

# RMXplorer

## LAB2: Brushless DC Motor Report

### Name

- นายจิรัชันนท์ ลีอุดมวงศ์ 66340500009
- นายนิธิศ สีแสงสุวรรณชัย 66340500028
- นางสาวอัญญารดา สินพัฒน์ฐานกุล 66340500064

### Objective

- นักศึกษาต้องสามารถออกแบบการทดลองโดยใช้ทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ในการ สืบเสาะพฤติกรรม ประภากรณ์ ทดลอง บันทึกผลการทดลอง สรุปผล และอภิปรายผลการทดลอง เข้าใจหลักการทำงานของ เช็นเซอร์ และอุปกรณ์ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องได้ ตลอดจนใช้หลักการทางวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์ สถิติ และ ศาสตร์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ประยุกต์ใช้ร่วมกับโปรแกรม MATLAB เพื่อเก็บผลการทดลอง วิเคราะห์ผลการทดลอง วิเคราะห์ความเที่ยงตรง ความแม่นยำ ได้อย่างถูกต้อง และมีเหตุผลรองรับตรวจสอบความถูกต้องเทียบกับ ทฤษฎีที่น่าเชื่อถือ
- นักศึกษาต้องสามารถอธิบายความสามารถในการรับรู้ปริมาณทางฟิสิกส์ของเช็นเซอร์ทั้งหมดตั้งแต่ต้นจนจบ กระบวนการได้ เช่น การอธิบายการวัดความเร็วของ Brushless DC Motor จาก Hall Sensor (จากคลื่น สัญญาณไฟฟ้าและเป็นความเร็วได้อย่างไร)
- นักศึกษาต้องสามารถกำหนด ตัวแปรในการทดลองได้อย่างถูกต้องและสมเหตุสมผล ไม่ว่าจะเป็น ตัวแปรต้น ตัวแปรตาม ตัวแปรควบคุม อธิบายจุดประสงค์การทดลองอธิบายสมมติฐานให้สอดคล้องกับตัวแปรที่กำหนด นิยามเชิงปฏิบัติการ และมีทฤษฎีที่น่าเชื่อถือรองรับ เช่น ทฤษฎีทางฟิสิกส์ หรือข้อมูลจาก Datasheet
- นักศึกษาต้องสามารถออกแบบวิธีการทดลองเพื่อหาคำตอบ ให้สอดคล้องกับผลการเรียนรู้ย่อทั้งหมดได้ด้วย ตนเองอย่างถูกต้องตามหลักวิทยาศาสตร์ รวมทั้ง บันทึกผลสรุปผล อภิปรายผล ตามข้อมูลที่บันทึกได้จริง มี กระบวนการทำซ้ำ อธิบายที่มาของผลการทดลองนั้นได้ โดยใช้อุปกรณ์ เครื่องมือ ไฟล์ Simulink, mlx และ ชุดการทดลองพร้อมบอร์ด Microcontroller ที่ TA จัดเตรียมให้เบื้องต้น
- นักศึกษาต้องสามารถเขียนรายงาน สัญลักษณ์ และสมการทางวิทยาศาสตร์ ได้อย่างถูกต้อง ทั้งขนาด และ รูปแบบอักษร การเว้นช่องไฟ การเว้นขอบกระดาษ การเว้นระยะพิมพ์ ให้ได้ระยะที่เหมาะสมตามหลักสากล

# บทที่ 1 Brushless DC Motor

โดยบทนี้จะเป็นกล่าวถึงคุณสมบัติของ Brushless DC Motor ต่างๆ หลักการทำงาน รวมถึงวิธีการควบคุม Torque และ Speed ของ Brushless DC Motor รูปแบบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น PWM(Pulse width modulation) หรือ FOC(Field Oriented Control) และการควบคุมความเร็ว

## 1.1 วัตถุประสงค์

- 1.1.1 เพื่อศึกษาหลักการทำงานและวิธีการควบคุม Brushless DC Motor
- 1.1.2 เพื่อศึกษาการใช้งานโปรแกรม MotorWorkbench 6.3.2
- 1.1.3 เพื่อศึกษาการใช้งานและการคำนวณสัญญาณ Pulse Width Modulation (PWM) ในการควบคุม มอเตอร์ และสามารถตั้งค่า PWM Generation Frequency ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- 1.1.4 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical Parameters), ทางกล (Mechanical Parameters) และ โครงสร้างทางแม่เหล็ก (Magnetic Structure) ของมอเตอร์ BLDC
- 1.1.5 เพื่อศึกษารูปแบบการควบคุมมอเตอร์ BLDC ทั้งแบบ Sensorless Control และ Sensor-based Control
- 1.1.6 เพื่อศึกษากราฟสัญญาณของมอเตอร์ BLDC ทั้ง 3 เฟส และพัฒนาทักษะการใช้ Oscilloscope และ วิเคราะห์การคำนวณความเร็วจากความถี่ที่อ่านได้
- 1.1.7 เพื่อศึกษารูปแบบการควบคุม PMSM แบบ FOC เปรียบเทียบกับการควบคุม BLDC Motor

## 1.2 สมมติฐาน

สามารถทำการควบคุมการทำงานของของ BLDC ได้ทั้งจากการใช้ PWM (Pulse width modulation) และ FOC (Field Oriented Control) และสามารถวัดความเร็วการทำงานของ BLDC จาก Oscilloscope เทียบกับความเร็วที่วัดได้จาก BEMF

## 1.3 ตัวแปรที่ศึกษา

- การทดลองที่ 1 : ตัวแปรต้น : ความเร็วของ BLDC จากการควบคุมด้วย PWM ที่วัดจาก BEMF  
ตัวแปรตาม : ความเร็วของ BLDC จาก Oscilloscope  
ตัวแปรควบคุม : ช่วงความถี่ของ PWM ที่พิจารณา

## 1.4 นิยามศัพท์เฉพาะ

### 1.4.1 BLDC Motor

มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor) ซึ่งเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่ไม่ใช้แปรงถ่านในการส่งกระแสไฟฟ้าไปยังโรเตอร์ แทนที่จะใช้แปรงถ่าน มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านใช้สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อควบคุมกระแสไฟฟ้า

### 1.4.2 Pulse width modulation (PWM)

เทคนิคการควบคุมสัญญาณไฟฟ้าโดยการปรับความกว้างของสัญญาณในแต่ละช่วงเวลา (Period) เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ส่งไปยังโหลด

### 1.4.3 Back counter-electromotive force (BEMF)

แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ คือแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขดลวดของมอเตอร์ไฟฟ้าขณะที่มันหมุน ซึ่งแรงดันนี้จะมีพิษทางตรงข้ามกับแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์ แรงเคลื่อนไฟฟ้านี้เป็นผลมาจากการหมุน เดยกับการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า

### 1.4.4 Proportional-Integral-Derivative Controller (PID controller)

เป็นระบบควบคุมที่ใช้หลักการทางคณิตศาสตร์เพื่อควบคุมกระบวนการให้มีความเสถียรและแม่นยำ โดย PID เป็นเครื่องมือที่นิยมใช้ในระบบควบคุมอัตโนมัติ

### 1.4.5 Oscilloscope

เป็นเครื่องมือวัดทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับแสดงผลของสัญญาณไฟฟ้าในรูปแบบของกราฟ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า (Voltage) กับเวลา (Time)

### 1.4.6 Rotor

ชิ้นส่วนมอเตอร์ที่หมุน

### 1.4.7 Stator

ชิ้นส่วนมอเตอร์ที่หยุดนิ่ง

## 1.5 นิยามเชิงปฏิการ

- 1.5.1 ประสิทธิภาพการทำงาน BLDC Motor สามารถวัดได้จากการเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ (Input power) กับพลังงานที่ได้จากการออกเตอร์ (Output power)
- 1.5.2 การควบคุมการทำงานของ BLDC Motor แบบ Sensorless คือการควบคุมตำแหน่งของ BLDC ด้วยการวัด BEMF หรือผ่านวิธีการ Zero-crossing ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้ Sensor อาทิ Hall-effect sensor หรือ Encoder
- 1.5.3 ความเร็วของ BLDC Motor จากการทดลองหาได้จากการวัด BEMF ซึ่งความเร็วถูกแสดงให้เห็นผ่านโปรแกรม Motor pilot หรือวัดความเร็วจากการวัดความถี่ของสัญญาณที่ใช้ในการควบคุม BLDC Motor
- 1.5.4 การควบคุมความเร็วของ BLDC Motor ถูกควบคุมด้วย PID Controller โดยได้รับความเร็วป้อนกลับจากการวัดค่า BEMF
- 1.5.5 STMICROELECTRONICS X-NUCLEO-IHM08M1 สามารถควบคุมการทำงานของ BLDC Motor ได้ด้วย PWM เพียงเท่านั้น ไม่สามารถควบคุม BLDC Motor แบบ FOC ได้ เนื่องจากไม่มีเซ็นเซอร์ที่ใช้วัด
- 1.5.6 การเปรียบเทียบผลการควบคุมระหว่าง PWM และ FOC นั้นถูกเปรียบโดยข้อมูลที่หาได้จากอินเตอร์เน็ตเนื่องจากข้อจำกัดในอุปกรณ์ทำให้ไม่สามารถควบคุม BLDC Motor แบบ FOC ได้

## 1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1.6.1 Brushless DC Motor (BLDC Motor)

BLDC Motor หรือมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน มีหลักการทำงานที่อาศัยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในตัวมอเตอร์เพื่อสร้างการหมุน โดยไม่มีการใช้แปรงถ่าน (Brush) เมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์กระแสตรงทั่วไป ทำให้มีข้อดีในเรื่องของความทนทานและประสิทธิภาพการทำงานที่สูงกว่า โดยมีข้อมูลที่น่าสนใจดังนี้

#### (1) ส่วนประกอบหลักของ BLDC Motor

- (1.1) Rotor หรือส่วนที่หมุน มีแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) ติดอยู่
- (1.2) Stator หรือส่วนที่อยู่กับที่ ประกอบด้วยขดลวด (Coil Winding) สำหรับสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
- (1.3) Electronic Controller คือระบบควบคุมการทำงาน ซึ่งทำหน้าที่สลับการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดใน Stator เพื่อควบคุมการหมุนของ Rotor

#### (2) หลักการทำงาน

##### (2.1) การสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าถูกส่งไปยังขดลวดใน Stator จะเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น สนามแม่เหล็กนี้จะต่อตัวกับสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรใน Rotor ทำให้เกิดแรงดึงดูด และแรงตึง

##### (2.2) การหมุนของ Rotor

Electronic Controller จะสลับกระแสไฟฟ้าในขดลวด Stator อย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ สนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงและทำให้ Rotor หมุน การสลับกระแสไฟฟ้า เช่นเดียวกับ Commutation ซึ่งใน BLDC Motor เป็นแบบ Electronic Commutation

##### (2.3) การควบคุมความเร็วและตำแหน่ง

ความเร็วของมอเตอร์สามารถควบคุมได้ด้วยการปรับแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าที่ส่งไปยัง ขดลวด และสามารถใช้ระบบตรวจจับตำแหน่ง (เช่น Hall Effect Sensor) ใช้เพื่อตรวจสอบ ตำแหน่งของ Rotor และบอกให้ Electronic Controller สลับกระแสไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม

#### (3) ข้อดีของ BLDC Motor

- (3.1) ไม่มีแปรงถ่าน ทำให้ไม่เกิดการสึกหรอและลดการบำรุงรักษา
- (3.2) ประสิทธิภาพสูง เนื่องจากมีการสูญเสียพลังงานน้อยกว่า
- (3.3) เสียงรบกวนน้อย
- (3.4) ใช้งานได้ในอุปกรณ์ที่ต้องการความแม่นยำสูง เช่น หุ่นยนต์, พัดลม, และ ยานพาหนะไฟฟ้า



รูปภาพตัวอย่าง Brushless DC Motor (BLDC Motor)

แหล่งที่มา : <https://vayuyaan.com/shop/quadcopter/1800kv-blcd-motor-brushless-dc-motor-for-drone/>

### 1.6.2 Electronic Commutation

Electronic Controller มีหน้าที่สำคัญในการสลับกระแสไฟฟ้า ในชุดลวดของ Stator เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ซึ่งจะดึงดูดหรือผลักดัน Rotor หมุนได้อย่างต่อเนื่อง กระบวนการนี้เรียกว่า Commutation

ใน BLDC Motor การ Commutation ไม่ได้ทำผ่านแปรรูป (เหมือนใน Brushed DC Motor) แต่ใช้ Electronic Commutation แทน โดยมีข้อมูลที่น่าสนใจดังนี้

#### (1) หลักการทำงานของ Electronic Commutation

- (1.1) มีการใช้ Hall Effect Sensors หรือ Position Sensors เพื่อตรวจจับตำแหน่งของ Rotor
- (1.2) ใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์เพื่อคำนวณตำแหน่งของ Rotor และกำหนดว่าจะจ่ายกระแสไฟฟ้าไปที่ชุดลวดใด
- (1.3) ควบคุมผ่านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น MOSFETs หรือ IGBTs เพื่อเปลี่ยนแปลงทิศทางและลำดับการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับชุดลวดของ Stator อย่างเหมาะสม

#### (2) ข้อดีของ Electronic Commutation

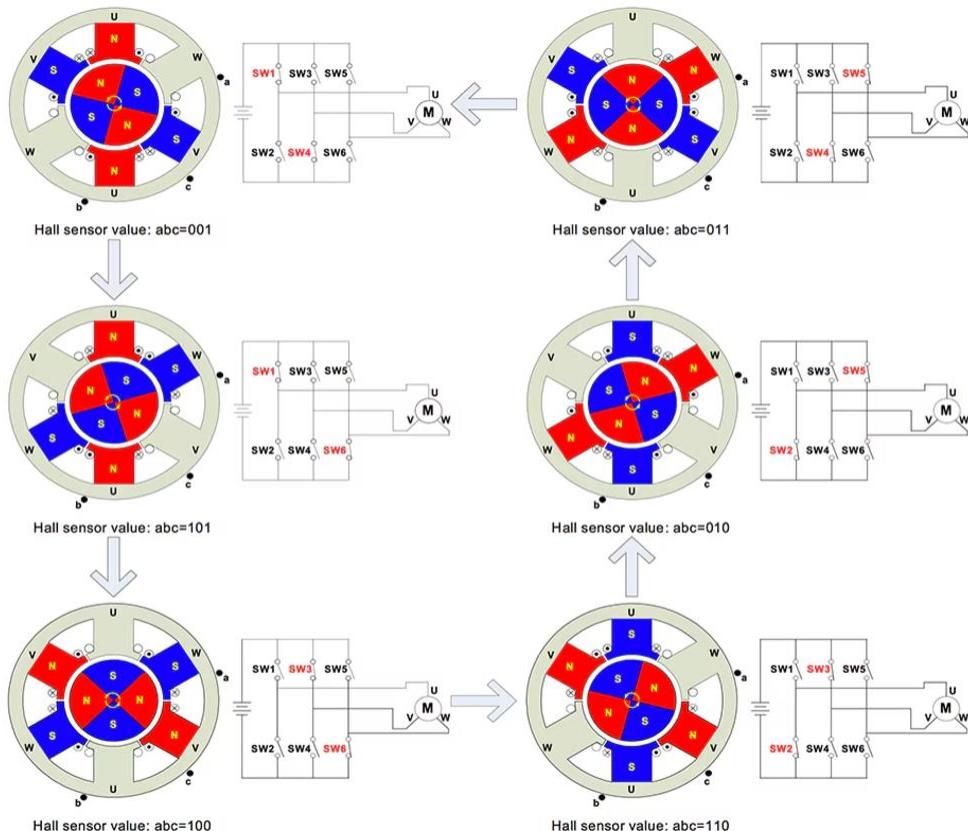
- (2.1) ไม่มีแปรรูป, ลดการสึกหรอของอุปกรณ์ ทำให้อายุการใช้งานนานขึ้น
- (2.2) ประสิทธิภาพสูง, ใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และให้แรงบิดสูงในขณะที่มีขนาดเล็ก
- (2.3) ควบคุมได้แม่นยำ, สามารถปรับความเร็วและแรงบิดได้จ่ายผ่านซอฟต์แวร์
- (2.4) เสียงรบกวนน้อย, เนื่องจากไม่มีการสัมผัสทางกลไกโดยตรง

### (3) การสลับกระแสใน BLDC Motor

การสลับกระแสในชุดลวด Stator จะทำตามลำดับที่กำหนดเพื่อให้เกิดการหมุนของ Roto ซึ่ง BLDC Motor สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

(3.1) 3-phase BLDC Motor มี 3 ชุดลวด ซึ่งกระแสจะถูกสลับแบบ 6-step Commutation

(3.2) Sensorless BLDC Motor ใช้แรงดันย้อนกลับ (Back-EMF) เพื่อตรวจจับตำแหน่งของ Rotor



รูปแสดง Electronic Commutation Sequence สำหรับมอเตอร์ BLDC แบบสามเฟส โดยใช้ MOSFET และเซ็นเซอร์ Hall-effect โดย Rotor ถูกขับเคลื่อนในทิศทางเข็มนาฬิกา และเซ็นเซอร์ Hall-effect ('a', 'b' และ 'c') ติดตั้งในตำแหน่งที่มีระยะห่าง  $60^\circ$  ต่อกัน

แหล่งที่มา : <https://www.digikey.pl/pl/articles/how-to-power-and-control-brushless-dc-motors>

### 1.6.3 คุณสมบัติของ BLDC

- (1) คุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical Parameters) มีข้อมูลที่ควรรู้ดังนี้
- (1.1) BLDC Motor มีแรงดันไฟฟ้าพิกัดที่กำหนด เช่น 12v, 24v, 48v หรือสูงกว่านั้นในกรณีที่ใช้ในอุตสาหกรรมหรือยานพาหนะไฟฟ้า โดยแรงดันไฟฟ้าที่ใช้จะส่งผลต่อความเร็วรอบและกำลังของมอเตอร์ ซึ่งในการทดลองนี้จะอยู่ที่ 15V
- (1.2) กระแสไฟฟ้า (Current Rating)  
กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ต้องการในการทำงาน โดยแบ่งออกเป็น  
กระแสทำงานปกติ (Rated Current) หรือ กระแสที่มอเตอร์ใช้เมื่อทำงานที่โหลดพิกัด และกระแสสูงสุด (Peak Current) หรือ กระแสสูงสุดที่มอเตอร์สามารถรองรับได้ในช่วงเวลาสั้นๆ
- (1.3) ความเร็วรอบของมอเตอร์ (Speed Rating) วัดเป็นรอบต่อนาที (RPM: Revolutions Per Minute) เช่น 3000RPM, 6000RPM เป็นต้น ซึ่งความเร็วขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายและการออกแบบของมอเตอร์
- (1.4) BLDC Motor มีแรงบิดพิกัด (Rated Torque) และแรงบิดสูงสุด (Peak Torque) ซึ่งระบุถึงความสามารถในการหมุนโหลด
- (1.5) กำลังไฟฟ้า (Power Rating) แสดงถึงพลังงานที่มอเตอร์สามารถส่งออกได้ อยู่ในหน่วยวัตต์ (W) หรือกิโลวัตต์ (kW) เช่น 100w, 500w, หรือ 1.5kw
- (1.6) ความต้านทานไฟฟ้าภายในชุดลวดของ Stator ส่งผลต่อการใช้พลังงานและการสูญเสียพลังงานในมอเตอร์
- (1.7) ค่าคงที่ของแรงดัน-ความเร็ว (Back EMF Constant, Ke) แสดงถึงแรงดันย้อนกลับที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เมื่อ Rotor หมุน มีผลต่อความเร็วและการควบคุมมอเตอร์
- (1.8) ค่าคงที่แรงบิด (Torque Constant, Kt) ระบุว่าแรงบิดที่เกิดขึ้นสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าอย่างไร ใช้หน่วย Nm/A (นิวตัน-เมตรต่อแอม培ร์)
- (1.9) BLDC Motor มีประสิทธิภาพสูง มักอยู่ในช่วง 85-95% ขึ้นอยู่กับการออกแบบและสภาพการทำงาน
- (1.10) การเหนี่ยวนำของชุดลวดส่งผลต่อการตอบสนองของมอเตอร์และการควบคุมที่แม่นยำ
- (1.11) ความถี่การทำงาน (Operating Frequency) คือความถี่ของการสลับกระแสไฟฟ้าในชุดลวด ซึ่งต้องสอดคล้องกับความเร็วและการควบคุม

(2) คุณสมบัติทางกล (Mechanical Parameters) มีข้อมูลที่ควรรู้ดังนี้

(2.1) ขนาดและน้ำหนัก (Size and Weight)

เส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของมอเตอร์ ระบุขนาดของ Rotor และ Stator ซึ่งส่งผลต่อ กำลังและแรงบิดของมอเตอร์

น้ำหนักของมอเตอร์ส่งผลต่อการนำไปใช้ มอเตอร์ที่มีน้ำหนักเบาจะเหมาะสมสำหรับอุปกรณ์ พกพาหรือโดรน ในขณะที่มอเตอร์หนักจะเหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการกำลังสูง

(2.2) แรงบิดสูงสุด (Maximum Torque)

แรงบิดสูงสุดสัมพันธ์กับขนาดของมอเตอร์และการออกแบบ Rotor ซึ่งสามารถกำหนด แรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์สามารถสร้างได้ในสภาพโหลดสูงสุด

(2.3) ความเนื้อของ Rotor (Rotor Inertia)

ความเรื่อยบ่งบอกถึงความยากง่ายในการเร่งหรือหยุดการหมุนของ Rotor โดยความเรื่อย ส่งผลต่อการนำไปใช้ เมื่อความเรื่อยต่ำจะเหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการการตอบสนองที่รวดเร็ว

(2.4) การระบายความร้อน (Cooling Mechanism)

การระบายความร้อนที่ดีช่วยลดความร้อนสะสมในมอเตอร์ เช่น ระบบระบายความร้อนด้วย อากาศ และระบบระบายความร้อนตัวยน้ำ (ในมอเตอร์ที่มีกำลังสูง)

(2.5) ช่วงอุณหภูมิการทำงาน (Operating Temperature Range)

BLDC Motor ออกแบบให้ทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิที่กำหนด เช่น -20°C ถึง 100°C หรือสูง กว่าในบางรุ่น โดยอุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจทำให้วัสดุของขดลวดหรือแม่เหล็กเสื่อมสภาพ

(2.6) อายุการใช้งาน (Lifespan)

เนื่องจากไม่มีประถ่าน BLDC Motor จึงมีอายุการใช้งานยาวนานกว่ามอเตอร์ทั่วไป แต่ทั้งนี้ อายุการใช้งานขึ้นอยู่กับการใช้งานและการบำรุงรักษา เช่น การหล่อเลี้นแกนหมุน

(2.7) ความเร็วรอบสูงสุด (Maximum Speed)

ระบุความเร็วรอบสูงสุดที่มอเตอร์สามารถทำงานได้โดยไม่เสียหาย เช่น 10,000 RPM หรือมากกว่า

(2.8) การติดตั้ง (Mounting Options)

มอเตอร์มีลักษณะการติดตั้งหลากหลาย เช่น หน้าแปลนติดตั้ง (Flange Mounting) หรือการยึดแบบเพลา (Shaft Mounting) ซึ่งขึ้นอยู่กับการใช้งานในอุปกรณ์หรือเครื่องจักร

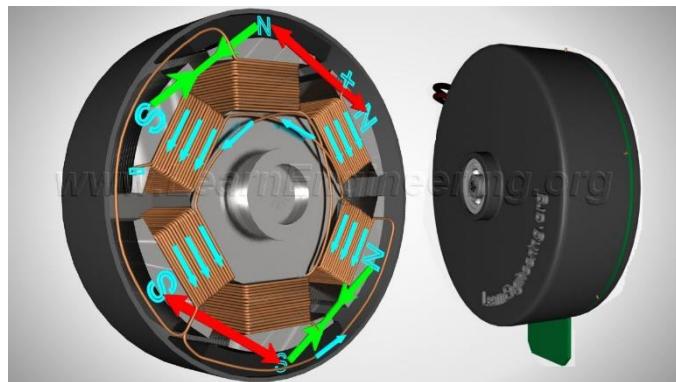
(2.9) วัสดุโครงสร้าง (Construction Materials)

- a. Stator ทำจากแผ่นเหล็กซิลิกอน (Silicon Steel) เพื่อลดการสูญเสียพลังงาน
- b. Rotor ใช้แม่เหล็กถาวรชนิดต่างๆ เช่น Neodymium เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ
- c. โครงมอเตอร์มักทำจากอลูминิเนียมหรือเหล็กเพื่อความแข็งแรง

(2.10) BLDC Motor มีการสั่นสะเทือนและเสียงรบกวนต่ำ เนื่องจากไม่มีการเสียดสีจากแปรถ่าน

(2.11) BLDC Motor มีความทนทานต่อแรงกระแทก เหมาะสำหรับการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่รุนแรง

(2.12) ระบบหล่อลื่นช่วยลดการสึกหรอของแกนหมุนและยืดอายุการใช้งาน (Shaft Lubrication)



รูปแสดงภายในของมอเตอร์ BLDC

แหล่งที่มา : <https://th.twmotor.net/info/how-brushless-dc-motors-work-97376907.html>

### (3) โครงสร้างทางแม่เหล็ก (Magnetic Structure) ของมอเตอร์ BLDC

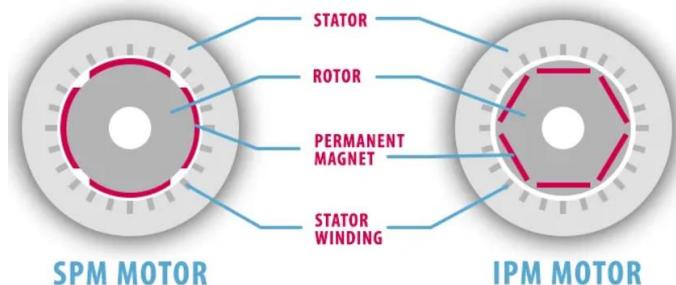
โครงสร้างทางแม่เหล็กในมอเตอร์ BLDC ถูกออกแบบเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่เหมาะสม สำหรับการทำงานของ Rotor และ Stator โดยมีความสำคัญในการกำหนดแรงบิด (Torque), ความเร็ว (Speed), และประสิทธิภาพ (Efficiency) ของมอเตอร์ โดยมีประเภทดังนี้

#### (3.1) Surface-Mounted Permanent Magnet (SMPM)

มีลักษณะเป็นแม่เหล็กถาวรติดตั้งอยู่บนพื้นผิวด้านนอกของ Rotor ซึ่งมีต้นทุนต่ำและโครงสร้างง่าย เหมาะสำหรับงานที่ต้องการแรงบิดไม่สูงมาก

#### (3.2) Interior Permanent Magnet (IPM)

มีลักษณะเป็นแม่เหล็กถาวรถูกฝังอยู่ภายใน Rotor มีแรงบิดสูงและทนต่อแรงเหวี่ยง (Centrifugal Force) ได้ดี เหมาะสำหรับงานที่ต้องการประสิทธิภาพสูง เช่น ยานพาหนะไฟฟ้า



รูปแสดง SMPM และ IPM

แหล่งที่มา : <https://enmotor.com/what-is-the-difference-between-ipm-and-spm-motor/>

### (3.2) Halbach Array

มีลักษณะเป็นการจัดเรียงแม่เหล็กถาวรเพื่อเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กในด้านหนึ่งและลดในอีกด้านหนึ่ง สามารถลดการสูญเสียพลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพ BLDC Motor ได้ มากใช้ในมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง

โดยโครงสร้างทางแม่เหล็กในมอเตอร์ BLDC ทั้งหมด มีข้อจำกัดดังนี้

จำนวนขั้วแม่เหล็กมีผลต่อความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์, ควรกระจายสนามแม่เหล็กอย่างสม่ำเสมอเพื่อป้องกันการสั่นสะเทือนและลดเสียงรบกวน, และความเข้มของสนามแม่เหล็กต้องพอดีกับชุดลวดเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด



รูปแสดง Halbach Array

แหล่งที่มา : <https://www.honsenmagnetics.com/halbach-array-magnetic-system-product/>

## 1.6.4 BLDC motor control type

### (1) Sensorless Control

Sensorless Control คือวิธีการควบคุมมอเตอร์ BLDC โดยไม่ใช้เซ็นเซอร์ตรวจสอบตำแหน่ง (เช่น Hall Effect Sensor) แต่ใช้การคำนวณจากสัญญาณไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบตำแหน่งของ Rotor แทน เทคนิคนี้ช่วยลดต้นทุนและเพิ่มความทนทาน เนื่องจากไม่ต้องพึ่งพาเซ็นเซอร์ทางกลที่อาจเสียหายได้ง่าย โดยมีข้อมูลที่น่าสนใจดังนี้

#### (1) หลักการทำงานของ Sensorless Control

##### (1.1) Back-EMF (Electromotive Force)

Sensorless Control ใช้แรงดันย้อนกลับ (Back-EMF) ที่เกิดขึ้นในชุดลวดของ Stator ระหว่างการหมุนของ Rotor เมื่อ Back-EMF เป็นแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งของ Rotor

(1.2) การตรวจจับตำแหน่ง Rotor

ขณะ Rotor หมุน สนามแม่เหล็กของ Rotor จะเหนี่ยวนำแรงดัน Back-EMF ในชุดลวดของ Stator, ตัวควบคุม (Controller) จะตรวจจับค่า Back-EMF ที่ไม่มีการกระตุ้น (Unexcited Phase) เพื่อระบุตำแหน่ง Rotor

(1.3) การสลับกระแสไฟฟ้า (Commutation)

เมื่อทราบตำแหน่งของ Rotor และ Controller จะสลับกระแสไฟฟ้าในชุดลวดของ Stator เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่เหมาะสมสำหรับการหมุนต่อเนื่อง

(2) ข้อดีของ Sensorless Control

ลดต้นทุนการผลิตและการบำรุงรักษา, เพิ่มความทนทาน, มอเตอร์มีขนาดเล็กและง่ายต่อการติดตั้ง

(3) ข้อจำกัดของ Sensorless Control

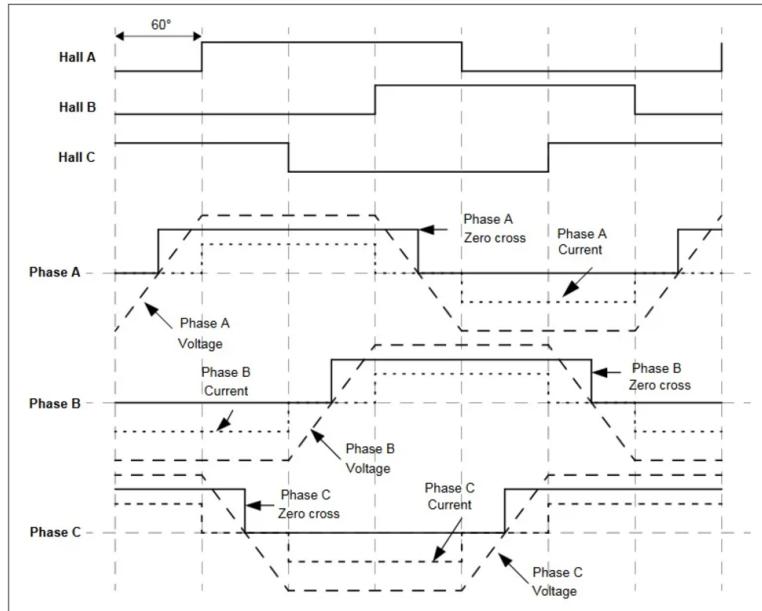
- (3.1) ขณะมอเตอร์หยุดหมุน จะไม่มี Back-EMF ทำให้ต้องใช้วิธีพิเศษในการเริ่มต้นการหมุน
- (3.2) Back-EMF มีค่าน้อยมากที่ความเร็วต่ำ ทำให้การตรวจจับตำแหน่งไม่แม่นยำ
- (3.3) การเปลี่ยนโหลด (Load) อย่างรวดเร็วอาจทำให้การตรวจจับตำแหน่งผิดพลาด

(4) เทคนิคที่ใช้ใน Sensorless Control

- (4.1) การตรวจจับแรงดัน Back-EMF ที่เกิดขึ้นในชุดลวดโดยตรง
- (4.2) การวัดการเปลี่ยนแปลงของ Flux Linkage จากการคำนวณการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กและกระแสไฟฟ้า
- (4.3) การใช้ Sliding Mode Observer (SMO) เพื่อประมวลผลตำแหน่ง Rotor โดยอิงกับกระแสและแรงดันที่ป้อนเข้า
- (4.4) ใช้การกรองสัญญาณแบบ Extended Kalman Filter (EKF) เพื่อคาดคะเนตำแหน่งของ Rotor

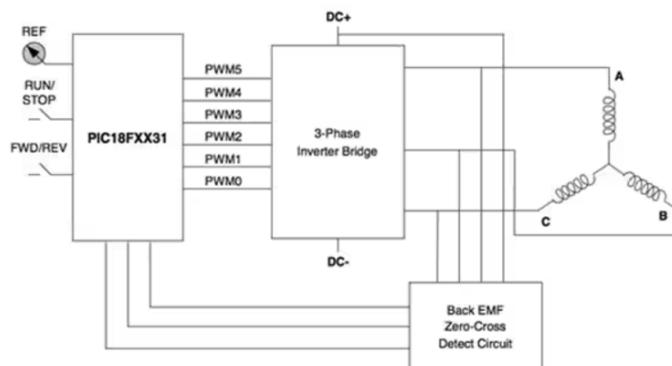
(5) เหมาะสำหรับอุปกรณ์ที่ทำงานด้วยความเร็วสูง เช่น พัดลม, ปั๊มน้ำ, คอมเพรสเซอร์ และอุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดเล็ก

FIGURE 1: WAVEFORM OF HALL SENSOR VERSUS BEMF VOLTAGES



รูปแสดงการเปรียบเทียบสัญญาณระหว่าง Output ของ Hall Sensor และแรงดัน Back-EMF

แหล่งที่มา : <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/sensorless-brushless-dc-bldc-motor-control/>



รูปแสดงวงจรควบคุมมอเตอร์ BLDC แบบสามเฟส โดยไม่ใช้เซ็นเซอร์ในการส่งสัญญาณ Output

แหล่งที่มา : <https://www.digikey.co.th/th/articles/controlling-sensorless-bldc-motors-via-back-emf>

## (2) Sensor-based Control

Sensor-Based Control เป็นวิธีการควบคุมมอเตอร์ BLDC ที่อาศัยเซ็นเซอร์ตรวจจับตำแหน่งของ Rotor เพื่อประเมินตำแหน่งแบบเรียลไทม์ และใช้ข้อมูลนี้ในการควบคุมการสลับกระแส (Commutation) ในชุดลวดของ Stator อย่างแม่นยำ วิธีนี้ช่วยให้มอเตอร์สามารถเริ่มต้นการหมุน, ทำงานที่ความเร็วต่ำ, และตอบสนองต่อโหลดที่เปลี่ยนแปลงได้ดี โดยมีข้อมูลที่นำสนับสนุนดังนี้

## (1) เซ็นเซอร์ที่ใช้ใน Sensor-based Control

### (1.1) Hall Effect Sensor

เซ็นเซอร์ถูกติดตั้งอยู่ภายในหรือใกล้ Rotor มีหน้าที่ตรวจจับสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กภายใน Rotor และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่บ่งบอกตำแหน่งของ Rotor นักใช้ 3 ตัวในมอเตอร์ BLDC เพื่อให้ครอบคลุมตำแหน่งของ Rotor ใน  $360^\circ$

### (1.2) Encoder (Rotary Encoder)

เซ็นเซอร์ที่ให้ข้อมูลตำแหน่งและความเร็วของ Rotor, มีความละเอียดสูงกว่า Hall Effect Sensor เพราะสำหรับการควบคุมที่ต้องการความแม่นยำสูง เช่น หุ่นยนต์และเครื่อง CNC

### (1.3) Resolver

เซ็นเซอร์แม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้สำหรับงานอุตสาหกรรม สามารถทนต่อสภาพแวดล้อมที่รุนแรง เช่น อุณหภูมิสูงหรือการสั่นสะเทือน

### (1.4) Optical Sensor

ใช้แสงในการตรวจจับตำแหน่งของ Rotor ให้ความแม่นยำสูง แต่มีข้อเสียคือต้องการการป้องกันจากผู้คนและสิ่งสกปรก

## (2) หลักการทำงานของ Sensor-Based Control

### (2.1) การตรวจจับตำแหน่ง Rotor

เซ็นเซอร์จะตรวจจับตำแหน่งของ Rotor และส่งข้อมูลไปยังตัวควบคุม (Controller)

### (2.2) การสลับกระแสไฟฟ้า (Commutation)

Controller ใช้ข้อมูลตำแหน่งจากเซ็นเซอร์เพื่อควบคุมการสลับกระแสในชุดลวดของ Stator สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจาก Stator จะดึงหรือผลัก Rotor ให้หมุนต่อเนื่อง

### (2.3) การปรับความเร็วและแรงบิด

Controller สามารถปรับกระแสไฟฟ้าและแรงดันเพื่อควบคุมความเร็วและแรงบิดตามความต้องการ

## (3) ข้อดีของ Sensor-Based Control

### (3.1) สามารถระบุตำแหน่ง Rotor ได้ทันที ทำให้เริ่มหมุนได้แม่นยำ

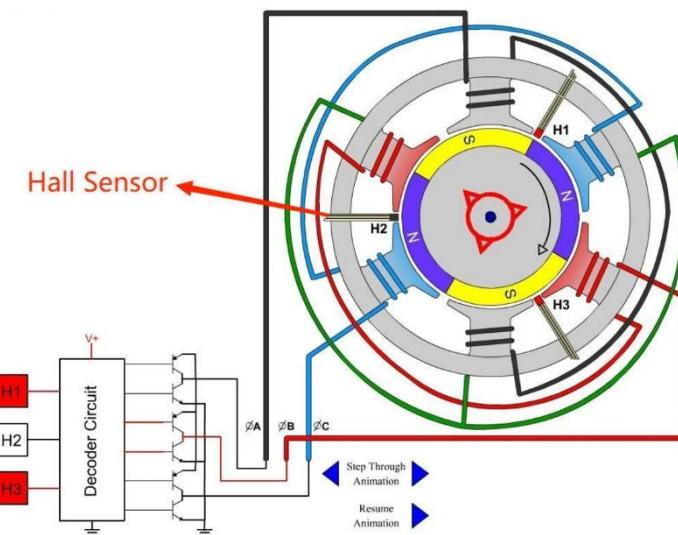
### (3.2) ความแม่นยำสูง ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลด (Load) ได้ดี

### (3.3) สามารถทำงานได้ต่อเนื่องความเร็วต่อ

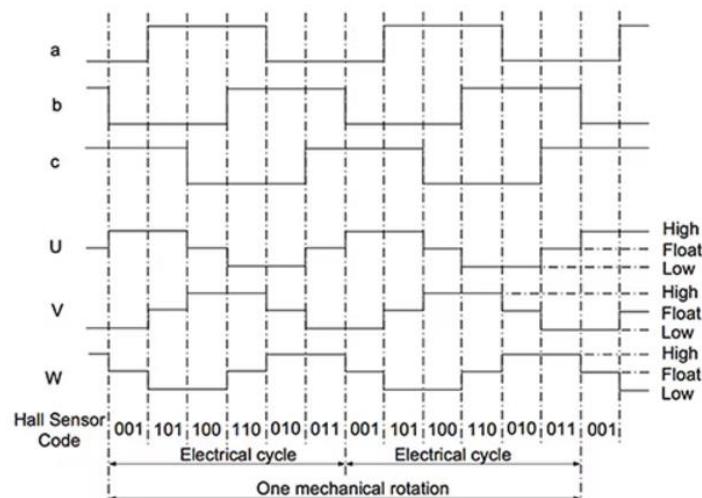
### (3.4) เพราะสำหรับงานที่ต้องการการควบคุมความเร็วหรือแรงบิดอย่างแม่นยำ

#### (4) ข้อเสียของ Sensor-Based Control

- (4.1) ต้นทุนสูงกว่า เนื่องจากต้องเพิ่มเซ็นเซอร์และวงจรที่ซับซ้อน
  - (4.2) ต้องมีการตรวจเช็ค บำรุงรักษาตลอด เนื่องจากเซ็นเซอร์อาจเสียหายได้ง่าย
  - (4.3) เซ็นเซอร์บางประเภท เช่น Optical Sensor อาจทำงานไม่ดีในสภาพผู้นหรือความชื้น
- (5) Sensor-Based Control ถูกใช้ในชีวิตประจำวันอย่างแพร่หลาย เช่น ยานพาหนะไฟฟ้า (EVs), หุ่นยนต์, เครื่องจักร CNC (Computer Numerical Control), ลิฟต์และเครื่อง



รูปแสดงวงจรควบคุมมอเตอร์ BLDC แบบสามเฟส โดยใช้เซ็นเซอร์ในการส่งสัญญาณ Output  
แหล่งที่มา : <https://doncenmotor.com/bldc-motor-hall-sensor/>



รูปแสดงลำดับเวลาของ Hall-effect sensor logic switch output และสถานะขดลวดสำหรับมอเตอร์ BLDC  
แหล่งที่มา : <https://www.digikey.pl/pl/articles/how-to-power-and-control-brushless-dc-motors>

## 1.6.5 BLDC Motor Control Techniques

### (1) Trapezoidal

Trapezoidal Control เป็นเทคนิคการควบคุมมอเตอร์ BLDC ที่สร้างรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าแบบ Trapezoidal (รูปคลื่นสี่เหลี่ยมคงที่) เพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์ เทคนิคนี้ใช้การกระตุนขดลวดในแต่ละ Phase ของ Stator เป็นลำดับ ซึ่งทำให้สามารถแม่เหล็กในมอเตอร์ผลักดันหรือดึง Rotor ให้หมุน โดยมีข้อมูลที่นาสนใจดังนี้

#### (1.1) หลักการทำงานของ Trapezoidal Control

##### a. รูปคลื่น Back-EMF แบบ Trapezoidal

ใน BLDC Motor รูปคลื่นแรงดัน Back-EMF ที่เกิดในขดลวดของ Stator มักมีลักษณะคล้ายรูปคลื่น Trapezoidal โดย Trapezoidal Control ใช้รูปคลื่นนี้ในการกำหนดจังหวะการกระตุนขดลวด

##### b. การกระตุนขดลวด (Commutation)

ในแต่ละรอบของการหมุน Rotor จะมีขดลวด 2 เฟสที่ถูกกระตุน และอีก 1 เฟสที่ไม่มีการกระตุน (Inactive Phase) สามารถแม่เหล็กจากขดลวดที่ถูกกระตุนจะสร้างแรงผลักหรือแรงดึงกับแม่เหล็กภายใน Rotor

##### c. การควบคุมกระแสแบบ 6-Step Commutation

การสลับกระแสไฟฟ้าในขดลวดถูกควบคุมด้วย 6 ลำดับ (6-Steps) ซึ่งแต่ละ Step จะสลับตำแหน่งของขดลวดที่กระตุน ทำให้ Rotor หมุนอย่างต่อเนื่อง

##### d. การใช้ Hall Sensor หรือ Sensorless

Trapezoidal Control สามารถใช้ร่วมกับ Hall Effect Sensor เพื่อระบุตำแหน่ง Rotor หากไม่มีเซ็นเซอร์ จะใช้การตรวจจับ Back-EMF เพื่อคำนวณตำแหน่ง Rotor

#### (1.2) ข้อดีของ Trapezoidal Control

a. มีความง่ายในการออกแบบและควบคุม ใช้การสลับกระแสแบบง่าย

b. ต้นทุนต่ำ

c. เหมาะสำหรับงานที่ไม่ต้องการการควบคุมความเร็วหรือแรงบิดที่แม่นยำมาก

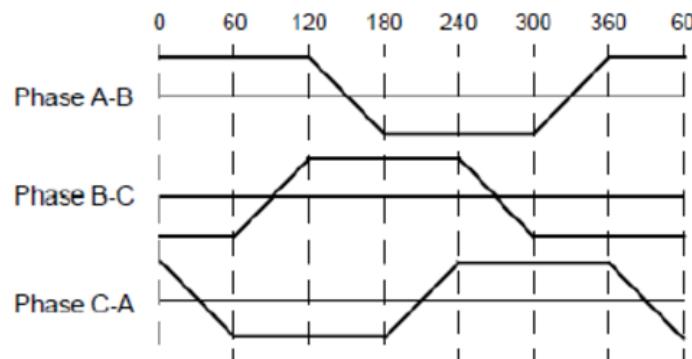
d. ประสิทธิภาพสูงที่ความเร็วปานกลาง

e. ทำงานได้ดีในช่วงความเร็วที่คงที่

(1.3) ข้อเสียของ Trapezoidal Control

- a. แรงบิดไม่คงที่ (Torque Ripple) เนื่องจากการสลับกระแสแบบขั้น (Stepped Commutation)
- b. เกิดเสียงรบกวน (Noise) จากแรงบิดไม่สม่ำเสมอ ไม่เหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการความเงียบ
- c. มีประสิทธิภาพต่ำที่ความเร็วสูง เนื่องจาก Back-EMF อาจส่งผลกระทบต่อการควบคุมที่ความเร็วสูง
- d. ความแม่นยำต่ำกว่าการควบคุมแบบ Sine Wave
- e. ไม่เหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการแรงบิดและความเร็วที่มีความละเอียดสูง

(1.4) เหมาะสำหรับงานที่ไม่ต้องการการควบคุมความเร็วหรือแรงบิดที่แม่นยำมาก มักใช้กับพัดลม, ปั๊มน้ำ, เครื่องมือไฟฟ้า และyanพานะไฟฟ้าขนาดเล็ก



รูปแสดงตัวอย่างสัญญาณแบบ Trapezoidal

แหล่งที่มา : [https://www.researchgate.net/figure/Trapezoidal-back-EMF-II-LITRATURE-REVIEW\\_fig4\\_261045612](https://www.researchgate.net/figure/Trapezoidal-back-EMF-II-LITRATURE-REVIEW_fig4_261045612)

## (2) Sinusoidal

Sinusoidal Control เป็นเทคนิคการควบคุมมอเตอร์ BLDC ที่สร้างรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าแบบ Sinusoidal (ไซน์เวฟ) เพื่อให้แรงบิดของมอเตอร์มีความราบรื่น (Smooth Torque) และลดแรงบิดไม่คงที่ (Torque Ripple) ซึ่งพบได้ในเทคนิค Trapezoidal Control โดยมีข้อมูลที่นำเสนอดังนี้

### (2.1) หลักการทำงานของ Sinusoidal Control

#### a. การสร้างรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าแบบไซน์เวฟ

ใช้ตัวควบคุม (Controller) เพื่อกำหนดรูปคลื่นกระแสในขดลวดของ Stator ให้อยู่ในรูปแบบ Sinusoidal กระแสไฟฟ้าในขดลวดทั้ง 3 เพสจะมีเฟสต่างกัน 120 องศา

#### b. การควบคุมสนามแม่เหล็ก

รูปคลื่น Sinusoidal ในขดลวดแต่ละเฟสสร้างสนามแม่เหล็กที่นิ่มนวลและสมดุลมากกว่า ทำให้ Rotor หมุนอย่างราบรื่นโดยไม่มีแรงกระตุก

#### c. การใช้เซ็นเซอร์หรือ Sensorless

ตำแหน่งของ Rotor จะถูกตรวจสอบด้วยเซ็นเซอร์ เช่น Hall Effect Sensor หรือ Resolver หากเป็น Sensorless จะใช้การคำนวณจาก Back-EMF

#### d. Pulse Width Modulation (PWM)

Sinusoidal Control ใช้ PWM เพื่อสร้างสัญญาณกระแสแบบไซน์เวฟที่ปรับค่าได้ตามความต้องการ

### (2.2) ข้อดีของ Sinusoidal Control

#### a. แรงบิดนิ่มนวล (Smooth Torque) ลดแรงบิดไม่คงที่ (Torque Ripple) ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและลดการสั่นสะเทือน

#### b. เสียงรบกวนต่ำ ทำให้ทำงานเงียบกว่า Trapezoidal Control (亥มาสำหรับงานที่ต้องการความเงียบ)

#### c. ประสิทธิภาพสูงที่ความเร็วต่ำ เนื่องจากสนามแม่เหล็กมีความต่อเนื่อง

#### d. 亥มาสำหรับงานที่ต้องการความแม่นยำ เช่น การควบคุมความเร็วและแรงบิดในระบบที่ต้องการความละเอียดสูง

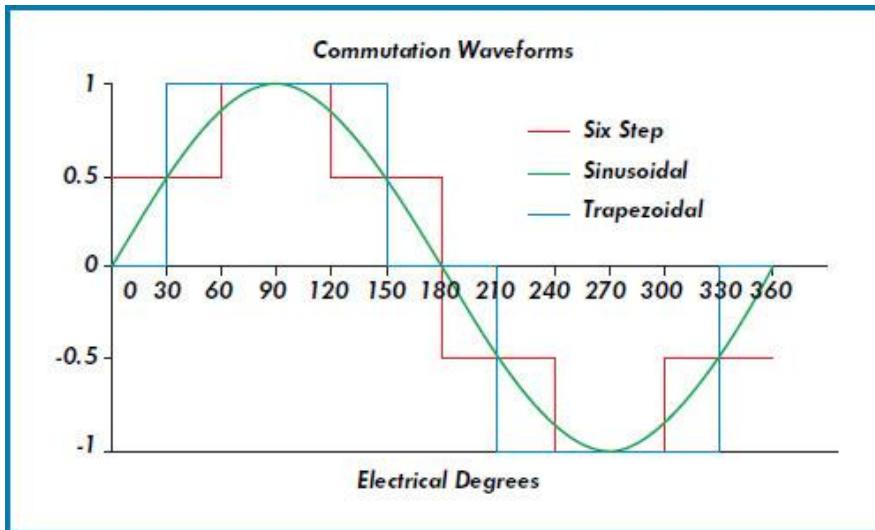
### (2.3) ข้อเสียของ Sinusoidal Control

#### a. ต้นทุนสูง เนื่องจากการระบบควบคุมที่ซับซ้อนจึงต้องการฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่มีประสิทธิภาพสูง

#### b. การสร้างรูปคลื่น Sinusoidal ต้องใช้อัลกอริทึมและการคำนวณที่ซับซ้อน

#### c. มีการสูญเสียพลังงานใน PWM

(2.4) เทมาสสำหรับงานที่ต้องการควบคุมความเร็วหรือแรงบิดที่นุ่มนวล, แม่นยำ และเงียบ  
สงบ มักใช้กับยานพาหนะไฟฟ้า (EVs), หุ่นยนต์, เครื่องจักร CNC, ระบบ  
เครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้าน และเครื่องเสียง (Audio Equipment)



รูปแสดงตัวอย่างสัญญาณแบบ Sinusoidal

แหล่งที่มา : <https://www.motioncontrolltips.com/what-is-sinusoidal-commutation-for-dc-motors/>

### (3) Field Oriented Control (FOC)

Field-Oriented Control (FOC) หรือ Vector Control เป็นเทคนิคการควบคุม BLDC Motor ที่ใช้การแปลงระบบพิกัด (Coordinate Transformation) เพื่อแยกการควบคุมแรงบิด (Torque) และสนามแม่เหล็ก (Flux) ออกจากกัน เทคนิคนี้ทำให้สามารถควบคุมมอเตอร์ได้อย่าง แม่นยำและราบรื่น โดยเฉพาะในงานที่ต้องการประสิทธิภาพสูง เช่น ยานพาหนะไฟฟ้า หุ่นยนต์ และระบบอัตโนมัติขั้นสูง โดยมีข้อมูลที่น่าสนใจดังนี้

#### (3.1) หลักการทำงานของ Sinusoidal Control

##### a. การแปลงพิกัด (Coordinate Transformation)

FOC ใช้การแปลงกระแสไฟฟ้าในพิกัดแบบ 3 เฟส (ABC) ไปเป็นพิกัดแบบ หมุน (DQ) การแปลงนี้ช่วยแยกกระแสไฟฟ้าออกเป็น 2 ส่วนหลักคือ

i. D-axis: ควบคุมสนามแม่เหล็ก (Flux)

ii. Q-axis: ควบคุมแรงบิด (Torque)

##### b. การสร้างสนามแม่เหล็กที่สัมพันธ์กับ Rotor

FOC ทำให้สนามแม่เหล็กใน Stator สอดคล้องกับการหมุนของ Rotor ตลอดเวลา ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและลดแรงบิดไม่คงที่ (Torque Ripple)

c. การใช้ Pulse Width Modulation (PWM)

กระแสไฟฟ้าที่ควบคุมในแกน D และ Q จะถูกแปลงกลับเป็นรูปคลื่น 3 เฟสด้วย PWM

d. การใช้เซ็นเซอร์ตรวจจับตำแหน่ง Rotor

เซ็นเซอร์ เช่น Hall Effect Sensor, Resolver หรือ Encoder ใช้สำหรับตรวจจับตำแหน่ง Rotor เพื่อการควบคุมที่แม่นยำ ในบางกรณีสามารถใช้แบบ Sensorless โดยคำนวณตำแหน่ง Rotor จาก Back-EMF

(3.2) ขั้นตอนการทำงาน

- a. การวัดกระแสและแรงดันในแต่ละเฟสของมอเตอร์
- b. แปลงค่าพิกัด โดยกระแสจากพิกัด 3 เฟส (ABC) เป็นพิกัด 2 เฟส (Alpha-Beta)
- c. แปลงพิกัดแบบหมุน โดยแปลงค่ากระแสจากพิกัด Alpha-Beta เป็นพิกัด DQ โดยสัมพันธ์กับตำแหน่ง Rotor
- d. ใช้ตัวควบคุม PI (Proportional-Integral) เพื่อปรับค่ากระแสในแกน D และ Q
- e. แปลงค่ากระแสจากพิกัด DQ กลับเป็นพิกัด ABC เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมมอเตอร์
- f. การส่งสัญญาณควบคุม PWM ไปยังอินเวอร์เตอร์เพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์

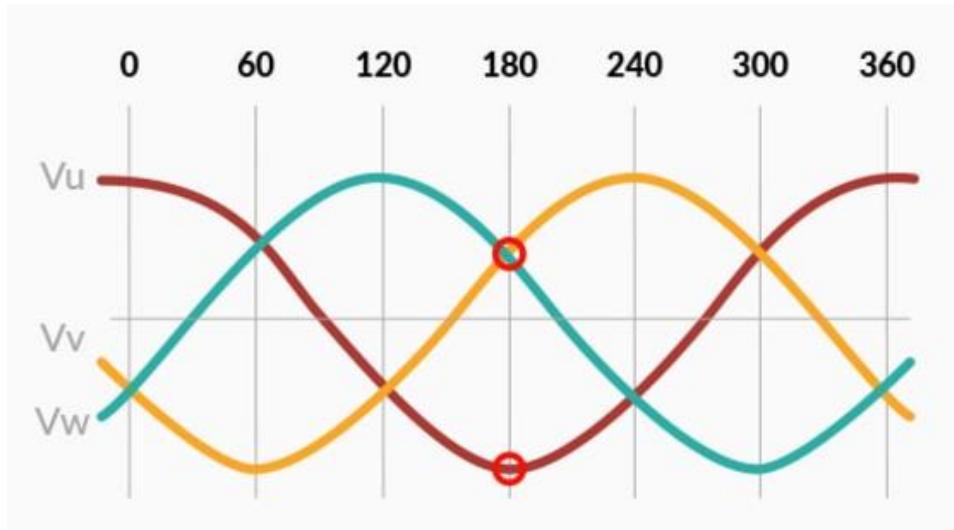
(3.3) ข้อดีของ FOC

- a. แรงบิดราบรื่น (Smooth Torque) ลดแรงบิดไม่คงที่ ทำให้เหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการความแม่นยำ
- b. ประสิทธิภาพสูง เนื่องจากสามารถควบคุมสนามแม่เหล็กและแรงบิดได้อย่างเหมาะสม
- c. มีการตอบสนองที่รวดเร็ว สามารถปรับแรงบิดและความเร็วได้ในทันที
- d. เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความละเอียดสูง เช่น หุ่นยนต์, ยานพาหนะไฟฟ้า, และระบบควบคุมอัตโนมัติ

(3.4) ข้อเสียของ FOC

- a. ต้นทุนสูง เนื่องจากเซ็นเซอร์คุณภาพสูงและตัวควบคุมที่ซับซ้อน
- b. การคำนวณและการควบคุมต้องใช้ซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ขั้นสูง
- c. ต้องการการปรับจูนระบบ เนื่องจากการตั้งค่าที่ไม่ถูกต้องอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพของมอเตอร์

(3.5) เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความละเอียดสูง,แม่นยำ และเงียบสงบ มักใช้กับ  
ยานพาหนะไฟฟ้า (EVs), หุ่นยนต์, เครื่องจักร CNC, ระบบเครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้าน  
และเครื่องเสียง (Audio Equipment)



รูปแสดงตัวอย่างสัญญาณแบบ FOC  
แหล่งที่มา : <https://www.roboteq.com/technology/field-oriented-control>

(4) สามารถเปรียบเทียบเทคนิคการควบคุม BLDC Motor ทั้งสามเทคนิคได้ดังนี้

คุณสมบัติ	Sinusoidal Control	Trapezoidal Control	Field-Oriented Control (FOC)
แรงบิด	นุ่มนวล	ไม่คงที่	นุ่มนวลและแม่นยำ
เสียงรบกวน	ต่ำ	สูง	ต่ำ
ตันทุน	ปานกลาง	ต่ำ	สูง
ความซับซ้อน	ปานกลาง	ต่ำ	สูง
ประสิทธิภาพที่ความเร็วต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง

## 1.6.6 PWM

PWM (Pulse Width Modulation) คือเทคนิคในการควบคุมความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ BLDC (Brushless DC Motor) โดยการสลับการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับชุดลวดในมอเตอร์ในรูปแบบของคลื่นพัลส์ (Pulse) ซึ่งจะมีความยาวของแต่ละพัลส์ที่แตกต่างกันไป โดยการปรับความกว้างของพัลส์ (Duty Cycle) จะควบคุมพลังงานที่ส่งไปยังมอเตอร์ โดยมีข้อมูลที่นำเสนอได้ดังนี้

### (1) หลักการทำงานของ PWM

#### (1.1) การสร้างคลื่น PWM

คลื่น PWM เป็นสัญญาณที่ประกอบด้วยพัลส์สั้นๆ (Pulse) ที่มีระยะเวลาสั้น และยาวสลับกันไป รูปคลื่นจะมีลักษณะเป็นการเปิด (ON) และปิด (OFF) ซึ่งสลับกัน ในช่วงเวลาที่กำหนด

#### (1.2) Duty Cycle

Duty Cycle คือสัดส่วนของเวลาที่สัญญาณ PWM อยู่ในสถานะ ON เมื่อเทียบ กับระยะเวลาในการหนึ่งรอบ (Period) Duty Cycle จะมีค่าในช่วง 0% ถึง 100% 0% Duty Cycle จะไม่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้า (คลื่นทั้งหมดคือ OFF) 100% Duty Cycle จะจ่ายกระแสอย่างต่อเนื่อง (คลื่นทั้งหมดคือ ON)

#### (1.3) การควบคุมมอเตอร์ BLDC

การใช้คลื่น PWM จะช่วยควบคุมแรงบิดของมอเตอร์โดยการกำหนดความกว้าง ของ Pulse (Duty Cycle) นั่นคือเมื่อ Duty Cycle เพิ่มขึ้น กระแสไฟฟ้าถึงชุดลวด มอเตอร์จะเพิ่มขึ้น ทำให้แรงบิดของมอเตอร์เพิ่มขึ้น

#### (1.4) การควบคุมความเร็ว

การปรับค่า Duty Cycle จะเปลี่ยนความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ ค่า Duty Cycle ที่สูงขึ้นจะทำให้มอเตอร์หมุนเร็วขึ้น ขณะที่ค่า Duty Cycle ที่ต่ำจะทำให้มอเตอร์หมุนช้าลง

### (2) การใช้งาน PWM ในการควบคุม BLDC Motor

#### (2.1) ควบคุมความเร็ว

การปรับ Duty Cycle ในคลื่น PWM ทำให้สามารถควบคุมความเร็วของ มอเตอร์ได้ตามต้องการ โดยการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ส่งไปยังมอเตอร์

#### (2.2) การควบคุมแรงบิด

เมื่อ Duty Cycle สูงขึ้น พลังงานที่จ่ายให้มอเตอร์เพิ่มขึ้น ทำให้แรงบิดสูงขึ้น และในทางกลับกันเมื่อ Duty Cycle ต่ำลง แรงบิดจะลดลง

(2.3) การควบคุมแรงดันและกระแส

การใช้ PWM ทำให้สามารถควบคุมการจ่ายแรงดันและกระแสให้เหมาะสมกับการทำงานของมอเตอร์และโหลดที่ติดตั้งกับมอเตอร์ได้

(3) ข้อดีของ PWM

(3.1) PWM มีประสิทธิภาพสูง คลื่น PWM ช่วยให้การควบคุมพลังงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากไม่ต้องมีการตัดการไฟของกระแสไฟฟ้า ซึ่งทำให้การสูญเสียพลังงานน้อยลง

(3.2) PWM มีความยืดหยุ่นในการควบคุม สามารถควบคุมทั้งความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ได้โดยการปรับค่า Duty Cycle เพียงอย่างเดียว

(3.3) การใช้งาน PWM ช่วยลดความร้อนที่เกิดจากการตัดการกระแสไฟฟ้าและลดความสูญเสียพลังงานในมอเตอร์ ทำให้มีเกิดการสูญเสียพลังงานที่ร้อนมาก

(3.4) สามารถปรับค่า Duty Cycle ได้ละเอียด ซึ่งหมายความว่าสามารถควบคุมความเร็ว และแรงบิดในหลายๆ งาน

(4) ข้อเสียของ PWM

(4.1) การสับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าอย่างรวดเร็วอาจทำให้เกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใกล้เคียง

(4.2) ต้องใช้วงจรและอัลกอริズึมที่ซับซ้อนในการควบคุมคลื่น PWM ให้มีความแม่นยำ

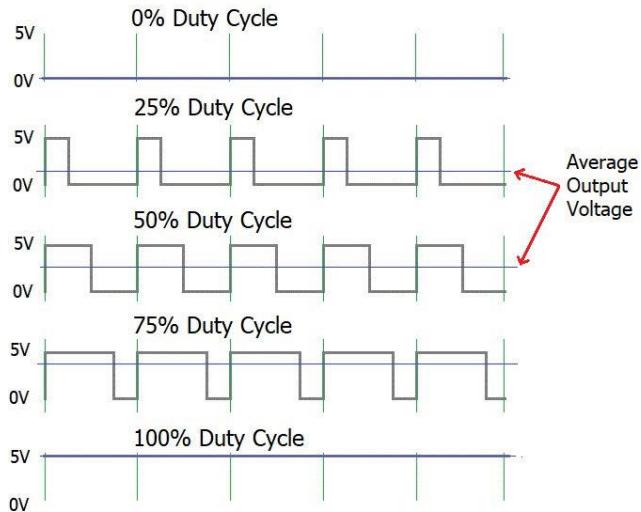
(5) การใช้งานของ PWM

(5.1) มอเตอร์ BLDC ใช้ PWM ในการควบคุมความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์

(5.2) แหล่งจ่ายไฟ DC ใช้ PWM ในวงจรแปลงแรงดันเพื่อควบคุมการจ่ายไฟ

(5.3) เครื่องปรับอากาศ (Air Conditioners) ใช้ PWM ในการควบคุมมอเตอร์ของพัดลม

(5.4) ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ใช้ PWM ในการควบคุมการชาร์จของแบตเตอรี่



รูปแสดงตัวอย่างสัญญาณ PWM

แหล่งที่มา : <https://th.amen-technologies.com/what-is-pwm-pulse-width-modulation>

### 1.6.7 Motor Workbench 6.3.2

Motor Workbench 6.3.2 เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการพัฒนาและจำลองการควบคุมมอเตอร์โดยเฉพาะสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32 ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถออกแบบและตั้งค่าการควบคุมมอเตอร์ BLDC (Brushless DC Motor) และมอเตอร์ชนิดอื่นๆ ได้ง่ายขึ้น ซอฟต์แวร์นี้รองรับเทคนิคการควบคุมมอเตอร์ทั้งแบบมีเซ็นเซอร์และแบบไม่มีเซ็นเซอร์ เช่น การควบคุมแบบ Field-Oriented Control (FOC) และการควบคุมแบบ Trapezoidal

Motor Workbench ช่วยในการตั้งค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ โดยสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่จำเป็นในการควบคุมมอเตอร์ เช่น พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและกลไก เพื่อให้มอเตอร์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซอฟต์แวร์นี้ยังมีฟีเจอร์ในการทดสอบและตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์แบบเรียลไทม์ โดยผู้ใช้สามารถดูข้อมูลจากการจำลองการทำงานของมอเตอร์ได้แบบกราฟิก

ในเวอร์ชัน 6.3.2 ซอฟต์แวร์มีการอัพเดทปรับปรุงให้สามารถควบคุมมอเตอร์ได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น รวมถึงรองรับการใช้งานฟังก์ชันต่างๆ ที่ช่วยให้การควบคุมมอเตอร์และการทำงานร่วมกับเซ็นเซอร์และอัลกอริธึมต่างๆ เป็นไปได้อย่างราบรื่น

### 1.6.8 Six-Step Commutation

Six-Step Commutation เป็นเทคนิคการควบคุมมอเตอร์ BLDC (Brushless DC Motor) ที่ใช้ สำหรับการเปลี่ยนทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่ให้ผลผ่านชุดลวดของมอเตอร์ในแต่ละขั้นตอนของการหมุน มันเป็นกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะของสวิตซ์ต่างๆ ในมอเตอร์เพื่อให้มอเตอร์หมุนใน ทิศทางที่ต้องการ โดยแต่ละขั้นตอนจะมีการเปิดและปิดสวิตซ์ที่เข้ามต่อ กับชุดลวดของมอเตอร์ 6 ขั้นตอน ซึ่งเป็นการจัดการกระแสไฟฟ้าที่ให้ผลผ่านในทุกๆ 60 องศาของการหมุนรอบหนึ่งรอบ (360 องศา) ซึ่งมีข้อมูลที่น่าสนใจดังนี้

#### (1) หลักการทำงานของ Six-Step Commutation

##### (1.1) มีการทำงานแบบ 3 เฟส

มอเตอร์ BLDC มีการทำงานในรูปแบบของมอเตอร์สามเฟส โดยแต่ละเฟสจะมี การควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่หมุน ซึ่งจะทำให้มอเตอร์ หมุนตามทิศทางที่ต้องการ

##### (1.2) การเปลี่ยนแปลงสถานะ

ในการหมุนมอเตอร์ผ่าน 360 องศา จะมีการเปลี่ยนแปลงสถานะของสวิตซ์ที่ เข้ามต่อ กับชุดลวด โดยแต่ละขั้นตอนจะเกิดขึ้นทุกๆ 60 องศาของการหมุน ดังนั้นจะมี การเปิดและปิดสวิตซ์ทั้งหมด 6 ขั้นตอน

##### (1.3) การควบคุมทิศทางและแรงบิด

การควบคุมมอเตอร์ด้วย Six-Step Commutation ช่วยให้มอเตอร์หมุนได้ อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถควบคุมทิศทางและแรงบิดได้ตามต้องการ ซึ่ง กระบวนการนี้จะใช้การจ่ายกระแสไฟฟ้าที่แม่นยำในแต่ละเฟสเพื่อให้มอเตอร์ทำงานได้ สมบูรณ์แบบ

##### (1.4) การสร้างสนามแม่เหล็กที่หมุน

การเปลี่ยนแปลงสถานะของสวิตซ์ในแต่ละขั้นตอนจะช่วยสร้างสนามแม่เหล็กที่ หมุนในมอเตอร์ ซึ่งสนามแม่เหล็กนี้จะทำให้มอเตอร์หมุนตามทิศทางที่ต้องการ

#### (2) ข้อดีของ Six-Step Commutation

##### (2.1) ทำให้การควบคุมมอเตอร์ BLDC ง่ายขึ้น

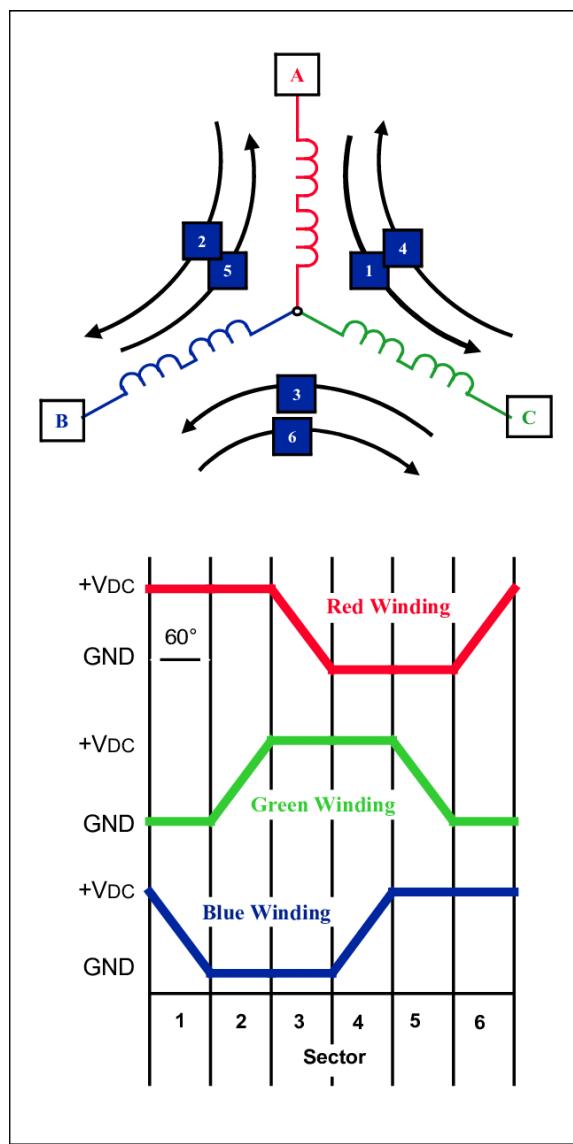
##### (2.2) ใช้ในการควบคุมมอเตอร์ในแอปพลิเคชันที่ไม่ต้องการความแม่นยำสูงมาก

##### (2.3) ใช้การควบคุมที่ไม่ซับซ้อน ทำให้ค่าใช้จ่ายต่ำ

(3) ข้อเสียของ Six-Step Commutation

- (3.1) มีความไม่เรียบในการหมุน (Ripple) ที่สามารถส่งผลกระทบต่อการทำงานในบางกรณี
- (3.2) การควบคุมแรงบิดและความเร็วจะไม่ละเอียดเท่าเทคนิคอื่นๆ เช่น Field-Oriented Control (FOC)

(4) เป็นที่นิยมในแอปพลิเคชันที่ไม่ต้องการการควบคุมความเร็วหรือแรงบิดที่สูงมาก เช่น พัดลม หรือเครื่องมือที่ใช้งานทั่วไป



รูปแสดงตัวอย่างสัญญาณ Six-Step Commutation

แหล่งที่มา : [https://www.researchgate.net/figure/SIX-STEP-COMMUTATION\\_fig1\\_320621981](https://www.researchgate.net/figure/SIX-STEP-COMMUTATION_fig1_320621981)

### 1.6.9 Space Vector Modulation (SVM)

Space Vector Modulation (SVM) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์ โดยเฉพาะในระบบมอเตอร์สามเฟสที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ BLDC หรือมอเตอร์ซิงโครนัสแบบ AC เทคนิคนี้ใช้เพื่อปรับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายไปยังมอเตอร์ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดและลดความผิดเพี้ยนของแรงดันในแต่ละเฟส ทำให้การควบคุมมอเตอร์มีความแม่นยำและประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งมีข้อดีที่สำคัญเจดังนี้

#### (1) หลักการทำงานของ SVM

##### (1.1) การแทนที่เวกเตอร์แรงดัน

ในระบบมอเตอร์ 3 เฟส SVM ใช้แนวคิดในการแทนที่เวกเตอร์แรงดัน ของมอเตอร์ในรูปแบบของเวกเตอร์ในพื้นที่สองมิติ (2D) ระบบมอเตอร์ 3 เฟสสามารถแบ่งเป็น 6 เวกเตอร์ (พื้นที่เวกเตอร์ที่ใช้ในการควบคุม) ซึ่งเรียกว่าพื้นที่เวกเตอร์ของแรงดัน

##### (1.2) การแบ่งพื้นที่ของเวกเตอร์

พื้นที่ของเวกเตอร์จะแบ่งออกเป็น 6 ส่วน โดยที่แต่ละส่วนสามารถใช้ในการควบคุมสถานะต่างๆ ของมอเตอร์ ซึ่งจะเป็นการควบคุม ทั้งแรงดันและกระแสที่ให้ผลผ่านชุดลวดของมอเตอร์ในแต่ละเฟส

##### (1.3) การใช้การคำนวณที่แม่นยำ

SVM ใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนเพื่อปรับแรงดันในแต่ละเฟสอย่างแม่นยำ ทำให้สามารถควบคุมมอเตอร์ได้ดีขึ้น และลดการผิดเพี้ยน ที่อาจเกิดจากการควบคุมที่ไม่แม่นยำ

##### (1.4) การสลับสถานะของสวิตช์

ในการใช้ SVM, การสลับสถานะของสวิตช์ในมอเตอร์จะถูกควบคุม โดยการคำนวณที่แม่นยำ ซึ่งทำให้มอเตอร์สามารถหมุนได้ราบรื่น และลดการสูญเสียพลังงานจากการสลับสวิตช์

#### (2) ข้อดีของ SVM

##### (2.1) SVM สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมมอเตอร์โดยทำให้การจ่ายพลังงานเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพและลดการสูญเสียพลังงาน

##### (2.2) ลดการผิดเพี้ยนเนื่องจากการควบคุมที่แม่นยำ SVM ช่วยลดการผิดเพี้ยนของแรงดันในแต่ละเฟส

##### (2.3) ช่วยลดเสียงรบกวนที่เกิดจากการทำงานของมอเตอร์ ทำให้มอเตอร์ทำงานเงียบขึ้น

- (3) ข้อเสียของ SVM
  - (3.1) ซับซ้อนและต้องการการคำนวณสูง
  - (3.2) ต้องการการปรับจุนที่แม่นยำ
- (4) เป็นที่นิยมในแอปพลิเคชันที่ต้องการการควบคุมมอเตอร์ที่มีความแม่นยำสูง เช่น มอเตอร์ในเครื่องจักรอุตสาหกรรม หรือในระบบขับเคลื่อนที่มีความเร็วสูง

### 1.6.10 Trapezoidal Back EMF

Trapezoidal Back EMF คือรูปแบบของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการหมุนของมอเตอร์ BLDC (Brushless DC Motor) ที่มีลักษณะเป็นทรงปีกผีเสื้อหรือทรงรูปสี่เหลี่ยมคงหู โดยลักษณะนี้มักพบในมอเตอร์ BLDC ที่ใช้การควบคุมแบบ "Six-Step Commutation" ซึ่งมีลักษณะการสลับเฟสแบบขั้นบันได (Step-like Switching) โดยมีข้อมูลที่นำเสนอได้ดังนี้

- (1) ลักษณะเด่นของ Trapezoidal Back EMF

#### (1.1) รูปแบบของแรงดันไฟฟ้า

แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการหมุนในมอเตอร์แบบตราเพชรอยู่ด้วยจะมีลักษณะคล้ายกับรูปทรงสี่เหลี่ยมคงหู โดยมีจุดที่เป็นแนวราบในส่วนบนและการเปลี่ยนแปลงที่ชันในช่วงขอบของกราฟ ซึ่งเกิดจากการที่ Rotor ของมอเตอร์มีลักษณะเป็นรูปหลายเหลี่ยมที่มีขอบตรง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าอย่างฉับพลันเมื่อ Rotor ผ่านจุดขั้วของ Stator

#### (1.2) การควบคุมมอเตอร์

มอเตอร์ BLDC แบบตราเพชรอยู่ด้วยจะใช้การควบคุมการสลับเฟส 6 ขั้นตอน (Six-Step Commutation) ซึ่งจะทำการเปิด-ปิดสวิตช์ในเฟสต่างๆตามตำแหน่ง ของโรเตอร์ในแต่ละขั้นตอน ส่งผลให้มีการหมุนของมอเตอร์ที่มีลักษณะเป็นขั้นๆ คล้ายกับการสลับกระแสที่มีจุดพัก (Flat-top) ในแต่ละเฟส

#### (1.3) ประสิทธิภาพและการควบคุม

แม้ว่าการใช้แรงดันแบบตราเพชรอยู่ด้วยจะมีความไม่رابรื่น (Torque Ripple) เมื่อเทียบกับการใช้แรงดันแบบไซนัส (Sinusoidal), แต่ข้อดีของมันคือการควบคุม ที่ง่ายและต้นทุนต่ำ ซึ่งมักใช้ในแอปพลิเคชันที่ไม่ต้องการความแม่นยำสูงมากนัก เช่น พัดลมหรือเครื่องมือที่ใช้งานทั่วไป

(1.4) Torque Ripple

หนึ่งในข้อเสียของการควบคุมมอเตอร์ BLDC แบบตราเปโซยตัล คือการเกิดแรงบิดที่ไม่คงที่ (Torque Ripple) ซึ่งสามารถทำให้มอเตอร์หมุนไม่เรียบ และอาจทำให้เกิดการสั่นสะเทือนหรือเสียงรบกวน โดยเฉพาะที่ความเร็วต่ำ

- (2) มอเตอร์ที่มีแรงดันไฟฟ้าแบบตราเปโซยตัลมากจะถูกนำไปใช้ในแอปพลิเคชันที่ไม่ต้องการความแม่นยำสูง เช่น ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป รถยนต์ หรือเครื่องมืออุตสาหกรรมที่ไม่จำเป็นต้องมีการควบคุมแรงบิดที่ละเอียด

### 1.6.11 Permanent Magnet Synchronous Machine (PMSM)

Permanent Magnet Synchronous Machine (PMSM) คือ มอเตอร์ที่มีการใช้แม่เหล็กถาวรในการสร้างสนามแม่เหล็กเพื่อหมุน Rotor โดยที่มอเตอร์นี้จะทำงานด้วยการใช้สนามแม่เหล็กที่สร้างจากแม่เหล็กถาวรใน Rotor และกระแสไฟฟ้าที่ถูกจ่ายไปยังชุดลวดของ Stator เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กหมุนที่สัมพันธ์กับ Stator ซึ่งจะทำให้มอเตอร์หมุนได้อย่างราบรื่นและมีประสิทธิภาพสูง โดยมีข้อมูลที่น่าสนใจดังนี้

(1) ลักษณะเด่นของ PMSM

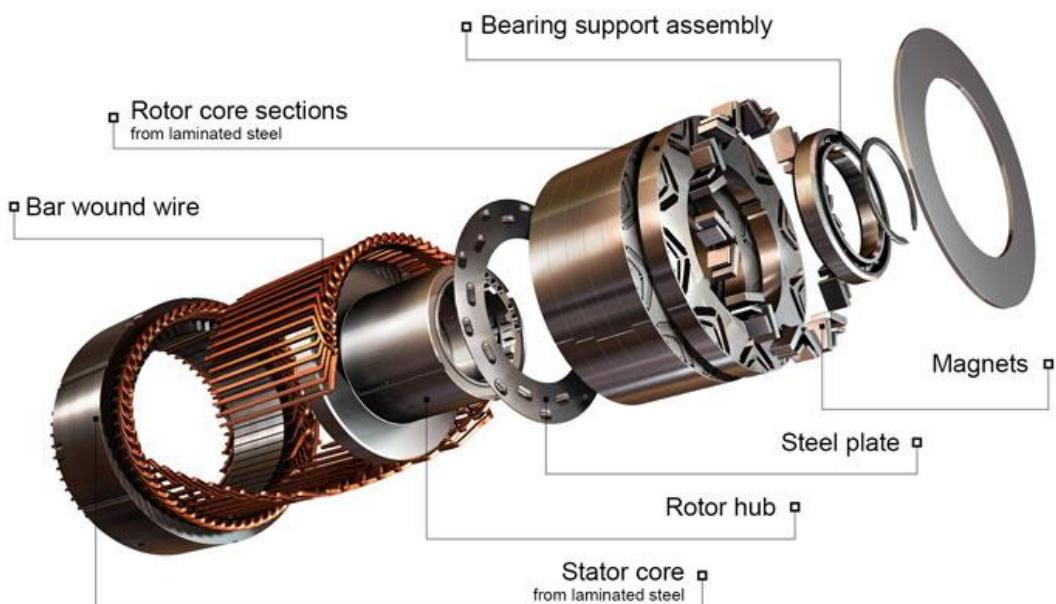
- (1.1) PMSM ใช้แม่เหล็กถาวร (Permanent Magnets) ใน Rotor ซึ่งจะช่วยให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพสูงกว่ามอเตอร์แบบ Stator ธรรมดา เพราะไม่จำเป็นต้องใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กใน Rotor ซึ่งลดการสูญเสียพลังงานในรูปแบบความร้อน
- (1.2) PMSM ทำงานในลักษณะ "Synchronous" หมายความว่า Rotor จะหมุนตามความเร็วเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนที่สร้างโดย Stator ซึ่งทำให้การควบคุมความเร็วของมอเตอร์แม่นยำมากขึ้นและสามารถทำงานได้ที่ความเร็วสูงโดยไม่มีการสูญเสียพลังงานที่เกิดจากการหมุนไม่สัมพันธ์
- (1.3) การควบคุม PMSM จะใช้เทคนิคเช่น Field-Oriented Control (FOC) หรือ Direct Torque Control (DTC) ซึ่งช่วยให้การควบคุมแรงบิดและความเร็วมีความแม่นยำสูง โดยไม่ทำให้มอเตอร์เกิดการสั่นสะเทือนหรือการสึกหรอที่ไม่จำเป็น
- (1.4) PMSM มีประสิทธิภาพสูงในการใช้งาน เพราะไม่ต้องการพลังงานในการสร้างสนามแม่เหล็กใน Rotor

(2) ข้อดีของ PMSM

- (2.1) ประสิทธิภาพสูง
- (2.2) ใช้พลังงานน้อยกว่า
- (2.3) ขนาดกะทัดรัดและแรงบิดสูง
- (2.4) ความแม่นยำในการควบคุมความเร็วและแรงบิด
- (2.5) เหมาะสำหรับการใช้งานในระบบที่ต้องการประสิทธิภาพสูง เช่น ในรถยนต์ไฟฟ้า, หุ่นยนต์, หรือการควบคุมระบบอัตโนมัติ

(3) ข้อเสียของ PMSM

- (3.1) ราคาแพงกว่าเนื่องจากใช้แม่เหล็กถาวร
- (3.2) การควบคุมอาจซับซ้อนเมื่อเทียบกับมอเตอร์ชนิดอื่น
- (3.3) ความเสี่ยงของการลดประสิทธิภาพจากการสูญเสียแม่เหล็กถาวร



รูป PMSM

แหล่งที่มา : <https://about-motors.com/motorcontrol/pmsm/>

### 1.6.12 ESC (Electronic Speed Controller)

ESC (Electronic Speed Controller) คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้า โดยการควบคุมนี้จะทำได้ผ่านการปรับการจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังมอเตอร์ ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว ESC จะใช้ในมอเตอร์ที่มีการควบคุมแบบ Brushless DC Motor (BLDC) หรือ Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) ในการปรับความเร็วหรือทิศทางการหมุน โดยมีข้อมูลที่นำเสนอเจดังนี้

#### (1) หลักการทำงานของ ESC

- (1.1) การควบคุมความเร็ว ด้วย ESC ควบคุมการให้หลังกระแสไฟฟ้าไปยังมอเตอร์ตามสัญญาณที่ได้รับจากผู้ควบคุม (เช่น คันเร่งหรือสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์) ซึ่งทำให้มอเตอร์หมุนได้เร็วขึ้นหรือลดความเร็วลงตามคำสั่ง
- (1.2) ESC สามารถเปลี่ยนทิศทางการหมุนของมอเตอร์ได้ โดยการปรับเปลี่ยนการสลับเฟสของมอเตอร์หรือการสลับการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังขดลวดของมอเตอร์ ซึ่งช่วยให้สามารถควบคุมการหมุนทั้งในทิศทางปกติและทิศทางย้อนกลับ
- (1.3) ESC ยังมีฟังก์ชันการป้องกันต่างๆ เช่น การป้องกันกระแสเกิน (Overcurrent Protection) หรือการป้องกันความร้อนเกิน (Overheating Protection) เพื่อป้องกันมอเตอร์และระบบไฟฟ้าจากความเสียหาย
- (1.4) ESC ใช้เทคนิค PWM ในการควบคุมการจ่ายพลังงานไปยังมอเตอร์ ซึ่งจะปรับระยะเวลาของการเปิด-ปิดสวิตช์ในแต่ละรอบ โดยที่ความกว้างของ Pulse จะสัมพันธ์กับความเร็วที่ต้องการควบคุม

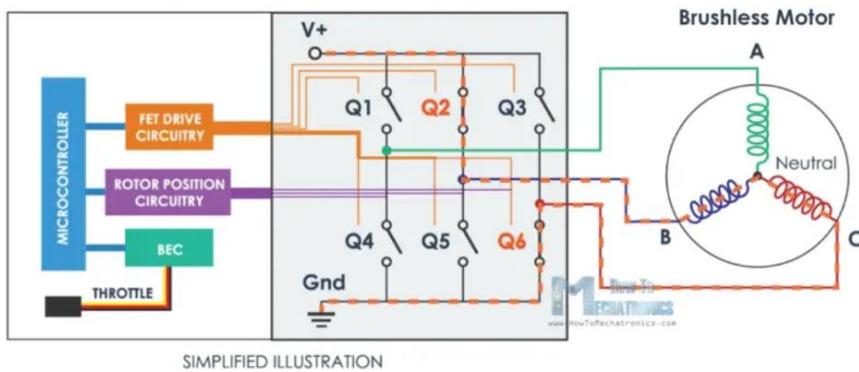
#### (2) ข้อดีของ PMSM

- (2.1) ควบคุมความเร็วได้อย่างแม่นยำ
- (2.2) มีฟังก์ชันการป้องกันต่างๆ ช่วยยืดอายุการใช้งานของมอเตอร์
- (2.3) ใช้เทคนิค PWM ที่ช่วยประหยัดพลังงานและลดความร้อน

#### (3) มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย

- (3.1) รถยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicles) ใช้ ESC เพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์ในระบบขับเคลื่อน
- (3.2) โดรนใช้ ESC เพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนใบพัด
- (3.3) เครื่องมือไฟฟ้า เช่น เครื่องเจียรหรือเครื่องปั่นที่ใช้มอเตอร์ BLDC จะมี ESC สำหรับการควบคุมความเร็ว
- (3.4) หุ่นยนต์ที่ใช้มอเตอร์ในการเคลื่อนไหว ESC ช่วยควบคุมความเร็วในการหมุนของมอเตอร์

## ELECTRONICS SPEED CONTROLLER



แหล่งที่มา : <https://howtomechatronics.com/how-it-works/how-brushless-motor-and-esc-work/>

### 1.6.13 Zero Crossing

Zero Crossing คือ จุดที่สัญญาณไฟฟ้าหรือแรงดัน (Voltage) ที่มีลักษณะเป็นคลื่นไอน์ (Sine Wave) ข้ามผ่านศูนย์ (Zero) หรือจุดที่มีค่าเป็นศูนย์ในช่วงการเปลี่ยนแปลงจากบวกไปลบหรือจากลบไปบวก ซึ่งหมายถึงจุดที่สัญญาณไฟฟ้าเปลี่ยนทิศทาง มีข้อมูลที่น่าสนใจดังนี้

#### (1) การใช้งานของ Zero Crossing

- (1.1) ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าหรือมอเตอร์ที่ใช้การควบคุมแบบ AC (Alternating Current) การตรวจจับ Zero Crossing จะใช้ในการจับจังหวะการสลับของสัญญาณไฟฟ้า เพื่อปรับการจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ในช่วงเวลาที่เหมาะสม ทำให้มอเตอร์หมุนได้อย่างราบรื่น และมีประสิทธิภาพสูง
- (1.2) ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าแบบ BLDC หรือ PMSM การตรวจจับ Zero Crossing สามารถใช้เพื่อควบคุมความเร็วหรือทิศทางการหมุนมอเตอร์ได้ โดยเฉพาะกรณีที่ต้องการให้มอเตอร์ทำงานได้ตรงตามจังหวะที่สัญญาณไฟฟ้าผ่านจุดศูนย์ ซึ่งจะช่วยให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดขณะทำงาน
- (1.3) ในการใช้งาน เช่น การปรับการจ่ายพลังงานให้กับ Load (เช่น หลอดไฟ) เทคนิค Zero Crossing จะถูกใช้เพื่อควบคุมการเปิด-ปิดสวิตช์ในเวลาที่สัญญาณไฟฟ้าอยู่ที่จุดศูนย์ ทำให้เกิดการทำงานที่ราบรื่นและลดการกระพริบหรือความผิดเพี้ยนของแสงการทำงาน
  - a. สัญญาณ AC ที่มีลักษณะคลื่นไอน์จะมีการเปลี่ยนแปลงจากบวกไปบวก แล้วในช่วงเวลาที่สัญญาณผ่านศูนย์ จะเรียกว่า “Zero Crossing” จุดนี้จะถูกตรวจจับเพื่อใช้ในกระบวนการควบคุมต่างๆ

b. การตรวจจับ Zero Crossing มักใช้ในวงจรที่มีการใช้งาน AC เพื่อให้สามารถสลับการจ่ายพลังงานในจังหวะที่เหมาะสม

(2) ข้อดีของการใช้ Zero Crossing

- (2.1) ช่วยให้การควบคุมการจ่ายพลังงานมีความแม่นยำ
- (2.2) ลดการเกิดความผิดเพี้ยนในระบบที่ใช้งาน
- (2.3) เพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของระบบไฟฟ้า

(3) Zero Crossing มักใช้ในหลายแอปพลิเคชันที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมระบบไฟฟ้า เช่น การควบคุมมอเตอร์, การปรับความเร็ว, หรือการควบคุมแสงในระบบ AC

## 1.7 วิธีการดำเนินการทดลอง

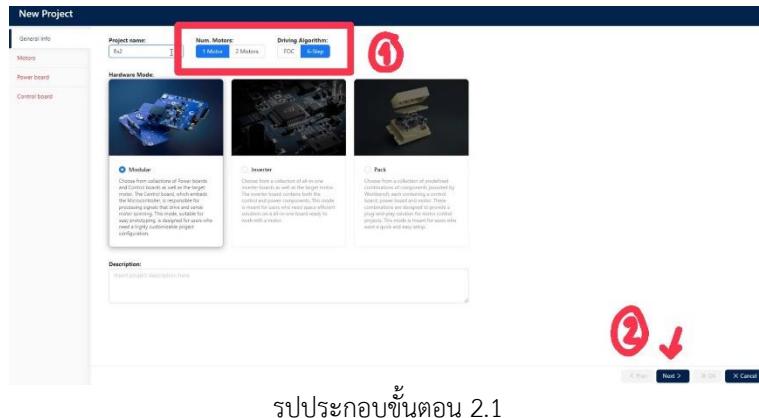
หัวข้อวิธีการดำเนินการทดลอง จะกล่าวถึงขั้นตอนและวิธีการที่ใช้ในการดำเนินการทดลอง เพื่อทดสอบและตรวจสอบสมมติฐานที่ได้ โดยอธิบายถึงเครื่องมือ อุปกรณ์ รวมถึงวิธีการทดลอง การควบคุมความเร็วของ BLDC Motor ด้วย PWM จากค่าตำแหน่ง BEMF

### 1.7.1 วัสดุอุปกรณ์

- (1) BLDC Motor
- (2) STMICROELECTRONICS X-NUCLEO-IHM08M1
- (3) Nucleo STM32G474RE

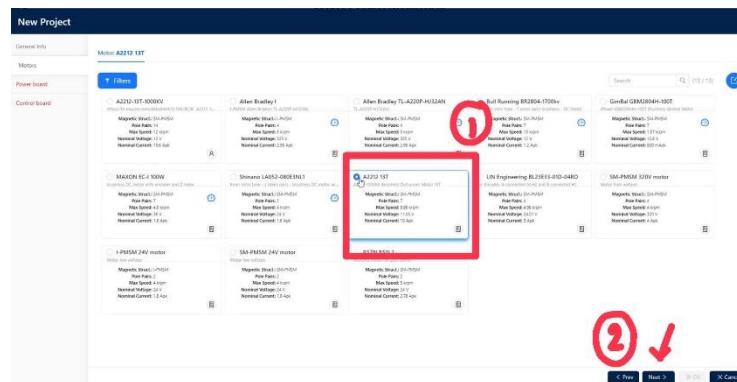
### 1.7.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน การทดลองที่ 1

- (1) ทำการเชื่อมต่อบอร์ดต่างๆหากัน จากนั้นให้ต่อไฟเลี้ยงด้วย Adapter ขนาด 12 V
- (2) เชื่อมต่อบอร์ดทดลองเข้ากับคอมพิวเตอร์ จากนั้นให้ทำการตั้งค่าต่างๆในโปรแกรม Motor Control Workbench ดังนี้
  - (2.1) กด New Project ,เลือกจำนวนมอเตอร์ และ Driving Algorithm เป็น 1 Motor และ 6-Step ตามลำดับ และกด Next เพื่อไปต่อ



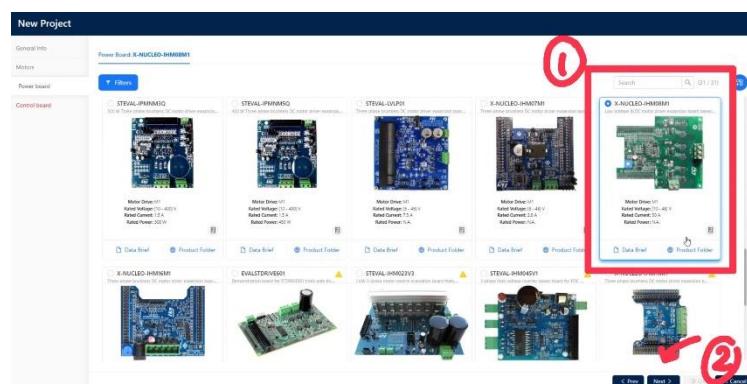
รูปประกอบขั้นตอน 2.1

### (2.2) เลือก A2212 13T และกด Next



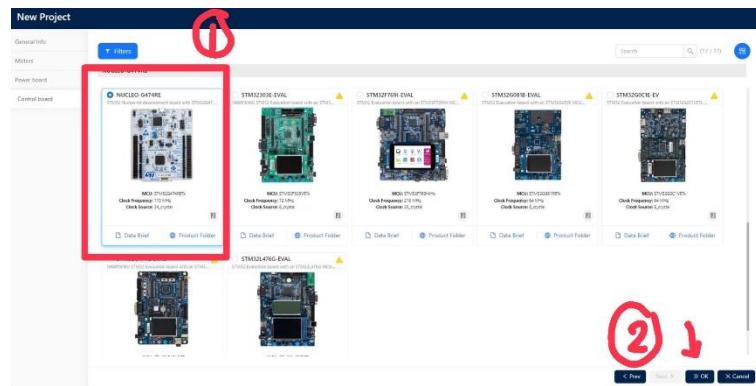
รูปประกอบขั้นตอน 2.2

### (2.3) เลือกบอร์ด X-NUCLEO-IHM08M1 และกด Next



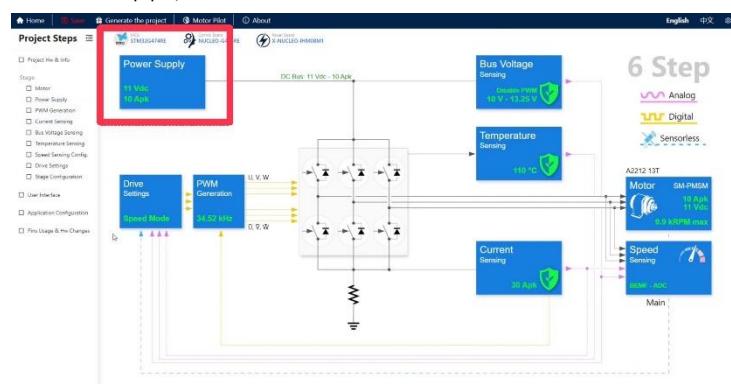
รูปประกอบขั้นตอน 2.3

### (2.4) เลือกบอร์ด NUCLEO-G474RE และกด Ok



รูปประกอบขั้นตอน 2.4

- (2.5) โปรแกรม Motor Control Workbench จะแสดงหน้าหลักหลังจากตั้งค่าเสร็จแล้ว, คลิก Power Supply

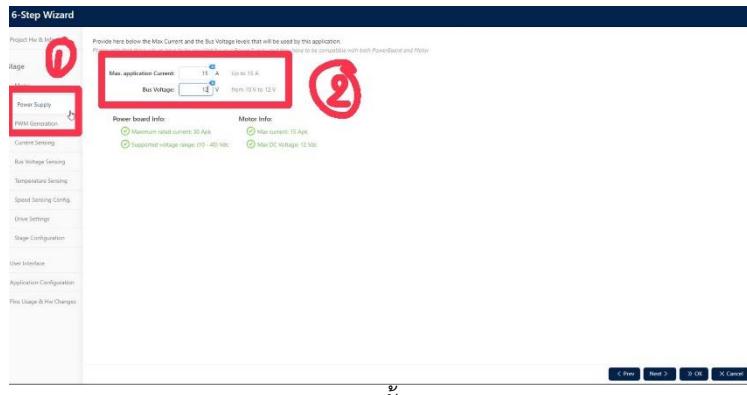


รูปประกอบขั้นตอน 2.5

- (2.6) เลือกหัวข้อ Motor, ในช่อง Electrical parameters ตั้งค่า Max current ที่ 15 Apk และ Max DC Voltage ที่ 12 V

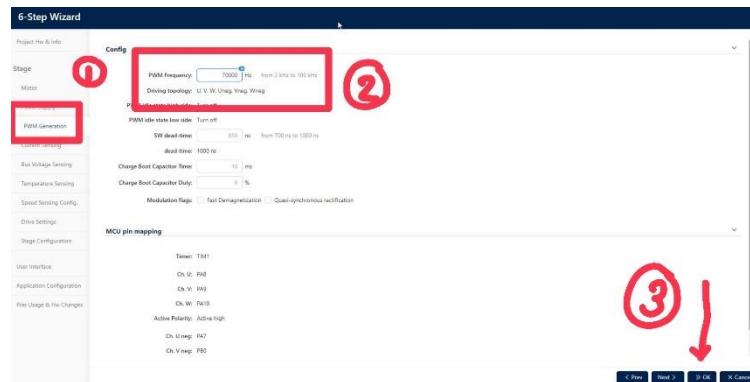
รูปประกอบขั้นตอน 2.6

- (2.7) เลือกหัวข้อ Power Supply, ตั้งค่า Max. application Current ที่ 15 A และ Bus Voltage ที่ 12 V



รูปประกอบขั้นตอน 2.7

- (2.8) เลือกหัวข้อ PWM Generation, ในช่อง Config ตั้งค่า PWM Frequency ที่ 70000 Hz แล้วกด Ok



รูปประกอบขั้นตอน 2.8

จากนั้น Generate ข้อมูลลง Nucleo STM32G474RE

- (3) เปิดโปรแกรม Motor Pilot และทำการทดลอง โดยการสั่งให้มอเตอร์หมุน ณ ความเร็วต่างๆ พร้อม กับนำ Oscilloscope มาวัดสัญญาณแรงดันที่จ่ายให้กับ BLDC Motor เพื่อทำการหาความเร็ว และ นำมาเทียบกับค่าที่ได้ได้ใน Motor Pilot เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง

## 1.8 ผลการทดลอง

จากการตั้งสมมติฐานนี้ สามารถเรียบเรียงผลการทดลองออกมาได้ทั้งสิ้น 4 การทดลอง ดังนี้

### 1.8.1 ผลการทดลองที่ 1

(1) มอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกา 9000 RPM



รูปแสดงสัญญาณที่จับได้เมื่อกำหนดให้มอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกา 9000 RPM ครั้งที่ 1

ความถี่ที่วัดได้ ( $\frac{1}{\Delta X}$ ) มีค่า 990.1 Hz เมื่อคาบของสัญญาณ ( $\Delta X$ ) คือ 1.010 ms



รูปแสดงสัญญาณที่จับได้เมื่อกำหนดให้มอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกา 9000 RPM ครั้งที่ 2

ความถี่ที่วัดได้ ( $\frac{1}{\Delta X}$ ) มีค่า 1000 Hz เมื่อคาบของสัญญาณ ( $\Delta X$ ) คือ 1.000 ms



รูปแสดงสัญญาณที่จับได้เมื่อกำหนดให้มอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกา 9000 RPM ครั้งที่ 3

ความถี่ที่วัดได้  $\left(\frac{1}{\Delta X}\right)$  มีค่า 990.1 Hz เมื่อค่าของสัญญาณ ( $\Delta X$ ) คือ 1.010 ms

ซึ่งสามารถสรุปความถี่เฉลี่ยที่วัดค่าได้ดังนี้

$$\text{ความถี่เฉลี่ย} = \frac{\text{ความถี่ทั้งหมดที่เก็บค่าได้}}{\text{จำนวนความถี่ที่เก็บค่าได้}}$$

ดังนั้นความถี่เฉลี่ยที่วัดค่าได้เมื่อกำหนดให้มอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกา 9000 RPM คือ 993.4 Hz

(2) มอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกา 6000 RPM



รูปแสดงสัญญาณที่จับได้เมื่อกำหนดให้มอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกา 6000 RPM ครั้งที่ 1

ความถี่ที่วัดได้ ( $\frac{1}{\Delta X}$ ) มีค่า 704.2 Hz เมื่อค่าของสัญญาณ ( $\Delta X$ ) คือ 1.420 ms



รูปแสดงสัญญาณที่จับได้เมื่อกำหนดให้มอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกา 6000 RPM ครั้งที่ 2

ความถี่ที่วัดได้ ( $\frac{1}{\Delta X}$ ) มีค่า 704.2 Hz เมื่อค่าของสัญญาณ ( $\Delta X$ ) คือ 1.420 ms



รูปแสดงสัญญาณที่จับได้เมื่อกำหนดให้มอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกา 6000 RPM ครั้งที่ 3

ความถี่ที่วัดได้  $\left(\frac{1}{\Delta X}\right)$  มีค่า 746.3 Hz เมื่อค่าของสัญญาณ ( $\Delta X$ ) คือ 1.340 ms

ซึ่งสามารถสรุปความถี่เฉลี่ยที่วัดค่าได้ดังนี้

$$\text{ความถี่เฉลี่ย} = \frac{\text{ความถี่ทั้งหมดที่เก็บค่าได้}}{\text{จำนวนความถี่ที่เก็บค่าได้}}$$

ดังนั้นความถี่เฉลี่ยที่วัดค่าได้เมื่อกำหนดให้มอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกา 6000 RPM คือ 718.23 Hz

(3) นาโตร์ทมนุ่มตามเข็มนาฬิกา 3000 RPM



รูปแสดงสัญญาณที่จับได้เมื่อกำหนดให้มอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกา 3000 RPM ครั้งที่ 1

ความถี่ที่วัดได้ ( $\frac{1}{\Delta X}$ ) มีค่า 342.5 Hz เมื่อค่าของสัญญาณ ( $\Delta X$ ) คือ 2.920 ms



รูปแสดงสัญญาณที่จับได้เมื่อกำหนดให้มอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกา 3000 RPM ครั้งที่ 2

ความถี่ที่วัดได้ ( $\frac{1}{\Delta X}$ ) มีค่า 347.2 Hz เมื่อค่าของสัญญาณ ( $\Delta X$ ) คือ 2.880 ms



รูปแสดงสัญญาณที่จับได้เมื่อกำหนดให้มอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกา 3000 RPM ครั้งที่ 3

ความถี่ที่วัดได้  $\left(\frac{1}{\Delta X}\right)$  มีค่า 352.1 Hz เมื่อค่าของสัญญาณ ( $\Delta X$ ) คือ 2.840 ms

ซึ่งสามารถสรุปความถี่เฉลี่ยที่วัดค่าได้ดังนี้

$$\text{ความถี่เฉลี่ย} = \frac{\text{ความถี่ทั้งหมดที่เก็บค่าได้}}{\text{จำนวนความถี่ที่เก็บค่าได้}}$$

ดังนั้นความถี่เฉลี่ยที่วัดค่าได้เมื่อกำหนดให้มอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกา 3000 RPM คือ 347.27 Hz

(4) นาโนเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกา 3000 RPM



รูปแสดงสัญญาณที่จับได้เมื่อกำหนดให้มอเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกา 3000 RPM ครั้งที่ 1

ความถี่ที่วัดได้ ( $\frac{1}{\Delta X}$ ) มีค่า 349.7 Hz เมื่อค่าของสัญญาณ ( $\Delta X$ ) คือ 2.860 ms



รูปแสดงสัญญาณที่จับได้เมื่อกำหนดให้มอเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกา 3000 RPM ครั้งที่ 2

ความถี่ที่วัดได้ ( $\frac{1}{\Delta X}$ ) มีค่า 357.1 Hz เมื่อค่าของสัญญาณ ( $\Delta X$ ) คือ 2.800 ms



รูปแสดงสัญญาณที่จับได้เมื่อกำหนดให้มอเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกา 3000 RPM ครั้งที่ 3

ความถี่ที่วัดได้  $\left(\frac{1}{\Delta X}\right)$  มีค่า 347.2 Hz เมื่อค่าของสัญญาณ ( $\Delta X$ ) คือ 2.880 ms

ซึ่งสามารถสรุปความถี่เฉลี่ยที่วัดค่าได้ดังนี้

$$\text{ความถี่เฉลี่ย} = \frac{\text{ความถี่ทั้งหมดที่เก็บค่าได้}}{\text{จำนวนความถี่ที่เก็บค่าได้}}$$

ดังนั้นความถี่เฉลี่ยที่วัดค่าได้เมื่อกำหนดให้มอเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกา 3000 RPM คือ 351.33 Hz

(5) นาโนเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกา 6000 RPM



รูปแสดงสัญญาณที่จับได้เมื่อกำหนดให้มอเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกา 6000 RPM ครั้งที่ 1

ความถี่ที่วัดได้ ( $\frac{1}{\Delta X}$ ) มีค่า 632.9 Hz เมื่อค่าของสัญญาณ ( $\Delta X$ ) คือ 1.580 ms



รูปแสดงสัญญาณที่จับได้เมื่อกำหนดให้มอเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกา 6000 RPM ครั้งที่ 2

ความถี่ที่วัดได้ ( $\frac{1}{\Delta X}$ ) มีค่า 666.7 Hz เมื่อค่าของสัญญาณ ( $\Delta X$ ) คือ 1.500 ms



รูปแสดงสัญญาณที่จับได้เมื่อกำหนดให้มอเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกา 6000 RPM ครั้งที่ 3

ความถี่ที่วัดได้  $\left(\frac{1}{\Delta X}\right)$  มีค่า 625.0 Hz เมื่อค่าของสัญญาณ ( $\Delta X$ ) คือ 1.600 ms

ซึ่งสามารถสรุปความถี่เฉลี่ยที่วัดค่าได้ดังนี้

$$\text{ความถี่เฉลี่ย} = \frac{\text{ความถี่ทั้งหมดที่เก็บค่าได้}}{\text{จำนวนความถี่ที่เก็บค่าได้}}$$

ดังนั้นความถี่เฉลี่ยที่วัดค่าได้เมื่อกำหนดให้มอเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกา 6000 RPM คือ 641.53 Hz

(6) นาโนเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกา 9000 RPM



รูปแสดงสัญญาณที่จับได้เมื่อกำหนดให้มอเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกา 9000 RPM ครั้งที่ 1

ความถี่ที่วัดได้ ( $\frac{1}{\Delta X}$ ) มีค่า 990.1 Hz เมื่อคาบของสัญญาณ ( $\Delta X$ ) คือ 1.010 ms



รูปแสดงสัญญาณที่จับได้เมื่อกำหนดให้มอเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกา 9000 RPM ครั้งที่ 2

ความถี่ที่วัดได้ ( $\frac{1}{\Delta X}$ ) มีค่า 1020 Hz เมื่อคาบของสัญญาณ ( $\Delta X$ ) คือ 0.980 ms



รูปแสดงสัญญาณที่จับได้เมื่อกำหนดให้มอเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกา 9000 RPM ครั้งที่ 3

ความถี่ที่วัดได้  $\left(\frac{1}{\Delta X}\right)$  มีค่า 990.1 Hz เมื่อค่าของสัญญาณ ( $\Delta X$ ) คือ 1.010 ms

ซึ่งสามารถสรุปความถี่เฉลี่ยที่วัดค่าได้ดังนี้

$$\text{ความถี่เฉลี่ย} = \frac{\text{ความถี่ทั้งหมดที่เก็บค่าได้}}{\text{จำนวนความถี่ที่เก็บค่าได้}}$$

ดังนั้นความถี่เฉลี่ยที่วัดค่าได้เมื่อกำหนดให้มอเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกา 9000 RPM คือ 1000 Hz

จากผลการทดลองทำให้พบว่า

เมื่อ BLDC Motor หมุนที่ความเร็ว 9000 RPM สัญญาณจะมีความถี่อยู่ที่ประมาณ 995.4 Hz

เมื่อ BLDC Motor หมุนที่ความเร็ว 6000 RPM สัญญาณจะมีความถี่อยู่ที่ประมาณ 679.88 Hz

และเมื่อ BLDC Motor หมุนที่ความเร็ว 3000 RPM สัญญาณจะมีความถี่อยู่ที่ประมาณ 349.3 Hz

โดยการเฉลี่ยค่าความถี่ที่ได้จากการทดลองในแต่ละความเร็ว (RPM) จะทำให้ได้ความถี่เฉลี่ยโดยรวมจากทั้งสองทิศทาง

### 1.8.2 ผลการทดลองที่ 2

จากการควบคุม BLDC Motor ให้หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ทำให้สามารถจับข้อสังเกตได้ดังนี้

เมื่อมอเตอร์หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (CW), สัญญาณจากมอเตอร์ที่แสดงด้วยเส้นที่หนึ่ง (สัญญาณสีเหลือง) จะจ่ายแรงดันก่อนเส้นที่สอง (สัญญาณสีฟ้า) และเส้นที่สาม (สัญญาณสีม่วง) ตามลำดับ

เมื่อมอเตอร์หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา (CCW), สัญญาณจากมอเตอร์ที่แสดงด้วยเส้นที่สาม (สัญญาณสีม่วง) จะจ่ายแรงดันก่อนเส้นที่สอง (สัญญาณสีฟ้า) และเส้นที่หนึ่ง (สัญญาณสีเหลือง) ตามลำดับ



รูปแสดงสัญญาณที่จับได้เมื่อกำหนดให้มอเตอร์หมุน 6000 RPM ในทิศตามเข็มนาฬิกาและทิศทวนเข็มนาฬิกา ตามลำดับ

### 1.8.3 ผลการทดลองที่ 3

นอกจากนี้ การทดลองต้องทำการนำความถี่ของสัญญาณที่วัดได้้นั้นมาทำการหาความเร็วซึ่งสามารถหาได้จากการสมการดังต่อไปนี้

$$RPM = \frac{\text{Electrical Frequency} \times 60}{\text{Pole Pairs}}$$

เมื่อ **RPM** คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ในหน่วยรอบต่อนาที (RPM)

**Electrical Frequency** คือ ความถี่ไฟฟ้าที่เก็บค่าได้ (Hz) และ

**Pole Pairs** คือ จำนวนคู่ขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์

จากหลักการควบคุมมอเตอร์ BLDC จะเห็นว่า ในหนึ่งรอบของสัญญาณการควบคุมจะทำให้มอเตอร์หมุนได้เพียงแค่ระยะหนึ่งคู่ขั้วแม่เหล็ก (Pole Pairs) เท่านั้น

ดังนั้น เพื่อคำนวณว่ามอเตอร์สามารถหมุนได้กี่รอบในหนึ่งวินาที จำเป็นต้องใช้ Pole Pairs ซึ่ง Pole Pairs ไม่เพียงแค่บวกจำนวนคู่แม่เหล็กในมอเตอร์ BLDC เท่านั้น แต่ยังบวกถึงจำนวนค่าบที่มอเตอร์หมุนครบ 1 รอบ หลังจากได้ค่าในหน่วยวินาทีแล้ว จึงแปลงเป็นหน่วยนาทีโดยการคูณด้วย 60

Ideal RPM (RPM)	Electrical Frequency (Hz)	Calculated RPM (RPM)
9000 CW	993.40	8514.86
6000 CW	718.23	6156.26
3000 CW	347.27	2976.60
3000 CCW	351.33	3011.40
6000 CCW	641.53	5498.83
9000 CCW	1000.00	8571.42

ตารางแสดงค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่กำหนดเทียบกับความเร็วรอบของมอเตอร์ที่หาค่าได้

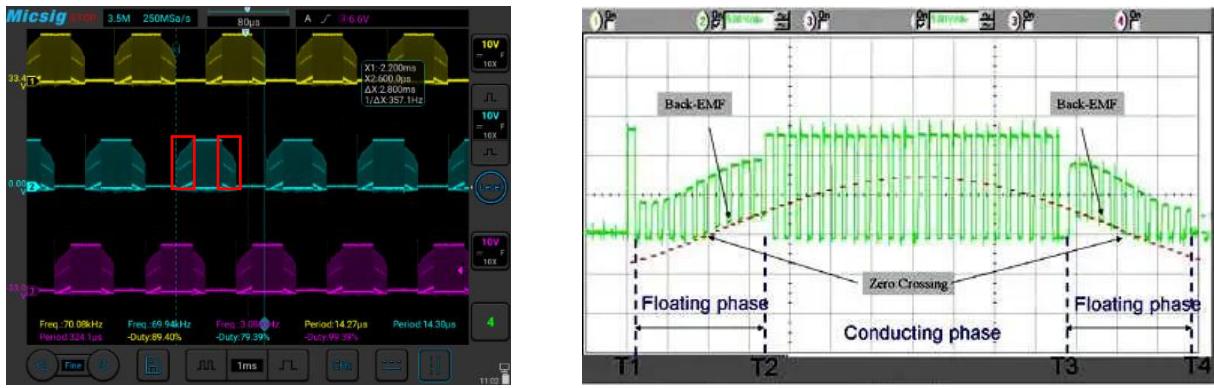
โดยที่ CW (Clockwise) แทน หมุนตามเข็มนาฬิกา และ

CCW (Counterclockwise) แทน หมุนวนเข็มนาฬิกา

จากตารางสรุปผลทำให้เราทราบว่าการทำงานของ BLDC Motor นั้นควบคุมความเร็วด้วยความถี่ของสัญญาณ ยิ่งความถี่ของสัญญาณสูงยิ่งทำให้ BLDC Motor หมุนเร็ว และสามารถทำความเร็วขึ้นกลับได้จากสูตรที่ได้กล่าวไปข้างต้น

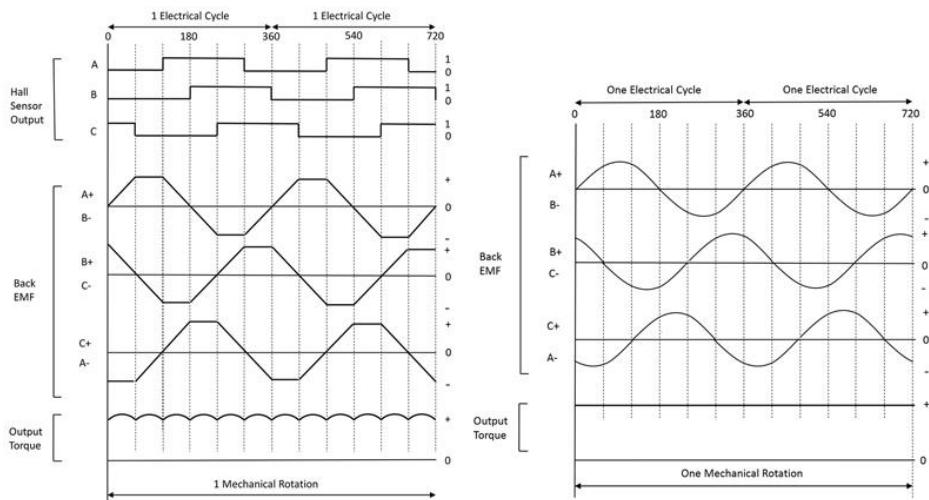
#### 1.8.4 ผลการทดลองที่ 4

จากการผลการทดลองที่ 3 และการควบคุมความเร็วด้วย Motor Pilot ที่เป็นการควบคุมแบบ PID จึงทำให้ค่าความเร็วที่ถูกควบคุมไม่เท่ากับค่าความเร็วรอบที่เป็นอุดมคติ อีกทั้งการวัดความเร็วเพื่อเป็นค่าป้อนกลับในระบบของ PID นั้นได้จากการวัด BEMF ซึ่งมีความแม่นยำน้อยกว่าการใช้ Encoder หรือ Hall effect sensor อย่างแน่นอน รวมถึงการวัดในแต่ละครั้งนั้นอาจจะมี Human-error ทำให้ค่าที่ทำการเก็บผลได้นั้นมีการคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่เป็นอุดมคติ



รูปแสดงสัญญาณที่จับได้เทียบกับสัญญาณในอุดมคติ

จากการวิธีการควบคุมแบบ PWM นั้น ไม่ควรจะมีลักษณะสัญญาณเป็นรูป Trapezoid หรือมีสัญญาณไฟฟ้าในช่วงกรอบสีแดง ทางคณะผู้จัดทำจึงได้ทำการหาข้อมูลเพิ่มเติมจึงได้พบร่วมในช่วงกรอบสีแดง หมายถึงช่วงที่เกิด BEMF ขึ้น ซึ่งก็คือแรงดันป้อนกลับที่เกิดจากการหมุนของมอเตอร์ ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อเกิดเมื่อเกิดการหมุนของมอเตอร์และแหล่ง Stator นั้นๆ ของมอเตอร์ไม่ได้รับการจ่ายแรงดันไฟฟ้า



รูปเปรียบเทียบสัญญาณขาออกเมื่อควบคุมมอเตอร์ด้วยวิธีการ PWM และวิธี FOC

การควบคุมมอเตอร์ BLDC ด้วยวิธีการ PWM ส่งผลให้ค่าแรงบิด (Torque) ที่ได้ไม่คงที่ เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่มอเตอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน ไม่มีการไล่ระดับแรงดันอย่างต่อเนื่อง ซึ่งทำให้เกิดแรงบิดที่ไม่สม่ำเสมอในระหว่างการทำงาน แตกต่างจากการควบคุมแบบ FOC (Field-Oriented Control) ที่สามารถควบคุมแรงบิดได้อย่างแม่นยำและสม่ำเสมอกว่า

นอกจากนี้ การตอบสนองต่อตำแหน่งของมอเตอร์ในระบบ FOC มีความแม่นยำมากกว่า เนื่องจากวิธีการนี้ต้องอาศัยเซ็นเซอร์สำหรับตรวจสอบตำแหน่งของ Rotor ซึ่งช่วยให้สามารถควบคุมการจ่ายกระแสและแรงดันได้อย่างเหมาะสมในทุกช่วงเวลา จึงทำให้การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ด้วย FOC มีความแม่นยำสูง และตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับการควบคุมด้วย PWM

## 1.9 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

### 1.9.1 สรุปผล

จากการทดลองพบว่าการควบคุม BLDC motor ด้วยวิธี PWM สามารถทำได้ แต่การควบคุมความเร็วนั้นจะไม่เสถียรเท่าการควบคุมแบบ FOC

### 1.9.2 อภิปรายผล

จากการทำการทดลองควบคุมความเร็วของ BLDC motor ด้วยวิธีการ PWM ผ่านโปรแกรม Motor Pilot พบว่า และตรวจสอบความเร็วด้วยการวัดสัญญาณควบคุมด้วย Oscilloscope พบว่า ความถี่ของสัญญาณที่ใช้ควบคุม BLDC Motor นั้นแปรผันตรงกับค่าความเร็วของ BLDC Motor อย่างชัดเจน และหลังจากการคำนวณความเร็วจากความถี่ของสัญญาณความคุณภาพว่า ค่ามีความคลาดเคลื่อนจากอุดมคติอันเกิดจาก 3 ปัจจัยด้วยกัน ปัจจัยแรกคือการควบคุมความเร็ว BLDC Motor นั้นถูกควบคุมด้วย PID ทำให้ค่าความเร็วที่เกิดขึ้นจริงไม่คงที่ ปัจจัยที่สองคือการวัดความเร็วที่ถูกนำไปใช้เป็นค่าความเร็วป้อนกลับของการควบคุมนั้นถูกวัดด้วย BEMF ซึ่งไม่ได้มีความแม่นยำเท่ากับการใช้ Hall effect sensor หรือ การใช้ Encoder ซึ่งจะส่งผลต่อการควบคุมความเร็ว เช่นกัน ปัจจัยที่สามคือ Human Error จากการใช้เครื่องมือวัด เนื่องจากการเลื่อนจุดวัดภายใน Oscilloscope นั้นถูกเลื่อนด้วยมือจึงอาจเกิดของผิดพลาดจากการวัดได้ นอกจากนั้นได้ทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการใช้วิธีควบคุมแบบ FOC ซึ่งพบว่าผลลัพธ์จากการควบคุมแบบ FOC นั้น สร้างแรงบิดได้สูงกว่ารวมถึงสามารถที่จะควบคุมตำแหน่งได้อย่างแม่นยำกว่า

### 1.9.3 ข้อเสนอแนะ

การเพิ่มขีดความสามารถของบอร์ดทดลองให้สามารถควบคุมการทำงานของ BLDC Motor แบบ FOC ได้จะทำให้สามารถเห็นภาพของการควบคุมรวมถึงผลลัพธ์ได้ดีกว่า

## 1.10 เอกสารอ้างอิง

<https://www.electronics-tutorials.ws/>

<https://www.tescaglobal.com/solutions/motor-control/>

<https://www.electronics-tutorials.ws/accircuits/zero-crossing-detector.html>

<https://www.microchip.com/design-centers/motor-control>

[https://fab.cba.mit.edu/classes/865.21/topics/power\\_electronics/commutation/](https://fab.cba.mit.edu/classes/865.21/topics/power_electronics/commutation/)

<https://www.digikey.pl/pl/articles/how-to-power-and-control-brushless-dc-motors>

<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/sensorless-brushless-dc-blcd-motor-control/>

<https://enmotor.com/what-is-the-difference-between-ipm-and-spm-motor/>

[https://www.researchgate.net/figure/SIX-STEP-COMMUTATION\\_fig1\\_320621981](https://www.researchgate.net/figure/SIX-STEP-COMMUTATION_fig1_320621981)

## บทที่ 2 Brushed DC Motor

โดยบทนี้เป็นการทดลองของทั้งสองกลุ่ม ได้แก่ กลุ่ม A08 และกลุ่ม A01 มีการทดลองทั้งหมด 4 การทดลอง ได้แก่ การทดลองเพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของ Brushed DC Motor, การทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของ Brushed DC Motor, การทดลองเพื่อศึกษาหลักการทำงาน H-Bridge Drive Mode และการควบคุม DC Motor และ การทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับค่า Torque Setpoint ของ Dynamic Torque Motor

### 2.1 วัตถุประสงค์

- 2.1.1 เพื่อศึกษาหลักการทำงานของ DC Motor และความสามารถของ Motor-Torque Constant ของ DC motor
- 2.1.2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของ Speed, Torque, Current, Power, %Efficiency เมื่อ Dynamic Load ที่กระทำต่อ DC Motor ผ่านการปรับ Torque ของ Dynamic Load เป็นไป และแรงดันไฟฟ้า Input จากการปรับกระแสไฟฟ้าของ DC Motor ณ Dynamic Load ที่ต่างกัน
- 2.1.3 เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ (Motor Characteristics) ที่ได้จากการใช้มอเตอร์แบบแรงบิดไดนามิก (Dynamic Torque Motor) ในการสร้างโหลดที่แตกต่างกัน
- 2.1.4 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความเร็วของ DC Motor
- 2.1.5 เพื่อศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ผ่านความสัมพันธ์ของ Speed, Torque, Power, %Efficiency และ Current ทั้งในเงื่อนไขแบบ No Load และ Full Load
- 2.1.6 เพื่อศึกษาหลักการทำงาน H-Bridge Drive Mode และการควบคุม DC Motor
- 2.1.7 เพื่อศึกษาระบวนการ Signal Conditioning และ Signal Processing
- 2.1.8 เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้ MATLAB และ Simulink ในการสั่งการหรือรับค่าร่วมกับบอร์ด Nucleo STM32G474RE โดยใช้สัญญาณจาก Incremental Encoder, Hall Current Sensor เป็น Input และแสดงสัญญาณ Output จากการ Log สัญญาณ และแสดงผลเป็นกราฟจาก Data Inspector ใน MATLAB Simulink และแสดงให้เห็นว่าสัญญาณ Output ประผันตามสัญญาณ Input แบบ Real Time โดยมี Output เป็นความเร็วเชิงมุมและกระแสไฟฟ้า ในหน่วย SI derived อุปกรณ์การทดลอง

## 2.2 สมมติฐาน

- 2.2.1 ลักษณะเฉพาะของมอเตอร์นั้น สามารถหาได้จากการใช้ค่าคงตัวดังต่อไปนี้  $\omega_{NL}, i_{ST}, v_{in}, \tau_{ST}, i_{NL}$
- 2.2.2 การใช้หลักการทำงาน H-Bridge Drive และการควบคุมมอเตอร์ DC ที่มีการเปลี่ยนแปลง จะทำให้กระแสไฟฟ้าและความเร็วของมอเตอร์เกิดการเปลี่ยนแปลง
- 2.2.3 เมื่อแรงบิดของ Dynamic Torque Motor เปลี่ยนแปลง จะทำให้กระแสไฟฟ้าและแรงบิดของ Brushed DC Motor เปลี่ยนแปลงไป

## 2.3 ตัวแปรที่ศึกษา

การทดลองที่ 1 และการทดลองที่ 2 :

- ตัวแปรต้น : ขนาดของโหลด (Load)
- ตัวแปรตาม : ลักษณะเฉพาะของมอเตอร์
- ตัวแปรควบคุม : ทิศทางและแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์

การทดลองที่ 3 :

- ตัวแปรต้น : แรงบิดของ Dynamic Torque Motor
- ตัวแปรตาม : กระแสไฟฟ้าและแรงบิดของ Brushed DC Motor
- ตัวแปรควบคุม : ทิศทางและแรงดันไฟฟ้าของ Brushed DC Motor

การทดลองที่ 4 :

- ตัวแปรต้น : หลักการทำงาน H-Bridge Drive Mode และการควบคุม DC Motor
- ตัวแปรตาม : กระแสไฟฟ้าและความเร็วของมอเตอร์
- ตัวแปรควบคุม : ขนาดของ Load

## 2.4 นิยามศัพท์เฉพาะ

### 2.4.1 Motor-Torque Constant

ค่าความต้านทานในมอเตอร์ หรือเขียนแทนด้วย  $K_m$  มักใช้กับการคำนวณเพื่อหาค่าต่างๆ ในมอเตอร์

### 2.4.2 % Efficiency

ตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ จากการการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลสำหรับขับเคลื่อนโหลด มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 100 เปอร์เซนต์

#### 2.4.3 Dynamic Load

โหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงหรือแปรผันตลอดเวลา

#### 2.4.4 Stall Torque

แรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์สามารถสร้างได้เมื่อเพลาของมอเตอร์หยุดนิ่ง ( $\omega = 0$ )

#### 2.4.5 No-load Torque

แรงบิดต่ำสุดที่มอเตอร์ต้องใช้เพื่อหมุนเพลาของตัวเองในสภาพไม่มีโหลด

#### 2.4.6 Duty Cycle

Duty Cycle แสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยคำนวณจากอัตราส่วนของเวลาที่มอเตอร์ทำงาน (On Time) ต่อเวลาทั้งหมด (On Time + Off Time) ในหนึ่งรอบ

#### 2.4.7 Rotor

ชิ้นส่วนมอเตอร์ที่หมุน

### 2.5 นิยามเชิงปฏิบัติการ

#### 2.5.1 DC Motor คือ Brush DC Motor

#### 2.5.2 Dynamic Load เกิดจากแรงบิดของ Dynamic Torque Motor

### 2.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.6.1 ลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ (Motor Characteristics)

Brushed DC Motor มีลักษณะเฉพาะที่หลากหลาย แต่มีลักษณะเฉพาะที่สำคัญดังนี้

##### (1) Torque-Speed Characteristic (แรงบิด-ความเร็ว)

เมื่อ Load เพิ่มขึ้น (แรงบิดสูงขึ้น) ความเร็วรอบของมอเตอร์จะลดลง กราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงลดลงจากซ้ายไปขวา (Negative Slope)

จากกฎแรงดันของเคิร์ชhoff's Voltage Law หรือ KVL และ กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน-ออยเลอร์ (Newton-Euler's Law) จะได้สมการดังนี้

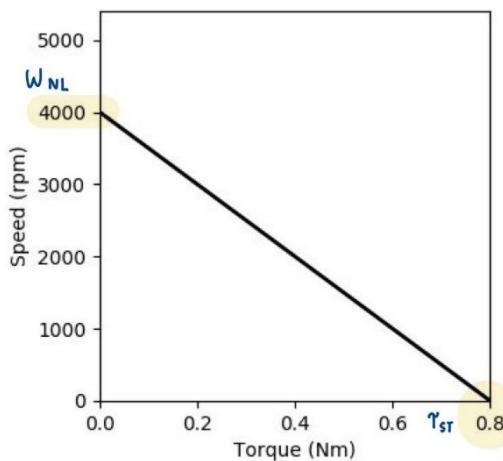
(1.1) เมื่อค่า Torque สูงสุด (ความเร็วเชิงมุมมีค่าเท่ากับศูนย์ หรือ Stall Torque Condition)

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

(1.2) เมื่อค่า Torque ต่ำสุด (ไม่มี Load หรือ No-Load Condition)

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

เมื่อ $\omega_{NL}$	คือ ความเร็วเฉิงมุขขณะไม่มีโหลด หรือความเร็วสูงสุดของมอเตอร์ (radian/s),
$K_m$	คือ ค่าคงที่ของมอเตอร์ที่สัมพันธ์กับแรงบิด ( $N \cdot m/A$ ),
$v_{in}$	คือ แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (V),
$B$	คือ ค่าความหนืดหรือแรงต้านการหมุน ( $N \cdot m \cdot s/radian$ ),
$R$	คือ ความต้านทานของชุดลวดในมอเตอร์ ( $\Omega$ ),
$K_b$	คือ ค่าคงที่ของ Back EMF ( $V \cdot s/radian$ ) และ
$\tau_{ST}$	คือ แรงบิดสูงสุด ( $N \cdot m$ )



รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Torque และ Speed

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

## (2) Torque-Current Characteristic (แรงบิด-กระแสไฟฟ้า)

เมื่อ Load เพิ่มขึ้น (แรงบิดสูงขึ้น) กระแสไฟฟ้าภายในมอเตอร์จะเพิ่มขึ้น กราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงเพิ่มขึ้นจากซ้ายไปขวา

จากกฎแรงดันของเคิร์ชhoff's Voltage Law หรือ KVL และ กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน-ออยเลอร์ (Newton-Euler's Law) จะได้สมการดังนี้

- (2.1) เมื่อค่า Torque สูงสุด (ความเร็วคงที่ 0 หรือ Stall Condition)

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

- (2.2) เมื่อค่า Torque ต่ำสุด (ไม่มี Load หรือ No-Load Condition)

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

เมื่อ  $i_{NL}$  คือ กระแสไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด หรือความเร็วสูงสุดของมอเตอร์ (A),

$K_m$  คือ ค่าคงที่ของมอเตอร์ที่สัมพันธ์กับแรงบิด ( $N \cdot m/A$ ),

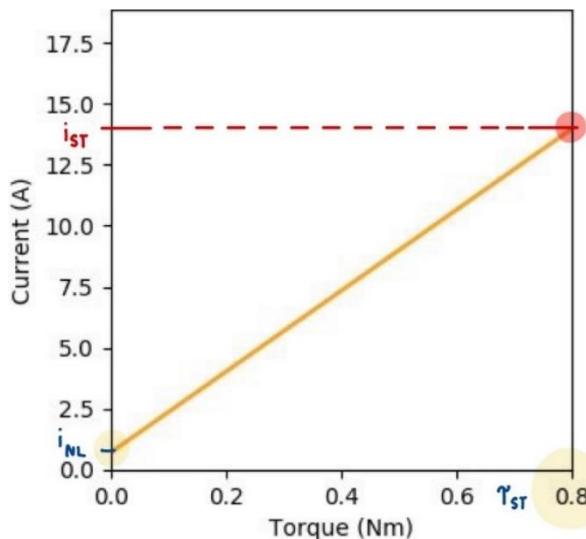
$v_{in}$  คือ แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (V),

$B$  คือ ค่าความหนืดหรือแรงต้านการหมุน ( $N \cdot m \cdot s/radian$ ),

$R$  คือ ความต้านทานของขดลวดในมอเตอร์ ( $\Omega$ ),

$K_b$  คือ ค่าคงที่ของ Back EMF ( $V \cdot s/radian$ ) และ

$i_{ST}$  คือ กระแสไฟฟ้าในสภาวะเริ่มต้นหรือกระแสที่เกิดขึ้นเมื่อแรงบิดเริ่มต้น (A)



รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Torque และ Current

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

### (3) Power Characteristic (พลังงาน)

เมื่อ Load เพิ่มขึ้น (แรงบิดสูงขึ้น) พลังงานของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้น โดยกราฟมีลักษณะเป็นพาราโบลาค่าว่า ซึ่งมีพลังงานสูงสุดในช่วงหนึ่งเป็นจุดเปลี่ยนโค้ง และลดลงเมื่อแรงบิดของโหลดเพิ่มขึ้นเกินค่าที่เหมาะสมกับมอเตอร์

จากกฎแรงดันของเคิร์ชhoff (Kirchhoff's Voltage Law หรือ KVL) และ กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน-อยเลอร์ (Newton-Euler's Law) จะได้สมการดังนี้

#### (3.1) สมการพลังงานทั่วไป

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

(2.3) เมื่อค่า Torque สูงสุด (ความเร็วเชิงมุมมีค่าเท่ากับศูนย์ หรือ Stall Torque Condition)

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

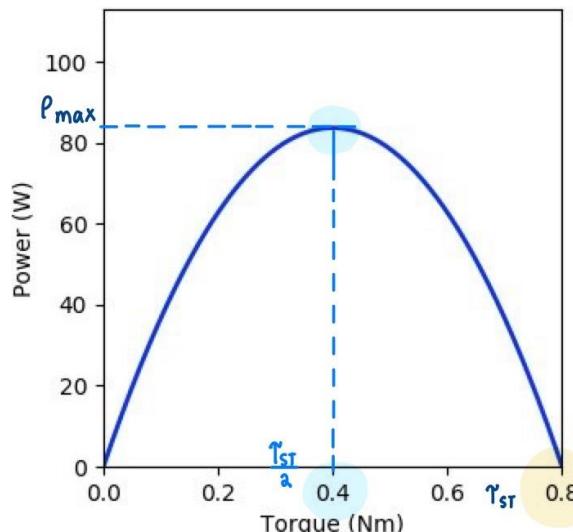
เมื่อ  $P$  คือ กำลังงานของมอเตอร์ (W),

$\omega_{NL}$  คือ ความเร็วเชิงมุมขณะไม่มีโหลด หรือความเร็วสูงสุดของมอเตอร์ (radian/s),

$\tau_{ST}$  คือ แรงบิดสูงสุด (N · m),

$\tau_L$  คือ แรงบิดที่โหลด (Load Torque) (N · m) และ

$P_{max}$  คือ กำลังงานสูงสุดของมอเตอร์ (W)



รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Torque และ Power

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

#### (4) Efficiency % (เบอร์เซ็นประสิทธิภาพ)

คืออัตราส่วนระหว่าง พลังงานไฟฟ้าที่แปลงเป็นพลังงานกล (กำลังงานที่มอเตอร์ส่งออกไปใช้งาน) ต่อ พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนเข้าให้กับมอเตอร์ ซึ่งแสดงในรูปของเบอร์เซ็นต์ โดยเป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ จากการการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลสำหรับขับเคลื่อนโหลด グラฟของ Efficiency ต่อแรงบิดเป็นกราฟพาราโบลาเป็นไปทางขวา และมีสูตรการคำนวณดังนี้

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{-\frac{\omega_{NL}}{\tau_{ST}} \tau_L^2 + \omega_{NL} \tau_L}{\left(\frac{i_{st} - i_{NL}}{\tau_{ST}}\right) \tau_L v_{in} + i_{NL} v_{in}} \times 100\%$$

เมื่อ  $\eta$  คือ เบอร์เซ็นประสิทธิภาพของมอเตอร์ (%) ,

$P_{out}$  คือ กำลังงานเชิงกลของมอเตอร์ (W),

$P_{in}$  คือ กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ (W),

$\omega_{NL}$  คือ ความเร็วเฉลี่ยมุมขณะไม่มีโหลด หรือความเร็วสูงสุดของมอเตอร์ (radian/s),

$\tau_{ST}$  คือ แรงบิดสูงสุด (N · m),

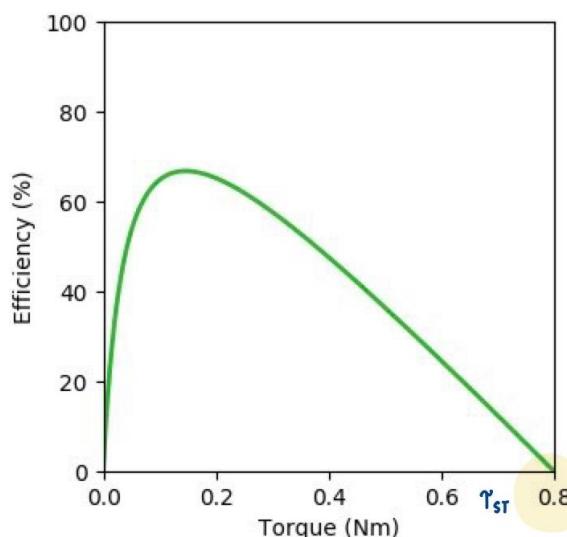
$\tau_L$  คือ แรงบิดที่โหลด (Load Torque) (N · m),

$P_{max}$  คือ กำลังงานสูงสุดของมอเตอร์ (W),

$i_{st}$  คือ กระแสไฟฟ้าในสภาวะเริ่มต้นหรือกระแสที่เกิดขึ้นเมื่อแรงบิดเริ่มต้น (A),

$i_{NL}$  คือ กระแสไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด หรือความเร็วสูงสุดของมอเตอร์ (A) และ

$v_{in}$  คือ แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (V)



รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Torque และ Efficiency

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

## 2.6.2 คลัตช์อนุภาคแม่เหล็ก (Magnetic Particle Clutch)

คลัตช์อนุภาคแม่เหล็กเป็นอุปกรณ์ถ่ายโอนแรงบิดที่ควบคุมได้โดยใช้สนามแม่เหล็ก ร่วมกับ อนุภาคแม่เหล็ก (Magnetic Particles) ที่บรรจุอยู่ระหว่างผิวของชุดขับ (Driving Member) และชุด ตาม (Driven Member) ซึ่งทำให้อุปกรณ์นี้สามารถควบคุมแรงบิดได้อย่างละเอียดและตอบสนองได้ดี ในงานที่ต้องการการถ่ายโอนแรงบิดแบบปรับเปลี่ยนได้

ซึ่งคลัตช์อนุภาคแม่เหล็กทำงานเมื่อกระแสไฟฟ้าถูกจ่ายเข้าไปในขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า จะเกิด สนามแม่เหล็กขึ้นในคลัตช์ ซึ่งสนามแม่เหล็กจะกระตุ้นให้อนุภาคแม่เหล็กที่อยู่ระหว่างชุดขับและชุด ตาม, จัดเรียงตัว และเกาะตัวกันแน่น

การเกาะตัวนี้ทำให้เกิดการถ่ายโอนแรงบิดจากชุดขับไปยังชุดตาม หากเพิ่มกระแสไฟฟ้า สนามแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้น อนุภาคแม่เหล็กจะเกาะตัวแน่นขึ้น และแรงบิดที่ถ่ายโอนจะเพิ่มตาม ในทาง กลับกัน หากลดกระแสไฟฟ้า สนามแม่เหล็กจะอ่อนลง อนุภาคจะหลุดตัว และแรงบิดที่ถ่ายโอนก็จะ ลดลง

และยังมีคุณสมบัติเด่นของ Magnetic Particle Clutch ดังนี้

- (1) สามารถควบคุมแรงบิดได้อย่างแม่นยำ โดยการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ขดลวด
- (2) สนามแม่เหล็กสามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็ว ทำให้อุปกรณ์ตอบสนองต่อการ เปลี่ยนแปลงของระบบได้ดี
- (3) มีการเชื่อมต่อแบบไม่มีการลื่นไถล เนื่องจากแรงบิดถูกส่งผ่านอนุภาคแม่เหล็กที่เกาะตัวกัน ทำ ให้แรงบิดถ่ายโอนอย่างต่อเนื่องและราบรื่น
- (4) ทนต่อการสึกหรอ เนื่องจากไม่มีชิ้นส่วนสัมผัสโดยตรง
- (5) สามารถการทำงานแบบไร้เสียง

มักนำไปใช้กับงานระบบควบคุมแรงบิดในเครื่องจักร, การควบคุมความเร็วและแรงตึงในระบบ ขับเคลื่อน (Tension Control), การทดสอบเครื่องยนต์หรือชิ้นส่วน และในงานที่ต้องการความแม่นยำ สูง



รูปตัวอย่างคลัตช์อนุภาคแม่เหล็ก

แหล่งที่มา : <https://placidindustries.com/products/clutches/magnetic-particle-clutches/>

### 2.6.3 Dynamic Torque Motor

Dynamic Torque Motor เป็นมอเตอร์ที่ออกแบบมาเพื่อให้สามารถควบคุมแรงบิด (Torque) ได้อย่างแม่นยำในระหว่างการทำงาน โดยเฉพาะในงานที่ต้องการการเปลี่ยนแปลงของแรงบิดในแบบเรียลไทม์ เช่น การเร่งความเร็ว การเบรก หรือการรักษาระดับความเร็วในสภาพที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลง โดยมีคุณสมบัติหลักดังนี้

#### (1) สามารถควบคุมแรงบิดโดยตรง

มอเตอร์ชนิดนี้เน้นการควบคุมแรงบิดโดยตรงผ่านระบบอิเล็กทรอนิกส์หรือซอฟต์แวร์ควบคุม เช่น การใช้ตัวควบคุมแบบ Field-Oriented Control (FOC) หรือ Direct Torque Control (DTC) ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำในการปรับแรงบิดตามความต้องการ

#### (2) ตอบสนองเร็ว

มีความสามารถในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงบิดได้อย่างรวดเร็ว เหมาะสำหรับการใช้งานในระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดหรือการทำงานที่ซับซ้อน เช่น หุ่นยนต์ หรือเครื่องจักรกล

#### (3) พลังงานและความแม่นยำสูง

Dynamic Torque Motor นักใช้ในการประยุกต์ที่ต้องการความแม่นยำสูงในการควบคุม เช่น การควบคุมการหมุนในระบบ Servo Motor, มอเตอร์ไฟฟ้าของยานพาหนะไฟฟ้า (EV), หรือในกระบวนการผลิตที่ต้องการความละเอียดสูง

#### (4) การทำงานแบบไดนามิก

มอเตอร์สามารถปรับเปลี่ยนแรงบิดได้ตามความต้องการของงาน เช่น การเพิ่มแรงบิดชั่วขณะเพื่อเอาชนะแรงเฉือนของระบบ หรือการลดแรงบิดเพื่อประหยัดพลังงานในช่วงเวลาที่ไม่ต้องใช้แรงสูง

นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้งานได้อย่างหลากหลาย เช่น อุตสาหกรรมการผลิต, ยานพาหนะไฟฟ้า, ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ และงานวิจัยและการทดสอบ



รูปตัวอย่าง Dynamic Torque Motor

แหล่งที่มา : <https://www.ebay.fr/item/382914196158>

#### 2.6.4 หลักการทำงาน H-Bridge Drive Mode และวิธีการควบคุม

H-Bridge ใช้สำหรับควบคุมมอเตอร์ DC โดยมี mode การทำงานหลัก 4 โหมด ได้แก่

##### (1) Lock Anti-Phase Drive

ใช้ควบคุมความเร็วและทิศทางด้วยการสลับ PWM ระหว่างขั้วบวกและขั้วลบอย่างต่อเนื่อง และมีลักษณะเด่นคือการเปลี่ยนขั้วแรงดันอย่างรวดเร็ว ทำให้เหมาะสมสำหรับการควบคุมที่ต้องการการตอบสนองสูง

##### (2) Sign-Magnitude Drive

ใช้ PWM เพื่อปรับความเร็วในขณะที่ควบคุมทิศทางผ่านการเปิดปิด MOSFET มักใช้วิธีนี้เพื่อความแม่นยำในการควบคุมความเร็ว

##### (3) Asynchronous Sign-Magnitude Drive

คล้ายกับ Sign-Magnitude Drive แต่ใช้ Dead-Time เพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของกระแส (Short Circuit) ระหว่างการเปลี่ยนสถานะ สามารถลดการเกิดความร้อนใน MOSFET

##### (4) Free (High Impedance)

สถานะที่ MOSFET อยู่ในสถานะเปิดทั้งหมด ทำให้มอเตอร์หมุนโดยอิสระ (Coast) เหมาะสำหรับการหยุดมอเตอร์แบบไม่มีแรงต้าน

โดย H-Bridge Drive Mode มีวิธีการควบคุมดังนี้

##### (1) การเปลี่ยนทิศทาง (Direction Control)

การเปลี่ยนทิศทางกระแสไฟฟ้าในมอเตอร์ทำได้โดยควบคุมการเปิดปิดของ MOSFET ภายใต้ H-Bridge

เช่น เปิด MOSFET Q1 และ Q4 ทำให้มอเตอร์หมุนไปข้างหน้า,  
 เปิด MOSFET Q2 และ Q3 ทำให้มอเตอร์หมุนถอยหลัง  
 และต้องมี Dead-Time เพื่อป้องกัน Short Circuit

##### (2) การควบคุมความเร็ว (Speed Control)

ใช้ PWM (Pulse Width Modulation) เพื่อควบคุมแรงดันเฉลี่ยที่ส่งไปยังมอเตอร์ ซึ่งความถี่ของ PWM มีผลต่อการตอบสนองของมอเตอร์ ดังนี้  
 เมื่อ ความถี่ต่ำ ทำให้ กระแสสูงขึ้น และ ประสิทธิภาพลดลง,  
 ความถี่สูง ทำให้ กระแสต่ำ และ ประสิทธิภาพสูงขึ้น

##### (3) การเบรก (Braking)

ใช้ Slow Decay (เบรกแบบช้า) หรือ Fast Decay (เบรกแบบเร็ว) เพื่อควบคุมทิศทาง ซึ่ง Slow Decay ใช้แรงต้านจากกระแสย้อนกลับผ่านมอเตอร์ ส่วน Fast Decay ใช้การตัดวงจรเพื่อยุดมอเตอร์เร็วขึ้น

## 2.6.5 Signal Conditioning

Signal Conditioning คือกระบวนการเตรียมสัญญาณจากเซ็นเซอร์หรือแหล่งกำเนิด เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปประมวลผลต่อไป โดยมักประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้

(1) การขยายสัญญาณ (Amplification)

ใช้ขยายสัญญาณที่มีระดับแรงดันต่ำให้สูงขึ้น เช่น จากมิลลิโวลต์เป็นโวลต์ มักใช้ Operational Amplifier (Op-Amp)

(2) การกรองสัญญาณ (Filtering)

กำจัดสัญญาณรบกวน (Noise) หรือความถี่ที่ไม่ต้องการ ตัวกรองมีหลายประเภท เช่น Low-pass, High-pass, Band-pass, Band-stop

(3) การปรับระดับสัญญาณ (Level Shifting)

ใช้ในกรณีที่สัญญาณมีค่าแรงดันที่ไม่เหมาะสม เช่น การเปลี่ยนช่วงแรงดันให้เข้ากับ ADC (Analog-to-Digital Converter)

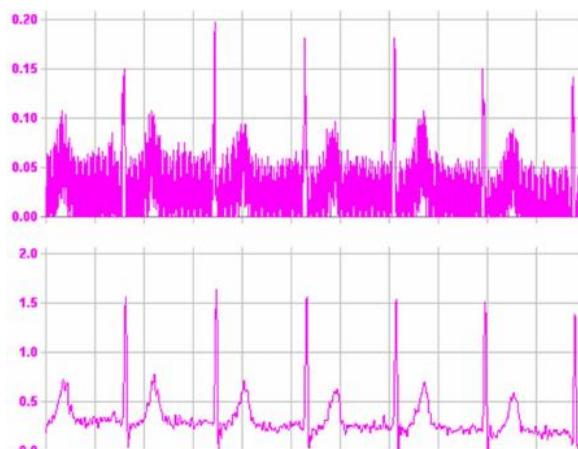
(4) การแปลงรูปแบบสัญญาณ (Signal Conversion)

เช่น การแปลงสัญญาณกระแส (Current) เป็นแรงดัน (Voltage) หรือจากแรงดันเป็นดิจิทัล

(5) การปรับสมดุลสัญญาณ (Impedance Matching)

ทำให้ความต้านทานของแหล่งกำเนิดสัญญาณและตัวรับสัญญาณตรงกัน เพื่อลดการสูญเสียพลังงาน

ยกตัวอย่างการใช้ Signal Conditioning เช่น การขยายสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ก่อนส่งเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปแสดงตัวอย่างสัญญาณก่อนและหลังเข้ากระบวนการ Signal Conditioning

แหล่งที่มา : <https://www.youtube.com/watch?v=d7y9xg-Bc18>

### 2.6.6 Signal Processing

Signal Processing คือกระบวนการประมวลผลและวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้รับจากการวัดสัญญาณโดยอาจทำในรูปแบบ อนาล็อก (Analog) หรือ ดิจิทัล (Digital) เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความหมายและสามารถใช้งานได้

#### (1) การแปลงสัญญาณ (Signal Transformation)

เช่น Fourier Transform เพื่อแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลา (Time Domain) ไปเป็นโดเมนความถี่ (Frequency Domain)

#### (2) การกรองสัญญาณแบบดิจิทัล (Digital Filtering)

การกรองสัญญาณผ่านการคำนวณ เช่น FIR (Finite Impulse Response) หรือ IIR (Infinite Impulse Response) Filter

#### (3) การลดสัญญาณรบกวน (Noise Reduction)

เช่น การใช้ Kalman Filter เพื่อคาดการณ์และลดผลกระทบจาก Noise

#### (4) การตรวจจับเหตุการณ์ (Event Detection)

เช่น การตรวจจับจุดพีคของสัญญาณ ECG (คลื่นไฟฟ้าหัวใจ)

#### (5) การปรับสเกลและการทำให้สัญญาณปกติ (Normalization)

การปรับระดับสัญญาณให้อยู่ในช่วงค่าที่กำหนด เช่น 0 ถึง 1 หรือ -1 ถึง 1

ยกตัวอย่างการใช้ Signal Processing เช่น การประมวลผลสัญญาณ EEG เพื่อวิเคราะห์การทำงานของสมอง และ การใช้เทคนิค FFT เพื่อแยกส่วนประกอบความถี่ในสัญญาณเสียง

## 2.7 วิธีการดำเนินการทดลอง

### 2.7.1 วัสดุอุปกรณ์

- (1) Incremental Encoder AMT103-V
- (2) Nidec Components Geared DC Geared Motor, 12 V dc, 20 Ncm, 70 rpm, 6mm Shaft Diameter
- (3) Warner Electric Magnetic Particle Clutches MPB12
- (4) WCS1700 Hall Current Sensor
- (5) Cytron MDD20A Motor Driver
- (6) Nucleo STM32G474RE
- (7) MotorXplorer
- (8) สายจัมเปอร์

## 2.7.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน การทดลองที่ 1 และ 2

คณะกรรมการได้แบ่งการทดลองออกเป็นทั้งหมด 3 ช่วง ประกอบด้วย Calibration, Measurement และ Calculation โดยแต่ละช่วงจะมีขั้นตอนย่อยดังต่อไปนี้

### (1) Calibration

ในช่วงนี้จะเป็นการเตรียมเซ็นเซอร์ และอุปกรณ์ทดลองให้พร้อมสำหรับการเก็บผล โดยประกอบด้วยขั้นตอนย่อยดังต่อไปนี้

#### (1.1) Current Sensor Calibration

ก่อนที่จะทำการวัดข้อมูลจาก Current sensor ควรดำเนินการใช้วิธี Linear regression เพื่อปรับปรุงความแม่นยำในการประมวลผลค่ากระแสไฟฟ้า ในการทำ Linear regression นั้น จำเป็นต้องเก็บค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จาก Current sensor โดยในกรณีที่กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0 A ค่า แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้คือ 2.05 V และในกรณีกระแสไฟฟ้าใดๆ ทางคณะกรรมการได้ใช้ Multimeter เป็นเครื่องมือวัดเปรียบเทียบ โดยทำการต่อ Multimeter แบบอนุกรมเพื่อวัดกระแสไฟฟ้าที่เหล่านักเรียน

ในขณะที่ไม้อตอร์หมุนโดยไม่มีโหลด (No-load) ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเซ็นเซอร์คือ 2.11 V และค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จาก Multimeter คือ 0.92 A เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวเข้าสมการ Linear regression จะได้ค่าความชัน ( $m$ ) เท่ากับ 15.33 และค่าเชิงเส้นตัดแกน ( $C$ ) เท่ากับ -31.4265 ส่งผลให้สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ผ่านเซ็นเซอร์กับแรงดันไฟฟ้าที่เซ็นเซอร์ให้สามารถเขียนได้ดังนี้

$$I = 15.33(V) - 31.4265$$

เมื่อเทียบจากสมการเส้นตรง  $y = mx + c$ ,

$I$  แทน กระแสไฟฟ้า และ  $V$  แทน แรงดันไฟฟ้า

#### (1.2) Loadcell Calibration

ก่อนดำเนินการวัดข้อมูลจาก Loadcell จำเป็นต้องพัฒนาสมการที่สามารถแปลงค่า แรงดันไฟฟ้าให้เป็นค่าน้ำหนักได้อย่างถูกต้อง ทั้งนี้เนื่องจากมอเตอร์ เมื่อผ่านการส่งกำลังผ่านก้านส่ง กำลังแล้ว จะสร้างน้ำหนักที่น้อยกว่า 1 กิโลกรัม ทางคณะกรรมการจึงได้ทำการปรับค่า  $R_g$  ให้เหมาะสม กับการวัด เพื่อให้ค่าแรงดันที่ได้จาก Loadcell มีลักษณะเป็นเส้นตรง (linear) มากที่สุด

โดยทราบว่าแรงดันสูงสุดที่ Loadcell สามารถจ่ายได้คือ 2.5 V ทั้งนี้ คณะกรรมการได้ปรับค่า แรงดันที่ออกจาก Loadcell ให้มีค่าอยู่ที่ 2.35 V เมื่อรับน้ำหนัก 990 กรัม และตรวจสอบค่าแรงดัน ที่วัดได้ เมื่อไม่มีน้ำหนัก (0 กรัม) พบร่วมค่า 0.26 V จากนั้นจึงนำค่าที่ได้เข้าสมการ Linear regression เพื่อประมาณค่า

พบว่าค่าความชัน ( $m$ ) เท่ากับ 473.68 และค่าความตัดแกน ( $c$ ) เท่ากับ -123.1568 ทำให้สามารถเขียนสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จาก Loadcell ได้ดังนี้

$$\text{mass} = 473.68(V) - 123.1568$$

เมื่อเทียบจากการเส้นตรง  $y = mx + c$ ,

mass แทน น้ำหนักที่ตรวจจับได้ และ V แทน แรงดันไฟฟ้า

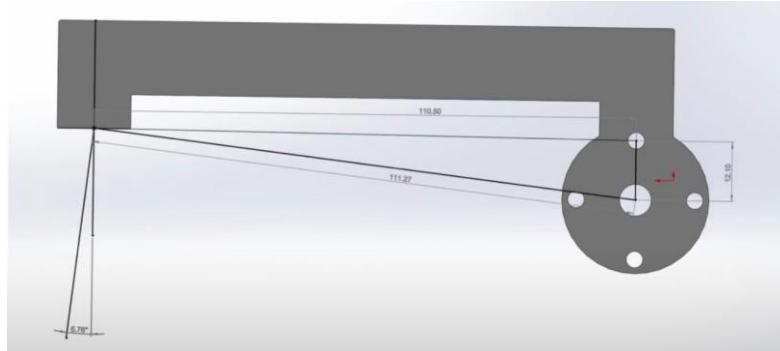
### (1.3) Torque Transmission Calculations

เนื่องจากการวัดค่า Torque จำเป็นต้องอาศัยก้านส่งกำลังที่ทำหน้าที่ถ่ายทอดแรงจากมอเตอร์ไปยังก้านส่งกำลังและกดลงบน Loadcell เมื่อผ่านกระบวนการส่งกำลัง จึงต้องทำการแปลงค่าจากน้ำหนักที่ได้จาก Loadcell ให้เป็นค่า Torque ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ  $\tau = \vec{F} \times r$  โดยอาศัยความยาวของก้านส่งกำลัง ทำให้สามารถคำนวณค่า Torque ได้ด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$\tau = \left( \frac{\text{mass}}{100} \times \cos(6.76) \right) \times 0.11127$$

โดยมีหน่วยเป็น  $N \cdot m$  (Newton-meter),

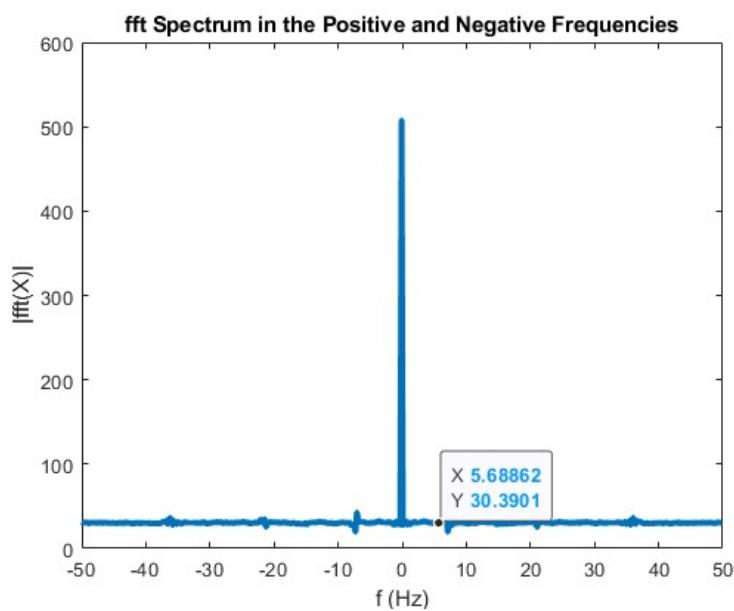
mass แทน น้ำหนักที่ตรวจจับได้ และ  $\tau$  แทน แรงบิดที่เกิดขึ้น



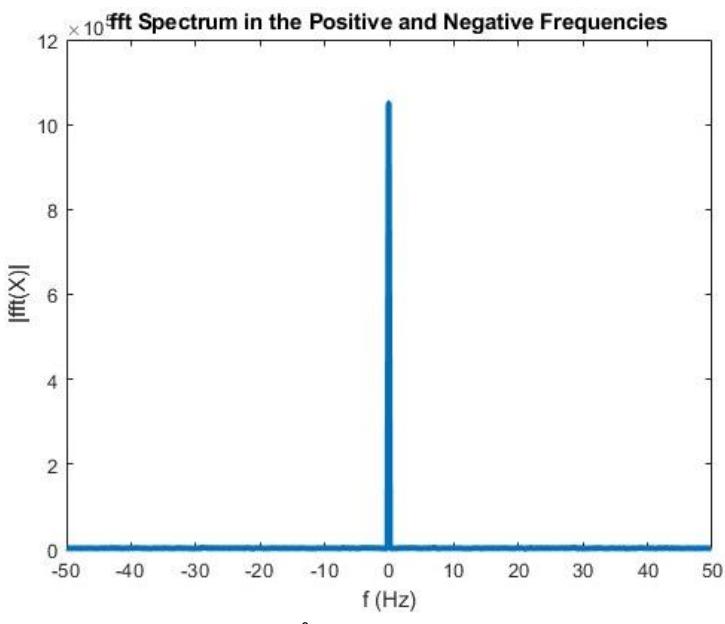
รูปแสดงความยาวของก้านส่งประจุและการคำนวณแรงบิด

### (1.4) Signal conditioning

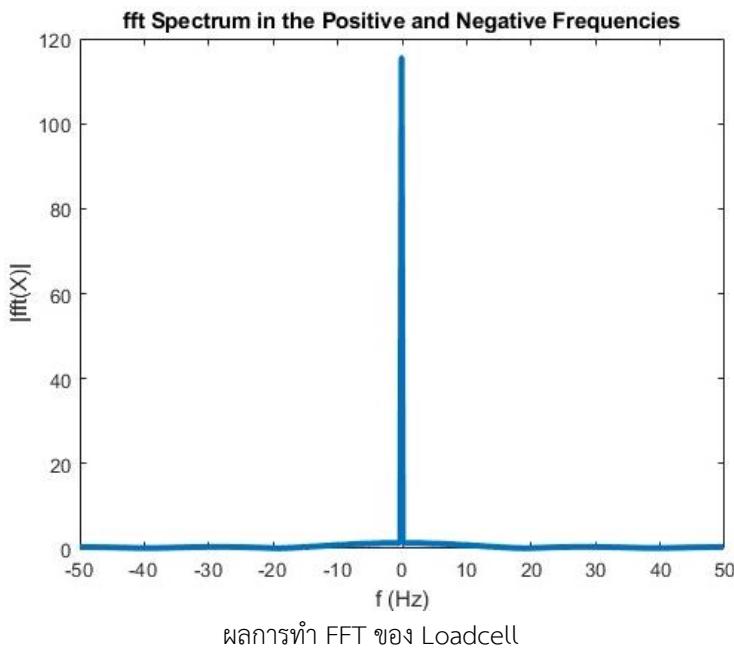
เนื่องจากข้อมูลที่ได้มีความผันผวนอันเกิดจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น ความไม่ตรงแนว (Miss-alignment) และความไม่เป็นอุดมคติของเซ็นเซอร์ การกรองสัญญาณจึงจำเป็นต้องดำเนินการเพื่อแก้ไขความคลาดเคลื่อนของค่าที่วัดได้ โดยกระบวนการกรองสัญญาณสามารถแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนย่อย ขั้นตอนแรกคือการใช้ FFT (Fast Fourier Transform) เพื่อวิเคราะห์และระบุช่วงความถี่ที่ไม่ต้องการ ซึ่งผลการวิเคราะห์มีรายละเอียดดังนี้



ผลการทำ FFT ของ Current sensor



ผลการทำ FFT ของ Encoder



จากการวิเคราะห์ด้วย FFT ทำให้สามารถระบุช่วงความถี่ที่ไม่ต้องการได้อย่างชัดเจน ซึ่งนำไปสู่การดำเนินการในขั้นตอนถัดไป นั่นคือกระบวนการกรองสัญญาณ (Filtering) จากผลการวิเคราะห์ด้วย FFT พบว่าสัญญาณที่พิจารณาส่วนใหญ่อยู่ในช่วงความถี่ต่ำ ดังนั้น ทางคณะผู้จัดทำจึงเลือกใช้ Low-pass filter เพื่อกรองความถี่ที่ไม่ต้องการออก

สำหรับสัญญาณจาก Current sensor ได้มีการเลือกใช้ Low-pass filter ที่มีค่า cut-off frequency เท่ากับ 5 Hz เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนออก อย่างไรก็ตาม สำหรับสัญญาณอื่นๆ จากการวิเคราะห์ด้วย FFT ไม่พบสัญญาณรบกวนที่เด่นชัด ทางคณะผู้จัดทำจึงเลือกใช้วิธี Running RMS ในการกรองค่าที่ไม่ต้องการแทนการใช้ Low-pass filter

## (2) Measurement

ข้อมูลที่ทางคณะผู้จัดทำให้ความสนใจและดำเนินการเก็บรวมมีทั้งหมด 4 ค่า โดยการเก็บข้อมูลแบ่งออกเป็น 2 รอบ ดังนี้

### (2.1) No-load

เก็บข้อมูลขณะที่มอเตอร์นั่นหมุนโดยไม่ได้ต่อ load ใดๆ โดยจะสามารถเก็บข้อมูลได้ 2 ค่า ประกอบด้วย

- $\omega_{NL}$  ความเร็วเฉลี่ยของมอเตอร์ ขณะมอเตอร์หมุนโดยไม่ได้ต่อ load ใดๆ
- $i_{NL}$  กระแสไฟฟ้า ขณะที่มอเตอร์หมุนโดยไม่ได้ต่อ load ใดๆ

## (2.2) Stall

เก็บข้อมูลขณะที่มอเตอร์หมุนโดยใช้กำลังสูงสุด ซึ่งส่งผลให้มอเตอร์ไม่เกิดการขยาย โดยสามารถเก็บข้อมูลได้ 2 ค่าดังต่อไปนี้

- $\tau_{ST}$  แรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์สามารถส่งกำลังได้
- $i_{ST}$  กระแสไฟฟ้า ขณะที่มอเตอร์ส่งกำลังสูงสุด

จากการเก็บข้อมูลดังกล่าวเพียงพอต่อการนำไปคำนวณในขั้นตอนถัดไป

## (3) Calculation

จากวัตถุประสงค์ของการทดลองที่ต้องการหา Motor characteristic และความสัมพันธ์ของข้อมูลต่างๆ จึงจำเป็นต้องนำข้อมูลที่ได้รับมาทำการคำนวณต่อไป ซึ่งจะประกอบด้วย ขั้นตอนการคำนวณดังต่อไปนี้

### (3.1) Torque Speed curve

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของมอเตอร์กับความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ ตั้งแต่ No-load Torque (Torque = 0 Nm) ถึง Stall Torque โดยสามารถใช้ข้อมูลจากการ Measurement มา plot ลงกราฟด้วยสมการเส้นตรงได้เลย

### (3.2) Torque Current curve

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของมอเตอร์กับกระแสไฟฟ้าที่ให้ผ่านมอเตอร์ ตั้งแต่ No-load Torque (Torque = 0 Nm) ถึง Stall Torque โดยสามารถใช้ข้อมูลจากการ Measurement มา plot ลงกราฟด้วยสมการเส้นตรงได้เลย

### (3.3) Power curve

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของมอเตอร์กับกำลังที่มอเตอร์ใช้ ตั้งแต่ No-load Torque (Torque = 0 Nm) ถึง Stall Torque โดยผ่านสมการดังต่อไปนี้

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

เมื่อ  $P$  คือ กำลังงานของมอเตอร์ (W),

$\omega_{NL}$  คือ ความเร็วเชิงมุมขณะไม่มีโหลด หรือความเร็วสูงสุดของมอเตอร์ (radian/s),

$\tau_{ST}$  คือ แรงบิดสูงสุด (N · m),

$\tau_L$  คือ แรงบิดที่โหลด (Load Torque) (N · m) และ

ที่สามารถนำข้อมูลที่ได้มาแทนในสมการได้เลย มีเพียง  $\tau_L$  ที่จำเป็นต้องแทนค่าตั้งแต่ No-load Torque (Torque = 0 Nm) ถึง Stall Torque โดยเพื่อความละเอียดทางคณิตศาสตร์จัดทำได้เลือกใช้ค่าความละเอียดที่ 1000 ค่า

### (3.4) Efficiency curve

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของมอเตอร์กับประสิทธิภาพ ตั้งแต่ No-load Torque (Torque = 0 Nm) ถึง Stall Torque โดยผ่านสมการดังต่อไปนี้

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

เมื่อ  $\eta$  คือ เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพของมอเตอร์ (%) ,

$P_{out}$  คือ กำลังงานเชิงกลของมอเตอร์ (W),

$P_{in}$  คือ กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ (W),

$\omega_{NL}$  คือ ความเร็วเฉลี่ยมุขณะไม่มีโหลด หรือความเร็วสูงสุดของมอเตอร์ (radian/s),

$\tau_{ST}$  คือ แรงบิดสูงสุด (N · m),

$\tau_L$  คือ แรงบิดที่โหลด (Load Torque) (N · m),

$P_{max}$  คือ กำลังงานสูงสุดของมอเตอร์ (W),

$i_{ST}$  คือ กระแสไฟฟ้าในสภาพะเริ่มต้นหรือกระแสที่เกิดขึ้นเมื่อแรงบิดเริ่มต้น (A),

$i_{NL}$  คือ กระแสไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด หรือความเร็วสูงสุดของมอเตอร์ (A) และ

$v_{in}$  คือ แรงดันไฟฟ้าเข้า (V)

ที่สามารถนำข้อมูลที่ได้มาแทนในสมการได้เลย มีเพียง  $\tau_L$  ที่จำเป็นต้องแทนค่าตั้งแต่ No-load Torque (Torque = 0 Nm) ถึง Stall Torque โดยเพื่อความละเอียดทางคณิตศาสตร์จัดทำได้เลือกใช้ค่าความละเอียดที่ 1000 ค่า

### (3.5) Rated

ความเร็วเฉลี่ยมุ่ง, แรงบิด, กระแสไฟฟ้าและกำลังงานของมอเตอร์ ขณะที่ Efficiency มีค่าสูงสุดโดยสามารถหาได้จากการหาแรงบิด ณ จุดสูงสุดของ Efficiency curve (จุดที่  $m = 0$ ) จากนั้นก็สามารถที่จะใช้  $\tau_{Rated}$  เพื่อหาค่า Rated ของค่าอื่นๆ จากความสัมพันธ์อื่นได้ เช่น กัน เมื่อ  $\tau_{Rated}$  คือ แรงบิดของมอเตอร์ที่ประสิทธิภาพของมอเตอร์สูงที่สุด

### 2.7.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน การทดลองที่ 3

ก่อนจะทำการทดลองที่ 3 จะเป็นต้องทำขั้นตอนที่ 1 (Calibration) จากการทดลองที่ 1 และ 2 ก่อน การทดลองที่ 3 เป็นการวัดกระแสไฟฟ้าอ้างอิง โดยจะทำการต่อ Dynamic load motor เข้ากับตัว Motor driver และควบคุมด้วยวิธี Torque control หลังจากนั้นก็มาหมุนสวนทางกับมอเตอร์ที่พิจารณา และ วัดกระแส ด้วยวิธีการนี้จะทำให้สามารถสร้างแรงบิดที่ต้านกับมอเตอร์ที่พิจารณาได้ด้วยขนาดของแรงบิดที่มี ความหลากหลาย ในที่นี้ทางคณะผู้จัดทำได้เก็บทั้งหมด 10 ค่าจากทั้งหมด 3 รอบ โดยตั้งค่าแรงบิดอ้างอิงที่  $0.02 - 0.2 \text{ N} \cdot \text{m}$  การเก็บค่าทั้งสามรอบนั้นมีวิธีการเก็บที่แตกต่างกันดังนี้

- (1) No-Load จะเป็นการวัดกระแสไฟฟ้าจากมอเตอร์ที่พิจารณา โดยที่ยังไม่ได้เชื่อม มอเตอร์ที่พิจารณา กับ Dynamic load motor โดยจะเก็บทั้งหมด 10 ค่า
- (2) No-Drive จะเป็นการวัดกระแสไฟฟ้าจากมอเตอร์ที่พิจารณา โดยที่เชื่อมมอเตอร์ที่ พิจารณา กับ Dynamic load motor แต่จะไม่ทำการควบคุมใด หรือไม่ได้ต่อ มอเตอร์ เข้ากับบอร์ด motor drive นั้นเอง โดยจะเก็บทั้งหมด 10 ค่า
- (3) Dynamic load จะเป็นการวัดกระแสไฟฟ้าจากมอเตอร์ที่พิจารณา โดยที่ เชื่อม มอเตอร์ที่พิจารณา กับ Dynamic load motor และทำการต้านการหมุนของมอเตอร์ ที่พิจารณาด้วยแรงบิดตั้งแต่  $0.02 - 0.2 \text{ N} \cdot \text{m}$  ผ่าน Dynamic load motor ด้วย Current control

### 2.7.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน การทดลองที่ 4

การทดลองที่ 4 ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนที่ 1 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง Duty cycle, ความเร็วการหมุนของมอเตอร์ และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งผ่านมอเตอร์ และส่วนที่ 2 การวิเคราะห์การทำงานของโหมดการควบคุมต่างๆ โดยใช้ H-bridge drive

- (1) การทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง Duty cycle, ความเร็วการหมุนของมอเตอร์ และ กระแสไฟฟ้าที่แหล่งผ่านมอเตอร์

การทดลองดำเนินการโดยควบคุมการทำงานของมอเตอร์ด้วย Duty cycle ในช่วง 0 ถึง 100% ที่ความถี่  $1000 \text{ Hz}$  และ  $20000 \text{ Hz}$  โดยทำการวัดค่าความเร็วรอบและกระแสไฟฟ้าที่ แหล่งผ่านมอเตอร์ สำหรับความถี่  $20000 \text{ Hz}$  จะทำการวัดเฉพาะกระแสไฟฟ้าที่แหล่งผ่านมอเตอร์ เท่านั้น

- (2) การทดลองเพื่อศึกษาการทำงานของโหมดการควบคุมต่างๆด้วย H-bridge Drive

การทดลองนี้ประกอบด้วยการทดสอบการทำงานของ H-bridge Drive ใน 2 โหมด ได้แก่ Lock Anti-phase Drive และ Sign-magnitude Drive โดยทำการตรวจสอบการลดลงของ

กระແສໄຟຟ້າຫລັງຈາກຫຼຸດຈ່າຍແຮງດັນໄຟຟ້າໃຫ້ກັບມອເຕອຣ໌ ເພື່ອສັງເກດແລະເປີຍບພຸດີກຣມ  
Fast Decay ໃນໂທມດ Lock Anti-phase ແລະ Slow Decay ໃນໂທມດ Sign-magnitude

(2.1) ສໍາຮັບໂທມດ Lock Anti-phase Drive ໃຫ້ຈ່າຍສ້າງຄວາມ PWM ໄປຢັ້ງໜ່ອງ DIR ແລະຈ່າຍ  
ແຮງດັນໄຟຟ້າ 3.3 V ໄປຢັ້ງໜ່ອງ PWM ຂອງ MD20 A

(2.2) ສໍາຮັບໂທມດ Sign-magnitude Drive ໃຫ້ຈ່າຍສ້າງຄວາມ PWM ໄປຢັ້ງໜ່ອງ PWM ແລະ  
ຈ່າຍແຮງດັນໄຟຟ້າ 3.3 V ໄປຢັ້ງໜ່ອງ DIR

## 2.8 ພລກາຣທດລອງ

ຈາກສົມມຸດສູງຈະສາມາດສ້າງກາຣທດລອງຍ່ອຍໄດ້ທັງໝາດ 4 ກາຣທດລອງ ກາຣທດລອງທີ 1 ອືກາຣທດລອງ  
ເພື່ອຫາລັກຂະນະເພາະຂອງ Brushed DC Motor, ກາຣທດລອງທີ 2 ອືກ ກາຣທດລອງເພື່ອສຶກຫາຄວາມສັມພັນຮ່ອງ  
Brushed DC Motor, ກາຣທດລອງທີ 3 ອືກ ກາຣທດລອງເພື່ອສຶກຫາລັກກາຣທ່າງໆ H-Bridge Drive Mode ແລະ  
ກາຣຄວບຄຸມ DC Motor ແລະ ກາຣທດລອງທີ 4 ອືກ ກາຣທດລອງເພື່ອສຶກຫາຄວາມສັມພັນຮ່ອງຮວ່າງກະແສໄຟຟ້າກັບ  
ຄ່າ Torque Setpoint ຂອງ Dynamic Torque Motor

### 2.8.1 ພລກາຣທດລອງທີ 1 ແລະ ພລກາຣທດລອງທີ 2

ຈາກກາຣທດລອງທີຈະສາມາດຫາຄ່າຄົງຕົວທີ່ຈໍາເປັນຕ່ອງກາຣຄໍານວນໄດ້ດັ່ງຕ່ອງໄປນີ້

$$\omega_{NL} = 2200 \text{ RPM} = 230 \text{ radian/s}$$

$$i_{NL} = 0.98 \text{ A}$$

$$\tau_{ST} = 0.2 \text{ A}$$

$$i_{ST} = 5 \text{ A}$$

$$V_{in} = 12 \text{ V}$$

ເມື່ອ  $\omega_{NL}$  ອືກ ຄວາມເຮົວເຂີງມຸນຂະນະໄມ່ມີໂຫລດ ຮີ່ອຄວາມເຮົວສູງສຸດຂອງມອເຕອຣ໌ (radian/s),

$i_{NL}$  ອືກ ກະແສໄຟຟ້າຂະນະໄມ່ມີໂຫລດ ຮີ່ອຄວາມເຮົວສູງສຸດຂອງມອເຕອຣ໌ (A),

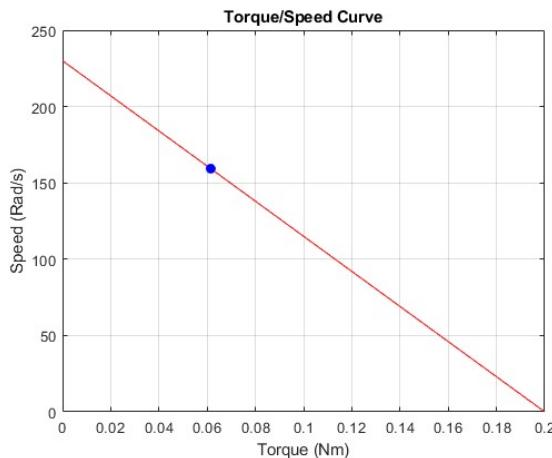
$\tau_{ST}$  ອືກ ແຮງປິດສູງສຸດ ( $N \cdot m$ ),

$i_{ST}$  ອືກ ກະແສໄຟຟ້າໃນສກາວເຮີມຕົ້ນຮີ່ອກະແສທີ່ເກີດຂຶ້ນເມື່ອແຮງປິດເຮີມຕົ້ນ (A) ແລະ

$V_{in}$  ອືກ ແຮງດັນໄຟຟ້າຂາເຂົາ (V)

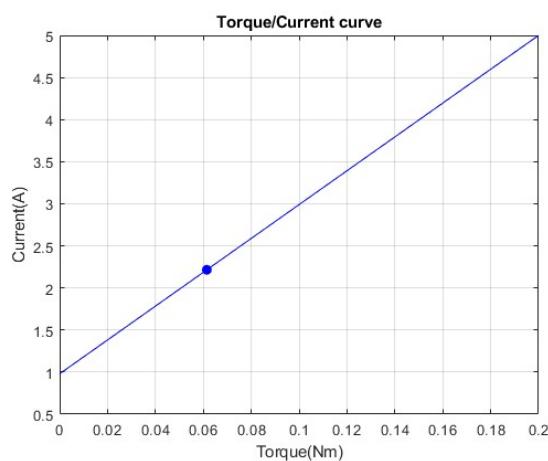
ຈຶ່ງຈາກຄ່າຄົງຕົວດັ່ງຕ່ອງໄປນີ້ສາມາດທຳໃຫ້ເຮົາສາມາດຄໍານວນແລະສ້າງກາຣຟແສດງຄວາມສັມພັນຮ່ອງຕ່າງໆໄດ້  
ດັ່ງຕ່ອງໄປນີ້ ໂດຍທີ່ມີຈຸດສີ່ພໍາເປັນຈຸດທີ່ໜ້າໃຫ້ເຫັນຄື່ງຈຸດທີ່ມີຄ່າ Efficiency ສູງສຸດ

(1) Torque Speed curve



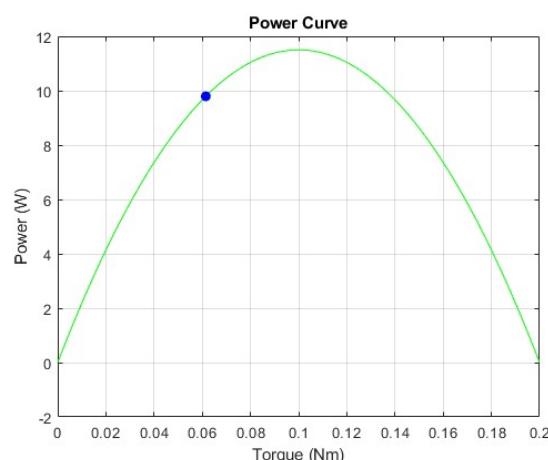
รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์

(2) Torque Current curve



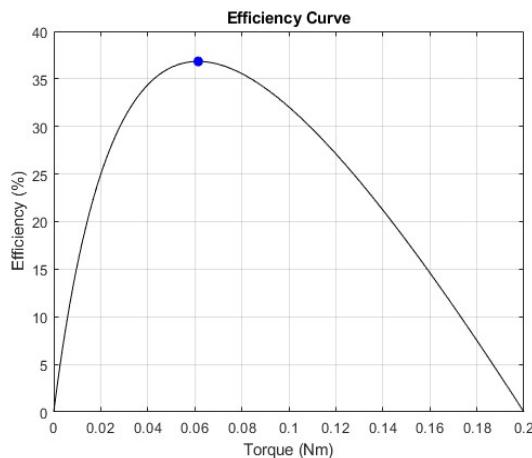
รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์

(3) Power Curve



รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและกำลังงานของมอเตอร์

(4) Efficiency curve



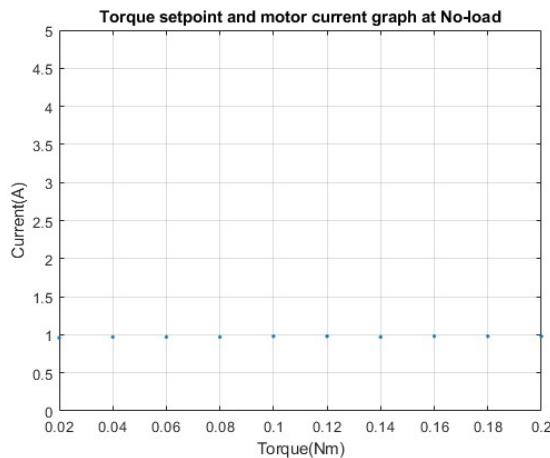
รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและประสิทธิภาพของมอเตอร์

หลังจากที่นำค่าคงตัวที่วัดได้มาพล็อตกราฟทำให้ได้ข้อสรุปของ Motor Characteristics ได้ดังต่อไปนี้

- Recommended/Rated Voltage : 12 V
- No-load current @12V : 0.98 A
- No-load speed @12V : 2200 RPM หรือ 230 radian/s
- Stall current @12V : 5 A
- Stall torque @12V : 0.2 N · m
- Rated current @12V : 2.21 A
- Rated speed @12V : 1519 RPM
- Rated torque @12V : 0.0614 N · m
- Rated power @12V : 9.792 W
- Rated efficiency @12V : 36.83 %
- Shaft diameter 5 mm

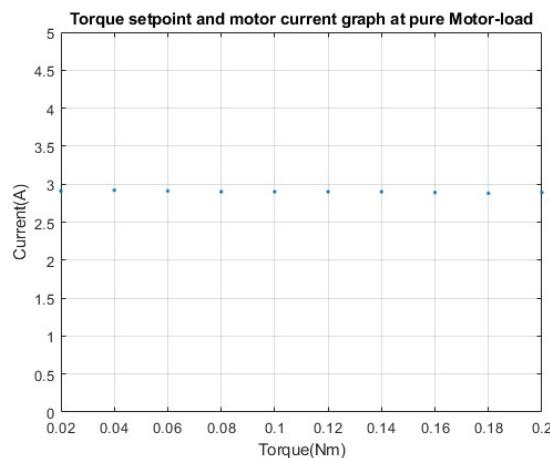
## 2.8.2 ผลการทดลองที่ 3

การทดลองนี้จะเป็นการสังเกตพฤติกรรมกระแสไฟฟ้าที่โหลดผ่านมอเตอร์ขณะที่รับ Load ต่างๆผ่าน Dynamic Torque motor โดยจะทำการทดลองทั้งหมดสามครั้ง ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้



รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงบิดของมอเตอร์เมื่อไม่มีโหลด (No-load)

จากการทดลองทั้งที่ 1 พบร่วมกับการให้มอเตอร์หมุนโดยไม่ได้ต่อมอเตอร์เข้ากับ Dynamic load motor จะทำให้ค่ากระแสเมื่อกลับหรือเท่ากับกระแสเมื่อไม่มี load มากระทำ



รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงบิดของมอเตอร์เมื่อรับโหลดมอเตอร์เพียงอย่างเดียว (Pure Motor-load)

จากการทดลองครั้งที่ 2 พบร่วมกับมอเตอร์ต้องใช้แรงบิดในการทำให้ Rotor หมุน จากการที่เราทราบ แรงบิดสูงสุด ณ Stall Torque และกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์จ่ายแรงบิดสูงสุดทำให้สามารถหาค่าคงตัวของมอเตอร์ ออกมากได้ด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$\tau = K_m i$$

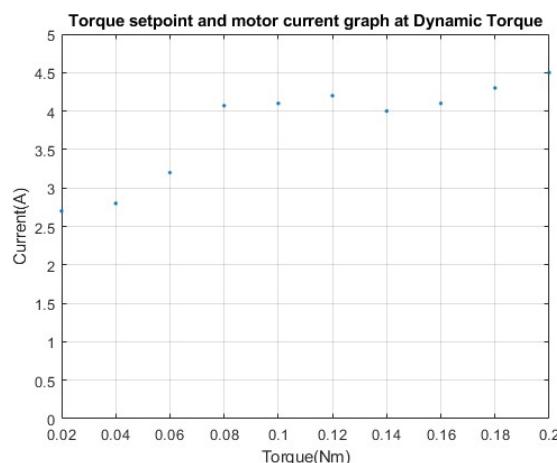
เมื่อ  $\tau$  แทน แรงบิดสูงสุด ณ Stall Torque,

$i$  แทน กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์จ่ายแรงบิดสูงสุด และ

$K_m$  แทนค่าคงตัวของมอเตอร์ จะได้

$$K_m = \frac{0.2}{5} = 0.04$$

และจากสมการเดียวกันทำให้เราทราบว่า แรงบิดของ Dynamic torque motor ขณะไม่ได้ควบคุม หรือต่อ Motor driver และ ขณะที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมอเตอร์ที่พิจารณาที่ 2.8 A จะมีแรงบิดที่ 0.112 N · m



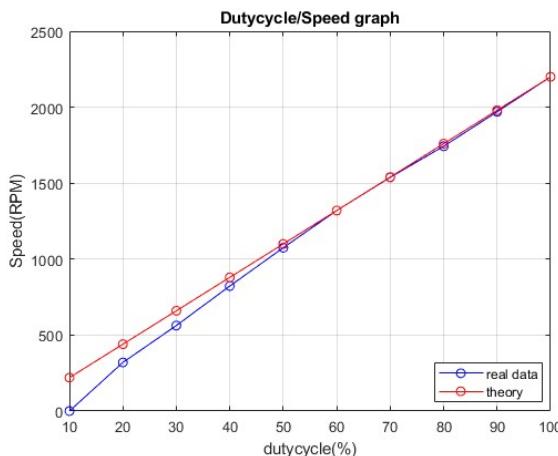
รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงบิดของมอเตอร์เมื่อรับ Dynamic Load

จากการทดลองที่ 3 จะเป็นการสั่งการให้ Dynamic load motor ทำงานตามแรงบิดที่กำหนดเพื่อ สังเกตพฤติกรรมของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอเตอร์ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า เมื่อแรงบิดมากขึ้นกระแสที่ใช้ก็จะมากขึ้นตาม

### 2.8.3 ผลการทดลองที่ 4

การทดลองที่ 4 ได้ถูกแบ่งออกเป็น 2 การทดลองย่อย ดังนี้

- (1) การทดลองย่อยที่ 1 จะอธิบายเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่าง Duty cycle , ความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์ และกระแสไฟฟ้าที่เหล่านี้มอเตอร์



รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Duty Cycle และความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์

จากราฟทดลองหากความสัมพันธ์ระหว่าง Duty cycle กับความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์พบว่า ความเร็วรอบและ Duty cycle มีความสัมพันธ์กันใกล้เคียงเชิงเส้น โดยเราทราบว่า Duty cycle จะทำหน้าที่ เสมือนลดระดับแรงดันมีสูตรคำนวณดังนี้

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} \times \text{Duty cycle}$$

เมื่อ  $V_{\text{out}}$  แทน แรงดันไฟฟ้าขาออก (V) และ

$V_{\text{in}}$  แทน แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (V)

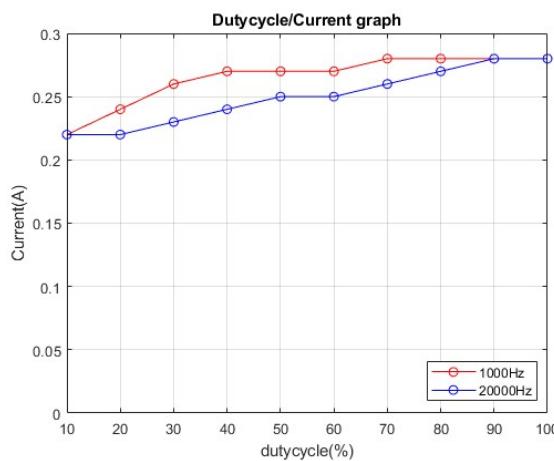
ซึ่งจากสูตรคำนวณจะแสดงให้เห็นว่าระดับแรงดันไฟฟ้าจะลดลงตามขนาดของ Duty cycle ซึ่งหาก ระดับแรงดันไฟฟ้าลดลง จะทำให้ความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์ลดลงตาม จากการวัดและวิเคราะห์ผลใน การทดลองที่ 1 และ 2 พบว่า

ณ แรงดัน 12 V มอเตอร์มีความเร็วรอบที่ 2200 RPM ซึ่งในสูตรคำนวณเดียวกันแต่เปลี่ยนจาก แรงดันไฟฟ้าเป็นความเร็วรอบจะได้สูตรคำนวณดังนี้

$$\omega_{\text{out}} = \omega_{\text{NL}} \times \text{Duty cycle}$$

เมื่อ  $\omega_{out}$  แทน ความเร็วรอบขาออก (RPM) และ  $\omega_{NL}$  แทน ความเร็วรอบขณะไม่มีโหลด หรือความเร็วสูงสุดของมอเตอร์ (RPM)

ซึ่งสามารถสร้างกราฟได้ตามกราฟเส้นสีแดง และจากการทดลองพบว่าค่าทฤษฎีมีความใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้เป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตาม การทดลองอาจมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากโหลดที่กระทำต่อนมอเตอร์ซึ่งมีผลต่อการวัดความเร็วรอบ ทำให้ค่าที่วัดได้มีความผิดเพี้ยน รวมถึงส่งผลให้มอเตอร์ไม่สามารถทำงานได้เคียงกับสภาพอุณหภูมิได้อย่างสมบูรณ์ แม้กระนั้น ผลลัพธ์ที่ได้ยังเพียงพอที่จะสรุปได้ว่า Duty cycle มีผลต่อความเร็วรอบของมอเตอร์ในลักษณะเชิงเส้น

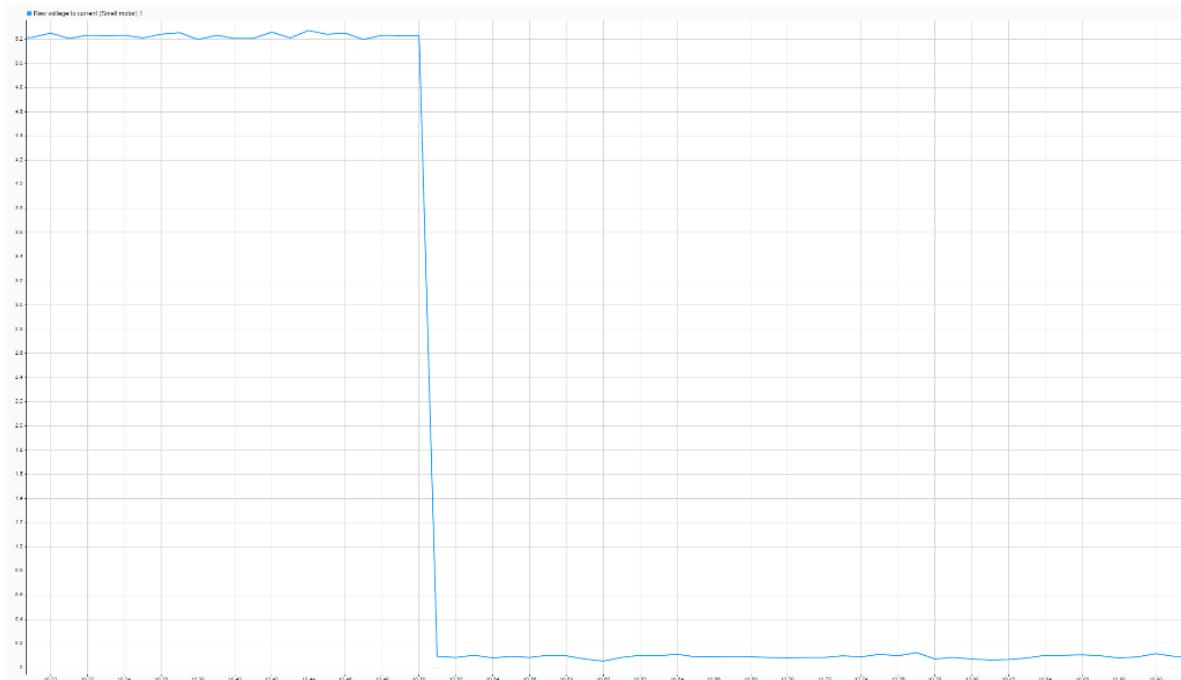


รูปกราฟเปรียบเทียบ Duty cycle และกระแสไฟฟ้าที่โหลดผ่านมอเตอร์ ณ ความถี่ที่ 1,000 Hz และ 20,000 Hz

จากราฟการทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Duty cycle และกระแสไฟฟ้าที่โหลดผ่านมอเตอร์ เมื่อใช้ความถี่ PWM ที่ 1000 Hz และ 20000 Hz พบร่วมกัน

ตามทฤษฎี การใช้ PWM ที่ความถี่ต่ำจะทำให้เกิดการใช้กระแสมากกว่าการใช้ PWM ที่ความถี่สูง ซึ่งผลการทดลองยืนยันว่า การเพิ่มความถี่ของ PWM ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่โหลดผ่านมอเตอร์ลดลงตามที่คาดการณ์ไว้ อย่างไรก็ตาม จากการทดลองไม่สามารถสรุปได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่าง Duty cycle และกระแสไฟฟ้ามีลักษณะเป็นเชิงเส้น

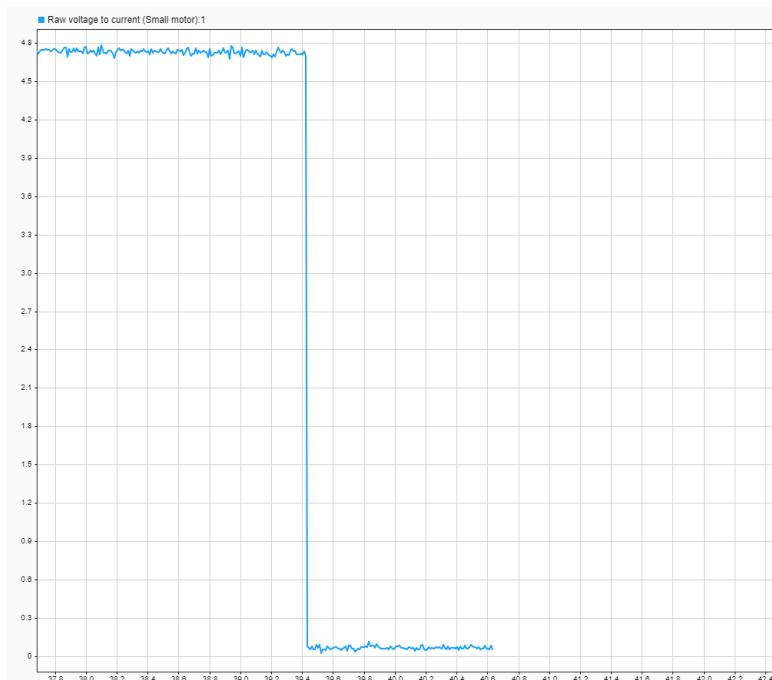
(2) การทดลองย่ออย่างที่ 2 จะอธิบายเกี่ยวกับพฤติกรรมของกระแสไฟฟ้าที่โหลดผ่านมอเตอร์ ภายใต้โหมดการทำงานที่แตกต่างกันของ Motor Drive



รูปแสดงพฤติกรรมการโหลดของกระแสไฟฟ้าที่โหลดผ่านมอเตอร์ในโหมดการควบคุมมอเตอร์แบบ Sign magnitude

Sign magnitude (Slow decay) หรือการควบคุมมอเตอร์แบบ Sign magnitude ใช้สายไฟทั้งหมด 2 เส้นในการควบคุม ได้แก่ PWM ที่ควบคุมในเรื่องของความเร็ว และ DIR ที่ควบคุมในเรื่องของทิศทาง

ในส่วนของการลดลงของกระแสไฟฟ้าของ Slow decay พบว่า กระแสไฟฟ้าลดลงจากค่าซ่าง Stall Torque (5V) จนถึง 0V เมื่อหยุดการจ่าย PWM โดยใช้เวลาในการเปลี่ยนแปลงประมาณ 0.01 วินาที



รูปแสดงพฤติกรรมการไฟหลังกระแสไฟฟ้าที่ไฟผ่านมอเตอร์ในโหมดการควบคุมมอเตอร์แบบ Lock Anti-Phase

Lock Anti-Phase Drive (Fast decay) หรือการควบคุมมอเตอร์แบบ Lock Anti-Phase ใช้สายไฟเพียงเส้นเดียวในการควบคุม โดยลักษณะการทำงานของ PWM มีความสัมพันธ์กับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ดังนี้

หาก Duty cycle มากกว่า 50% มอเตอร์จะหมุนตามเข็มนาฬิกา,

หาก Duty cycle น้อยกว่า 50% มอเตอร์จะหมุนทวนเข็มนาฬิกาและ

หาก Duty cycle เท่ากับ 50% มอเตอร์จะหยุดนิ่ง ไม่เกิดการหมุน

สำหรับการลดลงของกระแสไฟแบบ Fast Decay พบร้า กระแสไฟลดลงจากค่าช่วง Stall Torque (5V) จนถึง 0V เมื่อหยุดการจ่าย PWM โดยใช้เวลาเพียง 0.005 วินาที ซึ่งเร็วกว่าการควบคุมแบบ Sign Magnitude ที่ใช้ Slow Decay ซึ่งใช้เวลา 0.01 วินาที

## 2.9 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

### 2.9.1 สรุปผล

จากการทดลองที่ 1 และ 2 ทำให้เราทราบว่ามอเตอร์นี้สามารถหาลักษณะเฉพาะได้จากค่าคงที่เพียง 5 ตัว  $\omega_{NL}$ ,  $\tau_{ST}$ ,  $i_{ST}$ ,  $i_{NL}$  และ  $V_{in}$  นอกจากลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ ค่าคงที่เหล่านี้สามารถใช้หากความสัมพันธ์ระหว่าง แรงบิดต่อกำลังเร็วของมอเตอร์, แรงบิดต่อรัฐภาพของมอเตอร์, แรงบิดต่อรัฐภาพของมอเตอร์ได้ จากการทดลองที่ 3 ทำให้เราทราบว่ารัฐภาพและไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้จะขึ้นอยู่กับแรงบิดที่มอเตอร์ได้ส่งกำลังออกไป และจากการทดลองที่ 4 ทำให้เราทราบว่าความเร็วของมอเตอร์แปรผันตรงกับแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟฟ้ามอเตอร์ โดยจะสามารถคุณได้ผ่านขนาดของ Duty cycle จากการสั่งการควบคุม PWM นอกจากนี้ หากใช้ PWM ในการควบคุมมอเตอร์ที่ความถี่ที่สูงขึ้นจะลดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟฟ้ามอเตอร์ได้ และการควบคุมแบบ Sign magnitude เป็นการควบคุมที่ต้องควบคุมด้วยสายสัญญาณทั้งหมด 2 เส้น ทั้ง PWM ที่ใช้ควบคุมความเร็วและ DIR ที่ใช้ควบคุมทิศทาง อีกทั้ง Sign magnitude เป็นการควบคุม Motor driver แบบ Slow decay ทำให้การลดกระแสลงจาก 5V จนถึง 0V ทำได้ช้าเมื่อเทียบกับ Lock Anti-Phase Drive ที่ใช้การควบคุมเพียงสายเดียวทั้งความเร็วและทิศทางโดยควบคุมผ่านขนาดของ Duty cycle จากการสั่งการควบคุม PWM อีกทั้ง Lock Anti-Phase เป็นการควบคุมแบบ Fast decay ซึ่งทำให้การลดกระแสลงจาก 5V จนถึง 0V ได้เร็วกว่า Sign magnitude

### 2.9.2 อภิปรายผล

จากการทดลองพบว่า ไม่ว่ามอเตอร์จะมีรูปแบบใด สามารถวิเคราะห์และระบุลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง แรงบิดต่อกำลังเร็วของมอเตอร์, แรงบิดต่อรัฐภาพของมอเตอร์, แรงบิดต่อรัฐภาพของมอเตอร์ และ แรงบิดต่อรัฐภาพของมอเตอร์ได้ ก่อนที่จะสามารถคำนวณค่าความสัมพันธ์ต่างๆ ได้ จะเป็นต้องหาค่าลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ทั้ง 5 ค่าก่อน ได้แก่  $\omega_{NL}$ ,  $\tau_{ST}$ ,  $i_{ST}$ ,  $i_{NL}$  และ  $V_{in}$  เมื่อได้ข้อมูลเหล่านี้แล้ว สามารถคำนวณได้ตามที่ต้องการ ความสัมพันธ์เพื่อคำนวณค่าที่จุดแรงบิดใดๆ ได้ การคำนวณค่าดังกล่าวมีความสำคัญโดยเฉพาะเมื่อต้องการหาค่าที่จุด Efficiency สูงสุดหรือ Rated Torque การทดสอบมอเตอร์กับ Dynamic load แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของรัฐภาพตามแรงด้านที่เพิ่มขึ้น โดยลักษณะของความสัมพันธ์มีแนวโน้มเป็นเชิงเส้น กล่าวคือ เมื่อมอเตอร์ต้องใช้แรงบิดมากขึ้น ย่อมต้องใช้รัฐภาพมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณค่าแรงบิดของมอเตอร์จากการรัฐภาพและไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟฟ้ามอเตอร์ได้ โดยใช้สมการ Lorentz Force – Motor's Motion การควบคุมความเร็วของมอเตอร์สามารถทำได้ผ่านการสร้างแรงดันเสมือนด้วยวิธี PWM ซึ่ง Duty cycle มีผลโดยตรงต่อแรงดันไฟฟ้า หาก Duty cycle มีค่าสูง จะเสมือนแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น และหาก Duty cycle ต่ำ จะเสมือนแรงดันไฟฟ้าลดลง เนื่องจากความเร็วของมอเตอร์แปรผันตรงกับแรงดันไฟฟ้า ความเร็วตอบจังหวะแปรผันตรงกับ Duty cycle

เช่นกัน นอกจานั้นจากการทดลองพบว่าหาก PWM มีค่า Frequency สูง จะทำให้มอเตอร์ใช้กระแสน้อยลงจริง จากการทดลองขึ้นเคลื่อนมอเตอร์ภายใต้โหมด Sign magnitude พบร่วงการควบคุมตรงไปตรงมาและไม่ต้องจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับบอร์ด Drive ตลอดเวลา ซึ่งใช้สายไฟ 2 เส้น ได้แก่ PWM สำหรับควบคุมความเร็ว และ DIR สำหรับควบคุมทิศทาง พบร่วงการควบคุมลักษณะนี้เป็นแบบ Slow Decay ทำให้กระแสไฟฟ้าลดลงจากค่าช่วง Stall Torque (5V) จนถึง 0V ใช้เวลา 0.01 วินาที และจากการทดลอง Lock Anti-phase นั้นพบว่า ต้องจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับบอร์ด Drive ตลอดเวลา แต่ใช้สายไฟเพียงเส้นเดียวในการควบคุมทั้งความเร็วและทิศทาง โดยการปรับขนาด Duty cycle ผ่าน PWM ซึ่งการควบคุมแบบ Lock Anti-phase เป็นลักษณะการทำงานแบบ Fast Decay ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าลดลงจากค่าช่วง Stall Torque (5V) จนถึง 0V ใช้เวลา 0.005 วินาที ซึ่งเร็วกว่าการควบคุมแบบ Sign Magnitude ที่ใช้ Slow Decay

### 2.9.3 ข้อเสนอแนะ

ชุดทดลองควรออกแบบมาให้คำนึงถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการสูญเสียพลังงาน เช่น การไม่ตรงแนว (Miss Alignment), แรงเสียดทาน (Friction) และปัจจัยอื่นๆ ที่อาจเกิดขึ้น เพื่อให้ผลการทดลองมีความแม่นยำและสะท้อนประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ได้อย่างแท้จริง

## 2.10 เอกสารอ้างอิง

<https://filtron.lnwshop.com/article/102/>  
<https://www.youtube.com/watch?v=m8jpOX3h60k>  
<https://dewesoft.com/blog/what-is-signal-conditioning>  
<https://www.kistler.com/INT/en/signal-processing/C00000155>  
<https://www.youtube.com/watch?v=d7y9xg-Bc18>  
<https://www.blockdit.com/posts/5edb528e6b1c154a1ccbdc6>  
<http://modularcircuits.tantosonline.com/blog/articles/h-bridge-secrets/h-bridges-the-basics/>  
<https://www.pcb-3d.com/tutorials/what-is-a-h-bridge-sign-magnitude-and-locked-anti-phase-control-of-a-dc-motor/>

## บทที่ 3 Stepper Motor

โดยบทนี้เป็นการทดลองของห้องส่องกลุ่ม ได้แก่ กลุ่ม A08 และกลุ่ม A01 ซึ่งเป็นการทดลองเกี่ยวกับการหา Step loss ของ Stepper Motor

### 3.1 วัตถุประสงค์

- 3.1.1 เพื่อศึกษาหลักการทำงานและส่วนประกอบของ Stepper Motor
- 3.1.2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณ และความเร็วของ Stepper Motor
- 3.1.3 เพื่อศึกษาและประยุกต์ใช้รูปแบบการ Drive ทั้ง Full-Step, Half-Step, และ Micro-Step Drive และเปรียบเทียบผลกระทบที่มีต่อความแม่นยำในการควบคุมตำแหน่ง ความเร็ว และแรงบิดของ Stepper Motor
- 3.1.4 เพื่อศึกษาประเภทของ Stepper Motor Rotor และเปรียบเทียบคุณสมบัติ และสามารถเลือก Rotor Type ที่เหมาะสมกับการใช้งาน
- 3.1.5 เพื่อศึกษาวิธีการขับเคลื่อน Stepper Drive Type ต่างๆ, วิเคราะห์ข้อดีและข้อเสียของ Stepper Drive Type และประยุกต์ใช้ Stepper Drive Type ให้เหมาะสมกับระบบควบคุม
- 3.1.6 เพื่อศึกษาปัจจัยที่ทำให้เกิดการ Loss Step ใน Stepper Motor และผลกระทบที่มีต่อประสิทธิภาพของมอเตอร์ พร้อมแนวทางการป้องกันและแก้ไข
- 3.1.7 เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะและสเปคของ Stepper Motor
- 3.1.8 เพื่อฝึกฝนการประยุกต์ Stepper Motor, MATLAB และ Simulink ในการสั่งการหรือรับค่าร่วมกับบอร์ด Nucleo STM32G474RE และใช้สัญญาณจาก Incremental Encoder เป็น Input พร้อมแสดงผลแบบ Real Time ด้วย Data Inspector ในรูปแบบกราฟแสดงความเร็วเชิงมุนและกระแสไฟฟ้า

### 3.2 สมมติฐาน

- 3.2.1 ความเร็วเชิงมุมของ Stepper Motor จะเปลี่ยนแปลงโดยปรับแต่งกับความถี่ของสัญญาณควบคุมที่จ่ายเข้าสู่ Stepper Motor
- 3.2.2 การเพิ่มความถี่ของสัญญาณควบคุมจะทำให้ความเร็วของ Stepper Motor เพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้น ในช่วงแรก แต่เมื่อถึงค่าความถี่สูงสุดที่ Stepper Motor สามารถตอบสนองได้ (Saturation Point) ความเร็วจะคงที่และไม่เพิ่มขึ้นต่อไป แม้ว่าความถี่ของสัญญาณควบคุมจะเพิ่มขึ้น
- 3.2.3 การ Loss Step ใน Stepper Motor จะเกิดขึ้นเมื่อแรงบิดของมอเตอร์ไม่เพียงพอ และภาระโหลดที่สูงเกินไป หรือ Acceleration Ramp ที่สูงเกินไป
- 3.2.4 การ Drive Stepper Motor ในรูปแบบ Microstep จะช่วยลดแรงบิดกระเพื่อม (Torque Ripple) และทำให้การเคลื่อนที่ของมอเตอร์ราบรื่นกว่าการ Drive แบบ Full-Step หรือ Half-Step
- 3.2.5 Stepper Drive Type แบบ Chopper Drive จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้ L/R Drive โดยเฉพาะในงานที่ต้องการแรงบิดและความเร็วสูง

### 3.3 ตัวแปรที่ศึกษา

ตัวแปรต้น : ความถี่ของสัญญาณควบคุมที่จ่ายเข้าสู่ Stepper Motor, แรงบิดของมอเตอร์, ภาระโหลด และ Acceleration Ramp

ตัวแปรตาม : ความเร็วเชิงมุมของ Stepper Motor และการเกิด Loss Step

ตัวแปรควบคุม : แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์, ประเภทของ Stepper Motor และอุณหภูมิของระบบ

### 3.4 นิยามศัพท์เฉพาะ

#### 3.4.1 Stepper Motor

มอเตอร์ไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยพัลส์ไฟฟ้า โดยการหมุนแต่ละครั้งจะถูกแบ่งออกเป็นขั้นตอนที่มีมุมคงที่ เช่น  $1.8^\circ$  หรือ  $0.9^\circ$  ขึ้นอยู่กับชนิดของมอเตอร์ ซึ่งช่วยให้สามารถควบคุมตำแหน่งได้อย่างแม่นยำ

#### 3.4.2 Step Loss

การสูญเสียขั้นตอนในการหมุนของ Stepper Motor อันเนื่องมาจากมอเตอร์ไม่สามารถตอบสนองต่อสัญญาณพัลส์ได้อย่างถูกต้อง สาเหตุอาจเกิดจากการเร่งความเร็วเกินกำหนดหรือโหลดที่หนักเกินไป

### 3.4.3 Microstep Resolution

ความละเอียดในการควบคุมการหมุนของ Stepper Motor โดยการแบ่งขั้นตอนการหมุนย่อยลงไปในระดับที่เล็กกว่า Full Step ซึ่งช่วยเพิ่มความราบรื่นและความแม่นยำ

### 3.4.4 Pullout Torque

แรงบิดสูงสุดที่ Stepper Motor สามารถสร้างได้เมื่อหมุนที่ความเร็วหนึ่ง ๆ หากโหลดเกินค่าแรงบิดนี้ มอเตอร์จะสูญเสียขั้นตอนการหมุน

### 3.4.5 Butterworth Low Pass Filter

ตัวกรองสัญญาณที่ออกแบบมาให้ลดความแรงของสัญญาณความถี่สูง ขณะเดียวกันยังคงรักษาความแรงของสัญญาณในความถี่ต่ำอย่างสม่ำเสมอ เพื่อลดสัญญาณรบกวน

### 3.4.6 Nyquist-Shannon Sampling Theorem

ทฤษฎีการสุ่มตัวอย่างที่ระบุว่าความถี่การสุ่มตัวอย่างต้องมีค่ามากกว่าสองเท่าของความถี่สูงสุดในสัญญาณ เพื่อป้องกันการเกิด Aliasing

### 3.4.7 Quantization Error

ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นระหว่างค่าของสัญญาณ實際และค่าที่ได้จากการสุ่มตัวอย่าง ที่สุดในกระบวนการแปลงสัญญาณ

### 3.4.8 Load Inertia

ความเสื่อมของโหลดที่เข้ามายังแกนหมุนของ Stepper Motor โดยโหลดที่มีความเสื่อมสูงจะต้องการแรงบิดมากขึ้นในการเปลี่ยนแปลงความเร็ว

### 3.4.9 Frictional Load

แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจากการทำงานของระบบ เช่น แรงเสียดทานระหว่างแกนมอเตอร์และโหลด ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของ Stepper Motor และความแม่นยำ

### 3.4.10 จุดแท้ปกลา

จุดเชื่อมต่อกลางของชุดลวดใน Stepper Motor แบบ Unipolar ซึ่งช่วยให้การจ่ายกระแสในทิศทางเดียวสามารถสร้างสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนข้ามได้

### 3.4.11 SNR (Signal-to-Noise Ratio)

อัตราส่วนระหว่างพลังงานของสัญญาณที่สนใจ (Signal) กับพลังงานของสัญญาณรบกวน (Noise) ซึ่งค่าที่สูงขึ้นบ่งชี้ว่าสัญญาณมีคุณภาพและความแม่นยำที่ดีขึ้น

### 3.4.12 Saturation Point

จุดที่แรงดันหรือกระแสไฟฟ้าที่ขยายออกมากถึงค่ามากที่สุดที่วงจรหรืออุปกรณ์สามารถรองรับได้ หากเกินค่าดังกล่าว การทำงานจะไม่เป็นไปตามปกติ

### 3.4.13 Acceleration Ramp

การเพิ่มความเร็วของ Stepper Motor อย่างค่อยเป็นค่อยไปตามช่วงเวลา เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหา Step Loss ที่อาจเกิดจากการเร่งเร็วเกินไป

### 3.4.14 Chopper Drive

เทคนิคการควบคุมกระแสใน Stepper Motor โดยการเปิด-ปิดกระแสไฟฟ้าด้วยความถี่สูง ช่วยลดการสูญเสียพลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์

### 3.4.15 L/R Drive

ระบบควบคุมกระแสใน Stepper Motor ที่ใช้ความต้านทาน (R) และความหนี้ຍวน (L) ของขดลวดในการจำกัดกระแสไฟฟ้า ทำให้เหมาะสมสำหรับการควบคุมความเร็วต่อ

### 3.4.16 Cut Off Frequency

ค่าความถี่ที่กำหนดเป็นขอบเขตของตัวกรองสัญญาณ เช่น Low-Pass Filter จะลดตอนความถี่ที่สูงกว่าค่าที่กำหนดนี้

### 3.4.17 Trapezoidal

รูปแบบการเร่งหรือชะลอความเร็วใน Stepper Motor โดยแบ่งการเพิ่มและลดความเร็วออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ Ramp-Up (เร่งความเร็ว), Constant Speed (ความเร็วคงที่), และ Ramp-Down (ลดความเร็ว) เพื่อให้มอเตอร์หมุนได้ราบรื่นและป้องกันการสูญเสียขั้นตอน

## 3.5 นิยามเชิงปฏิบัติการ

### 3.5.1 Total Loss คือจำนวนขั้นตอนที่สูญเสียไปทั้งหมดในการหมุนของ Stepper Motor

### 3.5.2 RadLoss คือจำนวนมุนที่สูญเสียไปในหน่วยเรเดียนต่อการหมุนหนึ่งรอบ

### 3.5.3 Step Deviation หมายถึงการวัดจำนวนก้าวที่สูญเสียไปในระหว่างการทำงานของ Stepper Motor ขั้นเกิดจากแรงบิดไม่เที่ยงพอดหรือการเร่งที่สูงเกินไป โดยใช้ข้อมูลเบรียบเทียบจำนวนก้าวที่ควรเคลื่อนที่ กับจำนวนก้าวที่เคลื่อนที่จริง

### 3.5.4 Backlash หมายถึงระยะห่างมุนที่สูญเสียไปเมื่อเปลี่ยนทิศทางการหมุนของ Stepper Motor ขั้นเกิดจากความคลาดเคลื่อนในระบบ เช่น แรงเสียดทานหรือ Misalignment

### 3.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 3.6.1 Stepper Motor



รูป Stepper Motor

แหล่งที่มา : <https://th.rs-online.com/web/p/stepper-motors/5350401>

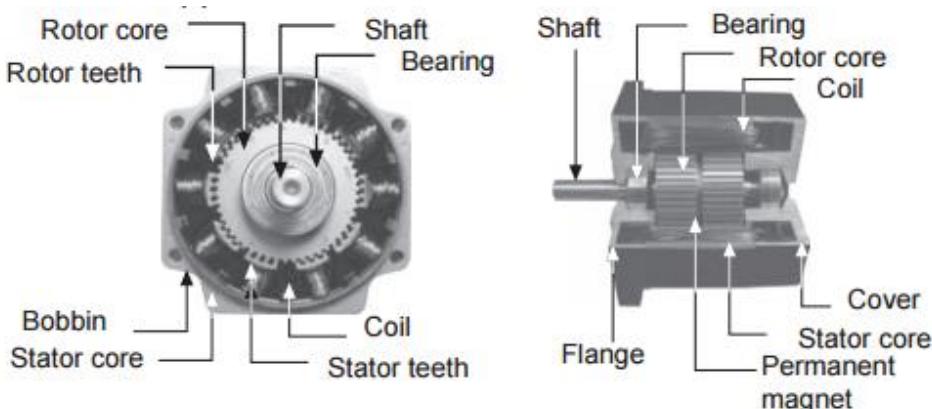
Stepper Motor เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วย Pulse ซึ่งเป็นมอเตอร์ชนิดหนึ่งที่สามารถหมุนในทิศทางที่แน่นอนได้ในทุก ๆ ขั้นตอน โดยโครงสร้างภายในนั้นจะประกอบไปด้วยขั้วแม่เหล็กบัน Stator ทำมาจากแผ่นเหล็กวงแหวน จะมีชี้นออกแบบประกอบกันเป็นชั้น ๆ โดยแต่ละชี้นที่ยื่นออกแบบนั้นจะมีชุดลวด (Coil) พันอยู่ Stepper Motor นั้นจะไม่สามารถขับเคลื่อนหรือทำงานเองได้ จำเป็นต้องมีวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการสร้างสัญญาณหรือจ่ายพลังสีไปให้กับ Stepping Motor Drive การสร้างสัญญาณนั้นจะเป็นต้องสร้างและเรียงลำดับของสัญญาณด้วยและอีกสิ่งที่สำคัญคือการดูตำแหน่งของสายที่ทำการต่อเข้ากับ Stepper Motor

มอเตอร์ชนิดนี้หมุนในหน่วยการหมุนที่เรียกว่า "Step" โดยแต่ละการหมุนจะมีมุมการหมุนคงที่ เช่น  $1.8^\circ$ ,  $0.9^\circ$  ขั้นอยู่กับชนิดของมอเตอร์

โดยมีส่วนประกอบที่น่าสนใจดังนี้

- (1) Rotor Core (แกนหมุนหลักของ Rotor) เป็นส่วนที่อยู่ตรงกลางของมอเตอร์ มีหน้าที่รับสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากชุดลวดและหมุนไปตามทิศทางของสนามแม่เหล็กนั้น
- (2) Rotor Teeth (ฟันของ Rotor) ส่วนของฟันบน Rotor ที่ช่วยให้มอเตอร์หมุนไปทีละ "Step" อย่างแม่นยำ ตามตำแหน่งของสนามแม่เหล็ก
- (3) Shaft (แกนหมุน) เป็นแกนโลหะที่เชื่อมต่อกับ Rotor Core ทำหน้าที่ส่งแรงหมุนจากมอเตอร์ไปยังภาระงานหรืออุปกรณ์อื่น
- (4) Bearing (ลูกปืน) รองรับการหมุนของแกนหมุน (Shaft) ลดแรงเสียดทานระหว่างการหมุน ช่วยให้การหมุนมีความราบรื่น
- (5) Coil (ชุดลวด) เป็นชุดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างสนามแม่เหล็กขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ทำให้ Rotor ถูกผลักหรือดูดให้หมุนไปตามลำดับ

- (6) Stator Core (แกน Stator) โครงสร้างหลักของ Stator ที่ทำจากเหล็กแม่เหล็ก ซึ่งรองรับขดลวดและช่วยให้สนามแม่เหล็กมีทิศทางที่เหมาะสม
- (7) Stator Teeth (ฟันของ Stator) ฟันของ Stator ทำหน้าที่จับตัวแห่งของฟัน Rotor ทำให้การหมุนเป็นไปตามมุ่งการ step อาย่างถูกต้อง
- (8) Bobbin (แกนพลาสติกของขดลวด) เป็นวัสดุที่รองรับขดลวด (Coil) ช่วยให้ขดลวดจัดเรียงตัวได้ดีและป้องกันความเสียหายจากความร้อน
- (9) Permanent Magnet (แม่เหล็กถาวร) ใช้ในมอเตอร์แบบ Permanent Magnet Stepper Motor ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กถาวรที่ส่งผลต่อการหมุนของ Rotor
- (10) Cover (ฝาครอบ) เป็นฝาครอบด้านนอกของมอเตอร์ที่ช่วยป้องกันชิ้นส่วนภายในจากสิ่งแปลกลบломและให้ความแข็งแรง
- (11) Flange (แพลน) แพลนยึดเป็นจุดสำหรับติดตั้งมอเตอร์เข้ากับโครงสร้างภายนอก เช่น แท่นรองรับหรือเครื่องจักร



รูปส่วนประกอบภายใน Stepper Motor

แหล่งที่มา : <https://mall.factomart.com/principle-of-stepping-motor/>

### 3.6.2 การ Loss Step

การทำงานผิดปกติของ Stepper Motor มักเกิดจากการสูญเสียขั้นตอน (Step Loss) ซึ่งทำให้มอเตอร์กระโดดข้ามขั้นตอนหรือหยุดทำงาน โดยสาเหตุอาจเกิดจากตัวมอเตอร์เองหรือระบบควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ การระบุปัญหาอาจเป็นเรื่องยาก เนื่องจากการอ่านค่ากระแสไฟฟ้าของมอเตอร์นั้นไม่ค่อยมีประโยชน์ และมอเตอร์จำนวนมากไม่มีอุปกรณ์ป้อนกลับ (Feedback) เพื่อตรวจสอบพัฒนาระบบที่ทำงาน ซึ่งมีปัญหาหลักดังนี้

#### (1) การเลือก Stepper Motor ไม่เหมาะสมกับการใช้งาน

ทำให้เกิด Loss Step เกิดได้หากพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไม่เหมาะสมกับความต้องการใช้งาน ฉะนั้นควรพิจารณาแก้ไขด้วย

- (1.1) คำนวณแรงบิดและความเร็วที่ต้องการในสถานการณ์ที่เลวร้ายที่สุด (Worst-case Scenario)
- (1.2) เว้นระยะความปลดภัยอย่างน้อย 30% บนกราฟ แรงบิด-ความเร็ว (Pull-out Torque) เพื่อให้มอเตอร์สามารถรับภาระได้แม้เกิดแรงกระชาก
- (1.3) ตรวจสอบว่าไม่มีปัจจัยภายนอก เช่น โหลดติดขัด ที่อาจทำให้มอเตอร์หยุดทำงาน

#### (2) ปัญหาในโหมด Start-Stop

ในโหมด Start-Stop (เปิด-ปิดทันที) Stepper Motor ต้องสร้างแรงบิดให้มากพอเพื่อเข้าชันจะแรงเนื้อiy และแรงเสียดทานของโหลดภายในก้าวแรก หากไม่สามารถทำได้ มอเตอร์จะไม่เริ่มหมุน มีสาเหตุและวิธีแก้ไขดังนี้

หากโหลดหนักเกินไป	ให้ใช้มอเตอร์ที่มีกำลังสูงกว่า
หากความถี่สัญญาณสูงเกินไป	ให้ลดความถี่ลง เพื่อให้มอเตอร์สามารถหมุนได้ทัน
หากกระแสไฟฟ้าต่ำเกินไป	ให้เพิ่มกระแสไฟเพียงพอ โดยเฉพาะในช่วงเริ่มต้นการหมุน

#### (3) การเร่งความเร็วแบบ Trapezoidal

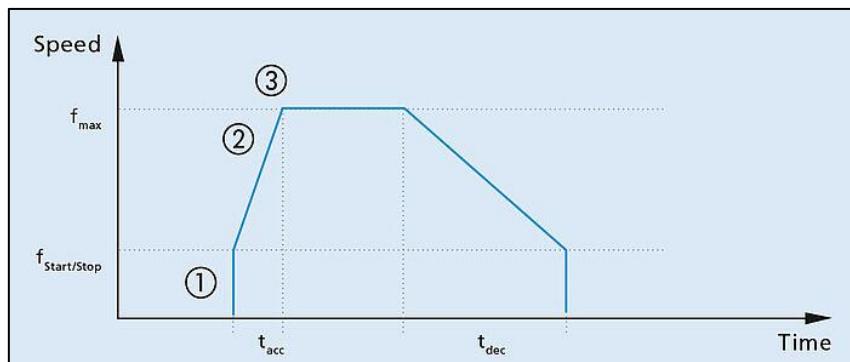
เมื่อมอเตอร์ต้องเร่งความเร็วขึ้นสู่ความเร็วสูงสุดแบบ Trapezoidal การเร่งที่รวดเร็วเกินไปอาจทำให้มอเตอร์หมุนไม่ทันและเกิด Step Loss มีสาเหตุและวิธีแก้ไขดังนี้

หากมีการเร่งเร็วเกินไป	ให้ลดความลาดชันของโปรไฟล์การเร่งความเร็ว
หากเกิดการสั่นพ้อง (Resonance) ให้ทำ Microstep, เพิ่มการ Damping เชิงกล	
หากแหล่งจ่ายไฟไม่เหมาะสม	ให้ตรวจสอบแรงดันและกระแสให้ตรงสเปกมอเตอร์

#### (4) การผิดพลาดจากการสลับเฟสไฟฟ้าภายนอก (External Commutation)

ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการสลับเฟสไฟฟ้า (Commutation) ของ Stepper Motor ที่ถูกควบคุมโดย อุปกรณ์ภายนอก เช่น Driver หรือวงจรควบคุมไฟฟ้า ซึ่งการทำงานผิดพลาดนี้ส่งผลให้สัญญาณไฟฟ้าที่จ่าย เข้าสู่ชุดลวดมอเตอร์ไม่เป็นไปตามลำดับที่ถูกต้อง ทำให้มอเตอร์เกิด Step Loss ซึ่งมักมีลักษณะดังนี้

เกิด Step Loss เป็นจำนวนที่ไม่เป็นตัวเท่าของ 4 เช่น 8, 12 หรือ 16 ขั้น (ปกติ Stepper Motor จะ ทำงานเป็นรอบที่เกี่ยวข้องกับการสลับเฟสของสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งสาเหตุหลักมักมาจากการควบคุมที่ ผิดพลาดในลำดับของสัญญาณไฟฟ้าที่ส่งไปยังชุดลวด (ผิดเฟส, คลาดเคลื่อนในการส่งสัญญาณ) นักไม่ได้เกิด จากตัวมอเตอร์ แต่เกิดจากอุปกรณ์ควบคุมหรือการตั้งค่าเฟสไฟฟ้าไม่ถูกต้อง



รูปแสดงการเร่งแบบ Trapezoidal

แหล่งที่มา : <https://www.faulhaber.com/it/know-how/tutorials/stepper-motor-tutorial-how-to-prevent-step-losses-with-stepper-motors/>

#### (5) Step Loss จากภายนอก

การสูญเสียขั้นตอนที่ไม่ได้เกิดจากปัญหาภายในของ Stepper Motor หรือระบบควบคุม แต่เกิดจาก เหตุการณ์หรือสภาพแวดล้อมภายนอกที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของมอเตอร์โดยตรง ซึ่งปัญหาเหล่านี้ สามารถระบุได้ค่อนข้างง่ายจากลักษณะของการทำงานผิดปกติของมอเตอร์ ซึ่งมักมีสาเหตุมาจากการ

(5.1) โหลดเปลี่ยนแปลงกระแทกหันหัน : การเพิ่มหรือลดภาระโหลดที่ไม่คาดคิด ทำให้แรงบิดที่มอเตอร์ ต้องสร้างขึ้นไม่สอดคล้องกับความต้องการของระบบ

(5.2) การติดขัดของกลไกหรือระบบเครื่องกล : อุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับมอเตอร์ เช่น สายพาน, รยางเลื่อน, เพียง มีสิ่งกีดขวางหรือเกิดการเสียดสี ทำให้มอเตอร์หยุดการหมุน

(5.3) แรงกระแทกหรือการสั่นสะเทือนจากภายนอก : การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากเครื่องจักรอื่น ภายในระบบ หรือแรงกระแทกจากการทำงาน ส่งผลให้มอเตอร์สูญเสียการควบคุมและข้าม ขั้นตอน

(5.4) สภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม : ความร้อนสูงเกินไป, ความชื้น, หรือการจ่ายไฟฟ้าที่ไม่เสถียร ทำให้มอเตอร์ทำงานผิดพลาด

### 3.6.3 การสั่งความเร็วด้วยความเร่งของ Stepper Motor

การสั่งความเร็วด้วยความเร่ง (Acceleration Control) สำหรับ Stepper Motor เป็นเทคนิคที่สำคัญเพื่อให้มอเตอร์ทำงานได้อย่างราบรื่นและป้องกันปัญหา Step Loss โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องการเปลี่ยนแปลงความเร็วจากจุดหยุดนิ่งไปจนถึงความเร็วสูงสุด

หลักการของการสั่งความเร็วด้วยความเร่ง ไม่สามารถเปลี่ยนความเร็วจากศูนย์ไปยังความเร็วสูงสุดได้ในทันที เนื่องจากมอเตอร์มีข้อจำกัดจากแรงเฉื่อยของโหลดและแรงเสียดทานที่ต้องเอาชนะ การเปลี่ยนความเร็วอย่างฉับพลัน จะทำให้เกิดปัญหา Step Loss ซึ่งทำให้มอเตอร์สูญเสียความแม่นยำ

เพื่อแก้ไขปัญหานี้ การควบคุมความเร่ง จึงถูกนำมาใช้ โดยทำการเพิ่มความเร็วทีละน้อยจากความเร็วต่ำไปยังความเร็วสูงสุดในลักษณะ Ramp-up และลดความเร็วลงในลักษณะ Ramp-down เมื่อหยุดการทำงาน โดยรูปแบบการสั่งความเร็วด้วยความเร่งมีดังนี้

- (1) Linear Acceleration (การเร่งเชิงเส้น) การเพิ่มความเร็วอย่างคงที่ทีละขั้นตามระยะเวลาที่กำหนด โปรไฟล์ความเร็วเป็นเส้นตรง (Ramp-up) ไปยังจุดความเร็วสูงสุด และ Ramp-down เมื่อหยุดทำงาน
- (2) Trapezoidal Velocity Profile การเร่งความเร็วจากศูนย์ไปยังจุดสูงสุด จากนั้นรักษาความเร็วคงที่ และชะลอความเร็วลง ช่วยให้การทำงานราบรื่น และลดความเสี่ยงของ Step Loss
- (3) S-Curve Acceleration (การเร่งแบบโค้ง S) การเพิ่มความเร็วอย่างนุ่มนวลเป็นเส้นโค้ง (ไม่ใช่เส้นตรง) ช่วยลดแรงกระชากระดับแรงสั่นสะเทือน

รูปแบบการเร่งความเร็ว	ข้อดี	ข้อเสีย
Linear Acceleration	<ul style="list-style-type: none"> <li>- โครงสร้างโปรไฟล์ง่าย เข้าใจง่าย</li> <li>- การเร่งคงที่ ทำให้ควบคุมได้ง่าย</li> </ul>	อาจเกิดแรงกระชากในช่วงเริ่มต้นและหยุดแรงสั่นสะเทือนยังคงมีอยู่
Trapezoidal Velocity Profile	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ราบรื่นขึ้นกว่า Linear</li> <li>- ลดการกระชากในช่วงรักษาความเร็วคงที่</li> <li>- ควบคุมได้แม่นยำ</li> </ul>	ช่วงเร่งและลดความเร็วอาจยังมีการสั่นสะเทือนเล็กน้อยในบางกรณี
S-Curve Acceleration	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ราบรื่นที่สุด ลดแรงกระชากระดับแรงสั่นสะเทือนได้ดี</li> <li>- ช่วยยืดอายุการใช้งานของมอเตอร์</li> <li>- เหมาะสำหรับโหลดที่ต้องการความแม่นยำสูง</li> </ul>	ซับซ้อนในการออกแบบและควบคุม ต้องการทรัพยากรุ่นแรง

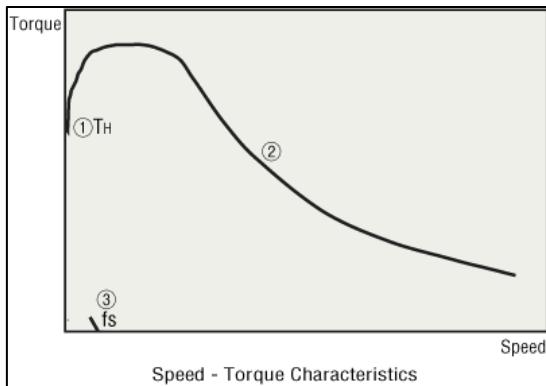
ตารางแสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวิธีการสั่งความเร็วด้วยความเร่งของ Stepper Motor

### 3.6.4 ลักษณะเฉพาะของ Stepper Motor

คุณลักษณะของ Stepper Motor สามารถจำแนกออกอย่างกว้างๆ ได้ 2 ประเภท ดังนี้

#### (1) Dynamic Characteristics

##### (1.1) Speed - Torque Characteristics



รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วของ Stepper Motor

แหล่งที่มา : <https://www.orientalmotor-vie.com.vn/vn/tech/reference/stepping-motor03>

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงบิดนี้ถูกกำหนดโดยมอเตอร์และ Driver ซึ่งได้รับผลกระทบอย่างมากจากชนิดของ Driver ที่ใช้

##### (1.1.1) Maximum Holding Torque (TH: Holding Torque)

แรงบิดสูงสุด (แรงยึด) ที่ Stepper Motor มีเมื่อยูในสถานะเปิดไฟ (กระแสไฟฟ้าตามค่าพิกัด) และหยุดนิ่ง

##### (1.1.2) Pullout Torque

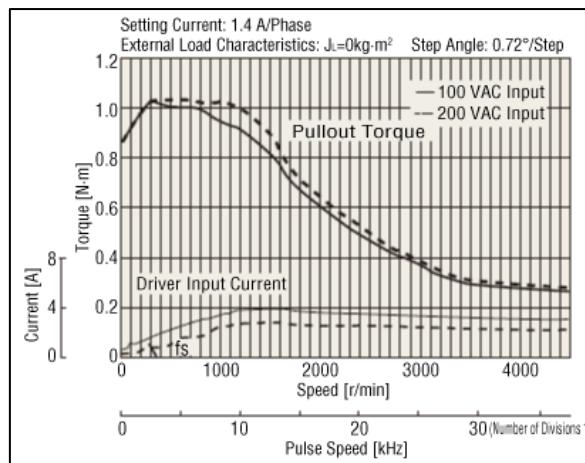
แรงบิดสูงสุดในทันทีที่สามารถสร้างได้ในแต่ละความเร็วรอบ เมื่อเลือกมอเตอร์ ควรตรวจสอบให้แน่ใจว่าแรงบิดที่ต้องการอยู่ภายในการฟุ่นเฟือยนี้

##### (1.1.3) Maximum Starting Frequency ( $f_S$ )

ความถี่พัลส์สูงสุดที่มอเตอร์สามารถเริ่มและหยุดได้ทันที (โดยไม่ต้องใช้เวลาเร่ง/ลดความเร็ว) เมื่อไม่มีแรงเสียดทานและความเรื้อรัง (Load Inertia) บนมอเตอร์ ซึ่งหากต้องการขับมอเตอร์ที่ความถี่พัลส์สูงกว่านี้ จะต้องเพิ่มเวลาเร่ง/ลดความเร็ว โดยค่านี้จะลดลงเมื่อมี Load Inertia บนมอเตอร์

##### (1.1.4) Maximum Response Frequency ( $f_r$ )

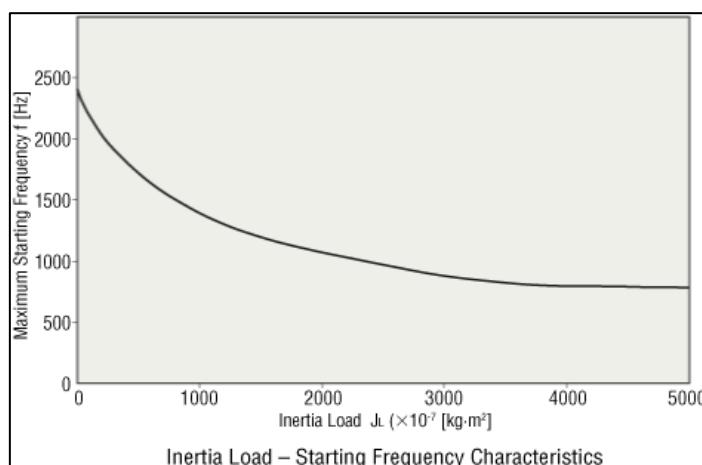
ความถี่พัลส์สูงสุดที่ Stepper Motor สามารถทำงานได้ด้วยการเร่ง/ลดความเร็วที่ลงน้อย เมื่อไม่มีแรงเสียดทานและ Load Inertia



รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความเร็วของพัลส์ใน Stepper Motor

แหล่งที่มา : <https://www.orientalmotor-vie.com.vn/vn/tech/reference/stepping-motor03>

### (1.2) Load Inertia - Starting Frequency Characteristics



รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่สูงสุดและความเมื่อยโหลดใน Stepper Motor

แหล่งที่มา : <https://www.orientalmotor-vie.com.vn/vn/tech/reference/stepping-motor03>

เนื่องจาก Rotor ของ Stepper Motor และ Load มีความเมื่อย ทำให้เกิดความล่าช้าหรือความเร่งล้าหน้าของแกน摩托อร์ระหว่างการเริ่มต้นและหยุดในทันที ค่านี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่พัลส์ แต่หากเกินค่าที่กำหนด มอเตอร์จะไม่สามารถติดตามความถี่พัลส์ได้และเกิด Step Loss ตามมา ซึ่งความถี่พัลส์ก่อนที่ระบบจะสัญญาณเสียขั้นตอนเรียกว่า ความถี่เริ่มต้น (Starting Frequency)

ความสัมพันธ์ของความถี่เริ่มต้นสูงสุดและความเมื่อยโหลดสามารถประมาณได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$f = \frac{f_s}{\sqrt{1 + \frac{J_L}{J_o}}}$$

เมื่อ $f_s$	คือ ความถี่เริ่มต้นสูงสุดของมอเตอร์เพียงอย่างเดียว	(Hz),
$f$	คือ ความถี่เริ่มต้นสูงสุดเมื่อมี Load Inertia	(Hz),
$J_o$	คือ ความเฉื่อยของ Rotor	(N) และ
$J_L$	คือ ความเฉื่อยของโหลด	(N)

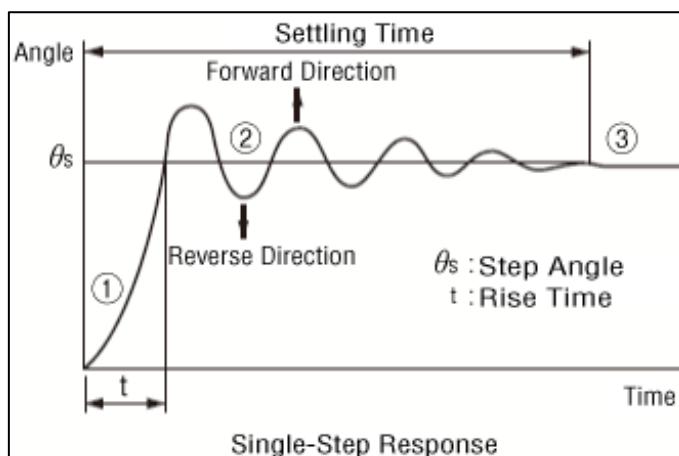
### (1.3) Vibration Characteristics

Stepper Motor หมุนในลักษณะการเคลื่อนที่เป็นขั้น (Step) ต่อเนื่อง การตอบสนองของแต่ละขั้นตอนซึ่งแสดงในรูปแบบการเคลื่อนที่เป็นขั้นตอน เรียกว่า Single-Step Response คือ

(1.3.1) เมื่อส่งพลังเพียงครั้งเดียวไปยัง Stepper Motor ที่หยุดนิ่ง มอเตอร์จะเร่งไปยังมุมของขั้นตอนถัดไป

(1.3.2) มอเตอร์ที่เร่งความเร็วจะผ่านมุมของขั้นตอนนั้น เกิดการเร่งสัมภានา (Overshoot) และถูกดึงกลับในทิศทางตรงกันข้าม

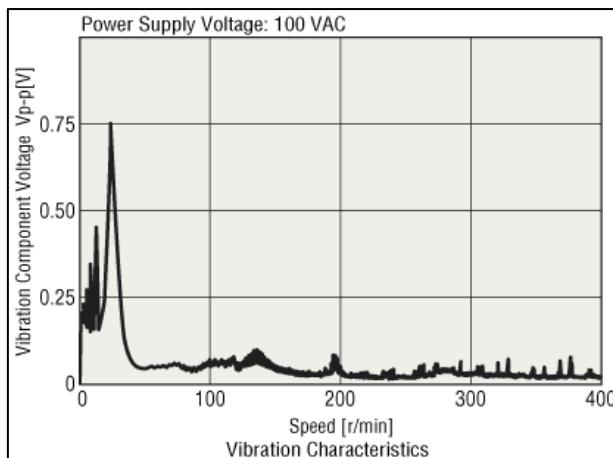
(1.3.3) หลังจากเกิดการสั่นแบบลดลง (Damped Oscillation) มอเตอร์จะหยุดที่ตำแหน่งของมุมขั้นตอนที่กำหนด



รูปแสดงการสั่นสะเทือนที่เกิดจาก Single-Step Response

แหล่งที่มา : <https://www.orientalmotor-vie.com.vn/vn/tech/reference/stepping-motor03>

ที่ Single-Step Response เป็นสาเหตุของการสั่นสะเทือนที่ความเร็วต่ำ และคุณลักษณะการสั่นสะเทือนนี้มักแสดงถึงระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนในขณะที่ Stepper Motor กำลังหมุน ฉะนั้นหากการสั่นสะเทือนนีน้อยลง จะช่วยให้การหมุนราบเรื่นมากขึ้น

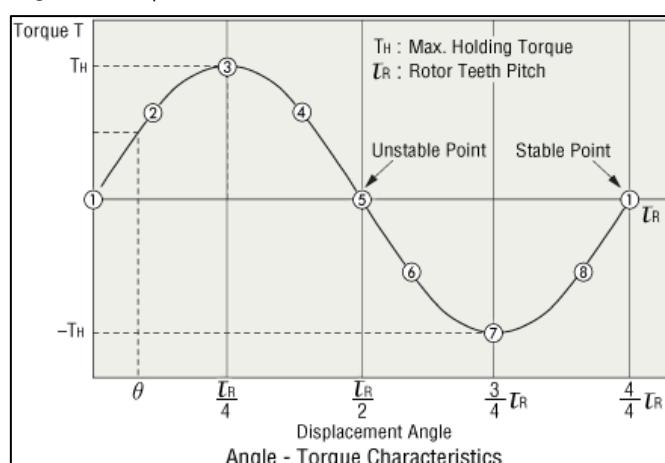


รูปแสดง Vibration Characteristics

แหล่งที่มา : <https://www.orientalmotor-vie.com.vn/vn/tech/reference/stepping-motor03>

## (2) Static Characteristics

### (2.1) Angle - Torque Characteristics



รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและการทำมุมของ Stepper Motor

แหล่งที่มา : <https://www.orientalmotor-vie.com.vn/vn/tech/reference/stepping-motor03>

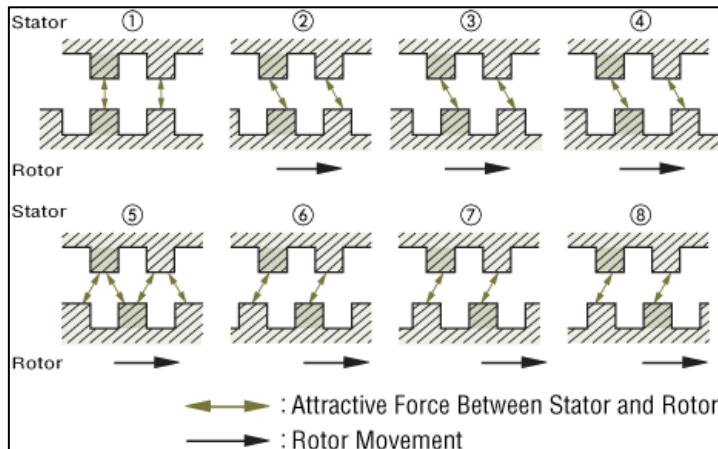
ความสัมพันธ์ระหว่างมุมการหมุนของ Rotor และแรงบิดที่เกิดขึ้นเมื่อมอเตอร์ถูกกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าตามค่าพิกัด และมีแรงบิดภายนอกกระทำต่อแกนหมุนของมอเตอร์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

#### (2.1.1) จุดสมดุลและแรงบิด

เป็นจุดที่ฟันของ Stator และ Rotor อยู่ในตำแหน่งที่ตรงกันอย่างสมบูรณ์ (ฟันซ้อนกัน) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เสียงรบกวนสูด และ Rotor จะหยุดอยู่ที่ตำแหน่งนี้เมื่อไม่มีแรงภายนอกกระทำ หากมีแรงบิดภายนอกกระทำให้ Rotor เป็นวงจรเดียว แรงบิด  $T(+)$  จะดึง Rotor กลับสู่จุดสมดุล

### (2.1.2) Unstable Point (จุดไม่เสถียร)

เป็นจุดที่ฟันของ Stator และ Rotor เยื่องกันครึ่งหนึ่งของระยะพิทช์ (1/2 pitch) ซึ่งเป็นจุดที่ไม่เสถียร หากมีแรงภายนอกเล็กน้อยกระทำต่อモเตอร์ Rotor จะถูกผลักไปยังจุดสมดุลข้างใดข้างหนึ่งทันที



รูปแสดง Rotor Movement ผ่านจุด Stable และ Unstable

แหล่งที่มา : <https://www.orientalmotor-vie.com.vn/vn/tech/reference/stepping-motor03>

### (2.2) Maximum Holding Torque (TH)

เมื่อแรงภายนอกที่กระทำต่อโมเตอร์เพิ่มขึ้น จะมีจุดหนึ่งที่แรงบิดถึงค่าสูงสุด ที่เรียกว่า Maximum Holding Torque (TH) ซึ่งหากแรงภายนอกเพิ่มขึ้นจนเกินจุดนี้ แรงบิดที่เกิดขึ้นจะทำให้ Rotor หมุนไปยังจุดสมดุลถัดไปและหยุดที่ตำแหน่งนั้น

### (2.3) ความแม่นยำเชิงมุม (Angular Accuracy)

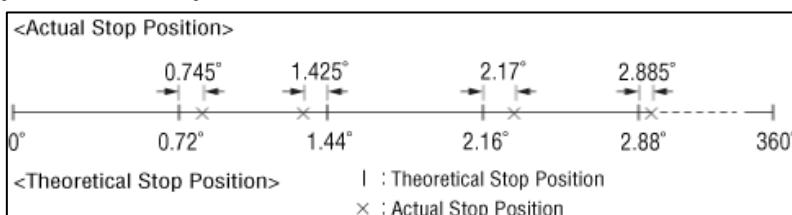
ความแม่นยำเชิงมุมของ Stepper Motor อยู่ที่  $\pm 3$  Arcmin ( $0.05^\circ$ ) ภายใต้สภาวะไม่มีโหลด ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้อาจเกิดจาก

#### (2.3.1) ความแม่นยำเชิงกลของ Stator และ Rotor

#### (2.3.2) ความไม่สม่ำเสมอของความต้านทานในชุดลวดของ Stator

#### (2.3.3) Stop Position Accuracy (ความแม่นยำของตำแหน่งหยุด)

ความแตกต่างระหว่างตำแหน่งหยุดตามทฤษฎีและตำแหน่งหยุดจริงของ Rotor ซึ่งวัดเป็นค่าสูงสุด (+) และค่าสูงสุด (-) ที่เกิดขึ้นเมื่อหมุนมอเตอร์ทีละขั้นรอบ  $360^\circ$



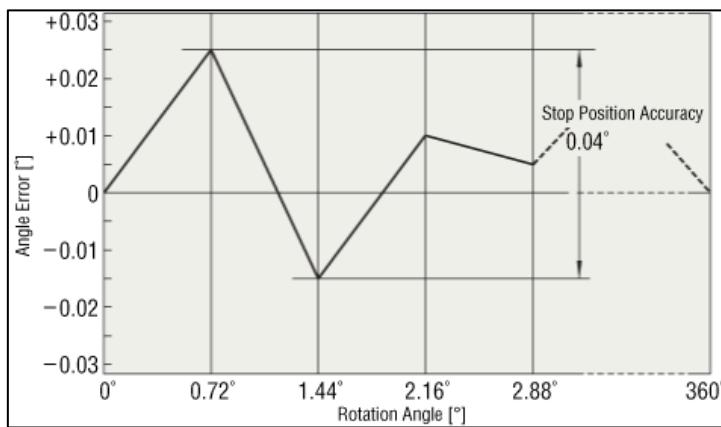
รูปแสดงความแตกต่างระหว่างตำแหน่งหยุดตามทฤษฎีและตำแหน่งหยุดจริงของ Rotor

แหล่งที่มา : <https://www.orientalmotor-vie.com.vn/vn/tech/reference/stepping-motor03>

#### (2.4) อิทธิพลของ Frictional Load ต่อความแม่นยำเชิงมุม

ในการใช้งานจริง Frictional Load จะส่งผลให้เกิดการเบี่ยงเบนของมุน Rotor จากตำแหน่งที่คาดหวัง หากแรงเสียดทานมีค่าคงที่ การเบี่ยงเบนของมุนจะมีค่าคงที่ในกรณีที่ไม่เตอร์หมุนไปในทิศทางเดียว (Unidirectional Operation)

แต่ในกรณีหมุนไป-กลับ (Bidirectional Operation) การเบี่ยงเบนของมุนจะมีค่าเป็นสองเท่าของการเบี่ยงเบนปกติ ทำให้มีอัตราการความแม่นยำในการหยุดสูงสุด ควรกำหนดตำแหน่งหยุดจากทิศทางเดียวเท่านั้น เพื่อให้การเบี่ยงเบนเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ



รูปแสดงถึง Step Loss ต่อองศาที่เปลี่ยนแปลงไปตามจริง

แหล่งที่มา : <https://www.orientalmotor-vie.com.vn/vn/tech/reference/stepping-motor03>

### 3.6.5 Stepper Motor Specification

#### (1) Stability and Resolution in Control (ความเสถียรและความละเอียดในการควบคุม)

ความเสถียรในการควบคุมจำเป็นต้องใช้จำนวน Microstep ที่สูง เพื่อช่วยให้ควบคุมตำแหน่งได้อย่างราบรื่น แม้ในขั้นตอนที่เล็กมาก ซึ่งความละเอียดในการควบคุมจะช่วยลดข้อผิดพลาดและเพิ่มความแม่นยำในการทำงาน

#### (2) Repeatability (ความสามารถในการทำซ้ำ)

Stepper Motor มีความแม่นยำอยู่ที่ประมาณ 3–5% ของแต่ละ Step โดยข้อผิดพลาดนี้ไม่จะสะสมจาก Step หนึ่งไปยัง Step ถัดไป ซึ่งความสามารถในการทำซ้ำขึ้นอยู่กับระบบอิเล็กทรอนิกส์ของ Driver, Load ที่มอเตอร์ต้องรับ และปัจจัยภายนอก เช่น การสั่นสะเทือน ความร้อน และความชื้น

#### (3) Velocity (ความเร็ว)

ในการใช้งานมักต้องการความเร็วแตกต่างกันไป เช่น การเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วสำหรับการกำหนดตำแหน่ง, การเคลื่อนที่ช้าในระดับ 100 μm/s ถึงต่ำกว่า 100 nm/s สำหรับงานที่ต้องการความละเอียดสูง

(4) Step Angle (มุมหมุนต่อขั้น)

หมายถึงการหมุนเชิงมุมของแกนมอเตอร์เมื่อได้รับพลังไฟฟ้า 1 ครั้ง มักแสดงเป็นองศา เช่น  $1.8^\circ$ ,  $0.9^\circ$ ,  $0.72^\circ$ , หรือ  $0.36^\circ$  ตัวอย่าง มอเตอร์ที่มีมุมหมุนต่อขั้น  $0.9^\circ$  จะหมุนครบ  $360^\circ$  ด้วย 400 ขั้น

(5) Step Size (ขนาดการหมุนต่อขั้น)

หมายถึงระยะทางเชิงเส้นที่แกนมอเตอร์เคลื่อนที่ต่อ 1 ขั้น กำหนดโดยมุมหมุนต่อขั้นและลักษณะทางกลของมอเตอร์ เช่น ระบบเกียร์หรือกลไกเชื่อมต่อ

(6) Motor Flange Size (ขนาดหน้าแปลนมอเตอร์)

ใช้มาตรฐาน NEMA (National Electrical Manufacturers Association) เช่น NEMA 14 ถึง NEMA 56 ตัวอย่าง NEMA 17 มีขนาดหน้าแปลนประมาณ 43.2 มม. และมีรูติดตั้งแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส

(7) Motor Connection Type (ประเภทการเชื่อมต่อ)

M Connector (เช่น M12) ตัวเชื่อมต่อทรงกลมที่นิยมในงานอุตสาหกรรม RJ45 Connector ตัวเชื่อมต่อที่ใช้ในระบบเครือข่าย Ethernet

(8) Pullout Torque (แรงบิดดึงออก)

หมายถึงแรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์สามารถสร้างได้ที่ความเร็วหนึ่ง ๆ ควรเปรียบเทียบความต้องการแรงบิดกับกราฟ Speed-Torque Curve ของผลิตภัณฑ์

(9) Maximum Holding Torque (แรงบิดหยุดสูงสุด)

หมายถึงแรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์สามารถยึดตำแหน่งไว้เมื่ออยู่ในสถานะหยุดนิ่งและได้รับพลังงาน

(10) Encoder (ตัวเข้ารหัสตำแหน่ง)

ใช้ในการแปลงการเคลื่อนที่เชิงกลเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อให้ระบบควบคุมติดตามตำแหน่ง ความเร็ว และทิศทางแบบเรียลไทม์ Encoder Resolution (CPR/PPR): จำนวนพลั๊สที่สร้างได้ต่อการหมุน 1 รอบเต็มของแกนมอเตอร์

(11) Current per Phase (กระแสต่อเฟส)

หมายถึงปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลในแต่ละชุดลวดของเฟสมอเตอร์ กระแสที่สูงขึ้นให้แรงบิดที่สูงขึ้นแต่เพิ่มการใช้พลังงานและการเกิดความร้อน

(12) Number of Phases (จำนวนเฟส)

มอเตอร์มี 2 แบบหลัก 2-Phase Stepper Motor: ชุดลวด 2 ชุด (Phase A และ Phase B) จ่ายต่อการควบคุม 4-Phase Stepper Motor: ชุดลวด 4 ชุด (Phase A, B, C, D) ให้การเคลื่อนที่ราบรื่นและความลักษณะดีกว่า

(13) Inductance (ความเหนี่ยวนำ)

ค่าความเหนี่ยวนำต่อเฟสมีผลต่อความเร็วและแรงบิดที่มอเตอร์สามารถทำได้ ความเหนี่ยวนำที่สูงขึ้นช่วยให้การทำงานราบรื่นขึ้นในความเร็วสูง

(14) Motor Length (ความยาวของมอเตอร์)

หมายถึงขนาดทางกายภาพของมอเตอร์ในแนวแกนหมุน (หน่วย: มม.)

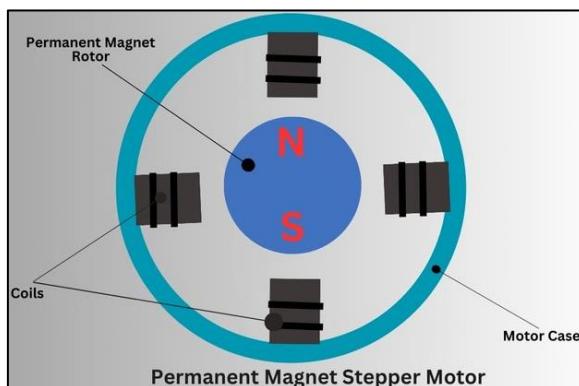
(15) Resistance and Rated Voltage (ความต้านทานและแรงดันไฟฟ้าพิกัด)

ระบุค่าความต้านทานต่อเฟสและแรงดันที่จ่ายเมื่อมอเตอร์หยุดนิ่ง ควรเลือกแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมกับแหล่งจ่ายไฟและ Driver

### 3.6.6 Stepper Motor Rotor Type

Rotor ใน Stepper Motor เป็นส่วนสำคัญที่หมุนและรับแรงจากสนามแม่เหล็กที่สร้างโดย Stator โดยประเภทของ Rotor ที่ใช้ใน Stepper Motor สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลัก โดยแต่ละประเภทมีคุณสมบัติและการใช้งานเฉพาะดังนี้

#### (1) Permanent Magnet (PM) Stepper Motor



รูปส่วนประกอบของ Permanent Magnet (PM) Stepper Motor

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

Stepper Motor ชนิด Permanent Magnet (PM) เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่แปลงพลังพัลส์ไฟฟ้าให้เป็นการเคลื่อนที่เชิงกลอย่างแม่นยำผ่านสนามแม่เหล็ก โดย Rotor ของมอเตอร์ชนิดนี้ฝังแม่เหล็กถาวรไว้ ซึ่งแม่เหล็กเหล่านี้จะสร้างสนามแม่เหล็กที่ทำปฏิกิริยากับสนามแม่เหล็กจาก Stator ทำให้มอเตอร์เคลื่อนที่ในมุมที่กำหนด

ข้อดีคือ PM Stepper Motor สามารถกำหนดตำแหน่งได้อย่างแม่นยำโดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์ป้อนกลับ (Feedback Device) ซึ่งช่วยลดความซับซ้อนของการออกแบบและเพิ่มความน่าเชื่อถือโดยลดข้อผิดพลาดที่เกิดจากเซนเซอร์ และให้แรงบิดสูงที่ความเร็วต่ำ เนื่องจากใช้แม่เหล็กถาวรในการสร้างสนามแม่เหล็ก ทำให้มอเตอร์ชนิดนี้สามารถรักษาแรงบิดสูงได้แม้ในความเร็วต่ำทำให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ต้องการความแม่นยำและแรงบิดสูงที่ความเร็วต่ำ เช่น หุ่นยนต์, เครื่องจักรอัตโนมัติ, และอุปกรณ์ทางการแพทย์

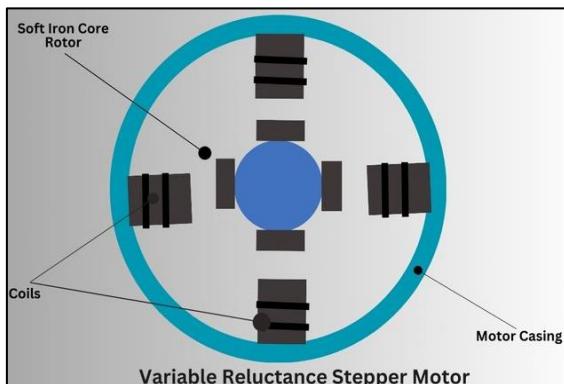
หลักการทำงาน PM Stepper Motor ทำงานบนหลักการแม่เหล็กไฟฟ้า โดยประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก

Stator : ส่วนที่อยู่กับที่ ประกอบด้วยชุดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าจัดเรียงในรูปแบบเฉพาะ

Rotor : ส่วนที่หมุน ประกอบด้วยแม่เหล็กถาวรพร้อมพื้นผิวแบบมีช่อง

เมื่อต่อกระแสไฟฟ้ากับชุดลวดใน Stator จะเกิดสนามแม่เหล็ก ซึ่งทำปฏิกิริยากับแม่เหล็กถาวรใน Rotor ทำให้เกิดการหมุน ซึ่งการควบคุมทิศทางการหมุนจะขึ้นอยู่กับลำดับการจ่ายกระแสไฟไปยังชุดลวดของ Stator

## (2) Variable Reluctance (VR) Stepper Motor



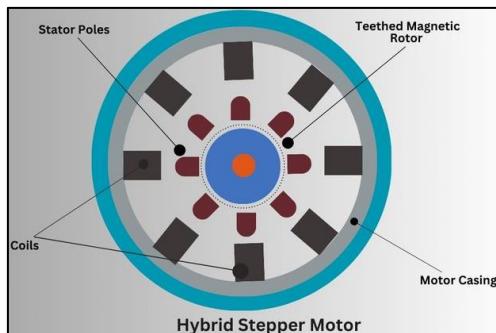
รูปส่วนประกอบ Variable Reluctance (VR) Stepper Motor  
แหล่งที่มา : <https://mechtex.com/blog/types-of-stepper-motor>

Stepper Motor ชนิด Variable Reluctance (VR) หรือ Reluctance Stepper Motor มี Rotor ทำจากเหล็กอ่อน (Soft Iron) และ Stator ที่มีฟันพร้อมชุดลวดในแต่ละฟัน

ข้อดีคือมีแรงบิดต่ำขณะไม่หมุน จากการออกแบบที่ช่วยลดแรงต้านเมื่อ Rotor เริ่มหมุน ทำให้มอเตอร์เคลื่อนที่ได้ราบรื่น ลดการสั่นสะเทือนและเสียงรบกวน รวมไปถึงให้แรงบิดสูงที่ความเร็วต่ำการติดต่อระหว่างฟันของ Rotor และ Stator ช่วยสร้างแรงบิดสูงแม้ในความเร็วต่ำ VR Stepper Motor ใช้ในงานที่ต้องการกำลังสูง เช่น เครื่องจักรอุตสาหกรรม, หุ่นยนต์, และเครื่อง CNC ที่ต้องการกำหนดตำแหน่งที่แม่นยำและการเคลื่อนที่ที่ราบรื่น

หลักการทำงาน VR Stepper Motor ทำงานบนหลักการของความต้านทานแม่เหล็ก (Magnetic Reluctance) โดยชุดลวดใน Stator สร้างสนามแม่เหล็กที่ดึงดูดฟันของ Rotor ให้หมุน โดยการควบคุมการหมุนสามารถทำได้ทั้งแบบ Unipolar Drives (จ่ายไฟทางเดียว) และ Bipolar Drives (จ่ายไฟสองทาง)

### (3) Hybrid Synchronous (HS) Stepper Motor



รูปส่วนประกอบ Hybrid Synchronous (HS) Stepper Motor

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

Stepper Motor ชนิด Hybrid Synchronous (HS) หรือ Hybrid Stepper Motor เป็นมอเตอร์ที่ผสมผสานคุณสมบัติของ PM และ VR Stepper Motor โดย Rotor มีทั้งแม่เหล็กถาวรและฟันที่ช่วยเพิ่มความแม่นยำ

ข้อดีคือสามารถให้แรงบิดสูงที่ความเร็วต่ำ เนื่องจากการติดต่อกันระหว่างแม่เหล็กถาวรในRotor และขดลวดในStator ช่วยให้เกิดแรงบิดสูงและแรงบิดหยุด (Holding Torque) ที่มั่นคง และให้ความแม่นยำในการกำหนดตำแหน่ง เพราะ Hybrid Stepper Motor สามารถทำงานได้ในระบบวงปิด (Closed-Loop System) โดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์ป้อนกลับ และมีความละเอียดในการหมุนที่  $0.9^\circ$  ถึง  $1.8^\circ$  เมื่อกับการนำไปใช้งาน Hybrid Stepper Motor ใช้ในงานที่ต้องการความแม่นยำสูง เช่น เครื่องพิมพ์ 3D, เครื่อง CNC, และอุปกรณ์ทางการแพทย์

หลักการทำงานคือ เมื่อขดลวดในStator ถูกกระตุ้น จะเกิดสนามแม่เหล็กที่ดึงดูดฟันของRotor ฟันของRotor ช่วยเพิ่มความละเอียดในการกำหนดตำแหน่ง ทำให้ Hybrid Stepper Motor มีความสามารถในการเคลื่อนที่ที่นุ่มนวลและแม่นย้ำกว่า PM และ VR Stepper Motor

#### 3.6.7 Stepper Drive Mode

##### (1) Full Step Mode

โหมด Full Step เป็นโหมดพื้นฐานที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ ในโหมดนี้ มอเตอร์จะหมุนหนึ่งขั้นเต็ม (Full Step) สำหรับทุกพัลส์ไฟฟ้าที่ส่งไปยังขดลวด ใน Stepper Motor แบบตั้งเดิม แต่ละเฟสจะประกอบด้วยขดลวด 2 ชุด เพื่อให้มอเตอร์เคลื่อนที่หนึ่งขั้นเต็มในมอเตอร์ประเภทนี้ ขดลวดหนึ่งในแต่ละเฟสจะถูกกระตุ้นทีละลำดับอย่างต่อเนื่อง โดยการควบคุมลำดับการกระตุ้นและระยะเวลาของแต่ละพัลส์ มอเตอร์สามารถหมุนได้ทั้งในทิศตามเข็มนาฬิกา (Clockwise) หรือทวนเข็มนาฬิกา (Counterclockwise)

ในโหมด Full Step Rotor จะหมุนทีมุมขั้น (Step Angle) ที่กำหนดไว้สำหรับแต่ละพัลส์ที่ส่งไปยัง ชุดลวด โหมดนี้ช่วยให้มอเตอร์สร้างแรงบิดที่ดีกว่า แต่การเปลี่ยนจากขั้นหนึ่งไปยังอีกขั้นอาจทำให้เกิดเสียง รบกวนและการสั่นสะเทือนในบางแอปพลิเคชัน

### (2) Half Step Mode

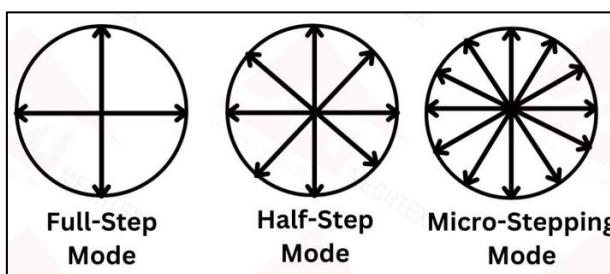
โหมด Half-Step เป็นโหมดที่อยู่ระหว่าง Full-Step Mode และ Microstep Mode ในโหมดนี้ มอเตอร์จะหมุนด้วยขนาดของขั้นที่เล็กลงครึ่งหนึ่งเมื่อเทียบกับขั้นในโหมด Full-Step ใน Stepper Motor แบบสองเฟส (Two-Phase Stepper Motor) ชุดลวดจะถูกกระตุ้นในลำดับที่เริ่มจากการกระตุ้นชุดลวดเพียงชุดเดียว (Single Coil) และต่อด้วยการกระตุ้นชุดลวดทั้งสองชุดพร้อมกัน (Dual Coils) แต่ในระดับกระแสไฟฟ้าที่ ต่ำกว่า ซึ่งผลลัพธ์คือมอเตอร์จะก้าวทีละขั้นที่เล็กกว่าขั้นในโหมด Full-Step

โดยในโหมด Half-Step มอเตอร์จะมีมุมก้าว (Step Angle) ลดลงครึ่งหนึ่งสำหรับทุกพัลส์ที่ส่งเข้าไป ทำให้จำนวนขั้นเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเมื่อเทียบกับโหมด Full-Step แต่การทำงานจะราบรื่นขึ้นและมีความ ละเอียดสูงขึ้น โหมดนี้ช่วยปรับปรุงการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ เนื่องจากขั้นที่เล็กลงช่วยให้ควบคุมตำแหน่งของ มอเตอร์ได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น และลดเสียงรบกวนและการสั่นสะเทือนที่อาจเกิดขึ้น

### (3) Microstep Mode

โหมด Microstep เป็นโหมดที่ใช้เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ให้แม่นยำมากที่สุด ในโหมดนี้แต่ ละขั้น (Step) จะถูกแบ่งย่อยออกเป็น Micro Steps ที่เล็กกว่าอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับโหมด Full-Step และ Half-Step โหมด Microstep ช่วยทำให้ควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ได้ดีกว่า เพราะการกระตุ้น ชุดลวดจะไม่ได้ทำแบบเต็มที่หรือสลับไปมาระหว่างชุดลวดเหมือนในโหมด Full-Step หรือ Half-Step แต่จะใช้ วิธีปรับระดับกระแสไฟฟ้าในชุดลวดของมอเตอร์อย่างแม่นยำ การเปลี่ยนแปลงระดับกระแสไฟฟ้านี้ช่วยให้ Rotor สามารถหยุดอยู่ที่ตำแหน่งที่ต้องการได้ดีกว่า

โดยจำนวน Micro Steps ระหว่างขั้นเต็มของมอเตอร์อาจมีได้หลายสิบหรือมากกว่า ทำให้เหมาะสม สำหรับการใช้งานที่ต้องการความแม่นยำสูงสุด การสั่นสะเทือนต่ำ และการทำงานที่เงียบ เช่น เครื่อง CNC, เครื่องพิมพ์ 3D และระบบอัตโนมัติอื่น ๆ ที่ต้องการควบคุมที่ละเอียดและราบรื่น

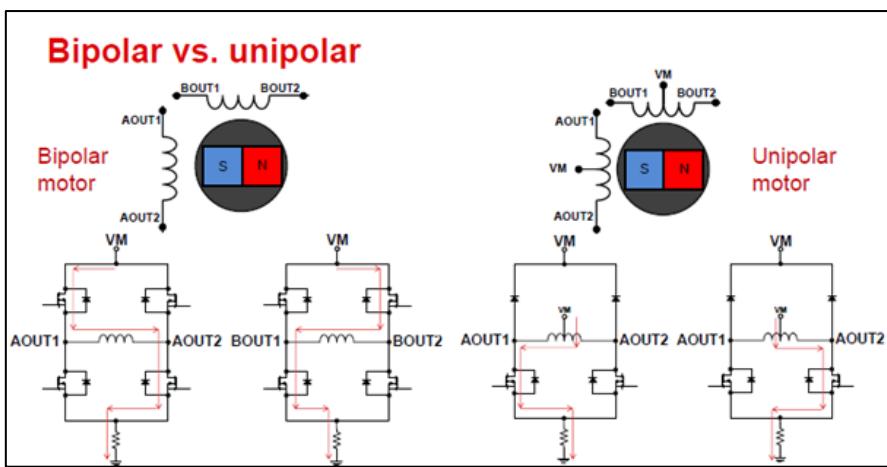


รูปประเภทของโหมดการ Drive Stepper Motor

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

### 3.6.8 Stepper Drive Type

Stepper Motor แบบ Unipolar และ Bipolar สามารถทำงานได้โดยใช้แหล่งจ่ายไฟแบบ Unipolar (Single Rail) ทั้งสองแบบสามารถหมุนได้ทั้งสองทิศทางโดยใช้แหล่งจ่ายไฟตัวเดียวกัน โดย Driver ของ Stepper Motor จะควบคุมตำแหน่งของ Rotor ด้วยการกระตุ้นชุดลวดของมอเตอร์ในลำดับที่กำหนด ตัวอย่างเช่น Microcontroller จะส่งพัลส์ไปยัง Driver มอเตอร์เพื่อรบุว่า Rotor ควรเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งถัดไป เมื่อ Rotor ได้รับพัลส์ มันจะส่งพลังงานไปยังชุดลวดในเฟสแรก และเมื่อได้รับพัลส์ถัดไป มันจะส่งพลังงานไปยังชุดลวดในเฟสถัดไปเพื่อให้ Rotor หมุนต่อไป หากไม่ครอบคลุมเรื่องหยุดส่งพัลส์ Rotor จะยังคงหยุดนิ่งและอยู่ในแนวเดียวกับสนามแม่เหล็กของชุดลวดเฟสที่ได้รับพลังงาน



รูปแสดงขั้วของ Stepper Motor สามารถจัดเรียงและเดินสายได้ในรูปแบบ Bipolar และ Unipolar โดยแต่ละแบบต้องใช้ MOSFET ที่แตกต่างกัน

แหล่งที่มา : <https://community.element14.com/challenges-projects/project14/digitalfever/b/blog/posts/digistep-a-digital-stepper-motor-controller-using-psoc4>

สำหรับ Stepper Motor แบบ H-Bridge และแม่เหล็กถาวร มีทักษะการตั้งค่าชุดลวดแบบ Bipolar และ Unipolar มอเตอร์แบบ Bipolar ใช้งาน H-Bridge ซึ่งช่วยให้กระแสน้ำไฟฟ้าไหลในทิศทางเดียวกันได้ผ่านชุดลวดทิศทางของกระแสน้ำไฟฟ้าจะเป็นตัวกำหนดขั้วของสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นโดยชุดลวด ในขณะที่มอเตอร์แบบ Bipolar มีชุดลวดเพียงชุดเดียวต่อเฟส ทำให้วางรับขับเคลื่อนซับซ้อนขึ้น เนื่องจากต้องกลับทิศทางกระแสน้ำไฟฟ้าเพื่อเปลี่ยนขั้วของสนามแม่เหล็ก มอเตอร์แบบ Unipolar ต้องมี Transistor เพียง 4 ตัวในรูปแบบ Half-Bridge เพื่อควบคุม ขณะที่มอเตอร์แบบ Bipolar ต้องมี Transistor ถึง 8 ตัวที่จัดเรียงเป็นสอง H-Bridge เพื่อควบคุม

มอเตอร์แบบ Unipolar ต้องการเพียง FET แบบด้านเดียวหรือด้านสอง เพื่อกระตุ้นกระแสไฟฟ้าในทิศทางเดียวผ่านชุดลวด โดยชุดลวดในแต่ละเฟสจะมีจุดแท็ปกลางซึ่งสามารถเชื่อมต่อกับกราวด์หรือแหล่งจ่ายไฟได้ แทนที่จะเปลี่ยนทิศทางกระแสเพื่อเปลี่ยนขั้วของสนามแม่เหล็ก ชุดลวดสำหรับเฟสนี้จะถูกพันในทิศทางตรงข้ามกันเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนขั้วได้ วิธีนี้ช่วยให้สามารถเปลี่ยนทิศทางของมอเตอร์ได้โดยไม่ต้องกลับทิศทางของกระแสไฟฟ้า ทำให้สามารถทำงานได้แม้จะใช้แหล่งจ่ายไฟแบบขั้วเดียว โดยทั่วไปการเดินสายของมอเตอร์ Unipolar มีสามสายต่อเฟส ทำให้มอเตอร์สองเฟสมาตรฐานมีสายห้องหมุด 6 สาย และมอเตอร์ Unipolar สามารถถูกขับเหมือนมอเตอร์ Bipolar ได้หากจุดแท็ปกลางไม่ได้เชื่อมต่อและชุดลวดถูกเชื่อมต่อกับ Driver มอเตอร์ Bipolar

ความแตกต่างที่สำคัญระหว่าง Stepper Motor แบบ Unipolar และ Bipolar คือการมีหรือไม่มีสายแท็ปกลางซึ่งแบ่งชุดลวดที่พันเป็นสองส่วน การแบ่งนี้สามารถทำได้ด้วยสายเชื่อมต่อเส้นเดียวหรือสองเส้นสำหรับแต่ละปั๊ลชุดลวด การผลัดแท็ปกลางออกจะเปลี่ยนการตั้งค่า Unipolar เป็นการเชื่อมต่อแบบอนุกรม Bipolar

ในทางปฏิบัติ สีของสายไฟของมอเตอร์มักถูกกำหนดเป็นมาตรฐานในอุตสาหกรรมและมีความสม่ำเสมอในกลุ่มผลิตภัณฑ์ของผู้ผลิตรายเดียวกัน ด้วยเหตุนี้ แผนผังการเดินสายส่วนใหญ่มักใช้สีแทนการระบุหมายเลขอ แต่การเลือกโครงสร้างการตั้งค่าแบบ Unipolar หรือ Bipolar ไม่ได้ส่งผลต่อการเดินสายเพียงอย่างเดียว แต่ยังส่งผลกระทบต่อกุญแจลักษณะทางไฟฟ้าของชุดลวดมอเตอร์ เช่น แรงดันไฟฟ้า ความต้านทาน ความเหนี่ยวแน่น ความเร็ว อัตราเร่ง และแรงบิด ซึ่งต้องพิจารณาอย่างตามการใช้งานที่ต้องการ

### 3.7 วิธีการดำเนินการทดลอง

หัวข้อวิธีการดำเนินการทดลอง จะกล่าวถึงขั้นตอนและวิธีการที่ใช้ในการดำเนินการทดลอง เพื่อทดสอบและตรวจสอบสมมติฐานที่ได้ โดยอธิบายถึงเครื่องมือ อุปกรณ์ รวมถึงวิธีการทดลองหา Step loss ของ Stepper Motor ร่วมกับ MATLAB, Simulink และบอร์ด Nucleo STM32G474RE

#### 3.7.1 วัสดุอุปกรณ์

- (1) RS PRO Hybrid, Permanent Magnet Stepper Motor, 0.22Nm Torque, 2.8 V, 1.8°, 42.3 x 42.3mm Frame, 5mm Shaft
- (2) Incremental Encoder AMT103-V
- (3) WCS1700 Hall Current Sensor
- (4) Cytron MDD20A Motor Driver
- (5) Nucleo STM32G474RE
- (6) MotorXplorer

### 3.7.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

การทดลองหา Step loss ของ Stepper Motor สามารถทำได้ด้วยทั้งหมด 3 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

#### (1) Setup

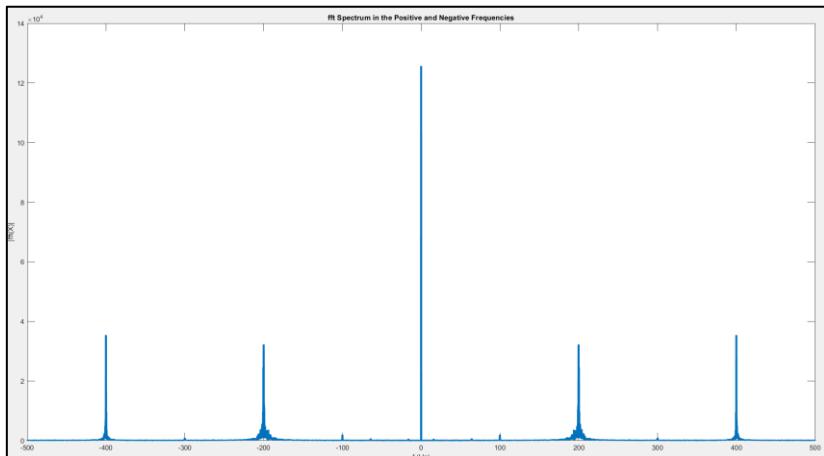
ก่อนจะทำการทดลองต้องทำการตั้งค่า Stepper Motor ให้พร้อมใช้งานและปรับเปลี่ยนค่าตามการทดลองเสียก่อน โดยค่าของตัวแปรที่ต้องเปลี่ยนไปตามการทดลองต่างๆ จะประกอบด้วย Resolution ที่ต้องสามารถปรับค่าได้ตั้งแต่ Full step ถึง 1/32 step DIR(Direction) ที่ต้องสามารถปรับได้ว่าจะเป็นทิศทาง Clockwise หรือ Counterclockwise และ Frequency ของ Stepper motor เพื่อใช้ควบคุมความเร็วแต่เพื่อที่จะทำให้การวัดนั้นครอบคลุมความถี่ในช่วงที่กว้างทาก่อนจะผู้จัดทำจึงได้ทำการคุณค่าความถี่ให้มากขึ้นเรื่อยๆ ด้วยการกำหนดค่าตัวคูณเพื่อให้เกิดการเร่งขึ้นของความเร็วเชิงมุมของ Stepper motor

#### (2) Measurement

หลังจากที่ตั้งค่าทุกอย่างเรียบร้อย ทางคนละผู้จัดทำจะทำการวัดความเร็วเชิงมุมของ Stepper motor เพื่อทำการวิเคราะห์ผลในลำดับดังๆ ไป

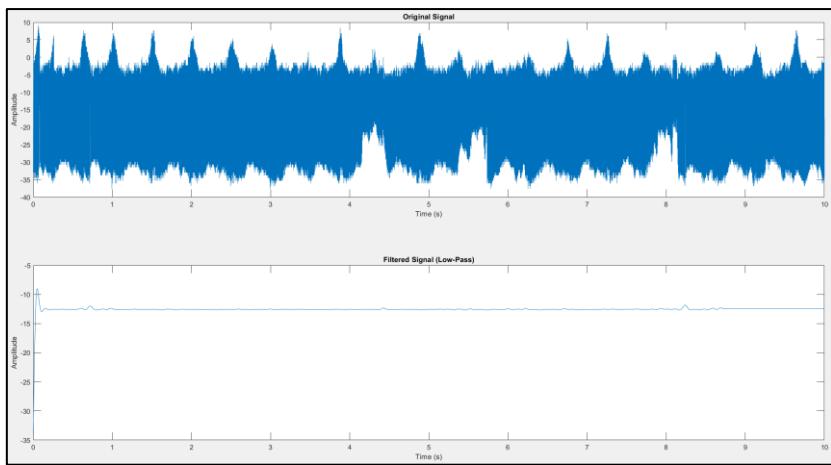
#### (3) Signal conditioning

จากการวัดค่าความเร็วเชิงมุมทำให้พบ Noise เป็นจำนวนมาก ทางคนละผู้จัดทำได้ใช้ Fast Fourier Transform ในการแยกขนาดสัญญาณ ณ ความถี่ต่างๆ ออกมาได้ดังนี้



รูปแสดงขนาดสัญญาณ ณ ความถี่ต่างๆ หลังผ่านกระบวนการ FFT

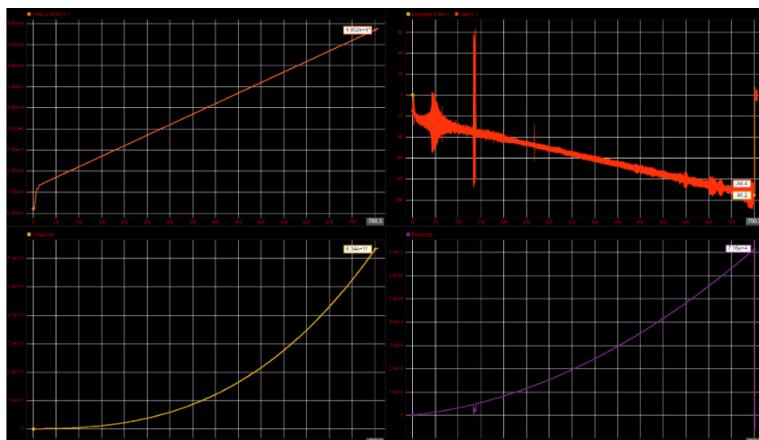
จากราฟ FFT ทำให้ทราบว่าสัญญาณที่ต้องการนั้นอยู่ที่ 0 Hz และมีสัญญาณรบกวนอย่างมากในช่วง 200 Hz ถึง 400 Hz (ทั้งในทิศทางบวก และทิศทางลบ) หลังจากที่ทราบว่าสัญญาณที่ต้องการนั้นมีความถี่ต่ำ ทางคนละผู้จัดทำได้เลือกใช้ Low pass filter ในการกรองสัญญาณที่มีความถี่สูงออก โดยที่ได้ตั้ง Cut off frequency ที่ 10 Hz เพื่อกรองสัญญาณรบกวนทั้งหมดออกซึ่งได้ผลดังต่อไปนี้



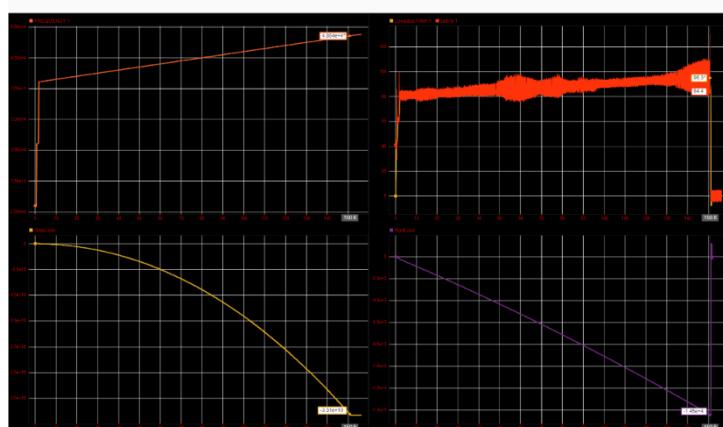
รูปสัญญาณหลังจากการกรองสัญญาณรบกวนทั้งหมดเรียบร้อยแล้ว

### 3.8 ผลการทดลอง

จากการทดลองหา Step Loss ณ Resolution ต่างๆของ Stepper motor ได้ผลดังต่อไปนี้



รูปแสดงกราฟความถี่ ความเร็วเชิงมุม(ทั้งก่อนและหลัง Lowpass Filter), TotalLoss (Step Loss ทั้งหมด) และ RadLoss (Radian ที่หายไปต่อการหมุน 1 รอบ) ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา



รูปแสดงถึงกราฟความถี่ ความเร็วเชิงมุม (ทั้งก่อนและหลัง Lowpass Filter), TotalLoss (Step Loss ทั้งหมด) และ RadLoss (Radian ที่หายไปต่อการหมุน 1 รอบ) ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

จากราฟดังกล่าวทางคณะผู้จัดทำได้ทำการวิเคราะห์ Step Loss ณ ทิศทางการหมุนต่างๆ และบันทึกผลได้ดังต่อไปนี้

CCW					
Mode	Loss Frequency	Max Rad	Total Step Loss	Rad Loss per Rev	
1	8886.1	-139.6	7.28E+11	4.86E+04	
1/2	7869.5	-123.9	1.32E+10	5.51E+03	
1/4	1.65E+04	-129.9	1.05E+11	3.26E+04	
1/8	1.77E+04	-69.3	4.64E+10	1.61E+04	
1/16	4.85E+04	-95.2	6.34E+11	7.16E+04	
1/32	1.11E+05	-108.5	4.80E+10	2.17E+04	

รูปแสดงตารางความถี่ ความเร็วเชิงมุมหลัง Lowpass Filter, TotalLoss (Step Loss ทั้งหมด) และ RadLoss (Radian ที่หายไปต่อการหมุน 1 รอบ) ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

CW					
Mode	Loss Frequency	Max Rad	Total Step Loss	Rad Loss per Rev	
1	2973.6	124.3	-4.54E+10	-1.85E+04	
1/2	1.23E+04	193.1	-1.10E+11	-4.38E+04	
1/4	1.65E+04	129.5	-1.37E+11	-4.03E+04	
1/8	1.77E+04	69.3	-1.73E+10	-9.31E+03	
1/16	4.85E+04	84.4	-3.31E+10	-1.45E+04	
1/32	9.80E+04	96.2	-2.98E+10	-1.36E+04	

รูปแสดงตารางความถี่ ความเร็วเชิงมุมหลัง Lowpass Filter, TotalLoss (Step Loss ทั้งหมด) และ RadLoss (Radian ที่หายไปต่อการหมุน 1 รอบ) ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

ซึ่งจะสามารถอธิบายได้ว่า ณ Full step ที่มี Resolution น้อยที่สุด จะเข้าสู่ช่วงที่ Stepper motor ไม่สามารถหมุนได้เนื่องจาก Step loss ได้ด้วยความถี่ที่น้อยที่สุด ในทางเดียวกัน ณ 1/32 Step ที่มี Resolution มากที่สุดจะเข้าสู่ช่วงที่ Stepper motor ไม่สามารถหมุนได้เนื่องจาก Step loss ได้ด้วยความถี่ที่มากที่สุดเช่นกัน ไม่ว่าจะทิศทางไหนก็ตาม

### 3.9 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

#### 3.9.1 สรุปผล

จากการสังเกตแนวโน้มของข้อมูลทำให้ทางคณะผู้จัดทำทราบว่า Stepper motor จะเกิด Step Loss มากขึ้นเมื่อควบคุม Stepper motor ที่ Frequency มากขึ้น หรือมีแรงต้านการหมุนของ Stepper motor และหาก Resolution ของ Stepper Motor สูงจะทำให้ Frequency ที่ทำให้เกิด Step Loss นั้นสูงขึ้นตาม

#### 3.9.2 อภิปรายผล

จากการทดลองพบว่า Step Loss ของ Stepper Motor จะเกิดขึ้นเมื่อความถี่ของ สัญญาณควบคุมสูงเกินไป หรือมีแรงต้านการหมุนที่กระทำต่อ Stepper Motor มากเกินไป ทำให้ Roter ของ Stepper Motor ไม่เกิดการหมุน และสามารถสังเกตได้อีกว่า ณ Resolution ที่สูงจะ สามารถตอบสนองต่อความถี่ที่สูงขึ้นได้มากตาม และหากควบคุม Stepper motor ด้วยความถี่ที่สูงเกิน กว่าที่ Stepper motor ณ Resolution นั้นๆ จะตอบสนองทัน จะส่งผลให้การหมุนของ Stepper motor ไม่สันพันธ์กับการควบคุม นอกจากนั้น Stepper motor จะสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อระบบถูกออกแบบมาโดยมี Misalignment ที่น้อย และการทดลองจะอุบമีความแม่นยำ มากขึ้นหากสามารถลดแรงต้านการหมุนของ Stepper motor ไม่ว่าจะเป็น Frictional Load จาก Bearing หรือจาก misalignment ก็ตาม

#### 3.9.3 ข้อเสนอแนะ

การทดลองจะมีความแม่นยำมากขึ้นหากชุดการทดลองที่ได้รับ มีค่าคาดเดือนทางเครื่องกล น้อย อาทิ Misalignment, Frictional Load หรือ การเลือกใช้ Bearing ที่แน่นจนทำให้เพลาขยับได้ยาก

### 3.10 เอกสารอ้างอิง

<https://mall.factomart.com/principle-of-stepping-motor/>

<https://www.faulhaber.com/it/know-how/tutorials/stepper-motor-tutorial-how-to-prevent-step-losses-with-stepper-motors/>

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

<https://community.element14.com/challenges-projects/project14/digitalfever/b/blog/posts/digistep-a-digital-stepper-motor-controller-using-psoc4>