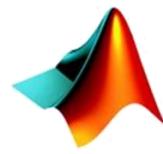


RMXplorer



LAB 2: Brushed DC Motor และ Stepper Motor

Name

1. นายณพสัญญ์	จีระวัฒนวนนท์	66340500014
2. นายนภสินธุ์	รินทา	66340500022
3. นายอริยุชย์	สุวรรณ	66340500062

Objectives

- เพื่อให้สามารถออกแบบและดำเนินการทดลองทางวิทยาศาสตร์อย่างเป็นระบบ ตั้งแต่การสืบค้น ทดลอง บันทึก วิเคราะห์ สรุป และอภิปรายผล พร้อมประยุกต์ใช้ MATLAB ในการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล รวมถึงตรวจสอบความเที่ยงตรงและความแม่นยำ โดยมีทฤษฎีที่เขียนถือได้รองรับ
- เพื่อให้เข้าใจและอธิบายกระบวนการทำงานของเซ็นเซอร์แต่ละประเภทอย่างครบถ้วน ตั้งแต่การวัดปริมาณทางพลิกส์ไปจนถึงการแปลงข้อมูล เช่น ออิบายวิซิการ์ที Current Sensor ใช้วัดกระแสไฟฟ้าได้อย่างถูกต้อง
- เพื่อให้กำหนดตัวแปรการทดลองได้อย่างชัดเจนและสมเหตุสมผล โดยมีการระบุทั้งตัวแปรต้น ตัวแปรตาม และตัวแปรควบคุม พร้อมอธิบายสมมติฐานและนิยามเชิงปฏิบัติที่สอดคล้องกับทฤษฎีทางพลิกส์หรือข้อมูลใน Datasheet
- เพื่อให้สามารถออกแบบวิธีการทดลองให้สอดคล้องกับเป้าหมายการเรียนรู้ บันทึกผล สรุป และอภิปรายผลได้ตามข้อมูลจริง โดยใช้อุปกรณ์และเครื่องมือที่จัดเตรียมให้ เช่น ไฟล์ Simulink, mlx และชุดทดลองบนบอร์ด Microcontroller รวมถึงสามารถทำซ้ำการทดลองได้
- เพื่อให้สามารถเขียนรายงานทางวิทยาศาสตร์ โดยใช้สัญลักษณ์ สมการ และรูปแบบการจัดพิมพ์ที่ถูกต้องตามมาตรฐานสากล ทั้งในด้านขนาดอักษร การจัดวาง และการเว้นระยะ

Brushed DC Motor

จุดประสงค์

- เพื่อให้สามารถอธิบายหลักการทำงานของ Brushed DC Motor และวิเคราะห์ Motor Characteristic
- เพื่อให้สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง Speed, Torque, Current, Power และ %Efficiency ของ Brushed DC Motor โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของ Load Torque
- เพื่อให้สามารถอธิบายหลักการทำงาน H-Bridge Drive Mode ทั้ง 3 โหมด (Sign-Magnitude, Locked Anti-Phase, Async Sign-Magnitude)

สมมติฐาน

- แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะเพิ่มความเร็วเชิงมุม (RPM) และแรงบิด (Torque) จะมีความสัมพันธ์กับกระแส (Current) โดยตรง
- การควบคุมด้วย H-Bridge Drive ในโหมด Sign-Magnitude, Locked Anti-Phase จะส่งผลต่อ ความเร็วและทิศทางการหมุนของมอเตอร์แตกต่างกัน
- เมื่อ Load Torque เพิ่มขึ้น ความเร็วของมอเตอร์จะลดลง ในขณะที่กระแสไฟฟ้าและแรงบิดที่มอเตอร์ต้องการจะเพิ่มขึ้น และ %Efficiency จะมีค่าต่ำสุดในช่วงที่โหลดสูงเกินกำลังของมอเตอร์

ตัวแปร

ตัวแปรต้น : PWM, Frequency, Load Torque (Nm)

ตัวแปรตาม : Torque, Current, Power, %Efficiency, speed (RPM)

ตัวแปรควบคุม : แรงดันไฟฟ้า, H-Bridge Drive

นิยามศัพท์เฉพาะ

- DC Motor (มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง)

อุปกรณ์ไฟฟ้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นพลังงานกล โดยการหมุนของโรเตอร์ภายในมอเตอร์ จะถูกควบคุมด้วยกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่จ่ายให้

- Torque (แรงบิด)

แรงหมุนที่มอเตอร์สร้างขึ้นซึ่งใช้ในการหมุนเพลา มีหน่วยเป็น นิวตัน-เมตร (Nm) และมีความสัมพันธ์โดยตรงกับกระแสที่จ่ายให้มอเตอร์

3. Speed (ความเร็วรอบ)

จำนวนรอบที่มอเตอร์หมุนในหนึ่งนาที มีหน่วยเป็น รอบต่อนาที (RPM) และมักได้รับผลกระทบจากแรงบิดและโหลด

4. Current (กระแสไฟฟ้า)

ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ มีหน่วยเป็น แอมเปียร์ (A) ซึ่งควบคุมแรงบิดของมอเตอร์

5. Load (โหลด)

แรงหรือภาระที่มอเตอร์ต้องขับเคลื่อน เช่น น้ำหนักหรือแรงต้านที่ส่งผลต่อแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์

6. Efficiency (ประสิทธิภาพ)

สัดส่วนระหว่างพลังงานกลที่มอเตอร์ผลิตได้ต่อพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้ มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (%)

7. Power (กำลังงาน)

ปริมาณพลังงานที่มอเตอร์ใช้หรือผลิตได้ในหนึ่งหน่วยเวลา มีหน่วยเป็น วัตต์ (W) ซึ่งคำนวณจากผลคูณของแรงบิดและความเร็ว

8. H-Bridge Drive

วงจรที่ใช้ขั้บมอเตอร์โดยควบคุมการให้โหลดของกระแสไฟฟ้า เพื่อกำหนดทิศทางและความเร็วของมอเตอร์

- Sign-Magnitude Mode

โหมดควบคุมที่ใช้กำหนดทิศทางและความเร็วโดยตรง

- Anti-phase Mode

โหมดควบคุมที่เปลี่ยนทิศทางและความเร็วโดยการปรับ duty cycle

9. Dynamic Load (โหลดแบบเปลี่ยนแปลง)

โหลดที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เช่น การเพิ่มหรือลดแรงต้านที่มอเตอร์ต้องขับ

นิยามเชิงปฏิบัติการ

1. DC Motor (มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง)

อุปกรณ์ที่ถูกเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (DC) และใช้ในการทดลองเพื่อแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล โดยค่าความเร็วรอบ (RPM), กระแส (A) และแรงบิด (Nm) จะถูกวัดเพื่อศึกษาพฤติกรรมของมอเตอร์

2. Torque (แรงบิด)

ค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์แรงบิดที่ติดตั้งกับเพลาของมอเตอร์ โดยใช้ค่ากระแสที่จ่ายให้มอเตอร์เป็นตัวควบคุม

3. Speed (ความเร็วรอบ)

ค่าความเร็วของการหมุนที่วัดจากเซนเซอร์วัดรอบหรือเครื่องวัดความเร็ว มีหน่วยเป็น RPM ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์กับแรงบิดและโหลด

4. Current (กระแสไฟฟ้า)

ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่มอเตอร์ วัดโดยใช้แอมมิเตอร์ (Ammeter) ที่เชื่อมต่อในวงจรไฟฟ้า

5. Load (โหลด)

แรงต้านทานที่มอเตอร์ต้องขับเคลื่อน เช่น การปรับโหลดด้วย magnetic particle clutch โดยค่าผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงแรงบิดและความเร็ว

6. Efficiency (ประสิทธิภาพ)

ค่าที่คำนวณจากสัดส่วนของกำลังงานกลที่วัดได้จากมอเตอร์ต่อกำลังงานไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (%)

7. Power (กำลังงาน)

ค่าที่คำนวณจากผลคูณระหว่างแรงบิด (Nm) และความเร็ว (RPM) ของมอเตอร์ โดยพิจารณาโดยโหลดในแต่ละสถานะการทำงาน

8. H-Bridge Drive

วงจรไฮบริดทรอโนนิกส์ที่ใช้ควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้มอเตอร์ โดยเลือกใช้ชุด Sign-Magnitude หรือ Anti-phase เพื่อปรับความเร็วและทิศทางของมอเตอร์

ลดของสัญญาณจากมอเตอร์ออกจากกัน

9. Dynamic Load (โหลดแบบเปลี่ยนแปลง)

การเพิ่มหรือลดโหลดแบบค่อยเป็นค่อยไป โดยใช้ magnetic particle clutch หรืออุปกรณ์เสริมเพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงในแรงบิดและความเร็ว

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

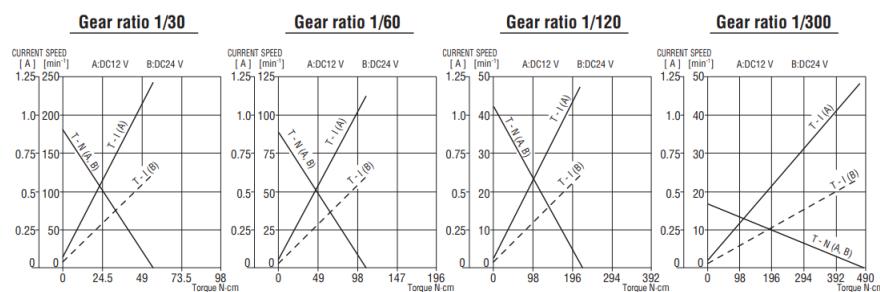
1. Nidec Components Geared DC Geared Motor (12 V dc, 20 Ncm, 70 rpm, 6mm Shaft Diameter)

มีคุณสมบัติเบื้องต้นคือ

- แรงดันไฟฟ้า : 12V DC
- ความเร็วรอบ : 70 รอบต่อนาที
- แรงบิดสูงสุด : 20 Ncm
- อัตราทดเกียร์ : 60:1
- เส้นผ่านศูนย์กลางเพลา : 6 มม.
- กระแสไฟฟ้า : 280 mA
- ขนาด : เส้นผ่านศูนย์กลาง 39 มม. ยาว 77.7 มม.

■ PERFORMANCE CURVES

(Figures in the table are typical values under rated operating condition.)



2. Incremental Encoder AMT103-V

ELECTRICAL

parameter	conditions/description	min	typ	max	units
power supply	VDD	3.6	5	5.5	V
current consumption	with unloaded output		6		mA
output high level		VDD-0.8			V
output low level			0.4		V
output current	CMOS sink/source per channel		2		mA
rise/fall time		30			ns

INCREMENTAL CHARACTERISTICS

parameter	conditions/description	min	typ	max	units
channels	quadrature A, B, and X index				
waveform	CMOS voltage square wave				
phase difference	A leads B for CCW rotation (viewed from front)	90			degrees
quadrature resolutions ¹	48, 96, 100, 125, 192, 200, 250, 256, 384, 400, 500, 512, 800, 1000, 1024, 2048				PPR
index ²	one pulse per 360 degree rotation				
accuracy		0.25			degrees
quadrature duty cycle {at each resolution}	256, 512, 1024, 2048 48, 96, 100, 125, 192, 200, 250, 384, 400, 500 800, 1000	49 47 43	50 50 50	51 53 56	%

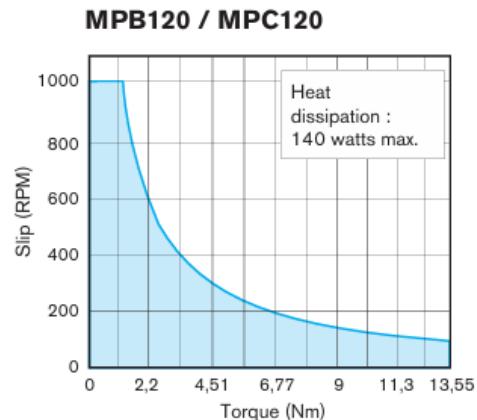
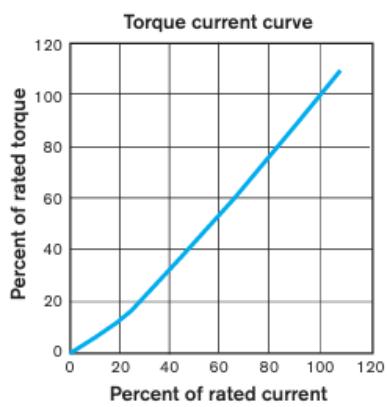
MECHANICAL

parameter	conditions/description	min	typ	max	units
motor shaft length		9			mm
motor shaft tolerance			NOM +0/-0.015		mm
weight	AMT102 AMT103		20,5 14,0		g
axial play				±0,3	mm
rotational speed (at each resolution)	192, 384, 400, 500, 800, 1000, 1024, 2048 48, 96, 100, 125, 200, 250, 256, 512		7500	RPM	
				15000	RPM

ENVIRONMENTAL

parameter	conditions/description	min	typ	max	units
operating temperature ¹		-40		100	°C
humidity	non-condensing			95	%
vibration	20-500 Hz, 1 hour on each XYZ			10	G
shock	11 ms, ±XYZ direction			50	G
RoHS	yes				

3. Warner Electric Magnetic Particle Clutches MPB120



Specifications

Models	Max. torque (Nm)	Drag torque (Nm)	Rated voltage (VDC)	Resistance (Ω)	Rated current (A)	Response zero force (ms)	Response with force (ms)	Inertia of output shaft (kgcm²)	Max. heat dissipation (W)	Max. speed (RPM)	Weight (kg)
MPC2M-6-24	0,2	0,044	24	92	0,261	8	4	0,0039	10	1800	0,454
MPC15M-12-24	1,7	0,044	24	80	0,302	25	9	0,043	20	1000	2,72
MPC70M-19-24	7,9	0,11	24	35	0,677	70	17	0,26	100	1000	7,71
MPC120M-19-24	13,6	0,22	24	33	0,742	90	25	1,1	140	1000	9,98

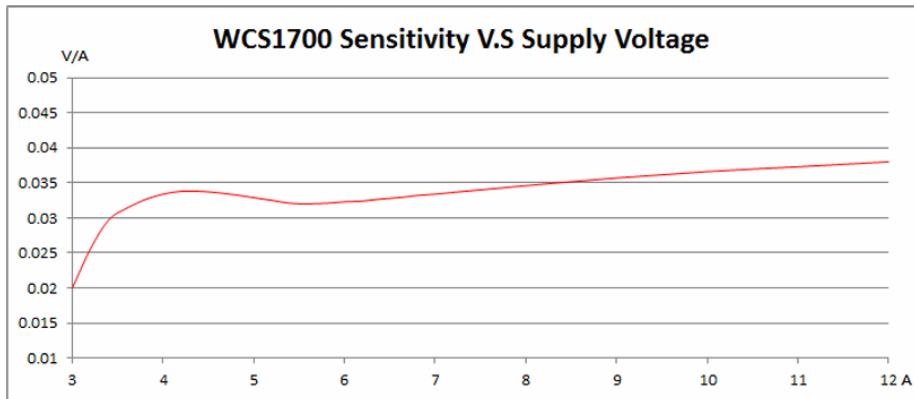
4. WCS1700 Hall Current Sensor

ABSOLUTE MAXIMUM RATING

Supply Voltage, Vdd ----- 14V
 Pass Through Wire Diameter ----- 9.0 mm
 Output Current Sink ----- 0.4mA
 Output Current Source ----- 2mA
 Basic Isolation Voltage ----- 4000V
 Operating Temperature Range
 Ta ----- -20°C to +125°C
 Storage Temperature Range
 Ts ----- -65°C to +150°C
 Power Dissipation Pd ----- 1 W

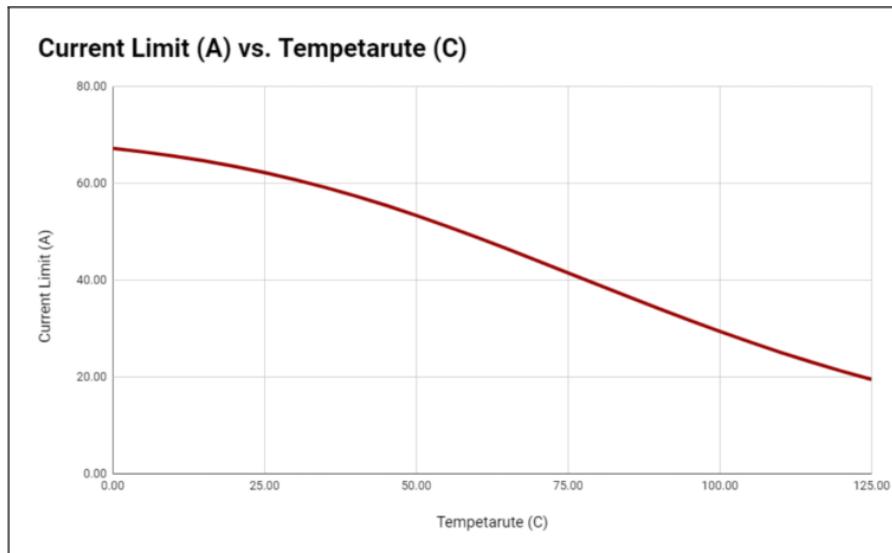
Electrical Characteristics: (T=+25°C, Vdd=5.0V)

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min	Typ	Max	Units
Supply Voltage	Vdd	—	3.0	—	12	V
Supply Current	I _{supply}	I _P = 0 A	—	3.5	6.0	mA
Zero Current Vout	V _O G	I _P = 0 A	2.4	2.5	2.6	V
Conductor Through Hole			—	9.0	—	mm
Sensitivity	WCS1700	I _P = +10 A	25	30	35	mV/A
Bandwidth	BW		—	23	—	kHz
Measurable Current Range	WCS1700	Vdd=5V (DC)	—	±70	—	A
		Vdd=5V (AC RMS)	—	50	—	
Temperature Drift	△Vout	I _P = 0 A	—	±0.5	—	mV/°C



5. Cytron MDD20A Motor Driver

No	Parameters	Min	Max	Unit
1	Power Input Voltage	6	30	V
2	Maximum Motor Current (Per channel)	Continuous	-	A
		Peak * ¹	-	A
3	Logic Input Voltage (PWM & DIR)	Low Level	0	0.8 V
		High Level	1.5	15 * ² V
4	PWM Frequency <i>(Output frequency is same as input frequency)</i>	Standard	DC	KHz
		Extended * ³	20	KHz



กราฟเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิของบอร์ดกับกระแสไฟฟ้า

ระบบควบคุมของ MDD20A ออกแบบให้ปรับค่าขีดจำกัดกระแสสูงสุดตามอุณหภูมิของบอร์ด เมื่อบอร์ดมีอุณหภูมิสูงขึ้น ระบบจะลดกระแสที่อนุญาตลงเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายต่อ MOSFETs ด้วยแนวทางนี้ MDD20A จะสามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยปรับตัวให้เข้ากับสภาพการทำงานจริงที่เปลี่ยนแปลงไป

วิธีการดำเนินการทดลอง

1. วัสดุ /อุปกรณ์ และเครื่องมือพิเศษ

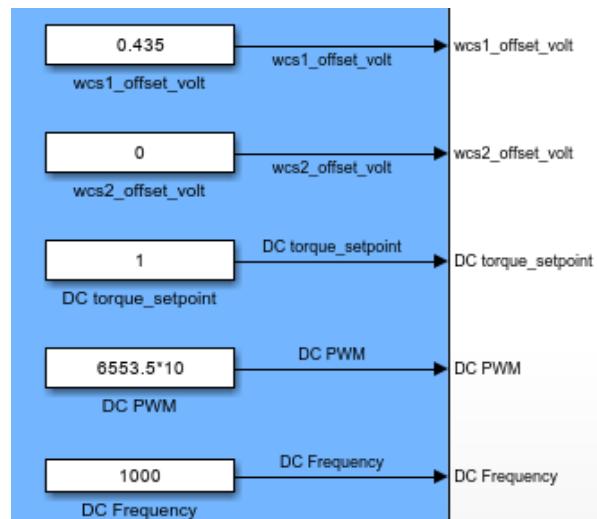
- 1.1 Nidec Components Geared DC Geared Motor, 12 V dc, 20 Ncm, 70 rpm, 6mm Shaft Diameter จำนวน 1 อัน
- 1.2 Incremental Encoder AMT103-V จำนวน 1 อัน
- 1.3 Warner Electric Magnetic Particle Clutches MPB120 จำนวน 1 อัน
- 1.4 WCS1700 Hall Current Sensor จำนวน 1 อัน
- 1.5 Cytron MDD20A Motor Driver จำนวน 1 อัน
- 1.6 Nucleo STM32G474RE พร้อมสายอัปโหลด จำนวน 1 ชุด
- 1.7 MotorXplorer จำนวน 1 ชุด - ฐานสามารถบรรจุอร์ดควบคุม, Breadboard, 3D-Print ใช้สำหรับการประกอบกับ DC Motor

2. ขั้นตอนการดำเนินงาน

2.1 การตั้งค่า parameter



2.2 การตั้งค่า matlab สำหรับการทดลอง brushed dc motor



wcs1_offset-volt คือการตั้งค่า offset ของ volt สำหรับ motor ตัวใหญ่

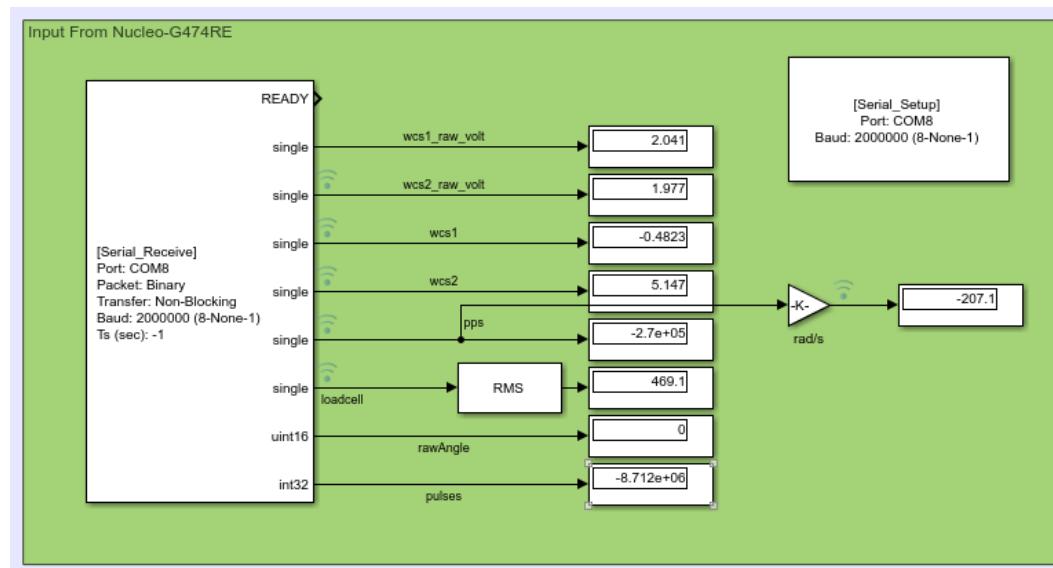
wcs2_offset-volt (ไม่สามารถใช้งานได้) คือการตั้งค่า offset ของ volt สำหรับ motor ตัวเล็ก

DC torque_setpoint (ไม่สามารถใช้งานได้) คือการตั้งค่าค่าแรงบิดสำหรับอุปกรณ์สร้างแรงบิด (motor ตัวใหญ่)

DC PWM ใช้สำหรับปรับความถี่ของ PWM เพื่อควบคุมมอเตอร์ตัวเล็ก

DC Frequency ใช้สำหรับปรับความถี่ในการสั่งงานของ motor

2.3 การตั้งค่าการอ่านค่าจาก matlab สำหรับการทดลอง brushed dc motor



wcs1_raw_volt คือค่ากระแสที่อ่านได้ก่อนทำการปรับค่า offset (ค่า raw)

wcs2_raw_volt คือค่ากระแสที่อ่านได้ก่อนทำการปรับค่า offset (ค่า raw)

wcs1 คือค่ากระแสของมอเตอร์ตัวใหญ่หลังจากปรับค่า offset (เนื่องมาจากการใช้กระแส ค่านี้จะใกล้เคียงศูนย์)

wcs2 คือค่ากระแสของมอเตอร์ตัวเล็กหลังจากปรับค่า offset (ค่าของตัวนี้ไม่สามารถปรับได้)

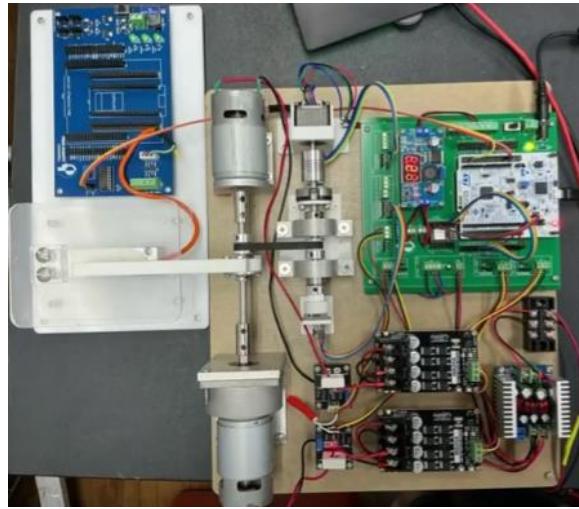
Pps คือค่าที่ได้จาก encoder และนำไปแปลงให้เป็นความเร็ว

Loadcell คือค่าที่ได้จาก loadcell ซึ่งค่าดังกล่าวผ่านการคำนวณ RMS เพื่อใช้งาน

Raw Angle และ pulse ไม่ได้มีบทบาทหรือถูกใช้ในชุดการทดลองนี้

2.4 การ Setup ชุดการทดลอง

2.4.1 แบบมีก้านไปกด loadcell



รูปชุดการทดลอง Brushed DC motor พร้อม loadcell

1. ทำการต่อ loadcell เข้ากับ stm32



2. ทำการแกะ stepper และ coupling ออกรูปตามรูป

3. เริ่มจ่ายไฟให้มอเตอร์

4. ปรับค่า PWM ตามลำดับ (เริ่มจาก 0%, 10%, 20%, ..., 100%) โดยทำการเปลี่ยนค่า PWM ทั้งหมด 11 ระดับ

5. สำหรับแต่ละค่า PWM:

○ บันทึกข้อมูลจาก Loadcell และ Current Sensor เป็นเวลา 30 วินาที

○ เก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่องและตรวจสอบความเสถียรของระบบ

โดยตั้งค่า Simulink ให้สามารถอ่านค่าได้แบบ real time

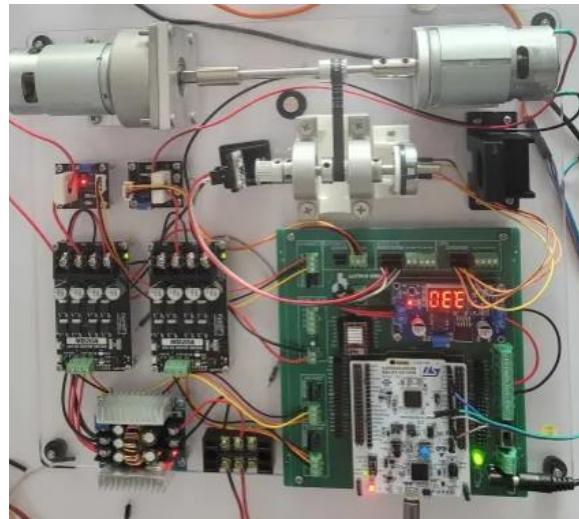


อ่านค่า stall torque ที่กดลง loadcell



อ่านค่า current ของ motor ตัวเล็ก

2.4.2 แบบไม่มีก้านไปกด loadcell



รูปชุดการทดลอง Brushed DC motor

1. ทำการแกะแขนกดออก
2. เริ่มจ่ายไฟให้มอเตอร์
3. ปรับค่า PWM ตามลำดับ (เริ่มจาก 0%, 10%, 20%, ..., 100%) โดยทำการเปลี่ยนค่า PWM ทั้งหมด 11 ระดับ
4. สำหรับแต่ละค่า PWM:

- บันทึกค่าความเร็วรอบ (RPM)
- กระแส (Current), และแรงดันไฟฟ้า (Voltage) เป็นเวลา 30 วินาทีโดยตั้งค่า Simulink ให้สามารถอ่านค่าได้แบบ real time



ทำการเก็บค่า rad/s



ทำการเก็บค่า current

2.5 การออกแบบการทดลอง

2.5.1 ตอนที่ 1 ทดลอง Brushed DC Motor หากมีก้านไปกด loadcell เพื่อวิเคราะห์หา Motor Characteristic

2.5.1.1 ทำการทดลองโดยเพิ่มค่า PWM เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง PWM และ Stall Torque, Stall Current, Power (max), %Efficiency

2.5.1.2 ทำการทดลองว่าความถี่มีผลต่อแรงที่กระทำต่อ Loadcell หรือไม่โดยที่ตั้งค่าให้ PWM มีค่า 65535 ตลอดเวลา และความถี่มีความสัมพันธ์อย่างไรกับ Torque, Current, Power, %Efficiency

2.5.2 ตอนที่ 2 ทดลอง Brushed DC Motor หากไม่มีก้านไปกด loadcell เพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร และพุทธิกรรมของมอเตอร์

2.5.2.1 ทำการทดลองโดยเพิ่มค่า PWM เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง PWM และ RPM , wcs, Torque, Power, % Efficiency

2.5.2.2 ทำการทดลองโดยเพิ่มค่า PWM เพื่อดูพุทธิกรรมของมอเตอร์

2.5.3 ตอนที่ 3 ทดลองการควบคุมมอเตอร์ด้วยการใช้ H-Bridge Drive ใน mode ต่าง ๆ และดูพุทธิกรรมของมอเตอร์

2.5.3.1 ทดลองควบคุมมอเตอร์ด้วย Sign-Magnitude Mode และปรับค่า DutyCycle และทำการดูพุทธิกรรมของมอเตอร์ พร้อมบอกข้อดีข้อเสียของโหมดนี้

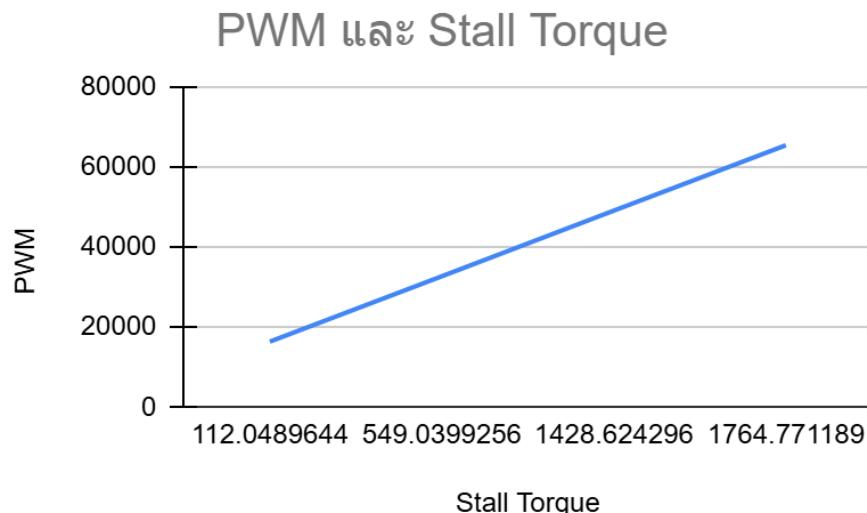
2.5.3.2 ทดลองควบคุมมอเตอร์ด้วย Locked Anti-Phase Mode และปรับค่า DutyCycle และทำการดูพุทธิกรรมของมอเตอร์ พร้อมบอกข้อดีข้อเสียของโหมดนี้

ผลการทดลอง

- ทดลอง Brushed DC Motor หากมีก้านไปกด loadcell ใน PWM ต่าง ๆ เพื่อวิเคราะห์หา Motor Characteristic

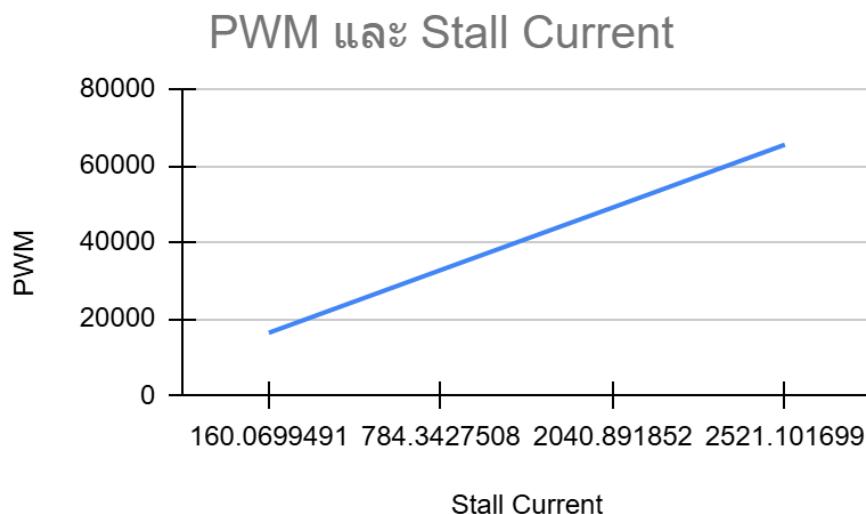
1.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง PWM และ Stall Torque, Stall Current, Power (max), %Efficiency

1.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง PWM และ Stall Torque



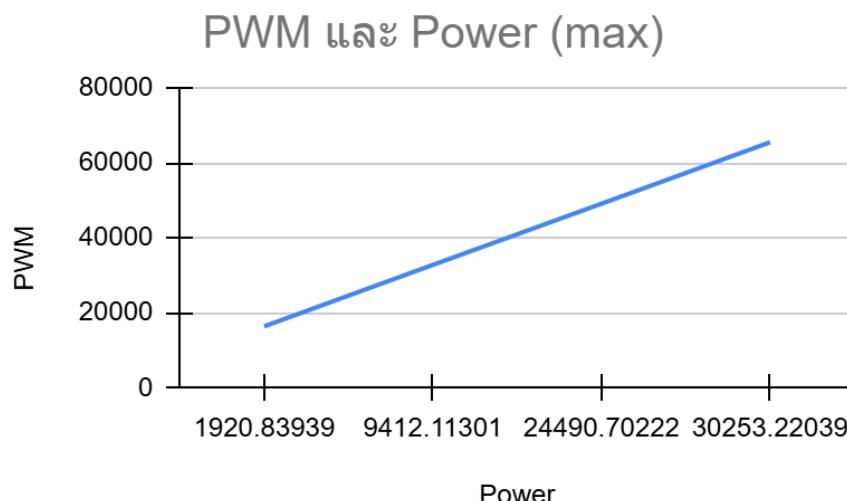
กราฟนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PWM กับ Stall Torque โดยสามารถสังเกตได้ว่า เมื่อค่า PWM เพิ่มขึ้น ค่า Stall Torque ก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งหมายความว่า การปรับเพิ่มค่า PWM ส่งผลให้มอเตอร์สามารถสร้างแรงบิดได้มากขึ้นอย่างชัดเจน แสดงถึงความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างสองตัวแปรนี้

1.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง PWM และ Stall Current



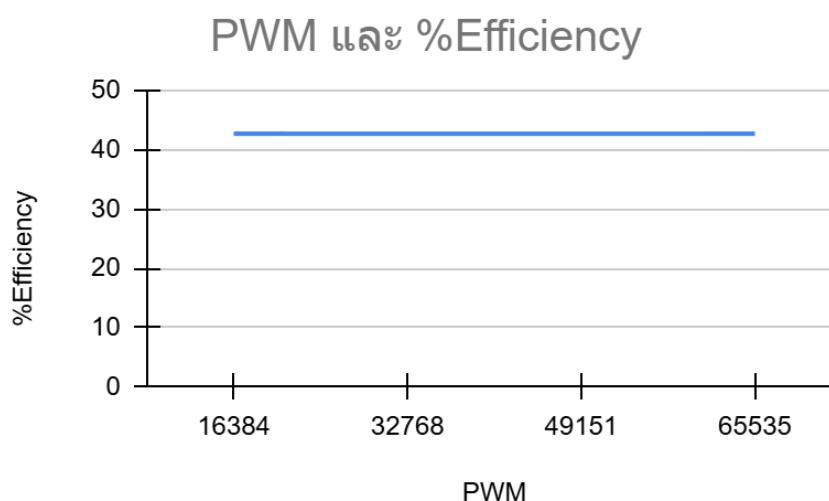
กราฟนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PWM กับ Stall Current โดยสามารถสังเกตได้ว่า เมื่อค่า PWM เพิ่มขึ้น ค่า Stall Current ก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งหมายความว่า การปรับเพิ่มค่า PWM ส่งผลให้มอเตอร์สามารถสร้างกระแสได้มากขึ้นอย่างชัดเจน และแสดงถึงความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างสองตัวแปรนี้

1.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง PWM และ Power (max)



กราฟนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PWM กับ Power (max) โดยสามารถสังเกตได้ว่า เมื่อค่า PWM เพิ่มขึ้น ค่า Power (max) ก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งหมายความว่า การปรับเพิ่มค่า PWM ส่งผลให้ระบบสามารถผลิตพลังงานสูงสุดได้มากขึ้นอย่างชัดเจน และแสดงถึงความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างสองตัวแปรนี้

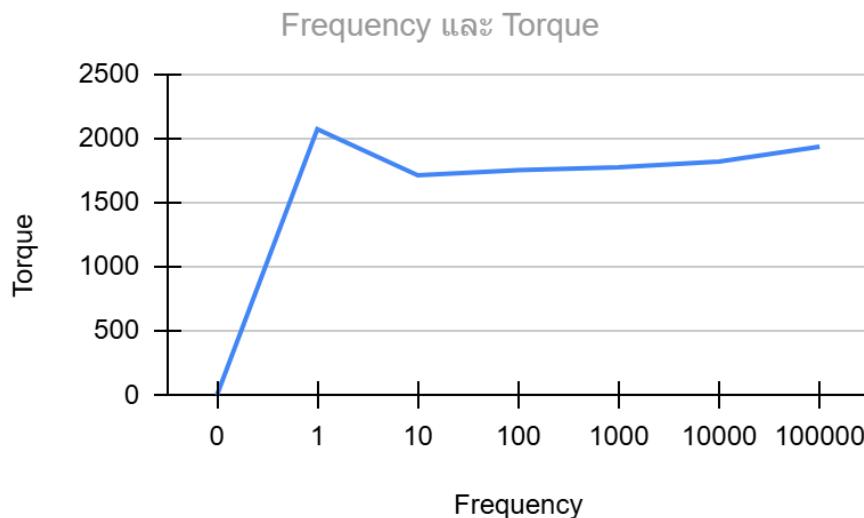
1.1.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง PWM และ %Efficiency



กราฟนี้แสดงว่า %Efficiency ของระบบยังคงที่ในระดับประมาณ 42.73% แม้ว่าค่า PWM จะเพิ่มขึ้นหรือลดลง ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าประสิทธิภาพของระบบไม่ได้ขึ้นอยู่กับการปรับค่า PWM

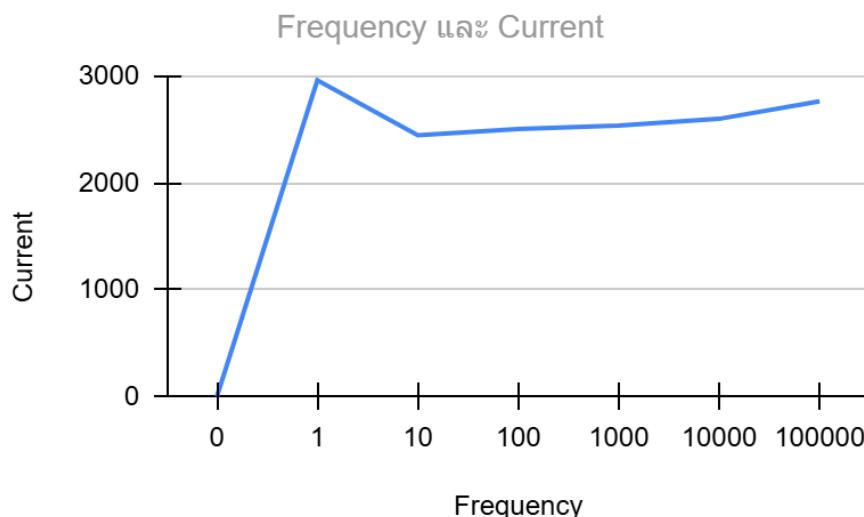
1.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Frequency และ Torque, Current, Power, %Efficiency

1.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Frequency และ Torque



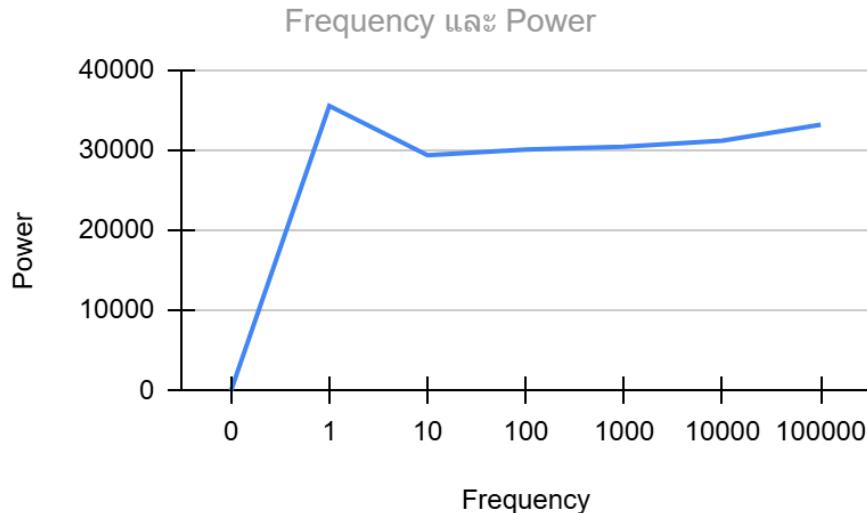
กราฟนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Frequency) และแรงบิด (Torque) จากข้อมูลในกราฟจะเห็นว่าแรงบิดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความถี่อยู่ในช่วงเริ่มต้น และค่อยๆ ทรงตัวเมื่อความถี่เพิ่มสูงขึ้น

1.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Frequency และ Current



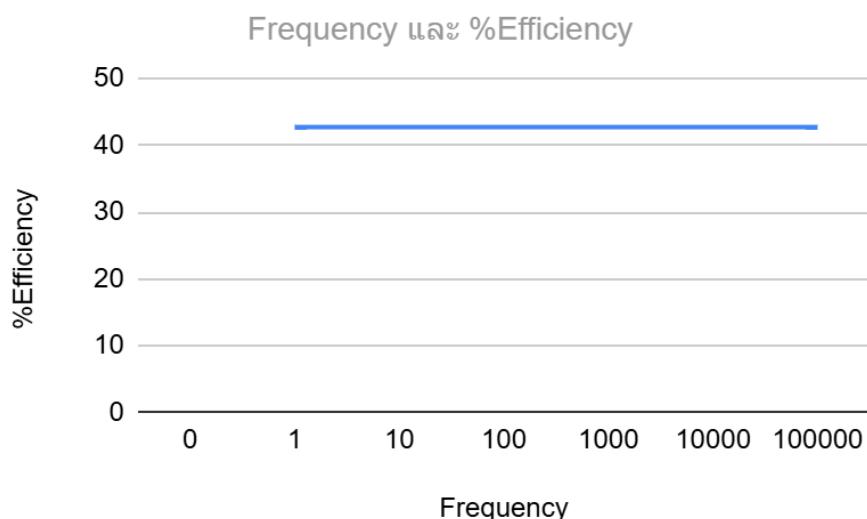
กราฟนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Frequency) และ Current จากข้อมูลในกราฟจะเห็นว่ากระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความถี่อยู่ในช่วงเริ่มต้น และค่อยๆ ทรงตัวเมื่อความถี่เพิ่มสูงขึ้น

1.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Frequency และ Power



กราฟนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Frequency) และ Power จากข้อมูลในกราฟจะเห็นว่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความถี่อยู่ในช่วงเริ่มต้น และค่อยๆ ทรงตัวเมื่อความถี่เพิ่มสูงขึ้น

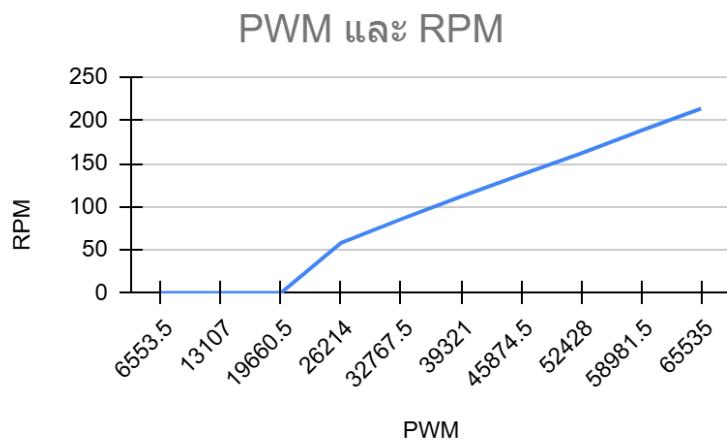
1.2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Frequency และ %Efficiency



กราฟนี้แสดงว่า %Efficiency ของระบบยังคงที่ในระดับประมาณ 42.73% แม้ว่าค่าความถี่ (Frequency) จะเพิ่มขึ้นหรือลดลง ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าประสิทธิภาพของระบบไม่ได้ขึ้นอยู่กับการปรับค่าความถี่ (Frequency)

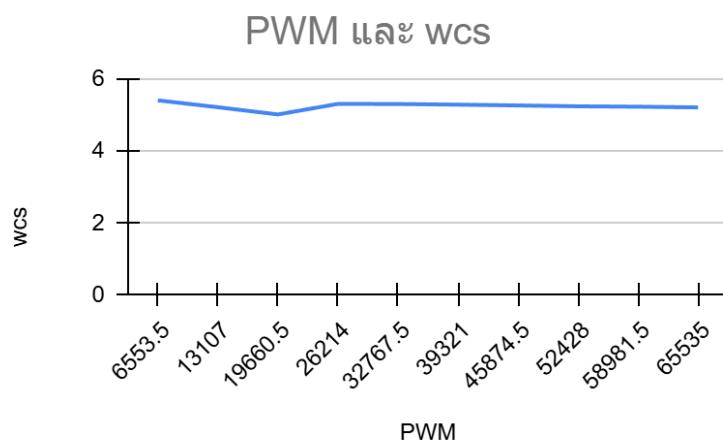
2. การทดลองหากไม่มีก้านไปกด loadcell ใน PWM ต่าง ๆ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง PWM และ RPM , wcs, Torque, Power, % Efficiency และพฤติกรรมของมอเตอร์

2.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง PWM และ RPM



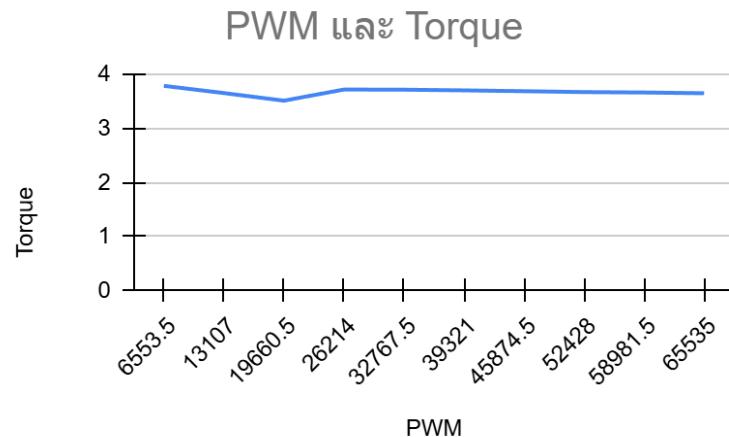
กราฟนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PWM และ RPM จากข้อมูลในกราฟจะเห็นว่ามอเตอร์ยังไม่เริ่มหมุนเมื่อค่า PWM ต่ำกว่า 19660.5 เมื่อจากยังไม่สามารถเอาชนะแรงเสียดทานเริ่มต้นได้ อย่างไรก็ตาม มอเตอร์จะเริ่มหมุนเมื่อค่า PWM อยู่ที่ประมาณ 26214 หลังจากจุดนี้ เมื่อเพิ่มค่า PWM ความเร็วรอบ (RPM) จะเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอในลักษณะเชิงเส้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบมีการตอบสนองเชิงเส้นต่อการควบคุม PWM หลังจากผ่านจุดเริ่มหมุนแล้ว

2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง PWM และ wcs



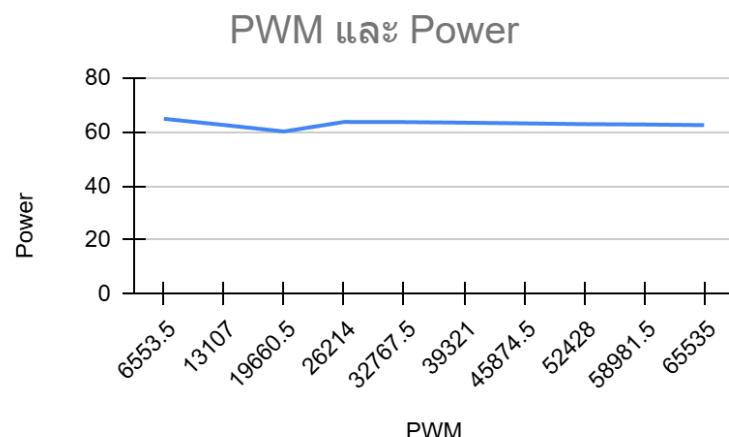
กราฟนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PWM และ WCS จากข้อมูลในกราฟจะเห็นว่าค่า WCS ค่อนข้างคงที่เมื่อค่า PWM เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าในระบบนี้ การเปลี่ยนแปลงของ PWM ไม่ค่อยมีผลกระทบต่อค่า WCS หรือระบบอาจมีการควบคุมที่ช่วยรักษาค่า WCS ให้อยู่ในระดับที่ใกล้เคียงเดิมตลอดช่วงการเปลี่ยนแปลงของ PWM

2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง PWM และ Torque



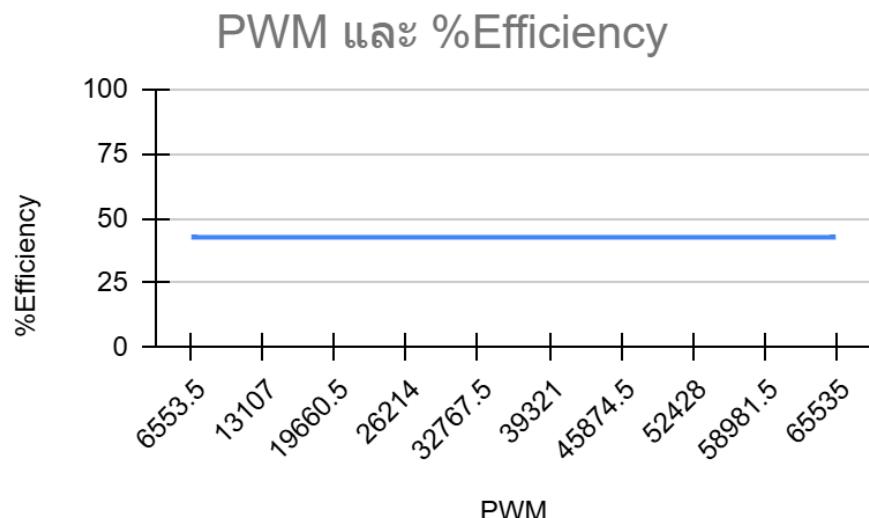
กราฟนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PWM และ Torque จากข้อมูลในกราฟจะเห็นว่าค่า Torque ค่อนข้างคงที่เมื่อค่า PWM เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าในระบบนี้ การเปลี่ยนแปลงของ PWM ไม่ค่อยมีผลกระทบต่อค่า Torque หรือระบบอาจมีการควบคุมที่ช่วยรักษาค่า Torque ให้อยู่ในระดับที่ใกล้เคียงเดิมตลอดช่วงการเปลี่ยนแปลงของ PWM

2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง PWM และ Power



กราฟนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PWM และ Power จากข้อมูลในกราฟจะเห็นว่าค่า Power ค่อนข้างคงที่เมื่อค่า PWM เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าในระบบนี้ การเปลี่ยนแปลงของ PWM ไม่ค่อยมีผลกระทบต่อค่า Power หรือระบบอาจมีการควบคุมที่ช่วยรักษาค่า Power ให้อยู่ในระดับที่ใกล้เคียงเดิม ตลอดช่วงการเปลี่ยนแปลงของ PWM

2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง PWM และ % Efficiency



กราฟนี้แสดงว่า %Efficiency ของระบบยังคงที่ในระดับประมาณ 42.73% แม้ว่าค่า PWM จะเพิ่มขึ้นหรือลดลง ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าประสิทธิภาพของระบบไม่ได้ขึ้นอยู่กับการปรับค่า PWM

3. การควบคุมมอเตอร์ด้วยการใช้ H-Bridge Drive ใน mode ต่าง ๆ

H-Bridge เป็นวงจรที่ใช้ควบคุมการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) โดยสามารถควบคุมทิศทางและความเร็วได้อย่างมีประสิทธิภาพ วงจรนี้ประกอบด้วยสวิตซ์ 4 ตัว (มักเป็น MOSFET หรือทรานซิสเตอร์) ที่ทำงานร่วมกันเป็นสะพานเชื่อมไฟฟ้าเพื่อควบคุมการไหลของกระแส ซึ่งเมื่อกระแสไฟลัลในทิศทางหนึ่ง มอเตอร์จะหมุนไปในทิศทางหนึ่ง กลับกันหากกระแสไฟลัลทิศทาง มอเตอร์จะหมุนกลับด้าน และสำหรับ Cytron MDD20A Motor Driver ซึ่งเป็นโมดูลควบคุมมอเตอร์แบบ H-Bridge ที่รองรับการควบคุมทั้งความเร็วและทิศทางด้วยสัญญาณ PWM และ DIR ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.1 Sign-Magnitude Mode

ในโหมด Sign-Magnitude การควบคุมความเร็วและทิศทางของมอเตอร์จะถูกแยกจากกันโดย PWM (Pulse Width Modulation) มีหน้าที่ในการใช้ปรับความเร็วของมอเตอร์ โดยค่าความกว้างของ

Duty Cycle จะเป็นตัวกำหนดความเร็วในการหมุน และ DIR (Direction) มีหน้าที่ในการใช้ควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ หาก DIR อยู่ในสถานะ HIGH (1) มอเตอร์จะหมุนไปข้างหน้า และหาก DIR อยู่ในสถานะ LOW (0) มอเตอร์จะหมุนโดยหลัง

พฤติกรรมของมอเตอร์ในโหมดนี้คือ มอเตอร์จะหยุดหมุนเมื่อ PWM มีค่าเท่ากับ 0% หรือก็คือไม่มีพลังงานจ่ายให้กับมอเตอร์ และตัวnummอเตอร์สามารถปรับความเร็วได้ตั้งแต่ 0% ถึง 100% ของค่า Duty Cycle

ข้อดี : โหมดนี้ใช้งานง่ายและเข้าใจได้ไม่ยาก เหมาะสำหรับงานที่ไม่ต้องการการตอบสนองที่รวดเร็ว

ข้อเสีย : การเปลี่ยนทิศทางอาจมีความล่าช้าเล็กน้อย เนื่องจากต้องรอสัญญาณ DIR เปลี่ยนสถานะก่อน

3.2 Locked Anti-Phase Mode

ในโหมด Locked Anti-base จะมีการใช้สัญญาณ PWM เพียงช่องเดียวในการควบคุมทั้งความเร็วและทิศทางของมอเตอร์ หาก Duty Cycle ของ PWM มีค่าอยู่ที่ 50% มอเตอร์จะหยุดหมุน และหาก Duty Cycle ของ PWM มีค่ามากกว่า 50% มอเตอร์จะหมุนไปข้างหน้า และหาก Duty Cycle ของ PWM มีค่าน้อยกว่า 50% มอเตอร์จะหมุนโดยหลัง

พฤติกรรมของมอเตอร์ในโหมดนี้คือ หากต้องการเปลี่ยนทิศทางของมอเตอร์จะสามารถทำได้อย่างรวดเร็วเพียงแค่เปลี่ยนค่าของ Duty Cycle และหากต้องการให้มอเตอร์หยุดหมุน เพียงแค่เปลี่ยนค่า Duty Cycle ของ PWM ให้มีค่าอยู่ที่ 50% มอเตอร์ก็จะหยุดหมุนทันที

ข้อดี : มีการตอบสนองที่เร็วและเหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการความแม่นยำสูง สามารถใช้โหมดเดียวเพื่อควบคุมทั้งความเร็วและทิศทาง

ข้อเสีย : มีการสูญเสียพลังงานมากกว่า เนื่องจาก Switching Loss ในการเปลี่ยนสถานะบ่อย อาจมีความซับซ้อนสำหรับผู้ที่เพิ่งเริ่มต้นใช้งาน

3.3 การเปรียบเทียบโหมดระหว่าง Sign-Magnitude Mode กับ Locked Anti-Phase Mode

คุณสมบัติ	Sign-Magnitude Mode	Locked Anti-Phase Mode
การควบคุมทิศทาง	ใช้ DIR	ใช้ PWM
การควบคุมความเร็ว	ใช้ PWM	ใช้ PWM
การตอบสนอง	ช้ากว่า	รวดเร็ว
การใช้พลังงาน	ประหยัดกว่า	ใช้พลังงานมากกว่า

ความซับซ้อน	น้อยกว่า	มากกว่า
ความแม่นยำ	ปานกลาง	สูง

ตารางเปรียบเทียบ Sign-Magnitude Mode กับ Locked Anti-Phase Mode

3.4 พฤติกรรมของมอเตอร์ที่ PWM ต่างๆ



กราฟนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PWM และ มอเตอร์ จากข้อมูลในกราฟจะเห็นว่ามอเตอร์ยังไม่เริ่มหมุนเมื่อค่า PWM ต่ำกว่า 19660.5 อย่างไรก็ตาม มอเตอร์จะเริ่มหมุนเมื่อค่า PWM อยู่ที่ประมาณ 26214 และจะหมุนต่อไปเรื่อยๆ หลังจากจุดนี้เป็นต้นไป

สรุป อกิจกรรม และข้อเสนอแนะ

1. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าการปรับค่า PWM ส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมของมอเตอร์ โดยการเพิ่มค่า PWM ทำให้แรงบิด (Stall Torque) และกระแสไฟฟ้า (Stall Current) เพิ่มขึ้น เนื่องจากพลังงานที่จ่ายเข้าสู่มอเตอร์มีมากขึ้น ทำให้มอเตอร์สร้างกำลังงาน (Power) ได้สูงขึ้นด้วย อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการทำงาน (%Efficiency) ของมอเตอร์ยังคงอยู่ในระดับประมาณ 42.73% ไม่เปลี่ยนแปลง แม้ว่าค่า PWM จะเพิ่มขึ้นหรือลดลง ซึ่งอาจเป็นข้อจำกัดของมอเตอร์ในการแปลงพลังงานไฟฟ้าให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

ในส่วนของความถี่ (Frequency) พบว่าการเพิ่มความถี่ช่วยเพิ่มแรงบิดและกำลังงานในช่วงแรก แต่ค่าตั้งกล่าวจะเริ่มคงที่เมื่อความถี่สูงขึ้น สำหรับประสิทธิภาพของระบบยังคงไม่เปลี่ยนแปลง แม้ว่าจะปรับเพิ่มหรือลดค่าความถี่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างสม่ำเสมอภายใต้ค่าความถี่ที่หลากหลาย

2. การอภิปรายผล

ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าค่า PWM และความถี่ (Frequency) มีบทบาทสำคัญต่อพฤติกรรมของมอเตอร์ การเพิ่มค่า PWM ทำให้มอเตอร์สร้างแรงบิดและกำลังงานได้มากขึ้น แต่ประสิทธิภาพของระบบ (% Efficiency) ยังคงไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งแสดงถึงข้อจำกัดของมอเตอร์ในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน แม้ว่าจะมีการปรับค่า พลังงานที่จ่ายเข้าสู่ระบบ

ในด้านของความถี่ พบร่วมกันของการเพิ่มความถี่ช่วยให้มอเตอร์ตอบสนองได้เร็วขึ้นและสร้างแรงบิดและกำลังงานได้มากขึ้นในช่วงแรก ก่อนที่ค่าดังกล่าวจะเข้าสู่ความคงตัว ซึ่งเป็นผลจากขีดจำกัดของระบบภายใน H-Bridge Drive ที่ออกแบบมาเพื่อรักษาความเสถียรของมอเตอร์

สำหรับ H-Bridge Drive Mode แต่ละโหมด เช่น Sign-Magnitude และ Locked Anti-Phase มีลักษณะเด่นที่แตกต่างกัน โดย Sign-Magnitude ใช้งานง่ายและเหมาะสมสำหรับงานทั่วไป ในขณะที่ Locked Anti-Phase เหมาะสำหรับงานที่ต้องการการตอบสนองที่รวดเร็วและการควบคุมที่แม่นยำ

นอกจากนี้ การทดลองยังชี้ให้เห็นถึงข้อจำกัดบางประการ เช่น ประสิทธิภาพที่ไม่เพิ่มขึ้นตามการปรับค่า PWM และการตอบสนองที่จำกัดในช่วงความถี่สูงสุด ซึ่งควรนำไปพิจารณาในการเลือกใช้งานในระบบที่ต้องการการปรับเปลี่ยนค่าอย่างต่อเนื่องหรือต้องการประสิทธิภาพสูงในสถานการณ์ที่หลากหลาย

3. ข้อเสนอแนะ

- ควรเลือกโหมดการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เหมาะสมกับลักษณะงาน เช่น เลือกใช้ Micro-Step ในงานที่ต้องการความละเอียดสูง หรือ Full-Step สำหรับงานที่เน้นความเร็ว
- การปรับค่า PWM หรือความถี่ควรทำอย่างระมัดระวัง โดยเฉพาะใน Stepper Motor เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิด Loss of Step
- ควรตรวจสอบและบำรุงรักษาอุปกรณ์ เช่น แบริ่ง (Bearing) และส่วนประกอบที่เคลื่อนที่ เพื่อลดแรงเสียดทานที่อาจส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของผลการทดลอง
- ควรทำการทดลองอ้อมมาให้ดีและพร้อมก่อนที่จะนำมาให้ผู้เรียนทำการทดลอง ไม่ใช่การเช็คแบบทั่ว ๆ ไป แต่ต้องเช็คให้มั่นใจแล้วว่าสิ่งที่จะส่งมอบให้ จะไม่ทำให้ผู้เรียนรู้สึกเดือดร้อนไปด้วย

อ้างอิง

1. [HG37-060-AA-00 | Nidec Components Geared DC Geared Motor, 12 V dc, 20 Ncm, 70 rpm, 6mm Shaft Diameter | RS](#)
2. [TCS_catGB02: TCS_catGB.qxp.qxd](#)
3. [20Amp 6V-30V DC Motor Driver \(2 Channels\)](#)
4. [WCS1700 Datasheet\(PDF\) - Winson Semiconductor Corp.](#)
5. [AMT10 Series Datasheet - Modular | Incremental | Same Sky](#)

Stepper Motor

จุดประสงค์

- เพื่อให้สามารถอธิบายหลักการทำงานของ Stepper Motor ได้
- เพื่อให้สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของ Speed เมื่อ Frequency ของสัญญาณที่จ่ายเข้า Stepper Motor เปลี่ยนแปลงไป
- เพื่อให้สามารถอธิบายหลักการทำงานของรูปแบบการไดรฟ์แบบ Full-Step และ Half-Step ได้ ว่าส่งผลต่อการควบคุมความเร็วและตำแหน่งของ Stepper มอเตอร์อย่างไร
- เพื่อให้สามารถอธิบายกระบวนการ Signal Conditioning และ Signal Processing ตั้งแต่การอ่านค่า การ Calibrate Sensor การจัดการข้อมูล และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์กับแรงดันไฟฟ้าที่อ่านจาก Hall Current Sensor รวมถึงกระบวนการ Unwrap ค่า
- เพื่อให้สามารถพัฒนาโปรแกรมด้วย MATLAB และ Simulink เพื่อรับค่าและส่งคำสั่งร่วมกับบอร์ด Nucleo STM32G474RE พร้อมแสดงผลสัญญาณ Output (ความเร็วเชิงมุมและกระแสไฟฟ้าในหน่วย SI) แบบ Real-Time ผ่าน Data Inspector ของ MATLAB Simulink

สมมติฐาน

- ความเร็วของ Stepper Motor เพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ของสัญญาณเพิ่มขึ้น จนถึงจุดที่มอเตอร์เริ่ม Loss Step
- Micro-Step ให้ความละเอียดสูงสุด แต่ Full-Step ให้ความเร็วสูงสุด

ตัวแปร

- ตอนที่ 1 ศึกษาผลกระทบของความถี่ต่อ Stepper Motor (Loss of Step)
 - ตัวแปรต้น : frequency ความถี่ (Hz)
 - ตัวแปรตาม : ความเร็วเชิงมุม (RPM) และตำแหน่งมุม (°)
 - ตัวแปรควบคุม : แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟ, Stepper Drive Mode
- ตอนที่ 2 การเปรียบเทียบ Stepper Drive Modes
 - ตัวแปรต้น : Stepper Drive Mode
 - ตัวแปรตาม : ความละเอียด (มม/Step) และความเร็วเชิงมุม (RPM)
 - ตัวแปรควบคุม : ความถี่, แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟ

นิยามคัพท์เฉพาะ

1. Stepper Motor

มอเตอร์ชนิดหนึ่งที่ทำงานโดยการหมุนในลักษณะเป็นขั้น (Step) แต่ละขั้นมีมุกการหมุนที่แน่นอน สามารถควบคุมตำแหน่งและความเร็วได้อย่างแม่นยำโดยไม่จำเป็นต้องใช้ระบบเซนเซอร์วัดตำแหน่ง

2. Loss of Step

การสูญเสียตำแหน่งที่เกิดขึ้นเมื่อมอเตอร์ไม่สามารถหมุนไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้ เนื่องจากแรงบิดไม่เพียงพอหรือเกิดการทำงานที่ไม่สัมพันธ์กับสัญญาณควบคุม

3. Micro-stepping

เทคนิคการควบคุม stepper motor โดยการแบ่งหนึ่ง full step ออกเป็นหลายขั้นเล็กๆ เพื่อเพิ่มความละเอียดและความราบรื่นของการหมุน

4. Full-Step Drive

รูปแบบการควบคุม stepper motor ที่มอเตอร์หมุนทีละ full step โดยขาด漉จะถูกกระตุ้นทีละคู่ในเวลาที่กำหนด

5. Half-Step Drive

รูปแบบการควบคุม stepper motor ที่มอเตอร์หมุนทีละครึ่งของ full step โดยขาด漉จะถูกกระตุ้นทึ้งแบบเดียวและแบบคู่สลับกัน เพิ่มความละเอียดของตำแหน่งการหมุน

6. Load Torque

แรงบิดที่เกิดจากโหลดหรือแรงต้านภายนอกที่กระทำต่อมอเตอร์

7. Signal Conditioning

กระบวนการปรับเปลี่ยนสัญญาณจากเซนเซอร์หรือแหล่งกำเนิดให้เหมาะสมกับการประมวลผล เช่น การกรองสัญญาณ (Filtering) หรือการขยายสัญญาณ (Amplification)

8. Signal Processing

การประมวลผลและวิเคราะห์สัญญาณ เช่น การแปลงข้อมูล การกรอง หรือการวิเคราะห์เชิงตัวเลข เพื่อดึงข้อมูลที่เป็นประโยชน์จากสัญญาณดิบ

9. Hall Current Sensor

เซนเซอร์ที่ใช้วัดกระแสไฟฟ้าผ่านการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า โดยไม่จำเป็นต้องเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้าโดยตรง

10. Unwrap

กระบวนการปรับปรุงข้อมูลมุ่งเพื่อของสัญญาณให้ต่อเนื่อง เพื่อขัดความไม่ต่อเนื่องที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงมุมไฟมากกว่า 360 องศาหรือ 2π เรเดียน

11. Torque Margin

แรบบิດสำรองที่เหลืออยู่เมื่อ stepper motor ทำงาน โดยไม่เกิด loss of step

12. Stability of Motion

ความราบรื่นและความคงที่ของการเคลื่อนไหวของ stepper motor ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพและความแม่นยำในการทำงาน

13. Speed

ความเร็วเชิงมุมของ Stepper Motor ที่สามารถวัดได้ในหน่วยรอบต่อนาที (Revolutions Per Minute, RPM) หรือเรเดียนต่อวินาที (rad/s) ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณควบคุมและการตั้งค่า step

14. Frequency

ความถี่ของพัลส์หรือสัญญาณควบคุมที่จ่ายเข้า Stepper Motor มีหน่วยเป็นเอิร์ตซ์ (Hz) เป็นตัวกำหนดจำนวน step ที่มอเตอร์หมุนได้ในหนึ่งวินาที และส่งผลต่อความเร็วของมอเตอร์โดยตรง

15. Calibrate Sensor

กระบวนการปรับตั้งค่าเซนเซอร์ให้ทำงานได้อย่างแม่นยำและตรงกับค่าที่วัดจริงในสภาพแวดล้อมที่กำหนด โดยการเปลี่ยนค่าที่อ่านได้กับค่ามาตรฐานหรือค่าจริง

นิยามเชิงปฏิบัติการ

1. Stepper Motor

มอเตอร์ชนิดหนึ่งที่ทำงานโดยการหมุนเป็นขั้น (Step) โดยแต่ละขั้นมีมุกการหมุนที่แน่นอน สามารถควบคุมตำแหน่งและความเร็วได้อย่างแม่นยำ

2. Loss of Step

การสูญเสียตำแหน่งที่เกิดขึ้นเมื่อมอเตอร์ไม่สามารถหมุนไปยังตำแหน่งที่กำหนดได้ เนื่องจากแรงบิดไม่เพียงพอหรือสัญญาณควบคุมไม่สัมพันธ์กับการทำงานของมอเตอร์

3. Micro-stepping

เทคนิคการควบคุม stepper motor โดยแบ่งหนึ่ง full step ออกเป็นหลายขั้นเล็ก ๆ เพื่อเพิ่มความละเอียดและลดแรงกระชากระหว่าง step

4. Full-Step Drive

การควบคุม stepper motor ที่มอเตอร์หมุนทีละ full step โดยจะตัดความในลำดับที่แน่นอน

5. Half-Step Drive

การควบคุม stepper motor ที่มอเตอร์หมุนทีละครึ่งของ full step โดยจะตัดความทั้งแบบเดียวและแบบคู่ในลำดับที่กำหนด

6. Load Torque

แรงบิดจากโหลดที่กระทำต่อมอเตอร์ ซึ่งอาจเกิดจากน้ำหนักหรือแรงเสียดทานในระบบ

7. Signal Conditioning

การปรับเปลี่ยนสัญญาณที่รับได้จากเซนเซอร์เพื่อให้เหมาะสมกับการประมวลผล เช่น การกรองสัญญาณหรือการขยายสัญญาณ

8. Signal Processing

การประมวลผลสัญญาณที่รับได้ เช่น การกรอง การแปลงข้อมูล หรือการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เพื่อหาข้อมูลเชิงลึก

9. Hall Current Sensor

เซนเซอร์ที่วัดกระแสไฟฟ้าผ่านสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการกระแสไฟ โดยไม่ต้องเชื่อมต่อกับวงจรไฟฟ้าโดยตรง

10. Unwrap

กระบวนการปรับข้อมูลมุ่งเพื่อสัญญาณให้ต่อเนื่อง เพื่อจัดความไม่ต่อเนื่องที่เกิดจากการเปลี่ยนมุม
เฟسمากกว่า 360 องศาหรือ 2π เรเดียน

11. Speed

ความเร็วเชิงมุมของ stepper motor ที่วัดได้ในหน่วยรอบต่อนาที (RPM)

12. Frequency

ความถี่ของพัลส์หรือสัญญาณควบคุมที่จ่ายเข้า stepper motor (Hz) ซึ่งกำหนดจำนวน step ที่มอเตอร์
หมุนได้ในหนึ่งวินาที

13. Calibrate Sensor

กระบวนการปรับตั้งค่าเซนเซอร์ให้วัดค่าได้อย่างถูกต้องและตรงกับค่าจริง เช่น การปรับค่า offset หรือ
การซัดเบี้ยค่าที่ผิดพลาดจากอุณหภูมิ

14. Torque Margin

แรงบิดสำรองที่มอเตอร์ยังสามารถสร้างได้โดยไม่เกิด loss of step

15. Stability of Motion

ความราบรื่นและความคงที่ของการหมุนของ stepper motor ซึ่งมีผลต่อความแม่นยำและประสิทธิภาพ
ในการทำงาน

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. RS PRO Hybrid, Permanent Magnet Stepper Stepper Motor, 2.8 V, 5mm Shaft Diameter

General Specifications

Stepper Motor Type	Hybrid, Permanent Magnet Stepper
Step Angle	1.8°
Step Angle Accuracy (Full Step, No Load)	±5%
Holding Torque	0.22Nm
Detent Torque	72mNm
Output Speed	186rpm
Number of Pole Pairs	1
Applications	Floppy disk drives, flatbed scanners, computer printers, plotters, slot machines
Number Of Leads	4

Electrical Specifications

Voltage Rating	2.8V
Current Per Phase	1.33A
Number Of Wires	4
Winding Arrangement	Bipolar; Parallel; Series; Unipolar; Unparallel
Resistance Per Phase	2.1Ohm
Resistance Accuracy	±10%
Inductance Per Phase	4.2mH
Inductance Accuracy	±20%
Rotor Inertia	35g-cm ²
Insulation Resistance	100MOhm min. 500VDC
Dielectric Strength	500VAC for one minute
Insulation Class	B

Mechanical Specifications

Shaft Diameter	5mm
Shaft Length	22mm
Depth	33mm
Frame Size	28mm x 28mm
Weight	0.22kg
Shaft Radial Play	0.02 Max. (450G Load)
Shaft Axial Play	0.08 Max. (450G Load)
Maximum Radial Force	28N (20mm from front flange)
Maximum Axial Force	10N

Operation Environment Specifications

Maximum Temperature Rise	80°C
Ambient Temperature	-20°C to 50°C
Ambient Humidity	85% Max. (No Condensation)

2. Incremental Encoder AMT103-V

ELECTRICAL

parameter	conditions/description	min	typ	max	units
power supply	VDD	3.6	5	5.5	V
current consumption	with unloaded output		6		mA
output high level		VDD-0.8		V	
output low level			0.4	V	
output current	CMOS sink/source per channel		2		mA
rise/fall time		30		ns	

INCREMENTAL CHARACTERISTICS

parameter	conditions/description	min	typ	max	units
channels	quadrature A, B, and X index				
waveform	CMOS voltage square wave				
phase difference	A leads B for CCW rotation (viewed from front)		90		degrees
quadrature resolutions ¹	48, 96, 100, 125, 192, 200, 250, 256, 384, 400, 500, 512, 800, 1000, 1024, 2048				PPR
index ²	one pulse per 360 degree rotation				
accuracy		0.25			degrees
quadrature duty cycle (at each resolution)	256, 512, 1024, 2048 48, 96, 100, 125, 192, 200, 250, 384, 400, 500 800, 1000	49 47 43	50 50 50	51 53 56	%

MECHANICAL

parameter	conditions/description	min	typ	max	units
motor shaft length		9			mm
motor shaft tolerance		NOM +0/-0.015			mm
weight	AMT102 AMT103	20.5 14.0			g
axial play			±0.3		mm
rotational speed (at each resolution)	192, 384, 400, 500, 800, 1000, 1024, 2048 48, 96, 100, 125, 200, 250, 256, 512		7500 15000		RPM

ENVIRONMENTAL

parameter	conditions/description	min	typ	max	units
operating temperature ¹		-40		100	°C
humidity	non-condensing			95	%
vibration	20-500 Hz, 1 hour on each XYZ			10	G
shock	11 ms, ±XYZ direction			50	G
RoHS	yes				

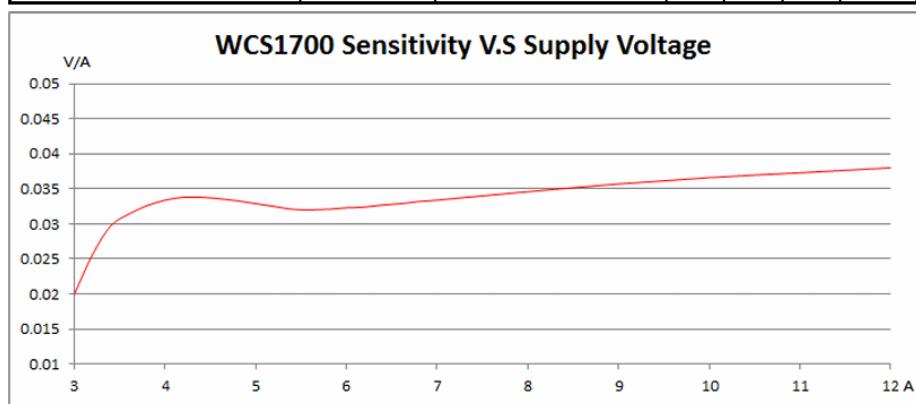
3. WCS1700 Hall Current Sensor

ABSOLUTE MAXIMUM RATING

Supply Voltage, Vdd ----- 14V
 Pass Through Wire Diameter ----- 9.0 mm
 Output Current Sink ----- 0.4mA
 Output Current Source ----- 2mA
 Basic Isolation Voltage ----- 4000V
 Operating Temperature Range
 Ta ----- -20°C to +125°C
 Storage Temperature Range
 Ts ----- -65°C to +150°C
 Power Dissipation Pd ----- 1 W

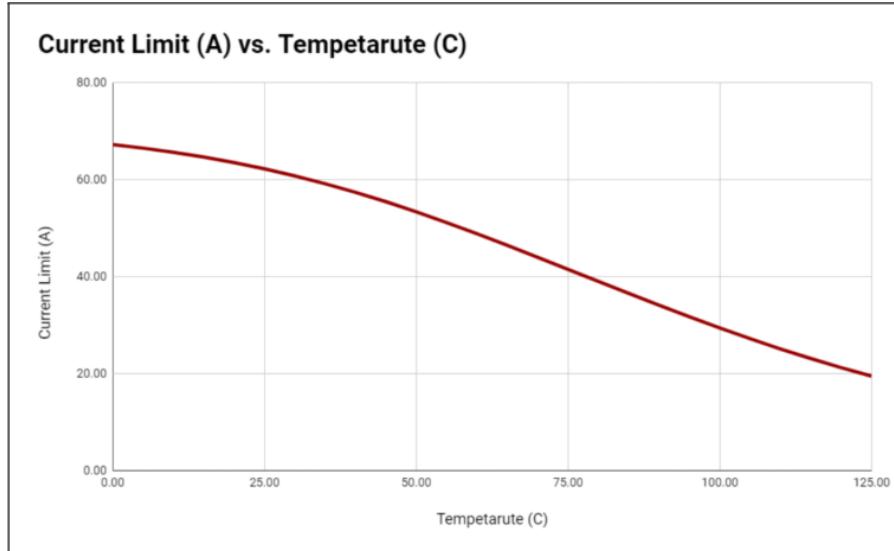
Electrical Characteristics: (T=+25°C, Vdd=5.0V)

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min	Typ	Max	Units
Supply Voltage	Vdd	—	3.0	—	12	V
Supply Current	I _{supply}	I _P =0 A	—	3.5	6.0	mA
Zero Current Vout	V _O G	I _P =0 A	2.4	2.5	2.6	V
Conductor Through Hole			—	9.0	—	mm
Sensitivity	WCS1700	I _P = +10 A	25	30	35	mV/A
Bandwidth	BW		—	23	—	kHz
Measurable Current Range	WCS1700	Vdd=5V (DC)	—	±70	—	A
		Vdd=5V (AC RMS)	—	50	—	
Temperature Drift	△Vout	I _P =0 A	—	±0.5	—	mV/°C



4. Cytron MDD20A Motor Driver

No	Parameters	Min	Max	Unit	
1	Power Input Voltage	6	30	V	
2	Maximum Motor Current (Per channel)	Continuous	-	20	A
		Peak * ¹	-	60	A
3	Logic Input Voltage (PWM & DIR)	Low Level	0	0.8	V
		High Level	1.5	15 * ²	V
4	PWM Frequency <i>(Output frequency is same as input frequency)</i>	Standard	DC	20	KHz
		Extended * ³	20	40	KHz



กราฟเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิของบอร์ดกับกระแสไฟฟ้า

ระบบควบคุมของ MDD20A ออกแบบมาให้ปรับค่าขีดจำกัดกระแสสูงสุดตามอุณหภูมิของบอร์ด เมื่อบอร์ดมีอุณหภูมิสูงขึ้น ระบบจะลดกระแสที่อนุญาตลงเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายต่อ MOSFETs ด้วยแนวทางนี้ MDD20A จะสามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยปรับตัวให้เข้ากับสภาพการทำงานจริงที่เปลี่ยนแปลงไป

5. หลักการทำงานของ Stepper Motor

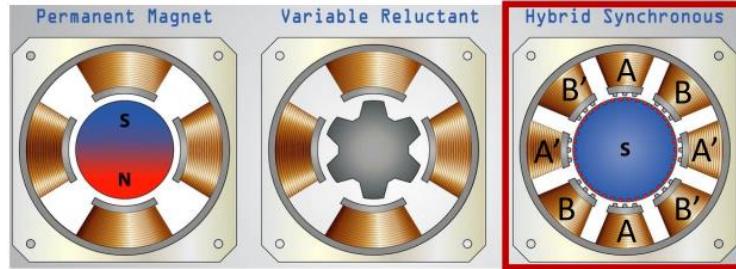
Stepper Motor เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ทีละ "ขั้น (Step)" ตามลำดับของสัญญาณไฟฟ้าที่ถูกส่งไปยังขดลวด โดยแต่ละขั้นจะหมุนด้วยมุมที่แน่นอน (เช่น 1.8° ต่อ Step ในมอเตอร์ทั่วไป) ซึ่งทำให้สามารถควบคุมการเคลื่อนที่เชิงมุมได้อย่างแม่นยำโดยไม่ต้องใช้เซนเซอร์สำหรับตรวจสอบตำแหน่ง

5.1. พื้นฐานการทำงาน

Stepper Motor มีขดลวดหลายชุด (Stator Coils) และโรเตอร์ที่เป็นแม่เหล็ก โดยที่การส่งสัญญาณไฟฟ้า (Pulse Signal) ไปยังขดลวดจะสร้างสนามแม่เหล็ก ซึ่งดึงดูดโรเตอร์ให้หมุนไปในมุมที่กำหนด และการเปลี่ยนลำดับการจ่ายกระแสไฟฟ้า (Stepping Sequence) ทำให้มอเตอร์หมุนไปในทิศทางที่ต้องการ

5.2. ประเภทของ Stepper Motor

- Permanent Magnet (PM): โรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร
- Variable Reluctance (VR): โรเตอร์ทำจากวัสดุที่มีความหนาแน่นแม่เหล็กสูง
- Hybrid: ผสมคุณสมบัติของ PM และ VR เพื่อเพิ่มความแม่นยำและแรงบิด



รูปประเภทของ Stepper Motor

6. ส่วนประกอบของ Stepper Motor

6.1. Stator (ขาดลวดสนามแม่เหล็ก)

- ขาดลวดหลายชุดติดตั้งอยู่รอบแกนกลาง
- สร้างสนามแม่เหล็กเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

6.2. Rotor (โรเตอร์)

- แกนหมุนที่ต้องสนองต่อสนามแม่เหล็กจาก Stator
- อาจเป็นแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) หรือวัสดุแม่เหล็กอ่อน (Soft Magnetic Material)

6.3. Bearings (ตลับลูกปืน)

- ช่วยให้โรเตอร์หมุนได้อย่างราบรื่นและลดแรงเสียดทาน

6.4. Housing (ตัวเรือน)

- โครงสร้างภายนอกที่ป้องกันส่วนประกอบภายในจากการเสียดหาย

6.5. Lead Wires (สายไฟนำกระแส)

- สายไฟที่ต่อ กับ ชุด ลวด เพื่อรับสัญญาณ ควบคุม จาก ตัวขับ (Driver)

7. Stepper Drive Type

ประเภทของไดรฟ์ที่ใช้ควบคุม Stepper Motor

7.1. L/R Drive

- ควบคุม แรงดัน ผ่าน ความต้านทาน (Resistor)
- ง่าย ต่อ การใช้งาน แต่มี ประสิทธิภาพ ต่ำ
- เหมาะ สำหรับ Stepper Motor ขนาดเล็ก

7.2. Chopper Drive (Constant Current Drive)

- ใช้ PWM (Pulse Width Modulation) เพื่อรักษา กระแส ให้คงที่
- ให้ ประสิทธิภาพ สูง และ แรงบิด ดี ใน ความเร็ว สูง
- เป็น ที่นิยม ใน งาน ที่ต้อง การ ความแม่น ยำ สูง

7.3. Unipolar Drive

- ใช้ กระแสไฟ ฟ้า ขาเดียว (Single Direction Current)
- โครงสร้าง เรียบง่าย แต่ แรงบิด ต่ำ กว่า Bipolar Drive

7.4. Bipolar Drive

- ใช้ กระแสไฟ ฟ้า สอง ทิศทาง ใน ชุด ลวด
- ให้ แรงบิด สูง กว่า Unipolar Drive แต่ ต้อง ใช้วงจร ซับซ้อน กว่า

7.5. Closed-Loop Drive

- ใช้ เช่น เซอร์ ตรวจ สอบ ตำแหน่ง โรเตอร์
- ป้อง กัน Loss of Step และ ปรับ แรงบิด แบบ อัตโนมัติ
- เหมาะ สำหรับ งาน ที่ต้อง การ ความแม่น ยำ สูงมาก

วิธีการดำเนินการทดลอง

1. วัสดุ /อุปกรณ์ และเครื่องมือพิเศษ

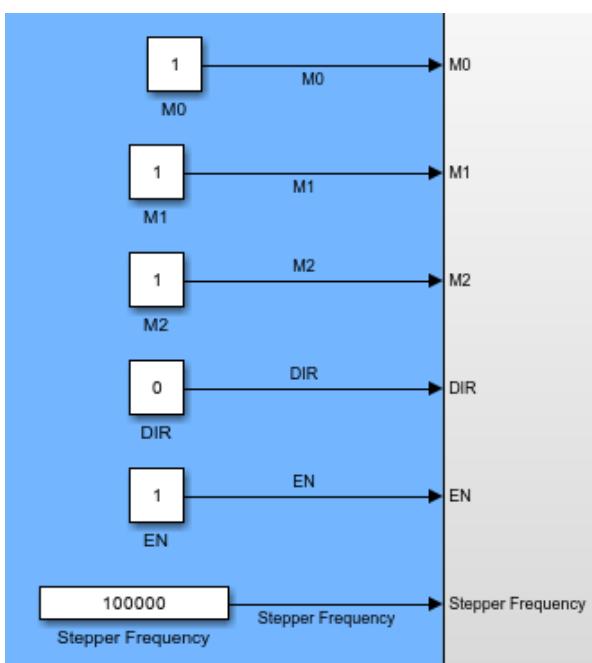
- 1.1. RS PRO Hybrid, Permanent Magnet Stepper Motor, 0.22Nm Torque, 2.8 V, 1.8°, 42.3 x 42.3mm Frame, 5mm Shaft จำนวน 1 อัน
- 1.2. Incremental Encoder AMT103-V จำนวน 1 อัน
- 1.3. WCS1700 Hall Current Sensor จำนวน 1 อัน
- 1.4. Cytron MDD20A Motor Driver จำนวน 1 อัน
- 1.5. Nucleo STM32G474RE พร้อมสายอัปโหลด จำนวน 1 ชุด
- 1.6. MotorXplorer จำนวน 1 ชุด - ฐานสามารถบรรจุบอร์ดควบคุม, Breadboard, 3D-Print ใช้สำหรับการประกอบกับ Stepper Motor2. ขั้นตอนการดำเนินงาน

2. ขั้นตอนการดำเนินงาน

2.1. การตั้งค่า Parameter



2.2. การตั้งค่าโปรแกรม Simulink

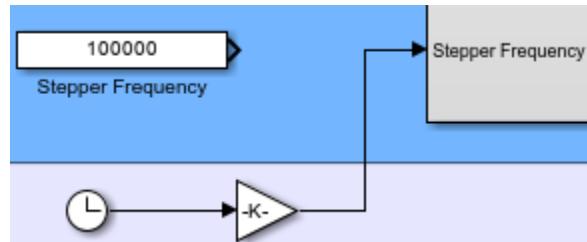


- M0, M1 และ M2 ปรับค่าแบบ binary เพื่อเปลี่ยน mode การควบคุม stepper โดยอ้างอิงตามนี้

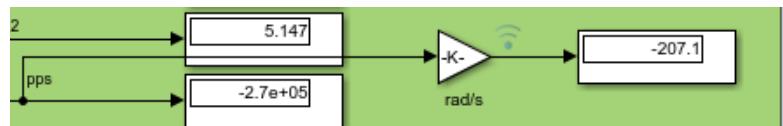
M0	M1	M2	Step Mode	Microstep Size
LOW	LOW	LOW	Full Step	1 step
HIGH	LOW	LOW	Half Step	1/2 step
LOW	HIGH	LOW	1/4 Step	1/4 step
HIGH	HIGH	LOW	1/8 Step	1/8 step
LOW	LOW	HIGH	1/16 Step	1/16 step
HIGH	LOW	HIGH	1/32 Step	1/32 step

รูปโหนดการทำงานของ Stepper motor

- EN ใช้ในการเปิดปิด stepper
- Stepper Frequency มักในการปรับความถี่ในการสั่งงาน stepper motor
- โดยในการทดสอบมีการเพิ่มค่า frequency โดยการ clock จาก MATLAB ผ่านการคูณโดยใช้ gain ในหลายแบบ

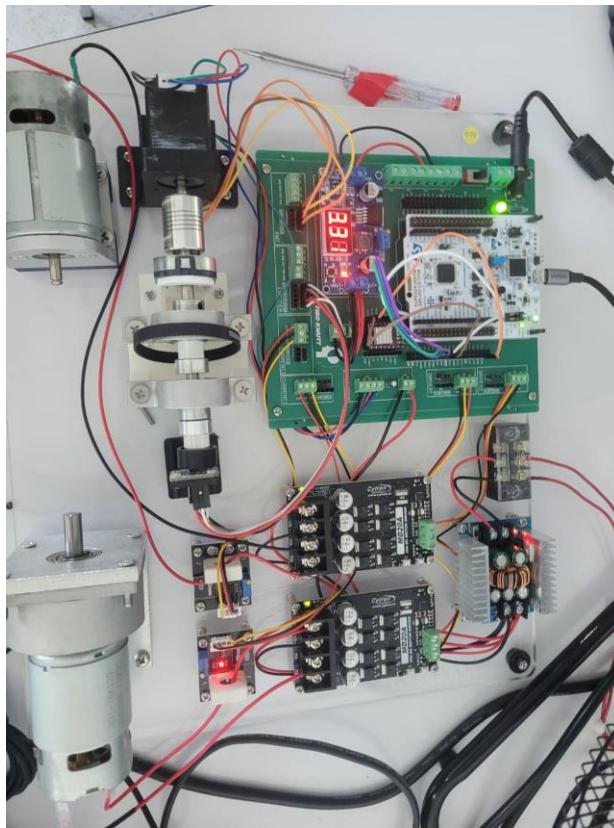


- การอ่านค่าจาก MATLAB สำหรับการทดลอง stepper motor



- ใช้เพียงเพิ่งค่า pps ในการตรวจจับความเร็วที่ stepper motor หมุน

2.3. การ Setup ชุดการทดลอง



รูปชุดการทดลอง Stepper motor

ทำการแกะ belt ที่เชื่อมกับ part motor ออก จากนั้นเชื่อมต่อสายไฟดังนี้

1. Incremental Encoder

- AMT103-V 5V -> 3V3
- GND -> GND
- A -> PA6
- B -> PA7

2. Magnetic Encoder

- SCL -> PB8
- SDA -> PB9
- DIR -> GND
- VCC -> 3V3
- GND -> GND

3. Stepper Motor Driver

- M0 -> PB15
- M1 -> PB14
- M2 -> PB13
- EN -> PB1
- DIR -> PB2
- STEP -> PC8

2.4. การออกแบบการทดลอง

2.4.1. ตอนที่ 1 ศึกษาผลกราฟของความถี่ต่อ Stepper Motor (Loss of Step)

- 2.4.1.1. ทำการทดลองโดยเพิ่มค่า frequency ในการ drive สัญญาณมอเตอร์ เพิ่มขึ้นตามเวลาที่ผ่านไป
- 2.4.1.2. โดยจะทดลองด้วยการเพิ่มค่า frequency ที่ละ 100 Hz 1000 Hz และ 2000 Hz เพื่อเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างความถี่ที่เกิด Loss of Step ของทั้ง 3 การทดลอง

2.4.2. ตอนที่ 2 การเปรียบเทียบ Stepper Drive Modes

- 2.4.2.1. ทำการตั้งค่า Stepper Drive Modes ในโหมด Full-Step จากนั้นทำการกำหนดความถี่ที่ 100 Hz ทำการทดลองโดยเก็บค่า เวลา เปรียบเทียบ และ ความเร็วเชิงมุม (RPM)
- 2.4.2.2. ทำการเปลี่ยนความถี่ที่ 500, 1000 Hz และทำการทดลองที่ Stepper Drive Modes ในโหมดเดิมๆ
- 2.4.2.3. ทำการเปลี่ยน Stepper Drive Modes เป็นโหมด Half-Step และ Micro-Step และเก็บค่าให้ครบทุกโหมด
- 2.4.2.4. ทุกการเก็บค่าจะเก็บผลการทดลองในระยะเวลา 60 วินาที โดยจะพิจารณาค่าที่ได้ในช่วง 10 – 50 วินาที

ผลการทดลอง

1. การทดลองศึกษาผลกระทบของความถี่ต่อ Stepper Motor (Loss of Step)

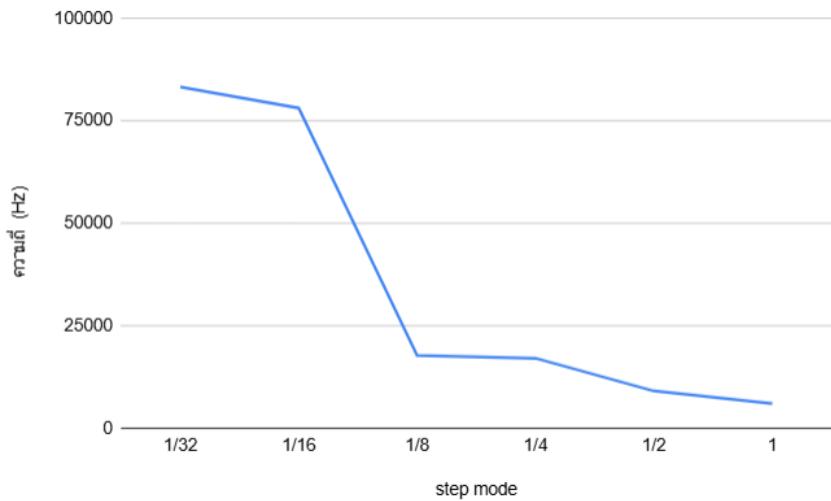
ในการทดลองนี้ทำขึ้นเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และการเกิด Loss of Step ของ Stepper Motor ได้ผลการทดลองดังนี้

Step Mode	ความถี่ที่เกิด Loss of Step (Hz)		
	เพิ่มความถี่ที่ละ 100 Hz	เพิ่มความถี่ที่ละ 500 Hz	เพิ่มความถี่ที่ละ 1000 Hz
1/32	83,240	128,500	127,000
1/16	78,100	62,400	79,200
1/8	17,730	18,000	30,600
1/4	17,060	18,000	11,400
1/2	9,060	6,600	6,600
1	5,970	3,300	5,000

ตารางผลการทดลองการทดลองศึกษาผลกระทบของความถี่ต่อ Stepper Motor (Loss of Step)

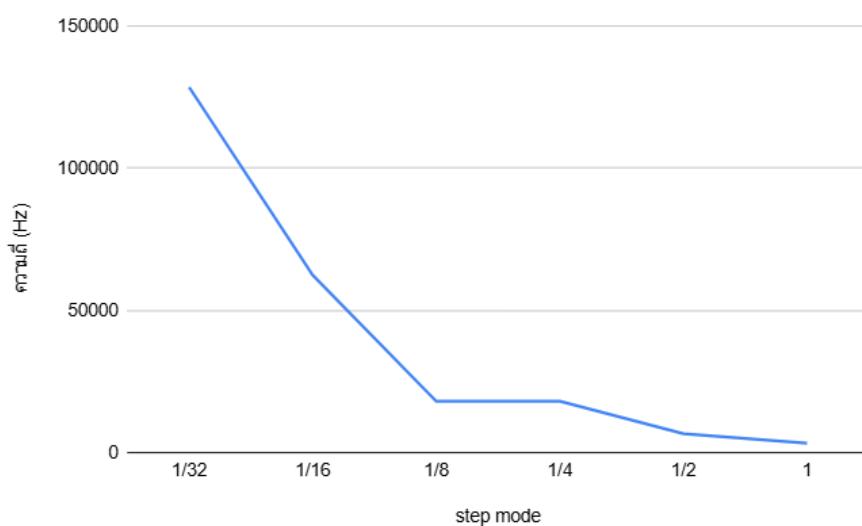
จากตารางดังกล่าวสามารถสร้างกราฟแสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของจุด Loss of Step ใน荷模ต่าง ๆ ได้ดังนี้

- การทดลองโดยเพิ่มค่าความถี่ที่ละ 100 Hz



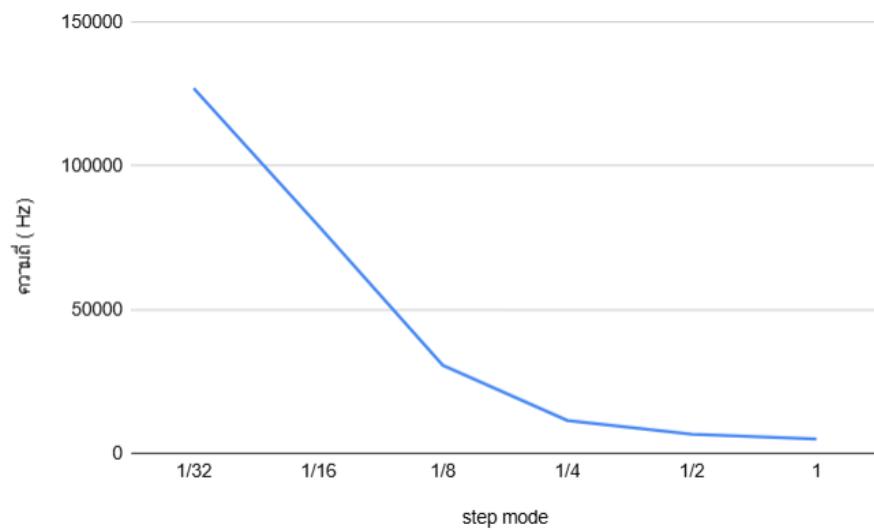
กราฟแสดงแนวโน้มจุดที่เกิด Loss of Step ในโหมดต่าง ๆ โดยทดลองเพิ่มความถี่ที่ละ 100 Hz

- การทดลองโดยเพิ่มค่าความถี่ที่ละ 1000 Hz



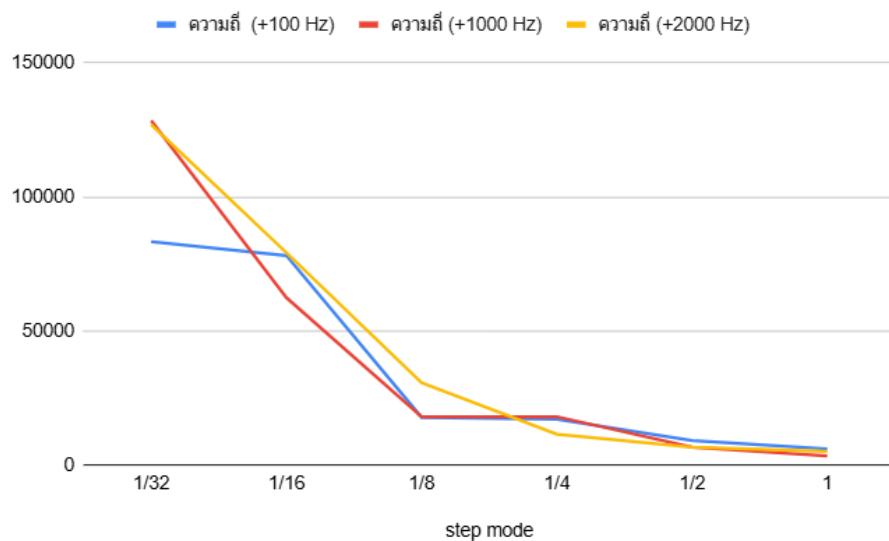
กราฟแสดงแนวโน้มจุดที่เกิด Loss of Step ในโหมดต่าง ๆ โดยทดลองเพิ่มความถี่ที่ละ 1000 Hz

- การทดลองโดยเพิ่มค่าความถี่ที่ละ 2000 Hz



กราฟแสดงแนวโน้มจุดที่เกิด Loss of Step ในโหมดต่าง ๆ โดยทดลองเพิ่มความถี่ที่ละ 2000 Hz

- เปรียบเทียบแนวโน้มทั้ง 3 การทดลอง



กราฟแสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของจุด Loss of Step ในโหมดต่าง ๆ

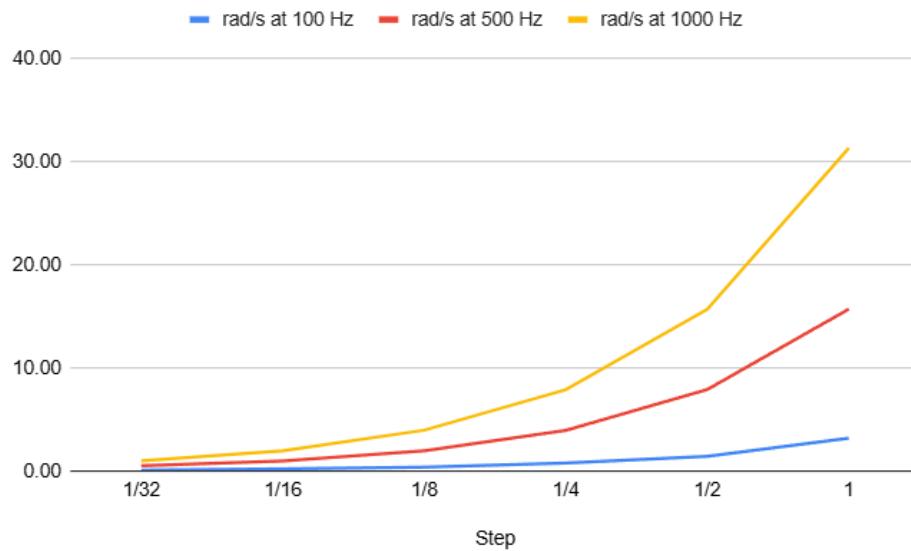
2. การทดลองการเปรียบเทียบ Stepper Drive Modes

ในการทดลองนี้ทำขึ้นเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของ Stepper Motor กับการทำงานในโหมดต่าง ๆ โดยทดลองกับความถี่ 3 ค่า คือ 100 Hz 500 Hz และ 1000 Hz ในโหมดการทำงานแบบ Full Step, Half Step, Micro Step ได้ผลการทดลองดังนี้

Step Mode	rad/s		
	100 Hz	500 Hz	1000 Hz
1/32	0.09	0.51	0.98
1/16	0.21	0.98	1.96
1/8	0.38	1.97	3.96
1/4	0.78	3.95	7.90
1/2	1.43	7.91	15.69
1	3.19	15.72	31.33

ตารางผลการทดลองการทดลองการเปรียบเทียบ Stepper Drive Modes

ซึ่งสามารถสร้างกราฟการเปรียบเทียบ Step Mode ความเร็วตอบที่ได้ และการทดลองในความถี่ต่าง ๆ ได้ดังนี้

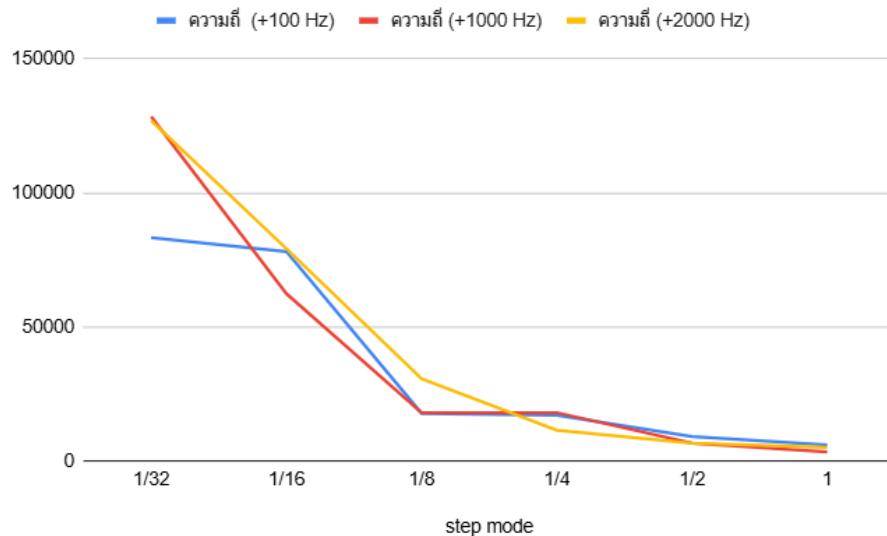


กราฟการเปรียบเทียบ Step Mode ความเร็วตอบที่ได้ และการทดลองในความถี่ต่าง ๆ

สรุป อกิประยผล และข้อเสนอแนะ

1. สรุปผลการทดลอง

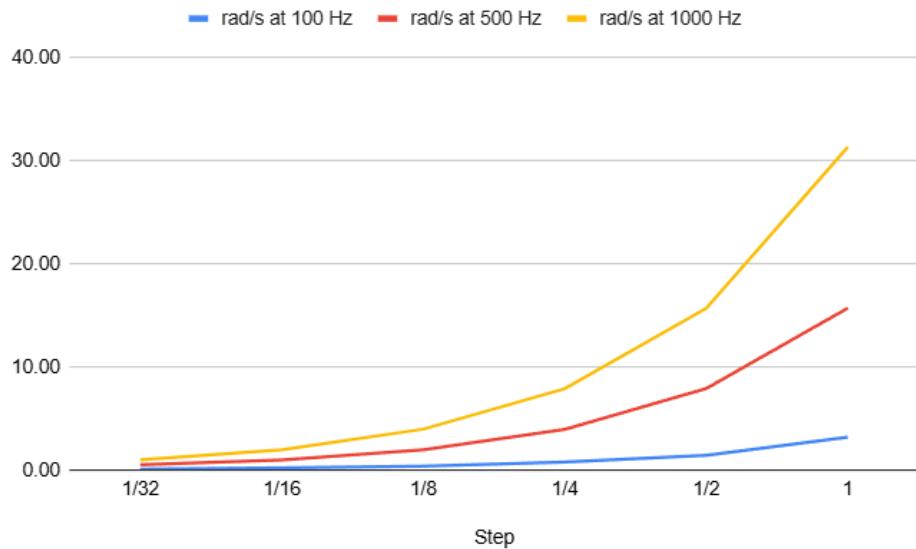
1.1. การทดลองที่ 1 การทดลองศึกษาผลกระทบของความถี่ต่อ Stepper Motor (Loss of Step)



กราฟแสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของจุด Loss of Step ในโหมดต่าง ๆ

จากการภาพแนวโน้มของทั้ง 3 การทดลอง จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของกราฟจะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อ Step mode เพิ่มขึ้นจาก $1/32$ ไป 1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ที่ Step mode น้อยเท่าไหร่จะเกิด Loss of Step ที่ความถี่สูงขึ้นเท่านั้น ในทางกลับกันยิ่ง Step Mode มีค่ามาก ก็จะทำให้มีโอกาสเกิด Loss of Step ที่ความถี่ต่ำ เช่นกัน

1.2. การทดลองที่ 2 การทดลองการเปรียบเทียบ Stepper Drive Modes



กราฟการเปรียบเทียบ Step Mode ความเร็วตอบที่ได้ และการทดลองในความถี่ต่าง ๆ

จากผลการทดลองข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าในทุกความถี่ที่ทำการทดลอง 100 Hz 500 Hz และ 1000 Hz มีแนวโน้มของความเร็วตอบที่เป็นไปในทางเดียวกัน นั่นคือ เมื่อ Step mode สูงขึ้น ความเร็วตอบของ Stepper Motor ก็จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเช่นกัน

ทั้งนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเร็วตอบสามารถสรุปได้ว่า ที่ความถี่สูงจะทำให้เกิดความเร็วตอบที่มากกว่าความถี่ต่ำ ดังนั้นจึงเห็นได้ว่า กราฟความเร็วตอบของ 1000 Hz จะมีค่ามากกว่า 500 Hz และกราฟความเร็วตอบของ 500 Hz ก็จะมากกว่า 100 Hz เช่นกัน

จากสมมติฐานทั้ง 2 ข้อ สามารถสรุปได้ว่า

- **สมมติฐานที่ 1** ความเร็วของ Stepper Motor เพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ของสัญญาณเพิ่มขึ้น จนถึงจุดที่มอเตอร์เริ่ม Loss Step เป็นจริง ซึ่งเห็นได้จากการทดลองที่ 2 ที่เมื่อความถี่สูงขึ้น ความเร็วตอบของ Stepper Motor ก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเมื่อความถี่สูงขึ้นถึงค่าหนึ่งก็จะเกิด Loss of Step ดังการทดลองที่ 1
- **สมมติฐานที่ 2** Micro-Step ให้ความละเอียดสูงสุด แต่ Full-Step ให้ความเร็วสูงสุด เป็นจริง โดยที่
 - Micro-Step ให้ความละเอียดสูงสุดนั้นเป็นจริง เพราะ Micro-Stepping แบ่งหนึ่ง Full-Step ออกเป็นหลายส่วนย่อย (เช่น 1/16, 1/32) ทำให้ Stepper Motor มีการเคลื่อนไหวที่ละเอียดและرابรื่นมากขึ้น สังเกตได้จากการทดลองที่ 1 ที่จะเห็นได้ว่า ที่ Micro-Step จะสามารถรับความถี่

ของสัญญาณได้สูงกว่า Half-Step และ Full-Step ซึ่งแสดงให้เห็นว่า Micro-Step มีความละเอียดในการควบคุมสูงที่สุด และความละเอียดของความเร็วรอบที่มากกว่าโหมดอื่น ๆ

- Full-Step ให้ความเร็วสูงสุด เป็นจริง หากสังเกตจากการทดลองที่ 2 จะเห็นได้ว่า ที่ Full-Step จะทำให้ความเร็วรอบของ Stepper Motor สูงที่สุดจากโหมดอื่น ๆ

2. อภิปรายผลการทดลอง

- 2.1. **สมมติฐานที่ 1** ความเร็วของ Stepper Motor เพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ของสัญญาณเพิ่มขึ้น จนถึงจุดที่ 모เตอร์เริ่ม Loss Step เป็นจริง สามารถอธิบายได้ดังนี้

2.1.1. ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็ว

ความถี่ของสัญญาณ (Hz) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเร็วรอบ (RPM) ของ Stepper Motor เนื่องจากความถี่ที่เพิ่มขึ้นทำให้ Stepper Motor หมุนได้เร็วขึ้นในหน่วยเวลาเดียวกัน

2.1.2. การเกิด Loss of Step

เมื่อเพิ่มความถี่ของสัญญาณเกินขีดจำกัดที่มอเตอร์สามารถตอบสนองได้ (เช่น ความจืดของโรเตอร์, แรงบิดไม่เพียงพอ) จะเกิด Loss of Step ซึ่งหมายถึงมอเตอร์ไม่สามารถหมุนตามคำสั่งได้อย่างแม่นยำ

- 2.2. **สมมติฐานที่ 2** Micro-Step ให้ความละเอียดสูงสุด แต่ Full-Step ให้ความเร็วสูงสุด เป็นจริง ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.2.1. Micro-Step ให้ความละเอียดสูงสุด

- Micro-Stepping แบ่งหนึ่ง Full-Step ออกเป็นหลายส่วนย่อย (เช่น 1/16, 1/32) ทำให้ Stepper Motor มีการเคลื่อนไหวที่ละเอียดและราบรื่นมากขึ้น
- การแบ่งย่อยช่วยให้มอเตอร์สามารถเคลื่อนไหวในตำแหน่งที่แม่นยำกว่า Full-Step
- เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความละเอียดสูง เช่น การพิมพ์ 3 มิติ หรือระบบควบคุมการเคลื่อนที่ที่แม่นยำ

2.2.2. Full-Step ให้ความเร็วสูงสุด

- Full-Step ทำให้ Stepper Motor ใช้จำนวนขั้นตอน (steps) น้อยที่สุดต่อการหมุนหนึ่งรอบ ดังนั้นในทางทฤษฎี สามารถเพิ่มความถี่ (Hz) ได้สูงกว่าการใช้ Micro-Step ซึ่งต้องการขั้นตอนมากกว่า

- อย่างไรก็ตาม ความเร็วสูงสุดของ Stepper Motor ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น เช่น
 - แรงเฉียบของ Load
 - ความสามารถของ Driver
 - คุณสมบัติทางไฟฟ้าและกลไกของมอเตอร์

2.3. เพิ่มเติม

2.3.1. การสั่งความเร็วด้วยความเร่งของ Stepper Motor

2.3.1.1. หลักการควบคุมความเร็ว

- ความเร็วของ Stepper Motor ขึ้นอยู่กับความถี่ของ Pulse Signal (Hz) ที่ส่งไปยังมอเตอร์
- ความถี่ที่สูงขึ้น = ความเร็วรอบ (RPM) สูงขึ้น

2.3.1.2. การเพิ่มความเร่ง (Acceleration Control)

- Stepper Motor ไม่สามารถเปลี่ยนความเร็วได้ทันที เพราะอาจเกิด Loss of Step
- การเพิ่มหรือลดความเร็วต้องทำผ่านการควบคุมความเร่ง (Acceleration) ซึ่งเป็นการเพิ่มหรือลดความถี่ของ Pulse อย่างค่อยเป็นค่อยไป

2.3.1.3. การคำนวณ

- ความเร็ว (RPM) คำนวณจาก

$$\text{RPM} = \frac{\text{Pulse Frequency (Hz)}}{\text{Steps per Revolution}} \times 60$$

โดยที่ Pulse Frequency คือ ความถี่ของสัญญาณ Pulse

Steps per Revolution คือ จำนวนขั้นตอนที่ Stepper

Motor ต้องหมุนเพื่อให้rotate หมุนครบหนึ่งรอบ

- ความเร่ง (Acceleration) คำนวณจากอัตราการเพิ่มความถี่ของ pulse ต่อเวลา

ตั้งนั้น การควบคุม Stepper Motor ให้มีความเร็วและความล่ำเอียดที่เหมาะสม จำเป็นต้องคำนึงถึงการออกแบบการเร่งและการหน่วงที่เหมาะสม รวมถึงการเลือกความถี่ของสัญญาณให้สอดคล้องกับคุณสมบัติของมอเตอร์และโหลด

3. ข้อเสนอแนะ

- 3.1. เพื่อเพิ่มความแม่นยำและประสิทธิภาพในการใช้งาน Stepper Motor ควรเลือกโหมดการขับเคลื่อนให้เหมาะสมกับลักษณะงาน เช่น ใช้โหมด Half-Step สำหรับงานที่ต้องการความราบรื่นและความละเอียด หรือใช้โหมด Full-Step ในกรณีที่ต้องการแรงบิดสูง นอกจากนี้ ควรหลีกเลี่ยงการตั้งค่าความถี่สูงเกินไป เพื่อป้องกันปัญหา Loss of Step ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความแม่นยำ
- 3.2. 在การทดลองเพิ่มความถี่ขึ้นเรื่อยๆ เพื่อหาจุดที่ Loss of Step ควรทำการทดลองโดยเพิ่มความถี่ที่ลงน้อยกว่านี้ เช่น 1 Hz เพื่อจะได้สังเกตพฤติกรรมของ Loss of Step ได้อย่างแม่นยำมากขึ้น ซึ่งวิธีนี้จะต้องใช้เวลาในการทดลองนานยิ่งขึ้น
- 3.3. ในชุดการทดลองเกิดข้อขัดข้องเกี่ยวกับอุปกรณ์นั่นคือ Bearing ที่เชื่อมตัวเพลา กับแกน มอเตอร์ รีดซึ่งทำให้การหมุนเกิดแรงเสียดทานมากขึ้น เป็นต้นทางคณะผู้จัดทำได้แก้ไขโดยการไข Bearing ตัวดังกล่าวออก เพื่อลดข้อผิดพลาดให้ได้มากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามอาจส่งผลต่อผลการทดลองในการทดลองข้างต้นได้

อ้างอิง

1. [20Amp 6V-30V DC Motor Driver \(2 Channels\)](#)
2. [WCS1700 Datasheet\(PDF\) - Winson Semiconductor Corp.](#)
3. [AMT10 Series Datasheet - Modular | Incremental | Same Sky](#)
4. [A700000008880659.pdf](#)
5. [Magnetic Particle Clutch](#)

Brushless DC Motor

จุดประสงค์

4. เพื่อให้สามารถอธิบายหลักการทำงานของ Brushless DC Motor ได้
5. เพื่อให้เข้าใจวิธีการตั้งค่า Motor ในโปรแกรม Motor Workbench
6. เพื่อให้เข้าใจวิธีการตั้งค่า PWM Generation Frequency และ Speed Sensing
7. เพื่อให้เข้าใจ Electrical parameters, Mechanical parameters, และ Motor magnetic structure ของ BLDC Motor
8. เพื่อให้เข้าใจ BLDC motor control types ทั้งในรูปแบบ Sensorless Control และ Sensor-based Control
9. เพื่อให้เข้าใจและอธิบายกราฟสัญญาณของ BLDC Motor ทั้ง 3 Phases จากพฤติกรรมที่สังเกตว่ามาจากการควบคุมแบบไหน และสาเหตุที่กราฟมีลักษณะเช่นนี้โดยละเอียด และวิเคราะห์โดยใช้ผลการเรียนรู้ย่อที่เกี่ยวข้องมาอธิบายและอภิปรายในผลการทดลอง ครอบคลุมถึง
 - Brushless DC (BLDC) Motor
 - Trapezoidal Back EMF
 - Permanent Magnet Synchronous Machine (PMSM)
 - Trapezoidal Control
 - Field-Oriented Control (FOC)
 - Pulse Width Modulation (PWM)
 - Commutation Logic
 - Six-Step Commutation
 - Space Vector Modulation (SVM)
 - Sensor less Control
 - Hall Effect Sensorsโดยสามารถนำผลการทดลองไปเปรียบเทียบกับพฤติกรรมการควบคุม PMSM แบบ FOC ด้วยการสืบค้นจากแหล่งข้อมูลภายนอก เช่น MATLAB
10. เพื่อให้เข้าใจวิธีการคำนวณหาความเร็วของ BLDC Motor จาก Frequency ของสัญญาณที่อ่านได้จาก Oscilloscope
11. เพื่อให้เข้าใจวิธีการใช้งาน Oscilloscope 4 Channels ในการจับสัญญาณของ BLDC Motor ทั้ง 3 Phases

สมมติฐาน

- เมื่อความเร็วรอบ RPM เปลี่ยนแปลง จะส่งผลให้ความถี่ของลูกคลีนและ Duty Cycle เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบผันตรงกับความเร็วรอบ RPM สองผลให้แรงดันไฟฟ้าแปรผันตรงตาม RPM ด้วยเช่นกัน
- ถ้าหากตั้งค่าความเร็วรอบ RPM เป็นติดลบและบวกมอเตอร์จะหมุนในทิศทางตรงกันข้ามกัน แต่ค่า Duty Cycle และความถี่ของลูกคลีนยังมีค่าเท่ากันในความเร็วรอบเดียวกัน
- การควบคุมแบบ FOC จะให้การหมุนของมอเตอร์ที่ราบรื่นกว่าการควบคุมแบบ 6-Step Control เนื่องจากการควบคุมกระแสและแรงดันเป็นแบบต่อเนื่องและสอดคล้องกับตำแหน่งของโรเตอร์ ซึ่งต่างจาก 6-Step Control ที่การเปลี่ยนลำดับการจ่ายไฟ (Commutation) จะเกิดขึ้นแบบไม่ต่อเนื่อง (Step-by-Step)
- ใน FOC การควบคุมกระแสผ่าน Space Vector Modulation (SVM) จะมีความแม่นยำสูงกว่า 6-Step Control เนื่องจากการจัดการ Vector กระแสในระบบอ้างอิง d-q ซึ่งต่างจาก 6-Step Control ที่จะควบคุมกระแสในลำดับแบบ On-Off ซึ่งไม่แม่นยำเท่ากับ FOC
- ความถี่ของสัญญาณ Hall Sensor มีความสัมพันธ์โดยตรงกับ Duty Cycle ของ PWM
- เมื่อเพิ่ม Duty cycle ของ PWM จะส่งผลให้ความถี่ Back-EMF เพิ่มขึ้น

ตัวแปร

ตัวแปรต้น :

- ความเร็วรอบ RPM

ตัวแปรตาม

- กราฟสัญญาณจาก Oscilloscope
- ความถี่ของลูกคลีนสัญญาณในแต่ละความเร็วรอบ RPM
- Duty Cycle ในแต่ละความเร็วรอบ RPM
- พุติกรรมของ Back-EMF

ตัวแปรควบคุม

- แรงดันไฟฟ้าและความถี่ของแหล่งจ่าย
- การตั้งค่าของ Oscilloscope
- ค่าคงที่ของแม่เหล็กถาวร
- อุณหภูมิ ณ สภาพแวดล้อมในการทดลอง
- ชุดการทดลองชุดเดียวกันตลอดการทดลอง
- จำนวนครั้งในการบันทึกผลการทดลองในแต่ละความเร็วรอบ

นิยามคัพท์เฉพาะ

1. Brushless DC (BLDC) Motor

มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่ใช้แม่เหล็กถาวรในโรเตอร์ และขดลวดในสเตเตอร์ การควบคุมกระแสไฟฟ้าทำโดยใช้จารอเล็กทรอนิกส์เพื่อลดการสูญเสียพลังงานและยืดอายุการใช้งาน

2. Trapezoidal Back EMF

แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับที่เกิดใน BLDC Motor มีรูปแบบคลื่นทรงสี่เหลี่ยมคงที่ ซึ่งเป็นผลจากการออกแบบโครงสร้างแม่เหล็ก

3. Permanent Magnet Synchronous Machine (PMSM)

มอเตอร์ที่มีแม่เหล็กถาวรในโรเตอร์ ใช้การขับเคลื่อนโดยการซิงโครในช่วงความเร็วของโรเตอร์กับความถี่ของสนามแม่เหล็กในสเตเตอร์

4. Trapezoidal Control

วิธีการควบคุม BLDC Motor ที่ใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับทรงสี่เหลี่ยมคงที่ โดยมีการจ่ายพลังงานให้แต่ละเฟสในลักษณะหกขั้นตอน

5. Field-Oriented Control (FOC)

วิธีการควบคุมมอเตอร์แบบซิงโครนัส (รวมถึง PMSM) โดยการเปลี่ยนพิกัดกระแสจากกรอบหมุนให้สอดคล้องกับสนามแม่เหล็กในโรเตอร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำ

6. Pulse Width Modulation (PWM)

เทคนิคการควบคุมความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ด้วยการปรับอัตราส่วนระหว่างช่วงเปิดและปิดของสัญญาณไฟฟ้า

7. Commutation Logic

ตระรากที่ใช้ควบคุมการสลับเฟสกระแสไฟฟ้าใน BLDC Motor เพื่อทำให้เกิดการหมุนของโรเตอร์อย่างต่อเนื่อง

8. Six-Step Commutation

วิธีการคอมมิวเตชันแบบหกขั้นตอน โดยการเปลี่ยนการจ่ายพลังงานในสามเฟสเพื่อให้เกิดแรงบิดในลักษณะต่อเนื่อง

9. Space Vector Modulation (SVM)

เทคนิคการปรับ PWM เพื่อสร้างรูปแบบแรงดันที่มีประสิทธิภาพสูง โดยใช้การคำนวณในระบบ พิกัดเชิงเวกเตอร์

10. Sensorless Control

การควบคุมมอเตอร์แบบไม่ใช้เซ็นเซอร์ โดยประมาณค่าตำแหน่งและความเร็วของโรเตอร์จากแรงดันและกระแสในสเตเตอร์

11. Hall Effect Sensors

เซ็นเซอร์ที่ใช้ตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ใน BLDC Motor โดยอาศัย原理การณ์ Hall Effect

12. Oscilloscope

อุปกรณ์ที่ใช้แสดงรูปคลื่นของสัญญาณไฟฟ้าบนหน้าจอเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมและความถี่ของมอเตอร์

13. Frequency

จำนวนรอบการเกิดขึ้นไฟฟ้าต่อวินาที หน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz) ใช้ในการคำนวณความเร็วของมอเตอร์

14. Speed Sensing

กระบวนการตรวจวัดความเร็วของมอเตอร์ โดยอาศัยการวิเคราะห์สัญญาณที่ได้จากเซ็นเซอร์หรือตัวมอเตอร์

15. Motor Workbench

ซอฟต์แวร์ที่ใช้สำหรับตั้งค่าและปรับจุนพารามิเตอร์ของมอเตอร์ เช่น BLDC Motor

16. Motor Magnetic Structure

โครงสร้างทางแม่เหล็กของมอเตอร์ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมและประสิทธิภาพ เช่น การวางแผนตำแหน่ง แม่เหล็กถาวรในโรเตอร์

17. 3-Phase Signal Graph

กราฟแสดงรูปคลื่นของแรงดันหรือกระแสในสามเฟสของมอเตอร์ ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์ พฤติกรรมการควบคุม

18. Comparison with PMSM Control

การเปรียบเทียบพัฒนาระบบและประสิทธิภาพของการควบคุม BLDC กับ PMSM แบบ FOC เพื่อประเมินข้อดีและข้อเสีย

19. Voltage

ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างสองจุดในวงจรไฟฟ้า หน่วยเป็นโวลต์ (V) ซึ่งเป็นพลังงานที่ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำ

20. Current

การไหลของประจุไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า หน่วยเป็นแอมเปอร์ (A) ซึ่งสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าและต้านทานตามกฎของโอม

21. Resistance

คุณสมบัติของวัสดุที่ต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า หน่วยเป็นโอห์ม (Ω) ซึ่งกำหนดปริมาณกระแสที่ไหลผ่านเมื่อมีแรงดันไฟฟ้าคงที่

22. Torque

แรงหมุนที่เกิดจากมอเตอร์ หน่วยเป็นนิวตัน-เมตร (Nm) ซึ่งเป็นผลของการแปลงพลังงานไฟฟ้าในมอเตอร์ให้กลายเป็นพลังงานกล

23. Back-EMF

แรงดันที่เกิดขึ้นเมื่อโรเตอร์ของมอเตอร์หมุนผ่านสนามแม่เหล็ก ส่งผลให้แรงดันนี้ต่อต้านแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์

24. Efficiency

อัตราส่วนระหว่างพลังงานที่มอเตอร์ส่งออกเป็นงานกลต่อพลังงานที่ป้อนให้มอเตอร์ หน่วยเป็น เปอร์เซ็นต์ (%)

25. Full (kHz)

ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคลื่น

26. On (kHz)

ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคลื่น ในช่วง On time

27. T full (s)

คาบของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคลื่น

28. T on (s)

คาบของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคลื่น ในช่วง On time

นิยามเชิงปฏิบัติการ

1. Brushless DC (BLDC) Motor

อุปกรณ์ที่แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลโดยไม่ใช้แปรรูปต่าง ทำงานผ่านการควบคุมกระแสในชุด漉ดสามารถเพสในสเตเตอร์ด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์

2. Trapezoidal Back EMF

สัญญาณแรงดันย้อนกลับที่มีลักษณะเป็นคลื่นทรงสี่เหลี่ยมคงที่ ซึ่งวัดได้จากขั้วไฟฟ้าของมอเตอร์ระหว่างการทำงาน

3. Permanent Magnet Synchronous Machine (PMSM)

มอเตอร์ที่สามารถหมุนได้ตามความถี่ของสนามแม่เหล็กในสเตเตอร์ ใช้แม่เหล็กถาวรในโรเตอร์ และต้องการวงจรควบคุมขั้นสูง

4. Trapezoidal Control

การควบคุมการหมุนของ BLDC Motor ด้วยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าตามลำดับของแต่ละเฟส

5. Field-Oriented Control (FOC)

การควบคุมมอเตอร์โดยใช้การแปลงพิกัดกระแสให้สอดคล้องกับการหมุนของสนามแม่เหล็ก เพื่อปรับแรงบิดและความเร็วอย่างแม่นยำ

6. Pulse Width Modulation (PWM)

วิธีปรับความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์โดยเปลี่ยนอัตราส่วนการเปิด-ปิดของสัญญาณควบคุม

7. Commutation Logic

กฎที่กำหนดลำดับการจ่ายพลังงานให้กับเฟสต่าง ๆ ของ BLDC Motor เพื่อให้โรเตอร์หมุน

8. Six-Step Commutation

เทคนิคการสลับการจ่ายพลังงานในมอเตอร์แบบ 6 ขั้นตอน โดยให้กระแสไฟหล่อผ่านเฟสที่เหมือนกันแต่ละเวลา

9. Space Vector Modulation (SVM)

เทคนิคการสร้างสัญญาณ PWM โดยใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจ่ายพลังงาน

10. Sensorless Control

การควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์โดยใช้สัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้ แทนการใช้เซ็นเซอร์

11. Hall Effect Sensors

เซ็นเซอร์ที่ติดตั้งในมอเตอร์สำหรับตรวจสอบตำแหน่งของโรเตอร์โดยการตรวจวัดสนามแม่เหล็ก

12. Oscilloscope

เครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบรูปแบบสัญญาณไฟฟ้า เช่น แรงดันและกระแส ในมอเตอร์ BLDC เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการทำงาน

13. Frequency

ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าที่ตรวจพบจากมอเตอร์ สามารถใช้คำนวณความเร็วการหมุนได้

14. Speed Sensing

วิธีการตรวจสอบความเร็วการหมุนของมอเตอร์โดยใช้สัญญาณไฟฟ้าหรืออุปกรณ์วัด

15. Motor Workbench

ซอฟต์แวร์สำหรับปรับแต่งและตั้งค่าการทำงานของมอเตอร์ เช่นการตั้งค่า PWMและการควบคุมความเร็ว

16. Motor Magnetic Structure

การจัดวางแม่เหล็กและขดลวดในมอเตอร์ที่ส่งผลต่อแรงบิดและประสิทธิภาพ

17. 3-Phase Signal Graph

กราฟที่แสดงสัญญาณไฟฟ้าจากเฟสทั้งสามของมอเตอร์ ซึ่งใช้วิเคราะห์การทำงานและการควบคุม

18. Comparison with PMSM Control

การเปรียบเทียบพัฒนาระหว่าง BLDC Motor กับ PMSM โดยดูจากรูปแบบกราฟและประสิทธิภาพ

19. Voltage

วัดระดับแรงดันไฟฟ้าที่ส่งไปยังมอเตอร์เพื่อตรวจสอบการทำงานและประสิทธิภาพ

20. Current

ตรวจสอบปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดของมอเตอร์ในแต่ละสถานะการทำงาน

21. Resistance

ทดสอบความต้านทานในขดลวดของมอเตอร์เพื่อวิเคราะห์การสูญเสียพลังงาน

22. Torque

วัดแรงบิดของมอเตอร์เพื่อประเมินสมรรถนะในการทำงานกับโหลด

23. Back-EMF

ตรวจสอบแรงดันย้อนกลับที่เกิดจากการหมุนของโรเตอร์เพื่อตั้งค่าการควบคุมที่เหมาะสม

24. Efficiency

คำนวณอัตราส่วนพลังงานที่ได้ออกมาเป็นงานกลเมื่อเทียบกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้

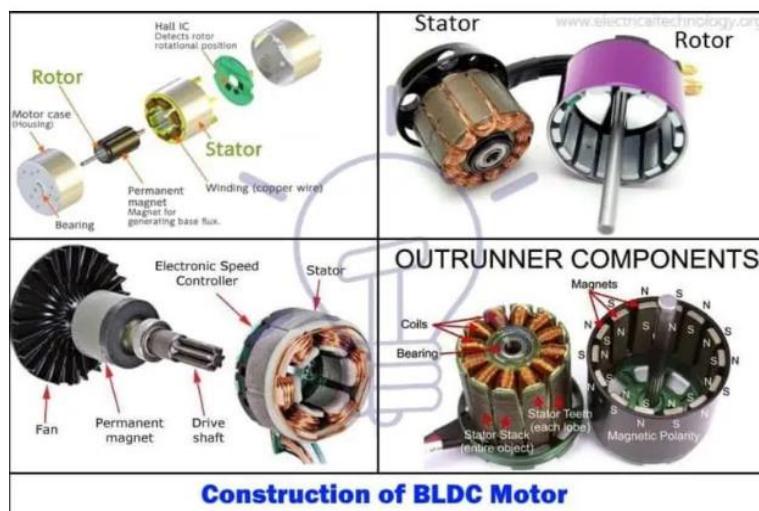
25. RPM ที่น้อยที่สุดที่ทำให้มอเตอร์หมุน

ค่า RPM ที่ใส่เข้าไปในโปรแกรมแล้วกดเปิดการทำงานเพื่อสั่งให้มอเตอร์หมุน ซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุดที่เมื่อกดการทำงานของโปรแกรมใหม่แล้วมอเตอร์สามารถทำงานได้

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

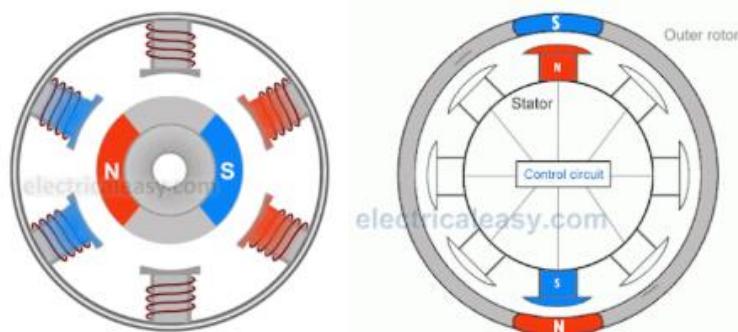
Brushless DC Motor คืออะไร

Brushless DC Motor (BLDC) หรือมอเตอร์กระแสตรงแบบบีร์แปร่งถ่าน หรือมอเตอร์กระแสตรงแบบซิงโครนัส (Synchronous DC Motor) เป็นมอเตอร์ที่ทำงานโดยอาศัยตัวควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Controller) ในการกำหนดที่ควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับชุดลวด (Stator) ใช้คู่กับแม่เหล็กทราบเป็นโรเตอร์ (rotor) ซึ่งมีโครงสร้างดังนี้



รูปโครงสร้างของ Blushless DC Motor (BLDC)

มีหลักการทำงานโดยอาศัยการสลับขั้วของกระแสในชุดลวดสเตเตอร์ เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่ดึงหรือผลักโรเตอร์ให้หมุน เพื่อควบคุมทั้งทิศทาง Torque รวมถึงความเร็วรอบของมอเตอร์ ดังรูป



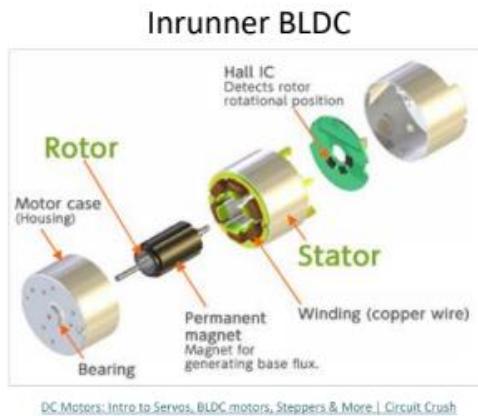
รูปหลักการทำงานของ Blushless DC Motor (BLDC)

ประเภทของ Brushless DC Motor

1. แบ่งตามโครงสร้างทางกายภาพ

1.1 Inrunner Motor

โรเตอร์ (rotor) ของ Inrunner BLDC Motor จะอยู่ภายใน ซึ่งมีจุดเด่นที่ความเร็วสูงและมีการระบายความร้อนได้ดี แต่ข้อจำกัดคือ มีแรงบิดที่ต่ำ จึงเหมาะสมสำหรับการใช้งานในหุ่นยนต์ พัดลม, เครื่องใช้ไฟฟ้าขนาดเล็ก



รูป Inrunner Motor

1.2 Outrunner Motor

โรเตอร์ (rotor) ของ Outrunner BLDC Motor จะอยู่ภายนอก ซึ่งมีจุดเด่นที่แรงบิดสูง และประหยัดพลังงาน แต่ข้อจำกัดคือความเร็วตอบตัวและมีการระบายความไม่ดี จึงเหมาะสมสำหรับการใช้งานในโดรน, ยานพาหนะไฟฟ้า, และเครื่องจักรบางประเภท



รูป Outrunner Motor

2. แบ่งตามประเภทของกระแสที่ควบคุม

2.1 Trapezoidal (6-Steps Control)

การควบคุม Trapezoidal มักจะใช้ในงานที่ต้องการตันทุนต่ำและการควบคุมที่ง่าย โดยระบบการขับเคลื่อนมีลักษณะการกระแสตันสนามแม่เหล็กแบบ Trapezoidal ที่ทำให้กระแสที่จ่ายให้กับขดลวดในมอเตอร์มีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมคงที่ (Trapezoidal Wave)

2.1.1 ลักษณะการทำงาน

- มอเตอร์ประเภทนี้มี Back-EMF ที่มีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมคงที่ (Trapezoidal) ซึ่งส่งผลต่อการควบคุมแรงบิดและการหมุนของมอเตอร์
- การควบคุมกระแสในมอเตอร์ประเภทนี้ใช้วิธีการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าในขดลวดให้เป็นสี่เหลี่ยมคงที่ เพื่อกระแสตันสนามแม่เหล็กในสเตเตอร์ ทำให้มอเตอร์หมุนได้
- ตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์โดยใช้เซ็นเซอร์ Hall Effect หรือการคำนวณจาก Back-EMF เพื่อตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ และสลับกระแสให้ถูกต้องในแต่ละเฟสของมอเตอร์

2.1.2 ข้อดี

- ตันทุนต่ำ
- มีวงจรการควบคุมที่ง่าย
- เหมาะสำหรับงานที่ไม่ต้องการความแม่นยำสูง

2.1.3 ข้อเสีย

- มอเตอร์อาจจะมีการสั่นสะเทือนมากกว่าเมื่อทำงานที่ความเร็วต่ำ เนื่องจากการควบคุมแบบสี่เหลี่ยมคงที่ไม่สามารถทำให้แรงบิดرابรื่นได้
- ประสิทธิภาพลดลงที่ความเร็วสูงเนื่องจากการควบคุมแรงบิดและสนามแม่เหล็กมีลักษณะไม่ต่อเนื่อง
- ใช้ในอุปกรณ์ที่ไม่ต้องการการควบคุมที่ซับซ้อนและไม่ต้องการความแม่นยำสูง เช่น พัดลม, ปั๊มน้ำ, เครื่องปรับอากาศ, และเครื่องมือไฟฟ้า

2.1.4 การจัดการกับ Vector ของกระแสใน Trapezoidal (6-Step Control)

- 6-Step Control ไม่มีการควบคุมที่ซับซ้อนในการเปลี่ยนแปลงของกระแสในแต่ละเฟส แต่จะสลับกระแสในลำดับที่กำหนดเพื่อให้สนามแม่เหล็กหมุนอย่างต่อเนื่อง

- โดยการควบคุมลำดับขั้นตอนที่แน่นอนนี้ กระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสจะไม่สามารถปรับทิศทางหรือมุ่งได้อย่างอิสระเหมือน FOC ซึ่งทำให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพต่ำกว่าและมีการสั่นสะเทือนที่สูง

2.1.5 Space Vector Modulation (SVM) ใน 6-Step Control

ใน 6-Step Control, SVM ไม่ได้ถูกนำมาใช้ในแบบที่มีการปรับเปลี่ยนเวลาเตอร์กระแสไฟฟ้าให้เป็นคลื่นไอน์เน็งเนื่องจากการควบคุมกระแสจะเป็นการสลับกระแสในลำดับที่แน่นอนเท่านั้น ซึ่งทำให้การควบคุมแบบนี้ง่ายและไม่ต้องการการประมวลผลที่สูง

2.2 Sinusoidal

การควบคุมแบบ Sinusoidal ใช้การควบคุมกระแสแบบไอน์ (Sinusoidal Control) มักจะใช้ในงานที่ต้องการให้มอเตอร์สามารถทำงานได้อย่างราบรื่น โดย Back-EMF ของมอเตอร์นี้มีลักษณะเป็นคลื่นไอน์ ซึ่งทำให้สามารถควบคุมแรงบิดได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพสูงที่ทุกความเร็ว

2.2.1 ลักษณะการทำงาน

- มอเตอร์ประเภทนี้มี Back EMF ที่มีลักษณะเป็นคลื่นไอน์ ซึ่งหมายความว่ามันมีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กอย่างราบรื่นและต่อเนื่อง
- การควบคุมกระแสในมอเตอร์ประเภทนี้ ใช้วิธีการเปลี่ยนแปลงกระแสในชุดลวดให้เป็นรูปคลื่นไอน์ ซึ่งช่วยให้สามารถควบคุมแรงบิดได้อย่างราบรื่น ทำให้มอเตอร์ทำงานได้ดีที่ความเร็วต่ำและสูง
- ตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์โดยใช้เซ็นเซอร์ Hall Effect หรือการคำนวณจาก Back-EMF ในระบบที่ไม่ใช้เซ็นเซอร์ เพื่อควบคุมการสลับกระแสให้เหมาะสมกับตำแหน่งของโรเตอร์

2.2.2 ข้อดี

- มีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากการควบคุมกระแสแบบไอน์จะทำให้แรงบิดที่ได้รับมีความราบรื่นและต่อเนื่อง ทำให้มอเตอร์ทำงานได้มีประสิทธิภาพสูง
- มอเตอร์ทำงานเงียบและมีการสั่นสะเทือนที่น้อย
- มอเตอร์จะตอบสนองได้เร็วและราบรื่นในทุกสภาพการทำงาน

2.2.3 ข้อเสีย

- ต้นทุนสูงเนื่องจากการควบคุมที่ซับซ้อนกว่าและต้องใช้วงจรควบคุมที่มีประสิทธิภาพสูง
- มีความซับซ้อนในการออกแบบวงจรการควบคุม

- ใช้ในระบบที่ต้องการการควบคุมที่มีประสิทธิภาพสูง เช่น ยานพาหนะไฟฟ้า (EVs), เครื่องมืออุตสาหกรรมที่ต้องการแรงบิดสม่ำเสมอ และระบบขับเคลื่อนที่ต้องการประสิทธิภาพสูง

2.3 ความแตกต่างระหว่าง Trapezoidal และ Sinusoidal

ลักษณะ	Trapezoidal	Sinusoidal
Back EMF	สี่เหลี่ยมคงที่ (Trapezoidal)	ไซน์ (Sinusoidal)
ความราบรื่นของการทำงาน	ต่ำ, มีการสั่นสะเทือนมากกว่า	สูง, ทำงานได้ราบรื่นและต่อเนื่อง
ประสิทธิภาพ	ต่ำกว่าในบางกรณี โดยเฉพาะที่ความเร็วสูง	สูง, เหมาะสำหรับการควบคุมที่มีประสิทธิภาพสูง
เสียงและการสั่นสะเทือน	เสียงดังและมีการสั่นสะเทือนมาก	เสียงเงียบและการสั่นสะเทือนน้อย
ความซับซ้อนของการควบคุม	ง่ายและต้นทุนต่ำ	ซับซ้อนและต้นทุนสูง
การใช้งาน	พัดลม, เครื่องมือไฟฟ้า, ปั๊มน้ำ	ยานพาหนะไฟฟ้า, หุ่นยนต์, ระบบอุตสาหกรรม

ตารางเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่าง Trapezoidal และ Sinusoidal

2.4 Field Oriented Control (FOC)

FOC เป็นการควบคุมที่มีการแปลงพลังงานไฟฟ้าจากกระแสตรง (DC) ไปสู่การควบคุมแบบ AC โดยแยกการควบคุมสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) และการควบคุมแรงบิด (Torque) ในมุมที่แตกต่างกันผ่านการแปลงข้อมูลเป็น สองแกน (d-axis และ q-axis) ดังนี้

- d-axis (Direct axis): จะเกี่ยวข้องกับการควบคุมสนามแม่เหล็กที่ทำให้เกิดแรงบิด
- q-axis (Quadrature axis): จะเกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก

2.4.1 หลักการทำงาน

ในการควบคุมแบบ FOC จะมีการแปลงข้อมูลจาก สามเฟส AC เป็นสองเฟส (d-axis, q-axis) โดยใช้การแปลง Clarke Transform และ Park Transform ซึ่งทำให้สามารถควบคุมแรงบิดและสนามแม่เหล็กแยกกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

- Clarke Transformation (α, β)

เปลี่ยนค่าของกระแสไฟฟ้า 3 เฟส (A, B, C) ให้เป็นค่ากระแส 2 เฟส (α, β)

- Park Transformation (d, q)

แปลงค่ากระแส 2 เฟส (α, β) เป็นการควบคุมที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมสนามแม่เหล็กและแรงบิด (d, q)

2.4.2 ขั้นตอนการควบคุม FOC

- การวัดตำแหน่งของโรเตอร์โดยใช้เซ็นเซอร์ หรือการคำนวณจาก Back-EMF
- การแปลงการวัดกระแส (α, β) ไปยัง (d, q) โดยการใช้การแปลง Clarke และ Park เพื่อแยกการควบคุมแรงบิดและการควบคุมสนามแม่เหล็ก
- การควบคุมแรงบิดจะทำให้มอเตอร์ทำงานได้ในระดับประสิทธิภาพสูงสุด โดยควบคุมกระแสในแกน q
- การควบคุมแกน d จะช่วยในการควบคุมการให้ของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ให้เหมาะสมกับสภาพการทำงาน
- การควบคุมการส่งพลังงานให้กับมอเตอร์ผ่าน PWM เพื่อให้กระแสที่ผ่านมอเตอร์ถูกควบคุมอย่างแม่นยำ

2.4.3 ข้อดี

- มีประสิทธิภาพสูง เพราะ FOC ช่วยในการควบคุมแรงบิดและการควบคุมสนามแม่เหล็กให้มีความแม่นยำ ทำให้มอเตอร์ทำงานได้ราบรื่นที่ความเร็วต่ำและสูง
- ช่วยให้มอเตอร์มีการตอบสนองที่เร็วและมีการสั่นสะเทือนน้อย
- ด้วยการควบคุมที่มีประสิทธิภาพ มอเตอร์จะสามารถทำงานได้ด้วยการแปลงพลังงานไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้น
- ช่วยให้สามารถควบคุมทั้งแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์ได้อย่างแม่นยำ

2.4.4 ข้อเสีย

- การควบคุมแบบ FOC ต้องการวงจรควบคุมที่ซับซ้อนและการคำนวณที่รวดเร็ว
- ต้นทุนสูง (DSP)
- สำหรับ FOC ที่ใช้เซ็นเซอร์ (sensored FOC) จะต้องการเซ็นเซอร์ที่มีความแม่นยำในการวัดตำแหน่งโรเตอร์

2.4.5 FOC และ BLDC

การใช้ FOC ในการควบคุม BLDC มอเตอร์ช่วยให้การทำงานของมอเตอร์ BLDC มีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากสามารถควบคุมแรงบิดและความเร็วได้อย่างแม่นยำในทุกสถานการณ์ โดยเฉพาะเมื่อมอเตอร์ทำงานในสภาพแวดล้อมที่ต้องการการควบคุมที่มีประสิทธิภาพสูง

การควบคุมแบบ FOC จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมมอเตอร์ BLDC ในการใช้งานที่ต้องการความแม่นยำและประสิทธิภาพสูง โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องการลดการสูญเสียพลังงานและเพิ่มความยืดหยุ่นในการควบคุมมอเตอร์ในสภาพแวดล้อมต่างๆ

2.4.6 การจัดการกับ Vector ของกระแสใน FOC

- FOC ใช้การควบคุมแบบ Space Vector Modulation (SVM) โดยการปรับเวกเตอร์กระแสให้เป็นคลื่นไอน์ที่มีมุ่งที่เหมาะสมในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งทำให้มอเตอร์มีการหมุนราบรื่นและการควบคุมแรงบิดและความเร็วทำได้อย่างแม่นยำ
- การควบคุมกระแสใน FOC สามารถปรับทิศทางและมุ่งของกระแสไฟฟ้าได้อย่างอิสระ ซึ่งช่วยให้การทำงานของมอเตอร์เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพในทุกความเร็ว และโหลด

2.4.7 Space Vector Modulation (SVM) ใน FOC

ใน FOC, SVM ใช้ในการควบคุมการปรับทิศทางและขนาดของเวกเตอร์กระแสไฟฟ้า (Electric Current Vector) โดยการเลือกคลื่นไอน์ที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งทำให้การควบคุมแรงบิดและสนับสนุนแม่เหล็กมีความแม่นยำมากขึ้น

- SVM จะปรับเวกเตอร์กระแสเพื่อให้กระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสของมอเตอร์มีลักษณะเป็นไอน์และปรับทิศทางของกระแสในแต่ละช่วงเวลา
- ด้วย SVM, FOC สามารถควบคุมการหมุนของโรเตอร์ได้อย่างราบรื่น ทำให้มอเตอร์ทำงานได้ในสภาพที่มีประสิทธิภาพสูง

2.5 ความแตกต่างของ FOC กับ Trapezoidal (6-Step Control) ในวิธีการจัดการกับ Vector ของกระแสผ่าน Space Vector Modulation (SVM)

ลักษณะ	6-Step Control	FOC
การควบคุมกระแสไฟฟ้า	การสลับกระแสในลำดับที่แน่นอน ตามตำแหน่งของโรเตอร์	การควบคุมกระแสไฟฟ้าเป็นคลื่นไอน์ ผ่านการแปลง Clarke และ Park
วิธีการควบคุมเวกเตอร์กระแส	ไม่มีการควบคุมเวกเตอร์กระแสที่ซับซ้อน	ใช้ Space Vector Modulation (SVM) ในการปรับทิศทางและขนาดของเวกเตอร์กระแส
ลักษณะของกระแสไฟฟ้า	สลับเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมคงที่ (Trapezoidal Wave)	กระแสไฟฟ้ามีลักษณะเป็นคลื่นไอน์ (Sinusoidal Wave)

การจัดการแรงบิดและ สนานแม่เหล็ก	ไม่มีการแยกการควบคุมแรงบิดและ สนานแม่เหล็ก	แยกการควบคุมแรงบิด (q-axis) และ สนานแม่เหล็ก (d-axis)
ประสิทธิภาพ	ต่ำกว่า FOC ในบางสถานการณ์	สูงกว่าเนื่องจากการควบคุมที่แม่นยำและ การทำงานราบรื่น

ตารางแสดงความแตกต่างของ FOC กับ Trapezoidal (**6-Step Control**) ในแบบ SVM

3. แบ่งตามการควบคุมตำแหน่ง

3.1 Sensored

เป็นการควบคุมมอเตอร์ BLDC โดยใช้อุปกรณ์เซนเซอร์ เช่น Hall Effect Sensors หรือ Rotary Encoders เพื่อวัดตำแหน่งของโรเตอร์โดยตรง

3.1.1 ข้อดี

- สามารถตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ได้โดยตรง ทำให้การควบคุมความเร็วและแรงบิดมีความแม่นยำ
- มีการตอบสนองที่เร็ว
- เริ่มต้นเดินเครื่องง่ายโดยเฉพาะเมื่อมอเตอร์อยู่ในสภาพโหลดสูงหรือเริ่มหมุนจากจุดหยุดนิ่ง
- ใช้งานที่ความเร็วต่ำได้ดี

3.1.2 ข้อเสีย

- ต้นทุนสูงขึ้น
- มีความซับซ้อนกว่าในฮาร์ดแวร์ เพราะต้องออกแบบวงจรเพิ่มเติมสำหรับการอ่านค่าจากเซนเซอร์
- ในสภาพแวดล้อมที่มีฝุ่น ความชื้น หรืออุณหภูมิสูง เช่นเซอร์วอเจส์อาจเสื่อมสภาพได้ง่าย

3.2 Sensorless

เป็นการควบคุมมอเตอร์ BLDC โดยไม่ใช้เซนเซอร์วัดตำแหน่งของโรเตอร์ โดยจะใช้การวิเคราะห์ Back Electromotive Force (Back-EMF) ที่เกิดขึ้นในขดลวดมอเตอร์เพื่อคำนวณตำแหน่งของโรเตอร์

3.2.1 ข้อดี

- ต้นทุนต่ำ
- มีความทนทานสูง因为กับงานในสภาพแวดล้อมที่รุนแรง

- การออกแบบที่ง่ายกว่าในบางกรณีไม่ต้องใช้วงจรเชื่อมต่อ กับเซนเซอร์ ทำให้การออกแบบทางอิเล็กทรอนิกส์ง่ายขึ้น

3.2.2 ข้อเสีย

- มีความแม่นยำที่น้อย โดยเฉพาะในช่วงความเร็วต่ำ เนื่องจาก Back-EMF จะมีขนาดเล็กมากและตรวจจับได้ยาก
- มีความล่าช้าในกระบวนการคำนวณตำแหน่ง ทำให้มีการตอบสนองที่ช้า
- เริ่มต้นเดินเครื่องยากในบางกรณี เช่น เมื่อมอเตอร์อยู่ในโหลดสูงหรือหยุดนิ่ง การตรวจจับตำแหน่งเริ่มต้นอาจมีปัญหา

3.3 ความแตกต่างระหว่าง Sensored กับ Sensorless

คุณสมบัติ	Sensored Control	Sensorless Control
ต้นทุน	สูง	ต่ำ
ความแม่นยำ	สูง	ต่ำกว่า
เหมาะสมกับงานที่มีความเร็วต่ำ	ดีมาก	จำกัด
เริ่มต้นเดินเครื่อง	ง่าย	อาจซับซ้อน
ความซับซ้อนของฮาร์ดแวร์	สูง	ต่ำ
ความทนทาน	ต่ำกว่า	สูง

ตารางความแตกต่างระหว่าง Sensored กับ Sensorless

Datasheet A2212/13T

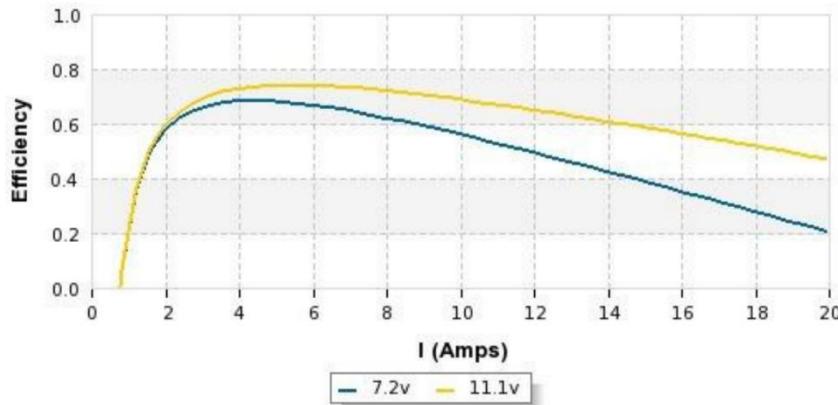
No. of Cells	2 - 3 Li-Poly 6 - 10 NiCd/NiMH
Kv	1000 RPM/V
Max Efficiency	80%
Max Efficiency Current	4 – 10A (>75%)
No Load Current	0.5A @10V
Resistance	0.090 ohms
Max Current	13A for 60S

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

โดยที่

- No. of Cells คือ จำนวนเซลล์แบตเตอรี่ที่รองรับ
- Kv คือ Velocity Constant มอเตอร์จะหมุนที่ 1000 RPM (รอบต่อนาที) ต่อแรงดัน 1 โวลต์
- Max Efficiency คือ ประสิทธิภาพสูงสุดของมอเตอร์คือ 80%
- Max Efficiency Current คือ ช่วงกระแสที่มอเตอร์ทำงานได้มีประสิทธิภาพสูงสุดที่มากกว่า 75%
- No Load Current คือ กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้เมื่อไม่มีโหลด คือ 0.5A ที่แรงดัน 10V
- Resistance คือ ความต้านทานภายในของขดลวดมอเตอร์ คือ 0.090 โอห์ม
- Max Current คือ กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่มอเตอร์รับได้คือ 13A เป็นเวลาสูงสุด 60 วินาที
- Max Watts คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่มอเตอร์รับได้คือ 150 วัตต์
- Weight คือ น้ำหนักของมอเตอร์คือ 52.7 กรัม หรือประมาณ 1.86 ออนซ์
- Size คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 28 มม. และความยาวของตัวมอเตอร์ 28 มม.
- Shaft Diameter คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนหมุน (Shaft) คือ 3.2 มม.
- Poles คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก (Poles) ภายในมอเตอร์ ใช้ในการคำนวณความถี่ไฟฟ้า และ ตำแหน่งการหมุนของโรเตอร์
- Model Weight คือ น้ำหนักโดยรวมของโมเดลที่ใช้งานร่วมกับมอเตอร์นี้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและประสิทธิภาพของมอเตอร์



อธิบายกราฟ

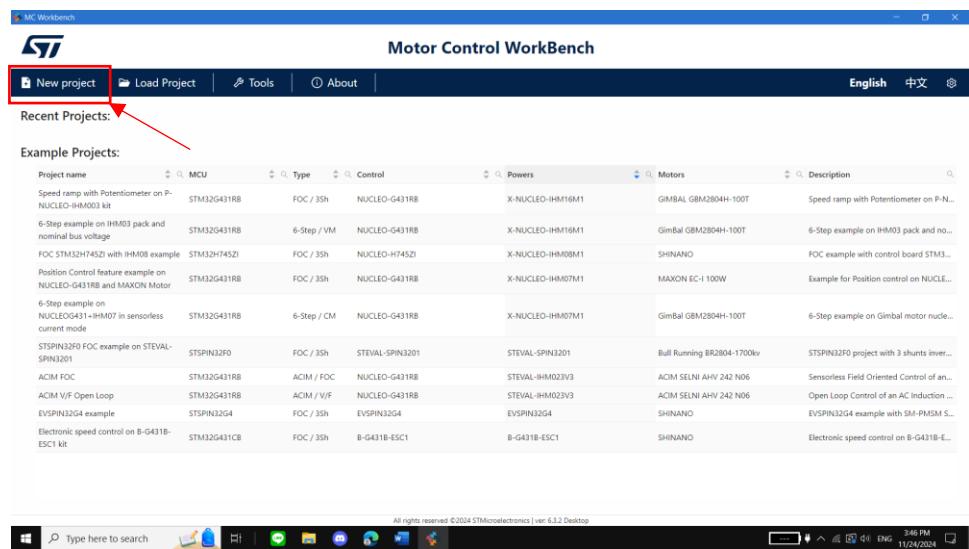
- แกน X คือ กระแสไฟฟ้า (I) มีหน่วยเป็น อัมป์ (Amps)
- แกน Y คือ ประสิทธิภาพของมอเตอร์ (Efficiency) แสดงในรูปแบบอัตราส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าตั้งแต่ 0.0 ถึง 1.0 (หรือ 0% ถึง 100%)
- เส้นสีเหลือง: ประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่แรงดัน 11.1V
- เส้นสีน้ำเงิน: ประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่แรงดัน 7.2V

สรุปกราฟ

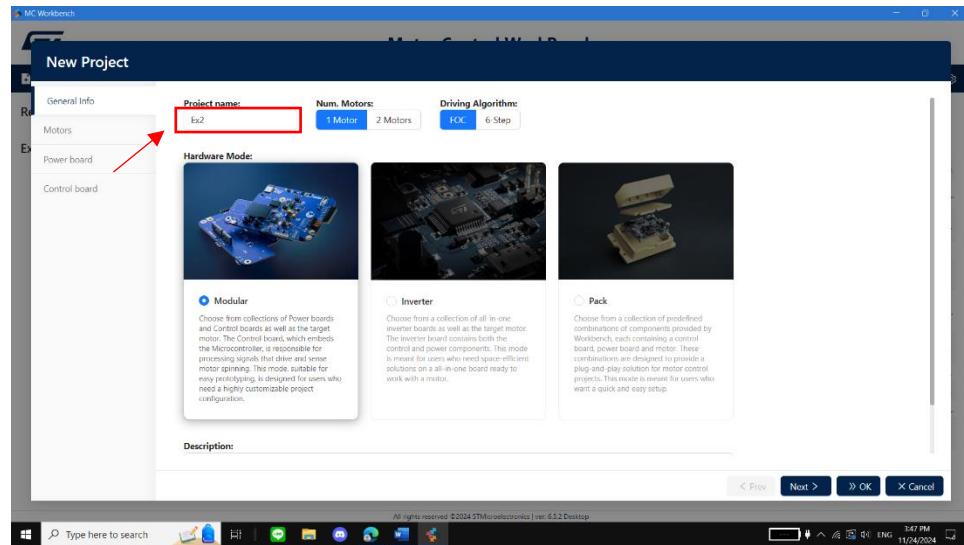
- กราฟแสดงให้เห็นว่ามอเตอร์ทำงานได้มีประสิทธิภาพสูงสุดในช่วงกระแสไฟฟ้า 4 – 6 A
- แรงดันไฟฟ้าที่สูงกว่า (11.1V) ให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าแรงดันต่ำ (7.2V) โดยเฉพาะที่กระแสไฟฟ้าต่ำ
- ประสิทธิภาพจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อกระแสเพิ่มขึ้นเกินช่วงทำงานที่เหมาะสม เนื่องจาก การสูญเสียพลังงานเพิ่มขึ้น

วิธีการดำเนินการทดลอง

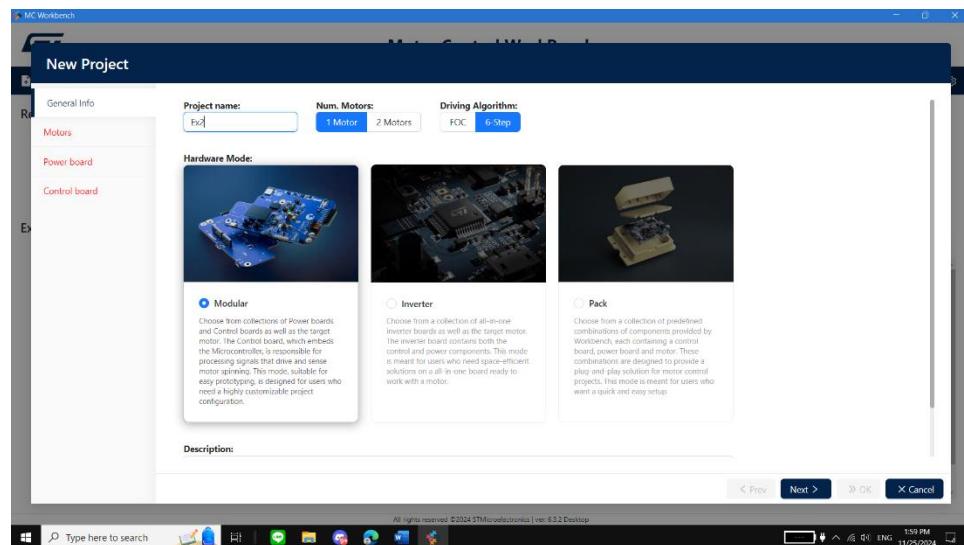
1. วัสดุ / อุปกรณ์ และเครื่องมือพิเศษ
 - 1.8 BLDC Motor จำนวน 1 อัน
 - 1.9 STMICROELECTRONICS X-NUCLEO-IHM08M1 จำนวน 1 อัน
 - 1.10 Nucleo STM32G474RE พร้อมสายอัปโหลด จำนวน 1 ชุด
 - 1.11 BLDCXplorer จำนวน 1 ชุด - ฐานสามารถบรรจุบอร์ดควบคุม, Breadboard, 3D-Print ใช้สำหรับการประกอบกับ BLDC Motor
2. ขั้นตอนการดำเนินงาน
 - 2.1 วิธีการตั้งค่า Motor ในโปรแกรม Motor Workbench 6.3.2
 - 2.1.1 สร้าง New Project



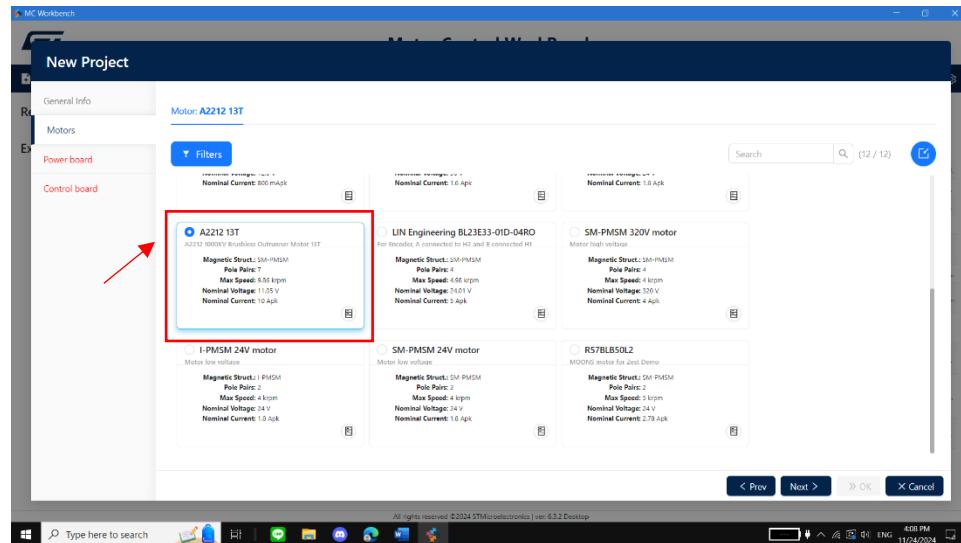
2.1.2 ตั้งชื่อ Project



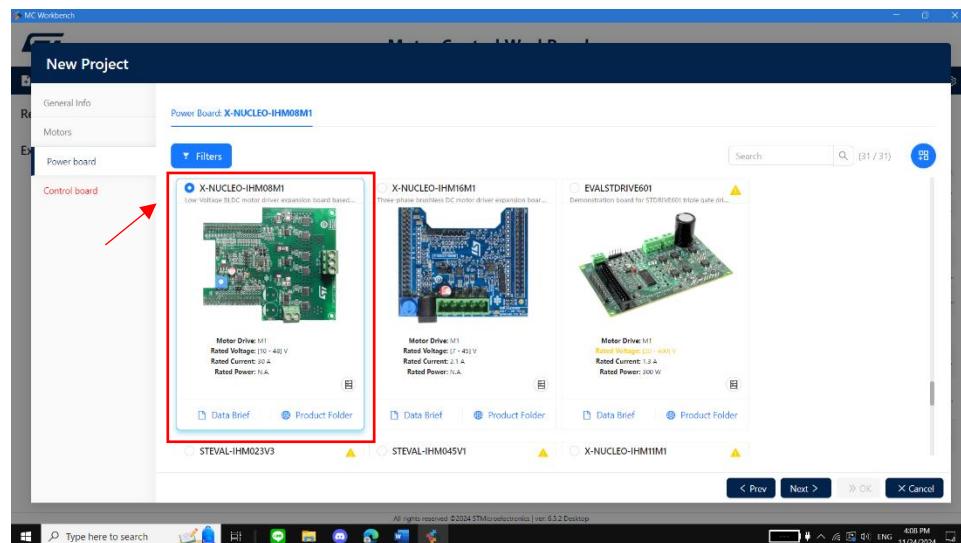
2.1.3 กดเลือก 6-Steps



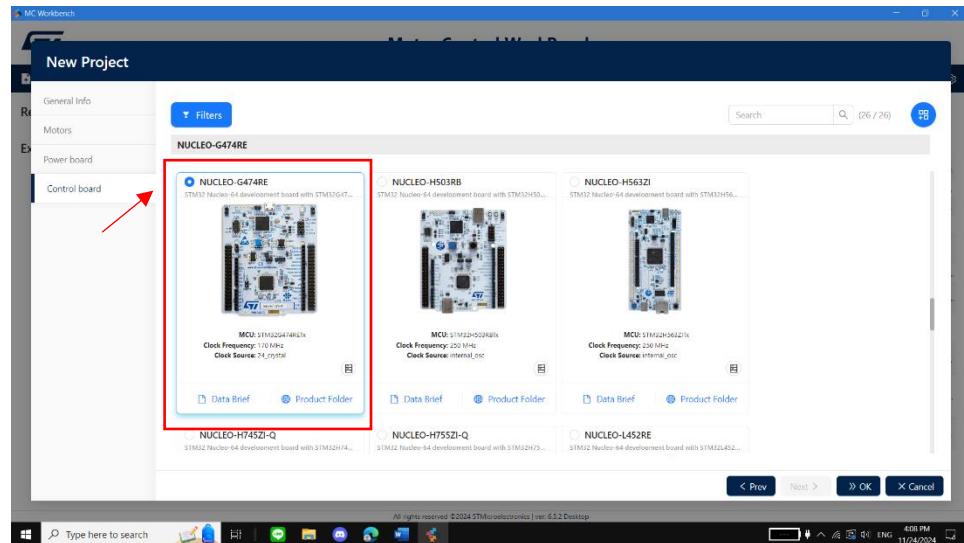
2.1.4 กดเลือก A2212 13T



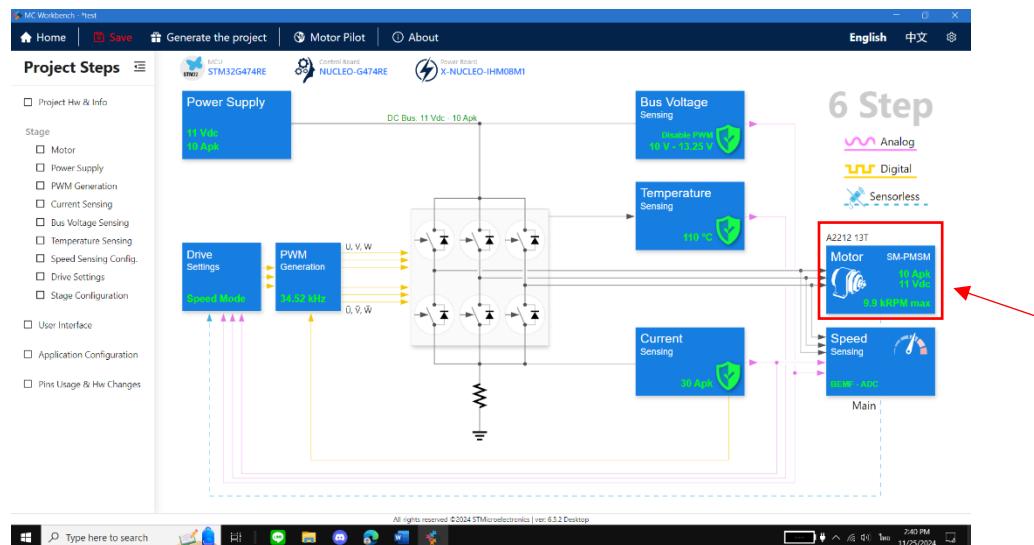
2.1.5 กดเลือก X-NUCLEO-IHM08M1



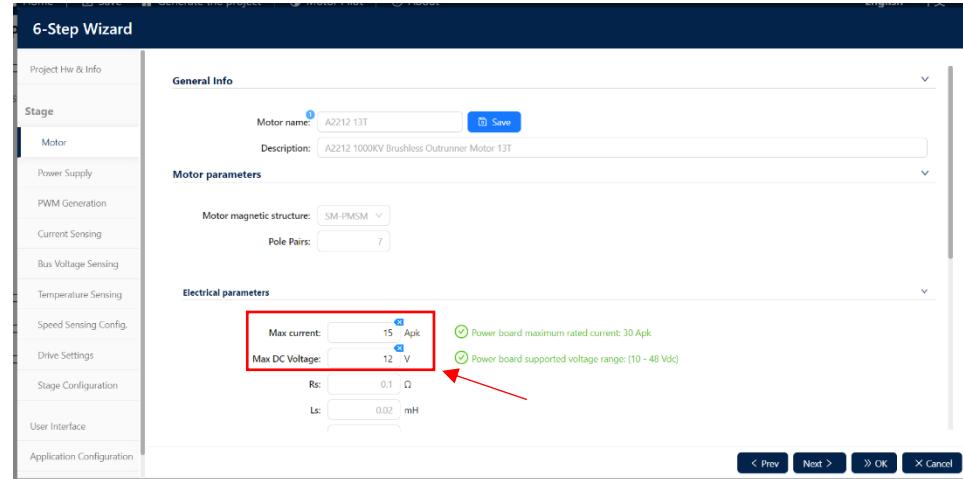
2.1.6 กดเลือก NUCLEO-G474RE



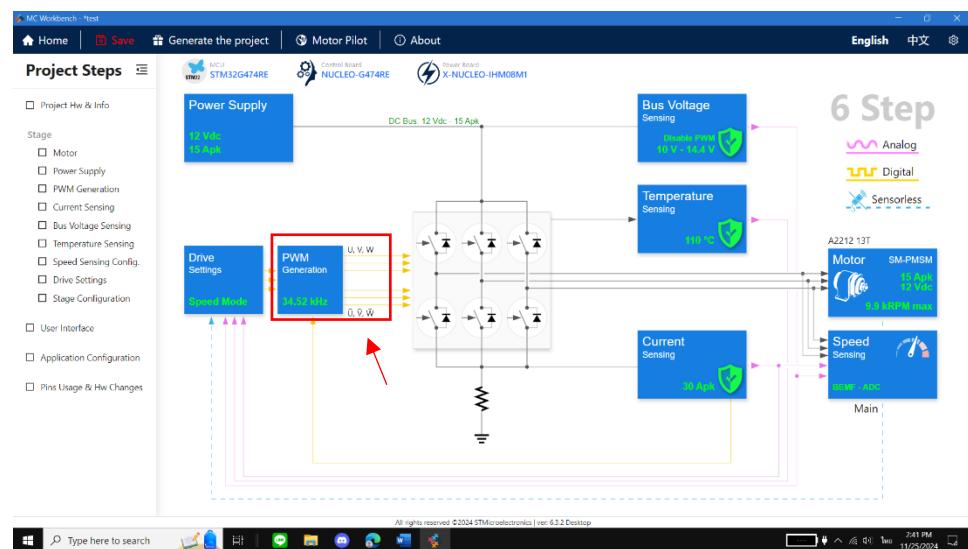
2.1.7 กด Motor



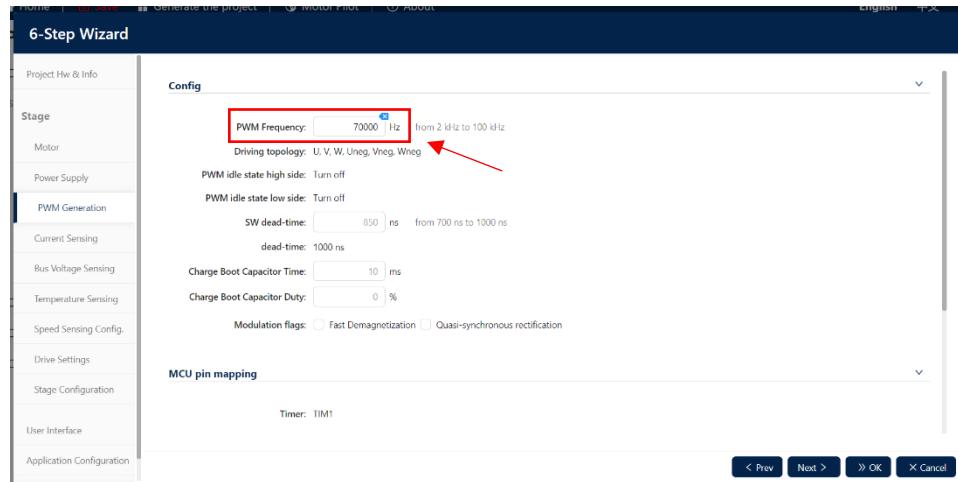
2.1.8 ตั้งค่าให้ Max current เป็น 15V และ Max DC Voltage เป็น 12V



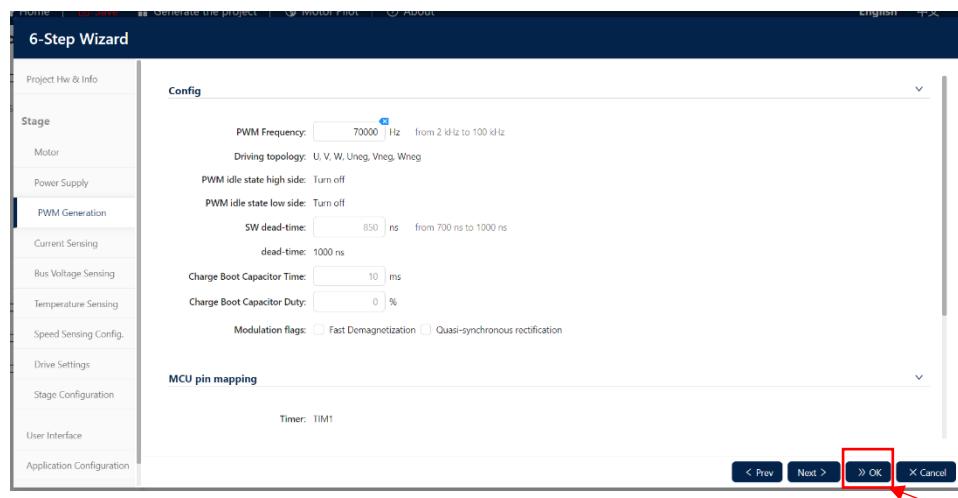
2.1.9 กด PWM Generation



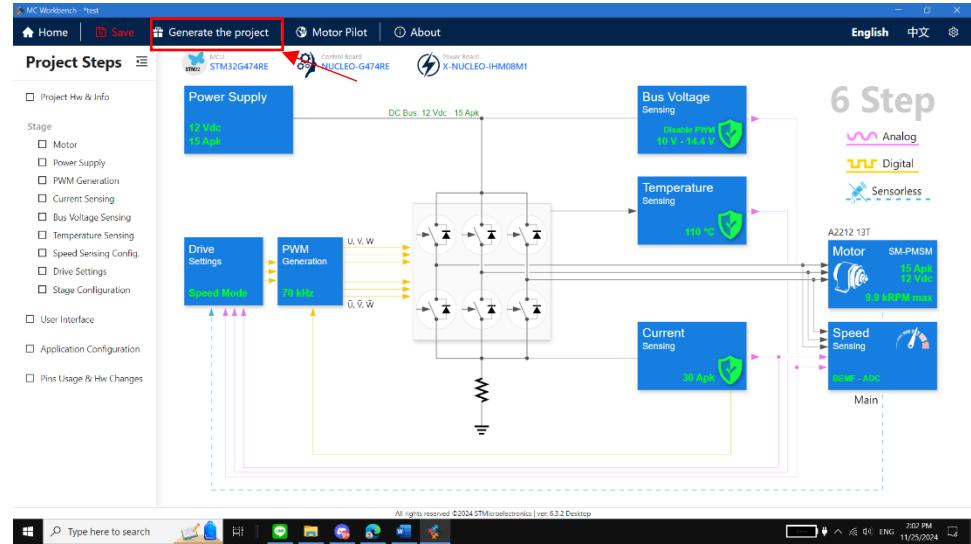
2.1.10 ตั้งค่าให้ PWM Frequency เป็น 70,000Hz



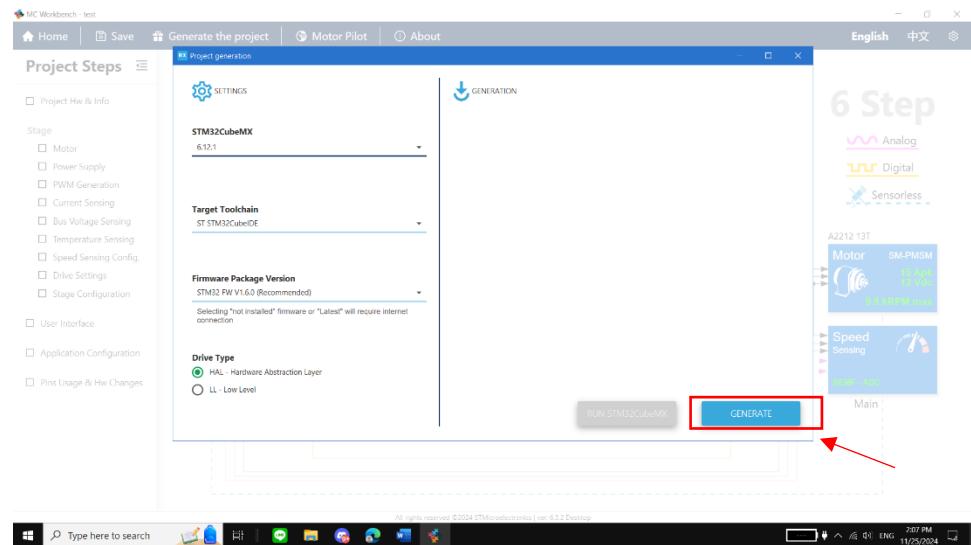
2.1.11 กด Ok



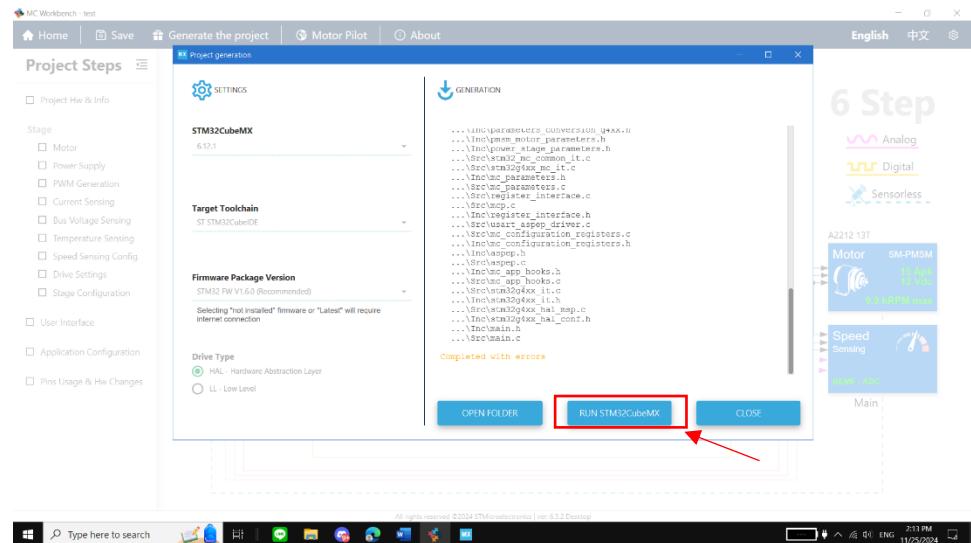
2.1.12 กด Generate the project



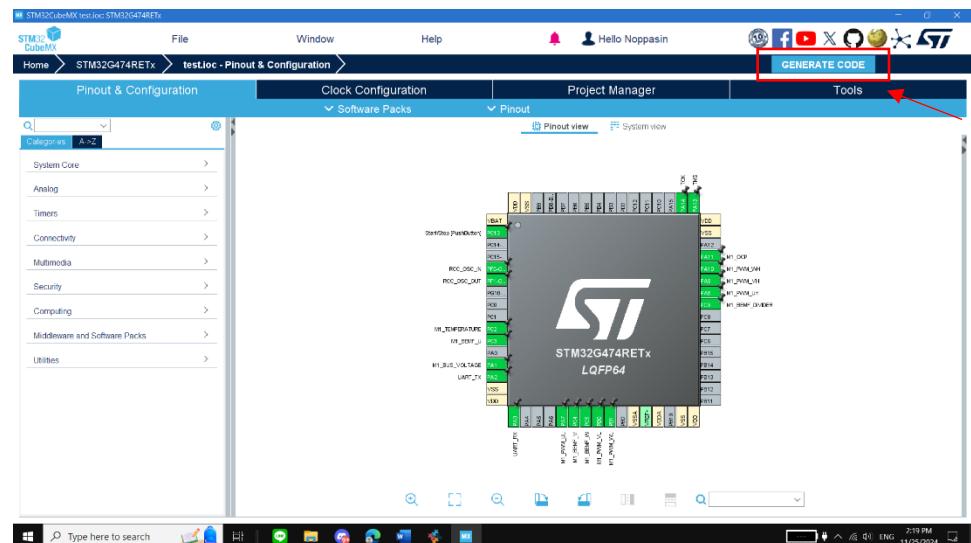
2.1.13 กด Generate แล้วรอ



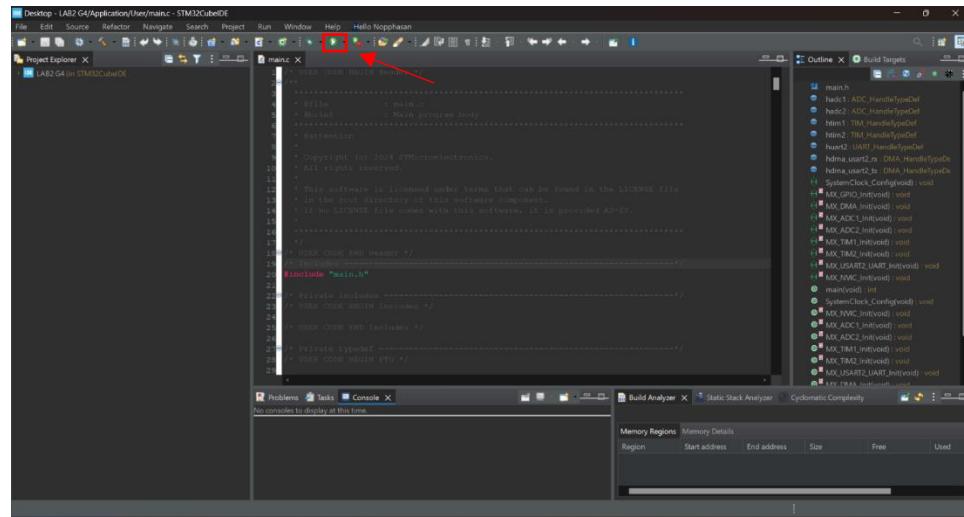
2.1.14 กด Run STM32CubeMX



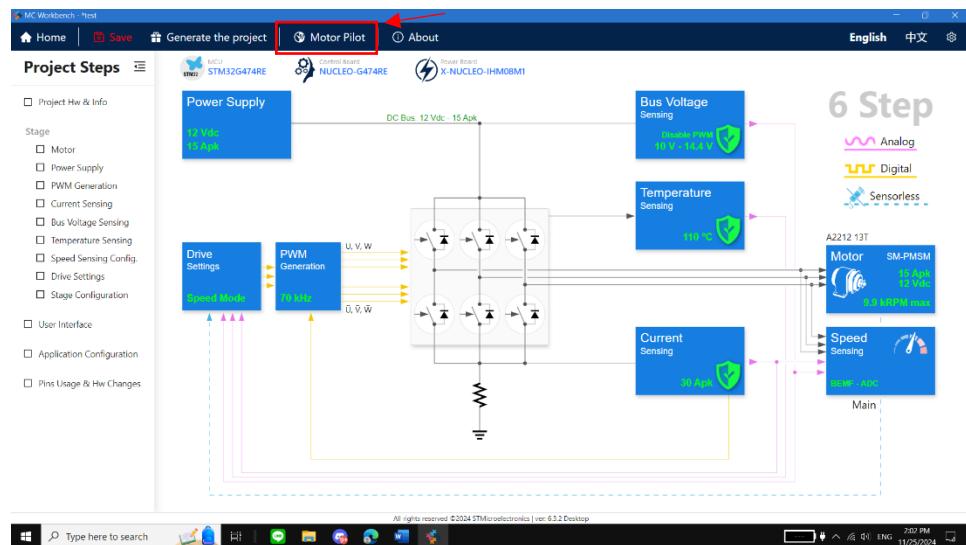
2.1.15 กด Generate Code บน STM32CubeMX



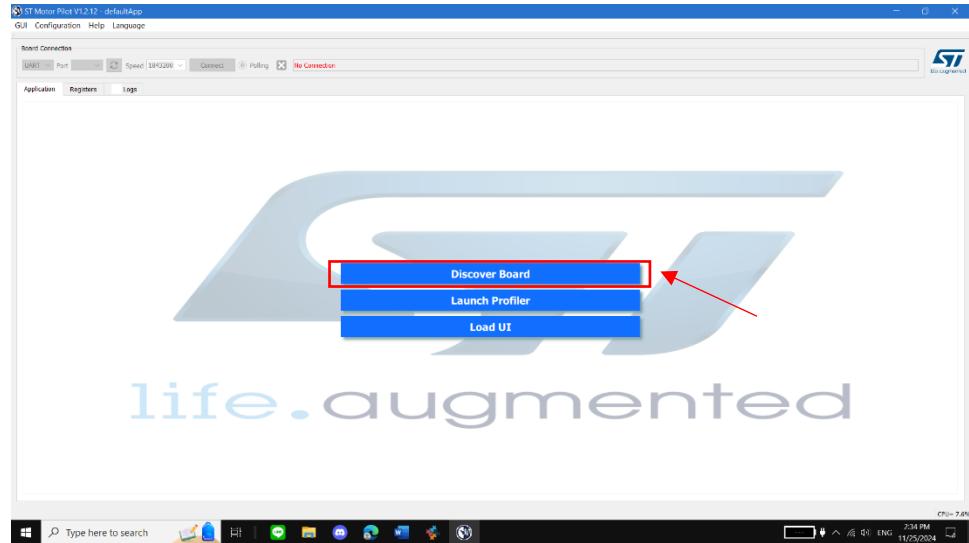
2.1.16 กด Run code เพื่อ flash code จาก STM32CubeIDE ไป board NUCLEO-G474RE



2.1.17 กลับมาที่ Motor Workbench กด Motor Pilot

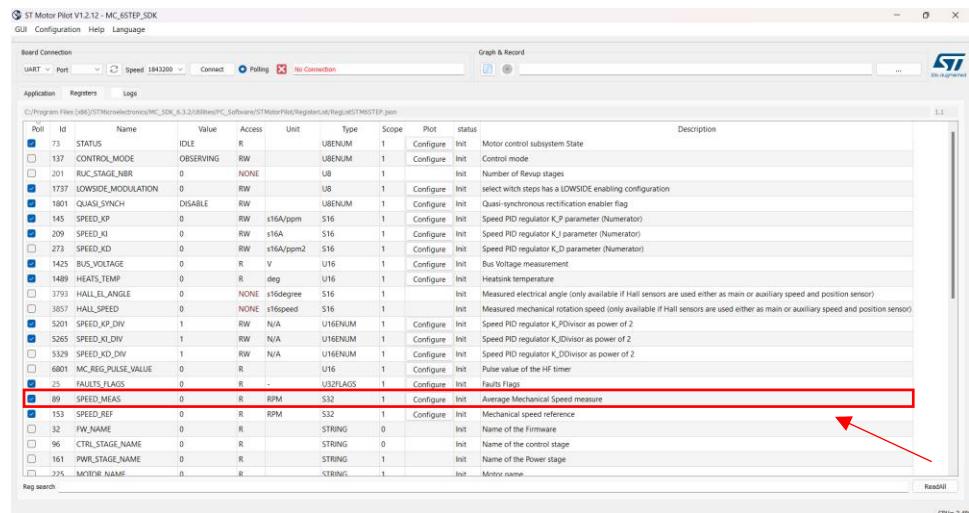


2.1.18 กด discover board เป็นอันจะการตั้งค่า



2.2 ทำการทดลองโดยควบคุม BLDC Motor ผ่านตัว Motor Pilot

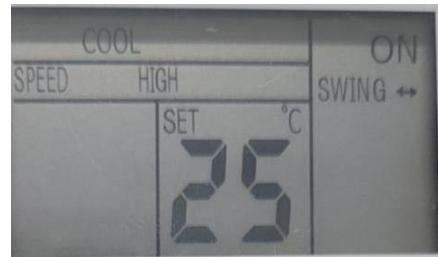
2.3 ทำการเก็บข้อมูลจากราฟของ SPEED_MEAS โดยการกด Configure



2.4 เก็บผลการทดลองโดยปรับค่า RPM โดยเริ่มจากค่าสูงสุดที่มอเตอร์สามารถทำได้แล้วลงไปเรื่อย ๆ ครั้งละ 1000 RPM จนถึงค่า RPM ที่น้อยที่สุดที่มอเตอร์สามารถทำได้ ดังนี้ 9800 8800 7800 6800 5800 4800 3800 2800 1800 -9800 -8800 -7800 -6800 -5800 -4800 -3800 -2800 -1800 และเก็บค่าที่ RPM 1400 และ -1400 เพราะเป็นค่า RPM ที่น้อยที่สุดของแต่ละทิศทางการหมุนที่มอเตอร์จะสามารถหมุนได้เมื่อกดเริ่มการทำงานใหม่ (โดยค่า RPM ในการเก็บผลจริงจะคลาดเคลื่อนเล็กน้อย จากความสามารถในการปรับค่า RPM ของโปรแกรมควบคุมมอเตอร์)

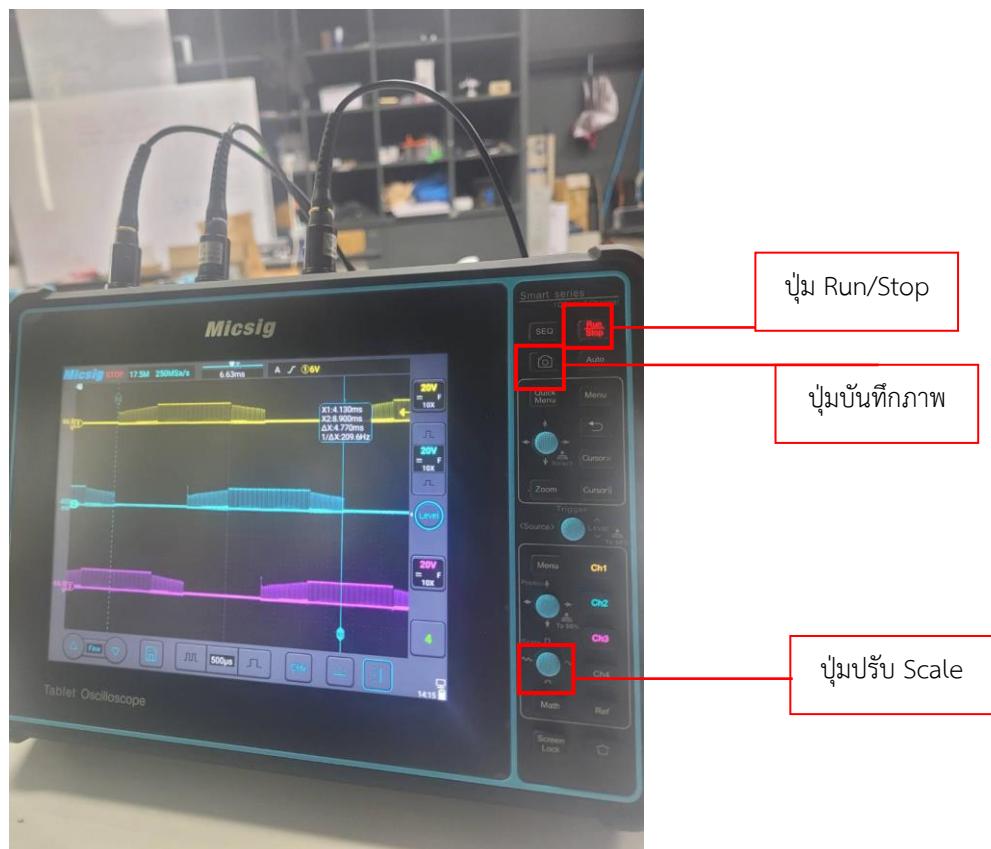
2.5 โดยจะบันทึกผลทั้งหมด 3 ค่า ภายใต้การควบคุมอุณหภูมิภายในห้อง 25°C ดังนี้

- ความเร็วของลูกคลื่น
- Duty Cycle
- แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่มอเตอร์



รูปแสดงอุณหภูมิภายในห้องทดลอง

ก่อนจะทำการเก็บค่าต่าง ๆ ในแต่ละ RPM ต้องปรับ Scale ที่เครื่อง Oscilloscope ให้รูปคลื่นบนหน้าจอไม่เกิดการซ้อนทับกัน จากนั้นจึงกดปุ่ม Run/Stop เพื่อให้ลูกคลื่นอยู่นิ่งพร้อมสำหรับการบันทึกค่าต่าง ๆ



รูป Tablet Oscilloscope

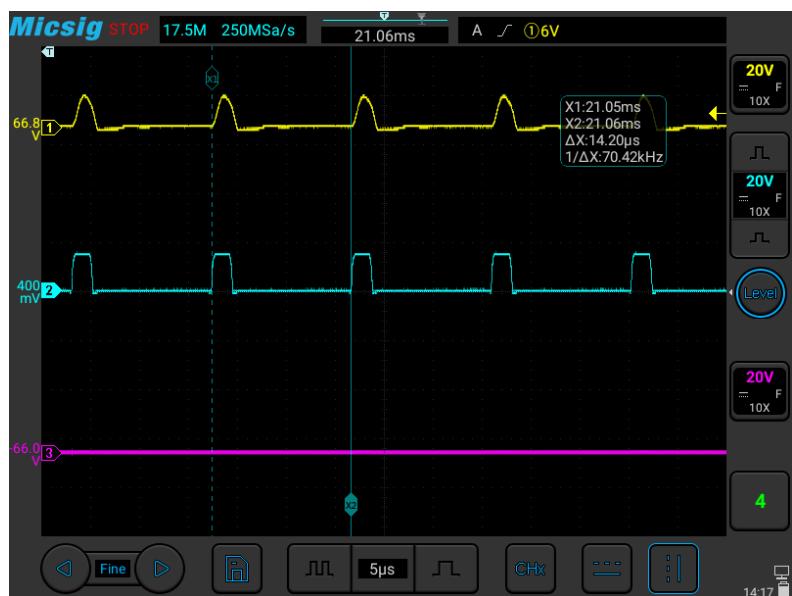
2.5.1. การเก็บค่าความถี่ของลูกคลื่น



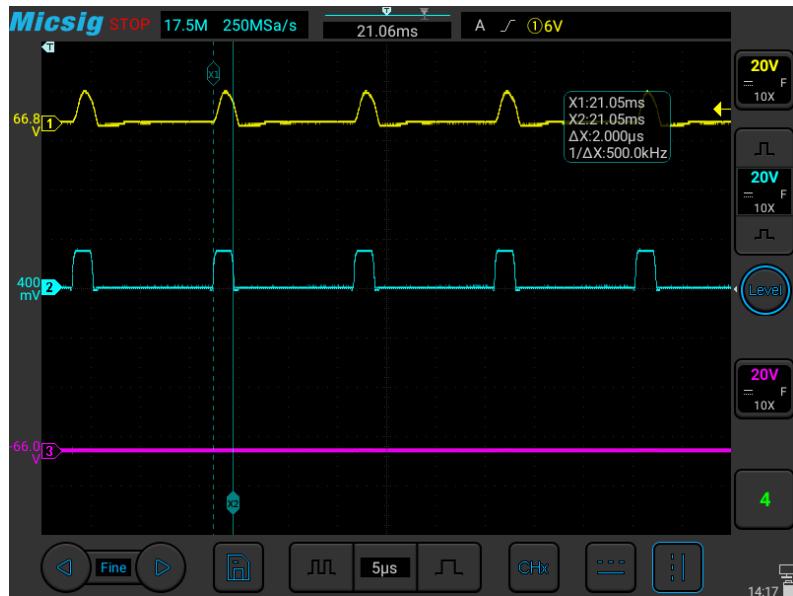
- เพิ่ม Scale เพื่อให้เห็นลูกคลื่นได้ชัดเจน
- จากนั้นใช้ Scope วัดจุดต้นและจุดปลายของลูกคลื่นเพื่อวัดความถี่ของ 1 ลูกคลื่น
- เก็บค่าความถี่ของลูกคลื่นอื่น ๆ ทั้งหมด 5 ลูกคลื่นในแต่ละ RPM เพื่อหาค่าเฉลี่ยของความถี่ลูกคลื่นใน RPM นั้น ๆ และลดความผิดพลาดจากการวัดซึ่งลูกคลื่น

2.5.2. การเก็บค่า Duty Cycle

- ปรับ Scale ให้สามารถเห็นสัญญาณ PWM
- ใช้ Scope วัดความถี่ของรอบการทำงานทั้งหมด (Full Cycle) ของสัญญาณ Pulse 1 ลูก



- ใช้ Scope วัดความถี่ของรอบการทำงานที่เป็นช่วง On ของสัญญาณ Pulse 1 ลูก



- จานั่นคำนวณค่า Duty Cycle

$$\text{Duty Cycle} = (100 \times \frac{\text{On time}}{\text{Period}})$$

โดยที่ On Time คือ ช่วงเวลา On ของ Pulse (วินาที)

Period คือ ครบ (วินาที)

2.5.3. การเก็บค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ไม่เตอร์



- ใช้ Scope วัดจุดล่างสุดและบนสุดของสัญญาณ เพื่อหาแรงดันไฟฟ้าที่ถูกนำไปใช้กับมอเตอร์
- บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าในแต่ละ RPM

2.6. การ Setup ชุดการทดลอง



รูปชุดการทดลอง Brushless DC Motor

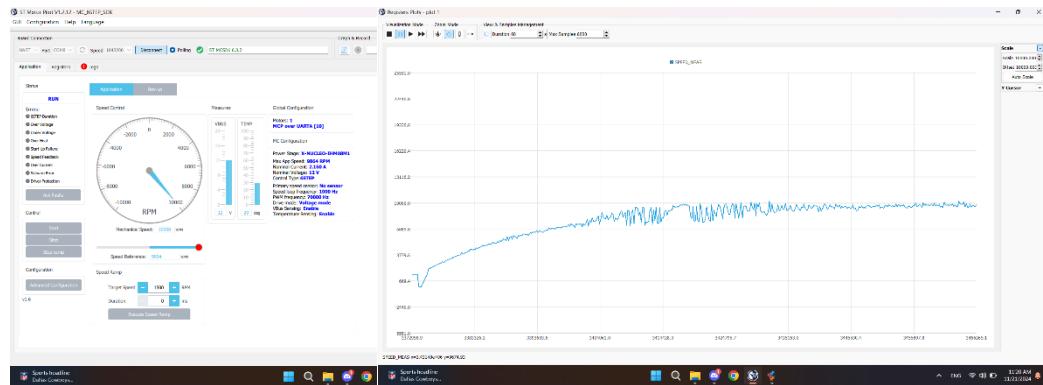
ผลการทดลอง

ทำการทดลองเก็บค่าด้วยวิธีการควบคุมแบบ 6-Steps ทำให้ได้รูปในโปรแกรม Motor Pilot และสัญญาณบนหน้าจอ oscilloscope ออกมาดังนี้

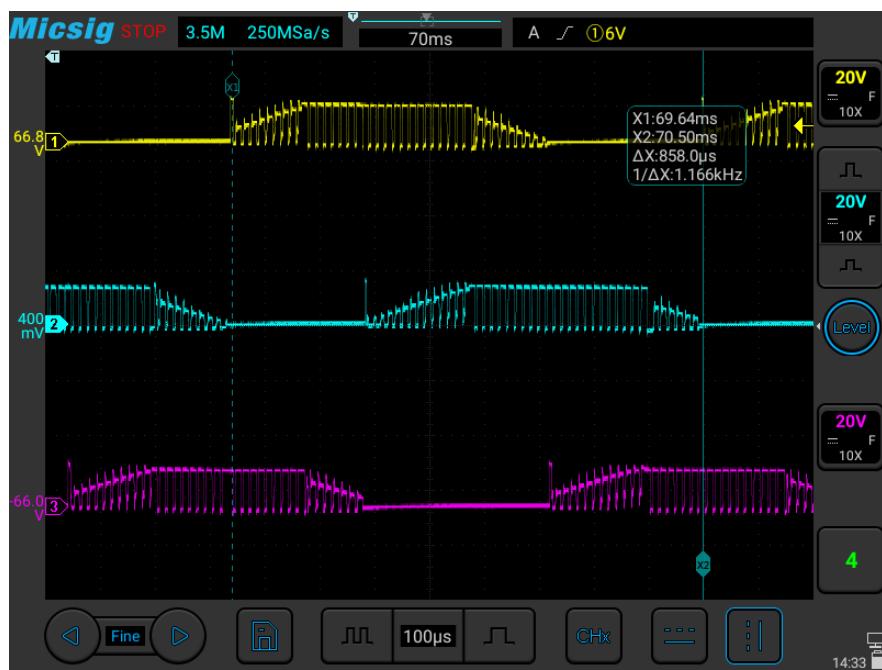
1. Brushless Motor หมุนแบบวนเข็มนาฬิกา

1.1 ที่ความเร็ว 9,864 rpm

- กราฟในโปรแกรม Motor Pilot

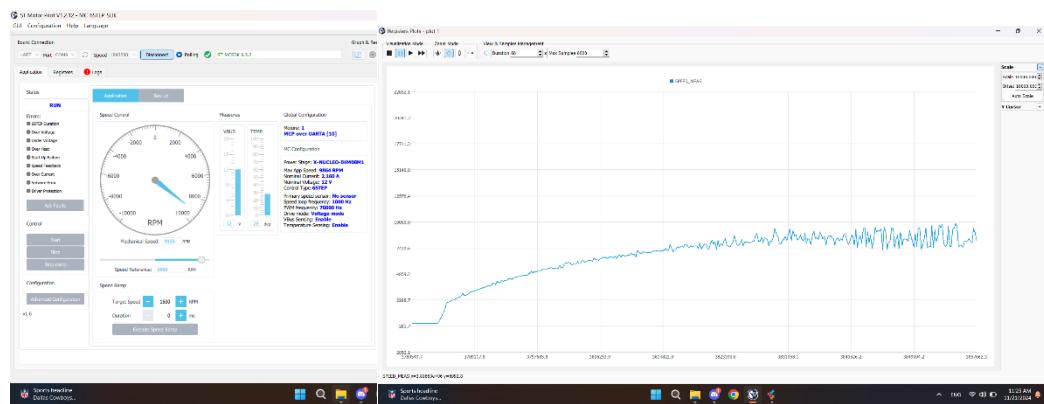


- กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope

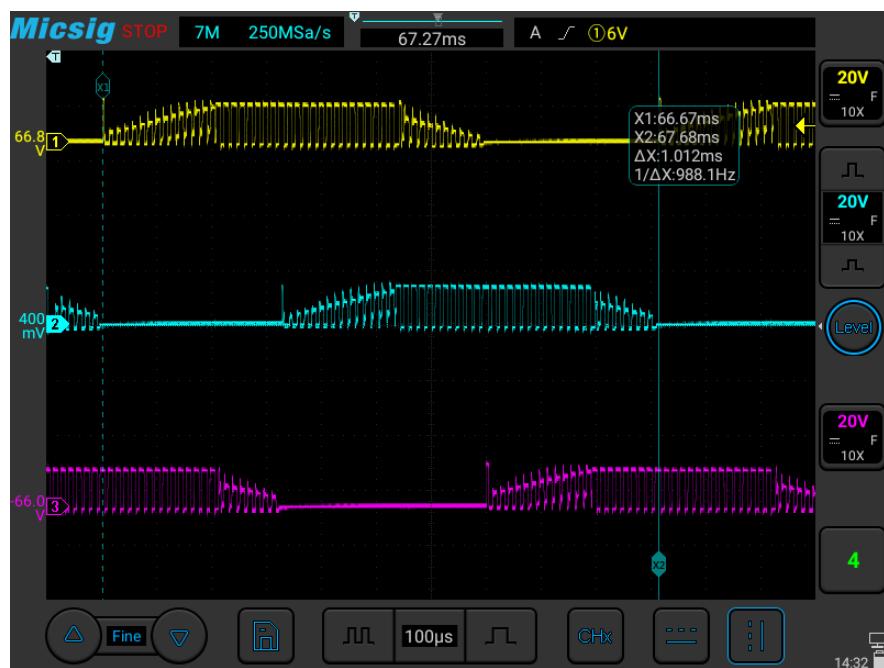


1.2 ที่ความเร็ว 8,864 rpm

- กราฟในโปรแกรม Motor Pilot

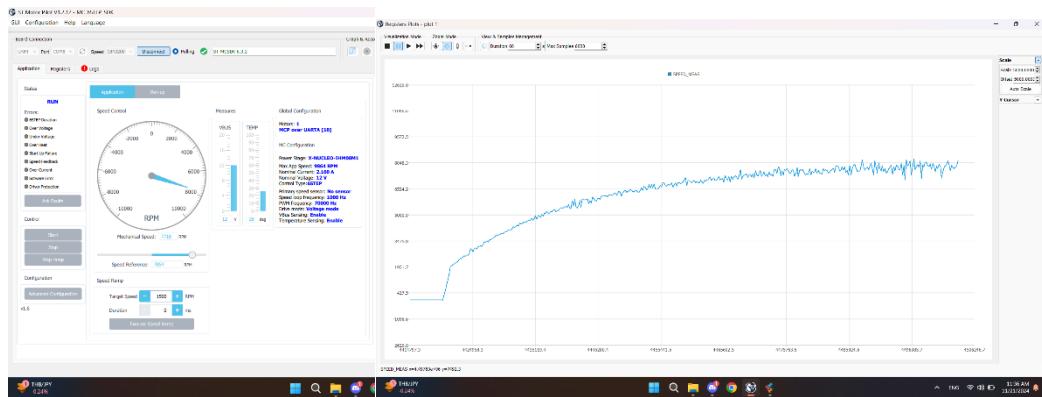


- กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope

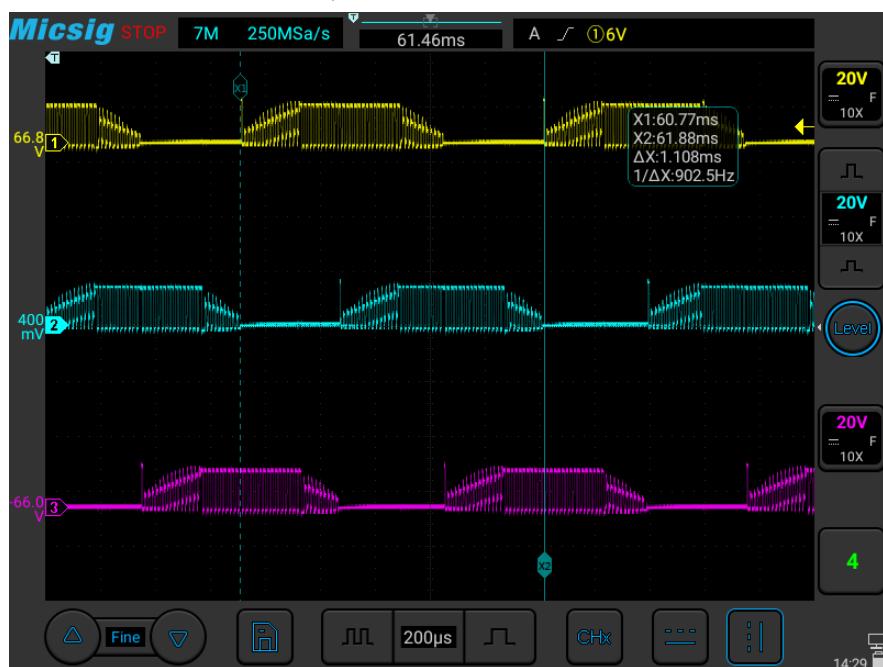


1.3 ที่ความเร็ว 7,854 rpm

- กราฟในโปรแกรม Motor Pilot

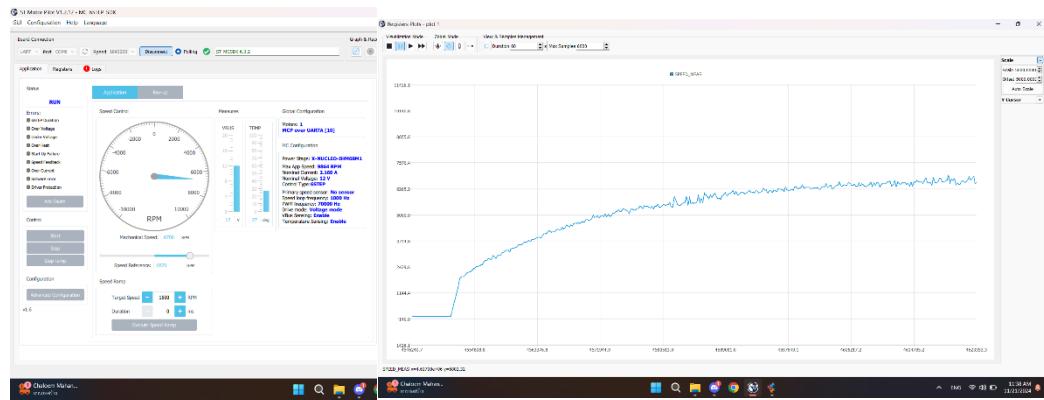


- กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope

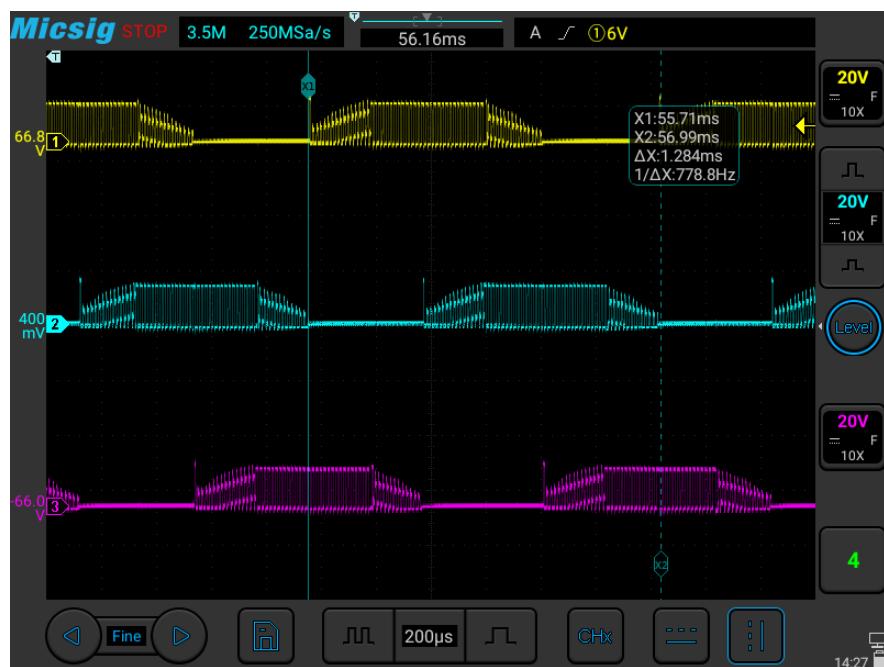


1.4 ที่ความเร็ว 6,872 rpm

- กราฟในโปรแกรม Motor Pilot

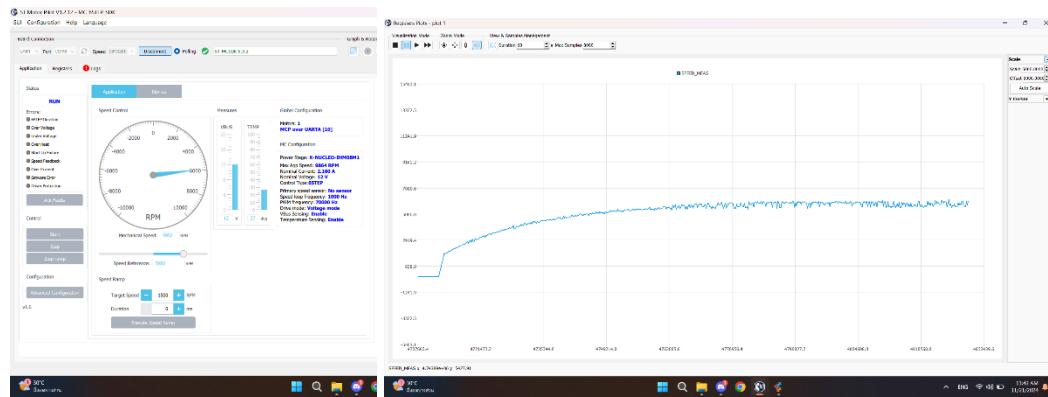


- กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope

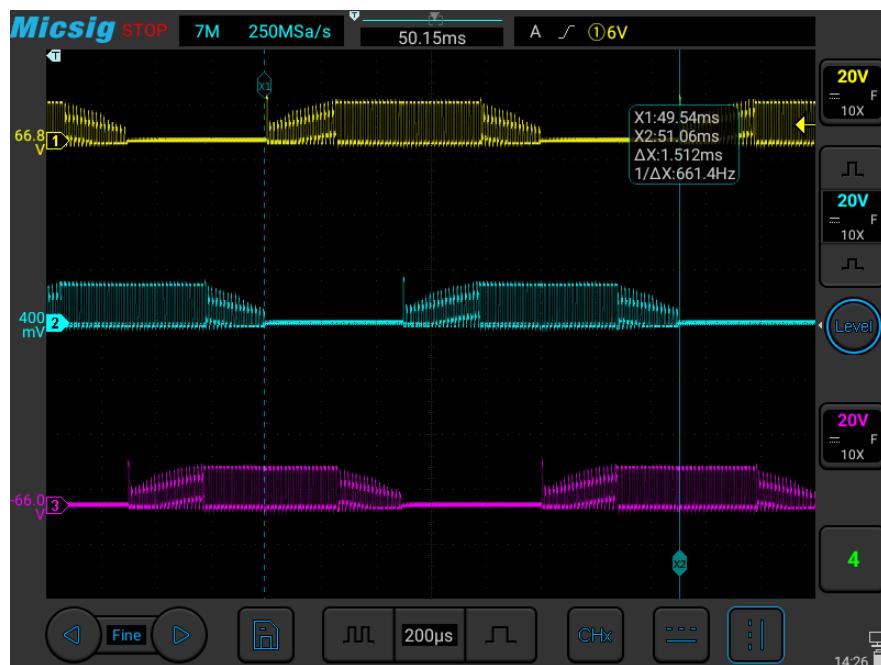


1.5 ที่ความเร็ว 5,886 rpm

- กราฟในโปรแกรม Motor Pilot

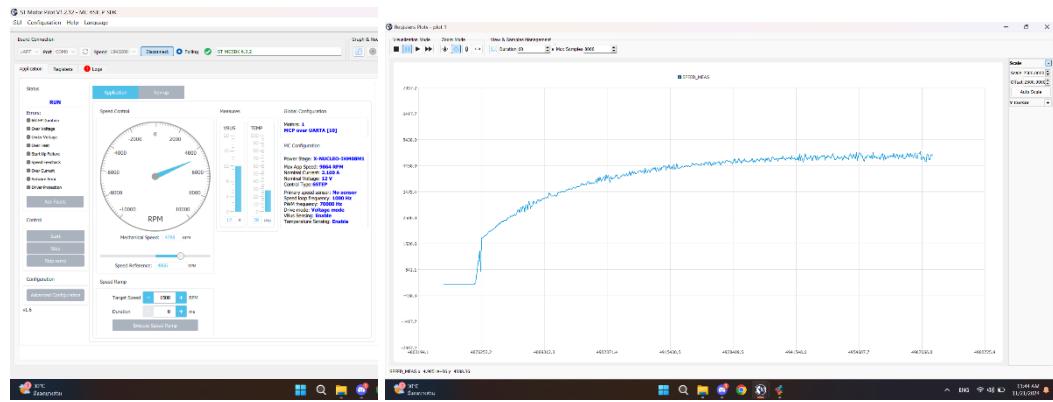


- กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope

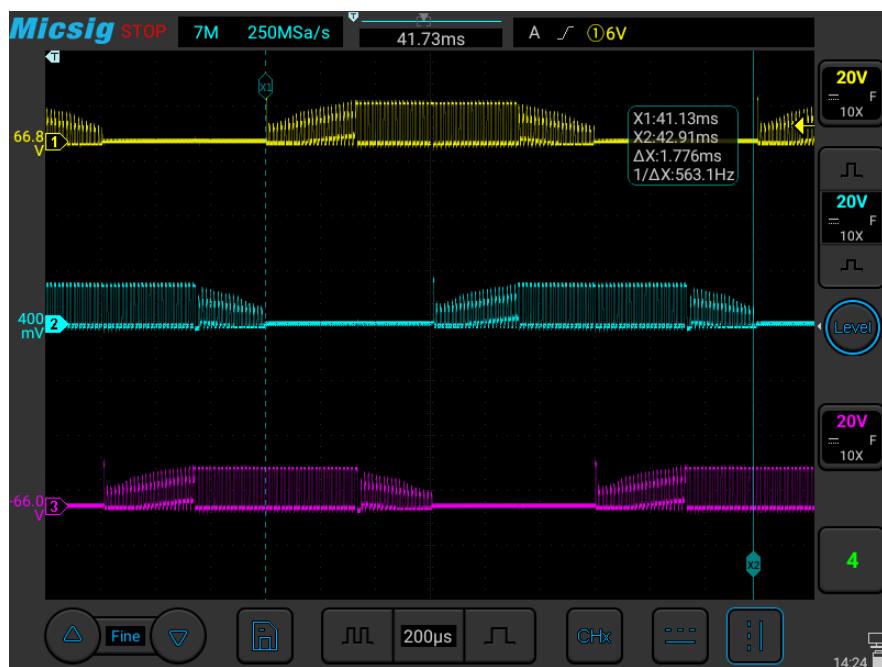


1.6 ที่ความเร็ว 4,886 rpm

- กราฟในโปรแกรม Motor Pilot

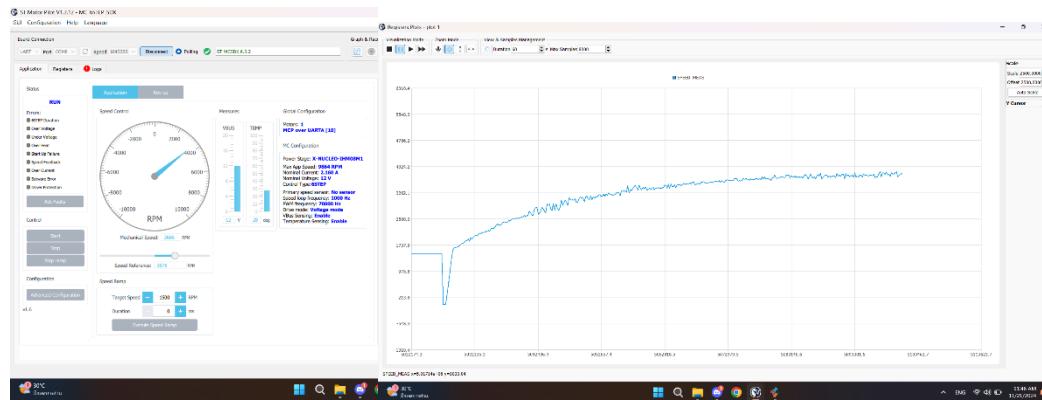


- กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope

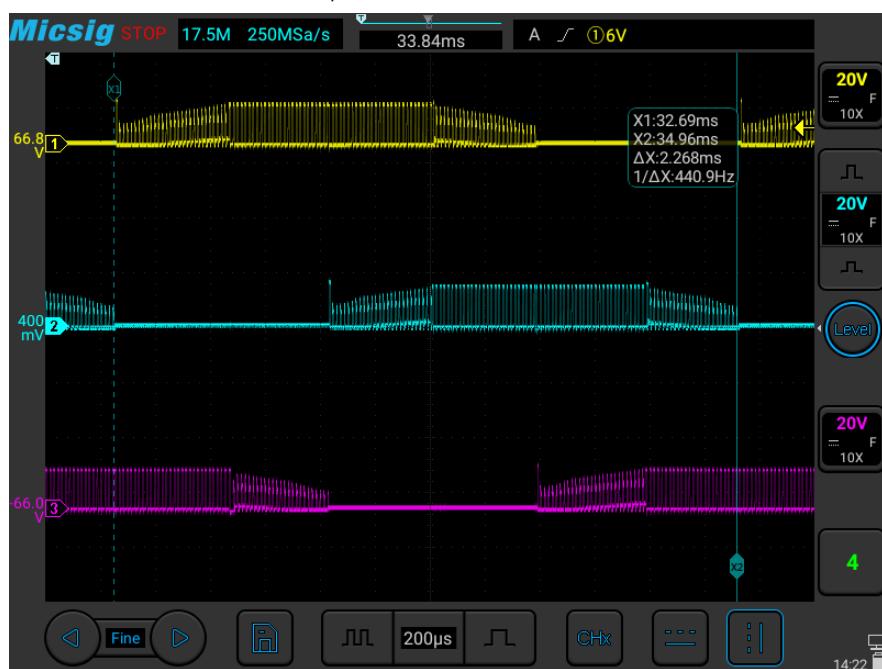


1.7 ที่ความเร็ว 3,876 rpm

- กราฟในโปรแกรม Motor Pilot

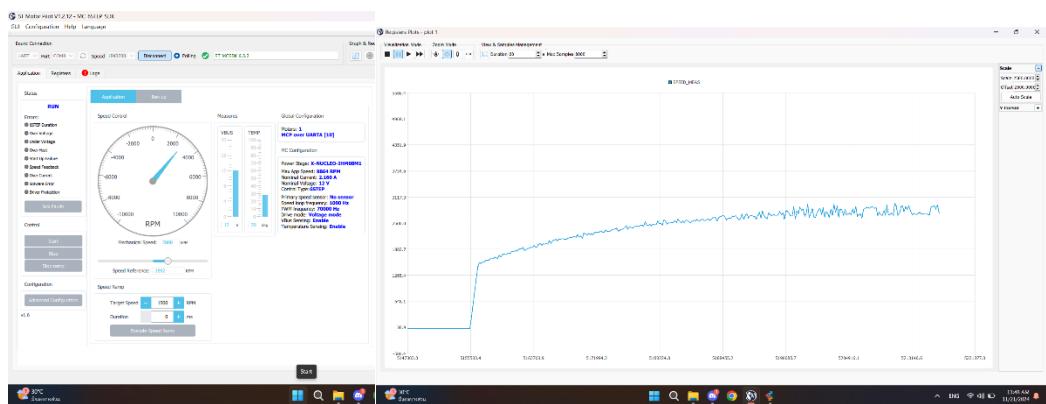


- กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope



1.8 ที่ความเร็ว 2,892 rpm

- กราฟในโปรแกรม Motor Pilot

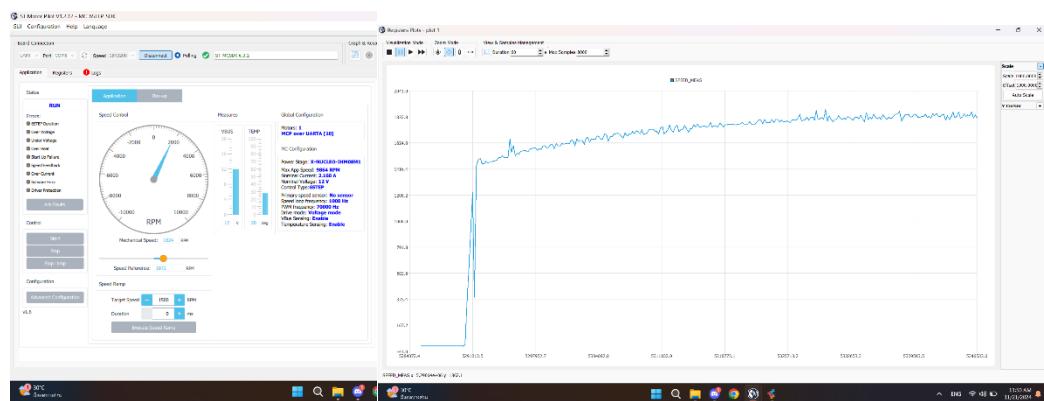


- กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope



1.9 ที่ความเร็ว 1,872 rpm

- กราฟในโปรแกรม Motor Pilot

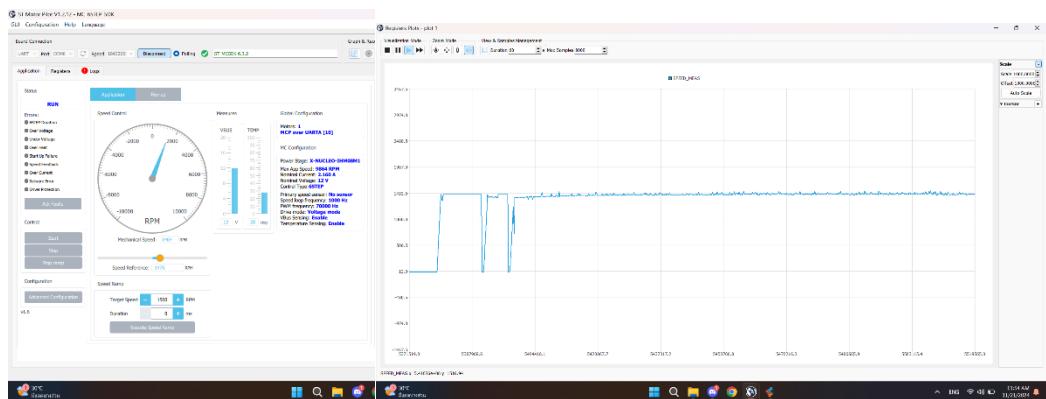


- กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope



1.10 ที่ความเร็ว 1,476 rpm

- กราฟในโปรแกรม Motor Pilot



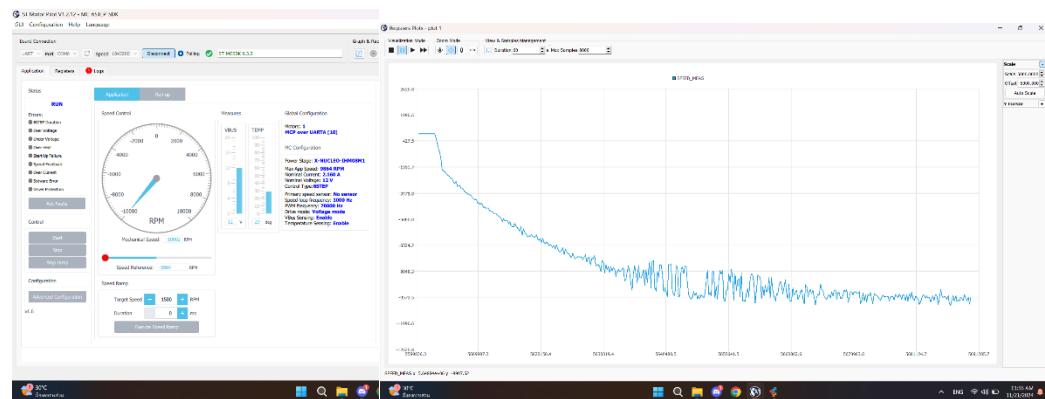
- กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope



2. Brushless Motor หมุนแบบตามเข็มนาฬิกา

2.1 ที่ความเร็ว 9,864 rpm

- กราฟในโปรแกรม Motor Pilot

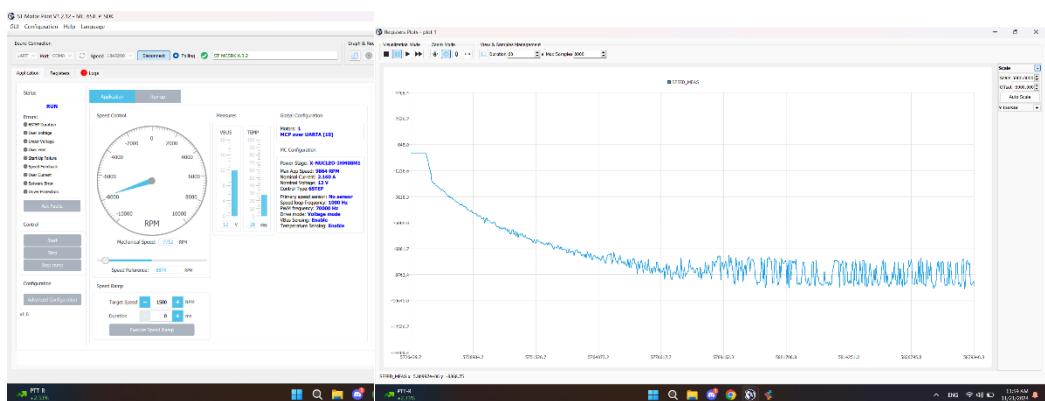


- กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope

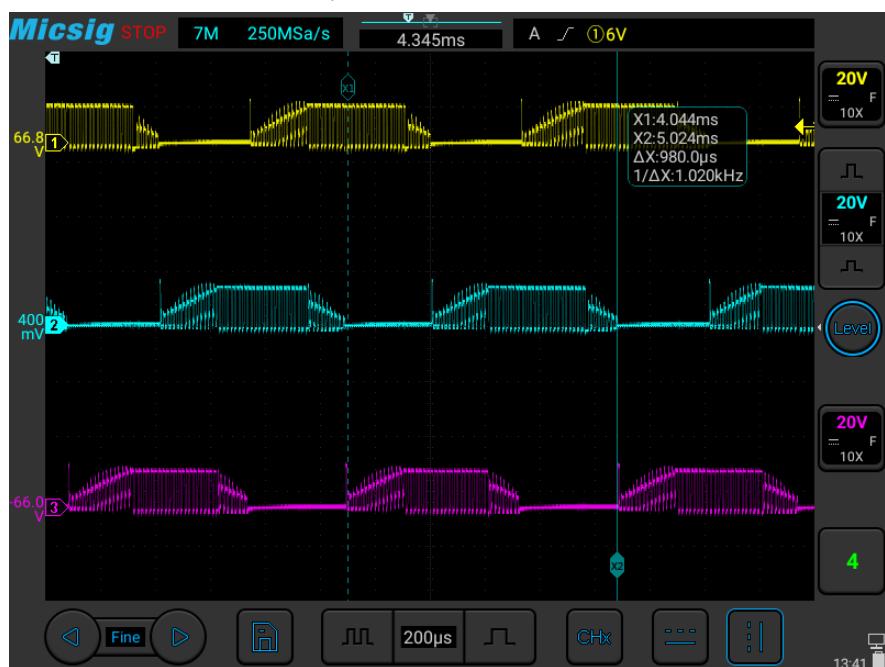


2.2 ที่ความเร็ว 8,874 rpm

- กราฟในโปรแกรม Motor Pilot

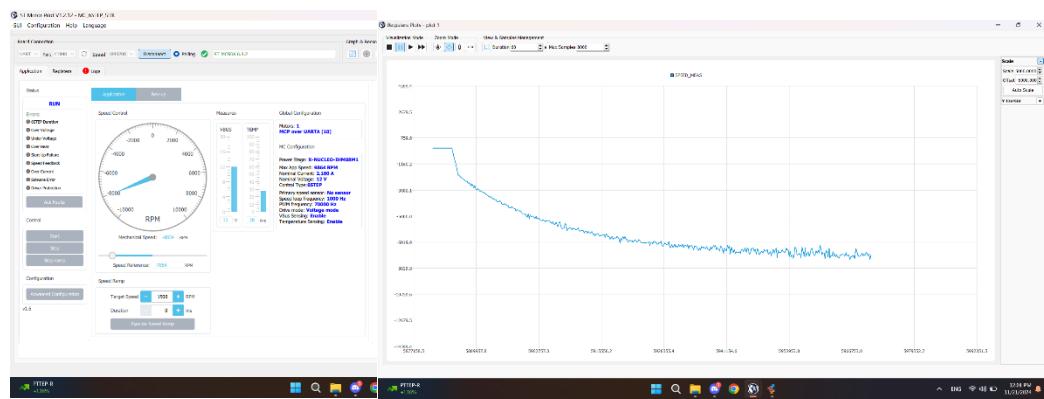


- กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope

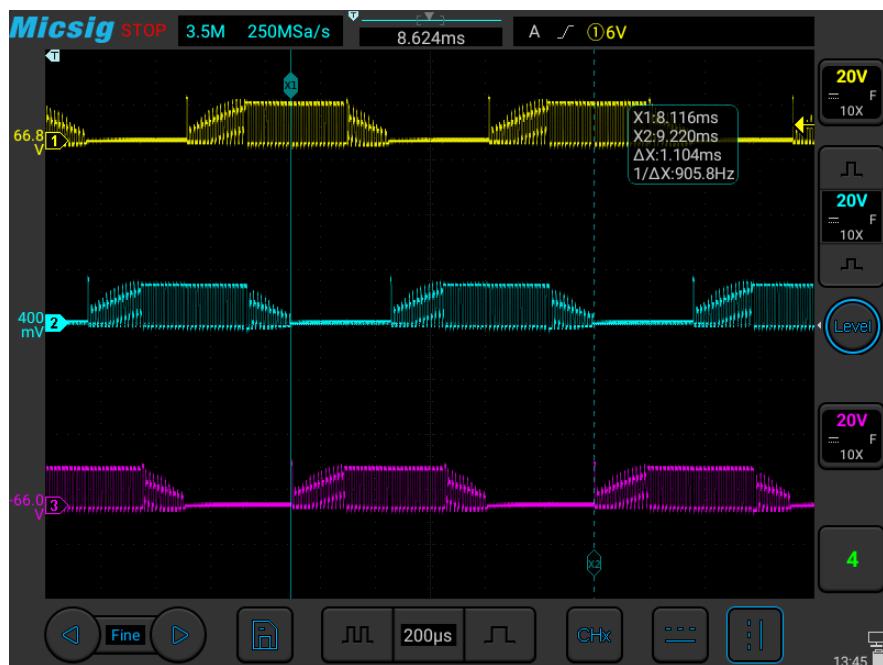


2.3 ที่ความเร็ว 7,854 rpm

กราฟในโปรแกรม Motor Pilot

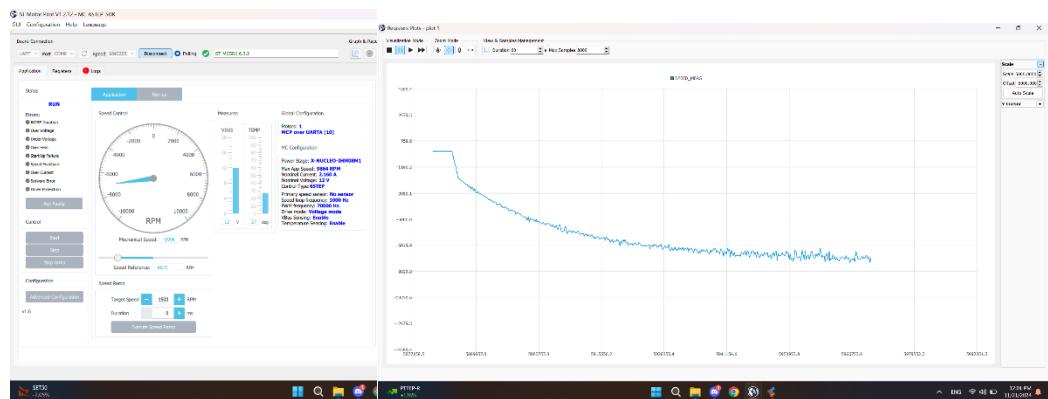


- กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope

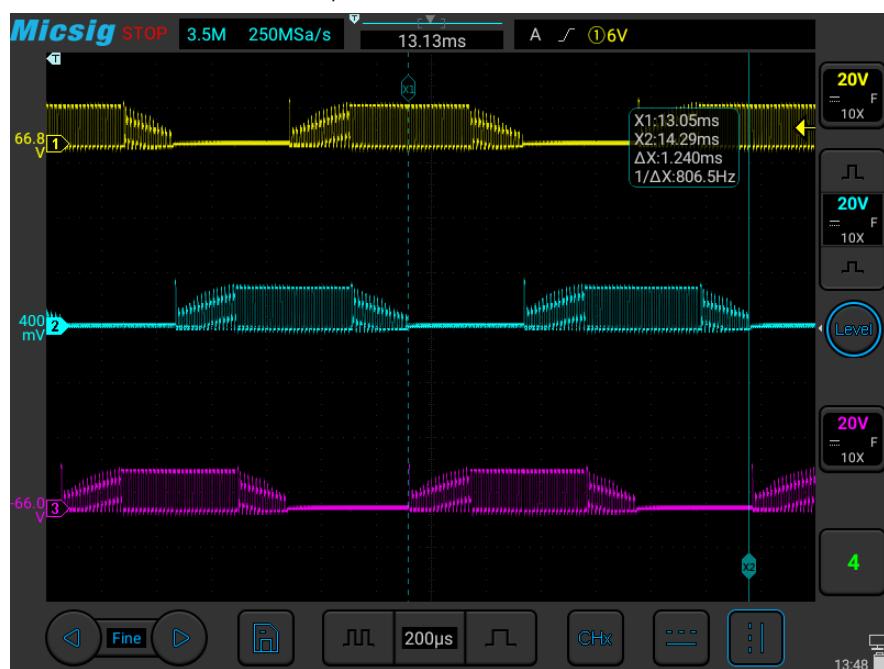


2.4 ที่ความเร็ว 6,872 rpm

- กราฟในโปรแกรม Motor Pilot

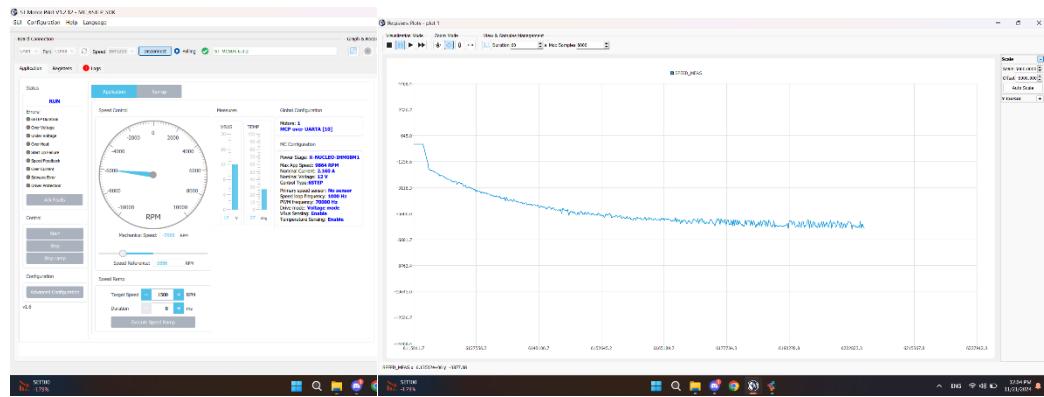


- กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope

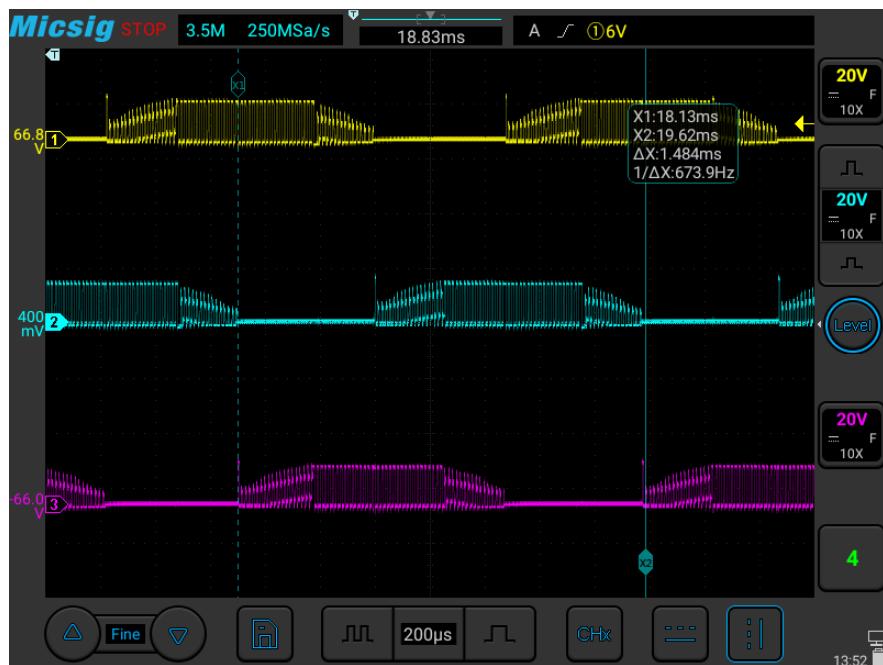


2.5 ที่ความเร็ว 5,886 rpm

- กราฟในโปรแกรม Motor Pilot

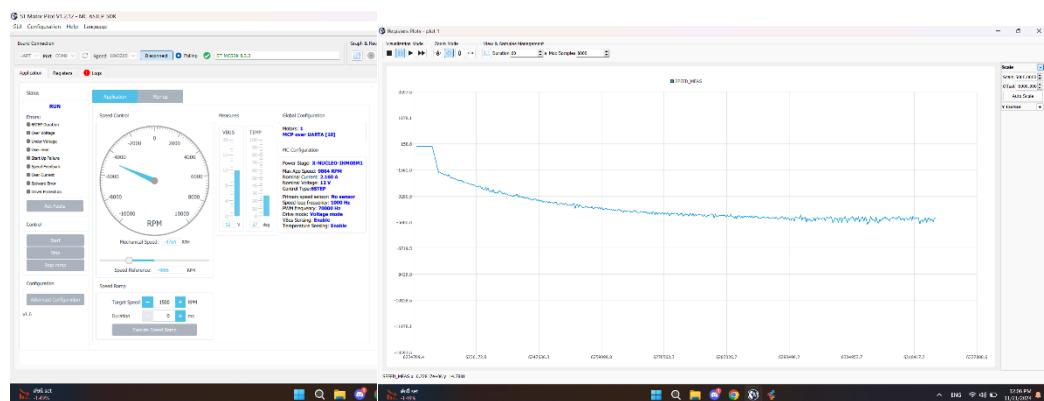


- กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope



2.6 ที่ความเร็ว 4,866 rpm

- กราฟในโปรแกรม Motor Pilot

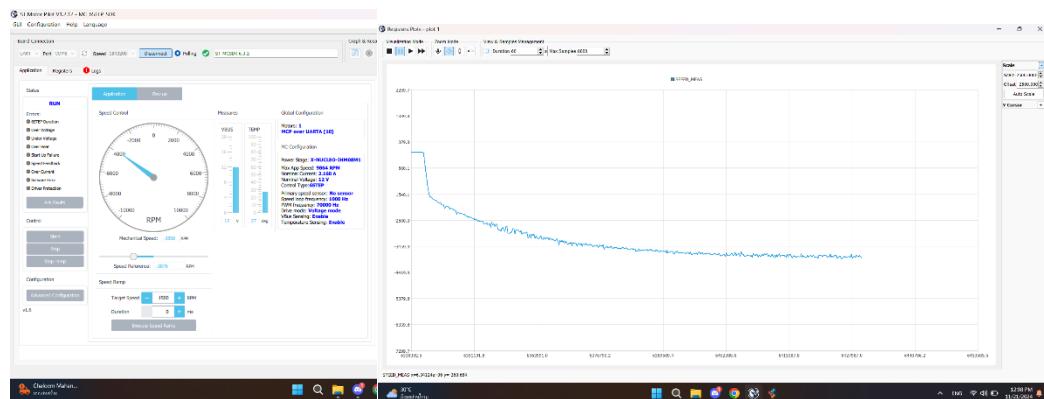


- กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope

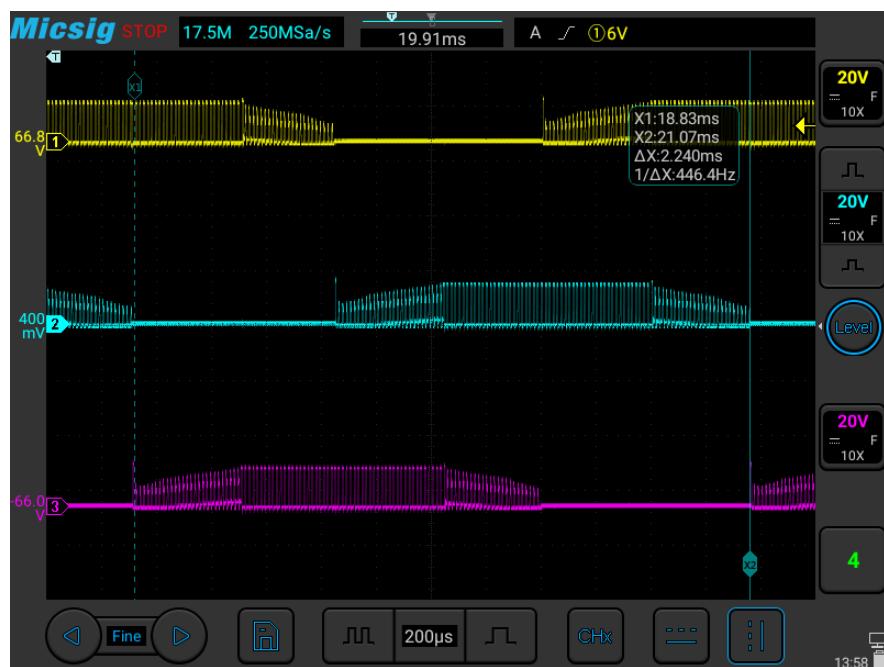


2.7 ที่ความเร็ว 3,876 rpm

- กราฟในโปรแกรม Motor Pilot

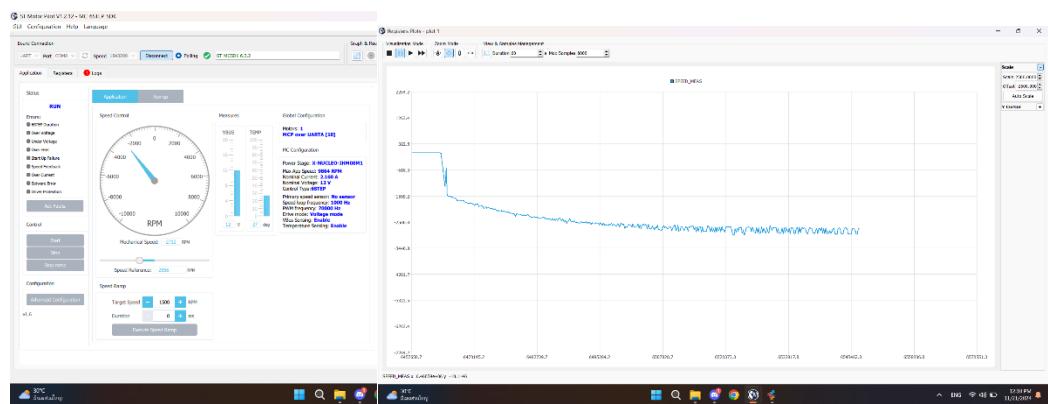


- กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope



2.8 ที่ความเร็ว 2,856 rpm

- กราฟในโปรแกรม Motor Pilot

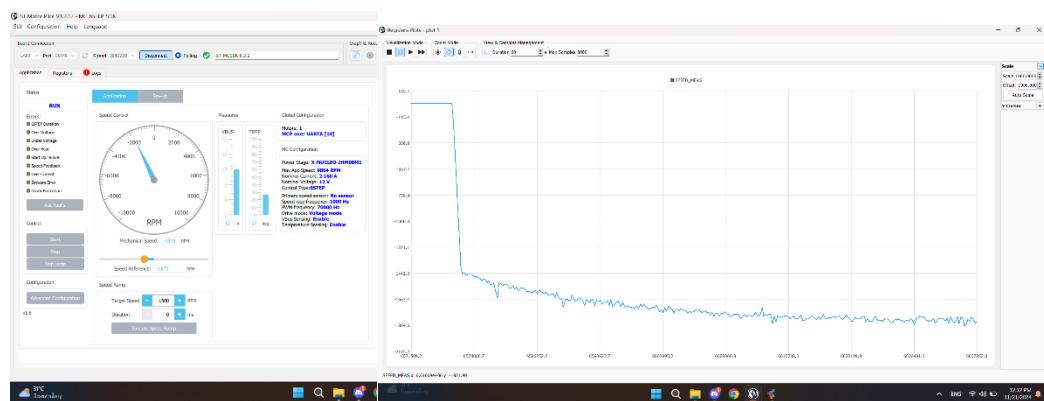


- กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope

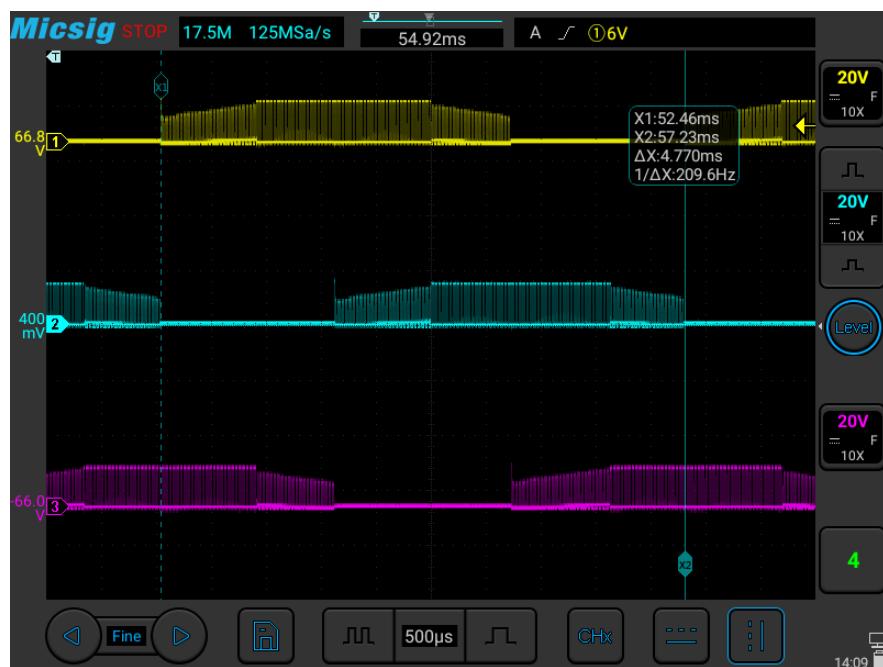


2.9 ที่ความเร็ว 1,872 rpm

- กราฟในโปรแกรม Motor Pilot

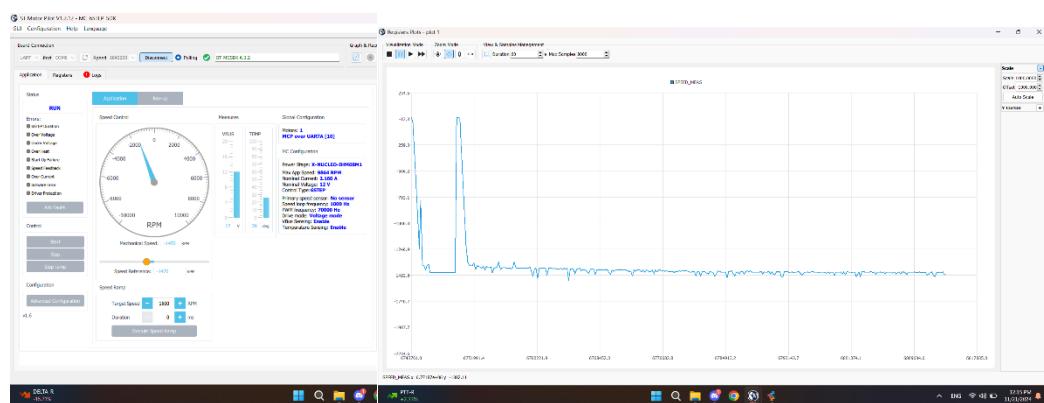


- กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope



2.10 ที่ความเร็ว 1,476 rpm

- กราฟในโปรแกรม Motor Pilot



- กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope



3. ความถี่ของลูกคลื่นสัญญาณในแต่ละค่า RPM

จากการทดลองเพื่อหาว่า ในแต่ละค่า RPM ที่ต่างกันจะส่งผลอย่างไรกับความถี่ของลูกคลื่น ซึ่งสามารถเก็บผลการทดลองได้ดังนี้

พฤติกรรม 摩托อร์	RPM	ความถี่ (Hz)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
หมุนวน เข็มนาฬิกา	9,864	1,166.00	1,111.00	1,129.00	1,129.00	1,147.00	1,136.40
	8,864	1,012.00	988.10	988.10	1,002.00	984.30	994.90
	7,854	902.50	905.80	889.70	902.50	912.40	902.58
	6,872	778.80	801.30	793.70	793.70	791.10	791.72
	5,886	661.40	664.90	666.70	654.50	670.20	663.54
	4,886	563.10	555.60	559.30	559.30	558.00	559.06
	3,876	440.90	440.90	440.10	440.10	437.80	439.96
	2,892	326.80	324.70	324.70	322.60	324.70	324.70
	1,872	209.60	209.60	207.90	209.60	209.60	209.26
ไม่หมุน	0	0	0	0	0	0	0
หมุนตาม เข็มนาฬิกา	-1,872	209.60	209.60	210.10	210.10	208.30	209.54
	-2,856	332.20	328.90	334.40	334.40	337.80	333.54
	-3,876	446.40	444.80	444.80	440.10	446.40	444.50
	-4,866	563.10	569.50	565.60	569.50	569.50	567.44
	-5,886	673.90	677.50	677.50	681.20	675.70	677.16
	-6,872	806.50	786.20	796.20	796.20	781.30	793.28
	-7,854	905.80	919.10	899.30	889.70	929.40	908.66
	-8,874	1,020.00	1,020.00	988.10	1,012.00	992.10	1,006.44
	-9,864	1,012.00	1,008.00	992.10	1,012.00	1,008.00	1,006.42

ตารางผลการทดลองการปรับค่า RPM เพื่อศึกษาความถี่ของลูกคลื่นสัญญาณ

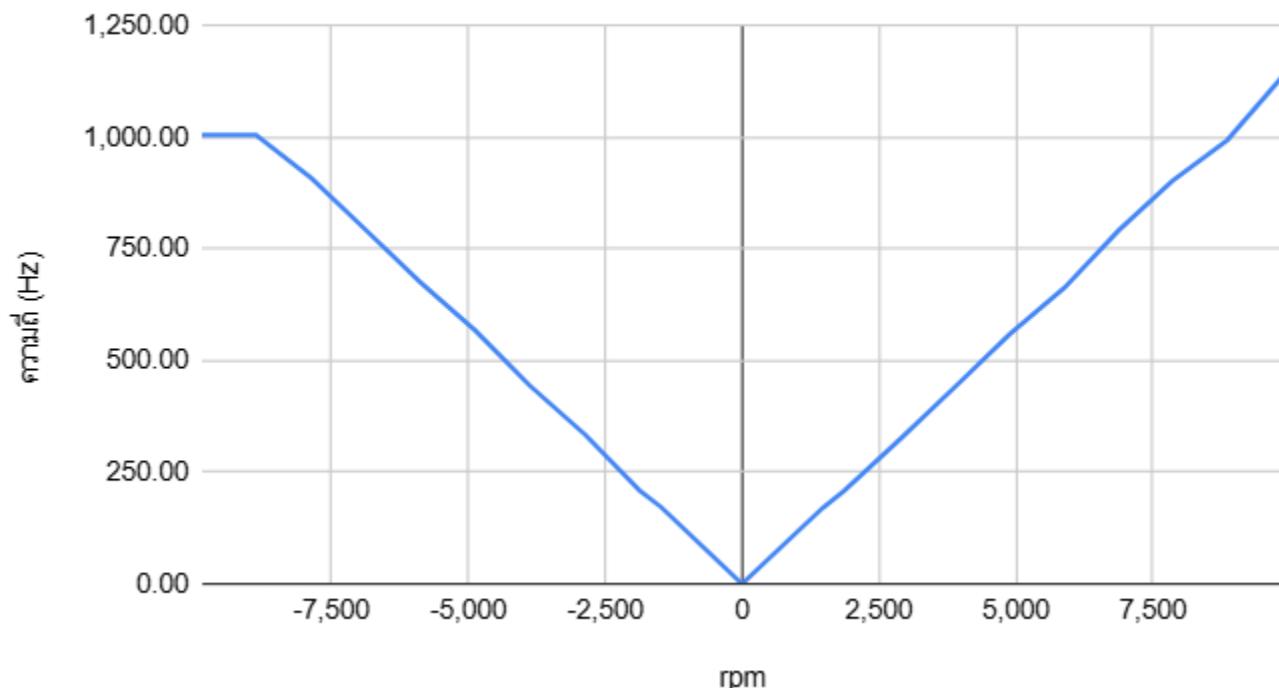
นอกจากผลการทดลองดังกล่าวที่ทดสอบที่ RPM ตั้งแต่ 9,800 ถึง -9,800 ทางคณะผู้จัดทำได้ทดลองเพื่อหาค่า RPM ที่น้อยที่สุดที่สามารถสั่นการทำงานของมอเตอร์ได้ ซึ่งได้ผลว่าที่ 1,476 RPM และ -1,476 RPM เป็นค่าที่น้อยที่สุดที่สามารถสั่นการทำงานของมอเตอร์ได้ ซึ่งสามารถเก็บผลการทดลองเพื่อศึกษาความถี่ของลูกคลื่นสัญญาณได้ดังนี้

พฤติกรรมมอเตอร์	RPM	ความถี่ (Hz)
หมุนวนเข็มนาฬิกา	1,476	170.60
หมุนตามเข็มนาฬิกา	-1,476	171.80

ตารางผลการทดลองการปรับค่า RPM ที่น้อยที่สุดที่ทำให้มอเตอร์หมุนเพื่อศึกษาความถี่ของลูกคลื่นสัญญาณ

จากการทดลองดังกล่าวสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง RPM และความถี่ของสัญญาณได้ดังนี้

Frequency vs RPM



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง RPM และความถี่ของสัญญาณ

4. แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่มอเตอร์ (เมื่อ Duty Cycle 100%)

เพื่อศึกษาว่าในแต่ละ RPM ส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่มอเตอร์อย่างไร ได้ผลการทดลองดังนี้

RPM	Voltage (V)
9,864	16.4
8,864	16.4
7,854	16
6,872	16.4
5,886	16.4
4,886	16.8
3,876	16
2,892	16.4
1,872	16
-1,872	16.4
-2,856	16.4
-3,876	15.6
-4,866	16.4
-5,886	16.4
-6,872	16.4
-7,854	16.8
-8,874	16
-9,864	17.2
Mean	16.36

ตารางผลการทดลองการปรับค่า RPM เพื่อศึกษาแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่มอเตอร์

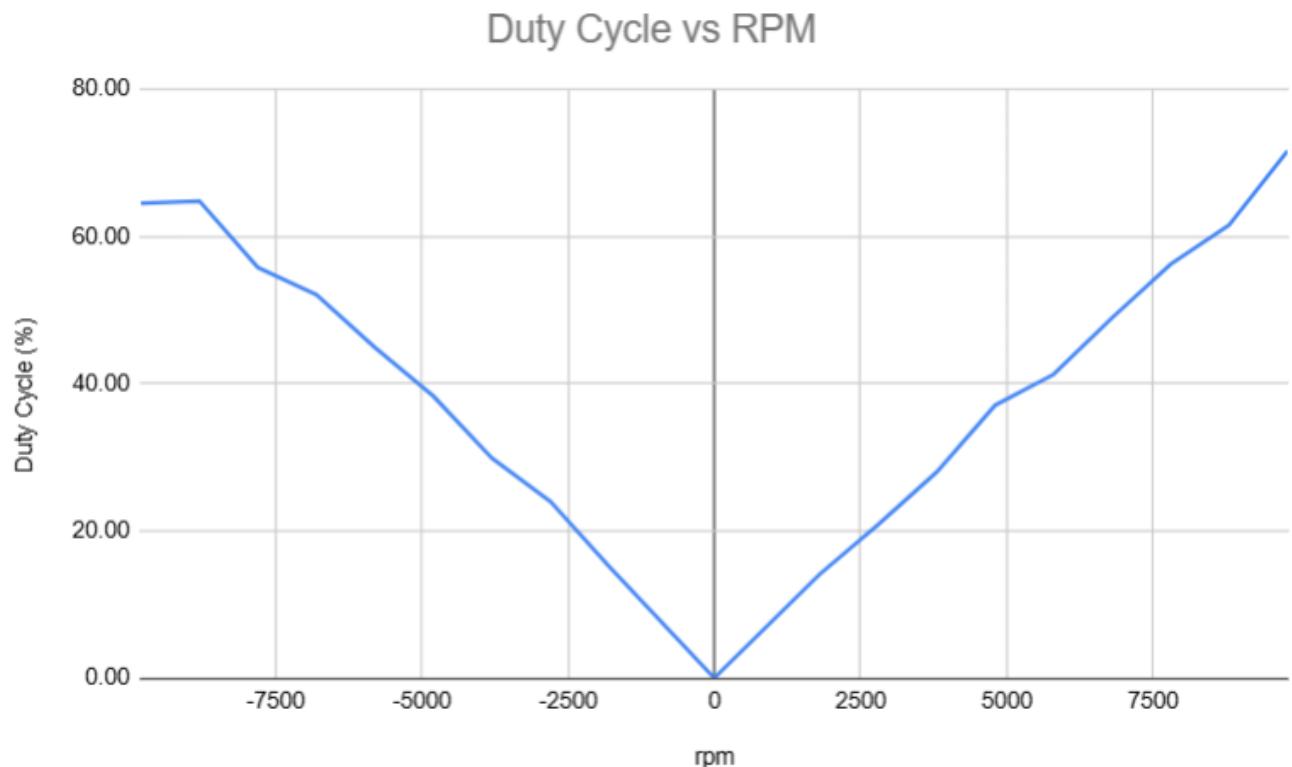
5. Duty Cycle

จากการทดลองเพื่อศึกษา Duty Cycle ในแต่ละ RPM ของมอเตอร์ ได้ผลการทดลองดังนี้

RPM	Full (kHz)	On (kHz)	T full (s)	T on (s)	Duty Cycle (%)	Voltage (V)
9800	70.92	99.01	0.0141	0.0101	71.63	10.17
8800	69.93	113.6	0.0143	0.0088	61.56	8.74
7800	69.44	123.5	0.0144	0.0081	56.23	7.98
6800	69.93	142.9	0.0143	0.007	48.94	6.95
5800	69.93	169.5	0.0143	0.0059	41.26	5.86
4800	69.93	188.7	0.0143	0.0053	37.06	5.26
3800	69.93	250	0.0143	0.004	27.97	3.97
2800	69.44	333.3	0.0144	0.003	20.83	2.96
1800	70.42	500	0.0142	0.002	14.08	2.00
0	0	0	0	0	0	0
-1800	68.97	454.4	0.0145	0.0022	15.18	2.16
-2800	68.49	285.7	0.0146	0.0035	23.97	3.40
-3800	69.44	232.6	0.0144	0.0043	29.85	4.24
-4800	70.92	185.2	0.0141	0.0054	38.29	5.44
-5800	68.03	151.5	0.0147	0.0066	44.90	6.38
-6800	69.44	133.3	0.0144	0.0075	52.09	7.40
-7800	68.03	122	0.0147	0.0082	55.76	7.92
-8800	68.97	106.4	0.0145	0.0094	64.82	9.20
-9800	70.92	109.9	0.0141	0.0091	64.53	9.16

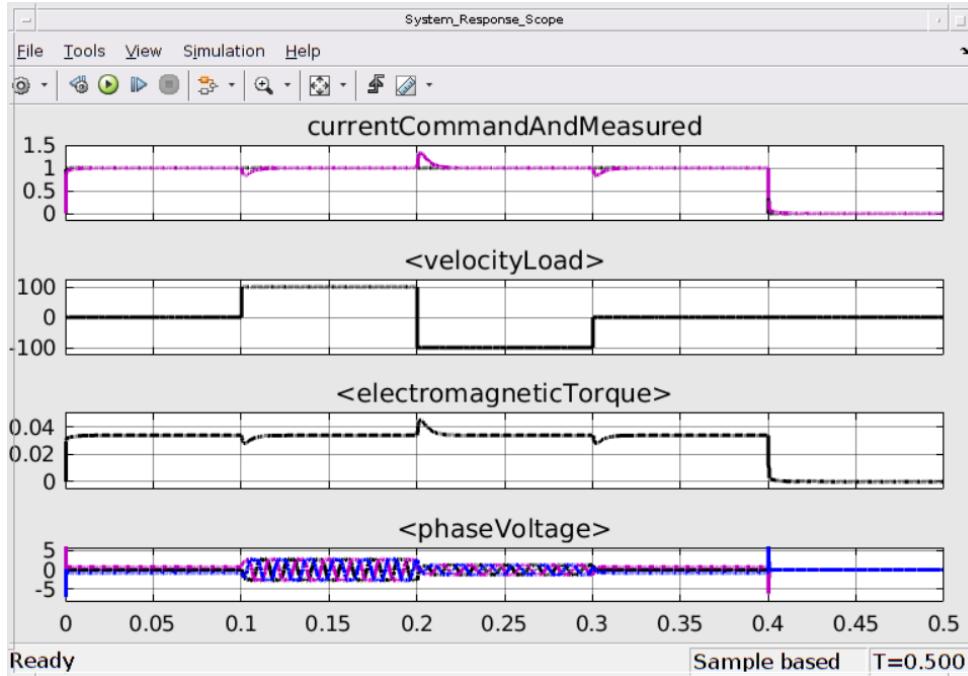
ตารางผลการทดลองหาค่า Duty Cycle ในแต่ละ RPM

จากการทดลองสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง RPM และ Duty Cycle ได้ดังนี้



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง RPM และ Duty Cycle

3. การควบคุมแบบ Field-Oriented Control of PMSM Using Hall Sensor



ภาพแสดงกราฟ currentCommandAndMeasured, velocity Load, electromagnetic Torque, phase Voltage

3.1 กราฟ currentCommandAndMeasured

กราฟนี้แสดงกระแสที่สั่งให้ระบบทำงาน (command) และกระแสที่วัดได้จริง (measured) ในการควบคุมมอเตอร์แบบ FOC จะเห็นได้ว่าเส้นสีชมพูและสีดำมีทิศทางและค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถควบคุมกระแสได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เมื่อถึงช่วงเวลาใกล้ 0.2 และ 0.4 วินาที จะเห็นว่ากระแสเมื่อการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดหรือเงื่อนไขการทำงานในระบบ

3.2 กราฟ velocity Load

กราฟนี้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วที่ชัดเจน โดยในช่วงเวลาประมาณ 0.1 และ 0.4 วินาที ความเร็วมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก +100 เป็น -100 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังสามารถควบคุมความเร็วให้คงที่ตามค่าที่ต้องการได้อย่างมีเสถียรภาพ ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพที่ดีของระบบควบคุม FOC

3.3 กราฟ electromagnetic Torque

กราฟนี้แสดงให้เห็นว่าแรงบิดมีการปรับตัวทันทีเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของความเร็วหรือโหลดโดยเฉลี่ยช่วงเวลาประมาณ 0.1, 0.2 และ 0.4 วินาที แรงบิดจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามความจำเป็นเพื่อรักษาความสมดุลของระบบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบ FOC สามารถตอบสนองและจัดการกับการเปลี่ยนแปลงของโหลดได้อย่างรวดเร็วและมีความเสถียร

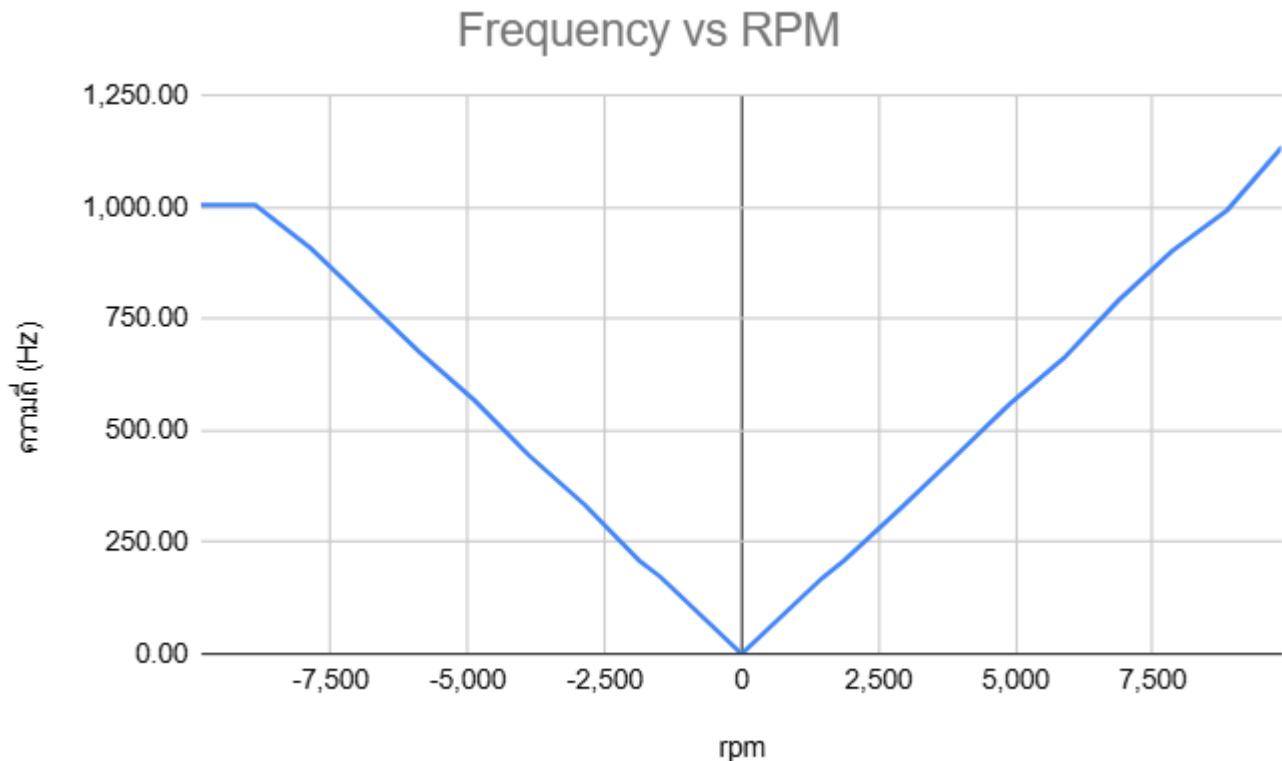
3.4 กราฟ phase Voltage

กราฟนี้แสดงให้เห็นรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นจากอินเวอร์เตอร์ ซึ่งมีการปรับเปลี่ยนตามการทำงานของระบบ FOC ในช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น ระหว่าง 0.1 ถึง 0.4 วินาที แรงดันไฟฟ้าถูกปรับให้สอดคล้องกับความต้องการของระบบ เพื่อควบคุมกระแสและแรงบิดให้เหมาะสมกับสภาพที่เปลี่ยนแปลงในขณะนั้น

สรุป อกิจกรรมผล และข้อเสนอแนะ

1. สรุปผลการทดลอง

1.1. การทดลองความถี่ของลูกคลื่นสัญญาณในแต่ละค่า RPM



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง RPM และความถี่ของสัญญาณ

จากการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง RPM และความถี่ของสัญญาณ สามารถสรุปได้ว่า

1.1.1. ที่ RPM บวก (หมุนวนเข็มนาฬิกา)

เมื่อ RPM เพิ่มขึ้นในทิศทางหมุนวนเข็ม ความถี่ของสัญญาณจะเพิ่มขึ้นตาม
นั้นคือความถี่เพิ่มขึ้นตาม RPM บวก

1.1.2. ที่ RPM ลบ (หมุนวนเข็มนาฬิกา)

เมื่อ RPM ลดลง (ในทิศทางตามเข็ม) ความถี่ของสัญญาณก็เพิ่มขึ้นในลักษณะ
เดียวกัน นั้นคือความถี่เพิ่มขึ้นตามความเร็วในทิศทางหมุนตามเข็ม (RPM ลบ)

1.1.3. ที่ RPM เป็นศูนย์ (ไม่หมุน)

ความถี่เท่ากับ 0 Hz ทุกครั้ง สะท้อนถึงการไม่มีการเคลื่อนที่ของโรเตอร์และไม่มี Back-EMF เกิดขึ้น

ข้อสังเกตเกี่ยวกับทิศทางการหมุน

1. สัญญาณความถี่ไม่เขียนกับทิศทาง (หวานเข้มหรือตามเข้ม)

- แม้ว่าทิศทางการหมุนจะแตกต่างกัน (บวกและลบ) แต่ค่าความถี่ขึ้นอยู่กับความเร็วสัมบูรณ์ของ RPM
- Back-EMF เกิดจากการหมุนของโรเตอร์ในสนามแม่เหล็ก และแรงดัน Back-EMF มีลักษณะสัมพันธ์กับความเร็วเชิงมุมโดยตรง

2. สัญญาณ Back-EMF มีเฟสแตกต่างกันในแต่ละทิศทาง

- ทิศทางการหมุน (ตามเข้มหรือตามเข้ม) จะส่งผลต่อเฟสของสัญญาณ Back-EMF แต่ไม่ได้ส่งผลต่อขนาดความถี่ที่วัดได้

กราฟนี้ยืนยันความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และ RPM ในมอเตอร์ BLDC ที่ควบคุมด้วย 6-Step Control โดยความถี่เพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบ (ทั้งบวกและลบ) และสามารถใช้กราฟนี้ในการวิเคราะห์และควบคุมมอเตอร์ในแอปพลิเคชันต่าง ๆ ได้

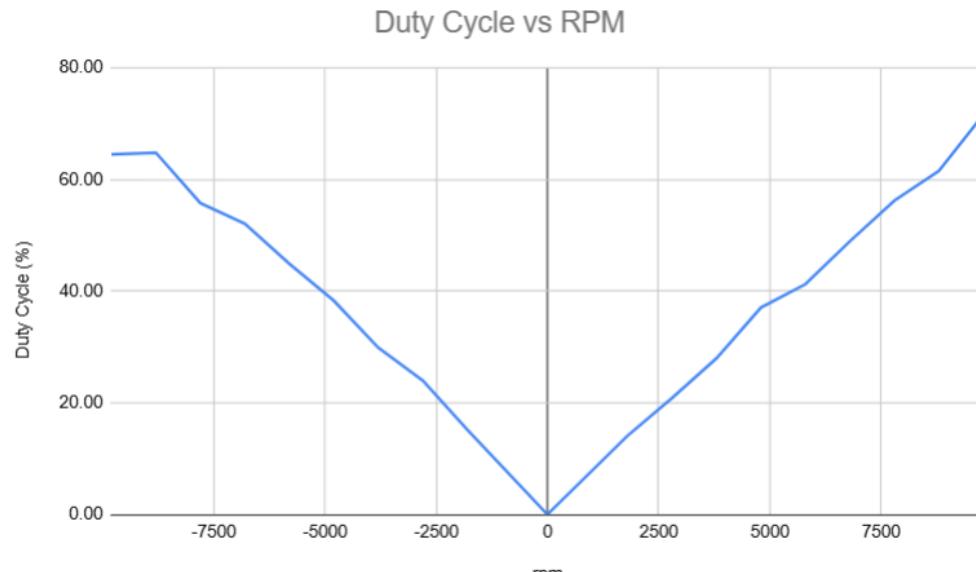
1.2. การทดลองแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่มอเตอร์ (เมื่อ Duty Cycle 100%)

จากผลการทดลองแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่มอเตอร์ (เมื่อ Duty Cycle 100%) จะคงที่อยู่ที่ประมาณ 16.4 V ในเกือบทุกค่า RPM และสามารถหาค่าเฉลี่ยออกมากได้ 16.36 V

ดังนั้นอาจสรุปได้ว่าไม่มีความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่าง RPM และแรงดันไฟฟ้าสูงสุด แม้ค่า RPM จะเพิ่มขึ้นหรือลดลง แต่แรงดันยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน

ซึ่งค่าดังกล่าวเกิดจากแรงดันเฉลี่ยที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ซึ่งแหล่งจ่ายไฟจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้มอเตอร์ 24 V ซึ่งสามารถหา V_{rms} ได้จาก Voltage คูณ 0.71 ซึ่งจะได้ค่า V_{rms} อยู่ที่ 17.76 V ซึ่งใกล้เคียงกับค่าแรงดันไฟฟ้า 16.36 V ที่วัดได้จาก Oscilloscope (ค่าแรงดันไฟฟ้าทั้งสองมีความต่างกันเล็กน้อย อาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนในขั้นตอนของการใช้ Scope ใน Oscilloscope วัดค่าแรงดันไฟฟ้าดังกล่าว)

1.3. การทดลอง Duty Cycle



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง RPM และ Duty Cycle

จากผลการทดลองสามารถสรุปผลการทดลองได้ว่า

1.3.1. ความสัมพันธ์ระหว่าง RPM และ Duty Cycle

- เมื่อ RPM ใกล้ศูนย์ ค่า Duty Cycle ต่ำที่สุด
- เมื่อ RPM เพิ่มขึ้น ค่า Duty Cycle จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน
- กราฟ Duty Cycle กับ RPM มีลักษณะ V-shaped สมมาตร โดย Duty Cycle เพิ่มขึ้นเมื่อ RPM เพิ่มขึ้น (ทั้งบวกและลบ)

1.3.2. ค่าที่เกี่ยวข้องในตาราง

- Full Frequency (kHz)

ความถี่เต็มรอบ (T_{full}) คงที่ในช่วง ~ 69.4 kHz ถึง 70.92 kHz

- On Frequency (kHz)

ความถี่ขณะที่ Duty Cycle กำลังทำงาน (T_{on}) มีค่าสูงขึ้นเมื่อ $|RPM|$ เพิ่มขึ้น

- Voltage (V)

แรงดันไฟฟ้าที่ได้เพิ่มขึ้นเมื่อ $|RPM|$ เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับ Duty Cycle ที่สูงขึ้น

2. การอภิปรายผล

2.1. สมมุติฐานที่ 1 เมื่อความเร็วรอบ RPM เปลี่ยนแปลง จะส่งผลให้ความถี่ของลูกคลีนและ Duty Cycle เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบผันตรงกับความเร็วรอบ RPM ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าแปรผันตรงตาม RPM ด้วยเช่นกัน เป็นจริง

เพรจากจากการทดลองจะเห็นได้ว่า เมื่อค่าสัมบูรณ์ของ RPM เพิ่มขึ้น ก็จะส่งผลให้ ความถี่ ของลูกคลีน Duty Cycle และแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นไปด้วย ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้จากสมการ

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

โดยที่ f คือ ความถี่ของลูกคลีน

Pole Pairs คือ คู่ขั้วแม่เหล็ก (ในที่นี้ BLDC มี Pole Pairs 7 คู่)

จากสมการจะเห็นได้ว่า หากค่า RPM มีค่ามาก ก็จะส่งผลให้ความถี่ของสัญญาณมีค่ามาก ตามไปด้วย ในทางกลับกันหากค่า RPM น้อย ก็จะส่งผลให้ความถี่ของสัญญาณมีค่าน้อยตามไปด้วย ซึ่งก็จะส่งผลให้ค่า Duty Cycle และแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงแบบผันตรงตามความถี่ของสัญญาณ อีกด้วย

RPM	ความถี่จากการคำนวณ (Hz)	ความถี่จากการทดลอง (Hz)	Error (%)
9800	1150.80	1,136.40	1.27
8800	1034.13	994.90	3.94
7800	916.30	902.58	1.52
6800	801.73	791.72	1.26
5800	686.70	663.54	3.49
4800	570.03	559.06	1.96
3800	452.20	439.96	2.78
2800	337.40	324.70	3.91
1800	218.40	209.26	4.37
0	172.20	170.60	0.94
-1800	0.00	0.00	0.00
-2800	172.20	171.80	0.23

-3800	218.40	209.54	4.23
-4800	333.20	333.54	0.10
-5800	452.20	444.50	1.73
-6800	567.70	567.44	0.05
-7800	686.70	677.16	1.41
-8800	801.73	793.28	1.07
-9800	916.30	908.66	0.84

ตารางเปรียบเทียบค่าความถี่ที่ได้จากการคำนวณและความถี่จากการทดลอง

- 2.2. **สมมุติฐานที่ 2** ถ้าหากตั้งค่าความเร็วรอบ RPM เป็นติดลบและบวกมอเตอร์จะหมุนในทิศทางตรงกันข้ามกัน แต่ค่า Duty Cycle และความถี่ของลูกคึ่นยังคงมีค่าเท่ากันในความเร็วรอบเดียวกัน เป็นจริง

เพราะหากพิจารณาจากกราฟการทดลองความสัมพันธ์ระหว่าง RPM และความถี่ของลูกคึ่นสัญญาณจะเห็นได้ว่า ไม่ว่า RPM จะเป็นค่าบวกหรือลบ ถ้าหากค่าสัมบูรณ์ของ RPM เพิ่มขึ้น ก็จะส่งผลให้ Duty Cycle มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยที่ RPM ผู้บวกและลบในแต่ละค่า จะมีค่า Duty Cycle ที่ใกล้เคียงหรือเท่ากัน แตกต่างเพียงหาก RPM มีค่าเป็นบวก มอเตอร์จะหมุนวนเข็มนาฬิกา แต่หาก RPM มีค่าเป็นลบ มอเตอร์จะหมุนตามเข็มนาฬิกา

ทั้งนี้มอเตอร์ BLDC (Brushless DC Motor) เป็นมอเตอร์ที่การหมุนลูกกำหนดโดย ลำดับการจ่ายกระแสไฟฟ้า (Commutation Sequence) ไปยังชุดลวดของ Stator และตำแหน่งของโรเตอร์ (Rotor) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.2.1. การควบคุมทิศทางการหมุนในมอเตอร์ BLDC

- ลำดับการจ่ายกระแสไฟฟ้า (Commutation)

BLDC Motor ใช้ลำดับการจ่ายกระแสไฟฟ้าสลับกันใน 3 เฟส (A, B, C) เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กหมุน (Rotating Magnetic Field) บน Stator

ทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุนนี้เป็นตัวกำหนดทิศทางการหมุนของโรเตอร์

- ทิศทางของการหมุน (Direction of Rotation)

หากลำดับการจ่ายกระแสเป็นลำดับ "ไปข้างหน้า" (Forward Sequence) เช่น A → B → C → A โรเตอร์จะหมุนตามเข็มนาฬิกา

หากลำดับการจ่ายกระแส "ย้อนกลับ" (Reverse Sequence) เช่น

A → C → B → A โรเตอร์จะหมุนทวนเข็มนาฬิกา

2.2.2. ความสัมพันธ์ระหว่าง RPM บวก/ลบ กับลำดับการจ่ายกระแส

- RPM บวก

เมื่อกำหนดค่า RPM เป็นบวก ระบบควบคุม (ESC หรือ MCU) จะตั้งค่าลำดับการจ่ายกระแสเป็น Forward Sequence

สนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นจะทำให้โรเตอร์หมุนในทิศทางหนึ่ง (ในที่นี้คือทวนเข็มนาฬิกา)

- RPM ลบ

เมื่อกำหนดค่า RPM เป็นลบ ระบบควบคุมจะสลับลำดับการจ่ายกระแสเป็น Reverse Sequence

สนามแม่เหล็กหมุนจะถูกสร้างในทิศทางตรงกันข้าม ทำให้โรเตอร์หมุนในทิศทางตรงข้าม (ในที่นี้คือตามเข็มนาฬิกา)

2.2.3. การทำงานของเซ็นเซอร์ตำแหน่ง (Hall Sensor หรือ Sensorless Control)

- เซ็นเซอร์ตำแหน่ง

ในมอเตอร์ BLDC แบบ Sensor-Based Control ระบบจะใช้เซ็นเซอร์ Hall เพื่อตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์

ระบบควบคุมจะใช้ข้อมูลตำแหน่งนี้ในการกำหนดลำดับการจ่ายกระแส (Commutation Sequence) ให้สอดคล้องกับ RPM ที่กำหนด

- Sensorless Control

ในกรณีที่ไม่มี Hall Sensor ระบบจะใช้ Back-EMF เพื่อตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ และคำนวณลำดับการจ่ายกระแส

ทิศทางของสนาม Back-EMF จะสลับตามลำดับการจ่ายกระแส ซึ่งสัมพันธ์กับค่า RPM บวกหรือลบ

2.3. สมมุติฐานที่ 3 การควบคุมแบบ FOC จะให้การหมุนของมอเตอร์ที่ราบรื่นกว่าการควบคุมแบบ 6-Step Control เนื่องจากการควบคุมกระแสและแรงดันเป็นแบบต่อเนื่องและสอดคล้องกับตำแหน่งของโรเตอร์ ซึ่งต่างจาก 6-Step Control ที่การเปลี่ยนลำดับการจ่ายไฟ (Commutation) จะเกิดขึ้นแบบเมื่อต่อเนื่อง (Step-by-Step) สมมติฐานนี้เป็นจริง

จากผลการทดลองและข้อมูลที่มี FOC ให้การหมุนของมอเตอร์ที่ราบรื่นกว่าการควบคุมแบบ 6-Step Control เนื่องจาก

- การควบคุมกระแสและแรงดันใน FOC เป็นแบบต่อเนื่องและสัมพันธ์กับตำแหน่งโรเตอร์
- Torque Ripple ลดลงอย่างชัดเจนในระบบ FOC
- ระบบ 6-Step Control มีข้อจำกัดด้านความราบรื่น เนื่องจากการเปลี่ยนลำดับการจ่ายไฟแบบ Step-by-Step

2.3.1. การหมุนที่ราบรื่นของมอเตอร์ (Smooth Rotation)

2.3.1.1. 6-Step Control

- ลำดับการจ่ายกระแสไม่ต่อเนื่อง ทำให้แรงบิดมีการแกว่งในแต่ละจังหวะการเปลี่ยนเฟส
- รูปคลื่นของกระแสเมล็ดกษณะ Trapezoidal ซึ่งมีความไม่สมูทในตำแหน่งของการสลับเฟส

2.3.1.2. FOC

- ระบบควบคุมกระแสและแรงดันในระบบอ้างอิง $d-qd-qd-q$ ทำให้กระแสและแรงบิดคงที่มากกว่า
- ไม่มีการเปลี่ยนเฟสแบบไม่ต่อเนื่อง (Step-by-Step) ทำให้การหมุนของมอเตอร์ราบรื่นกว่า

2.3.2. การควบคุมกระแสและแรงดัน

2.3.2.1. 6-Step Control

- กระแสและแรงดันเมล็ดกษณะ Trapezoidal ซึ่งไม่ต่อเนื่อง และมีการสลับเฟสแบบทันที (Stepped Switching)
- การเปลี่ยนแปลงกระแสในแต่ละ Step ส่งผลให้แรงบิดไม่คงที่

2.3.2.2. FOC

- กระแสและแรงดันถูกควบคุมในรูปแบบ Sinusoidal ซึ่งต่อเนื่องและแม่นยำกว่า
- ระบบควบคุมด้วย PWM และการจัดการเวกเตอร์กระแสในอ้างอิง $d-q$ ช่วยลด Torque Ripple และเพิ่มประสิทธิภาพ

2.4. สมมุติฐานที่ 4 ใน FOC การควบคุมกระแสผ่าน Space Vector Modulation (SVM) จะมีความแม่นยำสูงกว่า 6-Step Control เนื่องจากการจัดการ Vector กระแสในระบบอ้างอิง d-q ซึ่งต่างจาก 6-Step Control ที่จะควบคุมกระแสในลำดับแบบ On-Off ซึ่งไม่แม่นยำเท่ากับ FOC สมมุติฐานนี้ เป็นจริง

พิจารณาจากหลักการทำงานของ FOC และ SVM และการทำงานของ 6-Step Control ซึ่ง อธิบายได้ว่า

2.4.1. FOC (Field-Oriented Control)

- FOC ใช้ระบบอ้างอิง d-q (Rotating Frame) เพื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าในรูปแบบ Vector
- ใช้ Space Vector Modulation (SVM) เพื่อสร้างรูปคลื่น PWM ที่เหมาะสม โดยที่ SVM ช่วยให้กระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ชุด漉ดมีลักษณะ Sinusoidal ต่อเนื่อง และการควบคุมเชิงเวกเตอร์นี้ช่วยให้กระแสไฟฟ้าคงที่และลดคลื่น กับตำแหน่งโรเตอร์ในทุกช่วงเวลา

2.4.2. 6-Step Control

- 6-Step Control ควบคุมมอเตอร์ BLDC ด้วยรูปคลื่น Trapezoidal โดยกระแสไฟฟ้าถูกจ่ายให้ชุด漉ด 2 เพส ในขณะที่อีก 1 เพสเป็นเฟสลอย (Floating Phase)
- การเปลี่ยนลำดับการจ่ายกระแส (Commutation) เกิดขึ้นแบบ On-Off ในลำดับ 6 ขั้นตอน ซึ่งจะทำให้กระแสไฟฟ้าไม่ได้มีลักษณะต่อเนื่อง และแรงบิดที่เกิดขึ้นจะมีการสั่น (Torque Ripple)

เมื่อพิจารณาถึงความแม่นยำในการควบคุมกระแส สามารถอธิบายได้ดังนี้

2.4.3. FOC

กระแสไฟฟ้าถูกควบคุมในระบบอ้างอิง d-q ซึ่งช่วยแยกกระแสออกเป็นส่วนควบคุมฟลักซ์และแรงบิด ทำให้สามารถควบคุมกระแสและแรงดันได้อย่างต่อเนื่อง และแม่นยำ การใช้ Space Vector Modulation (SVM) ซึ่งใช้ PWM ในการควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าในรูปแบบ Vector ที่ปรับแต่งได้อย่างแม่นยำในทุกช่วงเวลา จะช่วยลดการสูญเสียพลังงานและ Torque Ripple ซึ่งทำให้ความแม่นยำของ SVM สูงกว่าเนื่องจาก การคำนวณกระแสและแรงดันในเชิงเวกเตอร์ที่ละเอียดกว่า

2.4.4. 6-Step Control

กระแสไฟฟ้าถูกจ่ายในลักษณะ On-Off แบบไม่ต่อเนื่อง (Stepped Switching) มีช่วงเวลา "หยุด" หรือ "Floating Phase" ที่กระแสในเฟสอยู่ไม่มีการจ่ายไฟฟ้า และลักษณะ Trapezoidal ของกระแสทำให้ Torque Ripple สูงกว่าและการควบคุมกระแสในแต่ละเฟสไม่ต่อเนื่อง ทำให้แม่นยำน้อยกว่า FOC เนื่องจากไม่สามารถควบคุมกระแสไฟฟ้าในทุกมุมของโรเตอร์ได้

ผลการทดลองและข้อมูลแสดงว่า FOC มีประสิทธิภาพและความแม่นยำสูงกว่า 6-Step Control เนื่องจาก SVM สร้างกระแส Sinusoidal ที่ต่อเนื่องและลด Torque Ripple ได้อย่างชัดเจน อีกทั้งการควบคุมกระแสในอั้งอิ้ง d-q ช่วยให้แรงบิดและฟลักซ์แม่เหล็กสม่ำเสมอและแม่นยำ

2.5. **สมมติฐานที่ 5** ความถี่ของสัญญาณ Hall Sensor มีความสัมพันธ์โดยตรงกับ Duty Cycle ของ PWM สมมติฐานนี้เป็นจริง เนื่องจาก Duty Cycle ควบคุมแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่จ่ายให้มอเตอร์ ซึ่งส่งผลต่อความเร็วรอบ (RPM) และความถี่ของ Hall Sensor โดยที่

- Hall Sensor ทำหน้าที่ตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ และสัญญาณที่เกิดขึ้น (f_{Hall}) ความสัมพันธ์โดยตรงกับความเร็วรอบ (RPM) ของมอเตอร์
- Duty Cycle ของ PWM เป็นตัวกำหนดแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่จ่ายให้มอเตอร์ และส่งผลต่อ RPM โดยตรง

2.6. **สมมติฐานที่ 6** เมื่อเพิ่ม Duty cycle ของ PWM จะส่งผลให้ความถี่ Back-EMF เพิ่มขึ้น สมมติฐานนี้เป็นจริง เพราะเมื่อพิจารณาจากผลการทดลอง การเพิ่ม Duty Cycle ของ PWM จะส่งผลให้ความถี่ Back-EMF เพิ่มขึ้น เนื่องจาก Duty Cycle สูงขึ้นทำให้แรงดันเฉลี่ย (V_{out}) ที่จ่ายให้มอเตอร์สูงขึ้น ซึ่งเพิ่มความเร็วรอบ (RPM) และความถี่ของ Back-EMF

3. ข้อเสนอแนะ

3.1. การปรับค่า RPM ในการทดลอง

เนื่องจากโปรแกรมควบคุมมอเตอร์ไม่สามารถพิมพ์ค่า RPM ที่ต้องการได้โดยตรง ดังนั้นจึงไม่สามารถทดสอบในค่า RPM ที่ต้องการได้ วิธีการที่ทำให้สามารถทำการทดลองต่อได้ คือการใช้ค่าที่ใกล้เคียงกับที่ต้องการในการเก็บผลการทดลอง

3.2. การเก็บค่าต่าง ๆ ใน Oscilloscope โดยการปรับ Scope ด้วยมือ

เนื่องจากการวัดค่าใน Oscilloscope จำเป็นต้องใช้ Scope ในการวัดค่าต่าง ๆ ซึ่งจำเป็นต้องใช้มือหรือปุ่มในการเลื่อนขอบเขตที่ต้องการวัดค่า ทำให้อาจเกิดการคลาดเคลื่อนของผลการทดลองได้ วิธีการที่ทำให้ค่าต่าง ๆ มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น คือการเก็บค่านั้น ๆ หลายครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย การทำแบบนี้จะช่วยให้ข้อมูลที่ได้รับมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

3.3. การทดลองในโหมดการควบคุมแบบ FOC

เนื่องจากในชุดการทดลองไม่สามารถทดลองด้วยโหมด FOC ได้ จึงไม่สามารถบันทึกผลค่าต่าง ๆ จากการทดลองจริง ๆ ได้ วิธีการเก็บผลหรือนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่มีอยู่ สามารถทำได้โดยการหาโมเดลจำลอง MATLAB หรือการทดลองที่มีอยู่แล้วมาใช้เป็นข้อมูลในการอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์ในโหมดควบคุมต่าง ๆ

อ้างอิง

1. [Field-Oriented Control of a Permanent Magnet Synchronous Machine](#)
2. [BLDC_A2212_13T-3223217.pdf](#)
3. [Field-Oriented Control of PMSM Using Hall Sensor](#)

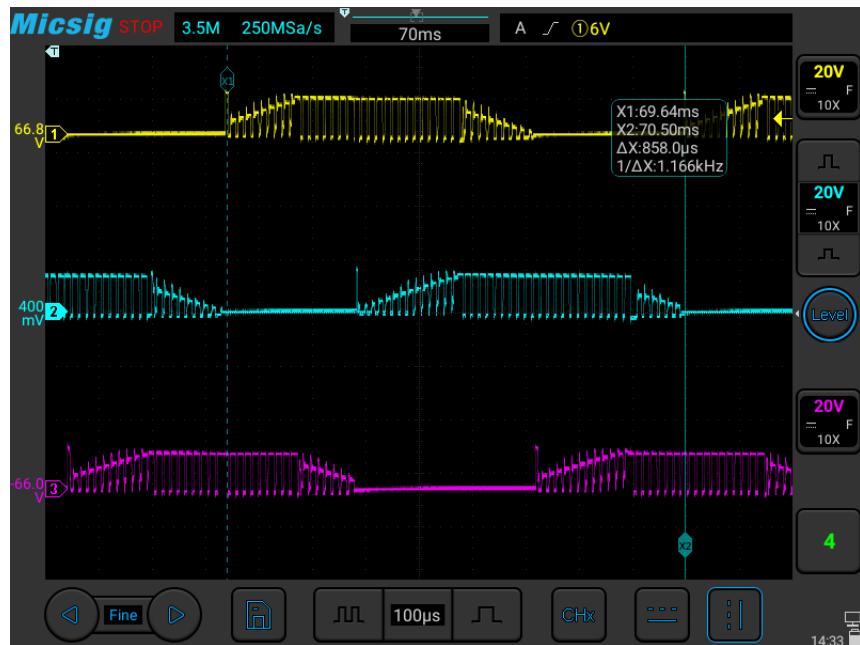
ภาคผนวก

1. Brushless Motor หมุนแบบทวนเข็มนาฬิกา

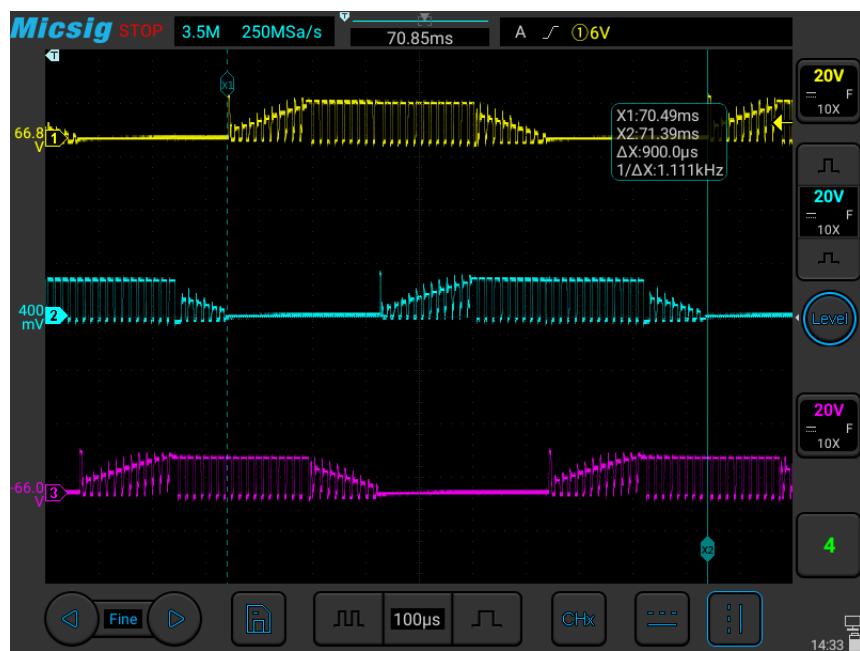
1.1 ที่ความเร็ว 9,864 rpm

กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope

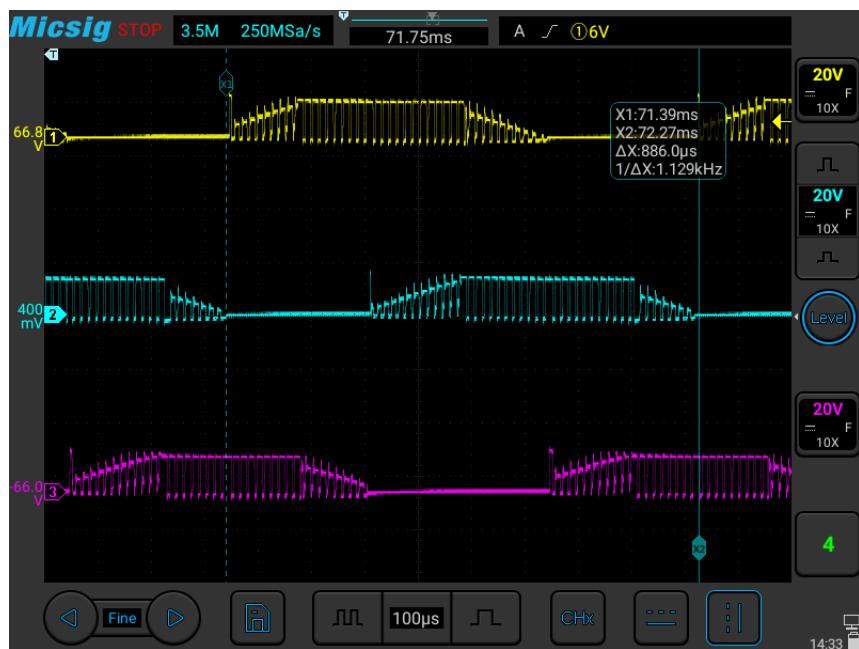
- ครั้งที่ 1



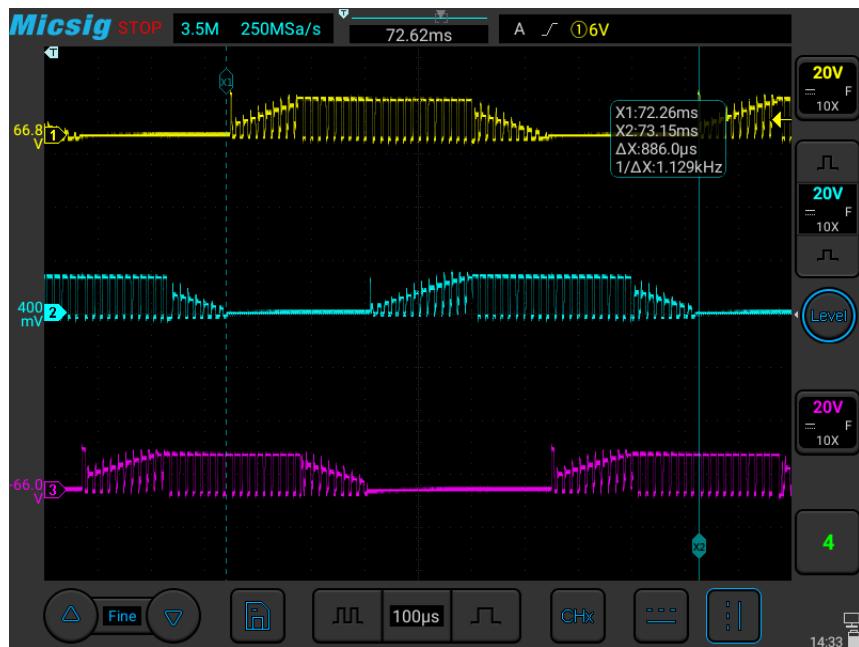
- ครั้งที่ 2



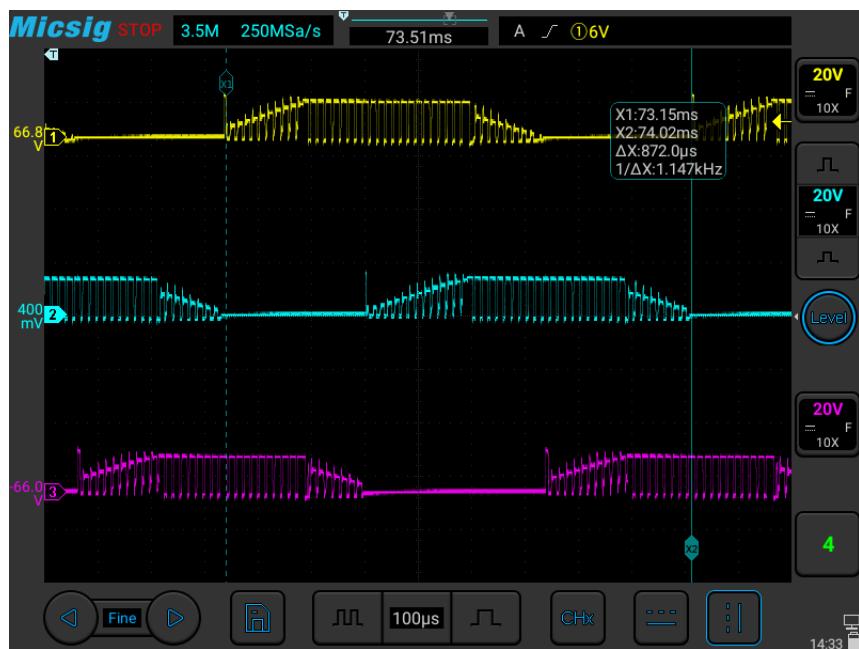
- ครั้งที่ 3



- ครั้งที่ 4

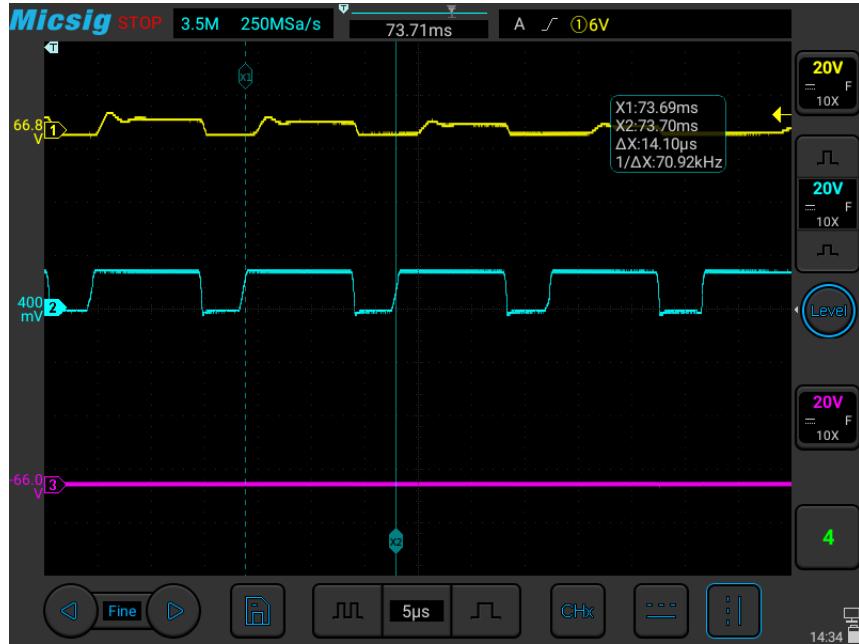


- ครั้งที่ 5

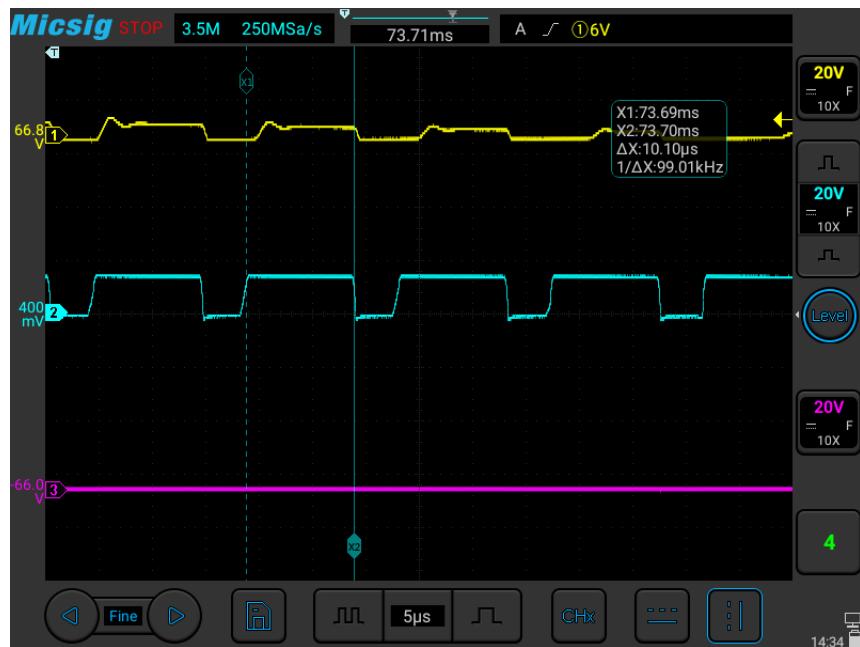


Duty Cycle

- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคิลิน



- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคื่นในช่วง On



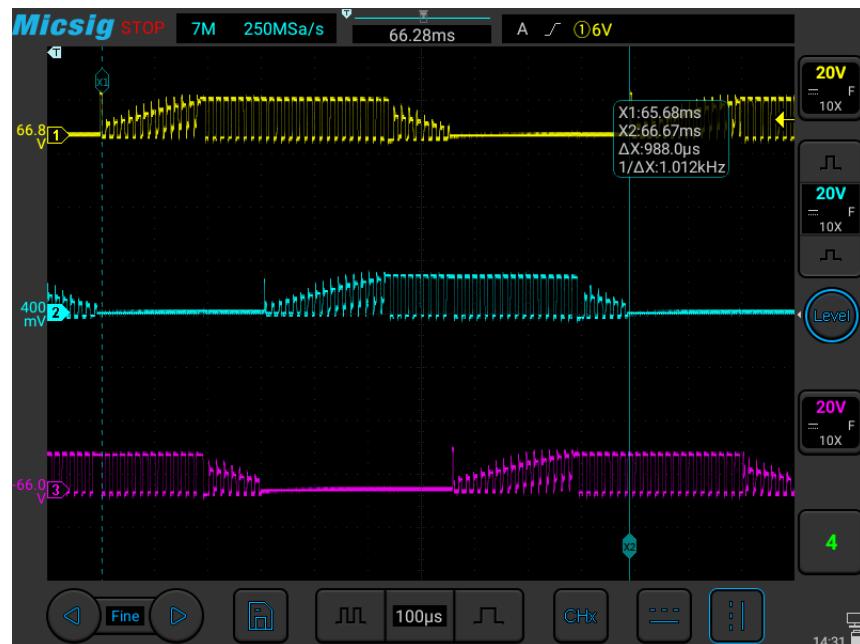
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Duty Cycle 100%)



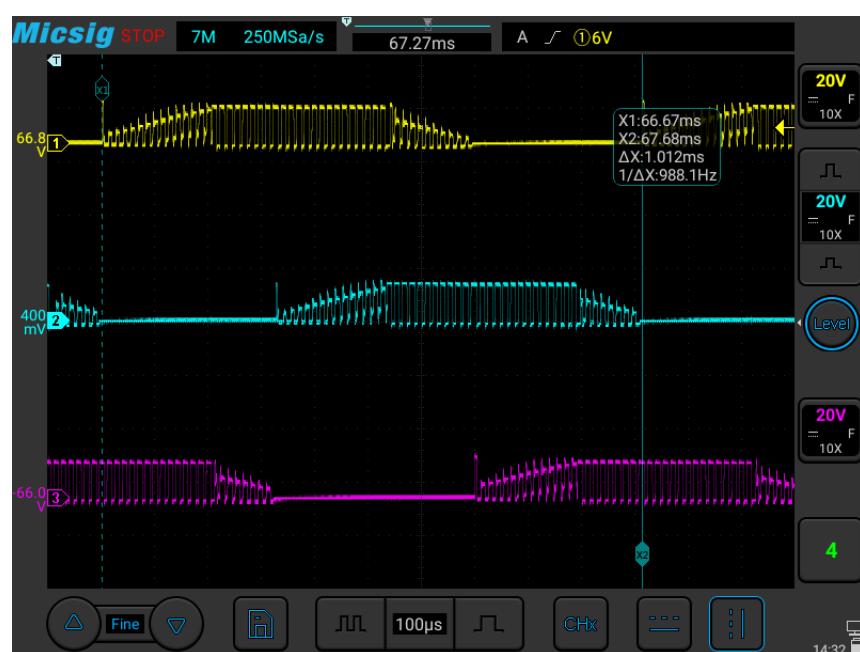
1.2 ที่ความเร็ว 8,864 rpm

กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope

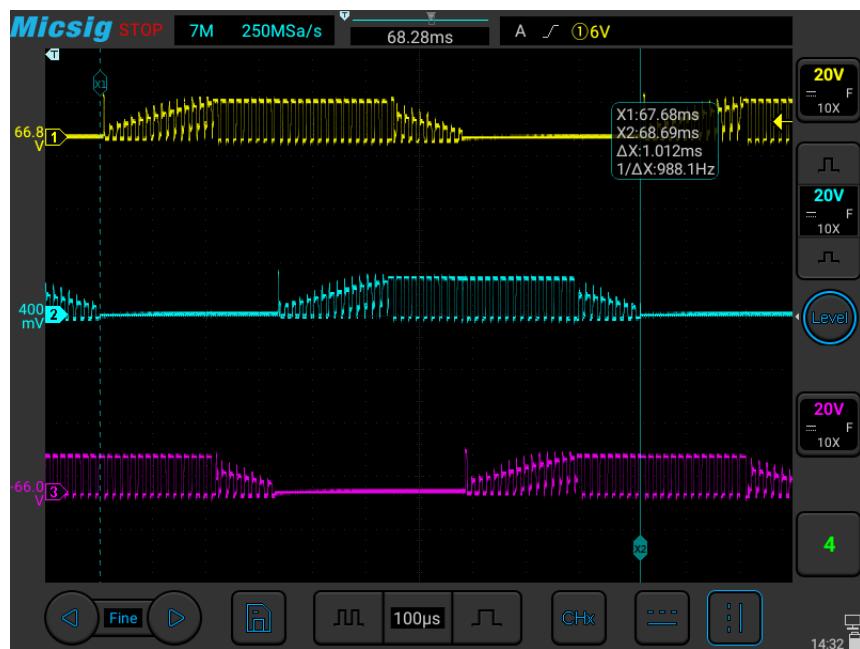
- ครั้งที่ 1



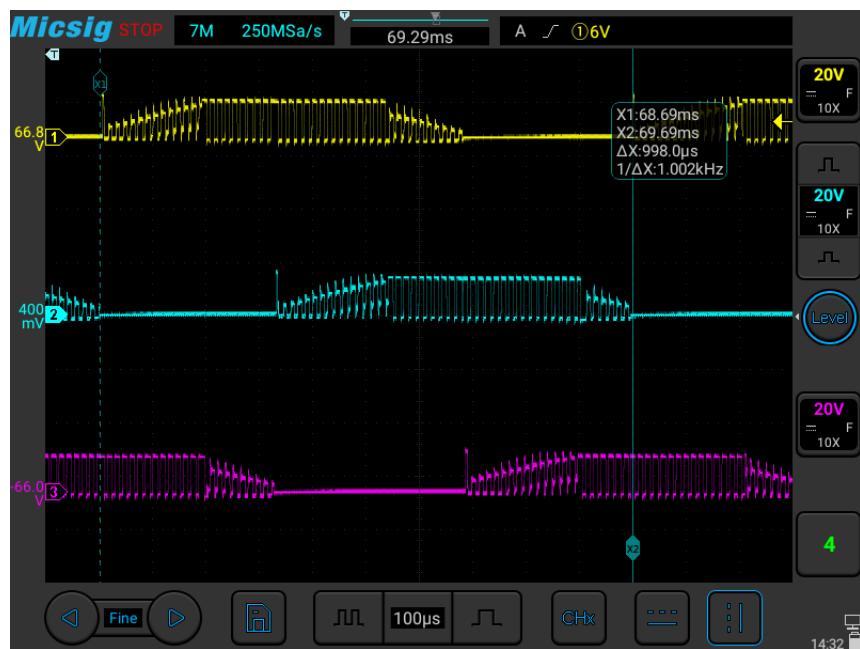
- ครั้งที่ 2



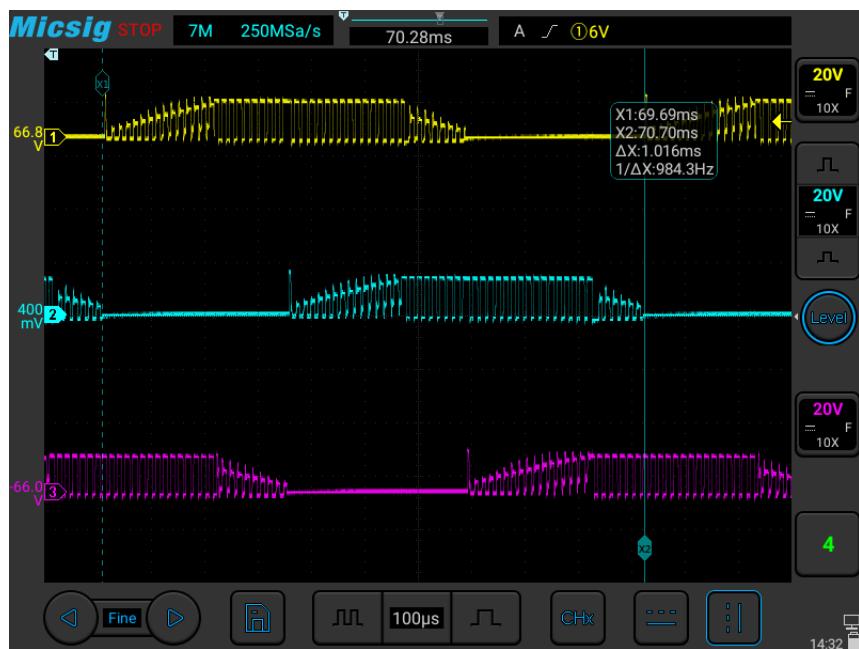
- ครั้งที่ 3



- ครั้งที่ 4

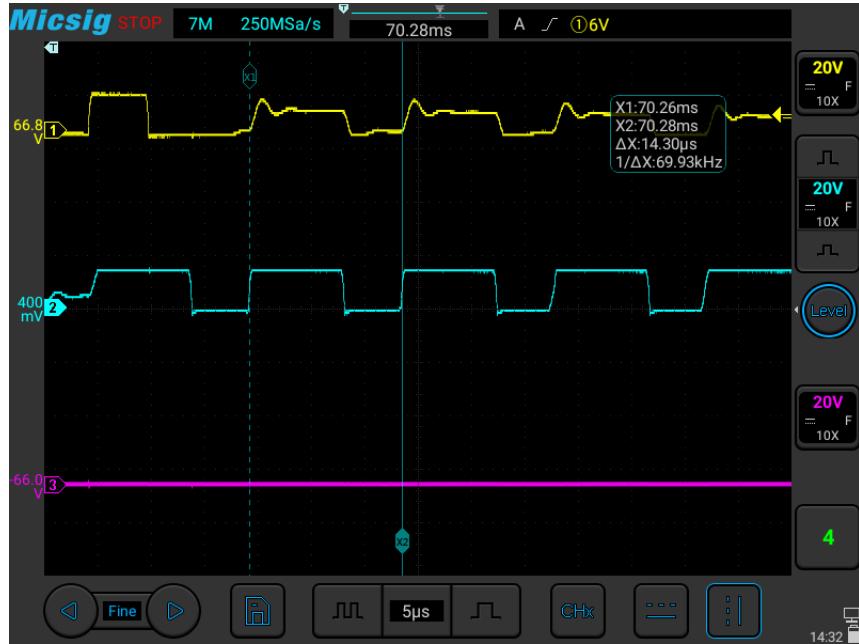


- ครั้งที่ 5

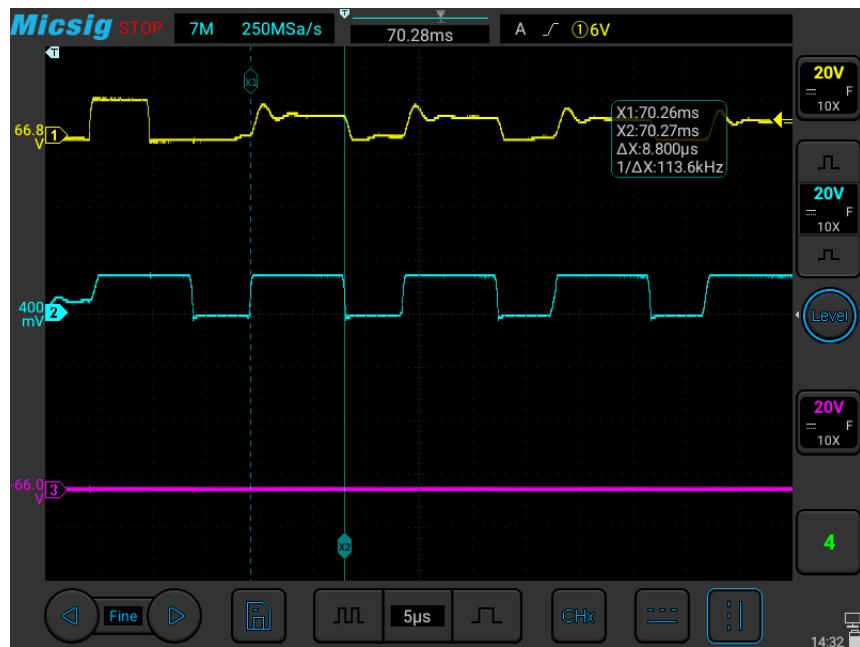


Duty Cycle

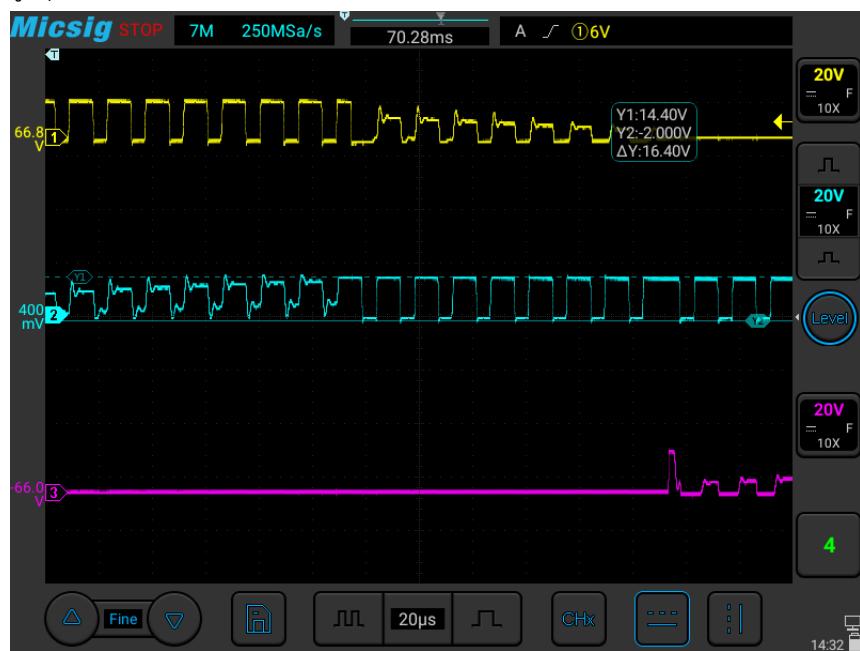
- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคิลิน



- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคลื่นในช่วง On



แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Duty Cycle 100%)



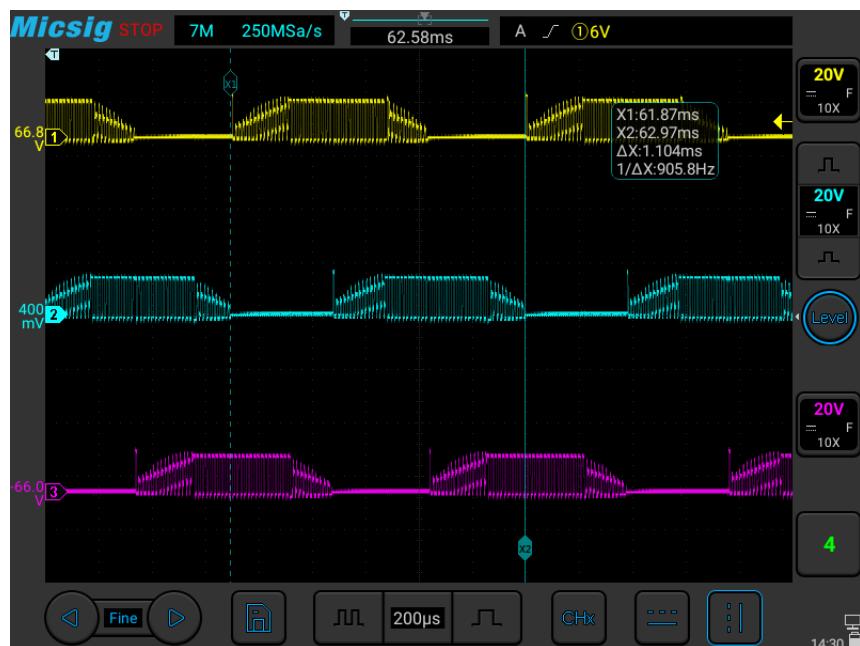
1.3 ที่ความเร็ว 7,854 rpm

กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope

- ครั้งที่ 1



- ครั้งที่ 2



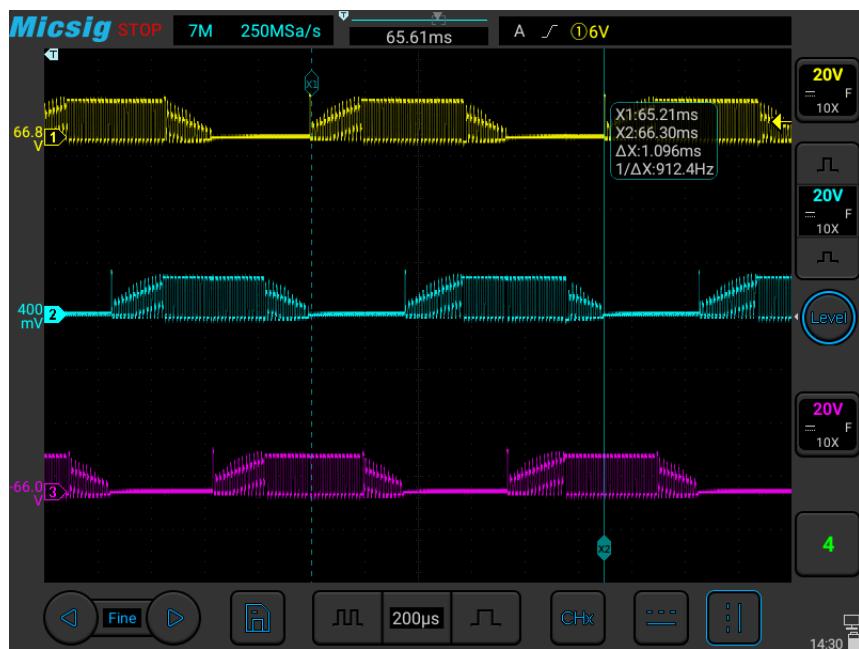
- ครั้งที่ 3



- ครั้งที่ 4

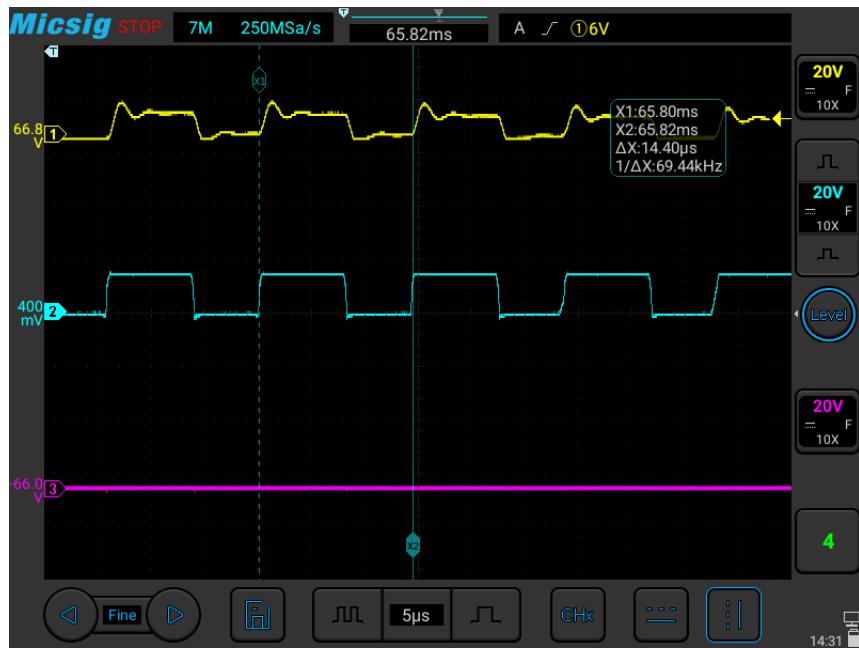


- ครั้งที่ 5

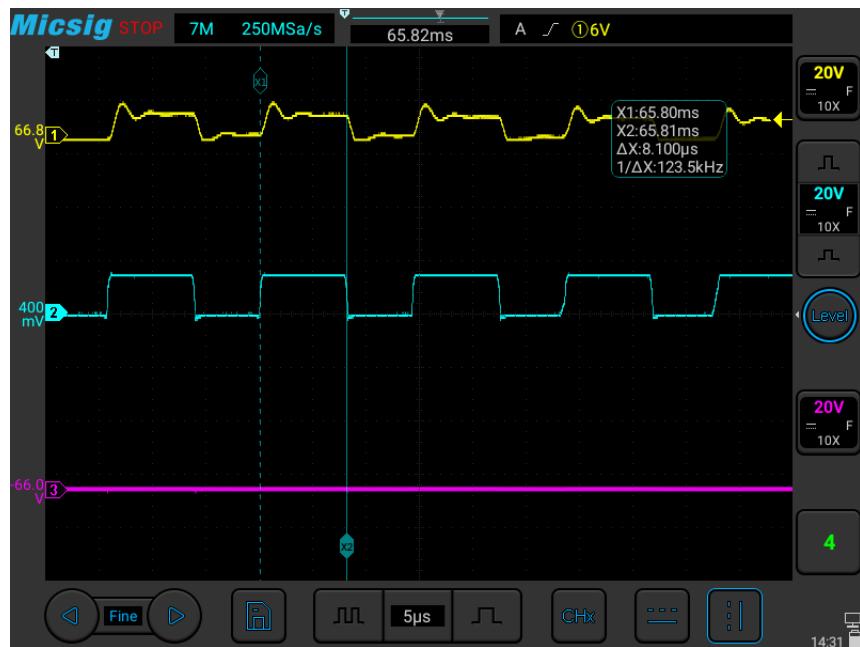


Duty Cycle

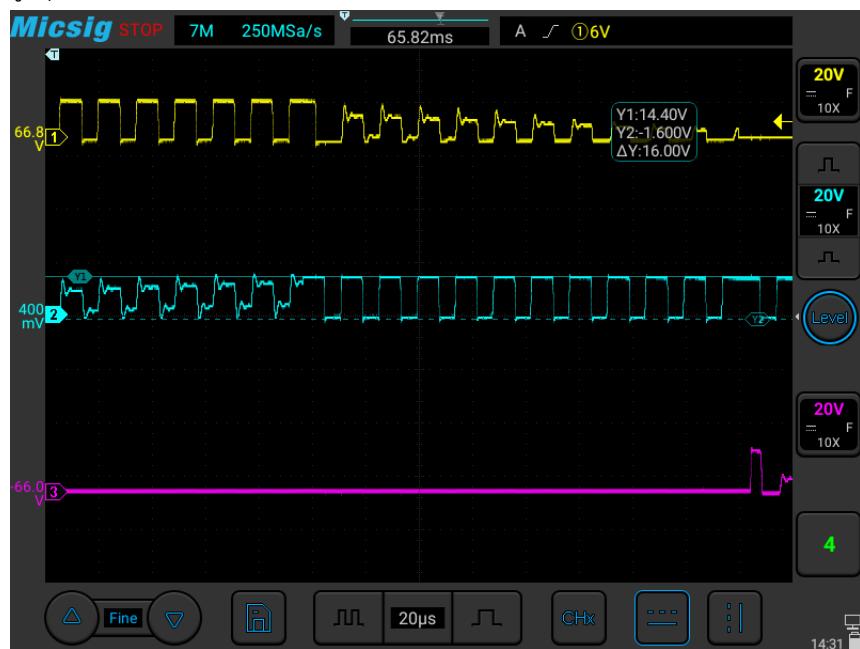
- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคื่น



- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคลื่นในช่วง On



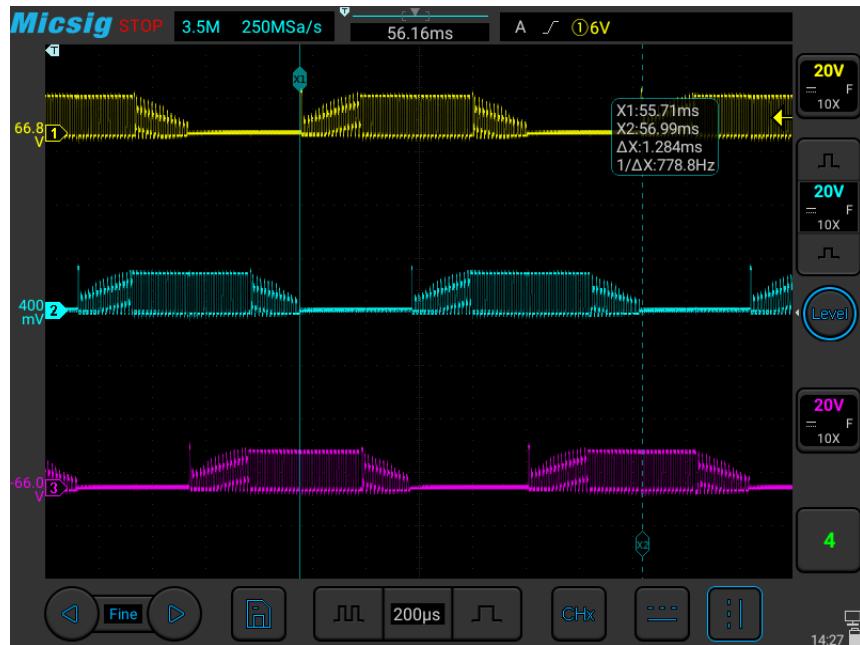
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Duty Cycle 100%)



1.4 ที่ความเร็ว 6,872 rpm

กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope

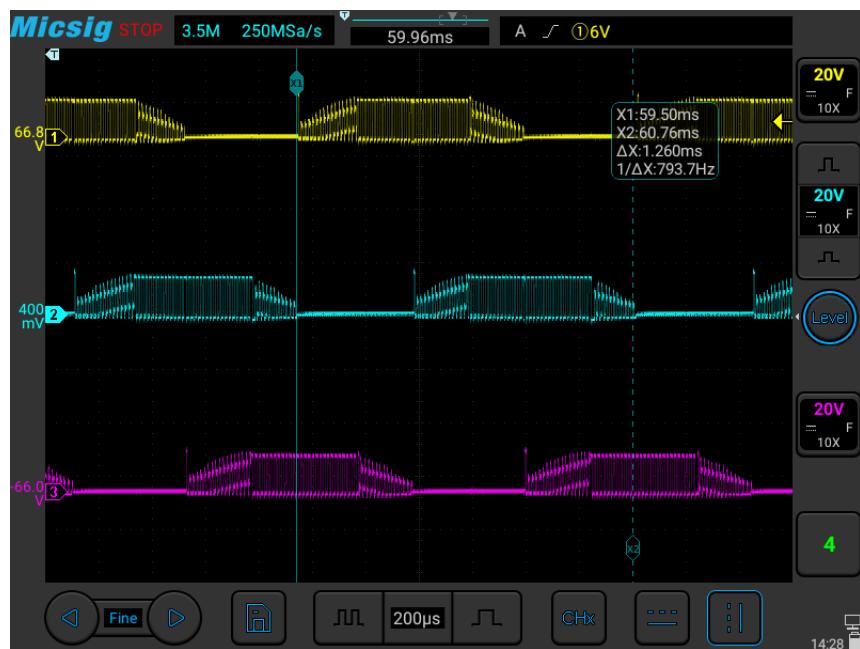
- ครั้งที่ 1



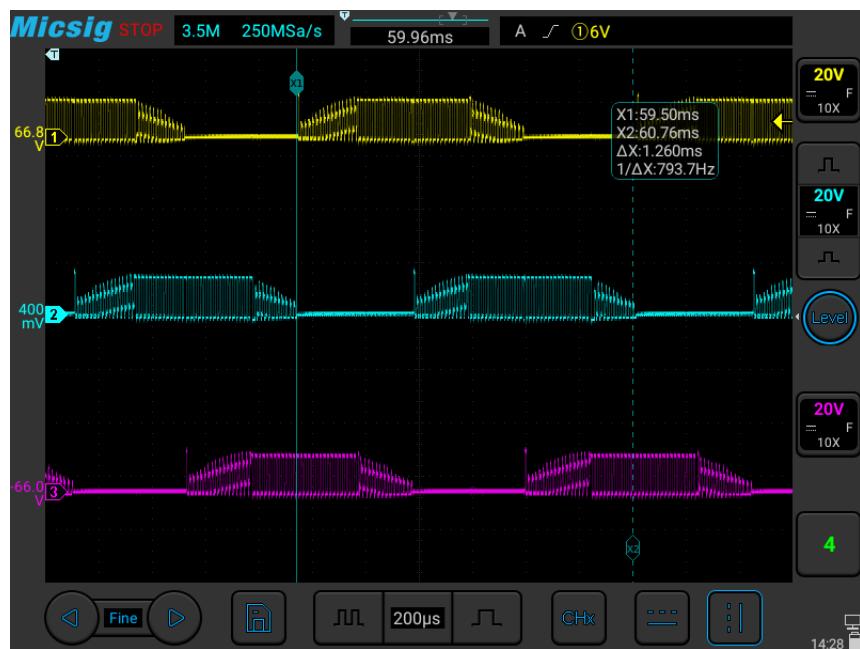
- ครั้งที่ 2



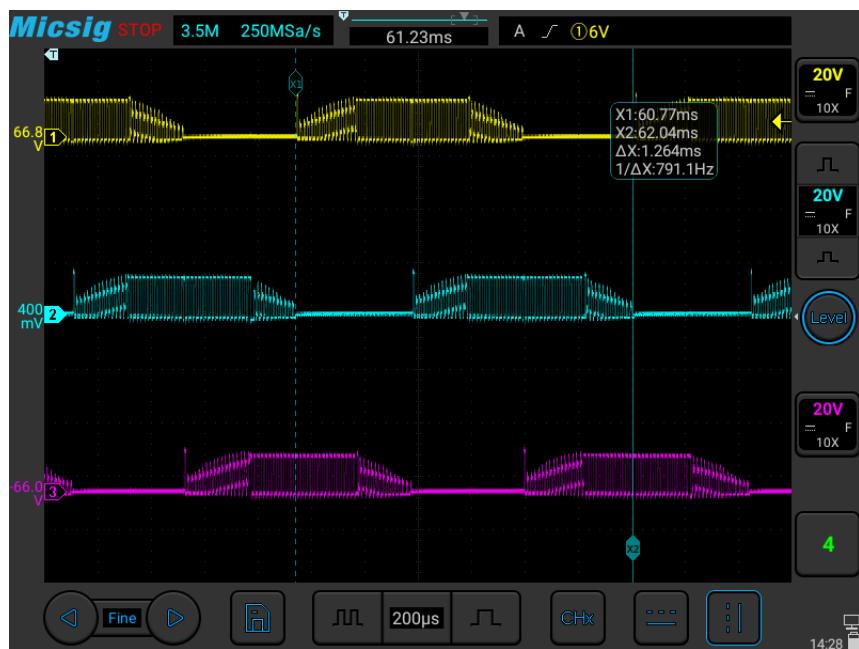
- ครั้งที่ 3



- ครั้งที่ 4

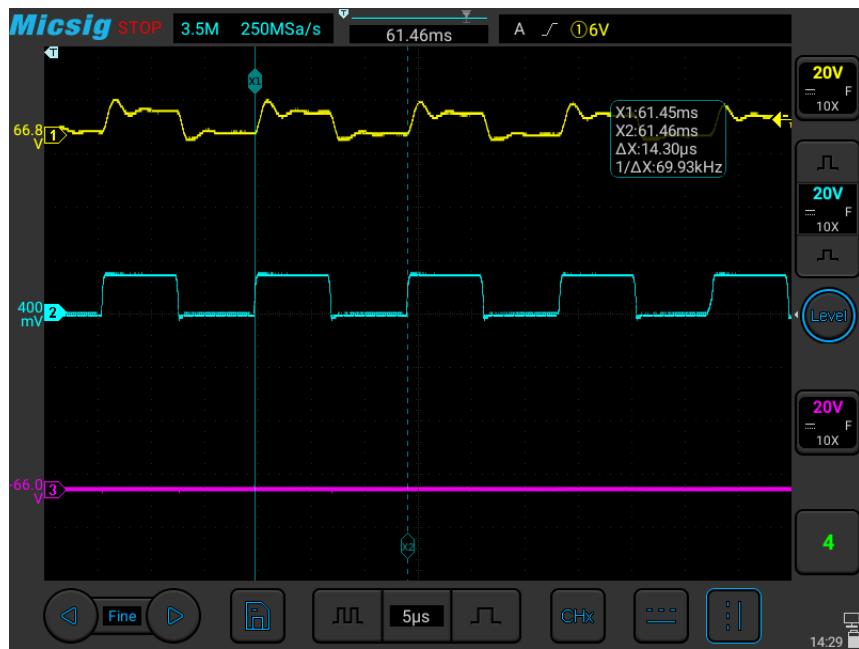


- ครั้งที่ 5

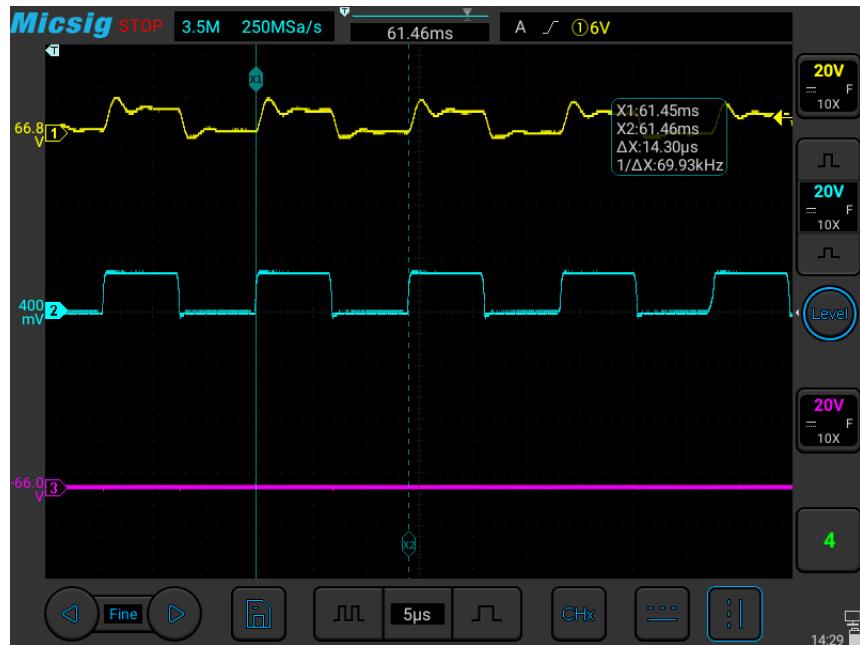


Duty Cycle

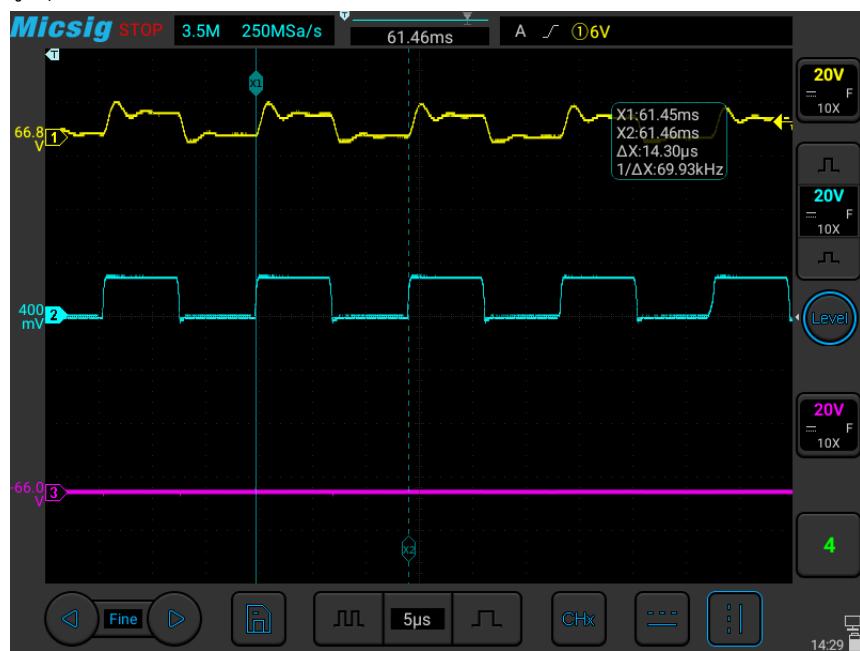
- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคืน



- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคลื่นในช่วง On



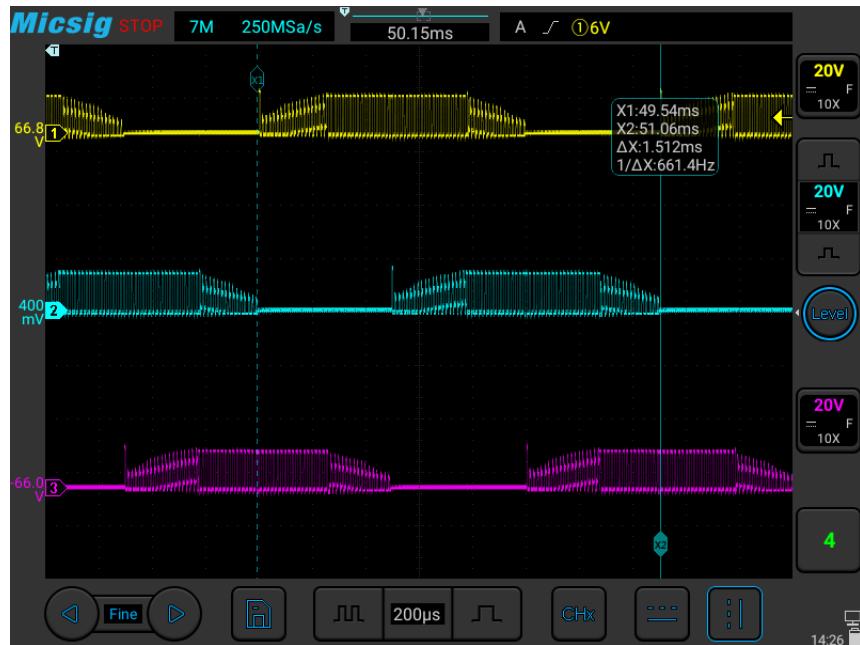
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Duty Cycle 100%)



1.5 ที่ความเร็ว 5,886 rpm

กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope

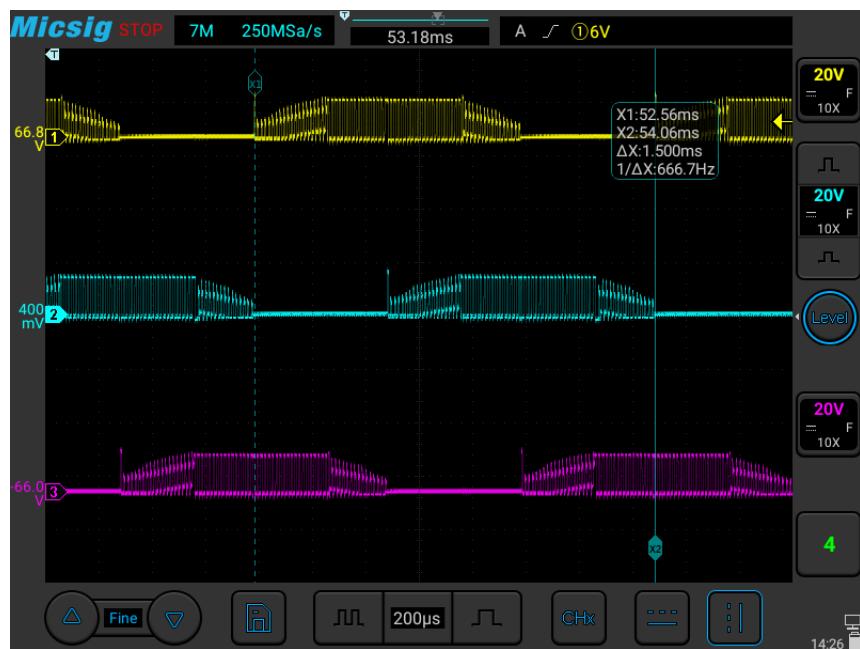
- ครั้งที่ 1



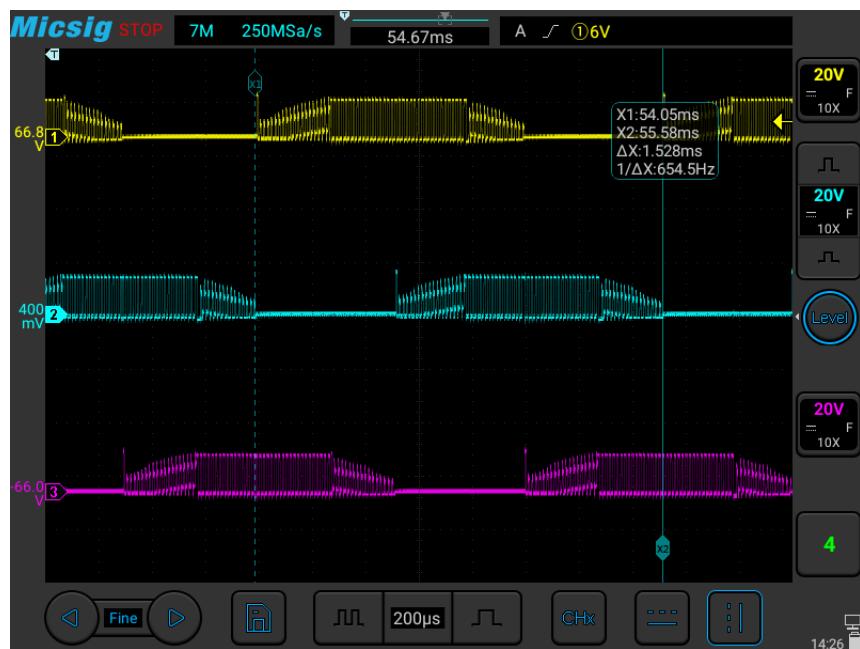
- ครั้งที่ 2



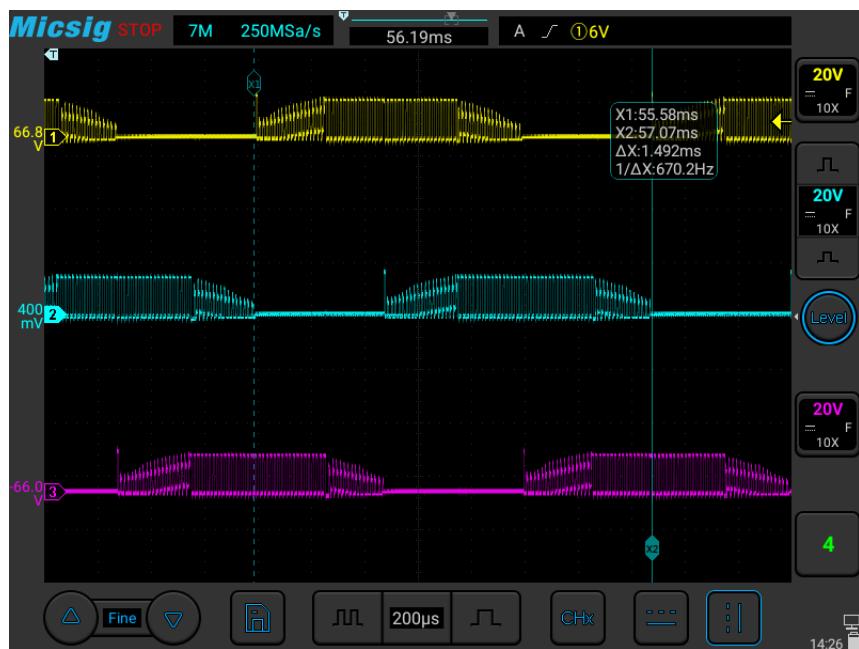
- ครั้งที่ 3



- ครั้งที่ 4

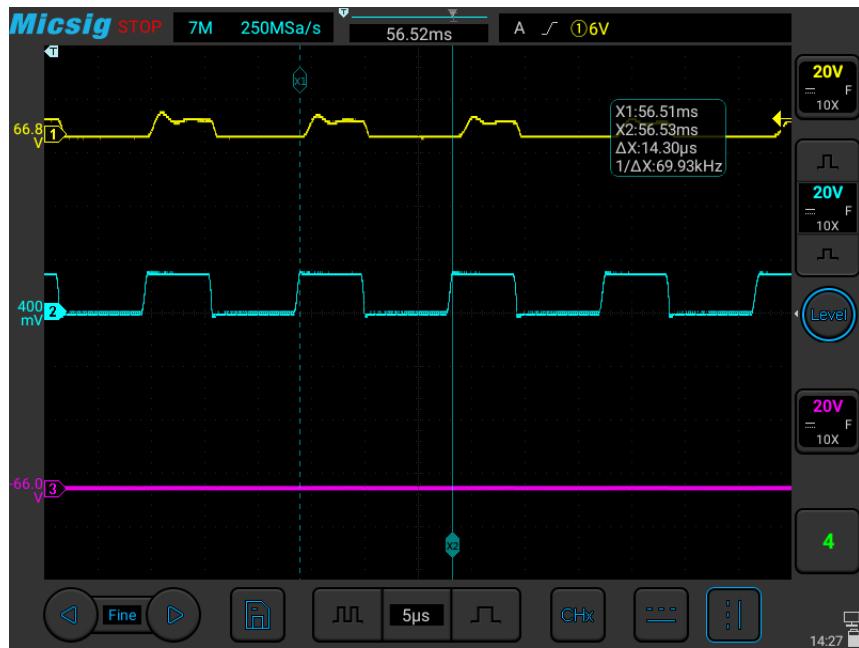


- ครั้งที่ 5

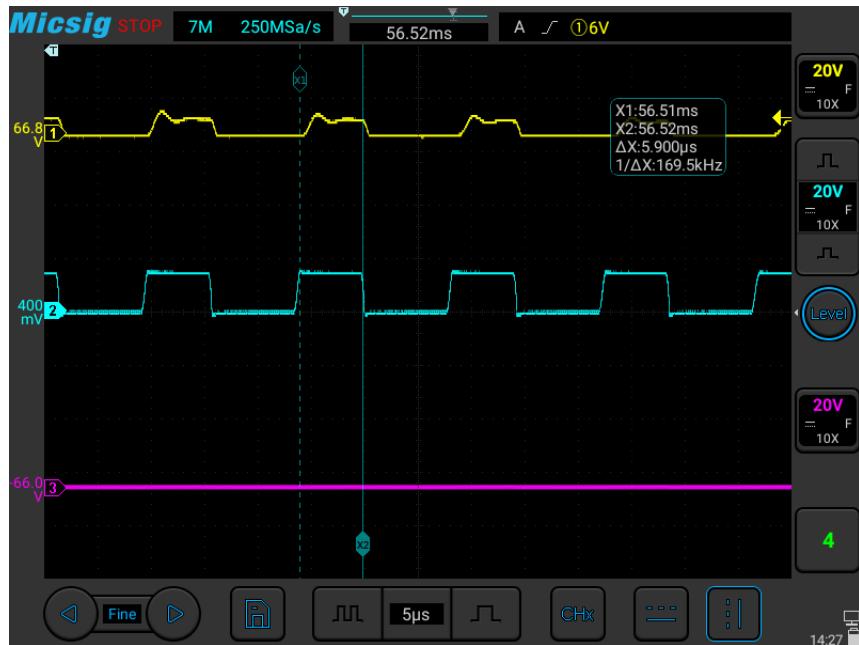


Duty Cycle

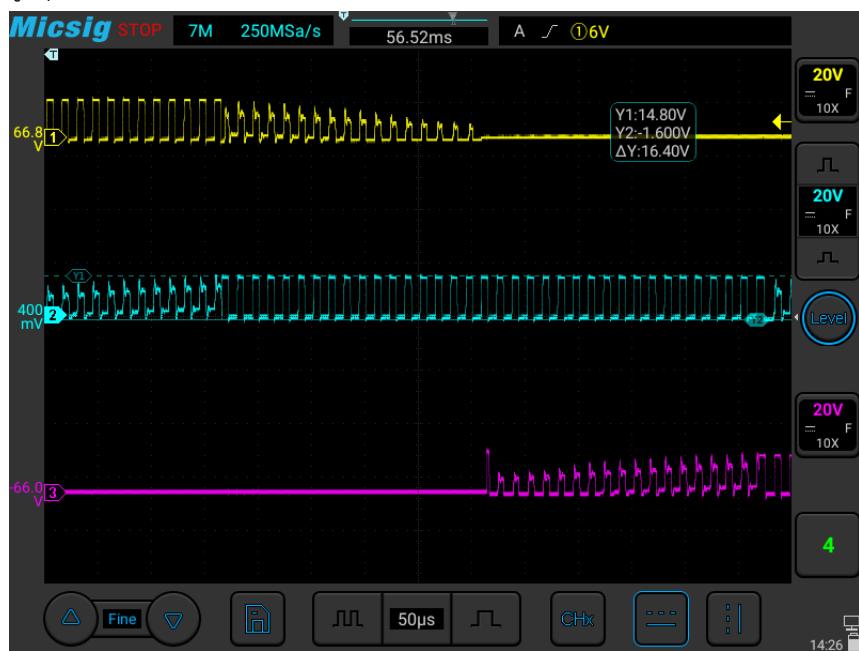
- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคื่น



- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคื่นในช่วง On



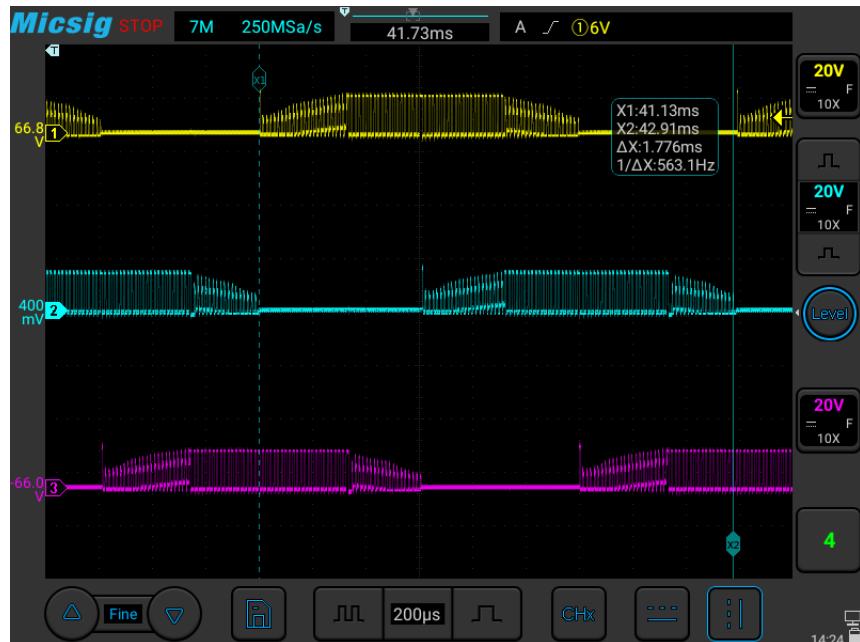
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Duty Cycle 100%)



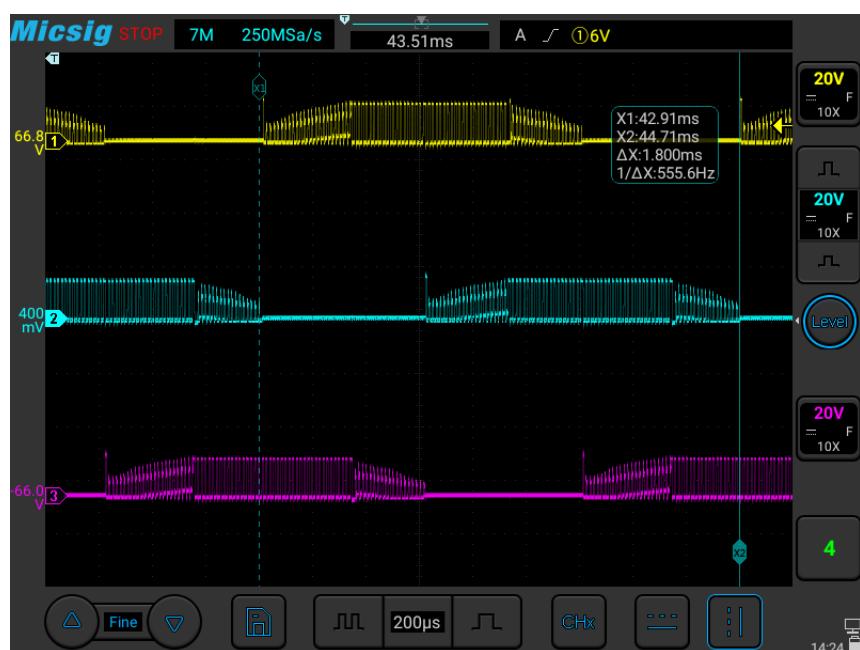
1.6 ที่ความเร็ว 4,886 rpm

กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope

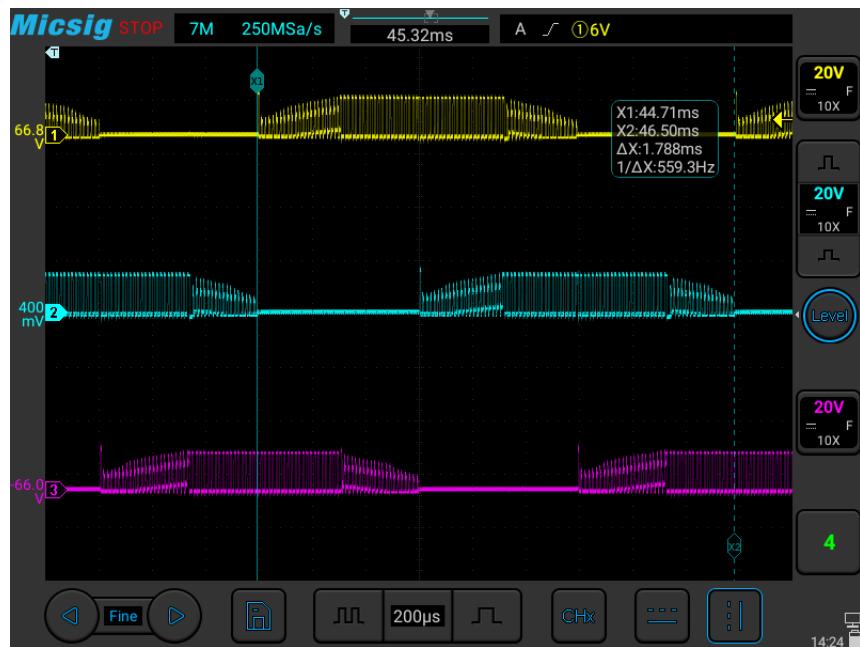
- ครั้งที่ 1



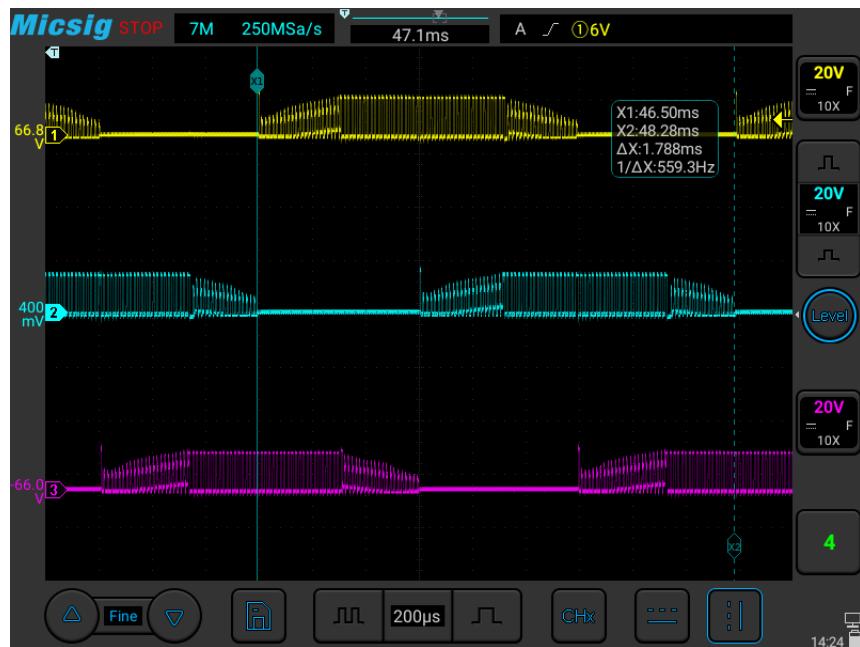
- ครั้งที่ 2



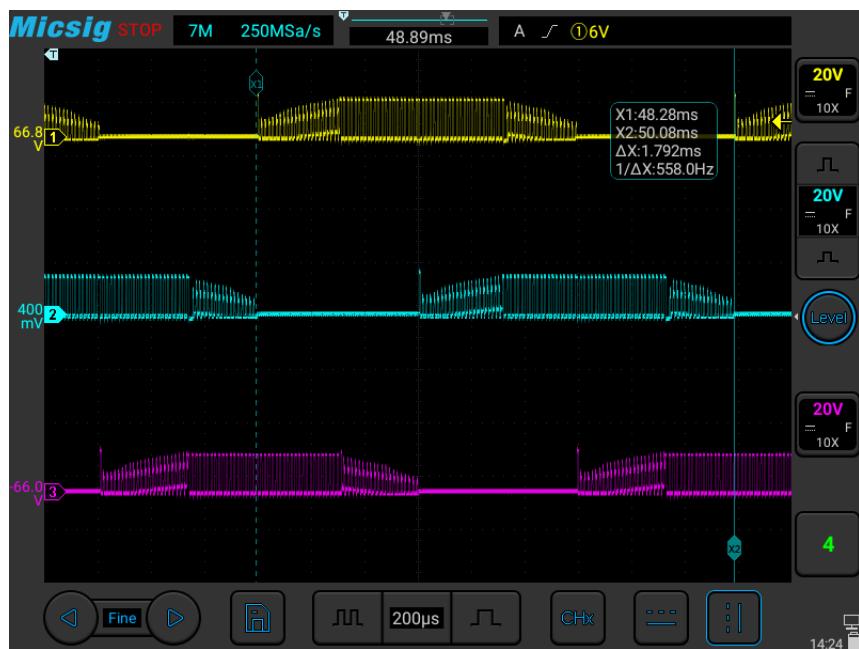
- ครั้งที่ 3



- ครั้งที่ 4

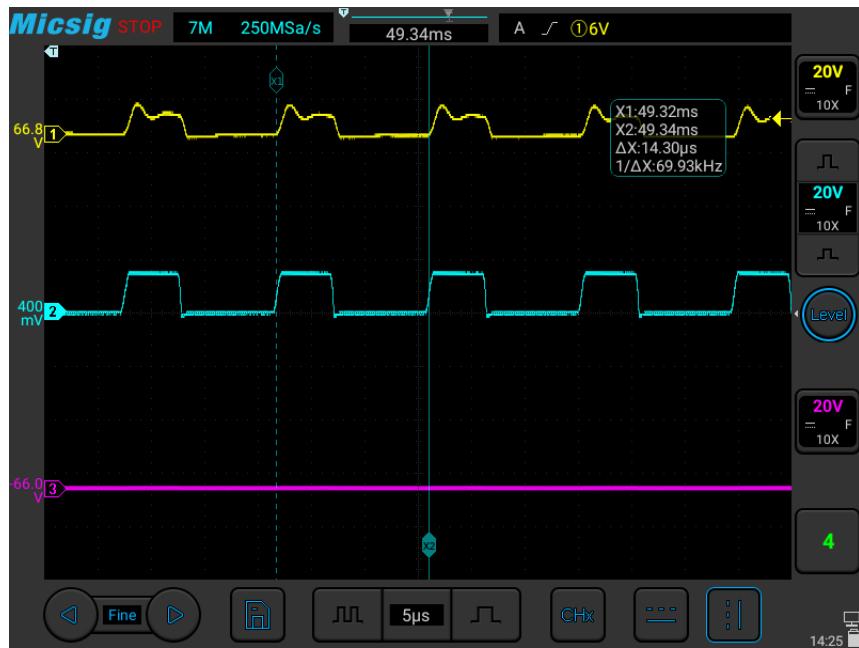


- ครั้งที่ 5

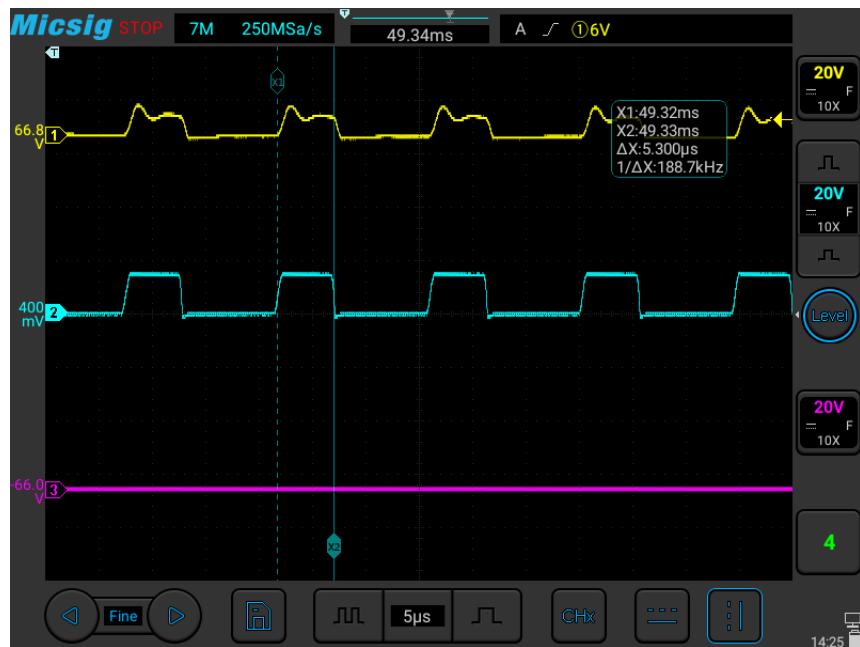


Duty Cycle

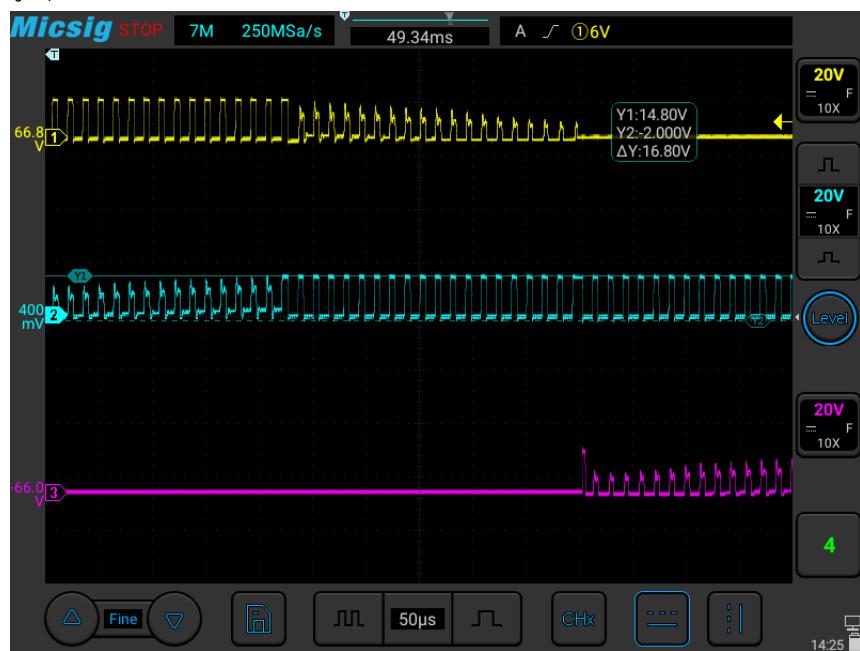
- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคื่น



- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคื่นในช่วง On



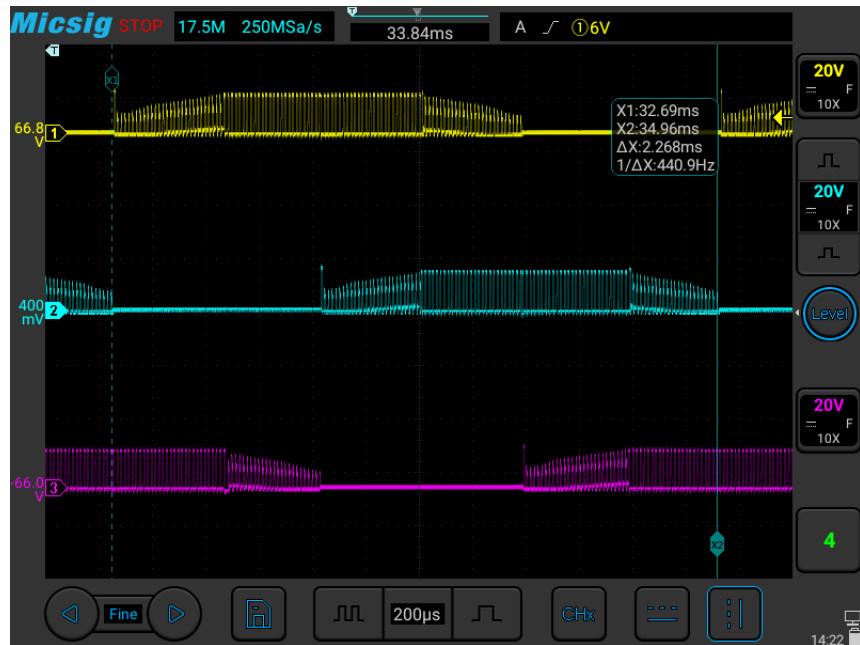
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Duty Cycle 100%)



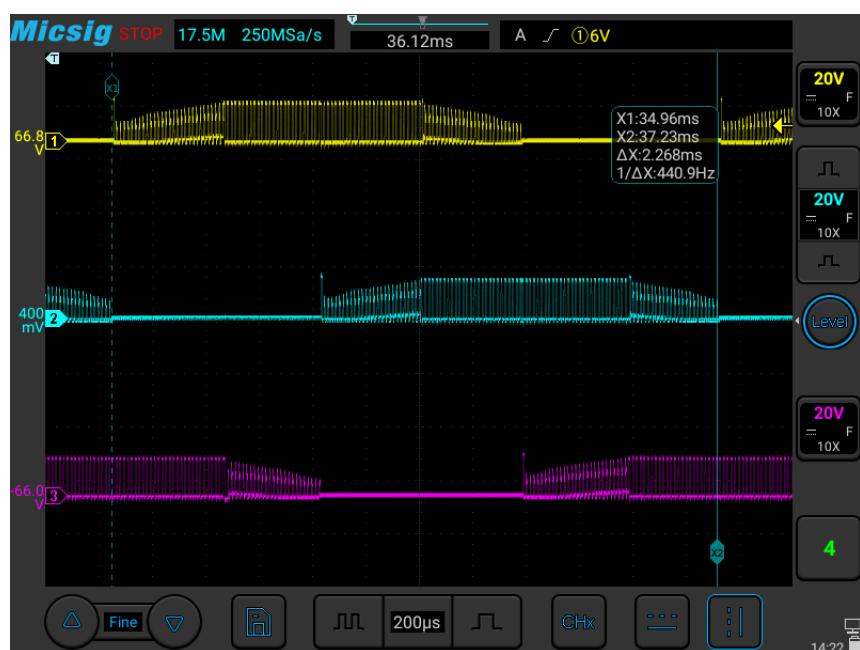
1.7 ที่ความเร็ว 3,876 rpm

กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope

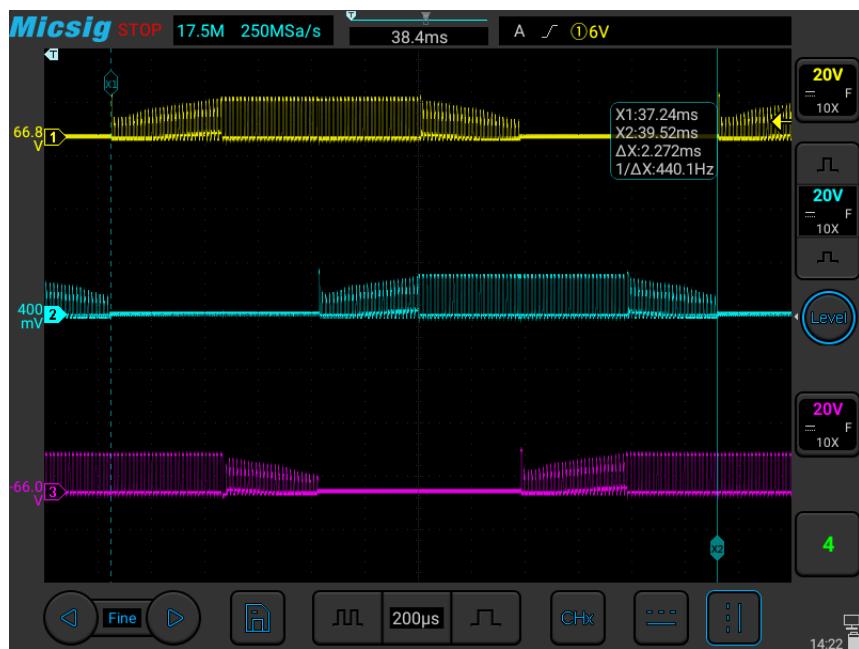
- ครั้งที่ 1



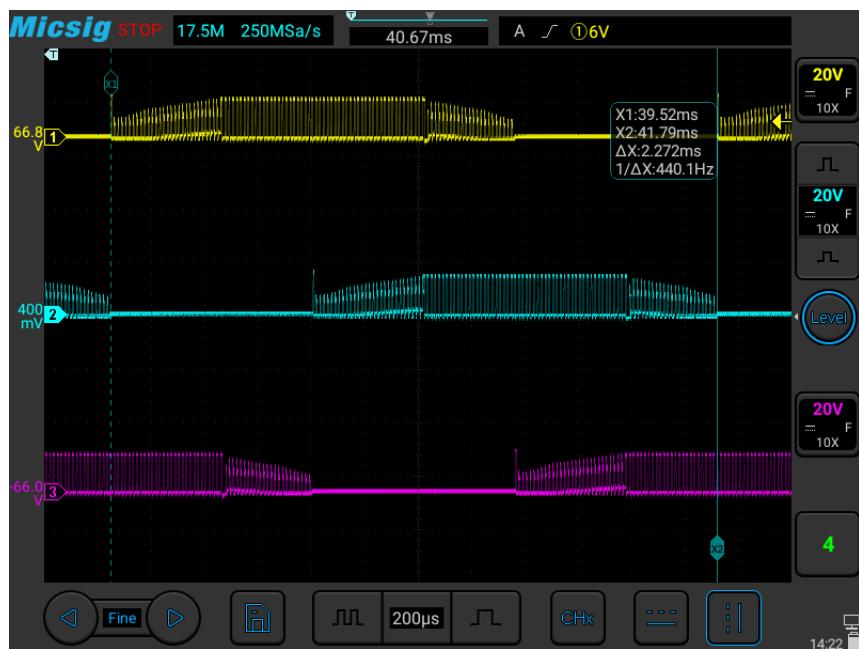
- ครั้งที่ 2



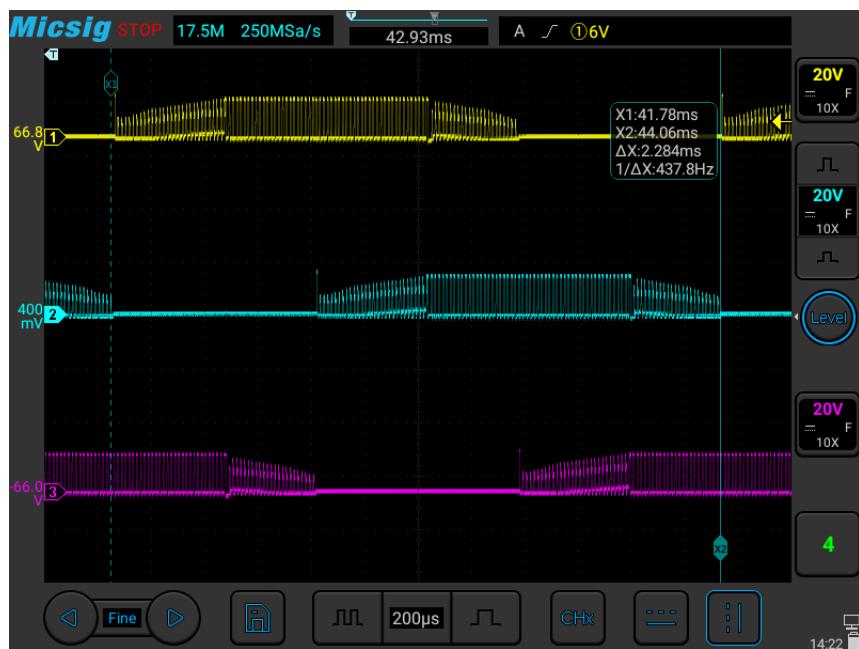
- ครั้งที่ 3



- ครั้งที่ 4

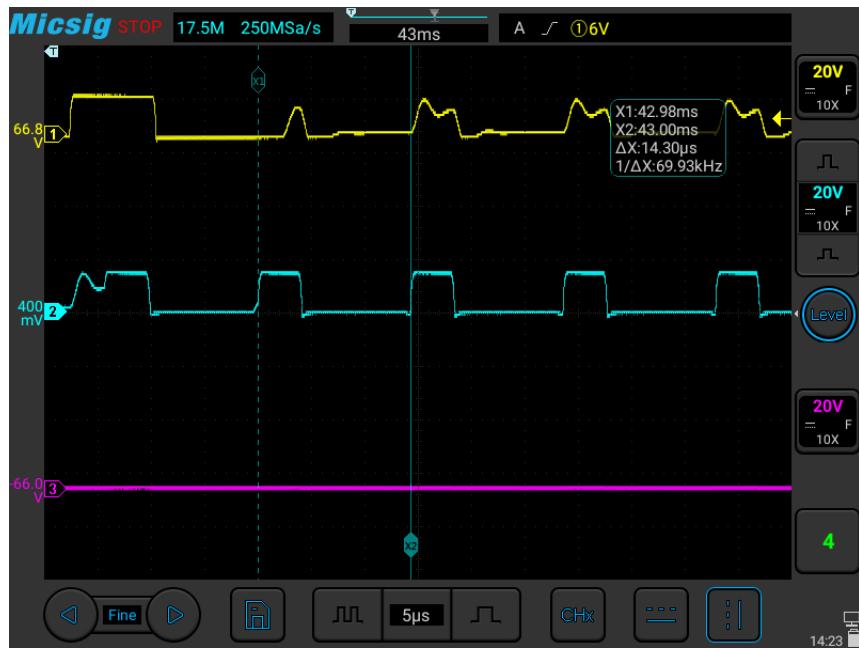


- ครั้งที่ 5

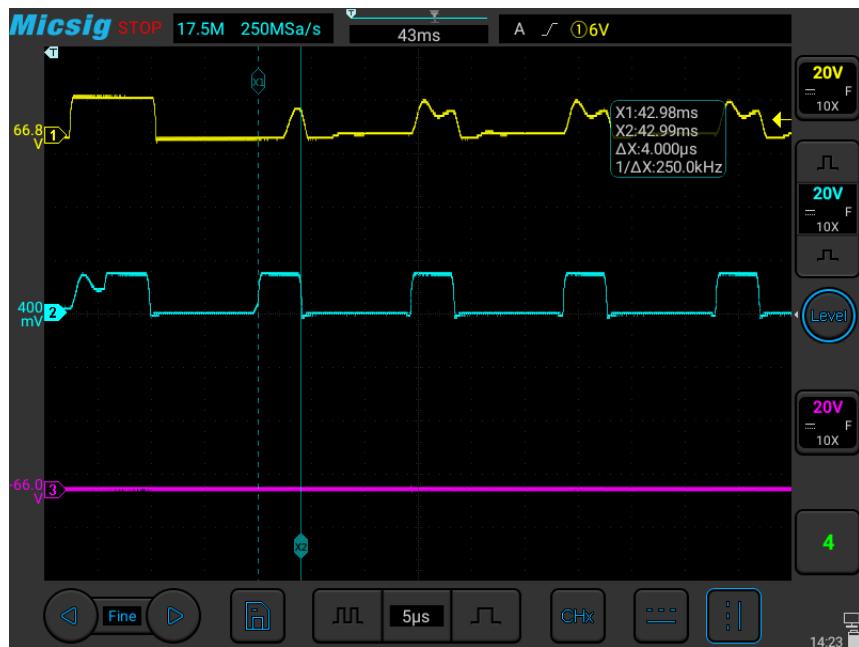


Duty Cycle

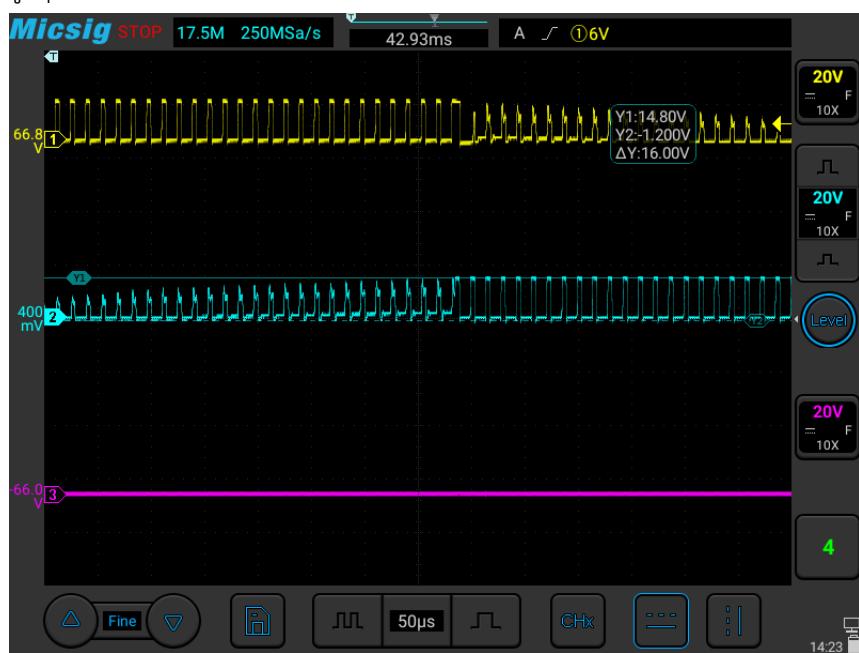
- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคื่น



- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคึ่นในช่วง On



แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Duty Cycle 100%)



1.8 ที่ความเร็ว 2,892 rpm

กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope

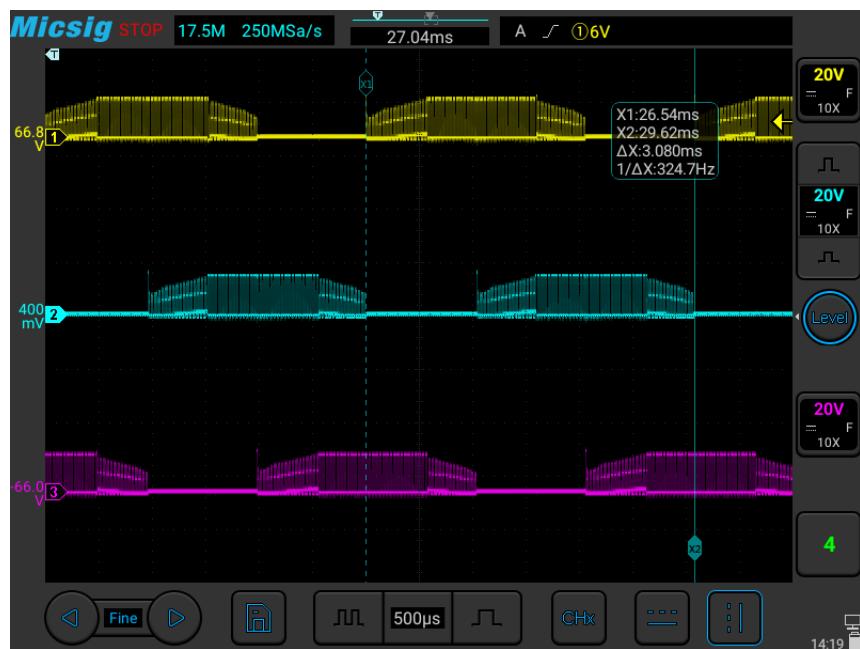
- ครั้งที่ 1



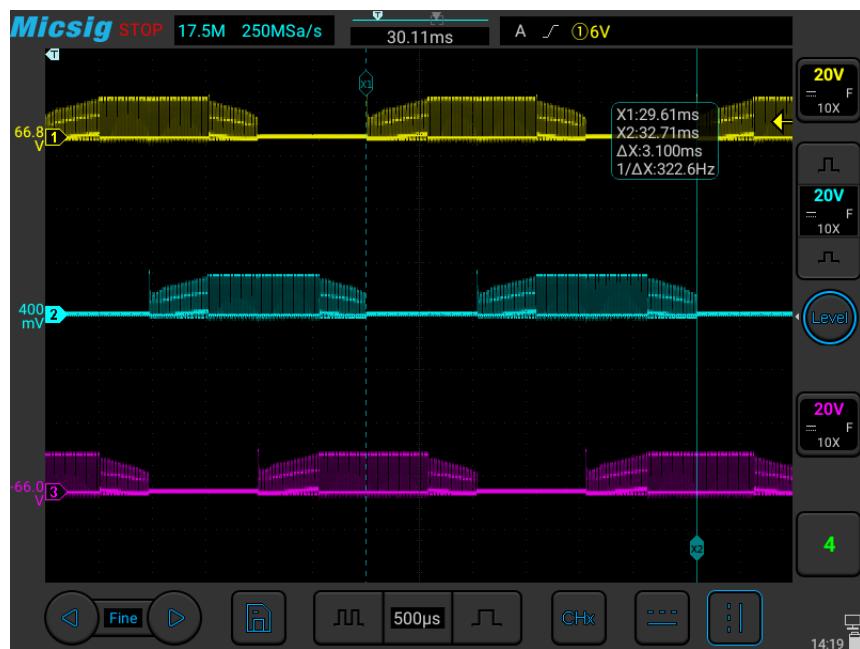
- ครั้งที่ 2



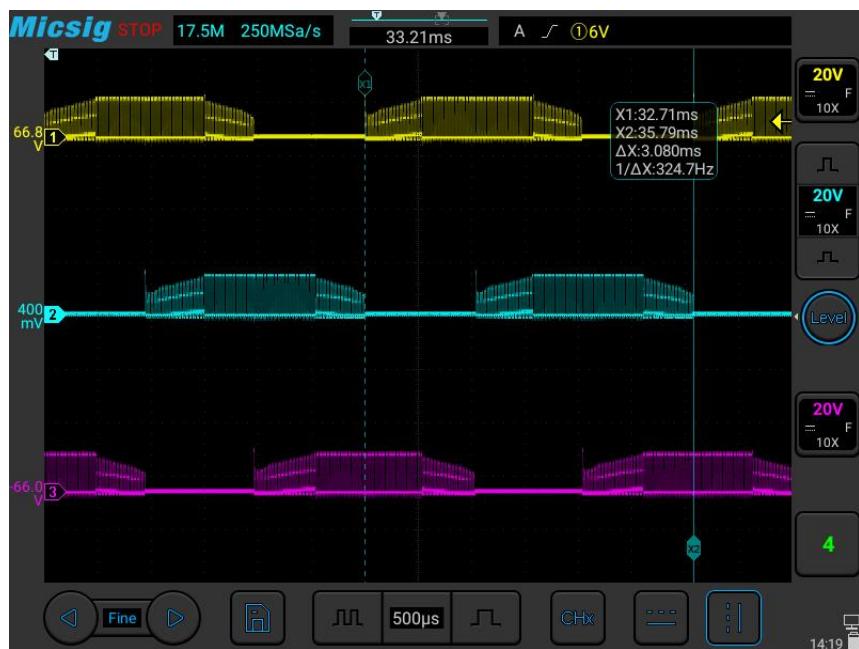
- ครั้งที่ 3



- ครั้งที่ 4

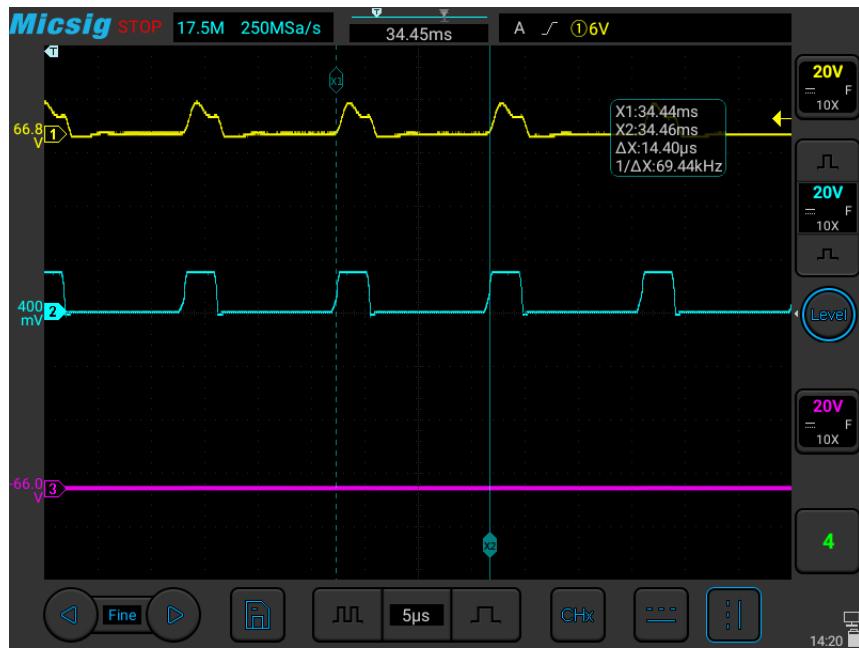


- ครั้งที่ 5

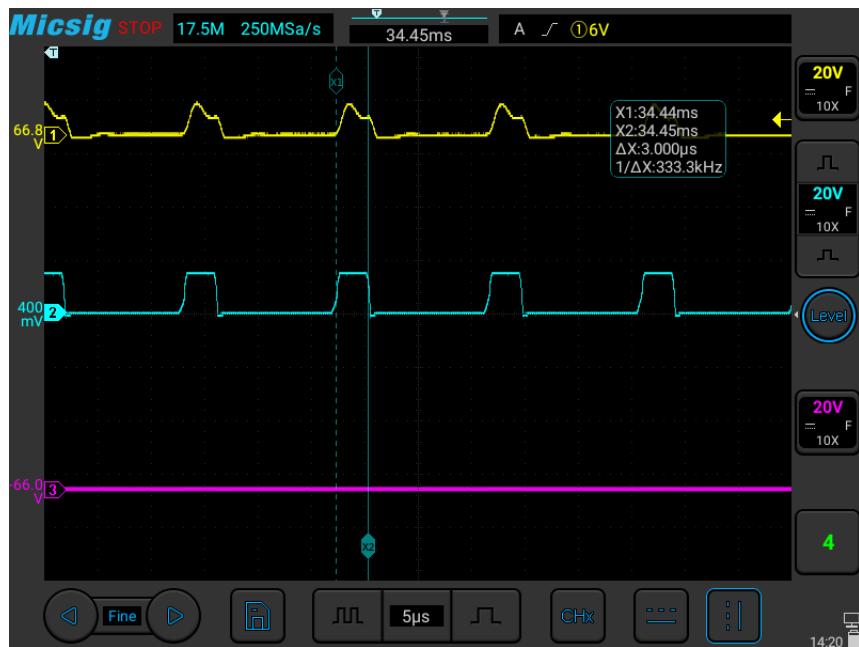


Duty Cycle

- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคลื่น



- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคลื่นในช่วง On



แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Duty Cycle 100%)



1.9 ที่ความเร็ว 1,872 rpm

กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope

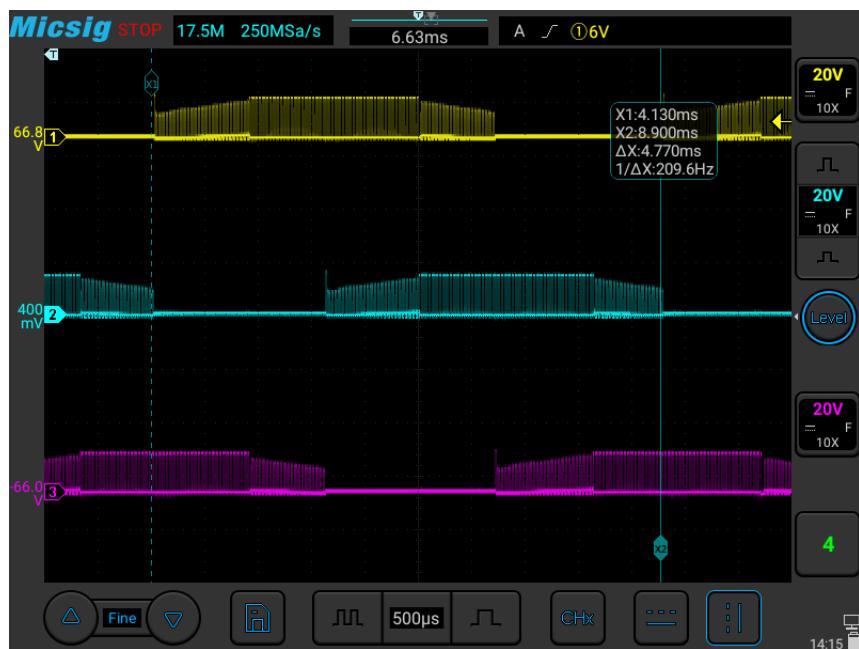
- ครั้งที่ 1



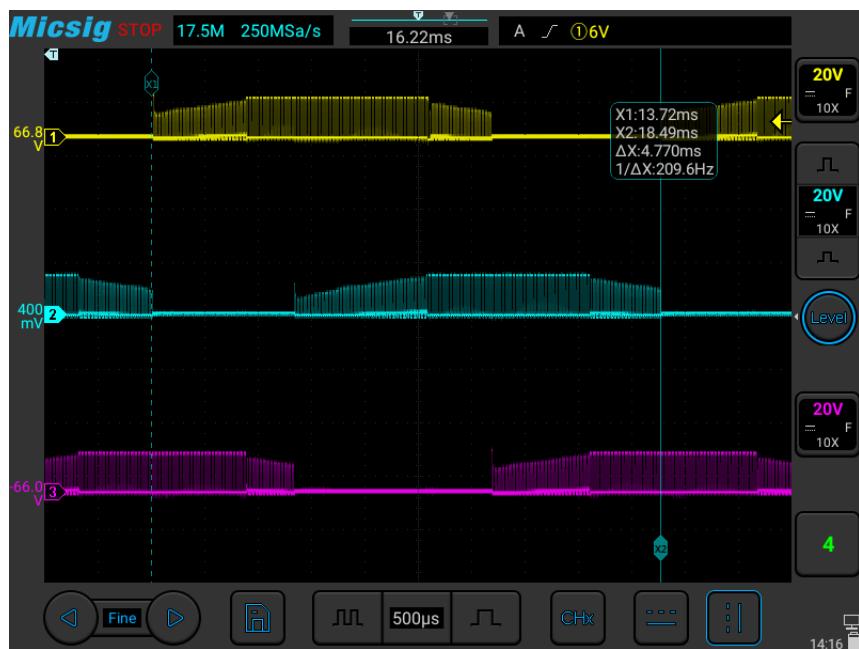
- ครั้งที่ 2



- ครั้งที่ 3



- ครั้งที่ 4

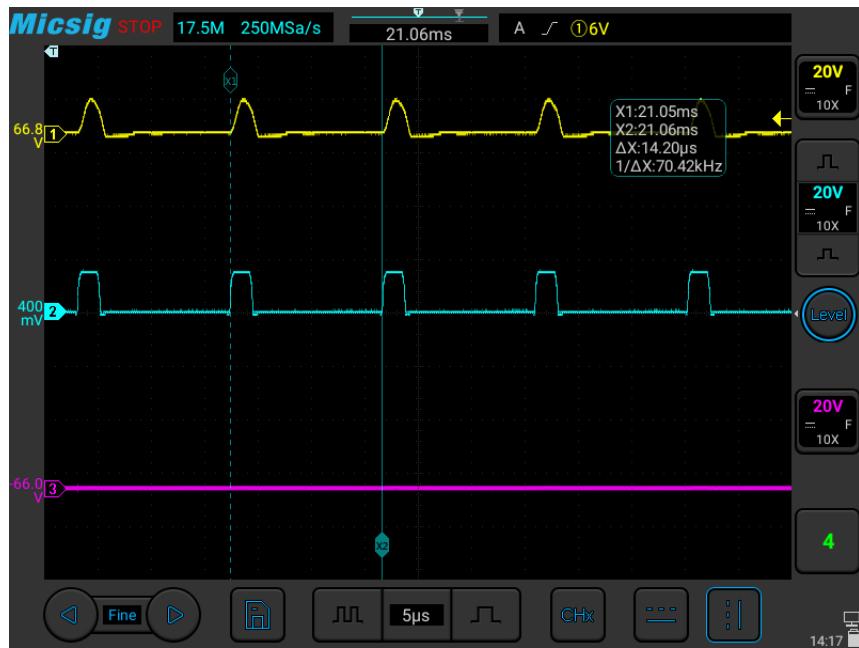


- ครั้งที่ 5

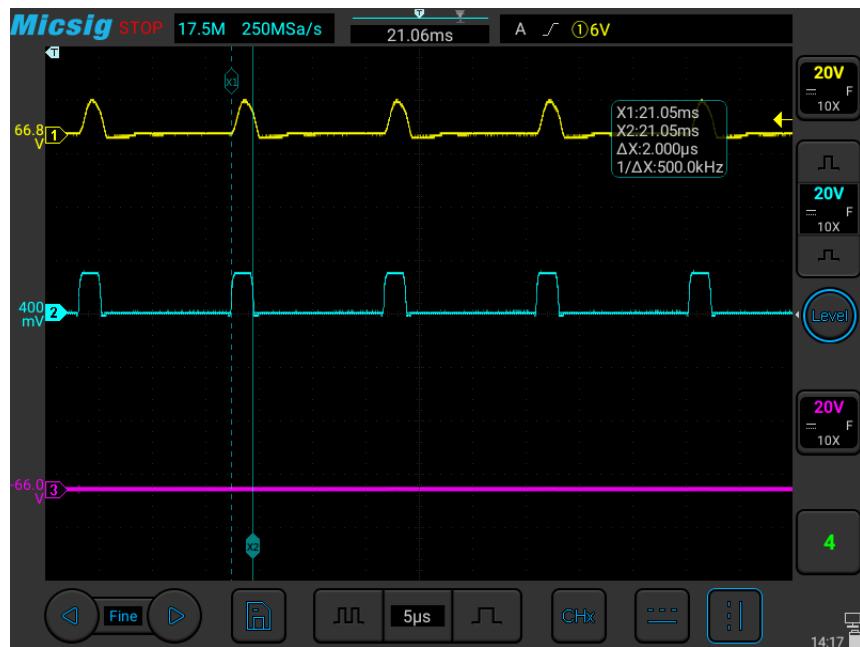


Duty Cycle

- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคื่น



- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคลื่นในช่วง On



แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Duty Cycle 100%)



1.10 ที่ความเร็ว 1,476 rpm

กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope



2. Brushless Motor หมุนแบบตามเข็มนาฬิกา

2.1. ที่ความเร็ว -9,864 rpm

กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope

- ครั้งที่ 1



- ครั้งที่ 2



- ครั้งที่ 3



- ครั้งที่ 4



- ครั้งที่ 5

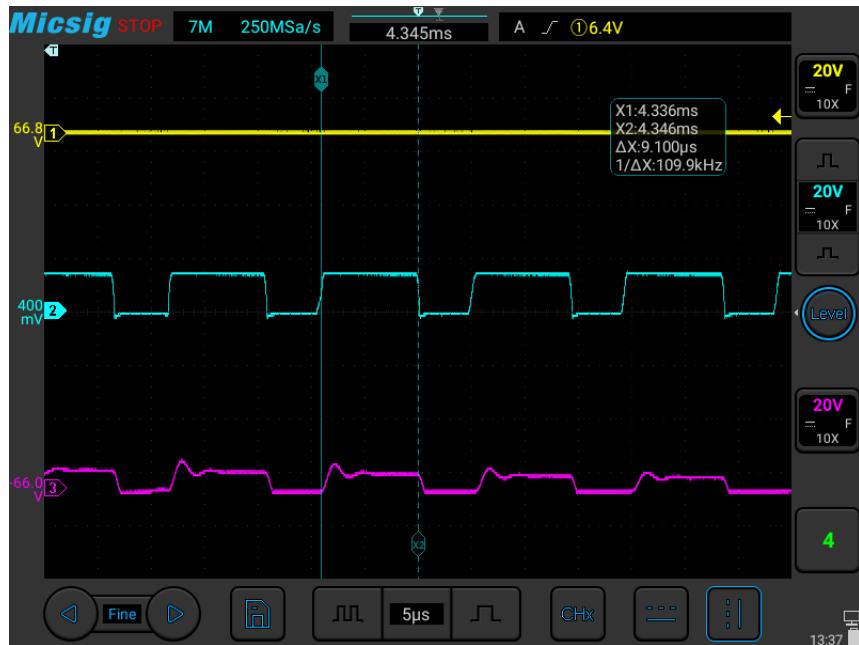


Duty Cycle

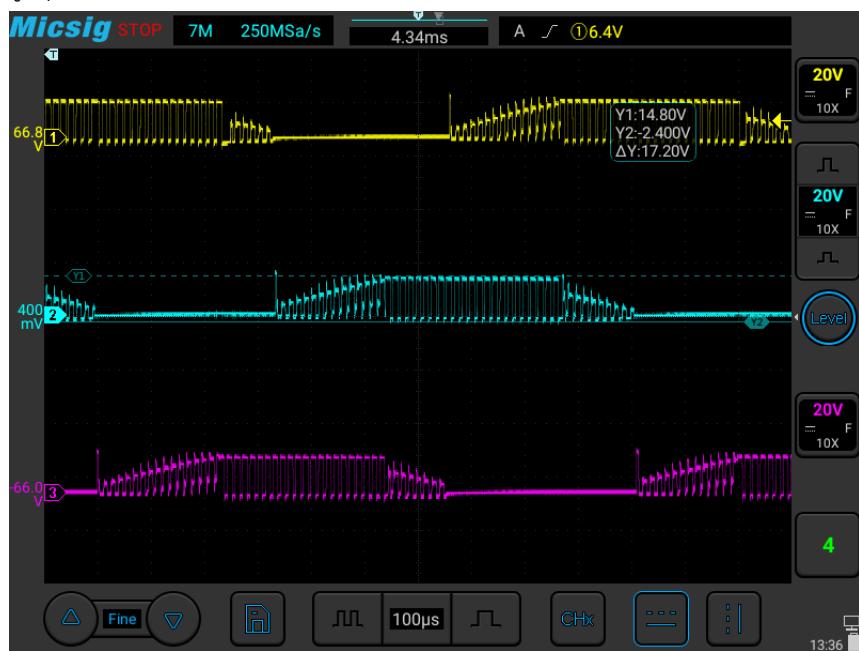
- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคื่น



- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคึ่นในช่วง On



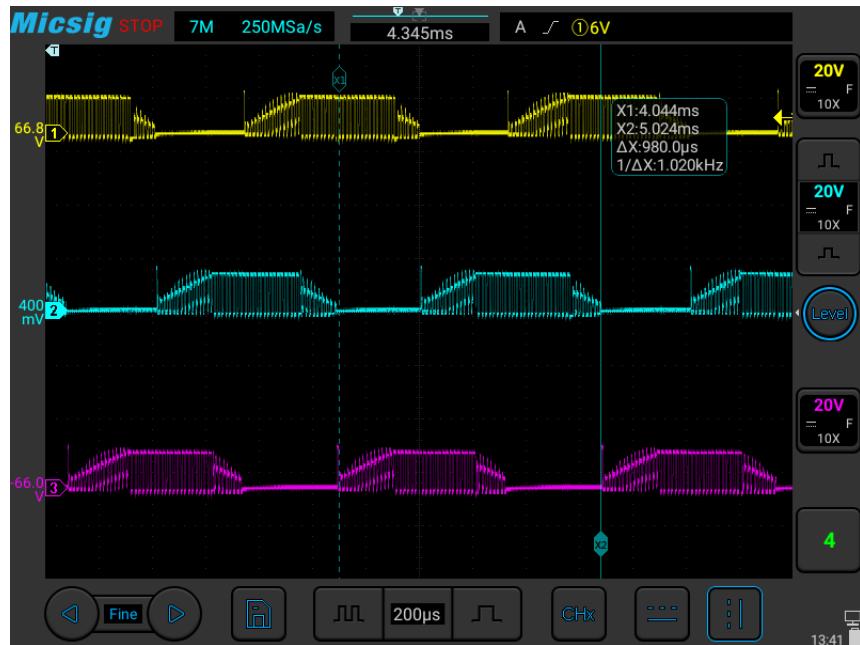
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Duty Cycle 100%)



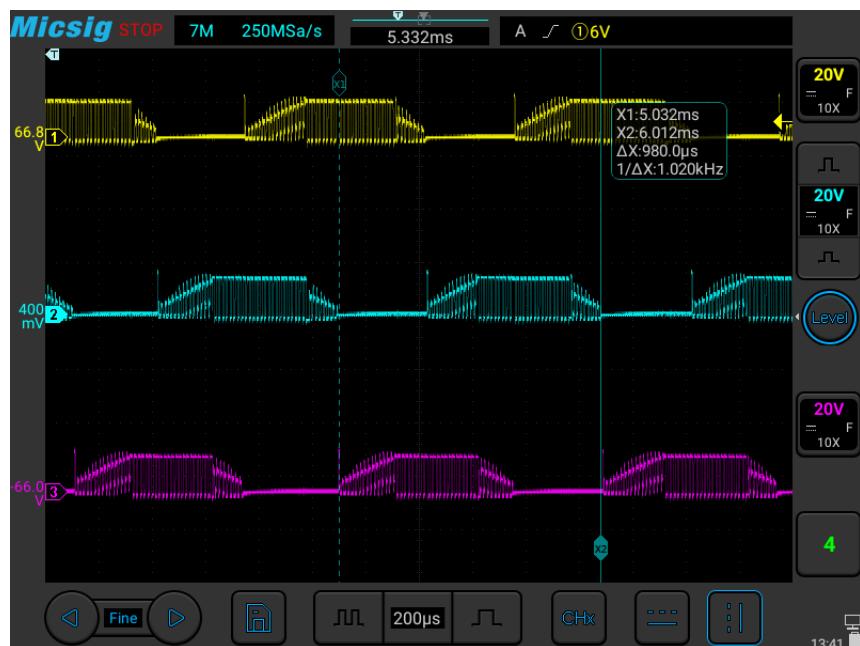
2.2. ที่ความเร็ว -8,874 rpm

กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope

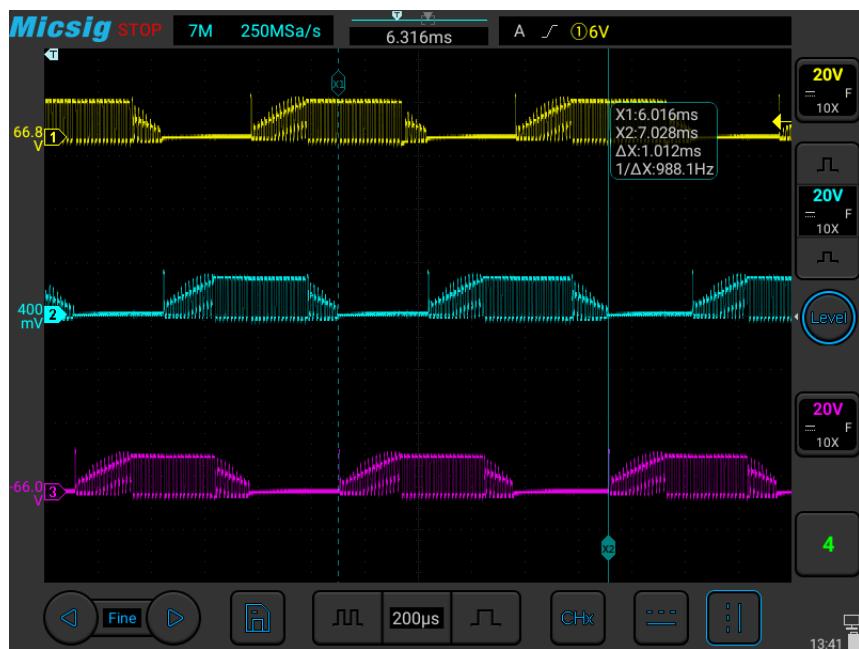
- ครั้งที่ 1



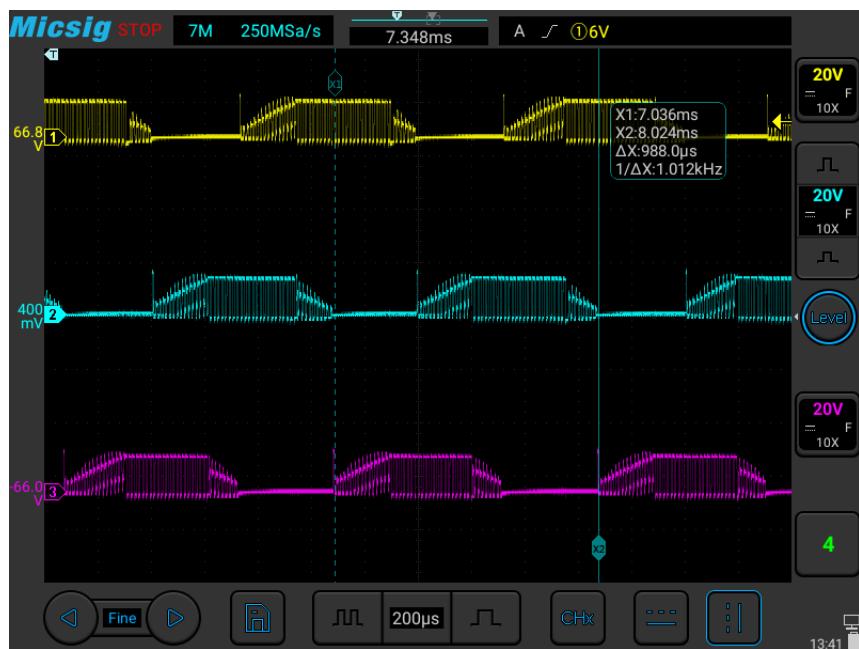
- ครั้งที่ 2



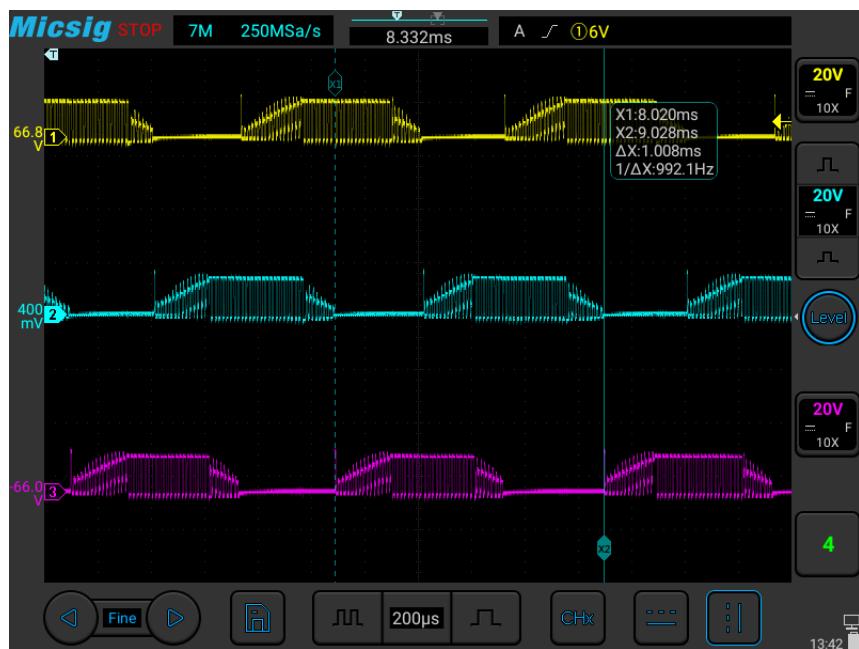
- ครั้งที่ 3



- ครั้งที่ 4

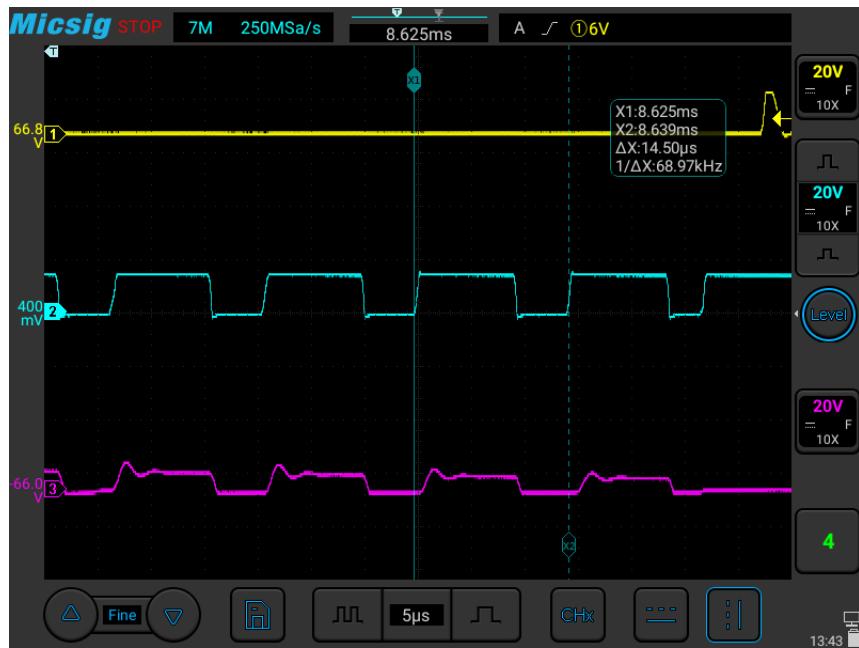


- ครั้งที่ 5

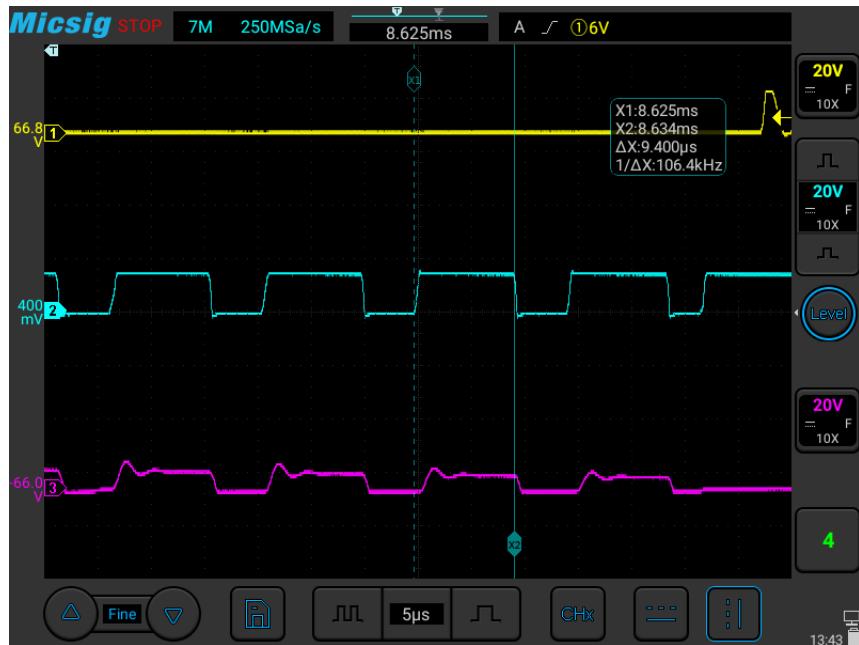


Duty Cycle

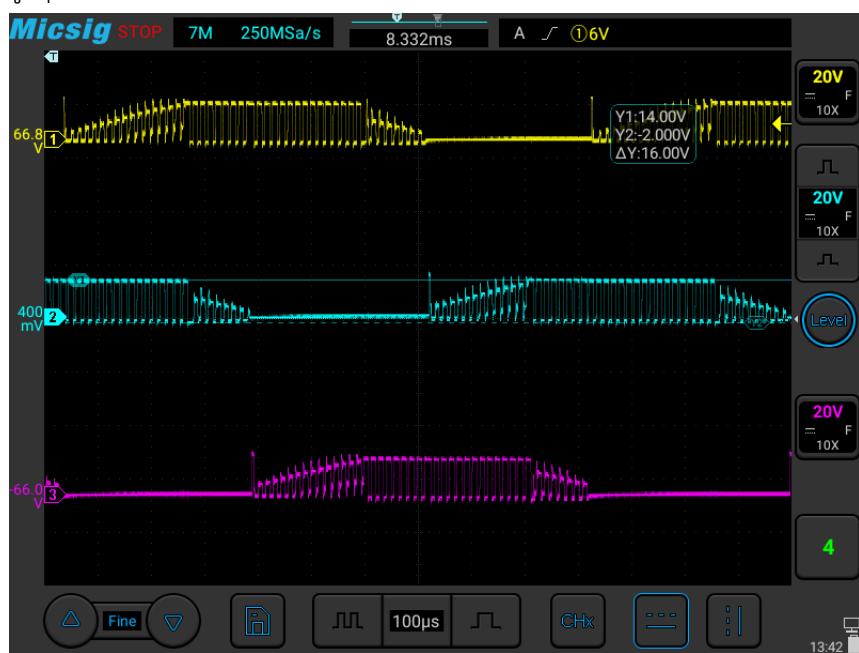
- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคลื่น



- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคึ่นในช่วง On



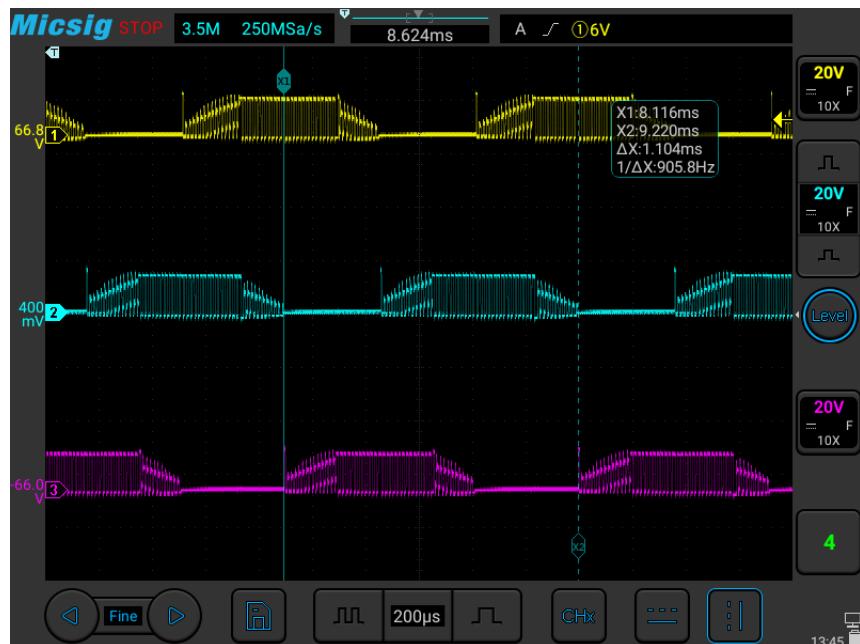
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Duty Cycle 100%)



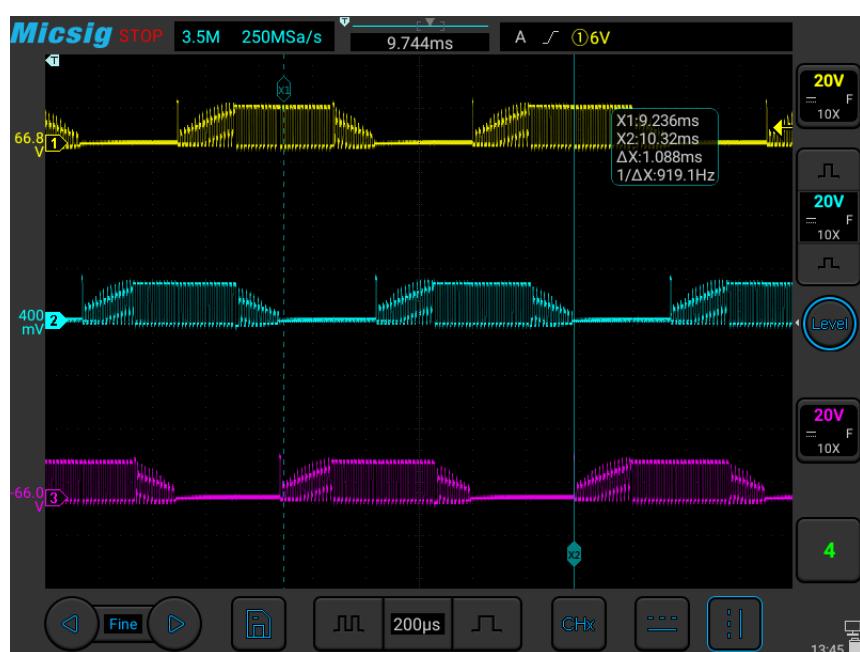
2.3. ที่ความเร็ว -7,854 rpm

กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope

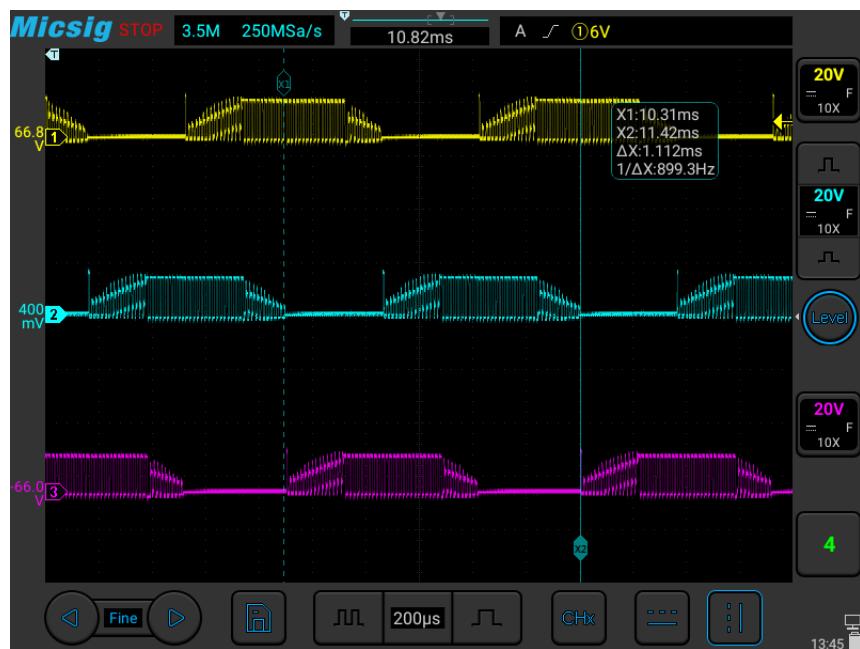
- ครั้งที่ 1



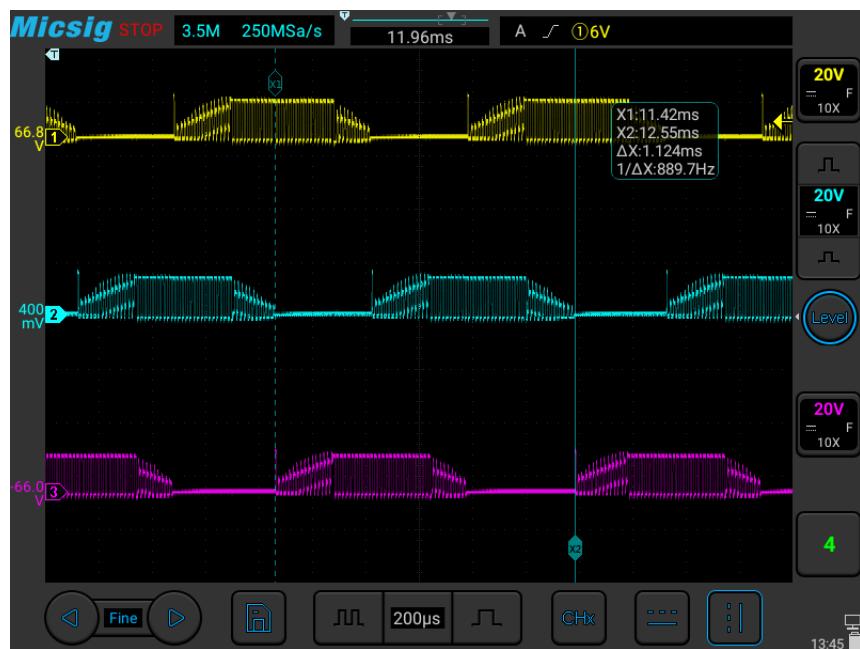
- ครั้งที่ 2



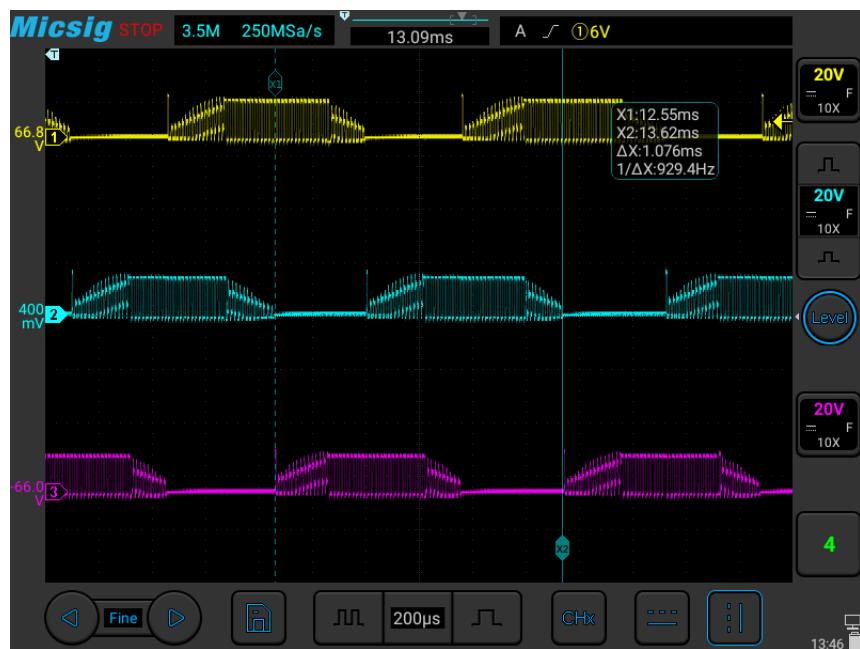
- ครั้งที่ 3



- ครั้งที่ 4

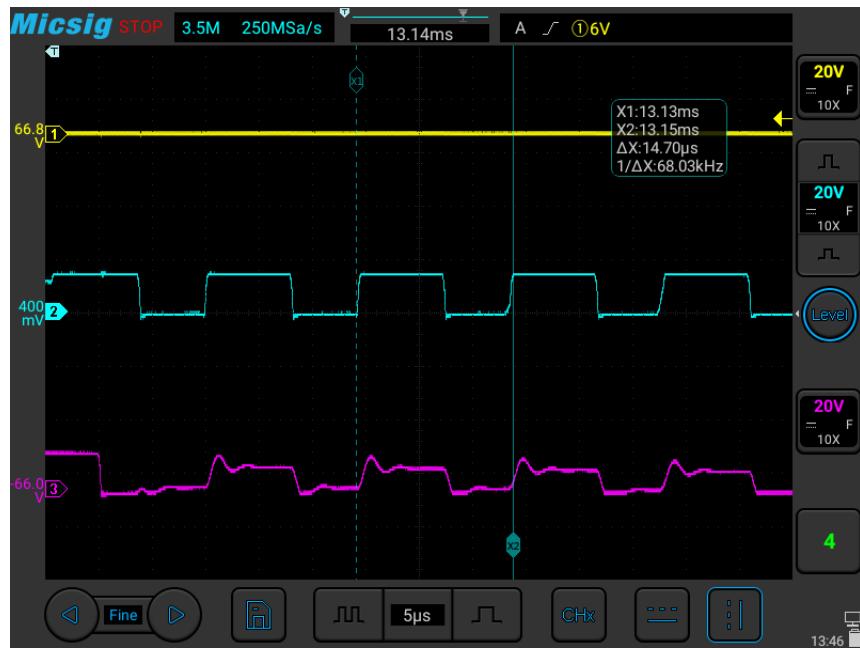


- ครั้งที่ 5

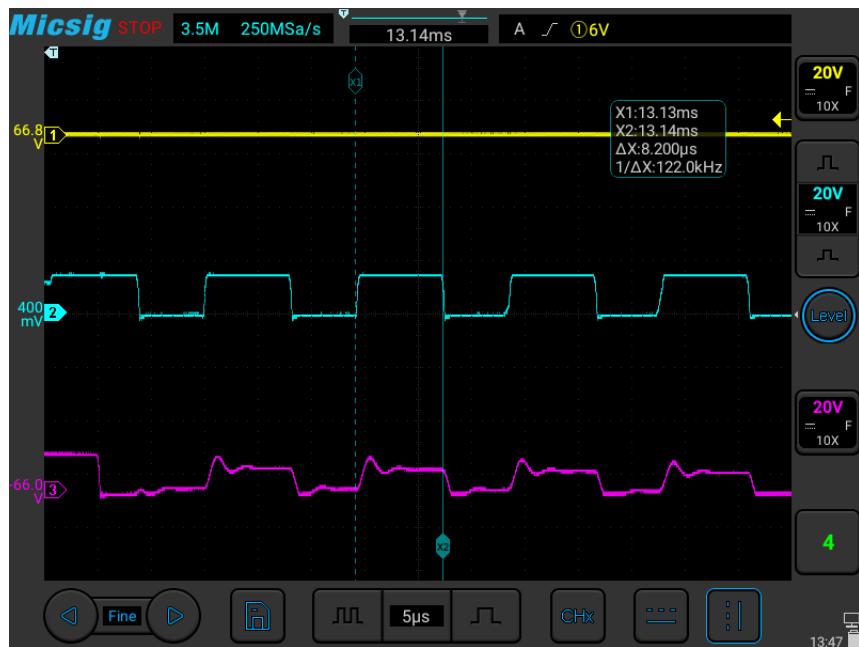


Duty Cycle

- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคื่น



- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคื่นในช่วง On



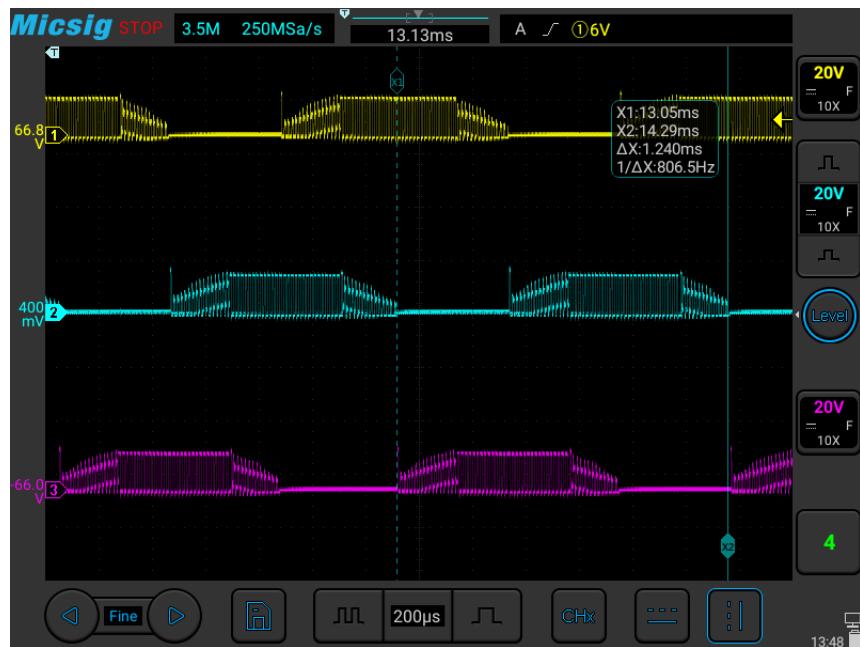
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Duty Cycle 100%)



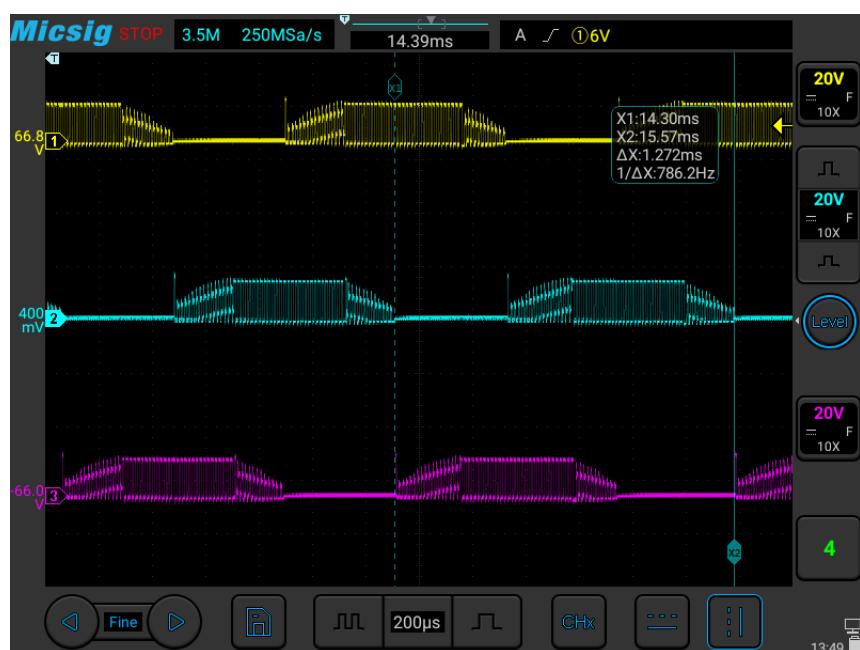
2.4. ที่ความเร็ว -6,872 rpm

กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope

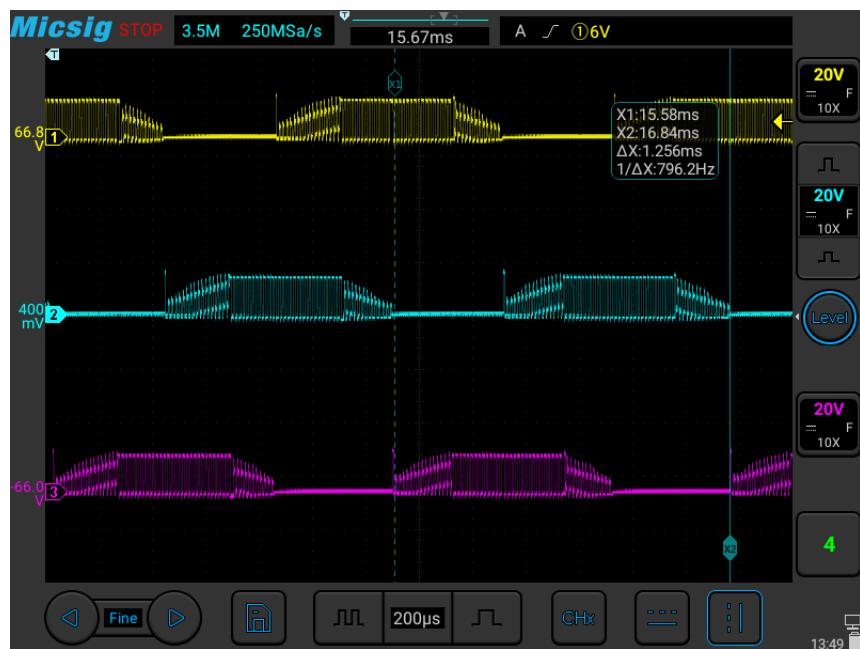
- ครั้งที่ 1



- ครั้งที่ 2



- ครั้งที่ 3



- ครั้งที่ 4

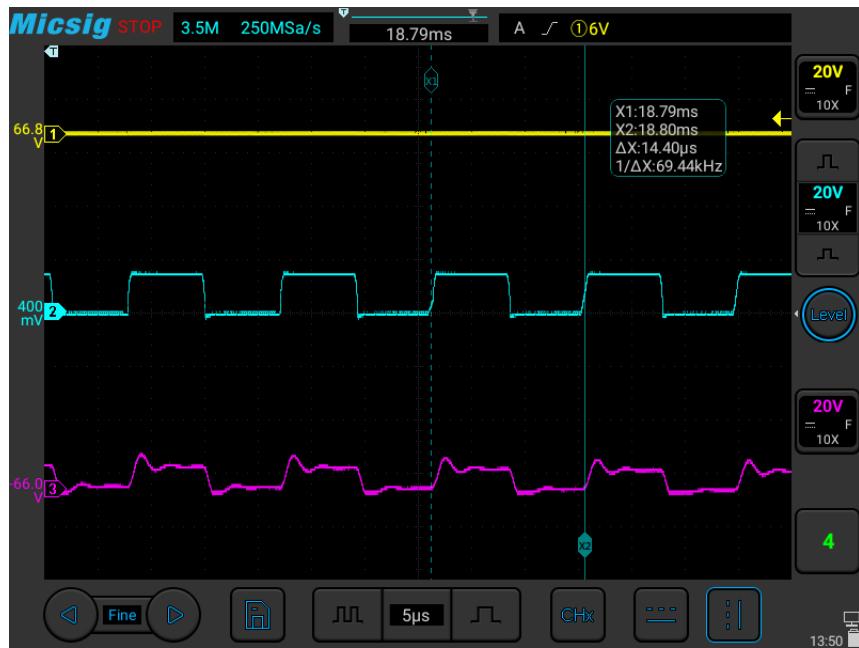


- ครั้งที่ 5



Duty Cycle

- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคื่น



- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคื่นในช่วง On



แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Duty Cycle 100%)



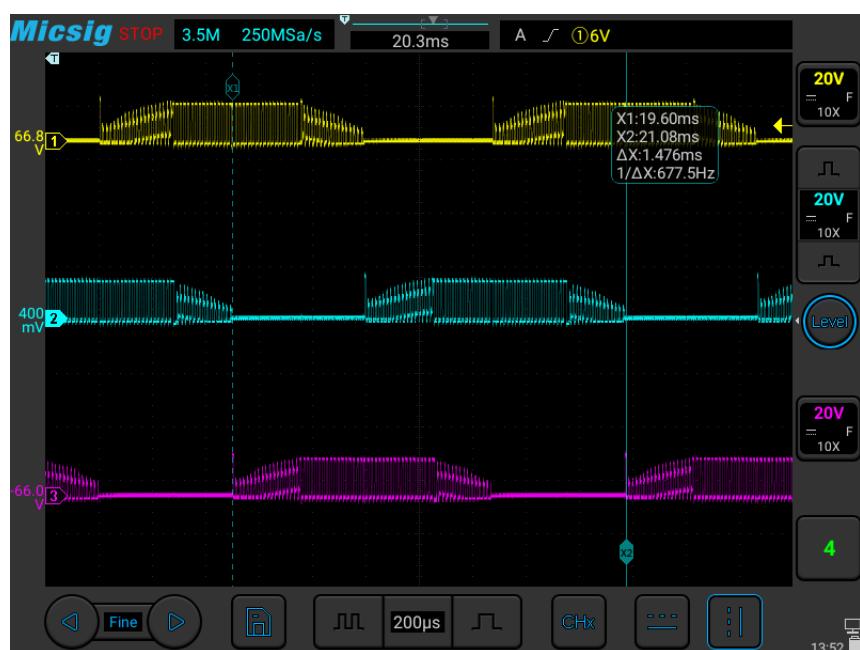
2.5. ที่ความเร็ว -5,886 rpm

กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope

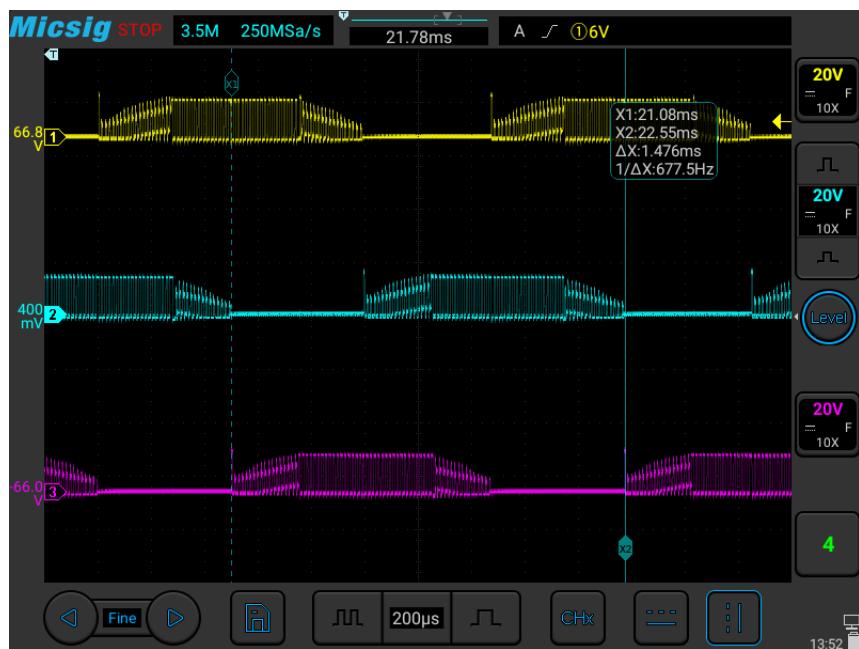
- ครั้งที่ 1



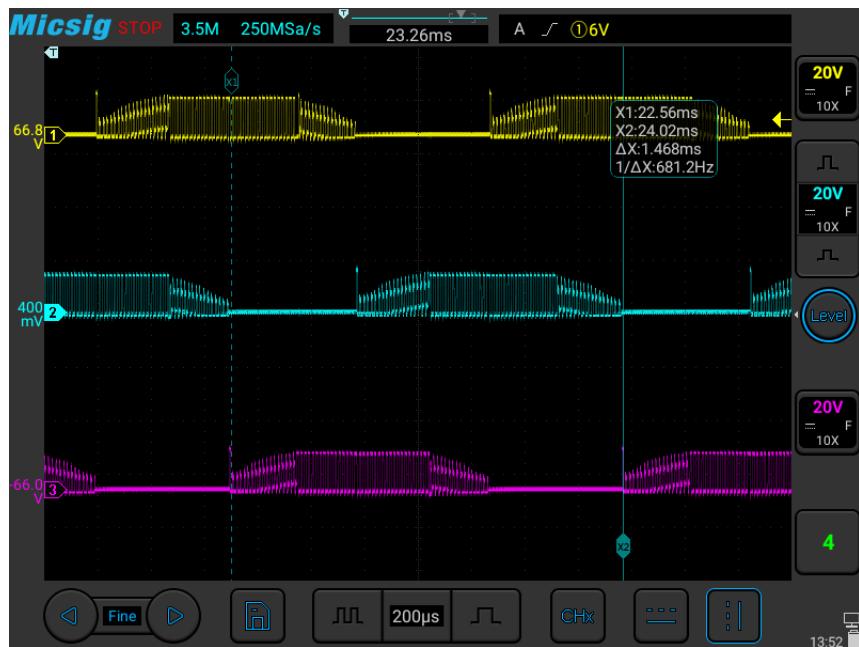
- ครั้งที่ 2



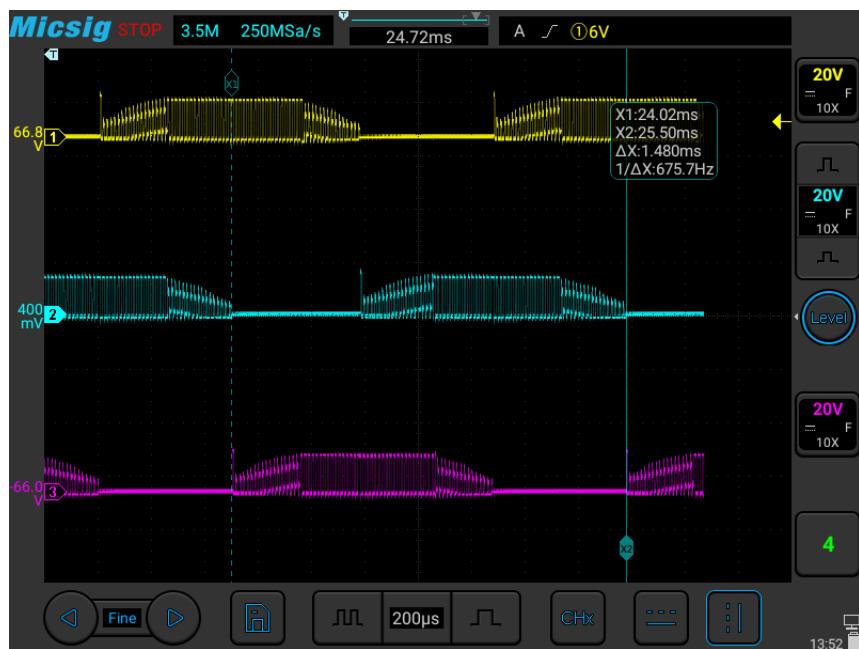
- ครั้งที่ 3



- ครั้งที่ 4

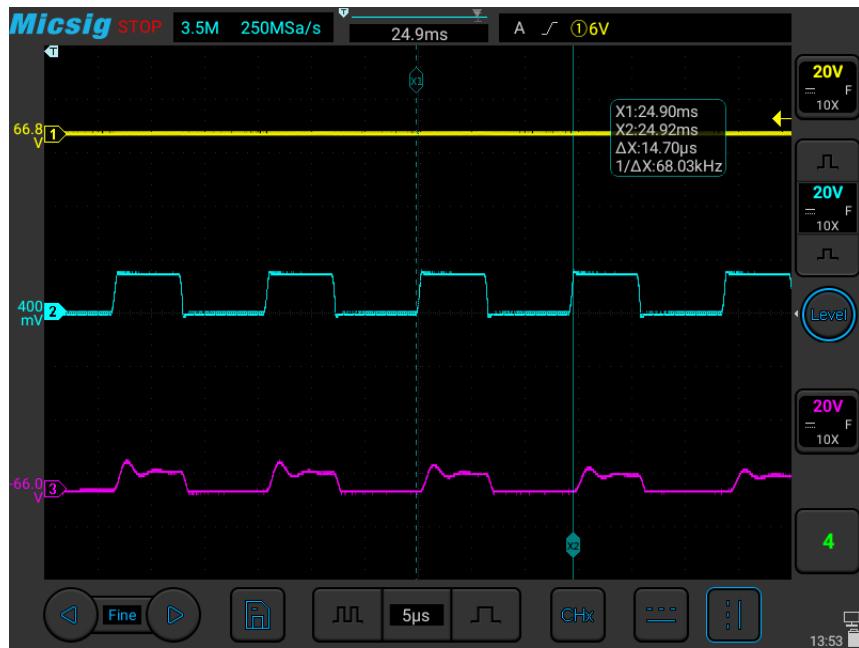


- ครั้งที่ 5

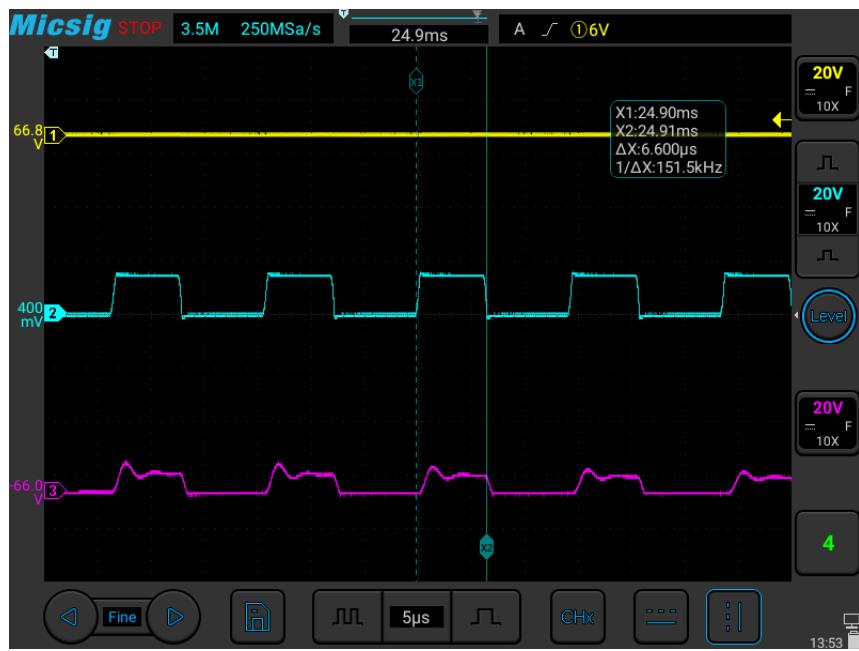


Duty Cycle

- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคลื่น



- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคลื่นในช่วง On



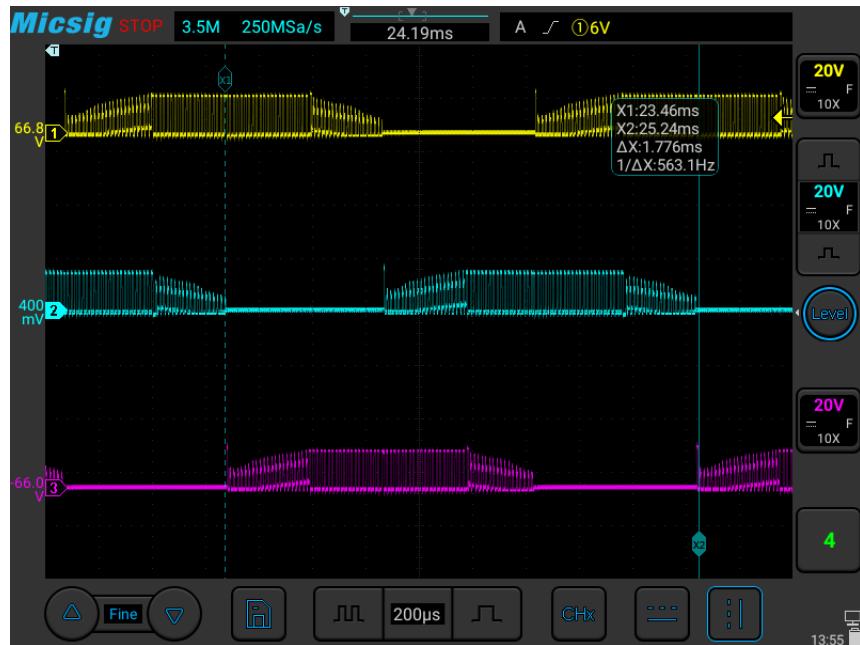
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Duty Cycle 100%)



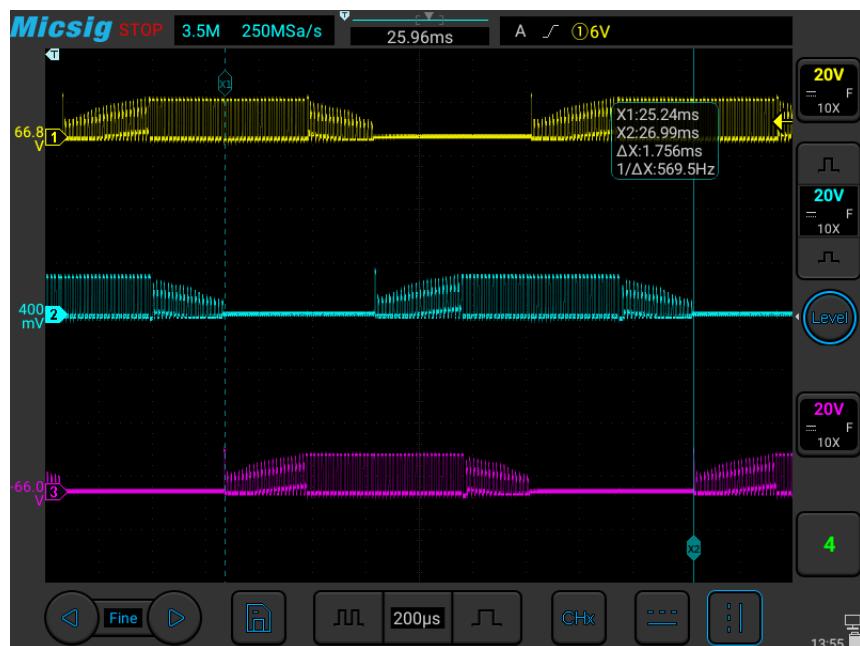
2.6. ที่ความเร็ว -4,886 rpm

กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope

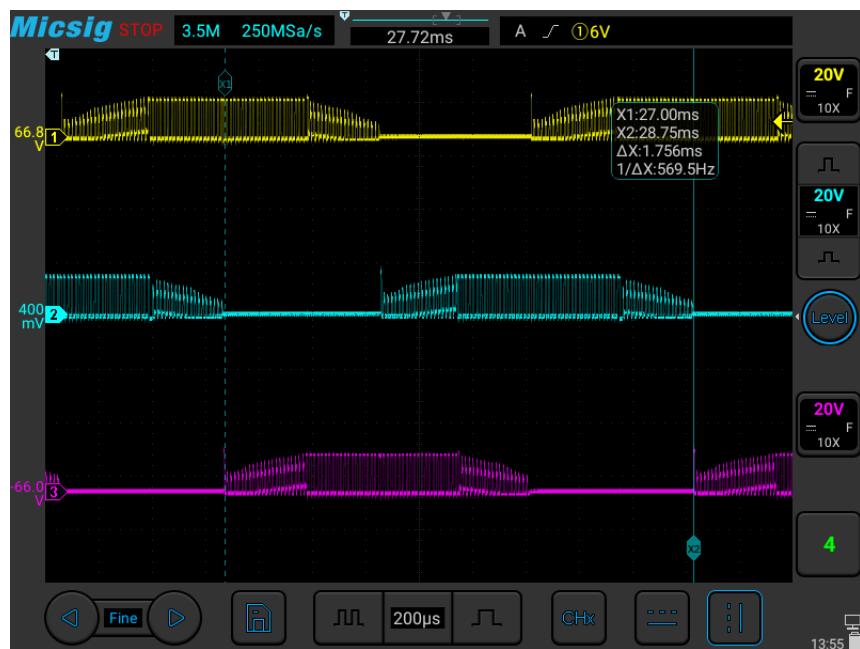
- ครั้งที่ 1



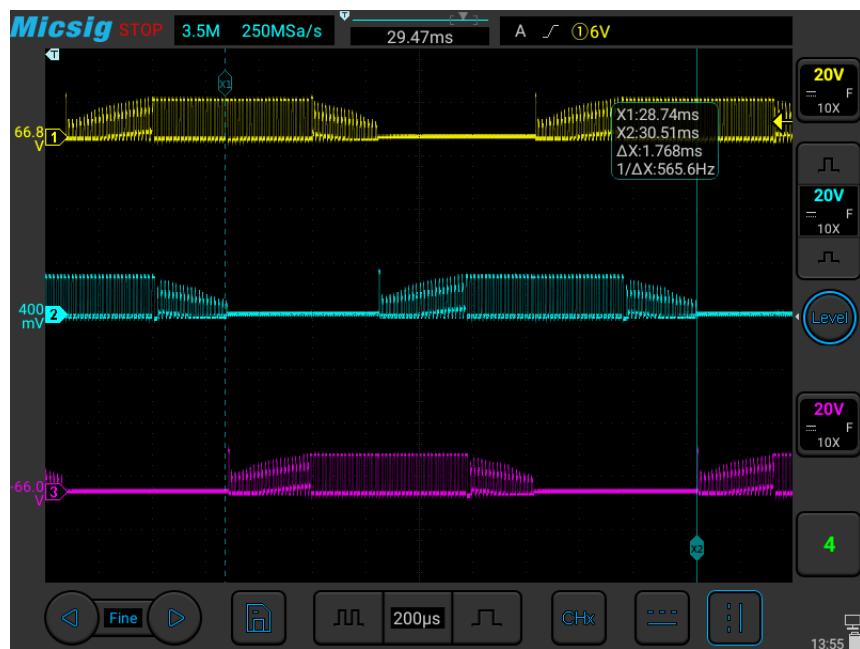
- ครั้งที่ 2



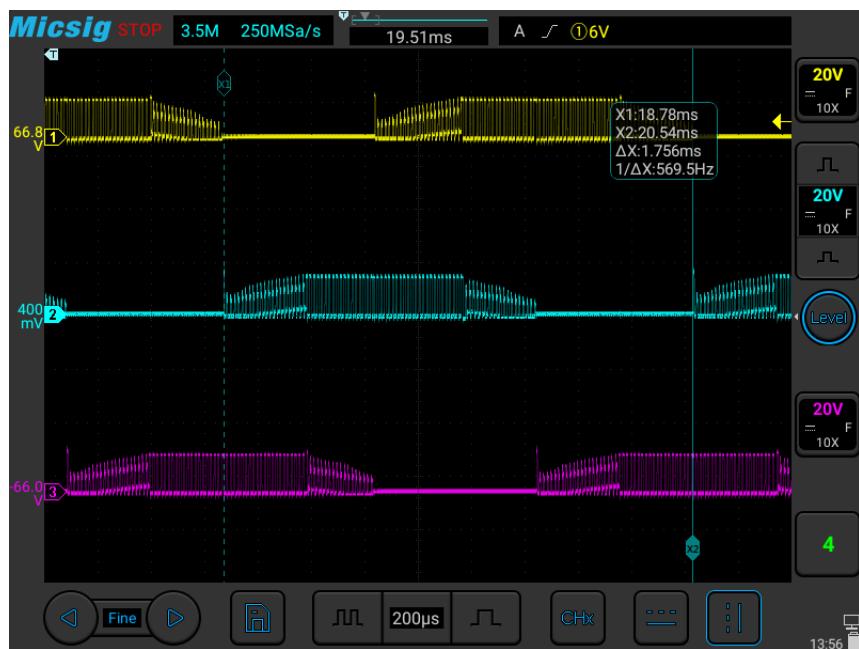
- ครั้งที่ 3



- ครั้งที่ 4

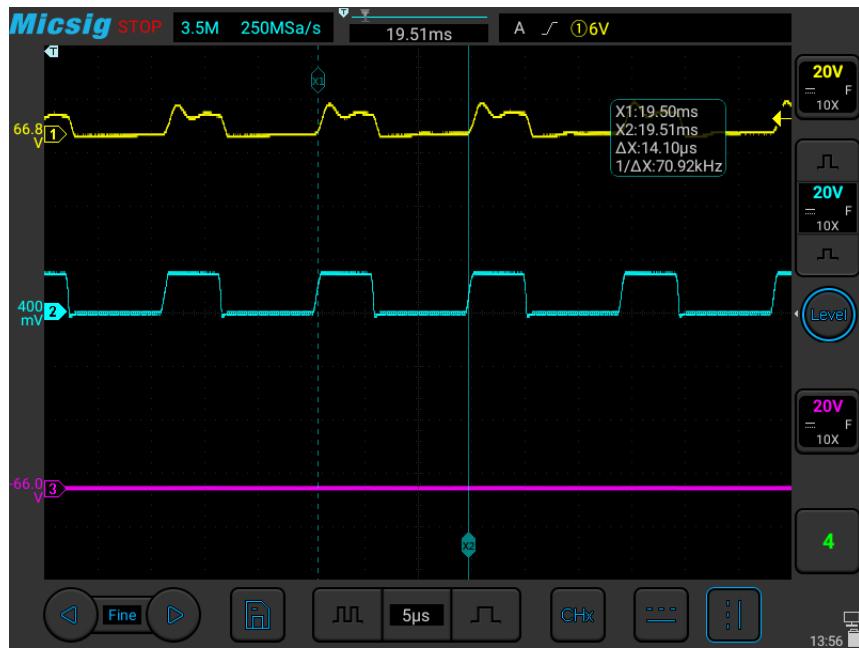


- ครั้งที่ 5

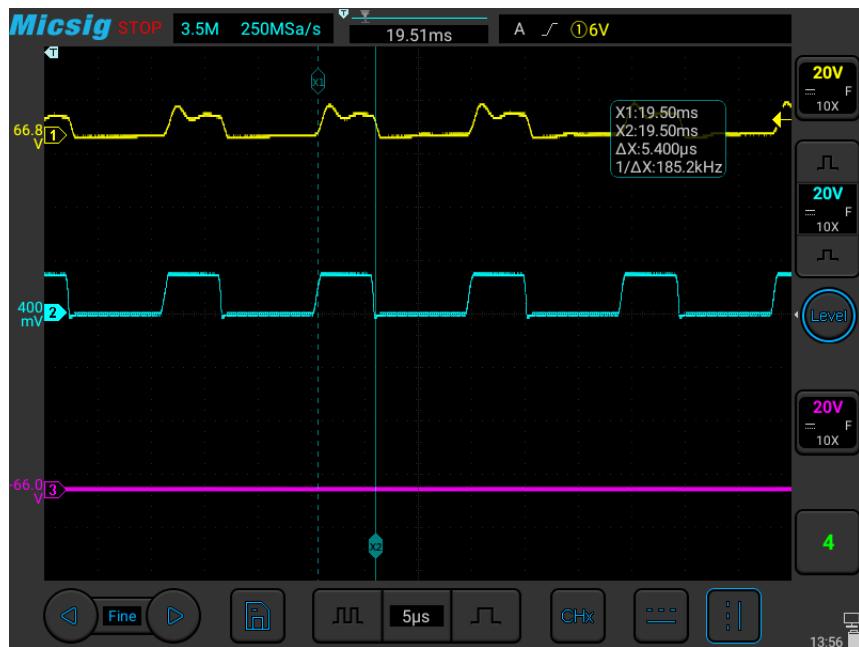


Duty Cycle

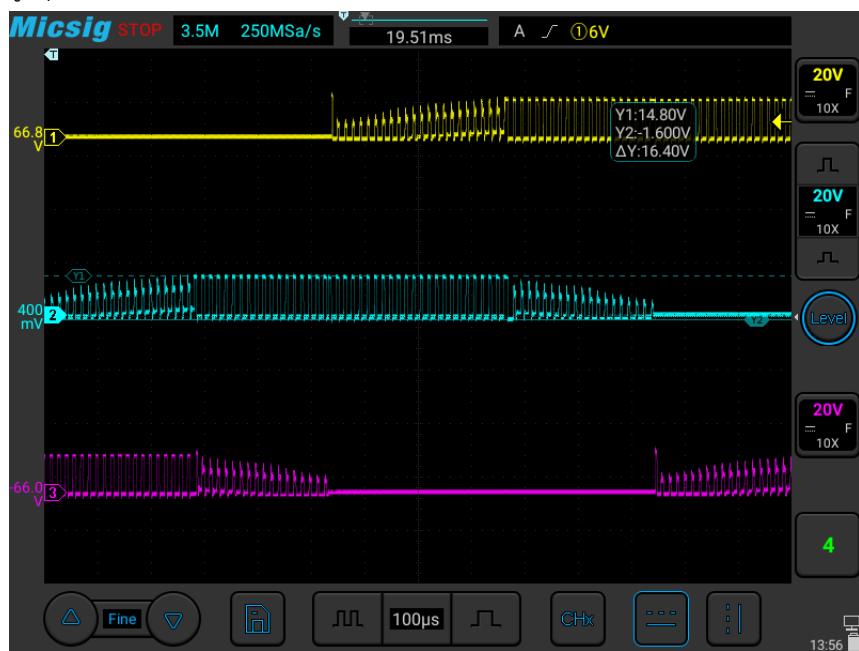
- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคื่น



- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคื่นในช่วง On



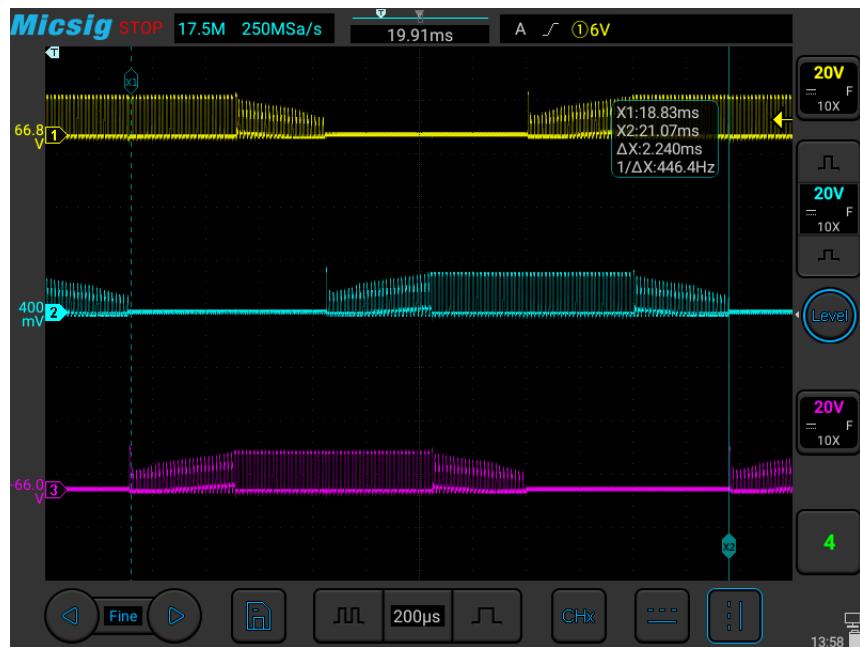
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Duty Cycle 100%)



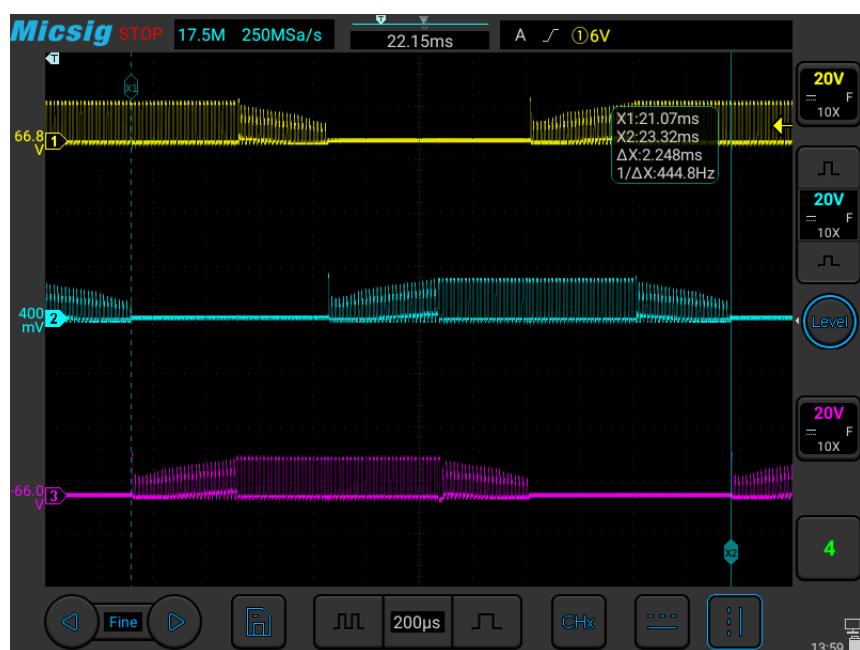
2.7. ที่ความเร็ว -3,876 rpm

กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope

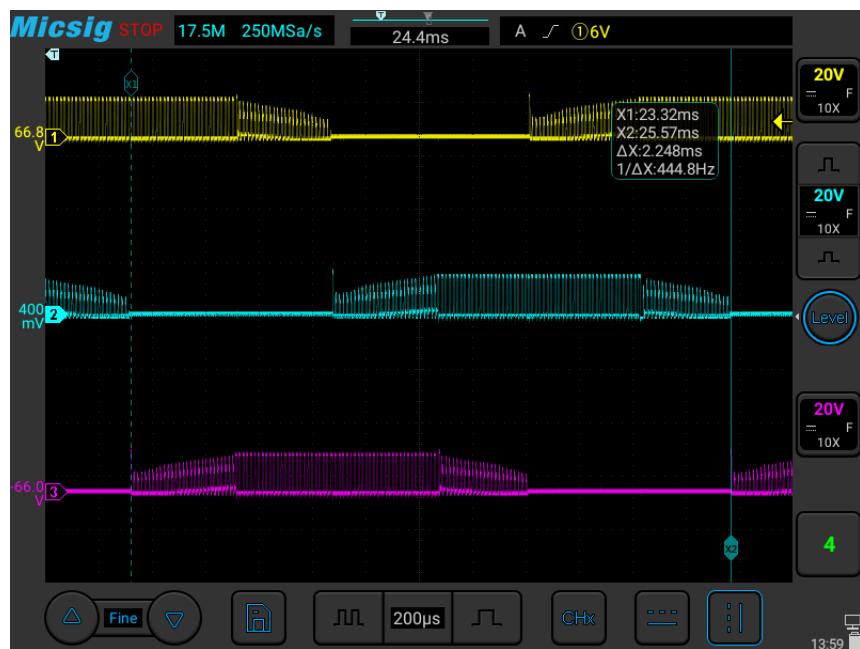
- ครั้งที่ 1



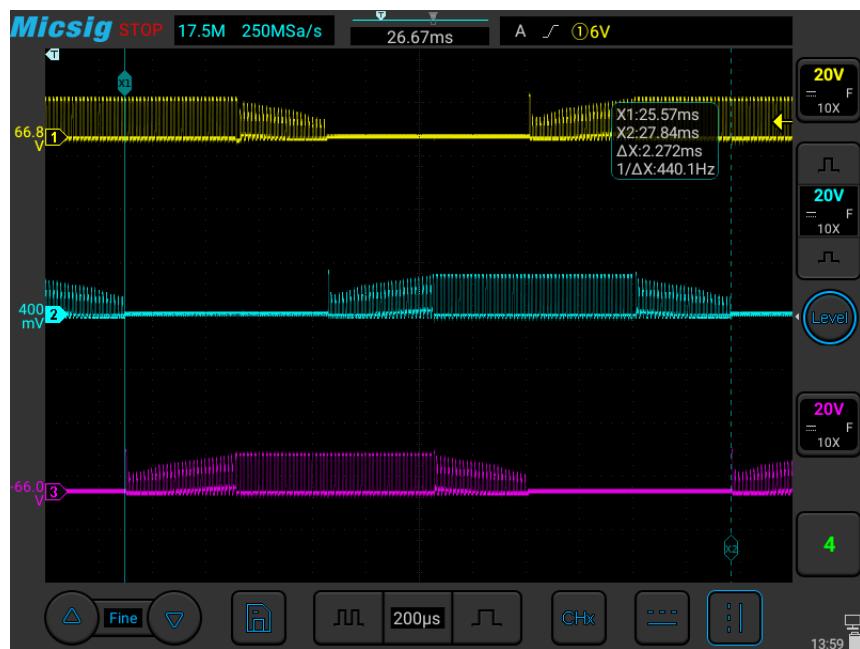
- ครั้งที่ 2



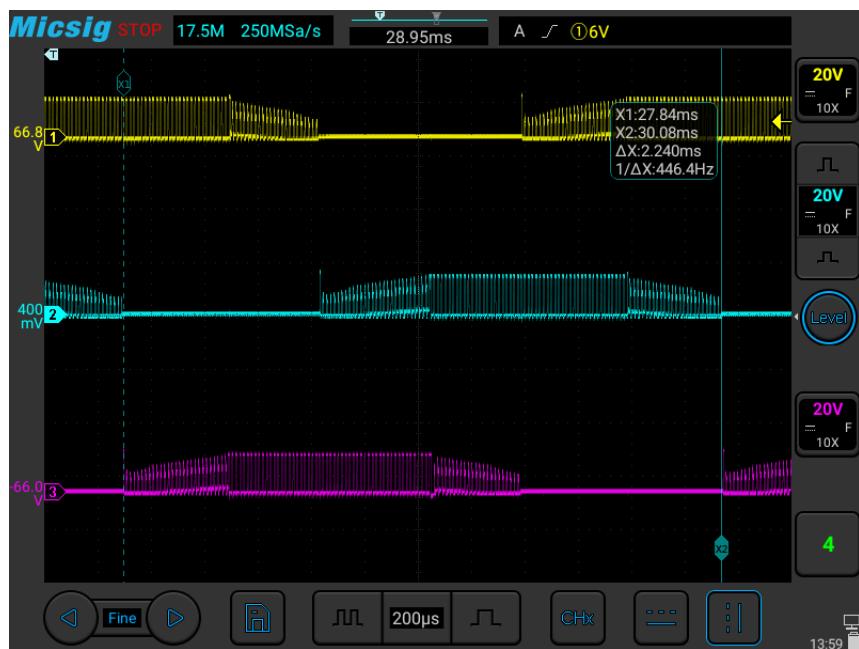
- ครั้งที่ 3



- ครั้งที่ 4

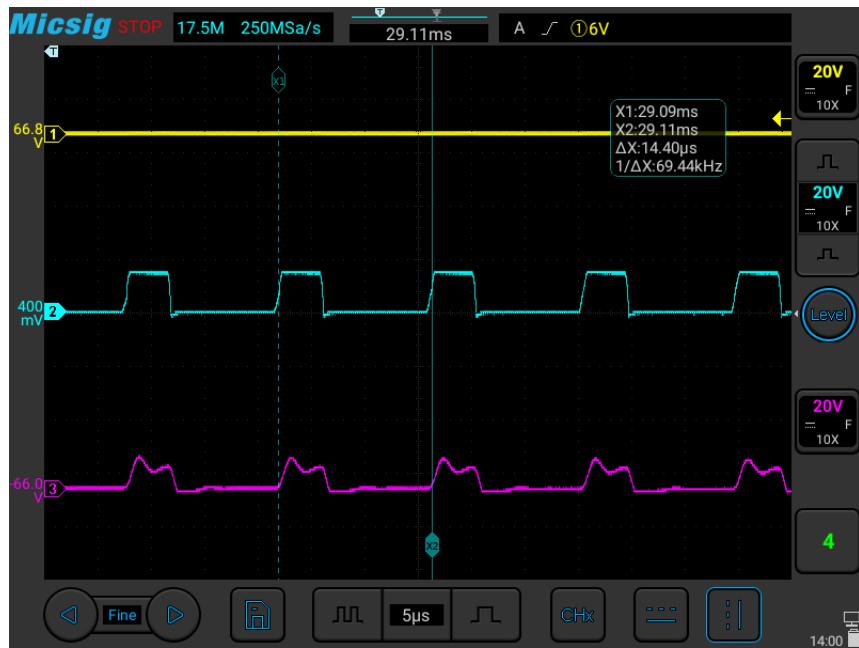


- ครั้งที่ 5



Duty Cycle

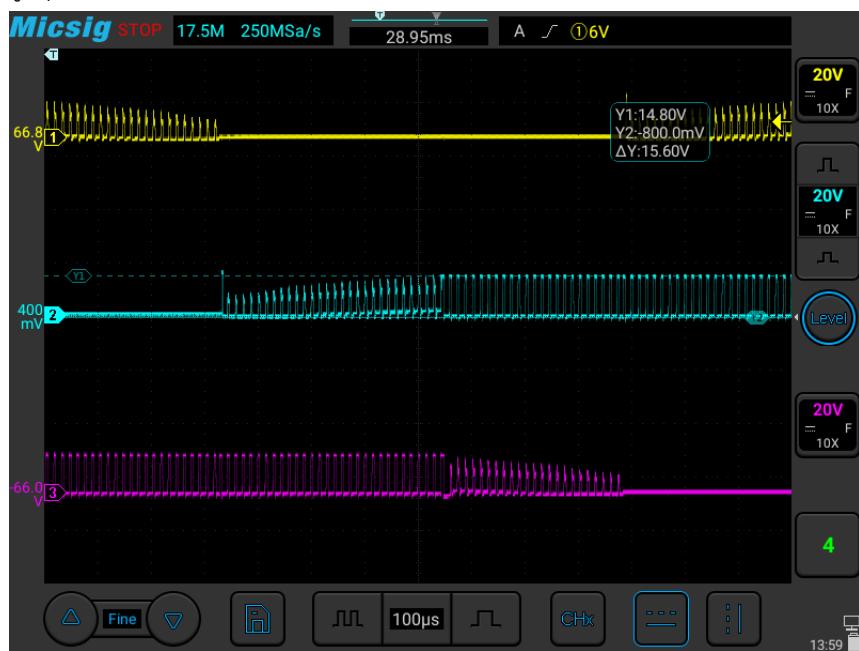
- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคลื่น



- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคลื่นในช่วง On



แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Duty Cycle 100%)



2.8. ที่ความเร็ว -2,856 rpm

กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope

- ครั้งที่ 1



- ครั้งที่ 2



- ครั้งที่ 3



- ครั้งที่ 4

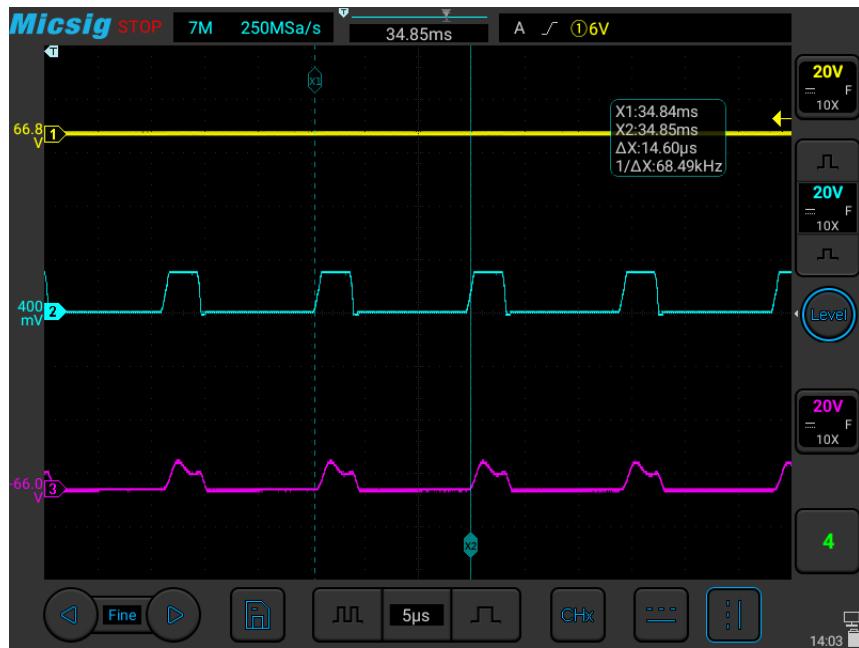


- ครั้งที่ 5

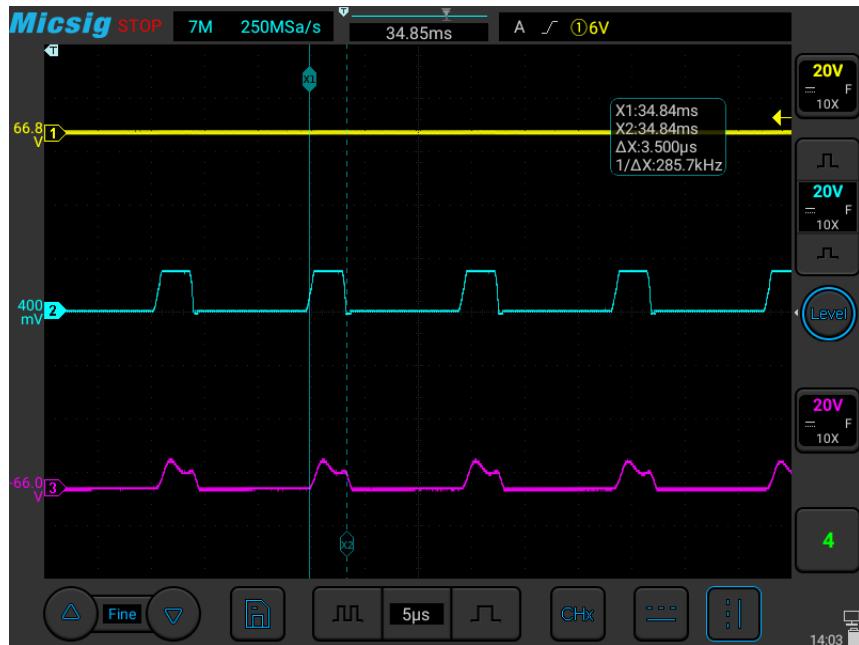


Duty Cycle

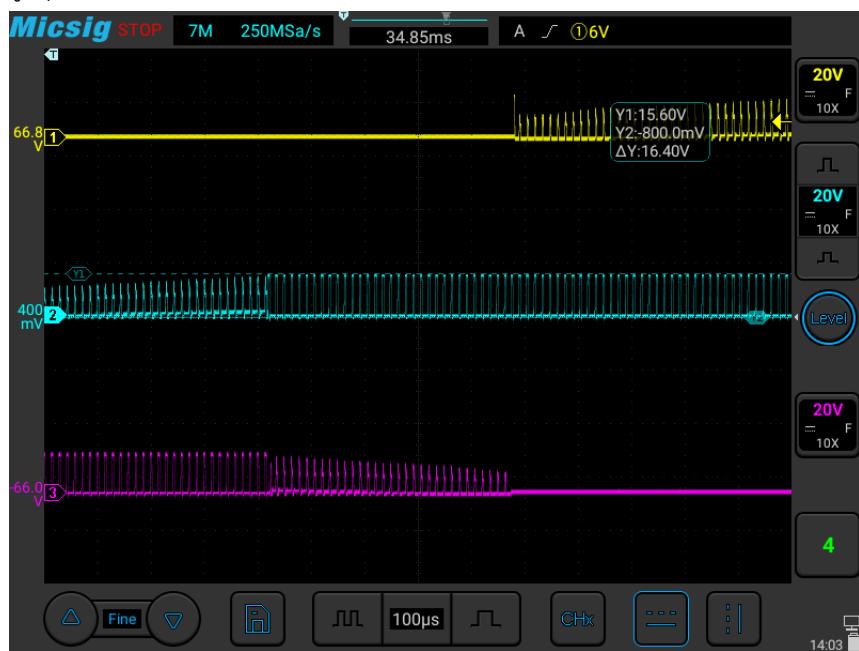
- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคื่น



- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคลื่นในช่วง On



แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Duty Cycle 100%)



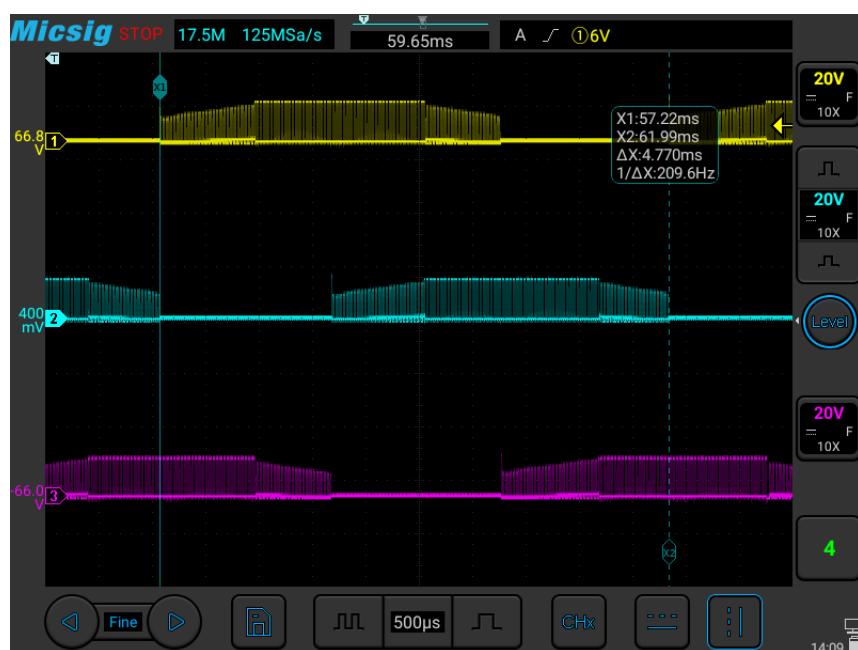
2.9. ที่ความเร็ว -1,872 rpm

กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope

- ครั้งที่ 1



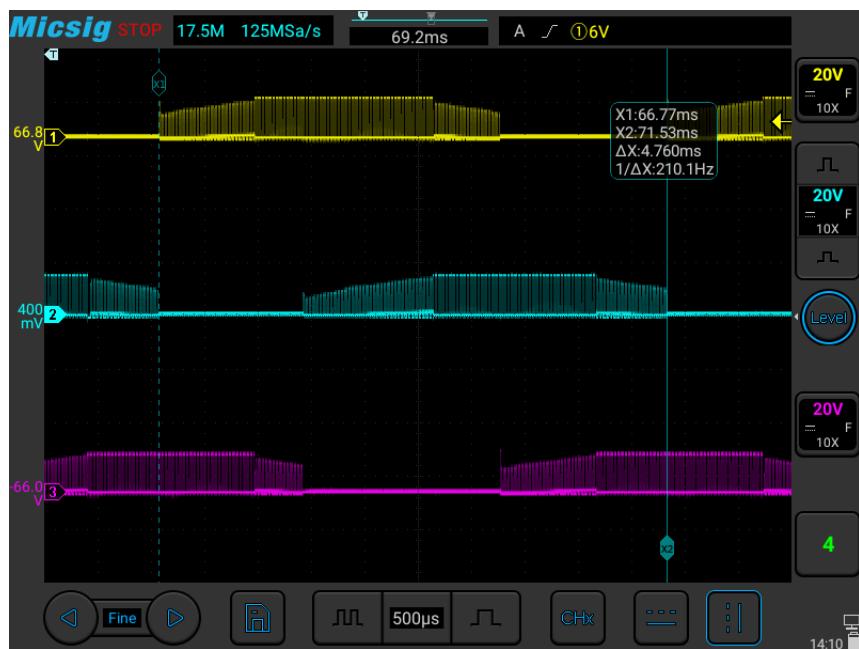
- ครั้งที่ 2



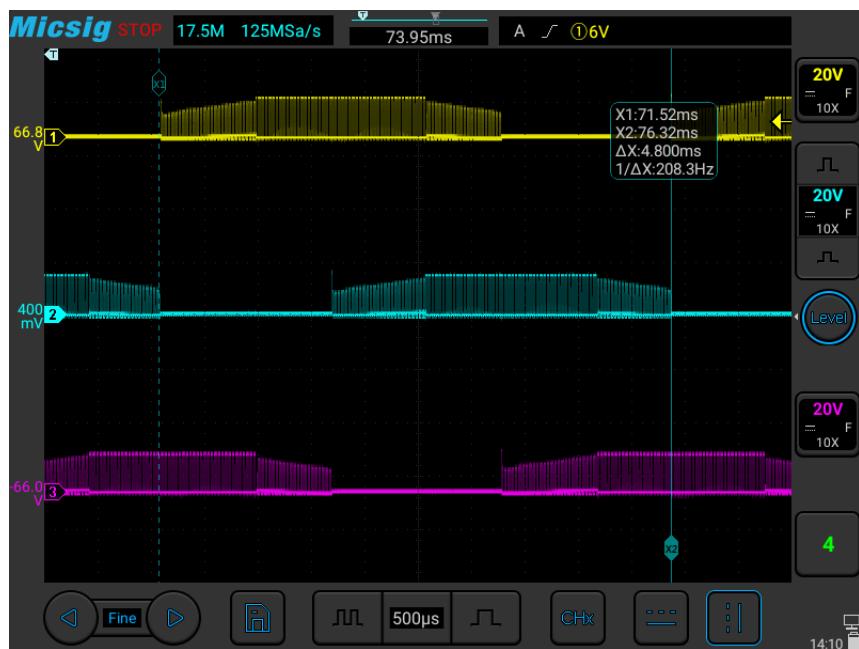
- ครั้งที่ 3



- ครั้งที่ 4

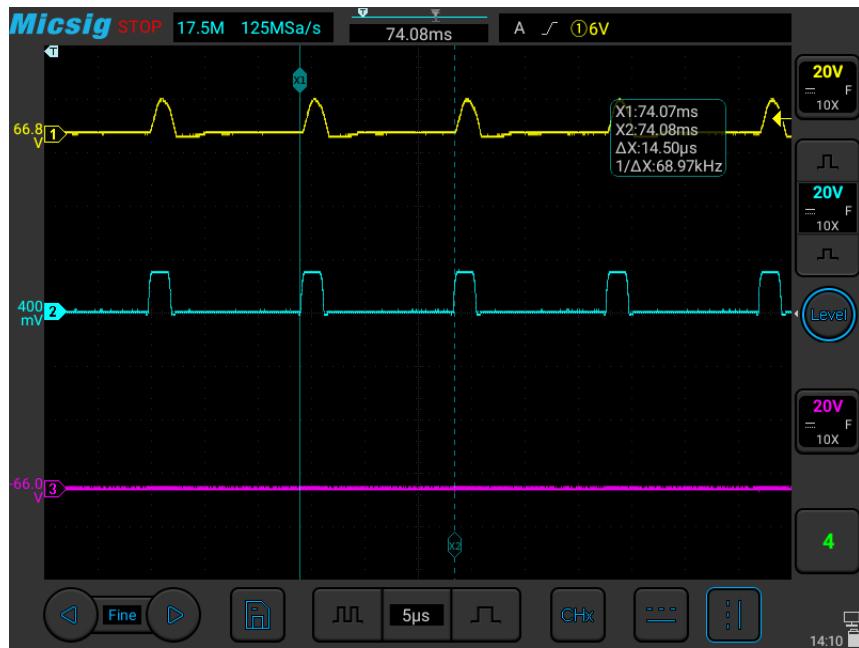


- ครั้งที่ 5

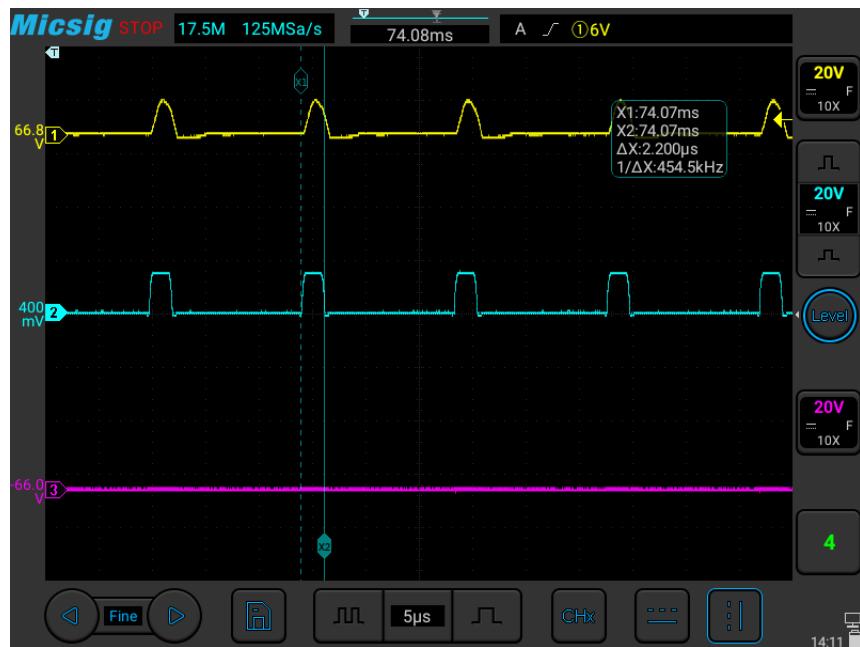


Duty Cycle

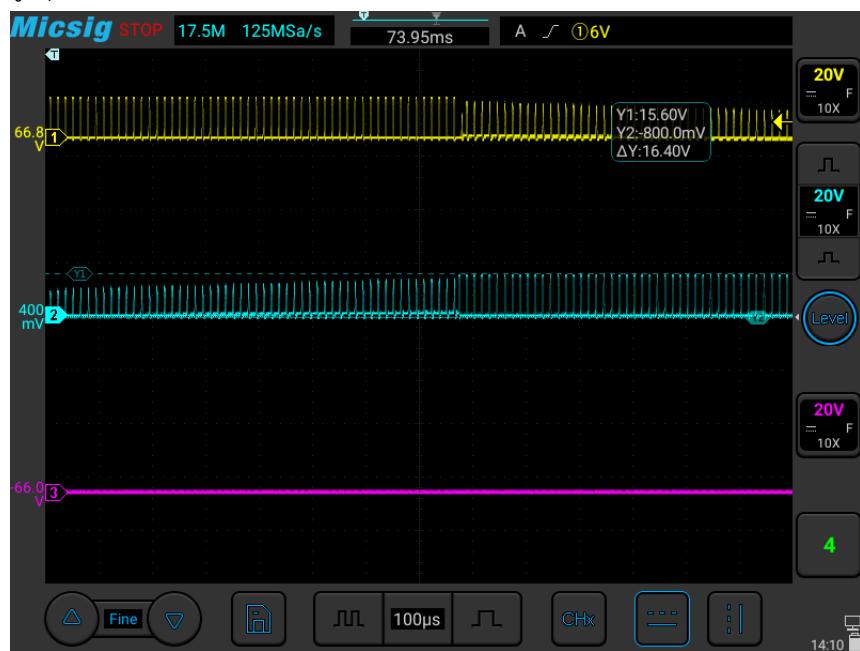
- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคื่น



- ความถี่ของสัญญาณ Pulse 1 ลูกคลื่นในช่วง On



แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Duty Cycle 100%)



2.10. ที่ความเร็ว -1,476 rpm
กราฟบนหน้าจอ Oscilloscope

