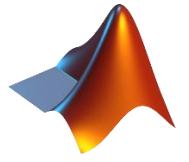


RMXplorer



LAB2 : Motor Report

Name

- นางสาวนันท์มนัส วราวนสิน รหัสนักศึกษา 66340500026
- นายبولตัน ออาทิตย์ เดวิส รหัสนักศึกษา 66340500029
- นายพีรวิชญ์ บุตรชีวัน รหัสนักศึกษา 66340500034

Objectives

- สามารถออกแบบการทดลองโดยใช้ทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ ในการสืบเสาะพฤติกรรม ปรากฏการณ์ ทดลอง บันทึกผลการทดลอง สรุปผล และอภิปรายผลการทดลอง เข้าใจหลักการทำงานของ เชิงเซอร์ และอุปกรณ์ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องได้ ตลอดจนใช้หลักการทำงานทางวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์ สถิติ และ ศาสตร์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ประยุกต์ใช้ร่วมกับโปรแกรม MATLAB เพื่อเก็บผลการทดลอง วิเคราะห์ผลการ ทดลอง วิเคราะห์ความเที่ยงตรง ความแม่นยำ ได้อย่างถูกต้อง และมีเหตุผลรองรับ ตรวจสอบความถูกต้อง เทียบกับทฤษฎีที่นำเข้ามา
- สามารถอธิบายความสามารถในการรับรู้ปริมาณทางฟิสิกส์ของเชิงเซอร์ทั้งหมดดังแต่ต้นจนจบกระบวนการได้ เช่น การอธิบายการวัดกระแสไฟฟ้าของ Current Sensor (จากแรงดันไฟฟ้าแปลงเป็นกระแสไฟฟ้าได้อย่างไร)
- สามารถอธิบายความสามารถในการรับรู้ปริมาณทางฟิสิกส์ของเชิงเซอร์ทั้งหมดดังแต่ต้นจนจบกระบวนการได้ เช่น การอธิบายการวัดความเร็วของ Brushless DC Motor จาก Hall Sensor (จากคลื่นสัญญาณไฟฟ้าแปลง เป็นความเร็วได้อย่างไร)
- สามารถกำหนด ตัวแปรในการทดลองได้อย่างถูกต้องและสมเหตุสมผล ไม่ว่าจะเป็น ตัวแปรต้น ตัวแปรตาม ตัวแปรควบคุม อธิบายจุดประสงค์การทดลอง อธิบายสมมติฐานให้สอดคล้องกับตัวแปรที่กำหนด นิยามเชิง ปฏิบัติการ และมีทฤษฎีที่นำเข้ามาอธิบายรองรับ เช่น ทฤษฎีทางฟิสิกส์ หรือข้อมูลจาก Datasheet
- สามารถออกแบบวิธีการทดลองเพื่อหาคำตอบ ให้สอดคล้องกับผลการเรียนรู้อย่างทั้งหมดได้ด้วยตนเองอย่าง ถูกต้องตามหลักวิทยาศาสตร์ รวมทั้ง บันทึกผล สรุปผล อภิปรายผล ตามข้อมูลที่บันทึกได้จริง มีกระบวนการ ทำซ้ำ อธิบายที่มาของผลการทดลองนั้นได้ โดยใช้อุปกรณ์ เครื่องมือ ไฟล์ Simulink, mlx ฯลฯ และชุดการ ทดลองพร้อมบอร์ด Microcontroller ที่ TA จัดเตรียมให้เบื้องต้น
- สามารถเขียนรายงาน สัญลักษณ์ และสมการทางวิทยาศาสตร์ ได้อย่างถูกต้อง ทั้งขนาด และรูปแบบอักษร การเว้นช่องไฟ การเว้นขอบกระดาษ การเว้นระยะพิมพ์ ให้ได้ระยะที่เหมาะสมตามหลักสากล

การทดลองที่ 1 DC Motor with WCS1700 Hall Current Sensor

1. จุดประสงค์

1.1 สามารถอธิบายหลักการทำงานของ DC Motor และความสามารถของ Motor-Torque Constant และ Back-EMF Constant ของ DC motor ได้

1.2 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของ Speed, Torque, Current, Power, %Efficiency ได้ เมื่อ Load Torque ที่กระทำต่อ DC Motor ผ่านการปรับ Load Torque ด้วย DC Motor เปลี่ยนแปลงไป และแรงดันไฟฟ้า Input จากการปรับ Duty Cycle, Frequency ของ PWM ที่จ่ายเข้า DC Motor เปลี่ยนแปลงไป

1.3 สามารถอธิบายหลักการทำงาน H-Bridge Drive Mode ทั้ง 3 Mode ได้ (Sign-Magnitude, Locked Anti-Phase, Async Sign-Magnitude) และควบคุม DC Motor ได้ทั้ง 2 Mode (Sign-Magnitude, Locked Anti-Phase)

1.4 สามารถอธิบายกระบวนการ Signal Conditioning, Signal Processing ทั้งหมดได้ตั้งแต่ต้นจนจบกระบวนการ ว่าค่าที่อ่านได้จาก Incremental Encoder, Hall Current Sensor มีที่มาอย่างไร อธิบายให้เห็นถึงวิธีคิด และขั้นตอนทั้งหมด ทั้งก่อนและหลัง Calibrate Sensor หรือ วิธีจัดการข้อมูลที่ได้มา จัดการอย่างไร รวมถึงความสามารถ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้จริง กับแรงดันไฟฟ้าที่ออกมายจาก Hall Current Sensor และอธิบายกระบวนการการ Unwrap ค่า

1.5 สามารถเขียนโปรแกรม โดยประยุกต์ใช้ MATLAB และ Simulink ในการสั่งการหรือรับค่า ร่วมกับบอร์ด Nucleo STM32G474RE โดยใช้สัญญาณจาก Incremental Encoder, Hall Current Sensor เป็น Input และแสดงสัญญาณ Output จากการ Log สัญญาณ และแสดงผลเป็นกราฟจาก Data Inspector ใน MATLAB Simulink และให้เห็นว่าสัญญาณ Output ประพันตามสัญญาณ Input แบบ Real Time โดยมี Output เป็นความเร็วเชิงมุม และกระแสไฟฟ้า ในหน่วย SI derived

2. สมมติฐานการทดลอง

หากแรงบิดที่มอเตอร์ทำกับมอเตอร์เปลี่ยนแปลงไป ค่าความเร็ว, กระแสไฟฟ้า, กำลังและประสิทธิภาพของ มอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงไปเช่นกันตาม Motor Characteristics

3. กำหนดตัวแปร

3.1 ตัวแปรต้น

แรงบิดที่มอเตอร์ทำกับมอเตอร์

3.2 ตัวแปรตาม

ความเร็ว, กระแสไฟฟ้า, กำลังและประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไป

3.3 ตัวแปรควบคุม

แรงดันไฟฟ้า, บอร์ด MotorXplorer, บอร์ด Nucleo STM32G474RE, สายจัมเปอร์

4. นิยามศัพท์เฉพาะ

4.1 เก็บค่าความเร็วเชิงมุม ณ ช่วงความถี่ที่สนใจ หมายถึง การบันทึกค่าความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ในช่วงความถี่ที่กำหนด เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หรือประเมินผลการทำงาน

4.2 ป้อนค่าความถี่ หมายถึง การกำหนดและส่งค่าอัตราการเกิดซ้ำของสัญญาณ (ความถี่) เข้าไปในระบบหรืออุปกรณ์ เพื่อควบคุมการทำงาน

4.3 วัดค่า stall torque หมายถึง การตรวจสอบและบันทึกค่าแรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์สามารถสร้างได้ในสภาพที่มอเตอร์ไม่หมุน

5. นิยามเชิงปฏิบัติการ

5.1 Nucleo STM32G474RE หมายถึง บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น Nucleo STM32G474RE ที่ใช้พัฒนาการควบคุมและอ่านค่าจากเซนเซอร์หรืออุปกรณ์ที่เชื่อมต่อได้ มาพร้อมพอร์ตเชื่อมต่อ USB และรองรับการเขียนโปรแกรมผ่านซอฟต์แวร์ต่าง ๆ

5.2 Simulink หมายถึง โปรแกรมที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองระบบด้วยแผนภาพแบบบล็อก ช่วยจำลองระบบการทำงานและสามารถเชื่อมต่อเพื่อ อ่านค่าจากอุปกรณ์hardwareได้โดยไม่ต้องเขียนโค้ด

5.3 Eddy Current Loss หมายถึง การสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นจากการไหลของกระแสไฟฟ้า (Eddy Current) ภายในวัสดุนำไฟฟ้า เช่น แกนเหล็กของมอเตอร์หรือหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก กระแสเหล่านี้จะสร้างความร้อน ส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อน และทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ลดลง

5.4 Hysteresis Loss หมายถึง การสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นในวัสดุแม่เหล็กเมื่อวัสดุนั้นถูกทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางของสนามแม่เหล็กซ้ำๆไปซ้ำมา ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียด้วยในโครงสร้างของวัสดุแม่เหล็ก ส่งผลให้พลังงานบางส่วนสูญเสียไปในรูปของความร้อน

5.5 Brushed DC Motor หมายถึง มอเตอร์กระแสตรงที่ใช้แปรงถ่าน (Brush) และคอมมิวเตอเร่ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่วงจรคลอดโรคเตอร์ โดยแปรงถ่านจะสัมผัสกับคอมมิวเตอเร่เพื่อเปลี่ยนทิศทางกระแสไฟฟ้าในชด漉ด ทำให้เกิดแรงบิดที่ทำให้มอเตอร์หมุน ในการทดลองนี้หมายถึง Nidec Components Geared DC Geared Motor, 12 V dc, 20 Ncm, 70 rpm, 6mm Shaft Diameter

5.6 Brush หมายถึง ส่วนประกอบของมอเตอร์ที่ทำหน้าที่ส่งกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไปยังชด漉ดของโรคเตอร์ผ่านการสัมผัสกับคอมมิวเตอเร่ โดยมักทำจากวัสดุที่มีความต้านทานต่ำ เช่น คาร์บอน เพื่อให้การนำไฟฟ้ามีประสิทธิภาพและลดการสึกหรอขณะทำงาน

5.7 Commutator หมายถึง ส่วนประกอบในมอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนทิศทางกระแสไฟฟ้าในชด漉ดของโรคเตอร์ให้สอดคล้องกับการหมุนของมอเตอร์ โดยทำงานร่วมกับแปรงถ่าน (Brush) เพื่อให้แรงบิดที่เกิดขึ้นมีทิศทางคงที่และทำให้มอเตอร์หมุนต่อเนื่องได้อย่างราบรื่น

5.8 Rotor หมายถึง ส่วนที่หมุนได้ของมอเตอร์หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยประกอบด้วยชุดลวดหรือแม่เหล็ก ทำการ ทำหน้าที่สร้างการเคลื่อนที่เมื่อได้รับพลังงานจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสเตเตอร์ ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการ แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลในมอเตอร์

5.9 Stator หมายถึง ส่วนที่อยู่กับที่ของมอเตอร์หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กคงที่หรือ สนามแม่เหล็กหมุนเพื่อกระตุนการทำงานของโรเตอร์ โดยสเตเตอร์มักประกอบด้วยชุดลวดหรือแม่เหล็กทราบที่ทำให้ เกิดสนามแม่เหล็กเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

5.10 Iron Core หมายถึง แกนเหล็กที่ใช้เป็นโครงสร้างภายในของชุดลวดในมอเตอร์หรือหม้อแปลงไฟฟ้า ทำ หน้าที่เพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กโดยการนำพาฟลักซ์แม่เหล็ก ช่วยให้ประสิทธิภาพในการทำงานของอุปกรณ์ ไฟฟ้าสูงขึ้น โดยทั่วไปมากทำจากวัสดุที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กสูง

5.11 Coil หมายถึง ชุดลวดที่พันเป็นวงรอบแกนหรือวัตถุ ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กเมื่อต่อ กับกระแสไฟฟ้า หรือเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก โดยชุดลวดมักใช้ในมอเตอร์ หม้อแปลงไฟฟ้า และ อุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ในการแปลงพลังงานไฟฟ้าและพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า

5.12 Low Inertia หมายถึง คุณสมบัติของวัสดุที่มีความเร็วตัวต่ำ ทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงความเร็วหรือทิศ ทางการเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็วเมื่อมีแรงกระทำ ซึ่งในระบบมอเตอร์หรือเครื่องจักร คุณสมบัตินี้ช่วยให้มอเตอร์ ตอบสนองต่อการควบคุมได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

5.13 Coreless DC Motor หมายถึง มอเตอร์กระแสตรงที่ไม่มีแกนเหล็ก (Iron Core) ในส่วนโรเตอร์ โดย ชุดลวดของโรเตอร์จะถูกพันในลักษณะทรงกระบอกและติดตั้งอยู่บนโครงสร้างเบาแทนแกนเหล็ก ส่งผลให้มอเตอร์มี น้ำหนักเบา ความเร็วตัวต่ำ ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วได้รวดเร็ว และลดการสูญเสียพลังงานจาก Hysteresis Loss และ Eddy Current Loss เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการความแม่นยำและการควบคุมที่ละเอียด

5.14 Flakage หมายถึง ปริมาณของเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่หนึ่งในสนามแม่เหล็ก โดยฟลักซ์ แม่เหล็กมีหน่วยเป็นเวเบอร์ (Weber) และสามารถคำนวณได้จากผลคูณของความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density) กับพื้นที่ที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบอุปกรณ์แม่เหล็กไฟฟ้า เช่น มอเตอร์และหม้อแปลงไฟฟ้า

5.15 Magnetic Flux Density หมายถึง ปริมาณของฟลักซ์แม่เหล็กที่กระจายตัวอยู่ในพื้นที่หนึ่ง โดยมีหน่วย เป็นเทสลา (Tesla) หรือเวเบอร์ต่ำเมตรกำลังสอง (Wb/m^2) ใช้เพื่อบอกความเข้มของสนามแม่เหล็กในจุดนั้น และเป็น ปัจจัยสำคัญในการวิเคราะห์การทำงานของอุปกรณ์แม่เหล็กไฟฟ้า

5.16 Torque หมายถึง แรงบิดที่เกิดจากการกระทำของแรงบันวัตถุรอบจุดหมุน หรือแกนหมุน โดยคำนวณ จากผลคูณของแรงที่กระทำและระยะห่างตั้งฉากจากแกนหมุน มีหน่วยเป็นนิวตันเมตร (Nm) ใช้ในการวัดความสามารถ ในการหมุนของมอเตอร์หรือเครื่องจักรในงานต่าง ๆ

5.17 RPM หมายถึง จำนวนรอบการหมุนของวัตถุรอบแกนหมุนในหนึ่งนาที ใช้เป็นหน่วยวัดความเร็วเชิงมุมใน ระบบหมุนหรือเครื่องจักรกล เช่น มอเตอร์

5.18 Power Flow หมายถึง การถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าภายในระบบหรือระหว่างอุปกรณ์ โดยแสดงถึงทิศทางและปริมาณของพลังงานที่ถูกส่งผ่านในช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการวิเคราะห์และออกแบบระบบไฟฟ้าและพลังงาน

5.19 Copper Losses หมายถึง การสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนที่เกิดจากความต้านทานของลวดทองแดงในชุดลวดของมอเตอร์หรือหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

5.20 Armature Resistance หมายถึง ความต้านทานไฟฟ้าภายในชุดลวดอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากคุณสมบัติทางวัสดุและความยาวของลวดทองแดงในชุดลวด ส่งผลต่อการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

5.21 Core Losses หมายถึง การสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กของมอเตอร์หรือหม้อแปลงไฟฟ้า โดยมีสาเหตุมาจาก Hysteresis Loss และ Eddy Current Loss ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กในแกนเหล็กขณะทำงาน

5.22 Mechanical Losses หมายถึง การสูญเสียพลังงานในระบบมอเตอร์หรือเครื่องจักรที่เกิดจากแรงเสียดทานในส่วนประกอบต่าง ๆ เช่น แบร์จ หรือแรงต้านของอากาศเมื่อขึ้นส่วนเคลื่อนที่ ส่งผลให้พลังงานบางส่วนสูญเสียไปในรูปของความร้อนหรือการสั่นสะเทือน

5.23 Bearing Friction หมายถึง แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของส่วนประกอบในแบร์จขณะรองรับและเคลื่อนที่ ซึ่งเกิดจากการหมุนหรือเลื่อนของชิ้นส่วนที่อยู่ภายใต้แบร์จ ส่งผลต่อการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนและลดประสิทธิภาพของระบบหมุน

5.24 Commutator Friction หมายถึง แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างแปรงถ่าน (Brush) และคอมมิวเตเตอร์ในมอเตอร์กระแสตรงขณะทำงาน ซึ่งแรงเสียดทานนี้ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนและการสึกหรอของส่วนประกอบทั้งสอง

5.25 Stray Losses หมายถึง การสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นในมอเตอร์หรือหม้อแปลงไฟฟ้าที่ไม่ได้อยู่ในกลุ่มของ Copper Losses, Core Losses หรือ Mechanical Losses โดยมักเกิดจากผลกระทบของสนามแม่เหล็กที่กระจายตัวไม่สม่ำเสมอและการเหนี่ยวแน่นกระแสในส่วนประกอบต่าง ๆ ของอุปกรณ์

5.26 Efficiency หมายถึง สัดส่วนของพลังงานที่ได้ใช้งานจริงเมื่อเทียบกับพลังงานทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่ระบบโดยแสดงถึงความสามารถของระบบหรืออุปกรณ์ในการแปลงพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยพลังงานที่สูญเสียไปมักอยู่ในรูปของความร้อน แรงเสียดทาน หรือการรั่วไหลของพลังงาน

5.27 Lorentz Force หมายถึง แรงที่กระทำต่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเมื่อยื่นตัวกับอนุภาคนั้นเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า แรงนี้เกิดจากการปฏิสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าและสนาม ทำให้อิเล็กตรอนหรือไอออนเบี่ยงเบนทิศทางขณะเคลื่อนที่ในระบบไฟฟ้าแม่เหล็ก

5.28 สนามแม่เหล็ก หมายถึง บริเวณรอบแม่เหล็กหรือกระแสไฟฟ้าที่มีกำลังทำให้เกิดแรงกระทำต่อวัสดุแม่เหล็กหรืออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าในบริเวณนั้น สนามแม่เหล็กถูกแสดงด้วยเส้นแรงแม่เหล็กที่แสดงทิศทางและความเข้มของสนามในแต่ละจุด

5.29 Motor-Torque Constant หมายถึง ค่าคงที่ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่มอเตอร์กับแรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้น โดยบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของมอเตอร์ในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลในรูปของแรงบิด

5.30 Faraday's Law of Electromagnetic Induction หมายถึง กฎที่อธิบายการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ผ่านวัสดุ โดยมีผลลัพธ์ที่เรียกว่า EMF (Electromotive Force) ในวงจร เมื่อพลักดันไฟฟ้าเดินทางผ่านวัสดุแล้วจะมีแรงแม่เหล็กที่ต่อต้านการเดินทาง ทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าลดลง จนกว่าแรงแม่เหล็กจะเท่ากับแรงแม่เหล็กที่ต่อต้าน การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กในช่วงเวลาหนึ่ง

5.31 Electromotive Force หมายถึง พลังงานที่แหล่งกำเนิดไฟฟ้าผลิตขึ้นเพื่อขับเคลื่อนประจุไฟฟ้าในวงจร หรือแรงที่ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า มีหน่วยวัดเป็นโวลต์ (Volt) และไม่ได้เป็นแรงทางกายภาพจริง แต่เป็นผลมาจากการพลังงานไฟฟ้าของแหล่งกำเนิด เช่น แบตเตอรี่หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

5.32 Kirchhoff's Voltage Law หมายถึง กฎที่ระบุว่าผลรวมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าทั้งหมดในวงจรปิดเท่ากับศูนย์ ซึ่งสะท้อนถึงหลักการอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้าในวงจร โดยแรงดันไฟฟ้าทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นและลดลงจะสมดุลกันในแต่ละรอบของวงจร

5.33 Newton-Euler's Law หมายถึง กฎที่ใช้วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุแข็ง (Rigid Body) โดยรวมหลักการของกฎการเคลื่อนที่ของนิวตันสำหรับแรงเชิงเส้น และสมการโมเมนต์สำหรับการหมุน ซึ่งใช้เพื่อคำนวณแรงและแรงบิดที่กระทำต่อวัตถุในระบบไดนามิกส์

5.34 Rigid Body หมายถึง วัตถุที่มีรูปทรงคงที่และไม่เปลี่ยนแปลงระหว่างการเคลื่อนที่หรือการหมุน แม้จะมีแรงกระทำต่อวัตถุนั้น โดยสมมุติฐานนี้ใช้ในวิชาการศาสตร์เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์การเคลื่อนที่และแรงในระบบ

5.35 Euler's Equations of Motion หมายถึง ชุดสมการที่อธิบายการหมุนของวัตถุแข็งรอบจุดหมุนหรือแกนโดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ของแรงบิด โมเมนต์ความเฉื่อย และอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร็วเชิงมุม ใช้ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่เชิงมุมในระบบไดนามิกส์ของวัตถุแข็ง

5.36 โมเมนต์ความเฉื่อย หมายถึง ค่าที่แสดงความต้านทานของวัตถุแข็งต่อการเปลี่ยนแปลงการหมุนรอบแกนใดแกนหนึ่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับมวลของวัตถุและการกระจายตัวของมวลนั้นจากแกนหมุน โดยโมเมนต์ความเฉื่อยมีผลต่อการหมุนและแรงบิดที่จำเป็นในการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมของวัตถุ

5.37 การหน่วงภายใน หมายถึง ความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ภายในวัตถุเอง โดยเกิดจากแรงเสียดทานระหว่างชั้นของวัสดุที่เคลื่อนที่สัมพัทธ์กัน ส่งผลให้พลังงานสูญเสียในรูปของความร้อนหรือการสั่นสะเทือนลดลง

5.38 Motor Characteristics หมายถึง คุณสมบัติและพฤติกรรมการทำงานของมอเตอร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความเร็ว แรงบิด กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบการใช้งานมอเตอร์ให้เหมาะสมกับระบบที่ต้องการ

5.39 Time Domain หมายถึง การแสดงข้อมูลหรือสัญญาณในรูปของการเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยค่าของสัญญาณจะถูกพิสูจน์โดยเทียบกับแกนเวลา ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบและการตอบสนองของสัญญาณในช่วงเวลาหนึ่ง

5.40 Speed Curve หมายถึง กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของมอเตอร์หรือวัตถุที่หมุนกับพารามิเตอร์อื่น ๆ เช่น เวลา แรงบิด หรือโหลด ใช้เพื่อวิเคราะห์การตอบสนองและประสิทธิภาพของระบบในสถานการณ์ต่าง ๆ

5.41 Steady State Condition หมายถึง สภาวะที่ระบบหรือกระบวนการดำเนินไปอย่างคงที่ โดยตัวแปรต่าง ๆ เช่น ความเร็ว กระแส หรือแรงดัน ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งแสดงถึงการเข้าสู่สมดุลหลังจากช่วงเวลาการเปลี่ยนผ่านหรือการเริ่มต้นทำงานของระบบ

5.42 No-Load Condition หมายถึง สภาวะการทำงานของมอเตอร์หรือเครื่องจักรเมื่อไม่มีโหลดหรือแรงต้านทานภายนอกกระทำต่อระบบ โดยระบบจะทำงานด้วยความเร็วสูงสุดและใช้พลังงานเพียงเพื่ออาจนนากลการสูญเสียภายใน เช่น การสูญเสียทางกลหรือไฟฟ้า

5.43 Stall Torque Condition หมายถึง สภาวะที่มอเตอร์หยุดหมุนแม้จะมีแรงบิดสูงสุด เนื่องจากแรงต้านทานหรือโหลดภายนอกมีค่ามากเกินกว่าที่มอเตอร์จะอาจนนนได้ โดยในสภาวะนี้กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้จะอยู่ในระดับสูงสุด

5.44 Phasor Diagram หมายถึง การนำเสนอข้อมูลในรูปแบบกราฟิกโดยการวางจุด จีดเส้น หรือการใช้สัญลักษณ์ต่าง ๆ บนระนาบสองมิติหรือสามมิติเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร เช่น ข้อมูลแกน X และแกน Y ช่วยให้เข้าใจแนวโน้มหรือรูปแบบของข้อมูลได้เจ้ายืน

5.45 Current Curve หมายถึง กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับตัวแปรอื่น ๆ เช่น เวลา แรงดันไฟฟ้า หรือโหลด เพื่อใช้วิเคราะห์การทำงานของระบบไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้า

5.46 Motor's Power Curve หมายถึง กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์กับตัวแปรอื่น เช่น ความเร็วหรือแรงบิด ใช้วิเคราะห์ประสิทธิภาพและพฤติกรรมการทำงานของมอเตอร์ในช่วงการทำงานต่าง ๆ

5.47 Power Formula หมายถึง สมการที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ถูกส่งหรือใช้งานในระบบกับตัวแปรอื่น ๆ เช่น กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และความต้านทาน โดยสูตรพื้นฐานคือ พลังงานไฟฟ้า (Power) สามารถคำนวณจากการคุณของแรงดันไฟฟ้า (Voltage) และกระแสไฟฟ้า (Current) โดยไม่ต้องแสดงสูตรคำนวณ

5.48 Motor Specifications หมายถึง รายละเอียดหรือค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดคุณสมบัติและขอบเขตการทำงานของมอเตอร์ เช่น แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ความเร็วรอบ แรงบิด กำลังไฟฟ้า และประสิทธิภาพ ซึ่งช่วยในการเลือกใช้งานมอเตอร์ให้เหมาะสมกับระบบหรือเครื่องจักรที่ต้องการ

5.49 Operating Voltage หมายถึง ช่วงแรงดันไฟฟ้าที่อุปกรณ์หรือมอเตอร์สามารถทำงานได้อย่างปลอดภัย และมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยอยู่ในขอบเขตที่กำหนดในสเปคของอุปกรณ์นั้น

5.50 Rated Voltage หมายถึง ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ถูกกำหนดไว้สำหรับการทำงานปกติของอุปกรณ์หรือมอเตอร์ ซึ่งได้รับการออกแบบมาเพื่อให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัยที่สุดภายใต้เงื่อนไขการใช้งานมาตรฐาน

5.51 No-Load Current หมายถึง กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าดึงจากแหล่งจ่ายไฟเมื่อทำงานในสภาวะไม่มีโหลด โดยกระแสนี้ส่วนใหญ่ใช้ในการอาจนนากลการสูญเสียภายใน เช่น แรงเสียดทานทางกลและการสูญเสียในวงจรแม่เหล็ก

5.52 No-Load Speed หมายถึง ความเร็วรอบของมอเตอร์ในสภาพที่ไม่มีโหลดภายนอกกระทำ ซึ่งเป็นความเร็วสูงสุดที่มอเตอร์สามารถทำได้เมื่อแรงบิดมีค่าเป็นศูนย์

5.53 Stall Current หมายถึง กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่มอเตอร์ดึงจากแหล่งจ่ายไฟเมื่อมอเตอร์อยู่ในสภาพ Stall Torque Condition หรือหยุดหมุนโดยมีแรงบิดสูงสุด ซึ่งกระแสนี้อาจทำให้อุปกรณ์เสียหายได้หากไม่มีการป้องกันที่เหมาะสม

5.54 Stall Torque หมายถึง แรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์สามารถสร้างได้เมื่อเพลาหมุนหยุดนิ่ง เนื่องจากแรงต้านทานจากโหลดภายนอกมีค่าสูงกว่าที่มอเตอร์จะเข้าหนะแรงนั้นได้

5.55 Rated Speed หมายถึง ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่กำหนดไว้ในスペคสำหรับการทำงานปกติ เมื่อมอเตอร์ทำงานภายใต้โหลดที่กำหนด โดยเป็นค่าที่มอเตอร์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย

5.56 Rated Torque หมายถึง ค่าแรงบิดที่มอเตอร์สามารถสร้างได้อย่างต่อเนื่องในระหว่างการทำงานปกติ ภายใต้โหลดที่กำหนด โดยไม่ทำให้มอเตอร์ร้อนเกินไปหรือเกิดความเสียหาย

5.57 Rated Power หมายถึง กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่มอเตอร์สามารถจ่ายหรือใช้งานได้อย่างต่อเนื่องภายใต้เงื่อนไขการทำงานปกติที่กำหนดไว้ในスペค โดยไม่ทำให้มอเตอร์เกิดความเสียหายหรือสูญเสียประสิทธิภาพ

5.58 H-Bridge Drive หมายถึง วงจรขับมอเตอร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์หรือสวิตช์ไฟฟ้าสี่ตัวจัดเรียงในรูปแบบคล้ายตัวยักษ์ H เพื่อควบคุมทิศทางและความเร็วของมอเตอร์ โดยสามารถเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอเตอร์ได้ทั้งสองทิศทาง ทำให้มอเตอร์หมุนไปข้างหน้าและถอยหลังได้

5.59 Shoot-Through หมายถึง สถานะผิดปกติในวงจร H-Bridge หรือวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ทรานซิสเตอร์หรือสวิตช์ที่อยู่ในแขนเดียวกัน (upper และ lower switch) เปิดพร้อมกัน ส่งผลให้เกิดการลัดวงจรระหว่างแหล่งจ่ายไฟ โดยตรง ซึ่งอาจทำให้วงจรเสียหายหรือเกิดความร้อนสูงในระบบ

5.60 Pulse Width Modulation หมายถึง เทคนิคการควบคุมสัญญาณไฟฟ้าโดยการปรับความกว้างของพัลส์ในสัญญาณที่มีความถี่คงที่ เพื่อควบคุมพลังงานที่ส่งไปยังโหลด เช่น มอเตอร์ หรือหลอดไฟ ใช้สำหรับควบคุมความเร็ว ความสว่าง หรือพลังงานที่จ่ายให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้า

5.61 Frequency หมายถึง จำนวนรอบของการเกิดซ้ำของสัญญาณหรือคลื่นในหนึ่งวินาที มีหน่วยวัดเป็น เฮิรตซ์ (Hz) โดยใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณไฟฟ้า การสั่นสะเทือน หรือปรากฏการณ์ที่เกิดซ้ำในระบบต่าง ๆ

5.62 Motor Driver หมายถึง อุปกรณ์หรือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ เช่น การเปิด-ปิด การควบคุมทิศทาง ความเร็ว และแรงบิด โดยกำหนดที่เป็นตัวกลางระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้าและมอเตอร์ เพื่อส่งพลังงานให้มอเตอร์ทำงานตามที่ต้องการ ในการทดลองนี้หมายถึง Cytron MD20A Motor Driver

5.63 Shaft Diameter หมายถึง เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนหมุนของมอเตอร์หรืออุปกรณ์หมุนอื่น ๆ ซึ่งเป็นขนาดที่ใช้ในการเลือกหรือออกแบบการเชื่อมต่อระหว่างมอเตอร์กับโหลดหรือส่วนประกอบอื่นในระบบ

5.64 Incremental Encoder หมายถึง อุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งหรือการหมุนที่ให้สัญญาณพัลส์เพื่อบอกการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งหรือการหมุนในแต่ละขั้น โดยไม่สามารถระบุตำแหน่งเริ่มต้นได้ ต้องอาศัยการนับพัลส์เพื่อคำนวณตำแหน่งหรือมุกการหมุนปัจจุบัน ในการทดลองนี้หมายถึง Incremental Encoder AMT103-V

5.67 Hall Effect หมายถึง ปรากฏการณ์ที่เกิดแรงดันไฟฟ้าตามแนวตั้งจากกับกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำที่อยู่ในสนามแม่เหล็ก ซึ่งแรงดันนี้สามารถใช้ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กหรือวัดกระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

5.65 Hall Current Sensor หมายถึง อุปกรณ์ที่ใช้หลักการของผลลัพธ์ (Hall Effect) ในการวัดกระแสไฟฟ้า โดยตรวจจับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำและแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อประมวลผล ใช้สำหรับการวัดกระแสแบบไม่มีสัมผัสในระบบไฟฟ้าต่าง ๆ ในการทดลองนี้หมายถึง WCS1700 Hall Current Sensor

5.66 Hall Effect หมายถึง ปรากฏการณ์ที่เกิดแรงดันไฟฟ้าตามแนวตั้งจากกับกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำที่อยู่ในสนามแม่เหล็ก ซึ่งแรงดันนี้สามารถใช้ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กหรือวัดกระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

5.67 MotorXplorer หมายถึง บอร์ดที่ประกอบไปด้วยฐานที่สามารถบรรจุบอร์ดควบคุม, Motor และ 3D-Print part ที่ใช้สำหรับการตรวจสอบ ทดสอบ และวิเคราะห์การทำงานของมอเตอร์ โดยรองรับการวัดค่าต่าง ๆ เช่น กระแส แรงดัน ความเร็วรอบ และแรงบิด

5.68 Strain Gauge หมายถึง อุปกรณ์ที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงของความเค้นหรือความเครียดในวัสดุ โดยการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าตามการยืดหรือหดตัวของวัสดุ

5.69 Load Cell หมายถึง อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแรงหรือโหลด โดยแปลงแรงที่กระทำเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่สามารถอ่านค่าได้

5.70 Wheatstone Bridge หมายถึง วงจรไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ใช้สำหรับวัดความต้านทาน โดยเฉพาะใน Load Cell และ Strain Gauge เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวัด

5.71 LoadCellXplorer หมายถึง บอร์ดที่ประกอบไปด้วยฐานที่สามารถบรรจุบอร์ดควบคุม, LoadCell และ 3D-Print part ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์และตรวจสอบค่าที่ได้จาก Load Cell ซึ่งช่วยให้การใช้งานและการทดสอบเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

5.72 Stall Torque หมายถึง แรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์สามารถสร้างได้เมื่อโรเตอร์ไม่สามารถหมุนได้

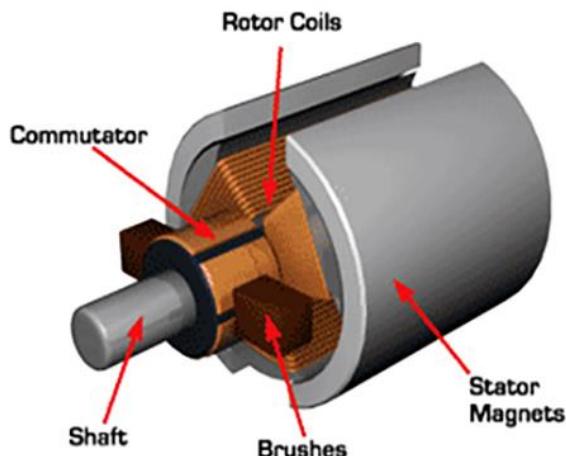
5.73 Magnetic Encoder หมายถึง อุปกรณ์ที่ใช้สนามแม่เหล็กในการตรวจจับตำแหน่งหรือการหมุนของวัตถุ โดยแปลงข้อมูลเหล่านี้เป็นสัญญาณไฟฟ้า

5.74 สายจัมเปอร์ หมายถึง สายไฟขนาดเล็กที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างขั้วหรือจุดต่าง ๆ บนบอร์ดทดลองวงจรไฟฟ้า

6. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

6.1 Brushed DC Motor

Brushed DC Motor เป็นมอเตอร์กระแสตรงชนิดหนึ่งที่อาศัยการทำงานของแปรงถ่าน (Brush) และคอมมิวเตเตอร์ (Commutator) ในการส่งกระแสไฟฟ้าไปยังชุดลวดที่อยู่บนโรเตอร์ (Rotor) เพื่อสร้างแรงบิดและทำให้โรเตอร์หมุนอย่างต่อเนื่อง หลักการพื้นฐานคือ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไป กระแสจะไหลผ่านแปรงถ่านไปยังคอมมิวเตเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่ส่งกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ชุดลวดที่พันรอบแกนเหล็กของโรเตอร์ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านชุดลวดนี้จะสร้างสนามแม่เหล็กตามกฎของแม่เหล็กไฟฟ้า สนามแม่เหล็กนี้จะมีปฏิกิริยา กับสนามแม่เหล็กของสเตเตเตอร์ (Stator) ซึ่งสามารถเป็นได้ทั้งแม่เหล็กถาวรหรือแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงผลักและแรงดึงดูดระหว่างขั้วสนามแม่เหล็กทั้งสอง ส่งผลให้โรเตอร์หมุน

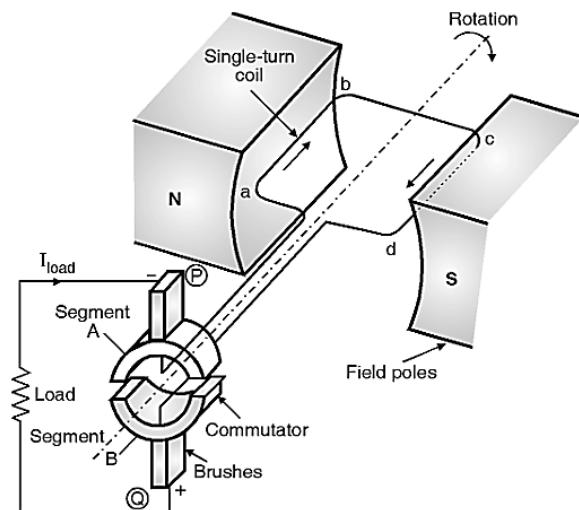


รูปที่ 1 Brushed DC Motor

ที่มา : <https://www.linearmotiontips.com/are-brushed-motors-suitable-for-industrial-applications/>

6.1.1 คอมมิวเตเตอร์ (Commutator)

ขณะที่โรเตอร์หมุน คอมมิวเตเตอร์ที่ติดอยู่กับโรเตอร์จะหมุนไปด้วย โดยหน้าที่ของคอมมิวเตเตอร์คือการสลับขั้วกระแสไฟฟ้าในชุดลวดของโรเตอร์ให้เปลี่ยนทิศทางอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีปฏิกิริยา กับสนามแม่เหล็กของสเตเตเตอร์อยู่ตลอดเวลา การเปลี่ยนทิศทางของ กระแสไฟฟ้าในชุดลวดนี้เป็นกระบวนการสำคัญที่ทำให้แรงบิดในโรเตอร์คงที่ และการหมุนเป็นไปอย่าง ราบรื่น กระบวนการทั้งหมดนี้ถูกควบคุมโดยแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ และความเร็วของการ หมุนสามารถปรับได้โดยการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า ขณะที่แรงบิดจะขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน ชุดลวด ยิ่งกระแสสูง แรงบิดยิ่งมาก

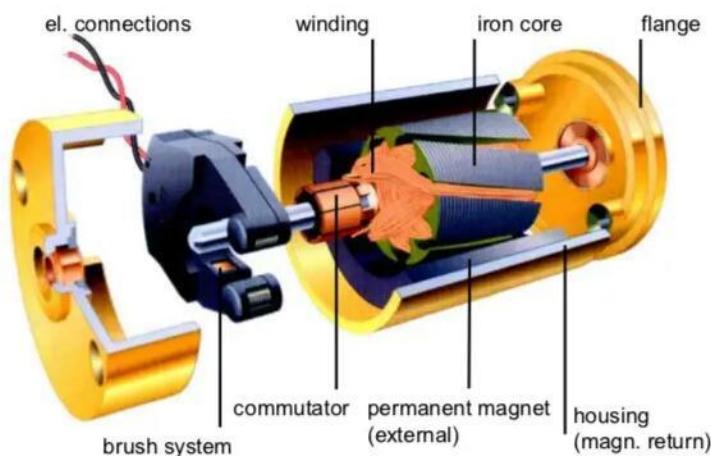


รูปที่ 2 การทำงานของ Commutator

ที่มา : <https://electricalworkbook.com/commutator/>

6.2 Cored DC Motor

Cored DC Motor หรือที่เรียกอีกอย่างว่า DC Motor with an Iron Core เป็นมอเตอร์กระแสตรงชนิดหนึ่งที่มีแกนโรเตอร์ (Rotor) ทำจากวัสดุแม่เหล็ก เช่น เหล็ก เพื่อเพิ่มความสามารถในการสร้างแรงบิดและการเหนี่ยวนำแม่เหล็กที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น



รูปที่ 3 Cored DC Motor

ที่มา : <https://www.fbelec.com/portugal/coreless-dc-motors.html>

6.2.1 โครงสร้างหลักของ Cored DC Motor

6.2.1.1 แกนโรเตอร์ (Rotor Core)

- ทำมาจากวัสดุแม่เหล็ก ซึ่งมีลวดทองแดงพันอยู่ (Windings)
- ช่วยเพิ่มแรงบิด และประสิทธิภาพโดยการเก็บพลังงานแม่เหล็กมากขึ้น

6.2.1.2 แปรงถ่าน (Brush) และ คอมมิวเตเตอร์ (Commutator)

- ใช้ในการเปลี่ยนทิศทางกระแสไฟฟ้าในชุดลวดเพื่อให้เกิดการหมุนต่อเนื่อง

6.2.1.3 สเตเตอร์ (Stator)

- เป็นแม่เหล็กถาวรหรือชุดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างสนามแม่เหล็กรอบโรเตอร์

6.2.2 คุณสมบัติเด่นของ Cored DC Motor

6.2.2.1 ให้แรงบิดสูง โรเตอร์ที่มีแกนเหล็กช่วยเพิ่มแรงบิด เนื่องจากสามารถสร้างพลักซ์แม่เหล็กได้มากขึ้น

6.2.2.2 มีโครงสร้างแข็งแรงและเหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ต้องการแรงบิดสูง

6.2.2.3 การออกแบบเรียบง่าย การใช้คอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่านช่วยให้ควบคุมง่าย

6.2.3 ข้อเสียของ Cored DC Motor

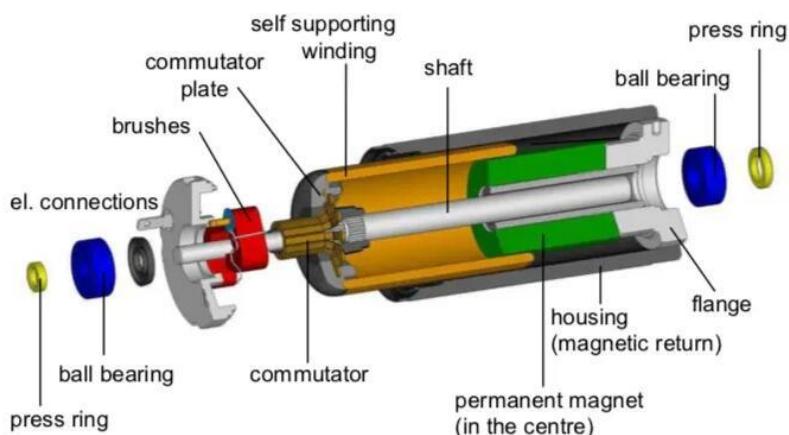
6.2.3.1 แกนเหล็กเพิ่มน้ำหนักของมอเตอร์ ทำให้เหมาะสมกับการใช้งานที่ไม่ต้องการการเคลื่อนไหวรวดเร็วหรือเบา

6.2.3.2 โรเตอร์ที่มีมวลมากขึ้นทำให้เกิดแรงเสียดย ซึ่งอาจลดการตอบสนองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว

6.2.3.3 เกิด Eddy Current Loss และ Hysteresis Loss ในแกนเหล็ก

6.3 Coreless DC Motor

Coreless DC Motor หรือมอเตอร์กระแสตรงไร้แกน เป็นมอเตอร์ที่ไม่มีแกนเหล็กในส่วนโรเตอร์ (Rotor) ซึ่งแตกต่างจาก Cored DC Motor ที่ใช้แกนเหล็ก โรเตอร์ในมอเตอร์ประเภทนี้มักจะประกอบด้วยชุดลวด (Coil) ที่พันเป็นโครงสร้างทรงกระบอกแบบกลวงและน้ำหนักเบา ซึ่งช่วยลดข้อเสียบางอย่างของมอเตอร์แบบมีแกนเหล็ก เช่น แรงเสียดยและการสูญเสียพลังงานจากการกระแสไฟล่วน (Eddy Current Loss)



รูปที่ 4 Coreless DC Motor

ที่มา : <https://www.fbelec.com/portugal/coreless-dc-motors.html>

6.3.1 โครงสร้างหลักของ Coreless DC Motor

6.3.1.1 โรเตอร์ (Rotor)

- ไม่มีแกนเหล็กตรงกลาง
- ชุดลวดทองแดงถูกพันในรูปแบบพิเศษ (มักเป็นทรงถ้วยหรือทรงกระบอก)
- น้ำหนักเบา และลดแรงเสียดทาน

6.3.1.2 สเตเตอร์ (Stator)

- มีแม่เหล็กถาวรที่สร้างสนามแม่เหล็ก
- อุยร์รอบ ๆ โรเตอร์

6.3.1.3 แปรงถ่าน (Brush) และ คอมมิวเตเตอร์ (Commutator)

- ใช้สำหรับการสลับกระแสไฟในชุดลวดเช่นเดียวกับมอเตอร์กระแสตรงทั่วไป

6.3.2 คุณสมบัติเด่นของ Coreless DC Motor

6.3.2.1 แรงเฉือนยต่ำ (Low Inertia) เนื่องจากไม่มีแกนเหล็ก โรเตอร์มีน้ำหนักเบา ทำให้ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วได้รวดเร็ว

6.3.2.2 การสูญเสียพลังงานต่ำ ไม่มี Eddy Current Loss และลด Hysteresis Loss เพราะไม่มีแกนเหล็ก

6.3.2.3 การควบคุมที่แม่นยำ ตอบสนองต่อคำสั่งได้รวดเร็ว เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความละเอียด

6.3.2.4 น้ำหนักเบา ออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งานในอุปกรณ์ที่ต้องการความเบาและประสิทธิภาพสูง

6.3.3 ข้อเสียของ Coreless DC Motor

6.3.3.1 ราคาแพงกว่า เนื่องจากเทคโนโลยีการผลิตและวัสดุพิเศษที่ใช้มีราคาสูงกว่ามอเตอร์แบบมีแกนเหล็ก

6.3.3.2 แรงบิดต่ำกว่าในบางกรณี เนื่องจากไม่มีแกนเหล็กที่จะช่วยเพิ่มฟลักซ์แม่เหล็ก

6.3.3.3 ความร้อนสะสม ชุดลวดที่ไม่มีแกนเหล็กอาจเกิดความร้อนสะสมได้จ่าย หากมีการทำงานต่อเนื่องหรือใช้กำลังไฟสูง

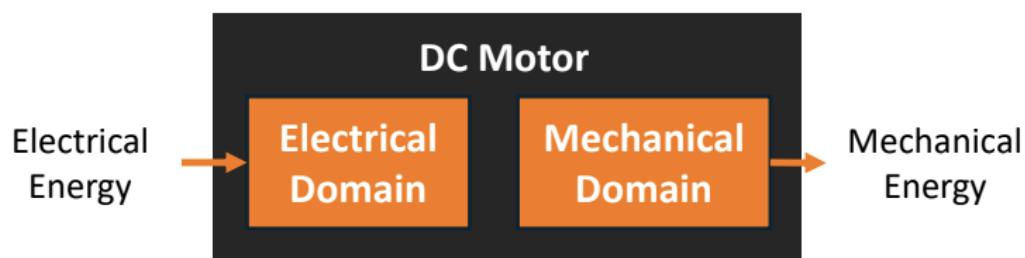
6.4 การเปรียบเทียบระหว่าง Cored DC Motor กับ Coreless DC Motor

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบระหว่าง Cored DC Motor กับ Coreless DC Motor

คุณสมบัติ	Cored DC Motor	Coreless DC Motor
แกนโรเตอร์	มีแกนเหล็ก	ไม่มีแกนเหล็ก
น้ำหนัก	หนัก	เบา
แรงเฉียบ	สูง	ต่ำ
แรงบิด (Torque)	สูงกว่า	อาจต่ำกว่าในบางกรณี
ความเร็วรอบ (RPM)	ปานกลาง	สูง
ราคา	ถูกกว่า	แพงกว่า

6.5 Power Flow ใน DC Motor

มอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) จะแปลงพลังงานไฟฟ้า (Electrical Power) ที่ป้อนเข้ามาให้เป็น พลังงานกล (Mechanical Power) สำหรับขับเคลื่อนโหลด



รูปที่ 5 การแปลงพลังงานของ DC Motor

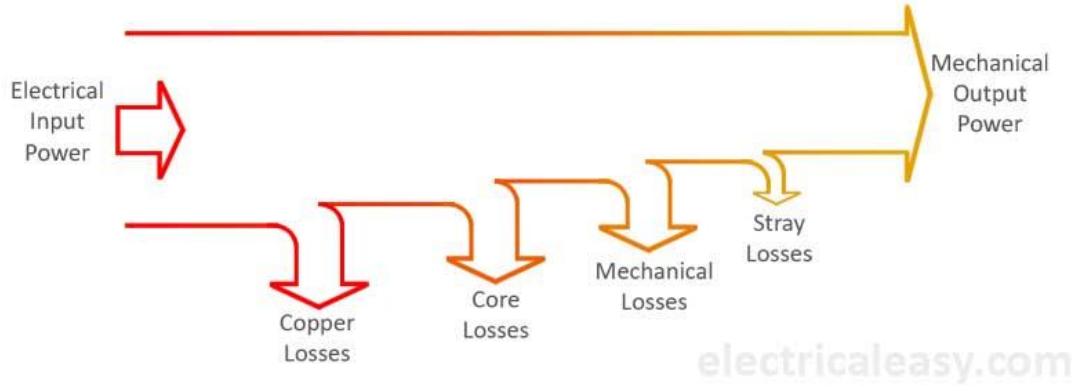
โดยในกระบวนการแปลงพลังงานจะเกิดการสูญเสียพลังงานขึ้นในรูปแบบต่าง ๆ ดังนี้

6.5.1 Copper Losses เกิดจากความต้านทานในชุดลวดของอาร์มาเจอร์ (Armature Resistance)

6.5.2 Core Losses ประกอบด้วย Hysteresis Loss และ Eddy Current Loss ในแกนเหล็ก

6.5.3 Mechanical Losses เกิดจากแรงเสียดทานในเบริ่ง (Bearing Friction) และคอมมิวเตเตอร์ (Commutator Friction) และแรงต้านของอากาศในอาร์มาเจอร์

6.5.4 Stray Losses เกิดจากข้อผิดพลาดหรือความไม่สมบูรณ์ในกระบวนการออกแบบและการผลิต



Power flow diagram of a DC motor

รูปที่ 6 Power Flow Diagram ของ DC Motor

ที่มา : <https://www.electricaleeasy.com/2014/01/losses-in-dc-machine.html>

6.6 ประสิทธิภาพของ DC Motor

จากการสูญเสียพลังงาน ส่งผลให้ประสิทธิภาพของ DC Motor ลดลง โดยประสิทธิภาพสามารถหาได้จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน ดังนี้

$$\eta \cdot Vi = \tau\omega$$

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

โดย	η	คือ ประสิทธิภาพ (Efficiency) มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (%)
	V	คือ แรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)
	i	คือ กระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็นแอมเปอร์ (A)
	τ	คือ แรงบิด (Torque) มีหน่วยเป็นกิโลกรัม-เมตร ($kg \cdot m$)
	ω	คือ ความเร็วเชิงมุม มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที (rad/s)

หรือสามารถหาได้จากการอัตราส่วนระหว่างกำลังข้ออกต่อกำลังขาเข้า

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

6.7 พลิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของ DC Motor

6.7.1 Lorentz Force – Motor's Motion

แรงโล伦ซ์ (Lorentz Force) คือแรงกระทำต่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า ซึ่งเคลื่อนที่ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก มีสมการดังนี้

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

โดย Lorentz Force ถูกนำมาใช้ในการหาสูตรการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ ดังนี้

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

$$= (\vec{i} \times \vec{B}) \cdot l \cdot n$$

$$= iBln; \vec{i} \perp \vec{B}$$

เมื่อนำมาคำนวณหาแรงบิดของมอเตอร์จะได้ว่า

$$\tau_m = 2(\vec{r} \times \vec{F})$$

$$\tau_m = 2(riln); \vec{r} \perp \vec{F}$$

$$\tau_m = 2(rBl)n$$

$$\tau_m = K_m \cdot i$$

โดย	\vec{F}	คือ แรง洛伦兹 มีหน่วยเป็นนิวตัน (N)
	q	คือ ประจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็นคูลอมบ์ (C)
	\vec{E}	คือ สนามไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโวลต์ต่อเมตร (V/m)
	\vec{v}	คือ ความเร็วของประจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที (m/s)
	\vec{B}	คือ ค่าสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเทสลา (T)
	\vec{i}	คือ กระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็นแอมป์ร (A)
	l	คือ ความยาวของชุดลวด มีหน่วยเป็นเมตร (m)
	n	คือ จำนวนรอบที่พันชุดลวด
	r	คือ รัศมีของการพันชุดลวด มีหน่วยเป็นเมตร (m)
	τ_m	คือ แรงบิดของมอเตอร์ มีหน่วยเป็นนิวตันเมตร (Nm)
	K_m	คือ Motor-Torque Constant มีหน่วยเป็น Nm/A

6.7.2 Faraday's Law – Motional EMF

Motional EMF (Electromotive Force) คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก โดยหลักการพื้นฐานมาจาก กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law of Electromagnetic Induction) ซึ่งกล่าวว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะถูกเหนี่ยวนำในวงจรไฟฟ้าเมื่อฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านวงจรนั้นเปลี่ยนแปลง โดยมีสมการดังนี้

$$V_{emf} = -n \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t}$$

$$V_{emf} = -n \frac{\Delta B A \cos \theta}{\Delta t}$$

$$V_{emf} = -n \frac{B \Delta A \cos \theta}{\Delta t}$$

$$V_{emf} = -n \frac{Bl \Delta x}{\Delta t}$$

$$V_{emf} = -nBlv$$

$$V_{emf} = -nBl(\omega r)$$

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

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

โดย Φ_B คือ พลักซ์แม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเวเบอร์ (Wb)

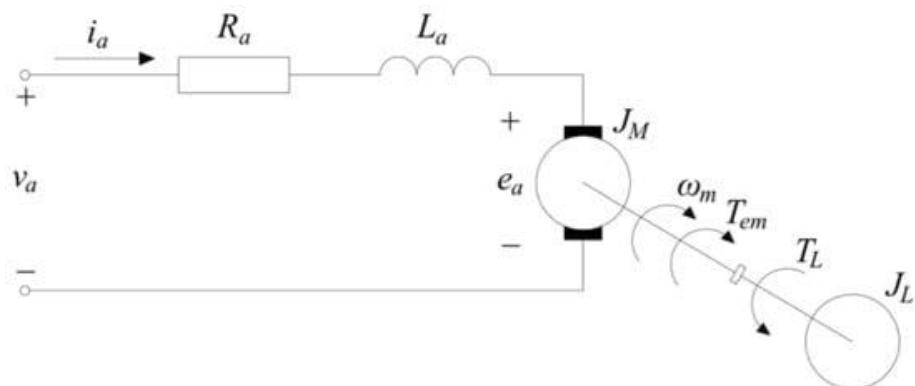
A คือ พื้นที่ของสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)

ω คือ ความเร็วเชิงมุม มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที (rad/s)

K_b คือ Back-EMF Constant มีหน่วยเป็น Vs/rad

6.7.3 Kirchoff's Voltage Law

กฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ เป็นหนึ่งในกฎพื้นฐานของวงจรไฟฟ้า ซึ่งกล่าวถึง ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้าปิด โดยมีหลักการคือ ผลรวมของแรงดันไฟฟ้าทั้งหมดในวงจรไฟฟ้าปิดเท่ากับศูนย์



รูปที่ 7 DC Motor Dynamic Model

ที่มา : <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/17/5359>

เมื่อนำกฎของเคอร์ชอฟฟ์มาประยุกต์ใช้กับ DC Motor จะได้สมการดังนี้

$$-v_{in} + v_L + v_R + v_{emf} = 0$$

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

โดย	L	คือ ความเหนี่ยววน้ำของชด漉วด มีหน่วยเป็นเอนรี (H)
	R	คือ ความต้านทานไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโอม (Ω)
	v_{in}	คือ แรงดันไฟฟ้าขาเข้า มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)
	i	คือ กระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็นแอมเปอร์ (A)

6.7.4 Newton-Euler's Law

Newton-Euler's Law เป็นหลักการพื้นฐานที่ใช้ในกลศาสตร์เพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ของวัตถุในระบบไดนามิกส์ โดยการรวมหลักการของ กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน (Newton's Laws of Motion) และ สมการโมเมนต์เชิงมุม (Euler's Equations of Motion) เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนที่แบบทราบสเลชันและการหมุนของวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body) ในเวลาเดียวกัน โดยเมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับ DC Motor จะได้สมการดังนี้

$$\Sigma \tau = J \dot{\omega}$$

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

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

โดย	τ_m	คือ แรงบิดของมอเตอร์ มีหน่วยเป็นนิวตันเมตร (Nm)
	ω	คือ ความเร็วเชิงมุม มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที (rad/s)
	J	คือ โมเมนต์ความเฉื่อย มีหน่วยเป็นกิโลกรัมเมตรยกกำลังสอง ($kg m^2$)
	B	คือ การหน่วงภายใน มีหน่วยเป็นนิวตันวินาทีต่อเรเดียน (Ns/rad)
	τ_L	คือ แรงบิดภายนอก มีหน่วยเป็นนิวตันเมตร (Nm)

6.8 Motor Characteristics

จากข้อที่ 6.7.3 และ 6.7.4 จะได้สมการการเคลื่อนที่ของ Motor ใน Time Domain ดังนี้

$$L \frac{di}{dt} + Ri + K_b \omega = v_{in} \rightarrow (1)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} + B\omega - K_m i = -\tau_L \rightarrow (2)$$

นำสมการข้างต้นมาหา Motor Characteristics ดังนี้

6.8.1 Motor's Torque/Speed Curve

6.8.1.1 Steady State Condition

$$\text{ในกรณี } \frac{d\omega}{dt} = 0, \frac{di}{dt} = 0$$

แทน $\frac{di}{dt} = 0$ ลงในสมการ (1) จะได้

$$v_{in} = Ri + K_b \omega$$

$$i = \frac{v_{in} - K_B \omega}{R} \rightarrow (3)$$

แทน $\frac{d\omega}{dt} = 0$ ลงในสมการ (2) จะได้

$$-\tau_L = B\omega - K_m i \rightarrow (4)$$

แทน (3) ลงใน (4) จะได้

$$-\tau_L = B\omega - K_m \left(\frac{v_{in} - K_B \omega}{R} \right)$$

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

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

$$\omega = -\left(\frac{R}{BR + K_m K_B}\right)\tau_L + \left(\frac{K_m v_{in}}{BR + K_m K_B}\right) \rightarrow (5)$$

6.8.1.2 No-Load Condition

ในกรณี $\tau_L = 0$ แทนลงใน (5) จะได้

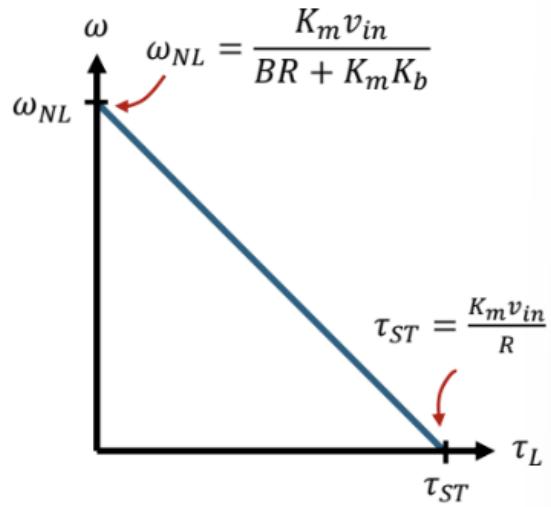
$$\omega_{NL} = \frac{K_m v_{in}}{BR + K_m K_B}$$

6.8.1.3 Stall Torque Condition

ในกรณี $\omega = 0$ แทนลงใน (5) จะได้

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

จากทั้ง 3 สมการที่ได้ จะสามารถนำไปพล็อตกราฟแรงบิดและความเร็วได้ ดังนี้



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็ว

6.8.2 Motor's Torque/Current Curve

6.8.2.1 Steady State Condition

$$\text{ในกรณี } \frac{d\omega}{dt} = 0, \frac{di}{dt} = 0$$

แทน $\frac{di}{dt} = 0$ ลงในสมการ (1) จะได้

$$v_{in} = Ri + K_b\omega$$

$$\omega = \frac{v_{in} - Ri}{K_b} \rightarrow (6)$$

แทน $\frac{d\omega}{dt} = 0$ ลงในสมการ (2) จะได้

$$-\tau_L = B\omega - K_m i \rightarrow (4)$$

แทน (6) ลงใน (4) จะได้

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

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

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

$$i = \left(\frac{K_b}{BR + K_m K_b} \right) \tau_L + \left(\frac{B v_{in}}{BR + K_m K_b} \right) \rightarrow (7)$$

6.8.2.2 No-Load Condition

ในกรณีนี้ $\tau_L = 0$ แทนลงใน (7) จะได้

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

6.8.2.3 Stall Torque Condition

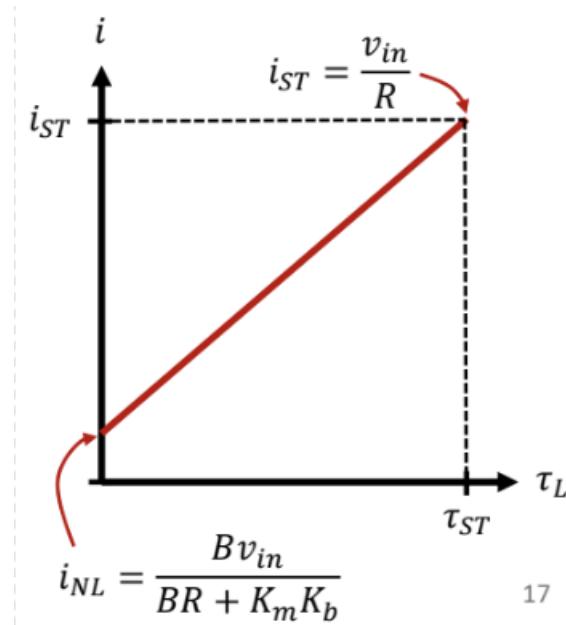
ในกรณีนี้ $\omega = 0, i = i_{ST}$ แทนลงใน (4) จะได้

$$-\tau_{ST} = B(0) - K_m i_{ST}$$

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

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

จากทั้ง 3 สมการที่ได้ จะสามารถนำไปพล็อตกราฟแรงบิดและกระแสได้ ดังนี้



รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกระแส

6.8.3 Motor's Power Curve

6.8.3.1 Steady State Condition

จากสมการที่ (4) มาจัดรูปได้เป็น

$$\frac{\tau_L + B\omega}{K_m} = i \rightarrow (8)$$

จากสมการที่ (3) น่าจะดูรูปได้เป็น

$$v_{in} = Ri + K_b \omega \rightarrow (9)$$

แทน (8) ลงใน (9) จะได้

$$\begin{aligned} v_{in} &= R \left(\frac{\tau_L + B\omega}{K_m} \right) + K_b \omega \\ v_{in} &= \left(\frac{R}{K_m} \right) \tau_L + \left(\frac{RB + K_b K_m}{K_m} \right) \omega \\ v_{in} &= \left(\frac{v_{in}}{\tau_{ST}} \right) \tau_L + \left(\frac{v_{in}}{\omega_{NL}} \right) \omega \\ \omega &= -\frac{\omega_{NL}}{\tau_{ST}} \tau_L + \omega_{NL} \rightarrow (10) \end{aligned}$$

6.8.3.2 Power Formular

$$P = \tau_L \omega \rightarrow (11)$$

แทน (10) ลงใน (11) จะได้

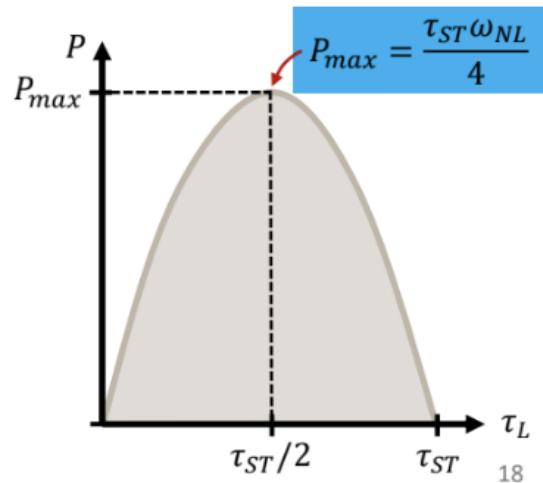
$$\begin{aligned} P &= \tau_L \left(-\frac{\omega_{NL}}{\tau_{ST}} \tau_L + \omega_{NL} \right) \\ P &= -\frac{\omega_{NL}}{\tau_{ST}} \tau_L^2 + \omega_{NL} \tau_L \\ \text{หากค่าแรงบิดที่ทำให้กำลังมีค่ามากที่สุด} \\ \frac{dP}{d\tau_L} &= -2 \frac{\omega_{NL}}{\tau_{ST}} + \omega_{NL} \\ 0 &= -2 \frac{\omega_{NL}}{\tau_{ST}} \tau_L^* + \omega_{NL} \\ \tau_L^* &= \frac{\tau_{ST}}{2} \end{aligned}$$

ดังนั้น จะได้ว่า

$$\begin{aligned} P_{max} &= -\frac{\omega_{NL}}{\tau_{ST}} \left(\frac{\tau_{ST}}{2} \right)^2 + \omega_{NL} \left(\frac{\tau_{ST}}{2} \right) \\ P_{max} &= -\frac{\omega_{NL} \tau_{ST}}{4} + \frac{2\omega_{NL} \tau_{ST}}{4} \end{aligned}$$

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

เมื่อนำสมการข้างต้นทั้งหมดมาพล็อตกราฟ จะได้กราฟกำลัง ดังนี้



รูปที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกำลัง

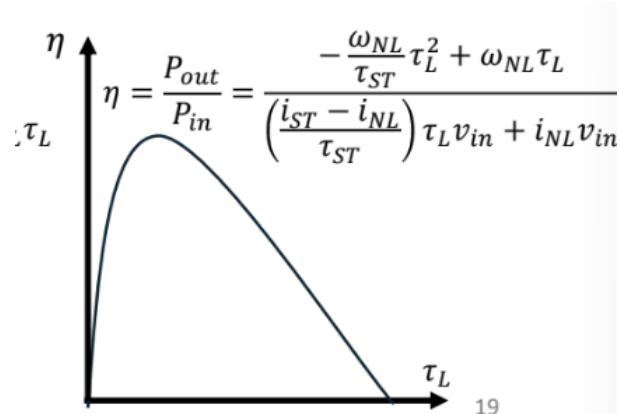
6.8.4 Efficiency

$$\text{จากข้อ 6.6 จะได้ว่า } \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100$$

เมื่อนำสมการกำลังมาแทนค่า จะได้ว่า

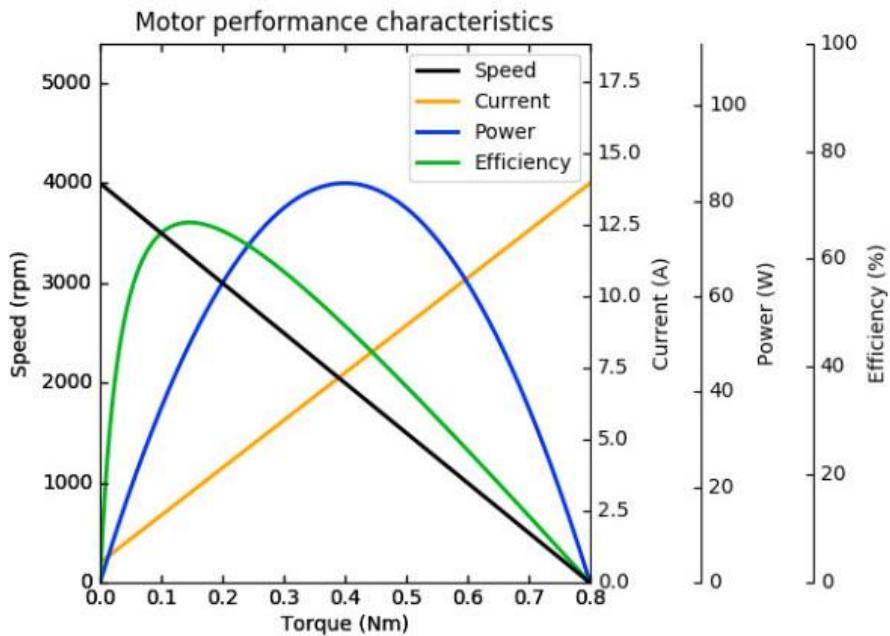
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{-\frac{\omega_{NL}}{\tau_{ST}}\tau_L^2 + \omega_{NL}\tau_L}{\left(\frac{i_{ST} - i_{NL}}{\tau_{ST}}\right)\tau_L v_{in} + i_{NL}v_{in}}$$

เมื่อนำไปพล็อตกราฟ จะได้กราฟอย่างดังนี้



รูปที่ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับประสิทธิภาพ

จากราฟข้างต้นทั้งหมด เมื่อนำมารวมกันจะได้ Motor Characteristics ดังนี้



รูปที่ 12 Motor Characteristics

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

6.9 Motor Specifications

คุณสมบัติของมอเตอร์ที่ควรรู้มีดังนี้

Motor Specifications

- **Operating Voltage:** 4.5V to 9V
- **Recommended/Rated Voltage:** 6V
- **No-load current @6V:** 70mA
- **No-load speed @6V:** 9000 rpm
- **Stall current @6V:** 937.5 mA
- **Stall torque @6V:** 46.5 g-cm
- **Rated speed @6V:** 7000 rpm
- **Rated torque @6V:** 10 g-cm
- **Rated power @6V:** 720 mW
- **Motor size:** 27.5 mm x 20 mm x 15 mm
- **Shaft diameter:** 2 mm
- **Weight:** 17 g

รูปที่ 13 Motor Specifications

6.9.1 Operating Voltage ช่วงของแรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์ทำงาน

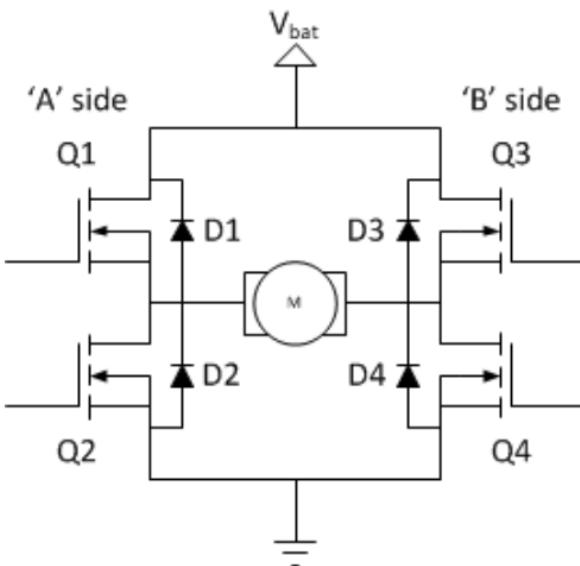
6.9.2 Rated Voltage ช่วงของแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้มอเตอร์ทำงานได้มีประสิทธิภาพสูงที่สุด

6.9.3 No-Load Current กระแสไฟฟ้าในช่วงที่ไม่มีแรงบิด

- 6.9.4 No-Load Speed ความเร็วในช่วงที่ไม่มีแรงบิด
- 6.9.5 Stall Current กระแสไฟฟ้าในช่วงที่แรงบิดมีค่ามากที่สุด
- 6.9.6 Stall Torque ค่าแรงบิดที่สูงที่สุด
- 6.9.7 Rated Speed ความเร็วที่ทำให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพสูงที่สุด
- 6.9.8 Rated Torque แรงบิดที่ทำให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพสูงที่สุด
- 6.9.9 Rated Power กำลังที่ทำให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพสูงที่สุด

6.10 การควบคุมทิศทางของ Motor ด้วย H-Bridge Drive

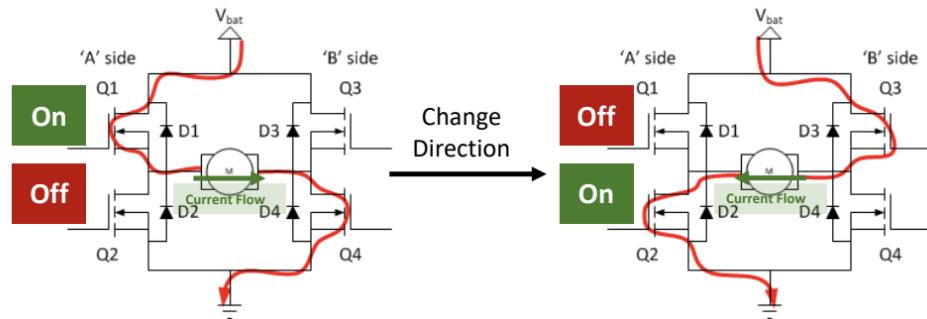
การควบคุมทิศทางของ Motor ด้วย H-Bridge Drive เป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการควบคุมมอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) โดย H-Bridge Drive เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ช่วยให้สามารถเปลี่ยนทิศทางการหมุนของมอเตอร์ได้อย่างง่ายดายและควบคุมการทำงานของมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 14 วงจร H-Bridge Drive

6.10.1 หลักการทำงานของ H-Bridge Drive

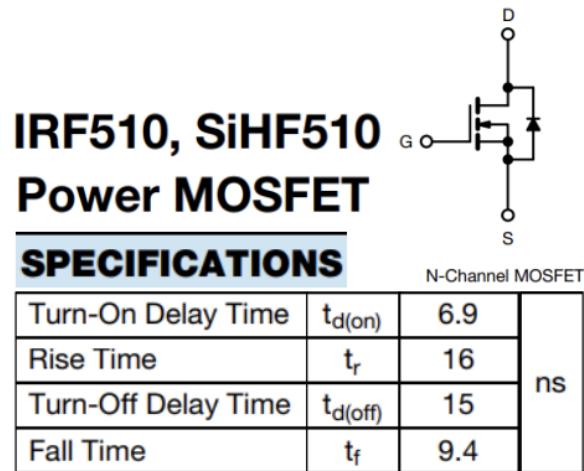
H-Bridge Drive ประกอบด้วยสวิตซ์หรือทรานซิสเตอร์ 4 ตัว ที่จัดเรียงในรูปตัวอักษร "H" เพื่อควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ ซึ่งแรงดันไฟฟ้าสามารถกลับขั้วได้โดยการเปิด - ปิด สวิตซ์ในลำดับที่เหมาะสม โดยหากต้องการให้มอเตอร์หมุนไปด้านหน้า จะทำการเปิด Q1 และ Q4 และปิด Q2 และ Q3 เพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลจากแหล่งจ่ายไฟไปยัง Q1 ไปที่มอเตอร์และไปที่ Q4 และลงกราวด์ แต่หากต้องการกลับทิศทางของมอเตอร์ จะทำการเปิด Q2 และ Q3 แทน เพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลจากแหล่งจ่ายไฟไปยัง Q3 ไปที่มอเตอร์และไปที่ Q2 และลงกราวด์ ดัง รูปที่ 14



รูปที่ 15 การเปลี่ยนทิศทางการหมุนของ Motor

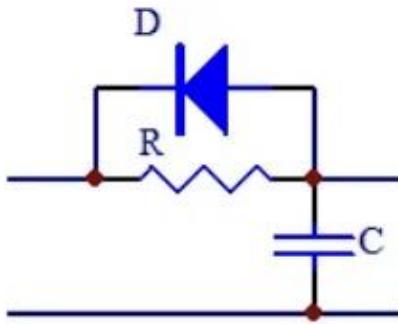
6.11 การป้องกันการ Shoot-Through ภายใน H-Bridge Drive

Shoot-Through คือสถานการณ์ที่ทرانซิสเตอร์สองตัวในขาเดียวกันของ H-Bridge (เช่น Q1 และ Q3 หรือ Q2 และ Q4) เปิดพร้อมกัน ทำให้เกิด ไฟฟ้าลัดวงจร (Short Circuit) ระหว่างแรงดันสูง (VCC) และ กราวด์ (GND) ซึ่งอาจทำให้อุปกรณ์เสียหายหรือเกิดความร้อนสูงจนวายไหม้ได้ โดยสาเหตุเกิดจากช่วงเวลา Dead Time ที่ไม่เพียงพอ ซึ่ง Dead Time คือช่วงที่ทرانซิสเตอร์ตัวหนึ่งปิดก่อนที่อีกตัวจะเปิด



รูปที่ 16 Specification ของ MOSFET

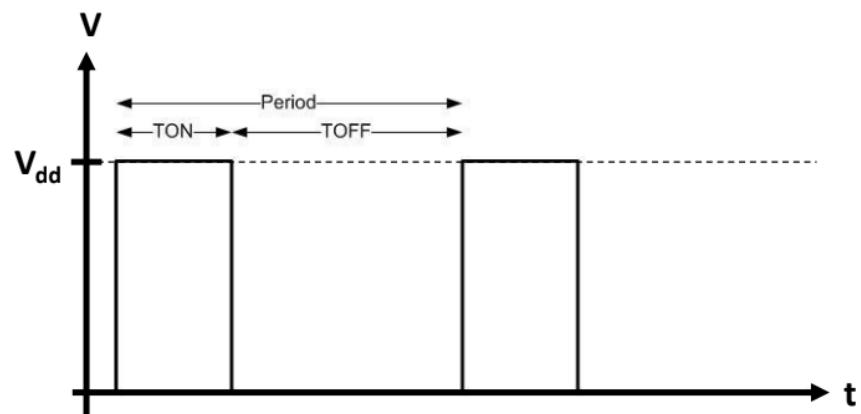
จาก รูปที่ 16 จะเห็นว่า ช่วง Turn-Off Delay Time มากกว่าช่วง Turn-On Delay Time ซึ่งหากสั่งให้ Motor เปลี่ยนทิศทางทันที จะทำให้เกิดช่วง Dead Time ประมาณ 8.1 ns ที่ทرانซิสเตอร์จะเปิดพร้อมกัน ซึ่งจะทำให้เกิดการ Shoot-Through โดยสามารถแก้ไขได้โดยการทำให้ค่า Turn-On Delay Time ไม่น้อยกว่า Turn-Off Delay Time โดยการต่อ Capacitor เพื่อปรับให้ Turn-On Delay Time และ Turn-Off Delay Time มีค่าใกล้เคียงกัน และต่อ Diode เพื่อป้องกันการโหลดลับของกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 17 การต่อวงจรเพื่อป้องกันการเกิด Shoot-Through

6.12 การควบคุมความเร็วของ Motor ด้วย Pulse Width Modulation

Pulse Width Modulation (PWM) เป็นเทคนิคที่ใช้ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ DC โดยการปรับสัดส่วนของเวลาเปิด-ปิดสัญญาณ (Duty Cycle) แทนที่จะควบคุมแรงดันโดยตรง ซึ่งช่วยลดการสูญเสียพลังงานในรูปแบบความร้อนและทำให้ควบคุมความเร็วได้อย่างแม่นยำ โดยมีสูตรที่ใช้ในการคำนวณ ดังนี้



รูปที่ 18 Pulse Width Modulation

$$Period = TON + TOFF$$

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

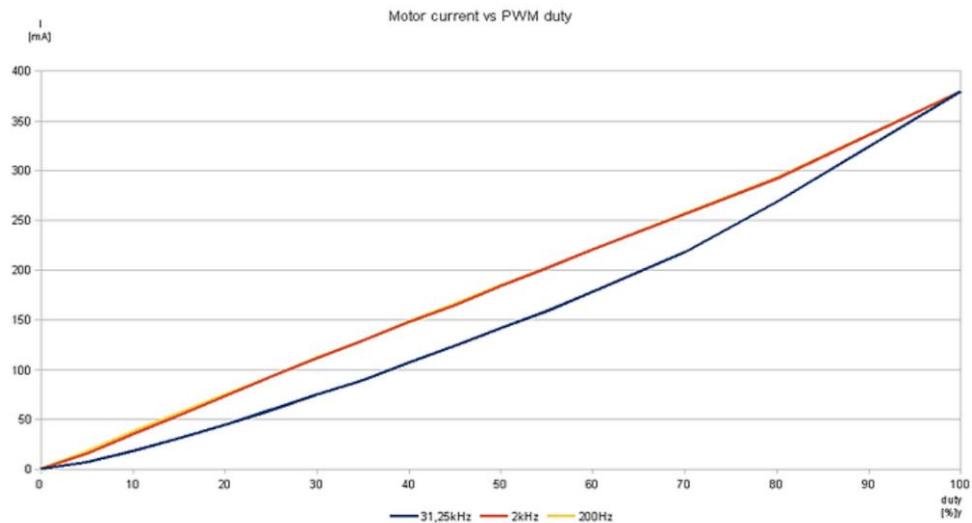
$$Duty\ Cycle = \frac{TON}{TON + TOFF} \times 100$$

$$Output\ Voltage = Duty\ Cycle \times V_{dd}$$

โดย	<i>Period</i>	คือ คาบ มีหน่วยเป็นวินาที (s)
	<i>Frequency</i>	คือ ความถี่ มีหน่วยเป็น (Hz)
	<i>Duty Cycle</i>	คือ สัดส่วนของเวลาเปิด-ปิดสัญญาณ มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (%)

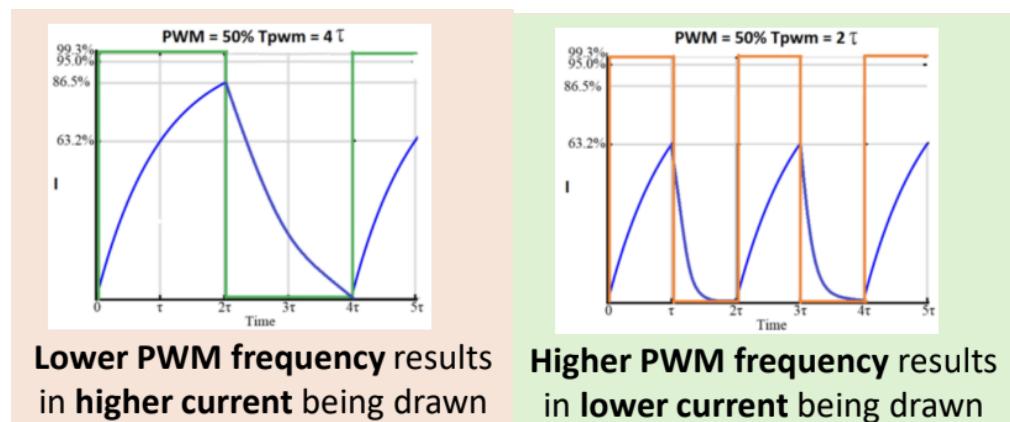
6.13 ความสัมพันธ์ของ Frequency กับ ความเร็วและกระแสไฟฟ้า

6.13.1 ความสัมพันธ์ของ Frequency กับกระแสไฟฟ้า



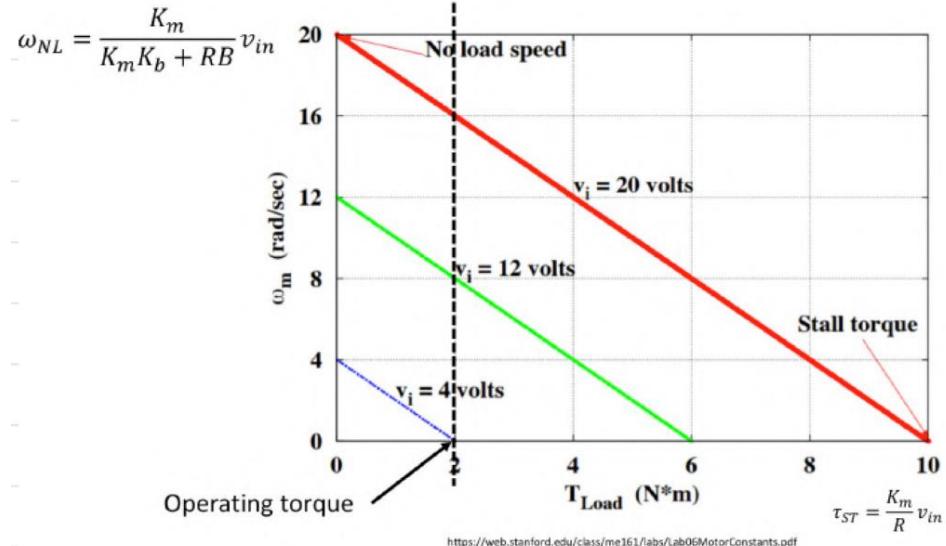
รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ของ Frequency กับกระแสไฟฟ้า

จากรูปที่ 19 จะเห็นว่า เมื่อความถี่ของสัญญาณ Pulse Width Modulation สูง จะทำให้กระแสไฟฟ้าที่ Motor เป็น Non-Linear เนื่องจากกระแสไฟฟ้าอาจขึ้นไปไม่ถึงค่า Max ที่ 5τ ซึ่งทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าเปลี่ยนต่ำกว่าที่ควรจะเป็น



รูปที่ 20 การเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าในช่วงที่ความถี่ต่ำและสูง

6.13.2 ความสัมพันธ์ของ Frequency กับความเร็ว



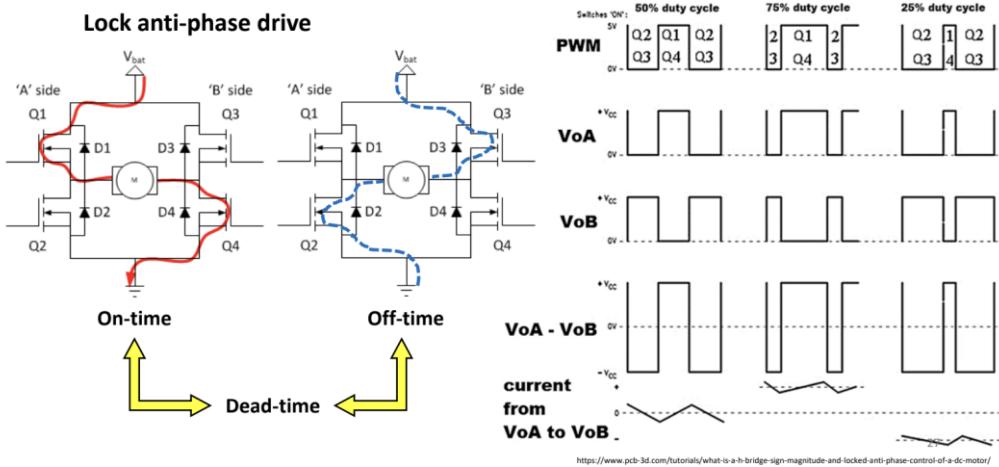
รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ของ Frequency กับความเร็ว

จากสมการ $\omega_{NL} = \frac{K_m}{K_m K_b + RB} V_{in}$ จะเห็นว่า ω_{NL} แปรผันตาม V_{in} คือถ้า V_{in} มาก ω_{NL} ก็จะมาก ถ้า V_{in} น้อย ω_{NL} ก็จะน้อยตาม และจากสมการ $\tau_{ST} = \frac{K_m}{R} V_{in}$ จะเห็นว่า τ_{ST} ก็แปรผันตาม V_{in} เช่นกัน ดังนั้น V_{in} จึงส่งผลต่อความเร็ว และเนื่องจาก PWM จะควบคุมแรงดันเฉลี่ยที่จ่ายให้กับมอเตอร์โดยการปรับ Duty Cycle ดังนั้นหาก V_{in} สูง แต่ Duty Cycle ต่ำ แรงดันเฉลี่ยก็จะต่ำ ส่งผลให้มอเตอร์หมุนช้าลง แต่ถ้า V_{in} ต่ำ แต่ Duty Cycle สูง แรงดันเฉลี่ยก็จะสูงขึ้น ส่งผลให้มอเตอร์หมุนเร็วขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความถี่ PWM ส่งผลต่อความเร็วของมอเตอร์ โดยเมื่อความถี่สูง ความเร็วของมอเตอร์ก็จะเพิ่มขึ้น และเมื่อความถี่ต่ำ ความเร็วของมอเตอร์จะลดลง

6.14 Motor Driver Drive Modes

6.14.1 Lock Anti-Phase Drive

Lock Anti-Phase Drive คือการควบคุมโดยใช้สัญญาณ PWM เพียงอย่างเดียว ในการควบคุมทั้งขนาดและทิศทาง โดยควบคุมขนาดโดยใช้ความห่างของ % Duty Cycle ในการควบคุมแบบนี้ มอเตอร์จะหยุดนิ่งในช่วง % Duty Cycle ที่ 50% หากค่า % Duty Cycle มากกว่า 50% มอเตอร์จะหมุนไปทางนึง และเมื่อน้อยกว่า 50% มอเตอร์จะหมุนไปอีกทางนึง



รูปที่ 22 Lock Anti-Phase Drive

6.14.2 Sign-Magnitude Drive

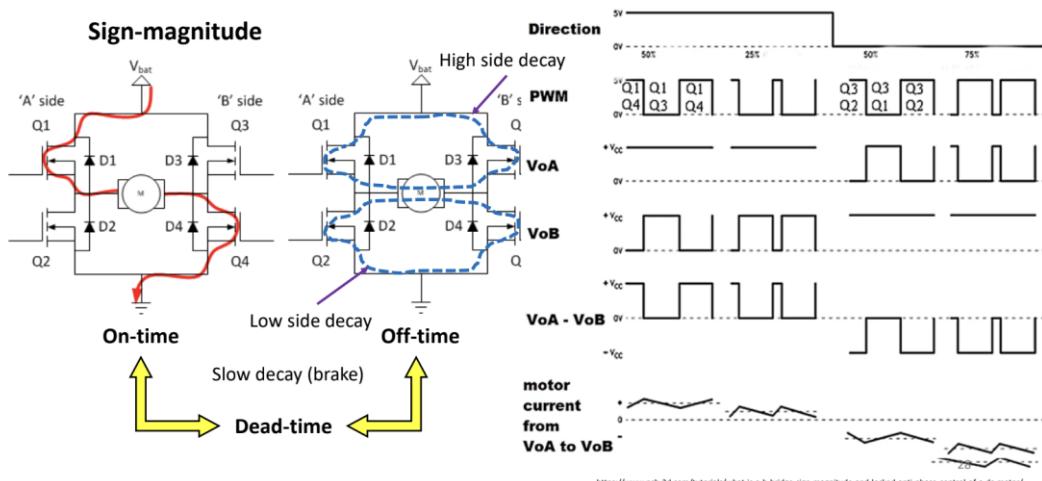
Sign-Magnitude Drive เป็นวิธีการควบคุมมอเตอร์ DC ที่ใช้สัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ และสัญญาณดิจิทัล (High/Low) สำหรับควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ โดยในการควบคุมจะใช้สัญญาณ 2 ส่วน ได้แก่

6.14.2.1 Sign (ทิศทาง)

- ใช้กำหนดทิศทางการหมุนของมอเตอร์ (หมุนตามเข็มหรือทวนเข็ม)
- ควบคุมผ่านสัญญาณดิจิทัล (High/Low หรือ 1/0)

6.14.2.2 Magnitude (ความเร็ว)

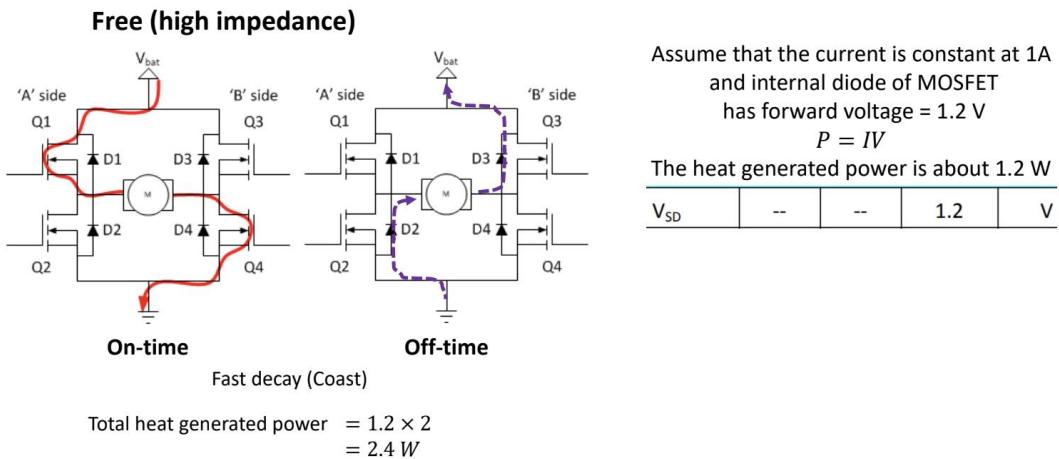
- กำหนดความเร็วการหมุนของมอเตอร์
- ใช้สัญญาณ PWM (Duty Cycle) ในการควบคุม



รูปที่ 23 Sign-Magnitude Drive

6.14.3 Free (High Impedance)

Free (High Impedance) หรือบางครั้งเรียกว่า Coast Mode เป็นสถานะหนึ่งในการควบคุมมอเตอร์ผ่าน H-Bridge Driver โดยที่มอเตอร์จะไม่ถูกขับด้วยแรงดันไฟฟ้าใด ๆ และข้อต่อของมอเตอร์จะถูกปล่อยให้ลอยตัว (High Impedance State) โดยภายในโหมดนี้ สวิตช์ภายใน H-Bridge จะถูกปิดทั้งหมด และไม่มีการเชื่อมต่อระหว่างข้อต่อของมอเตอร์และแหล่งจ่ายไฟ (VCC) หรือกราวด์ (GND) ซึ่งจะส่งผลให้มอเตอร์หมุนอย่างอิสระตามแรงเฉือนของมอเตอร์

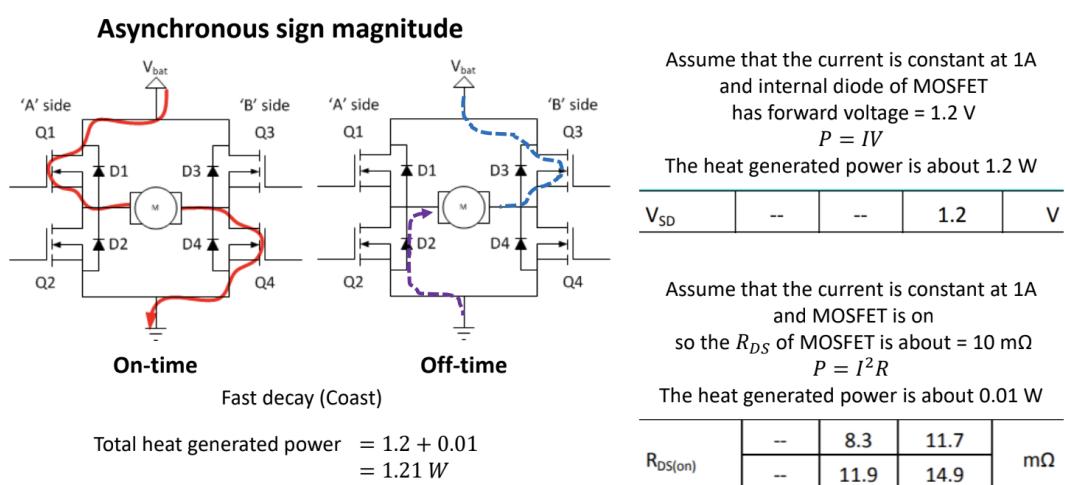


Assume that the current is constant at 1A
and internal diode of MOSFET
has forward voltage = 1.2 V
 $P = IV$

The heat generated power is about 1.2 W

6.14.4 Asynchronous Sign Magnitude Drive

Asynchronous Sign Magnitude Drive เป็นเทคนิคการควบคุมที่พัฒนาต่อจากโหมด Free (High Impedance) โดยมีการจัดการทิศทางของกระแสไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นผ่านไดโอด (Diode) เพื่อลดการสูญเสียพลังงานจากการกระแสย้อนกลับ (Regenerative Current)



รูปที่ 25 Asynchronous Sign Magnitude Drive

6.15 Load Cell

6.15.1 หลักการทำงานของ Load Cell

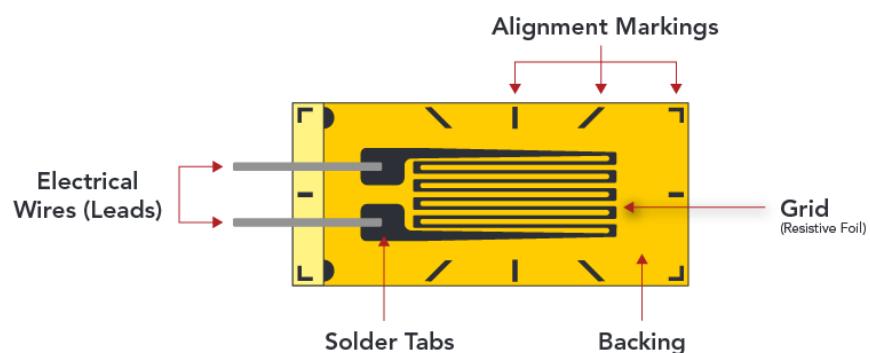
Load Cell เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแรง (เช่น แรงกด แรงดึง หรือแรงบิด) โดยแปลงแรงที่กระทำให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า Load Cell ประเภทที่นิยมใช้งานคือ Strain Gauge Load Cell ซึ่งมี Strain Gauge ติดตั้งภายในเพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงของแรง



รูปที่ 26 แสดงลักษณะของ Load Cell

6.15.2 Strain Gauge และหลักการวัดแรง

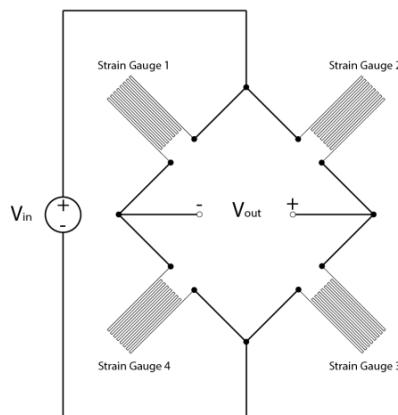
Strain Gauge เป็นตัวต้านทานไฟฟ้าที่ติดตั้งอยู่ภายใน Load Cell ซึ่งออกแบบมาเพื่อตรวจจับการยืดหรือบีบอัดของวัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำ เมื่อ Load Cell ถูกกระทำโดยแรง จะทำให้เกิดการยืดหรือบีบอัดในโครงสร้างของ Load Cell ซึ่งจะถูกส่งผ่านไปยัง Strain Gauge ที่ติดตั้งอยู่ เมื่อ Strain Gauge ยืดออก ค่าความต้านทานไฟฟ้าภายใน Strain Gauge จะเพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน เมื่อ Strain Gauge ถูกบีบอัด ค่าความต้านทานจะลดลง การเปลี่ยนแปลงนี้สามารถวัดได้ผ่านวงจร Wheatstone Bridge



รูปที่ 27 แสดงลักษณะของ Strain gauge

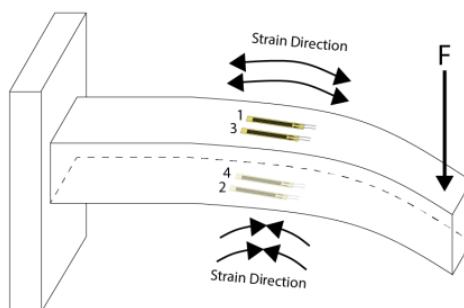
6.15.3 การใช้งาน Wheatstone Bridge ใน Load Cell

Wheatstone Bridge เป็นวงจรที่นิยมใช้ใน Load Cell เพื่อวัดความเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานที่เกิดจาก Strain Gauge วงจรนี้ประกอบด้วยตัวต้านทานห้องหมุด 4 ตัว โดยจะมีการจัดเรียงในรูปแบบสะพาน (bridge) เพื่อให้เกิดการเปรียบเทียบแรงดันระหว่างจุดสมดุล ใน Load Cell จะใช้ Strain Gauge แทนตัวต้านทานในวงจร Wheatstone Bridge อย่างน้อย 1 ตัวหรือมากกว่านั้น เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อตัว Strain Gauge ถูกยืดหรือบีบอัด



รูปที่ 28 แสดงลักษณะของ Wheatstone Bridge

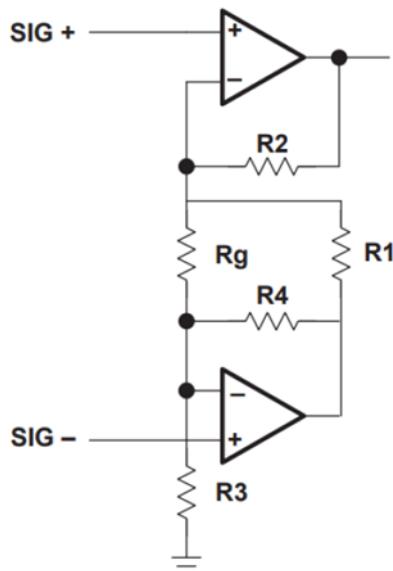
ในการเชื่อมต่อแบบ Wheatstone Bridge จะมีการจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Excitation Voltage) ไปยังวงจร และทำการวัดแรงดันไฟฟ้าระหว่างสองจุดในกลางสะพาน เมื่อไม่มีแรงกระทำกับ Load Cell วงจร Wheatstone Bridge จะอยู่ในสภาพสมดุล ทำให้แรงดัน Output ที่วัดได้มีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อเกิดแรงกระทำต่อวัสดุภายใต้ Strain Gauge จะทำให้ Strain Gauge เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทาน (เนื่องจากการยืดหรือหดตัว) ซึ่งจะส่งผลให้วงจร Wheatstone Bridge หลุดออกจากสมดุล ทำให้แรงดัน Output ที่วัดได้เกิดการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 29 แสดงการทำงานของ Load Cell และค่า Strain Direction ที่ Strain gauge ถูกกระทำ

6.15.4 หลักการทำงานของ 2 Op-amps Differential Amplifier

2 Op-amps Differential Amplifier เป็นวงจรขยายสัญญาณที่ใช้แอมป์เชิงปฏิบัติการ (Operational Amplifiers หรือ Op-amps) สองตัวในการขยายสัญญาณแรงดันที่ต่างกันระหว่างสองอินพุตหลัก โดยมีการออกแบบที่ช่วยขัดสัญญาณรบกวนร่วม (Common Mode Noise) และขยายสัญญาณที่เราต้องการ โดยวงจรนี้ใช้ Op-amp สองตัว (เรียกว่า Op-amp 1 และ Op-amp 2) โดยแต่ละตัวจะถูกเชื่อมต่อในลักษณะวงจร Inverting และ Non-Inverting



รูปที่ 30 แสดงลักษณะวงจร 2 Op-amps Differential Amplifier ภายใน INA125

อินพุตสองตัวของวงจร (เรียกว่า V_{in+} และ V_{in-}) จะเป็นแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการขยาย โดยที่ V_{in+} และ V_{in-} เป็นค่าที่อ่านได้จากวงจร Wheatstone Bridge หรือวงจรอื่น ๆ ที่ให้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าต่างกัน (Differential Voltage) โดยการทำงานของ Op-amp ตัวที่หนึ่ง (A_1) จะทำหน้าที่ขยายแรงดันไฟฟ้า V_{in+} โดยจะทำหน้าที่เป็นตัวขยายแบบ Non-Inverting และแรงดันไฟฟ้า Output จาก Op-amp ตัวที่หนึ่งนี้จะถูกส่งผ่านไปยัง Input Inverting ของ Op-amp ตัวที่สอง ซึ่งจะถูกขยายด้วยตัวที่สองต่อไป ต่อไปในการทำงานของ Op-amp ตัวที่สอง (A_2) ทำหน้าที่ขยายแรงดันไฟฟ้า V_{in-} ซึ่งจะถูกส่งเข้าที่ Input Non-Inverting ของ A_2 ผลลัพธ์สุดท้ายจาก Op-amp ตัวที่สองนี้ จะทำให้ได้ค่าความแตกต่างของแรงดันระหว่าง V_{in+} และ V_{in-} ที่ขยายขึ้นตามค่า Gain ที่กำหนด จากความสัมพันธ์ของ V_{in+} และ V_{in-} ทำให้ได้สมการการขยายสัญญาณดังนี้

$$V_{out} = A \times (V_{in+} - V_{in-})$$

โดย V_{out} คือ แรงดันขาออกของ Op-amp ตัวที่หนึ่ง มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

V_{in+} คือ แรงดันขาเข้าบวกของวงจร Differential Amplifier มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

V_{in-} คือ แรงดันขาเข้าลบของวงจร Differential Amplifier มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

A คือ ค่า Gain หรืออัตราขยายของวงจร Differential Amplifier

และสามารถหาค่าอัตราขยายได้จากสมการดังนี้

$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{2R_2}{R_g}$$

โดย	A	คือ อัตราขยายของวงจร Differential Amplifier
	R_1	คือ ตัวต้านทานที่ 1 มีหน่วยเป็นโอม (Ω)
	R_2	คือ ตัวต้านทานที่ 2 มีหน่วยเป็นโอม (Ω)
	R_g	คือ ตัวต้านทานที่เชื่อมต่อกับขาลงของ Op-amp มีหน่วยเป็นโอม (Ω)

นอกจาก 2 Op-amps Differential Amplifier จะทำหน้าที่ขยายสัญญาณแล้ว วงจรนี้ยังมีความสามารถในการจัดสัญญาณร่วม (Common Mode Signal) ที่อาจเกิดจากสัญญาณรบกวนภายนอก เช่น เสียงรบกวนหรือการเปลี่ยนแปลงของแรงดันพื้นฐานจากการที่ Differential Amplifier จะขยายเฉพาะสัญญาณที่เป็นความแตกต่างระหว่าง V_{in+} และ V_{in-} โดยหากมีสัญญาณรบกวนที่เหมือนกันในทั้งสองอินพุต วงจรนี้จะจัดสัญญาณเหล่านั้นออกไป

7. วิธีดำเนินการทดลอง

- 7.1 ศึกษาการทำงานของ Brushed DC motor พร้อมกับพฤติกรรมของมอเตอร์
- 7.2 ติดตั้งสายจัมเปอร์ตามการออกแบบของ MotorXplorer
- 7.3 ติดตั้งสายจัมเปอร์ตามการออกแบบของ LoadCellXplorer
- 7.4 ติดตั้งโปรแกรมที่จำเป็นต่อการควบคุม Brushed DC motor ได้แก่ ไฟล์ Simulink และ wajitung
- 7.5 ทำการหาค่าต้านทานที่เหมาะสมสำหรับการวัดค่า Stall Torque จากการกดของก้าน 3D Printing ที่ติดตั้งที่เพลาของ Brushed DC motor
- 7.6 หา No-Load Current, No-Load Speed, Stall Current และ Stall Torque
- 7.7 นำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟเพื่อหา Motor Characteristic

8. วัสดุอุปกรณ์

- 8.1 Nidec Components Geared DC Geared Motor, 12 V dc, 20 Ncm, 70 rpm, 6mm Shaft Diameter จำนวน 1 อัน
- 8.2 Incremental Encoder AMT103-V จำนวน 1 อัน
- 8.3 WCS1700 Hall Current Sensor จำนวน 2 อัน
- 8.4 Cytron MD20A Motor Driver จำนวน 2 อัน
- 8.5 Nucleo STM32G474RE พร้อมสายอัปโหลด จำนวน 1 ชุด
- 8.6 MotorXplorer จำนวน 1 ชุด - ฐานสามารถบรรจุบอร์ดควบคุม, Breadboard, 3D-Print ใช้สำหรับการประกอบกับ DC Motor

9. ขั้นตอนการดำเนินงาน

9.1 ศึกษาบอร์ด MotorXplorer สำหรับการสำรวจพฤติกรรมการทำงานของ Brushed DC Motor และโปรแกรมที่ควบคุมการทำงานของบอร์ด MotorXplorer ด้วย Simulink

9.2 Hardware setup

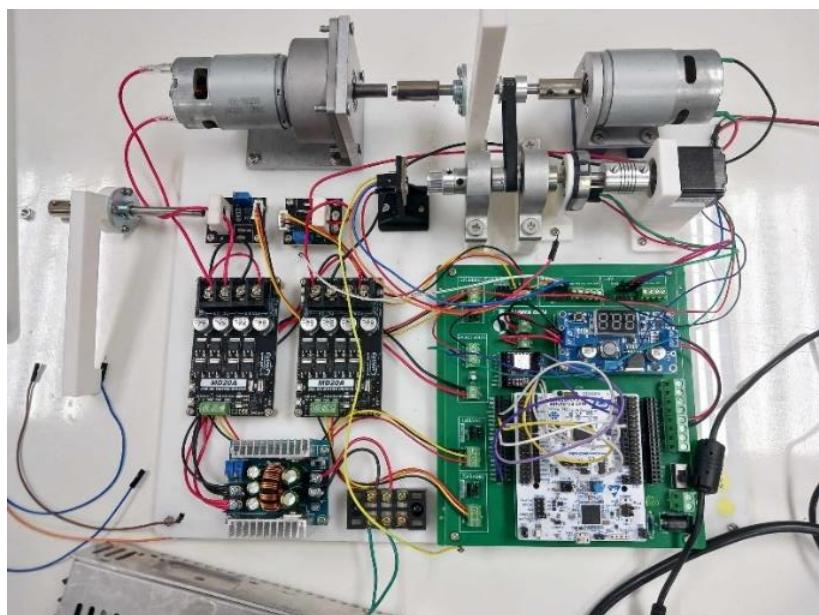
9.2.1 ทำการเสียบสายจ้มเบอร์ดังนี้

9.2.1.1 Incremental Encoder AMT103-V

- 5V ต่อเข้ากับ 3V3 ของ บอร์ด Nucleo STM32G474RE
- GND ต่อเข้ากับ GND ของ บอร์ด Nucleo STM32G474RE
- A ต่อเข้ากับ PA6 ของ บอร์ด Nucleo STM32G474RE
- B ต่อเข้ากับ PA7 ของ บอร์ด Nucleo STM32G474RE

9.2.1.2 Magnetic Encoder

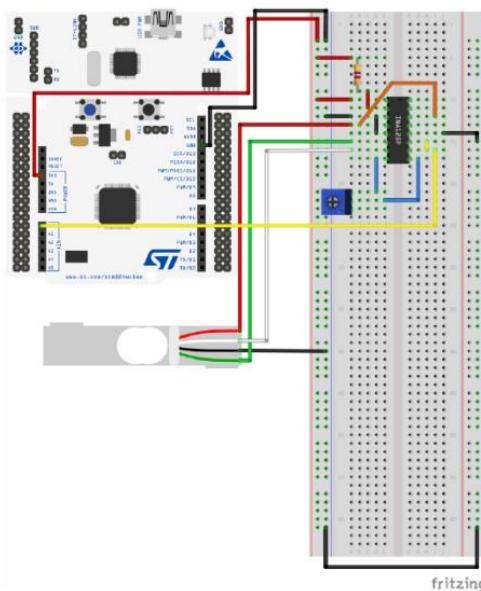
- SCL ต่อเข้ากับ PB8 ของ บอร์ด Nucleo STM32G474RE
- SDA ต่อเข้ากับ PB9 ของ บอร์ด Nucleo STM32G474RE
- DIR ต่อเข้ากับ GND ของ บอร์ด Nucleo STM32G474RE
- VCC ต่อเข้ากับ 3V3 ของ บอร์ด Nucleo STM32G474RE
- GND ต่อเข้ากับ GND ของ บอร์ด Nucleo STM32G474RE



รูปที่ 31 แสดงการต่อวงจรในขั้นตอนที่ 9.2.1

9.2.2 ต่อสายอับโหลดจากบอร์ด Nucleo STM32G474RE เข้าคอมพิวเตอร์เพื่อสั่งการจากโปรแกรม Simulink

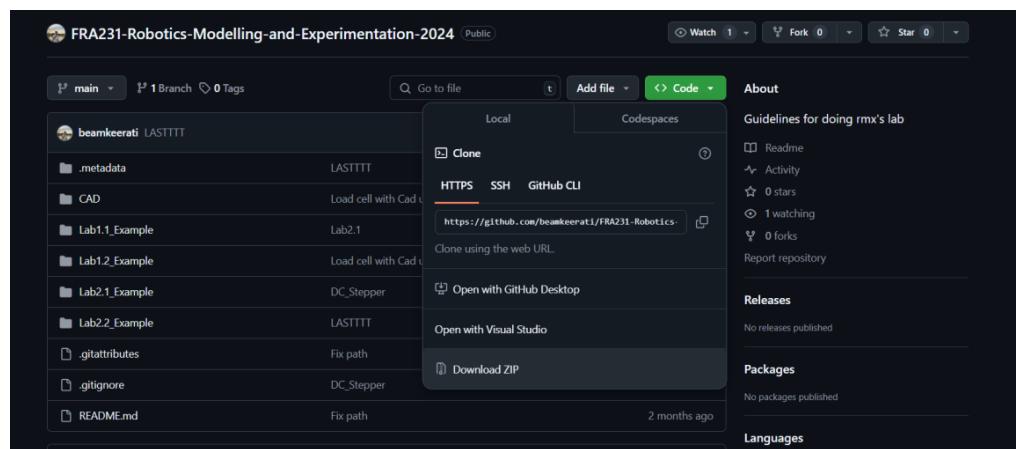
9.2.3 นำสายจัมเปอร์มาเสียบเข้าช่อง 3V3 ของ Nucleo STM32G474RE และขาเข้าของ INA125, เสียบเข้าช่อง Ground ของ Nucleo STM32G474RE และขา Ground ของ INA125, เสียบขาออกของ INA125 และ Port A0 ของ Nucleo STM32G474RE, เสียบสายสีเขียวของ Load Cell ต่อเข้ากับขา 6 ของ INA125, เสียบสายสีแดงของ Load Cell ต่อเข้ากับขา 7 ของ INA125, เสียบสายสีขาวของ Load Cell ต่อเข้ากับขา 4 ของ INA125 และเสียบสายสีดำของ Load Cell ต่อเข้ากับ Ground



รูปที่ 32 แสดง การต่อวงจรการทดลอง Load Cell

9.3 Software setup

9.3.1 โหลดโฟลเดอร์ FRA231-Robotics-Modelling-and-Experimentation-2024-main จาก Github โดยในโฟลเดอร์นี้จะประกอบไปด้วยไฟล์ Simulink ที่ใช้สำหรับควบคุม stepper motor



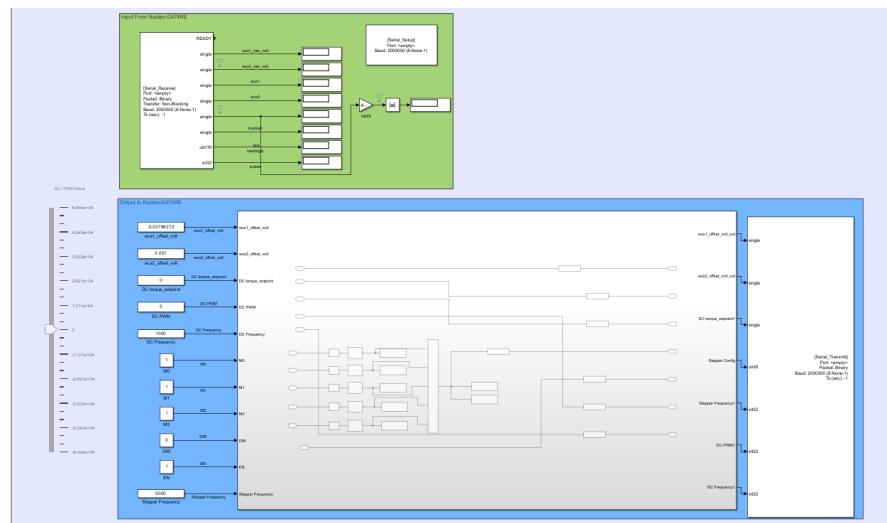
รูปที่ 33 แสดงการดาวน์โหลด FRA231-Robotics-Modelling-and-Experimentation-2024-main

9.3.2 จากนั้นให้ไปที่ตำแหน่งไฟล์ "C:\Users\User\Documents\MATLAB\rmxlab2\FRA231-Robotics-Modeling-and-Experimentation-2024-main\waijung_18.11a\install_waijung.m" และเข้าไปตามลิงค์เพื่อดาวน์โหลด embedding programming ที่จำเป็นสำหรับการรันโปรแกรม Simulink

```
Editor - C:\Users\User\Documents\MATLAB\rmxlab2\FRA231-Robotics-Modelling-and-Experimentation-2024-main\Lab2.1_Example\waijung_18...
+ 4 LinearLoadCell.m schmitt_trigger.m Unshieldmagnetic_matlab.m Waijung 1 Download Link.url install_waijung.m + 1
1 function install_waijung
2
3 clc
4 disp('Pre-Installation')
5 disp(['Host computer: ' computer])
6 osversion = evalc('!ver');
7 osversion(osversion==10) = []; % remove newline characters
8 disp(['Operating System: ' osversion])
9 disp('Checking previous Waijung installation (if any)...')
10 uninstall_waijung % if any previous installation exists
11 current_dir = pwd;
12 try
13     cd('src')
14 catch
15     str = ['Can not find ''src'' folder.' char(10) ...
16             'Make sure that:' char(10) ...
17             '1. You have extracted the downloaded archive (*.7z).' char(10) ...
18             '2. Matlab ''Current Directory'' is the extracted folder.' char(10) ...
19             '3. Run install_waijung.m from the extracted folder and NOT from the archive.' char(10) ...
20             'Abort installation.'];
21     error(str)
22 end
23
24 disp('Checking Matlab...')
25 if (str2double(waijung.getMatlab.year) < 2009)
26     error('Waijung needs Matlab R2009a or later.')
27 else
28     disp(['Matlab release: ' waijung.getMatlab.release '. OK.'])
29 end
```

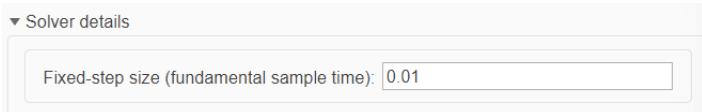
รูปที่ 34 แสดงการดาวน์โหลด wajung

9.3.3 เปิดโปรแกรม Simulink เพื่อออกแบบ State Diagram สำหรับการเก็บค่าที่สนใจ โดยสิ่งที่จะต้องทำก่อนการเก็บค่ากระแสไฟฟ้าที่รัดจากตัว Current sensor คือการ offset ซึ่งวิธีการ offset คือการนำค่า wcs1 ลบด้วย 1.65 และ wcs2 ลบด้วย 1.65 ก็จะได้ค่า offset สำหรับการปั๊มกรอกในช่อง wcs1_offset_volt และ wcs2_offset_volt



รูปที่ 35 แสดง Block Diagram ในโปรแกรม Simulink

9.3.4 เข้าไปยังหน้า Modeling -> Model Setting -> Solver จากนั้นให้เปลี่ยน Fixed step size (fundamental sample time) ให้เป็น 0.01



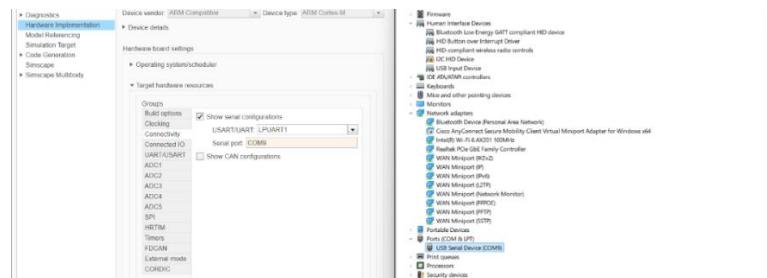
รูปที่ 36 แสดงหน้าการเปลี่ยนค่า Fixed step size (fundamental sample time) ให้เป็น 0.01

9.3.5 ไปที่หน้า Modeling -> Model Setting -> Hardware Implementation จากนั้นให้เปลี่ยน Hardware Board เป็น STM32G4xx Based



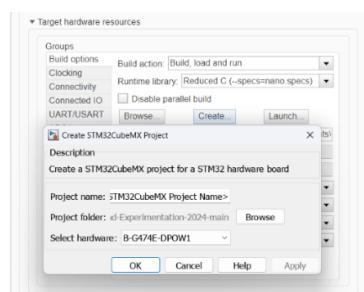
รูปที่ 37 แสดงหน้าการเปลี่ยน Hardware Board เป็น STM32G4xx Based

9.3.6 จากนั้นให้ดูในส่วนของ Target Hardware Resources -> Connectivity ให้เปลี่ยน Serial Port ให้ตรงกับสายอปป์โหลดของ Nucleo STM32G474RE ที่ต่อเข้าคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถดูได้จาก Device Manager



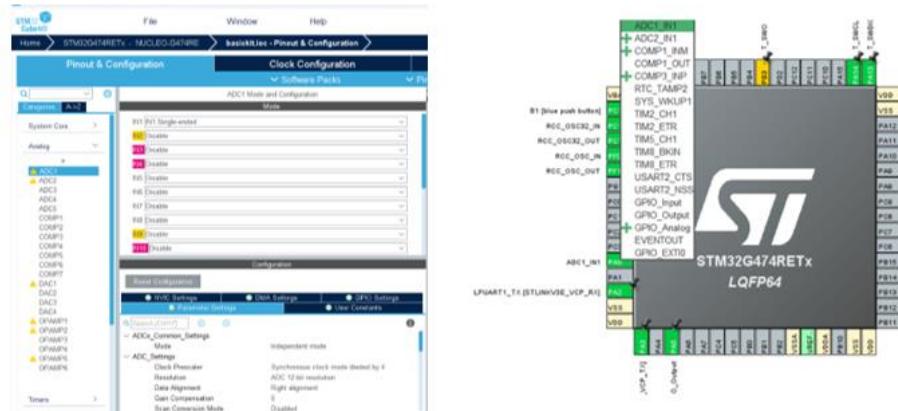
รูปที่ 38 แสดงหน้าการเปลี่ยน Serial port

9.3.7 จากนั้นให้ดูในส่วนของ Target Hardware resources -> Build options ให้กด create เพื่อสร้าง compiler ที่เป็นไฟล์ .ioc



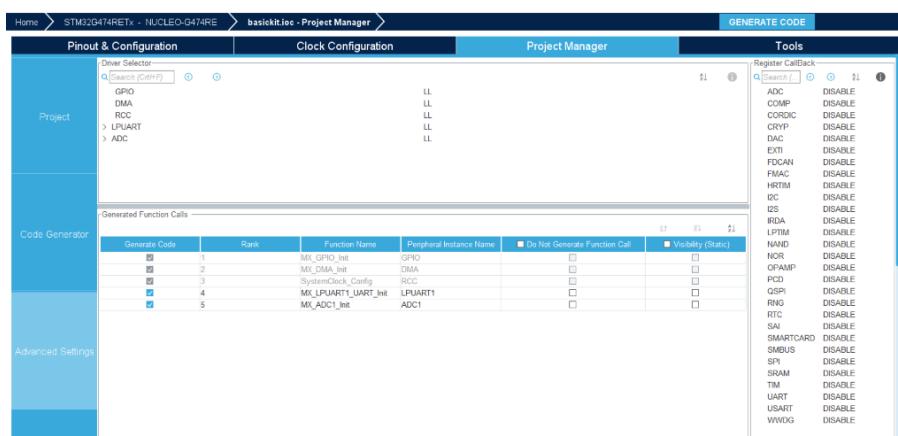
รูปที่ 39 แสดงการกด create เพื่อสร้าง compiler ที่เป็นไฟล์ .ioc

9.3.8 จากนั้นเมื่อ Launch ไฟล์ .ioc แล้ว ให้ทำการเปลี่ยน pin PA0 ให้เป็น ADC1_IN1 และเปลี่ยน ADC mode ของ IN1 ให้เป็นแบบ IN1-Single Ended



รูปที่ 40 แสดงการเปลี่ยน pin PA0 ให้เป็น ADC1_IN1 และเปลี่ยน ADC mode ให้เป็นแบบ IN1-Single Ended

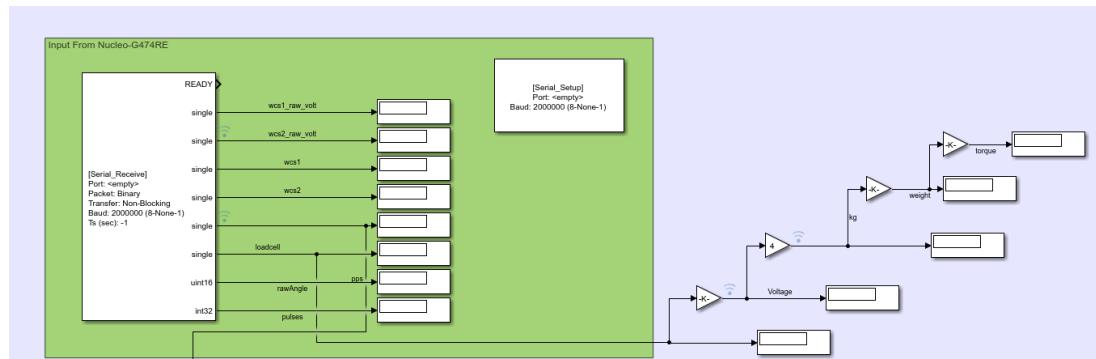
9.3.9 จากนั้นให้เข้าไปที่หน้า Project Manager -> Advanced Settings จากนั้นที่ Driver Selector ให้เป็นค่าของ ADC เป็น LL และที่ Generated Function Calls ให้อาเครื่องหมายถูกออกจาก Column ที่ชื่อว่า Visibility (static) ออกให้หมด และกด Generate Code เพื่ออัปเดตการ Config



รูปที่ 41 แสดงการ config ค่าใน compiler file

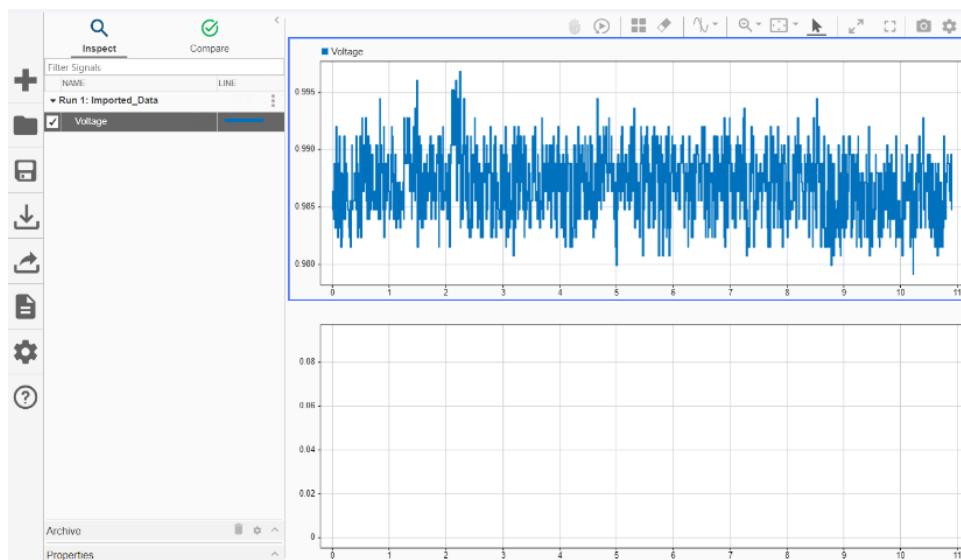
9.3.10 เข้าไปยังหน้า HARDWARE จากนั้นเลือก Connect IO

9.3.11 ให้คลิกซ้าย 2 ครั้งเพื่อ Insert กล่อง Analog to Digital Converter, Gain และ Display และเชื่อมต่อกันดัง รูปที่ 42 โดยหน้า Simulink นี้มี Output จำนวน 3 ค่า ได้แก่ ค่า Analog ที่มีช่วง Resolution ที่ 16 บิต, ค่าแรงดันไฟฟ้าที่แปลงมาจากค่า Analog โดยการคูณกับ 2.5/4095 และค่ามวลในหน่วย SI Unit ซึ่งก็คือหน่วยกิโลกรัมจากการคูณ 4 กับค่าแรงดันไฟฟ้า จากนั้นก็ทำการคูณกับค่าแรงโน้มถ่วง 9.81 เพื่อให้ได้แรงที่กระทำต่อ Loadcell ในหน่วยนิวตัน สุดท้ายทำการคูณระยะของก้าน 3D printing ซึ่งก็คือ 0.1105 เมตร



รูปที่ 42 แสดง Block Logic ในการบันทึกค่าที่อ่านได้จาก INA125

9.3.11 เข้าไปยังหน้า HARDWARE จากนั้นเลือก Data Inspector



รูปที่ 43 แสดงหน้า Data Inspector สำหรับการแสดงผลและ Export ค่า log ที่ได้จาก INA125

9.4 การทดสอบวัดค่าแรงดันขาออกจาก INA125

9.4.1 จากที่เราทราบจากชนิดของ Load Cell ว่าสามารถตอบสนองต่อหนักที่มากที่สุดคือ 10 กิโลกรัม ดังนั้น และแรงดันขาออกจาก INA125 จะไม่เกิน 2.5 โวลต์ ดังนั้นเราจึงสามารถหาค่า R_g ที่เหมาะสมจากหาค่า Gain จากสมการ

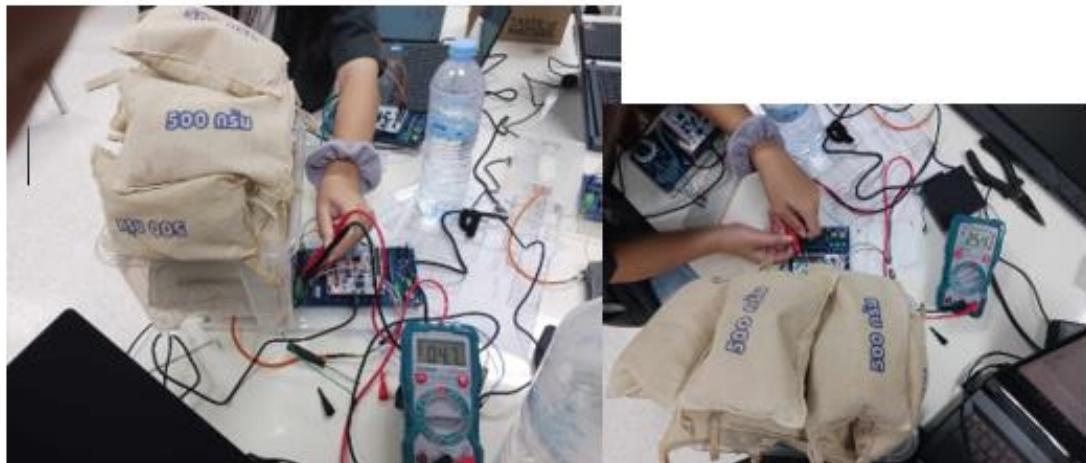
$$V_{out} = A \times (V_{in+} - V_{in-})$$

- โดย V_{out} คือ แรงดันขาออกของ Op-amp ตัวที่หนึ่ง มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)
- V_{in+} คือ แรงดันขาเข้าบวกของวงจร Differential Amplifier มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)
- V_{in-} คือ แรงดันขาเข้าลบของวงจร Differential Amplifier มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)
- A คือ ค่า Gain หรืออัตราขยายของวงจร Differential Amplifier

ซึ่งจากการใช้ Multimeter ในการวัดแรงดันต่อกคร่องระหว่าง V_{in+} และ V_{in-} จะได้ค่าที่ 0.47 mV และวัดแรงดันต่อกคร่องระหว่าง V_{out} และ Ground จะได้ค่าที่ 2.54 V จะได้ว่า

$$2.54 = A \times (4.7 \times 10^{-3})$$

$$A = 540.42553$$



รูปที่ 44 แสดงการวัดแรงดันต่อกคร่องสำหรับการคำนวณหาค่า Gain

เมื่อหาค่าของอัตราขยายได้แล้ว เราจึงนำมาคำนวณหาค่า R_g จากสมการ

$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{2R_2}{R_g}$$

โดย A คือ อัตราขยายของวงจร Differential Amplifier

R_1 คือ ตัวต้านทานที่ 1 มีหน่วยเป็นโอม (Ω)

R_2 คือ ตัวต้านทานที่ 2 มีหน่วยเป็นโอม (Ω)

R_g คือ ตัวต้านทานที่เชื่อมต่อ กับขัลบทอง Op-amp มีหน่วยเป็นโอม (Ω)

จาก Datasheet ของ INA125 ได้ระบุไว้ว่าค่าความต้านทานของ R_1 เท่ากับ $1000 \text{ }\Omega$ และค่าของ R_2 จะเท่ากับ $3000 \text{ }\Omega$ เมื่อนำมาแทนค่าในสมการ จะได้ว่า

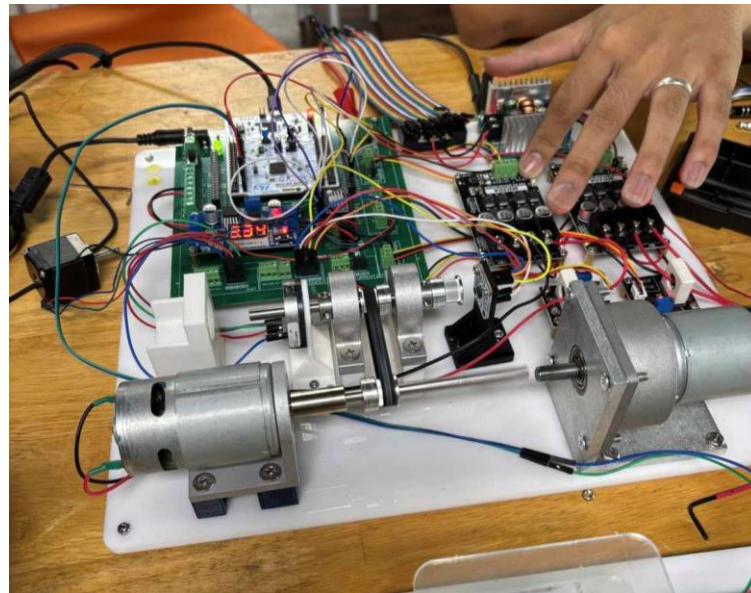
$$540.42553 = 1 + \frac{30000}{10000} + \frac{2 \times 30000}{R_g}$$

$$R_g = 111.8515 \text{ }\Omega$$

ค่าความต้านทาน R_g ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ $111.8515 \text{ }\Omega$

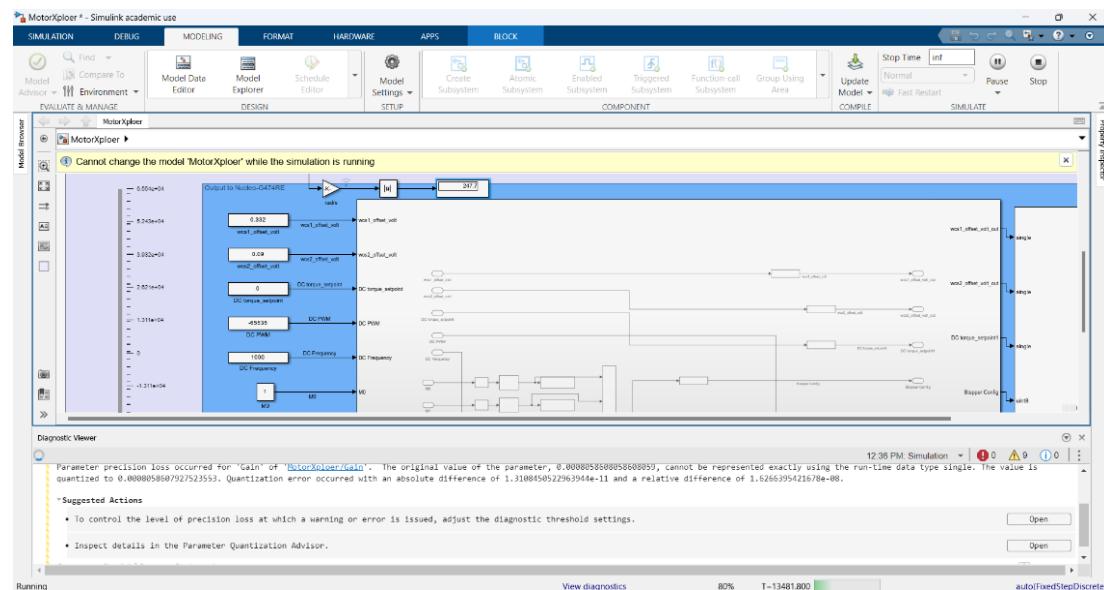
9.5 การเก็บค่า No-Load Current & No-Load Speed

โดยจะทำการเก็บโดยการถอด Coupling ที่เชื่อมระหว่างเพลาของ Motor ที่ติดตั้ง Dynamic Load และเพลาของ Brushed DC Motor เพื่อลดแรงต้านในระบบดังรูปที่ 45

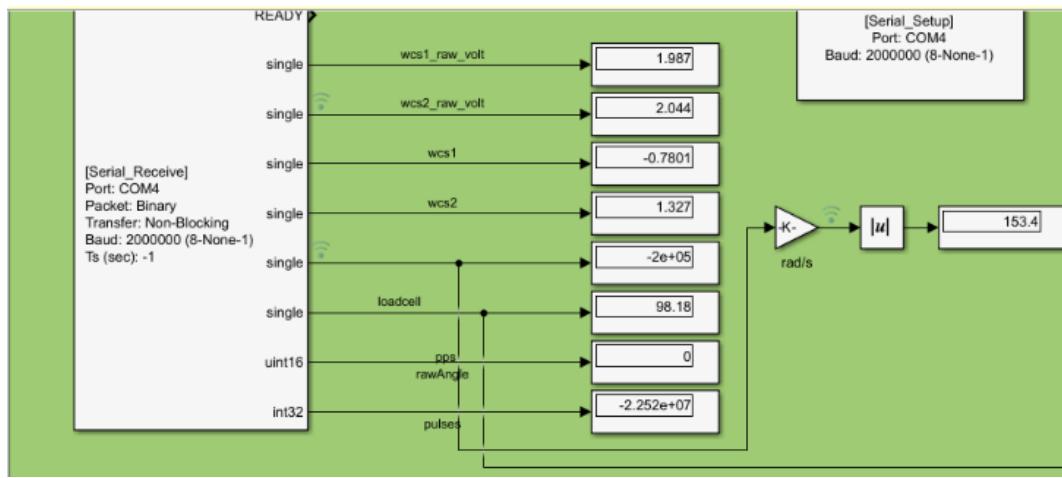


รูปที่ 45 แสดงการ Setup สำหรับการเก็บค่า No-Load Current & No-Load Speed

จากนั้นทำการป้อนค่าความถี่ที่ 1000 เอิร์ท และค่า PWM ที่ 65535 จากนั้นทำการเก็บค่ากระแสและค่าความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์จากโปรแกรม Simulink ดังรูปที่ 46



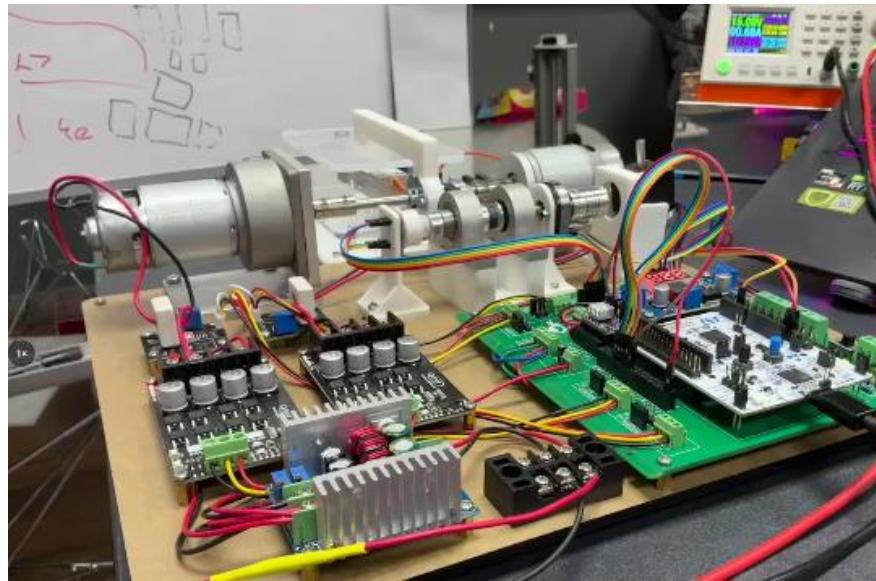
รูปที่ 46 แสดงตัวอย่างการ เก็บค่า No-Load Speed



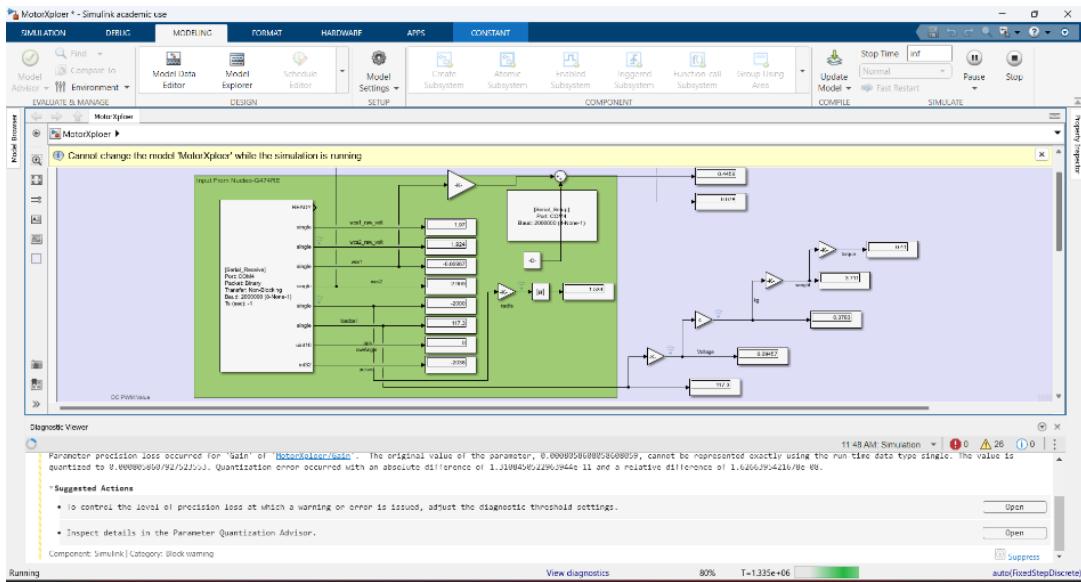
รูปที่ 47 แสดงตัวอย่างการ เก็บค่า No-Load Current

9.6 การเก็บค่า Stall Current & Stall Torque

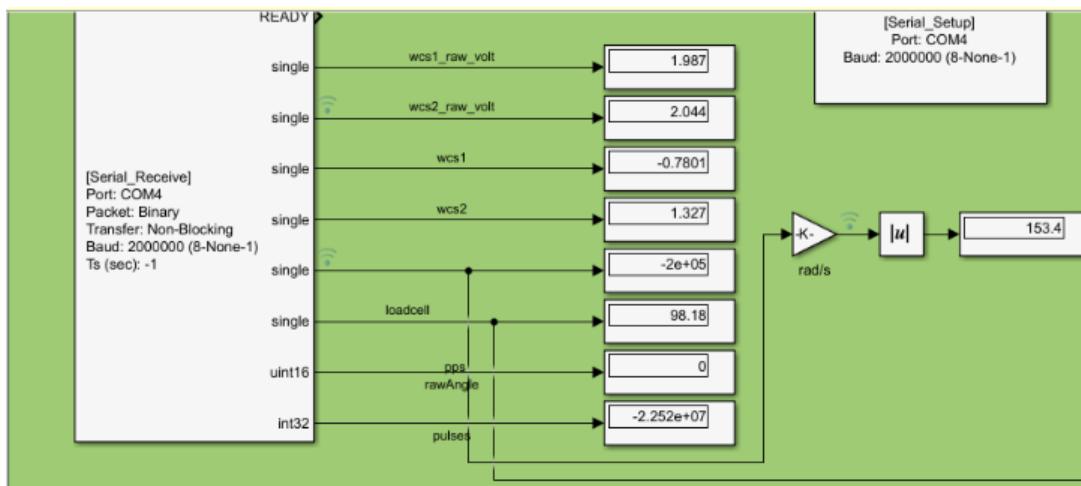
หลังจากที่ Setup Loadcell ได้แล้วนั้น ให้ทำการติดตั้งก้าน 3D Printing สีขาวสำหรับการวัดค่า Stall Torque จากการกดของก้าน 3D Printing ที่ติดตั้งที่เพลาของ Brushed DC Motor จนนั้นให้วัดกระแสไฟฟ้าจากโปรแกรม Simulink



รูปที่ 48 แสดงตัวอย่างการติดตั้งก้าน 3D Printing สีขาว สำหรับการเก็บค่า Stall Torque



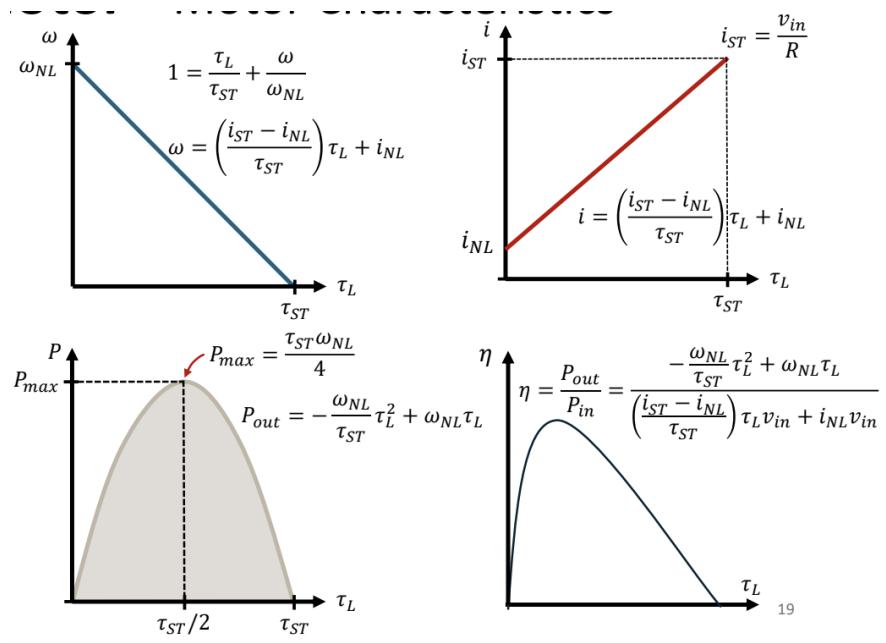
รูปที่ 49 แสดงตัวอย่างการเก็บค่า stall torque



รูปที่ 50 แสดงตัวอย่างการเก็บค่า stall current

9.7 การพล็อตกราฟเพื่อหา Motor Characteristic

นำค่า No-Load Current, No-Load Speed, Stall Torque และ Stall Current ที่ได้จากการทดลอง มาพล็อตกราฟ Motor Characteristics โดยใช้สูตรตามรูปที่ 51



รูปที่ 51 สูตรที่ใช้ในการพล็อตกราฟ Motor Characteristics

10. ผลการทดลอง

10.1 ค่า No-Load Current, No-Load Speed, Stall Torque และ Stall Current ที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 2 ค่า No-Load Current, No-Load Speed, Stall Torque และ Stall Current ที่ได้

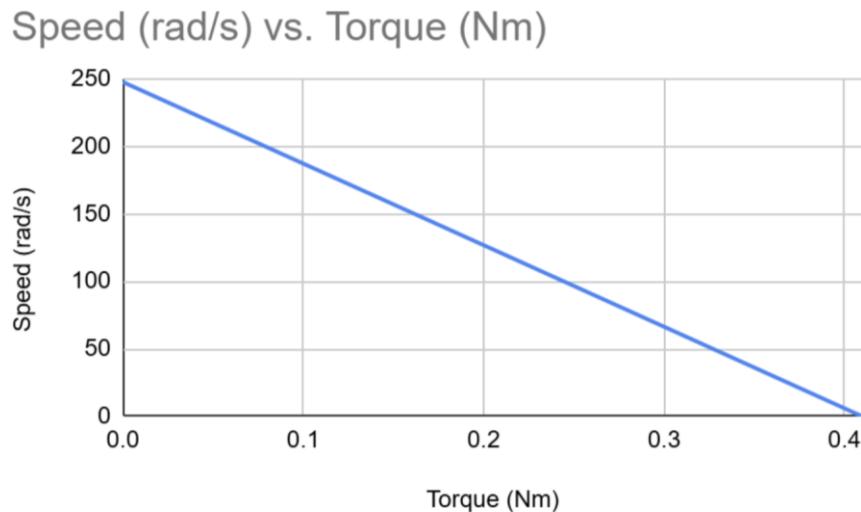
No-Load Current (A)	0.61
No-Load Speed (rad/s)	247.7
Stall Torque (Nm)	0.41
Stall Current (A)	4.21

10.2 Motor's Torque/Speed Curve

จากสูตรในรูปที่ 51 จะเห็นว่า กราฟความเร็วจะใช้ค่า No-Load Speed และ Stall Torque ในการ พล็อตกราฟ โดยจากค่าที่เก็บมาได้ จะได้กราฟอย่างดังนี้

ตารางที่ 3 ค่าที่ใช้ในการพล็อตกราฟ Torque/Speed Curve

Torque (Nm)	Speed (rad/s)
0	247.7
0.41	0



รูปที่ 52 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็ว

10.3 Motor's Torque/Current Curve

จากสูตรในรูปที่ 51 จะได้สูตรของกระแสไฟฟ้ามา ดังนี้

$$i = \left(\frac{i_{ST} - i_{NL}}{\tau_{ST}} \right) \tau_L + i_{NL}$$

กำหนดให้ Torque Load มีค่าตั้งแต่ 0 ถึงค่า Stall Torque และนำค่า Stall Current, No-Load Current, Stall Torque ที่ได้จากการทดลองแทนค่าลงไปในสมการ จะได้กราฟออกมารูปดังนี้

ตารางที่ 4 ค่าที่ใช้ในการplotกราฟ Torque/Current Curve

Torque (Nm)	Current (A)
0.00	0.61
0.05	1.04902439
0.10	1.48804878
0.15	1.927073171
0.20	2.366097561
0.25	2.805121951
0.30	3.244146341

Torque (Nm)	Current (A)
0.35	3.683170732
0.40	4.122195122
0.41	4.21

Figure 53: Current (A) vs. Torque (Nm)

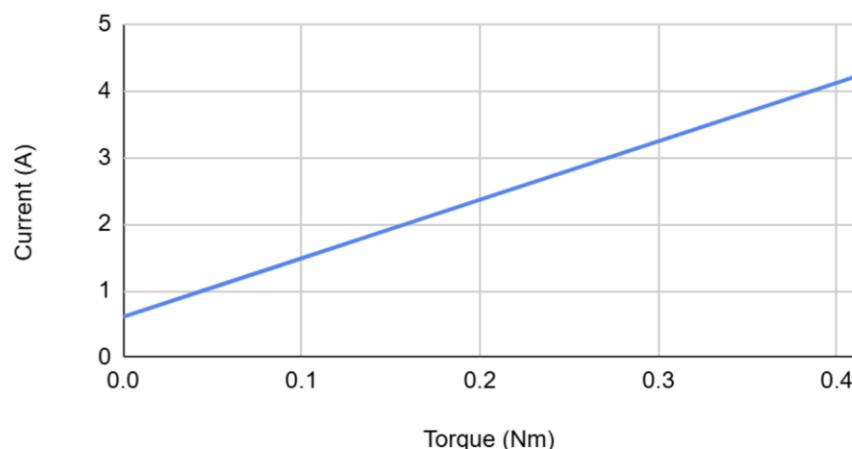


Figure 53 shows the relationship between torque and current, which is approximately linear.

10.4 Power Curve

From the formula in Figure 51, we can derive the power curve equation:

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

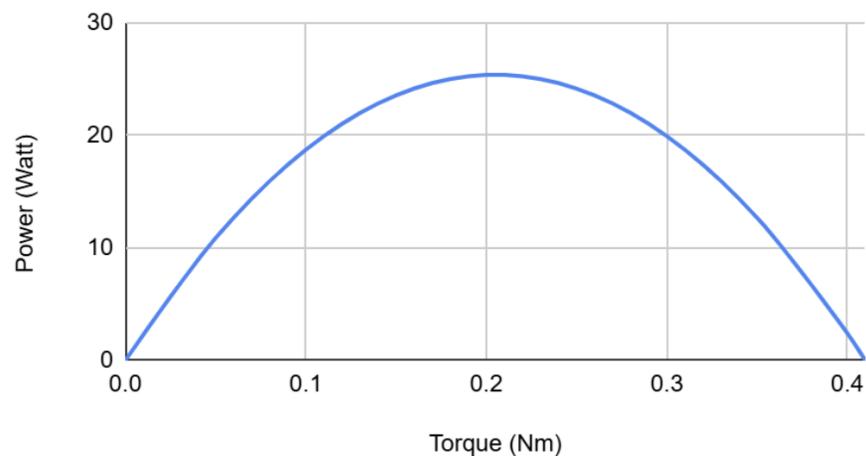
Let's set the torque load τ_L to 0.05 Nm. The stall torque τ_{ST} is 0.35 Nm, the no-load speed ω_{NL} is 100 rad/s, and the stall current I_{ST} is 4.21 A. Substituting these values into the equation, we get:

Figure 54: Power Curve Data

Torque (Nm)	Power (Watt)
0.00	0
0.05	10.87463415

Torque (Nm)	Power (Watt)
0.10	18.72853659
0.15	23.56170732
0.20	25.37414634
0.25	24.16585366
0.30	19.93682927
0.35	12.68707317
0.40	2.416585366
0.41	0

Power (Watt) vs. Torque (Nm)



รูปที่ 54 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกำลัง

10.5 Efficiency

จากสูตรในรูปที่ 51 จะได้สูตรของ Efficiency มา ดังนี้

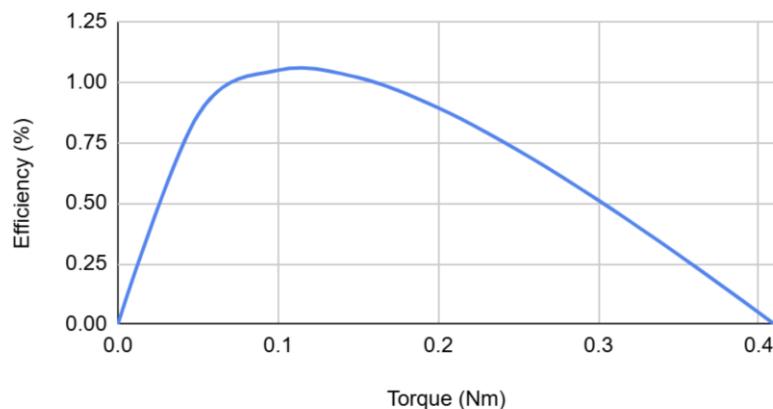
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{-\frac{\omega_{NL}}{\tau_{ST}} \tau_L^2 + \omega_{NL} \tau_L}{\left(\frac{i_{ST} - i_{NL}}{\tau_{ST}}\right) \tau_L v_{in} + i_{NL} v_{in}}$$

กำหนดให้ Torque Load มีค่าตั้งแต่ 0 ถึงค่า Stall Torque และนำค่า Stall Current, No-Load Current, Stall Torque และ No-Load Speed ที่ได้จากการทดลองแทนค่าลงไปในสมการ จะได้กราฟออกมานี้

ตารางที่ 6 ค่าที่ใช้ในการplotกราฟ Efficiency

Torque (Nm)	Efficiency (%)
0.00	0
0.05	0.8638688677
0.10	1.048830793
0.15	1.018890014
0.20	0.8936707556
0.25	0.7179085877
0.30	0.5121231486
0.35	0.2870505265
0.40	0.04885312506
0.41	0

Efficiency (%) vs. Torque (Nm)



รูปที่ 55 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับ Efficiency

11. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองจะเห็นว่า เมื่อแรงบิดที่มีกระทำกับมอเตอร์เปลี่ยนแปลงไป จะส่งผลให้ความเร็ว, กระแสไฟฟ้า, กำลังและประสิทธิภาพของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงไป ดังนี้

11.1 ความเร็วของมอเตอร์แปรผันกับแรงบิดที่มีกระทำกับมอเตอร์ นั่นคือ เมื่อแรงบิดน้อย ความเร็วของมอเตอร์จะมาก แต่เมื่อแรงบิดมาก ความเร็วของมอเตอร์จะน้อย เนื่องจากแรงบิดที่สูงขึ้นจะทำให้มอเตอร์ต้องใช้พลังงานมากขึ้นในการเข้าชานะแรงต้าน ส่งผลให้ความเร็วลดลง

11.2 กระแสไฟฟ้าแปรผันตรงกับแรงบิดที่มีกระทำกับมอเตอร์ นั่นคือ เมื่อแรงบิดน้อย กระแสไฟฟ้าจะน้อย แต่เมื่อแรงบิดมาก กระแสไฟฟ้าจะมาก เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านชุดลวดของมอเตอร์เป็นตัวสร้างแรงบิด ดังนั้น เมื่อแรงบิดมากขึ้น มอเตอร์ก็ต้องการกระแสมากขึ้น

11.3 กำลังของมอเตอร์แปรผันตามแรงบิดในรูปแบบพาราโบลา นั่นคือกำลังจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามแรงบิดจนถึงจุดสูงสุด หลังจากนั้นจะคงค่าอยู่ ลดลง เนื่องจากกำลังเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็ว ที่แรงบิดสูง ความเร็วจะลดลงมาก ส่งผลให้กำลังลดลงตามไปด้วย

11.4 ประสิทธิภาพของมอเตอร์จะขึ้นอยู่กับแรงบิด โดยที่แรงบิดต่ำ การสูญเสียจากการต้านทานภายใน (Copper Loss) จะมีสัดส่วนสูง ทำให้ประสิทธิภาพต่ำ ที่แรงบิดปานกลางจะมีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากการสูญเสียต่ำและการใช้พลังงานอยู่ในจุดที่เหมาะสม และที่แรงบิดสูง กระแสไฟฟ้าจะสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานจากความร้อน ทำให้ประสิทธิภาพลดลง

12. อภิรายผล

จากการทดลองพบว่า Motor Torque Constant (K_m) และ Back-EMF Constant (K_b) มีบทบาทสำคัญในการอธิบายคุณสมบัติการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) โดยทั้งสองค่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับแรงบิด, กระแสไฟฟ้า, ความเร็วรอบ และแรงดันยังอันกลับที่เกิดขึ้นภายใต้มอเตอร์ ดังนี้

12.1 Motor Torque Constant (K_m) เป็นค่าคงที่ที่แสดงถึงความสามารถของมอเตอร์ในการสร้างแรงบิดจากการกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านชุดลวดของมอเตอร์ ตามสมการ:

$$\tau = K_m \cdot i$$

โดยที่แรงบิด (τ) แปรผันตรงกับกระแสไฟฟ้า (i) และค่าคงที่แรงบิด (K_m) จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น จำนวนรอบของชุดลวด, ขนาดของชุดลวด, คุณภาพของวัสดุที่ใช้ และความเข้มของสนามแม่เหล็กฟาร์ หากค่าคงที่แรงบิดมีค่าสูง มอเตอร์จะสามารถสร้างแรงบิดได้มากขึ้นที่กระแสไฟฟ้าต่ำ ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้นในชุดลวด ซึ่งช่วยยืดอายุการใช้งานของมอเตอร์อีกด้วย ค่าคงที่นี้ยังมีบทบาทสำคัญในการออกแบบระบบควบคุมแรงบิด (Torque Control) อย่างแม่นยำ ทำให้สามารถตอบสนองได้รวดเร็วและมีเสถียรภาพในสภาพการทำงานที่หลากหลาย

12.2 Back-EMF Constant (K_b) แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเฉิงมุนของมอเตอร์กับแรงดันย้อนกลับที่เกิดขึ้นขณะมอเตอร์หมุน ตามสมการ:

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

โดยที่แรงดันย้อนกลับ (V_{emf}) จะแปรผันตรงกับความเร็วเฉิงมุน (ω) ของมอเตอร์ ซึ่งเกิดจากการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าขณะชด漉ดหมุนผ่านสนามแม่เหล็ก ค่าคงที่นี้มีบทบาทสำคัญในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ เนื่องจากแรงดันย้อนกลับจะเป็นตัวกำหนดแรงดันสูตรที่ส่งไปยังชด漉ด ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความเร็วของมอเตอร์ นอกจากนี้ ค่าคงที่แรงดันย้อนกลับยังช่วยป้องกันไม่ให้มอเตอร์หมุนเร็วเกินกว่าที่ออกแบบไว้ (Overspeed Protection) และช่วยเพิ่มความเสถียรในการควบคุมความเร็วในงานที่ต้องการความแม่นยำสูง

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า Motor Torque Constant และ Back-EMF Constant เป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดสมรรถนะของ DC Motor โดยทั้งสองค่ามีความสัมพันธ์กันอย่างชัดเจน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบ และควบคุมมอเตอร์เพื่อให้เหมาะสมกับงานที่ต้องการ ทั้งในด้านแรงบิดและการควบคุมความเร็วอย่างมีประสิทธิภาพ

13. ข้อเสนอแนะ

13.1 ปรับปรุงบอร์ดที่ใช้ในการทดลองให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากบอร์ดที่ใช้ในปัจจุบันเกิดข้อผิดพลาด ชั้นหลายอย่าง ทั้งชิ้นส่วนบางชิ้นหลุด เกิด Misalignment ทำให้ต้องถอดและประกอบบอร์ดใหม่อยู่บ่อยครั้ง ซึ่งส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการทำการทดลอง

13.2 เพิ่ม Heat Sink ให้กับมอเตอร์ เนื่องจากในระหว่างทำการทดลอง มอเตอร์เกิดความร้อนมาก ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการทำงานของมอเตอร์

14. เอกสารอ้างอิง

14.1 <https://www.linearmotiontips.com/are-brushed-motors-suitable-for-industrial-applications/>

14.2 Cored Vs Coreless DC Motors – Progressive Automations

14.3 <https://www.fbelec.com/portugal/coreless-dc-motors.html>

14.4 <https://electricalworkbook.com/commutator/>

14.5 <https://www.electricleeasy.com/2014/01/losses-in-dc-machine.html>

14.6 http://www.digitalschool.club/digitalschool/physics2_2_2/physics5/3/item9.php

14.7 <https://digilent.com/reference/learn/fundamentals/circuits/kirchhoffs-voltage-law/start>

14.8 <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/17/5359>

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

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

การทดลองที่ 2 Stepper Motor

1. จุดประสงค์

- 1.1 สามารถอธิบายหลักการทำงานของ Stepper Motor ได้
- 1.2 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของ Speed เมื่อ Frequency ของสัญญาณที่จ่ายเข้า Stepper Motor เปลี่ยนแปลงไป
- 1.3 สามารถอธิบายหลักการทำงานของรูปแบบการไดร์ฟแบบ Full-Step, Half-Step และ Micro-Step ได้ ว่าส่งผลต่อการควบคุมความเร็วและตำแหน่งของ Stepper มอเตอร์อย่างไร
- 1.4 สามารถอธิบายกระบวนการ Signal Conditioning, Signal Processing ทั้งหมดได้ตั้งแต่ต้นจนจบ กระบวนการ ว่าค่าที่อ่านได้จาก Incremental Encoder, Hall Current Sensor มีที่มาอย่างไร อธิบายให้เห็นถึงวิธีคิด และขั้นตอนทั้งหมด ทั้งก่อนและหลัง Calibrate Sensor หรือ วิธีจัดการข้อมูลที่ได้มา จัดการอย่างไร รวมถึงความสามารถ ความสัมพันธ์ระหว่างกระ_FB และไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้จริง กับแรงดันไฟฟ้าที่ออกมายจาก Hall Current Sensor และอธิบาย กระบวนการการ Unwrap ค่า
- 1.5 สามารถเขียนโปรแกรม โดยประยุกต์ใช้ MATLAB และ Simulink ในการสั่งการควบคุมความเร็วของ Stepper Motor ในรูปแบบของความถี่ ความเร็วเชิงมุม และรับค่า ร่วมกับบอร์ด Nucleo STM32G474RE โดยใช้ สัญญาณจาก Incremental Encoder, Hall Current Sensor เป็น Input และ แสดงสัญญาณ Output จากการ Log สัญญาณ และผลเป็นกราฟจาก Data Inspector ใน MATLAB Simulink แสดงให้เห็นว่าสัญญาณ Output แป้งตามสัญญาณ Input แบบ Real Time โดยมี Output เป็นความเร็วเชิงมุม และกระ_FB ในหน่วย SI derived

2. สมมติฐานการทดลอง

- 2.1 ความเร็วของ Stepper Motor แป้งตามความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า
- 2.2 การควบคุมความเร็วของ Stepper Motor จาก Stepper Motor Drive ด้วย Mode ต่าง ๆ จะให้ค่า ความเร็วที่แตกต่างกัน

3. กำหนดตัวแปร

- 3.1 ตัวแปรต้น
 - 3.1.1 ปริมาณความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า
 - 3.1.2 Mode การควบคุม Stepper Motor จาก Stepper Motor Drive
- 3.2 ตัวแปรตาม
 - 3.2.1 ความเร็วเชิงมุมของ Stepper Motor
 - 3.2.2 ความถี่ที่เกิด Loss Step
- 3.3 ตัวแปรควบคุม
 - 3.3.1 ชนิดของ Incremental Encoder ที่ใช้
 - 3.3.2 ชนิดของ Stepper Motor และ Stepper Drive

4. นิยามศัพท์เฉพาะ

4.1 เก็บค่าความเร็วเชิงมุมที่อ่านได้จาก Incremental Encoder หมายถึง การบันทึกค่าความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์โดยใช้สัญญาณที่ได้จาก Incremental Encoder เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หรือควบคุม

4.2 ป้อนความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าที่เราสนใจ หมายถึง การกำหนดและส่งค่าอัตราการเกิดซ้ำของสัญญาณไฟฟ้า (ความถี่) ที่ต้องการเข้าไปในระบบเพื่อควบคุมหรือทดสอบ

4.3 ค่าความถี่ที่ทำให้เกิดการ Loss Step หมายถึง ค่าความถี่สูงสุดของสัญญาณที่ทำให้ Stepper Motor ลุบเสียตำแหน่งหรือก้าว เนื่องจากไม่สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงได้ทัน

5. นิยามเชิงปฏิบัติการ

5.1 Stepper Motor หมายถึง มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่สามารถควบคุมตำแหน่งการหมุนได้อย่างแม่นยำผ่านการส่งคำสั่งเป็นก้าว (Step) โดยแต่ละก้าวมีตำแหน่งที่กำหนดไว้แน่นอน ในการทดลองนี้หมายถึง OUKEDA - Stepper Motor Nema11 (OK28STH32-0674A)

5.2 Speed หมายถึง อัตราการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งหรือการหมุนของวัตถุในหนึ่งหน่วยเวลา มักวัดในหน่วยรอบต่อนาที (RPM)

5.3 Frequency หมายถึง จำนวนรอบหรือเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในหนึ่งวินาที โดยมีหน่วยวัดเป็นเฮิรตซ์ (Hz)

5.4 Full-Step หมายถึง โหมดการขับเคลื่อน Stepper Motor ที่จ่ายพลังงานให้ขาด漉ดสองเฟสพร้อมกันในทุกก้าว เพื่อสร้างแรงบิดสูงสุด

5.5 Half-Step หมายถึง โหมดการขับเคลื่อน Stepper Motor ที่เพิ่มตำแหน่งการหมุนระหว่าง Full Step โดยการขับเคลื่อนโดยลิ้นลักษณะสลับระหว่างเปิด 1 ตัว และเปิด 2 ตัวพร้อมกัน

5.6 Signal Conditioning หมายถึง กระบวนการแปลงหรือปรับสัญญาณไฟฟ้าให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการประมวลผลหรือการวัดค่า

5.7 Signal Processing หมายถึง การประมวลผลข้อมูลจากสัญญาณไฟฟ้าเพื่อดึงข้อมูลที่มีประโยชน์ เช่น การกรองหรือการแปลงค่า

5.8 Incremental Encoder หมายถึง อุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งหรือการหมุนที่ให้สัญญาณพัลส์เพื่อบอกการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งหรือการหมุนในแต่ละขั้น โดยไม่สามารถระบุตำแหน่งเริ่มต้นได้ ต้องอาศัยการนับพัลส์เพื่อคำนวณตำแหน่งหรือมุมการหมุนปัจจุบัน ในการทดลองนี้หมายถึง Incremental Encoder AMT103-V

5.9 Hall Current Sensor หมายถึง อุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้าที่ใช้งานโดยใช้พลาสมอลล์ในการตรวจจับการไหลของกระแสไฟฟ้า

5.10 Calibrate Sensor หมายถึง กระบวนการปรับตั้งค่าเซ็นเซอร์ให้สามารถวัดค่าได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

5.11 Unwrap หมายถึง การปรับค่าที่ได้จากเซ็นเซอร์หรือการวัดให้มีความต่อเนื่อง เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูล

5.12 MATLAB หมายถึง ซอฟต์แวร์ที่ใช้สำหรับการคำนวณเชิงตัวเลข การจำลอง และการพัฒนาอัลกอริทึมที่ชั้นช้อน

5.13 Simulink หมายถึง โปรแกรมที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองระบบด้วยแผนภาพแบบล็อก ช่วยจำลองระบบการทำงานและสามารถเขียนต่อเพื่อ อ่านค่าจากอุปกรณ์หรือได้โดยไม่ต้องเขียนโค้ด

5.14 ความเร็วเชิงมุม หมายถึง อัตราการเปลี่ยนแปลงมุมของวัตถุที่หมุน โดยมีหน่วยวัดเป็นเรเดียนต่อวินาที

5.15 Nucleo STM32G474RE หมายถึง บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น Nucleo STM32G474RE ที่ใช้พัฒนาการควบคุมและอ่านค่าจากเซนเซอร์หรืออุปกรณ์ที่เขียนต่อได้ มาพร้อมพอร์ตเขียนต่อ USB และรองรับการเขียนโปรแกรมผ่านซอฟต์แวร์ต่าง ๆ

5.16 Input หมายถึง ข้อมูลหรือสัญญาณที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบหรืออุปกรณ์เพื่อประมวลผลหรือควบคุม

5.17 Output หมายถึง ข้อมูลหรือสัญญาณที่ส่งออกจากระบบหรืออุปกรณ์หลังจากการประมวลผลหรือการควบคุม

5.18 Log สัญญาณ หมายถึง การบันทึกข้อมูลสัญญาณหรือค่าที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ในระหว่างการทดลองเพื่อใช้ในการวิเคราะห์

5.19 Data Inspector หมายถึง ฟังก์ชันใน MATLAB Simulink ที่ใช้สำหรับแสดงและวิเคราะห์ข้อมูลจากการจำลองหรือการทดลอง

5.20 Real Time หมายถึง การทำงานหรือการประมวลผลที่เกิดขึ้นพร้อมกันกับเวลาจริงโดยไม่มีการหน่วงเวลา

5.21 SI derived หมายถึง หน่วยอนุพันธ์ในระบบหน่วยสากล (SI) ที่เกิดจากการรวมกันของหน่วยพื้นฐาน เช่น นิวตัน (N) หรือจูล (J)

5.22 Stepper Motor Drive หมายถึง วงจรหรืออุปกรณ์ที่ใช้สำหรับควบคุมการทำงานของ Stepper Motor ให้หมุนตามตำแหน่งและความเร็วที่กำหนด ในการทดลองนี้หมายถึง DRV8825

5.23 Mode หมายถึง รูปแบบหรือวิธีการทำงานของอุปกรณ์หรือระบบ เช่น Full-Step Mode, Half-Step Mode และ Micro-Step Mode

5.24 Loss Step หมายถึง การสูญเสียก้าวของ Stepper Motor ที่เกิดจากการไม่สามารถรักษาตำแหน่งที่ถูกต้องได้ เนื่องจากโหลดหรือแรงบิดที่เกินขีดจำกัด

5.25 Brushless DC Motor หมายถึง มอเตอร์กระแสตรงที่ไม่มีแปรงถ่าน ทำงานโดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ในการสลับทิศทางกระแสไฟฟ้า

5.26 Stator หมายถึง ส่วนที่อยู่กับที่ของมอเตอร์ ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กเพื่อกระตุ้นการทำงานของโรเตอร์ (Rotor)

5.27 Concentrated Winding หมายถึง การพันขดลวดที่ม้วนรอบแกนหรือพันของสเตเตอร์ในมอเตอร์โดยตรง แต่ละพันมีขดลวดที่แยกกันอย่างชัดเจน

5.28 Distributed Winding หมายถึง การพันขดลวดที่กระจายไปตามพื้นที่พันของสเตเตอร์ในมอเตอร์ เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่สม่ำเสมอ

5.29 Back-EMF หมายถึง แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในดิลัดของมอเตอร์ขณะหมุน ซึ่งเกิดจากการตัดผ่านสนามแม่เหล็ก

5.30 Rotor หมายถึง ส่วนที่หมุนได้ของมอเตอร์ ทำหน้าที่สร้างแรงบิดและการเคลื่อนที่เมื่อได้รับพลังงานจากสนามแม่เหล็ก

5.31 Torque หมายถึง แรงที่กระทำต่อวัตถุเพื่อทำให้เกิดการหมุนรอบแกน โดยคำนวณจากแรงและระยะห่างจากแกนหมุน

5.32 Angular Steps หมายถึง ระยะการหมุนของ Stepper Motor ที่แบ่งเป็นช่วงเล็ก ๆ แต่ละก้าวสามารถควบคุมได้อย่างแม่นยำ

5.33 feedback หมายถึง กระบวนการส่งสัญญาณผลลัพธ์กลับไปยังระบบเพื่อปรับปรุงหรือควบคุมการทำงาน

5.34 Step Position หมายถึง ตำแหน่งที่ Stepper Motor อยู่ในแต่ละก้าวของการหมุน ซึ่งใช้ในการระบุตำแหน่งที่แม่นยำ

5.35 Step Resolution หมายถึง จำนวนของก้าวที่ Stepper Motor สามารถทำได้ในหนึ่งรอบการหมุน ซึ่งแสดงถึงความละเอียดในการควบคุมตำแหน่ง

5.36 Stepper Motor Nema11 หมายถึง รุ่นของ Stepper Motor ที่มีขนาดเฟรมแบบ Nema11 ซึ่งหมาย味着สำหรับงานที่ต้องการความแม่นยำสูงในพื้นที่จำกัด

5.37 Toothed Electromagnets หมายถึง แม่เหล็กไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นฟัน ซึ่งช่วยในการจับตำแหน่งของโรเตอร์ใน Stepper Motor

5.38 Microcontroller หมายถึง หน่วยประมวลผลขนาดเล็กที่รวมฟังก์ชันการทำงานหลายอย่างไว้ในชิปเดียว ใช้ควบคุมระบบอิเล็กทรอนิกส์ ในการทดลองนี้หมายถึง Nucleo STM32G474RE

5.39 Step หมายถึง การเคลื่อนที่หนึ่งก้าวของ Stepper Motor ซึ่งแสดงถึงตำแหน่งที่มอเตอร์เปลี่ยนแปลง

5.40 Permanent Magnet Stepper motor หมายถึง Stepper Motor ที่ใช้แม่เหล็กถาวรในโรเตอร์ เพื่อสร้างแรงบิดโดยการโต้ตอบกับสนามแม่เหล็กจากสเตเตอร์

5.41 Power-off Detent หมายถึง คุณสมบัติของ Stepper Motor ที่สามารถรักษาตำแหน่งของโรเตอร์ได้เมื่อไม่มีพลังงานจ่าย

5.42 Position Readout หมายถึง การแสดงผลตำแหน่งของ Stepper Motor ในรูปแบบข้อมูลหรือการแสดงผลดิจิทัล

5.43 Paper Printers หมายถึง เครื่องพิมพ์กระดาษที่ใช้ Stepper Motor ในการควบคุมตำแหน่งและการเคลื่อนที่ของหัวพิมพ์

5.44 3D Printers หมายถึง เครื่องพิมพ์ที่สร้างวัตถุสามมิติ โดยใช้ Stepper Motor ในการควบคุมตำแหน่งของหัวฉีดหรือแกนเครื่อง

5.45 Robotics หมายถึง สาขาที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและพัฒนาหุ่นยนต์ ซึ่งมักใช้ Stepper Motor ในการเคลื่อนที่และการควบคุมตำแหน่ง

5.46 Variables Reluctance Stepper Motor หมายถึง Stepper Motor ที่ใช้หลักการของการเปลี่ยนแปลงความเหนี่ยวแน่นในโรเตอร์ เพื่อสร้างแรงบิดและการควบคุมตำแหน่ง

5.47 Soft Iron Rotor หมายถึง โรเตอร์ที่ทำจากเหล็กอ่อน ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างแรงบิดใน Stepper Motor

5.48 Reluctance หมายถึง คุณสมบัติของวัสดุที่ต่อต้านการเกิดสนามแม่เหล็ก โดยใช้ในการออกแบบมอเตอร์ให้เหมาะสมกับการใช้งาน

5.49 Hybrid Synchronous Stepper motor หมายถึง Stepper Motor ที่รวมคุณสมบัติของ Permanent Magnet Stepper Motor และ Variable Reluctance Stepper Motor เพื่อเพิ่มความแม่นยำและแรงบิด

5.50 Permanent Magnet หมายถึง แม่เหล็กที่สร้างสนามแม่เหล็กทราบโดยไม่ต้องการแหล่งพลังงานภายนอก

5.51 Dimension หมายถึง ขนาดหรือลักษณะทางกายภาพของมอเตอร์หรืออุปกรณ์ เช่น เส้นผ่านศูนย์กลางและความยาว

5.52 Motor Characteristic หมายถึง คุณสมบัติหรือพฤติกรรมที่แสดงถึงการทำงานของมอเตอร์ เช่น แรงบิดความเร็ว และกำลังไฟฟ้า

5.53 Motor Specification หมายถึง รายละเอียดหรือค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดคุณสมบัติและขอบเขตการทำงานของมอเตอร์ เช่น แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

5.54 Datasheet หมายถึง เอกสารที่ให้ข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์ เช่น มอเตอร์หรือวงจร เพื่อช่วยในการใช้งานและการออกแบบ

5.55 DRV8825 หมายถึง ชิปขั้นบasse มอเตอร์ที่ใช้ควบคุม Stepper Motor โดยรองรับโหมดการขับเคลื่อนหลายแบบ เช่น Full-Step และ Microstepping

5.56 IC หมายถึง วงจรรวมที่บรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไว้ในชิปเดียว ใช้ในงานควบคุมและประมวลผล

5.57 Full-Step mode หมายถึง โหมดการทำงานของ Stepper Motor ที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้ขาด漉ดสองเฟสพร้อมกันเพื่อสร้างแรงบิดสูงสุด

5.58 Half-Step Mode หมายถึง โหมดการขับเคลื่อน Stepper Motor ที่เพิ่มตำแหน่งการหมุนระหว่าง Full Step เพื่อลดการกระแสเพื่อมและเพิ่มความละเอียด

5.59 Micro-Step Mode หมายถึง โหมดการขับเคลื่อน Stepper Motor ที่แบ่งตำแหน่งการหมุนออกเป็นช่วงเล็ก ๆ เพื่อเพิ่มความละเอียดในการควบคุม

5.60 Unipolar Stepper Motors หมายถึง Stepper Motor ที่ใช้ขาด漉ดหลายชุดซึ่งแต่ละชุดมีจุดกึ่งกลางที่สามารถเปลี่ยนทิศทางกระแสได้ง่าย

5.61 Bipolar Stepper Motors หมายถึง Stepper Motor ที่ใช้ขาด漉ดสองชุดและต้องการวงจร H-Bridge สำหรับการเปลี่ยนทิศทางกระแสไฟฟ้าเพื่อควบคุมการหมุน

5.62 วงจร H-Bridge หมายถึง วงจรขั้บมอเตอร์ที่ใช้ทรานซิสสเตอร์หรือสวิตซ์ไฟฟ้าสี่ตัวเรียงในรูปแบบคล้ายตัวอักษร H เพื่อควบคุมทิศทางและความเร็วของมอเตอร์

5.63 Logic หมายถึง ชุดคำสั่งหรือกฎเกณฑ์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือวงจร เช่น การสลับสถานะของสวิตซ์

5.64 Library หมายถึง ชุดของฟังก์ชันหรือโค้ดที่เก็บไว้เพื่อใช้งานสำหรับการพัฒนาซอฟต์แวร์หรือระบบควบคุม

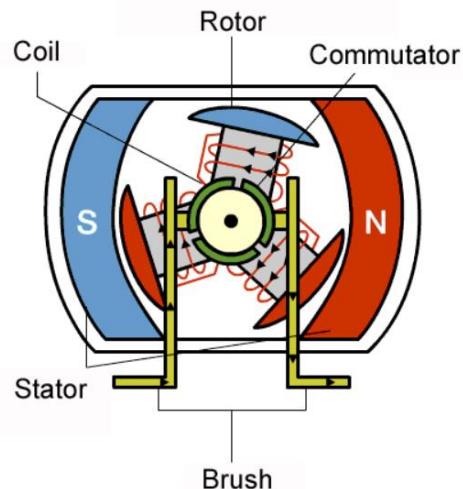
5.65 MotorXplorer หมายถึง บอร์ดที่ประกอบไปด้วยฐานที่สามารถบรรจุบอร์ดควบคุม, Stepper motor และ 3D-Print part ที่ใช้สำหรับการตรวจสอบ ทดสอบ และวิเคราะห์การทำงานของมอเตอร์ โดยรองรับการวัดค่าต่างๆ เช่น กระแส แรงดัน ความเร็วรอบ และแรงบิด

5.66 สายจัมเปอร์ หมายถึง สายไฟขนาดเล็กที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างขั้วหรือจุดต่างๆ บนบอร์ดทดลองของวงจรไฟฟ้า

6. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

6.1 Brushless DC Motor

Brushless DC Motor เป็นมอเตอร์ที่ไม่ใช้แปรงถ่าน โดยแปรงถ่านจะนำกระแสไฟฟ้าผ่านคอมมิวเตเตอร์เข้าสู่ชุดลวดที่อยู่บนโรเตอร์ แต่สำหรับมอเตอร์แบบแปรงถ่าน กระแสไฟฟ้าจะไม่ถูกส่งไปยังชุดลวดบนโรเตอร์ เนื่องจากชุดลวดไม่ได้อยู่บนโรเตอร์นั้นเอง โดยโรเตอร์ของมอเตอร์แบบนี้จะเป็นแม่เหล็กถาวร ในขณะที่ชุดลวดจะถูกติดตั้งอยู่กับที่บันสเตเตอร์ (Stator) และเนื่องจากชุดลวดไม่ได้เคลื่อนที่ จึงไม่จำเป็นต้องใช้แปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์ เนื่องจากโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร จึงไม่ต้องการกระแสไฟฟ้า ซึ่งช่วยลดความจำเป็นในการใช้แปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์ กระแสไฟฟ้าสำหรับชุดลวดที่อยู่กับที่จะถูกควบคุมจากภายนอก



รูปที่ 56 Brushless DC Motor

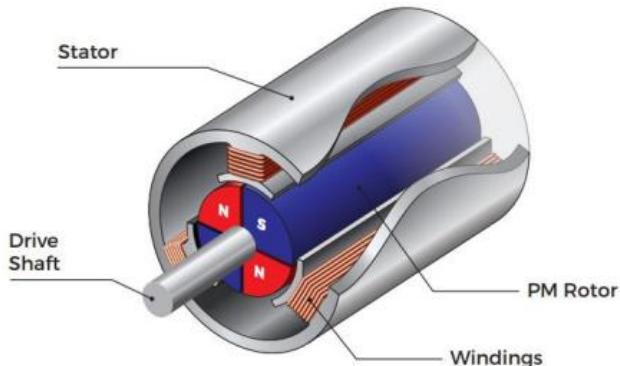
ที่มา : <https://th.twmotor.net/info/how-brushless-dc-motors-work-97376907.html>

6.1.1 Stator

สเตเตอเร่อร์เป็นส่วนที่บรรจุชุดลวดของมอเตอร์ ซึ่งแตกต่างจากมอเตอร์ DC แบบมีแปรง (Brushed DC Motor) ที่ขดลวดอยู่ในโรเตอร์ ชุดลวดจะถูกพันและติดตั้งกับสเตเตอเร่อร์ โดยสายไฟจะพันรอบแขวนหรือฟันของเหล็กแผ่นบางที่ประกอบกันเป็นสเตเตอเร่อร์ ซึ่งทำให้เกิดชุดลวดสเตเตอเร่อร์ ชุดลวดเหล่านี้สามารถจัดเรียงได้ในสองรูปแบบคือ Concentrated winding และ Distributed winding ซึ่งทั้งสองแบบมีความแตกต่างกันในวิธีการพันชุดลวดรอบสเตเตอเร่อร์และรูปคลื่นของ Back-EMF ที่เกิดขึ้น

6.1.2 Rotor

โรเตอร์ประกอบด้วยเพลาหรือแกนมอเตอร์และแม่เหล็กถาวรที่มีขั้วแม่เหล็กสลับกัน (Alternating Magnetic Poles) จำนวนขั้วแม่เหล็กในโรเตอร์ขึ้นอยู่กับการใช้งาน การมีขั้วแม่เหล็กมากขึ้นสามารถช่วยเพิ่มแรงบิด (Torque) แต่จะลดความเร็วสูงสุดของมอเตอร์



รูปที่ 57 โครงสร้างของ Brushless DC Motor

ที่มา : <https://www.diodes.com/assets/Uploads/AN1164-BLDC-Motors.pdf>

6.2 Stepper Motor

Stepper Motor หรือที่เรียกอีกอย่างว่า Step Motor หรือ Stepping Motor เป็น Brushless DC Motor ที่หมุนเป็นลำดับของมุมเล็ก ๆ อย่างต่อเนื่อง (Angular Steps) โดยสามารถตั้งให้หยุดที่ตำแหน่งก้าวได้ ๆ ได้โดยไม่ต้องใช้เซ็นเซอร์ตำแหน่งสำหรับการ Feedback นอกจากนี้ Step Position ยังสามารถเพิ่มหรือลดได้อย่างรวดเร็วเพื่อสร้างการหมุนอย่างต่อเนื่อง หรือสามารถตั้งคำสั่งใหม่มอเตอร์คงตำแหน่งไว้ที่ก้าวหนึ่งได้อย่างมั่นคง มอเตอร์เหล่านี้มีความหลากหลายในด้านขนาด ความเร็ว Step Resolution และ Torque ทางคณะผู้จัดทำได้ใช้มอเตอร์ OUKEDA - Stepper Motor Nema11 (OK28STH32-0674A)



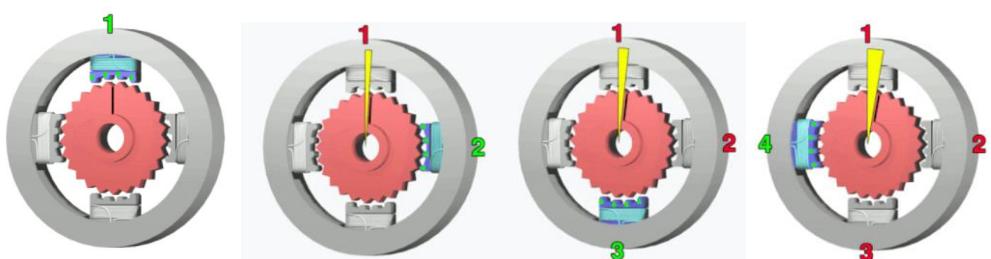
รูปที่ 58 Stepper Motor

ที่มา : OUKEDA - Stepper Motor (Nema11) แรงบิด 5.88 N.cm 0.8A (OK28STH32-0674A) - ZoneMaker |
จำหน่ายอุปกรณ์ 3D Printer, CNC, หุ่นยนต์, Arduino, และเครื่องมืองาน Maker

6.2.1 หลักการทำงานของ Stepper Motor

โดย Stepper Motor ประกอบด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า "มีฟัน" (Toothed Electromagnets) หลายตัวที่จัดเรียงอยู่รอบ ๆ สเตเตอร์ (Stator) ซึ่งล้อมรอบโรเตอร์ (Rotor) ที่มีลักษณะเหมือนฟันเพื่อรองโลหะ แม่เหล็กไฟฟ้าเหล่านี้ได้รับพลังงานจากวงจรขับภายในหรือไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) และในเบื้องต้น การทำงานของ Stepper Motor มีขั้นการทำงานดังนี้

1. แม่เหล็กไฟฟ้าตัวหนึ่งถูกจ่ายไฟก่อน ซึ่งจะดึงฟันของเพื่อบนโรเตอร์เข้ามาให้ตรงกับตำแหน่งของแม่เหล็กไฟฟ้า
2. เมื่อฟันเพื่อรองตรงกับแม่เหล็กไฟฟ้าตัวแรกแล้ว ฟันเพื่อจะอยู่ในตำแหน่งที่เล็กน้อยห่างจากแม่เหล็กไฟฟ้าตัวถัดไป
3. เมื่อจ่ายไฟให้กับแม่เหล็กไฟฟ้าตัวถัดไปและปิดพลังงานของตัวแรก โรเตอร์จะหมุนไปเล็กน้อยเพื่อให้ฟันเพื่อรองตรงกับแม่เหล็กไฟฟ้าตัวถัดไป
4. กระบวนการนี้ถูกทำซ้ำ โดยการหมุนเล็ก ๆ เหล่านี้เรียกว่า Step และจำนวนก้าวทั้งหมดในหนึ่งรอบเต็มจะเป็นจำนวนเต็ม

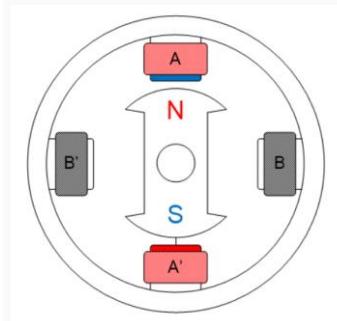


รูปที่ 59 ขั้นตอนการทำงานของ Stepper Motor
ที่มา : https://en.wikipedia.org/wiki/Stepper_motor

6.2.2 ประเภทของ Stepper Motor

6.2.2.1 Permanent Magnet Stepper Motor

มอเตอร์แบบ Permanent Magnet Stepper Motor มีวงจรสลับกระแสต่อที่เรียบง่าย มีแรงหน่วงตำแหน่งเมื่อปิดไฟ (Power-off Detent) และไม่มีระบบอ่านค่าตำแหน่ง (Position Readout) คุณสมบัติเหล่านี้เหมาะสมสำหรับการใช้งาน เช่น เครื่องพิมพ์กระดาษ (Paper Printers) เครื่องพิมพ์ 3 มิติ (3D Printers) และหุ่นยนต์ (Robotics) โดยในแอปพลิเคชันเหล่านี้ การติดตามตำแหน่งจะทำโดยการนับจำนวนก้าว (Steps) ที่มอเตอร์ได้รับคำสั่งให้หมุน

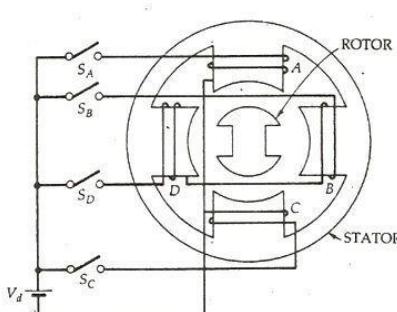


รูปที่ 60 Stepper Motor แบบ Permanent Magnet

ที่มา : UNIT II BUILDING BLOCKS OF A ROBOT.pptx

6.2.2.2 Variables Reluctance Stepper motor

Variable Reluctance มีโรเตอร์ที่ทำจาก Soft Iron Rotor และทำงานตามหลักการที่ว่าค่า Reluctance ต่ำสุดจะเกิดขึ้นเมื่อช่องว่างระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์น้อยที่สุด ดังนั้นปลายของโรเตอร์จะถูกดึงดูดไปยังขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ มอเตอร์แบบ Variable Reluctance จะมีแรงหน่วงตำแหน่ง เมื่อมีการจ่ายไฟ แต่จะไม่มีแรงหน่วงเมื่อตัดไฟออก

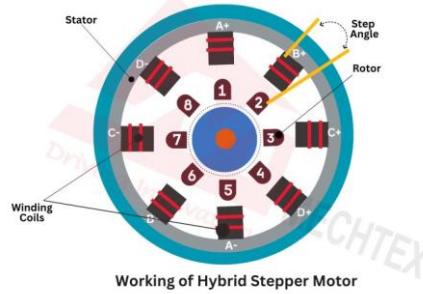


รูปที่ 61 Stepper Motor แบบ Variables Reluctance

ที่มา : <https://circuitglobe.com/variable-reluctance-stepper-motor.html>

6.2.2.3 Hybrid Synchronous Stepper Motor

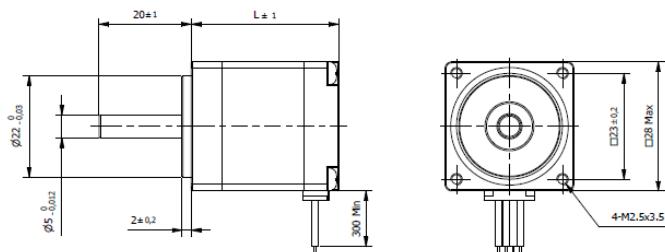
Hybrid Synchronous Stepper Motor เป็นการผสมผสานระหว่างมอเตอร์แบบ Permanent Magnet และแบบ Variable Reluctance เพื่อเพิ่มพลังงานสูงสุดในขนาดที่กะทัดรัด



รูปที่ 62 Stepper Motor แบบ Hybrid Synchronous Stepper Motor
ที่มา : <https://mechtex.com/blog/what-is-a-hybrid-stepper-motor>

6.2.3 Stepper Motor Characteristics

โดยขนาด Dimension ของ OUKEDA - Stepper Motor Nema11 (OK28STH32-0674A)
จะเป็นไปตามลักษณะตามรูปที่ 63 และมี stepper motor characteristic ดังรูปที่ 64



รูปที่ 63 Dimension ของ OUKEDA - Stepper Motor Nema11 (OK28STH32-0674A)
ที่มา : 28SH32-0674A Hybrid Stepper motors | Delta Line

Characteristics	
Item	
Step angle	1,8°
Step angle Accuracy	±5%
Insulation Class	B
Protection Class	IP30
Ambient Temperature	-20°C to +50°C
Max. Temp. Rise (rated current, 2-phase on)	80°C
Max. Shaft Radial play (450g load)	0,02mm
Max. Shaft Axial play (450g load)	0,08mm
Max. Radial Force (5mm from front flange)	28N
Max Axial Force	7N
Dielectric Strength (for 1 sec.)	600 VAC
Insulation Resistance (min. 500 VDC)	100 Mohm

รูปที่ 64 stepper motor characteristic ของ OUKEDA - Stepper Motor Nema11
ที่มา : 28SH32-0674A Hybrid Stepper motors | Delta Line

6.2.4 Stepper Motor Specification

Stepper Motor Specification คือข้อมูลทางเทคนิคที่แสดงคุณสมบัติและความสามารถของ Stepper Motor เพื่อช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถเลือกมอเตอร์ที่เหมาะสมกับความต้องการของป้องเจ็กต์หรือการใช้งานเฉพาะด้าน ข้อมูลเหล่านี้มักระบุในเอกสาร Datasheet ของมอเตอร์ โดยมอเตอร์รุ่น OUKEDA - Stepper Motor Nema11 (OK28STH32-0674A) จะมีรายละเอียดดังนี้

Specification		Model	...0956A	...0674A
1	Rated Voltage	V	2,66	3,8
2	Current/Phase	A	0,95	0,67
3	Resistance/Phase	Ω	2,8	5,6
4	Inductance/Phase	mH	0,8	3,4
5	Holding Torque	Nm	0,043	0,06
6	Rotor Inertia	gcm ²	9	9
7	Detent Torque	Nm	0,005	0,005
8	n° of Leads		6	4
9	Length (L)	mm	32	32
10	Weight	Kg	0,11	0,11

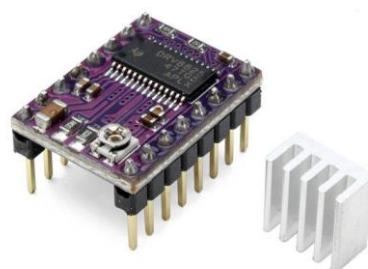
รูปที่ 65 stepper motor specification ของ OUKEDA - Stepper Motor Nema11 (OK28STH32-0674A)
ที่มา : 28SH32-0674A Hybrid Stepper motors | Delta Line

6.2.5 Loss Step

Loss Step หมายถึงสถานการณ์ที่มอเตอร์ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งก้าว (Step) ที่ต้องการได้ตามคำสั่ง ซึ่งส่งผลให้ตำแหน่งของโรเตอร์ไม่ตรงกับตำแหน่งที่ควรจะเป็นในระบบควบคุม

6.3 Stepper Driver

ความหมายโดยทั่วไปของ Motor Driver คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรือโมดูลที่ใช้ควบคุมและจัดการการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า โดยทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์หรือระบบควบคุมอื่น ๆ กับตัวมอเตอร์ ช่วยให้สามารถควบคุมความเร็ว ทิศทาง และพารามิเตอร์อื่น ๆ ของมอเตอร์ได้อย่างแม่นยำ Motor driver ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในหลายแอปพลิเคชัน เช่น หุ่นยนต์ ระบบอัตโนมัติ ระบบยานยนต์ และเครื่องจักรในอุตสาหกรรม โดยในการทดลองนี้ได้เลือกใช้ DRV8825

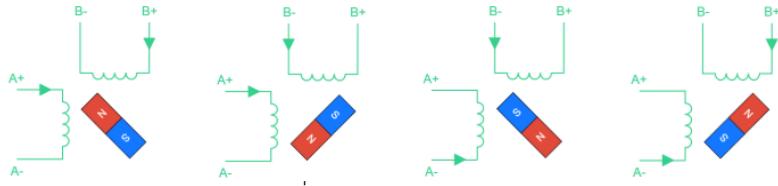


รูปที่ 66 DRV8825
ที่มา : <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8825.pdf>

6.3.1 Stepper Mode

โดยในการควบคุมมอเตอร์ด้วย IC ชนิดนี้นั้นจะมี mode การควบคุมหลัก ๆ ดังนี้

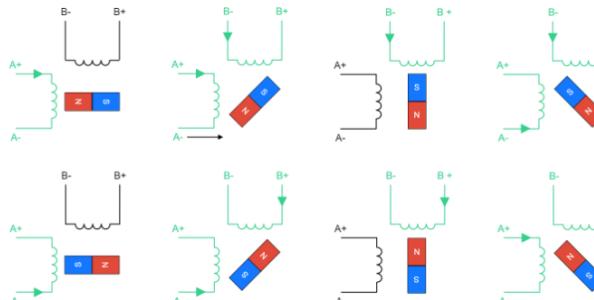
1. Full-Step Mode : ในโหมดนี้ ขดลวดสองเฟสจะถูกจ่ายพลังงานพร้อมกันเสมอ ตามรูปที่ 67 แสดงลำดับของก้าวในโหมดการขับเคลื่อนนี้ โดยในโหมดนี้ มอเตอร์สามารถสร้างแรงบิดได้สูงกว่า เนื่องจากมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมอเตอร์มากขึ้น ส่งผลให้สามารถแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีความเข้มแข็งกว่า



รูปที่ 67 Full-Step Mode

ที่มา : All you need to know about Stepper Motors! | by Binal Weerasena | Medium

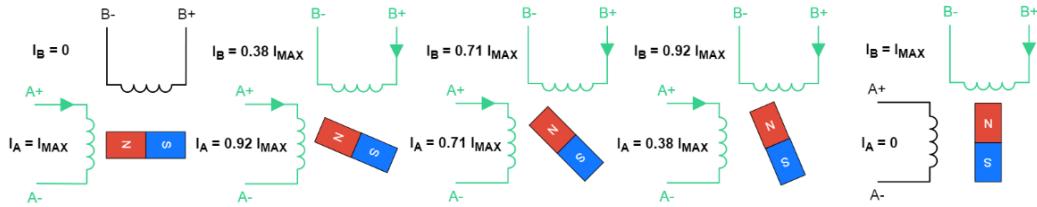
2. Half-Step Mode : เป็นโหมดหนึ่งของการขับเคลื่อน Stepper Motor ที่ทำให้มอเตอร์หมุนได้ในตำแหน่งที่มีความละเอียดมากกว่า Full-Step Mode โดยในโหมดนี้จะมีการขับเคลื่อนครอยล์ของมอเตอร์ในลักษณะที่สลับกันระหว่างการเปิดครอยล์ 1 ตัว และเปิดครอยล์ 2 ตัวพร้อมกัน ซึ่งจะทำให้เกิดตำแหน่งการหมุนที่อยู่ระหว่างตำแหน่งใน Full-Step Mode ได้



รูปที่ 68 Half-Step Mode

ที่มา : All you need to know about Stepper Motors! | by Binal Weerasena | Medium

3. Microstepping : ในโหมดนี้เป็นการพัฒนาเพิ่มเติมจาก Half-Step Mode เพื่อช่วยลดขนาดก้าวได้เล็กลงยิ่งกว่าเดิมและสามารถรักษาแรงบิดให้อยู่ในระดับคงที่ได้ การทำงานนี้เกิดขึ้นโดยการควบคุมความเข้มของกระแสที่ไหลในแต่ละเฟส โดยโหมดนี้ต้องใช้ Motor Driver ที่ซับซ้อนกว่ารูปแบบการขับเคลื่อนก่อนหน้านี้ โดยจากภาพตัวอย่างที่ \times ในตำแหน่งเริ่มต้น $I_A = I_{MAX}$ และ $I_B = 0$ ในก้าวถัดไป กระแสถูกควบคุมให้ $I_A = 0.92 \times I_{MAX}$ และ $I_B = 0.38 \times I_{MAX}$ ซึ่งสร้างสนามแม่เหล็กที่หมุนไปทางตามเข็มนาฬิกา 22.5° เมื่อเทียบกับตำแหน่งก่อนหน้า กระบวนการนี้ถูกทำซ้ำด้วยค่ากระแสที่ต่างกันเพื่อให้ได้ตำแหน่งที่ 45° , 67.5° , และ 90°



รูปที่ 69 Microstepping

ที่มา : All you need to know about Stepper Motors! | by Binal Weerasena | Medium

6.3.2 Stepper Drive Type

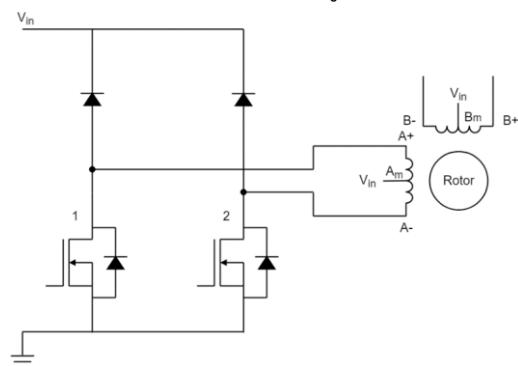
อีกคุณสมบัติหนึ่งของมอเตอร์ที่ส่งผลต่อการควบคุมคือการจัดเรียงขดลวดของ Stator ซึ่งมีบทบาทในการกำหนดวิธีการเปลี่ยนทิศทางของกระแสไฟฟ้า เพื่อให้มอเตอร์เคลื่อนที่ได้นั้น ไม่เพียงแค่ต้องจ่ายพลังงานให้กับขดลวด แต่ยังต้องควบคุมทิศทางของกระแสไฟฟ้าด้วย ซึ่งทิศทางของกระแสไฟฟ้าจะกำหนดทิศทางของสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นโดยขดลวดเอง ใน Stepper motor ปัญหาเกี่ยวกับการควบคุมทิศทางกระแสไฟฟ้าถูกแก้ไขด้วยวิธีการ 2 รูปแบบที่แตกต่างกัน ดังนี้



รูปที่ 70 Unipolar Stepper Motor Drive

ที่มา : Stepper Motors: Types, Uses and Working Principle | Article | MPS

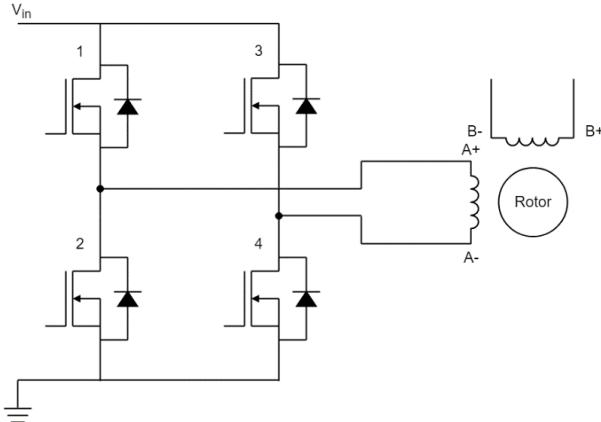
1. Unipolar Stepper Motors : ใน Stepper Motor แบบ Unipolar หนึ่งในสายไฟจะเชื่อมต่อกับจุดกึ่งกลางของขดลวดดังรูปที่ 70 การออกแบบนี้ช่วยให้สามารถควบคุมทิศทางของกระแสไฟฟ้าได้โดยใช้วงจรและอุปกรณ์ที่ค่อนข้างเรียบง่าย สายกึ่งกลาง (A_m) จะเชื่อมต่อกับแรงดันไฟฟ้าขาเข้า (V_{IN}) ดังรูปที่ 71



รูปที่ 71 Unipolar Stepper Motor Drive

ที่มา : Stepper Motors: Types, Uses and Working Principle | Article | MPS

2. Bipolar Stepper Motors : ในมอเตอร์สเต็ปเปอร์แบบ Bipolar ขดลวดแต่ละชุดจะมีสายไฟเพียงสองเส้น และการควบคุมทิศทางของกระแสไฟฟ้าจำเป็นต้องใช้ช่วงจร H-Bridge ดังรูปที่ 72



รูปที่ 72 Bipolar Stepper Motor Drive

ที่มา : Stepper Motors: Types, Uses and Working Principle | Article | MPS

6.3.3 Stepper Drive Characteristic

โดยการควบคุม Motor ใน Mode ต่าง ๆ จะต้องสั่งการด้วย Logic ดังนี้

MODE2	MODE1	MODE0	STEP MODE
0	0	0	Full step (2-phase excitation) with 71% current
0	0	1	1/2 step (1-2 phase excitation)
0	1	0	1/4 step (W1-2 phase excitation)
0	1	1	8 microsteps/step
1	0	0	16 microsteps/step
1	0	1	32 microsteps/step
1	1	0	32 microsteps/step
1	1	1	32 microsteps/step

รูปที่ 73 Stepping Format จาก Datasheet ของ DRV8825

7. วิธีดำเนินการทดลอง

- 7.1 ศึกษาหลักการทำงานและวิธีการควบคุมของ Stepper Motor
- 7.2 ติดตั้ง Library ที่จำเป็นต่อการทำงานของโปรแกรมควบคุมมอเตอร์จาก Simulink
- 7.3 เริ่มเก็บค่าความเร็วเชิงมุมที่อ่านได้จาก Incremental Encoder จากการป้อนความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าที่เราสนใจ
- 7.4 นำค่าที่เก็บได้ไปพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าและ ความเร็วเชิงมุมของ Stepper Motor

8. วัสดุอุปกรณ์

- 8.1 RS PRO Hybrid, Permanent Magnet Stepper Motor, 0.22Nm Torque, 2.8 V, 1.8°, 42.3 x 42.3mm Frame, 5mm Shaft จำนวน 1 อัน
- 8.2 Incremental Encoder AMT103-V จำนวน 1 อัน
- 8.3 Nucleo STM32G474RE พร้อมสายอัปโหลด จำนวน 1 ชุด
- 8.4 MotorXplorer จำนวน 1 ชุด - ฐานสามารถบรรจุบอร์ดควบคุม, Breadboard, 3D-Print ใช้สำหรับการประกอบกับ Stepper Motor

9. ขั้นตอนการดำเนินงาน

9.1 ศึกษาบอร์ด MotorXplorer สำหรับการสำรวจพฤติกรรมการทำงานของ Stepper Motor และโปรแกรมที่ควบคุมการทำงานของบอร์ด MotorXplorer ด้วย Simulink

9.2 Hardware setup

9.2.1 ทำการเสียบสายจัมเปอร์ดังนี้

9.2.1.1 Incremental Encoder AMT103-V

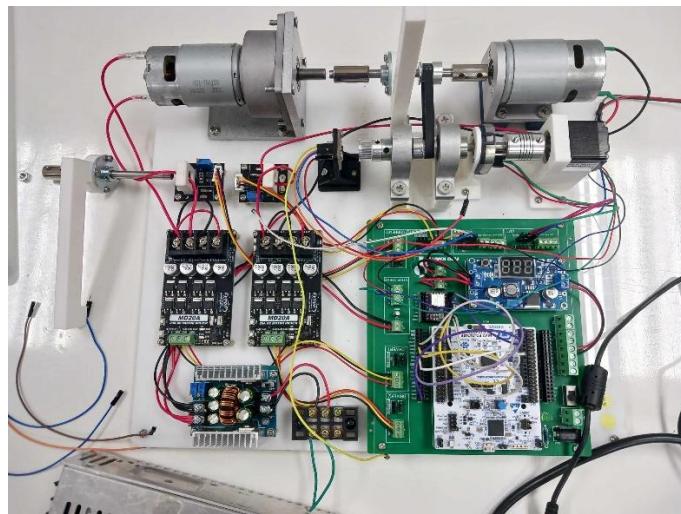
- 5V ต่อเข้ากับ 3V3 ของ บอร์ด Nucleo STM32G474RE
- GND ต่อเข้ากับ GND ของ บอร์ด Nucleo STM32G474RE
- A ต่อเข้ากับ PA6 ของ บอร์ด Nucleo STM32G474RE
- B ต่อเข้ากับ PA7 ของ บอร์ด Nucleo STM32G474RE

9.2.1.2 Magnetic Encoder

- SCL ต่อเข้ากับ PB8 ของ บอร์ด Nucleo STM32G474RE
- SDA ต่อเข้ากับ PB9 ของ บอร์ด Nucleo STM32G474RE
- DIR ต่อเข้ากับ GND ของ บอร์ด Nucleo STM32G474RE
- VCC ต่อเข้ากับ 3V3 ของ บอร์ด Nucleo STM32G474RE
- GND ต่อเข้ากับ GND ของ บอร์ด Nucleo STM32G474RE

9.2.1.3 Stepper Motor Driver

- M0 ต่อเข้ากับ PB15 ของ บอร์ด Nucleo STM32G474RE
- M1 ต่อเข้ากับ PB14 ของ บอร์ด Nucleo STM32G474RE
- M2 ต่อเข้ากับ PB13 ของ บอร์ด Nucleo STM32G474RE
- EN ต่อเข้ากับ PB1 ของ บอร์ด Nucleo STM32G474RE
- DIR ต่อเข้ากับ PB2 ของ บอร์ด Nucleo STM32G474RE
- STEP ต่อเข้ากับ PB8 ของ บอร์ด Nucleo STM32G474RE

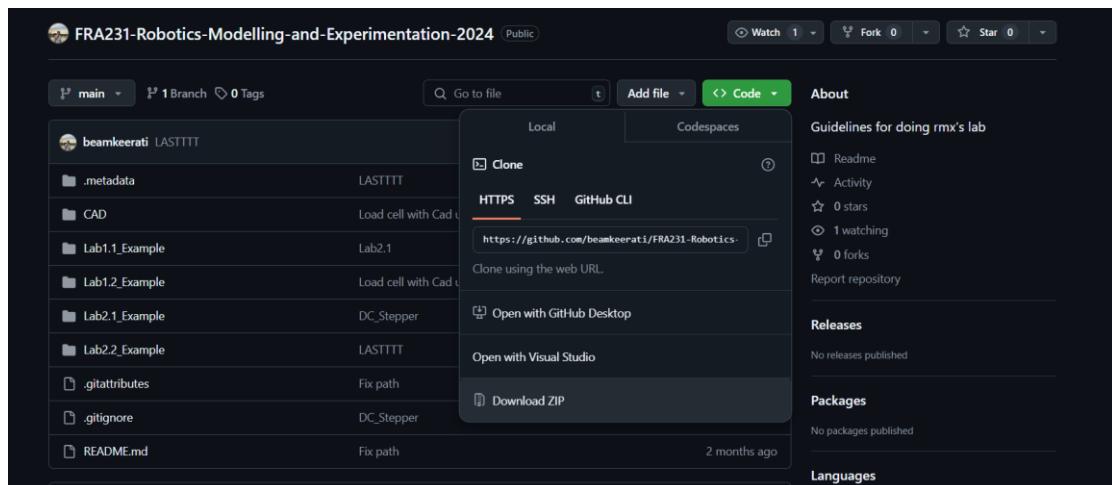


รูปที่ 74 แสดงการต่อวงจรในขั้นตอนที่ 9.2.1

9.2.2 ต่อสายอัปโหลดจากบอร์ด Nucleo STM32G474RE เข้าคอมพิวเตอร์เพื่อส่งการจากโปรแกรม Simulink

9.3 Software setup

9.3.1 โหลดโฟลเดอร์ FRA231-Robotics-Modelling-and-Experimentation-2024-main จาก github โดยในโฟลเดอร์นี้จะประกอบไปด้วยไฟล์ Simulink ที่ใช้สำหรับควบคุม Stepper Motor



รูปที่ 75 แสดงการดาวน์โหลด FRA231-Robotics-Modelling-and-Experimentation-2024-main

9.3.2 จักนั้นให้ไปที่ตำแหน่งไฟล์ "C:\Users\User\Documents\MATLAB\rmxlab2\FRA231-Robotics-Modeling-and-Experimentation-2024-main\waijung_18.11a\install_waijung.m" และเข้าไปตามลิงค์เพื่อดาวน์โหลด embedding programming ที่จำเป็นสำหรับการรันโปรแกรม Simulink

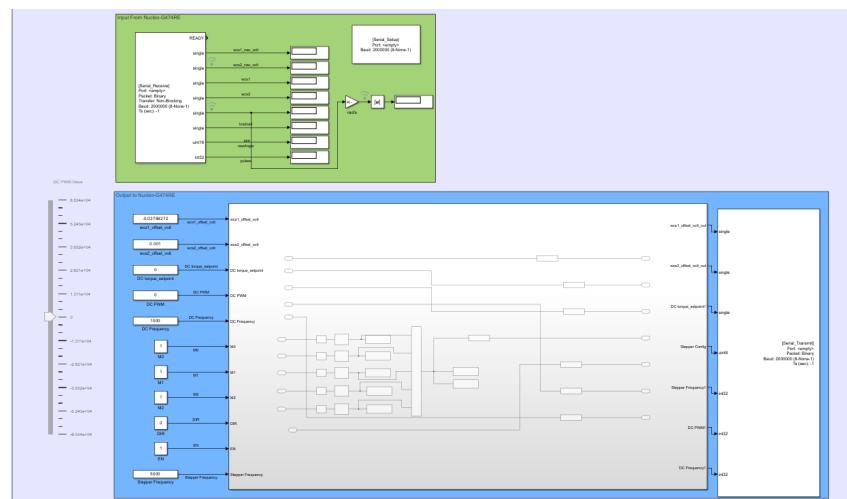
```

Editor - C:\Users\...\MATLAB\mexlab2\FRA231-Robotics-Modelling-and-Experimentation-2024-main\Lab2_1_Example\waijung_18...
+4 LinearLoadCell.m schmitt_trigger.m Unshieldmagnetic_matlab.m Waijung 1 Download Linkurl install_waijung.m
1 function install_waijung
2
3 clc
4 disp('Pre-Installation')
5 disp(['Host computer: ' computer])
6 osversion = evalc('!ver');
7 osversion(osversion==10) = []; % remove newline characters
8 disp(['Operating System: ' osversion])
9 disp('Checking previous Waijung installation (if any)...')
10 uninstall_waijung % if any previous installation exists
11 current_dir = pwd;
12 try
13 cd('src')
14 catch
15 str = ['Can not find ''src'' folder.' char(10) ...
16 'Make sure that:' char(10) ...
17 '1. You have extracted the downloaded archive (*.7z).' char(10) ...
18 '2. Matlab ''Current Directory'' is the extracted folder.' char(10) ...
19 '3. Run install_waijung.m from the extracted folder and NOT from the archive.' char(10) ...
20 'Abort installation.'];
21 error(str)
22 end
23
24 disp('Checking Matlab...')
25 if (str2double(waijung.getMatlab.year) < 2009)
26 error('Waijung needs Matlab R2009a or later.')
27 else
28 disp(['Matlab release: ' waijung.getMatlab.release '. OK.'])
29 end
30

```

รูปที่ 76 แสดงการดาวน์โหลด waijung

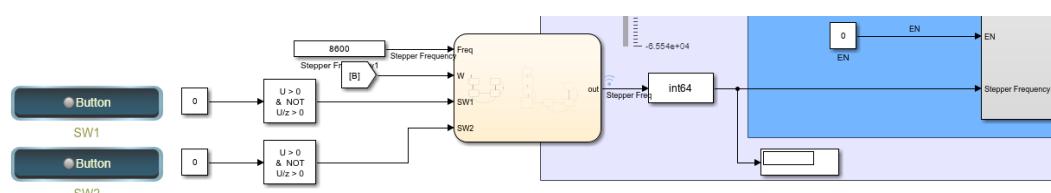
9.3.3 เปิดโปรแกรม Simulink เพื่อออกแบบ State Diagram สำหรับการเก็บค่าความเร็วเชิงมุม ณ ช่วงความถี่ที่สนใจ



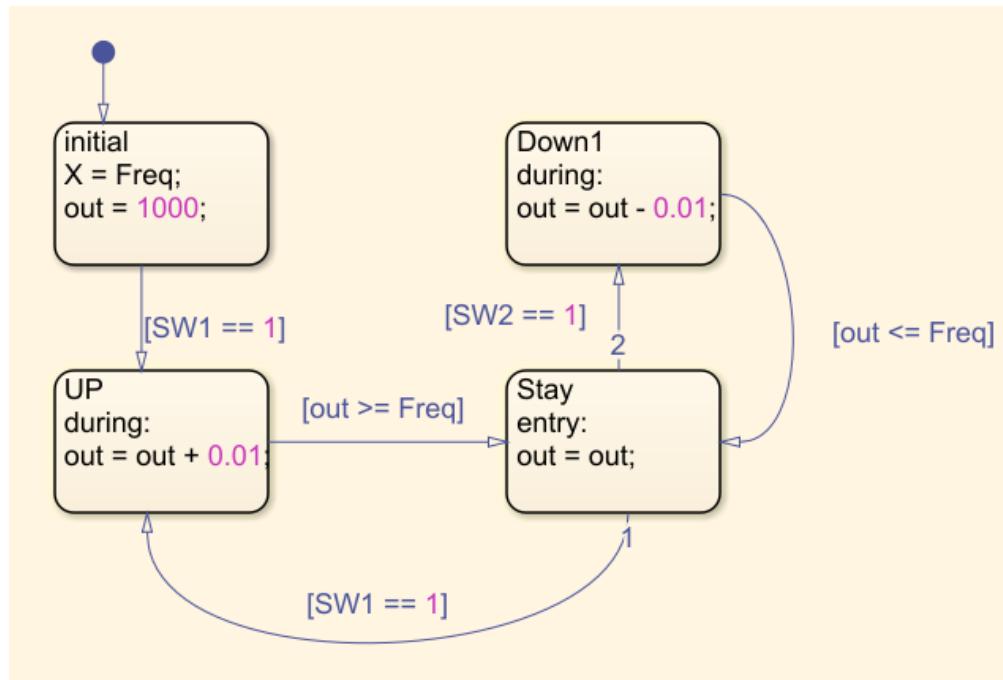
รูปที่ 77 แสดง Block Diagram ในโปรแกรม Simulink

9.4 Simulink setup

9.4.1 ทำการออกแบบ State flow สำหรับการเก็บค่าความเร็วเชิงมุม ณ ความถี่ที่สนใจดังนี้



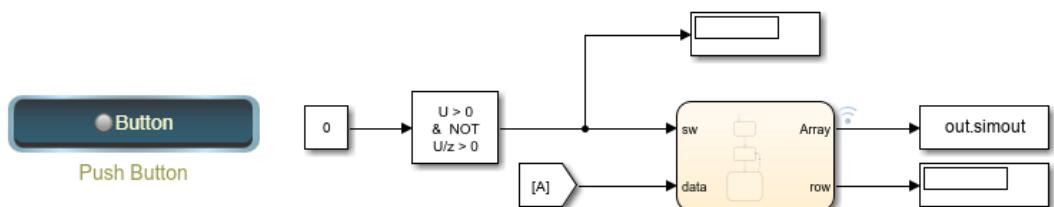
รูปที่ 78 แสดง Block Diagram ในโปรแกรม Simulink



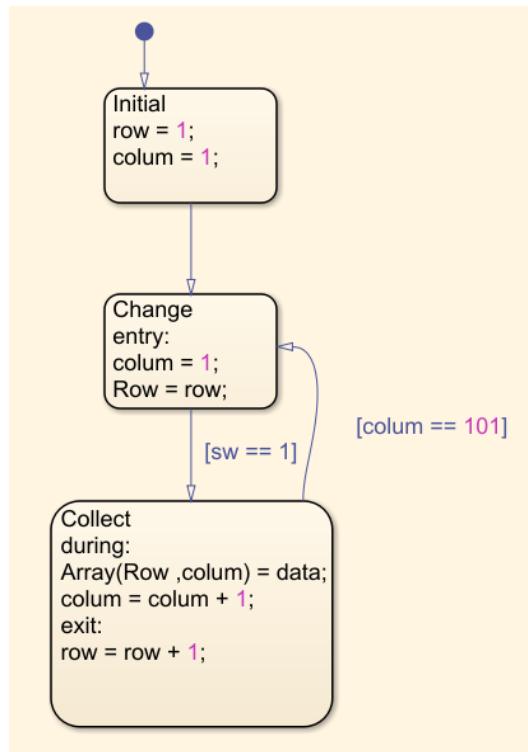
รูปที่ 79 State Flow ที่ใช้ในการเพิ่ม-ลดค่าความถี่อย่างละเอียงที่ใช้ในการควบคุม Stepper Motor

จากรูปที่ 79 จะใช้ State Flow ในการเพิ่ม-ลดค่าความถี่ที่ใช้ในการควบคุม Stepper Motor โดยเมื่อเข้ามาจะเริ่มความถี่ที่ 1000 ก่อน เมื่อกดปุ่ม SW1 จะเข้าสู่ State ที่ใช้ในการเพิ่มค่าความถี่ หากความถี่เท่ากับค่าความถี่ที่อินพุตเข้ามาก็จะเข้าสู่ State Stay เพื่อรอในการทำอย่างอื่นถ้าหากกดปุ่ม SW2 ก็จะเข้าสู่ State ที่ใช้ในการลดค่าความถี่ หากความถี่เท่ากับค่าความถี่ที่อินพุตเข้ามาก็จะเข้าสู่ State Stay เพื่อรอในการทำอย่างอื่นต่อไป

9.4.2 ออกแบบและสร้างโมเดล Simulink เพื่อทำการเก็บค่าความเร็วเฉิงมุขของ Stepper Motor



รูปที่ 80 ภาพรวมของ Simulink ที่ใช้ในการเก็บค่าความเร็วเฉิงมุขของ Stepper Motor



รูปที่ 81 State Flow ที่ใช้เก็บข้อมูล

จากรูปที่ 81 จะใช้ State Flow ในการเก็บค่าจากการทดลอง ซึ่งจะเก็บค่าไว้ใน Array ที่มีขนาด 30×100 โดยหลักการทำงาน คือ เมื่อกดปุ่มจะมีการเปลี่ยน State จาก State Change ไปสู่ State Collect เพื่อเก็บค่าความเร็วเชิงมุมของ Stepper Motor ที่วัดมา 100 ค่าในคอลัมน์ทั้ง 100 คอลัมน์ เมื่อเก็บค่าครบแล้วจะกลับไปสู่ State Change เพื่อทำการเปลี่ยนแผล Array ในการเก็บ และจะต้องกดปุ่ม เพื่อเป็นการ trigger ให้เข้าไปสู่ State Collect ในการเก็บค่าต่อไป

9.5 ทำการทดลอง

9.5.1 ใช้ State flow ใน Simulink เพื่อเก็บข้อมูลความเร็วเชิงมุมของ Stepper Motor ในแต่ละ ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยกำหนดให้เก็บค่า 100 ค่าต่อความถี่ที่เพิ่มขึ้นทีละ 200 เพื่อนำไปหาค่าเฉลี่ย โดยเริ่มจาก 1000 ไปจนถึงค่าความถี่ที่จะเกิด Loss Step ในการคุณแบบ Full Step และบันทึกค่าลงใน MATLAB

9.5.2 ใช้ State flow ใน Simulink เพิ่มความถี่ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งเกิด Lost Step ของในแต่ละ การควบคุม ทั้ง Full Step, Half step, $\frac{1}{4}$ Step, 8 microsteps, 16 microsteps, 32 microsteps และเมื่อครู่ ว่าในแต่ละการควบคุมมีค่า Lost Step เท่าไร ก็จะลดค่าความถี่อินพุตเพื่อให้ Stepper Motor สามารถหมุนได้ อีกรอบ โดยจะลดค่าความถี่อินพุตให้ห่างจากค่า Lost Step ลงมา 500 และจากค่าที่ได้มาจะเพิ่มจากค่านี้ขึ้น ไปเรื่อย ๆ ทีละ 50 โดยเมื่อได้ทำการทดลองในการคุณแบบ Full Step จะเริ่มที่ 3500, Half Step จะเริ่มที่ 7500, $\frac{1}{4}$ Step จะเริ่มที่ 15500, 8 microsteps จะเริ่มที่ 17300, 16 microsteps จะเริ่มที่ 3900, 32 microsteps จะเริ่มที่ 8000

9.6 วิเคราะห์และอภิปรายผลที่ได้จากการทดลอง

9.6.1 ในกรณีวิเคราะห์จะนำข้อมูลความเร็วเชิงมุมในแต่ละความถี่จำนวน 100 ค่ามาหาค่าเฉลี่ยเพื่อทำให้ข้อมูลนั้นมีความความเสถียรและความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น โดยใช้สมการดังนี้

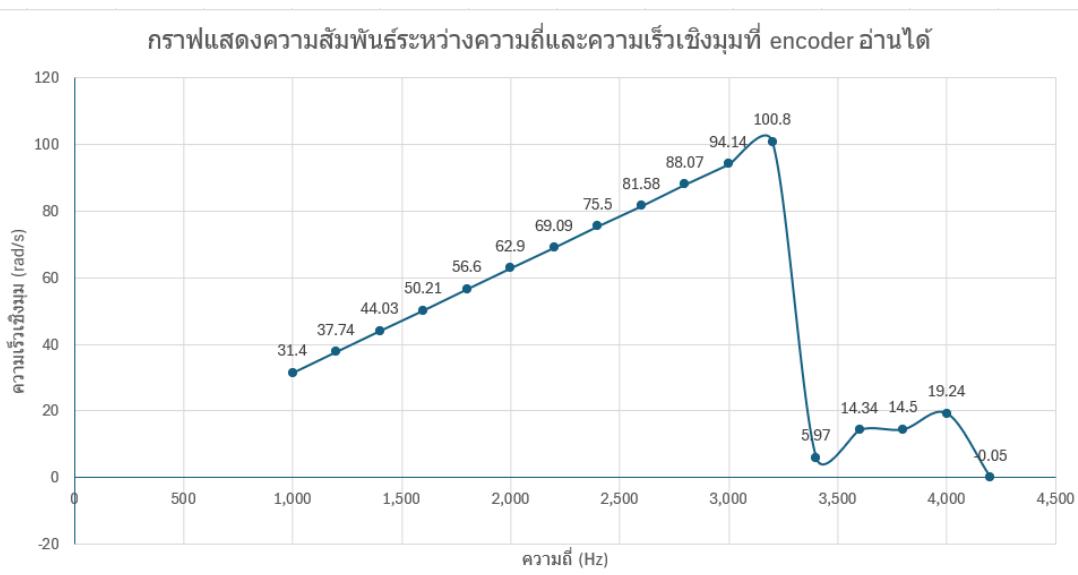
$$\bar{\omega} = \frac{\sum \omega}{100}$$

โดย $\bar{\omega}$ คือ ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ยในการหมุนของมอเตอร์ มีหน่วยเป็น (rad/s)

ω คือ ความเร็วเชิงมุมในการหมุนของมอเตอร์ที่วัดได้ มีหน่วยเป็น (rad/s)

บันทึกความเร็วเชิงมุมเฉลี่ยที่คำนวณได้เทียบกับความถี่ที่สนใจในรูปแบบตาราง

9.6.2 สังเกตความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่และค่าเฉลี่ยความเร็วเชิงมุม ณ ความถี่นั้น ๆ โดยการนำข้อมูลทั้งสองชุดมาสร้างเป็นกราฟ



รูปที่ 82 แสดงตัวอย่างการสร้างกราฟ

9.6.3 สรุปผลการทดลองพร้อมอภิปรายผล รวมถึงให้ข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนาหรือการปรับปรุงการทดลองในอนาคต

10. ผลการทดลอง

10.1 การเก็บข้อมูลค่าความเร็วเชิงมุม (rad/s) ของ Stepper Motor ใน Full Step Mode จำนวน 100 ชุด ในแต่ละความถี่ โดยความถี่เริ่มที่ 1,000 Hz และเพิ่มขึ้นทีละ 200 จนกว่าจะ Loss Step เพื่อหาค่าความถี่สูงสุด ที่ Stepper Motor สามารถทำงานได้ใน Full Step Mode ก่อนเกิด Loss Step

Freq (Hz)	ความเร็วเชิงมุม (m/s)																			
1000	32.2136	32.2136	32.2136	29.9126	30.6796	30.6796	31.4466	32.2136	32.2136	30.6796	30.6796	32.2136	32.9806	32.2136	31.4466	30.6796	31.4466	31.4466	32.2136	31.4466
1200	36.8155	39.1165	39.1165	39.1165	36.0486	37.5825	37.5825	37.5825	37.5825	36.8155	38.3495	36.8155	36.0486	37.5825	37.5825	38.3495	38.3495	38.3495	38.3495	37.582
1400	44.4854	44.4854	42.9515	42.9515	43.7185	44.4854	44.4854	44.4854	44.4854	46.0194	44.4854	44.4854	43.7185	43.7185	43.7185	43.7185	43.7185	43.7185	43.7185	43.7185
1600	48.3204	50.6214	49.8544	50.6214	50.6214	52.1554	50.6214	49.0874	49.0874	49.8544	51.3884	50.6214	49.8544	48.3204	49.8544	51.3884	51.3884	51.3884	51.3884	51.3884
1800	55.2233	55.2233	56.7573	58.2913	57.5242	55.9905	54.4563	52.9223	56.7573	59.8253	59.8253	55.9903	54.4563	53.6893	55.9903	59.0583	59.0583	54.4563	52.922	52.922
2000	63.6602	63.6602	62.1262	62.1262	62.8932	63.6602	65.1942	62.1262	62.8932	62.1262	62.8932	62.1262	62.8932	63.6602	63.6602	62.8932	63.6602	64.427	63.6602	64.427
2200	65.9612	67.4952	69.0291	69.7961	70.5631	68.2621	72.0971	69.7961	68.2621	67.4952	67.4952	68.2621	69.7961	69.7961	70.5631	69.0291	69.0291	70.5631	69.0291	69.0291
2400	77.466	76.698	75.1651	75.9321	76.699	75.1651	75.1651	75.9321	73.6311	74.3981	74.3981	71.301	80.534	80.534	81.301	82.835	82.835	82.835	80.534	81.301
2600	81.301	81.301	80.534	82.068	82.068	82.835	81.301	81.301	82.835	81.301	80.534	81.301	82.835	82.835	82.835	82.835	82.835	82.835	82.835	81.301
2800	85.9029	88.2039	88.9709	87.4369	88.9709	88.2039	87.4369	88.9709	88.9709	88.2039	88.9709	88.9709	88.2039	88.6699	87.4369	89.7379	91.2719	89.7379	89.7379	85.135
3000	95.9029	91.2719	98.1748	101.243	95.8738	89.7379	88.9709	94.3398	98.9418	98.9418	92.8058	87.4369	89.7379	98.1748	101.243	98.1748	90.5049	95.1068	101.243	92.805
3200	95.1068	114.282	120.418	108.913	120.418	109.68	92.0388	81.301	90.5049	105.845	119.651	111.981	95.8738	82.835	85.9029	103.544	118.884	115.816	98.9418	112.748
3400	22.2427	10.7379	-15.3398	19.1748	19.1748	32.2136	-14.5728	0	22.2427	21.4757	-3.83495	-15.3398	19.1748	27.6117	13.8058	-5.36893	-3.06796	19.1748	42.9515	-9.97088
3600	16.1068	-23.0097	9.20389	33.7476	39.8835	3.83495	-18.4078	21.4757	26.8447	40.6505	-3.06796	-16.8738	24.5437	35.2816	22.2427	-10.7379	20.7067	46.0194	9.97088	-13.0388
3800	15.3398	36.8155	32.9806	-3.06796	-13.8058	23.0097	40.6505	11.5049	-6.90291	-0.76699	39.8835	35.2816	5.36893	-16.8738	16.1068	39.1165	29.9126	-6.90291	-14.5728	30.6796
4000	26.8447	52.9223	12.2718	-6.13592	5.36893	41.4175	6.13592	-14.5728	23.7767	42.9515	45.2524	0.76699	-9.20389	30.6796	46.0194	27.6117	-0.76699	2.30097	30.6796	50.621
4200	-0.76699	1.53398	0.76699	1.53398	0	0	-0.76699	-1.53398	-0.76699	0	0	-0.76699	0.76699	0	0	0	1.53398	0	0.76699	-0.76699

รูปที่ 83 แสดงตัวอย่างชุดข้อมูลที่เก็บมาได้

จากนั้น นำข้อมูลความเร็วเชิงมุมทั้ง 100 ค่าในแต่ละความถี่มาคำนวณหาค่าเฉลี่ย เพื่อทำให้ข้อมูลที่ได้นั้นมีความความเสถียรและความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น โดยใช้สมการดังนี้

$$\bar{\omega} = \frac{\sum \omega}{100}$$

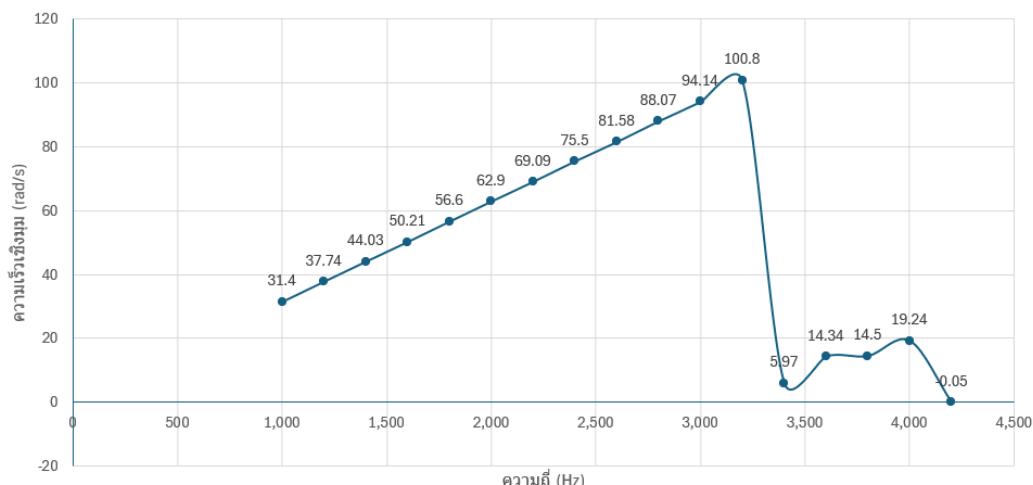
โดย $\bar{\omega}$ คือ ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ยในการหมุนของมอเตอร์ มีหน่วยเป็น (rad/s)

ω คือ ความเร็วเชิงมุมในการหมุนของมอเตอร์ที่วัดได้ มีหน่วยเป็น (rad/s)

ตารางที่ 7 แสดงค่าความเร็วเชิงมุมเฉลี่ยที่คำนวณได้ในแต่ละความถี่

ค่าความถี่ (Hz)	ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ย (rad/s)	ค่าความถี่ (Hz)	ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ย (rad/s)
1,000	31.40	2,800	88.07
1,200	37.74	3,000	94.14
1,400	44.03	3,200	100.8
1,600	50.21	3,400	5.97
1,800	56.60	3,600	14.34
2,000	62.90	3,800	14.50
2,200	69.09	4,000	19.24
2,400	75.50	4,200	-0.05
2,600	81.58		

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเร็วเชิงมุมที่ encoder อ่านได้



รูปที่ 84 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเร็วเชิงมุมที่ Encoder อ่านได้

10.2 การเก็บข้อมูลค่าความเร็วเชิงมุม (rad/s) ของ Stepper Motor ใน Full Step Mode จำนวน 100 ชุด ในแต่ละความถี่ โดยความถี่เริ่มที่ 3,200 Hz และเพิ่มขึ้นทีละ 50 จนกว่าจะ Loss Step เพื่อหาค่าความถี่สูงสุดที่มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ที่ Stepper Motor สามารถทำงานได้ใน Full Step Mode ก่อนเกิด Loss Step

Freq (HZ)	ความเร็วเชิงมุม (m/s)	
3500	-20.7087	12.27185
3550	31.44661	-16.1068
3600	49.85438	-2.30097
3650	22.24272	-21.4757
3700	26.84466	52.15535
3750	0.76699	-0.76699
3800	0	0

รูปที่ 85 แสดงตัวอย่างชุดข้อมูลที่เก็บมาได้

จากนั้น นำข้อมูลความเร็วเชิงมุมทั้ง 100 ค่า ในแต่ละความถี่มาคำนวณหาค่าเฉลี่ย เพื่อทำให้ข้อมูลที่ได้นั้นมีความความเสถียรและความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น โดยใช้สมการดังนี้

$$\bar{\omega} = \frac{\sum \omega}{100}$$

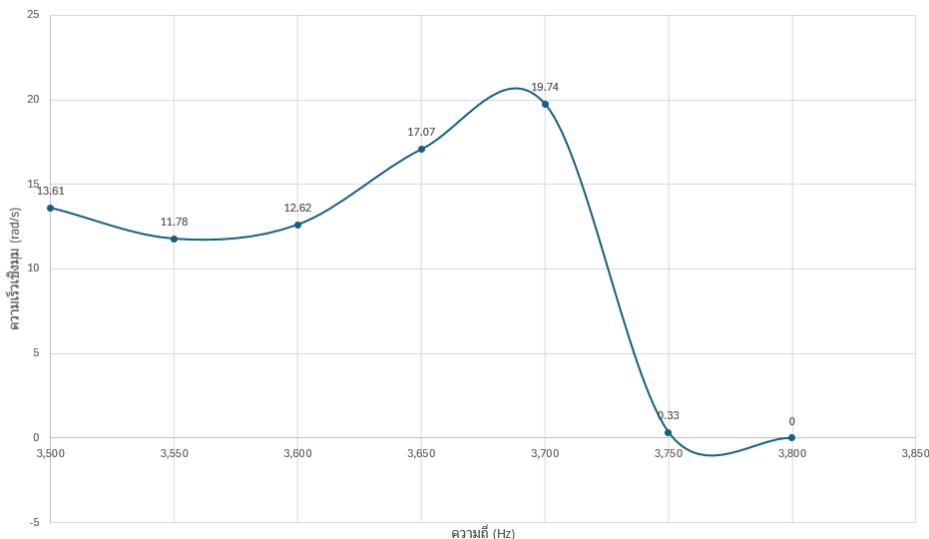
โดย $\bar{\omega}$ คือ ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ยในการหมุนของมอเตอร์ มีหน่วยเป็น (rad/s)

ω คือ ความเร็วเชิงมุมในการหมุนของมอเตอร์ที่วัดได้ มีหน่วยเป็น (rad/s)

ตารางที่ 8 แสดงค่าความเร็วเชิงมุ่งเฉลี่ยที่คำนวณได้ในแต่ละความถี่

ค่าความถี่ (Hz)	ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ย (rad/s)
3,500	13.61
3,550	11.78
3,600	12.62
3,650	17.07
3,700	19.74
3,750	0.33
3,800	0

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเร้าเชิงบุนที่ encoder อ่านได้



รูปที่ 86 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเร็วเชิงมุมที่ Encoder อ่านได้

10.3 การเก็บข้อมูลค่าความเร็วเชิงมุม (rad/s) ของ Stepper Motor ใน Half Step Mode จำนวน 100 ชุด ในแต่ละความถี่ โดยความถี่เริ่มที่ 7,500 Hz และเพิ่มขึ้นทีละ 50 จนกว่าจะ Loss Step เพื่อหาค่าความถี่สูงสุด ที่ Stepper Motor สามารถทำงานได้ใน Half Step Mode ก่อนเกิด Loss Step

Freq (Hz)	ຄວາມខ្សោយកម្ម (m/s)											
	7500	6.90298	30.67962	45.25243	27.61165	-6.90291	-6.90291	27.61165	44.48544	21.47573	-1.53398	2.30971
7550	-6.90291	17.64078	29.14564	47.55341	4.601943	-13.0388	25.31068	42.18447	38.34952	-2.30097	-9.20389	30.67962
7600	-20.7067	28.37865	37.58253	46.01942	4.601943	-14.5728	32.2136	53.68933	23.7767	-6.13592	4.601943	32.98059
7650	27.61165	45.25243	46.01942	7.66994	27.6117	21.47573	39.8835	50.62137	14.57282	-8.43689	-2.30097	36.04855
7700	-22.2427	21.47573	30.67962	53.68933	17.64078	-16.1068	10.73787	41.47148	52.15535	9.970876	-7.6699	12.27185
7750	45.25243	55.9933	12.27185	-8.43689	43.86894	34.51547	62.89322	9.970876	-11.5049	22.24272	34.51457	59.05826
7800	-13.0386	19.17476	31.44661	60.59224	14.57282	-14.5728	13.80583	47.55341	57.52428	6.13593	-12.2718	9.970876
7850	-14.5728	41.47148	50.62137	26.84466	2.300971	-19.9418	42.95146	56.75729	43.71845	0.76699	-15.3999	45.25243
7900	-22.2427	44.48544	55.23231	43.71845	0	-18.4076	47.68642	45.25243	36.04855	53.68933	-13.8058	39.11651
7950	55.23231	31.44661	3.834952	-4.60194	43.71848	50.62137	29.14564	-0.76699	0	31.44661	52.92234	33.74748
8000	41.47148	71.33031	21.47573	-2.30097	-4.60194	41.47148	64.42719	25.31068	-0.76699	-7.6699	49.08739	61.35932
8050	39.11651	37.58253	55.9930	8.436894	-17.6408	39.8835	52.22331	0.76699	16.8738	46.01942	50.62137	40.65049
8100	49.85438	51.38836	6.13593	-7.6699	36.81554	42.18447	38.34952	-0.76699	46.47862	51.38836	8.436894	-16.8738
8150	0	0	0	0.76699	0	0	0	0	-0.76699	0	0.76699	1.533981
											-0.76699	0

รูปที่ 87 แสดงตัวอย่างชุดข้อมูลที่เก็บมาได้

จากนั้น นำข้อมูลความเร็วเชิงมุมทั้ง 100 ค่าในแต่ละความถี่มาคำนวณหาค่าเฉลี่ย เพื่อทำให้ข้อมูลที่ได้นั้นมีความความเสถียรและความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น โดยใช้สมการดังนี้

$$\bar{\omega} = \frac{\sum \omega}{100}$$

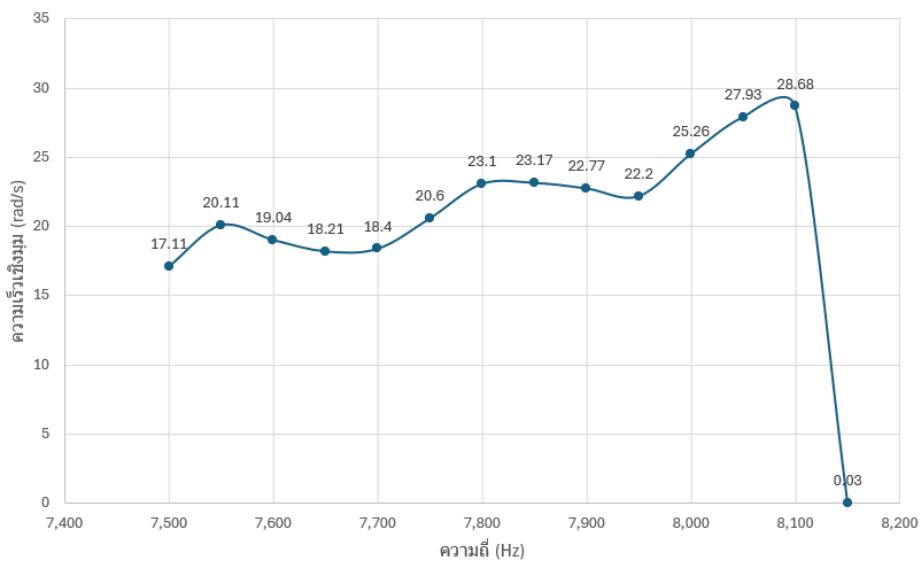
โดย $\bar{\omega}$ คือ ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ยในการหมุนของมอเตอร์ มีหน่วยเป็น (rad/s)

ω คือ ความเร็วเชิงมุมในการหมุนของมอเตอร์ที่วัดได้ มีหน่วยเป็น (rad/s)

ตารางที่ 9 แสดงค่าความเร็วเชิงมุมเฉลี่ยที่คำนวณได้ในแต่ละความถี่

ค่าความถี่ (Hz)	ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ย (rad/s)	ค่าความถี่ (Hz)	ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ย (rad/s)
7,500	17.11	7,850	23.17
7,550	20.11	7,900	22.77
7,600	19.04	7,950	22.20
7,650	18.21	8,000	25.26
7,700	18.40	8,050	27.93
7,750	20.60	8,100	28.68
7,800	23.10	8,150	0.03

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเร็วเชิงมุมที่ encoder อ่านได้



รูปที่ 88 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเร็วเชิงมุมที่ Encoder อ่านได้

10.4 การเก็บข้อมูลค่าความเร็วเชิงมุม (rad/s) ของ Stepper Motor ใน Micro Step 1/4 Mode จำนวน 100 ชุด ในแต่ละความถี่ โดยความถีเริ่มที่ 15,500 Hz และเพิ่มขึ้นทีละ 50 จนกว่าจะ Loss Step เพื่อหาค่าความถี่ สูงสุด ที่ Stepper Motor สามารถทำงานได้ ก่อนเกิด Loss Step

Freq(Hz)	ความเร็วเชิงมุม (m/s)																							
15,500	16.1068	42.18447	46.01942	4.601943	-14.5728	26.84466	49.08739	45.25243	3.834952	-15.3398	43.71845	45.25243	28.37865	-6.13592	0.76699	30.67962	49.08739	28.37865	1.533981	9.203885	36.04855	56.75729		
15,550	-19.9418	-0.76699	49.85438	65.19418	-3.35981	-9.97088	0	36.81554	55.9903	18.40777	-7.6699	3.067962	39.8835	64.42719	16.1068	-5.36893	9.203885	32.2136	50.62137	11.50486	-26.0777	25.31068		
15,600	51.38836	55.22331	-0.76699	-21.4757	27.61165	31.44661	57.52428	5.368933	-12.2718	27.61165	45.25243	52.92234	9.203885	-23.0097	27.61165	36.81554	50.62137	1.533981	-23.0097	42.95146	53.68933	53.68933		
15,650	26.07768	32.98059	39.05826	-1.53398	-23.7767	36.04855	52.15535	59.82525	7.669904	-23.0097	32.98059	32.2136	48.3204	3.834952	-12.2718	28.37865	32.98059	62.12623	17.64078	-15.3398	32.2136	34.51457		
15,700	-0.76699	0	0	0	0.76699	0	0	0	0.76699	0	0	0	0.76699	-1.53398	0	0	0.76699	0	0	0.76699	0	0	-0.76699	

รูปที่ 89 แสดงตัวอย่างชุดข้อมูลที่เก็บมาได้

จากนั้น นำข้อมูลความเร็วเชิงมุมทั้ง 100 ค่าในแต่ละความถี่มาคำนวณหาค่าเฉลี่ย เพื่อทำให้ข้อมูลที่ได้นั้นมี ความความเสถียรและความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น โดยใช้สมการดังนี้

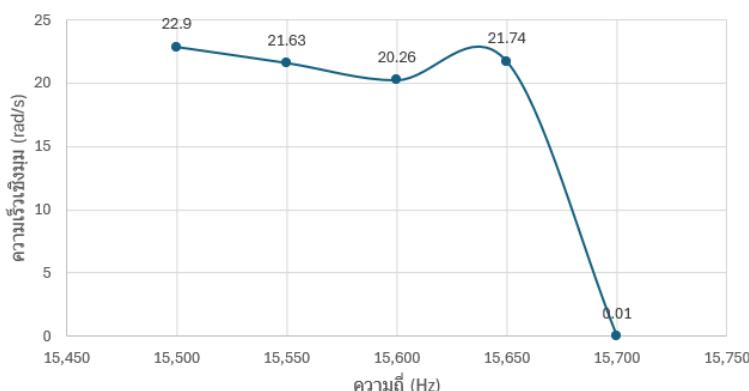
$$\bar{\omega} = \frac{\sum \omega}{100}$$

โดย $\bar{\omega}$ คือ ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ยในการหมุนของมอเตอร์ มีหน่วยเป็น (rad/s)
 ω คือ ความเร็วเชิงมุมในการหมุนของมอเตอร์ที่วัดได้ มีหน่วยเป็น (rad/s)

ตารางที่ 10 แสดงค่าความเร็วเชิงมุมเฉลี่ยที่คำนวณได้ในแต่ละความถี่

ค่าความถี่ (Hz)	ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ย (rad/s)
15,500	22.90
15,550	21.63
15,600	20.26
15,650	21.74
15,700	0.01

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเร็วเชิงมุม ที่ encoder อ่านได้



รูปที่ 90 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเร็วเชิงมุมที่ Encoder อ่านได้

10.5 การเก็บข้อมูลค่าความเร็วเชิงมุม (rad/s) ของ Stepper Motor ใน Micro Step 1/8 Mode จำนวน 100 ชุด ในแต่ละความถี่ โดยความถีเริ่มที่ 17,300 Hz และเพิ่มขึ้นทีละ 50 จนกว่าจะ Loss Step เพื่อหาค่าความถี่สูงสุด ที่ Stepper Motor สามารถทำงานได้ก่อนเกิด Loss Step

Freq(Hz)	ความเร็วเชิงมุม (m/s)																				
17300	69.02914	69.79613	67.49516	67.49516	68.26215	66.72817	67.49516	67.49516	68.26215	69.02914	68.26215	66.72817	69.02914	66.72817	66.72817	67.49516	67.49516	68.26215	66.72817		
17350	69.79613	68.26215	69.02914	68.26215	65.96117	67.49516	68.26215	69.02914	68.26215	66.72817	69.02914	68.26215	65.96117	68.26215	68.26215	68.26215	68.26215	68.26215	68.26215	66.72817	
17400	65.19418	67.49516	69.02914	65.19418	65.96117	69.79613	69.79613	70.56312	68.26215	66.72817	67.49516	65.19418	68.26215	69.79613	67.49516	64.42719	65.96117	70.56312	71.33011	69.02914	66.72817
17450	65.96117	67.49516	69.79613	70.56312	67.49516	66.72817	67.49516	70.56312	68.26215	69.79613	67.49516	65.19418	67.49516	70.56312	69.79613	67.49516	66.72817	69.79613	71.33011	66.72817	66.72817
17500	69.02914	69.02914	67.49516	69.79613	68.26215	69.79613	69.02914	68.26215	68.26215	69.02914	68.26215	67.49516	68.26215	69.79613	69.02914	68.26215	68.26215	68.26215	68.26215	69.79613	68.26215
17550	69.02914	69.79613	70.56312	69.79613	67.49516	68.26215	69.79613	69.02914	68.26215	66.72817	67.49516	69.79613	69.02914	68.26215	69.02914	69.02914	69.02914	68.26215	69.02914	69.02914	67.49516
17600	69.02914	68.26215	69.02914	69.79613	69.79613	68.26215	69.79613	68.26215	69.02914	68.26215	69.02914	68.26215	69.79613	69.02914	70.56312	69.79613	69.02914	69.02914	69.02914	69.02914	69.02914
17650	69.02914	69.02914	69.79613	68.26215	69.02914	68.26215	69.79613	69.02914	68.26215	69.79613	69.02914	68.26215	69.79613	69.02914	67.49516	69.79613	69.02914	69.02914	69.02914	69.02914	69.02914
17700	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

รูปที่ 91 แสดงตัวอย่างชุดข้อมูลที่เก็บมาได้

จากนั้นนำข้อมูลความเร็วเชิงมุมทั้ง 100 ค่าในแต่ละความถี่มาคำนวณหาค่าเฉลี่ย เพื่อทำให้ข้อมูลที่ได้นั้นมีความความเสถียรและความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น โดยใช้สมการดังนี้

$$\bar{\omega} = \frac{\sum \omega}{100}$$

โดย $\bar{\omega}$ คือ ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ยในการหมุนของมอเตอร์ มีหน่วยเป็น (rad/s)
 ω คือ ความเร็วเชิงมุมในการหมุนของมอเตอร์ที่วัดได้ มีหน่วยเป็น (rad/s)

ตารางที่ 11 แสดงค่าความเร็วเชิงมุมเฉลี่ยที่คำนวณได้ในแต่ละความถี่

ค่าความถี่ (Hz)	ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ย (rad/s)	ค่าความถี่ (Hz)	ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ย (rad/s)
17,300	68.05	17,550	69.08
17,350	68.21	17,600	69.08
17,400	68.17	17,650	69.30
17,450	68.44	17,700	0
17,500	68.75		



รูปที่ 92 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเร็วเชิงมุมที่ Encoder อ่านได้

10.6 การเก็บข้อมูลค่าความเร็วเชิงมุม (rad/s) ของ Stepper Motor ใน Micro Step 1/16 Mode จำนวน 100 ชุด ในแต่ละความถี่ โดยความถี่เริ่มที่ 3,900 Hz และเพิ่มขึ้นทีละ 50 จนกว่าจะ Loss Step เพื่อหาค่าความถี่สูงสุด ที่ Stepper Motor สามารถทำงานได้ก่อนเกิด Loss Step

Freq(Hz)	ความเร็วเชิงมุม (m/s)																					
3900	-20.7087	32.2136	49.85438	50.62137	3.834952	-24.5437	40.65049	38.34952	42.95146	3.067962	-15.3398	38.34952	47.55341	9.970876	-14.5728	37.58253	50.62137	24.54369	0	-4.60194	36.04855	
3950	-24.5437	42.95146	44.48544	45.25243	0.76699	-26.0777	42.95146	58.29127	53.68933	-1.53398	-25.3107	46.01942	46.01942	40.65049	0	-19.9418	50.62137	52.15535	43.71845	-1.53398	-11.5049	34.51457
4000	49.85438	-0.76699	-25.3107	47.55341	76.69904	28.37865	0.76699	-24.5437	51.38836	62.12623	37.58253	-5.36893	-21.4757	50.62137	59.05826	42.95146	-5.36893	-19.9418	46.01942	61.35923	42.95146	-7.6699
4050	45.25243	69.02914	15.33981	-3.83495	3.067962	50.62137	57.52428	15.33981	-19.1748	29.14564	52.15535	59.05826	16.87379	-16.1068	20.70874	49.08739	67.49516	16.1068	-11.5049	23.00971	43.71845	63.66021
4100	-11.5049	20.70874	47.55341	50.62137	13.03884	-6.13592	15.33981	59.05826	70.56312	18.40777	-24.5437	39.11651	52.15535	51.38836	6.135923	-23.0097	29.91263	55.9903	62.89322	26.84466	-13.8058	26.07768
4150	25.31068	59.05826	76.69904	14.57282	-6.13592	16.87379	55.22331	74.39807	7.669904	-8.43689	-2.30097	51.38836	79.00002	31.44661	-0.76699	-13.8058	55.22331	79.00002	35.28156	-5.36893	-23.0097	49.85438
4200	0	0	0.76699	0	-0.76699	0.76699	0	0	-1.53398	0.76699	-0.76699	0	0	-0.76699	0.76699	0	0	0	0.76699	0	0	

รูปที่ 93 แสดงตัวอย่างชุดข้อมูลที่เก็บมาได้

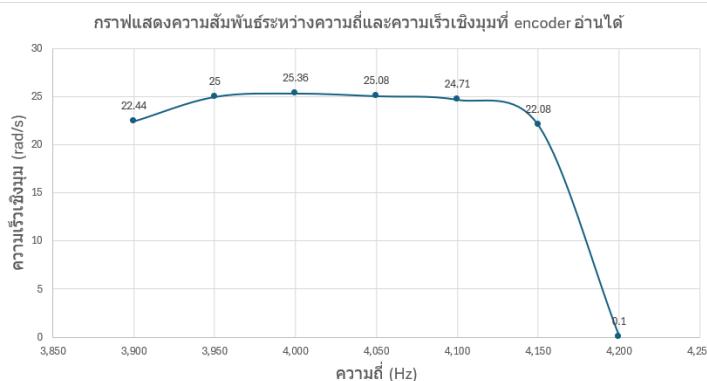
จากนั้น นำข้อมูลความเร็วเชิงมุมทั้ง 100 ค่าในแต่ละความถี่มาคำนวณหาค่าเฉลี่ย เพื่อทำให้ข้อมูลที่ได้นั้นมีความความเสถียรและความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น โดยใช้สมการดังนี้

$$\bar{\omega} = \frac{\sum \omega}{100}$$

โดย $\bar{\omega}$ คือ ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ยในการหมุนของมอเตอร์ มีหน่วยเป็น (rad/s)
 ω คือ ความเร็วเชิงมุมในการหมุนของมอเตอร์ที่วัดได้ มีหน่วยเป็น (rad/s)

ตารางที่ 12 แสดงค่าความเร็วเชิงมุมเฉลี่ยที่คำนวณได้ในแต่ละความถี่

ค่าความถี่ (Hz)	ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ย (rad/s)
3,900	22.44
3,950	25.00
4,000	25.36
4,050	25.08
4,100	24.71
4,150	22.08
4,200	0.10



รูปที่ 94 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเร็วเชิงมุมที่ Encoder อ่านได้

10.7 การเก็บข้อมูลค่าความเร็วเชิงมุม (rad/s) ของ Stepper Motor ใน Micro Step 1/32 Mode จำนวน 100 ชุด ในแต่ละความถี่ โดยความถี่เริ่มที่ 8,000 Hz และเพิ่มขึ้นทีละ 50 จนกว่าจะ Loss Step เพื่อหาค่าความถี่สูงสุด ที่ Stepper Motor สามารถทำงานได้ก่อนเกิด Loss Step

Freq(Hz)	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)																								
8000	59.05826	19.94175	-8.43689	29.91263	42.18447	51.38836	9.970876	-5.36893	30.67962	49.08739	46.01942	5.368933	-11.5049	43.71845	51.38836	37.58253	5.368933	-1.53398	36.04855	56.75729	24.54369	3.834952			
8050	-9.7088	27.61165	39.8835	61.35923	7.669904	-9.20389	34.51457	36.81554	58.29127	18.40777	-8.43689	18.40777	46.01942	52.15535	16.1068	-20.7087	32.2136	49.08739	53.68933	14.57282	-19.1748	32.2136			
8100	21.47573	-19.1748	27.61165	52.15535	12.27185	-7.6699	24.54369	39.8835	62.89322	13.80583	-1.53398	23.7767	41.41748	55.22331	18.40777	-19.9418	33.74758	52.15535	63.66021	7.669904	-19.1748				
8150	40.65049	8.436894	-6.90291	36.81554	56.75729	57.52428	6.135923	-13.0388	32.2136	48.3204	48.3204	6.902914	-21.4757	42.95146	55.9903	59.05826	12.27185	-16.1068	37.58253	45.25243	68.26215	3.834952			
8200	29.91263	4.601943	-3.83495	45.25243	56.75729	39.8835	3.834952	52.92234	64.42719	25.31068	-6.90291	0	47.55341	72.0971	27.61165	8.436894	-0.76699	42.5146	58.29127	30.67962	3.834952				
8250	29.14564	42.18447	58.29127	16.87378	-16.87378	38.34952	52.92234	63.66021	9.970876	-18.4077	46.78642	51.38836	55.22331	7.669904	-11.5049	39.8835	54.45632	59.05826	6.135923	-4.60194	41.41748	64.42719			
8300	58.29127	27.61165	20.7087	39.11651	53.68933	62.89322	6.902914	-7.6699	35.28156	39.8835	62.89322	17.64078	0	28.37663	46.01942	59.05826	19.17408	-17.6408	35.28156	58.29127	61.35923	12.27185			
8350	59.05826	73.63108	40.65049	-2.30097	-6.13592	46.01942	72.0971	32.98059	7.669904	-8.43689	46.01942	67.49516	48.3204	5.368933	-3.83495	48.3204	65.96117	30.67962	-3.83495	-6.13592	52.92234	67.49516			
8400	-16.1068	54.45632	69.79613	52.15535	-0.76699	-9.97088	45.25243	62.89322	45.25243	12.27185	-6.13592	46.01942	53.68933	55.9903	3.067962	-8.43689	59.05826	61.35923	39.8835	4.601943	15.533981	47.55341			
8450	16.87379	-7.6699	11.50486	59.05826	65.96117	29.14564	-29.1456	38.34952	58.29127	79.0002	12.27185	-13.8058	32.98059	52.15535	72.86409	18.40777	-2.30097	14.57282	59.82525	65.96117	28.37665	-25.3107			
8500	56.75729	64.42719	10.73787	-16.1068	55.22331	50.62137	67.49516	13.80583	-5.36893	29.14564	55.22331	65.19418	18.40777	-10.7379	39.8835	64.42719	65.96117	11.50486	-20.7087	51.38836	45.25243	71.33011			
8550	73.63108	16.1068	-6.90291	25.31068	59.82525	71.33011	25.31068	-0.76699	15.33981	57.52428	72.86409	18.40777	-18.4078	39.11651	52.15535	79.0002	19.94175	-4.60194	18.40777	65.96117	67.49516	23.7767			
8600	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.76699	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

รูปที่ 95 แสดงตัวอย่างชุดข้อมูลที่เก็บมาได้

จากนั้น นำข้อมูลความเร็วเชิงมุมทั้ง 100 ค่าในแต่ละความถี่มาคำนวณหาค่าเฉลี่ย เพื่อทำให้ข้อมูลที่ได้นั้นมีความความเสถียรและความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น โดยใช้สมการดังนี้

$$\bar{\omega} = \frac{\sum \omega}{100}$$

โดย $\bar{\omega}$ คือ ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ยในการหมุนของมอเตอร์ มีหน่วยเป็น (rad/s)

ω คือ ความเร็วเชิงมุมในการหมุนของมอเตอร์ที่วัดได้ มีหน่วยเป็น (rad/s)

ตารางที่ 13 แสดงค่าความเร็วเชิงมุมเฉลี่ยที่คำนวณได้ในแต่ละความถี่

ค่าความถี่ (Hz)	ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ย (rad/s)	ค่าความถี่ (Hz)	ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ย (rad/s)
8,000	25.76	8,350	31.06
8,050	25.38	8,400	32.97
8,100	25.23	8,450	30.17
8,150	28.07	8,500	34.68
8,200	28.60	8,550	30.94
8,250	28.56	8,600	-0.02
8,300	31.34		



รูปที่ 96 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเร็วเชิงมุมที่ Encoder อ่านได้

11. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเพิ่มความถี่เพื่อเก็บค่าความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ใน Mode ของ Full-Step พบว่าความเร็วของมอเตอร์แปรผันตามความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า นั่นคือ เมื่อความถี่ของสัญญาณเพิ่มขึ้น จำนวนสเต็ปที่มอเตอร์หมุนในหนึ่งหน่วยเวลาจะเพิ่มขึ้น ทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในทางกลับกัน หากลดความถี่ลง ความเร็วรอบของมอเตอร์ก็จะลดลงตามไปด้วย และจากการทดลองหากค่า Loss Step จากการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า พบร่วมกับความถี่เพิ่มความละเอียดในการอ่าน Step มากขึ้นเท่าไร ค่าความถี่สูงสุดก่อนการ Loss Step จะยิ่งมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งตรงตามสมมติฐาน

12. อภิปรายผล

Stepper Motor ทำงานโดยการหมุนตามคำสั่งจากสัญญาณพัลส์ที่จ่ายเข้าชุดลาดสเตเตอร์ ซึ่งแต่ละพัลส์จะสั่งให้มอเตอร์หมุนทีละสเต็ป ดังนั้น ความถี่ของสัญญาณพัลส์จะกำหนดความเร็วของการหมุนโดยตรง ยิ่งความถี่สูง มอเตอร์จะได้รับคำสั่งให้หมุนในแต่ละสเต็ปเร็วขึ้น ส่งผลให้ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์เพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน หากความถี่ต่ำ มอเตอร์จะหมุนช้าลงเนื่องจากมีเวลามากขึ้นระหว่างพัลส์แต่ละลูก

อย่างไรก็ตาม Stepper Motor มีข้อจำกัดด้านแรงบิดที่เกิดจากความเฉื่อยและแรงเสียดทาน หากความถี่ของสัญญาณพัลส์สูงเกินไป มอเตอร์อาจไม่สามารถหมุนตามคำสั่งได้ทัน เนื่องจากโรเตอร์มีเวลาไม่เพียงพอในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการจ่ายพัลส์ ทำให้เกิดภาวะ Loss Step ซึ่งหมายถึงการที่มอเตอร์ไม่สามารถหมุนไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ และมีความเร็วรอบลดลง

และจากผลการทดลองจะเห็นว่า ยิ่งปรับ Mode ให้มีความละเอียดมากขึ้นเท่าไหร่ มอเตอร์จะสามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงขึ้นเท่านั้น เนื่องจากยิ่งความละเอียดมาก มอเตอร์จะสามารถหมุนไปในแต่ละตำแหน่งได้ละเอียดมากขึ้น เช่นกัน เช่น ใน Full-Step Mode มอเตอร์จะหมุนครั้งละ 1.8 องศา เมื่อปรับการทำงานให้เป็น Half-Step Mode มอเตอร์จะหมุนได้ครั้งละ 0.9 องศา และหากปรับเป็น Micro-Step Mode มอเตอร์จะหมุนได้องศาที่ละเอียดมากขึ้น เรื่อยๆ ตามความละเอียดที่เราตั้งค่าไว้ ซึ่งหมายความว่ายิ่งความละเอียดเพิ่มขึ้น มอเตอร์ต้องการจำนวนพัลส์มากขึ้นในการหมุนครบหนึ่งรอบ ดังนั้นมอเตอร์จึงสามารถรับความถี่ได้มากขึ้น

แต่ใน Mode การทำงานแบบ Micro-Step ที่ความละเอียด 1/16 และ 1/32 นั้น จะเห็นว่ามอเตอร์สามารถรับความถี่ได้ต่ำกว่าความละเอียด 1/8 ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากข้อจำกัดทางกล นั่นคือเมื่อเพิ่มความถี่สูงขึ้นไปถึงระดับหนึ่ง โรเตอร์อาจไม่สามารถตอบสนองได้ทันกับพัลส์ที่เข้ามา เนื่องจากข้อจำกัดทางกลของโรเตอร์และสเตเตอร์ หรืออาจมีสาเหตุมาจากการลดลงของแรงบิด ในโหมด Micro-Step ที่ละเอียดมากขึ้น กระแสที่ให้ผลผ่านขดลวดจะถูกปรับลด และจะรายอย่างละเอียดตามบุบbling ที่ต้องการ ยิ่งจำนวนสเต็ปมากขึ้น กระแสต่อสเต็ปยิ่งต่ำ ส่งผลให้ แรงบิดลดลง แรงบิดที่ต่ำลงทำให้ Stepper Motor สูญเสียความสามารถในการอาชันนั่นแรงเสียดทานและแรงเฉื่อยเมื่อทำงานที่ความถี่สูง ส่งผลให้มอเตอร์เริ่มพลาดตำแหน่งหรือหยุดหมุน (Loss Step)

13. ข้อเสนอแนะ

13.1 ปรับปรุงบอร์ดที่ใช้ในการทดลองให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากบอร์ดที่ใช้ในปัจจุบันเกิดข้อผิดพลาด ขึ้นหลายอย่าง ทั้งชิ้นส่วนบางชิ้นหลุด เกิด Misalignment ทำให้ต้องถอดและประกอบบอร์ดใหม่อยู่บ่อยครั้ง ซึ่งส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการทำการทดลอง

13.2 เพิ่ม Heat Sink ให้กับมอเตอร์ เนื่องจากในระหว่างทำการทดลอง มอเตอร์เกิดความร้อนมาก ซึ่งอาจส่งผลกระทบกับประสิทธิภาพในการทำงานของมอเตอร์ และทำให้ชิ้นส่วน 3D Printing ละลายได้

14. เอกสารอ้างอิง

- 14.1 https://en.wikipedia.org/wiki/Stepper_motor
- 14.2 <http://ee.cet.ac.in/downloads/demo/PMSM.html>
- 14.3 <https://circuitglobe.com/variable-reluctance-stepper-motor.html>
- 14.4 <https://picobricks.com/blogs/info/what-is-motor-driver?srsltid=AfmBOoofgKoirqJRYcN09mMCiqrThcBxox6dP06d0H6y9KY4VeRjwNf>
- 14.5 <https://th.twmotor.net/info/how-brushless-dc-motors-work-97376907.html>
- 14.6 <https://binalweerasena-k.medium.com/all-you-need-to-know-about-stepper-motors-6c39efa7b1fc>

การทดลองที่ 3 Brushless DC Motor

1. จุดประสงค์

- 1.1 สามารถอธิบายหลักการทำงานของ Brushless DC Motor ได้
- 1.2 เข้าใจวิธีการตั้งค่า Motor ในโปรแกรม Motor Workbench 6.3.2
- 1.3 เข้าใจวิธีการตั้งค่า PWM Generation Frequency และ Speed Sensing
- 1.4 เข้าใจ Electrical parameters, Mechanical parameters, และ Motor magnetic structure ของ BLDC Motor

1.5 เข้าใจ BLDC motor control types ทั้งในรูปแบบ Sensorless Control และ Sensor-based Control
1.6 เข้าใจและอธิบายกราฟสัญญาณของ BLDC Motor ทั้ง 3 Phases จากพุติกรรมที่สังเกตว่ามาจากการควบคุมแบบไหน และสาเหตุที่กราฟมีลักษณะเช่นนี้โดยละเอียด และวิเคราะห์โดยใช้ผลการเรียนรู้ย่อที่เกี่ยวข้องมาอธิบายและอภิปรายในผลการทดลอง ครอบคลุมถึง

- 1.6.1 Brushless DC (BLDC) Motor
- 1.6.2 Trapezoidal Back EMF
- 1.6.3 Permanent Magnet Synchronous Machine (PMSM)
- 1.6.4 Trapezoidal Control
- 1.6.5 Field-Oriented Control (FOC)
- 1.6.6 Pulse Width Modulation (PWM)
- 1.6.7 Commutation Logic
- 1.6.8 Six-Step Commutation
- 1.6.9 Space Vector Modulation (SVM)
- 1.6.10 Sensorless Control
- 1.6.11 Hall Effect Sensors

โดยสามารถนำผลการทดลองไปเปรียบเทียบกับพุติกรรมการควบคุม PMSM แบบ FOC ด้วยการสืบค้นจากแหล่งข้อมูลภายนอก เช่น MATLAB

1.7 เข้าใจวิธีการคำนวณหาความเร็วของ BLDC Motor จาก Frequency ของสัญญาณที่อ่านได้จาก Oscilloscope

- 1.8 เข้าใจวิธีการใช้งาน Oscilloscope 4 Channels ในการจับสัญญาณของ BLDC Motor ทั้ง 3 Phases

2. สมมติฐานการทดลอง

- 2.1 ความเร็วเฉิงกลของ Brushless DC motor แปรผันตามความถี่ของแรงดัน Back EMF 1 รูปคลื่น
- 2.2 ความเร็วเฉิงกลของมอเตอร์แปรผันตาม Duty cycle

3. กำหนดตัวแปร

3.1 ตัวแปรต้น

3.1.1 RPM ที่ป้อนให้モเตอร์หมุนจำนวน 20 ค่าตั้งแต่ช่วง -9800 ถึง 9800 เพิ่มทีละ 1000

3.2 ตัวแปรตาม

3.2.1 ค่า RPM ที่คำนวณจากความสัมพันธ์ของความถี่ของแรงดัน Back EMF กับจำนวน Pole pairs

3.2.2 ค่า Duty cycle จาก RPM ที่สนใจ

3.3 ตัวแปรควบคุม

8.1 BLDC Motor

8.2 STMICROELECTRONICS X-NUCLEO-IHM08M1

8.3 Nucleo STM32G474RE พร้อมสายอัปโหลด

8.4 BLDCXplorer

4. นิยามศัพท์เฉพาะ

4.1 เก็บค่าความถี่จากสัญญาณ Trapezoid เทียบกับค่า rpm ณ ค่าต่าง ๆ หมายถึง การบันทึกค่าความถี่ของสัญญาณที่มีลักษณะเป็นคลื่นทรายปีซอยด์ และเปรียบเทียบกับค่าความเร็วรอบ (RPM) ในแต่ละระดับที่กำหนด

4.2 กรอกค่า RPM ที่ Target Speed หมายถึง การป้อนค่าความเร็วรอบที่ต้องการ (Target Speed) เพื่อใช้ในการควบคุมหรือทดสอบการทำงานของモเตอร์

4.3 เก็บความถี่ของแรงดัน Back EMF หมายถึง การบันทึกค่าความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Back EMF) ที่เกิดขึ้นในโมเตอร์ขณะหมุน

4.4 เก็บ Duty Cycle หมายถึง การบันทึกค่า Duty Cycle หรือสัดส่วนของเวลาเปิดการทำงานต่อรอบเวลาทั้งหมดในสัญญาณ PWM

5. นิยามเชิงปฏิบัติการ

5.1 Brushless DC Motor หมายถึง โมเตอร์กระแสตรงที่ไม่มีแปรงถ่าน (Brush) และคอมมิวเตเตอร์ ทำงานโดยใช้วงจรอลิเกตทรอนิกส์ในการสลับทิศทางกระแสไฟฟ้าในชุดลวดของสเตเตอร์เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กหมุนและควบคุมการหมุนของโรเตอร์ ในการทดลองนี้หมายถึง BLDC A2212/13T

5.2 MotorControl Workbench 6.3.2 หมายถึง ซอฟต์แวร์เครื่องมือสำหรับการออกแบบและพัฒนาโปรแกรมควบคุมโมเตอร์ ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถปรับแต่งและทดสอบการควบคุมโมเตอร์ในระบบต่าง ๆ

5.3 PWM Generation Frequency หมายถึง ความถี่ที่ใช้ในการสร้างสัญญาณพัลส์ความกว้างที่เปลี่ยนแปลง (PWM) เพื่อควบคุมพลังงานที่จ่ายไปยังโมเตอร์

5.4 Speed Sensing หมายถึง การตรวจจับและวัดความเร็วของโมเตอร์หรือระบบหมุน เพื่อใช้ในการควบคุมและประเมินประสิทธิภาพการทำงาน

5.5 Electrical Parameters หมายถึง ค่าทางไฟฟ้าที่ใช้บ่งบอกคุณสมบัติของระบบ เช่น แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า

5.6 Mechanical Parameters หมายถึง ค่าทางกลศาสตร์ที่ใช้บ่งบอกคุณสมบัติของระบบ เช่น ความเร็ว เชิงมุม แรงบิด และแรงเสียดทาน

5.7 การควบคุมมอเตอร์ หมายถึง กระบวนการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ในด้านความเร็ว ทิศทาง หรือแรงบิด เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานที่กำหนด

5.8 Motor Magnetic Structure หมายถึง โครงสร้างของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ที่เกิดจากการจัดเรียงแม่เหล็กและชุดลวด ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพและการทำงานของมอเตอร์

5.9 Sensorless Control หมายถึง การควบคุมมอเตอร์โดยไม่ใช้เซ็นเซอร์ในการตรวจจับตำแหน่งหรือความเร็วของโรเตอร์ แต่ใช้การคำนวณจากข้อมูลไฟฟ้าแทน

5.10 Sensor-Based Control หมายถึง การควบคุมมอเตอร์โดยใช้เซ็นเซอร์ในการตรวจจับตำแหน่งหรือความเร็วของโรเตอร์ เพื่อให้การควบคุมมีความแม่นยำสูงขึ้น

5.11 Trapezoidal Back EMF หมายถึง แรงคลื่นไฟฟ้าหนี่วนทำที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ BLDC ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปคลื่นทรายปี啾ย์

5.12 Permanent Magnet Synchronous Machine หมายถึง มอเตอร์ที่ใช้แม่เหล็กถาวรในโรเตอร์และทำงานร่วมกับสนามแม่เหล็กในสเตเตอร์แบบซิงโครนัส

5.13 Trapezoidal Control หมายถึง เทคนิคการควบคุมมอเตอร์ที่ใช้สัญญาณควบคุมในลักษณะทรายปี啾ย์เพื่อควบคุมแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์

5.14 Field-Oriented Control หมายถึง เทคนิคการควบคุมสัญญาณไฟฟ้าโดยการปรับความกว้างของพัลส์ที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุม

5.15 Pulse Width Modulation หมายถึง เทคนิคการควบคุมสัญญาณไฟฟ้าโดยการปรับความกว้างของพัลส์ในสัญญาณที่มีความถี่คงที่ เพื่อควบคุมพลังงานที่ส่งไปยังโหลด

5.16 Commutation Logic หมายถึง ลอกิจหรือหลักการที่ใช้ในการสลับทิศทางกระแสไฟฟ้าในมอเตอร์ เพื่อควบคุมการทำงานของสนามแม่เหล็กและโรเตอร์ให้สมพันธ์กัน

5.17 Six-Step Commutation หมายถึง วิธีการสลับกระแสไฟฟ้าในมอเตอร์ BLDC แบบหกขั้นตอน เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กหมุนที่ช่วยให้โรเตอร์หมุนได้อย่างต่อเนื่อง

5.18 Space Vector Modulation หมายถึง เทคนิคการควบคุมมอเตอร์ที่ใช้การปรับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าในเชิงมุมและเวลาเพื่อสร้างเวกเตอร์แรงดันที่มีประสิทธิภาพสูง

5.19 การสร้างสนามแม่เหล็ก หมายถึง กระบวนการสร้างสนามแม่เหล็กในมอเตอร์หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าผ่านการใช้ชุดลวดหรือแม่เหล็กถาวรเพื่อการตั้งค่าการทำงานของระบบ

5.20 Hall Effect Sensors หมายถึง เซ็นเซอร์ที่ใช้ผลอยอลล์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยสามารถแปลงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กเป็นสัญญาณไฟฟ้า

5.21 Oscilloscope หมายถึง เครื่องมือที่ใช้ในการแสดงและวิเคราะห์สัญญาณไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยจะแสดงผลในรูปของกราฟบนหน้าจอ

5.22 RPM หมายถึง จำนวนรอบการหมุนของวัตถุรอบแกนหมุนในหนึ่งนาที ใช้เป็นหน่วยวัดความเร็วเชิงมุมในระบบหมุนหรือเครื่องจักรกล

5.23 Duty Cycle หมายถึง สัดส่วนระหว่างเวลาในการทำงาน (On-time) และระยะเวลาเต็มรอบของสัญญาณพัลส์ (Period) โดยมักแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์

5.24 Back-EMF หมายถึง แรงคดลู้นไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขณะเดินทางของมอเตอร์ขณะหมุน ซึ่งเกิดจากการตัดผ่านสนามแม่เหล็กของตัวนำ

5.25 การป้อนกลับ หมายถึง กระบวนการส่งสัญญาณหรือข้อมูลจากผลลัพธ์ของระบบกลับไปยังตัวควบคุมเพื่อปรับปรุงหรือควบคุมการทำงานของระบบ

5.26 Pole Pairs หมายถึง คู่ของขั้วแม่เหล็กเหนือและขั้วแม่เหล็กใต้ท่ออยู่บนโรเตอร์หรือสเตเตอร์ของมอเตอร์ ซึ่งใช้ในการคำนวณคุณสมบัติต่าง ๆ ของมอเตอร์

5.27 Simulink หมายถึง โปรแกรมที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองระบบด้วยแผนภาพแบบล็อก ช่วยจำลองระบบการทำงานและสามารถเขียนต่อเพื่อ อ่านค่าจากอุปกรณ์หารดแรร์ได้โดยไม่ต้องเขียนโค้ด

5.28 Incremental Encoder หมายถึง อุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งหรือการหมุนที่ให้สัญญาณพัลส์เพื่อบอกการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งหรือการหมุนในแต่ละขั้น

5.29 Nucleo STM32G474RE หมายถึง บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น Nucleo STM32G474RE ที่ใช้พัฒนาการควบคุมและอ่านค่าจากเซนเซอร์หรืออุปกรณ์ที่เขียนต่อได้ มาพร้อมพอร์ตเขียนต่อ USB และรองรับการเขียนโปรแกรมผ่านซอฟต์แวร์ต่าง ๆ

5.30 สนามแม่เหล็ก หมายถึง บริเวณรอบแม่เหล็กหรือกระแสไฟฟ้าที่มีกำลังทำให้เกิดแรงกระทำต่อวัสดุแม่เหล็กหรืออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าในบริเวณนั้น

5.31 Sensor-Based Control using Hall-Effect Sensor หมายถึง การควบคุมมอเตอร์ที่ใช้เซ็นเซอร์ฮอลล์ในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กเพื่อตรวจสอบตำแหน่งหรือความเร็วของโรเตอร์

5.32 Characteristics หมายถึง คุณสมบัติหรือพฤติกรรมที่สังเกตได้จากสิ่งใดสิ่งหนึ่ง เช่น การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยต่าง ๆ ในมอเตอร์

5.33 Characteristics of Motor หมายถึง คุณสมบัติและพฤติกรรมของมอเตอร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ เช่น ความเร็ว แรงบิด และกระแสไฟฟ้า

5.34 Phase Shift หมายถึง การเลื่อนตำแหน่งของสัญญาณหรือคลื่นหนึ่ง ๆ ไปในทิศทางของเวลา โดยมักใช้เพื่อจัดการเปลี่ยนแปลงในมุมระหว่างสัญญาณสองตัวที่มีความถี่เดียวกัน

5.35 Sinusoidal Commutation หมายถึง วิธีการเปลี่ยนทิศทางกระแสไฟฟ้าในมอเตอร์ BLDC โดยใช้สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นคลื่นไซน์เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กหมุน

5.36 Sinusoidal control หมายถึง เทคนิคการควบคุมมอเตอร์ที่ใช้สัญญาณควบคุมในรูปแบบของคลื่นไอน์เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่หมุนอย่างราบรื่น

5.37 Inductance หมายถึง คุณสมบัติของตัวนำหรือวงจรไฟฟ้าที่ต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดสนามแม่เหล็กตามกระแสไฟฟ้า

5.38 การเหนี่ยวนำไฟฟ้า หมายถึง ปรากฏการณ์ที่แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในตัวนำเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กที่ผ่านตัวนำนั้น

5.39 Electrical Angle หมายถึง มุมที่ใช้ในการอธิบายตำแหน่งของโรเตอร์ในมอเตอร์ไฟฟ้า โดยสัมพันธ์กับการหมุนของสนามแม่เหล็กในสเตเตอร์

5.40 Angular Velocity หมายถึง อัตราการเปลี่ยนแปลงมุมของวัตถุที่หมุน โดยวัดในหน่วยขององศาหรือเรเดียนต่อวินาที

5.41 ค่าเฉลี่ย หมายถึง ผลรวมของค่าทั้งหมดในชุดข้อมูลหารด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมด ซึ่งใช้ในการหาค่ากลางของชุดข้อมูล

5.42 Mechanical Angle หมายถึง มุมที่วัดจากตำแหน่งเริ่มต้นของโรเตอร์ในมอเตอร์ โดยแสดงถึงการหมุนที่แท้จริงของโรเตอร์เมื่อเทียบกับแกนหมุน

5.43 Ripple Torque หมายถึง การเปลี่ยนแปลงหรือความผันผวนของแรงบิดที่เกิดขึ้นระหว่างการหมุนของมอเตอร์

5.44 Synchronize หมายถึง การทำให้สองหรือมากกว่าของกระบวนการหรือระบบทำงานร่วมกันในเวลาเดียวกันหรืออยู่ในระยะเวลาเดียวกัน

5.45 Switching Times หมายถึง ระยะเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของสวิตช์หรืออุปกรณ์จากสถานะหนึ่งไปยังสถานะอื่น

5.46 Full Rated Voltage หมายถึง ค่าแรงดันไฟฟ้าที่กำหนดไว้ในスペคของอุปกรณ์ที่สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ

5.47 Ground หมายถึง จุดที่เป็นฐานหรือศูนย์ของระบบไฟฟ้า ใช้เป็นจุดอ้างอิงในการวัดแรงดันไฟฟ้าและป้องกันอันตรายจากไฟฟ้าลัดวงจร

5.48 กระแสไฟฟ้า AC หมายถึง กระแสไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางอย่างต่อเนื่องและเป็นระยะ โดยใช้ในระบบส่งพลังงานไฟฟ้า

5.49 Adaptor 24 V หมายถึง อุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าหนึ่งให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 24 โวลต์ เพื่อใช้งานกับอุปกรณ์ต่าง ๆ

5.50 On-Time หมายถึง ระยะเวลาที่อุปกรณ์หรือวงจรทำงานในสถานะเปิดหรือทำงานตามที่กำหนด

5.51 On-State Duration หมายถึง ระยะเวลาที่อุปกรณ์หรือวงจรทำงานในสถานะเปิดหรือเชื่อมต่อ โดยกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

5.52 Pulse หมายถึง การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณไฟฟ้าในช่วงเวลาสั้น ๆ ใช้ในการส่งข้อมูลหรือควบคุมการทำงานในระบบไฟฟ้า

5.53 แรงดันไฟฟ้า หมายถึง ความแตกต่างของพลังงานไฟฟาระหว่างสองจุดในวงจรไฟฟ้า ซึ่งเป็นตัวกำหนดการไหลของกระแสไฟฟ้า โดยมีหน่วยวัดเป็นโวลต์ (Volt)

5.54 Space Vector Hexagon หมายถึง รูปแบบการแสดงผลของเวกเตอร์แรงดันในระบบการควบคุมมอเตอร์สามเฟส ซึ่งจัดเรียงในลักษณะหกเหลี่ยม

5.55 Null Vector หมายถึง เวกเตอร์แรงดันที่มีค่าศูนย์ในระบบ Space Vector Modulation ซึ่งใช้ปรับสมดุลของแรงดันในระบบ

5.56 Resistive DC Device หมายถึง อุปกรณ์ที่ใช้การต้านทานไฟฟ้าเพื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าในระบบกระแสตรง

5.57 Dynamic Braking หมายถึง วิธีการลดความเร็วของมอเตอร์โดยใช้พลังงานที่เกิดจากมอเตอร์เองในการสร้างแรงต้าน

5.58 Three-Phase AC Power หมายถึง ระบบพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับที่ประกอบด้วยสามเฟส โดยแต่ละเฟสมีความถี่เดียวกันแต่มีการเลื่อนเฟส

5.59 Target Speed หมายถึง ความเร็วที่ตั้งเป้าหมายให้มอเตอร์หรืออุปกรณ์หมุนึงตามที่ต้องการ

5.60 Alternating Magnetic Poles หมายถึง การเรียงลำดับของขั้วแม่เหล็กที่สลับกันระหว่างขั้วเหนือและขั้วใต้ในมอเตอร์

5.61 High-Z หมายถึง สถานะของวงจรหรืออุปกรณ์ที่มีความต้านทานสูง ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้น้อย

5.62 Low-Z หมายถึง สถานะของวงจรหรืออุปกรณ์ที่มีความต้านทานต่ำ ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้มาก

5.63 Permanent magnet หมายถึง แม่เหล็กที่สร้างสนามแม่เหล็กคงที่โดยไม่ต้องการแหล่งพลังงานภายนอก

5.64 Stator หมายถึง ส่วนที่อยู่กับที่ของมอเตอร์หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กเพื่อกระตุ้นการทำงานของโรเตอร์

5.65 Rotor หมายถึง ส่วนที่หมุนได้ของมอเตอร์หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำหน้าที่สร้างแรงบิดและการเคลื่อนที่เมื่อได้รับพลังงานจากสนามแม่เหล็ก

5.66 Brush หมายถึง ส่วนประกอบของมอเตอร์ที่ทำหน้าที่ส่งกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไปยังคอมมิวเตเตอร์

5.67 Torque หมายถึง แรงที่กระทำต่อวัตถุเพื่อทำให้เกิดการหมุนรอบแกน

5.68 Low Inertia หมายถึง คุณสมบัติของวัตถุที่มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วต่ำ ทำให้สามารถเร่งหรือชะลอการหมุนได้อย่างรวดเร็ว

5.69 External Rotor หมายถึง โรเตอร์ที่อยู่ภายนอกของสเตเตอร์ในมอเตอร์ ซึ่งช่วยเพิ่มแรงบิดและลดขนาดของมอเตอร์ในบางการใช้งาน

5.70 Outrunner Brushless DC Motor หมายถึง มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่มีการออกแบบให้รีเตอร์หมุนอยู่ภายนอกสเตเตอร์

5.71 Moment of Inertia หมายถึง การวัดความต้านทานของวัตถุต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมเมื่อมีแรงบิดกระทำ

5.72 Lenz's Law หมายถึง กฎที่ระบุว่าทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำในวงจรจะต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่ทำให้เกิดกระแสนั้น

5.73 Zero-Crossing หมายถึง จุดที่สัญญาณหรือคลื่นขั้มผ่านค่าศูนย์ โดยมีการเปลี่ยนแปลงจากค่าบวกเป็นค่าลบหรือกลับกัน

5.74 Intercept of the Axis หมายถึง จุดที่กราฟหรือเส้นตรงตัดกับแกนในระบบพิกัด

5.75 RC Cars หมายถึง รถยนต์ที่ควบคุมโดยรีโมตคอนโทรล ซึ่งสามารถควบคุมทิศทางและความเร็วของ BLDC ได้จากระยะไกล

5.76 Electric Vehicles หมายถึง ยานยนต์ที่ใช้ BLDC และพลังงานไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานหลักในการขับเคลื่อน

5.77 Fan-Jets หมายถึง เครื่องมือที่ใช้ BLDC ในการขับเคลื่อน โดยໄเล่อากาศออกผ่านใบพัดเพื่อสร้างแรงดูด

5.78 H-Bridge Drive หมายถึง วงจรขับมอเตอร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์หรือสวิตช์ไฟฟ้าสี่ตัวจัดเรียงในรูปแบบคล้ายตัวอักษร H เพื่อควบคุมทิศทางและความเร็วของมอเตอร์

5.79 Voltage Measurement หมายถึง การตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้าในระบบหรือวงจร เพื่อประเมินประสิทธิภาพและการทำงานของอุปกรณ์

5.80 Frequency หมายถึง จำนวนรอบของการเกิดซ้ำของสัญญาณหรือคลื่นในหนึ่งวินาที โดยวัดในหน่วยไฮรัตซ์ (Hz)

5.81 Motor Driver หมายถึง อุปกรณ์หรือวงจรที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์ เช่น การเปิด-ปิด การควบคุมทิศทาง ความเร็ว และแรงบิด ในการทดลองนี้หมายถึง STMICROELECTRONICS X-NUCLEO-IHM08M1

5.82 Space Vector Control หมายถึง เทคนิคการควบคุมมอเตอร์ที่ใช้การคำนวณเวลาเดอร์แรงดันในระบบสามเฟสเพื่อเพิ่มความแม่นยำและประสิทธิภาพ

5.83 BLDC A2212/13T หมายถึง มอเตอร์ไร้แปรงถ่านรุ่น A2212/13T

5.84 Loss Step หมายถึง การสูญเสียตำแหน่งของโรเตอร์ในมอเตอร์เมื่อแรงบิดหรือโหลดเกินกว่าที่มอเตอร์จะรับได้

5.85 Optical Encoder หมายถึง อุปกรณ์ที่ใช้แสงในการตรวจจับการหมุนหรือการเคลื่อนที่ของเพลาหรือส่วนประกอบอื่น ๆ

5.86 Time Constant หมายถึง ค่าที่แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของระบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปร เช่น แรงดันหรือกระแสไฟฟ้า

5.87 Magnetic Structure หมายถึง โครงสร้างแม่เหล็กภายในมอเตอร์ที่ส่งผลต่อการสร้างสนามแม่เหล็กและประสิทธิภาพการทำงาน

5.88 Hall Latches หมายถึง เซ็นเซอร์สอลล์ที่ทำงานในลักษณะการจับตำแหน่งหรือสถานะของสนามแม่เหล็ก โดยล็อกตำแหน่งของสัญญาณออก

5.89 Sinusoidal PWM หมายถึง เทคนิคการควบคุมมอเตอร์ที่ใช้การสร้างสัญญาณพัลส์ความกว้างที่มีลักษณะเป็นคลื่นไอน์เพื่อควบคุมการจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์

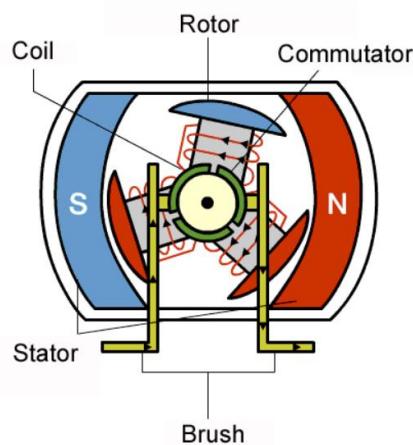
5.90 BLDCXplorer หมายถึง บอร์ดที่ประกอบไปด้วยฐานที่สามารถบรรจุบอร์ดควบคุม, Brushless DC Motor และ 3D-Print part ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์และควบคุมมอเตอร์ BLDC โดยช่วยให้ผู้ใช้สามารถทดสอบการทำงานของมอเตอร์ได้ในหลากหลายรูปแบบ

5.91 สายจัมเปอร์ หมายถึง สายไฟขนาดเล็กที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างขั้วหรือจุดต่าง ๆ บนบอร์ดทดลองวงจรไฟฟ้า

6. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

6.1 Brushless DC Motor

Brushless DC Motor เป็นมอเตอร์ที่ไม่ใช้แปรงถ่าน โดยแปรงถ่านจะนำกระแสไฟฟ้าผ่านคอมมิวเตเตอร์เข้าสู่ชุดลวดที่อยู่บนโรเตอร์ แต่สำหรับมอเตอร์แบบไร้แปรงถ่าน กระแสไฟฟ้าจะไม่ถูกส่งไปยังชุดลวดบนโรเตอร์ เนื่องจากชุดลวดไม่ได้อยู่บนโรเตอร์นั่นเอง โดยโรเตอร์ของมอเตอร์แบบนี้จะเป็นแม่เหล็กถาวร ในขณะที่ชุดลวดจะถูกติดตั้งอยู่กับที่บันสเตเตอร์ (Stator) และเนื่องจากชุดลวดไม่ได้เคลื่อนที่ จึงไม่จำเป็นต้องใช้แปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์ เนื่องจากโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร จึงไม่ต้องการกระแสไฟฟ้า ซึ่งช่วยลดความจำเป็นในการใช้แปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์ กระแสไฟฟ้าสำหรับชุดลวดที่อยู่กับที่จะถูกควบคุมจากภายนอก



รูปที่ 97 Brushless DC Motor

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

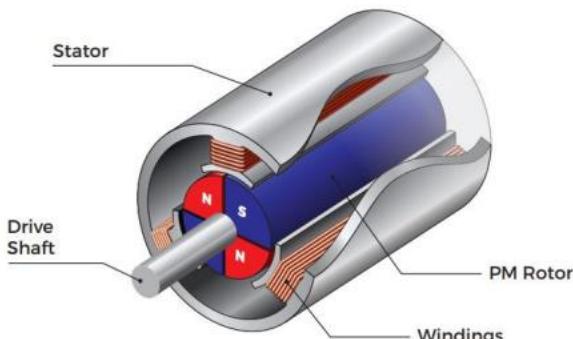
6.1.1 องค์ประกอบของ Brushless DC Motor

6.1.1.1 Stator

สเตเตอเร่อเป็นส่วนที่บรรจุชุดลวดของมอเตอร์ ซึ่งแตกต่างจากมอเตอร์ DC แบบมีแปรง (Brushed DC Motor) ที่ขดลวดอยู่ในโรเตอร์ ขดลวดจะถูกพันและติดตั้งกับสเตเตอเร่อโดยสายไฟจะพันรอบแนวนหรือพันของเหล็กแผ่นบางที่ประกอบกันเป็นสเตเตอเร่อ ซึ่งทำให้เกิดขดลวดสเตเตอเร่อ ขดลวดเหล่านี้สามารถจัดเรียงได้ในสองรูปแบบคือ Concentrated winding และ Distributed winding ซึ่งทั้งสองแบบมีความแตกต่างกันในวิธีการพันขดลวดรอบสเตเตอเร่อและรูปคลื่นของ Back-EMF ที่เกิดขึ้น

6.1.1.2 Rotor

โรเตอร์ประกอบด้วยเพลาหรือแกนมอเตอร์และแม่เหล็กถาวรที่มีขั้วแม่เหล็กสลับกัน (Alternating Magnetic Poles) จำนวนขั้วแม่เหล็กในโรเตอร์ขึ้นอยู่กับการใช้งาน การมีขั้วแม่เหล็กมากขึ้นสามารถช่วยเพิ่มแรงบิด (Torque) แต่จะลดความเร็วสูงสุดของมอเตอร์



รูปที่ 98 โครงสร้างของ Brushless DC Motor

ที่มา : <https://www.diodes.com/assets/Uploads/AN1164-BLDC-Motors.pdf>

6.1.2 ประเภทของ Brushless DC Motor Pole

Pole Pair ในมอเตอร์ BLDC หมายถึงขั้วแม่เหล็กทางไฟฟ้าที่อยู่ใน stator หรือขั้วแม่เหล็กทางแม่เหล็กที่อยู่ใน rotor มอเตอร์ BLDC แบบสามเฟสพื้นฐานจะมีสาม Pole Pairs บนสเตเตอเร่อ และสามารถรองรับขั้วแม่เหล็กหลายขั้วนบนโรเตอร์ได้ ขึ้นอยู่กับการใช้งาน

6.1.2.1 Pole stator

จำนวนขั้วแม่เหล็กใน stator โดย 1 pole stator จะมี 3 permanent magnet

6.1.2.2 Rotor Pole

จำนวนขั้วแม่เหล็กใน rotor โดย 1 pole rotor จะมี 2 ขั้ว

6.1.3 ประเภทของ Brushless DC Motor

6.1.3.1 Inrunner Brushless DC Motor

โครงสร้างมอเตอร์มีการจัดเรียงที่โรเตอร์แม่เหล็กถาวรอยู่ภายในสเตเตอร์ที่มีขนาดด้วยพื้น ข้อดีหลักสองประการของการออกแบบแบบนี้คือ การระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากตำแหน่งของขนาด และความสามารถในการลดขนาดเส้นรอบวงโดยรวมของมอเตอร์ อย่างไรก็ตาม จำเป็นต้องใช้แม่เหล็กที่มีพลังงานสูง ซึ่งอาจส่งผลต่อค่าใช้จ่าย เนื่องจากออกแบบที่มีมวลต่ำ (Low Inertia) การออกแบบ Inrunner จึงเหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ต้องการความเร็วสูง เช่น เครื่องยนต์พัดลม-เจ็ท (Fan-Jets), รถบังคับวิทยุ (RC Cars), และยานพาหนะไฟฟ้า (Electric Vehicles)

6.1.3.2 Outrunner Brushless DC Motor

ในการตั้งค่านี้ โรเตอร์ภายนอก (External Rotor) จะห่อหุ้มสเตเตอร์และมีขนาดใหญ่กว่าในมอเตอร์ทั่วไป การออกแบบนี้ให้ โมเมนต์ความเนื่อย (Moment of Inertia) ที่สูงขึ้นและช่วยลด แรงบิดการสั่นสะเทือน (Ripple Torque) ทำให้มอเตอร์หมุนได้อย่างราบรื่นที่ความเร็วต่ำ การออกแบบนี้มักพบในงานที่ต้องการแรงบิดสูง เช่น ปั๊มและพัดลม (เนื่องจากการหุ้มโรเตอร์สามารถทำหน้าที่เป็นขับได้)



รูปที่ 99 Inrunner (ซ้าย) และ Outrunner (ขวา)

ที่มา : <https://depositphotos.com/photo/rotor-stator-electric-motor-isolated-white-background-231119806.html>

6.2 Permanent Magnet Synchronous Motor

Permanent Magnet Synchronous Motor หรือ PMSM หรือเป็นมอเตอร์ไฟฟ้านิcidหนึ่งที่ใช้แม่เหล็กถาวร (Permanent Magnets) เป็นส่วนประกอบใน โรเตอร์ (Rotor) เพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก และทำงานโดยที่ความเร็วของโรเตอร์จะสัมพันธ์โดยตรง (Synchronize) กับความถี่ของกระแสไฟฟ้า AC ที่ป้อนให้ สเตเตอร์ (Stator)

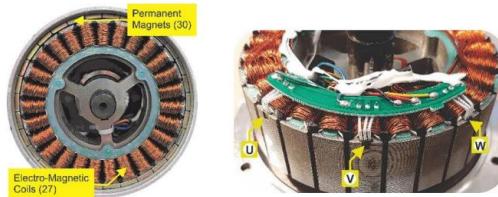


รูปที่ 100 Brushless DC Motor

ที่มา : <https://www.controldesign.com/directory/product/11323783/nidec-motor-motor-drive-industrial-electric-nidec-motor-brushless-permanent-magnet-motor-and-drive>

6.3 Sensor-based Control using Hall-Effect Sensor

Brushless DC Motor Sensor-Based Control ระบบการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ Brushless DC โดยอาศัยเซ็นเซอร์ ในการตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ (Rotor) เพื่อช่วยในการควบคุมทิศทาง และจังหวะการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับขดลวดสเตเตอเร่อร์ (Stator) ของมอเตอร์อย่างแม่นยำ โดยในรายงานนี้ จะยกตัวอย่างระบบที่ใช้ Hall-Effect Sensor



รูปที่ 101 Brushless DC Motor Commutation Using Hall-Effect Sensors

6.4 Sensorless Control

Sensorless Control หมายถึงวิธีการควบคุมมอเตอร์โดย ไม่ใช้เซ็นเซอร์ตรวจจับตำแหน่งของ โรเตอร์ เช่น Hall Sensor หรือ Optical Encoder แต่ใช้วิธีการตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ผ่านคุณสมบัติทางไฟฟ้าของมอเตอร์แทน เช่น แรงดันย้อนกลับ (Back-EMF)



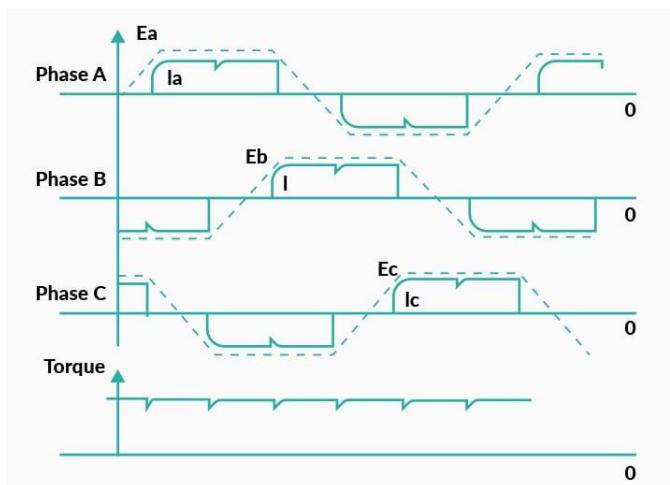
รูปที่ 102 Sensorless Brushless DC Motor

ที่มา : <https://www.diodes.com/assets/Uploads/AN1164-BLDC-Motors.pdf>

6.5 Trapezoidal control

Trapezoidal Commutation เป็นการควบคุมที่กำหนดครูปร่างของแรงดันย้อนกลับ (Back EMF) และคลื่นสัญญาณกระแสที่ใช้ขั้บมอเตอร์ เพื่อให้มอเตอร์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด รูปคลื่นของกระแสขับเคลื่อนควรสอดคล้องกับรูปคลื่นของแรงดันย้อนกลับ (Back EMF) เนื่องจากแรงดันย้อนกลับของมอเตอร์ BLDC มีลักษณะเป็นทรายเบซอยด์ (Trapezoidal) ดังนั้น กระแสที่ขับมอเตอร์ควรมีรูปร่างแบบทรายเบซอยด์เช่นกันเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

วิธีนี้มักเรียกว่า “Six Step Commutation” เพราะการขับเคลื่อนกระแสแบบออกเป็น 6 ขั้นตอน (Steps) เพื่อให้โรเตอร์หมุนครบ 1 รอบ ใน การควบคุมแบบ Trapezoidal จะมีการกระตุ้นเฟสของมอเตอร์เพียง 2 เฟสในแต่ละครั้ง วิธีนี้ใช้อัลกอริทึมการควบคุมที่ง่ายและไม่ซับซ้อน แต่มีข้อเสียคือเกิด แรงบิดไม่สม่ำเสมอ (Torque Ripple) ทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนเฟส (ทุกๆ 60 องศาเชิงกล)



รูปที่ 103 Trapezoidal Commutation

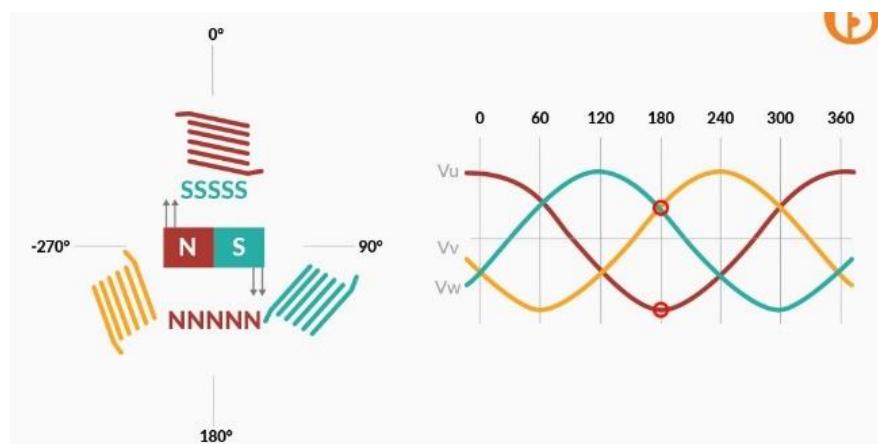
ที่มา : <https://bacancysystems.com/blog/trapezoidal-and-sinusoidal-blcd-motors>

6.6 Sinusoidal control

Sinusoidal Commutation ถูกนำมาใช้กับมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Synchronous Motors - PMSM) เนื่องจากมอเตอร์ PMSM มีแรงดันย้อนกลับ (Back EMF) ที่มีรูปร่างเป็น Sinusoidal แม้ว่าทางทฤษฎีแล้วแรงดันย้อนกลับของมอเตอร์ BLDC จะมีรูปร่างเป็นทรายเบซอยด์ (Trapezoidal) แต่ค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) ในมอเตอร์จะทำให้แรงดันย้อนกลับนั้นถูกปรับให้เรียบจนมีลักษณะใกล้เคียงกับไซนุซอยด์ ดังนั้น มอเตอร์ BLDC จึงสามารถใช้วิธีคอมมิวเตชันได้ทั้งแบบ Trapezoidal และ Sinusoidal

ตามชื่อของวิธีนี้ รูปร่างของแรงดัน Back EMF และกระแสขับเคลื่อน (Drive Current) ในวิธีนี้จะมีลักษณะเป็นไข่นูชอยด์ การควบคุมแบบไข่นูชอยด์ช่วยจัดแรงบิดที่ไม่สม่ำเสมอ (Torque Ripple) และให้การเคลื่อนไหวที่ราบรื่น หลักการพื้นฐานของการคอมมูเตชันแบบไข่นูชอยด์คือการจ่ายกระแสไฟฟ้าในรูปแบบไข่นูชอยด์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งของโรเตอร์ โดยกระแสในแต่ละเฟสจะมีเฟสชิฟต์ (Phase Shift) แตกต่างกัน 120 องศา

การควบคุมแบบไข่นูชอยด์นี้สามารถทำได้โดยใช้ อัลกอริทึมการควบคุมสนามแม่เหล็ก (Field Oriented Control - FOC) หลักการพื้นฐานของอัลกอริทึมนี้คือการสร้างแรงบิดสูงสุดเมื่อสนามแม่เหล็กของโรเตอร์และสเตเตอร์อยู่ในมุมจากต่อกัน (Orthogonal) ดังนั้นกระแสแบบไข่นูชอยด์จึงเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งของโรเตอร์เพื่อให้เกิดแรงบิดสูงสุดและการเคลื่อนไหวที่ราบรื่น



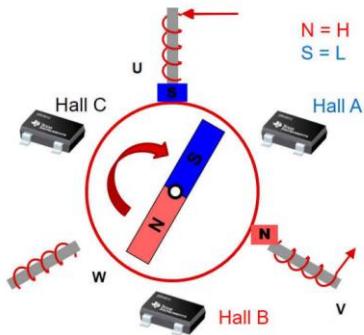
รูปที่ 104 Sinusoidal Commutation

ที่มา : <https://bacancysystems.com/blog/trapezoidal-and-sinusoidal-bldc-motors>

6.7 6-Steps Controls

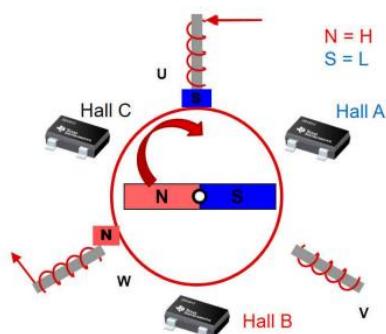
6.7.1 6-Steps Controls Sensor-based brushless DC motor

6-Step Control เป็นวิธีการควบคุมพื้นฐานสำหรับมอเตอร์ BLDC (Brushless DC Motor) ที่ใช้งานง่ายและเหมาะสมสำหรับแอปพลิเคชันทั่วไปที่ต้องการควบคุมมอเตอร์โดยไม่ซับซ้อนเกินไป โดยใช้แนวคิดในการสลับแรงดันไฟฟ้า (commutation) ระหว่างเฟสของมอเตอร์ BLDC เพื่อสร้างแรงบิดหมุน โดยใช้ 6 ขั้นตอน (steps) ในการสลับเฟสต่อรอบการหมุนของโรเตอร์



รูปที่ 105 Brushless DC Motor Commutation Using Hall-Effect Sensors ในขั้นตอนที่ 1

ที่มา : Brushless DC Motor Commutation Using Hall-Effect Sensors (Rev. B)



รูปที่ 106 Brushless DC Motor Commutation Using Hall-Effect Sensors ในขั้นตอนที่ 2

ที่มา : Brushless DC Motor Commutation Using Hall-Effect Sensors (Rev. B)

โดยรายละเอียดเกี่ยวกับการทำงานของมอเตอร์ Brushless DC Motor ตามรูปที่ 105 แสดงแบบจำลองที่เรียบง่ายของมอเตอร์ BLDC ซึ่งใช้ขั้วแม่เหล็กสองขั้ว (หนึ่งขั้วเหนือและหนึ่งข้าไว้) และขดลวดสามชุด ในแบบจำลองนี้ แม่เหล็กการที่อยู่บนโรเตอร์ (ส่วนที่หมุนของมอเตอร์) จะถูกล้อมรอบด้วยขดลวดที่อยู่บนสเตเตอร์ (ส่วนที่อยู่นิ่งของมอเตอร์) การเคลื่อนที่ของแม่เหล็กจะทำให้โรเตอร์หมุน ขดลวดจะเปลี่ยนขั้วแม่เหล็ก (ขั้วเหนือหรือข้าไว้) ขึ้นอยู่กับทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่ขดลวดนั้น การดึงดูดของแม่เหล็กไฟฟ้าต่อขั้วตรงข้ามของแม่เหล็กการ และการผลักกันของแม่เหล็กไฟฟ้าต่อขั้วเดียวกันของแม่เหล็กการ จะทำให้แม่เหล็กการและโรเตอร์เคลื่อนที่ ส่งผลให้เกิดแรงบิด (Torque) ในการทำงานของมอเตอร์

โดยเราสามารถสั่งการทำงานของ Brushless DC Motor ในระบบนี้ได้จากการควบคุมแบบ Six-Step motor commutation ด้วยการอ่านค่าแม่เหล็กจาก Hall Effect Sensor จำนวน 3 ตัว ซึ่งถูกติดตั้งในตำแหน่งที่มีมุนต่างกัน 120 องศา ระหว่างผลลัพธ์ของแต่ละตัว มุนนี้เรียกว่า มุนทางไฟฟ้า (Electrical Angle) ซึ่งอาจแตกต่างจากมุนจริงที่เชนเชอร์ถูกติดตั้งเชิงกลต่อกัน (Mechanical Angle) จากจุดกึ่งกลางของแกนมอเตอร์ มุนในเชิงกลที่ควรกำหนดระยะห่างของแต่ละเซนเซอร์สามารถคำนวณได้โดยใช้สูตร

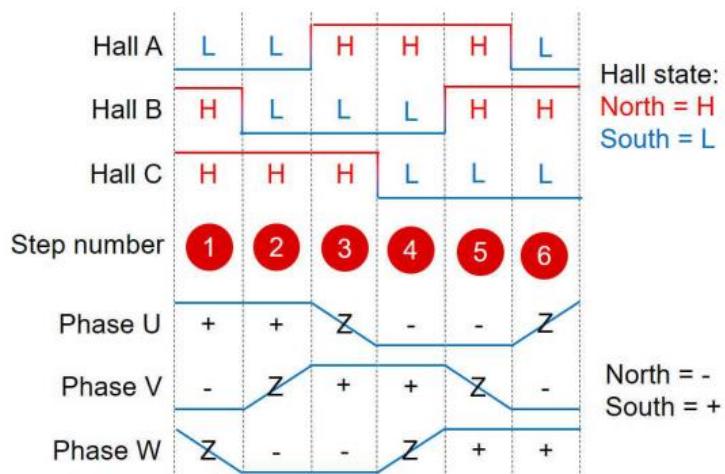
$$\text{Mechanical Angle} = \frac{2}{n} \times 120$$

โดย $\frac{\text{Mechanical Angle}}{n}$ คือ มุมเชิงกล มีหน่วยเป็นองศา ($^{\circ}$)
คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก

ในระบบนี้จะมีการจ่ายกระแสให้กับสองเฟสในแต่ละครั้ง โดยเฟสที่สามจะอยู่ในสถานะ High-Z (ไม่มีการเชื่อมต่อกราฟฟ์) ในภาพ ตัวเลขที่แสดงหมายถึงขั้นตอนของคอมมิวเตชัน โดยขั้นตอนที่ 1 สอดคล้องกับสถานะที่แสดงในรูปที่ 105 และ ขั้นตอนที่ 2 สอดคล้องกับสถานะที่แสดงในรูปที่ 106 จากการเก็บค่ารูปคลื่นของ Hall A, Hall B และ Hall C ในรูปที่ 107 แสดงถึงผลลัพธ์จาก Hall Latches ในแต่ละขั้นตอนคอมมิวเตชัน ขณะที่ รูปคลื่นของ Phase U, Phase V และ Phase W แสดงถึงสัญญาณที่จะจ่ายให้กับเฟส เพื่อให้แม่เหล็กเคลื่อนที่ไปยังขั้นตอนคอมมิวเตชันถัดไป นอกจากนี้ในรูปที่ 107 แสดงให้เห็นว่ามี 6 สถานะของ Hall ที่ไม่ซ้ำกัน โดยที่

- "+" หมายถึง การจ่ายกระแสในลักษณะที่ทำให้ข้าวได้ของแม่เหล็กถูกสร้างขึ้นในเฟสนั้น
- "-" หมายถึง การจ่ายกระแสในลักษณะที่ทำให้ข้าวเหนือของแม่เหล็กถูกสร้างขึ้นในเฟส
- "Z" หมายถึง เฟสที่อยู่ในสถานะ High-Z ซึ่งไม่มีการจ่ายกระแส

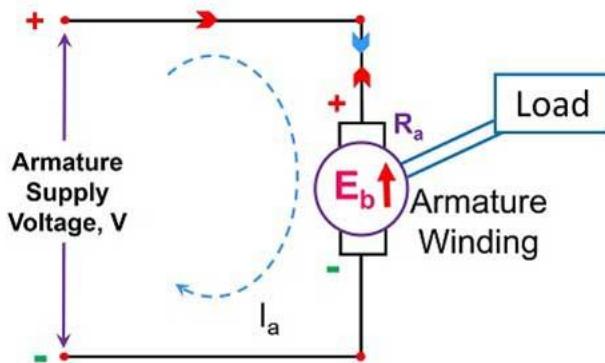
ซึ่งแต่ละสถานะสอดคล้องกับตัวเลือกที่แตกต่างกันสำหรับการขับเคลื่อนเฟส เพื่อให้มอเตอร์สามารถหมุนต่อไปได้



รูปที่ 107 Six-Step motor commutation
ที่มา : Brushless DC Motor Commutation Using Hall-Effect Sensors (Rev. B)

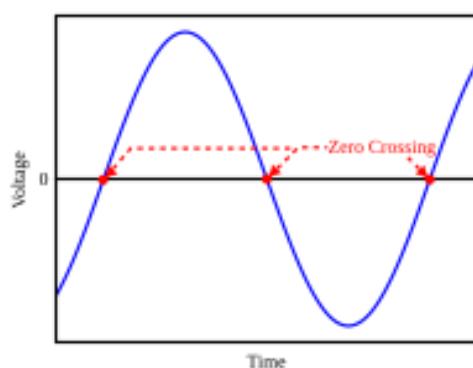
6.7.2 Zero-Crossing Detection in back EMF signal

ในการอ่านค่าที่มาจากการมอเตอร์ Sensorless brushless DC motor จะต้องทำการเกิด Back EMF โดย Back EMF หมายถึงแรงดันไฟฟ้า (Measured in Volts) ในขณะลวดของมอเตอร์ไฟฟ้าทำหน้าที่คล้ายเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเคลื่อนผ่านเส้นแรงแม่เหล็กตามกฎของเลนซ์ (Lenz's Law), EMF นี้จะสร้างสนามแม่เหล็กrong ที่จะต้านการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กที่ขับเคลื่อนการหมุนของมอเตอร์ โดยแรงดันนี้จะต้านทานการเคลื่อนที่ตามธรรมชาติของมอเตอร์ ซึ่งจึงเรียกว่า “Back EMF” สำหรับมอเตอร์ที่มีฟลักซ์แม่เหล็กและจำนวนชุดลวดคงที่ ขนาดของ Back EMF จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ (Angular Velocity)



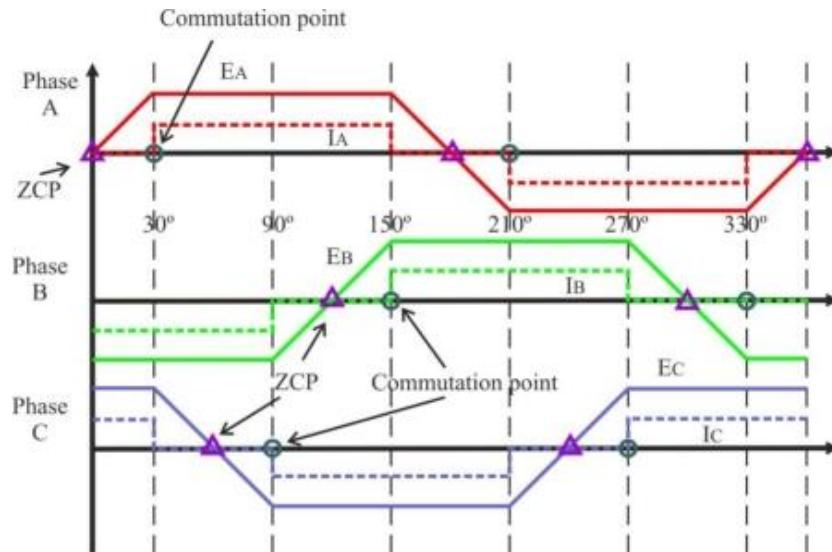
รูปที่ 108 การเกิด Back EMF
ที่มา : <https://omgfreestudy.com/back-emf-and-its-significance/>

Zero-Crossing หมายถึงจุดที่สัญญาณของฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์เปลี่ยนเครื่องหมาย (เช่น จากบวกเป็นลบ หรือจากลบเป็นบวก) โดยสามารถสังเกตได้จากการภาพของฟังก์ชันซึ่งจะตัดแกนค่าเป็นศูนย์ (Intercept of the Axis)



รูปที่ 109 Zero-Crossing ในกราฟเส้นของคลื่นสัญญาณที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า (Voltage) กับเวลา (time)

ในอิเล็กทรอนิกส์ Zero-Crossing เป็นแนวคิดที่ถูกใช้อย่างกว้างขวาง เช่น ในการตรวจจับจุดที่แรงดันหรือกระแสเปลี่ยนทิศทางในสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) หรือในวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อการซิงโครไนซ์หรือการลับการทำงาน เช่น ในวงจรควบคุมเฟส วงจรการตรวจจับสัญญาณ หรือวงจรไทริสเตอร์



รูปที่ 110 การ Zero-Crossing Detection in back EMF signal
ที่มา : https://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_speed_control

นอกจากนี้ความถี่ของแรงดัน Back EMF ยังสัมพันธ์กับความเร็วมอเตอร์และจำนวน Pole pair ดังสมการ

$$RPM = \frac{f}{Pole Pairs} \times 60$$

โดย RPM คือ ความเร็วเชิงกลของโรเตอร์ (Revolutions Per Minute) หรือ จำนวนรอบการหมุนในหนึ่งวินาที

f คือ ความถี่ทางไฟฟ้า (Electrical Frequency) ของแรงดัน Back EMF มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz)

$Pole Pair$ คือ จำนวนคู่ของขั้วแม่เหล็กคู่ในโรเตอร์

6.9 Op-Amp

Op-Amp หรือ Operational Amplifier เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบแอดดิทีฟ (active circuit) ที่ได้รับการออกแบบมาเพื่อยายสัญญาณไฟฟ้า โดยมีความสามารถในการขยายแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าสูงกว่าอินพุตอย่างมาก

6.9.1 คุณสมบัติสำคัญของ Op-Amp

6.9.1.1 มีอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าสูงมากในโหมดวงจรเปิด (Open-Loop)

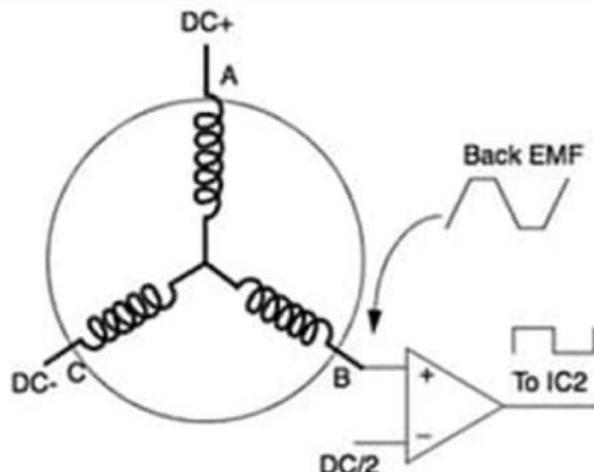
6.9.1.2 มีความต้านทานทางเข้าที่สูง ทำให้กระแสไฟฟ้าสูงสุดได้ต่ำมาก

6.9.1.3 มีความต้านทานทางออกต่ำ เพื่อให้สามารถจ่ายแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6.9.1.4 มีข้ออินพุตสองขั้ว (Inverting และ Non-inverting) สำหรับรับแรงดันต่างกัน

6.9.2 การใช้ Op-Amp ใน Zero Crossing Detectors (ZCD)

Op-Amp เป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้ใน Zero Crossing Detector (ZCD) เนื่องจากคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณไฟฟ้าจากบวกเป็นลบหรือจากลบเป็นบวก (จุดที่แรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์) และมีการตอบสนองที่รวดเร็ว ซึ่งมีความสำคัญในการที่ต้องการตรวจสอบเฟสหรือสัญญาณที่ซิงโครไนซ์

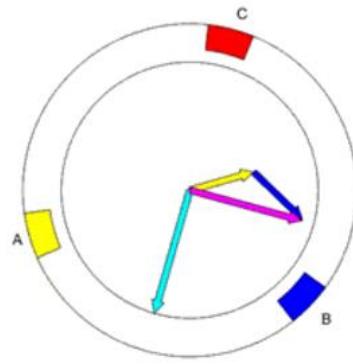


รูปที่ 111 การต่อวงจร zero crossing ด้วย Op-Amp

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

6.10 Field Oriented Control

Field Oriented Control หรือ FOC คือหรือที่เรียกว่า Vector Control เป็นเทคนิคที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Synchronous Motor - PMSM) และมอเตอร์เนี้ยบสำหรับการเปลี่ยนแปลง (AC Induction Motor - ACIM) โดยเทคนิคนี้ให้ความสามารถในการควบคุมที่ดีในช่วงแรงบิดและความเร็วที่หลากหลาย นอกจากนี้ยังสามารถเร่งความเร็วและลดความเร็วของมอเตอร์ได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งให้การควบคุมที่แม่นยำยิ่งขึ้นสำหรับมอเตอร์ที่ต้องการประสิทธิภาพสูง



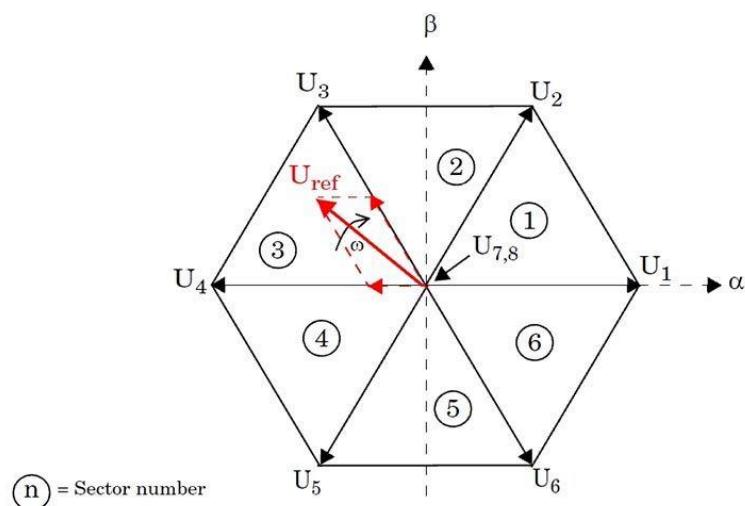
รูปที่ 112 Vector Control

ที่มา : <https://www.mathworks.com/discovery/bldc-motor-control.html>

6.11 Space Vector Modulation

Space Vector Modulation (SVM) คือเทคนิคที่นิยมใช้ในระบบควบคุมแบบ Field-Oriented Control (FOC) สำหรับมอเตอร์เนี้ยวยานแม่ (Induction Motors) และมอเตอร์ซิงโกรันส์แบบแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Synchronous Motors - PMSM) โดย SVM ทำหน้าที่สร้างสัญญาณ Pulse Width Modulation (PWM) เพื่อควบคุมสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ และสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ปรับค่าได้ตามที่ต้องการเพื่อควบคุมความเร็วหรือแรงบิดของมอเตอร์

SVM เป็นเทคนิคในการสร้างสัญญาณพัลส์ที่ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ในระบบอินเวอร์เตอร์สามเฟส โดยเน้นการควบคุมความเร็วและแรงบิดให้สอดคล้องกับความต้องการผ่านการสร้างแรงดันอ้างอิงในรูปแบบเวกเตอร์ในพื้นที่วงกลม (space vector hexagon) ซึ่งสามารถปรับทิศทางและขนาดได้อย่างต่อเนื่องภายในช่วงเวลาหนึ่ง (PWM period)



รูปที่ 113 รูปแบบเวกเตอร์ในพื้นที่วงกลม

ที่มา : SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation) reference generator

6.11.1 หลักการทำงาน

6.11.1.1 การสร้างเวกเตอร์แรงดันอ้างอิง (Reference Voltage Vector)

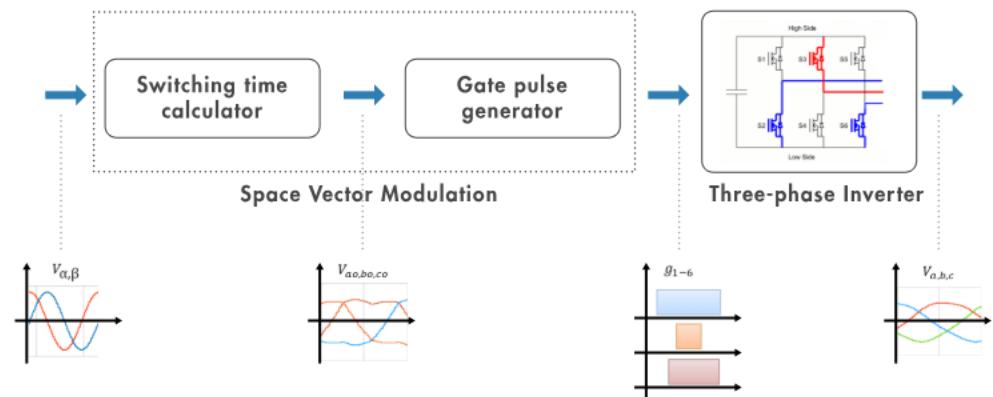
เวกเตอร์แรงดันอ้างอิงถูกสร้างขึ้นโดยการรวมเวกเตอร์แรงดันพื้นฐานสองตัวที่อยู่ใกล้กัน พร้อมกับการใช้ null vector เพื่อสร้างสมดุลแรงดันเฉลี่ย

6.11.1.2 การคำนวณเวลาเปิด-ปิดของสวิตช์ (Switching Times)

เวลาการเปิด-ปิดถูกคำนวณตามตำแหน่งของเวกเตอร์อ้างอิงในหน้าเหลี่ยม space vector โดยใช้เวลาในการคำนวนน้อย เหมาะกับการใช้งานในไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ไม่เป็น

6.11.1.3 การควบคุมสวิตช์อินเวอร์เตอร์

กำหนดลำดับการเปิด-ปิดของสวิตช์เพื่อให้แรงดันที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกับแรงดันอ้างอิงมากที่สุด ทำให้ได้แรงดันเอาต์พุตสูงสุดเท่าที่ DC bus จะรองรับได้ โดยมีประสิทธิภาพดีกว่าเทคนิค Sinusoidal PWM



รูปที่ 114 หลักการทำงานของ SVM

6.11.2 ข้อดี

6.11.2.1 เพิ่มประสิทธิภาพการใช้แรงดัน: ได้แรงดันเอาต์พุตสูงสุดในช่วงแรงดัน DC bus

6.11.2.2 ความแม่นยำสูง: ปรับแรงดันและทิศทางได้ตามต้องการ

6.11.2.3 ลดความซับซ้อนในการคำนวณ: ใช้เวลาในการประมวลผลน้อย

6.12 Pulse width modulation

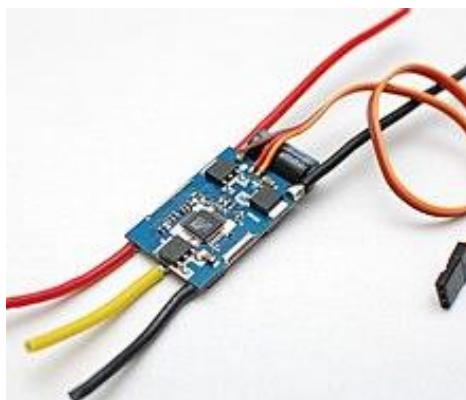
Pulse Width Modulation หรือ PWM เป็นวิธีการที่สามารถลดปริมาณพลังงานไฟฟ้ารวมที่จ่ายให้กับอุปกรณ์ DC แบบความต้านทาน (Resistive DC Device) ได้ โดยการเปลี่ยนอัตราส่วนของเวลาที่อุปกรณ์ได้รับแรงดันไฟฟ้าเต็มค่าที่กำหนด (Full Rated Voltage) ในระหว่างที่เปิดและปิดการทำงานอย่างรวดเร็ว เมื่ออัตราส่วนของเวลาที่สัญญาณอยู่ในสถานะเปิด (On-Time) เพิ่มขึ้นหรือลดลง แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยของสัญญาณก็จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามลำดับ แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยนี้ทำหน้าที่ให้พลังงานไฟฟ้าที่ต่ำกว่าเดิมในเชิงผลลัพธ์ แต่ยังคงรักษาแรงดันไฟฟ้าเต็มค่าในระหว่างช่วงเปิด (On-State Duration) ของ Pulse โดยค่าที่ใช้สำหรับควบคุม PWM ได้แก่ Switch frequency และ Duty cycle โดย Switching Frequency หมายถึงจำนวนครั้งที่สัญญาณ PWM เปิดและปิดในหนึ่งวินาที มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz) และ Duty cycle หมายถึง อัตราส่วนของช่วงเวลาเปิด (On-Time) ต่อช่วงเวลาทั้งหมดของหนึ่งรอบสัญญาณ (Period) มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (%) โดยมีสูตรคำนวณดังนี้

$$\text{Duty cycle} = \frac{\text{On - Time}}{\text{Period}} \times 100$$

- โดย **Duty cycle** คือ Duty cycle มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (%)
On - Time คือ ช่วงเวลาที่เปิดแรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็นวินาที (s)
Period คือ ช่วงเวลาทั้งหมดที่สนใจ มีหน่วยเป็นวินาที (s)

6.13 Electronics Speed Controller

Electronics Speed Controller หรือ ESC หมายถึงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการควบคุมและปรับความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้า โดยอาจมีความสามารถในการย้อนทิศทางการหมุนของมอเตอร์ และการเบรกแบบไดนามิก (Dynamic Braking) ด้วย โดยระบบ ESC สำหรับ Brushless DC motor ทำหน้าที่สร้างพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส (Three-Phase AC Power) สำหรับอ่านค่าแรงดันย้อนกลับ (Back EMF) ที่เกิดจากขาดลวดของมอเตอร์เพื่อตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ในการขับเคลื่อนมอเตอร์



รูปที่ 115 ESC module

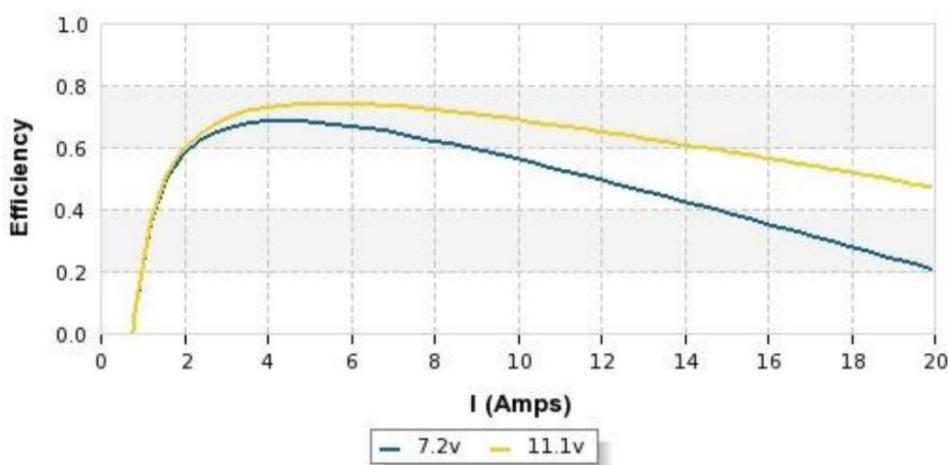
ที่มา : https://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_speed_control

6.14 BLDC A2212/13T Datasheet

No. of Cells:	2 - 3 Li-Poly 6 - 10 NiCd/NiMH
Kv:	1000 RPM/V
Max Efficiency:	80%
Max Efficiency Current:	4 - 10A (>75%)
No Load Current:	0.5A @10V
Resistance:	0.090 ohms
Max Current:	13A for 60S
Max Watts:	150W
Weight:	52.7 g / 1.86 oz
Size:	28 mm dia x 28 mm bell length
Shaft Diameter:	3.2 mm
Poles:	14
Model Weight:	300 - 800g / 10.5 - 28.2 oz

รูปที่ 116 BLDC A2212/13T Specifications

ที่มา : BLDC_A2212_13T.pdf



รูปที่ 117 กราฟแสดงประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ในแต่ละช่วงการทำงาน

ที่มา : BLDC_A2212_13T.pdf

6.15 การหาค่าเฉลี่ย

ค่าเฉลี่ย หรือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต คือ ค่ากลางที่ได้จากการนำผลรวมของข้อมูลทั้งหมดมาหารด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมด ค่าเฉลี่ยเป็นตัวแทนของข้อมูลชุดหนึ่ง และมักใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ โดยมีสูตรดังนี้

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{n}$$

โดย \bar{X} คือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต

$\sum X$ คือ ผลรวมของข้อมูลทั้งหมดที่สนใจ

n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมดที่สนใจ

7. วิธีดำเนินการทดลอง

7.1 ศึกษาการทำงานของ Brushless DC Motor

7.2 เชื่อม STMICROELECTRONICS X-NUCLEO-IHM08M1 เข้ากับ Nucleo STM32G474RE

7.3 ลงโปรแกรม MotorControl Workbench_6.3.2

7.4 ต่อสายอัปโหลดเข้ากับบอร์ดและคอมพิวเตอร์

7.5 เริ่มทำการทดลองโดยการเก็บค่าสัญญาณไฟฟ้าจาก 1, 2, 3 ณ ความเร็วรอบมอเตอร์ค่าต่างๆ

7.6 นำค่าที่ได้มาหาความสัมพันธ์ขององค์ประกอบของกราฟสัญญาณไฟฟ้าที่ได้กับค่าเซิงกลที่มาจากการทดลอง

7.7 สรุปผลและอภิปรายผล

8. วัสดุอุปกรณ์

8.1 BLDC Motor จำนวน 1 อัน

8.2 STMICROELECTRONICS X-NUCLEO-IHM08M1 จำนวน 1 อัน

8.3 Nucleo STM32G474RE พร้อมสายอัปโหลด จำนวน 1 ชุด

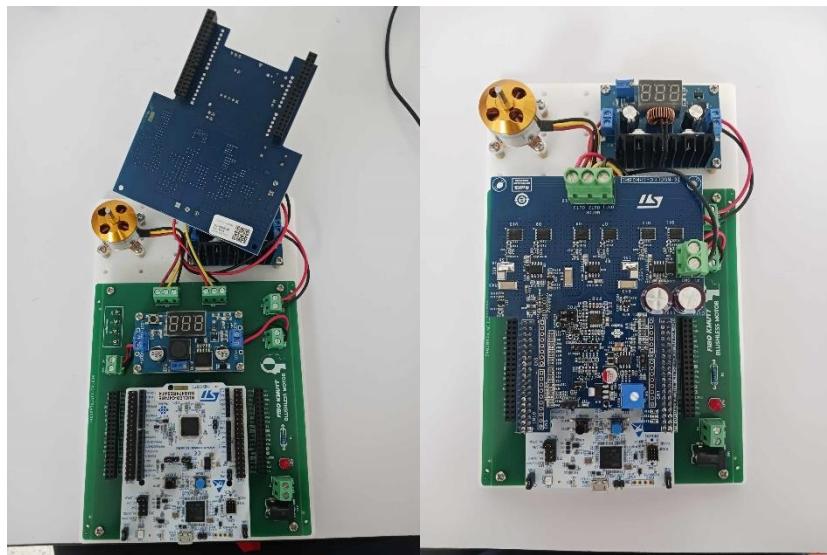
8.4 BLDCXplorer จำนวน 1 ชุด - ฐานสามารถบรรจุบอร์ดควบคุม, Breadboard, 3D-Print ใช้สำหรับการประกอบกับ BLDC Motor

9. ขั้นตอนการดำเนินงาน

9.1 ศึกษาหลักการทำงานของ STMICROELECTRONICS X-NUCLEO-IHM08M1 และวิธีการใช้บอร์ด BLDCXplorer ผ่านวิดีโอใน Google Classroom และศึกษา Characteristics ของ Brushless DC Motor จาก Datasheet

9.2 Hardware Setup

9.2.1 นำ Nucleo STM32G474RE ต่อเข้ากับ BLDCXplorer และต่อ STMICROELECTRONICS X-NUCLEO-IHM08M1 อีกที



รูปที่ 118 การต่อ Nucleo STM32G474RE (ซ้าย) และ STMICROELECTRONICS X-NUCLEO-IHM08M1 (ขวา)

9.2.2 นำ Adaptor 24 V ต่อเข้ากับ BLDCXplorer และต่อนำสายอัปโหลดของ Nucleo STM32G474RE ต่อเข้าคอมพิวเตอร์

9.2.3 นำ Oscilloscope ต่อเข้ากับขา 1, 2, 3 ของ BLDCXplorer และต่อ Ground ของ Oscilloscope เข้ากับขา Gnd ของ BLDCXplorer



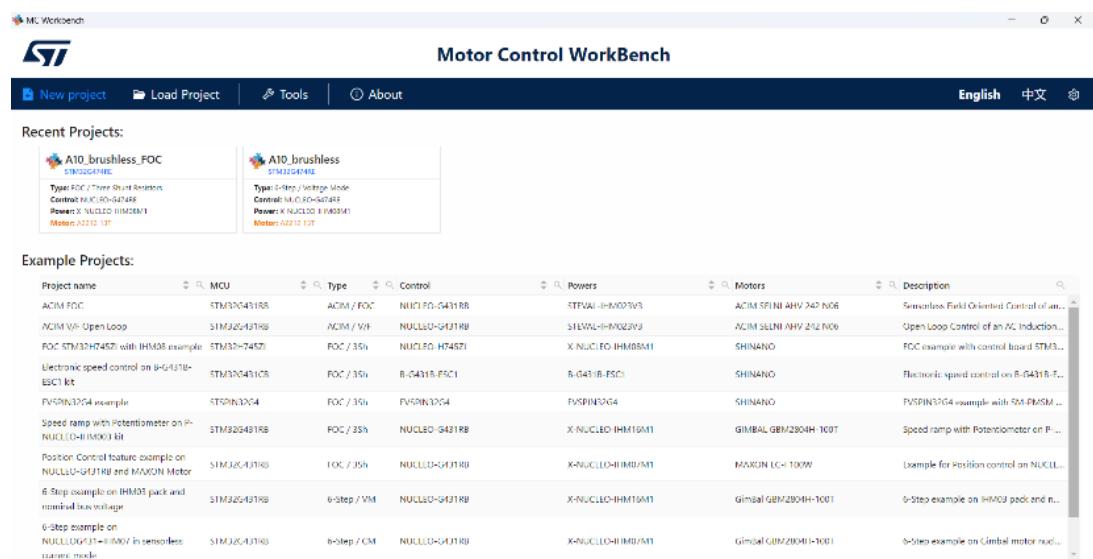
รูปที่ 119 การต่อสายจาก Oscilloscope เข้ากับ BLDCXplorer



รูปที่ 120 การเชื่อมต่อของ Adaptor 24 V และสายอัปโหลดของ Nucleo STM32G474RE

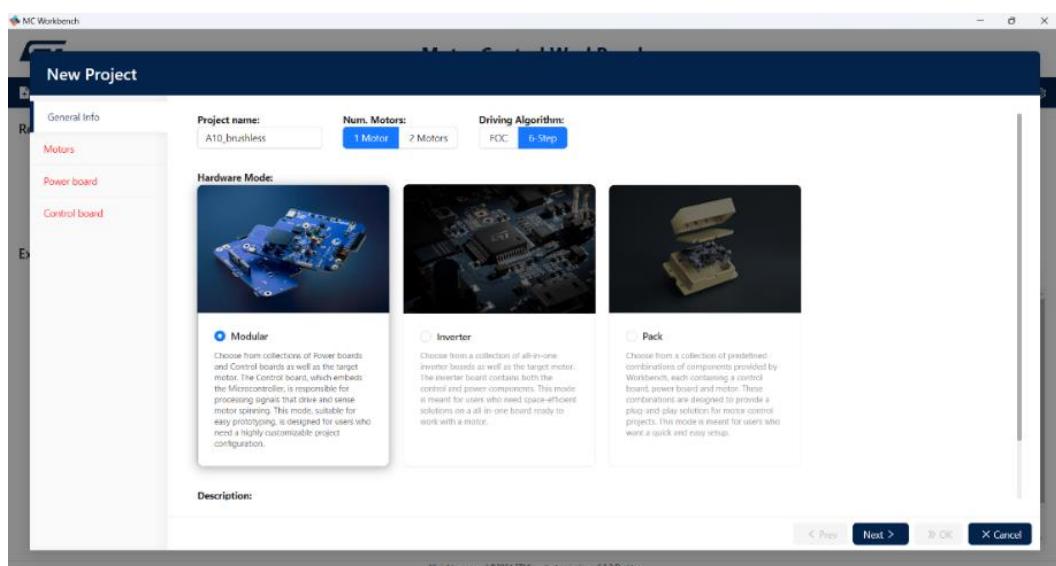
9.3 Software Setup

9.3.1 เปิดโปรแกรม MotorControl Workbench_6.3.2 และกด New project



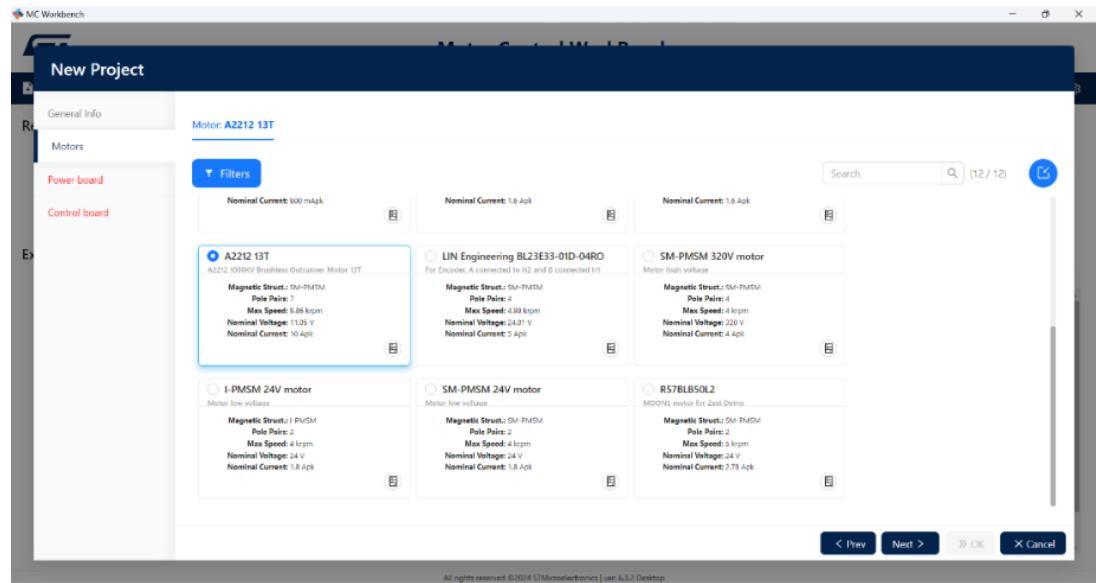
รูปที่ 121 การกดปุ่ม New project

9.3.2 เมื่อเข้าสู่หน้า New Project ให้เข้าไปที่หน้า General Info และให้เลือก Driving Algorithm เป็น 6-Step



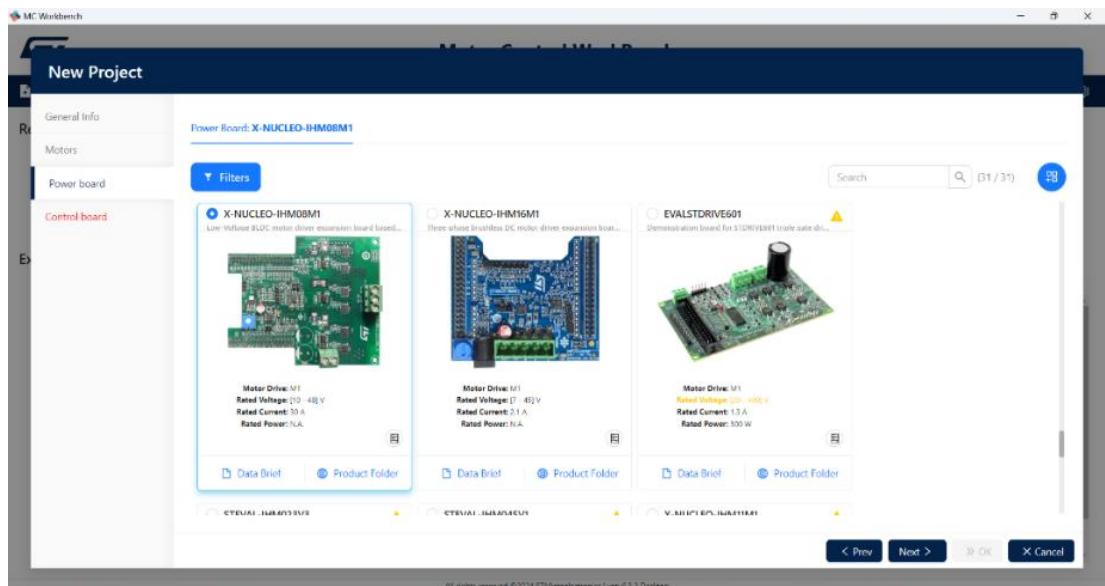
รูปที่ 122 การเลือก Driving Algorithm เป็น 6-Step

9.3.3 ให้เปลี่ยนหน้า Motors และให้เลือกมอเตอร์เป็นรุ่น A2212 13T



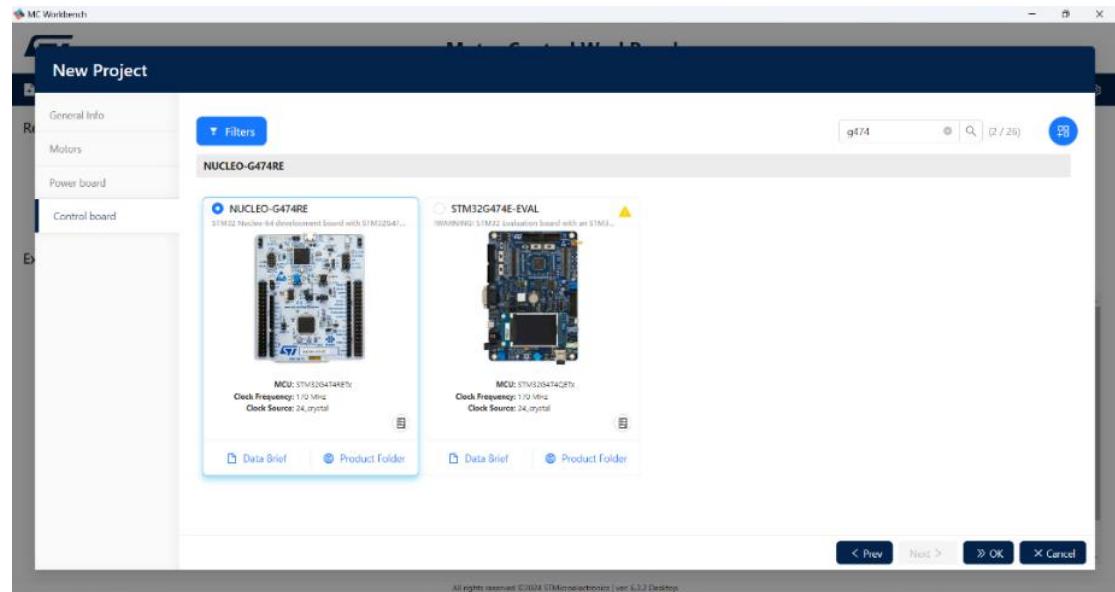
รูปที่ 123 การเลือกมอเตอร์เป็นรุ่น A2212 13T

9.3.4 ให้เปลี่ยนหน้า Power board และให้เลือกรุ่น X-NUCLEO-IHM08M1



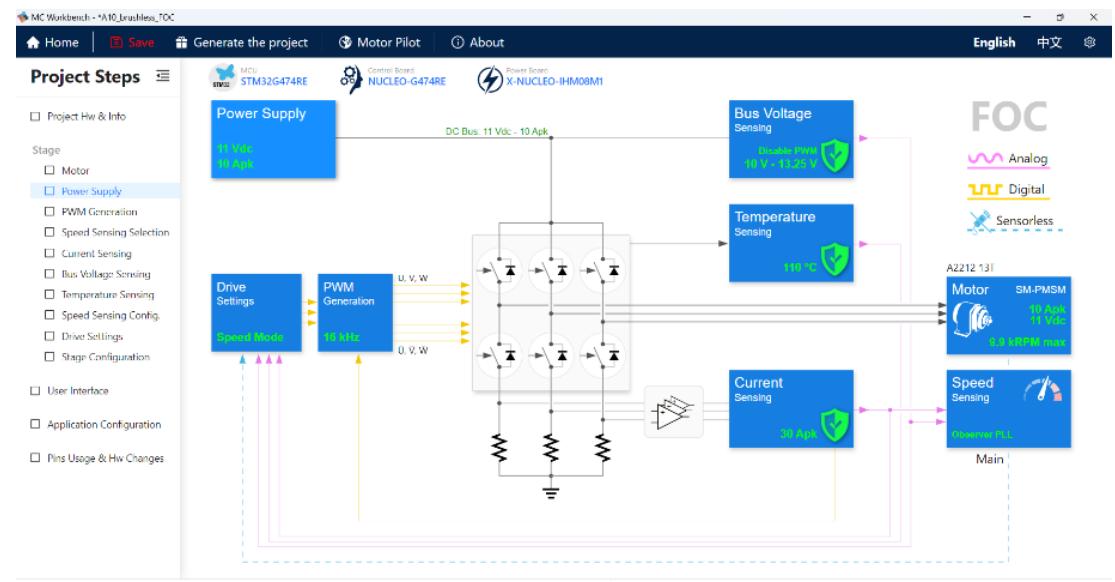
รูปที่ 124 การเลือกรุ่นของ Power board

9.3.5 ให้เปลี่ยนหน้า Control board และให้เลือกรุ่น NUCLEO-G474RE



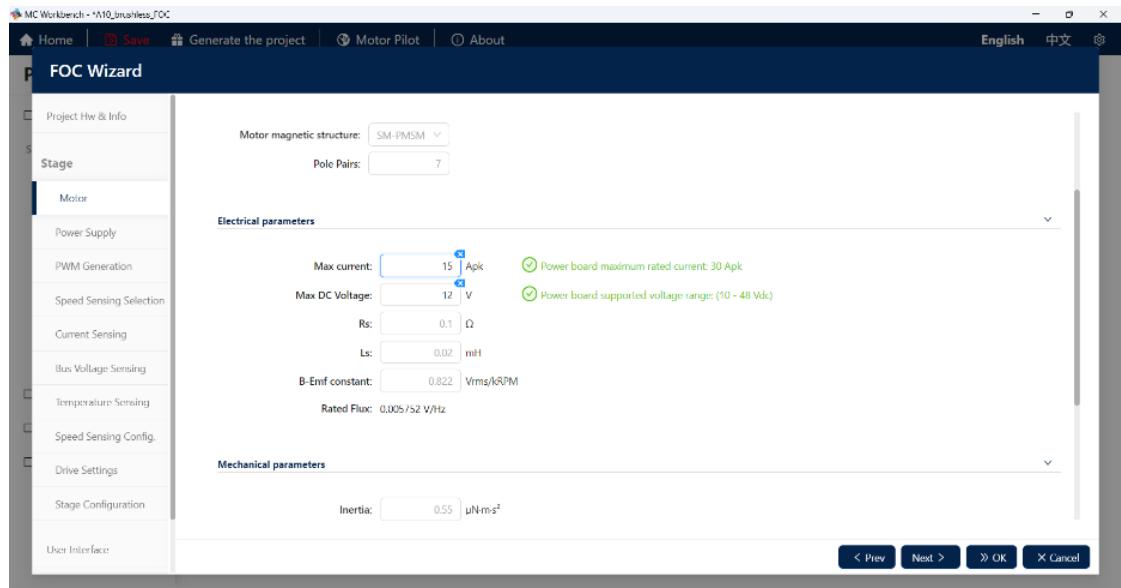
รูปที่ 125 การเลือกรุ่นของ Control board

9.3.6 เมื่อสร้าง Project เสร็จสิ้น ให้เปลี่ยน Stage ที่ซึ่งว่า Motor



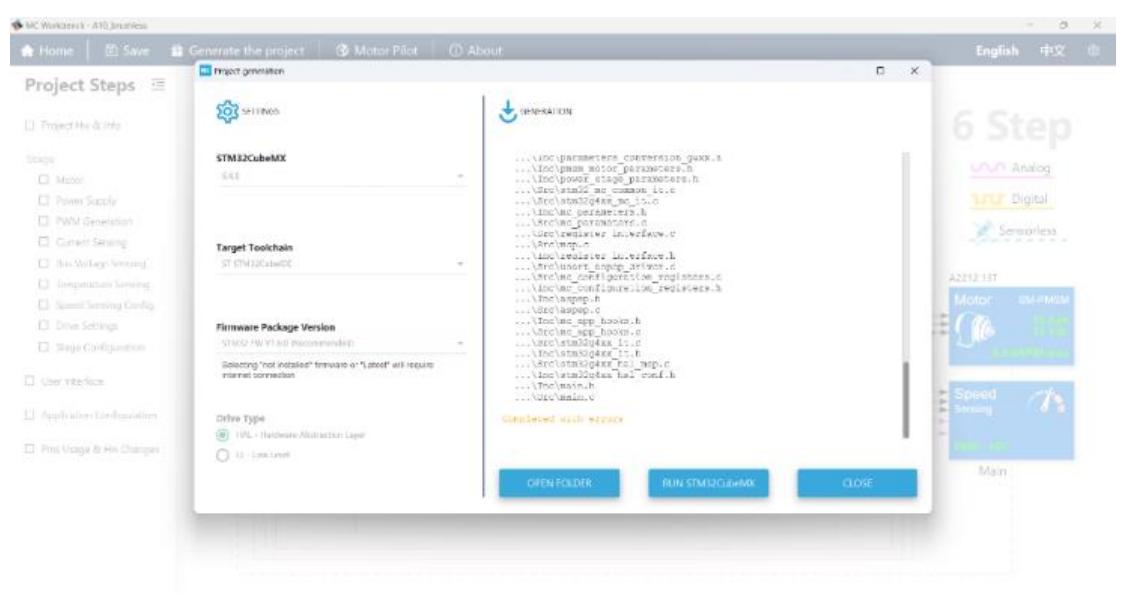
รูปที่ 126 การเลือก stage ที่ซึ่งว่า Power Supply

9.3.7 จานน์ให้กำหนด Max current ที่ 15 Apk และ Max DC Voltage ที่ 12 V



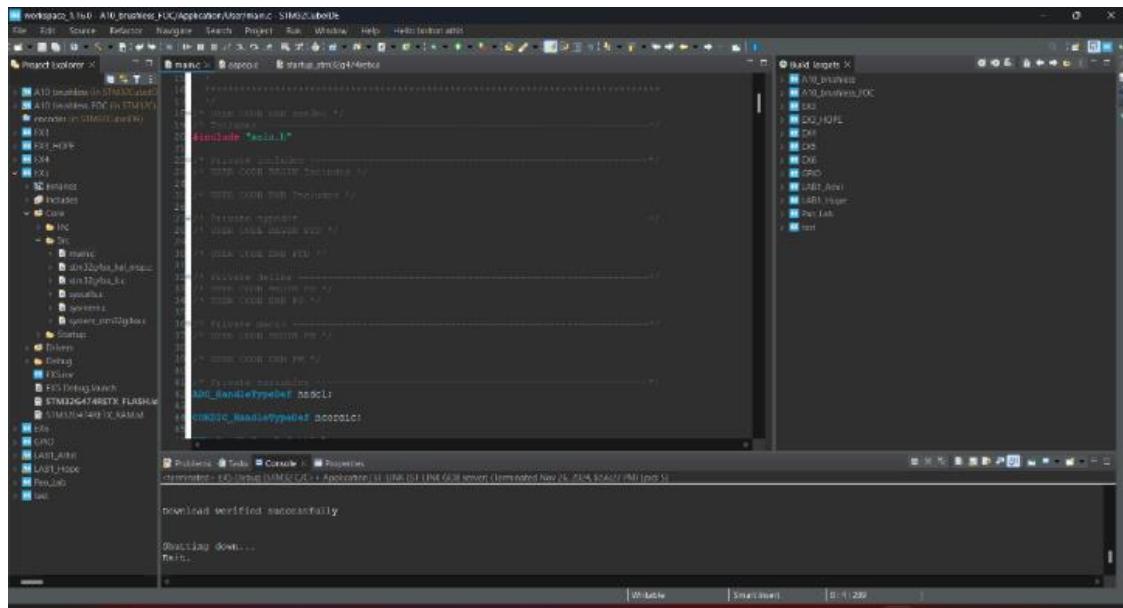
รูปที่ 127 การกำหนด Max current และ Max voltage

9.3.8 เมื่อกำหนดค่าเสร็จสิ้น ให้กด generate the project จากนั้นเมื่อ Generate เสร็จสิ้นให้กด RUN STM32CubeMX



รูปที่ 128 การ Generate the project

9.3.9 ให้ Generate ไฟล์สกุล .ioc ที่โปรแกรมนี้ Generate มาและ run ไฟล์ที่ชื่อว่า main.h เป็นอันเสร็จสิ้นการ Software setup

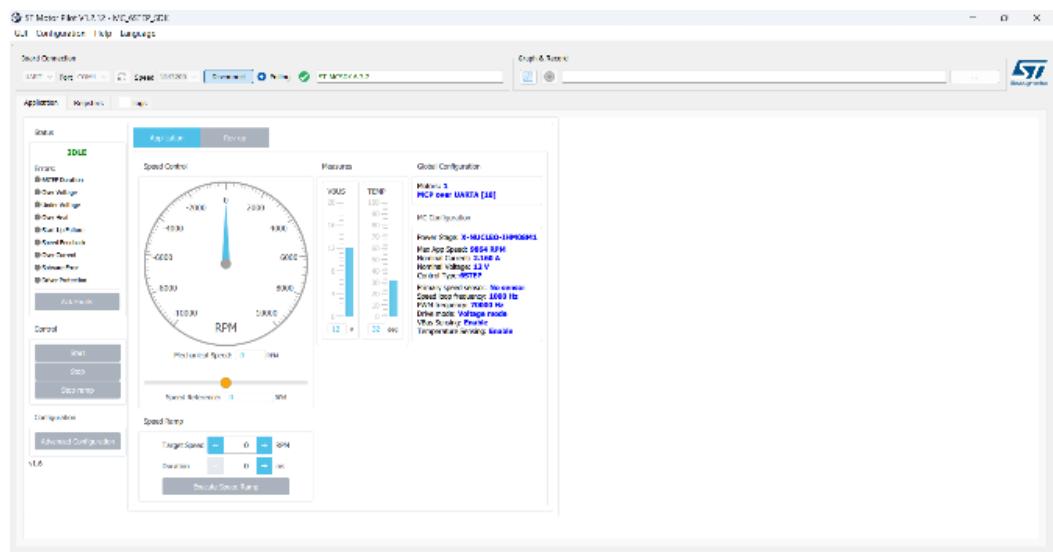


รูปที่ 129 การ run main.h

9.4 การทดสอบเก็บค่าความถี่จากสัญญาณ Trapezoid เทียบกับค่า rpm ณ ค่าต่าง ๆ

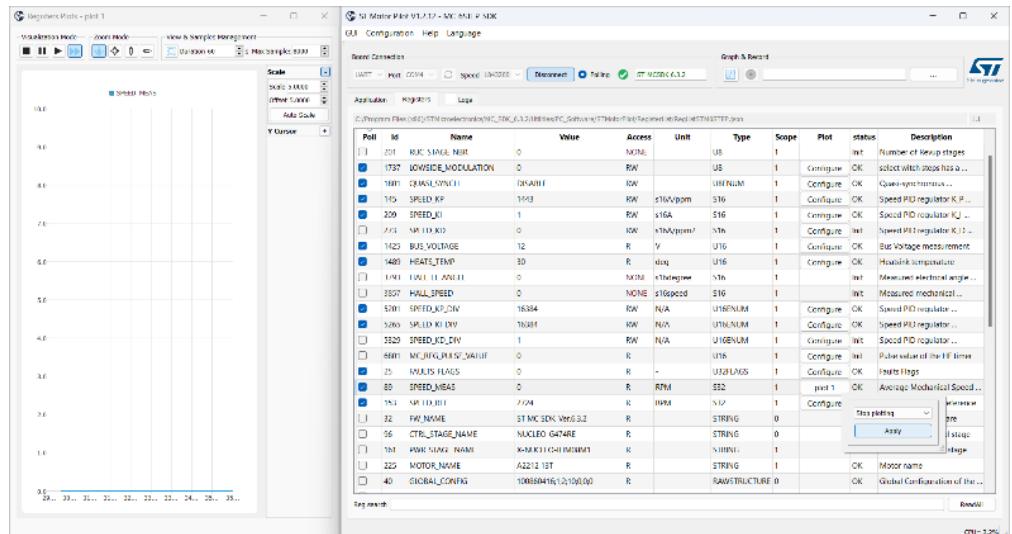
9.4.1 โปรแกรม ST Motor Pilot

9.4.1.1 ให้เข้าไปที่โปรแกรม Motor Pilot จากนั้นให้กด Connect



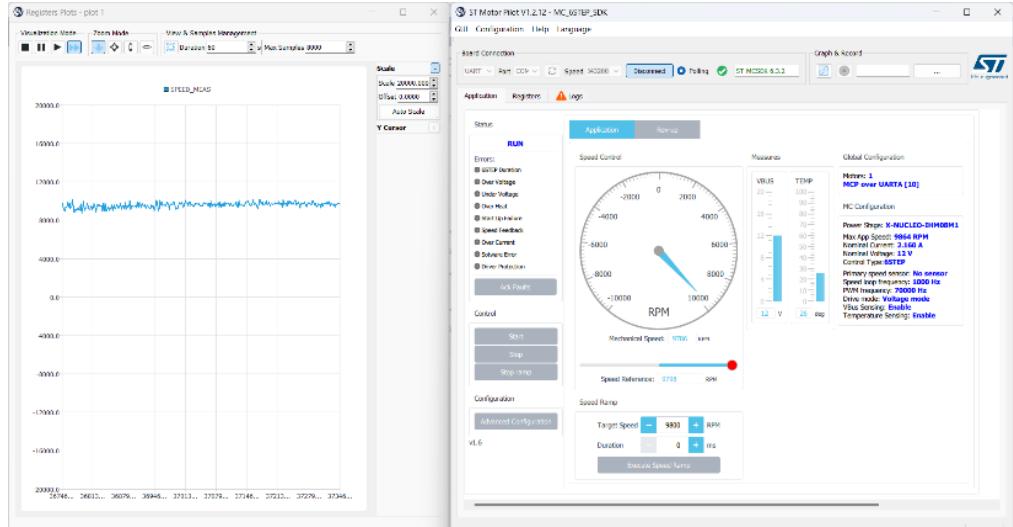
รูปที่ 130 การ Connect เข้ากับ STM32G474RE

9.4.1.2 จานวนให้เป็น Register -> SPEED_MEAS -> Configure -> Apply



รูปที่ 131 การแสดงหน้ากราฟ RPM เทียบกับเวลาอย่าง Realtime

9.4.1.3 จานวนให้ทำการสั่งการมอเตอร์โดยการกรอกค่า RPM ที่ Target Speed ทั้งหมด 20 ค่า ได้แก่ -9800 ถึง 9800 โดยเพิ่มที่ 1000 โดยค่าลับเป็นการหมุนทวนเข็มนาฬิกา และค่าบวก เป็นการหมุนตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 132 การเก็บค่า ณ RPM ที่ 9800

9.4.2 Oscilloscope

9.4.2.1 Back EMF Frequency

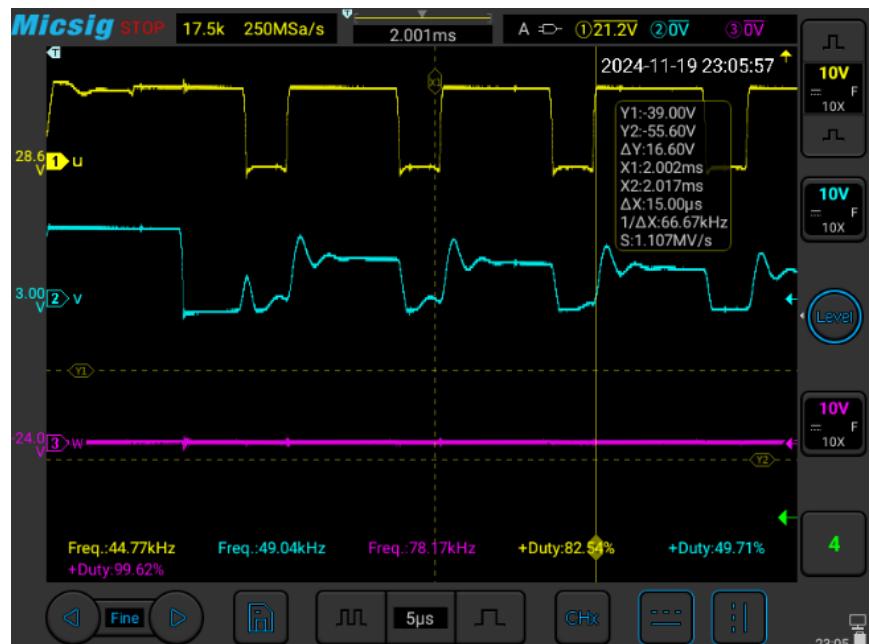
9.4.2.1.1 ในการเก็บความถี่ของแรงดัน Back EMP ให้เห็นรูปคลื่นอย่างชัดเจนนั้น จึงได้ปรับความละเอียดที่ 200 μ s



รูปที่ 133 การเก็บค่าความถี่ของแรงดัน Back EMF ณ RPM ที่ 9800

9.4.2.2 Duty Cycle

9.4.2.2.1 เพื่อให้เก็บ Duty Cycle ให้เห็นรูปคลื่นอย่างชัดเจนนั้น จึงได้ปรับความละเอียดที่ $5 \mu\text{s}$



รูปที่ 134 การเก็บค่า PWM ณ RPM ที่ 9800

9.5 การคำนวณสำหรับเก็บผลการทดลอง

หลังจากที่เก็บค่า ณ RPM ที่สนใจครบแล้ว ให้ทำการค่าความถี่ได้จาก Oscilloscope จำนวน 5 ลูกคลื่นมาหาค่าเฉลี่ยได้จาก

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{n}$$

โดย \bar{X} คือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต $\sum X$ คือ ผลรวมของความถี่ ณ RPM ที่สนใจ
 n คือ จำนวนลูกคลื่นของแรงดัน Back EMF ที่สนใจ ซึ่งเท่า 5

9.5.1 คำนวณ RPM จาก Back EMF Frequency

```
import matplotlib.pyplot as plt

# Define the motor parameters
period_pos = [[4.77*(10**-3), 4.77*(10**-3), 4.81*(10**-3), 4.77*(10**-3), 4.77*(10**-3)],
[3.06*(10**-3), 3.08*(10**-3), 3.08*(10**-3), 3.10*(10**-3), 3.08*(10**-3)],
[2.268*(10**-3), 2.268*(10**-3), 2.272*(10**-3), 2.272*(10**-3), 2.284*(10**-3)],
[1.776*(10**-3), 1.8*(10**-3), 1.788*(10**-3), 1.788*(10**-3), 1.792*(10**-3)],
[1.512*(10**-3), 1.504*(10**-3), 1.508*(10**-3), 1.528*(10**-3), 1.492*(10**-3)],
[1.284*(10**-3), 1.248*(10**-3), 1.260*(10**-3), 1.260*(10**-3), 1.264*(10**-3)],
[1.188*(10**-3), 1.184*(10**-3), 1.124*(10**-3), 1.188*(10**-3), 1.096*(10**-3)],
[0.988*(10**-3), 1.012*(10**-3), 1.012*(10**-3), 0.998*(10**-3), 1.016*(10**-3)],
[0.858*(10**-3), 0.908*(10**-3), 0.886*(10**-3), 0.886*(10**-3), 0.872*(10**-3)]]

period_neg = [[4.77*(10**-3), 4.77*(10**-3), 4.760*(10**-3), 4.760*(10**-3), 4.8*(10**-3)],
[3.01*(10**-3), 3.04*(10**-3), 2.99*(10**-3), 2.99*(10**-3), 2.96*(10**-3)],
[2.240*(10**-3), 2.248*(10**-3), 2.248*(10**-3), 2.272*(10**-3), 2.240*(10**-3)],
[1.776*(10**-3), 1.756*(10**-3), 1.756*(10**-3), 1.768*(10**-3), 1.756*(10**-3)],
[1.484*(10**-3), 1.476*(10**-3), 1.476*(10**-3), 1.468*(10**-3), 1.480*(10**-3)],
[1.240*(10**-3), 1.272*(10**-3), 1.256*(10**-3), 1.256*(10**-3), 1.280*(10**-3)],
[1.104*(10**-3), 1.088*(10**-3), 1.112*(10**-3), 1.124*(10**-3), 1.076*(10**-3)],
[0.980*(10**-3), 0.988*(10**-3), 0.988*(10**-3), 0.998*(10**-3), 1.008*(10**-3)],
[1.012*(10**-3), 0.992*(10**-3), 0.992*(10**-3), 1.008*(10**-3), 0.988*(10**-3)]]]

period_pos = [sum(x)/len(x) for x in period_pos]
period_neg = [sum(x)/len(x) for x in period_neg]
```

รูปที่ 135 โค้ดการเก็บค่าความถี่ของแรงดัน Back EMF ณ RPM ที่สนใจทั้งหมดสำหรับการพล็อตกราฟ

โดยหลังจากที่ได้ค่าความถี่เฉลี่ยในแต่ละ RPM ที่สนใจแล้วนั้น จึงนำค่าที่ไปเข้าสมการเพื่อหา RPM ที่แปรผันตามความถี่ได้จาก

$$RPM = \frac{f}{Pole Pairs} \times 60$$

โดย RPM คือ ความเร็วชิงกลของโรเตอร์ (Revolutions Per Minute) หรือ จำนวนรอบการหมุนในหนึ่งวินาที
 f คือ ความถี่ทางไฟฟ้า (Electrical Frequency) ของแรงดัน Back EMF มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz)
 $Pole Pair$ คือ จำนวนคู่ของขั้วแม่เหล็กคู่ในโรเตอร์

ซึ่งจาก Datasheet ของ A2212/13T พบว่าจำนวน Pole Pairs ของมอเตอร์มีค่าเท่ากับ 7 ซึ่งเราสามารถหาความเร็วเชิงกลจากความถี่ของแรงดัน Back EMF ได้จาก

$$RPM = \frac{f}{7} \times 60$$

โดย RPM	คือ ความเร็วเชิงกลของโรเตอร์ (Revolutions Per Minute) หรือ จำนวนรอบการหมุนในหนึ่งวินาที
f	คือ ความถี่ทางไฟฟ้าเฉลี่ยของแรงดัน Back EMF มีหน่วยเป็นไฮรัตซ์ (Hz)

```

rpm_pos = []
rpm_neg = []
for period in period_pos:
    if period == 0:
        rPm = 0
    else:
        rPm = ((1/period)/7) * 60
    rpm_pos.append(rPm)

for period in period_neg:
    if period == 0:
        rPm = 0
    else:
        rPm = ((1/period)/7) * 60
    rpm_neg.append(rPm)

# multiply rpm_neg by -1
rpm_neg = [-1 * x for x in rpm_neg]

period_pos = [1/x for x in period_pos]
period_neg = [1/x for x in period_neg]

pp = [1800, 2800, 3800, 4800, 5800, 6800, 7800, 8800, 9800]
pn = [x * -1 for x in pp]

```

รูปที่ 136 โค้ดการคำนวณหา RPM ที่แปรผันตามความถี่ ณ RPM ที่สนใจทั้งหมดสำหรับการพล็อตกราฟ เมื่อเราได้ RPM ทั้งหมดแล้วนั้น จึงนำค่าที่คำนวณได้มาพล็อตกราฟ RPM จาก Target Speed เทียบกับความถี่ของรูปคลื่นแรงดัน Back EMF และกราฟ RPM ที่คำนวณได้เทียบกับความถี่ของรูปคลื่นแรงดัน Back EMF เพื่อหาค่า Error ของค่า RPM ที่คำนวณได้จาก

$$\bar{X} = \frac{\sum |y - Y|}{n}$$

โดย \bar{X}	คือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต
$\sum y - Y $	คือ ผลรวมของ Error ของ RPM ที่คำนวณได้เทียบกับ RPM จาก Target Speed
n	คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมดที่สนใจ

```

# subplot
fig, ax = plt.subplots()
ax.plot(period_pos, rpm_pos, label='Calculated Positive Direction')
ax.plot(period_neg, rpm_neg, label='Calculated Negative Direction')
ax.plot(period_pos, pp, label='Input Positive Direction')
ax.plot(period_neg, pn, label='Input Negative Direction')
plt.xlabel('Frequency (Hz)')
plt.ylabel('RPM')
plt.title('Frequency - RPM Graph')
plt.grid(True)
plt.legend()

plt.show()

```

รูปที่ 137 โค้ดการplotกราฟ

9.5.2 PWM

```

import matplotlib.pyplot as plt

# Define the motor parameters
freq_pos = [4.160*(10**-3), 2.860*(10**-3), 2.160*(10**-3),
            1.690*(10**-3), 1.420*(10**-3), 1.250*(10**-3),
            1.090*(10**-3), 1.010*(10**-3), 0.890*(10**-3)]

freq_neg = [4.300*(10**-3), 2.820*(10**-3), 2.240*(10**-3),
            1.730*(10**-3), 1.440*(10**-3), 1.210*(10**-3),
            1.100*(10**-3), 1.020*(10**-3), 0.850*(10**-3)]

pos_onetime = [2.0*(10**-6), 3.0*(10**-6), 4.0*(10**-6),
                5.3*(10**-6), 5.9*(10**-6), 7.0*(10**-6),
                8.1*(10**-6), 8.8*(10**-6), 10.10*(10**-6)]

pos_period = [14.2*(10**-6), 14.4*(10**-6), 14.3*(10**-6),
               14.1*(10**-6), 14.3*(10**-6), 14.3*(10**-6),
               14.4*(10**-6), 14.3*(10**-6), 14.1*(10**-6)]

neg_onetime = [2.2*(10**-6), 3.5*(10**-6), 4.3*(10**-6),
                5.4*(10**-6), 6.6*(10**-6), 7.5*(10**-6),
                8.2*(10**-6), 9.4*(10**-6), 10.10*(10**-6)]

neg_period = [14.5*(10**-6), 14.6*(10**-6), 14.4*(10**-6),
               14.1*(10**-6), 14.7*(10**-6), 14.4*(10**-6),
               14.7*(10**-6), 14.5*(10**-6), 14.1*(10**-6)]

```

รูปที่ 138 โค้ดการเก็บสำหรับการคำนวนหา Duty cycle

โดยทำการคำนวนหา Duty cycle ณ RPM ที่สนใจทั้งหมดได้จาก

$$\text{Duty cycle} = \frac{\text{On - Time}}{\text{Period}} \times 100$$

โดย *Duty cycle* คือ Duty cycle มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็น (%)

On - Time คือ ช่วงเวลาที่เปิดแรงตันไฟฟ้า มีหน่วยเป็นวินาที (s)

Period คือ ช่วงเวลาใน 1 Pulses มีหน่วยเป็นวินาที (s)

```

dutyc_pos = []
dutyc_neg = []

period = sum(pos_period+neg_period)/len(pos_period+neg_period)
for i,freq in enumerate(freq_pos):
    dc = (pos_ontime[i]/period) * 100
    dutyc_pos.append(dc)

for freq in freq_neg:
    dc = (neg_ontime[i]/period) * 100
    dutyc_neg.append(dc)

```

รูปที่ 139 โค้ดการคำนวณหา Duty cycle ณ RPM ที่สนใจทั้งหมด

เมื่อคำนวณเสร็จสิ้นแล้ว ให้นำค่าที่ได้ไปplot ตกราฟเทียบกับความถี่ของรูปคลื่นแรงดัน

Back EMF

```

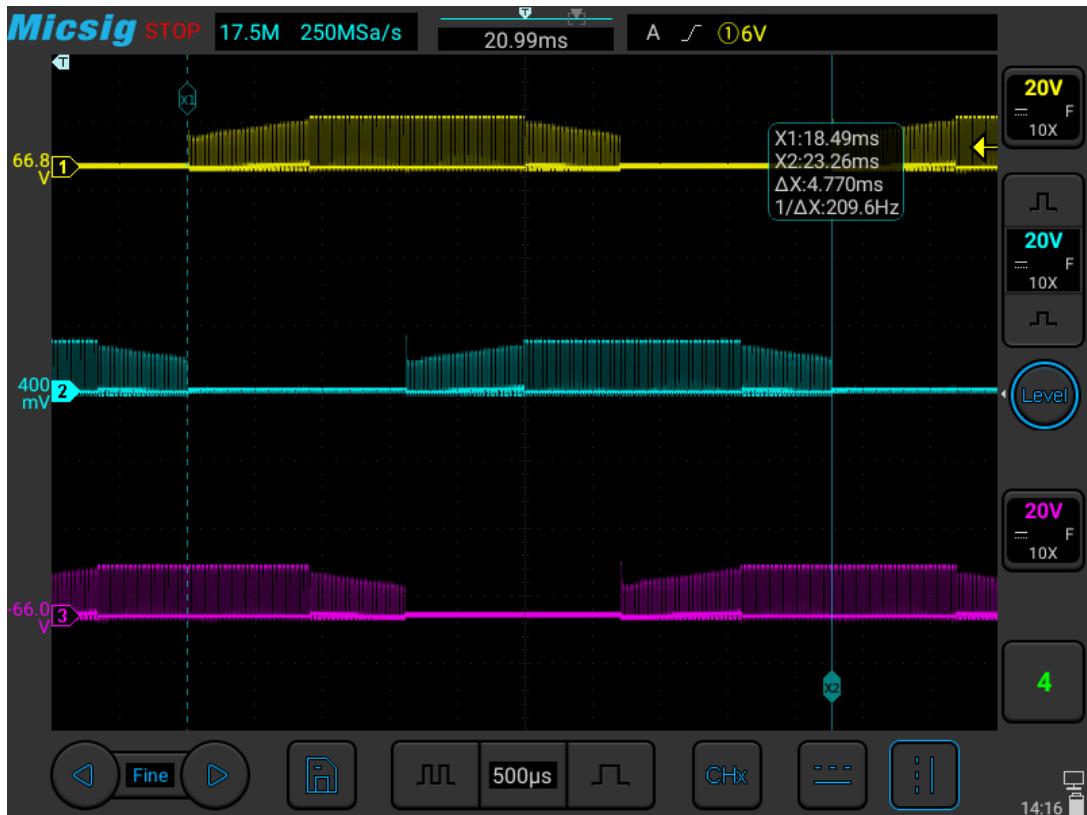
# subplot
plt.figure()
plt.plot(freq_pos, dutyc_pos, label='Positive Direction', marker='o')
plt.xlabel('Frequency (Hz)')
plt.ylabel('Duty Cycle')
plt.title('Frequency - PWM graph')
plt.grid(True)
plt.legend()

plt.show()

```

รูปที่ 140 โค้ดการplot ตกราฟ

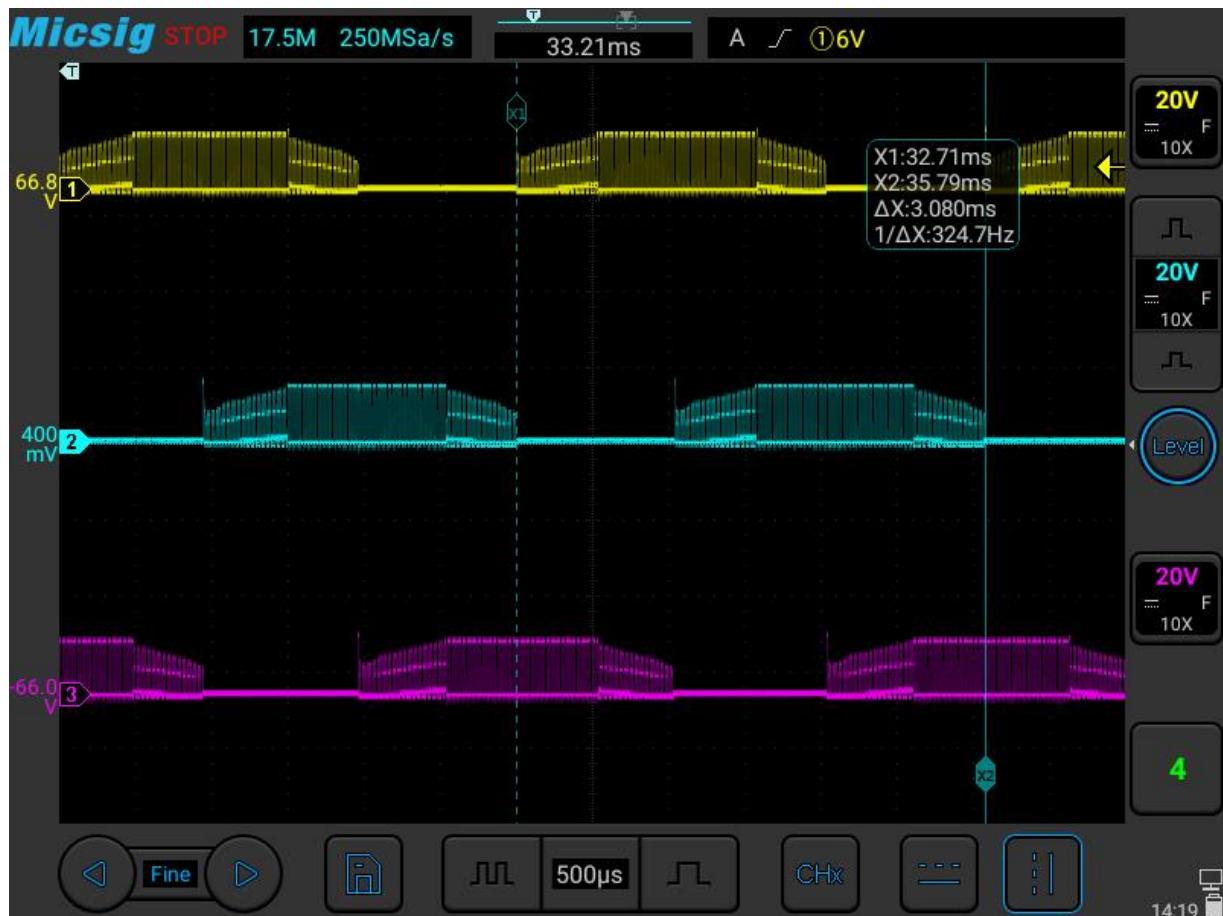
10. ผลการทดลอง



รูปที่ 141 ความถี่แรงดัน Back EMF จากการหมุนหวานเข็มนาฬิกา ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 1800 rpm



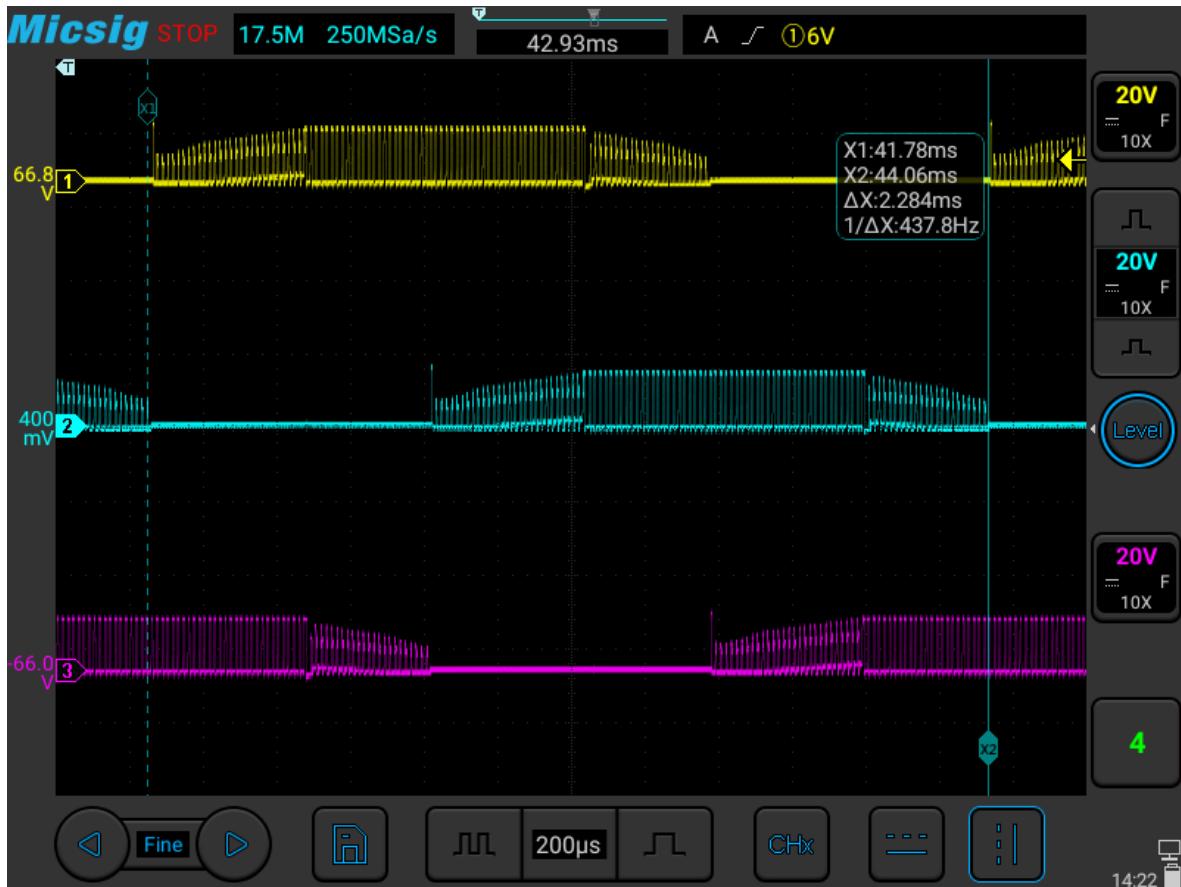
รูปที่ 142 ค่า Duty cycle จากการหมุนหวานเข็มนาฬิกาของมอเตอร์ ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 1800 rpm



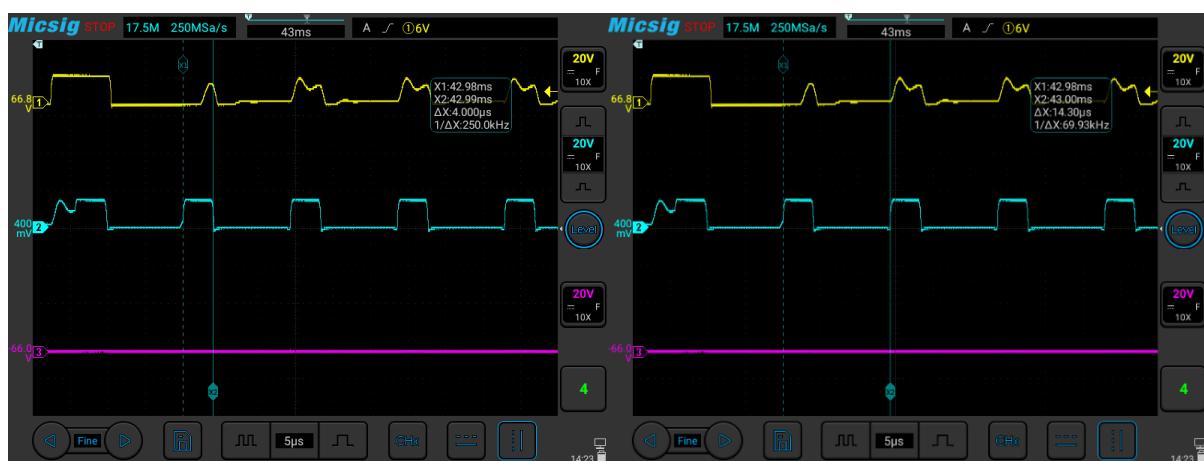
รูปที่ 143 ความถี่แรงดัน Back EMF จากการหมุนหวานเข้มนาฬิกา ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 2800 rpm



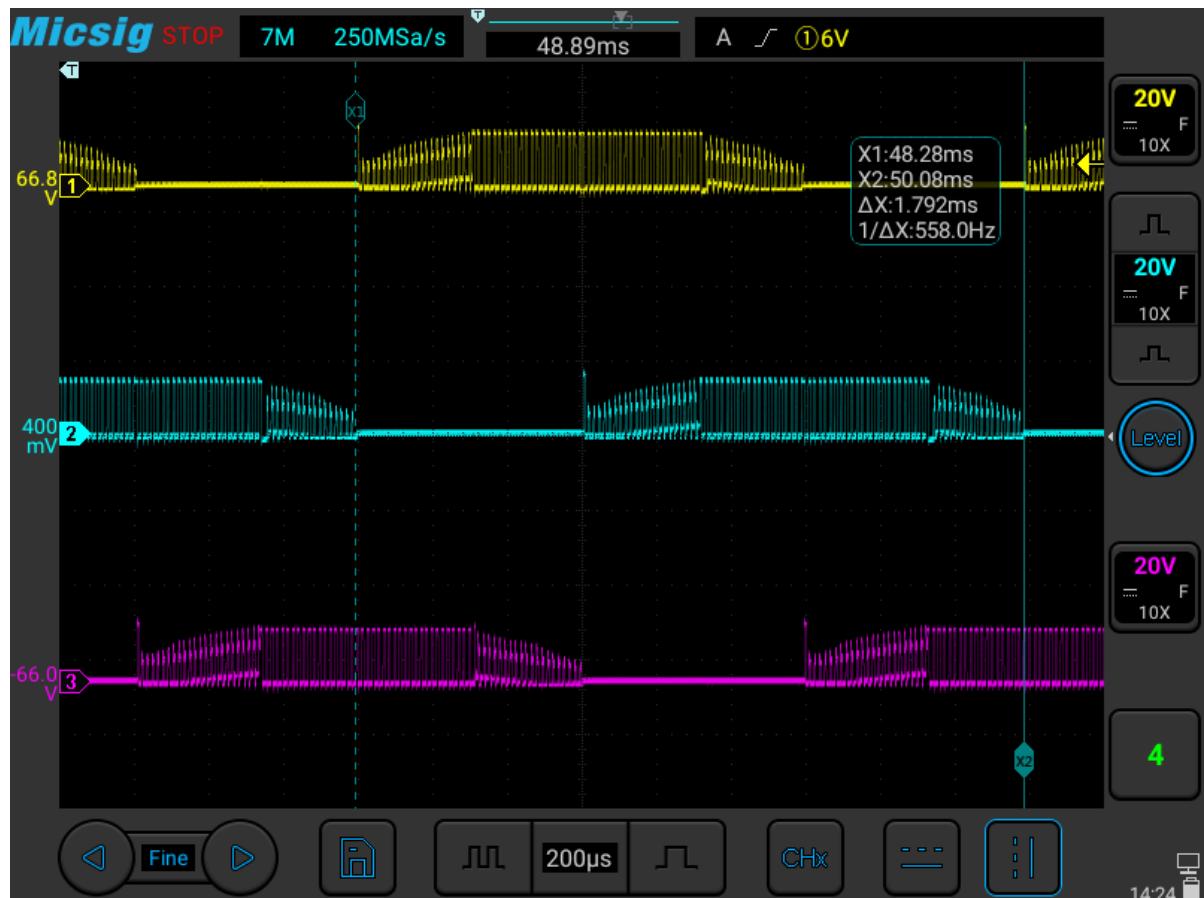
รูปที่ 144 ค่า Duty cycle จากการหมุนหวานเข้มนาฬิกาของมอเตอร์ ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 2800 rpm



รูปที่ 145 ความถี่แรงดัน Back EMF จากการหมุนทวนเข็มนาฬิกา ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 3800 rpm



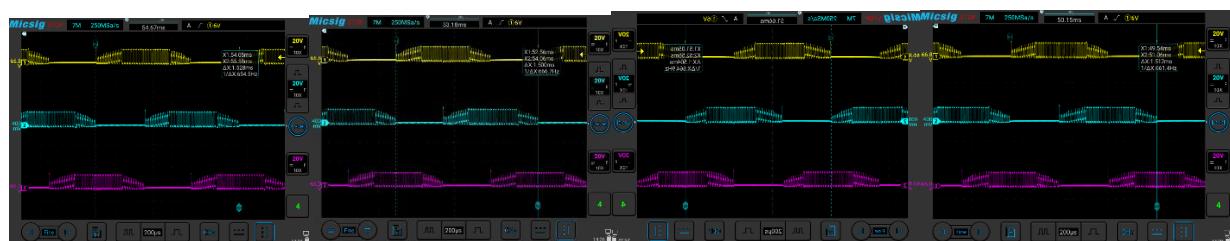
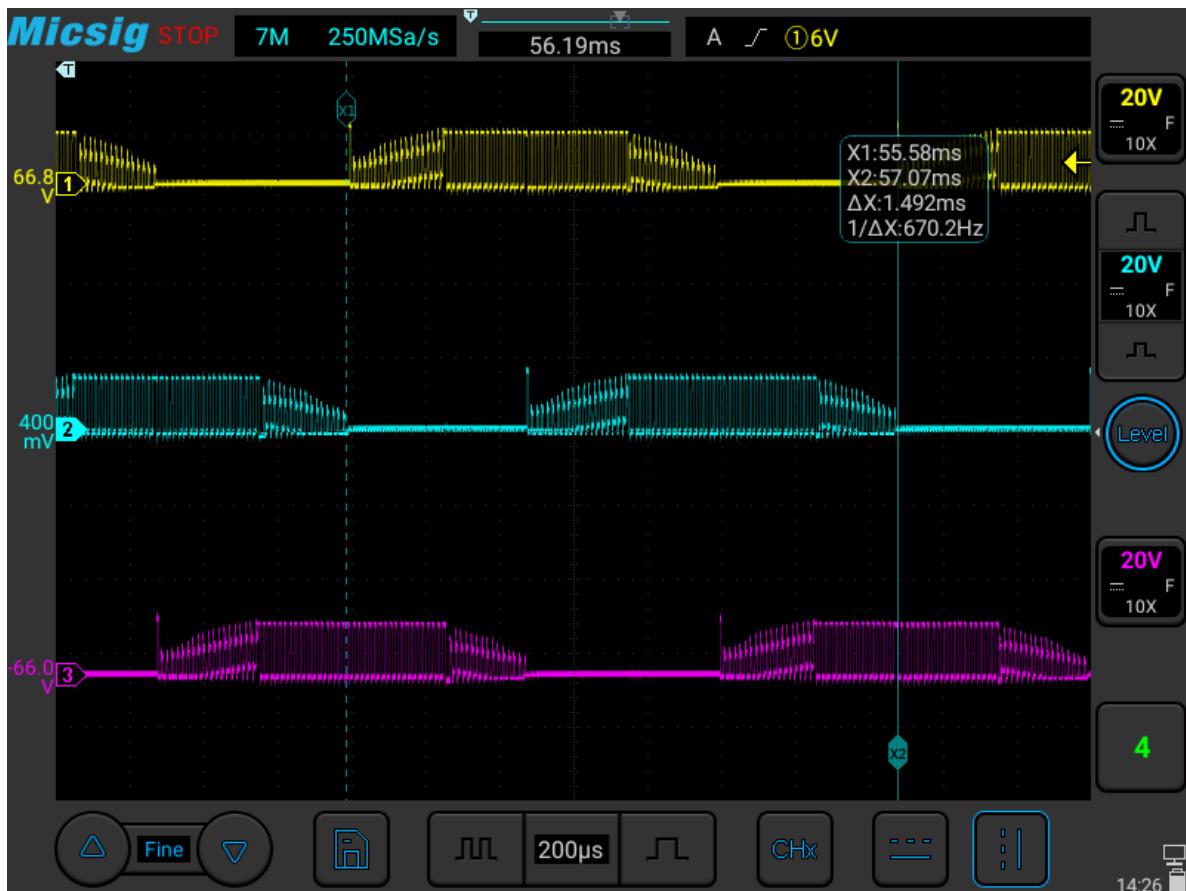
รูปที่ 146 ค่า Duty cycle จากการหมุนทวนเข็มนาฬิกาของมอเตอร์ ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 3800 rpm



รูปที่ 147 ความถี่แรงดัน Back EMF จากการหมุนทวนเข็มนาฬิกา ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 4800 rpm



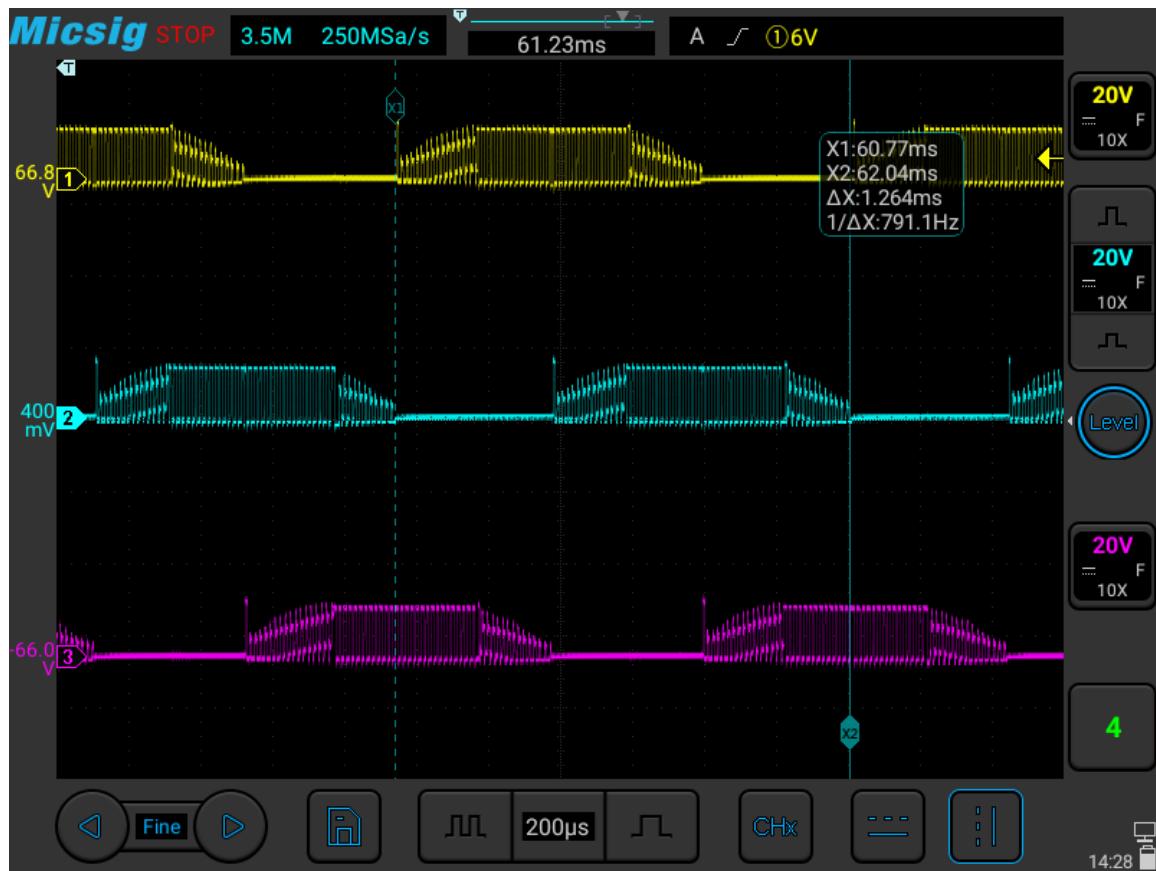
รูปที่ 148 ค่า Duty cycle จากการหมุนทวนเข็มนาฬิกาของมอเตอร์ ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 4800 rpm



รูปที่ 149 ความถี่แรงดัน Back EMF จากการหมุนทวนเข็มนาฬิกา ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 5800 rpm



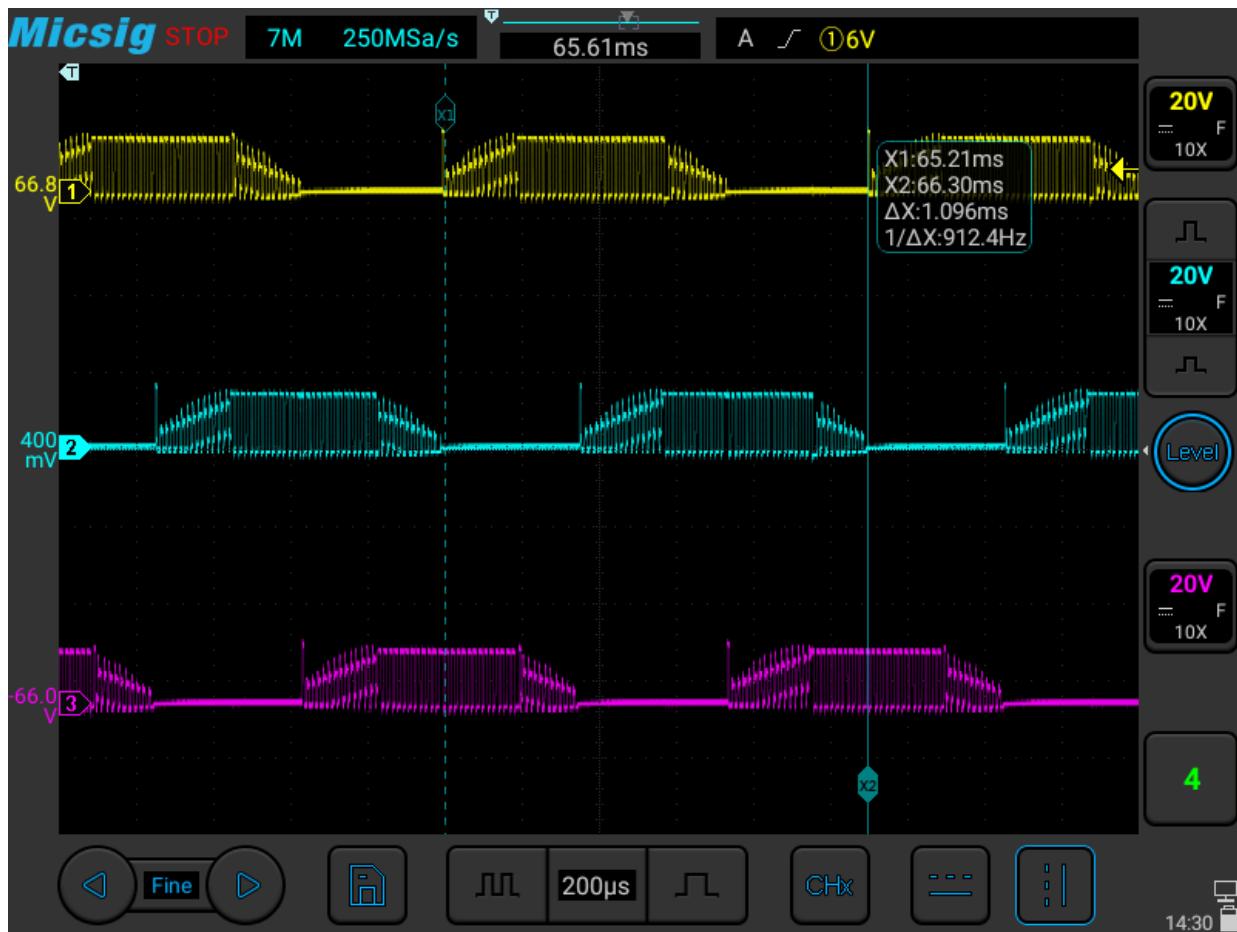
รูปที่ 150 ค่า Duty cycle จากการหมุนทวนเข็มนาฬิกาของมอเตอร์ ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 5800 rpm



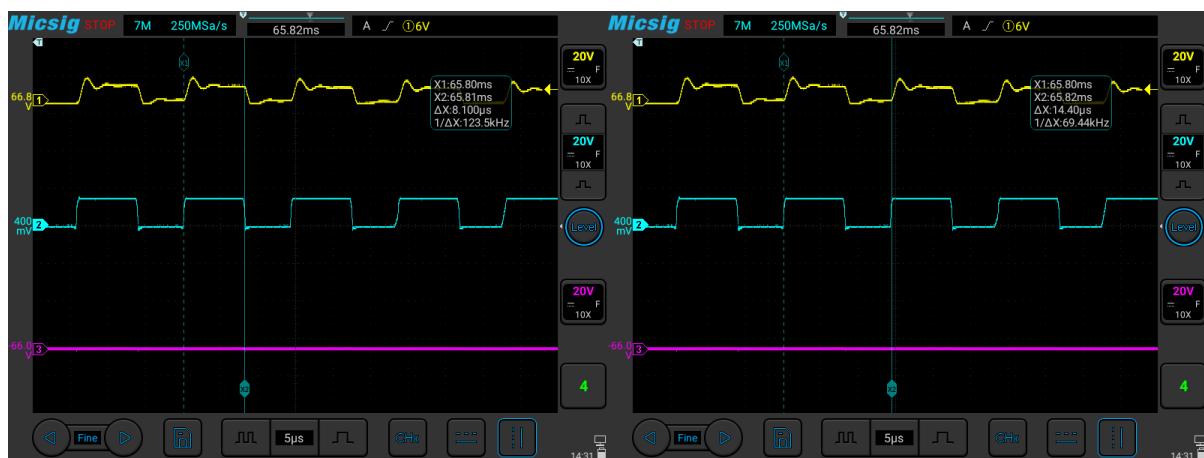
รูปที่ 151 ความถี่แรงดัน Back EMF จากการหมุนวนเข็มนาฬิกา ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 6800 rpm



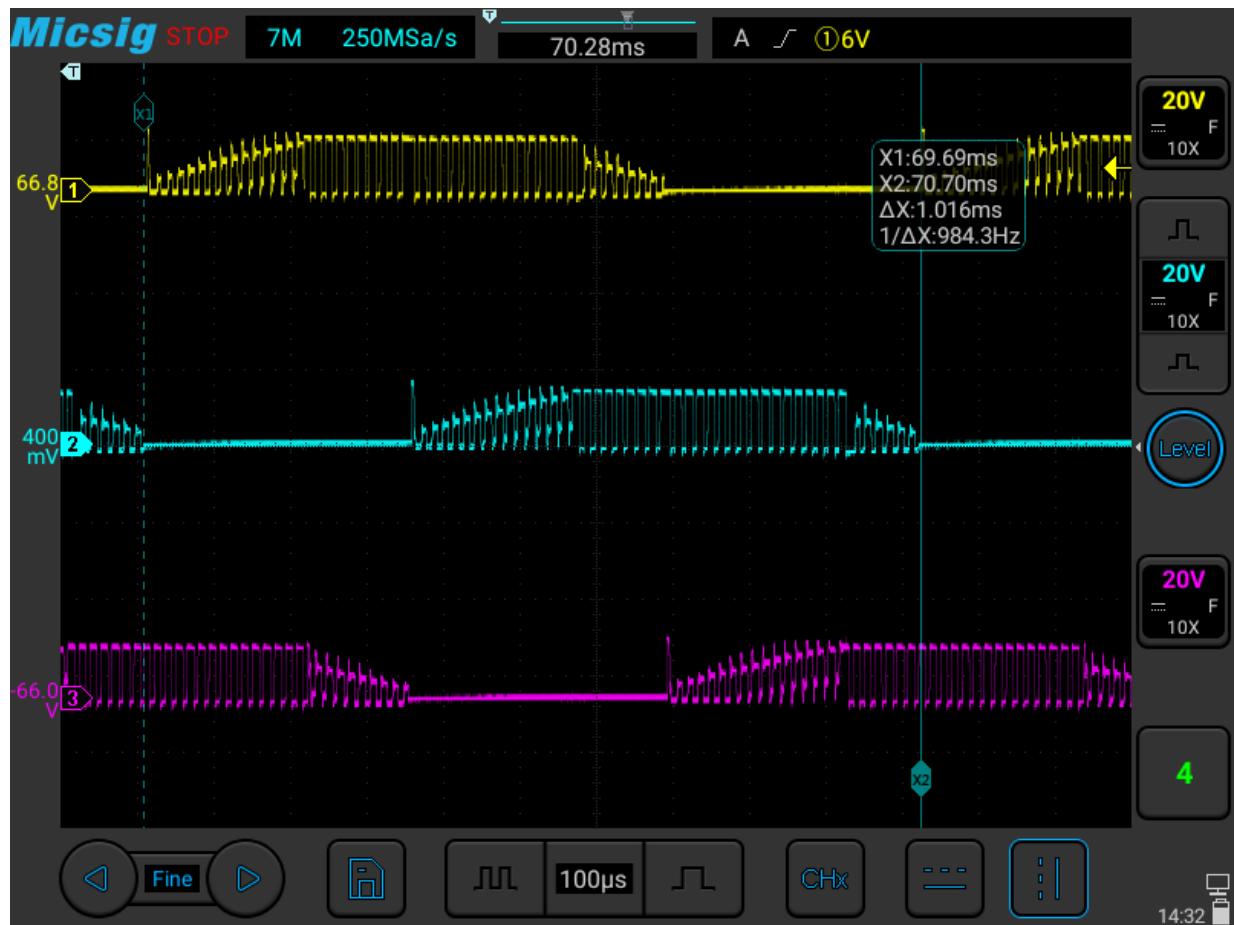
รูปที่ 152 ค่า Duty cycle จากการหมุนวนเข็มนาฬิกาของมอเตอร์ ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 6800 rpm



รูปที่ 153 ความถี่แรงดัน Back EMF จากการหมุนทวนเข็มนาฬิกา ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 7800 rpm



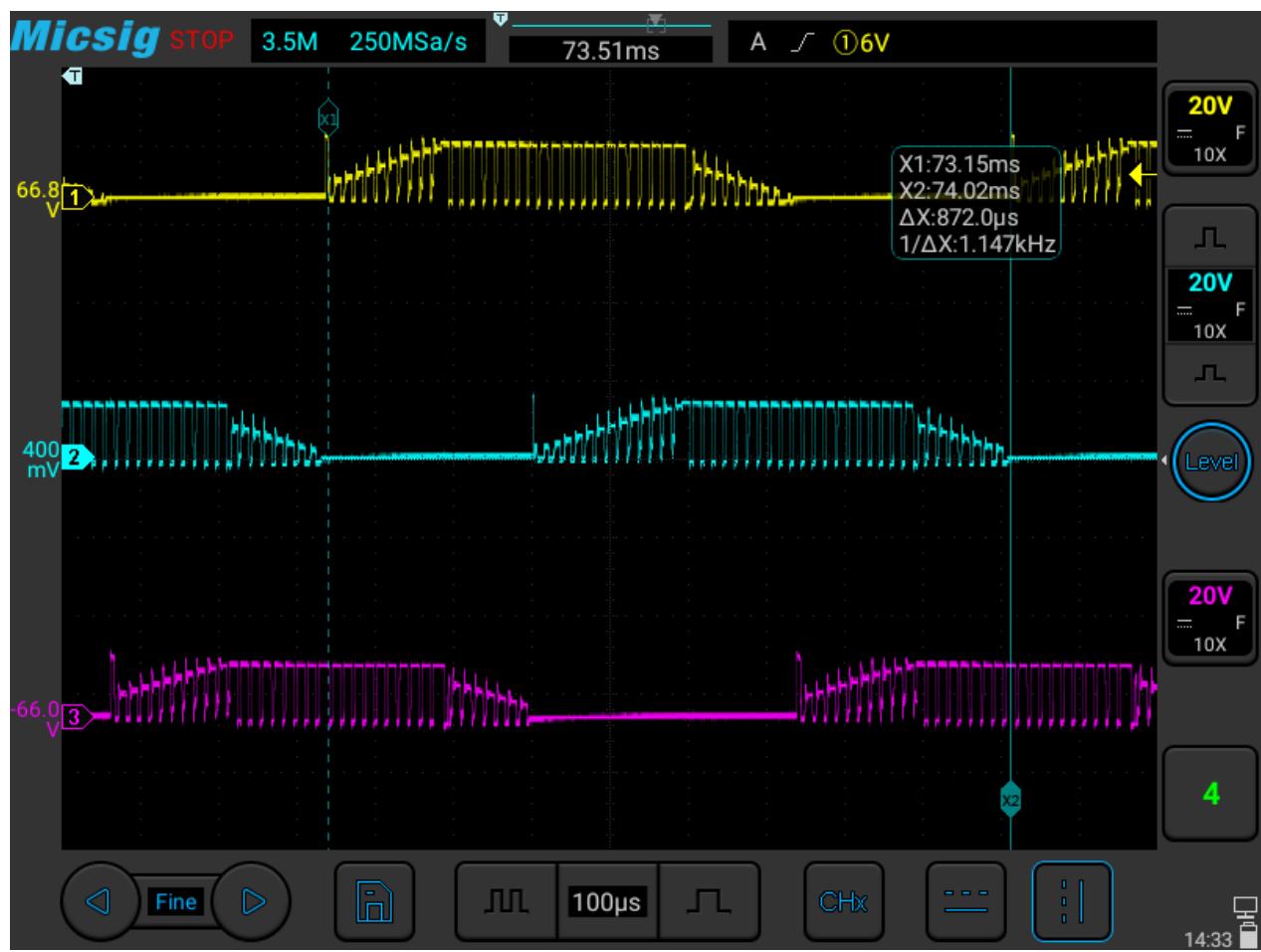
รูปที่ 154 ค่า Duty cycle จากการหมุนทวนเข็มนาฬิกาของมอเตอร์ ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 7800 rpm



รูปที่ 155 ความถี่แรงดัน Back EMF จากการหมุนวนเข็มนาฬิกา ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 8800 rpm



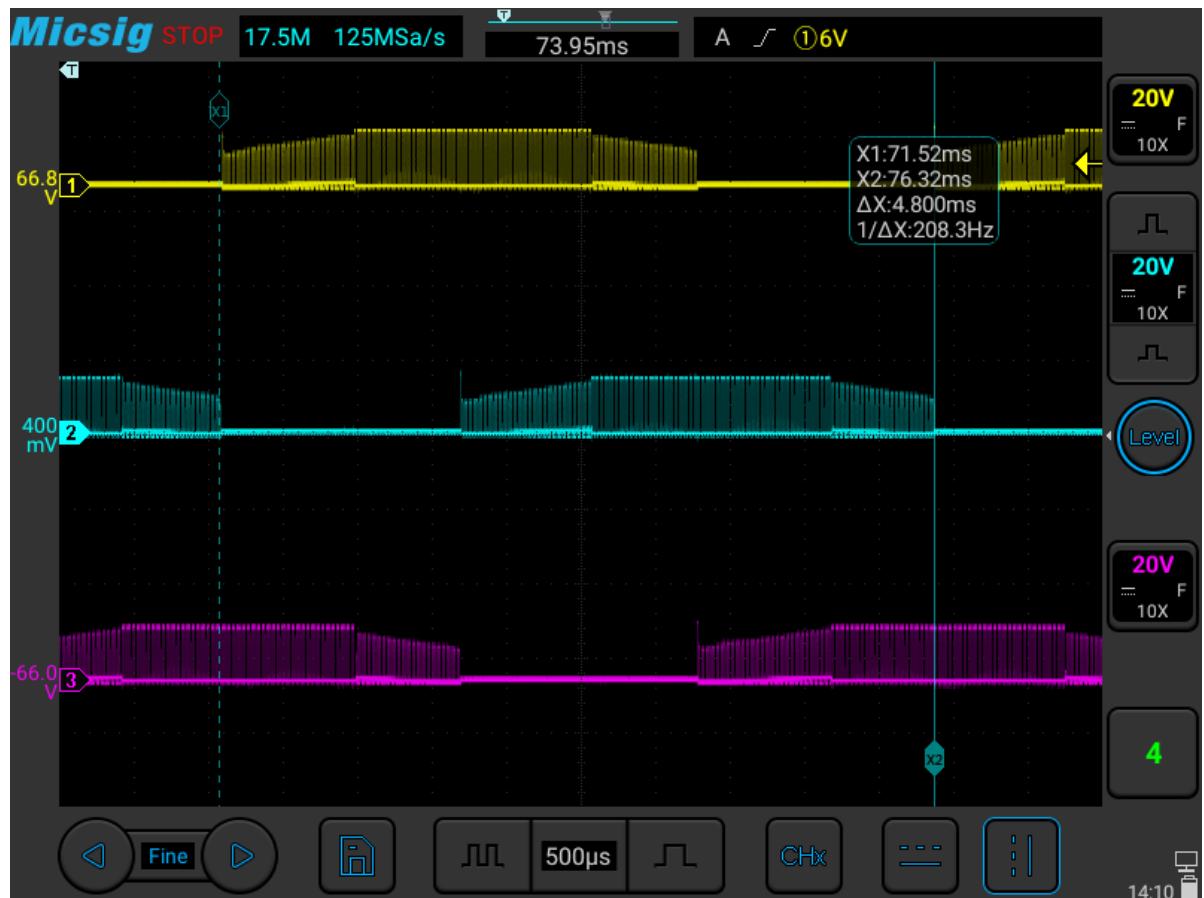
รูปที่ 156 ค่า Duty cycle จากการหมุนวนเข็มนาฬิกาของมอเตอร์ ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 8800 rpm



รูปที่ 157 ความเร็วแรงดัน Back EMF จากการหมุนวนเข็มนาฬิกา ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 9800 rpm



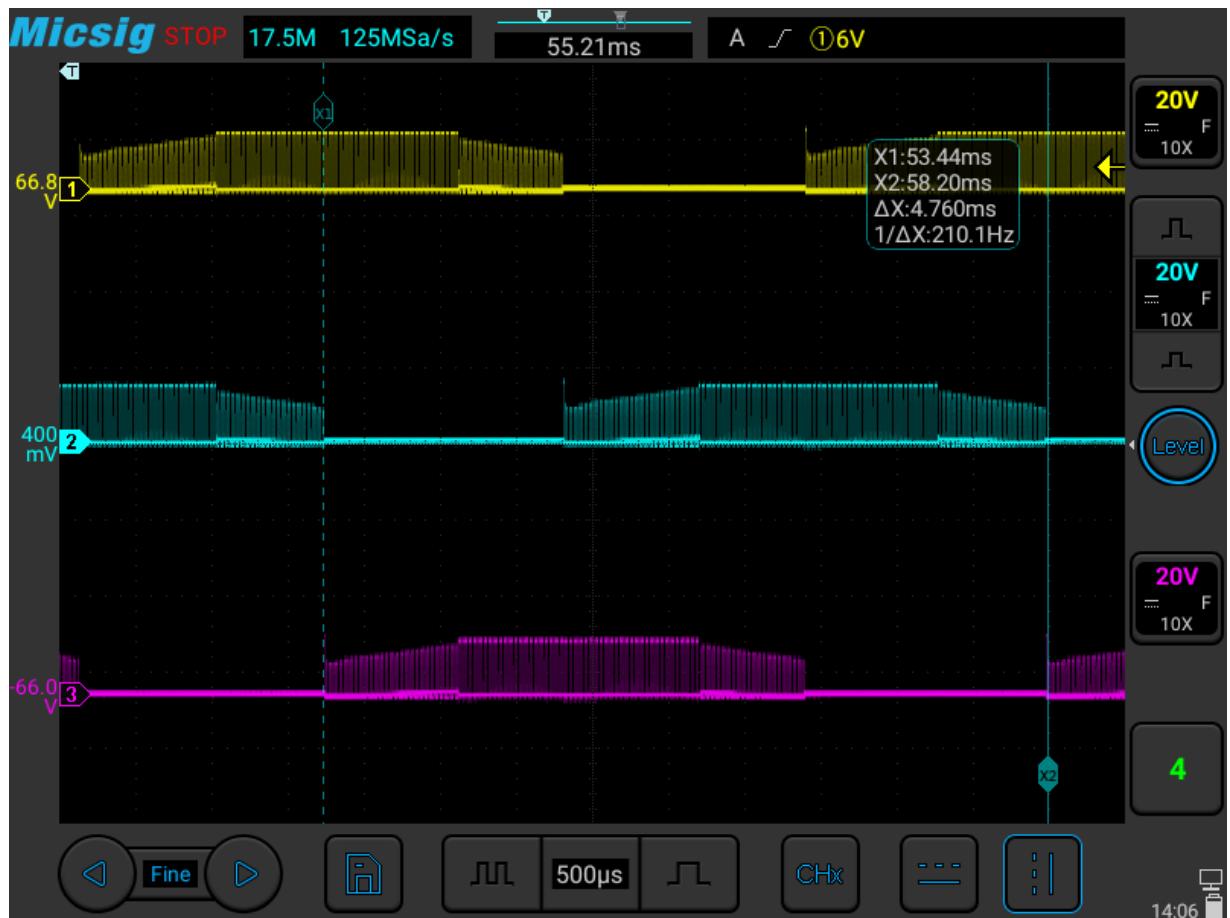
รูปที่ 158 ค่า Duty cycle จากการหมุนวนเข็มนาฬิกาของมอเตอร์ ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 9800 rpm



รูปที่ 159 ความถี่แรงดัน Back EMF จากการหมุนตามเข็มนาฬิกา ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 1800 rpm



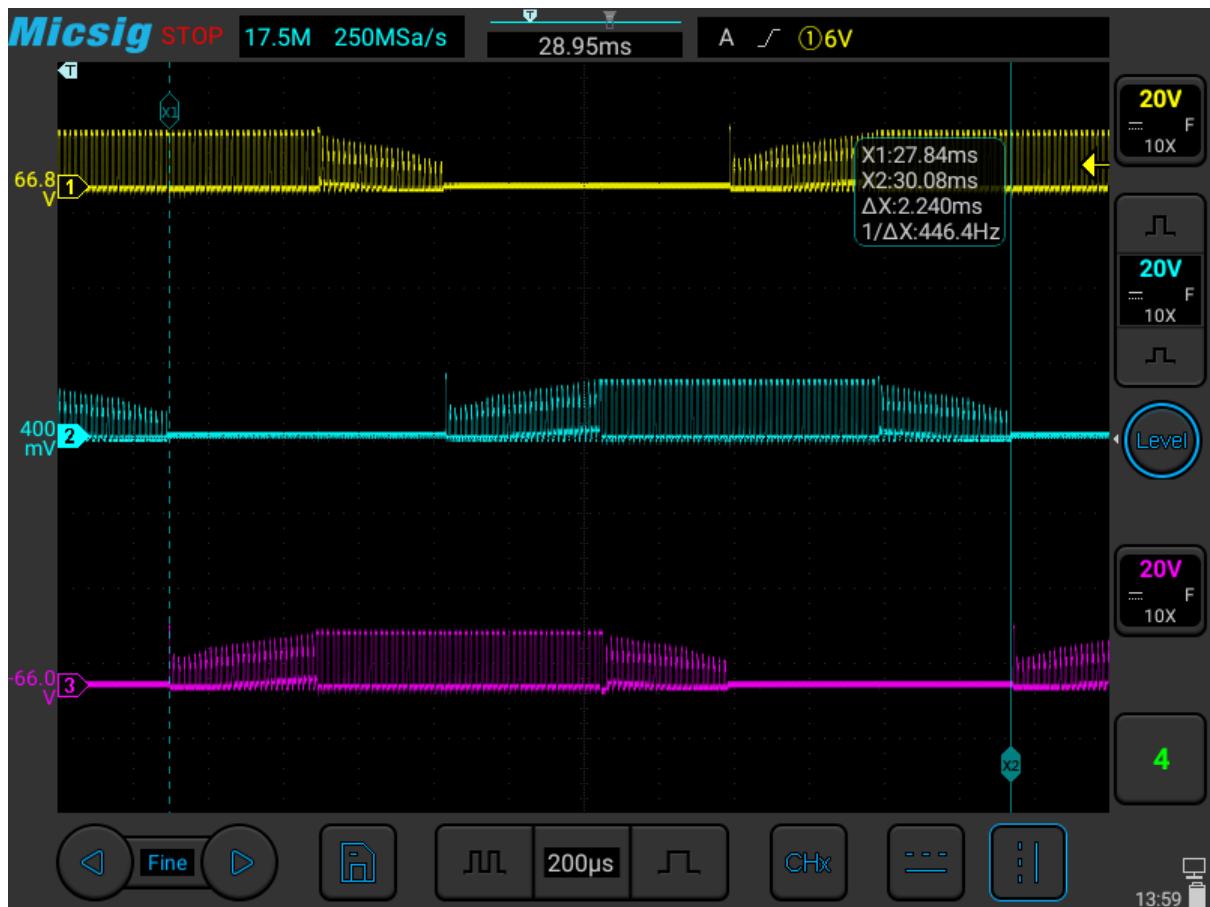
รูปที่ 160 ค่า Duty cycle จากการหมุนตามเข็มนาฬิกาของมอเตอร์ ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 1800 rpm



รูปที่ 161 ความถี่แรงดัน Back EMF จากการหมุนตามเข็มนาฬิกา ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 2800 rpm



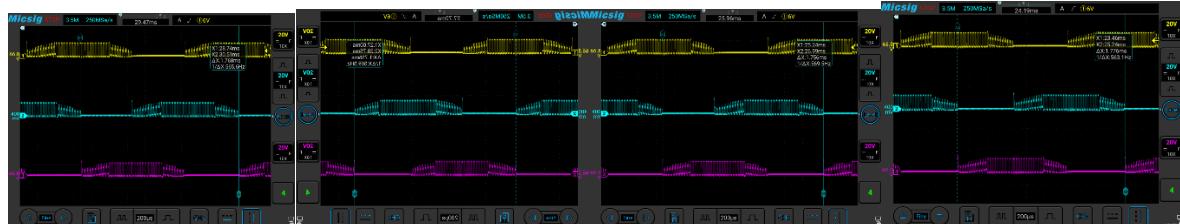
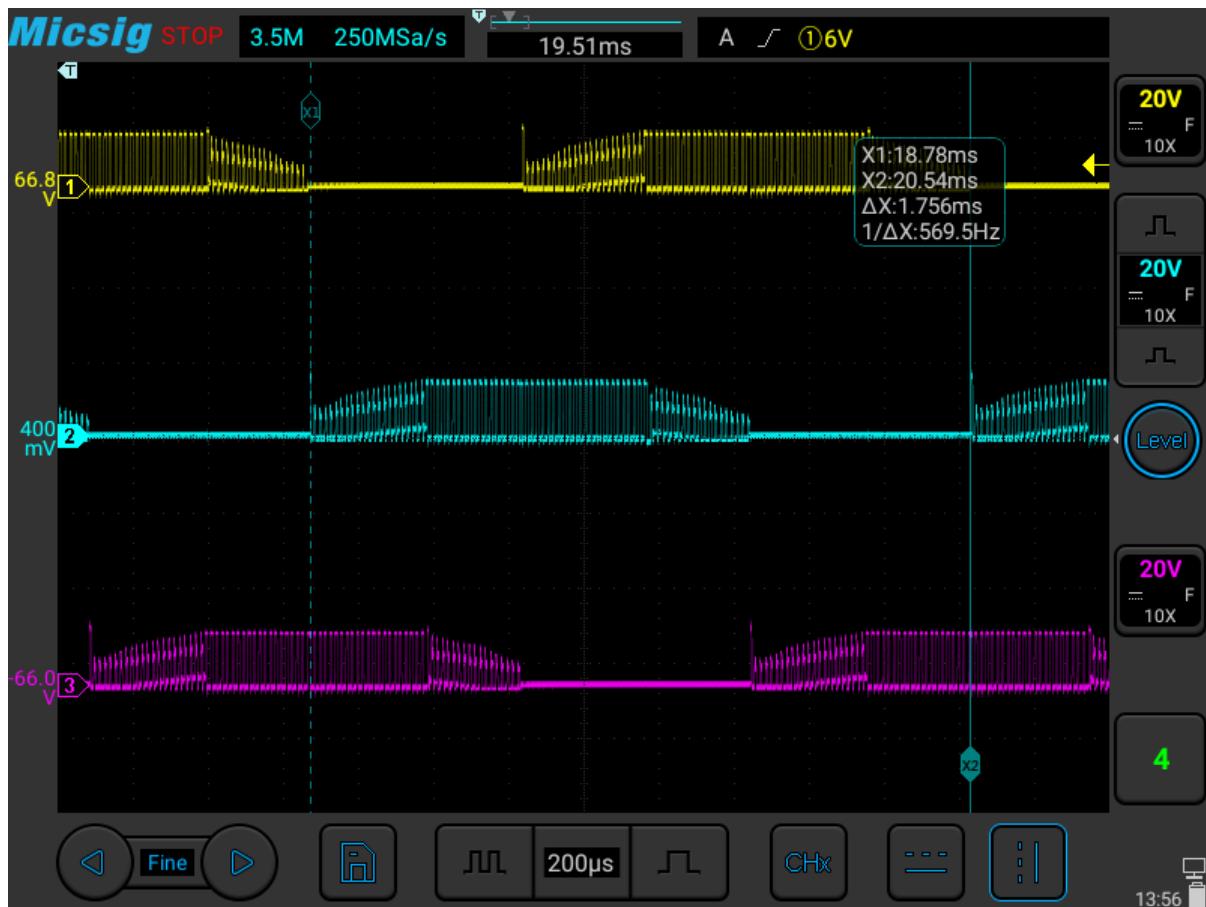
รูปที่ 162 ความถี่แรงดัน Back EMF จากการหมุนตามเข็มนาฬิกา ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 2800 rpm



รูปที่ 163 ความถี่แรงดัน Back EMF จากการหมุนตามเข็มนาฬิกา ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 3800 rpm



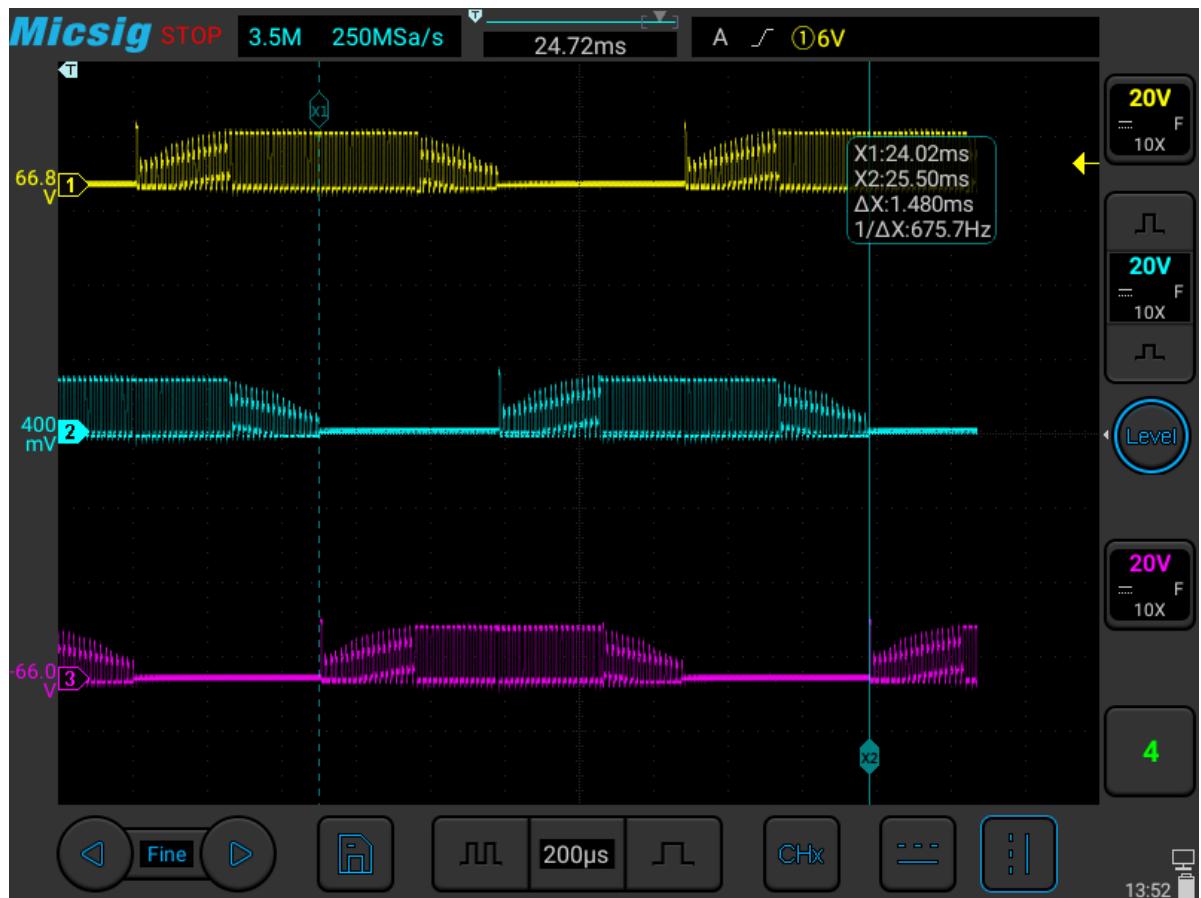
รูปที่ 164 ความถี่แรงดัน Back EMF จากการหมุนตามเข็มนาฬิกา ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 3800 rpm



รูปที่ 165 ความถี่แรงดัน Back EMF จากการหมุนตามเข็มนาฬิกา ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 4800 rpm



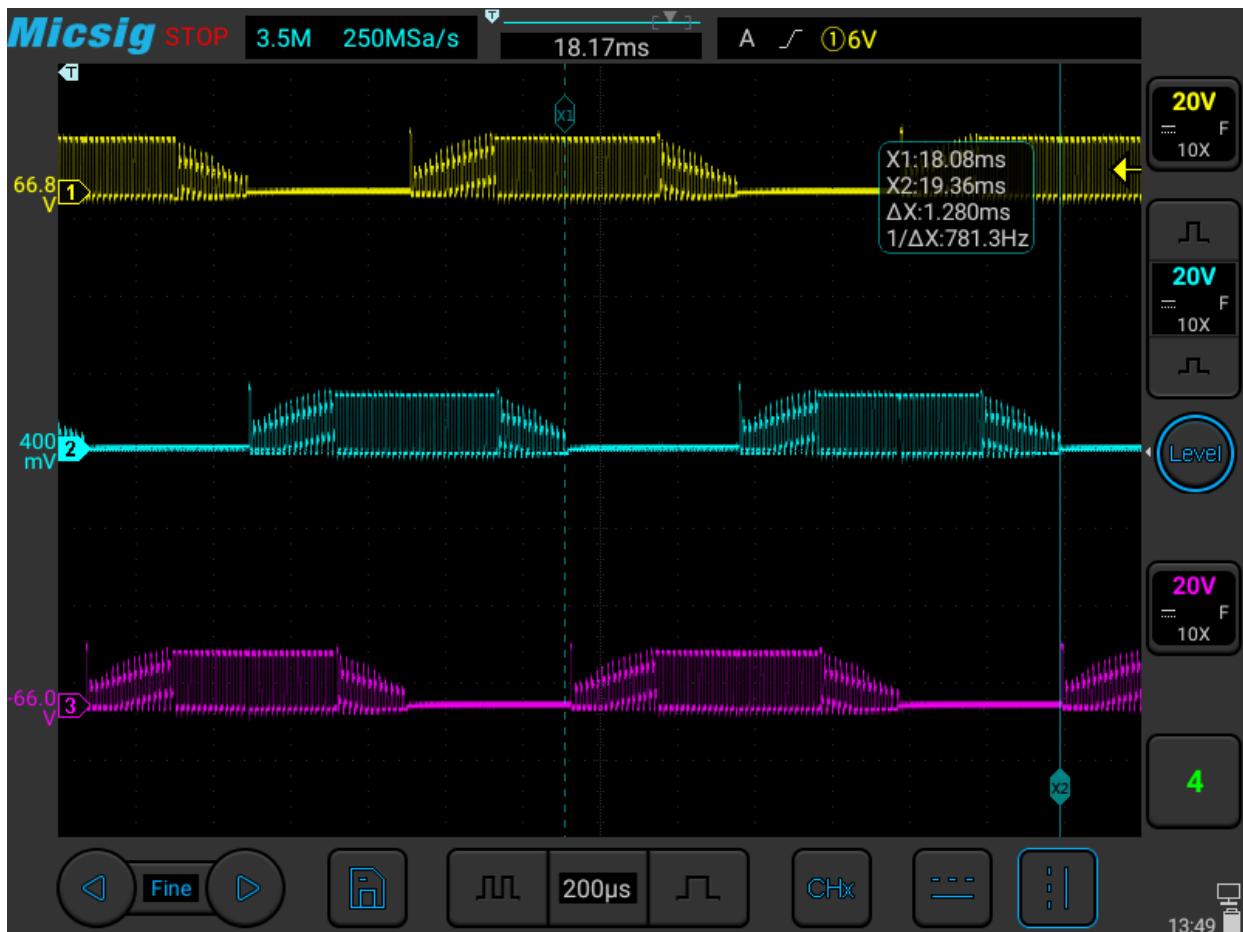
รูปที่ 166 ความถี่แรงดัน Back EMF จากการหมุนตามเข็มนาฬิกา ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 4800 rpm



รูปที่ 167 ความถี่แรงดัน Back EMF จากการหมุนตามเข็มนาฬิกา ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 5800 rpm



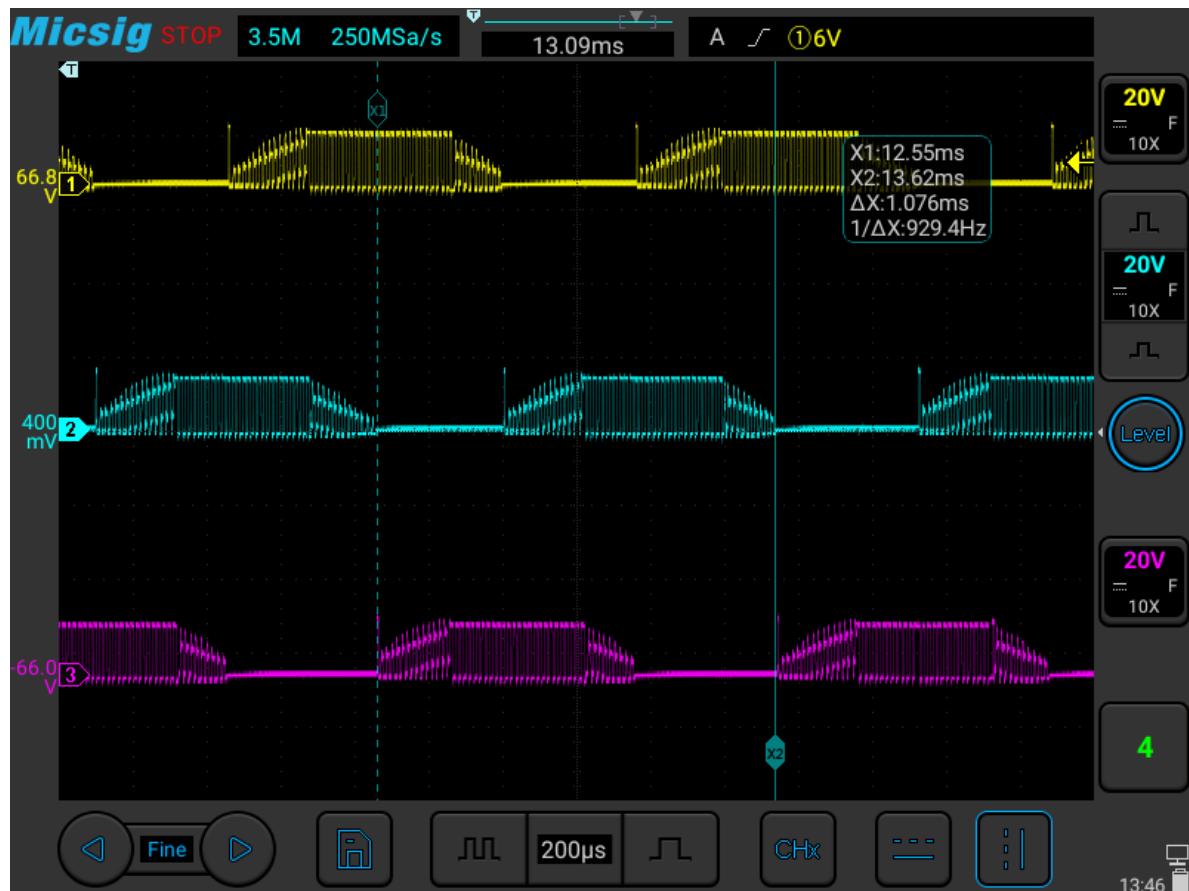
รูปที่ 168 ความถี่แรงดัน Back EMF จากการหมุนตามเข็มนาฬิกา ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 5800 rpm



รูปที่ 169 ความถี่แรงดัน Back EMF จากการหมุนตามเข็มนาฬิกา ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 6800 rpm



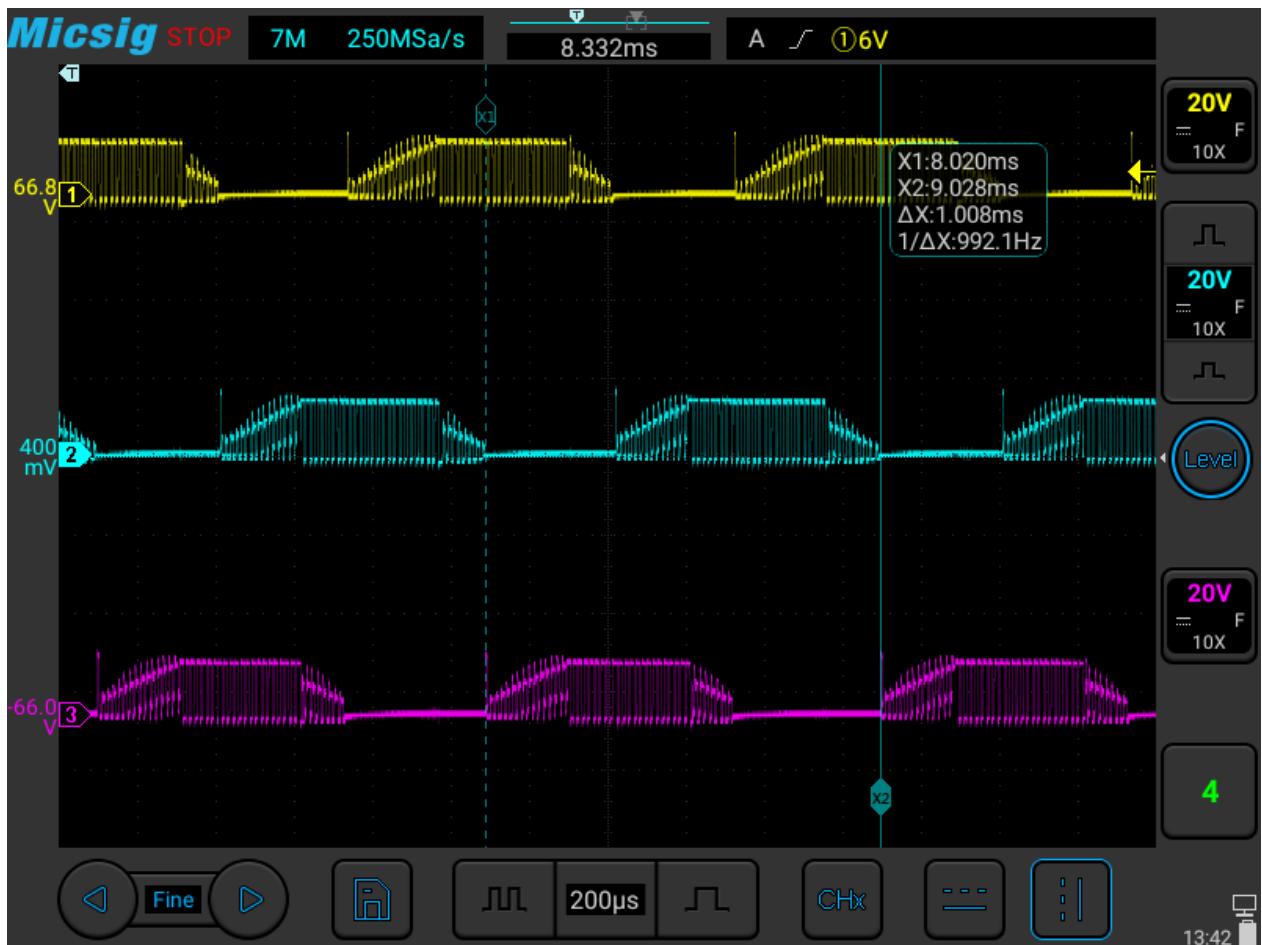
รูปที่ 170 ความถี่แรงดัน Back EMF จากการหมุนตามเข็มนาฬิกา ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 6800 rpm



รูปที่ 171 ความถี่แรงดัน Back EMF จากการหมุนตามเข็มนาฬิกา ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 7800 rpm



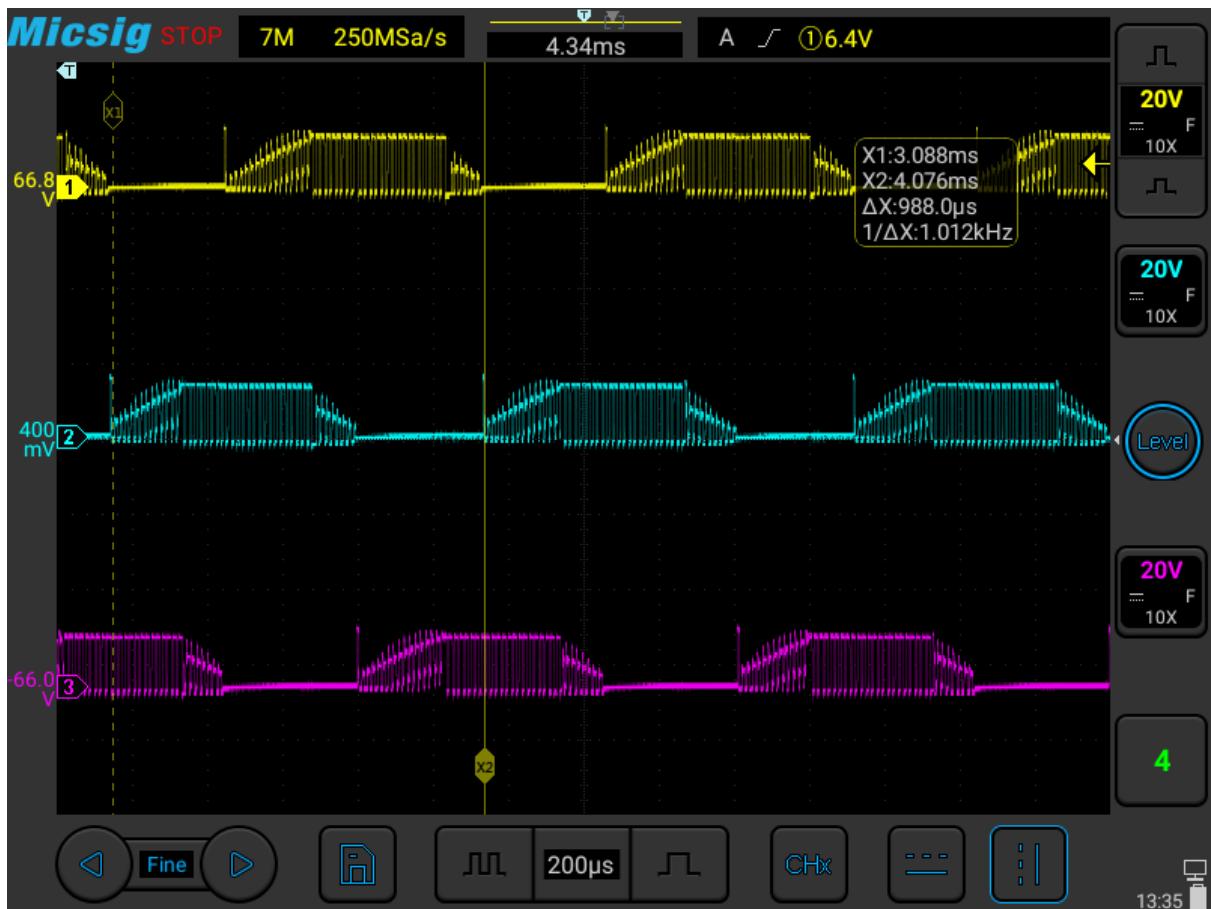
รูปที่ 172 ความถี่แรงดัน Back EMF จากการหมุนตามเข็มนาฬิกา ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 7800 rpm



รูปที่ 173 ความถี่แรงดัน Back EMF จากการหมุนตามเข็มนาฬิกา ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 8800 rpm



รูปที่ 174 ความถี่แรงดัน Back EMF จากการหมุนตามเข็มนาฬิกา ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 8800 rpm



รูปที่ 175 ความถี่แรงดัน Back EMF จากการหมุนตามเข็มนาฬิกา ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 9800 rpm



รูปที่ 176 ความถี่แรงดัน Back EMF จากการหมุนตามเข็มนาฬิกา ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่ 9800 rpm

11. สรุปผลการทดลอง

11.1 ความเร็วมอเตอร์จาก Back EMF Frequency

จากการเก็บค่า จะได้ความถี่ของแรงดัน Back EMF จากการหมุนทวนเข็มนาฬิกา จะได้ข้อมูลดังนี้

ตารางที่ 14 ความถี่แรงดัน Back EMF จากการหมุนทวนเข็มนาฬิกา ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่สนใจ

ความเร็วมอเตอร์ (RPM)	ความถี่ (Hz)					
	ความถี่ที่ 1	ความถี่ที่ 2	ความถี่ที่ 3	ความถี่ที่ 4	ความถี่ที่ 5	ความถี่เฉลี่ย
1800	209.64	209.64	207.90	209.64	209.64	209.29
2800	326.79	324.67	324.67	322.58	324.67	324.67
3800	440.91	440.91	440.14	440.14	437.82	439.98
4800	563.06	555.55	559.28	559.28	558.03	559.03
5800	661.37	664.89	666.66	654.45	670.24	663.48
6800	778.81	801.28	793.65	793.65	791.13	791.64
7800	902.52	905.79	889.67	902.52	912.40	902.52
8800	1012.14	988.14	988.14	1002.00	984.25	994.82
9800	1165.50	1111.11	1128.66	1128.66	1146.78	1135.84

จากนั้นเมื่อนำความถี่เฉลี่ยของแรงดัน Back EMF จากการหมุนทวนเข็มนาฬิกามาคำนวณหาความเร็วมอเตอร์ จะได้ข้อมูลดังนี้

ตารางที่ 15 การเปรียบเทียบระหว่างความเร็วมอเตอร์จากการหมุนทวนเข็มนาฬิกาจากการป้อนค่าในโปรแกรม กับความเร็วมอเตอร์จากการคำนวณ

ความเร็วมอเตอร์จากการป้อนค่าใน Target Speed (RPM)	ความเร็วมอเตอร์จากการคำนวณ (RPM)
1800	1793.93
2800	2782.93
3800	3771.30
4800	4791.71
5800	5686.98
6800	6785.48
7800	7735.94
8800	8527.08
9800	9735.83

จากการเก็บค่า จะได้ความถี่ของแรงดัน Back EMF จากการหมุนตามเข็มนาฬิกา จะได้ข้อมูลดังนี้

ตารางที่ 16 ความถี่แรงดัน Back EMF จากการหมุนตามเข็มนาฬิกา ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่สนใจ

ความเร็วมอเตอร์ (RPM)	ความถี่ (Hz)					
	ความถี่ที่ 1	ความถี่ที่ 2	ความถี่ที่ 3	ความถี่ที่ 4	ความถี่ที่ 5	ความถี่เฉลี่ย
1800	209.64	209.64	210.08	210.08	208.33	209.55
2800	332.22	328.94	334.44	334.44	337.83	333.55
3800	446.42	444.83	444.83	440.14	446.42	444.52
4800	563.06	569.47	569.47	565.61	569.47	567.40
5800	673.85	677.50	677.50	681.19	675.67	677.13

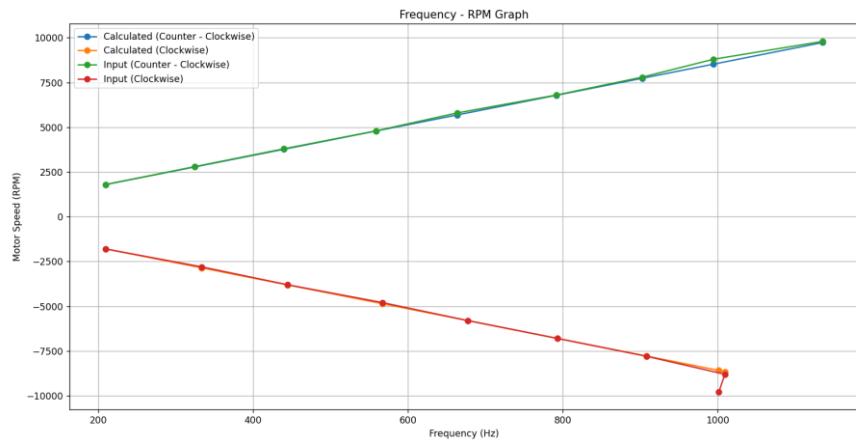
ความเร็วมอเตอร์ (RPM)	ความถี่ (Hz)					
	ความถี่ที่ 1	ความถี่ที่ 2	ความถี่ที่ 3	ความถี่ที่ 4	ความถี่ที่ 5	ความถี่เฉลี่ย
6800	806.45	786.16	796.17	796.17	781.24	793.14
7800	905.79	919.11	899.28	889.67	929.36	908.43
8800	1020.40	1020.40	1012.14	1002.00	992.06	1009.28
9800	988.14	1008.06	1008.06	992.06	1012.14	1001.60

จากนั้นเมื่อนำความถี่ของแรงดัน Back EMF จากการหมุนวนเข้ามาคำนวณหาความเร็วมอเตอร์ จะได้ข้อมูลดังนี้

ตารางที่ 17 การเปรียบเทียบระหว่างความเร็วมอเตอร์จากการหมุนตามเข็มนาฬิกาจากการป้อนค่าในโปรแกรม กับความเร็วมอเตอร์จากการคำนวณ

ความเร็วมอเตอร์จากการป้อนค่าใน Target Speed (RPM)	ความเร็วมอเตอร์จากการคำนวณ (RPM)
1800	1793.93
2800	2782.93
3800	3771.30
4800	4791.71
5800	5686.98
6800	6785.48
7800	7735.94
8800	8527.08
9800	9735.83

เมื่อนำค่าความเร็วมอเตอร์จากการหมุนตามเข็มนาฬิกาจากการป้อนค่าในโปรแกรม กับความเร็วมอเตอร์จากการคำนวณได้มาพล็อตกราฟเทียบกับความถี่ของแรงดัน Back EMF จะได้ข้อมูลดังนี้



รูปที่ 177 กราฟความเร็วมอเตอร์ - ความถี่แรงดัน Back EMF

เมื่อสังเกตกราฟจากรูปที่ 177 พบร่วมกับความเร็วมอเตอร์ที่คำนวณมา มีค่าใกล้เคียงกับความเร็วมอเตอร์ที่โปรแกรม Motor Pilot อ่านค่าให้ ทำให้สรุปได้ว่าความเร็วเชิงกลของมอเตอร์แปรผันตามความถี่ของแรงดัน Back EMF กล่าวคือ ยิ่งความถี่มาก ความเร็วเชิงกลของมอเตอร์จะยิ่งมากเช่นกัน

11.2 PWM

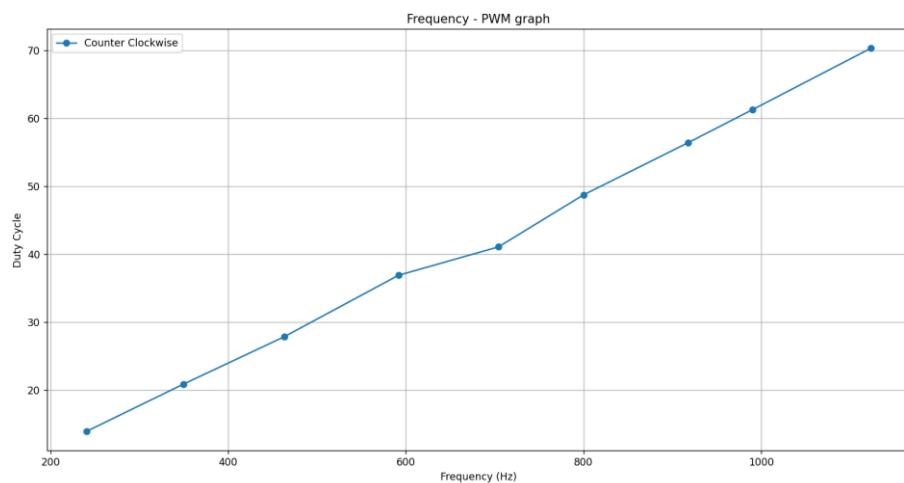
จากการคำนวนหาค่า Duty cycle ในทุก ๆ ความเร็วมอเตอร์ทวนเข็มนาฬิกาที่เราสนใจ จะได้ข้อมูล มาดังนี้

ตารางที่ 18 ค่า Duty cycle จากการหมุนทวนเข็มนาฬิกาของมอเตอร์ ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่สนใจ

ความเร็วมอเตอร์ (RPM)	Duty cycle (%)
1800	13.92
2800	20.88
3800	27.84
4800	36.89
5800	41.06
6800	48.72

ความเร็วมอเตอร์ (RPM)	Duty cycle (%)
7800	56.38
8800	61.25
9800	70.30

เมื่อต้องการหาความสัมพันธ์ระหว่าง Duty cycle และ Frequency Output จากการหมุนทวนนาฬิกาของมอเตอร์ ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่สนใจจะได้กราฟดังนี้



รูปที่ 178 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Duty cycle และ Frequency Output จากการหมุนทวนนาฬิกาของมอเตอร์

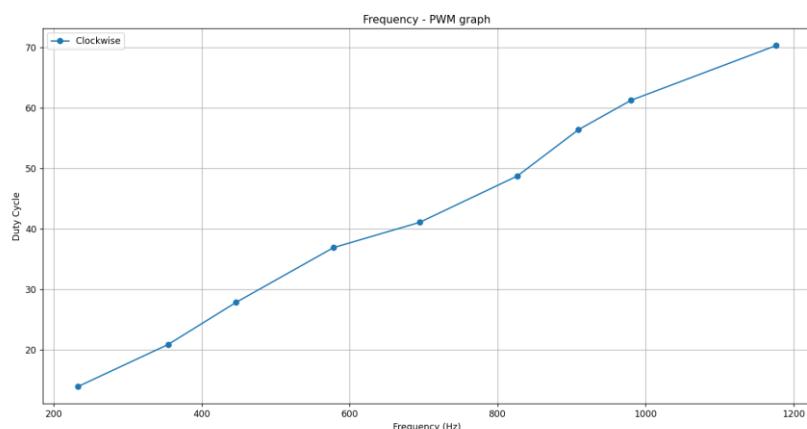
จากการคำนวณหากค่า Duty cycle ในทุก ๆ ความเร็วมอเตอร์ตามเข็มนาฬิกาที่เราสนใจ จะได้ข้อมูลมาดังนี้

ตารางที่ 19 ค่า Duty cycle จากการหมุนตามเข็มนาฬิกาของมอเตอร์ ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่สนใจ

ความเร็วมอเตอร์ (RPM)	Duty cycle (%)
1800	15.31
2800	24.36
3800	29.93
4800	37.58

ความเร็วมอเตอร์ (RPM)	Duty cycle (%)
5800	45.93
6800	52.20
7800	57.07
8800	65.42
9800	70.30

เมื่อต้องการหาความสัมพันธ์ระหว่าง Duty cycle และ Frequency Output จากการหมุนตามนาฬิกาของมอเตอร์ ณ ช่วงความเร็วมอเตอร์ที่สนใจจะได้กราฟดังนี้



รูปที่ 179 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Duty cycle และ Frequency Output จากการหมุนตามนาฬิกาของมอเตอร์

จากการสรุปผลการทดลองข้อ 11.1 และการสังเกตกราฟจากรูปที่ 179 ทำให้สรุปได้ว่า ความถี่ของแรงดัน Back EMF แปรผันตาม Duty cycle กล่าวคือ ยิ่ง Duty cycle มา ก ความถี่ของแรงดัน Back EMF ก็จะยิ่งมากเช่นกัน

12. อภิรายผล

จากการทดลอง เราได้นำกราฟแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส จาก Brushless DC (BLDC) Motor มาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเร็วเชิงกลของมอเตอร์ โดย BLDC Motor เป็นมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่ใช้แม่เหล็กถาวรใน Rotor และ Stator ที่มีขดลวด ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูง การสึกหรอน้อย และมีการทำงานเงียบกว่าแบบ Brushed Motor โดยการควบคุมต้องอาศัยการจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดในลำดับที่เหมาะสมเพื่อสร้างแรงบิดหมุน Rotor สำหรับ Trapezoidal Back EMF นั้นหมายถึงแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่เกิดใน BLDC Motor มีรูปคลื่นลักษณะสี่เหลี่ยมคงที่ซึ่งสัมพันธ์กับการหมุนของ Rotor และการกระตุนในแต่ละเฟส โดยมี Commutation Logic ทำหน้าที่กำหนดลำดับการจ่ายกระแสผ่านขดลวดเพื่อสร้างแรงบิดหมุน Rotor โดยใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ (หรือวิธี Sensorless) เพื่อตรวจสอบตำแหน่ง Rotor และควบคุมการทำงานได้อย่างถูกต้อง Six-Step Commutation เป็นวิธีการควบคุมพื้นฐานที่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้สองเฟสขณะเดียวกัน อิํกเฟสหนึ่งจะปล่อยว่าง ทำให้เกิดแรงบิดแบบขั้น เหมาะสมสำหรับการควบคุม BLDC Motor แบบ Back EMF ทรง Trapezoidal โดยเมื่อเทียบกับการควบคุมแบบ Field-Oriented Control (FOC) ซึ่งเป็นการควบคุมขั้นสูงที่ใช้การแปลงพิกัด (Clarke และ Park Transform) เพื่อจัดการกระแสใน Rotor Frame ทำให้สามารถควบคุมแรงบิดและความเร็วได้อย่างแม่นยำ เหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการประสิทธิภาพสูง เช่น หุ่นยนต์และยานพาหนะไฟฟ้า โดยใช้ Pulse Width Modulation (PWM) ซึ่งเป็นเทคนิคสำหรับควบคุมแรงดันที่จ่ายให้ขดลวดมอเตอร์โดยการเปลี่ยนอัตราส่วนของการเปิด-ปิดสวิตช์ (Duty Cycle) ทำให้ควบคุมความเร็วและแรงบิดของ BLDC Motor ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้เทคนิคที่ชื่อว่า Space Vector Modulation (SVM) ซึ่งเป็นเทคนิค PWM ขั้นสูงที่ใช้แสดงเวลาเทอร์แรงดันในระบบสามเฟสเพื่อลดการสั่นสะเทือนและเพิ่มประสิทธิภาพ ทำให้มอเตอร์ทำงานได้ราบรื่นและเงียบ เหมาะสมกับการควบคุมแบบ FOC ในขณะที่ Sensorless Control หมายถึงการควบคุมโดยไม่ใช้เซ็นเซอร์สำหรับตรวจสอบตำแหน่ง Rotor เช่น การวิเคราะห์ Back EMF วิธีนี้ลดต้นทุนและเพิ่มความทนทาน แต่ต้องการการคำนวณที่ซับซ้อน

ซึ่งจากการทดลองหากความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเร็วเชิงกลของมอเตอร์ พบว่าความเร็วเชิงกลของมอเตอร์ที่คำนวณได้มีค่า Error เฉลี่ยตั้งแต่ช่วง 1800-9800 อยู่ที่ 65.41 rpm ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากปัญหาด้าน Hardware เช่น การผลิตมอเตอร์ที่ผิดพลาดจากโรงงาน สายจัมเปอร์ที่มีความต้านทาน เป็นต้น

จากการทดลองหากความความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงกลของมอเตอร์และ PWM นั้นพบว่ามีความสัมพันธ์แบบแปรผันตามกัน หมายความว่า ying Duty cycle มีมาก ความเร็วเชิงกลของมอเตอร์จะยิ่งมากเช่นกัน

13. ข้อเสนอแนะ

13.1 เก็บค่าความถี่ ณ ความเร็วเชิงกลของมอเตอร์ที่สนใจให้มากขึ้น

13.2 เก็บค่า Duty cycle ณ ความเร็วเชิงกลของมอเตอร์ที่สนใจให้มากขึ้น

14. เอกสารอ้างอิง

- 14.1 https://www.renesas.com/en/support/engineer-school/brushless-dc-motor-01-overview?srsltid=AfmBOooxiXplmRud_dBW0XZEF3JqBe6zgVrFWwm0_SY18_qSTXLM_Teo
- 14.2 https://www.ti.com/lit/ab/slvaeg3b/slvaeg3b.pdf?ts=1731921289907&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- 14.3 <https://www.digikey.co.th/th/articles/controlling-sensorless-bldc-motors-via-back-emf>
- 14.4 <https://www.pmdcorp.com/resources/type/articles/get/field-oriented-control-foc-a-deep-dive-article>
- 14.5 <https://www.mathworks.com/discovery/bldc-motor-control.html>
- 14.6 <https://bacancysystems.com/blog/trapezoidal-and-sinusoidal-bldc-motors>
- 14.7 <https://www.st.com/en/applications/industrial-motor-control/3-phase-field-oriented-control-foc.html>
- 14.8 https://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_speed_control
- 14.9 <https://islproducts.com/bldc-motor-selection-guide/#:~:text=Brushless%20Motor%20Construction,the%20center%20of%20the%20motor.>
- 14.10 <https://www.diodes.com/assets/Uploads/AN1164-BLDC-Motors.pdf>
- 14.11 <https://www.mathworks.com/discovery/space-vector-modulation.html>
- 14.12 <https://www.ti.com/lit/ta/sszt348/sszt348.pdf?ts=1732629828334>
- 14.13 https://www.rhydolabz.com/documents/26/BLDC_A2212_13T.pdf?srsltid=AfmBOopC9LAYD8RY3iJ7mZZ0sWDvPZVe-fAbVgfOmvtJo5GDc2iystxO
- 14.14 https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/99099-field-oriented-control-foc-of-induction-motor?s_tid=FX_rc1_behav