บทที่ 5
พารามีเตอร์ไฮบริด

5.1 บทนำ

การวิเคราะห์และออกแบบวงจรขยาย อาจใช้วงจรสมมูลไฮบริด (hybrid equivalent circuit) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงร่างวงจรสองภาค พารามีเตอร์ไฮบริดเป็นปริมาณที่นิยมใช้บ่งบอกคุณสมบัติจำเพาะของทรานซิสเตอร์ (จากทางบริษัทผู้ผลิต) ดังนั้น รายละเอียดในบทนี้จึงเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับพารามีเตอร์ไฮบริดทั้งสิ้น เริ่มจากพื้นฐานคือ โครงร่างวงจรสองภาคทั่วไป และรายละเอียดของพารามีเตอร์ไฮบริดตลอดจนการประยุกต์ใช้วงจรสมมูลไฮบริด (เพื่อวิเคราะห์วงจรขยาย) อนึ่ง ถ้าพารามีเตอร์มีค่าสูงหรือต่ำกว่ากันมาก (ประมาณ 10 เท่า) อาจใช้วิธีการวิเคราะห์โดยประมาณ กล่าวคือ ละทิ้งบางพารามีเตอร์ในวงจรสมมูลไฮบริด (ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขและข้อกำหนดที่เหมาะสม) สุดท้ายได้สรุปคุณสมบัติของวงจรขยาย โดยแสดงปริมาณอัตราขยายแรงดันไฟฟ้า ความขัดอินพุท และความขัดเอาท์พุทในนิพจน์ของพารามีเตอร์ไฮบริดและธาตุวงจรที่เกี่ยวข้อง ซึ่งบางวงจรได้แสดงขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์อย่างละเอียดแล้วในตอน 5.5

สำหรับการใช้งานจริง ๆ อาจเกิดปัญหา เช่น ปริมาณพารามีเตอร์แปรค่าไปจากที่ทางบริษัทผู้ผลิตได้แจ้งไว้ วิธีแก้ปัญหาหนึ่งอาจเป็นไปตามรายละเอียดในตอน 5.5

5.2 โครงร่างวงจรสองภาคทั่วไป

ความหมายของ "วงจรสองภาค" คือ แยกวงจรออกเป็นภาคสัญญาณเข้า และภาคสัญญาณออก รวมทั้งปริมาณพื้นฐานทางไฟฟ้า คือ ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าด้วย รูป 5.1 แสดงโครงร่างวงจรสองภาค โดยภาคอินพุทมีกระแสอินพุท i_i และแรงดันไฟฟ้าอินพุท v_i ส่วนภาคเอาท์พุทมีกระแสเอาท์พุทเป็น i_o และแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท v_o จุดประสงค์ในการสร้างวงจรสมมูลเพื่อวิเคราะห์วงจรคือ ต้องการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรทางไฟฟ้าทั้ง 4 นั้น เริ่มโดยเขียนความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ โดยกำหนดให้มี 2 ตัวแปร เป็นอิสระ ส่วนอีกสองตัวแปรที่เหลือย่อมเขียนได้ในรูปของฟังก์ชันตัวแปรอิสระ ดังนี้

$$v_i = f(i_i, i_o) \quad \text{.....(5.1)}$$

$$v_o = f(i_i, i_o) \quad \text{.....(5.2)}$$

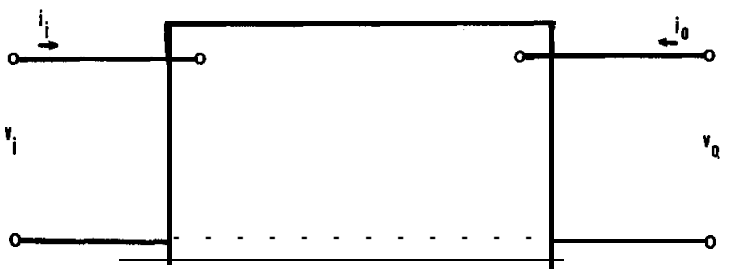
$$i_i = f(v_i, v_o) \quad \text{.....(5.3)}$$

$$i_o = f(v_i, v_o) \quad \text{.....(5.4)}$$

$$v_i = f(i_i, v_o) \quad \text{.....(5.5)}$$

$$i_o = f(i_i, v_o) \quad \text{.....(5.6)}$$

โดยสมการ (5.1) และ (5.2) มี i_i และ i_o เป็นตัวแปรอิสระ ส่วนสมการ (5.3) และ (5.4) มี v_i และ v_o เป็นตัวแปรอิสระ เห็นได้ว่าเป็นกรณีที่เราเลือกตัวแปรกระแส หรือแรงดันไฟฟ้าเท่านั้นที่เป็นตัวแปรอิสระ โอกาสที่จะเขียนได้อีกวิธีหนึ่งคือผสมตัวแปรกระแสและแรงดันไฟฟ้าให้เป็นตัวแปรอิสระขึ้นมา ในที่นี้ เลือกให้ i_i และ v_o เป็นตัวแปรอิสระ ดังนั้น ตัวแปรที่เหลือคือ v_i และ i_o ซึ่งเขียนเป็นฟังก์ชันได้ในสมการ (5.5) และ (5.6)



รูป 5.1 แสดงโครงร่างของระบบวงจรสองภาค

ในการใช้งานจริง ๆ จะต้องเกี่ยวข้องกับกระแสสลับ พิจารณาค่าที่แปรไป โดยถือว่าเป็นการแปรค่าไปทีละน้อย ๆ ดังนั้น หาอนุพันธุ์ของสมการทั้ง 6 ได้ดังนี้

$$dv_i = \frac{\partial v_i}{\partial i_i}\Big|_{i_o} di_i + \frac{\partial v_i}{\partial i_o}\Big|_{i_i} di_o \quad \text{.....(5.7)}$$

$$dv, = \frac{\partial v_o}{\partial i_i}\Big|_{i_o} di_i + \frac{\partial v_o}{\partial i_{i_i}}\Big|_{i_i} di_o \quad \text{.....(5.8)}$$

$$di. = \frac{\partial i_i}{\partial v_i}\Big|_{v_o} dv_i + \frac{\partial i_i}{\partial v_o}\Big|_{v_i} dv_o \quad \text{.....(5.9)}$$

$$di_i = \frac{\partial i_o}{\partial v_i}\Big|_{v_o} dv_i + \frac{\partial i_o}{\partial v_o}\Big|_{v_i} dv_o \qquad \text{.....(5.10)}$$

$$dv_i = \frac{\partial v_i}{\partial i_i}\Big|_{v_o} di_i + \frac{\partial v_i}{\partial v_o}\Big|_{i_i} dv_o \qquad \text{.....(5.11)}$$

$$di_o = \frac{\partial i_o}{\partial i_i}\Big|_{v_o} di_i + \frac{\partial i_o}{\partial v_o}\Big|_{i_i} dv_o \qquad \text{.....(5.12)}$$

พิจารณาอนุพันธุ์ย่อย (partial derivative) ในแต่ละคู่สมการ ถ้าการแปรค่าของปริมาณไฟฟ้าเป็นไปอย่างน้อย ๆ ตามข้อกำหนด ถือได้ว่า แต่ละอนุพันธุ์ย่อยเป็นค่าคงที่ ซึ่งต่างเป็นพารามีเตอร์แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณไฟฟ้าด้านอินพุทกับด้านเอาท์พุท อาจเรียกชื่อเป็น "พารามีเตอร์ส่งผ่าน" กล่าวคือ เป็นสัมประสิทธิ์ของปริมาณส่งผ่านจากภาคอินพุทไปยังภาคเอาท์พุท หรือกลับกัน กำหนดเรียกชื่อพารามีเตอร์ ดังนี้

(1) จากสมการ (5.7) และ (5.8)

$\frac{\partial v_i}{\partial i_i}$ เรียก ความขัดอินพุท (input impedance) เมื่อวงจรเอาท์พุทเป็นวงจรเปิด ($i_o = 0$ = ค่าคงที่) แทนด้วย Z_i

$\frac{\partial v_i}{\partial i_o}$ เรียก ความขัดส่งผ่านย้อนกลับ (reverse transfer impedance) เมื่อวงจรอินพุทเป็นวงจรเปิด แทนด้วย Z_r

$\frac{\partial v_o}{\partial i_i}$ เรียก ความขัดส่งผ่านโดยตรง (forward transfer impedance) เมื่อวงจรเอาท์พุทเป็นวงจรเปิด แทนด้วย Z_f

$\frac{\partial v_o}{\partial i_o}$ เรียก ความขัดเอาท์พุท (output impedance) เมื่อวงจรอินพุทเป็นวงจรเปิด แทนด้วย Z_o

(2) จากสมการ (5.9) และ (5.10)

$\frac{\partial i_i}{\partial v_i}$ เรียก แอดมิตแตนซ์อินพุท (input admittance) เมื่อวงจรเอาท์พุทเป็นวงจรลัด ($v_2 = 0$) แทนด้วย Y_i

$\frac{\partial i_i}{\partial v_o}$ เรียก แอดมิตแตนซ์ส่งผ่านย้อนกลับ (reverse transfer admittance) เมื่อวงจรอินพุทเป็นวงจรลัด ($v_i = 0$) แทนด้วย Y_r

$\frac{\partial i_o}{\partial v_i}$ เรียก แอดมิตแตนซ์ตรง (forward transfer admittance) เมื่อวงจรเอาท์พุทเป็นวงจรลัด แทนด้วย Y_f

$\frac{\partial i_o}{\partial v_o}$ เรียก แอดมิตแตนซ์เอาท์พุท (output admittance) เมื่อวงจรอินพุทเป็นวงจรลัด แทนด้วย Y_o

(3) จากสมการ (5.11) และ (5.12) เป็นพารามีเตอร์แบบผสม กล่าวคือ เลือก i และ v ของวงจรอินพุทและเอาท์พุท คู่ใดคู่หนึ่งเป็นตัวแปรคงที่ จึงมีชื่อเรียกเป็น พารามีเตอร์ไฮบริด (hybrid parameter)

$\frac{\partial v_i}{\partial i_i}$ เรียกเป็น ความขัดอินพุท (input impedance) เมื่อวงจรเอาท์พุทเป็นวงจรลัด ($v_o = 0$) แทนด้วย h_i

$\frac{\partial v_i}{\partial v_o}$ เรียกเป็น เกนแรงดันไฟฟ้าส่วนกลับ (reverse voltage gain) เมื่อวงจรอินพุทเป็นวงจรเปิด ($i_i = 0$) แทนด้วย h_r

$\frac{\partial i_o}{\partial i_i}$ เรียกเป็น เกนกระแสไฟฟ้า (forward current gain) เมื่อวงจรเอาท์พุทเป็นวงจรลัด แทนด้วย h_f

$\frac{\partial i_o}{\partial v_o}$ เรียกเป็นเอาท์พุทแอดมิตแตนซ์ (output admittance) เมื่อวงจรอินพุทเป็นวงจรเปิด แทนด้วย h_o

5.3 พารามีเตอร์ไฮบริดสำหรับวงจรทรานซิสเตอร์

จากตอนที่แล้ว พารามีเตอร์ไฮบริดทั้ง 4 คือ h_i, h_r, h_f และ h_o ความหมายของตัวห้อย คือ

i	หมายถึง input	r	หมายถึง reverse
0	หมายถึง output	f	หมายถึง forward

แต่วงจรพื้นฐานของทรานซิสเตอร์มีได้ 3 แบบ ดังนั้น จึงเพิ่มตัวห้อยเพื่อแสดงความหมายของวงจรแต่ละชนิด ดังนี้

e หมายถึง วงจรเอมมิตเตอร์ร่วม

b หมายถึง วงจรเบสร่วม

c หมายถึง วงจรคอลเลคเตอร์ร่วม

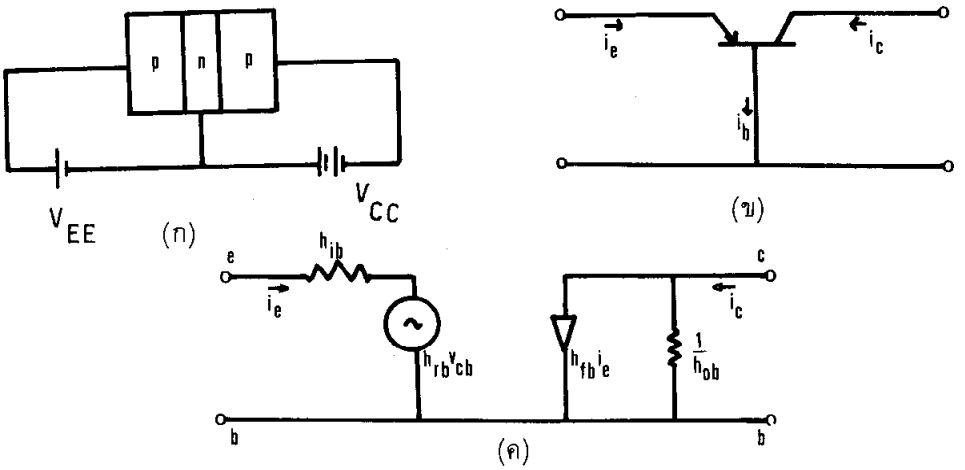
ตัวอย่าง เช่น วงจรเบสร่วม ดังแสดงในรูป 5.2 วิธีการเขียนวงจรสมมูลไฮบริด มีดังนี้

(1) จากสมการ (5.11) เขียนแทนให้อยู่ในรูปของพารามิเตอร์ไฮบริด

$$dv_i = h_i di_i + h_r dv_o \quad \text{.....(5.13)}$$

$$di_o = h_f di_i + h_o dv_o \quad \text{.....(5.14)}$$

นั่นคือ ในวงจรด้านอินพุท ควรประกอบด้วยความต้านทาน h_i ต่ออนุกรมอยู่กับแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้า $h_r v_o$ (จากสมการ (5.13)) และในวงจรเอาท์พุทควรประกอบด้วยความต้านทาน $1/h_o$ ต่ออนุกรมกับแหล่งกำเนิดกระแส $h_f i_i$



รูป 5.2 แผนผังโครงร่างวงจรเบสร่วมอย่างง่าย (ก) ตามโครงสร้างของทรานซิสเตอร์ (ข) สัญลักษณ์ทั่วไปในวงจรใช้งานจริง โดยตัดแรงดันไบแอส (ค) วงจรสมมูลไฮบริดของรูป (ก)

(2) สร้างโครงร่างวงจร ดังแสดงในรูป 5.2 **(ข)** โดยเพิ่มตัวห้อย b เพื่อแสดงว่าเป็นวงจรเบสร่วมนั่นเอง

(3) วงจรอินพุท จากรูป 5.2 (ค) เขียนสมการความสัมพันธ์ ดังนี้

$$v_{eb} = h_{ib} i_e + h_{rb} v_{cb} \quad \text{.....(5.15)}$$

วงจรเอาท์พุท $$v_{cb} = \frac{1}{h_{ob}} (i_c \quad h_{fb} i_e) \quad \text{.....(5.16)}$$

$$\therefore \quad i_c = h_{fb} i_e + h_{0b} v_{cb} \quad \text{.....(5.17)}$$

การวัดค่าต่าง ๆ ในวงจรรูป 5.2 (ค) ทำดังนี้

(1) ถ้าให้ด้านเอาท์พุทเป็นวงจรลัด ดังนั้น $v_{cb} = 0$ (ทำโดยต่อขั้วคอลเลคเตอร์ลงกราวนด์) จากสมการ (5.15) และ (5.17)

$$h_{ib} = \frac{V_{eb}}{i_e}$$

$$h_{fb} = \frac{i_c}{i_e}$$

(2) ถ้าเปิดวงจรด้านอินพุท ดังนั้น $i_e = 0$ จากสมการ (5.15) และ (5.17)

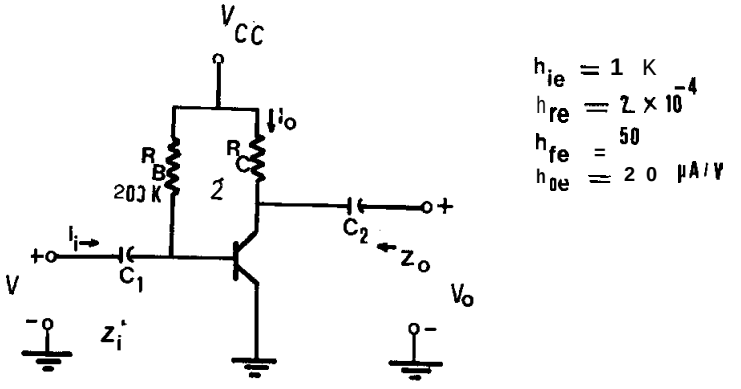
$$h_{rb} = \frac{v_{eb}}{v_{cb}}$$

$$h_{ob} = \frac{i_c}{v_{cb}}$$

5.4 ตัวอย่างการวิเคราะห์วงจรโดยใช้พารามีเตอร์ไฮบริด

5.4.1 วงจรขยายเมื่อไม่มีการต่อตัวต้านทานเอมมิตเตอร์

จากวงจรในรูป 5.3 ค่าต่าง ๆ ของพารามีเตอร์ไฮบริดนั้นอ่านจากแผ่นข้อมูล ถ้าพิจารณาเฉพาะกรณีไฟกระแสสลับ ดังนั้น สามารถกำจัดแหล่งจ่ายไฟตรง V_{cc} โดยลัดวงจรลงสู่กราวนด์ ส่วนตัวจุ C_1 และ C_2 จะทำหน้าที่ลัดวงจรสำหรับกระแสสลับ ดังนั้น เขียนแผนผังของวงจรสมมูลไฮบริด ดังแสดงในรูป 5.4 แต่โดยทั่วไป สามารถลดพารามีเตอร์ไฮบริดได้อีก ดังนี้



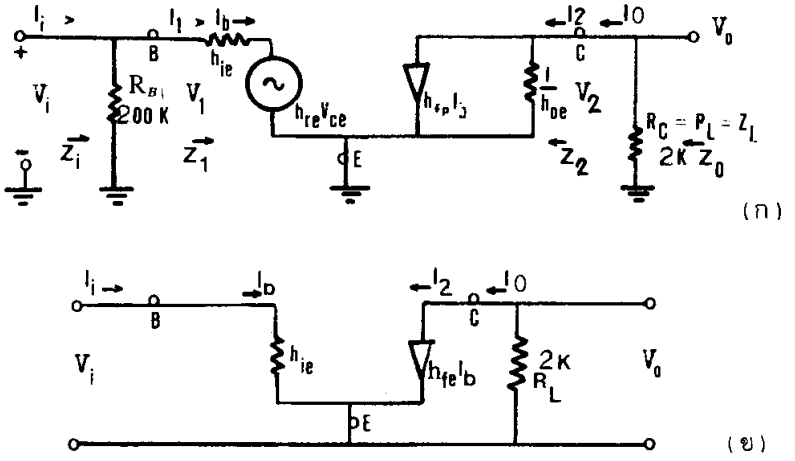
รูป 5.3 วงจรเอมมิตเตอร์ร่วม ต่อตัวต้านทาน R_B และ R_C แหล่งจ่ายไฟตรง คือ V_{CC}

(1) h_{re} เป็นพารามิเตอร์ป้อนกลับ โดยทั่วไปมีค่าน้อย ๆ จึงสามารถตัดต้นกำเนิดแรงดันไฟฟ้า $h_{re}V_{ce}$ ออกจากแผนภาพได้

(2) $1/h_{oe} = 1/20\,\mu\text{mhos} = 50\,\text{K}$ เป็นความต้านทานต่อขนานกับตัวต้านทาน R_c ซึ่งมีค่า 2K

$$\text{ความต้านทานลัพธ์} = \frac{(R_c)\,(1/h_{oe})}{(R_c) + (1/h_{oe})} = \frac{2\times 50}{52} \sim 2\,\text{K}$$

เห็นได้ว่า $1/h_{oe}$ มากกว่าความต้านทานลัพธ์ ประมาณ 25 เท่า จึงสามารถกำจัด $1/h_{oe}$ ออกจากแผนภาพได้ (หมายเหตุ มักถือปฏิบัติว่า ถ้าค่าลัพธ์น้อยกว่าค่ามาก ประมาณ 10 เท่า สามารถตัดค่ามากทิ้งได้)



รูป 5.4 (ก) โครงร่างวงจรสมมูลไฮบริดของรูป 5.3
(ข) ละทิ้งบางปริมาณในรูป (ก) ตามข้อกำหนดที่เหมาะสม

พิจารณารูป 5.4 (ก) ซึ่งเป็นโครงร่างวงจรสมมูลไฮบริดโดยสมบูรณ์ แต่เมื่อตัด $h_{re}V_{ce}$ ออกไป ความต้านทาน $R_B = 200\,\text{K}$ กลายเป็นต่อขนานกับ h_{ie} ซึ่งมีค่าเพียง 1 K ดังนั้น สามารถตัดค่า R_B ออกจากโครงร่างวงจร 5.4 (ก) วงจรสมมูลไฮบริดของรูป 5.3 จึงเป็นดังแสดงในรูป 5.4 (ข) ซึ่งเห็นได้ว่า กระแสอินพุทมีค่าเท่ากระแสเบส ($I_i = I_b$) และกระแสเอาท์พุทมีค่าเท่าปริมาณจากแหล่งกำเนิดกระแสในภาคเอาท์พุท ($I_o = h_{fe}I_b$)

$$\text{เกนกระแส} = \frac{I_0}{I_i} \sim h_{fe} = 50$$

หาค่าเกนกระแสจากวงจรสมมูลไฮบริดรูป 5.4 (ก) ซึ่งเป็นรูปโดยสมบูรณ์

เกนกระแส $\frac{I_2}{I_1}$

จากกฎของเคอร์ชอฟ เขียนสมการของกระแสด้านเอาท์พุท

$$I_2 = h_{fe}I_b + I = h_{fe}I_b + h_{oe}V_2 \quad \text{.....(5.18)}$$

แทนค่า $V_2 = -I_2Z_L$ จากนั้นเขียนสมการ (5.18) ได้ใหม่ เป็น

$$I_2 = h_{fe}I_b - h_{oe}I_2Z_L$$

$$I_2(1 + h_{oe}Z_L) = h_{fe}I_b \quad \text{.....(5.19)}$$

$$A_i = \frac{I_2}{r,} = \frac{h_{fe}}{1 + h_{oe}Z_L} = 48.1 \quad \text{.....(5.20)}$$

ค่าโดยประมาณนั้นผิดพลาด 4% ซึ่งเป็นความคลาดเคลื่อนน้อยมาก ดังนั้น กล่าวได้ว่า **เกนกระแสสลับ** มีค่าโดยประมาณเท่ากับพารามิเตอร์ไฮบริด h_{fe} การคำนวณค่าโดยประมาณเช่นนี้จะใช้ได้ในโอกาสใดบ้าง ? คำตอบคือสามารถใช้ได้ทุกโอกาสที่เหมาะสมและเป็นไปได้ ตัวอย่างการพิจารณาดังกรณีที่ได้กล่าวแล้ว ผลคือ ทุ่นเวลาและได้ความแม่นยำพอสมควร

ความขัดอินพุท ในกรณีนี้ มีค่าเท่าความต้านทาน h_{ie} ถ้าคำนวณจากวงจรที่สมบูรณ์ได้ค่าเป็น

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1}$$

เขียน V_1 โดยพิจารณาจากสมการลูปอินพุท และอาศัยกฎของเคอร์ชอฟ

$$V_1 = I_1h_{ie} + h_{re}V_2 = I_1h_{ie} - h_{re}I_2Z_L \quad \text{.....(5.21)}$$

เขียน I_2 ให้อยู่ในรูปของ I_1 โดยอาศัยความสัมพันธ์ $I_2 = A_iI_1$

$$v, = h_{ie}I_1 - h_{re}Z_LA_iI_1 = I_1(h_{ie} - h_{re}Z_LA_i) \quad \text{.....(5.22)}$$

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} = h_{ie} - h_{re}Z_LA_i = 0.981\ K \quad \text{.....(5.23)}$$

$$Z_i = Z_1 \,//\, R_B \sim Z_1$$

ค่าต่อไปคือ **ความขัดเอาท์พุท** ค่าโดยประมาณถือได้ว่า $Z_0 = Z_L = R_C = 2\ K$ แต่ถ้าคำนวณจากวงจรโดยสมบูรณ์ พิจารณา $Z_2 = \frac{V_2}{I_2}$ โดยเขียน I_2 จากลูปเอาท์พุท

$$I_2 = h_{fe}I_1 + h_{oe}V_2 \quad \text{.....(5.24)}$$

พยายามแทนค่า I_1 ให้อยู่ในรูปของตัวแปรอื่น โดยพิจารณาลูปอินพุท

$$I_1 h_{ie} + h_{re} V_2 = 0$$

$$I_1 = - \frac{h_{re} V_2}{h_{ie}} \qquad \text{.....(5.25)}$$

แทนค่าจากสมการ (5.25) ลงในสมการ (5.24)

$$I_2 = - \frac{h_{fe} h_{re} V_2}{h_{ie}} + h_{oe} V_2 = V_2 \left(h_{oe} - \frac{h_{fe} h_{re}}{h_{ie}} \right) \qquad \text{.....(5.26)}$$

$$Z_2 = \frac{V_2}{I_2} = \frac{1}{h_{oe} - \frac{h_{fe} h_{re}}{h_{ie}}} = 100 \text{ K} \qquad \text{.....(5.27)}$$

ความขัดเอาท์พุท หาได้โดยถือว่าแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟ = 0 และจากรูป 5.4 (ก) ความขัดเอาท์พุท คือ $Z_o = Z_2 \,//\, R_C = 1.96$ K

เกนแรงดันไฟฟ้า เป็นอัตราส่วนของ V_o ต่อ V_i ซึ่งโดยประมาณ

$$V_0 = - I_0 R_C = - h_{fe} I_b R_C \quad \text{และ} \quad V_i = I_b h_{ie}$$

$$A_v = \frac{V_0}{V_i} = \frac{h_{fe} I_b R_C}{I_b h_{ie}} = \frac{h_{fe} R_C}{h_{ie}} = -100 \qquad \text{.....(5.28)}$$

หาค่าโดยสมบูรณ์จากรูป 5.4 (ก) เริ่มจากสมการแรงดันไฟฟ้าในลูปอินพุท (5.21)

$$V_1 = I_1 h_{ie} + h_{re} V_2$$

แทนค่า I_1 จากสมการ (5.18)

$$I_1 = \frac{I_2 - h_{oe} V_2}{h_{fe}} = - \frac{V_2 / Z_L - h_{oe} V_2}{h_{fe}} = - \frac{V_2 (1 + h_{oe} Z_L)}{h_{fe} Z_L} \qquad \textbf{(5.29)}$$

ดังนั้น เขียนสมการใหม่ได้ค่าของ V_1 ดังนี้

$$V_1 = - \frac{(1 + h_{oe} Z_L) V_2 h_{ie}}{h_{fe} Z_L} + h_{re} V_2$$

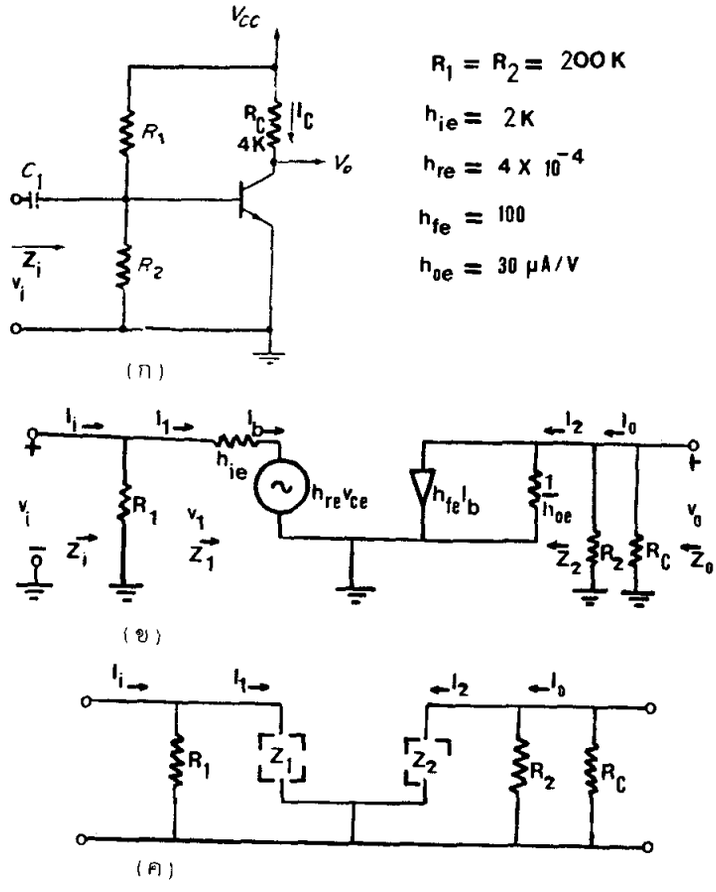
$$= - V_2 \left\{ \frac{h_{ie} + h_{oe} h_{ie} Z_L \quad h_{re} h_{fe} Z_L}{h_{fe} Z_L} \right\}$$

$$= - V_2 \left\{ \frac{h_{ie} + Z_L (h_{oe} h_{ie} - h_{re} h_{fe})}{h_{fe} Z_L} \right\} \qquad \text{..... (5.30)}$$

$$A_v = \frac{V_2}{V_1} = \frac{h_{fe} Z_L}{h_{ie} + (h_{oe} h_{ie} - h_{fe} h_{re}) Z_L} = -98 \qquad \text{..... (5.31)}$$

เครื่องหมายลบ แสดงว่าสัญญาณอินพุทต่างเฟสกับสัญญาณเอาท์พุท 180° หรือกล่าวได้ว่า ถ้าสัญญาณอินพุทมีค่ายอดเป็นบวก สัญญาณเอาท์พุทมีค่ายอดเป็นลบ

ตัวอย่าง 5.1 วงจรขยายในรูป 5.5 (ก) ได้กำหนดพารามิเตอร์ไฮบริดไว้แล้ว จงหา (ก) อัตราขยายกระแส (ข) อัตราขยายแรงดัน (ค) ความขัดอินพุท (ง) ความขัดเอาท์พุท (จ) อัตราขยายกำลัง



รูป 5.5 ใช้สำหรับตัวอย่าง 5.1

วิธี

แทนวงจรขยายในโจทย์ด้วยวงจรสมมูลไฮบริด โดยปิดวงจรระหว่างขั้ว C_1 และ V_{cc} จากนั้นจัดวงจรใหม่ โดยแยก R_1 ต่อขนานกับวงจรอินพุท ส่วน R_2 ต่อขนานกับ R_C ในวงจรเอาท์พุท ดังแสดงในรูป 5.5 (ข) หาอัตราขยายกระแสในข้อ

(ก) โดยพิจารณาลูปอินพุท และเอาท์พุท ดังนี้

จากลูปอินพุท,

$$I_1 Z_1 = I_1 (R_1 // Z_1) = I_i \frac{R_1 Z_1}{R_1 + Z_1} \quad \text{.....(i)}$$

$$I_0 R_C = I_1 (R_1 // R_C) = I_2 \frac{R_2 R_C}{R_2 + R_C}$$

$$\frac{I_0}{I_2} \quad \frac{R_2}{R_2 + R_C} \quad \text{.....(ii)}$$

$$A_1 = \frac{I_0}{I_i} = (\frac{I_0}{I_1})(\frac{I_1}{I_i}) = (\frac{I_0}{I_2})(\frac{I_2}{I_1})(\frac{I_1}{I_i})$$

แทนค่าจากสมการ (i) และ (ii) และ $\frac{I_2}{I_1}$ ได้จากสมการ (5.20)

$$A_1 = \frac{R_1 R_2 h_{fe}}{(R_2 + R_C)(R_1 + Z_1)(1 + h_{oe} Z_L)} \quad \text{.....(5.32)}$$

จากสมการ (5.23). $Z_1 = h_{11} - \frac{h_{fe} h_{re} Z_L}{1 + h_{oe} Z_L} = 1.86\ K$

เห็นได้ว่า $R_1 >> Z_1$ และโจทย์กำหนดใช้ $R_2 >> R_C$ นั่นคือ

$$A_1 = \frac{h_{fe}}{1 + h_{oe} Z_L} = 89$$

(ใช้ค่า $Z_L = R_C = 4 \times 10^3$ เนื่องจาก $R_2 >> R_C$)

ถ้าใช้ค่าโดยประมาณ $A_i = h_{fe} = 100$

(ข) อัตราขยายแรงดันไฟฟ้า จากสมการ (5.31)

$$A_v = - \frac{h_{fe} Z_L}{h_{ie} + (h_{ie} h_{oe} - h_{fe} h_{re}) Z_L} = -192$$

ถ้าใช้ค่าโดยประมาณ $A_v = - \frac{h_{fe} Z_L}{h_{ie}} = -200$

(ค) ความขัดอินพุท จากรูป 5.5 (ข)

$Z_i = Z_1 // R_1 = 1.86\ K // 200\ K = 1.86\ K$

ค่าโดยประมาณ ถือว่ามีค่าเท่า $h_{ie} = 2\ K$

(ง) ความขัดเอาท์พุท ใช้สมการ (5.27) สำหรับกรณีความต้านทานของแหล่งจ่ายไฟไม่มี

$$Z_2 = \frac{1}{h_{oe} - \frac{h_{fe}h_{re}}{h_{ie}}} = 100\ K$$

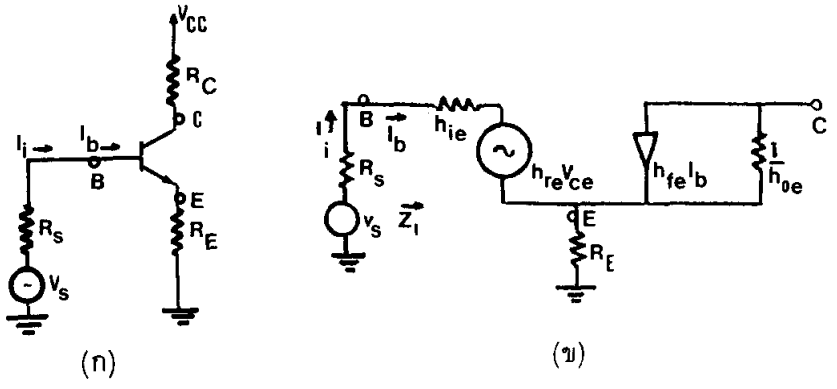
$$Z_o = Z_2 \,//\, R_C \,//\, R_2 = 100\ K \,//\, 4\ K \,//\, 200\ K = 4\ K$$

(จ) $A_p = -A_V A_i = -(-192)(89) = 17088$

5.4.2 วงจรขยายที่มีการต่อตัวต้านทานเอมมิตเตอร์

สำหรับวงจรขยายที่มีการต่อตัวต้านทานเอมมิตเตอร์ R_E และตัวจุ C_E สัญญาณกระแสสลับจะผ่านลัดไปทางตัวจุ C_E ทั้งสิ้น ซึ่งใช้หลักการเดิมในการเขียนวงจรสมมูลไฮบริด ดังนั้นลักษณะของวงจรสมมูลเป็นเช่นเดียวกับกรณีไม่ต่อ R_E และ C_E แต่ถ้าวงจรต่อตัวต้านทาน R_E เพียงตัวเดียว ไม่มีการต่อตัวจุ C_E กล่าวได้ว่า R_E ไม่ถูกบายพาส ต้องนำค่ามาเกี่ยวข้องในการวิเคราะห์วงจรด้วย ดังแสดงใน ตัวอย่าง 5.2

จากวงจรในรูป 5.6 (ก) ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดสัญญาณสลับ V_s, ความต้านทานของแหล่งกำเนิดดังกล่าว R_s, และความต้านทานเอมมิตเตอร์ R_E วิธีการเขียนโครงร่างวงจรสมมูลไฮบริดใช้หลักการเดิม แต่ยังคงค่าของ V_s, R_s, และ R_E ไว้ด้วย เพื่อสะดวกในการทำความเข้าใจวิธีการวิเคราะห์วงจรโดยใช้พารามิเตอร์ไฮบริด ลำดับขั้นตอนการพิจารณา ดังนี้



รูป 5.6 (ก) วงจรขยายเอมมิตเตอร์ร่วมซึ่งต่อตัวต้านทานเอมมิตเตอร์ไว้ด้วย
(ข) โครงร่างวงจรสมมูลไฮบริดของรูป (ก)

(1) กระแสไหลผ่านตัวต้านทานเอมมิตเตอร์ $= I_b + h_{fe}I_b = (i + h_{fe})\, I_b$

ค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม $R_E = V_{RE} = (1 + h_{fe})\, R_E I_b$ .....(5.33)

สังเกตว่า ลักษณะดังแสดงในสมการ (5.33) นี้ เป็นการแปลงความต้านทานของทรานซิสเตอร์ ดังได้กล่าวรายละเอียดไว้แล้วในตอน 4.3 คือ กระแส I_b มองเห็นความต้านทานในขาเอมมิตเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น $(1+h_{fe})$ เท่า ดังนั้น I_b จะไหลผ่านความต้านทานนี้ได้น้อยลง

(2) ความขัดอินพุท

$$Z_i = h_{ie} + (1+h_{fe})\,R_E \qquad \text{.....(5.34)}$$

โดยทั่วไป $h_{fe} >> 1$ และ $(1+h_{fe})\,R_E >> h_{ie}$

$$Z_i \sim h_{fe}R_E \qquad \text{.....(5.35)}$$

(3) จากลูปอินพุท

$$V_s = I_iR_s + I_bh_{ie} + I_b\,(1+h_{fe})\,R_E$$

กรณีนี้ $I_i = I_b$ ดังนั้น เขียนสมการของ I_i ได้ดังนี้

$$I_i = \frac{V_s}{R_s + h_{ie} + (1+h_{fe})\,R_E} \qquad \text{.....(5.36)}$$

(4) ความขัดที่ขาเอมมิตเตอร์

$$Z_e = \frac{V_e}{I_e} = \frac{(R_s+h_{ie})\,I_b}{(1+h_{fe})\,I_b} = \frac{R_s+h_{ie}}{1+h_{fe}} \qquad \text{.....(5.37)}$$

ลักษณะดังแสดงในสมการ (5.37) เหมือนกับที่ได้อธิบายในข้อ (1) แต่กรณีนี้พิจารณาโดยถือว่าผู้สังเกตได้เดินทางตามแนวของกระแส I_e ซึ่งจะมองเห็นความต้านทานในขาเบสมีค่าลดลง $(1+h_{fe})$ เท่า หรือกล่าวได้ว่าลดลง h_{fe} เท่า (ถ้าถือว่า $(1+h_{fe}) \sim h_{fe}$)

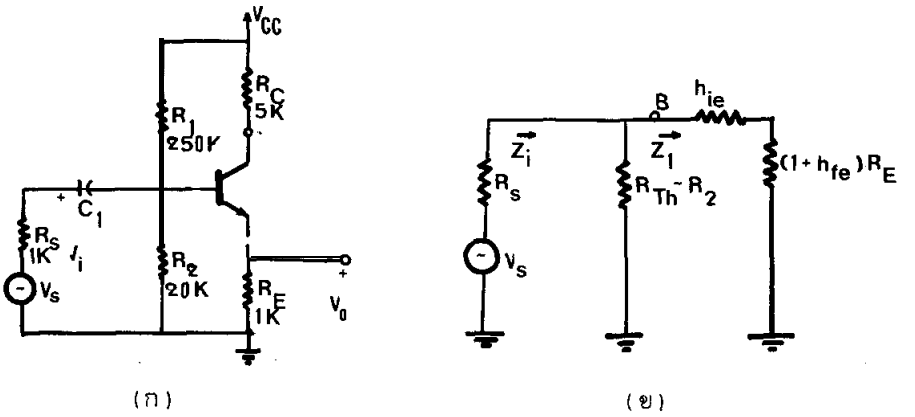
(5) กระแสเอมมิตเตอร์

$$I_e = \frac{V_s}{Z_e + R_E} = \frac{V_s}{\dfrac{R_s+h_{ie}}{1+h_{fe}} + R_E} \qquad \text{.....(5.38)}$$

กล่าวได้ว่า กระแสเอมมิตเตอร์มองเห็นความต้านทานในขาเอมมิตเตอร์มีค่าเท่าเดิม แต่ความต้านทานในขาเบสลดลง $(1+h_{fe})$ เท่า เช่นเดียวกับข้อพิจารณาที่ (4) และรายละเอียดได้กล่าวแล้วในตอน 4.3

ตัวอย่าง 5.2 วงจรเอมมิตเตอร์ตาม ในรูป 5.7 (ก) ใช้ทรานซิสเตอร์ซิลิคอน ค่าของพารามิเตอร์ไฮบริด คือ $h_{ie} = 1\ K$, $h_{fe} = 50$ จงคำนวณ (ก) Z_i (ข) Z_o (ค) $A_{v1} = V_o/V_s$ และ $A_{v2} = V_o/V_i$ (ง) $A_i = I_o/I_i$

วิธี อาศัยกฎของเทเวนิน จัดความต้านทานในลูปอินพุทให้มีรูปง่ายขึ้น



(ก) (ข)

รูป 5.7 (ก) วงจรเอมมิตเตอร์ตาม (ข) โครงร่างวงจรสมมูลของรูป (ก) โดยอาศัยทฤษฎีเทเวนิน จัดรูปแบบของตัวต้านทานให้ง่าย ซึ่ง $R_{Th} = R_1 \,//\, R_2$

(ก) อาศัยวงจรสมมูลในรูป 5.7 (ข) ซึ่งใช้วิธีการตรวจพินิจดังอธิบายแล้วตามสมการ (5.34)

$$Z_1 = h_{ie} + (1 + h_{fe})\, R_E = 52 \text{ K}$$

ความขัดอินพุท, $Z_i = 20 \text{ K} \,//\, 52 \text{ K} = 14.5 \text{ K}$

แต่ถ้าจะหาค่าโดยประมาณ ตามสมการ (5.35) ผลคือ

$$Z_1 = h_{fe} R_E = 50 \text{ K}$$

$$Z_i = 20 \text{ K} \,//\, 50 \text{ K} \sim 14.3 \text{ K}$$

เห็นได้ว่าค่าใกล้เคียงมาก (ต่างกัน 1.3%) ดังนั้น สามารถใช้ค่าโดยประมาณได้

(ข) วงจรสมมูลเทเวนินสำหรับความต้านทานในวงจรเบส (รูป 5.7 (ข)) มีโครงร่างเช่นเดียวกับวงจรในรูป 5.6 ซึ่งความต้านทานในวงจรอินพุทได้แก่ R_s ต่อขนานกับความต้านทาน $R_1 \,//\, R_2$ ซึ่งมีค่าดังนี้

$$R_{Th} = R_s \,//\, (R_1 \,//\, R_2) = R_s \,//\, 20 \text{ K} \sim 1 \text{ K}$$

$$V_{Th} = \frac{20 \text{ K}}{20 \text{ K} + 1\text{K}} V_s \sim V_s$$

สรุปได้ว่า ความต้านทานเทเวนินมีค่าใกล้เคียงกับความต้านทานของแหล่งกำเนิดสัญญาณ และแรงดันไฟฟ้าเทเวนินมีค่าโดยประมาณเท่ากับแรงดันของแหล่งกำเนิดสัญญาณ

จากคำจำกัดความของความขัดเอาท์พุท เป็นค่าซึ่งหาจากวงจรซึ่ง $V_s = 0$

$$Z_e = \frac{R_{Th} + R_E}{1 + h_{fe}} = \frac{1\,K + 1\,K}{1 + 50} = 39.22 \text{ ohms}$$

หรือหาค่าโดยประมาณ ซึ่งถือว่า $(1 + h_{fe}) \sim h_{fe}$ ได้ $Z_e = 40$ ohms

$$Z_0 = Z_e \,//\, R_L = 40 \,//\, 1000 \sim 40 \text{ ohms}$$

(ค) จากรูป 5.7 (ก) แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทมีค่าต่างจากแรงดันไฟฟ้าอินพุทด้วยค่า V_{be} และสำหรับกรณีไฟฟ้ากระแสสลับซึ่ง R_E ไม่ถูกบายพาส มักถือว่า $V_{be} \sim 0$ นั่นคือ $V_0 \sim V_i$

$$V_0 \sim V_i \quad \text{และ} \quad A_{v2} = \frac{V_0}{V_i} \sim 1$$

สำหรับค่า $A_{,,} = V_0/V_s = (\frac{V_0}{V_i})(\frac{V_i}{V_s})$ .....(i)

หาค่า V_i โดยพิจารณารูป 5.7 (Y)

$$V_i = I_i R = I_i(Z_1 // R_2) = \frac{V_s\,(Z_1 \,//\, R_2)}{(Z_1 \,//\, R_2) + R_s}$$

$$= 0.93 \text{ v,}$$

แทนค่าในสมการ (i), $A_{,} = (I)\,(0.93) \sim 0.93$

อีกวิธีหนึ่ง หาค่า $A_{,,}$ โดยหาค่าของ V_0 โดยตรง

$$V_0 = \frac{V_s}{R_E + Z_e} R_E = \frac{(1\,K)\,V_s}{1\,K + 40} = 0.96\,V_s$$

$$A_{,,} = \frac{V_0}{V_s} = 0.96$$

ค่าที่ได้มีปริมาณใกล้เคียงกับวิธีแรก ซึ่งถือว่า $V_{be} \sim 0$

(ง) ต้องการหาค่า $A_i = I_0/I_i$

ซึ่ง $I_{,} = I_{,} = \frac{V_s}{1.040\,K}$

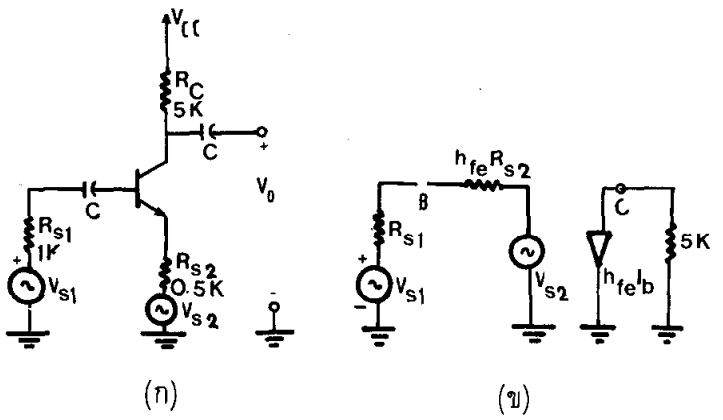
ส่วน I_i หาโดยอาศัยรูป 5.7 (ก)

$$I_i = \frac{V_s}{R_s + Z_i} = \frac{V_s}{1\,K + 14.3\,K} = 15.3\,K$$

$$A_i = -\frac{I_o}{I_i} = -\frac{15.3\ K}{1.040\ K} = -14.71$$

จากตัวอย่าง 5.2 แสดงว่าวงจรเอมมิตเตอร์ตามมีค่าความขัดอินพุทสูง ส่วนความขัดเอาท์พุทต่ำ อัตราขยายแรงดันไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียง หรือต่ำกว่า 1 จึงนิยมใช้เป็นวงจรปรับความขัดของอีก 2 วงจรอื่น ดังอธิบายรายละเอียดแล้วในบทที่ 2

ตัวอย่าง 5.3 ตามวงจรในรูป 5.8 (ก) ประกอบด้วย 2 แหล่งกำเนิดสัญญาณ คือ V_{s1} และ V_{s2} มักเรียกชื่อเป็น difference amplifier เนื่องจากมีคุณสมบัติในการสร้างสัญญาณเอาท์พุทให้มีขนาดเป็นจำนวนเท่าของผลต่างแรงดันไฟฟ้าอินพุททั้งสอง ต้องการหาค่าแรงดันเอาท์พุท



(ก) (ข)

รูป 5.8 (ก) วงจรเอมมิตเตอร์ร่วม แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับมี 2 ตัว คือ V_{s1} และ V_{s2}
(ข) วงจรสมมูลไฮบริดของรูป (ก)

วิธี

(1) สร้างโครงร่างวงจรสมมูล ดังแสดงในรูป 5.8 (ข) สำหรับลูปอินพุท มี V_{s1} และ V_{s2} ซึ่งสัญญาณจาก V_{s2} ผ่านเข้าสู่ขาเบสโดยตรง ไม่มีการแปลงค่า

(2) เขียนสมการของปริมาณแรงดันเอาท์พุท โดยอาศัยวงจรสมมูลลูปเอาท์พุท

$$V_o = (-I_o)(5\ K) = -(h_{fe}I_b)(5\ K) = -(50\ I_b)(5\ K)$$

(3) กระแส I_b หาโดยอาศัยวงจรสมมูลของลูปอินพุท

$$V_{s1} - V_{s2} = I_b R_{s1} + I_b (h_{fe}R_{s2})$$
$$= I_b (1\ K + 25\ K)$$

$$I_b = \frac{V_{s1} - V_{s2}}{26\ K}$$

แทนค่า I_b ลงในสมการของ V_0 ผลคือ

$$V_0 = \frac{-250\,(V_{s1} - V_{s2})}{26\ K} = 9.62\,(V_{s1} - V_{s2})$$

กล่าวได้ว่า แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทมีค่าประมาณ 9.62 เท่าของผลต่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าอินพุท

5.5 วงจรสมมูลโดยประมาณ

เนื่องจากค่า h_{ie} จากแผ่นข้อมูลของบริษัทผู้ผลิต เป็นค่าตามตำแหน่งจุดทำงานเฉพาะค่าหนึ่ง แต่ถ้า I_C แปรค่า ผลคือ h_{ie} แปรค่าตาม (ซึ่งถือว่า $I_C \sim I_E$) ปัญหา คือ h_{ie} ที่ช่วงการใช้งานมีค่าต่างจากค่าในแผ่นข้อมูล ผู้ใช้จะมีวิธีแก้ไขอย่างไร ? การแก้ปัญหาทำโดยสร้างวงจรสมมูลซึ่งใช้ในการหาค่า h_{ie} ได้จากข้อกำหนดการใช้งาน dc ซึ่งเป็นการหลุดพ้นจากขีดจำกัดที่ต้องเป็นไปตามข้อมูลของอุปกรณ์จากทางบริษัทผู้ผลิตได้แจ้งไว้ แนวคิดของวงจรสมมูลนี้ ได้จากการเลือกพิจารณาเฉพาะคู่แรกของสารกึ่งตัวนำด้านอินพุท เช่น วงจรเบสร่วมมีคู่สารกึ่งตัวนำด้านอินพุท คือ เอมมิตเตอร์-เบส ซึ่งอาจเปรียบได้กับไดโอด สำหรับกรณีไฟฟ้ากระแสสลับ สมการความต้านทานไดนามิกส์ของไดโอดเป็นไปตามสมการ (1.12) คือ

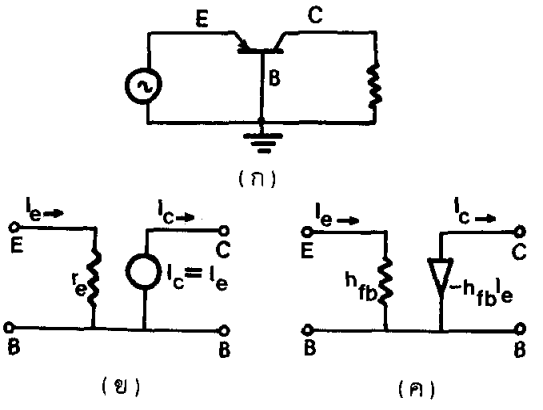
$$r_d = \frac{26\ (mv)}{I_D\ (mA)}\ (ohms) \qquad \ldots\ldots\ldots(1.12)$$

แทนไดโอดด้วยเอมมิตเตอร์ โดยใช้อักษร E, e แทน D, d สำหรับกรณีไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ ตามลำดับ เขียนสมการความสัมพันธ์ใหม่เป็น

$$r_e = \frac{26\ (mv)}{I_E\ (mA)}\ (ohms) \qquad \ldots\ldots\ldots(5.39)$$

ดังนั้น ในโครงร่างวงจรสมมูลด้านอินพุท จึงมี r_e แทนไดโอดเอมมิตเตอร์-เบส ส่วนด้านเอาท์พุทถือว่าแหล่งผลิตกระแสคือ I_C แสดงในรูป 5.9 (ข) เห็นได้ว่ามีลักษณะเป็นการลดรูปของวงจรสมมูลไฮบริดนั่นเอง (ในรูป 5.9 (ค)) เขียนแสดงปริมาณเทียบเท่าของทั้งสองวงจรสมมูลได้ดังนี้

$$\left.\begin{aligned} h_{ib} &= r_e \\ h_{fb} &= 1 \end{aligned}\right\} \qquad \ldots\ldots\ldots(5.40)$$

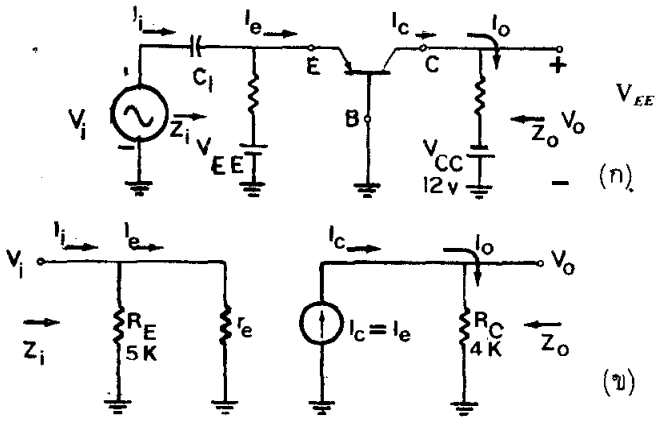


รูป 5.9 (ก) โครงร่างวงจรเบสร่วมแบบทั่วไป
(ข) โครงร่างวงจรสมมูลโดยประมาณของรูป (ก)
(ค) โครงร่างวงจรสมมูลไฮบริดโดยประมาณของรูป (ก)

การประยุกต์ใช้วงจรสมมูล แสดงในตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่าง 5.4 จากวงจรในรูป 5.10 (ก) จงหาค่า A_v, A_i, Z_i, และ Z_o

วิธี (1) สร้างโครงร่างวงจรสมมูลดังแสดงในรูป 5.10 (ข)
(2) คำนวณปริมาณกระแสตรง และกระแสสลับตามโจทย์ต้องการ



รูป 5.10 (ก) วงจรเพื่อใช้ในตัวอย่าง 5.4
(ข) แบบจำลองของรูป (ก)

สิ่งแรกที่โจทย์ต้องการ คือ A_v ดังนั้น ต้องหาพจน์ของ V_0 และ V_i

$$V_0 = I_c R_C = I_e R_C$$

แต่ $$I_e = \frac{V_i}{r_e}$$

$$V_0 = \frac{V_i}{r_e} R_C$$

$$A_v = \frac{V_0}{V_i} = \frac{R_C}{r_e} \qquad \text{..... (5.41)}$$

และ $$r_e = \frac{26 \text{ (mv)}}{I_E}$$ (จากสมการ (5.39))

จากลูปอินพุท $I_E = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_E} = \frac{10 - 0.7}{5 \text{ K}} = 1.86 \text{ mA}$

แทนค่า I_E ลงในสมการข้างบน $r_e = \frac{26 \text{ mv}}{1.86 \text{ mA}} = 14 \Omega$

จากสมการ (5.41), $A_v = \frac{4 \text{ K}}{14} = 285.71$

(3) ต้องการหาค่า A_i จากลูปอินพุท $R_E \,//\, r_e \sim r_e$

ดังนั้น $I_0 = I_c = I_e = I_i$

นั่นคือ $A_i \sim 1 \sim h_{fb}$

(4) ความขัดอินพุท Z_i

$Z_i \sim r_e = h_{ib} = 14 \Omega$

(5) ความขัดเอาท์พุท Z_0 หาค่าโดยกำหนดให้ $v_i = 0$

$Z_0 = R_C = 4\text{K}$

สำหรับวงจรเอมมิตเตอร์ร่วม กระแสตรงที่ป้อนเข้าสู่ทรานซิสเตอร์คือกระแสเบส I_B ดังนั้น เขียนปริมาณความต้านทานต่อกระแสสลับของวงจรอินพุทได้เป็น

$$r_{ac} = \frac{26 \text{ (mv)}}{I_B} \qquad \text{.....(5.42)}$$

แต่ $I_E \sim I_C = \beta I_B$ ดังนั้น $I_B \sim \frac{I_E}{\beta}$

แทนค่าลงในสมการ (5.42)

$$r_{ac} = \beta \left(\frac{26\ (mv)}{I_E}\right)$$

$$= \beta r_e \qquad \text{.....(5.43)}$$

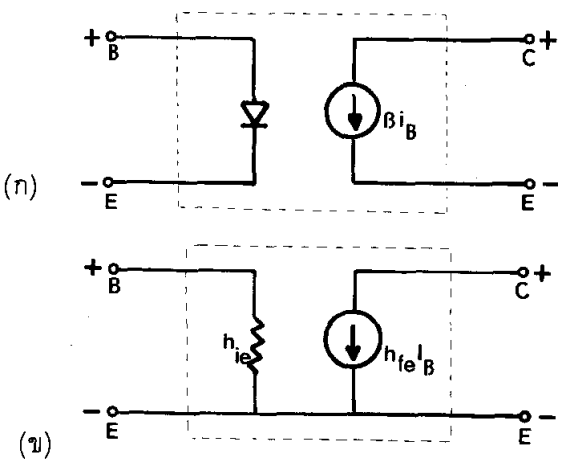
ค่าที่ได้จากสมการ (5.43) เป็นกรณีที่วงจรไม่มีการต่อตัวต้านทานเอมมิตเตอร์ หรือตัวต้านทานเอมมิตเตอร์ถูกบายพาส สำหรับวงจรที่ต่อตัวต้านทานเอมมิตเตอร์และไม่ถูกบายพาส ต้องบวกค่าความต้านทานนี้ด้วย ซึ่งกระแสเบสจะมองเห็นความต้านทานดังกล่าวเพิ่มขึ้น β เท่า นั่นคือ

$$r_{ac} = \beta (r_e + R_E) \sim \beta R_E \qquad \text{.....(5.44)}$$

โครงร่างวงจรสมมูลโดยประมาณของวงจรเอมมิตเตอร์ร่วมได้แสดงในรูป 5.11 (ก) ซึ่งสรุปข้อแตกต่างจากวงจรสมมูลของวงจรเบสร่วม ดังนี้

(1) ความขัดอินพุท มีค่าเป็น βr_e และ r_e หาค่าจากปริมาณกระแสตรง I_E (ไม่ใช่ I_B)

(2) แหล่งกำเนิดกระแสในภาคเอาท์พุทของวงจรสมมูลมีค่าเป็น βi_B



รูป 5.11 (ก) โครงร่างวงจรสมมูลโดยประมาณ ของวงจรเอมมิตเตอร์ร่วม
(ข) โครงร่างวงจรสมมูลไฮบริดโดยประมาณของรูป (ก)

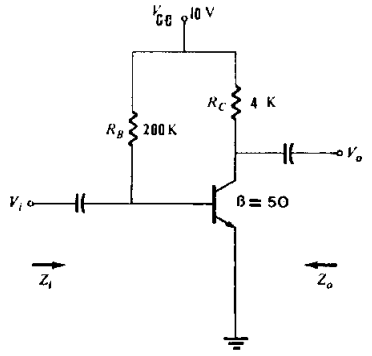
ข้อสังเกต คือ ในการหาค่าโดยประมาณจากพารามิเตอร์ดังกล่าว ค่าของ β แปรไปหรือไม่ ? ตามความเป็นจริงแล้วย่อมมีการแปรค่าตามอุณหภูมิ (กล่าวรายละเอียดในตอน 4.4) แต่สำหรับกรณีใช้งานในช่วงแอ็คทีฟ อาจสมมติให้ปริมาณดังกล่าวแปรได้เล็กน้อย หรือเป็นค่าคงที่ก็ได้

เปรียบเทียบพารามีเตอร์ของวงจรสมมูลโดยประมาณ กับวงจรสมมูลไฮบริดโดยประมาณในรูป 5.11 (ข) ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้ ดังนี้

$$\left.\begin{aligned} \beta &= h_{fe} \\ \beta r_e &= h_{ie} \end{aligned}\right\} \qquad \text{.....(5.45)}$$

การประยุกต์ใช้วงจรสมมูลโดยประมาณกับวงจรขยาย เป็นไปตามตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่าง 5.5 ตามวงจรในรูป 5.12 **จงหาค่า** A_v, A_i, Z_i **และ** Z_o



รูป 5.12

วิธี (1) หาค่า A_v ซึ่งจากการหาความสัมพันธ์ในสมการ (5.39) และ (5.43) ได้ค่า ดังนี้

$$r_e = \frac{26\ \text{mv}}{I_E}$$

ค่าที่จำเป็นคือ I_E หาโดยอาศัยลูปอินพุท

$$I_E \sim I_C = \beta I_B = \beta \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} = 50\ \frac{(10-0.7)}{200\ \text{K}} = 2\ 325\ \text{mA}$$

ดังนั้น $$r_e = \frac{26\ \text{mv}}{2.325} = 11.18\ \Omega$$

$$V_0 = -I_C R_C = -\beta I_b R_C = -\beta \left(\frac{V_i}{r_i}\right) R_C = -\beta \left(\frac{V_i}{\beta r_e}\right) R_C$$

$$\frac{V_0}{V_i} = A_v = \frac{R_C}{r_e} \qquad \text{..... (5.46)}$$

แทนค่า $$A_v = \frac{4\ \text{K}}{11.18} = 357.14$$

(2) หาค่า A_i เริ่มจากพิจารณาพจน์ของกระแสอินพุท จากลูปอินพุท

$$R_B \,//\, r_i = R_B \,//\, \beta r_e \sim \beta r_e$$

ดังนั้น $$I_b \sim I_i$$

$$I_0 = \beta I_b = \beta I_i$$

$$\frac{I_o}{I_i} = A_i = \beta = h_{fe} \qquad (5.47)$$

แทนค่า $A_i = 50$

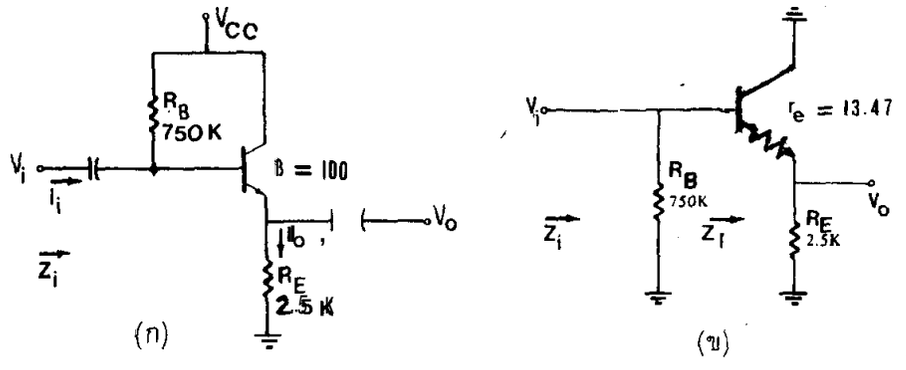
(3) หาค่าความขัดอินพุท จากสมการ (5.43)

$$Z_i \sim \beta r_e = 50 \times 11.18 = 560\,R \qquad .....(5.48)$$

(4) หาความขัดเอาท์พุท เมื่อแรงดันไฟฟ้าอินพุท = 0

$$Z_o \sim R_C = 4\ K \qquad .....(5.49)$$

ตัวอย่าง 5.6 จากวงจรในรูป 5.13 (ก) $V_{CC} = 15$ v จงคำนวณค่า A_V, A_i, Z_i, Z_0



รูป 5.13 (ก) วงจรเอมมิตเตอร์ตาม ต่อตัวต้านทานเอมมิตเตอร์ (ข) วงจรสมมูล โดยประมาณของรูป (ก) พิจารณาเฉพาะกรณีไฟฟ้ากระแสสลับ

วิธี

(1) เพื่อจะหาค่า A_v ก่อนอื่นต้องหาค่า r_e โดยอาศัยปริมาณกระแสตรง

$$I_E \sim I_C = \beta I_B = \beta \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + R_E} = 1.93\ mA$$

$$r_e = \frac{26\ mv}{I_E} = 13.47\ \Omega$$

(2) พิจารณากรณีเสนอให้ $V_{be} \sim 0$ เมื่อวงจรมีตัวต้านทานเอมมิตเตอร์ไม่ถูกบายพาส ดังนั้น $V_o = V_i$

$$A_v \lesssim 1 \qquad .....(5.50)$$

(3) คำนวณค่า A_i โดยพิจารณาพจน์ของกระแสอินพุทและเอาท์พุท ซึ่งอาศัยค่าของความขัดในวงจร จากวงจรสมมูลในรูป 5.13 (ข) เขียนได้เป็น

$$Z_1 = \beta (r_e + R_E) \sim \beta R_E = 250 \text{ K}$$

$$(r_e = 13.47\ \Omega << R_E)$$

$$I_b = \frac{V_{Z1}}{Z_1} = \frac{I_i (R_B \,//\, Z_1)}{Z_1} = I_i \left(\frac{R_B}{R_B + Z_1}\right)$$

$$\frac{I_b}{I_i} \quad \frac{R_B}{R_B + Z_1} = 0.75$$

$$A_i = \frac{I_o}{I_i} = \left(\frac{I_b}{I_i}\right)\left(\frac{I_o}{I_b}\right) = 0.75\,(\beta) = 75$$

(4) หาค่าความขัดอินพุท พิจารณารูป 5.13 (ข) ในลูปอินพุท

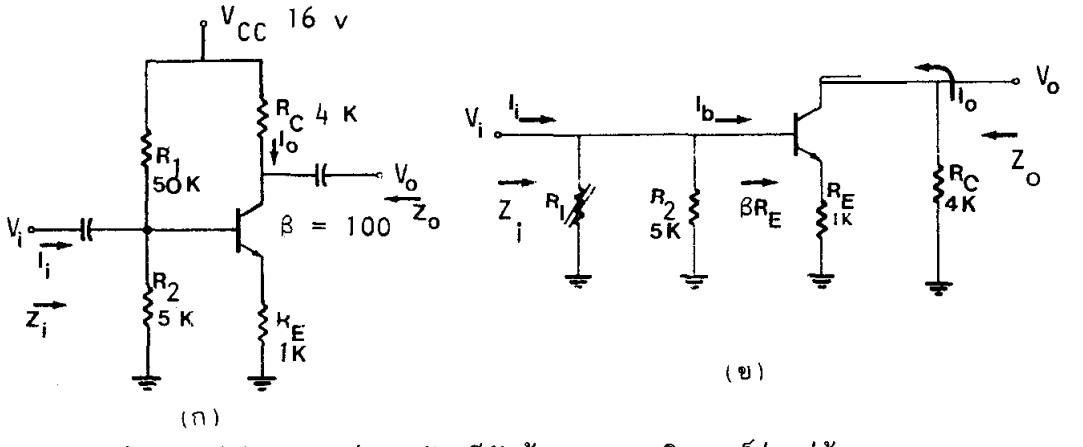
$$Z_i \sim R_B \,//\, R_E = 187.5 \text{ K} \qquad \text{.....(5.51)}$$

(5) หาค่าความขัดเอาท์พุท โดยแรงดันไฟฟ้าอินพุท = O ความขัดที่ขาเอมมิตเตอร์

$$Z_e = r_e = 13.47\ \Omega$$

และ $$Z_o = R_E \,//\, r_e \sim r_e = 13.47\ \Omega$$

ตัวอย่าง 5.7 จากวงจรในรูป 5.14 (ก) จงคำนวณค่า A_v, A_i, Z_i, และ Z_o



รูป 5.14 (ก) วงจรแบ่งแรงดัน มีตัวต้านทานเอมมิตเตอร์ต่ออยู่ด้วย
(ข) วงจรสมมูลของรูป (ก)

วิธี (1) เพื่อจะหาค่า r_e ต้องหาปริมาณไฟฟ้ากระแสตรง I_E ซึ่งมีค่าเป็น

$$I_E = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_E} \qquad \text{.....(i)}$$

ปริมาณ $V_{Th} = \frac{R_2 V_{CC}}{R_1 + R_2} = 1.818$ v (แทนค่าใน (i) เพื่อหาค่า I_E)

$$r_e = \frac{26 \text{ mv}}{I_E} = 23.26$$

(2) จากวงจรสมมูลในรูป 5.14 (ข) พิจารณาหาพจน์ของแรงดันเอาท์พุทและอินพุท

$$V_o = -I_o R_C = -I_c R_C = -I_e R_C$$

$$V_i = I_b(\beta R_E) = \frac{I_e}{\beta}(\beta R_E)$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_C}{R_E} \quad \text{.....(5.52)}$$

แทนค่าตามโจทย์กำหนด $A_v = -4$

ข้อสังเกตคือ อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าไม่ขึ้นกับค่า $\beta (= h_{fe})$ แต่ตัวต้านทานเอมมิตเตอร์ไม่ถูกบายพาส ดังนั้น จะมีการสูญเสียเกนแรงดันไฟฟ้าไปบ้างเล็กน้อย ค่าที่ได้จริง ๆ จึงควรน้อยกว่า 4 (ตามที่คำนวณได้)

(3) หาเกนกระแส ซึ่งต้องคำนึงถึงพจน์ของกระแสเอาท์พุทและกระแสอินพุท

$$I_1 = \frac{V_b}{\beta R_E} = \frac{1}{\beta R_1} I_i \left(\frac{R_2 \beta R_E}{R_2 + R_E}\right) \left(\frac{R_2}{R_2 + \beta R_E}\right) I_i$$

$$I'_1 = I_1 = \beta I_b = \beta \frac{R_2 I_i}{R_2 + \beta R_E}$$

$$A_i = \frac{I_o}{I_i} = \frac{\beta R_2}{R_2 + \beta R_E} = \frac{R_2}{\frac{R_2}{\beta} + R} \sim \frac{R_2}{R_E} \quad \text{.....(5.53)}$$

$(R_1 \gg R_2)$

แทนค่า $A_i = 5$

(4) ค่าความขัดอินพุท พิจารณาลูปอินพุท

$$Z_i \sim R_2 // \beta R_E \sim R_2 = 5 \text{ K} \quad (\beta R_E \gg R_2) \quad \text{.....(5.54)}$$

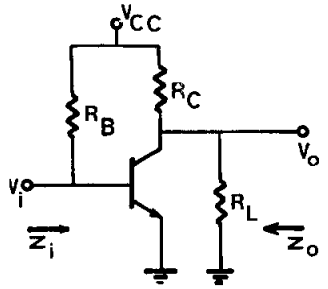
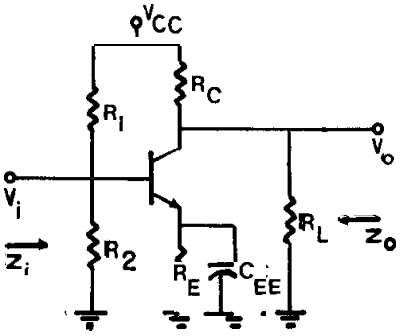
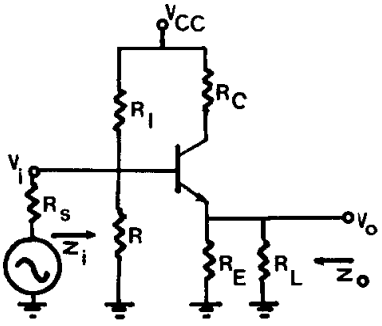
(5) ความขัดเอาท์พุท กรณีนี้มีค่าอนันต์ โดยพิจารณา

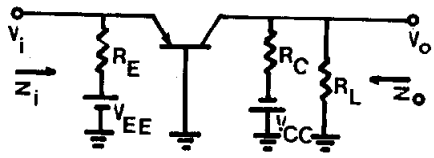
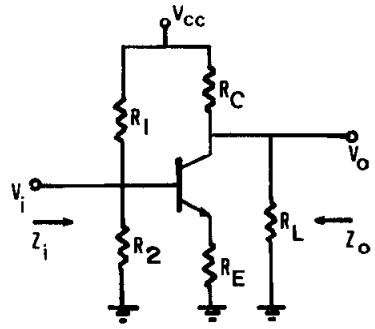
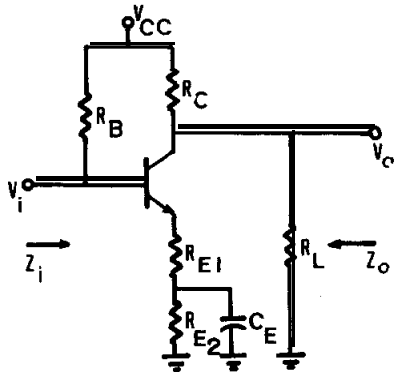
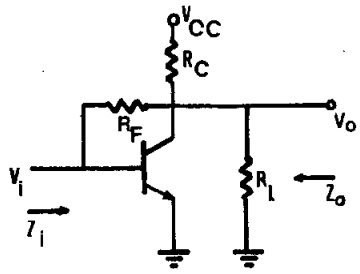
$$Z_o = Z_{transistor} + Z_e \sim \infty + Z_e \sim \infty \quad \text{.....(5.55)}$$

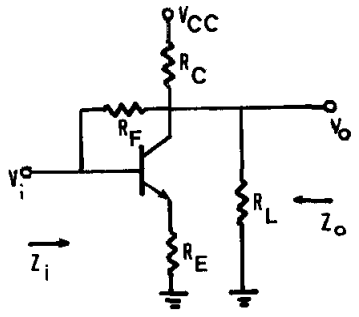
5.6 สรุปคุณสมบัติของวงจรขยายซึ่งหาได้จากวงจรสมมูลโดยประมาณ

ตาราง 5.1 ได้สรุปคุณสมบัติต่าง ๆ คือปริมาณอัตราขยายแรงดันไฟฟ้า ความขัดข้องของวงจรขยายที่มีโครงร่างแตกต่างกันไป บางวงจรได้อธิบายวิธีการหาค่าโดยละเอียดในตัวอย่างของตอน 5.5 แล้ว และในการประมาณค่าทุกกรณีถือว่า $h_{re}, h_{oe} \sim O$ ข้อสังเกต คือ ถ้า $h_{oe} \sim O$ ดังนั้น $1/h_{oe} \sim \infty$ แต่สำหรับกรณี $1/h_{oe}$ มีค่าใกล้เคียง R_C, R_L หรือ ผลลัพธ์ของการต่อแบบขนานคือ $R_C/\!/R_L$ เช่นนี้จะละทิ้งค่าของมันไม่ได้ เช่นเดียวกับปริมาณ $\beta (R_E + r_e)$ ถ้า R_E มีค่าใกล้เคียง r_e จะไม่สามารถละทิ้ง r_e

ตาราง 5.1 สรุปคุณสมบัติของวงจรทรานซิสเตอร์แบบต่าง ๆ (แต่ละกรณี $R'_L = R'_L \parallel R_C$)

	A_v	Z_i	Z_o
	$\frac{h_{fe}}{h_{ie}} R'_L$ $-\frac{R'_L}{r_e}$	$R_B \parallel h_{ie}$ $R_B \parallel \beta r_e$	R'_L
	$\frac{h_{fe}R'_L}{h_{ie}}$ $\frac{R'_L}{r_e}$	$R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel h_{ie}$ $R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel \beta r_e$	R'_L
	$\cong 1$	$(R'_E = R_E \parallel R_L)$ $R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel (h_{ie} + h_{fe} R'_E$ $R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel \beta (r_e + R'_E)$	$R'_S = R_S \parallel R_{B1} \parallel R_{B2}$ $R'_E \parallel \frac{R_S + h_{ie}}{h_{fe}}$ $R'_E \parallel \left(\frac{R'_S}{\beta} + r_e \right)$

	A_v	Z_i	Z_o
	$-\frac{h_{fb}}{h_{ib}} R_L'$ $\geq \frac{R_L'}{r_e}$	$R_E \parallel h_{ib}$ $R_E \parallel r_e$	R_L'
	$-\frac{R_L'}{R_E}$	$R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel (h_{ie} + h_{fe}R_E)$ $R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel \beta (r_e + R_E)$	R_L'
	$-\frac{R_L'}{R_{E1}}$	$R_B \parallel (h_{ie} + h_{fe}R_{E1})$ $R_B \parallel \beta (r_e + R_{E1})$	R_L'
	$-\frac{h_{fe}}{h_{ie}} R_L'$ $-\frac{R_L'}{r_e}$	$\frac{R_F}{\lvert A_v \rvert} \parallel h_{ie}$ $\frac{R_F}{\lvert A_v \rvert} \parallel \beta r_e$	$\cong R_L'$

	A_v	Z_i	Z_o
	$-\frac{R_L'}{R_E}$	$\frac{R_F}{\lvert A_v\rvert} \parallel h_{fe}R_E$ $\frac{R_F}{\lvert A_r\rvert} \parallel \beta R_E$	$\cong R_L'$

5.7 บทสรุป

การวิเคราะห์และออกแบบวงจรขยายด้วยแบบจำลองไฮบริด ยังคงเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย ในกรณีไม่ต้องการความแม่นยำสูงแต่ต้องการใช้เวลาน้อย อาจเลือกตัดบางพารามิเตอร์ไฮบริดที่ค่าน้อย ๆ (หรือมากกว่ามาก) ซึ่งแสดงรายละเอียดไว้แล้วในตอน 5.4 นอกจากนี้ยังมีวงจรสมมูลไฮบริดโดยประมาณ ซึ่งหลักการคล้ายกับแบบจำลองไฮบริด ในตอน 5.6 ได้สรุปปริมาณสำคัญซึ่งบ่งถึงลักษณะการทำงานโดยเฉพาะของวงจรขยายชนิดต่าง ๆ ซึ่งบางวงจรได้เฉลยวิธีทำโดยละเอียดแล้ว

แบบฝึกหัดบทที่ 5

5.1 อธิบายหลักการของแบบจำลองวงจรสองภาคทั่วไป

5.2 จากวงจรรูป 5.2 สร้างวงจรคอลเลคเตอร์ร่วมและแสดงแนวกระแสในวงจรพร้อมทั้งร่างแบบจำลองไฮบริดอย่างสมบูรณ์

5.3 จากวงจรรูป 5.3 ถ้า $h_{fe} = 100$ จงคำนวณหา (ก) เกนกระแส (ข) เกนแรงดันไฟฟ้า (ค) อินพุทอิมพีแดนซ์ (ง) เอาท์พุทอิมพีแดนซ์ (จ) เกนกำลัง

5.4 ตามตัวอย่าง 5.5 ทวนคำถามใหม่ โดย $\beta = 100$

5.5 ถ้าคำถามในข้อ 5.4 มีค่า $\beta = 20$ เปรียบเทียบผลการคำนวณทั้งสองกรณีนี้

5.6 อาศัยวงจรในรูป 5.13 (ก) สร้างโครงร่างวงจรสมมูลไฮบริดโดยสมบูรณ์

5.7 ทวนคำถามในตัวอย่าง 5.7 โดยใช้วงจรสมมูลไฮบริด

5.8 วิจารณ์เปรียบเทียบการวิเคราะห์วงจรทรานซิสเตอร์โดยวิธีกราฟกับการใช้พารามิเตอร์ไฮบริด (ในแง่ของความแม่นยำของผลที่ได้ ความสะดวกสบายในการคำนวณและผลที่อาจกระทบต่อจุดทำงานของทรานซิสเตอร์ เป็นต้น)

5.9 ทวนคำสั่งในตัวอย่าง 5.7 ใหม่ โดยใช้ $R_1 = 250$ K, $R_2 = 20$ K