

วงจรกรองผ่านทุกความถี่โหมดกระแสที่ปรับค่าขนาดและเฟสได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์

Current-Mode All-Pass Filter with Electronically Adjustable Amplitude and Phase Features

วิภาวัลย์ นาคทรัพย์¹ แสงระวี บัวแก้ว² ประจวบ ปวรางกูร³ และ ไวยพจน์ สุกบวรเสถียร¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม

235 ถนนเพชรเกษม เขตภาษีเจริญ กรุงเทพมหานคร 10160 โทร. 0-2457-0068 ต่อ 5123 E-mail: wipavann@gmail.com, vyapoltes@hotmail.com

² ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทร. 0-2737-3000 ต่อ 3375 E-mail: ktseangr@kmit.ac.th

³ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530 โทร. 0-2988-3655 ต่อ 1128 Email: prajuab@mut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรกรองผ่านทุกความถี่โหมดกระแสที่สร้างขึ้นจากวงจรสายพานกระแสที่สามารถปรับค่าอัตราขยายกระแสได้ (KCCCI) สองตัวประกอบกับตัวเก็บประจุเพียงหนึ่งตัวเท่านั้น วงจรนี้ต้องการตัวต้านทานแบบพาสซีฟในการทำงาน ทำให้มีความน่าสนใจในการสร้างเป็นวงจรรวม วงจรมีคุณสมบัติที่สามารถปรับค่าอัตราขยายและการเลื่อนเฟสของวงจรได้ง่ายและอิสระจากกันโดยการปรับค่ากระแสไบอัสของวงจรสายพานกระแส อีกทั้งสัญญาณเอาต์พุตเป็นได้ทั้งแบบเฟสนำและแบบเฟสตามภายในวงจรเดียวกันโดยมีต้องปรับเปลี่ยนโครงสร้างแต่ประการใด ผลการจำลองวงจรได้ยืนยันการทำงานของวงจรที่สอดคล้องกับผลของการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีเป็นอย่างดี

คำสำคัญ: วงจรกรองผ่านทุกความถี่, โหมดกระแส, วงจรสายพานกระแส

Abstract

This paper presents a current-mode first order all-pass filter using only two second-generation current conveyors with controlled current gain (KCCCIIs) and one capacitor. The proposed circuit does not require any passive resistor. Then, it is suitable for implementation as integrated circuit. The current gains and the phase characteristics can be easily independently controlled by dc bias current. Simulation results of the circuit show well agreement with theoretical analysis.

Keywords: all-pass filter, current-mode, current conveyor

1. คำนำ

วงจรกรองผ่านทุกความถี่หรือวงจรเลื่อนเฟสเป็นวงจรแอนะล็อกประเภทหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญในงานด้านการประมวลผลสัญญาณ และพบเห็นได้บ่อยครั้งในงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ วงจร

กรองผ่านทุกความถี่แบบพื้นฐานมีหน้าที่เลื่อนเฟสของสัญญาณอินพุตเท่านั้น โดยจะคงค่าขนาดของสัญญาณและความถี่ของสัญญาณอินพุตไว้ วงจรกรองผ่านทุกความถี่สามารถนำไปใช้งานต่าง ๆ ได้หลายประเภท เช่น ในวงจรกำหนดความถี่ของวงจรควอดเรเจอร์ออสซิลเลเตอร์ วงจรออสซิลเลเตอร์แบบหลายเฟส และวงจรกรองแถบผ่านชนิดที่มีค่าตัวประกอบคุณภาพสูง เป็นต้น จึงทำให้วงจรกรองผ่านทุกความถี่ได้รับความนิยมในการคิดค้นและพัฒนาอย่างต่อเนื่องในงานด้านการออกแบบวงจรรวม (Integrated Circuit: IC) [1-4]

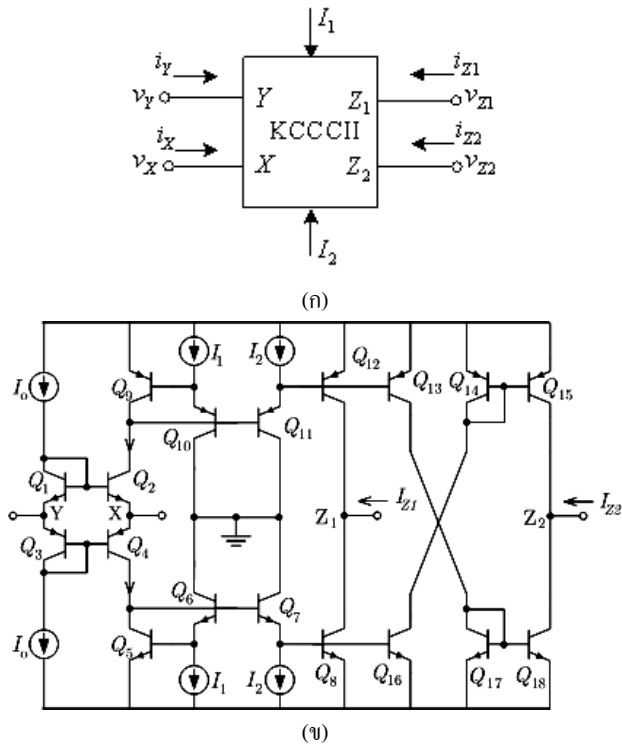
ในช่วงเวลาที่ผ่านมา ได้มีการนำเอาอุปกรณ์แอคทีฟชนิดต่าง ๆ อาทิเช่น OP-AMP, FTFN, OTAR และ CCII เป็นต้น ที่ใช้ในการออกแบบเป็นวงจรกรองผ่านทุกความถี่ อย่างไรก็ตามวงจรกรองผ่านทุกความถี่หลาย ๆ วงจรที่มีการนำเสนอไปก่อนหน้านี้ ก็ยังคงมีความต้องการอุปกรณ์พาสซีฟจำนวนมากในการสร้าง และมีบางวงจรที่ไม่สามารถปรับค่าได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ และยังพบว่าวงจรกรองผ่านทุกความถี่ที่ถูกออกแบบขึ้นจากวงจรสายพานกระแสที่เคยมีการนำเสนอเป็นวงจรที่มีความน่าสนใจ เนื่องจากมีโครงสร้างที่เรียบง่าย และสามารถปรับค่าการเลื่อนเฟสได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ แต่อย่างไรก็ตามถ้าออกแบบให้วงจรกรองผ่านทุกความถี่มีคุณสมบัติที่สามารถปรับค่าอัตราขยายของสัญญาณเอาต์พุตได้ด้วย นอกเหนือไปจากการปรับค่าเฟสเพียงอย่างเดียว ก็จะทำให้วงจรมีความคล่องตัวในการทำงานที่สถานะของสัญญาณอินพุตมีขนาดค่า ๆ ได้

ในบทความนี้นำเสนอวงจรกรองผ่านทุกความถี่อันดับหนึ่งที่สามารถปรับค่าอัตราขยายของสัญญาณ และ ปรับค่าการเลื่อนเฟสได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ วงจรสามารถให้สัญญาณเอาต์พุตทั้งแบบเฟสนำและแบบเฟสตามได้ภายในวงจรเดียวกัน วงจรถูกสร้างขึ้นจากวงจรสายพานกระแสแบบดอปทรานสลีเยอร์ที่สามารถปรับค่าอัตราขยายกระแสได้ [5] และใช้ตัวเก็บประจุเพียงหนึ่งตัวเท่านั้นในการทำงาน นอกจากนี้ยังได้ทำการตรวจสอบการทำงานของวงจรกรองผ่านทุกความถี่ที่นำเสนอด้วยโปรแกรม Pspice

2. ทฤษฎีและหลักการทำงานของวงจร

2.1 วงจรสายพานกระแสที่ปรับค่าอัตราขยายได้ (KCCCH)

วงจรกรองผ่านทุกความถี่ที่นำเสนอนี้ได้สร้างขึ้นจากวงจร KCCCH [5] สัญลักษณ์ของวงจร KCCCH แสดงดังรูปที่ 1(ก) และมีโครงสร้างภายในของวงจร KCCCH ที่สร้างจากไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ แสดงดังรูปที่ 1 (ข) จะเห็นได้ว่าภาคอินพุต ($Q_1 - Q_4$) เป็นวงจรสายพานกระแสที่ประกอบขึ้นจากวงจรรูปทรงแปดเหลี่ยม ประกอบกับวงจรสะท้อนกระแสที่ปรับค่าอัตราขยายกระแสได้ ($Q_5 - Q_{12}$) และวงจรสะท้อนกระแสแบบไขว้ ($Q_{13} - Q_{18}$)



รูปที่ 1 KCCCH (ก) สัญลักษณ์ (ข) โครงสร้างภายใน

ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่พอร์ตต่าง ๆ ของวงจร KCCCH ทางอุดมคติแทนได้ด้วยเมตริกซ์เป็นดังนี้

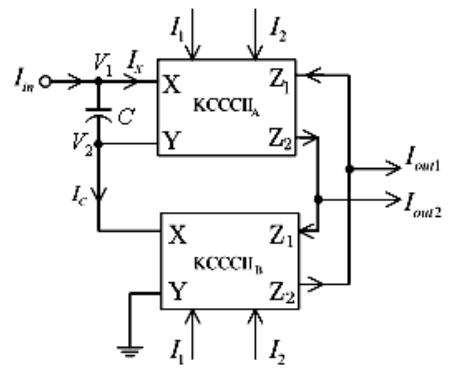
$$\begin{bmatrix} i_Y \\ v_X \\ i_{Z1} \\ i_{Z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & R_X & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 & 0 \\ 0 & -k & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_Y \\ i_X \\ v_{Z1} \\ v_{Z2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

เมื่อ i_Y, i_X, i_{Z1}, i_{Z2} และ v_Y, v_X, v_{Z1}, v_{Z2} คือกระแสและแรงดันของแต่ละขั้วตามลำดับ โดยที่ อัตราขยายกระแส k ของวงจรสายพานกระแสเท่ากับอัตราส่วนของกระแสไบอัส I_1 และ I_2 นั่นคืออัตรา

ขยายกระแสที่เอาต์พุตของพอร์ต Z ของวงจร KCCCH ซึ่งสามารถปรับค่าได้ด้วยการปรับกระแส I_1 และ I_2 ส่วนเครื่องหมายลบแสดงถึงทิศทางการไหลของกระแสที่พอร์ต Z ของวงจรสายพานกระแสเนื่องจากคุณสมบัติของวงจร KCCCH ที่กล่าวมานี้จะนำไปใช้ในการออกแบบเพื่อสร้างเป็นวงจรกรองผ่านทุกความถี่ที่สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ ดังที่จะกล่าวต่อไป

2.2 วงจรกรองผ่านทุกความถี่ที่นำเสนอ

วงจรกรองผ่านทุกความถี่ที่นำเสนอประกอบด้วย KCCCH ทั้งหมด 2 ตัวคือ KCCCH_A และ KCCCH_B และตัวเก็บประจุเพียงหนึ่งตัว ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรกรองผ่านทุกความถี่ที่นำเสนอ

พิจารณาที่โหนด V_1 ได้ผลรวมกระแสเป็น

$$I_{in} = I_C + I_{XA} \quad (2)$$

ค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุมีค่าเป็น

$$I_C = (V_1 - V_2)Cs \quad (3)$$

กระแสที่ไหลเข้าสู่พอร์ต X ของวงจร KCCCH_A มีค่าเป็น

$$I_{XA} = \frac{V_1 - V_2}{R_{XA}} \quad (4)$$

แทนค่าสมการ (3) และ (4) ในสมการ (2) ได้เป็น

$$I_{in} = (V_1 - V_2)Cs + \frac{(V_1 - V_2)}{R_{XA}} \quad (5)$$

ความสัมพันธ์ของกระแสเอาต์พุต I_{out1} มีค่าเป็น

$$I_{out1} = I_{Z2B} - I_{Z1A} \quad (6)$$

จากคุณสมบัติของ KCCCH และจากวงจรตามรูปที่ 2 จะได้

$$I_{out1} = kI_C - kI_{XA} \quad (7)$$

อาศัยสมการ (2) และ (7) ทำให้ได้ความสัมพันธ์ดังสมการ (8)

$$\frac{I_{out1}}{I_{in}} = k \left(\frac{I_C - I_{XA}}{I_C + I_{XA}} \right) = k \left(\frac{CR_{XA}S - 1}{CR_{XA}S + 1} \right) \quad (8)$$

เมื่อแทนค่า $R_{XA} \approx V_T / 2I_O$ และ $k = \frac{I_1}{I_2}$ ในสมการ (8) ได้ฟังก์ชัน

ถ่ายโอนในโหมคระแสของสัญญาณเอาต์พุตแบบเฟสนำเป็นดังนี้

$$H_1(s) = \frac{I_{out1}}{I_{in}} = \frac{I_1}{I_2} \left(\frac{CV_T s - 2I_O}{CV_T s + 2I_O} \right) \quad (9)$$

สำหรับผลตอบสนองทางขนาดและทางเฟส ที่ตำแหน่ง $s = j\omega$ แสดงได้ดังสมการ (10) และ (11) ตามลำดับ

$$|H_1(j\omega)| = \left| \frac{I_1}{I_2} \left(\frac{j\omega CV_T - 2I_O}{j\omega CV_T + 2I_O} \right) \right| = \frac{I_1}{I_2} \quad (10)$$

$$\angle H_1(j\omega) = \pi - 2 \tan^{-1}(\omega CV_T / 2I_O) \quad (11)$$

เมื่อพิจารณาสมการ (11) พบว่าสัญญาณเอาต์พุตมีการเลื่อนเฟสจาก 180 องศา ไปยัง 0 องศา เมื่อความถี่สูงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตที่ได้นี้มีเฟสเป็นแบบเฟสนำเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต อีกทั้งยังพบว่าการเลื่อนเฟสสามารถปรับได้ง่ายโดยการปรับค่ากระแส I_O ของวงจร KCCCH

ในทำนองเดียวกันสามารถวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์ของกระแสเอาต์พุต I_{out2} และกระแสอินพุต I_{in} ได้เป็นดังนี้

$$H_2(s) = \frac{I_{out2}}{I_{in}} = \frac{I_1}{I_2} \left(\frac{2I_O - CV_T s}{2I_O + CV_T s} \right) \quad (12)$$

จากสมการ (12) พบว่าที่ตำแหน่ง $s = j\omega$ ได้ผลตอบสนองทางขนาดและทางเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นดังสมการ (13) และ (14) ตามลำดับ

$$|H_2(j\omega)| = \left| \frac{I_1}{I_2} \left(\frac{2I_O - j\omega CV_T}{2I_O + j\omega CV_T} \right) \right| = \frac{I_1}{I_2} \quad (13)$$

$$\angle H_2(j\omega) = -2 \tan^{-1}(\omega CV_T / 2I_O) \quad (14)$$

พิจารณาสมการ (14) พบว่าสัญญาณเอาต์พุตมีการเลื่อนเฟสจาก 0 องศา ไปยัง -180 องศา เมื่อความถี่สูงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ทำงานเป็นแบบเฟสดำ

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลตอบสนองทางขนาดของเอาต์พุตทั้งสองที่แสดงในสมการ (10) และ (13) พบว่า ผลตอบสนองทางขนาดสามารถปรับค่าอัตราขยายได้ง่าย โดยอาศัยการปรับค่าสัดส่วนของกระแสไบแอส I_1 หรือ I_2 ของวงจรสายพานกระแส

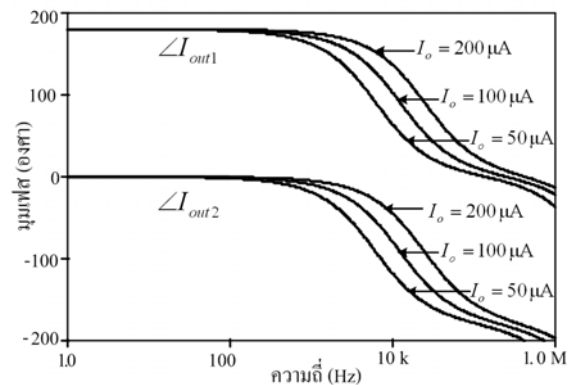
สำหรับความถี่โพล f_0 สามารถวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$f_0 = \frac{I_O}{\pi CV_T} \quad (15)$$

จากสมการ (15) พบว่าความถี่โพลสามารถควบคุมค่าได้เช่นกันด้วยค่ากระแสไบแอส I_O ของวงจร KCCCH

3. ผลการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์

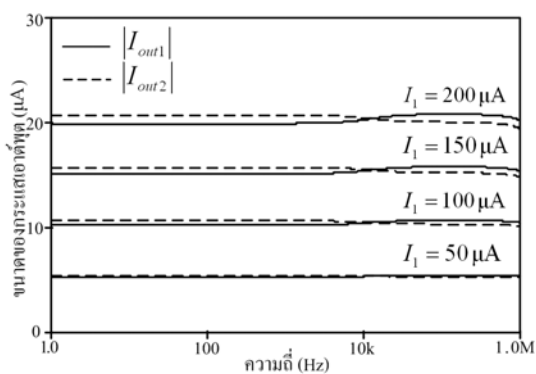
เพื่อยืนยันการทำงานของวงจรกรองผ่านทุกความถี่ที่ได้นำเสนอ นั้น ได้ทำการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม Pspice โดยใช้ทรานซิสเตอร์ NPN เบอร์ 2N2222A และ PNP เบอร์ 2N2907A ในการสร้างเป็นวงจรสายพานกระแสตามโครงสร้างในรูปที่ 1 กำหนดให้แรงดันไฟเลี้ยงวงจรมีค่าเป็น ± 3 V การทดสอบคุณสมบัติทางเฟสและทางขนาดของวงจรกรองผ่านทุกความถี่โดยการไบอัสวงจร KCCCHs ด้วยกระแสไบแอส I_O ค่าต่าง ๆ กันดังนี้คือ 50 μA , 100 μA , 200 μA และใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าเท่ากับ 10 nF โดยที่กระแส I_1 และ I_2 ในขณะนั้นมีค่าคงที่เท่ากับ 100 μA ได้ผลตอบสนองทางเฟสของกระแสเอาต์พุตทั้งสองเป็นแบบเฟสนำและแบบเฟสดำแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ผลตอบสนองทางเฟสของกระแสเอาต์พุต

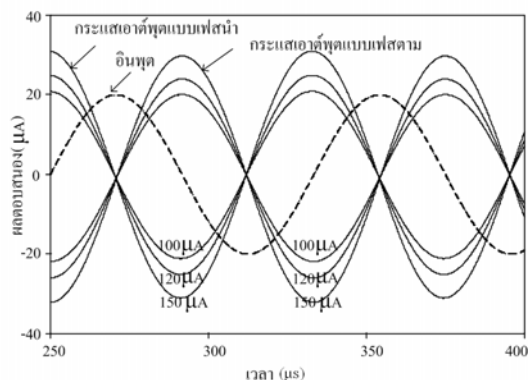
จากรูปที่ 3 พบว่ากระแสเอาต์พุต I_{out1} เป็นสัญญาณที่มีการเลื่อนเฟสจาก 180 องศา ลงมาที่ 0 องศา เมื่อความถี่ของสัญญาณอินพุตเพิ่มสูงขึ้น วงจรทำงานเป็นวงจรเลื่อนเฟสแบบเฟสนำนั่นเอง ขณะที่กระแสเอาต์พุต

I_{out2} เป็นสัญญาณที่มีการเลื่อนเฟสจาก 0 องศา ลงมาที่ -180 องศา เมื่อความถี่ของสัญญาณอินพุตเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะการทำงานของวงจรเลื่อนเฟสแบบเฟสดาม และกระแสเอาต์พุตทั้งสองสามารถปรับค่ามุมเฟสของสัญญาณได้ด้วยการปรับค่ากระแสไบอัส I_o โดยที่ความถี่โพลมีค่าเท่ากับ 6.15 kHz, 12.4 kHz และ 24.58 kHz ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้นี้สอดคล้องกับค่าทางทฤษฎีเป็นอย่างดีโดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.5% จากนั้นได้ปรับค่าขนาดของกระแสเอาต์พุตทั้งสอง เมื่ออินพุตเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่มีขนาดเป็น 10 μA และกระแสไบอัส I_2 มีค่าเท่ากับ 100 μA ในขณะที่ปรับเปลี่ยนค่ากระแสไบอัส I_1 ของวงจรมีค่าต่าง ๆ กันนั้นคือ 50 μA , 100 μA , 150 μA และ 200 μA ได้ผลตอบสนองทางขนาดของกระแสเอาต์พุตเป็นดังรูปที่ 4



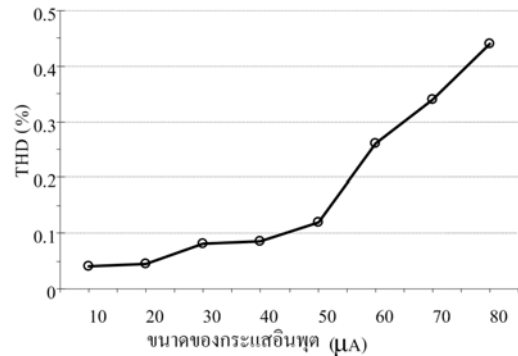
รูปที่ 4 ผลตอบสนองทางขนาดของกระแสเอาต์พุต

จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าวงจรกรองผ่านทุกความถี่ที่นำเสนอสามารถปรับค่าขนาดให้มีความถี่มากขึ้นหรือลดน้อยลงได้ด้วยการปรับค่ากระแสไบอัสของวงจร ในทำนองเดียวกันผลของสัญญาณเอาต์พุตเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุตในโดเมนของเวลาเมื่อกำหนดให้สัญญาณอินพุตเป็น $i_{in} = 20 \sin(30\pi kt)$ μA แสดงดังรูปที่ 5 พบว่าสัญญาณเอาต์พุตสามารถปรับค่าอัตราขยายได้โดยการปรับค่ากระแสไบอัส I_1 หรือ I_2



รูปที่ 5 สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตเมื่อกระแสไบอัส I_1 มีค่าเท่ากับ 100 μA , 120 μA และ 150 μA กำหนดให้ $I_2 = 100 \mu A$

สำหรับกราฟแสดงค่าผลรวมความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (Total Harmonic Distortion, THD) ของสัญญาณเอาต์พุตเมื่ออินพุตมีค่าตั้งแต่ 10 μA จนถึง 80 μA ที่ความถี่ 1 kHz ได้ถูกแสดงในรูปที่ 6 จะสังเกตว่าค่า THD ที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าสัญญาณเอาต์พุตมีค่าอยู่ในระดับค่อนข้างต่ำไม่เกิน 0.5%



รูปที่ 6 ค่าผลรวมความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ของสัญญาณเอาต์พุต

4. บทสรุป

ในบทความนี้ได้นำเสนอวงจรกรองผ่านทุกความถี่ในโหมดกระแสที่สร้างขึ้นโดยวงจรสายพานกระแสที่ปรับค่าอัตราขยายได้ วงจรที่นำเสนอสามารถให้สัญญาณเอาต์พุตได้ทั้งเฟสดามและเฟสดามโดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนโครงสร้างของวงจร และยังสามารถปรับค่าอัตราขยายของวงจรและความถี่โพลได้โดยการปรับค่ากระแสไบอัส ผลการจำลองการทำงานของวงจร ได้ยืนยันหลักการทำงานของสโตนคอลลิงกับค่าทางทฤษฎีเป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Sudhanshu and A. K. Iqbal, "Simple First-Order Translinear-C Current Mode All Pass Filter Sections", Int. J. Electron., Vol. 90, 2003, pp. 79-85.
- [2] C. C. Cakir and U. O. Cicekdoglu, "Novel Allpass Filter Configuration Employing Single OTRA", IEEE Trans. Circ&Syst., Vol. 52, No.3, 2005, pp.122-125.
- [3] P. Neeta and K.P. Salal, "All-Pass Filter Based on CCII- And CCCII-", Int. J. Electron., Vol. 91, 2004, pp. 485-489.
- [4] M. Higashimura, "Current-Mode Allpass Filter Using FTFN with Grounded Capacitor", Electron. Lett., Vol. 27, No.13, 1991 pp.1182-1183.
- [5] A. Fabre and N. Mimeche, "Class A/AB Second-Generation Current Conveyor with Controlled Current Gain", Electron. Lett., Vol. 30, 1994, pp. 1267-1269.