

เอกสารประกอบการสอน

วิชา 221419 Selected Topics in Electronics

เรื่อง

การออกแบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

Power Supply Design



รศ.ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์

ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

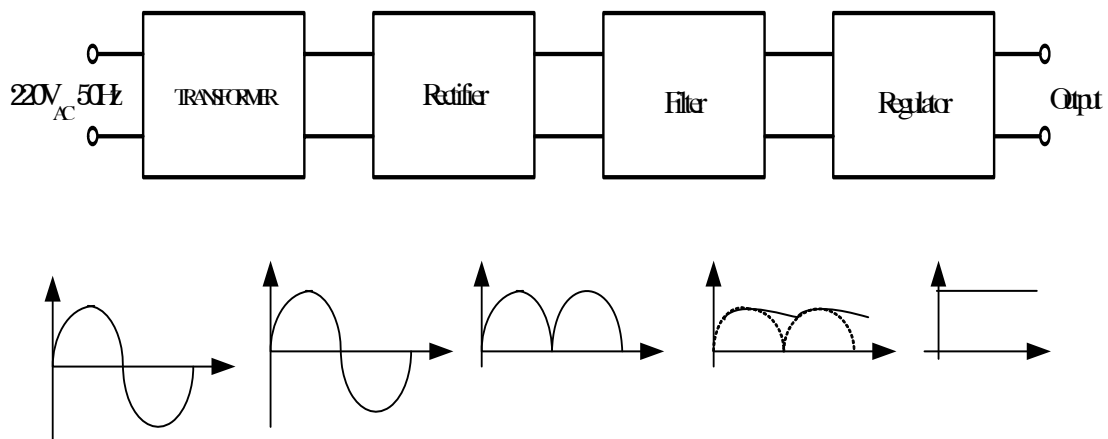
Homepage: <http://www.te.kmitnb.ac.th/~msn/>

Email: mts@kmitnb.ac.th

การออกแบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

โดยส่วนใหญ่แล้ว ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะต้องมีแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงให้วงจรเพื่อเป็นการไบอัสให้วงจรนั้นทำงานอยู่ได้ แต่แหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้าที่หาได้ง่ายที่สุด ก็คือ ขนาดแรงดันไฟ 220 V 50Hz ที่มีอยู่ตามอาคารบ้านเรือนหรือในโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้นจะมาถึง การออกแบบแหล่งจ่ายไฟที่มีแหล่งกำเนิดมาจากไฟฟ้า 220V 50Hz ให้ตรงกับความต้องการในการใช้งานจริง

หลักการของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า



จากแผนผัง สัญญาณรูปคลื่นไซน์ ขนาด 220 V_{AC} ความถี่ 50Hz จะถูกเหนี่ยวนำให้มีขนาดเล็กลงด้วยหม้อแปลง (Transformer) สัญญาณที่ได้จากหม้อแปลงจะเป็นไฟสลั้อยู่ จึงต้องผ่านวงจรเรียงกระแส (Rectifier) เพื่อทำให้เป็นไฟตรงก่อน จากนั้นจะผ่านวงจรกรองกระแส (Filter) เพื่อทำให้ไฟตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสมีความเรียบขึ้นเมื่อมีการจ่ายกระแสให้ภาระ ในที่สุดก็จะเป็นวงจรรักษาระดับแรงดัน (Voltage Regulator) เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟตรงให้คงที่ และมีค่าตรงตามความต้องการ

การเลือกหม้อแปลง (Transformer Specifications)

ในการเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้ามูลฐานคือ จะต้องเลือกหม้อแปลงที่สามารถจ่ายแรงดันและกระแสได้เพียงพอกับการใช้งานจริง แต่ก็ไม่ควรที่จะเลือกหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่ (จ่ายแรงดันและกระแสได้สูง) เพราะจะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย

ดังนั้นในการเลือกหม้อแปลงไฟฟ้าให้มีขนาดพอบรรลุกับงานที่ต้องการก็จะพิจารณาขนาดของแรงดันไฟตรง (V_o) และกระแสไฟตรงสูงสุด (I_o) ที่สามารถจ่ายให้ภาระได้ แล้วนำมากำหนด

ขนาดของแรงดันขดทุติยภูมิ (Secondary) และกระแสใช้งานที่ขดทุติยภูมิของหม้อแปลง โดยพิจารณาได้จากสมการ

$$V_{rms} = 1.1 \frac{V_o + V_{do} + V_{rect} + V_r}{\sqrt{2}} \frac{V_{line(nom)}}{V_{line(low)}} \quad (1)$$

V_{rms} หมายถึง แรงดันใช้งานที่ขดทุติยภูมิของหม้อแปลง (V)

V_o หมายถึง แรงดันเอาต์พุตที่ผ่านการรักษาระดับแรงดัน (V)

V_{do} หมายถึง แรงดันตกคร่อมภายในภาครักษาระดับแรงดัน (V)

$V_{rect} = 1V$ สำหรับวงจรเรียงกระแสที่ใช้หม้อแปลงมีแทปกกลาง

$= 2V$ สำหรับวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์

จากสมการที่ 1 จะทำให้รู้ถึงขนาดของแรงดันใช้งานที่ขดทุติยภูมิของหม้อแปลง และกระแสใช้งานที่ขดทุติยภูมิ (I_{rms}) สามารถหาได้โดย

$$I_{rms} \approx 1.2I_o \quad \text{สำหรับวงจรเรียงกระแสที่ใช้หม้อแปลงมีแทปกกลาง} \quad (2)$$

และ
$$I_{rms} \approx 1.8I_o \quad \text{สำหรับวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์} \quad (3)$$

ต่อมาจะทำให้เราทราบถึงขนาดกำลังของหม้อแปลงที่ขดทุติยภูมิ (Power Rating of Secondary) ซึ่งมีค่า

$$\text{ขนาดกำลังของหม้อแปลงที่ขดทุติยภูมิ} = V_{rms} I_{rms} \text{ (VA)} \quad (4)$$

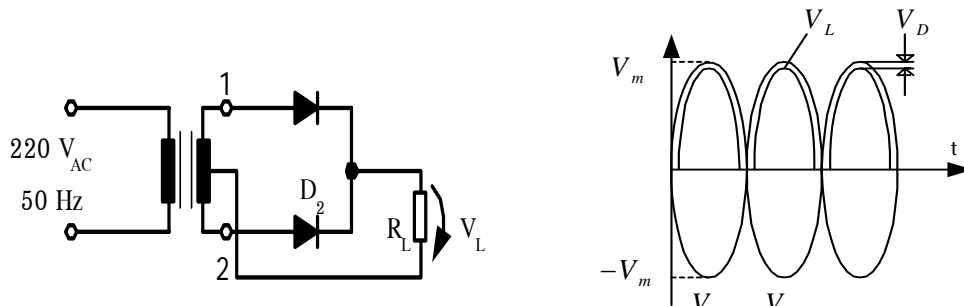
วงจรเรียงกระแส

วงจรเรียงกระแส จะทำหน้าที่เป็นตัวเปลี่ยนกระแสไฟสลับที่มาจากหม้อแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยวงจรเรียงกระแสที่นิยมใช้ในทางปฏิบัติ จะมีอยู่ 2 ชนิด

1. วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นที่ใช้หม้อแปลงมีแทปกกลาง (Center-tapped Full-wave Rectifier)
2. วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ (Full wave Bridge Rectifier)

แต่จริง ๆ แล้ว จะมีวงจรเรียงกระแสอีกชนิดหนึ่ง คือ วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half-wave rectifier) แต่ไม่ค่อยนิยมนำมาใช้งาน ถึงแม้้อรรถการดีทั้งกำลัง และค่าใช้จ่ายจะต่ำกว่า เพราะวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นให้ประสิทธิภาพที่ต่ำมาก

วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นที่ใช้หม้อแปลงมีแทปกกลาง



จากวงจรไดโอด D_1 และ D_2 จะผลัดกันทำงานในแต่ละช่วงครึ่งรูปคลื่น และจากแรงดันเอาต์พุต (V_L) ที่ได้จะเห็นว่า มีค่าน้อยกว่า แรงดันอินพุต โดยขนาดของ V_L สูงสุด $V_{L(peak)}$ สามารถหาได้จาก

$$V_{L(peak)} = V_m - V_{D(on)} \quad (5)$$

$V_{D(on)}$ คือ แรงดันตกคร่อมไดโอด D_1 หรือ D_2 ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง ซึ่งปกติจะมีค่าประมาณ 0.6V ถึง 1V เนื่องจากไดโอดที่นำมาใช้ในวงจรเรียงกระแส ส่วนใหญ่เป็นไดโอดชนิดซิลิกอน (Silicon diode)

ในการเลือกใช้ไดโอดในวงจรเรียงกระแส มีข้อควรคำนึง 2 ประการ คือ

1. อัตราทนกระแสขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง (I_{Fmax}) ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$I_{Fmax} = \frac{V_{L(peak)}}{R_{L(min)}} \quad (6)$$

เมื่อ $R_{L(min)}$ คือ ค่าต่ำสุดของภาวะ ซึ่งจะทำให้วงจรเรียงกระแส จะต้องจ่ายกระแสออกมาสูงสุด ตามที่เราต้องการนั่นเอง

2. อัตราการทนแรงดันสูงสุด ขณะได้รับไบอัสกลับ (Peak Inverse Voltage, PIV)

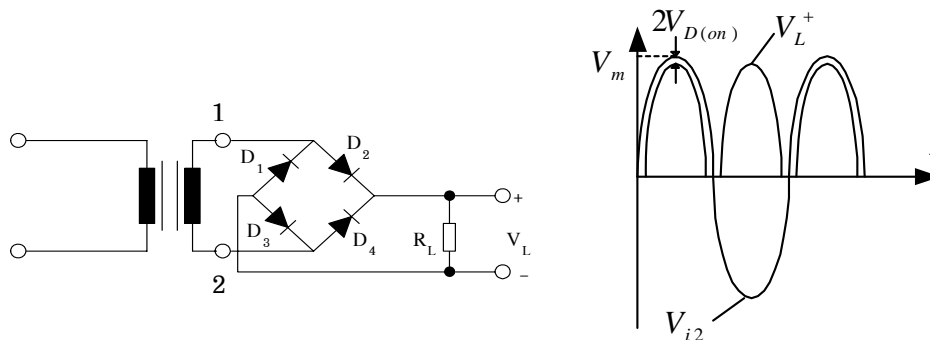
สำหรับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นที่ใช้หม้อแปลงมีแทปกกลางนี้ สามารถหาค่า PIV ได้จาก

$$PIV = 2V_{m(max)} - V_{D(on)} \quad (7)$$

ค่าพิคกิ้งของไดโอดทั้ง 2 ค่านี้ในการออกแบบจริงควรเลือกใช้ให้มากกว่าค่าที่คำนวณได้อย่างน้อย 50% ทั้งนี้เพื่อป้องกันความเสียหายของไดโอดอันเนื่องมาจากแรงดันสไปซ์ (Spike Voltage)

วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์

วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ สามารถให้แรงดันไฟตรงออกมาในลักษณะเต็มคลื่นได้โดยไม่ต้องใช้หม้อแปลงที่มีแทปกกลาง ดังวงจรข้างล่าง



จากวงจรช่วงครึ่งคลื่นด้านบวก กระแสจะไหลผ่าน D₂, R_L และ D₃ แล้วกลับเข้าขา 2 ของหม้อแปลง ทำให้ได้รูปคลื่นครึ่งบวกมาตกคร่อมที่ R_L

ในช่วงครึ่งคลื่นลบ กระแสไฟฟ้าจะไหลจากขา 2 ผ่าน D₄, R_L และ D₁ กลับเข้าขา 1 ของหม้อแปลง ทำให้ได้รูปคลื่นอีกครึ่งคลื่นมาบวกที่ R_L

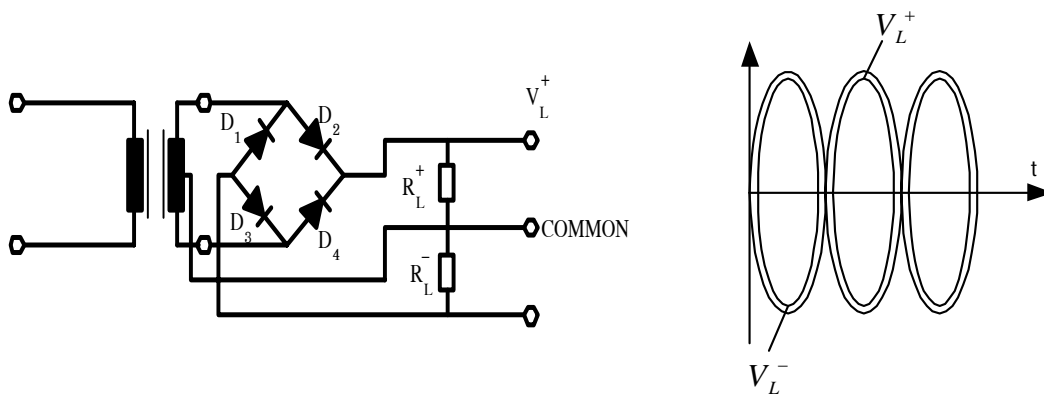
สำหรับขนาดของแรงดันเอาต์พุต (V_L) สามารถหาได้จาก

$$V_{L(peak)} = V_m - 2V_{D(on)} \tag{8}$$

ส่วนพิคกการทนแรงดันย้อนกลับ (PIV) ของไดโอด แต่ละตัวสามารถหาได้จาก

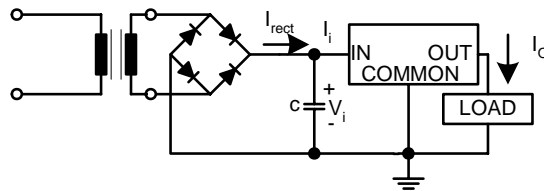
$$PIV = V_{m(max)} - V_{D(on)} \tag{9}$$

ในกรณีที่เรต้องการออกแบบ แหล่งจ่ายไฟแรงดันคู่ (Dual Power Supply) ก็สามารถใช้วงจรเรียงกระแสดังวงจรข้างล่างได้ ส่วนค่า PIV ของไดโอดแต่ละตัวของวงจรนี้ สามารถหาได้โดยใช้สมการที่ (7)

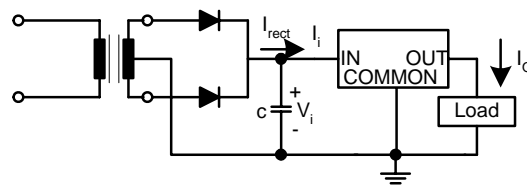


วงจรกรองกระแส

วงจรกรองกระแส (Filter) ที่นิยมและได้ผลดี ก็จะเป็นวงจรกรองกระแสที่ใช้ตัวเก็บประจุ (Capacitor) วงจรกรองกระแสนี้จะต่ออยู่ระหว่างวงจรเรียงกระแส และวงจรรักษาระดับแรงดัน ดังในวงจรข้างล่าง



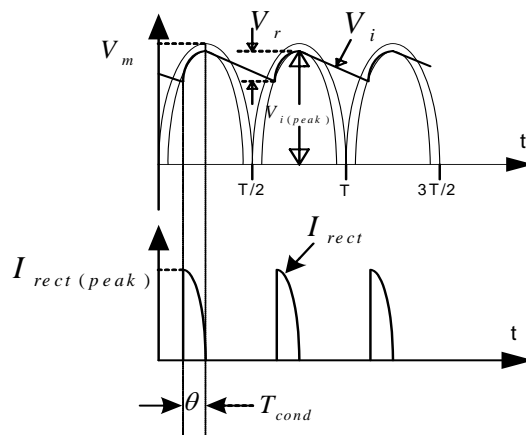
(a)



(b)

จากวงจรทั้ง (a) และ (b) ในการเลือกค่าตัวเก็บประจุ จะต้องเลือกค่าตัวเก็บประจุที่สามารถเก็บประจุ ถึงแรงดัน $V_{i(peak)}$ ซึ่งหาได้จาก

$$V_{i(peak)} = V_m - V_{rect} \tag{10}$$



- จากภาพ V_m หมายถึง แรงดันแรงดันสูงสุดที่ขั้วทุติยภูมิของหม้อแปลง
- V_{rect} หมายถึง 1 หรือ 2V ที่เป็นแรงดันตกคร่อมไดโอด (แปรตามชนิดของวงจรเรียงกระแส)
- V_r หมายถึง แรงดันกระเพื่อม

เราสามารถหาขนาดของ V_r นี้ได้จากสมการพื้นฐาน คือ

$$v = \frac{1}{c} \int i_c dt$$

$$dv = \frac{i_c}{c} \cdot dt$$

เมื่อ $dv = v_r =$ แรงดันกระเพื่อม

$$i_c = I = I_i = I_o + I_Q \approx I_o$$

และ dt เป็นช่วงเวลาในการคายประจุของตัวเก็บประจุ (Capacitor Discharge Interval)

จากรูปจะเห็นว่า $dt \approx T/2$ เมื่อ $T = \frac{1}{f}$ ดังนั้น

$$V_r \approx \frac{I_o}{2fc} \quad (11)$$

จากสมการที่ (11) V_r เป็นแรงดันกระเพื่อม

I_o เป็นกระแสเอาต์พุตที่ผ่านการรักษาระดับแรงดันแล้ว

f เป็นความถี่ของสัญญาณไฟสลับ (ในประเทศไทยมีค่าเท่ากับ 50Hz)

วงจรเรียงกระแส จะจ่ายกระแส (I_{rect}) ในช่วงเวลานำกระแส (Conduction time) (T_{cond}) เท่านั้น ซึ่งค่าเวลา T_{cond} สามารถหาได้จาก

$$T_{cond} = \frac{\theta}{360^\circ} \cdot T \quad (12)$$

เมื่อ θ คือ มุมนำกระแส (Conduction Angle, Degree) หาได้จาก

$$\theta = \cos^{-1} \frac{V_{i(peak)} - V_r}{V_{i(Peak)}} \quad (13)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$I_{rect(peak)} \approx \frac{360^\circ}{\theta} I_o \quad (14)$$

จากสมการที่ได้มาทั้งหมดเหล่านี้ ทำให้เราสามารถกำหนดค่า C ที่เหมาะสมได้จาก

$$c \approx \frac{I_o}{V_r} \left(\frac{T}{2} - T_{cond} \right) \quad (15)$$

สำหรับค่าอัตราาการทนแรงดันของตัวเก็บประจุ ควรใช้ระดับแรงดันในวงจรกรองกระแส ($V_{i(peak)}$) ไม่นเกิน 75% ของอัตราาการทนแรงดันที่ระบุไว้บนตัวเก็บประจุนั้น

ตัวอย่าง 1 หม้อแปลงมีแรงดันทุติยภูมิ 24V ความถี่ 50Hz [วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นที่ใช้หม้อแปลงมีแทปกกลาง]

(a) ต้องการหาค่าตัวเก็บประจุ ถ้า $V_r = 2V$ ที่ $I_o = 1A$

(b) ต้องการหา I_{cond} และ $I_{rect(peak)}$

วิธีทำ (a)

$$V_m = \frac{\sqrt{2} \times 24}{2} = 17V$$

$$V_{i(peak)} = V_m - V_{rect} \approx 17 - 1 = 16V$$

$$\theta \approx \cos^{-1} \left[\frac{(16 - 2)}{16} \right] \approx 30^\circ$$

$$T = \frac{1}{f} = 20ms$$

$$T_{cond} = 1.667ms$$

ดังนั้น $C \approx \frac{1}{2} \times \left(\frac{20ms}{2} - 1.667ms \right) = 4,166.5\mu F$

เลือกค่าตัวเก็บประจุมาตรฐานคือ 4,700 μF 35V เป็นอย่างต่ำ

(b)

$$I_{rect(peak)} = \frac{1 \times 360^\circ}{30^\circ} = 12A$$

$$T_{cond} = 1.667ms$$

วงจรรักษาระดับแรงดัน

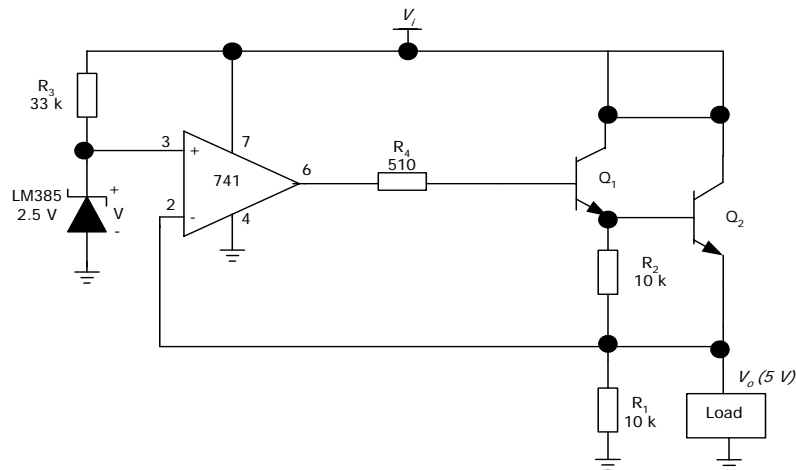
วงจรรักษาระดับแรงดัน (Voltage Regulators) มีหน้าที่รักษาระดับแรงดันไฟตรงที่จ่ายให้ภาระมีค่าคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตามสภาพภาระ โดยทั่วไป สามารถแบ่งชนิดของวงจรรักษาระดับแรงดันออกเป็น 2 ชนิด คือ วงจรรักษาระดับแรงดันแบบอนุกรม (Series Regulator) และวงจรรักษาระดับแรงดันแบบสวิตซิ่ง (Switching Regulator)

วงจรรักษาระดับแรงดันแบบอนุกรม จะทำหน้าที่ควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้โดยการใช้ตัวเปรียบเทียบแรงดันกับแรงดันเอาต์พุตที่ย้อนกลับมา ส่วนวงจรรักษาระดับแรงดันแบบสวิตซิ่งนั้นจะทำงานในลักษณะเปิดขปิด จากนั้นสัญญาณที่ได้ก็จะผ่านวงจรกรองกระแสแบบตัวเหนี่ยวนำ-ตัวเก็บประจุ (LC Filter) เพื่อกรองกระแสให้เรียบเป็นไฟตรง ส่วนการควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ทำได้โดยการปรับค่าเวลาในการ "On" (t_{on})

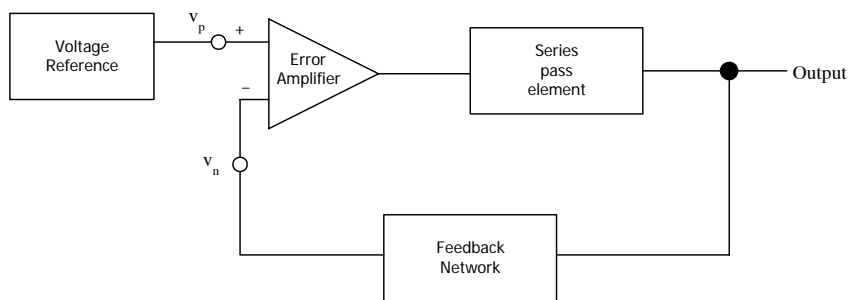
วงจรรักษาระดับแรงดันแบบอนุกรม

วงจรรักษาระดับแรงดันแบบอนุกรมนี้เป็นหลักการทำงานของวงจรรักษาระดับแรงดันของวงจรรวมหรือไอซี (Integrated Circuit, IC) ที่ทำหน้าที่รักษาระดับแรงดัน โดยทั่วไปในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็น IC ตระกูล 78XX (Three terminal positive voltage Regulator) หรือ 79XX (Three terminal negative voltage Regulator) ตลอดจนไอซีตระกูลปรับค่าแรงดันเอาต์พุตได้ (Adjustable Regulator)

พื้นฐานของวงจรรักษาระดับแรงดันแบบอนุกรม



จากวงจรด้านบนเป็นวงจรเบื้องต้นของวงจรรักษาระดับแรงดันแบบอนุกรม เพื่อให้ง่ายในการทำความเข้าใจ เราสามารถจำลองออกมาเป็นแผนผังได้ดังนี้



1. ภาคสร้างแรงดันอ้างอิง (Voltage Reference) เป็นจุดเริ่มต้นซึ่งเป็นตัวกำหนดแรงดันอ้างอิงขึ้นมา เพื่อใช้เปรียบเทียบกับแรงดันเอาต์พุตที่ป้อนกลับเข้ามายังภาคขยายค่าผิดพลาด (Error Amplifier) ซึ่งวงจรนี้ก็คือส่วนของ R₃ และ LM385 จะให้แรงดันอ้างอิงออกมา 2.5V และเป็นอิสระต่ออุณหภูมิ

2. ภาคขยายค่าผิดพลาด (Error Amplifier) ทำหน้าที่รับสัญญาณแรงดัน v_p คือ v_{ref} และ v_n คือ แรงดันที่ผ่านมาจากโครงข่ายป้อนกลับ (Feedback Network) ซึ่งได้รับมาจาก v_o โดยที่ v_o หาได้จาก

$$v_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)v_{ref} \tag{16}$$

เอาต์พุตของภาคขยายค่าผิดพลาด คือ $v_d = v_p - v_n$

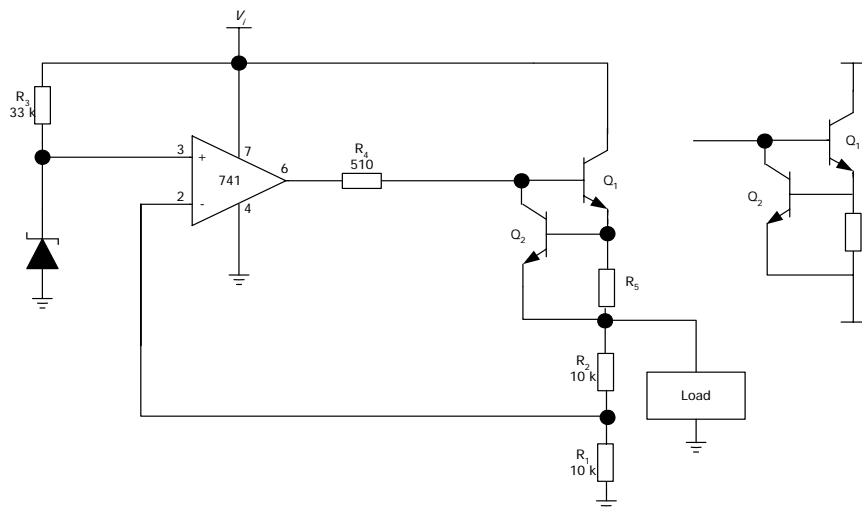
3. โครงข่ายป้อนกลับ (Feedback Network) ส่วนนี้คือ วงจรแบ่งแรงดัน R_1 และ R_2 จาก V_o ทำหน้าที่แบ่งแรงดันให้เหมาะสมในการเปรียบเทียบกับ V_{ref} โดยภาคขยายค่าผิดพลาด

4. อุปกรณ์ส่งผ่านแบบอนุกรม (Series Pass Element) ส่วนนี้คือ ทรานซิสเตอร์ดาร์ลิ่งตัน Q_1 และ Q_2 หลังภาคขยายค่าผิดพลาด ทำหน้าที่ ขยายกระแสให้เพียงพอที่จ่ายให้โหลดได้ตามต้องการ

วงจรภาคป้องกัน (Protection Circuitry)

วงจรรักษาระดับแรงดัน เมื่อนำมาใช้งาน จะต้องมีการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับวงจรเองและภาระที่นำมาต่อ การป้องกันที่นิยมใช้กันมีอยู่ 3 วิธีดังนี้

- 1. การป้องกันภาระเกิน (Overload Protection)** จุดประสงค์ของการป้องกันในส่วนนี้ ก็เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดกระแสไหลผ่านภาระ ซึ่งต้องผ่านทรานซิสเตอร์ส่งผ่านแบบอนุกรม (Series-Pass Transistor) มากเกินไป ซึ่งจะทำให้ทรานซิสเตอร์นี้เสียหายได้



วงจรนี้ สามารถที่จะลัดวงจรที่เอาต์พุตได้โดยที่วงจรไม่เสียหาย เนื่องจากในขณะที่ลัดวงจรเอาต์พุต จะมีกระแสไหล $I_{out(max)}$ ซึ่งเราก็กำหนดได้โดย R_{sc}

$$I_{out(max)} = \frac{V_{BE2(on)}}{R_{sc}} \quad (17)$$

ค่า $V_{BE2(on)}$ คือ แรงดันเบส-อิมิตเตอร์ ในขณะที่ “On” ซึ่งจะมีคงที่อยู่ในช่วง 0.6V–1V ขึ้นอยู่กับ Data Sheet ของทรานซิสเตอร์เบอร์นั้น ระบุไว้

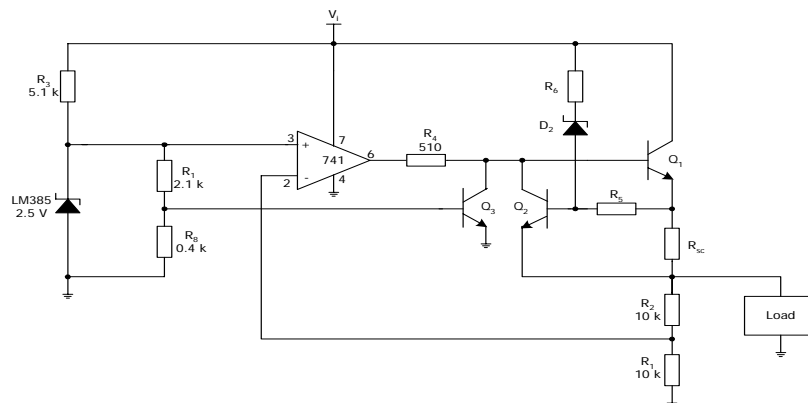
ดังนั้นจากวงจรดังกล่าว เราสามารถจำกัดกระแส (Current Limit) วงจรรักษาระดับแรงดัน โดยกำหนดกระแสที่ต้องการจะจำกัด ได้โดยการเลือกค่า R_{sc}

2. การป้องกันให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในบริเวณที่ปลอดภัย SOA protection

SOA คือ Safe Operating Area หมายถึงบริเวณทำงานที่ปลอดภัยของ Power Dissipation ใน Power Transistor ที่นำมาใช้จ่ายกระแสในวงจร Regulator

$$Power\ Dissipation, P_D = I_C V_{CE} \quad (18)$$

โดยทั่วไปค่า P_D จะระบุมาใน Data Sheet ของทรานซิสเตอร์แต่ละเบอร์ด้วย ในขณะที่ใช้งาน ผลคูณระหว่าง I_C และ V_{CE} จะต้องมีค่าไม่เกิน $P_{D(max)}$ อย่างเด็ดขาดเพราะทรานซิสเตอร์จะร้อนและเกิดความเสียหายได้



จากวงจร ส่วนที่ทำหน้าที่ป้องกันให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในบริเวณที่ปลอดภัย คือ D_2 , R_5 และ R_6 เมื่อ V_i ยังมีค่าปกติ ซีเนอร์ไดโอด D_2 ก็ไม่สามารถที่จะ “On” ได้ ดังนั้นวงจรในส่วนป้องกันให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในบริเวณที่ปลอดภัย จึงไม่มีผลต่อวงจรโดยรวม แต่เมื่อ V_i มีค่าสูงมาก (V_{CEQ1} ก็จะมีค่าสูงขึ้นตาม) ซีเนอร์ไดโอด D_2 จะ “On” ซึ่งมีผลทำให้ Q_2 ทำงาน ภาคจำกัดกระแสจึงทำงาน เพื่อลดกระแสลงเป็นการป้องกันไม่ให้ Q_1 เสียหาย

3. การป้องกันวงจรเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal Shutdown) ในวงจรรักษา

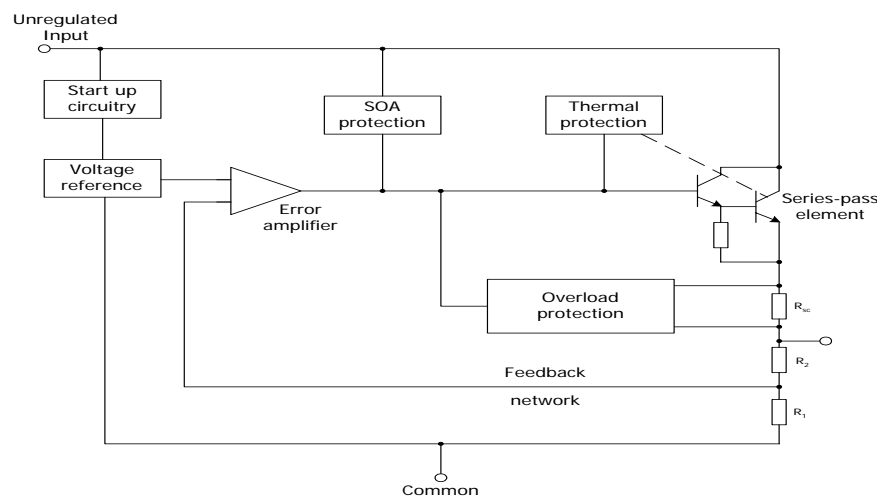
ระดับแรงดันที่ทำงานด้วยกำลังสูง (High-Power Regulator) เมื่อทำงานตามสภาวะปกติก็จะเกิดความร้อนขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้อุปกรณ์เสียหายเนื่องจากความร้อนได้ ดังนั้น จึงต้องมีการป้องกันไม่ให้วงจรมีอุณหภูมิสูงเกินไป โดยอาศัยหลักการคือ ลดการแพร่กระจายกำลังงาน (Power

Dissipation) ที่ตัวทรานซิสเตอร์ลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อลดการแพร่กระจายกำลังงานลงได้ อุณหภูมิสูงก็จะลดลงมาเอง

ในวงจรส่วนการป้องกันวงจรเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิ ก็คือ Q_3, R_7 และ R_8 เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึงประมาณ 175°C ทรานซิสเตอร์ Q_3 จะดึงกระแส I_B มาจาก Q_1 ทำให้การแพร่กระจายกำลังงานของ Q_1 ลดลง (เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น I_C ของ Q_3 จะสูงขึ้น) ก็จะส่งผลให้อุณหภูมิที่ตัว Q_1 ลดลงตาม

แผนผังของวงจรรักษาระดับแรงดันที่สมบูรณ์

เราสามารถสรุปโครงสร้างของวงจรรักษาระดับแรงดันได้ตามแผนผังข้างล่างนี้ ซึ่งเป็นโครงสร้างของไอซีวงจรรักษาระดับแรงดันที่มีอยู่ในปัจจุบัน



ไอซีวงจรรักษาระดับแรงดัน (IC Voltage Regulator)

ไอซีวงจรรักษาระดับแรงดัน เป็นที่นิยมนำมาใช้กันมาก เนื่องจากใช้งานง่ายและมีราคาไม่แพงมาก อีกทั้งยังมีวงจรป้องกันภายในตัวไอซีเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ยังมีหลายประเภทไว้ให้เลือกเพื่อความเหมาะสมในการใช้งาน

ไอซีวงจรรักษาระดับแรงดันที่มีแรงดันคงที่ชนิด 3 ขา (Three-terminal fixed voltage regulators)

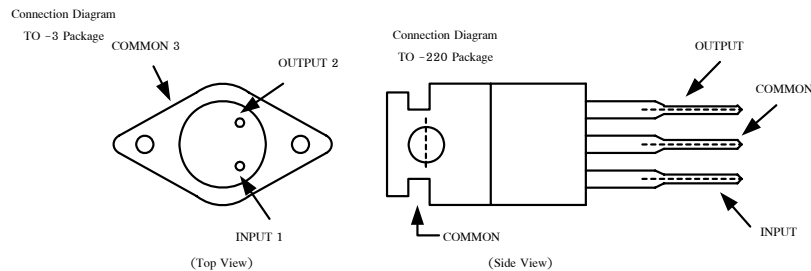
เป็นไอซีที่ให้แรงดันออกมาคงที่ (ตามเบอร์ไอซี) โดยประกอบด้วย 3 ขาคือ อินพุตของแรงดันที่ยังไม่มีการรักษาระดับแรงดัน (Unregulated input), เอาต์พุตที่มีการรักษาระดับแรงดันแล้ว (Regulated output) และ จุดร่วม (Common) หรือจุดลงกราวนด์ (Ground)

ไอซีชนิดนี้สามารถจำแนกได้ 2 ประเภทคือ

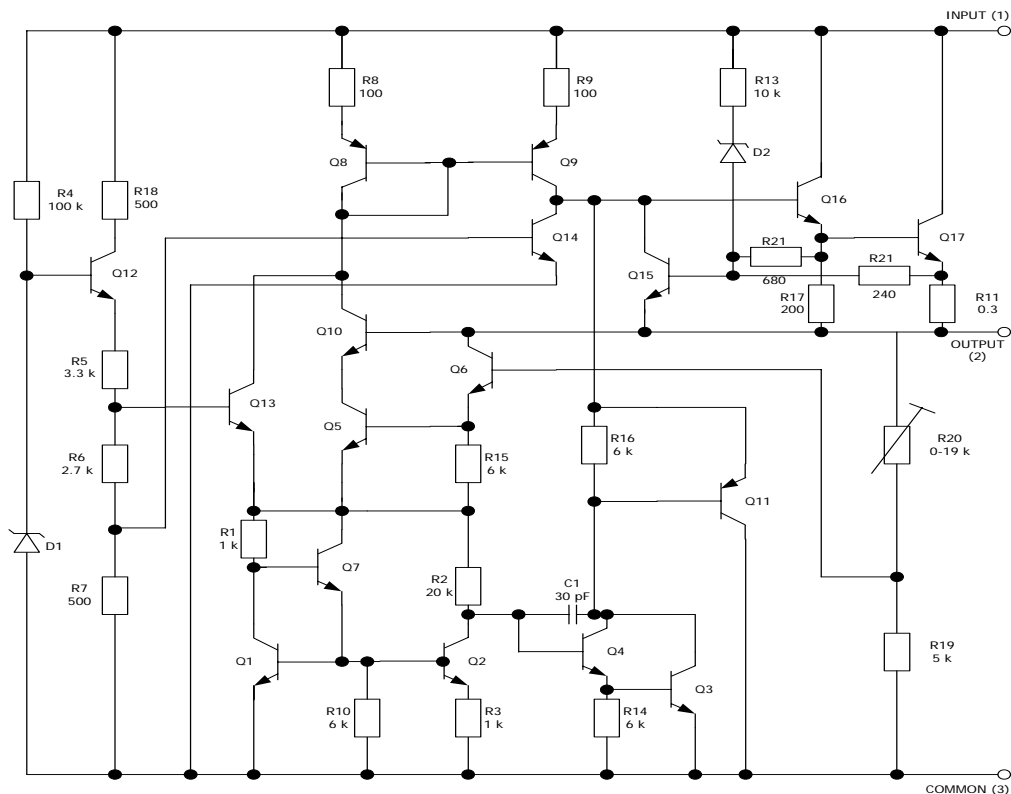
1. วงจรรักษาระดับแรงดันคงที่ด้านบวก (Fixed voltage regulators) จะขึ้นต้นด้วย 78XX โดยที่ XX นี้ หมายถึงแรงดันไฟตรงที่ผ่านการรักษาระดับแรงดันแล้ว เช่น 7805 จะให้แรงดันไฟตรงออกมาคงที่ 5V
2. วงจรรักษาระดับแรงดันคงที่ด้านลบ (Negative fixed Voltage Regulators) จะขึ้นต้นด้วย 79XX โดยที่ XX นี้มีความหมายคือ เป็นแรงดันไฟลบที่ผ่านการรักษาระดับแรงดันแล้ว

สำหรับรูปร่างของไอซีชนิดนี้จะมีอยู่ 2 แบบ ถ้าเป็นไอซีที่จ่ายกระแสได้ประมาณ 1A ตัวไอซี จะมีรูปร่าง T_O -220 Package แต่ถ้าจ่ายกระแสได้สูงกว่านั้น ตัวไอซีจะมีรูปร่างเป็น T_O-3 Package ทั้ง 2 แบบนี้ ต้องติดแผ่นระบายความร้อนให้กับตัวไอซีด้วย

ถ้าไอซีที่จ่ายกระแสได้ต่ำกว่า 1A ก็จะมีรูปร่างเล็กลงไปด้วย ซึ่งผู้ผลิตจะไม่มีการเตรียมสำหรับยึดตัวไอซีเข้ากับแผ่นระบายความร้อน (Heat Sink) เนื่องจากเกิดความร้อนขึ้นไม่มาก แต่เราก็ไม่ค่อยนำมาใช้มากนัก เนื่องจากจ่ายกระแสได้ต่ำ



โครงสร้างภายใน (Internal Construction)



โครงสร้างภายในตัวไอซีข้างต้น เป็นไอซีรักษาระดับแรงดันที่ให้ไฟบวก ซึ่งเป็นตระกูล 78XX (จ่ายกระแสได้ประมาณ 1A) ซึ่งจากโครงสร้าง สามารถแบ่งการทำงานออกเป็น ส่วน ๆ ดังนี้

1. ทรานซิสเตอร์ Q_1 ถึง Q_{11} ทำหน้าที่ผลิตแรงดันอ้างอิงและตรวจจับค่าผิดพลาด (Bandgap Reference/Error Amplifier) ในสภาวะปกติ (แรงดันที่เบสของ Q_6) จะมีค่า 5V
2. R_{19} และ R_{20} เป็นโครงข่ายป้อนกลับ ดังนั้นแรงดันเอาต์พุต (V_o) สามารถหาได้จาก

$$V_o = \left(1 + \frac{R_{20}}{R_{19}}\right) \cdot 5V \quad (19)$$

ดังนั้นในการผลิต ผู้ผลิตสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตได้โดย การเลือกค่า R_{20} ยกตัวอย่าง ถ้า R_{20} เท่ากับ 0 ไอซีตัวนี้ก็คือ เบอร์ 7805 ถ้า $R_{20} = 10k\Omega$ ก็เป็นเบอร์ 7815

3. Q_{16} และ Q_{17} ทำหน้าที่ทรานซิสเตอร์ดาร์ลิงตันส่งผ่านแบบอนุกรม (Series-Pass Darlington Pair)
4. R_{11} และ Q_{15} ทำหน้าที่ วงจรป้องกันสภาวะภาวะเกิน
5. D_2 และ R_{12} ทำหน้าที่ป้องกันให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในบริเวณที่ปลอดภัย
6. Q_{14} เป็นตัวตรวจจับอุณหภูมิ (Temperature Sensor) เพื่อทำหน้าที่ป้องกันวงจรเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึงประมาณ 150°C
7. R_4 และ D_1 ทำหน้าที่เป็นภาคสร้างแรงดันอ้างอิง

ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical Characteristics)

ยกตัวอย่าง ไอซีรักษาระดับแรงดันเบอร์ 7805

Absolute Maximum Ratings

Input Voltage (5 V through 18 V) 35 V

(24 V) 40 V

Internal Power Dissipation Internally Limited

Storage Temperature Range -65°C to $+150^\circ\text{C}$

Operating Junction

Temperature Range

$\mu A7800$ -55°C to $+150^\circ\text{C}$

$\mu A7800C$ 0°C to $+125^\circ\text{C}$

$\mu A7805C$

Electrical Characteristics

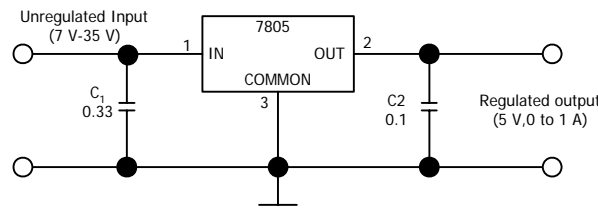
$$V_{IN} = 10V, I_{OUT} = 500mA, 0^{\circ}C \geq T_J \leq 125^{\circ}C, C_{IN} = 0.33\mu F, C_{OUT} = 0.1\mu F.$$

Unless otherwise specified.

Characteristic	Condition(Note)	Min	Typ	Max	Unit
Output Voltage	$T_J = 25^{\circ}C$	4.8	5.0	5.2	V
Line Regulation	$T_J = 25^{\circ}C$ C	$7V \leq V_{IN} \leq 25V$	3	100	mV
		$8V \leq V_{IN} \leq 12V$	1		mV
Load Regulation	$T_J = 25^{\circ}C$ C	$5mA \leq I_{OUT} \leq 1.5A$	15		mV
		$250mA \leq I_{OUT} \leq 700mA$	5		mV
Output Voltage	$7V \leq V_{IN} \leq 20V$ $5mA \leq I_{OUT} \leq 1.0A$ $P \leq 15W$	4.75		5.25	V
Quiescent Current	$T_J = 25^{\circ}C$		4.2	8.0	mV
Quiescent Current Change	With line	$7V \leq V_{IN} \leq 25V$			mV
	With load	$5mA \leq I_{OUT} \leq 1.0A$			mV
Output Noise Voltage	$T_J = 25^{\circ}C$ $10Hz \leq f \leq 100Hz$		40		μV
Ripple Rejection	$f = 120Hz, 8V \leq V_{IN} \leq 18V$	62	78		dB
Dropout Voltage	$I_{OUT} = 1.0A, T_J = 25^{\circ}C$		2.0		V
Output Resistance	$F = 1 kHz$		17		$m\Omega$
Short-Circuit Current	$T_J = 25^{\circ}C, V_{IN} = 35V$		750		mA
Peak Output Current	$T_J = 25^{\circ}C$		2.2		A
Average Temperature Coefficient of Output Voltage	$I_{OUT} = 5 mA$ $0^{\circ}C \leq T_J \leq 125^{\circ}C$		1.1		mV/ $^{\circ}C$

จากตารางลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า ของ 7805 จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตออกมาคงที่ที่ 5V เราจะต้องจ่ายแรงดันอินพุตให้มากกว่า 5V แต่ก็มากกว่าได้ระดับหนึ่งเท่านั้น ซึ่งดูจากตารางข้างบนแล้ว ไอซีเบอร์ 7805 จะจ่ายแรงดันอินพุตได้ไม่เกิน 35V และต้องจ่ายแรงดันอินพุตไม่ต่ำกว่า $V_{out} + V_{Dropout}$ ซึ่งจะได้ $5V + 2V = 7V$

ใน Data Sheet จะระบุให้เราต่อตัวเก็บประจุ 2 ตัว ครอบคลุมด้านอินพุต และเอาต์พุตด้วย



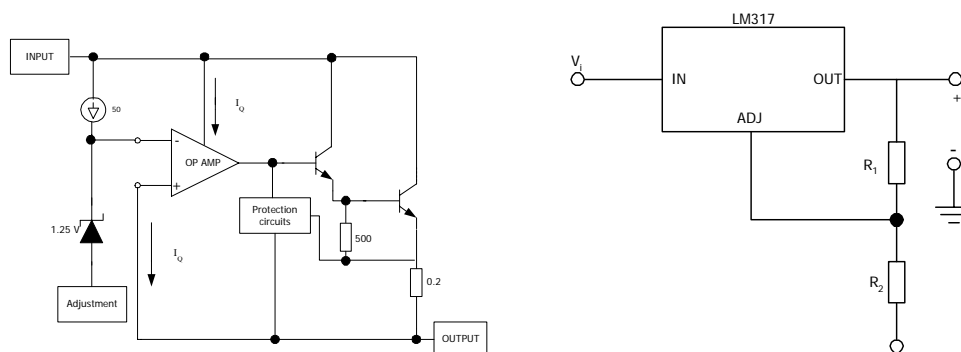
C_1 จะทำหน้าที่ลดผลของความจุแฝง (Stray Inductance) ที่เกิดจากสายไฟ ซึ่งจะมีความจำเป็นมาก ในกรณีที่วงจรรักษาระดับแรงดันถูกวางอยู่ห่างจากภาคที่ยังไม่มีการรักษาระดับแรงดันมาก

ส่วน C_2 ช่วยในการป้องกันการตอบสนองสัญญาณแบบทรานเซียน (Transient Response) ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใด

ไอซีรักษาระดับแรงดันปรับค่าได้แบบ 3 ขา (Three-terminal Adjustable Regulators)

ไอซีรักษาระดับแรงดันปรับค่าได้แบบ 3 ขา จะมีจุดที่เตรียมไว้สำหรับต่อตัวต้านทานภายนอก เพื่อปรับค่าแรงดันเอาต์พุต ซึ่งแรงดันเอาต์พุต ก็มีทั้งไอซีประเภทที่ให้ไฟบวก (Positive) และ ไอซีที่ให้ไฟลบ (Negative)

ตัวอย่างของไอซีประเภทนี้ ที่เป็นไฟบวกคือ IC เบอร์ LM317 ส่วนที่เป็นไฟลบคือ เบอร์ LM337 ซึ่งทั้ง 2 ชนิดนี้ สามารถจ่ายกระแสได้สูงสุดประมาณ 1.5A โครงสร้างของไอซีเบอร์ LM317 แสดงในภาพข้างล่าง ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับไอซีเบอร์ LM337



จากแผนผังด้านบน แสดงถึงโครงสร้างภายในไอซีเบอร์ LM317 จะเห็นว่ามี แรงดันอ้างอิง (Bandgap Reference) มีค่า 1.5V และมีกระแสไหลผ่านขณะทำงาน $50\mu A$ ซึ่งไหลมาจากแหล่งจ่ายกระแส วงจรในส่วนนี้จะทำงานเป็นอิสระต่ออุณหภูมิ นอกจากนี้ ไอซี LM317 จะมีวงจรป้องกัน เช่นเดียวกับไอซีรักษาระดับแรงดันทั่วไป

เราสามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตได้จากแผนผังข้างต้น

จากกฎ KVL ;
$$V_O = V_{Adj} + 1.25V \text{ (เนื่องจาก } V_n = V_p \text{)}$$

$$\text{และ } V_O = V_{R1} + V_{R2}$$

เนื่องจาก $V_{Adj} = V_{R2}$ และ $V_{R1} = 1.25V$

$$\text{ดังนั้น } V_O = 1.25V + R_2(50\mu A + \frac{1.25V}{R_1})$$

เมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$V_O = (1 + \frac{R_2}{R_1})(1 + \frac{50\mu A}{(1.25V)(R_1 // R_2)})1.25V \quad (20)$$

จากสมการที่ (20) จะพบว่า V_O ขึ้นอยู่กับค่าของ R_1 และ R_2 แต่ในทางปฏิบัติเราสามารถลดรูปสมการให้สั้นลงได้ เนื่องจาก Data Sheet LM317 ผู้ผลิตบอกว่ากระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่าน R_1 ควรอยู่ในค่าประมาณ 5 mA ดังนั้นค่าของ R_1 คือ

$$R_1 = \frac{1.25V}{5mA} = 250\Omega$$

ซึ่งจะให้ $\frac{50\mu A}{(1.25V)(R_1 // R_2)} \ll 1$ ดังนั้นจากสมการ (20) จะได้

$$V_O = (1 + \frac{R_2}{R_1})1.25V \quad (21)$$

ในการใช้งานจริงจะใช้ค่า R_1 เป็นตัวต้านทานค่าคงที่ประมาณ 250 Ω และ R_2 เป็นตัวต้านทานปรับค่าได้ (Potentiometer, POT) ต่อไว้รับค่าแรงดันเอาต์พุต ซึ่งสามารถปรับได้อยู่ในช่วง

$$1.25V \leq V_O \leq 35V$$

โดยปกติแล้ว นิยมใช้ค่า R_2 ประมาณ 5k Ω (Potentiometer)

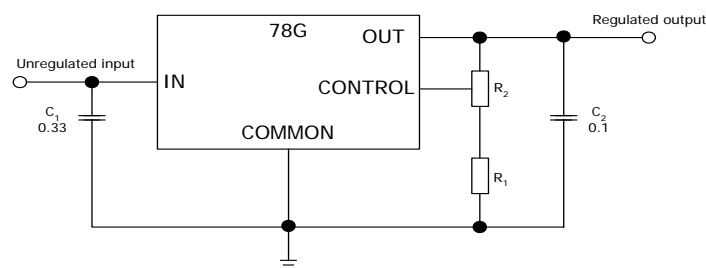
ข้อควรระวัง

การจ่ายแรงดันอินพุต สำหรับไอซี LM317 และไอซี LM337 จะต้องจ่ายแรงดันแรงดันอินพุตไม่มากกว่าแรงดันเอาต์พุต 40V เพราะจะทำให้ไอซีพังได้

$$V_i \leq V_o + 40V \quad (22)$$

ไอซี LM317 สามารถจ่ายกระแสได้สูงสุด 1.5A ถ้าหากว่าเราต้องการกระแสที่สูงกว่านี้ก็อาจหันมาใช้ไอซีรักษาแรงดันปรับค่าได้แบบ 3 ขา เบอร์ LM338 ซึ่งสามารถจ่ายกระแสสูงสุดได้ถึง 5A หรือ LT1038 และ LM396 ซึ่งจ่ายกระแสได้สูงสุดถึง **10A** แต่ในการออกแบบเพื่อใช้งานควรศึกษาถึง **Data Sheet ของ IC ตัวนั้นก่อน** ซึ่งก็จะมีหลักการที่คล้ายกันกับไอซีรักษาแรงดันที่ได้อีกแล้ว

ไอซีรักษาแรงดันปรับค่าได้แบบ 4 ขา (Four-terminal Adjustable Regulators)



ไอซีรักษาแรงดันปรับค่าได้แบบ 4 จะมีขาที่เพิ่มขึ้นมาคือขาควบคุม (Control) และมีลักษณะการต่อใช้งานดังวงจรข้างบน ซึ่งเป็นการยกตัวอย่างไอซีเบอร์ 78G (แบบบวก, Positive) และ 79G (แบบลบ, Negative)

จากวงจร V_{control} ของไอซีเบอร์ 78G มีค่า 5V และ 79G มีค่า $-2.23V$ ซึ่งเป็นแรงดันอ้างอิง ดังนั้นเราสามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตได้จาก

$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)5V \quad \text{สำหรับ 78G} \quad (23)$$

และ

$$V_o = -\left(1 + \frac{R_1}{R_1}\right)2.23V \quad \text{สำหรับ 79G} \quad (24)$$

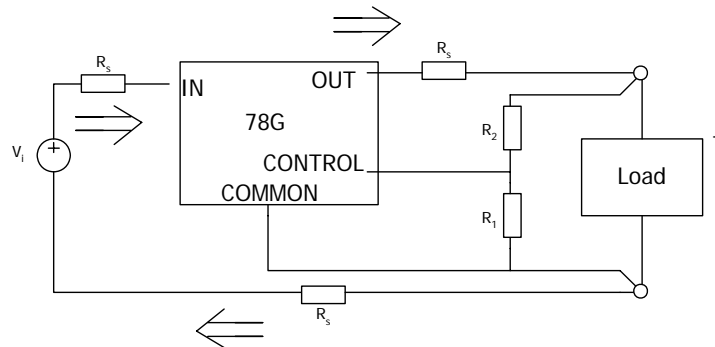
เพื่อจะผลกระทบของกระแสไบอัสอินพุต (Input bias current) ที่ขาควบคุมของไอซีจาก Data Sheet ผู้ผลิตได้แนะนำว่า ควรจะมีกระแสไหลในโครงข่ายป้อนกลับประมาณ 1 mA ดังนั้นค่าของตัวต้านทาน สามารถหาได้ดังนี้

$$R_1 = \frac{5V}{1mA} = 5k\Omega$$

$$R_1 = \frac{2.23V}{1mA} = 2.23k\Omega \approx 2.2k\Omega$$

แรงดันเอาต์พุตสามารถปรับได้โดยการปรับค่า R_2 ถ้าเป็นไอซีเบอร์ 78G สามารถปรับค่า V_o ได้ในช่วง $5V \leq V_o \leq 30V$ และถ้าเป็นเบอร์ 79G ก็จะสามารถปรับค่าได้ในช่วง $-2.3V \geq V_o \geq -30V$

ในกรณีที่จำเป็นต้องวางวงจรรักษาระดับแรงดันกับภาระไว้ห่างกันมาก จะต้องเดินสายไฟยาวมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้เกิดแรงดันตกคร่อมในสาย เนื่องจากค่าความต้านทานแฝงที่อยู่ในสาย (Stray Wiring Resistances) เราสามารถกำจัดผลของแรงดันตกคร่อมในสายได้ โดยใช้วงจร Four wire remote sensing ตามวงจรด้านล่างได้



ปัญหา 2

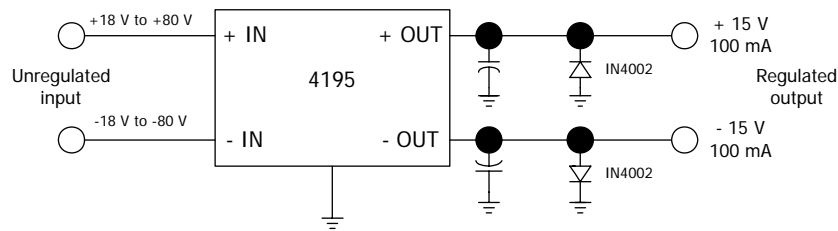
- จงใช้ไอซีเบอร์ 78G และ 79G ออกแบบแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงแรงดันคู่ที่สามารถปรับค่าได้ในช่วง $\pm 5V$ ถึง $\pm 30V$ โดยการปรับ POT 2 ตัว
- ถ้าอัตราทนแรงดันอินพุตสูงสุด (Maximum input voltage rating) ของไอซีเบอร์ 78G คือ $+40V$ และ 79G คือ $-40V$ และแรงดันตกคร่อมสูงสุด (Maximum dropout voltage) $2.5V$ สำหรับ 78G และ $2.3V$ สำหรับ 79G จงหาค่าแรงดันอินพุต (Unregulated input voltage) ที่ใช้งานได้ของวงจรนี้

วงจรรักษาระดับแรงดันชนิดติดตามคู่ (Dual Tracking Regulators)

สำหรับวงจรหรืออุปกรณ์ที่ต้องใช้ไฟเลี้ยงเป็นแบบแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงคู่ (Dual Power Supply) ยกตัวอย่าง เช่น ออปแอมป์, ตัวแปลงข้อมูล (Data Converters) และ Function Modules วงจรรักษาระดับแรงดันที่เหมาะสม และสะดวกในการใช้งานก็คือ วงจรรักษาระดับแรงดันชนิดติดตาม ซึ่งจะให้แรงดันเอาต์พุตออกมา 2 ค่า โดยแต่ละค่ามีขนาดเท่ากัน แต่มีขั้วตรงกันข้าม

ตัวอย่าง ไอซีชนิดนี้คือ เบอร์ RC4195 เป็น ไอซีที่ให้แรงดันคงที่แบบคู่ $\pm 15V$ (Fixed dual regulator) เป็นของบริษัท Reytheon ส่วน RC4194 เป็นไอซีชนิดเดียวกันแต่สามารถปรับค่าได้ ไอซีทั้ง 2 เบอร์นี้จะมีวงจรป้องกันลัดวงจร และวงจรป้องกันการเสียหายทรานซิสเตอร์เนื่องจากอุณหภูมิด้วย

อุปกรณ์ที่ต้องต่อภายนอก คือ ตัวเก็บประจุตรงเอาต์พุต เพื่อป้องกันการตอบสนองแบบทรานเซียนส์ (เพื่อให้ได้ผลดีที่สุดควรใช้ตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม)



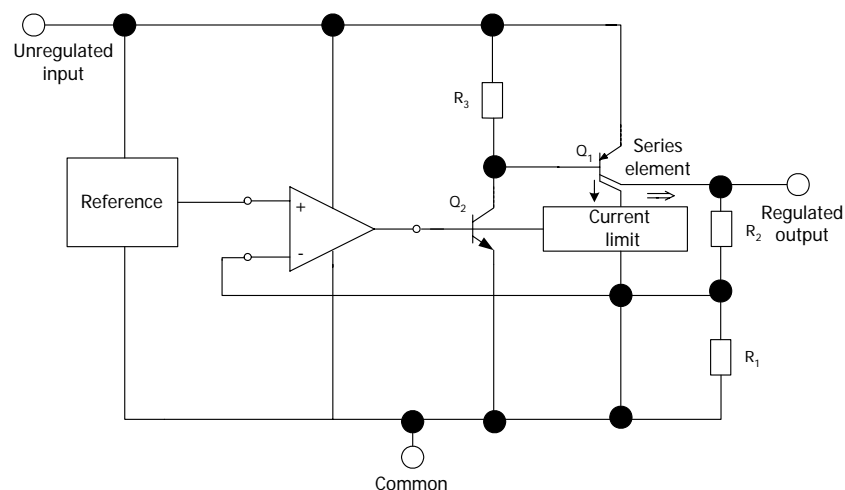
ส่วนไดโอดนั้นต่อไว้เพื่อป้องกันสถานะแลทช์ที่เอาต์พุต (Output latchup) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อมีการจ่ายไฟให้วงจรรักษาระดับแรงดัน อาจจะทำให้วงจรรักษาระดับแรงดันแต่ละตัว ทำงานในเวลาที่แตกต่างกัน ถ้าภาวะที่เอาต์พุตมีค่าต่างกัน วงจรรักษาระดับแรงดันที่ทำงานเร็วกว่าจะพยายามสร้างแรงดันเอาต์พุตที่มีขั้วตรงข้ามกับสถานะปกติ ทำให้เกิดสถานะแลทช์ ไดโอดที่ต่อจะได้รับไบัสตรงเมื่อเกิดสถานะนี้

วงจรรักษาระดับแรงดันที่มีแรงดันตกคร่อมต่ำ (Low-Dropout Voltage Regulators)

แรงดันตกคร่อม (Dropout Voltage) คือ ความแตกต่างของแรงดันอินพุต และแรงดันเอาต์พุตที่ต่ำที่สุด ที่ยังคงสามารถส่งผลให้วงจรรักษาระดับแรงดันนั้นทำงานอยู่ได้

ในไอซีรักษาระดับแรงดันแบบทั่วไป เช่น 7805 จะมีแรงดันตกคร่อม 2V (โดยเฉลี่ย) 2.5V(สูงสุด) หมายความว่า เราจะต้องจ่ายแรงดันอินพุตให้อีซีเบอร์ 7805 นี้ไม่ต่ำกว่า $5V+2.5V=7.5V$ เป็นอย่างต่ำ

วงจรรักษาระดับแรงดันที่มีแรงดันตกคร่อมต่ำ จะมีแรงดันตกคร่อมต่ำกว่า 0.6V เหมาะสำหรับใช้กับวงจรที่มีขีดจำกัดของแรงดันอินพุต เช่น อุปกรณ์ไร้สาย อุปกรณ์เคลื่อนที่ ที่จำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายไฟเป็นแบตเตอรี่

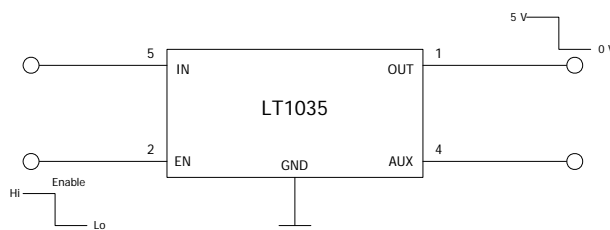


แผนผังของวงจรรักษาระดับแรงดันที่มีแรงดันตกคร่อมต่ำ จะเห็นว่า มีภาคจำกัดกระแส (Current Limit) โดยที่ไม่ใช้ R_{SC} ซึ่งจุดนี้เป็นตัวลดแรงดันตกคร่อมในตัวไอซีได้เป็นอย่างดี

ตัวอย่างของวงจรรักษาแรงดันที่มีแรงดันตกคร่อมต่ำ คือเบอร์ L487, L4700 ของบริษัท SOS หรือ LM2931 และ LM2935 ของบริษัท National Semiconductor ตลอดจน LT1020 ของบริษัท Linear Technology

วงจรรักษาแรงดันที่ควบคุมด้วยลอจิก (Logic-Controlled Regulators)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมการรักษาระดับแรงดัน ได้จากสัญญาณลอจิกดิจิทัล ตัวอย่างของวงจรรักษาแรงดันที่ควบคุมด้วยลอจิก คือ ไอซีเบอร์ LT1005 และ LT1035 ของบริษัท Linear Technology จากภาพล่าง เป็นไอซีเบอร์ LT1035

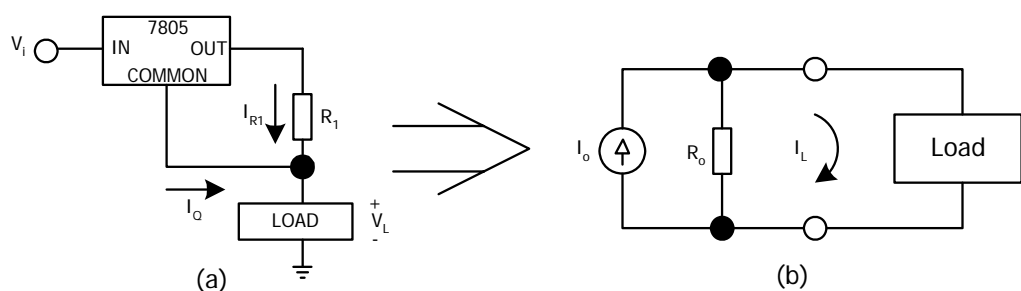


LT1035 จะมีแรงดันเอาต์พุต ขณะได้รับสัญญาณ Enable เป็น ลอจิกสูง มีขนาด 5V 3A นอกจากนี้ยังมี Auxiliary Output ขนาด 5V 75mA จะให้แรงดันเอาต์พุตนี้ตลอดเวลา ในการใช้งานจริง สัญญาณ Enable จะเป็นคำสั่ง (Command) ซึ่งจะถูกระงับ (Shut off) เนื่องจากเกิดสภาวะภาระเกินหรือลัดวงจรที่เอาต์พุต แต่ยังมีไฟเลี้ยงวงจรในส่วนอื่นที่กินกระแสไม่มาก จากขา Auxiliary
 วงจรรักษาแรงดันที่ควบคุมด้วยลอจิกนี้ มักจะนิยมใช้ในงานควบคุมกำลังไฟฟาระยะไกล (Remote Power Control) หรือ การเรียงลำดับแหล่งจ่ายกำลังฉุกเฉิน (Emergency Power Sequencing)

การประยุกต์ใช้งานไอซีรักษาระดับแรงดัน

นอกจากเราจะใช้ไอซีรักษาระดับแรงดันในการทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันแล้ว ยังมีเทคนิคในการประยุกต์ใช้งานไอซีรักษาระดับแรงดันได้อีกดังนี้

1. แหล่งจ่ายกระแส (Current Sources)



การต่อไอซีรักษาระดับแรงดันตามวงจรข้างต้น ก็จะได้แหล่งจ่ายกระแสที่มีขนาด

$$I_o = \frac{5V}{R_1} + I_Q \quad (25)$$

เมื่อ R_1 เป็นตัวต้านทานที่ใช้กำหนดค่ากระแส

I_Q เป็นกระแสหนึ่งสงบ (Quiescent Current)

ค่าของ I_Q สามารถดูได้จาก Data Sheet ซึ่งเป็นค่าคงที่สำหรับไอซีเบอร์ 7805 มีค่า $I_Q = 4.2\text{mA}$ (โดยเฉลี่ย)

ตัวอย่าง 2 โดยการใช้ทฤษฎีอินอร์ตัน แหล่งจ่ายกระแสสามารถเขียนเป็นวงจรเทียบเท่าได้ดังรูป (b) ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแส (I_o) และตัวต้านทานขนาน R_o จงหาค่า I_o และ $R_{o(\min)}$ เมื่อ $R_1 = 20\Omega$

วิธีทำ จากสมการที่ (25)
$$I_o = \frac{5V}{20\Omega} + 4.2\text{mA} = \underline{\underline{254.2\text{mA}}}$$
*

- ถ้าต้องการ $I_o = 250\text{mA}$ ให้ใช้ R_1 เป็น POT

$$R_{o(\min)} \approx \frac{\Delta V_L}{\Delta I_{L(\max)}}$$

จาก Data Sheet การเปลี่ยนแปลงของ $V_1 - V_{\text{common}}$ จาก 8V ถึง 25V จะส่งผลให้ I_Q เปลี่ยนแปลง 0.8mA (สูงสุด)

$$\Delta I_Q = \frac{0.8\text{mA}}{25V - 8V} = 47\mu\text{A}/V(\text{Max})$$

ดังนั้น

ในทำนองเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงของ $V_1 - V_{\text{common}}$ จาก 7V ถึง 25V จะทำให้ $\Delta V_{R1} = 50\text{mV}(\text{max})$ ดังนั้น

$$\Delta I_{R1} = \frac{50\text{mV}}{(25V - 7V)} = 139\mu/V$$

ดังนั้น ทุก ๆ 1V ใน V_L ; I_L มีการเปลี่ยนแปลง = $47 + 139 = 186\mu\text{A}$

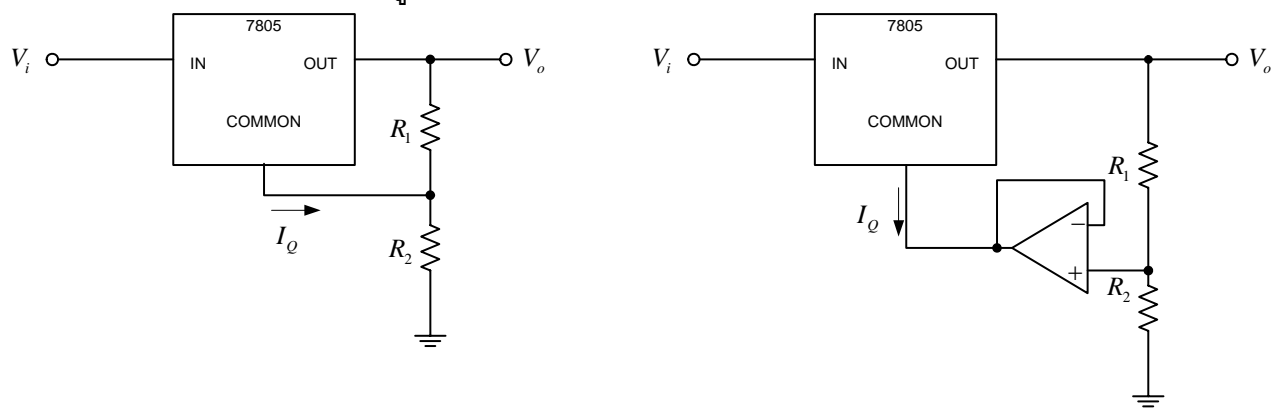
$$R_{o(\min)} = \frac{1V}{186\mu\text{A}} = 5.38\text{k}\Omega$$

ปัญหา 3 จงใช้ LM317 ซึ่งมี line Regulation 0.07%/V แรงดันตกคร่อมประมาณ 2V ที่ $I_O=1A$; $\Delta I_{Adj} = 5\mu A$ (สูงสุด) สำหรับ $2.5V \leq V_I - V_O \leq 40V$

- (a) ออกแบบแหล่งจ่ายกระแสขนาด 1A
- (b) จงหา I_O และ $R_{O(min)}$ จากข้อ(a)

2. การปรับค่าแรงดันเอาต์พุตจากไอซีรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตที่มีค่าคงที่

ไอซีรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตที่มีค่าคงที่ สามารถให้แรงดันเอาต์พุตที่เป็นค่าแรงดันไม่เป็นมาตรฐาน (Nonstandard Voltage) ได้โดยการต่อตัวต้านทาน เพื่อเอาไว้ปรับแรงดันที่ผ่านการรักษาระดับให้ได้ตามต้องการ ตามวงจรรูป (a) ปกตินิยมจะปรับที่ R_2



จากวงจรเป็นตัวอย่างที่ใช้ไอซีรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตที่มีค่าคงที่ เบอร์ 7805 สำหรับแรงดันเอาต์พุตของวงจร สามารถหาได้จาก

$$V_O = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)V_{reg} + R_2 I_Q \tag{26}$$

เมื่อ V_{reg} เป็น แรงดันที่ผ่านการรักษาระดับ

R_2 ควรใช้ค่าต่ำๆ เพื่อให้กำจัดผลของเทอมหลังของสมการ (26) ได้

ตัวอย่าง 3 ต้องการออกแบบวงจรรักษาระดับแรงดันที่มีขนาด $V_O = 7.5V$ จาก IC 7805 จงหาค่า R_1 และ R_2

วิธีทำ จาก Data Sheet ของไอซี 7805

$$I_Q = 4.2 \text{ mA (Typ)}$$

ดังนั้น เลือก $I_{R1} \gg I_Q$ เพื่อที่จะลดผลของ ΔI_Q

เลือก $I_{R1} = 25\text{mA}$

$$\text{ดังนั้น } R_1 = \frac{5\text{V}}{25\text{mA}} = \underline{\underline{200\Omega}}$$

จุดประสงค์ ในการใส่ R_2 ก็เพื่อเพิ่มแรงดันที่ขาจตุรรม ขึ้นมาอีก 2.5V

$$\text{ดังนั้น } R_2 = \frac{2.5\text{V}}{4.2\text{mA} + 25\text{mA}} = \underline{\underline{85.6\Omega}}$$

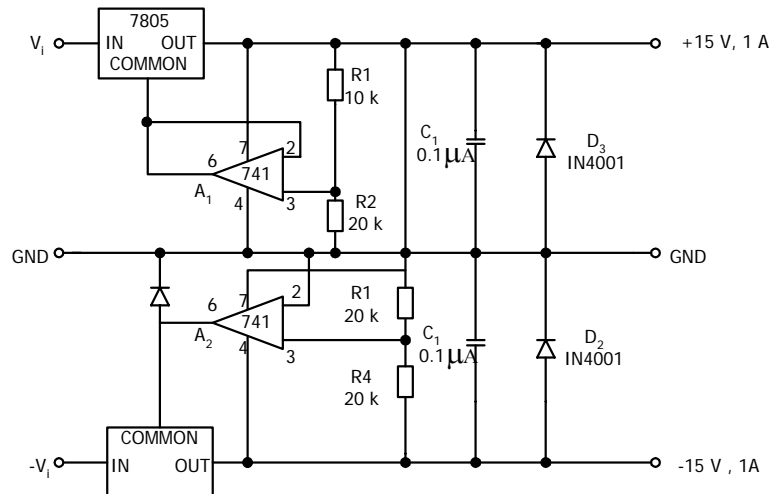
ค่า R_2 ไม่มีขาย ดังนั้น ควร R_2 ใช้ เป็น POT

ปัญหา 4 จงหา Load และ Line Regulation จากตัวอย่างข้างบน

ผลของ I_Q จะส่งผลให้มีกระแสไหลผ่านมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ในการออกแบบจะต้องใช้ R_2 ที่มีกำลังวัตต์สูงขึ้น ยิ่งไอซีรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตที่มีค่าคงที่ อย่างเช่น 7805 จะมีค่า I_Q สูงกว่าไอซีรักษาระดับแรงดันที่ปรับค่าได้ อย่างเช่น LM317 มาก (7805 มี $I_Q = 4.2\text{mA}$ (โดยเฉลี่ย) ส่วน LM 317 มี $I_Q = 5\mu\text{A}$ (สูงสุด) แต่เราสามารถกำจัดผลของ I_Q ได้โดยใช้วงจร (b) เนื่องจากกระแส I_Q จะทำให้ถูกเปลี่ยนทิศทาง โดยแรงดันเอาต์พุตสามารถหาได้จาก

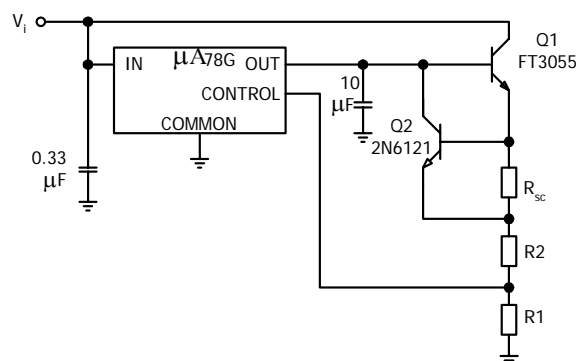
$$V_O = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)V_{reg}$$

วงจรข้างล่างนี้ เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าชนิดแรงดันติดตามคู่ขนาด $\pm 15\text{V}$ ที่สร้างจากไอซีรักษาระดับแรงดันขนาดคงที่ 5V (7805) จำนวน 2 ตัว



3. การเพิ่มขนาดกระแสเอาต์พุตแก่อิซึร์กษาาระดับแรงดัน (Boosting IC Regulator Output Current)

ถึงแม้ว่า จะมีไอซึร์กษาาระดับแรงดันที่สามารถจ่ายกระแสแก้อโหลดได้สูง เช่น 10A ก็ตาม แต่ก็มีขีดจำกัดที่เกิดจากราคาและขนาดของแผ่นระบายความร้อน ในขณะที่เดียวกัน เราสามารถที่จะเพิ่มขนาดการจ่ายกระแสให้เพียงพอกับความต้องการของเรา จากวงจรรักษาาระดับแรงดันที่จ่ายกระแสต่ำๆ ได้โดยการเพิ่มอุปกรณ์ขยายกำลัง (Power Devices) เข้าไปในวงจร



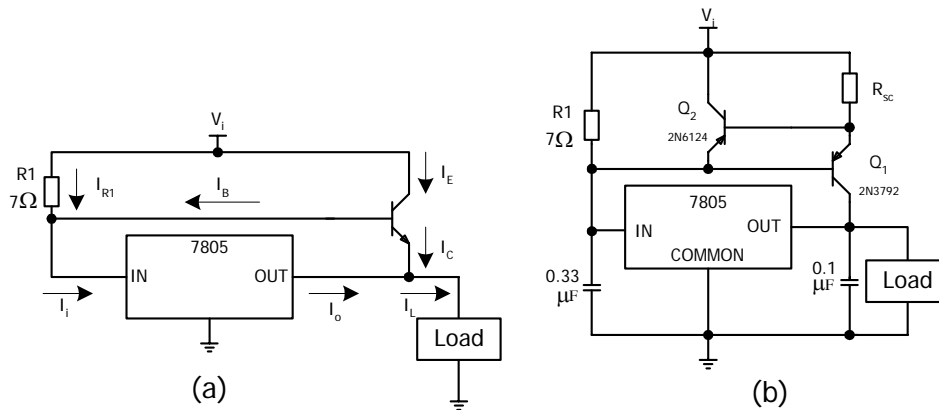
จากวงจรเป็นการเพิ่มกระแส จากไอซึร์กษาาระดับแรงดันแบบ 4 ขา วงจรนี้ยังมีชุดป้องกันสถานะภาวะเกินด้วย โดยที่กระแสเอาต์พุตสูงสุดของวงจรนี้ จะหาได้จาก

$$I_{E1(max)} = \frac{V_{be2(on)}}{R_{sc}}$$

อย่างไรก็ตาม วงจรนี้จะมีแรงดันตกคร่อมเพิ่มขึ้นอีก $V_{BE1(on)} + V_{RSC}$ เนื่องจากไอซี 78G มีแรงดันตกคร่อมสูงสุดอยู่ 2.5V

ดังนั้น กรณีเลวร้ายที่สุด (Worst-Case) สำหรับ แรงดันตกคร่อมคือ

$$2.5V + V_{BE1(on)} + V_{BE2(on)} = 2.5V + 1V + 0.8V = \underline{4.3V}$$



ส่วนวงจรด้านบน (a) เป็นการเพิ่มกระแส สำหรับไอซีรักษาระดับแรงดันแบบ 3 ขา

จากวงจร $I_o + I_d = I_L$

จาก $I_c = \beta I_B$ และ $I_B = I_i - I_{R1} \approx I_o - \frac{V_{EB(on)}}{R_1}; (I_i \approx I_D)$

ดังนั้น $I_o + \beta(I_o - \frac{V_{EB(on)}}{R_1}) = I_L$

$$I_L = (\beta + 1)I_o - \beta \frac{V_{EB1(on)}}{R_1} \tag{29}$$

จากสมการ (29) จะเห็นว่า กระแสสูงสุดจะขึ้นอยู่กับค่า β ของทรานซิสเตอร์

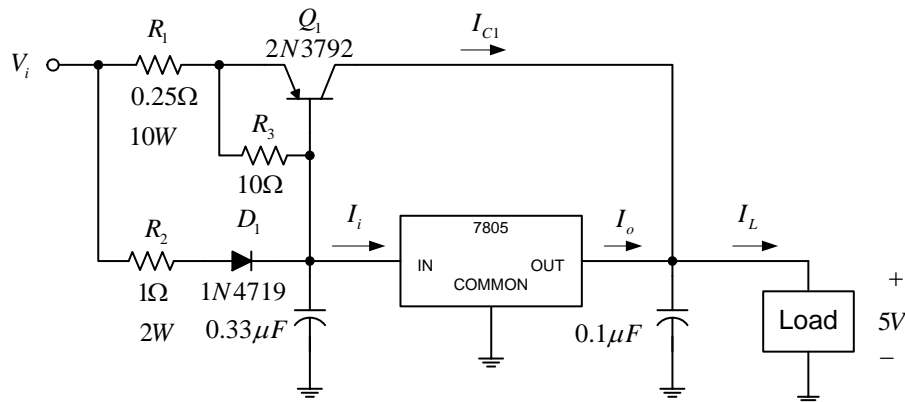
จากวงจรในรูป (a) ไอซีเบอร์ 7805 มี $I_{o,max}$ 1A ถ้า $V_{EB1(on)} \approx 1V$ และ $\beta = 15$ จากสมการ (29) จะได้

$$I_{L(max)} = 16 \times 1A - 15 \times \frac{1V}{7\Omega} = 13.8A$$

ปัญหา 5 จากวงจรในรูป (a) จงหาค่ากระแส I_o และกระแส I_c เมื่อมีภาระค่า $100\Omega, 5\Omega$ และ 1Ω ตามลำดับ

ส่วนวงจรในรูป (b) ได้เพิ่มวงจรป้องกันสภาวะภาระเกิน (ส่วนของ Q_2 และ R_{sc}) แต่ไม่มีภาคป้องกันให้ทรานซิสเตอร์ทำงานอยู่ในบริเวณที่ปลอดภัย หรือภาคป้องกันวงจรเสียหายเนื่องมาจากอุณหภูมิ แต่เราสามารถปรับปรุงวงจรรักษาระดับแรงดันที่มีวงจรป้องกันสภาวะภาระเกิน และภาคป้องกันวงจรเสียหายเนื่องมาจากอุณหภูมิให้แก่ทรานซิสเตอร์ที่ต่ออนุกรมได้ ตาม

ลักษณะวงจรต่อไปนี้ ซึ่งเรียกววงจรนี้ว่า **วงจรรักษาระดับแรงดันแบบแบ่งกระแส (Current sharing regulator)**



จากวงจร ไดโอด D_1 และทรานซิสเตอร์ Q_1 ทำมาจากสารชนิดเดียวกัน ดังนั้น V_{D1} จะมีขนาดเท่ากับ V_{EB1} ซึ่งจะส่งผลให้

$$I_{C1}R_1 \approx I_{D1}R_2$$

ดังนั้น

$$I_{C1} \approx \frac{R_2}{R_1} \cdot I_o \tag{30}$$

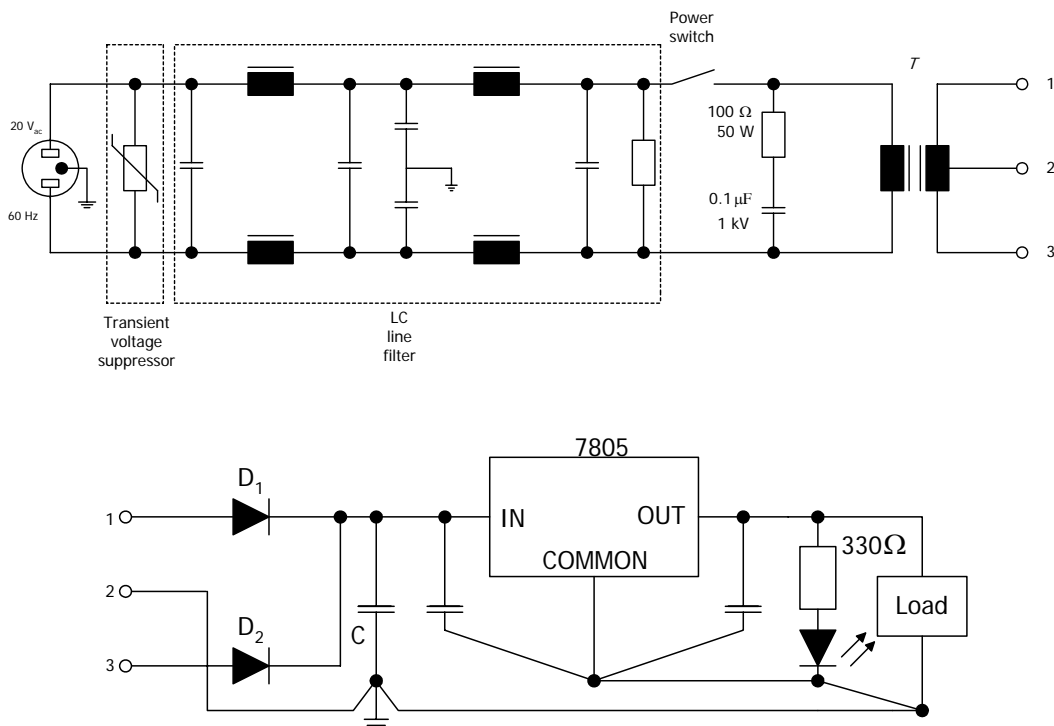
หากพิจารณาจากวงจร พบว่า $I_{C1} \approx 4I_o$ นั้นหมายความว่า ถ้ามีกระแสไหลผ่านโหลด 1A จะเกิดการไหลมาจากทรานซิสเตอร์ (I_{C1}) 0.8A และไหลมาจากไอซี 7805 อีก (I_o) 0.2A

ไอซี 7805 มี $I_{O(max)} = 1A$ ดังนั้นวงจรนี้ สามารถจ่ายกระแสได้ถึง 5A [$I_{C1(max)} = 4A$] และเพื่อเสถียรภาพในการทำงาน ควรติดตั้งแผ่นระบายความร้อนของทรานซิสเตอร์ให้มีขนาดใหญ่กว่าแผ่นระบายความร้อนที่ติดตั้งให้แก่ตัวไอซีรักษาระดับแรงดันถึง 4 เท่าด้วย ไดโอด D_1 ก็ควรติดตั้งอยู่บนแผ่นระบายความร้อนเดียวกับทรานซิสเตอร์ ส่วน R_3 ต่อไว้เพื่อเป็นทางผ่านในการคายประจุของประจุที่ตกค้าง (Stored Charge) ในรอยต่อขาเบสของ Q_1 ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดจากสภาวะภาระเต็ม (Full load) มาเป็นสภาวะภาระน้อยหรือไม่มีภาระในทันทีทันใด

สำหรับที่กล่าวมาทั้งหมด เป็นตัวอย่างและการประยุกต์ใช้งานของไอซีรักษาระดับแรงดันซึ่งได้ยกตัวอย่างเป็นบางตัวเท่านั้น แต่ไอซีรักษาระดับแรงดันนอกเหนือจากนี้ หรือที่ผลิตขึ้นมาใหม่ ก็มีหลักการทำงานและการใช้งานเช่นเดียวกันนี้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบใช้งาน ควรศึกษาถึง Data Sheet ของไอซีรักษาระดับแรงดันเบอร์นั้นเสียก่อน

การพิจารณาในทางปฏิบัติ (Practical Considerations)

ต่อไปนี้เป็นข้อควรคำนึงง่ายๆ ในการออกแบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ผู้ออกแบบควรพิจารณา



1. ควรต่อฟิวส์ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง เพื่อป้องกันการลัดวงจรทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง ฟิวส์ที่ใช้ ควรเป็นฟิวส์ชนิด “ขาดช้า (Slow-blow)” เพื่อให้มีความต้านทานต่อกระแสจำนวนมาก เมื่อเกิดการเปิดแหล่งจ่าย (Power Turn on) และอัตราการทนกระแสของฟิวส์ที่นำมาใช้ควรมีค่าสูงกว่า 50% ของค่ากระแสใช้งาน (RMS Current) รวมในด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง
2. ใช้สายไฟแบบสามเส้น (Three-wire) พร้อมทั้งต่อสายนิวตรอน (Neutral wire) ลงตัวถังของเครื่อง เพื่อป้องกันกระแสรั่วไหล
3. ขณะที่มีการปิดสวิตช์แหล่งจ่ายกำลัง (Turn off) พลังงานที่สะสมอยู่ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง สามารถทำให้เกิดสัญญาณทรานเซียนส์ที่เกิดการคายประจุขนาดใหญ่ (Large discharge transient) ได้ การต่อโครงข่าย snubber เบอร์ (RC Snubber network) ตามวงจรด้านบน จะช่วยแก้ปัญหานี้ได้
4. ควรใช้ตัวกรองความถี่สัญญาณแบบ LC (LC Line Filter) เพื่อลดการแพร่กระจายของการแทรกสอดทางความถี่วิทยุ (Radio-Frequency Interference, RFI) ที่จะเกิดขึ้นจากกระแสไปซ์ขนาดใหญ่ (Large current spikes) ในวงจรเรียงกระแส
5. ในแรงดันอินพุตไฟสลับอาจเกิดแรงดันสไปซ์ขนาดสูง (High Voltage Spikes) เนื่องจากการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ เช่น มอเตอร์ได้ ดังนั้นจึงควรต่อตัวกำจัดแรงดันทรานเซียนส์ (Transient Voltage Suppressors) จะแก้ปัญหานี้ได้ โดยอุปกรณ์ตัวนี้มีขนาด 2 ขา

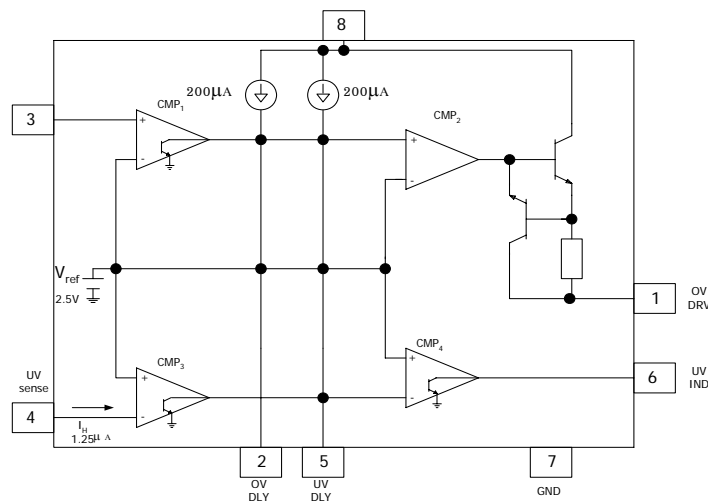
โครงสร้างภายในคล้ายจะเป็นซีเนอร์ไดโอด 2 ตัว ต่อโดยหันขั้วมาชนกัน กระแสสไปซ์จะไหลผ่านอุปกรณ์ตัวนี้แทน

วงจรบอกสถานะและป้องกันแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power Supply Supervisory Circuits)

ถึงแม้ว่า ไอซีรักษาระดับแรงดันโดยทั่วไปจะมีการป้องกันอยู่ภายในตัวไอซีอยู่แล้ว แต่ยังมี ไอซีรักษาระดับแรงดันอยู่หลายเบอร์ที่ไม่มีการป้องกันในตัว รวมทั้งในการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้า ผู้ใช้ควรทราบถึงสถานะของแหล่งจ่ายไฟฟ้านั้น ว่าปกติดีหรือไม่

ดังนั้น จึงได้มีการผลิตไอซีที่ทำหน้าที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าโดยเฉพาะ รวมถึงยังมีการแจ้งบอกผู้ใช้งานว่า เกิดสถานะผิดปกติอะไรขึ้นอีกด้วย เราเรียกไอซีที่ทำหน้าที่นี้ว่า “Power Supply Supervisory Circuit”

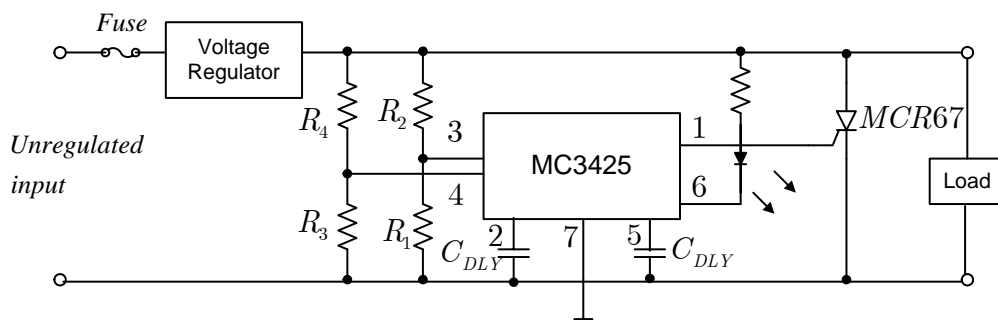
ไอซีเบอร์ MC 3425 (Power Supply Supervisory Circuit)



ไอซี MC 3425 เป็นตัวอย่างของไอซีที่ทำหน้าที่นี้ การป้องกันจะมีทั้งหมด 3 สถานะคือ การป้องกันแรงดันเกิน (Overvoltage,OV) , การตรวจจับแรงดันต่ำเกิน (Undervoltage sensing,UV) และการตรวจจับการสูญเสียสัญญาณไฟสลับ (AC LineLoss Detection)

จากรูป แสดงถึงแผนผังภายในตัวไอซี MC 3425 ซึ่งเป็นไอซีขนาด 8 ขา

การตรวจจับแรงดันสูง/ต่ำเกิน (Over/Under voltage Sensing)



แรงดันสูงเกิน (OV) จะทำงานเมื่อ V_{CC} สูงถึงระดับ V_{OV}

จากวงจรจะเห็นว่า
$$V_{ref} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{OV}$$

ดังนั้น ระดับเปลี่ยนแปลง (Trip level, V_{OV}) สามารถหาได้จาก

$$V_{OV} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{ref} \quad (31)$$

ค่าเวลาในการหน่วง (T_{DLY}) สามารถหาได้จาก

ดังนั้น
$$C_{DLY} \times 2.5V = 200\mu A \times T_{DLY}$$

$$T_{DLY} = 12,500 C_{DLY} \quad (32)$$

จากสมการที่ (32) ถ้าใช้ $C_{DLY} = 0.01\mu F$ จะได้ $T_{DLY} = 125\mu S$ หลังจากสิ้นสุดเวลาหน่วง T_{DLY} นี้แล้วยังเกิดสถานะแรงดันสูงเกินอยู่ เอสซีอาร์จะถูกกระตุ้นให้ทำงาน ทำให้เกิดการลัดวงจรที่เอาต์พุตของวงจรรักษาระดับแรงดัน ซึ่งจะมีผลทำให้ฟิวส์ขาด

ในทำนองเดียวกัน สถานะแรงดันต่ำเกิน (UV) จะเกิดขึ้นเมื่อ V_{CC} ต่ำกว่า V_{UV} ซึ่งค่า V_{UV} หาได้จาก

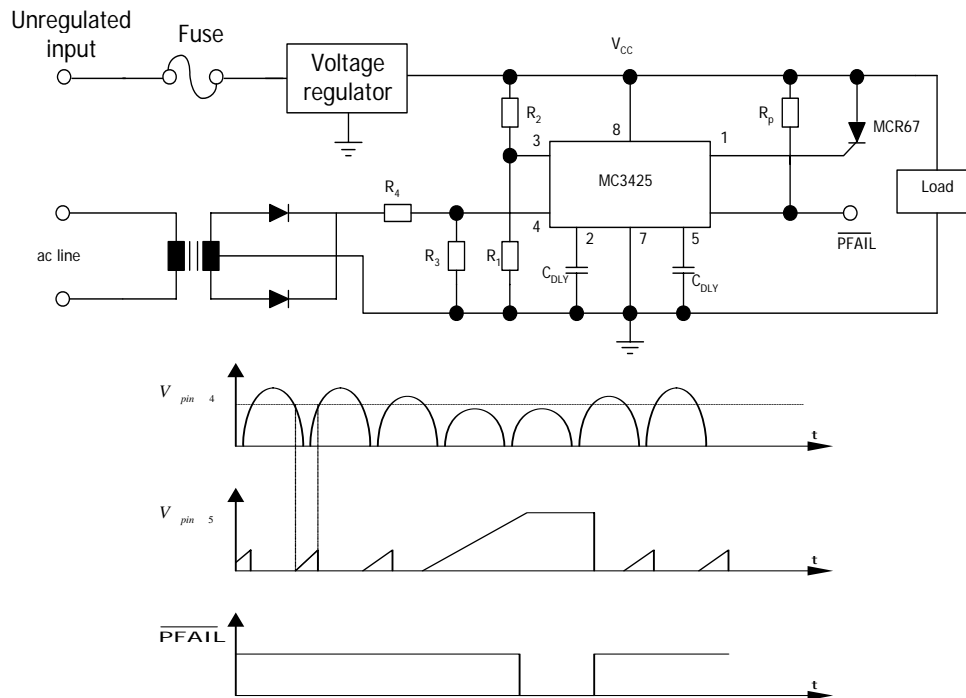
$$V_{UV} = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) V_{ref} \quad (33)$$

จากแผนผัง CMP_3 จะทำงานเมื่อ I_H (กระแสชิ่งค์) มีค่าสูงถึง $12.5\mu A$ กระแสในส่วนนี้จะใช้ผลติฮิสเตอร์ซิส (Hysteresis) โดยที่ความกว้างฮิสเตอร์ซิส (Hysteresis Width, V_H) สามารถหาได้จาก

$$V_H = 12.5\mu A (R_3 // R_4) \quad (34)$$

ดังนั้น CMP_3 จะทำงาน เมื่อ V_{CC} มีค่าต่ำกว่าระดับ V_{UV} แต่ CMP_4 ยังไม่ทำงานจนกว่า V_{CC} จะสูงขึ้นถึง $V_{UV} + V_H$ จากนั้น CMP_4 จะทำงาน ทำให้ขา 6 มีค่าเป็น "0" ส่งผลให้ LED สว่างบอกสถานะแรงดันต่ำเกิน (UV)

การตรวจจับการสูญเสียสัญญาณไฟสลั (Line Loss Detection)



เราสามารถใช้ในการตรวจจับแรงดันต่ำเกินไปมาใช้ในการตรวจจับการสูญเสียสัญญาณไฟสลั จากวงจรข้างต้น สัญญาณ Power Fail (PFAIL) นี้จะนำไปใช้ในการขัดจังหวะ (Interrupt) ในระบบไมโครโพรเซสเซอร์ เพื่อป้องกันระบบและข้อมูลในกรณีที่ไฟตก และป้องกันแรงดันสไปร์ชที่จะทำให้ไอซีพัง ควรต่อตัวเก็บประจุคร่อม R₃ ไว้ด้วย

นอกจากไอซีเบอร์ MC 3425 ของบริษัท Motorola แล้ว ยังมีไอซีที่ทำหน้าที่วงจรบอกสถานะและป้องกันแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power Supply Supervisory Circuit) อีก ยกตัวอย่างเช่น MC 3423, MC 3424 หรือ SG 3543/44/48 (Silicon General), UC 1903 (Unitrode) และ ICL 7665 (Intersil) เป็นต้น ในการใช้งาน ควรศึกษาถึง [Data Sheet](#) ด้วย

ปัญหา 6 จากวงจรตรวจจับแรงดันสูง/ต่ำเกิน จงหาค่าที่เหมาะสมของอุปกรณ์ เมื่อต้องการ OV มีระดับเปลี่ยนแปลงที่ 6.5V โดยที่มีเวลาหน่วง 100 μ s และ UV มีระดับเปลี่ยนแปลงอยู่ที่ 4.5V โดยที่มีฮิสเตอร์ซิส 0.25V และ UV มีเวลาหน่วง 500 μ s

ปัญหา 7 จากวงจรตรวจจับการสูญเสียสัญญาณไฟสลั ต้องการออกแบบ ให้ป้องกันแรงดันสูงเกิน เมื่อแรงดันขึ้นถึง 6.5V และเกิดสัญญาณ PFAIL เมื่อสัญญาณไฟสลัมีค่าต่ำกว่า 80% ของค่าปกติ จงหาค่าอุปกรณ์ทั้งหมด

ตารางที่ 1 ไอซีรักษาระดับแรงดันชนิดจ่ายแรงดันคงที่ (เรียงค่าตามกระแสเอาต์พุต)

Device	Output voltage (typ)(V)	Temperature*	Line regulation (max)(mV)	Load regulation (max)(mV)	Ripple rejection (min)(dB)	Quiescent current (mA)	Input voltage range(V)	Dropout Voltage (typ)(V)
Fixed Positive 100mA								
78L26	2.6	C	100	50	43	5.5	4.8 to 35	2.2
78L05	5.0	C	150	60	41	5.5	7.2 to 35	2.2
78L62	6.2	C	175	80	40	5.5	8.4 to 35	2.2
78L82	8.2	C	175	80	39	5.5	10.4 to 35	2.2
78L09	9.0	C	188	90	38	5.5	11.2 to 35	2.2
78L12	12	C	250	100	37	6.0	14.2 to 35	2.2
78L15	15	C	300	150	34	6.0	17.2 to 35	2.2
78L18	18	C	300	170	33	6.0	20.2 to 40	2.2
78L24	24	C	300	200	31	6.0	26.2 to 40	2.2
Fixed Positive 500mA								
78M05	5.0	M	50	50	62	6.0	8.0 to 35	2.5
78M05	5.0	C	100	100	62	6.0	7.5 to 35	2.5
78M06	6.0	M	60	60	59	6.0	9.0 to 35	2.5
78M06	6.0	C	100	120	59	6.0	8.5 to 35	2.5
78M08	8.0	M	60	80	56	6.0	11 to 35	2.5
78M08	8.0	C	100	160	56	6.0	10.5 to 35	2.5
78M12	12	M	60	120	55	6.0	15 to 35	2.5
78M15	15	M	60	150	54	6.0	18 to 35	2.5
78M15	15	C	100	300	54	6.0	17.5 to 35	2.5
78M20	20	M	60	200	53	6.0	23 to 40	2.5
78M20	20	C	100	400	53	6.0	22.5 to 40	2.5
78M24	24	M	60	240	50	6.0	27 to 40	2.5
78M24	24	C	100	480	50	6.0	26.5 to 40	2.5
Fixed Negative 500 mA								
79M05	-5.0	M	50	100	54	2.0	-7.5 to -35	2.5
79M05	-5.0	C	50	100	54	2.0	-7.3 to -35	2.3
79M06	-6.0	M	60	120	54	2.0	-8.5 to -35	2.5
79M06	-6.0	C	60	120	54	2.0	-8.3 to -35	2.3
79M08	-8.0	M	80	160	54	2.0	-10.5 to -35	2.5
79M08	-8.0	C	80	160	54	2.0	-10.3 to -35	2.3
79M12	-12	M	80	240	54	3.0	-14.5 to -35	2.5
79M12	-12	C	80	240	54	3.0	-14.3 to -35	2.3
79M15	-15	M	80	240	54	3.0	-17.5 to -35	2.5
79M15	-15	C	80	240	54	3.0	-17.3 to -35	2.3
79M20	-20	M	80	300	54	3.5	-22.5 to -40	2.5
79M20	-20	C	80	300	54	3.5	-22.3 to -40	2.3
79M24	-24	M	80	300	54	3.5	-26.5 to -40	2.5
79M24	-24	C	80	300	54	3.5	-26.3 to -40	2.3

Fixed Negative 3.0 A								
LM145	-5.0	M	15	75	66	2.0	-20	2.8
LM345	-5.0	C	25	100	66	3.0	-20	2.8
Fixed Positive 1.0 A								
7805	5.0	M	50	50	68	6.0	8.0 to 35	3.0
7805	5.0	C	100	100	62	8.0	7.5 to 35	2.5
LM309	5.0	C	50	100	-	10	7.0 to 35	2.0
LM309	5.0	M	50	100	-	10	7.0 to 35	2.0
7806	6.0	M	60	60	65	6.0	9.0 to 35	3.0
7806	6.0	C	120	120	59	8.0	8.5 to 35	2.5
7808	8.0	M	80	80	62	6.0	11 to 35	3.0
7808	8.0	C	160	160	56	8.0	10.5 to 35	2.5
7885	8.5	M	85	85	60	6.0	11.5 to 35	3.0
7885	8.5	C	170	170	64	8.0	11 to 35	2.5
7812	12	M	120	120	61	6.0	15 to 35	3.0
7812	12	C	240	240	55	8.0	14.5 to 35	2.5
7815	15	M	150	150	60	6.0	18 to 35	3.0
7815	15	C	300	300	54	8.0	17.5 to 35	2.5
7818	18	M	180	180	59	6.0	21 to 35	3.0
7818	18	C	360	360	53	8.0	20.5 to 35	2.5
7824	24	M	240	240	56	6.0	27 to 40	3.0
7824	24	C	480	480	50	8.0	26.5 to 40	2.5
Fixed Negative 1.0 A								
7905	-5.0	M	50	50	54	2.0	-7.8 to -35	2.8
7905	-5.0	C	100	100	54	2.0	-7.3 to -35	2.3
7906	-6.0	M	60	60	54	2.0	-8.8 to -35	2.8
7906	-6.0	C	120	120	54	2.0	-8.3 to -35	2.3
7908	-8.0	M	80	80	54	2.0	-10.8 to -35	2.8
7908	-8.0	C	160	160	54	2.0	-10.2 to -35	2.3
7912	-12	M	120	120	54	3.0	-14.8 to -35	2.8
7912	-12	C	240	240	54	3.0	-14.3 to -35	2.3
7915	-15	M	150	150	-	3.0	-17.8 to -35	2.8
7915	-15	C	300	300	54	3.0	-17.3 to -35	2.3
7918	-18	M	180	180	54	3.0	-20.8 to -40	2.8
7918	-18	C	360	360	54	3.0	-20.3 to -40	2.3
7924	-24	M	240	240	54	3.0	-26.8 to -40	2.8
7924	-24	C	480	480	54	3.0	-26.3 to -40	2.3
Fixed Positive 2.0 A								
UA78CB	13.8	C	150	150	50	8.0	17 to 25	2.5
Fixed Positive 3.0 A								
LM123	5.0	M	25	100	-	20	7.5 to 20	2.5
LM233	5.0	M	25	100	-	20	7.5 to 20	2.5
LM323	5.0	C	25	100	-	20	7.5 to 20	2.5

Fixed Positive 5.0 A								
78H05	5.0	C , M	12	50	60	10	8.5 to 25	3.5
78H05A	5.0	C , M	25	50	60	10	7.8 to 25	2.3
78H12	12	C	-	120	60	10	15.5 to 25	3.5
78H15	15	C	30	30	60	10	18.5 to 25	-

ตารางที่ 2 ไอซีรักษาระดับแรงดันชนิดปรับแรงดันได้ (เรียงค่าตามกระแสเอาต์พุต)

Device	Output current (mA)	Output voltage rang(V)	Temperature *	Line regulation (%V)	Load regulation (%V)	Ripple rejection (dB)	Quiescent current(mA)	Input voltage range(V)	Dropout voltage (V)
Positive adjustable									
LM105	12	4.5 to 30	M	0.06	1.0	1.0	2.0	8.5 to 50	3.0
LM305	12	4.5 to 30	C	0.06	1.0	1.0	2.0	8.5 to 40	3.0
LM376	25	5.0 to 37	C	0.1	0.1	1.0	2.5	9.0 to 40	3.0
LM305A	45	4.5 to 40	C	0.06	0.4	-	2.0	8.5 to 50	3.0
LM723	150	2.0 to 37	M	0.3	0.15	58	3.5	9.5 to 40	3.0
LM723	150	2.0 to 37	C	0.5	0.2	58	4.0	9.5 to 40	3.0
78MG	500	5.0 to 30	M	1.0	1.0		5.0	7.5 to 40	3.0
78MG	500	5.0 to 30	C	1.0	1.0	62	5.0	7.5 to 40	2.5
78G	1000	5.0 to 30	M	1.0	1.0	62	5.0	7.5 to 40	2.5
78G	1000	5.0 to 30	C	1.0	1.0	68	5.0	7.5 to 40	3.0
LM117	1500	1.2 to 37	M	0.01	0.1	62	10.0	3 to 40	1.5
LM317	1500	1.2 to 37	C	0.01	0.1	66	10.0	3 to 40	1.5
LM150	3000	1.2 to 33	M	0.01	0.3	66	5.0	35	2.2
LM350	3000	1.2 to 33	C	0.03	0.5	66	10.0	35	2.2
LM138	5000	1.2 to 32	M	0.01	0.3	60	5.0	35	2.6
LM338	5000	1.2 to 32	C	0.03	0.5	60	10.0	35	2.6
78HG	5000	5.0 to 24	C	1.0	1.0	60	10.0	8.5 to 25	3.5
LM196	10,000	1.25 to 15	M	0.01	1.0	60	10.0	20	3.5
LM396	10,000	1.25 to 15	C	0.02	1.0	60	10.0	20	2.75
Negative adjustable									
LM104	25	-0.15 to -40	M	0.1	5 mV	1.0	5.0	-8.0 to -50	2.0
LM304	25	-0.035 to -30	C	0.1	5 mV	1.0	5.0	-8.0 to -40	2.0
79MG	500	-2.25 to -30	M	1.0	1.0	50	2.5	-7.0 to -30	2.5
79MG	500	-2.23 to -30	C	1.0	1.0	50	2.5	-7.0 to -30	2.3
79G	1000	-2.23 to -30	M	1.0	2.0	50	2.0	-7.0 to -40	2.8
79G	1000	-2.23 to -30	C	1.0	2.0	50	2.0	-7.0 to -40	2.3
LM137	1500	-1.2 to 37	M	0.02	1.0	66	3.0	-40	1.8
LM137	1500	-1.2 to 37	C	0.04	1.0	66	6.0	-40	1.8
79GH	5000	-2.25 to -24	C , M	1.0	1.0	66	5.0	-7.0 to -40	2.0

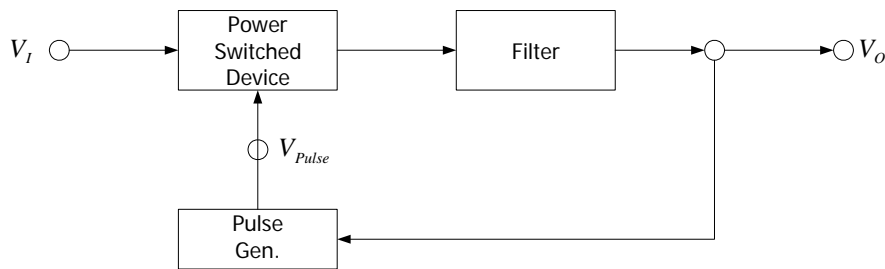
*Operating junction temperature range : C = commercial range , 0°C to +125°C

M = extended military , -55°C to 150°C

ตารางที่ 3 ไอซีรักษาระดับแรงดันชนิดพิเศษที่ใช้เฉพาะงาน

Device	Function	Input voltage rang (V)	Output voltage rang(V)	Output current max(A)	Line regulati on(%)	Load regulati on(%)	Quiese nt current (mA)	Ripple rejecti on(dB)	Dropo ut voltag e (V)
LM325	Dual polarity tracking	$\pm 30V$	$\pm 15V$	100mA	0.06	0.06	8	66	2.0
LM326	Dual polarity tracking	$\pm 30V$	$\pm 15V$	100mA	0.06	0.06	8	66	2.0
LM2930	Low dropout regulator	26V	5V	150mA	0.2	1	1	66	0.6
LM2931	Low dropout regulator	26V	3 to 24V	150mA	0.2	1	1	66	0.6

วงจรรักษาระดับแรงดันแบบสวิตซิ่ง (Switching Regulators)



จากแผนผังด้านบน แสดงถึง โครงสร้างพื้นฐานของวงจรรักษาระดับแรงดันแบบสวิตซิ่ง โดยที่ v_i เป็น แรงดันอินพุตที่ยังไม่มีการรักษาระดับแรงดัน (Unregulated Voltage) ส่วน v_o เป็น แรงดันเอาต์พุตที่ผ่านการรักษาระดับแรงดันแล้ว (Regulated Voltage)

จากแผนผังวงจรรักษาระดับแรงดันแบบสวิตซิ่ง จะประกอบไปด้วย 4 ส่วน ดังต่อไปนี้

1. แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต (v_i) ในกรณีปกติ v_i ที่นำมาต่อจะต้องมีค่าสูงกว่าแรงดันเอาต์พุตที่ต้องการ
2. อุปกรณ์สวิตช์กำลัง (Power Switched Device) ส่วนใหญ่จะนิยมใช้ทรานซิสเตอร์ หรือ อุปกรณ์ไทรสเตอร์ (Thyristor Device) เพื่อที่จะทำการตัด-ต่อแรงดันอินพุต (v_i) ไปยังภาคกรองกระแส โดยที่การตัด-ต่อนี้ สามารถควบคุมจากภาคกำเนิดสัญญาณพัลส์
3. ภาคกำเนิดสัญญาณพัลส์ (Pulse Generator) ภาคนี้จะผลิตแรงดัน v_{pulse} ซึ่งจะเป็น สัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีความไม่สมมาตรกัน (Asymmetrical Square Wave) ซึ่งตามปกติจะสามารถปรับความถี่ หรือค่าความกว้างพัลส์ได้จากแรงดันเอาต์พุต (v_o) ที่ถูกป้อนกลับเข้ามาที่ภาคกำเนิดสัญญาณพัลส์

การปรับความถี่หรือความกว้างพัลส์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยม เรียกว่าการมอดูเลต (Modulation) ซึ่งในภาคกำเนิดสัญญาณพัลส์มีวิธีการมอดูเลตที่นิยมใช้อยู่ 2 วิธี ดังนี้

- การมอดูเลตเชิงความถี่ (Frequency Modulation, FM) วิธีนี้ เมื่อภาระมีค่ามากขึ้น v_o จะตกลง ภาคกำเนิดสัญญาณพัลส์จะสร้างสัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ต่ำลง (โดยที่วิธีนี้ความกว้างพัลส์จะมีค่าคงที่) ดังนั้นเราจะได้ v_o ที่ผ่านการกรองกระแสสูงขึ้นไป ซึ่งหมายความว่าแรงดัน v_o จะไม่ต่ำลงตามภาระนั่นเอง

- การมอดูเลตเชิงความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation, PWM) วิธีนี้ จะมีความถี่ที่คงที่ แต่จะอาศัยการปรับความกว้างของพัลส์แทน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากสามารถควบคุมได้ง่ายกว่า

$$Duty \quad Cycle = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} = t_{on} \cdot f \quad (35)$$

เมื่อ t_{on} เป็นช่วงเวลา "On" ของสัญญาณพัลส์

t_{off} เป็นช่วงเวลา "Off" ของสัญญาณพัลส์

T เป็นคาบเวลา = $t_{on} + t_{off}$

ส่วนความถี่ที่นิยมใช้งานมากที่สุด จะอยู่ในช่วง 10kHz-50kHz

4. ภาคกรองกระแส (Filter) ทำหน้าที่เปลี่ยนรูปคลื่นพัลส์จากอุปกรณ์สวิตซ์กำลังให้เป็นแรงดันไฟตรง โดยที่แรงดันเอาต์พุต (V_o) จะเป็นสัดส่วนของค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) กับแรงดันอินพุต (V_{in}) ตามสมการที่ (36)

$$V_o = \frac{t_{on}}{T} \times V_{in} \quad (36)$$

จากสมการที่ (36) ถ้าลองพิจารณาว่า คาบเวลา (T) มีค่าคงที่ V_o ก็จะมีค่าแปรผันตรงกับช่วงเวลา "On" ของสัญญาณพัลส์ (t_{on}) ซึ่งก็คือการปรับแรงดันเอาต์พุต (V_o) โดยการเปลี่ยน t_{on} เรียกวิธีนี้ว่า การมอดูเลตเชิงความกว้างพัลส์ (PWM)

ในทำนองเดียวกัน ถ้า t_{on} มีค่าคงที่ V_o ก็จะแปรผันกับค่า T หรือ แปรผันตรงกับค่าของความถี่ ซึ่งวิธีการปรับ V_o โดยการปรับความถี่นี้เราเรียกว่า การมอดูเลตเชิงความถี่ (FM)

ชนิดของวงจรกรองกระแสที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นวงจรกรองกระแสชนิด RC, RL หรือ RLC วงจรกรองกระแสที่นิยมใช้ในวงจรรักษาระดับแรงดันแบบสวิตซ์ซึ่งมากที่สุดคือชนิด RLC

ค่าตัวเหนี่ยวนำที่จะใช้ในวงจรกรองกระแสชนิด RL หรือ RLC เป็นส่วนที่สำคัญในการออกแบบวงจรรักษาระดับแรงดันแบบสวิตซ์ เนื่องจากค่าตัวเหนี่ยวนำจะมีผลต่อการเก็บพลังงาน (Energy Store), การตอบสนองต่อทรานเซียนส์ (Transient Response), โอเวอร์ชูต (Overshoot) และขนาดของตัวเหนี่ยวนำ

วิธีการที่นิยมมาออกแบบตัวเหนี่ยวนำ มีอยู่ 3 วิธีคือ

1. Powdered permally toroids
2. Ferrite EI, U และ Toroid cores
3. Silicon Steel EI butt stacks

วิธีการแรก จะให้ค่าความเหนี่ยวนำที่มีการรั่วไหลต่ำ, การสูญเสียในแกนต่ำ และ การซึมซาบสูง (High permeability) การใช้วิธีนี้เหมาะสำหรับค่าตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าคงที่

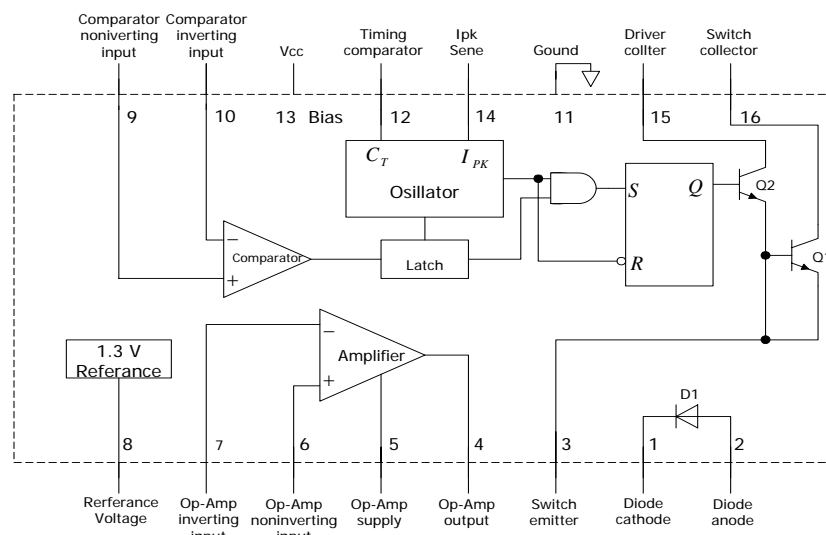
แบบที่สอง จะทำให้ตัวเหนี่ยวนำมีคุณสมบัติที่มีการรั่วไหลต่ำ, การสูญเสียในแกนต่ำ และ การซึมซาบสูง แต่มีข้อเสียคือ มีราคาแพง

ส่วนแบบสุดท้าย จะได้ค่าตัวเหนี่ยวนำที่มีคุณสมบัติการซึมซาบสูง, ความเข้มฟลักซ์สูง (High flux density) และมีราคาถูก ดังนั้นวิธีนี้จะนิยมใช้มากที่สุดในการออกแบบวงจรรักษาระดับแรงดันแบบสวิตซ์ซึ่งแรงดันต่ำ

ในปัจจุบันได้มีการออกแบบวงจรรักษาระดับแรงดันแบบสวิตซ์ซึ่ง ออกมาในรูปของวงจรรวมหรือไอซี ซึ่งเราเรียกว่า **Monolithic Switching Regulators** สามารถทำงานได้โดยต่ออุปกรณ์ภายนอกเพียงไม่กี่ตัวเท่านั้น

ไอซีที่ทำหน้าที่นี้ ส่วนใหญ่มีหลักการการทำงานและการใช้งานที่คล้ายๆ กัน เพียงแต่ศึกษาถึง Data Sheet ที่ผู้ผลิตกำหนดมาให้ก็สามารถใช้งานได้ ไอซีรักษาระดับแรงดันแบบสวิตซ์ซึ่งที่นิยมใช้และง่ายต่อการออกแบบ จะมีอยู่ 2 เบอร์คือ $\mu A78S40$ ของ Fairchild และ TL497 ของ Texas Instrument แต่ในที่นี้จะขอยกตัวอย่างการใช้งานของ $\mu A78S40$

$\mu A78S40$ Switch Regulator



จากรูปเป็นโครงสร้างภายในของ IC $\mu A78S40$ ซึ่งประกอบไปด้วย ภาคสร้างแรงดันอ้างอิงที่มีการชดเชยอุณหภูมิ (Temperature Compensated Voltage Reference), วงจรกำเนิด

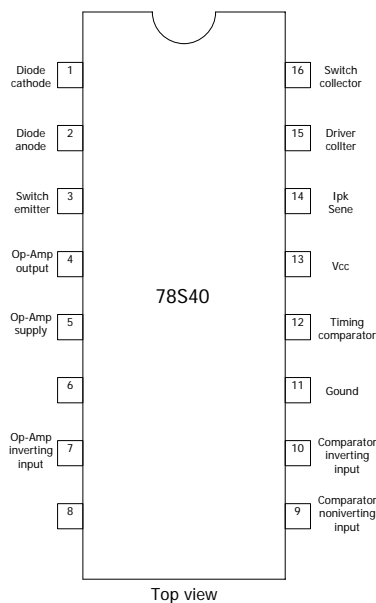
สัญญาณที่สามารถควบคุมค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle Controller Oscillator), ภาคเปรียบเทียบสัญญาณ (Comparator), ออปแอมป์, ไดโอดสวิตช์กำลัง (Power-Switching Diode) และทรานซิสเตอร์สวิตช์กำลัง (Power Switch Transistor)

$\mu A78S40$ จะมีคุณสมบัติดังนี้

- สามารถทำงานได้ทั้งโหมดแปลงขึ้น (Step-Up), แปลงลง (Step-Down) และสลับขั้ว (Inverting)

- ย่านแรงดันอินพุตตั้งแต่ 2.5V ถึง 40V
- Line และ Load Regulation มีค่า 80 dB
- แรงดันเอาต์พุตปรับค่าได้ตั้งแต่ 1.3-40V
- กระแสสูงสุด 1.5A (โดยไม่ต้องมีทรานซิสเตอร์ภายนอก)
- สามารถปรับความถี่หรือค่าดิวตี้ไซเคิลได้

$\mu A78S40$ เป็นไอซีขนาด 16 ขา โดยมีตำแหน่งขา แสดงดังรูปข้างล่าง



สำหรับการทำงานของ $\mu A78S40$ นี้ ค่าความถี่สวิตช์ภายใน จะถูกกำหนดโดยตัวเก็บประจุกำหนดเวลา (Timing Capacity): C_T โดยจะต้องต่ออยู่ระหว่างขา 12 และขากราวนด์ 11 และจะมีค่าดิวตี้ไซเคิลเริ่มต้น (Initial Duty Cycle) เท่ากับ 6:1 ส่วนค่าความถี่สวิตช์ (Switching Frequency) และค่าดิวตี้ไซเคิลจะสามารถเปลี่ยนแปลงโดยวงจรจำกัดกระแส, การตรวจจับกระแส I_{pk} และภาคเปรียบเทียบแรงดัน

ภาคเปรียบเทียบแรงดันจะทำให้ Q_1 และ Q_2 "Off" ในการทำงานแบบแปลงขึ้นและแปลงลง โดยปกติแล้ว ขา 9 จะต่ออยู่กับแรงดันอ้างอิง 1.3V (ขา 8) และขา 10 จะต่ออยู่กับขาเอาต์พุตซึ่งมาจากการแบ่งแรงดันของแรงดันเอาต์พุต

ในการทำงานแบบสลับขั้ว ขา 9 จะถูกต่อผ่านวงจรแบ่งแรงดันที่มาจากแรงดันอ้างอิง 1.3V (ขา 9) ส่วนขา 10 จะถูกต่ออยู่กับกราวนด์

เมื่อแรงดันเอาต์พุต (V_o) มีค่าถูกต้องตามต้องการ สัญญาณเอาต์พุตของภาคเปรียบเทียบกับแรงดันจะมีสภาวะสูง ทำให้ไม่มีผลต่อการทำงานของวงจร แต่ถ้าแรงดันเอาต์พุตมีค่าสูงเกินไป แรงดันที่ขาสลับขั้ว (ขา 10) ก็จะมีค่าสูงกว่าที่ขาไม่สลับขั้ว (ขา 9) ทำให้ภาคเปรียบเทียบกับแรงดันมีเอาต์พุตเป็นสภาวะต่ำ ส่งผลให้วงจรเข้าสู่ “OFF time” ดังนั้น แรงดันเอาต์พุตและกระแสเอาต์พุตก็จะมีค่าลดลง

ในการใช้งานทั้ง 3 โหมด วงจรจำกัดกระแสจะทำงานสมบูรณ์ได้ ก็ต่อเมื่อมีการต่อตัวต้านทานตรวจจับ (Sense Resistor): R_{SC} ระหว่างขาตรวจจับกระแส I_{pk} (ขา 14) และ V_{cc} ขา 13 โดยที่วงจรจำกัดกระแส จะทำงานเมื่อมีแรงดันมาตกคร่อมที่ R_{SC} ประมาณ 330mV (350mV สูงสุด) ดังนั้น เราสามารถกำหนด ค่ากระแสเอาต์พุตสูงสุดได้จาก

$$I_{pk} = \frac{330mV}{R_{SC}} \quad (37)$$

ส่วนไดโอดสวิตช์กำลังที่อยู่ภายในตัวไอซีจะมีไว้เพื่อใช้แรงดันขณะไปอัสตรง, V_D ในการหาค่าตัวเหนี่ยวนำ, L และประสิทธิภาพ (Efficiency) ของวงจรรักษาระดับแรงดันแบบสวิตช์ซึ่งที่สร้างขึ้น โดยจาก Data Sheet V_D จะมีค่า 1.25V (โดยเฉลี่ย) และ 1.5V (สูงสุด)

ตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบ อีกประการ คือ แรงดันอิ่มตัว (Saturation Voltage); V_S ซึ่งเป็น ค่าแรงดันอิ่มตัวของทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 ซึ่งจะระบุมาใน Data Sheet โดยมีค่าในโหมดต่าง ๆ ดังนี้

- โหมดแปลงลง; $V_S = 1.1V$ (โดยเฉลี่ย) และ 1.3V (สูงสุด)
- โหมดแปลงขึ้น; $V_S = 0.45V$ (โดยเฉลี่ย) และ 0.7V (สูงสุด)
- โหมดสลับขั้ว; ต้องพิจารณาจากทรานซิสเตอร์ภายนอก

ดังมีรายละเอียดสรุปดังตาราง

ค่า	โหมตแปลงลง	โหมตแปลงขึ้น	โหมตสลับขั้ว	หน่วย
I_{pk}	$2I_{o(max)}$	$2I_{o(max)} \times \frac{V_o + V_D + V_S}{V_{in} - V_S}$	$2I_{o(max)} \times \frac{V_{in} + V_o + V_D - V_S}{V_{in} - V_S}$	A
R_{SC}	$\frac{0.33}{I_{pk}}$	$\frac{0.33}{I_{pk}}$	$\frac{0.33}{I_{pk}}$	Ω
$\frac{I_{on}}{I_{off}}$	$\frac{V_o + V_D}{V_{in} - V_S - V_o}$	$\frac{V_o + V_D - V_{in}}{V_{in} - V_S}$	$\frac{ V_o + V_D}{V_{in} - V_S}$	
L	$\frac{V_o + V_D}{I_{pk}} \times t_{off}$	$\frac{V_o + V_D - V_{in}}{I_{pk}} \times t_{off}$	$\frac{ V_o + V_D}{I_{pk}} \times t_{off}$	μH
t_{off}	$\frac{I_{pk} \times L}{V_o + V_D}$	$\frac{I_{pk} \times L}{V_o + V_D - V_{in}}$	$\frac{I_{pk} \times L}{ V_o + V_D}$	μS
$C_r (\mu F)$	$45 \times 10^{-5} t_{off} (\mu S)$	$45 \times 10^{-5} t_{off} (\mu S)$	$45 \times 10^{-5} t_{off} (\mu S)$	μF
C_o	$\frac{I_{pk} \times (t_{on} + t_{off})}{8V_{ripple}}$	$\frac{(I_{pk} - I_o)^2}{2I_{pk} \times V_{ripple}}$	$\frac{(I_{pk} - I_o)^2 \times t_{off}}{2I_{pk} \times V_{ripple}}$	μF
Efficiency	$\frac{V_{in} - V_S + V_D}{V_{in}} \times$	$\frac{V_{in} - V_S}{V_{in}} \times \frac{V_o}{V_o + V_D}$	$\frac{V_{in} - V_S}{V_{in}} \times \frac{ V_o }{V_o + V_D}$	
$I_{in avg}$ (Max load condition)	$\frac{I_{pk}}{2} \times \frac{V_o + V_D}{V_{in} - V_S} +$	$\frac{I_{pk}}{2}$	$\frac{I_{pk}}{2} \times \frac{ V_o + V_D}{V_{in} + V_o + V_D - V_S}$	A

ตัวอย่าง 4 ต้องการออกแบบวงจรรักษาระดับแรงดันแบบสวิตชิ่งโหมตแปลงลง ตามความต้องการดังนี้

- แรงดันอินพุต; $V_{in} = 12$
- แรงดันเอาต์พุต; $V_o = 5V$ ที่ $I_D = 500mA$ (สูงสุด)
- แรงดันกระเพื่อมที่เอาต์พุต; $V_{ripple} = 50mV$ หรือ 1% ของ
- ใช้ไอซีรักษาระดับแรงดันแบบสวิตชิ่ง; $\mu A78S40$

วิธีทำ พิจารณา Data Sheet ของ $\mu A78S40$ จะได้

- $V_D = 1.25V$ (โดยเฉลี่ย)
- $V_S = 1.1V$ (โดยเฉลี่ย)
- แรงดันอ้างอิง; $V_{REF} = 1.245V$ (โดยเฉลี่ย)

กระแสไบอัสอินพุต; I_B ของภาคเปรียบเทียบแรงดัน = 35nA (โดยเฉลี่ย)
และ 200 nA (สูงสุด)

โดยการใช้ตารางสูตรในช่องโหมดแปลงลง จะได้

$$1. I_{pk} = 2I_{o(Max)} = 2(500mA) = 1A$$

$$2. R_{SC} = \frac{0.33}{I_{pk}} = \frac{0.33}{1} = 0.33 \text{ ohm} , \frac{1}{2}W$$

$$3. \frac{t_{on}}{t_{off}} = \frac{V_o + V_D}{V_{in} - V_S - V_o} = \frac{5V + 1.25V}{(12V - 1.1V - 5V)} = 1.06$$

$$\text{หรือ } t_{on} = 1.06t_{off}$$

กำหนดค่าความถี่ = 20kHz ดังนั้น $T = 50\mu S$

$$\text{หรือจะได้ } t_{on} + t_{off} = 50\mu S$$

$$\text{แต่ } t_{on} = 1.06t_{off} \text{ ดังนั้น } 1.06t_{off} + t_{off} = 50\mu S$$

$$\text{จะได้ } \underline{t_{off} = \frac{50\mu S}{2.06} = \underline{\underline{24.27\mu S}}}$$

$$\text{และ } t_{on} = 25.73\mu S$$

4. จาก $t_{off} = 24.27\mu S$ นำไปแทนลงในสูตรเพื่อหาค่าตัวเก็บประจุกำหนดเวลา
จะได้

$$\begin{aligned} C_T &= (45 \times 10^{-5})t_{off} \\ &= (45 \times 10^{-5})(24.27)(10^{-6}) \end{aligned}$$

$$C_T = 0.0109\mu F$$

เลือกค่ามาตรฐาน คือ $C_T = 0.01\mu F$

$$\begin{aligned}
 5. \quad L &= \frac{V_o + V_D}{I_{pk}} t_{off} \\
 &= \frac{5V + 1.25V}{1A} (24.27 \times 10^{-6}) \\
 L &= 151.69 \mu H
 \end{aligned}$$

เลือกค่ามาตรฐานคือ $L = 150 \mu H$

6. ค่าตัวเก็บประจุภายนอก; C_o หาได้จาก

$$\begin{aligned}
 C_o &= I_{pk} \frac{t_{on} + t_{off}}{8V_{ripple}} \\
 &= 1A \frac{50 \mu S}{8(50mV)} = 125 \mu F
 \end{aligned}$$

เลือกค่ามาตรฐานคือ $C_o = 150 \mu F$

7. คำนวณค่าตัวต้านทานในโครงข่ายสุ่ม (Sampling Network) เพื่อใช้ต่อระหว่างขาเอาต์พุตและขาเข้าสลับขั้วของของภาคเปรียบเทียบแรงดัน (ขา 10) ให้ได้แรงดันเอาต์พุต (V_o) ตามต้องการคือ $5V_{DC}$

ส่วนขาเข้าไม่สลับขั้วจะถูกต่ออยู่กับแรงดันอ้างอิง 1.245V ดังนั้นแรงดันที่ขาเข้าสลับขั้วก็จะมีค่าประมาณ 1.245V ด้วย

กำหนดให้ $I_{R_2} \gg I_B$ เลือก $I_{R_2} = 0.1mA$

$$\text{ดังนั้น } R_2 = \frac{V_{REF}}{I_{R_2}} = \frac{1.245V}{0.1mA} = 12.45k\Omega$$

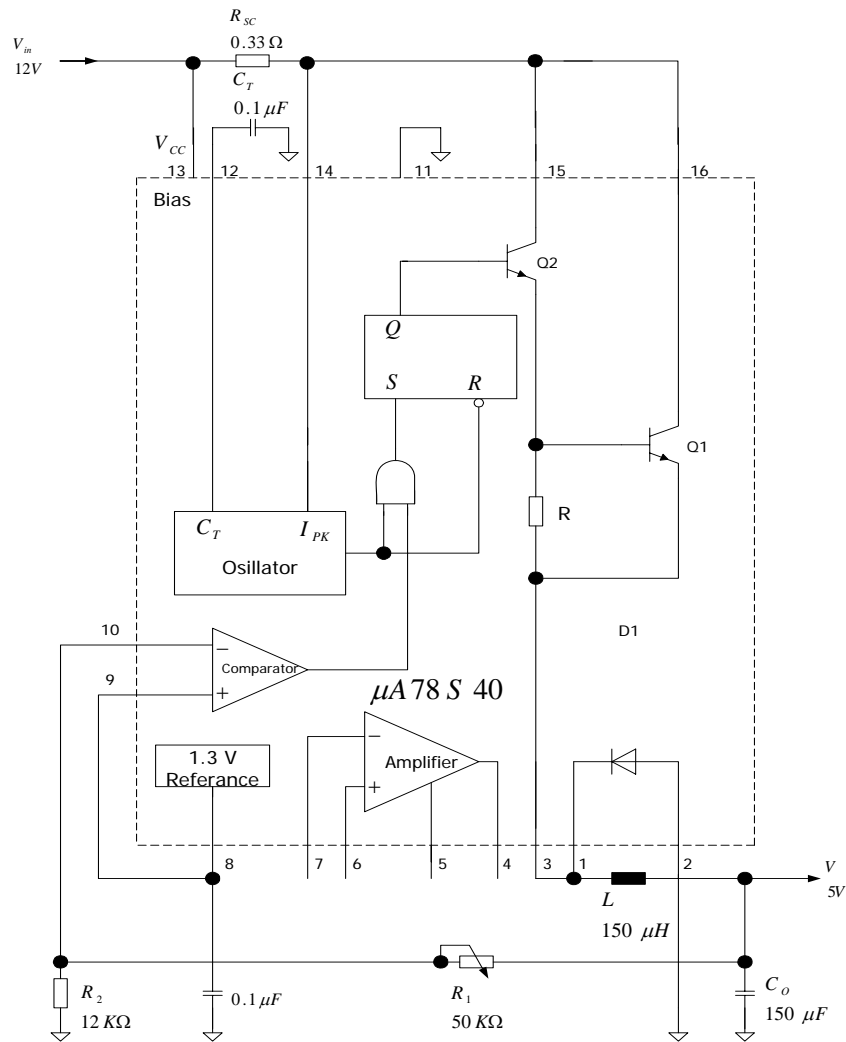
เลือกค่ามาตรฐานคือ $R_2 = 12k\Omega$

$$\begin{aligned}
 \text{โดยการใช่วงจรแบ่งแรงดัน; } V_{R_2} &= \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_o \\
 1.245V &= \frac{12k\Omega}{R_1 + 12k\Omega} 5V
 \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้ $R_1 = 36.193k\Omega$

เลือก $R_1 = 50k\Omega$ Potentiometer

สรุปก็จะได้ วงจรรักษาระดับแรงดันแบบสวิตชิ่งโหมดแปลงลง ขนาด 5V 0.5A ตามวงจรข้างล่างนี้



ส่วน $C = 0.1\mu F$ ที่ต่อตรงแรงดันอ้างอิงกับกราวด์จะทำหน้าที่ช่วยป้องกันสัญญาณรบกวนและสไปซ์เชิงเหนี่ยวนำ (Inductive Spikes) ที่จะเกิดขึ้นกับแรงดันอ้างอิง

8. ประสิทธิภาพของวงจรรักษาระดับแรงดัน สามารถคำนวณหาได้จาก

$$Efficiency(\eta) = \frac{V_{in} - V_S + V_D}{V_{in}} \times \frac{V_o}{V_o + V_D}$$

$$= \frac{12V - 11V + 1.25V}{12V} \times \frac{5V}{5V + 1.25V} \times 100\%$$

$$\underline{\underline{\eta = 81\%}}$$

จากตัวอย่างที่ผ่านมา เราสามารถใช้ IC $\mu A78S40$ ต่อเป็นวงจรรักษาระดับแรงดันแบบสวิตชิ่งที่สามารถจ่ายกระแสและแรงดันได้สูงกว่านี้ โดยการต่อไดโอดภายนอกและทรานซิสเตอร์เข้าไป ดังในตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่าง 5 ต้องการปรับปรุงวงจรรักษาระดับแรงดันแบบสวิตชิ่ง โดยใช้ $\mu A78S40$ ให้สามารถจ่ายแรงดันเอาต์พุต 5V กระแสเอาต์พุต 3A

วิธีทำ เมื่อกระแสเอาต์พุตเปลี่ยนจะทำให้ค่าอุปกรณ์ที่ต่ออยู่ภายนอกจะต้องเปลี่ยนไปด้วย เช่น R_{SC} , L และ C_o

$$1. R_{SC} = \frac{0.33}{I_{pk}} = \frac{0.33}{6} = 0.055\Omega$$

$$\underline{\underline{\text{เลือกค่า } R_{SC} = 0.05\Omega \quad 1W}}$$

$$2. L = \frac{V_o + V_D}{I_{pk}} \times t_{off} = \frac{5V + 1.25V}{6A} (24.27\mu S)$$

$$= 25.28\mu H$$

$$\underline{\underline{\text{เลือกค่า } L = 25\mu H}}$$

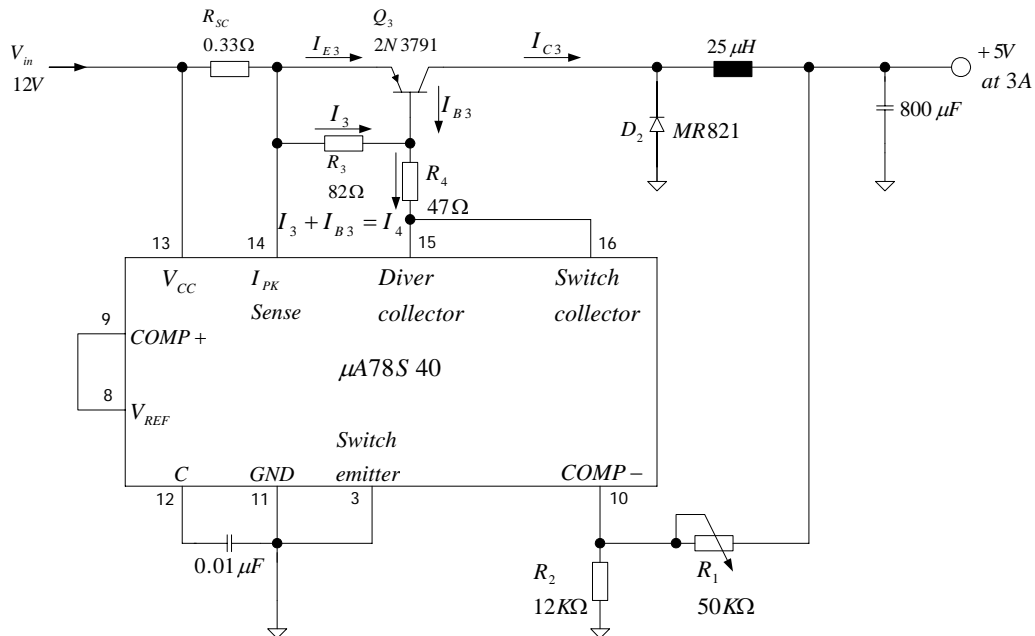
$$3. C_o = \frac{I_{pk} (t_{on} + t_{off})}{8V_{ripple}} = \frac{6A (50\mu S)}{8(50mV)} = 750\mu F$$

$$\underline{\underline{\text{เลือกค่า } C_o = 800\mu F}}$$

จากวงจรรักษาระดับแรงดันแบบสวิตชิ่งแบบแปลงลง ดังในตัวอย่างที่แล้ว เราจะปรับปรุงวงจรให้สามารถจ่ายกระแสได้มากขึ้นดังนี้

1. ไม่ใช่ไดโอดภายในที่ต่อตรงขา 1 และ 2 ของไอซี
2. เนื่องจากทรานซิสเตอร์ภายใน Q_1 และ Q_2 จะจ่ายกระแสได้ต่ำ จึงควรใช้ทรานซิสเตอร์ภายนอกเพิ่มเติม

3. ทรานซิสเตอร์ภายนอกต่ออนุกรมกับ R_{SC} และเพื่อให้ทำงานร่วมกับ Q_1 และ Q_2 ได้ ทรานซิสเตอร์ภายนอกต้องเป็นชนิด PNP และควรต่อ R_3 และ R_4 เพื่อเป็นการไบอัสให้กับทรานซิสเตอร์ภายนอก ดังวงจรข้างล่างนี้



4. ตัวเหนี่ยวนำ $L(25\mu H)$ ต่ออยู่ระหว่างขาคอลเล็กเตอร์ของ Q_3 กับขั้วบวกของ C_o โดยไดโอด D_2 มีหน้าที่ส่งผ่านสัญญาณสไปซ์เชิงเหนี่ยวนำค่าลบ (Negative Inductive Spike) ลงกราวนด์

ค่าของ R_3 และ R_4 จะต้องเลือกเพื่อให้ I_{R_4} มีค่าเท่ากับ I_{R_3} รวมกับ I_B ของ Q_3 โดยจะมีกระแสไหลผ่าน R_4 มาก ดังนั้นควรใช้ตัวต้านทานขนาด 1W

ทรานซิสเตอร์ Q_3 ต้องเป็นทรานซิสเตอร์สวิทช์กำลังความเร็วสูงแบบ PNP โดยต้องมีเงื่อนไขตามความต้องการดังนี้

$$I_C \gt 3A \text{ และ } V_{CEO} \gt 12V$$

จากการศึกษาจาก Data Sheet ของทรานซิสเตอร์ พบว่า ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3791 ตรงตามเงื่อนไขที่ระบุไว้ข้างต้น โดย 2N3791 มีคุณสมบัติดังนี้

- $V_{CEO} = -60V$ (สูงสุด)
- $I_C = -10A$ (ต่อเนื่องสูงสุด)
- $h_{FE} = 30$ (ต่ำสุด)
- $V_{BE} = -1.8V$ (สูงสุด)
- $V_{CE(sat)} = -1V$ (สูงสุด)

$$h_{fe} = 250 \text{ (สูงสุด)}$$

ทำนองเดียวกัน ไดโอดกำลัง; D_2 เบอร์ที่เหมาะสม คือ MR821 โดยมีคุณสมบัติดังนี้

$$I_o = \text{กระแสเฉลี่ยที่ไปอัสตรง} = 5A$$

$$V_{PIV} = \text{แรงดันย้อนกลับสูงสุด} = 100V$$

เมื่อรวมอุปกรณ์ต่าง ๆ แล้วจะได้วงจรรักษาระดับแรงดันแบบสวิตช์ซึ่งแบบแปลงลง ขนาด 5V 3A และการใช้งานจริงควรต่อแผ่นระบายความร้อนเข้ากับ Q_3 เพื่อระบายความร้อนให้กับ Q_3 ด้วย

นอกจากนี้ เราสามารถสร้างวงจรรักษาระดับแรงดันแบบสวิตช์ซึ่งที่สามารถจ่ายแรงดันเอาต์พุตที่มีค่าสูงกว่าแรงดันอินพุตได้ ซึ่งการทำงานในลักษณะนี้ เราเรียกว่า “โหมดแปลงขึ้น (Step-Up Mode)”

ตัวอย่าง 6 ต้องการออกแบบวงจรรักษาระดับแรงดันแบบสวิตช์ซึ่งโหมดแปลงขึ้น โดยมีความต้องการดังนี้

$$V_{in} = 10V$$

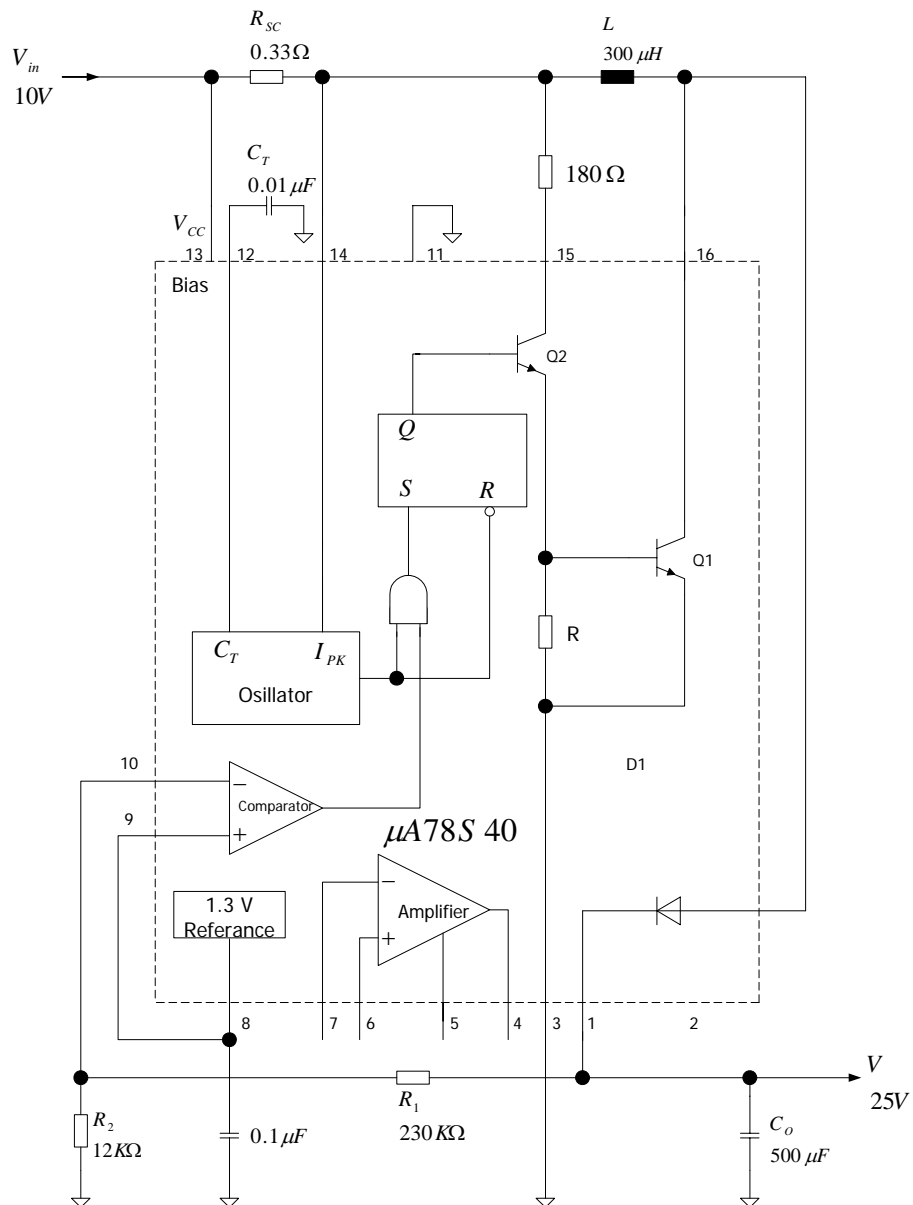
$$V_o = 25V$$

$$I_{oMax} = 160mA$$

$$V_{ripple} = 30mV$$

วิธีทำ จากการศึกษาถึงตารางสูตรในช่องวงจรรักษาระดับแรงดันแบบสวิตช์ซึ่งโหมดแปลงขึ้น และมีการคำนวณในทำนองเดียวกันกับตัวอย่างที่ผ่านมา

เราจะได้วงจรใช้งานจริง ดังรูป



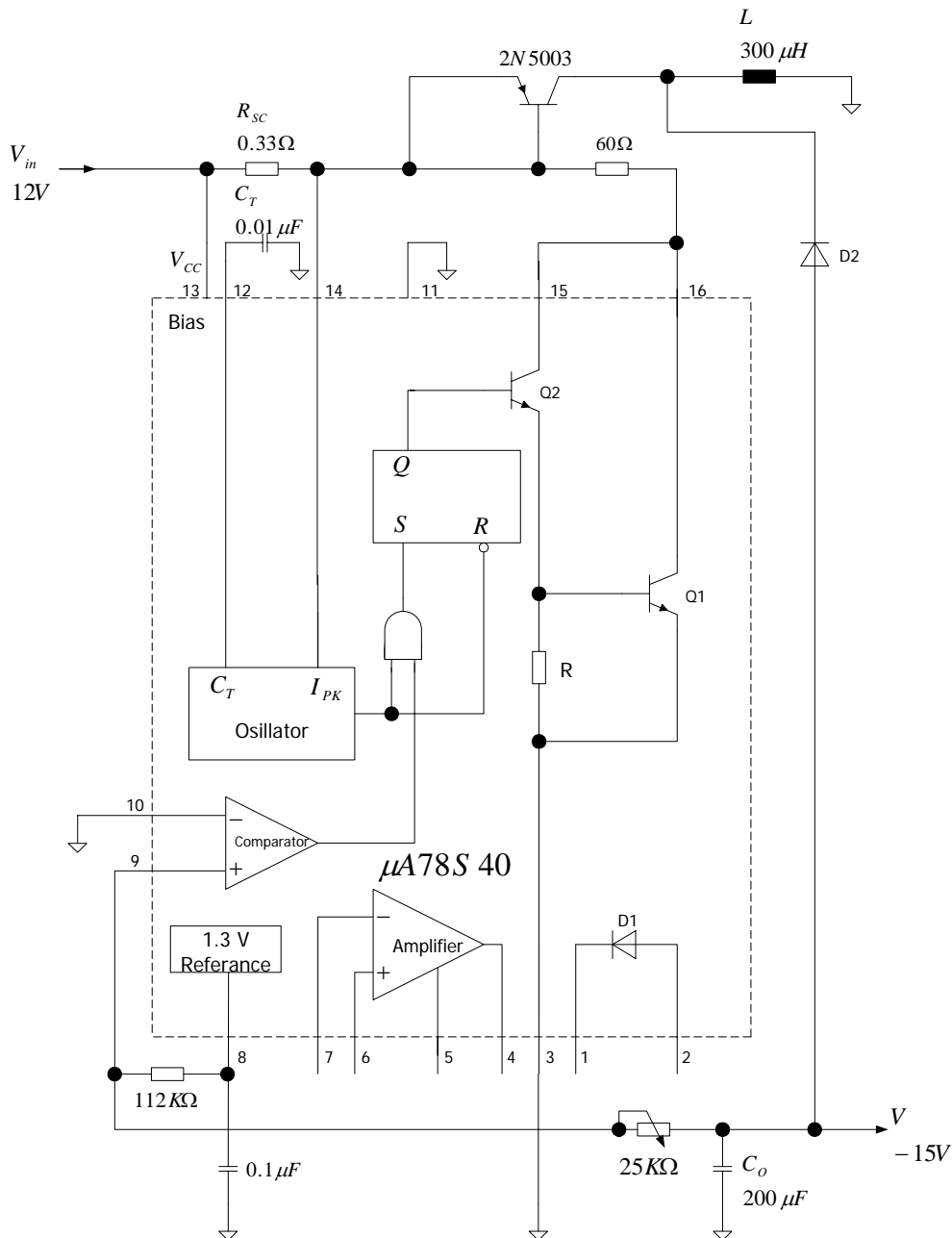
ส่วนวงจรข้างล่างนี้ เป็นวงจรรักษาระดับแรงดันแบบสวิตซ์ซึ่งโหมดสลับขั้ว ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันอินพุต +12V เป็นแรงดันเอาต์พุต -15V การออกแบบวงจรก็พิจารณาจากตารางสูตร ในช่องวงจรรักษาระดับแรงดันแบบสวิตซ์ซึ่งโหมดสลับขั้ว โดยพิจารณาจากความต้องการคือ

$$V_{in} = 12V$$

$$V_o = -15V$$

$$I_{oMax} = 160mA$$

$$V_{ripple} = 20mA$$



ตัวแปรที่แสดงถึงสมรรถนะในวงจรรักษาระดับแรงดัน

ความสามารถในการรักษาระดับแรงดันของวงจรรักษาระดับแรงดัน ในทางปฏิบัติจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามสภาพภายนอก ซึ่งสภาพภายนอกจะมีผลอย่างไรต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุต เราสามารถระบุค่าที่แสดงถึงประสิทธิภาพของการรักษาระดับแรงดันต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพภายนอก โดยทั่วไปจะมีอยู่ 4 ค่าได้แก่

1. Line Regulation
2. Load Regulation
3. สัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ (Temperature Coefficient)
4. Long-term stability

Line Regulation

Line Regulation อาจจะเรียกอีกอย่างว่า Supply Regulation ค่า Line Regulation เป็นความสามารถของการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุต หรือ แรงดันไฟเลี้ยง

$$Line \text{ Regulation} = \frac{\Delta V_o}{\Delta V_i}$$

Line Regulation นี้จะทำการวัดภายใต้เงื่อนไขที่กระแสภาระคงที่ ผลที่ได้จะมีค่าอยู่ในหน่วยของ mV/V แต่โดยทั่วไปนิยมที่จะระบุเป็นเปอร์เซ็นต์ (%) เนื่องจากหน่วย mV/V จะบอกอะไรได้ไม่มากนัก นั่นคือ

$$Line \text{ Regulation} \triangleq \frac{\Delta V_o / V_o}{\Delta V_i} \times 100\%$$

จะได้ Line Regulation ในหน่วยของ %/V ซึ่งนิยมใช้ในทางอุตสาหกรรม

Load Regulation

Load Regulation เป็นค่าที่บอกความสามารถในการรักษาระดับแรงดันของแรงดันเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสภาระ

ในทางความคิด ค่านี้ควรจะมีค่าเป็นศูนย์ หมายความว่า แรงดันเอาต์พุต จะเป็นอิสระต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสภาระ แต่ในทางปฏิบัติ วงจรรักษาระดับแรงดันจะมีความต้านทานเอาต์พุตอยู่ ทำให้เกิดปรากฏการณ์ของภาระ (Loading Effect) เมื่อภาระมีการเปลี่ยนแปลง

$$Load \text{ Regulation} = \frac{\Delta V_o}{\Delta I_L}$$

Load Regulation จะมีหน่วยเป็น mV/mA หรือ mV/A และทำการวัดภายใต้เงื่อนไขที่แรงดันอินพุตมีค่าคงที่

ค่า Load Regulation ในหน่วย %/mA หรือ %/A สามารถหาได้จาก

$$Load \text{ Regulation} = \frac{\Delta V_o / V_o}{\Delta I_L} \times 100\%$$

Load Regulation ที่หาได้ สามารถบอกถึงค่าความต้านทานเอาต์พุตของวงจรรักษาระดับแรงดันได้ด้วย โดยที่

$$\text{Load Regulation} = \frac{\Delta V_o}{\Delta I_L} = R_o$$

ตัวอย่าง 7 วงจรรักษาระดับแรงดันใช้ไอซี 7805 ซึ่งแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเปลี่ยนแปลง 3mV (โดยเฉลี่ย) เมื่อแรงดันอินพุตเปลี่ยนจาก 7V เป็น 25V และแรงดันเอาต์พุตเปลี่ยนแปลง 5mV (โดยเฉลี่ย) เมื่อ I_L เปลี่ยนจาก 250mA เป็น 750mA จงหา

(a) Line Regulation

(b) Load Regulation

(c) ความต้านทานเอาต์พุตของวงจรรักษาระดับแรงดันนี้

วิธีทำ (a) จาก $\text{Line Regulation} = \frac{\Delta V_o}{\Delta V_i}$

$$= \frac{3mV}{(25V - 7V)} = 0.17mV/V$$

$$\text{Line Regulation}(\%) = \frac{0.17mV/V}{5V} \times 100\%$$

$$= \underline{\underline{0.0033\%/V}}$$

หมายความว่าทุกๆ การเปลี่ยนแปลงแรงดันของแรงดันอินพุต 1V จะทำให้แรงดันเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงไป 0.0033% ของแรงดันเอาต์พุตเดิม

(b) $\text{Load Regulation} = \frac{\Delta V_o}{\Delta I_L}$

$$= \frac{5mV}{(750mA - 250mA)}$$

$$= 0.01mV/mA$$

$$\text{Load Regulation}(\%) = \frac{0.01mV/mA}{5V} \times 100\% = \underline{\underline{0.2\%/A}}$$

หมายความว่า ทุกๆ การเปลี่ยนแปลงของกระแสภาระ 1A จะทำให้ค่าแรงดันเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงไป 0.2% ของแรงดันเอาต์พุตเดิม

(c) $\text{Output Resistance} = \frac{\Delta V_o}{\Delta I_L} = 0.01\Omega$

สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแรงดันเอาต์พุต (Temperature Coefficient of the Output Voltage)

เรียกสั้น ๆ ว่า “Tempco” หรือ $TC(V_o)$ เป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ นั่นคือ

$$TC(V_o) = \frac{\Delta V_o}{\Delta T}$$

ค่า $TC(V_o)$ นี้ จะทำการทดสอบภายใต้เงื่อนไข ที่แรงดันอินพุต และกระแสเอาต์พุตมีค่าคงที่ ค่าที่ได้จะมีหน่วยเป็น $mV/^\circ C$ หรือ $\mu V/^\circ C$ ส่วน $TC(V_o)$ ในหน่วยของ $\%/^\circ C$ สามารถหาได้จาก

$$TC(V_o) \triangleq \frac{\Delta V_o / V_o}{\Delta T} \times 100\%$$

แต่ในทางปฏิบัติ แรงดันเอาต์พุตจะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ดังนั้น เราอาจจะพบว่าค่า $TC(V_o)$ จะมีหน่วยเป็น $ppm/^\circ C$

ตัวอย่าง 8 วงจรรักษาระดับแรงดันใช้ไอซีสร้างแรงดันอ้างอิงชนิดแม่นยำ REF101KM (Burr-Brown) ขนาด 10V จาก Data Sheet ของไอซีเบอร์นี้ บอกไว้ว่ามี Line Regulation 0.001%/V (โดยเฉลี่ย) และ TC 1 $ppm/^\circ C$ ต้องการหาค่าการเปลี่ยนแปลงของ V_o เมื่อ

- (a) แรงดันอินพุตเปลี่ยนจาก 13.5 เป็น 35V
- (b) กระแสเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงจากเดิม $\pm 10mA$
- (c) อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจาก 0° เป็น $70^\circ C$

วิธีทำ

(a) จาก $Line \text{ Regulation} = \frac{\Delta V_o / V_o}{\Delta V_i} \times 100\%$

$$0.001\%/V = \frac{\Delta V_o / 10}{(35V - 13.5V)} \times 100\%$$

ดังนั้น $\Delta V_o = 2.15mV \quad (typ)$

(b) จาก $Load \text{ Regulation} = \frac{\Delta V_o / V_o}{\Delta I_L} \times 100\%$

$$0.001\% / mA = \frac{\Delta V_o / 10}{\pm 10 mA} \times 100\%$$

ดังนั้น
$$\underline{\underline{\Delta V_o = \pm 1 mA}} \quad (typ)$$

(c) จาก
$$TC(V_o) = \frac{\Delta V_o / V_o}{\Delta T} \times 100\%$$

$$1ppm / ^\circ C = \frac{10^6 (\Delta V_o / 10V)}{70^\circ C}$$

ดังนั้น
$$\underline{\underline{\Delta V_o = 0.7 mV}} \quad (Max)$$

Long-Term Stability

Long-Term Stability เป็นการวัดถึงความสามารถของวงจรรักษาระดับแรงดัน ในการรักษา ระดับแรงดันเอาต์พุต ภายใต้ระยะเวลาที่ยาวนานในการใช้งาน (Over time) โดยปกติแล้วจะมีหน่วย เป็น ppm/1000 Hours

ยกตัวอย่างเช่น ไอซีสร้างแรงดันอ้างอิง เบอร์ REF101 จะมีค่า Long-Term Stability เท่ากับ 50 ppm/1000 Hours (โดยเฉลี่ย) ซึ่งหมายความว่า ในเวลา 1000 ชั่วโมง (ประมาณ 42 วัน) แรงดันเอาต์พุต จะเปลี่ยนแปลงไปเท่ากับ

$$(50 \times 10^{-6}) \times 10V = 500\mu V = 0.5mV \quad (typ)$$

ตัวแปรอื่นที่แสดงถึงสมรรถนะในวงจรรักษาระดับแรงดัน

นอกจากนี้ยังมีตัวแปรที่สำคัญในการระบุประสิทธิภาพของวงจรรักษาระดับแรงดัน อีกดังนี้

1. สัญญาณรบกวนเอาต์พุต (Output Noise) เป็นการทดสอบสัญญาณรบกวนที่แรงดัน เอาต์พุต ซึ่งสัญญาณรบกวนจะเป็นสัญญาณความถี่ขนาดเล็กๆ ที่รวมมากับแรงดันไฟตรงเอาต์พุต

ยกตัวอย่างเช่น REF 101 จะมี สัญญาณรบกวนเอาต์พุต $6\mu V_{p-p} \quad (typ)$

2. อัตราการกำจัดแรงดันกระเพื่อม (Ripple Rejection Ratio, RRR) เป็นการบอกถึง ความสามารถในการกำจัดแรงดันกระเพื่อมของวงจรรักษาระดับแรงดัน สามารถหาได้จาก

$$RRR \approx 20 \log \left(\frac{V_{ri}}{V_{ro}} \right) \quad ; \text{ dB}$$

เมื่อ V_{ri} เป็นขนาดของแรงดันกระเพื่อมที่อินพุต
 V_{ro} เป็นขนาดของแรงดันกระเพื่อมที่อินพุต

ยกตัวอย่างเช่น ไอซีรักษาระดับแรงดัน 7805 จาก Data Sheet มี RRR 78 dB(typ) หมายความว่า ทุกๆ แรงดันกระเพื่อมที่อินพุต 1V หลังจาก ผ่านการรักษาระดับแรงดันแล้ว ขนาดของแรงดันกระเพื่อมที่อินพุต จะลดลงเหลือเท่ากับ

$$\frac{1}{10^{(78/20)}} = 0.128mV \quad (typ)$$