แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 2
การทดลองซีเนอร์ไดโอด และการประยุกต์ใช้งาน

หัวข้อเนื้อหา

1. ซีเนอร์ไดโอด
2. แหล่งจ่ายแรงดันและโหลดคงที่
3. แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ ขณะที่โหลดปรับค่าได้
4. ค่าความต้านทานโหลดคงที่ ขณะที่แหล่งจ่ายแรงดันปรับค่าได้
5. การทดลองหาคุณลักษณะซีเนอร์ไดโอด และการประยุกต์ใช้งาน
6. การทดลองการประยุกต์ใช้งานซีเนอร์ไดโอด

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. เพื่อทดลองหาคุณลักษณะการทำงานของซีเนอร์ไดโอดที่ต่อแบบไบอัสตรง และไบอัสกลับ
2. เพื่อศึกษาการนำซีเนอร์ไดโอดมาต่อทดลองในวงจรรักษาระดับแรงดัน
3. เพื่อศึกษาการนำซีเนอร์ไดโอดมาต่อทดลองในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับในระดับการประยุกต์

วิธีสอนและกิจกรรมการเรียนการสอน

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

สื่อการเรียนการสอน

1. เอกสารประกอบการสอนรายวิชาปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ 1
2. ใบประลอง
3. แบบฝึกหัดท้ายบทเรียน

การวัดผลและการประเมินผล

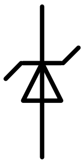
1. การเข้าเรียน
2. เอกสารปฏิบัติการ
3. สอบกลางภาค
4. สอบปลายภาค

บทที่ 2
การทดลองซีเนอร์ไดโอด และการประยุกต์ใช้งาน

2.1 ซีเนอร์ไดโอด (Zener Diode)

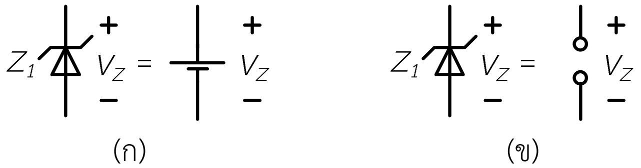
2.1.1 ทฤษฎีพื้นฐานของซีเนอร์ไดโอด

ซีเนอร์ไดโอด คือไดโอดชนิดหนึ่งที่ทำงานในช่วงแรงดันไบอัสกลับ โดยทำการรักษาระดับแรงดันซีเนอร์ในย่านที่ระดับแรงดันต่ำจนถึงแรงดันสูง รูปที่ 2.1 แสดงสัญลักษณ์ของซีเนอร์ไดโอด



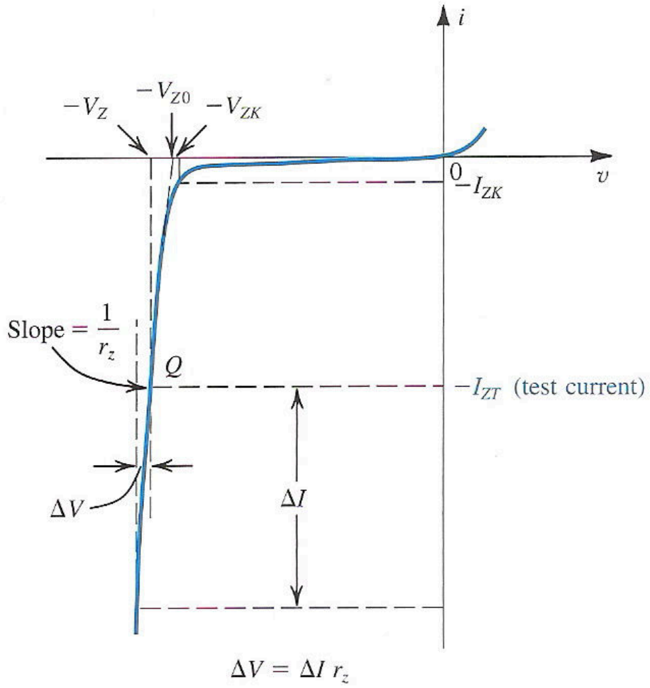
รูปที่ 2.1 สัญลักษณ์ซีเนอร์ไดโอด

รูปที่ 2.2 แสดงการทำงานของซีเนอร์ไดโอดแบบอุดมคติ รูปที่ 2.2 (ก) แสดงการทำงานของซีเนอร์ไดโอดเมื่อซีเนอร์ไดโอดต่อแรงดันไบอัสกลับที่สูงกว่าแรงดันซีเนอร์ต่ำสุด และมีกระแสซีเนอร์ที่มากกว่ากระแสซีเนอร์ต่ำสุด ซึ่งวงจรเทียบเคียงขณะที่ซีเนอร์ไดโอดทำการรักษาระดับแรงดันมีค่าเท่ากับ V_Z ด้วยการซึ่งเปรียบเสมือนมีแรงดันคงที่เท่ากับแรงดันซีเนอร์ ในทางกลับกัน ถ้าซีเนอร์ไดโอดถูกไบอัสกลับต่ำกว่าแรงดันต่ำสุดของซีเนอร์ไดโอด ซีเนอร์ไดโอดจะไม่สามารถรักษาระดับแรงดันได้ รูปที่ 2.2 (ข) แสดงการไบอัสกลับให้กับซีเนอร์ได้โอด ซึ่งแรงดันดังกล่าวไม่มากเพียงพอที่จะทำให้ซีเนอร์ไดโอดรักษาระดับแรงดันซีเนอร์ได้ แรงดันตกคร่อมซีเนอร์ไดโอดมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามกระแส I_Z



รูปที่ 2.2 วงจรเทียบเคียงการทำงานของไดโอด (ก) ซีเนอร์ไดโอดทำงาน (ข) ซีเนอร์ไดโอดไม่ทำงาน

รูปที่ 2.3 แสดงกราฟการทำงานของซีเนอร์ไดโอด ซึ่งสังเกตเห็นว่าซีเนอร์สามารถรักษาระดับแรงดันซีเนอร์ (V_Z) ให้คงที่ได้ เมื่อไบอัสให้ซีเนอร์ไดโอดมีกระแสไหลผ่านเท่ากับ I_{ZT} และสามารถทำงานในช่วงไบอัสตรงได้ แต่จะมีกระแสและแรงดันที่น้อยกว่าไดโอดทั่วไป กระแสซีเนอร์ไดโอดถูกจำกัดด้วย



รูปที่ 2.3 กราฟคุณลักษณะของซีเนอร์ไดโอด (Adel S. Sedra and Kenneth C. Smith)

กระแสซีเนอร์ที่สามารถไหลได้ต่ำสุด (Knee Current: I_{ZK}) และกระแสซีเนอร์ที่สามารถไหลได้สูงสุด (I_{ZM}) ส่วนที่สำคัญอีกอย่างของซีเนอร์ไดโอดคือกำลังที่ซีเนอร์ไดโอดสามารถทนได้ หาได้จากสมการ

$$P_D = V_Z I_Z \tag{2.1}$$

กระแสซีเนอร์สูงสุดนั้นทำให้เกิดกำลังที่ซีเนอร์สูงสุดจากสมการ

$$P_{DM} = V_Z I_{ZM} \tag{2.2}$$

การประยุกต์ใช้งานซีเนอร์ไดโอดนั้น ซีเนอร์ไดโอดสามารถทำงานได้ทั้งในไฟฟ้ากระแสตรง และกระแสสลับ โดยการทำงานในไฟฟ้ากระแสตรงนั้นสามารถแบ่งการทำงานออกเป็น 3 แบบ

- แหล่งจ่ายแรงดันและโหลดคงที่
- แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ ขณะที่โหลดปรับค่าได้
- แหล่งจ่ายแรงดันปรับค่าได้ ขณะที่โหลดคงที่

ตัวอย่างที่ 2.1 กำหนดให้ซีเนอร์ไดโอด เบอร์ 1N4737A มี V_Z = 7.5 V I_{ZT} = 34 mA และ I_{ZM} = 221 mA ทำการหาค่า P_{ZM} และ R_Z

วิธีทำ ค่ากำลังไฟฟ้าของซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 1N4737A สูงสุดเท่ากับ

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

$$= 7.5 \text{ V} \times 221 \text{ mA} \tag{2.4}$$

$$= 1.657 \text{ W}$$

ค่าความต้านทานภายในซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 1N4737A เท่ากับ

$$R_Z = V_Z / I_{ZM} \tag{2.5}$$

$$= 7.5 \text{ V} / 34 \text{ mA} \tag{2.6}$$

$$= 220.56\ \Omega$$

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

วิธีทำ ค่ากำลังไฟฟ้าของซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 1N4728A สูงสุดเท่ากับ

$$P_{ZM} = V_Z \times I_{ZM} \tag{2.7}$$

$$= 3.3 \text{ V} \times 276 \text{ mA} \tag{2.8}$$

$$= 0.91 \text{ W}$$

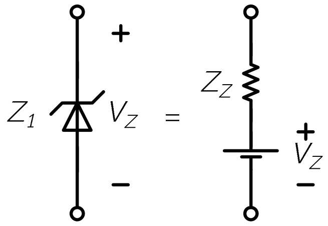
ค่าความต้านทานภายในซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 1N428A เท่ากับ

$$R_Z = V_Z / I_{ZM} \tag{2.9}$$

$$= 3.3 \text{ V} / 76 \text{ mA} \tag{2.10}$$

$$= 43.42\ \Omega$$

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



รูปที่ 2.4 วงจรเทียบเคียงซีเนอร์ไดโอด

วิธีทำ ขณะที่ซีเนอร์ไดโอดมีกระแสไหลผ่านเท่ากับ 50 mA ซีเนอร์ไดโอดมีกระแสเพิ่มขึ้น 13 mA กล่าวคือ ΔI_Z = 13 mA ΔV_Z มีค่าเท่ากับ

$$\Delta V_Z = \Delta I_Z \times R_Z = 13 \text{ mA} \times 3.5\ \Omega = 45.5 \text{ mV} \tag{2.11}$$

เมื่อกระแสซีเนอร์ไดโอดเพิ่มขึ้นเท่ากับ 50 mA แรงดัน V_Z เพิ่มขึ้นเท่ากับ

$$V_Z = V_{ZT} + \Delta V_Z = 6.8 \text{ V} + 45.5 \text{ mV} = 6.85 \text{ V} \tag{2.12}$$

ขณะที่ซีเนอร์ไดโอดมีกระแสไหลผ่านเท่ากับ 25 mA ซีเนอร์ไดโอดมีกระแสลดลง 12 mA กล่าวคือ ΔI_Z = -12 mA ΔV_Z มีค่าเท่ากับ

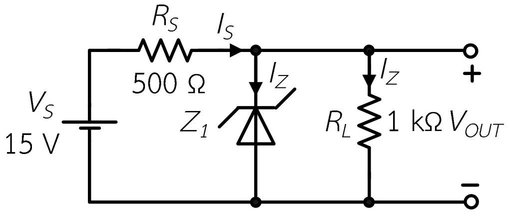
$$\Delta V_Z = \Delta I_Z \times R_Z = -12 \text{ mA} \times 3.5\ \Omega = -42 \text{ mV} \tag{2.13}$$

เมื่อกระแสซีเนอร์ไดโอดลดลงเท่ากับ 25 mA แรงดัน V_Z ลดลงเท่ากับ

$$V_Z = V_{ZT} + \Delta V_Z = 6.8 \text{ V} - 42 \text{ mV} = 6.76 \text{ V} \tag{2.14}$$

ตัวอย่างที่ 2.4 กำหนดให้ซีเนอร์ไดโอด เบอร์ 1N4733A มี V_Z = 5.1 V I_{ZT} = 49 mA R_Z = 7 Ω และ $P_{D(max)}$ = 1 W จงหาค่า V_{RS} I_{RS} และ I_L ของวงจรซีเนอร์ในรูปที่ 2.6

วิธีทำ เขียนวงจรเทียบเคียงวงจรรักษาระดับแรงดันด้วยซีเนอร์ไดโอดได้ดังที่แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 วงจรรักษาระดับแรงดันด้วยซีเนอร์ไดโอด

การวิเคราะห์หากระแส I_Z ที่ไหลผ่านใช้วิธี

$$V_{OUT} = V_Z - \Delta I_Z \times R_Z = V_Z - (I_Z - I_{ZK})R_Z \quad (2.15)$$

$$= 5.1\ \text{V} - (49\ \text{mA} - 1\ \text{mA}) \times 7\ \Omega \quad (2.16)$$

$$= 4.76\ \text{V}$$

หาค่า V_{RS} เท่ากับ

$$V_{RS} = V_S - V_{OUT} = 15\ V - 4.76\ \text{V} \quad (2.17)$$

$$= 10.24\ \text{V}$$

หาค่า I_{RS} เท่ากับ

$$I_{RS} = \frac{V_S - V_{OUT}}{R_S} = \frac{15V - 4.76V}{500\Omega} \quad (2.18)$$

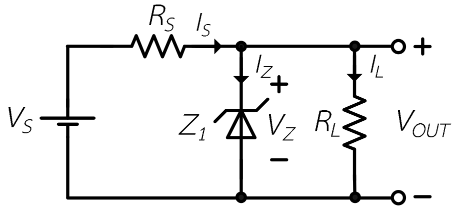
$$= 20.48\ \text{mA}$$

หาค่า I_L เท่ากับ

$$I_L = \frac{V_{OUT}}{R_L} = \frac{4.76V}{1k\Omega} = 4.76mA \quad (2.19)$$

2.2 แหล่งจ่ายแรงดันและโหลดคงที่

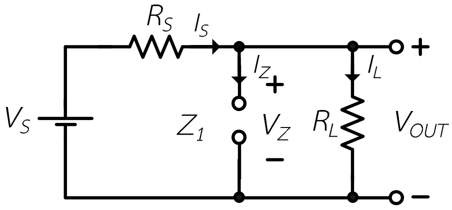
การประยุกต์ใช้ซีเนอร์ไดโอดเพื่อรักษาระดับแรงดันสามารถต่อวงจรอย่างง่ายในรูปที่ 2.5 เป็นการป้อนแรงดันคงที่และต่อกับโหลดซึ่งแทนด้วยตัวต้านทาน



รูปที่ 2.6 วงจรรักษาระดับแรงดันด้วยซีเนอร์ไดโอด

จากตัวอย่างที่ 2.3 และ 2.4 เราสามารถพิจารณาซีเนอร์ไดโอดลักษณะอุดมคติได้ เนื่องจากค่าความต้านทานภายในซีเนอร์ไดโอดมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความต้านทาน R_S และ R_L การพิจารณาว่าซีเนอร์ไดโอดทำงานหรือไม่สามารถตรวจสอบได้ดังนี้

2.2.1 หาค่าแรงดันที่โหลดขณะไม่มีซีเนอร์ไดโอดในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วงจรเทียบเคียงที่ตรวจสอบซีเนอร์ไดโอด

คำนวณหาแรงดันขณะไม่มีซีเนอร์ไดโอดจากสมการ 2.1

$$V_{OUT} = V_L = \frac{R_L V_S}{R_S + R_L} \qquad (2.20)$$

2.2.2 การหาค่าแรงดัน และกระแสในวงจรซีเนอร์ไดโอด

If $V \geq V_Z$ Zener Diode “on”

If $V < V_Z$ Zener Diode “off”

เมื่อซีเนอร์ไดโอดนำกระแสใน และรักษาระดับแรงดันแล้ว แรงดันที่เอาต์พุตเท่ากับแรงดันซีเนอร์ดังสมการ

$$V_{OUT} = V_Z \qquad (2.21)$$

กระแสที่ไหลผ่านซีเนอร์ไดโอดสามารถหาจากสมการ

$$I_Z = I_S - I_L \qquad (2.22)$$

โดยที่กระแสที่ไหลผ่านโหลดหาได้จากสมการ

$$I_L = \frac{V_{OUT}}{R_L} \qquad (2.23)$$

และกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานกำจัดกระแสนั้นหาได้จากสมการ

$$I_S = \frac{V_R}{R_S} = \frac{V_S - V_Z}{R_S} \qquad (2.24)$$

การออกแบบซีเนอร์ไดโอดต้องคำนึงถึงกำลังที่ตัวซีเนอร์ไดโอดสามารถทนได้ โดยกำลังที่ซีเนอร์ไดโอดสามารถทนได้นั้นสามารถหาจากสมการ

$$P_Z = V_Z I_Z \qquad (2.25)$$

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

วิธีทำ ซีเนอร์ไดโอดนำกระแสใน แรงดันที่เอาต์พุตเท่ากับ

$$V_{OUT} = V_Z = 5.1 \text{ V} \qquad (2.26)$$

กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานกำจัดกระแสนั้นหาได้จากสมการ

$$I_R = \frac{V_S - V_Z}{R_S} = \frac{15V - 5.1V}{500\Omega} \qquad (2.27)$$

$$= 19.8 \text{ mA}$$

และกระแสที่ไหลผ่านโหลดหาได้จากสมการ

$$I_L = \frac{V_{OUT}}{R_L} = \frac{5.1V}{1k\Omega} \qquad (2.28)$$

$$= 5.1 \text{ mA}$$

กระแสที่ไหลผ่านซีเนอร์ไดโอดสามารถหาจากสมการ

$$I_Z = I_S - I_L \qquad (2.29)$$

$$= 19.8 \text{ mA} - 5.1 \text{ mA} \qquad (2.30)$$

$$= 14.7 \text{ mA}$$

ตัวอย่างที่ 2.6 ทำการหาค่า V_R I_R I_L และ I_Z ของวงจรซีเนอร์ในตัวอย่างที่ 2.4 กำหนดให้พิจารณาซีเนอร์ไดโอดลักษณะอุดมคติ

วิธีทำ ซีเนอร์ไดโอดนำกระแสใน แรงดันที่เอาต์พุตเท่ากับ

$$V_{OUT} = V_Z = 36 \text{ V} \tag{2.31}$$

กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานกำจัดกระแสนั้นหาได้จากสมการ

$$I_R = \frac{V_S - V_Z}{R_S} = \frac{50V - 36V}{10k\Omega} \tag{2.32}$$

$$= 1.4 \text{ mA}$$

และกระแสที่ไหลผ่านโหลดหาได้จากสมการ

$$I_L = \frac{V_{OUT}}{R_L} = \frac{36V}{50k\Omega} \tag{2.33}$$

$$= 0.72 \text{ mA}$$

กระแสที่ไหลผ่านซีเนอร์ไดโอดสามารถหาจากสมการ

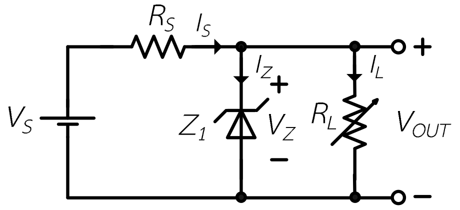
$$I_Z = I_S - I_L \tag{2.34}$$

$$= 1.4 \text{ mA} - 0.72 \text{ mA} \tag{2.35}$$

$$= 0.68 \text{ mA}$$

2.3 แหล่งจ่ายแรงดันคงที่ ขณะที่โหลดปรับค่าได้

รูปที่ 2.8 แสดงวงจรรักษาระดับแรงดัน (Voltage regulator) ใช้ค่าตัวต้านทาน R_S เป็นตัวป้องกันกระแสเกิน และซีเนอร์ไดโอดจะรักษาระดับแรงดันซีเนอร์ กำหนดให้ V_S คงที่และสามารถปรับ R_L ได้



รูปที่ 2.8 วงจรรักษาระดับแรงดันแบบปรับค่าความต้านทาน R_L

การหาออกแบบวงจรรักษาระดับแรงดันที่สามารถปรับค่าความต้านทานที่โหลดได้ สามารถต่อวงจรได้ดังรูปที่ 2.8 ในการออกแบบต้องเลือกค่า R_S ที่เหมาะสม เพื่อจำกัดกระแสไม่ให้ไหลไปที่โหลดหรือที่ตัวซีเนอร์ไดโอดมากเกินขีดจำกัดของตัวซีเนอร์ไดโอด และตัวต้านทาน จากวงจรในรูปที่ 2.8 เมื่อซีเนอร์ไดโอดทำงาน จากสมการที่ 2.20

$$V_{OUT} = V_L = \frac{R_L V_S}{R_S + R_L} \tag{2.36}$$

ค่าความต้านทานของโหลดที่ต่ำสุดที่ซีเนอร์ไดโอดยังสามารถทำงานมีค่าเท่ากับ

$$R_{L\min} = \frac{R_S V_Z}{V_S - V_Z} \tag{2.37}$$

นำค่าความต้านทาน R_{Lmin} หาค่ากระแส I_{Lmax} ได้จาก

$$I_{L\max} = \frac{V_L}{R_L} = \frac{V_Z}{R_{L\min}} \tag{2.38}$$

แรงดันที่ R_S หาได้จาก

$$V_R = V_S - V_Z \tag{2.39}$$

ดังนั้น

$$I_S = \frac{V_{RS}}{R_s} \tag{2.40}$$

กระแสที่ไหลผ่านซีเนอร์ไดโอดมากสุด I_{ZM} หาได้จาก

$$I_{ZM} = I_S - I_L \tag{2.41}$$

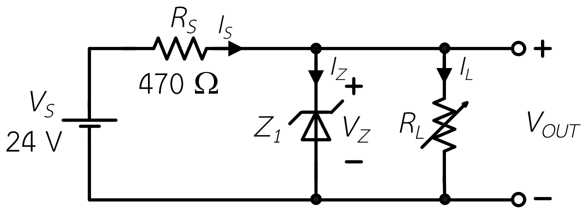
ดังนั้น กระแสที่ไหลผ่านค่าความต้านทานที่น้อยสุด I_{Lmin} จากสมการ

$$I_{Lmin} = I_S - I_{ZM} \tag{2.42}$$

ดังนั้น จากค่า I_{Lmin} สามารถนำมาหาค่า R_{Lmax} ได้จากสมการ

$$R_{L\max} = \frac{V_Z}{I_{L\min}} \tag{2.43}$$

ตัวอย่างที่ 2.7 กำหนดให้ซีเนอร์ไดโอดในวงจรรักษาระดับแรงดันรูปที่ 2.9 มี V_Z = 12 V I_{ZK} = 1 mA และ I_{ZM} = 50 mA พิจารณาซีเนอร์ไดโอดอุดมคติ ทำการหาค่า R_{Lmin} และ R_{Lmax}



รูปที่ 2.9 วงจรรักษาระดับแรงดันด้วยซีเนอร์ไดโอด

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

$$I_{Z(\max)} = I_T = \frac{V_S - V_Z}{R_S} = \frac{24V - 12V}{470\Omega} \tag{2.44}$$

ขณะทีกระแส I_L สูงสุดได้ เมื่อกระแสไหลผ่านซีเนอร์ไดโอดน้อยสุดเท่ากับ I_{ZK} ดังนั้น กระแสที่ไหลผ่านค่าความต้านทานที่มากสุด $I_{L(max)}$ เท่ากับ

$$I_{L(max)} = I_S - I_{ZK} = 25.5 \text{ mA} - 1 \text{ mA} \tag{2.45}$$

$$= 24.5 \text{ mA}$$

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

$$R_{L(\min)} = \frac{V_Z}{I_{L(\max)}} = \frac{12V}{24.5mA} \tag{2.46}$$

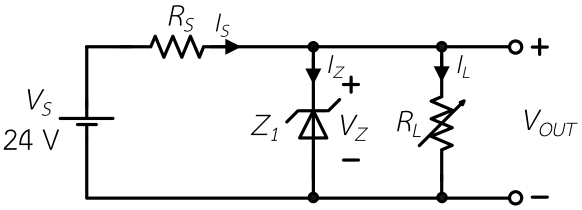
$$= 490 \ \Omega$$

ตัวอย่างที่ 2.8 วงจรซีเนอร์ในรูปที่ 2.10 อุปกรณ์ซีเนอร์ไดโอด Z_1 เบอร์ 1N4744A มี V_Z = 15 V I_{ZT} = 17 mA I_{ZK} = 0.25 mA และ R_Z = 14 Ω ทำการหาค่าต่อไปนี้

(ก) คำนวณหาค่าแรงดันเอาต์พุต V_{OUT} ณ I_{ZK} และ I_{ZM}

(ข) คำนวณหาค่า R ที่ใช้ในวงจร

(ค) คำนวณหาค่า $R_{L(min)}$ ที่ซีเนอร์ไดโอดยังคงรักษาระดับแรงดัน



รูปที่ 2.10 วงจรรักษาระดับแรงดันด้วยซีเนอร์ไดโอด

(ก) ขณะที่ซีเนอร์ไดโอดมีกระแสไหลเท่ากับ I_{ZK} แรงดันเอาต์พุตเท่ากับ

$$V_{OUT} = V_Z - \Delta I_Z R_Z = V_Z - (I_Z - I_{ZK})R_Z \tag{2.47}$$

$$= 15 \text{ V} - (66.7 \text{ mA} - 17 \text{ mA}) \times 14\ \Omega \tag{2.48}$$

$$= 15.7 \text{ V}$$

กำลังสูญเสียสูงสุดของซีเนอร์ไดโอดเท่ากับ 1 W ซีเนอร์ไดโอดมีกระแส I_{ZM} ไหลเท่ากับ

$$I_{ZM} = \frac{P_{D(\max)}}{V_Z} = \frac{1W}{15V} = 66.7mA \tag{2.49}$$

แรงดันเอาต์พุตเท่ากับ

$$V_{OUT} = V_Z - \Delta I_Z R_Z = V_Z - (I_{ZM} - I_Z)R_Z \tag{2.50}$$

$$= 15 \text{ V} - (17 \text{ mA} - 0.25 \text{ mA}) \times 14\ \Omega \tag{2.51}$$

$$= 14.76 \text{ V}$$

(ข) คำนวณหาค่า *R* ขณะที่ซีเนอร์ไดโอดมีกระแสไหลมากที่สุด และวงจรไม่ได้ต่อโหลด

$$R_S = \frac{V_S - V_{OUT}}{I_{ZK}} = \frac{24V - 15.7V}{66.7mA} = 124\Omega \qquad (2.52)$$

R_S = 130 Ω

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

$$I_T = \frac{V_S - V_{OUT}}{R_S} = \frac{24V - 14.76V}{130\Omega} = 71mA \qquad (2.53)$$

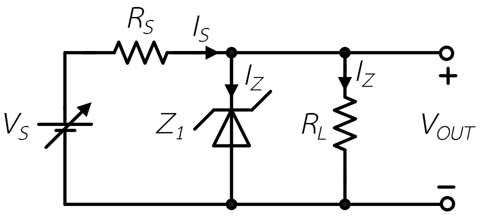
$$I_L = I_T - I_{ZK} = 71 \text{ mA} - 0.25 \text{ mA} \qquad (2.54)$$

$$= 70.75 \text{ mA}$$

$$R_{L(\min)} = \frac{V_{OUT}}{I_L} = \frac{14.76V}{70.75mA} = 209\Omega \qquad (2.55)$$

2.4 ค่าความต้านทานโหลดคงที่ ขณะที่แหล่งจ่ายแรงดันปรับค่าได้

รูปที่ 2.11 แสดงวงจรรักษาระดับแรงดันแบบค่าความต้านทาน R_L คงที่และสามารถปรับ V_S ได้



รูปที่ 2.11 วงจรรักษาระดับแรงดันแบบปรับค่าความต้านทาน R_L

จากสมการที่ 2.20

$$V_Z = V_L = \frac{R_L V_S}{R_S + R_L} \qquad (2.56)$$

แรงดัน V_L หาได้จากสมการ

$$V_S = \frac{\left(R + R_L\right)V_Z}{R_L} \tag{2.57}$$

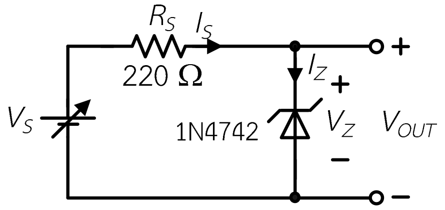
กระแสที่ไหลผ่านซีเนอร์ไดโอดมากสุด $I_{R,max}$ หาได้จาก

$$I_{R,max} = I_{ZM} + I_L \tag{2.58}$$

แทนค่า $V_{R,max} = I_{R,max} \times R$ แรงดัน $V_{S,max}$ มีค่าเท่ากับ

$$V_{S,max} = V_{R,max} + V_Z \tag{2.59}$$

ตัวอย่างที่ 2.9 กำหนดให้ซีเนอร์ไดโอด เบอร์ 1N4742A มี V_Z = 10 V I_{ZT} = 25 mA I_{ZK} = 0.25 mA และ Z_Z = 7 W ทำการหาค่า V_{Smax} และ V_{Smin} ของวงจรซีเนอร์ในรูป 2.12



รูปที่ 2.12 วงจรรักษาระดับแรงดันด้วยซีเนอร์ไดโอด

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

$$V_{RS} = I_{ZK} \times R_S = 0.25 \text{ mA} \times 220\ \Omega \tag{2.60}$$

$$= 55 \text{ mV}$$

เพราะฉะนั้น

$$V_{Smin} = V_R + V_Z = 55 \text{ mV} + 10 \text{ V} \tag{2.61}$$

$$= 10.055 \text{ V}$$

กระแสที่ไหลผ่านซีเนอร์ไดโอดมากสุดเท่ากับ

$$I_{ZM} = \frac{P_{D(\max)}}{V_Z} = \frac{1W}{10V} = 100mA \qquad (2.62)$$

$$V_{RS} = I_{ZM} \times R_S = 100 \text{ mA} \times 220\ \Omega \qquad (2.63)$$

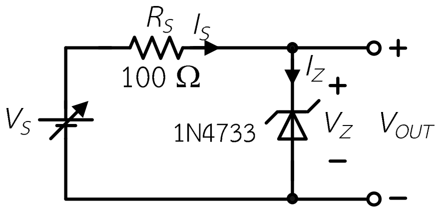
$$= 22 \text{ V}$$

เพราะฉะนั้น

$$V_{Smax} = V_R + V_Z = 22 \text{ V} + 10 \text{ V} \qquad (2.64)$$

$$= 32 \text{ V}$$

ตัวอย่างที่ 2.10 ทำการหาค่า V_{Smax} และ V_{Smin} ของวงจรซีเนอร์ในรูปที่ 2.13



รูปที่ 1.13 วงจรรักษาระดับแรงดันด้วยซีเนอร์ไดโอด

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

$$V_{OUT} = V_Z - \Delta V_Z = V_Z - (I_Z - I_{ZK})R_Z \qquad (2.65)$$

$$= 5.1 \text{ V} - (49 \text{ mA} - 1 \text{ mA}) \times 7\ \Omega \qquad (2.66)$$

$$= 4.76 \text{ V}$$

เพราะฉะนั้น

$$V_{Smin} = I_{ZK}R + V_{OUT} \qquad (2.67)$$

$$= (1\ mA \times 100\ \Omega) + 4.76\ V \qquad (2.68)$$

$$= 4.86\ V$$

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

$$I_{ZM} = \frac{P_{D(\max)}}{V_Z} = \frac{1W}{5.1V} = 196mA \qquad (2.69)$$

แรงดันเอาต์พุตขณะที่ ซีเนอร์ไดโอดมีกระแสไหลสูงสุด

$$V_{OUT} = V_Z + \Delta V_Z = V_Z + (I_{ZM} - I_Z)R_Z \qquad (2.70)$$

$$= 5.1\ V + (196\ mA - 49\ mA) \times 7\ \Omega \qquad (2.71)$$

$$= 6.13\ V$$

เพราะฉะนั้น

$$V_{Smin} = I_{ZK}R + V_{OUT} \qquad (2.72)$$

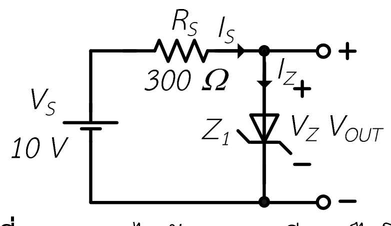
$$= (196\ mA \times 100\ \Omega) + 6.13\ V \qquad (2.73)$$

$$= 25.7\ V$$

2.5 การทดลองวงจรซีเนอร์ไดโอด และการประยุกต์ใช้งาน

2.5.1 การทำงานของซีเนอร์ไดโอด ซีเนอร์ไดโอดมีคุณลักษณะ V_Z = 7.5 V

2.5.1.1 ให้ต่อวงจรการไบอัสตรงของซีเนอร์ไดโอดดังรูปที่ 2.14 ทำการวัดแรงดัน V_Z และกระแส I_F



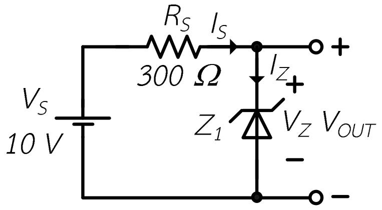
รูปที่ 2.14 การไบอัสตรงของซีเนอร์ไดโอด

V_Z = ... V I_F = ... A

ตารางที่ 2.1 ผลการทดลองการไบอัสตรง

V_S	0	0.4	0.6	0.8	1	2	3	4	6	8	10	12	V
I_D													A
V_D													V

2.5.1.2 ให้ต่อวงจรการไบอัสกลับของซีเนอร์ไดโอดดังรูปที่ 2.15 ทำการวัดแรงดัน V_Z และกระแส I_R



รูปที่ 2.15 การไบอัสกลับของซีเนอร์ไดโอด

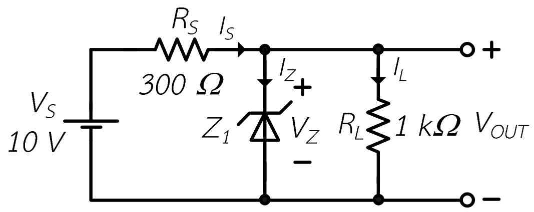
V_Z = ... V I_R = ... A

ตารางที่ 2.2 ผลการทดลองการไบอัสกลับ

V_S	0	0.4	0.6	0.8	1	2	3	4	6	8	10	12	V
I_D													A
V_D													V

2.5.1.3 ให้นำผลการทดลองในตารางที่ 2.1 และ 2.2 มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันในการไบอัสตรง และไบอัสกลับ

2.5.1.4 ให้ต่อวงจรการไบอัสกลับของซีเนอร์ไดโอดดังรูปที่ 2.16 ทำการวัดแรงดัน V_Z และกระแส I_R



รูปที่ 2.16 วงจรรักษาระดับแรงดันด้วยซีเนอร์ไดโอด

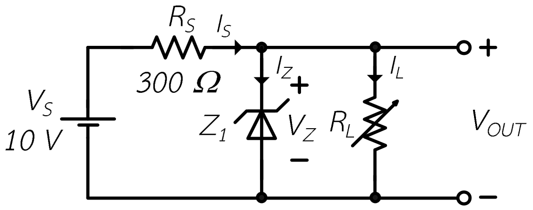
V_Z = ... V I_R = ... A I_Z = ... A

2.5.1.5 สรุปผลการทดลอง

....
....
....

2.5.2 การรักษาระดับแรงดัน (Voltage Regulator)

2.5.2.1 ให้ต่อวงจรซีเนอร์ไดโอดดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 วงจรรักษาระดับแรงดัน

2.5.2.2 ให้คำนวณหาค่าความต้านทาน R_{Lmin} และ R_{Lmax}

R_{Lmin} = ... R_{Lmax} = ...

2.5.2.3 ทำการปรับค่าความต้านทานที่ R_{Lmin} และ R_{Lmax} ตามข้อ 2.5.2.2 จากนั้นให้วัดค่า I_S, I_Z, I_L และ V_O

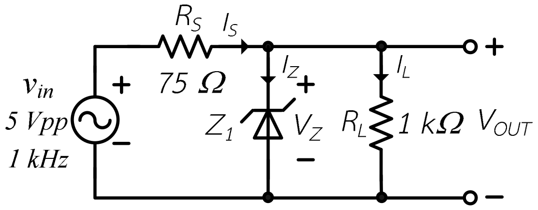
เมื่อปรับ R_L เป็น R_{Lmin}	เมื่อปรับ R_L เป็น R_{Lmax}
I_S = ...	I_S = ...
I_Z = ...	I_Z = ...
I_L = ...	I_L = ...
V_{OUT} = ...	V_{OUT} = ...

2.5.2.4 สรุปผลการทดลอง

....
....
....

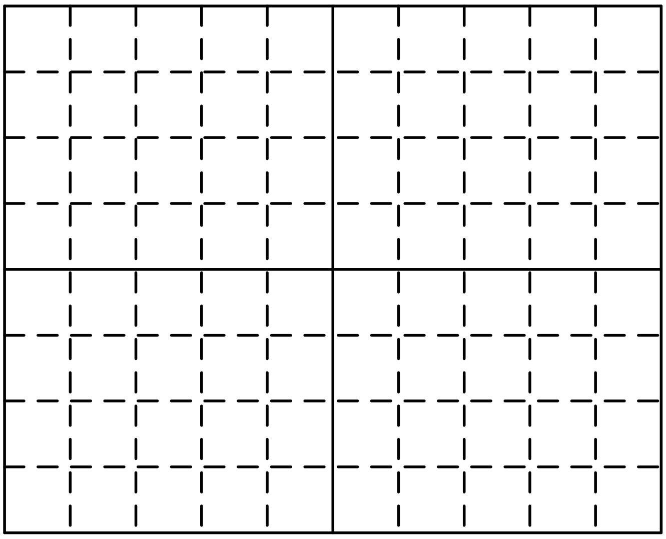
2.5.3 วงจรจำกัดแรงดันด้วยซีเนอร์ไดโอด (Zener Limiters)

2.5.3.1 ให้ต่อวงจรซีเนอร์ไดโอดดังรูปที่ 2.18 ซีเนอร์ไดโอด 1N4728 V_Z = 3.3 V ป้อนสัญญาณอินพุต Sine wave 5 V_{pp} ความถี่ 1 kHz



รูปที่ 2.18 วงจรจำกัดแรงดันด้วยซีเนอร์ไดโอด

2.5.3.2 ให้ใช้ออสซิลโลสโคปวัดแรงดันที่เอาต์พุตในวงจรจำกัดแรงดันด้วยซีเนอร์ไดโอดเทียบกับอินพุต และวาดภาพสัญญาณที่ได้จากการทดลองในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 สัญญาณเอาต์พุตเทียบกับอินพุต

2.5.3.3 สรุปผลการทดลอง

....

....

....

2.5.4 สรุปผลการทดลองทั้งหมด

....

....

....

....

2.6 บทสรุป

ซีเนอร์ไดโอด คืออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ และเท่ากับแรงดันซีเนอร์ การใช้งานซีเนอร์ไดโอดต้องต่อแรงดันไบอัสกลับให้กับซีเนอร์ไดโอด วงจรใช้งานซีเนอร์ไดโอดระดับประยุกต์มี 3 ลักษณะดังนี้ 1. วงจรซีเนอร์ไดโอดขณะแรงดันไบอัส และโหลดคงที่ 2. วงจรซีเนอร์ไดโอดขณะแรงดันไบอัสคงที่ และโหลดเปลี่ยนแปลงค่าได้ และ 3. วงจรซีเนอร์ไดโอดขณะแรงดันไบอัสเปลี่ยนแปลงค่า และโหลดคงที่ ซีเนอร์ไดโอดสามารถประยุกต์ใช้กับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้ ผลการทดลองวัดคุณลักษณะซีเนอร์ไดโอดแสดงเป็นกราฟผลการทดลองที่สอดคล้องกับทฤษฎี และผลการทดลองวงจรซีเนอร์ไดโอดมีความสอดคล้องกับทฤษฎี การคำนวณค่าต่าง ๆ ด้วยวิธีการประมาณค่าส่งให้ผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย

คำถามหลังการทดลอง

1. ให้อธิบายการทำงานของซีเนอร์ไดโอดที่สังเกตได้จากการทดลอง
2. ทำไมแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน R_L เท่ากับแรงดันของซีเนอร์ไดโอด
3. ให้อธิบายการทำงานของซีเนอร์ไดโอดที่สังเกตได้จากการทดลอง
4. ค่าแรงดันและกระแสที่ตัวต้านทานปรับค่าได้เท่ากันหรือแตกต่างกันเท่าไร เพราะเหตุใด
5. ให้อธิบายการทำงานของซีเนอร์ไดโอดที่สังเกตได้จากการทดลอง
6. เพราะเหตุใด ค่าแรงดันที่ได้จึงมีค่าดังผลการทดลอง

แบบฝึกหัดท้ายบท

1. กำหนดให้ซีเนอร์ไดโอด 1N4742A มี V_Z = 12 V I_{ZT} = 21 mA และ R_Z = 9 Ω จงวิเคราะห์หาค่าต่าง เมื่อ I_Z = 10 mA และ I_Z = 30 mA

3. จงหาค่า R_S กำหนดให้ซีเนอร์ไดโอดในวงจรรูปที่ 2.7 เบอร์ 1N4737A V_S = 24 V I_R = 1 mA และ R_L = 10 kΩ

4. กำหนดให้ซีเนอร์ไดโอด เบอร์ 1N4753A มี V_Z = 36 V I_{ZT} = 7 mA Z_Z = 50 Ω และ $P_{D(max)}$ = 1 W จงหาค่า V_R I_R I_L และ I_Z ของวงจรซีเนอร์ในรูปที่ 2.6

5. กำหนดให้ซีเนอร์ไดโอด เบอร์ 1N4728A มี V_Z = 3.3 V I_{ZT} = 76 mA และ I_{ZM} = 276 mA R_S = 750 Ω และ R_L = 1 kΩ จงหาค่า V_S I_R I_L และ I_Z ของวงจรซีเนอร์ไดโอดในรูปที่ 2.6

6. จงหาค่า I_{Lmax} และ I_{Lmin} ของวงจรซีเนอร์ไดโอดในรูปที่ 2.10 ที่ซีเนอร์ไดโอดยังรักษาระดับแรงดันได้ และหาค่า $R_{L(min)}$ กำหนดให้ซีเนอร์ไดโอด เบอร์ 1N4728A มี V_Z = 3.3 V I_{ZK} = 1 mA และ I_{ZM} = 150 mA สมมุติให้ซีเนอร์ไดโอดอุดมคติ

7. จากตัวอย่างที่ 2.8 ถ้าเปลี่ยนซีเนอร์ไดโอดเป็นเบอร์ 1N4742A มี V_Z = 12 V ให้วิเคราะห์หาค่าต่าง ๆ ตามตัวอย่างที่ 2.8

8. จงหาค่าแรงดัน V_{Smax} และ V_{Smin} ของวงจรซีเนอร์ไดโอดในรูปที่ 2.12 กำหนดให้ซีเนอร์ไดโอดในวงจรเบอร์ 1N4737A R_S = 750 Ω และ R_L = 10 kΩ

9. กำหนดให้ซีเนอร์ไดโอด เบอร์ 1N4728A มี V_Z = 3.3 V I_{ZT} = 76 mA และ I_{ZM} = 276 mA จงหาค่า V_R I_R V_{Smax} และ V_{Smin} ของวงจรซีเนอร์ไดโอดในรูปที่ 2.13