บทที่ 3
การใช้วิธีกราฟวิเคราะห์วงจรทรานซิสเตอร์

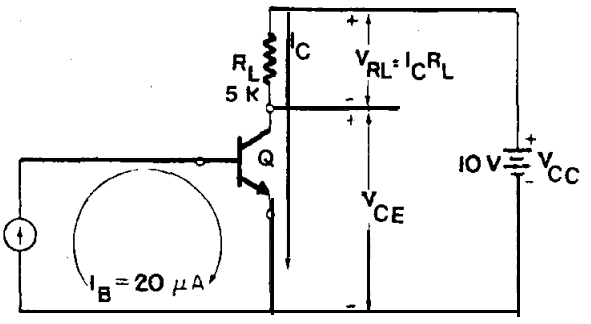
3.1 บทนำ

หลังจากได้มีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวัสดุที่ใช้สร้าง หลักทฤษฎีการสร้าง และคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของทรานซิสเตอร์แล้ว ขั้นต่อไปคือศึกษาวงจรทรานซิสเตอร์ ซึ่งรายละเอียดในบทนี้จะกล่าวเฉพาะเมื่อทรานซิสเตอร์ทำหน้าที่เป็นตัวขยายสัญญาณ การวิเคราะห์วงจรทรานซิสเตอร์โดยวิธีกราฟเป็นวิธีการง่าย ๆ ทำให้เห็นภาพพจน์ของการขยายสัญญาณการแกว่งของแรงดันเอาท์พุท และลักษณะที่จุดทำงาน (operating point หรือ quiescent point) ขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของตัวทรานซิสเตอร์เองและธาตุวงจรภายนอก (เช่น ตัวต้านทานแบตเตอรี่ เป็นต้น)

รายละเอียดในบทนี้ กล่าวถึงเส้นโหลด (load line) ของไฟกระแสตรงและกระแสสลับ การเลือกจุดทำงานของทรานซิสเตอร์ ซึ่งเป็นตำแหน่งเหมาะสมที่สุดที่จะรักษาคุณสมบัติของตัวทรานซิสเตอร์ให้สอดคล้องกับธาตุวงจรภายนอก เมื่อทำการแปรค่าของธาตุวงจรภายนอก ย่อมมีผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของทรานซิสเตอร์

3.2 เส้นโหลดของไฟกระแสตรง (The DC Load Line)

เส้นโหลด เป็นเส้นตรงที่ลากทับบนกลุ่มเส้นกราฟแสดงลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์ สมการเส้นโหลดของไฟกระแสตรงและกระแสสลับมีค่าต่างกันไป แล้วแต่กรณีตัวอย่างคือ ใช้วงจรดังแสดงในรูป 3.1 ซึ่งมีทรานซิสเตอร์ Q ต่ออนุกรมกับธาตุวงจรภายนอกคือ V_{cc} คือ R_L ดังนั้น จึงต่างมีกระแสปริมาณเดียวกันไหลผ่านแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทานโหลดนั้นหาค่าโดยใช้ความสัมพันธ์ $V_{RL} = I_C R_L$ สิ่งที่ควรพิจารณาคือ ความต้านทานภายในของแหล่งจ่ายไฟ มีหรือไม่? โดยทั่วไป มีค่าความต้านทานภายในดังกล่าวต่ำมากจนสามารถละทิ้งได้ และในกรณีนี้ ไม่แสดงค่าไว้ในวงจร ดังนั้น จะละทิ้งค่านี้ไป กล่าวได้ว่า แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟได้ป้อนเข้าในวงจร ไม่ขึ้นกับกระแสที่ถูกส่งออกมาจากแหล่งเดียวกันนี้ ต่อไปพิจารณาค่าแรงดันตกคร่อมตัวทรานซิสเตอร์ ซึ่งมีวิธีการพิจารณา ดังนี้



รูป 3.1 วงจรเอมมิตเตอร์ร่วม ในวงจรเอาท์พุทมีปริมาณกระแสไหลผ่านเป็นค่าเดียว

(1) ใช้ความสัมพันธ์

แรงดันจากแหล่งจ่ายไฟ = แรงดันตกคร่อมโหลด + แรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์

(2) อ่านค่าจากกราฟลักษณะสมบัติ ดังนั้น ทราบค่ากระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์

จากรูป 3.1 แบตเตอรี V_{CC} ป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับ V_{RL} และ V_{CE} เขียนสมการลูปเอาท์พุทดังนี้

$$V_{CC} = V_{RL} + V_{CE} \qquad \text{.....(3.1)}$$

เขียน (3.1) ใหม่ โดยแทน V_{RL} ด้วยผลคูณของ I_C กับ R_L นั่นคือ

$$V_{CC} = I_C R_L + V_{CE} \qquad \text{.....(3.2)}$$

เรียกสมการ (3.2) เป็น "สมการเส้นโหลด" (load-line equation) ใช้ในการพล็อต V_{CC} และ R_L ซ้อนลงบนกราฟลักษณะสมบัติด้านเอาท์พุท (คือกราฟ I_C vs V_{CE})

ตัวอย่างการพล็อตค่า เพื่อสร้างเส้นโหลดลงบนกราฟลักษณะสมบัติ ใช้ค่า $R_L = 5$ กิโลโอห์ม (kilohm) และ $V_{CC} = 10$ โวลต์ แทนค่าลงในสมการ (3.2) ผลคือ

$$10 = 5000\, I_C + V_{CE} \qquad \text{.....(3.2)'}$$

จากสมการ (3.2)' มี 2 ตัวแปรคือ I_C และ V_{CE} ซึ่งเป็นค่าบนแกนตั้งและแกนนอน ตามลำดับ วิธีการอย่างง่ายทำดังนี้

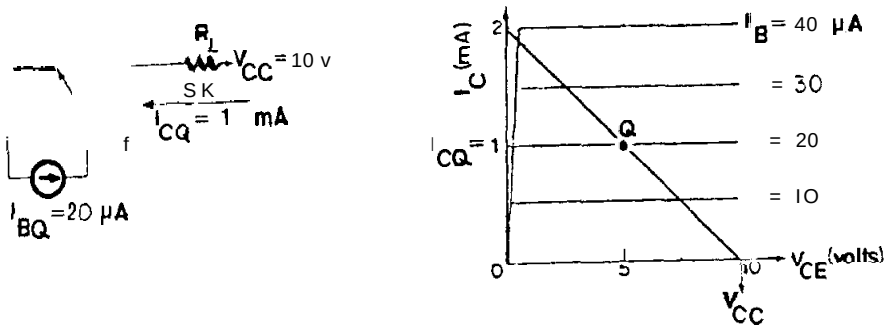
(1) หาจุดตัดบนแกนตั้ง โดยให้ $V_{CE} = 0$ ดังนั้น

$$I_C = \frac{10}{5000} = 2\ \text{m A}$$

(2) หาจุดตัดบนแกนนอน โดยให้ $I_C = 0$ ดังนั้น

$$V_{CE} = 10\ \text{v} = V_{CC}$$

ความชันของเส้นโหลด มีค่า $-\frac{1}{R_L}$ และแสดงไว้แล้วในรูป 3.2



รูป 3.2 แสดงการพล็อตเส้นโหลดจากสมการ (3.2) โดยแทนค่า $R_L = 5$ *กิโลโอห์ม,* $V_{CC} = 10$ v *เส้นกราฟตัดแกนตั้งที่ค่า* $I_C = 2$ *มิลลิแอมแปร์ และตัดแกนนอน* $V_{CE} = 10$ v $= V_{CC}$

3.3 จุดทำงาน (Operating point)

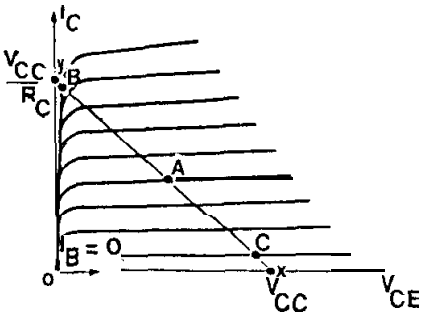
จุดทำงานของทรานซิสเตอร์ เป็นจุดใด ๆ บนเส้นโหลด ผู้ใช้วงจรสามารถเลือกตามวัตถุประสงค์ของการใช้ประโยชน์ เช่น วงจรขยาย ย่อมต้องการให้สัญญาณแรงดันเอาท์พุทมีค่าแกว่งอย่างสมมาตรทั้งด้านบนและด้านล่างของจุดทำงาน ดังนั้น จุดทำงานควรจะอยู่บริเวณกึ่งกลางเส้นโหลด ตัวอย่างของจุดทำงานแสดงในรูป 3.3 โดยทั่วไป เลือกจุดทำงาน ณ ตำแหน่งที่เส้นโหลดตัดกับกระแสอินพุทของวงจร (ในรูป คือ I_B) พิจารณาแต่ละตำแหน่ง ดังนี้

(1) จุด A เป็นตำแหน่งกึ่งกลางเส้นโหลด เหมาะสมกับวงจรขยาย

(2) จุด B ทรานซิสเตอร์อยู่ในภาวะอิ่มตัว

(3) จุด C ทรานซิสเตอร์อยู่ในภาวะคัตออฟ ($I_B = 0$)

ทั้งจุด B และ C สัญญาณเอาท์พุทจะถูกขลิบ จึงไม่เหมาะจะใช้กับวงจรขยาย นอกจากนี้การกำหนดเลือกใช้ค่าของธาตุวงจรภายนอกยังส่งผลถึงความเคลื่อนของตำแหน่งจุดทำงานได้ ตัวอย่างต่อไปนี้แสดงให้เห็นลักษณะการเคลื่อนที่ของเส้นโหลดเมื่อมีการแปรค่าตัวต้านทานโหลดหรือแหล่งจ่ายไฟตรง



รูป 3.3 ตัวอย่างการพล็อตเส้นโหลด xy ลงบนเส้นกราฟลักษณะสมบัติของวงจรเอม-มิตเตอร์ร่วม จุด A,B และ C เป็นตำแหน่งจุดทำงานของทรานซิสเตอร์

ตัวอย่าง 3.1 จากวงจรในรูป 3.1 ถ้า R_L แปรค่าจาก 5 เป็น 8 กิโลโอห์ม ส่วนค่าอื่น ๆ ยังคงเหมือนเดิมคือ V_{CC} = 10 โวลต์ และกระแสเบสมีค่า 20 ไมโครแอมป์แปร์, (ก) จงหาจุดทำงานทั้งสองกรณี และอธิบายการเคลื่อนที่ของเส้นโหลด, (ข) จงประมาณค่าของ R_L ที่ทำให้ทรานซิสเตอร์อยู่ในภาวะอิ่มตัว โดยพิจารณาจากเส้นกราฟลักษณะสมบัติในรูป 3.4 และทุกกรณีมีกระแสคอลเลคเตอร์ 1 mA

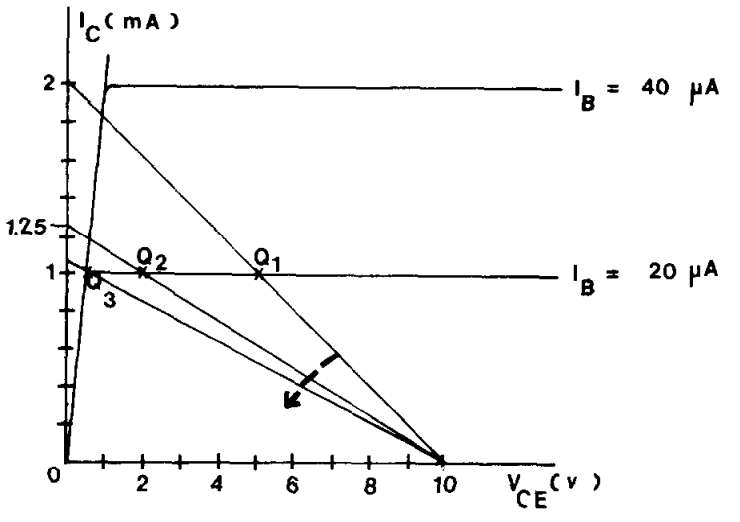
วิธี (ก) คำนวณหาเส้นโหลด โดยใช้สมการ $(3.2)_1$

$$V_{CC} = I_C R_L + V_{CE}$$

หาจุดตัดบนแกนตั้ง โดยให้ $V_{CE} = 0, I_C = 2$ mA
หาจุดตัดบนแกนนอน โดยให้ $I_C = 0, V_{CE} = 10$ v
} โดย $R_L = 5$ K

ดังนั้น เส้นโหลดแรกเมื่อ $R_L = 5$ กิโลโอห์มตัดแกนตั้งที่ค่า $I_C = 2$ mA และตัดแกนนอนที่ค่า $V_{CE} = 10$ v จุดทำงาน Q_1 เป็นตำแหน่งที่เส้นโหลดตัดกับเส้นกราฟลักษณะสมบัติ $I_B = 20\ \mu$A และมีค่า $I_{CQ_1} = 1$ mA, $V_{CE} = 5$ v

ขั้นที่ 2 เป็นกรณี $R_L = 8$ กิโลโอห์ม ยังคงใช้สมการเส้นโหลด (3.2) แต่ใช้ค่า R_L ตามกำหนด จากนั้นแทนค่าเพื่อหาจุดตัดบนแกนทั้งสอง ได้เส้นโหลดที่สองเป็นเส้นตรงตัดแกรตั้งที่ค่า $I_C = 1.25$ mA และตัดแกนนอนที่ค่า $V_{CE} = 10$ v จุดทำงานใหม่ Q_2 เป็นตำแหน่งที่เส้นโหลดที่สองนี้ตัดกับเส้นกราฟ $I_B = 20\mu$A มีค่า $I_{CQ_2} = I_{CQ_1} = 1$ mA, $V_{CE} = 2$ v



รูป 3.4 แสดงเส้นโหลดเมื่อ V_{CC}, I_B, I_C *คงที่ แต่แปรค่า* R_L*เห็นได้ว่าเส้นโหลดหมุดทวนเข็มนาฬิกา รอบจุดตรึง* $V_{CE} = 10$ v

(ข) จากรูป 3.4 ทรานซิสเตอร์อยู่ในภาวะอิ่มตัว ณ ตำแหน่ง Q_3 ซึ่งยังคงค่า $I_C = 1$ mA และ $V_{CC} = 10$ v อ่านจากกราฟรูป 3.4 ได้ค่า $V_{CE} = 0.9$ v ต่อแนวเส้นโหลดที่ 3 จากจุดบนแกนนอนที่ $V_{CE} = V_{CC} = 10$ v ไปยังจุดทำงาน Q_3ซึ่งอ่าน I_C มีค่า 1.05 mA ดังนั้น

$$R_L = \frac{V_{CE}}{I_C} = \frac{10 \text{ v}}{1.05 \times 10^{-3} \text{ A}} = 9.5 \text{ K}$$

ผลจากข้อ (ก) และ (ข) สรุปได้ว่า เมื่อ V_{CC}, I_B, I_C คงที่ แต่ R_L เพิ่มค่าขึ้นเรื่อย ๆ แนวเส้นโหลดจะหมุนทวนเข็มนาฬิกา รอบจุดตรึง $V_{CE} = 10$ v

ตัวอย่าง 3.2 สืบเนื่องจากตัวอย่าง 3.1 ถ้ากระแสเบสคงที่ 20μA และใช้ค่า $R_L = 5$ K, $I_C = 1$ mA แต่แปรค่า V_{CC} จาก 10 v เป็น 7.5 v

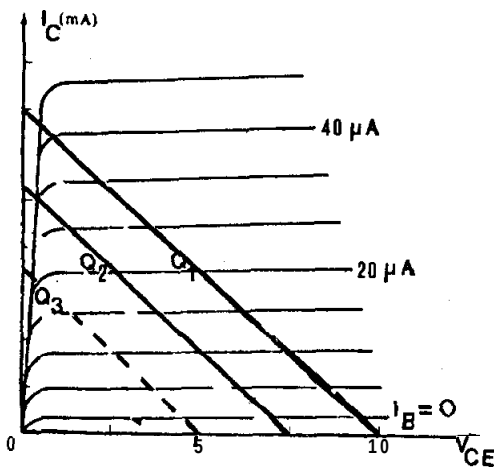
(ก) จงหาจุดทำงานใหม่

(ข) หาค่า β_F ณ จุดทำงานทั้งสอง

(ค) V_{CC} มีค่าประมาณเท่าไรจึงทำให้ทรานซิสเตอร์อิ่มตัว

วิธี (ก) อาศัยสมการ (3.2) เช่นเดียวกัน หาเส้นโหลดที่สอง จุดตัดบนแนวแกนตั้ง โดยให้ $V_{CE} = 0$, $I_C = 1.5$ mA

จุดตัดบนแนวแกนนอน โดยให้ $I_C = 0$, $V_{CE} = 7.5$ v
ได้เส้นโหลดใหม่ เป็นเส้นตรงตัดแกนตั้งที่ค่า $I_C = 1.5$ mA และตัดแกนนอนที่ค่า $V_{CE} = 7.5$ v จุดทำงานใหม่ Q_2 ยังคงอยู่บนแนวเส้นกราฟ $I_B = 20\mu A$ ถ้าลากเส้นกราฟดังกล่าวนี้จะเห็นภาพพจน์ได้ดีขึ้น ในรูป 3.5 จุดทำงานใหม่ Q_2 อยู่บนแนวเส้นกราฟ $I_B = 20\mu A$ ซึ่งยังคงค่า $I_C = 1$ mA ส่วน $V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_L = 2.5$ v



รูป 3.5 ถ้าคงค่า I_B, I_C และ R_L แต่แปรค่า V_{CC} ให้น้อยลง เส้นโหลด (และจุดทำงานใหม่) จะเลื่อนไปทางซ้าย เข้าใกล้บริเวณอิ่มตัวของทรานซิสเตอร์

(ข) β_F ณ จุดทำงานทั้งสองมีค่าดังนี้

$$\beta_F = I_C/I_B = 10^{-3}/20 \times 10^{-6} = 50$$

(ค) ถ้ายังคงค่า $I_{CQ} = 1$ mA ณ จุดทำงาน Q_3 ทรานซิสเตอร์อิ่มตัว ($V_{CE} = 0$)

$$V_{CC} = I_CR_L = 5 \text{ v}$$

หมายเหตุ ปัญหาข้อนี้ อาจทำได้อีกวิธีหนึ่ง คือโดยการคาดคะเนจากรูป 3.5

จากตัวอย่างทั้งสองนี้ วิธีการพล็อตเส้นโหลดทำโดยหาจุดตัวหัวท้ายของเส้นโหลดบนแกนตั้งและแกนนอน นอกจากนี้ หากทราบสมการเส้นโหลด เช่น จากสมการ (3.2)

$$V_{CC} = R_LI_C + V_{CE}$$

ความชัน (หรือสโลป) ของเส้นโหลดมีค่าเป็น $-\frac{1}{R_L}$ เมื่อทราบจุดตัดบนแกนใดแกนหนึ่ง (เพียงค่าเดียว) สามารถลากเส้นโหลดจากจุดดังกล่าวให้มีความชันตามกำหนดก็ได้

ขีดจำกัดของวิธีการพล็อตเส้นโหลด มี 2 กรณี ดังนี้

(1) ขีดจำกัดต่ำสุดของตัวต้านทานโหลดคือ 0 โอห์ม เส้นโหลดจะมีความชัน $-1/0 = \infty$ โดยมีลักษณะเป็นเส้นตรงเริ่มจากจุดตัดบนแกนนอน ขนานไปกับแนวแกนตั้ง

(2) ขีดจำกัดสูงสุดของตัวต้านทานโหลดคือ ∞ กรณีนี้เส้นโหลดจะมีความชันเป็น $-1/\infty = 0$ ลักษณะจะเป็นเส้นในแนวแกนนอน

และจุดทำงานในทั้งสองกรณีนี้ ไม่สามารถหาค่าได้โดยวิธีกราฟ

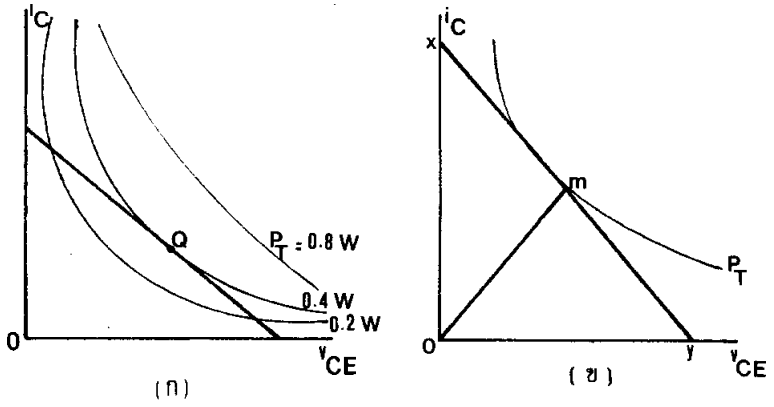
3.4 ความสัมพันธ์ของจุดทำงานกับกำลังสูญเสียของทรานซิสเตอร์

อุณหภูมิภายในตัวทรานซิสเตอร์แยกได้ 2 สาเหตุคือ เกิดจากอุณหภูมิในห้อง หรืออุณหภูมิที่เกิดจากความร้อนเกิดขึ้นเองในตัวทรานซิสเตอร์ ซึ่งสาเหตุหลังเนื่องจากปริมาณกำลังสูญเสียในทรานซิสเตอร์ ดังได้กล่าวรายละเอียดแล้วในตอน 2.8.3 อย่างไรก็ตาม อาจเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนที่แปรไป (ΔT มีหน่วยเป็น °C) กับปริมาณกำลังสูญเสีย (P_T มีหน่วยเป็น W) โดยนิยามให้อัตราส่วนของ ΔT ต่อ P_T มีค่าเป็นปริมาณความต้านทานความร้อน (thermal resistance) แทนด้วยสัญญลักษณ์ θ

$$\theta = \frac{\Delta T}{P_T} \qquad \text{.....(3.3)}$$

สมการ (3.3) มีลักษณะคล้ายกฎของโอห์ม และ θ มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 1 ถึง1000 °C/Watt

ผลของความร้อนที่เกิดขึ้นเองในตัวทรานซิสเตอร์ ได้แสดงในรูป 3.6 ซึ่งใน



รูป 3.6 การวิเคราะห์ความร้อนที่เกิดขึ้นเองในตัวทรานซิสเตอร์ โดยมีเส้นโหลดลากสัมผัสแนวไฮเปอร์โบลา และแสดงจุดทำงาน ณ บริเวณกำลังสูญเสีย

รูป 3.6 (ก) แสดงไฮเปอร์โบลา 3 เส้น แต่ละเส้นกราฟเป็นค่ากำลังสูญเสียของทรานซิสเตอร์ พล็อตในระนาบของ i_C และ v_{CE} มีเส้นโหลดของไฟกระแสตรงลากประชิดส่วนโค้งของไฮเปอร์โบลาที่มีค่า $P_T = 0.4$ W เห็นได้ชัดว่า ทรานซิสเตอร์จะมีกำลังสูญเสียค่าสูงสุดเมื่อจุดทำงานอยู่ ณ ตำแหน่งที่เส้นโหลดประชิดกับส่วนโค้งไฮเปอร์โบลา ถ้าจุดทำงานอยู่ต่ำกว่าจุดประชิด เมื่อ i_C เพิ่มค่า จะมีผลให้จุดทำงานเลื่อนสู่บริเวณที่มีกำลังสูญเสียมากขึ้น กรณีนี้ ความร้อนที่เกิดขึ้นเองในทรานซิสเตอร์จะส่งผลแบบปริมาณสะสม ถ้าจุดทำงานอยู่สูงกว่าจุดประชิด เมื่อ i_C เพิ่มค่า จุดทำงานจะเลื่อนไปยังบริเวณที่มีกำลังสูญเสียน้อยลง ดังนั้น ความร้อนที่เกิดขึ้นเองในทรานซิสเตอร์จะกลายเป็นผลชดเชยปริมาณกำลังสูญเสียได้เอง

รูป 3.6 (ข) แสดงไฮเปอร์โบลาของกำลังสูญเสีย P_T และเส้นโหลดของไฟกระแสตรง xy ซึ่งประชิดกับส่วนโค้งไฮเปอร์โบลาที่จุด m ซึ่งทำหน้าที่แบ่งครึ่งของเส้นตรง xy สมการของไฮเปอร์โบลาคือ

$$I_C = \frac{P_T}{v_{CE}} \qquad \text{.....(3.4)}$$

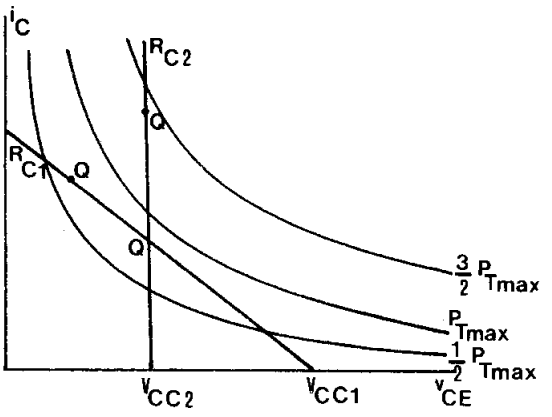
(หมายเหตุ รูปสมการไฮเปอร์โบลา คือ $1/y = a_o + a_1x$ และสมการเส้นตรง คือ $y = a_o + a_1x$)
ความชัน ณ จุดใด ๆ คือ

$$\frac{di_C}{d\,v_{CE}} = -\frac{P_T}{v_{CE}^2} = -\frac{i_C}{v_{CE}} \qquad \text{.....(3.5)}$$

แต่ i_C/v_{CE} เป็นความชันของเส้นตรง om ในรูป 3.6 (ข) ดังนั้น ความชันของไฮเปอร์โบลา ณ จุดใด ๆ มีค่าเป็นลบความชันของคอร์ด (chord) ที่ลากจากจุดกำเนิด o ไปยังจุดนั้น ๆ สามเหลี่ยม omy จึงเป็นสามเหลี่ยมที่มีสองด้านเท่ากันนั่นคือ จุดประชิด m แบ่งครึ่งเส้นตรง xy

แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วคอลเลคเตอร์มีผลต่อการเกิดความร้อนขึ้นเองในตัวทรานซิสเตอร์ ถ้าทรานซิสเตอร์ได้รับไบแอสซึ่งในภาวะสงบมีค่าแรงดันคอลเลคเตอร์ V_{CE} น้อยกว่า $1/2\ V_{CC}$ จุดทำงานอยู่ในบริเวณซึ่งการเกิดความร้อนขึ้นเองในตัวทรานซิสเตอร์มีลักษณะชดเชยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และความร้อนที่เกิดขึ้นดังกล่าว มีผลน้อยมากต่อจุดทำงานในภาวะสงบ ดังแสดงในรูป .3.7 เป็นแนวเส้นตรง $V_{CC1}R_{c1}$ ถ้าเป็นกรณี V_{CE} มีค่ามากกว่า $1/2\ V_{CC}$ แสดงด้วยแนวเส้นตรง $V_{CC2}R_{c2}$ จุดทำงานอยู่ในบริเวณซึ่งการเกิดความร้อนขึ้นเองในตัวทรานซิสเตอร์มีลักษณะเป็นปริมาณสะสม และมีผลต่อจุดทำงานมาก ทรานซิสเตอร์อาจมีกำลังสูญเสียเกินไป สุดท้ายคือทรานซิสเตอร์เกิดการเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิสูงเกินไป ปรากฏการณ์ที่เกิดความร้อนเองในทรานซิสเตอร์และมีลักษณะส่งผลแบบสะสมนี้ หมายถึงลักษณะการหนี

ความร้อน (thermal runaway) ซึ่งจะเป็นปัญหาเมื่อแรงดันคอลเลคเตอร์ (V_{CE}) ถูกป้อนโดยผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ เช่น หม้อแปลงปฐมภูมิ (primary transformer) แทนที่จะผ่านตัวต้านทาน

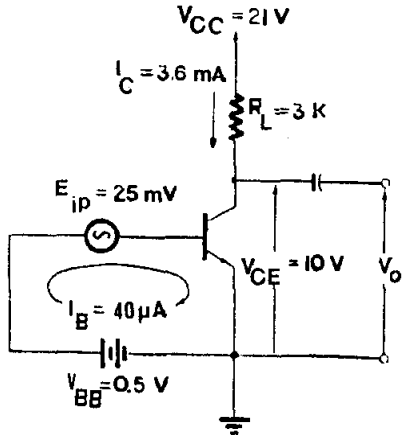


รูป 3.7 แสดงผลของการเกิดความร้อนขึ้นเองในทรานซิสเตอร์ต่อจุดทำงาน ซึ่งขึ้นกับการเลือกไบแอสให้แรงดันไฟฟ้า V_{CE} มีค่ามากหรือน้อยกว่า V_{EE} สัญญลักษณ์ P_{Tmax} หมายถึงปริมาณสูงสุดที่ยอมให้มีค่าได้ของปริมาณ P_T

3.5 การประยุกต์วิธีกราฟกับวงจรขยาย

3.5.1 ความต้านทานอินพุทของทรานซิสเตอร์

ถ้านำทรานซิสเตอร์ไปใช้ในวงจรขยาย ต้องมีการป้อนสัญญาณ ac เพื่อให้ทรานซิสเตอร์ทำหน้าที่ขยายสัญญาณดังกล่าว โดยยังคงมีแหล่งไบแอส dc เพื่อให้ทรานซิสเตอร์ทำงานได้ การใช้วิธีกราฟหาความต้านทานอินพุทของทรานซิสเตอร์ที่มีต่อสัญญาณอินพุท ต้องอาศัยกราฟลักษณะสมบัติด้านอินพุท ตัวอย่างวงจรขยายเอมมิตเตอร์ร่วม แสดงในรูป 3.8 โดยมีสัญญาณอินพุทเป็นคลื่นซายน์จาก E_{ip} มีค่ายอด (peak value) เป็น E_{ip} ต่ออนุกรมกับลูปเบส ซึ่ง E_{ip} จะทำให้กระแสเบส I_B จากแบตเตอรี V_{BB} แปรค่าโดยมีลักษณะเป็นคลื่นรูปซายน์ด้วย ซึ่งมีค่ายอดเป็น I_{bp} และหาค่าได้โดยอาศัยความต้านทานอินพุทกระแสสลับ ที่มีต่อ E_{ip} จากรูป 3.8 ถ้าถือว่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี V_{BB} น้อยมากจนสามารถตัดทิ้งได้ ดังนั้น ความต้านทาน ac ที่มีต่อ E_{ip} คือความต้านทานอินพุทของทรานซิสเตอร์



รูป 3.8 วงจรขยายแบบเอมมิตเตอร์ร่วม มีแหล่งจ่ายไฟตรงคือ V_{BB} *และ* V_{CC} *แหล่งป้อนสัญญาณไฟสลับคือ* E_{ip}

เส้นกราฟลักษณะสมบัติด้านอินพุทของวงจรนี้ แสดงในรูป 3.9 ที่ตำแหน่งจุดทำงาน Q มีปริมาณกระแสตรง I_B = 40μA และ V_{BB} = V_{BE} = 0.5 v ในรูปได้วาด E_{ip} sin ωt ซ้อนลงบน V_B เนื่องจาก E_{ip} ต่ออนุกรมกับ V_{BB} ทั้งนี้เพื่อแสดงลักษณะที่ E_{ip} ต้านและเสริม V_{BE} ดังนั้น V_{BE} จะมีค่าแกว่งอยู่ระหว่าง 0.5-0.025 = 475 mv และ 0.5 + 0.025 = 525 mv ปริมาณดังกล่าวนี้แสดงไว้ที่จุด C และ D ตามลำดับ ค่ากระแสเบสที่สมนัยกัน อ่านจากแกนตั้งได้ค่า I_{bp} = 20 μA และ 60 μA ตามลำดับ สรุปได้ว่า แรงดันอินพุท Ei ก่อให้จุดทำงานแปรตำแหน่งอยู่ในช่วง QC หรือ QD จึงกำหนดเรียกแนว CD เป็น "ทางทำงาน" (operating path) ของทรานซิสเตอร์ ความชันของเส้น CD คือ $\Delta I_B/\Delta V_{BE}$ = $1/h_{ie}$ โดย

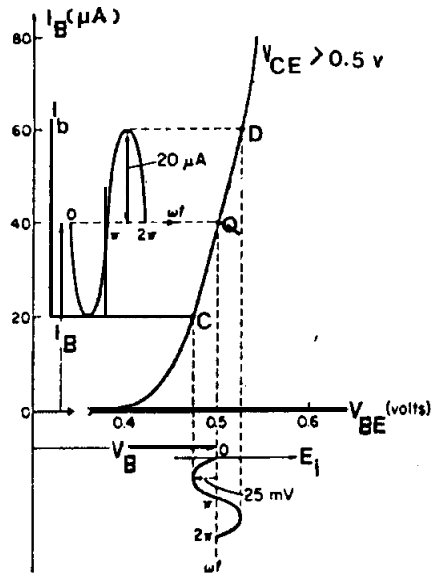
$$h_{ie} = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B} \qquad \text{.....(3.6)}$$

กล่าวได้ว่า E_{ip} มองเห็นทรานซิสเตอร์มีความต้านทานอินพุทเป็น h_{ie} ซึ่งหาค่าได้โดยคำนวณจากค่ายอดถึงยอด (peak-to-peak value) ของ ΔI_B โดย

$$\Delta I_B = 2 I_{bp} = 40\ \mu A$$

และ $$\Delta V_{BE} = 2 E_{ip} = 50\ mv$$

แทนค่าทั้งสองนี้ลงในสมการ (3.6) ได้ค่า h_{ie} = 1250 โอห์ม สังเกตุเส้นกราฟลักษณะสมบัติ I_B vs V_{BE} มีความชันแตกต่างกันไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อกระแสเบสมีค่าน้อย ๆ (ลักษณะเช่นนี้เหมือนกับกรณีของไดโอด) ดังนั้น ความต้านทานอินพุทมีค่าแปรตามตำแหน่งจุดทำงาน



รูป 3.9 โครงร่างของสัญญาณอินพุท $E_{ip} \sin \omega t$ *บนระนาบของ* I_B *และ* V_{BE} *ซึ่ง* $V_{CE} >$ 0.5 v *แนวทางทำงานของทรานซิสเตอร์คือ* CD

3.5.2 อัตราขยายแรงดันไฟฟ้า

จากผลลัพธ์ในตอน 3.5.1 สรุปได้ว่า E_{ip} ในรูป 3.9 เป็นตัวก่อให้เกิด

(1) กระแสเบส ac คร่อมบนกระแสเบส dc

(2) กระแสคอลเลคเตอร์ ac แปรค่าไปรอบ ๆ ปริมาณ dc ของมันเอง

ตามคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ กระแสคอลเลคเตอร์ ac ดังกล่าวได้ถูกย้าย โดยมีอัตราขยายกระแส ac เป็น β_o ซึ่งถูกกำหนดให้เป็นสัญญลักษณ์แทนเกนกระแสของสัญญาณขนาดน้อย ๆ กระแสคอลเลคเตอร์ปริมาณนี้จะไหลผ่านตัวต้านทานโหลด R_L ผลคือ แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทจะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม (การเพิ่มค่าของกระแสและแรงดันไฟฟ้า ac เป็นไปในลักษณะทีละน้อย ๆ) แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทที่ทำการวัดนั้น เป็นปริมาณ ac หรือ dc? คำตอบคือเป็นปริมาณ ac เท่านั้น เนื่องจากตัวจุ C จะกันสัญญาณ dc ไม่ให้ผ่านออกมาจากรายละเอียดในตอน 3.5.1 E_{ip} ก่อให้เกิดกระแสเบส ac มีค่ายอดเป็น I_{bp} = 20 μA เริ่มพิจารณาเมื่อ E_{ip} อยู่ในช่วงบวก จึงเสริม I_Bให้มีค่ามากในรูป 3.10 เป็น I_{B2} = 40 μA ต่อไปเมื่อ E_{ip} อยู่ในช่วงลบ I_B จะมีค่าลดลง คือเป็น I_{B1} = 20 μA ดังนั้น จุดทำงานจะต้องเลื่อนตามแนวเส้นโหลดลงสู่จุด C

การแปรค่ายอดถึงยอดถึงยอดวัดจากรูป 3.10 ได้ค่า V_{CE} = 16 − 3.5 = 12.5 โวลท์ ซึ่งลำดับเหตุการณ์ในช่วงเวลา o – ¶ ดังนี้

(1) E_i ทำให้เบสเป็นลบ เมื่อเทียบกับเอมมิตเตอร์

(2) กระแสเบสลดลงแบบคลื่นซายน์

(3) จุดทำงาน Q เคลื่อนลงสู่จุด C

(4) กระแสคอลเลคเตอร์แปรค่าแบบคลื่นซายน์ จาก 3.6 เป็น 1.6 มิลลิแอมแปร์

(5) V_{CE} เพิ่มค่าจาก 10 โวลท์เป็น 16 โวลท์ (โดยประมาณ)

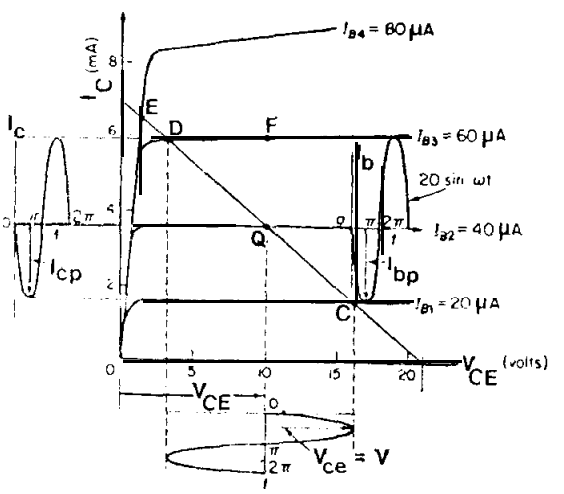
ส่วนในช่วงเวลาต่อมาคือ ¶ – 2 ¶ เป็นดังนี้

(1) E_i ขับให้เบสเป็นบวก เมื่อเทียบกับเอมมิตเตอร์

(2) กระแสเบสมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $I_B + I_{bp}$

(3) กระแสคอลเลคเตอร์เพิ่มค่าเป็น $I_C + I_{cp}$

(4) V_{CE} มีค่าลดลง 10 – 3.5 = 6.5 โวลท์



รูป 3.10 สัญญาณด้านเอาท์พุทของวงจรในรูป 3.8 ซึ่งรูปร่างสัญญาณกระแสและแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทวาดลงบนกลุ่มเส้นกราฟลักษณะสมบัติด้านเอาท์พุท

ตัวจุ C ในรูป 3.8 ทำหน้าที่ควบคุมการแปรค่าของ V_{CE} เพื่อให้แรงดันเอาท์พุทแกว่งโดยมีค่ายอดถึงยอดเป็นเช่นเดียวกับ V_i เกนแรงดันไฟฟ้า A_v มีค่าดังนี้

$$A_v = \frac{V_o}{E_i} = - \frac{12.5}{50 \times 10^{-3}} = - 250 \qquad \ldots\ldots (3.7)$$

สรุปผลจากการวิเคราะห์แบบกราฟ

(1) จากรูป 3.10 สัญญาณกระแสเบสเป็นตัวเลื่อนจุดทำงานตามแนวทาง CD และแปรค่าจากจุด C ถึง D จากนั้นสามารถวัดค่ายอดของกระแสและแรงดันไฟฟ้าของคอลเลคเตอร์ได้

(2) เมื่อสัญญาณแรงดันไฟฟ้าอินพุท E_i ขับให้ขั้วเบสเป็นลบ ขั้วเอาท์พุท (คือคอลเลคเตอร์) เป็นขั้วบวก ดังนั้น V_o มีเฟสต่างกับ E_i เป็น 180° ความสัมพันธ์นี้แทนด้วยเครื่องหมายลบ หรือเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น $V_o = -A_v E_i$

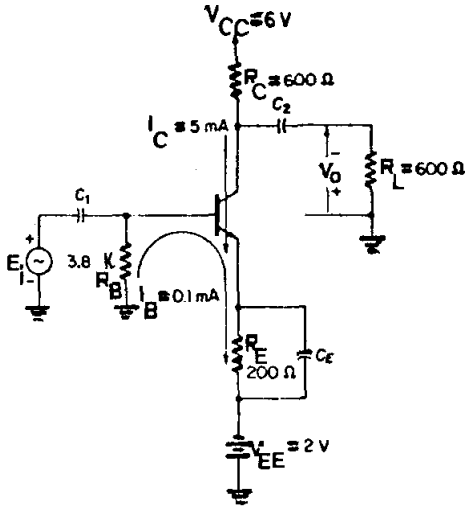
(3) ถ้าค่ายอด I_{bp} มีค่าเกิน 20 μA จะก่อให้เกิดการเพี้ยนอย่างมาก ตัวอย่างดูได้จากรูป 3.10 ถ้า I_b เพิ่มค่าเป็น 65 μA กระแสคอลเลคเตอร์จะเพิ่มค่าถึงจุด E แม้ว่า I_b จะเพิ่มสูงขึ้นอีกก็ไม่ทำให้กระแสคอลเลคเตอร์เปลี่ยนแปลง นั่นคือ สัญญาณอินพุทจะไม่ถูกสร้างใหม่อีกเลยที่ขั้วเอาท์พุท ยอดของคลื่นกระแสและแรงดันเอาท์พุทถูกขลิบตลอดช่วงเวลาที่กระแสเบสมีค่าเกิน 65 μA หรือเมื่อยอดของสัญญาณกระแสเบสสูงกว่า 25 μA ดังนั้น เพื่อให้แรงดันเอาท์พุทแกว่งได้มากที่สุด อาจทำการไบแอสทรานซิสเตอร์ในช่วงครึ่งบนของเส้นโหลด คือ $V_{CE} = 1/2\ V_{CC}$

(4) เกนกระแสของวงจรนี้ มีค่าน้อยกว่า β_o เล็กน้อย เนื่องจากกระแสคอลเลคเตอร์ที่จุด D น้อยกว่าที่จุด F ช่วง QF เป็นกระแสที่แปรค่าเนื่องจาก βo และ Ibp ส่วนช่วง QD เป็นเกนกระแสตามปกติ ทั้งนี้เนื่องจากเส้นกราฟลักษณะสมบัติของ $I_{B3} = 60\ \mu$A ไม่เป็นเส้นนอนที่แท้จริง

(5) E_i ในรูป 3.9 ต้องมีปริมาณน้อยมาก หรือมีค่าเป็นครึ่งรอบของกระแสเบสจากรูป 3.10 ถ้า I_B แปรค่าอย่างสม่ำเสมอ ย่อมทำให้ I_C แปรค่าอย่างสม่ำเสมอเช่นกัน สังเกตุได้จากการแปรค่าของช่วงกว้างระหว่างเส้นกราฟลักษณะสมบัติด้านเอาท์พุท ตามค่าที่เพิ่มขึ้นของ I_C และ V_{CE}

3.6 เส้นโหลดของไฟฟ้ากระแสสลับ

บางครั้งเรียกเส้นโหลดของไฟฟ้ากระแสสลับเป็นเส้นโหลด ac หรือเส้นโหลดไดนามิกส์ (dynamics) เนื่องจากวงจรทรานซิสเตอร์ที่ใช้งานแท้จริงจะมีตัวจุทำหน้าที่กันแสตรงไม่ให้ผ่าน หรือบางตำราอาจกล่าวว่า ตัวจุจะมีลักษณะทำงานเป็นวงจรเปิดต่อกระแสตรง และเป็นวงจรปิดต่อกระแสสลับ ถ้าเช่นนั้นแล้ว ในวงจรทรานซิสเตอร์ยังคงมีไฟฟ้ากระแสตรงหรือไม่? คำตอบคือ ยังคงมีอยู่เพื่อเลี้ยงให้ทรานซิสเตอร์สามารถทำงานได้ตามต้องการ ดังนั้น ในการวิเคราะห์โดยวิธีกราฟจำต้องอาศัยเส้นโหลดไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับ กรณีปัญหาไฟฟ้ากระแสตรง และอาศัยเส้นโหลดไฟฟ้ากระแสสลับ สำหรับกรณีปัญหาไฟฟ้ากระแสสลับ ตัวอย่างวงจรไฟฟ้าแสดงในรูป 3.11 ซึ่งมีตัวจุ C_1 และ C_2 ทำหน้าที่กันกระแสไฟตรง ไม่ให้ผ่านแหล่งกำเนิดสัญญาณ E_i และตัวต้านทานโหลด R_L ตามลำดับ ส่วน C_E เป็นตัวผ่านสัญญาณกระแสสลับใด ๆ รอบตัวต้านทาน R_E



รูป 3.11 วงจรเอมมิตเตอร์ร่วม ต่อตัวจุ C_1, C_2 และ C_E เพื่อแยกโหลดของไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ

พิจารณากรณีไฟฟ้ากระแสตรง

(1) ความต้านทานของไฟฟ้ากระแสตรงคือ $R_E + R_C$ ซึ่งเป็นตัวจำกัดกระแสตรงของคอลเลคเตอร์ คือ I_C

(2) แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทั้งหมดที่จ่ายให้ทรานซิสเตอร์คือ $V_{CC} + V_{EE}$

ถ้าถือว่ากระแสตรงของเอมมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์มีค่าเท่ากัน ($I_E \sim I_C$) สมการเส้นโหลด (3.2) ถูกดัดแปลงเป็น

$$V_{CC} + V_{EE} = I_C(R_C + R_E) + V_{CE} \qquad \text{.....(3.8)}$$

เมื่อ $I_C = 0$, จุดตัดบนแกนนอนคือ $V_{CE} = V_{CC} + V_{EE}$

เมื่อ $V_{CE} = 0$, จุดตัดบนแกนตั้งคือ $I_C = (V_{CC} + V_{EE})/(R_C + R_E)$

ความชันของเส้นโหลดไฟตรงคือ $-1/(R_C + R_E)$

จากนั้น ทำการพล็อตเส้นโหลดบนกลุ่มเส้นกราฟลักษณะสมบัติด้านเอาท์พุทของทรานซิสเตอร์ จุดทำงานของทรานซิสเตอร์คือตำแหน่งที่เส้นโหลดตัดกับเส้นกราฟกระแสเบส (I_B)

พิจารณากรณีไฟฟ้ากระแสสลับ

กรณีนี้มี E_i เป็นต้นกำเนิดแรงดันไฟฟ้าแบบคลื่นซายน์ปริมาณน้อย ๆ ซึ่งก่อให้เกิดกระแสเบสแบบคลื่นซายน์ปริมาณน้อย ๆ เช่นกัน ซึ่งไหลในวงจรรูป 3.11 ปริมาณของกระแสเบสจะไหลผ่านทรานซิสเตอร์ได้มากน้อยเพียงใด ขึ้นกับความต้านทานอินพุท (h_{ie}) ของทรานซิสเตอร์ ไม่ขึ้นกับค่า R_E เนื่องจากตัวจุ C_E ทำหน้าที่ผ่านสัญญาณกระแสสลับทั้งหมด

นั่นเอง กระแสสลับของคอลเลคเตอร์มีค่าเป็น $\beta_o I_b$ ($I_c = \beta_o I_b$) อธิบายได้ดังนี้ เมื่อกระแสเบส I_b ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ จะถูกเพิ่มค่าด้วยปริมาณ β_o เท่า เนื่องจากการโด๊ปสารกึ่งตัวนำ (ดูคำอธิบายรายละเอียดในหัวเรื่อง คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของทรานซิสเตอร์) พิจารณา

(1) ความต้านทานโหลดสำหรับกระแสสลับ คือผลรวมของตัวต้านทาน R_C และ R_L ซึ่งต่อกันอย่างขนาน นั่นคือ

$$R_{ac} = R_C // R_L = \frac{R_C R_L}{R_C + R_L}$$

เห็นได้ชัดว่า ค่าโหลดของทั้งสองกรณีนั้นต่างกัน ดังนั้น จุดทำงานจึงไม่ควรเคลื่อนตามแนวเส้นโหลดไฟกระแสตรงเท่านั้น

(2) แรงดันตกคร่อมโหลดไฟกระแสสลับคือ V_{ce} ถ้าถือว่าค่าแรงดันไฟกระแสสลับนี้เป็นค่ายอดย่อมมีผลมาจากค่ายอดของกระแสคอลเลคเตอร์ไหลผ่านตัวต้านทานไฟกระแสสลับ เขียนความสัมพันธ์เป็น

$$V_{cep} = I_{cp} R_{ac} \qquad \text{.....(3.9)}$$

จากสมการ (3.9) กล่าวได้ว่า จุดทำงานจะเคลื่อนจากตำแหน่งทำงานเป็นระยะทางยอดเท่ากับ I_{cp} และ V_{cep} หรือกล่าวว่า จุดทำงานเคลื่อนไปตาม "ทางทำงาน" บนแนวเส้นโหลดของไฟกระแสสลับ เมื่อไม่มีสัญญาณ หรือสัญญาณกำลังผ่านค่าศูนย์ (หมายเหตุ สัญญาณสลับมีค่าเป็น +, o, – ตามลำดับ จึงถือว่าครบรอบของมัน) จุดทำงานจะย้อนสู่ตำแหน่งทำงานเสมอ ดังนั้น ในกรณีดังกล่าวนี้ เส้นโหลดของกระแสสลับจะตัดผ่านจุดทำงานกระแสตรงเสมอ ความชันของเส้นโหลดกระแสสลับ คือ $-1/R_{ac} = -I_{cp}/V_{cep}$

ตัวอย่าง 3.3 จากวงจรในรูป 3.11

(ก) ถ้า $I_B = 0.10$ mA จงหาจุดทำงานสำหรับไฟกระแสตรง โดยอาศัยเส้นกราฟลักษณะสมบัติในรูป 3.12

(ข) สมมุติกระแสเบสมีค่ายอดเป็น 0.05 mA จงหาเส้นโหลดของไฟกระแสสลับ

(ค) หาเกนกระแสของทรานซิสเตอร์โดยวิธีกราฟ

วิธี (ก) จากสมการ (3.8), หาจุดตัดบนแกนนอน โดยให้ $I_C = 0$ ดังนั้น

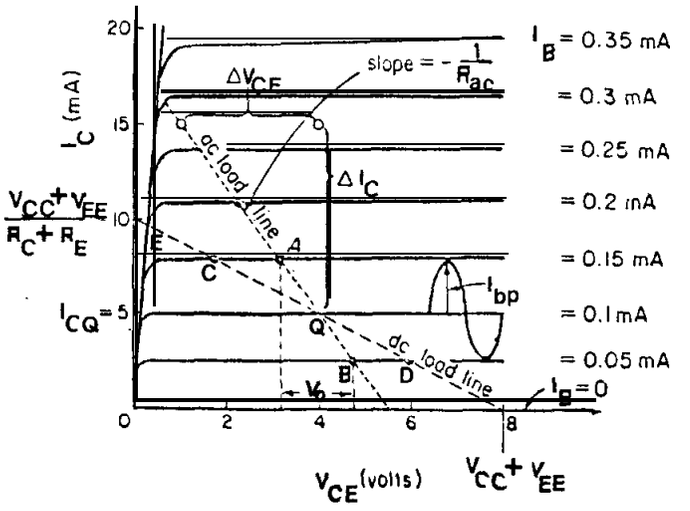
$$V_{CE} = V_{CC} + V_{EE} = 6 + 2 = 8 \text{ v}$$

ความชันของเส้นโหลดไฟตรงคือ $-1/(R_C + R_E) = -1/800\ \Omega$

จุดตัดบนแกนตั้ง เมื่อ $V_{CE} = 0$ ดังนั้น

$$I_C = \frac{V_{CC} + V_{EE}}{R_C + R_E} = 10 \text{ mA}$$

จุดทำงาน Q เป็นตำแหน่งที่เส้นโหลดตัดกับเส้นกราฟ $I_B = 0.10$ mA



รูป 3.12 เส้นกราฟลักษณะสมบัติด้านเอาท์พุทของทรานซิสเตอร์

(ข) ความต้านทานโหลดของไฟกระแสสลับคือ $R_{ac} = R_L // R_C = 300\ \Omega$ เพื่อความสะดวก เลือกให้ $\Delta I_C = 10$ mA หาค่า ΔV_{CE} จากสมการ (3.9)

$$V_{cep} = \Delta V_{CE} = \Delta I_C R_{ac} = 10 \times 10^{-3} \times 300 = 3 \text{ v}$$

หาเส้นโหลดไฟกระแสสลับโดยอาศัยจุด Q ในข้อ (ก) เป็นหลัก เนื่องจากจุดทำงานเป็นตำแหน่งที่เส้นโหลดของไฟกระแสตรงตัดกับของไฟกระแสสลับ คือจากจุด Q สูงขึ้นไป 10 mA (เป็นค่า ΔI_C) และเลื่อนไปทางซ้าย 3 v (เป็นค่า ΔV_{CE}) ลากเส้นต่อจุดทั้งสองได้เส้นโหลดไฟกระแสสลับ

(ค) โจทย์กำหนดให้กระแสเบสมีค่ายอดเป็น 0.05 mA

(ก) ค่า $I_B = 0.10$ mA ดังนั้น I_B แปรค่าอยู่ระหว่าง 0.05 – 0.15 mA จากรูป 3.12 อ่านค่า I_C ที่สมนัยกัน มีค่าเป็น 2.5 mA และ 7.8 mA ตามลำดับ เกนกระแส A_i มีค่าดังนี้

$$A_i = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{7.8 - 2.5}{0.15 - 0.05} = 53$$

จากรูป 3.12 เส้นกราฟ $I_B = 0.15$ mA เกือบขนานกับเส้นกราฟ $I_B = 0.05$ mA ดังนั้นถือได้ว่า $\beta_o \sim A_i$

ตัวอย่าง 3.4 จากตัวอย่าง 3.3 ถ้าทรานซิสเตอร์มีค่า $h_{ie} = 250\ \Omega$

(ก) จงหาค่ายอดถึงยอดของ E_i เพื่อก่อกระแสเบสซึ่งมีค่ายอดถึงยอดเป็น 0.1 mA

(ข) จงคำนวณเกนแรงดันไฟฟ้าของวงจร

(ค) สัญญาณกระแสไหลผ่าน R_L และ R_C มีค่ายอดถึงยอดเท่าใด

(ง) จงคำนวณเกนกระแสของวงจร จากต้นกำเนิดแรงดันไฟฟ้า E_i ไปยังโหลด R_L

วิธี (ก) ถ้าเป็นกรณีไฟสลับ ถือได้ว่าแหล่งป้อนแรงดันไฟตรงเป็นวงจรลัด (คือ C_E และ V_{EE})

$$E_{i(p/p)} = I_{b(p/p)}\, h_{ie} = (0.10 \times 10^{-3}) \times 250 = 25 \text{ mv}$$

(ข) จากรูป 3.12 อ่านได้ $V_{CE} = 3.2$ v เมื่อ $I_B = \mathbf{0.15}$ mA

$= 4.7$ V เมื่อ $I_B = \mathbf{0.05}$ mA

นั่นคือ $V_{o(p/p)} = \mathbf{3.2 - 4.7} = -1.5$ v

$$A_v = \frac{V_{o(p/p)}}{E_{i(p/p)}} = \frac{-1.5}{25 \times 10^{-3}} = -60$$

(ค) สัญญาณกระแสที่ไหลผ่าน R_L มีค่ายอดถึงยอดเป็น $I_{L(p/p)}$

$$I_{L(p/p)} = \frac{V_{o(p/p)}}{R_L} = \frac{-1.5}{600} = -2.5 \text{ mA}$$

เนื่องจาก $R_L = R_C$ ดังนั้นมีกระแสปริมาณเท่ากันไหลผ่าน ซึ่งเป็นค่าครึ่งหนึ่งของ I_C ดังนั้น ค่า I_C ที่เปลี่ยนแปลงไป ควรเท่ากับผลรวมของ $I_{L(p/p)}$ และ $I_{RC(p/p)}$

$$\Delta I_C = I_{L(p/p)} + I_{RC(p/p)} = \mathbf{5\ mA}$$

(ง) จากวงจรในรูป 3.11 กระแสไหลผ่าน R_B มีค่าดังนี้

$$I_{RB} = \frac{E_i}{R_B} \qquad \frac{\mathbf{25 \times 10^{-3}}}{\mathbf{3.8 \times 10^{-3}}} = 6.5\ \mu\text{A}$$

กระแสที่ป้อนเข้าในวงจรคือ $I_i = I_B + I_{RB} = (0.10 \text{ mA}) + (6.5\ \mu\text{A}) = 106\ \mu\text{A}$

(ค่า $I_B = 0.10$ mA จากตัวอย่าง 3.3)

เกนกระแสของวงจร $= I_L/I_i = (2.5 \times 10^{-3}) / (106 \times 10^{-6}) = 23.6$

3.7 บทสรุป

ข้อได้เปรียบของวิธีกราฟคือ ทำให้เห็นลักษณะการแกว่งของสัญญาณอินพุทและเอาท์พุทได้ชัดเจนดี ทำให้เข้าใจหน้าที่การทำงานของทรานซิสเตอร์ในวงจรได้ดีขึ้น ส่วนข้อเสียเปรียบคือ ต้องอาศัยเส้นกราฟลักษณะสมบัติด้านเอาท์พุทของทรานซิสเตอร์ ซึ่งในบางกรณีหาได้ยาก และจากการทดสอบคำนวณค่าในตัวอย่าง 3.4 ข้อ (ค) เปรียบเทียบกับค่าในตัวอย่าง 3.3 ข้อ (ก), ΔI_C มีค่าแตกต่างไปเล็กน้อย แสดงว่าวิธีกราฟยังไม่แม่นยำนัก

จุดทำงาน เป็นตำแหน่งที่ปริมาณทางไฟฟ้าภายในตัวทรานซิสเตอร์มีค่าสมนัยกับปริมาณ

ของธาตุวงจรภายนอก ผู้ใช้สามารถเลือกตำแหน่งเพื่อให้ทรานซิสเตอร์ทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ เช่น ในวงจรขยาย เลือกจุดทำงาน ณ บริเวณกึ่งกลางเส้นโหลด เป็นต้น

กรณีมีทั้งไฟกระแสตรงและกระแสสลับป้อนในวงจร ต้องใช้ตัวจุซึ่งทำหน้าที่เลือกให้กระแสสลับผ่านไปในแนวที่ต้องการ เมื่อกระแสไฟทั้งสองชนิดมีแนวทางเดินต่างกัน ความต้านทานการไหลของกระแสทั้งสองชนิดย่อมต่างกัน นอกจากนี้ ศักย์ไฟฟ้าครบรอบวงจรยังต่างกันอีกด้วย ดังนั้น จำเป็นต้องหาเส้นโหลดของแต่ละกรณี เส้นโหลดของไฟกระแสสลับจะย้อนสู่ตำแหน่งทำงานเสมอเมื่อไม่มีสัญญาณ หรือเมื่อสัญญาณกำลังผ่านค่าศูนย์ นั่นคือ เส้นโหลดของไฟฟ้ากระแสสลับจะตัดกับเส้นโหลดของไฟฟ้ากระแสตรง ในกรณีดังกล่าวเลือกให้จุดตัดนี้เป็นจุดทำงาน

ขีดจำกัดของวิธีกราฟคือ

(1) เมื่อตัวต้านทานโหลดมีค่าเป็นศูนย์

(2) เมื่อตัวต้านทานโหลดมีค่าอนันต์

จากการสังเกตพบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้จุดทำงานเลื่อนขึ้นตามแนวเส้นโหลดของไฟกระแสตรง ถ้าอุณหภูมิลดลง จุดทำงานจะเลื่อนลงตามแนวเส้นโหลดเช่นกัน

แบบฝึกหัดบทที่ 3

3.1 ตามวงจรในรูป 3.1 ถ้า R_L เพิ่มค่าเป็น 10 K จงหาเส้นโหลดใหม่ในรูป 3.2

3.2 ตามวงจรในรูป 3.1 ถ้า V_{CC} แปรงค่าเป็น 5 v จงหาเส้นโหลดใหม่ในรูป 3.2

3.3 จากตัวอย่าง 3.2 ถ้า I_B คงที่ 10 μA จงแสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าต่าง ๆ

3.4 เปรียบเทียบข้อแตกต่างจากคำถาม 3.3 กับการคำนวณใหม่ในตัวอย่าง 3.2 โดยใช้ I_B คงที่ 10 μA เช่นเดิม

3.5 พล็อตเส้นโหลดลงในรูป 3.3 ถ้า $R_L = \infty$ และ $R_L = 0$

3.6 กำลังสูญเสียสูงสุด มีส่วนเกี่ยวข้องอย่างไรกับการเลือกจุดทำงานของทรานซิสเตอร์?

3.7 จากวงจรรูป 3.11 ถ้าไม่มีการต่อตัวจุทั้งสามในวงจร ท่านคิดว่าเส้นโหลดของไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับจะเช่นไร? หน้าที่ของแต่ละตัวจุคืออะไร

3.8 อาศัยวงจรในรูป 3.11 ถ้า R_L ลดค่ากลายเป็น 300 Ω จงหาเส้นโหลดของไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ

3.9 วงจรในรูป 3.11 ถ้า $R_L = R_E = C_E = 0$, $R_B = 80$ K $R_C = 2.5$ K, $V_{CC} = 20$ v และ $V_{BE} = 0.7$ vจงหา

(ก) เส้นโหลดสำหรับไฟกระแสตรง

(ข) จุดทำงาน

(ค) ถ้าใช้ R_C 10 K จงหาจุดทำงานใหม่

(ง) ถ้าใช้ค่าเดิมตามโจทย์กำหนดแต่เปลี่ยน V_{CC} เป็น 10 v จุดทำงานจะอยู่ตำแหน่งใด?