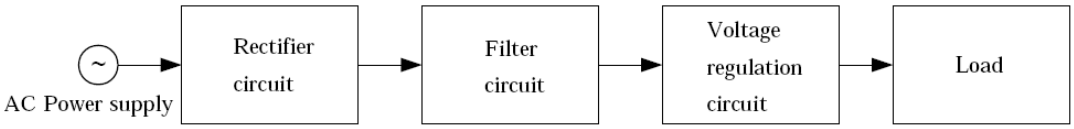
ารทดลองที่ 6 Voltage Regulators

วัตถุประสงค์

- เพื่อให้นักศึกษาเข้าใจถึงการทำงานของวงจร DC Voltage regulators หรือวงจร DC Power Supply สำหรับการใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์
- ศึกษาคุณสมบัติและการประยุกต์ใช้งาน เร็กกูเลเตอร์แบบวงจรรวม

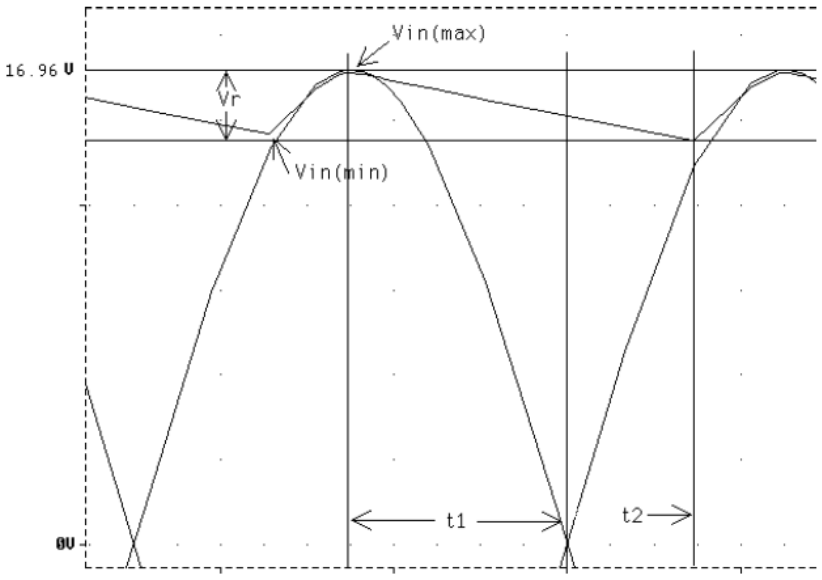
บทนำ

ในงานที่ต้องการระดับแรงดัน DC ให้มีค่าคงที่นั้น เพื่อนำมาใช้เป็น DC Power Supply จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ในการรักษาระดับแรงดันที่เรียกว่า Voltage regulators ต่อร่วมด้วย ซึ่งรักษาระดับแรงดันเอาท์พุทได้คงที่โดยไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดและแรงดัน i/p (ภายในช่วงที่กำหนด) โดยในการทดลองนี้จะศึกษาเฉพาะที่เป็นวงจรแบบง่ายๆ



รูปที่ 1 Block diagram *ของ* Power supply

จากรูปที่ 1วงจร Rectifier จะแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง และวงจร Filter ทำ ให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่เรียบขึ้น จากนั้นจะใช้วงจร Voltage regulation เพื่อให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่



รูปที่ 2 รูปคลื่นแรงดันที่เรียงกระแสแล้ว

Voltage regulation

แรงดันเอาต์พุตของ Power supply หลังจากผ่านวงจร Voltage Regulator แล้วจะมีค่าคงที่ วงจร Voltage regulator มีคุณลักษณะที่สำคัญสองแบบคือ

Load regulation คือการเปลี่ยนของระดับแรงดัน DC o/p หรือกระแส DC o/p อันเป็นผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสโหลดหรือแรงดันโหลดตามลำดับในขณะที่เงื่อนไขอื่นไม่เปลี่ยนแปลง

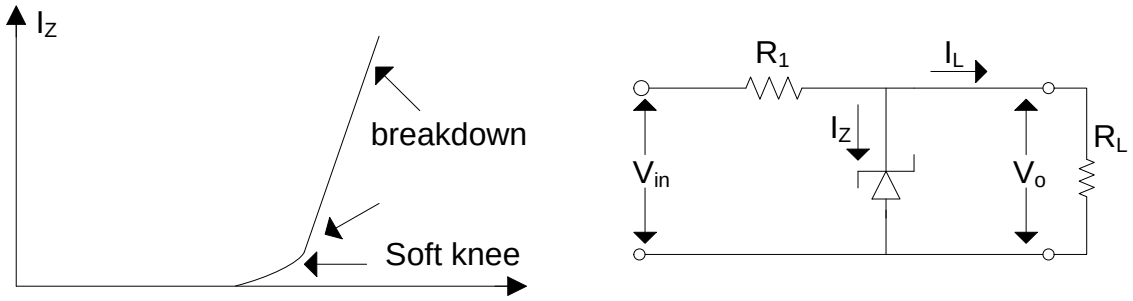
Line regulation คือการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดัน DC o/p (สำหรับ constant voltage supply) หรือกระแส DC o/p (สำหรับ constant current supply)อันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแรงดัน i/p ในขณะที่เงื่อนไขอื่นๆไม่เปลี่ยนแปลง

วงจร **Voltage regulator** ที่จะศึกษาต่อไปนี้ จะสามารถแบ่งออกเป็น **shunt regulator** และ **series regulator** และ **series regulator**

1. Shunt voltage regulator

รูปที่ 3 ข เป็นวงจรการนำ Zener diode มาใช้งานเป็น voltage regulator ทำงานด้วยการ reverse biased ตัว Zener diode ให้อยู่ในช่วง "Zener breakdown voltage" โดยจะมี Voltage-Ampere characteristic ดังรูปที่ 3 ก แรงดัน o/p จะมีค่าเท่ากับแรงดัน Zener breakdown และจาก V-I curve จะเห็นว่าเมื่อ breakdown แล้ว Zener impedance ต่ำมากΔV/ΔI ต่ำ ดังนั้นกระแสโหลดสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงได้ในช่วงที่กว้างมากโดยไม่ทำให้ V_o เปลี่ยนไปมากนักโดยที่ต้องเลือกจุดทำงาน (operating point) ที่เหมาะสม จากวงจรได้ว่า

$$I_Z = \left(\frac{V_{in}-V_Z-I_{RL}}{R_1}\right) = \left(\frac{(V_{in}-V_Z)}{R_1}\right) - \left(\frac{V_Z}{R_L}\right) \quad (1)$$



ก ข

รูปที่ 3

ในการออกแบบวงจรเราต้องกำหนดค่า V_{in} ,$I_{L(max)}$, $I_{L(min)}$ เพื่อที่จะหาค่า R_1 จุดการทำงานจะต้องไม่ต่ำกว่าจุด soft knee (รูปที่ 3ก) ในขณะที่ I_Z ต่ำสุดและI_Z สูงสุดจะต้องไม่เกินค่าที่กำหนด (maximum rate) ของ Zener ดังนั้นจากสมการ 1 จะได้

$$R_1(max) = \frac{(V_{in}-V_Z)_{(min)}}{\left(I_{Z(min)} + \frac{V_{Z(max)}}{R_{L(min)}}\right)} \quad (2)$$

จากสมการที่ 2 เราสามารถหาค่า R_1 nom (nominal value) ได้ จากนั้นก็หาค่าของ $I_{Z(max)}$

$$I_Z(max) = \frac{(V_{in}-V_Z)_{(max)}}{R_{1(min)}} - \frac{V_{Z(min)}}{R_{L(min)}} \quad (3)$$

จะได้ maximum zener power dissipation = $I_{Z(max)} \times V_{Z(min)}$

ดังตัวอย่างเช่น zener diode เบอร์ 1N752 มี $V_Z = 5.6V \pm 5\%$

ถ้าให้ $V_{in} = 20V \pm 10\%$ ต้องการ $I_{L(min)}$ = 10mA, $I_{L(max)}$= 20 mA และ $I_{Z(min)}$ยังทำให้มันทำงานเหนือจุด soft knee คือ 10mA จะได้ว่า

จาก (2) แทนค่า $\frac{V_{Z(max)}}{R_{L(min)}} = I_{L(max)} = 20mA$

$$R_{1(max)} = \frac{\big((20)(0.9) - (5.6)(1.05)\big)}{(10 \times 10^{-3}) + (20 \times 10^{-3})} = 404$$

ใช้ R มีค่าผิดพลาด $\pm 5\%$ ดังนี้

$$R_{1(min)} = \frac{401}{1.05} = 385$$

จาก (3) แทนค่า $\frac{V_{Z(min)}}{R_{L(min)}} = I_{L(min)} = 10mA$

$$I_{Z(max)} = \frac{(20)(1.1) - (5.6)(0.95)}{(385)(0.95)} - 10 \times 10^{-3}$$

$$= 35.87 \text{ mA}$$

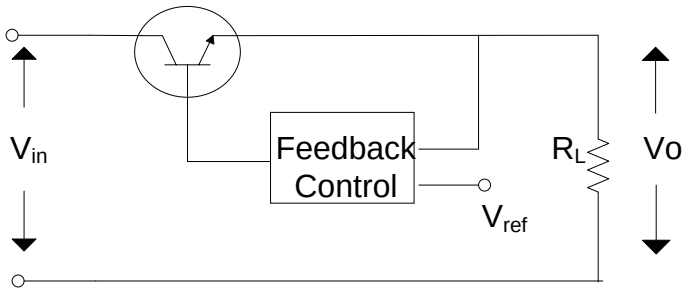
Maximum power dissipation$= (35.87)(5.6)(0.95)$

$$= 190.82 \text{ mW}$$

1N752 มี maximum rating, 400mw เพราะฉะนั้นจากการออกแบบสามารถใช้ได้อย่างปลอดภัย

2. Series voltage regulator

รูปที่ 4 เป็นวงจรง่ายๆของ Series voltage regulator



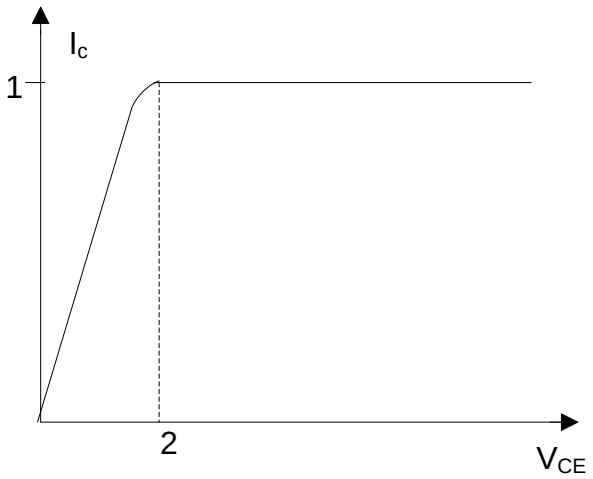
รูปที่ 4

วงจร series voltage regulator นี้เป็น regulator ที่สามารถสร้างได้ง่ายๆและมีราคาถูก ขจัด ripple ได้ดี การเปลี่ยนแปลงของแรงดัน o/p ต่อโหลดและการเปลี่ยนแปลงของ V_{in} ต่ำเนื่องจากใช้วงจร negative-

feedback control ซึ่งจะควบคุมให้ $V = V_{ref}$ (reference voltage) ใช้เวลาโดยการป้อนแรงดันควบคุม series element ซึ่งเป็น transistor ที่ทำงานอยู่ในช่วง active region ส่วน feedback control โดยทั่วไปจะเป็น comparison amplifier

ข้อเสียของ series regulator ก็คือ มีประสิทธิภาพต่ำเมื่อเทียบกับ regulator แบบอื่นๆ Transistor ที่ใช้เป็น series element ต้องเป็น power transistor เพราะกระแสโหลดจะไหลผ่านตัวมัน และมีแรงดันตกคร่อมเท่ากับ $V_{in} - V_{out}$ ดังนั้น $V_{in} - V_{out}$ มีค่าสูงจะเกิด power dissipation ที่ตัว transistor สูงมากในการใช้งานจริง transistor ตัวนี้จึงต้องติด heat sink เพื่อช่วยในการระบายความร้อน และขีดจำกัดของกระแสโหลดขึ้นอยู่กับอัตราทนกระแสของ transistor

เมื่อดูจากรูปที่ 5 ซึ่งเป็น $I_C - V_{CE}$ curve ของ transistor โดยทั่วไปจะมี knee point อยู่ที่ V_{CE} ประมาณ 2 V ถ้า V_{CE} ต่ำกว่าจุดนี้ transistor จะเข้าสู่ saturation region ทำให้ gain ต่ำ และการเปลี่ยนแปลงในแรงดัน i/p จะผ่านไปยัง o/p ได้มาก ดังนั้นแรงดัน i/p ต่ำสุดต้องไม่น้อยกว่า $V_O + 2\ V$ เพื่อให้ transistor อยู่ในช่วง active region



รูปที่ 5

ถ้าเราไม่คำนึงถึง loss ในอุปกรณ์อื่นๆและให้ V_{in} เป็นแรงดัน DC ที่เรียบไม่มี ripple และ V_{in} เปลี่ยนในช่วง $\pm$T% ดังนั้นแรงดัน i/p ต่ำสุด คือ

$$(1 - 0.01T)V_{in} = V_O + 2 \quad (6)$$

$V_{in} =$ nominal i/p voltage

และแรงดัน i/p สูงสุดคือ

$$(1 + 0.01T)V_{in} = \frac{(1+0.01T)}{(1-0.01T)}(V_o + 2) \quad (7)$$

ประสิทธิภาพต่ำสุดจะเกิดขึ้นเมื่อ V_{in} มีค่าสูง

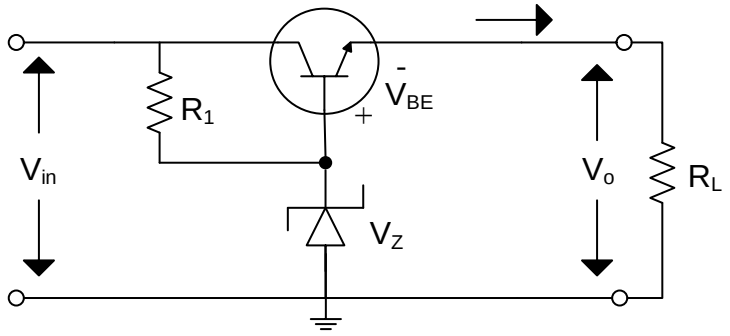
$$E_{min} = \frac{P_O}{P_{in}} = \frac{V_O I_O}{V_{in(max)} I_O} = \frac{V_O}{V_{in(max)}}$$

$$= \frac{V_O}{\frac{(1+0.01T)}{1-0.01T}} / (V_O + 2)$$

$$= \frac{(1-0.01T)}{1+0.01T} \frac{V_o}{V_o+2} \quad (8)$$

หมายเหตุ : สมการ 8 นี้เป็นกรณีของ fixed regulator V_o ไม่เปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 3 ในกรณีที่ต้องการช่วงกระแสโหลดที่เปลี่ยนแปลงได้มาก โดยไม่ทำให้จุดทำงานของ Zener diode เปลี่ยนไปมาก เราอาจใช้วงจรดังรูปที่ 2 ซึ่งใช้ทรานซิสเตอร์ช่วยจ่ายกระแสให้โหลดดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของ I_Z ต่อ I_L จะลดลงด้วย factor (current gain transistor) วงจรนี้เรียกว่า “Zener diode-Emitter Follower Regulator”



รูปที่ 6

$$\Delta I_Z = \frac{\Delta I_L}{\beta} \quad (4)$$

$$V_O = V_Z - V_{BE} \quad (5)$$

$$R_1 = \frac{V_{in}-V_Z}{I_B+I_Z} = \frac{V_{in}-V_Z}{\frac{I_C}{\beta}+I_Z}$$

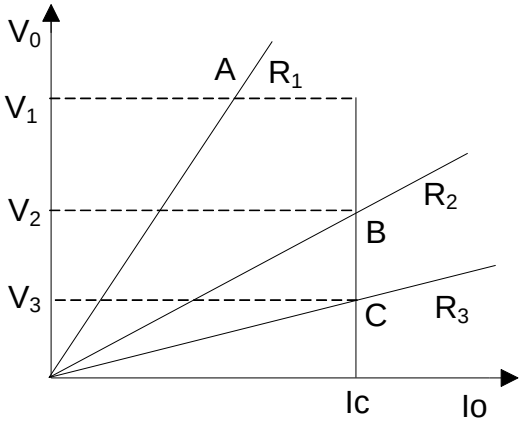
โดย $I_{C(max)} \approx I_{E(max)}$ =กระแสสูงสุดที่ต้องการให้วงจรสามารถจ่ายได้

I_Z = กระแสต่ำสุดที่จะทำให้ Zener diode ทำงาน

ถ้าโหลดเพิ่มขึ้น V_o ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นจะทำ ให้ V_{BE} ลดลง (V_o คงที่) การลดลงของ V_{BE} นี้เองเป็นผลให้การนำ กระแสของทรานซิสเตอร์ลดลง ทำ ให้ V_{CE} มีค่าเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ Vin คงที่ ดังนั้น จะทำให้ V_o ลดลงเหลือเท่าเดิม นั่นคือ ทำ ให้ Output Voltage (V_o) มีค่าคงที่ในทำนองเดียวกัน ถ้าโหลดมีค่าลดลง จะทำ ให้ V_o ลดลงด้วย เป็นผลให้ V_{BE} เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มการนำ กระแสของทรานซิสเตอร์ ทำ ให้ V_{CE} ลดลง ส่งผลให้ V_o มีค่าเพิ่มขึ้น แต่วงจรนี้ก็มีข้อเสียคือ เมื่อแรงดัน input หรือกระแสโหลดเพิ่มมากขึ้น กระแสที่ไหลผ่าน zener diode ก็ต้องมีค่ามากขึ้นดังนั้นอาจเกิดความเสียหายกับ zener diodeได้ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยใช้วงจร Darlington pair-transistor regulator ดังรูปที่ 8

3. Overcurrent/Short-circuit Protection

ในรูปที่ 7 เป็นคุณสมบัติของวงจร Over Current Protection แบบที่เป็น constant current I_C คือขนาดกระแสโหลดที่วงจรสามารถจ่ายเต็มที่ ถ้าเราตั้ง $V_O = V_1$ ใส่ $R_L = R_1$ จะได้กระแส I_O ค่าหนึ่งที่จุด A เมื่อเราลดขนาด V_1 ลงเรื่อยๆ I_O จะเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงจุดที่ $I_O = I_C$ วงจรจะเปลี่ยนการทำงานไปเป็น constant source โดยอัตโนมัติจากจุดนี้ถ้าขนาดของ R_L ลดลงอีก, $I_O = I_C$ คงที่แต่ V_o จะลดลงเรื่อยๆ ดังรูปที่จุด B และ C $(R_2 > R_3)$

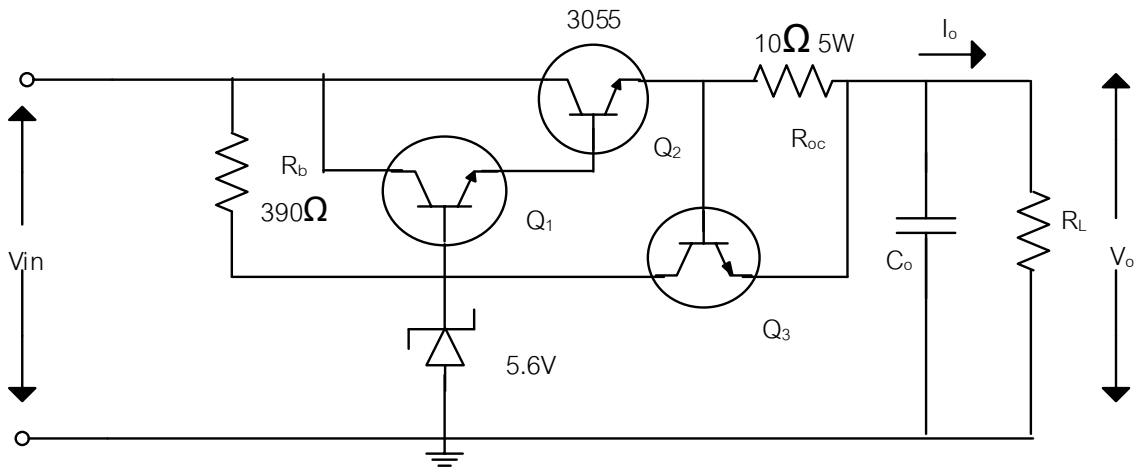


รูปที่ 7

รูปที่ 8 เป็นวงจรใช้งาน R_{oc} เป็น current sensing resistor Q_1, Q_2 เป็น Darlington on pair ทำงานด้วยกระแส I_b ที่ป้อนเข้าขา base ของ Q_1 ตามปกติ Q_3 จะ off อยู่ และจะ ON ต่อเมื่อแรงดันตกคร่อม R_{oc} มีค่าประมาณ 0.7V เพราะฉะนั้น

จะได้ $R_{OC} = \frac{0.7}{I_o}\Omega$

เมื่อ Q_3 ON มันจะดึงกระแส I_b ส่วนหนึ่งทำให้กระแส o/p รักษาระดับอยู่ที่ I_o ตลอดเวลา



รูปที่ 8

การหาค่า R_b เริ่มจากการหาค่า I_b ที่ต้องการจาก

$$I_o = \beta_{Q_1}\beta_{Q_2}I_b \quad (10)$$

แรงดันสูงสุดที่ตกคร่อม R_b ประมาณได้ว่า

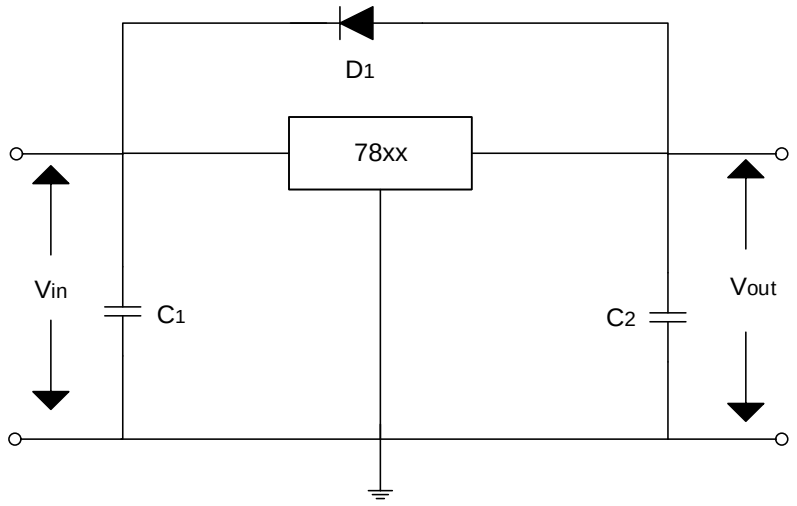
$$V_{Rb} = V_{in} - V_{BE1} - V_{BE2} - V_{BE3} - V_O \quad (11)$$

ดังนั้น $R_b = (V_{in} - V_O - V_{BE1} - V_{BE2} - V_{BE3})\left(\frac{\beta_{Q_1}\beta_{Q_2}}{I_O}\right)$ (12)

4. IC Voltage Regulator

4.1 IC Fixed Voltage Regulator

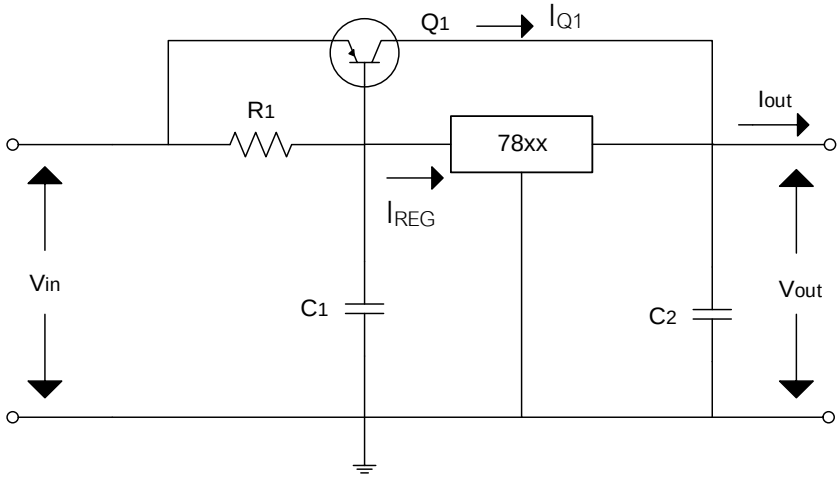
IC Fixed Voltage Regulator มีอยู่มากมาย ในการทดลองนี้จะขอแนะนำแบบง่ายๆและนิยมใช้กันโดยทั่วไป คือ IC ในตระกูล 78xx โดยที่ xx สองตัวหลังจะเป็นตัวระบุค่า voltage เช่น เบอร์ 7812 ให้แรงดัน o/p เป็น 12V เป็นต้น IC ตระกูลนี้มีวงจรจำกัดกระแสภายในตัวเพื่อป้องกันกระแสโหลดมากเกินขีดจำกัดซึ่งจะทำให้ IC หรืออุปกรณ์อื่นในวงจรเสียหายได้ การใช้งาน IC เหล่านี้ทำได้ง่าย เพราะต้องการอุปกรณ์ประกอบอื่นน้อยมาก สิ่งที่จะต้องคำนึงถึงคือ แรงดัน i/p เพราะจะมีแรงดันส่วนหนึ่งตกคร่อม IC ซึ่งทางบริษัทผู้ผลิตจะกำหนดไว้ใน data sheet เรียกว่า “drop out voltage” สำหรับ IC ตระกูล 78xx จะมี drop out voltage ประมาณ 2V ดังนั้น V_{in} ต่ำสุดจะต้องมีค่ามากกว่า V_o + 2V และ V_{in} สูงสุดก็ต้องไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ใน data sheet เพราะจะทำให้ IC เสียหายได้ รูปที่ 9 เป็นวงจรที่ใช้งานโดยทั่วไป



รูปที่ 9

C_1 เป็นตัว filter. C_2 เป็น capacitive load ตามที่กำหนดไว้ data-sheet ไม่น้อยกว่า 0.01 μF เพื่อกำจัด high frequency noise. Diode D_1 เป็น protection diode ในกรณีที่ i/p short ลง ground หรือ power off. แล้ว output-capacitor ยังมีประจุอยู่เต็มจะเกิด reverse-voltage ตกคร่อมตัว regulator ในกรณีที่ C_o มีขนาดใหญ่อาจทำให้ตัว regulator IC พังเสียหายได้ D_1 จะช่วยให้ประจุ discharge ผ่านตัวมันไป โดยทั่วไป D_1 นี้ไม่จำเป็นต้องใส่ถ้า C_o < 10 μF

สำหรับ load regulation จะกำหนดไว้ใน data sheet โดยกำหนดกระแสใช้งานสูงสุดไว้ด้วย และ line regulation ก็กำหนดช่วงของแรงดัน i/p ไว้ถ้ากระแส load มากเกินกำหนดจะทำให้ ΔV_o มีค่าสูง ดังนั้นในการที่ใช้งานที่ต้องการ I_o สูง ต้องต่อวงจรช่วยจ่ายกระแสดังรูปที่ 10



รูปที่ 10

โดยที่ $R_1 = V_{BEQ1}/(I_{REG(MAX)} - (I_{Q1} / \beta_{Q1\,(min)}))$ $\beta_{Q1(min)} > 10$ (9)

หรือ $R_1 = \dfrac{\beta_{Q1(min)}(V_{BEQ1})}{(\beta_{Q1(min)}+1)I_{REG(MAX)} - I_o}$

ทั้งนี้จะต้องคำนึงถึงอัตราการจ่ายกระแสของ transistor Q_1 ว่าสามารถทนได้เท่าไร

$I_{Q1} = I_{out} - I_{REG}$

V_{BEQ1} คือ แรงดัน V_{BE} ของ Q1

I_{REG} คือ กระแสสูงสุดที่ต้องการให้ไหลผ่าน IC regulator สำหรับ 78xx ต้องไม่เกิน 1A

β_{Q1} ดูจาก Datasheet ซึ่งระบุเป็นค่า h_{FE} ถ้าไม่บอกค่าต่ำสุดให้ใช้ค่าประมาณ 0.8 ของ h_{FE} สูงสุด

4.2 IC Variable Voltage Regulator

เป็น IC regulator ที่สามารถปรับแรงดัน o/p ได้ในช่วงกว้าง เช่น เบอร์ **317 เป็น IC 3 ขา สามารถปรับแรงดัน o/p ได้ตั้งแต่ 1.2 ถึง 37 V ดัง

รูปที่ 11 เป็นวงจรใช้งานแบบง่ายๆ โดย

$$V_o = 1.25\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + I_{Adj}R_2 \qquad (10)$$

เมื่อ I_{Adj} คือ กระแสขา Adjust มีค่า 50-100μA

รูปที่ 12 เป็นวงจรที่มีการใช้ทรานซิสเตอร์ช่วยจ่ายกระแส

โดยที่ $R_1 = V_{BEQ1}/(I_{REG(MAX)} - (I_{Q1} / \beta_{Q1\,(min)}))$ $\beta_{Q1(min)} > 10$ (9)

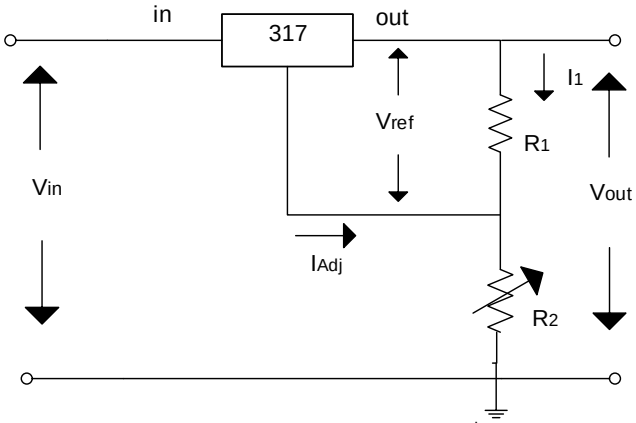
ทั้งนี้จะต้องคำนึงถึงอัตราการจ่ายกระแสของ transistor Q_1 ว่าสามารถทนได้เท่าไร

$I_{Q1} = I_{out} - I_{REG}$

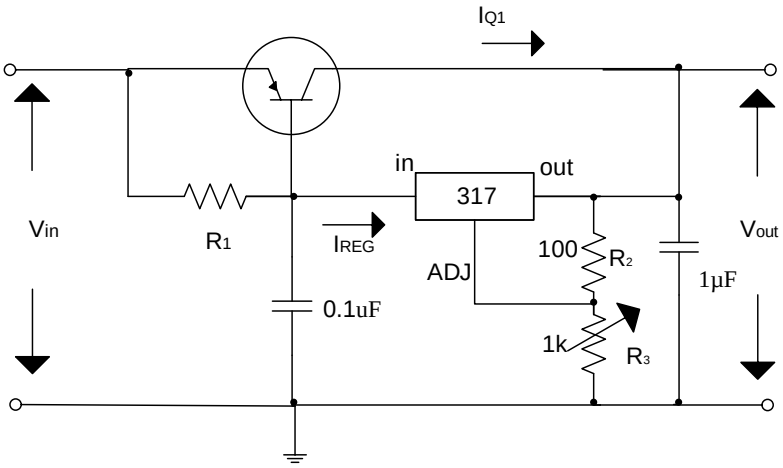
V_{BEQ1} คือ แรงดัน V_{BE} ของ Q_1

I_{REG} คือ กระแสสูงสุดที่ต้องการให้ไหลผ่าน IC regulator มีค่าสูงสุด 2.2A ถ้า $V_I - V_O \leq 15V$

β_{Q1} ดูจาก Datasheet ซึ่งระบุเป็นค่า h_{FE} ถ้าไม่บอกค่าต่ำสุดให้ใช้ค่าประมาณ 0.8 ของ h_{FE} สูงสุด



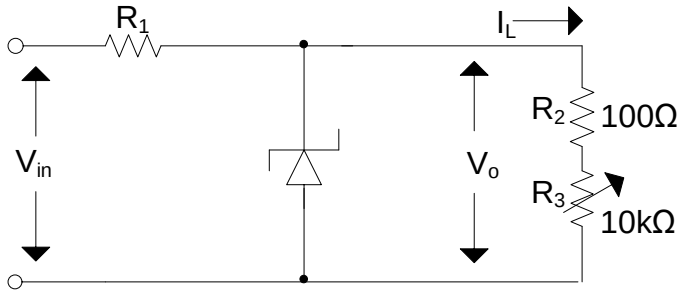
รูปที่ 11



รูปที่ 12

การทดลองตอนที่ 1 Simple voltage regulator power supply

1) ต่อวงจรดังรูปที่ 3 โดยใช้ Zener diode 5.6 V, $R_1 = 390\Omega$
2) ใช้ข้อกำหนดตามตัวอย่างหัวข้อ 1 ให้ I_L คงที่ =15mA (ใช้การวัดกระแสโดยอ้อม ปรับVR จน V คร่อม R_2 = 1.5V) ใช้ V_{in} มีค่าตั้งแต่ 18V ถึง 22V โดยปรับ step ละ 0.5V และวัด V_O แล้ววาดกราฟระหว่าง V_{in} กับ V_O (ตารางที่ 1)



รูปที่ *1*3

3) ให้ V_{in} คงที่ = 20V ปรับ I_L (ใช้การวัดกระแสโดยอ้อม) ตั้งแต่ 10mA (ใช้ step ละ 1 mA) พร้อมทั้งวัด V_O แล้วนำผลมาวาดกราฟระหว่าง I_Lกับ V_O (ตารางที่ 2)

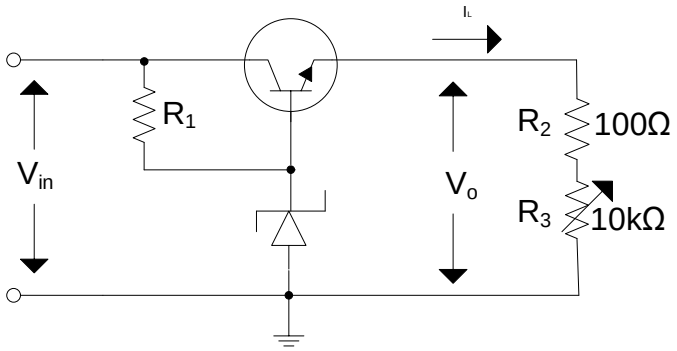
ตารางที่ 1

V_{in}	V_O
18	
18.5	
19	
19.5	
20	
20.5	
21	
21.5	
22	

ตารางที่ 2

I_L	V_O
10	
11	
12	
13	
14	
15	
16	
17	
18	
19	
20	

4) ต่อวงจรตามรูปที่ 14 ใช้ transistor เบอร์ 2SC1815 แล้วทำการทดลองเหมือน 2,3



รูปที่ *1*4

ตารางที่ 3

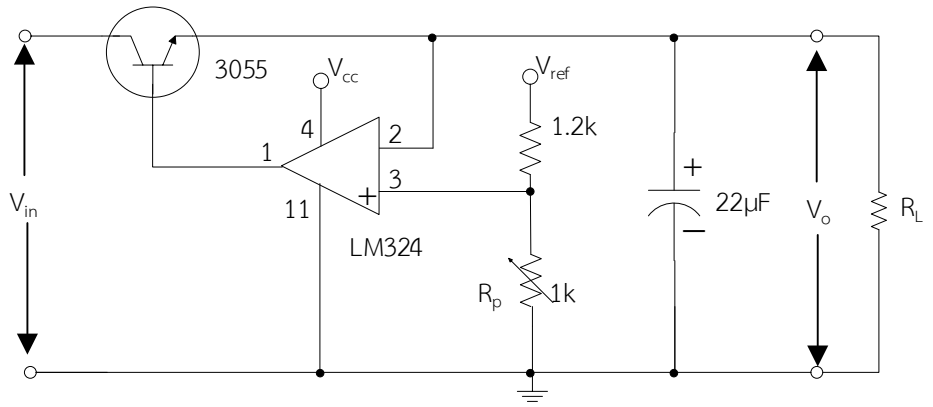
V_{in}	V_O
18	
18.5	
19	
19.5	
20	
20.5	
21	
21.5	
22	

ตารางที่ 4

I_L	V_O
10	
11	
12	
13	
14	
15	
16	
17	
18	
19	
20	

การทดลองตอนที่ 2 Voltage regulator with Op-amp

1) ต่อวงจรดังรูปที่ *1*



รูปที่ *1*5

2) ใช้ V_{in}, V_{cc} และ V_{ref} เป็น DC voltage ปรับไว้คงที่ 15V (อย่าปรับเกิน 15 V, เพราะ op amp อาจพังได้)

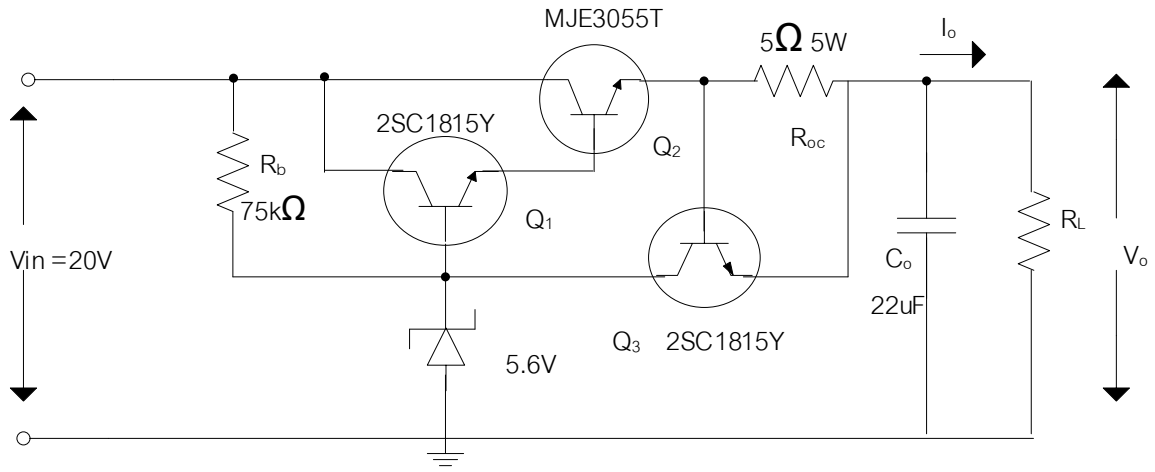
3) ทดลองปรับ R_P เพื่อให้ได้ $V_{Rp} = 6\,V$ แล้วไม่ต้องปรับอีก เปลี่ยนค่า R_L ตามตารางที่ 5 แล้ววัดดู V_O ว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร

ตารางที่ 5

R_L (5W)	10	25	50	75	100	250	500	750	1k	∞
V_o										

การทดลองตอนที่ 3 Overcurrent/short-Circuit Protection

1. ต่อวงจรดังรูป



รูปที่ 16

ถ้าต้องการ $V_O = 10V$ และต้องการกระแส I_O สูงสุด =100mA Q_1, Q_3 ใช้ 2SC1815 Q_2 ใช้ 2N3055 ใช้ $C_O = 22\mu F$, $V_{BEQ1,3} = 0.7V$

ดังนั้น $R_{OC} = \frac{V_{BEQ3}}{I_o} = \frac{0.7}{0.1} = 7\Omega$ ใช้ R= 5Ω 5W

$\beta_{Q1(min)} = 120, \beta_{Q2(min)} = 20$, $V_{BEQ1} = 0.55V$, $V_{BEQ2} = 0.5V$

จากสมการที่ 10 $100 \times 10^{-3} = 120 \times 20 \times I_b$

$$I_b = 0.041mA$$

ดังนั้นจากสมการที่ 12 $R_b = \frac{(15-10-1.9)\times(120\times20)}{0.1}$;..

$$= 74.4k\Omega \text{ ใช้ } 75k\Omega$$

2. ใช้ R_L ค่าต่างๆ ดังตารางที่ 6 (R_L ต้องใช้ที่**ทน power ได้สูง ๆ**)

ตารางที่ 6

$R_L(\Omega$,5W)	∞	200	150	100	50	25	10
I_O (mA)							
V_O (V)							

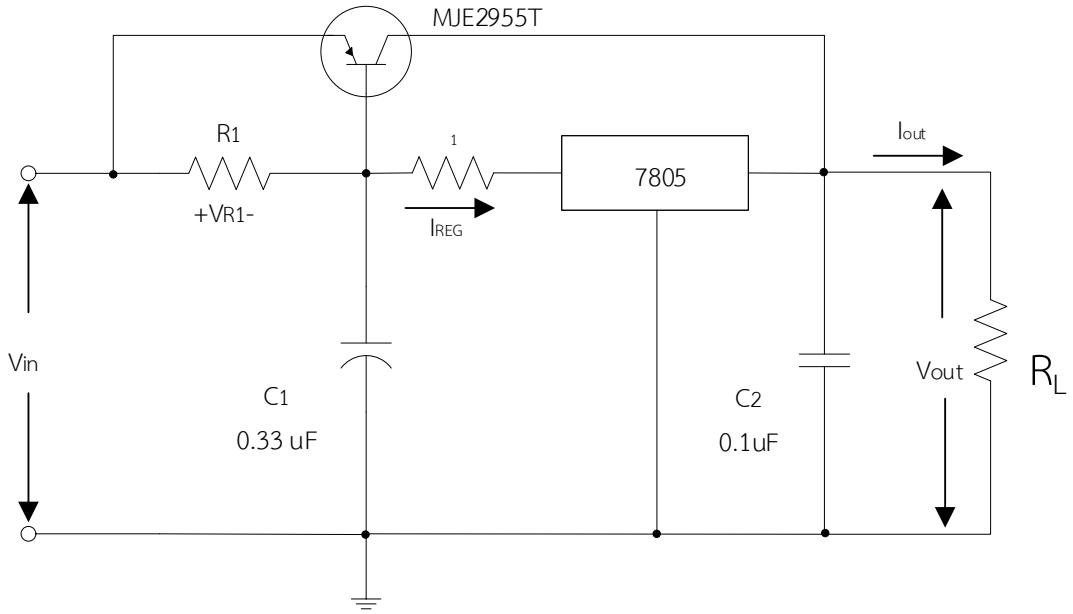
การทดลองตอนที่ 4.1 IC Fixed Voltage Regulator

กำหนดให้ที่ I_{out} = 100 mA ให้ $I_{REG(MAX)}$ = 10 mA

$I_{Q1(MAX)} = I_{out} - I_{REG(MAX)}$ = 100mA - 10mA = 90mA , V_{BEQ1} = 0.7 V Ω β_{min} ของ MJE2955T = 20 ดังนั้นจากสมการ 9 จะได้

$R_1 = V_{BEQ1}/(I_{REG(MAX)} - (I_{Q1} / \beta_{Q1\,(min)}))$

R_1 = 0.8/ (0.01 - (0.09 /20)) = 145.45 Ω ใช้ค่า 150 Ω



รูปที่ *17*

1. ต่อวงจรดังรูปที่ 17

2. ใช้ V_{in} = 15 V วัด I_{REG} โดยวัดความต่างศักย์คร่อม R 10Ω และ V_o ทดลองตามตารางที่ 7

ตารางที่ 7

$R_L(\Omega)$,5W	∞	200	150	100	50	25	10
I_{REG}(mA)							
V_O(V)							

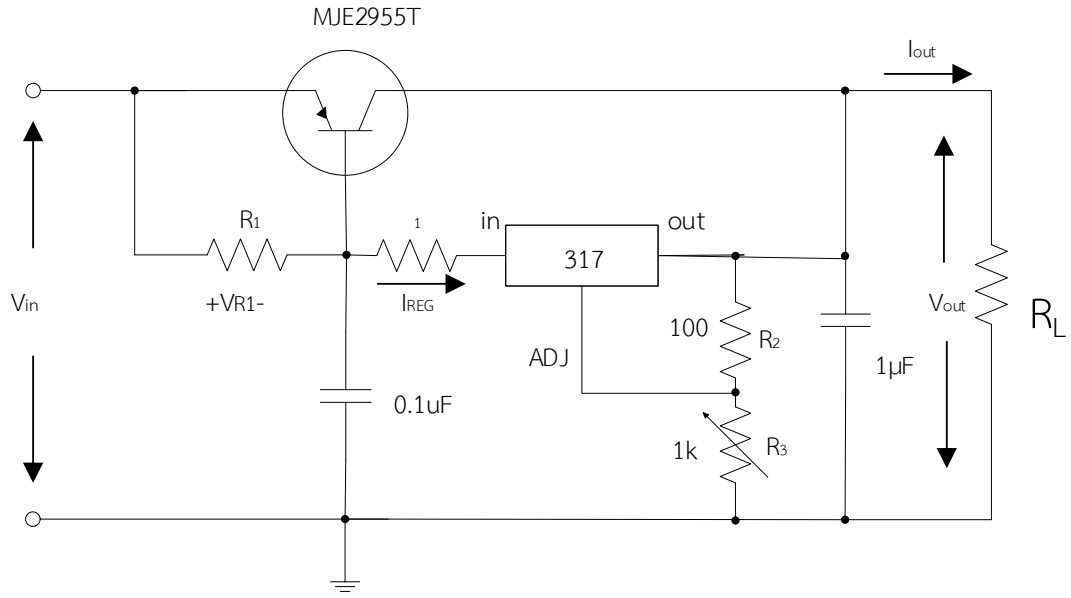
การทดลองตอนที่ 4.2 IC Variable voltage regulator

กำหนดให้ที่ I_{out} = 100 mA ให้ $I_{REG(MAX)}$ = 10 mA, V_{BE} = 0.8 V Ω, β_{min} ของ MJE2955T = 20 ดังนั้นจากสมการ 9 จะได้

$R_1 = V_{BEQ1}/(I_{REG(MAX)} - (I_{Q1} / \beta_{Q1\ (min)}))$

$I_{Q1(MAX)} = I_{out} - I_{REG(MAX)} = 0.1 - 0.01 = 0.09$ A

$R_1 = 0.8/(0.01 - (0.09/20)) = 145.45\ \Omega$ ใช้ค่า 150 Ω



รูปที่ *18*

1. ต่อวงจรดังรูปที่ 18
2. ใช้ R_L = 200 Ω 5W, V_{in} = 23 V วัด I_{REG} โดยวัดความต่างศักย์คร่อม R 1Ω 5W และ V_o ทดลองตามตารางที่ 8

ตารางที่ 8

V_O(V)	0(ต่ำสุด)	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
V_{R1}(V)												
I_{REG}(mA)												

คำถาม

1. อธิบายหลักการทำงานของวงจรในทุกการทดลองมาโดยละเอียด

สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลองทั้งหมด