

การออกแบบวงจรอินทิเกรเตอร์ในโหมดกระแส ด้วย OTA (A Design Current-mode Integrator Circuit Used OTA)

เกรียงไกร สุยะ¹ สมชาย ศรีสกุลเตียว² และศักดิ์เดช สังคพัฒน์³

¹สาขาอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคโนโลยีโปลิเทคนิคลานนาเชียงใหม่

2 ถนนสุขเกษม ต.ป่าตัน อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50300 โทรศัพท์: 053-213061

E-mail: kriangkrai.ok@gmail.com

²สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 โทรศัพท์: 044-252659

E-mail: somchaikorat2008@hotmail.com

³คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏกาฬสินธุ์

13 หมู่ 14 ต.สงเปลือย อ.นาคอน จ.กาฬสินธุ์ 46230

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบวงจรอินทิเกรเตอร์ในโหมดกระแส ด้วย OTA ที่ใช้ไอซีที่มีจำหน่ายในท้องตลาด คือ AD844 ที่มีคุณลักษณะของวงจรคือสามารถควบคุมสภาวะการอินทิเกรตได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุ วงจรที่ออกแบบเรียบง่ายใช้ AD844 จำนวน 1 ตัว ร่วมกับตัวต้านทานและตัวเก็บประจุอย่างละ 1 ตัวต่อลงกราวด์ ให้ผลการจำลองการทำงานด้วย PSpice ตอบรับกับทางทฤษฎีเป็นอย่างดี มีอัตราการใช้พลังงานต่ำ 0.672 mW ที่แหล่งจ่ายไฟฟ้า $\pm 5V$

คำสำคัญ

วงจรอินทิเกรเตอร์, โหมดกระแส, OTA, CFA, AD844

1. บทนำ

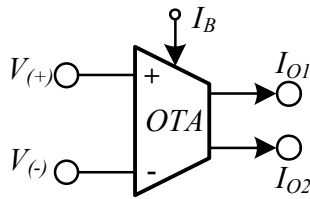
วงจรพื้นฐานทางอิเล็กทรอนิกส์ จะประกอบด้วย วงจรขยาย วงจรอินทิเกรเตอร์ วงจรดิฟเฟอเรนเชียลเฟอเรนเชียล จากนั้นก็จะนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรอื่น ๆ ในชื่อใหม่เช่น ในงานกรองความถี่ เป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ความถี่สูงผ่าน วงจรกรองความถี่เอนกประสงค์ [1] วงจรกรองความถี่แบบหลายหน้าที่ [2] และเมื่อนำวงจรพื้นฐานทั้ง 3 วงจรไปประยุกต์ใช้งานในงานควบคุมก็จะเป็นวงจรควบคุมได้ 3 แบบด้วยกัน คือ วงจรตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์ (PI Controller) วงจรตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอนุพันธ์ (PD Controller) และนำทั้ง 3 ส่วนมาทำงานร่วมกันก็เป็นวงจรตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์ และอนุพันธ์ หรือที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายในวงการควบคุมในงานอุตสาหกรรม (PID Controller: Proportional Integral and Derivative Controller) [3] และวงจรพื้นฐานทั้ง 3 ก็สามารถไปประยุกต์ใช้งานอื่นๆ ได้อีกมากมาย

วงจรอินทิเกรเตอร์เป็นวงจรพื้นฐานที่มีการประยุกต์ใช้งานอย่างมากมาย เช่น วงจรกรองความถี่ วงจรกำเนิดสัญญาณ ทางด้านการสื่อสาร ทางด้านเครื่องวัด และการควบคุมอัตโนมัติต่าง ๆ [4] จึงนับว่าสำคัญมาก ดังนั้นบทความนี้จะกล่าวถึงการออกแบบวงจรอินทิเกรเตอร์ด้วยวงจรขยายความนำ (OTA: Operational Transconductance Amplifier) ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบแอคทีฟ ประเภทแหล่งกระแสควบคุมด้วยแรงดัน (VCCS: Voltage Control Current Source) ที่สามารถทำงานได้ทั้งให้โหมดแรงดัน และโหมดกระแส โดยเฉพาะอย่างยิ่งเหมาะกับการประมวลผลสัญญาณแอนะล็อก [5] มีความยืดหยุ่นสูงในการออกแบบเป็นวงจรต่าง ๆ ได้สะดวก โครงสร้างภายในของ OTA ที่เป็นในระดับทรานซิสเตอร์จะใช้น้อยกว่าอุปกรณ์อื่นๆ อีกทั้งเป็นอุปกรณ์ที่มีจำหน่ายเป็นในรูปแบบไอซี และมีคุณลักษณะพิเศษของอุปกรณ์คือ มีอัตราสูง ความเร็วสูง แบนด์วิดท์กว้าง และประยุกต์เป็นวงจรต่างๆ ได้ง่าย [6] สัญลักษณ์ของ OTA แสดงได้ดังรูปที่ 1 เมื่อ OTA ถูกสมมติเป็นแหล่งจ่ายกระแสที่ควบคุมด้วยแรงดันที่เป็นอุดมคติ จะสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันได้ คือ

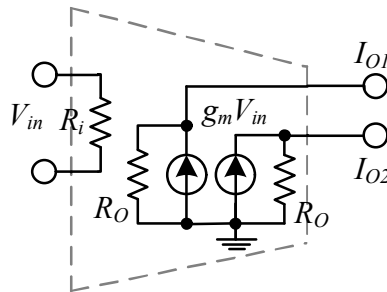
$$I_o = \pm g_m (V_{(+)} - V_{(-)}) \quad (1)$$

และ

$$g_m = \frac{I_B}{2V_T} \quad (2)$$



(ก) สัญลักษณ์



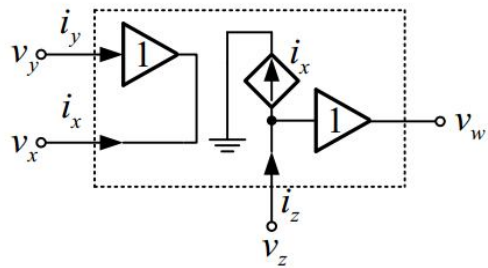
(ข) วงจรสมมูลภายใน

รูปที่ 1 OTA (Operational Transconductance Amplifiers)

จากสมการที่ (2) g_m คือค่าความนำกระแส (Transconductance) ที่สามารถปรับค่าได้ด้วย กระแสไบแอสจากภายนอก และค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิในระหว่างการทดลอง (V_T : Thermal Voltage) ที่อุณหภูมิปกติมีค่าเท่ากับ 26mV ส่วน $V_{(+)}$ และ $V_{(-)}$ คืออินพุตแบบไม่กลับ ขั้วสัญญาณ และกลับขั้วสัญญาณตามลำดับ และ I_O คือกระแสเอาต์พุต เครื่องหมาย $\pm$ ในสมการ ที่ (1) แสดงได้ว่าวงจร OTA มีเอาต์พุตกระแสแบบบวก และ แบบลบในวงจรเดียว ข้อดีของการ ใช้วงจรแอกทิฟแบบหลายเอาต์พุตมาสร้างเป็นวงจรประมวลผลสัญญาณคือทำให้วงจรที่สร้างขึ้น สามารถลดจำนวนอุปกรณ์ทั้งแบบพาสซีฟและแอกทิฟลงได้

ไอซี AD844 ของบริษัท Analog Devices เป็นออปแอมป์ความเร็วสูง ที่มีโครงสร้างภายใน ทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์ มีคุณลักษณะเฉพาะคือ มีแบนด์วิดท์กว้าง สามารถตอบสนองความถี่ ได้กว้างกว่า สามารถประยุกต์ใช้ในงานเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดัน หรือเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส ได้ [7] อีกทั้งมีสถาปัตยกรรมภายในเป็นวงจรขยายป้อนกลับกระแส หรือที่รู้จักในอุปกรณ์แอกทิฟชื่อ Current Feedback Amplifier (CFA) ที่มีคุณลักษณะเด่นดีกว่าออปแอมป์ปกติ คือ มีความเป็นเชิงเส้นสูง และเป็นที่ยอมรับในการการตอบสนองของความถี่ [8] จากลักษณะเด่นของ อุปกรณ์ จึงนำมาใช้เป็นอุปกรณ์หลักของบทความนี้เนื่องจากตรงกับลักษณะเด่นของการออกแบบ วงจรในโหมดกระแส คือ มีช่วงพิสัยพลวัตกว้าง มีแบนด์วิดท์กว้าง มีความเป็นเชิงเส้นสูง ง่ายใน การออกแบบวงจร และมีอัตราการสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าต่ำ [9-10]

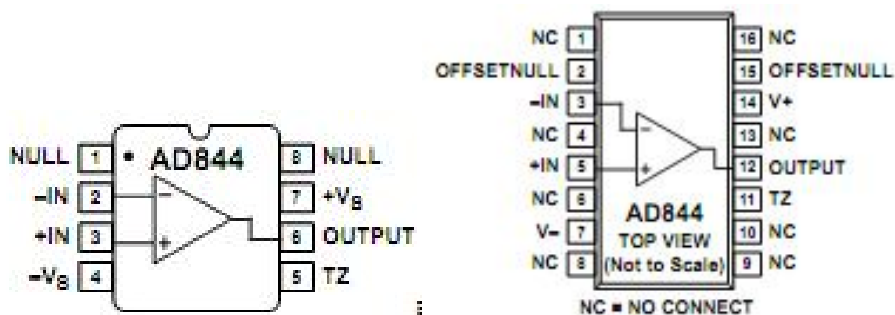
วงจรขยายป้อนกลับกระแสเป็นอุปกรณ์ที่มี 4 ขาประกอบด้วยขาอินพุต 2 ขาคือ ขา y และขา x ทำหน้าที่เป็นรับแรงดันและกระแสอินพุตตามลำดับ ส่วนขาเอาต์พุตมี 2 ขาคือขา z และขา w ที่ ให้เอาต์พุตเป็นกระแสและแรงดันตามลำดับ ซึ่งสัญลักษณ์และวงจรสมมูลย์ ของวงจรขยาย ป้อนกลับกระแสแสดงได้ ดังรูปที่ 2



(๒) วงจรสมมูลย์

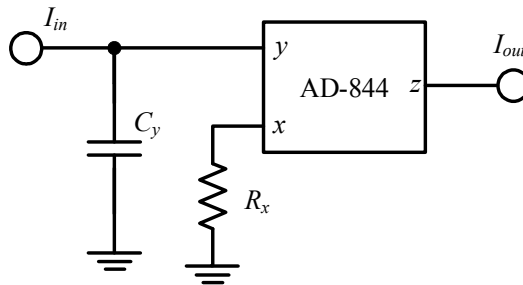
รูปที่ 2 วงจรขยายป้อนกลับกระแส

จากวงจรสมมูลย์ ในรูปที่ 2 (ข) พบว่าที่ขา y มีวงจรถักดันแรงดัน (Voltage Buffer) อยู่ ดังนั้นที่ขา y จะมีความต้านทานสูงมาก กระแสจึงไม่สามารถไหลเข้าที่ขา y ได้ ($I_y = 0$) หรือพูดได้ว่าที่ขา y เหมาะที่จะป้อนอินพุตเป็นแรงดัน ส่วนที่ขา x จะมีความต้านทานต่ำมาก โดยที่ขา x เหมาะที่จะป้อนอินพุตเป็นกระแส ในขณะที่กระแสเอาต์พุตที่ขา z จะมีขนาดกระแสเท่ากับ กระแสที่ไหลเข้าที่ขา x ($I_x = I_z$) ซึ่งมีข้อควรทำความเข้าใจว่า I_x และ I_z มิจะทิศเหมือนกัน นั่นคือหาก I_x มีทิศทางไหลเข้า I_z ก็จะไหลเข้าด้วย ส่วนแรงดันขา w จะเท่ากับแรงดันที่ขา z ซึ่งในทางอุดมคติความต้านทานที่ขา w จะมีค่าต่ำโดยวงจรขยายป้อนกลับกระแสที่ถูกผลิตอยู่ในรูปแบบของวงจรรวม และได้รับความนิยมนิยาม AD-844 โครงสร้างภายในแสดงดังรูปที่ 2 (ข) สำหรับการต่อแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงคู่เข้ากับวงจรขยายป้อนกลับกระแส ให้ต่อ V_{CC} (ขาที่ 7) และ V_{EE} (ขาที่ 4) ขาอินพุต y และขา x ขาที่ 2 และ 3 ตามลำดับกระแสเอาต์พุตหรือขา z อยู่ที่ขา 5 ส่วนขา 6 แรงดันเอาต์พุตหรือขา w



รูปที่ 3 โครงสร้างและตำแหน่งขาของไอซี AD844

2. ขั้นตอนการออกแบบวงจรอินทิเกรเตอร์ด้วย AD844



รูปที่ 4 วงจรอินทิเกรเตอร์ โดยใช้ AD844

จากวงจรในรูปที่ 4 เป็นวงจรอินทิเกรเตอร์ที่ได้ออกแบบเป็นวงจรอินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย จะเห็นได้ว่าเรียบง่ายประกอบด้วย AD844 ทำงานร่วมกับตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวนด้อย่างละ 1 ตัว ที่สามารถเขียนสมการแรงดันที่ขั้ว y ได้ ดังนี้

$$V_y = \frac{1}{sC_y} \times I_{in} \quad (3)$$

$$V_y = \frac{I_{in}}{sC_y}$$

จากคุณสมบัติวงจรป้อนกลับกระแส $V_y = V_x, I_x = I_z$ จะได้

$$I_x = \frac{V_x}{R_x} = \frac{V_y}{R_x} \quad (4)$$

หรือ

$$I_x = \frac{I_{in}}{R_x s C_y} \quad (5)$$

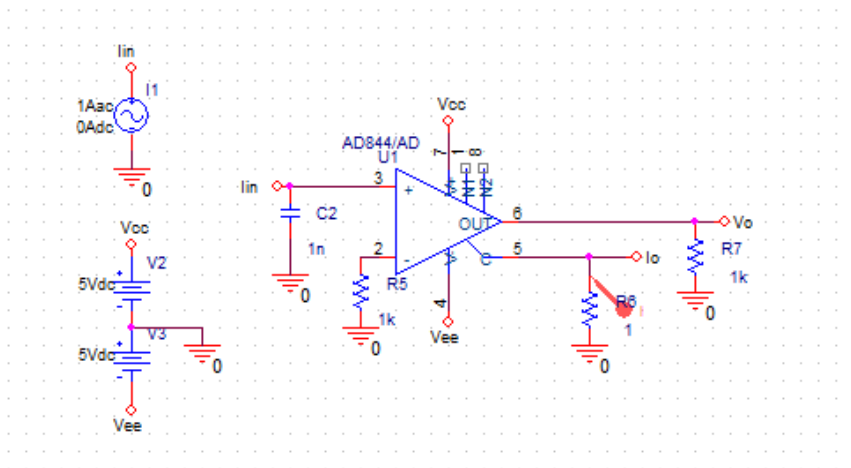
เมื่อ $I_x = I_z = I_{out}$

$$I_{out} = \frac{1}{R_x C_y} \int_0^T I_{in} dt \quad (6)$$

3. ลำดับขั้นตอนการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice

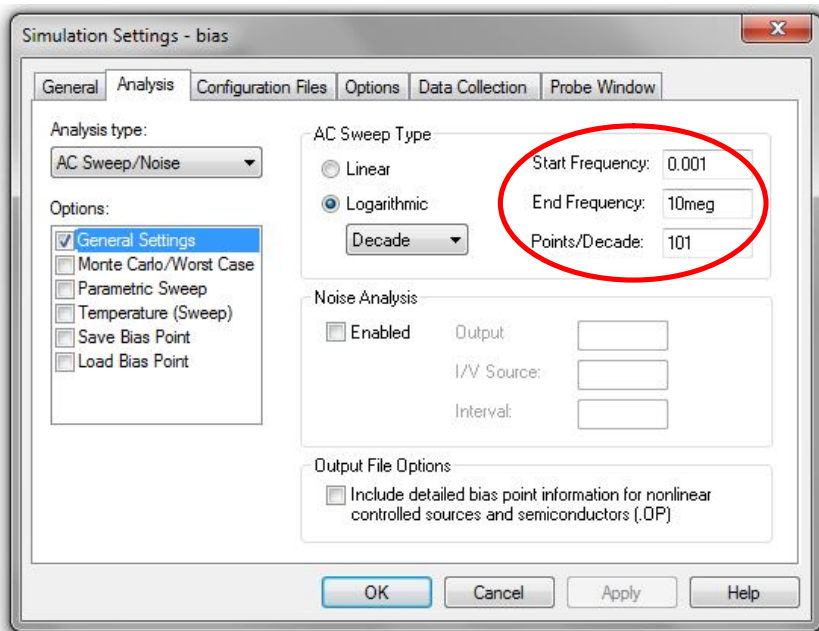
เพื่อเป็นการยืนยันคุณลักษณะของวงจรที่ได้ออกแบบ ด้วยโปรแกรม PSpice ในการจำลองการทดสอบการทำงาน และใช้ไอซี AD844 ของบริษัท Analog Devices และใช้แหล่งจ่ายแรงดัน $\pm 5V$

1. การจำลองการทำงานของวงจรอินทิเกรเตอร์ด้วย AD844

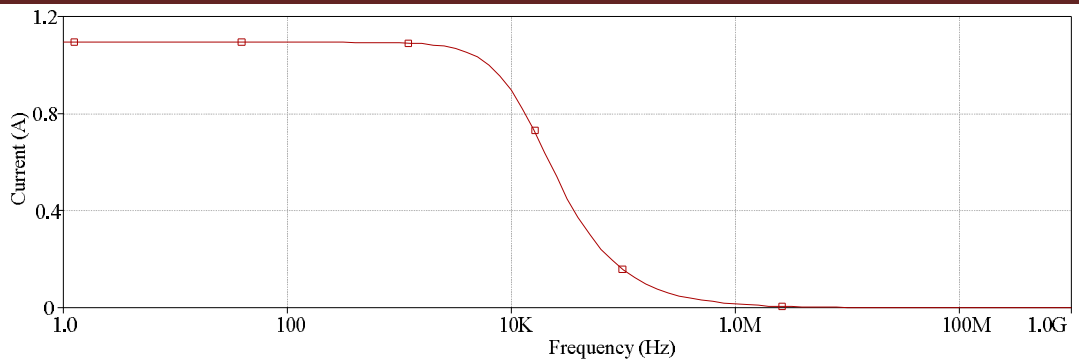


รูปที่ 5 วงจรอินทิเกรเตอร์โดยใช้ AD844 ด้วย PSpice

2. ต่อวงจรตามรูปที่ 5 กำหนด I_{in} เป็น I_{AC} Sweep เพื่อหาการตอบสนองทางความถี่ (Frequency Response) ของวงจรก่อนโดยตั้งค่าตามรูปที่ 6 จะได้ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจร ดังรูปที่ 7

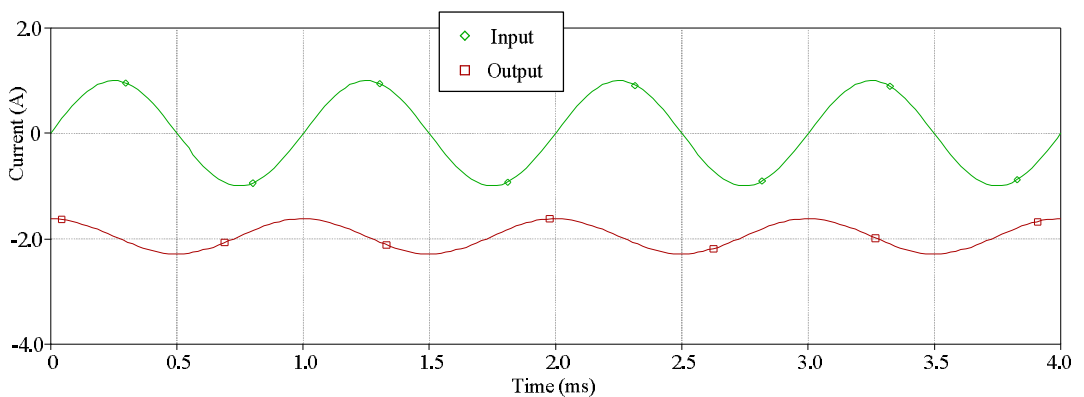


รูปที่ 6 การตั้งค่า AC Sweep ใน PSpice



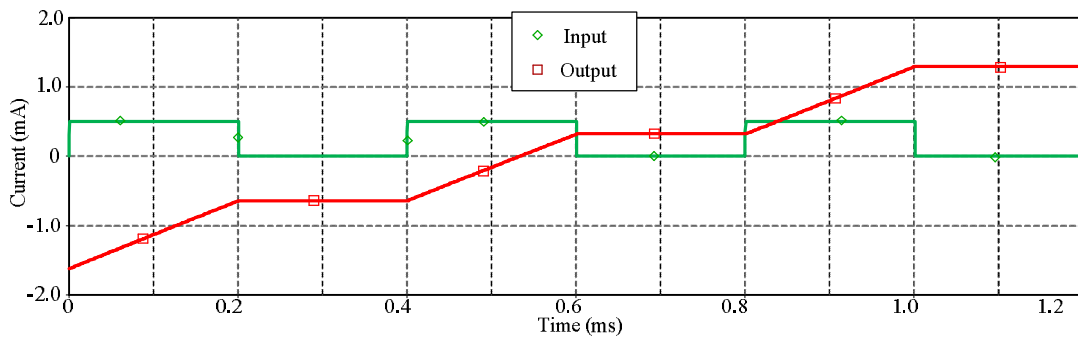
รูปที่ 7 ผลตอบสนองความถี่ของวงจร

3. จากรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองความถี่ที่ได้ จะเป็นผลตอบสนองแบบความถี่ต่ำผ่าน ที่สามารถนำมาใช้งานได้ คือในช่วง 1-100KHz กำหนดให้อินพุตมีความถี่ 1KHz, $I_{sin}=500\mu A$ แล้วตั้งค่าการจำลองใหม่เป็นโหมด Time Domain จะได้ผลดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ผลการจำลองการทำงานของวงจรอินทิเกรเตอร์โดยป้อน Input เป็น I_{sin}

4. จากนั้นเปลี่ยนสัญญาณเข้าเป็น IPulse พร้อมกำหนดค่าเวลาเท่ากับ 0.4ms เงื่อนไขการจำลองเป็น Time Domain ตามเดิมเปลี่ยนเวลาที่แสดงผลเป็น 1.2ms จะได้ผลการจำลองการทำงานดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ผลการจำลองวงจรอินทิเกรเตอร์โดยกำหนด Input เป็น IPluse

5. คำนวณหาค่า I_{out} จากสมการที่ 6

$$I_{out} = \frac{1}{R_x C_y} \int_0^T I_{in} dt$$

หาค่า $T = \frac{1}{F}$ จะได้ $T = \frac{1}{2.5 KHz} = 0.4 mS$

จากรูปที่ 5 $C_y = 0.1 \mu F, R_x = 1 K\Omega, I_{in} = 500 \mu A$

แทนค่าในสมการที่ 6

$$I_{out} = \frac{1}{(1 \times 10^3)(0.1 \times 10^{-6})} \int_0^{0.4 m} (500 \times 10^{-6}) dt$$

$$I_{out} = 2 mA$$

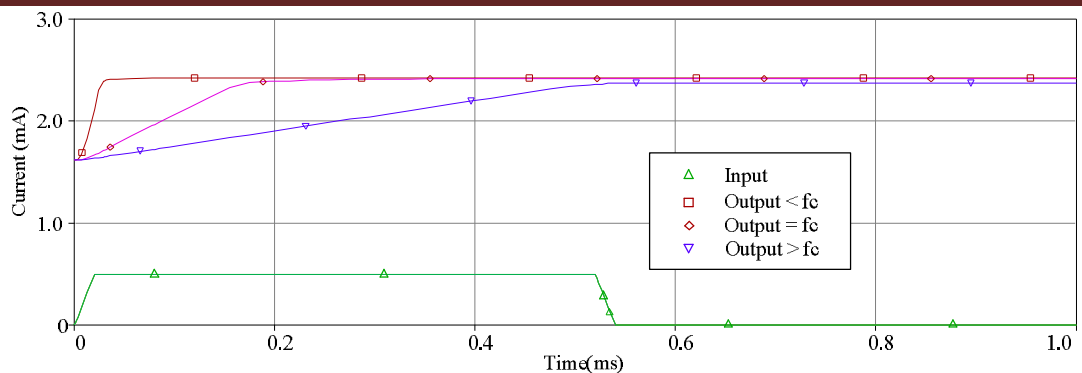
ผลการจำลอง $I_{out} = 1.9303 mA$

จากผลการจำลองการทำงานของวงจรอินทิเกรเตอร์ ด้วย AD844 ในรูปที่ 9 จะเห็นว่าเอาต์พุตจะเป็นสโโลปได้ขึ้น เมื่อสัญญาณอินพุตเป็นรูปสเตปเวฟเข้ามาค่าความถี่เข้าจะมีผลกับรูปสัญญาณเอาต์พุต ดังรูปที่ 10 คือ จาก f_c (Frequency Cut-off) สามารถสรุปได้ดังนี้ คือ

หากความถี่เข้าน้อยกว่า $10f_c$ รูปเอาต์พุตจะเป็น Short Time Constance

หากความถี่เข้าใกล้เคียง f_c รูปเอาต์พุตจะเป็น Medium Time Constance

หากความถี่เข้ามากกว่า $10f_c$ รูปเอาต์พุตจะเป็น Long Time Constance



รูปที่ 10 สถานะการอินทิเกรเตอร์

4. สรุปผลการออกแบบวงจรอินทิเกรเตอร์

บทความนี้ได้ทำการออกแบบวงจรอินทิเกรเตอร์ในโหมดกระแสด้วย OTA ที่ใช้ไอซีที่มีจำหน่ายคือ AD844 ออกแบบเป็นวงจรอินทิเกรเตอร์แบบไม่มีการสูญเสียที่ใช้อุปกรณ์แอคทีฟ AD844 เพียง 1 ตัว ร่วมกับตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ แบบต่อลงกราวด์อีกอย่างละ 1 ตัว ซึ่งวงจรเรียบง่ายไม่ซับซ้อน พร้อมทั้งแสดงให้เห็นถึงการออกแบบ และทดสอบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSpice ให้เห็นถึงคุณลักษณะของวงจรอินทิเกรเตอร์ในทุกแง่มุม วงจรมีอัตราการสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้า 0.672mW ที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า $\pm 5V$ และเพื่อให้เป็นพื้นฐานของการศึกษาวงจรอิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน และเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในวงจรอื่น ๆ ต่อไป

บรรณานุกรม

- [1] สมชาย ศรีสกุลเตียว, ศุภวัฒน์ ลาวัณย์วิสุทธิ์ และมนตรี ศิริปรัชญานันท์, “วงจรกรองความถี่โหมดกระแสหลายหน้าที่ที่ควบคุมด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้ MO-OTAs”, วารสาร มทร.อีสาน, ปีที่ 5 ฉบับที่ 2, ปี 2556, หน้า 11-20.
- [2] S. Srisakultiew and M. Siripruchyanum, “A Current-mode Electronically Controllable Multifunction Biquadratic Filter Using OTAs”, iEECON2013, Chiang Mai, Thailand, 2013.
- [3] A. J. Michael and H. M. Mohammad., “PID control new identification and design methods”, Springer, 2005.
- [4] A.S. Sedra, and K.C. Smith, 2003, “Microelectronic circuits”, 5rd ed., Florida: Holt, Rinehart and Winston.

- [5] C.C. Chang and S.K. Pai. “Universal current-mode OTA-C biquad with minimum components”, *IEEE Trans. on CAS*, vol. 47, No. 8, 2000, pp. 1235-1238.
- [6] A. Qadir and T. Altaf, “Current mode canonic OTA-C universal filter with single input and multiple”, International Conference on Electronic Computer Technology (ICECT 2010), 2010, pp. 32-34.
- [7] Analog Devices Inc., AD844, “Linear Products Data Book”. Norwood, Massachusetts, USA, 2009,
- [8] M. Somdunyakanok, P. Phumme and K. Dejhan, “Universal filter and its quadrature oscillator employing lossy and lossless integrators loop”, *Ladkrabang Engineering Journal*, 25th Vol. 4, 2011, pp. 17-22.
- [9] C. Toumazou, F.J. Lidgey, and D. G. Haigh, “Analogue IC design: The current-mode approach”, London: Peter Peregrines, 1990.
- [10] D. R. Bhaskar , V. K. Sharma , M. Monis, and S. M. I. Rizvi, “New current-mode universal biquad filter”, *Microelectronics Journal*, vol. 30, pp. 837-839, 1999