

2102333: ระบบควบคุมเชิงเส้น 1
ห้องปฏิบัติการพื้นฐานระบบควบคุม
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองที่ 1 การจำลองและวิเคราะห์ระบบพลวัตด้วยคอมพิวเตอร์

วัตถุประสงค์

ศึกษาการใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK เพื่อจำลองและวิเคราะห์ระบบควบคุมของชุดการทดลองมอเตอร์

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. เพื่อให้นิสิตสามารถเขียนแผนภาพกรอบโดยใช้ SIMULINK
2. เพื่อให้นิสิตสามารถแสดงผลตอบเชิงเวลาของระบบควบคุมโดยใช้ MATLAB/SIMULINK

บทนำ

การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ (computer simulation) เป็นขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่งในการวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุม โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบทางอุตสาหกรรม ในการวิเคราะห์และออกแบบระบบพลวัต (dynamic system) นั้นเราต้องทราบพฤติกรรมการทำงานและปัจจัยต่างๆของระบบที่ส่งผลต่อการทำงาน โดยเฉพาะผลตอบสนองเชิงเวลาของระบบควบคุม หากมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) ของระบบแล้ว เราสามารถทราบพฤติกรรมของระบบได้โดยการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

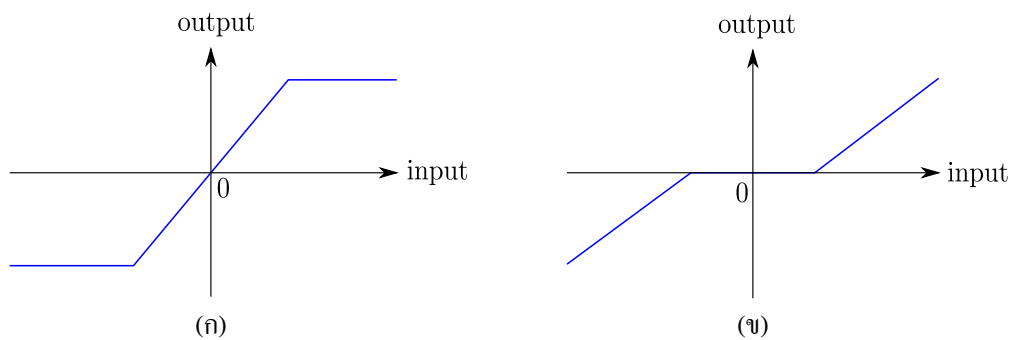
อนึ่ง การศึกษาของแบบจำลองของระบบพลวัตสามารถแบ่งได้เป็น 2 เรื่องหลักๆ คือ ความง่ายของการสร้างแบบจำลองและความแม่นยำของระบบจำลอง ถ้าเราต้องการแบบจำลองที่แม่นยำมาก การสร้างแบบจำลองอาจจะต้องมีความซับซ้อนในทางกลับกันถ้าเราสามารถยอมรับแบบจำลองที่ได้จากการประมาณคร่าวๆ แบบจำลองจะมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ในการทดลองนี้จะเน้นการสร้างแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น (linear) และไม่แปรผันตามเวลา (time-invariant) ซึ่งเป็นแบบจำลองอย่างง่ายและมีความแม่นยำจำกัด

ระบบเชิงเส้น หมายถึง ระบบที่ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเข้าและสัญญาณออกเป็นไปตามกฎการทับซ้อน (superposition) ยกตัวอย่างเช่น ผลตอบสนองจากสัญญาณเข้าหลายสัญญาณมีค่าเท่ากับผลรวมของผลตอบสนองจากสัญญาณเข้าแต่ละสัญญาณ ระบบไม่แปรผันตามเวลา หมายถึง ระบบที่ผลตอบสนองจากการประวิงเวลาของสัญญาณเข้ามีค่าเท่ากับการประวิงเวลาของสัญญาณออกจากการกระตุ้นโดยสัญญาณเข้าเดิมที่ไม่มีการประวิงเวลา ระบบเชิงเส้นและไม่แปรผันตามเวลา เป็นระบบเชิงเส้นที่อธิบายพฤติกรรมด้วยสมการอนุพันธ์สามัญเชิงเส้นที่มีสัมประสิทธิ์เป็นค่าคงที่

ระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น หมายถึง ระบบที่ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเข้าและสัญญาณออกไม่สอดคล้องกับกฎการทับซ้อน (superposition) นั่นคือ ผลตอบสนองจากสัญญาณเข้าหลายๆสัญญาณมีค่าไม่เท่ากับผลรวมของผลตอบสนองจากสัญญาณเข้าแต่ละสัญญาณ ตัวอย่างระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น เช่น

$$\begin{aligned}\ddot{x} + \dot{x}^2 + x &= A \sin(\omega t) \\ \ddot{x} + (x^2 - 1)\dot{x} + x &= u_1 \\ \ddot{x} + \dot{x} + x + x^3 &= u_2\end{aligned}$$

ในทางปฏิบัติระบบพลวัตบางระบบอาจประมาณให้เป็นเชิงเส้นที่จุดทำงานค่าหนึ่งภายใต้เปลี่ยนแปลงของสัญญาณเข้าที่มีค่าเล็กน้อยเพียงพอ แต่หากสัญญาณที่เข้าระบบมีขนาดใหญ่เกินไป สัญญาณออกที่ได้อาจเกิดการอิ่มตัว (saturation) ดังรูปที่



รูปที่ 1: (ก) สัญญาณออกที่เกิดจากการอิมิต (ข) สัญญาณออกที่เกิดจากเขตไร้ผลตอบสนอง

1 (ก) หรือระบบอาจจะมีเขตไร้ผลตอบสนอง (deadzone) เกิดขึ้น นั่นคือ ไม่มีสัญญาณออกหากสัญญาณเข้ามีขนาดเล็กเกินไปดังรูปที่ 1 (ข)

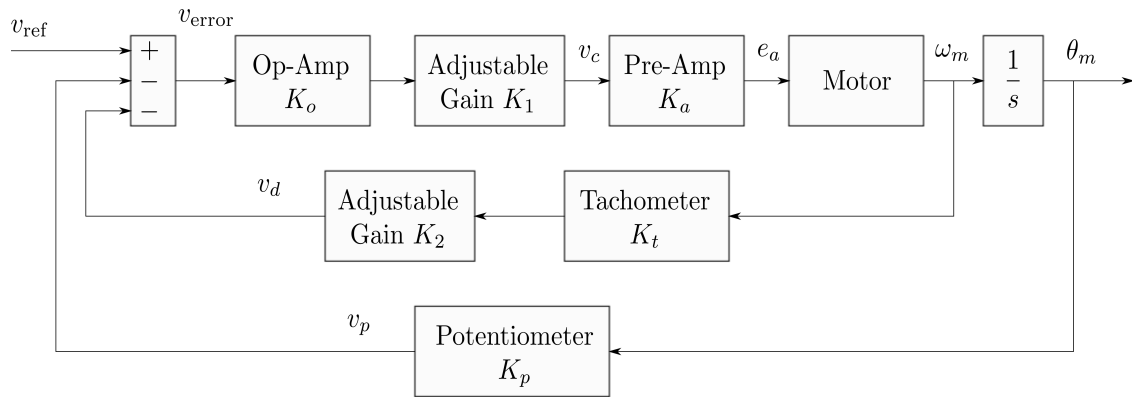
โดยทั่วไปแบบจำลองของระบบพลวัตสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ ดังนั้นการจำลองในโดเมนเวลาคือการหาผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ที่ใช้แสดงแบบจำลองของระบบนั่นเอง การจำลองระบบพลวัตทำได้ 2 แบบคือ

1. แอนะล็อกคอมพิวเตอร์ (analog computer) การจำลองโดยใช้แอนะล็อกคอมพิวเตอร์ทำได้โดยต่อวงจรทางไฟฟ้า ซึ่งมีลักษณะสมบัติเหมือน (หรือคล้าย) กับระบบที่ต้องการจำลอง สัญญาณออกของวงจรคือ ผลตอบสนองของระบบ ที่ทำการจำลองนั่นเอง องค์ประกอบหลักของแอนะล็อกคอมพิวเตอร์ที่ใช้ได้แก่ ตัวอินทิเกรต (integrator) ตัวขยาย (gain) และตัวรวมสัญญาณ (summer) นอกจากนี้อาจมีองค์ประกอบอื่นๆอีกเช่น ตัวจำกัดค่า (limiter) และรีเลย์ (relay) เป็นต้น ซึ่งใช้ในการจำลองระบบไม่เชิงเส้น ข้อดีของการจำลองด้วยแอนะล็อกคอมพิวเตอร์คือ สามารถให้ผลตอบออกมาได้ทันที ซึ่งทำให้เหมาะสำหรับการประยุกต์บางประเภท ทั้งยังสะดวกและรวดเร็วถ้าทำงานที่ไม่ซับซ้อนมาก ส่วนข้อเสียคือ ถ้าต้องการผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำสูงจะทำได้ยากและราคาของอุปกรณ์ที่ใช้จะมีราคาสูงมาก นอกจากนี้ยังมีปัญหาเกี่ยวกับค่าจำกัดของค่าแรงดันเกินพิกัดซึ่งอาจจะต้องทำการย่อขนาดของสัญญาณ (scaling) เพื่อให้วงจรที่ต่อทำงานได้ในช่วงที่ให้ผลลัพธ์ถูกต้อง
2. ดิจิตอลคอมพิวเตอร์ (digital computer) การจำลองโดยใช้ดิจิตอลคอมพิวเตอร์ทำได้โดยการคำนวณหาคำตอบของสมการอนุพันธ์ที่แสดงแบบจำลองของระบบด้วยระเบียบวิธีทางเชิงเลข (numerical method) ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำสูงเหมาะกับการจำลองระบบที่ซับซ้อน ไม่มีปัญหาเรื่องการย่อขนาดของสัญญาณ (scaling) และในปัจจุบันดิจิตอลคอมพิวเตอร์มีใช้แพร่หลาย แต่ข้อเสียคือผู้ใช้ควรมีความรู้ทางระเบียบวิธีเชิงเลข (เมื่อจำเป็นต้องเขียนโปรแกรมหรือซอฟต์แวร์เอง) หรือบางครั้งไม่สามารถให้ผลลัพธ์ได้ในเวลาจริง (real time) ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วในการคำนวณของคอมพิวเตอร์

สำหรับการทดลองนี้ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับคำนวณ ได้แก่โปรแกรมMATLAB/SIMULINK ซึ่งมีเครื่องมือช่วยแสดงผลที่ง่ายและชัดเจน ผู้ใช้สามารถโต้ตอบกับโปรแกรมได้สะดวก และยืดหยุ่น การจำลองระบบด้วย MATLAB/SIMULINK ช่วยลดภาระของการพัฒนาโปรแกรมลงอย่างมาก โดยเฉพาะในเรื่องการเรียนรู้ระเบียบวิธีเชิงเลขและเขียนโปรแกรมเพื่อทำการคำนวณ (เช่น การหาคำตอบของสมการอนุพันธ์) ทำให้เราสามารถมุ่งความสนใจในเรื่องการวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมได้เต็มที่ นอกจากนี้ MATLAB/SIMULINK ยังมีส่วนเชื่อมต่อกับผู้ใช้ (user interface) ที่ใช้งานได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว

ในทางปฏิบัติการวิเคราะห์และสังเคราะห์ระบบควบคุมจะประกอบด้วยขั้นตอนหลักๆคือ

1. ทดลองและเก็บข้อมูลจากระบบจริงเพื่อหาคุณลักษณะและพารามิเตอร์ของระบบ
2. นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์
3. จำลองผลตอบสนองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของแบบจำลองว่าใกล้เคียงกับระบบจริงเพียงใด
4. ออกแบบตัวควบคุม และปรับแต่งจนกระทั่งระบบมีสมรรถนะตามต้องการ



รูปที่ 2: แผนภาพกรอบของชุดการทดลองมอเตอร์

5. นำตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบไปควบคุมระบบจริง

การปฏิบัติครั้งนี้จะเน้นการจำลองระบบชุดการทดลองมอเตอร์แล้ววิเคราะห์พฤติกรรมของระบบสำหรับนำไปใช้ออกแบบตัวควบคุมต่อไป ชุดการทดลองมอเตอร์มีแบบจำลองอย่างง่ายแสดงในรูปที่ 2

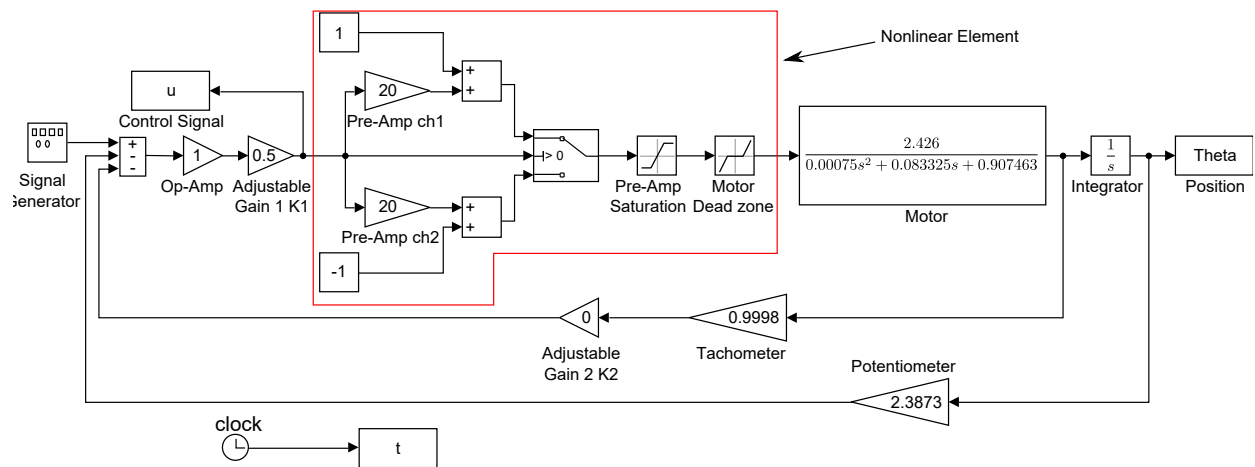
แบบจำลองของการควบคุมมอเตอร์นี้มีสัญญาณเข้าเป็นแรงดันอ้างอิง v_{ref} (V) และมีสัญญาณออกเป็นตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์ θ_m (rad) เป้าหมายของการควบคุมระบบนี้คือ การทำให้ให้แกนโรเตอร์หมุนไปตรงตำแหน่งที่ต้องการ นั่นคือการตามรอยสัญญาณอ้างอิง (reference tracking) ระบบนี้ใช้การควบคุมแบบมีการป้อนกลับตำแหน่ง และ/หรือการป้อนกลับความเร็ว ชุดการทดลองประกอบด้วย อุปกรณ์ต่างๆ และหน้าที่ของอุปกรณ์เป็นดังต่อไปนี้

1. มอเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่เราต้องการควบคุม โดยให้โรเตอร์ของมอเตอร์หมุนไปหยุดในตำแหน่งที่ต้องการ ฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์จากแรงดันอาร์เมเจอร์ e_a (V) ถึงความเร็วเชิงมุม ω_m (rad/sec) เป็นดังนี้

$$G(s) = \frac{2.426}{0.00075s^2 + 0.083325s + 0.907463}$$

2. แทคโคมิเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์เป็นแรงดัน ป้อนกลับความเร็ว ฟังก์ชันถ่ายโอนของแทคโคมิเตอร์เป็นอัตราขยายค่าคงที่เท่ากับ 0.1047 V/rpm หรือ 0.9998 V/rad/sec
3. โพเทนซิโอมิเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์เป็นแรงดันป้อนกลับตำแหน่ง ฟังก์ชันถ่ายโอนของโพเทนซิโอมิเตอร์เป็นอัตราขยายค่าคงที่เท่ากับ 2.3873 V/rad
4. ออปแอมป์ เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปรียบเทียบแรงดันอ้างอิงกับแรงดันป้อนกลับ ถ้าแรงดันป้อนกลับมีค่าไม่เท่ากับแรงดันอ้างอิง แรงดันคลาดเคลื่อนจะมีค่าไม่เป็นศูนย์เพื่อเป็นแรงดันขับเคลื่อนมอเตอร์ต่อไป ออปแอมป์ มีอัตราขยายค่าคงที่เท่ากับ 1
5. อัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 1 (K_1) รับสัญญาณแรงดันจากออปแอมป์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแบ่งแรงดัน มีลักษณะเป็นตัวต้านทานที่ปรับค่าได้ สามารถเลือกอัตราขยายตั้งแต่ 0 ถึง 1 หรือ 0-100%
6. อัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 2 (K_2) รับสัญญาณแรงดันจากแทคโคมิเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแบ่งแรงดัน มีลักษณะเป็นตัวต้านทานที่ปรับค่าได้ สามารถเลือกอัตราขยายตั้งแต่ 0 ถึง 1 หรือ 0-100%
7. ฟรีแอมป์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการขยายสัญญาณควบคุม ตัวฟรีแอมป์มีขั้วสัญญาณออกอยู่ 2 ขั้ว เพื่อแยกสัญญาณที่เป็นบวกและลบออกจากกัน เมื่อมีสัญญาณเข้าเป็นบวก จะได้สัญญาณขยายมีค่าบวกที่ขั้วหนึ่ง ขณะที่เมื่อสัญญาณเข้าเป็นลบจะได้สัญญาณขยายออกมีค่าบวกที่อีกขั้วหนึ่ง ฟรีแอมป์จึงทำหน้าที่ปรับสัญญาณเข้าสู่มอเตอร์ทำให้มอเตอร์หมุนได้ 2 ทิศทาง สัญญาณออกแต่ละช่องเป็นฟังก์ชันของแรงดันจากตัวควบคุม ดังนี้

$$e_a = \begin{cases} 13, & v_c > 0.6 \\ 1 + 20v_c, & 0 \leq v_c \leq 0.6 \\ 1, & v_c < 0 \end{cases}$$



รูปที่ 3: แผนภาพกรอบ SIMULINK ของชุดการทดลองมอเตอร์

$$e_a = \begin{cases} -13, & v_c > 0 \\ -1 + 20v_c, & -0.6 \leq v_c \leq 0 \\ -1, & v_c < -0.6 \end{cases}$$

ฟังก์ชันดังกล่าวสามารถจัดในรูปแบบง่ายเพื่อประโยชน์ในการเขียนภาพกรอบ SIMULINK ดังนี้

$$e_a = \begin{cases} 13, & v_c > 0.6 \\ 1 + 20v_c, & 0 \leq v_c \leq 0.6 \\ -1 + 20v_c, & -0.6 \leq v_c \leq 0 \\ -13, & v_c < -0.6 \end{cases}$$

ระบบการควบคุมมอเตอร์มีลักษณะสำคัญ คือ มีเขตไร้ผลตอบสนองในส่วนการเคลื่อนที่เชิงมุมของตัวมอเตอร์ ซึ่งเกิดจากแรงเสียดทานสถิตย ดังนั้นแรงดัน e_a ที่ป้อนให้กับมอเตอร์ต้องมีค่าเพียงพอในระดับหนึ่งเพื่อให้แรงบิดของมอเตอร์เอาชนะแรงเสียดทานสถิตยได้ แล้วโรเตอร์จึงจะเริ่มหมุน แรงดันที่ทำให้โรเตอร์เอาชนะแรงเสียดทานของมอเตอร์คือ 1.5 V ดังนั้นเขตไร้ผลตอบสนองอยู่ในช่วง -1.5 ถึง 1.5 V

นอกจากนี้ ตัวพรีแอมป์ มีลักษณะการอิ่มตัว เนื่องจากแรงดันของแหล่งจ่ายไฟ มีขนาดจำกัด ทั้งนี้อาจมองว่าการอิ่มตัวเป็นประโยชน์ป้องกันไม่ให้แรงดันที่เข้ามอเตอร์มากเกินไป นั่นคือแรงดัน อิ่มตัวเท่ากับ $+13$ หรือ -13 V ขณะเดียวกันสมรรถนะของระบบควบคุมอาจลดลงด้วย แผนภาพกรอบ SIMULINK ของชุดควบคุมมอเตอร์ที่มีส่วนประกอบที่ไม่เชิงเส้นพร้อม พารามิเตอร์ต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 3

อนึ่ง แบบจำลองเชิงเส้นของระบบควบคุมมอเตอร์เป็นแบบจำลองที่ทำให้เป็นเชิงเส้น นั่นคือละเลยเขตไร้ผลตอบสนองของมอเตอร์และการอิ่มตัวของพรีแอมป์ อีกทั้งให้ประมาณพรีแอมป์ให้เป็นอัตราขยายมีค่าเท่ากับ 20

วิธีทดลอง

การทดลองที่ 1.1 สร้างแผนภาพกรอบที่เป็นเชิงเส้นของชุดการทดลองมอเตอร์

1. สร้างแผนภาพกรอบ SIMULINK ของชุดการทดลองมอเตอร์ ตามแบบจำลองรูปที่ 3 และประมาณระบบให้เป็นเชิงเส้น นั่นคือละเลยเขตไร้ผลตอบสนองของมอเตอร์และการอิ่มตัวของพรีแอมป์ ให้ประมาณพรีแอมป์เป็นอัตรา

ขยายมีค่าเท่ากับ 20 เมื่อยังไม่มี การป้อนกลับทั้งสัญญาณตำแหน่งและความเร็วเชิงมุม

- พิจารณากรณีที่มีการป้อนกลับสัญญาณตำแหน่งเพียงอย่างเดียว กำหนดให้ค่าอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 1 เป็น 50% และให้อัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 2 เป็น 0% จากนั้นใส่สัญญาณอ้างอิงเป็นสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมขนาด $2 V_{p-p}$ และมีความถี่ 0.1 Hz จำลองผลตอบสนองทางเวลาของสัญญาณตำแหน่งเชิงมุม (θ_m) และสัญญาณควบคุม (u) บันทึกผลสัญญาณทั้งสอง

** บันทึกรูปภาพผลตอบทุกภาพจากการใช้คำสั่ง plot ในโปรแกรม MATLAB ระบุชื่อภาพ พร้อมทั้งชื่อแกนนอนและแกนตั้ง

การทดลองที่ 1.2 การจำลองระบบของชุดการควบคุมมอเตอร์

- ใช้ MATLAB/SIMULINK จำลองระบบของชุดการควบคุมมอเตอร์ตามรูปที่ 3 และประมาณระบบให้เป็นเชิงเส้น นั่นคือละเลยเขตไร้ผลตอบสนองของมอเตอร์และการอิ่มตัวของพรีแอมป์ นั่นคือละเลยเขตไร้ผลตอบสนองของมอเตอร์ และการอิ่มตัวของพรีแอมป์ ให้ประมาณพรีแอมป์เป็นอัตราขยายมีค่าเท่ากับ 20
- ตั้งค่าอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 1 เป็น 50% และอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 2 เป็น 0% จากนั้นใส่สัญญาณเข้าให้เป็นสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมขนาด $2 V_{p-p}$ และมีความถี่ 0.1 Hz ใช้เวลาในการจำลอง (simulation time) 10 วินาที โดยปรับพารามิเตอร์ในการจำลองให้ max step size และ initial step size เป็น auto, ให้ relative tolerance เป็น 1×10^{-3} และปรับ absolute tolerance เป็น auto จำลองผลตอบสนองทางเวลาของสัญญาณตำแหน่งเชิงมุม (θ_m) บันทึกผลสัญญาณ
- ทำการทดลองข้อ 2. ซ้ำ โดยให้ max step size และ initial step size เป็น 0.1, relative tolerance เป็น 1 และให้ absolute tolerance เป็น auto
- ทำการทดลองข้อ 2. ซ้ำ โดยให้ max step size และ Initial step size เป็น 1×10^{-4} , relative tolerance เป็น 1×10^{-4} และให้ absolute tolerance เป็น auto
- วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง

การทดลองที่ 1.3 การป้อนกลับแบบ P ของชุดการควบคุมมอเตอร์

- ประมาณระบบให้เป็นเชิงเส้นโดยละเลย deadzone ของมอเตอร์และการอิ่มตัวของพรีแอมป์ นั่นคือประมาณพรีแอมป์เป็นเพียงอัตราขยายมีค่าเท่ากับ 20 ตั้งค่าอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 1 เป็น 20% กำหนดให้อัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 2 เป็น 0% จากนั้นใส่สัญญาณเข้าให้เป็นสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมขนาด $2 V_{p-p}$ และมีความถี่ 0.1 Hz จำลองผลตอบสนองทางเวลาของสัญญาณตำแหน่งเชิงมุม (θ_m) บันทึกผลสัญญาณ
- ทำการทดลองข้อ 1. ซ้ำที่ค่าอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 1 เป็น 50% และ 100%
- ใช้คำสั่ง stepinfo ของ MATLAB เพื่อหาลักษณะสมบัติของผลตอบสนองสัญญาณขั้นบันได
- บันทึกรูปภาพผลตอบจากการใช้คำสั่ง plot ในโปรแกรม MATLAB ระบุชื่อภาพ พร้อมทั้งชื่อแกนนอนและแกนตั้ง วิเคราะห์พฤติกรรมของระบบที่ทำการประมาณให้เป็นเชิงเส้นเมื่อมีการเปลี่ยนค่าอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 1 และอธิบายผลทางกายภาพของระบบจริง

การทดลองที่ 1.4 การป้อนกลับแบบ PD ของชุดการควบคุมมอเตอร์

- โดยละเลย deadzone ของมอเตอร์และการอิ่มตัวของพรีแอมป์ นั่นคือประมาณพรีแอมป์เป็นเพียงอัตราขยายมีค่าเท่ากับ 20 ตั้งค่าอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 1 เป็น 100% และอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 2 เป็น 10% จากนั้น

ใส่สัญญาณเข้าให้เป็นสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมขนาด $2 V_{p-p}$ และมีความถี่ 0.1 Hz จ้างลองผลตอบสนองทางเวลาของสัญญาณตำแหน่งเชิงมุม (θ_m) บันทึกผลสัญญาณ

2. ทำการทดลองข้อ 1 ซ้ำที่ค่าอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 2 เป็น 20% และ 50%
3. ใช้คำสั่ง stepinfo ของ MATLAB เพื่อหาลักษณะสมบัติของผลตอบสนองสัญญาณขั้นบันได
4. วิเคราะห์พฤติกรรมของระบบที่ทำการประมาณให้เป็นเชิงเส้นเมื่อมีการเปลี่ยนค่าอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 2 และอธิบายผลทางกายภาพของระบบจริง

การทดลองที่ 1.5 การจำลองระบบของชุดการควบคุมมอเตอร์

1. ใช้ MATLAB/SIMULINK จ้างลองระบบของชุดการควบคุมมอเตอร์ตามรูปที่ 3
2. ตั้งค่าอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 1 เป็น 50% และอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 2 เป็น 0% จากนั้นใส่สัญญาณเข้าให้เป็นสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมขนาด $2 V_{p-p}$ และมีความถี่ 0.1 Hz แสดงผลตอบทางเวลาของระบบโดยใช้เวลาในการจำลอง (simulation time) 10 วินาที โดยปรับพารามิเตอร์ในการจำลองให้ max step size และ initial step size เป็น auto, ให้ relative tolerance เป็น 1×10^{-3} และปรับ absolute tolerance เป็น auto จ้างลองผลตอบสนองทางเวลาของสัญญาณตำแหน่งเชิงมุม (θ_m) บันทึกผลสัญญาณ
3. ทำการทดลองข้อ 2. ซ้ำ โดยให้ max step size และ initial step size เป็น 0.1, relative tolerance เป็น 1 และให้ absolute tolerance เป็น auto
4. ทำการทดลองข้อ 2. ซ้ำ โดยให้ max step size และ Initial step size เป็น 1×10^{-4} , relative tolerance เป็น 1×10^{-4} และให้ absolute tolerance เป็น auto
5. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง

การทดลองที่ 1.6 ผลขององค์ประกอบที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่มีต่อระบบ

1. ใช้ MATLAB/SIMULINK จ้างลองระบบของชุดการควบคุมมอเตอร์ตามรูปที่ 3
2. ตั้งค่าอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 1 เป็น 100% และอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 2 เป็น 10% จากนั้นใส่สัญญาณเข้าให้เป็นสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมขนาด $2 V_{p-p}$ และมีความถี่ 0.1 Hz จ้างลองผลตอบสนองทางเวลาของสัญญาณตำแหน่งเชิงมุม (θ_m) บันทึกผลสัญญาณ
3. ประมาณระบบให้เป็นเชิงเส้น ตั้งค่าอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 1 เป็น 100% และอัตราขยายปรับค่าได้ตัวที่ 2 เป็น 10% จากนั้นใส่สัญญาณเข้าให้เป็นสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมขนาด $2 V_{p-p}$ และมีความถี่ 0.1 Hz จ้างลองผลตอบสนองทางเวลาของสัญญาณตำแหน่งเชิงมุม (θ_m) บันทึกผลสัญญาณ
4. เปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาของตำแหน่งเชิงมุมของระบบจริงและระบบที่ประมาณด้วยเชิงเส้น วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง