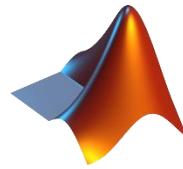


RMXplorer



LAB 2 Actuator

Name

- นางสาววิศรา สิทธินิวิธ 67340500037
- นายกฤตนัย แดงເມືອກ 67340500047
- นายทีปกร แสงภัทราชัย 67340500052

Objectives

- เพื่อศึกษาหลักการทำงานและสมการพื้นฐานของ DC Motor, Stepper Motor และ BLDC Motor
- เพื่อทำการวัดและคำนวณหาค่าพารามิเตอร์สำคัญของมอเตอร์ เช่น Torque Constant, Stall Torque, Loss Step และความเร็วจากสัญญาณ Back EMF
- เพื่อสร้างกราฟ Motor Characteristic Curve และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความเร็วกับแรงบิดและประสิทธิภาพภายใต้การควบคุมด้วย PWM และ Drive Modes ต่าง ๆ
- เพื่อศึกษาเทคนิคการขับเคลื่อน การควบคุมกำลัง และการปรับสภาพสัญญาณ (Signal Conditioning) เช่น การทำงานของ H-Bridge, การเปรียบเทียบโหมดการขับเคลื่อน, การออกแบบ Low-Pass Filter และการวิเคราะห์สัญญาณ FFT
- เพื่อแสดงผลการทดลองจริง การสรุปผล และการวิเคราะห์สาเหตุของความคลาดเคลื่อนจากการนับในอุ่น คติของมอเตอร์แต่ละชนิด

LAB 2.1: DC Motor

การทดลองที่ 1 DC Motor การตอบสนองความเร็วและการกรองสัญญาณ

จุดประสงค์

- เพื่อศึกษาการตอบสนองความเร็ว Speed Response ของ DC Motor ต่อคำสั่งควบคุมแบบ Step Change และวิเคราะห์คุณลักษณะ Dynamic Characteristics ของระบบ
- เพื่อแสดงขั้นตอนและผลลัพธ์ของการทำ Signal Conditioning โดยการออกแบบและใช้งาน Low-Pass Filter สำหรับการวัดความเร็วรอบมอเตอร์

สมมติฐาน

- เมื่อมีการป้อนคำสั่งความเร็ว Step Change มอเตอร์จะเกิด Acceleration และใช้เวลาช่วงหนึ่งในการเข้าสู่ สภาวะความเร็ว Steady-State โดยความเร็วรอบที่วัดได้ในสภาวะ Steady-State จะมีค่า Steady-State Error เมื่อเทียบกับคำสั่งที่กำหนด
- สัญญาณความเร็วที่ผ่านการกรองด้วย Low-Pass Filter ที่มีค่ามถี่ Cut-off เหมาะสม จะมีความราบรื่น Smooth มากกว่าสัญญาณ Unfiltered Signal ทำให้สามารถอ่านค่าความเร็วในสภาวะ Steady-State ได้อย่าง แม่นยำ

ตัวแปร

- ตัวแปรต้น :
 - คำสั่งความเร็ว Setpoint
- ตัวแปรตาม :
 - ความเร็วรอบที่วัดได้ Filtered Speed
 - เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สถานะคงที่ Settling Time

- ค่าความผิดพลาดในสถานะคงที่ Steady-State Error

3. ตัวแปรควบคุม :

- แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์
- ชนิดและรุ่นของมอเตอร์

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หลักการทำงานและสมการพื้นฐานของ DC Motor

DC Motor เป็นอุปกรณ์ที่แปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเป็น พลังงานกล โดยแรงบิดเกิดจากแรง洛伦ซ์ที่กระทำต่อกระแสไฟฟ้าในตัวนำซึ่งอยู่ในสนามแม่เหล็ก ทำให้โรเตอร์หมุน โดยแรงบิดของมอเตอร์แปรผันตรงกับกระแสในขดลวด armature ตามความสัมพันธ์

$$T = k_t I$$

ขณะเดียวกัน การหมุนของโรเตอร์ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (Back EMF) ซึ่งแปรผันตรงกับความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์

$$E_b = k_e \omega$$

Back EMF มีทิศทางต้านกับแหล่งจ่าย ทำให้กระแสและแรงบิดปรับตัวจนเข้าสู่สมดุล โดยในสภาวะคงตัวสามารถเขียนความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าได้เป็น

$$V_s = R_a I + E_b$$

กำลังกลที่มอเตอร์ส่งให้โหลดสามารถเขียนได้เป็น

$$P_{load} = T \omega$$

โดยกำลังที่ส่งให้โหลดจะมีค่าเป็นศูนย์ทั้งในสภาวะ no-load (แรงบิดต่ำมาก) และสภาวะ stall ($\omega = 0$) และจะมีค่าสูงสุดที่ช่วงแรงบิดระดับปานกลางของมอเตอร์

- Stall Torque และการวัด

Stall Torque คือแรงบิดสูงสุดที่ DC Motor สามารถสร้างได้ โดยเกิดขึ้นในสภาวะที่เพลาหยุดนิ่งหรือความเร็วเฉลี่ยเป็นศูนย์ ($\omega = 0$) ซึ่งบนกราฟ Torque-Speed จะปรากฏที่ปลายแกนแรงบิดและใช้เป็นค่าขอบบนของช่วงการทำงานด้านแรงบิด

จากสมการ Back EMF ($E_b = k_e \omega$) เมื่อ $\omega = 0$ จะได้ $E_b = 0$ ทำให้แรงไฟฟ้าในสภาวะ stall เขียนได้เป็น

$$V_s = R_a I_{stall}$$

ดังนั้น

$$I_{stall} = \frac{V_s}{R_a}$$

เมื่อนำไปแทนในสมการแรงบิด $T = k_t I$ จะได้

$$T_{stall} = k_t I_{stall} = \frac{k_t V_s}{R_a}$$

ส่วนสมการด้านล่างไม่จำเป็นต้องทราบ k_t แต่ต้องวัดแรงและระยะอย่างแม่นยำ

$$T = Fr$$

- PWM และ Duty Cycle ในการควบคุม DC Motor

ในการควบคุม DC Motor ใช้ Pulse Width Modulation (PWM) โดย PWM ควบคุมสัดส่วนเวลาเปิด–ปิดของสัญญาณดิจิทัลที่แรงดันคงที่ V_s เพื่อปรับค่าแรงดันเฉลี่ยที่มอเตอร์รับรู้

Duty Cycle นิยามเป็น

$$D = \frac{T_{on}}{T_{period}} \times 100\%$$

และแรงดันเฉลี่ยที่ป้อนให้มอเตอร์เขียนได้เป็น

$$V_{avg} = DV_s$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง PWM และความเร็วรอบ ในสภาวะคงตัว สมการมอเตอร์เขียนได้เป็น

$$V_{avg} = R_a I + E_b$$

เมื่อแทน $V_{avg} = DV_s$ และ $E_b = k_e \omega$ จะได้

$$DV_s = R_a I + k_e \omega$$

ภายในตัวโหลดคงที่ กระแสจะเปลี่ยนไม่มาก ทำให้ความเร็ว rob แปรผันตาม Duty Cycle โดยประมาณแบบเกือบเส้นตรง

ความสัมพันธ์ระหว่าง PWM กระแสเฉลี่ยของมอเตอร์จะเป็น

$$I = \frac{DV_s - E_b}{R_a}$$

เมื่อ Duty เพิ่ม กระแสเพิ่มในช่วงแรก แต่เมื่อความเร็วสูงขึ้น Back EMF จะเพิ่มและลดแรงดันสูญหักลบ ทำให้กระแสไม่เพิ่มแบบเส้นตรง โดยจะชันขึ้นมากในช่วง Duty สูงหรือใกล้ stagnation stall

กราฟที่ใช้วัดรายหัว:

Current (A) vs Duty Cycle (%)

PWM และประสิทธิภาพของมอเตอร์

ประสิทธิภาพนิยามเป็น

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{T\omega}{V_s I}$$

การเพิ่ม Duty Cycle ส่งผลให้หัว ω และ I เปลี่ยนพร้อมกัน ทำให้ประสิทธิภาพมีค่าสูงสุดที่ Duty ปานกลาง ไม่ใช่ Duty สูงสุด เนื่องจากในช่วง Duty สูง การสูญเสียแบบ $I^2 R_a$ เพิ่มขึ้นเร็วกว่ากำลังกลที่ได้

กราฟที่ใช้วัดรายหัว:

Efficiency (%) vs Duty Cycle (%)

- H-Bridge Topology

H-Bridge เป็นวงจรสวิตช์ 4 ตัวจัดเรียงเป็นรูปตัว *H* ใช้ควบคุมการกลับขั้วแรงดันของมอเตอร์ ทำให้มอเตอร์หมุนได้ทั้งทิศทางเดินหน้าและถอยหลัง รวมถึงสามารถปล่อยอิสระ หรือเบรกโดยการต่อข้ามมอเตอร์เข้าหากันได้ ข้อควรระวังคือห้ามให้สวิตช์ผ่านบันและล่างของต้านเดียวกันนำพร้อมกัน (*shoot-through*) จึงต้องมีการกำหนด *dead-time* และวงจรขับที่เหมาะสม

Sign-Magnitude เป็นโหมดที่แยกการควบคุมทิศทางและขนาดแรงดันออกจากกัน โดยใช้ *direction* ใช้กำหนดทิศทางการหมุน ส่วน *PWM* ใช้กำหนดแรงดันเฉลี่ยที่ป้อนให้มอเตอร์ (*duty 0–100%*) เหมาะกับไดรเวอร์เชิงพาณิชย์ เช่น Cytron MD20A อย่างไรก็ตาม ที่ *duty* ต่ำ แรงบิดและกระแสจะเป็นพัลซ์ ทำให้เกิด *torque ripple* และเสียงรบกวนในบางสภาวะ

Locked Anti-Phase ใช้สัญญาณ *PWM* เพียงเส้นเดียว โดยกำหนด *duty = 50%* เป็นแรงดันเฉลี่ยศูนย์, *duty* มากกว่า 50% หมุนทิศหนึ่ง และน้อยกว่า 50% หมุนอีกทิศหนึ่ง ขั้วแรงดันที่มอเตอร์จึงถูกสลับระหว่าง $+V$ และ $-V$ ตลอดเวลา ข้อดีคือกระแสไฟลต่อเนื่องและแรงบิดเรียบ เหมาะกับงานควบคุมแบบป้อนกลับและการทำงานที่ความเร็วต่ำ แต่แลกกับความซับซ้อนของวงจร

ทั้ง *FFT*, *Bode Plot* และ *Signal Conditioning FFT (Fourier Analysis)* เอาไว้แปลงสัญญาณจากโดเมนเวลาไปเป็นโดเมนความถี่ ทำให้เราเห็นเลยว่ามีฮาร์มอนิกจาก *PWM*, *ripple* ของกระแส หรือ *noise* ความถี่สูงผลลัพธ์ตรงไหนบ้าง. พอยุ่งกับความถี่กวน เราจะไม่เดาสุ่มว่า “noise มาจากไหน” แต่เห็นมันชัด ๆ บนสเปกตรัม.

- จากผล *FFT* เราออกแบบวงจร *Signal Conditioning* เช่น *RC low-pass filter* เพื่อกรองคอมโพเนนต์ความถี่สูงออก เลือกความถี่ตัดให้ต่ำกว่าความถี่ *PWM* แต่สูงพอให้ข้อมูลที่สนใจ (ค่าเฉลี่ยกระแส/ความเร็ว) ยังผ่านได้. ตรงนี้คือขั้น “จัดการสัญญาณ” ก่อนส่งเข้า *ADC*.
- *Bode Plot* คือกราฟที่บอกว่าฟิลเตอร์ที่เราออกแบบ จะขยาย/ลดทอนสัญญาณแต่ละความถี่เท่าไร (*magnitude*) และเลื่อนเฟสแค่ไหน (*phase*). มันช่วยยืนยันเชิงทฤษฎีว่า *low-pass filter* ของเราตัดฮาร์มอนิกจาก *PWM* ได้พอดีอย่าง และแลกกับการตอบสนองที่ช้าลงเท่าไร

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เตรียมชุดทดลอง DC Motor และวงจรควบคุมที่สามารถรับคำสั่งความเร็ว *Setpoint* และวัดผลความเร็วรอบได้ โดยมีการติดตั้งวงจร Low-Pass Filter สำหรับสัญญาณความเร็ว

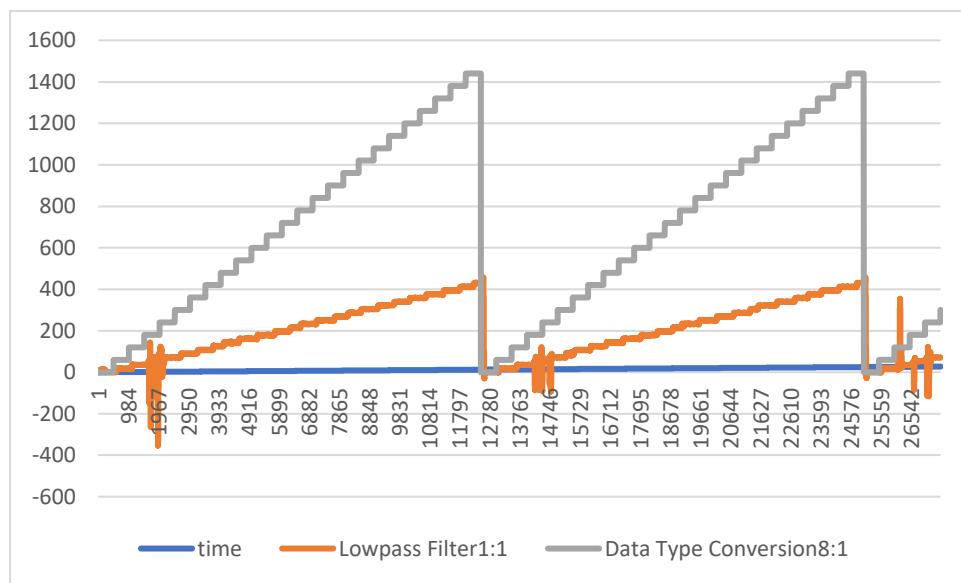
2. กำหนดค่าค่าสั่งความเร็วเริ่มต้นที่ศูนย์ 0 Unit และบันทึกข้อมูลจนกว่ามอเตอร์จะหยุดนิ่ง
3. ป้อนค่าสั่งความเร็วแบบ Step Change โดยเพิ่มค่าค่าสั่งความเร็วอย่างเป็นลำดับ จนถึง 1200 Unit และบันทึกข้อมูลการตอบสนองความเร็วของมอเตอร์ Lowpass Filter 1:1 เพื่อบรรยากาศเวลา
4. ทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 2-3 ครั้ง เพื่อยืนยันผลการตอบสนองต่อค่าสั่งความเร็วในแต่ละระดับ
5. นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หา Settling Time, Steady-State Value และ Steady-State Error

ผลการทดลอง

การทดลองนี้เป็นการวัดการตอบสนองความเร็วของ DC Motor ต่อค่าสั่งแบบ Step Change โดยมีการใช้สัญญาณความเร็วที่ผ่าน Low-Pass Filter Lowpass Filter 1:1 เพื่อให้สัญญาณมีความราบรื่น Smooth

จากราฟการตอบสนองความเร็ว Step Response พบว่า เมื่อค่าสั่งความเร็ว Data Type Conversion 8:1 ถูกเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด ความเร็วที่วัดได้จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนเข้าสู่สภาวะความเร็ว Steady-State

กราฟที่ 1: สรุปผลการตอบสนองความเร็วของ DC Motor



ข้อมูลแสดงให้เห็นถึงการ Acceleration ที่ราบรื่น Filtered และการเกิดค่า Steady-State Error ซึ่งค่าความเร็วที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าค่าสั่งความเร็วที่ตั้งไว้ตามสัดส่วน

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองการตอบสนองความเร็วของ DC Motor ต่อคำสั่งแบบ Step Change พบร่วงการทำงานของระบบเป็นไปตามสมมติฐานหลัก โดยความเร็วตอบที่วัดได้มีการเร่งตัวอย่างราบรื่นและเข้าสู่สภาวะความเร็ว Steady-State เมื่อเวลาผ่านไป

1. มอเตอร์แสดงลักษณะการตอบสนองแบบ First-Order System หรือ Second-Order Damped System โดยไม่มี Overshoot ที่ชัดเจน ซึ่งบ่งชี้ถึงเสถียรภาพในการควบคุม
2. สัญญาณความเร็วที่วัดได้ Lowpass Filter 1:1 มีความราบรื่น Smooth ซึ่งยืนยันได้ว่า Low-Pass Filter ที่ใช้นั้นสามารถลด Noise หรือ Ripple ในสัญญาณวัดความเร็วได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อภิรายผล

1. ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเร็วตอบ Steady-State Value ที่วัดได้ ต่ำกว่า คำสั่งความเร็ว Setpoint อย่างมีนัยสำคัญ ความผิดพลาดนี้บ่งชี้ว่าระบบควบคุมความเร็วที่ใช้นั้นอาจเป็น Open-Loop Control หรือ เป็น Closed-Loop System ที่มี Gain ต่ำ หรือใช้เพียง Proportional Controller ซึ่งตามธรรมชาติจะทำให้เกิด Steady-State Error เมื่อมี Load กระทำ
2. การใช้สัญญาณความเร็วที่ผ่าน Low-Pass Filter ในการบันทึกผล ทำให้การวิเคราะห์ Acceleration มีความชัดเจนและ Smooth ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทำ Signal Conditioning อย่างไรก็ตาม หากความถี่ Cut-off ของ Filter ต่ำเกินไป อาจส่งผลให้การตอบสนองของความเร็วที่วัดได้ ช้ากว่า ความเร็วที่เกิดขึ้นจริง Lagging ซึ่งเป็น Trade-off ที่ต้องพิจารณาในการออกแบบ
3. เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่ Steady-State Settling Time ที่สามารถสังเกตได้จากผลการทดลอง สามารถนำไปใช้ในการหา Time Constant ของมอเตอร์ได้ ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญที่บ่งบอกถึงความเร็วในการตอบสนองของมอเตอร์ต่อสัญญาณควบคุม

ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและกลศาสตร์ของมอเตอร์ให้ครบถ้วน เช่น Torque Constant , Armature Resistance , Armature Inductance เพื่อนำไปสร้าง Mathematical Model สำหรับการออกแบบ Closed-Loop Controller ที่แม่นยำยิ่งขึ้น
2. เพื่อลดค่า Steady-State Error ควรพิจารณาออกแบบ Closed-Loop Speed Control System โดยใช้ Controller ที่มีองค์ประกอบแบบ Integral Control
3. ควรวิเคราะห์ผลกระทบของ Low-Pass Filter ต่อ Stability ของ Closed-Loop Control System ผ่านการใช้ โดยการวิเคราะห์ Bode Plot หรือ FFT เพื่อให้แน่ใจว่าการกรองสัญญาณไม่ได้ทำให้เกิด Phase Lag ที่ส่งผลเสียต่อการทำงานของระบบ

อ้างอิง

<https://www.electicaleeasy.com/2014/03/working-principle-of-dc-motor.html>

<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/understanding-dc-motor-torque-speed-characteristics/>

ภาพพนวก

```

dt = Moor{2}.Values.Time(2) - Moor{2}.Values.Time(1);
Fs = 1/dt;
L = length(Moor{2}.Values.Time); % Number of samples
x = squeeze(Moor{2}.Values.Data);

Y = fft(x); % Compute FFT
P2 = abs(Y/L); % Two-sided amplitude spectrum
P1 = P2(1:L/2+1); % Single-sided spectrum
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
f = Fs*(0:(L/2))/L; % Frequency axis (Hz)

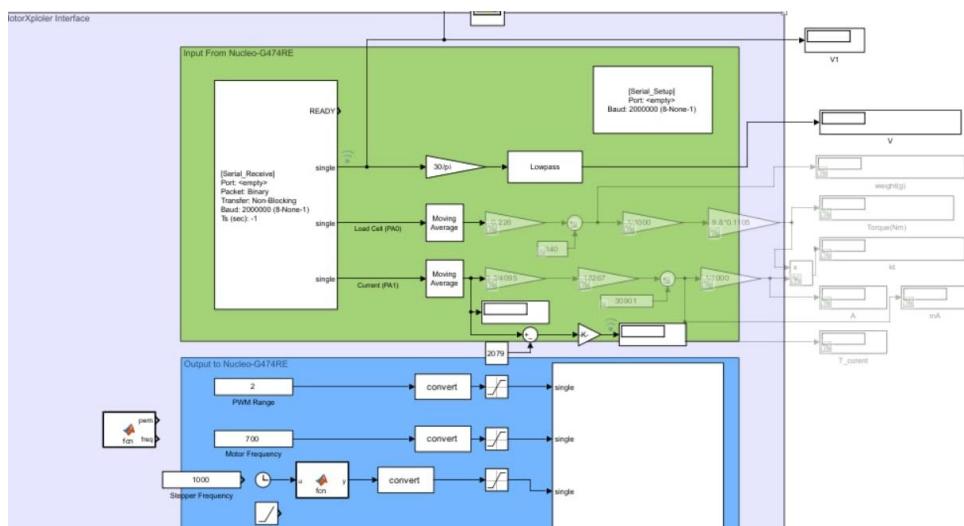
% --- 2. ការ Plot ក្រឡ (បែនពីនិង Excel Style) ---
figure('Color', 'w'); % 1. បងគំពីនលុងហ្មតាគចាប់បើនឹងសិខាត (White)

plot(f, P1, 'b', 'LineWidth', 1.2); % 2. ដំណឹតសេនស្នើសោះ (b) ដើម្បីគុណភាពនានិតុយ
title('Single-Sided Amplitude Spectrum of x(t)');
xlabel('Frequency (Hz)');
ylabel('|P1(f)|');

% 3. បែនពីនិងការកែវគ្រប់
set(gca, ...
    'Color', 'w', ... % ពីនលុងភាពនានិតុយ
    'XColor', 'k', ... % សេនការ X តិចា
    'YColor', 'k', ... % សេនការ Y តិចា
    'FontSize', 12, ... % ខ្សោយតុវក្សរ
    'FontName', 'Arial'); % ឃុំជាមាត្រក្នុង

grid on; % បើកសេនតារាងអាចក្លិះ
grid minor; % បើកសេនតារាងយូរ

```



การทดลองที่ 2 การวิเคราะห์ผลกระทบของความถี่ PWM และ Duty Cycle ต่อการทำงานของ DC Motor จุดประสงค์

- เพื่อศึกษาและแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Duty Cycle ของสัญญาณ PWM กับ ความเร็วรอบ Speed และ กระแสไฟฟ้า Current ที่มอเตอร์ใช้
- เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลง ความถี่ PWM Frequency ที่มีต่อ Current Ripple ของกระแสไฟฟ้ามอเตอร์ และ ประสิทธิภาพ Efficiency ในการทำงาน
- เพื่อเปรียบเทียบและอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง PWM Parameter และคุณสมบัติทางไฟฟ้า Mechanical Characteristics ของ DC Motor

สมมติฐาน

- เมื่อ ความถี่ PWM Frequency คงที่ การเพิ่มค่า Duty Cycle จะส่งผลให้ ความเร็วรอบ Speed และ กระแสไฟฟ้า Current เคลื่อนของมอเตอร์เพิ่มขึ้นตามความสัมพันธ์เชิงเส้น Linear Relationship
- เมื่อ Duty Cycle คงที่ การเพิ่มความถี่ PWM Frequency จะส่งผลให้ค่า Current Ripple ของกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้ลดลง และส่งผลให้ ประสิทธิภาพ Efficiency ของมอเตอร์สูงขึ้น เนื่องจากลด Switching Loss และการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อน

ตัวแปร

- ตัวแปรต้น :
 - Duty Cycle
 - ความถี่ PWM Frequency
- ตัวแปรตาม :
 - ความเร็วรอบของมอเตอร์ Speed
 - กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย Average Current
 - Current Ripple

- ประสิทธิภาพ Efficiency

3. ตัวแปรควบคุม :

- แรงดันไฟฟ้าหลักที่จ่าย Main Voltage Supply
- ภาระทางกล Load Torque
- มอเตอร์ที่ใช้ทดลอง

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Motor Characteristic Curve (กราฟคุณลักษณะ)

กราฟคุณลักษณะระหว่าง ความเร็ว และ แรงบิด

- จากการรวมสมการแรงดันไฟฟ้าและสมการแรงบิด จะได้สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว และแรงบิด (Speed-Torque Characteristic):
 - กราฟนี้เป็นเส้นตรง (Linear Relationship) โดยมีจุดสำคัญคือ:
 - No-Load Speed : คือความเร็วสูงสุดเมื่อแรงบิดเป็นศูนย์
 - Stall Torque : คือแรงบิดสูงสุดเมื่อความเร็วเป็นศูนย์
- ความสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้า (PWM): เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ หรือ Duty Cycle ของ PWM ลดลง จะส่งผลให้เส้นกราฟ Speed-Torque เลื่อนลงมาขนาดนัก

การควบคุมความเร็วด้วย PWM (Pulse Width Modulation)

- หลักการของ PWM: PWM เป็นเทคนิคการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย โดยการเปิด-ปิดสัญญาณ แรงดันไฟฟ้าที่ความถี่คงที่ (PWM Frequency) และปรับเปลี่ยนระยะเวลาที่สัญญาณเป็น 'เปิด' หรือ Duty Cycle
- ผลกระทบต่อความเร็วและกระแสไฟฟ้า:
 - Speed: การเพิ่ม Duty Cycle จะเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย ทำให้ความเร็วของมอเตอร์ เพิ่มขึ้น

- Current and Torque: การเพิ่ม Duty Cycle จะเพิ่มกระแสไฟฟ้า ที่ให้ผลเข้ามอเตอร์ ซึ่งจะเพิ่มแรงบิด ให้มากขึ้น
- ความถี่ PWM (PWM Frequency): การใช้ความถี่ที่สูงเพียงพอจะช่วยให้มอเตอร์หมุนได้อย่างราบรื่น เนื่องจากความเร็ว (Inertia) ของมอเตอร์สามารถกรองความผันผวนของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการเปิด-ปิดสัญญาณได้ หากความถี่ต่ำเกินไป มอเตอร์อาจเกิดการสั่นสะเทือน (Vibration)

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. กำหนด ความถี่ PWM Frequency ให้คงที่ที่ค่าหนึ่ง เช่น 10 kHz หรือค่าที่แนะนำจากผู้ผลิต
2. ทำการทดลองโดยการเปลี่ยนค่า Duty Cycle อย่างเป็นลำดับ ตั้งแต่ 0% จนถึง 100% หรือช่วงที่เหมาะสมกับการทดลอง
3. ทำการวัดและบันทึกค่า ความเร็ว robust Speed และ กระแสไฟฟ้า Current เฉลี่ยของมอเตอร์ใน状況 Steady-State ของแต่ละค่า Duty Cycle
4. กำหนดค่า Duty Cycle ให้คงที่ที่ค่ากลาง เช่น 50% และกำหนดภาระ Load ให้คงที่
5. ทำการทดลองโดยการเปลี่ยนค่า ความถี่ PWM Frequency อย่างเป็นลำดับ ตั้งแต่ความถี่ต่ำถึงความถี่สูง ที่สามารถใช้งานได้

ผลการทดลอง

จากการทดลองหาความสัมพันธ์ของ PWM Parameter กับ Speed และ Current โดยใช้ข้อมูลการทำงานของ มอเตอร์ที่ความถี่ต่างกัน

1. ความสัมพันธ์ระหว่าง Duty Cycle และความเร็ว robust

ภาพที่ 2 แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง Duty Cycle และ ความเร็ว robust Speed โดยพบว่า เมื่อเพิ่ม Duty Cycle ความเร็ว robust ของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนคงที่

2. ผลกระทบของความถี่ PWM ต่อกระแสไฟฟ้า Current

จากข้อมูลดิบที่ได้จากการวัด กระแสไฟฟ้า Current ที่มีการเปลี่ยนอย่างรวดเร็ว เมื่อวิเคราะห์ผลของ ความถี่ PWM Frequency พบร่วม:

- ที่ ความถี่ PWM Frequency ต่อ Current Ripple ในกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้มีขนาดใหญ่ Magnitude ชัดเจน
- เมื่อเพิ่ม ความถี่ PWM Frequency ค่า Current Ripple จะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้กระแสไฟฟ้า มีลักษณะเข้าใกล้กระแสไฟฟ้ากระแสตรง DC Current หากซึ่ง

3. ประสิทธิภาพ Efficiency

จากการคำนวณ ประสิทธิภาพ Efficiency พบร้า มอเตอร์มีประสิทธิภาพสูงสุด Maximum Efficiency ที่ Duty Cycle ระดับกลางถึงสูง และการใช้ ความถี่ PWM Frequency ที่สูงขึ้นสามารถเพิ่ม Efficiency โดยรวมได้ เล็กน้อย

สรุปผลการทดลอง

1. การควบคุมความเร็ว: การควบคุมความเร็วของ DC Motor ด้วย PWM เป็นไปตามหลักการเชิงเส้น Linear Principle โดย Duty Cycle เป็นตัวกำหนดแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย Average Voltage ที่จ่ายให้มอเตอร์ ซึ่ง ส่งผลโดยตรงต่อ ความเร็วของ Speed
2. ผลของ Frequency: การเลือกใช้ ความถี่ PWM Frequency ที่สูงมีผลต่อคุณภาพของกระแสไฟฟ้า โดย ช่วยลด Current Ripple ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ก่อให้เกิดความร้อนสะสมและการสูญเสียพลังงานที่เกิดจาก การสลับสปาระ Switching Loss ภายในมอเตอร์
3. การทำงานโดยรวม: ผลการทดลองยืนยันสมมติฐานที่ว่าการปรับ PWM Parameter มีผลโดยตรงต่อ Dynamic และ Steady-State Performance ของ DC Motor

อภิปรายผล

1. การกำเนิด Current Ripple และผลกระทบต่อประสิทธิภาพ

การใช้ PWM ในการขับเคลื่อน DC Motor ทำให้เกิดการจ่ายแรงดันไฟฟ้าในลักษณะของคลื่นสี่เหลี่ยม Square Wave ซึ่งส่งผลให้เกิด Current Ripple ขึ้นในกระแสไฟฟ้าที่แหล่งน้ำด้วย Armature Inductance ของ

มอเตอร์ ขนาดของ Current Ripple ขึ้นอยู่กับ ความถี่ PWM Frequency, Armature Inductance และ Duty Cycle

เมื่อ ความถี่ PWM Frequency สูงขึ้น เวลาที่สวิตช์ Switch เปิดและปิดจะสั่นลง ทำให้กระแสไฟฟ้าไม่มีเวลาเพียงพอที่จะสร้างความแตกต่างของกระแสสูงสุดและต่ำสุด Maximum and Minimum Current ที่มากเกินไป ส่งผลให้ Current Ripple ลดลง การลดลงของ Current Ripple นี้เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง เพราะลดการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อน ที่เพิ่มขึ้นตามค่า RMS Current ที่สูงขึ้นเนื่องจาก Ripple ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ Efficiency ของมอเตอร์ดีขึ้นเมื่อใช้ความถี่สูง

2. Trade-off ระหว่าง Frequency และ Switching Loss

แม้ว่าการเพิ่ม ความถี่ PWM Frequency จะช่วยลด Current Ripple และเพิ่ม Performance ทางกล Mechanical Performance แต่ก็มีข้อจำกัดที่เรียกว่า Switching Loss ซึ่งเกิดจากการเปิดและปิด Power Switch ในวงจร H-Bridge หรือ Inverter ที่ใช้ในการขับมอเตอร์

- Frequency ที่สูงขึ้น หมายถึงจำนวนครั้งที่สวิตช์ทำงานต่อวินาทีเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ Switching Loss เพิ่มขึ้น
- ในการออกแบบระบบควบคุม จะต้องมีการหาจุด Trade-off ที่เหมาะสมระหว่างการลด Current Ripple โดยใช้ความถี่สูง กับการควบคุม Switching Loss และความร้อนที่เกิดขึ้นในวงจรขับ Driver Circuit ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนด Optimum PWM Frequency สำหรับระบบ

3. การควบคุมกำลังขับ Power Control

Duty Cycle ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยความสัมพันธ์เชิงเส้น Linear ที่พับในกราฟยืนยันว่า Duty Cycle เป็นตัวแปรควบคุมหลักสำหรับการกำหนดกำลังขับ Power Output และ ความเร็วรอบ Speed ของมอเตอร์

ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการวัดและวิเคราะห์ Current Ripple เชิงปริมาณ Quantitative Analysis โดยเฉพาะในย่างความถี่ต่ำและสูง เพื่อให้สามารถหา Optimum PWM Frequency ที่ให้ Efficiency สูงสุดก่อน Switching Loss จะมีอิทธิพล
2. แนะนำให้ทำการวัดและคำนวณ Efficiency ของมอเตอร์ที่ Duty Cycle และ Frequency ต่างกันอย่างเป็นระบบ เพื่อสร้างแผนผัง Performance Map ที่แสดงขอบเขตการทำงานที่เหมาะสมที่สุด
3. ควรทำการวิเคราะห์ทางสเปกตรัม Spectral Analysis เช่น FFT Fast Fourier Transform ของสัญญาณ Current และ Speed เพื่อยืนยันว่าองค์ประกอบความถี่หลัก Fundamental Frequency Component ของ Ripple นั้นสอดคล้องกับ ความถี่ PWM Frequency ที่ใช้ในการทดลอง

อ้างอิง

https://www.engineersedge.com/power_transmission/dc_motor_formulas_14169.htm

ภาพพนวก

LAB 2.2: Stepper Motor

การทดลองที่ 1 การเปรียบเทียบ Stepper Motor Drive Modes (Full Step และ Half Step)

จุดประสงค์

- เพื่อศึกษาและอธิบายหลักการขับเคลื่อนของ Stepper Motor ในโหมด Full Step และ Half Step
- เพื่อเปรียบเทียบความละเอียดเชิงมุม Angular Resolution ความเร็วรอบ Speed และความราบรื่น Smoothness ของการเคลื่อนที่ในโหมด Full Step และ Half Step
- เพื่อทดสอบหาจุดจำกัดความเร็วสูงสุด Maximum Speed ของแต่ละโหมด และวิเคราะห์ความสามารถในการทนต่อ Loss Step

สมมติฐาน

- โหมด Half Step จะให้มุกการก้าว Step Angle ที่ละเอียดกว่าโหมด Full Step เป็นสองเท่า ทำให้การเคลื่อนที่มีความราบรื่น Smoothness มากกว่า
- โหมด Full Step จะมีความสามารถในการทำความเร็วสูงสุด Maximum Speed หรือมีแรงบิด Torque ที่จุดทำงานสูงกว่า Half Step เล็กน้อย เนื่องจากใช้กระแสขับเคลื่อน Drive Current ที่เต็มที่กว่า

ตัวแปร

- ตัวแปรต้น:
 - โหมดการขับเคลื่อน Drive Mode
 - ความถี่ในการก้าว Stepping Frequency
- ตัวแปรตาม:
 - มุกการก้าว Step Angle
 - ความเร็วรอบของมอเตอร์ Speed
 - จำนวน Loss Step

3. ตัวแปรควบคุม:

- แรงดันไฟฟ้าที่จ่าย Main Voltage Supply
- ชนิดและรุ่นของ Stepper Motor

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หลักการทำงานและคุณลักษณะ:

- Stepper Motor เป็นมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor) ที่เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าแบบพัลส์ (Pulse) ให้เป็นการเคลื่อนที่เชิงมุมแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Angular Steps) โดยอาศัยหลักการดึงดูดของสนามแม่เหล็กระหว่างสเตเตอร์ (Stator) และโรเตอร์ (Rotor)
- มุกการก้าว (Step Angle): เป็นพารามิเตอร์พื้นฐานที่กำหนดความละเอียดเชิงมุม (Angular Resolution) ของมอเตอร์ ซึ่งถูกกำหนดโดยจำนวนฟัน (Rotor Teeth) และจำนวนเฟส (Number of Phases) ในสมการ $Step\ Angle = \frac{360^\circ}{Phases \times Teeth}$
- แรงบิดยึด (Holding Torque): คือแรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์สามารถต้านทานได้เมื่อมอเตอร์หยุดนิ่งและจ่ายกระแสเต็มที่ ซึ่งเป็นตัวชี้วัดความแข็งแกร่งของมอเตอร์

กลไกการขับเคลื่อน (Excitation Patterns):

- Full Step: นักใช้การจ่ายกระแสเต็มที่ให้ขดลวด 2 ชุดพร้อมกัน (2-Phase-ON Excitation) ทำให้แรงบิดที่เกิดขึ้นสูงและมีความสม่ำเสมอ (Uniform Torque) แต่มีมุกการก้าวที่หยาบ (Coarse Resolution)
- Half Step: ใช้การสลับการจ่ายกระแสระหว่าง 1 ขดลวด และ 2 ขดลวด (1-2 Phase Excitation) โดยมีหลักการคือการสร้างตำแหน่งสมดุล (Equilibrium Position) ระหว่างตำแหน่ง Full Step ทำให้มุกการก้าวลดลงครึ่งหนึ่ง (Resolution เพิ่มขึ้น 2 เท่า)

ข้อจำกัดด้านพลวัต (Dynamic Limitations):

- ในโหมด Half Step แรงบิดยึด (Holding Torque) ในจังหวะ 1-Phase Excitation นักจะต่ำกว่าจังหวะ 2-Phase Excitation ทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของแรงบิด (Non-uniform Torque) งานวิจัยของ

Hughes and Miller (1988) ระบุว่าความไม่สม่ำเสมอของแรงบิดนี้เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ Half Step มีความสามารถในการทนต่อความถี่การก้าวสูง (High Stepping Frequency) และความเสี่ยงในการเกิด Loss Step มากกว่า Full Step เล็กน้อย

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ติดตั้ง Stepper Motor เข้ากับวงจรขับเคลื่อน Driver Circuit และชุดทดสอบ Test Setup
2. กำหนดค่าสั่ง Stepping Frequency ให้มอเตอร์เริ่มหมุนในโหมด Full Step และบันทึกข้อมูลการทำงาน Speed หรือ Position
3. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 โดยเปลี่ยนเป็นโหมด Half Step ภายใต้ Stepping Frequency และภาระ Load เดียวกัน
4. ทำการทดสอบหาขีดจำกัดความเร็วสูงสุด Maximum Speed ของแต่ละโหมด โดยการเพิ่ม Stepping Frequency อย่างรวดเร็ว และสังเกตการเกิด Loss Step

ผลการทดลอง

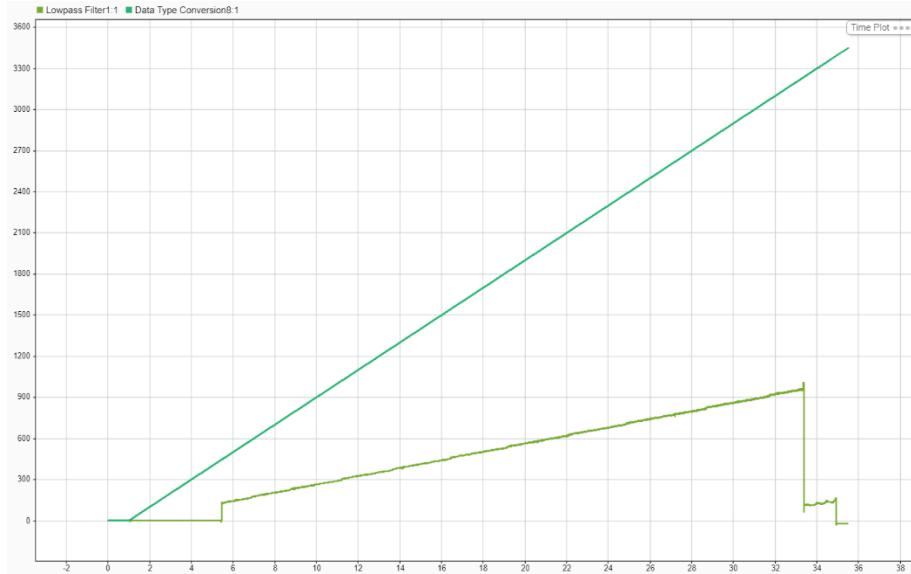
ผลการทดลองแสดงการเปรียบเทียบคุณลักษณะของ Stepper Motor ระหว่างโหมด Full Step และ Half Step

Drive Mode	มุมการก้าว Step Angle	Angular Resolution	Smoothness
Full Step	1.8 Degree/Step (ค่ามาตรฐาน)	ต่ำกว่า	หยาบ Rough
Half Step	0.9 Degree/Step (ครึ่งหนึ่งของ Full Step)	สูงกว่า 2 เท่า	ปานกลางถึงดี

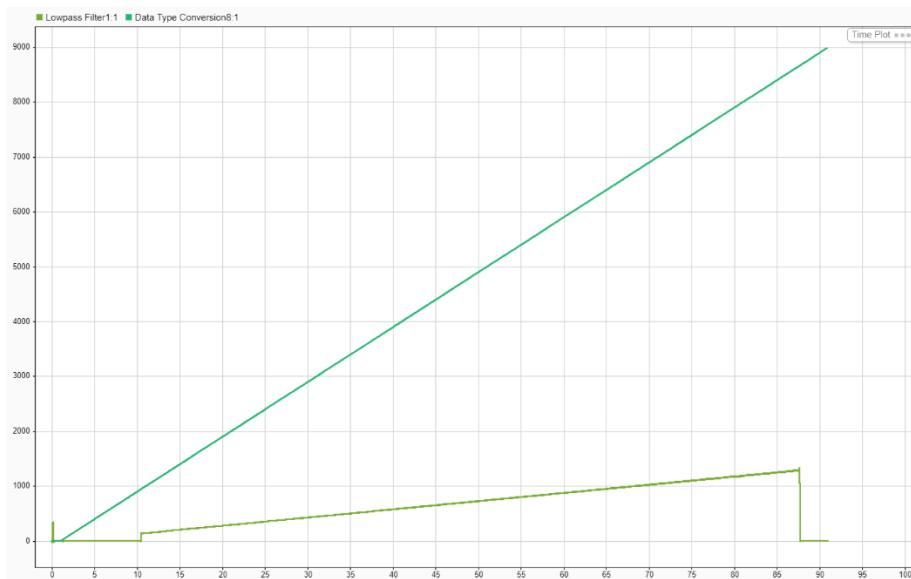
โหมด Half Step ให้ Step Angle ละเอียดกว่า เพราะมีการสลับการจ่ายกระแส Excitation ระหว่าง 1 ขั้นตอน และ 2 ขั้นตอน ทำให้เกิดตำแหน่งระหว่างกลาง Intermediate Position

กราฟเปรียบเทียบความผันผวนของความเร็ว rotor (Speed Fluctuation) ในโหมด Full Step และ Half Step

กราฟที่ 2: แสดงโหมด Full Step มีความผันผวน Speed Fluctuation หรือ Ripple ของความเร็วที่สูงกว่า



กราฟที่ 3: แสดงโหมด Half Step มีความผันผวน Speed Fluctuation ลดลงอย่างมาก และมีความราบรื่น Smoothness สูงกว่า Full Step



สรุปผลการทดลอง

กราฟเปรียบเทียบสัญญาณความเร็ว Speed Signal ที่ได้ในสภาวะ Steady-State ของทั้งสองโหมด แสดงถึงความแตกต่างของคุณภาพการเคลื่อนที่ Motion Quality ดังนี้:

- โหมด Full Step (เส้นที่มีความผันผวนสูง): สัญญาณความเร็วแสดง Ripple หรือความผันผวน Fluctuation ที่มีขนาดใหญ่และมีความถี่ต่ำ นี่คือลักษณะของการเคลื่อนที่ที่ไม่มีความราบรื่น Low Smoothness ความผันผวนนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงมุมการก้าว Step Angle ที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งสร้างแรงบิดกระชากร Torque Jerk ให้กับ Rotor ในแต่ละก้าว
- โหมด Half Step (เส้นที่มีความผันผวนต่ำ): สัญญาณความเร็วมีความผันผวน Fluctuation ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับ Full Step เส้นกราฟมีความราบรื่น Smoothness สูงกว่ามาก การลดลงของ Fluctuation เป็นผลโดยตรงจาก Step Angle ที่ถูกแบ่งเป็นครึ่งหนึ่ง ทำให้การเคลื่อนที่เข้าใกล้ Continuous Motion มากขึ้นและลดการสั่น Vibration

ผลการทดสอบ Maximum Speed Capability

จากการทดสอบหาขีดจำกัดความเร็ว Maximum Speed พบร่วมกับ Full Step สามารถทนต่อ Stepping Frequency ที่สูงกว่า Half Step ได้เล็กน้อยก่อนที่จะเกิด Loss Step เนื่องจากแรงบิดยึด Holding Torque ใน Full Step มีความสม่ำเสมอ Uniform มากกว่า

อภิปรายผล

1. กลไกการสร้าง Step Angle และแรงบิด Torque

ความแตกต่างของคุณภาพการเคลื่อนที่มาจากการความแตกต่างของ Torque และ Step Angle

- Full Step: ใช้ 2-Phase Excitation ตลอดเวลา ทำให้ Rotor ถูกดึงไปยังตำแหน่งที่ให้ Torque สูงสุดอย่างรวดเร็ว แม้จะมีแรงบิดสูง แต่การเปลี่ยนตำแหน่งที่ขยายทำให้เกิด Vibration
- Half Step: ใช้การสลับระหว่าง 1-Phase และ 2-Phase Excitation ทำให้ Rotor ถูกนำไปสู่ตำแหน่งระหว่างกลาง Intermediate Position ซึ่งเป็นการเพิ่ม Resolution อย่างไรก็ตาม แรงบิดยึด Holding Torque ในจังหวะ 1-Phase Excitation มักจะต่ำกว่าจังหวะ 2-Phase Excitation เล็กน้อย ทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอ Non-uniformity ของแรงบิดตามธรรมชาติ

2. Smoothness และ Dynamic Stability

การลดลงของ Speed Fluctuation ใน Half Step ทำให้มอเตอร์เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ต้องการความเสียบและ Smoothness

อย่างไรก็ตาม ความไม่สม่ำเสมอของแรงบิด Non-uniform Torque ใน Half Step เป็นข้อจำกัดเชิงพลวัต Dynamic Limitation ที่ความเร็วสูง High Speed เมื่อ Stepping Frequency เพิ่มขึ้น มอเตอร์ต้องการ Torque สำรองเพื่อเอาชนะ Rotor Inertia และแรงเสียดทาน Friction ให้ทันเวลา การที่ Half Step มีช่วง Low Torque ทำให้มอเตอร์มีความอ่อนไหวต่อการเกิด Loss Step ได้ง่ายกว่า Full Step ในย่านความถี่สูง

ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการวัด Torque-Speed Curve ของ Full Step และ Half Step เพื่อสร้างข้อมูลเชิงปริมาณ Quantitative Data ที่แสดงขีดจำกัดของแรงบิด Torque ในแต่ละโหมด
2. แนะนำให้ใช้ Half Step ในการใช้งานที่ต้องการความราบรื่น Smoothness ในช่วงความเร็วต่ำถึงปานกลาง และสำรอง Full Step ไว้สำหรับการเคลื่อนที่ที่ความเร็วสูง High Speed ที่ไม่นิ่น Smoothness มากนัก

อ้างอิง

<https://www.orientalmotor.com/stepper-motors/technology/stepper-motor-basics.html>

https://www.orientalmotor.com/products/pdfs/SteppingMotors/SectionBIntro_B2-B42.pdf

ภาพผนวก

การทดลองที่ 2 การวิเคราะห์ผลกระทบของ Microstep Resolution ต่อ Stepper Motor

จุดประสงค์

- เพื่อศึกษาและอธิบายหลักการทำงานของ Microstep Driving และกลไกการสร้าง Microstep ที่ความละเอียดต่างกัน ($1/4, 1/8, 1/16, 1/32$)
- เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบของ Microstep Resolution ที่มีต่อความละเอียดเชิงมุม Angular Resolution และความราบรื่น Smoothness ในการเคลื่อนที่ของมอเตอร์
- เพื่อวิเคราะห์ Trade-off ระหว่างความละเอียด Resolution และคุณสมบัติทางพลวัต Dynamic Properties (เช่น Torque และ Speed) ในโหมด Microstep Driving

สมมติฐาน

- เมื่อเพิ่มความละเอียดของ Microstep Driving จาก $1/4$ ไปเป็น $1/32$ มอเตอร์จะมีมุกการก้าว Step Angle ที่ละเอียดขึ้น ซึ่งส่งผลให้การเคลื่อนที่ Motion มีความราบรื่น Smoothness สูงสุดและการสั่น Vibration ลดลงอย่างต่อเนื่อง
- การใช้ Microstep Driving ที่ความละเอียดสูง อาจส่งผลให้แรงบิด Torque ที่เกิดขึ้นจริงในแต่ละ Microstep มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ Full Step หรือ Half Step

ตัวแปร

- ตัวแปรต้น:
 - ความละเอียด Microstep Resolution
 - ความถี่ในการก้าว Stepping Frequency
- ตัวแปรตาม:
 - ความราบรื่นของการเคลื่อนที่ Smoothness

- หมุนการก้าว Step Angle
- ความเร็วตอบของมอเตอร์ Speed

3. ตัวแปรควบคุม:

- คำสั่งตำแหน่ง Position Command
- ชนิดและรุ่นของ Stepper Motor

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หลักการ Microstep Driving (Sinusoidal Current Control):

- Microstep ไม่ได้ใช้การจ่ายกระแสเต็มที่แบบเปิด-ปิด แต่ใช้การควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ให้ในขดลวดทั้งสองให้เป็นไปตามรูปแบบ คลื่นไอน์ (Sinusoidal Waveform)
- กระแสไฟฟ้าในขดลวด A และ B ที่ตำแหน่งมุม θ ถูกควบคุมตามสมการ $I_A = I_{max} \cos \theta, I_B = I_{max} \sin \theta$ เพื่อให้แรงบิดรวม (Resultant Torque) คงที่ตลอดเวลา ส่งผลให้โรเตอร์ (Rotor) เคลื่อนที่ไปสู่ตำแหน่งระหว่างกลาง (Intermediate Positions) ด้วยความละเอียดสูงมาก (เช่น 1/32 ของ Step Angle ปกติ)

การลด Resonance และ Vibration:

- งานวิจัยของ VanZuidam and A. W. C. de Vries (2012) ยืนยันว่า Microstep Driving เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดความผันผวนของความเร็ว (Speed Fluctuation) และลดปัญหาการสั่นพ้อง (Rotor Resonance) ที่เกิดขึ้นใน Stepper Motor ทั่วไป การเพิ่ม Microstep Resolution อย่างต่อเนื่อง จะทำให้การเคลื่อนที่เข้าใกล้การหมุนแบบต่อเนื่อง (Continuous Rotation) มาถูกต้องมากที่สุด

ข้อจำกัดและความคลาดเคลื่อน (Torque Loss and Accuracy Error):

- งานวิจัยของ K. D. Stutz (1998) ชี้ให้เห็นว่า ที่ Microstep Resolution สูงมาก (เช่น 1/16 หรือ 1/32) ความคลาดเคลื่อนในการควบคุมกระแสไฟฟ้า (Current Control Errors) และผลกระทบจากแรงเสียดทาน (Friction) ที่เหลืออยู่ จะทำให้แรงบิดยึด (Holding Torque) ใน Microstep มีค่าน้อยกว่าแรงบิด

ตามทฤษฎี ส่งผลให้ความแม่นยำเชิงตำแหน่ง (Positional Accuracy) ลดลง และมอเตอร์เสียงต่อการเกิด Loss Step ได้ง่ายในสภาพการทำงานที่มีภาระ (Loaded Conditions)

ขั้นตอนการดำเนินงาน

- ติดตั้ง Stepper Motor เข้ากับวงจรขับเคลื่อน Driver Circuit ที่รองรับโหมด Microstep Driving
- กำหนดคำสั่งตำแหน่ง Position Command และ Stepping Frequency ให้คงที่สำหรับการทดสอบทุกความละเอียด
- ทำการทดลองโดยตั้งค่า Microstep Resolution เป็น 1/4, 1/8, 1/16 และ 1/32 ตามลำดับ
- บันทึกข้อมูลการตอบสนองความเร็ว Speed ของมอเตอร์ในสภาพ Steady-State ของแต่ละ Resolution
- นำข้อมูลความเร็ว Speed Data มาวิเคราะห์ความผันผวน Fluctuation เพื่อเปรียบเทียบความราบรื่น Smoothness ระหว่าง Resolution ต่างๆ

ผลการทดลอง

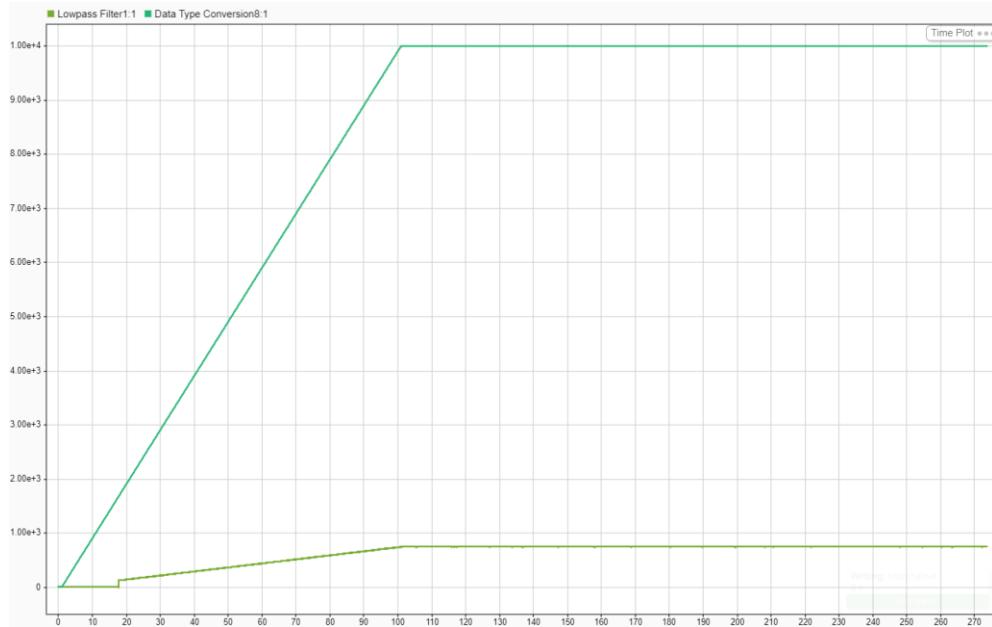
ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Microstep Resolution และคุณภาพการเคลื่อนที่ Motion Quality โดยมีเป้าหมายคือการเพิ่มความละเอียด Resolution และความราบรื่น Smoothness

Microstep Resolution	Step Angle (เทียบกับ Full Step)	Step Angle (1.8°)	Smoothness
1/4	1/4X	0.45 Degree	ปานกลาง
1/8	1/8X	0.225 Degree	ดี
1/16	1/16X	0.1125 Degree	ดีมาก
1/32	1/32X	0.05625 Degree	นุ่มนวลที่สุด

การขับเคลื่อนแบบ Microstep Driving เพิ่ม Angular Resolution อย่างมีนัยสำคัญ โดย Microstep 1/32 ให้มุ่งการก้าว Step Angle ที่เล็กที่สุด ทำให้ Rotor มีตำแหน่งที่ควบคุมได้มากขึ้น

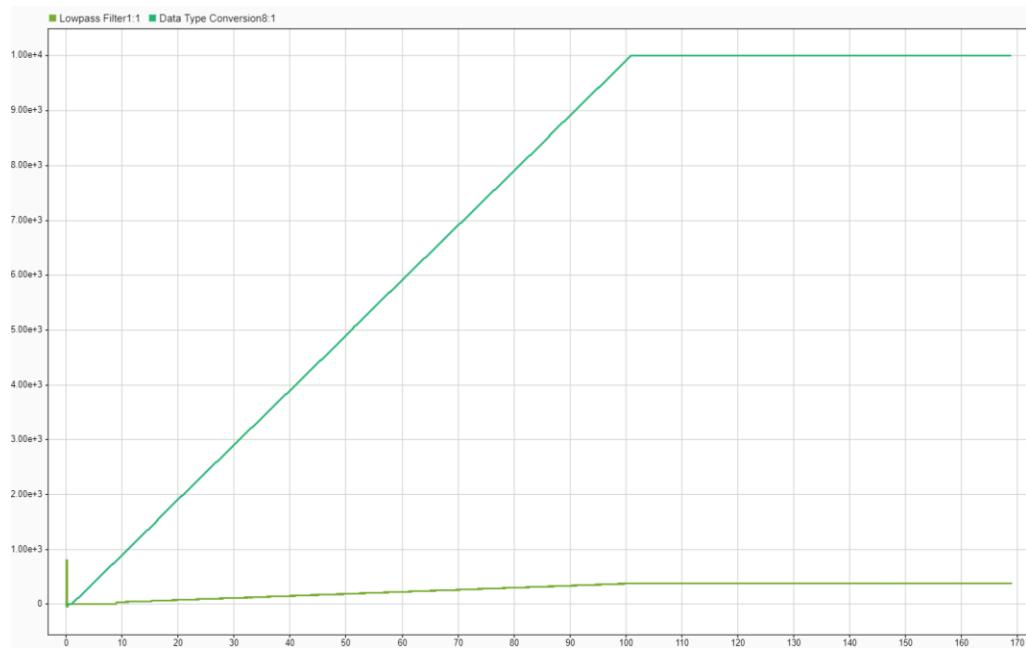
กราฟนี้แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณความเร็ว Speed Signal ที่วัดได้ในสภาวะการทำงานคงที่ Steady-State ของ Stepper Motor ในโหมด Microstep ที่ความละเอียด 1/4, 1/8, 1/16 และ 1/32 ภายใต้เงื่อนไข Stepping Frequency และภาระ Load ที่คงที่

กราฟที่ 4: แสดง Microstep 1/4

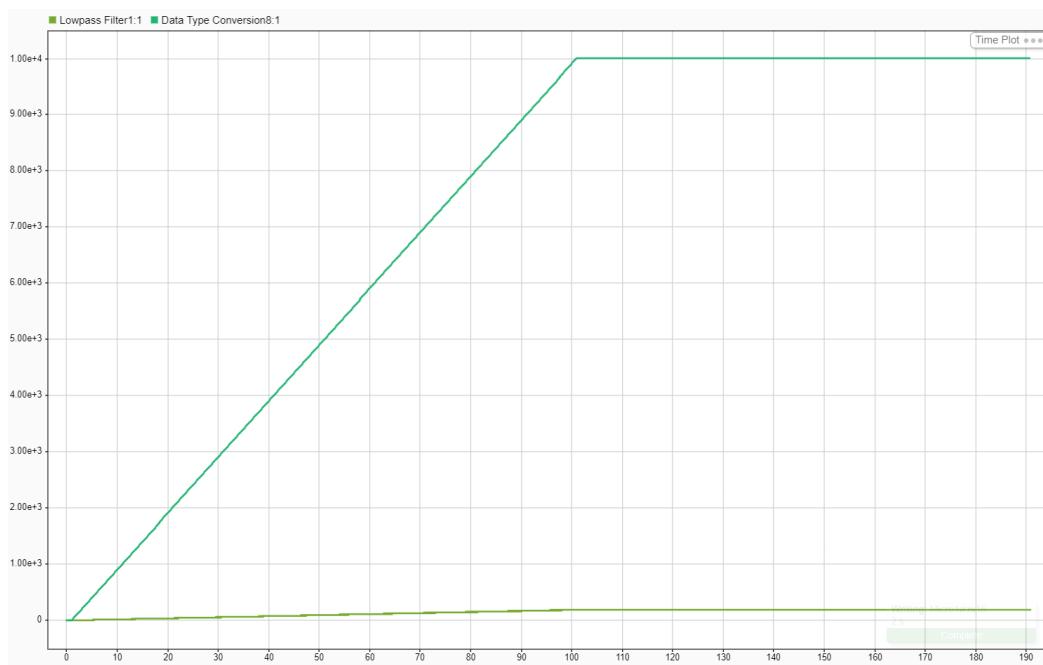


โหมดนี้แสดงความผันผวนของความเร็ว Speed Fluctuation ที่สูงที่สุดในกลุ่ม Microstep ซึ่งบ่งชี้ว่าแม้จะเป็น Microstep แต่ 1/4 ยังคงมี Torque Jerk หลงเหลืออยู่มาก ทำให้การเคลื่อนที่ยังไม่ราบรื่น Smooth เท่าที่ควร

กราฟที่ 5: แสดง Microstep 1/8

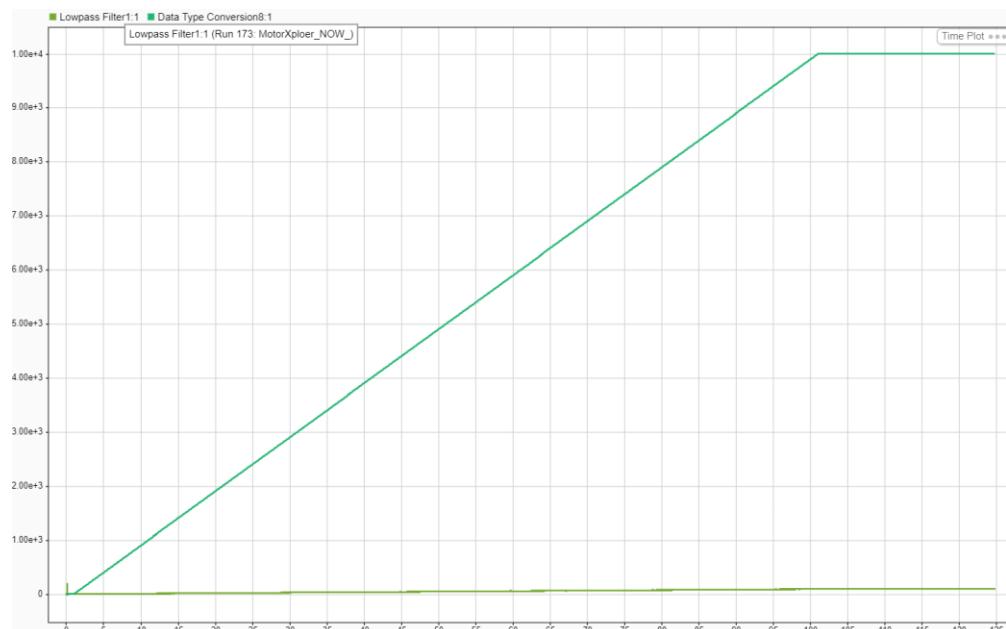


กราฟที่ 6: แสดง Microstep 1/16



การเพิ่ม Resolution ไปยัง 1/8 และ 1/16 ส่งผลให้ Speed Fluctuation ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ความราบรื่น Smoothness เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจาก Step Angle เล็กลง และการควบคุมกระแสไฟฟ้า Current Control ใกล้เคียง Sinusoidal Waveform มากรึเปล่า

กราฟที่ 7: แสดง Microstep 1/32



โหนดนี้ให้สัญญาณความเร็วที่มีความผันผวน Fluctuation ต่ำที่สุดเกือบจะราบเรียบ Almost Flat ซึ่งเป็นการยืนยันว่า Microstep 1/32 สามารถลดการสั่น Vibration ของมอเตอร์ และให้คุณภาพการเคลื่อนที่ Motion Quality ที่นุ่มนวลที่สุด Maximum Smoothness

ข้อเสนอแนะ

3. ทำการวัด Torque-Speed Curve ของ Full Step และ Half Step เพื่อสร้างข้อมูลเชิงปริมาณ Quantitative Data ที่แสดงขีดจำกัดของแรงบิด Torque ในแต่ละโหนด

4. แนะนำให้ใช้ Half Step ใน การใช้งานที่ต้องการความราบรื่น Smoothness ในช่วงความเร็วต่ำถึงปานกลาง และสำรอง Full Step ไว้สำหรับการเคลื่อนที่ที่ความเร็วสูง High Speed ที่ไม่นิ่น Smoothness มากนัก

สรุปผลการทดลอง

1. Microstep Driving เป็นวิธีที่ประสบความสำเร็จในการเพิ่มความละเอียดเชิงมุม Angular Resolution อย่างมาก โดย Microstep 1/32 ให้ Resolution สูงสุดตามการออกแบบ
2. ผลการทดลองยืนยันว่าความราบรื่น Smoothness และการลดการสั่น Vibration ของ Stepper Motor แปรผันตรงกับความละเอียดของ Microstep Resolution ดังที่แสดงในการลดลงของ Speed Fluctuation
3. การเพิ่ม Microstep Resolution มีข้อจำกัดในเรื่องของแรงบิด Torque เนื่องจาก Torque ที่สร้างขึ้นในแต่ละ Microstep มีค่าน้อยลง ทำให้ความสามารถในการทำความเร็วสูงสุด Maximum Speed หรือการเอากนนิภาระ Load อาจลดลงเล็กน้อย

อภิปรายผล

1. หลักการทำงานของ Microstep และ Smoothness

Microstep Driving บรรลุการแบ่งมุมกว้างที่ละเอียด Fine Step Division โดยการควบคุมกระแสไฟฟ้า Current ที่ให้เลี้ยวสู่ชุดลวด Winding ทั้งสองตามรูปแบบคลื่น Sinusoidal Waveform

- การควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบนี้ทำให้ Rotor ถูกผลักไปยังตำแหน่งระหว่าง Full Steps ด้วยแรงที่นุ่มนวล และต่อเนื่อง Continuously หากกว่าแบบกระโดด Discrete Jump
- การลดการเปลี่ยนแปลงแรงบิดอย่างรวดเร็ว Torque Fluctuation ระหว่างก้าว ส่งผลโดยตรงให้ Vibration ลดลงและ Smoothness เพิ่มขึ้น ทำให้ Microstep Driving เหมาะอย่างยิ่งสำหรับงานที่ต้องการความแม่นยำสูง High Precision และความเงียบ Low Noise

2. ข้อจำกัดของ Microstep: Torque Loss

ข้อจำกัดสำคัญของการใช้ Microstep Driving ที่ความละเอียดสูงคือ Torque Loss และความแม่นยำ Accuracy ที่อาจลดลงในทางปฏิบัติ:

- Current Control Error: ที่ความละเอียดสูงมาก (1/32) ค่ากระแสไฟฟ้า Current ในแต่ละ Microstep มีความแตกต่างกันน้อยมาก วงจรขับเคลื่อน Driver Circuit อาจไม่สามารถควบคุมกระแส Current ให้เป็นไปตาม Perfect Sinusoidal Waveform ได้อย่างสมบูรณ์เนื่องจากข้อจำกัดทางฮาร์ดแวร์ Hardware Limitations
- Torque Reduction: ความคลาดเคลื่อนในการควบคุมกระแสไฟฟ้า Current Control Error นี้จะส่งผลให้แรงบิด Torque ที่สร้างขึ้นไม่สม่ำเสมอ Non-uniform และลดลงเมื่อเทียบกับแรงบิดสูงสุด Maximum Torque ของ Full Step ปรากฏการณ์นี้ทำให้ความสามารถในการทนต่อภาระ Load และความเสี่ยงในการเกิด Loss Step เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเร็วสูง High Speed

ข้อเสนอแนะ

1. แนะนำให้วิเคราะห์ความถูกต้องเชิงตำแหน่ง Positional Accuracy ของแต่ละ Microstep Resolution เพื่อประเมินว่า Resolution ที่เพิ่มขึ้นนั้น นำไปสู่ความแม่นยำ Accuracy ที่เพิ่มขึ้นจริงหรือไม่
2. สำหรับการใช้งานจริง ควรเลือกใช้ Microstep Resolution ที่เป็นจุด Trade-off ระหว่าง Smoothness และ Torque เช่น Microstep 1/8 หรือ 1/16 เพื่อให้ได้คุณภาพการเคลื่อนที่ดีโดยยังคงรักษาความสามารถในการรับภาระ Load Capacity ที่เพียงพอ

อ้างอิง

<https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/mastering-precision-understanding-microstepping.html>

<https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/mastering-precision-understanding-microstepping.html>

ກາພພນວກ

2.3 BLDC Motor

การทดลองที่ 1 BLDC Motor

จุดประสงค์ (การทดลองนี้สร้างขึ้นเพื่ออะไร)

- เพื่อศึกษาหลักการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่ใช้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor) โดยอาศัยการสลับเฟสของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
- เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และค่า Duty Cycle ของสัญญาณ PWM ที่ใช้ควบคุมมอเตอร์กับความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์
- เพื่อฝึกวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณไฟฟ้าของมอเตอร์ BLDC ในแต่ละเฟสจากการวัดด้วยอสซิลโลสโคปสมมติฐาน (ข้อสันนิษฐานเบื้องต้น)

เมื่อเพิ่มความถี่หรือ Duty Cycle ของสัญญาณ PWM ที่ใช้ควบคุม BLDC motor จะส่งผลให้ความเร็วการหมุนของมอเตอร์เพิ่มขึ้น โดยเฟสของแรงดันไฟฟ้าจะถูกสลับตามลำดับเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กหมุนอย่างต่อเนื่อง

ตัวแปร

ตัวแปรต้น:

-ค่า Speed reference (rpm) จาก Motor Pilot: 2000, 3000, 5000, -2000, -3000, -5000

ตัวแปรตาม:

- Speed feedback เฉลี่ยจาก Motor Pilot (rpm)

- ความถี่ Back-EMF ต่อเฟส f_{BEMF} (Hz หรือ kHz) จาก cursor บนสโคป

- รูปร่างสัญญาณ 3 เฟส (trapezoidal, phase shift, floating/ conducting)

ตัวแปรควบคุม:

- แรงดันไฟเลี้ยง DC (เช่น 15 V ตามใบงาน)

- จำนวน pole pairs ของมอเตอร์ (P – ค่าคงที่ตัวเดียวกันตลอดการทดลอง)

- โหมดควบคุม – ใช้ 6-Step sensorless + Back-EMF เมื่อกันทุกครั้ง

- Target speed = 3000 rpm, Duration = 0 ms สำหรับทุกการทดลอง (ตามที่เรอตั้ง)

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการทำการทดลอง หรือ เนื้อหาที่นำมาอธิบายผลการทดลอง)

1) ความรู้ที่ใช้ในการอธิบายกราฟและค่า R^2

ต้องมีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการอ่านและตีความกราฟ เช่น การกำหนดแกนตั้ง-แกนนอน หน่วยของตัวแปร (rpm สำหรับความเร็วเชิงกล และ Hz สำหรับความถี่ Back-EMF) รวมถึงความหมายของการฟิตข้อมูลด้วยเส้นตรง (linear fitting)

ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด R^2 จะใช้เป็นตัวชี้วัดความเหมาะสมของแบบจำลองเชิงเส้น โดยค่า R^2 ที่เข้าใกล้ 1 หมายความว่าข้อมูลการทดลองมีความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ดี และตัวแปรอิสระสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามได้ในระดับสูง ซึ่งหมายความว่าสำหรับใช้ตรวจสอบความสอดคล้องกับแบบจำลองเชิงทฤษฎี

2) ความรู้เชิงทฤษฎี

การตีความผลว่าเป็นไปตามสมการอาศัยทฤษฎี Back-EMF ของมอเตอร์แม่เหล็กถาวร ซึ่งระบุว่าแรงดัน Back-EMF ประพันธ์ร่วมกับความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ตามสมการ

$$E_{\text{BEMF}} = K_e \omega$$

นอกจากนี้ ยังต้องเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงกลของมอเตอร์สามเฟสกับความถี่ไฟฟ้าของ Back-EMF ซึ่งขึ้นกับจำนวนคู่ขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์

$$f_{\text{BEMF}} = \frac{Pn}{60}$$

สมการดังกล่าวสามารถจัดรูปเป็นความสัมพันธ์เชิงสัดส่วน

$$n \propto f_{\text{BEMF}}$$

ได้ โดยเข้าใจว่าค่าสัดส่วน (ความชันของกราฟ) ขึ้นกับค่าคงที่ของมอเตอร์ เช่น จำนวนคู่ขั้ว P และค่าคงที่ Back-EMF แต่ลักษณะความเป็นเส้นตรงควรคงอยู่เสมอภายใต้สมมติฐานของแบบจำลองเชิงเส้น

3) ความรู้ที่ใช้ในการเปรียบเทียบกรณี CW และ CCW

การเปรียบเทียบผลกระทบจากการหมุนตามเข็มนาฬิกา (CW) และทวนเข็มนาฬิกา (CCW) อาศัยความเข้าใจจากกฎฟิสิกส์และสมการ Back-EMF ไม่ขึ้นกับทิศทางการหมุน โดยการเปลี่ยนทิศการหมุนจะส่งผลต่อเครื่องหมายและลำดับเฟสของแรงดันเท่านั้น แต่ไม่ส่งผลต่อขนาดของ Back-EMF หรือความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเร็ว n และความถี่ f_{BEMF}

นอกจากนี้ ยังต้องเข้าใจแนวคิดเรื่อง repeatability ของการทดลอง กล่าวคือ หากทำการวัดในทิศทางต่างกันหรือทำซ้ำหลายรอบ แล้วยังคงได้กราฟเชิงเส้นและค่า R^2 ใกล้เคียงกัน แสดงว่าระบบวัดมีความเสถียรและผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือ

4) ความรู้ที่ใช้ในการสรุปว่าสามารถใช้ f_{BEMF} ประมาณความเร็วได้

การสรุปว่าสามารถใช้ความถี่ของ Back-EMF เพื่อประมาณความเร็วเชิงกลของมอเตอร์ได้ อาศัยแนวคิดของการควบคุมมอเตอร์แบบ sensorless ซึ่งใช้ข้อมูลจาก Back-EMF เช่น ความถี่หรือช่วงเวลาระหว่างเหตุการณ์ต่าง ๆ แทนการใช้เซนเซอร์ความเร็วโดยตรง

การยืนยันเชิงทดลองในบริบทนี้หมายถึง การแสดงว่าข้อมูลที่วัดได้จากระบบจริงมีแนวโน้มสอดคล้องกับสมการเชิงทฤษฎีภายในระดับความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ เมื่อข้อมูล “けば” สมการอย่างเป็นระบบ จึงสามารถสรุปได้ว่า ทฤษฎีสามารถใช้อธิบายพฤติกรรมของระบบจริงได้ในช่วงการทดลองที่พิจารณา

5) ความรู้ที่ใช้ในการอธิบายรูปกราฟและค่า error

ต้องเข้าใจความหมายของตัวแปรที่ใช้ในกราฟ เช่น speed reference ซึ่งเป็นค่าความเร็วที่ระบบควบคุมกำหนดขึ้น, mechanical speed ที่วัดได้จากระบบจริง และค่า %error ซึ่งใช้แสดงความแตกต่างเชิงสัมพัทธ์ระหว่างค่าที่คำนวณได้และค่าที่อ้างอิง นอกจากนี้ ยังต้องมีความเข้าใจในการอ่านกราฟกระจาย (scatter plot) ซึ่งแสดงข้อมูลเป็นจุดจากการวัดแต่ละครั้ง

การที่จุดข้อมูลไม่เรียงตัวเป็นเส้นตรงเส้นเดียว แต่มีการกระจายรอบแนวโน้มหลัก ไม่ได้หมายความว่าผลการทดลองผิดพลาด หากแต่สะท้อนถึงการแปรผันตามธรรมชาติของระบบจริงและความไม่แน่นอนของการวัด ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่คาดหมายได้ในระบบทางวิศวกรรม

6) ความรู้ที่ใช้ในการอธิบายผลจากการขั้นแบบ 6-Step และ torque ripple

การตีความพฤติกรรมของความเร็วและแรงบิดอาศัยทฤษฎีการคอมมิวเตชันแบบ 6-step trapezoidal ซึ่งในแต่ละช่วงจะมีเพียงสองเฟสที่นำกระแส และอีกหนึ่งเฟสอยู่ในสถานะลอย โครงสร้างการขั้นนี้ทำให้แรงบิดของมอเตอร์ไม่เป็นค่าคงที่ต่อเนื่อง

แนวคิดเรื่อง torque ripple เป็นองค์ความรู้สำคัญในการอธิบายว่าทำไมความเร็วของมอเตอร์จึงเกิดการแกว่งเดือนอยู่รอบค่าความเร็วเฉลี่ยตามตำแหน่งของโรเตอร์ แรงบิดที่เพิ่มและลดเป็นช่วง ๆ ทำให้ค่าความเร็วที่วัดได้ในแต่ละช่วงเวลาไม่เท่ากันอย่างสมบูรณ์ แม้ระบบโดยรวมจะอยู่ในสภาพสมดุล

7) ความรู้ที่ใช้เชื่อมโยงกับสมการความเร็วจาก Back-EMF

การสรุปผลโดยอ้างอิงสมการอาศัยความเข้าใจความสัมพันธ์เชิงทฤษฎีระหว่างความเร็วเชิงกลของมอเตอร์และความถี่ของ Back-EMF ซึ่งสามารถเขียนได้ในรูปแบบเชิงเส้น

$$n = Kf_{\text{BEMF}}$$

หรือแสดงในเชิงสัดส่วนว่า $n \propto f_{\text{BEMF}}$

สมการดังกล่าวเป็นแบบจำลองเชิงค่าเฉลี่ย ซึ่งบ่งบอกว่าความเร็วเฉลี่ยของมอเตอร์ควรแปรผันตามความถี่ Back-EMF อย่างเป็นเส้นตรง อย่างไรก็ตาม เมื่อความเร็วจริงมีการสั่นไหวเล็กน้อยจาก torque ripple ค่าความถี่ Back-EMF ที่วัดแต่ละครั้งย่อมแตกต่างกันเล็กน้อย ส่งผลให้ค่า %error กระจายตัวรอบศูนย์ ซึ่งเป็นลักษณะที่สอดคล้องกับสมมตฐานของแบบจำลอง

8) ความรู้เกี่ยวกับ non-idealities ระบบจริงและการวัด

ต้องเข้าใจหลักการตรวจจับ zero-crossing ของแรงดันในเฟสที่ลอย และสาเหตุที่ทำให้ตำแหน่ง zero-crossing มี jitter เช่น noise ในสัญญาณ, ผลของฟิลเตอร์, และการ sampling ที่ไม่ตรงตำแหน่งทุกครั้ง

นอกจากนี้ ยังต้องพิจารณาผลของ PWM switching noise ต่อรูปคลื่นแรงดันและความแม่นยำในการประเมินความถี่ รวมถึงการหน่วงเวลาในวงควบคุมและการประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งอาจทำให้ช่วงเวลาในการวัดแต่ละครั้งแตกต่างกันเล็กน้อย แม้ระบบจะทำงานภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน

9) ความรู้เชิง metrology และการควบคุมเพื่อสรุปผลได้อย่างถูกต้อง

ในเชิงการวัดและการควบคุม การที่ค่า error กระจายรอบศูนย์ในระดับเพียงไม่กี่เปอร์เซ็นต์สามารถถือว่าเป็นพัฒนาระบบที่สอดคล้องกับทฤษฎีภายในกรอบความแม่นยำของเครื่องมือและระบบจริง

10) ความรู้เกี่ยวกับลักษณะ Back-EMF ของมอเตอร์ BLDC สามเฟส

ต้องเข้าใจชนิดของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลองว่าเป็นมอเตอร์ BLDC แบบ trapezoidal ซึ่งมี Back-EMF เป็นทรงทรายไฟฟ้าตัวล้อ ต่างจากมอเตอร์ PMSM แบบ sinusoidal ที่มี Back-EMF เป็นไซน์ และใช้วิธีควบคุมคลื่นรูปแบบองค์ความรู้นี้ใช้เป็นเกณฑ์ตรวจสอบว่ารูปคลื่น Back-EMF ที่วัดได้มีลักษณะถูกต้องตามชนิดมอเตอร์จริง

นอกจากนี้ยังต้องเข้าใจรูปทรงของ Back-EMF waveform ได้แก่ flat-top, ช่วง slope และความสัมพันธ์กับการจัดขาด漉และสนามแม่เหล็กทราบ รวมถึงหลักการของระบบไฟฟ้า 3-เฟสที่สัญญาณแต่ละเฟสเลื่อนกัน 120 องศา ทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นพื้นฐานของการสร้างสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์

11) ความรู้เกี่ยวกับ Trapezoidal Drive และ 6-Step Commutation

การอธิบายผลต้องอาศัยความเข้าใจรูปแบบการขับแบบ 6-Step ซึ่งแบ่งหนึ่งรอบทางไฟฟ้าออกเป็น 6 ช่วง โดยแต่ละช่วงมีความยาว 60 องศาทางไฟฟ้า รวมถึงหลักการจับคู่ระหว่างรูปคลื่น Back-EMF กับจังหวะการคอมมิวเตชัน ความรู้ส่วนนี้ช่วยอธิบายว่าทำไมรูปคลื่น Bit-EMF ที่มี flat-top ประมาณ 120 องศาและช่วงเปลี่ยนระดับประมาณ 60 องศา จึงเหมาะสมกับการขับแบบ 6-Step และทำให้ไม่ต้องเลือกเฟสที่ทำหน้าที่เป็น high และ low ในแต่ละช่วง จึงช่วยให้แรงบิดสอดคล้องกับ Back-EMF มากที่สุด นอกจากนี้ยังใช้เป็นกรอบอธิบายเหตุผลว่าเหตุใดการขับแบบ 6-Step จึงมีโครงสร้างควบคุมที่เรียบง่ายแต่ยังให้แรงบิดที่เพียงพอสำหรับการใช้งานจริง

12) ความรู้เกี่ยวกับ Conducting Phase และ Floating Phase

ต้องเข้าใจโครงสร้างอินเวอร์เตอร์สามเฟสของมอเตอร์ BLDC ว่าในแต่ละ step จะมีเพียงสองเฟสที่นำกระแส (ต่อ กับแหล่งจ่าย +DC และ -DC) และอีกหนึ่งเฟสอยู่ในสถานะลอย

การปล่อยให้หนึ่งเฟสอยู่ในความสำคัญในเชิง sensorless control เนื่องจากช่วยให้สามารถวัดแรงดัน Back-EMF ของเฟสนั้นได้โดยไม่ต้องรบกวนจากแรงดันสวิทซ์ ความรู้ส่วนนี้ถูกใช้ในการอ่านรูปคลื่นจริงเพื่อยืนยันว่ามี floating phase เกิดขึ้นตามทฤษฎีในแต่ละช่วงของการคอมมิวเตชัน

13) ความรู้เกี่ยวกับ Zero-Crossing และ Sensorless Control

การควบคุมแบบ sensorless อาศัยหลักการตรวจจับจุด zero-crossing ของแรงดัน Back-EMF ในเฟสที่ลอย ซึ่งสัมพันธ์กับตำแหน่งโรเตอร์ ณ ทิศทางของเซกเตอร์ทางไฟฟ้า ความรู้ส่วนนี้จำเป็นต่อการอธิบายกลไกการประมาณตำแหน่งโรเตอร์โดยไม่ใช้เซนเซอร์

นอกจากนี้ยังต้องเข้าใจหลักการหน่วงเวลาในการคอมมิวเตชัน โดยระบบจะหน่วงเวลาประมาณครึ่งหนึ่งของช่วงทางไฟฟ้าหลังตรวจจับ zero-crossing ก่อนสลับ step เพื่อให้สอดคล้องกับตำแหน่งที่ไฟแรงบิดเฉลี่ยสูงสุด รวมถึงข้อจำกัดเชิงปฏิบัติ เช่น noise รอบจุด zero-crossing และอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ที่ลดลงในช่วงความเร็วต่ำ ซึ่งจำเป็นต้องใช้เทคนิครองรับสัญญาณเข้าช่วย

14) ความรู้เกี่ยวกับลำดับเฟสและทิศทางการหมุน

ต้องเข้าใจแนวคิด phase sequence ของระบบสามเฟส โดยลำดับ A→B→C และ A→C→B จะสอดคล้องกับทิศทางการหมุนที่แตกต่างกัน ความรู้ส่วนนี้ช่วยให้สามารถใช้รูปคลื่น Back-EMF ที่วัดได้เพื่อตรวจสอบทิศทางการหมุนของมอเตอร์ (CW/CCW) และใช้เป็นเครื่องมือยืนยันว่าล้อจิกการคอมมิวเตชันถูกตั้งค่าอย่างถูกต้องตามที่ออกแบบไว้

15) ความรู้ในการเปรียบเทียบกรณี 2000 rpm และ 5000 rpm

การเปรียบเทียบผลกระทบความเร็วต่ำและความเร็วสูงอาทิตย์สมการพื้นฐานของ Back-EMF ซึ่งระบุว่าแรงดัน Back-EMF แปรผันตรงกับความเร็วของโรเตอร์ และความถี่ไฟฟ้าแปรผันตรงกับความเร็วของมอเตอร์ องค์ความรู้นี้ถูกใช้ในการอ่านและเปรียบเทียบรูปคลื่น Back-EMF ที่ 2000 rpm และ 5000 rpm ในด้านความถี่ แอมเพลจิตุด ความคงของตราไฟเซ็ตต์ flat-top และระดับ noise เพื่ออธิบายว่าที่ความเร็วสูง สัญญาณจะมีความชัดเจนและมี SNR ดีกว่า

16) ความรู้เกี่ยวกับข้อจำกัดของ Back-EMF Sensing และการใช้ Hall Sensor

ต้องเข้าใจว่า Back-EMF แปรผันตรงกับความเร็ว ทำให้ในช่วงความเร็วต่ำสัญญาณมีขนาดเล็กและถูกระบกวนด้วย noise ได้ง่าย ส่งผลให้การตรวจจับ zero-crossing ทำได้ยาก องค์ความรู้ส่วนนี้ใช้เป็นพื้นฐานในการอธิบายข้อจำกัดของการควบคุมแบบ sensorless

นอกจากนี้ยังต้องเข้าใจหลักการทำงานของ Hall Effect Sensor ซึ่งให้สัญญาณดิจิทัลที่สะท้อนตำแหน่งแม่เหล็กโดยตรงและไม่ขึ้นกับความเร็ว รวมถึงแนวคิด hybrid control ที่ใช้ Hall sensor หรือวิธีอื่นในช่วง start-up และ low-speed ก่อนสลับไปใช้ sensorless control เมื่อ Back-EMF มีขนาดเพียงพอ

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบ Hall Effect Sensor และ Back-EMF Sensing (เวอร์ชันรายงาน)

หัวข้อ	Hall Effect Sensor	Back-EMF Sensing
การวัด	ตรวจจับสนามแม่เหล็กของโรเตอร์โดยตรง ด้วย Hall sensor ที่ติดตั้งอยู่ภายในมอเตอร์ แล้วแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อบอก ตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์	วัดแรงดัน Back-EMF ที่เกิดขึ้นในชุดลวดเฟสที่ ไม่ได้ถูกจ่ายไฟ (floating phase) แล้วใช้ ตำแหน่ง zero-crossing ของสัญญาณเป็น ข้อมูลอ้างอิงตำแหน่งโรเตอร์
ต้องใช้เซนเซอร์เพิ่มหรือไม่	ต้องใช้ Hall sensor เพิ่ม และต้องติดตั้ง [*] ภายในมอเตอร์	ไม่ต้องใช้เซนเซอร์เพิ่ม ใช้ชุดลวดของมอเตอร์ใน การตรวจจับสัญญาณ
ช่วงความเร็วที่ใช้ได้	ใช้งานได้ตั้งแต่ความเร็วต่ำมากจนถึงความเร็วสูง รวมถึงช่วง start-up	ใช้งานได้ตั้งแต่ความเร็วปานกลางถึงสูง เนื่องจากต้องอาศัยระดับ Back-EMF ที่เพียงพอ
ข้อดี	ระบบตำแหน่งโรเตอร์ได้แม่นยำ สัญญาณมีแฮม พลิกผันต่ำๆ ไม่ขึ้นกับความเร็ว และสามารถ [*] ติดตั้งได้ง่าย	ลดจำนวนอุปกรณ์และเซนเซอร์ โครงสร้างระบบ เรียบง่าย ต้นทุนต่ำ และเหมาะสมกับระบบที่ ต้องการความทนทาน

หัวข้อ	Hall Effect Sensor	Back-EMF Sensing
เปรียบเทียบ		
ข้อเสีย	เพิ่มต้นทุนและความซับซ้อนของฮาร์ดแวร์ เช่นเซอร์วอร์อาจเสื่อมตามเวลา	การตรวจจับตำแหน่งที่ความเร็วต่ำไม่แม่นยำ สัญญาณถูกครอบกวนจาก noise และต้องมีการประมวลผลสัญญาณเพิ่ม
ตัวอย่างการใช้งาน	มอเตอร์ BLDC สำหรับงานที่ต้องการแรงบิดเริ่มต้นสูง เช่น หุ่นยนต์ รถไฟฟ้า ระบบ positioning	พัดลมไฟฟ้า คอมเพรสเซอร์ ปั๊ม ระบบที่ทำงานต่อเนื่องที่ความเร็วค่อนข้างสูง

ตารางเปรียบเทียบการควบคุมมอเตอร์แบบ 6-Step Commutation และ FOC

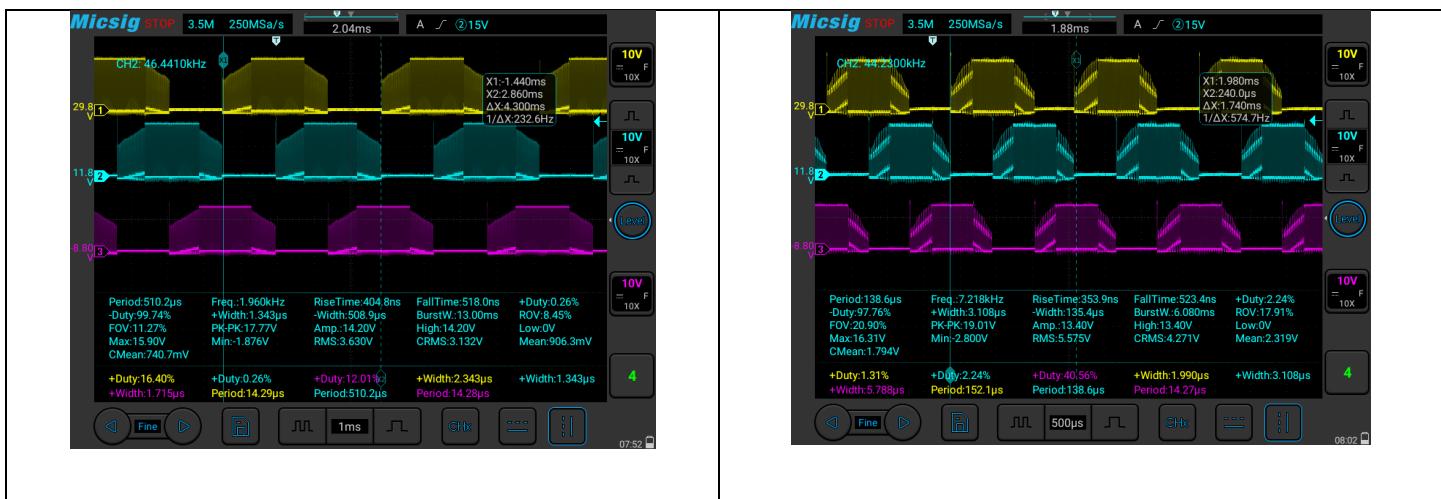
หัวข้อเปรียบเทียบ	6-Step Commutation	FOC (Field Oriented Control)
หลักการควบคุม	เปิด-ปิดเฟสเป็นลำดับ 6 ตำแหน่งต่อหนึ่งรอบไฟฟ้า	ควบคุมกระแสในแกน d-q ให้พุ่มพิกรม เมื่ออนมอเตอร์ DC
รูปคลื่นแรงบิด	ไม่ต่อเนื่อง มี torque ripple ค่อนข้างสูง ต่อเนื่อง แรงบิดเรียบกว่า	
ความซับซ้อนระบบ	ต่ำ โครงสร้างง่าย	สูง ต้องใช้ Clarke/Park Transform
การประมวลผล	ไม่ใช้ transform และไม่ใช้ current loop	ต้องใช้การคำนวณเชิงเวกเตอร์และ current control
การตอบสนอง	ปานกลาง	สูง ควบคุม torque / speed ได้แม่นยำ
ความเหมาะสมในการใช้งาน	พัดลม ปั๊ม โหลดไม่ sensitive	Servo, Robot, EV ฯลฯ

ขั้นตอนการดำเนินงาน (อธิบายขั้นตอนการทดลอง ใส่เฉพาะขั้นตอนที่จำเป็น)

1. เชื่อมต่อ Motor Control Board / Inverter กับแหล่งจ่ายไฟ DC และ BLDC Motor ตามข้อ และลำดับเฟสที่กำหนด พร้อมเชื่อมต่อบอร์ดเข้ากับคอมพิวเตอร์ผ่าน USB
2. เปิดโปรแกรม Motor Pilot ตรวจสอบการเชื่อมต่อให้สถานะเป็น Connected และยืนยันว่า ระบบสามารถอ่านค่า Speed feedback ของมอเตอร์ได้ปกติ
3. ใช้probe ออสซิลโลสโคปแบบ ต่อเข้ากับช่อง CH1, CH2, CH3 และนำปลายprobeไปวัดสัญญาณที่ ขั้ว Phase A, Phase B, Phase C ของมอเตอร์ตามลำดับ
4. ตั้งค่า Speed reference = 2000 rpm ,Target Speed = 3000 rpm, Duration = 0 ms ใน Motor Pilot แล้วกด Start ให้มอเตอร์หมุน
5. บันทึกค่าต่อไปนี้
 - รูปคลื่นแรงดันสวิตซ์ของเฟส A, B, C จากออสซิลโลสโคป ทั้ง 3 ชานแนล
 - ใช้ Cursor วัด คาบเวลา (Δt) ของสัญญาณเฟสไดเฟสหนึ่งในส่วนที่รูปคลื่นนิ่ง (เช่น ช่วง plateau ตามรูปที่บันทึก) แล้วอ่านค่า $\frac{1}{\Delta t} = f_{BEMF}$ ที่แสดงบนจอ
 - จดค่าที่แสดงในช่อง Measurement เช่น Frequency, Duty, Max, Min, Mean ของแต่ละ เฟสเพื่อใช้เคราะห์ลักษณะสัญญาณ trapezoidal และการเลื่อนเฟส 120°
6. ทำการ บันทึกภาพหน้าจอ (screenshot) ของออสซิลโลสโคป สำหรับความเร็ว 2000 rpm จำนวน 3 ครั้ง เพื่อใช้ตรวจสอบความสม่ำเสมอของผลทดลอง
7. เปลี่ยนค่า Speed reference เป็น 3000 rpm แล้วทำขั้นตอน 2-4 อีก 3 รอบ
8. เปลี่ยนค่า Speed reference เป็น 5000 rpm แล้วทำขั้นตอน 2-4 อีก 3 รอบ
9. เปลี่ยนทิศการหมุนโดยตั้ง Speed reference เป็น -5000 rpm แล้วบันทึกข้อมูลเหมือนเดิม อย่างน้อย 2 รอบ
10. เปลี่ยน Speed reference เป็น -3000 rpm แล้วบันทึกข้อมูลเหมือนเดิมอย่างน้อย 3 รอบ
11. เปลี่ยน Speed reference เป็น -2000 rpm แล้วบันทึกข้อมูลเหมือนเดิมอย่างน้อย 3 รอบ
12. ทุกครั้งที่เปลี่ยนค่า Speed reference ให้สังเกตจาก Motor Pilot ว่าความเร็วมอเตอร์ถึงค่าที่ กำหนดและนิ่งแล้ว จึงค่อยจับภาพสโคปและอ่านค่าด้วย Cursor เพื่อให้ค่าความถี่และรูปคลื่น เป็น steady-state จริง

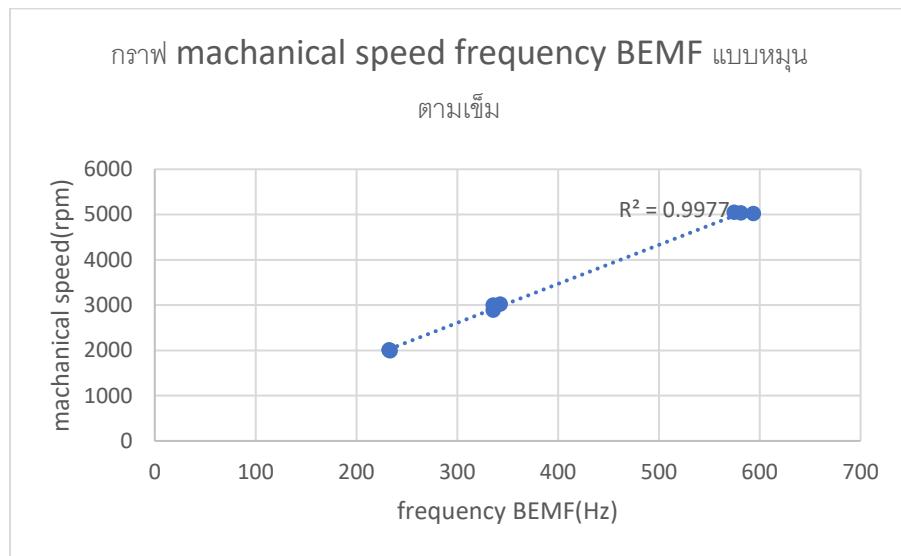
ผลการทดลอง (สิ่งที่เกิดขึ้นจริงในการทดลอง)

Waveform BEMF 3 เฟส ที่ speed ref = 2000 rpm (CW)	Waveform BEMF 3 เฟส ที่ speed ref = 5000 rpm (CW)
---	---



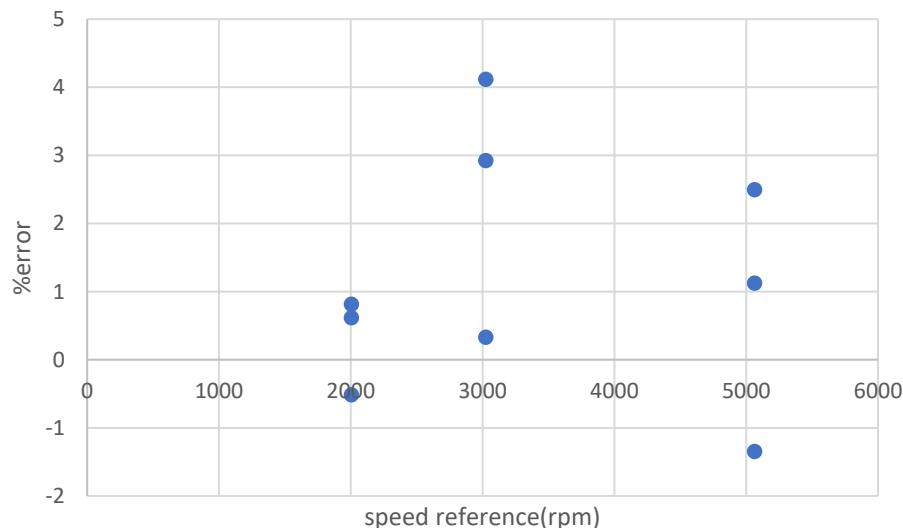
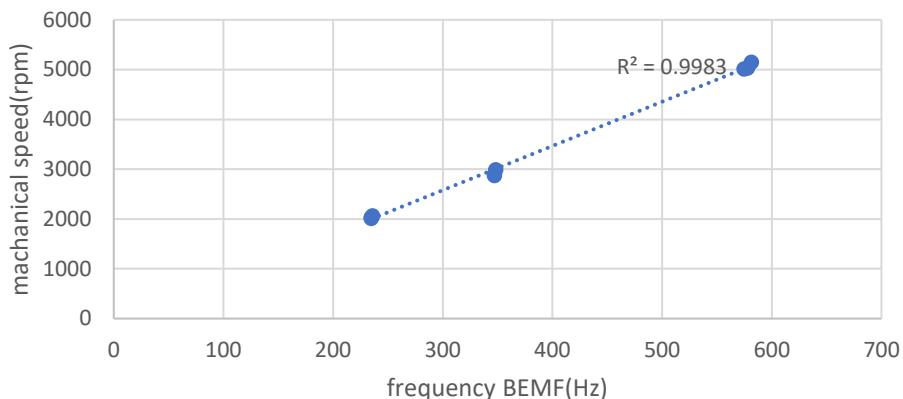
speed ref(rpm)	CW(+)/CCW(-)	mechanical speed(rpm)	frequency BEMF(Hz)	ความเร็วเชิงกลที่คำนวณได้(rpm)	%error
2004	CW(+)	1992	233.6	2002.28571	-0.51635
2004	CW(+)	2010	232.6	1993.71429	0.810235
2004	CW(+)	2006	232.6	1993.71429	0.612448
3024	CW(+)	2886	335.6	2876.57143	0.3267
3024	CW(+)	3000	335.6	2876.57143	4.114286
3024	CW(+)	3024	342.5	2935.71429	2.919501
5064	CW(+)	5052	574.7	4926	2.494062
5064	CW(+)	5040	581.4	4983.42857	1.122449

5064	CW(+)	5022	593.8	5089.71429	-1.34835
2070	CCW(-)	2010	234.7	2011.71429	-0.08529
2070	CCW(-)	2028	234.7	2011.71429	0.803043
2070	CCW(-)	2064	235.8	2021.14286	2.076412
3024	CCW(-)	2874	347.2	2976	-3.54906
3024	CCW(-)	2988	348.2	2984.57143	0.114745
5064	CCW(-)	5010	574.7	4926	1.676647
5064	CCW(-)	5034	578	4954.28571	1.583518
5064	CCW(-)	5148	581.4	4983.42857	3.196803



กราฟ mechanical speed frequency BEMF แบบหมุนทวน

เข็ม



ทำไม error ถึงไม่เรียบ และกระจาย

(1) 6-Step = torque ripple

การขับแบบ 6-Step:

กระแสเปลี่ยนแบบขั้นบันได

torque ไม่ต่อเนื่อง

ความเร็วเกิด micro-oscillation

➔ Speed feedback จะกระดิกเล็ก ๆ ตลอด

➔ Error เลยไม่คงที่แม้ตั้ง speed ref เดียวกัน

สรุปผลการทดลอง (อธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นในการทดลอง)

จากการทดลองศึกษาการทำงานของมอเตอร์ Brushless DC (BLDC) โดยใช้การควบคุมแบบ Six-Step (Trapezoidal Control) และการตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ด้วยวิธี Back-EMF Sensing ได้ข้อสรุปสำคัญดังต่อไปนี้

1) ลักษณะสัญญาณ Back-EMF แบบ 3-Phase และความสอดคล้องกับทฤษฎี

จากการวัดสัญญาณแรงดัน Back-EMF ของมอเตอร์ที่ความเร็วอ้างอิง 2000 rpm และ 5000 rpm พบว่า สัญญาณประกอบด้วยแรงดันสามเฟส (Phase A, B และ C) ที่มีการเลื่อนเฟสระหว่างกันประมาณ 120 องศาทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นลักษณะมาตรฐานของระบบไฟฟ้าสามเฟส สัญญาณ Back-EMF ที่ได้มีรูปร่างเป็นคลื่นสี่เหลี่ยมคงที่ (trapezoidal waveform) อย่างชัดเจน สอดคล้องกับโครงสร้างแม่เหล็กของมอเตอร์ BLDC ที่ออกแบบมาเพื่อการควบคุมแบบ Trapezoidal Commutation ไม่ใช่มอเตอร์ประเภท PMSM ที่ให้ Back-EMF แบบไซน์ลักษณะรูปคลื่นดังกล่าวยืนยันว่าการทดลองนี้เป็นการทำงานของมอเตอร์ BLDC ภายใต้การควบคุมแบบ 6-step อย่างแท้จริง ทั้งในเชิงโครงสร้างของสัญญาณและหลักการทำงานทางทฤษฎี

2) การทำงานของ 6-Step Commutation และ Back-EMF Sensing

จากรูปคลื่น Back-EMF สามารถสังเกตได้ว่าในแต่ละช่วงการคอมมิวเตชัน จะมีเพียงสองเฟสที่นำกระแส ในขณะที่อีกหนึ่งเฟสอยู่ในสถานะลอย (floating phase) ลักษณะนี้เป็นหัวใจของการควบคุมแบบ 6-step และเปิดโอกาสให้สามารถนำแรงดัน Back-EMF ของเฟสที่ลอยมาใช้ตรวจสอบตำแหน่งเชิงมุ่งของโรเตอร์ได้

การตรวจจับจุด zero-crossing ของแรงดัน Back-EMF ในเฟสลอยถูกนำมาใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงทางเวลา ก่อนหน่วยเวลาเพื่อเข้าสู่การคอมมิวเตชันในสเต็ปถัดไป ซึ่งสอดคล้องกับหลักการของระบบควบคุมมอเตอร์แบบ sensorless ที่อาศัย Back-EMF โดยตรง ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถทำงานได้จริงตามแนวคิดทางทฤษฎี

3) ผลของความเร็วต่อคุณภาพสัญญาณ Back-EMF

เมื่อเปรียบเทียบสัญญาณ Back-EMF ที่ความเร็วอ้างอิง 2000 rpm และ 5000 rpm พบว่าเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ความถี่และแอมพลิจูดของสัญญาณ Back-EMF เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับสมการพื้นฐาน

$$E_{BEMF} = K_e \omega$$

ที่ระบุว่าแรงดัน Back-EMF แปรผันตรงกับความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์

ที่ความเร็วต่ำ สัญญาณ Back-EMF มีแอมเพลจูดค่อนข้างต่ำและถูกรบกวนได้ง่าย ส่งผลให้การตรวจจับ zero-crossing มีความไม่แน่นอนมากขึ้น ในขณะที่ที่ความเร็วสูง สัญญาณ Back-EMF มีความชัดเจนและเสถียรมากกว่า ทำให้เหมาะสมต่อการนำมามุ่งเป้าเป็น feedback ในระบบ sensorless ผลการทดลองนี้สนับสนุนแนวคิดเชิงวิศวกรรมที่นิยมใช้ Hall Effect Sensor ในช่วงความเร็วต่ำ และเปลี่ยนไปใช้ Back-EMF Sensing เมื่อความเร็วสูงเพียงพอ

4) ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ Back-EMF และความเร็วเชิงกล

จากข้อมูลเชิงตัวเลขในตารางผลการทดลอง และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง mechanical speed และความถี่ของ Back-EMF พบร่องรอยในกรณีการหมุนตามเข็มนาฬิกา (CW) และทวนเข็มนาฬิกา (CCW) ความเร็วเชิงกลของมอเตอร์มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความถี่ของสัญญาณ Back-EMF อย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับสมการ

$$f_{BEMF} = \frac{P \cdot n}{60}$$

ผลการทดลองให้ค่า R^2 ใกล้เคียง 1 แสดงให้เห็นว่าวิธีการประมาณความเร็วจากสัญญาณ Back-EMF สามารถอธิบายพฤติกรรมของมอเตอร์ได้อย่างเหมาะสมในเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติ

5) การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนและพฤติกรรมที่ไม่เป็น Ideal

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง %error และค่า speed reference แสดงให้เห็นว่า เมื่อจะตั้งค่า speed reference เท่ากัน แต่ค่าความคลาดเคลื่อนไม่คงที่และมีการกระจายอยู่ในช่วงหนึ่ง พฤติกรรมดังกล่าวไม่ได้บ่งชี้ถึงความผิดพลาดของการทดลอง แต่สะท้อนลักษณะโดยธรรมชาติของการควบคุมมอเตอร์แบบ 6-step ซึ่งมี torque ripple เนื่องจากการนำกระแสแบบไม่ต่อเนื่อง

แรงบิดที่ไม่สม่ำเสมอทำให้ความเร็วเชิงกลของมอเตอร์เกิด micro-oscillation รอบคากลาง ส่งผลให้การวัดความถี่ของ Back-EMF และการคำนวณความเร็วในแต่ละครั้งมีความแปรผันเล็กน้อย นอกจากนี้ยังมีผลจากสัญญาณรบกวนของ PWM switching ความไม่แน่นอนของการตรวจจับ zero-crossing และดีเลย์ในวงควบคุมซึ่งทั้งหมดเป็น non-idealities ที่พبدأได้ทั่วไปในระบบควบคุมมอเตอร์แบบ sensorless

6) ภาพรวมของความสมเหตุสมผลของผลการทดลอง

โดยภาพรวม ผลการทดลองทั้งหมดมีความสอดคล้องกับทฤษฎีของมอเตอร์ BLDC การควบคุมแบบ 6-step และการตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ด้วย Back-EMF Sensing อย่างดี ความสัมพันธ์ระหว่าง Back-EMF และความเร็วเฉิงกลเป็นไปตามสมการพื้นฐาน ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ด้วยข้อจำกัดของเซิร์ฟบอร์ด แนะนำมที่บ่งชี้ถึงความผิดพลาดเชิงขั้นตอนหรือการวัด

อภิปรายผล (วิเคราะห์สิ่งที่เกิดขึ้นในการทดลอง)

วิเคราะห์สัญญาณ Back-EMF แบบ 3-Phase ที่ความเร็วอ้างอิง 2000 rpm (CW)

1) ลักษณะสัญญาณ Back-EMF แบบ 3-Phase

จากการวัดสัญญาณแรงดัน Back-EMF ของมอเตอร์ Brushless DC ที่ความเร็วอ้างอิง 2000 rpm และทิศทางการหมุนตามเข็มนาฬิกา พบร่วมสัญญาณที่ได้ประกอบด้วยแรงดัน Back-EMF จำนวนสามเฟส ซึ่งแทนด้วย Phase A, Phase B และ Phase C

สัญญาณแรงดันของทั้งสามเฟสมีรูปร่างเป็นคลื่นสี่เหลี่ยมคงที่ (trapezoidal waveform) อย่างชัดเจน และแสดงถึงลักษณะ Back-EMF ที่เกิดจากโครงสร้างแม่เหล็กของมอเตอร์ BLDC ซึ่งได้รับการออกแบบให้เหมาะสมกับการควบคุมแบบ Trapezoidal Commutation ไม่ใช่มอเตอร์ประเภท PMSM ที่มี Back-EMF เป็นคลื่นไส้

2) หลักการสัญญาณสามเฟสและการเลื่อนเฟส (Phase Shift)

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของสัญญาณ Back-EMF ทั้งสามเฟส พบร่วมสัญญาณมีการเลื่อนเฟสระหว่างกันประมาณ 120 องศาทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นคุณสมบัติมาตรฐานของระบบไฟฟ้าสามเฟส

การเลื่อนเฟสตั้งกล่าวทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนภายในสเตเตอร์ของมอเตอร์ ซึ่งเป็นกลไกพื้นฐานที่ทำให้เกิดแรงบิดและทำให้มอเตอร์สามารถหมุนได้อย่างต่อเนื่อง การจัดเฟสจึงเป็นสิ่งสำคัญของการทำงานของมอเตอร์สามเฟสทุกประเภท รวมถึงมอเตอร์ BLDC

3) Trapezoidal Back-EMF และการควบคุมแบบ 6-Step Commutation

จากรูปคลื่น Back-EMF ของแต่ละเฟส สามารถสังเกตได้ว่าสัญญาณมีช่วงแรงดันคงที่ (flat region) ประมาณ 120 องศาทางไฟฟ้า และมีช่วงเปลี่ยนค่าแรงดัน (slope transition) ประมาณ 60 องศาทางไฟฟ้าในแต่ละรอบ

ลักษณะรูปคลื่นดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการควบคุมมอเตอร์แบบ Six-Step Commutation หรือ Trapezoidal Control ซึ่งแบ่งการขับมอเตอร์ออกเป็นหกช่วงต่อหนึ่งรอบทางไฟฟ้า ในแต่ละช่วงจะมีการเลือกเฟสที่เหมาะสมเพื่อสร้างแรงบิดให้ตรงกับรูปแบบ Back-EMF ของมอเตอร์

การจับคู่ระหว่างรูปคลื่น Back-EMF แบบ trapezoidal และการควบคุมแบบ 6-step ช่วยให้มอเตอร์สามารถสร้างแรงบิดได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้โครงสร้างการควบคุมที่เรียบง่าย

4) ช่วงเฟสนำกระแสและเฟสลอย (Conducting and Floating Phase)

ในการควบคุมแบบ 6-step จะมีพิยองสองเฟสที่นำกระแสไฟฟ้าในแต่ละช่วงการคอมมิวเตชัน ขณะที่อีกหนึ่งเฟสอยู่ในสถานะลอยและไม่ถูกเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าโดยตรง

จากรูปคลื่นสามารถยืนได้ว่ามีเฟสหนึ่งอยู่ในสถานะลอยในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของการควบคุมแบบ 6-step การปล่อยให้หนึ่งเฟสอยู่ในสถานะลอย เปิดโอกาสให้สามารถวัดแรงดัน Back-EMF ของเฟสดังกล่าวได้โดยไม่ถูกรบกวนจากแรงดันสวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์

5) การตรวจจับ Zero-Crossing ของ Back-EMF

เฟสที่อยู่ในสถานะลอยจะให้สัญญาณ Back-EMF ที่สะท้อนการเคลื่อนที่ของโรเตอร์โดยตรง จากการวิเคราะห์รูปคลื่นจะพบจุดที่สัญญาณ Back-EMF ตัดเกนศูนย์แรงดัน หรือที่เรียกว่า Zero-Crossing ซึ่งทำแทนงี้มีความสัมพันธ์กับตำแหน่งเชิงมุขของโรเตอร์

ในระบบควบคุมมอเตอร์แบบ Sensorless จุด Zero-Crossing ไม่ได้ถูกใช้เพื่อสั่งสลับเฟสในทันที แต่ถูกนำมาใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงทางเวลา กำหนดระบบจะหน่วงเวลาไปประมาณครึ่งหนึ่งของช่วงทางไฟฟ้าก่อนทำการคอมมิวเตชันไปยังสเต็ปถัดไป เพื่อให้จังหวะการสลับสอดคล้องกับตำแหน่งของโรเตอร์ที่เหมาะสมต่อการสร้างแรงบิด

จากสัญญาณที่วัดได้ยังพบสัญญาณrgbกวนบริเวณใกล้ Zero-Crossing ซึ่งสะท้อนข้อจำกัดเชิงปฏิบัติของการควบคุมแบบ Back-EMF Sensing โดยเฉพาะเมื่อค่า Back-EMF มีระดับไม่สูงมาก

6) ลำดับเฟสและทิศทางการหมุนของมอเตอร์

จากลำดับการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน Back-EMF สามารถระบุได้ว่าการเปลี่ยนเฟสดำเนินไปในลำดับที่สอดคล้องกับทิศทางการหมุนตามเข็มนาฬิกาที่กำหนดไว้ในระบบควบคุม ลำดับการเปลี่ยนเฟสดังกล่าวเป็นตัวกำหนดทิศทางการหมุนของสนามแม่เหล็กและส่งผลโดยตรงต่อทิศทางการหมุนของโรเตอร์

การวิเคราะห์ลำดับเฟสจากรูปคลื่นจึงสามารถให้ยืนยันได้ว่าทั้งทิศทางการหมุนและความถูกต้องของการตั้งค่าการคอมมิวเตชันในระบบควบคุมมอเตอร์

การเปรียบเทียบสัญญาณ Back-EMF ที่ความเร็วต่างกัน และความเชื่อมโยงกับวิธีการตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

1) การเปรียบเทียบสัญญาณ Back-EMF ที่ความเร็วอ้างอิง 2000 rpm และ 5000 rpm

เมื่อเปรียบเทียบรูปคลื่น Back-EMF ของมอเตอร์ BLDC ที่ความเร็วอ้างอิง 2000 rpm (รูปที่ 1) กับกรณีที่เพิ่มความเร็วอ้างอิงเป็น 5000 rpm (รูปที่ 2) พบร่วงสัญญาณ Back-EMF ทั้งสามเฟสมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนทั้งในด้านความถี่และแอมเพลจูด

ที่ความเร็ว 5000 rpm ความถี่ของสัญญาณ Back-EMF เพิ่มขึ้นตามอัตราการหมุนของโรเตอร์ ขณะเดียวกันแอมเพลจูดของแรงดัน Back-EMF ก็สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับกรณี 2000 rpm นอกจากนี้ รูปทรงของสัญญาณ trapezoidal มีขอบคุมชี้ขึ้น ซึ่ง flat-top มีความชัดเจนมากขึ้น และการเปลี่ยนผ่านของสัญญาณมีความสม่ำเสมอกว่า

พฤติกรรมดังกล่าวสอดคล้องกับสมการพื้นฐานของแรงดัน Back-EMF

$$E_{\text{BEMF}} = K_e \omega$$

ซึ่งระบุว่าแรงดัน Back-EMF ประพันโดยตรงกับความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ ดังนั้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น สัญญาณ Back-EMF ที่วัดได้จึงมีขนาดใหญ่ขึ้น และมีสัดส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio) ที่ดีกว่า

2) ผลของความเร็วต่อการตรวจจับ Zero-Crossing และการควบคุมแบบ Sensorless

จากการเปรียบเทียบรูปคลื่นทั้งสองกรณี พบร่วงในกรณีความเร็วอ้างอิง 2000 rpm ระดับแรงดัน Back-EMF ค่อนข้างต่ำ และมีสัญญาณรบกวนปราภภูมิอยู่บริเวณใกล้จุด zero-crossing ของเฟล皂อย ส่งผลให้การระบุจุดตัดศูนย์ซึ่งใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงตำแหน่งโรเตอร์มีความไม่แน่นอนมากขึ้น

ในทางกลับกัน ที่ความเร็วอ้างอิง 5000 rpm สัญญาณ Back-EMF มีแอนเพลจูดสูงขึ้นอย่างชัดเจน ทำให้จุด zero-crossing ของเฟลสโลยสามารถตรวจจับได้ง่ายและมีความเสถียรมากกว่า ซึ่งเอื้อต่อการนำสัญญาณดังกล่าวมาใช้เป็นตัวอ้างอิงทางเวลาในการกำหนดจังหวะคอมมิเตชันของอินเวอร์เตอร์ในระบบควบคุมแบบ sensorless

ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพของการตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ด้วยวิธี Back-EMF sensing เริ่มมีข้อจำกัดชัดเจนในช่วงความเร็วต่ำ เนื่องจากระดับสัญญาณ Back-EMF มีขนาดเล็กและถูกรบกวนได้ง่าย ขณะที่เมื่อความเร็วสูงขึ้น สัญญาณมีความชัดเจนเพียงพอสำหรับการใช้งานเป็น feedback ได้อย่างมีความน่าเชื่อถือ

3) ข้อจำกัดของการควบคุมแบบ Back-EMF Sensing ที่ความเร็วต่ำ

จากข้อสังเกตเชิงทดลองข้างต้น สามารถอธิบายแนวทางการออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์ BLDC ในทางปฏิบัติได้ว่า ในช่วงเริ่มต้นการหมุนหรือช่วงความเร็วต่ำ มักมีการใช้ Hall Effect Sensor หรือเซนเซอร์อื่น ๆ ที่ให้สัญญาณดิจิทัลซึ่งมีแอนเพลจูดคงที่และไม่ขึ้นกับความเร็ว เพื่อระบุตำแหน่งโรเตอร์ได้อย่างแม่นยำ เมื่อความเร็วของมอเตอร์เพิ่มขึ้นจน Back-EMF มีระดับแรงดันสูงและมีสัญญาณรบกวนต่ำ ระบบจึงสามารถเปลี่ยนไปใช้การควบคุมแบบ sensorless โดยอาศัยการตรวจจับ zero-crossing ของ Back-EMF ซึ่งช่วยลดจำนวนเซนเซอร์และเพิ่มความเรียบง่ายของระบบโดยรวม

ดังนั้น รูปคลื่น Back-EMF ที่ความเร็วอ้างอิง 5000 rpm จะเป็นหลักฐานเชิงทดลองที่สนับสนุนห้องสมการ Back-EMF ทางทฤษฎี และคำอธิบายเชิงวิศวกรรมว่าทำให้ระบบควบคุมมอเตอร์ BLDC ในการใช้งานจริงจึงนิยมใช้ Hall sensor ในช่วงความเร็วต่ำ และเปลี่ยนไปใช้การควบคุมแบบ sensorless จาก Back-EMF เมื่อความเร็วสูงเพียงพอ

การวิเคราะห์ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Speed, Back-EMF และ Error

ในตารางที่ 1 แสดงผลการทดลองที่กำหนดค่า speed reference ผ่านซอฟต์แวร์ Motor Pilot หลายค่า จากนั้นวัด ความเร็วเชิงกลจริง (mechanical speed) จากสัญญาณ speed feedback ของมอเตอร์ และวัด ความถี่ของสัญญาณ Back-EMF จากอุปกรณ์โอลิสโคลปโดยใช้พังก์ชันวัดความถี่หรือ cursor ให้ได้ค่า f_{BEMF} ของแต่ละจุดทดลอง จากค่าความถี่ดังกล่าว นำไปคำนวณ ความเร็วเชิงกลที่คาดการณ์ n_{calc} ด้วยสมการความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ทางไฟฟ้าและความเร็วเชิงกลของมอเตอร์ BLDC คือ

$$f_{\text{BEMF}} = \frac{P \cdot n}{60}$$

ซึ่งสามารถจัดรูปเป็น

$$n_{\text{calc}} = K f_{\text{BEMF}}, \text{โดยที่ } K = \frac{60}{P}$$

ดังนั้น หากการวัดถูกต้อง ผลที่ได้ควรแสดงให้เห็นว่า n_{calc} มีค่าคลาดเคลื่อนจากความเร็วที่วัดได้จริงเพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นไปตามหลักการของสมการ Back-EMF ของมอเตอร์แม่เหล็กถาวรสามเฟส

เพื่อประเมิน ความน่าเชื่อถือและการทำซ้ำได้ (repeatability) ของวิธีการวัด ในแต่ละค่า speed reference ได้ทำการทดลองซ้ำอย่างน้อยสามครั้ง ทั้งในทิศทางหมุน CW และ CCW แล้วนำความเร็วที่คำนวณจาก Back-EMF เปรียบเทียบกับความเร็วที่วัดได้จริง พิรุณคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนเป็นเปอร์เซ็นต์ error ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่า error อยู่ในช่วงที่สอดคล้องกับความไม่น่นอนของเครื่องมือวัด และค่าที่วัดซ้ำมีความใกล้เคียงกัน จึงสามารถสรุปได้ว่า

- การใช้ความถี่ของสัญญาณ Back-EMF เพื่อประมาณค่าความเร็วเชิงกลของมอเตอร์ สอดคล้องกับสมการ เชิงทฤษฎี $n \propto f_{\text{BEMF}}$
- ข้อมูลในตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าระบบวัดความเร็วจาก Back-EMF มีความน่าเชื่อถือและให้ผลซ้ำได้ดี ในช่วงการทดลองนี้ ซึ่งถือเป็น การยืนยันเชิงทดลอง (theoretical justification) ว่าทฤษฎีที่ใช้สามารถ อธิบายพฤติกรรมของมอเตอร์ในสถานการณ์จริงได้อย่างเหมาะสม

การวิเคราะห์กราฟเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเทียบกับค่าอ้างอิงความเร็ว

กราฟในรูปที่ ... แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า speed reference (แกนนอน หน่วย rpm) และค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วที่คำนวณจากสัญญาณ Back-EMF เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วเชิงกลที่วัดได้จริง (แกนตั้ง หน่วย %error) จากผลการทดลองพบว่า แม้จะตั้งค่า speed reference เท่ากัน จุดข้อมูลของ %error ไม่รวมตัวเป็นค่าคงที่จุดเดียว แต่มีการกระจายตัวอยู่ในช่วงหนึ่ง ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าความเร็วเชิงกลของมอเตอร์ในระบบจริงมีการแปรผันเล็กน้อยตามเวลา

พุติกรรมดังกล่าว เป็นไปตามหลักการของการขับมอเตอร์ BLDC แบบ 6-step commutation ซึ่งเป็นการสลับการนำกระแสของชุดลวดแบบเป็นช่วง (step-wise) ส่งผลให้แรงบิดที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นขั้นและเกิด torque ripple ตามตำแหน่งของโรเตอร์ ความไม่สม่ำเสมอของแรงบิดนี้ทำให้ความเร็วเฉิงกลของมอเตอร์ไม่คงที่อย่างสมบูรณ์ แต่แก่ว่องยุ่รุบค่ากลาง แม้ว่าค่า speed reference จะถูกตั้งให้คงที่ก็ตาม เมื่อพิจารณาการคำนวณความเร็วจากความถี่ของ Back-EMF ด้วยสมการเชิงทฤษฎี

$$n = Kf_{\text{BEMF}}$$

จะเห็นว่าสมการดังกล่าวให้ค่าความเร็วเฉลี่ยที่ถูกต้องตามทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัติ เมื่อความเร็วเฉิงกลมีการแกว่งเล็กน้อยจาก torque ripple ค่า Back-EMF ที่วัดได้ในแต่ละครั้งย่อมแปรผันตามไปด้วย ส่งผลให้ค่าที่คำนวณได้เกิดการกระจายของ %error รอบศูนย์ แทนที่จะเป็นค่าเดียวคงที่ แม้ว่าความสัมพันธ์พื้นฐาน $n \propto f_{\text{BEMF}}$ จะยังคงถูกต้อง

นอกจากนี้ การกระจายของ %error ยังได้รับอิทธิพลจากปัจจัยร่วมอื่น ได้แก่ ความไม่แน่นอนของการตรวจจับจุด zero-crossing ของ Back-EMF, สัญญาณรบกวนจาก PWM switching และดีเลย์ของวงควบคุมและการประมวลผลสัญญาณ ปัจจัยเหล่านี้เป็น non-idealities ที่พบได้ทั่วไปในระบบควบคุมมอเตอร์แบบ sensorless และมีรายงานในงานวิจัยด้าน BLDC motor control อย่างกว้างขวาง

โดยสรุป การที่กราฟ %error แสดงการกระจายตัวรอบศูนย์ในระดับไม่เกิน +/- 1% และไม่แสดงแนวโน้มเบี่ยงเบนอย่างเป็นระบบ เป็นผลที่สอดคล้องกับหลักการและข้อจำกัดของระบบ 6-step ตามทฤษฎี และจึงถือเป็นพุติกรรมปกติและสมเหตุสมผลของการทดลองจริง ไม่ใช่ความผิดพลาดของขั้นตอนการทดลองหรือการวัด

ข้อเสนอแนะ

อ้างอิง (ใส่แค่ Link)

https://www.electicaleeasy.com/2014/01/losses-in-dc-machine.html#google_vignette (ตัวอย่าง)

[https://www.rhydolabz.com/documents/26/BLDC_A2212_13T.pdf\(poies\)](https://www.rhydolabz.com/documents/26/BLDC_A2212_13T.pdf(poies))

<https://www.mathworks.com/help/mcb/ref/bldc.html>

https://www.iaeng.org/publication/WCE2011/WCE2011_pp1504-1508.pdf#:~:text=back%2DEMF%20signals%20have%20120%20degree%20phase%20shift

<https://www.mathworks.com/help/mcb/gs/sensorless-speed-control-six-step-commutation-example.html>

<https://www.ti.com/lit/an/sprabq7a/sprabq7a.pdf?ts=1765084384010>

https://www.iaeng.org/publication/WCE2011/WCE2011_pp1504-1508.pdf