

บทที่ 3

หลักการและวงจรย่อยที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

3.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการของของวงจรตรวจจับค่าแรงดันคั่นหรือกระแสสูงสุดและต่ำสุดเพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับทำความเข้าใจ วงจรตรวจกับค่าแรงดันสูงสุดและต่ำสุดที่ใช้อุปกรณ์แอ็กทิฟเป็นพื้นฐานคือ ใช้วงจรโอทีเอ ใช้วงจรสายพานกระแส จึงเป็นวงจรที่หยิบยกมาเพื่ออธิบายถึงหลักการของวงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุดและต่ำสุดดังกล่าว หลังจากนั้นจะกล่าวถึงวงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุดและต่ำสุดแบบหลายอินพุตที่ออกแบบโดยใช้ทรานซิสเตอร์ ต่อมาจะกล่าวถึงวงจรย่อยที่ใช้เป็นส่วนประกอบในการออกแบบวงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุดและต่ำสุดที่จะนำเสนอในบทที่ 4 และ 5 วงจรที่จะกล่าวถึงได้แก่ วงจรเลื่อนระดับแรงดัน วงจรสะท้อนกระแส วงจรกันชนป้อนกลับกระแสซึ่งเนื้อหาต่างๆ มีดังต่อไปนี้

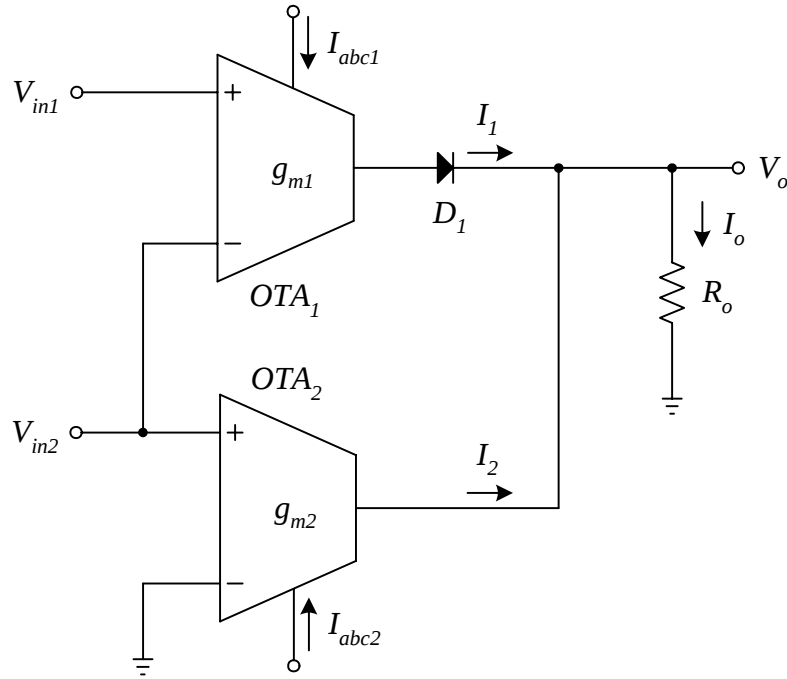
3.2 หลักการของวงจรตรวจจับค่าแรงดันต่ำสุดและสูงสุด

3.2.1 วงจรตรวจจับค่าแรงดันต่ำสุดและสูงสุดใช้วงจรโอทีเอ

วงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุดที่ใช้โอทีเอ (Operational Transconductance Amplifier: OTA) แสดงได้ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งเป็นวงจรที่นำเสนอใน [3] วงจรประกอบด้วยวงจรโอทีเอ 2 วงจร ไดโอด 1 ตัว และตัวต้านทาน 1 ตัว (ตัวต้านทานอาจจะแทนได้ด้วยวงจรโอทีเอ 1 วงจร) การทำงานของวงจรมีดังนี้ OTA_1 และ D_1 ทำหน้าที่เป็นวงจรจำกัดกระแส ตัวต้านทาน R_O ทำหน้าที่แปลงค่ากระแส I_O เป็นแรงดัน V_{out} ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ของตัวโอทีเอสามารถควบคุมได้ด้วยกระแสไบอัส ถ้าวงจรโอทีเอถูกสร้างด้วยมอสทรานซิสเตอร์ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์จะเป็นสัดส่วนกับรากที่สองของ I_{out} แต่ถ้าถูกสร้างด้วยไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์จะแปรผันตรงกับ I_{abc} วงจรโอทีเอคือวงจรขยายค่าทรานส์คอนดักแตนซ์เมื่อป้อนแรงดันเข้าที่อินพุต เอาท์พุตที่ได้คือกระแสซึ่งเป็นที่รู้กันดีว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันอินพุต (V_{in}) และกระแสเอาท์พุต (I_{out}) ของวงจรโอทีเอสามารถเขียนได้คือ [15]

$$I_{out} = g_m (V_{in+} - V_{in-}) \quad (3.1)$$

โดยที่ V_{in+} คืออินพุต Non-inverting ส่วน V_{in-} คืออินพุต Inverting และ g_m คือค่าทรานส์คอนดักแตนซ์หรือค่าความนำของโอทีเอ



รูปที่ 3.1 วงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุดโดยใช้วงจรโอทีเอ

จากวงจรในรูปที่ 3.1 จะสามารถกำหนดสมการได้คือ

$$I_o = I_1 + I_2 \quad (3.2)$$

และ

$$V_o = I_o R_o \quad (3.3)$$

จากคุณสมบัติของไดโอด D₁ ค่ากระแส I₁ จะสามารถกำหนดได้คือ

$$I_1 = \begin{cases} 0 & ; V_{in1} \leq V_{in2} \\ g_{m1}(V_{in1} - V_{in2}) & ; V_{in1} > V_{in2} \end{cases} \quad (3.4)$$

พิจารณาในกรณีที่ $V_{in1} < V_{in2}$ จะสามารถเขียนสมการได้คือ

$$I_o = g_{m2} V_{in2} \quad (3.5)$$

เมื่อแทนสมการที่ (3.5) ลงในสมการที่ (3.3) จะได้สมการ

$$V_o = g_{m2} R_o V_{in2} \quad (3.6)$$

พิจารณาในกรณีที่ $V_{in1} > V_{in2}$ จะสามารถเขียนสมการได้คือ

$$I_o = g_{m1} V_{in1} \quad (3.7)$$

เมื่อแทนสมการที่ (3.7) ลงในสมการที่ (3.3) จะได้สมการ

$$V_o = g_{m1} R_o V_{in1} \quad (3.8)$$

จากสมการที่ (3.6) และ (3.8) จะเห็นว่าวงจรในรูปที่ 3.1 เป็นวงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุดระหว่างอินพุต V_{in1} และ V_{in2} และถ้ากำหนดให้ $g_{m1} = g_{m2} = 1/R_o$ จะสามารถเขียนสมการได้ว่า

$$V_o = \max(V_{in1}, V_{in2}) = \begin{cases} V_{in2} & ; V_{in1} \leq V_{in2} \\ V_{in1} & ; V_{in1} > V_{in2} \end{cases} \quad (3.9)$$

รูปที่ 3.2 คือวงจรตรวจจับค่าแรงดันต่ำสุด วงจรใช้วงจรโอทีเอ 2 วงจรและไดโอด 2 ตัวทำหน้าที่เป็นวงจรจำกัดกระแส โดย OTA1 และ D1 ทำหน้าที่เป็นวงจรจำกัดกระแสแบบลบ ส่วน R_o ทำหน้าที่แปลงกระแส I_o เป็นแรงดัน V_o จากวงจรในรูปที่ 3.2 จะสามารถกำหนดสมการได้คือ

$$I_3 = I_2 - I_1 \quad (3.10)$$

หรือ

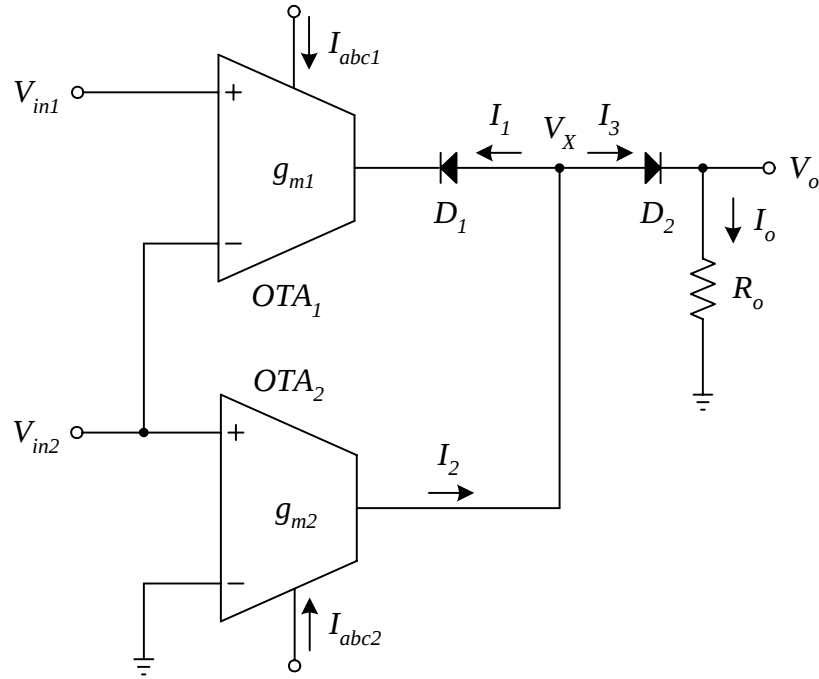
$$I_3 = g_{m2} V_{in2} - I_1 \quad (3.11)$$

ถ้ากำหนดให้ V_x มีค่ามากกว่า V_o

$$V_o = (g_{m2} V_{in2} - I_1) R_o \quad (3.12)$$

จากคุณสมบัติของไดโอด D_1 กระแส I_1 จะสามารถกำหนดได้คือ

$$I_1 = \begin{cases} g_{m1} (V_{in2} - V_{in1}) & ; V_{in1} < V_{in2} \\ 0 & ; V_{in1} \geq V_{in2} \end{cases} \quad (3.13)$$



รูปที่ 3.2 วงจรตรวจจับค่าแรงดันต่ำสุดโดยใช้วงจรโอทีเอ

จากคุณสมบัติของไดโอด D_2 ความสัมพันธ์ของกระแส I_3 และ I_o จะสามารถเขียนได้คือ

$$I_o = \begin{cases} 0 & ; V_X \leq V_o \\ g_{m2}V_{in2} - I_1 & ; V_X > V_o \end{cases} \quad (3.14)$$

พิจารณาในกรณีที่ $V_{in1} < V_{in2}$ จะสามารถเขียนสมการได้คือ

$$V_o = (g_{m2}V_{in2} - g_{m1}(V_{in2} - V_{in1}))R_o \quad (3.15)$$

กำหนด $g_{m1} = g_{m2} = g_m$ จะได้เอาท์พุทคือ

$$V_o = g_m R_o V_{in1} \quad (3.16)$$

พิจารณาในกรณีที่ $V_{in1} > V_{in2}$ จะสามารถเขียนสมการได้คือ

$$V_o = g_{m1} R_o V_{in2} \quad (3.17)$$

จากสมการที่ (3.16) และ (3.17) จะเห็นว่าวงจรในรูปที่ 3.2 เป็นวงจรตรวจับค่าแรงดันต่ำสุดระหว่างอินพุต V_{in1} และ V_{in2} และถ้ากำหนดให้ $g_{m1}=g_{m2}=1/R_o$ จะสามารถเขียนสมการได้ว่า

$$V_o = \min(V_{in1}, V_{in2}) = \begin{cases} V_{in1} & ; V_{in1} < V_{in2} \\ V_{in2} & ; V_{in1} \geq V_{in2} \end{cases} \quad (3.18)$$

3.2.2 วงจรตรวจับค่าแรงดันสูงสุดและต่ำสุดใช้วงจรสายพานกระแส

วงจรตรวจับค่าแรงดันสูงสุดแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 วงจรประกอบด้วยวงจรสายพานกระแส 1 วงจร ไดโอด 1 ตัว และตัวต้านทาน 3 ตัว จากคุณสมบัติของวงจรสายพานกระแสคือ $V_x=V_y$ และ $I_z=I_x$ เมื่อ V_x และ V_y คือแรงดันที่ขั้ว X และ Y ตามลำดับ ในขณะที่ I_z และ I_x คือกระแสที่ไหลที่ขั้ว Z และ X ตามลำดับ เมื่อใช้คุณสมบัติของวงจรสายพานกระแสดังกล่าว จะได้ว่า

$$I_x = \frac{V_{in2} - V_{in1}}{R_1} \quad (3.19)$$

จากคุณสมบัติของวงจรสายพานกระแส $I_x=I_z$ ถ้าค่ากระแส I_z มีค่าเป็นลบ ($V_{in1} > V_{in2}$) ไดโอด D_1 จะได้รับไบอัสตรงทำให้ D_1 นำกระแส ทำให้เกิดกระแส I_o ไหลในทิศทางตรงกันข้าม เมื่อค่ากระแส I_z มีค่าเป็นบวก ($V_{in1} < V_{in2}$) ไดโอด D_1 จะได้รับไบอัสกลับทำให้ไดโอด D_2 ไม่ทำงานจากการทำงานดังกล่าวสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

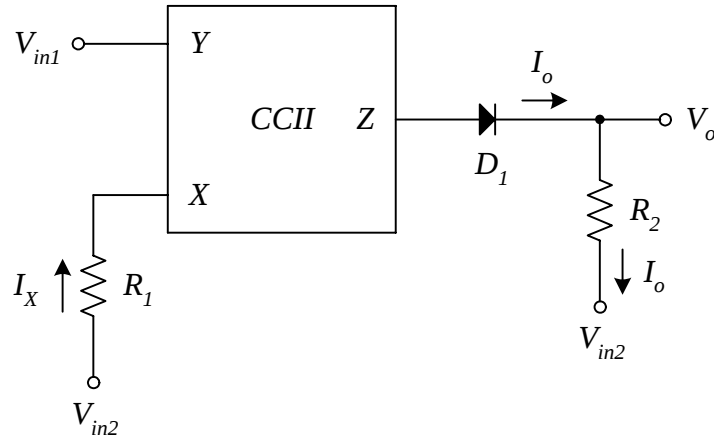
$$I_o = \begin{cases} 0 & ; V_{in1} \leq V_{in2} \\ -I_z = -I_x & ; V_{in1} > V_{in2} \end{cases} \quad (3.20)$$

เมื่อ

$$V_o = I_o R_2 + V_{in2} \quad (3.21)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (3.21) ด้วยสมการ (3.20) จะได้

$$V_o = \begin{cases} V_{in2} = V_{in1} & ; V_{in1} \leq V_{in2} \\ \left(\frac{V_{in1} - V_{in2}}{R_1} \right) R_2 + V_{in2} & ; V_{in1} > V_{in2} \end{cases} \quad (3.22)$$



รูปที่ 3.3 วงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุดโดยใช้วงจรสายพานกระแส

จากสมการที่ (3.22) เมื่อกำหนด $R_1=R_2$ จะกำหนดคุณสมบัติวงจรในรูปที่ 3.3 ได้ว่า

$$V_o = \begin{cases} V_{in2} ; V_{in1} \leq V_{in2} \\ V_{in1} ; V_{in1} > V_{in2} \end{cases} \quad (3.23)$$

วงจรในรูปที่ 3.4 คือวงจรตรวจจับค่าแรงดันต่ำสุดโดยใช้วงจรสายพานกระแส วงจรนี้ใช้อุปกรณ์เท่ากับวงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุดในรูปที่ 3.3 เมื่อใช้คุณสมบัติของวงจรสายพานกระแสจะสามารถหาสมการได้ว่า

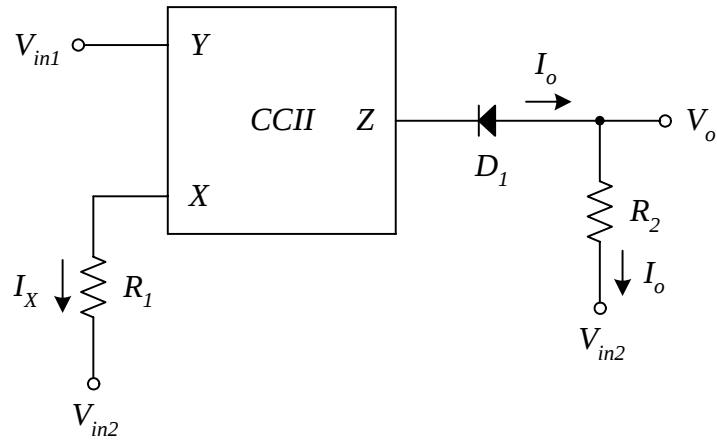
$$I_X = \frac{V_{in2} - V_{in1}}{R_1} \quad (3.24)$$

ไดโอด D_1 จะทำงานเมื่อกระแส I_Z มีค่าเป็นบวก ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_Z กับ I_o คือ

$$I_o = \begin{cases} I_Z ; V_{in1} < V_{in2} \\ 0 ; V_{in1} \geq V_{in2} \end{cases} \quad (3.25)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (3.24) ด้วยสมการ (2.25) จะได้

$$I_o = \begin{cases} \frac{V_{in1} - V_{in2}}{R_1} ; V_{in1} < V_{in2} \\ 0 ; V_{in1} \geq V_{in2} \end{cases} \quad (3.26)$$



รูปที่ 3.4 วงจรตรวจจับค่าแรงดันต่ำสุดโดยใช้วงจรสายพานกระแส

เมื่อ

$$V_o = V_{in2} - I_o R_2 \quad (3.27)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (3.27) ด้วยสมการ (3.26) จะได้

$$V_o = \begin{cases} V_{in2} - R_2 \left(\frac{V_{in1} - V_{in2}}{R_1} \right) & ; V_{in1} < V_{in2} \\ V_{in2} & ; V_{in1} \geq V_{in2} \end{cases} \quad (3.28)$$

จากสมการที่ (3.28) เมื่อกำหนด $R_1 = R_2$ จะกำหนดคุณสมบัติวงจรในรูปที่ 3.4 ได้ว่า

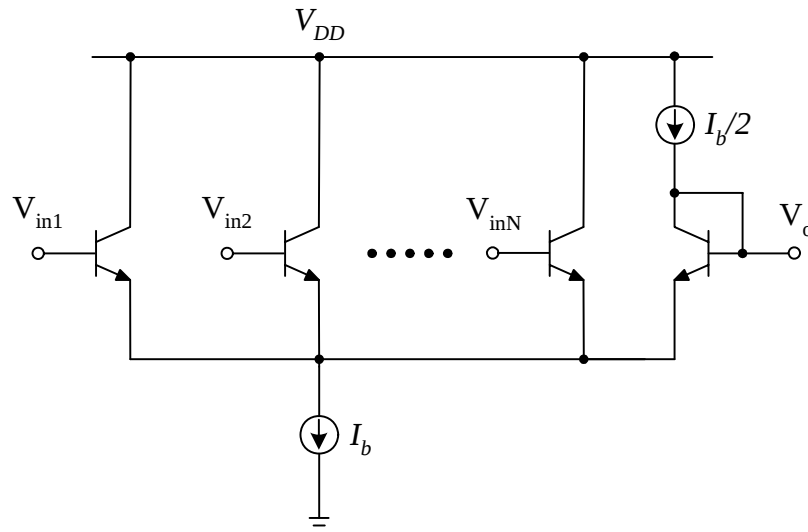
$$V_o = \begin{cases} V_{in2} & ; V_{in1} < V_{in2} \\ V_{in1} & ; V_{in1} \geq V_{in2} \end{cases} \quad (3.29)$$

จากสมการที่ (3.29) แสดงได้ว่าวงจรในรูปที่ 3.4 คือวงจรตรวจจับค่าต่ำสุดระหว่างอินพุต V_{in1} และอินพุต V_{in2}

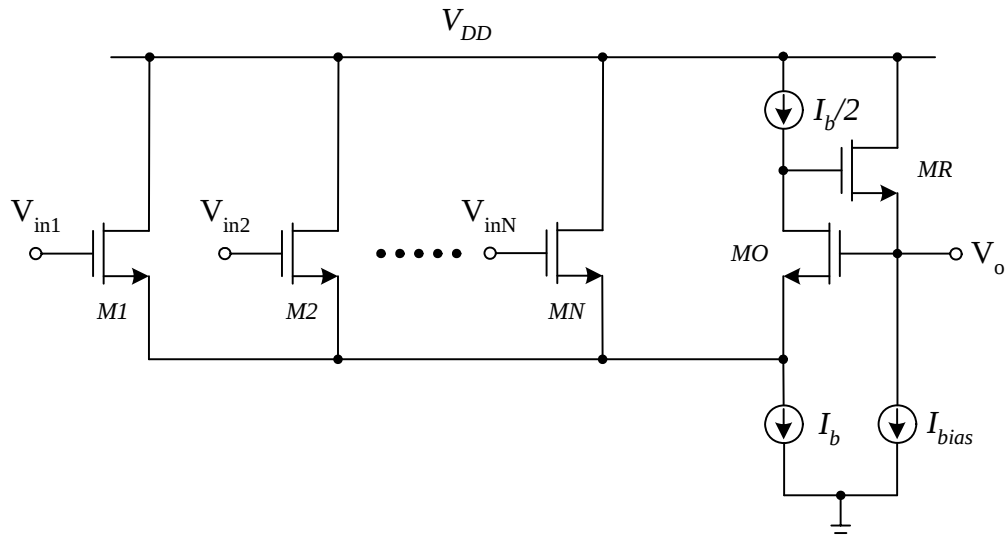
3.2.3 วงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุดแบบหลายอินพุต

รูปที่ 3.5 คือวงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุดของ Yamakawa [4] ซึ่งเป็นวงจรที่รู้จักกันดี วงจรใช้โครงสร้างการต่อทรานซิสเตอร์แบบคอมมอนอีมิเตอร์ซึ่งสามารถมีอินพุตได้ถึง n อินพุตแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าตามอินพุต V_{in} ที่มีค่ามากที่สุด ทรานซิสเตอร์อินพุตทั้งหมดจะได้รับไบแอสด้วยกระแส $I_b/2$ ทรานซิสเตอร์ที่มีอินพุตสูงสุดจะมีค่ากระแสไบแอสสูงสุด วงจรในรูปที่ 3.5 สามารถสร้างใหม่โดยใช้มอสทรานซิสเตอร์ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.6 เนื่องจากโดยปกติแล้วค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ในตัวของมอสทรานซิสเตอร์จะมีค่าน้อยกว่าในตัวไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ดังนั้นเมื่ออินพุตสองอินพุตหรือมากกว่าต่างมีค่าเข้าใกล้ค่าสูงสุด ค่ากระแส $I_b/2$ จะถูกแบ่งออกเป็นหลายๆ สาขา ซึ่งทำให้แรงดันเอาต์พุตจะไม่มีค่าตามแรงดันอินพุตสูงสุด ซึ่งปัญหาดังกล่าวนี้จะเรียกว่า “Corner error” ค่าความนำของมอสทรานซิสเตอร์ที่ต่ำนี้สามารถแก้ไขโดยใช้มอสทรานซิสเตอร์ MR ต่อในลักษณะป้อนกลับกระแสซึ่งจะช่วยให้การตอบสนองทางความถี่ของวงจรดีขึ้นด้วย จากวงจรในรูปที่ 3.5 และ 3.6 จะสามารถเขียนสมการได้ว่า

$$V_{out} = \max\{V_{in1}, V_{in2}, \dots, V_{inN}\} \quad (3.30)$$



รูปที่ 3.5 วงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุดของ Yamakawa [4]



รูปที่ 3.6 วงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุดของ Yamakawa [4] ในแบบใช้มอสทรานซิสเตอร์

3.3 วงจรสะท้อนกระแส

วงจรสะท้อนกระแส (Current mirror) เป็นวงจรที่สำคัญอย่างมากสำหรับการออกแบบวงจรประเภทอนาล็อกที่ออกแบบโดยใช้หลักการของวงจรรวม วงจรสะท้อนกระแสที่เราเห็นกันอยู่ทั่วไปจะมีอยู่ประมาณ 4 วงจรที่เป็นวงจรที่เป็นที่นิยมและใช้งานคือ วงจรสะท้อนกระแสแบบพื้นฐาน วงจรสะท้อนกระแสแบบคลาดโคด วงจรสะท้อนกระแสแบบ Wilson และวงจรสะท้อนกระแสแบบ Wilson ชนิดปรับปรุง แต่อย่างไรก็ตาม วงจรสะท้อนยังได้รับการพัฒนาและเผยแพร่มาอย่างต่อเนื่อง แต่เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ นำเอาเฉพาะวงจรสะท้อนกระแสแบบพื้นฐานมาใช้งาน ดังนั้นจึงจะขอกล่าวถึงเฉพาะวงจรสะท้อนกระแสแบบพื้นฐานนี้เท่านั้น

วงจรสะท้อนกระแสแบบพื้นฐานแสดงได้ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งเป็นวงจรสะท้อนกระแสแบบพื้นฐานที่ใช้มอสทรานซิสเตอร์เพียงสองตัวเท่านั้น ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอาต์พุต (I_{out}) และกระแสอินพุต (I_{in}) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$I_{out} = \frac{g_{m2}}{g_{m1}} I_{in} \quad (3.2)$$

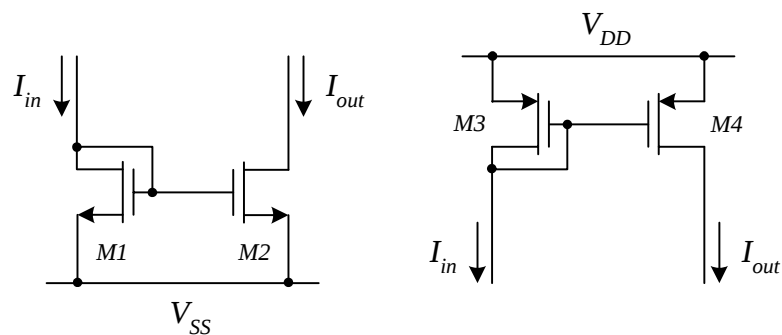
โดยที่ g_{m1} และ g_{m2} คือค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ของทรานซิสเตอร์ M1 และ M2 สำหรับค่าความต้านทานทางเอาต์พุตของวงจรสามารถกำหนดให้คือ

$$r_{out} = r_{o2} \quad (3.3)$$

ค่าความต้านทานทางเอาต์พุตของวงจรกำหนดให้คือ

$$r_{out} = \frac{1}{g_{ds2}} \quad (3.4)$$

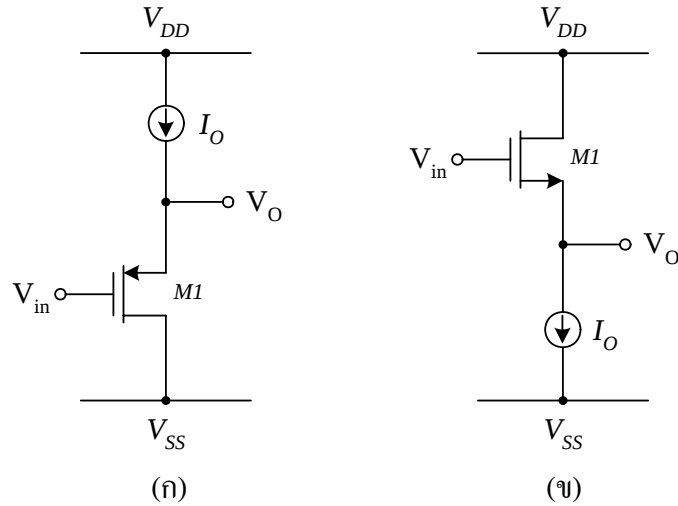
เมื่อ g_{ds2} คือค่าความนำระหว่างขาเดรนและขาซอร์สของมอสทรานซิสเตอร์ M2 จากสมการที่ (3.3) และ (3.4) จะเห็นว่าความต้านทานทางเอาต์พุตของวงจรในรูปที่ 3.1 จะขึ้นอยู่กับความต้านทานทางเอาต์พุตของ Q2 (r_{o2}) หรือค่าความนำทางเอาต์พุต (g_{ds}) ของ M2 ซึ่งค่าความต้านทานทางเอาต์พุตนี้ในทางอุดมคติควรมีค่าเข้าใกล้อนันต์ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาวงจรสะท้อนกระแสในแบบต่างๆ เพื่อเพิ่มค่าความต้านทานทางเอาต์พุตซึ่งจะมีผลที่ดีต่อการสะท้อนกระแสของวงจรด้วย



รูปที่ 3.7 วงจรสะท้อนกระแสแบบพื้นฐาน (ก) แบบบวก (ข) แบบลบ

3.4 วงจรเลื่อนระดับแรงดัน

วงจรเลื่อนระดับแรงดัน (Voltage level shifter) ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นวงจรที่ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ 1 ตัว และแหล่งจ่ายกระแส 1 แหล่งจ่าย วงจรสามารถออกแบบเป็นวงจรที่เลื่อนระดับทั้งแบบบวกและแบบลบเพียงแค่เปลี่ยนชนิดของมอสทรานซิสเตอร์และตำแหน่งของมอสทรานซิสเตอร์เท่านั้น วงจรทั้งสองแบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรเลื่อนระดับแรงดัน (ก) แบบบวก (ข) แบบลบ

สมมติว่าทรานซิสเตอร์ในรูปที่ 3.8(ก) และ (ข) ทำงานในย่านอิ่มตัว จากวงจรในรูปที่ 3.2(ก) จะสามารถเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตได้คือ

$$V_O = V_{in} + V_{KP} \quad (3.2)$$

โดย $V_{KP} = \sqrt{\frac{I_O}{\beta_P}} + V_{TP}$ $\beta_P = \frac{\mu_P C_{OX}}{2} \left(\frac{W}{L} \right)$ และ V_{TP} คือค่าแรงดันเทรชโฮลด์ของ PMOS ส่วนรูปที่ 3.2(ข) สามารถเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตได้คือ

$$V_O = V_{in} - V_{KN} \quad (3.30)$$

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

การวิเคราะห์ผลตอบสนองความถี่ของวงจรในรูปที่ 3.8 สามารถทำได้โดยเขียนวงจรดังกล่าวเป็นวงจรเสมือนสัญญาณขนาดเล็ก ถ้าให้ความสำคัญกับค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขาเกตและซอร์ส (C_{gs}) ของมอสทรานซิสเตอร์เป็นสำคัญ ค่าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของวงจรในรูปที่ 3.2 สามารถหาได้คือ

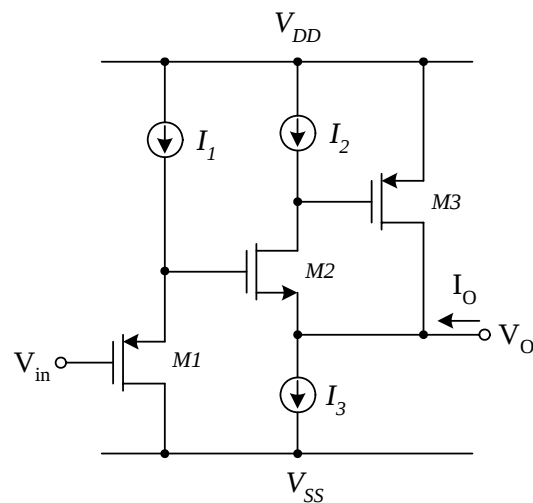
$$\frac{V_O(s)}{V_{in}(s)} = \frac{g_{d1} + g_O + g_{m1} + sC_{gs1}}{g_{m1} + sC_{gs1}} \quad (3.20)$$

ถ้ากำหนด g_{dl} และ $g_o \ll g_m$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\frac{V_o(s)}{V_{in}(s)} \approx 1 \quad (3.20)$$

โดยที่ g_{m1} คือค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ของ M1 g_{dl} คือค่าความนำที่ขาเดรนของ M1 ส่วน g_o คือค่าความนำภายในของแหล่งจ่ายกระแส จากสมการที่ (3.20) จะเห็นว่าวงจรเลื่อนระดับแรงดันมีอัตราขยายประมาณ 1 เท่า โดยมีค่าการตอบสนองความถี่ที่สูงมาก

3.5 วงจรกันชนป้อนกลับกระแส



รูปที่ 3.9 วงจรกันชนป้อนกลับกระแส

วงจรกันชนป้อนกลับกระแสแสดงได้ดังรูปที่ 3.9 วงจรประกอบด้วยมอสทรานซิสเตอร์ 3 ตัว และแหล่งจ่ายกระแส 3 แหล่งจ่าย สมมุติว่ามอสทรานซิสเตอร์ทุกตัวทำงานในย่านอิ่มตัว สมการกระแสเดรนของมอสทรานซิสเตอร์สามารถแสดงได้คือ

$$I_{D1} = -K_P (V_{SG} - |V_{TP}|)^2 \quad (3.21)$$

และ

$$I_{D2} = K_N (V_{GS} - V_{TN})^2 \quad (3.22)$$

โดยที่ $K_P = \frac{\mu_P C_{OX}}{2} \left(\frac{W}{L} \right)$ $K_N = \frac{\mu_N C_{OX}}{2} \left(\frac{W}{L} \right)$ V_{TH} คือค่าแรงดันเทรชโฮลด์ของ NMOS และ V_{TP} คือค่าแรงดันเทรชโฮลด์ของ PMOS แหล่งจ่ายกระแสคงที่ I_1 และทรานซิสเตอร์ M1 ประกอบเป็นวงจรเลื่อนระดับแรงดัน ส่วนทรานซิสเตอร์ M2 M3 และแหล่งจ่ายกระแสคงที่ I_2 และ I_3 เป็นวงจรกันชนป้อนกลับกระแส จากรูปที่ 3.9 ถ้าแรงดัน V_{in} ถูกป้อนเข้าที่ขาเกตของทรานซิสเตอร์ M1 ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรเลื่อนระดับแรงดันโดยมีเอาต์พุตอยู่ที่ขาซอร์ส ซึ่งสามารถกำหนดได้คือ

$$V_{S1} = V_{in} + \sqrt{\frac{I_1}{K_P}} + |V_{TP}| \quad (3.23)$$

และ

$$V_O = V_{S1} + \sqrt{\frac{I_1}{K_P}} + |V_{TP}| - \sqrt{\frac{I_2}{K_N}} - V_{TN} \quad (3.24)$$

ถ้ากำหนดกระแสไบอัสของ M1 และ M2 มีค่าเท่ากับ

$$\sqrt{\frac{I_2}{K_N}} + V_{TN} = \sqrt{\frac{I_1}{K_P}} + |V_{TP}| \quad (3.25)$$

สมการที่ (3.24) จะสามารถเขียนได้คือ

$$V_O = V_{in} \quad (3.26)$$

จากสมการที่ (3.26) สามารถสรุปได้ว่า วงจรในรูปที่ 3.9 คือวงจรกันชน (Buffer circuit) ที่มีคุณสมบัติ $V_{in} = V_{out}$ โดยวงจรดังกล่าวมีคุณสมบัติมีอินพุตอิมพีแดนซ์สูงมากเนื่องจากอินพุตต่อเข้ากับขาเกต ส่วนทางด้านเอาต์พุตจะใช้ทรานซิสเตอร์ M3 มาทำหน้าที่ป้อนกลับแบบลบซึ่งจะทำให้เอาต์พุตอิมพีแดนซ์มีค่าต่ำมาก

3.6 สรุป

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงวงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุดและต่ำสุดที่ได้นำเสนอไว้ในอดีต เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจจึงได้หยิบยกเอาวงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุดและต่ำสุดที่ใช้อุปกรณ์แอ็กทิฟเป็นพื้นฐานคือ วงจรโอทีเอ วงจรสายพานกระแส มาอธิบายการทำงาน ต่อมาได้กล่าวถึงวงจรย่อยที่ใช้เป็นส่วนประกอบในการออกแบบวงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุดและต่ำสุดซึ่งจะนำเสนอในบทต่อไป