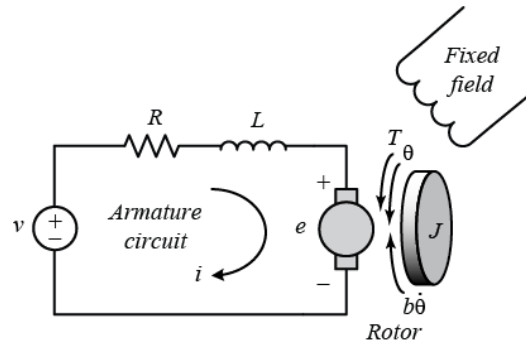


Guide Questions

ในการออกแบบระบบควบคุม (Controller Design) การจำลองระบบ (Simulation) และการออกแบบตัวประมาณสถานะ (State Estimator) สิ่งสำคัญที่เราจำเป็นต้องทราบคือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่สนใจ เพื่อใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของระบบนั้น ๆ ในการทดลองนี้จะมุ่งเน้นไปที่ระบบของมอเตอร์แปรงถ่าน (Brushed DC Motor) ซึ่งมีสมการที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้



ภาพที่ 1 DC Motor

สมการทางไฟฟ้า:

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

$$V_{emf} = K_e \omega_m(t)$$

สมการทางกล:

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

$$T_m = K_m I_m(t)$$

โดยที่:

$V_{in}(t)$ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ (Voltage Input)

$I_m(t)$ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอเตอร์ (Current)

V_{emf} แรงดันไฟฟ้า Back EMF

$\omega_m(t)$ ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ (Angular Velocity)

T_m แรงบิดของมอเตอร์ (Torque)

K_e Back EMF Constant

K_m Torque Constant

R_m ค่าความต้านทานไฟฟ้าของมอเตอร์ (Resistance)

L_m ค่าความเหนี่ยวนำของมอเตอร์ (Inductance)

J_m ค่าความเฉื่อย (Inertia)

B_m ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานหนืด (Damping)

Part 1: System Modelling

1. จากสมการที่ (1) ถึง (4) นักศึกษาคิดว่าระบบของมอเตอร์มี Input และ Output เป็นอะไรบ้าง
2. จากสมการที่ (1) ถึง (4) นักศึกษาเข้าใจว่ามีค่าคงที่ที่ยังไม่ทราบค่าจำนวนกี่ตัว และค่าคงที่เหล่านั้นคืออะไรบ้าง
3. จงพิสูจน์ว่า $K_m = \eta K_e, 0 \leq \eta \leq 1$ (Hint! ใช้สมการเกี่ยวกับกำลัง (Power) ในการพิสูจน์)
4. จงวาด Block Diagram ของระบบ โดยกำหนดให้ $K_m = \eta K_e$

Part 2: System Identification (Resistance & Inductance Estimation)

ในการทดลองในส่วนนี้เราจะทำการประยุกต์ใช้องค์ความรู้ทางด้านไฟฟ้า เพื่อที่จะทำการประมาณค่าความต้านทาน R_m และค่าความเหนี่ยวนำ L_m ของมอเตอร์ โดยอุปกรณ์ที่มีให้เพื่อใช้ในการทำการทดลองในครั้งนี้จะประกอบด้วย

- Oscilloscope แบบ 2 Channel ตัว
- Multimeter 1 ตัว
- Power Supply 1 ตัว
- ตัวต้านทาน R_{sh} ที่มีค่าความต้านทาน 6.8Ω และ 8Ω ซึ่งสามารถทนกำลังไฟฟ้าได้ 20W

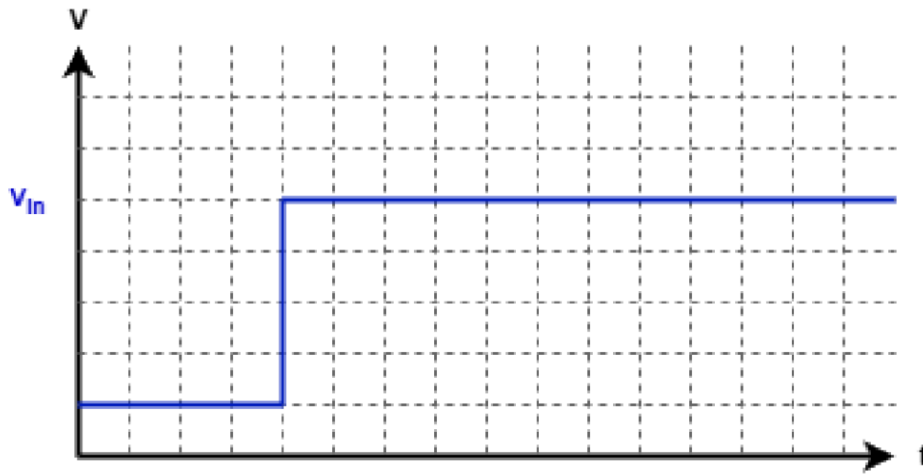
5. หากต้องการลดรูปสมการให้เหลือเฉพาะพจน์ที่เกี่ยวข้องกับ R_m และ L_m ควรดำเนินการอย่างไร? แสดงวิธีการและอธิบายโดยอ้างอิงจากสมการ ที่ (1) ถึง (4) (Hint! คำนึงถึงสมการที่มีสิ่งที่ต้องการและกำจัดบางอย่างออก)

6. จงเขียนสมการที่ได้หลังการลดรูปพร้อมวาดภาพวงจรไฟฟ้าของสมการที่ได้ (Hint! วงจรที่ได้ควรมีลักษณะเป็นวงจรพื้นฐาน)

7. เพื่อวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอเตอร์ เราต้องเพิ่มตัวต้านทาน R_{sh} เข้ากับวงจรไฟฟ้า นักศึกษาคิดว่าเราควรเชื่อมต่อตัวต้านทานนี้กับวงจรอย่างไร? อธิบายโดยใช้ความรู้เกี่ยวกับวงจรไฟฟ้า (Hint! คำนึงถึงคุณสมบัติของวงจรแต่ละรูปแบบ เช่น อนุกรมและขนาน)

8. จงเขียนสมการที่ได้หลังการเพิ่มตัวต้านทาน R_{sh} พร้อมวาดภาพวงจรไฟฟ้าของสมการที่ได้
9. นักศึกษาคิดว่าเราสามารถคำนวณกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรเมื่อเพิ่ม R_{sh} ได้อย่างไร? และต้องการข้อมูลใดเพิ่มเติมเพื่อใช้ในการคำนวณกระแสไฟฟ้า แสดงคำตอบในรูปแบบสมการทางไฟฟ้า (Hint! การแก้สมการ ODE ด้วย Laplace Transform)
10. หากเราต้องการวัดข้อมูลเพิ่มเติมที่นักศึกษาตอบในข้อที่ 9 โดยใช้ Oscilloscope นักศึกษาควรเชื่อมต่อโพรบกับวงจรอย่างไร? นักศึกษาควรระบุ จุดที่ใช้วัดและขั้วของโพรบให้ชัดเจน พร้อมทั้งอธิบายเหตุผลในการเลือกจุดเชื่อมต่อนั้น ไฟฟ้า (Hint! การวัดสัญญาณทางไฟฟ้าจำเป็นต้องมีจุด Reference ที่ชัดเจน)

11. จงวาดกราฟแสดงแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่ตัวต้านทาน R_{sh} ซึ่งคาดว่าจะวัดได้ โดยสมมุติว่าค่าความต้านทาน R_m มีค่าน้อยมาก



ภาพที่ 2 Step Response Graph

12. นักศึกษาคิดว่าเหตุใดเราจึงไม่ใช้ Multimeter ในการวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร (ตอบอย่างน้อย 2 เหตุผล) (Hint! ทำไมบางงานจึงต้องใช้ Oscilloscope, ข้อมูลบางอย่างที่ Oscilloscope สามารถให้ได้)

13. จากวงจรไฟฟ้าในข้อที่ 8 จงพิสูจน์ว่าสมการ $R_m = R_{sh} \left(\frac{V_{in}}{V_{sh}} - 1 \right)$ และ $L_m = R_{sh} \left(\tau \frac{V_{in}}{V_{sh}} \right)$ เป็นจริง โดยกำหนดให้ τ คือ Time Constant และ V_{sh} คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่ตัวต้านทาน R_{sh} (Hint! แบ่งการวิเคราะห์เป็น 2 ช่วง ได้แก่ Transient Response และ Steady-State ว่าสามารถใช้หลักการหรือค่าอะไรในการช่วยพิสูจน์สมการ)

14. ให้นักศึกษาแสดงวิธีการประมาณค่าแรงดันไฟฟ้า V_{in} สูงสุดที่จะทำให้เรามั่นใจว่าจะไม่มีอุปกรณ์ไฟฟ้าในวงจรเสียหาย พร้อมอธิบายเหตุผล โดย กำหนดให้มอเตอร์ของเราสามารถทนแรงดันไฟฟ้าสูงสุดได้ที่ 12V โดยให้สมมุติว่าเราจะไม่ทราบและยังไม่สามารถวัดค่าของตัวแปรต่าง ๆ ของ มอเตอร์ได้ (Hint! อุปกรณ์ใดในวงจรอาจเสียหายได้? แต่ละอุปกรณ์มีขีดจำกัดอะไร? เช่นแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า)

15. นักศึกษาคิดว่าค่าความต้านทาน R_{sh} ที่จะใช้แทนค่าเพื่อหาค่า R_m และ L_m ควรใช้ค่าเป็นค่าความต้านทานตามที่ระบุอยู่บนตัวต้านทานหรือไม่ หากไม่ควรใช้วิธีใดในการหาค่าความต้านทาน R_{sh} (Hint! ทุกครั้งเวลาหยิบตัวต้านทานหลังห้อง FB501 เราน่ามันมาใช้ได้เลยหรือไม่)

16. ถ้าหากนักศึกษามี Power Supply 12 V 5 A Limit แล้วต้องการจะจ่ายไฟ 10 V สำหรับทำการทดลองหาค่า R_m และ L_m ควรจะจ่ายไฟด้วยวิธีใดในระหว่างการปรับแรงดันไฟฟ้าจาก Power Supply หรือ การจ่ายแบบ PWM (Hint! คำนิยามของ Pulse Width Modulation คืออะไร แล้วทำไมในงานหุ่นยนต์ถึงใช้ Pulse Width Modulation)

Part 3: Motor Parameter Estimation using Different Input Signals

หลังจากที่เราสามารถหาค่าความต้านทาน R_m และค่าความเหนี่ยวนำ L_m ของมอเตอร์ได้แล้ว เราจะหาค่า **Parameter** ที่เหลือด้วย **Parameter Estimator** ของ **MATLAB** โดยอุปกรณ์ที่มีให้เพื่อใช้ในการทำการทดลองในครั้งนี้จะประกอบด้วย

- MotorXplorer
- Computer ที่มี MATLAB

Parameter Estimator เป็นเครื่องมือใน MATLAB/Simulink ที่ใช้สำหรับประมาณค่าตัวแปรในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยอาศัยหลักการ **Optimization** กล่าวคือ เครื่องมือจะพยายามปรับค่า **Parameter** ต่างๆ เพื่อให้สัญญาณ Output ที่ได้จากแบบจำลอง (Model) มีความใกล้เคียงกับสัญญาณ Output ที่วัดได้จากระบบจริงมากที่สุด

การที่เราจะสามารถหาค่า **Parameter** อื่นๆ ได้นั้น เราจำเป็นต้องสร้าง **Motor Model** ใน Simulink ก่อน จากนั้นทำการทดลองโดยจ่ายสัญญาณไฟฟ้ารูปแบบต่างๆ เข้าไปให้มอเตอร์ของจริง แล้วบันทึกข้อมูลความเร็วเชิงมุมที่วัดได้ เครื่องมือ **Parameter Estimator** จะทำการหาค่า **Parameter** ที่เหมาะสมออกมาให้ โดยพยายามปรับค่าต่างๆ จนกว่า **Response** ของ Model จะมีหน้าตาใกล้เคียงกับของจริงมากที่สุด

เนื่องจากกระบวนการนี้เป็นการ **Optimization** การ Run โปรแกรมแต่ละครั้งอาจให้ค่าที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับ Initial Value ที่ตั้งไว้ และลักษณะของสัญญาณ Input ที่ใช้ ดังนั้นในการทดลองนี้จึงได้ออกแบบให้มีการทดสอบด้วยสัญญาณ Input หลากหลายรูปแบบ ได้แก่ **Sine Wave, Ramp, Step, Stair Step, และ Chirp** เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลลัพธ์และเลือกชุด **Parameter** ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอธิบายพฤติกรรมของมอเตอร์

17. นักศึกษาคิดว่า K_m และ K_e สามารถนำไปประมาณค่าได้โดยตรงด้วย **Parameter Estimator** หรือไม่? เพราะเหตุใด? (Hint! พิจารณาสมการ $K_m = \eta K_e$ นักศึกษาคิดว่าข้อจำกัดของตัวแปร 2 ตัวนี้คืออะไร และควรกำหนดเงื่อนไขอย่างไรให้ **Parameter Estimator** ประมาณค่าได้อย่างเหมาะสม)

18. จงอธิบายลักษณะของสัญญาณ Input แต่ละประเภทต่อไปนี้ พร้อมวาดกราฟแสดงรูปร่างของสัญญาณ:

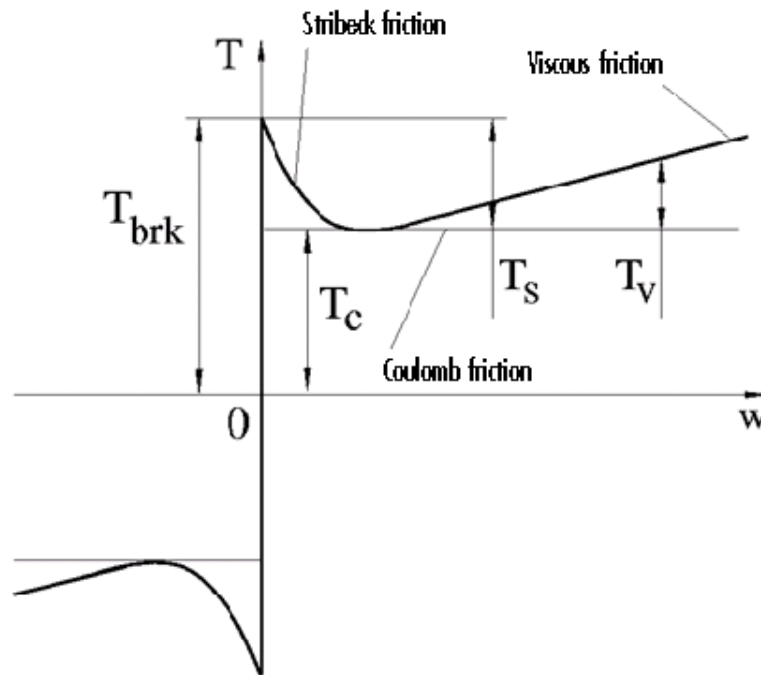
- Sine Wave
- Ramp
- Step
- Stair Step
- Chirp

19. เหตุใดจึงควรใช้สัญญาณหลากหลายรูปแบบในการทำ Parameter Estimation แทนที่จะใช้สัญญาณเพียงรูปแบบเดียว? (Hint! พิจารณาว่าสัญญาณแต่ละแบบทำให้เห็นพฤติกรรมที่หลากหลายของมอเตอร์ได้ เช่น Transient State, Steady State, Deadband, Phase Shift)

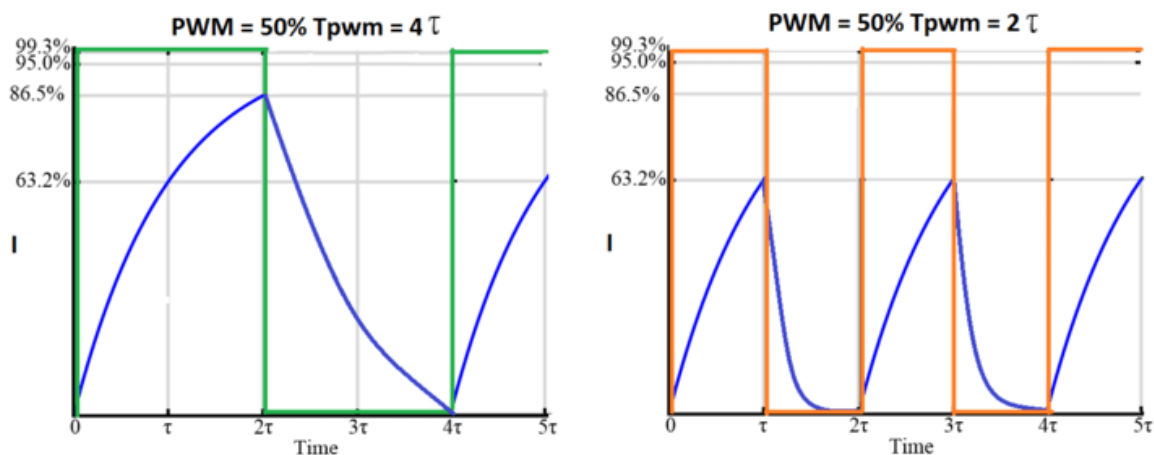
20. นักศึกษาคิดว่ามอเตอร์มีพฤติกรรมที่เป็น Non-Linear หรือไม่? (เนื่องจากตอนนี้ **Model** ของเราเป็น **Linear Model**) ถ้ามี จงยกตัวอย่างพฤติกรรม Non-Linear ที่คาดว่าสังเกตได้จากการทดลองและจากสัญญาณ Input รูปแบบใด

Part 4: Analysis of Discrepancies between Model and Real Motor

ในการทดลองจริง เราจะพบว่า Response ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และ Response ของมอเตอร์จริงมีความแตกต่างกันอยู่ ซึ่งความแตกต่างเหล่านี้เกิดจากหลายปัจจัยที่แบบจำลองไม่ได้พิจารณาไว้ ในส่วนนี้นักศึกษาจะได้วิเคราะห์และค้นหาสาเหตุของความแตกต่างเหล่านั้น ตัวอย่างเช่น ผลกระทบของการใช้ Pulse Width Modulation และ Rotational Friction



ภาพที่ 3 Rotational Friction ภายในมอเตอร์



ภาพที่ 4 กระแสไฟฟ้าภายในมอเตอร์ที่ Duty Cycle 50% แต่ความถี่ของ PWM ต่างกัน

21. จากการทำการทดลองเพื่อหาค่า Parameter ใช้การจ่ายไฟแบบ Pulse Width Modulation แทนการจ่ายแรงดันไฟฟ้าโดยตรงจาก Power Supply นักศึกษาคิดว่าการจ่ายไฟทั้งสองแบบนี้จะทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอเตอร์มีลักษณะแตกต่างกันอย่างไร? (Hint! พิจารณาผลกระทบของ PWM ทุกอย่างตามที่เรียนมาในรายวิชา FRA 271 Robotics Modelling and Experimentation)

22. จากสมการทางไฟฟ้าของมอเตอร์ นักศึกษาคิดว่าพจน์ใดในสมการที่ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่าง Model กับมอเตอร์จริงเมื่อจ่ายไฟแบบ Pulse Width Modulation? และหากต้องการให้ Model ทำงานได้ถูกต้อง ควรจ่ายไฟในลักษณะใด? (Hint! พิจารณาพจน์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า)

23. นักศึกษาคิดว่ามอเตอร์สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าได้ทันทีทันใดหรือไม่? เพราะเหตุใด? (Hint! พิจารณาคูณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลของมอเตอร์ที่ส่งผลต่อความเร็วในการตอบสนอง)

24. นักศึกษาคิดว่าหากจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าน้อยมากๆ จะสามารถทำให้มอเตอร์เริ่มหมุนได้หรือไม่? หากไม่สามารถหมุนได้เกิดจากสาเหตุใด? (Hint! พิจารณาวามีแรงต้านอะไรภายในระบบที่ต้องเอาชนะก่อนที่จะมอเตอร์จะเริ่มหมุน)