

## บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการ

สำหรับเนื้อหาในบทนี้เราจะนำเสนอ 3 หัวข้อหลัก ประกอบด้วย ภาพรวมของวงจรแปลงผันแรงดันแบบวีซิกส์, การวิเคราะห์การทำงานของวงจรในสภาวะคงตัว และ การออกแบบวงจรต้นแบบ

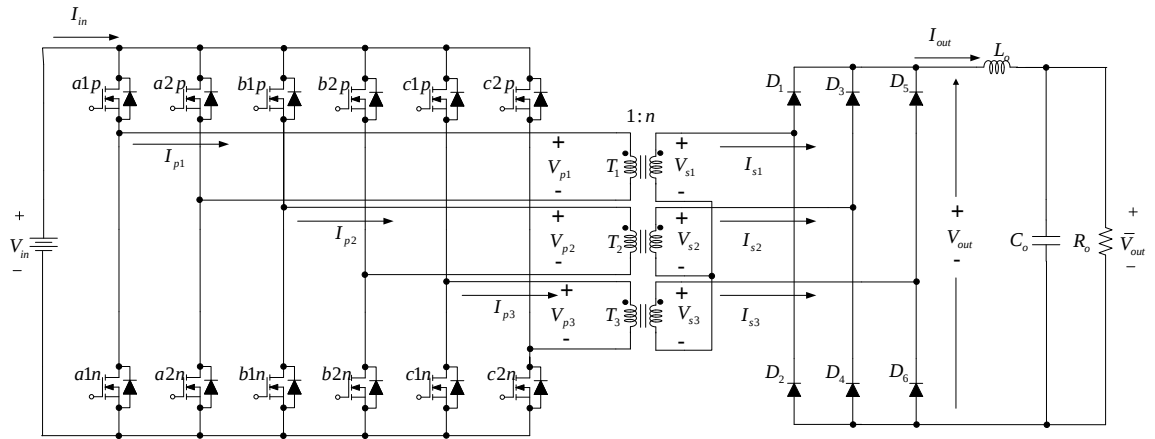
### 3.1 ภาพรวมของวงจรแปลงผันแรงดันแบบวีซิกส์

วงจรแปลงผันแรงดันแบบวีซิกส์ ทำหน้าที่ที่ระดับแรงดันไฟตรงเพื่อป้อนให้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบพีคเบรียเอม (PWM inverter) แรงดันไฟตรงที่บัสไฟตรง (DC-link) จะต้องมีค่าอย่างน้อย 350 โวลต์ เพื่อให้แน่ใจว่าแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะมีขนาดตามที่ต้องการ และสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ตามพิกัดที่ออกแบบไว้ เหตุผลสำคัญที่เลือกใช้วงจรแปลงผันแรงดันแบบวีซิกส์ กับแหล่งพลังงานทดแทนคือ

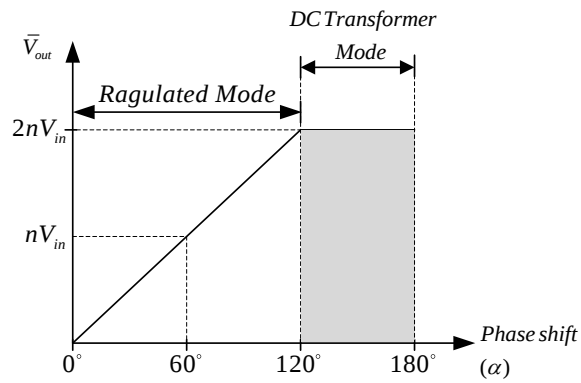
1. อัตราการแปลงผันแรงดันสูง
2. จ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูง
3. แยกกันทางไฟฟ้าระหว่างด้านอินพุตและด้านเอาต์พุต
4. สามารถลดอัตราส่วนหม้อแปลงลงได้
5. ประสิทธิภาพสูง
6. สามารถลดขนาดของวงจรกรองด้านเอาต์พุต (Output Filtering Components) ลงได้
7. สวิตช์แบบนุ่มนวล (Soft switching)

แต่วงจรแปลงผันแรงดันแบบวีซิกส์ นี้ก็ยังมีข้อเสีย เช่นไม่สามารถควบคุมแรงดันด้านเอาต์พุตได้ วงจรแปลงผันแรงดันแบบวีซิกส์ ประกอบด้วยวงจรแปลงผันแรงดันแบบเต็มคลื่นสามวงจร ซึ่งแต่ละวงจรต่อกับด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงแต่ละตัวอย่างอิสระ ส่วนด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงทั้งสามตัวต่อกันแบบวาย และต่อกับวงจรเรียงกระแส ซึ่งวงจรแปลงผันแรงดันแบบวีซิกส์ แสดงในรูปที่ 3.1

ผลของการต่อวงจรดังแสดงในรูปที่ 3.1 ทำให้เกิดการเหลื่อมทับกันของแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงทั้งสาม ซึ่งมีมุมต่างกัน 120 องศา วงจรทำงานด้วยเทคนิคการปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์ (PWM) และเทคนิคการปรับมุมต่างเฟส (PSM) ซึ่งควบคุมมุมต่างเฟสของสัญญาณขับนำสวิตช์ ( $\alpha$ ) การทำงานของวงจรสามารถแบ่งออกได้เป็นสองช่วง คือ เมื่อ  $0^\circ < \alpha < 120^\circ$  และ เมื่อ  $120^\circ < \alpha < 180^\circ$



รูปที่ 3.1 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของวงจรแปลงผันแรงดันแบบวีซิกส์



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมต่างเฟส (\$\alpha\$) กับแรงดันเอาต์พุตเฉลี่ย (\$\bar{V}\_{out}\$)

การทำงานในช่วง  $0^\circ < \alpha < 120^\circ$  แรงดันเอาต์พุตเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ

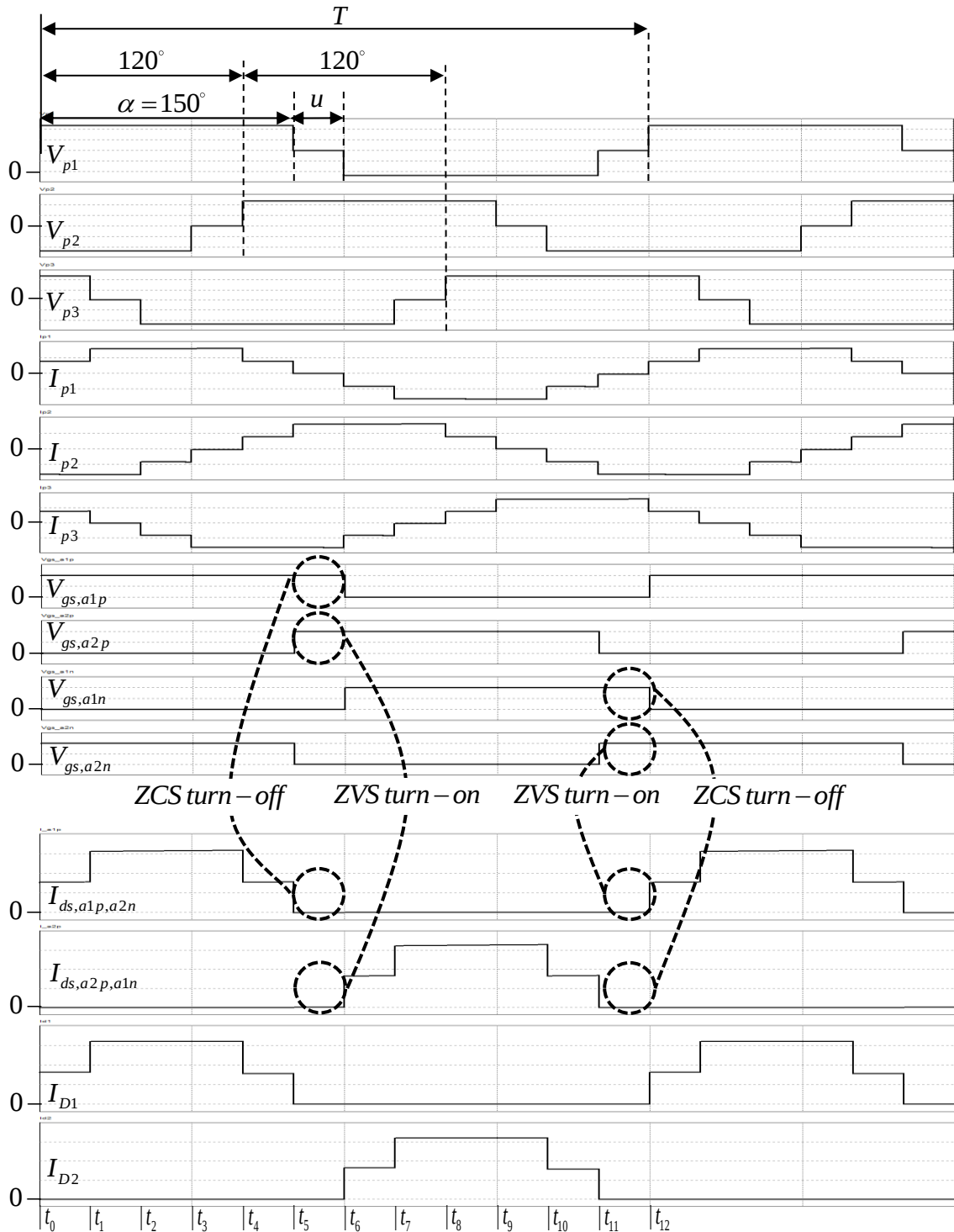
$$\bar{V}_{out} = \frac{\alpha}{60^\circ} nV_{in} \quad (3.1)$$

การทำงานในช่วง  $120^\circ < \alpha < 180^\circ$  แรงดันเอาต์พุตเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ

$$\bar{V}_{out} = 2nV_{in} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $\bar{V}_{out}$  คือ แรงดันเฉลี่ยด้านเอาต์พุต  
 $V_{in}$  คือ แรงดันด้านอินพุต  
 $n$  คือ อัตราส่วนหม้อแปลง

ช่วงการทำงานเมื่อ  $120^\circ < \alpha < 180^\circ$  ของวงจรแปลงผันแรงดันแบบวีซิกส์ เหมาะกับการนำไปใช้กับ แหล่งพลังงานทดแทนที่จ่ายกำลังไฟฟ้าออกมาในรูปไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระดับแรงดันต่ำ หัวข้อต่อไปจะเป็นการวิเคราะห์การทำงานที่สถานะต่างๆเมื่อวงจรทำงานในช่วง  $120^\circ < \alpha < 180^\circ$  ซึ่งมีอัตราการแปลงแรงดันที่สูงที่สุด



รูปที่ 3.3 กระแสและแรงดันขณะที่ยังทำงานที่มุมต่างเฟส  $\alpha = 150^\circ$

### 3.2 การวิเคราะห์การทำงานของวงจรในสถานะคงตัว

จากรูปที่ 3.3 ช่วงเวลา  $t_0 - t_1$ : สวิตช์  $a1p, b2p, c1p, a2n, b1n, c2n$  นำกระแส ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง  $T_1, T_3$  ได้รับแรงดัน  $+V_{in}$  ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง  $T_2$  ได้รับแรงดัน  $-V_{in}$  ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงทั้งสามต่อกันแบบอนุกรม แรงดันเอาต์พุตจึงมีค่าเท่ากับ  $2nV_{in}$  ขนาดของกระแส  $I_{p2}$  จึงเท่ากับ ผลรวมของกระแส  $I_{p1}$  และ  $I_{p3}$  ( $I_{p2} = -(I_{p1} + I_{p3})$ )

พิจารณากระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง :

$$I_{in} = I_{p1} - I_{p2} + I_{p3} \quad (3.3)$$

พิจารณากระแสด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง :

$$I_{out} = I_{s1} + I_{s3} = -I_{s2} \quad (3.4)$$

$$I_{s1} = I_{s3} \quad (3.5)$$

จากสมการ (3.4) และ (3.5) กระแสด้านปฐมภูมิมีความสัมพันธ์เช่นเดียวกับกระแสด้านทุติยภูมิ:

$$I_{p1} + I_{p3} = -I_{p2} \quad (3.6)$$

$$I_{p1} = I_{p3} \quad (3.7)$$

แทนค่าสมการ (3.3) ด้วยสมการ (3.6) และ (3.7) :

$$I_{in} = I_{p1} + 2I_{p1} + I_{p1} \quad (3.8)$$

$$I_{p1} = I_{in} / 4 \quad (3.9)$$

ช่วงเวลา  $t_1 - t_2$ : สวิตช์  $a1p, b2p, c1p, a1n, a2n$  นำกระแส ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง  $T_1$  ได้รับแรงดัน  $+V_{in}$  ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง  $T_2$  ได้รับแรงดัน  $-V_{in}$  และด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง  $T_3$  มีแรงดันเท่ากับศูนย์ เนื่องจากสวิตช์  $c1p, c2p$  ปิดวงจรอยู่ ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงทั้งสามต่อกันแบบ

อนุกรม แรงดันเอาต์พุตจึงมีค่าเท่ากับ  $2nV_{in}$  ขนาดของกระแส  $I_{p1}$  และกระแส  $I_{p2}$  มีค่าเท่ากัน แต่ไหลทิศทางตรงข้าม ( $I_{p1} = -I_{p2}$ )

พิจารณากระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง :

$$I_{in} = I_{p1} - I_{p2} \quad (3.10)$$

พิจารณากระแสด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง :

$$I_{out} = I_{s1} = -I_{s2} \quad (3.11)$$

จากสมการ (3.11) กระแสด้านปฐมภูมิมีความสัมพันธ์เช่นเดียวกับกระแสด้านทุติยภูมิ:

$$-I_{p2} = I_{p1} \quad (2.12)$$

แทนค่าสมการ (3.10) ด้วยสมการ (2.12) :

$$I_{in} = I_{p1} + I_{p1} \quad (2.13)$$

$$I_{p1} = I_{in} / 2 \quad (2.14)$$

ช่วงเวลา  $t_2 - t_3$ : สวิตช์  $a1p, b2p, c2p, a2n, b1n$  นำกระแส ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง  $T_1$  ได้รับแรงดัน  $+V_{in}$  ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง  $T_2, T_3$  ได้รับแรงดัน  $-V_{in}$  ขนาดของกระแส  $I_{p1}$  จึงเท่ากับผลรวมของกระแส  $I_{p2}$  และ  $I_{p3}$  ( $I_{p1} = -(I_{p2} + I_{p3})$ )

พิจารณากระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง :

$$I_{in} = I_{p1} - I_{p2} - I_{p3} \quad (3.15)$$

พิจารณากระแสด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง :

$$I_{out} = I_{s1} + I_{s3} = -I_{s2} \quad (3.16)$$

$$I_{S1} = I_{S3} \quad (3.17)$$

จากสมการ (3.16) และ (3.17) กระแสด้านปฐมภูมิมีความสัมพันธ์เช่นเดียวกับกระแสด้านทุติยภูมิ:

$$I_{P1} + I_{P3} = -I_{P2} \quad (3.18)$$

$$I_{P1} = I_{P3} \quad (3.19)$$

แทนค่าสมการ (3.15) ด้วยสมการ (3.18) และ (3.19) :

$$I_{in} = I_{P1} + 2I_{P1} - I_{P1} \quad (3.20)$$

$$I_{P1} = I_{in} / 2 \quad (3.21)$$

ช่วงเวลา  $t_3 - t_4$ : สวิตช์  $a1p, c2p, a2n, b1n, b2n, c1n$  นำกระแส ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง  $T_1$  ได้รับแรงดัน  $+V_{in}$  ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง  $T_3$  ได้รับแรงดัน  $-V_{in}$  และด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง  $T_2$  มีแรงดันเป็นศูนย์ เนื่องจากสวิตช์  $a2n, b1n$  ปิดวงจรอยู่ ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงทั้งสามต่อกันแบบอนุกรม แรงดันเอาต์พุตจึงมีค่าเท่ากับ  $2nV_{in}$  ขนาดของกระแส  $I_{P1}$  มีค่าเท่ากับขนาดของกระแส  $I_{P3}$  แต่ไหลทิศทางตรงข้าม ( $I_{P1} = -I_{P3}$ )

พิจารณากระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง :

$$I_{in} = I_{P1} - I_{P3} \quad (3.22)$$

พิจารณากระแสด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง :

$$I_{out} = I_{S1} = -I_{S3} \quad (3.23)$$

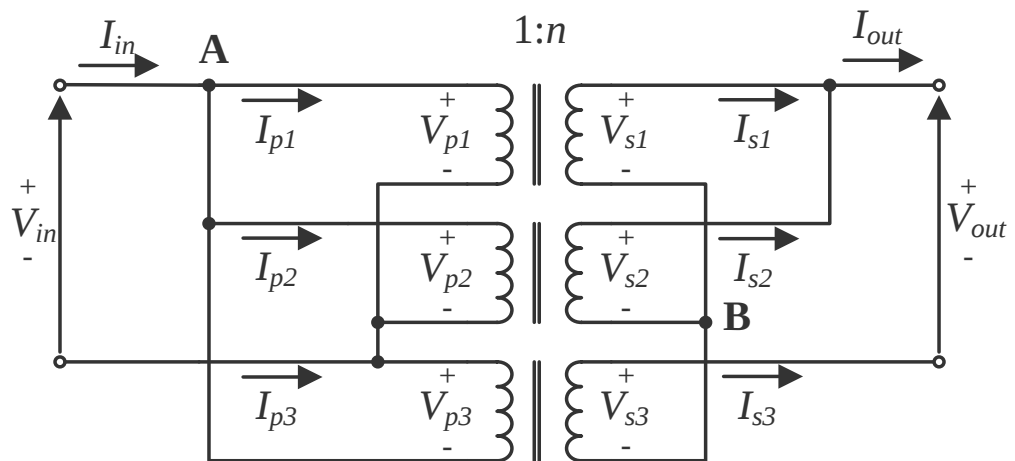
จากสมการ (3.23) กระแสด้านปฐมภูมิมีความสัมพันธ์เช่นเดียวกับกระแสด้านทุติยภูมิ:

$$-I_{P3} = I_{P1} \quad (3.24)$$

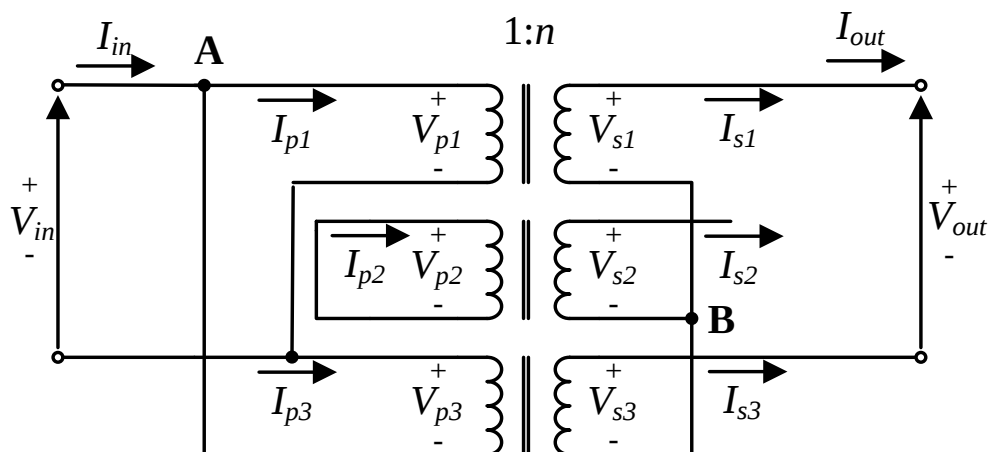
แทนค่าสมการ (3.22) ด้วยสมการ (3.24) :

$$I_{in} = I_{p1} + I_{p1} \quad (3.25)$$

$$I_{p1} = I_{in} / 2 \quad (3.26)$$



รูปที่ 3.4 วงจรแปลงผันแรงดันแบบวิซิกส์ เมื่อสองในสามตัวของหม้อแปลงนำกระแส



รูปที่ 3.5 วงจรแปลงผันแรงดันแบบวิซิกส์ เมื่อหม้อแปลงทั้งสามตัวนำกระแส

### 3.3 การออกแบบวงจรต้นแบบ

#### 3.3.1 วงจรกำลัง

จากการสังเกตการทำงานของวงจรแต่ละสถานะข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าเมื่อวงจรแปลงผันแรงดันแบบวีซิกส์ ทำงานที่มุมต่างเฟส  $\alpha > 120^\circ$  จะมีหม้อแปลงอย่างน้อยสองในสามตัวทำงานเพื่อส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไปยังด้านเอาต์พุต ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงทั้งสามต่อกันแบบวาย (wye) จึงทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเปลี่ยนแปลงตามแรงดันอินพุตโดยมีค่าอัตราการแปลงผันแรงดันเท่ากับ  $2n$  และไม่สามารถควบคุมแรงดันด้านเอาต์พุตได้ ด้วยเหตุนี้วงจรจึงมีลักษณะการทำงานเสมือนหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสตรง (DC-DC Transformer) ในทางปฏิบัติแรงดันด้านเอาต์พุตจะมีการกระเพื่อมเล็กน้อยเนื่องจากการสับเปลี่ยน (Commutation) ของสวิตช์ ดังนั้นเมื่อวงจรทำงานที่มุมต่างเฟส  $\alpha > 120^\circ$  จึงสามารถลดขนาดของวงจรกรองด้านเอาต์พุต (output filter stage) ลงได้

รูปที่ 3.3 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสของวงจร เมื่อวงจรทำงานที่มุมต่างเฟส  $\alpha = 150^\circ$  จะเห็นว่ารูปคลื่นแรงดันทั้งสามเฟสมีมุมต่างเฟสกัน  $120^\circ$  องศา เมื่อใช้สวิตช์ในอุดมคติและแรงดันด้านอินพุตมีค่าคงที่  $V_{in}$  พิจารณาด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงทั้งสามตัว เมื่อหม้อแปลงทั้งสามนำกระแสสองในสามจะต่อกันแบบขนานกับแรงดันอินพุต และหม้อแปลงตัวที่เหลือจะต่อขนานแบบสวนทาง (anti parallel) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และในกรณีที่เมื่อหม้อแปลงสองในสามตัวนำกระแส (รูปที่ 3.5) ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงจะต่อขนานแบบสวนทางกัน กับแรงดันอินพุต เนื่องจากการต่อกันแบบวายทางด้านทุติยภูมิ หม้อแปลงจะต่อกันแบบอนุกรม เมื่อแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงมีทิศทางตรงกันข้าม และจะต่อขนานกันเมื่อแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงมีทิศทางเดียวกัน เนื่องจากแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงคู่ใดคู่หนึ่งจะมีทิศทางตรงกันข้ามตลอดเวลา จึงทำให้มีหม้อแปลงอย่างน้อยสองตัวต่อกันแบบอนุกรมตลอดเวลา แรงดันเอาต์พุตจึงมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงทั้งสอง ( $V_{out} = 2nV_{in}$ ) ตลอดเวลา

กรณีเมื่อสองในสามของหม้อแปลงนำกระแส แรงดันด้านปฐมภูมิ :

$$V_{p1} = V_{in}, \quad V_{p2} = 0, \quad V_{p3} = -V_{in} \quad (3.27)$$

แรงดันด้านทุติยภูมิ :

$$V_{s1} = nV_{in}, \quad V_{s2} = 0, \quad V_{s3} = -nV_{in} \quad (3.28)$$

ดังนั้นแรงดันด้านเอาต์พุต :

$$V_{out} = V_{s1} - V_{s3} = nV_{in} - (nV_{in}) = 2nV_{in} \quad (3.29)$$

และอัตราการแปลงผันแรงดันของวงจร :

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 2n \quad (3.30)$$

เมื่อมีหม้อแปลงสองในสามตัวนำกระแส กระแสอินพุต ( $I_{in}$ ) จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนเท่าๆกัน ไหลเข้าสู่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงทั้งสอง เมื่อพิจารณาที่จุด A กระแสที่ไหลเข้าด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงทั้งสองจะมีขนาดเท่ากัน ( $I_{in}/2$ ) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 :

พิจารณากระแสอินพุตที่จุด A :

$$I_{in} = I_{p1} - I_{p3} \quad (3.31)$$

และกระแสด้านทุติยภูมิที่จุด B :

$$I_{out} = I_{s1} = -I_{s3} \quad (3.32)$$

$$I_{p1} = -I_{p3} \quad (3.33)$$

เมื่อแทนค่าลงในสมการ (3.31) จะได้ :

$$I_{in} = I_{p1} - (-I_{p1}) \quad (3.34)$$

$$I_{p1} = \frac{I_{in}}{2} \quad (3.35)$$

กรณีเมื่อหม้อแปลงทั้งสามนำกระแส พิจารณาเช่นเดียวกับการพิจารณากรณีข้างต้น ในรูปที่ 3.4

พิจารณากระแสอินพุตที่จุด A :

$$I_{in} = I_{p1} + I_{p2} - I_{p3} \quad (3.36)$$

และพิจารณากระแสที่จุด B :

$$-I_{s3} = I_{s1} + I_{s2} \quad (3.37)$$

ดังนั้นกระแสด้านปฐมภูมิจึงมีความสัมพันธ์เช่นเดียวกับด้านทุติยภูมิ :

$$-I_{p3} = I_{p1} + I_{p2} \quad (3.38)$$

ซึ่งเราสมมติว่าหม้อแปลง  $T_1$  และ  $T_2$  มีขนาดกระแสที่ไหลผ่านเท่ากัน ดังนั้น :

$$-I_{p3} = 2I_{p1} \quad (3.39)$$

แทนค่าในสมการ (3.36) สามารถหาขนาดของกระแส  $I_{p1}$  และ  $I_{p3}$  ได้ดังนี้ :

$$I_{in} = 2I_{p1} + 2I_{p1} \quad I_{p1} = I_{p2} = \frac{I_{in}}{4} \quad (3.40)$$

$$I_{in} = I_{p3} + I_{p3} \quad I_{p3} = \frac{I_{in}}{2}$$

รูปที่ 3.3 แสดงรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง  $T_1$  ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าประสิทธิภาพ (RMS) ของกระแสที่ไหลผ่านด้านปฐมภูมิของหม้อ เนื่องจากรูปคลื่นกระแสมีลักษณะสมมาตร เราสามารถคำนวณแค่ครึ่งคาบเวลา  $\left(\frac{T}{2}\right)$  ได้ดังนี้ :

$$I_{p1,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{p1}^2(t) dt} \quad (3.41)$$

$$I_{p1,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \left[ \int_0^{\frac{u}{3}T} \left(\frac{I_{in}}{4}\right)^2 dt + \int_{\frac{u}{3}T}^{\frac{2}{3}T} \left(\frac{I_{in}}{2}\right)^2 dt + \int_{\frac{2}{3}T}^{\frac{u+2}{3}T} \left(\frac{I_{in}}{4}\right)^2 dt \right]} \quad (3.42)$$

$$I_{p1,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \left[ \frac{I_{in}^2}{16} \frac{u}{3} T + \frac{I_{in}^2}{4} \left( \frac{3}{2} - \frac{u}{3} \right) T + \frac{I_{in}^2}{16} \left( \frac{u+2}{3} - \frac{2}{3} \right) T \right]} \quad (3.43)$$

$$I_{p1,rms} = \sqrt{\frac{I_{in}^2}{4} \left[ \frac{1}{4} \frac{u}{3} + \frac{2}{3} - \frac{u}{3} + \frac{1}{4} \frac{u}{3} \right]} \quad (3.44)$$

$$I_{p1,rms} = \frac{I_{in}}{2} \sqrt{\frac{2}{3} - \frac{u}{6}} \quad (3.45)$$

ซึ่งค่าประสิทธิภาพของกระแสที่ไหลผ่านด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงทั้งสามตัวมีค่าเท่ากัน ( $I_{p1,rms} = I_{p2,rms} = I_{p3,rms} = I_{p,rms}$ ) เช่นเดียวกันกับค่าประสิทธิภาพของกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์แต่ละตัว ( $I_{ds,rms,a1p,a2n} = I_{ds,rms,a2p,a1n} = I_{ds,rms}$ ) จากรูปที่ 3.3 ในกรณีนี้คาบเวลาที่ใช้คำนวณคือ  $t = 0 - 2T$  ดังนี้ :

$$I_{ds,rms} = \sqrt{\frac{1}{2T} \int_0^{2T} i_p(t)^2 dt} \quad (3.46)$$

แต่กระแสที่เวลา  $T$  ถึง  $2T$  มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น :

$$I_{ds,rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_p(t)^2 dt} \quad (3.47)$$

$$I_{ds,rms} = \frac{I_{p,rms}}{\sqrt{2}} \quad (3.48)$$

แทนค่าลงในสมการ (3.45) :

$$I_{ds,rms} = \frac{I_{in}}{2} \sqrt{\frac{1}{3} - \frac{u}{12}} \quad (3.49)$$

และกระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านสวิตช์แต่ละตัวมีค่า :

$$\bar{I}_{ds} = \frac{1}{T} \int_0^{2T} i_p(t) dt \quad (3.50)$$

$$\bar{I}_{ds} = \frac{1}{2T} \left[ \int_0^{\frac{u}{3}T} \frac{I_{in}}{4} dt + \int_{\frac{u}{3}T}^{\frac{2}{3}T} \frac{I_{in}}{2} dt + \int_{\frac{2}{3}T}^{\frac{u+2}{3}T} \frac{I_{in}}{4} dt \right] \quad (3.51)$$

$$\bar{I}_{ds} = \frac{1}{2T} \left[ \frac{I_{in}}{4} \left( \frac{u}{3}T \right) + \frac{I_{in}}{2} \left( \frac{2}{3} - \frac{u}{3}T \right) + \frac{I_{in}}{4} \left( \frac{u+2}{3} - \frac{2}{3}T \right) \right] \quad (3.52)$$

$$\bar{I}_{ds} = \frac{I_{in}}{6} \quad (3.53)$$

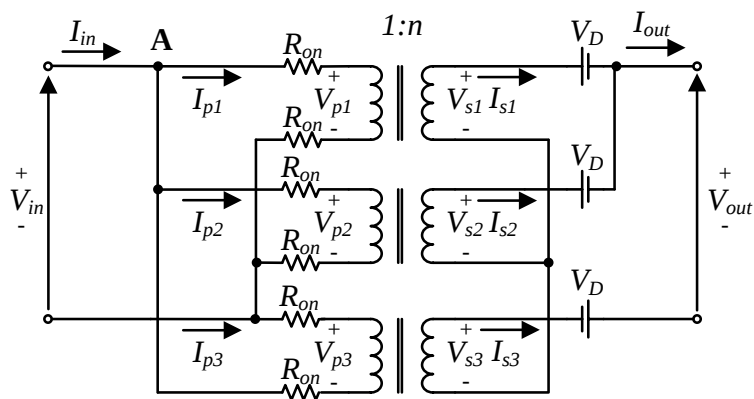
จากรูปที่ 3.3 เช่นเดียวกันกับกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์แต่ละตัว กระแสที่ไหลผ่านไดโอดสามารถคำนวณได้จากกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์แต่ละตัว ( $I_{ds}$ ) และอัตราส่วนหม้อแปลง ( $n$ ) ได้ดังนี้ :

จากสมการ (3.49) ค่าประสิทธิผลของกระแสที่ไหลผ่านไดโอดแต่ละตัว :

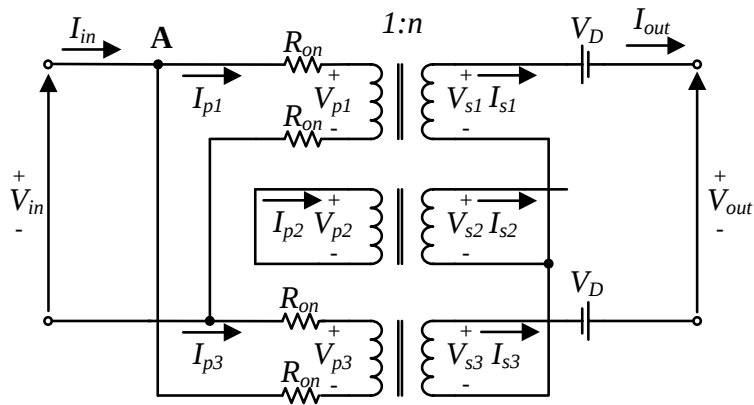
$$I_{D,rms} = \frac{1}{n} \frac{I_{in}}{2} \sqrt{\frac{1}{3} - \frac{u}{12}} \quad (3.54)$$

และจากสมการ (3.53) ค่าเฉลี่ยของกระแสที่ไหลผ่านไดโอดแต่ละตัว :

$$\bar{I}_{D,rms} = \frac{1}{n} \frac{I_{in}}{6} \quad (3.55)$$



รูปที่ 3.6 วงจรแปลงผันแรงดันแบบวีซิกส์ เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานของสวิตช์ ( $R_{on}$ ) และแรงดันตกคร่อมไดโอด ( $V_D$ ) เมื่อหม้อแปลงทั้งสามตัวนำกระแส



รูปที่ 3.7 วงจรแปลงผันแรงดันแบบวีซิกส์ เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานของสวิตช์ ( $R_{on}$ ) และแรงดันตกคร่อมไดโอด ( $V_D$ ) เมื่อหม้อแปลงสองในสามตัวนำกระแส

เพื่อที่จะหาค่าอัตราส่วนหม้อแปลงได้อย่างแม่นยำ จึงพิจารณาค่าความต้านทานของสวิตช์ ( $R_{on}$ ) และแรงดันตกคร่อมไดโอด ( $V_D$ ) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7 กรณีหม้อแปลงทั้งสามตัวนำกระแส (รูปที่ 3.6) แรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงมีค่า :

$$V_{p1} = V_{in} - \frac{2R_{on}I_{in}}{2} \quad V_{p3} = -V_{in} + 2R_{on}I_{in} \quad (3.56)$$

พิจารณาด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง :

$$V_{out} + 2V_D = V_{s1} - V_{s3} \quad (3.57)$$

พิจารณาค่าอัตราส่วนหม้อแปลงแล้วแทนค่าสมการ (3.56) ลงในสมการ (3.57) :

$$V_{out} + V_D = n(2V_{in} - 3R_{on}I_{in}) \quad (3.58)$$

ดังนั้นอัตราส่วนหม้อแปลงกรณีหม้อแปลงทั้งสามตัวนำกระแสสามารถคำนวณได้จาก :

$$n = \frac{V_{out} + 2V_D}{2V_{in} - 3R_{on}I_{in}} \quad (3.59)$$

พิจารณากรณีเมื่อหม้อแปลงสองในสามตัวนำกระแส (รูปที่ 3.7) แรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง :

$$V_{p1} = V_{in} - 2R_{on}I_{in} \quad V_{p3} = -V_{in} + 2R_{on}I_{in} \quad (3.60)$$

พิจารณาอัตราส่วนหม้อแปลงแล้วแทนค่าสมการ (3.60) ลงในสมการ (3.57) :

$$V_{out} + 2V_D = n(2V_{in} - 4R_{on}I_{in}) \quad (3.61)$$

ดังนั้นอัตราส่วนหม้อแปลงกรณีหม้อแปลงสองในสามตัวนำกระแสสามารถคำนวณได้จาก :

$$n = \frac{V_{out} + 2V_D}{2V_{in} - 4R_{on}I_{in}} \quad (3.62)$$

แต่จากสมการ (3.59) และ (3.62) มีค่าไม่เท่ากันเนื่องจากจำนวนหม้อแปลงที่นำกระแสในแต่ละสถานะไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงเลือกใช้กรณีที่เลวร้ายที่สุด (Worst Case) ของการทำงานคือเมื่อหม้อแปลงสองในสามตัวนำกระแส ดังนั้นอัตราส่วนหม้อแปลงควรจะเป็นดังสมการ (3.62) และจากการวิเคราะห์การทำงานของวงจรในข้างต้น จึงสามารถหาขนาดพิกัดของอุปกรณ์ต่างๆ ในวงจรได้ดังตารางที่ 3.1 และ 3.2 ดังนี้

ตารางที่ 3.1 สรุปค่าพิกัดของอุปกรณ์ในวงจรที่คำนวณได้

| หม้อแปลง      | $V_{max}$ | $I_{max}$           | $I_{rms}$                                            | $n$                                              |
|---------------|-----------|---------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| ด้านปฐมภูมิ   | $V_{in}$  | $\frac{I_{in}}{2}$  | $\frac{I_{in}}{2} \sqrt{\frac{2}{3} - \frac{u}{6}}$  | $\frac{V_{out} + 2V_D}{2V_{in} - 4R_{on}I_{in}}$ |
| ด้านทุติยภูมิ | $nV_{in}$ | $\frac{I_{in}}{2n}$ | $\frac{I_{in}}{2n} \sqrt{\frac{2}{3} - \frac{u}{6}}$ | -                                                |

|        | $V_{ds,max}$ | $I_{d,max}$         | $I_{d,rms}$                                           | $I_{d,mean}$        |
|--------|--------------|---------------------|-------------------------------------------------------|---------------------|
| สวิตช์ | $V_{in}$     | $\frac{I_{in}}{2}$  | $\frac{I_{in}}{2} \sqrt{\frac{1}{3} - \frac{u}{12}}$  | $\frac{I_{in}}{6}$  |
| ไดโอด  | $2nV_{in}$   | $\frac{I_{in}}{2n}$ | $\frac{I_{in}}{2n} \sqrt{\frac{1}{3} - \frac{u}{12}}$ | $\frac{I_{in}}{6n}$ |

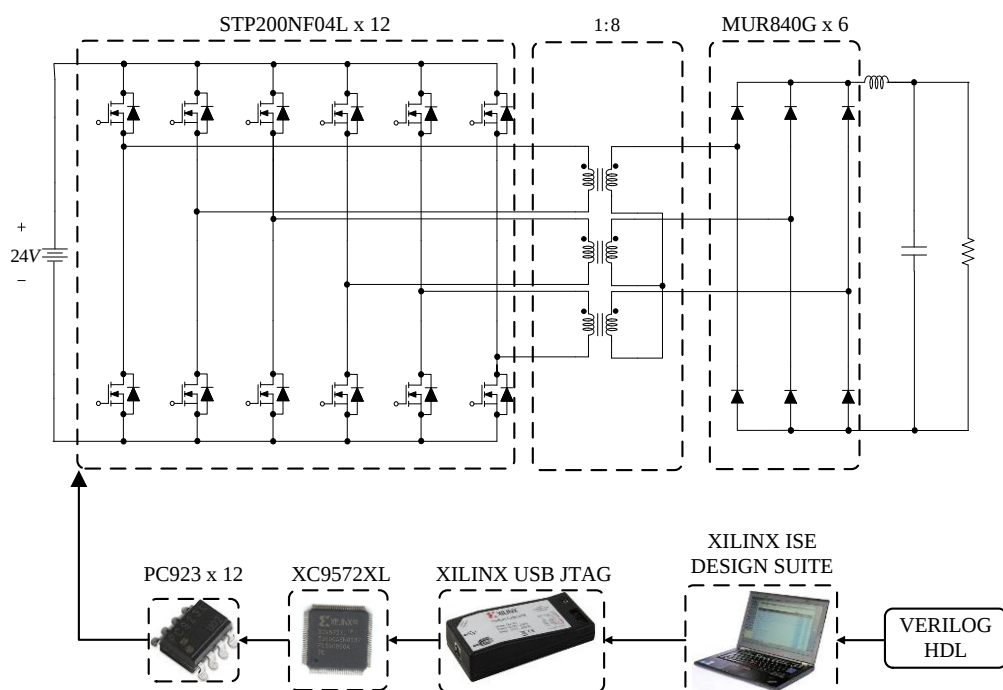
ในการสร้างวงจรต้นแบบให้ทำงานที่ความถี่สวิตช์ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ มุมต่างเฟส  $\alpha = 150^\circ$  ( $u = 1.667 \times 10^{-6}$ ) แรงดันอินพุต  $V_{in}$  24 โวลต์ และกำหนดกระแสอินพุต  $I_{in}$  ไว้ที่ 50 แอมป์ ต้องการแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  350 โวลต์ เลือกใช้สวิตช์ มอสเฟตเบอร์ STP200NF04L ซึ่งสามารถทนแรงดัน  $V_{ds,max}$  ได้ 40 โวลต์สามารถรองรับกระแส  $I_{d,max}$  ได้ 120 แอมป์ และมีความต้านทานขณะนำกระแส  $R_{on}$  3.8 มิลลิโอห์ม จากตารางที่ 3.1 สามารถคำนวณหาค่าพิกัดของอุปกรณ์ต่างๆ ได้ดังนี้

ตารางที่ 3.2 ค่าพิกัดของอุปกรณ์ในวงจรต้นแบบ

| หม้อแปลง      | $V_{max}$ (V) | $I_{max}$ (A) | $I_{rms}$ (A) | $n$              |
|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------|
| ด้านปฐมภูมิ   | 24            | 25            | 20.41         | $7.42 \approx 8$ |
| ด้านทุติยภูมิ | 192           | 3.13          | 2.55          | -                |

|        | $V_{ds,max}$ (V) | $I_{d,max}$ (A) | $I_{d,rms}$ (A) | $I_{d,mean}$ (A) |
|--------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| สวิตช์ | 24               | 25              | 14.43           | 8.33             |
| ไดโอด  | 384              | 3.13            | 1.81            | 1.04             |

จากนั้นเราสามารถกำหนดค่าตัวแปร และอุปกรณ์ที่จะใช้ในวงจรต้นแบบให้สอดคล้องกับค่าพิกัดที่คำนวณได้จากตารางที่ 3.2 ได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของวงจรต้นแบบที่นำเสนอ

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์และอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรต้นแบบ

|                           |                        |
|---------------------------|------------------------|
| แรงดันอินพุต              | $V_{in} = 24\text{ V}$ |
| ความถี่การสวิตช์          | $f = 50\text{ kHz}$    |
| อัตราส่วนหม้อแปลง         | $1 : n = 1:8$          |
| มอสเฟต                    | STP200NF04L            |
| ไดโอด                     | MUR840G                |
| CPLD                      | XC9572XL               |
| Opto-Coupled Gate Drivers | PC923                  |

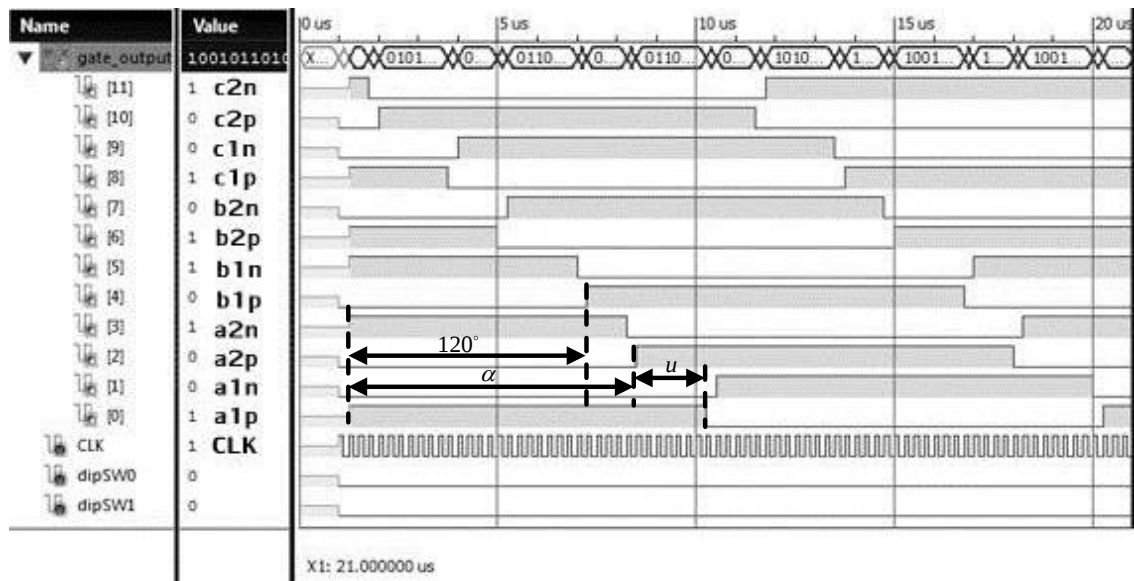
### 3.3.2 วงจรสร้างสัญญาณขั้วนำสวิตช์

งานวิจัยนี้เราจะสร้างวงจรสร้างสัญญาณขั้วนำสวิตช์บนบอร์ดซีพีแอลดี ซึ่งใช้ซีพีแอลดี เบอร์ XC9572XL ที่ประกอบไปด้วย 72 มาโครเซลล์ 1,600 เกต ซึ่งเพียงพอกับการใช้งานในวงจรแปลงผันแรงดันแบบวีซิกส์ และทำการเขียนโปรแกรมซอฟต์แวร์ด้วยภาษา Verilog HDL โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Xilinx ISE Design Suite ของบริษัท Xilinx ส่งผ่านทางบอร์ด Xilinx USB JTAG ซึ่งเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับบอร์ดสำเร็จรูป รูปที่ 3.8 แสดงผลการจำลองผล จากภาษาเวริลอค เอชดีแอล (Verilog HDL) ที่เขียนขึ้น ในสถานะการทำงาน  $\alpha = 150^\circ$  ความถี่นาฬิกา (CLK) 4 เมกะเฮิร์ตซ์ และความถี่ในการสวิตช์ (Switching frequency) 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ซีพีแอลดีรับอินพุตแบบขนานขนาด 2 บิต คือ dipSW0 และ dipSW1 เพื่อเลือกมุมเลื่อนเฟส  $\alpha$  และสร้างสัญญาณขั้วนำสวิตช์ 12 สัญญาณ (gate\_output[0-11]) โดยที่สัญญาณที่มีลอจิกตรงกันข้าม (complementary) กันจะมีเวลาวิกฤต (Dead time) 0.5 ไมโครวินาที

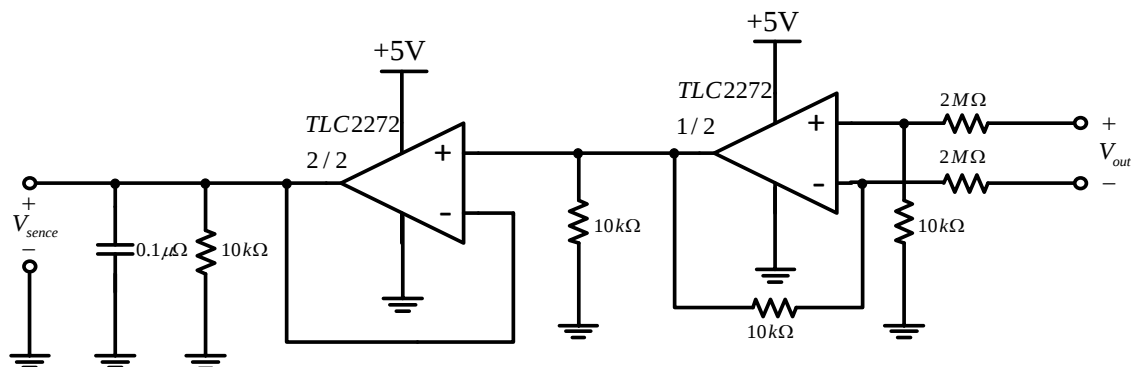
### 3.3.3 วงจรตรวจจับแรงดันเอาต์พุต

รูปที่ 3.9 แสดงวงจรตรวจจับแรงดันด้านเอาต์พุต สามารถตรวจจับระดับแรงดันที่มีค่าระหว่าง 0-1,000 โวลต์ และแยกกราวด์วงจรสร้างสัญญาณขั้วนำสวิตช์ออกจากวงจรกำลัง ซึ่งจะนำสัญญาณแรงดัน  $V_{sense}$  ที่ได้ไปประมวลผลโดยวงจรรักษาระดับแรงดันด้านเอาต์พุต โดยแรงดันที่ถูกตรวจจับถูกลดทอนขนาดแรงดันลง 200 เท่า ให้มีขนาดแรงดันอยู่ในช่วง 0-5 โวลต์ และแยกกราวด์ออกจากวงจรกำลัง หากวงจรใดทำงานผิดพลาดก็จะไม่ส่งผลเสียหายกับวงจรรักษาระดับแรงดันด้านเอาต์พุต โดยวงจรรักษาระดับแรงดันด้านเอาต์พุตนี้ใช้ออปแอมป์เบอร์ TLC2272 ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตที่ถูกตรวจจับ ( $V_{out}$ ) และแรงดัน  $V_{sense}$  เป็นไปดังสมการที่ 3.63

$$V_{sense} = \frac{1}{200} V_{out} \quad (3.63)$$



รูปที่ 3.9 สัญญาณขั้วนำสวิตช์ที่สร้างโดยใช้ซีพีแอลดี



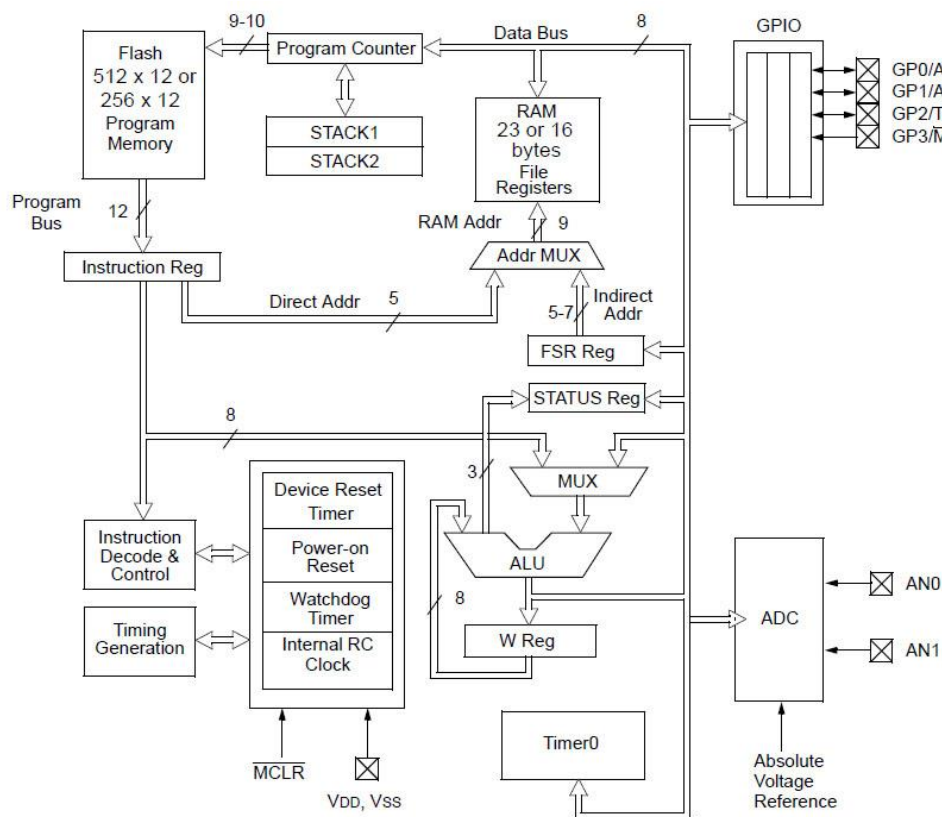
รูปที่ 3.10 วงจรตรวจจับแรงดันเอาต์พุต

### 3.3.4 วงจรรักษาระดับแรงดันเอาต์พุต

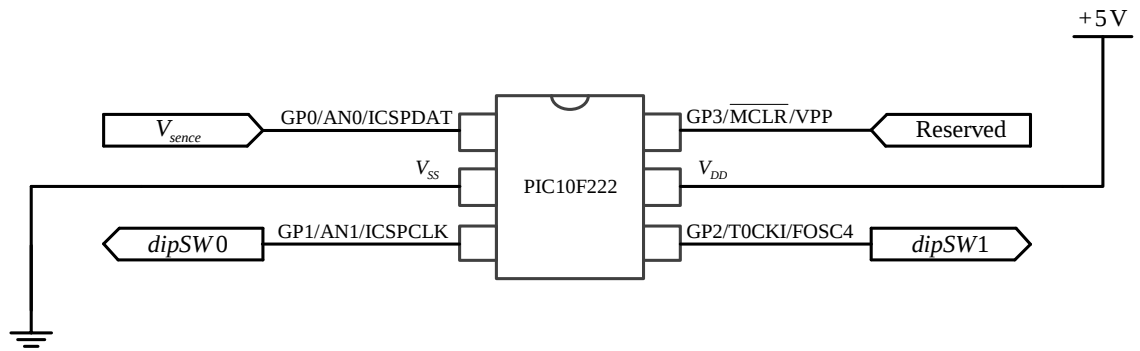
เพื่อความยืดหยุ่นในการพัฒนาและแก้ไขวิธีการในการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุต จึงเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ PIC10F222 ที่มีขนาดเล็กและมีความสามารถเพียงพอต่อกับงานวิจัยนี้ ซึ่งคุณสมบัติโดยสังเขปของไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ PIC10F222 สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ใช้ไฟเลี้ยง 2-5.5 โวลต์
2. ใช้กระแสไฟฟ้าน้อยกว่า 170 ไมโครแอมป์ ที่ไฟเลี้ยง 2 โวลต์ ความถี่สัญญาณพิก้า 4 เมกะเฮิรตซ์

3. ใช้กระแสไฟฟ้าเพียง 100 นาโนแอมป์ ที่ไฟเลี้ยง 2 โวลต์ เมื่อทำงานในโหมดประหยัดพลังงาน
4. หน่วยความจำโปรแกรมแบบแฟลช 512 ไบต์ ลบ-เขียนใหม่ได้ 100,000 ครั้ง รักษาข้อมูลนาน 40 ปี
5. หน่วยความจำข้อมูลแรม 23 ไบต์
6. มีวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาภายในความเที่ยงตรงสูง ความถี่เลือกได้ 4 และ 8 เมกะเฮิร์ตซ์ ผิดพลาด 1%
7. ตัวถังแบบ DIP 8 ขา, SOT-23 6 ขา และ DFN 8 ขา
8. มีไทมเมอร์/เคาน์เตอร์ 8 บิต และปริสเกลเลอร์ 8 บิตแบบโปรแกรมได้ในตัว
9. มีโมดูลแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิทัล ความละเอียด 8 บิต 2 ช่อง
10. พอร์ตอินพุต/เอาต์พุต 4 ขา สามารถควบคุมทิศทางเป็นอินพุตหรือเอาต์พุตดิจิทัลได้ 3 ขา อีก 1 ขาเป็นพอร์ตอินพุตเท่านั้น มีความสามารถในการขับเคลื่อนกระแส/ซอร์สสูงพอที่จะขับหลอดแอลอีดี ได้โดยตรง กำหนดให้มีการพูลอัพแบบอ่อนได้ และสามารถใช้ในการออกจากโหมดประหยัดพลังงานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงลอจิกที่ขาพอร์ตที่กำหนดหรือขาพอร์ตใดๆ



รูปที่ 3.11 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC10F222



รูปที่ 3.12 วงจรรักษาระดับแรงดันเอาต์พุต