

วงจรถวลคุมพีไอดีที่ใช้อุปกรณ์ที่หาซื้อได้ทั่วไป

A PID controller circuit using commercially available devices

อิทธิพงษ์ ชัยสายัณห์ และ สมเกียรติ เพียงพรานทอง

Ittipong Chaisayun and Somkiat Piangprantong

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

19/1 ถนนเพชรเกษม เขตหนองแขม กรุงเทพฯ 10160

ผู้นิพนธ์ประสานงาน Email: ittipong@sau.ac.th

วันที่รับบทความ: 23 กรกฎาคม 2565 / วันที่แก้ไขบทความ: 19 พฤศจิกายน 2565 / วันที่ตอบรับการตีพิมพ์: 3 ธันวาคม 2565

บทคัดย่อ บทความนี้เป็นการออกแบบวงจรถวลคุมพีไอดีโดยใช้โอปแอมป์ป้อนกลับกระแส วงจรถวลคุมพีไอดีนี้มีข้อดีคือ ใช้อุปกรณ์ที่มีขายทั่วไป และสามารถปรับค่าเกน K_p , K_i , K_d ได้อย่างอิสระ การวิเคราะห์วงจรถวลคุมพีไอดีด้วยคณิตศาสตร์เช่น ความไวและ ผลของความไม่แน่นอนของโอปแอมป์ป้อนกลับกระแสพบว่าค่าความไวของอุปกรณ์ต่างๆ ต่อ พารามิเตอร์ K_p , K_i , K_d มีค่าขนาดเท่ากับ 1 ผลการทดสอบวงจรถวลคุมพีไอดีด้วย LTspice พบว่าวงจรถวลคุมพีไอดีสามารถปรับค่า K_p , K_i , K_d ได้อย่างอิสระ ขณะที่วงจรถวลคุมพีไอดีใช้พลังงานไฟฟ้า 0.4 วัตต์เมื่อใช้แรงดันไฟเลี้ยง ± 15 โวลต์ นอกจากนี้ ตัวควบคุมพีไอดีได้นำไปทดสอบทำงานร่วมกับพลาตันต์อันดับสามแบบวงรอบปิด ผลการทดสอบด้วยโปรแกรม LTspice เปรียบเทียบกับ MATLAB พบว่ามีผลลัพธ์ที่สอดคล้องกัน

คำสำคัญ: วงจรถวลคุมพีไอดี, โอปแอมป์ป้อนกลับกระแส, วงจรขยายป้อนกลับ

Abstract In this paper, a PID controller employing current feedback operational amplifier (CFOA) is designed. The advantage of proposed circuit are independently adjustable parameters (K_p , K_i , K_d) and commercially available used devices. Mathematical analyses like sensitivities and the effects of the non-ideal of CFOA find that the active and passive element sensitivities are equal to unity in magnitude. Simulation results using LTspice are shown that the parameters (K_p , K_i , K_d) can be independently adjusted and the power consumption of PID controller circuit 0.4 W at ± 15 V supply voltages. In addition, this PID circuit is demonstrated on a close loop system with the third order plant. The simulation results using LTspice are compared with that using MATLAB. It found that both results are consistent.

Keywords: PID controller circuit, current feedback op-amp, feedback amplifier

1. บทนำ

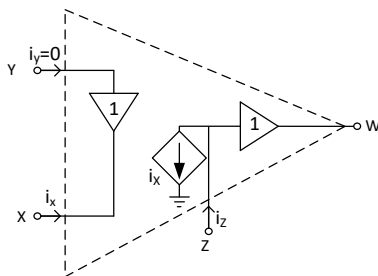
ตัวควบคุมหรือตัวชดเชยที่มีใช้ในระบบควบคุมทำหน้าที่ให้ระบบมีผลการตอบสนองเป็นไปตามที่ต้องการ โดยตัวควบคุมที่นิยมใช้มากที่สุดคือตัวควบคุมแบบพีไอดี (Proportional-Integral-derivative: PID) ทั้งนี้เพราะตัวควบคุมแบบพีไอดี มีความสามารถในการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ง่าย มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน และราคาถูก[1] ตัวควบคุมพีไอดีประกอบด้วย 3 องค์ประกอบหลัก คือ องค์ประกอบการปรับสัดส่วน สัญญาณ องค์ประกอบการอินทิเกรตสัญญาณและ องค์ประกอบการอนุพันธ์สัญญาณ เมื่อนำทั้งสามส่วนประกอบนี้มารวมเข้าด้วยกันจะทำให้สามารถปรับแต่งสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในปัจจุบันนี้ การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีส่วนใหญ่จะเป็นแบบดิจิทัล[1] เพราะมีข้อดีคือมีความยืดหยุ่นและความเชื่อถือสูง แต่ตัวควบคุมพีไอดีแบบแอนะล็อก[2-3]ยังมีข้อดีกว่าในเรื่องความเร็วในการตอบสนองที่เร็วกว่าและ ถ้านำตัวควบคุมไปสร้างเป็นวงจรรวม ตัวควบคุมแบบแอนะล็อกจะใช้พื้นที่น้อยกว่าและบริโภคกำลังไฟน้อยกว่า เมื่อไม่นานมานี้ก็มีการรวมตัวควบคุมทั้งดิจิทัลและแอนะล็อกให้ทำงานด้วยกันเพื่อจะได้รับจุดเด่นของทั้งคู่[4] เดิมทีการสร้างตัวควบคุมพีไอดีแบบแอนะล็อกจะใช้โอปแอมป์ป้อนกลับแรงดัน ร่วมกับตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ แต่ด้วยข้อจำกัดของโอปแอมป์ป้อนกลับแรงดัน ในเรื่องความถี่ตอบสนองและอัตราสลับ (Slew Rate) ที่ต่ำ จึงได้มีการนำเสนอตัวควบคุมพีไอดีที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์แอคทีฟที่ทันสมัย เช่น งานวิจัย[5] ใช้วงจรสายพานกระแสร่นสองจำนวน 8 ตัว งานวิจัย[6] ใช้วงจรโอปแอมป์ป้อนกลับกระแสจำนวน 6 ตัว งานวิจัย[7] ใช้วงจรขยายความนำจำนวน 8 ตัวและงานวิจัย[8-9] ใช้วงจรขยายผลต่างกระแสจำนวน 4 ตัวและ 2 ตามลำดับ โดยงานวิจัย[5-7] มีข้อดีคือ ใช้อุปกรณ์ที่หาซื้อได้ทั่วไปและเกน K_p , K_i , K_d สามารถปรับค่า

ได้อย่างอิสระแต่ข้อด้อยคือใช้อุปกรณ์แบบแอคทีฟจำนวนมากทำให้วงจรมีขนาดที่ใหญ่และกินกำลังไฟฟ้าที่สูง ขณะที่งานวิจัย[8-9] มีข้อดีคือเกน K_p , K_i , K_d สามารถปรับค่าได้อย่างอิสระ ข้อด้อยคือวงจรขยายผลต่างกระแส ยังไม่มีขายในท้องตลาดแต่ก็สามารถสร้างขึ้นมาได้โดยใช้ โอปแอมป์ป้อนกลับกระแส 2 ตัว [9] เมื่อเร็ว ๆ นี้ได้เสนอตัวควบคุมพีไอดี[10] ที่มีข้อเด่นคือใช้โอปแอมป์ป้อนกลับกระแสที่หาซื้อได้ทั่วไปเพียง 2 ตัวและสามารถปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมได้อย่างอิสระ สำหรับบทความนี้ได้นำเสนอตัวควบคุมพีไอดีที่มีข้อดีเหมือนกับงานวิจัย[10] เพราะโครงสร้างวงจรที่คล้ายกันโดยงานวิจัย[10] ออกแบบตัวควบคุมแบบพีดี ต่อกับตัวควบคุมแบบไอ ขณะที่บทความนี้ได้ ออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ ต่อกับตัวควบคุมแบบดี นอกจากนี้จากตัวควบคุมพีไอดีที่ผ่านมา[5-8]พบว่า ส่วนมากยังไม่ถูกทดสอบกับพลาเน็ต และ[5-10]ยังไม่ถูกเปรียบเทียบกับผลของทดสอบของโปรแกรม MATLAB ซึ่งเป็นโปรแกรมที่เป็นที่ยอมรับและใช้กันอย่างทั่วไปในการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี ในบทความนี้ได้ ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีแบบแอนะล็อก โดยใช้โอปแอมป์ป้อนกลับกระแส (Current Feedback Operational Amplifier: CFOA หรือ CFA) ซึ่งมีข้อดีกว่าโอปแอมป์ป้อนกลับแรงดันในหลายเรื่อง เช่น ตอบสนองความถี่และอัตราสลับที่สูงกว่า เป็นต้น และโอปแอมป์ป้อนกลับกระแสยังเป็นที่นิยมใช้มากกว่าวงจรขยายความนำเพราะโอปแอมป์ป้อนกลับกระแส มีอินพุตและเอาต์พุตที่รับสัญญาณได้ทั้งกระแสและแรงดัน และที่สำคัญคือโอปแอมป์ป้อนกลับกระแสเป็นอุปกรณ์ที่ราคาไม่แพงและสามารถหาซื้อได้ทั่วไป

2. หลักการทำงาน

2.1 ออปแอมป์ป้อนกลับกระแส

ออปแอมป์ป้อนกลับกระแส(CFA) ประกอบด้วย วงจรตามแรงดัน ของวงจรและวงจรตามกระแส 1 วงจร ตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 แบบจำลองอย่างง่ายของออปแอมป์ป้อนกลับ กระแสแบบอุดมคติ

จากรูปที่ 1 ขา y เป็นอินพุตแรงดันที่มี อิมพีแดนซ์สูงของออปแอมป์ป้อนกลับกระแส ทำหน้าที่ เป็นอินพุตของวงจรตามแรงดันที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดัน ที่ ขา x ขณะที่ ขา x ยังเป็นอินพุตกระแสด้วยที่ทำหน้าที่ เป็นวงจรตามกระแสที่ให้เอาต์พุตเป็นกระแสที่ ขา z และ ที่ขา z นี้ยังทำหน้าที่เป็นอินพุตของวงจรตาม แรงดันที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันที่ ขา w ความสัมพันธ์ ของกระแสและแรงดันที่ขาต่างๆเป็นดังนี้

$$i_y = 0, i_x = i_z, v_x = v_y, v_w = v_z \quad (1)$$

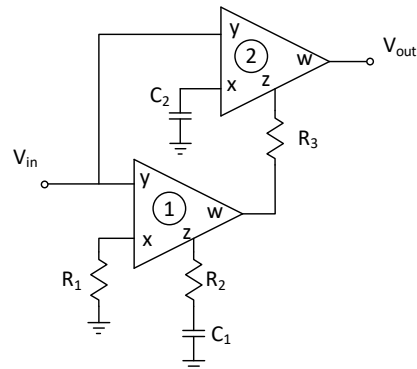
2.2 วงจรตัวควบคุม พีไอดี

ตัวควบคุมแบบพีไอดี(PID controller)[1]มีฟังก์ชันถ่าย โอนของตัวควบคุมดังนี้

$$T(s) = \frac{V_o}{V_i} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2)$$

เมื่อ K_p คืออัตราขยายขององค์ประกอบพี K_i คือ อัตราขยายขององค์ประกอบไอ K_d คืออัตราขยายของ

องค์ประกอบดี บทความนี้ได้นำเสนอตัวควบคุมพีไอดี ที่มีโครงสร้างวงจรที่คล้ายกันกับงานวิจัย[10] โดย บทความ[10] ได้ออกแบบตัวควบคุมแบบพีดี ต่อกับตัว ควบคุมแบบไอ ขณะที่ในบทความนี้ออกแบบตัว ควบคุมแบบพีไอ ต่อกับตัวควบคุมแบบดี ดังแสดงในรูป ที่ 2



รูปที่ 2 วงจรตัวควบคุมพีไอดีโหมดแรงดัน

วงจรตัวควบคุมพีไอดีนี้ใช้ ออปแอมป์ ป้อนกลับกระแส เพียง 2 ตัวเท่านั้น โดยที่ CFOA_1 R_1 R_2 และ C_1 ทำหน้าที่เป็น ตัวควบคุมพีไอ ซึ่ง ความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุต และแรงดันเอาต์พุต v_{w1} แสดงได้ดังนี้

$$v_{w1} = \left(\frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{sR_1C_1} \right) v_{in} \quad (3)$$

ขณะที่ CFOA_2 R_3 และ C_2 ทำหน้าที่เป็นตัว ควบคุมดี ซึ่งความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุตและแรงดัน ที่ตกคร่อม R_3 แสดงได้ดังนี้

$$v_{R3} = sC_2R_3v_{in} \quad (4)$$

และแรงดันเอาต์พุตของวงจร v_{out} เกิดจาก $v_{w1} + v_{R3}$ และฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรตัวควบคุม พีไอดีในรูปที่ 2 คือ

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \left(\frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{sR_1C_1} + sC_2R_3 \right) \quad (5)$$

พารามิเตอร์ K_P , K_I , K_D คือ

$$K_P = \frac{R_2}{R_1} \quad (6)$$

$$K_I = \frac{1}{R_1C_1} \quad (7)$$

$$K_D = C_2R_3 \quad (8)$$

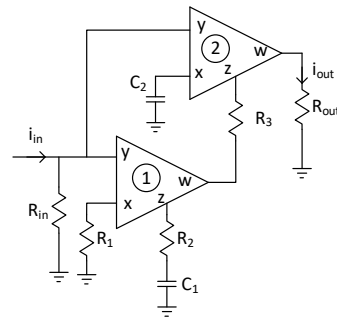
จากสมการที่ (5) - (7) จะเห็นว่าอัตราขยายของตัวควบคุมสามารถปรับได้โดยอิสระจากกัน โดยอัตราขยายขององค์ประกอบที่ สามารถปรับอย่างอิสระได้ด้วย R_2 อัตราขยายขององค์ประกอบไอ สามารถปรับอย่างอิสระได้ด้วย C_1 และอัตราขยายขององค์ประกอบดี สามารถปรับอย่างอิสระได้ด้วย R_3 และ C_2 จากสมการดังกล่าว เราสามารถคำนวณหาค่าความไว (Sensitivity) ของค่าพารามิเตอร์ K_P , K_I , K_D ต่อค่า R และ C ต่างๆ ได้ดังนี้

$$S_{R_2}^{K_P} = -S_{R_1}^{K_P} = 1 \quad (9)$$

$$S_{R_1, C_1}^{K_I} = -1 \quad (10)$$

$$S_{R_3, C_2}^{K_D} = 1 \quad (11)$$

วงจรตัวควบคุม พีไอดี ในรูปที่ 2 ทำงานในโหมดแรงดัน (สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตเป็นแรงดัน) สามารถถูกดัดแปลงให้เป็น วงจรตัวควบคุม พีไอดี ที่ทำงานในโหมดกระแส (สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตเป็นกระแส) ได้ดังในรูปที่ 3 โดยเพิ่ม R_{in} และ R_{out} เพื่อทำหน้าที่แปลงกระแสเป็นแรงดัน และแปลงแรงดันเป็นกระแส ตามลำดับ



รูปที่ 3 วงจรตัวควบคุม พีไอดี โหมดกระแส

ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรตัวควบคุม พีไอดี โหมดกระแส แสดงได้ดังนี้

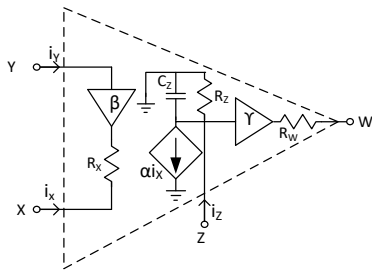
$$\frac{i_{out}}{i_{in}} = \frac{R_{in}}{R_{out}} \left(\frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{sR_1C_1} + sC_2R_3 \right) \quad (12)$$

พารามิเตอร์ K_P , K_I , K_D สามารถปรับได้เช่นเดียวกับตัวควบคุมพีไอดี โหมดแรงดันในรูปที่ 2

2.3 การวิเคราะห์วงจรในกรณีไม่เป็นอุดมคติของออปแอมป์ป้อนกลับกระแส

การวิเคราะห์วงจรที่เสนอก่อนหน้านี้มีพื้นฐานอยู่บนสมมติฐานที่ว่าค่าความต้านทานอินพุต y และ z เป็นอนันต์ขณะที่ความต้านทานอินพุต x และ w เป็นศูนย์ และตัวเก็บประจุภายในโหนดต่างๆ ไม่ถูกคิด แต่ในทางปฏิบัติ ผลของความไม่เป็นอุดมคติของออปแอมป์ป้อนกลับกระแสดังกล่าวส่งผลต่อการทำงานของวงจรตัวควบคุมอย่างแน่นอน และเพื่อศึกษาผลกระทบดังกล่าวเราจะใช้แบบจำลองอย่างง่ายของออปแอมป์ป้อนกลับกระแสแบบไม่เป็นอุดมคติ ประกอบด้วย ความต้านทานที่โหนด Y (R_Y) ความต้านทานที่โหนด X (R_X) ความต้านทานโหนด W (R_W) ความต้านทานโหนด Z (R_Z) และตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่โหนด Z (C_Z) ตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่โหนด Y (C_Y) โดยทั่วไปค่าของความต้านทานและความจุไฟฟ้าของออปแอมป์ป้อนกลับกระแส เช่น AD844 มีค่าดังนี้ $R_Y=10M\Omega$ $R_X=50\Omega$ $R_W=15\Omega$ $R_Z=3M\Omega$ $C_Y=2\text{ pF}$ และ $C_Z=4.5\text{ pF}$ [10] แต่

เนื่องจากความต้านทาน R_Y มีค่าสูง มากและตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_Y ก็มีค่าน้อยทำให้สามารถตัดทิ้งได้นอกจากนี้ ค่าอัตราขยาย Y, β และ α ที่ผ่านมาในการวิเคราะห์วงจรถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ หนึ่ง แต่ในทางปฏิบัติค่าดังกล่าวนี้สามารถเบี่ยงเบนจากหนึ่งได้ ทำให้แบบจำลองอย่างง่ายของออปแอมป์ย้อนกลับกระแสแบบไม่เป็นอุดมคติสามารถแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แบบจำลองอย่างง่ายของออปแอมป์ย้อนกลับกระแสในทางปฏิบัติ

ออปแอมป์ย้อนกลับกระแสในทางปฏิบัติจะมีความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่โหนดต่างๆ ดังนี้ $i_Y = 0, i_X = \alpha i_Z, v_X = \beta v_Y, v_W = \gamma v_Z$ เมื่อ Y, β และ α เป็นค่าส่งผ่านของแรงดันและกระแสที่สามารถเบี่ยงเบนจากหนึ่งได้ เมื่อมีการพิจารณาความผิดพลาดนี้และผลของผลของความต้านทานไฟฟ้าและความจุไฟฟ้าภายใน สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรตัวควบคุม ฟิโอดีและอัตราขยายของแต่ละองค์ประกอบได้ใหม่ดังนี้

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \left(\frac{\gamma_1 \gamma_2 \alpha_1 \beta_1 R_2}{R_1} + \frac{\gamma_1 \gamma_2 \alpha_1 \beta_1}{s R_1 C_1} + s \gamma_2 \alpha_2 \beta_2 C_2 R_3 \right) \quad (13)$$

$$K_P = \gamma_1 \gamma_2 \alpha_1 \beta_1 \frac{R_2}{R_1} \quad (14)$$

$$K_I = \gamma_1 \gamma_2 \alpha_1 \beta_1 \frac{1}{R_1 C_1} \quad (15)$$

$$K_D = \gamma_2 \alpha_2 \beta_2 C_2 R_3 \quad (16)$$

จากสมการที่ 14-16 พบว่าค่าอัตราขยายที่ไม่เป็นอุดมคติ Y, β และ α ของออปแอมป์ย้อนกลับกระแสต่างๆจะส่งผลโดยตรงกับค่าพารามิเตอร์ K_P, K_I, K_D

และสามารถคำนวณหาค่าความไว (Sensitivity) ของค่าพารามิเตอร์ K_P, K_I, K_D ต่อค่า R, C, Y, β และ α ต่างๆได้ดังนี้

$$S_{R_2, \gamma_1 \gamma_2, \alpha_1 \beta_2}^{K_P} = -S_{R_1}^{K_P} = 1 \quad (17)$$

$$S_{\gamma_1 \gamma_2, \alpha_1 \beta_1}^{K_I} = -S_{R_1, C_1}^{K_I} = 1 \quad (18)$$

$$S_{R_3, C_2 \gamma_2, \alpha_2 \beta_2}^{K_D} = 1 \quad (19)$$

จากสมการ(9)-(11) และ (17)-(19)พบว่าค่าความไวของอุปกรณ์ต่างๆ ต่อ พารามิเตอร์ K_P, K_I, K_D มีค่าขนาดเท่ากับ 1 ผลกระทบของตัวเก็บประจุภายในสามารถละเลยได้ โดยการออกแบบให้ตัวเก็บประจุที่ใช้ (C_1 และ C_2) ในวงจรฟิโอดี มีค่ามากกว่าตัวเก็บประจุภายในซึ่งจะทำให้เกิดขั้ว (pole) ที่ไม่มีนัยสำคัญ สำหรับความต้านทานโหนดต่างๆของ CFOA นำเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อตัวควบคุมฟิโอดีที่เสนอ และ ฟังก์ชันการถ่ายโอนของตัวควบคุมฟิโอดี ที่เกิดจากการใช้แบบจำลองในรูปที่ 4 ทำให้สมการที่ (5) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

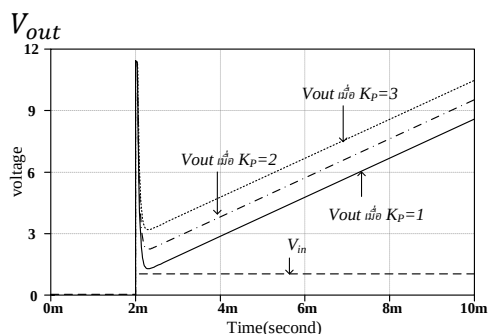
$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \left[\frac{R_2}{R_1 + R_{X1}} + \frac{1}{s C_1 (R_1 + R_{X1})} \right] \frac{\frac{C_1}{C_1 + C_{Z1}}}{\left[\frac{s C_1 C_{Z1} R_2 + 1}{C_1 + C_{Z1}} + 1 \right]} + \frac{s C_2 (R_3 + R_{W1})}{[s C_2 R_{X2} + 1][s C_{Z2} (R_3 + R_{W1}) + 1]} \quad (20)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการ (5) กับ สมการ (20)พบว่าพารามิเตอร์ K_P และ K_I มีการเปลี่ยนแปลงจากผลของ R_{X1} และพารามิเตอร์ K_D มีการเปลี่ยนแปลงจากผลของ R_{W1} นอกจากนี้องค์ประกอบฟิโอดี มีขั้ว (pole) เพิ่มมา 1 ตัว และองค์ประกอบคิมิขั้ว (pole) เพิ่มมา 2 ตัว ซึ่งการเพิ่มมาของขั้ว (pole) จะส่งผลให้เอาต์พุตมีการตอบสนองที่ช้าลง

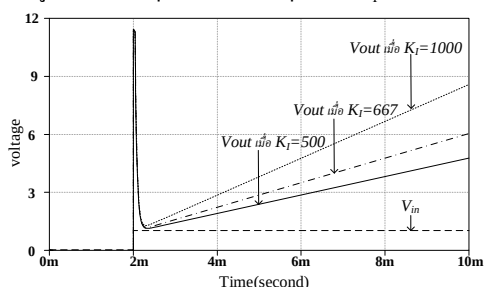
3. ผลการจำลองการทำงานโดยใช้ LTspice

เพื่อตรวจสอบผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี วงจรควบคุม ฟิโอดี ในรูปที่ 3 ได้ถูกนำมาจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม LTspice สำหรับวงจรออปแอมป์

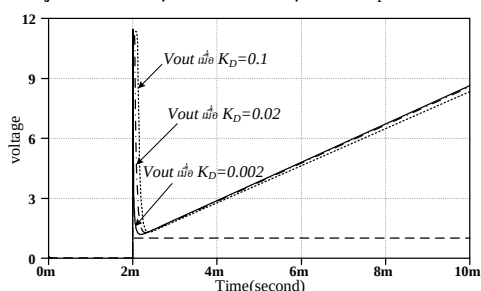
ป้อนกลับกระแสในรูปที่ 5) ใช้แบบจำลอง (ก) 1Macro-Model ของ AD 844 Analog Devices ในการทดสอบนี้ใช้ไฟเลี้ยง $\pm 15V$ และเพื่อเห็นภาพการปรับค่าของเกน K_p , K_i , K_D ได้อย่างชัดเจน จึงกำหนดค่าอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้ $C_1=1\mu F$, $C_2=1\mu F$, $R_1=1k\Omega$, $R_2=1k\Omega$ และ $R_3=20k\Omega$ ซึ่งจะทำได้ค่า $K_p=1$, $K_i=1000$ และ $K_D=0.02$ ในการทดสอบพบว่า วงจรควบคุมฟีดแบ็คนี้บริโภคกำลังไฟฟ้า 0.4 วัตต์ และการทดสอบผลตอบสนองในโดเมนเวลาโดยจะป้อนอินพุต V_{in} เป็นสัญญาณขั้นบันไดขนาด 1 โวลต์และวัดแรงดันเอาต์พุต



รูปที่ 5 เอาต์พุตของตัวควบคุม เมื่อ K_p มีค่าต่าง ๆ



รูปที่ 6 เอาต์พุตของตัวควบคุม เมื่อ K_i มีค่าต่าง ๆ

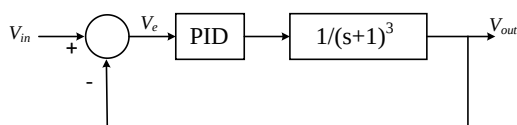


รูปที่ 7 เอาต์พุตของตัวควบคุม เมื่อ K_D มีค่าต่าง ๆ

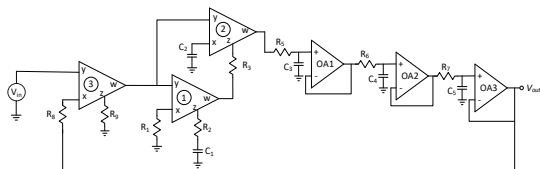
รูปที่ 5 แสดงแรงดันเอาต์พุตเมื่อให้ K_i และ K_D มีค่าคงที่ ขณะที่ค่า K_p เปลี่ยนแปลงตามนี้คือ 1, 2 และ 3 โดยการปรับค่า R_2 เป็น $1k\Omega$, $2k\Omega$ และ $3k\Omega$ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตของตัวควบคุมฟีดแบ็ค จะเป็นแปรผันตรงกับค่า K_p รูปที่ 6 แสดงแรงดันเอาต์พุตเมื่อให้ K_p และ K_D มีค่าคงที่ ขณะที่ K_i เปลี่ยนแปลงตามนี้ 500, 667 และ 1000 โดยการปรับค่า C_1 เป็น $2\mu F$, $1.5\mu F$ และ $1\mu F$ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตของตัวควบคุมฟีดแบ็ค จะมีค่าความชันที่เปลี่ยนแปลงตามค่า K_i และรูปที่ 7 แสดงแรงดันเอาต์พุตเมื่อ K_i และ K_p มีค่าคงที่ ขณะที่ K_D เปลี่ยนแปลงตามนี้ 0.01, 0.02 และ 0.002 โดยการปรับค่า R_3 เป็น $100k\Omega$, $20k\Omega$ และ $2k\Omega$ ตามลำดับ และจะเห็นว่าสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมฟีดแบ็ค จะมีการตอบสนองในช่วงเริ่มต้นที่เปลี่ยนแปลงตามค่า K_D

4. การประยุกต์ใช้งานของตัวควบคุมฟีดแบ็ค

ในหัวข้อนี้เป็นการนำตัวควบคุมฟีดแบ็คที่ออกแบบมาทดสอบกับพลาตันอันดับสามซึ่งถือว่าเป็นพลาตันที่ควบคุมได้ยากเพราะอันดับของพลาตันสูงว่า ซีโรของตัวควบคุมฟีดแบ็ค [12] โดยจะทดสอบในโดเมนเวลา บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมป้อนกลับ แสดงในรูป 8 (ก) วงจรที่ใช้จำลองการทำงานของตัวควบคุม ฟีดแบ็ค กับพลาตัน แสดงในรูป 8 (ข) ในการทดสอบนี้จะใช้พลาตันอันดับสามที่สร้างจากออปแอมป์ป้อนกลับแรงดันแบบอุดมคติ (OA1-OA3) เพราะต้องการให้มีคุณสมบัติตามสมการ (21) ขณะที่ตัวเปรียบเทียบแรงดัน (CFOA_3) และตัวควบคุมฟีดแบ็ค (CFOA_1 และ CFOA_2) จะสร้างจากออปแอมป์ป้อนกลับกระแส (AD844)



(ก)



(ข)

รูปที่ 8 ระบบควบคุมป้อนกลับ

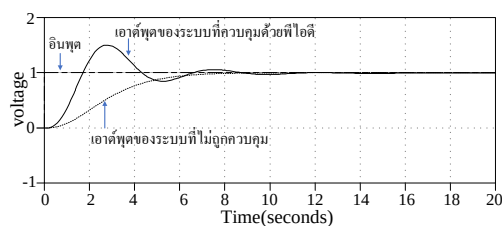
(ก) บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมป้อนกลับ

(ข) การแทนบล็อกไดอะแกรมด้วยวงจร

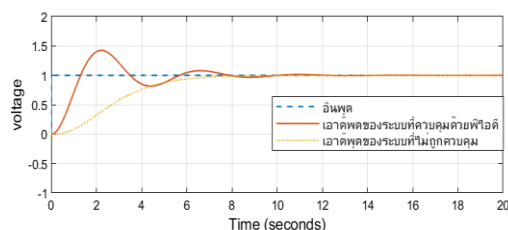
พลาตออันดับสามในรูปที่ 8 ประกอบด้วย OA1-OA3 R_5 - R_7 และ C_3 - C_5 สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังนี้

$$T(s) = \frac{1}{(s+1)^3} \quad (21)$$

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีของระบบในรูป 8 ด้วยวิธีการของ Ziegler และ Nichols[1],[9] จะได้ค่า $K_p = 4.8$, $K_i = 2.67$ และ $K_D = 2.11$ โดยใช้ค่าอุปกรณ์ต่างๆ ในตัวควบคุมพีไอดีมีค่าต่างๆ ดังนี้ $C_1 = 37.5 \mu F$, $C_2 = 10 \mu F$, $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 48 \text{ k}\Omega$ และ $R_3 = 211 \text{ k}\Omega$ สำหรับระบบอันดับสามใช้ค่า $C_4 = C_5 = C_6 = 100 \mu F$, $R_4 = R_5 = R_6 = 10 \text{ k}\Omega$ และวงจรลบสัญญาณแรงดันขึ้นบันไดขนาด 1 V ผลการทดสอบของระบบก่อนการควบคุมเปรียบเทียบกับระบบที่ควบคุมด้วยพีไอดีแสดงในรูปที่ 9



(ก)



(ข)

รูปที่ 9 เอาต์พุตของระบบก่อนและหลังการควบคุมด้วยพีไอดี ($K_p = 4.8$, $K_i = 2.67$ และ $K_D = 2.11$)

(ก) ผลการทดสอบด้วย LTspice

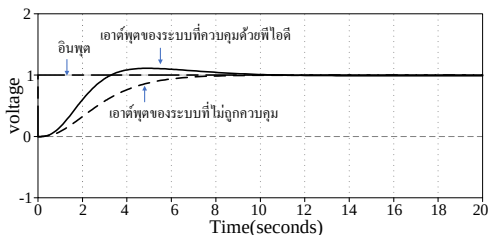
(ข) ผลการทดสอบด้วย MATLAB

จากรูปที่ 9 จะเห็นว่าอินพุตและเอาต์พุตของระบบที่ไม่ถูกควบคุมมีผลลัพธ์ที่เหมือนกันทั้ง LTspice และ MATLAB ขณะที่เอาต์พุตของระบบที่ถูกควบคุมด้วยพีไอดี มีผลลัพธ์ที่คล้ายกัน โดยได้เปรียบเทียบเอาต์พุตของระบบที่ถูกควบคุมกับระบบที่ไม่มีการควบคุมแสดงในตารางที่ 1

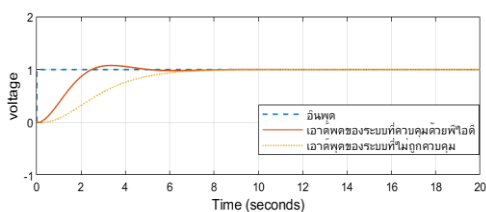
ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบผลการทดสอบในรูปที่ 9

ข้อกำหนดของการตอบสนอง	เอาต์พุตของระบบที่ถูกควบคุมที่ทดสอบด้วย LTspice	เอาต์พุตของระบบที่ถูกควบคุมที่ทดสอบด้วย MATLAB	เอาต์พุตของระบบที่ไม่มีการควบคุม
rise time	1.7 s	1.3 s	4.2 s
peak time	2.8 s	2.2 s	>14 s
settling time	10.9 s	9.5 s	7.5 s
overshoot	50.0 %	42.0 %	0.0 %

เมื่อลองปรับค่าเกณฑ์ต่างๆใหม่ดังนี้ $K_p = 2.17$, $K_i = 0.85$ และ $K_d = 1.91$ โดยใช้ค่าอุปกรณ์ต่างๆ ใน ตัวควบคุมฟีดแบ็ค มีค่าต่างๆ ดังนี้ $C_1 = 117 \mu F$, $C_2 = 10 \mu F$, $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 21.7 \text{ k}\Omega$ และ $R_3 = 191 \text{ k}\Omega$



(ก)



(ข)

รูปที่ 10 เาต์พุตของระบบก่อนและหลังการควบคุมด้วยฟีดแบ็ค ($K_p = 2.17$, $K_i = 0.85$ และ $K_d = 1.91$)

(ก) ผลการทดสอบด้วย LTSpice

(ข) ผลการทดสอบด้วย MATLAB

จากรูปที่ 10 จะเห็นว่าอินพุตและเอาต์พุตของระบบที่ไม่ถูกควบคุมมีผลลัพธ์ที่เหมือนกันทั้ง LTSpice และ MATLAB ขณะที่เอาต์พุตของระบบที่ถูกควบคุมด้วยฟีดแบ็คมีผลลัพธ์ที่คล้ายกัน โดยได้เปรียบเทียบเอาต์พุตของระบบที่ถูกควบคุมกับระบบที่ไม่มีการควบคุมแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบผลการทดสอบในรูปที่ 10

ข้อกำหนดของการตอบสนอง	เอาต์พุตของระบบที่ถูกควบคุมที่ทดสอบด้วย LTSpice	เอาต์พุตของระบบที่ถูกควบคุมที่ทดสอบด้วย MATLAB	ระบบที่ไม่มีการควบคุม
rise time	3.3 s	2.5 s	4.2 s
peak time	4.9 s	3.3 s	>14 s
settling time	10.7 s	6.6 s	7.5 s
overshoot	11.0 %	7.8 %	0.0 %

ในรูปที่ 9 และ 10 เอาต์พุตของพลาตัสหรือระบบที่ไม่ถูกควบคุมมีผลลัพธ์ที่เหมือนกันทั้ง LTSpice และ MATLAB เพราะระบบอันดับสามที่ใช้ใน LTSpice (ใช้โอปแอมป์ในอุดมคติ) และ MATLAB มีสมการที่เหมือนกันคือสมการ(21) ขณะที่เอาต์พุตของระบบที่ถูกควบคุมด้วยฟีดแบ็ค ที่ทดสอบด้วย LTSpice มีรูปร่างคล้ายกับ ที่ทดสอบด้วย MATLAB โดยต่างกันที่ การใช้ LTSpice จะให้ผลของเวลาขึ้น (rise time) เวลาขนาดสูงสุด (peak time) และเวลาเข้าที่ (settling time) มีค่าช้ากว่า การใช้ MATLAB ทั้งนี้เพราะ MATLAB ใช้ตัวควบคุมฟีดแบ็คตามสมการ(5) ขณะที่ LTSpice ใช้ตัวควบคุมฟีดแบ็ค (ที่เกิดผลของความต้านทานและความจุไฟฟ้าภายในโอปแอมป์ป้อนกลับกระแส) ตามสมการ(20) โดยจะเห็นว่ามีขั้ว (pole) ที่เพิ่มขึ้นมา 3 ตัวซึ่งจะส่งผลทำให้เอาต์พุตช้าลงกว่าการใช้ MATLAB และเมื่อเปรียบเทียบเอาต์พุตของระบบที่ถูกควบคุมที่ทดสอบด้วย LTSpice และ MATLAB กับ เอาต์พุตของระบบที่ไม่มีการควบคุม พบว่า ระบบที่ถูกควบคุม ที่ทดสอบด้วย LTSpice และ MATLAB มีเวลาขึ้น (rise time) ที่เร็วกว่า และมีการพุ่งเกิน (overshoot) ขณะที่ระบบที่ไม่มีการควบคุม ไม่มีการพุ่งเกิน

5. สรุป

บทความนี้เป็นการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี โดยใช้ออปแอมป์ป้อนกลับกระแสเพียง 2 ตัว ผลการจำลองการทำงานสอดคล้องกับการวิเคราะห์ทางทฤษฎี คืออัตราขยายของตัวควบคุม (K_p , K_i และ K_d) สามารถปรับได้อย่างอิสระ ในการประยุกต์ใช้งาน ได้นำตัวควบคุมพีไอดี ที่ออกแบบมาทดสอบกับพลาตันอันดับสาม และได้เปรียบการทดสอบโดยใช้ LTspice กับ MATLAB ซึ่งให้ผลที่คล้ายกันโดยการใช้ LTspice จะให้ผลที่มีการหน่วงเวลาหรือเกิดล่าช้าหลังกว่าการใช้ MATLAB ผลของความแตกต่างนี้เกิดจากความไม่เป็นอุดมคติของออปแอมป์ป้อนกลับกระแส

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. J. Astrom, and T. Haggglund, PID Controllers: Theory Design and Tuning, North Carolina: Instrument Society of America, 1995.
- [2] L. Jia, D. Wang, J. Fu, YF. Liu, PC. Sen, "A novel analog implementation of capacitor charge balance controller with a practical extreme voltage detector," Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011 IEEE, 245-252
- [3] K. Jang, J.-M. Choi, C. Park, J. Choi, "A voltage-mode DC-DC converter with enhanced transient responses," IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 20-23 May 2012
- [4] M. Huang and Y. Lu, "An analog-proportional digital-integral multi-loop digital LDO with fast response, improved PSR and zero minimum load current," in Proc. IEEE Custom Integr. Circuits Conf. (CICC), Apr. 2019, pp. 1-4.
- [5] C. Erdal, H. Kuntman, and S. Kafali, "A current controller conveyor- based proportion- integral- Derivative (PID) controller," Istanbul university eng. Journal of electrical & electronics, vol. 4, no. 2, pp. 1243-1248, 2004.
- [6] C. Erdal, "A new current-feedback- amplifiers (CFAs) based proportional- integral- derivative (PID) Controller realization and calculating optimum parameter tolerances," Pakistan Journal of Applied Sciences, vol. 2, no. 1, pp. 56-59, 2002.
- [7] C. Erdal, A. Toker, and C. Acar, "OTA-C based Proportional- Integral- Derivative Controller and calculating optimum parameter tolerances," Turkish J. Elect. Enging Comput. Sci., Elektrik, 9(2) (2001), 189-198.
- [8] Ali Ümit Keskin, "Design of a pid controller circuit employing CDBAa," Int. J. Electr. Eng. Educ. 43(1),48-56(2006)
- [9] สมเกียรติ เพ็ญพรานทอง และ อธิพงษ์ ชัยสาขันธ์, "การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีโดยใช้วงจรขยาย บัพเฟอร์ของผลต่างกระแส," หน้า 95-100, การประชุมวิชาการสหวิทยาการเอเชียอาคเนย์ครั้งที่ 9, มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์, 24-25, มิถุนายน 2565.
- [10] Z. Gülru, C. Taşkıran, H. Sedef & F. Anda, "A New PID Controller Circuit Design Using CFOAs," Circuits Syst Signal Process 40, 1166-1182 (2021)
- [11] Analog Devices, "Linear products data book", Norwood, Ma, 1990.
- [12] S. Jung and R. C. Dorf, "Analytic PIDA Controller Design Technique for A Third Order System," Proceeding of the 35th Conference on Decision and Control, Japan, 13 Dec. 1996, pp. 2513-2518