

บทที่ 2

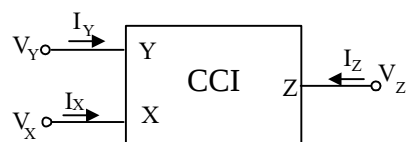
วงจรพื้นฐาน

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงวงจรพื้นฐานที่จะนำคุณสมบัติของวงจรมาใช้ในการออกแบบและสร้างเป็นวงจรกรองผ่านทุกความถี่ โหมดกระแส โดยได้เลือกใช้เป็นวงจรสายพานกระแสเป็นอุปกรณ์แอคทีฟหลัก ดังนั้นจึงขอกล่าวถึงก่อนพอสังเขป เพื่อความเข้าใจในรายละเอียดได้ดียิ่งขึ้น

2.1 ความเป็นมาและคุณสมบัติของวงจรสายพานกระแส

ในปัจจุบันนี้การออกแบบวงจรแอนะล็อกในโหมดกระแสได้รับความสนใจกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากวงจรที่ทำงานในโหมดกระแสมีข้อดีที่เหนือกว่าวงจรที่ทำงานในโหมดแรงดัน อาทิเช่น ความถี่การใช้งานที่สูงกว่า ย่านการทำงานที่กว้างกว่า กินกำลังไฟฟ้าที่ต่ำกว่าและโครงสร้างของวงจรที่ง่ายกว่า เป็นต้น

วงจรสายพานกระแส (Current Conveyor: CC) เป็นวงจรที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อสร้างเป็นวงจรแอนะล็อกชนิดต่าง ๆ ในโหมดกระแสได้เป็นอย่างดี วงจรสายพานกระแสถูกเสนอขึ้นครั้งแรกโดย Sedra และ Smith ในปี ค.ศ.1968 [13] โดยเรียกววงจรนี้ว่าวงจรสายพานกระแสรุ่นที่ 1 (First Generation Current Conveyor: CCI) ซึ่งวงจรมีขั้วสำหรับใช้งานอยู่ 3 ขั้วคือ ขั้ว Y เป็นขั้วใช้สำหรับรับสัญญาณอินพุต ขั้ว X และ ขั้ว Z เป็นขั้วที่ให้สัญญาณเอาต์พุต และมีสัญลักษณ์ที่ใช้งานทั่วไปแสดงได้ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 สัญลักษณ์ของวงจรสายพานกระแสรุ่นที่หนึ่ง

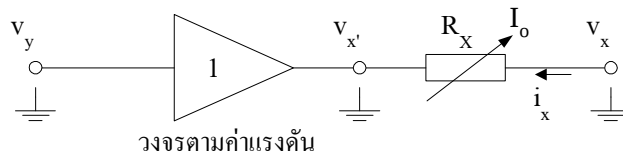
หลักการทำงานพื้นฐานของวงจร CCI คือ ถ้ามีแรงดันตกคร่อมที่ขั้ว Y จะทำให้เกิดแรงดันมีค่าเท่ากับที่ขั้ว X ในทำนองเดียวกัน ถ้ามีกระแสไหลผ่านที่ขั้ว X ก็จะทำให้เกิดค่ากระแสที่เท่ากับที่ขั้ว Y และกระแสค่าเดียวกันนี้จะถูกถ่ายโอนไปยังขั้ว Z ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสที่ขั้วต่าง ๆ เขียนแทนด้วยสมการเชิงเมทริกซ์ได้เป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_Y \\ V_X \\ I_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_Y \\ I_X \\ V_Z \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

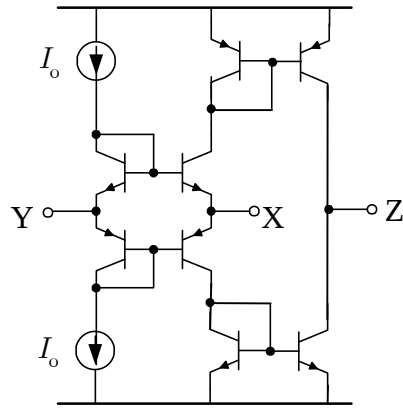
ต่อมาไม่นานได้มีการปรับปรุงคุณสมบัติของวงจร CCI เพื่อให้เกิดความคล่องตัวและประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายกว่าเดิม พร้อมทั้งได้เรียกววงจรที่ปรับปรุงคุณสมบัติใหม่นี้ว่าวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สอง (Second Generation Current Conveyor :CCII) ซึ่งวงจรนี้ได้รับความสนใจและถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยต่าง ๆ เป็นจำนวนมากโดยวงจร CCII มีคุณสมบัติพื้นฐานต่างไปจากวงจร CCI คือ ที่ขั้ว Y มีการปรับปรุงค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านอินพุตให้มีค่าสูงเป็นอนันต์ ส่งผลให้กระแสไม่สามารถไหลผ่านเข้าที่ขั้ว Y ส่วนแรงดันที่ขั้ว X และขั้ว Y ยังคงมีค่าที่เท่ากันเสมอและกระแสที่ขั้ว X ก็ยังคงส่งผ่านไปยังขั้ว Z สมการเชิงเมตริกซ์แสดงได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_Y \\ V_X \\ I_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_Y \\ I_X \\ V_Z \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

สำหรับโครงสร้างของวงจร CCII ได้มีการนำเสนอวิธีการสร้างไว้ในหลาย ๆ รูปแบบ ซึ่งแต่ละวงจรที่นำเสนอมาแล้วนั้นจะแตกต่างกันเฉพาะในส่วนของวงจรย่อยที่ทำหน้าที่เป็นวงจรตามแรงดันเท่านั้น วงจร CCII ในบทความ [17-19] และ [20] ใช้โอปแอมป์ทำงานร่วมกับวงจรสะท้อนกระแส แต่อย่างไรก็ตาม วงจร CCII ชนิดนี้ไม่ค่อยได้รับความนิยมมากนักเนื่องจากมีข้อจำกัดของความถี่ใช้งาน ส่วนวงจร CCII ที่มีโครงสร้างภายในที่สร้างขึ้นจากทรานซิสเตอร์โดยใช้หลักการทรานสลิเนียร์ที่นำเสนอโดย Fabre A. [11] เป็นวงจร CCII ที่มีความน่าสนใจและได้รับความนิยมมากกว่า เนื่องจากวงจรให้ผลตอบสนองทางความถี่ที่กว้างกว่าวงจร CCII ที่สร้างจากโอปแอมป์ พร้อมทั้งยังใช้อุปกรณ์น้อยกว่า แต่อย่างไรก็ตามวงจร CCII ชนิดนี้เมื่อถูกวิเคราะห์ห้วงจรอย่างละเอียดพบว่าวงจรดังกล่าวเกิดความคลาดเคลื่อนในการทำงานที่ขั้ว X เมื่อค่ากระแสไบอัสของวงจรมีค่าต่ำ ๆ ทั้งนี้เนื่องจากผลของความต้านทานแฝงที่ขั้ว X และในการวิเคราะห์นั้นพบว่าค่าความต้านทานนี้สามารถควบคุมค่าได้โดยใช้การควบคุมกระแสไบอัสของวงจร จึงเรียกววงจร CCII ที่มีค่าความต้านทานภายในนี้ใหม่ว่าวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองที่ควบคุมได้ด้วยกระแส (Second Generation Current Controlled Conveyor :CCCII) โดยในวงจรสมมูลนั้นจะมีค่าตัวต้านทาน R_X ต่อร่วมที่ขั้ว X ดังแสดงในภาพที่ 2 และมีโครงสร้างภายในดังภาพที่ 3



ภาพที่ 2 วงจรสมมูลระหว่างพอร์ต X และพอร์ต Y ของวงจร CCCII



ภาพที่ 3 วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองที่สร้างจากหลักการของวงจรทรานสลิเนียร์

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสแสดงด้วยสมการเชิงเมทริกซ์ได้ดังนี้คือ

$$\begin{bmatrix} I_Y \\ V_X \\ I_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & R_X & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_Y \\ I_X \\ V_Z \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Fabre A. และคณะได้ทำการศึกษาวิจัยวิเคราะห์หาค่าความต้านทานดังกล่าว โดยพบว่าค่าความต้านทานนี้สัมพันธ์กับกระแสไบอัส I_O โดยมีค่าประมาณได้ดังนี้

$$R_X \approx \frac{V_T}{2I_O} \quad (2.4)$$

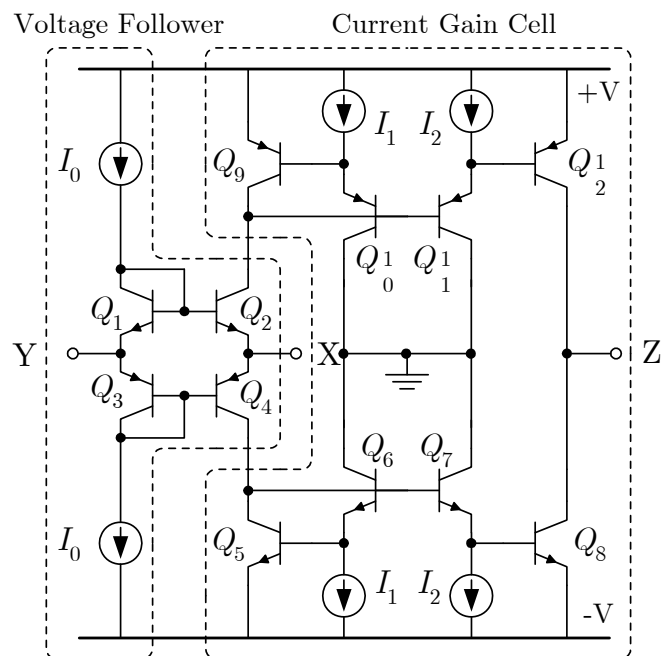
จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานนี้สามารถปรับค่าได้ โดยการควบคุมค่ากระแสไบอัส ดังนั้น Fabre A. จึงได้ตั้งชื่อวงจรชนิดนี้ว่า วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองที่ควบคุมได้ด้วยกระแส และจากการศึกษาพบว่าวงจร CCCII นี้ได้รับความนิยมในการนำไปสร้างเป็นวงจรชนิดต่างๆ ที่มีคุณสมบัติสามารถปรับค่าได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ส่งผลให้วงจรอนุลอกที่ออกแบบโดยใช้วงจร CCCII นี้สามารถลดตัวต้านทานแบบพาสซีฟลงไปได้ จึงทำให้วงจรอนุลอกดังกล่าวนี้มีโครงสร้างที่ง่าย คือลดความซับซ้อนลงจึงทำให้ มีความน่าสนใจในกรณีที่สร้างเป็นวงจรรวมได้เป็นอย่างดี

จากการศึกษาพบว่าได้มีการพัฒนางจรสายพานกระแสให้สามารถปรับค่าอัตราขยายในการส่งผ่านกระแสอยู่มากมาย ตัวอย่างเช่นวงจรสายพานกระแสในบทความ [21] และ [24-27] ซึ่งแต่ละบทความที่นำเสนอมีวิธีการคิดที่น่าสนใจอยู่ทั้งสิ้น สำหรับในงานวิจัยนี้ก็ได้นำวงจรสายพานกระแสแบบปรับค่าอัตราขยายได้มาใช้ในการสร้างเป็นวงจรกรองผ่านทุกความถี่ ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจในวงจรดังกล่าวจึงจะขอกกล่าวถึงรายละเอียดของโครงสร้างภายในวงจร CCCII ดังต่อไปนี้

2.2 วงจรสายพานกระแสที่ปรับค่าอัตราขยายได้

วงจรสายพานกระแสที่ปรับค่าอัตราขยายได้เป็นวงจรสายพานกระแสชนิดหนึ่งปรับปรุงขึ้นเพื่อให้มีความคล่องตัวในการใช้งานและมีความสะดวกในการควบคุมค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจร ในงานวิจัยนี้ได้นำวงจรสายพานกระแสที่ปรับค่าอัตราขยายมาใช้สังเคราะห์วงจร โดยวงจรสายพานกระแสที่ปรับค่าอัตราขยายได้นี้ มีพื้นฐานมาจากวงจรสายพานกระแสที่สร้างขึ้นจากหลักการทรานสลิเนียร์ ประกอบกับวงจรขยายกระแส ด้วยการได้นำวงจรในบทความ [11] และ [21] มารวมเข้าไว้ด้วยกัน

โครงสร้างของวงจรสายพานกระแสที่ปรับค่าอัตราขยายได้ประกอบด้วยวงจรย่อยที่สำคัญอยู่สองส่วนคือวงจรตามแรงดัน (Voltage Follower) และวงจรขยายกระแส (Current Gain Cell) ซึ่งมีแผนภาพของวงจรแสดงได้ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 โครงสร้างของวงจรสายพานกระแสที่ปรับค่าอัตราขยายได้

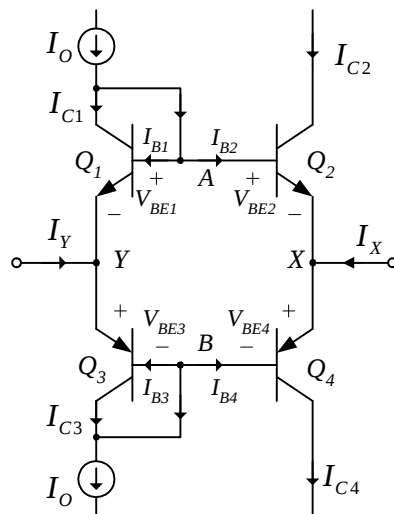
จากวงจรตามภาพที่ 4 ในส่วนของวงจรตามแรงดัน ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ $Q_1 - Q_4$ ที่ประกอบกันเป็นวงรอบปิดตามหลักการทรานสลิเนียร์ โดยที่ทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 เป็นชนิดเอ็นพีเอ็น (NPN) และทรานซิสเตอร์ Q_3 และ Q_4 เป็นชนิดพีเอ็นพี (PNP) ทรานซิสเตอร์ Q_1 มีการเชื่อมต่อระหว่างขาคอลเลกเตอร์และขาเบสเข้าด้วยกัน จึงทำให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 มีการทำงานคล้ายกับไดโอดเมื่อถูกป้อนด้วยกระแสไบอัส I_0 ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมขาเบสและขาอีมิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_1 แรงดันนี้ส่งผลให้ทรานซิสเตอร์ Q_2 ทำงานด้วย และจุดต่อระหว่างขาอีมิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_1 และขาอีมิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_3 นี้ถูกต่อออกมาให้เป็นขั้ว Y

ส่วนจุดต่อระหว่างขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_2 และขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_4 ถูกต่อออกมาให้เป็นขั้ว X

ในส่วนของวงจรขยายกระแสส่วนนั้นถูกสร้างขึ้นโดยใช้วงจรสะท้อนกระแสแบบปรับค่าอัตราขยายได้ (Current Mirror with Adjustable Gain) [21] ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ $Q_5 - Q_8$ เป็นชนิดเอ็นพีเอ็น และทรานซิสเตอร์ $Q_9 - Q_{12}$ เป็นชนิดพีเอ็นพี ประกอบร่วมกับแหล่งจ่ายกระแสค่าคงที่ I_1 และ I_2 แหล่งจ่ายนี้ทำหน้าที่ไบอัสกระแสให้กับทรานซิสเตอร์ $Q_6 - Q_7$ และ $Q_{10} - Q_{11}$ โดยทรานซิสเตอร์ $Q_5 - Q_8$ และ $Q_9 - Q_{12}$ นั้นต่อประกอบกันโดยเป็นวงจรทรานสลิเนียร์สองวงรอบปิด เมื่อปรับค่ากระแสไบอัส I_1 และ I_2 สามารถที่จะปรับค่าอัตราขยายกระแสในการส่งผ่านจากขั้ว X ไปยังขั้ว Z ได้ สำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ของวงจรก็จะกล่าวถึงโดยละเอียดในหัวข้อถัดไป

2.2.1 การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของกระแส I_X และแรงดันระหว่างขั้ว X

การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของกระแส I_X และแรงดันระหว่างขั้ว X สามารถพิจารณาหาความสัมพันธ์ได้จากภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ของกระแส I_X และแรงดันระหว่างขั้ว X

ทำการวิเคราะห์วงจร โดยพิจารณาผลรวมของแรงดันภายในวงรอบปิด ได้ความสัมพันธ์ของรอยต่อเบส-อิมิตเตอร์ในทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา ดังนี้

$$V_{BE2} + V_{BE4} = V_{BE1} + V_{BE3}$$

$$V_{T2} \ln\left(\frac{I_{C2}}{I_{S2}}\right) + V_{T4} \ln\left(\frac{I_{C4}}{I_{S4}}\right) = V_{T1} \ln\left(\frac{I_{C1}}{I_{S1}}\right) + V_{T3} \ln\left(\frac{I_{C3}}{I_{S3}}\right) \quad (2.5)$$

โดยที่ V_{Ti} เมื่อ $i=1,2,\dots,4$ คือแรงดันเชิงอุณหภูมิของทรานซิสเตอร์ตัวที่ 1, 2,...,4 มีค่าเท่ากับ $KT/q \approx 26 \text{ mV}$ ที่อุณหภูมิห้อง และจากสมการ (2.5) เขียนให้อยู่ในรูปของความหนาแน่นกระแส (J) ได้คือ

$$V_{T2} \ln\left(\frac{J_{C2}}{J_{S2}}\right) + V_{T4} \ln\left(\frac{J_{C4}}{J_{S4}}\right) = V_{T1} \ln\left(\frac{J_{C1}}{J_{S1}}\right) + V_{T3} \ln\left(\frac{J_{C3}}{J_{S3}}\right) \quad (2.6)$$

โดยสมมติให้ทรานซิสเตอร์ทั้งหมด (Q_1-Q_4) ถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการที่ทำในเวลาเดียวกัน และทำงานที่มีสภาวะอุณหภูมิแวดล้อมเดียวกัน จึงทำให้ $V_{T1}=V_{T2}=V_{T3}=V_{T4}=V_T$ และ J_S ของทรานซิสเตอร์แต่ละตัวมีค่าเท่ากัน ($J_{S1}=J_{S2}=J_{S3}=J_{S4}=J_S$) มีผลทำให้ V_T และ J_S ในสมการ (2.6) จะถูกขจัดออกไป ได้ความสัมพันธ์เป็น

$$J_{C2} \cdot J_{C4} = J_{C1} \cdot J_{C3} \quad (2.7)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์กับพื้นที่อิมิตเตอร์ (A) จะได้

$$\frac{I_{C2}I_{C4}}{A_2A_4} = \frac{I_{C1}I_{C3}}{A_1A_3} \quad (2.8)$$

จากสมการ (2.8) ในกรณีที่ทำให้พื้นที่อิมิตเตอร์ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ทั้งชนิดพีเอ็นพีและเอ็นพีเอ็นมีค่าเท่ากัน ได้ความสัมพันธ์ของกระแสคอลเลกเตอร์ของทรานซิสเตอร์แต่ละตัวเป็นดังสมการต่อไปนี้

$$I_{C2}I_{C4} = I_{C1}I_{C3} \quad (2.9)$$

จากสมการ (2.9) พบว่าผลรวมของแรงดันระหว่างเบส-อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ภายในรูปนั้น ส่งผลทำให้เกิดเป็นผลคูณของกระแสคอลเลกเตอร์ของทรานซิสเตอร์ที่อยู่ภายในรูปเดียวกัน โดยในที่นี้ผลคูณของกระแสคอลเลกเตอร์ Q_2 และ Q_4 จะมีค่าเท่ากับผลคูณของกระแสคอลเลกเตอร์ของ Q_1 และ Q_3 นั่นคือหลักการของวงจรทรานสลิเนียร์

เมื่อพิจารณาผลรวมของกระแสไฟตรงที่โหนด A และ โหนด B ตามลำดับ พบว่าผลรวมของกระแสเป็นดังนี้

$$I_O - I_{C1} - I_{B1} - I_{B2} = 0 \quad (2.10)$$

และ

$$I_O - I_{C3} - I_{B3} - I_{B4} = 0 \quad (2.11)$$

ถ้ากำหนดให้ β_F คืออัตราขยายไฟตรงของทรานซิสเตอร์ ที่มีค่า β_F เท่ากันทุกตัว จัดรูปสมการ (2.10) และ (2.11) ใหม่ได้เป็น

$$I_O - I_{C1} - 2\frac{I_{C1}}{\beta_F} = 0 \quad (2.12)$$

$$I_O - I_{C3} - 2\frac{I_{C3}}{\beta_F} = 0 \quad (2.13)$$

จัดรูปสมการ (2.12) และ (2.13) ใหม่เพื่อหากระแส I_{C1} และ I_{C3} ตามลำดับ

$$I_{C1} = \frac{I_O}{1 + 2/\beta_F} \quad (2.14)$$

และ

$$I_{C3} = \frac{I_O}{1 + 2/\beta_F} \quad (2.15)$$

จากสมการ (2.14) และ (2.15) เมื่อ β_F มีค่าสูงมาก ๆ มีผลทำให้กระแส I_{C1} และ I_{C3} มีค่าประมาณเท่ากับ I_O จึงส่งผลให้กระแส I_Y ไม่สามารถไหลผ่านเข้าไปที่ขั้ว Y จึงทำให้มีค่าอิมพีแดนซ์ในทางทฤษฎีที่มองจากขั้ว Y มีค่าสูงเป็นอนันต์ ดังนั้นในการนำวงจร CCCII ไปสังเคราะห์เป็นวงจรชนิดต่าง ๆ ขั้ว Y ของวงจร CCCII จึงเหมาะสมสำหรับใช้รับสัญญาณแรงดัน เพราะไม่ทำให้เกิดผลกระทบของการโหลด (Loading Effect) กับสัญญาณที่เข้ามา

2.2.2 การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่ขั้ว X

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นแล้วว่ากระแสที่ขั้ว X และแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขั้ว X และขั้ว Y มีความสัมพันธ์กันอย่างไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นถ้าหากนำวงจรสายพานกระแสดังกล่าวไปสังเคราะห์เป็นวงจรประมวลสัญญาณที่เป็นเชิงเส้นแล้ว ก็จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการ

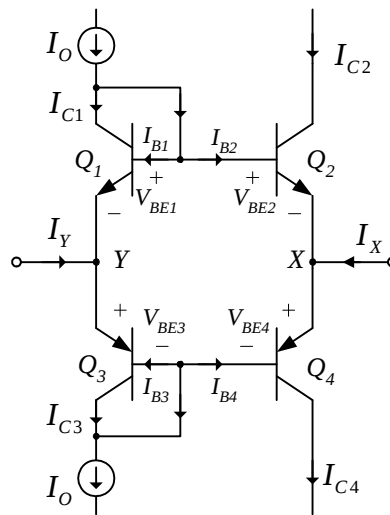
ทำงาน ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นในการทำงาน โดยอาศัยการวิเคราะห์วงจรรูปทรานสลิเนียร์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

เมื่อพิจารณาลูปทรานสลิเนียร์ในภาพที่ 6 โดยการกำหนดให้ทรานซิสเตอร์ทุกตัวสมพงษ์กัน และค่าอัตราขยายไฟตรงของทรานซิสเตอร์มีค่ามากกว่าหนึ่งมาก ๆ เมื่อคิดผลรวมของกระแสที่ขั้ว X จะได้

$$I_X = I_{C4} - I_{C2} \quad (2.16)$$

และแรงดันตกคร่อมระหว่างขาเบส-อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_2 มีค่า

$$V_{BE2} = V_{BE1} - (V_X - V_Y) \quad (2.17)$$



ภาพที่ 6 วงจรใช้เพื่อวิเคราะห์หาความต้านทานที่ขั้ว X

จากคุณสมบัติความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของทรานซิสเตอร์

$$V_{BE1} = V_T \ln \left(\frac{I_{C1}}{I_s} \right) \quad (2.18)$$

เมื่อแทนค่าสมการ (2.18) ลงใน (2.17) จะได้

$$V_{BE2} = V_T \ln \left(\frac{I_O}{I_s} \right) - V_{XY} \quad (2.19)$$

โดยที่ $V_{XY} = V_X - V_Y$ ได้ค่ากระแสที่ไหลผ่านขาคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์เป็นดังนี้

$$\begin{aligned}
 I_{C2} &= I_s e^{(V_{BE2}/V_T)} \\
 &= I_s e^{\{V_T \ln(I_o/I_s) - V_{XY}\}} \\
 &= I_s e^{\{\ln I_o/I_s\}} e^{\{-V_{XY}/V_T\}} \\
 &= I_o e^{(-V_{XY}/V_T)} \quad (2.20)
 \end{aligned}$$

และจากสมการ (2.9) ได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ในรูปเป็นดังนี้คือ

$$I_O^2 = I_{C2} I_{C4} \quad (2.21)$$

หรือ

$$I_{C4} = \frac{I_O^2}{I_{C2}} \quad (2.22)$$

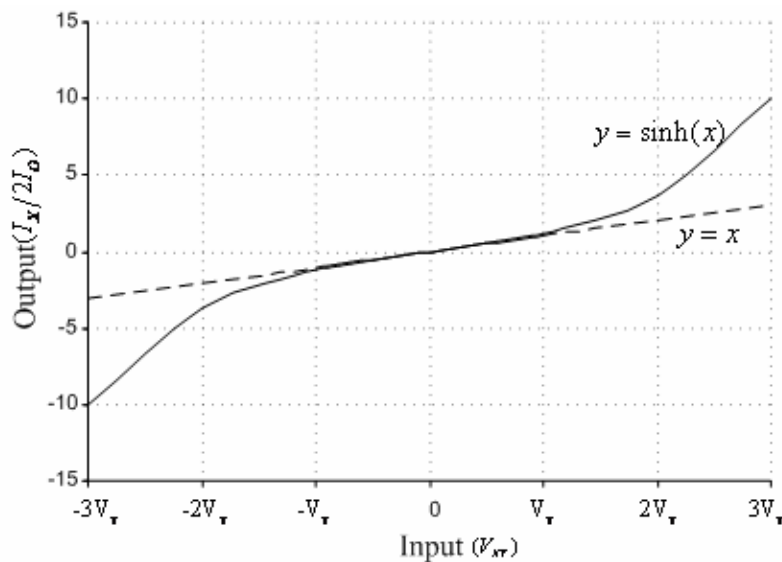
เมื่อแทนค่าสมการ (2.20) และ (2.22) ลงใน (2.16) จะได้

$$\begin{aligned}
 I_X &= \frac{I_O^2}{I_o e^{(-V_{XY}/V_T)}} - I_o e^{(-V_{XY}/V_T)} \\
 &= I_o e^{(V_{XY}/V_T)} - I_o e^{(-V_{XY}/V_T)} \\
 &= \frac{2(I_o e^{(V_{XY}/V_T)} - I_o e^{(-V_{XY}/V_T)})}{2} \quad (2.23)
 \end{aligned}$$

จัดรูปสมการ (2.23) ใหม่ โดยใช้ความสัมพันธ์ของ $\sinh x = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$ จะได้

$$I_X = 2I_o \sinh\left(\frac{V_{XY}}{V_T}\right) \quad (2.24)$$

จากสมการ (2.24) จะเห็นได้ว่ากระแส I_X สัมพันธ์กับแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขั้ว X และ Y เป็นฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิก ซึ่งเป็นฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นชนิดหนึ่ง ได้กราฟความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันแสดงในภาพที่ 7 โดยวาดกราฟเส้นตรง $y = x$ เทียบกับสมการ (2.24) เพื่อเปรียบเทียบความเป็นเชิงเส้นของความสัมพันธ์ได้ชัดเจนขึ้นด้วย



ภาพที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสที่ขั้ว X และแรงดันอินพุต V_{XY}

จากกราฟในภาพที่ 7 จะเห็นได้ว่ากระแส I_X สัมพันธ์กับแรงดัน V_{XY} ในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น ตลอดช่วงแรงดันอินพุต แต่อย่างไรก็ตามบางช่วงของกราฟมีความสัมพันธ์ที่ประมาณเป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งสังเกตจากช่วงที่กราฟทั้งสองเส้นจะทับกันสนิท พบว่าประมาณเป็นช่วงที่แรงดันอินพุต V_{XY} มีค่าไม่เกินค่า V_T เท่านั้น เป็นช่วงที่ผลตอบสนองของวงจรมีความเป็นเชิงเส้น สามารถยืนยันได้อีกวิธีหนึ่งโดยใช้การกระจาย Taylor's Series ของฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกตามสมการ (2.25)

$$\sinh x = x + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + \dots \quad ; -\infty < x < \infty \quad (2.25)$$

ดังนั้นจากสมการ (2.24) จึงประมาณค่าได้เป็น

$$I_X = 2I_o \left\{ \frac{V_{XY}}{V_T} + \frac{1}{3!} \left(\frac{V_{XY}}{V_T} \right)^3 + \frac{1}{5!} \left(\frac{V_{XY}}{V_T} \right)^5 + \dots \right\} \quad (2.26)$$

จากสมการ (2.26) จะเห็นได้ว่า ถ้า V_{XY} มีค่าน้อยกว่า 1 มาก ๆ หรือค่า $V_{XY} \ll V_T$ มาก ๆ แล้วจะทำให้พจน์ที่มีกำลังมากกว่าหนึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพจน์แรก จึงสามารถละทิ้งพจน์ที่มีกำลังมากกว่าหนึ่งของอนุกรม $\sinh\left(\frac{V_{XY}}{V_T}\right)$ ได้ จึงประมาณฟังก์ชันนี้เป็น

$$\sinh\left(\frac{V_{XY}}{V_T}\right) = \frac{V_{XY}}{V_T} \quad (2.27)$$

แทนค่าสมการ (2.27) ลงใน (2.24) จะได้

$$I_X = 2I_0 \frac{V_{XY}}{V_T} \quad (2.28)$$

หาค่าความต้านทานภายในที่ขั้ว X ของวงจรสายพานกระแสมีค่าประมาณได้เป็น

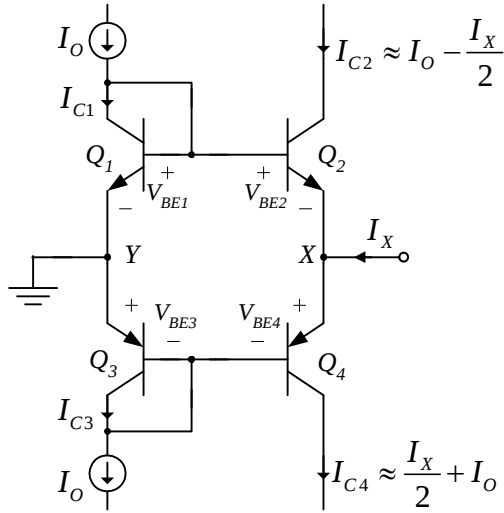
$$R_{XY} = \frac{V_{XY}}{I_X} \approx \frac{V_T}{2I_0} \quad (2.29)$$

จากสมการ (2.29) จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานภายในที่ขั้ว X จะมีค่าขึ้นอยู่กับตัวแปร 2 ตัว คือ แรงดันเชิงอุณหภูมิ V_T ที่มีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและกระแสไบอัส I_0 ของอุปกรณ์สลิเนียม ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไบอัสนี้ได้ จึงทำให้สามารถนำค่าความต้านทานภายในที่ขั้ว X นี้ไปใช้งานเป็นค่าความต้านทานที่ประกอบรวมในวงจรได้โดยที่ไม่จำเป็นต้องใช้ค่าความต้านทานที่เป็นอุปกรณ์พาสซีฟภายนอก และยังสามารถปรับค่าความต้านทานนี้ได้ด้วยวิธีที่เรียกว่า วิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ คือปรับกระแสไบอัส I_0 ของอุปกรณ์สลิเนียมนั่นเอง

2.2.3 การวิเคราะห์การส่งผ่านกระแสจากขั้ว X ไปยังขั้ว Z

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการส่งผ่านกระแสจากขั้ว X ไปยังขั้ว Z และการวิเคราะห์หาอัตราขยายกระแสของวงจร

ในการวิเคราะห์การส่งผ่านกระแสจากขั้ว X ไปยังขั้ว Z และการวิเคราะห์หาอัตราขยายกระแส สามารถทำได้โดยการต่อขั้ว Y ให้ลงกราวด์และป้อนกระแสอินพุต I_X เข้าที่ขั้ว X ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 วงจรใช้เพื่อวิเคราะห์หาค่ากระแสคอลเลกเตอร์ Q_2 และ Q_4

พิจารณาความสัมพันธ์ของกระแสที่เข้า X ได้เป็น

$$I_{C4} = I_{C2} + I_X \quad (2.30)$$

และ

$$I_{C2} = I_{C4} - I_X \quad (2.31)$$

จากสมการ (2.22) กระแส I_{C2} สัมพันธ์กับกระแส I_O ดังนี้

$$I_{C2} = \frac{I_O^2}{I_{C4}} \quad (2.32)$$

เมื่อแทนค่าสมการ (2.32) ลงใน (2.31) จะได้

$$I_{C4}^2 - I_X I_{C4} - I_O^2 = 0 \quad (2.33)$$

จากสมการ (2.33) สามารถหาค่ากระแส I_{C4} ได้เป็นดังนี้

$$I_{C4} = \frac{I_X \pm \sqrt{I_X^2 + 4I_O^2}}{2} \quad (2.34)$$

ค่ากระแส I_{C12} และ I_{C8} ได้โดยคิดผลรวมของแรงดันภายในลูบที่ประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์ $Q_5 - Q_8$ ที่ต่อร่วมกันเป็นวงรอบโดยอาศัยหลักการของวงจรทรานสลิเนียร์ ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$V_{BE5} + V_{BE6} = V_{BE7} + V_{BE8} \quad (2.37)$$

จากสมการ (2.37) กระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ Q_5 มีค่าประมาณเท่ากับ $I_O + \frac{I_X}{2}$ ดังนั้นจะได้

$$V_T \ln \left(\frac{I_O + \frac{I_X}{2}}{I_S} \right) + V_T \ln \left(\frac{I_1}{I_S} \right) = V_T \ln \left(\frac{I_2}{I_S} \right) + V_T \ln \left(\frac{I_{C8}}{I_S} \right) \quad (2.38)$$

ซึ่งจะทำให้ได้ค่ากระแสคอลเลกเตอร์ของทรานซิสเตอร์ I_{C8} มีค่าเป็น

$$I_{C8} = \frac{I_1}{I_2} \left(I_O + \frac{I_X}{2} \right) \quad (2.39)$$

ในทำนองเดียวกันเราจะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันในลูบที่ประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์ $Q_9 - Q_{12}$ เป็นดังนี้คือ

$$V_{BE9} + V_{BE10} = V_{BE11} + V_{BE12} \quad (2.40)$$

กระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ Q_9 มีค่าเท่ากับ $I_O - \frac{I_X}{2}$ แทนในสมการ (2.40) เป็น

$$V_T \ln \left(\frac{I_O - \frac{I_X}{2}}{I_S} \right) + V_T \ln \left(\frac{I_1}{I_S} \right) = V_T \ln \left(\frac{I_2}{I_S} \right) + V_T \ln \left(\frac{I_{C12}}{I_S} \right) \quad (2.41)$$

เมื่อจัดรูปสมการ (2.41) ใหม่จะได้ว่า

$$I_{C12} = \frac{I_1}{I_2} \left(I_O - \frac{I_X}{2} \right) \quad (2.42)$$

$$I_{C6} = I_{C13} = I_O - \frac{I_X}{2} \quad (2.45)$$

ในทำนองเดียวกัน $Q_7 - Q_8$ ประกอบกันเป็นวงจรสะท้อนกระแสทำให้กระแส I_{C8} เท่ากับ I_{C9}

$$I_{C8} = I_{C9} = I_O + \frac{I_X}{2} \quad (2.46)$$

ได้ค่ากระแส I_{C12} มีค่าเป็น

$$I_{C12} = \frac{I_1}{I_2} \left(I_O + \frac{I_X}{2} \right) \quad (2.47)$$

ในทำนองเดียวกันค่ากระแส I_{C16} มีค่าเท่ากับ

$$I_{C16} = \frac{I_1}{I_2} \left(I_O - \frac{I_X}{2} \right) \quad (2.48)$$

เมื่อพิจารณาผลรวมของกระแสที่ขั้ว Z จะได้

$$I_Z = I_{C16} - I_{C12} \quad (2.49)$$

แทนค่าสมการ (2.47) และ (2.48) ลงใน (2.49) จึงทำให้ได้กระแส I_Z มีค่าเป็น

$$I_Z = \frac{-I_1}{I_2} I_X = -k I_X \quad (2.50)$$

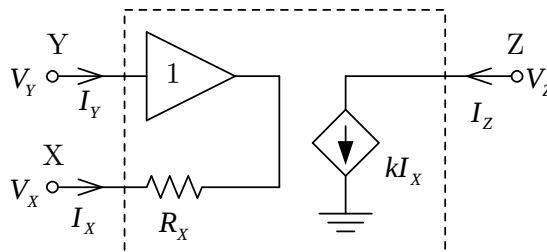
เครื่องหมายลบในสมการ (2.50) แสดงถึงทิศทางกระแสที่แสดงว่า I_X และ I_Z จะมีทิศทางกระแสไหลที่ตรงข้ามกัน และจะสังเกตได้ว่าการปรับค่าอัตราขยายกระแสในการส่งผ่านกระแสจากขั้ว X ไปยังขั้ว Z นั้นสามารถทำได้โดยการปรับค่ากระแสไบอัสเช่นกันกับวงจรในภาพที่ 9

2.2.4 วงจรสมมูลและความสัมพันธ์เชิงเมทริกซ์

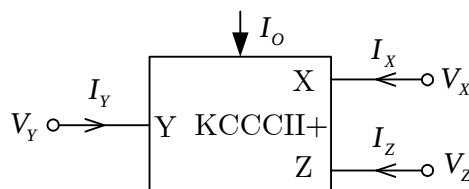
ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่ขั้วต่าง ๆ ของวงจรสายพานกระแสที่ปรับค่าอัตราขยายได้เป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_Y \\ V_X \\ I_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & R_X & 0 \\ 0 & \pm k & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_Y \\ I_X \\ V_Z \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

โดยในที่นี้ R_X คือค่าความต้านทานแฝงที่ขั้ว X มีค่าประมาณเท่ากับ $V_T/2I_O$ ในขณะที่ k คืออัตราขยายกระแสของวงจรสายพานกระแสที่สามารถปรับค่าได้โดยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ มีค่าเท่ากับ I_1/I_2 เครื่องหมาย $\pm$ แสดงถึงชนิดของวงจรสายพานกระแส โดยกำหนดให้เครื่องหมาย + แสดงถึงกระแสที่ขั้ว X และ ขั้ว Z นั้นมีทิศการไหลไปทางเดียวกันคือไหลเข้าหรือไหลออกจากวงจรเหมือนกัน และวงจรถูกกำหนดให้เป็นวงจรสายพานกระแสชนิดบวกและเครื่องหมาย - แสดงถึงกระแสที่ขั้ว X และ ขั้ว Z มีทิศทางการไหลตรงกันข้ามกันและวงจรดังกล่าวก็จะถูกกำหนดให้เป็นวงจรสายพานกระแสชนิดลบ ตัวอย่างของวงจรสมมูลและสัญลักษณ์ของวงจรสายพานกระแสที่ปรับค่าได้ชนิดบวกแสดงในภาพที่ 11 และ 2.12 ตามลำดับ

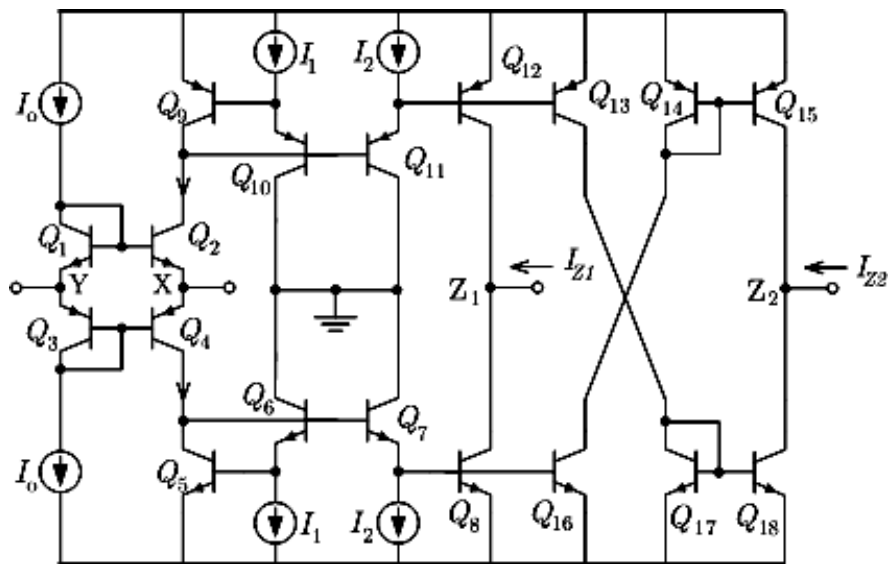


ภาพที่ 11 วงจรสมมูลของวงจรสายพานกระแสที่ปรับค่าได้

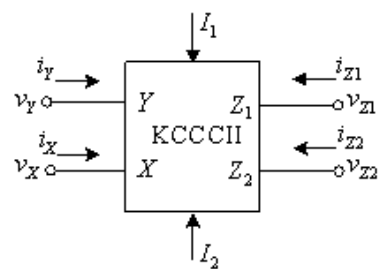


ภาพที่ 12 สัญลักษณ์ของวงจรสายพานกระแสที่ปรับค่าได้

ส่วนวงจรสายพานกระแสที่สามารถปรับค่าอัตราขยายได้ทั้งชนิดบวกและลบมีโครงสร้างภายในของวงจร KCCCHII แสดงดังภาพที่ 13 (ก) จะเห็นได้ว่าภาคอินพุต (Q_1-Q_4) เป็นวงจรสายพานกระแสที่ประกอบขึ้นจากวงจรลูปทรานสลิเนียร์ ต่อประกอบกับวงจรสะท้อนกระแสที่ปรับค่าอัตราขยายกระแสได้ (Q_5-Q_{12}) และวงจรสะท้อนกระแสแบบไขว้ ($Q_{13}-Q_{18}$) ส่วนสัญลักษณ์แสดงดังภาพที่ 13 (ข) ตามลำดับ



(ก)



(ข)

ภาพที่ 13 วงจรสายพานกระแสปรับค่าอัตราขยายได้ทั้งชนิดบวกและลบ

(ก) โครงสร้างภายใน (ข) สัญลักษณ์

ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่พอร์ตต่าง ๆ ของวงจร KCCCHII ทางอุดมคติแทนได้ด้วยเมตริกซ์เป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} i_Y \\ v_X \\ i_{Z1} \\ i_{Z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & R_X & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 & 0 \\ 0 & -k & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_Y \\ i_X \\ v_{Z1} \\ v_{Z2} \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

เมื่อ i_Y, i_X, i_{Z1}, i_{Z2} และ v_Y, v_X, v_{Z1}, v_{Z2} คือกระแสและแรงดันของแต่ละขั้วตามลำดับ โดยที่อัตราขยายกระแส k ของวงจรสายพานกระแสเท่ากับอัตราส่วนของกระแสไปอัส I_1 และ I_2 นั่นคือ อัตราการขยายกระแสที่เอาต์พุตของพอร์ต z ของวงจร KCCCII ซึ่งสามารถปรับค่าได้ด้วยการปรับกระแส I_1 และ I_2 ส่วนเครื่องหมายลบแสดงถึงทิศทางการไหลของกระแสที่พอร์ต z ของวงจรสายพานกระแสนั้นเอง จากคุณสมบัติของวงจร KCCCII ที่กล่าวมานี้จะนำไปใช้ในการออกแบบเพื่อสร้างเป็นวงจรกรองผ่านทุกความถี่ที่สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ ต่าง ๆ ได้ ดังที่จะกล่าวในบทต่อไป

2.3 สรุป

เนื้อหาสาระสำคัญในบทนี้ได้กล่าวรวบรวมเกี่ยวกับเรื่องของวงจรสายพานกระแส และวงจรสายพานกระแสที่ปรับค่าอัตราขยายกระแสได้ ซึ่งจะใช้เป็นวงจรพื้นฐานที่จะถูกนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป โดยได้มีการกล่าวถึงโครงสร้างวงจรที่สำคัญและแสดงการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตที่ขั้ว Y และแรงดันที่ขั้ว X ค่าอัตราขยายกระแสระหว่างขั้ว X และขั้ว Z ที่สามารถปรับค่าอัตราขยายกระแสได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ รวมทั้งได้แสดงถึงวงจรสมมูลความสัมพันธ์เชิงเมตริกซ์ และสัญลักษณ์ของวงจรสายพานกระแสที่ปรับค่าอัตราขยายกระแสได้