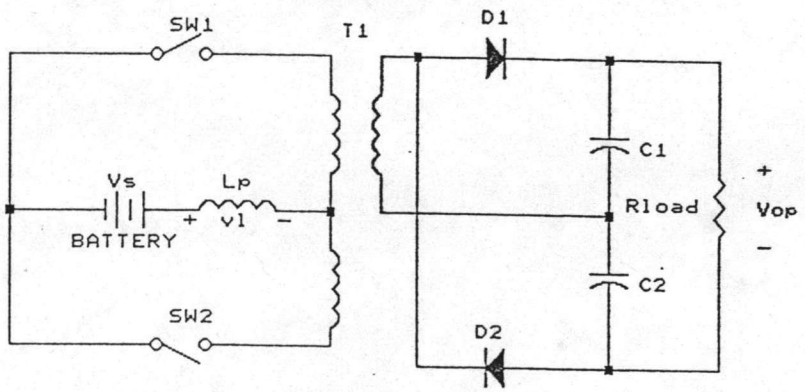
บทที่ 3

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่นำมาใช้กับ UPS ในที่นี้จะทำหน้าที่แปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจากแบตเตอรี่ขนาด 24 โวลต์ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 450 โวลต์ เพื่อจ่ายให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ทำให้ไม่สามารถใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวงจร ทบระดับ (boost) ธรรมดาได้ เนื่องจากการทบแรงดันระหว่าง 24โวลต์กับ 450 โวลต์ ไม่สามารถทำได้โดยอาศัยค่าวัฏจักรงานเพียงอย่างเดียว จำเป็นที่จะต้องอาศัยหม้อแปลงเข้ามาช่วย นอกจากนี้การใช้หม้อแปลงจะทำให้เกิดการแยกโดด (isolation) ทำให้สามารถนำแบตเตอรี่มาเป็นไฟเลี้ยงวงจรควบคุมต่างๆได้อีกด้วย ดังนั้นจึงเลือกใช้วงจรแบบ พุชพูลภาคกระแส ผ่านหม้อแปลงในการแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 24 โวลต์ไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 450 โวลต์ ซึ่งวงจร พุชพูลภาคกระแสนี้มีลักษณะดังรูปที่ 3.1 และมีหลักการทำงานดังนี้



รูปที่ 3.1 วงจรพุชพูลภาคกระแส

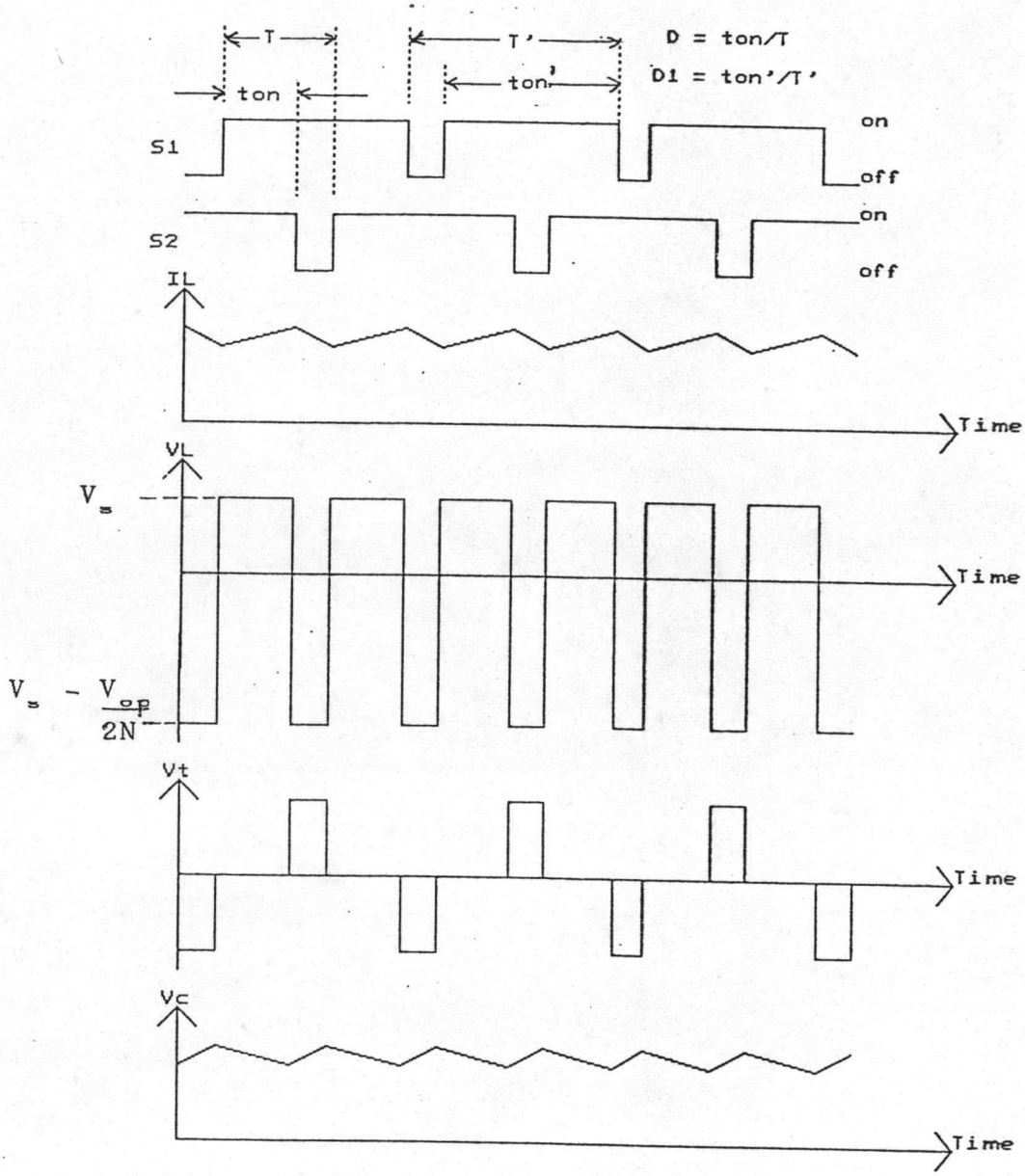
ช่วง A: สวิตช์ S1 และ S2 ON พร้อมกันกระแสจากแบตเตอรี่จะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง ทำให้แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำเป็นบวก และมีแรงดันตกคร่อมขดปฐมภูมิ ทั้งสองขดของหม้อแปลงด้วยแรงดันเท่ากับศูนย์ จึงไม่มีแรงดันปรากฏที่ขดทุติยภูมิ ไดโอด D_1 และ D_2 จึง OFF ตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 จะดีสชาร์จผ่านโหลดทำให้แรงดันขาออก V_o ลดลง

ช่วง B: สวิตช์ S1 ON และ S2 OFF ทำให้กระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าลดลงอย่างเชิงเส้นแรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำเป็นลบ และมีแรงดันตกคร่อมขดปฐมภูมิเพียงขดเดียว จึงเกิดแรงดันปรากฏทางด้านขดทุติยภูมิ มีค่าเป็นลบไดโอด D_2 จึงนำกระแส C_2 ถูกชาร์จทำให้ V_o มีค่าเพิ่มขึ้น

ช่วง A': สวิตช์ S1 และ S2 ON พร้อมกัน จะมีการทำงานเหมือนช่วง A

ช่วง B': สวิตช์ S1 OFF และ S2 ON จะเหมือนกับกรณีช่วง B เพียงแต่แรงดันคร่อมขดทุติยภูมิ ของหม้อแปลงมีค่าเป็นบวก ไดโอด D1 นำกระแสไปชาร์จ C_1 ทำให้ V_o มีค่าเพิ่มขึ้น

การทำงานของวงจรในช่วงต่างๆ แสดงด้วยรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การทำงานของวงจรพุชพูลภาคกระแส

3.1 การออกแบบวงจรภาคกำลัง

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่ออกแบบมีข้อกำหนดดังนี้คือ

กำลังขาออกของวงจร P_o = 600 วัตต์

แรงดันออกของวงจร V_{op} = 450 โวลต์

แรงดันเข้าของวงจร V_s = 24 โวลต์

อัตราส่วนจำนวนของหม้อแปลง N = 6

ความถี่สวิตช์ f = 50 กิโลเฮิรตซ์

สูตรในการออกแบบ

แรงดันขาออกคำนาณได้จากสมดุลโวลต์วินาทีของแรงดัน V_1 ในรูปที่ 3.2 นั่นคือ

$$V_sD = [V_s-(V_{op}/2N)]D' \quad \text{หรือ}$$

$$V_o = 2NV_sD'/D' \qquad (3.1)$$

โดยที่ V_s = แรงดันของแบตเตอรี่ เท่ากับ 24 โวลต์

N = อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลง

D' = 1-D (D = วัฏจักรงานตามรูปที่ 3.2)

ระลอกกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ (ΔI_L)

$$\Delta I_L = V_sDT/L \qquad (3.2)$$

โดยที่ T = 1/(2f) (f = 1/T' = ความถี่สวิตช์แต่ละตัว)

ระลอกแรงดันขาออก (ΔV_o)

$$\Delta V_o = I_oDT/C \qquad (3.3)$$

โดยที่ C = ค่าตัวเก็บประจุ = $C_1C_2/(C_1+C_2)$

I_o = กระแสโหลดเฉลี่ย

จากข้อกำหนดและสูตรในการออกแบบวงจรพุชพูลเราสามารถนำมาหาค่าต่างๆ ได้ดังนี้

ค่าวัฏจักรงาน (duty cycle = D)

$$D = 0.36$$

เนื่องจากความถี่สวิตช์ที่ใช้งานเท่ากับ 50 กิโลเฮริตช์ดังนั้น

$$T = 1/(2x50x10^{3})$$

$$= 10 \text{ us}$$

และ $t_{on} = 0.36x10 \text{ us}$

$$= 3.6 \text{ us}$$

เมื่อคิด duty cycle (D1) จริงของแต่ละสวิตช์

เท่ากับ (10+3.6)/20 = 0.68

ค่าตัวเหนี่ยวนำ (L)

ให้ ΔI_L = 1 แอมแปร์ จากสมการ (3.2) จะได้

$$L = 86.4 \text{ uH}$$

ค่าตัวเก็บประจุ (C)

ให้ ΔV_o = 0.2 โวลต์ จากสมการ (3.3) จะได้

$$C = 24 \text{ uF}$$

ค่าโหลดมากที่สุด (R_{Lmin})

จาก $P_o = V_{op}^2/R_L$

$600 = (450^2/R_{Lmin})$

$= 337$ โอห์ม

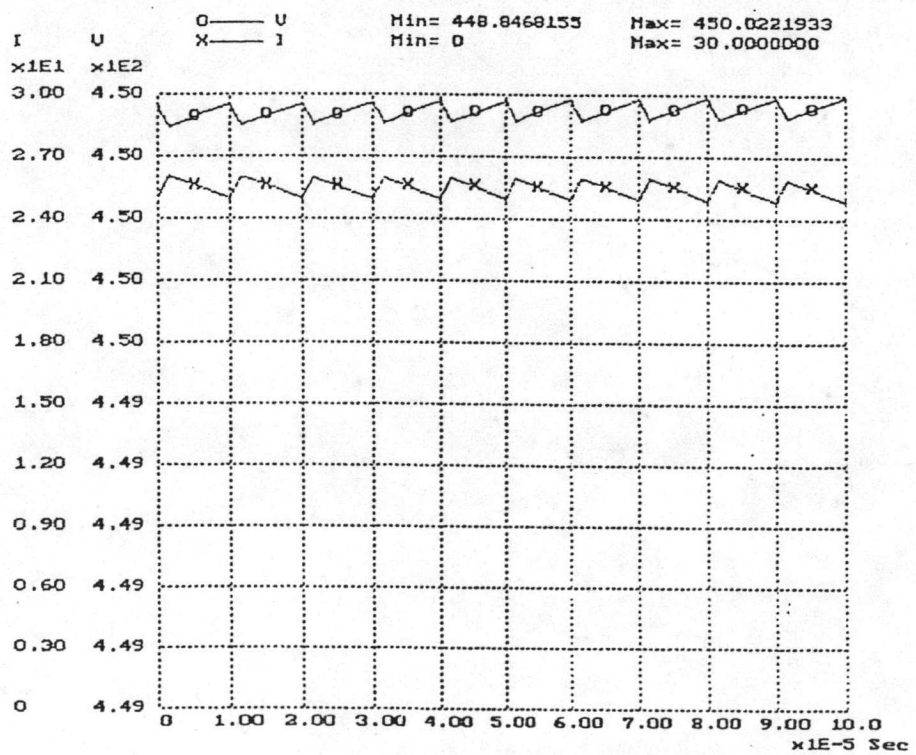
ค่ากระแสเฉลี่ยที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำ ($I_L(av)$)

จาก Power in = Power out

$V_s x I_L(av) = 600$

$I_L(av) = 25$ แอมแปร์

นำค่าอุปกรณ์ต่างๆ มาทำการชีมูเลตโดยใช้โปรแกรม LEC (เอกชัย ลีลารัศมี , 2530) เพื่อหาลักษณะการทำงานของวงจรว่าได้ผลตามที่ต้องการหรือไม่

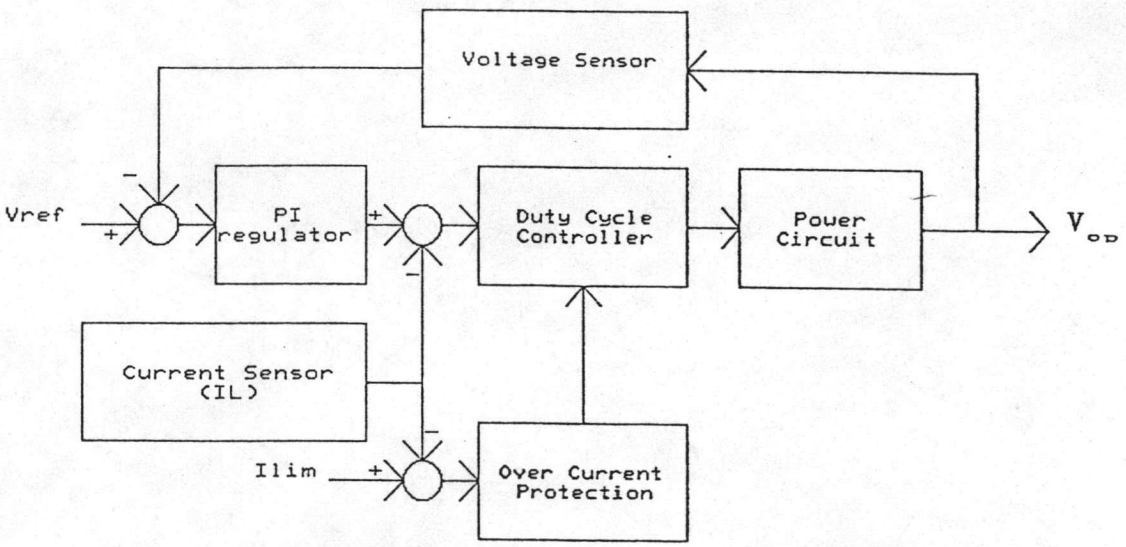


รูปที่ 3.3 แรงดันออกและกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ (ชีมูเลต)

จากรูปที่ 3.3 จะเห็นว่าแรงดันออก ค่ากระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ ค่าระลอกของแรงดันออก และค่าระลอกของกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ มีค่าตามข้อกำหนดดังที่กล่าวมาแล้ว

3.2 การออกแบบวงจรภาคควบคุม

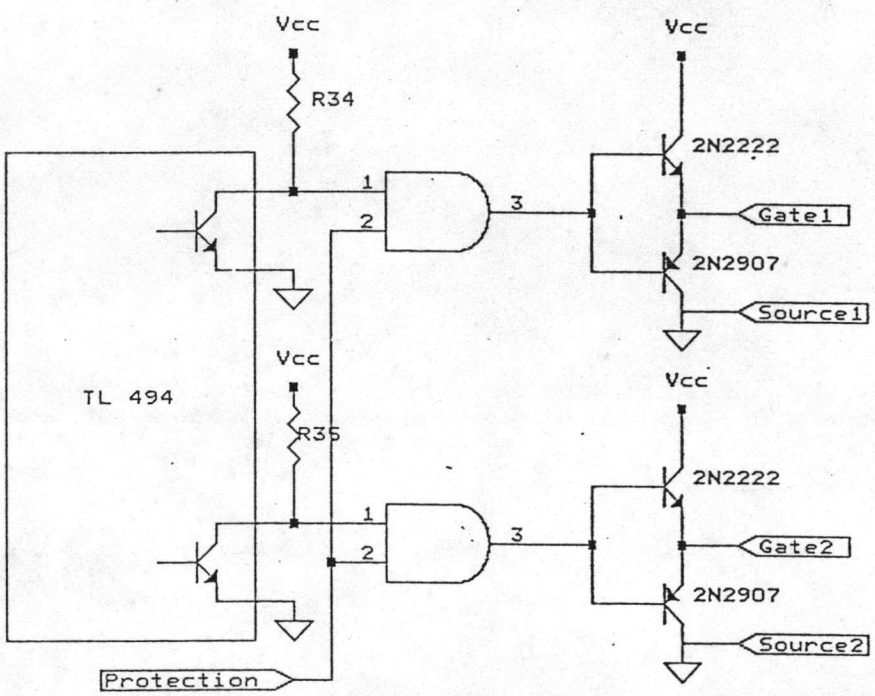
วงจรพุชพูล จะมีการควบคุมแรงดันออกให้มีค่าคงที่ ที่ 450 โวลต์โดยการปรับกระแสขาเข้าตามโหลดขณะนั้น ซึ่งสาเหตุที่ใช้การควบคุมกระแส ก็เพื่อที่จะทำให้การควบคุมมีความเร็วมากขึ้น วงจรในส่วนภาคควบคุมนี้ มีลักษณะดังในรูปที่ 3.4 และแต่ละส่วนมีการทำงานดังนี้



รูปที่ 3.4 แผนภาพบล็อกของวงจรภาคควบคุม

3.2.1 วงจรขับน่าสวิตช์

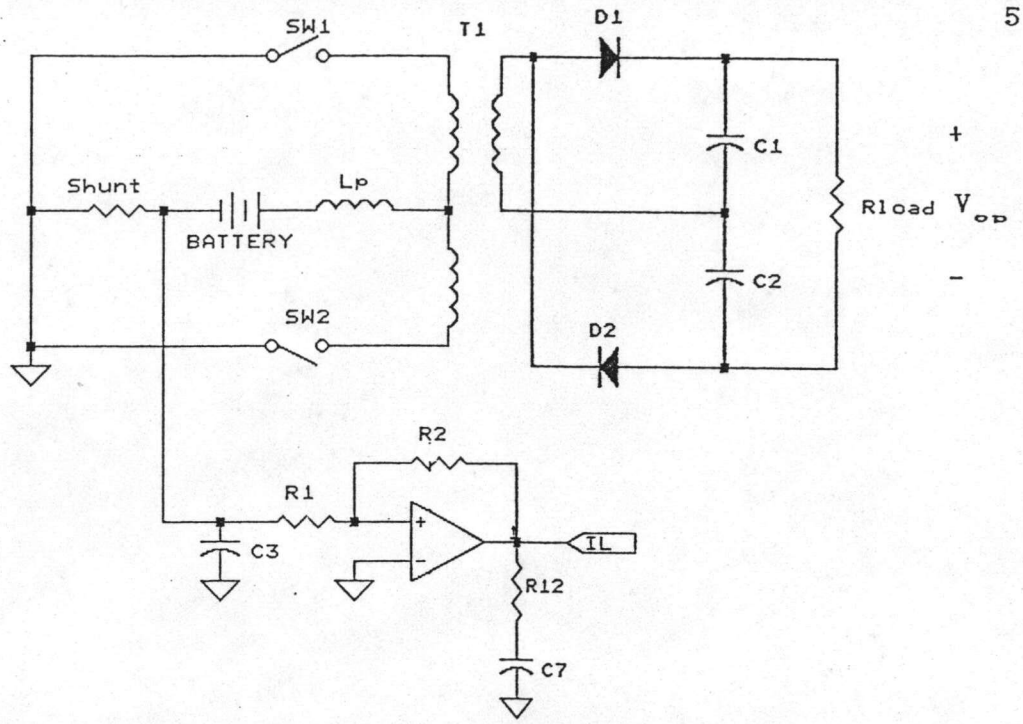
จากการคำนวณหาค่าวัฏจักรงานของสัญญาณสวิตช์ จะเห็นได้ว่ามีค่ามากกว่า 0.5 เสมอเราจึงใช้สัญญาณขาออกจากขา collector ของ ไอซี TL 494 เพื่อที่จะให้วงจรขับเกตมีค่าวัฏจักรงานมีค่ามากกว่า 0.5 ดังกล่าวมาแล้ว และนำสัญญาณที่ได้ มาผ่านเกตที่ต่อไว้เป็นวงจรป้องกันกระแสเกินพิกัด สัญญาณที่ผ่านจากเกตนี้สามารถนำไปขับสวิตช์แต่ละตัวได้โดยตรงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วงจรขับน่าสวิตช์

3.2.2 วงจรสุ่มกระแส

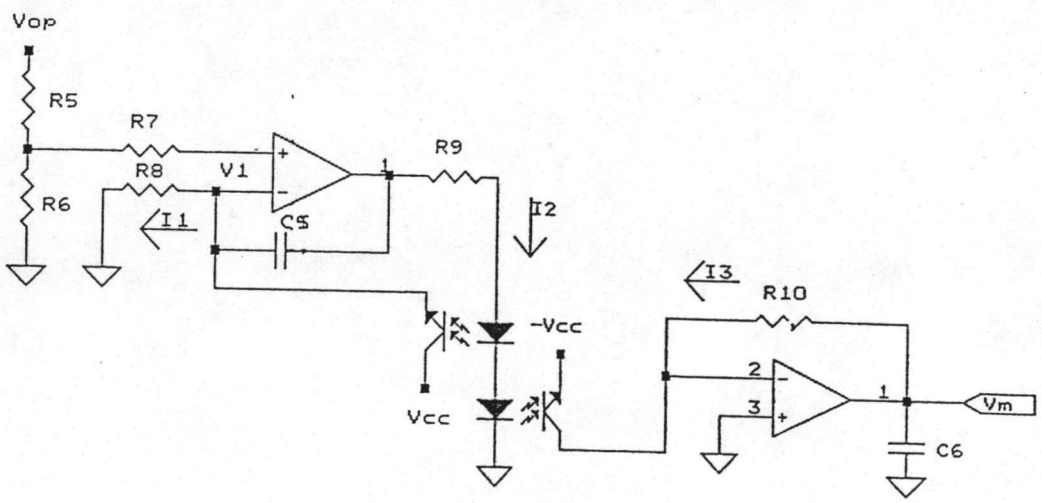
วงจรนี้จะมีการควบคุมกระแสขาเข้า ทำให้ต้องมีการสุ่มกระแสขาเข้าซึ่งเป็นกระแสตรงโดยใช้ shunt และใช้วงจรขยายแบบกลับขั้ว เนื่องจากแรงดันที่สุ่มมาจากกระแสผ่าน shunt มีค่าเป็นลบโดยต่อกราวนด์เดียวกันกับระบบ นอกจากนี้กระแสที่สุ่มมายังใช้เป็นสัญญาณเข้าสำหรับการป้องกัน กระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ไม่ให้เกินพิกัดที่สวิตช์นั้นจะทนได้อีกด้วย ซึ่งวงจรในส่วนนี้เป็นดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรสุ่มกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ

3.2.3 วงจรสุ่มแรงดัน

ในการสุ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านออก เพื่อนำไปใช้ในการควบคุม จำเป็นที่จะต้องมีการแยกโดดวงจรภาคกำลังออก จากวงจรภาคควบคุมเนื่องจากแรงดันที่จะสุ่ม V_{op} มีค่าถึง 450 โวลต์ ซึ่งอาจทำให้เกิดอันตรายได้จึงนำ opto-diode มาใช้งาน ดังวงจรในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงจรสุ่มแรงดันขาออก

หลักการทำงาน

จาก $I_1 = V_1/R_8 = f(I_2)$ (3.4)

$I_3 = V_m/R_{10} = f(I_2)$ (3.5)

จาก (3.4) และ (3.5)

$I_1 = I_3$

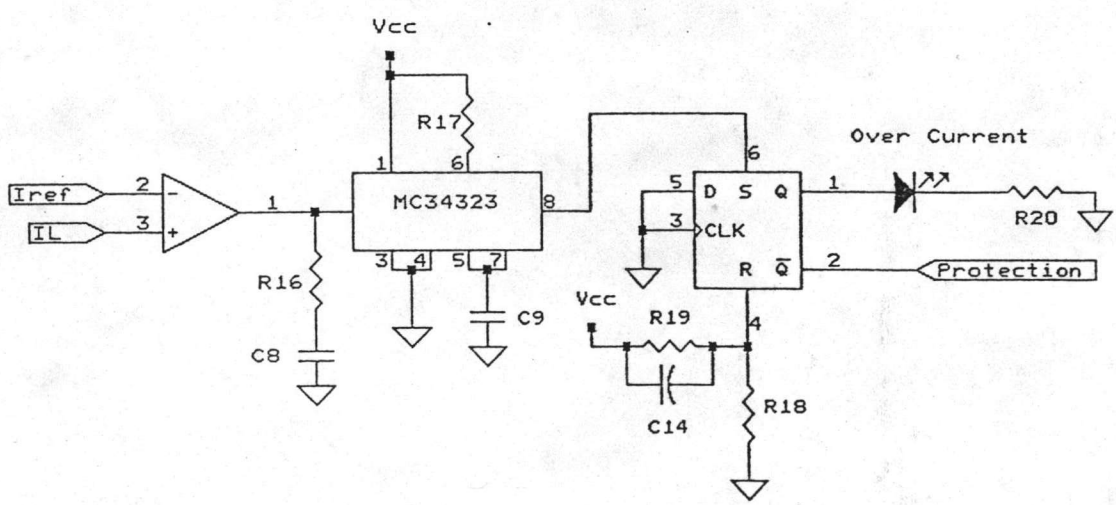
$V_1/R_8 = V_m/R_{10}$

ดังนั้น $V_m = V_1R_{10}/R_8$ (3.6)

สมการ (3.6) แสดงให้เห็นว่าแรงดันที่สุม V_m มีความเป็นเชิงเส้นกับแรงดันที่ต้องการจะวัด V_{op} เนื่องจาก $V_{op}R_8/(R_5+R_8) = V_1$

3.2.3 วงจรป้องกันกระแสเกินพิกัด

เหตุที่ต้องป้องกันกระแสเกินก็เพราะ อุปกรณ์ในวงจรหลายตัวได้ออกแบบมาเพื่อใช้กับกระแสไม่เกินค่าหนึ่ง ถ้าหากกระแสมีค่าเกินค่าดังกล่าวอุปกรณ์นั้น ๆ อาจเสียหายและยังจะทำความเสียหายให้กับส่วนต่างๆในวงจรได้อีกด้วย สำหรับสาเหตุที่ทำให้กระแสเกินนั้นส่วนใหญ่จะเนื่องจากการเพิ่มโหลดหรือการทำงานผิดพลาดซึ่งทำให้กระแสไหลในวงจรมีค่ามากขึ้น วงจรป้องกันนี้มีลักษณะดังรูปที่ 3.8



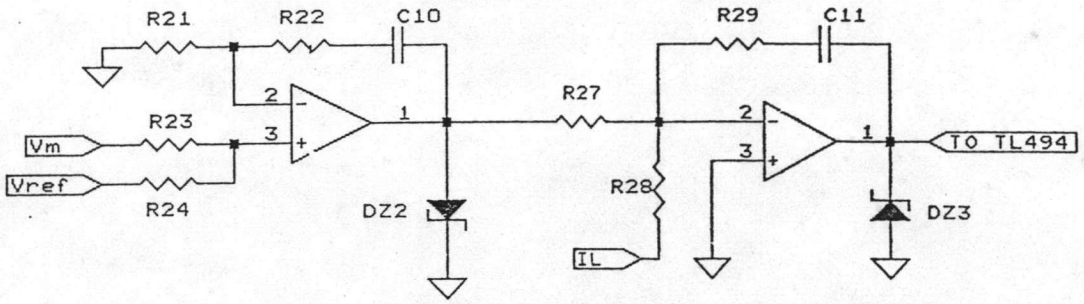
รูปที่ 3.8 วงจรป้องกันกระแสเกินพิกัด

หลักการทำงาน เมื่อสัญญาณกระแสที่สุ่มมามีค่าเกินพิกัดที่ตั้งไว้ จะทำให้มีแรงดันเข้าไปที่ขา 2 ของ MC 3423 เกินกว่า 2.6 โวลต์ เป็นเวลานานตามค่าเก็บประจุ C_9 แล้ว MC 3423 จะให้กำเนิดสัญญาณพัลส์มาเซ็ท D-FF ทำให้ Q เป็น High และ $\overline{Q}$ เป็น Low ทำให้สัญญาณจาก TL 494 ที่จะไปขับเกตไม่สามารถที่จะผ่าน AND GATE ออกไปได้ และสัญญาณออกจาก AND GATE จะยังคงเป็น LOW ตลอดไปจนกว่าจะมีการรีเซ็ทวงจรใหม่

3.2.4 วงจรคุมค่า

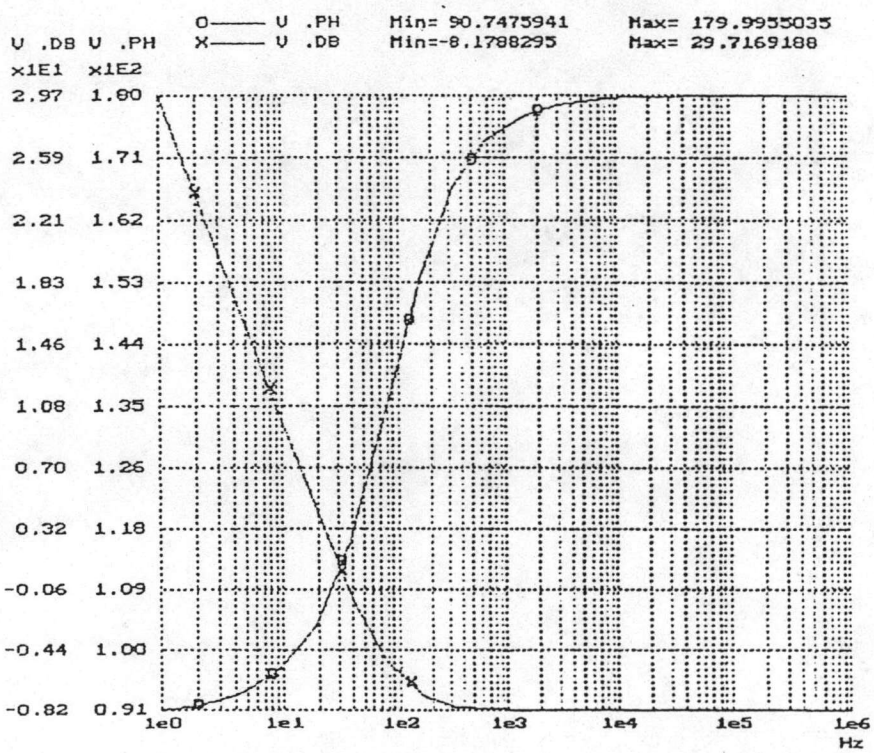
ในวงจรที่ไม่มีการป้อนกลับแรงดันขาออกจะควบคุมด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงานแต่ในความเป็นจริงจะมีกำลังสูญเสียในวงจรเกิดขึ้นเสมอ ทำให้แรงดันขาออกที่ได้มีค่าต่ำกว่าค่าที่ต้องการ นอกจากนี้กำลังสูญเสียยังมีค่าแปรตามกระแสที่ไหลในวงจรอีกด้วย คือ ถ้าโหลดมากขึ้น กระแสจะไหลมากขึ้นทำให้กำลังสูญเสียเพิ่มขึ้น แรงดันขาออกก็จะมีค่ายิ่งลดลงไปอีก ซึ่งทางแก้ไขก็คือ การใช้วงจรป้อนกลับ ที่มีการควบคุมค่าแรงดันขาออกและกระแสขาเข้า ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.9

วงจรคุมค่าที่ใช้เป็นวงจรควบคุมแบบ PI ที่จะนำสัญญาณแรงดันขาเข้าที่สุ่มมาเทียบกับแรงดันอ้างอิง แล้วนำค่าผิดพลาดที่ได้ไปเป็นค่าอ้างอิงให้วงรอบการควบคุมกระแส แล้วนำค่าผิดพลาดที่ได้จากการควบคุมกระแสไปควบคุมวงจรวัฏจักรงานให้เกิดสัญญาณขับเกตที่มีค่าวัฏจักรงานตามค่าผิดพลาดดังกล่าว ถ้ามีการควบคุมที่ดีจะทำให้ค่าวัฏจักรงานแปรตามโหลดได้เสมอ ซึ่งจะทำให้แรงดันออกมีค่าคงที่ตามต้องการ วงจรคุมค่าวงรอบกระแสและวงรอบแรงดัน จะต้องมีอัตราการขยายไฟตรงที่มีค่าสูงและมีอัตราการขยายที่ความถี่สูงต่ำ



รูปที่ 3.9 วงจรคุมค่า

ผลตอบเชิงความถี่ของวงจรคุมค่าดังกล่าวเมื่อทำการซีมูลเลตด้วยโปรแกรม LEK(เอกชัยลีลารัศมี , 2536) มีลักษณะดังในรูปที่ 3.10 ซึ่งวงจรมีหนึ่งขั้วที่ความถี่ศูนย์ และมีหนึ่งศูนย์ที่ความถี่ 150 เฮิรตซ์ (ตรงกับค่าคงตัวเวลาของวงจร RC ที่ต่อเป็นวงจรป้อนกลับของออปแอมป์)



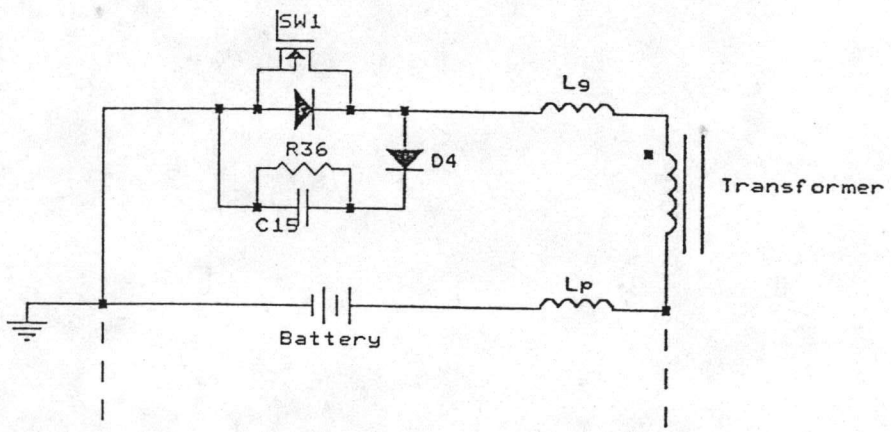
รูปที่ 3.10 ผลตอบเชิงความถี่ของวงจรคุมค่า (ซีมูเลต)

3.3 วงจรสนับเบอร์

ปัญหาที่สำคัญของวงจรพุชพูล ก็คือการเกิดแรงดันยอดแหลมในช่วงที่สวิตช์ตัดวงจรเป็นแรงดันช่วงเวลาสั้นมากและมีค่าสูงอาจจะทำให้สวิตช์เสียหายได้ ซึ่งสาเหตุที่ทำให้เกิดแรงดันดังกล่าวก็คือการสั่ง OFF สวิตช์ทำให้กระแสที่ไหลผ่าน leakage inductance ของหม้อแปลงในขณะที่สวิตช์ ONไม่สามารถไหลได้อีก ทำให้เกิดแรงดันค่าสูงมากไปตกคร่อมสวิตช์ ซึ่งอาจจะสูงกว่าที่สวิตช์จะทนได้จึงจำเป็นที่จะต้องมีวงจรที่ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายขึ้น

3.3.1 voltage clamp

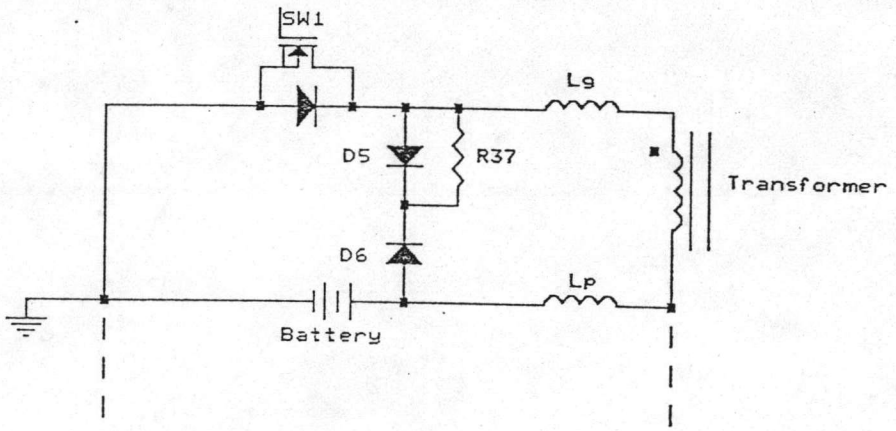
วงจร voltage clamp จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.11 คือจะมีการต่อไดโอด ตัวเก็บประจุและความต้านทาน ไว้ในลักษณะที่จะตรึงค่าแรงดันคร่อมสวิตช์เอาไว้ตามค่าที่กำหนด ซึ่งจะต้องต่ำกว่าค่าพิกัดแรงดันสูงสุดของสวิตช์



รูปที่ 3.11 voltage clamp

3.3.2 weaving snubbler diode

เป็นวงจรที่ต้องอาศัยช่วงเวลา recovery time (t_{rr}) ของไดโอดมาใช้ประโยชน์ในการลดค่าแรงดันยอดแหลม ซึ่งวงจรมีลักษณะดังรูปที่ 3.12 ซึ่งการทำงานเป็นดังนี้คือช่วงที่สวิตช์ ON จะมีการไบแอสไดโอด D1 ให้นำกระแสและเมื่อสวิตช์ OFF กระแสเนื่องจาก leakage inductance ของหม้อแปลงจะไหลผ่านไดโอด D_6 และผ่านไดโอด D_5 ในช่วงเวลา recovery time เข้าไปยังแหล่งจ่าย ทำให้แรงดันที่จะไปตกคร่อมสวิตช์ลดลง



รูปที่ 3.12 weaving snubber diode

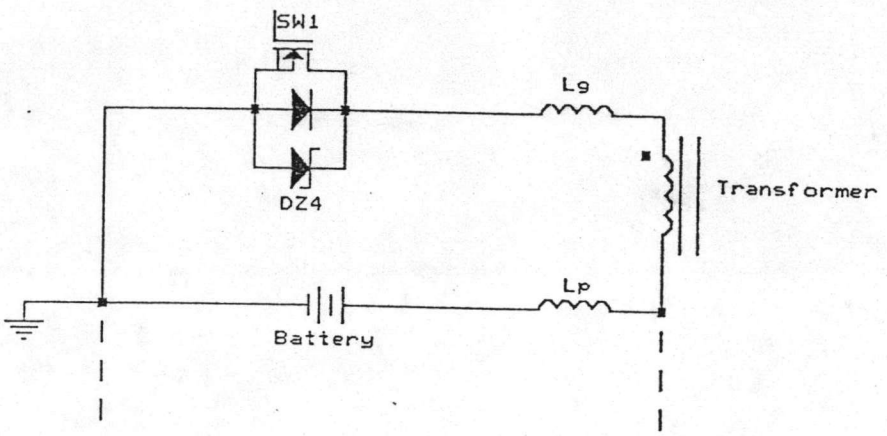
ค่าแรงดัน spike ที่เกิดขึ้นจะมีขนาดกับช่วงเวลา recovery time ของไดโอด D_1 ซึ่งปัจจัยที่มีผลได้แก่

- ค่า R_{37} ที่จะไปแอสไดโอด D_5 ในช่วงที่สวิตช์ ON ถ้ามีค่าน้อยก็จะมี t_{rr} มาก
- ลักษณะสมบัติของไดโอด D_5 ว่าเป็นพวกที่มี t_{rr} มากหรือไม่
- ช่วงเวลาที่ใช้ในการ ON ของไดโอด D_6 ว่าเร็วแค่ไหน

ดังนั้นในการเลือกจึงเลือกไดโอด D_5 เป็นพวก rectifier diode และ D_6 เป็นพวก fast recovery diode

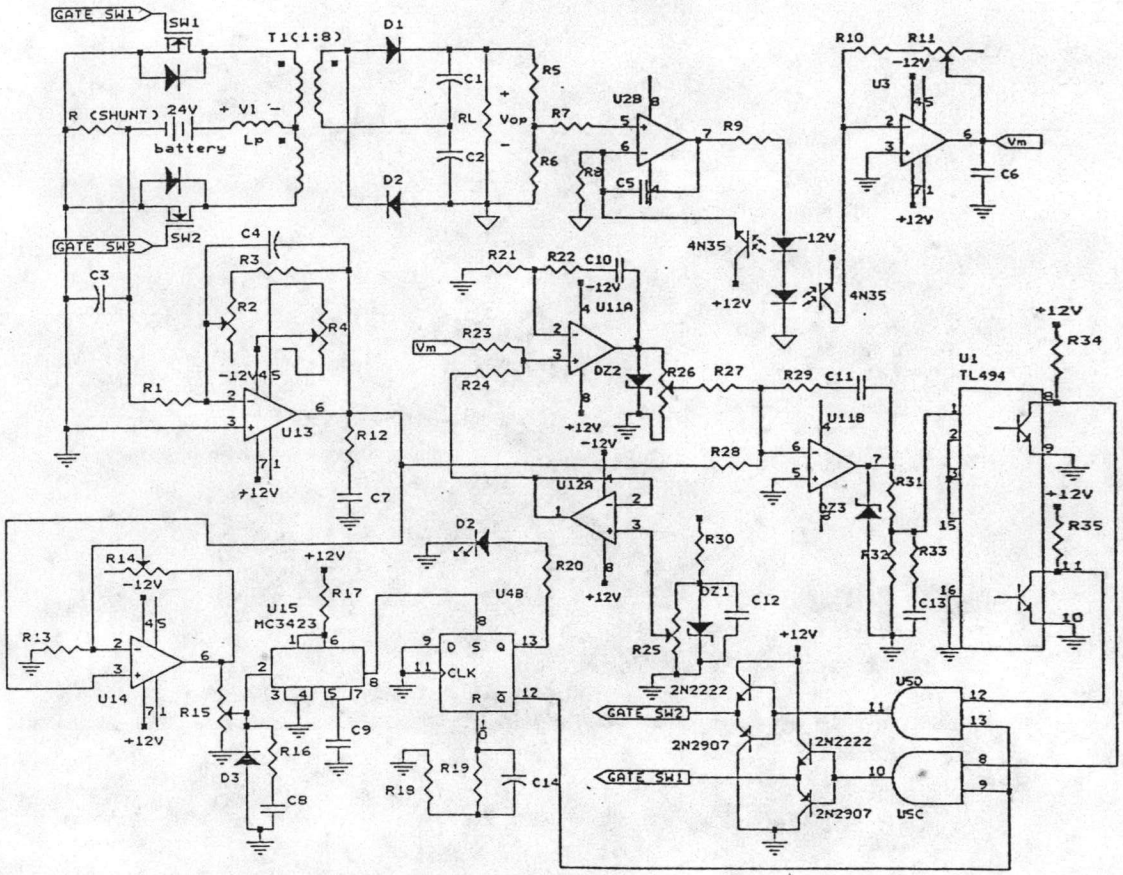
3.3.3 การใช้ซีเนอร์ไดโอดเป็นสนับเบอร์

เป็นการลดแรงดันยอดแหลมของสวิตช์โดยใช้ซีเนอร์ไดโอดต่อคร่อมระหว่าง drain และ source ของสวิตช์ดังรูปที่ 3.13 โดยใช้พวกที่มีค่าแรงดันเบรกดาวน์ (V_b) ต่ำกว่า V_{ds} ของสวิตช์นอกจากนี้ยังต้องมีค่าความคงทนต่อกำลังสูญเสียสูงด้วย



รูปที่ 3.13 การใช้ซีเนอร์ไดโอดเป็นสนับเบอร์

ในที่นี้เราจะใช้วงจรสนับเบอร์ทั้งสามแบบดังได้กล่าวมาแล้วนั้นในการป้องกันมอสเฟสที่ใช้เป็นสวิตช์ในวงจรกำลังของวงจรพุชพูลภาคกระแส



รูปที่ 3.14 วงจรรวมของวงจรพุชพูลภาคกระแส

(ยังไม่รวมวงจรสนับเบอร์ทั้งสามแบบที่ได้กล่าวมาแล้วในข้อ 3.3)