บทที่ 4

การวิเคราะห์ผลตอบสนองความถี่ของวงจร

4.1 กล่าวนำ

ความสามารถในการตอบสนองความถี่ เป็นคุณสมบัติของวงจรอย่างหนึ่งที่เรานำมาวิเคราะห์และพิจารณา เนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลายชนิดมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงกับความถี่ ซึ่งจะมีผลทำให้คุณสมบัติของวงจร เช่น อัตราขยายแรงดัน, อิมพีแดนซ์ขาเข้า ฯลฯ เปลี่ยนแปลงกับความถี่ด้วย และในการวิเคราะห์ผลตอบสนองความถี่ของวงจร จะถือว่าเป็นการวิเคราะห์ที่สัญญาณขณะกำลังทำงานของวงจรเป็นสัญญาณที่มีขนาดเล็ก ๆ เท่านั้น (Small Signal Analysis)

4.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลตอบสนองความถี่

ขั้นตอนของการวิเคราะห์ผลตอบสนองความถี่แสดงได้ดังต่อไปนี้

1. วิเคราะห์หาจุดทำงานสงบของวงจร เพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้ไปใช้ในการคำนวณหาโมเดลสัญญาณขนาดเล็กในบทที่ 2
2. ประทับองค์ประกอบต่าง ๆ ลงในสมการเมตริกซ์ คำนวณหาโมเดลสัญญาณขนาดเล็ก (Small Signal Model) สำหรับองค์ประกอบพวกไม่เชิงเส้น
3. แก้ระบบสมการเมตริกซ์ที่ได้
4. คำนวณหาความถี่ที่ต้องการวิเคราะห์ใหม่
5. ตรวจดูว่าทำการวิเคราะห์ครบทุกความถี่แล้วหรือยัง ถ้ายังไม่ครบ กลับไปขั้นตอนที่ 2
6. จบการวิเคราะห์

4.3 โมเดลสัญญาณขนาดเล็ก (Small Signal Model) ขององค์ประกอบของวงจรไม่เชิงเส้น

ในการวิเคราะห์วงจรแบบสัญญาณขนาดเล็กนั้น จะสนใจคุณสมบัติของวงจรขณะที่วงจรถูก

ไบแอสที่จุดทำงานสงบแล้ว ดังนั้น พารามิเตอร์ขององค์ประกอบวงจรไม่เชิงเส้น จะถูกพิจารณาว่าเป็นพารามิเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขนาดเล็ก ๆ เท่านั้น นั่นคือ ถ้ามีองค์ประกอบของวงจรตัวหนึ่งที่มีความสัมพันธ์ ดังนี้

$$I = G(V) \qquad \ldots(4.3.1)$$

เมื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็ก จะพิจารณาคุณสมบัติที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก ๆ เท่านั้น คือ

$$i = \frac{\partial G}{\partial V}\Big|_{V=v_{op}} \cdot v \qquad \ldots(4.3.2)$$

จาก 4.3.2

$$i = g \cdot v \qquad \ldots(4.3.3)$$

ค่า g คือค่า Small Signal Admittance ขององค์ประกอบวงจรนี้

V_{op} คือ ค่าแรงดันที่จุดทำงานสงบ

4.3.1 <u>โมเดลสัญญาณขนาดเล็กของไดโอด</u>

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันในไดโอดจะเป็น

$$I_D = G(V_D) = I_s[\exp(V_D/V_T) - 1.0] \qquad \ldots(4.3.4)$$

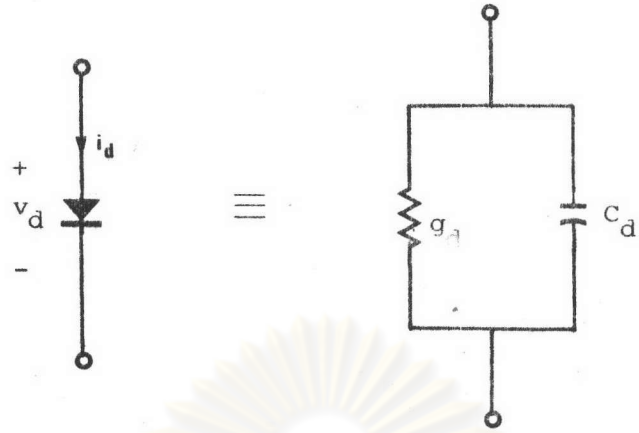
เมื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็ก จะได้

$$i_d = \frac{\partial G}{\partial V_D}\Big|_{V_D=v_{op}} \cdot v_d \qquad \ldots(4.3.5)$$

จากสมการที่ 4.3.6 นำมาโมเดลสัญญาณขนาดเล็ก ได้เป็น

$$i_d = \frac{I_s}{V_T}[\exp(v_D/v_T)]\Big|_{V_D=v_{op}} \cdot v_d \qquad \ldots(4.3.6)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.1 โมเดลสัญญาณขนาดเล็กของไดโอด

เมื่อ g_d คือ Small Signal Conductance

$$g_d = \frac{I_s}{V_T}\left[\exp(V_D/V_T)\right]\Big|_{V_D=V_{op}} \qquad \ldots(4.3.7)$$

C_D คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างรอยต่อ พี-เอ็น ของไดโอด ซึ่งจะประกอบไปด้วย Depletion Capacitance และ Diffusion Capacitance

4.3.2 โมเดลสัญญาณขนาดเล็กของทรานซิสเตอร์แบบรอยต่อไบโพลาร์

ความสัมพันธ์แบบ Ebers-Moll Model ของทรานซิสเตอร์ชนิดรอยต่อไบโพลาร์จะเป็น

$$I_B = f_B(V_{BE},V_{BC}) \qquad \ldots(4.3.8)$$

$$I_C = f_C(V_{BE},V_{BC}) \qquad \ldots(4.3.9)$$

โดย

$$f_B(V_{BE},V_{BC}) = (1 - \alpha_F)I_{ES}[\exp(V_{BE}/V_T) - 1.0] + (1 - \alpha_R)I_{CS}[\exp(V_{BC}/V_T) - 1.0] \quad ...(4.3.10)$$

และ

$$f_C(V_{BE},V_{BC}) = \alpha_F I_{ES}[\exp(V_{BE}/V_T) - 1.0] + \alpha_R I_{CS}[\exp(V_{BC}/V_T) - 1.0] \quad ...(4.3.10)$$

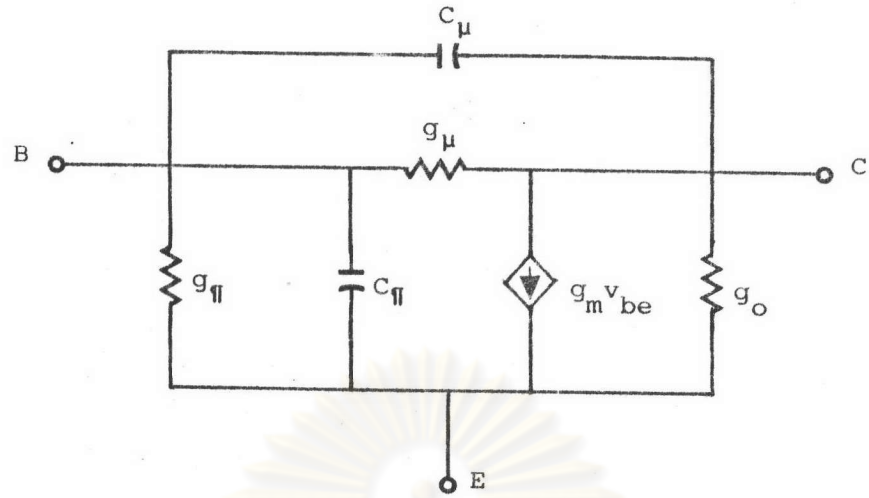
ดิฟเฟอเรนติเอต สมการที่ 4.3.8 และ 4.3.9 เมื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็ก จะได้

$$i_b = \frac{\partial f_B}{\partial V_{BE}}\bigg|_{V_{op}} \cdot v_{be} + \frac{\partial f_B}{\partial V_{BC}}\bigg|_{V_{op}} \cdot v_{bc} \quad ...(4.3.12)$$

$$i_c = \frac{\partial f_C}{\partial V_{BE}}\bigg|_{V_{op}} \cdot v_{be} + \frac{\partial f_C}{\partial V_{BC}}\bigg|_{V_{op}} \cdot v_{bc} \quad ...(4.3.13)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 4.3.12 และ 4.3.13 สามารถนำมาเขียน เป็น Small Signal Hybrid-pi Model ได้ดังรูปที่ 4.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.2 Hybrid-pi Model ของทรานซิสเตอร์แบบรอยต่อ npn

โดย

$$g_\pi = \left.\frac{\partial f_B}{\partial V_{BE}}\right|_{V_{op}} \qquad \ldots(4.3.14)$$

$$g_\mu = \left.\frac{\partial f_B}{\partial V_{BC}}\right|_{V_{op}} \qquad \ldots(4.3.15)$$

$$g_o = -\left.\frac{\partial f_C}{\partial V_{BC}}\right|_{V_{op}} - \left.\frac{\partial f_B}{\partial V_{BC}}\right|_{V_{op}} \qquad \ldots(4.3.16)$$

$$g_m = \left.\frac{\partial f_C}{\partial V_{BE}}\right|_{V_{op}} + \left.\frac{\partial f_C}{\partial V_{BC}}\right|_{V_{op}} + \left.\frac{\partial f_B}{\partial V_{BC}}\right|_{V_{op}} \qquad \ldots(4.3.17)$$

C_π = Base - Emitter Junction Capacitance

C_μ = Base - Collector Junction Capacitance

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 10293103

จากสมการที่ 4.3.14 ถึง 4.3 17 และสมการที่ 4.3.10 ถึง4.3.11 จะได้

$$g_{\pi} = (1 - \alpha_F)\cdot I_{ES}/V_T \cdot \exp(V_{BE}/V_T)\Big|_{V_{op}} \quad \ldots(4.3.18)$$

$$g_{\mu} = (1 - \alpha_R)\cdot I_{CS}/V_T \cdot \exp(V_{BC}/V_T)\Big|_{V_{op}} \quad \ldots(4.3.19)$$

$$g_{o} = \alpha_R \cdot \frac{I_{CS}}{V_T} \exp(V_{BC}/V_T)\Big|_{V_{op}} \quad \ldots(4.3.20)$$

$$g_{m} = \alpha_F \cdot I_{ES}/V_T \cdot \exp(V_{BE}/V_T) - \alpha_R \cdot I_{CS}/V_T \cdot \exp(V_{BC}/V_T)\Big|_{V_{op}} \quad \ldots(4.3.21)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย