

2102333: ระบบควบคุมเชิงเส้น 1 และปฏิบัติการ
ห้องปฏิบัติการพื้นฐานระบบควบคุม
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองที่ 4 การออกแบบตัวควบคุม PID

หมายเลขกลุ่ม

ตอนเรียน

คะแนน /20

1. ชื่อ
2. ชื่อ
3. ชื่อ

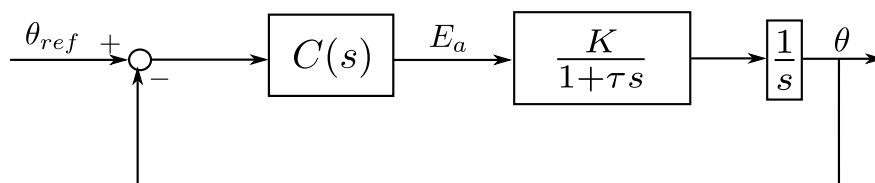
1. รหัสนิสิต
2. รหัสนิสิต
3. รหัสนิสิต

วัตถุประสงค์

1. สามารถออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางเดินราก เมื่อกำหนดคุณสมบัติของผลตอบสนองแบบขั้นบันได
2. เข้าใจ และออกแบบตัวควบคุม PID ด้วยวิธี Ziegler-Nichol

การออกแบบตัวควบคุมแบบ PD โดยวิธีทางเดินราก

วิธีออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีทางเดินรากเป็นวิธีที่อาศัยการเลือกตำแหน่งของโพล โดยสามารถเลือกจากสมรรถภาพที่ถูกกำหนดโดยสมการ 2, 3 และ 4 ด้วยเงื่อนไขขนาด และมุม พิจารณาระบบมอเตอร์จากการทดลองที่ 3 จะได้ระบบมอเตอร์ ที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนคือ $\frac{\Omega(s)}{E_a(s)} = \frac{K}{\tau s + 1}$ จากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับตำแหน่งของมุม จะได้ $\theta(t) = \int_0^t \omega(\tau) d\tau$ จะได้ระบบมอเตอร์ที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนใหม่คือ $G(s) = \frac{\Theta(s)}{E_a(s)} = \frac{K}{s(\tau s + 1)}$ และเลือกตัวควบคุม $C(s) = K_P + K_D s$



รูปที่ 1: แผนภาพกรอบของการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์วงปิด

เมื่อหาแผนภาพของระบบวงปิดในรูปที่ 1 จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการ 1 เมื่อดูจากสมการ เราเลือก K_P และ K_D

$$H(s) = \frac{(K_P + K_D s)K}{\tau s^2 + (K_D K + 1)s + K_P K} \quad (1)$$

สมการที่ใช้ในการทดลอง

1. Maximum overshoot :

$$M_p = e^{-\frac{\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (2)$$

2. Settling time (5 %) :

$$t_s = \frac{3.2}{\zeta\omega_n} \quad (3)$$

3. Rise time :

$$t_r = \frac{1.8}{\omega_n} \quad (4)$$

ตัวอย่างการออกแบบตัวควบคุมแบบ PD โดยวิธีทางเดินราก

ให้ระบบวงเปิดที่ต้องการออกแบบคือ

$$G(s) = \frac{16}{s(0.2s + 1)}$$

และมีข้อกำหนดการออกแบบประกอบด้วย $M_p = 30\%$ และ $t_s = 1$ s
ขั้นตอนที่ 1 เลือกตำแหน่งของโพลจากการเลือกข้อกำหนดดังนี้

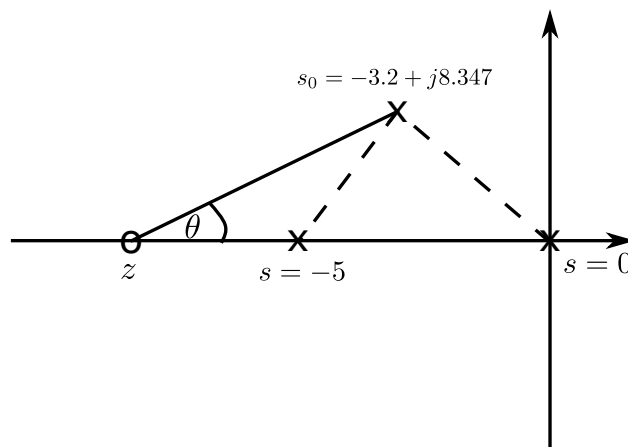
1. หาค่า ζ : $M_p = 10\% \Rightarrow \zeta = 0.5912$
2. หาค่า ω_n : $t_s = 0.05$ s $\Rightarrow \omega_n = 3.2/0.05\zeta \Rightarrow \omega_n = 178.77$
3. $s_0 = -\zeta\omega_n \pm j\omega\sqrt{1-\zeta^2} = -3.2 \pm j8.347$

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหามุมชดเชย θ เมื่อตำแหน่งของ Pole อยู่ที่ s_0 จากโพลของ $G(s)$ จะได้

$$\angle(s_0 - (-5)) = \angle(-3.2 + j8.347 + 5) = 77.83^\circ$$

$$\angle(s_0 - 0) = \angle(-3.2 + j8.347) = 110.97^\circ$$

นำมุมที่ได้พล็อตลงบนระนาบเชิงซ้อนได้ดังรูปที่ 2 จะสังเกตว่ามุมทั้งสองยังไม่ตรงเงื่อนไขของมุม จึงต้องเติม Zero โดยเลือกให้อยู่บนเส้นจำนวนจริง



รูปที่ 2: ตำแหน่งของ Pole และ Zero

ต่อมาคำนวณมุมชดเชยเมื่อเพิ่มมุมที่ขาดหายไปจาก z จะได้ว่า

$$\begin{aligned}\sum \angle(s-p) &= 180^\circ + \angle(s-z) \\ 77.83^\circ + 110.97^\circ &= 180^\circ + \theta \\ \theta &= 8.8^\circ\end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาตำแหน่งของ zero เพื่อหาค่า T_D จากรูปที่ 2 เลือกลากเส้นจาก s_0 ลงมายังเส้นจำนวนจริงจะทราบรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก เราจะสามารถหาตำแหน่งของ z ได้
จากสมการที่ 1 ตำแหน่งของ Zero สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$(K_P + K_D s) = K_P(1 + T_D s)$$

โดย $K_D = K_P T_D$ เราสามารถบอกได้ว่า ตำแหน่งของ Zero จะอยู่ตำแหน่ง $(\frac{1}{T_D}, 0)$ ต่อมาจะเป็นการคำนวณหาค่า T_D จะได้

$$\begin{aligned}-\frac{1}{T_d} &= -3.2 - 8.347 \cot(8.8^\circ) \\ -\frac{1}{T_d} &= -57.11 \\ T_d &= 0.0175\end{aligned}$$

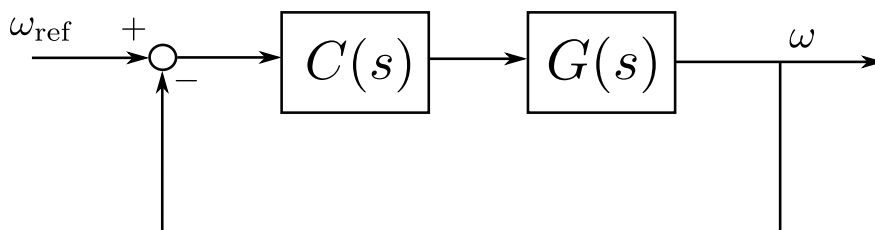
ขั้นตอนที่ 4 หาค่า K_P จากเงื่อนไขขนาดของระบบที่ตำแหน่ง Pole ใหม่ จะต้องมามีค่าเท่ากับ 1 จะได้ว่า

$$\begin{aligned}|K_P||T_d s_0 + 1||G(s_0)| &= 1 \\ K_P &= \left| \frac{s_0(0.2s_0 + 1)}{16(T_d s_0 + 1)} \right| \\ &= 1\end{aligned}$$

เพราะฉะนั้น $K_P = 1$ และ $K_D = 0.0175$

การออกแบบตัวควบคุม PID ด้วยวิธี Ziegler-Nichol

การควบคุมความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์เมื่อคิดผลของเวลาประวิง



รูปที่ 3: แผนภาพการควบคุมวงปิดของการควบคุมความเร็วมอเตอร์

จากการทดลองที่ 3 เราได้ทำการวิเคราะห์ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์โดยการประมาณฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบให้อยู่ในรูปของ

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (5)$$

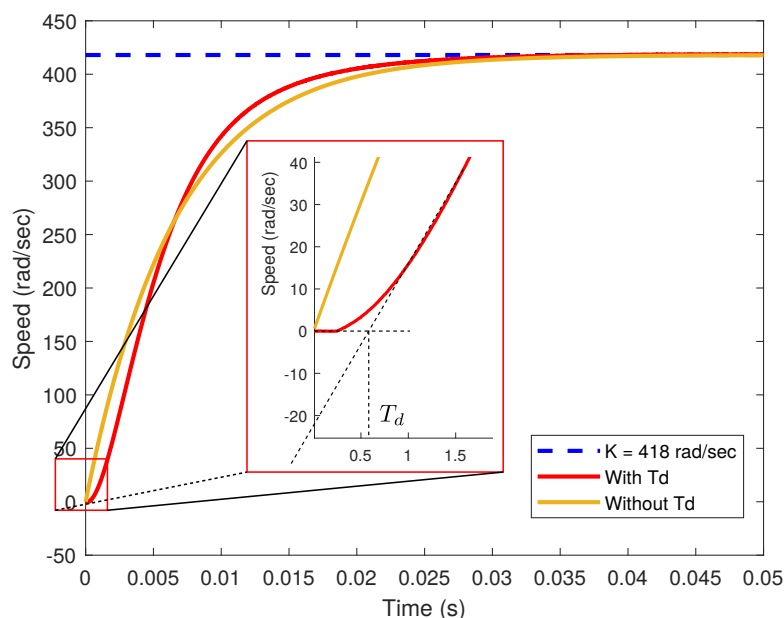
เมื่อ K และ τ คือ อัตราขยายกระแสตรง และ ค่าคงตัวเวลาของระบบ ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ระบบมีการประวิงเวลา (time delay) เนื่องจากข้อจำกัดด้านการสุ่มตัวอย่างและการประมวลสัญญาณ จึงทำให้ ฟังก์ชันถ่ายโอนมีรูปแบบเป็นแบบจำลองอันดับหนึ่งที่มีการประวิงเวลา ดังสมการ (6)

$$G(s) = \frac{Ke^{-T_d s}}{\tau s + 1} \quad (6)$$

เมื่อ T_d คือ เวลาประวิงของระบบ กำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม PID อยู่ในรูปของ

$$C(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)$$

การจูนตัวควบคุม PID ด้วยวิธีของ Ziegler-Nichols แบบวงเปิด



รูปที่ 4: ผลตอบสนองขั้นบันไดของระบบวงเปิด

รูปที่ 4 แสดงผลตอบสนองขั้นบันไดของระบบวงเปิดจาก Simscape และจากระบบที่ไม่มีประวิงเวลา $K(1 - e^{-t/\tau})$ จากรูปแสดงให้เห็นถึงการประวิงเวลาในช่วงแรกของการป้อนสัญญาณให้แก่ระบบ การออกแบบตัวควบคุม PID ด้วยวิธีของ Ziegler-Nichols มีจุดประสงค์เพื่อให้ผลตอบสนองวงรอบปิดมีผลตอบสนองในแบบขนาดลดลงหนึ่งในสี่ (quarter amplitude decay) ซึ่งสามารถเลือกพารามิเตอร์ได้โดยใช้สูตรในตารางที่ 1

ตารางที่ 1: สูตรการหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ด้วยวิธีของ Ziegler-Nichols แบบวงเปิด

ชนิดของตัวควบคุม	K_P	T_I	T_D
ตัวควบคุม P	$\frac{1}{RL}$		
ตัวควบคุม PI	$\frac{0.9}{RL}$	$\frac{L}{0.3}$	
ตัวควบคุม PID	$\frac{1.2}{RL}$	$2L$	$0.5L$

เมื่อ $L = T_d$ และ $R = K/\tau$ สำหรับระบบอันดับหนึ่งที่มีการประวิงเวลา

การทดลองที่ 4 การออกแบบตัวควบคุม PID

หมายเลขกลุ่ม

ตอนเรียน

คะแนน

/20

1. ชื่อ
2. ชื่อ
3. ชื่อ

1. รหัสนิสิต
2. รหัสนิสิต
3. รหัสนิสิต

การทดลองที่ 1 การออกแบบตัวควบคุม PD ด้วยวิธีเชิงราก

ขั้นตอนการทดลอง

1. ออกแบบค่า K_P และ K_D เพื่อควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ ด้วยวิธีทางเดินราก พร้อมทั้งแสดงผลตอบสนองด้วย Simulink (แสดงวิธีทำให้เรียบร้อยลงในรายงาน โดยไม่ต้องคำนึงถึงผลของ Load)
2. แสดงผลตอบสนองด้วย Simscape จากระบบที่เคยทำไว้ในไฟล์ก่อนหน้า โดยเชื่อมต่อบล็อกควบคุมตำแหน่งวงปิดแบบ PID
3. ใช้ค่า K_P และ K_D ที่ได้จากการออกแบบเพื่อหาผลตอบสนองวงปิดของระบบมอเตอร์บน Simscape เมื่อสัญญาณอ้างอิงมีขนาดเท่ากับ 90 องศา
4. นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองข้อที่ 4 เพื่อออกแบบตัวควบคุมโดยให้ผลตอบสนองจาก Simscape อยู่ในขอบเขตที่กำหนดไว้
5. ทำการออกแบบตัวควบคุมใหม่ โดยไม่ต้องคำนวณด้วยวิธีทางเดินรากที่ทำให้สมรรถนะดียิ่งขึ้น
6. แสดงกราฟผลตอบสนอง และสัญญาณขาเข้าของการทดลองแต่ละข้อ โดยตั้งชื่อกราฟ ระบุชื่อแกนให้ถูกต้อง รวมทั้งอภิปรายผลการทดลอง

บันทึกผลการทดลอง

1. เขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมตำแหน่ง

• $K =$ [rad/sV]

• $\tau =$ [s]

• ฟังก์ชันถ่ายโอนของชุดทดลอง $G(s) =$ /

2. จงออกแบบตัวควบคุมเมื่อกำหนดให้

(a) มีค่า M_P น้อยกว่า 20 %

(b) มีค่า t_s น้อยกว่า 0.02 s (5 %)

(c) มีค่า t_r น้อยกว่า 0.01 s

เลือกพารามิเตอร์ของระบบที่ต้องการออกแบบได้เป็น

$\zeta =$, $\omega_n =$, $T_D =$

3. จงออกแบบ Gain ใหม่จากการทดลองก่อนหน้านี้โดยไม่ต้องคำนวณ (ถ้าผลจากข้อ 2 อยู่ในเงื่อนไขแล้วให้ปรับใหม่โดยสมรรถนะดีกว่า 2 ใน 3 ข้อ)

ตารางที่ 2: ผลการทดลองการออกแบบตัวควบคุม

การทดลอง (K_P, K_D, K_I)	M_p (%)	t_s (s)	t_r (s)
วิธีทางเดินรก (, , 0)			
ออกแบบใหม่ (, ,)			

4. พล็อตกราฟผลการทดลองสัญญาณตำแหน่งของมอเตอร์ของทุกกรณีให้อยู่ในกราฟเดียวกัน
5. พล็อตกราฟผลการทดลองสัญญาณควบคุมของระบบของทุกกรณีให้อยู่ในกราฟเดียวกัน
6. จงวิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดลอง

การทดลองที่ 2 การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี Ziegler-Nichol

ขั้นตอนการทดลอง

1. วัดค่า Time delay และออกแบบตัวควบคุม P, PI, และ PID ด้วยวิธี Ziegler-Nichols แบบวงเปิด (ใช้หน่วย SI ในการคำนวณ)
2. แสดงผลตอบสนองด้วย Simulink (แสดงวิธีทำให้เรียบร้อยลงในรายงาน โดยคิดกรณี Load = 0%) โดยกำหนดให้สัญญาณอ้างอิงขึ้นบันไดมีค่าเท่ากับ 200 rad/sec
3. แสดงผลตอบสนองด้วย Simscape จากระบบที่เคยทำไว้ในไฟล์ก่อนหน้า โดยเชื่อมต่อบล็อกควบคุมตำแหน่งวงปิดแบบ PID
4. ใช้ค่าที่ได้จากข้อ 1 เพื่อหาผลตอบสนองที่แท้จริงของชุดทดลอง โดยเลือกควบคุมความเร็ว จะเริ่มต้นจากความเร็วเป็น 0 rad/sec ไปยัง 200 rad/sec

บันทึกผลการทดลอง

1. วัดค่าประวิงเวลาจากการทดลอง

- Time Delay = _____ [s]

2. การออกแบบตัวควบคุม P

- $K_P =$ _____
- บันทึกผลการทดลองลงในตารางที่ 2

ตารางที่ 3: ผลการทดลองเมื่อเลือกตัวควบคุม P ด้วยวิธีของ Ziegler-Nichols แบบวงเปิด

ค่าที่วัดได้	M_p (%)	t_r (s)	t_s (s)	e_{ss} (rad/sec)
Simscape				

3. การออกแบบตัวควบคุม PI

- $K_P =$ _____ และ $K_I =$ _____
- บันทึกผลการทดลองลงในตารางที่ 3

ตารางที่ 4: ผลการทดลองเมื่อเลือกตัวควบคุม PI ด้วยวิธีของ Ziegler-Nichols แบบวงเปิด

ค่าที่วัดได้	M_p (%)	t_r (s)	t_s (s)	e_{ss} (rad/sec)
Simscape				

4. การออกแบบตัวควบคุม PID

- $K_P =$, $K_I =$

และ $K_D =$

- บันทึกผลการทดลองลงในตารางที่ 4

ตารางที่ 5: ผลการทดลองเมื่อเลือกตัวควบคุม PID ด้วยวิธีของ Ziegler-Nichols แบบวงเปิด

ค่าที่วัดได้	M_p (%)	t_r (s)	t_s (s)	e_{ss} (rad/sec)
Simscape				

5. พล็อตกราฟผลการทดลองสัญญาณความเร็วของมอเตอร์ของทั้งสามกรณีให้อยู่ในกราฟเดียวกัน

6. พล็อตกราฟผลการทดลองสัญญาณควบคุมของระบบของทั้งสามกรณีให้อยู่ในกราฟเดียวกัน

7. วิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดลอง