

มนตรี สมดุลยภน

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม

235 ถนนเพชรเกษม เขตภาษีเจริญ กรุงเทพฯ 10163 E-mail:monsom@siamu.com

**บทคัดย่อ**

บทความวิจัยนี้ใช้เทคโนโลยีซีมอสมาทำการออกแบบเป็นวงจรความต้านทานปรับค่าได้ด้วยแรงดันโดยใช้หลักการของการกำจัดเทอมที่ไม่เป็นเชิงเส้นออกไป วงจรที่นำเสนอในบทความนี้ใช้ทรานซิสเตอร์ทั้งหมด 4 ตัว โดยทรานซิสเตอร์ 2 ตัว ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไบอัสของทรานซิสเตอร์อีก 2 ตัว ซึ่งทำหน้าที่เป็น ความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน ที่ทำงานในย่านนำกระแสไม่อิ่มตัว ผลลัพธ์ของวงจรความต้านทานที่ได้จากงานวิจัยนี้ มีความเป็นเชิงเส้นค่อนข้างดีและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในวงจรกรองความถี่สูงผ่าน (HPF) ซึ่งผลการทดสอบทั้งหมด ถูกกระทำโดยใช้โปรแกรม PSpice จำลองแบบการทำงาน

**Abstract**

This paper utilizes the CMOS technology for the design of voltage controlled grounding resistance circuit using the nonlinearity terms cancellation principle. The circuit proposed in this paper uses four CMOS transistors where two transistors are used to control bias voltages of the other two transistors which are working as the voltage controlled grounding resistances operating in non-saturation region. The resistance circuit obtained from this research work gives a good linearity applicable adequately for a high-pass filter circuit. The test results are simulated by the PSpice simulation program.

**1. บทนำ**

วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน เป็นวงจรที่มีงานวิจัยออกมามากมายในอดีต [1-3] ในงานด้านประมวลสัญญาณอนาล็อก และนิยมสร้างเป็นวงจรร้อยในวงจรรวมเสมอ การประยุกต์ใช้งานมีอย่างกว้างขวางในงานด้านโทรคมนาคม เช่น วงจรกรองความถี่ วงจรกำเนิดสัญญาณ วงจรควบคุมเกนอัตโนมัติ เป็นต้น ในบทความวิจัยนี้ได้นำเสนอ วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันโดยใช้ซีมอส ซึ่งมีประสิทธิภาพที่ดีวงจรหนึ่ง

**2. ทฤษฎีและหลักการ**

**2.1 หลักการของวงจรความต้านทานปรับค่าได้ด้วยแรงดันโดยใช้ทรานซิสเตอร์**

ในหลักการของวงจรความต้านทานปรับค่าได้ด้วยแรงดันนี้มีด้วยกันหลายวิธี โดยหลักการนี้เป็นหลักการหนึ่งซึ่งเป็นที่แพร่หลายใช้กันอย่างกว้างขวางกล่าวคือจะเป็นการใช้ทรานซิสเตอร์ให้ทำงานในย่านที่ไม่อิ่มตัว (Ohmic Region) และสร้างวงจรหักล้างค่าที่ไม่เป็นเชิงเส้นออกไปซึ่งหลักการดังกล่าวจะแสดงไว้ต่อไป

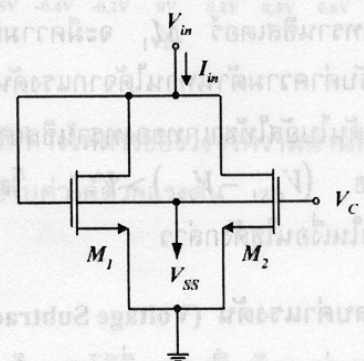
**2.2 ทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในย่านไม่อิ่มตัว (Ohmic's Transistor Operation)**

วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ ถูกนำเสนอเมื่อปี 1984 โดย Han and Park [4] โดยใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัว ดังรูปที่ 1 ซึ่งการทำงานใช้หลักการหักล้างค่าความไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งกันและกัน โดยที่กระแสเดรนของทรานซิสเตอร์ทั้งสองทำงานในย่านไม่อิ่มตัว มีค่าดังสมการที่ (1-2)

$$I_{D1} = k_N \left( V_{in} - V_{TN} - \frac{V_{in}}{2} \right) V_{in} \quad (1)$$

และ

$$I_{D2} = k_N \left( V_C - V_{TN} - \frac{V_{in}}{2} \right) V_{in} \quad (2)$$



รูปที่ 1. วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ [4]

โดยที่  $I_{in}$  คือกระแสเดรนของทรานซิสเตอร์  $M_1$  และ  $M_2, k_N = \mu_N C_{OX} \left( \frac{W}{L} \right)$  และค่าของความต้านทาน

ในวงจรมีค่าเท่ากับ

$$R_{eq} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{V_{in}}{I_{D1} + I_{D2}} = \frac{1}{k_N (V_C - 2V_{TN})} \quad (3)$$

จากรูปที่ 1 จะเห็นว่าทรานซิสเตอร์  $M_1$  จะไม่สามารถทำงานในย่านไม่อิ่มตัว (Ohmic Region) ได้ซึ่งทำให้สมการที่ (1) ไม่ถูกต้อง เนื่องจาก  $V_{GS1} = V_{DS1}$  หรือ  $(V_{GS} - V_{TN}) < V_{DS}$  ซึ่งทรานซิสเตอร์  $M_1$  จะทำงานในย่านอิ่มตัว (Saturation Region) สมการที่ถูกต้องจะเป็นสมการของทรานซิสเตอร์ในย่านอิ่มตัวซึ่งจะมีค่าเท่ากับ

$$I_{D1} = \frac{k_N}{2} (V_{GS1} - V_{TN})^2 \quad (4)$$

ในกรณีนี้ทรานซิสเตอร์  $M_2$  สามารถทำงานในย่านไม่อิ่มตัว (Ohmic Region) ดังสมการที่ (2) ทำให้กระแสอินพุทจะมีค่าเท่ากับ

$$I_{in} = I_{D1} + I_{D2} = k_N \left[ (V_C - 2V_{TN}) V_{in} + \frac{V_{TN}^2}{2} \right] \quad (5)$$

เมื่อเขียนอยู่ในรูปของความต้านทานจะมีค่าเป็น

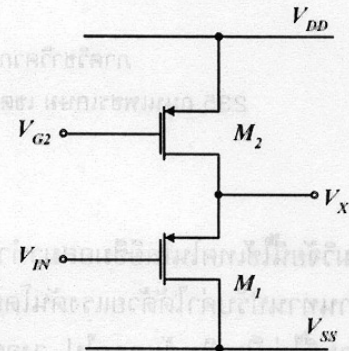
$$R_{eq} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{1}{k_N \left( V_C - 2V_{TN} + \frac{V_{TN}^2}{2V_{in}} \right)} \quad (6)$$

จากสมการที่ (6) แสดงให้เห็นว่าความต้านทานที่สร้างจากทรานซิสเตอร์  $M_1$  จะมีความเป็นเชิงเส้นและสามารถปรับค่าความต้านทานได้จากแรงดัน  $V_C$  โดยทำการจัดแรงดันไบอัสให้ขาเกตของทรานซิสเตอร์  $M_1$  ใหม่ตามเงื่อนไข  $(V_{GS1} - V_{TN}) > V_{DS1}$  โดยใช้วงจรลบค่าแรงดันช่วยในเงื่อนไขดังกล่าว

### 2.3 วงจรลบค่าแรงดัน (Voltage Subtractor Circuit)

วงจรลบค่าแรงดันเป็นวงจรที่มีโครงสร้างง่าย ไม่ซับซ้อน โดยใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด PMOS 2 ตัว มีคุณสมบัติในการ

หักล้างค่าแรงดัน ทำงานในย่านอิ่มตัว ดังรูปที่ 2 และแรงดันเอาต์พุทจะมีค่าเท่ากับสมการที่ (7)



รูปที่ 2. วงจรลบค่าแรงดัน

$$V_X = V_{in} + V_{kp} \quad (7)$$

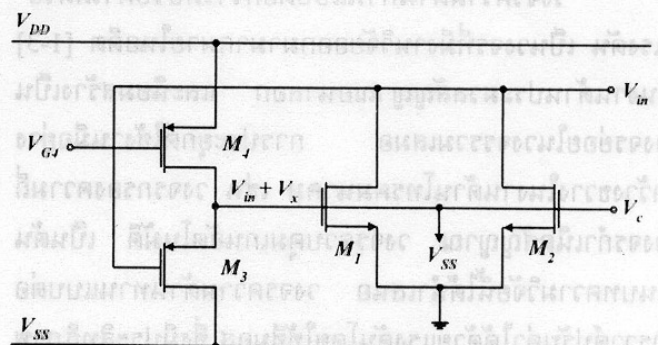
เมื่อ

$$V_{kp} = -V_{G2} + V_{TP} \quad (8)$$

$V_{TP}$  คือ แรงดันเทรชโฮลด์ของทรานซิสเตอร์ PMOS

### 3. การออกแบบวงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน (Voltage-Controlled Grounded Resistance Circuit)

วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน โดยใช้ซีมอส ดังรูปที่ 3) ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ PMOS 2 ตัว ได้แก่  $M_3, M_4$  ถูกต่อเป็นวงจรลบค่าแรงดันและทรานซิสเตอร์ NMOS อีก 2 ตัว คือ  $M_2$  ถูกต่อเป็นวงจรควบคุมแรงดัน ส่วนทรานซิสเตอร์  $M_1$  ถูกต่อเป็นวงจรความต้านทานทำงานอยู่ในช่วงนำกระแสไม่อิ่มตัว และถูกไบอัสด้วยค่าแรงดัน ที่ได้มาจากการหักล้างความไม่เป็นเชิงเส้นออกไป ทำให้ได้ความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันที่สมบูรณ์



รูปที่ 3. วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันโดยใช้ซีมอส

จากรูปที่ 3) ที่ขาเกตของทรานซิสเตอร์  $M_1$  จะมีแรงดันเท่ากับ  $V_{G1} = V_{in} + V_X$  ดังนั้นทรานซิสเตอร์  $M_1$  ต้องการที่จะให้ทำงานในย่านไม่อิ่มตัว จึงต้องมีอัตราแรงดันไบอัสดังนี้

$$(V_{in} + V_X - V_{TN}) > V_{in} \quad \text{หรือ} \quad V_X > V_{TN} \quad (9)$$

ด้วยเงื่อนไขของสมการที่ (9) สามารถบอกได้ว่าจะต้องการหาค่าแรงดัน  $V_X$  ให้มากกว่าแรงดันเทรชโฮลด์ของทรานซิสเตอร์เท่านั้น ก็สามารถทำให้วงจรทำงานเป็นความต้านทานปรับค่าด้วยแรงดันได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นสมการกระแสเดรนของทรานซิสเตอร์  $M_1$  มีค่าเท่ากับ

$$I_{D1} = k_N \left( \frac{V_{in} - V_{TN} + V_X}{2} \right) V_{in} \quad (10)$$

เมื่อ  $V_X = V_{IN} - V_{G4} + V_{TP}$  (11)

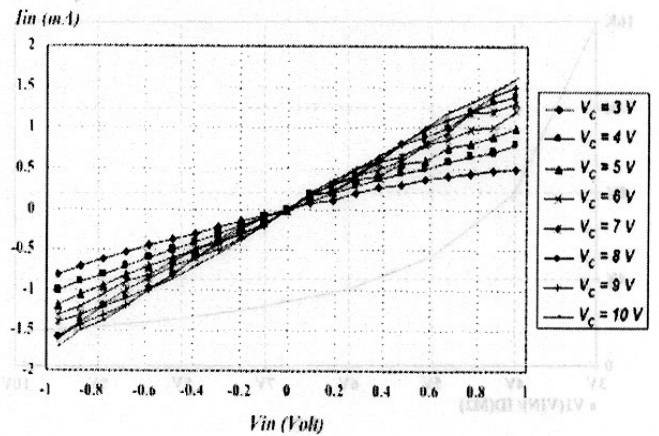
จากสมการที่ (2) และสมการที่ (10) สามารถเขียนสมการของความต้านทานของวงจรได้ดังสมการที่ (12)

$$R_{eq} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{V_{in}}{I_{D1} + I_{D2}} = \frac{1}{k_N (V_C + V_X - 2V_{TN})} \quad (12)$$

จากสมการที่ (12) แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงความเป็นเชิงเส้นของความต้านทาน ซึ่งเกิดจากการหักล้างค่าแรงดันไบอัสให้กับขาเกตของทรานซิสเตอร์  $M_1$  ด้วยการหักล้างค่าของแรงดันอินพุท โดยอัตราการหักล้างค่าของวงจรจะขึ้นอยู่กับแรงดัน  $V_X$  ต้องสูงมากพอที่จะทำให้เกิดเงื่อนไข  $V_{in} < (V_{DD} - 2V_X + |V_{TP}|)$  เพื่อให้ทรานซิสเตอร์  $M_1$  ทำงานเป็นความต้านทานในช่วงนำกระแสไม่อิ่มตัว

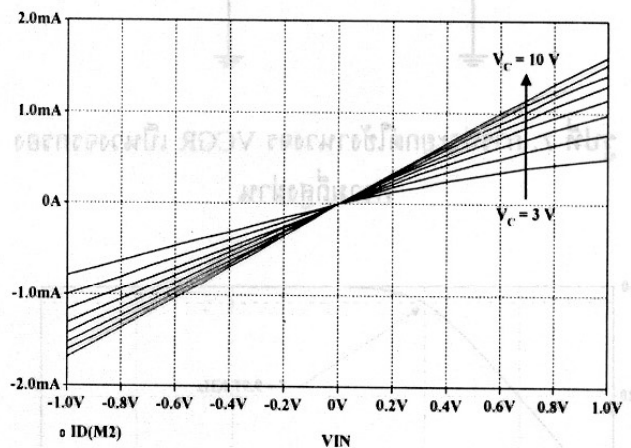
#### 4. การทดลองและผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์สมการที่ (12) เพื่อหาค่าคุณสมบัติทางไฟตรงของวงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน เมื่อนำสมการที่ (12) มาทำการพล็อตกราฟสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4

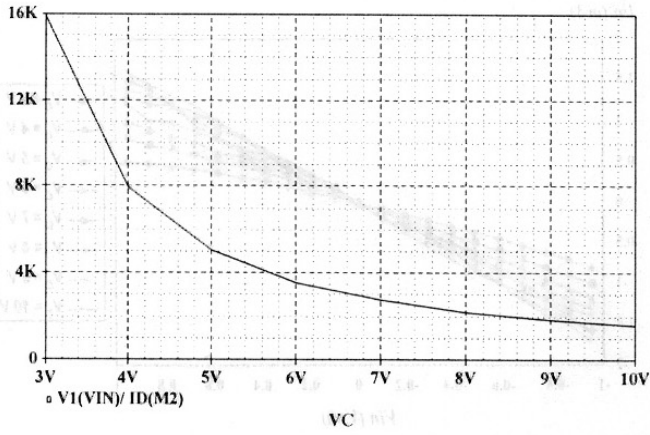


รูปที่ 4. คุณสมบัติทางไฟตรงของวงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันจากการคำนวณ

การเลียนแบบการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice โดยใช้แบบจำลอง (Model) T14Y MOSIS Level 3 ขนาด  $0.25 \mu\text{m}$  แรงดันไฟเลี้ยง  $\pm 5V$  โดยอัตราส่วนขนาด (Aspect Ratio) ของทรานซิสเตอร์มีค่าดังนี้ ทรานซิสเตอร์  $M_1, M_2$  จะมีค่า  $(W/L)$  เท่ากับ  $20 \mu\text{m}/10 \mu\text{m}$  และทรานซิสเตอร์  $M_3, M_4$  จะมีค่า  $(W/L)$  เท่ากับ  $50 \mu\text{m}/10 \mu\text{m}$  ตามลำดับ และกำหนดให้  $V_{TN} = 1.07V, V_{TP} = 0.8V$  ซึ่งคุณสมบัติทางไฟตรงจะแสดงไว้ดังรูปที่ 5

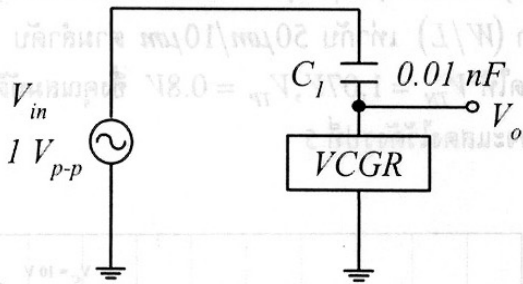


รูปที่ 5. คุณสมบัติทางไฟตรงของวงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน

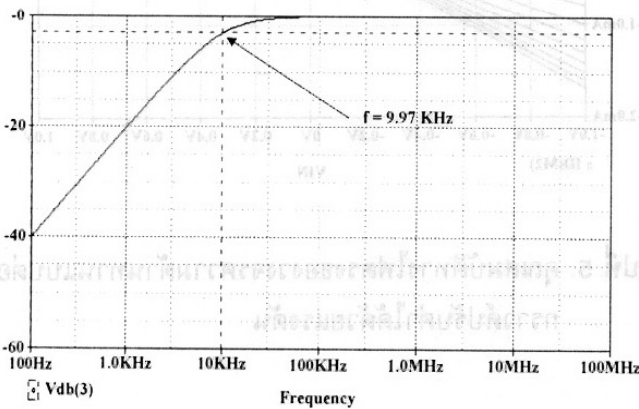


รูปที่ 6. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับแรงดันควบคุม

การประยุกต์ใช้งาน วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน โดยสร้างเป็นวงจรกรองความถี่สูงผ่านอันดับ 1 ดังรูปที่ 7 และผลการตอบสนองต่อความถี่แสดงไว้ดังรูปที่ 8 ซึ่งมีค่าประมาณ 10kHz



รูปที่ 7. การประยุกต์ใช้งานวงจร VCGR เป็นวงจรกรองความถี่สูงผ่าน



รูปที่ 8. ผลการตอบสนองความถี่ของวงจรในรูปที่ 7

## 5. บทสรุป

วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ ปรับค่าได้ด้วยแรงดันในบทความวิจัยนี้เป็นวงจรที่มีประสิทธิภาพดี ใช้การหักล้างในเทอมที่ไม่เป็นเชิงเส้นออกไปด้วยการหักล้างแรงดันไบอัสที่ป้อนให้กับขาเกตของทรานซิสเตอร์ โดยการหักล้างกับแรงดันอินพุท เมื่ออัตราค่าแรงดันของวงจรขึ้นอยู่กับค่าของแรงดัน  $V_x$  จะต้องสูงมากพอที่จะทำให้เกิดเงื่อนไขของทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในช่วงนำกระแสไม่อิ่มตัว เพื่อให้ทรานซิสเตอร์ทำงานเป็นความต้านทานแบบต่อกราวด์ ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน ผลจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice ยืนยันได้ว่า วงจรมีความเป็นเชิงเส้นดี สามารถควบคุมค่าความต้านทานได้อย่างแม่นยำ มีโครงสร้างของวงจรง่ายและใช้ทรานซิสเตอร์น้อยเพียง 4 ตัว อีกทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้เป็นวงจรอื่น ๆ ได้เป็นอย่างดี

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยสยามและคณะผู้บริหารที่ให้โอกาส และให้การสนับสนุน จัดสรรทุนเพื่อทำการวิจัย พล.ท.ดร.สมพงษ์ ตุ่มสวัสดิ์ หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ผู้ส่งเสริมและให้แนวคิดใหม่ในทุก ๆ อย่าง สำหรับการทําวิจัย และ ผศ.ดร.พิพัฒน์ พรหมมี ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำ ทำให้บทความวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

## เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Banu and Y. Tsvividis, "Floating Voltage - Controlled Resistors in MOS Technology," *Electron. Lett.*, Vol.18, pp.678-679, July 1982.
- [2] R. Senani and D. R. Bhaskar, "A Simple Configuration for Realizing Voltage - Controlled Impedance," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, Vol.CAS-39, pp.52-59, Jan. 1992.
- [3] K. Nay and A. Budak, "A Variable Negative Resistance," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, Vol.CAS-32, pp.1193-1194, Jan. 1985.
- [4] I. S. Han and S. B. Park, Voltage-Controlled Linear Resistor by Two MOS Transistor and Its Application to Active RC Filter MOS Integration. *Proc. IEEE*, Vol. 72, pp.1655-1657, Nov. 1984.
- [5] Z. Wang , " Novel Electronically -Controlled Floating Resistors Using MOS Transistor Operating in Saturation," *Electron Lett.*, Vol.27, pp.188-189
- [6] K. Dejhan, P. Prommee, L. Yuttasukprasert, M. Somdulyakanok, A Compensated Temperature CMOS Voltage-Controlled Grounded Resistance Circuit. *Proc.of IEEE TENCON 2004*, Chiang Mai, Thailand, Nov. 21-24, 2004.