

แนะนำเทคนิคการออกแบบวงจรเรียงกระแสโหมดกระแสใช้แหล่งจ่ายแรงดันต่ำ

บุญยิ่ง นบหนอง¹

บทคัดย่อ

บทความนี้แนะนำเสนอเทคนิคการออกแบบวงจรเรียงกระแสที่ทำงานในโหมดกระแสโดยใช้เทคโนโลยี CMOS วงจรเรียงกระแสที่นำเสนอ สามารถทำงานเป็นแบบสัญญาณครึ่งคลื่นและแบบเต็มคลื่นได้ในวงจรเดียว โดยสามารถทำงานได้ที่แหล่งจ่ายแรงดันระหว่าง 0.5 โวลต์ วงจรที่นำเสนอประกอบด้วยวงจรเปรียบเทียบกับกระแส

และวงจรสะท้อนกระแสวงจรเรียงกระแสทั้งแบบสัญญาณครึ่งคลื่นและแบบเต็มคลื่นมีคุณสมบัติการสูญเสียกำลังงานต่ำ มีย่านการตอบสนองกระแสอินพุตกว้างและมีการตอบสนองความถี่สูง การทำงานและคุณสมบัติของวงจรเรียงกระแสสามารถยืนยันได้โดยจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice

คำสำคัญ: วงจรเรียงกระแส โหมดกระแส แรงดันต่ำ

¹ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โทรศัพท์ 0-2549-4631 อีเมล: kboonying.k@en.rmut.ac.th



Design of a Low-voltage Current-mode Rectifier

Boonying Knobnob¹

Abstract

This paper introduces a novel version for implementing current-mode precision rectifier using CMOS technology. Half-wave and full-wave rectification were operated into a single circuit. The rectifier circuit consisted of a current comparator and current mirrors. The single supply voltage range of 0.5 V was used, offering a number of

favorable features including low-power dissipation, wide input range and high frequency response. Through PSpice program, the simulation results can be utilized to confirm the high performance and efficient function of the proposed rectifier circuit.

Keyword: Rectifier, Current-mode, Low-voltage

¹ Lecturer, Department of Electronics and Communication, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Tel. 0-2549-4631, E-mail: kboonying.k@en.rmut.ac.th

1. บทนำ

วงจรเรียงกระแสแบบที่ยิงตรง เป็นวงจรที่มีความสำคัญที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้ในเรื่องมัลติวัตต์ไฟฟ้ากระแสสลับ วงจรตีมอดูเลเตอร์เอพในเครื่องรับ การสร้างสัญญาณกำลังสองของสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม ตัวแปลงสัญญาณ RMS เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง วงจรเรียงกระแสแบบที่ยิงตรง เป็นวงจรที่ออกแบบเพื่อสามารถเรียงกระแสสัญญาณขนาดเล็ก ซึ่งไดโอดไม่สามารถทำงานได้เพราะไดโอดจะทำงานได้ ต้องมีแรงดันตกคร่อมตัวมัน 0.3 V สำหรับชนิดเยอรมานีอัมและตกคร่อม 0.6 V สำหรับชนิดซิลิคอน ดังนั้นที่ผ่านมาจึงมีการออกแบบวงจรเรียงกระแสที่สามารถเรียงกระแสสัญญาณขนาดเล็ก เผยแพร่ไว้ในวารสารต่างๆ มากมายดังเอกสารอ้างอิง [1]-[10] วงจรเรียงกระแสใช้ ทรานซิสเตอร์ ไดโอดและตัวต้านทานได้ถูกนำเสนอไว้ใน [10] แต่ปัญหาสำคัญของวงจรเรียงกระแสที่ใช้ ทรานซิสเตอร์และไดโอด คือ ระหว่างช่วงหยุดนำกระแสและนำกระแสของไดโอด ทรานซิสเตอร์ จะทำงานด้วยสัญญาณขนาดเล็ก dv/dt ที่จำกัดผลก็คือ จะเกิดความเพี้ยนที่บริเวณ Zero Crossing ของสัญญาณอินพุต นอกจากนั้นวงจรเรียงกระแสที่ใช้ ทรานซิสเตอร์ จะไม่สามารถทำงานที่ความถี่สูงได้เนื่องจากถูกจำกัดจากค่า GBW (Gain-Bandwidth Product) ในตัว ทรานซิสเตอร์เอง ปัญหาเหล่านี้สามารถแก้ไขได้โดยการออกแบบวงจรเรียงกระแสให้ทำงานในโหมดกระแส [1], [2], [5], [7] วงจรเรียงกระแสทำงานในโหมดกระแสใช้วงจรสายพานกระแส และไดโอดนำเสนอใน [5], [6] แต่อย่างไรก็ตาม วงจรดังกล่าวใช้ตัวต้านทานทั้งแบบลอยตัวและแบบต่อลงกราวด์ซึ่งทำให้ไม่เหมาะกับการนำไปสร้างเป็นวงจรรวม วงจรเรียงกระแสทำงานในโหมดกระแสใช้วงจร สายพานกระแสหนึ่งวงจร และวงจรสะท้อนกระแสได้ถูกนำเสนอใน [9] วงจรดังกล่าวออกแบบโดยใช้ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ และกำหนดให้วงจรทำงานในคลาส B ซึ่งทำให้วงจรสามารถเรียงกระแสที่สัญญาณขนาดเล็กได้ดี แต่เนื่องจากวงจรทำงานในคลาส B จึงทำให้วงจรไม่สามารถเรียงกระแสที่สัญญาณความถี่สูงได้ดี นอกจากนั้นวงจรยังต้องการตัวต้านทานแบบต่อลงกราวด์อีกสองตัวอีกด้วย วงจรเรียงกระแสทำงานใน

โหมดกระแสทำงานในคลาส AB ได้ถูกนำเสนอไว้ใน [8], [9] วงจรเรียงกระแสที่ทำงานในคลาส AB จะต้องการกระแสอินพุตที่ใหญ่กว่ากระแสไบอัส สี่เท่าเพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาด อันเกิดจากคุณสมบัติกำลังสองของทรานซิสเตอร์ ดังนั้นถ้าสัญญาณอินพุตที่มีขนาดเล็กมากๆ วงจรชนิดนี้จะไม่สามารถเรียงกระแสได้ แต่ข้อดีของวงจรที่ทำงานในคลาส AB คือวงจรเรียงกระแสสามารถทำงานที่สัญญาณความถี่สูงได้ดี เพราะทรานซิสเตอร์ไม่ต้องหยุดนำกระแสในขณะที่ไม่มีสัญญาณเหมือนคลาส B

ดังนั้นในบทความนี้จะนำเสนอวิธีการออกแบบวงจรเรียงกระแส ที่ทำงานในโหมดกระแสที่ทำงานได้ทั้งแรงดันไฟเลี้ยง 0.5 โวลต์ วงจรที่นำเสนอเหมาะกับการนำไปสร้างเป็นวงจรรวมด้วยเทคโนโลยี CMOS โครงสร้างของวงจรที่นำเสนอสามารถทำงานเป็นวงจรเรียงกระแสที่คลื่นและเต็มคลื่นในวงจรเดียว วงจรที่นำเสนอมีคุณสมบัติการสูญเสียกำลังงานต่ำ มีย่านการตอบสนองกระแสอินพุตกว้างและทำงานที่ความถี่สูงได้ดี โครงสร้างของวงจรที่นำเสนอจะถูกไบอัสด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ 4 แบบ ซึ่งแต่ละแบบจะมีข้อจำกัดที่ต่างกัน แบบที่ 1 วงจรเรียงกระแสโดยใช้วงจรเปรียบเทียบกระแส แบบพหุผลจะทำงานที่ย่านอินพุต $\pm 200 \mu A$ ตอบสนองที่ความถี่สูงสุด 50 MHz แบบที่ 2 วงจรเรียงกระแสโดยใช้วงจรเปรียบเทียบกระแสที่ใช้มอสชนิดพีแชนแนลเป็นโหลดจะทำงานที่ย่านอินพุต $\pm 200 \mu A$ ตอบสนองที่ความถี่สูงสุด 50 MHz แบบที่ 3 วงจรเรียงกระแสที่ใช้วงจรเปรียบเทียบกระแสที่ใช้แหล่งจ่ายกระแส เป็นโหลดจะทำงานที่ย่านอินพุต $\pm 200 \mu A$ ตอบสนองที่ความถี่สูงสุด 50 MHz แบบที่ 4 วงจรเรียงกระแสโดยใช้วงจรเปรียบเทียบกระแสแบบคาสโคดพหุผลจะทำงานที่ย่านอินพุต $\pm 200 \mu A$ ตอบสนองที่ความถี่สูงสุด 50 MHz วงจรเรียงกระแส ทั้ง 4 แบบจะตอบสนองที่ย่านอินพุตและย่านความถี่ที่ต่างกัน สามารถนำไปใช้ที่วัตถุประสงค์ที่ต่างกัน จากรูปที่ 1 ส่วนวงจรเปรียบเทียบกระแสจะทำให้วงจรตอบสนองที่ค่าต่างๆ กัน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของวงจรการทำงานและคุณสมบัติของวงจรเรียงกระแสสามารถยืนยันได้โดยการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice

2. หลักการทำงานของวงจร

รูปที่ 1 แสดงบล็อกไดอะแกรมโครงสร้างของวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นและแบบเต็มคลื่น การทำงานสามารถอธิบายได้ดังนี้ โครงสร้างของวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตเข้าที่อินพุตของวงจรเรียงกระแส สัญญาณจะถูกส่งมาที่วงจรเปรียบเทียบกระแส และถูกแบ่งออกเป็นสัญญาณซีกบวกและซีกลบ สัญญาณซีกบวกจะได้เป็นเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น ในขณะที่เดียวกันจะถูกส่งผ่านไปยังวงจรสะท้อนกระแสแบบบวก (Current Mirror 1) กำหนดให้ทรานซิสเตอร์ของวงจรสะท้อนกระแสวงจรที่ 1 มีค่าอัตรากระแสสะท้อนเป็น 1 ต่อ 40 จะทำให้สัญญาณซีกบวกมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ สัญญาณซีกบวกและสัญญาณซีกลบจะถูกส่งไปยังวงจรสะท้อนกระแสแบบลบ (Current Mirror 2) สัญญาณทั้งสองจะถูกนำมารวมกันที่วงจรสะท้อนกระแสแบบบวกและจะได้สัญญาณเอาต์พุตของครึ่งคลื่นทางด้านซีกลบดังแสดงในสมการที่ (1) และ (2)

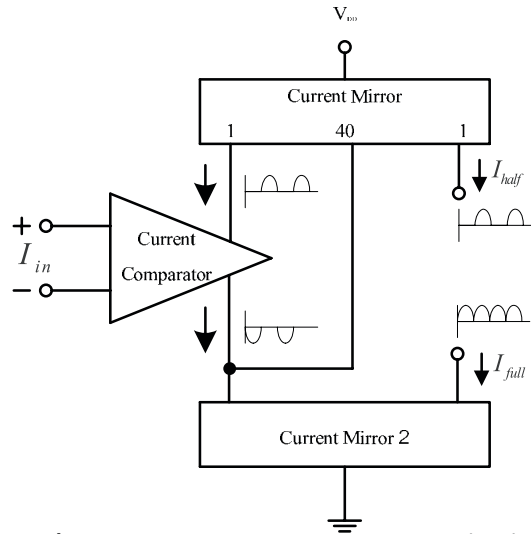
$$I_{in} > 0; \quad I_o = I_{in+} \quad (1)$$

$$I_{in} \leq 0 = 0 \quad (2)$$

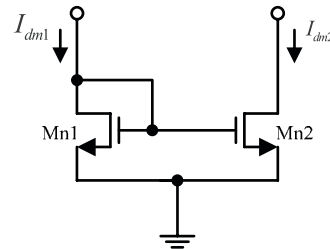
โครงสร้างของวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตให้วงจรเปรียบเทียบกระแส สัญญาณซีกบวกจะไหลผ่านไปยังวงจรสะท้อนกระแสแบบบวก ส่วนสัญญาณซีกลบจะไหลผ่านไปยังวงจรสะท้อนกระแสแบบลบ เอาต์พุตของวงจรสะท้อนกระแสแบบลบ จะถูกนำมาเป็นอินพุตของวงจรสะท้อนกระแสแบบบวกอีกครั้งหนึ่ง ดังนั้นจะได้สัญญาณเอาต์พุตเป็นสัญญาณเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นแสดงได้ คือ

$$I_{out} = I_{in-} + I_{in+} \quad (3)$$

จากหลักการในรูปที่ 1 วงจรเรียงกระแสจะประกอบด้วยวงจรหลัก 2 วงจร คือ วงจรเปรียบเทียบกระแสและวงจรสะท้อนกระแส



รูปที่ 1 หลักการของวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นและแบบเต็มคลื่น



รูปที่ 2 วงจรสะท้อนกระแสแบบพื้นฐาน

2.1 วงจรสะท้อนกระแส

รูปที่ 2 แสดงวงจรสะท้อนกระแสแบบพื้นฐาน โดยกระแส I_{dn1} คือกระแสทางด้านอินพุตและ I_{dn2} คือ กระแสทางด้านเอาต์พุต เมื่อกำหนดให้ Mn1 และ Mn2 ทำงานในช่วงอิ่มตัว จะได้ความสัมพันธ์ คือ $V_{dsn1} = V_{gsn1}$ และ $V_{dsn2} \geq V_{gsn2} - V_{tn2}$ อัตราส่วนกระแสเอาต์พุตและอินพุตสามารถเขียนได้ คือ

$$\frac{I_{dn2}}{I_{dn1}} = \frac{K_{n2}}{K_{n1}} \left(\frac{V_{gsn2} - V_{tn2}}{V_{gsn1} - V_{tn1}} \right)^2 \left(\frac{\lambda_{vdsn2}}{1 + V_{dsn1}} \right) \quad (4)$$

เมื่อ $K_n = K'_n \frac{W_n}{L_n} \cong \mu_{on} C_{ox} \frac{W_n}{L_n} (A/V^2)$

$$\frac{I_{dn2}}{I_{dn1}} = \frac{L_{n1}W_{n2}}{W_{n1}L_{n2}} \left(\frac{V_{gsn1} - V_{tn2}}{V_{gsn2} - V_{tn1}} \right)^2 \left(\frac{K'_{n2}}{K'_{n1}} \right) \quad (5)$$

เมื่อทรานซิสเตอร์ $Mn1$ และ $Mn2$ มีความสมพงค์กัน
ทุกประการยกเว้นขนาดของทรานซิสเตอร์ สมการที่ (5)
เขียนใหม่ได้ คือ

$$\frac{I_{dn2}}{I_{dn1}} = \left(\frac{L_{n1}W_{n2}}{W_{n1}L_{n2}} \right) \left(\frac{1 + \lambda V_{dsn2}}{1 + \lambda V_{dsn1}} \right) \quad (6)$$

ถ้ากำหนดให้ $V_{dsn2} = V_{dsn1}$ สมการที่ (6) สามารถเขียน
ใหม่ได้ คือ

$$\frac{I_{dn2}}{I_{dn1}} = \left(\frac{L_{n1}W_{n2}}{W_{n1}L_{n2}} \right) \quad (7)$$

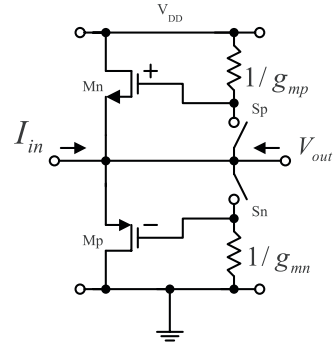
2.2 วงจรเปรียบเทียบกระแส

รูปที่ 3 แสดงโครงสร้างของวงจรเปรียบเทียบกระแส
ที่ใช้ในวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นและแบบเต็มคลื่น
การทำงานสามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อป้อนสัญญาณกระแส
อินพุตเป็นรูปคลื่นไซน์ สวิตช์ S_p และ จะสลับกันทำงาน
โดย S_p จะทำงานในช่วงบวกและ S_p จะทำงานในช่วงลบ
ด้วยสัดส่วนของ $1/g_{mp}$ และ $1/g_{mn}$ วงจรเรียงกระแสที่นำ
เสนอจะใช้ค่าสัดส่วนของ $1/g_{mp}$ และ $1/g_{mn}$ ที่ค่าต่างๆ
กัน 4 แบบ คือวงจรเปรียบเทียบกระแสแบบพหุพหุ
วงจรเปรียบเทียบกระแสที่ใช้มอสชนิดพีแชนแนลเป็น
โหลด วงจรเปรียบเทียบกระแสที่แหล่งจ่ายกระแสเป็น
โหลดและวงจรเปรียบเทียบกระแสแบบคาสโคดพหุพหุวงจร
เปรียบเทียบกระแสจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ วงจรเปรียบเทียบ
สัญญาณคู่และวงจรอินเวอร์เตอร์

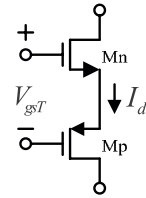
รูปที่ 4 แสดงวงจรเปรียบเทียบสัญญาณคู่ แรงดัน
ตกคร่อมระหว่างขาเกตและขาซอร์สสามารถเขียนได้ คือ

$$V_{gsi} = \sqrt{\frac{i_d}{K_i}} + V_{ti} \quad (8)$$

เมื่อ K_i คือค่าทรานสดักชันคัตแดนซ์ของทรานซิสเตอร์



รูปที่ 3 หลักการของวงจรเปรียบเทียบกระแส



รูปที่ 4 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณคู่

แบบเอ็นและพีแชนแนลและ V_{ti} คือ แรงดันเทรชโฮลล์
จะได้แรงดันตกคร่อมขาเกตและขาซอร์สของทรานซิสเตอร์
ชนิดเอ็นและพีแชนแนลที่แสดงได้ คือ

$$V_{gsT} = V_{gsn} + V_{gsp} = \sqrt{\frac{I_d}{K_T}} + V_{iT} \quad (9)$$

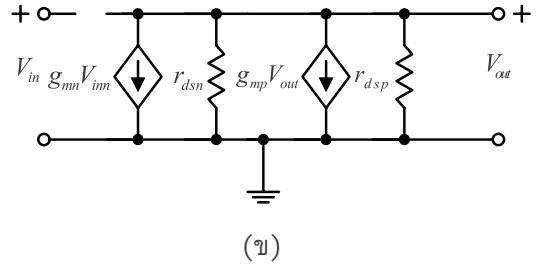
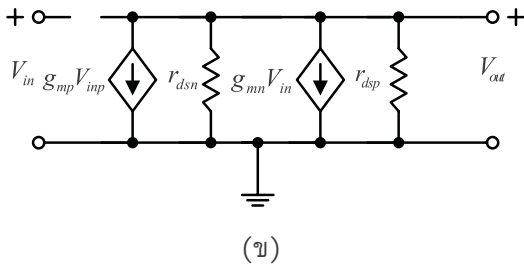
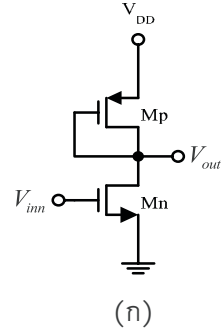
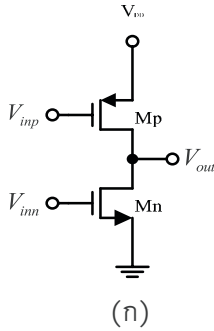
$$\text{เมื่อ } K_T = \frac{K_n + K_p}{(\sqrt{K_n} + \sqrt{K_p})}$$

จากสมการที่ (9) จะได้ค่าแรงดันเทรชโฮลล์ของ
ทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นและพีแชนแนลได้ คือ

$$V_{iT} = V_{tn} + |V_{tp}| \quad (10)$$

2.3 วงจรเปรียบเทียบกระแสแบบพหุพหุ

รูปที่ 5 (ก) แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์แบบพหุพหุ
รูปที่ 5 (ข) แสดงวงจรสมมูลตามลำดับ และจากรูป
ที่ 5 (ข) จะได้ความต้านทานทางดำนเอาท์พุท (R_{out})
แสดงดังสมการที่ (11) และอัตราขยายแรงดัน (A_v)
แสดงได้ดังสมการที่ (12)



รูปที่ 5 (ก) วงจรอินเวอร์เตอร์แบบพุชพูล (ข) วงจรสมมูล

รูปที่ 6 (ก) วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้มอสชนิดพีแชนแนล เป็นโหลด (ข) วงจรสมมูล

$$R_{out} = \frac{1}{(g_{dsn} + g_{dsp})} \quad (11)$$

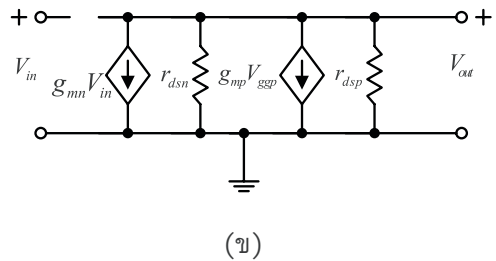
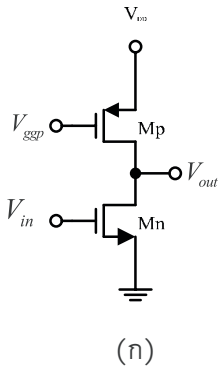
เมื่อ $V_{in} = V_{inn} + V_{inp}$

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-(g_{mn} + g_{mp})}{g_{dsn} + g_{dsp}} \quad (12)$$

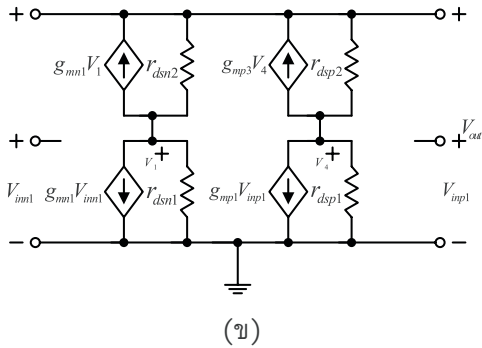
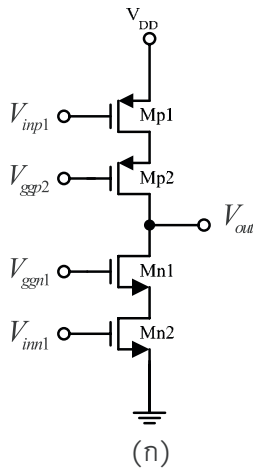
2.4 วงจรเปรียบเทียบกระแสที่ใช้มอสชนิดพีแชนแนล เป็นโหลด

รูปที่ 6 (ก) แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้มอสชนิดพีแชนแนล ส่วนรูปที่ 6 (ข) แสดงวงจรสมมูล จากรูปที่ 6 (ข) ความต้านทานทางด้านเอาต์พุต (R_{out}) สามารถกำหนดได้ดังสมการที่ (13) และอัตราขยายแรงดัน สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (14)

$$R_{out} = \frac{1}{g_{dsp} + g_{dsn} + g_{mp}} \quad (13)$$



รูปที่ 7 (ก) วงจรเปรียบเทียบกระแสที่ใช้แหล่งจ่าย กระแสเป็นโหลด (ข) วงจรสมมูล



รูปที่ 8 (ก) แสดงวงจรเปรียบเทียบกระแสแบบคาสโคดพหุพูล
ส่วนรูปที่ 8 (ข) แสดงวงจรสมมูล

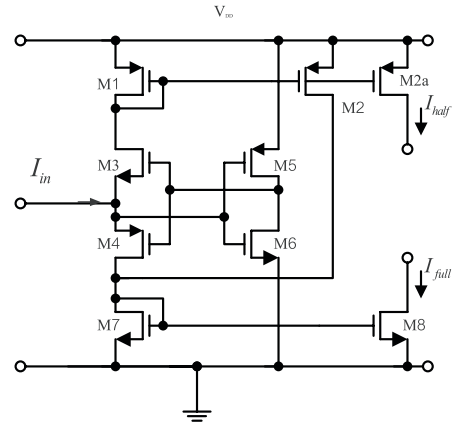
$$\text{และ} \quad A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-g_{mn}}{g_{dsp} + g_{dsn} + g_{mp}} \quad (14)$$

2.5 วงจรเปรียบเทียบกระแสที่ใช้แหล่งจ่ายกระแสเป็นโหลด

รูปที่ 7(ก) วงจรเปรียบเทียบกระแส ที่ใช้แหล่งจ่ายกระแสเป็นโหลด (ข) วงจรสมมูล จากรูปที่ 7(ข) จะได้ความต้านทานทางด้านเอาต์พุต (R_{out}) ดังสมการที่ (15) และอัตราการขยายแรงดัน (A_v) ดังสมการที่ (16)

$$R_{out} = \frac{1}{g_{dsp} + g_{dsp}} \quad (15)$$

$$\text{และ} \quad A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-g_{mn}}{g_{dsn} + g_{dsp}} \quad (16)$$



รูปที่ 9 วงจรเรียงกระแสโดยใช้วงจรเปรียบเทียบกระแสแบบพหุพูล

2.6 วงจรเปรียบเทียบกระแสแบบคาสโคดพหุพูล

จากรูปที่ 8 (ข) ความต้านทานทางด้านเอาต์พุต (R_{out}) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 17 และอัตราการขยายแรงดัน สามารถเขียนได้ คือ

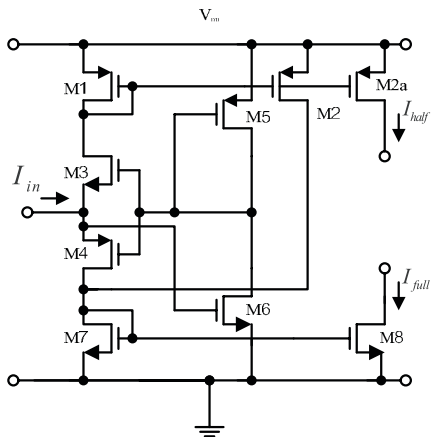
$$R_{out} = (r_{dsn1} + r_{dsn2} + g_{mn1}r_{dsn1}r_{dsn2}) // (r_{dsn3} + r_{dsn4} + g_{mn3}r_{dsn3}r_{dsn4}) \quad (17)$$

และ

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -(g_{mn1} + g_{mp1})R_{out} \quad (18)$$

3. วงจรเรียงกระแสแบบต่าง ๆ

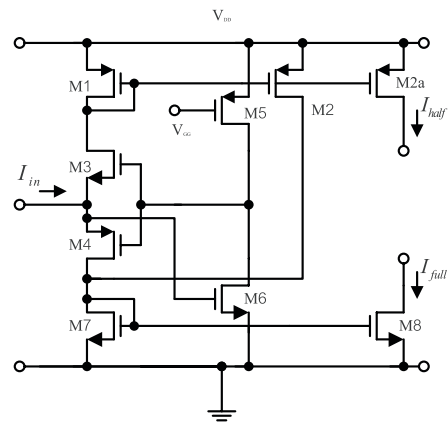
วงจรเรียงกระแสโดยใช้วงจรเปรียบเทียบกระแสแบบพหุพูลแสดงได้ดังรูปที่ 9 ทราวนซิสเตอร์ M1 และ M2 ทำงานเป็นวงจรสะท้อนกระแสแบบบวก ส่วน M7 และ M8 ทำงานเป็นวงจรสะท้อนกระแสแบบลบ M3 และ M4 ทำงานเป็นวงจรเปรียบเทียบกระแส ในขณะที่ M5 และ M6 ทำงานเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ วงจรอินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่ไบอัสให้กับวงจรเปรียบเทียบกระแส การทำงานของวงจรสามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อสัญญาณกระแส I_{in} ซีกบวกไหลเข้าสู่วงจร สัญญาณจะไหลผ่าน M4 และไหลมายังวงจรสะท้อนกระแสแบบลบ (M7 และ M8) และสัญญาณซีกบวกซีกแรกจะปรากฏที่เอาต์พุต I_{full} จากนั้น



รูปที่ 10 วงจรเรียงกระแสโดยใช้วงจรเปรียบเทียบกระแสที่ใช้มอสชนิดพีแซนแนลเป็นโหลด

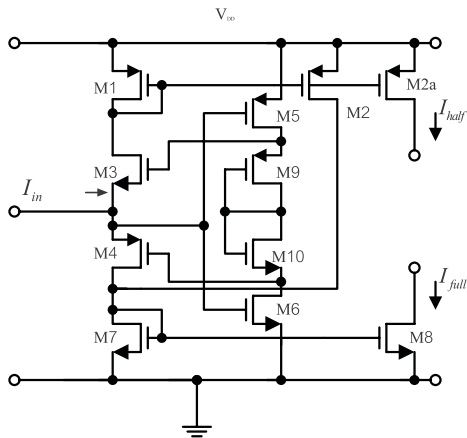
เมื่อสัญญาณซีกลบไหลเข้ามา สัญญาณจะไหลผ่าน M3 และ M1 สัญญาณจะถูกสะท้อนมายัง M2 และไหลมาเป็นอินพุตให้กับวงจรสะท้อนกระแส M7 และ M8 และกลายเป็นสัญญาณซีกบวกลูกที่สองทางเอาต์พุต I_{full} จะเห็นได้ว่าเราสามารถได้เอาต์พุตกระแสแบบครึ่งคลื่นที่เอาต์พุต I_{half} อีกด้วย จากรูปที่ 9 เมื่อวงจรเปรียบเทียบกระแสแบบพหุคูณในรูปที่ 5 ถูกนำมาใช้สร้างวงจรเรียงกระแส ทรานซิสเตอร์ M5 และ M6 จะสลับกันทำงานโดยตัวหนึ่งทำงานอีกตัวหนึ่งจะหยุดทำงาน ซึ่งการทำงานในลักษณะนี้จะเป็นแบบคลาส B ดังนั้นการสวิตช์ on และ off ของ M5 และ M6 ของวงจรเปรียบเทียบกระแสจึงมีผลต่อการทำงานกับวงจรเรียงกระแสโดยตรง โดยเฉพาะที่ความถี่สูงซึ่งจะไม่สามารถตอบสนองได้รวดเร็วเพียงพอ ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาการสวิตช์ on และ off ของวงจรเปรียบเทียบกระแสแบบพหุคูณจึงได้เปลี่ยนมาใช้วงจรเปรียบเทียบกระแสที่ใช้มอสชนิดพีแซนแนลเป็นโหลดดังแสดงในรูปที่ 10

วงจรเรียงกระแสโดยใช้วงจรเปรียบเทียบกระแสที่ใช้มอสชนิดพีแซนแนลเป็นโหลดจะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10 วงจรเปรียบเทียบกระแสนี้นี้จะทำงานในคลาส A ดังนั้นทรานซิสเตอร์ M6 พร้อมทั้งจะทำงานทันทีเมื่อมีแรงดันมาไบอัสเข้าที่ขาเกตของตัวมัน โดยมี M5 ทำหน้าที่เป็นโหลดจ่ายกระแส จากวงจรในรูปที่ 10 จะเห็นว่าเมื่อ M6

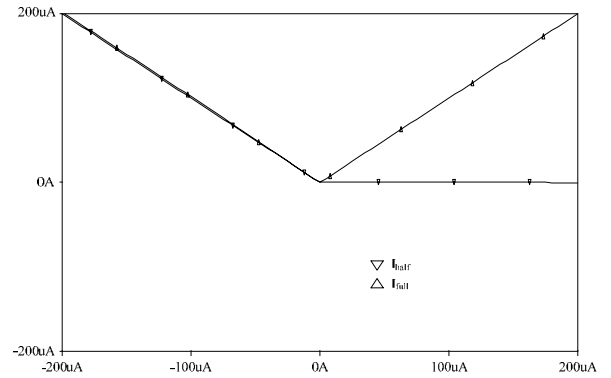


รูปที่ 11 วงจรเรียงกระแสที่ใช้วงจรเปรียบเทียบกระแสที่ใช้แหล่งจ่ายกระแสเป็นโหลด

ทำงาน จะมีกระแสไหลผ่าน M5 มาไบอัสให้กับ M6 เป็นจำนวนมาก เนื่องจากไม่สามารถควบคุมปริมาณการไหลของกระแสได้ ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองกำลังงานค่อนข้างมาก ดังนั้นถ้าต้องการลดการใช้กำลังงานของวงจรเรียงกระแส เราสามารถทำได้ใช้วงจรเปรียบเทียบกระแสที่ใช้แหล่งจ่ายกระแสเป็นโหลดดังแสดงในรูปที่ 11 จากรูป ทรานซิสเตอร์ M5 จะทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายกระแสซึ่งสามารถควบคุมปริมาณการไหลได้ด้วยแรงดัน V_{gg} ดังนั้นปริมาณการไหลของกระแสที่ไหลผ่านวงจรเปรียบเทียบกระแสจึงสามารถควบคุมได้ด้วยแรงดัน V_{gg} แต่เมื่อเปรียบเทียบกับวงจรเปรียบเทียบกระแสที่ใช้มอสชนิดพีแซนแนลเป็นโหลด วงจรเปรียบเทียบกระแสนี้จะต้องใช้แหล่งจ่ายอิสระจากภายนอกอีกหนึ่งแหล่งจ่าย ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้วงจรไบอัสจากภายนอก เนื่องจากวงจรเปรียบเทียบกระแสทั้งสามแบบที่กล่าวมามีเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ไม่สูงเพราะสร้างจากวงจรวงจรพื้นฐาน ดังนั้นเพื่อเพิ่มค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ $1/g_{mp}$ และ $1/g_{mn}$ ให้สูงขึ้นจึงได้นำวงจรเปรียบเทียบกระแสแบบคาสโคดพหุคูณมาใช้ในวงจรเรียงกระแส ดังแสดงในรูปที่ 12 ดังนั้นเมื่อ $1/g_{mp}$ และ $1/g_{mn}$ (ดูรูปที่ 3) มีค่าสูงมากๆ จึงไม่มีผลกระทบกับค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจร โดยทั่วไปค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรที่ทำงานในโหมดกระแสจะมีค่าต่ำ ดังนั้นถ้า $1/g_{mp}$ และ $1/g_{mn}$ มีค่าไม่ต่างจากค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจร



รูปที่ 12 วงจรเรียงกระแสโดยใช้วงจรเปรียบเทียบกระแสแบบคลาสโคตพุชพุล



รูปที่ 13 คุณสมบัติทางด้านไฟกระแสดรของวงจรเรียงกระแสโดยใช้วงจรเปรียบเทียบกระแสแบบพุชพุลที่ย่าน $\pm 200 \mu A$

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบการทำงานของวงจรเรียงกระแสทั้ง 4 แบบ

วงจรที่นำเสนอ	รูปที่ 9	รูปที่ 10	รูปที่ 11	รูปที่ 12
ชนิดของวงจรเปรียบเทียบกระแสที่ใช้	พุชพุล	ใช้มอสชนิดพี แชนแนลเป็นโหลด	ใช้แหล่งจ่ายกระแสเป็นโหลด	คลาสโคตพุชพุล
แหล่งจ่ายแรงดัน (โวลต์)	0.5	0.5	0.5	0.5
ช่วงปฏิบัติงานทางอินพุต (μA)	± 200	± 200	± 200	± 300
ช่วงความถี่ปฏิบัติงานสูงสุด (MHz)	50	50	50	50
การใช้กำลังงาน (μW)				
เต็มคลื่น (Full-wave)	0.0032	0.0031	0.25	0.025
ครึ่งคลื่น (Half-wave)	0.228	0.228	0.020	0.018

(รูปที่ 3 $R_{in} \approx 1/(g_{mp} // g_{mn})$) จะมีผลต่อความแม่นยำของวงจรโดยตรง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้วงจรเรียงกระแสในรูปที่ 12 มีความเที่ยงตรงกว่าวงจรในรูปที่ 9 ถึง 11 จากวงจรที่นำเสนอทั้ง 4 แบบสามารถสรุปได้ว่าวงจรในรูปที่ 9 ถึง 11 เป็นวงจรที่มีความง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรในรูปที่ 12 แต่ด้วยวงจรที่มีความซับซ้อนมากกว่าวงจรในรูปที่ 12 จะสามารถทำงานได้ดีกว่าวงจรในรูปที่ 9 ถึง 11

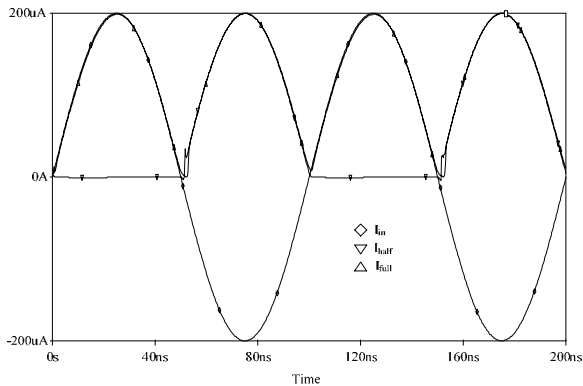
4. ตัวอย่างการจำลองการทำงาน

เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของวงจรเรียงกระแสทั้ง 4 แบบ วงจรเรียงกระแสทั้งหมดจะถูกจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม PSpice โดยใช้เทคโนโลยีซีมอส $0.25 \mu m$

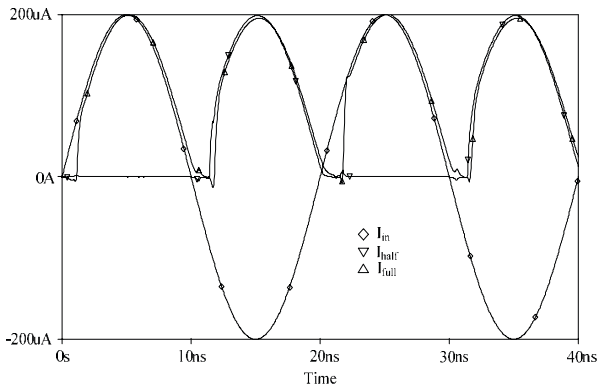
แหล่งจ่ายแรงดัน 0.5 โวลต์ สำหรับวงจรเรียงกระแสในรูปที่ 11 กำหนดแรงดัน เท่ากับ 0.1 โวลต์ ผลการจำลองสรุปได้ดังตารางที่ 1

4.1 ตัวอย่างผลการจำลองวงจรเรียงกระแสโดยใช้วงจรเปรียบเทียบกระแสแบบพุชพุล

รูปที่ 13 แสดงคุณสมบัติทางด้านไฟกระแสดรของวงจรเรียงกระแส จากรูปช่วงปฏิบัติงานทางอินพุตของวงจรประมาณ $\pm 200 \mu A$ จากนั้นได้ทดลองเพิ่มความถี่เป็น 10 MHz และความถี่ 50 MHz แอมพลิจูด $200 \mu A$ สัญญาณเอาต์พุตแบบครึ่งคลื่นและแบบเต็มคลื่นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 14 และรูปที่ 15 ตามลำดับ



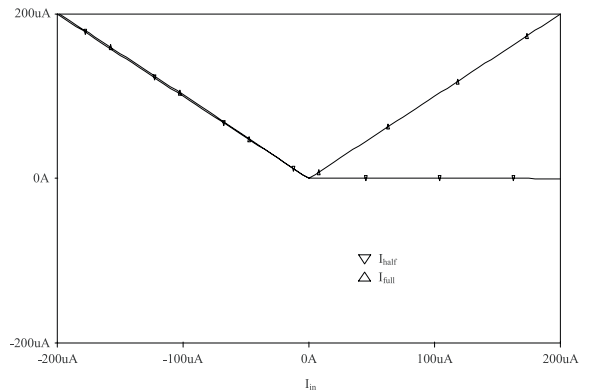
รูปที่ 14 สัญญาณกระแสเอาต์พุตครึ่งคลื่นและเต็มคลื่นของวงจรเรียงกระแสโดยใช้วงจรเปรียบเทียบกระแสแบบพหุพูลที่ความถี่ 10 MHz แอมป์ลิจูด $\pm 200 \mu\text{A}$



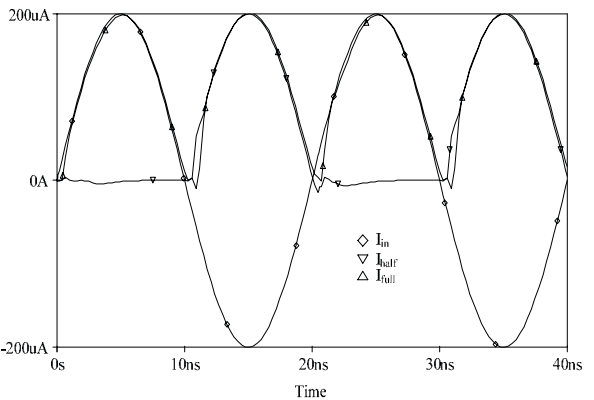
รูปที่ 15 สัญญาณกระแสเอาต์พุตครึ่งคลื่นและเต็มคลื่นของวงจรเรียงกระแสโดยใช้วงจรเปรียบเทียบกระแสแบบพหุพูลที่ความถี่ 50 MHz แอมป์ลิจูด $\pm 200 \mu\text{A}$

4.2 ตัวอย่างผลการจำลองวงจรเรียงกระแสโดยใช้วงจรเปรียบเทียบกระแสที่ใช้มอดูลชนิดพีแซนแนลเป็นโหลด

รูปที่ 16 แสดงคุณสมบัติทางด้านไฟกระแสตรงที่ย่านของวงจร จากรูปช่วงปฏิบัติงานทางอินพุตของวงจรประมาณ $\pm 200 \mu\text{A}$ จากนั้น ได้ทดลองเพิ่มความถี่เป็น 10 MHz และความถี่ 50 MHz แอมป์ลิจูด $\pm 200 \mu\text{A}$ สัญญาณเอาต์พุตแบบครึ่งคลื่นและแบบเต็มคลื่นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 17 และรูปที่ 18 ตามลำดับ



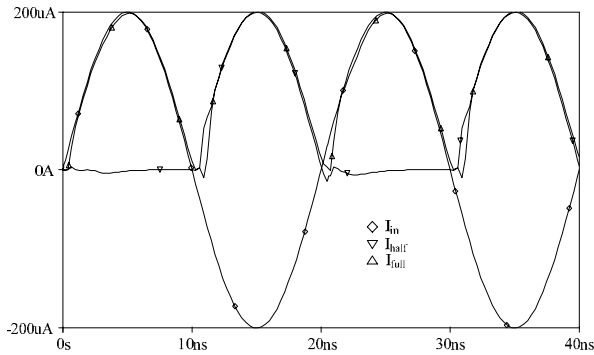
รูปที่ 16 คุณสมบัติทางด้านไฟกระแสตรงของวงจรเรียงกระแสโดยใช้วงจรเปรียบเทียบกระแสแบบพหุพูลที่ย่าน $\pm 200 \mu\text{A}$



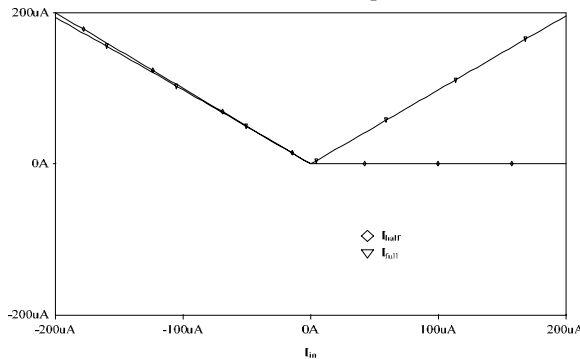
รูปที่ 17 สัญญาณกระแสเอาต์พุตครึ่งคลื่นและเต็มคลื่นของวงจรเรียงกระแสโดยใช้วงจรเปรียบเทียบกระแสที่ใช้มอดูลชนิดพีแซนแนลเป็นโหลดที่ความถี่ 10 MHz $\pm$ แอมป์ลิจูด $\pm 200 \mu\text{A}$

4.3 ตัวอย่างผลการจำลองวงจรเรียงกระแสโดยใช้แหล่งจ่ายกระแสเป็นโหลด

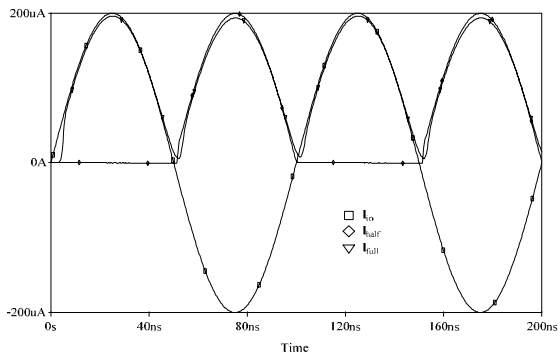
รูปที่ 19 แสดงคุณสมบัติทางด้านไฟกระแสตรงที่ย่านของวงจรจากรูปช่วงปฏิบัติงานทางอินพุตของวงจรประมาณ $\pm 200 \mu\text{A}$ จากนั้น ได้ทดลองเพิ่มความถี่เป็น 10 MHz และ 50 MHz แอมป์ลิจูด $\pm 200 \mu\text{A}$ สัญญาณเอาต์พุตแบบครึ่งคลื่นและแบบเต็มคลื่นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 20 และรูปที่ 21 ตามลำดับ



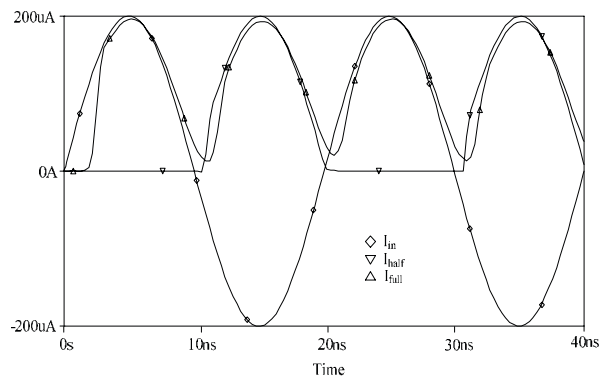
รูปที่ 18 สัญญาณกระแสเอาต์พุตครึ่งคลื่นและเต็มคลื่นของวงจรเรียงกระแสโดยใช้วงจรเปรียบเทียบกระแสที่ใช้มอดสชนิดพีแซนแนลเป็นโหลดที่มีความถี่ 50 MHz แอมพลิจูด $\pm 200 \mu\text{A}$



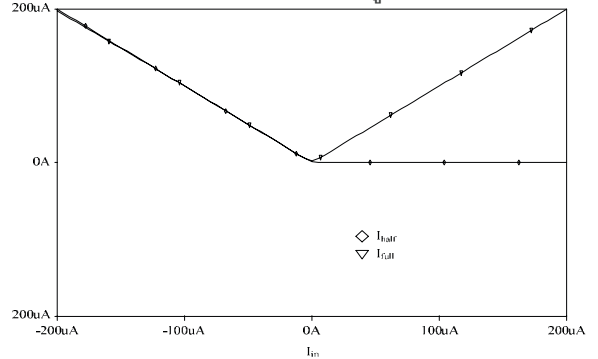
รูปที่ 19 คุณสมบัติทางด้านไฟกระแสตรงของวงจรเรียงกระแสโดยใช้วงจรเปรียบเทียบกระแสที่ใช้แหล่งจ่ายกระแสเป็นโหลดที่ย่าน $\pm 200 \mu\text{A}$



รูปที่ 20 สัญญาณกระแสเอาต์พุตครึ่งคลื่นและเต็มคลื่นของวงจรเรียงกระแสโดยใช้วงจรเปรียบเทียบกระแสที่ใช้แหล่งจ่ายกระแสเป็นโหลดที่มีความถี่ 10 MHz แอมพลิจูด $\pm 200 \mu\text{A}$



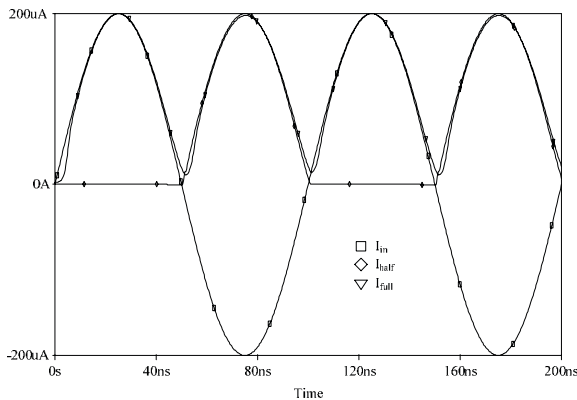
รูปที่ 21 สัญญาณกระแสเอาต์พุตครึ่งคลื่นและเต็มคลื่นของวงจรเรียงกระแสโดยใช้วงจรเปรียบเทียบกระแสที่ใช้แหล่งจ่ายกระแสเป็นโหลดที่มีความถี่ 50 MHz แอมพลิจูด $\pm 200 \mu\text{A}$



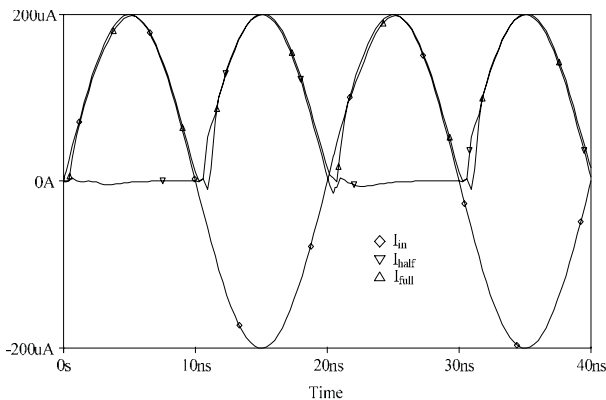
รูปที่ 22 คุณสมบัติทางด้านไฟกระแสตรงของวงจรเรียงกระแสโดยใช้วงจรเปรียบเทียบกระแสแบบคาสโคดพซพุทที่ย่าน $\pm 200 \mu\text{A}$

4.4 ตัวอย่างผลการจำลองวงจรเรียงกระแสโดยใช้วงจรเปรียบเทียบกระแสแบบคาสโคดพซพุท

รูปที่ 22 แสดงคุณสมบัติทางด้านไฟกระแสตรงที่ย่านของวงจร จากรูปช่วงปฏิบัติงานทางอินพุทของวงจรประมาณ $\pm 200 \mu\text{A}$ จากนั้นได้ทดลองเพิ่มความถี่เป็น 10 MHz และ 100 MHz แอมพลิจูด $\pm 200 \mu\text{A}$ สัญญาณเอาต์พุตแบบครึ่งคลื่นและแบบเต็มคลื่นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 23 และรูปที่ 24 ตามลำดับ จากรูปที่ 24 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 15 รูปที่ 18 และรูปที่ 21 จะเห็นว่าสัญญาณในรูปที่ 24 มีรูปคลื่นทางเอาต์พุตที่ดีและตอบสนองต่อความถี่ที่สูงกว่า



รูปที่ 23 สัญญาณเอาต์พุตครึ่งคลื่นและเต็มคลื่นของ วงจรเรียงกระแสโดยใช้วงจรเปรียบเทียบ กระแสแบบคาสโคดพุลลที่ความถี่ 10 MHz แอมพลิจูด $\pm 200 \mu A$



รูปที่ 24 สัญญาณเอาต์พุตครึ่งคลื่นและเต็มคลื่นของ วงจรเรียงกระแสโดยใช้วงจรเปรียบเทียบ กระแสแบบคาสโคดพุลลที่ความถี่ 50 MHz แอมพลิจูด $\pm 200 \mu A$

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอวิธีการออกแบบวงจรเรียงกระแส ชนิดเที่ยงตรงที่ใช้เทคโนโลยี CMOS โครงสร้างวงจร เรียงกระแสที่นำเสนอทั้งหมดสามารถเป็นได้ทั้งวงจรเรียง กระแสครึ่งคลื่นและแบบเต็มคลื่นในวงจรเดียวกัน วงจรที่ นำเสนอมีคุณสมบัติใช้แรงดันไฟเลี้ยงต่ำ 0.5 โวลต์ มีช่วง ปฏิบัติงานทางอินพุตกว้าง สามารถทำงานที่ความถี่สูง

ได้ดีและวงจรเหมาะกับการนำไปสร้างเป็นวงจรรวมด้วย เทคโนโลยีซีมอส จากวงจรเรียงกระแสทั้งหมดจะเห็นได้ ว่าวงจรเปรียบเทียบกระแสทั้ง 4 แบบจะทำงานเป็นสวิตช์ เพื่อไบอัสแรงดันให้กับ M_n และ M_p ค่า $1/g_{mp}$ และ $1/g_{mn}$ ซึ่งเป็นเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ ของวงจรเปรียบเทียบกระแส จะมีผลต่อความเที่ยงตรงกับวงจรเรียงกระแส จากรูปที่ 5 เมื่อวงจรเปรียบเทียบกระแสแบบพุลลถูกนำมาใช้ไบอัส ให้กับวงจรเรียงกระแส ทราานซิสเตอร์ M_p และ M_n จะ สลับกันทำงานโดยตัวหนึ่งทำงานอีกตัวหนึ่งจะหยุดทำงาน ซึ่งการทำงานในลักษณะนี้จะเป็นแบบคลาส B ดังนั้นการ สวิตช์ on และ off ของ M_p และ M_n ของวงจรเปรียบเทียบ กระแสจึงมีผลต่อการทำงานกับวงจรเรียงกระแสโดยตรง โดยเฉพาะที่ความถี่สูงซึ่งจะไม่สามารถตอบสนองได้รวดเร็ว เพียงพอ ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาการสวิตช์ on และ off ของวงจรเปรียบเทียบกระแสแบบพุลลจึงได้เปลี่ยนมา ใช้วงจรเปรียบเทียบกระแสที่ใช้มอสชนิดพีแชนแนลเป็น โหลดดังแสดงในรูปที่ 10 วงจรเปรียบเทียบกระแสชนิดนี้ จะทำงานในคลาส A ดังนั้นทราานซิสเตอร์ M_6 พร้อมทั้ง จะทำงานทันทีเมื่อมีแรงดันมาไบอัสเข้าที่ขาเกต โดยมี M_5 ทำหน้าที่เป็นโหลดจ่ายกระแส จากวงจรในรูปที่ 10 จะเห็นว่าเมื่อ M_6 ทำงาน จะมีกระแสไหลผ่าน M_5 มา ไบอัสให้กับ M_6 เป็นจำนวนมาก เนื่องจากไม่สามารถ ควบคุมปริมาณการไหลของกระแสได้ ซึ่งทำให้สิ้นเปลือง กำลังงานค่อนข้างมาก จากปัญหาดังกล่าวจึงได้เปลี่ยน มาใช้วงจรเปรียบเทียบกระแสที่ใช้แหล่งจ่ายกระแส เป็นโหลดดังแสดงในรูปที่ 11 จากรูป ทราานซิสเตอร์ M_5 จะทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายกระแสซึ่งสามารถควบคุม ปริมาณการไหลได้ด้วยแรงดัน V_{gg} ดังนั้นปริมาณการไหล ของกระแสที่ไหลผ่านวงจรเปรียบเทียบกระแสจึงสามารถ ควบคุมได้ด้วยแรงดัน V_{gg} แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ วงจรเปรียบเทียบกระแสที่ใช้มอสชนิดพีแชนแนล เป็นโหลด วงจรเปรียบเทียบกระแสชนิดนี้จะต้อง ใช้แหล่งจ่ายอิสระจากภายนอกอีกหนึ่งแหล่งจ่าย ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้วงจรไบอัสจากภายนอก เนื่องจากวงจรเปรียบเทียบกระแสทั้งสามแบบที่กล่าว มายังมีเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ไม่สูงเพราะสร้างจากวงจร

วงจรพื้นฐาน ดังนั้นเพื่อเพิ่มค่าเอาต์พุต อิมพีแดนซ์ $1/g_{mp}$ และ $1/g_{mn}$ ให้สูงขึ้นจึงได้นำวงจรเปรียบเทียบกับกระแสแบบคลาสโคตพชพูลมาใช้ในวงจรเรียงกระแส ดังแสดงในรูปที่ 12 ดังนั้นเมื่อ $1/g_{mp}$ และ $1/g_{mn}$ มีค่าสูงมากๆ จึงไม่มีผลกระทบกับค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจร โดยทั่วไปค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรที่ทำงานในโหมดกระแสจะมีค่าต่ำ ดังนั้นถ้า $1/g_{mp}$ และ $1/g_{mn}$ มีค่าไม่ต่างจากค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจร (รูปที่ 3) $R_{in} \approx 1/(g_{mp}/g_{mn})$ จะมีผลต่อความแม่นยำของวงจรโดยตรง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้วงจรเรียงกระแสในรูปที่ 12 มีความเที่ยงตรงมากที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- [1] B. Knobnob, J. Nakasuwan, B. Burapattanasiri, and K. Dejhan, "Full-wave Rectifier Current High-speed Mode," in *EECON 29*, 2006 (in Thai).
- [2] A. Virattiya, B. Knobnob, and M. Kumngern, "CMOS Precision Full-Wave and Half-Wave Rectifier," *IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering*, vol. 4, pp. 556-559, 2011.
- [3] Z. Wang, "Full-wave precision rectification that is performed in current domain and very suitable for CMOS implementation," *IEEE Transaction on Circuits and Systems-I*, vol. 39, pp. 456-462, 1992.
- [4] S. J. G. Gift, "A high-performance full-wave rectifier circuit," *International Journal of Electronics*, vol. 89, pp. 467-476, 2000.
- [5] C. Toumazou, F. J. Lidgey, and S. Chattong, "High frequency current conveyor precision full-wave rectifier," *Electronics Letters*, vol. 30, pp. 745-746, 1994.
- [6] A. A. Khan, M. Abou El-Ela, and M. A. Al-Turaigi, "Current-mode precision rectification," *International Journal of Electronics*, vol. 79, pp. 853-859, 1995.
- [7] A. Monpapassorn, K. Dejhan, and F. Cheevasuvit, "A full-wave rectifier using a current conveyor and current mirrors," *International Journal of Electronic*, vol. 88, pp. 751-758, 2001.
- [8] V. Riewruja and R. Guntapong, "A low-voltage wide-band CMOS precision full-wave rectifier," *International Journal of Electronics*, vol. 89, pp. 467-476, 2002.
- [9] V. Surakumpontorn and V. Riewruja, "Integrable CMOS sinusoidal frequency doubler and full-wave rectifier," *International Journal of Electronics*, vol. 73, pp. 627-632, 1992.
- [10] J. Ramirez-Angulo, "High frequency low voltage CMOS diode," *Electronics Letters*, vol. 25, pp. 298-299, 1992.
- [11] H. Traff, "Novel approach to high speed CMOS current comparators," *Electronic Letters*, vol. 28, pp. 310-312, 1992.
- [12] D. A. Freitas and K. W. Current, "CMOS current comparator circuit," *Electronic Letters*, vol. 19, pp. 695-697, 1983.
- [13] D. G. Nairn and C.A.T. Samala, "Current-mode algorithmic analog-to-digital converters," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 25, pp. 997-1004, 1990.
- [14] P. E. Allen and D. R. Holberg, *CMOS Analog circuit design*, New York: Holt Rinehart and Winston, Inc., 1987.
- [15] P. Gray, P. J. Hurst, S. H. Lewis, and R. G. Meyer, *Analysis and design of analog integrated circuit*, New York: John Wiley & Sons, 2001.