

การสังเคราะห์ตัวควบคุมแบบ PI, PD และ PID โหมดกระแสโดยใช้ AD-844

A Synthesis of Current-mode PI, PD and PID Controllers Employing AD-844

เกรียงไกร สุยะ¹ กฤษณ์พันธ์ พรรณรัตนชัย² ชิตสิริวัศ วิจิโต³ สมชาย ศรีสกุลเดี่ยว³ ศักดิ์เดช สังคพัฒน์⁴

Received: October, 2013; Accepted: June, 2014

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการสังเคราะห์ตัวควบคุม PI, PD และ PID ที่ทำงานในโหมดกระแสโดยใช้ AD844 ซึ่งเป็นไอซีที่มีจำหน่ายท้องตลาด ที่มีคุณลักษณะของการควบคุม คือ สามารถควบคุมพารามิเตอร์ได้อย่างอิสระในแต่ละส่วนของตัวควบคุม ทั้งตัวควบคุมแบบสัดส่วน (P) แบบปริพันธ์ (I) และแบบอนุพันธ์ (D) ที่มีรายละเอียดของวงจรไม่ซับซ้อน ประกอบไปด้วย AD844 จำนวน 3 ตัว ทำงานร่วมกับตัวต้านทานแบบต่อลงกราวด์ 3 ตัว และตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวด์อีก 2 ตัว ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองด้วย PSpice สอดคล้องกับทางทฤษฎี มีอัตราการใช้พลังงานของวงจรการควบคุมของตัวควบคุมแบบ PI, PD และ PID ในการควบคุมแบบปิดคือ 13mW, 12.4mW และ 18.6mW ตามลำดับ ที่แหล่งจ่าย ± 5 โวลต์

คำสำคัญ : AD844; โหมดกระแส; PI; PD; PID

¹ สาขาอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคโนโลยีโปลิเทคนิคลานนาเชียงใหม่

² คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

³ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

⁴ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏกาฬสินธุ์

E - mail : somchaikorat2008@hotmail.com

Abstract

This paper presents a synthesis of current-mode PI, PD and PID controllers employing AD844s. The features of these controllers are as follow: the parameters can be independently controlled in the proportional, integral, and deviation controllers, circuit description of the PID controller is simply formulated, it consists of only 3 AD844s cooperating with 3 grounded resistors and 2 grounded capacitors. The proposed circuit is very suitable to develop into an integrated circuit. The experimental results of the PSpice simulation agree well with the theoretical anticipation. The maximum power consumptions obtained from the PI, PD and PID in a closed loop control system was approximately 13mW, 12.4mW and 18.6mW respectively at $\pm 5V$ supply voltages.

Keywords : AD844; Current-mode; PI; PD; PID

บทนำ

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์และอนุพันธ์ (PID Controller) เป็นระบบควบคุมที่นิยมใช้ ในกระบวนการควบคุมในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสะดวกในการออกแบบง่ายในการ ปรับแต่งคุณลักษณะเฉพาะในแต่ละส่วนของตัวควบคุม และราคาประหยัด (Bennette S., 1993) ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์และอนุพันธ์ ประกอบด้วยเทอมทั้งสาม คือ ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (P) ตัวควบคุมแบบปริพันธ์ (I) และตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (D) ซึ่งเป็นตัวควบคุมที่ต้องการปรับแต่ง คุณลักษณะเฉพาะในแต่ละส่วนให้เหมาะสม ตัวควบคุม PID กับการปรับแต่งคุณลักษณะภายใน แต่ละส่วนการควบคุมให้เกิดประสิทธิภาพได้อย่างเหมาะสมเป็นการควบคุมอัตโนมัติ การปรับแต่ง P เป็นการปรับความเร็วของการตอบสนองของระบบ I เป็นการปรับแต่งค่าผิดพลาดให้ลดลงเท่าที่จะทำได้ ในสภาวะคงตัว และ D เป็นการปรับแต่งการตอบสนองชั่วคราวให้ดีขึ้นจึงเป็นที่ยอมรับและใช้กันอย่าง กว้างขวางในระบบควบคุม

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์ และอนุพันธ์ ที่ออกแบบโดยใช้โอปแอมป์ จะต้องใช้ อุปกรณ์พาสซีฟที่ต่อลงถึงลิบตัว และโอปแอมป์อีกสี่ตัว (Franco S., 1998) [1] ในขณะเดียวกัน วงจรที่ออกแบบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ใหม่ ๆ เช่น วงจรสายพานกระแสได้ผลลัพธ์ดี เช่น มีความ เป็นเชิงเส้นสูง แบนด์วิดท์กว้าง พิสัยพลวัตสูง ใช้อุปกรณ์น้อย อัตราการสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าต่ำ และมีความง่ายในการออกแบบวงจร (Toumazou C., et al, 1990; Ferri G., Guerrini NC., 2003) หากวงจรใช้อุปกรณ์พาสซีฟแบบต่อลงกราวด์โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวเก็บประจุต่อลงกราวด์ และไม่ต้องใช้อุปกรณ์อื่น ๆ ใด ทำให้วงจรเกิดสมดุลวงจรมั่น จึงเหมาะที่จะนำไปทำเป็นวงจรรวม

อุปกรณ์ที่นำมาสังเคราะห์เป็นวงจรควบคุม PID สามารถใช้อุปกรณ์ใดก็ได้ เช่น OTA (Cevat E. et al., 2001) [2], CCII (Erdal C. et al., 2001 [3]; Minaei S. et al., 2005) [4], CFA (Srisakultiew S. et al., 2013 [5], CCCII (วิภาวัลย์ และคณะ, 2551 [6] และอิทธิพงศ์ และ สมเกียรติ, 2553 [7]), CDDBA (Keskin A. U., 2005) [8], OTA และ CCII (V. Michal, et al., 2010) [9] เป็นต้นซึ่งได้มีการนำเสนอแล้วทั้งสิ้นทั้งในและต่างประเทศ ดังตารางเปรียบเทียบที่ 1 คุณลักษณะของตัวควบคุมที่ต้องการ คือ

- (1) มีโครงสร้างที่เรียบง่ายไม่ซับซ้อน
- (2) ใช้อุปกรณ์แอคทีฟน้อย
- (3) ใช้อุปกรณ์พาสซีสแบบต่อลงกราวนด์
- (4) ปรับแต่งพารามิเตอร์ได้ง่ายและอิสระในแต่ละส่วนตัวควบคุมได้ง่ายด้วยการเปลี่ยนค่าความต้านทาน หรือค่าตัวเก็บประจุ
- (5) ไม่ต้องใช้อุปกรณ์สมพงษ์ที่แอคทีฟ

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณลักษณะของตัวควบคุม PID ต่าง ๆ กับตัวควบคุม PID ที่นำเสนอ

คุณลักษณะ	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
PID ที่นำเสนอ	ใช่	ใช่	ใช่	ใช่	ใช่
PID [1]	ไม่	ไม่	ไม่	ไม่	ไม่
PID [2]	ไม่	ไม่	ไม่	ไม่	ไม่
PID [3]	ใช่	ไม่	ไม่	ใช่	ไม่
PID [4]	ใช่	ไม่	ไม่	ใช่	ไม่
PID [5]	ใช่	ใช่	ใช่	ไม่	ใช่
PID [6]	ไม่	ไม่	ใช่	ไม่	ใช่
PID [7]	ไม่	ไม่	ใช่	ไม่	ใช่
PID [8]	ใช่	ไม่	ใช่	ใช่	ไม่
PID [9]	ใช่	ใช่	ไม่	ไม่	ใช่

ดังนั้นบทความนี้แนะนำเสนอตัวควบคุม PID ด้วย AD844 ซึ่งเป็นไอซีที่มีจำหน่ายในท้องตลาด ตัวควบคุมที่ออกแบบนี้มีลักษณะเด่นของวงจรที่นำเสนอ คือ

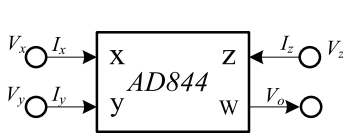
- มีโครงสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อน
- ใช้อุปกรณ์ทั้งแอคทีฟน้อย
- ต่อร่วมกับตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวนด์
- สามารถปรับแต่งพารามิเตอร์ได้อย่างอิสระในแต่ละส่วนของตัวควบคุม
- อุปกรณ์แอคทีฟสามารถซื้อได้ในท้องตลาด

หลักการของวงจร

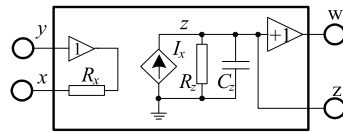
ไอซี AD844

ไอซี AD844 เป็นวงจรรวมในเชิงพาณิชย์ ที่มีคุณสมบัติพื้นฐาน มีอินพุตอิมพีแดนซ์ต่ำ และเอาต์พุตอิมพีแดนซ์สูง โดยมีเอาต์พุตเป็นทั้งกระแส และแรงดัน หรือสามารถเรียกว่าวงจรขยายป้อนกลับกระแส จึงขออธิบายคุณลักษณะเฉพาะของ AD844 ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสโดยสังเขปดังสมการที่ (1)

$$V_x = V_y, V_o = V_z, I_y = 0, I_z = I_x \quad (1)$$



(ก) สัญลักษณ์



(ข) วงจรสมมูลภายใน

วงจรขยายป้อนกลับกระแส เบอร์ AD-844

รูปที่ 1 (ก) และ(ข) แสดงสัญลักษณ์ และวงจรสมมูลภายในของ ไอซี AD844 ตามลำดับ

การสังเคราะห์ตัวควบคุม PI ด้วย AD844

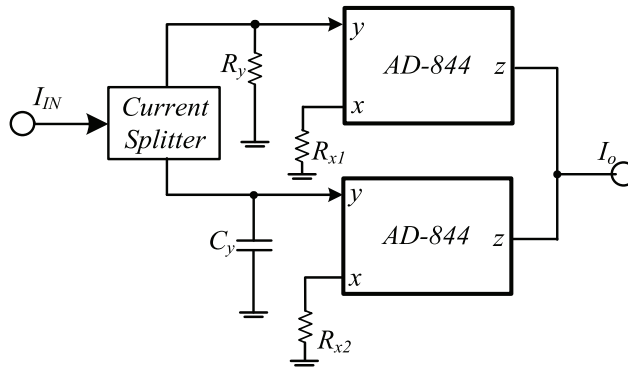
ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์ (Proportional Integral: PI) ในโหมดกระแส ด้วย AD844 ดังรูปที่ 2 วงจรประกอบไปด้วย AD844 จำนวน 2 ตัว ต่อร่วมกับตัวต้านทาน 3 ตัว กับตัวเก็บประจุ 1 ตัว แบบต่อลงกราวด์ AD844 ตัวที่ 1 ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมแบบ P และตัวที่ 2 ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมแบบ I ที่อินพุตใช้ตัวแยกกระแสในอุดมคติ จากสมการทั่วไปของตัวควบคุมแบบ PI ในสมการที่ (2) สามารถเขียนสมการถ่ายโอนของ AD844 ได้ดังสมการที่ (3)

$$H_{PI}(s) = \frac{I_o}{I_{in}} = K_{pi} + \frac{1}{T_i s} \quad (2)$$

เมื่อ

$$K_p = K_{pi}$$

$$H_{PI}(s) = \frac{I_o}{I_{in}} = \frac{R_y}{R_{x1}} + R_{x2} s C_y \quad (3)$$



รูปที่ 2 ตัวควบคุมแบบ PI

จากสมการที่ (3) จะเห็นว่าตัวควบคุมแบบสัดส่วน (K_p) สามารถควบคุมอัตราการขยายได้ด้วย R_y หรือ R_{x1} และค่าเวลา T_i ก็สามารถปรับได้ด้วย R_{x2} หรือ C_y อย่างเป็นอิสระต่อกันจากตัวควบคุม P

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอนุพันธ์ (Proportional-Derivative Controller: PD)

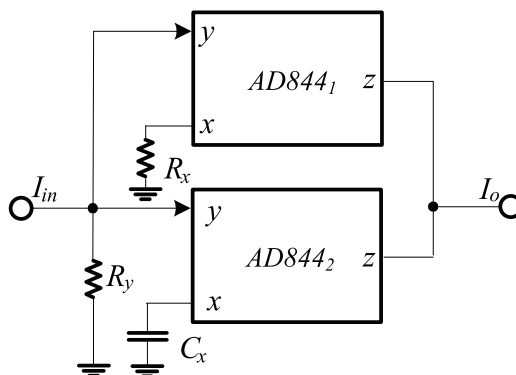
ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอนุพันธ์ในโหมดกระแสด้วย AD844 ที่นำเสนอในรูปที่ 3 ประกอบด้วย AD844 จำนวน 2 ตัว และตัวต้านทานแบบต่อลงกราวด์ 2 ตัว กับตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวด์อีก 1 ตัวสามารถเขียนสมการควบคุมได้สมการที่ (4) ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานของตัวควบคุมแบบ PD และสมการที่ (5) เป็นสมการถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบ PD ด้วย AD844 ในโหมดกระแส

$$H_{PD}(s) = \frac{I_o}{I_{in}} = K_p + T_D s \quad (4)$$

เมื่อ

$$K_p = K_{PD}$$

$$H_{PD}(s) = \frac{I_o}{I_{in}} = \frac{R_y}{R_x} + R_y s C_x \quad (5)$$



รูปที่ 3 ตัวควบคุมแบบ PD

จากสมการที่ (5) จะเห็นว่าตัวควบคุมแบบสัดส่วนสามารถควบคุมอัตราการขยายได้ด้วย R_x และค่าเวลาของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ก็สามารถควบคุมได้ด้วย C_x อย่างเป็นอิสระต่อกัน

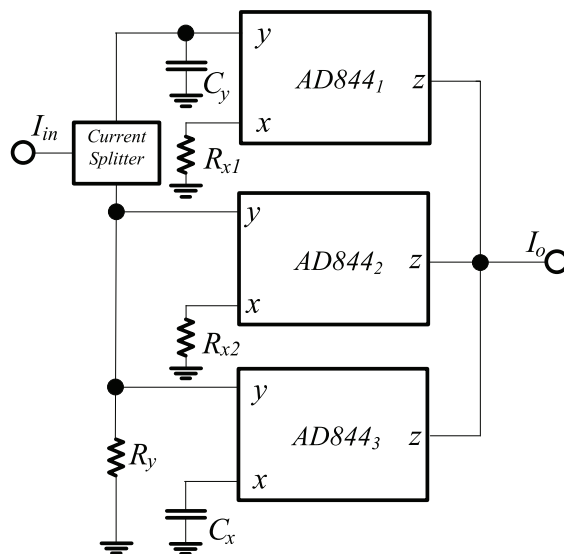
ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์และอนุพันธ์ (Proportional- Integral Derivative: PID)

ตัวควบคุม PID ที่นำเสนอในโหมดกระแสด้วย AD844 ในรูปที่ 4 ประกอบด้วย AD844 จำนวน 3 ตัว ต่อร่วมกับตัวต้านทาน 3 ตัว และตัวเก็บประจุ 2 ตัว แบบต่อลงกราวด์ ซึ่ง AD844 ตัวที่ 1 ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมแบบ P ตัวที่ 2 ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมแบบ I และตัวที่ 3 เป็นตัวควบคุมแบบ D จากสมการทั่วไปตัวควบคุมแบบ PID ในสมการที่ (6) สามารถเขียนสมการถ่ายโอนของวงจรในรูปที่ 4 ได้ดังสมการที่ (7)

$$H_{PID}(s) = \frac{I_o}{I_{in}} = K_{pi} + \frac{1}{T_i s} + T_D s \quad (6)$$

$$H_{PID}(s) = \frac{I_o}{I_{in}} = \frac{R_y}{R_{x2}} + R_{x1} s C_y + R_y s C_x \quad (7)$$

จากสมการที่ (7) จะเห็นได้ว่าคุณลักษณะเฉพาะตัวควบคุมแบบ PID ด้วย AD-844 ในโหมดกระแสที่นำเสนอ สามารถควบคุมได้อย่างเป็นอิสระของแต่ละส่วนตัวควบคุม กล่าวคือ R_{x2} ใช้ควบคุมค่าอัตราขยาย (K_p) ของตัวควบคุมแบบสัดส่วน C_y ควบคุมค่าเวลา T_i และ C_x ควบคุมค่าเวลา T_D



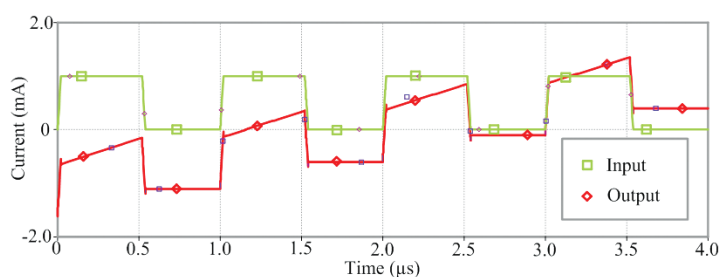
รูปที่ 4 ตัวควบคุมแบบ PID ที่นำเสนอ

ผลการจำลองการทำงาน

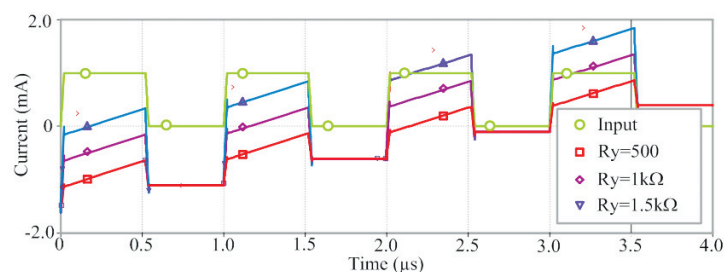
ตัวควบคุมแบบ PID ในโหมดกระแส ด้วย AD844 ที่นำเสนอ สามารถยืนยันประสิทธิภาพ และคุณสมบัติของวงจรด้วยโปรแกรม PSpice ซึ่งใช้พารามิเตอร์ของไอซี AD844 ของบริษัทแอนาล็อก ดีไวส์ (Analog Devices, 1998-2009) วงจรตัวควบคุมที่นำเสนอนี้กำหนดให้ทำงานที่ไฟเลี้ยง $\pm 5V$

การทดสอบคุณสมบัติของวงจรตัวควบคุมทั้งหมด กำหนดสัญญาณทางเข้าเป็นสัญญาณแบบขั้นบันได และตัวแยกกระแสในอุดมคติ (Current Splitter) ที่อินพุตของตัวควบคุม PI และ PID

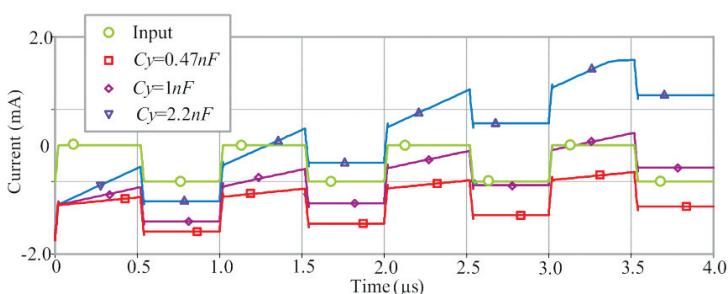
ผลการจำลองของตัวควบคุมแบบ PI ในวงจรรูปที่ 2 ประกอบด้วย AD844 จำนวน 2 ตัว และกำหนดให้ $R_y=R_{x1}=R_{x2}=1k\Omega$ และ $C_y=1nF$ ในรูปที่ 5 (ก) เป็นการทำงานในสภาวะเริ่มต้นที่มีค่า $K_p=1$ และ $1/T_s=1\mu s$ ให้สัญญาณอินพุตเป็นแบบสเตปที่สภาวะนี้สิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้า 12.4mW รูปที่ 5(ข) เป็นการปรับ K_p หรืออัตราขยายโดยให้ $R_{x1}=500\Omega, 1k\Omega$ และ $1.5k\Omega$ เพื่อทำให้อัตราขยายค่า $K_p=0.5, 1, 1.5$ ตามลำดับ ในรูปที่ 5(ค) แสดงการเปลี่ยนแปลงของ K_i ด้วยการเปลี่ยนค่าของ $C_y=0.47nF, 1nF$ และ $2.2nF$ จะมีค่า $T_i=0.47\mu s, 1\mu s$ และ $2.2\mu s$ ตามลำดับ จะพบว่า การเพิ่มค่าตัวเก็บประจุจะทำให้ค่าความชันเพิ่มขึ้น และตัวควบคุม PD ที่นำเสนอนี้สามารถควบคุมพารามิเตอร์ทั้งสองได้อย่างอิสระต่อกัน



(ก)



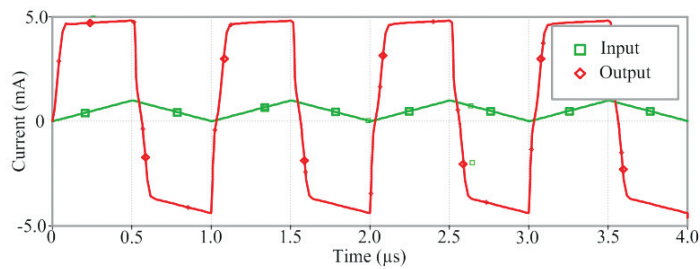
(ข)



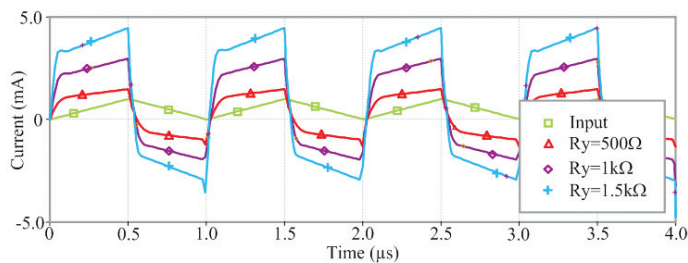
(ค)

รูปที่ 5 ผลการจำลองการทำงานของตัวควบคุมแบบ PI

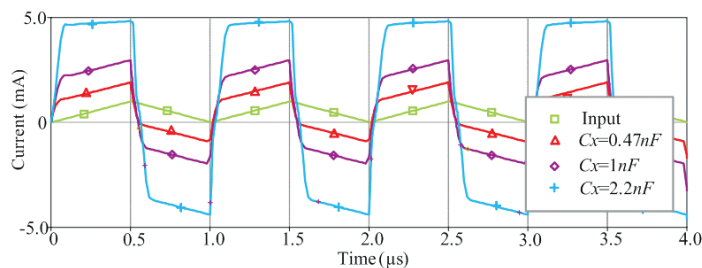
ผลการจำลองการทำงานของตัวควบคุมแบบ PD แสดงดังรูปที่ 6 โดยกำหนด $R_y=R_{x1}=R_{x2}=1k\Omega$ และ $C_x=1nF$ รูปที่ 6(ก) เป็นผลการจำลองการทำงานของตัวควบคุมแบบ PD ในสภาวะเริ่มต้นด้วยการป้อนสัญญาณรูปแรมขนาด 1mA จากอุปกรณ์ที่กำหนดจะได้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมคือค่า $K_p=1$, $T_d=1\mu s$ และรูปที่ 6 (ข) เป็นการปรับค่าอัตราขยายด้วย R_y ให้มีค่า 500Ω , $1k\Omega$ และ $1.5k\Omega$ ทำให้ได้ค่า $K_p = 0.5, 1$ และ 1.5 ในทำนองเดียวกันในรูปที่ 6 (ค) เป็นการจำลองการทำงานให้เห็นสภาวะการอนุพันธ์ หรือ T_d ด้วย $C_x=0.47nF$, $1nF$ และ $2.2nF$ ทำให้ค่า $T_d=0.47\mu s$, $1\mu s$ และ $2.2\mu s$ ตามลำดับ ทำให้เห็นสภาวะการเปลี่ยนแปลงของการปรับค่าเวลาอนุพันธ์ดังนั้นตัวควบคุม PD ที่นำเสนอจะเห็นได้ว่าสามารถควบคุมพารามิเตอร์ทั้งสองได้อย่างอิสระต่อกัน



(ก)

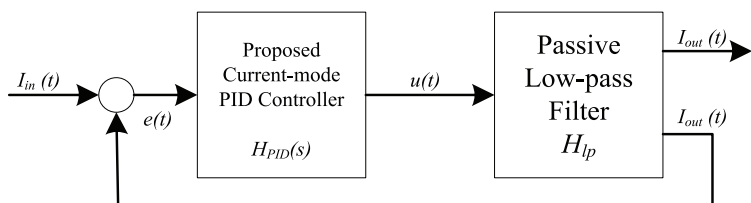


(ข)

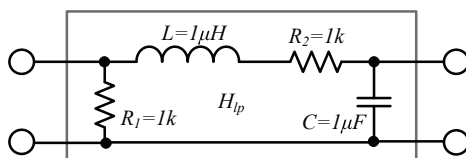


(ค)

รูปที่ 6 ผลการจำลองการทำงานของตัวควบคุมแบบ PD



รูปที่ 7 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ



รูปที่ 8 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

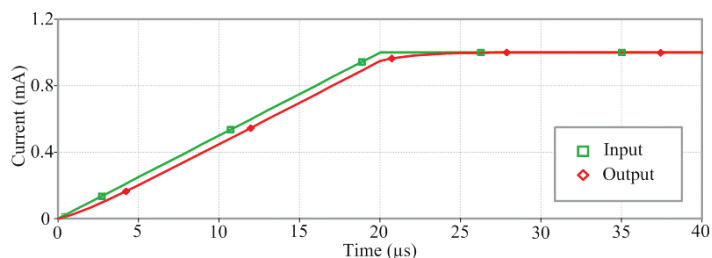
$$H_{lp} = \frac{I_o}{I_{in}} = \frac{R_1 C}{LCs^2 + (R_1 + R_2)sC + 1} \quad (4)$$

รูปที่ 7 เป็นผังงานของระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้ทดสอบตัวควบคุม PID ที่นำเสนอต่อร่วมกับพลาน์ (plant) ของระบบ ที่เป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่มีรายละเอียดดังรูปที่ 8 มีสมการถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านดังสมการที่ 9 ในการจำลองการทำงานที่เอาต์พุตของพลาน์ได้คือตัวแยกกระแสในทางอุดมคติเพื่อป้อนกลับ และเอาต์พุตของระบบกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุม PID คือ $K_p=1$, $K_i=1\mu s$ และ $K_d=1\mu s$ ต่อร่วมกับพลาน์ และป้อนสัญญาณอินพุตในรูปแบบสเตปที่มีขนาด 1mA ที่ความถี่ 1kHz ดังรูปที่ 9 เป็นผลการจำลองการทำงานของตัวควบคุม PID ในระบบป้อนกลับ รูปที่ 9(ก) แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบสัญญาณอินพุตกับเอาต์พุตในสภาวะเริ่มต้นของระบบควบคุมในระยะเวลา 40μs จะเห็นได้ว่าสัญญาณเอาต์พุตเลียนแบบตามอินพุต โดยไม่เกิดการโอเวอร์ชูตของสัญญาณเอาต์พุตและในรูปที่ 9 (ข) เปรียบเทียบสัญญาณอินพุตกับเอาต์พุตของผลการจำลองการทำงานในสภาวะคงตัวของระบบควบคุมจะเห็นได้ว่า ผลของสัญญาณเอาต์พุตเป็นไปตามสัญญาณอินพุต ซึ่งสอดคล้องตามทฤษฎี

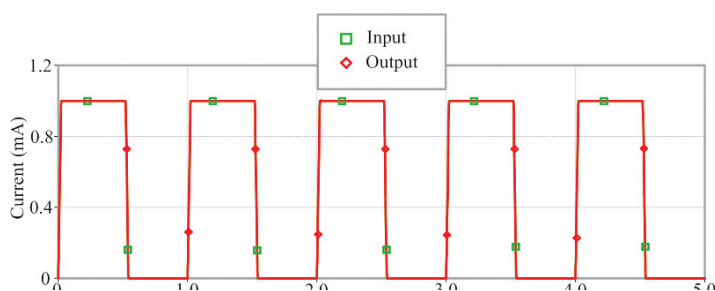
บทสรุป

บทความนี้นำเสนอวงจรควบคุม PI, PD และ PID ในโหมดกระแสด้วย AD844 ที่มีวงจรไม่ซับซ้อน ตัวควบคุม PI ประกอบด้วย AD844 จำนวน 2 ตัว ต่อร่วมกับตัวต้านทาน 3 ตัว และตัวเก็บประจุ 1 ตัวแบบต่อลงกราวด์ ตัวควบคุม PD ประกอบด้วย AD844 จำนวน 2 ตัว ต่อร่วมกับตัวต้านทาน 2 ตัว และตัวเก็บประจุ 1 ตัว แบบต่อลงกราวด์ และตัวควบคุม PID ประกอบด้วย AD844 จำนวน 3 ตัว ต่อร่วมกับตัวต้านทาน 3 ตัว และตัวเก็บประจุ 2 ตัว ที่เป็นแบบต่อลงกราวด์ ที่มีคุณลักษณะของการควบคุมคือสามารถปรับพารามิเตอร์ได้อย่างอิสระในแต่ละส่วน ตัวควบคุมด้วยอุปกรณ์พาสซีฟภายนอกแบบต่อลงกราวด์ ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วย

โปรแกรม PSpice ซึ่งสอดคล้องกับทางทฤษฎี และตัวควบคุม PI, PD และ PID ร่วมกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ต่อรวมเป็นระบบควบคุมระบบปิดมีอัตราการสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าทั้งระบบ คือ 13mW, 12.4mW และ 18.6mW ตามลำดับ ที่แหล่งจ่าย ± 5 โวลต์



(ก)



(ข)

รูปที่ 9 ผลการจำลองการทำงานของตัวควบคุม PID ในระบบปิด

บรรณานุกรม

- Analog Devices, Inc. (1989-2009). AD844. WWW.analog.com.
- Bennette S. (1993). Development of the PID controller. IEEE Control Systems Mag. pp. 58-65.
- Cevat E., Ali T., Cevdet A. (2001). OTA-C based Proportion-Integral-Derivative (PID) Controller and Calculating Optimum Parameter Tolerances. Turk J ElecEngin. vol. 9, NO. 2 pp. 189-198.
- Erdal C., Toker A., Acar C. (2001). A new proportional integral derivative (PID) controller realization by using current conveyor and calculating optimum parameter tolerances. Journal of Electrical & Electronics. vol. 1 No. 2, 267-273.
- Ferri G., Guerrini NC. (2003). Low-voltage low-power CMOS current conveyors. London: Kluwer Academic Publishers.

- Franco S. (1998). Design with operational amplifiers and analog integrated circuits. 2nded. New York: McGraw-Hill International Editions.
- Keskin A. U. (2005). Design of a PID controller circuit employing CDBAs. International journal of electrical engineering education. pp. 48-54.
- Michal V., Premont C., Pillonnet G. and Abouchi N. (2010). Single Active Element PID Controllers. Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA). 20th International Conference. pp. 1-4. Brno.
- Minaei S., Yuce E., Takat S. and Cicekoglu O. (2005). Simple realizations of current-mode and voltage-mode PID, PI and PD controllers. Industrial electronics. Proceeding of the IEEE international symposium.
- Srisakultiew S., Lawanwisut S. and Siripruchyanun M. (2013). A synthesis of current-mode PI, PD and PID controllers employing CFAs. in The proceeding of 51th Kasetsart University Annual Conference, pp. 47-51.
- Toumazou C., Lidgey FJ., Haigh D.G. (1990). Analog IC design: the current-mode approach. London: Peter Peregrinus.
- วิภาวัลย์ นาคทรัพย์, วิวัฒน์ กิรานนท์, จรียา วงศ์เดชธรรม และวิภา แสงพิลลิตี. (2551). ตัวควบคุมพีไอดีพีไอและพีดีโดยใช้วงจรสายพานกระแสร่นที่สองที่ถูกควบคุมด้วยกระแส. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 31, ณ รอยัลฮิลล์กอล์ฟรีสอร์ตแอนด์สปา, หน้าที่ 29-31.
- อิทธิพงศ์ ชัยสายัณห์ และ สมเกียรติ เพียงพรานทอง. (2553). ตัวควบคุม พีไอดี แบบสองอินพุตสองเอาต์พุตโดยใช้วงจรสายพานกระแสร่นที่สองที่ควบคุมด้วยกระแส. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 8, หน้าที่ 285-289.