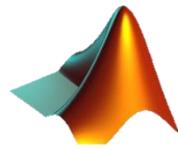


RMXplorer



LAB3 : Brushless DC Motor

สมาชิก

นางสาวกัณฑิลา

บุญศรีวัฒน์

66340500038

วัตถุประสงค์

- สามารถออกแบบและดำเนินการทดลองโดยใช้กระบวนการทางวิทยาศาสตร์ รวมถึงการบันทึก สรุป และอภิปรายผลการทดลองอย่างมีเหตุผลอย่างรับ
- เข้าใจหลักการทำงานของเซ็นเซอร์และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง พร้อมประยุกต์ใช้ความรู้ทางวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์ และสถิติผ่านโปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์ความเม่นยำและเทียบผลการทดลองกับทฤษฎี
- อธิบายการทำงานของเซ็นเซอร์ เช่น การวัดความเร็วของ Brushless DC Motor ด้วย Hall Sensor ตั้งแต่การรับรู้สัญญาณจนถึงการคำนวณ
- กำหนดตัวแปรต้น ตัวแปรตาม ตัวแปรควบคุม พร้อมอธิบายจุดประสงค์ สมมติฐาน และนิยามเชิงปฏิบัติการที่สอดคล้องกับทฤษฎีที่เขียนไว้ได้
- ออกแบบวิธีการทดลอง บันทึก สรุป อภิปรายผล และอธิบายที่มาของผลการทดลอง โดยใช้อุปกรณ์และชุดทดลองที่กำหนด

สมมติฐาน

- การออกแบบและดำเนินการทดลองตามกระบวนการทางวิทยาศาสตร์จะช่วยให้ได้ผลลัพธ์ที่เชื่อถือได้
- การทำงานของเซ็นเซอร์และอุปกรณ์สามารถวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้องหากใช้ความรู้ทางวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์ และโปรแกรม MATLAB อย่างเหมาะสม
- สัญญาณจากเซ็นเซอร์ เช่น Hall Sensor สามารถคำนวณหาปริมาณทางฟิสิกส์ เช่น ความเร็วของ Brushless DC Motor ได้อย่างถูกต้อง
- การกำหนดตัวแปรและสมมติฐานที่สอดคล้องกับทฤษฎี จะช่วยสนับสนุนการทดลองให้ดำเนินไปอย่างสมเหตุสมผล
- วิธีการทดลอง การบันทึก และการวิเคราะห์ผลตามกระบวนการที่ออกแบบไว้อย่างถูกต้อง จะช่วยให้สามารถอธิบายผลลัพธ์ได้ชัดเจน

ขั้นตอนการดำเนินงาน

- กำหนดวัตถุประสงค์และตัวแปรของการทดลอง เพื่อศึกษาหลักการทำงานของมอเตอร์ BLDC วิเคราะห์ พฤติกรรมของการควบคุมในรูปแบบต่าง ๆ และกำหนดตัวแปรที่ศึกษา เพื่อให้สามารถควบคุมพารามิเตอร์ ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องได้อย่างครบถ้วน
- ออกแบบการเก็บข้อมูล กำหนดเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ พร้อมวางแผนการเก็บข้อมูล รวมถึงการออกแบบ ตารางบันทึกผลหรือรูปแบบสำหรับบันทึกค่าให้เหมาะสม
- ดำเนินการทดลอง เริ่มจากการตั้งค่าโปรแกรมและต่อชุดทดลองตามแผนที่ออกแบบไว้ ตั้งค่าเครื่องมือวัด เพื่อให้สามารถอ่านค่าพารามิเตอร์ได้อย่างถูกต้อง จากนั้นเริ่มเขียนคำสั่งควบคุมการทำงานของมอเตอร์
- บันทึกผลการทดลอง เก็บข้อมูลทั้งในรูปแบบภาพและตัวเลข พร้อมบันทึกค่าลงในตารางบันทึกโดยย่อ ครบถ้วน
- สรุปผลการทดลองและจัดระเบียบข้อมูล เพื่อให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถวิเคราะห์ผลได้ง่าย
- อภิปรายผล โดยใช้หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมาอธิบายผลการทดลองที่ได้
- จัดทำรายงาน สรุปและเรียบเรียงผลการทดลอง วิเคราะห์ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น พร้อมเสนอแนะแนวทางแก้ไข สำหรับการทดลองในอนาคต

Brushless DC Motor

1. จุดประสงค์

- 1.1 นักศึกษาสามารถอธิบายหลักการทำงานของ Brushless DC Motor (BLDC) รวมถึงการควบคุมแบบ Sensorless และ Sensor-based Control ได้อย่างชัดเจน
- 1.2 นักศึกษาเข้าใจเทคนิคการควบคุม BLDC Motor ทั้งแบบ Trapezoidal, Sinusoidal และ Field-Oriented Control (FOC) พร้อมเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างวิธีการควบคุม เช่น 6-Step Control, PWM และ SVM
- 1.3 นักศึกษาสามารถวิเคราะห์และอธิบายกราฟสัญญาณของ BLDC Motor ในทั้ง 3 Phase โดยพิจารณา พฤติกรรมจากวิธีการควบคุม พร้อมเชื่อมโยงกับทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
- 1.4 นักศึกษาสามารถตั้งค่า Motor ผ่านโปรแกรม Motor Workbench 6.3.2 รวมถึงการตั้งค่า PWM Frequency, Speed Sensing และใช้งาน Oscilloscope ในการเก็บสัญญาณได้
- 1.5 นักศึกษาสามารถคำนวณความเร็วของ BLDC Motor จาก Feedback ที่ได้จาก Hall Sensor หรือ Back EMF พร้อมเปรียบเทียบ Feedback จากทั้งสองแบบ
- 1.6 นักศึกษาสามารถเปรียบเทียบพุทธิกรรมการควบคุม BLDC Motor แบบ Trapezoidal Control และ PMSM แบบ FOC ได้โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองและแหล่งข้อมูลภายนอก

2. สมมติฐาน

- 2.1 หลักการทำงานและการควบคุมของ BLDC Motor ทั้งแบบ Sensorless และ Sensor-based สามารถอธิบาย ได้อย่างชัดเจนเมื่อเข้าใจเทคนิคและกระบวนการควบคุมแต่ละประเภท
- 2.2 การตั้งค่า PWM Frequency, Speed Sensing และการใช้งาน Oscilloscope อย่างถูกต้อง ช่วยเพิ่มความ แม่นยำในการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลสัญญาณ
- 2.3 การควบคุม BLDC Motor แต่ละแบบ เช่น Trapezoidal, Sinusoidal และ FOC มีผลต่อพุทธิกรรมของกราฟ สัญญาณและประสิทธิภาพของมอเตอร์ ซึ่งสามารถสังเกตและวิเคราะห์ได้
- 2.4 ความเร็วของ BLDC Motor สามารถคำนวณได้อย่างแม่นยำจาก Feedback ที่ได้จาก Back EMF หรือ Hall Sensor โดยใช้อุปกรณ์และการคำนวณที่เหมาะสม
- 2.5 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับทฤษฎีและแหล่งข้อมูลภายนอก เช่น MATLAB สามารถช่วยสนับสนุน ผลลัพธ์และเพิ่มความน่าเชื่อถือของการวิเคราะห์
- 2.6 เทคนิคการควบคุม เช่น SVM และ FOC แสดงความแตกต่างเชิงพุทธิกรรมเมื่อเปรียบเทียบกับ Trapezoidal หรือ 6-Step Control โดยวิเคราะห์ผ่านสัญญาณและทฤษฎีได้อย่างสมบูรณ์

3. นิยามศัพท์เฉพาะ

- 3.1 Brushless DC Motor (BLDC) คือมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่ใช้ Permanent Magnet และอาศัยการควบคุมอิเล็กทรอนิกส์เพื่อสลับกระแสในชุดลวด
- 3.2 Sensorless Control คือการควบคุมมอเตอร์โดยใช้ Feedback จาก Back EMF เพื่อรับตำแหน่งของโรเตอร์ แทนการใช้เซ็นเซอร์ภายนอก
- 3.3 Sensor-based Control คือการควบคุมมอเตอร์โดยใช้เซ็นเซอร์ เช่น Hall Sensor ในการตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์เพื่อเพิ่มความแม่นยำ
- 3.4 Trapezoidal Control คือการควบคุม BLDC Motor ด้วย Back EMF ที่มีรูปคลื่นแบบ Trapezoidal ส่งผลให้เกิดแรงบิดเป็นช่วงๆ
- 3.5 Sinusoidal Control คือการควบคุม BLDC Motor ด้วยกระแสในรูปคลื่นไอน์ เพื่อให้แรงบิดมีความต่อเนื่องและลดการสั่นสะเทือน
- 3.6 Field-Oriented Control (FOC) คือเทคนิคการควบคุมที่อาศัยการจัดการ Vector ของกระแสไฟฟ้าให้ขนานกับสนามแม่เหล็กเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ
- 3.7 6-Step Control คือการควบคุม BLDC Motor โดยการสลับการจ่ายกระแสในแต่ละชุดลวดแบบ Step-by-Step ตามตำแหน่งโรเตอร์
- 3.8 Space Vector Modulation (SVM) คือวิธีการสร้างคลื่น PWM ที่ปรับ Vector ของแรงดันไฟฟ้าในรูปแบบ Space Vector เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ
- 3.9 Pulse Width Modulation (PWM) คือเทคนิคการปรับความกว้างของพลังสัญญาณเพื่อควบคุมแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์
- 3.10 Back EMF คือสัญญาณแรงดันที่เกิดขึ้นในชุดลวดของมอเตอร์เนื่องจากการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ในสนามแม่เหล็ก
- 3.11 Hall Effect Sensor คือเซ็นเซอร์ที่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก เพื่อรับตำแหน่งของโรเตอร์ในมอเตอร์
- 3.12 Electronic Speed Controller (ESC) คือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ควบคุมการหมุนและความเร็วของ BLDC Motor
- 3.13 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่ทำหน้าที่เป็นหน่วยประมวลผลภายใน
- 3.14 Operational Amplifier (Op-Amp) คือ วงจรขยายสัญญาณไฟฟ้าแบบอิเล็กทรอนิกส์ ที่ได้รับการออกแบบให้มีคุณสมบัติขยายสัญญาณอินพุตในอัตราขยายที่สูงมาก (High Gain) ใช้สำหรับงานแปลงสัญญาณต่าง ๆ ภายใต้วงจรอิเล็กทรอนิกส์
- 3.15 Zero Crossing คือจุดที่สัญญาณไฟฟ้าข้ามแกนศูนย์ ใช้ใน Sensorless Control เพื่อรับตำแหน่งของโรเตอร์

- 3.16 Permanent Magnet Synchronous Machine (PMSM) คือมอเตอร์แบบบิจโครนัสที่ใช้แม่เหล็กถาวรเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กในโรเตอร์
- 3.17 Commutation Logic คือ สิ่งที่มาเพื่อตัดสินใจว่าจะสลับกระแสไฟฟ้าไปยังชุดลวดใดในเวลาที่เหมาะสมโดยใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์หรือระบบตรวจสอบจับตำแหน่ง
- 3.18 Oscilloscope คืออุปกรณ์ที่ใช้วัดและแสดงผลสัญญาณไฟฟ้าในรูปแบบกราฟเวลา

4. นิยามเชิงปฏิบัติการ

- 4.1 Brushless DC Motor (BLDC) คือ มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่อาศัยแม่เหล็กถาวรและการควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์เพื่อสลับกระแสในชุดลวด A2212/13T TECHNICAL DATA
- 4.2 Back EMF (Electromotive Force) คือ แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ในสนามแม่เหล็กซึ่งใช้ใน Sensorless Control เพื่อระบุตำแหน่งโรเตอร์
- 4.3 Hall Effect Sensors คือ เซ็นเซอร์ที่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กเพื่อระบุตำแหน่งโรเตอร์ใน Sensor-based Control
- 4.4 Pulse Width Modulation (PWM) คือ เทคนิคการปรับความกว้างของพัลส์สัญญาณเพื่อควบคุมแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์
- 4.5 Field-Oriented Control (FOC) คือ วิธีควบคุมกระแสในรูปแบบเวกเตอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์
- 4.6 6-Step Control คือ การควบคุม BLDC Motor โดยการสลับกระแสในชุดลวดตามตำแหน่งของโรเตอร์
- 4.7 Trapezoidal Back EMF คือ รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าของ Back EMF ที่มีลักษณะสี่เหลี่ยมคงที่

5. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (related literature)

5.1 Brushless DC Motor (BLDC)

มอเตอร์บล็อก (Brushless) เป็นมอเตอร์ที่มีการทำงานของขั้วไฟฟ้าตัวไฟฟ้าจะถูกส่งไปยังชุดลวดที่มอเตอร์โดยตรงโดยจะแบ่งออกเป็น 3 ชุดใหญ่ และแต่ละชุดใหญ่จะมี 2 ชุดย่อยที่สร้างสนามแม่เหล็กทั้ง 2 ขั้ว ทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กตรงกันข้ามแม่เหล็กและเกิดการหมุน โดยการทำงานแบบนี้นั้น ทำให้มอเตอร์บล็อกสนับสนุนไม่เกิดประกายไฟ จากการเสียดสี หรือ ความร้อนสะสม ทำให้อายุการใช้งานที่ยาวนาน รวมถึงความเสี่ยงของการทำงานของมอเตอร์ต่ำ



รูป 1 Brushless DC Motor

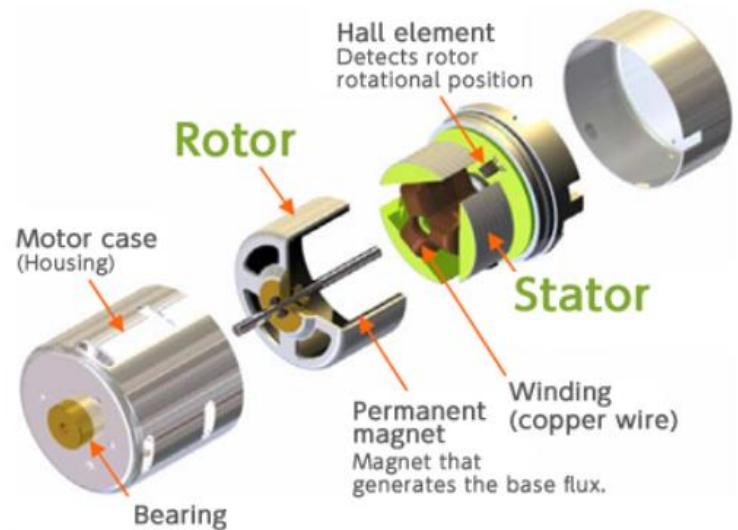
ที่มา : <https://images.app.goo.gl/45bsd8A7HDygaQNm9>

5.1.1 ประเภทของ Brushless DC Motor (BLDC)

สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ Outrunner BLDC Motor และ Inrunner BLDC Motor ซึ่งมีลักษณะและคุณสมบัติที่แตกต่างกันดังนี้

1) Outrunner BLDC Motor (มอเตอร์แบบโรเตอร์อยู่ด้านนอก)

ลักษณะการทำงาน โรเตอร์อยู่ด้านนอกของสเตเตอร์ โดยโรเตอร์มักเป็นระบบอากาศที่บรรจุแม่เหล็กไว้ และหมุนรอบสเตเตอร์ซึ่งอยู่ตรงกลาง ให้แรงบิดสูง เหมาะสำหรับงานที่ต้องการพลังงานสูง เช่น โดรนและยานพาหนะไฟฟ้า มีประสิทธิภาพสูง สามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลได้อย่างมีประสิทธิผล สามารถหมุนด้วยความเร็วต่าแต่ยังคงให้แรงบิดสูง เนื่องจากโรเตอร์ด้านนอกช่วยเพิ่มแรงแขนผลิตและบำรุงรักษาได้ง่าย

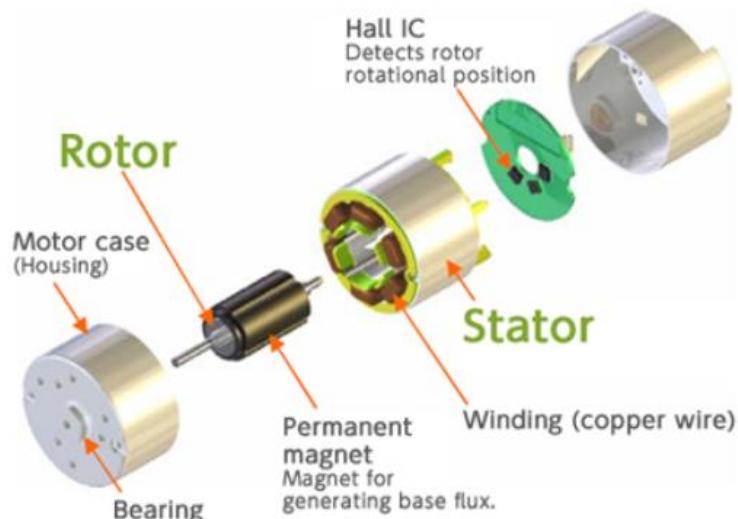


รูป 2 Outrunner BLDC Motor

ที่มา : https://9engineer.com/post_files_editor/image/Article/DRC/Mot/BLDC%2002.PNG

2) Inrunner BLDC Motor (มอเตอร์แบบโรเตอร์อยู่ด้านใน)

ลักษณะการทำงาน: โรเตอร์อยู่ด้านในของสเตเตอร์ โดยโรเตอร์มักเป็นระบบอกโลหะที่บรรจุแม่เหล็กและหมุนอยู่ภายใน เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความเร็วรอบสูง เช่น เครื่องมือแพทย์และเครื่องมือไฟฟ้า มีอัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนักสูง เหมาะสำหรับงานที่ต้องการมอเตอร์น้ำหนักเบา ควบคุมความเร็วและแรงบิดได้อย่างราบรื่นและแม่นยำ ใช้ในงานหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติทำงานเจียบ เหมาะสำหรับอุปกรณ์ที่ต้องการเสียงรบกวนต่ำ



รูป 3 Inrunner BLDC Motor

ที่มา : https://9engineer.com/post_files_editor/image/Article/DRC/Mot/BLDC%2003.PNG

ความแตกต่างหลักระหว่าง Outrunner และ Inrunner BLDC Motors

คุณสมบัติ	Outrunner BLDC Motor	Inrunner BLDC Motor
ตำแหน่งของโรเตอร์	อยู่ด้านนอกของสเตเตอร์	อยู่ด้านในของสเตเตอร์
แรงบิด (Torque)	แรงบิดสูง เหมาะสำหรับงานที่ต้องการแรงมาก	แรงบิดต่ำกว่า เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความเร็วสูง
ความเร็วรอบ (Speed)	ความเร็วต่ำแต่ยังคงแรงบิดสูง	ความเร็วรอบสูง เหมาะสำหรับงานที่ต้องการรอบเร็ว
อัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนัก	ต่ำกว่า Inrunner	สูงกว่า Outrunner
อัตราส่วนแรงบิดต่อน้ำหนัก	สูงกว่า Inrunner	ต่ำกว่า Outrunner
ประสิทธิภาพการทำงาน	สูง แปลงพลังงานได้ดี	สูงขึ้น แต่ต่ำเรื่องการควบคุมที่แม่นยำ
การควบคุมความเร็วและแรงบิด	น้อยกว่า Inrunner	ควบคุมได้ราบรื่นและแม่นยำ
การใช้งานที่เหมาะสม	โดรน, ยานพาหนะไฟฟ้า, งานที่ต้องการแรงบิดสูง	เครื่องมือแพทย์, เครื่องมือไฟฟ้า, งานที่ต้องการน้ำหนักเบา
เสียงขณะทำงาน	อาจมีเสียงมากกว่า	ทำงานเงียบ
การผลิตและบำรุงรักษา	ง่ายกว่า	ซับซ้อนกว่าเล็กน้อย

ที่มา : <https://www.mirrorreview.com/bldc-motor/>

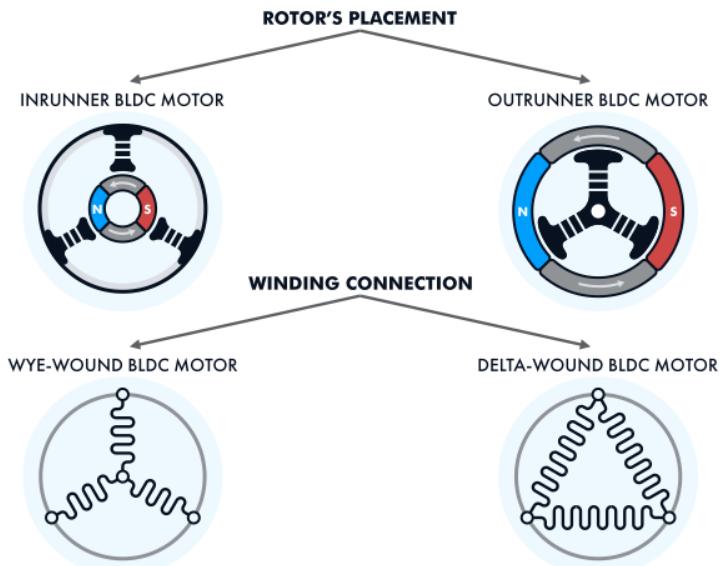


รูป 4 Brushless DC Motor

ที่มา : <https://images.app.goo.gl/45bsd8A7HDygaQNm9>

BLDC MOTOR CLASSIFICATION

WWW.INTEGRASOUI



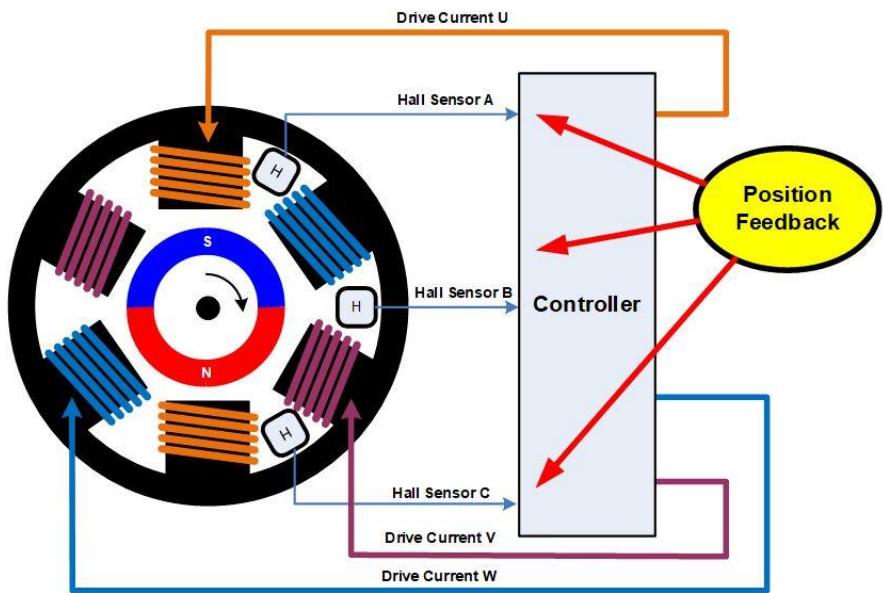
รูป 5 types of winding connections

ที่มา : <https://www.integrasources.com/blog/bldc-motor-controller-design-principles/>

5.1.2 Rotor position sensing

1) Sensor based Control - Hall Sensors Wiring

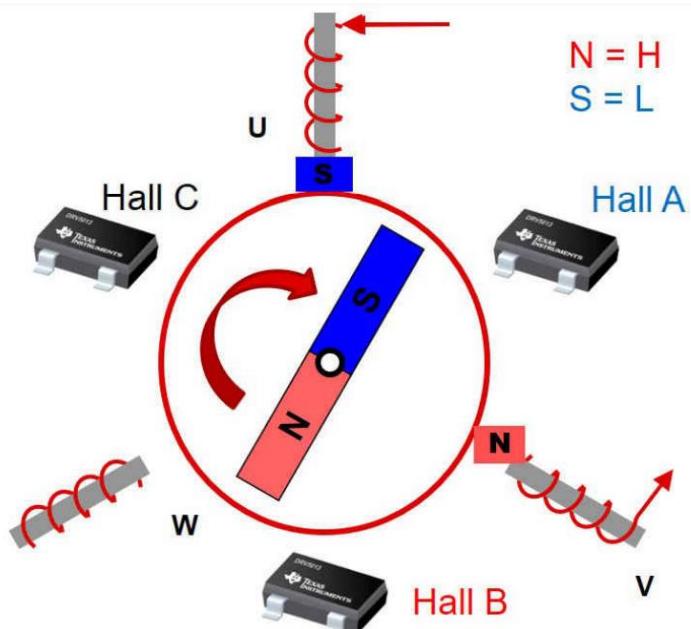
หลักการทำงานของ Hall Sensors ใน BLDC Motor Hall Effect Sensors ใช้สำหรับตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ใน BLDC Motor โดยอิงกับสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นโดยแม่เหล็กการวนในโรเตอร์ ซึ่งทำให้สามารถควบคุมการสลับเฟสของกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดของสเตเตอร์ได้อย่างแม่นยำ Hall Sensors Hall Sensors แต่ละตัวจะถูกติดตั้งภายใต้มอเตอร์ และสายไฟที่อุกมาจะเชื่อมต่อกับคอนโทรลเลอร์ของมอเตอร์ผ่านขั้วต่อพิเศษ



รูป 6 Sensor based Control - Hall Sensors Wiring
ที่มา : <https://images.app.goo.gl/45bsd8A7HDygaQNm9>

การสับเปลี่ยนกระแสในมอเตอร์ BLDC

รูปที่ 1 แสดงรูปแบบอย่างง่ายของมอเตอร์ BLDC ที่ใช้แม่เหล็กสองขั้ว (ขั้วนีโอและขั้วไถ) และชุดลวดสามชุด ในระบบบันได เดตเตอร์ (ส่วนหมุนของมอเตอร์) จะถูกกล้อมรอบด้วยชุดลวดบนสเตเตอร์ (ส่วนที่อยู่กับที่ของมอเตอร์) การเคลื่อนที่ของแม่เหล็กจะทำให้สเตเตอร์หมุน ขั้วแม่เหล็กของชุดลวดสามารถเปลี่ยนแปลงได้ (เป็นขั้วนีโอหรือไถ) ขึ้นอยู่กับทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่ฉีดเข้าไป



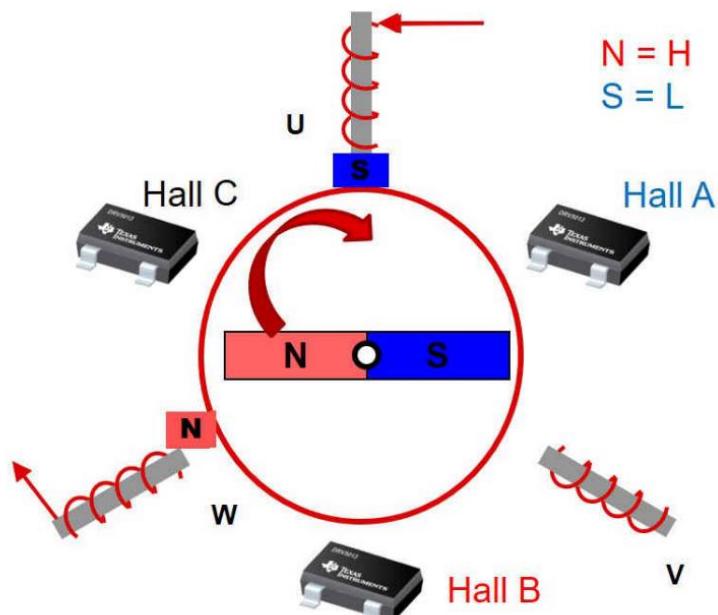
รูป 7 BLDC Motor Model, Commutation Step 1

ที่มา :

https://www.ti.com/lit/ab/slvaeg3b/slvaeg3b.pdf?ts=1734781426676&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F

แรงดึงดูดระหว่างแม่เหล็กไฟฟ้ากับขั้วตรงข้ามของแม่เหล็กถาวร และแรงผลักจากขั้วเดียวกัน จะทำให้แม่เหล็กถาวรและโรเตอร์เคลื่อนที่ ส่งผลให้เกิดแรงบิด

ตัวอย่างเช่น ถ้าตำแหน่งของแม่เหล็กอยู่ในตำแหน่งที่แสดงในรูปที่ 1 และต้องการให้แม่เหล็กเคลื่อนที่ในทิศตามเข็มนาฬิกา ให้ฉีดกระแสเข้าไปในชด漉ด U เพื่อทำให้มันกลับเป็นขั้วใต้ และฉีดกระแสเข้าไปในชด漉ด V เพื่อทำให้มันกลับเป็นขั้วเหนือ ขั้วใต้ที่เกิดจากชด漉ด U จะผลักข้ามได้ของแม่เหล็กถาวร และขั้วเหนือที่เกิดจากชด漉ด V จะดึงขึ้นต่อของแม่เหล็กถาวร ส่งผลให้แม่เหล็กถาวรและโรเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกาจนถึงตำแหน่งที่แสดงในรูปที่ 2



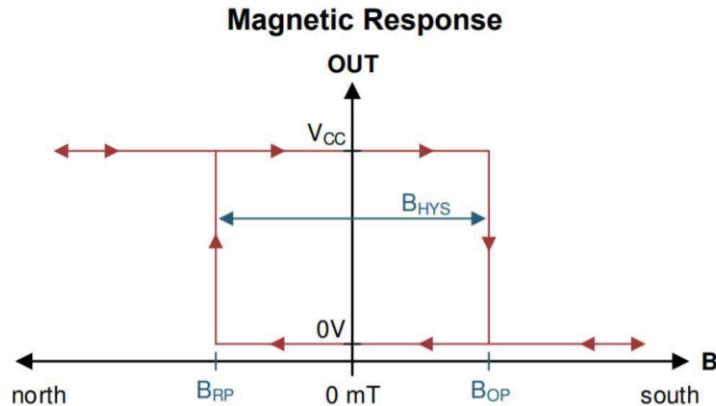
รูป 8 BLDC Motor Model, Commutation Step 2

ที่มา :

https://www.ti.com/lit/ab/slvaeg3b/slvaeg3b.pdf?ts=1734781426676&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F

จากตำแหน่งแม่เหล็กในรูปที่ 2 การฉีดกระแสเข้าไปในชด漉ด W เพื่อทำให้เป็นขั้วเหนือ และในชด漉ด U เพื่อให้ยังคงเป็นขั้วใต้ จะทำให้โรเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกาอีกรอบ เพื่อให้แม่เหล็กและโรเตอร์เคลื่อนที่ต่อเนื่องไปรอบวงกลม ต้องฉีดกระแสเข้าไปในชด漉ดต่าง ๆ ตามลำดับที่

เฉพาะเจาะจง กระบวนการเปลี่ยนชุดลวดที่ได้รับกระแสเพื่อทำให้โรเตอร์เคลื่อนที่นี้เรียกว่า การสับเปลี่ยนกระแส (Commutation)

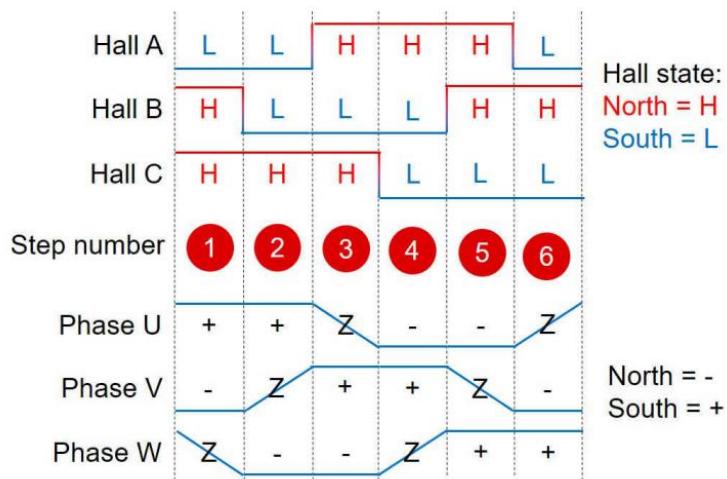


รูป 9 Output of a Hall Latch

ที่มา :

https://www.ti.com/lit/ab/slvaeg3b/slvaeg3b.pdf?ts=1734781426676&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F

Hall Latch ที่แสดงในรูปนี้ สัญญาณส่งออกจะอยู่ในสถานะต่ำเมื่อเซ็นเซอร์ตรวจพบข้าวตีของแม่เหล็กและความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กมีค่านากกว่าค่าจุดการทำงาน (BOP) สัญญาณจะคงอยู่ในสถานะต่ำจนกว่าเซ็นเซอร์จะตรวจพบข้าวเหนือและความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กมีค่านากกว่าค่าการปล่อย (BRP) หากไม่มีสัญญาณแม่เหล็ก สถานะสุดท้ายจะยังคงไม่เปลี่ยนแปลง



รูป 10 Six-Step Motor Commutation Control Scheme

ที่มา :

https://www.ti.com/lit/ab/slvaeg3b/slvaeg3b.pdf?ts=1734781426676&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F

รูปที่ 4 แสดงคลื่นสัญญาณจากเซนเซอร์ Hall ลอจิกสามตัว ในแต่ละขั้นตอน จะมีเพียงสองเฟสที่ถูกขับเคลื่อนในเวลาเดียวกัน ในขณะที่เฟสที่สามจะอยู่ในสถานะ High-Z (ไม่ได้ใช้งาน)

เครื่องหมาย "+" หมายถึงการฉีดกระแสเพื่อสร้างขั้วใต้ให้กับเฟส

เครื่องหมาย "-" หมายถึงการฉีดกระแสในทิศทางตรงข้ามเพื่อสร้างขั้วเหนือให้กับเฟส

เครื่องหมาย "Z" หมายถึงเฟสที่ไม่ได้ใช้งาน

ในรูปที่ 4 สถานะของเซนเซอร์ Hall สามารถถูกใช้เป็นดัชนีในการควบคุมขาในซอฟต์แวร์ เพื่อกำหนดริชีขับเคลื่อนเฟสที่แตกต่างกันตามตำแหน่งปัจจุบันของโรเตอร์

การออกแบบเซนเซอร์ Hall ในมอเตอร์ BLDC

โดยปกติ มอเตอร์ BLDC จะมีขั้วแม่เหล็กและชุดลวดมากกว่าที่แสดงในรูปที่ 1 และ 2 การเพิ่มจำนวนชุดลวดและขั้วแม่เหล็กช่วยให้สามารถควบคุมตำแหน่งแม่เหล็กได้ลະเอียดขึ้น

เซนเซอร์ Hall ตำแหน่งสามตัว ควรถูกวางให้มีมุ่งทางไฟฟ้าแตกต่างกัน 120° ซึ่งอาจแตกต่างจากมุ่งทางกลไก ขึ้นอยู่กับจำนวนขั้วแม่เหล็ก

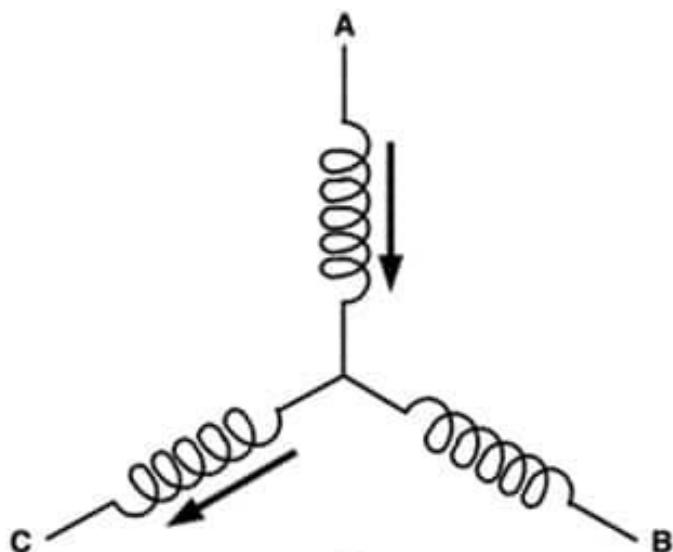
2) Sensorless Control - Back EMF sensing

ชุดลวดของมอเตอร์ไฟฟ้าทำงานที่เมื่อขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อเคลื่อนที่ผ่านเส้นสนามแม่เหล็ก จะเกิดแรงดันไฟฟ้าในชุดลวด ซึ่งวัดค่าเป็นโวลต์ เรียกว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive Force หรือ EMF) ตามกฎของเลนซ์ (Lenz's Law) EMF นี้ จะสร้างสนามแม่เหล็กที่สองขึ้นมาเพื่อต่อต้านการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กที่เป็นต้นเหตุของการหมุนของมอเตอร์ ในภาษาที่ง่ายขึ้น EMF จะต้านทานการเคลื่อนไหวตามธรรมชาติของมอเตอร์ และถูกเรียกว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (Back EMF) สำหรับมอเตอร์ที่มีฟลักซ์แม่เหล็กและจำนวนรอบชุดลวดคงที่ ค่า EMF จะมีขนาดแปรผันตรงกับความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์

พารามิเตอร์แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ ค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (Back EMF Constant) ซึ่งสามารถใช้ในการคำนวณแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่เกิดขึ้นที่ความเร็วเฉพาะ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในชุดลวดสามารถคำนวณได้โดยการลบค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับออกจากแรงดันไฟฟ้าจ่าย

มอเตอร์ถูกออกแบบมาให้ทำงานที่ความเร็วที่กำหนด โดยความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับและแรงดันจ่าย จะทำให้มอเตอร์ดึงกระแสที่กำหนดและส่งแรงบิดที่กำหนด หากมอเตอร์ทำงานที่ความเร็วเกินค่าที่กำหนด แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก ลดความต่างศักย์ไฟฟ้านิดลวลด ทำให้กระแสและแรงบิดลดลง

หากเพิ่มความเร็วต่อไป แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (รวมกับความสูญเสียของมอเตอร์) จะเท่ากับแรงดันไฟฟ้าจ่าย ทำให้กระแสและแรงบิดลดลงเป็นศูนย์

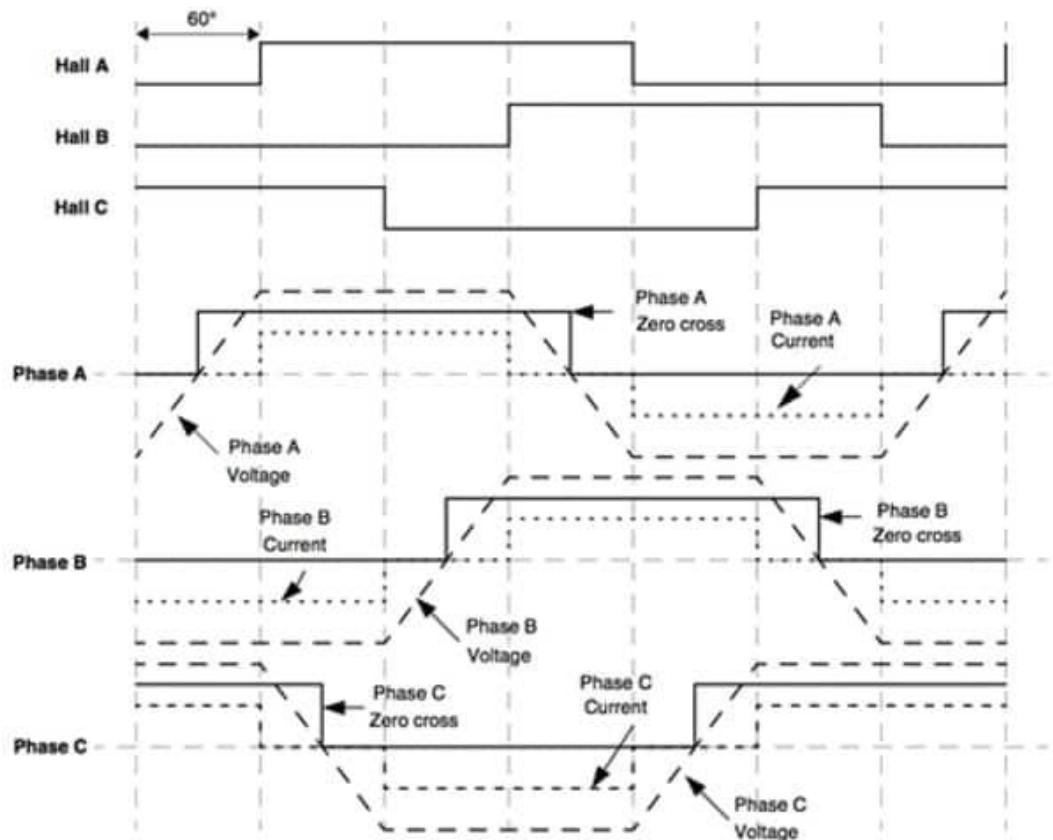


รูป 11 First of a six-stage electrical cycle for a BLDC motor

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

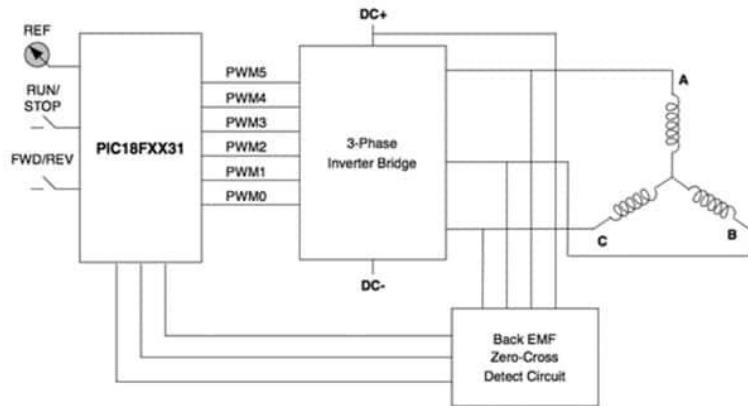
ขั้นตอนต่างๆ ของลำดับการสับเปลี่ยนสำหรับมอเตอร์ BLDC สามเฟสทำได้โดยจ่ายพลังงานให้กับชุดลวดหนึ่งเป็นบวก ชุดลวดที่สองเป็นลบ และปล่อยให้ชุดลวดที่สามเปิดอยู่ รูปที่ 1 แสดงแผนผังแบบง่ายของขั้นตอนแรกจากลำดับการสับเปลี่ยนหากขั้นตอนสำหรับมอเตอร์ดังกล่าว

ในมอเตอร์ BLDC แบบไม่มีเซ็นเซอร์ ไม่มีเซ็นเซอร์ชอลล์ ในขณะที่มอเตอร์หมุน EMF ย้อนกลับในชุดลวดทั้งสามจะเปลี่ยนแปลงไปในรูปคลื่นสี่เหลี่ยมคงที่ (สี่เหลี่ยมจัตุรัส) ตามที่แสดงในรูปเพื่อการเปรียบเทียบ รูปเดียวกันนี้ยังแสดงเอาต์พุตจากเซ็นเซอร์ชอลล์ของมอเตอร์ที่มีการกำหนดค่าคล้ายกัน



รูป 12 เอ้าต์พุตเซ็นเซอร์ซอลล์ของ Microchip เปรียบเทียบกับ EMF ย้อนกลับ
ที่มา : <https://www.digikey.co.th/th/articles/controlling-sensorless-bldc-motors-via-back-emf>

เอ้าต์พุตเซ็นเซอร์ซอลล์เปรียบเทียบกับ EMF ย้อนกลับสำหรับมอเตอร์ BLDC สามเฟส โปรดทราบว่าการสลับเอ้าต์พุตเซ็นเซอร์ซอลล์สอดคล้องกับ EMF ย้อนกลับของชด漉วดที่เกี่ยวข้องที่ขามจุดศูนย์ในมอเตอร์ที่ไม่มีเซ็นเซอร์การรวมกันของจุดข้ามศูนย์ทั้งสามจุดสำหรับชด漉วดจะใช้เพื่อกำหนดลำดับการให้พลังงานของชด漉วด โปรดทราบว่ามีความต่างของเฟสระหว่างเอ้าต์พุตที่เปลี่ยนเซ็นเซอร์ซอลล์แต่ละตัวในมอเตอร์ BLDC ทั่วไป และจุดข้ามศูนย์ของ EMF ย้อนกลับสำหรับชด漉วดแต่ละตัวในหน่วยที่ไม่มีเซ็นเซอร์ที่มีมุ่ม 30 องศา ดังนั้น ในวงจรควบคุมมอเตอร์แบบไม่มีเซ็นเซอร์ หลังจากตรวจพบจุดตัดศูนย์แล้ว ความล่าช้าของเฟส 30 องศาจะถูกสร้างขึ้นในเฟิร์มแวร์ก่อนที่จะมีการเปิดใช้งานการดำเนินการถัดไปในลำดับการให้พลังงาน ในรูปเส้นประสันแสดงกราฟฟ้าในชด漉วด



รูป 13 แสดงวงจรควบคุมสำหรับมอเตอร์ BLDC สามเฟสแบบไม่มีเซ็นเซอร์

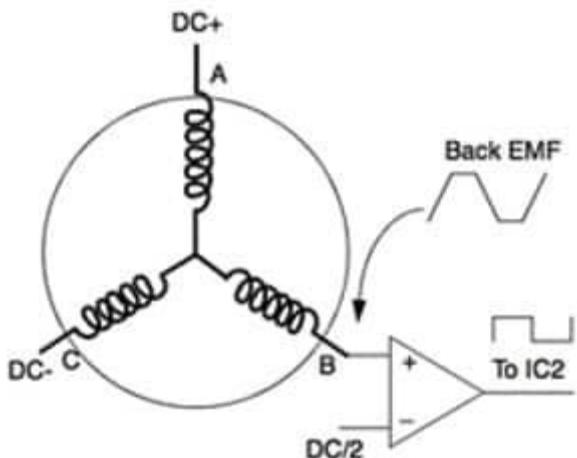
ที่มา : <https://www.digikey.co.th/th/articles/controlling-sensorless-bldc-motors-via-back-emf>

จะใช้ MCU 8 บิต Microchip PIC18FXX31 เพื่อสร้างเอาต์พุตที่ปรับความกว้างพัลส์ (PWM) เพื่อทริกเกอร์ IGBT หรือ MOSFET ในบริจจ์อินเวอร์เตอร์สามเฟส MCU จะตอบสนองต่อ อินพุตจากการตรวจสอบจุดตัดศูนย์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ

วิธีการตรวจจับ Back EMF

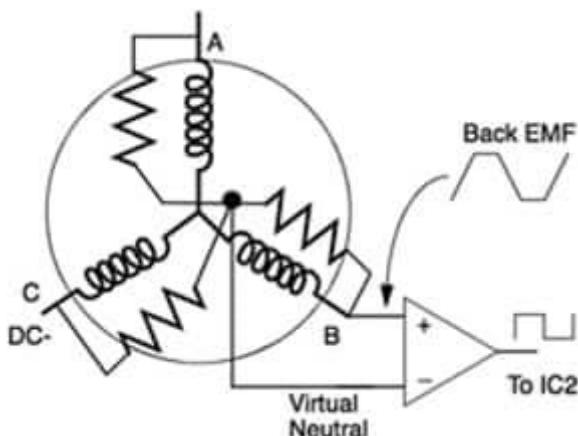
มีเทคนิคหลายวิธีสำหรับการวัด Back EMF โดยวิธีที่ง่ายที่สุดคือการเปรียบเทียบ Back EMF กับครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าของ DC Bus โดยใช้ตัวเปรียบเทียบ (Comparator) ดังแสดงในรูปที่ 4a ในกรณีนี้ ตัวเปรียบเทียบจะเชื่อมต่อกับชุดลวด B ซึ่งระบบที่สมบูรณ์จะต้องมีตัวเปรียบเทียบ เชื่อมต่อกับทุกชุดลวด ในรูป ชุดลวด A ได้รับพลังงานในทิศทางบวก ชุดลวด C ได้รับพลังงานใน ทิศทางลบ และชุดลวด B ถูกปล่อยว่า Back EMF จะเพิ่มขึ้นและลดลงตามลำดับการจ่ายพลังงาน ในเฟสนี้

ข้อเสียหลักของวิธีการใช้ตัวเปรียบเทียบที่เรียบง่ายนี้คือ ชุดลวดทั้งสามอาจมีคุณสมบัติที่ไม่ เหมือนกัน ส่งผลให้เกิดการเลื่อนเฟสทางบวกหรือทางลบจากจุดตัดศูนย์ที่แท้จริง มอเตอร์อาจ ยังคงทำงานได้ แต่มีโอกาสที่จะดึงกระแสไฟเกินพิกัด



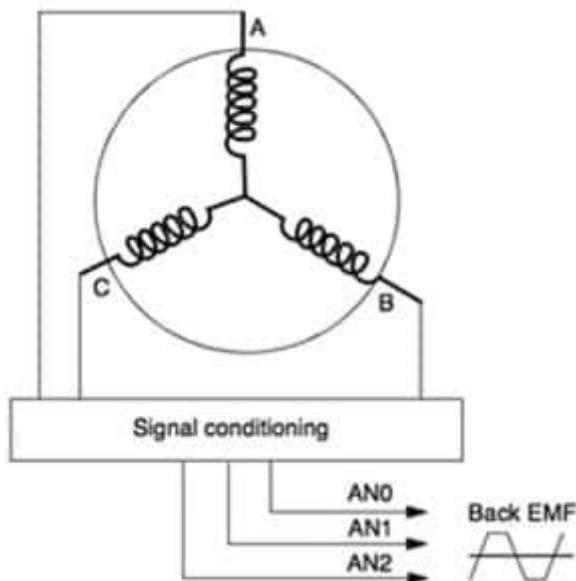
รูป 14 Simple comparator circuit for measuring back EMF

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



รูป 15 The simple comparator circuit can be improved by implementing a virtual neutral point

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



รูป 16 The signal is sampled by an ADC and then compared with a digital value corresponding to the zero point

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

วิธีแก้ไขคือการสร้างจุดศูนย์จำลอง
ดังแสดงในรูปที่ 4b โดยใช้เครื่อข่ายตัวต้านทานสามชุดที่เชื่อมต่อขานกับขาดลวดของ
มอเตอร์ จากนั้นเปรียบเทียบ Back EMF กับจุดศูนย์จำลอง

วิธีที่สามคือการใช้ตัวแปลงอนาล็อกเป็นดิจิทัล (ADC)
ดังแสดงในรูปที่ 4c MCU หลายรุ่นที่ออกแบบมาสำหรับการควบคุมมอเตอร์ BLDC มี ADC
ความเร็วสูงที่เหมาะสมสำหรับวัตถุประสงค์นี้ ในวิธินี้ Back EMF จะถูกลดลงเพื่อให้สามารถ
ป้อนเข้าตรงไปยัง MCU สัญญาณนี้จะถูกสุ่มตัวอย่างโดย ADC และเปรียบเทียบกับค่าดิจิทัลที่
สอดคล้องกับจุดศูนย์ เมื่อค่าทั้งสองตรงกัน ลำดับการจ่ายพลังงานของขาดลวดจะเลื่อนไปยัง
ขั้นตอนถัดไป วิธินี้มีข้อดีบางประการ เช่น การใช้ฟิลเตอร์ดิจิทัลเพื่อลบองค์ประกอบการสวิตซ์
ความถี่สูงออกจากสัญญาณ Back EMF

ข้อเสียที่สำคัญของการควบคุมมอเตอร์ BLDC แบบไร้เซนเซอร์
เมื่อมอเตอร์อยู่กับที่ จะไม่มี Back EMF ถูกสร้างขึ้น ทำให้ MCU ขาดข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่ง
ของสเตเตอเรลและโรเตอร์

วิธีแก้ไขคือการเริ่มต้นมอเตอร์ในโหมดเปิดวงจร (Open Loop) โดยการจ่ายพลังงานให้กับ
ขาดลวดตามลำดับที่กำหนดไว้ล่วงหน้า แม้ว่ามอเตอร์อาจทำงานได้อย่างไม่มีประสิทธิภาพ แต่เมื่อ

จะเริ่มหมุน เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นจนมากพอที่จะสร้าง Back EMF ได้ ระบบควบคุมจะลับไปยังโหมดปิดวงจร (Closed Loop) ที่มีประสิทธิภาพ

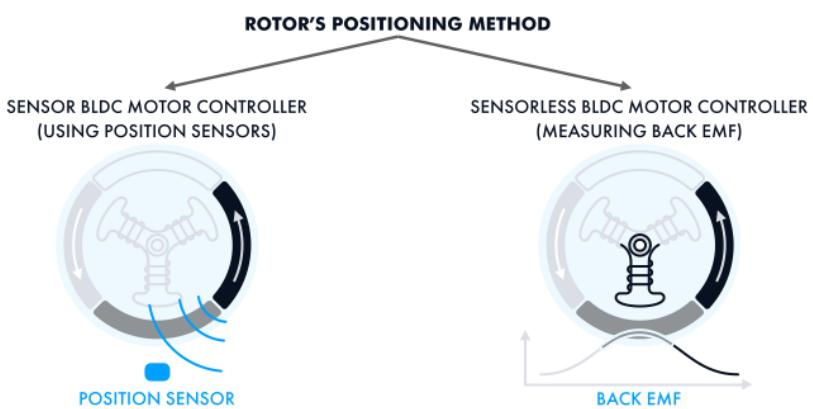
เนื่องจาก Back EMF มีความสัมพันธ์กับความเร็วของมอเตอร์ โมเตอร์ BLDC แบบไร้เซ็นเซอร์อาจไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ต้องการความเร็วต่ำมาก ในกรณีนี้ การใช้มอเตอร์ BLDC ที่มีเซ็นเซอร์ Hall-Effect อาจเป็นตัวเลือกที่ดีกว่า

- 3) เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียระหว่าง Sensor-Based Control (Hall Sensors Wiring) และ Sensorless Control (Back EMF Sensing)

หัวข้อเปรียบเทียบ	Sensor-Based Control (Hall Sensors Wiring)	Sensorless Control (Back EMF Sensing)
ความแม่นยำในการตรวจจับตำแหน่ง	- ตรวจสอบตำแหน่งโดยอัตโนมัติอย่างแม่นยำ	- ความแม่นยำลดลงที่ความเร็วต่ำเนื่องจากสัญญาณ Back EMF อ่อน
การเริ่มต้นการหมุน	- เริ่มต้นการหมุนได้ง่ายและมีเสียงรบกวน	- มีปัญหาในการเริ่มต้น เพราะไม่มี Back EMF ที่แรงดันต่ำ
ค่าใช้จ่าย	- มีค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมสำหรับเซ็นเซอร์และการเดินสาย	- ค่าใช้จ่ายต่ำกว่าเนื่องจากไม่ต้องใช้เซ็นเซอร์เพิ่มเติม
ความซับซ้อนของการออกแบบ	- การออกแบบอาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ง่ายกว่าด้วยการใช้เซ็นเซอร์	- ต้องพัฒนาลักษณะสำหรับการตรวจจับ Back EMF ซึ่งซับซ้อนกว่า
การบำรุงรักษา	- อาจมีความเสี่ยงที่เซ็นเซอร์หรือสายจะเสียหาย	- ไม่ต้องบำรุงรักษาเซ็นเซอร์ เนื่องจากไม่มีการใช้เซ็นเซอร์
ความสามารถในความเร็วต่ำ	- ทำงานได้ดีที่ความเร็วต่ำ	- ประสิทธิภาพลดลงที่ความเร็วต่ำเนื่องจาก Back EMF อ่อน
ความทนทาน	- อาจมีจุดอ่อนที่สายไฟและเซ็นเซอร์	- ไม่มีส่วนประกอบเซ็นเซอร์ที่เสี่ยงต่อการเสียหาย
การใช้งานทั่วไป	- เหมาะสมสำหรับระบบที่ต้องการการควบคุมที่แม่นยำสูง เช่น หุ่นยนต์หรือยานพาหนะ	- ใช้ในแอปพลิเคชันต้นทุนต่ำหรือที่ต้องการลดส่วนประกอบชาร์ดแวร์
การออกแบบระบบไฟฟ้า	- ต้องใช้สายไฟเพิ่มสำหรับเซ็นเซอร์	- ใช้สายไฟน้อยกว่า เนื่องจากไม่มี

BLDC MOTOR CONTROLLER TYPES

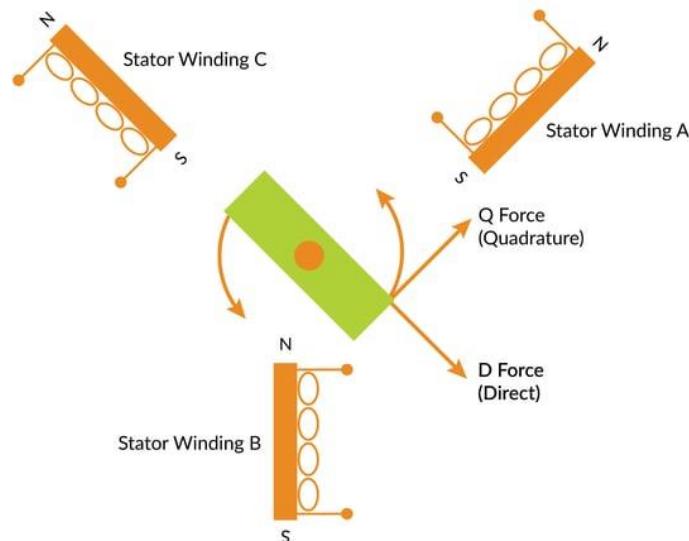
WWW.INTEGRASOURCES.COM



รูป 17 two different types of winding connections
 ที่มา : <https://www.integrasources.com/blog/bldc-motor-controller-design-principles/>

5.1.3 Field-Oriented Control (FOC)

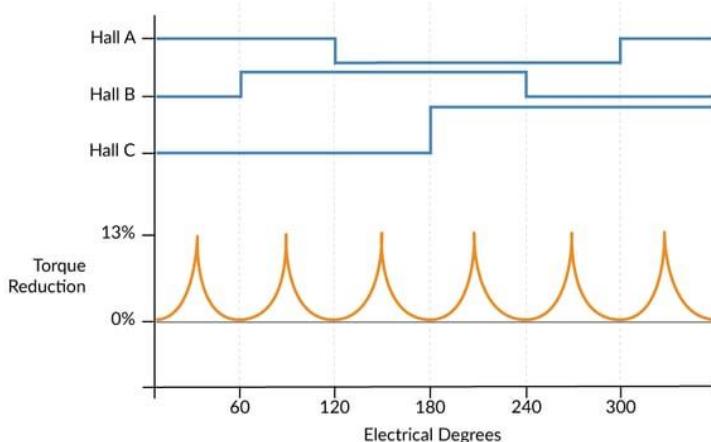
สำหรับมอเตอร์ Brushless DC สามารถแม่เหล็กถูกสร้างขึ้นโดยแม่เหล็กที่ติดตั้งอยู่บนโรเตอร์ โดยตรงและขาด漉ดในสเตเตอเรอร์ ขาด漉ดในสเตเตอเรอร์มักจะมาในรูปแบบสามเฟสและถูกจัดเรียงให้มีมุ่มไฟฟ้าห่างกัน 120 องศา และรวมที่เกิดจากสามเฟสนี้จะเป็นตัวสร้างการหมุนที่ใช้งานได้ของมอเตอร์ การขับขาด漉ดแม่เหล็กแต่ละตัวสามารถสร้างแรงที่ไม่ก่อให้เกิดแรงบิดแบบหมุน หรือสร้างแรงที่ก่อให้เกิดการหมุนได้ แรงสองประเภทนี้เรียกว่า Quadrature (Q) และ Direct (D) โดยแรง Quadrature ที่เป็นประโยชน์ (ไม่ควรสับสนกับระบบการเข้ารหัสแบบ Quadrature สำหรับอุปกรณ์ป้อนกลับตำแหน่ง) จะวิ่งตั้งฉากกับแกนขวางแม่เหล็กของโรเตอร์ ในขณะที่แรง Direct ที่ไม่ก่อให้เกิดแรงบิดจะวิงชicinaไปกับแกนขวางแม่เหล็กของโรเตอร์



รูป 18 Quadrature และ Direct
 ที่มา : <https://www.pmdcorp.com/resources/type/articles/get/field-oriented-control-foc-a-deep-dive-article>

เคล็ดลับในการสร้างการหมุนคือการเพิ่มแรงบิดแบบ Q (Quadrature) ให้มากที่สุดในขณะที่ลดแรงบิดแบบ D (Direct) ให้เหลือน้อยที่สุด หากมุมของโรเตอร์ถูกวัดด้วยเซนเซอร์ Hall หรือ Encoder ตำแหน่ง ทิศทางของสนามแม่เหล็กจากโรเตอร์จะเป็นที่ทราบได้

การคอมมิวเตชันแบบหกขั้นตอน (Six-step Commutation) เป็นเทคนิคง่ายๆ ที่อ่านค่าจากเซนเซอร์ Hall และกระตุนขนาดตามลำดับเฉพาะ ข้อเสียของเทคนิคนี้คือ สำหรับมอเตอร์หลายตัว มันทำให้เกิดการลดประสิทธิภาพและความราบรื่นของการเคลื่อนที่ เมื่อเทียบกับเทคนิคขั้นสูงกว่า เพราะสัญญาณควบคุมอาจต้องผ่านหลายชั้น แต่สำหรับมอเตอร์ที่มีความเร็วต่ำ เช่นมอเตอร์ DC หรือมอเตอร์步进 ไม่ใช่เรื่องใหญ่ อย่างไรก็ตาม สำหรับมอเตอร์ที่ต้องการความเร็วสูง เช่น มอเตอร์交流 หรือมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ อาจต้องใช้เวลาและพลังงานเพิ่มขึ้น



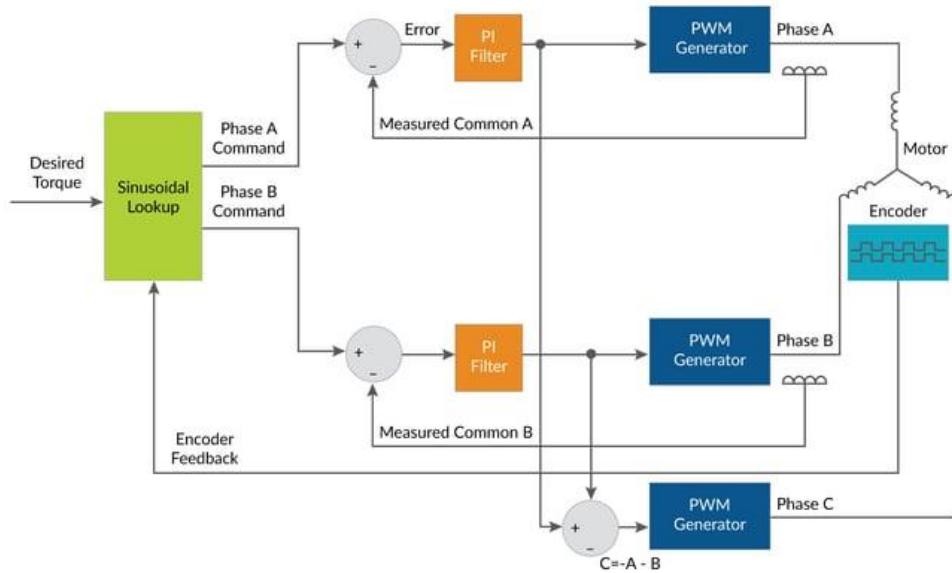
รูป 19 การลดแรงบิดเทียบกับการตรวจจับด้วย Hall

ที่มา : <https://www.pmdcorp.com/resources/type/articles/get/field-oriented-control-foc-a-deep-dive-article>

ประสิทธิภาพแบบนี้หมายความว่าสำหรับการหมุนธรรมดายังไงก็มอเตอร์ถูกลดเกียร์ลง แต่สำหรับระบบที่ต้องการการเคลื่อนไหวที่ราบรื่นและประสิทธิภาพที่สูงขึ้น เทคนิคขั้นสูงสองแบบ ได้แก่ การควบคุมแบบซายน์ (Sinusoidal Control) และการควบคุมแบบ Field-Oriented Control (FOC) ให้การยกระดับประสิทธิภาพ

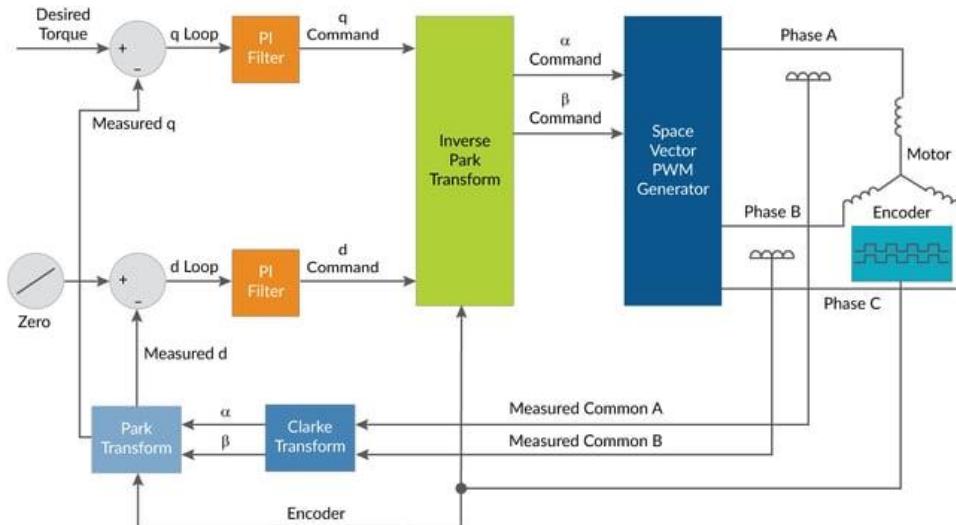
การควบคุมแบบ Field-Oriented Control (FOC)

เป็นวิธีการควบคุมที่สำคัญสำหรับมอเตอร์ Brushless DC มันคล้ายกับการคอมมิวเตชันแบบซายน์ แต่เพิ่มมิติทางคณิตศาสตร์ที่สำคัญเข้าไป



รูป 20 การคอมมิวเตชันแบบชาيان์

ที่มา : <https://www.pmdcorp.com/resources/type/articles/get/field-oriented-control-foc-a-deep-dive-article>



รูป 21 การควบคุมแบบ FOC

ที่มา : <https://www.pmdcorp.com/resources/type/articles/get/field-oriented-control-foc-a-deep-dive-article>

รูป แสดงโครงสร้างการควบคุมสำหรับการคอมมิวเตชันแบบชาيان์และการควบคุมแบบ Field-Oriented Control ในวิธีการควบคุมแบบชาيان์ คำสั่งแรงบิดถูกแปลงเป็นเวกเตอร์ผ่านตารางลุคอัพแบบชาيان์ ทำให้ได้คำสั่งแยกสำหรับคลัวดแต่ละสีในมอเตอร์ เมื่อโกรเตอร์เคลื่อนที่ไปข้างหน้า มุมใน

ตารางลูกอัพก็จะเคลื่อนที่ไปตามกัน เมื่อคำสั่งเฟสแบบเวกเตอร์ถูกสร้างขึ้น มันจะถูกส่งต่อไปยังลูปกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีหนึ่งลูปสำหรับแต่ละขดลวด ลูปนี้พยายามรักษาค่ากระแสไฟฟ้าจริงให้ตรงกับค่าที่ต้องการ

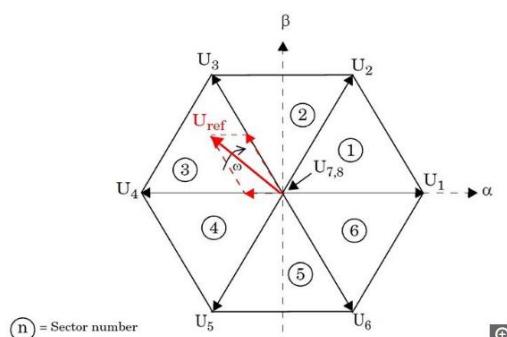
ลักษณะสำคัญของวิธีการนี้คือ เมื่อความถี่การหมุนของมอเตอร์เพิ่มขึ้น ความท้าทายในการรักษาค่ากระแสที่ต้องการก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน เพราะลูปกระแสไฟฟ้าถูกกระทบจากความถี่การหมุน ล่าช้าในลูปกระแสไฟฟ้าที่ไม่สำคัญในความเร็วต่ำ จะสร้างแรงบิด D (ที่ไม่ต้องการ) มากขึ้นในความเร็วสูง ส่งผลให้แรงบิดที่ใช้เดัดลง

วิธีการควบคุม FOC ในรูปแบบต่างๆ ก็จะมีจุดเด่นที่ต้องการให้มอเตอร์ทำงานโดยอิสระจากการหมุนของมอเตอร์ ไม่ว่าค่า m ทำงานโดยอิสระจากการหมุนของมอเตอร์ ในวิธีการ FOC จะมีลูปกระแสไฟฟ้าสองลูป หนึ่งสำหรับแรงบิด Q และอีกลูปสำหรับแรงบิด D ลูปแรงบิด Q ถูกขับด้วยคำสั่งแรงบิดที่ผู้ใช้งานต้องการจากคอนโทรลเลอร์เซอร์โว ลูป D ถูกขับด้วยคำสั่งอินพุตเป็นศูนย์ เพื่อให้ลดแรงบิด D ที่ไม่ต้องการให้เหลือน้อยที่สุด

เคล็ดลับที่ทำให้หงุดหงิดนี้ใช้งานได้คือการดำเนินการแปลงทางคณิตศาสตร์ที่เข้มข้น ซึ่งแปลงมุมเฟสแบบเวกเตอร์ไปยังกรอบอ้างอิง D และ Q และแปลงกลับมา รู้จักกันในชื่อการแปลง Park และ Clarke การนำไปใช้งานในมอเตอร์ Brushless DC ในทางปฏิบัติกลายเป็นเรื่องปกติ เนื่องจากการมี DSPs และไมโครโปรเซสเซอร์ที่มีราคาถูกและมีประสิทธิภาพสูง

5.1.4 Space Vector Modulation – SVM

(Space Vector Modulation - SVM) เป็นเทคนิคที่พัฒนาขึ้นใน Field-Oriented Control (FOC) สำหรับมอเตอร์เนี้ยวนำ (Induction Motors) และมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Synchronous Motors - PMSM) SVM มีหน้าที่ในการสร้างสัญญาณมอตอร์ เผชิญความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulated - PWM) เพื่อควบคุมสวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะผลิตแรงดันที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงต่อเนื่องตามต้องการเพื่อขับมอเตอร์ให้ทำงานที่ความเร็วหรือแรงบิดที่ต้องการ SVM ยังรู้จักกันในชื่อ Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM)

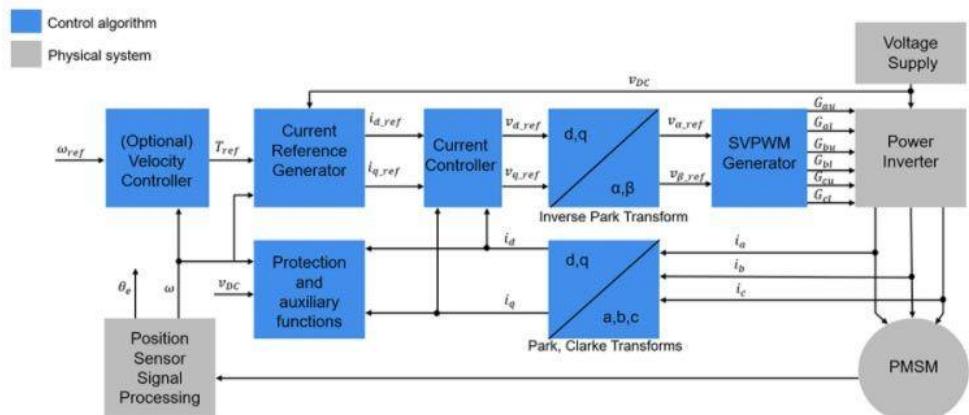


Space Vector	S1	S3	S5
U1	1	0	0
U2	1	1	0
U3	0	1	0
U4	0	1	1
U5	0	0	1
U6	1	0	1
U7	0	0	0
U8	1	1	1

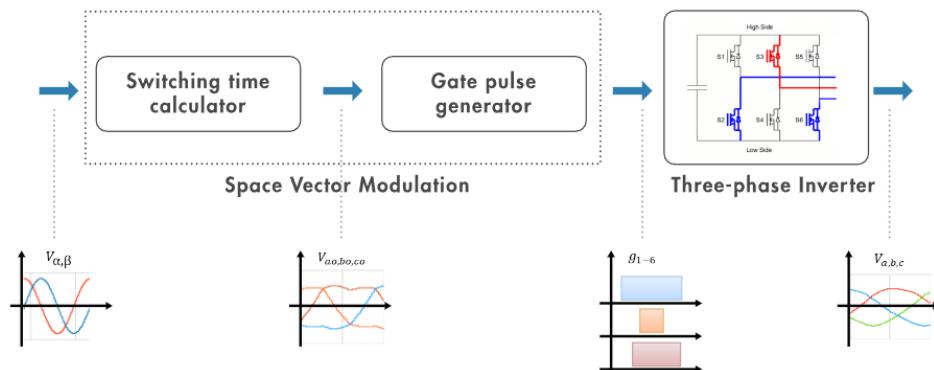
สถานะการสลับที่สอดคล้องกับเวกเตอร์พื้นฐานในอว拉斯 (สำหรับทิศทาง) และเวกเตอร์ว่า (สำหรับขนาด) จะถูกนำมารวมกันเพื่อประมาณเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดใดๆ ในตำแหน่งใดๆ ก็ได้ภายในรูปแบบเลี้ยงของเวกเตอร์ในอว拉斯 ตัวอย่างเช่น สำหรับทุกช่วงการมอดูล็อกความกว้างพัลส์ (PWM) เวกเตอร์อ้างอิง 'Uref' จะถูกเฉลี่ยโดยใช้ลำดับการสลับของเวกเตอร์ในอว拉斯ที่อยู่ติดกันสองตัว (U3 และ U4 ในรูป) สำหรับระยะเวลาที่กำหนด และเวกเตอร์ว่า (U7 หรือ U8) สำหรับช่วงที่เหลือของช่วง

โดยการควบคุมลำดับการสลับและระยะเวลาเปิดของพัลส์ จึงทำให้สามารถสร้างเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดและทิศทางที่แตกต่างกันได้สำหรับช่วง PWM ทุกช่วง เป้าหมายของเทคนิคการมอดูล็อกเวกเตอร์อว拉斯คือการสร้างลำดับการสลับที่สอดคล้องกับเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงสำหรับช่วง PWM ทุกช่วงเพื่อให้ได้เวกเตอร์อว拉斯ที่หมุนอย่างต่อเนื่อง

เทคนิคการมอดูล็อกเวกเตอร์อว拉斯จะดำเนินการกับเวกเตอร์แรงดันอ้างอิงเพื่อสร้างสัญญาณเกตที่เหมาะสมสำหรับอินเวอร์เตอร์ทุกช่วง PWM โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้เวกเตอร์อว拉斯ที่หมุนอย่างต่อเนื่อง



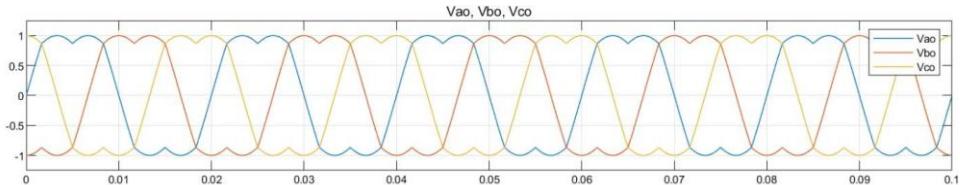
ภาพประกอบสถานะปัจจุบันการควบคุมแบบมุ่งเน้นสนามพร้อมการมอดูล็อกเวกเตอร์ในอว拉斯



แผนผังบล็อกแสดงตัวอย่างหนึ่งของวิธีการมอดูล็อกเวกเตอร์เชิงพื้นที่สำหรับทุกช่วง PWM โดยมีเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าเป็นข้อมูลอ้างอิงอินพุต อัลกอริทึม SVM:

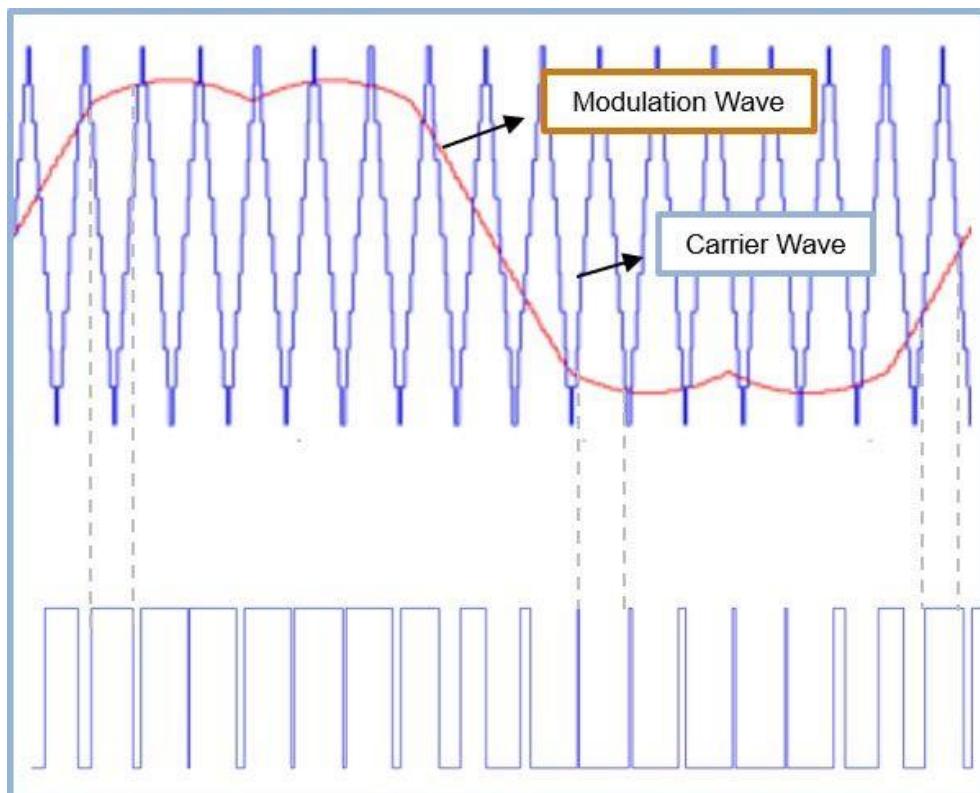
- คำนวณเวลาเปิดและปิดเกตโดยอิงตามเวกเตอร์แรงดันอ้างอิง

- ใช้เวลาเกตเพื่อสร้างรูปคลื่นมอڈูลาร์ชั้นแบบโค้งคู่
- ใช้เวลาเกตเพื่อสร้างพัลส์เกตที่เหมาะสมสมำรถรับสวิตซ์อินเวอร์เตอร์



สัญญาณแรงดันไฟฟ้ามอڈูลาร์เวลาเทอร์อวิภัคที่สร้างโดยอัลกอริทึม SVM

ลักษณะเฉพาะของคลื่นมอڈูลาร์ชั้นที่สร้างขึ้นด้วยส่วนโค้งคู่ทำให้ใช้แรงดันไฟฟ้า DC บัสที่มีอยู่ได้อย่างเต็มที่ ซึ่งจะทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าข้าออกที่มีอัตราดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิค Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)

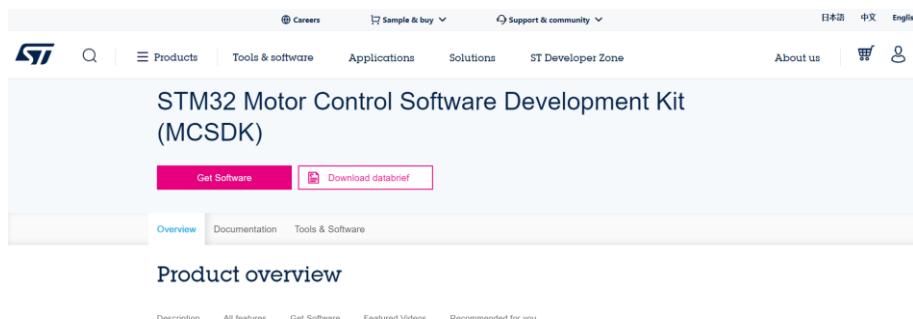


การสร้างพัลส์เกตเป็นผลจากการเปรียบเทียบคลื่นมอڈูลาร์ชั้นและคลื่นพาหะ

จากนั้นคุณสามารถใช้สัญญาณเกตที่สร้างขึ้นกับสวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์สามเฟสเพื่อขับมอเตอร์ด้วยความเร็วหรือแรงบิดที่ต้องการได้

6. วิธีดำเนินการทดลอง

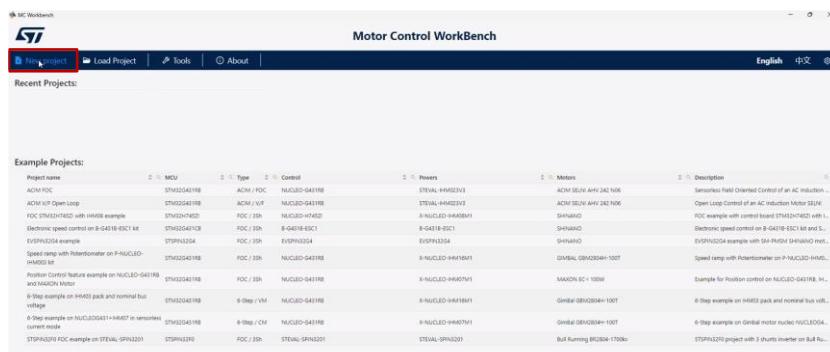
6.1 การเตรียมอุปกรณ์และซอฟต์แวร์ เริ่มจากการเราใช้บอร์ด X-NUCLEO-IHM08M1 เป็นบอร์ดขยายไดรเวอร์ชาร์ดแวร์ ซึ่งเป็นบอร์ดขยายไดรเวอร์มอเตอร์ BLDC ซึ่งเป็น Low-Voltage BLDC Motor Driver Expansion Board พัฒนาขึ้นโดยใช้ MOSFET รุ่น STL220N6F7 ซึ่งออกแบบมาเพื่อเชื่อมต่อกับบอร์ดพัฒนา STM32 Nucleo โดยตรง โดยชุดซอฟต์แวร์นี้มีวัสดุที่จำเป็นสำหรับขั้นตอนการติดต่อ BLDC และเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32 โดยในการใช้งาน X-NUCLEO-IHM08M1 ควบคู่ไปกับ STM32 Nucleo จำเป็นต้องใช้ซอฟต์แวร์ STM32 Motor Control Software Development Kit (MCSDK) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ออกแบบมาสำหรับการพัฒนาและควบคุมการทำงานของมอเตอร์บนไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32 โดย MCSDK ช่วยอำนวยความสะดวกในการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความถี่ PWM, การควบคุมกระแส, และการเลือกโหมดการควบคุม เช่น Trapezoidal Control หรือ Field-Oriented Control (FOC) ซึ่งเราได้เริ่มจากลง Software ดังรูป



รูป 22 Software STM32 Motor Control Software Development Kit (MCSDK)

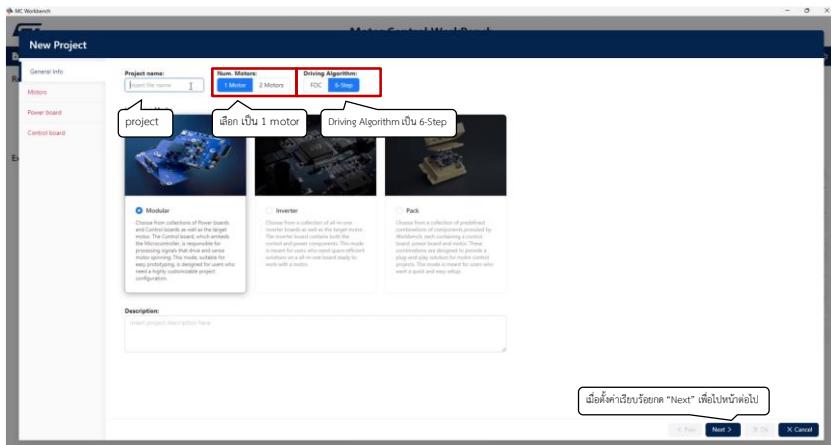
6.2 สร้างโปรเจกต์ใหม่ใน MotorControl Workbench 6.3.2

- ทำการเปิดโปรแกรม “MotorControl Workbench 6.3.2” และสร้าง project ใหม่



รูป 23 การสร้างโปรเจกต์ใหม่ใน MotorControl Workbench 6.3.2 (1)

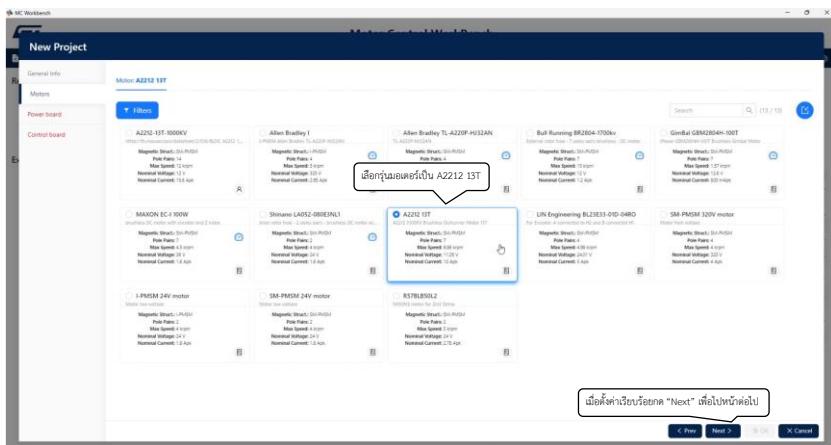
- ตั้งค่า project ให้เป็น 1 motor และเลือก Driving Algorithm เป็น 6-Step



รูป 24 การสร้างโปรเจกต์ใหม่ใน MotorControl Workbench 6.3.2 (2)

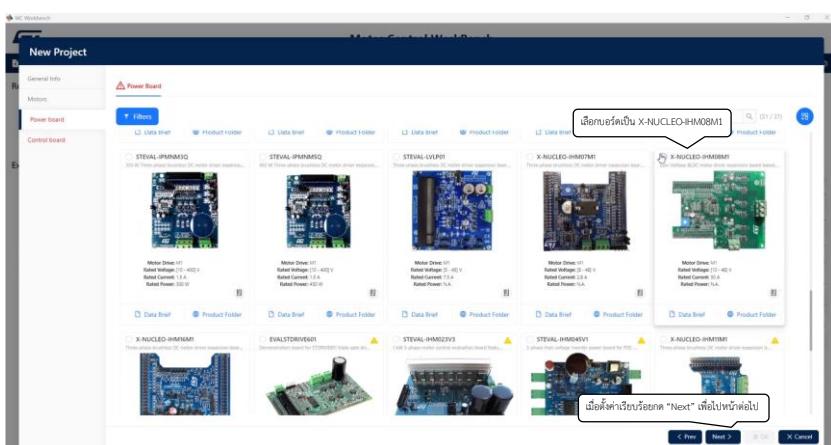
6.3 การตั้งค่ามอเตอร์และบอร์ด

- เลือกรุ่นมอเตอร์เป็น A2212 13T



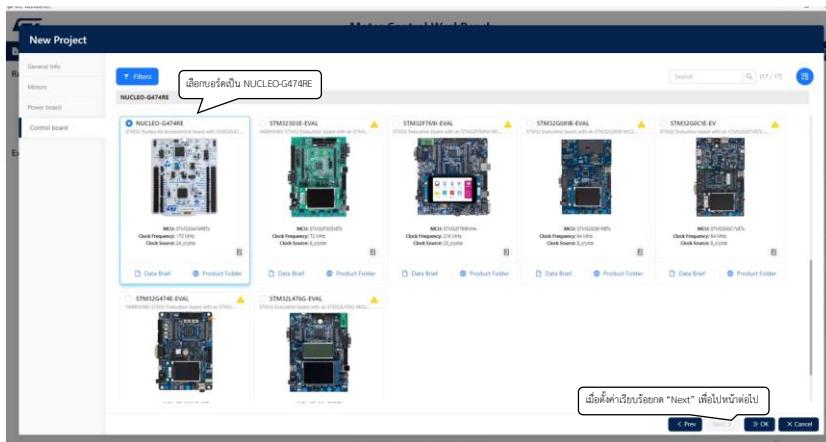
รูป 25 การตั้งค่ามอเตอร์และบอร์ด (1)

- เลือก Power board เป็น X-NUCLEO-IHM08M1



รูป 26 การตั้งค่ามอเตอร์และบอร์ด (2)

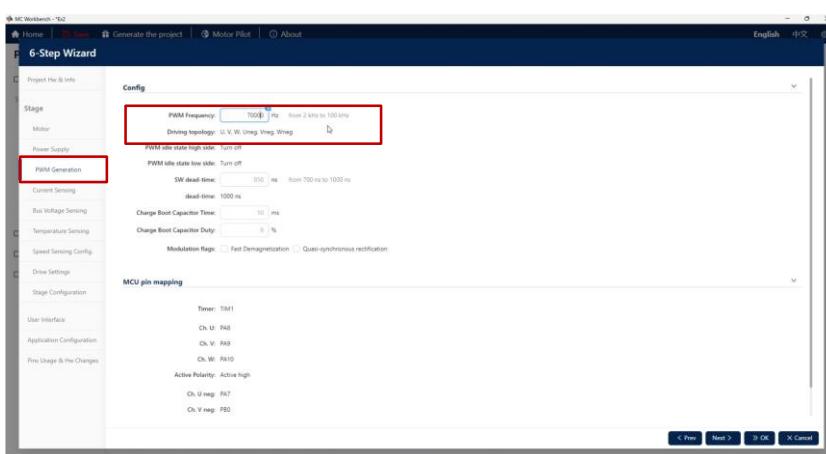
- เลือก Control board เป็น NUCLEO-G474RE



ຮູບ 27 ການຕັ້ງຄ່າມອເຕອຣແລະບ່ອຮົດ (3)

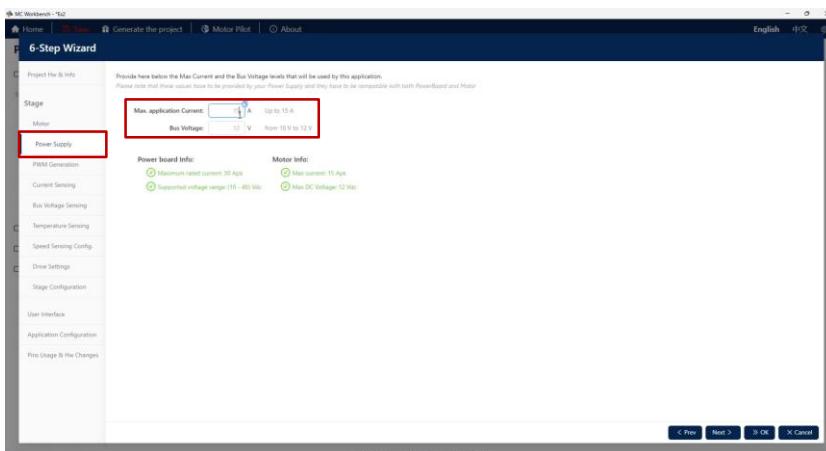
6.4 ຕັ້ງຄ່າ PWM Frequency ແລະ Bus Voltage

- ແກ້ໄຂຄ່າ PWM Frequency ຈຶ່ງເປັນຫຼຸດຄວາມຄືທີ່ໃໝ່ໃນການສ້າງມອເຕອຣ ໂດຍຄັ້ງຄ່າໃນຫຼຸດຄວາມຄື PWM ທີ່ໄມ່ເໜາະສໍາຮັບມອເຕອຣ ຈະທຳໄໝມອເຕອຣທຳການຕິດຫັດ ຮູ່ອີໄມ່ສາມຽກທຳການໄດ້



ຮູບ 28 ຕັ້ງຄ່າ PWM Frequency

- ເຂົ້າໄປແກ້ໄຂຄ່າ Power Supply ໄທຕຽບກັບ Spec ຂອງມອເຕອຣ



รูป 29 ตั้งค่า Max Current และ Bus Voltage

โดยจาก datasheet ของ A2212/13T 1000KV ทำให้สามารถตั้งค่า พารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

- Maximum Current 13A ใน 60S

- Bus Voltage 7.2 V. - 12.0 V.

(จากการที่ Support 2S-3S LiPo batteries เท่ากับว่าสามารถทำงานในช่วง 7.4 V. - 11.1 V. และ 6

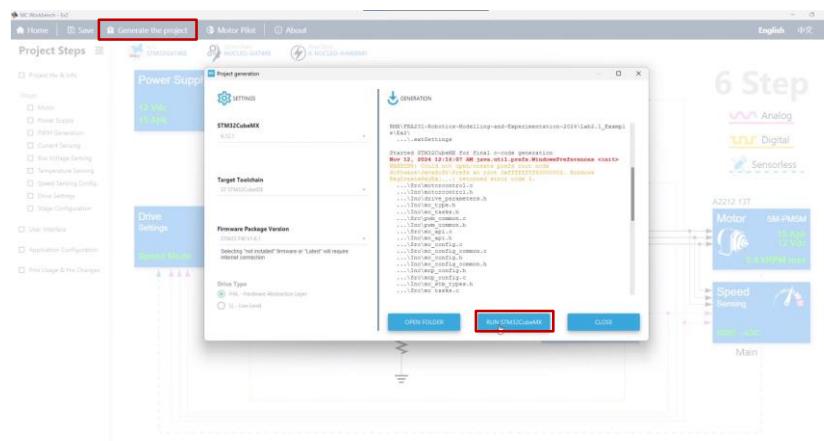
- 10 nicd/nimh voltage เท่ากับว่าสามารถทำงานในช่วง 7.2 V. - 12.0 V.)

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

ຮູບ 30 datasheet ຂອງ A2212/13T 1000KV

6.5 การเตรียมໂຄດ

- เมื่อกำหนดค่าทั้งหมดเสร็จสิ้นแล้ว ก็ทำการกด Generate the project จากนั้น RUN STM32CubeMX เป็นการเตรียมโครงสร้างโค้ดที่พร้อมสำหรับการพัฒนาและใช้งานกับไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32



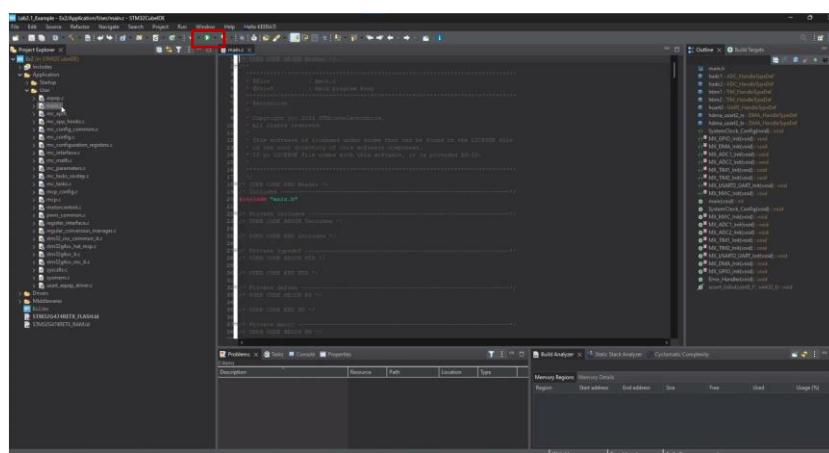
รูป 31 การเตรียมโโค้ด (1)

- เปิดโปรเจกต์ใน STM32CubeMX และกด Generate Code เพื่อสร้างไฟล์โค้ดที่พร้อมใช้งาน



รูป 32 การเตรียมโค้ด (2)

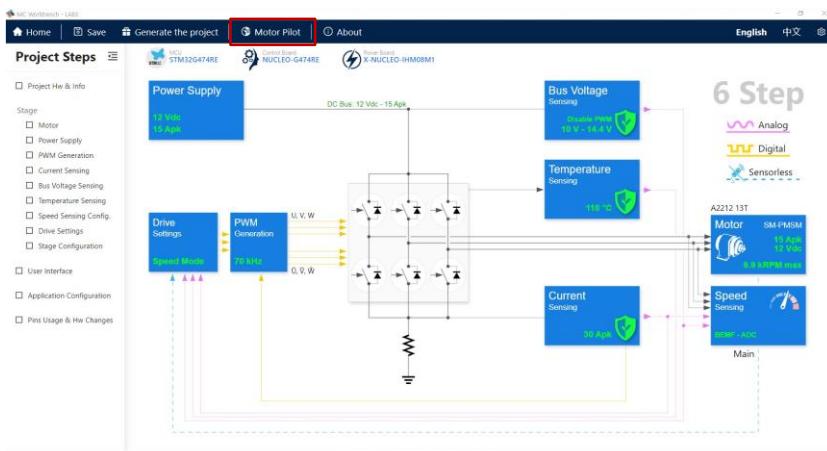
- จากนั้นมาที่หน้า Code “main.c” และสามารถกด Upload code ลงบอร์ดได้เลย



รูป 33 การเตรียมโค้ด (3)

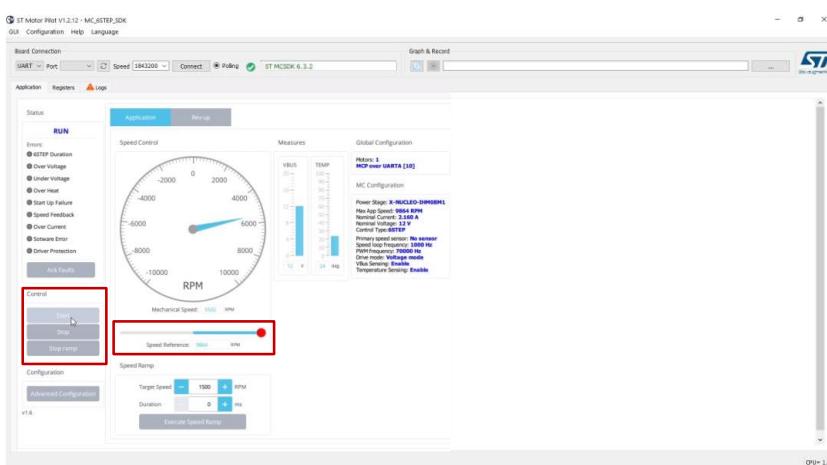
6.6 การใช้งานมอเตอร์ใน MotorControl Workbench

- เมื่อทำการตั้งค่าทุกอย่างเสร็จสิ้นก็สามารถลับมาหน้า MotorControl Workbench เพื่อใช้งานมอเตอร์ได้เลย โดยทำการเปิด Motor Pilot และถ้าหากมีการกำหนดค่าต่าง ๆ ในโปรแกรมใหม่ให้ทำการทำขั้นตอน “6.5 การเตรียมโค้ด” ใหม่ด้วย



รูป 34 การใช้งานมอเตอร์ใน MotorControl Workbench (1)

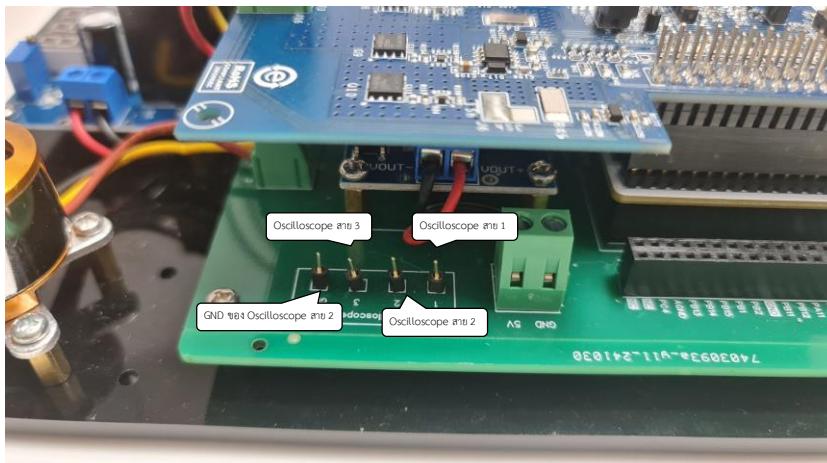
- เมื่อเขียนมาในโปรแกรมก็สามารถกำหนดความเร็ว และกดเริ่มให้มอเตอร์เริ่มหรือหยุดทำงานได้โดยตั้งภาพ



รูป 35 การใช้งานมอเตอร์ใน MotorControl Workbench (2)

6.7 ตั้งค่า Oscilloscope เพื่อวัดค่าการทดลอง

- ต่อสาย Feedback จากมอเตอร์เข้ากับ Oscilloscope ตามรูป



รูป 36 การต่อสาย feedback กับ Oscilloscope

- เลือก Channel (CH) ที่ต้องการวัดค่า สังเกต Cursor ที่เปลี่ยนสีให้ตรงกับสัญญาณ



รูป 37 เลือก Channel ที่ต้องการวัดค่า

- ตั้งค่า Oscilloscope ให้เห็นสัญญาณ Back EMF ชัดเจน โดยตั้งช่วงเวลา (Time Division) ให้ครอบคลุม 3 ลูกคลื่น



รูป 38 ตั้งค่า Time Division

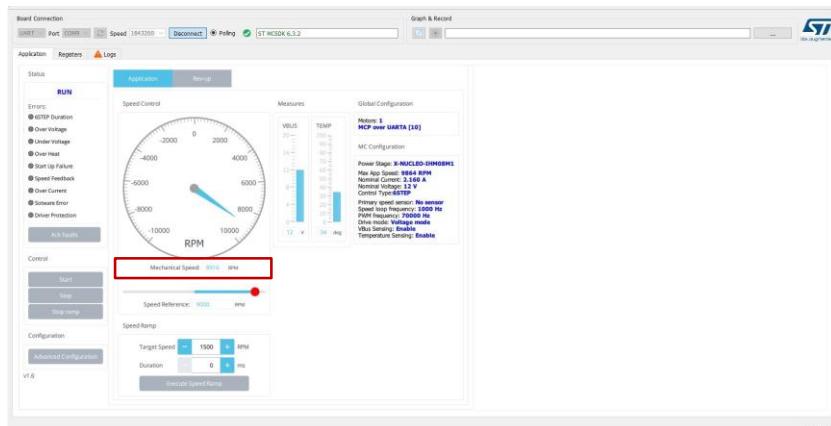
- ปรับค่าแรงดัน (Voltage Division) ให้เหมาะสม ให้ได้รูปสัญญาประมวลภาพด้านล่าง



รูป 39 ปรับค่าแรงดัน (Voltage Division)

6.8 การทำการทดลอง และเก็บข้อมูลการทดลอง

- เริ่มทำการเก็บค่า โดยเริ่มจากการตั้งค่าความเร็วของมอเตอร์เป็น 9,000 rpm แล้วทำการกดปุ่ม Start โดยทำการสังเกตุไปด้วยว่า Mechanical Speed อยู่ในค่าใกล้เคียงกับความเร็วของมอเตอร์ที่เราตั้งค่าไว้หรือไม่ ก่อนทำการเก็บค่า



รูป 40 การทำการทดลอง (1)

- วัดระยะห่างของสัญญาณ Back EMF ในแต่ละลูกคลื่น และบันทึกภาพรวมถึงค่าของ 3 ลูกคลื่นที่ต่อเนื่องกันเพื่อหาค่าเฉลี่ยของข้อมูล



รูป 41 การทำการทดลอง (2)

- ทำขั้นตอนข้างต้นกับ Channel อื่น ๆ
- ทำการตั้งค่าความเร็วของมอเตอร์เป็น 3,000, 6,000, และ 9,000 rpm ทั้ง 2 ทิศทาง และทำการเก็บข้อมูลทั้งหมดขึ้น

6.9 คำนวนผลลัพธ์

- การคำนวนความถี่จากเวลาในหนึ่งลูกคลื่น

$$\text{ความถี่ (Hz) ของ Back EMF หาได้จาก : } f = \frac{1}{T}$$

f คือความถี่ของ Back EMF (Hz)
 T คือเวลาในหนึ่งลูกคลื่น (s)

- การคำนวนความเร็วเชิงมุ่งจากความถี่ของสัญญาณที่เกิดจาก Back EMF

$$\text{ความเร็วเชิงมุ่ง (rpm) ของ Back EMF หาได้จาก : } rpm = \frac{f \times 60}{P}$$

$$\text{ความเร็วเชิงมุ่ง (rad/s) ของ Back EMF หาได้จาก : } \omega = \frac{2\pi f}{P}$$

f คือความถี่ของ Back EMF (Hz)

ω คือความเร็วเชิงมุ่ง (rad/s)

rpm คือความเร็วเชิงมุ่ง (rpm)

P คือจำนวนคู่ขั้วแม่เหล็ก (A2212/13T มี 14 poles ดังนั้นมี 7 คู่ขั้วแม่เหล็ก)

6.10 วิเคราะห์และบันทึกผล

- เปรียบเทียบค่าที่ได้ในสัญญาณ Channel และความเร็วต่าง ๆ มากวิเคราะห์ความสอดคล้องกับทฤษฎี และบันทึกผลในรูปแบบตาราง และกราฟเพื่อนำเสนอในรายงาน

7 วัสดุอุปกรณ์

7.2 BLDC Motor	จำนวน 1 อัน
7.3 STMICROELECTRONICS X-NUCLEO-IHM08M1	จำนวน 1 อัน
7.4 Nucleo STM32G474RE พร้อมสายอัปโหลด	จำนวน 1 ชุด
7.5 BLDCXplorer	จำนวน 1 ชุด

8 ตัวแปร

ตัวแปรต้น	ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์
ตัวแปรตาม	สัญญาณ feedback ที่อ่านค่าได้จาก Oscilloscope
ตัวแปรควบคุม	สายสัญญาณที่ใช้ในการวัด, การตั้งค่า Oscilloscope, การวางแผน, การตั้งค่าบน Oscilloscope เช่น Time Division-Voltage Division, สเกลแวดล้อมต่าง ๆ รอบพื้นที่ทดลอง

9 ผลการทดลอง

9.1 ตารางแสดงค่า ความถี่ และความเร็วของมอเตอร์ BLDC จากการวัดสัญญาณ feedback ด้วย Oscilloscope ที่ความเร็ว 9,000 rpm

ลูกคื่นที่	ค่า (ms)		
	CH 1	CH 2	CH 3
1	1.01	0.99	0.99
2	1.01	1.01	1.00
3	0.99	0.99	1.01
ค่าเฉลี่ยค่า (ms)	1.0033	0.9967	1.0000
Frequency (Hz)	996.6777409	1003.344482	1000
ความเร็ว (rpm)	8542.952065	8600.095557	8571.429
ความเร็ว (rad/s)	894.9759306	900.9623916	897.9592

9.2 ตารางแสดงค่าบ ความถี่ และความเร็วของมอเตอร์ BLDC จากการวัดสัญญาณ feedback ด้วย Oscilloscope ที่ความเร็ว 6,000 rpm

ลูกคื่นที่	ค่าบ (ms)		
	CH 1	CH 2	CH 3
1	1.45	1.45	1.42
2	1.44	1.42	1.44
3	1.41	1.44	1.45
ค่าเฉลี่ยค่าบ (ms)	1.4333	1.4367	1.4367
Frequency (Hz)	697.6744186	696.0556845	696.0557
ความเร็ว (rpm)	5980.066445	5966.191581	5966.192
ความเร็ว (rad/s)	626.4831514	625.0295942	625.0296

9.3 ตารางแสดงค่าบ ความถี่ และความเร็วของมอเตอร์ BLDC จากการวัดสัญญาณ feedback ด้วย Oscilloscope ที่ความเร็ว 3,000 rpm

ลูกคื่นที่	ค่าบ (ms)		
	CH 1	CH 2	CH 3
1	2.86	2.86	2.88
2	2.84	2.86	2.86
3	2.84	2.86	2.82
ค่าเฉลี่ยค่าบ (ms)	2.8467	2.8600	2.8533
Frequency (Hz)	351.2880562	349.6503497	350.4673
ความเร็ว (rpm)	3011.040482	2997.002997	3004.005
ความเร็ว (rad/s)	315.4423362	313.9717425	314.7053

9.4 ตารางแสดงค่าบ ความถี่ และความเร็วของมอเตอร์ BLDC จากการวัดสัญญาณ feedback ด้วย Oscilloscope ที่ความเร็ว -9,000 rpm

ลูกคื่นที่	ค่าบ (ms)		
	CH 1	CH 2	CH 3
1	1.01	1.01	1.01

2	1.00	1.00	1.01
3	0.98	1.01	0.99
ค่าเฉลี่ยคาบ (ms)	0.9967	1.0067	1.0033
Frequency (Hz)	1003.344482	993.3774834	996.6777
ความเร็ว (rad/s)	0.894965986	0.903945578	0.900952

9.5 ตารางแสดงคาบ ความถี่ และความเร็วของมอเตอร์ BLDC จากการวัดสัญญาณ feedback ด้วย Oscilloscope ที่ความเร็ว -6,000 rpm

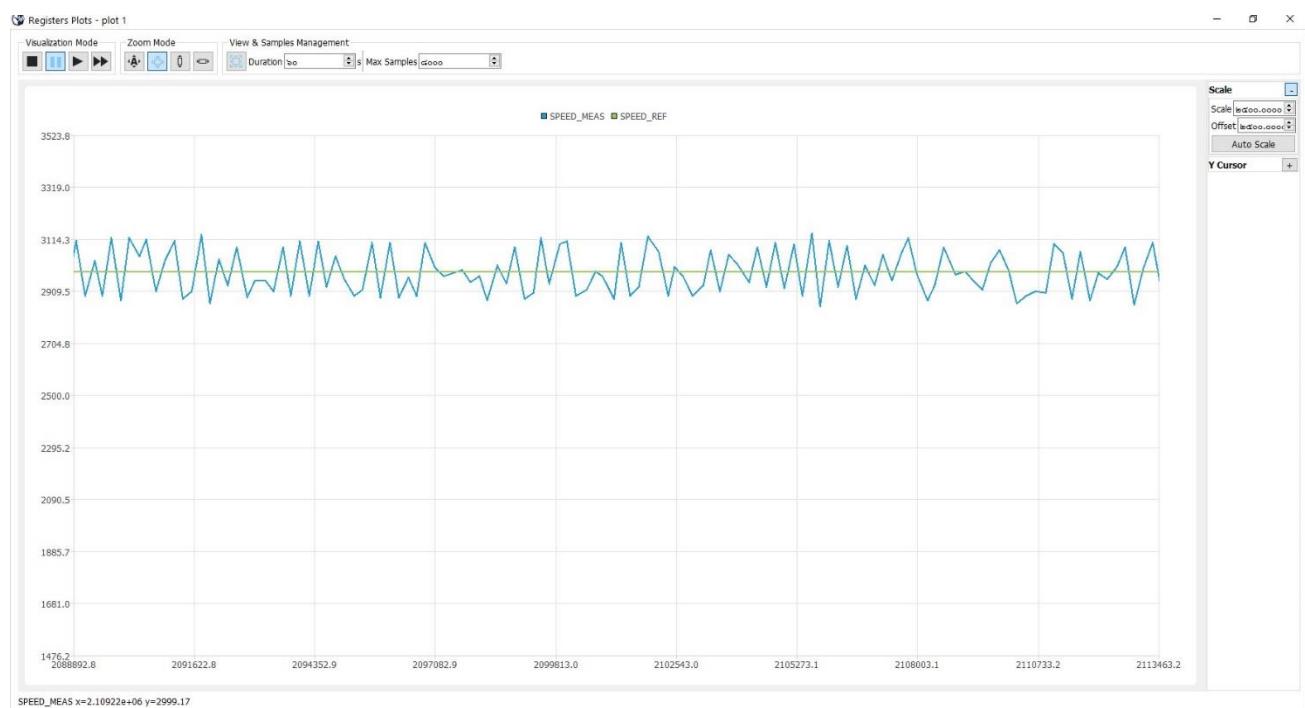
ลูกคื่นที่	คาบ (ms)		
	CH 1	CH 2	CH 3
1	1.45	1.45	1.42
2	1.44	1.42	1.00
3	1.41	1.44	1.01
ค่าเฉลี่ยคาบ (ms)	1.4333	1.4367	1.1433
Frequency (Hz)	697.6744186	696.0556845	874.6356
ความเร็ว (rad/s)	1.28707483	1.290068027	1.026667

9.6 ตารางแสดงคาบ ความถี่ และความเร็วของมอเตอร์ BLDC จากการวัดสัญญาณ feedback ด้วย Oscilloscope ที่ความเร็ว -3,000 rpm

ลูกคื่นที่	คาบ (ms)		
	CH 1	CH 2	CH 3
1	2.88	2.86	2.88
2	2.84	2.84	2.86
3	2.86	2.86	2.84
ค่าเฉลี่ยคาบ (ms)	2.8600	2.8533	2.8600
Frequency (Hz)	349.6503497	350.4672897	349.6503
ความเร็ว (rad/s)	2.568163265	2.562176871	2.568163

10 สรุปผล

จากการวัดสัญญาณ Back EMF ใน 3 ช่องสัญญาณ จากตารางแสดงค่า ความถี่ และความเร็วของมอเตอร์ BLDC จากการวัดสัญญาณ feedback ด้วย Oscilloscope ที่ความเร็ว 9,000 rpm จะเห็นว่า ค่าคาบเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.9967–1.0033 ms
ความถี่ (Frequency) มีค่าประมาณ 996.68 Hz - 1003.34 Hz
ความเร็วเชิงมุม (rad/s) ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 894.98 - 900.96 rad/s
ความเร็วเชิงมุม (RPM) ความเร็วเฉลี่ยของมอเตอร์อยู่ในช่วง 8542.95 - 8600.10 RPM
ซึ่งข้อมูลมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 4.4%-5.1% จากค่าเป้าหมายที่ความเร็ว และความเร็วที่ตั้งค่า (ทั้งบวกและลบ) ส่งผลต่อค่าคาบและความถี่ของสัญญาณ โดยความถี่แปรผันตรงกับความเร็ว โดยจะเห็นว่ามีความสัมพันธ์แบบนี้ทุกการทดลอง และการทดลองพบความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยกว่า 5% จากค่าเป้าหมาย ดังภาพ



11 อภิปรายผล

11.2 QEI

11.3 Polling

12 ข้อเสนอแนะ

12.2 จากการวิเคราะห์ข้อมูลในแต่ละช่องสัญญาณ พบร่วมความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นซึ่งอาจเกิดได้จากปัจจัยดังนี้ การตั้งค่าเครื่องมือวัด การต่อสายวัดที่ไม่แน่นหนา ความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยในรอบหมุนของมอเตอร์

เพื่อลดความคลาดเคลื่อน ควรตรวจสอบความแน่นหนาของการต่อสายวัด, ใช้ Oscilloscope ที่มีความละเอียดสูง, และควบคุมสภาพแวดล้อมการทดลองให้คงที่

- 12.3 เสนอให้มีการออกแบบการทดลองเพิ่มเติม เพื่อวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของมอเตอร์ BLDC ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมของมอเตอร์ได้ลึกซึ้งยิ่งขึ้น เช่นการวัดแรงดันและกระแสในแต่ละเฟส: เพื่อตรวจสอบความสมมัติฐานกับแรงบิดและความเร็ว

13 เอกสารอ้างอิง

- 13.2 https://th.amen-technologies.com/what-is-brushless-dc-motor#google_vignette
- 13.3 <https://greensky-power.com/th/brushless-dc-motor-bldc-basics/>
- 13.4 <https://www.tgdautodoor.com/post/>
- 13.5 https://www.rhydolabz.com/documents/26/BLDC_A2212_13T.pdf?srsltid=AfmBOopX7YVQcm_cjqNjjNjUvSpKqZ8LCHC85z9xyhjPMZwLb4-PR76N
- 13.6 <https://electronics.stackexchange.com/questions/428028/why-is-back-emf-of-bldc-trapezoidal>
- 13.7 <https://electronics.stackexchange.com/questions/428028/why-is-back-emf-of-bldc-trapezoidal?newreg=47bdae32052c4d8f93b36d0c106931a8>
- 13.8 <https://www.mirrorreview.com/bldc-motor/>
- 13.9 https://www.9engineer.com/index.php?m=article&a=print&article_id=2606
- 13.10 <https://www.integrasources.com/blog/bldc-motor-controller-design-principles/>
- 13.11 <https://www.mathworks.com/discovery/space-vector-modulation.html>
- 13.12
- 13.13

14 ภาคผนวก



รูป 42 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว 9000 rpm (1)



รูป 43 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว 9000 rpm (2)



รูป 44 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว 9000 rpm (3)



รูป 45 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว 9000 rpm (4)



รูป 46 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว 9000 rpm (5)



รูป 47 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว 9000 rpm (6)



รูป 48 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว 9000 rpm (7)



รูป 49 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว 9000 rpm (8)



รูป 50 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว 9000 rpm (9)



รูป 51 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว 6000 rpm (1)



รูป 52 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว 6000 rpm (2)



รูป 53 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว 6000 rpm (3)



รูป 54 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว 6000 rpm (4)



รูป 55 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว 6000 rpm (5)



รูป 56 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว 6000 rpm (6)



รูป 57 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว 6000 rpm (7)



รูป 58 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว 6000 rpm (8)



รูป 59 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว 6000 rpm (9)



รูป 60 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว 3000 rpm (1)



รูป 61 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว 3000 rpm (2)



รูป 62 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว 3000 rpm (3)



รูป 63 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว 3000 rpm (4)



รูป 64 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว 3000 rpm (5)



รูป 65 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว 3000 rpm (6)



รูป 66 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว 3000 rpm (7)



รูป 67 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว 3000 rpm (8)



รูป 68 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว 3000 rpm (9)



รูป 69 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว -9000 rpm (1)



รูป 70 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว -9000 rpm (2)



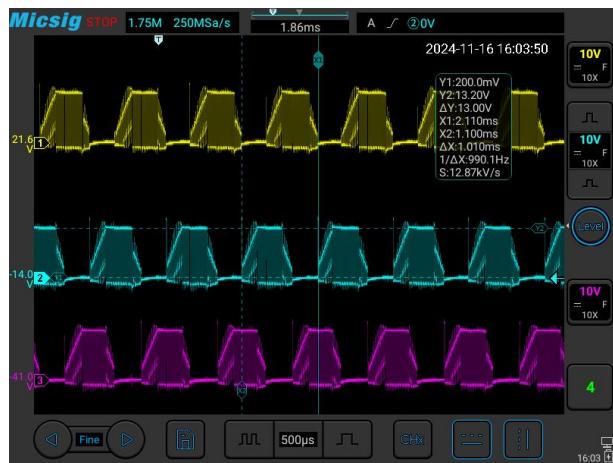
รูป 71 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว -9000 rpm (3)



รูป 72 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว -9000 rpm (4)



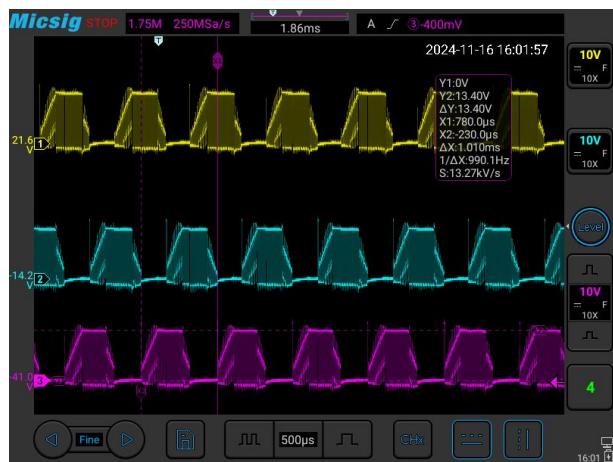
รูป 73 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว -9000 rpm (5)



รูป 74 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว -9000 rpm (6)



รูป 75 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว -9000 rpm (7)



รูป 76 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว -9000 rpm (8)



รูป 77 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว -9000 rpm (9)



รูป 78 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว -6000 rpm (1)



รูป 79 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว -6000 rpm (2)



รูป 80 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว -6000 rpm (3)



รูป 81 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว -6000 rpm (4)



รูป 82 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว -6000 rpm (5)



รูป 83 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว -6000 rpm (6)



รูป 84 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว -6000 rpm (7)



รูป 85 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว -6000 rpm (8)



รูป 86 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว -6000 rpm (9)



รูป 87 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว -3000 rpm (1)



รูป 88 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว -3000 rpm (2)



รูป 89 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว -3000 rpm (3)



รูป 90 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว -3000 rpm (4)



รูป 91 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว -3000 rpm (5)



รูป 92 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว -3000 rpm (6)



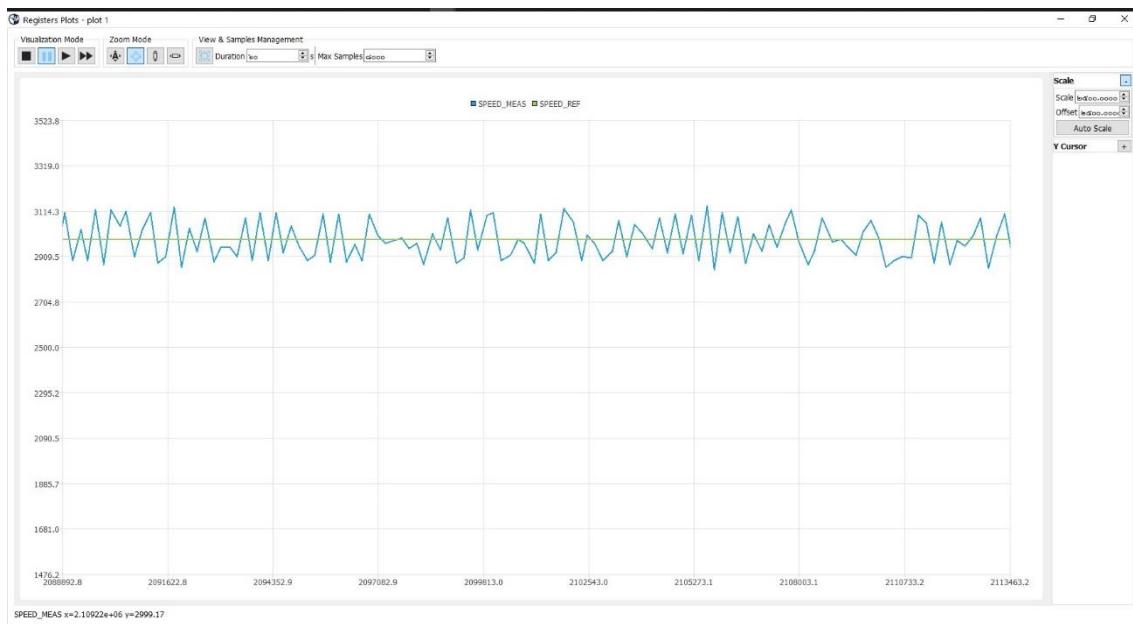
รูป 93 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว -3000 rpm (7)



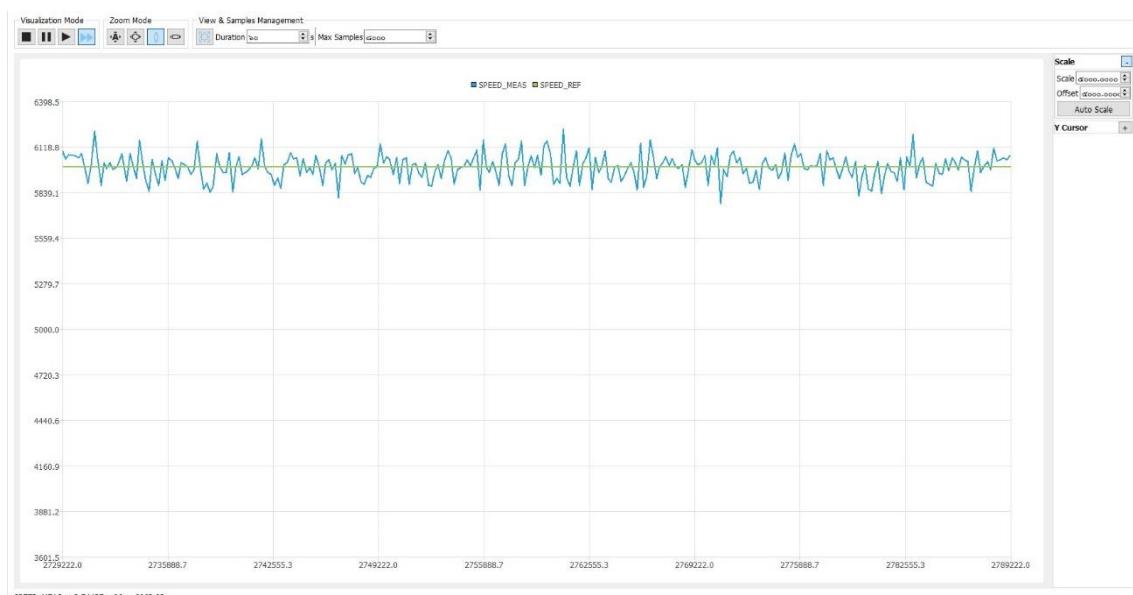
รูป 94 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว -3000 rpm (8)



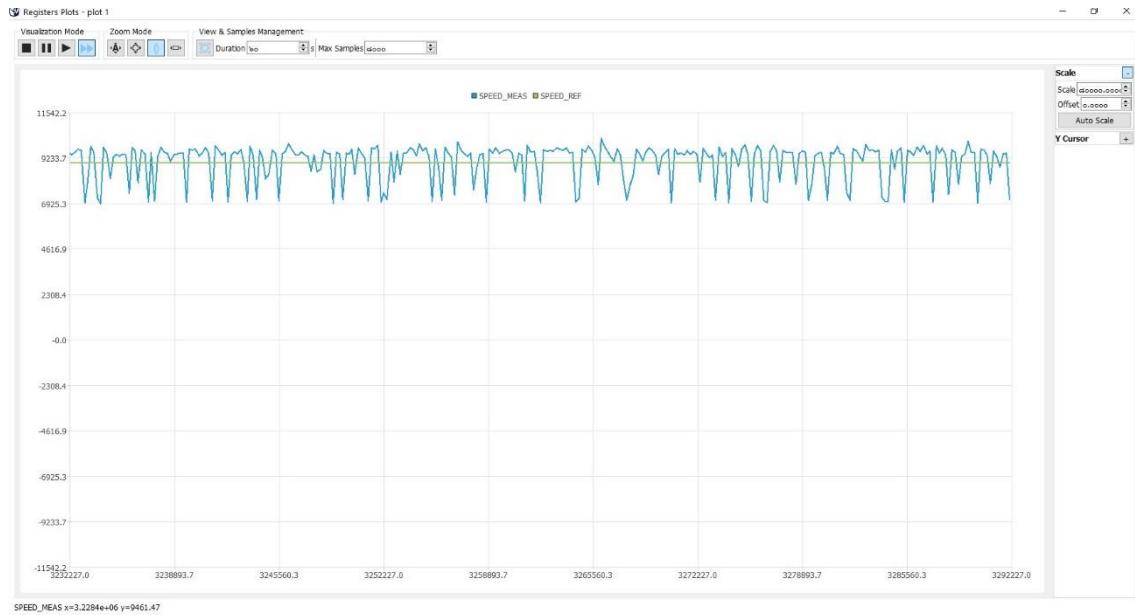
รูป 95 สัญญาณที่อ่านได้ที่ความเร็ว -3000 rpm (9)



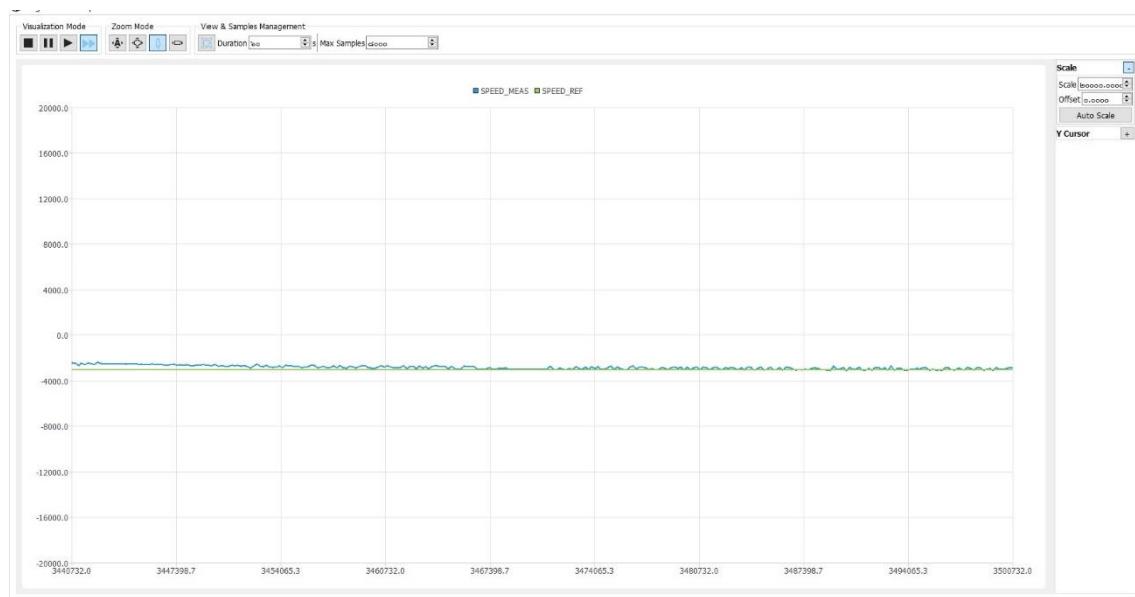
รูป 96 ความเร็วเฉิงมุมที่อ่านได้ที่ความเร็ว 3000 rpm



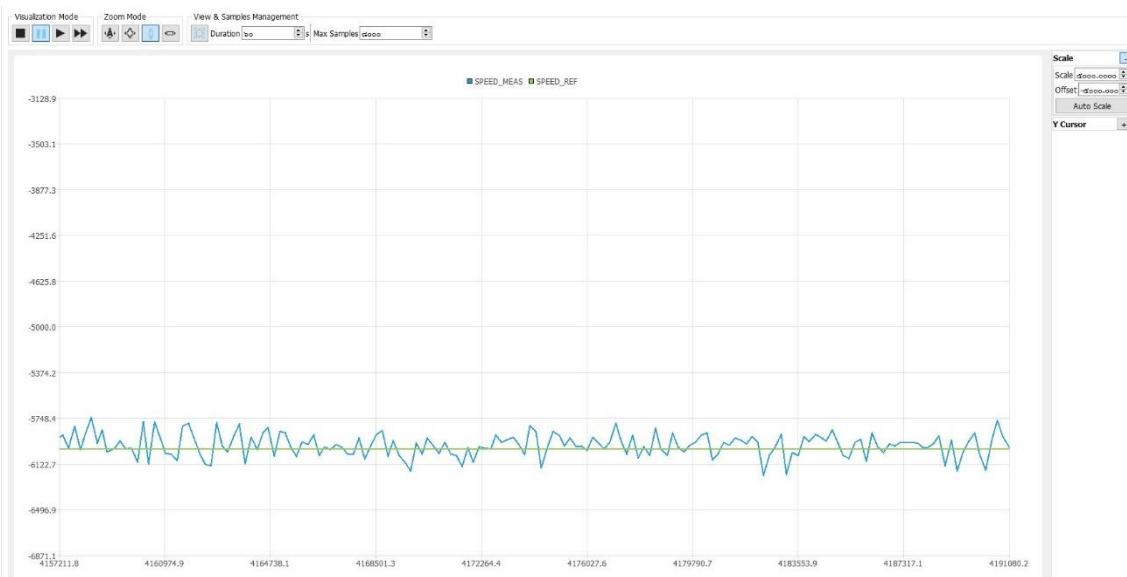
รูป 97 ความเร็วเฉิงมุมที่อ่านได้ที่ความเร็ว 6000 rpm



รูป 98 ความเร็วเชิงมุมที่อ่านได้ที่ความเร็ว 9000 rpm

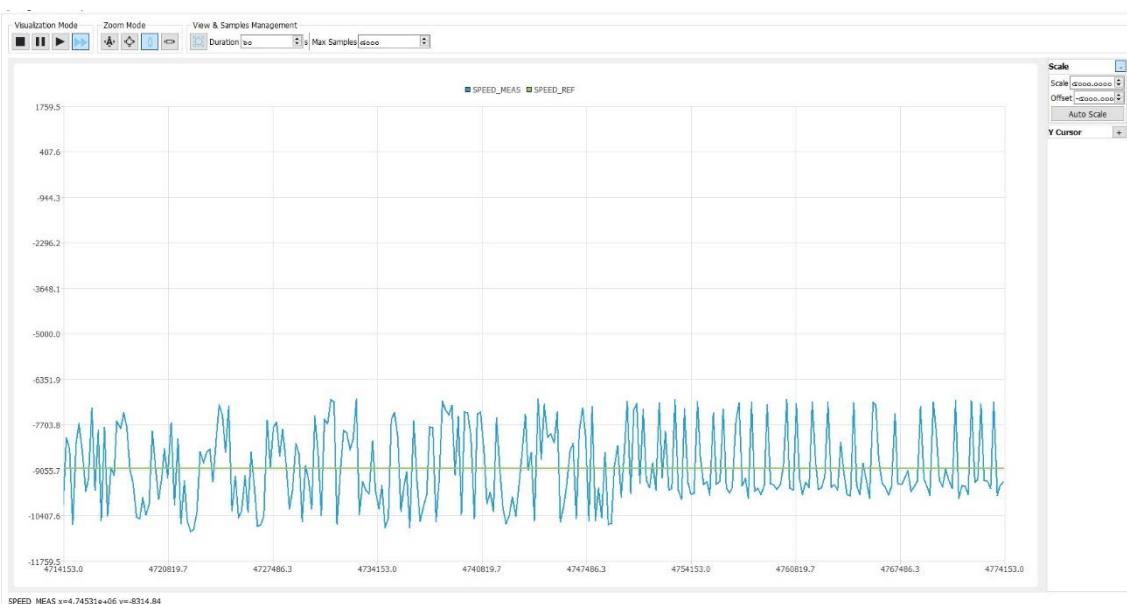


รูป 99 ความเร็วเชิงมุมที่อ่านได้ที่ความเร็ว -3000 rpm



รูป 100 ความเร็วเชิงมุมที่อ่านได้ที่ความเร็ว -6000 rpm

S



รูป 101 ความเร็วเชิงมุมที่อ่านได้ที่ความเร็ว -9000 rpm