บทที่ 3

การออกแบบและสร้างวงจรเอซีซอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สาย

การออกแบบและสร้างวงจรเอซีซอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สายจะใช้โครงสร้างตามรูปที่ 2.19 ที่ประกอบด้วยสวิตช์สองทาง 6 ชุด ($S_1 - S_6$: สวิตช์ 12 ตัว ไดโอด 12 ตัว) กำหนดขนาดของวงจรในการออกแบบเท่ากับ $3.3\,kVA$ แรงดันด้านเข้า $380\,V$ ความถี่ $50\,Hz$ กระแสโหลดสูงสุด $5\,A$ และความถี่การสวิตช์ $20\,kHz$ สามารถปรับแรงดันไฟสลับด้านออกเป็นแบบทอนระดับ

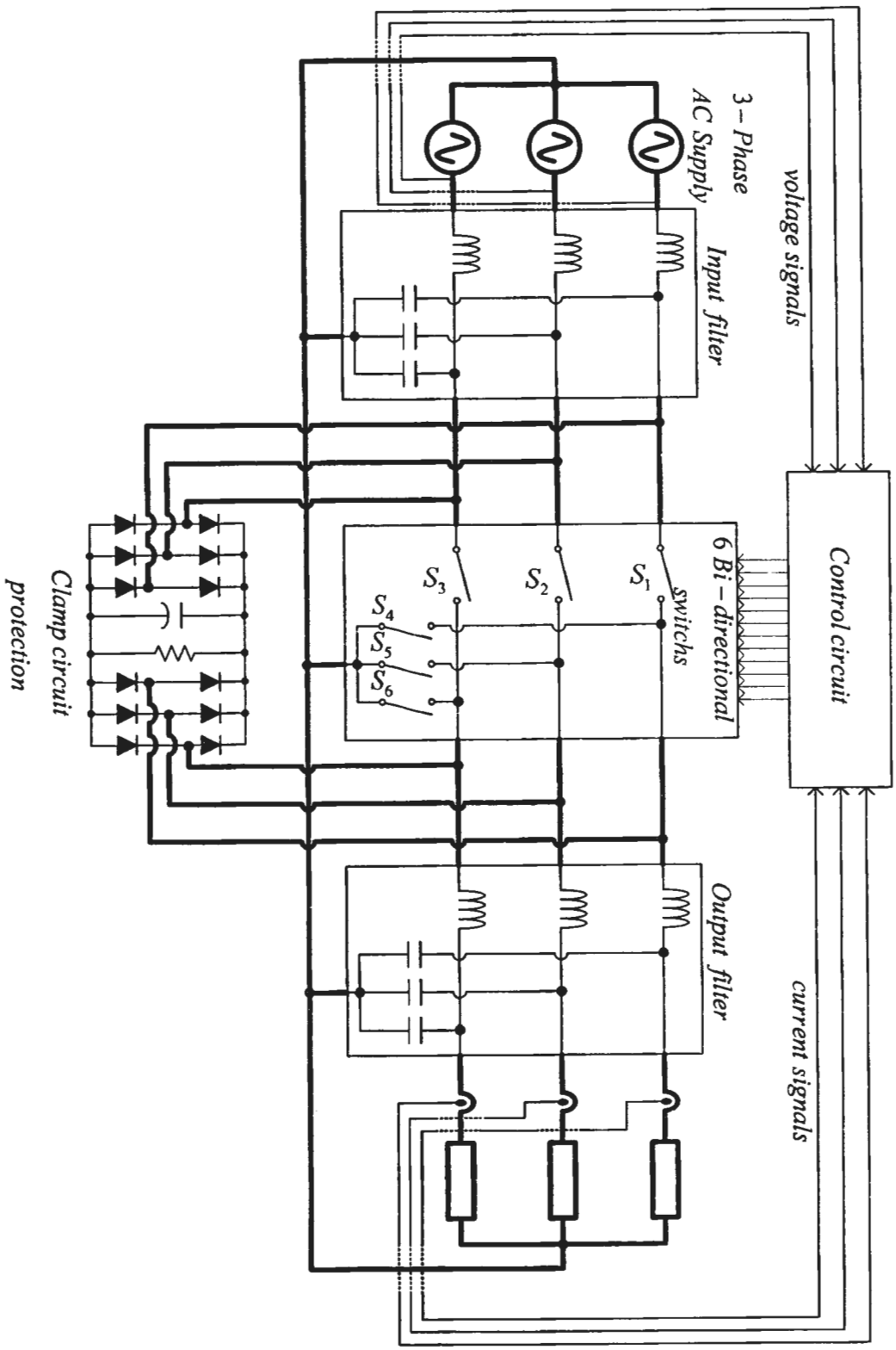
การรออกแบบและสร้างวงจรเอซีซอปเปอร์จะแบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยกันคือ วงจรกำลังและวงจรควบคุม โดยมีหัวข้อการพิจารณาและออกแบบดังต่อไปนี้

วงจรกำลัง

1. สวิตช์สองทาง
2. การกำหนดเวลาหน่วงให้กับรูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์
3. วงจรกรองด้านเข้าและด้านออก
4. วงจรป้องกัน

วงจรควบคุม

1. วงจรกำเนิดสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม
2. วงจรหน่วงเวลา
3. วงจรเลือกสัญญาณ
4. วงจรตรวจจับผ่านศูนย์ของกระแสและแรงดัน
5. วงจรขับนำ
6. วงจรควบคุมการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม

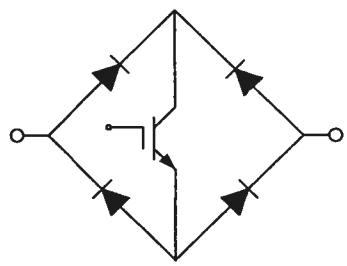


รูปที่ 3.1 โครงสร้างวงจรจริงของวงจรเอซีซอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สาย

3.1 การออกแบบและสร้างวงจรกำลัง

3.1.1 สวิตช์สองทาง

วงจรเอซีซอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สายเป็นวงจรที่ต้องใช้สวิตช์สองทางเพื่อวงจรสามารถทำงานได้ สวิตช์สองทางเป็นสวิตช์ที่สามารถบล็อกแรงดันได้สองทิศทางและนำกระแสได้สองทิศทาง ซึ่งในปัจจุบันสวิตช์แบบนี้ยังไม่มีการผลิตออกมาเป็นแบบสำเร็จรูป จึงต้องใช้สวิตช์ที่มีใช้ทั่วไปนำมาสร้างเป็นชุดสวิตช์สองทางดังแสดงในรูปที่ 3.2 และ 3.3



รูปที่ 3.2 สวิตช์สองทางแบบไดโอดบริดจ์

สวิตช์สองทางแบบไดโอดบริดจ์ประกอบด้วยหนึ่งสวิตช์กับไดโอดบริดจ์แบบหนึ่งเฟสดังรูป 3.2 ข้อดีของสวิตช์สองทางแบบไดโอดบริดจ์คือใช้สัญญาณขับนำเพียงหนึ่งสัญญาณควบคุมการนำกระแสและหยุดนำกระแส แต่สวิตช์แบบนี้จะมีการสูญเสียของสวิตช์สูงเนื่องจากมีสวิตช์กับไดโอดอีกสองตัวทำงานเมื่อนำกระแส

ก) สวิตช์สองทางแบบอิมิตเตอร์ร่วม ข) สวิตช์สองทางแบบคอลเลคเตอร์ร่วม

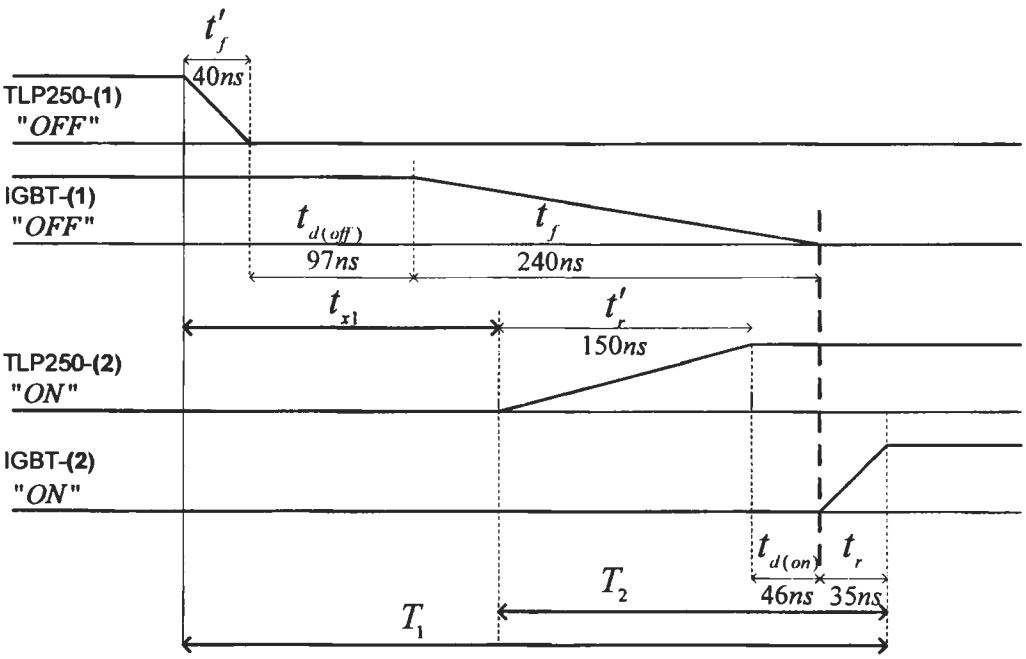
รูปที่ 3.3 สวิตช์สองทางแบบอิมิตเตอร์ร่วมและแบบคอลเลคเตอร์ร่วม

สวิตช์สองทางแบบอิมิตเตอร์ร่วมและสวิตช์สองทางแบบคอลเลคเตอร์ร่วมเป็นการใช้สวิตช์สองตัวที่มีไดโอดต่อคร่อมอยู่ประกอบกันเป็นสวิตช์สองทาง ทั้งสองแบบต่างกันที่การต่อขาร่วมดังรูป 3.3 สวิตช์แบบนี้จะมีการสูญเสียของสวิตช์น้อยกว่าแบบไดโอดบริดจ์คือมีสวิตช์กับไดโอดอย่างละตัวทำงานเมื่อนำกระแส ในการสร้างวงจรเอซีซอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สายนี้จะเลือกใช้สวิตช์สองทางแบบอิมิตเตอร์ร่วม เนื่องจากว่าแบบคอลเลคเตอร์ร่วมจะต้องใช้แหล่งจ่ายของวงจรขับนำมากกว่า ส่วนแบบไดโอดบริดจ์นั้นจะไม่สามารถสร้างรูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ได้และมีการสูญเสียของสวิตช์ที่สูงกว่า

3.1.2 การกำหนดเวลาหน่วงของรูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์

ในการกำหนดช่วงเวลาหน่วงให้กับสวิตช์แต่ละลำดับจะเห็นได้ว่ารูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ทั้งแบบกระแสและแรงดันจะมีช่วงเวลาที่มีนัยสำคัญอยู่ 1 ลำดับ ในทุกๆการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ ซึ่งถ้าเวลาที่มีนัยสำคัญถูกกำหนดให้มีเวลาไม่มากพอที่สวิตช์จะสร้างทางไหลของกระแสโหลดอย่างสมบูรณ์แล้ว ก็จะทำให้เกิดสภาวะเปิดวงจรด้านโหลดขณะสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ได้ ดังนั้นการสร้างรูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์จำเป็นต้องมีระยะเวลาหน่วงเพื่อรอให้สวิตช์ตัวที่ถูกขับนำก่อนอยู่ในสถานะนำกระแสหรือหยุดนำกระแสแล้วอย่างสมบูรณ์หลังจากนั้นจึงขับนำสวิตช์ตัวถัดไปตามรูปแบบที่กำหนดดังแสดงในบทที่ 2 จากรูปที่ 3.4 และ 3.5 เป็นการประมาณหาช่วงเวลา (t_x) ที่เหมาะสมที่จะนำไปกำหนดให้กับสัญญาณขับนำสวิตช์ เวลาที่นำมาพิจารณาได้มาจากข้อมูลของตัวขับนำเบอร์ TLP250 (Gate driver) และสวิตช์ IGBT เบอร์ IRG4PH40UD โดยแบ่งการพิจารณาได้เป็น 2 กรณีดังนี้

1. กรณี "*OFF*" สวิตช์ IGBT- (1) และ "*ON*" สวิตช์ IGBT- (2)



รูปที่ 3.4 การประมาณหาช่วงเวลา t_{x1}

จากรูปจะได้ว่า $t_{x1} = T_1 - T_2$

เมื่อ $T_1 = t'_f + t_{d(off)} + t_f + t_r$

$T_2 = t'_r + t_{d(on)} + t_r$

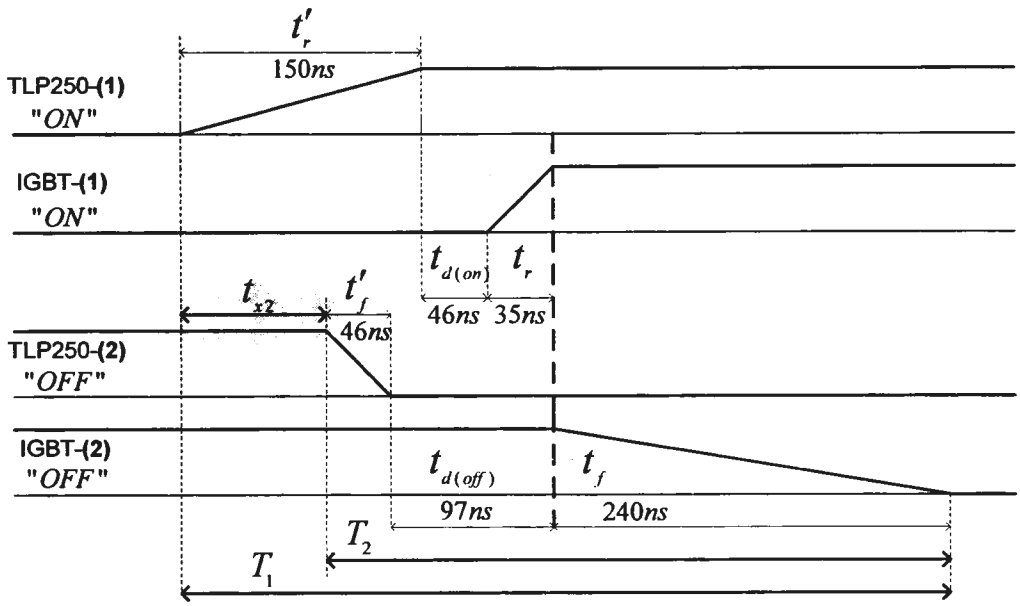
กำหนดให้ t_{x1} คือ ช่วงเวลาที่ต้องการหน่วงเวลาของสัญญาณขับนำกรณีที่ 1

หาช่วงเวลา t_{x1} ได้ดังนี้

$$T_1 = 40+97+240+35 = 412ns$$
$$T_2 = 150+46+35 = 231ns$$
$$t_{x1} = 412ns-231ns = 181ns$$

ดังนั้นการเปลี่ยนสถานะสวิตช์นี้จะต้องกำหนดให้เวลาหน่วงสัญญาณขับนำเป็นเวลาอย่างน้อย $t_{x1} > 181ns$

2. กรณี "*ON*" สวิตช์ IGBT- (1) และ "*OFF*" สวิตช์ IGBT- (2)



รูปที่ 3.5 การประมาณหาช่วงเวลา t_{x2}

จากรูปจะได้ว่า $t_{x2} = T_1 - T_2$

เมื่อ $T_1 = t'_r + t_{d(on)} + t_r + t_f$

$T_2 = t'_f + t_{d(off)} + t_f$

กำหนดให้ t_{x2} คือ ช่วงเวลาที่ต้องการหน่วงเวลาของสัญญาณขับนำกรณีที่ 2

หาช่วงเวลา t_{x2} ได้ดังนี้

$$T_1 = 150+46+35+240 = 471ns$$
$$T_2 = 40+97+240 = 231ns$$
$$t_{x2} = T_1-T_2 = 471ns-377ns$$
$$= 94ns$$

ดังนั้นการเปลี่ยนสถานะสวิตช์ในลักษณะนี้จะต้องกำหนดให้เวลาหน่วงสัญญาณขับนำเป็นเวลาอย่างน้อย $t_{x2} > 94 \quad ns$

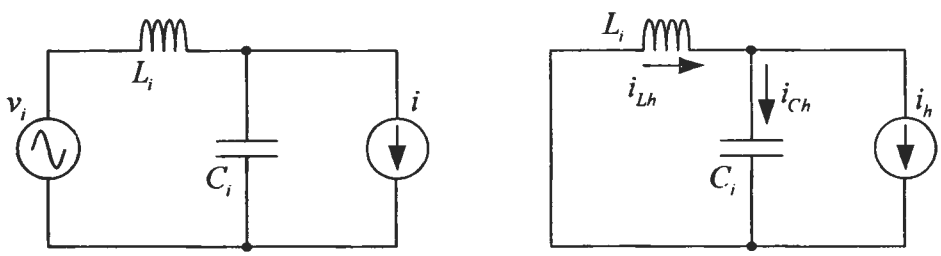
เมื่อพิจารณาการทำงานของสวิตช์ในรูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแสและแบบแรงดัน พบว่าลำดับการขับนำสวิตช์ตรงกับกรณีที่ 2 คือสวิตช์ตัวถัดไปจะต้องนำกระแสก่อนจะหยุดนำกระแสของสวิตช์ตัวปัจจุบัน (*make before break*) เพื่อให้ง่ายในการสร้างสำหรับงานวิจัยนี้จะกำหนดช่วงเวลาในแต่ล่ะลำดับของสัญญาณขับนำให้มีค่าเท่ากันทุกลำดับคือเท่ากับ t_{x2}

จากที่ $t_{x2} > 94ns$ การเลือกเวลา t_{x2} ไม่ควรมีค่าน้อยกว่า $94ns$ หรือมากเกินไปเพราะจะส่งผลกระทบกับค่าแรงดันด้านออกได้ เพื่อความปลอดภัยของวงจรช่วงเวลา t_{x2} ที่จะใช้จริงจะกำหนดให้เท่ากับ $400ns$ ซึ่งถือว่าเป็นค่าเวลาที่ไม่มากเกินไปเมื่อเทียบกับคาบเวลาการสวิตช์ คือ 0.8 %ของคาบเวลาการสวิตช์

3.1.3 วงจรกรองด้านเข้าและด้านออก

วงจรกรองด้านเข้าและด้านออกที่ต่อเข้ากับวงจรเอซีซอปเปอร์ทำหน้าที่กรองความถี่การสวิตช์เพื่อให้กระแสด้านเข้าและแรงดันด้านออกเป็นคลื่นรูปไซน์

วงจรกรองด้านเข้า



รูปที่ 3.6 วงจรกรองด้านเข้าและวงจรสมมูลของกระแสฮาร์มอนิก

จากรูปวงจรสมมูลในรูปที่ 3.6 จะได้อัตราส่วนของกระแสฮาร์มอนิกผ่านตัวเหนี่ยวนำต่อกระแสฮาร์มอนิกส์ ดังนี้ :[5]

$$\frac{i_{Lh}}{i_h} = \frac{1}{\omega_s^2 L_i C_i - 1} \tag{3.1}$$

กำหนดให้ที่ความถี่การสวิตช์เท่ากับ ω_s และขนาดของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีขนาดเท่ากับ 3 % ของกระแสฮาร์มอนิกด้านเข้าของวงจรเอซีซอปเปอร์ จะได้ว่า

$$\frac{1}{\omega_s^2 L_i C_i - 1} = 0.03$$

$$\omega_s^2 L_i C_i - 1 = \frac{1}{0.03}$$

$$\therefore \quad \omega_s^2 L_i C_i = 34 \tag{3.2}$$

เลือกค่าตัวเก็บประจุของวงจรกรองด้านเข้า โดยการประมาณค่าตัวเก็บประจุ จาก $C_i > \frac{I_{chp}}{2 f_s \Delta V_c}$

เมื่อ I_{chp} คือกระแสฮาร์มอนิกส์สูงสุดที่ไหลผ่านตัวก็บประจุ

ΔV_c คือค่ายอดถึงค่ายอดของแรงดันกระเพื่อมของแรงดันตกคร่อมตัวก็บประจุ

ในที่นี้กำหนดให้แรงดันกระเพื่อมสูงสุดของแรงดันตกคร่อม C_i เท่ากับ $10\,V$ กระแส I_{chp} เท่ากับค่ายอดของกระแสพิกัดของวงจรคือ $5\sqrt{2}\ A$ และความถี่กรสวิตช์ $20\ kHz$

$$\text{จะได้ } C_i = \frac{5\sqrt{2}}{2\times 20\times 10^3 \times 10} > 17.6\ uF \tag{3.3}$$

เลือก C_i เท่ากับ $20\ uF$

จาก $\omega_s^2 L_i C_i = 34$ จะได้ค่า L_i เท่ากับ

$$L_i = \frac{34}{C_i \omega_s^2} = \frac{34}{20\times 10^{-6} \times \left(2\pi \times 20\times 10^3\right)^2} \simeq 0.1\ mH$$

จากการคำนวณค่าที่จะเลือกนำไปใช้คือ

$$L_i = 0.1 mH,\quad C_i = 20\ uF \text{ และจะได้ } f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_i C_i}} = 3.5\ kHz$$

วงจรกรองด้านออก

กำหนดค่ายอดของกระแสกระเพื่อมสูงสุด $\Delta i_L = \frac{T_s}{2} \cdot \frac{V_{Lo}}{L_o} = \frac{V_{Lo}}{2 f_s L_o}$ ที่ผ่านวงจรกรองด้านออกไม่เกิน 10 % ของกระแสพิกัดด้านออกที่วัฏจักรงานเท่ากับ 0.5 โดยที่ V_{Lo} คือ แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำด้านออก

ดังนั้นจะได้ว่า

$$L_{o\,min} \geq \frac{V_{Lo}}{2\Delta i_L f_s} \tag{3.4}$$

$$\geq \frac{220\sqrt{2}}{2\times 0.1\times 5\sqrt{2}\times 20\times 10^3} = 10.98\ mH$$

เลือก L_o เท่ากับ $10\ mH$

กำหนดความถี่หักมุมให้น้อยกว่าความถี่การสวิตช์ 10 เท่า จะได้ความถี่หักมุมเท่ากับ $2\ kHz$

จาก $f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_o C_o}}$

สามารถหาค่า C_o ได้จากสมการความถี่หักมุมโดยแทนค่า L_o ที่เลือกไว้

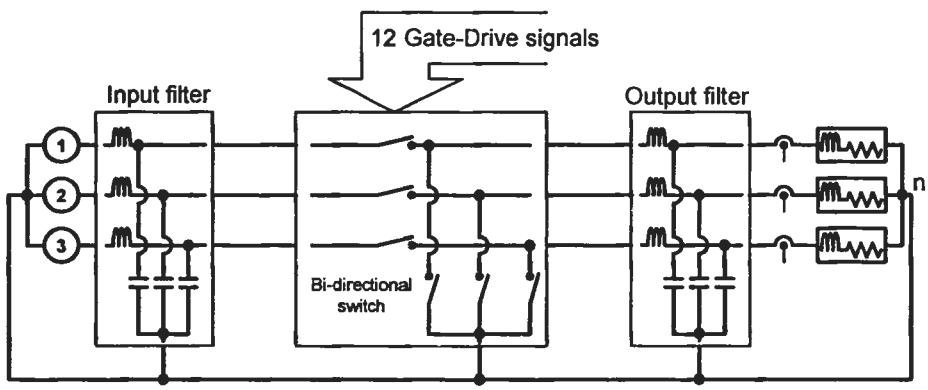
$$C_o = \frac{1}{(2\pi f_c)^2 L_o} = \frac{1}{\left(2\pi \times 2 \times 10^3\right)^2 \times 10 \times 10^{-3}} = 0.57\ uF$$

จากการคำนวนค่าที่จะเลือกนำไปใช้คือ

$L_o = 10mH,\ \ C_o = 1uF$

3.1.4 วงจรป้องกัน

การทำงานของวงจรป้องกัน



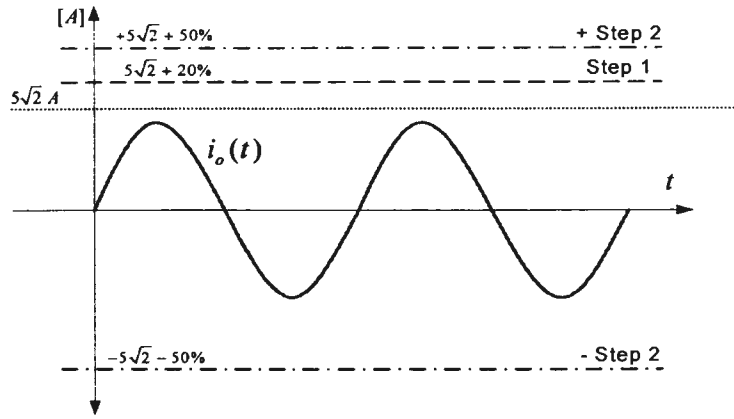
รูปที่ 3.7 วงจรเอซีซอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สาย

แนวคิดการทำงานของวงจรป้องกัน คือ ต้องการป้องกันการพังเสียหายของสวิตช์กำลัง โดยกำหนดการทำงานให้สวิตช์กำลังทำงานอยู่ในพิกัดที่ไม่เกิดความเสียหายได้ วงจรเอซีซอปเปอร์ที่สร้างขึ้นกำหนดให้สวิตช์ทำงานที่แรงดันตกค่ายอดคร่อมสวิตช์สูงสุด $310V$ กระแสไหลผ่านสวิตช์ค่ายอดสูงสุดเท่ากับ $7.07A$

ออกแบบการทำงานของวงจรป้องกันให้มีการทำงาน 2 แบบด้วยกันคือ

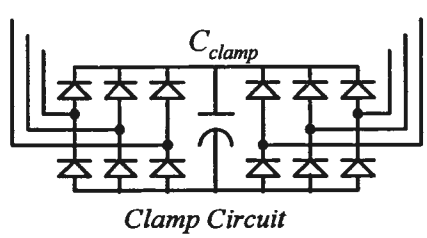
แบบที่ 1 :*(Step1)* จะจำกัดกระแสโหลดไม่ให้เกิน $7.07A_{peak} + 20\%$ เมื่อกระแสเกินค่าที่กำหนด สัญญาณขับนำจะถูกสั่งหยุดนำกระแส คือสวิตช์ถูกสั่งเปิดวงจรในเฟสที่มีกระแสเกิน ซึ่งการทำงานของแบบที่ 1 จะแยกการป้องกันของแต่ละเฟสออกจากกัน

แบบที่ 2:*(Step2)* มีไว้เพื่อสั่งป้องกันทันทีทันใดในกรณีเกิดลัดวงจรโหลด โดยจะจำกัดกระแสโหลดไม่ให้เกิน $7.07A_{peak} + 50\%$ เมื่อกระแสเกินค่าที่กำหนด แหล่งจ่ายของ $TLP250$ ทุกแหล่งจ่ายจะถูกตัดออก ทำให้สัญญาณขับนำสวิตช์ทุกตัวถูกสั่งหยุดนำกระแสทันทีทันใด การทำงานของ แบบที่ 2 จะทำงานพร้อมกันทั้ง 3 เฟส ไม่ว่าจะเกิดกระแสเกินที่เฟสใดก็ตาม



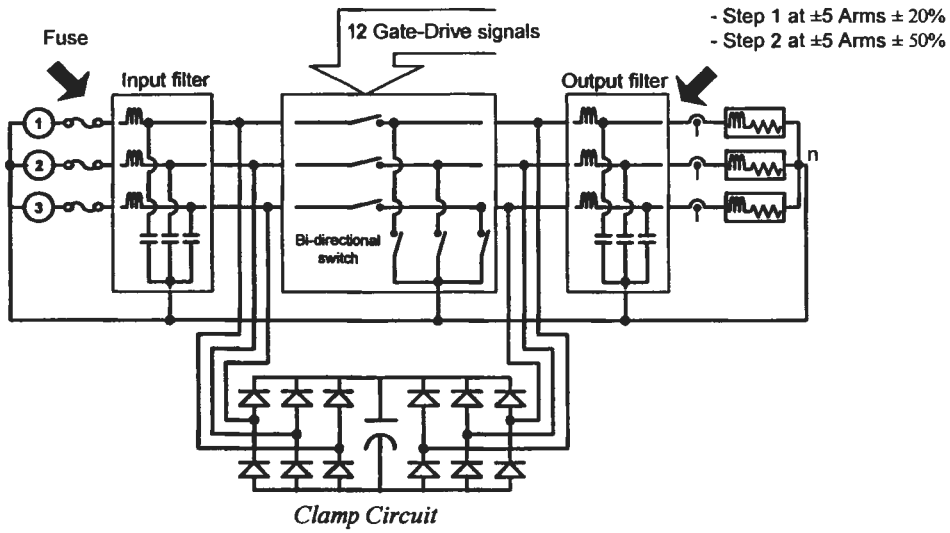
รูปที่ 3.8 รูปคลื่นกระแสโหลดด้านออกที่ถูกจำกัดด้วยการป้องกันทั้ง 2 แบบ

เนื่องจากการทำงานของวงจรป้องกันจะสั่งหยุดนำกระแสสวิตช์ทุกตัวเมื่อเกิดกระแสเกินค่าที่กำหนด ทำให้ด้านออกถูกทำให้เปิดวงจร เพื่อไม่ให้กระแสเกินค่าพิกัดของสวิตช์ แต่ปัญหาที่ตามมาก็คือเมื่อด้านออกถูกทำให้เปิดวงจร กระแสที่โหลดไม่มีทางไหลเป็นผลทำให้เกิดแรงดันค่าสูงตกคร่อมสวิตช์ ซึ่งจะส่งผลให้สวิตช์เสียหายได้ แต่ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยใช้วงจรแคลมป์ (Clamp circuit)[12] เพื่อลดแรงดันค่าสูงนี้ให้ตกคร่อมสวิตช์น้อยลงให้อยู่ในพิกัดที่สวิตช์ทนได้ การนำวงจรแคลมป์มาใช้กับวงจรเอซีซอปเปอร์ได้แนวคิดมาจากการป้องกันวงจรของคอนเวอร์เตอร์แบบเมทริกซ์ เพราะวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบเมทริกซ์นั้นก็มีโครงสร้างที่ใช้สวิตช์สองทางและไม่มีทางเดินกระแสหมุนเวียนเสรีเหมือนกัน รูปที่ 3.9 เป็นวงจรแคลมป์ที่ป้องกันแรงดันเกินทั้งทางด้านโหลดและด้านเข้า



รูปที่ 3.9 วงจรแคลมป์ป้องกันแรงดันเกิน

หน้าที่ของวงจรแคลมป์คือ จะช่วยรองรับพลังงานจากโหลดเมื่อด้านโหลดถูกเปิดวงจร โดยให้กระแสโหลดไหลผ่านไดโอดของวงจรแคลมป์ที่ต่อเป็นวงจรบริดจ์ 3 เฟสเข้าสู่ตัวเก็บประจุรองรับพลังงาน วงจรแคลมป์มีลักษณะการต่อวงจรเข้ากับวงจรเอซีซอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สายดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วงจรเอซีซอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สายที่มีวงจรแคลมป์

การออกแบบค่า C_{clamp}

กำหนดให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุขณะมีแรงดันตกคร่อมปรกติเท่ากับ $540\,V$ และแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุสูงสุดขณะรองรับพลังงานเท่ากับ $760\,V$

เมื่อ $\hat{V}_{max}$: แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุสูงสุด

$\hat{V}$: แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ

L : ค่าความเหนี่ยวนำในวงจรแต่ละเฟส

$\hat{I}$: กระแสสูงสุด

จาก $$Q_L = \frac{1}{2}L_1\hat{I}^2 + \frac{1}{2}L_2\left(\frac{\hat{I}}{2}\right)^2 + \frac{1}{2}L_3\left(\frac{\hat{I}}{2}\right)^2 = \frac{3}{4}L\hat{I}^2$$

เมื่อ $\hat{I} = \sqrt{2}\cdot I_{rms} = 5\sqrt{2}\ A$ และ $\hat{V} = 540\,V$

และ $$Q_L = Q_C$$

$$\frac{3}{4}L\hat{I}^2 = \frac{1}{2}C_{clamp}(\hat{V}_{\max}^2 - \hat{V}^2)$$

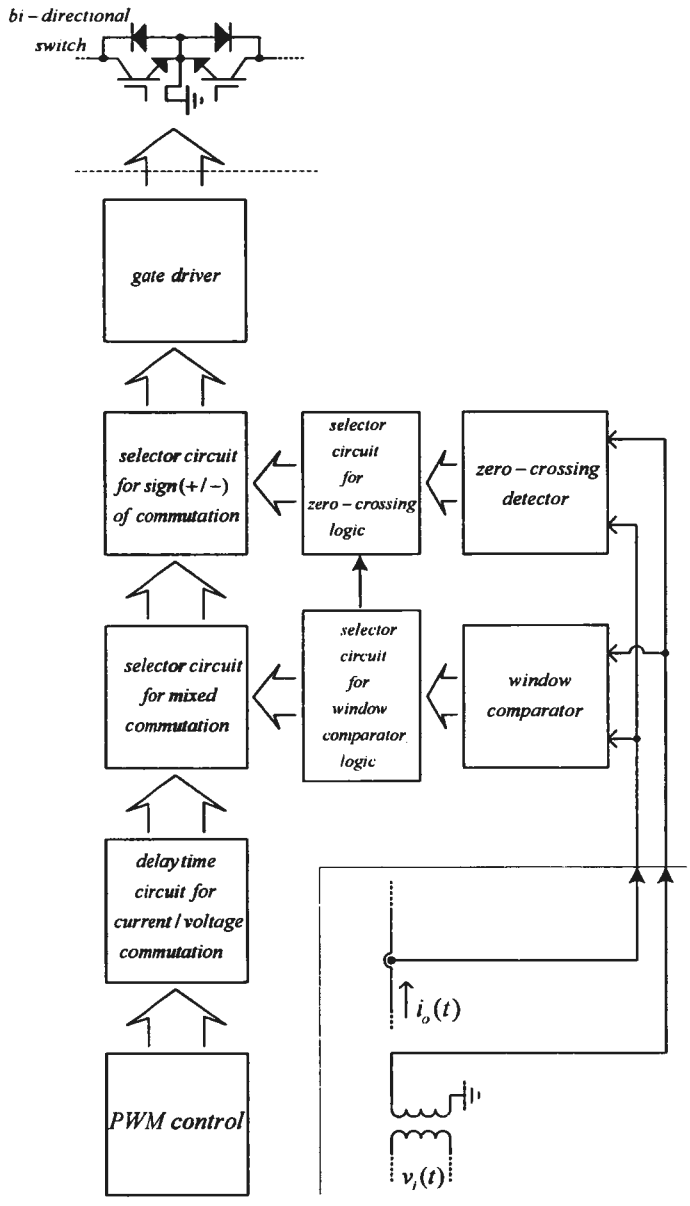
$$\therefore \quad C_{clamp} = \frac{3L\hat{I}^2}{2(\hat{V}_{\max}^2 - \hat{V}^2)}$$

กำหนดค่าความเหนี่ยวนำในวงจรแต่ละเฟสเท่ากับ $50mH$

จะได้ $$C_{clamp} = \frac{3}{2}\times 50\times 10^{-3}\times(5\sqrt{2})^2\times\frac{1}{(760^2 - 540^2)} = 13\ uF$$

ดังนั้นจะต้องเลือกค่า C_{clamp} อย่างน้อย $13\ uF$ และมีค่าพิกัดแรงดันของ C_{clamp} อย่างน้อยเท่ากับ $760\,V$

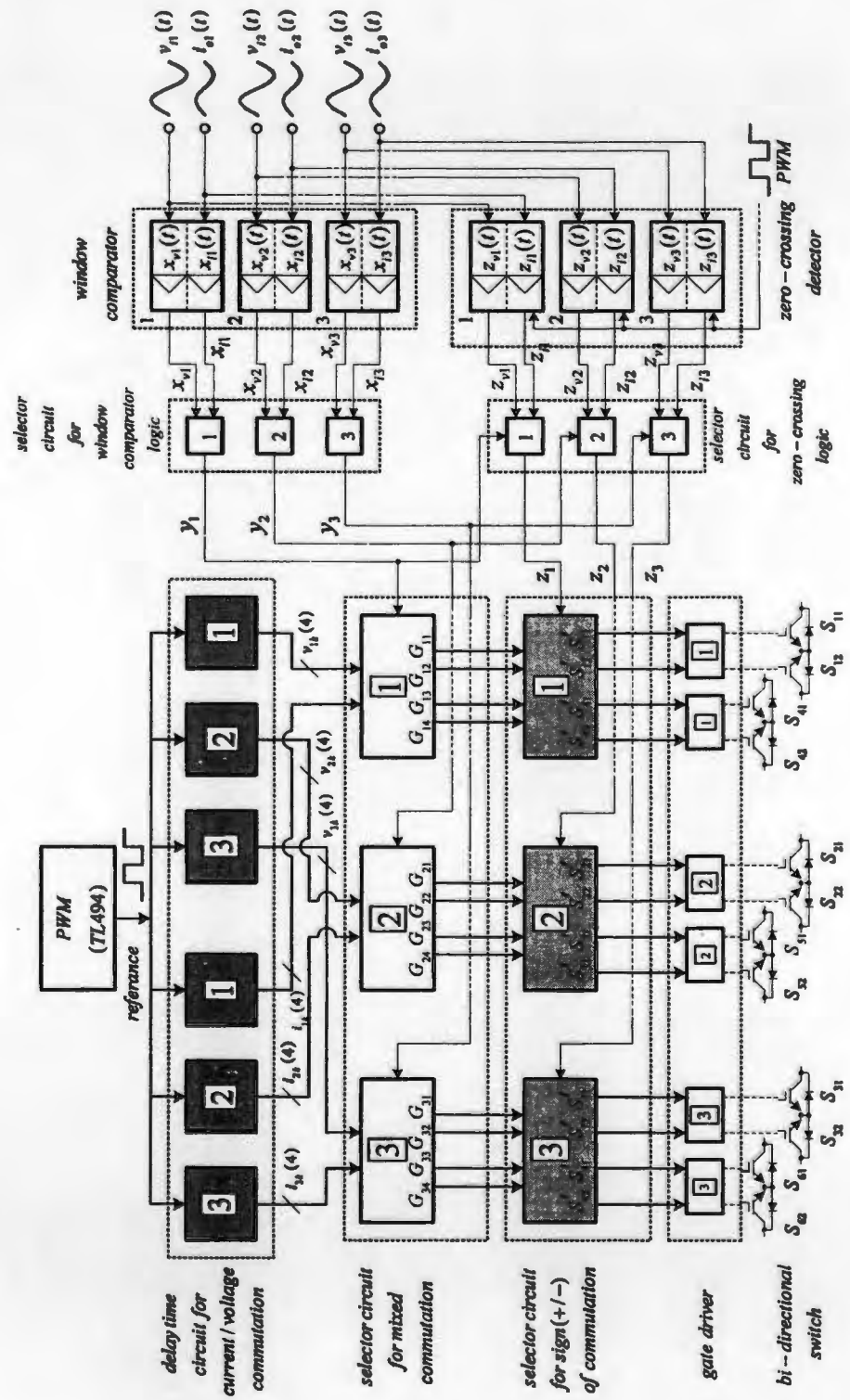
3.2 การออกแบบและสร้างวงจรควบคุม



รูปที่ 3.11 บล็อกไดอะแกรมแสดงการควบคุม

ลำดับการทำงานของการควบคุมแสดงดังบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 3.11 สามารถอธิบายได้ดังนี้ วงจรกำเนิดสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่มีวัฏจักรงานตามต้องการ หลังจากนั้นจะถูกจัดการสัญญาณให้เป็นไปตามรูปแบบพื้นฐานของการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ทั้งแบบแรงดันและแบบกระแสด้วยวงจรหน่วงเวลาของแต่ละแบบ ถัดไปจะเป็นวงจรเลือกการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม ซึ่งจะได้รับสัญญาณคำสั่งที่เกิดจากการนำข้อมูลจากวงจรสร้างย่านแรงดันและย่านกระแสผ่านวงจรการตัดสินใจเลือกการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ เมื่อได้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ที่จะใช้แล้วต่อมาจะต้องเลือกเครื่องหมายของสัญญาณโดยใช้วงจรตรวจจับผ่านศูนย์เพื่อเลือกรูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ว่าเป็นแบบมากกว่าศูนย์หรือแบบน้อยกว่าศูนย์ การเลือกว่าจะใช้สัญญาณเครื่องหมายของวงจร

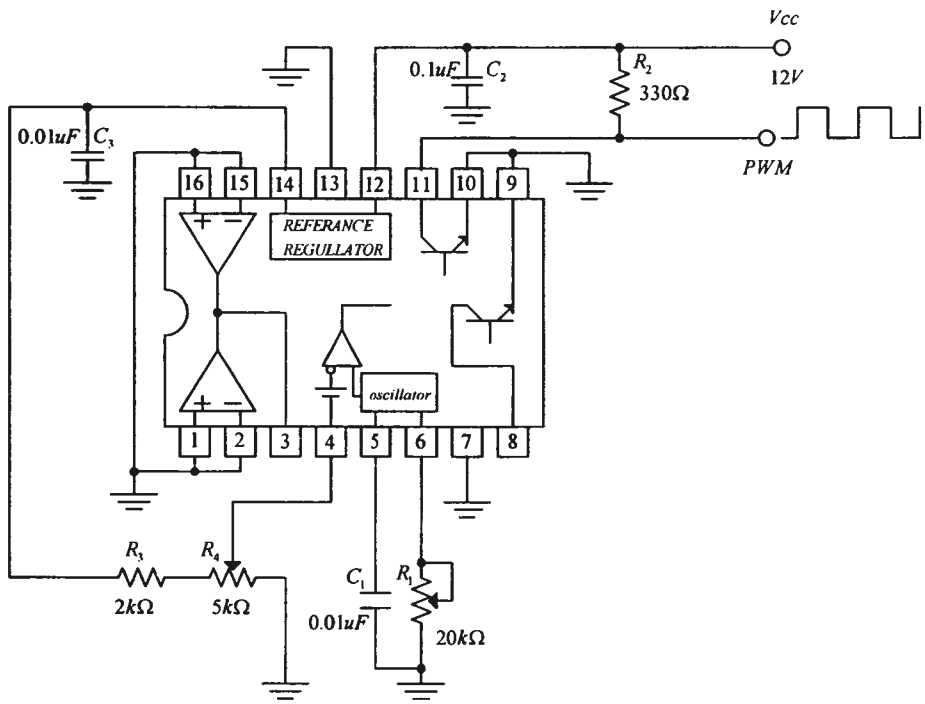
ตรวจจับผ่านศูนย์แรงดันหรือกระแสก็จะใช้คำสั่งเดียวกันกับคำสั่งเลือกการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ก่อนหน้านี้ หลังจากที่รู้แล้วว่าใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบอะไร มีเครื่องหมายอะไร ก็จะส่งสัญญาณให้กับวงจรขับนำสร้างสัญญาณไปขับนำสวิตช์ต่อไป



รูปที่ 3.12 บล็อกไดอะแกรมแสดงภาพรวมของวงจรการควบคุม

3.2.1 วงจรกำเนิดสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม

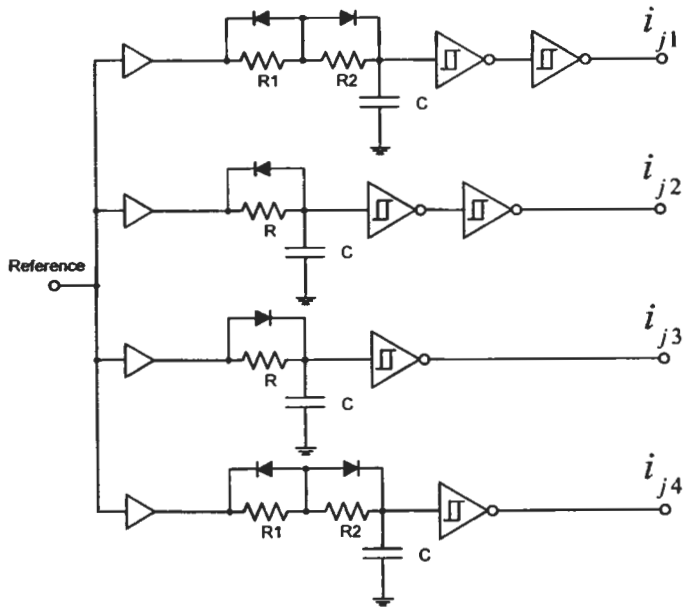
วงจรควบคุมของวงจรเอซีซอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สายจะใช้ไอซีกำเนิดสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่ใช้กันทั่วไปคือ ไอซีเบอร์ *TL*494 ซึ่งจะใช้ไอซีเพียงตัวเดียวควบคุมทั้งสามเฟส โดยจะใช้สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มหนึ่งสัญญาณมาแยกออกเป็น 3 สัญญาณหลักแล้วจึงนำไปเข้าสู่วงจรหน่วงเวลาต่อไป วงจรกำเนิดสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่ใช้แสดงดังรูปที่ 3.13 วงจรทำงานในโหมด Single-end สามารถปรับความกว้างของพัลส์ได้ที่ R_4 และปรับความถี่ของสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่ R_1



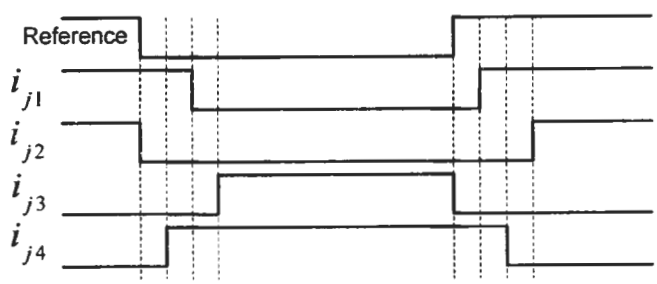
รูปที่ 3.13 วงจรกำเนิดสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม

3.2.2 วงจรหน่วงเวลา

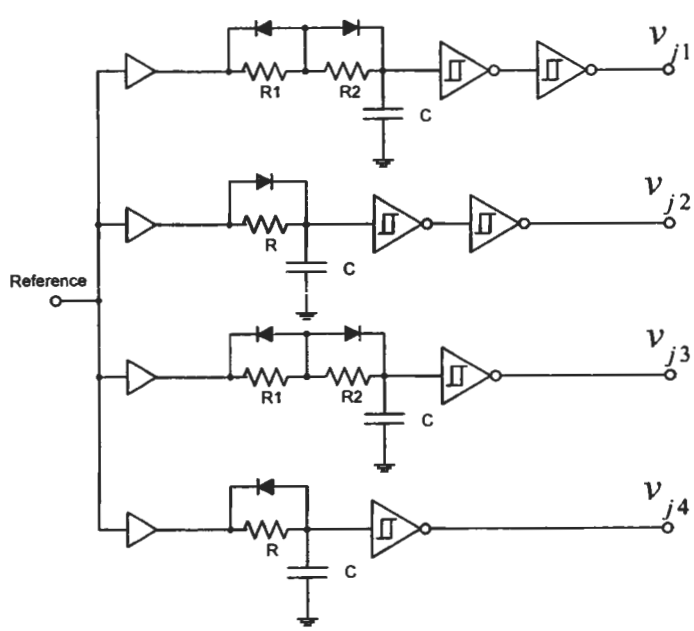
การสร้างรูปแบบพื้นฐานของการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์จะใช้วงจรหน่วงเวลาที่มีส่วนประกอบของวงจรคือ ไดโอด ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวชมิททริกเกอร์ จากสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มหลักหนึ่งสัญญาณจะถูกแยกจ่ายให้กับวงจรหน่วงเวลา 4 วงจร ให้กำเนิด 4 สัญญาณที่จะนำไปใช้ในหนึ่งเฟส วงจรและรูปแบบของสัญญาณสำหรับการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแสแสดงดังรูปที่ 3.14 และ 3.15 และการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดันแสดงดังรูปที่ 3.16 และ 3.17



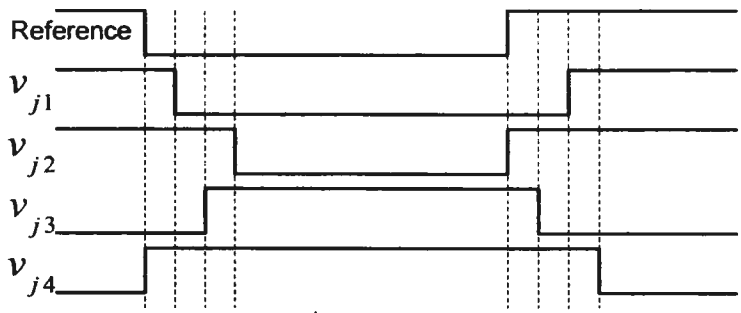
รูปที่ 3.14 วงจรหน่วงเวลาสำหรับการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส



รูปที่ 3.15 รูปแบบสัญญาณการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส

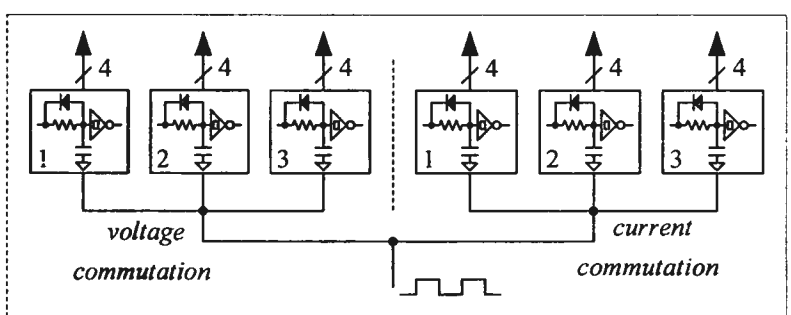


รูปที่ 3.16 วงจรหน่วงเวลาสำหรับการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน



รูปที่ 3.17 รูปแบบสัญญาณการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน

ในการสร้างวงจรควบคุมให้กับวงจรเอซีซอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สายโดยใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสมจะใช้วงจรหน่วงเวลาที่ใช้สร้างรูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส 3 วงจรและวงจรหน่วงเวลาที่ใช้สร้างรูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน 3 วงจร



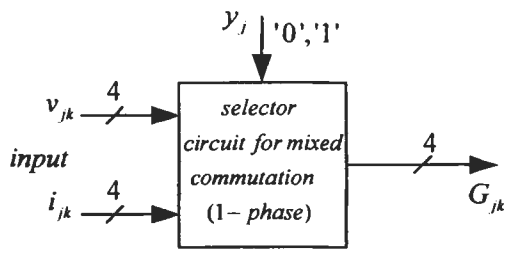
รูปที่ 3.18 การสร้างวงจรหน่วงเวลาที่ใช้ในวงจรเอซีซอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สาย

3.2.3 วงจรเลือกสัญญาณ

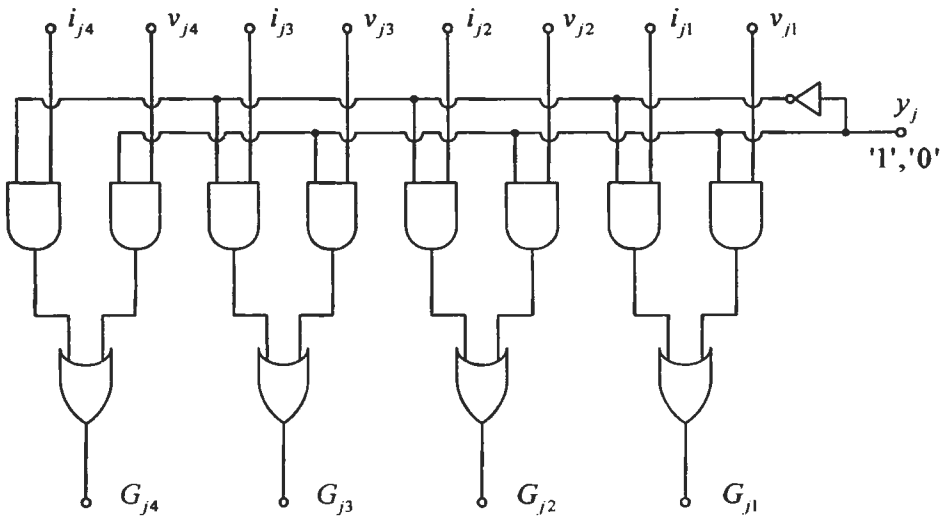
หน้าที่ของวงจรเลือกสัญญาณในการควบคุมมีอยู่ 3 ส่วนด้วยกันคือ

1. เลือกการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์
2. เลือกรูปแบบมากกว่าศูนย์หรือน้อยกว่าศูนย์ของการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์
3. เลือกสัญญาณอ้างอิงจากวงจรตรวจจับผ่านศูนย์

วงจรเลือกการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ทำหน้าที่เลือกสัญญาณขับนำของการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ที่ต้องการ รูปที่ 3.19 เป็นการควบคุมสัญญาณขับนำสวิตช์ใน 1 เฟส ที่ด้านเข้าจะต้องมีสัญญาณเข้า 8 สัญญาณ แบ่งเป็นแบบแรงดันและแบบกระแสอย่างละ 4 สัญญาณที่มาจากวงจรหน่วงเวลา และด้านออกเหลือ 4 สัญญาณที่เป็นรูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ที่ถูกเลือกแล้ว



รูปที่ 3.19 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของวงจรเลือกการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์



รูปที่ 3.20 วงจรเลือกสัญญาณขับนำของการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์

v_{jk} คือสัญญาณขับนำของการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน

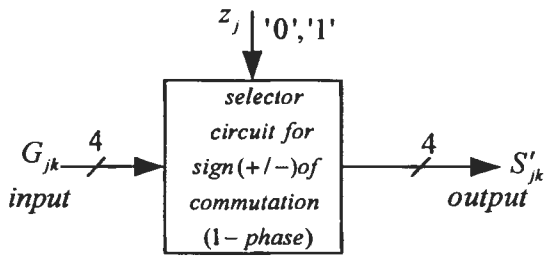
i_{jk} คือสัญญาณขับนำของการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส

G_{jk} คือสัญญาณขับนำสวิตช์ที่เลือก

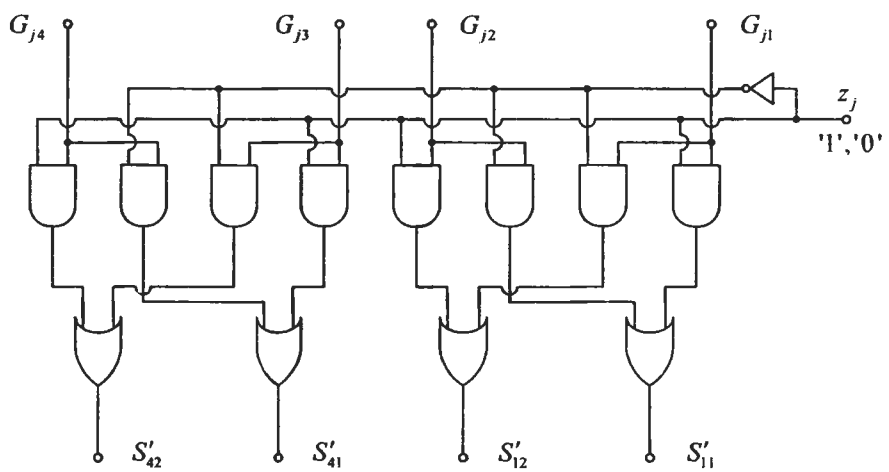
y_j คือสัญญาณตรรกะที่ใช้เลือกการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์

วงจรรูปที่ 3.20 เป็นวงจรที่ใช้เลือกการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแสหรือแบบแรงดัน คือ $y = '1'$ สัญญาณด้านออกทั้ง 4 จะเป็นสัญญาณของการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน แสดงว่าการควบคุมเลือกใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดันและ $y = '0'$ สัญญาณด้านออกทั้ง 4 จะเป็นสัญญาณของการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส แสดงว่าการควบคุมเลือกใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส ในการสร้างวงจรควบคุมให้กับวงจรเอซีชอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สายที่ใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสมจะใช้วงจรเลือกสัญญาณขับนำของการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ 3 วงจร

วงจรเลือกรูปแบบมากกว่าศูนย์หรือน้อยกว่าศูนย์ของการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ทำหน้าที่เปลี่ยนรูปแบบของสัญญาณขับนำสวิตช์ให้สอดคล้องกับทิศทางของแรงดันแหล่งจ่ายหรือกระแสโหลด



รูปที่ 3.21 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของวงจรเลือกรูปแบบมากกว่าศูนย์หรือน้อยกว่าศูนย์ของการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์



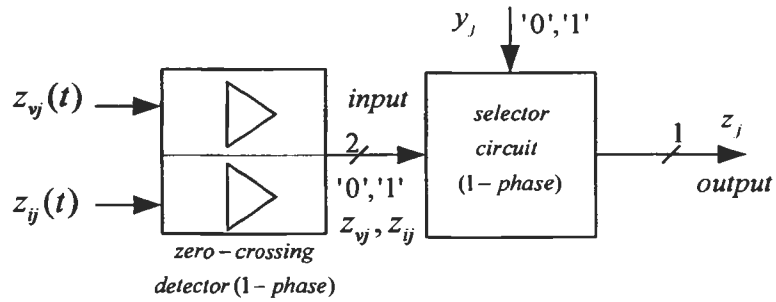
รูปที่ 3.22 วงจรเลือกรูปแบบมากกว่าศูนย์หรือน้อยกว่าศูนย์ของการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์

S'_{jk} คือสัญญาณขับนำสวิตช์

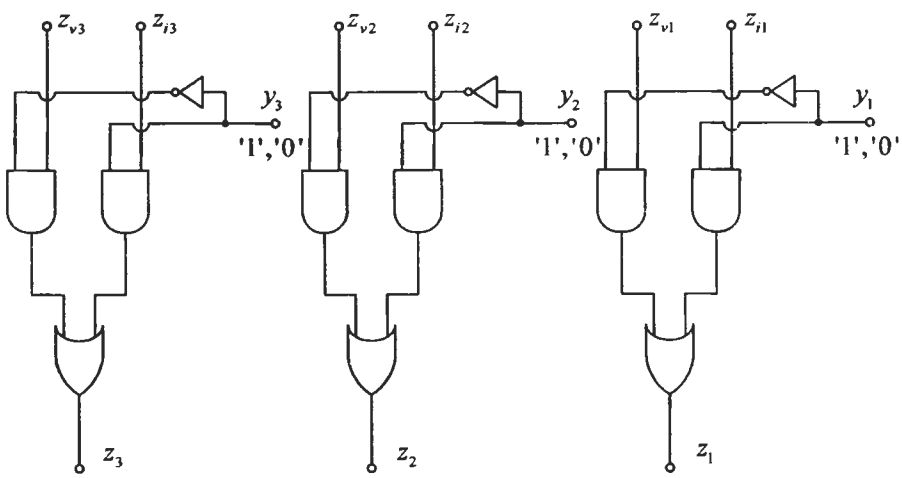
z_j คือสัญญาณตรรกะที่ใช้เลือกรูปแบบมากกว่าศูนย์หรือน้อยกว่าศูนย์

วงจรรูปที่ 3.22 เป็นวงจรที่ใช้เลือกรูปแบบมากกว่าศูนย์หรือน้อยกว่าศูนย์ของการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ที่จะใช้ เมื่อ $z = '1'$ สัญญาณออกจะเป็นรูปแบบมากกว่าศูนย์ และ $z = '0'$ สัญญาณด้านออกจะเป็นรูปแบบน้อยกว่าศูนย์ ซึ่งรูปแบบน้อยกว่าศูนย์จะเป็นการสลับสัญญาณที่เป็นรูปแบบพื้นฐานที่สร้างมาจากวงจรหน่วงเวลา ระหว่าง G_{j1} กับ G_{j2} และสัญญาณระหว่าง G_{j3} กับ G_{j4} ในการสร้างวงจรควบคุมให้กับวงจรเอซีซอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สายที่ใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสมจะใช้วงจรเลือกรูปแบบทั้งหมด 3 วงจร

วงจรเลือกสัญญาณอ้างอิงจากวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ทำหน้าที่เลือกสัญญาณของการตรวจจับผ่านศูนย์ของสัญญาณอ้างอิงอันใดอันหนึ่ง ระหว่างแรงดันแหล่งจ่ายกับกระแสโหลด จากรูปที่ 3.23 สัญญาณด้านเข้าจะมีสองสัญญาณคือ สัญญาณตรรกะการตรวจจับผ่านศูนย์ของสัญญาณแรงดันอ้างอิงและสัญญาณกระแสอ้างอิง



รูปที่ 3.23 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของวงจรเลือกสัญญาณอ้างอิงจากวงจรตรวจจับผ่านศูนย์



รูปที่ 3.24 วงจรเลือกข้อมูลของวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ทั้ง 3 เฟส

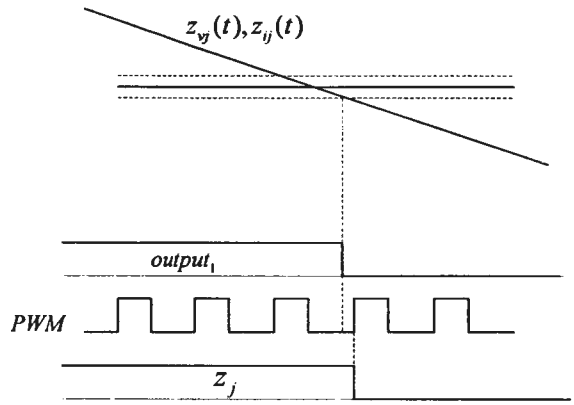
z_{ij} คือสัญญาณตรรกะการตรวจจับผ่านศูนย์ของสัญญาณกระแสอ้างอิง

z_{vj} คือสัญญาณตรรกะการตรวจจับผ่านศูนย์ของสัญญาณแรงดันอ้างอิง

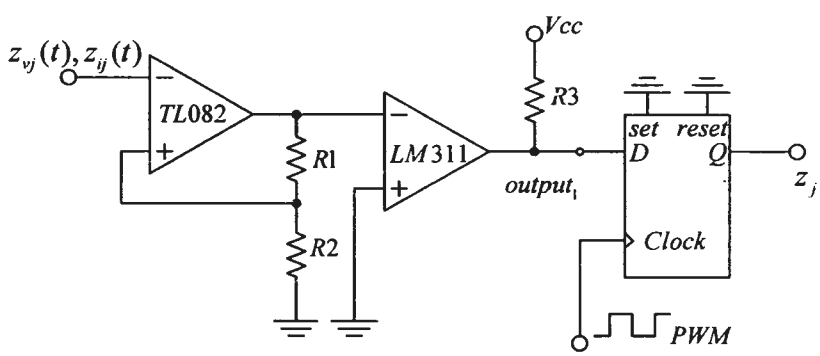
วงจรรูปที่ 3.24 เป็นวงจรที่ใช้เลือกข้อมูลจากวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ว่าจะใช้กระแสโหลดหรือแรงดันแหล่งจ่ายเป็นสัญญาณอ้างอิงในการเลือกรูปแบบมากกว่าศูนย์หรือรูปแบบน้อยกว่าศูนย์ของแต่ละเฟส

3.2.4 วงจรตรวจจับผ่านศูนย์

วงจรตรวจจับผ่านศูนย์มีหน้าที่บอกสถานะของสัญญาณกระแสโหลดและสัญญาณแรงดันแหล่งจ่ายว่า มีค่ามากกว่าศูนย์หรือน้อยกว่าศูนย์ สัญญาณด้านออกของวงจรตรวจจับผ่านศูนย์จะเป็นตรรกะ โดยกำหนดให้ '1' หมายความว่า สัญญาณที่ตรวจจับมากกว่าศูนย์ และ '0' หมายความว่า สัญญาณที่ตรวจจับน้อยกว่าศูนย์ การสร้างวงจรตรวจจับผ่านศูนย์จะใช้ออปแอมป์รับสัญญาณเข้ามาเปรียบเทียบ แต่จะไม่เปรียบเทียบกับศูนย์ที่เดียว ในวงจรออปแอมป์จะทำเป็นวงรอบฮีสเตอรีซิสเพื่อป้องกันการกลับไป-กลับมาของสัญญาณเมื่อผ่านศูนย์ไปแล้ว



รูปที่ 3.25 การทำงานของวงจรตรวจจับผ่านศูนย์



รูปที่ 3.26 วงจรตรวจจับผ่านศูนย์

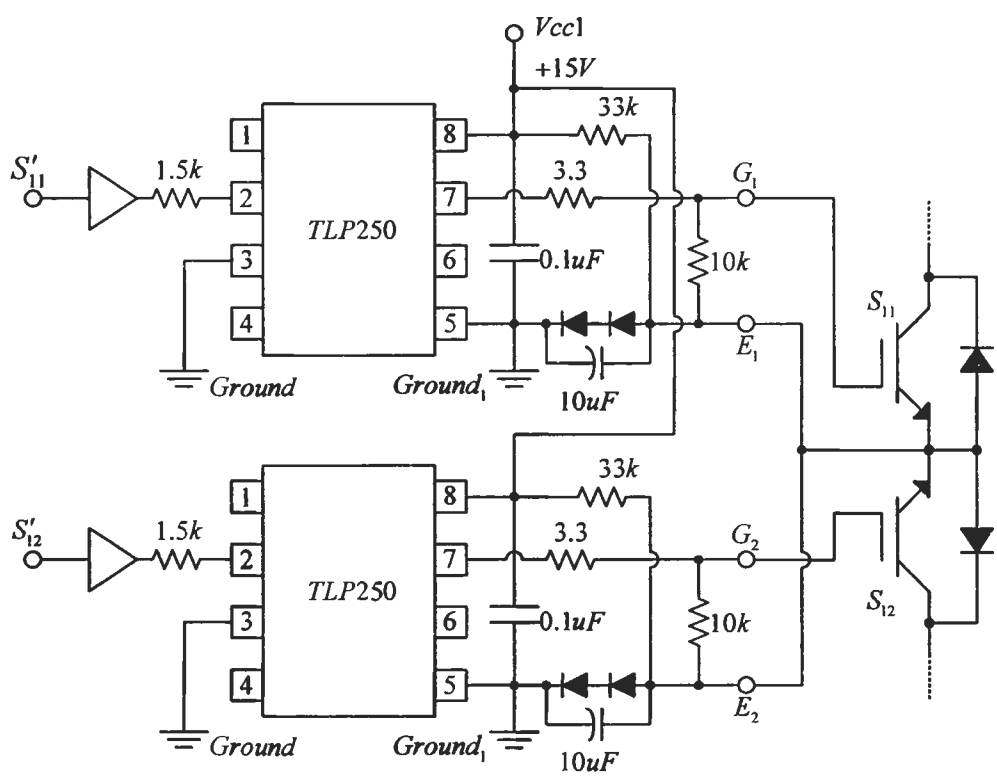
จากที่ใช้วงจรฮีสเตอรีซิสป้องกันการกลับไป-กลับมาของสัญญาณแล้วยังได้เพิ่มวงจรฟลิปฟล็อป ต่อเพิ่มเข้าไปเพื่อให้วงจรตรวจจับสัญญาณผ่านศูนย์มีเครื่องหมายคงที่ตลอด 1 คาบการสวิตช์ ไม่ให้มีการเปลี่ยนรูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์จากบวกเป็นลบหรือลบเป็นบวกภายใน 1 คาบการสวิตช์ดังวงจรรูปที่ 2.26

ในการสร้างวงจรควบคุมให้กับวงจรเอซีซอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สายที่ใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสมจะใช้วงจรตรวจจับผ่านศูนย์ทั้งหมด 6 วงจร แบ่งออกเป็นวงจรตรวจจับกระแสโหลด 3 วงจรและวงจรตรวจจับแรงดันแหล่งจ่าย 3 วงจร

จากที่กล่าวไว้ว่าปัญหาที่เกิดกับวงจรเอซีซอปเปอร์ที่ใช้สวิตช์สองทางคือ สัญญาณอ้างอิงที่ใช้ในการกำหนดรูปแบบของการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ให้เป็นบวกหรือเป็นลบ อาจมีความไม่แน่นอนขณะกำลังผ่านศูนย์ การแก้ไขปัญหานี้ด้วยวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ที่เป็นวงจรฮีสเตอรีซิสต่อฟลิปฟลอปก็เป็นวิธีหนึ่งที่ทำให้สัญญาณเครื่องหมายมีความแน่นอนขึ้น แต่ก็ยังมีส่วนที่ไม่สอดคล้องกับแรงดันและกระแสจริงอยู่

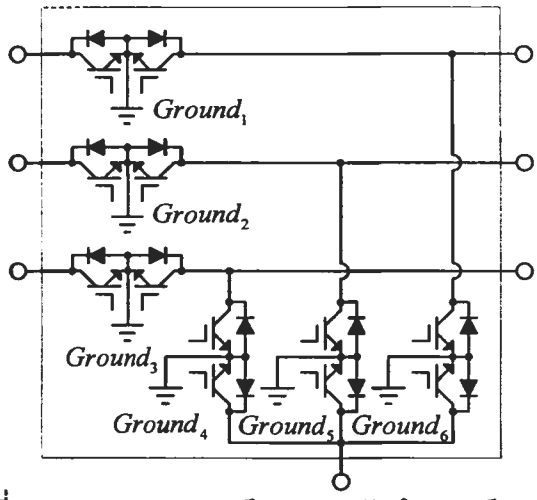
3.2.5 วงจรขับนำสวิตช์สองทาง(Gate driver)

วงจรขับนำสวิตช์สองทางจะใช้ไอซีขับนำ 2 ตัวต่อสวิตช์สองทาง 1 ชุดเนื่องจากว่าการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์จะแยกขับนำทรานซิสเตอร์ เพราะว่าสัญญาณขับนำของสวิตช์ทั้งสองตัวไม่เหมือนกัน ไอซีขับนำทรานซิสเตอร์ที่นำมาใช้เป็นทั้งวงจรขับนำและออปโตทรานซิสเตอร์ภายในตัวด้วย ดังนั้นจึงไม่ต้องมีวงจรเพิ่มเพื่อแยกกราวด์อีก ไอซีขับนำที่เลือกใช้คือ *TLP*250ซึ่งจะใช้ขับสวิตช์ของวงจรเอซีซอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สาย ทั้งหมด 12 ตัวเท่ากับจำนวนทรานซิสเตอร์



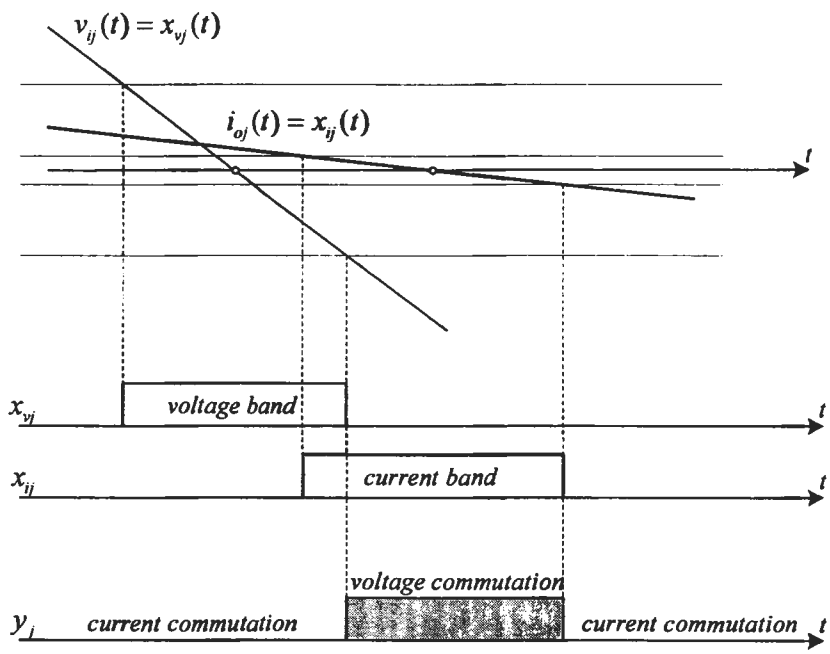
รูปที่ 3.27 วงจรขับนำสวิตช์สองทาง

สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งของการสร้างวงจรขับนำก็คือ การแยกกราวด์ของวงจขับนำเพื่อไม่ให้วงจรกำลังเกิดลัดวงจรผ่านกราวด์ของวงจรขับนำได้ วงจรเอซีซอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สาย จะมีแหล่งจ่ายให้กับวงจรขับนำทั้งหมด 6 แหล่งจ่าย ซึ่งก็คือมีการแยกเป็น 6 กราวด์ ดังรูปที่ 3.28



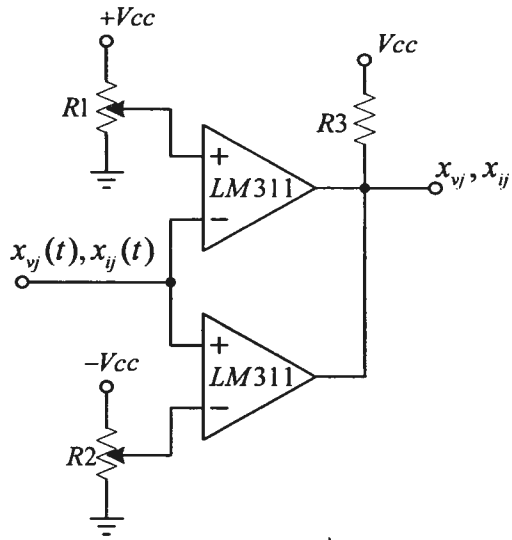
รูปที่ 3.28 การแยกกราวด์ของวงจรขับนำสวตช์สองทาง

3.2.6 วงจรการควบคุมการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม



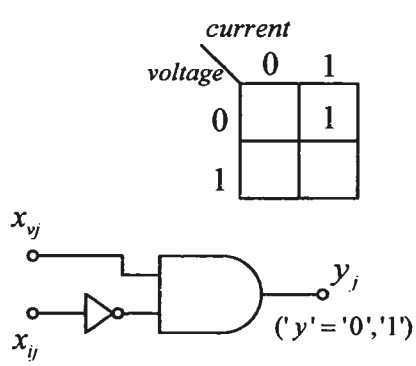
รูปที่ 3.29 หลักการทำงานของการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม

จากที่ได้กล่าวในบทที่ 2 ว่าสัญญาณอ้างอิงที่จะนำใช้ในการควบคุมการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสมประกอบด้วย สัญญาณกระแสและสัญญาณแรงดัน ทั้งสองสัญญาณจะถูกกำหนดให้มีย่านรอบศูนย์ของแต่ละสัญญาณอ้างอิง เรียกว่าย่านกระแสและย่านแรงดันดังรูปที่ 3.29 วงจรที่ใช้กำหนดย่านของสัญญาณคือ วงจร window comparator ดังรูปที่ 3.30



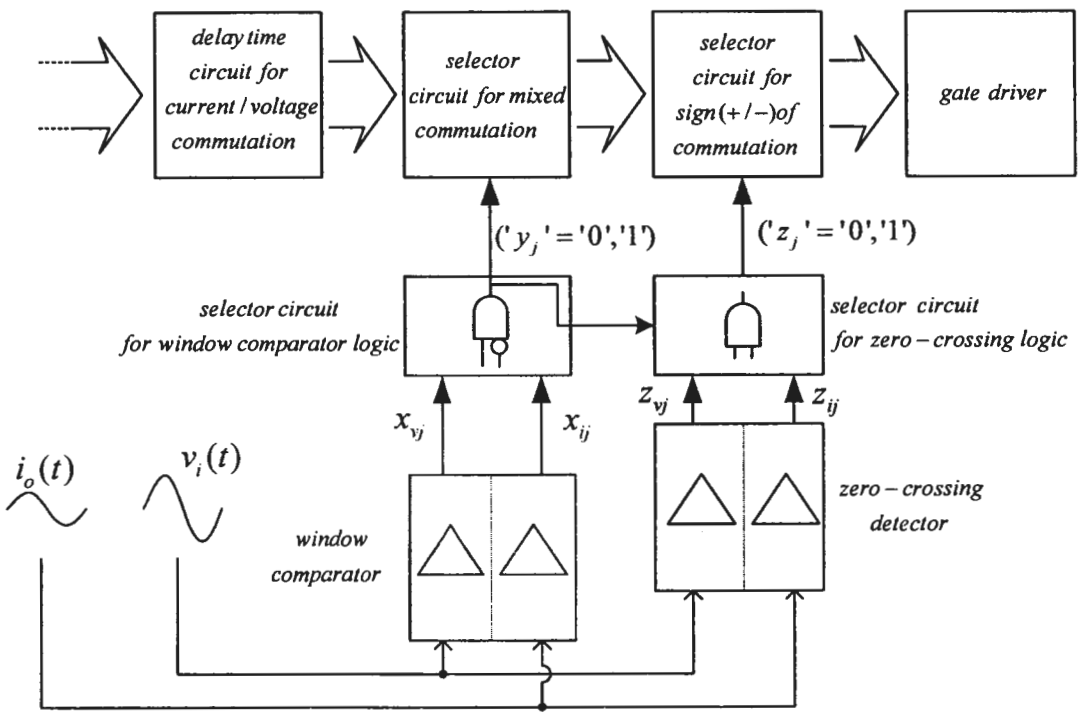
รูปที่ 3.30 วงจร window comparator ที่ใช้สร้างย่านสัญญาณ

ย่านของกระแสและย่านของแรงดันจะถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ค่าหนึ่งตามที่ได้ออกแบบไว้ให้มีค่าเป็น 10 % ของค่ายอดกระแสและแรงดันคือ $\pm 700mA$ และ $\pm 30V$ สัญญาณที่ออกมาจากวงจร window comparator จะเป็นตรรกะที่แสดงให้รู้ว่าสัญญาณอ้างอิงกระแสและสัญญาณอ้างอิงแรงดันอยู่ภายในหรือภายนอกย่านที่กำหนดไว้ จากนั้นจะนำตรรกะที่ได้มาเข้าเงื่อนไขที่ว่า การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสมจะใช้สัญญาณอ้างอิงจากกระแสเป็นหลัก ยกเว้นกรณีที่สัญญาณอ้างอิงกระแสอยู่ภายในย่านกระแสและขณะเดียวกันสัญญาณอ้างอิงแรงดันอยู่ภายนอกย่านสัญญาณแรงดันจึงจะใช้สัญญาณอ้างอิงแรงดัน รูปที่ 3.31 เป็นวงจรตรรกะที่ใช้เปรียบเทียบเพื่อให้ได้เงื่อนไขดังที่กล่าวมา



รูปที่ 3.31 วงจรเลือกรูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์

สัญญาณตรรกะที่ได้จากวงจรควบคุมการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสมจะถูกนำไปเป็นคำสั่งเลือกใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์และใช้เป็นคำสั่งเลือกข้อมูลของวงจรตรวจจับผ่านศูนย์แสดงการทำงานดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 การทำงานของการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม