

## LAB 2: Actuators Report

### Name

- นาย อรรถณพ แซ่ไคว่ 66340500061
- นาย ธีรานนท์ ธรรมโชติวรศิริ 67340500023
- นาย เด่นภูมิ สอนพร 67340500013
- นาย ทรงพล มณีโชติ 67340500015

### Objectives

- เพื่อให้สามารถออกแบบการทดลองโดยใช้ทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ โดยประยุกต์ใช้ร่วมกับโปรแกรม MATLAB เพื่อเก็บผลการทดลอง วิเคราะห์ความเที่ยงตรง ความแม่นยำ ได้อย่างถูกต้อง และมีเหตุผลรองรับตรวจสอบความถูกต้องเทียบกับทฤษฎีที่น่าเชื่อถือ
- เพื่อให้สามารถอธิบายความสามารถในการรับรู้ปริมาณทางฟิสิกส์ของเซ็นเซอร์ทั้งหมดตั้งแต่ต้นจนจบกระบวนการได้ เช่น การอธิบายการวัดกระแสไฟฟ้าของ Current Sensor
- เพื่อให้สามารถกำหนดตัวแปรในการทดลองได้อย่างถูกต้องและสมเหตุสมผล ไม่ว่าจะเป็น ตัวแปรต้น ตัวแปรตาม ตัวแปรควบคุม รวมถึงอธิบายวัตถุประสงค์การทดลองและอธิบายสมมติฐานให้สอดคล้องกับตัวแปรที่กำหนด นิยามเชิงปฏิบัติการ และมีทฤษฎีที่น่าเชื่อถือ
- เพื่อให้สามารถออกแบบวิธีการทดลองเพื่อให้สอดคล้องกับผลการเรียนรู้ย่อยทั้งหมดอย่างถูกต้องตามหลักวิทยาศาสตร์ รวมทั้งบันทึกผล สรุปผล อภิปรายผล ตามความเป็นจริง มีกระบวนการทำซ้ำ อธิบายที่มาของผลการทดลองนั้นได้ โดยใช้อุปกรณ์เครื่องมือไฟล์ Simulink, mlx ฯลฯ และชุดการทดลองที่ TA จัดเตรียมให้

## 1. Lab 2.1 Brushless DC Motor

### การทดลองที่ 2.1 Brushless DC Motor

#### จุดประสงค์

1. เพื่อให้ นักศึกษาสามารถอธิบายหลักการของสัญญาณไฟฟ้าแบบสามเฟส (3-Phase) สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor: BLDC Motor) ได้อย่างถูกต้อง
2. เพื่อให้ นักศึกษาสามารถอธิบายหลักการทำงานและความแตกต่างระหว่างการตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ด้วย Hall Effect Sensor และการตรวจจับด้วยวิธี Back Electromotive Force (Back EMF Sensing) ได้อย่างชัดเจน
3. เพื่อให้ นักศึกษาสามารถอธิบายหลักการควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์แบบ 6-Step Commutation และการควบคุมแบบ Field Oriented Control (FOC) รวมทั้งสามารถเปรียบเทียบข้อดีและข้อจำกัดของแต่ละวิธีได้อย่างเหมาะสม
4. เพื่อให้ นักศึกษาสามารถศึกษาการทำงานจริงของระบบควบคุมมอเตอร์แบบ 6-Step โดยอาศัยการตรวจจับสัญญาณ Back EMF และสามารถวิเคราะห์ลักษณะของสัญญาณ Back EMF แบบ Trapezoidal รวมถึงการเกิด Phase Shift ระหว่างสัญญาณในแต่ละเฟสได้
5. เพื่อให้ นักศึกษาสามารถอธิบายลำดับการสวิตช์เฟสของมอเตอร์ตามทิศทางการหมุน และสามารถคำนวณความเร็วรอบของมอเตอร์จากความถี่ของสัญญาณ Back EMF ที่ตรวจวัดได้อย่างถูกต้อง
6. เพื่อให้ นักศึกษาสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณไฟฟ้ากับความเร็วรอบของมอเตอร์ รวมทั้งสามารถวิเคราะห์สาเหตุที่ทำให้ผลการทดลองแตกต่างจากสภาวะอุดมคติ (Ideal Case) ทางทฤษฎีได้
7. เพื่อให้ นักศึกษาสามารถใช้เครื่องมือวัด ได้แก่ Oscilloscope แบบ 4 Channels ในการตรวจวัดสัญญาณของ BLDC Motor ทั้ง 3 เฟส และสามารถอ่านค่า วิเคราะห์ และแปลผลสัญญาณได้อย่างถูกต้อง
8. เพื่อให้ นักศึกษาสามารถศึกษาการตั้งค่าและปรับพารามิเตอร์ของมอเตอร์ในโปรแกรม Motor Workbench 6.3.2 รวมถึงการตั้งค่า PWM Generation Frequency และระบบ Speed Sensing ได้อย่างเหมาะสม
9. เพื่อให้ นักศึกษาสามารถอธิบายพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า (Electrical Parameters) พารามิเตอร์เชิงกล (Mechanical Parameters) และโครงสร้างทางแม่เหล็กของมอเตอร์ BLDC ได้อย่างถูกต้อง
10. เพื่อให้ นักศึกษาสามารถอธิบายรูปแบบการควบคุมมอเตอร์ BLDC ทั้งในรูปแบบ Sensor-based Control และ Sensorless Control ได้อย่างเข้าใจ
11. เพื่อให้ นักศึกษาสามารถออกแบบการทดลองตามกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ ตั้งแต่วางแผนการทดลอง บันทึกผล วิเคราะห์ผล สรุปผล อภิปรายผล และแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการทำซ้ำของการทดลองอย่างมีเหตุผล

#### สมมติฐาน

การควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor: BLDC Motor) ด้วยวิธีการควบคุมแบบ 6-Step Commutation โดยอาศัยสัญญาณ Back Electromotive Force (Back EMF) ในการตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์จะสามารถทำให้มอเตอร์หมุนได้อย่างต่อเนื่องและมีเสถียรภาพตามหลักการทางทฤษฎี โดยสัญญาณ Back EMF ที่ตรวจวัดได้จะมีลักษณะเป็นแบบ Trapezoidal และเกิด Phase Shift ระหว่างเฟสทั้งสามแตกต่างกันประมาณ 120 องศาทางไฟฟ้า อีกทั้งเมื่อมีการเพิ่มความถี่ของสัญญาณ PWM ที่ใช้ควบคุม จะส่งผลให้ความเร็วรอบของมอเตอร์เพิ่มขึ้นตามความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าและความเร็วรอบของมอเตอร์ ทั้งนี้ค่าความเร็วรอบที่คำนวณได้จากความถี่ของสัญญาณ Back EMF ที่วัดด้วย Oscilloscope จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าความเร็วรอบที่ได้จากระบบ Speed Sensing ในโปรแกรม Motor Workbench อย่างไรก็ตาม หากมีการตั้ง

ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและทางกลของมอเตอร์ไม่เหมาะสม อาจส่งผลให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อนจากสภาวะอุดมคติทางทฤษฎี และในช่วงความเร็วรอบต่ำ ระบบควบคุมแบบ Sensor-based Control จะมีความแม่นยำในการตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ดีกว่าระบบ Sensorless Control

### ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น:
  - แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (BLDC Motor)
  - ค่าความถี่ของสัญญาณพัลส์กว้างคลื่น (PWM Frequency)
2. ตัวแปรตาม:
  - ความเร็วรอบของมอเตอร์ (Motor Speed)
  - ทิศทางการหมุนของมอเตอร์ (Direction of Rotation)
3. ตัวแปรควบคุม:
  - การตั้งค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ในโปรแกรม Motor Workbench
  - รูปแบบและโครงสร้างของวงจรควบคุมมอเตอร์
  - ชนิดของมอเตอร์ BLDC ที่ใช้ในการทดลอง
  - สภาวะแวดล้อมขณะทำการทดลอง เช่น อุณหภูมิ และแรงเสียดทานทางกล

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. Control of Brushless DC motors using sensorless Back-EMF integration method  
วิธีควบคุม BLDC แบบ sensorless โดยอาศัยการ integrate สัญญาณ Back EMF ของเฟสที่ “ไม่ถูกจ่ายไฟ (silent phase)” เพื่อกำหนดจุด commutation
2. Sensorless Control Methods for BLDC Motor Drives: A Review  
บทความสรุปวิธี sensorless หลัก ๆ สำหรับ BLDC (zero-crossing, integration, third-harmonic, observer, etc.) พร้อมข้อดีข้อด้อย
3. A New Approach to Sensorless Control Method for Brushless DC Motors  
วิธี sensorless แบบใหม่ โดยใช้ unknown input observer และ flux-linkage function เพื่อให้ควบคุมได้แม่นยำแม้ในช่วงความเร็วต่ำ
4. Sensorless BLDC motor control and BEMF sampling methods  
เอกสารเชิงปฏิบัติที่อธิบายวิธี sensorless หลัก เช่น Back-EMF zero-crossing, integration, free-wheeling diode conduction
5. Sensorless control of brushless DC motor using modified Back-EMF detection  
วิธี sensorless แบบปรับปรุง (modified Back-EMF detection) เพื่อเพิ่มความแม่นยำ และอาจลดปัญหา noise / commutation error
6. BLDC Motors Sensorless Control Based on MLP Topology  
เครือข่ายประสาทเทียม (MLP) ในการประเมินตำแหน่งโรเตอร์และความเร็วจากสัญญาณ phase-voltage และ back EMF

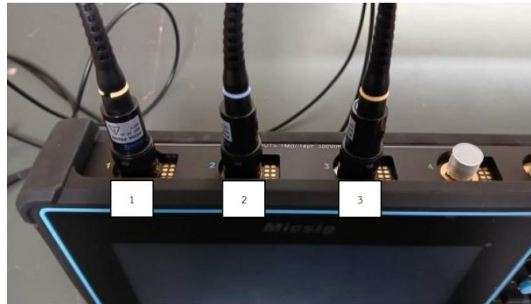
## 7. SENSORLESS SPEED CONTROL OF A BLDC MOTOR

เปรียบเทียบหลายวิธีควบคุมความเร็วของ BLDC (Hall sensor, back EMF direct detection, sliding-mode observer)  
โดยใช้ MATLAB/Simulink

### ขั้นตอนการดำเนินงาน

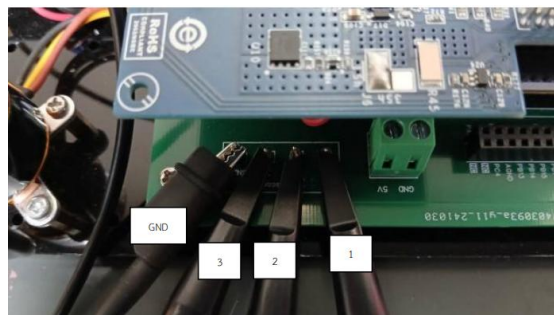
#### ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. นำสาย Probe มาต่อกับ Oscilloscope ให้ครบ 3 เส้น



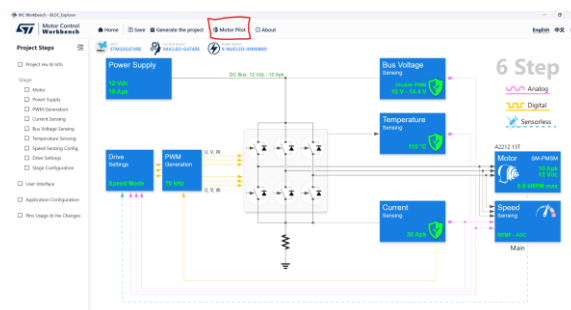
รูปที่ 1 เสียบสาย Oscilloscope

2. นำ Probe มาเกี่ยวกับตัววัดที่บอร์ด โดยเรียงช่องให้ถูกต้องตามเลขที่กำกับ พร้อมกับเกี่ยว GND ด้วย

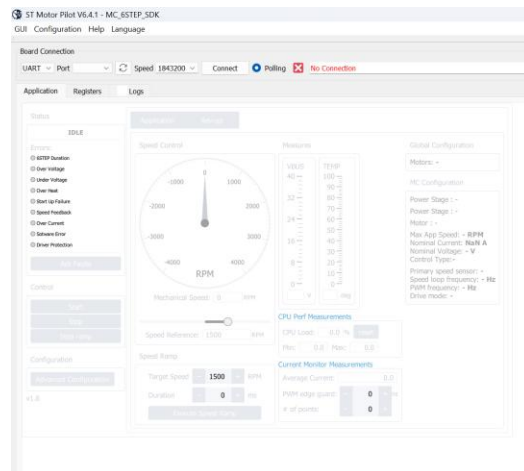


รูปที่ 2 ต่อ Probe เข้ากับบอร์ด

3. เปิดไฟล์ MC Workbench โดยกดปุ่ม Motor Pilot เพื่อเปิดแถบควบคุมขึ้นมา

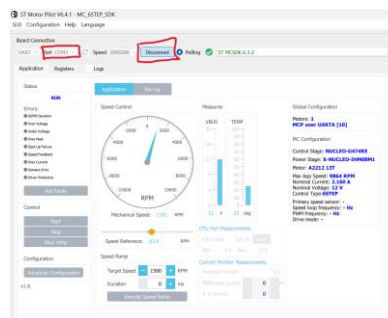


รูปที่ 3 MC Workbench



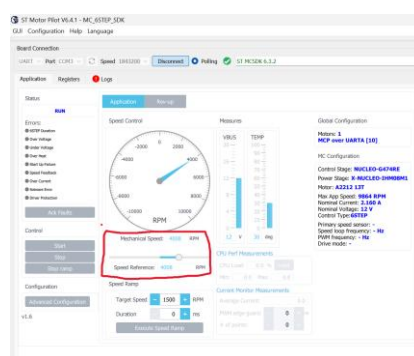
รูปที่ 4 Motor Pilot

4. กดเลือก Com Port ที่เชื่อมกับ STM32G474RE จากนั้นกด Connect



รูปที่ 5 การควบคุม

5. เลื่อน Slider Bar เพื่อปรับความเร็ว จากนั้นกดปุ่ม Start เพื่อให้ Motor หมุน โดยจะค่อย ๆ Ramp ความเร็วขึ้นไปจนถึงจุดที่กำหนดโดยทำตั้งแต่ 1000 ถึง 8000 RPM



รูปที่ 6 การควบคุม Slider Bar

6. เริ่มเก็บข้อมูลโดยรอ Mechanical speed ถึงจุดที่กำหนดแล้วกด Run Stop หลังจากนั้นตั้งแกน X,Y วัดคาบ Phase EMF ลูกคลื่นและการหมุนแบบตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกาโดยทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง



รูปที่ 7 ผลการทดลอง

## 7. Screenshot แล้วเก็บผลการทดลอง

### ผลการทดลอง

ทดลองการหมุน “ตามเข็มนาฬิกา (CW)” ที่ความเร็วประมาณ 4000 RPM

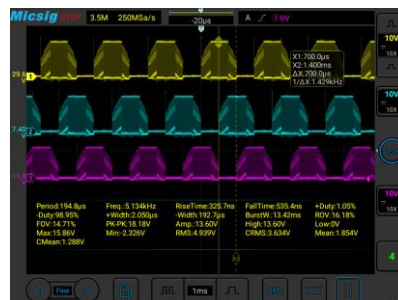


Back emf

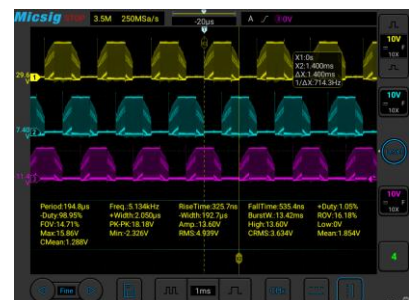
จากการบันทึกรูปคลื่นสัญญาณ Back EMF ของมอเตอร์ BLDC ขณะหมุนตามเข็มนาฬิกาที่ความเร็วประมาณ 4000 รอบต่อนาที พบว่า สัญญาณทั้งสามเฟส (Phase A, B และ C) มีลักษณะเป็นคลื่นแบบ Trapezoidal ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ BLDC แบบควบคุมด้วยวิธี 6-Step Commutation โดยสัญญาณของแต่ละเฟสมีการเลื่อนเฟสกันประมาณ 120 องศาทางไฟฟ้า (120° Phase Shift) อย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าการเรียงลำดับการสับเปลี่ยนเฟส (Commutation Sequence) เป็นไปอย่างถูกต้องตามทิศทางการหมุนแบบ CW



Phase 1-2

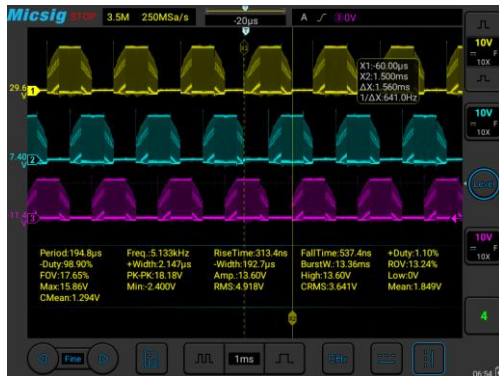


Phase 2-3



Phase 1-3

จากการวัดคาบของสัญญาณ Back EMF ในแต่ละเฟสพบว่า ค่าคาบมีความสม่ำเสมอใกล้เคียงกันทุกเฟส แสดงถึงความเสถียรของการหมุนของมอเตอร์ที่ความเร็ว 4000 RPM นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของสัญญาณระหว่างคู่เฟส (Phase 1–2, Phase 1–3 และ Phase 2–3) พบว่ามีการสลับสถานะการนำกระแสสอดคล้องกับลำดับการขับแบบ 6-Step อย่างถูกต้อง ซึ่งยืนยันว่าระบบ Back EMF Sensing สามารถตรวจจับตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์ได้อย่างเหมาะสม



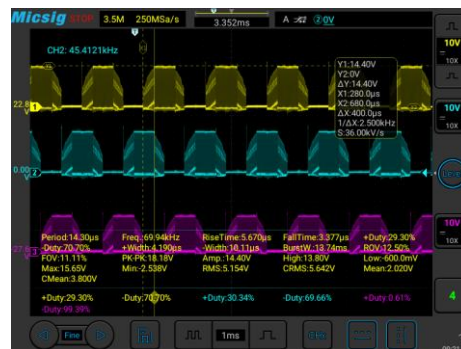
Rook



RPM

สำหรับสัญญาณ “Rook” และ “RPM” ที่บันทึกได้ แสดงให้เห็นว่าการคำนวณความเร็วรอบจากคาบสัญญาณ Back EMF ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าความเร็วรอบที่ตั้งไว้จริง (ประมาณ 4000 RPM) ซึ่งแสดงถึง ความถูกต้องของการประเมินความเร็วจากสัญญาณ Back EMF และยืนยันความสัมพันธ์โดยตรงระหว่าง ความถี่ของสัญญาณ Back EMF กับความเร็วเชิงกลของมอเตอร์

ทดลองการหมุน “ทวนเข็มนาฬิกา (CCW)” ที่ความเร็วประมาณ 4000 RPM



Back emf



Phase 1-2



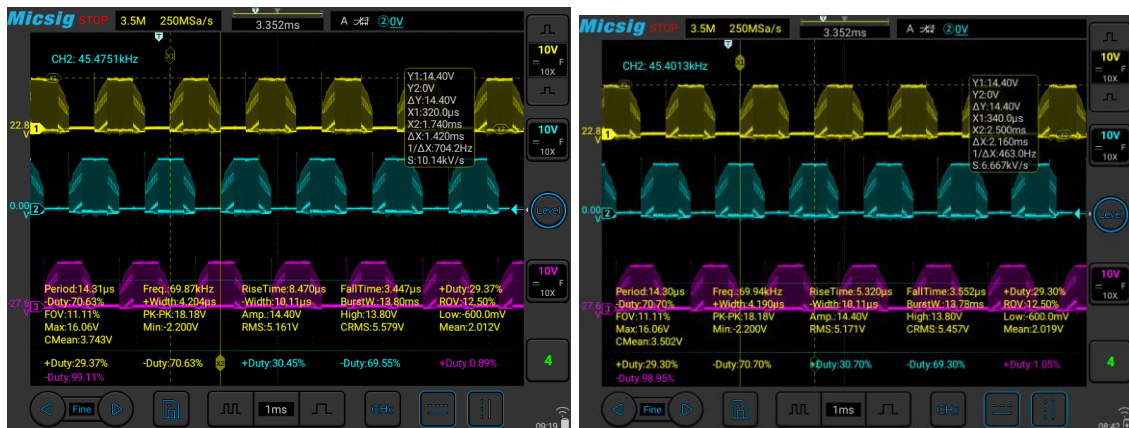
Phase 2-3



Phase 1-3



จากผลการทดลองการหมุนทวนเข็มนาฬิกา (CCW) ที่ความเร็วประมาณ 4000 RPM พบว่าสัญญาณ Back EMF ของมอเตอร์ BLDC ทั้งสามเฟสยังคงมีลักษณะเป็นคลื่นแบบ Trapezoidal และมีมุมเหลื่อมเฟสประมาณ 120 องศาทางไฟฟ้าเช่นเดียวกับกรณีการหมุนตามเข็มนาฬิกา (CW) แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติพื้นฐานของสัญญาณไฟฟ้าไม่ขึ้นกับทิศทางการหมุน อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณา ลำดับการเปลี่ยนสถานะของสัญญาณระหว่างคู่เฟส (Phase 1-2, 2-3 และ 1-3) พบว่าการเรียงลำดับการสับเปลี่ยนเฟสกลับทิศทาง จากกรณี CW อย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับหลักการของ 6-Step Commutation สำหรับการควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์



Rook

rpm

จากสัญญาณ Rook ที่ใช้สำหรับการตรวจจับคาบ พบว่าคาบของสัญญาณในกรณี CCW มีความสม่ำเสมอใกล้เคียงกับกรณี CW และเมื่อนำไปคำนวณเป็นความเร็วรอบ (RPM) ได้ค่าประมาณ 4000 RPM เช่นเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมสามารถรักษาความเร็วรอบของมอเตอร์ได้อย่างคงที่ทั้งในกรณีการหมุนตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา โดยความแตกต่างหลักระหว่างสองกรณีนี้อยู่ที่ลำดับการสลับเฟสของสัญญาณไฟฟ้าเท่านั้น ไม่ได้ส่งผลต่อรูปร่างของสัญญาณหรือค่าความเร็วเฉลี่ยของมอเตอร์

จากการทดลองการหมุนของมอเตอร์ BLDC ทั้งในกรณีตามเข็มนาฬิกา (CW) และทวนเข็มนาฬิกา (CCW) ที่ความเร็วประมาณ 4000 RPM พบว่าสัญญาณ Back EMF ของทั้งสองกรณีมีลักษณะเป็นคลื่นแบบ Trapezoidal และมีมุมเหลื่อมเฟสประมาณ 120 องศาทางไฟฟ้าเหมือนกัน แสดงให้เห็นว่าลักษณะพื้นฐานของสัญญาณไม่ขึ้นกับทิศทางการหมุน ความแตกต่างที่ชัดเจนคือ ลำดับการสับเปลี่ยนเฟส (Commutation Sequence) ที่กลับทิศทางกันตามทิศการหมุนของมอเตอร์ ขณะที่ค่าคาบสัญญาณและความเร็วรอบที่คำนวณได้จากสัญญาณ Rook มีค่าใกล้เคียงกันทั้งสองกรณี แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมสามารถรักษาความเร็วของมอเตอร์ได้อย่างสม่ำเสมอไม่ว่าทิศทางการหมุนจะเป็น CW หรือ CCW



## เปรียบเทียบ 6-Step และ FOC



เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการควบคุมมอเตอร์ BLDC ระหว่างวิธีแบบ 6-Step Commutation และ Field-Oriented Control (FOC) พบว่าทั้งสองวิธีมีลักษณะการทำงานที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน การควบคุมแบบ 6-Step เป็นการควบคุมโดยอาศัยการสลับแรงดันในแต่ละเฟสเป็นช่วง ๆ ทำให้กระแสที่ไหลในขดลวดมีลักษณะเป็นขั้นบันได ส่งผลให้เกิด Torque Ripple สูง มีการสั่นสะเทือนและเสียงรบกวนมากกว่า แต่ข้อดีคือระบบมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ใช้อุปกรณ์และอัลกอริทึมที่น้อย จึงเหมาะสำหรับงานที่ไม่ต้องการความละเอียดสูงด้านแรงบิดและต้นทุนต่ำ ในขณะที่การควบคุมแบบ FOC เป็นการควบคุมเชิงเวกเตอร์ที่ทำให้กระแสในขดลวดมีลักษณะใกล้เคียงกับคลื่นไซน์ ส่งผลให้แรงบิดที่ได้มีความเรียบต่อเนื่อง ลด Torque Ripple ได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีเสียงรบกวนต่ำ และให้ความแม่นยำในการควบคุมสูงกว่า อย่างไรก็ตาม FOC มีความซับซ้อนของระบบทั้งในด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์สูง ต้องใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์และการประมวลผลที่มากกว่า ดังนั้นการเลือกใช้วิธีควบคุมจึงขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของลักษณะงาน ความต้องการด้านสมรรถนะ และข้อจำกัดด้านต้นทุนของระบบ

### สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองการขับมอเตอร์ BLDC ทั้งในทิศทาง ตามเข็มนาฬิกา (CW) และ ทวนเข็มนาฬิกา (CCW) พบว่าสัญญาณ Back-EMF ของทั้งสองทิศทางมีลักษณะเป็น คลื่นแบบ Trapezoidal และมีการเหลื่อมเฟสกันประมาณ 120 องศาไฟฟ้า ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของมอเตอร์ BLDC แบบสามเฟส โดยความแตกต่างที่เห็นได้ชัดระหว่าง CW และ CCW คือ ลำดับการเกิดของเฟสสัญญาณที่กลับทิศทางกัน ขณะที่รูปร่างของสัญญาณและค่าความเร็วรอบโดยรวมยังคงมีลักษณะใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมสามารถสลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาการควบคุมแบบ 6-Step และเปรียบเทียบกับแนวคิดการควบคุมแบบ Field-Oriented Control (FOC) พบว่า 6-Step สามารถทำให้อัตราการทำงานได้จริงตามหลักการพื้นฐาน ขณะที่ FOC ให้สมรรถนะด้านความเรียบของแรงบิดและความแม่นยำสูงกว่าในเชิงทฤษฎี

### อภิปรายผล

จากการทดลอง CW และ CCW พบว่าการเปลี่ยนทิศทางการหมุนของมอเตอร์ BLDC ไม่ได้ส่งผลต่อขนาดของสัญญาณ Back-EMF แต่ส่งผลโดยตรงต่อ ลำดับของเฟสไฟฟ้า (Phase Sequence) ซึ่งเป็นกลไกหลักของการสลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ คุณสมบัตินี้แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมสามารถจัดการทิศทางการหมุนได้อย่างถูกต้องผ่านการสลับลำดับการกระตุ้นของเฟส อย่างไรก็ตาม จากลักษณะการควบคุมแบบ 6-Step จะพบว่ายังมี Torque Ripple และการสั่นสะเทือนของความเร็วรอบ ซึ่งเป็นผลมาจากกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์มีลักษณะเป็นช่วงขั้น ไม่ต่อเนื่องเหมือนคลื่นไซน์ ในขณะที่เมื่อพิจารณาการควบคุมแบบ FOC ซึ่งเป็นการควบคุมเชิงเวกเตอร์ จะพบว่าสามารถสร้างกระแสให้มีลักษณะใกล้เคียงคลื่นไซน์ ทำให้แรงบิดมีความเรียบต่อเนื่อง ลดการสั่นสะเทือนและเสียงรบกวนได้อย่างชัดเจน ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า การควบคุมแบบ 6-Step เหมาะสำหรับงานที่ต้องการระบบเรียบง่ายและต้นทุนต่ำ ส่วน FOC เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความแม่นยำ ความนุ่มนวล และสมรรถนะสูง

## ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองการควบคุมมอเตอร์ BLDC ในทิศทางการหมุนตามเข็มนาฬิกา (CW) และทวนเข็มนาฬิกา (CCW) รวมถึงการเปรียบเทียบกับแนวคิดการควบคุมแบบ Field-Oriented Control (FOC) พบว่ายังสามารถพัฒนาระบบให้มีสมรรถนะสูงขึ้นได้ในหลายด้าน ประการแรก ควรเพิ่มการทดสอบภายใต้ภาระโหลดที่แตกต่างกันในทั้งสองทิศทางการหมุน เพื่อศึกษาผลกระทบของโหลดต่อรูปคลื่น Back-EMF ความเสถียรของความเร็วรอบ และ Torque Ripple อย่างละเอียดมากยิ่งขึ้น ประการที่สอง ควรพัฒนาระบบควบคุมจากแบบ 6-Step ไปเป็นแบบ FOC จริ่งบนฮาร์ดแวร์ เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะด้านความเรียบของแรงบิด การตอบสนองเชิงพลวัต และประสิทธิภาพของระบบในสภาพการทำงานจริงอย่างชัดเจน ประการที่สาม ควรปรับปรุงระบบตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ เช่น การใช้ Hall Sensor ร่วมกับ Back-EMF Sensing เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการสลับเฟส โดยเฉพาะในช่วงความเร็วรอบต่ำ สุดท้าย ควรเพิ่มการวิเคราะห์ด้านพลังงานและความร้อน เช่น การสูญเสียในวงจรขับและอุณหภูมิของมอเตอร์ เพื่อประเมินความเหมาะสมในการนำระบบไปใช้งานจริงในระยะยาว

## อ้างอิง

- <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785321009585>
- [https://www.researchgate.net/publication/379738645\\_Sensorless\\_Control\\_Methods\\_for\\_BLDC\\_Motor\\_Drives\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/379738645_Sensorless_Control_Methods_for_BLDC_Motor_Drives_A_Review)
- [https://www.researchgate.net/publication/228677501\\_A\\_New\\_Approach\\_to\\_Sensorless\\_Control\\_Method\\_for\\_Brushless\\_DC\\_Motors](https://www.researchgate.net/publication/228677501_A_New_Approach_to_Sensorless_Control_Method_for_Brushless_DC_Motors)
- [https://www.st.com/resource/en/application\\_note/cd00020086-sensorless-blcd-motor-control-and-bemf-sampling-methods-with--st7mc-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/cd00020086-sensorless-blcd-motor-control-and-bemf-sampling-methods-with--st7mc-stmicroelectronics.pdf)
- <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/10/4027>
- [https://pure.manchester.ac.uk/ws/portalfiles/portal/220826649/CDSR\\_180.pdf](https://pure.manchester.ac.uk/ws/portalfiles/portal/220826649/CDSR_180.pdf)
- <https://www.ijtpc.com/IJTPC/IJTPC-2019/IJTPC-Issue38-Vol11-No1-Mar2019/1-IJTPC-Issue38-Vol11-No1-Mar2019-pp1-9.pdf>
- <https://www.eleco.org.tr/ELECO2023/eleco2023-papers/208.pdf>
- <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/wichcha/article/view/94099>

## 2. Lab 1.2 DC Motor

### การทดลองที่ 1.2 DC Motor

#### จุดประสงค์

1. เพื่อให้สามารถอธิบายหลักการทำงานของมอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) รวมถึงความหมายและบทบาทของค่าคงที่แรงบิด (Motor Torque Constant) และค่าคงที่แรงดันย้อนกลับ (Back EMF Constant) ได้อย่างถูกต้อง
2. เพื่อให้สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ (Speed), แรงบิด (Torque), กระแสไฟฟ้า (Current), กำลังไฟฟ้า (Power) และประสิทธิภาพ (%Efficiency) ของ DC Motor ภายใต้สภาวะโหลดที่เปลี่ยนแปลง โดยควบคุมแรงบิดด้วย Magnetic Particle Clutch ได้
3. เพื่อให้สามารถศึกษาผลของการปรับค่า Duty Cycle และความถี่ของสัญญาณ PWM ที่ป้อนเข้าสู่ DC Motor ต่อแรงดันไฟฟ้า อินพุต ความเร็วรอบ กระแสไฟฟ้า และกำลังของมอเตอร์ได้อย่างเป็นระบบ
4. เพื่อให้สามารถอธิบายหลักการทำงานของโหมดการขับ H-Bridge ทั้งสามโหมด (Sign-Magnitude, Locked Anti-Phase และ Asynchronous Sign-Magnitude) และสามารถควบคุมทิศทางการหมุนของ DC Motor ด้วยโหมด Sign-Magnitude และ Locked Anti-Phase ได้อย่างถูกต้อง
5. เพื่อให้สามารถสร้างกราฟคุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ (Motor Characteristic Curve) และอธิบายความสัมพันธ์ของโค้งลักษณะต่าง ๆ เช่น Speed-Torque, Current-Torque และ Power-Torque ได้จากผลการทดลอง
6. เพื่อให้สามารถอธิบายความหมายและวิธีการหาค่า Torque Constant, Stall Torque และจุดทำงานที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดของ DC Motor ได้จากข้อมูลการทดลอง
7. เพื่อให้สามารถอธิบายกระบวนการปรับสภาพสัญญาณ (Signal Conditioning) และกระบวนการประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) ของกระแสไฟฟ้าที่อ่านค่าจาก Hall Current Sensor รวมถึงกระบวนการ Unwrap ค่าสัญญาณได้อย่างถูกต้อง
8. เพื่อให้สามารถออกแบบและวิเคราะห์วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (Low-Pass Filter) สำหรับการวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ และสามารถวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ของระบบจากกราฟ Bode Plot ได้
9. เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณ PWM กับ Duty Cycle ต่อความเร็วรอบ กระแสไฟฟ้า และประสิทธิภาพของ DC Motor ได้จากข้อมูลเชิงทดลอง
10. เพื่อให้สามารถอธิบายการทำงานของวงจร H-Bridge Drive และสามารถเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของโหมดการควบคุมแบบ Sign-Magnitude และ Locked Anti-Phase จากผลการทดลองได้
11. เพื่อให้สามารถออกแบบการทดลองตามกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ ตั้งแต่การตั้งวัตถุประสงค์ การกำหนดตัวแปร การบันทึกผล การวิเคราะห์ผล และการสรุปผลได้อย่างเป็นระบบ
12. เพื่อให้สามารถจัดทำรายงานผลการทดลอง พร้อมสรุปผล อภิปรายผล และอ้างอิงเอกสารที่เกี่ยวข้องได้อย่างถูกต้อง ครบถ้วน และสอดคล้องตามหลักวิชาการ

## สมมติฐาน

เมื่อมีการปรับค่า Duty Cycle และความถี่ของสัญญาณ PWM ที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) จะส่งผลให้ความเร็วรอบ กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และประสิทธิภาพของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกันตามความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างแรงดัน กระแส และแรงบิดของมอเตอร์ นอกจากนี้ เมื่อมีการเพิ่มโหลดแรงบิดโดยใช้ Magnetic Particle Clutch จะทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ลดลง ขณะที่กระแสไฟฟ้าและแรงบิดเพิ่มขึ้นตามคุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ และโหมดการควบคุมแบบ Sign-Magnitude และ Locked Anti-Phase จะให้ผลการตอบสนองของมอเตอร์ที่แตกต่างกันทั้งในด้านความเร็ว กระแส และประสิทธิภาพของระบบ

## ตัวแปร

### 1. ตัวแปรต้น:

- ค่า Duty Cycle ของสัญญาณ PWM
- ความถี่ของสัญญาณ PWM
- ค่าแรงบิดโหลดที่กระทำต่อ DC Motor (จาก Magnetic Particle Clutch)
- โหมดการขับ H-Bridge (Sign-Magnitude และ Locked Anti-Phase)

### 2. ตัวแปรตาม:

- ความเร็วรอบของ DC Motor
- กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอเตอร์
- กำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้
- ประสิทธิภาพ (%Efficiency)
- แรงบิดของมอเตอร์

### 3. ตัวแปรควบคุม:

- ชนิดและขนาดของ DC Motor ที่ใช้
- แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่ายหลัก
- รูปแบบวงจร H-Bridge Drive
- ชนิดของ Hall Current Sensor
- สภาพแวดล้อมในการทดลอง เช่น อุณหภูมิ และแรงเสียดทานเชิงกล

## เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1. Chapman, S. J., Electric Machinery Fundamentals

หลักการพื้นฐานของเครื่องจักรไฟฟ้า โดยเฉพาะมอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) ซึ่งครอบคลุมความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า แรงบิด ความเร็วรอบ และแรงดันเหนี่ยวนำย้อนกลับ (Back EMF) อย่างเป็นระบบ พร้อมทั้งอธิบายลักษณะกราฟ คุณลักษณะของมอเตอร์

### 2. Dubey, G. K., Fundamentals of Electrical Drives

แนวคิดของระบบขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า (Electrical Drives) ซึ่งประกอบด้วยมอเตอร์ ภาระโหลด และระบบควบคุม โดยอธิบายลักษณะการทำงานของมอเตอร์ภายใต้สภาวะโหลดที่แตกต่างกัน เช่น โหลดแรงบิดคงที่และโหลดกำลังคงที่ รวมถึงผลกระทบของโหลดต่อความเร็ว กระแส และประสิทธิภาพของมอเตอร์ ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการอธิบายผลของ Magnetic Particle Clutch ต่อพฤติกรรมของ DC Motor ในการทดลอง

### 3. Texas Instruments, H-Bridge Motor Driver Application Note

โครงสร้างและหลักการทำงานของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์แบบ H-Bridge อย่างละเอียด รวมถึงการควบคุมแบบ Sign-Magnitude และ Locked Anti-Phase พร้อมการวิเคราะห์ทิศทางการไหลของกระแสในแต่ละโหมด ตลอดจนประเด็นด้าน Switching Loss และการป้องกัน Shoot-through ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการวิเคราะห์การควบคุมทิศทางและความเร็วของ DC Motor

### 4. Microchip Technology, PWM Techniques for DC Motor Speed Control

เทคนิคการควบคุมความเร็ว DC Motor ด้วยสัญญาณ PWM โดยอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง Duty Cycle กับแรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อมมอเตอร์ รวมถึงผลของความถี่ PWM ต่อแรงบิดกระแสเพี้ยน การสูญเสียพลังงาน และความราบรื่นของการหมุน ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญในการเลือกค่าพารามิเตอร์ PWM ให้เหมาะสม

### 5. Bose, B. K., Modern Power Electronics and AC Drives

พื้นฐานด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังและระบบขับเคลื่อนในเชิงอุตสาหกรรม โดยเน้นการแปลงพลังงานไฟฟ้า การทำงานของวงจรแปลงกำลัง เช่น Chopper และ Inverter รวมถึงการวิเคราะห์ประสิทธิภาพและการสูญเสียพลังงานในระบบขับเคลื่อน ซึ่งช่วยสนับสนุนการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบควบคุม DC Motor

### 6. Ogata, K., Modern Control Engineering

ทฤษฎีการควบคุมระบบเชิงเส้น การวิเคราะห์การตอบสนองของระบบทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ รวมถึงการออกแบบตัวกรองสัญญาณและการวิเคราะห์กราฟ Bode Plot ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบ Low-Pass Filter และการวิเคราะห์สัญญาณความเร็วรอบของ DC Motor

### 7. Rashid, M. H., Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications

หลักการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น Diode, MOSFET และ IGBT รวมถึงการขับโหลดเชิง Inductive อย่างมอเตอร์ไฟฟ้า การป้องกันแรงดันย้อนกลับจากขดลวด และการสูญเสียในอุปกรณ์สวิตชิง ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการวิเคราะห์วงจรขับ DC Motor และการสูญเสียพลังงาน

## ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ทำการติดตั้งและเชื่อมต่อวงจรทดลอง DC Motor เข้ากับบอร์ด STM32 และระบบควบคุมผ่าน MATLAB/Simulink ให้เรียบร้อย
2. เริ่มการทดลองในสถานะ ไม่ติดตั้งก้านกด (No Load) โดยปรับค่า PWM และ Frequency ในระดับที่ต่างกัน และเพิ่มค่า Duty Cycle ทีละ 20% เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณควบคุมกับความเร็วนำของมอเตอร์
3. วัดค่าความเร็วรอบ (Speed) กระแสไฟฟ้า (Current) และแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ในแต่ละระดับของ Duty Cycle และบันทึกข้อมูลลงในระบบ
4. ทำการติดตั้ง ก้านกดโหลด เข้ากับมอเตอร์ เพื่อใช้ในการวัดแรงกดหรือแรงบิดของมอเตอร์
5. กำหนดค่า PWM = 100% และทำการวัดค่าแรงกดของมอเตอร์ซ้ำ ทั้งหมด 5 ครั้ง เพื่อความแม่นยำของผลการทดลอง
6. บันทึกค่ากระแสไฟฟ้า ความเร็วรอบ และแรงบิดที่ได้จากการทดลองในแต่ละครั้ง เพื่อนำไปคำนวณค่ากำลังและประสิทธิภาพของมอเตอร์
7. ศึกษาการควบคุมมอเตอร์ด้วยวงจร H-Bridge ในโหมด Sign-Magnitude โดยใช้สัญญาณ PWM ควบคุมความเร็ว และ DIR ควบคุมทิศทางการหมุน
8. เปลี่ยนรูปแบบการควบคุมเป็นโหมด Locked Anti-Phase โดยทำการสลับสายสัญญาณ DIR และ PWM
9. บันทึกค่าการตอบสนองของความเร็วรอบและทิศทางการหมุนของมอเตอร์ในแต่ละโหมด เพื่อนำไปเปรียบเทียบประสิทธิภาพการควบคุม
10. นำข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ในโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง PWM, Speed, Torque, Power และ Efficiency

## ผลการทดลอง

ผลการทดลองด้านกระแส แรงบิด และกำลังของมอเตอร์

กระแส(A)	แรงบิด(N-m)	Pin (W)	P(out)	Efficiency
6.093	0.188	73.12	23.067	31.54
6.552	0.218	78.62	4.682	5.95
6.054	0.2	72.65	3.988	5.48
6.301	0.197	75.61	24.4871	32.38
6.122	0.203	73.46	46.081	62.72

จากผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระโหลดในช่วงน้ำหนักประมาณ 172–200 กรัม พบว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอเตอร์มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 6.09–6.55 แอมแปร์ ขณะที่แรงบิดของมอเตอร์มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.188–0.218 นิวตัน-เมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น กระแสและแรงบิดของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นตามลำดับ

กำลังไฟฟ้าขาเข้า (Pin) มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 72.65–78.62 วัตต์ ในขณะที่กำลังกลขาออก (Pout) มีค่าระหว่างประมาณ 3.99–46.08 วัตต์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงในช่วงประมาณ 5.49% ถึง 62.73%

#### การทดลอง Motor Characteristic Curves

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟกับแรงบิด

กระแส(A)	แรงบิด(N·m)
6.093	0.188
6.552	0.218
6.054	0.2
6.301	0.197
6.122	0.203

จากตารางความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงบิด พบว่าแรงบิดเพิ่มขึ้นเกือบเป็นสัดส่วนตรงกับกระแสไฟฟ้า แสดงถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นที่สอดคล้องกับทฤษฎีแรงบิดของมอเตอร์ DC

ผลการคำนวณ Torque Constant (Kt)

จากการคำนวณ Torque Constant โดยใช้ความสัมพันธ์

$$K_t = \frac{T}{I}$$



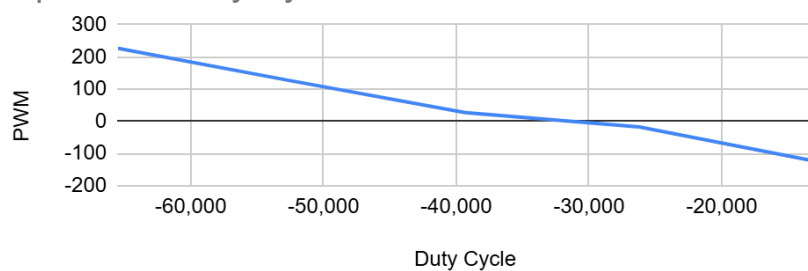
กระแส(A)	แรงบิด(N·m)	Kt
6.093	0.188	0.0308
6.552	0.218	0.0333
6.054	0.2	0.0330
6.301	0.197	0.0313
6.122	0.203	0.0332

จากการคำนวณ Torque Constant ของมอเตอร์กระแสตรงจากข้อมูลการทดลอง พบว่า มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.031–0.033 N·m/A และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับประมาณ 0.032 N·m/A ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามอเตอร์มีค่าคงที่แรงบิดต่อกระแสที่ค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงการทดลอง

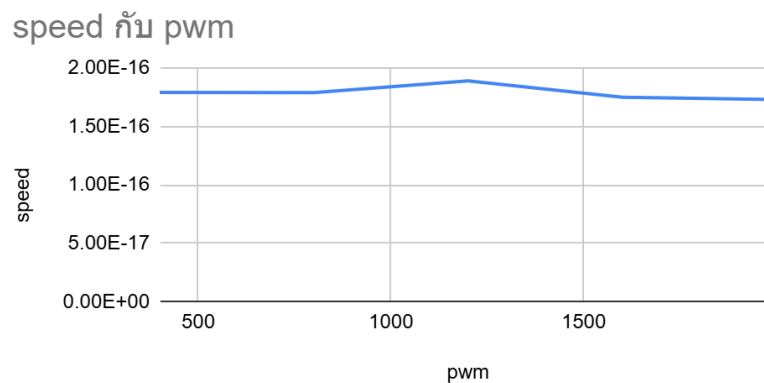
ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่าง PWM, Duty Cycle และความเร็วมอเตอร์

Duty Cycle	Speed	endcode	RPM
-13,110	-122.22	-122.7	1171.785
-26,210	-17.18	-21.48	205.134
-39,320	26.99	19.94	190.427
-52,430	125.8	124.3	1187.065
-65,540	227.3	227	2167.85

Speed กับ Duty Cycle

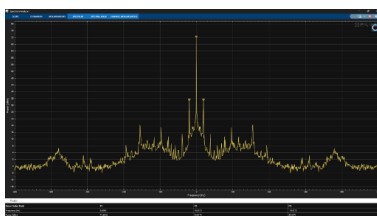


pwm	speed
400	1.79E-16
800	1.79E-16
1200	1.89E-16
1600	1.75E-16
2000	1.73E-16



จากการทดลองปรับค่า PWM และ Duty Cycle พบว่าความเร็วรอบของมอเตอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า PWM อย่างชัดเจน และมีลักษณะความสัมพันธ์ใกล้เคียงเชิงเส้นในช่วงการทำงานปกติ โดยค่าความเร็วรอบที่ได้จาก Encoder สอดคล้องกับค่าที่คำนวณได้จากสัญญาณควบคุม

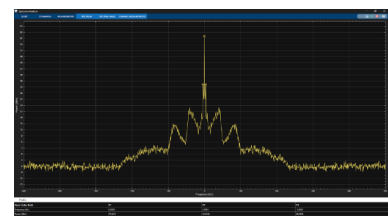
การวิเคราะห์สัญญาณด้วย FFT



Speed = -122.2



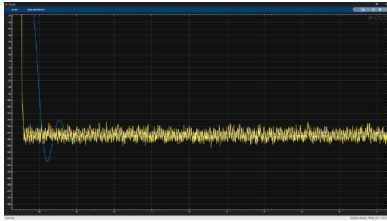
Speed = -17.18



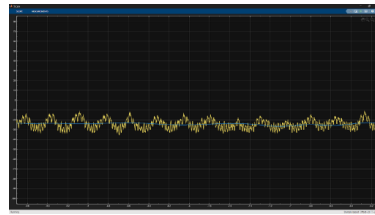
Speed = -26.99

จากการวิเคราะห์สัญญาณความเร็วด้วยเทคนิค Fast Fourier Transform (FFT) พบว่ามีคอมโพเนนต์ความถี่หลักที่สอดคล้องกับความถี่การหมุนของมอเตอร์ และมีสัญญาณรบกวนในย่านความถี่สูงซึ่งเกิดจากการสวิตช์ของ PWM อย่างชัดเจน

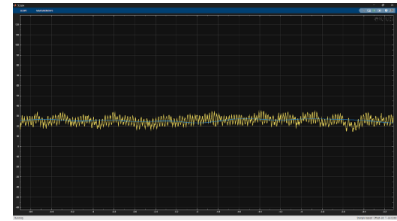
## หลังผ่าน Low-Pass Filter และ Signal Conditioning



Speed = -122.2



Speed = -17.18

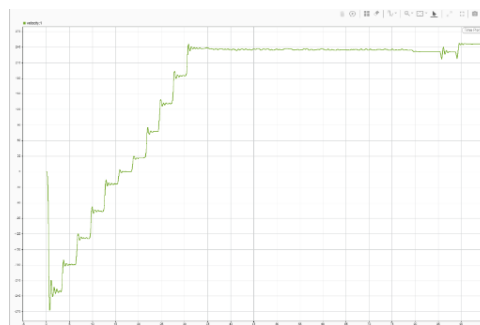


Speed = -26.99

เมื่อสัญญาณความเร็วผ่านวงจร Low-pass Filter พบว่าสัญญาณรบกวนความถี่สูงลดลงอย่างชัดเจน และรูปคลื่นของสัญญาณมีความเรียบต่อเนื่องมากขึ้น ส่งผลให้การนำสัญญาณไปใช้ในระบบควบคุมมีความแม่นยำสูงขึ้น

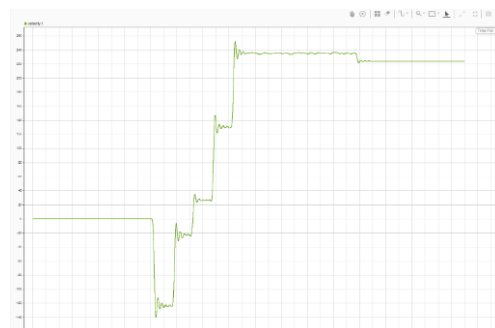
การทดลองระบบขับ H-Bridge ในแต่ละโหมด

โหมด Sign-Magnitude จากผลการทดลองในโหมด Sign-Magnitude พบว่าความเร็วรอบของมอเตอร์เพิ่มขึ้นแบบเป็นขั้นตามระดับสัญญาณควบคุม และเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว ความเร็วมีความเสถียรสูงและมี ripple ต่ำ



โหมด Locked Anti-Phase

จากผลการทดลองในโหมด Locked Anti-Phase พบว่าในช่วงเปลี่ยนทิศทางจะเกิด transient และ ripple ของความเร็วสูงกว่าโหมด Sign-Magnitude อย่างชัดเจน แต่ยังสามารถรักษาค่าความเร็วรอบคงที่ได้ในสภาวะ steady-state



## ผลการทดลองทิศทางการหมุน CW และ CCW

จากการทดลองเมื่อกำหนด PWM เป็นค่าบวก มอเตอร์หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (CW) และเมื่อกำหนด PWM เป็นค่าลบ มอเตอร์หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา (CCW) โดยค่าความเร็วเชิงเส้น ความเร็วเชิงมุม และความเร่งเชิงมุมมีเครื่องหมายเปลี่ยนตามทิศทางการหมุนอย่างถูกต้อง แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถควบคุมทั้ง “ขนาด” และ “ทิศทาง” ของความเร็วรอบได้อย่างถูกต้อง

## สรุปผลการทดลอง

การทดลองมอเตอร์กระแสตรงในครั้งนี้สามารถแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะสำคัญของ DC Motor ได้อย่างชัดเจน ทั้งในด้านความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า แรงบิด กำลัง และความเร็วรอบ โดยผลการทดลองยืนยันว่าแรงบิดแปรผันตรงกับกระแสไฟฟ้า และความเร็วรอบสามารถควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยสัญญาณ PWM

จากการคำนวณพบว่า Torque Constant ของมอเตอร์มีค่าเฉลี่ยประมาณ  $0.032 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{A}$  และค่า Stall Torque ที่ประมาณได้จากผลการทดลองมีค่าประมาณ  $0.22 \text{ N}\cdot\text{m}$  ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะเชิงกลของมอเตอร์ขนาดเล็กในงานอุตสาหกรรมและงานควบคุมทั่วไป

การวิเคราะห์สัญญาณด้วย FFT และการกรองด้วย Low-pass Filter แสดงให้เห็นว่าสัญญาณจากระบบควบคุมมีสัญญาณรบกวนจากการสวิตช์ของ PWM ซึ่งสามารถลดลงได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยการทำ Signal Conditioning ส่งผลให้ระบบมีความเสถียรและเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานจริง นอกจากนี้ การเปรียบเทียบการทำงานของ H-Bridge ในโหมด Sign-Magnitude และ Locked Anti-Phase แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างด้านการตอบสนองและความเรียบของความเร็วรอบ ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการเลือกโหมดขับที่เหมาะสมกับลักษณะงานได้

โดยสรุป การทดลองนี้ประสบความสำเร็จในการศึกษาพฤติกรรมพื้นฐานของ DC Motor การควบคุมด้วย PWM การประมวลผลสัญญาณ และระบบขับ H-Bridge ซึ่งสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในงานควบคุมมอเตอร์ ระบบอัตโนมัติ และระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าในงานวิศวกรรมจริงได้อย่างเหมาะสม

## อภิปรายผล

จากผลการทดลองพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงบิดของมอเตอร์มีลักษณะเป็นสัดส่วนโดยตรง ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของมอเตอร์กระแสตรงที่ระบุว่าแรงบิดแปรผันตรงกับกระแสในขดลวดอาร์มาเจอร์ โดยค่า Torque Constant ( $K_t$ ) ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเฉลี่ยประมาณ  $0.032 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{A}$  ซึ่งมีความสม่ำเสมอในทุกช่วงการทดลอง แสดงให้เห็นว่ามอเตอร์มีคุณสมบัติเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าที่ค่อนข้างคงที่ และระบบวัดมีความเสถียรในระดับที่ยอมรับได้

ในด้านประสิทธิภาพของมอเตอร์ พบว่าค่าประสิทธิภาพมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมากตั้งแต่ประมาณ 5% ถึงมากกว่า 60% ซึ่งเป็นลักษณะปกติของ DC Motor ที่ประสิทธิภาพจะต่ำในช่วงโหลดน้อย และจะสูงขึ้นเมื่อโหลดเข้าใกล้จุดทำงานที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม ความคลาดเคลื่อนของประสิทธิภาพในบางช่วงอาจเกิดจากการสูญเสียในวงจรขับ H-Bridge การสูญเสียในขดลวด (Copper loss) และการสูญเสียเชิงกลจากแรงเสียดทานและดลบลูกปืน

ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่าง PWM และความเร็วรอบแสดงให้เห็นว่าความเร็วรอบสามารถควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยการปรับ Duty Cycle โดยมีแนวโน้มเชิงเส้นในช่วงการทำงานหลัก อย่างไรก็ตาม ในบางช่วงพบว่าความเร็วรอบไม่

เพิ่มขึ้นอย่างเป็นสัดส่วนโดยสมบูรณ์ ซึ่งอาจเกิดจากแรงต้านโหลดที่เปลี่ยนแปลง การอ้อมตัวของสนามแม่เหล็ก และข้อจำกัดของแรงดันจ่ายในระบบ

จากการวิเคราะห์สัญญาณด้วย FFT พบว่าสัญญาณความเร็วมีคอมโพเนนต์ความถี่หลักที่สัมพันธ์กับการหมุนของมอเตอร์ และมีสัญญาณรบกวนในย่านความถี่สูงจากการสวิตช์ของ PWM อย่างชัดเจน เมื่อผ่านตัวกรองความถี่ต่ำ (Low-pass Filter) แล้ว สัญญาณรบกวนลดลงอย่างมาก ทำให้สัญญาณมีความเรียบและเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในระบบควบคุม แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของ Signal Conditioning ในงานควบคุมมอเตอร์จริง

สำหรับการเปรียบเทียบการทำงานของ H-Bridge ทั้งสองโหมด พบว่าโหมด Sign-Magnitude ให้ความเร็วรอบที่มีเสถียรภาพสูงและมี ripple ต่ำกว่า ในขณะที่โหมด Locked Anti-Phase ให้การตอบสนองที่รวดเร็วกว่าแต่มี ripple และ transient สูงกว่า ซึ่งแสดงถึงข้อดี-ข้อจำกัดที่ต่างกันของแต่ละโหมด และเหมาะกับการใช้งานคนละประเภท

ในด้านทิศทางการหมุน CW และ CCW พบว่าระบบสามารถควบคุมทิศทางได้อย่างถูกต้องผ่านเครื่องหมายของสัญญาณ PWM โดยค่าความเร็วเชิงเส้น ความเร็วเชิงมุม และความเร่งเชิงมุมเปลี่ยนเครื่องหมายตามทิศทางอย่างสอดคล้อง แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมมีความถูกต้องทั้งเชิงขนาดและทิศทางของการเคลื่อนที่

## ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองมอเตอร์กระแสตรงในครั้งนี้ พบว่ายังมีปัจจัยหลายประการที่สามารถพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มความถูกต้องและความสมบูรณ์ของการทดลองได้ ประการแรก ควรเพิ่มจำนวนจุดทดสอบในช่วงโหลดตั้งแต่โหลดต่ำจนถึงสภาวะใกล้หยุดนิ่ง (Stall) เพื่อให้สามารถสร้างกราฟ Motor Characteristic ได้แก่ Speed-Torque, Current-Torque และ Power-Speed ได้อย่างต่อเนื่องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น รวมถึงช่วยให้การประมาณค่า Stall Torque มีความถูกต้องสูงขึ้น

ควรมีการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับข้อมูลจาก Datasheet ของมอเตอร์จริง เพื่อวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของค่า Torque Constant ( $K_t$ ), ประสิทธิภาพ และความเร็วรอบ ซึ่งจะช่วยยืนยันความถูกต้องของระบบวัดและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทดลอง

ในส่วนของการควบคุมด้วยสัญญาณ PWM และการขับด้วย H-Bridge ควรศึกษาผลกระทบของความถี่ PWM ในช่วงที่กว้างขึ้น รวมถึงเปรียบเทียบการสูญเสียพลังงานและ ripple ของกระแสในแต่ละโหมดการขับอย่างละเอียด เพื่อให้สามารถเลือกโหมดการขับที่เหมาะสมกับลักษณะงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณด้วย FFT และการกรองด้วย Low-pass Filter ควรมีการปรับพารามิเตอร์ของตัวกรอง เช่น Cut-off Frequency และ Order ของฟิลเตอร์ เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบต่อความเรียบของสัญญาณและความหน่วงของระบบ ซึ่งจะ เป็นประโยชน์ต่อการออกแบบระบบควบคุมแบบปิด (Closed-loop Control) ในอนาคต

หากมีการต่อยอดการทดลอง ควรนำระบบควบคุมแบบปิด เช่น PID Controller เข้ามาใช้งานร่วมกับ DC Motor เพื่อศึกษาพฤติกรรมตอบสนองเชิงพลวัต (Dynamic Response) เช่น Rise Time, Overshoot และ Settling Time ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจด้านการควบคุมมอเตอร์ในเชิงอุตสาหกรรมและงานวิศวกรรมระบบอัตโนมัติได้ดียิ่งขึ้น

## อ้างอิง

Chapman, S.J., Electric Machinery Fundamentals, 4th ed., McGraw-Hill, 2005.

Texas Instruments, AN-694 A DMOS 3A, 55V, H-Bridge: The LMD18200, Application Note, SNOA170C, 1999 (rev. 2013).

Texas Instruments, Current Sensing in an H-Bridge, Tech Note SBOA174D, 2016 (rev. 2023).

### 3. Lab 1.3 Stepper Motor

#### การทดลองที่ 1.3 Stepper Motor

##### จุดประสงค์

1. เพื่อให้สามารถอธิบายหลักการทำงานและโครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์สเต็ปเปอร์ (Stepper Motor) ได้อย่างถูกต้องตามหลักวิศวกรรมไฟฟ้า
2. เพื่อให้สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของ Stepper Motor กับความถี่ของสัญญาณควบคุมที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ได้อย่างถูกต้อง
3. เพื่อให้สามารถอธิบายหลักการทำงานของโหมดการขับ (Drive Mode) ของ Stepper Motor ได้แก่ Wave Drive, Full-Step, Half-Step และ Micro-Step รวมถึงผลกระทบของแต่ละโหมดต่อความละเอียด ความเร็ว และตำแหน่งเชิงมุมของมอเตอร์ได้อย่างเหมาะสม
4. เพื่อให้สามารถอธิบายทิศทางการเคลื่อนที่และตำแหน่งเชิงมุมของ Stepper Motor ภายใต้การควบคุมในแต่ละโหมดการขับได้อย่างถูกต้อง
5. เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณควบคุม ความเร็วรอบ และตำแหน่งเชิงมุมของ Stepper Motor ด้วยข้อมูลเชิงทดลองได้อย่างเป็นระบบ
6. เพื่อให้สามารถอธิบายหลักการเกิด Loss Step และสภาพเงื่อนไขที่ทำให้เกิดการสูญเสียตำแหน่งของ Stepper Motor ได้อย่างถูกต้อง
7. เพื่อให้สามารถอธิบายหลักการเร่งความเร็ว (Acceleration) และการชะลอความเร็ว (Deceleration) ของ Stepper Motor รวมถึงผลกระทบต่อการเกิด Loss Step ได้อย่างชัดเจน
8. เพื่อให้สามารถอธิบายกระบวนการปรับสภาพสัญญาณ (Signal Conditioning) และกระบวนการประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) ที่เกี่ยวข้องกับการควบคุม Stepper Motor ได้อย่างถูกต้อง
9. เพื่อให้สามารถออกแบบและเขียนโปรแกรมควบคุม Stepper Motor โดยประยุกต์ใช้โปรแกรม MATLAB และ Simulink ในการควบคุมความเร็ว ความถี่ และตำแหน่งเชิงมุม รวมทั้งสามารถทำงานร่วมกับบอร์ด Nucleo STM32G474RE ได้อย่างถูกต้อง
10. เพื่อให้สามารถอธิบายขั้นตอนการดำเนินการทดลองได้อย่างครบถ้วน และสามารถบันทึกผล วิเคราะห์ผล สรุปผล และอภิปรายผลการทดลองได้อย่างเป็นระบบตามหลักวิทยาศาสตร์
11. เพื่อให้สามารถจัดทำรายงานผลการทดลอง พร้อมข้อสรุป อภิปรายผล และเอกสารอ้างอิงที่มีความถูกต้อง ครบถ้วน และสอดคล้องกับหลักวิชาการ

##### สมมติฐาน

เมื่อมีการเพิ่มความถี่ของสัญญาณควบคุมที่ป้อนเข้าสู่ Stepper Motor จะส่งผลให้ความเร็วรอบของมอเตอร์เพิ่มขึ้นตามความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความถี่ของสัญญาณและความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ โดยโหมดการขับแบบ Micro-Step จะให้การเคลื่อนที่ที่ราบรื่นและมีความละเอียดของตำแหน่งเชิงมุมสูงกว่าโหมด Wave Drive, Full-Step และ Half-Step อย่างไรก็ตาม เมื่อทำงานที่ความถี่สูงและมีอัตราการเร่งความเร็วที่ไม่เหมาะสม อาจทำให้เกิดปรากฏการณ์ Loss Step ส่งผลให้ตำแหน่งจริงของมอเตอร์คลาดเคลื่อนจากค่าที่ตั้งงาน ทั้งนี้การกำหนดโปรไฟล์การเร่งและชะลอความเร็วที่เหมาะสมจะช่วยลดโอกาสการเกิด Loss Step และเพิ่มความแม่นยำในการควบคุมตำแหน่งเชิงมุมของ Stepper Motor



## ตัวแปร

### 1. ตัวแปรต้น:

- ความถี่ของสัญญาณควบคุมที่ป้อนเข้าสู่ Stepper Motor (Pulse Frequency)
- โหมดการขับของ Stepper Motor
- โปรไฟล์การเร่งความเร็วและการชะลอความเร็ว

### 2. ตัวแปรตาม:

- ความเร็วรอบของ Stepper Motor
- ตำแหน่งเชิงมุมของ Stepper Motor
- ความแม่นยำของตำแหน่ง (Position Accuracy)
- การเกิดหรือไม่เกิด Loss Step
- ความราบรื่นของการเคลื่อนที่ (Smoothness of Motion)

### 3. ตัวแปรควบคุม:

- ชนิดและรุ่นของ Stepper Motor ที่ใช้ในการทดลอง
- แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่ายให้กับมอเตอร์และวงจรขับ
- ชนิดของไดรเวอร์ Stepper Motor
- บอร์ดควบคุมที่ใช้ (Nucleo STM32G474RE)

## เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1. Chapman, S. J. — Electric Machinery Fundamentals

หลักการพื้นฐานของเครื่องจักรไฟฟ้าโดยครอบคลุมทั้งโครงสร้าง การสร้างสนามแม่เหล็ก และกลไกการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล สำหรับ Stepper Motor ได้อธิบายหลักการควบคุมตำแหน่งเชิงมุมโดยอาศัยการกระตุ้นกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขดลวดที่ละเฟสตามลำดับ ทำให้โรเตอร์หมุนเป็นมุมคงที่ทีละ Step นอกจากนี้ยังอธิบายพื้นฐานแรงบิดของมอเตอร์ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงบิด รวมถึงลักษณะการตอบสนองของมอเตอร์เมื่อความถี่ของสัญญาณควบคุมเปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นพื้นฐานทางทฤษฎีที่ใช้รองรับการทดลอง Stepper Motor ในงานนี้

### 2. Kenjo, T. & Sugawara, A. — Stepping Motors and Their Microprocessor Controls

เนื้อหาเชิงลึกเฉพาะทางเกี่ยวกับ Stepper Motor โดยตรง ครอบคลุมทั้งโครงสร้างของมอเตอร์แบบ Unipolar และ Bipolar รวมถึงวิธีการขับแบบ Wave Drive, Full-Step, Half-Step และ Micro-Step อย่างละเอียด นอกจากนี้ยังอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง Torque-Speed Characteristic, ปรากฏการณ์ Resonance และสาเหตุของการเกิด Loss Step โดยชี้ให้เห็นว่า Loss Step มักเกิด

จากการเร่งความเร็วที่สูงเกินไปหรือโหลดที่เกินพิกัดของมอเตอร์ เอกสารเล่มนี้จึงเป็นแหล่งอ้างอิงหลักในการอธิบายพฤติกรรม การเคลื่อนที่ของ Stepper Motor และความแม่นยำของตำแหน่งเชิงมุมในงานทดลอง

### 3. Microchip Technology — AN907: Stepping Motor Fundamentals

Application Note AN907 ของ Microchip อธิบายหลักการพื้นฐานของ Stepper Motor ในมุมมองของงานควบคุมด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยเน้นความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของพัลส์ควบคุมกับความเร็วรอบของมอเตอร์ รวมถึงเทคนิคการสร้าง สัญญาณลำดับเฟสเพื่อขับ Stepper Motor ในโหมดต่าง ๆ เช่น Full-Step และ Half-Step นอกจากนี้ยังอธิบายผลกระทบของอัตรา การเร่ง (Acceleration Rate) ต่อการเกิด Loss Step และแนวทางในการเลือกความถี่เริ่มต้นและความชันของความเร่งที่เหมาะสม เอกสารฉบับนี้จึงเหมาะสำหรับใช้อ้างอิงในการออกแบบโปรแกรมควบคุม Stepper Motor ด้วย MATLAB, Simulink และบอร์ด ไมโครคอนโทรลเลอร์

### 4. Texas Instruments — Bipolar Stepper Motor Control Using an H-Bridge

การขับ Stepper Motor แบบ Bipolar โดยใช้วงจร H-Bridge ร่วมกับอุปกรณ์กำลัง เช่น MOSFET และไอซีไดรเวอร์มอเตอร์ เน้นหาเน้นการสลับทิศทางกระแสในขดลวดเพื่อควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ รวมถึงการสร้างลำดับพัลส์ที่เหมาะสมสำหรับโหมด Full-Step และ Micro-Step นอกจากนี้ยังอธิบายปัญหาทางไฟฟ้า เช่น Switching Loss และการป้องกันกระแสเกิน ซึ่งเป็นพื้นฐาน สำคัญสำหรับการออกแบบวงจรขับ Stepper Motor ให้ทำงานได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ

### 5. National Instruments — Stepper Motor Fundamentals

Stepper Motor ในมุมมองของระบบควบคุมอัตโนมัติ (Automation) โดยเน้นการควบคุมตำแหน่ง (Position Control) และความละเอียดของการเคลื่อนที่ (Step Resolution) เอกสารนี้อธิบายข้อดีของ Microstepping ในการลดแรงสั่นสะเทือน เพิ่มความราบรื่นของการหมุน และเพิ่มความแม่นยำของตำแหน่ง นอกจากนี้ยังเชื่อมโยงกับการใช้งานร่วมกับระบบวัดผลแบบป้อนกลับ (Feedback) เพื่อเพิ่มเสถียรภาพในการควบคุมตำแหน่ง ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของการควบคุมเชิงอุตสาหกรรมในงานทดลอง

### 6. Oriental Motor — Stepper Motor Technical Guide

ข้อมูลเชิงอุตสาหกรรมเกี่ยวกับ Stepper Motor โดยให้รายละเอียดเกี่ยวกับ Torque-Speed Curve, การเลือกสเปก มอเตอร์ให้เหมาะสมกับงาน และผลกระทบของโหลดต่อการทำงานของมอเตอร์ เอกสารยังอธิบายสาเหตุหลักของการเกิด Loss Step เช่น โหลดเกินพิกัด ความเร็วสูงเกินไป และการเลือกแรงดันไฟฟ้าไม่เหมาะสม รวมถึงแนวทางป้องกัน Loss Step ในงานจริง คู่มือนี้จึงมี ความสำคัญในการเชื่อมโยงการทดลองในห้องปฏิบัติการกับการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมจริง

### 7. STMicroelectronics — AN470: Stepper Motor Control with STM32

เอกสาร Application Note จาก STMicroelectronics ได้นำเสนอแนวทางการควบคุม Stepper Motor ด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล STM32 โดยอธิบายการสร้างสัญญาณพัลส์ควบคุมผ่าน Timer และการจัดการลำดับเฟสในระดับ

ซอฟต์แวร์ เอกสารยังแสดงตัวอย่างโค้ดและผังการทำงานของระบบควบคุม Stepper Motor ซึ่งสอดคล้องโดยตรงกับการทดลองที่ใช้บอร์ด Nucleo STM32G474RE ในรายวิชานี้ ช่วยให้สามารถอธิบายการเชื่อมต่อระหว่างทฤษฎีและการใช้งานจริงได้อย่างชัดเจน

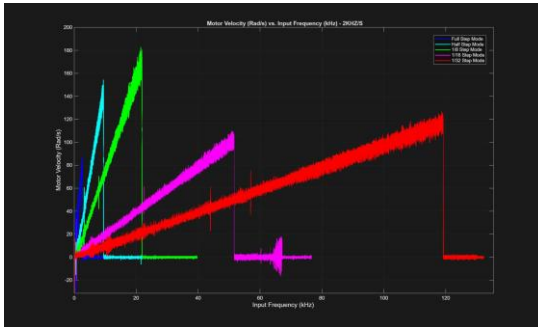
### ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เริ่มจากการติดตั้งชุดทดลอง Stepper Motor ให้เรียบร้อย ตรวจสอบการเชื่อมต่อของ Driver, แหล่งจ่ายไฟ และบอร์ดควบคุม STM32 ให้ถูกต้องครบถ้วน
2. เปิดโปรแกรม MATLAB และ Simulink พร้อมโหลดโมเดลที่ใช้ควบคุม Stepper Motor จากนั้นตรวจสอบการสื่อสารระหว่างโปรแกรมกับบอร์ด STM32 ให้สามารถรับ-ส่งสัญญาณได้ตามปกติ
3. ตั้งค่าระบบควบคุมให้สามารถเลือกโหมดการขับเคลื่อนได้ ได้แก่ Full-Step, Half-Step และ Micro-Step
4. ป้อนสัญญาณความถี่ที่ 3 kHz เข้าไปยัง Stepper Motor ในแต่ละโหมด เพื่อสังเกตและบันทึกค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ รวมถึงพฤติกรรมการหมุนในแต่ละโหมด
5. ป้อนสัญญาณความถี่ที่มีการเพิ่มขึ้นแบบมีอัตราเร่ง (Acceleration) ที่
  - 1 kHz/s
  - 5 kHz/s

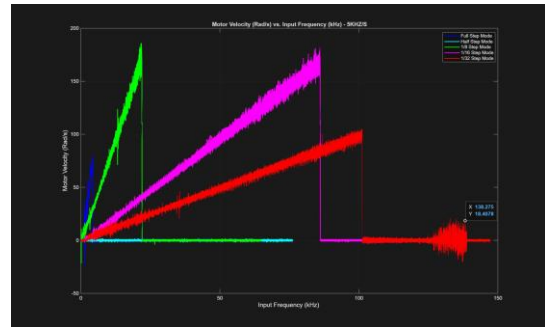
เพื่อศึกษาการเกิด Loss Step ของมอเตอร์ในแต่ละโหมดการขับ

6. บันทึกค่าความเร็วรอบ สัญญาณการเคลื่อนที่ และตำแหน่งของมอเตอร์จากระบบ Encoder หรือซอฟต์แวร์ MATLAB เพื่อนำไปวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ อัตราเร่ง และการเกิด Loss Step
7. ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Stepper Motor ในแต่ละโหมด ได้แก่ Full-Step, Half-Step และ Micro-Step เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างด้านความเร็ว ความนุ่มนวล และความเสถียรของการทำงาน

## ผลการทดลอง



อัตราเร่ง 2 kHz/s



อัตราเร่ง 5 kHz/s

### 1. Full Step (น้ำเงิน)

โหมด Full Step ให้แรงบิดต่อหนึ่งสเต็ปสูงที่สุด ทำให้มอเตอร์สามารถเพิ่มความเร็วได้อย่างรวดเร็วในช่วงความถี่ต่ำ อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความถี่ของสัญญาณเพิ่มขึ้น มอเตอร์จะสูญเสียเสถียรภาพค่อนข้างเร็วและเกิดปรากฏการณ์ Loss Step ได้ง่าย โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้อัตราการเร่งสูง (5 kHz/s) สาเหตุหลักมาจากแรงกระชากเชิงกลต่อหนึ่งสเต็ปมีค่าสูง ทำให้มอเตอร์ไม่สามารถติดตามสนามแม่เหล็กได้ทัน ส่งผลให้ตำแหน่งเกิดความคลาดเคลื่อน

### 2. Half Step (ฟ้า)

Half Step เป็นโหมดที่เพิ่มความละเอียดของตำแหน่งจาก Full Step โดยสลับระหว่างการขับแบบหนึ่งเฟสและสองเฟส ทำให้การเคลื่อนที่ราบรื่นขึ้นเล็กน้อย จากผลการทดลองพบว่ามอเตอร์มีเสถียรภาพดีกว่า Full Step เล็กน้อย แต่ยังคงเกิด Loss Step เมื่อความถี่เพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้อัตราเร่งสูง แสดงให้เห็นว่าแม้ Half Step จะลดแรงกระชากลงได้บางส่วน แต่ยังไม่สามารถรองรับความถี่สูงได้ดีเท่า Microstepping

### 3. 1/8 Step (เขียว)

โหมด 1/8 Step ให้การเคลื่อนที่ที่เรียบขึ้นอย่างชัดเจน ความเร็วของมอเตอร์เพิ่มขึ้นตามความถี่ของสัญญาณอินพุตในลักษณะเกือบเชิงเส้น และสามารถรองรับความถี่ได้สูงกว่า Full Step และ Half Step อย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตาม เมื่อความถี่หรืออัตราการเร่งสูงเกินค่าที่ระบบรองรับได้ ก็ยังคงเกิด Loss Step และความเร็วของมอเตอร์จะตกลงอย่างฉับพลัน แสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดด้านแรงบิดและแรงเฉื่อยของระบบ

### 4. 1/16 Step (ม่วง)

โหมด 1/16 Step ให้ความเรียบของการเคลื่อนที่และเสถียรภาพสูงมาก จากกราฟพบว่าความเร็วเพิ่มขึ้นตามความถี่อย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ สามารถรองรับช่วงความถี่ได้กว้าง และเกิด Loss Step ที่ช่วงความถี่สูงกว่าโหมดก่อนหน้านี้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้อัตราการเร่งสูงมาก มอเตอร์ยังคงมีโอกาสเกิด Loss Step ได้ ซึ่งสะท้อนถึงข้อจำกัดทางเชิงกลของมอเตอร์และภาระโหลด

### 5. 1/32 Step (แดง)

โหมด 1/32 Step ให้การเคลื่อนที่ที่เรียบที่สุดและมีความเสถียรสูงสุดในบรรดาทุกโหมด จากผลการทดลองพบว่าสามารถรองรับความถี่ของสัญญาณควบคุมได้สูงที่สุดก่อนจะเกิด Loss Step อย่างไรก็ตาม ความเร็วของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นช้าที่สุดเมื่อเทียบกับโหมดอื่น เนื่องจากต้องใช้จำนวนพัลส์ต่อหนึ่งรอบมากที่สุด แม้จะเหมาะกับงานที่ต้องการความละเอียดและความนุ่มนวลสูง แต่ไม่เหมาะกับงานที่ต้องการความเร็วรอบสูงมาก

## สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่า ความเร็วของ Stepper Motor แปรผันตรงกับความถี่ของสัญญาณควบคุม ในทุกโหมดการขับ โดยโหมด Microstepping (1/8, 1/16 และ 1/32 Step) ให้การเคลื่อนที่ที่เรียบและมีเสถียรภาพสูงกว่าโหมด Full Step และ Half Step อย่างชัดเจน ในขณะที่เมื่อใช้อัตราการเร่งสูงเกินไป มอเตอร์จะเกิด ปรากฏการณ์ Loss Step ส่งผลให้ไม่สามารถรักษาความเร็วและตำแหน่งตามที่กำหนดได้ โดยสรุป โหมด Microstepping เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความละเอียดและความนุ่มนวลสูง ส่วน Full Step และ Half Step เหมาะกับงานที่ต้องการแรงบิดสูงในช่วงความเร็วต่ำ

## อภิปรายผล

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า Loss Step เกิดจากข้อจำกัดเชิงกลของระบบ ได้แก่ แรงเฉื่อยของโรเตอร์และภาระโหลด ซึ่งทำให้มอเตอร์ไม่สามารถเปลี่ยนความเร็วตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วได้ โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้อัตราการเร่งสูง โหมด Full Step และ Half Step มีแนวโน้มเกิด Loss Step ได้ง่าย เนื่องจากแรงกระชากต่อหนึ่งสเต็ปมีค่าสูง ขณะที่โหมด Microstepping สามารถลดแรงกระชากดังกล่าว ทำให้มอเตอร์รักษาเสถียรภาพได้ดีกว่า ความคลาดเคลื่อนของผลการทดลองอาจเกิดจากความผิดพลาดของสัญญาณควบคุม และข้อจำกัดของไดรเวอร์มอเตอร์ ซึ่งล้วนเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของ Stepper Motor ในการทำงานจริง

## ข้อเสนอแนะ

- ในการใช้งาน Stepper Motor ควรเลือก โหมด Microstepping (เช่น 1/8, 1/16 หรือ 1/32 Step) สำหรับงานที่ต้องการความเรียบและความแม่นยำของตำแหน่งสูง เพื่อลดแรงสั่นสะเทือนและลดโอกาสการเกิด Loss Step
- ควรกำหนด อัตราการเร่งและการชะลอความเร็ว (Acceleration/Deceleration Profile) ให้เหมาะสมกับสมรรถนะของมอเตอร์และโหลด เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิด Loss Step จากแรงเฉื่อยของระบบ
- ในกรณีที่ต้องการใช้งานที่ความเร็วสูง ควรเลือก ไดรเวอร์ที่สามารถจ่ายกระแสได้เพียงพอ และมีการควบคุมกระแสแบบ Microstepping ที่มีคุณภาพ เพื่อเพิ่มแรงบิดและเสถียรภาพของมอเตอร์
- ควรลด ความผิดและแรงต้านเชิงกลของระบบ เช่น การตั้งศูนย์เพลา การหล่อลื่นแบริ่ง และการลดภาระโหลดที่ไม่จำเป็น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่ง
- สำหรับการศึกษาต่อในอนาคต ควรมีการเพิ่ม ระบบป้อนกลับ (Feedback) เช่น Encoder เพื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งจริงกับตำแหน่งที่สั่งงาน และศึกษาพฤติกรรมของ Stepper Motor ในระบบควบคุมแบบวงรอบปิด (Closed-loop Control)

## อ้างอิง

<https://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00907a.pdf>

<https://www.ti.com/lit/an/slva321a/slva321a.pdf?ts=1765090168570>

<https://www.orientalmotor.com/stepper-motors/>

