

แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 2 ซีเนอร์ไดโอด และการประยุกต์ใช้งาน

หัวข้อเนื้อหา

1. ซีเนอร์ไดโอด
2. วงจรรักษาระดับแรงดันกรณีแหล่งจ่ายแรงดันและโหลดคงที่
3. วงจรรักษาระดับแรงดันกรณีแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ ขณะที่โหลดปรับค่าได้
4. วงจรรักษาระดับแรงดันกรณีแหล่งจ่ายแรงดันปรับค่าได้
5. บทสรุป

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. นักศึกษาเกิดทักษะการต่อวงจรซีเนอร์ไดโอดที่ต่อแบบไบแอสตรง และไบแอสกลับ
2. นักศึกษาเกิดทักษะการต่อวงจรรักษาระดับแรงดันด้วยซีเนอร์ไดโอด
3. นักศึกษาอธิบายการนำซีเนอร์ไดโอดมาต่อทดลองในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับในระดับการประยุกต์

วิธีสอนและกิจกรรมการเรียนการสอน

1. วิธีสอน
 - 1.1 วิธีสอนแบบบรรยาย
 - 1.2 วิธีสอนแบบอภิปราย
 - 1.3 วิธีสอนแบบปฏิบัติการ
 - 1.4 วิธีสอนแบบเน้นการเรียนรู้ด้วยตนเอง
2. กิจกรรมการเรียนการสอน
 - 2.1 อธิบายทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับซีเนอร์ไดโอดและการประยุกต์ใช้งาน
 - 2.2 อธิบายขั้นตอนการทดลองที่เกี่ยวข้องกับซีเนอร์ไดโอด
 - 2.3 อธิบายขั้นตอนการทดลองการประยุกต์ใช้งานซีเนอร์ไดโอด
 - 2.4 อธิบายการบันทึกผลการทดลอง และสรุปผลการทดลอง
 - 2.5 นักศึกษาทำการทดลอง บันทึกผลการทดลอง สรุปผลการทดลอง และตอบคำถาม

หลังการทดลอง

สื่อการเรียนการสอน

1. เอกสารประกอบคำสอนรายอิเล็กทรอนิกส์ 1
2. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และโพลีบอร์ด
3. เครื่องมือวัดทางไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์
4. กระดานไวท์บอร์ด

5. โพรเจ็คเตอร์

การวัดผลและการประเมินผล

1. การเข้าเรียน
2. การบ้าน
3. สอบกลางภาค
4. สอบปลายภาค

บทที่ 2

ซีเนอร์ไดโอด และการประยุกต์ใช้งาน

2.1 ซีเนอร์ไดโอด

ซีเนอร์ไดโอด (zener diode) คือไดโอดชนิดหนึ่งที่ถูกออกแบบให้ทำงานขณะบ่อนแรงดันไบแอสกลับ แรงดันไบแอสกลับที่ตัวซีเนอร์ไดโอดจะมีค่าค่อนข้างคงที่ ภาพที่ 2.1 แสดงซีเนอร์ไดโอด และสัญลักษณ์ของซีเนอร์ไดโอด ภาพที่ 2.2 แสดงการเทียบเคียงซีเนอร์ไดโอดแบบอุดมคติ ภาพที่ 2.2 (ก) แสดงการเทียบเคียงแรงดันซีเนอร์ไดโอดขณะทำงาน ซึ่งต้องบ่อนแรงดันไบแอสกลับที่สูงกว่าแรงดันซีเนอร์ต่ำสุด และมีกระแสซีเนอร์ที่มากกว่ากระแสซีเนอร์ต่ำสุด ขณะที่ซีเนอร์ไดโอดทำการรักษาระดับแรงดันจะมีค่าเท่ากับ V_Z ซึ่งเปรียบเสมือนมีแรงดันคงที่เท่ากับแรงดันซีเนอร์ ภาพที่ 2.2 (ข) แสดงซีเนอร์ไดโอดขณะไม่ทำงานด้วยการไบแอสกลับให้กับซีเนอร์ไดโอด ซึ่งแรงดันดังกล่าวไม่มากเพียงพอที่จะทำให้ซีเนอร์ไดโอดรักษาระดับแรงดันซีเนอร์ได้ แรงดันตกคร่อมซีเนอร์ไดโอดมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามกระแส I_Z ลักษณะดังกล่าวเสมือนตัวซีเนอร์ไดโอดเปิดวงจรออก

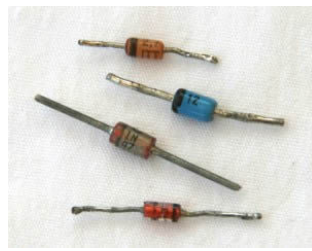
ภาพที่ 2.3 แสดงกราฟการทำงานของซีเนอร์ไดโอด ซึ่งสังเกตเห็นว่าซีเนอร์ไดโอดสามารถรักษาระดับแรงดันซีเนอร์ไดโอด (V_Z) ให้คงที่ได้ เมื่อไบแอสให้ซีเนอร์ไดโอดมีกระแสไหลผ่านเท่ากับกระแสซีเนอร์ไดโอดที่ใช้ในการทดสอบ (test current: I_{TZ}) กรณีที่กระแสที่ไหลผ่านตัวซีเนอร์ไดโอดมีค่าเท่ากับกระแสซีเนอร์ไดโอดต่ำสุด (knee current: I_{ZK}) แรงดันซีเนอร์ไดโอดมีค่าเท่ากับแรงดันซีเนอร์ต่ำสุด (V_{ZK}) ซึ่งแรงดันที่ซีเนอร์ไดโอดยังรักษาระดับแรงดันได้จะเริ่มมีค่าเท่ากับแรงดันต่ำสุดที่ซีเนอร์ไดโอดทำงาน V_{ZO} และกรณีที่ไบแอสให้ซีเนอร์ไดโอดมีกระแสไหลเท่ากับกระแสซีเนอร์ไดโอดสูงสุด (I_{ZM}) แรงดันซีเนอร์ไดโอดมีค่าเท่ากับแรงดันสูงสุดที่ซีเนอร์ทำงาน (V_{ZM}) ภาพที่ 2.4 แสดงสัญลักษณ์เทียบเคียงตัวซีเนอร์ไดโอดประกอบด้วยแรงดันซีเนอร์ไดโอดอุดมคติ และค่าความต้านทานเสมือนของซีเนอร์ไดโอดมีค่าเท่ากับ

$$R_Z = \frac{\Delta V_Z}{\Delta I_Z} \quad (2.1)$$

การออกแบบวงจรรักษาระดับแรงดันด้วยซีเนอร์ไดโอดจะต้องพิจารณากำลังที่ซีเนอร์ไดโอดสามารถทนได้สูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$P_{DM} = V_Z I_{ZM} \quad (2.2)$$

การประยุกต์ใช้งานซีเนอร์ไดโอดนั้น ซีเนอร์ไดโอดสามารถทำงานได้ทั้งในไฟฟ้ากระแสตรง และกระแสสลับ โดยการทำงานในไฟฟ้ากระแสตรงนั้นสามารถแบ่งการทำงานออกเป็น 3 แบบ ได้แก่ 1. แหล่งจ่ายแรงดันและโหลดคงที่ 2. แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ ขณะที่โหลดปรับค่าได้ และ 3. แหล่งจ่ายแรงดันปรับค่าได้ ขณะที่โหลดคงที่

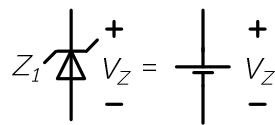


(ก)

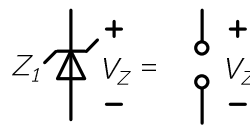


(ข)

ภาพที่ 2.1 (ก) ซีเนอร์ไดโอด และ (ข) สัญลักษณ์ซีเนอร์ไดโอด

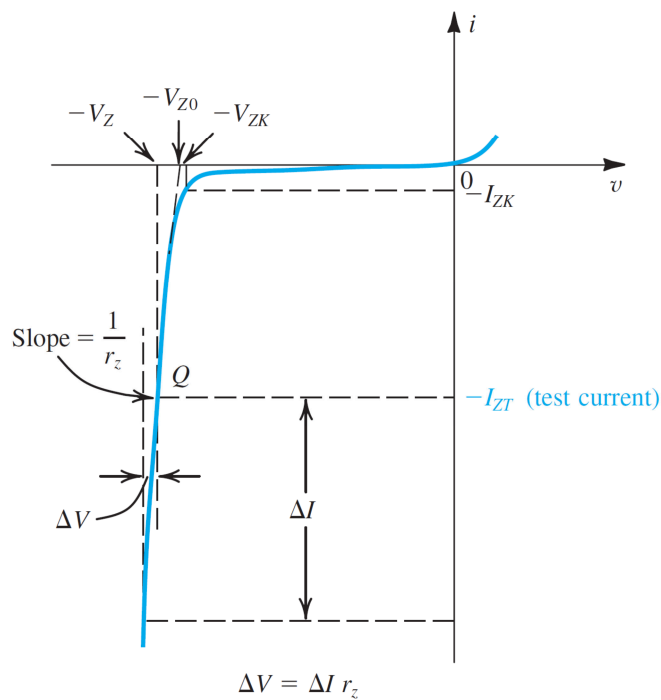


(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.2 การเทียบเคียงซีเนอร์ไดโอดแบบอุดมคติ (ก) ขณะทำงาน (ข) ขณะไม่ทำงาน



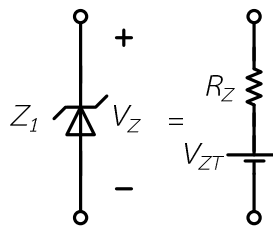
ภาพที่ 2.3 กราฟคุณลักษณะของซีเนอร์ไดโอด

ที่มา (Adel and Kenneth, 2016, p. 190)

ตัวอย่างที่ 2.1 กำหนดให้ซีเนอร์ไดโอด เบอร์ 1N4737A มี $V_Z = 7.5 \text{ V}$ $I_{ZT} = 34 \text{ mA}$ และ $I_{ZM} = 121 \text{ mA}$ ทำการหาค่า P_{ZM}

วิธีทำ ค่ากำลังไฟฟ้าของซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 1N4737A สูงสุดเท่ากับ

$$P_{ZM} = V_Z \times I_{ZM} \tag{2.3}$$



ภาพที่ 2.4 สัญลักษณ์เทียบเคียงตัวซีเนอร์ไดโอด

$$= 7.5 \text{ V} \times 121 \text{ mA}$$

$$= 0.9 \text{ W}$$

ตัวอย่างที่ 2.2 กำหนดให้ซีเนอร์ไดโอด เบอร์ 1N4728A มี $V_Z = 3.3 \text{ V}$ $I_{ZT} = 76 \text{ mA}$ และ $I_{ZM} = 276 \text{ mA}$ ทำการหาค่า P_{ZM}

วิธีทำ ค่ากำลังไฟฟ้าของซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 1N4728A สูงสุดเท่ากับ

$$P_{ZM} = V_Z \times I_{ZM} \quad (2.4)$$

$$= 3.3 \text{ V} \times 276 \text{ mA}$$

$$= 0.91 \text{ W}$$

ตัวอย่างที่ 2.3 กำหนดให้ซีเนอร์ไดโอด 1N4736A ใน datasheet มี $V_Z = 6.8 \text{ V}$ $R_Z = 3.5 \Omega$ $I_{ZT} = 37 \text{ mA}$ ทำการหาค่า V_Z ขณะที่ซีเนอร์ไดโอดมีกระแสไหลผ่านเท่ากับ 50 mA และ 25 mA

วิธีทำ จากกราฟในภาพที่ 2.3 ขณะที่ซีเนอร์ไดโอดมีกระแสไหลผ่านเท่ากับ 50 mA ซีเนอร์ไดโอดมีกระแสเพิ่มขึ้น 13 mA กล่าวคือ $\Delta I_Z = 13 \text{ mA}$ ΔV_Z มีค่าเท่ากับ

$$\Delta V_Z = \Delta I_Z \times R_Z = 13 \text{ mA} \times 3.5 \Omega = 45.5 \text{ mV} \quad (2.5)$$

เมื่อกระแสซีเนอร์ไดโอดเพิ่มขึ้นเท่ากับ 50 mA แรงดัน V_Z เพิ่มขึ้นเท่ากับ

$$V_Z = V_{ZT} + \Delta V_Z = 6.8 \text{ V} + 45.5 \text{ mV} = 6.85 \text{ V} \quad (2.6)$$

ขณะที่ซีเนอร์ไดโอดมีกระแสไหลผ่านเท่ากับ 25 mA ซีเนอร์ไดโอดมีกระแสลดลง 12 mA กล่าวคือ $\Delta I_Z = -12 \text{ mA}$ ΔV_Z มีค่าเท่ากับ

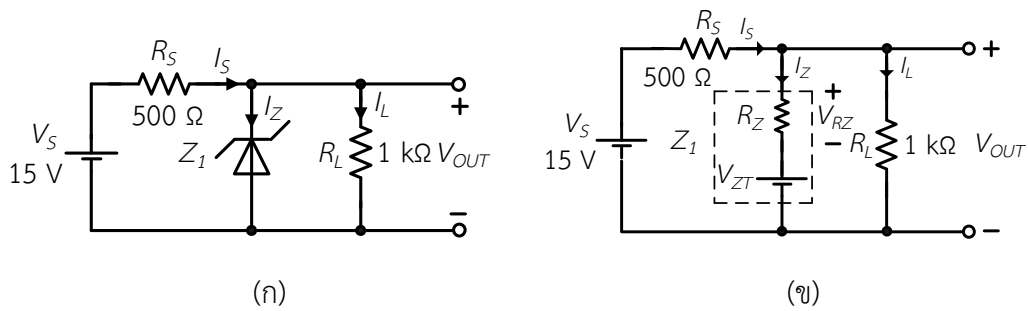
$$\Delta V_Z = \Delta I_Z \times R_Z = -12 \text{ mA} \times 3.5 \Omega = -42 \text{ mV} \quad (2.7)$$

เมื่อกระแสซีเนอร์ไดโอดลดลงเท่ากับ 25 mA แรงดัน V_Z ลดลงเท่ากับ

$$V_Z = V_{ZT} + \Delta V_Z = 6.8 \text{ V} - 42 \text{ mV} = 6.76 \text{ V} \quad (2.8)$$

ตัวอย่างที่ 2.4 กำหนดให้ซีเนอร์ไดโอด เบอร์ 1N4733A มี $V_Z = 5.1 \text{ V}$ $I_{ZT} = 49 \text{ mA}$ $R_Z = 7 \Omega$ และ $P_{D(max)} = 1 \text{ W}$ จงหาค่า V_{RS} I_S และ I_L ของวงจรซีเนอร์ในภาพที่ 2.5 (ก)

วิธีทำ เขียนวงจรเทียบเคียงวงจรรักษาระดับแรงดันด้วยซีเนอร์ไดโอดได้ดังที่แสดงในภาพที่ 2.5 (ข)



ภาพที่ 2.5 (ก) วงจรรักษาระดับแรงดันด้วยซีเนอร์ไดโอด และ (ข) แทนซีเนอร์ไดโอดด้วยวงจรเทียบเคียง

การวิเคราะห์หากระแส I_Z ที่ไหลผ่านใช้วิธี

$$\begin{aligned} V_{OUT} &= V_Z - \Delta I_Z \times R_Z = V_Z - (I_Z - I_{ZK})R_Z \\ &= 5.1 \text{ V} - (49 \text{ mA} - 1 \text{ mA}) \times 7 \Omega \\ &= 4.76 \text{ V} \end{aligned} \quad (2.9)$$

หาค่า V_{RS} เท่ากับ

$$\begin{aligned} V_{RS} &= V_S - V_{OUT} = 15 \text{ V} - 4.76 \text{ V} \\ &= 10.24 \text{ V} \end{aligned} \quad (2.10)$$

หาค่า I_{RS} เท่ากับ

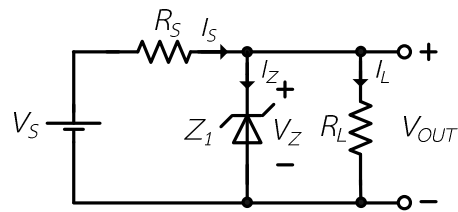
$$\begin{aligned} I_{RS} &= \frac{V_S - V_{OUT}}{R_S} = \frac{15 \text{ V} - 4.76 \text{ V}}{500 \Omega} \\ &= 20.48 \text{ mA} \end{aligned} \quad (2.11)$$

หาค่า I_L เท่ากับ

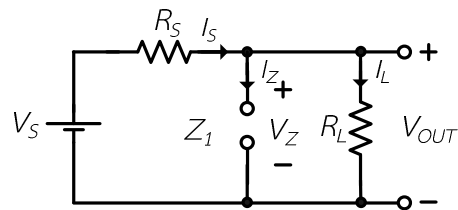
$$I_L = \frac{V_{OUT}}{R_L} = \frac{4.76 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 4.76 \text{ mA} \quad (2.12)$$

2.2 วงจรรักษาระดับแรงดันกรณีแหล่งจ่ายแรงดัน และโหลดคงที่

การประยุกต์ใช้ซีเนอร์ไดโอดเพื่อรักษาระดับแรงดัน (voltage regulator) สามารถต่อวงจรอย่างง่ายในภาพที่ 2.6 เป็นการป้อนแรงดันคงที่และต่อกับโหลดซึ่งแทนด้วยตัวต้านทาน เนื่องจากค่าความต้านทานภายในซีเนอร์ไดโอดในตัวอย่างที่ 2.3 และ 2.4 มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความต้านทาน R_S และ R_L การวิเคราะห์วงจรรักษาระดับแรงดันด้วยซีเนอร์ไดโอดสามารถทำได้ด้วยการพิจารณาซีเนอร์ไดโอดลักษณะอุดมคติ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ตามลำดับดังนี้



ภาพที่ 2.6 วงจรรักษาระดับแรงดันด้วยซีเนอร์ไดโอด



ภาพที่ 2.7 วงจรเทียบเคียงที่ตรวจสอบซีเนอร์ไดโอด

2.2.1 การหาค่าแรงดันที่โหลดขณะไม่มีซีเนอร์ไดโอด

การหาค่าแรงดันเอาต์พุต (V_{OUT}) ขณะไม่มีซีเนอร์ไดโอดดังแสดงในภาพที่ 2.7 ด้วยการแบ่งแรงดันระหว่าง R_L และ R_S ซึ่ง V_{OUT} มีค่าเท่ากับ

$$V_{OUT} = V_L = \frac{R_L V_S}{R_S + R_L} \quad (2.13)$$

2.2.2 การหาค่าแรงดัน และกระแสในวงจรซีเนอร์ไดโอด

จากสมการที่ 2.13 ถ้ากำหนดให้กรณีที่แรงดัน $V_L \geq V_Z$ ซีเนอร์ไดโอดจะรักษาระดับแรงดันซีเนอร์ และกรณีที่แรงดัน $V_L < V_Z$ ซีเนอร์ไดโอดจะไม่รักษาระดับแรงดันซีเนอร์ กรณีที่ $V_L \geq V_Z$ แรงดันที่เอาต์พุตมีค่าเท่ากับแรงดันซีเนอร์ซึ่งเขียนได้ว่า

$$V_{OUT} = V_Z \quad (2.14)$$

กระแสที่ไหลผ่านซีเนอร์ไดโอดสามารถเขียนได้ว่า

$$I_Z = I_S - I_L \quad (2.15)$$

กระแสที่ไหลผ่านโหลดมีค่าเท่ากับ

$$I_L = \frac{V_{OUT}}{R_L} \quad (2.16)$$

และกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานจำกัดกระแสนั้นเขียนได้ว่า

$$I_S = \frac{V_R}{R_S} = \frac{V_S - V_Z}{R_S} \quad (2.17)$$

การออกแบบซีเนอร์ไดโอดต้องคำนึงถึงกำลังที่ตัวซีเนอร์ไดโอดสามารถทนได้ โดยกำลังที่ซีเนอร์ไดโอดสามารถทนได้นั้นสามารถหาจากสมการ

$$P_Z = V_Z \times I_Z \quad (2.18)$$

ตัวอย่างที่ 2.5 จากตัวอย่างที่ 2.3 กำหนดให้พิจารณาซีเนอร์ไดโอดลักษณะอุดมคติ ทำการหาค่า V_R I_R I_L และ I_Z ของวงจรซีเนอร์

วิธีทำ ซีเนอร์ไดโอดนำกระแสใน แรงดันที่เอาต์พุตเท่ากับ

$$V_{OUT} = V_Z = 5.1 \text{ V} \quad (2.19)$$

กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานจำกัดกระแสนั้นหาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} I_R &= \frac{V_S - V_Z}{R_S} = \frac{15\text{V} - 5.1\text{V}}{500\Omega} \\ &= 19.8 \text{ mA} \end{aligned} \quad (2.20)$$

และกระแสที่ไหลผ่านโหลดหาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} I_L &= \frac{V_{OUT}}{R_L} = \frac{5.1\text{V}}{1\text{k}\Omega} \\ &= 5.1 \text{ mA} \end{aligned} \quad (2.21)$$

กระแสที่ไหลผ่านซีเนอร์ไดโอดสามารถหาจากสมการ

$$\begin{aligned} I_Z &= I_S - I_L \\ &= 19.8 \text{ mA} - 5.1 \text{ mA} \\ &= 14.7 \text{ mA} \end{aligned} \quad (2.22)$$

ตัวอย่างที่ 2.6 ทำการหาค่า V_R I_R I_L และ I_Z ของวงจรซีเนอร์ในตัวอย่างที่ 2.4 กำหนดให้พิจารณาซีเนอร์ไดโอดลักษณะอุดมคติ

วิธีทำ ซีเนอร์ไดโอดนำกระแสใน แรงดันที่เอาต์พุตเท่ากับ

$$V_{OUT} = V_Z = 36 \text{ V} \quad (2.23)$$

กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานจำกัดกระแสนั้นหาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} I_R &= \frac{V_S - V_Z}{R_S} = \frac{50\text{V} - 36\text{V}}{10\text{k}\Omega} \\ &= 1.4 \text{ mA} \end{aligned} \quad (2.24)$$

และกระแสที่ไหลผ่านโหลดหาได้จากสมการ

$$I_L = \frac{V_{OUT}}{R_L} = \frac{36V}{50k\Omega} \quad (2.25)$$

$$= 0.72 \text{ mA}$$

กระแสที่ไหลผ่านซีเนอร์ไดโอดสามารถหาจากสมการ

$$I_Z = I_S - I_L \quad (2.26)$$

$$= 1.4 \text{ mA} - 0.72 \text{ mA}$$

$$= 0.68 \text{ mA}$$

2.3 วงจรรักษาระดับแรงดันกรณีแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ ขณะทีโหลดปรับค่าได้

ภาพที่ 2.8 แสดงวงจรรักษาระดับแรงดันที่สามารถปรับค่าความต้านทานโหลด (R_L) ได้ และแรงดัน V_S มีค่าคงที่ การออกแบบต้องเลือกค่า R_S ที่เหมาะสม เพื่อจำกัดกระแสไม่ให้ไหลไปที่โหลดหรือที่ตัวซีเนอร์ไดโอดมากเกินไปจนเกินขีดจำกัดของตัวซีเนอร์ไดโอด และตัวต้านทาน จากวงจรในภาพที่ 2.8 เมื่อซีเนอร์ไดโอดทำงาน แรงดันเอาต์พุตเขียนได้ว่า

$$V_{OUT} = V_L = \frac{R_L V_S}{R_S + R_L} \quad (2.27)$$

ค่าความต้านทานของโหลดที่ต่ำสุดที่ซีเนอร์ไดโอดยังสามารถทำงานมีค่าเท่ากับ

$$R_{L(min)} = \frac{R_S V_Z}{V_S - V_Z} \quad (2.28)$$

นำค่าความต้านทาน $R_{L(min)}$ หาค่ากระแส $I_{L(max)}$ ได้จาก

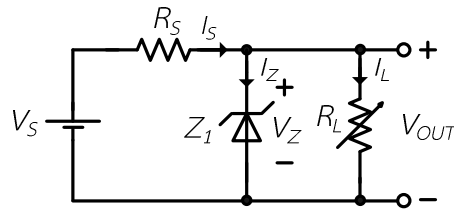
$$I_{L(max)} = \frac{V_L}{R_L} = \frac{V_Z}{R_{L(min)}} \quad (2.29)$$

แรงดันที่ R_S หาได้จาก

$$V_R = V_S - V_Z \quad (2.30)$$

ดังนั้น กระแส I_S เขียนได้ว่า

$$I_S = \frac{V_{RS}}{R_S} \quad (2.31)$$



ภาพที่ 2.8 วงจรรักษาระดับแรงดันแบบปรับค่าความต้านทาน R_L

กระแสที่ไหลผ่านซีเนอร์ไดโอดมากที่สุด I_{ZM} หาได้จาก

$$I_{ZM} = I_S - I_L \quad (2.32)$$

ดังนั้น กระแสที่ไหลผ่านค่าความต้านทานที่น้อยสุด $I_{L(min)}$ จากสมการ

$$I_{L(min)} = I_S - I_{ZM} \quad (2.33)$$

ดังนั้น จากค่า $I_{L(min)}$ สามารถนำมาหาค่า $R_{L(max)}$ ได้จากสมการ

$$R_{L(max)} = \frac{V_Z}{I_{L(min)}} \quad (2.34)$$

ตัวอย่างที่ 2.7 กำหนดให้ซีเนอร์ไดโอดในวงจรรักษาระดับแรงดันภาพที่ 2.9 มี $V_Z = 12 \text{ V}$ $I_{ZK} = 1 \text{ mA}$ และ $I_{ZM} = 50 \text{ mA}$ พิจารณาซีเนอร์ไดโอดอุดมคติ ทำการหาค่า $R_{L(min)}$ และ $R_{L(max)}$

วิธีทำ ถ้า $R_L = \infty$ ส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน $I_L = 0 \text{ A}$ ดังนั้น กระแสที่ไหลผ่านซีเนอร์สูงสุดเท่ากับ

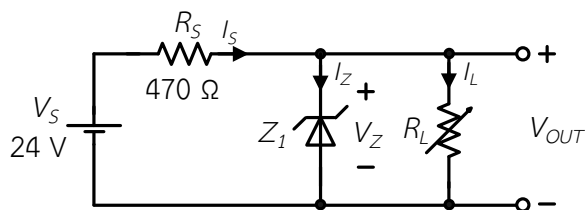
$$\begin{aligned} I_{Z(max)} &= I_S = \frac{V_S - V_Z}{R_S} = \frac{24\text{V} - 12\text{V}}{470\Omega} \\ &= 25.53 \text{ mA} \end{aligned} \quad (2.35)$$

ขณะที่กระแส I_L สูงสุดได้ เมื่อกระแสไหลผ่านซีเนอร์ไดโอดน้อยสุดเท่ากับ I_{ZK} ดังนั้น กระแสที่ไหลผ่านค่าความต้านทานที่มากที่สุด $I_{L(max)}$ เท่ากับ

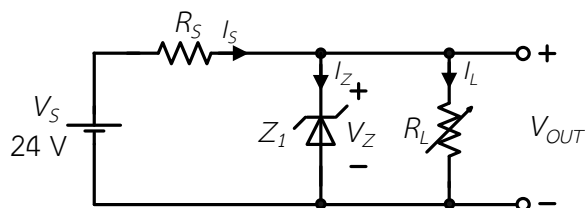
$$\begin{aligned} I_{L(max)} &= I_S - I_{ZK} = 25.53 \text{ mA} - 1 \text{ mA} \\ &= 24.53 \text{ mA} \end{aligned} \quad (2.36)$$

จากค่า $I_{L(max)}$ สามารถนำมาหาค่า $R_{L(min)}$ ได้จากสมการ

$$\begin{aligned} R_{L(min)} &= \frac{V_Z}{I_{L(max)}} = \frac{12\text{V}}{24.53\text{mA}} \\ &= 490 \Omega \end{aligned} \quad (2.37)$$



ภาพที่ 2.9 วงจรรักษาระดับแรงดันด้วยซีเนอร์ไดโอดแบบโหลดปรับค่าได้



ภาพที่ 2.10 วงจรรักษาระดับแรงดันด้วยซีเนอร์ไดโอดแบบโหลดปรับค่าได้

ตัวอย่างที่ 2.8 วงจรซีเนอร์ในภาพที่ 2.10 อุปกรณ์ซีเนอร์ไดโอด Z_1 เบอร์ 1N4744A มี $V_Z = 15\text{ V}$ $I_{ZT} = 17\text{ mA}$ $I_{ZK} = 0.25\text{ mA}$ และ $R_Z = 14\ \Omega$ ทำการหาค่าต่อไปนี้

- (ก) คำนวณหาค่าแรงดันเอาต์พุต V_{OUT} ณ I_{ZK} และ I_{ZM}
- (ข) คำนวณหาค่า R_S ที่ใช้ในวงจร
- (ค) คำนวณหาค่า $R_{L(min)}$ ที่ซีเนอร์ไดโอดยังคงรักษาระดับแรงดัน

วิธีทำ (ก) ขณะที่ซีเนอร์ไดโอดมีกระแสไหลเท่ากับ I_{ZK} แรงดันเอาต์พุตเท่ากับ

$$\begin{aligned} V_{OUT} &= V_Z - \Delta I_Z R_Z = V_Z - (I_Z - I_{ZK}) R_Z \\ &= 15\text{ V} - (66.7\text{ mA} - 17\text{ mA}) \times 14\ \Omega \\ &= 15.7\text{ V} \end{aligned} \quad (2.38)$$

กำลังสูญเสียสูงสุดของซีเนอร์ไดโอดเท่ากับ 1 W ซีเนอร์ไดโอดมีกระแส I_{ZM} ไหลเท่ากับ

$$I_{ZM} = \frac{P_{D(max)}}{V_Z} = \frac{1\text{ W}}{15\text{ V}} = 66.7\text{ mA} \quad (2.39)$$

แรงดันเอาต์พุตเท่ากับ

$$\begin{aligned} V_{OUT} &= V_Z - \Delta I_Z R_Z = V_Z - (I_{ZM} - I_Z) R_Z \\ &= 15\text{ V} - (17\text{ mA} - 0.25\text{ mA}) \times 14\ \Omega \\ &= 14.76\text{ V} \end{aligned} \quad (2.40)$$

(ข) คำนวณหาค่า R_S ขณะที่ซีเนอร์ไดโอดมีกระแสไหลมากที่สุด และวงจรไม่ได้ต่อโหลด

$$R_S = \frac{V_S - V_{OUT}}{I_{ZK}} = \frac{24V - 15.7V}{66.7mA} = 124\Omega \quad (2.41)$$

$$R_S = 130 \Omega$$

(ค) ขณะที่ $R_{L(min)}$ กระแส I_L จะไหลสูงสุด กระแส I_Z ที่น้อยสุด $I_{ZK} = 0.25 \text{ mA}$

$$I_S = \frac{V_S - V_{OUT}}{R_S} = \frac{24V - 14.76V}{130\Omega} = 71mA \quad (2.42)$$

$$\begin{aligned} I_L &= I_S - I_{ZK} = 71 \text{ mA} - 0.25 \text{ mA} \\ &= 70.75 \text{ mA} \end{aligned}$$

$$R_{L(min)} = \frac{V_{OUT}}{I_L} = \frac{14.76V}{70.75mA} = 209\Omega \quad (2.43)$$

2.4 วงจรรักษาระดับแรงดันกรณีแหล่งจ่ายแรงดันปรับค่าได้

ภาพที่ 2.11 แสดงวงจรรักษาระดับแรงดันกรณีค่าความต้านทาน R_L คงที่ และสามารถปรับแรงดัน V_S ได้ การออกแบบวงจรสามารถทำได้ด้วยการหาค่าแรงดัน V_Z เท่ากับ

$$V_Z = V_L = \frac{R_L V_S}{R_S + R_L} \quad (2.44)$$

แรงดัน V_L หาได้จากสมการ

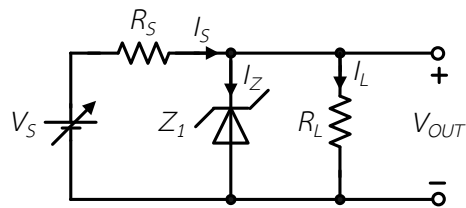
$$V_{S(min)} = \frac{(R_S + R_L)V_Z}{R_L} \quad (2.45)$$

กระแสที่ไหลผ่านซีเนอร์ไดโอดมากที่สุด $I_{S(max)}$ เขียนได้ว่า

$$I_{S(max)} = I_{ZM} + I_L \quad (2.46)$$

แทนค่า $V_{RS(max)} = I_{S(max)} \times R_S$ แรงดัน $V_{S(max)}$ มีค่าเท่ากับ

$$V_{S(max)} = V_{RS(max)} + V_Z \quad (2.47)$$



ภาพที่ 2.11 วงจรรักษาระดับแรงดันแบบปรับค่าแรงดัน V_S

ตัวอย่างที่ 2.9 กำหนดให้ซีเนอร์ไดโอด เบอร์ 1N4740A มี $V_Z = 10 \text{ V}$ $I_{ZT} = 25 \text{ mA}$ $I_{ZK} = 0.25 \text{ mA}$ และ $R_Z = 7 \text{ } \Omega$ ทำการหาค่า $V_{S(max)}$ และ $V_{S(min)}$ ของวงจรซีเนอร์ในภาพที่ 2.12 (ก)

วิธีทำ กระแสที่ไหลผ่านซีเนอร์ไดโอดน้อยสุดเท่ากับ I_{ZK} ดังนั้น $I_S = I_{ZK}$

$$\begin{aligned} V_{RS} &= I_{ZK} \times R_S = 0.25 \text{ mA} \times 220 \text{ } \Omega \\ &= 55 \text{ mV} \end{aligned} \quad (2.48)$$

เพราะฉะนั้น

$$\begin{aligned} V_{S(min)} &= V_R + V_Z = 55 \text{ mV} + 10 \text{ V} \\ &= 10.055 \text{ V} \end{aligned} \quad (2.49)$$

กระแสที่ไหลผ่านซีเนอร์ไดโอดมากที่สุดเท่ากับ

$$I_{ZM} = \frac{P_{D(max)}}{V_Z} = \frac{1 \text{ W}}{10 \text{ V}} = 100 \text{ mA} \quad (2.50)$$

$$\begin{aligned} V_{RS} &= I_{ZM} \times R_S = 100 \text{ mA} \times 220 \text{ } \Omega \\ &= 22 \text{ V} \end{aligned} \quad (2.51)$$

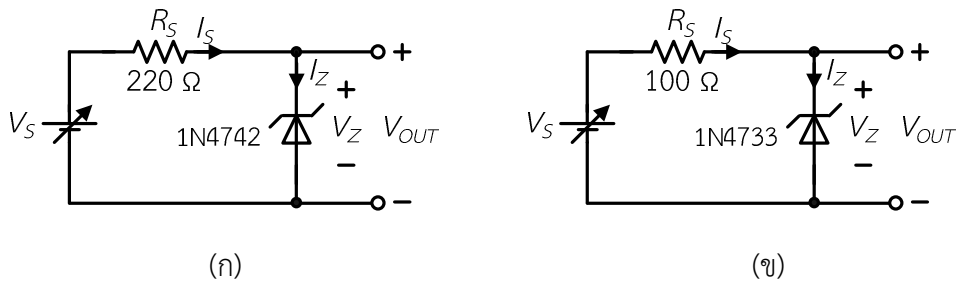
เพราะฉะนั้น

$$\begin{aligned} V_{S(max)} &= V_R + V_Z = 22 \text{ V} + 10 \text{ V} \\ &= 32 \text{ V} \end{aligned} \quad (2.52)$$

ตัวอย่างที่ 2.10 ทำการหาค่า $V_{S(max)}$ และ $V_{S(min)}$ ของวงจรซีเนอร์ในภาพที่ 2.12 (ข)

วิธีทำ ซีเนอร์ไดโอด เบอร์ 1N4733A มี $V_Z = 5.1 \text{ V}$ $I_{ZT} = 49 \text{ mA}$ $I_{ZK} = 1 \text{ mA}$ และ $R_Z = 7 \text{ } \Omega$ กระแส $I_{ZK} = 1 \text{ mA}$ แรงดันเอาต์พุตเท่ากับ

$$\begin{aligned} V_{OUT} &= V_Z - \Delta V_Z = V_Z - (I_Z - I_{ZK})R_Z \\ &= 5.1 \text{ V} - (49 \text{ mA} - 1 \text{ mA}) \times 7 \text{ } \Omega \\ &= 4.76 \text{ V} \end{aligned} \quad (2.53)$$



ภาพที่ 2.12 วงจรรักษาระดับแรงดันแบบปรับค่า V_S (ก) ซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 1N4742 และ (ข) ซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 1N4733

เพราะฉะนั้น

$$\begin{aligned}
 V_{Smin} &= (I_{ZK} \times R_S) + V_{OUT} & (2.54) \\
 &= (1 \text{ mA} \times 100 \ \Omega) + 4.76 \text{ V} \\
 &= 4.86 \text{ V}
 \end{aligned}$$

คำนวณหาค่ากระแส I_{ZM} ด้วยการสมมติให้กำลังสูญเสียสูงสุด $P_{D(max)} = 1 \text{ W}$ ด้วยเหตุนี้ กระแส I_{ZM} เท่ากับ

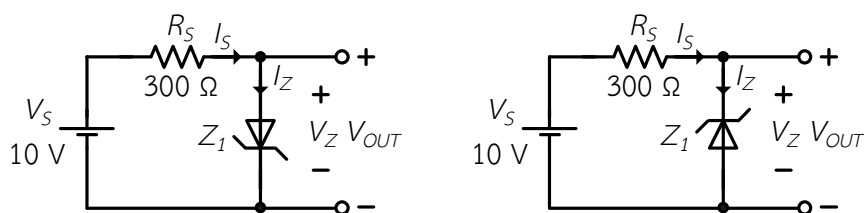
$$I_{ZM} = \frac{P_{D(max)}}{V_Z} = \frac{1 \text{ W}}{5.1 \text{ V}} = 196 \text{ mA} \quad (2.55)$$

แรงดันเอาต์พุตขณะที่ ซีเนอร์ไดโอดมีกระแสไหลสูงสุด

$$\begin{aligned}
 V_{OUT} &= V_Z + \Delta V_Z = V_Z + (I_{ZM} - I_Z)R_Z & (2.56) \\
 &= 5.1 \text{ V} + (196 \text{ mA} - 49 \text{ mA}) \times 7 \ \Omega \\
 &= 6.13 \text{ V}
 \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้น

$$\begin{aligned}
 V_{S(min)} &= (I_{ZK} \times R_S) + V_{OUT} & (2.57) \\
 &= (196 \text{ mA} \times 100 \ \Omega) + 6.13 \text{ V} \\
 &= 25.7 \text{ V}
 \end{aligned}$$



ภาพที่ 2.13 (ก) วงจรไบแอสตรงซีเนอร์ไดโอด และ (ข) วงจรไบแอสกลับซีเนอร์ไดโอด

2.6 บทสรุป

ซีเนอร์ไดโอด คืออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ และเท่ากับแรงดันซีเนอร์ การใช้งานซีเนอร์ไดโอดต้องต่อแรงดันไบแอสกลับให้กับซีเนอร์ไดโอด วงจรใช้งานซีเนอร์ไดโอดระดับประยุกต์มี 3 ลักษณะดังนี้ 1) วงจรซีเนอร์ไดโอดขณะแรงดันไบแอส และโหลดคงที่ 2) วงจรซีเนอร์ไดโอดขณะแรงดันไบแอสคงที่ และโหลดเปลี่ยนแปลงค่าได้ และ 3) วงจรซีเนอร์ไดโอดขณะแรงดันไบแอสเปลี่ยนแปลงค่า และโหลดคงที่ ซีเนอร์ไดโอดสามารถประยุกต์ใช้กับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้

แบบฝึกหัดท้ายบท

- กำหนดให้ซีเนอร์ไดโอด 1N4742A มี $V_Z = 12\text{ V}$ $I_{ZT} = 21\text{ mA}$ และ $R_Z = 9\ \Omega$ จงวิเคราะห์หาค่าต่าง เมื่อ $I_Z = 10\text{ mA}$ และ $I_Z = 30\text{ mA}$
- จงหาค่า R_S กำหนดให้ซีเนอร์ไดโอดในวงจรภาพที่ 2.6 เบอร์ 1N4737A $V_S = 24\text{ V}$ $I_R = 1\text{ mA}$ และ $R_L = 10\text{ k}\Omega$
- กำหนดให้ซีเนอร์ไดโอด เบอร์ 1N4753A มี $V_Z = 36\text{ V}$ $I_{ZT} = 7\text{ mA}$ $Z_Z = 50\ \Omega$ และ $P_{D(max)} = 1\text{ W}$ จงหาค่า V_R I_R I_L และ I_Z ของวงจรซีเนอร์ในภาพที่ 2.6
- กำหนดให้ซีเนอร์ไดโอด เบอร์ 1N4728A มี $V_Z = 3.3\text{ V}$ $I_{ZT} = 76\text{ mA}$ และ $I_{ZM} = 276\text{ mA}$ $R_S = 750\ \Omega$ และ $R_L = 1\text{ k}\Omega$ จงหาค่า V_S I_R I_L และ I_Z ของวงจรซีเนอร์ไดโอดในภาพที่ 2.6
- จงหาค่า I_{Lmax} และ I_{Lmin} ของวงจรซีเนอร์ไดโอดในภาพที่ 2.10 ที่ซีเนอร์ไดโอดยังรักษาระดับแรงดันได้ และหาค่า $R_{L(min)}$ กำหนดให้ซีเนอร์ไดโอด เบอร์ 1N4728A มี $V_Z = 3.3\text{ V}$ $I_{ZK} = 1\text{ mA}$ และ $I_{ZM} = 150\text{ mA}$ สมมติให้ซีเนอร์ไดโอดอุดมคติ
- จากตัวอย่างที่ 2.8 ถ้าเปลี่ยนซีเนอร์ไดโอดเป็นเบอร์ 1N4742A มี $V_Z = 12\text{ V}$ ให้วิเคราะห์หาค่าต่าง ๆ ตามตัวอย่างที่ 2.8
- จงหาค่าแรงดัน V_{Smax} และ V_{Smin} ของวงจรซีเนอร์ไดโอดในภาพที่ 2.12 กำหนดให้ซีเนอร์ไดโอดในวงจรเบอร์ 1N4737A $R_S = 750\ \Omega$ และ $R_L = 10\text{ k}\Omega$
- กำหนดให้ซีเนอร์ไดโอด เบอร์ 1N4728A มี $V_Z = 3.3\text{ V}$ $I_{ZT} = 76\text{ mA}$ และ $I_{ZM} = 276\text{ mA}$ จงหาค่า V_R I_R V_{Smax} และ V_{Smin} ของวงจรซีเนอร์ไดโอดในภาพที่ 2.13

