

การออกแบบวงจรควบคุม PI-D และ I-PD แบบอนาล็อกสำหรับระบบควบคุมเชิงเส้น

Design of analog PI-D and I-PD control circuits for linear control systems.

ปัญญา มาลีวัตร¹ และ อธิพงษ์ ชัยสายัณห์^{2*}

¹สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ กรุงเทพฯ 10160

²สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ กรุงเทพฯ 10160

*ติดต่อ: E-mail : ittipongc@sau.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ : 085-5041-888

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอหลักการทางทฤษฎีและแนวทางการออกแบบวงจรตัวควบคุมแบบ PI-D และ I-PD ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ปรับปรุงมาจากตัวควบคุม PID แบบดั้งเดิม โดยมีแนวคิดหลักในการจัดตำแหน่งส่วนประกอบอนุพันธ์และสัดส่วนในลูปป้อนกลับใหม่ เพื่อขจัดปัญหา setpoint kick ที่เกิดขึ้นเมื่อสัญญาณอ้างอิงเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน บทความมุ่งเน้นการออกแบบวงจรอนาล็อกโดยใช้วงจรรขยายออปแอมป์(op-amp) เพื่อให้สามารถสร้างและนำไปใช้งานจริงได้ในทางปฏิบัติ ผลการทดสอบโดยการจำลองด้วยโปรแกรม LTspice แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะของวงจรตัวควบคุม PI-D, I-PD และ PID เมื่อนำไปควบคุมพลาตันต์อันดับหนึ่ง และได้รับการยืนยันความถูกต้องโดยการเปรียบเทียบกับผลการจำลองจาก MATLAB

คำหลัก: ตัวควบคุม PI-D, ตัวควบคุม I-PD, ตัวควบคุม PID, ออปแอมป์

Abstract

This paper presents the theoretical principles and design methodology of PI-D and I-PD analog controller circuits, which are restructured forms of the conventional PID controller. The fundamental concept lies in repositioning the derivative and proportional components within the feedback loop to eliminate the setpoint kick caused by sudden changes in the reference input. The design focuses on analog circuit implementation using operational amplifiers (op-amps), making the controllers feasible for practical hardware realization. Simulation results from LTspice demonstrate a performance comparison among PI-D, I-PD, and PID controller circuits applied to a first-order plant, with validation carried out against MATLAB simulation results.

Keywords: PI-D controller, I-PD controller, PID controller, op-amp

1. บทนำ

ระบบควบคุมอัตโนมัติมีบทบาทสำคัญในกระบวนการทางอุตสาหกรรมสมัยใหม่อย่างกว้างขวาง ตัวควบคุม PID (Proportional-Integral-Derivative) [1–3] ได้รับความนิยมสูงสุดในบรรดาตัวควบคุมที่ใช้กันจริง เนื่องจากมีโครงสร้างที่เรียบง่าย ติดตั้งและปรับจูนได้ไม่ยาก อีกทั้งยังให้สมรรถนะการควบคุมที่ดีในสภาวะการทำงานทั่วไป อย่างไรก็ตาม เมื่อนำตัวควบคุม PID แบบดั้งเดิมไปใช้กับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าอ้างอิงอย่างกะทันหัน จะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า derivative kick และ proportional kick ซึ่งทำให้สัญญาณควบคุมแกว่งตัวรุนแรงในช่วงชั่วคราว ส่งผลเสียต่อการตอบสนองของระบบและอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ในบางกรณี

เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว จึงได้มีการพัฒนาโครงสร้างตัวควบคุมในตระกูล PID ขึ้นสองรูปแบบ ได้แก่ ตัวควบคุม PI-D [4–5] และ I-PD [6–7] โดยตัวควบคุม PI-D นั้นย้ายส่วนอนุพันธ์ (Derivative) ออกจากเส้นทางสัญญาณความผิดพลาด ไปอยู่ในลูบป้อนกลับ ทำให้สามารถจัดการ derivative kick ได้ ในขณะที่ตัวควบคุม I-PD ยิ่งกว่านั้น โดยย้ายทั้งส่วนสัดส่วน (Proportional) และส่วนอนุพันธ์ (Derivative) ไปอยู่ในลูบป้อนกลับ ส่งผลให้ลด ทั้ง proportional kick และ derivative kick ได้พร้อมกัน ทำให้สัญญาณควบคุมมีความนุ่มนวลยิ่งขึ้น

แม้ว่าแนวคิดของตัวควบคุม PI-D และ I-PD จะมีการศึกษาในเชิงทฤษฎีและการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์มาระยะหนึ่งแล้ว แต่ยังคงขาดการนำเสนอวงจรอนุโลกที่สามารถสร้างและทดสอบได้จริง เนื่องจากงานวิจัยก่อนหน้านี้มุ่งเน้นเฉพาะการออกแบบวงจรตัวควบคุม PID แบบอนุโลกเป็นส่วนใหญ่ บทความนี้จึงนำเสนอการออกแบบวงจรตัวควบคุม PI-D และ I-PD แบบอนุโลกโดยใช้วงจรขยายออปแอมป์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำงานและเปรียบเทียบสมรรถนะกับตัวควบคุม PID แบบดั้งเดิม ผ่านการจำลองด้วย LTspice และ MATLAB

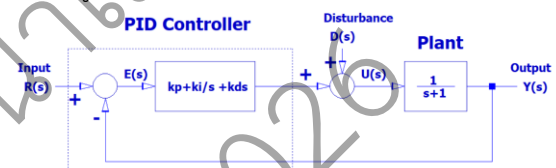
วงจรตัวควบคุมที่นำเสนอนี้ คาดว่าจะเป็นประโยชน์สำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบควบคุมที่มีการเปลี่ยนค่าอ้างอิงบ่อยครั้ง อาทิ ระบบควบคุมตำแหน่งของ servo motor ที่ต้องการการตอบสนองที่นุ่มนวล และลดแรงกระตุกของกลไก ระบบควบคุมอุณหภูมิของเตาความร้อนหรือระบบทำความเย็นที่ต้องการป้องกันการเปลี่ยนแปลงกำลังงานอย่างฉับพลัน ตลอดจนระบบควบคุมระดับของเหลวที่ต้องการลดการทำงานของวาล์วอย่างเฉียบพลันเมื่อมีการปรับ setpoint

2. หลักการทำงานของวงจรควบคุมแบบอนุโลก

บทความวิชาการนี้จะนำเสนอ วงจรควบคุม PID, วงจรควบคุม PI-D, วงจรควบคุม I-PD ตามลำดับดังนี้

2.1 วงจรตัวควบคุม PID

ระบบควบคุมเชิงเส้นโดยใช้ตัวควบคุม PID แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุม PID

โดยที่

$U(s)$ คือ สัญญาณควบคุม(control signal)

$E(s) = R(s) - Y(s)$ คือ สัญญาณความผิดพลาด (error signal)

$R(s)$ คือ สัญญาณอ้างอิง (setpoint)

$D(s)$ คือ สัญญาณรบกวน (disturbance)

$Y(s)$ คือ สัญญาณผลลัพธ์จากระบบ

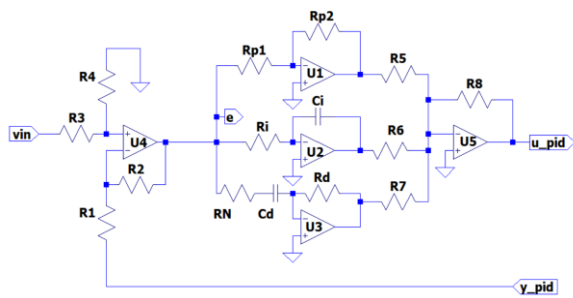
k_p, k_i, k_d คือ อัตราขยายของตัวควบคุม พี ไอ และ ดี ตามลำดับ สมการของตัวควบคุม PID สามารถเขียนในโดเมนลาปลาซได้ดังนี้

$$U(s) = k_p E(s) + \frac{k_i}{s} E(s) + k_d s E(s) \quad (1)$$

และเขียนสมการ(1)ในโดเมนเวลาได้ดังนี้

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

วงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับแผนวงจรควบคุม PID ในบล็อกไดอะแกรมตาม รูปที่ 1 แสดงได้ดังนี้



รูปที่ 2 วงจรควบคุม PID

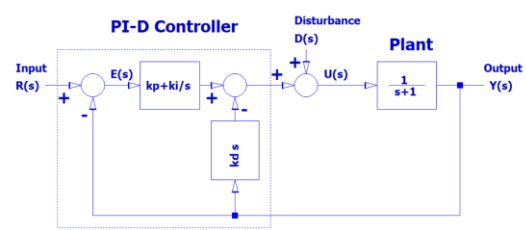
รูปที่ 2 ประกอบด้วยวงจรควบคุมที่ใช้ โอปแอมป์ U_1 , R_{p1} และ R_{p2} วงจรควบคุมไอ ที่ใช้ U_2 , R_i และ C_i วงจรควบคุมดี ที่ใช้ U_3 , R_d , R_N และ C_d วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ ที่ใช้ U_4 , R_1 - R_4 และ วงจรรวมสัญญาณที่ประกอบด้วย U_5 , R_5 - R_8 ความสัมพันธ์ของสัญญาณควบคุม $U(s)$ ต่อ สัญญาณความผิดพลาด $E(s)$ ของวงจรรูปที่ 2 สามารถแสดงได้ดังนี้

$$U(s) = \frac{R_{p2}}{R_{p1}} E(s) + \frac{1}{s R_i C_i} E(s) + \frac{s R_d C_d}{s R_N C_d + 1} E(s) \quad (3)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการ(1) และ(3) จะพบว่า $k_p = \frac{R_{p2}}{R_{p1}}$, $k_i = \frac{1}{R_i C_i}$ และ $k_d = R_d C_d$ สำหรับเทอม $\frac{1}{s R_N C_d + 1}$ เป็นตัวป้องกันสัญญาณรบกวนความถี่สูงในตัวควบคุมแบบดี ถ้าไม่ใช่ R_N (หรือให้ $R_N = 0\Omega$) สมการ(3) จะเหมือนกับ (1)

2.2. วงจรตัวควบคุม PI-D

ตัวควบคุม PI-D ปรับปรุงมาจากตัวควบคุม PID แบบดั้งเดิม โดย ย้ายส่วนขององค์ประกอบอนุพันธ์ ไปรับสัญญาณป้อนกลับเท่านั้น ดังแสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุม PI-D ในรูปที่ 3



รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุม PI-D

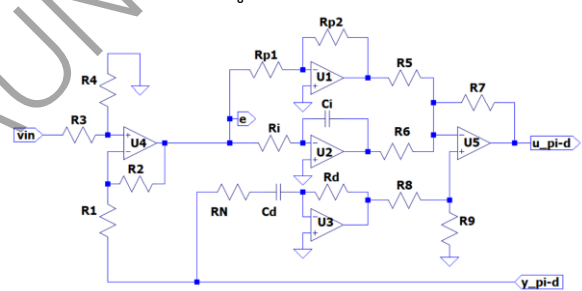
โดยส่วนตัวควบคุมพีไอ (PI) รับสัญญาณความผิดพลาด $E(s)$ ส่วน ตัวควบคุมดี (D) จะทำงานกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของผลเอาต์พุต $Y(s)$ ซึ่งจะลดปัญหา derivative kick เมื่อค่าอ้างอิงเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน เหมาะสำหรับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าอ้างอิงบ่อยครั้งยังคงประสิทธิภาพในการควบคุมได้ดี สมการของตัวควบคุม PI-D สามารถเขียนในโดเมนลาปลาซได้ดังนี้

$$U(s) = k_p E(s) + k_i \frac{E(s)}{s} - k_d s Y(s) \quad (4)$$

และเขียนสมการ(4)ในโดเมนเวลาได้

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt - k_d \frac{dy(t)}{dt} \quad (5)$$

วงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับแผนวงจรควบคุม PI-D ในบล็อกไดอะแกรมตาม รูปที่ 3 แสดงได้ดังนี้



รูปที่ 4 วงจรควบคุม PI-D

รูปที่ 4 วงจรรวมสัญญาณที่ประกอบด้วย โอปแอมป์ U_5 และ R_5 - R_9 ขณะที่วงจรย่อยอื่นๆจะเหมือนกับของวงจรควบคุม PID ความสัมพันธ์ของสัญญาณควบคุม $U(s)$ ต่อ สัญญาณความผิดพลาด $E(s)$ และสัญญาณ

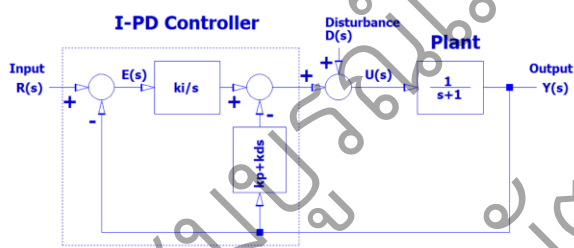
เอาต์พุตของระบบ $Y(s)$ ของวงจรรูปที่ 4 สามารถแสดงได้ดังนี้

$$U(s) = \frac{R_{p2}}{R_{p1}} E(s) + \frac{1}{sR_i C_i} E(s) - \frac{sR_d C_d}{sR_N C_d + 1} Y(s) \quad (6)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการ(4) และ(6) จะพบว่า $k_p = \frac{R_{p2}}{R_{p1}}$
 $k_i = \frac{1}{R_i C_i}$ และ $k_d = R_d C_d$ สำหรับเทอม $\frac{1}{sR_N C_d + 1}$
 เป็นตัวป้องกันสัญญาณรบกวนความถี่สูงในตัวควบคุมแบบดี ถ้าไม่ใช้ R_N (หรือให้ $R_N=0\Omega$) สมการ(6) จะเหมือนกับ (4)

2.3. วงจรตัวควบคุม I-PD

ตัวควบคุม I-PD ปรับปรุงมาจากตัวควบคุม PID แบบดั้งเดิม โดย ย้ายทั้งส่วนขององค์ประกอบอนุพันธ์และสัดส่วนไปรับสัญญาณป้อนกลับเท่านั้น ตามบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุม I-PD รูปที่ 5



รูปที่ 5 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุม I-PD

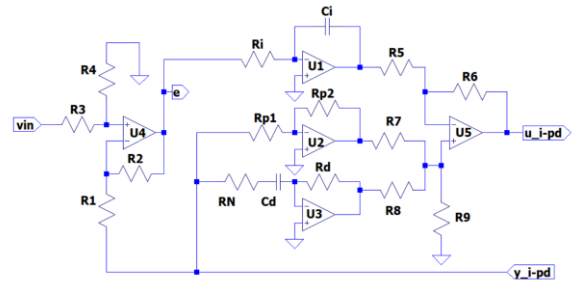
โดยส่วนตัวควบคุมไอ (I) รับสัญญาณความผิดพลาด $E(s)$ ส่วน ตัวควบคุมพีดี (PD) จะทำงานกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของผลเอาต์พุต $Y(s)$ ซึ่งจะลดทั้งปัญหา proportional kick และ derivative kick เมื่อค่าอ้างอิงเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน โครงสร้างนี้ช่วยลดการพุ่งเกิน(over shoot) และปรับปรุงการตอบสนองในช่วงเริ่มต้นของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ สมการของตัวควบคุม I-PD สามารถเขียนในโดเมนลาปลาซได้ดังนี้

$$U(s) = \frac{k_i}{s} E(s) - (k_p + s k_d) Y(s) \quad (7)$$

และเขียนสมการ(7)ในโดเมนเวลาได้

$$u(t) = k_i \int e(t) dt - k_p y(t) - k_d \frac{dy(t)}{dt} \quad (8)$$

วงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับแทนวงจร ควบคุม I-PD ในบล็อกไดอะแกรมตาม รูปที่ 6 แสดงได้ดังนี้



รูปที่ 6 วงจรควบคุม I-PD

รูปที่ 6 วงจรรวมสัญญาณที่ประกอบด้วย ออปแอมป์ U_5 และ R_5-R_9 ขณะที่วงจรรอยอื่นๆจะเหมือนกับของวงจรควบคุม PID ความสัมพันธ์ของสัญญาณควบคุม $U(s)$ ต่อ สัญญาณความผิดพลาด $E(s)$ และสัญญาณเอาต์พุตของระบบ $Y(s)$ ของวงจรรูปที่ 6 สามารถแสดงได้ดังนี้

$$U(s) = \frac{1}{sR_i C_i} E(s) - \left(\frac{R_{p2}}{R_{p1}} + \frac{sR_d C_d}{sR_N C_d + 1} \right) Y(s) \quad (9)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการ(7) และ(9) จะพบว่า $k_p = \frac{R_{p2}}{R_{p1}}$
 $k_i = \frac{1}{R_i C_i}$ และ $k_d = R_d C_d$ สำหรับเทอม $\frac{1}{sR_N C_d + 1}$
 เป็นตัวป้องกันสัญญาณรบกวนความถี่สูงในตัวควบคุมแบบดี ถ้าไม่ใช้ R_N (หรือให้ $R_N=0\Omega$) สมการ(9) จะเหมือนกับ (7) สังเกตว่าค่าอัตราขยาย $K_p K_i K_d$ ของทุกตัวควบคุมมีค่าเหมือนกันคือ

$$K_p = \frac{R_{p2}}{R_{p1}} \quad (10)$$

$$K_i = \frac{1}{R_i C_i} \quad (11)$$

$$K_d = R_d C_d \quad (12)$$

จากสมการ(10)-(12)จะเห็นได้ว่า อัตราขยายสามารถปรับได้อย่างอิสระ โดย K_p สามารถปรับได้อย่างอิสระด้วย R_{p1} และ R_{p2} , K_i สามารถปรับได้อย่างอิสระด้วย C_i และ R_i , และ K_d สามารถปรับได้อย่างอิสระด้วย

C_d และ R_d และเราสามารถหาผลกระทบของความคาดเคลื่อนของอุปกรณ์ต่อค่าอัตราขยายโดยการหาค่าความไวของ K_p , K_i , K_d ต่อ อุปกรณ์ต่างๆได้ดังนี้

$$S_{R_{p2}}^{K_p} = -S_{R_{p1}}^{K_p} = 1 \quad (13)$$

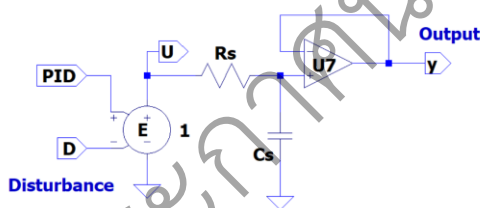
$$S_{R_i, C_i}^{K_i} = -1 \quad (14)$$

$$S_{R_d, C_d}^{K_d} = 1 \quad (15)$$

จากสมการ (13)-(15) จะเห็นได้ว่า ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของ K_p , K_i , K_d ต่อ อัตราการเปลี่ยนแปลง อุปกรณ์ต่างๆ มีค่าไม่เกินหนึ่ง สำหรับข้อจำกัดของออปแอมป์ต่อระบบควบคุมอาจเกิดได้จากผลของ gain bandwidth product (GBP) ที่มีค่าต่ำ แต่ปัญหาดังกล่าวจะไม่ส่งผลกระทบต่อระบบทั่วไปที่มีผลตอบสนองช้า สำหรับระบบที่มีผลตอบสนองที่เร็วเช่น วงจร buck-boost converter อาจต้องเลือกใช้ออปแอมป์สำหรับความถี่สูง

3. ผลการทดสอบ

ระบบหรือพลานต์ที่วงจรตัวควบคุม PID, PI-D และ I-PD นำไปควบคุมคือ ระบบอันดับหนึ่ง โดยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่ใช้แทนระบบอันดับหนึ่งแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 วงจรสำหรับระบบอันดับหนึ่ง

สมการของพลานต์อันดับหนึ่งในรูปที่ 7 สามารถเขียนในโดเมนลาปลาซได้ดังนี้

$$Y(s) = \frac{1}{sR_s C_s + 1} U(s) \quad (10)$$

ในตรวจสอบผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุม PID, PI-D และ I-PD (รูปที่ 1, 3 และ 5 ตามลำดับ) ได้ถูกแทนด้วย วงจรควบคุม

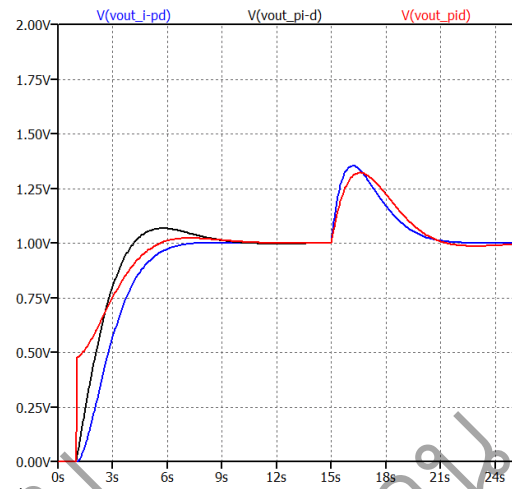
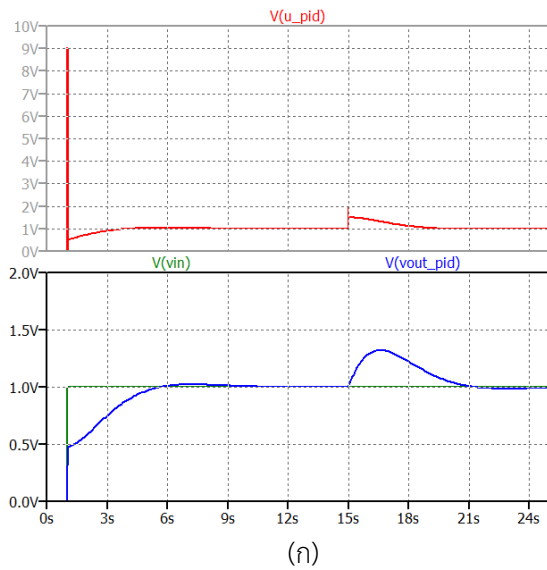
PID, PI-D, I-PD (รูปที่ 2, 4 และ 6 ตามลำดับ) และ วงจรระบบอันดับหนึ่ง (รูปที่ 7) โดยนำมาจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม LTspice ของ บริษัท Analog Device ในการทดสอบนี้ใช้ไฟเลี้ยง $\pm 10V$ ออปแอมป์เบอร์ OP07 วงจรสำหรับระบบอันดับหนึ่ง ใช้ค่า $R_5=100 \text{ k}\Omega$, $C_5=10 \mu\text{F}$ วงจรเปรียบเทียบแรงดันใช้ $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 100 \text{ k}\Omega$

สำหรับระบบควบคุม PID ใช้อุปกรณ์ ดังนี้ $C_i = 10 \mu\text{F}$, $C_d = 10 \mu\text{F}$, $R_{p1} = 10 \text{ k}\Omega$, $R_{p2} = 10 \text{ k}\Omega$, $R_i = 100 \text{ k}\Omega$, $R_d = 100 \text{ k}\Omega$ และ $R_N = 10 \Omega$ วงจรรวมสัญญาณใช้ $R_5 = R_6 = R_7 = R_8 = 10 \text{ k}\Omega$ ซึ่งจะทำให้ได้ค่า $k_p = 1$, $k_i = 1$ และ $k_d = 1$

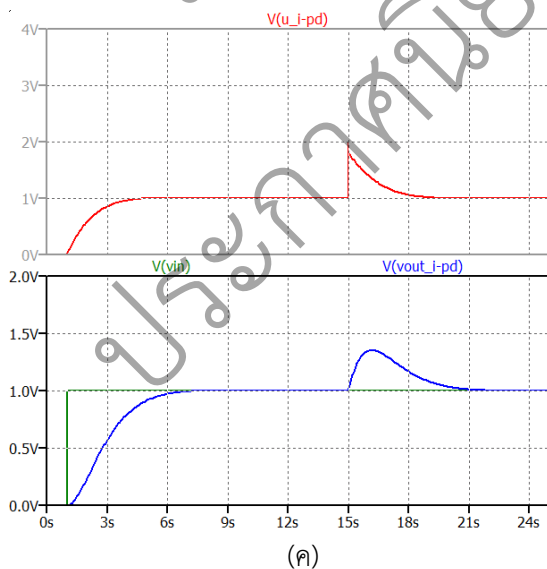
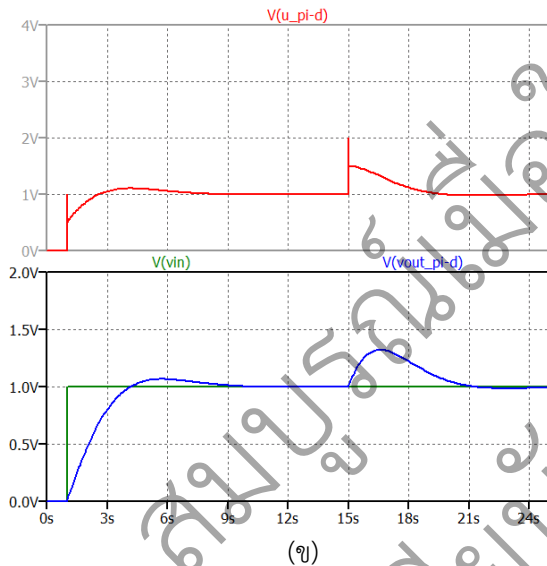
สำหรับระบบควบคุม PI-D ใช้อุปกรณ์เหมือนกับ วงจรระบบควบคุม PID ยกเว้น วงจรรวมสัญญาณที่ต่างไปและใช้ $R_5 = R_6 = R_7 = R_9 = 10 \text{ k}\Omega$ และ $R_8 = 20 \text{ k}\Omega$ ซึ่งจะทำให้ได้ค่า $K_p = 1$, $K_i = 1$ และ $K_d = 1$

สำหรับระบบควบคุม I-PD ใช้อุปกรณ์ ดังนี้ $C_i = 10 \mu\text{F}$, $C_d = 10 \mu\text{F}$, $R_{p1} = 10 \text{ k}\Omega$, $R_{p2} = 20 \text{ k}\Omega$, $R_i = 50 \text{ k}\Omega$, $R_d = 50 \text{ k}\Omega$ และ $R_N = 10 \Omega$ วงจรรวมสัญญาณใช้ $R_5 = 20 \text{ k}\Omega$ และ $R_6 = R_7 = R_8 = R_9 = 10 \text{ k}\Omega$ ซึ่งจะทำให้ได้ค่า $k_p = 1$, $k_i = 1$ และ $k_d = 1$

สำหรับการทดสอบในโดเมนเวลาจะป้อนอินพุต V_{in} เป็นสัญญาณขั้นบันไดขนาด 1 โวลต์ ที่เวลา $t = 1$ วินาที และสัญญาณรบกวน (Disturbance) ใช้สัญญาณขั้นบันไดขนาด -1 โวลต์ ที่ เวลาที่ 15 วินาที และวัดสัญญาณอินพุต V_{in} เอาต์พุต V_{out} สัญญาณควบคุม U ของระบบควบคุม PI-D, I-PD และ PID ตามรูปที่ 8



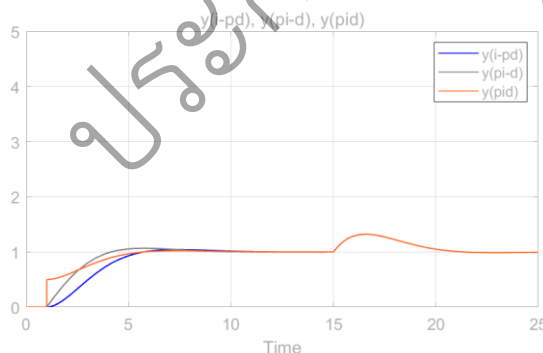
รูปที่ 9 การเปรียบเทียบสัญญาณเอาต์พุตของระบบควบคุม PID, PI-D และ I-PD เมื่อใช้ LTspice



รูปที่ 8 สัญญาณเอาต์พุตและสัญญาณควบคุมของระบบควบคุม PID(ก), PI-D(ข) และ I-PD(ค) เมื่อใช้ LTspice

รูปที่ 8(บน) แสดงสัญญาณอินพุต เอาต์พุตและสัญญาณควบคุมของระบบควบคุม PID ขณะที่ รูปที่ 8(กลาง) แสดงสัญญาณอินพุต เอาต์พุตและสัญญาณควบคุมของระบบควบคุม PI-D และ รูปที่ 8(ล่าง) แสดงสัญญาณอินพุต เอาต์พุตและสัญญาณควบคุมของระบบควบคุม I-PD เมื่อเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมในระบบควบคุมต่างๆพบว่า สัญญาณควบคุมของระบบควบคุม PID มีค่าสูงมากที่สุดซึ่งเกิดจากผลของ derivative kick และ proportional kick ขณะที่สัญญาณควบคุมของระบบควบคุม PI-D มีค่าต่ำกว่าของระบบ PID ทั้งนี้เพราะว่าระบบควบคุม PI-D จะลดผลของ derivative kick และสัญญาณควบคุมของระบบควบคุม I-PD มีค่าต่ำที่สุด ทั้งนี้เพราะว่าระบบควบคุม I-PD จะลดผลทั้ง proportional kick และ derivative kick เพื่อตรวจสอบค่าทางทฤษฎีระบบควบคุม PI-D, I-PD และ PID ถูกจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม MATLAB โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆเหมือนกับค่าที่ใช้ใน LTspice ดังนั้น $k_p = 1$, $k_i = 1$ และ $k_d = 1$ และตัวควบคุมดี(D) กำหนดให้ตัวป้องกันความถี่สูงรบกวน $N=1000$ โดยที่ $N=1/C_d R_N$ สำหรับพลาเน็ตอันดับหนึ่งกำหนดให้โพลอยู่ที่ -1 เป็นต้น ซึ่งให้ผลดังแสดงในรูป 10

รูปที่ 10 สัญญาณเอาต์พุตและสัญญาณควบคุมของระบบควบคุม PID(ก), PI-Д(ข) และ I-PД(ค) เมื่อใช้ MATLAB



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบสัญญาณเอาต์พุตของระบบ
ควบคุม PID, PI-D และ I-PD เมื่อใช้ MATLAB

4. สรุป

ตัวควบคุม PI-D แก้ปัญหาด้วยการย้ายส่วน
อนุพันธ์ (D) ไปอยู่ในลูบป้อนกลับ ทำให้จัด derivative
kick ได้ ในขณะที่ตัวควบคุม I-PD ยกกระตบขึ้นไปอีก โดย
ย้ายทั้งส่วนสัดส่วน (P) และอนุพันธ์ (D) ไปไว้ในลูบ
ป้อนกลับเช่นกัน ส่งผลให้ลดได้ทั้ง proportional kick
และ derivative kick พร้อมกัน ทำให้สัญญาณควบคุมมี
ความนุ่มนวลที่สุดในบรรดาทั้งสามโครงสร้าง

ผลการจำลองด้วย LTspice กับพลาเนตอันดับหนึ่งพบว่าสัญญาณควบคุมของวงจรระบบควบคุม PID มีค่าพุ่งสูงที่สุด รองลงมาคือ PI-D และ I-PD มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีและได้รับการยืนยันจากการจำลองด้วย MATLAB ด้วย แสดงให้เห็นว่าทั้งสองแนวทางให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน

วงจรที่นำเสนอนี้มีประโยชน์สำหรับระบบที่ต้องการการตอบสนองที่นุ่มนวล เช่น ระบบควบคุมตำแหน่ง servo motor ระบบควบคุมอุณหภูมิ และระบบควบคุมระดับของเหลว ที่มีการปรับ setpoint บ่อยครั้ง

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ogata K. (2015). *Modern Control Engineering, 5th edition*, Prentice Hall.
- [2] Åström K. J. and Hägglund T.(1995) *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning, 2nd Edition*, ISA.

- [3] Dorf R. C. and Bishop R. H.(2016). **Modern Control Systems 13th Edition**, Pearson.
- [4] Vesely V. and Kőrösi L. (2019). Robust PI-D Controller Design for Uncertain Linear Polytopic Systems Using LMI Regions and Performance, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 55 (5), pp. 5353-5359.
- [5] Mohamed Z. Fadel, Mahmoud G. Rabie, Ahmed M. Yousse (2019). Modeling, Simulation and Control of a Fly-by-wire Flight Control System Using Classical PID and Modified PI-D Controllers, *Journal Européen des Systèmes Automatisés* Vol. 52(3) pp. 267-276.
- [6] Zhu X. (2009). Practical PID Controller Implementation and the Theory Behind. *paper presented in Second International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems*, Tianjian, China.
- [7] Diep V. T., Hung P. D. , Su N. T.(2019). I-PD controller design based on robust

viewpoint, *paper presented in 2nd International Conference of Intelligent Robotic and Control Engineering*, Singapore.

ประวัติผู้เขียนบทความ



นายปัญญา มาลีวัตร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี และโททางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำคณะ

วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์



นายอิทธิพงศ์ ชัยสายัณห์ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี โท เอก ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ

ทหารลาดกระบัง ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์