฟ้าจะมากขึ้น

จากการทดสอบความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงมุมและ PWM Duty Cycle ที่ความถี่ 100 Hz, 500 Hz, 1000 Hz พบร่วมกับความถี่เพิ่มขึ้นความเร็วเชิงมุมจะเพิ่มขึ้น จนกระทั่งมีความถี่ที่ 3000 Hz จะความเร็วเชิงมุมจะลดลง จนน้อยกว่าที่ความถี่ที่ผ่านมา และพบว่าเมื่อเพิ่ม Duty Cycle ประสิทธิภาพก็จะมากขึ้น รวมถึงเมื่อ Duty Cycle เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพจะถูกลดลง

จากการทดสอบความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพและ PWM Duty Cycle ที่ความถี่ 100 Hz, 500 Hz, 1000 Hz พบร่วมกับความถี่เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้น จนกระทั่งมีความถี่ที่ 3000 Hz จะประสิทธิภาพจะลดลง จนน้อยกว่าที่ความถี่ที่ผ่านมา และพบว่าเมื่อเพิ่ม Duty Cycle ประสิทธิภาพก็จะมากขึ้น รวมถึงเมื่อ Duty Cycle เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพจะถูกลดลง

## ข้อเสนอแนะ

1. ควรใช้บอร์ดที่มีประสิทธิภาพมากกว่าในปัจจุบัน มีการวางแผน Component ที่ทำให้ไม่เกิด Misalignment ที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของมอเตอร์
2. ควรสลับสายมอเตอร์ให้กระแสไฟลัดผ่าน Current Sensor ได้ถูกทิศทาง

## อ้างอิง

- <https://docs.rs-online.com/2c85/A700000006724430.pdf>
- [https://www-corsair-com.translate.goog/ww/en/explorer/diy-builder/fans/what-is-pwm/?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=th&\\_x\\_tr\\_hl=th&\\_x\\_tr\\_pto=sge#:~:text=PWM%20หมายถึง%20อะไร?%20PWM%20ย่อมาจาก%20Pulse%20Width%20Modulation,50%25%20เราใช้%20พัฒนา%20iCUE%20LINK%20QX120%20ของเรานี้เป็นตัวอย่าง](https://www-corsair-com.translate.goog/ww/en/explorer/diy-builder/fans/what-is-pwm/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=th&_x_tr_hl=th&_x_tr_pto=sge#:~:text=PWM%20หมายถึง%20อะไร?%20PWM%20ย่อมาจาก%20Pulse%20Width%20Modulation,50%25%20เราใช้%20พัฒนา%20iCUE%20LINK%20QX120%20ของเรานี้เป็นตัวอย่าง)
- <https://www.thaiwatsadu.com/th/articles/understanding-duty-cycle>
- [https://image.makewebeeasy.net/makeweb/0/mqk9PemK3/Document/Part\\_2\\_Chapter\\_4\\_%E0%B8%9B%E0%B8%B5\\_2561.pdf?v=202012190947](https://image.makewebeeasy.net/makeweb/0/mqk9PemK3/Document/Part_2_Chapter_4_%E0%B8%9B%E0%B8%B5_2561.pdf?v=202012190947)
- <https://docs.aic-eec.com/bii/basic-mcu-interfacing/psoc-tm-6s2-peripherals-interfacing-adc-pwm/psoc-tm-6s2-pwm-and-tcpwm/pwm-principles>

## การทดลองที่ 3 การทดลองเพื่อวิเคราะห์ลักษณะการทำงานของ H-Bridge motor Driver

### จุดประสงค์

- สามารถอธิบายหลักการทำงานของ H-Bridge ได้
- สามารถอธิบายและเปรียบเทียบโหมด Sign-Magnitude กับ Locked Anti-Phase ได้
- สามารถวิเคราะห์ข้อดี-ข้อเสียระหว่างการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบ Sign-Magnitude กับ Locked Anti-Phase จากการทดลองได้

### สมมติฐาน

- ทั้งสองโหมดการทำงานจะให้ความเร็วที่เท่ากันตาม Duty Cycle
- ทั้งสองโหมดการทำงานมีการใช้กระแสไฟฟ้าใกล้เคียงกัน

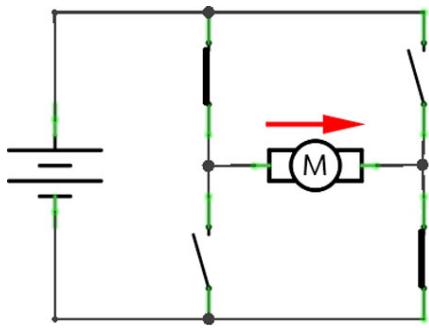
### ตัวแปร

- ตัวแปรต้น:
  - โหมดการทำงานของ H-Bridge Driver
  - Duty Cycle ของสัญญาณ PWM
- ตัวแปรตาม:
  - ความเร็วเชิงมุม
  - กระแสไฟฟ้า
- ตัวแปรควบคุม:
  - ความถี่ PWM
  - แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์
  - แรงดันไฟฟ้า
  - มอเตอร์และ Driver
  - อุญจัยในสภาพ No-Load

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- H-Bridge Drive

วงจรที่ประกอบด้วยสวิตซ์ 4 ตัวเรียกว่าเป็นรูปตัว "H" ใช้สำหรับควบคุมทิศทาง (เดินหน้า-ถอยหลัง) และความเร็วของมอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) โดยการสลับการเปิด - ปิดสวิตซ์เหล่านี้เพื่อเปลี่ยนทิศทางการหมุนของกระแสไฟฟ้าผ่านมอเตอร์ ทำให้มอเตอร์หมุนกลับทิศทางได้ หมายความว่าหัวที่เดินหน้าจะถูกเปลี่ยนเป็นหัวที่เดินหลัง และหัวที่เดินหลังจะถูกเปลี่ยนเป็นหัวที่เดินหน้า ทำให้มอเตอร์หมุนกลับทิศทางได้ หมายความว่าหัวที่เดินหน้าจะถูกเปลี่ยนเป็นหัวที่เดินหลัง และหัวที่เดินหลังจะถูกเปลี่ยนเป็นหัวที่เดินหน้า



ภาพที่ 8 วงจร H-bridge Drive

## 2. Sign-Magnitude

คือ โหมดหนึ่งในการควบคุมมอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) โดยใช้ H-Bridge และซ่องในการสั่งการทำงาน 2 ช่องมีหลักการทำงานดังนี้

- ช่องที่ 1 Sign (เครื่องหมาย): สัญญาณดิจิทัล 1 บิต (เช่น 1 Pin) ทำหน้าที่กำหนด ทิศทางการหมุน (เช่น HIGH ให้หมุนตามเข็ม, LOW ให้หมุนวนเข็ม)
- ช่องที่ 2 Magnitude (ขนาด): สัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) ทำหน้าที่กำหนด ความเร็ว ของมอเตอร์ (เช่น 0% = หยุด, 100% = เร็วสุด)

## 3. Locked Anti-Phase

คือ โหมดหนึ่งในการควบคุมมอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) โดยใช้ H-Bridge โดยใช้ช่องการควบคุม เพียงช่องเดียวมีหลักการทำงานดังนี้

- สัญญาณ PWM จะถูกแบ่งเป็นสองช่วงซึ่งตันถึงกลาง (0% - 50%) จะทำให้มอเตอร์หมุนไปทิศหนึ่ง และช่วงกลางถึงปลาย (50% – 100%) จะทำให้มอเตอร์หมุนไปอีกทิศหนึ่ง โดยช่วงกลาง (50%) จะ เป็นช่วงที่มอเตอร์หยุดหมุนพอดี

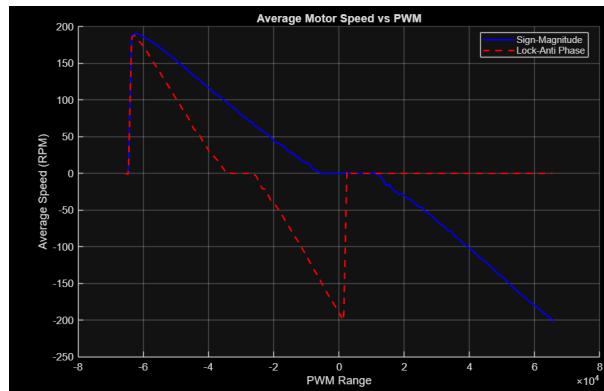
## 4. H-Bridge

### ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ตั้งความถี่มอเตอร์ 2000 เซ็ม DIR เข้ากับ PC6 PWM เชื่อมกับ PC7
2. สั่งมอเตอร์หมุนด้วย PWM range ตั้งแต่ -65535 ถึง 65535 และบันทึกค่าความเร็วของมอเตอร์
3. สลับสาย DIR เข้ากับ PC7 PWM เชื่อมกับ PC6
4. สั่งมอเตอร์หมุนด้วย PWM range ตั้งแต่ -65535 ถึง 65535 และบันทึกค่าความเร็วของมอเตอร์

## ผลการทดลอง

จากการทำการทดลองได้กราฟความสัมพันธ์ของความเร็วมอเตอร์กับ Duty Cycle ของ PWM และ กระแสที่ใช้กับความเร็ว ดังกราฟ



ภาพที่ 9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความเร็วที่ได้รับระหว่าง Sign-Magnitude และ Locked Anti-Phrase เพื่อเทียบกับ PWM range



ภาพที่ 1010 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสที่ใช้ระหว่าง Sign-Magnitude และ Locked Anti-Phrase เพื่อเทียบกับ ความเร็ว เซียงมูน

## สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองสรุปได้ดังนี้

มีเพียง荷德 Sign-Magnitude ที่จะให้ความเร็วที่แปรผันตรงตาม Duty Cycle แต่ Locked Anti-Phrase จะไม่แปรผันตรงหรือแปรผูกันเนื่องจากวิธีการขับนี้ ที่ Duty Cycle สูงสุดและต่ำสุดก็ให้ความเร็วสูงสุดเหมือนกัน แต่ค่อนลบทิศ และจะหยุดนิ่งเมื่อ Duty Cycle อยู่ที่ตรงกลาง

ทั้งสอง荷德การทำงานมีการใช้กระแสไฟฟ้าใกล้เคียงกันแต่ Sign – Magnitude จะมีการใช้กระแสต่ำกว่าเล็กน้อยในช่วงที่เป็นการหมุนวนเข้มนาฬิกา

## อกิจกรรม

ในโหมด Sign-Magnitude ความเร็วเชิงมุมและทิศทางของความเร็วเชิงมุม จะปรับตัวตาม PWM Range ที่สั่งเข้าไป สังเกตได้จาก ที่ PWM Range ประมาณ -65000 ขนาดของความเร็วเชิงมุมจะมีค่าประมาณ 190 rpm เมื่อ PWM Range ประมาณ 65000 ขนาดของความเร็วเชิงมุมจะมีค่าประมาณ 190 rpm ในอีกหนึ่งทิศทาง และเมื่อ PWM Range ที่ 0 ความเร็วก็เป็น 0 เช่นกัน

ในโหมด Locked Anti-Phrase ความเร็วเชิงมุมจะต่างไปจากโหมดก่อนหน้าโดย PWM range สูงสุดจะหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมสูงสุดในทิศทางหนึ่งและ PWM Range น้อยที่สุดจะได้ความเร็วเชิงมุมสูงสุดในอีกทิศทางหนึ่ง และช่วงต่างๆจะได้ความเร็วเชิงมุมเป็น 0 หรือหมายความว่ามอเตอร์หยุดนิ่ง สังเกตได้จากที่ PWM Range ประมาณ -65000 และ PWM Range ประมาณ 0 จะได้ขนาดของความเร็วเชิงมุม 190 rpm แต่ในทิศทางกลับกัน และที่ความเร็วเชิงมุมประมาณ 32000 ความเร็วจะหยุดหมุน แต่ช่วง PWM Range มากกว่า 0 เป็นต้นไปมอเตอร์จะหยุดหมุน คาดว่าไม่สามารถสั่งงานเกินช่วง -65535 ถึง 0 ได้

ในเรื่องกระแส Sign-magnitude จะใช้กระแสน้อยกว่า Locked Anti-Phrase ในทิศทางเดียวกัน และใช้กระแสใกล้เคียงกันในทิศทางเดียวกัน คาดว่าเกิดได้จากการ Misalignment ทำให้แนวโน้มกระแสที่ใช้ของทั้งสองทิศทางไม่เหมือนกัน

จากการทดลองข้อมูลข้างต้นทำให้สรุปข้อดีข้อเสียของแต่ละ Drive Mode ได้ดังนี้

### 1. Sign Magnitude

#### 1.1. ข้อดี

1.1.1. ช่วงความกว้างของ PWM ทั้งหมด (0-100%) ถูกใช้เพื่อควบคุมความเร็วในทิศทางเดียว ทำให้มีความสามารถในการสั่งงานมาก

#### 1.2. ข้อเสีย

1.2.1. ที่ความเร็วต่ำ(PWM Range น้อยกว่าประมาณ 500) มอเตอร์จะไม่หมุนเนื่องจากไม่สามารถเอานะแรงเสียดทานเริ่มต้นได้

โดยรวมแล้วโหมดนี้เหมาะสมสำหรับการใช้งานทั่วไป เช่น พัดลม ปั๊มน้ำ เป็นต้น

### 2. Locked Anti-Phrase

#### 2.1. ข้อดี

2.1.1. ได้แรงบิดมากกว่า Sign Magnitude ในช่วงความเร็วต่ำ เริ่มหมุนในช่วงความเร็วต่ำกว่า

2.1.2. ใช้สายสัญญาณเพียงเส้นเดียว

#### 2.2. ข้อเสีย

2.2.1. ได้ช่วงความกว้างของสัญญาณที่ต่ำ เพราะ สั่งได้แค่ 0- 50% เท่านั้น

โดยรวมแล้วโหนมคนี้เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ต้องการความแม่นยำมากขึ้น เช่น หุ่นยนต์ทรงตัว แขนกล เป็นต้น

### ข้อเสนอแนะ

1. ควรใช้บอร์ดที่มีประสิทธิภาพมากกว่าในปัจจุบัน มีการวาง Component ที่ทำให้ไม่เกิด Misalignment ที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของมอเตอร์
2. ควรสลับสายมอเตอร์ให้กระแสไฟลั่น Current sensor ได้ถูกทิศทาง

### อ้างอิง

- <https://www.ti.com/lit/ab/slaae97a/slaae97a.pdf?ts=1762310324494>
- <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8873-q1.pdf>

## 2.2 Stepper Motor

การทดลองที่ 1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณขับ ความเร็ว และ Drive Modes ของ Stepper Motor

### จุดประสงค์

- เพื่อศึกษาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณขับ กับความเร็วรอบของมอเตอร์ในแต่ละโหมด
- เพื่อแสดงการทำงานและเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของ Drive Modes ต่างๆ
- เพื่ออธิบายความแตกต่างของความนุ่มนวลในการเคลื่อนที่ (Smoothness) ในแต่ละโหมด

### สมมติฐาน

- ความเร็วรอบของ Stepper Motor จะแปรผันตรงกับความถี่ของสัญญาณขับ ที่ป้อนเข้าไป
- โหมด Full-Step จะสามารถทำงานที่ความถี่สูงได้มากกว่า โหมดอื่นๆ

### ตัวแปร

- ตัวแปรต้น:
  - ความถี่ของสัญญาณขับ
  - Drive Mode
- ตัวแปรตาม:
  - ความเร็วรอบของมอเตอร์
  - ความนุ่มนวลในการหมุน
  - ความถี่สูงสุดที่มอเตอร์สามารถทำงานได้ก่อนเกิด Loss Step
- ตัวแปรควบคุม:
  - แรงดันไฟฟ้า 12.34 V
  - Stepper Motor
  - อยู่ในสภาพ No-Load

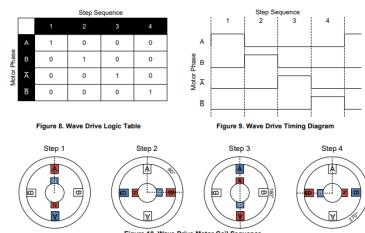
### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- Stepper Motor
  - มอเตอร์ไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยพัลส์ มีลักษณะการขับเคลื่อนโดยการหมุนรอบแกน 360 องศา ภายใต้นิ้นจะประกอบไปด้วยขั้วแม่เหล็กบนสเตเตอร์ (Stator) ทำมาจากแผ่นเหล็กวงแหวน จะมีชีวินอกมาประกอบกับกันเป็นชั้นๆ โดยแต่ละชีวีนักออกแบบนั้นจะมีขดลวด (คอily) พันอยู่ เมื่อมีกระแสผ่านคอily จะเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น ซึ่งรูปแบบการพันขดลวดบน Stator จะมีด้วยกัน 2 แบบ คือ

- 1.1. แบบ Bipolar ในแต่ละขั้วแม่เหล็กบน Stator จะมีการพันขดลวดหนึ่งชุด บางครั้งอาจเรียก Stepper Motor ประเภทนี้ว่า Stepper Motor แบบ 2 เฟส
- 1.2. แบบ Unipolar จะมีการพันขดลวด 2 ชุด บน Stator แต่ละชุดจะแบ่งเป็น 2 เฟส รวมทั้งตัวมอเตอร์จะมีด้วยกัน 4 เฟส จะมีการต่อสายอคอมจากขดลวดแต่ละชุดเพื่อจ่ายไฟเลี้ยง ทำให้ Stepper Motor แบบนี้มีทั้งแบบ 5 สายและ 6 สาย ถ้าเป็นแบบ 5 สาย จะเป็นการนำสายไฟเลี้ยงของขดลวดทั้งสองมาต่อรวมกันเป็นสายเดียว Stepper Motor นี้ยังเป็นที่นิยมใช้กันแพร่หลายอีกด้วย

## 2. Wave Drive

เป็น Drive Mode ที่ง่ายมากที่สุดในการสั่งการ Stepper Motor แต่เป็นวิธีที่พบได้น้อยที่สุด เพราะมีความสามารถในการสร้าง Torque ได้น้อยกว่า Full-Step และมีความแม่นยำน้อยกว่า Half-Step ทำให้ไม่ได้รับความนิยมและมักถูกนำมาใช้เมื่อต้องการลดพลังงานที่ใช้และไม่ได้ต้องการ Torque ที่สูง ซึ่ง Wave Drive สั่งการโดยเปิด Phase แค่ 1 ในหนึ่ง Step โดยจะมีทั้งหมดเพียง 4 Step ต่อการหมุน 1 รอบ ดังภาพนี้

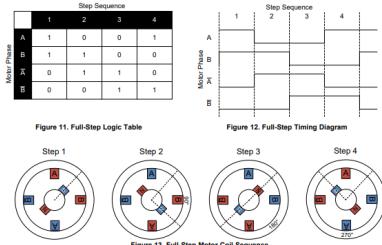


ภาพที่ 11 Wave drive

ภาพที่ 1112 Wave drive

## 3. Full – Step

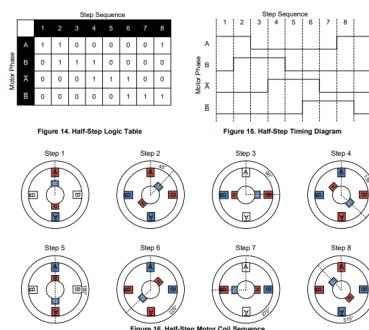
Full – Step เป็น Drive Mode ที่นิยมนำมาใช้ในการขับมอเตอร์ เนื่องจากให้ Torque ได้มากกว่า Mode อื่น และมี Torque ที่คงที่เมื่อเทียบกับ Half Step จึงมักจะนำมาใช้ในงานที่ต้องการให้ Torque เพิ่มขึ้น โดยมอเตอร์จะทำงานเป็น 4 Step ในการหมุน 1 รอบ โดยจะทำการเปิด Phase พร้อมกัน 2 Phase ทำให้ Stator อยู่กึ่งกลางระหว่าง Phase ทั้งคู่ จางนั้นเลื่อนคู่ Phase ที่เปิดไปเรื่อย ๆ ดังภาพ



ภาพที่ 13 Full-Step ภาพที่ 14

#### 4. Half – Step

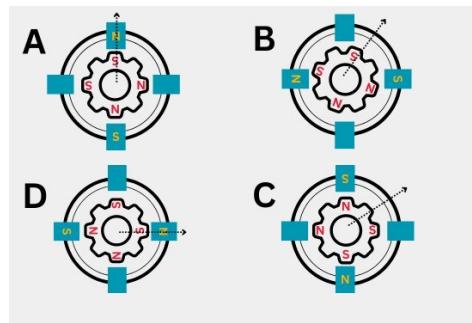
Half – Step เป็น Drive Mode ที่มี Resolution ที่ดีกว่าใน Mode อื่น ๆ แต่ Torque จะมีการสูง โดยมอเตอร์จะทำงานเป็น 8 Step ในการหมุน 1 รอบ โดยจะทำการเปิด Phase 1 Phase ก่อนจากนั้นจะเปิด Phase ถัดไปด้วยเป็นการเปิด Phase พร้อมกัน 2 Phase ทำให้ Stator อยู่กึ่งกลางระหว่าง Phase ทั้งคู่ จากนั้นจะปิด Phase ที่เปิดในตอนแรกจนเหลือ 1 Phase จากนั้นไปเรื่อย ๆ ดังภาพ ซึ่งเมื่อน Step มาขึ้น ก็จะยิงทำให้มอเตอร์ขับได้อย่างลื่นไหลมากขึ้น



ภาพที่ 1315 Half Step

#### 5. Micro – Step

Micro – Step เป็นการแบ่ง Step ให้เล็กลงเรื่อย ๆ เพื่อให้ได้ความละเอียดที่สูงขึ้น มีการควบคุมโดยค่อยๆ รุบคุณกระแทกที่จ่ายในแต่ละขั้วเป็น Pattern ในลักษณะคล้ายคลื่นไส้ เมื่อทำตามวิธีนี้แล้วจะสามารถทำให้มอเตอร์หมุนทีละน้อยได้ ตัวอย่างเช่น driver สั่งให้แบ่ง 4,8,16 Step เท่า ๆ กัน ในทุกๆ Full – Step จะทำให้ได้ความละเอียด Micro-Step เป็น 1/4, 1/8, 1/16 ตามลำดับ ซึ่งโหมดนี้จะได้มอเตอร์ที่มีความลื่นไหลมากและความละเอียดในการเคลื่อนที่สูง



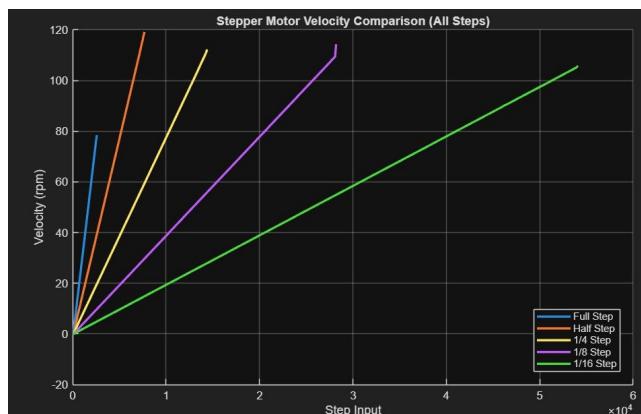
ภาพที่ 16 Micro – Step

### ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ต่อและตั้งค่าอุปกรณ์ตาม Instruction
2. ตั้งค่าเป็นโหมด Full Step
3. ป้อนความถี่โดยเริ่มจาก 100 Hz และค่อยๆ เพิ่มขึ้นทีละ 100 Hz บันทึกค่าความเร็ว พฤติกรรมของมอเตอร์ และค่าต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง และทำซ้ำ 3 ครั้ง
4. ตั้งค่าโหมดเป็น Half Step ทำซ้ำขั้นตอนที่ 3
5. ตั้งค่าโหมดเป็น Micro Step ทำซ้ำขั้นตอนที่ 3

### ผลการทดลอง

จากการทดลอง ได้กราฟความสัมพันธ์ของความเร็วมอเตอร์และ Step Input ของ Mode Drive ต่างๆ ดังรูป



ภาพที่ 17 กราฟความสัมพันธ์ของความเร็วมอเตอร์และ Step Input ของ Mode Drive ต่าง ๆ

### สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองสรุปได้ว่า

- Full – Step จะได้ความเร็วเชิงมุมมากที่สุด ตามด้วย Half – Step, 1/4 Step, 1/8 Step และ 1/16 Step ตามลำดับ
- 1/16 Step สามารถทำงานในความถี่ (Step Input) ที่สูงได้ ตามด้วย 1/8 Step, 1/4 Step, Half – Step และ Full – Step ตามลำดับ ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า มีความเร็วสูงสุดที่ทำได้前提是 Drive ตั้งกล่าว

## อภิรายผล

จากผลการทดลอง ในภาพที่ 14 พบว่าที่ความถี่ (Step Input) เดียวกัน Full – Step จะได้ความเร็วเชิงมุมมากที่สุด ตามด้วย Half – Step , 1/4 Step , 1/8 Step และ 1/16 Step ตามลำดับ แต่ 1/16 Step สามารถทำงานในความถี่ (Step Input) ที่สูงได้ ตามด้วย 1/8 Step , 1/4 Step , Half – Step และ Full – Step ตามลำดับ โดยความถี่ที่สูงนั้นส่งผลต่อความเร็วของมอเตอร์ในขณะนี้ด้วย หมายความว่าหากมอเตอร์สามารถทำงานในความถี่ที่สูงได้มากเท่าไหร่ ความเร็วสูงสุดที่มอเตอร์สามารถทำได้ก็จะสูงขึ้นด้วย เป็นผลมาจากการที่มีความถี่สูงหมายถึงมีการส่งสัญญาณจำนวนมากต่อวินาที ทำให้มอเตอร์ก็จะขยับหลาย Step ต่อวินาที ส่งผลให้ความเร็วในการหมุนสูงขึ้น และจากเอกสารอ้างอิงพบว่า 1/16 Step จะมีความเหลื่อมล้ำ (Smooth) ในการหมุนของมอเตอร์มากที่สุด ตามด้วย 1/8 Step , 1/4 Step , Half – Step และ Full – Step ตามลำดับ

ดังนั้น ความละเอียด Step ของ Drive mode ที่ใช้จะแปรผันตรงกับ ความลื่นเหลื่อม (Smooth) ในการหมุนของมอเตอร์ , แปรผันตรงความสามารถในการทำงานในความถี่สูง แต่แปรผันกับความเร็วเชิงมุมที่ทำได้

## ข้อเสนอแนะ

1. ควรใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณ STEP ที่ป้อนเข้าไป เพื่อยืนยันความถี่ที่ใช้ในการทดลองจริง
2. ควรใช้บอร์ดที่มีประสิทธิภาพมากกว่าในปัจจุบัน มีการวาง Component ที่ทำให้ไม่เกิด Misalignment ที่ส่งผลต่อการทำงานของมอเตอร์

## อ้างอิง

- [https://www.ti.com/lit/an/slva767a/slva767a.pdf?ts=1764815741162&ref\\_url=https%253A%252F%252Fti.com%252Flit%252Fpdf%252FsLva767](https://www.ti.com/lit/an/slva767a/slva767a.pdf?ts=1764815741162&ref_url=https%253A%252F%252Fti.com%252Flit%252Fpdf%252FsLva767)

## การทดลองที่ 2 การวิเคราะห์ปัจจัยที่ทำให้เกิด Loss Step และผลของ Acceleration

### จุดประสงค์

เพื่อศึกษาสาเหตุและปัจจัยที่ทำให้เกิด Loss Step

- เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง Acceleration กับความถี่สูงสุดที่มอเตอร์สามารถทำได้ก่อนเกิด Loss Step
- เพื่อหาค่า Start/Stop Frequency และ Maximum Frequency ของมอเตอร์ภายใต้สภาวะ No-Load

### สมมติฐาน

- การสั่นการมอเตอร์เพิ่มความเร็วโดยทันทีจะทำให้เกิด Loss Step ทำให้มอเตอร์หยุดหมุนก่อนมอเตอร์ที่สั่น การโดยค่อยๆเพิ่มความเร็ว

### ตัวแปร

- ตัวแปรต้น:
  - อัตราเร่ง
  - ความถี่เป้าหมาย
- ตัวแปรตาม:
  - การเกิด Loss Step
  - ความถี่สูงสุดที่มอเตอร์รับได้
- ตัวแปรควบคุม:
  - Drive Mode
  - มอเตอร์อยู่ในสภาวะ No-Load

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- Loss Step

Loss Step เกิดขึ้นเมื่อมอเตอร์ไม่สามารถเคลื่อนที่ตาม Step ที่สั่งการเข้าไปได้ โดยสาเหตุโดยทั่วไปเป็น การเกิด Loss Step ได้แก่ Torque ที่ไม่เพียงพออันเกิดจาก Load ที่มากเกินไป, การเลือกมอเตอร์ที่ไม่เหมาะสม, สั่นการมอเตอร์ที่แรงตันหรือกระแสต่ำไป, ความเร็วมากเกินไป, สั่นการให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วที่สูงกว่า rated speed, Noise ทางอิเล็กทรอนิกส์ และการรบกวนจากแหล่งแม่เหล็กไฟฟ้าภายนอก เป็นต้น

## ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ตั้งโหมดเป็น Full Step และ EN=0 ตั้งความถี่ STEP ให้เป็น 0
2. ค่อยๆ เพิ่มความถี่
  - 2.1. ค่อยๆ เพิ่มความถี่ครั้งละ 100 Hz ทุกๆ 1 วินาที จนกว่ามอเตอร์จะไม่สามารถหมุนตามได้
  - 2.2. บันทึกพุตติกรรมและความเร็วของมอเตอร์
  - 2.3. ทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง
3. เพิ่มความถี่โดยทันที
  - 3.1. เริ่มที่ความถี่ 100 Hz 1 วินาที แล้วเปลี่ยนมาที่ 0 Hz 1 วินาที แล้วบันทึกพุตติกรรมและความเร็วของมอเตอร์
  - 3.2. เพิ่มความถี่ครั้งละ 100 Hz 1 วินาที แล้วเปลี่ยนมาที่ 0 Hz 1 วินาที แล้วเพิ่มความถี่เรื่อยๆ จนกว่ามอเตอร์จะไม่สามารถหมุนตามได้ แล้วบันทึกพุตติกรรมและความเร็วของมอเตอร์
  - 3.3. ทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง

## ผลการทดลอง

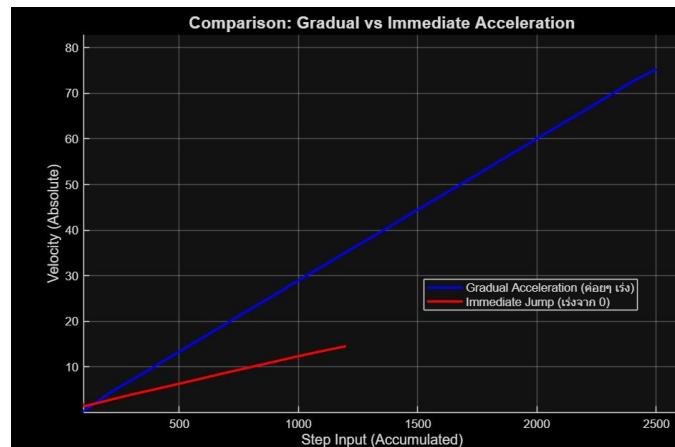
จากการทำการทดลองได้ตารางเปรียบเทียบพุตติกรรมของมอเตอร์เมื่อค่อยๆ เพิ่มความถี่กับเมื่อเพิ่มความถี่โดยทันทีได้ดังตาราง

ความถี่	พุตติกรรมเมื่อค่อยๆ เพิ่มความถี่	พุตติกรรมเมื่อเพิ่มความถี่โดยทันที
100	หมุน	หมุน
200	หมุน	หมุน
300	หมุน	หมุน
400	หมุน	หมุน
500	หมุน	หมุน
600	หมุน	หมุน
700	หมุน	หมุน
800	หมุน	หมุน
900	หมุน	หมุน
1000	หมุน	หมุน
1100	หมุน	หมุน
1200	หมุน	หมุน
1300	หมุน	ไม่หมุน

ความถี่	พุตติกรรมเมื่อค่อยๆ เพิ่มความถี่	พุตติกรรมเมื่อเพิ่มความถี่โดยทันที
1400	หมุน	ไม่หมุน
1500	หมุน	ไม่หมุน
1600	หมุน	ไม่หมุน
1700	หมุน	ไม่หมุน
1800	หมุน	ไม่หมุน
1900	หมุน	ไม่หมุน
2000	หมุน	ไม่หมุน
2100	หมุน	ไม่หมุน
2200	หมุน	ไม่หมุน
2300	หมุน	ไม่หมุน
2400	หมุน	ไม่หมุน
2500	หมุน	ไม่หมุน
2600	ไม่หมุน	ไม่หมุน

ตารางที่ 5 ตารางเปรียบเทียบพุตติกรรมของมอเตอร์เมื่อค่อยๆ เพิ่มความถี่กับเมื่อเพิ่มความถี่โดยทันที

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วต่อ Step Input ของมอเตอร์เมื่อค่าอยู่ที่เพิ่มความเร็ว และเมื่อเพิ่มความเร็วทันทีได้ดังรูป



ภาพที่ 18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วต่อ Step Input ของมอเตอร์เมื่อค่าอยู่ที่เพิ่มความเร็ว และเมื่อเพิ่มความเร็วทันที

### สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าการสั่งการมอเตอร์เพิ่มความเร็วโดยทันทีจะทำให้เกิด Loss Step ส่งผลให้ความเร็วที่ได้จากมอเตอร์นั้นน้อยกว่าเมื่อค่าอยู่ที่เพิ่มความเร็ว มอเตอร์หยุดหมุนก่อนมอเตอร์ที่สั่งการโดยค่าอยู่ที่เพิ่มความเร็ว

### อภิปรายผล

จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความถี่จาก 0 ไปยังความถี่ที่ต้องการโดยทันทีจะพบว่าความเร็วมอเตอร์ที่ได้มีค่าน้อยกว่าความเร็วของมอเตอร์ที่ได้จากการค่าอยู่ที่เพิ่มความถี่ของมอเตอร์จนถึงความถี่เดียวกัน โดยเมื่อเพิ่มความถี่ทันทีมอเตอร์จะหยุดหมุนจนถึงความถี่ที่ 1200 Hz และเมื่อค่าอยู่ที่เพิ่มความถี่มอเตอร์จะหยุดหมุนที่ 2500 Hz เป็นผลสืบเนื่องมาจากการเกิด Loss Step ของมอเตอร์ ที่เกิดขึ้นจากการที่ความเร่งในขณะที่เพิ่มความถี่โดยทันทีมีขนาดมาก เพราะความถี่ของสัญญาณมีผลโดยตรงต่อความเร็วเมื่อเพิ่มความถี่จาก 0 เป็นความถี่ที่ต้องการทันทีทำให้ความเร่งที่เกิดขึ้นมีขนาดมาก ซึ่งจากการศึกษาข้อมูลพบว่าหากมีความเร่งมากเกินไปจนมอเตอร์ไม่สามารถทำตามได้จะส่งผลให้เกิด Loss Step ขึ้นได้ ดังนั้น การสั่งการมอเตอร์ด้วยความเร่งที่สูงเกินไปนั้นทำให้มอเตอร์เกิด Loss Step ได้

### ข้อเสนอแนะ

- ควรใช้บอร์ดที่มีประสิทธิภาพมากกว่าในปัจจุบัน มีการวางแผน Component ที่ทำให้ไม่เกิด Misalignment ที่ส่งผลต่อการทำงานของมอเตอร์

### อ้างอิง

- <https://docs.rs-online.com/0330/A70000008880659.pdf>

## 2.3 Brushless DC Motor

การทดลองที่ 1 ผลของ Phase Shift ระหว่างสัญญาณแต่ละ Phase ของ BEMF และทิศทางการหมุนของ Brushless DC Motor

### จุดประสงค์

- เพื่อวิเคราะห์และอธิบายการเกิด Phase Shift ระหว่างสัญญาณแต่ละ Phase ของ BEMF
- เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง Phase Shift ของสัญญาณ BEMF และทิศทางการหมุนของ Brushless DC Motor

### สมมติฐาน

เมื่อ Brushless DC Motor หมุนในทิศทางวนเข็มนาฬิกาจะเกิด Phase Shift ของทั้ง 3 ต่างกันสัญญาณละ 120 องศา ตามลำดับการเกิด

### ตัวแปร

- ตัวแปรต้น:
  - ค่าของความเร็วที่ใช้สั่ง Brushless DC Motor
- ตัวแปรตาม:
  - Phase Shift ระหว่างสัญญาณแต่ละ Phase ของ BEMF
  - ทิศทางการหมุนของ Brushless DC Motor
- ตัวแปรควบคุม:
  - Brushless DC Motor
  - การต่อสาย Oscilloscope

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

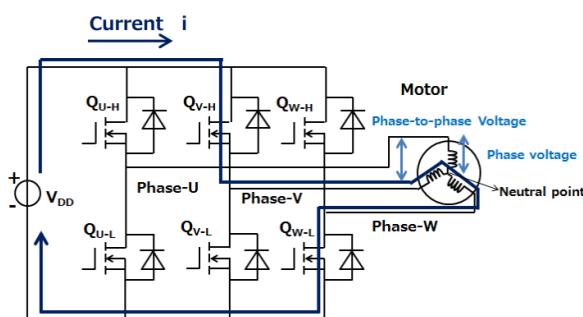
สายไฟที่เชื่อมต่อกันใน BLDC โดยส่วนใหญ่จะเป็นการต่อกันแบบ DLRK (Double Layer Ring Winding) ซึ่งจะมีสามสายสัญญาณคือ Phase U , V และ W โดยสายทั้งสามถูกวาง ทั้งสามสายจะมีเฟสต่างกัน 120 องศา

ซึ่งมันทำงานโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าต่างกัน 120 องศา ทำให้การเหนี่ยวนำแม่เหล็กเกิดขึ้นที่ขดลวด ข้ามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำนั้นก็ทำการดึงและผลักแม่เหล็กถาวรที่อยู่ในมอเตอร์ ทำให้มอเตอร์สามารถหมุนได้ และทำให้เกิด BEMF เกิดขึ้นกับขาที่ Floating

ซึ่งในการขับเคลื่อน BLDC นั้นสามารถขับเคลื่อนได้ด้วย 2 วิธีการ คือ 6 Step และ FOC (Field Oriented Control)

## - 6 Step

การขับเคลื่อนด้วยการ การเปิดปิดของ Mosfet ทั้ง 6 ตัว ทำให้การไฟลของกระแสที่แตกต่างกัน 6 แบบ ซึ่งรูปแบบในการเปิดปิดของกระแสนั้นตามตัวและเป็นขั้นลำดับ โดยการเปิดปิดของ Mosfet จะทำให้วงจรเรื่องมต่อ กันดังรูป กระแสจะไฟลผ่านชุดลวดทำให้เกิดการเหนี่ยวนำเป็นสนามแม่เหล็กอุบങดึงและผลักแม่เหล็กการทำให้มอเตอร์หมุน เมื่อแม่เหล็กเกิดการหมุนเมื่อถึง ณ จุดนี้รูปแบบในการจ่ายไฟก็จะเปลี่ยนไป เพื่อทำให้เกิดการ ออกแรงผลักและดึงให้แม่เหล็กถาวรหมุนต่อไป โดยการที่จะใช้การควบคุมแบบนี้ได้นั้น จะต้องรู้ตำแหน่งของ แม่เหล็กถาวร เพื่อที่จะสามารถถ่ายไฟได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 17 รูปวงจร Inverter

ซึ่งรูปสัญญาณของ BEMF ออกแบบเป็นรูปแบบ Trapezoidal ดังรูป



รูปที่ 18 กราฟ Trapezoidal

## - FOC (Field Oriented Control)

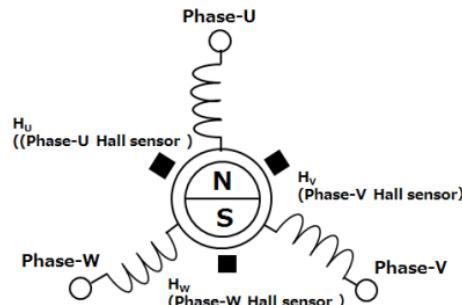
จะทำงานโดยการควบคุมกระแส เพื่อนำมาควบคุม torque ที่เกิดขึ้นและมีการควบคุมสนามแม่เหล็กภายใน มอเตอร์ โดยนั้นจะสร้างสนามแม่เหล็กทั้งฉากกับทำแรงน์ ณ ตอนนั้น ซึ่งทำให้แรงนั้นจะข้ามอย่างตามมุ่งของ rotor โดยทำแรงนั้นจะสามารถตรวจจับได้จาก hall sensor หรือ encoder

โดยเมื่อเรานำข้อดีข้อเสียมาเปรียบเทียบกันจะได้ดังตารางดังนี้

	6 Step	FOC
ข้อดี	ไม่แพง, ใช้งานง่าย	เสียงเบา , ความแม่นยำสูง Torque Ripple น้อยสำหรับ Stable Loads
ข้อเสีย	เสียงดัง, ไม่แม่นยำ	ใช้งานยาก, ราคาแพง Torque Ripple มากสำหรับ Dynamic Loads

ตารางที่ 6 ตารางเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียระหว่างการขับมอเตอร์โดย 6 Step และ FOC

จากข้อมูลข้างต้นทำให้เราทราบว่าต้องรู้ตำแหน่งของแม่เหล็กการข้างในเพื่อที่จะสามารถหมุนมอเตอร์ได้ซึ่งวิธีการที่จะทำให้เราสามารถรู้ตำแหน่งของแม่เหล็กข้างในได้อยู่ 2 วิธีด้วยกัน คือ Hall Effect Sensor และ Back EMF Sensing



รูปที่ 19 ตำแหน่งของ hall effect sensor

#### - Hall Effect Sensor

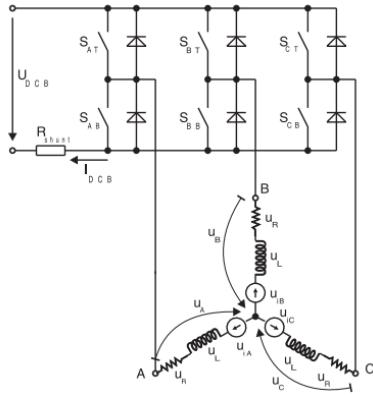
ทำงานโดยจะตรวจจับการเปลี่ยนชั้วของแม่เหล็กการข้างใน โดยจะพิจารณาจาก sensor ทั้งสามตัวเพื่อควบคุมการจ่ายกระแสผ่าน coil เพื่อทำให้มอเตอร์หมุนได้ซึ่งสามารถสรุปอุปกรณามาเป็นตารางดังรูป

Pattern	High-side devices			Low-side devices			Hall sensor output		
	$Q_{U-H}$	$Q_{V-H}$	$Q_{W-H}$	$Q_{U-L}$	$Q_{V-L}$	$Q_{W-L}$	$H_U$	$H_V$	$H_W$
t1	1	0	0	0	1	0	1	0	1
t2	1	0	0	0	0	1	1	0	0
t3	0	1	0	0	0	1	1	1	0
t4	0	1	0	1	0	0	0	1	0
t5	0	0	1	1	0	0	0	1	1
t6	0	0	1	0	1	0	0	0	1

รูปที่ 20 ตารางสรุปการจ่ายกระแสไฟตามตำแหน่งที่ hall senser ตรวจจับได้

#### - Back EMF Sensing

เป็นการใช้ความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นในขดลวดที่ต้านการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กเพื่อบรุตำแหน่งซึ่งจะต้องมีการตรวจหา zero crossing เพื่อที่จะทำให้มันจ่ายไฟในขั้นถัดไป ซึ่งวิธีนี้องค์มีข้อจำกัดบางอย่างในการใช้งาน เช่น BEMF จะเจอนในเฟสที่ไม่มีการโหลดของกระแส และหากไม่เกิดการหมุนจะไม่สามารถตรวจจับได้ เพราะไม่เกิดการเหนี่ยวนำจากแม่เหล็กการกับ เฟสที่เกิดการ floating หากเรานำมาประยุกต์ใช้กับ 6 step สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ดังนี้

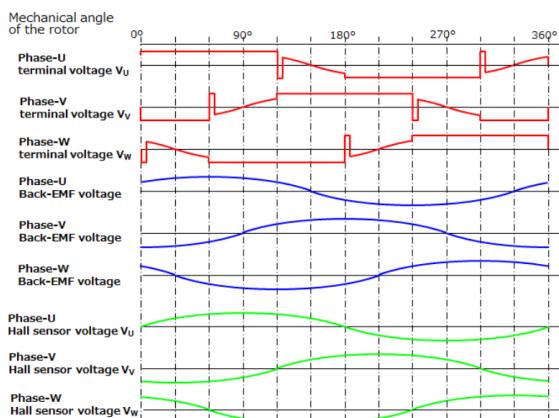


รูปที่ 21 รูป power stage และ โครงสร้างมอเตอร์

Rotor position	Sector number	Switch closed		Phase current		
		A	B	C	off	
0–60°	1	S <sub>AT</sub>	S <sub>BB</sub>	+	—	off
60–120°	2	S <sub>AT</sub>	S <sub>CB</sub>	+	off	—
120–180°	3	S <sub>BT</sub>	S <sub>CB</sub>	off	+	—
180–240°	4	S <sub>BT</sub>	S <sub>AB</sub>	—	+	off
240–300°	5	S <sub>CT</sub>	S <sub>AB</sub>	—	off	+
300–360°	6	S <sub>CT</sub>	S <sub>BB</sub>	off	—	+

รูปที่ 22 รูป ตาราง six step switching sequence

ในตอนแรกเริ่มจะต้องสั่งให้มอเตอร์หมุนแบบ open loop ก่อนเพื่อทำให้ BEMF สูงขึ้น จนถึงระดับที่เหมาะสมก่อนเปลี่ยนกลับมาใช้การตรวจจับแบบ BEMF ซึ่งจากตารางแสดงถึงการเปิดปิดของสวิชที่เปลี่ยนแปลงไปตามองศาที่มอเตอร์หมุนซึ่งสัญญาณ BEMF ที่เปลี่ยนแปลงไปจะเป็นตัวที่ทำให้ตัวสวิชเปิดปิด



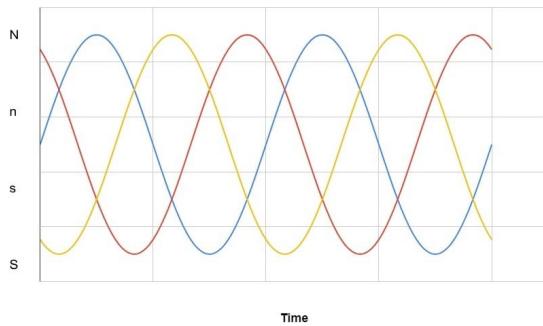
รูปที่ 23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ phase terminal, BEMF voltage และ hall sensor voltage ของแต่ละเฟส

จากการจะเห็นว่าที่ 0 องศา ของเฟส U ค่าความต่างศักย์ที่ hall sensor อยู่ที่ 0 แต่ความต่างศักย์ของ BEMF กลับมากกว่า 0 นั้น เพราะ BEMF จะสามารถตรวจจับได้ก่อน hall effect ทำให้หากใช้ BEMF ในการตรวจสอบตำแหน่งอาจทำให้เกิดการทำงานก่อนที่แม่เหล็กจะมาถึงตำแหน่งนั้น ซึ่งทำให้วิธีการนี้ไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้ในงานที่ต้องการใช้ความแม่นยำในการหมุน

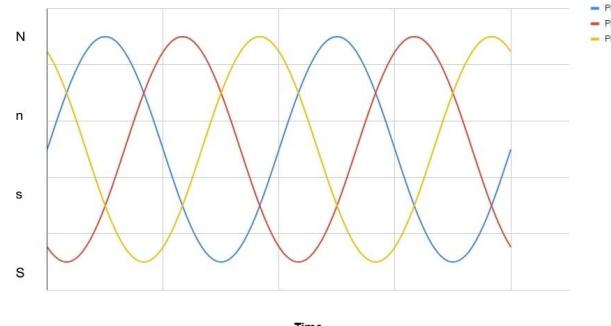
ซึ่งจากการหาสังเกตที่สัญญาณจาก hall effect จะเห็นได้ว่า จุดตัด 0 โวลต์ของคลื่นที่เคลื่อนตัวขึ้น ของเฟส U อยู่ที่มุม 0 องศา และเฟส V อยู่ที่มุม 120 องศา และของ W อยู่ที่ 240 องศา จากข้อมูลในส่วนนี้ทำให้เราได้ทราบว่า เฟส U กับ V และ V กับ W มีเฟสต่างกัน 120 องศา ซึ่งเกิดจากการใช้ระบบแรงดันไฟฟ้าแบบ 3 เฟส

และปั้งทำให้เรารู้ว่าหากมอเตอร์หมุนทิศตามเข็มนาฬิกาและมองจากฝั่งของมอเตอร์ จะทำให้เฟสที่เกิดขึ้นมีลำดับเป็น U, V และ W ซึ่งหาก มอเตอร์หมุนวนเข็มนาฬิกาจะทำให้ เราต้องให้แรงในทิศที่ต่างจากการหมุนตามเข็มที่ทำให้ลำดับการจ่ายกระแสไฟเปลี่ยนไป ส่งผลให้ลำดับเฟสเปลี่ยนไปด้วยเช่นกัน

3-Phase Alternating Current



3-Phase Alternating Current



รูปที่ 24 ข้าแม่เหล็กที่เกิดขึ้นหากหมุนตามเข็มนาฬิกา      รูปที่ 25 ข้าแม่เหล็กที่เกิดขึ้นหากหมุนวนเข็มนาฬิกา

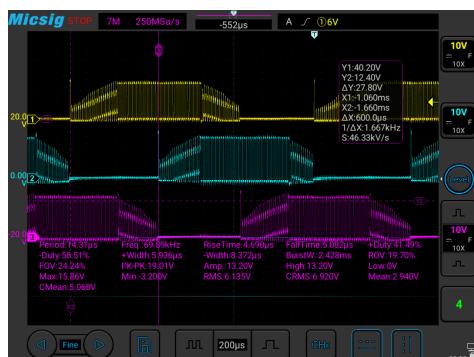
### ขั้นตอนการดำเนินงาน

- กำหนดค่า Speed Reference และ Target Speed ที่ 5000 RPM
- สั่งให้ Brushless DC Motor หมุน สังเกตทิศทางการหมุนของมอเตอร์ และสัญญาณ BEMF ที่เกิดขึ้น
- บันทึกการเรียงลำดับ Phase, ค่าของสัญญาณ BEMF และทิศทางการหมุนของมอเตอร์ ทำซ้ำ 5 ครั้ง
- เปลี่ยนค่า Speed Reference และ Target Speed ที่ -5000 RPM
- ทำซ้ำข้อที่ 2 และ 3

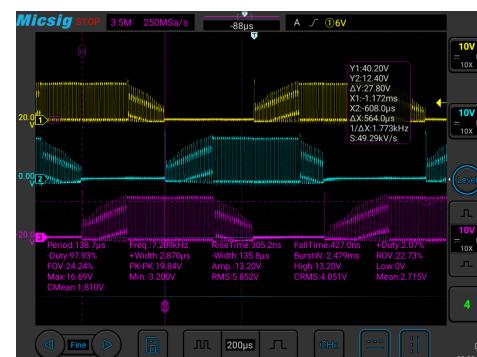
### ผลการทดลอง

ที่ 5000 RPM มอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกา phase ช่องที่ 1 นำหน้า phase ที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

ที่ -5000 RPM มอเตอร์หมุนวนเข็มนาฬิกา phase ช่องที่ 3 นำหน้า phase ที่ 2 และ 1 ตามลำดับ



รูปที่ 26 Terminal Voltage ของ Phase 1, 2 และ 3 ที่ 5000 RPM



รูปที่ 27 Terminal voltage ของ Phase 1, 2 และ 3 ที่ -5000 RPM

เมื่อวัดระยะห่างระหว่างจุดเริ่มต้นของแต่ละ phase และค่าบันทึกทำเป็นตารางจะได้ข้อมูลดังนี้

รอบการทดลอง	อัตราเร็ว [RPM]					
	5000			-5000		
	ค่าบ [μs]	ระยะห่าง [μs]		ค่าบ [μs]	ระยะห่าง [μs]	
		1 และ 2	2 และ 3		1 และ 2	2 และ 3
รอบที่ 1	1,659.32	600.00	560.00	1,647.21	608.00	564.00
รอบที่ 2	1,752.40	580.00	588.00	1,625.09	612.00	564.00
รอบที่ 3	1,705.34	564.00	580.00	1,724.97	568.00	560.00
รอบที่ 4	1,782.04	604.00	568.00	1,748.46	520.00	604.00
รอบที่ 5	1,733.17	584.00	576.00	1,710.79	584.00	568.00
ค่าเฉลี่ย	1,726.46	586.40	574.40	1,691.30	578.40	572.00

ตารางที่ 7 ตารางแสดงข้อมูลค่าบและระยะห่างของข้อมูล ที่เกิดขึ้นในอัตราเร็ว 5000 และ -5000 RPM

และเมื่อนำมาหาอนุพันธ์ที่ต่างกันของของมูลและทำเป็นตารางจะได้ดังนี้

รอบการทดลอง	อัตราเร็ว [RPM]			
	5000 [RPM]		-5000 [RPM]	
	อนุพันธ์ที่เปลี่ยนแปลงไป [องศา]			
	1 และ 2	2 และ 3	1 และ 2	2 และ 3
รอบที่ 1	130.17	121.50	132.88	123.26
รอบที่ 2	119.15	120.79	135.57	124.94
รอบที่ 3	119.06	122.44	118.54	116.87
รอบที่ 4	122.02	114.74	107.07	124.36
รอบที่ 5	121.30	119.64	122.89	119.52
ค่าเฉลี่ย	122.28	119.77	123.39	121.79

ตารางที่ 8 ตารางแสดงองศาที่เปลี่ยนแปลงไปในอัตราเร็ว 5000 และ -5000 RPM

## สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่ารั้งห่างระหว่าง 1 และ 2 กับ รั้งห่างระหว่าง 2 และ 3 ในความเร็ว 5000 และ -5000 RPM นั้นมีค่าประมาณ  $570-590 \mu\text{s}$  ทำให้ค่า มุมที่เปลี่ยนแปลงไปมีค่าประมาณ 120 – 123 องศา ซึ่งทำให้เราสรุปว่าใน การหมุน 1 รอบนั้นจะมีค่าความต่างศักย์เกิดขึ้นซึ่งความต่างศักย์ในแต่ละขาจากทั้งหมด 3 ขา นั้นมีเกิดขึ้นไม่พร้อมกัน โดยจะต่างกันอยู่ในช่วงประมาณ 120-123 องศา

และจากการหมุนด้วยอัตราเร็ว 5000 และ -5000 RPM ทำให้เราทราบว่าเครื่องหมาย – ทำให้เกิดการเปลี่ยนทิศ ทางการหมุนของมอเตอร์ และยังทำให้ลำดับในการเกิดสัญญาณ 1, 2 และ 3 ต่างกันโดย ในอัตราเร็ว 5000 RPM จะ เกิดการหมุนตามเข็ม และลำดับในการเกิดสัญญาณคือ 1, 2 และ 3 แต่ในทางกลับกัน ในอัตราเร็ว -5000 RPM มอเตอร์จะเกิดการหมุนทวนเข็มนาฬิกา และลำดับในการเกิดสัญญาณคือ 3, 2 และ 1

## อภิปรายผล

จากการทดลองพบว่าทิศทางในการหมุนส่งผลต่อการนำกันของเฟส ซึ่งจะเห็นได้ว่าจากเดิมหมุนตามเข็มนาฬิกาจะ ทำให้ลำดับของเฟสเป็น 1, 2 และ 3 ซึ่ง หากเกิดการหมุนทวนเข็มหมายความว่า จากเดิมที่สนามแม่เหล็กจากขดลวด จะต้องดึงและผลักแม่เหล็กหารให้เคลื่อนที่หมุนทิศตามเข็ม มันจะต้องเปลี่ยนทิศมันแรงที่จะทำกับแม่เหล็ก หมายความว่าเฟสในการจ่ายไฟให้กับขดลวดจะเปลี่ยนไป ส่งผลให้ลำดับของเฟสที่เกิดขึ้นจะต่างจากเดิม และทำให้เกิด BEMF ต่างจากเดิมจากรูปที่ 25 ทำให้เห็นว่าขาที่ floating อยู่ในตอนแรกคือ 1 ตามด้วย 3 และ 2 ทำให้สัญญา BEMF ที่ออกมานี้จะต้องเรียงลำดับตามนี้ แต่ผลการทดลองพบว่าเมื่อหมุนทวนเข็มจะได้ผลเป็น 3, 2 และ 1 เพราะว่าเกิดจาก การไปดูผลลัพธ์จากการหมุนรอบก่อนหน้าร่วมด้วย หากแต่มองที่ผลลัพธ์รอบท้ายสุดจากภาพ 27 จะเห็นได้ว่าผลที่ได้เกิด เรียงลำดับเป็น 1, 3 และ 2

อีกทั้งในเรื่องของ phase shift โดยธรรมชาติของสัญญาณ 3 phase ที่จะสัญญาณที่ออกมาก shift กัน 120 องศา แต่ผลที่ได้ออกมาคือ phase shift ที่วัดได้จากการหมุนตามเข็มหรือหมุนทวนเข็ม มี phase shift ประมาณ 120 องศา โดยไม่มีครั้งไหนที่สามารถถวកค่าได้ 120 องศา พอดี เพราะอัตราเร็วในการหมุนของมอเตอร์ส่งผลต่อ delay ในการเกิด phase shift แต่เนื่องจากการทดลองทำแค่อัตราเร็วเดียวจึงอาจทำให้มองเห็นภาพได้ยาก แต่จากการนวัตกรรมที่เกี่ยวข้อง พบว่าเมื่อมอเตอร์หมุนที่ความเร็วน้อยและมากจะทำให้เกิด phase shift คือ 1 และ 3 องศา

## ข้อเสนอแนะ

1. ทดสอบบัว phase shift ในอัตราเร็วที่หลากหลายมากขึ้นเพื่อที่จะได้เห็นแนวโน้มทั้งหมด.

## อ้างอิง

- [https://www.rhydolabz.com/documents/26/BLDC\\_A2212\\_13T.pdf](https://www.rhydolabz.com/documents/26/BLDC_A2212_13T.pdf)

- [https://toshiba.semicon-storage.com/info/application\\_note\\_en\\_20180803\\_AKX00303.pdf?did=61176](https://toshiba.semicon-storage.com/info/application_note_en_20180803_AKX00303.pdf?did=61176)
- <https://control.com/technical-articles/reversing-the-rotation-of-an-industrial-3-phase-motor/>
- [https://www.researchgate.net/publication/251863182\\_A\\_low-cost\\_sensorless\\_control\\_for\\_reduced-parts\\_brushless\\_DC\\_motor\\_drives](https://www.researchgate.net/publication/251863182_A_low-cost_sensorless_control_for_reduced-parts_brushless_DC_motor_drives)

## การทดลองที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณ BEMF และความเร็วของ Brushless DC Motor

### จุดประสงค์

- เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณ BEMF และความเร็วของ Brushless DC Motor
- เพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างความเร็วที่มอเตอร์หมุนจริงกับความเร็วได้จากการคำนวณด้วยความถี่ของสัญญาณ BEMF
- เพื่อศึกษาการวิธีการคำนวณเพื่อแปลงค่าความถี่ของสัญญาณที่ได้เป็นความเร็วในการหมุนของมอเตอร์
- เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกราฟในทางทฤษฎีกับกราฟที่ได้จากการทดลองจริง

### สมมติฐาน

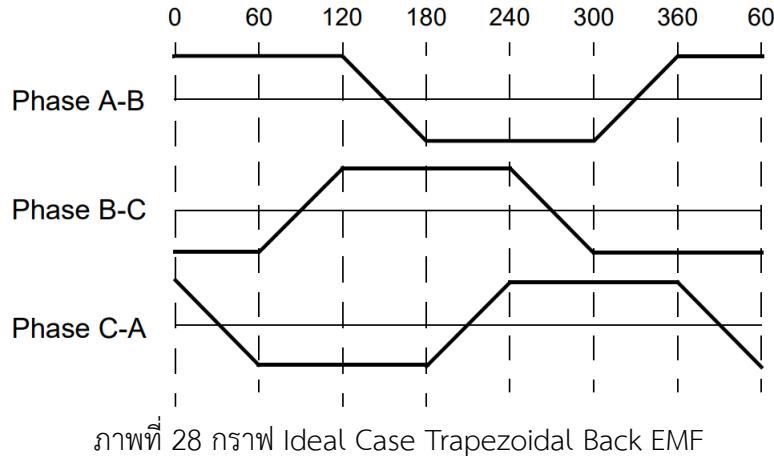
ความถี่ของสัญญาณ BEMF ที่มากขึ้น ส่งผลให้ความเร็วของ Brushless DC Motor มากขึ้น

### ตัวแปร

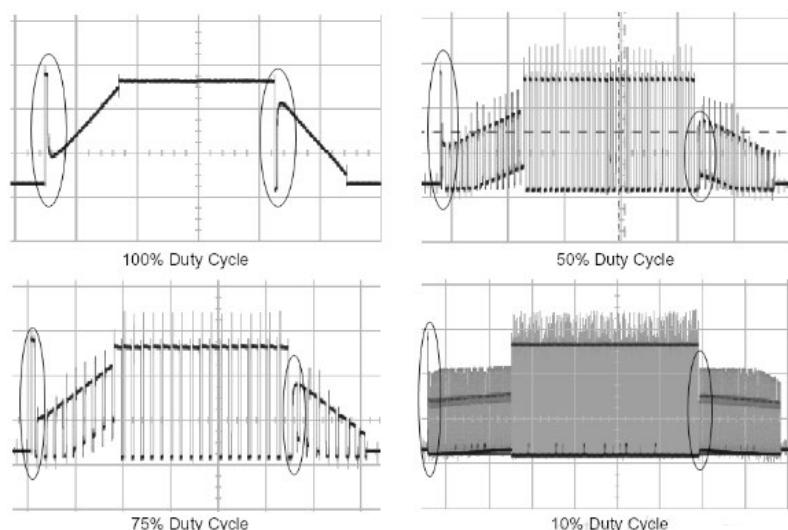
- ตัวแปรต้น:
  - ค่าของความเร็วที่ใช้สั่ง Brushless DC Motor
- ตัวแปรตาม:
  - ความถี่ของสัญญาณ BEMF
  - ความเร็วของ Brushless DC Motor
- ตัวแปรควบคุม:
  - Brushless DC Motor
  - การต่อสาย Oscilloscope

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- จาก Datasheet ของ Brushless DC Motor A2212 13T 1000KV พบว่ามอเตอร์นี้มี 14 Pole ซึ่งจำนวน Pole จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาขนาดความเร็วของมอเตอร์จากความถี่ของสัญญาณ BEMF
- จำนวน Pole Pairs ส่งผลต่อการแปลงความถี่ของสัญญาณ BEMF ไปยังขนาดของความเร็วมอเตอร์เนื่องจากการหมุนมอเตอร์ 1 รอบ จำนวนรอบของสัญญาณ Trapezoidal ที่เกิดขึ้นจะเท่ากับจำนวน Pole Pairs การหาขนาดความเร็วของมอเตอร์จากความถี่ของสัญญาณ Trapezoidal จึงทำได้โดยนำความถี่ที่อ่านได้มาคูณด้วย 60 เพื่อแปลงหน่วยจาก Hz เป็น RPM และในการหมุนมอเตอร์ 1 รอบจะทำให้เกิดสัญญาณขึ้นจำนวน Pole Pairs ครั้ง ดังนั้นได้ว่า ขนาดความเร็วของมอเตอร์ =  $\frac{\text{BEMF Frequency} \times 60}{\text{Number of Pole Pairs}}$
- ในทางทฤษฎีกราฟ Trapezoidal Back EMF จะมีทั้งช่วงบวก และช่วงลบ เนื่องจากเป็นการวัดสัญญาณเทียบที่จุด Neutral Point และมี Phase Shift ระหว่างสัญญาณอยู่ที่ 120 องศา ดังภาพ

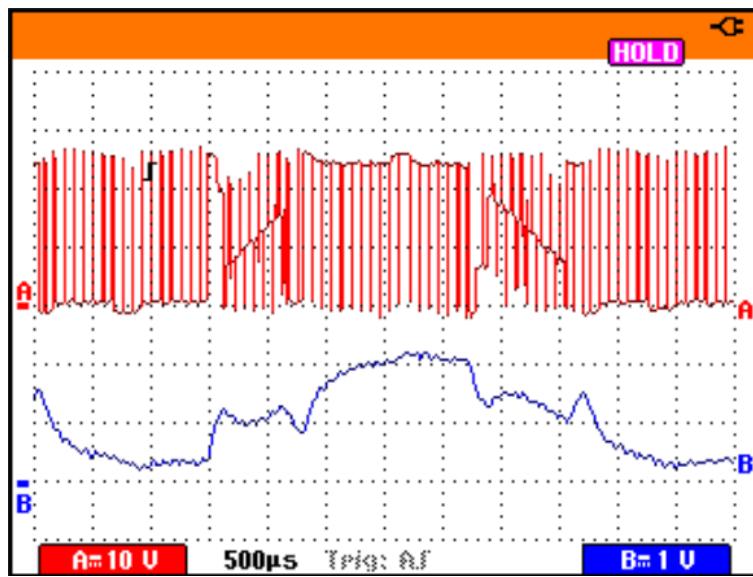


- ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณ Trapezoidal Back EMF เมื่อ PWM มีการเปิดปิดจะเกิด Peak Voltage ซึ่งจะส่งผลเสียต่อวิธีการตรวจจับ Back EMF ด้วยการสุ่มตัวอย่างจากช่วง On ของ PWM นอกจากนี้ยังมีการเกิด Peak Voltage จากการเปิดปิดของ Electronic Switches ในช่วงสลับ Phase โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น Downward Peak และ Upward Peak โดย Downward Peak จะเกิดเมื่อก่อนการสลับ Phase ขาด漉ดเป็นขั้วบวกแล้วถูกตัดการเขื่อมต่อ ทำให้แรงดันที่ขั้วลดลงอย่างรวดเร็วไปยังขั้วลบ ส่วน Upward Peak จะเกิดเมื่อก่อนการสลับ Phase ขาด漉ดเป็นขั้วบวกแล้วถูกตัดการเขื่อมต่อ ทำให้แรงดันที่ขั้วเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วไปยังขั้วบวก ปรากฏการณ์นี้ส่งผลกระทบต่อการตรวจจับ Back EMF ด้วยการสุ่มตัวอย่าง ดังนั้นจึงไม่ควรเลือกสุ่มตัวอย่าง Back EMF จากช่วง PWM แรก ๆ ของ การสลับ Phase



ภาพที่ 29 การเกิด Peak Voltage ในสัญญาณ

- หากต้องการดูเฉพาะกราฟของ Back EMF โดยไม่มีสัญญาณ PWM เข้ามารบกวน สามารถทำได้โดยใช้ Low-Pass Filter เพื่อกรองสัญญาณ PWM ที่มีความถี่มากกว่าอุบัติสัญญาณ Back EMF ที่มีความถี่น้อยกว่า ดังรูป



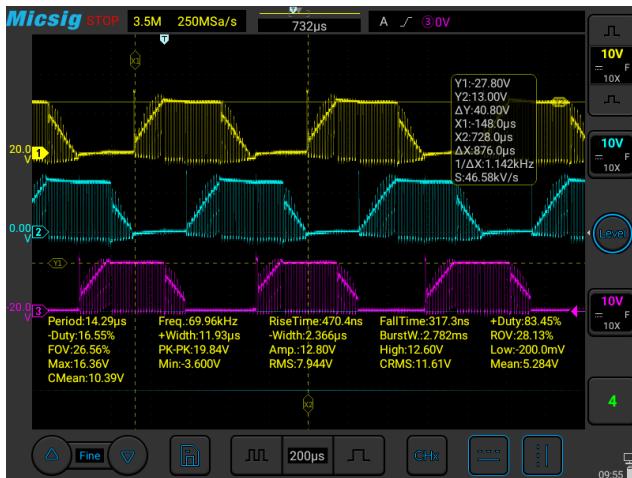
ภาพที่ 30 การกรองสัญญาณ PWM ออกจากสัญญาณ Back EMF

#### ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. กำหนดค่า Speed Reference และ Target Speed โดยเริ่มจาก 9864 RPM (ความเร็วที่มากที่สุด)
2. สั่งให้ Brushless DC Motor หมุน สังเกตสัญญาณ BEMF ที่เกิดขึ้น
3. บันทึกค่า Mechanical Speed และค่าของสัญญาณ BEMF ทำซ้ำ 3 ครั้ง
4. ลดค่า Speed Reference และ Target Speed ลงครั้งละประมาณ 1000 RPM จนถึงค่า -9864 RPM
5. ทำซ้ำข้อที่ 2 และ 3

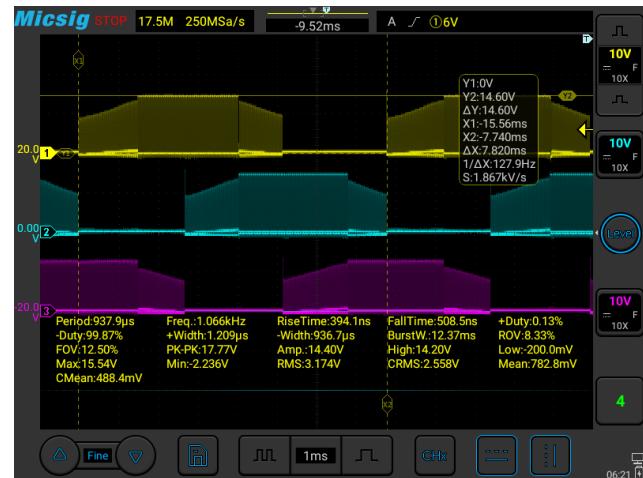
#### ผลการทดลอง

จากการทดลองที่ความเร็วตั้งแต่ 9864 RPM ถึง -9864 RPM โดยลดความเร็วครั้งละ 1000 ได้ผลการทดลองดังนี้



ภาพที่ 3119 สัญญาณ BEMF ความถี่ 1142 Hz ที่

Mechanical Speed 9900 RPM



ภาพที่ 3220 สัญญาณ BEMF ความถี่ 127.9 Hz ที่

Mechanical Speed 1098 RPM



ภาพที่ 3321 สัญญาณ BEMF ความถี่ 1111 Hz ที่

Mechanical Speed -10038 RPM



ภาพที่ 3422 สัญญาณ BEMF ความถี่ 124.4 Hz ที่

Mechanical Speed -1074 RPM

จากความถี่ของสัญญาณ BEMF ที่อ่านได้สามารถนำมาแปลงเป็นขนาดความเร็วของ Brushless DC Motor ได้

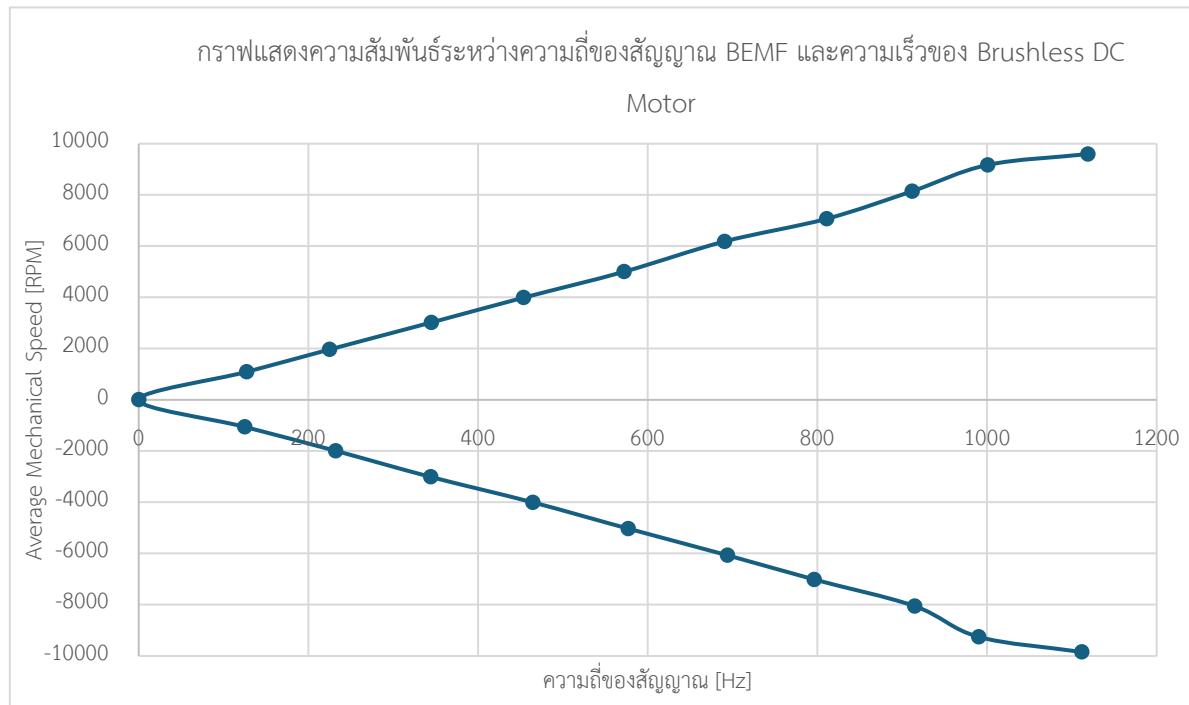
$$\text{ดังนี้ ความเร็วของมอเตอร์} = \frac{\text{BEMF Frequency} * 60}{\text{Number of Pole Pairs}}$$

โดยมอเตอร์มี 14 Poles ดังนั้น Number of Pole Pairs = 14/2 = 7 ในการหมุนมอเตอร์ 1 รอบจะทำให้เกิดสัญญาณ Trapezoidal 7 คบ

Speed Reference [RPM]	Average Mechanical Speed [RPM]	ความถี่เฉลี่ย [Hz]	ความเร็วเฉลี่ยที่ได้จากการ คำนวณด้วยความถี่ [RPM]
-9864	-9846	1111.64	-9528.33
-9006	-9254	989.98	-8485.53
-8022	-8054	914.70	-7840.31
-7002	-7014	796.25	-6824.99
-6012	-6068	693.91	-5947.80
-5028	-5028	576.97	-4945.45
-4008	-4002	464.51	-3981.55
-3024	-3008	344.08	-2949.26
-2004	-1990	232.02	-1988.78
-1014	-1054	124.83	-1069.94
0	0	0.00	0.00
1014	1092	127.18	1090.12
2004	1964	224.74	1926.34
3024	3020	344.85	2955.83
4008	3988	453.46	3886.81
5028	5002	572.18	4904.38
6012	6184	690.63	5919.70
7002	7068	810.89	6950.51
8022	8144	911.59	7813.67
9000	9172	1000.79	8578.16
9864	9596	1118.81	9589.76

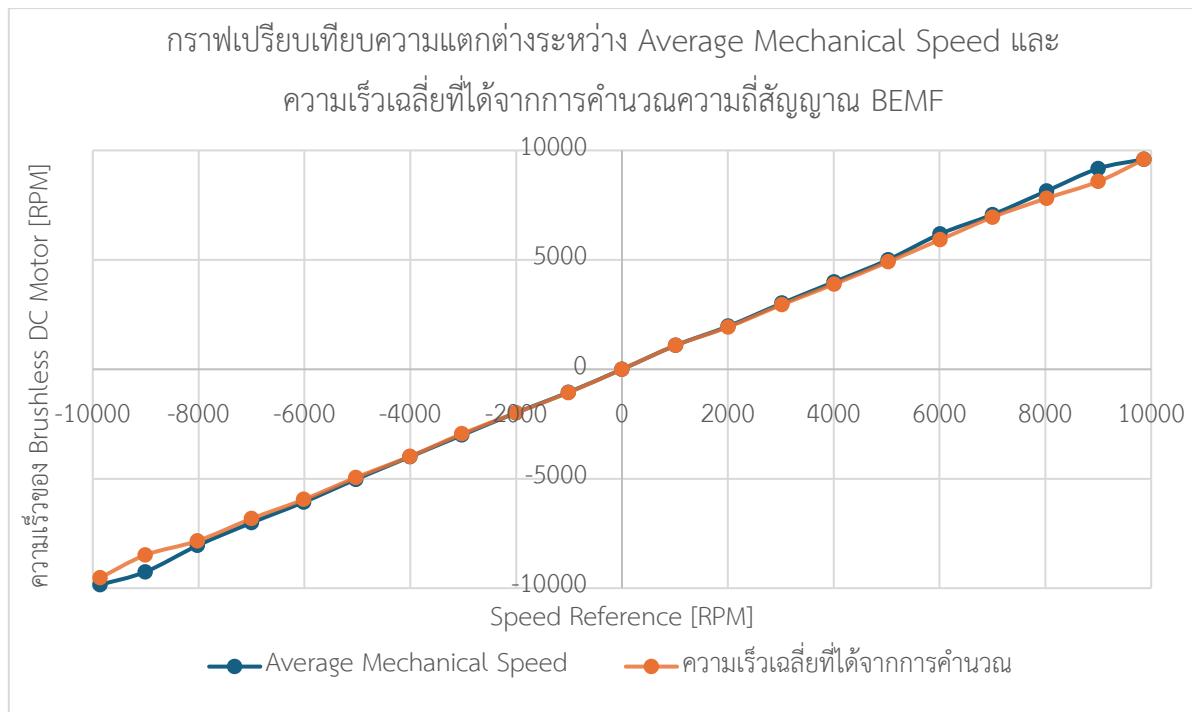
ตารางที่ 9 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณ และความเร็วของ Brushless DC Motor 1

สามารถนำความถี่เฉลี่ยของสัญญาณ และ Average Mechanical Speed มาสร้างเป็นกราฟได้ดังนี้



ภาพที่ 3523 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณ BEMF และความเร็วของ Brushless DC Motor

และสามารถสร้างกราฟเปรียบเทียบ Average Mechanical Speed และความเร็วเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณได้ดังนี้



ภาพที่ 3624 กราฟเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่าง Average Mechanical Speed และความเร็วเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณความถี่สัญญาณ BEMF

## สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองข้างต้นพบว่า เมื่อความถี่ของสัญญาณ BEMF มากขึ้น ส่งผลให้ขนาดของความเร็ว Brushless DC Motor มากขึ้นด้วย เนื่องจากความถี่เป็นปริมาณสเกลาร์ มีเพียงแค่ขนาด ไม่มีทิศทาง ดังนั้นจากความถี่ที่มากสามารถบอกรได้เพียงว่ามอเตอร์จะมีขนาดของความเร็วมาก หากต้องการทราบทิศทางจำเป็นต้องดู Phase Shift ตามการทดลองที่ 1

## อภิปรายผล

- จากการทดลองที่พบว่าความถี่ของสัญญาณ Back EMF แปรผันตรงกับขนาดความเร็วของ Brushless DC Motor เนื่องจากความถี่ของสัญญาณแสดงถึงความเร็วในการเปิดปิดของ Electronic Switches เมื่อความเร็วในการเปิดปิด Electronic Switches มา ก จะเกิดการความถี่ในการเหนี่ยวนำระหว่างแม่เหล็กและชุดลวดมาก ส่งผลให้มอเตอร์หมุนเร็วขึ้น
- สาเหตุที่ลักษณะกราฟที่ได้จากการทดลองมีความแตกต่างกับกราฟ Ideal Case เพราะในการทดลองเป็นการวัดทุกสัญญาณเทียบ GND จึงไม่สามารถอ่านสัญญาณในฝั่งลบได้ หากต้องการอ่านสัญญาณฝั่งลบจะต้องวัดทุกสัญญาณเทียบจุด Neutral Point ซึ่งเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก จากการต่อ กันแบบ Y-shaped ของชุดลวด
- จากการเปรียบเทียบระหว่างความเร็วที่มอเตอร์หมุนจริงกับความเร็วที่ได้จากการคำนวณด้วยความถี่ของสัญญาณพบว่าค่าทั้งสองมีความใกล้เคียงกัน แต่มีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง คาดว่าเกิดจากการที่มอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วอยู่เสมอ ทำให้การกดหยุดสัญญาณบน Oscilloscope และการถ่ายภาพหน้าจอที่ไม่ได้ทำ ณ ขณะเวลาเดียวกัน ส่งผลต่อความต่างระหว่างความเร็วของมอเตอร์ที่หมุนจริง และความเร็วของมอเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ

## ข้อเสนอแนะ

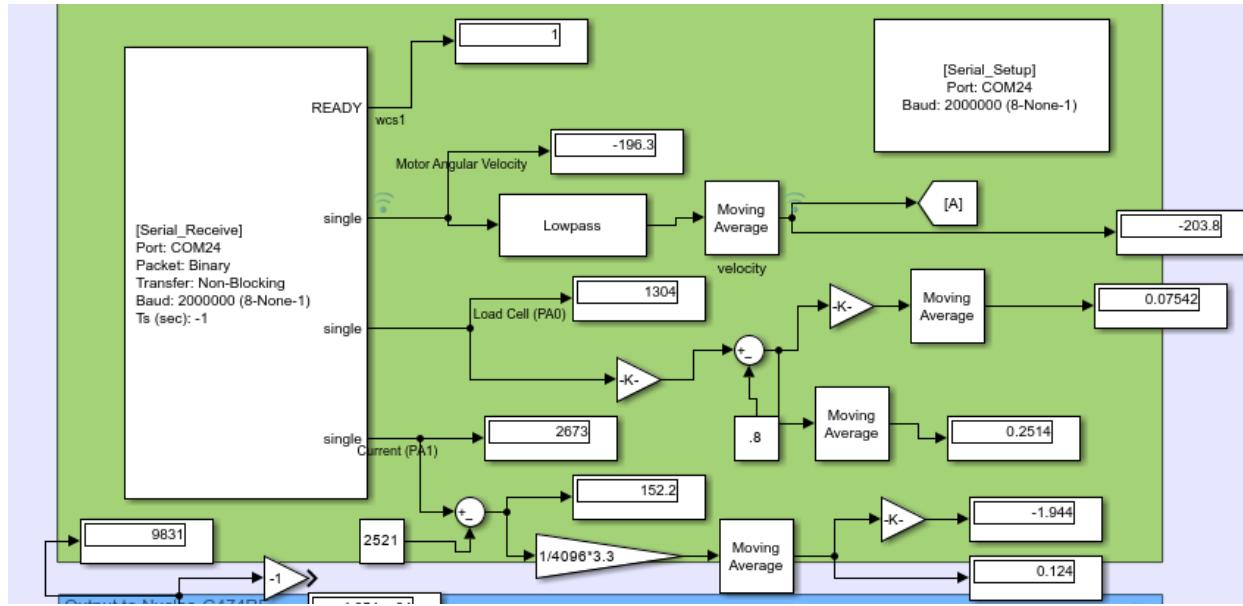
ในการถ่ายภาพหน้าจอสำหรับดูค่า Mechanical Speed และกดหยุด Oscilloscope สำหรับเก็บค่าความถี่ควรทำในเวลาที่ใกล้เคียงกันมากที่สุดเนื่องจากมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วที่ไม่คงที่ หากไม่ได้กดในเวลาที่ใกล้เคียงกันจะทำให้การนำค่าความถี่ที่เก็บได้จาก Oscilloscope ไปคำนวณย้อนกลับหากความเร็วของมอเตอร์มีความคลาดเคลื่อนสูง

## อ้างอิง

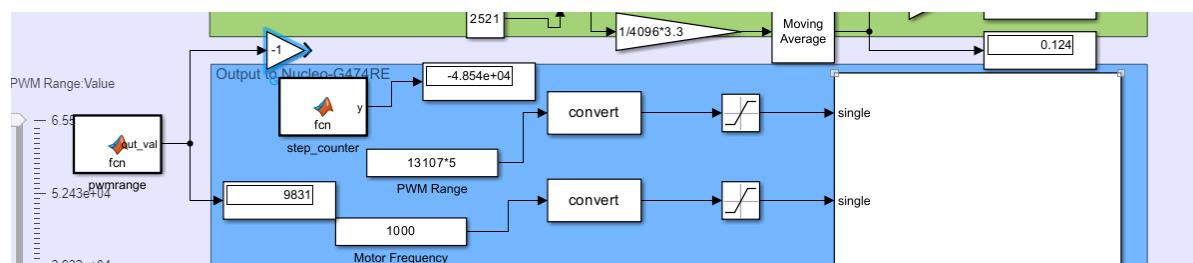
- [https://www.rhydolabz.com/documents/26/BLDC\\_A2212\\_13T.pdf](https://www.rhydolabz.com/documents/26/BLDC_A2212_13T.pdf)
- <https://www.renesas.com/en/document/apn/r8c-family-six-step-trapezoidal-control-bldc-motor-using-back-emf?srsltid=AfmBOooYGhVIDKHJBx-qVH1MR-9wYcHPXfFUqKnVLUp30VnuWnxUjhgX>
- <https://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00885a.pdf>
- [How to Control Sensorless BLDC Motor Based on Back EMF?](#)

## ภาคผนวก

### 2.1 DC Motor



ภาพที่ 37 Simulink ที่ใช้ในการอ่านค่าความเร็ว น้ำหนักจาก loadcell และกระแสที่ผ่านการทำ signal conditioning และ



ภาพที่ 38 Simulink ที่ใช้ในการสั่งการทำงานให้ DC Motor

```

step_counter
%
% 2. กำหนดค่าเริ่มต้น (ท่าງค่าเริ่มแรกเริ่บ)
if isempty(val)
    val = -65535; % เริ่มต้นที่ -65535
    count = 0; % เริ่มต้นที่ 0
end

% 3. ส่งค่าเริ่มต้นออกไปก่อน
y = val;

% 4. ให้จักรีบันผล (Count samples)
if count > samples_per_sec
    % --- เมื่อถึงค่า 1 วินาที (ค่า samples_per_sec) ---
    count = 0; % รีเซ็ตตัวบันทุณ
    % เพิ่มค่าเริ่บ 1000
    next_val = val + 1000;
    % เช็คไว้ว่า 65535 หรือยัง
    if next_val > 65535
        val = 65535; % ตั้งค่าสูงสุด
    else
        val = next_val; % บันเดคต้าใหม่
    end
else
    % --- ถ้ายังไม่ครบ 1 วินาที ---
    count = count + 1; % บันเดคเมื่อยัง
end

```

ภาพที่ 39 block MATLAB function ที่ใช้การสั่ง PWM range ตั้งแต่ -65535 ถึง 65535 ครั้งละ 1000 ทุกๆ 1 วินาที

```

1 function out_val = fcn()
2 %codegen
3
4 % --- 1. นับค่าเพิ่มปริมาณ ---
5 persistent count;
6 persistent val;
7
8 % --- 2. สำหรับค่าเริ่มต้น ---
9 if isempty(count)
10     count = 0;
11     val = 0;      % เริ่มต้นที่ 0%
12 end
13
14 % --- 3. ตั้งค่าอุปกรณ์ ---
15 out_val = val;
16
17 % --- 4. ให้กับเวลา (1 วินาที) ---
18 % สูบสี Sample Time = 0.001s (1kHz) -> 1000 ticks = 1 วินาที
19 TARGET_TICKS = 5000;
20
21 % At Step 10% ของ 65535 ต้อง 6553.5 เป็นเป็นจำนวนเดิม 6554
22 STEP_SIZE = 3277;
23
24 if count >= TARGET_TICKS
25     % --- ผ่าน 1 วินาที ---
26     count = 0; % ใช้เวลาอีก
27
28     % เพิ่มค่าที่ 10%
29     if val + STEP_SIZE <= 65540
30         val = val + STEP_SIZE;
31     else
32         % ถ้าเกิน 100% (65535) ให้วางคืนไปเริ่ม 0 อีก
33         val = 0;
34     end
35
36 else
37     % --- ผ่านในหนึ่ง 1 วินาที ---
38     count = count + 1;
39 end
40
41 end

```

ภาพที่ 40 block MATLAB function ที่ใช้การสั่ง PWM range ตั้งแต่ 0 ถึง 65535 ครั้งละ 10% ทุกๆ 5 วินาที

```

encoderfft.m x +
E:\college\I[RMX]\LAB2\FRA271-LAB2-A10-18-26-39-69\DC_STEPPER\encoderfft.m
1 %% Analyze DC Motor Speed + Design Lowpass + Bode Plot (For a1-a5)
2 clearvars -except a1 a2 a3 a4 a5;
3 clc; close all;
4
5 %% ===== CONFIG: ตั้งค่า Filter ตรงนี้ =====
6 Fp    = 5;          % Passband edge frequency (Hz) - ความถี่ที่ต้องการเก็บ
7 Fst   = 10;         % Stopband edge frequency (Hz) - ความถี่ที่จะเริ่มตัด
8 Apass = 0.5;        % Passband ripple (dB)
9 Astop = 40;         % Stopband attenuation (dB)
10 Target_Data = 1;   % เลือกข้อมูลตີ່ນຈາກ {1} หรือ {3} (ปกติ {1} คือ Raw)
11 %=====
12
13 % รวมรวมข้อมูล
14 data_list = {a1, a2, a3, a4, a5};
15 pwm_freqs = [13107, 26214, 39321, 52428, 65535];
16
17 % สร้างหน้าต่างกราฟ
18 f_main = figure('Name', 'Filter Design & Analysis', 'Color', 'k');
19 f_main.Position = [50 50 1200 800]; % จอยใหญ่หน่อยเพรากราฟเยอะ
20
21 % สร้างกลุ่ม Tab

```

ภาพที่ 41 ส่วนหนึ่งของไฟล์ encoderfft.m ที่ใช้ในการทำ FFT และ Bode plot ในการทดลองที่ 1

Ploting.m x +

E:\college\[RMX]\LAB2\FRA271-LAB2-A10-18-26-39-69\DC\_STEPPER\Ploting.m

```

19 figure('Name', 'Motor Current Cleaned', 'Color', 'w');
20 grid on; hold on;
21
22 % พล็อตเส้นเดียวเลย เน้นๆ
23 plot(duty_sorted, current_clean, 'b-', 'LineWidth', 2);
24
25 % --- 5. ตกแต่งกราฟ ---
26 xlabel('PWM Duty Cycle (%)', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold');
27 ylabel('Motor Current (A)', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold');
28 title('Motor Current vs PWM Duty (Cleaned)', 'FontSize', 14);
29
30 xlim([0 100]);
31 ylim([0 max(current_clean)*1.1]);
32
33 hold off;

```

ภาพที่ 42 ส่วนหนึ่งของไฟล์ plotting.m ที่ใช้ในการทำกราฟกระแสเบริ耶บเทียบกับ Duty Cycle ในการทดลองที่ 1

DC2.m x +

E:\college\[RMX]\LAB2\FRA271-LAB2-A10-18-26-39-69\DC\_STEPPER\DC2.m

```

1 % --- 1. ตั้งค่า Lookup Table (มีจุด 0,0 เพื่อรองรับกระแสน้ำ) ---
2 lookup_current = [0, 2, 2.34, 2.56, 2.884, 3.13, 3.336, 3.594, 3.706, 3.927, 4.375, 4.475, 4.6
3 lookup_torque = [0, 0.0015, 0.015, 0.028, 0.03975, 0.05575, 0.068, 0.08, 0.094, 0.1065, 0.119
4
5 % รายชื่อตัวแปร
6 var_names = {'dc2100', 'dc2500', 'dc21000', 'dc23000'};
7 legend_labels = {'100 Hz', '500 Hz', '1000 Hz', '3000 Hz'};
8 line_colors = lines(4);
9
10 % --- 2. สร้างกราฟเดรียมไว้ 3 หน้าต่าง ---
11
12 % กราฟที่ 1: Motor Current vs PWM (เอาตามที่ขอศึกษา)
13 fig_curr = figure('Name', 'Current vs PWM', 'Color', 'k');
14 ax_curr = axes(fig_curr); hold(ax_curr, 'on'); grid(ax_curr, 'on');
15 xlabel(ax_curr, 'PWM Duty Cycle (%)'); ylabel(ax_curr, 'Motor Current (A)');
16 title(ax_curr, 'Motor Current vs PWM Duty Cycle');
17
18 % กราฟที่ 2: Speed vs PWM
19 fig_speed = figure('Name', 'Speed vs PWM', 'Color', 'k');
20 ax_speed = axes(fig_speed); hold(ax_speed, 'on'); grid(ax_speed, 'on');

```

ภาพที่ 43 ส่วนหนึ่งของไฟล์ DC2.m ที่ใช้ในการทำกราฟในการทดลองที่ 2

DC3.m +

E:\college\LMX\LAB2\FRA271-LAB2-A10-18-26-39-69\DC\_STEPPER\DC3.m

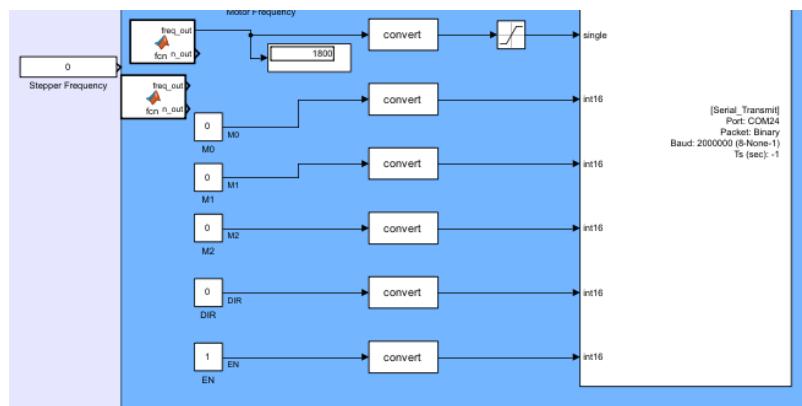
```

13 [avg_pwm_1, avg_speed_1, avg_current_1] = process_and_average(group1_vars);
14 [avg_pwm_2, avg_speed_2, avg_current_2] = process_and_average(group2_vars);
15
16 %% 3. กราฟที่ 1: ความเร็ว vs PWM (Average)
17 figure('Name', 'Avg Comparison: Speed vs PWM', 'Color', 'k');
18 hold on; grid on;
19
20 plot(avg_pwm_1, avg_speed_1, 'b-', 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', group1_name);
21 plot(avg_pwm_2, avg_speed_2, 'r--', 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', group2_name);
22
23 xlabel('PWM Range');
24 ylabel('Average Speed (RPM)');
25 title('Average Motor Speed vs PWM');
26 legend('show', 'Location', 'best');
27 hold off;
28
29 %% 4. กราฟที่ 2: กระแส vs ความเร็ว (Average) <--- กลับมาเป็น Speed
30 figure('Name', 'Avg Comparison: Current vs Speed', 'Color', 'k');
31 hold on; grid on;

```

ภาพที่ 44 ส่วนหนึ่งของไฟล์ DC2.m ที่ใช้ในการทำกราฟในการทดลองที่ 3

## 2.2 Stepper Motor



ภาพที่ 45 Simulink ที่ใช้ในการคุณ Stepper Motor

```

function [freq_out, n_out] = fcn()
%#codegen
%
% 1. นับ sample ในตัวแปร "count"
%
% 2. ลบ "count" ครบ 500 (即 0-499) จะเปลี่ยนความถี่
%
% 3. จัดอันดับ "count" เป็น 0
%
% 4. ทำร้าบห้อง 10000 Hz

%
% --- 1. สร้างตัวอย่าง "จั่กค่าค่า" (เหมือน example) ---
%
persistent count;
persistent freq_list;
persistent list_index;

%
% --- 2. กำหนดค่าเริ่มต้น (เหมือน example) ---
if isempty(count)
    count = 0; % จัดอันดับ count เป็น 0 ใหม่
    list_index = 1; % เริ่งต้น index เช่น
%
% 设置 List ค่าถี่ "เริ่มต้นที่ 100Hz ... จนถึง 10000Hz"
freq_list = [100:100:10000];
end

%
% --- 3. สมคาร์ชวนและออก (สำคัญ!) ---
%
% เสียง "จั่กค่า" ออกไม่สน
% และจะอ่านไปต่อส่วน "รวมๆๆ"
freq_out = freq_list(list_index);
n_out = count; % ต้องรีเซ็ต 0, 1, 2... 499

%
% --- 4. จัดการรอบ และ รีเซ็ต (เหมือน example) ---
%
% "หากครั้ง count มาเป็น"
if count >= 1000 % "ล่าครึ่ง 500" (เพื่อจะได้ 0-499 = 500 คร)
%
% "จัดอันดับ count เป็น 0 ใหม่"
count = 0;
%
% "+ ความถี่ไป" (โดยการเพิ่ม index)
if list_index < length(freq_list) % "จนถึง 10000Hz"
    list_index = list_index + 1;
end

```

ภาพที่ 46 block MATLAB function ที่ใช้การสั่ง Stepper frequency แบบค่อยๆ เร่งขึ้นไป

```

function [freq_out, n_out] = fcn()
kcodegen

% --- 1. պահպան Persistent ---
persistent count;
persistent state; % ժամանակակ: 1-խոր, 2-տուժ, 3-առաջ
persistent current_freq; % ժամանակավայրի առաջադեմություն

% --- 2. ժամանակավայրի (մասնավորություն) ---
if isempty(count)
    count = 0;
    state = 1; % վերաբերել "Ի 1" (State 1)
    current_freq = 100; % վավերական 100 Hz
end

switch state
    case 1 % --- State 1: մասն 0 և 1 1 ---
        freq_out = 0;

    if count >= 1000 % ըստ 1 նախ
        count = 0; % վերաբերել
        state = 2; % նույնականաց (սույն)
    else
        count = count + 1;
    end

    case 2 % --- State 2: պահպ մեջ 3 1 ---
        freq_out = current_freq;

    if count >= 1000 % ըստ 3 նախ
        count = 0; % վերաբերել
        state = 3; % նույնականաց (սույն 0)
    else
        count = count + 1;
    end

    case 3 % --- State 3: մասն 0 և 1 1 ---
        freq_out = 0;

    if count >= 1000 % ըստ 1 նախ (սույն 0 զինց)
        count = 0; % վերաբերել
        state = 1; % նույնականաց State 1 ԽՈՐ
        % մասնավորությունի առաջադեմություն
        if current_freq < 10000
            current_freq = current_freq + 100; % մասն 100
        else
            current_freq = 10000; % մասն 10000 մասնավորություն 100 մասնավորություն
        end
    else
        count = count + 1;
    end

otherwise
    % հանգի մոմ Սահման
    freq_out = 0;
    state = 1;
    count = 0;
end
% Կառ պահպան (պահ 0 մու 1000 մու 3000 առաջադեմություն)
n_out = count;
end

```

ภาพที่ 47 block MATLAB function ที่ใช้การสั่ง Stepper frequency แบบเร่งด้วยความถี่สูงทันที

```

DC3.m X untitled.m X Step2.m X Ploting.m X step1.m X +
E:\college\RMX\LAB2\FRA271-LAB2-A10-18-26-39-69\DC_STEPPER\step1.m

% 1. เพิ่ม 'full_step' เข้าไปในรายการตัวแปรและชื่อใน Legend
base_names = {'full_step', 'half_step', 'step_1_4', 'step_1_8', 'step_1_16'};
legend_names = {'Full Step', 'Half Step', '1/4 Step', '1/8 Step', '1/16 Step'};

% กำหนดสีเส้น (5 สี)
colors = lines(5);

figure;
hold on; grid on;

for i = 1:length(base_names)

    all_steps = [];
    all_vels = [];

    % วนลูป 3 คราทลดลง
    for trial = 1:3
        % สร้างชื่อตัวแปร (เช่น full_step, full_step_2, full_step_3)
        if trial == 1
            var_name = base_names{i};
        else

```

ภาพที่ 48 ส่วนหนึ่งของไฟล์ step1.m ที่ใช้ในการทำกราฟในการทดลองที่ 1

```

1 % --- 1. ดึงข้อมูล, แก้ไขมิติ (Squeeze), และทำ Absolute ---
2
3 % ใน squeeze() เพื่อแก้ Error "more than 2 dimensions"
4 % และทำ abs() เพื่อให้ค่าเป็นบวกทั้งหมด
5 steps_cont_raw = squeeze(continuous{5}.Values.Data);
6 vel_cont_raw   = abs(squeeze(continuous{7}.Values.Data));
7
8 steps_disc_raw = squeeze(discrete{5}.Values.Data);
9 vel_disc_raw   = abs(squeeze(discrete{7}.Values.Data));
10
11 % --- 2. ฟังก์ชันกรองข้อมูล (ตัดค่าที่ความเร็วเท่าเดิมออก) ---
12 function [steps_clean, vel_clean] = filter_repeated_velocity(steps, vel)
13     % หาผลิต่างของความเร็วเทียบกับจุดก่อนหน้า (Derivative)
14     d_vel = [1; diff(vel)]; % ใส่ 1 ตัวแรกเพื่อกีบจุดเริ่มต้นไว้
15
16     % เลือกเฉพาะจุดที่ความเร็วนี้การเปลี่ยนแปลง (diff ไม่เป็น 0)
17     % ใช้ Tolerance นิดหน่อยเพื่อเป็นเลขเศษนิยม (1e-6)
18     mask = abs(d_vel) > 1e-6;
19
20     % ดึงข้อมูลเฉพาะจุดที่ผ่านเงื่อนไข
21     steps_clean = steps(mask);

```

ภาพที่ 49 ส่วนหนึ่งของไฟล์ step2.m ที่ใช้ในการทำกราฟ ในการทดลองที่ 1

## 2.3 Brushless DC Motor

want	speed ref	รอบที่ 1			รอบที่ 2			รอบที่ 3					
		speed mach [RPM]	ค่า [μs]	ความถี่ [Hz]	speed graph [RPM]	speed mach [RPM]	ค่า [μs]	ความถี่ [Hz]	speed graph [RPM]	speed mach [RPM]	ค่า [μs]	ความถี่ [Hz]	speed graph [RPM]
-9864	-9864	-10038	900	1111.111111	-9523.81	-9672	924	1082.251082	-9276.44	-9828	876	1141.552511	-9784.74
-9000	-9006	-9210	992	1008.064516	-8640.55	-9216	996	1004.016064	-8605.85	-9336	1044	957.8544061	-8210.18
-8000	-8022	-8166	1080	925.925925	-7936.51	-7896	1100	909.0909091	-7792.21	-8100	1100	909.0909091	-7792.21
-7000	-7002	-7002	1240	806.4516129	-6912.44	-7062	1268	788.6435331	-6759.80	-6978	1260	793.6507937	-6802.72
-6000	-6012	-6156	1420	704.2253521	-6036.22	-5964	1464	683.0601093	-5854.80	-6084	1440	694.4444444	-5952.38
-5000	-5028	-4920	1740	574.7126437	-4926.11	-5046	1748	572.0823799	-4903.56	-5118	1712	584.1121495	-5006.68
-4000	-4008	-3954	2112	473.4848485	-4058.44	-4032	2196	455.3734062	-3903.20	-4020	2152	464.6840149	-3983.01
-3000	-3024	-2988	2870	348.4320557	-2986.56	-2970	2900	344.8275862	-2955.67	-3066	2950	338.9830508	-2905.57
-2000	-2004	-1974	4330	230.9468822	-1979.54	-2016	4280	233.6448598	-2002.67	-1980	4320	231.4814815	-1984.13
-1000	-1014	-1074	8040	124.3781095	-1066.10	-1014	8160	122.5490196	-1050.42	-1074	7840	127.5510204	-1093.29
0	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0.00
1000	1014	1098	7820	127.8772379	1096.09	1092	8100	123.4567901	1058.20	1086	7680	130.2083333	1116.07
2000	2004	1968	4390	227.7904328	1952.49	1968	4480	223.2142857	1913.27	1956	4480	223.2142857	1913.27
3000	3024	3078	2870	348.4320557	2986.56	3066	2910	343.6426117	2945.51	2916	2920	342.4657534	2935.42
4000	4008	3906	2212	452.079566	3874.97	4080	2272	440.1408451	3772.64	3978	2136	468.164794	4012.84
5000	5028	5088	1732	577.3672055	4948.86	4986	1732	577.3672055	4948.86	4932	1780	561.7977528	4815.41
6000	6012	6216	1440	694.4444444	5952.38	6198	1444	692.5207756	5935.89	6138	1460	684.9315068	5870.84
7000	7002	7092	1244	803.8585209	6890.22	7032	1216	822.3684211	7048.87	7080	1240	806.4516129	6912.44
8000	8022	8166	1072	932.8358209	7995.74	8166	1100	909.0909091	7792.21	8100	1120	892.8571429	7653.06
9000	9000	9390	1014	986.1932939	8453.09	9012	996	1004.016064	8605.85	9114	988	1012.145749	8675.53
9864	9864	9900	876	1141.552511	9784.74	9366	906	1103.752759	9460.74	9522	900	1111.111111	9523.81

ภาพที่ 250 50 ผลการทดลองการกำหนดค่าความเร็วที่ต้องการให้มอเตอร์หมุนเพื่อสังเกตพฤติกรรมความถี่และ

ความเร็วที่มอเตอร์หมุนจริง

ความเร็วของจั่ง เฉลี่ย	ความถี่เฉลี่ย [Hz]	avg speed (ค่าเฉลี่ย) [RPM]	speed mach - graph [RPM]			avg diff [RPM]
			diff 1	diff 2	diff 3	
-9846.00	1111.64	-9528.33	-514.19	-395.56	-43.26	-317.67
-9254.00	989.98	-8485.53	-569.45	-610.15	-1125.82	-768.47
-8054.00	914.70	-7840.31	-229.49	-103.79	-307.79	-213.69
-7014.00	796.25	-6824.99	-89.56	-302.20	-175.28	-189.01
-6068.00	693.91	-5947.80	-119.78	-109.20	-131.62	-120.20
-5028.00	576.97	-4945.45	6.11	-142.44	-111.32	-82.55
-4002.00	464.51	-3981.55	104.44	-128.80	-36.99	-20.45
-3008.00	344.08	-2949.26	-1.44	-14.33	-160.43	-58.74
-1990.00	232.02	-1988.78	5.54	-13.33	4.13	-1.22
-1054.00	124.83	-1069.94	-7.90	36.42	19.29	15.94
0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00
1092.00	127.18	1090.12	1.91	33.80	-30.07	1.88
1964.00	224.74	1926.34	15.51	54.73	42.73	37.66
3020.00	344.85	2955.83	91.44	120.49	-19.42	64.17
3988.00	453.46	3886.81	31.03	307.36	-34.84	101.19
5002.00	572.18	4904.38	139.14	37.14	116.59	97.62
6184.00	690.63	5919.70	263.62	262.11	267.16	264.30
7068.00	810.89	6950.51	201.78	-16.87	167.56	117.49
8144.00	911.59	7813.67	170.26	373.79	446.94	330.33
9172.00	1000.79	8578.16	936.91	406.15	438.47	593.84
9596.00	1118.81	9589.76	115.26	-94.74	-1.81	6.24

ภาพที่ 26 51 ที่ ที่ 51 ค่าเฉลี่ยของความเร็วที่มอเตอร์หมุนจริง, ความถี่, ความเร็วจากการคำนวณ, ความต่างระหว่าง

ความเร็วที่มอเตอร์หมุนจริงกับความเร็วจากการคำนวณ