บทที่ 4
การออกแบบวงจรไบแอสและเสถียรภาพของวงจร

4.1 บทนำ

ในการออกแบบวงจรไบแอสนั้น นอกจากจะต้องหาตำแหน่งจุดทำงานที่เหมาะสมแล้ว ยังต้องคำนึงถึงผลของแบบวงจรไบแอสที่มีต่อความต้านทานอินพุทอีกด้วย รายละเอียดในบทนี้เลือกให้จุดทำงานอยู่กึ่งกลางเส้นโหลด เพื่อให้สัญญาณเอาท์พุทแกว่งได้สูงสุด ถ้าจุดทำงานอยู่ช่วงบนของเส้นโหลด สัญญาณอาจถูกขลิบเนื่องจากทรานซิสเตอร์อิ่มตัว ในทางตรงข้าม ถ้าจุดทำงานอยู่ช่วงล่างของเส้นโหลด สัญญาณอาจถูกขลิบเนื่องจากทรานซิสเตอร์อยู่ในภาวะคัตออฟ ทั้งสองกรณีดังกล่าว เกิดเมื่อเครื่องขยายถูกป้อนสัญญาณขนาดมากเกินไป การวิเคราะห์วงจรทรานซิสเตอร์ในบทนี้ ใช้ทฤษฎีการวางซ้อนกระแสที่ไหลในวงจร (superposition) เป็นส่วนใหญ่ จุดประสงค์หลักคือ พิจารณาธาตุวงจรที่มีผลต่อเสถียรภาพของวงจร เพื่อประโยชน์ในการเลือกใช้ค่าต่าง ๆ ของมันนั่นเอง

การไบแอส คือการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้แก่วงจรทรานซิสเตอร์ เพื่อให้ได้จุดทำงานตามตำแหน่งที่ต้องการ **เสถียรภาพของวงจร** แสดงถึงการรักษาตำแหน่งจุดทำงานให้มีการแปรค่าอยู่ในขีดจำกัดซึ่งยอมให้เกิดขึ้นได้ แม้ว่าจะมีการแปรค่าของธาตุวงจรอย่างไรก็ตาม

วงจรไบแอสมีได้หลายแบบ อาจเป็นการต่อตัวต้านทานแบบง่าย ๆ หรือเป็นข่ายวงจรป้อนกลับที่ซับซ้อน ซึ่งอาจประกอบด้วยธาตุวงจรที่มีลักษณะไม่เป็นเส้นตรง เช่น เธอร์มิสเตอร์ชดเชยอุณหภูมิ (temperature compensating thermister) ไดโอด หรืออาจเป็นทรานซิสเตอร์อื่นเป็นต้น

4.2 การไบแอสวงจรขยายแบบเอมมิตเตอร์ร่วม

ที่ตำแหน่งจุดทำงาน ข้อมูลที่ถูกกำหนดมีดังนี้

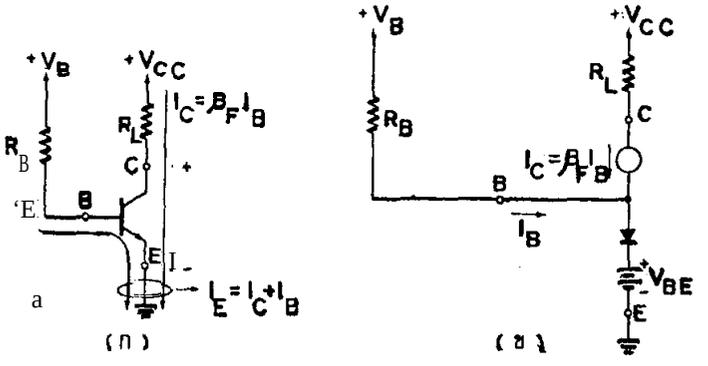
(1) กระแสตรงของคอลเลคเตอร์ (I_C)

(2) แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ตกคร่อมตัวทรานซิสเตอร์ (V_{CE})

(3) กระแสตรงของเบส (I_B) บางครั้งอาจเรียกเป็น **กระแสไบแอส** ก็ได้ ซึ่งสัมพันธ์

กับ I_C ด้วยอัตราส่วนการส่งผ่านกระแสไปข้างหน้า (forward current transfer ratio) h_{FE} หรือ β_F สำหรับวงจรเอมมิตเตอร์ร่วม

ในการไบแอสวงจร ต้องหาปริมาณกระแสไบแอสที่ต้องการ จากนั้นทำการออกแบบวงจรไบแอสด้านอินพุทให้ปล่อยกระแสปริมาณดังกล่าวเข้าสู่ทรานซิสเตอร์ วงจรไบแอสในขั้นตอนนี้ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน ดังแสดงในรูป 4.1 (ก) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า V_B อาจแยกเป็นแหล่งป้อนต่างหากจาก V_{CC} ก็ได้ แต่โดยปกติมักเป็นแหล่งจ่ายไฟเดียวกัน



รูป 4.1 (ก) วงจรไบแอสของวงจรเอมมิตเตอร์ร่วม มี 2 แหล่งจ่ายไฟตรง คือ V_B และ V_{CC}
(ข) วงจรสมมูล dc *ของรูป (ก)*

ถ้า V_B เป็นค่ากำหนดใด ๆ สามารถคำนวณค่า I_B โดยอาศัยค่า R_B และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ตกคร่อมระหว่างเบส-เอมมิตเตอร์ (คือ V_{BE}) ถ้ายังไม่ได้ I_B ตามค่าที่ต้องการ ทำโดยปรับ R_B ส่วนแรงดันไฟฟ้า V_{BE} ได้จากเส้นกราฟลักษณะสมบัติด้านอินพุทซึ่งมีค่าสมนัยกับ I_B แต่ถ้าไม่มีกราฟลักษณะสมบัติ อาจประมาณค่าเป็น 0.7 v สำหรับทรานซิสเตอร์ซิลิคอน หรือเป็น 0.3 v สำหรับทรานซิสเตอร์เจอร์มาเนียม และผลจากการใช้ค่าโดยประมาณดังกล่าวจะทำให้เกิดความไม่แน่นอนในการวิเคราะห์วงจรหรือไม่? คำตอบคือย่อมเกิดผลดังกล่าวแน่นอน แต่ผลจะน้อยมากจนอาจละทิ้งได้ เนื่องจาก V_B มากกว่า V_{BE} ถึง 10 เท่า ดังนั้นกระแสเบสขึ้นกับค่า V_B และ R_B เท่านั้น แต่ถ้าแรงดันไฟฟ้าทั้งสองนั้นต่างกันไม่ถึง 10 เท่า จำเป็นต้องหาค่าแน่นอนของ V_{BE} และต้องคำนึงถึงลักษณะการขึ้นกับอุณหภูมิของมันอีกด้วย

ในรูป 4.1 (ข) เป็นแบบจำลองของวงจรเอมมิตเตอร์ร่วม ซึ่งใช้ทรานซิสเตอร์ซิลิคอน จึงสามารถละทิ้งกระแสรั่วได้ สำหรับวิธีการทางคณิตศาสตร์ เริ่มโดยเขียน I_B ในพจน์ของธาตุวงจร โดยพิจารณาลูปอินพุท

$$I_B = \frac{V_B - V_{BE}}{R_B} \qquad \text{.....(4.1)}$$

และกระแสคอลเลคเตอร์ในพจน์ของธาตุวงจร ดังนี้

$$I_C = \beta_F I_B = \beta_F \frac{V_B - V_{BE}}{R_B} \qquad \text{.....(4.2)}$$

จากนั้น สามารถหาค่ากระแสเอมมิตเตอร์โดยใช้ความสัมพันธ์

$$I_E = I_B + I_C \qquad \text{.....(4.3)}$$

แรงดันไฟฟ้า V_{CE} คำนวณได้จากค่าของ V_{CC} และ R_L โดยใช้สมการ

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_L \qquad \text{.....(4.4)}$$

จากสมการ (4.4) เห็นได้ว่า ถ้า I_C มีค่าน้อย V_{CE} มีค่ามาก ดังนั้น ในการสร้างวงจรดังกล่าวนี้ ถ้าทำการวัดค่า V_{CE} ในวงจรได้ค่าสูงกว่าที่ต้องการ ณ ตำแหน่งจุดทำงาน แสดงว่ากระแส I_C มีค่าน้อย ซึ่งก็คือ I_B มีค่าน้อยเกินไปด้วย (จากสมการ (4.2)) วิธีชดเชยให้กระแสในวงจรเพิ่มค่าขึ้น ทำโดยลดค่า R_B

ตัวอย่าง 4.1 ตามวงจรในรูป 4.1 ใช้ทรานซิสเตอร์แบบซิลิคอน มี $\beta_F = 100$ ถ้า $V_{CC} = V_B = 8$ v และ $R_L = 1$ K ต้องใช้ R_B ค่าเท่าใดจึงจะเป็นการไบแอสวงจร ณ จุดกึ่งกลางเส้นโหลด

วิธี ที่จุดกึ่งกลางเส้นโหลด $V_{CE} = 1/2\ V_{CC} = V_{RL} = 4$ v

$$I_C = V_{RL}/R_L = 4/10^3 = 4 \text{ mA}$$

$$I_B = I_C/\beta_F = 40\ \mu\text{A}$$

ณ จุดทำงาน จะมีค่า $I_C = 4$ mA และ $I_B = 40\ \mu$A และกรณีนี้ไม่มีกราฟลักษณะสมบัติด้านอินพุท $V_{BE} \sim 0.7$ v

$$R_B = \frac{V_B - V_{BE}}{I_{BQ}} = \frac{8 - 0.7}{40 \times 10^{-6}} = 182 \text{ K}$$

(ถ้าตัดค่า V_{BE} ทิ้ง จะได้ค่า $R_B = 200$ K)

ตัวอย่าง 4.2 ตามวงจรในรูป 4.1 เช่นเดียวกับตัวอย่าง 4.1 ทุกประการ แต่ถ้า $V_{CC} = V_B = 20$ v และ $R_L = 2$ K ได้กระแสคอลเลคเตอร์ ณ จุดทำงานเป็น 2 mA

(ก) จงคำนวณหา R_B และ V_{CE}

(ข) จุดทำงานจะเลื่อนเข้าใกล้บริเวณอิ่มตัวหรือคัตออฟ?

วิธี ใช้สมการ (4.1) หาค่า R_B ดังนี้

$$(ก) \qquad R_B = \frac{V_B - V_{BE}}{I_B} = \frac{V_B - V_{BE}}{I_C/\beta_F} = \frac{20 - 0.7}{(2 \times 10^{-3})/100} \sim 1\ M\Omega$$

หาค่า V_{CE} โดยพิจารณาจากลูปเอาท์พุท

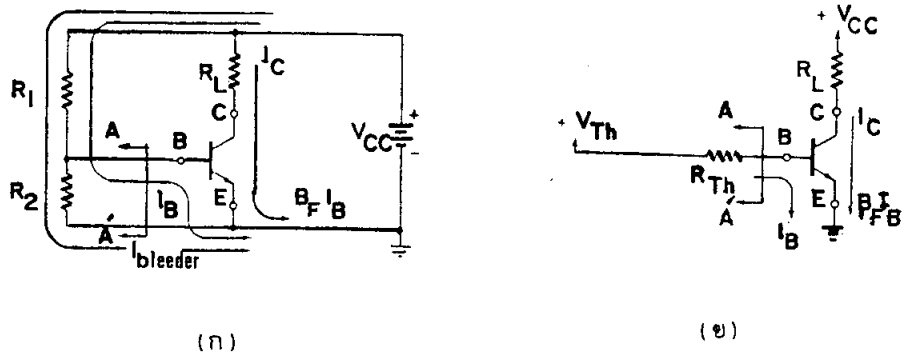
$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_L = 20 - (2 \times 10^{-3})(2 \times 10^{3}) = 16\ v$$

(ข) เห็นได้ว่า V_{CE} มีค่าสูงกว่า $V_{CC}/2$ ดังนั้น จุดทำงานเลื่อนลงตามแนวเส้นโหลด เข้าใกล้บริเวณคัตออฟ (ที่ตำแหน่งคัตออฟ คือที่กระแสคอลเลคเตอร์มีค่าเป็นศูนย์ $V_{CE} = V_{CC} = 20\ v$ ดังนั้น จุดทำงานที่คำนวณได้ตามข้อ (ก) อยู่ห่างจากตำแหน่งคัตออฟ 4 โวลท์ และสัญญาณเอาท์พุทจะแกว่งได้สูงสุดโดยไม่มีการขลิบเมื่อสัญญาณมีค่ายอด 4 โวลท์)

วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า (voltage divider circuit)

ตัวอย่างวงจรไบแอสแบบที่สองเป็นวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า แสดงในรูป 4.2 (ก) ลูปกระแสในวงจรนี้มี 3 ลูป คือ (1) กระแสคอลเลคเตอร์ (2) กระแสเบส (3) กระแสสูญเสีย (bleeder current) ถ้าใช้ทรานซิสเตอร์ ซิลิคอน สามารถละทิ้งกระแสรั่วได้ เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์วงจร เลือกใช้ทฤษฎีเทเวนิน (Thevenin's theorem) ซึ่งเป็นการเสนอแบบจำลองสำหรับวงจรอินพุท เพื่อลดรูปของตัวต้านทานให้มีรูปแบบง่าย ๆ และเพิ่มแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแก่วงจรอินพุท ดังนี้

(1) ตัวต้านทานเทเวนิน R_{Th} ได้จากการสมมุติว่าต้นกำเนิดแรงดันไฟฟ้า V_{CC} ลัดวงจรตัวต้านทาน R_1 ขนานกับ R_2 ใช้สัญญลักษณ์ $R_1 // R_2$



รูป 4.2 (ก) การไบแอสวงจรเอมมิตเตอร์ร่วมโดยใช้แบตเตอรีตัวเดียว
(ข) จัดค่าความต้านทานในวงจรอินพุทให้อยู่ในรูปง่าย ๆ โดยอาศัยทฤษฎีเทเวนิน

นั่นคือ $$R_{Th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{.....(4.5)}$$

(2) แรงดันไฟฟ้าเทเวนิน V_{Th} กำหนดให้เป็นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม R_2 โดยตัดส่วนที่ต่อกับเบสออก ดังนั้น กระแสไหลผ่าน R_2 ในกรณีนี้มีค่าเป็น $V_{CC}/(R_1 + R_2)$ เขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

$$V_{Th} = \frac{V_{CC}}{(R_1 + R_2)} .R_2 \quad \text{.....(4.6)}$$

ในรูป 4.2 (ข) แสดงวงจรสมมูลย์ของเทเวนิน ซึ่งเหมือนกับรูปวงจรที่ 4.1 (ข) แต่ข้อควรระวังคือ แรงดันไฟฟ้าเทเวนินไม่สามารถวัดค่าได้ในวงจรแท้จริงและ V_{Th} ไม่ใช่ V_{BE} จากรูป 4.2 (ข) เห็นได้ว่า $V_{Th} = V_{BE} + V_{RB}$

สำหรับการประยุกต์ใช้สมการ (4.5) และ (4.6) อาจทำได้ 2 กรณี ดังนี้

(1) เลือกค่า V_{Th} โดยทราบค่ากระแสไบแอส จากนั้นหาค่า R_{Th}

(2) เลือก R_{Th} โดยพิจารณาถึงผลของมัน ต่อความต้านทานอินพุท จากนั้น คำนวณหาค่า V_{Th} โดยทราบค่ากระแสไบแอสเช่นกัน

ทั้งสองกรณีดังกล่าว ต้องหาค่า R_1 และ R_2 ได้ จากการทราบค่า V_{Th} และ R_{Th} โดยเขียน R_1 ในสมการ (4.5) **โดยอาศัยสมการ (4.6)**

$$R_1 = \frac{V_{CC}}{V_{Th}} \cdot R_{Th} \quad \text{.....(4.7)}$$

ต่อไปคือเขียน R_2 ให้อยู่ในรูปของ V_{Th} และ R_{Th} เริ่มจากสมการ (4.6)

$$R_2 = \frac{V_{th}(R_1 + R_2)}{V_{CC}}$$

แทนค่า R_1 จาก (4.7), $R_2 = R_{Th} + R_2 . \frac{V_{Th}}{V_{CC}}$

$$R_2 (1 - \frac{V_{Th}}{V_{CC}}) = R_{Th}$$

$$R_2 = \frac{R_{Th} V_{CC}}{V_{CC} - V_{Th}} \quad \text{.....(4.8)}$$

กระแสไบแอสมีค่าเป็น $$I_B = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_{Th}} \quad \text{.....(4.9)}$$

เขียนกระแสคอลเลคเตอร์เป็น $I_C = \beta_F I_B = \beta_F (\frac{V_{Th} - V_{BE})}{R_{Th}}$ .....(4.10)

แทนค่า V_{Th} จาก (4.6) และ R_{Th} จาก (4.5) ลงในสมการ (4.10) ดังนั้น

$$I_C = \beta_F \left\{ \frac{V_{CC}}{R_1} - \frac{V_{BE}}{R_1 // R_2} \right\} \qquad \text{.....(4.11)}$$

ตัวอย่าง 4.3 จากวงจรในรูป 4.2 (ข) ถ้า V_{CC} = 8 v และ R_{Th} = 182 K กระแสไบแอส I_B = 40 μA

(ก) V_{Th} มีค่าสูงสุดและต่ำสุด เป็นเท่าใด

(ข) เลือก V_{Th} ให้มีค่าอยู่ระหว่างข้อ (ก) จากนั้นหาค่า R_1 และ R_2

(ค) ค่ากระแสบลีดเดอร์สำหรับแต่ละกรณี เป็นเท่าใด

วิธี

(ก) จากสมการ (4.7) $R_1 = \frac{V_{CC}}{V_{Th}} R_{Th}$ ค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ของ V_{Th} คือมีค่าเท่ากับ V_{CC} ซึ่งทำให้ $R_1 = R_{Th}$ นั่นคือ R_2 เป็นวงจรเปิดและค่าต่ำสุดที่เป็นไปได้คือ $V_{Th} = V_{BE}$ โดยพิจารณาจากรูป 4.2 (ข)

(ข) เลือกให้ V_{Th} = 7.7 v, 1.7 v และหาค่า R_{Th}

จาก (4.1) $R_{Th} = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{I_B}$ = 175 K (V_{Th} = 7.7 v)

= 25 K (V_{Th} = 1.7 v)

จาก (4.7), $R_1 = \frac{V_{CC}}{V_{Th}} R_{Th}$ = 200 K (V_{Th} = 7.7 v)

= 118 K (V_{Th} = 1.7 v)

จาก (4.8), $R_2 = \frac{V_{CC}}{V_{CC} - V_{Th}} R_{Th}$ = 1076 K (V_{Th} = 7.7 v)

= 31.8 K (V_{Th} = 1.7 v)

(ค) กระแสบลีดเดอร์ $I_{BL} = V_{BE}/R_2$ = 0.65 μA (R_2 = 1076 K)

= 22 μA R_2 = 31.8 K)

สรุปได้ว่า ถ้า V_{Th} ค่าสูง R_2 มีค่าสูง I_{BL} ต่ำ

V_{Th} ต่ำ R_2 มีค่าต่ำ I_{BL} สูง

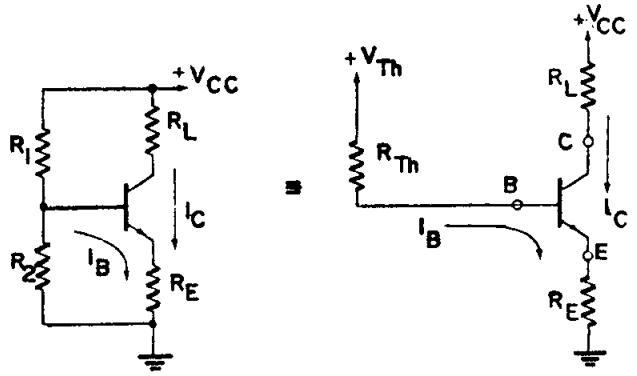
กระแสสูญเสีย หรือเรียกทับศัพท์เป็นกระแสบลีดเดอร์ เป็นปริมาณกระแสที่ไหลผ่าน R_2 ในวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้ารูป 4.2 (ก) ถ้ากระแสนี้มีปริมาณมากย่อมก่อให้เกิดการสูญเสียมากขึ้นใน V_{CC} บางครั้งอาจแทน R_2 ด้วยไดโอด (จะกล่าวรายละเอียดในตอน 4.7.3)

4.3 การต่อตัวต้านทานเอมมิตเตอร์ในวงจรไบแอส

จุดประสงค์ของการต่อตัวต้านทานที่ขาเอมมิตเตอร์ ดังแสดงในรูป 4.3 คือเพื่อช่วย

รักษาเสถียรภาพของวงจร ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในตอน 4.5 เนื้อหาที่จะกล่าวต่อไปนี้เพื่อศึกษา **คุณสมบัติการแปลงความต้านทานของทรานซิสเตอร์** สำหรับกรณีรู้ตำแหน่งจุดทำงานต้องการเลือก R_E, R_{Th} และ V_{Th} เพื่อให้ได้กระแสเบส I_B ตามต้องการ ประการแรก เขียน V_{Th} โดยพิจารณาจากลูปอินพุทในรูป 4.3

$$V_{Th} = I_B R_{Th} + V_{BE} + I_E R_E \qquad \text{.....(4.12)}$$



รูป 4.3 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า ซึ่งต่อตัวต้านทานเอมมิตเตอร์ R_E

ซึ่งสมการ (4.12) นี้ อาจเขียนให้อยู่ในรูปของกระแสเบสหรือกระแสเอมมิตเตอร์ พจน์ใดพจน์หนึ่งเท่านั้นก็ได้ ดังนี้

(1) ในพจน์ของกระแสเบสเท่านั้น ทำโดยแทนค่า $I_E = (\beta_F + 1)I_B$ ใน (4.12)

$$V_{Th} = I_B R_{Th} + V_{BE} + I_B(\beta_F + 1)R_E \qquad \text{.....(4.13)}$$

(2) ในพจน์ของกระแสเอมมิตเตอร์เท่านั้น โดยแทนค่า $I_B = I_E/(\beta_F + 1)$ ลงใน (4.12)

$$V_{Th} = \left(\frac{R_{Th}}{\beta_F + 1}\right) I_E + V_{BE} + I_E R_E \qquad \text{.....(4.14)}$$

จากสมการ (4.13) กล่าวได้ว่า กระแสเบสมองเห็น R_{Th} มีขนาดเท่าเดิม แต่เห็น R_E มีขนาดเพิ่มขึ้น $(\beta_F + 1)$ และถ้าหารตลอดสมการนี้ด้วยค่า I_B ผลคือ เป็นค่าของความต้านทานปริมาณหนึ่ง กำหนดเป็น R_{in} ดังนี้

$$\frac{V_{Th}}{I_B} = R_{in} = R_{Th} + (\beta_F + 1)\,R_E + \frac{V_{BE}}{I_B} \qquad \text{.....(4.15)}$$

สิ่งที่เกิดขึ้นนี้ อธิบายโดยมองเข้าในเบสตาม I_B ซึ่งไหลผ่าน R_{Th} และ R_E เมื่อ I_B เคลื่อนผ่านรอยต่อเอมมิตเตอร์ มันจะถูกเพิ่มค่าขึ้น β_F เท่า (เป็นคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์) และไหลผ่าน

R_E ซึ่งแรงดันตกคร่อมมีค่าเป็นไปตามการเพิ่มของกระแส ลักษณะเช่นนี้ อาจคิดเป็นว่า R_E เพิ่มค่าขึ้น β_F เท่าก็ได้ ดังนั้น สรุปว่า R_E ถูกแปลงจากขาเอมมิตเตอร์ เข้าสู่เบส หรือกล่าวได้ว่าทรานซิสเตอร์มีคุณสมบัติในการแปลงค่าความต้านทาน หลักการนี้ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการเขียนความต้านทานอินพุทเกือบทั้งหมดด้วยวิธีการคาดคะเน (inspection)

สมการ (4.14) อธิบายได้โดยวิธีเดียวกัน คือกระแสเอมมิตเตอร์ I_E (ผู้สังเกตมองเข้าสู่ขั้วเอมมิตเตอร์) มองเห็นตัวต้านทาน R_E ขนาดเท่าเดิม แต่ความต้านทาน R_{Th} มีค่าน้อยลง (β_F + 1) เท่า (คือพจน์ที่ 3 และ 1 ในสมการ (4.14) ตามลำดับ) ดังนั้น สามารถเขียนแรงดันตกคร่อม R_{Th} ได้ 2 รูป คือ

$$V_{Th} = I_B R_{Th} = \frac{I_E}{\beta_F + 1} R_{Th} \qquad \text{.....(4.16)}$$

สรุปได้ว่า เมื่อความต้านทานในขาเบสถูกแปลงเข้าสู่เอมมิตเตอร์ ต้องหารความต้านทานในขาเบสด้วยปริมาณ (β_F + 1) หรือถ้าความต้านทานถูกแปลงจากขาเอมมิตเตอร์เข้าสู่ขาเบสต้องคูณความต้านทานในขาเอมมิตเตอร์ด้วยปริมาณ (β_F + 1) ดังนั้น เขียนสมการ (4.13) และ (4.14) ได้จากรูป 4.3 โดยตรง

ขั้นต่อไปคือการเลือก R_E หรือ R_{Th} ในการออกแบบวงจรต้องคำนึงถึง

(1) เสถียรภาพ

(2) การแกว่งของแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทเนื่องจากความต้านทานอินพุท

(3) แหล่งป้อนแรงดันไฟฟ้า

หลักการออกแบบวงจรเอมมิตเตอร์ร่วม ซึ่งมีตัวต้านทาน R_E อยู่ด้วย

(1) เลือกจุดทำงาน เพื่ออ่านค่ากระแสคอลเลคเตอร์ กระแสเบส และแรงดันไฟฟ้าคอลเลคเตอร์-เอมมิตเตอร์

(2) เลือกความต้านทานเอมมิตเตอร์ เพื่อทำให้แรงดันตกคร่อมของไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างคอลเลคเตอร์-เอมมิตเตอร์ มีค่าไม่เกิน 10% ของ V_{CC} (โดยประมาณ)

(3) ให้ R_{Th} มากกว่า R_E ประมาณ 10-20 เท่า

(4) หาค่า V_{Th} จากสมการ (4-13)

(5) หาค่า R_1 และ R_2 จากสมการ (4-7) และ (4-8)

ตัวอย่าง 4.4 จากวงจรในรูป 4.3 ใช้ทรานซิสเตอร์แบบซิลิคอน มี β_F = 50 ถ้ากำหนดใช้ V_{CC} = 14 v ณ จุดทำงานมีค่า I_{CQ} = 2 mA, V_{CEQ} = 6 v ใช้ R_E = 1 K จงหาค่า R_1 และ R_2 เพื่อจัดกระแสไบแอสที่เหมาะสม

วิธี หาค่ากระแสไบแอสจาก $I_B = I_C/\beta_F = 40\ \mu A$

กระแสเอมมิตเตอร์มีค่าเป็น $I_E = I_C + I_B = 2.04$ mA

ใช้สมการ (4.13) หาค่า $V_{Th} = I_B R_{Th} + I_B(\beta_F + 1)R_E + V_{BE}$

แทนค่าตามโจทย์ $V_{Th} = (40 \times 10^{-6})(R_{Th} + 51 \times 10^3) + 0.7$

เลือก $R_{Th} = 10\ R_E = 10$ K แล้วแทนค่าในสมการข้างบน

$$V_{Th} \sim 3.1 \text{ v}$$

จากสมการ (4.7) $R_1 = \dfrac{V_{CC}R_{Th}}{V_{Th}} = 45$ K

จากสมการ (4.8) $R_2 = \dfrac{V_{CC}R_{Th}}{V_{CC} - V_{Th}} = 12.8$ K

(หรืออาจหา R_2 โดยใช้ความสัมพันธ์ $R_2 = \dfrac{R_1 R_{Th}}{R_1 - R_{Th}}$ ได้ค่าเดียวกัน)

หลักการวิเคราะห์หรือหาจุดทำงาน เมื่อกำหนดค่า R_1, R_2, R_E, β_F และ V_{CC} มีดังนี้

(1) หาค่า V_{Th} จากสมการ (4.6)

(2) หาค่า R_{Th} จากสมการ (4.5)

(3) หาค่า I_B จากสมการ (4.13) ดังนี้

$$I_B = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + (\beta_F + 1)R_E} \qquad \text{.....(4.17)}$$

(4) หาค่า V_{CE} จาก $V_{CE} = V_{CC} - (I_C R_L + I_E R_E)$ และ $I_C = \beta_F I_B$

ตัวอย่าง 4.5 จากรูป (4.3) ถ้าใช้ทรานซิสเตอร์ซิลิคอน $\beta_F = 50$ และ $V_{BE} = 0.6$ v ถ้ากำหนดค่าดังนี้ $V_{CC} = 15$ v, $R_1 = 80$ KΩ, $R_2 = 40$ KΩ, $R_L = 3$ K, $R_E = 1$ KΩ จงหาค่าของ I_B, I_C, V_{CE} และ V_{base}

วิธี หา I_B โดยใช้สมการ (4.17), $I_B = \dfrac{V_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + (\beta_F + 1)R_E}$

(1) ค่า $V_{Th} = \dfrac{R_2 V_{CC}}{R_1 + R_2} = 5$ v

(2) $R_{Th} = \dfrac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 26.7$ K

(3) $(\beta_F + 1)R_E = 51$ K

แทนค่า (1), (2), และ (3) ลงในสมการ (4.17) ได้ค่า $I_B = 57\ \mu A$

$I_C = \beta_F I_B = 2.85$ mA

$I_E = I_B + I_C = 2.90$ mA

จากลูปเอาท์พุท $V_{CC} = V_{CE} + V_{RE} + V_{RL}$

$V_{CE} = V_{CC} - V_{RE} - V_{RL}$

(1) $V_{RE} = I_E R_E = 2.9$ v

(2) $V_{RL} = I_C R_L = 86$ v

แทนค่า (1) และ (2) ลงในสมการของ V_{CE} และโจทย์ใช้ค่า $V_{CC} = 15$ v

นั่นคือ $V_{CE} = 3.5$ v

$V_{base} = V_{RE} + V_{BE} = 3.5$ v

ตัวอย่าง 4.6 ในวงจรรูป (4.3) ถ้าวัดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วคอลเลคเตอร์ได้ 6.4 v และแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเบสได้ค่า 3.5 v จงหา (ก) กระแสทั้งหมดในวงจร (ข) V_{CE} และ β_F โดยใช้ V_{CC}, R_1, R_2, R_L เช่นเดียวกับตัวอย่าง 4.5

วิธี (ก) (1) หากระแสคอลเลคเตอร์ โดยพิจารณาลูปเอาท์พุท

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{collector}}{R_L} = 2.85 \text{ mA}$$

(2) หากระแสไหลผ่าน R_2 $I_{R2} = V_B/R_2 = 87\ \mu A$

(3) หากระแสไหลผ่าน R_1 $I_{R1} = \dfrac{V_{CC} - V_{base}}{R_1} = 144\ \mu A$

(4) $I_B = I_{R1} - I_{R2} = 57\ \mu A$

(ข) $V_{CE} = V_{collector} - V_{RE}$

โดย $V_{RE} = V_{base} - V_{BE} = 2.9$ v

ดังนั้น $V_{CE} = 3.5$ v

$\beta_F = I_C/I_B = 50$

4.4 เสถียรภาพของวงจรทรานซิสเตอร์

เมื่อได้กำหนดจุดทำงานขึ้นแล้ว ทำให้ทราบค่ากระแสคอลเลคเตอร์ จากนั้นจึงทำการออกแบบวงจรไบแอสเพื่อให้ได้ปริมาณกระแสดังกล่าว แต่ถ้าสภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลง เช่น อุณหภูมิมีการแปรค่า เป็นต้น ผลคือ จุดทำงานแปรตำแหน่งได้เช่นกัน เสถียรภาพของวงจรย่อมหมายถึงเสถียรภาพของจุดทำงาน ซึ่งมีนิยามเป็นลักษณะการแปรค่าของกระแสเอาท์พุทโดยทั่วไป สำหรับวงจรขยายคือกระแสคอลเลคเตอร์ซึ่งแปรตามอุณหภูมิ (เมื่ออุณหภูมิเพิ่มกระแสคอลเลคเตอร์เพิ่มตาม และเมื่ออุณหภูมิลด กระแสคอลเลคเตอร์ลดลงด้วย) การกำหนด

ขีดจำกัดของการแปรค่ากระแสคอลเลคเตอร์ ต้องพิจารณาค่ายอดถึงยอดของแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท ตามความต้องการ ลักษณะของสัญญาณเอาท์พุทดังกล่าวนี้ได้เสนอรายละเอียดไว้แล้วในบทที่ 3

สำหรับภายในตัวทรานซิสเตอร์ มี 3 พารามีเตอร์ ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ คือ I_{CBO}, V_{BE} และ β_F แยกสรุปแต่ละพารามีเตอร์ ดังนี้

(1) I_{CBO} ที่อุณหภูมิห้อง มีค่า 10^{-3} μA สำหรับทรานซิสเตอร์ซิลิคอน และมีค่า 1 μA สำหรับทรานซิสเตอร์เจอร์มาเนียม (ค่าโดยประมาณ) ค่าดังกล่าวจะเพิ่มเป็น 2 เท่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 6 °C สำหรับทรานซิสเตอร์ซิลิคอน และ 10 °C สำหรับทรานซิสเตอร์เจอร์มาเนียม

(2) V_{BE} ลดลงประมาณ 2 mv ต่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 1 °C สำหรับทรานซิสเตอร์ทั้งสองชนิด

(3) β_F เป็นสัดส่วนโดยตรงกับช่วงห่างระหว่างเส้นกราฟที่มีกระแสเบสคงที่ ถ้าอุณหภูมิเพิ่มช่วงห่างจะกว้างมากขึ้น หรือเมื่อพิจารณาทรานซิสเตอร์ขณะอุณหภูมิเพิ่มขึ้น พาหะประจุมีความเร็วเพิ่มขึ้นในการเคลื่อนผ่านเบส ดังนั้น β_F เพิ่ม เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

ดังนั้น ในการวิเคราะห์วงจรทรานซิสเตอร์โดยวิธีการสร้างวงจรจำลอง หรือวงจรสมมูล จึงพยายามสร้างรูปทางคณิตศาสตร์ของกระแสคอลเลคเตอร์ให้เป็นอิสระต่อพารามีเตอร์ทั้งสาม โดยการกำหนดขีดจำกัดต่าง ๆ เช่น เมื่อกำหนดวงจรทรานซิสเตอร์วงจรหนึ่ง (จะกล่าวรายละเอียดในตอนต่อไป) ขั้นแรกวิเคราะห์โดยสร้างสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ จากนั้นพิจารณาค่าของ "ตัวประกอบเสถียรภาพ" (stability factor) เป็นต้น ซึ่งตัวประกอบเสถียรภาพยังแยกได้เป็นหลายแบบ มักใช้สัญลักษณ์เป็นอักษร S ส่วนตัวห้อย แล้วแต่ว่าจะพิจารณาการแปรค่าของกระแสคอลเลคเตอร์ขึ้นต่อค่าอะไร

เช่น ขึ้นกับการแปรค่าของ I_{CBO} กำหนด $\Delta I_{CQ} / \Delta I_{CBO} = S_I$

หรือ ถ้าขึ้นกับการแปรค่าของ V_{BE} กำหนด $\Delta I_{CQ} / \Delta V_{BE} = S_V$

สุดท้ายคือ ขึ้นกับการแปรค่าของ β_F กำหนด $\Delta I_{CQ} / \Delta \beta_F = S_\beta$

4.5 การวิเคราะห์กระแสรั่วของทรานซิสเตอร์โดยวิธีการวางซ้อน (superposition)

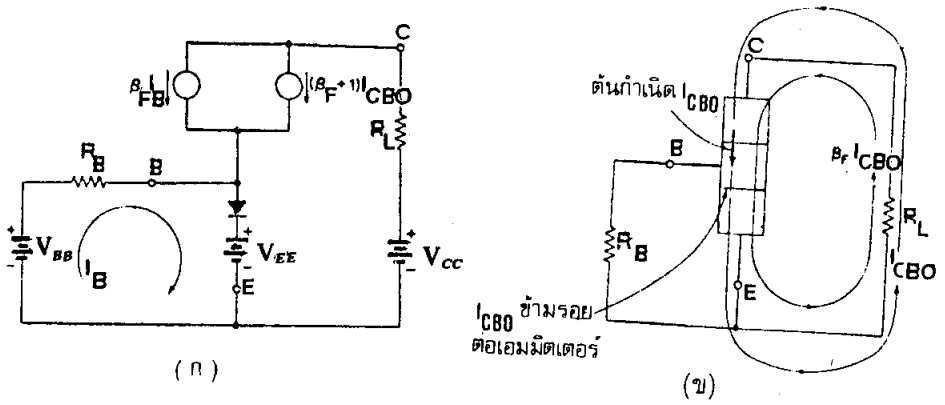
เทคนิคของวิธีการนี้ คือ ซ้อนแนวกระแสรั่วลงบนแนวของกระแสหลักในวงจร จัดเป็นวิธีหนึ่งที่ง่ายและสะดวกในการทำความเข้าใจผลของ I_{CBO}, V_{BE} และ β_F ที่มีต่อเสถียรภาพของจุดทำงาน ดังได้กล่าวแล้วว่า จุดทำงานมีโอกาสเคลื่อนตำแหน่งได้เมื่อธาตุวงจรหรือทรานซิสเตอร์เกิดการแปรค่า ประการสำคัญคือ ทำอย่างไรจึงจะให้จุดทำงานเคลื่อนตำแหน่งได้น้อยที่สุด ในทางทฤษฎีทำโดย

(1) เขียนกระแสคอลเลคเตอร์ในพจน์ของพารามีเตอร์ทรานซิสเตอร์ และธาตุวงจรภายนอก ซึ่งไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ

(2) จัดพจน์ดังกล่าวในข้อ (1) ให้อยู่ในรูปที่เหมาะสมต่อการทดสอบผลของแต่ละพารา-มีเตอร์ต่อการเลื่อนจุดทำงาน

(3) เขียนกระแสคอลเลคเตอร์ I_C ในรูปแบบซับซ้อนโดยวิธีการตรวจพินิจ (inspection)

ทั้งนี้ พึงรำลึกเสมอว่า สำหรับทรานซิสเตอร์ซิลิคอน I_{CBO} สามารถละทิ้งได้ แต่ถ้าเป็นทรานซิสเตอร์เจอร์มาเนียมต้องนำมาพิจารณาด้วยเสมอ จากวงจรในรูป 4.1 (ก) เขียนแบบจำลองวงจรใหม่ดังแสดงในรูป 4.4 (ก) ซึ่งรวม I_{CBO} ไว้ด้วย เขียนกระแสคอลเลคเตอร์ในเทอมของกระแสเบส (ในขั้นต้นจะพิจารณาเฉพาะกระแสตรงเพียงอย่างเดียว ซึ่งในรูปไม่ได้แสดงแหล่งจ่ายสัญญาณสลับอยู่เลย)



รูป 4.4 แสดงกระแสรั่วซึ่งถูกวางซ้อนบนแนวกระแสที่เกิดจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (ก) แบบจำลองโครงร่างของรูป 4.1 (ก) และได้รวมกระแสรั่วไว้ด้วย (ข) แนวกระแสคอลเลคเตอร์ ซึ่งแยกได้เป็นแต่ละส่วน มีต้นกำเนิดคือ I_{CBO}

$$I_C = \beta_F I_B + (\beta_F + 1) I_{CBO} \qquad \text{.....(4.18)}$$

เขียนกระแสเบสโดยพิจารณาลูปอินพุท

$$I_B = \frac{V_B - V_{BE}}{R_B} \qquad \text{.....(4.19)}$$

แทนค่าจากสมการ (4.19) ลงในสมการ (4.18)

$$I_C = \beta_F \left(\frac{V_B - V_{BE}}{R_B} \right) + (\beta_F + 1) I_{CBO} \qquad \text{.....(4.20)}$$

เปรียบเทียบสมการ (4.20) กับ สมการ (4.10) จะเห็นข้อแตกต่างเนื่องจากกระแสรั่ว

$$(I_C = \beta_F \frac{V_B - V_{BE}}{R_B} \qquad (4.10))$$

พิจารณาสมการ (4.20) เห็นได้ว่า

(1) I_{CBO} ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ จะเพิ่มค่าตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และยังถูกคูณด้วยค่า $(\beta_F + 1)$ อีกด้วย

(2) $(V_B - V_{BE})$ ในเทอมแรกนั้น ถ้าถือว่า $V_B >> V_{BE}$ ดังนั้น การแปรค่าของ V_{BE} จึงไม่มีความสำคัญ สามารถละทิ้งได้ เหลือเพียงปริมาณ V_B/R_B ซึ่งทำให้มีค่าคงที่ได้โดยจัดกระแสเบสตามต้องการ

(3) β_F มีผลต่อกระแสคอลเลคเตอร์ I_C ถ้า β_F แปรค่า ย่อมทำให้ I_C แปรค่าไปด้วยเสมอ

เขียนสมการ (4.20) ใหม่ เพื่อแยกส่วนประกอบของกระแสคอลเลคเตอร์ได้ดีขึ้น

$$I_C = \beta_F \left(\frac{V_B - V_{BE}}{R_B}\right) + I_{CBO} + \beta_F I_{CBO} \qquad \text{.....(4.21)}$$

$$= \quad (1) \quad + \quad (2) \quad + \quad (3)$$

สรุปได้ว่า กระแสคอลเลคเตอร์มีส่วนประกอบ 3 ส่วน ดังนี้

(1) β_F คูณกับกระแสเบสที่ข้ามรอยต่อเอมมิตเตอร์

(2) I_{CBO} ซึ่งมีเกิดขึ้นเสมอ

(3) β_F คูณกับส่วนที่ (2) ที่ข้ามรอยต่อเอมมิตเตอร์

วิธีการพิจารณาส่วนประกอบต่าง ๆ ของกระแสคอลเลคเตอร์ดังกล่าวนี้ เรียกว่าวิธีการวางซ้อน ในรูป 4.4 (ข) กระแสคอลเลคเตอร์ส่วนที่ (1) เกิดจากต้นกำเนิดแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้วงจรอินพุท เขียนค่าของมันโดยเริ่มต้นจากปริมาณกระแสเบส ซึ่งเขียนในรูปของแรงดันไฟฟ้าและความต้านทาน จากนั้นคูณด้วย β_F กระแสคอลเลคเตอร์ส่วนที่ (2) คือ ต้นกำเนิด I_{CBO} ไม่สามารถลดค่าของมันโดยใช้ธาตุวงจรภายนอก เมื่อมันเคลื่อนถึงบริเวณเบส จะมีการแยกส่วนและไหลไปยังขาเบสและขาเอมมิตเตอร์หรือไม่ ? ความจริงแล้วน่าจะเกิดการแยกไหล แต่ถ้า R_B มีค่ามาก (เมื่อเทียบกับความต้านทานที่รอยต่อเอมมิตเตอร์) ดังนั้น ถือได้ว่ากระแสส่วนใหญ่ไหลข้ามรอยต่อเอมมิตเตอร์เท่านั้น และส่วนประกอบที่ (3) ของกระแสคอลเลคเตอร์ เป็นผลจากการที่ I_{CBO} ไหลข้ามรอยต่อเอมมิตเตอร์ ซึ่งจะถูกเพิ่มค่าเป็น $\beta_F I_{CBO}$

ข้อสังเกต คือ I_{CBO} เกิดเนื่องจากอุณหภูมิ และถือเสมือนเป็นต้นกำเนิดกระแสที่เป็นอิสระ (คือไม่ขึ้นกับค่าของธาตุวงจร) แต่ $\beta_F I_{CBO}$ เป็นต้นกำเนิดกระแสที่ไม่เป็นอิสระ ถ้าใช้ทรานซิสเตอร์ซิลิคอน สามารถละทิ้งส่วนที่ (2) และ (3) ได้

สรุปได้ว่า ถ้าต้องการวิเคราะห์กระแสโดยวิธีการวางซ้อน สามารถเขียนสมการ (4.21)

โดยพิจารณาวงจรรูป 4.1 (ก) และสร้างส่วนประกอบที่ (1) จากการนำ β_F คูณกับกระแสเบสที่เขียนได้จากลูปเบส บวกกับส่วนที่ (2) คือ I_{CBO} และบวกกับส่วนที่ (3) คือ β_F คูณกับส่วนที่ (2) ที่ไหลข้ามรอยต่อเอมมิตเตอร์

4.6 การรักษาเสถียรภาพของจุดทำงาน

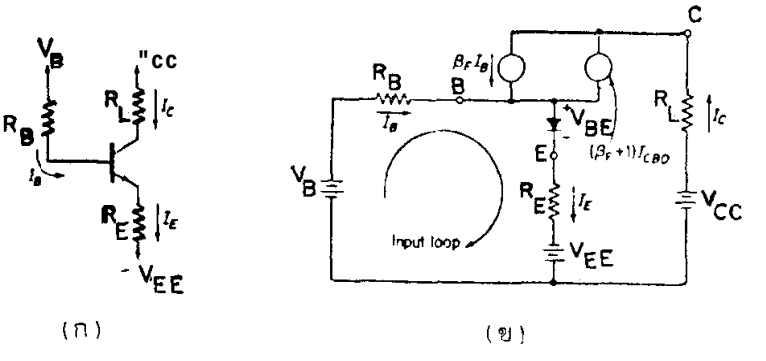
4.6.1 โดยวิธีต่อตัวต้านทานเอมมิตเตอร์

วงจรในรูป 4.5 ได้เพิ่มตัวต้านทานเอมมิตเตอร์เข้าในวงจรรูป 4.1 จุดประสงค์คือ รักษาเสถียรภาพของจุดทำงาน โดยพยายามคงค่ากระแสคอลเลคเตอร์ การวิเคราะห์ทำโดยเขียนกระแสคอลเลคเตอร์ให้อยู่ในพจน์ของธาตุวงจรและพารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ ตามวิธีการวางซ้อนกระแสดังกล่าวใน ตอน 4.5 กระแสคอลเลคเตอร์ควรประกอบด้วย 3 ส่วน ดังนี้

(1) ส่วนที่เกิดจาก β_F คูณกับกระแสเบส

(2) กระแสรั่ว I_{CBO}

(3) ส่วนของข้อ (2) ที่ไหลข้ามรอยต่อเอมมิตเตอร์



รูป 4.5 (ก) วงจรเอมมิตเตอร์ร่วมซึ่งต่อตัวต้านทานเอมมิตเตอร์ (ข) แบบจำลองของ (ก)

เขียนส่วนประกอบทั้งสามของกระแสคอลเลคเตอร์ ดังนี้

(1) เขียนกระแสเบส โดยพิจารณาจากลูปอินพุทของรูป 4.5 (ข)

$$V_B - I_B R_B - V_{BE} - I_E R_E + V_{EE} = 0 \qquad \text{(i)}$$

เขียนกระแสเอมมิตเตอร์ให้อยู่ในพจน์ของกระแสเบส โดย

$$I_E = I_B + I_C = I_B + \beta_F I_B + I_{CBO} + \beta_F I_{CBO}$$

$$= (\beta_F + 1)\, I_B + (\beta_F + 1)\, I_{CBO}$$

ดังนั้น เขียน (i) ใหม่

$$V_B + V_{EE} - V_{BE} = I_B R_B + (\beta_F + 1) I_B R_E + (\beta_F + 1) I_{CBO} R_E$$

$$= I_B [R_B + (\beta_F + 1) R_E] + I_{CBO} (\beta_F + 1) R_E$$

ย้ายข้างสมการเพื่อหาค่า I_B

$$I_B = \frac{V_B + V_{EE} - V_{BE} - I_{CBO} (\beta_F + 1) R_E}{R_B + (\beta_F + 1) R_E}$$

$$= \frac{V_B + V_{EE} - V_{BE}}{R_B + (\beta_F + 1) R_E} - \frac{(\beta_F + 1) R_E}{R_B + (\beta_F + 1) R_E} I_{CBO} \qquad \text{.....(4.22)}$$

$$= (1) - (2)$$

(2) เขียน I_C โดยเริ่มต้นจากความสัมพันธ์

$$I_C = \beta_F I_B + (\beta_F + 1) I_{CBO} \qquad \text{(ii)}$$

แทนค่า I_B จาก (4.22) ลงใน (ii)

$$I_C = \beta_F \left[\frac{V_B + V_{EE} - V_{BE}}{R_B + (\beta_F + 1) R_E} - \frac{(\beta_F + 1) R_E}{R_B + (\beta_F + 1) R_E} I_{CBO} \right] + (\beta_F + 1) I_{CBO}$$

$$= \beta_F \left[\frac{V_B + V_{EE} - V_{BE}}{R_B + (\beta_F + 1) R_E} \right] + (\beta_F + 1) I_{CBO} \left[1 - \frac{\beta_F R_E}{R_B + (\beta_F + 1) R_E} \right]$$

$$= (1) + (2)$$

จัดพจน์ที่ (2) ของ I_C ให้อยู่ในรูปแบบง่าย ๆ

$$(2) = (\beta_F + 1) I_{CBO} \left[\frac{R_B + (\beta_F + 1) R_E - \beta_F R_E}{R_B + (\beta_F + 1) R_E} \right]$$

$$= (\beta_F + 1) I_{CBO} \left[\frac{R_B + R_E}{R_B + (\beta_F + 1) R_E} \right]$$

$$= (\beta_F + 1) I_{CBO} \left[\frac{R_B + R_E}{(\beta_F + 1) \left(\frac{R_B}{\beta_F + 1} + R_E \right)} \right]$$

$$= I_{CBO} \left[\frac{(R_B + R_E) (\beta_F + 1)}{R_B + R_E (\beta_F + 1)} \right]$$

(คูณกระจาย และพยายามจัดให้เศษเหมือนส่วน)

$$= I_{CBO}\left[\frac{\beta_F R_B + R_B + \beta_F R_E + R_E}{R_B + (\beta_F + 1)R_E}\right]$$

$$= I_{CBO}\left[\frac{\{R_B + (\beta_F + 1)R_E\} + \beta_F R_B}{R_B + (\beta_F + 1)R_E}\right]$$

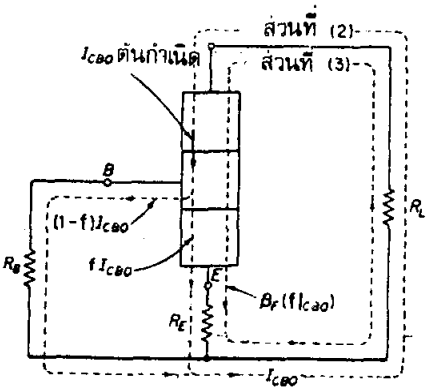
$$= I_{CBO}\left[1 + \frac{\beta_F R_B}{R_B + (\beta_F + 1)R_E}\right]$$

แทนค่าส่วนนี้ลงในสมการ (4.22)

$$I_C = \beta_F\left[\frac{V_B + V_{EE} - V_{BE}}{R_B + (\beta_F + 1)R_E}\right] + I_{CBO} + \beta_F I_{CBO}\left[\frac{R_B}{R_B + (\beta_F + 1)R_E}\right] \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (4.23)$$

$$= \qquad (1) \qquad + (2) + \qquad (3)$$

พิจารณา I_{CBO} ในพจน์ที่ (2) เริ่มเกิดที่รอยต่อคอลเลคเตอร์ เดินทางเข้าสู่เบส ซึ่งบริเวณเบสนี้ กระแส I_{CBO} มีทางไหลได้ 2 ทาง สมมุติให้ไหลข้ามรอยต่อเอมมิตเตอร์มีปริมาณ f ส่วน ที่เหลืออีก (1 – f) ส่วนนั้นไหลออกจากบริเวณเบสไปยัง R_B สุดท้ายกระแสรั่วทั้งสองส่วนดังกล่าว จะไหลบรรจบกัน และกลับสู่ขั้วคอลเลคเตอร์ ผังแสดงกระแสดังกล่าวแสดงในรูป 4.6 และในพจน์ที่ (3) ตัวหารของกระแสรั่วส่วนนี้คือ $[R_B + (\beta_F + 1)R_E]$ แสดงว่ากระแสรั่วต้องถูกแแบ่งแยกระหว่างตัวต้านทาน R_B และ $(\beta_F + 1)R_E$ กล่าวได้ว่า ณ บริเวณเบส กระแสรั่ว I_{CBO}



รูป 4.6 แสดงการแยกส่วนของกระแสรั่วที่เกิดขึ้น ไปยังขาเบสและข้ามรอยต่อเอมมิตเตอร์

มองเห็นความต้านทาน R_B มีขนาดเท่าเดิม แต่มองเห็นความต้านทาน R_E เพิ่มขึ้น $(\beta_F + 1)$ เท่า และกระแสรั่วปริมาณ fI_{CBO} เมื่อไหลข้ามรอยต่อเอมมิตเตอร์จะถูกกระตุ้นด้วยแหล่งผลิตกระแสไม่เป็นอิสระ กลายเป็น $\beta_F(fI_{CBO})$ ไหลเข้าสู่วงจรคอลเลคเตอร์

ค่า f หาโดยพิจารณาแรงดันตกคร่อมระหว่างเบส-เอมมิตเตอร์ทาง R_B จะต้องมีค่าเท่ากับทาง R_E ดังนี้

$$
\begin{aligned}
(1 - f)\, I_{CBO} R_B &= (f\, I_{CBO} + \beta_F f\, I_{CBO})\, R_E \\
(1 - f)\, R_B &= f\, R_E (1 + \beta_F) \\
R_B - f R_B &= f\, R_E (1 + \beta_F) \\
R_B &= f\, R_E (1 + \beta_F) + f R_B \\
f &= \frac{R_B}{R_B + (\beta_F + 1) R_E} \qquad \text{.....(4.24)}
\end{aligned}
$$

ย้อนพิจารณากระแสคอลเลคเตอร์ในสมการ (4.23) พจน์ที่ (2) เป็นปริมาณกระแสรั่ว ซึ่งไม่สามารถลดค่าลงโดยจัดธาตุวงจรภายนอก พจน์ที่ (3) อาจลดค่าลงได้โดยใช้ตัวต้านทานเอ็มมิตเตอร์ค่าสูง ซึ่งต้องเพิ่มแบตเตอรี่เอมมิตเตอร์ด้วย บทบาทของตัวต้านทานเอมมิตเตอร์คือแยกกระแสรั่วออกจากรอยต่อเอมมิตเตอร์ (ควรดูวงจรในรูป 4.5 (ก) ประกอบ) ส่วนในพจน์ที่ (1) มีค่า V_{BE} ซึ่งแปรค่าตามอุณหภูมิ และมีผลต่อเสถียรภาพของวงจร แต่ถ้า V_{EE} และ V_B มีค่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับ V_{BE} ดังนั้น สามารถละทิ้งผลของการแปรค่าของ V_{BE} ลงได้ และในทางปฏิบัติการต่อตัวต้านทานเอมมิตเตอร์ทำให้ต้องใช้ V_B ค่าสูงขึ้น จึงเป็นการลดผลเนื่องจากการแปรค่าของ V_{BE} ได้โดยตรง อีกปริมาณหนึ่งที่แปรตามอุณหภูมิคือ β_F จากสมการ (4.23) ถ้า R_B มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ $(\beta_F + 1)\, R_E$ เขียนความสัมพันธ์ใหม่เป็น

$$I_C \sim \beta_F \left[\frac{V_B + V_{EE} - V_{BE}}{(\beta_F + 1)\, R_E}\right] + I_{CBO} + \beta_F \left[\frac{R_B}{(\beta_F + 1)\, R_E}\right] I_{CBO} \qquad \text{.....(4.25)}$$

เมื่อ $R_B << (\beta_F + 1)\, R_E$ และ $\beta_F \sim (\beta_F + 1)$ เขียนสมการ (4.25) เป็น

$$I_C \simeq \frac{V_B + V_{EE} - V_{BE}}{R_E} + I_{CBO} + \frac{R_B}{R_E} I_{CBO} \qquad \text{.....(4.26)}$$

ในสมการ (4.26) ไม่มีพจน์ของ β_F ปรากฏอยู่เลย สรุปได้ว่า ตัวต้านทานเอมมิตเตอร์ยังรักษาเสถียรภาพของวงจร (คือคงค่ากระแสคอลเลคเตอร์) แม้ว่า β_F จะแปรไปก็ตาม

ข้อสังเกต คือ R_L (ตัวต้านทานโหลด) ไม่มีผลต่อเสถียรภาพของจุดทำงานเลย โดยทั่วไปวงจรนี้มักใช้ R_B เป็น 10 - 15 เท่าของ R_E และ β_F มักมีค่ามากกว่า 100 สำหรับทรานซิสเตอร์ที่ใช้สัญญาณขนาดน้อย ๆ พิจารณา ถ้า $R_B = 15\, R_E$ และ $(\beta_F + 1)\, R_E = 101\, R_E$ เห็นได้ว่าสอดคล้องกับแนวความคิดที่กล่าวมาแล้วข้างต้นและเป็นไปตามสมการ (4.26)

ตัวประกอบเสถียรภาพ หรือบางครั้งเรียกเป็นสัมประสิทธิ์ของเสถียรภาพดังกล่าวแล้ว

ในตอน 4.4 สำหรับวงจรนี้พิจารณาสมการ (4.24)

$$S_I = 1 + \beta_F \frac{R_B}{R_B + (\beta_F + 1) R_E} \sim \frac{R_B}{R_E}$$

และ $$S_V = \frac{\beta_F}{R_B + (\beta_F + 1) R_E} \sim \frac{1}{R_E}$$

ลักษณะวงจรในรูป 4.5 เปรียบเสมือนวงจรสมมูลของเทเวนินในวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า ซึ่งตัวต้านทาน R_B คือ R_1 และ R_2 ต่อขนานกัน ผลดีของการใช้ตัวต้านทาน 2 ค่า ดังกล่าว คือ สามารถแยกจัดความต้านทานในวงจรเบสและกระแสเบส ทำให้จุดทำงานในภาวะสงบมีเสถียรภาพดี ส่วนกระแสรั่วจะถูกแบ่งระหว่าง R_B และ R_E ทำให้กระแสเบสลดค่าลง ซึ่ง $\beta_F I_B$ ที่สมนัยกันย่อมลดค่าลง เป็นการชดเชยการเพิ่มค่าของกระแสรั่ว เนื่องจากความสัมพันธ์

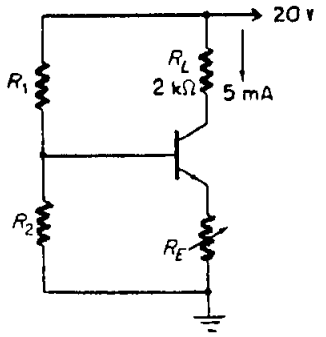
$$I_C = \beta_F I_B + (\beta_F + 1) I_{CBO}$$

จากวงจรในรูป 4.5 (ข) เป็นลักษณะของวงจรป้อนกลับ (feedback) ซึ่งมีผลอย่างมากต่อการขยาย (ลดประสิทธิภาพในการขยายลง) อธิบายดังนี้ ต้นกำเนิดกระแสไม่อิสระ $\beta_F I_B$ ต่อในวงจรเป็นลักษณะที่กระแสเบสขึ้นกับกระแสคอลเลคเตอร์ แต่กระแสคอลเลคเตอร์กลับขึ้นกับเอาท์พุทของ $\beta_F I_B$ กล่าวคือ ผลของเอาท์พุทย้อนกลับส่งผลยังภาคอินพุทของแหล่งกำเนิดเดียวกัน เรียกเป็นลักษณะของการป้อนกลับ ตัวต้านทานเอมมิตเตอร์ทำหน้าที่ตอบสนองการป้อนกลับดังกล่าว กำจัดการป้อนกลับโดยต่อตัวจุบายพาส (bypass) เพื่อลัดสัญญาณ

หรืออธิบายลักษณะการรักษาเสถียรภาพของวงจรนี้ โดยอาศัยทฤษฎีของการป้อนกลับกล่าวคือ ถ้าวงจรทำงานที่อุณหภูมิห้อง กระแสเบสหาค่าจาก V_B, R_B และแรงดันตกคร่อม R_E การรบกวนใด ๆ ที่อาจมีขึ้น เช่น อุณหภูมิเพิ่ม ซึ่งก่อให้กระแสคอลเลคเตอร์เพิ่มขึ้น และกระแสเอมมิตเตอร์เพิ่มขึ้นตาม ผลตามมาคือ แรงดันตกคร่อม R_E เพิ่มขึ้น แต่ V_B และ R_B ไม่เปลี่ยนแปลง ยิ่งแรงดันตกคร่อม R_E เพิ่ม จะยิ่งลดกระแสเบส ดังนั้น กระแสเอมมิตเตอร์ลดลง เห็นได้ว่าเป็นการชดเชยทำให้กระแสเอมมิตเตอร์คงที่เช่นเดียวกับกระแสคอลเลคเตอร์

ตัวอย่างต่อไปนี้จะช่วยแสดงให้เห็นผลที่ R_E รักษาเสถียรภาพของจุดทำงานได้ดี

ตัวอย่าง 4.7 วงจรในรูป 4.7 ถ้า V_{BE} และ β_F ไม่แปรค่าตามอุณหภูมิ กำหนดให้ $R_B = R_1 // R_2 = 10\ K\Omega$ ถ้า $R_E = 0$ (ก) ที่อุณหภูมิห้อง $I_C = 5\ mA$ และ $I_{CBO} = 10\ \mu A$ จงคำนวณ I_B, R_1, R_2



รูป 4.7 ใช้ในตัวอย่าง 4.7

(ข) ที่ 35 °C กระแสรั่ว I_{CBO} เพิ่มเป็น 20 μA จงคำนวณค่า I_B, I_C

(ค) ที่ 55 °C, I_{CBO} = 80 μA ทำซ้ำข้อ (ข) (B_F = 50)

วิธี หากระแสเบสจากสมการ (4.18)

$$I_B = \frac{1}{\beta_F}\left(I_C - (\beta_F + 1) I_{CBO} \right) = 89.8\ \mu A$$

จากสมการ (4.19)

$$V_B = I_B R_B + V_{BE} = 1.19\ v$$

และจากสมการ (4.7) และ (4.8) หาค่า R_1, R_2

$$R_1 = \frac{V_{CC}}{V_B} R_B = 168\ K\Omega$$

$$R_2 = \frac{V_{CC}}{V_{CC} - V_B} R_B = 10.6\ K\Omega$$

(ข) กระแสรั่วเพิ่มค่าเป็น 2 เท่า ถ้ากระแสเบสคงที่ หากระแสคอลเลคเตอร์ใหม่

$$I_C = \beta_F I_B + (\beta_F + 1) I_{CBO} = 5.51\ mA$$

(ค) ใช้ค่า I_{CBO} = 80 μA แทนลงในข้อ (ข), I_C = 8.57 mA

ตัวอย่าง 4.8 ตามข้อกำหนดเดิมในตัวอย่าง 4.7 แต่ใช้ R_E = 1 KΩ (ก) จงหาค่า I_B, R_1, R_2 ที่ 25 °C (ข) เมื่อกระแสรั่วเพิ่มค่าเป็น 20 μA จงหาผลที่เกิดต่อ I_B และ I_C (ค) ถ้ากระแสรั่วเพิ่มค่าเป็น 80 μA ทำซ้ำข้อ (ข)

วิธี

(ก) I_B หาได้ค่าเช่นเดียวกับตัวอย่าง 4.7 คือ 89.8 μA

เพื่อจะหาค่า R_1 และ R_2 ต้องหาค่า V_B ใหม่โดยอาศัยสมการ (4.22)

$$V_B = I_B \{R_B + (\beta_F + 1) R_E\} + I_{CBO} (\beta_F + 1) R_E + V_{BE}$$

$$= 6.27\ v$$

ดังนั้น

$$R_1 = \frac{V_{CC}}{V_B} R_B = 32\ K\Omega$$

$$R_2 = \frac{V_{CC}}{V_{CC} - V_B} R_B = 14.5\ K\Omega$$

(ข) จากสมการ (4.22) เห็นได้ว่ากระแสเบสมี 2 ส่วน ดังนี้

$$I_B = \frac{V_B - V_{BE}}{R_B + (\beta_F + 1)\, R_E} - \frac{(\beta_F + 1)\, R_E}{R_B + (\beta_F + 1)\, R_E}\, I_{CBO}$$

$$= \quad (1) \quad - \quad (2)$$

เมื่อแทนค่า $V_B = 6.27$ v และ $V_{BE} = 0.3$ v ผลคือ ส่วนที่ (1) มีค่า 98.0 μA, ส่วนที่ (2) ถ้าอุณหภูมิ 25 °C แทนค่ากระแสรั่วเป็น 10 μA ดังนั้น ส่วนที่ (2) มีค่าเป็น $\frac{51}{61}\, I_{CBO}$

นั่นคือ ที่ 25 °C, $I_B = 98 - 8.3 = 89.7\ \mu A$

ที่ 35 °C, $I_B = 98 - 16.6 = 81.4\ \mu A$

สำหรับกระแสคอลเลคเตอร์ เขียนทีละส่วนโดยอาศัยกระแสเบส ดังนี้

ส่วนที่ (1) = $\beta_F I_B$ = 50 (98.0) = 4.9 mA

ส่วนที่ (2) = I_{CBO} = 10 μA (25 °C)

ส่วนที่ (3) = $f\beta_F I_{CBO}$ = $(\frac{10}{61})$ (50) (10) = 82 μA

$$(f = \frac{R_B}{R_B + (\beta_F + 1)\, R_E} = \frac{10\, R_E}{10\, R_E + 51\, R_E} = \frac{10}{61})$$

ที่ 25 °C, I_C = (1) + (2) + (3) = 4.992 mA

ที่ 35 °C กระแสรั่วเพิ่มขึ้นเป็น 20 μA (2 เท่า) ส่วนที่ (3) = $2 \times 82 = 164\ \mu A$

ดังนั้น ที่ 35 °C, $I_C = 5.08$ mA

(ค) ที่ 55 °C กระแสรั่วเพิ่มค่าเป็น 80 μA ดังนั้น ส่วนที่ (2) ของกระแสเบสมีค่าเป็น $8 \times 8.3 = 66.4\ \mu A$ นั่นคือ $I_B = 98 - 66.4 = 31.6\ \mu A$

ส่วนกระแสคอลเลคเตอร์ที่ (3) มีค่าเป็น $8 \times 82 = 656\ \mu A$

นั่นคือ $I_C = 4.9 + 0.08 + 0.65 = 5.63$ mA

สรุปได้ว่า เมื่อกระแสรั่ว**เพิ่ม**ค่า กระแสเบส**ลด**ลง และกระแสคอลเลคเตอร์**เพิ่ม**ขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบ ตัวอย่าง 4.7 และ 4.8 จะสังเกตการแปรค่าของกระแสเบสเนื่องจากตัวต้านทานเอมมิตเตอร์ แต่กระแสคอลเลคเตอร์มีลักษณะค่อนข้างคงที่ (แปรค่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น) (ดูตาราง 4.1)

ตาราง 4.1 เปรียบเทียบกระแสแปรค่าจาก ตัวอย่าง 4.7 และ 4.8

		$R_E = 0$	$R_E = 1$ KΩ
I_B	25 °C	89.8 μA	89.7 μA
	35 °C		81.4 μA
	55 °C		32.0 μA
I_C	25 °C	5.00 mA	5.00 mA
	35 °C	5.51 mA	5.08 mA
	55 °C	8.57 mA	5.63 mA

การศึกษาบทบาทของตัวต้านทานเอมมิตเตอร์ อาจทำได้อีกวิธีหนึ่ง คือ พิจารณาค่า f จากสมการ(4.24)เมื่อเลือกค่า โดยประมาณ และลองทดสอบค่าของมันโดยคำนวณจากการแปรค่าของ β_F ผลคือ ตัวต้านทานเอมมิตเตอร์ช่วยรักษาให้ส่วนของกระแสรั่วไหลข้ามรอยต่อเอมมิตเตอร์อย่างสม่ำเสมอ แม้ว่า β_F จะแปรไปก็ตาม สมมุติ วงจรในรูป 4.7 ใช้ทรานซิสเตอร์เจอร์มาเนียม กระแสคอลเลคเตอร์แปรค่าอยู่ระหว่าง 2 - 4 mA ในสิ่งแวดล้อมมีอุณหภูมิแปรระหว่าง 25 - 55 °C ซึ่งกระแสรั่วแปรค่าตามจาก 10 - 80 μA ตามลำดับ และ β_F แปรค่า 50 - 100 พิจารณาตามลำดับ ดังนี้

(1) ถ้า $\beta_F = 50$ เป็นค่าคงที่ ไม่แปรตามอุณหภูมิ และ $R_E = 0$ กระแสคอลเลคเตอร์ส่วนที่ (2) + (3) = 10 + 500 μA (25 °C) (กรณีนี้ f = 1)

เมื่อกระแสรั่วเป็น 80 μA ส่วนที่ (2) + (3) = 80 + 100 (80) μA (55 °C) ดังนั้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่ม ส่วนที่ (2) + (3) ของกระแสคอลเลคเตอร์แปรไป 7.57 mA ถ้าต้องการให้แปรค่าไปเพียง 2 mA ต้องลดค่าของส่วนที่ (2) + (3) ลง 4 เท่า เพื่อความปลอดภัยเลือกที่จะลดค่าลง 6 เท่า นั่นคือ เลือกค่า f = 1/6

$$f = \frac{R_B}{R_B + (\beta_F + 1) R_E} = \frac{1}{6}$$

ยังคงใช้ค่า $\beta_F = 50$ และเลือกให้ $R_B = 10\ R_E$ แทนค่าในสมการ

นั่นคือ $f \sim \frac{1}{6}$ และ $f\beta_F \sim \frac{50}{6} = 8$

(2) ถ้า $\beta_F = 100$ คำนวณได้ค่า $f = \frac{10\ R_E}{R_E (10 + 100)} \sim \frac{1}{11}$.

และ $f\beta_F = \frac{100}{11} \sim 9$ ค่าเกือบเท่าเดิมในลำดับที่ (1)

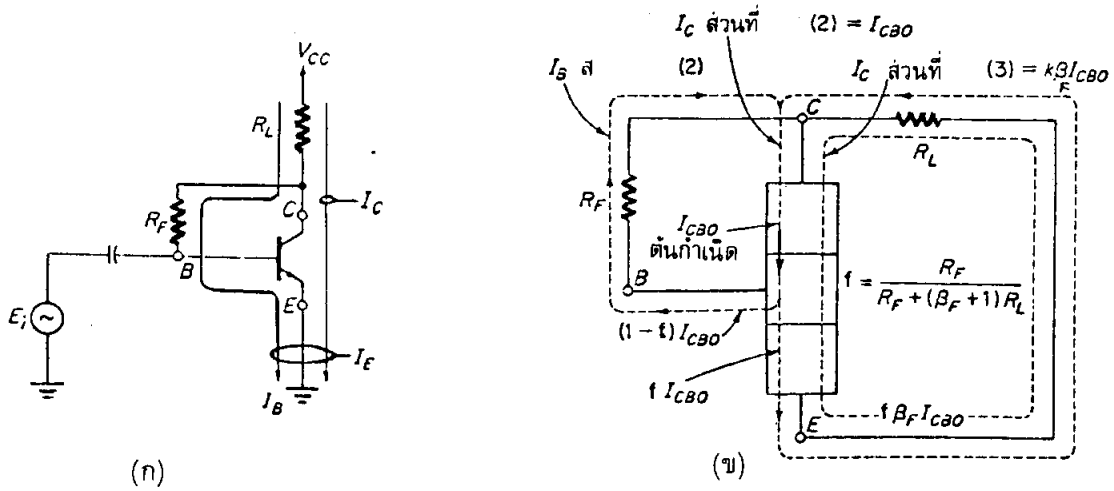
ดังนั้น ยอมให้ส่วนที่ (3) ของกระแสคอลเลคเตอร์เพิ่มค่าเป็น $f\beta_F I_{CBO} = 9 \times 80 = 0.72\,\text{mA}$ เนื่องจากการเลือกค่า f ไม่ว่า β_F จะมีค่าเท่าใดก็ตาม

4.6.2 โดยวิธีต่อตัวต้านทานคอลเลคเตอร์-เบส

การทำให้วงจรเสถียรอีกวิธีหนึ่ง คือ ต่อตัวต้านทานป้อนกลับ ระหว่างเบสและคอลเลคเตอร์ ลักษณะการต่อแสดงในรูป 4.8 ซึ่งต่างจากในรูป 4.7 แต่การรักษาเสถียรภาพคล้ายกัน เนื่องจากกระแสเบสถูกปรับโดยอัตโนมัติให้ต้านการแปรค่าของกระแสคอลเลคเตอร์ จุดประสงค์ในการวิเคราะห์วงจรเป็นเช่นเดียวกัน ดังนี้

(1) เพื่อเขียนสมการกระแสเบสและคอลเลคเตอร์ โดยวิธีการตรวจพินิจ

(2) จัดสมการให้มีรูปง่าย และสะดวกในการแยกพิจารณาผลจากการแปรค่าของกระแสรั่ว I_{CBO}, V_{BE} และ β_F



รูปที่ 4.8 การรักษาเสถียรภาพของวงจรเอมมิตเตอร์ร่วม โดยต่อตัวต้านทาน R_F ระหว่างคอลเลคเตอร์-เบส (ก) แสดงรูปวงจร ซึ่งประกอบด้วยกระแสที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้าใช้ทรานซิสเตอร์ซิลิคอน (ข) แผนผังกระแสรั่วเมื่อใช้ทรานซิสเตอร์เจอร์มาเนียม

ถ้าใช้ทรานซิสเตอร์ซิลิคอน เขียนกระแสเบสจากลูปอินพุท ดังนี้

$$V_{CC} - V_{BE} = I_B R_F + I_B R_L + \beta_F I_B R_L$$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_F + (\beta_F + 1) R_L} \qquad \text{.....(4.27)}$$

เขียนกระแสคอลเลคเตอร์โดยอาศัยสมการ (4.27)

$$I_C = \beta_F I_B = \beta_F \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_F + (\beta_F + 1) R_L} \quad \text{.....(4.28)}$$

ถ้า V_{BE} น้อยกว่า V_{CC} มาก ๆ การแปรค่าของ V_{BE} เนื่องจากอุณหภูมิจึงตัดทิ้งได้ นั่นคือ $V_{CC} \sim 10\ V_{BE}$ = 6 โวลท์ ถ้า $R_F << (\beta_F + 1)\ R_L$ และถือว่า $\beta_F \sim (\beta_F + 1)$ เขียนสมการ (4.28) ได้ใหม่ ดังนี้

$$I_C \sim \beta_F \frac{(V_{CC} - V_{BE})}{\beta_F + 1)\ R_L} \sim \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_L} \quad \text{.....(4.29)}$$

ถ้าใช้ทรานซิสเตอร์เจอร์มาเนียม ต้องคำนึงถึงกระแสรั่ว ในที่นี้จะใช้วิธีเช่นเดิม คือวางซ้อนกระแสรั่วลงบนแนวของกระแสปกติ แสดงแผนผังในรูป 4.8 (ข) ซึ่งแสดงถึงต้นกำเนิดกระแสรั่ว เริ่มจากรอยต่อคอลเลคเตอร์-เบส เมื่อเดินทางถึงรอยต่อเอมมิตเตอร์ กระแสรั่วจะแยกไหลไปยัง R_F ส่วนหนึ่ง ซึ่งเป็นวงจรอินพุท อีกส่วนหนึ่งจะไหลข้ามรอยต่อเอมมิตเตอร์ไปสู่วงจรเอาท์พุท ให้กระแสรั่วไหลผ่านรอยต่อเอมมิตเตอร์ด้วยปริมาณ $f\ I_{CBO}$ ดังนั้น ส่วนที่เหลือจะไหลไปยัง R_F มีปริมาณ $(1 - f)\ I_{CBO}$ เมื่อ fI_{CBO} ไหลข้ามรอยต่อเอมมิตเตอร์ มันจะถูกเพิ่มปริมาณขึ้น β_F เท่า จึงกลายเป็นกระแสรั่วปริมาณ $\beta_F f I_{CBO}$ไหลผ่าน R_L

จากรูป 4.8 (ข) พิจารณาแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างขั้วคอลเลคเตอร์และเบสทางด้าน R_F จะต้องเท่ากับด้าน R_L เขียนสมการทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

$$\begin{aligned}
(1 - f)\ I_{CBO} R_F &= (fI_{CBO} + f\beta_F I_{CBO})\ R_L \\
&= (f + f\beta_F)\ I_{CBO}\ R_L \\
R_F - fR_F &= f\ (1 + \beta_F)\ R_L \\
R_F &= f\ (1 + \beta_F)\ R_L + fR_F \\
&= f\left[(1 + \beta_F)\ R_L + R_F\right] \\
f &= \frac{R_F}{R_F + (\beta_F + 1) R_L} \quad \text{.....(4.30)}
\end{aligned}$$

จากสมการ (4.30) กระแสที่ไหลข้ามรอยต่อเอมมิตเตอร์จะมองเห็นความต้านทานเพิ่มค่าขึ้น $(\beta_F + 1)$ เท่า เนื่องจากคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์นั่นเอง ถ้าต่อตัวต้านทานเอมมิตเตอร์ไว้ด้วยกระแสปริมาณ fI_{CBO} จะมองเห็นความต้านทานนี้มีค่าเป็น $(\beta_F + 1)\ R_F$

กระแสเบส I_B มองเห็น R_F ต่ออนุกรมอยู่กับ R_L, V_{CC}, และ V_{BE} เมื่อกระแสเบสไหลข้ามรอยต่อเอมมิตเตอร์ มันจะถูกเพิ่มค่าเป็น $\beta_F I_B$ ซึ่งเมื่อไหลผ่าน R_L ย่อมก่อให้เกิดแรงดันตกคร่อม R_L เพิ่มขึ้น β_F เท่า ดังนั้น กระแสเบส I_B จากต้นกำเนิดกระแสอันเดิม จะมองเห็น R_L มีขนาดมากขึ้น β_F เท่า นั่นคือ I_B มองเห็นความต้านทานมีค่าเป็น $R_F + (\beta_F + 1)\ R_L$

เขียนสมการอธิบายกระแสคอลเลคเตอร์โดยใช้ส่วนที่ (1) จากสมการ (4.28) ส่วนที่ (2) เป็นปริมาณกระแสรั่ว I_{CBO} ซึ่งไม่สามารถลดปริมาณลงได้โดยการจัดธาตุวงจรภายนอก ส่วนที่ (3) คือ ปริมาณ $f\beta_F I_{CBO}$ ซึ่งมีรูปทั่วไปดังนี้

$$I_C = \beta_F \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_F + (\beta_F + 1)R_L} + I_{CBO} + \beta_F I_{CBO} \frac{R_F}{R_F + (\beta_F + 1) R_L} \quad \text{.....(4.31)}$$

$$= \quad (1) \quad + (2) + \quad (3)$$

ขั้นต่อไปเขียนกระแสเบสแยกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ (1) ได้จากสมการ (4.27) ส่วนที่ (2) เป็นกระแสที่ไหลสวนทิศกับกระแสเบสส่วนที่ (1)

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_F + (\beta_F + 1) R_L} - (1 - f) I_{CBO}$$

$$= \quad (1) \quad - \quad 2)$$

แทนค่า f จากสมการ (4.30) ลงในกระแสเบสส่วนที่ (2)

กระแสเบสส่วนที่ (2) $= \left[1 - \frac{R_F}{R_F + (\beta_F + 1) R_L}\right] I_{CBO}$

$$= \left[\frac{R_F + (\beta_F + 1) R_L - R_F}{R_F + (\beta_F + 1) R_L}\right] I_{CBO}$$

$$= \frac{(\beta_F + 1) R_L}{R_F + (\beta_F + 1) R_L} I_{CBO}$$

ดังนั้น เขียนกระแสเบสได้ใหม่ ดังนี้

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_F + (\beta_F + 1) R_L} - \frac{(\beta_F + 1) R_L}{R_F + (\beta_F + 1) R_L} I_{CBO} \quad \text{.....(4.32)}$$

สัมประสิทธิ์ของกระแสรั่ว I_{CBO} ในสมการ (4.32) เป็นตัวประกอบเสถียรภาพสำหรับกระแสรั่ว แต่การใช้ประโยชน์ทั่วไปจะพิจารณาว่า กระแสคอลเลคเตอร์แปรค่าอย่างไรตามฟังก์ชันของ I_{CBO} ทำโดยศึกษาค่า f ถ้าสามารถลดค่าของมันได้ จะทำให้สามารถลดกระแสรั่วลงได้ β_F เท่า การเพิ่ม R_L หรือ β_F และลดค่า R_F จะแยก I_{CBO} ออกไป ซึ่งจะเหลือ I_{CBO} ส่วนน้อยลงไหลข้ามรอยต่อเอมมิตเตอร์

การแปรค่าของกระแสคอลเลคเตอร์ เกิดจากกระแสเบส I_B ถูกสร้างขึ้นจาก V_{CE} ในรูป 4.8 (ก) ถ้ากระแสคอลเลคเตอร์เพิ่มขึ้น (ไม่ว่ากรณีใด ๆ) จะทำให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม R_L

เพิ่มขึ้นตาม ผลคือ V_{CE} ลดลง และทำให้ I_B ลดลง จึงเป็นการลดแนวโน้มที่กระแสคอลเลคเตอร์จะเพิ่มค่าขึ้น

ตัวอย่าง 4.9 จากวงจรในรูป 4.8 (ก) ใช้ทรานซิสเตอร์ซิลิคอน $R_L = 10\ K\Omega$ และ $V_{CC} = 20$ v, $V_{BE} = 0.6$ v (ก) จงคำนวณหา R_F เพื่อให้ได้กระแสคอลเลคเตอร์ 1 mA ถ้า $\beta_F = 50$ (ข) ถ้า $\beta_F = 100$ จงคำนวณกระแสคอลเลคเตอร์ พร้อมอธิบายว่า R_F ช่วยรักษาเสถียรภาพของวงจรหรือไม่

วิธี

(ก) กระแสเบสที่ต้องการ คือ

$$I_B = I_C/\beta_F = \frac{10^{-3}}{50} = 20\ \mu A$$

หาค่า R_F จากสมการ (4.27)

$$R_F = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_B} - (\beta_F + 1)\, R_L = 460\ K\Omega$$

(ข) เมื่อ β_F เพิ่มเป็นสองเท่า ถ้าไม่มีการรักษาเสถียรภาพของวงจร กระแสคอลเลคเตอร์ควรเพิ่มค่าเป็นสองเท่าเช่นกัน คือ มีค่า 2 mA ทดสอบโดยคำนวณกระแสปริมาณนี้จากสมการ (4.28) ดังนี้

$$I_C = \beta_F \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_F + (\beta_F + 1)\, R_L} = 1.3\ mA$$

เห็นได้ว่า การต่อตัวต้านทาน R_F ช่วยลดกระแสคอลเลคเตอร์จากการเพิ่มค่าถึง 35%

ตัวอย่าง 4.10 ถ้าใช้ทรานซิสเตอร์เจอร์มาเนียมแทนในตัวอย่าง 4.9 กำหนด $\beta_F = 50$, $I_{CBO} = 2\ \mu A$ และ $V_{BE} = 0.2$ v (ก) จงหาค่า R_F ซึ่งทำให้ I_C มีค่า 1 mA (ข) I_{CBO} ไหลข้ามรอยต่อเอมมิตเตอร์มีปริมาณเท่าใด ? (ค) ถ้าอุณหภูมิแปรค่า สมมุติ V_{BE} และ β_F แปรค่าน้อยมากจนสามารถละทิ้งได้ แต่ I_{CBO} เพิ่มเป็น 10 μA กระแสคอลเลคเตอร์จะเพิ่มขึ้นเท่าใด ?

วิธี

(ก) หาค่า R_F จากสมการ (4.31)

$$R_F = \frac{\beta_F (V_{CC} - V_{BE}) - (\beta_F + 1)\, R_L (I_C - I_{CBO})}{I_C - (\beta_F + 1)\, I_{CBO}}$$

$$= 536\ K\Omega$$

(ข) คำนวณค่า f จากสมการ (4.30)

$$f = \frac{R_F}{R_F + (\beta_F + 1) R_L} = 0.51$$

(ค) ถ้าไม่มีการรักษาเสถียรภาพ กระแสคอลเลคเตอร์จะเพิ่มค่าอีก

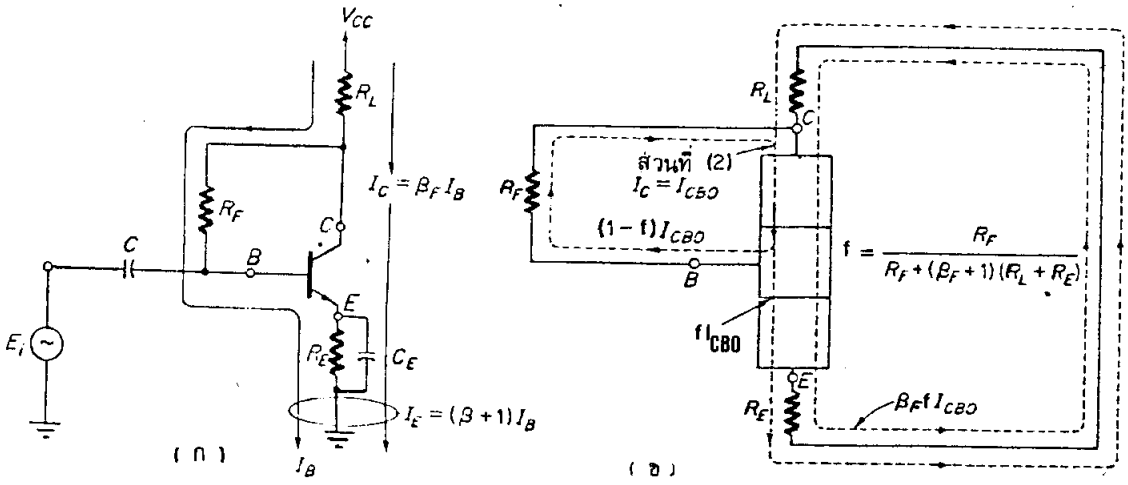
$I_{CBO}(\beta_F + 1) = 0.51$ mA (เป็นปริมาณที่ (2) + (3) ในสมการ (4.31)) แต่ถ้าวงจรมีการรักษาเสถียรภาพ ส่วนที่ (2) ของกระแสคอลเลคเตอร์มีค่า 10 μA และ

$f\beta_F I_{CBO} = 225$ μA เป็นส่วนที่ (3)

$\therefore$ I_C เพิ่มขึ้น 0.26 mA

4.6.3 โดยวิธีต่อตัวต้านทานเอมมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์-เบส

ในวงจรรูป 4.9 (ก) ใช้ทรานซิสเตอร์ซิลิคอน (ไม่คำนึงถึงกระแสรั่ว) ต่อตัวต้านทานป้อนกลับ R_F ระหว่างขั้วคอลเลคเตอร์และเบส ต่อตัวต้านทานเอมมิตเรอร์ R_E ที่ขั้วเอมมิตเตอร์เพื่อช่วยรักษาเสถียรภาพของวงจร วิเคราะห์วงจรนี้โดยพิจารณาลูปอินพุท เขียนกระแสเบสได้ดังนี้



รูป 4.9 วงจรเอมมิตเตอร์ร่วม ต่อตัวต้านทาน R_E และ R_F เพื่อช่วยรักษาเสถียรภาพของวงจร (ก) ใช้ทรานซิสเตอร์ซิลิคอน แนวกระแสเกิดจากต้นกำเนิดแรงดันไฟฟ้าเท่านั้น (ข) ใช้ทรานซิสเตอร์เจอร์มาเนียม แสดงแผนผังกระแสรั่ว

$$V_{CC} = (I_B + I_C) R_L + I_B R_F + (I_C + I_B) R_E + V_{BE}$$

$$= (\beta_F + 1) I_B R_L + I_B R_F + (\beta_F + 1) I_B R_E + V_{BE}$$

$$= (\beta_F + 1) I_B (R_L + R_E) + I_B R_F + V_{BE}$$

ย้ายข้างสมการ เพื่อได้ค่า I_B

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_F + (\beta_F + 1)(R_L + R_E)} \qquad \text{.....(4.33)}$$

จากสมการ (4.33) กล่าวได้ว่า กระแสเบสมองเห็นความต้านทาน R_F, R_L และ R_E ต่ออนุกรมกันอยู่ แต่ R_E และ R_L มีค่าสูงกว่าเดิมถึง $(\beta_F + 1)$ เท่า เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม R_L เกิดจากกระแส $(\beta_F + 1)\, I_B$ ซึ่งเปรียบเสมือนแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานมีค่า $(\beta_F + 1)\, R_L$ ลักษณะเช่นดังกล่าวนี้แสดงว่าทรานซิสเตอร์มีคุณสมบัติแปลงความต้านทาน (กล่าวรายละเอียดไว้แล้วในตอน 4.3)

กระแสคอลเลคเตอร์เขียนโดยอาศัยความสัมพันธ์ $I_C = \beta_F I_B$ ดังนี้

$$I_C = \beta_F \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_F + (\beta_F 1)(R_E + R_L)} \qquad \text{.....(4.34)}$$

ในสมการ (4.34) ยังคงตัวประกอบ β_F อยู่ ซึ่งมีลักษณะแปรค่าตามอุณหภูมิและจะส่งผลให้กระแสคอลเลคเตอร์แปรค่าไปด้วย เพื่อกำจัดส่วนนี้ออกไปทำโดยตั้งเงื่อนไขว่า R_F มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ $(\beta_F + 1)(R_E + R_L)$ และถือว่า $\beta_F \sim (\beta_F + 1)$ เขียนสมการ (4.34) ได้ใหม่ดังนี้

$$I_C \sim \frac{\beta_F (V_{CC} - V_{BE})}{(\beta_F + 1)(R_E + R_L)}$$

$$\sim \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_F + R_L} \qquad \text{.....(4.35)}$$

และถ้า V_{CC} มากกว่า V_{BE} มากเกิน 10 เท่า จะทำให้จุดทำงานเสถียรได้อย่างแน่นอน เมื่อย้อนไปดูสมการ (4.33) เห็นได้ว่าการเพิ่มค่า β_F จะลดค่าของกระแสเบส จึงเป็นการชดเชยให้วงจรไฟฟ้านี้มีการแปรค่ากระแสคอลเลคเตอร์น้อย

I_{CBO} มีผลต่อเสถียรภาพของวงจรนี้หรือไม่ ? เพื่อจะหาคำตอบ พิจารณาว่า I_{CBO} มีการแยกไหลอย่างไรที่บริเวณเบสซึ่งยังคงใช้ทฤษฎีการวางซ้อนกระแส โดยเพิ่ม I_{CBO} ลงในกระแสคอลเลคเตอร์ส่วนที่ (1) ในสมการ (4.34)

ณ บริเวณเบส I_{CBO} แยกไหลไปยังขาเบสส่วนหนึ่ง อีกส่วนหนึ่งไหลไปยังเอมมิตเตอร์ซึ่งกำหนดให้มีปริมาณ f ส่วน เมื่อข้ามรอยต่อเอมมิตเตอร์มันจะถูกทวีคุณกลายเป็น $\beta_F f I_{cBO}$ ไหลในวงจรคอลเลคเตอร์ ดังนั้น กระแสรั่วทั้งหมดในวงจรขาออกคือ $(\beta_F + 1)\, fI_{CBO}$ ไหลผ่านตัวต้านทาน R_E และ R_L หรือกล่าวว่า R_E และ R_L ถูกเพิ่มค่าเป็น $(\beta_F + 1)(R_E + R_L)$ ทำหน้าที่ต้านกระแส fI_{CBO} นั่นคือ กระแสรั่วมองเห็น R_F ในขาเบสมีค่าเท่าเดิม แต่เห็นความต้านทานในขาเอมมิตเตอร์เป็น $(\beta_F + 1)(R_E + R_L)$

กระแสรั่วอีกส่วนหนึ่งคือ $(1-f)\,I_{CBO}$ ไหลไปยังขาเบส มีค่าดังนี้

$$(1-f)\,I_{CBO} = \left[\frac{(\beta_F+1)\,(R_E+R_L)}{R_F+(\beta_F+1)\,(R_E+R_L)}\right] I_{CBO} \qquad \text{.....(4.36)}$$

$$f = \frac{R_F}{R_F+(\beta_F+1)\,(R_E+R_L)} \qquad \text{.....(4.37)}$$

วงจรที่มีเสถียรภาพดีควรมีกระแสรั่วน้อย ดังนั้น f ควรเป็นปริมาณน้อย ๆ จากสมการ (4.37) ถ้า R_F เป็นค่าน้อย ๆ ส่วน R_E, R_L และ β_F มีค่ามาก (เมื่อเทียบกับ R_F) ลักษณะเช่นนี้จะทำให้ค่า f น้อยลงได้ แยกส่วนประกอบของกระแสรั่วได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ (2) และ (3) ของกระแสคอลเลคเตอร์ ดังนี้

ส่วนของกระแสคอลเลคเตอร์ที่ (2) $= I_{CBO}$

ส่วนของกระแสคอลเลคเตอร์ที่ (3) $= \beta_F \dfrac{R_F}{R_F+(\beta_F+1)\,(R_E+R_L)}\, I_{CBO}$

$$= \beta_F f I_{CBO} \qquad \text{.....(4.38)}$$

รวมทั้ง 3 ส่วนของกระแสคอลเลคเตอร์ (ส่วนที่ (1) อยู่ในสมการ (4.34))

$$I_C = \beta_F \frac{V_{CC}-V_{BE}}{R_F+(\beta_F+1)\,(R_E+R_L)} + I_{CBO} + \beta_F \frac{R_F}{R_F+(\beta_F+1)(R_E+R_L)} \qquad \text{.....(4.39)}$$

สมการ (4.39) คล้ายกับสมการ (4.31) โดยแทน R_L ในสมการ (4.31) ด้วย (R_E+R_L)

ส่วนกระแสเบส ควรประกอบด้วยปริมาณในสมการ (4.33) ส่วนหนึ่ง และปริมาณกระแสรั่ว $(1-f)\,I_{CBO}$ อีกส่วนหนึ่ง ซึ่งไหลสวนทิศกัน ดังแสดงแผนผังในรูป 4.9 (ข)

$$I_B = \frac{V_{CC}-V_{BE}}{R_F+(\beta_F+1)\,(R_E+R_L)} - \frac{(\beta_F+1)\,(R_E+R_L)}{R_F+(\beta_F+1)\,(R_E+R_L)}\, I_{CBO} \qquad \text{.....(4.40)}$$

เปรียบเทียบสมการ(4.40)กับ (4.32) จะเห็นลักษณะที่ R_F ช่วยปรับกระแสเบสเพื่อลดความคลาดเคลื่อนของกระแสคอลเลคเตอร์ ซึ่งเกิดจากการแปรค่าของกระแสรั่ว

ตัวอย่าง 4.11 ในวงจรรูป 4.9 ใช้ทรานซิสเตอร์ซิลิคอน $\beta_F = 100$ ถ้าใช้ $R_L = 5\ K\Omega = R_E$และ $R_F = 1\ M\Omega$ $V_{CC} = 20$ v (ก) จงหาค่า I_B, I_C และ V_{CE} (ข) ถ้า $\beta_F = 200$ กระแสคอลเลคเตอร์เป็นเท่าใด (ค) ถ้าใช้ทรานซิสเตอร์เจอร์มาเนียม $I_{CBO} = 5\ \mu A$ จงหาค่าใหม่ของ I_B และ I_C

วิธี

(ก) หากระแสเบสจากสมการ (4.33)

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_F + (\beta_F + 1)(R_E + R_L)} = 9.7\ \mu A$$

$$I_C = \beta_F I_B = 0.96\ mA$$

$$V_{RL} = I_E R_L = (I_B + I_C)\, R_L = 4.85\ v$$

$$= V_{RE}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - V_{RE} - V_{RL} = 10.3\ v$$

(ข) คำนวณกระแสเบสโดยใช้สมการเดิมในข้อ (ก) แต่แทนค่า $\beta_F = 200$

$$I_B = 6.5\ \mu A$$

$$I_C = \beta_F I_B = 1.23\ mA$$

สรุปได้ว่า เมื่อ β_F เพิ่ม 100% กระแสคอลเลคเตอร์เพิ่มประมาณ 25%

(ค) เมื่อมีกระแสรั่วไหลผ่าน R_F จะทำให้กระแสเบสลดปริมาณลง

ส่วนของกระแสรั่วที่ผ่าน R_F

$$= \frac{(\beta_F + 1)(R_E + R_L)}{R_F + (\beta_F + 1)(R_E + R_L)}\ I_{CBO}$$

$$= 2.5\ \mu A$$

ดังนั้น

$$I_B = 9.7 - 2.5 = 7.2\ \mu A$$

$$I_C = (0.96\ mA) + I_{CBO} + f\,\beta_F\, I_{CBO}$$

ค่า

$$f = \frac{R_F}{R_F + (\beta_F + 1)(R_E + R_L)} = \frac{1}{2}$$

แทนค่า f และ $\beta_F = 100$ ลงในสมการเพื่อหากระแสคอลเลคเตอร์

$$I_C = 1.21\ mA$$

4.7 วงจรไบแอสเบื้องต้นแบบอื่น ๆ

4.7.1 วงจรเอมมิตเตอร์ร่วม ใช้แหล่งจ่ายไฟตรง 2 ตัว

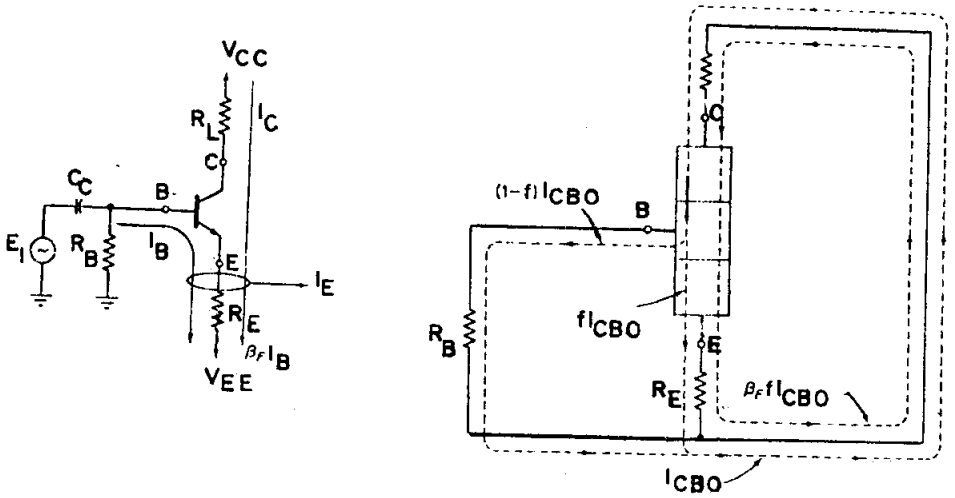
ถ้าจัดวงจรดังแสดงในรูป 4.10 (ก) ใช้แหล่งจ่ายไฟ 2 ตัวคือ V_{CC} และ V_{EE} ศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วเอมมิตเตอร์เกือบเท่าค่ากราวนด์ แต่เพิ่มค่า V_{BE} และศักย์ตกคร่อม R_B (ซึ่งมีค่าน้อย ๆ) กระแสเอมมิตเตอร์ (I_E) จะขึ้นกับ V_{EE} และ R_E และถูกทำให้มีค่าคงที่ การวิเคราะห์แยกเป็น 2 กรณี ดังนี้

(1) $I_{CBO} = 0$ กระแสเบส I_B มองเห็น R_E มีค่าเป็น $(\beta_F + 1)R_E$

$$I_B = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_B + (\beta_F + 1)R_E} \qquad \text{.....(4.41)}$$

เขียนกระแสเอมมิตเตอร์โดยวิธีการตรวจพินิจ

$$I_E = (\beta_F + 1)I_B = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{\frac{R_B}{(\beta_F + 1)} + R_E} \qquad \text{.....(4.42)}$$



รูป 4.10 (ก) วงจรเอมมิตเตอร์ร่วม ประกอบด้วยตัวต้านทานเอมมิตเตอร์ R_E และแหล่งจ่ายไฟตรง 2 ตัว

(ข) แผนภาพแสดงแนวการวางซ้อนกระแสรั่วในวงจร

ถ้า $V_{EE} >> V_{BE}$ และ R_E จะมีค่ามากเมื่อเทียบกับ $R_B/(\beta_F + 1)$ จึงสามารถลดรูปสมการ (4.42) เป็น

$$I_E \sim \frac{V_{EE}}{R_E} \qquad \text{.....(4.43)}$$

จากสมการ (4.43) กระแสเอมมิตเตอร์ไม่ขึ้นกับ β_F และ V_{BE} จึงกล่าวได้ว่า การไบแอสดังแสดงในรูป 4.10 (ก) ได้วงจรที่เสถียรมาก

กระแสคอลเลคเตอร์ เขียนโดยอาศัยสมการ (4.41)

$$I_C = \beta_F I_B = \beta_F \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_B + (\beta_F + 1)R_E} \qquad \text{.....(4.44)}$$

(2) เมื่อพิจารณากระแสรั่ว แผนภาพกระแสรั่วได้แสดงในรูป 4.10 (ข) กระแสรั่วปริมาณ $f\ I_{CBO}$ ไหลข้ามรอยต่อเอมมิตเตอร์ และเพิ่มปริมาณเป็น $\beta_F\ f\ I_{CBO}$ และปริมาณทั้งสองนี้ไหลผ่าน R_E ดังนั้น ค่าของ R_E จึงถูกเพิ่มเป็น $(\beta_F + 1)R_E$ ส่วน มีค่าเช่นเดียวกับการไบแอสด้วยแบตเตอรีเดี่ยวที่มี R_E ต่ออยู่ในวงจร กล่าวคือ

$$f = \frac{R_B}{R_B + (\beta_F + 1)R_E} \qquad \text{.....(4.45)}$$

กระแสคอลเลคเตอร์เขียนโดยใช้สมการ (4.44) เป็นส่วนที่ (1) ส่วนที่ (2) คือ I_{CBO} และส่วนที่ (3) คือ β_F f I_{CBO}

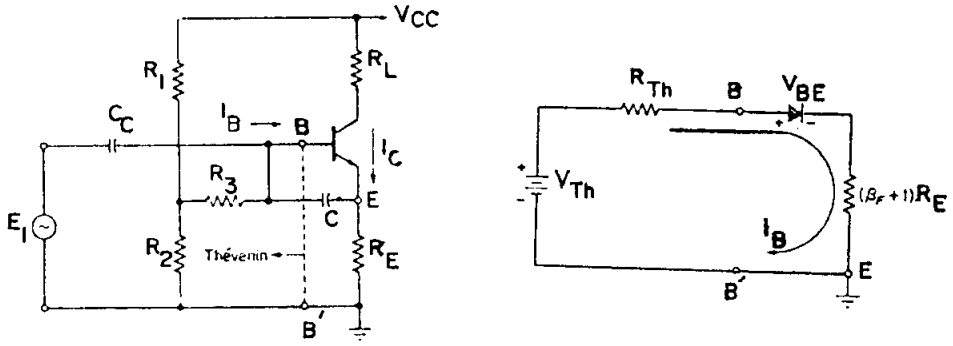
$$I_C = \beta_F \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_B + (\beta_F + 1)R_E} + I_{CBO} + \beta_F \frac{R_B}{R_B + (\beta_F + 1)R_E} I_{CBO} \qquad \text{.....(4.46)}$$

สมการ (4.46) เหมือนกับสมการ(4.23)ถ้า $V_B = 0$ ในสมการ (4.23) พิจารณาค่าของ f ในสมการ (4.45) ถ้า R_E มีค่ามากจะลดค่าของ f ลง วงจรจะมีเสถียรภาพดียิ่ง

4.7.2 วงจรบูตสแตรปปิ้งก์ (bootstrapping)

อีกตัวอย่างหนึ่ง คือ จัดวงจรดังแสดงในรูป 4.11 (ก) เรียกเป็นการบูตสแตรป ซึ่งเป็นเทคนิคในการเพิ่มความต้านทานอินพุทของกระแสสลับ แยกวิเคราะห์ 2 กรณี ดังนี้

(1) $I_{CBO} = 0$ อาศัยทฤษฎีเทเวนินเพื่อสร้างแบบจำลองของวงจรอินพุท ดังแสดงในรูป 4.11 (ข) จากนั้นเขียนสมการของกระแสเบส โดยพิจารณาลูปอินพุท



รูป 4.11 (ก) วงจรเอมมิตเตอร์ร่วมซึ่งถูกบูตสแตรป
(ข) แบบจำลองของรูป (ก) เพื่อให้วงจรอินพุทมีลักษณะง่ายต่อการวิเคราะห์ใช้ทฤษฎีเทเวนิน

$$I_B = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + (\beta_F + 1) R_E} \qquad \text{.....(4.47)}$$

$$R_{Th} = R_1 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \qquad \text{.....(4.48)}$$

$$V_{Th} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} \qquad \text{.....(4.49)}$$

เขียนกระแสคอลเลคเตอร์ I_C โดยอาศัยสมการ (4.47) และจากความสัมพันธ์

$$I_C = \beta_F I_B$$

(2) เพิ่มกรณีกระแสรั่ว วิเคราะห์วงจรโดยใช้รูป 4.10 (ข) แสดงแนวทางของกระแสรั่ว แต่เขียน R_{Th} ให้มีรูปดังสมการ (4.48)

ตัวอย่าง 4.12 ตามวงจรในรูป 4.11 (ก) มีข้อกำหนดดังนี้ $V_{BE} = 0.6$, $\beta_F = 49$, $V_{CC} = 30$ v, $R_1 = R_2 = R_3 = 500\,K\Omega$, $R_E = 5\,K\Omega$, $R_L = 10\,K\Omega$ ถ้าละทิ้งกระแสรั่ว จงหาค่าของ I_C และ V_{CE}

วิธี จากสมการ (4.48) หาปริมาณความต้านทานสมมูลด้านวงจรอินพุท

$$R_{Th} = R_3 + (R_1 /\!/ R_2) = 750\,K$$

จากสมการ (4.49) หาค่า V_{Th}

$$V_{Th} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = 15 \text{ v}$$

กระแสเบสหาค่าได้โดยใช้สมการ (4.47)

$$I_B = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + (\beta_F + 1)R_E} = 14.4\ \mu A$$

$$I_C = \beta_F I_B = 0.7 \text{ mA}$$

$$V_{RL} = I_C R_L = 7 \text{ v}$$

$$V_{RE} \sim I_C R_E = 3.5 \text{ v}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - V_{RE} - V_{RL} = 19.5 \text{ v}$$

ตัวอย่าง 4.13 ถ้าในตัวอย่าง 4.12 มีกระแสรั่ว I_{CBO} 10 μA กระแสเบสและกระแสเอมมิตเตอร์จะเปลี่ยนแปลงอย่างไร?

วิธี กระแสรั่ว เมื่อแยกไหลเข้าสู่วงจรของเบส จะมีทิศทางสวนกับกระแสเบสจากแหล่งป้อนแรงดันไฟฟ้า ดังนั้น กระแสเบสจะลดค่าลง ซึ่งกระแสรั่วมองเห็น R_{Th} มีค่าเท่าเดิมคือ 750 KΩ แต่มองเห็นความต้านทานในขาเอมมิตเตอร์มีค่าเป็น $(\beta_F + 1)R_E = 250\,K\Omega$

ปริมาณกระแสเบสที่ลดลง $= \frac{(\beta_F + 1)R_E}{R_B + (\beta_F + 1)R_E} I_{CBO} = 2.5\ \mu A$

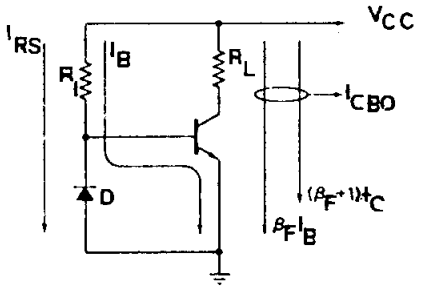
กระแสคอลเลคเตอร์ควรเพิ่มค่าขึ้น = ส่วนที่ (2) + ส่วนที่ (3)

$$= I_{CBO} + \beta_F \frac{R_{Th}}{R_B + (\beta_F + 1)R_E} I_{CBO}$$

$$= 337\ \mu A$$

4.7.3 การไบแอสด้วยไดโอดเพื่อชดเชยอุณหภูมิ

ลักษณะการต่อวงจรในรูป 4.12 เป็นเช่นเดียวกับวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า แต่ในวงจรนี้ใช้ไดโอดแทนตัวต้านทาน R_2 จัดเป็นการไบแอสอย่างไม่เป็นเส้นตรง เนื่องจากใช้ธาตุวงจรที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเส้นตรง ซึ่งนอกจากไดโอดอาจใช้เธอร์มิสเตอร์ (thermister) ก็ได้ กระแสคอลเลคเตอร์จะถูกปรับค่าให้คงที่โดยอัตโนมัติ



รูป 4.12 เทคนิคการไบแอสอย่างไม่เป็นเส้นตรง เพื่อปรับกระแสคอลเลคเตอร์ให้คงที่ เมื่อเกิดการแปรค่าเนื่องจากกระแสรั่ว

จากรูป 4.12 เห็นได้ว่าไดโอดถูกไบแอสย้อนกลับ เพื่อให้มีการนำกระแสย้อนกลับอิ่มตัว I_{RS} ได้ปริมาณน้อย ๆ จากลูปอินพุท

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_1} - I_{RS} \qquad \text{.....(4.50)}$$

$$I_C = \beta_F I_B + (\beta_F + 1)I_{CBO}$$

$$= \beta_F \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_1} - \beta_F I_{RS} + (\beta_F + 1)I_{CBO} \qquad \text{.....(4.51)}$$

ในสมการ (4.51) ถ้า I_{RS} มีค่าโดยประมาณเท่ากับ I_{CBO} และถ้าไดโอดมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อม ถือได้ว่า I_{RS} เท่ากับ I_{CBO} ไม่ว่าอุณหภูมิจะเป็นเท่าใด และจะไม่มีผลต่อ I_C นั่นคือ

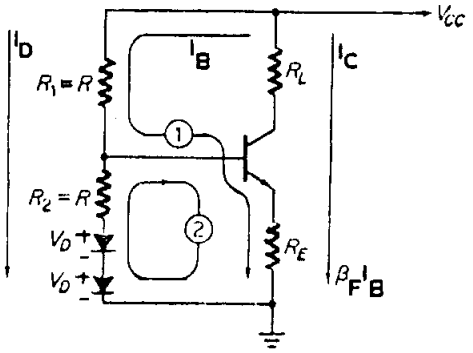
$$I_C \sim \beta_F \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_1} \qquad \text{.....(4.52)}$$

วิธีการชดเชยกระแสรั่วเช่นนี้ ได้ผลดียิ่งเมื่อใช้ทรานซิสเตอร์และไดโอดแบบเจอร์มาเนียม ซึ่งมีกระแสรั่วเป็นพารามิเตอร์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิมากที่สุด ถ้าใช้ทรานซิสเตอร์ซิลิคอนจะไม่เห็นผลแตกต่างมากนัก

"เธอร์มิสเตอร์" เป็นบล็อคสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์พอสมควร มีจุดสัมผัสแบบโอห์ม 2 จุด ซึ่งมีความต้านทานขึ้นกับอุณหภูมิอันเกิดจากกลไกของการแตกหักของพันธะโควาเลนท์ ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความต้านทานของมันจะลดลง อาจใช้เธอร์มิสเตอร์แทนไดโอดในวงจรไบแอสของทรานซิสเตอร์ซิลิคอน

ถ้าทรานซิสเตอร์และเธอร์มิสเตอร์อยู่ในสภาวะอุณหภูมิเดียวกัน กระแสคอลเลคเตอร์ยังคงที่ได้ในช่วงที่กำหนดให้อุณหภูมิแปรค่าได้ช่วงหนึ่ง เช่น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น β_F เพิ่มขึ้น แต่ความต้านทานของเธอร์มิสเตอร์ลดลง ดังนั้น R_B และ V_B ลดค่าลง ผลคือ กระแสเบสลดลง ซึ่งชดเชยการเพิ่มของ β_F ดังนั้น กระแสเบสคอลเลคเตอร์คงที่

ในวงจรอินทีเกรต (integrated eircuit) หรือ IC มักใช้ไดโอด 2 ตัวต่อกันดังแสดงในรูป 4.13 เพื่อรักษากระแสคอลเลคเตอร์ให้คงที่ เขียนสมการความสัมพันธ์ของธาตุวงจรในลูปที่ 1 และ 2 ดังนี้



รูป 4.13 วงจรอินทีเกรต ใช้ไดโอด 2 ตัวต่อกัน เพื่อรักษาเสถียรภาพของจุดทำงาน

ลูปที่ 1, $V_{CC} = I_D R_1 + I_B R_1 + I_B(\beta_F + 1) R_E + V_{BE}$ .....(i)

ลูปที่ 2, $I_D R_2 + 2V_D = V_{BE} + I_B(\beta_F + 1) R_E$ .....(ii)

จากนั้นใช้สมการ (i) และ (ii) เพื่อหาค่ากระแสเบส I_B โดยกำจัด I_D ออกไป

R_2(i) + R_1(ii), $I_B R_2 R_1 + I_B(\beta_F + 1) R_E + I_B(\beta_F + 1) R_E R_1 = R_2 V_{CC} + 2V_D R_1 - V_{BE}(R_1 + R_2)$

$I_B\left[R_1 R_2 + (\beta_F + 1) R_E (R_1 + R_2)\right] = R_2 V_{CC} + 2V_D R_1 - V_{BE}(R_1 + R_2)$

หารตลอดด้วย $(R_1 + R_2)$

$$I_B \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + (\beta_F + 1) R_E = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} + 2V_D \frac{R_1}{R_1 + R_2} - V_{BE}$$

$$I_B = \frac{\left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) V_{CC} + \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) 2V_D - V_{BE}}{R_1 /\!/ R_2 + (\beta_F + 1)R_E} \qquad \text{.....(4.53)}$$

เขียนกระแสคอลเลคเตอร์ มีค่าเป็น β_F คูณกับสมการ (4.53)

$$I_C = \left[\frac{\left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) V_{CC} + \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) 2V_D - V_{BE}}{R_1 /\!/ R_2 + (\beta_F + 1)R_E} \right] \beta_F \qquad \text{.....(4.54)}$$

จากสมการ (4.54) ถ้าให้ $R_1 = R_2 = R$ และ $V_{BE} = V_D$ ดังนั้น แรงดันไฟฟ้าของไดโอด V_D จะหักล้างกับแรงดันไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์ V_{BE} ซึ่งต่างเป็นพารามิเตอร์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิทั้งสองค่า และถ้าหารทั้งเศษและส่วนด้วย β_F โดยถือว่า $\beta_F = (\beta_F + 1)$ สามารถลดรูปสมการ (4.54) ได้เป็น

$$I_C \sim \frac{\frac{1}{2} V_{CC}}{\frac{1}{2}\frac{R}{\beta_F} + R_E}$$

$$\sim \frac{V_{CC}}{\frac{R}{\beta_F} + 2R_E} \qquad \text{.....(4.55)}$$

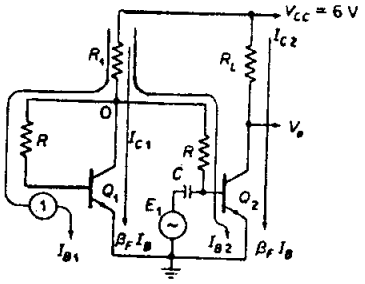
โดยทั่วไป $\frac{R}{\beta_F} << 2R_E$ ดังนั้น สมการ (4.55) จึงเขียนได้เป็น

$$I_C \sim \frac{V_{CC}}{2R_E} \qquad \text{.....(4.56)}$$

เห็นได้ว่า วิธีการดังกล่าวนี้ ช่วยให้จุดทำงานเป็นอิสระต่อการแปรค่าของ β_F และ I_C จะเสถียรมาก มักใช้เป็นต้นกำเนิดกระแสคงที่ปฐมภูมิในการไบแอสทรานซิสเตอร์ตัวอื่นต่อไป (อาจเป็นหนึ่ง หรือหลาย ๆ ทรานซิสเตอร์ก็ได้)

4.7.4 การไบแอสโดยใช้ทรานซิสเตอร์ทำให้เสถียร

สำหรับเทคโนโลยีวงจรอินทีเกรต มีอีกวิธีหนึ่งใช้อย่างแพร่หลาย คือการต่อทรานซิสเตอร์ซึ่งมีลักษณะสมบัติเหมือนกัน 2 ตัว ดังแสดงในรูป 4.14 ในวงจรเบสทั้งสองมี V_{BE} และ R ค่าเดียวกัน และยังต่ออยู่กับต้นกำเนิดแรงดันไฟฟ้าเดียวกันที่จุด O ดังนั้น



รูป 4.14 วงจรต่อทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 โดย Q_1 ก่อให้เกิดเสถียรภาพของกระแสคอลเลคเตอร์ในทรานซิสเตอร์ทั้งสอง (I_C ไม่แปรตามอุณหภูมิ)

กระแสเบสในทรานซิสเตอร์ทั้งสองนั้น มีค่าเท่ากัน นอกจากนี้ ทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 ต่างมีค่า β_F เดียวกัน กระแสคอลเลคเตอร์ของทั้งสองทรานซิสเตอร์จึงต้องเท่ากันด้วยจากสมการลูป 1

$$I_{B1} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R + (\beta_F + 2)R_1} \qquad \text{.....(4.57)}$$

(หมายเหตุ R_1 มีกระแส I_{B1}, I_{C1} และ I_{B2} ($= I_{B1}$) ผ่าน รวมเป็นกระแส $2I_B + \beta_F I_B = (\beta_F + 2)I_B$) ถ้าสมมุติให้ $(\beta_F + 2) \sim \beta_F$ และ $\beta_F R_1 >> R$ เขียนสมการ (4.57) ได้ใหม่เป็น

$$I_{B1} \sim \frac{V_{CC} - V_{BE}}{\beta_F R_1} \qquad \text{.....(4.58)}$$

สมมุติให้ $V_{BE} \leq 0.1\ V_{CC}$ และคูณตลอดสมการ (4.58) ด้วย β_F

$$\beta_F I_{B1} = I_{C1} = I_{C2} = I_C \sim \frac{V_{CC}}{R_1} \qquad \text{.....(4.59)}$$

นั่นคือ V_{CC} และ R_1 เป็นตัวทำให้กระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองเท่ากัน ซึ่งต่างเป็นอิสระต่อการแปรค่าของอุณหภูมิ จุด O และคอลเลคเตอร์ของ Q_1 จะยังคงมีศักย์ไฟฟ้าต่ำเสมอ แต่โดยทั่วไปมักต้องการให้คอลเลคเตอร์ของ Q_2 มีค่าเป็น $\frac{1}{2}\ V_{CC}$ หรืออยู่ในช่วงครึ่งบนของเส้นโหลด ดังนั้น $\frac{1}{2}\ V_{CC} = I_{C2} R_L$ แทนค่าดังกล่าวลงในสมการ (4.59) เป็นค่า I_{C2} จะได้

$$R_1 = 2\ R_L \text{ (เมื่อ } V_o = \frac{1}{2} V_{CC}) \qquad \text{.....(4.60)}$$

ตัวอย่าง 4.14 ในวงจรรูป 4.14 ถ้ากำหนด $R_L = 3$ K จงไบแอส Q_2 ด้วยค่า $V_o = \frac{1}{2} V_{CC}$ โดยวิธีการประมาณ

วิธี ∵ $V_o = 3\text{ v}, I_{C2} = 1\text{ mA}, R_1 = 2R_L = 6\text{ K}$

$R \leq 6\text{ K}$

ตัวอย่าง 4.15 ถ้าใช้ค่าความต้านทานในตัวอย่าง 4.14 และ $\beta_F = 100$ ส่วน $V_{BE} = 0.5$ v จงหาค่า V_o

$$I_{B1} = \frac{6 - 0.5}{6000 + (102 \times 6000)} = 8.9\,\mu\text{A}$$

$$I_C = \beta_F I_B = 0.89\text{ mA}$$

แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม R_L คือ 2.7 v และ $V_o = 6 - 2.7 = 3.3$ v

4.8 บทสรุป

จากรายละเอียดในบทนี้ สรุปได้ว่า การที่ V_{BE} และ β_F แปรค่าขึ้นกับอุณหภูมินั้น มีผลต่อเสถียรภาพของจุดทำงานของทรานซิสเตอร์ BJT ทั้งแบบซิลิคอนและเจอร์มาเนียม ส่วนกระแสรั่ว I_{CBO} มีส่วนสำคัญถ้าเป็นทรานซิสเตอร์เจอร์มาเนียม แต่สำหรับทรานซิสเตอร์ซิลิคอนมีค่าน้อยมาก ดังนั้น จึงวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพของจุดทำงานโดยศึกษาการเลื่อนตำแหน่งของมัน เนื่องจากการแปรค่าของ V_{BE} และ β_F ตามอุณหภูมิ ส่วน I_{CBO} จะถูกจำลองเป็นต้นกำเนิดกระแสอิสระ ซึ่งอาจให้จ่ายไฟเมื่อใช้ทรานซิสเตอร์เจอร์มาเนียม แต่ไม่จ่ายไฟถ้าใช้ทรานซิสเตอร์ซิลิคอน (อาจตัดทิ้งไปเลยก็ได้ สำหรับกรณีหลัง)

การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าในบทนี้ ได้เสนอแบบจำลองของวงจรไฟฟ้ากระแสตรง และวิเคราะห์กระแสรั่วโดยวิธีการวางซ้อนกระแสนี้ลงบนส่วนของกระแสปกติ กระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ถูกแยกเขียนเป็นส่วนประกอบย่อย ทำให้ง่ายในการคาดคะเนปริมาณกระแสที่เกิดเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการแปรค่าของกระแสรั่ว ตามตัวอย่างที่ 4.7 และ 4.8 ซึ่งได้มีการต่อตัวต้านทานที่ขาเอมมิตเตอร์ เป็นเทคนิคหนึ่งในการรักษาเสถียรภาพของวงจร

สำหรับวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า โดยมี R_1 ต่อขนานกับ R_2 ในวงจรขาเข้าอาจมีปัญหาในกรณีเกิดกระแสไหลผ่าน R_2 มาก ๆ (เรียกว่ากระแสบลีดเดอร์) ซึ่งอาจแก้โดยต่อไดโอดหรือเธอร์มิสเตอร์แทน R_2 ก็ได้ ซึ่งเริ่มวิเคราะห์วงจรง่าย ๆ ในตอน 4.6.1 จากนั้นเปลี่ยนบางธาตุวงจรในตอน 4.7.3 นอกจากนี้ ยังได้แสดงคุณสมบัติการแปลงความต้านทานของทรานซิสเตอร์อีกด้วย

เมื่อเปรียบเทียบการวิเคราะห์วงจรทรานซิสเตอร์โดยวิธีกราฟในบทที่ 3 กับวิธีการวางซ้อนกระแสในบทที่ 4 นี้ เห็นได้ว่า ความสะดวกและได้เปรียบในวิธีกราฟคือได้เห็นลักษณะการแกว่งของสัญญาณ ลักษณะการแปรค่าของจุดทำงานเมื่อแปรค่าธาตุวงจรภายนอกหรือ

พารามีเตอร์ของทรานซิสเตอร์ก็ตาม อย่างไรก็ตาม ถ้านักศึกษาได้ทบทวนและฝึกทำโจทย์หรือศึกษาการแปรค่าต่าง ๆ ย่อมมีความชำนาญและสามารถคาดคะเนลักษณะการเลื่อนตำแหน่งของจุดทำงานได้ดี ความสะดวกของวิธีกราฟคือ สามารถอ่านข้อมูลต่าง ๆ ได้จากการทราบตำแหน่งจุดทำงาน ข้อเสียเปรียบคือ ถ้าไม่มีกราฟลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์ต้องทำการร่างเส้นกราฟโดยประมาณ ซึ่งย่อมเกิดความไม่แน่นอนได้เล็กน้อย ส่วนวิธีการวางซ้อนกระแส ทำให้เข้าใจคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของทรานซิสเตอร์ได้ดี ตลอดจนกลไกการเกิดกระแสรั่ว การแยกเขียนส่วนประกอบของกระแสคอลเลคเตอร์และกระแสเบสอาจซับซ้อนกว่าวิธีกราฟ แต่ไม่ยากจนเกินไป ซึ่งอาจทำการคาดคะเนได้ โดยอาศัยลูปอินพุทและอาศัยคุณสมบัติการแปลงความต้านทานของขั้วทรานซิสเตอร์ (ที่สำคัญคือขั้วเบส และเอม-มิตเตอร์) ทั้งยังสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์หรือตัวประกอบเสถียรภาพได้โดยง่ายอีกด้วย

แบบฝึกหัดบทที่ 4

4.1 ตามตัวอย่าง 4.1 ถ้าใช้ทรานซิสเตอร์มี $\beta_F = 200$ จงคำนวณ R_B เพื่อให้จุดทำงานยังคงอยู่กึ่งกลางเส้นโหลด

4.2 จากวงจรในรูป 4.2 (ก) เหตุใดจึงเรียกชื่อเป็น "วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า" ? กระแสบลีดเดอร์เกิดจากอะไร ? จะมีผลอย่างไรต่อวงจรถ้ากระแสบลีดเดอร์มีค่ามาก ?

4.3 ตามตัวอย่าง 4.7 ถ้า $I_{CBO} = 40\ \mu A$ จงคำนวณค่าใหม่ของ I_B และ I_C

4.4 จากรูป 4.7 ถ้า $R_B = 10$ K, $R_E = 500\ \Omega$, $\beta_F = 50$

(ก) จงหาค่า f (ข) ถ้า $\beta_F = 100$ จงหาค่า f ใหม่ (ค) ถ้า $R_B = 20$ K จงหาค่า f

(ง) ถ้า $R_E = 1$ K ค่า f จะเป็นอย่างไร

4.5 จงแสดงค่ากระแสเบส และกระแสคอลเลคเตอร์ ในวงจรรูป 4.9 โดยวิธีการตรวจพินิจ ถ้าใช้ทรานซิสเตอร์ (ก) ซิลิคอน. (ข) เจอร์มาเนียม

4.6 จากตัวอย่าง 4.11 ถ้า $\beta_F = 50$ กระแสคอลเลคเตอร์จะเป็นเท่าใด ? ถ้า $I_{CBO} = 0$

4.7 ทวนคำสั่งของคำถาม 4.6 ถ้า $I_{CBO} = 5\ \mu A$

4.8 จากตัวอย่าง 4.12 จงหาค่า I_C และ V_{CE} ถ้า (ก) $\beta_F = 100$ (ข) $\beta_F = 20$

4.9 ถ้าใช้ไดโอด 1 ตัว แทน R_1 ดังแสดงในวงจรรูป 4.12 เกิดผลดีอย่างไร ?

4.10 เธอร์มิสเตอร์ คืออะไร ? นำไปประยุกต์ในวงจรไฟฟ้าอย่างไร ?