

บทที่ 3

วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันที่เกี่ยวข้องในการวิจัย โดยเนื้อหาประกอบด้วย บทนำ หลักการของวงจรที่นำเสนอ วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันที่นำเสนอและวงจรย่อย หลักการเบื้องต้นในการออกแบบวงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ วงจรทรานซิสเตอร์ที่เป็นความต้านทาน วงจรเลื่อนระดับแรงดัน วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันแบบสมบูรณ์ การวิเคราะห์หาค่าแรงดันอินพุตปฏิบัติงาน การวิเคราะห์หาค่าการตอบสนองทางความถี่ และบทสรุป

3.1 บทนำ

วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันเป็นวงจรหนึ่งที่มีการประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในระบบโทรคมนาคมและเครื่องมือวัด อาทิเช่น วงจรขยายสัญญาณ วงจรลดทอนสัญญาณ วงจรรองความถี่และวงจรกำเนิดสัญญาณ เป็นต้น วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันมีการนำเสนอมาโดยตลอด ซึ่งแต่ละวงจรมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับวิธีการในการออกแบบ ประวัติในการวิจัยแขนงนี้มีมายาวนาน เริ่มตั้งแต่การใช้ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์และเฟต จนมาถึงการใช้เทคโนโลยีซิลิคอน และเป็นที่นิยมแพร่หลายเป็นอย่างมาก มีผู้วิจัยหลายคนได้ออกแบบวงจรด้วยมอสเฟต และทำการสังเคราะห์เป็นความต้านทานขึ้นมาซึ่งเหมาะกับงานในแต่ละชนิด หัวข้อวิจัยนี้ได้เป็นการนำเสนอ วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์แบบซิลิคอนปรับค่าได้ด้วยแรงดัน ที่ประกอบขึ้นจากมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นแชนส์เมนต์ ทำงานในย่านไม้อิมิตัว การออกแบบในหัวข้อวิจัยนี้เน้นในเรื่องของวงจรไม่ซับซ้อนอุปกรณ์น้อย เหมาะที่จะสร้างเป็นวงจรรวม

3.2 หลักการของวงจรที่นำเสนอ

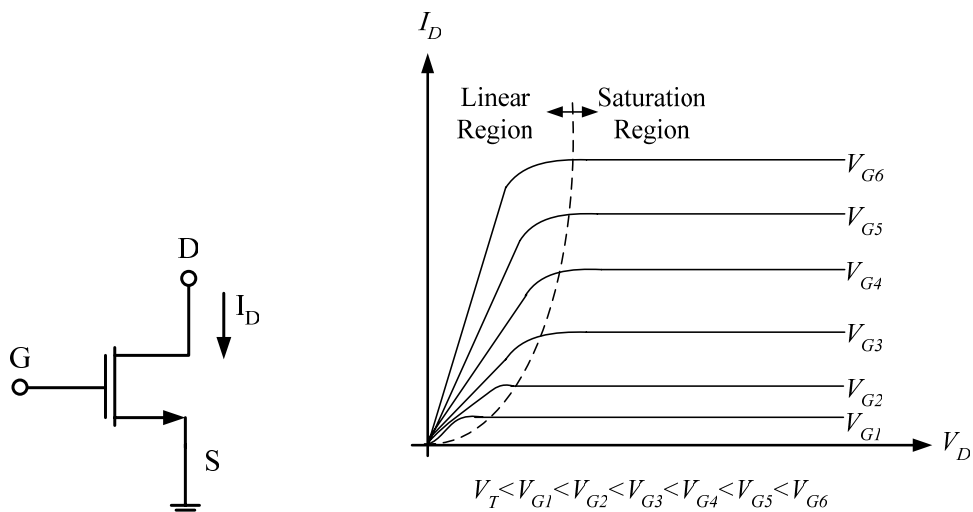
วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันในหัวข้อวิจัยนี้ได้นำเสนอหลักการหักล้างความไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นผลทำให้วงจรที่ได้เสนอมีคุณสมบัติเป็นความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน มีความเป็นเชิงเส้นสูง วงจรทั้งหมดในหัวข้อวิจัยนี้ถูกออกแบบด้วยเทคโนโลยีซิลิคอน

3.3 วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันที่นำเสนอละวงจรย่อย

ในการประมวลสัญญาณอนาล็อกได้มีการทำวิจัยมาอย่างยาวนาน และมีการพัฒนากันอย่างต่อเนื่องวงจรหนึ่งก็เห็นจะเป็นวงจรความต้านทานปรับค่าได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยหลักการที่ใช้ในอดีตจะใช้ทรานซิสเตอร์ต่อร่วมกับออปแอมป์ จนกลายเป็นการใช้ JFET และในปัจจุบันนิยมใช้มอสทรานซิสเตอร์เป็นหลัก โดยวงจรความต้านทานที่ออกแบบมานั้น สามารถแบ่งเป็น 2 พวกใหญ่ ๆ คือ วงจรความต้านทานชนิดต่อกราวด์ และวงจรความต้านทานชนิดลอยตัว โดยที่หัวใจสำคัญของวงจรความต้านทาน คือ มีความเป็นเชิงเส้น และปรับค่าได้กว้าง

3.3.1 หลักการเบื้องต้นในการออกแบบวงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน

จากมอสเฟตในภาพที่ 3.1 การทำงานของมอสเฟตจะอยู่ในย่าน (Ohmic Region) หรือ (Linear Region) ดังสมการที่ (3.1) นั้น สามารถที่จะประยุกต์นำมาสร้างเป็นวงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน



ภาพที่ 3.1 มอสเฟตและกราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสเดรนและแรงดันที่ขาเดรนและซอส

$$I_D = \mu_o C_{ox} \frac{W}{L} \left(V_{GS} - V_T - \frac{V_{DS}}{2} \right) V_{DS} \quad (3.1)$$

ในการออกแบบวงจรความต้านทานปรับค่าได้ด้วยแรงดัน ที่มีใช้กันอยู่ในวงจรรวมนั้น โดยส่วนมากจะมีการจัดแบ่งเป็น 2 พวกดังที่กล่าวมาแล้วนั้น นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยบางงานที่การทำงานในย่านอิ่มตัว (Saturation Region) ของมอสเฟตมาทำเป็นวงจรความต้านทานชนิดลอยตัวปรับค่าได้ด้วยแรงดัน ซึ่งก็มีประสิทธิภาพดีอีกชนิดหนึ่ง แต่โดยส่วนมากในงานวิจัยที่ออกมา มักจะใช้ในย่าน (Ohmic Region หรือ Linear Region) มาทำเป็นวงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน

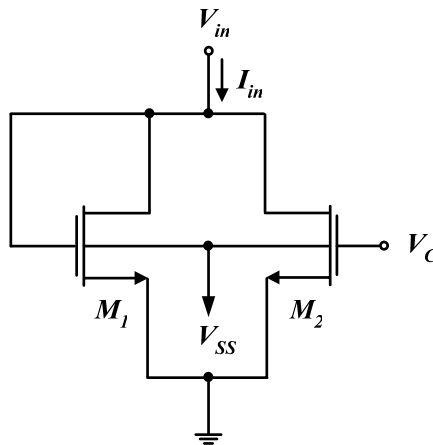
3.3.2 วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน

เมื่อปี 1984 วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ถูกนำเสนอโดย Han and Park [4] โดยใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัว ดังภาพที่ 3.2 ซึ่งการทำงานจะใช้หลักการหักล้างค่าความไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งกันและกัน โดยที่กระแสเดรนของทรานซิสเตอร์ทั้งสองทำงานในย่านไม่อิ่มตัว มีค่าดังสมการที่ (3.2)

$$I_{D1} = k_N \left(V_{in} - V_{TN} - \frac{V_{in}}{2} \right) V_{in} \quad (3.2)$$

และ

$$I_{D2} = k_N \left(V_C - V_{TN} - \frac{V_{in}}{2} \right) V_{in} \quad (3.3)$$



ภาพที่ 3.2 วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์

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

$$R_{eq} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{V_{in}}{I_{D1} + I_{D2}} = \frac{1}{k_N (V_C - 2V_{TN})} \quad (3.4)$$

จากภาพที่ 3.2 จะเห็นว่าทรานซิสเตอร์ M_1 จะไม่สามารถทำงานในย่านไม่อิ่มตัว (Ohmic Region) ได้ซึ่งทำให้สมการที่ (3.2) ไม่ถูกต้อง เนื่องจาก $V_{GS1} = V_{DS1}$ หรือ $(V_{GS} - V_{TN}) < V_{DS}$ ซึ่งทรานซิสเตอร์ M_1 จะทำงานในย่านอิ่มตัว (Saturation Region) สมการที่ถูกต้องจะเป็นสมการของมอสทรานซิสเตอร์ในย่านอิ่มตัวซึ่งจะมีค่าเท่ากับ

$$I_{D1} = \frac{k_N}{2} (V_{GS1} - V_{TN})^2 \quad (3.5)$$

ในกรณีนี้ทรานซิสเตอร์ M_2 สามารถทำงานในย่านไม่อิ่มตัว (Ohmic Region) ดังสมการที่ (3.3) ทำให้กระแสอินพุตจะมีค่าเท่ากับ

$$I_{in} = I_{D1} + I_{D2} = k_N \left[(V_C - 2V_{TN}) V_{in} + \frac{V_{TN}^2}{2} \right] \quad (3.6)$$

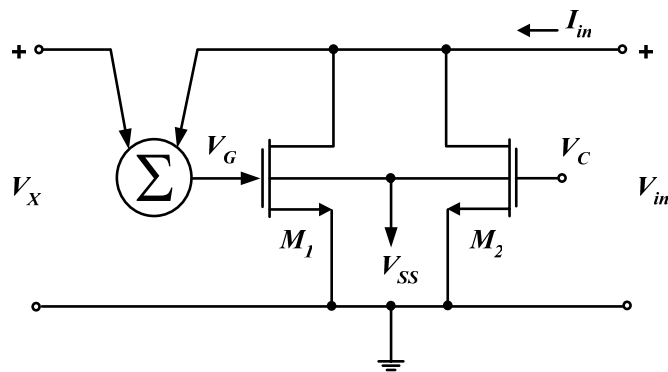
และเมื่อเขียนอยู่ในรูปของความต้านทานจะมีค่าเป็น

$$R_{eq} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{1}{k_N \left(V_C - 2V_{TN} + \frac{V_{TN}^2}{2V_{in}} \right)} \quad (3.7)$$

หัวข้อการวิจัยนี้จะเสนอวิธีการโดยใช้หลักการ จัดแรงดันไบอัสให้กับทรานซิสเตอร์ใหม่ ซึ่งใช้เทคนิคการเลื่อนระดับแรงดันของทรานซิสเตอร์ในย่านอิ่มตัว ให้ทำงานในย่านไม่อิ่มตัวทำให้วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันที่ได้มี คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นดี เมื่อทำการออกแบบให้ทรานซิสเตอร์ทำงานเป็นวงจรย่อย คือ วงจรเลื่อนระดับแรงดันแบบเลื่อนขึ้น (Voltage Level Shifter) ซึ่งวงจรย่อยทำหน้าที่เลื่อนระดับแรงดันไบอัสสำหรับทรานซิสเตอร์ที่เป็นความต้านทาน โดยทำงานย่านไม่อิ่มตัว

3.3.3 วงจรทรานซิสเตอร์ที่เป็นความต้านทาน

จากสมการที่ (3.7) จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานที่ได้จากวงจรภาพที่ 3.2 นั้น จะมีความไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ M_1 ทำงานในย่านอิ่มตัว ส่วน M_2 ทำงานในย่านไม่อิ่มตัว ดังนั้นเมื่อทราบปัญหาการทำงานของทรานซิสเตอร์ M_1 ให้ทำงานในย่านไม่อิ่มตัว ซึ่งทำได้โดยการเลื่อนระดับแรงดันไบอัสให้กับขาเกตของทรานซิสเตอร์ M_1 ให้มีเงื่อนไขเท่ากับ $(V_{GS1} - V_{TN}) > V_{DS1}$ การเลื่อนระดับแรงดันไบอัสดังกล่าวจะสามารถสร้างขึ้นได้จากวงจรย่อย ทำให้วงจรในภาพที่ 3.2 เปลี่ยนแปลงใหม่เป็นวงจรภาพที่ 3.3



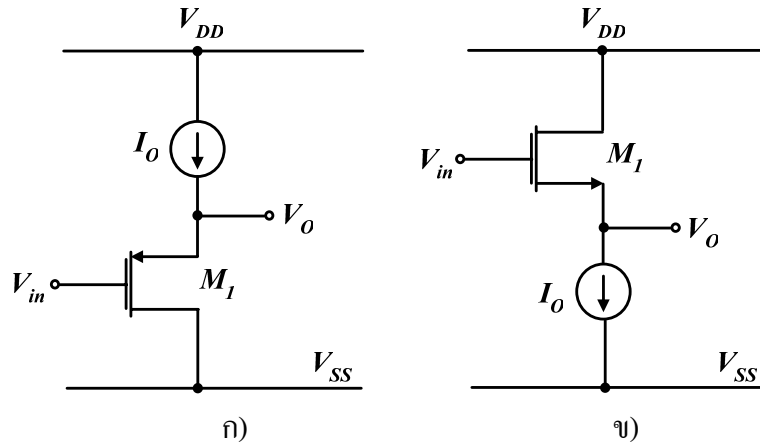
ภาพที่ 3.3 วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันที่นำเสนอ

วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันที่นำเสนอ จะเพิ่มในส่วนของการเลื่อนระดับแรงดันไบอัสให้กับขาเกตของทรานซิสเตอร์ M_1 โดยการเลื่อนระดับของวงจรย่อยจะต้องอยู่ภายในเงื่อนไข การทำงานดังนี้ $(V_{GS1} - V_{TN}) > V_{DS1}$ นั่นคือ $V_{G1} = V_{in} + V_x$ ซึ่งจากหลักการนี้สามารถทำให้ทรานซิสเตอร์ M_1 ทำงานในย่านไม่อิ่มตัวได้ ขณะที่กระแส drain ของทรานซิสเตอร์ M_2 จะมีค่าดังสมการที่ (3.3) เช่นเดิม

จากเงื่อนไขดังกล่าวสามารถนำไปออกแบบ วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันได้ โดยวงจรที่ออกแบบนี้จะประกอบด้วยวงจรย่อย คือ วงจรเลื่อนระดับแรงดันแบบเลื่อนขึ้น (Voltage Level Shifter Circuit)

3.3.4 วงจรเลื่อนระดับแรงดัน (Voltage Level Shifter Circuits)

วงจรเลื่อนระดับแรงดันที่ใช้ในหัวข้อวิจัยนี้เป็นวงจรที่ใช้อุปกรณ์เพียง 2 ตัว [5] คือ มอสทรานซิสเตอร์และแหล่งจ่ายกระแสคงที่อย่างละตัว และยังสามารถสร้างเป็นวงจรเลื่อนระดับทางด้านบวกและด้านลบ เพียงแต่เปลี่ยนชนิดของมอสทรานซิสเตอร์ และแหล่งจ่ายกระแสคงที่ที่แสดงได้ดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 วงจรเลื่อนระดับแรงดัน ก) ด้านบวก ข) ด้านลบ

มอสทรานซิสเตอร์ในภาพที่ 3.4 จะทำงานในย่านอิ่มตัว จากวงจรในภาพ ก) นั้น สามารถเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุต และเอาต์พุตได้ดังสมการที่ (3.8)

$$V_O = V_{in} + V_{kP} \quad (3.8)$$

โดยที่
$$V_{kP} = \sqrt{\frac{I_O}{\beta_P}} + V_{TP} \quad , \quad \beta_P = \frac{\mu_P C_{OX}}{2} \left(\frac{W}{L} \right)$$

และ V_{TP} คือ แรงดันเทรชโฮลด์ของมอสทรานซิสเตอร์ PMOS ส่วนในภาพที่ 3.4 (ข) นั้น สามารถเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตได้ดังสมการที่ (3.9)

$$V_O = V_{in} - V_{kN} \quad (3.9)$$

โดยที่
$$V_{kN} = \sqrt{\frac{I_O}{\beta_N}} + V_{TN} \quad , \quad \beta_N = \frac{\mu_N C_{OX}}{2} \left(\frac{W}{L} \right)$$

และ V_{TN} คือแรงดันเทรชโฮลด์ของมอสทรานซิสเตอร์ NMOS ส่วนผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรเลื่อนระดับแรงดัน จะขึ้นอยู่กับค่าตัวเก็บประจุระหว่างขาเกตและซอสเป็นหลักเช่นกัน ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรเลื่อนระดับแรงดันโดยใช้มอสทรานซิสเตอร์สามารถหาได้จากการใช้แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก (Small Signal Model) ซึ่งผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรในภาพที่ 3.4 จะมีค่าเท่ากับ

$$\frac{V_o(s)}{V_{in}(s)} = \frac{g_{d1} + g_o + g_{m1} + sC_{gs1}}{g_{m1} + sC_{gs1}} \quad (3.10)$$

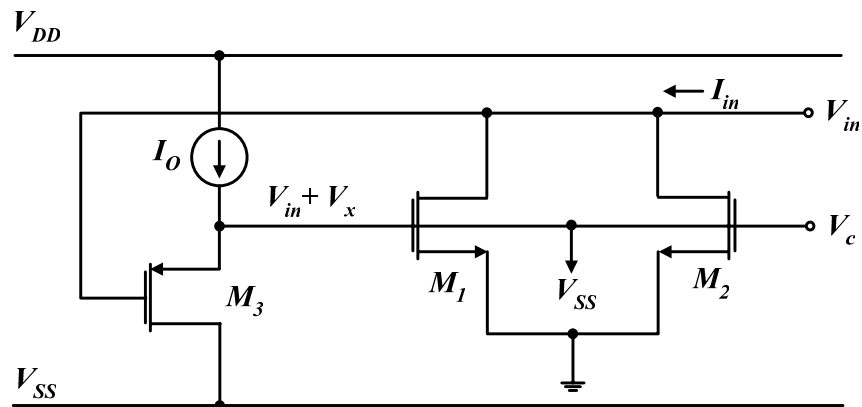
ซึ่งโดยปกติแล้ว $g_{d1}, g_o \ll g_m$ ดังนั้น

$$\frac{V_o(s)}{V_{in}(s)} \approx 1 \quad (3.11)$$

ซึ่งก็หมายความว่า ในส่วนของวงจรเลื่อนระดับแรงดันโดยใช้มอสทรานซิสเตอร์ จะมีการตอบสนองทางความถี่สูงมากนั่นเอง โดยที่ g_{m1} คือ ค่าความนำ (Transconductance) ของทรานซิสเตอร์ M_1 ส่วน C_{gs1} คือ ค่าประจุระหว่างขาเกตและซอสของทรานซิสเตอร์ M_1 และ g_{d1} คือ ค่าของความนำ (Conductance) ระหว่างขาเดรน และซอสของทรานซิสเตอร์ M_1 นั่นเอง

3.4 วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันโดยใช้มอสแบบสมบูร์น

วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันโดยใช้มอสแบบสมบูร์น ที่ได้นำเสนออาศัยคุณสมบัติของวงจรร้อย คือ วงจรเลื่อนระดับแรงดันมาประกอบกันดังภาพที่ 3.5 และเมื่อนำภาพที่ 3.5 มาทำการจัดวงจรใหม่ได้ดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.5 วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันโดยใช้มอส

จากสมการที่ (3.3) และสมการที่ (3.13) สามารถเขียนสมการของความต้านทานของวงจรถัดสมการ

$$R_{eq} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{V_{in}}{I_{D1} + I_{D2}} = \frac{1}{k_N (V_C + V_X - 2V_{TN})} \quad (3.14)$$

จากสมการที่ (3.14) แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึง ความเป็นเชิงเส้นของความต้านทาน ซึ่งเกิดจากการเลื่อนระดับแรงดันไบอัสให้กับขาเกตของทรานซิสเตอร์ M_1 ด้วยการเลื่อนระดับเพิ่มขึ้นของแรงดันอินพุต โดยอัตราการเลื่อนระดับของวงจรถะขึ้นอยู่กับกระแส I_{in} จะต้องสูงมากพอที่จะทำให้เกิดเงื่อนไขของทรานซิสเตอร์ M_1 ทำงานในย่านไม่อิ่มตัว

3.5 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงจรถัด

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงจรถัดทำได้โดยแบ่งเป็น 2 ส่วนได้ดังนี้ คือการวิเคราะห์ย่านอินพุตปฏิบัติงานของวงจรถัด สามารถทำได้โดยพิจารณาจากวงจรถัดเลื่อนระดับแรงดัน และการวิเคราะห์การตอบสนองทางความถี่

3.5.1 การวิเคราะห์อินพุตปฏิบัติงานทางด้านบวก

วงจรถัดเลื่อนระดับแรงดัน จะเป็นวงจรถัดที่ใช้สำหรับอธิบายถึงย่านอินพุตปฏิบัติงานซึ่งจะเป็นวงจรถัดเลื่อนระดับแรงดันของแรงดันอินพุต ซึ่งจะต้องทำให้มอสทรานซิสเตอร์ของวงจรถัดเลื่อนระดับแรงดัน ทำงานอยู่ในย่านอิ่มตัวอย่างถูกต้อง

จากสมการที่ (3.12)-(3.14) ด้วยเงื่อนไขของ $V_x = \sqrt{\frac{I_O}{\beta_P}} + |V_{TP}|$ โดยจะต้องตั้งค่าของ V_x ให้มีค่าเป็น $V_x > V_{TN}$ ด้วยเงื่อนไขของทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในย่านอิ่มตัวสามารถบอกได้ถึงค่าของย่านอินพุตปฏิบัติงานทางด้านบวกจะมีค่าเป็น

$$V_{in} < \left(V_{DD} - 2\sqrt{\frac{I_O}{\beta_P}} - |V_{TP}| \right) \quad (3.15)$$

หรือเขียนอยู่ในรูปของ V_x จะมีค่าเป็น

$$V_{in} < (V_{DD} - 2V_x + |V_{TP}|) \quad (3.16)$$

3.5.2 การวิเคราะห์อินพุตปฏิบัติงานทางด้านลบ

ด้วยหลักการเดียวกันกับการวิเคราะห์อินพุตปฏิบัติงาน ของวงจรเลื่อนระดับแรงดันทางด้านบวก ย่านแรงดันอินพุตปฏิบัติงานทางด้านลบ ก็จะมีค่าเท่ากับ

$$V_{in} > (V_{SS} - |V_{TP}|) \quad (3.17)$$

จากสมการที่ (3.15)-(3.17) สามารถอธิบายถึงย่านอินพุตปฏิบัติงานของวงจรได้เป็น

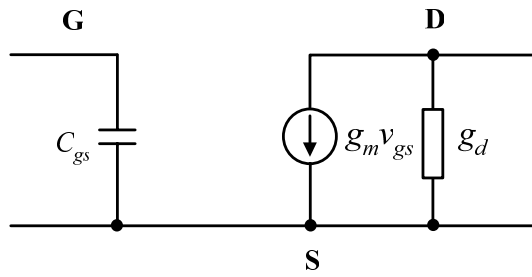
$$(V_{SS} - |V_{TP}|) < V_{in} < (V_{DD} - 2V_x + |V_{TP}|) \quad (3.18)$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องลงในสมการที่ (3.18) โดยกำหนดให้ V_x มีค่าเท่ากับ $V_{TN} = 1.07V, V_{SS} = -5V, |V_{TP}| = 0.8V$ ค่าของช่วงแรงดันอินพุตปฏิบัติงานจะมีค่าเท่ากับ

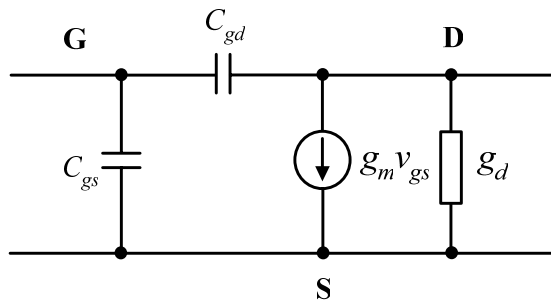
$$-5.8 < V_{in} < 3.66 \quad (3.19)$$

3.5.3 การวิเคราะห์การตอบสนองทางความถี่

ในการออกแบบวงจรความถี่ตามแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน ควรคำนึงถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของวงจร เช่น ความถี่ตอบสนอง ช่วงปฏิบัติงาน กำลังที่สูญเสีย เพราะคุณสมบัติเหล่านี้สามารถบ่งบอกได้ว่าวงจรจะมีประสิทธิภาพในการทำงานดี หรือไม่อย่างไร ในการหาช่วงความถี่ตอบสนองนั้น จะใช้แบบจำลองขนาดเล็ก (Small Signal Model) ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสโดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับค่าของแรงดัน (Voltage Control Current Source) และตัวเก็บประจุที่เสมือนกับว่ามีประจุติด (Stored Charge) ต่ออยู่ระหว่างขั้วต่อ (Junction) ของมอสทรานซิสเตอร์ เพื่อที่จะทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ของวงจรขอสมมติให้ g_m, g_d, C_{gs} ของมอสทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในย่านอิมิตัวมีค่าเท่ากันหมด และเนื่องจากค่าของ $g_m \gg g_d$ ทำให้ในเทอมที่มีค่าของ g_m ต่ออยู่ร่วมกับค่าของ g_d สมมติว่าให้ตัดค่าของ g_d ออกไปแต่ค่าของ g_m, g_d, C_{gs} ของมอสทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในย่านไม้อิมิตัวจะมีค่าไม่เท่ากับมอสทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในย่านอิมิตัว ภาพที่ 3.7 (ก) และ (ข) แสดงวงจรสมมูลของมอสทรานซิสเตอร์ที่ทำงานอยู่ในย่านอิมิตัวและย่านไม้อิมิตัวตามลำดับ



ก) วงจรสมมูลของมอสทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในย่านอิ่มตัว



ข) วงจรสมมูลของมอสทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในย่านไม่อิ่มตัว

ภาพที่ 3.7 วงจรสมมูลของมอสทรานซิสเตอร์ในการวิเคราะห์หาค่าการตอบสนองทางความถี่

การวิเคราะห์หาค่าของการตอบสนองทางความถี่จะทำการวิเคราะห์ห้วงจรด้วยกัน 2 ส่วน คือ ในส่วนของวงจรเลื่อนระดับแรงดันและในส่วนของวงจรความต้านทานในแบบฟังก์ชันจุดขับ ซึ่งค่าการตอบสนองทางความถี่ คือ โพลตัวที่ต่ำที่สุด (Dominant Pole) ซึ่งมีค่าเท่ากับ

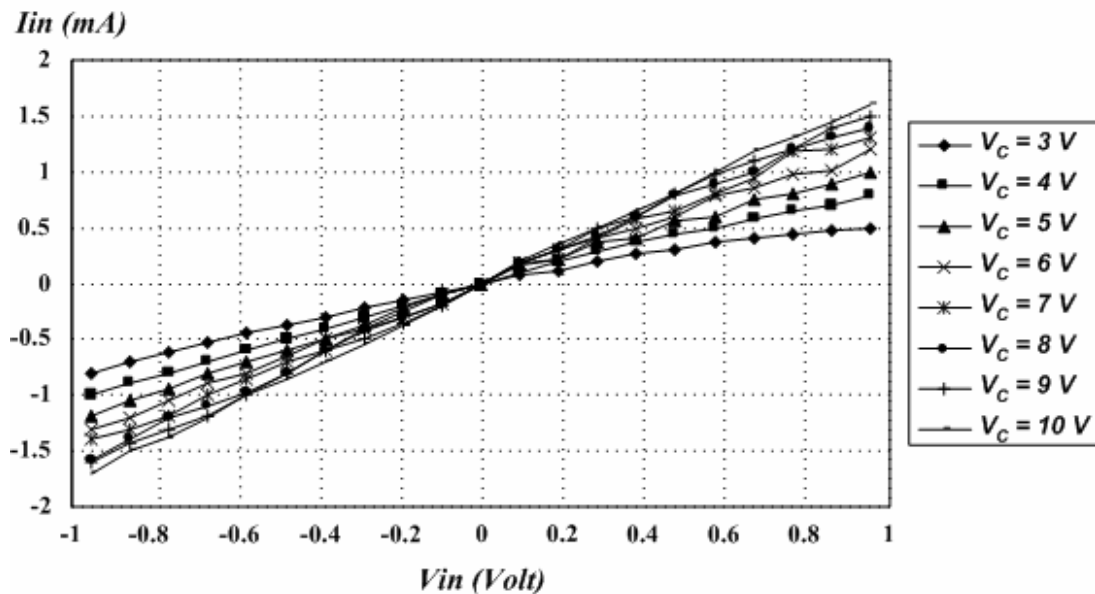
$$f_{-3dB} \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g_{m3}(g_{m1} + g_{d1} + g_{d3} + g_{d4})}{C_p C_{gs1}}} \quad (3.20)$$

$$f_{-3dB} \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3.62 \times 10^{-4} (0 + 8.51 \times 10^{-4} + 8.53 \times 10^{-8} + 2.74 \times 10^{-4})}{(2.625 \times 10^{-12})(6.05 \times 10^{-13})}}$$

$$f_{-3dB} \approx 80.598 \text{ MHz} \quad (3.21)$$

3.6 ผลการทดลอง และผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice

จากการวิเคราะห์สมการที่ (3.14) เพื่อหาค่าคุณสมบัติทางไฟตรงของวงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน เมื่อนำสมการที่ (3.14) มาทำการพล็อตกราฟสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 คุณสมบัติทางไฟตรงของวงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์จากการคำนวณ

การจำลองการทำงาน โดยการออกแบบวงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน สามารถยืนยันคุณสมบัติและประสิทธิภาพของวงจรได้ด้วยโปรแกรม PSpice เพื่อที่จะยืนยันถึงประสิทธิภาพในด้านความเป็นเชิงเส้นของวงจรด้วยการเลียนแบบการทำงาน และการต่อวงจรจริง

การเลียนแบบการทำงานจากภาพที่ 3.6 ด้วยโปรแกรม PSpice โดยใช้แบบจำลอง (Model) T14Y MOSIS Level 3 ขนาด $0.25\ \mu\text{m}$ โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ แสดงในตารางที่ 3.1 และใช้ค่าความกว้างต่อความยาว (W/L) แสดงในตารางที่ 3.2 และขนาดของแรงดันไบอัสที่ใช้แสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของมอสทรานซิสเตอร์ ของ T14Y MOSIS $0.25\mu m$

<i>Parameter</i>	<i>Value</i>	<i>Unit</i>
V_{TN}	1.07	V
V_{TP}	0.8	V
$\mu_N C_{OX}$	250.1048	$\mu A/V^2$
$\mu_P C_{OX}$	51.94153	$\mu A/V^2$

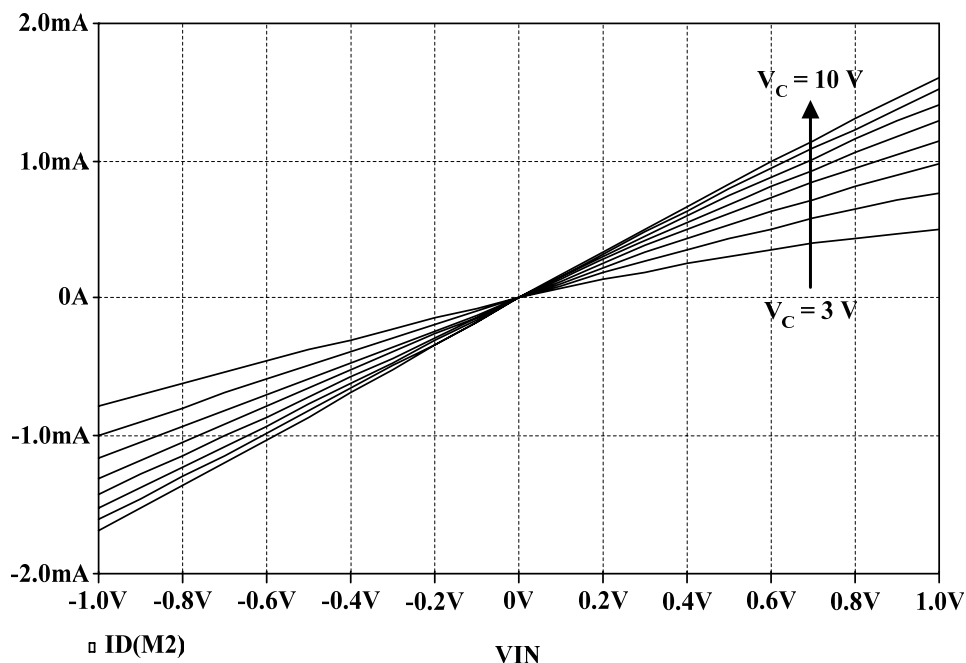
ตารางที่ 3.2 แสดงค่า (W/L) ของมอสทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในวงจรความต้านทานที่นำเสนอ

<i>Transistor</i>	<i>Aspect Ratio</i>
M_1, M_2	$20\mu m/10\mu m$
M_3, M_4	$50\mu m/10\mu m$

ตารางที่ 3.3 ขนาดของแรงดันไบอัสมอสทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในวงจรความต้านทานที่นำเสนอ

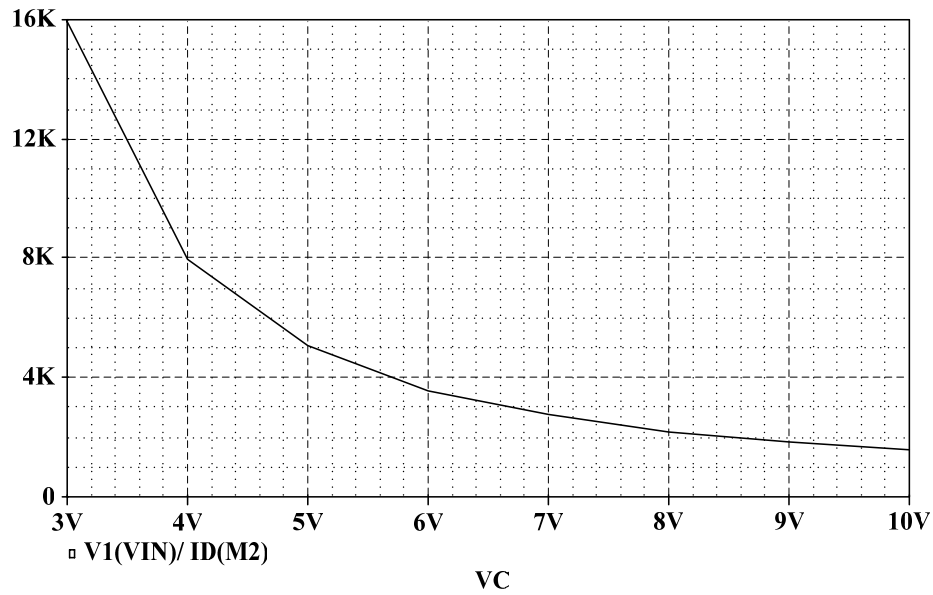
<i>ชนิดของแรงดัน</i>	<i>ค่าของแรงดัน</i>
แหล่งจ่ายแรงดัน	$\pm 5V$
แรงดันไบอัส (V_{G4})	1V
แรงดันอินพุต (V_{in})	$\pm 1V$
แรงดันควม (V_C)	3V – 10V

ผลการทดสอบการจำลองการทำงานและคุณสมบัติทางไฟฟ้าตรง ของวงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน ที่นำเสนอในหัวข้อวิจัย สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 คุณสมบัติทางไฟตรงของวงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน
จากการเขียนแบบการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice

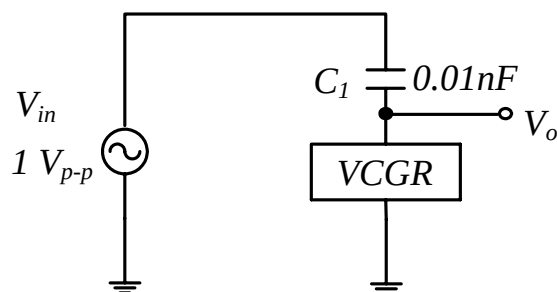
จากภาพที่ 3.9 แสดงคุณสมบัติทางไฟตรงของวงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันที่นำเสนอ โดยแปรค่าแรงดัน (V_C) ตั้งแต่ 3V ถึง 10V และแสดงการทำงานของอินพุตตั้งแต่ (V_{IN}) ตั้งแต่ $-1V$ ถึง $1V$ จากการทดสอบแสดงให้เห็นได้ว่าวงจรที่นำเสนอนี้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณในภาพที่ 3.8 เป็นการยืนยันว่าวงจรมีการทำงานถูกต้องตามทฤษฎี จากภาพที่ 3.9 ซึ่งจะเห็นได้ว่าวงจรมีช่วงที่มีย่านอินพุตปฏิบัติงานที่ค่อนข้างกว้างและมีค่าสอดคล้องกับการคำนวณตามสมการที่ (3.14) อีกทั้งยังมีย่านของการควบคุมที่กว้างเช่นเดียวกัน มีความเป็นเชิงเส้นค่อนข้างสูงและจะมีค่าความเป็นเชิงเส้นสูงมากขึ้นเมื่อ (V_C) มีค่าสูงขึ้น ในช่วงแรงดัน (V_C) ที่มีค่าน้อยๆ ค่าความต้านทานจะมีค่าความเป็นเชิงเส้นต่ำ เนื่องจากแรงดัน (V_C) มีค่าต่ำ ๆ นั้น จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าของแรงดันเทรชโฮลด์ของมอสทรานซิสเตอร์ ทำให้มอสทรานซิสเตอร์ยังทำงานในย่านไม่อิ่มตัวไม่เต็มที่นั่นเอง ซึ่งในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวทำได้โดยการเพิ่มกระแสไบอัส (I_{in}) เพื่อให้สัญญาณแรงดันขั้วระดับให้สูงขึ้นมากกว่า (V_{TN}) และเพิ่มแรงดัน (V_C) ให้สูงกว่าค่าแรงดัน (V_{TN}) ซึ่งเป็นการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นนั่นเอง



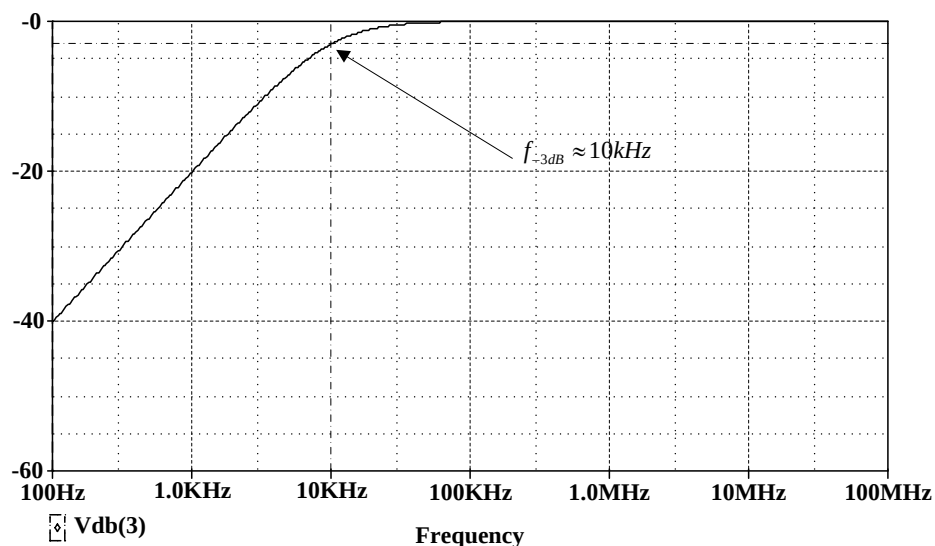
ภาพที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับแรงดันควมคุม (V_C)

จากภาพที่ 3.10 แสดงค่าความต้านทานของวงจรเมื่อแรงดันควมคุม (V_C) เปลี่ยนแปลงจาก 3V ถึง 10V จากกราฟจะแสดงให้เห็นว่าเมื่อแรงดัน (V_C) มีค่าสูงขึ้นค่าความต้านทานของวงจรจะลดลงตามสมการที่ (3.14) และมีความเป็นเชิงเส้นมากขึ้นเมื่อแรงดัน (V_C) มีค่าสูงขึ้น

สำหรับการทดลองเพื่อดูย่านความถี่การทำงาน หรือผลตอบสนองความถี่ใช้งานของวงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันที่นำเสนอ ทำได้โดยนำวงจรที่นำเสนอตามภาพที่ 3.6 มาประกอบเป็นวงจรที่มีลักษณะดังรูปที่ 3.11 โดยกำหนดให้ V_{in} เป็นสัญญาณรูปไซน์ที่มีขนาด $1V_{p-p}$ ค่าของ (VCGR) ที่มีค่าแรงดันควมคุม ($V_C = 6V$) และค่า ($C_1 = 0.01nF$) จากนั้นทำการวัดผลตอบสนองความถี่ของวงจร รูปที่ 3.12 แสดงผลการตอบสนองความถี่ของวงจรที่นำเสนอมีค่าผลตอบสนองความถี่ประมาณ $f_{-3dB} \approx 10kHz$



ภาพที่ 3.11 วงจรที่ใช้ทดสอบเพื่อหาผลตอบสนองความถี่ของวงจร (VCGR)



ภาพที่ 3.12 ผลตอบสนองความถี่ของวงจร (VCGR) ที่นำเสนอ

3.7 บทสรุป

วงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดัน ในหัวข้อวิจัยครั้งนี้ โดยใช้หลักการหักล้างความไม่เป็นเชิงเส้นของทรานซิสเตอร์แบบซีมอสในย่านไม่อิ่มตัว เมื่อทำการออกแบบให้ทรานซิสเตอร์ทำงานเป็นวงจรย่อยทั้งในย่านไม่อิ่มตัว ประกอบด้วย วงจรเลื่อนระดับแรงดัน โดยที่วงจรย่อยนี้ทำหน้าที่เป็นวงจรไบอัสให้กับทรานซิสเตอร์ที่เป็นความต้านทานซึ่งทำงานในย่านไม่อิ่มตัวและหักล้างความไม่เป็นเชิงเส้นออกไป ผลจำลองการทำงานของวงจรที่ได้มีคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นดี โดยวงจรความต้านทานแบบต่อกราวด์ปรับค่าได้ด้วยแรงดันนี้ใช้มอสทรานซิสเตอร์ทั้งหมด 4 ตัว ซึ่งประกอบด้วย NMOS จำนวน 2 ตัว และ PMOS จำนวน 2 ตัว สำหรับวงจรย่อย ผลการจำลองการทำงานอาศัยด้วยโปรแกรม PSpice โดยใช้แบบจำลอง (Model) ของ T14Y MOSIS Level 3 ขนาด $0.25\mu\text{m}$