

การทดลองที่ 2HB02 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันคงที่ (Regulated DC Power Supply)

1. บทนำ

การควบคุมแรงดันของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้มีค่าคงที่ตลอดเวลาเป็นสิ่งสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในวงจรไมโครโพรเซสเซอร์และวงจรถิจริตอลที่ต้องการความคงที่ของระดับแรงดัน มิฉะนั้นระดับลอจิกอาจไม่ถูกต้องและทำให้วงจรทำงานผิดพลาด

แหล่งจ่ายไฟตรงต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นแบตเตอรี่หรือแหล่งจ่ายไฟตรงที่ได้จากการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นแหล่งจ่ายไฟตรงที่ให้ค่าแรงดันไม่คงที่ เช่นเมื่อใช้แบตเตอรี่ไปนานๆ แรงดันของแบตเตอรี่ก็จะลดลง การมีวงจรควบคุมแรงดันให้คงที่จะช่วยให้แรงดันมีค่าคงที่ตลอดเวลา หรือถ้าเป็นวงจรแหล่งจ่ายไฟจากไฟฟ้ากระแสสลับ เมื่อผ่านวงจรเรียงกระแสและวงจรกรองกระแสแล้วก็อาจมีแรงดันกระเพื่อม (ripple voltage) หลงเหลืออยู่ซึ่งอาจเกิดปัญหาในการนำไปใช้งานได้ จึงต้องมีวงจรควบคุมแรงดันให้คงที่และลดแรงดันกระเพื่อมให้เหลือน้อยที่สุด วงจรควบคุมแรงดันคงที่นี้เรียกว่า วงจรเรกูเลเตอร์ (Voltage Regulator) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีวงจรควบคุมแรงดันคงที่เรียกว่า Regulated DC Power Supply

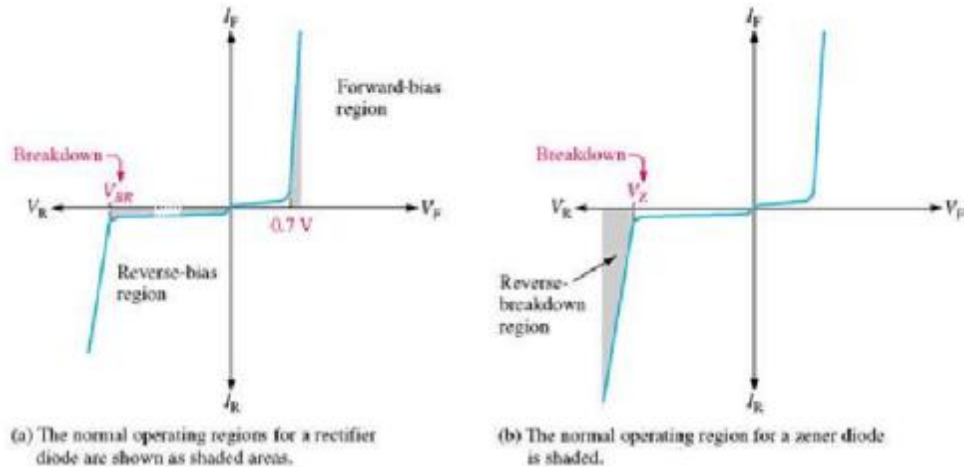
อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่เป็นหัวใจของการควบคุมแรงดันให้คงที่คือซีเนอร์ไดโอด (Zener Diode) ซึ่งจะได้อธิบายหลักการทำงานของไดโอดชนิดนี้ในหัวข้อถัดไป

1.1 ซีเนอร์ไดโอด

ซีเนอร์ไดโอด เป็นไดโอดชนิดพิเศษที่สร้างให้มีการทำงานแตกต่างจากไดโอดเรียงกระแสทั่วไป กล่าวคือเมื่อให้ไบอัสตรง (forward bias) กับซีเนอร์ไดโอด การทำงานจะเหมือนกับไดโอดปกติคือนำกระแสได้ และมีแรงดันคร่อมซีเนอร์ไดโอดเท่ากับ V_B แต่เมื่อซีเนอร์ไดโอดได้รับไบอัสกลับ (reverse bias) ถึงค่าแรงดันที่ออกแบบไว้ ซีเนอร์ไดโอดจะนำกระแสได้ และจะเกิดแรงดันคร่อมตัวเองเท่ากับค่าแรงดันที่กำหนดจากบริษัทผู้ผลิต ซึ่งในกระบวนการสร้างซีเนอร์ไดโอดจะกำหนดค่าแรงดันขึ้นเช่น 3.6V, 5.1V, 6V, 10V, 18V เป็นต้น รูปที่ 1 แสดงสัญลักษณ์ของซีเนอร์ไดโอด และรูปที่ 2 แสดงกราฟลักษณะสมบัติของซีเนอร์ไดโอด



รูปที่ 1 สัญลักษณ์ของซีเนอร์ไดโอด



รูปที่ 2 กราฟลักษณะสมบัติทางกระแสและแรงดันของซีเนอร์ไดโอด

1.2 การพังทลายของซีเนอร์ไดโอด (Zener Diode Breakdown)

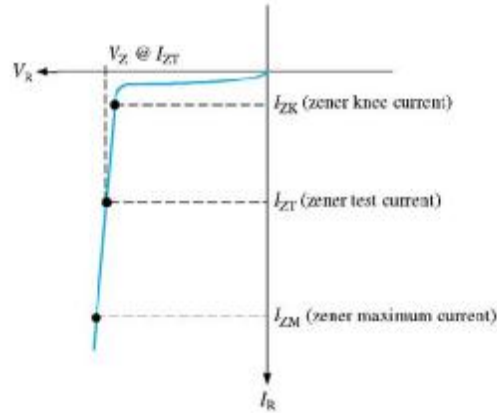
การพังทลายของซีเนอร์ไดโอดแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ

1. การพังทลายแบบอะวอลานช์ (Avalanche Breakdown)
2. การพังทลายแบบซีเนอร์ (Zener Breakdown)

การพังทลายแบบอะวอลานช์เกิดจากซีเนอร์ได้รับแรงดันไบอัสกลับสูงเกินไป ทำให้รอยต่อของซีเนอร์ทะลุและใช้งานไม่ได้ ส่วนการพังทลายแบบซีเนอร์เป็นการพังทลายที่เกิดขึ้นกับแรงดันไบอัสต่ำๆ ซึ่งเป็นช่วงการทำงานที่เป็นประโยชน์ของซีเนอร์ไดโอด โดยซีเนอร์จะพยายามรักษาระดับแรงดันนี้ไว้ให้คงที่ แรงดันนี้เรียกว่าแรงดันซีเนอร์ (Zener Voltage: V_Z) คุณสมบัติข้อนี้สามารถนำซีเนอร์ไดโอดไปสร้างเป็นวงจรควบคุมแรงดันไฟตรงจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้มีค่าแรงดันคงที่ ซีเนอร์ไดโอดที่มีใช้อยู่ในท้องตลาดมีขนาดแรงดันซีเนอร์ตั้งแต่ 1.8 ถึง 200 โวลต์ และสามารถทนกำลังได้ในช่วง 0.5 ถึง 1 วัตต์

1.3 คุณสมบัติของการพังทลาย (Breakdown Characteristics)

พิจารณาจากกราฟลักษณะสมบัติโดยเฉพาะการพังทลายของซีเนอร์ไดโอดเมื่อได้รับไบอัสกลับดังรูปที่ 3 เมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสกลับจนถึงค่าแรงดันซีเนอร์ (V_Z) จะเกิดกระแสไหลผ่านซีเนอร์มากขึ้น ที่จุดหักมุมของกราฟ (Knee Point) จะมีกระแสไหลผ่านซีเนอร์ไดโอดเท่ากับ I_{ZK} และถ้าซีเนอร์ไดโอดได้รับแรงดันสูงขึ้นอีก กระแสจะเพิ่มขึ้น แต่แรงดันซีเนอร์จะคงที่ แต่ถ้าเพิ่มกระแสเกินกว่าค่ากระแสซีเนอร์สูงสุด (I_{ZM}) แรงดันซีเนอร์จะไม่คงที่



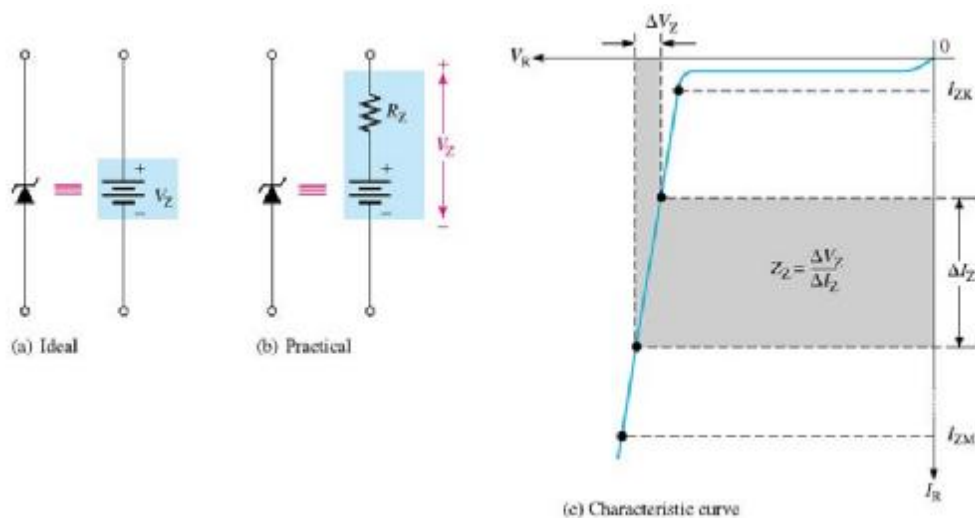
รูปที่ 3 กราฟแสดงลักษณะสมบัติของกระแส และแรงดันของซีเนอร์ไดโอดเมื่อได้รับไบอัสกลับ

ดังนั้น การนำซีเนอร์ไดโอดไปใช้ในการควบคุมให้แรงดันไฟฟ้าตรงคงที่โดยใช้ค่าแรงดันซีเนอร์นั้น จะต้องออกแบบวงจรควบคุมให้มีกระแสไหลผ่านซีเนอร์อยู่ในช่วง I_{ZK} ถึง I_{ZM} สำหรับกระแส I_{ZT} หมายถึง ค่ากระแสทดสอบที่แรงดันซีเนอร์ ซึ่งเป็นค่ากระแสที่พิกัดของแรงดันซีเนอร์ตามค่าที่ผู้ผลิตกำหนดไว้ในคู่มือ

1.4 วงจรสมมูลของซีเนอร์ไดโอด

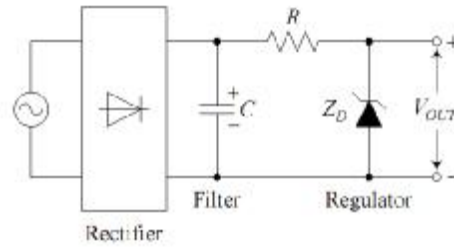
เนื่องจากซีเนอร์ไดโอดมีคุณสมบัติจ่ายแรงดันคงที่เมื่อได้รับไบอัสกลับนั้น ในทางอุดมคติซีเนอร์ไดโอดจึงมีวงจรเทียบเท่าหรือวงจรสมมูลเป็นแบตเตอรี่ที่มีขนาดแรงดันไฟตรงเท่ากับ V_Z โดยมีขั้วบวกของ V_Z อยู่ที่คาโธดและขั้วลบของ V_Z อยู่ที่แอนโอดดังรูปที่ 4(a) แต่ในทางปฏิบัติจะมีค่าความต้านทานภายในรอยต่อของซีเนอร์ไดโอด (R_Z) อยู่ด้วย ดังนั้นวงจรสมมูลของซีเนอร์ไดโอดในทางปฏิบัติจึงเป็นดังรูปที่ 4(b) ซึ่งค่าความต้านทาน R_Z นี้คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$R_Z = \frac{\Delta V_Z}{\Delta I_Z}$$



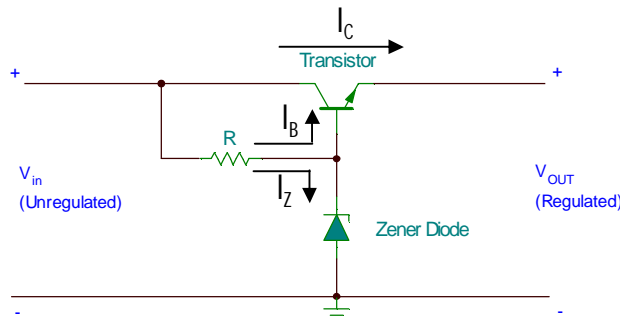
รูปที่ 4 วงจรสมมูลของซีเนอร์ไดโอด และการหาค่าความต้านทานภายในของซีเนอร์ไดโอด

ซีเนอร์ไดโอดถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะในวงจรรักษาแรงดันไฟตรงให้คงที่ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 วงจรควบคุมแรงดันคงที่โดยใช้ซีเนอร์ไดโอด

ข้อจำกัดประการหนึ่งของวงจรในรูปที่ 5 คือวงจรจะควบคุมแรงดันให้คงที่ได้เมื่อความต้องการกระแสของโหลดมีค่าคงที่ไปมาไม่เกินความสามารถในการทนกระแสของซีเนอร์ไดโอดเท่านั้น หากความต้องการกระแสของโหลดมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงที่กว้างกว่าที่ซีเนอร์ไดโอดจะทนได้ แรงดัน V_{OUT} จะไม่คงที่ นอกจากนี้กระแสที่ไหลผ่านซีเนอร์ไดโอดยังขึ้นกับแรงดันขาเข้าด้วย หากแรงดันขาเข้ามีค่าสูงขึ้นกระแสซีเนอร์ก็สูงขึ้นด้วย ถ้ามีค่าสูงเกินไปซีเนอร์ไดโอดก็อาจพังได้ ในทางปฏิบัติจะต้องใช้อุปกรณ์ขยายกระแสเช่น ทรานซิสเตอร์หรือมอสเฟตช่วยเพื่อลดการแกว่งของกระแสซีเนอร์ ให้วงจรสามารถจ่ายกระแสได้มากขึ้น และสามารถทนการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุตในช่วงที่กว้างขึ้นได้ รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างวงจรควบคุมแรงดันคงที่โดยใช้ซีเนอร์ไดโอดร่วมกับทรานซิสเตอร์



รูปที่ 6 วงจรควบคุมแรงดันคงที่โดยใช้ซีเนอร์ไดโอดร่วมกับทรานซิสเตอร์

จากวงจรในรูปที่ 6 สามารถอธิบายหลักการทำงานของวงจรได้ดังนี้ แรงดันจาก V_{IN} จะทำให้มีกระแสไหลผ่านตัวต้านทาน R ซึ่งจะไหลออกแล้วแยกออกเป็น 2 ทางคือ I_Z กับ I_B โดย I_Z เป็นกระแสที่ไหลผ่านซีเนอร์ไดโอดลงกราวนด์ และกระแส I_B ไหลเข้าขา Base ของทรานซิสเตอร์แล้วไหลผ่านขา Emitter ไปยังโหลดทางขั้วบวกของ V_{OUT}

เมื่อมีกระแส I_B ก็จะทำให้ทรานซิสเตอร์นำกระแส โดยจะมีกระแสไหลจากขา Collector ไปยังขา Emitter ซึ่งกระแสนี้มีค่าเท่ากับ I_C ซึ่งมีค่าเท่ากับ $b \cdot I_B$ กระแส I_C นี้เป็นกระแสที่โหลดจะได้รับ

เมื่อมีกระแส I_Z ก็จะทำให้มีแรงดันตกคร่อมซีเนอร์ไดโอด ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงดัน V_Z ของซีเนอร์ที่ออกแบบไว้ และในการทำงานของทรานซิสเตอร์จะมีแรงดันตกคร่อมระหว่างขา Base กับ Emitter (V_{BE}) อยู่

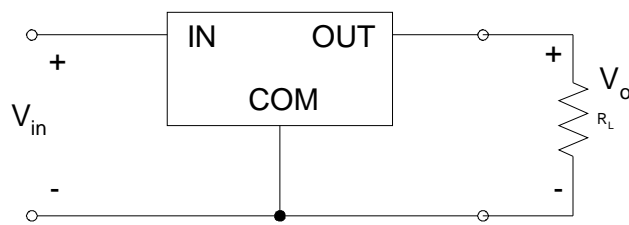
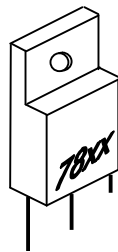
ประมาณ 0.6-0.7 โวลต์ (แรงดันที่ขา Base จะสูงกว่าที่ขา Emitter) ดังนั้นแรงดัน V_{OUT} จะมีค่าเท่ากับแรงดัน $V_Z - V_{BE}$

เมื่อโหลดต้องการกระแสมากขึ้น I_C จะต้องมากขึ้น ซึ่ง I_C จะมากขึ้นได้ก็ต่อเมื่อ I_B เพิ่มขึ้น ถ้า I_B เพิ่มขึ้น I_Z ก็จะลดลง แต่แรงดัน V_{OUT} ก็ยังคงมีค่าคงที่ตรงเท่าที่ซีเนอร์ไดโอดสามารถรักษาระดับแรงดันตกคร่อมตัวมันไว้ให้คงที่ได้ (นั่นคือเมื่อ $I_Z > 0$) และเมื่อโหลดต้องการกระแสน้อยลง I_B ก็จะลดลง และ I_Z จะเพิ่มขึ้น

การเปลี่ยนแปลงของแรงดัน V_{IN} ไม่มีผลมากนักต่อแรงดัน V_Z ทำให้ไม่มีผลต่อแรงดัน V_{OUT} ด้วย เพราะ V_{OUT} ขึ้นอยู่กับ V_Z

1.5 วงจรควบคุมแรงดันคงที่โดยไอซีสำเร็จรูป

เนื่องจากวงจรควบคุมแรงดันคงที่ที่มีความจำเป็นที่จะต้องใช้งานเกือบทุกประเภท ทำให้มีการผลิตไอซีสำหรับงานนี้โดยเฉพาะ ไอซีควบคุมแรงดันที่นิยมมากที่สุดคือไอซีในตระกูล 78XX ซึ่งมีระดับแรงดันให้เลือกใช้ตั้งแต่ 5 ถึง 24 โวลต์ โดยตัวเลข XX 2 ตัวหลัง จะเป็นแรงดันเอาต์พุต ไอซีตระกูลนี้เป็นไอซี 3 ขา บรรจุในตัวถังแบบ TO-220 ซึ่งสามารถยึดแผ่นระบายความร้อนได้ง่าย สามารถจ่ายกระแสได้ 1 แอมแปร์ รูปที่ 7 แสดงรูปร่างของไอซีและการต่อวงจรใช้งาน



รูปที่ 7 ไอซีตระกูล 78XX และการต่อวงจรใช้งาน

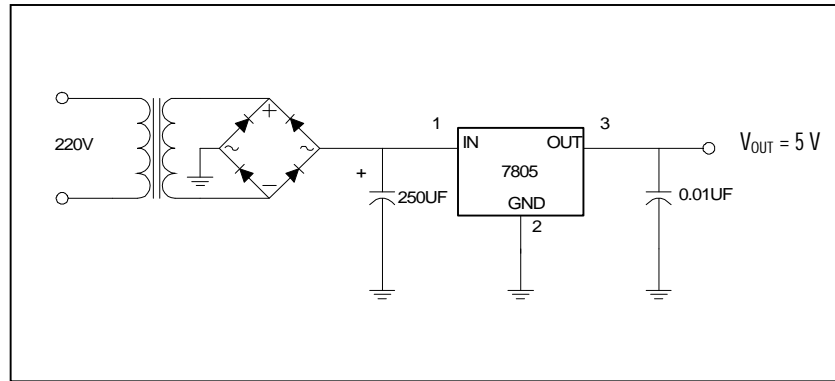
ตารางที่ 1 แสดงไอซีตระกูล 78XX เบอร์ต่างๆ ค่าแรงดันเอาต์พุตของแต่ละเบอร์ และค่าแรงดันอินพุตต่ำสุดที่ทำงานได้

ตารางที่ 1 ไอซีควบคุมแรงดันคงที่ตระกูล 78XX

หมายเลขไอซี	แรงดันเอาต์พุต (โวลต์)	แรงดันอินพุตต่ำสุด (โวลต์)
7805	5	7.3
7806	6	8.4
7808	8	10.5
7809	9	11.5
7812	12	14.6
7815	15	17.7
7818	18	20.8
7824	24	27.1

จากตารางที่ 1 เมื่อต้องการแรงดันใช้งานที่ 12 Volt จะต้องใช้ไอซีเบอร์ 7812 และจ่ายแรงดันที่ต่ำสุด 14.6 โวลต์ ซึ่งต้องมีกรอกแบบวงจรเรียงกระแส (Rectifier) และวงจรกรองกระแสที่ให้แรงดันเอาต์พุตต่ำสุดไม่น้อยกว่า 14.6 โวลต์ มาจ่ายให้กับไอซีนี้

รูปที่ 8 แสดงตัวอย่างวงจรที่ใช้ไอซีตระกูล 78XX



รูปที่ 8 แสดงการสร้างแหล่งจ่ายไฟตรงที่มีการควบคุมแรงดันจากไอซี 7805

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อให้เข้าใจถึงการทำงานของซีเนอร์ไดโอด
2. เพื่อให้เข้าใจถึงการควบคุมแรงดันคงที่โดยใช้ซีเนอร์ไดโอด
3. เพื่อให้เข้าใจการทำงานของวงจรควบคุมแรงดันคงที่ที่มีทรานซิสเตอร์ทำงานร่วมกับซีเนอร์ไดโอด

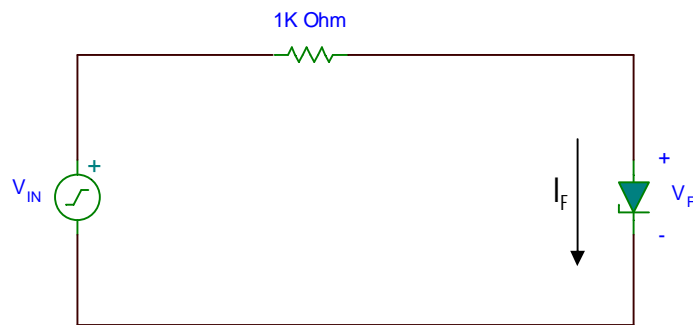
3. อุปกรณ์

- | | |
|--------------------------------------|-----------|
| 1. ซีเนอร์ไดโอด 3.6 V ½ วัตต์ | 1 ตัว |
| 2. ตัวต้านทาน 1k โอห์ม ¼ วัตต์ | 1 ตัว |
| 3. ตัวต้านทาน 200 โอห์ม ¼ วัตต์ | 1 ตัว |
| 4. คาปาซิเตอร์ 10µF/16V | 1 ตัว |
| 5. คาปาซิเตอร์ 100µF/25V | 1 ตัว |
| 6. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ | 1 เครื่อง |
| 7. ออสซิลโลสโคป | 1 เครื่อง |
| 8. แหล่งจ่ายไฟตรงปรับค่าได้ | 1 เครื่อง |
| 9. ชุดทดลองดิจิตอล | 1 ชุด |
| 10. เครื่อง PC ที่มีโปรแกรม Tina Pro | 1 ชุด |

4. วิธีการทดลอง

การทดลองที่ 1 ทดสอบคุณสมบัติซีเนอร์ไดโอด

- 1.1 ต่วงจรตามรูปที่ 9 บนบอร์ดทดลองดิจิทัลโดยป้อนแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงปรับค่าได้เข้าที่ V_{IN} ตั้งแรงดันให้มึค่า 0 โวลต์

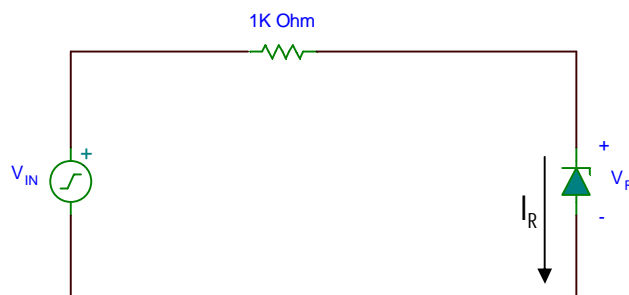


รูปที่ 9 วงจรไบอัสตรงซีเนอร์ไดโอด

- 1.2 ให้ใช้มัลติมิเตอร์วัดค่าแรงดันคร่อมซีเนอร์ไดโอด และวัดกระแสที่ไหลผ่านไดโอด (ตามทิศทางกระแสที่ระบุในวงจร) โดยปรับค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟตั้งแต่ 0-5 โวลต์ แล้วบันทึกผลที่ได้ลงในตารางต่อไปนี้ (การวัดกระแสจะต้องต่อมิเตอร์อนุกรมกับวงจร) บันทึกผลการทดลองในรูปตารางดังนี้

$V_{IN}(V)$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	2	3	4	5
$I_F(mA)$										
$V_F(V)$										

- 1.3 นำผลที่บันทึกไว้มาพล็อตเป็นกราฟ โดยให้แกนนอนเป็นแรงดันตกคร่อมซีเนอร์ไดโอด (V_F) และแกนตั้งเป็นกระแสที่ไหลผ่านซีเนอร์ไดโอด (I_F) พร้อมทั้งวิเคราะห์ผลการทดลอง
- 1.4 สลับขั้วซีเนอร์ไดโอดดังแสดงในรูปที่ 10 ปรับแรงดันไฟเข้าเป็น 0 โวลต์



รูปที่ 10 วงจรไบอัสย้อนกลับซีเนอร์ไดโอด

1.5 แล้วทำการวัดแรงดันคร่อมซีเนอร์ไดโอด (V_R) และวัดกระแสที่ไหลผ่านซีเนอร์ไดโอด (I_R) โดยปรับแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟจาก 0-20 โวลต์แล้วบันทึกผลลงในตารางต่อไปนี้

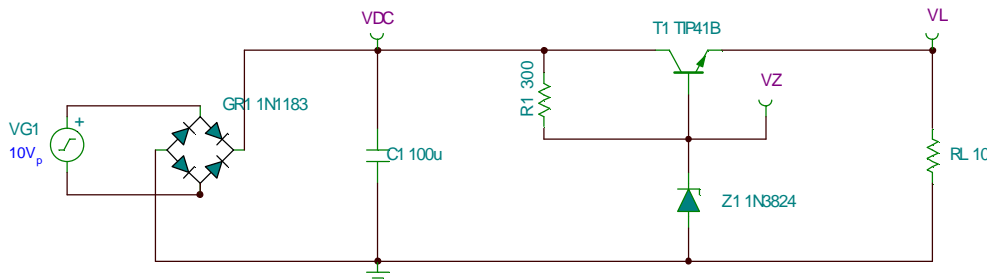
$V_{IN}(V)$	1	2	3	4	5	6	8	10	15	20
$I_R(mA)$										
$V_R(V)$										

1.6 นำผลที่บันทึกไว้มาพล็อตเป็นกราฟ โดยให้แกนนอนเป็นแรงดันตกคร่อมซีเนอร์ไดโอด (V_R) และแกนตั้งเป็นกระแสที่ไหลผ่านซีเนอร์ไดโอด (I_R) พร้อมทั้งวิเคราะห์ผลการทดลอง

Checkpoint 1: แสดงกราฟที่ได้จากการทดลองข้อ 1.3 และ 1.6

การทดลองที่ 2 วงจรควบคุมแรงดันคงที่ที่ใช้ซีเนอร์ไดโอดร่วมกับทรานซิสเตอร์

2.1 เปิดโปรแกรม Tina Pro แล้ว ต่อยังตามรูปที่ 11 โดยปรับ VG1 ให้มีแรงดัน DC เป็น 0 โวลต์ และปรับให้เป็น Sine Wave ที่มีขนาดความสูงเท่ากับ 10 โวลต์ และมีความถี่เท่ากับ 50 Hz และเลือกอุปกรณ์ต่างๆ ให้ตรงกับเบอร์ที่กำหนดไว้



รูปที่ 11 วงจรสำหรับการทดลองที่ 2

2.2 จำลองการทำงานของโปรแกรมโดยใช้คำสั่ง Analysis | Transient... และกำหนดให้ช่วงการจำลองอยู่ในช่วง 0-50ms

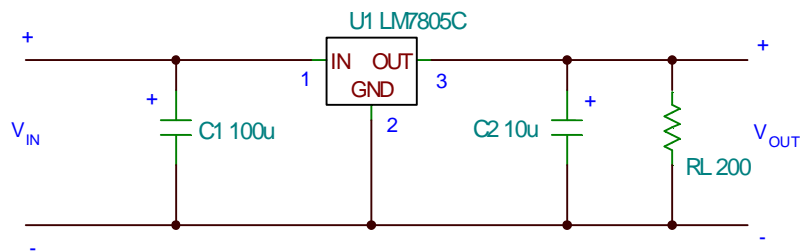
2.3 ในการจำลองแต่ละครั้งให้ใช้ค่า $C = 100\mu F, 500\mu F, 1000\mu F$ และ $RL = 10, 20, 30$ โอห์ม ซึ่งจะมีทั้งหมด 9 กรณี ในแต่ละกรณี ให้วัดค่าแรงดัน ripple ที่จุด VDC ค่าแรงดัน VZ (แรงดันคร่อมซีเนอร์ไดโอด) ค่าแรงดัน ripple ที่จุด VZ ค่าแรงดันที่ VL และค่าแรงดัน ripple ที่จุด VL โดยบันทึกผลลงในตาราง

ค่า C (uF)	ค่า RL (โอห์ม)	แรงดัน ripple ที่ VDC (โวลต์)	แรงดัน VZ (โวลต์)	แรงดัน ripple ที่ VZ (โวลต์)	แรงดัน VL (โวลต์)	แรงดัน ripple ที่ VL (โวลต์)
100	10					
100	20					
100	30					

Checkpoint 2: แสดงตารางที่ได้

การทดลองที่ 3 วงจรเร็กกูเลเตอร์แบบใช้ไอซีสำเร็จรูป

3.1 ต่อวงจรดังรูปที่ 12 ลงบอร์ดทดลอง



รูปที่ 12 วงจรสำหรับการทดลองที่ 3

- 3.2 ให้ป้อนแรงดัน V_{IN} โดยนำมาจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงปรับค่าได้ประจำโต๊ะทดลอง
- 3.3 วัดค่าแรงดัน V_{OUT} ด้วยมัลติมิเตอร์ โดยปรับแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟตรงจาก 0 ถึง 15 โวลต์ เป็นขั้นๆ ละ 0.5 โวลต์ ให้บันทึกผลที่ได้ในแต่ละขั้น แล้วพล็อตกราฟ โดยให้แกนนอนเป็นแรงดัน V_{IN} และแกนตั้งเป็นแรงดัน V_{OUT}
- 3.4 ทดลองปรับแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟในช่วง 5-10 โวลต์ (วัดด้วยมัลติมิเตอร์) เพื่อหาค่าแรงดัน V_{IN} ต่ำสุดที่ไอซีสามารถคงค่าแรงดันที่ 5 โวลต์ ไว้ได้

Checkpoint 3: แสดงการทำงานของวงจร และกราฟที่ได้

5. คำถามหลังการทดลอง

- 5.1 ข้อเสียของวงจรควบคุมแรงดันไฟโดยใช้ซีเนอร์ไดโอดในวงจรรูปที่ 5 มีอะไรบ้าง
- 5.2 เหตุใดในการทดลองที่ 2 แรงดัน V_L จึงมีค่าต่ำกว่าแรงดัน V_Z
- 5.3 จากการทดลองที่ 2 เหตุใดแรงดันคร่อมซีเนอร์ไดโอดจึงมีการกระเพื่อม
- 5.4 จากการทดลองที่ 2 แรงดัน V_L จะเป็นอย่างไรถ้าแรงดัน V_{DC} น้อยกว่าแรงดัน V_Z ของซีเนอร์ไดโอด
- 5.5 จงบอกข้อจำกัดของวงจรเร็กกูเลเตอร์แบบใช้ไอซีสำเร็จรูป