

Controls for Robotic Engineering

LAB1 : การประมาณค่าความพารามิเตอร์ของ Brushed DC Motor

Name

- นาย ชีรภัทร	แลเลิศ	67340500022
- นาย รัชชานนท์	อนุรักษทรัพย์	67340500034
- นางสาวรัชชิตา	แข็งขัน	67340500035
- นาย ศุภวัตร	จิตต์จำนงค์	67340500041
- นาย ธนากร	เจริญพงษ์พินิจ	67340500071
- นาย ปองภพ	ปิ่นเฉย	67340500072

นิยามศัพท์เฉพาะ

$V_{in}(t)$	แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ (Voltage Input)
V_{emf}	ค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (Back EMF Constant)
V_r	แรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน (Voltage Drop Across Resistor)
V_L	แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ (Voltage Drop Across Inductor)
V_{sh}	แรงดันตกคร่อมตัวต้านทานชั๊นท์ (Shunt Resistor)
R_m	ค่าความต้านทานไฟฟ้าของมอเตอร์ (Resistance)
R_{sh}	ค่าความต้านทานชั๊นท์ (Shunt Resistor)
$I_m(t)$	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอเตอร์ (Motor Current)
I_{max}	กระแสไฟฟ้าที่ไหลสูงสุด (Peak Current)
L_m	ค่าความเหนี่ยวนำของมอเตอร์ (Motor Inductance)
K_e	ค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (Back EMF Constant)
$\omega_m(t)$	ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ (Motor Angular Velocity)
τ	แรงบิด (Torque)
J	โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia)
α	ความเร่งเชิงมุม (Angular acceleration)
T_m	แรงบิดของมอเตอร์ (Motor Torque)
B_m	ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานหนืด (Motor Damping)
K_m	ค่าคงที่แรงบิด (Torque Constant)
P_{in}	กำลังไฟฟ้าที่เกิดจาก back emf
P_{out}	กำลังทางกลที่เกิดขึ้นที่เพลาของมอเตอร์
η	ค่าประสิทธิภาพในการแปลงพลังงาน โดยที่ $\eta \in [0,1]$
A	ค่าที่ใช้กำหนดความสูงของสัญญาณ (Amplitude)
f	ค่าที่กำหนดความเร็วในการแกว่งลูกคลื่นที่เกิดขึ้นใน 1 วินาที (Frequency)
\emptyset	ค่าที่ใช้กำหนดมุมเริ่มต้นของคลื่น (Phase)
D	ค่าที่ใช้กำหนดจุดกึ่งกลางของลูกคลื่น (Offset)
A	ค่าที่กำหนดขนาดการเปลี่ยนแปลงหรือความสูงของบันได (Step Size)
t_0	ค่าที่กำหนดเวลาที่เริ่มการเปลี่ยนแปลง (Step Time)
f_0	ค่าที่กำหนดความถี่เริ่มต้น (Start Frequency)



k ค่าที่กำหนดอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น (Chirp Rate)



LAB 1

การทดลองที่ 1 การหาค่าความต้านทาน R_m และค่าความเหนี่ยวนำ L_m

ของ Brushed DC Motor

จุดประสงค์

1. เพื่อศึกษาสมการและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ
2. เพื่อทำการประมาณค่าความต้านทาน R_m และค่าความเหนี่ยวนำ L_m ของมอเตอร์

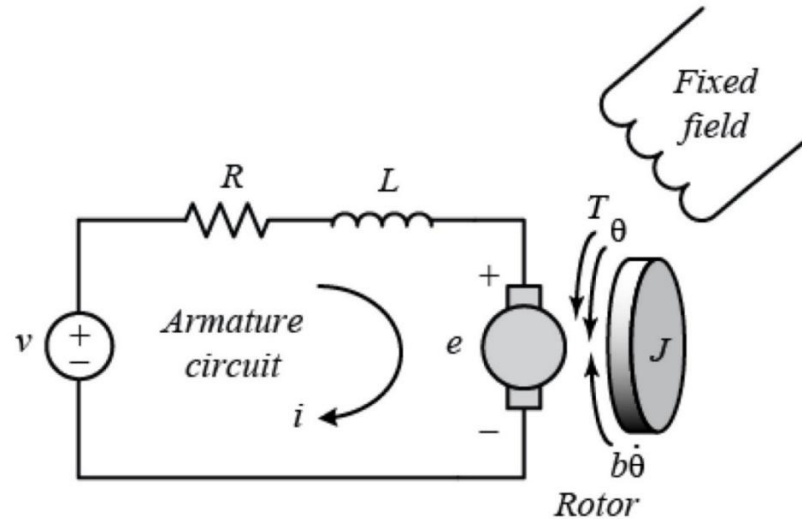
สมมติฐาน

เมื่อ Input แรงดันไฟฟ้าที่แรงดันต่าง ๆ ให้มอเตอร์ที่ แล้วค่าความต้านทาน และค่าความเหนี่ยวนำของมอเตอร์จะไม่เปลี่ยนแปลงตามแรงดันไฟฟ้า จะเป็นค่าคงที่

ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น
 - แรงดันไฟฟ้า (V_{in}) ที่ 8, 9, 10, 11, 12V
2. ตัวแปรตาม
 - แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทาน (R_{shunt})
 - กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร
 - ค่าคงที่เวลา (τ)
3. ตัวแปรควบคุม
 - ตัวต้านทาน 8.2 Ohm (R_{shunt})
 - ชนิดของมอเตอร์
 - Power Supply (SPS-C30105)

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 1 DC Motor

สมการทางไฟฟ้า

จากสมการแรงดันตามกฎของเคอร์ชอฟฟ์ด้านแรงดัน (Kirchhoff's Voltage Law: KVL) กล่าวว่า ในวงจรไฟฟ้าปิด (Closed Loop) ใดๆ ผลรวมทางพีชคณิตของแรงดันไฟฟ้าทั้งหมดจะมีค่าเท่ากับศูนย์

$$V_{in}(t) = V_{emf} + V_r + V_L$$

แรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน

$$V_r(t) = R_m I_m(t)$$

แรงดันที่ตัวเหนี่ยวนำ

$$V_L(t) = L_m \left(\frac{dI_m}{dt} \right)$$

Back EMF

$$V_{emf} = K_e \omega_m$$

สมการไฟฟ้าหลักของ DC Motor

$$V_{in}(t) = V_{emf} + R_m I_m(t) + L_m \left(\frac{dI_m}{dt} \right)$$

แปลงให้อยู่ในรูป Laplace transform

$$\mathcal{L}\{V_{in}(t)\} = \mathcal{L}\{V_{emf}\} + \mathcal{L}\{R_m I_m(t)\} + \mathcal{L}\left\{L_m \left(\frac{dI_m}{dt} \right)\right\}$$

$$V_{in}(s) = K_e \omega_m(s) + R_m I_m(s) + L_m s^1 \cdot I_m(s)$$

จะได้ว่า

$$V_{in}(s) = K_e \omega_m(s) + (R_m + L_m s) I_m(s)$$

สมการทางกล

จากสมการกฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's Second Law for Rotation) กล่าวว่า แรงบิดสุทธิที่กระทำต่อวัตถุ จะทำให้วัตถุเกิดความเร่งในการหมุน

$$\sum \tau = J \cdot \alpha$$

$$T_m - B_m \omega_m(t) = J_m \frac{d\omega_m(t)}{dt}$$

สมการแรงบิดของมอเตอร์กระแสตรง (Torque Equation of DC Motor)

$$T_m = K_m I_m(t)$$

จะได้ว่า

$$K_m I_m(t) - B_m \omega_m(t) = J_m \frac{d\omega_m(t)}{dt}$$

แปลงให้อยู่ในรูป Laplace transform

$$\begin{aligned}\mathcal{L}\{K_m I_m(t)\} - \mathcal{L}\{B_m \omega_m(t)\} &= \mathcal{L}\left\{J_m \frac{d\omega_m(t)}{dt}\right\} \\ K_m I_m(s) - B_m \omega_m(s) &= J_m S^1 \cdot \omega_m(s) \\ K_m I_m(s) &= J_m S \cdot \omega_m(s) + B_m \omega_m(s) \\ K_m I_m(s) &= (J_m S + B_m) \omega_m(s) \\ I_m(s) &= \frac{\omega_m(s)(J_m S + B)}{K_m}\end{aligned}$$

จัดรูปสมการให้อยู่ในรูป Transfer Functions

แทนสมการกลลงไปในสมการทางไฟฟ้า

$$V_{in}(s) = K_e \omega_m(s) + (R + LS) \cdot \frac{\omega_m(s)(J_m \cdot S + B)}{K_m}$$

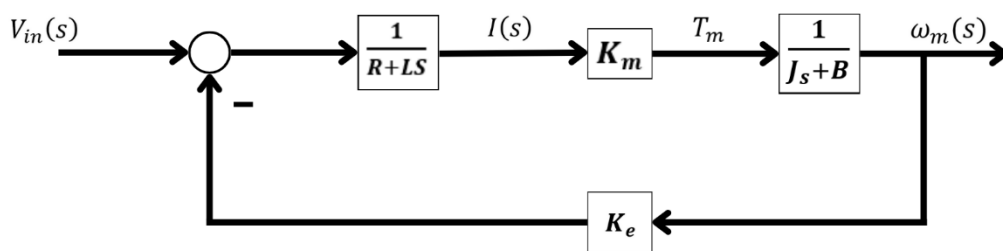
$$V_{in}(s) = \omega_m(s) \cdot \frac{K_m K_e + (R + LS)(J_m \cdot S + B)}{K_m}$$

$$V_{in}(s) = \omega_m(s) \cdot \frac{K_m K_e + (R + LS)(J_m \cdot S + B)}{K_m}$$

$$\frac{\omega_m(s)}{V_{in}(s)} = \frac{K_m}{(J_m \cdot S + B)(R + LS) + K_e K_m}$$

ดังนั้น สมการ Transfer Functions คือ $G(s) = \frac{L[output]}{L[input]} = \frac{\omega_m(s)}{V_{in}(s)} = \frac{K_m}{(J_m \cdot S + B)(R + LS) + K_e K_m}$

แปลงสมการ Transfer Functions เป็น Block diagram



รูปที่ 2 Block diagram ของ Transfer Functions

การประมาณค่าของความต้านทาน R_m และ L_m

จากการต่อวงจรแบบอนุกรมโดยใช้ R_{shunt} ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านทุกส่วนในวงจรมีค่าเท่ากัน ตามคุณสมบัติของวงจรอนุกรม ในขณะที่แรงดันตกคร่อมอุปกรณ์แต่ละตัวจะมีค่าแตกต่างกันไปตาม พารามิเตอร์ของอุปกรณ์นั้นๆ ซึ่งเราสามารถอาศัยความสัมพันธ์นี้ในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ความต้านทานภายใน (R_m) และความเหนี่ยวนำภายใน (L_m) ของมอเตอร์ได้จากสมการดังต่อไปนี้

สมการในการหา R_m

จากแรงดันตกคร่อม R_{shunt}

จะได้

$$V_{sh} = i R_{sh}$$

$$i = \frac{V_{sh}}{R_{sh}}$$

จากอนุกรมกระแสจะเท่ากันทั้งระบบและเมื่อมอเตอร์เข้าสู่สภาวะ Steady-State $L_m = 0 \Omega$

$$\begin{aligned} V_{in} &= i(R_m + R_{sh}) \\ V_{in} &= \frac{V_{sh}}{R_{sh}} R_m + \frac{V_{sh}}{R_{sh}} R_{sh} \\ V_{in} &= \frac{V_{sh}}{R_{sh}} R_m + V_{sh} \\ \frac{V_{in}}{V_{sh}} &= \frac{1}{R_{sh}} R_m + 1 \\ R_m &= R_{sh} \left(\frac{V_{in}}{V_{sh}} - 1 \right) \end{aligned}$$

จะได้

สมการในการหา L_m

ค่าคงที่เวลา (Time constant) ของวงจรอนุกรม RL คือ

$$\tau = \frac{L_m}{R_{total}}$$

โดย

$$R_{total} = R_{sh} + R_m$$

ดังนั้น

$$L_m = \tau(R_{sh} + R_m)$$

จากสมการในการหา R_m จะได้ว่า

$$L_m = \tau \left(R_{sh} + \left(R_{sh} \left(\frac{V_{in}}{V_{sh}} - 1 \right) \right) \right)$$

$$L_m = \tau \left(R_{sh} + R_{sh} \frac{V_{in}}{V_{sh}} - R_{sh} \right)$$

$$L_m = \tau \left(R_{sh} \frac{V_{in}}{V_{sh}} \right)$$

จะได้

$$L_m = R_{sh} \left(\tau \frac{V_{in}}{V_{sh}} \right) = \tau \frac{I_{in} R_{in}}{I_{sh}}$$

การประเมินหาค่า R_{sh} ที่ต้องนำมาทดลอง

ในการออกแบบและเลือกใช้ค่าความต้านทานขั้วต่อ (R_{sh}) สำหรับระบบควบคุมมอเตอร์นี้ ได้มีการพิจารณาจากเงื่อนไขของ แรงดันไฟฟ้าใช้งานจริง (Operating Voltage) และ พิกัดกำลังไฟฟ้า (Power Rating) ของอุปกรณ์เป็นหลัก โดยกำหนดให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ตัวต้านทานขั้วต่อสามารถรองรับได้คือ $20W$ ได้ดังนี้

จากสมการ

$$P = \frac{V^2}{R}$$

$$V = \sqrt{PR_{sh}}$$

จะได้ว่า

$$V = \sqrt{PR_{sh}} = \sqrt{20 \times 8} = 12.65 V$$

$$V = \sqrt{PR_{sh}} = \sqrt{20 \times 6.8} = 11.66 V$$

จากผลการคำนวณพบว่า ตัวต้านทานขั้วต่อขนาด 8Ω สามารถรองรับแรงดันได้สูงกว่า และมีค่าใกล้เคียงกับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าที่ใช้ในการทดลอง (ประมาณ 12 V) จึงเลือกใช้ตัวต้านทานขั้วต่อขนาด 8Ω ในการทดลองนี้

Time Constant

Time Constant คือ ค่าที่บ่งบอกความเร็วในการตอบสนองของระบบสำหรับ 1τ ซึ่งหมายถึง ช่วงเวลาที่เอาต์พุตของระบบเพิ่มขึ้นจากค่าเริ่มต้นไปถึงร้อยละ 63.2 ของค่าปลายทางที่ 5τ (steady-state value) ดังนั้น τ สามารถระบุได้จากซึ่งจากสมการ

$$\tau = t_{63.2\%} - t_{0\%}$$

$$I_m(\tau) = I_{max}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \approx 0.632I_{max}$$

อุปกรณ์

- Oscilloscope (Hantek DSO2D10) แบบ 2 Channel 1 ตัว
- Multimeter 1 ตัว
- Power Supply (SPS-C30105) 1 ตัว
- ตัวต้านทาน R_{sh} ที่มีค่าความต้านทาน 8.2 ซึ่งสามารถทนกำลังไฟฟ้าได้ 20W

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ต่อวงจรแบบอนุกรมระหว่าง ตัวต้านทาน (R_{shunt}) และ มอเตอร์
2. จ่ายแรงดันไฟฟ้า (V) จาก Power Supply ที่ค่าต่าง ๆ ตั้งแต่ 8, 9, 10, 11 และ 12
3. ใช้ Oscilloscope วัดแรงดันตกคร่อม ตัวต้านทาน (R_{shunt}) เพื่อดูค่า V ที่ตกคร่อม R_{shunt} และ คำนวณหาค่า Voltage ที่เวลา 1τ
4. จับภาพ Transient Response และวัดค่า Time Constant (τ) ที่ 63.2%
5. ใช้ Oscilloscope วัดค่า 1τ ในช่วง Transient บันทึกค่า 1τ
6. คำนวณค่าพารามิเตอร์ R_m , L_m โดยใช้สมการที่กำหนด

ผลการทดลอง

ตารางที่ 1 ผลการทดลองเฉลี่ยซ้ำ 3 ครั้งจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันให้กับวงจร

Vin(V)	V _{sh} (V)	Vin(V)/Vsh(V)	V0.632(V)	I(A)	T(us)	R _m (Ω)	L _m (H)
8	5.6	1.429	3.5392	0.682927	248	3.514286	0.002905
9	6.2	1.452	3.9184	0.756098	232.023	3.703226	0.002762
10	6.8	1.471	4.2976	0.829268	246.6739	3.858824	0.002975
11	7.4	1.486	4.6768	0.902439	246.6739	3.989189	0.003007
12	8	1.500	5.056	0.97561	240	4.1	0.002952
ค่าเฉลี่ย						3.824	2.91E-03

สรุปผลการทดลอง

ผลการวัดค่าความต้านทานของมอเตอร์จริง เทียบกับค่า R_m จากการคำนวณอยู่ที่ 3.824 Ω และ โดยการจับ Multimeter ที่ขามอเตอร์ โดยไม่ให้เมื่อนำมาคิด Error จะอยู่ที่ 27.47% ซึ่งถือว่ามีความที่ แรงดันให้กับระบบมอเตอร์ ได้อยู่ที่ 3 Ω อีกทั้งเมื่อสอดคล้องกับพฤติกรรมทางไฟฟ้าของอุปกรณ์



รูปที่ 3 แสดงค่าความต้านทานจากการวัดมอเตอร์

ผลการวัดกระแสของมอเตอร์จริง

เมื่อจ่ายแรงดัน 12 โวลต์ แล้วทำการวัดกระแสของมอเตอร์จริงของระบบ อยู่ที่ 0.97561 เนื่องจากเป็นการต่ออนุกรมกระแสจึงเท่ากันทั้งระบบ ส่งผลให้จากสมการ $L_m = \tau \frac{I_{in} R_{in}}{I_{sh}}$ มีกระแสเท่ากันทั้งระบบจะได้ว่า $L_m = \tau R_{in} = 240 \cdot 10^{-6} \cdot (8.2 + 3) = 2.69E - 03$ และเมื่อนำมาเทียบกับค่าจากการคำนวณ parameter คือ $2.91E-03$ Error จะอยู่ที่ 8.18% ซึ่งถือว่ามีความน้อยมากจนอยู่ในระดับที่ยอมรับได้อย่างมีนัยสำคัญ

จากการทดลองเกี่ยวกับ การประมาณค่าความต้านทาน (R_m) และค่าความเหนี่ยวนำ (L_m) ของ Brushed DC Motor โดยทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทาน (R_{sh}) และใช้ค่าที่วัดได้มาคำนวณหาพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของมอเตอร์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมของมอเตอร์ทางไฟฟ้า และสามารถนำค่าที่ได้ไปใช้งานวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมต่อไป จึงสามารถสรุปได้ว่า

1. จากสมการ $R_m = R_{sh} \left(\frac{V_{in}}{V_{sh}} - 1 \right)$ จะเห็นว่าค่าความต้านทาน R_{sh} และ R_m ถูกกำหนดเป็นค่าคงที่ ส่งผลให้ $\frac{V_{in}}{V_{sh}}$ ต้องมีอัตราการส่วนที่เท่ากัน โดย Error $|V_{i+1} - V_i|$ มีค่า Max อยู่ที่ 0.0230 ซึ่งถือว่ามีความน้อยมากจนอยู่ในระดับที่ยอมรับอย่างมีนัยสำคัญ
2. ค่าที่วัดได้มีความสอดคล้องกับทฤษฎีทางไฟฟ้าตามหลักการของวงจร RL Series Circuit โดยเมื่อนำค่าความต้านทานของมอเตอร์ (R_m) ที่แรงดันต่าง ๆ มาหาค่าเฉลี่ยจะได้ค่าของความต้านทานมอเตอร์ (R_m) อยู่ที่ 3.824Ω และเมื่อหาค่าความเหนี่ยวนำของมอเตอร์ (L_m) จะได้อยู่ที่ $0.0029 H$ โดยหาค่าเฉลี่ยเพื่อหาตัวแทนของระบบสำหรับมาทำการทดสอบในขั้นต่อไป
3. ค่าพารามิเตอร์ R_m และ L_m สามารถนำไปใช้ใน MATLAB Simulink เพื่อสร้าง Model ทางไฟฟ้าของมอเตอร์ และ สามารถใช้เป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบ ตัวควบคุม (Controller Design) เพื่อให้มอเตอร์ทำงานได้ตามที่ต้องการ

อภิปรายผล

จากการทดลองโดยใช้ Oscilloscope วัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานชั้น (Shunt Resistor, R_{sh}) เพื่อคำนวณค่ากระแสไฟฟ้า (L_m) และใช้ Transient Response เพื่อหาค่าคงที่เวลา (τ)

ซึ่งนำไปใช้ในการประมาณค่าความต้านทานของมอเตอร์ (R_m) และค่าความเหนี่ยวนำของมอเตอร์ (L_m) พบว่าค่าของ R_{sh} ที่เลือกใช้นั้นส่งผลโดยตรงต่อค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ

เมื่อใช้ค่า $R_{sh} = 8 \Omega$ พบว่าค่าที่ได้จากการประมาณการของ R_m และ L_m มีความสอดคล้องกับทฤษฎีของวงจร RL Series Circuit โดยค่าความต้านทานของมอเตอร์ (R_m) ที่ได้มีค่าเฉลี่ย 3.824Ω และค่าความเหนี่ยวนำของมอเตอร์ (L_m) มีค่าเฉลี่ย 0.0029 H ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการจำลองพฤติกรรมของมอเตอร์ได้อย่างแม่นยำ

ในส่วนของความคลาดเคลื่อน เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานจากการคำนวณ 3.824Ω กับการวัดจริงจาก Multimeter 3.00Ω พบค่า Error ร้อยละ 27.47 ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ เนื่องจาก Multimeter วัดค่าความต้านทานขดลวดในสถานะหยุดนิ่ง (Static) แต่ค่าจากการคำนวณสะสมผลกระทบเชิงพลวัต (Dynamic) เช่น ความต้านทานสัมผัสของแปรงถ่านในขณะมีกระแสไหลจริง

อย่างไรก็ตาม เมื่อตรวจสอบค่า Error ของกระแสไฟฟ้าที่ร้อยละ 8.18 พบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำมาก จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองนี้สามารถรักษาพฤติกรรมหลักของระบบ (System Dynamics) ไว้ได้ครบถ้วน และมีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการจำลองพฤติกรรมมอเตอร์ในขั้นสูงต่อไป

ตอบคำถาม Criteria

1. สามารถอธิบายเหตุผลในการออกแบบการทดลอง การเลือกค่า R L ที่จะถูกนำมาใช้ในแบบจำลองมอเตอร์ได้อย่างถูกต้องและน่าเชื่อถือ

จากการออกแบบการทดลองอาศัยหลักการของวงจรอนุกรมเพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลเท่ากันทั้งระบบ ทำให้สามารถใช้ตัวต้านทานชั้ด (R_{sh}) เป็นจุดตรวจวัดค่ากระแสและพฤติกรรมชั่วคราวได้อย่างแม่นยำ การเลือกค่าพารามิเตอร์ R_m และ L_m มาใช้ในแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือเนื่องจากการคำนวณค่าเฉลี่ยจากการทดสอบซ้ำในหลายระดับแรงดัน เพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากการวัด และมีการยืนยันความถูกต้องด้วยการเปรียบเทียบกับค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จริงในระบบ

2. สามารถอธิบายเหตุผลในการเลือกค่า R L ที่จะถูกนำมาใช้ในแบบจำลองมอเตอร์ ได้อย่างถูกต้อง

ในการเลือกค่า $R_m = 3.824 \Omega$ และ $L_m = 0.0029 \text{ H}$ มาใช้ในแบบจำลอง คือความสอดคล้องระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีวงจร RL กับผลการตอบสนองจริงของระบบ (Actual System Response) แม้จะมีความคลาดเคลื่อนเชิงสถิติจากการวัดโดยตรงบ้าง แต่ค่าพารามิเตอร์ชุดนี้ให้ผลลัพธ์ในด้านกระแสไฟฟ้าที่แม่นยำสูง (Error < 10%) ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการคำนวณแรงบิดและการตอบสนองเชิงกลในแบบจำลองมอเตอร์

ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการทดลองในช่วงสภาพแวดล้อม ที่แตกต่างกันเช่น อุณหภูมิ เพื่อศึกษาผลกระทบต่อค่าความต้านทานของมอเตอร์

อ้างอิง



1. <https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=MotorSpeed§ion=SystemModeling>
2. <https://ieeexplore.ieee.org/document/711582/>
3. <https://pic.hu.edu.jo/Upload/55000000/55050000/automatic%20control%20manual.pdf>

การทดลองที่ 2 การหาค่า Parameter ทางกล และวิเคราะห์พฤติกรรมของ Brushed DC Motor

จุดประสงค์

1. เพื่อหาค่าประมาณของ Parameters ต่าง ๆ (J, B, K_e, K_m)
2. เพื่อเปรียบเทียบข้อดี และข้อเสียของแต่ละ Parameters จากสัญญาณที่ Input
3. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของ motor parameter ที่เกิดจากการจ่ายสัญญาณรูปแบบต่างๆ

สมมติฐาน

ถ้าจ่ายสัญญาณ Input รูปแบบต่าง ๆ (Step, Ramp, Sine Wave, Stair Step, Chirp) ให้ Motor แล้วพฤติกรรมของมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงไป แต่ค่า Parameters ต่าง ๆ จะยังคงที่

ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น
 - รูปแบบสัญญาณ Input (Step, Ramp, Sine Wave, Stair Step, Chirp)
2. ตัวแปรตาม
 - ค่าความเร็วเชิงมุมจากการจำลอง (ω)
 - ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ (Efficiency)
 - ค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (Back EMF Constant)
 - ค่าความเฉื่อย (Inertia)
 - ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานหนืด (Damping)
3. ตัวแปรควบคุม
 - Algorithm ในการ Estimate
 - ค่า Minimum ของ Parameter
 - ค่า Maximum ของ Parameter
 - ค่า Initial value ของ Parameter

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทำงานของ Brushed DC motor มีลักษณะของวงจร $R_m L_m$ ที่มีแรงดันย้อนกลับจากการหมุน เมื่อ Motor หมุนส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอเตอร์จะทำให้เกิดแรงบิด ซึ่งจะหมุน Motor แต่ในขณะเดียวกันก็จะมีแรงดันย้อนกลับ (back EMF) ที่ตรงข้ามกับแรงดันที่ป้อนเข้า นอกจากนี้ ความเหนียวนำ และความต้านทาน ยังมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในมอเตอร์

ซึ่งค่า Dynamic ของ Brushed DC motor สามารถวิเคราะห์และออกแบบการควบคุมของมอเตอร์จากการเปลี่ยนแปลงของความเร็วเชิงมุมที่ได้รับผลกระทบจากแรงบิดและการเสียดทาน อีกทั้งความสัมพันธ์ของ Torque และ ω_m จะต้องมี Torque ที่มากพอที่จะชนะแรงเฉื่อยและแรงเสียดทาน

$$P_{out} = \eta P_{in}$$

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

$$\frac{K_m I_m(t) \omega_m(t)}{V_{em(in)} f I_m(t)} = \eta$$

$$\frac{K_m \omega_m(t)}{V_{emf(in)}} = \eta$$

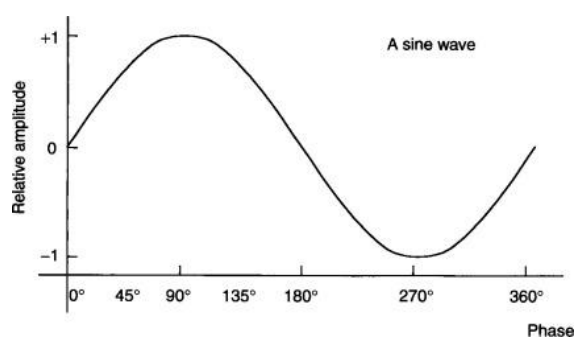
$$\frac{K_m \omega_m(t)}{K_e \omega_m(t)} = \eta$$

$$K_m = \eta K_e$$

จากสมการจะเห็นว่าพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ระบบจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานกลบางส่วนและสูญเสียไปบางส่วน

ลักษณะของสัญญาณที่นำมาใช้ในการทดลอง

Sine wave

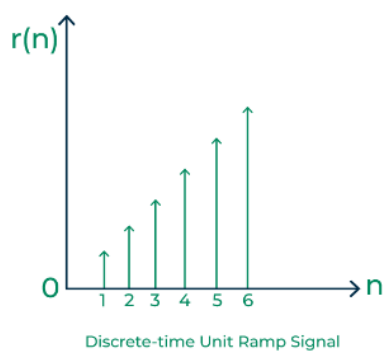


รูปที่ 4 sin wave

หน้าตาของสัญญาณนั้นเกิดจากสมการ

$$y(t) = A \sin(2\pi f t + \phi) + D$$

Ramp

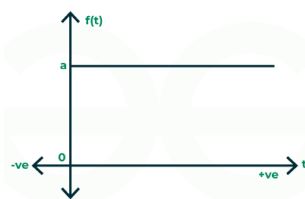


รูปที่ 5 ramp signal

สัญญาณนั้นเกิดจากสมการดังนี้

$$y(t) = (2A \cdot f \cdot t) + D$$

Step Signal



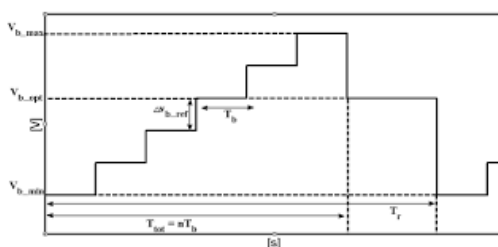
รูปที่ 6 Step signal

Step Signal เกิดจากสมการดังนี้

$$y(t) = \begin{cases} D & \text{เมื่อ } t < t_0 \\ D + A & \text{เมื่อ } t \geq t_0 \end{cases}$$

หน้าตาของคลื่นจะเปลี่ยนแปลงไปตาม 3 ตัวแปรดังนี้

Stair

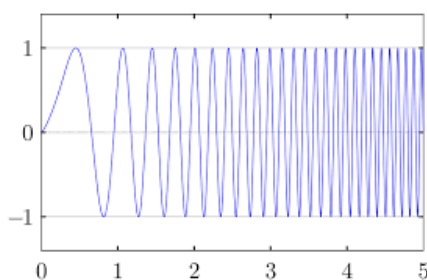


รูปที่ 7 Stair Signal

Stair มีลักษณะคล้าย Step signal แต่จุดที่แตกต่างคือ สัญญาณที่สร้างขึ้นมานั้นสามารถเพิ่มความสูงได้ขึ้นเรื่อย ๆ ขึ้นอยู่กับการตั้งค่า โดยหน้าตาสัญญาณจะคล้ายๆกับ บันได โดยการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณนั้นขึ้นอยู่กับ 3 ตัวแปรในสมการต่อไปนี้

$$y(t) = A \cdot |f \cdot t| + D$$

Chirp



รูปที่ 8 Chirp Signal

สัญญาณ Chirp มีความแตกต่างจากทุกสัญญาณที่กำลังทดลองคือมีความถี่ที่ไม่คงที่และจะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป โดยลักษณะของสัญญาณจะขึ้นกับสมการที่มี 4 ตัวแปรสำคัญดังนี้

$$y(t) = A \sin \left(2\pi \left(f_0 + \frac{k}{2} t \right) t + \theta \right) + D$$

Steady state

Steady state คือสถานะคงที่ ผลลัพธ์จะไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

Transient state

Transient state คือสถานะที่ไม่คงที่ ผลลัพธ์จะเปลี่ยนไปเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลง

Deadband

Deadband คือช่วงที่มีสัญญาณ Input เข้าสู่ระบบแต่ระบบไม่ตอบสนอง หรือไม่ให้ Output ออกมา

การวิเคราะห์ค่าความถูกต้องของโมเดล (Model Fit Analysis)

เมื่อทดลองเสร็จแล้วก็นำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ความใกล้เคียงกันของค่าความเร็วของ Brushed DC Motor Block และ Motor จริงจากสมการ R_{square} เพื่อหาค่าความแม่นยำของข้อมูล

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (realdata - modeldata)^2}{(\sum (realdata - mean(modeldata))^2)}$$

ขั้นตอนการดำเนินงาน

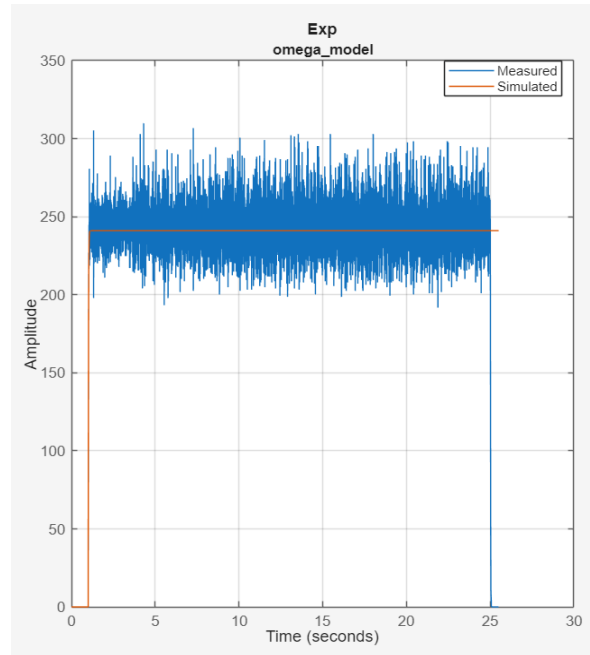
1. เตรียมชุดอุปกรณ์ให้พร้อมทดลอง
2. จ่าย Input สัญญาณรูปแบบต่าง ๆ (Step, Ramp, Sine Wave, Stair Step, Chirp) เพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ผ่าน Simulink
3. เก็บค่าความเร็วเชิงมุมจาก Encoder
4. ทำการ Parameter Estimation เพื่อหาค่า Efficiency, Back EMF Constant, Inertia, Damping ที่เหมาะสมของแต่ละรูปแบบสัญญาณ
5. นำค่า Parameters จากการ Estimate แต่ละสัญญาณแทนค่าในแบบจำลองเพื่อนำค่าความเร็วเชิงมุมจากแบบจำลองเปรียบเทียบกับความเร็วเชิงมุมของจริง
6. ทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง และเฉลี่ย

ผลการทดลอง

ค่า Parameters ต่าง ๆ จากการจ่าย Input รูปแบบต่าง ๆ

ตารางที่ 2 ค่า Parameters ต่าง ๆ จากสัญญาณ Step

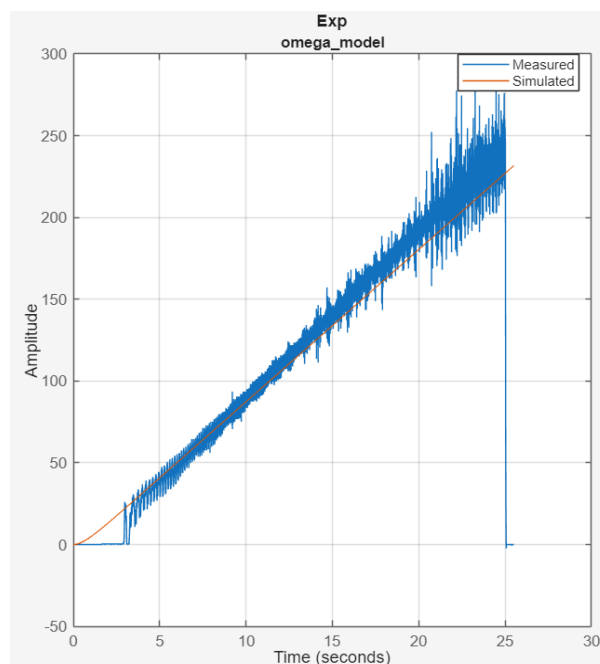
ครั้งที่	Motor Eff	B	J	Ke
1	9.99E-01	6.56E-05	9.14E-06	4.41E-02
2	9.98E-01	1.05E-04	2.18E-05	3.96E-02
3	9.99E-01	9.46E-05	1.28E-05	4.09E-02
ค่าเฉลี่ย	9.99E-01	8.84E-05	1.46E-05	4.15E-02



รูปที่ 9 แบบจำลอง Brushed DC Motor vs ความเร็วมอเตอร์จากสัญญาณ Step

ตารางที่ 3 ค่า Parameters ต่าง ๆ จากสัญญาณ Ramp

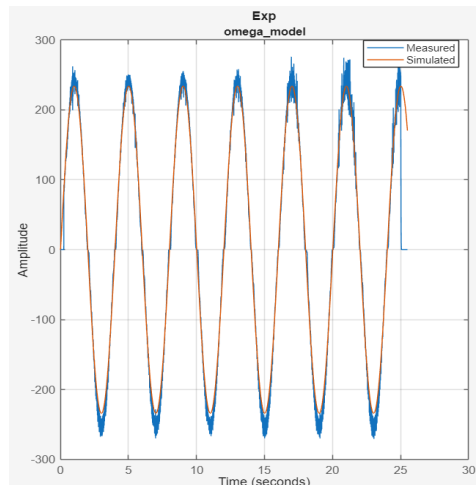
ครั้งที่	Motor Eff	B_m	J_m	K_e
1	9.97E-01	3.10E-06	4.30E-04	5.13E-02
2	9.25E-01	1.52E-04	2.47E-04	3.18E-02
3	9.98E-01	1.65E-04	3.49E-04	3.02E-02
ค่าเฉลี่ย	9.73E-01	1.07E-04	3.42E-04	3.78E-02



รูปที่ 10 แบบจำลอง Brushed DC Motor vs ความเร็วมอเตอร์จากสัญญาณ Ramp

ตารางที่ 4 ค่า Parameters ต่าง ๆ จากสัญญาณ Sine wave $\frac{\pi}{2}$

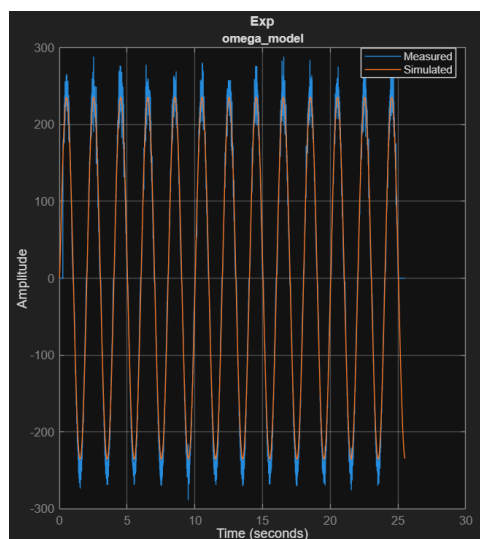
ครั้งที่	Motor Eff	B_m	I_m	K_e
1	9.99E-01	7.29E-05	1.34E-05	4.51E-02
2	9.99E-01	7.11E-05	1.19E-05	4.52E-02
3	9.99E-01	7.22E-05	1.28E-05	4.52E-02
ค่าเฉลี่ย	9.99E-01	7.21E-05	1.27E-05	4.52E-02



รูปที่ 11 แบบจำลอง Brushed DC Motor vs ความเร็วมอเตอร์จากสัญญาณ Sine wave ที่ $\frac{\pi}{2}$

ตารางที่ 5 ค่า Parameters ต่าง ๆ จากสัญญาณ Sine wave π

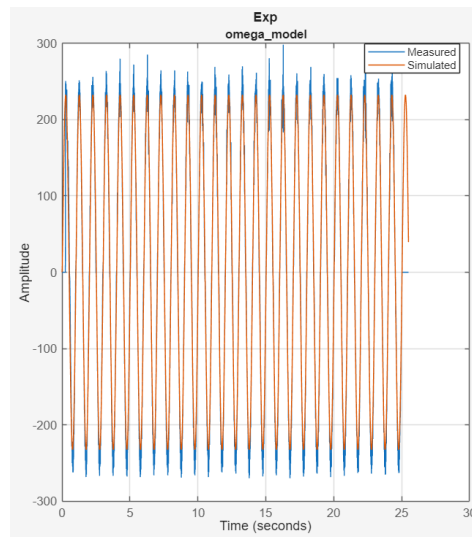
ครั้งที่	Motor Eff	B_m	I_m	K_e
1	9.98E-01	1.57E-04	1.29E-05	3.10E-02
2	9.95E-01	1.67E-04	9.84E-06	2.40E-02
3	9.91E-01	1.41E-04	1.58E-05	3.51E-02
ค่าเฉลี่ย	9.95E-01	1.55E-04	1.28E-05	3.00E-02



รูปที่ 12 แบบจำลอง Brushed DC Motor vs ความเร็วมอเตอร์จากสัญญาณ Sine wave ที่ π

ตารางที่ 6 ค่า Parameters ต่าง ๆ จากสัญญาณ Sine wave 2π

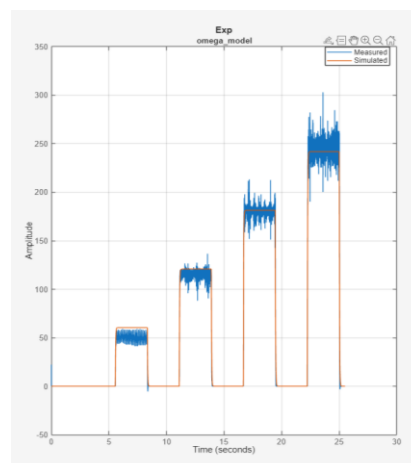
ครั้งที่	Motor Eff	B_m	J_m	K_e
1	9.99E-01	1.22E-04	1.45E-05	3.88E-02
2	9.99E-01	1.24E-04	1.45E-05	3.85E-02
3	9.99E-01	1.23E-04	1.45E-05	3.86E-02
ค่าเฉลี่ย	9.99E-01	1.23E-04	1.45E-05	3.86E-02



รูปที่ 13 แบบจำลอง Brushed DC Motor vs ความเร็วมอเตอร์จากสัญญาณ Sine wave ที่ 2π

ตารางที่ 7 ตารางที่ ค่า Parameters ต่าง ๆ จากสัญญาณ Stair step

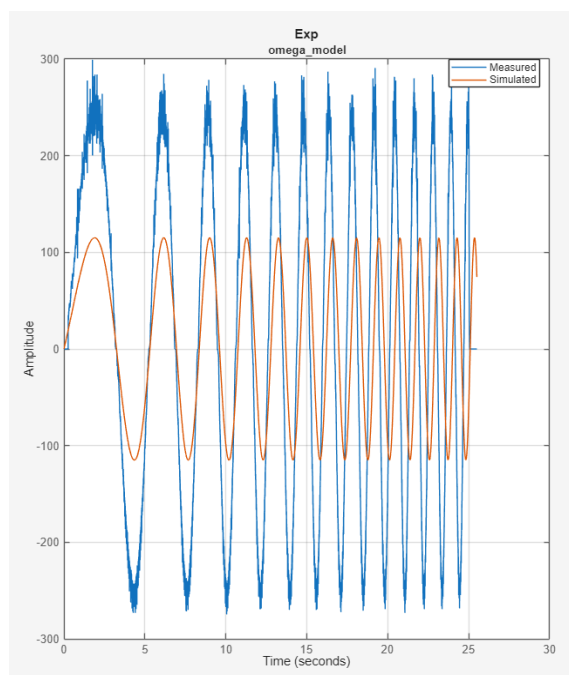
ครั้งที่	Motor Eff	B_m	J_m	K_e
1	9.99E-01	6.31E-05	1.49E-05	4.42E-02
2	9.99E-01	5.90E-05	1.23E-05	4.44E-02
3	9.99E-01	6.16E-05	1.32E-05	4.37E-02
ค่าเฉลี่ย	9.99E-01	6.12E-05	1.35E-05	4.41E-02



รูปที่ 14 แบบจำลอง Brushed DC Motor vs ความเร็วมอเตอร์จากสัญญาณ Stair step

ตารางที่ 8 ตารางที่ ค่า Parameters ต่าง ๆ จากสัญญาณ Chirp

ครั้งที่	Motor Eff	B_m	J_m	K_e
1	9.99E-01	6.62E-04	5.60E-07	6.59E-02
2	9.78E-01	2.65E-05	2.19E-06	8.72E-02
3	1.00E+00	5.65E-04	6.07E-07	5.72E-02
ค่าเฉลี่ย	9.92E-01	4.18E-04	1.12E-06	7.01E-02



รูปที่ 15 แบบจำลอง Brushed DC Motor vs ความเร็วมอเตอร์จากสัญญาณ Chirp

ค่าผันแปร (R^2) จาก Parameters ของสัญญาณต่าง ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับ การตอบสนองของมอเตอร์จริงจากแบบจำลองจากค่า Parameters ของสัญญาณต่าง ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับ การจ่ายสัญญาณต่าง ๆ ให้มอเตอร์จริง

ตารางที่ 9 แบบจำลองมอเตอร์เปรียบเทียบ (R^2) กับการจ่ายสัญญาณต่าง ๆ ให้มอเตอร์จริง

Input สัญญาณ	Step	Ramp	$\sin(\frac{\pi}{2})$	$\sin(\pi)$	$\sin(2\pi)$	Stair step	Chirp	เฉลี่ย
Step	0.6359	0.4926	0.6110	0.6397	0.6252	0.6334	-2.8049	0.118986
Ramp	0.8010	0.8074	0.8083	0.8024	0.8070	0.7988	0.2173	0.720314
$\sin(\frac{\pi}{2})$	0.9655	0.4595	0.9656	0.9652	0.9656	0.9654	0.7629	0.864243
$\sin(\pi)$	0.9771	0.2190	0.9757	0.9768	0.9765	0.9768	0.7621	0.837714
$\sin(2\pi)$	0.9650	0.1050	0.9644	0.9624	0.9642	0.9651	0.7517	0.811114
Stair step	0.9299	0.7125	0.9202	0.9372	0.9307	0.9251	0.5859	0.848786
Chirp	0.9815	0.3044	0.9802	0.9810	0.9809	0.9814	0.7652	0.853514

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองในครั้งนี้ทางผู้จัดทำได้ทำการวิเคราะห์และประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ ผ่าน MATLAB Simulink และ Parameter Estimator เพื่อหาค่าที่แม่นยำของมอเตอร์โดยอ้างอิงจากข้อมูลการทดลองจริง แทนที่จะใช้ค่าทางทฤษฎีเพียงอย่างเดียวผ่านทาง Estimate

การตอบสนองของมอเตอร์ต่อสัญญาณ Step

1. ใช้แรงดันไฟฟ้าแบบ Step Input ที่ 12V แสดงให้เห็นว่ามอเตอร์สามารถตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว
2. มี Overshoot เล็กน้อยก่อนที่มอเตอร์จะเข้าสู่สถานะ steady-state
3. ค่า R^2 สำหรับสัญญาณ Chirp ในช่วง -2.84 แสดงว่าโมเดลที่ Estimate สามารถใช้แทนพฤติกรรมของมอเตอร์ได้ไม่ดีส่งผลให้โมเดลชุดนี้ไม่เหมาะสมนำไปอ้างอิงกับสัญญาณทดสอบของสัญญาณ
4. ค่า R^2 ในช่วง 0.61 – 0.64 แสดงถึงความแม่นยำของโมเดลเมื่อใช้ Step Input ในสัญญาณต่าง ๆ แทนพฤติกรรมของมอเตอร์ได้ระดับกลาง ๆ สื่อถึงสัญญาณผ่านชุดข้อมูลได้ประมาณร้อยละ 64

การตอบสนองของมอเตอร์ต่อสัญญาณ Ramp

1. พบว่า Slope ของความเร็วของมอเตอร์มีความสัมพันธ์โดยตรงกับ Slope ของแรงดันไฟฟ้า
2. ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า โมเดลที่ Estimate ให้การตอบสนองที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง
3. ค่า R^2 ในช่วงที่มากกว่า 0.80 แสดงว่าโมเดลจำลองพฤติกรรมของมอเตอร์ได้ดีที่สัญญาณ Ramp
4. ค่า R^2 ในช่วงที่ต่ำกว่า 0.20 แสดงว่าโมเดลไม่สามารถจำลองพฤติกรรมของมอเตอร์ในสัญญาณ Chirp ได้เนื่องจากสัญญาณผ่านชุดข้อมูลได้ประมาณร้อยละ 20 ซึ่งมีค่าน้อยอย่างมาก

การตอบสนองของมอเตอร์ต่อสัญญาณ Sine Wave

1. ที่ Frequency 2π , π และ $\frac{\pi}{2}$ มีการเกิด Phase Shift ซึ่งแสดงถึงผลกระทบของแรงเฉื่อย
2. ค่า Amplitude และ Phase Shift สามารถอธิบายได้ด้วยค่าพารามิเตอร์ที่ Estimate ได้
3. ค่า R^2 ในช่วงที่มากกว่า 0.80 แสดงว่าโมเดลจำลองพฤติกรรมของมอเตอร์ได้ดีที่สัญญาณ Sine Wave
4. ค่า R^2 ในช่วงที่มากกว่า 0.70 - 0.80 แสดงว่า Model จำลองพฤติกรรมของมอเตอร์ในสัญญาณ Sine Wave ต่าง ๆ แสดงว่าสัญญาณผ่านชุดข้อมูลได้ประมาณร้อยละ 70 - 80 ซึ่งมีค่าปานกลาง
5. ค่า R^2 ในช่วง 0.10 – 0.50 แสดงว่าโมเดลไม่สามารถจำลองพฤติกรรมของมอเตอร์ในสัญญาณ Chirp ได้เนื่องจากสัญญาณผ่านชุดข้อมูลได้ประมาณร้อยละ 22 ซึ่งมีค่าน้อยอย่างมาก

การตอบสนองของมอเตอร์ต่อสัญญาณ Stair Step

1. ค่า R^2 ในช่วงมากกว่า 0.90 แสดงว่าโมเดลจำลองพฤติกรรมของมอเตอร์ได้ดีที่สัญญาณ Stair Step
2. ค่า R^2 ในช่วง 0.50 – 0.71 แสดงว่าโมเดลสามารถจำลองพฤติกรรมของมอเตอร์ในสัญญาณ Chirp พอได้เนื่องจากสัญญาณผ่านชุดข้อมูลได้ประมาณร้อยละ 50 - 71 ซึ่งมีค่าปานกลาง
3. มอเตอร์สามารถตอบสนองได้ดีในช่วงแรงดันที่เพิ่มขึ้น แต่มีการหน่วงเวลาเล็กน้อยในช่วงลดแรงดัน

- ในช่วงแรงดันต่ำมอเตอร์ไม่สามารถตอบสนองได้อย่างดีเนื่องจากผลกระทบของแรงเสียดทานสถิต อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน และ แรงดันตกคร่อมที่หน้าสัมผัสแปรงถ่าน เป็นต้น

การตอบสนองของมอเตอร์ต่อสัญญาณ Chirp

- ที่ความถี่สูง มีการหน่วงเวลา (Lag) เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (J_m)
- ค่า R^2 ในช่วงมากกว่า 0.90 แสดงว่าโมเดลจำลองพฤติกรรมของมอเตอร์ได้ดีที่สัญญาณ Chirp
- ค่า R^2 ในช่วง 0.30 แสดงว่าโมเดลไม่สามารถจำลองพฤติกรรมของมอเตอร์ในสัญญาณ Chirp ได้ เนื่องจากสัญญาณผ่านชุดข้อมูลได้ ประมาณร้อยละ 30 ซึ่งมีค่าน้อยอย่างมาก
- ค่า K_e แตกต่างกันขึ้นอยู่กับเวลาที่เปลี่ยนแรงดัน ซึ่งอาจเกิดจากแรงเฉื่อยของมอเตอร์

จากการวิเคราะห์ค่าที่ได้พบว่าชุดค่า Parameter ที่เหมาะสมที่สุดคือ ชุดค่า Parameter ที่ได้จากสัญญาณ $\sin(\frac{\pi}{2})$ โดยมีค่า

ประสิทธิภาพ	B_m	J_m	K_e
9.99E-01	7.21E-05	1.27E-05	4.52E-02

อภิปรายผล

จากการทดลองหาค่า Parameter B_m, J_m, K_e, η โดยการเปลี่ยนรูปแบบการจ่ายแรงดันโดยใช้การจ่ายแรงดันแบบ Ramp , Stair ,Chimp , Sine Wave และ Step โดยแต่ละรูปแบบสัญญาณจะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันเช่น

- Step** เป็นสัญญาณอินพุตที่มีการเปลี่ยนระดับค่าอย่างฉับพลัน ซึ่งเป็นเครื่องมือสำคัญในการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะเชิงพลวัตของมอเตอร์ ได้แก่ Deadband, Lag, Overshoot และ Settling Time โดยมีรายละเอียดดังนี้
 - Deadband:** สามารถสังเกตได้ในช่วงเริ่มต้นของการตอบสนอง โดยมอเตอร์อาจยังไม่มี การเคลื่อนที่ทันทีเนื่องจากแรงบิดที่สร้างขึ้นยังไม่เพียงพอที่จะเอาชนะแรงเสียดทานสถิต (Static Friction) และความเฉื่อย (J_m) ของระบบ
 - Lag :** บ่งบอกถึงระยะเวลาที่ระบบใช้ในการตอบสนองหลังจากได้รับสัญญาณกระตุ้น ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับค่าคงที่เวลาทางไฟฟ้าและทางกลของมอเตอร์
 - Overshoot:** หากการควบคุมยังขาดความสมดุลหรือมีพลังงานสะสมในระบบสูงเกินไป มอเตอร์อาจแสดงพฤติกรรมตอบสนองที่เกินกว่าค่าเป้าหมาย (Set-point)
 - Settling Time:** ใช้ระบุระยะเวลาที่มอเตอร์ใช้ในการปรับตัวเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady State) หลังจากเกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุต
- Ramp** เป็นอินพุตที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าแบบต่อเนื่องตามเวลา (Continuous Variation) ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งในการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะเชิงพลวัต ดังนี้

- **Deadband และแรงเสียดทานสถิต** : ในช่วงเริ่มต้นที่แรงดันอินพุตยังมีค่าน้อย มอเตอร์อาจยังไม่เริ่มหมุนจนกว่าแรงบิดที่สร้างขึ้นจะสูงพอที่จะเอาชนะแรงเสียดทานสถิต (Static Friction) ของระบบได้
 - **Lag** : เมื่อมอเตอร์เริ่มเคลื่อนที่ อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วอาจไม่สามารถติดตามสัญญาณอินพุตได้ทันทีเนื่องจากข้อจำกัดทางกายภาพและความเฉื่อย (J_m) ส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการตอบสนอง (Time Lag)
 - **Steady-State Error (ความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัว)**: สัญญาณ Ramp ช่วยให้เห็นผลต่างระหว่างค่าความเร็วที่ต้องการ (Set-point) และค่าความเร็วที่วัดได้จริงในระยะยาว ซึ่งบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการติดตามสัญญาณ (Tracking Performance) ของตัวควบคุม
 - **System Linearity (ความเป็นเชิงเส้นของระบบ)**: ใช้ตรวจสอบความสม่ำเสมอของอัตราการเพิ่มความเร็วยกเว้นว่าแปรผันตรงตามอัตราการเพิ่มของแรงดันอินพุตหรือไม่ ซึ่งจะช่วยระบุช่วงการทำงานที่เป็นเชิงเส้น (Linear Range) ของมอเตอร์
- หากมอเตอร์มีพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้นพบว่าความเร็วเพิ่มขึ้นไม่เป็นไปตาม Ramp ที่ป้อนเข้า ส่งผลให้ต้องมีการปรับแต่งระบบควบคุม เช่น การเพิ่มตัวชดเชยแรงเสียดทานหรือการปรับค่า Gain ของตัวควบคุมให้เหมาะสม
3. **Sine Wave** เป็นสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ผลของความถี่ต่อพฤติกรรมของมอเตอร์ เนื่องจากสามารถใช้ตรวจสอบ Lag และ Phase Shift ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ของอินพุต สัญญาณ Sine Wave ที่มีความถี่ต่ำ ทำให้มอเตอร์มีเวลาตอบสนองนานขึ้น ซึ่งช่วยลดผลของแรงเฉื่อยและแรงเสียดทาน ทำให้การเคลื่อนที่ของมอเตอร์สอดคล้องกับสัญญาณอินพุตมากขึ้น แต่เมื่อความถี่ของ Sine Wave เพิ่มขึ้น ค่า R^2 จะเริ่มลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจาก Phase Shift และ Gain ที่หายไป
 4. **Stair Step** คือช่วง Dead Band ที่ดีเพราะ เป็นรูปแบบสัญญาณที่เพิ่มขึ้นแบบก้าวกระโดดทำให้มีช่วงที่ Motor สร้างแรงบิดมาไม่มากพอเทียบกับ B_m, J_m เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุน Coulomb Friction จะต้องถูกเอาชนะก่อน ทำให้เกิดช่วง Deadband ที่มอเตอร์ไม่ตอบสนองต่อสัญญาณอินพุต แรงเสียดทานความหนืด (Viscous Friction) เป็นแรงเสียดทานที่เปลี่ยนแปลงตามอัตราความเร็วของมอเตอร์ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ทำให้ต้องใช้แรงบิดเพิ่มเติมเพื่อรักษาความเร็วให้คงที่
 5. **Chirp** เป็นอินพุตที่มีการเปลี่ยนความถี่แปรผันตามเวลา (Frequency Sweep) ทำให้สามารถวิเคราะห์คุณลักษณะของมอเตอร์ในทุกย่านความถี่ได้อย่างละเอียด ดังนี้

- **ช่วงความถี่ต่ำ** : มอเตอร์ยังคงมีความสามารถในการติดตามสัญญาณ input (Tracking) ได้ดี ทำให้สังเกตพฤติกรรม Deadband และแรงเสียดทานสถิตได้อย่างชัดเจน เนื่องจากพลังงานส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้เอาชนะแรงต้านทางกลในช่วงเริ่มต้น
- **Phase Shift/Lag**: เมื่อสัญญาณถูกกวาดไปยังย่านความถี่ที่สูงขึ้น มอเตอร์จะเริ่มตอบสนองล่าช้ากว่าสัญญาณอินพุต (Phase Lag) เนื่องจากข้อจำกัดจากค่าความเหนี่ยวนำ (L_m) และความเฉื่อย (J_m) ซึ่งทำให้กระแสไฟฟ้าและแรงบิดเปลี่ยนแปลงไม่ทันตามสัญญาณกระตุ้น
- **Resonance** : การเปลี่ยนแปลงความถี่อย่างต่อเนื่องช่วยให้ระบุจุดความถี่ธรรมชาติของระบบ หากความถี่อินพุตตรงกับความถี่ธรรมชาติ มอเตอร์อาจเกิดการสั่นสะเทือนที่รุนแรงผิดปกติ ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการกำหนดช่วงความถี่ใช้งานที่ปลอดภัย
- **Gain**: สัญญาณ Chirp ยังช่วยให้เห็นจังหวะที่แอมพลิจูด (Gain) ของมอเตอร์เริ่มลดลง (Attenuation) เมื่อความถี่สูงขึ้นจนพ้นจุด Cut-off frequency ของระบบ

ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการทดลองในช่วงสภาพแวดล้อม ที่แตกต่างกันเช่น อุณหภูมิ เพื่อศึกษาผลกระทบต่อมอเตอร์
2. ควรمرارการซ้ำที่มากขึ้นเพื่อดูข้อมูลที่มากยิ่งขึ้น
3. ควรของเปรียบเทียบมอเตอร์ที่รุ่นเดียวกันว่าได้ชุดข้อมูลที่เท่ากันหรือไม่

อ้างอิง

1. <https://www.allelcoelec.com/blog/low-pass-filters-unveiled-a-comprehensive-guide-to-their-function-and-impact.html>
2. <https://www.mathworks.com/help/simscape/ref/rotationalfriction.html>
3. <https://media.geeksforgeeks.org/wp-content/uploads/20231204175939/Discrete-Time-Unit-Ramp-Signal.png>
4. <https://media.geeksforgeeks.org/wp-content/uploads/20231212132317/Graph-of-step-signal-in-continuous-time- system.png>
5. <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSyz4bkJXEJQLFaTSp1aJXnPJOq4rgp8r6jYw&s>

การทดลองที่ 3 ผลกระทบจากความถี่ PWM และ Rotational friction

จุดประสงค์

1. เพื่อหาผลกระทบจากความถี่ PWM และ Rotational friction ที่ส่งผลต่อการหมุนมอเตอร์
2. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความถี่ PWM (20Hz, 200Hz, 2kHz, 20kHz) ที่มีผลต่อการตอบสนองความเร็วของมอเตอร์
3. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของแรงเสียดทาน (Rotational Friction) ในการหมุนของมอเตอร์ จากการจ่ายสัญญาณแรงดันประเภทต่าง ๆ
4. เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการตอบสนองของแบบจำลอง กับมอเตอร์จริง โดยวิเคราะห์สาเหตุจากปรับค่า PWM Frequency และ Rotational Friction

สมมติฐาน

1. การเปลี่ยนความถี่ PWM จะส่งผลต่อลักษณะความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์
2. ที่ความถี่ PWM ต่ำเกินไป จะส่งผลให้มอเตอร์ทำงานกระตุกเนื่องจากสัญญาณที่จ่ายให้มอเตอร์ที่ไม่ต่อเนื่อง
3. ที่ความถี่ PWM สูงเกินไป จะส่งผลให้มอเตอร์มีแรงบิดน้อยในช่วงเริ่มหมุน มอเตอร์ต้องใช้เวลาในการชาร์จกระแสเพิ่มขึ้น เนื่องจากสัญญาณมีความถี่สูงเกินไป

ตัวแปร

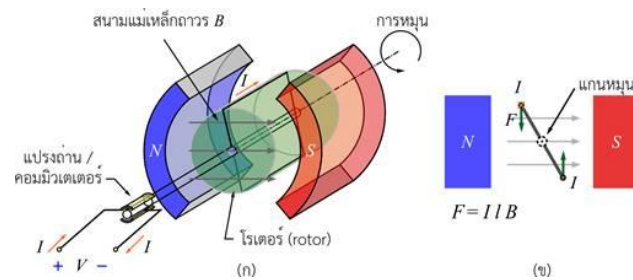
1. ตัวแปรต้น
 - รูปแบบของสัญญาณ Input
 - ความถี่ PWM ที่ระดับต่าง ๆ (20 Hz, 2kHz, 200kHz)
2. ตัวแปรตาม
 - ลักษณะกราฟความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ (ω)
3. ตัวแปรควบคุม
 - การกำหนดค่า Parameters อื่น ๆ

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. หลักการทำงานของ Brushed DC Motor

มอเตอร์จะอาศัยแรงดูดและแรงผลักที่เกิดจากสนามแม่เหล็กเมื่อมีกระแสไหลผ่านลวดตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบตัวนำนั้น ถ้าเรานำตัวนำดังกล่าวไปวางไว้ในสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวรก็จะเกิดการต้านและเสริมกับเส้นแรงแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวร ทำให้เกิดแรงดูดและแรงผลักขึ้นที่ขดลวด รูปที่ 4(ก) แสดงลักษณะโครงสร้างของมอเตอร์ไฟตรงที่ใช้แม่เหล็กถาวรในส่วนของสเตเตอร์และมีการป้อนกระแสผ่าน

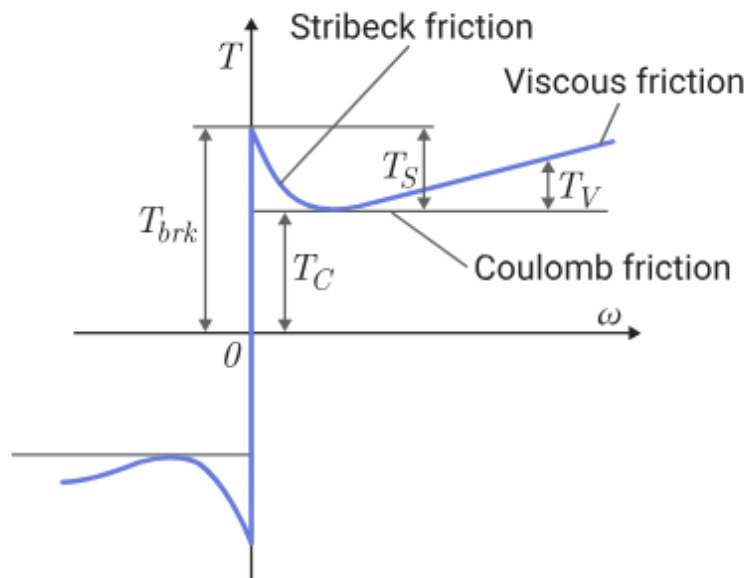
คอมมิวเตเตอร์ไปยังโรเตอร์ เพื่อให้แกนเหล็กที่โรเตอร์เป็นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4(ข) โดยกระแสไฟฟ้า I จะทำให้เกิดแรง F ขึ้น



รูปที่ 16 (ก) โครงสร้างและ (ข) การทำงานของ DC Motor

จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าเมื่อจ่ายกระแสผ่านขั้วต่อที่เรียกว่าแปรงถ่าน (brushes) ไปยังวงแหวนพิเศษที่เรียกว่า คอมมิวเตเตอร์ (commutator) ซึ่งต่อเข้ากับวงจรตัวนำกระแสที่ไหลผ่านตัวนำจะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำโดยด้านหนึ่งจะเป็นแรงผลักขึ้น ทำให้วงรอบตัวนำมีการหมุน โดยแรงที่เกิดขึ้นจะแปรตาม กระแสที่ไหลผ่าน I ความยาวของตัวนำ l และความเข้มของสนามแม่เหล็กถาวร B

2. Rotational friction ใน Brushed DC Motor



รูปที่ 12 Friction ประเภทต่าง ๆ

- Torque break (T_{brk}) คือ แรงบิดสูงสุดก่อนที่มอเตอร์จะเริ่มหมุนจากหยุดนิ่ง ซึ่งทำให้เกิด Deadband ขึ้น
- Coulomb friction (T_C) คือ แรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของวัตถุสองชิ้นที่เคลื่อนที่ผ่านกัน ซึ่งคงที่ตลอดการเคลื่อนที่

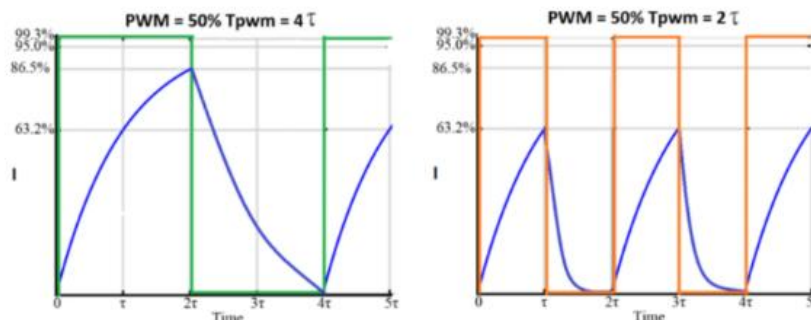
- Stribeck friction (T_s) คือ ช่วงรอยต่อที่เมื่อเริ่มหมุนแรงเสียดทานกำลังลดลงอย่างรวดเร็วระหว่างช่วง Torque break และ Coulomb friction
- Viscous friction (T_v) คือ ความหนืดหรือแรงเสียดทานที่แปรผันตรงกับความเร็ว

3. หลักการของ Pulse Width Modulation (PWM) และ Duty Cycle

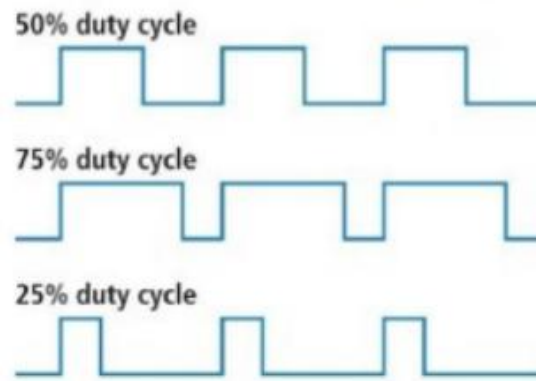
PWM ย่อมาจาก Pulse Width Modulation คือเทคนิคการควบคุมปริมาณแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าโดยการปรับความกว้างของพัลส์ในสัญญาณ ในระบบ PWM สัญญาณจะสลับระหว่างสถานะเปิดและปิดที่ความถี่คงที่ ระยะเวลาที่สัญญาณอยู่ในสถานะ “เปิด” ของแต่ละรอบ ซึ่งเรียกว่า Duty Cycle จะเป็นตัวกำหนดกำลังเฉลี่ยที่ส่งให้โหลด ในส่วนของ Duty Cycle คือสัดส่วนของเวลาที่สัญญาณอยู่ในสถานะ “เปิด (ON)” ต่อหนึ่งรอบพัลส์ มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ ยิ่ง Duty Cycle สูง แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ส่งให้โหลดก็ยิ่งมาก

$$\text{Duty Cycle} = \frac{\text{เวลา ON}}{\text{ช่วงเวลาหนึ่งรอบพัลส์}} \times 100\%$$

จุดเด่นของ PWM คือประสิทธิภาพสูงและการสูญเสียพลังงานต่ำ เนื่องจากส่วนควบคุมทำงานเพียงสองสถานะแบบดิจิทัลคือ เปิดเต็มที่ หรือ ปิดสนิท ทำให้ความร้อนและการสูญเสียพลังงานในวงจรมีน้อย นอกจากนี้ PWM ยังให้การควบคุมที่ละเอียดแม่นยำ



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลา ในสัญญาณ PWM ที่มีความถี่ต่างกัน

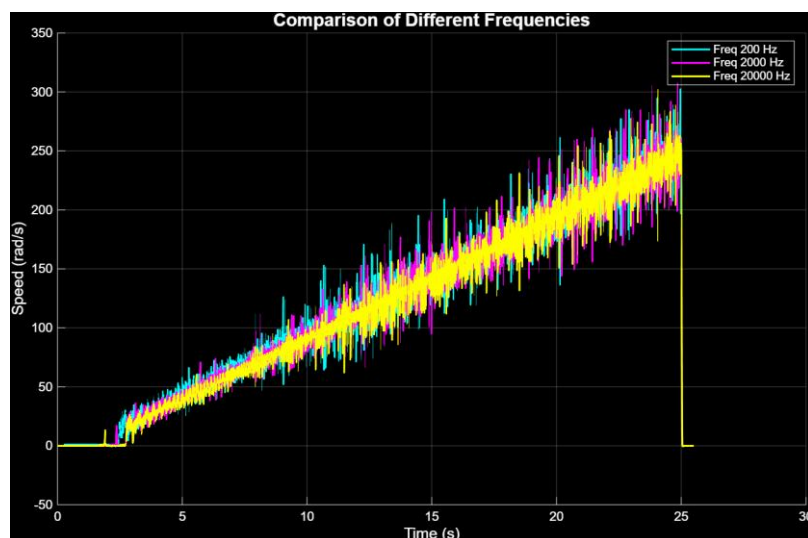


รูปที่ 18 สัญญาณแรงดันที่ Duty cycle ต่าง ๆ

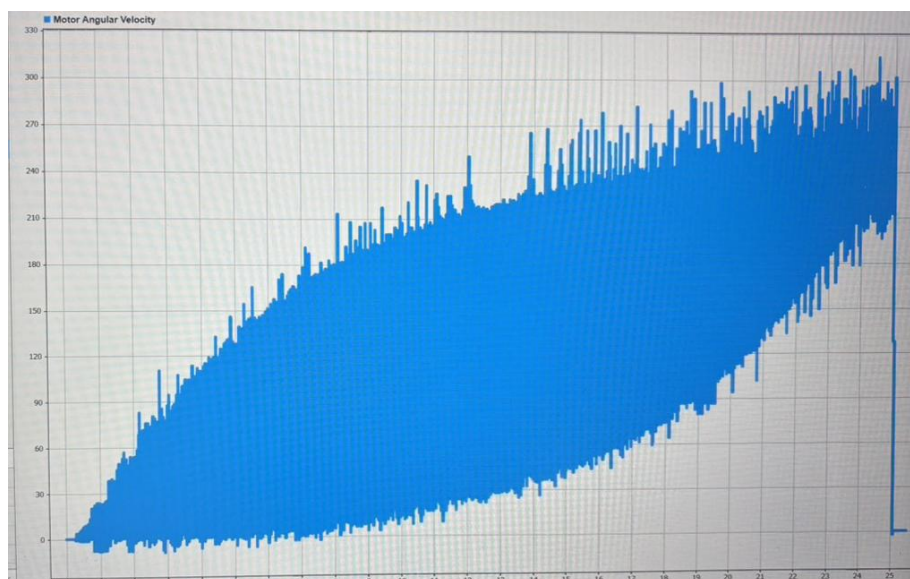
ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. นำค่า Parameters (J, B, Ke, Km) ที่หาได้จากการทดลองที่ 2 มาใส่ในแบบจำลอง Motor Model ใน MATLAB/Simulink และทำการจำลองการจ่ายสัญญาณ Ramp เพื่อเก็บค่าจากการจำลองโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
2. ป้อนสัญญาณ Input Ramp และปรับเปลี่ยนความถี่ PWM ได้แก่ (20Hz, 2kHz, 200KHz) โดยปรับ Duty Cycle ที่ 100% ทำซ้ำ 3 ครั้ง และเฉลี่ย
3. บันทึกลักษณะพฤติกรรมความเร็วเชิงมุม (ω) ของมอเตอร์จากการทดลองจริงผ่าน Encoder
4. นำผลการทดลองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงและวิเคราะห์ผลการทดลอง

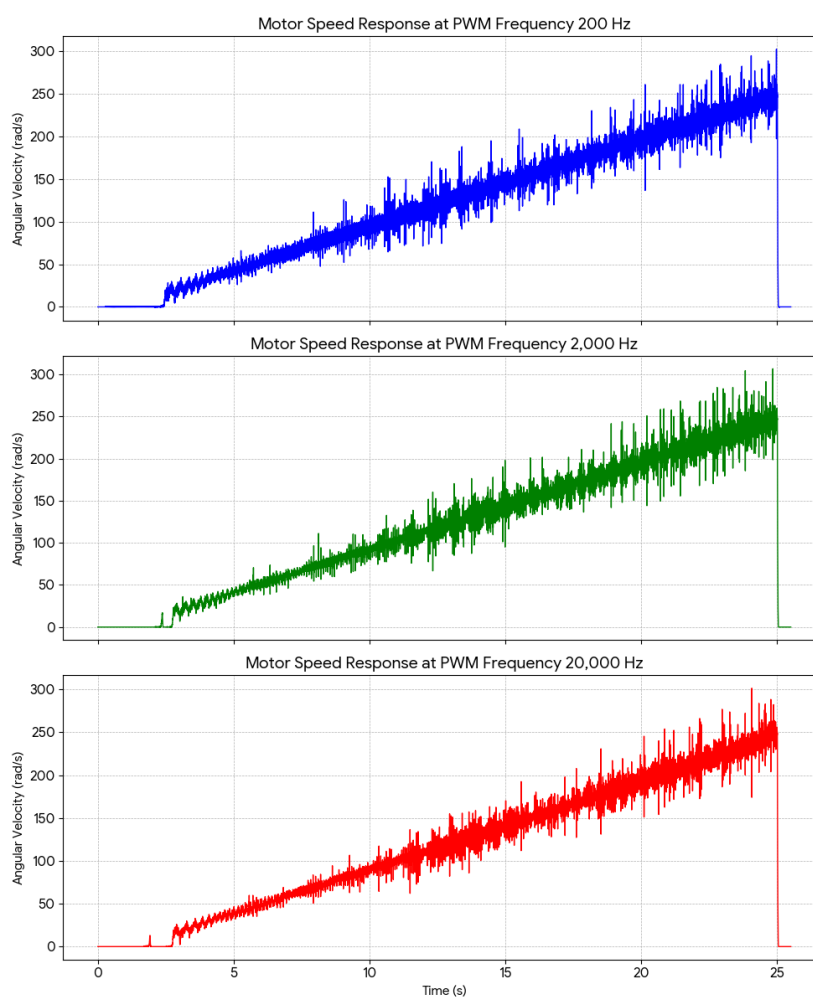
ผลการทดลอง



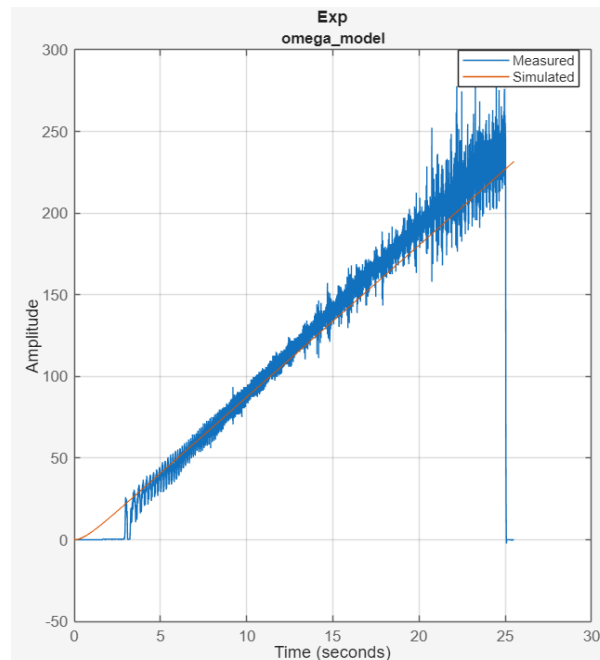
รูปที่ 19 การตอบสนองของ Brushed DC Motor ที่ความถี่ 200Hz, 2000Hz, 20000Hz



รูปที่ 16 การตอบสนองของ Brushed DC Motor ที่ความถี่ 20Hz



รูปที่ 17 การตอบสนองของ Brushed DC Motor ที่ความถี่ 200Hz, 2000Hz, 20000Hz



รูปที่ 17 แบบจำลอง Brushed DC Motor vs ความเร็วมอเตอร์จากสัญญาณ Ramp

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าการเปลี่ยนค่าความถี่ PWM มีผลต่อความเร็วเชิงมุมของ Brushed DC Motor อย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อใช้ PWM ความถี่ 20Hz พบว่าความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ มีการแกว่งกวัดเป็นอย่างมาก และมีการหมุนกระตุกเป็นบางครั้ง แต่เมื่อเพิ่มความถี่ PWM มีผลให้มอเตอร์มีความเรียบมากขึ้น และแกว่งกวัดน้อยลง

อภิปรายผล

จากผลการทดลองสอดคล้องกับสมมุติฐานที่ว่า การเปลี่ยนความถี่ PWM มีผลต่อความเร็วเชิงมุมของ Brushed DC Motor อย่างมีนัยสำคัญ คือเมื่อความถี่ PWM ต่ำเกินไปจะทำให้มอเตอร์ได้รับกระแสไฟฟ้าไม่ต่อเนื่องส่งผลให้มอเตอร์ทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ อาจทำงานแบบกระตุก เกิด Torque Ripple และไม่สามารถคงความเร็วที่ต้องการได้ แต่ถ้าความถี่ PWM สูงมากขึ้นจะทำให้มอเตอร์สามารถทำงานได้ดีมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

นอกจากนี้เมื่อนำกราฟที่นำ Parameters ต่าง ๆ ไปใช้ในโมเดลเปรียบเทียบกับกรณีสัญญาณ Ramp ให้กับมอเตอร์จะได้ว่าในตลอดช่วงของโมเดลจะมีการเคลื่อนที่แบบ Linear แต่ในกราฟความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์จริงจะต้องรอเวลาสักครู่หนึ่งก่อนจะเริ่มหมุนซึ่งแสดงให้เห็นถึง Rotational friction ของมอเตอร์

ข้อเสนอแนะ

อ้างอิง

<https://www.ti.com/lit/ug/spruhj1i/spruhj1i.pdf>

<https://www.mdpi.com/1424-8220/26/1/78>



https://www.ijareeie.com/upload/2017/october/46_E61010640%20Adaptive.pdf

<https://www.portescap.com/en/newsroom/blog/2023/09/the-effect-of-pwm-frequency-on-permanent-magnet-synchronous-motor-noise>

<https://electronics.stackexchange.com/questions/242293/is-there-an-ideal-pwm-frequency-for-dc-brush-motors>

<https://www.mdpi.com/1424-8220/21/22/7453>

<https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=MotorSpeed§ion=SystemModeling>

<https://www.intechopen.com/chapters/16120>

https://www.ti.com/lit/an/slvaer0b/slvaer0b.pdf?ts=1770380650130&ref_url=https%253A%252F%252Fgemini.google.com%252F



ภาคผนวก

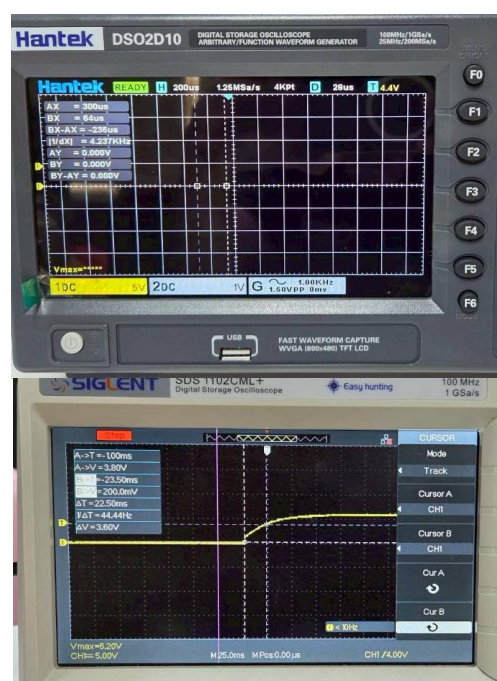
Part 1

ตารางที่ 10 เก็บ V ที่ตกที่คร่อม Rsh เพื่อหาค่า R L ของมอเตอร์

Vin(V)	Vsh(V)	Rm(Ohm)	V0.632(V)	I(A)	T(us)	Lm (H)
8	5.6	3.514286	3.5392	0.682927	248	0.002905
8	5.6	3.514286	3.5392	0.682927	248	0.002905
8	5.6	3.514286	3.5392	0.682927	248	0.002905
9	6.2	3.703226	3.9184	0.756098	236	0.002809
9	6.2	3.703226	3.9184	0.756098	228	0.002714
9	6.2	3.703226	3.9184	0.756098	232	0.002762
10	6.8	3.858824	4.2976	0.829268	248	0.002991
10	6.8	3.858824	4.2976	0.829268	248	0.002991
10	6.8	3.858824	4.2976	0.829268	244	0.002942
11	7.4	3.989189	4.6768	0.902439	248	0.003023
11	7.4	3.989189	4.6768	0.902439	244	0.002974
11	7.4	3.989189	4.6768	0.902439	248	0.003023
12	8	4.1	5.056	0.97561	240	0.002952
12	8	4.1	5.056	0.97561	240	0.002952
12	8	4.1	5.056	0.97561	240	0.002952



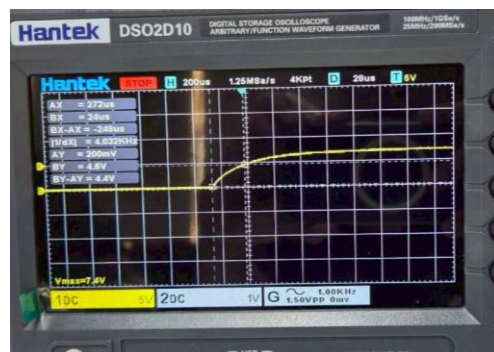
Vin 8V



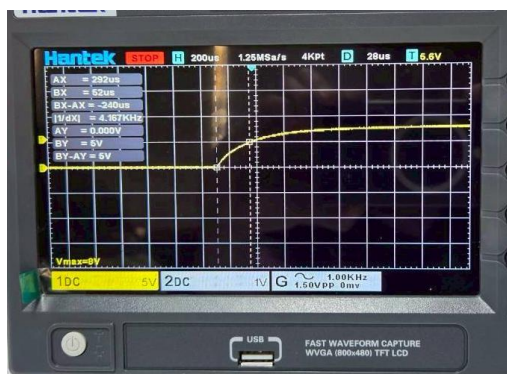
Vin 9V



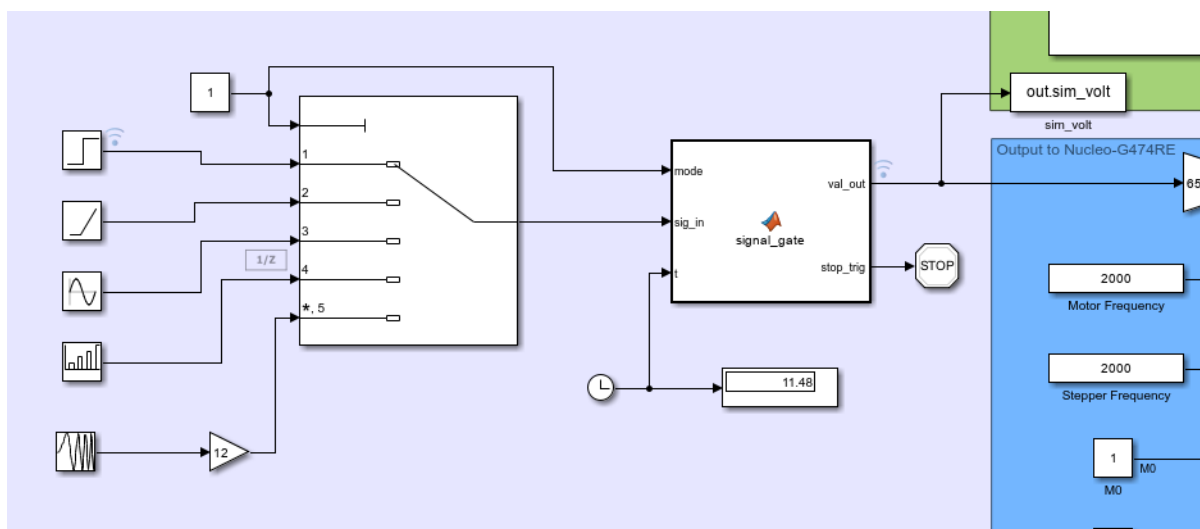
Vin 10V



Vin 11V



Vin 12V



Input Signal ต่าง ๆ เพื่อนำสัญญาณความเร็วเชิงมุมกับ Estimate หาค่า

Block Parameters: Step

Step

Output a step.

Main Signal Attributes

Step time:
1

Initial value:
0

Final value:
12

Sample time:
0

☒ Interpret vector parameters as 1-D

☒ Enable zero-crossing detection

OK Cancel Help Apply

Block Parameters: Ramp

Ramp (mask) (link)

Output a ramp signal starting at the specified time.

Parameters

Slope:
12/25 0.48

Start time:
0

Initial output:
0

☒ Interpret vector parameters as 1-D

OK Cancel Help Apply

Block Parameters: Sine Wave

Sine Wave

Output a sine wave:

$O(t) = \text{Amp} * \sin(\text{Freq} * t + \text{Phase}) + \text{Bias}$

Sine type determines the computational technique used. The parameter in the two types are related through:

Samples per period = $2 * \pi / (\text{Frequency} * \text{Sample time})$

Number of offset samples = $\text{Phase} * \text{Samples per period} / (2 * \pi)$

Use the sample-based sine type if numerical problems due to running for large times (e.g. overflow in absolute time) occur.

Parameters

Sine type: Time based

Time (t): Use simulation time

Amplitude:
12

Bias:
0

Frequency (rad/sec):
 $2 * \pi$ 6.2832

OK Cancel Help Apply

Block Parameters: Sine Wave

Sine Wave

Output a sine wave:

$O(t) = \text{Amp} * \sin(\text{Freq} * t + \text{Phase}) + \text{Bias}$

Sine type determines the computational technique used. The parameter in the two types are related through:

Samples per period = $2 * \pi / (\text{Frequency} * \text{Sample time})$

Number of offset samples = $\text{Phase} * \text{Samples per period} / (2 * \pi)$

Use the sample-based sine type if numerical problems due to running for large times (e.g. overflow in absolute time) occur.

Parameters

Sine type: Time based

Time (t): Use simulation time

Amplitude:
12

Bias:
0

Frequency (rad/sec):
 π

OK Cancel Help Apply

Block Parameters: Sine Wave

Sine Wave

Output a sine wave:

$$O(t) = \text{Amp} * \sin(\text{Freq} * t + \text{Phase}) + \text{Bias}$$

Sine type determines the computational technique used. The parameter in the two types are related through:

Samples per period = $2 * \pi / (\text{Frequency} * \text{Sample time})$

Number of offset samples = $\text{Phase} * \text{Samples per period} / (2 * \pi)$

Use the sample-based sine type if numerical problems due to running for large times (e.g. overflow in absolute time) occur.

Parameters

Sine type: Time based

Time (t): Use simulation time

Amplitude: 12

Bias: 0

Frequency (rad/sec): $\pi/2$ 1.5708

OK Cancel Help Apply

Block Parameters: Chirp Signal

chirp (mask) (link)

Output a linear chirp signal (sine wave whose frequency varies linearly with time).

Parameters

Initial frequency (Hz): 0.1

Target time (secs): 30

Frequency at target time (Hz): 1

☒ Interpret vector parameters as 1-D

OK Cancel Help Apply

Block Parameters: Repeating Sequence Stair

Repeating Sequence Stair (mask) (link)

Discrete time sequence is output, then repeated.

Main Signal Attributes

Vector of output values: [0 3 0 6 0 9 0 12].'

Sample time: 2.778

OK Cancel Help Apply

Block Parameters: Step

Step

Output a step.

Main Signal Attributes

Step time: 1

Initial value: 0

Final value: 12

Sample time: 0

☒ Interpret vector parameters as 1-D

☐ Enable zero-crossing detection

OK Cancel Help Apply

Block Parameters: Ramp

Ramp (mask) (link)

Output a ramp signal starting at the specified time.

Parameters

Slope: 12/25 0.48

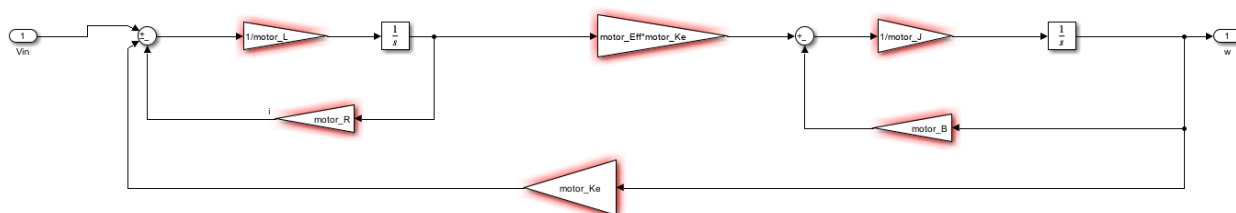
Start time: 0

Initial output: 0

☒ Interpret vector parameters as 1-D

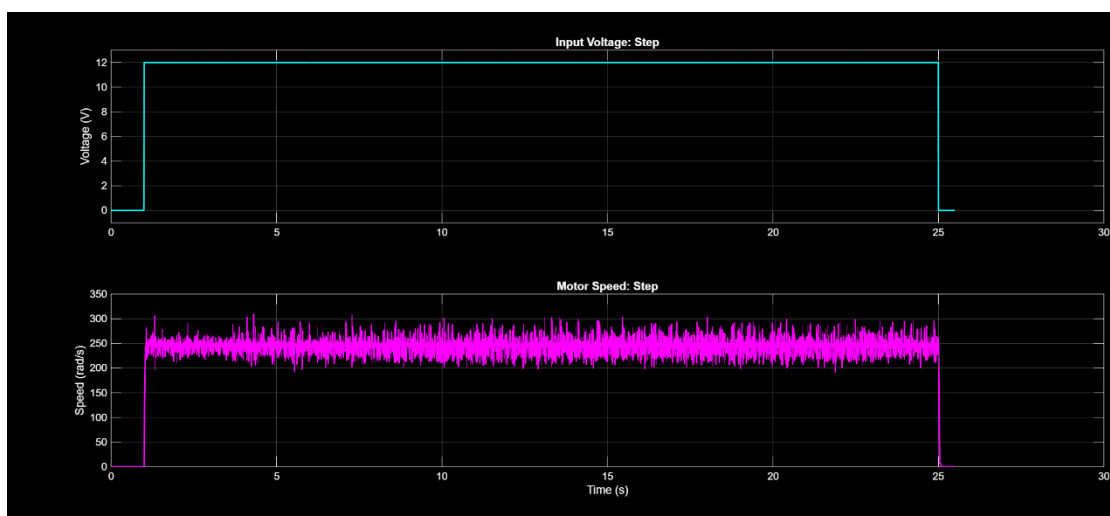
OK Cancel Help Apply

การตั้งค่า Signal ต่าง ๆ

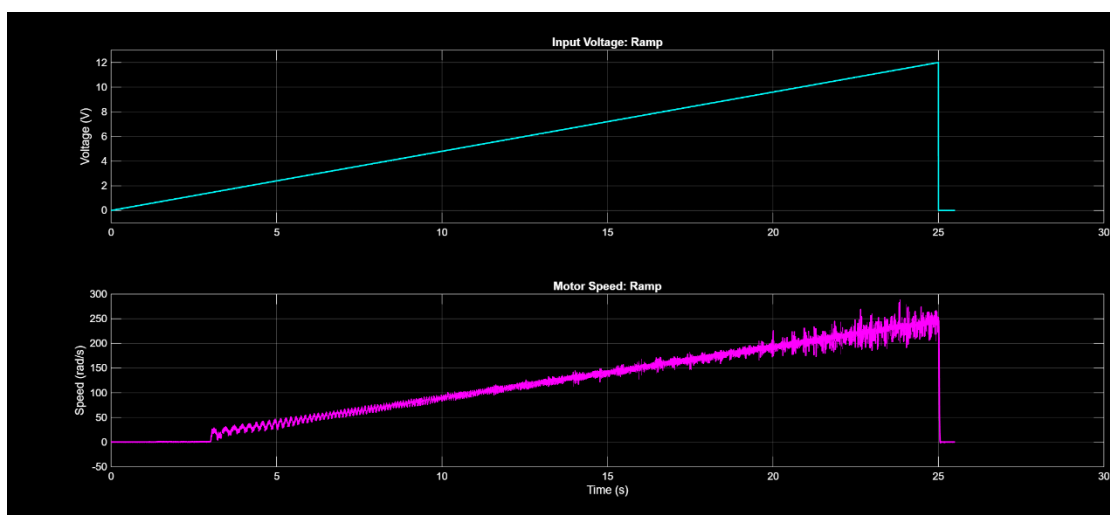


โมเดลแบบจำลอง Brushed DC motor

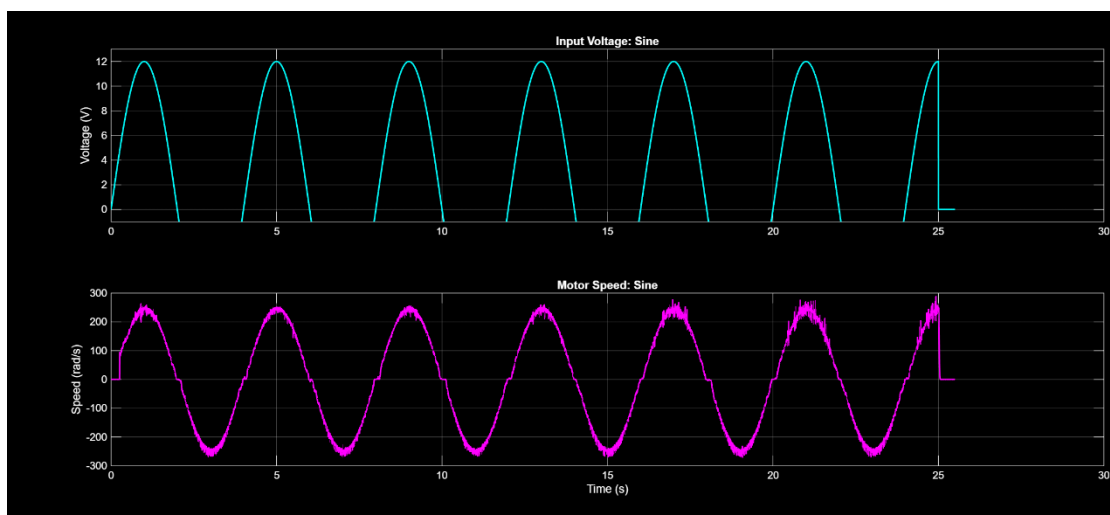
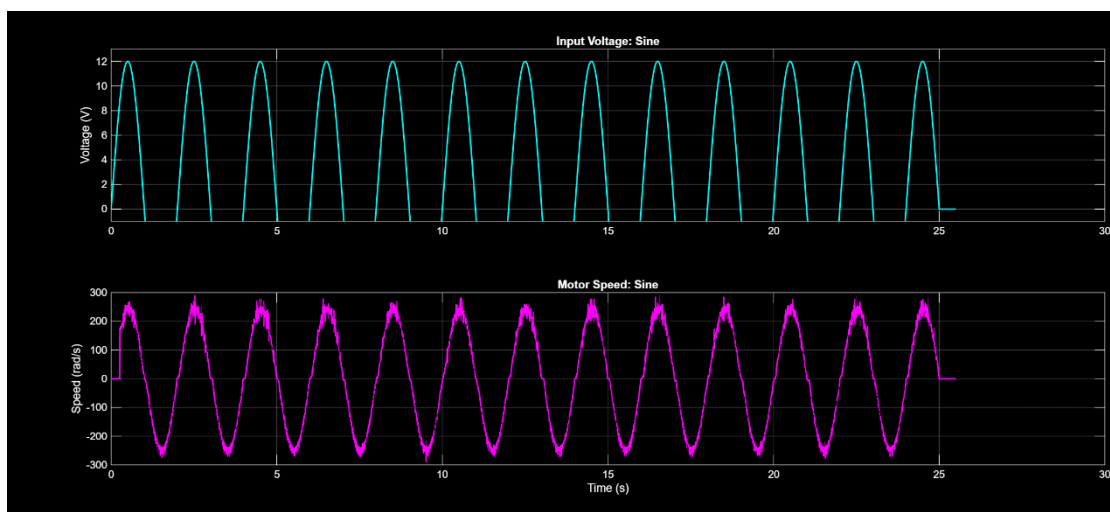
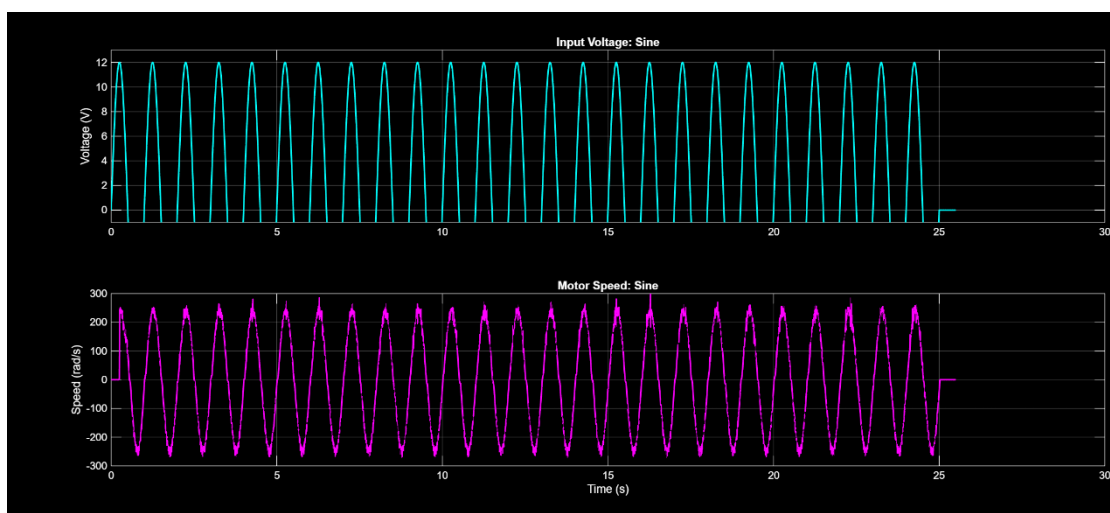
Part 2

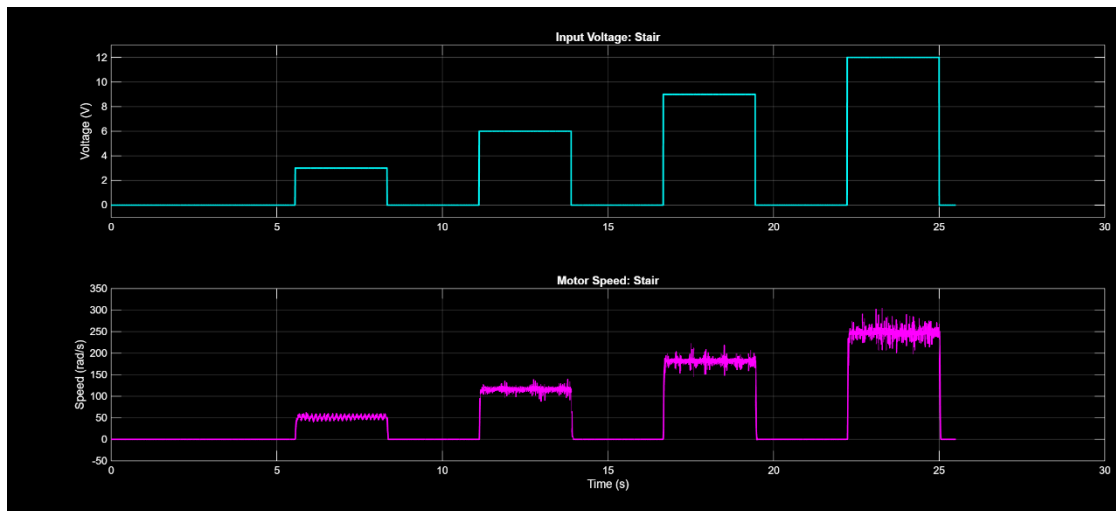


Input Step ให้ Brushed DC Motor

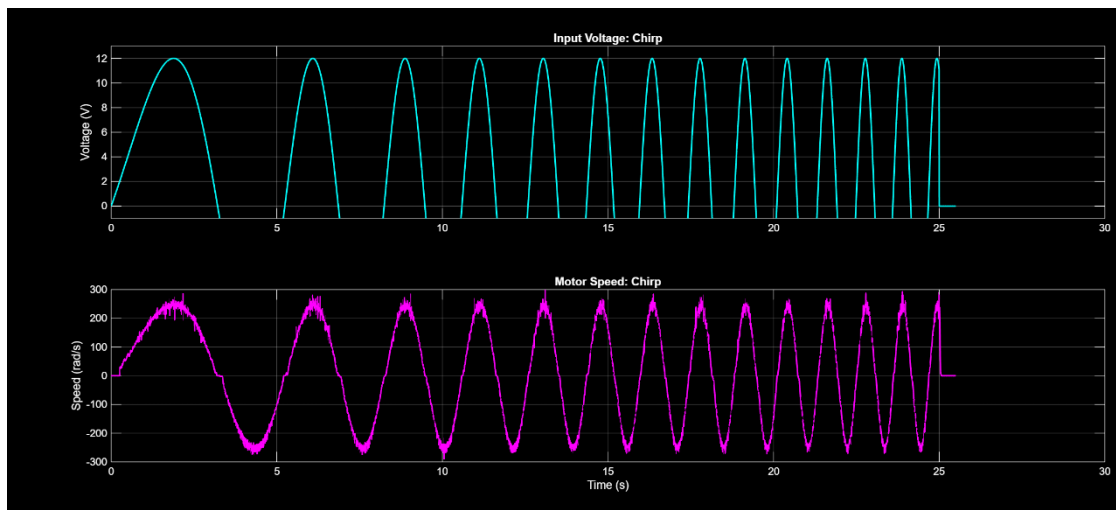


Input Ramp ให้ Brushed DC Motor


 Input $\sin(\pi/2)$ ให้ Brushed DC Motor

 Input $\sin(\pi)$ ให้ Brushed DC Motor

 Input $\sin(2\pi)$ ให้ Brushed DC Motor



Input Stair step ให้ Brushed DC Motor



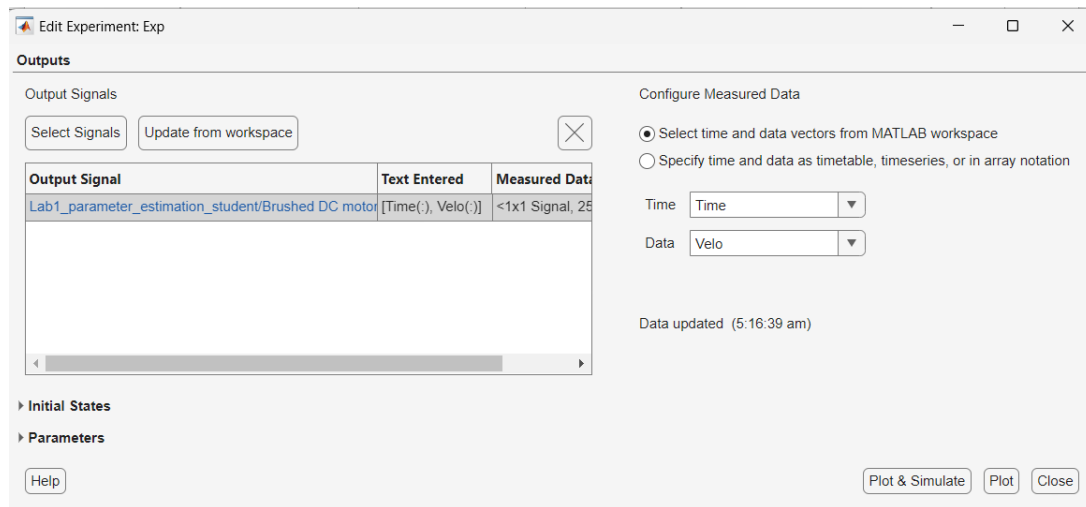
Input Chirp ให้ Brushed DC Motor

```
% R and L from experiment
motor_R = 3.82445689;
motor_L = 0.002919699;
% Optimization's parameters
motor_Eff = 0.99657;
motor_Ke = 0.030185667;
motor_J = 0.000086355;
motor_B = 0.000160622;

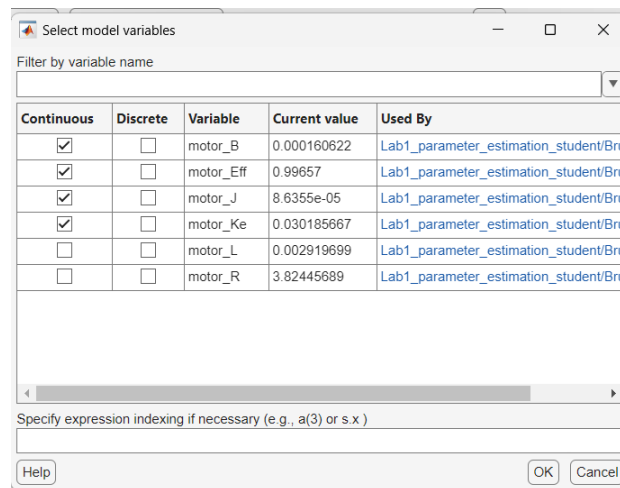
%% Extract collected data
Input = sig_volt.Data;
Time = sig_speed.Time;
speed_data = double(squeeze(sig_speed.Data));
Velo = speed_data;

% Plot
figure(Name='Motor velocity response')
plot(Time,Velo,Time,Input)
```

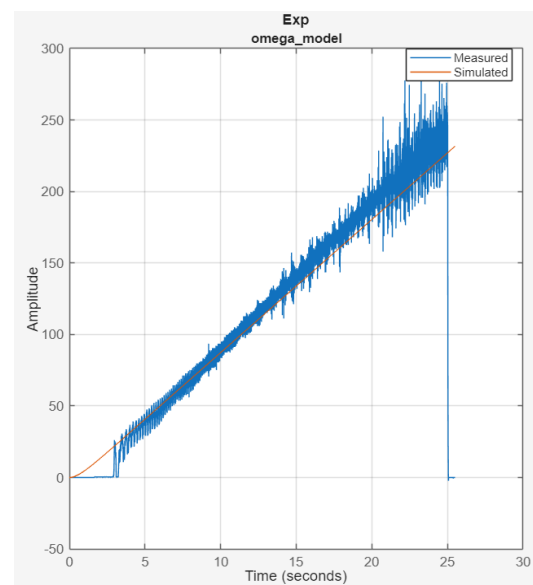
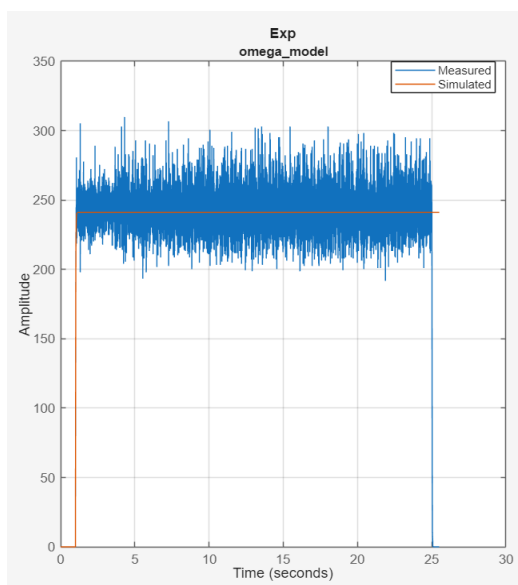
ค่า R L ที่กำหนดไว้

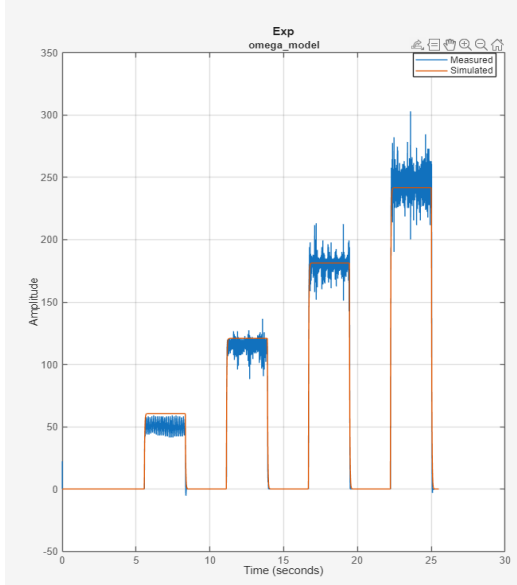
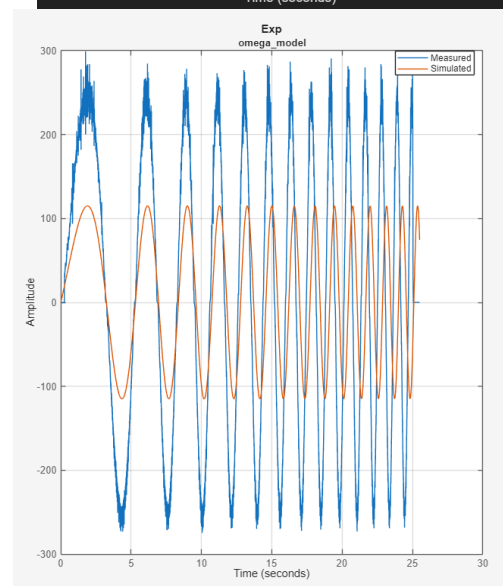
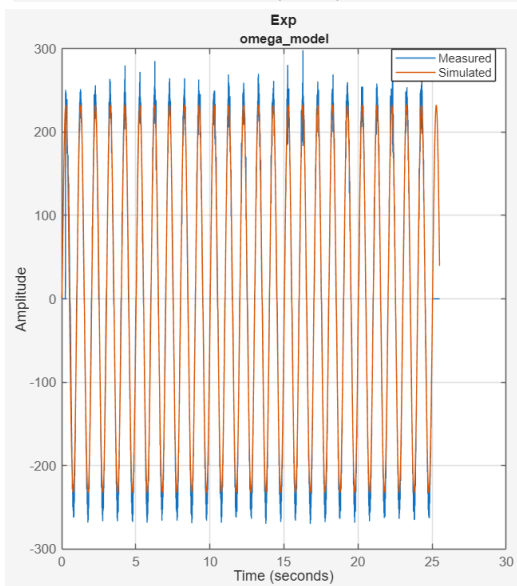
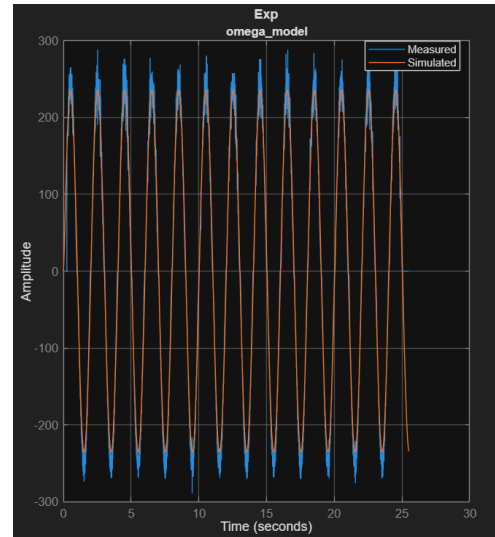
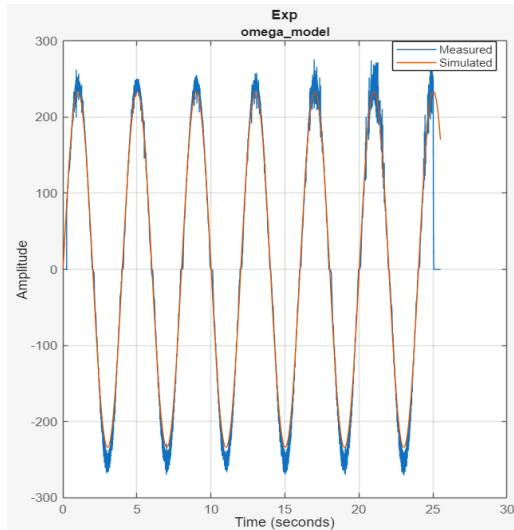


การเลือกตัวแปรในแกน X และแกน Y

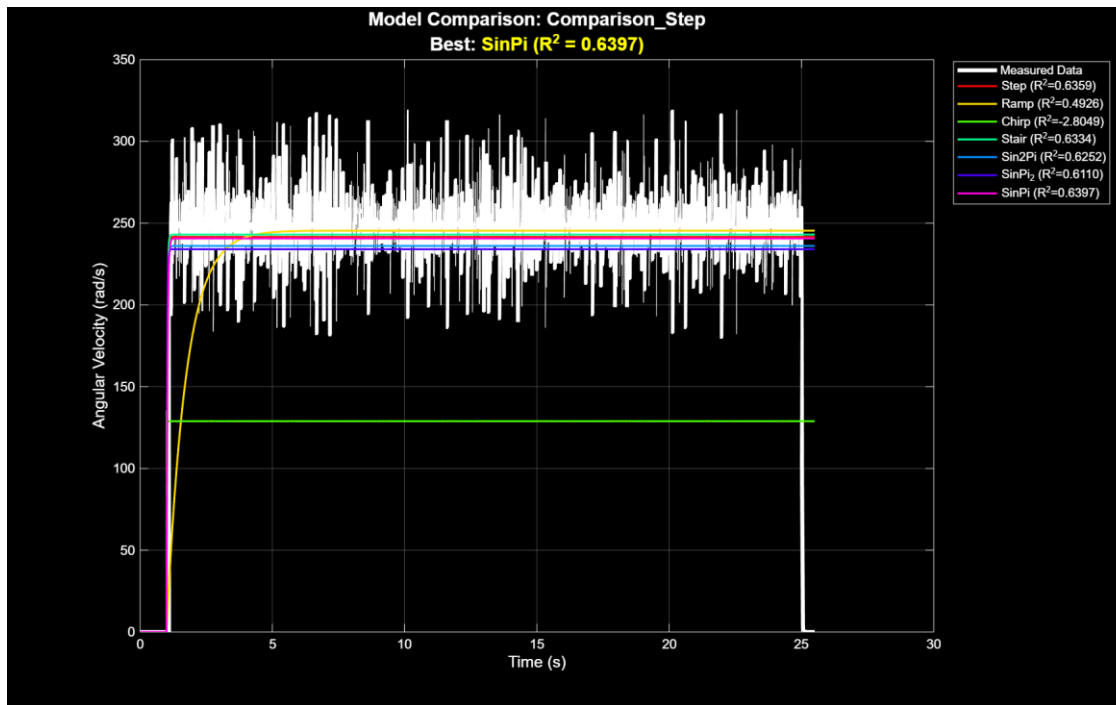


เลือกค่าที่ต้องการ Estimate

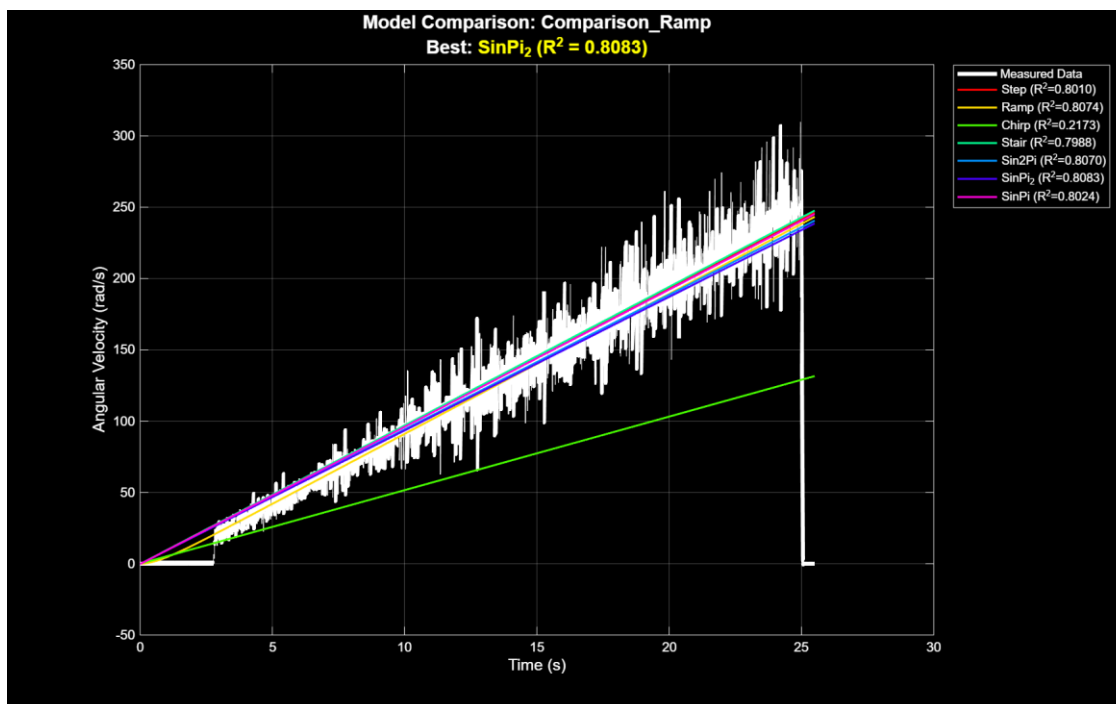




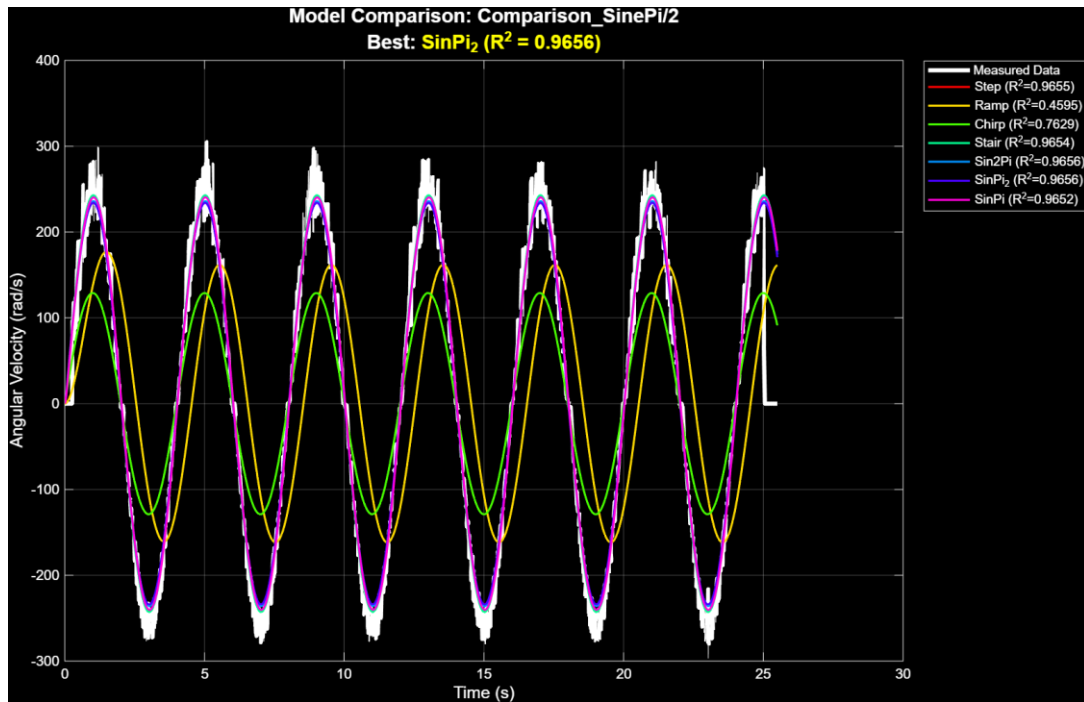
ผลการ Estimate



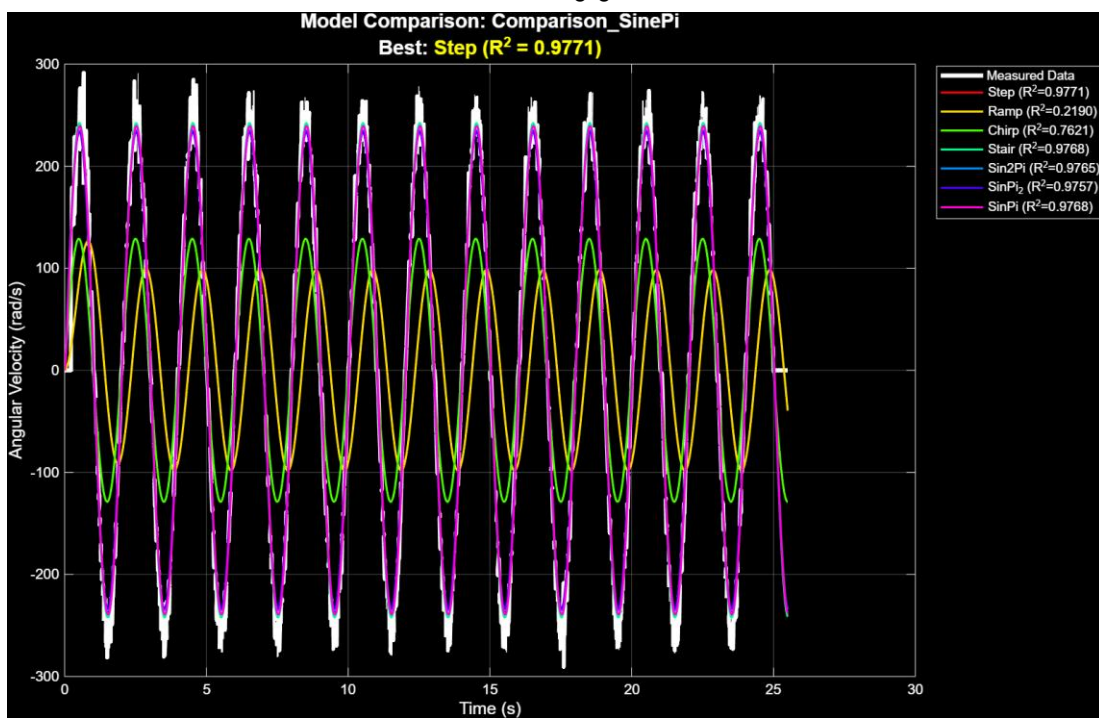
โมเดลมอเตอร์เมื่อแทน Parameter จากสัญญาณต่าง ๆ เปรียบเทียบกับ Step



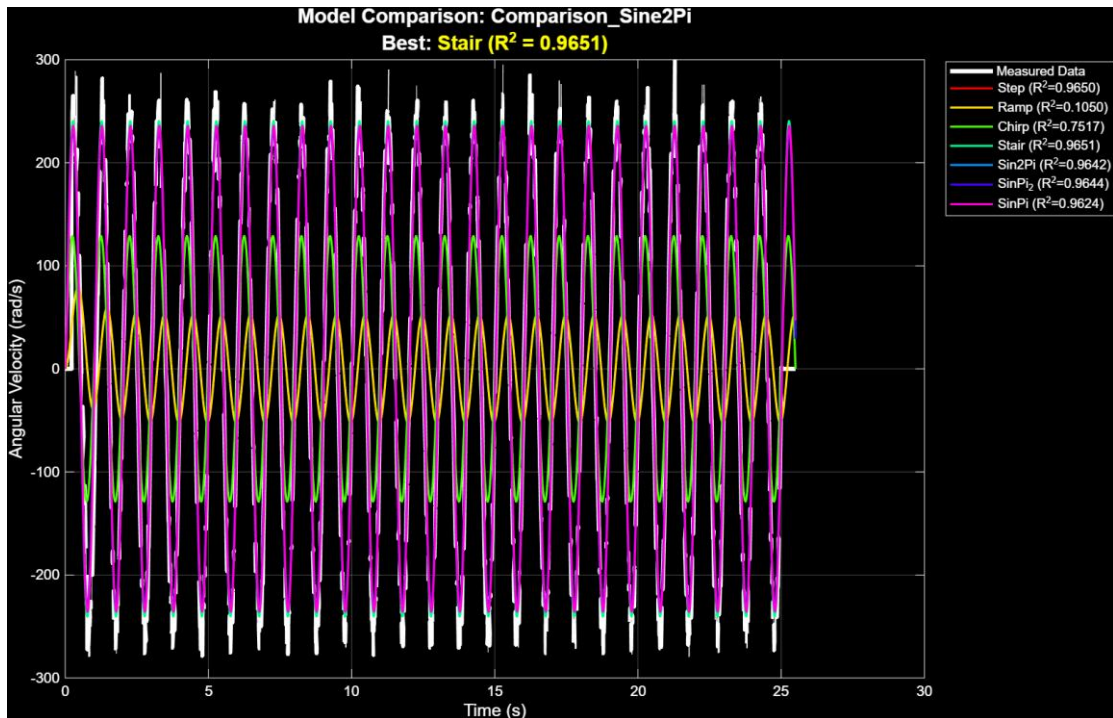
โมเดลมอเตอร์เมื่อแทน Parameter จากสัญญาณต่าง ๆ เปรียบเทียบกับ Ramp



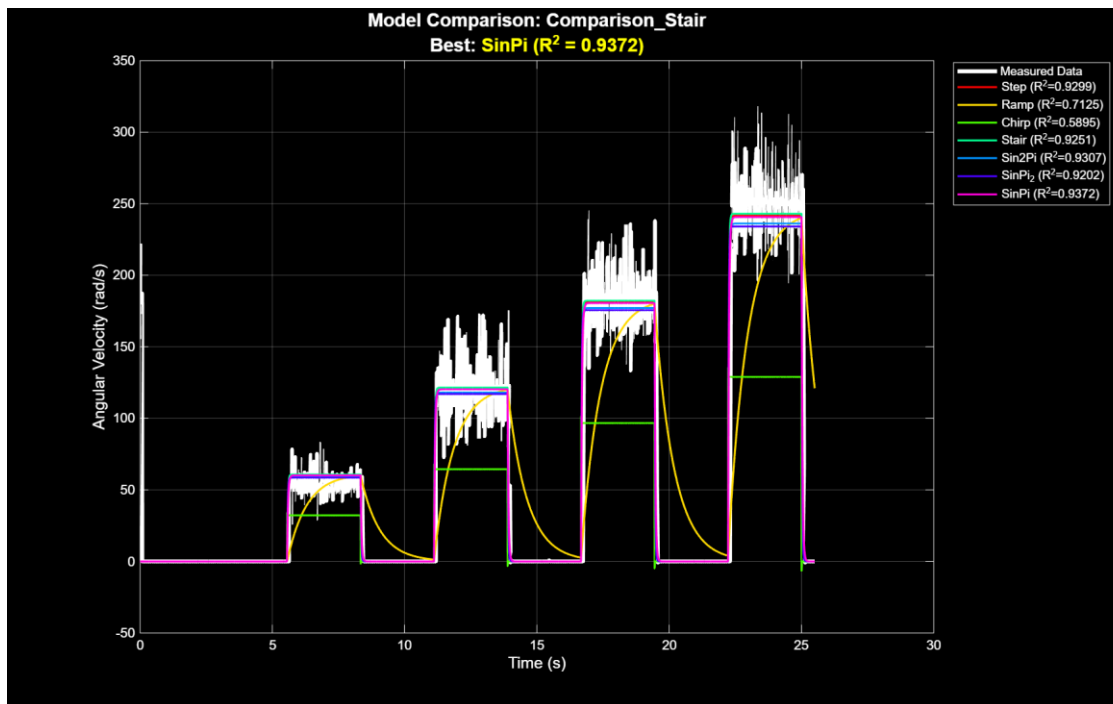
โมเดลมอเตอร์เมื่อแทน Parameter จากสัญญาณต่าง ๆ เปรียบเทียบกับ Sin(pi/2)



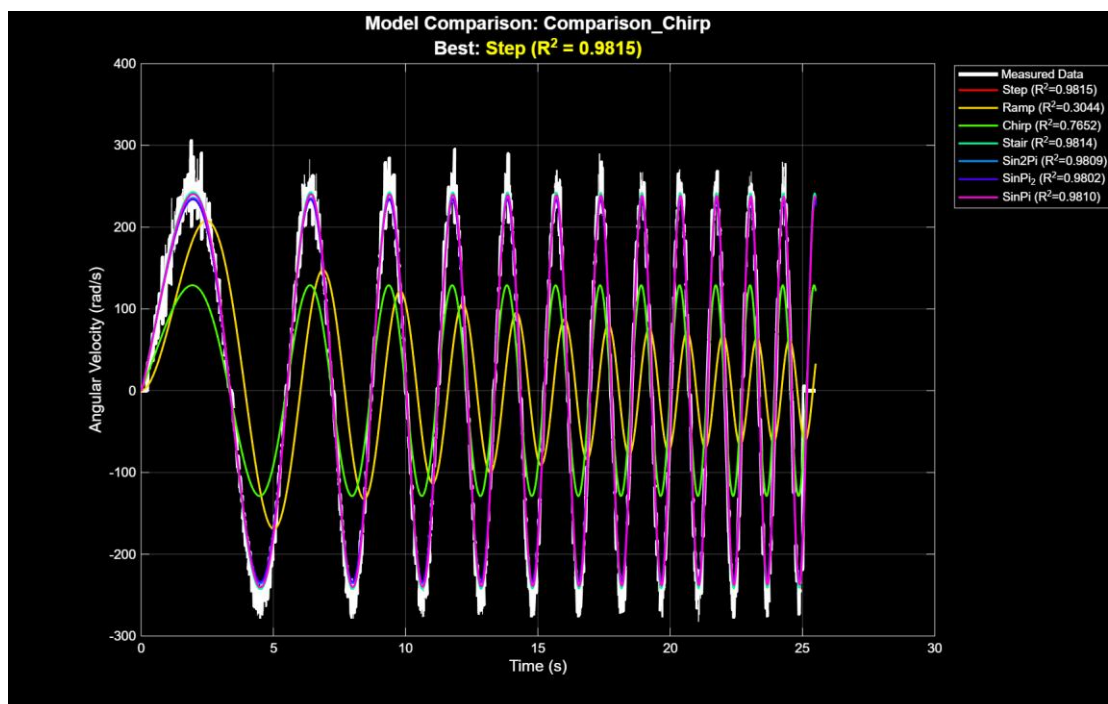
โมเดลมอเตอร์เมื่อแทน Parameter จากสัญญาณต่าง ๆ เปรียบเทียบกับ Sin(pi)



โมเดลมอเตอร์เมื่อแทน Parameter จากสัญญาณต่าง ๆ เปรียบเทียบกับ Sin(2pi)

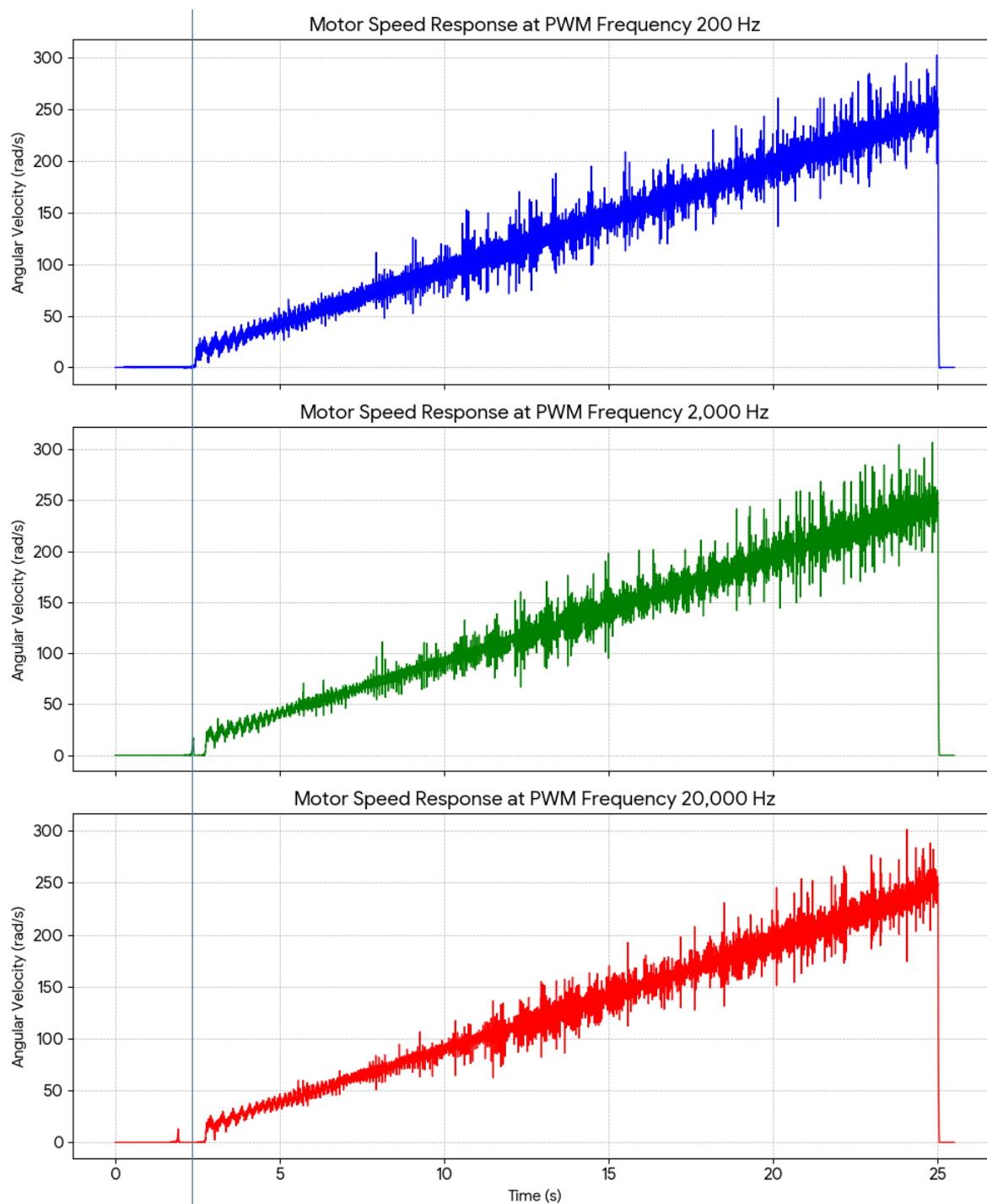


โมเดลมอเตอร์เมื่อแทน Parameter จากสัญญาณต่าง ๆ เปรียบเทียบกับ Stair



โมเดลมอเตอร์เมื่อแทน Parameter จากสัญญาณต่าง ๆ เปรียบเทียบกับ Chirp

Part 3



กราฟความเร็วเชิงมุมเมื่อจ่ายสัญญาณ Ramp ที่ความถี่ต่าง ๆ ให้ Brushed DC Motor