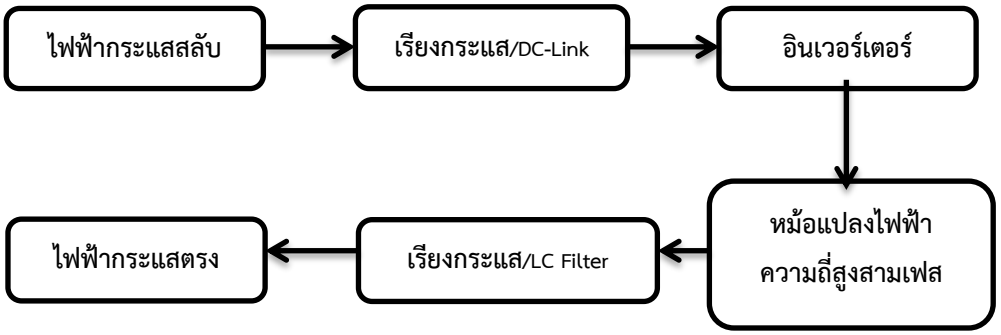
3.2 หลักการทำงานของวงจร

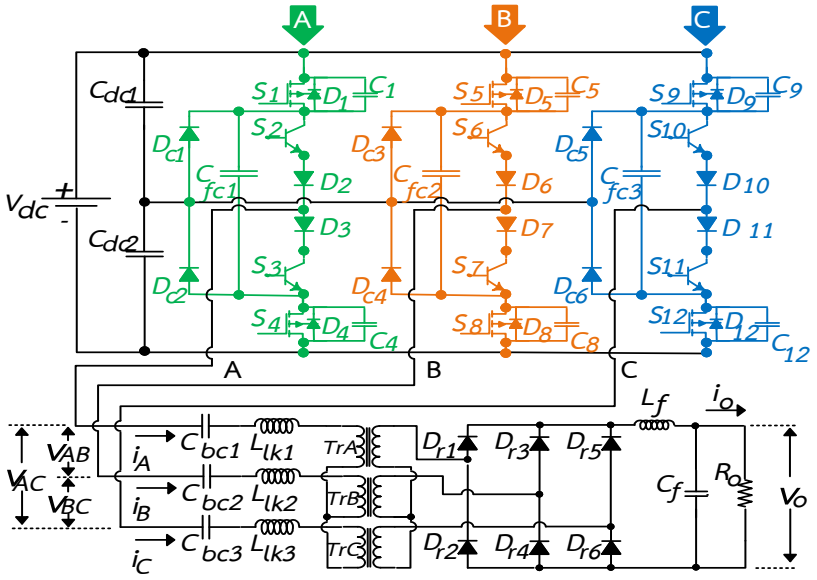
หลักการทำงานของวงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับสวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์ นั้นจะเป็นการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับจากการไฟฟ้าเป็นไฟฟ้ากระแสตรงจากนั้นไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกแบ่งแรงดันเป็นสามระดับด้วยตัวเก็บประจุสองตัว (C_{dc1} และ C_{dc2}) ที่ต่ออนุกรมกันจากนั้นรูปคลื่นที่ได้จะถูกเปลี่ยนให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับอีกครั้งด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับ รูปคลื่นเอาท์พุตที่ได้จากอินเวอร์เตอร์จะถูกลดทอนระดับแรงดันลงด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสามเฟสจากนั้นจะถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงอีกครั้งโดยวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟสและกรองโดยผ่าน LC ฟิลเตอร์ เพื่อทำการจ่ายโหลดต่อไป



รูปที่ 3.1 หลักการทำงานของวงจร

3.3 ลักษณะโครงสร้างของวงจร

ตามรูปที่ 3.2 แสดงถึงลักษณะและโครงสร้างของวงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์ โดยวงจรกำลังนั้นจะประกอบไปด้วยอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับจำนวน 3 กิ่งอันได้แก่เฟส A เฟส B และเฟส C แต่ละกิ่งจะประกอบไปด้วยสวิตช์ 4 ตัวโดยสวิตช์วงนอกได้แก่ S_1, S_4, S_5, S_8, S_9 และ S_{12} จะใช้มอสเฟต (MOSFETs) ในการสวิตช์โดยพิจารณาว่ามีไดโอดและตัวเก็บประจุแฝงอยู่ภายในตัวมอสเฟตด้วย ส่วนสวิตช์วงในได้แก่ S_2, S_3, S_6, S_7, S_{10} และ S_{11} จะใช้ไอจีบีที (IGBTs) ในการสวิตช์โดยจะมีการต่อไดโอดอนุกรมกับไอจีบีทีเพื่อช่วยให้ไอจีบีทีสามารถทนแรงดันย้อนกลับได้ นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบที่เป็นฟลายอิ้งคาปาซิเตอร์ (C_{fc1}-C_{fc3}) และแคล้มป์ไดโอด (D_{c1} – D_{c6}) ที่ต่อขนานคร่อมสวิตช์วงในของแต่สวิตช์แต่ละกิ่ง ด้านเอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์จะมีการต่อตัวเก็บประจุบล็อกกิ้ง (C_{bc1} – C_{bc3}) จากนั้นเป็นส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสามเฟส (T_{rA} - T_{rC}) โดยในการวิเคราะห์หลักการทำงานจะทำการพิจารณาว่ามีตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล (L_{lk1} – L_{lk3}) ต่ออนุกรมอยู่ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสามเฟส ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงจะต่ออยู่กับวงจรเรียงกระแสสามเฟสเพื่อแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงจากนั้นจะถูกกรองด้วย LC ฟิลเตอร์และจ่ายสู่โหลด R ต่อไป

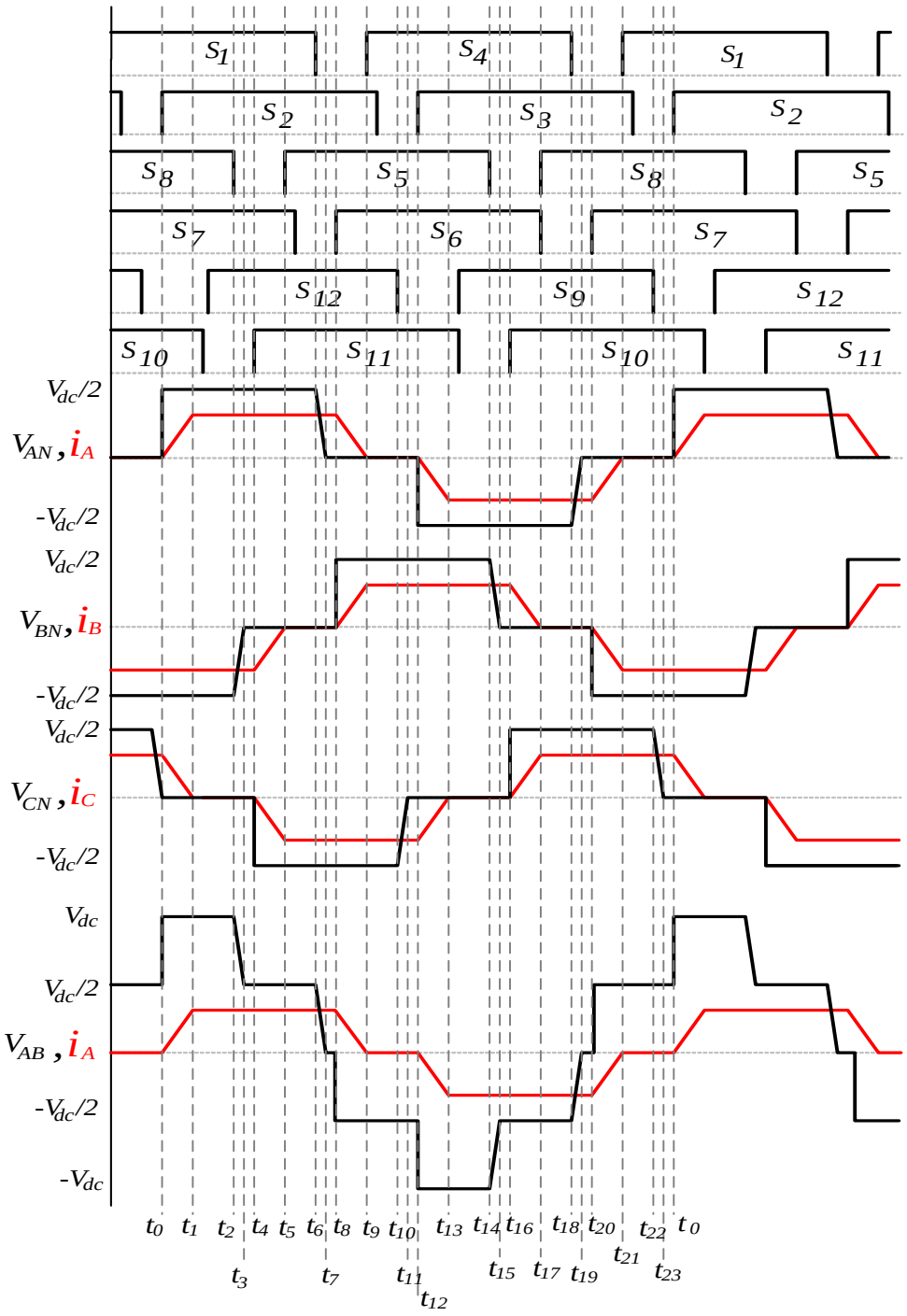


รูปที่ 3.2 วงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับสวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์

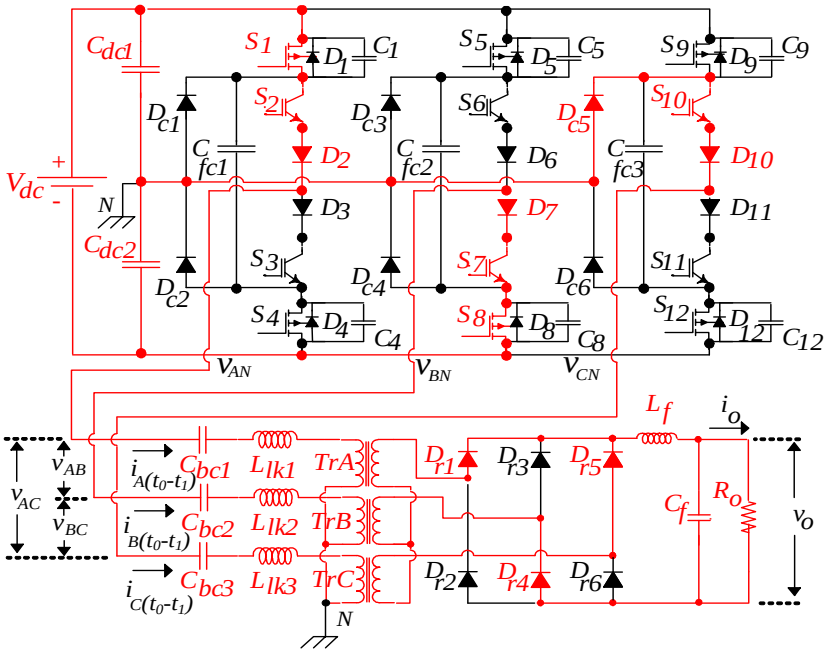
3.4 โหมดการทำงานของวงจร

สำหรับโหมดการทำงานของวงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับที่สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์นั้นจะสามารถแบ่งได้ทั้งหมดเป็น 24 โหมดการทำงานในหนึ่งไซเกิ้ลดังรูปที่ 3.3 ในการวิเคราะห์โหมดการทำงานของวงจรดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์สามเฟสสามระดับแบบใหม่ที่สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์กระแสศูนย์นั้นจะวิเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขดังนี้

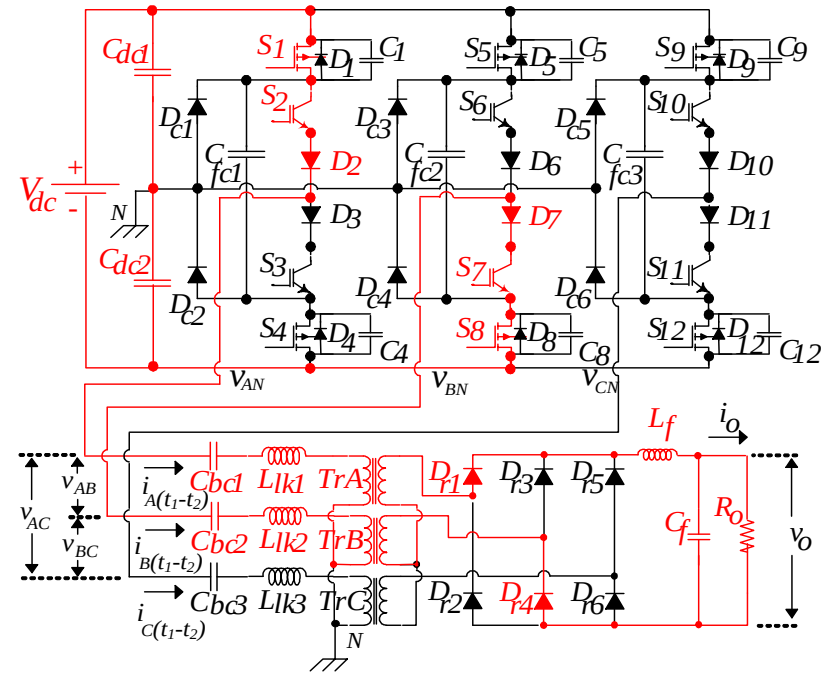
1. สวิตช์วงนอกจะพิจารณาว่ามีตัวเก็บประจุแฝง (Parasitic capacitor) อยู่ภายในตัวเพื่อที่จะวิเคราะห์การเกิด ZVS
2. ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำทั้งหมดเป็นอุดมคติ
3. ตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน C_{dc1} และ C_{dc2} จะต้องมีขนาดใหญ่มากพอที่จะรักษาระดับแรงดันไว้ที่ค่า $V_{dc}/2$
4. ตัวเก็บประจุฟลายอิ้ง C_{fc1} – C_{fc3} จะต้องมีขนาดใหญ่มากพอที่จะรักษาระดับแรงดันไว้ที่ $V_{dc}/2$
5. ตัวเหนี่ยวนำแมกนีไตซิ่งของหม้อแปลงความถี่สูงสามเฟสจะไม่ถูกพิจารณา จะพิจาณาแต่เพียงตัวเหนี่ยวนำรั่วไหลเท่านั้น



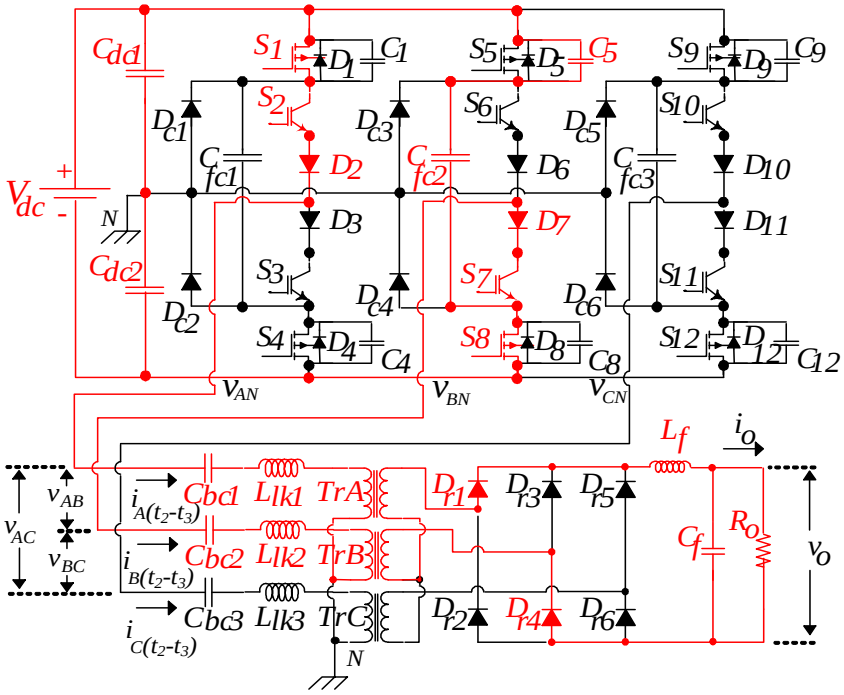
รูปที่ 3.3 ไดอะแกรมเวลาโหมดการทำงานของวงจร



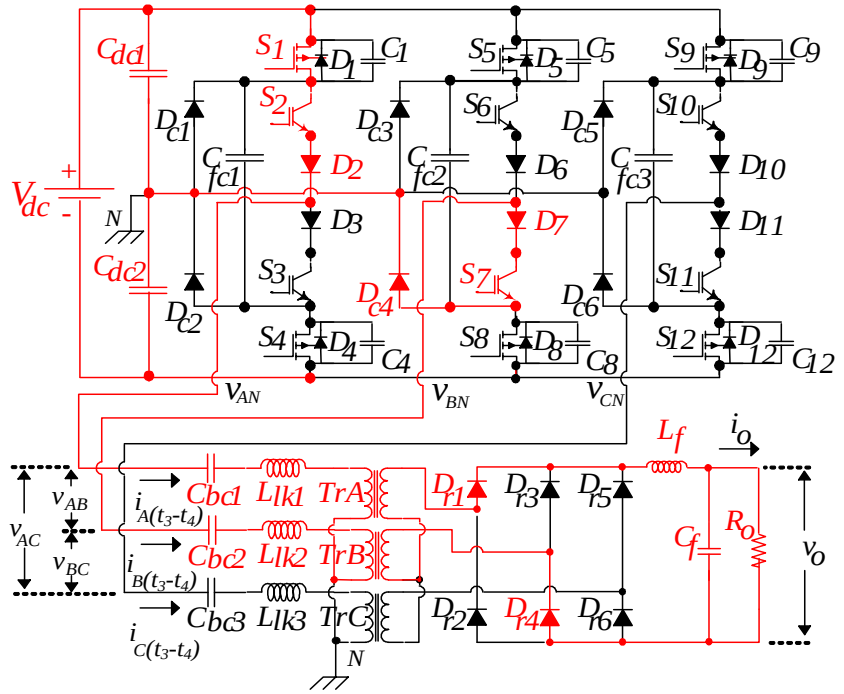
(ก) โหมดการทำงานที่ 1 (t_0 - t_1)



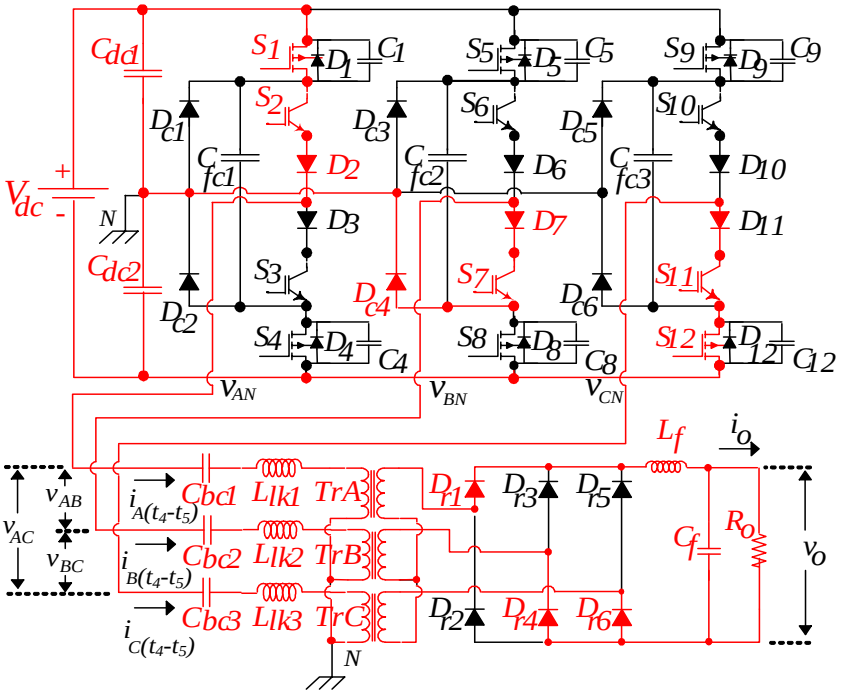
(ข) โหมดการทำงานที่ 2 (t_1 – t_2)



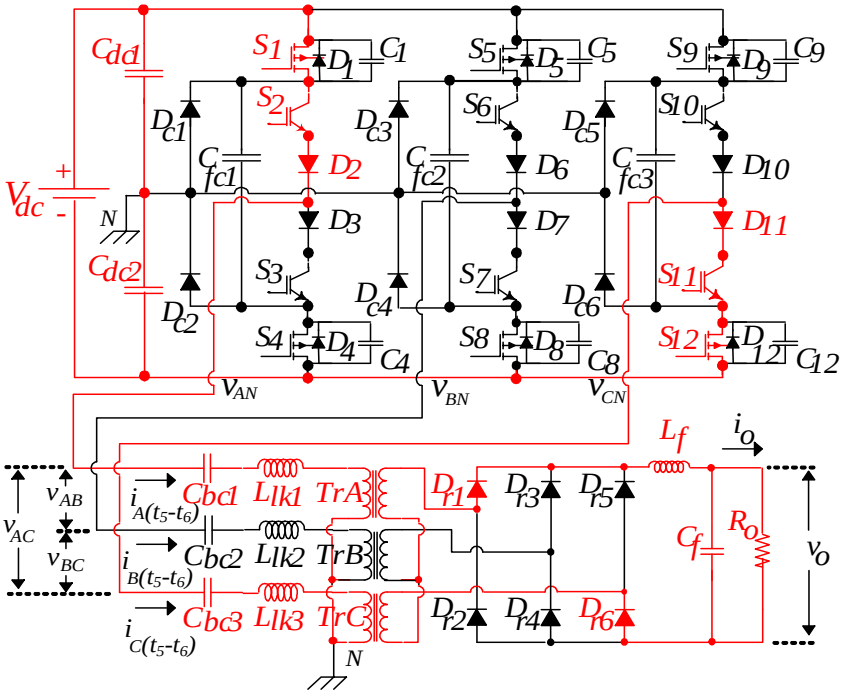
(ค) โหมดการทำงานที่ 3 ($t_2 - t_3$)



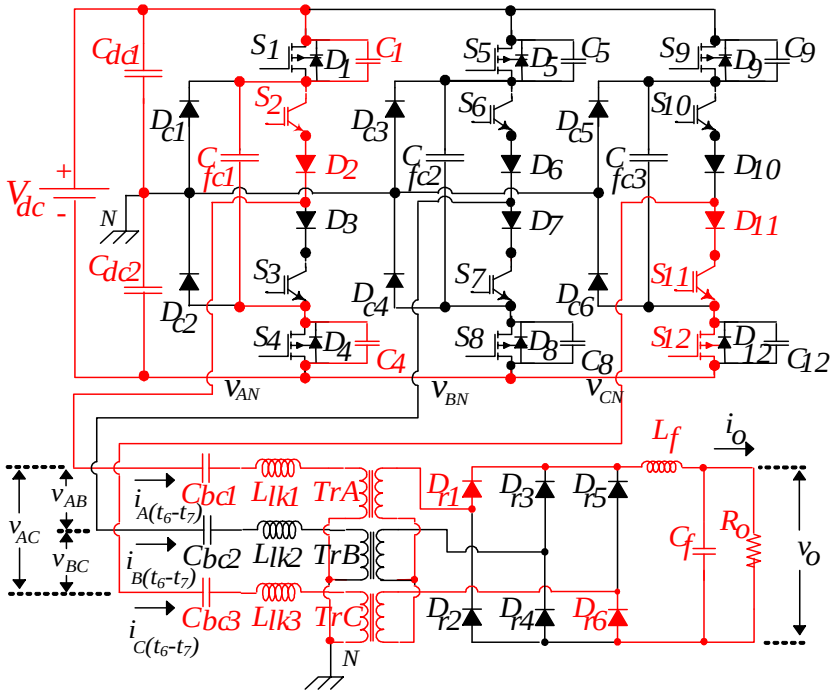
(ง) โหมดการทำงานที่ 4 ($t_3 - t_4$)



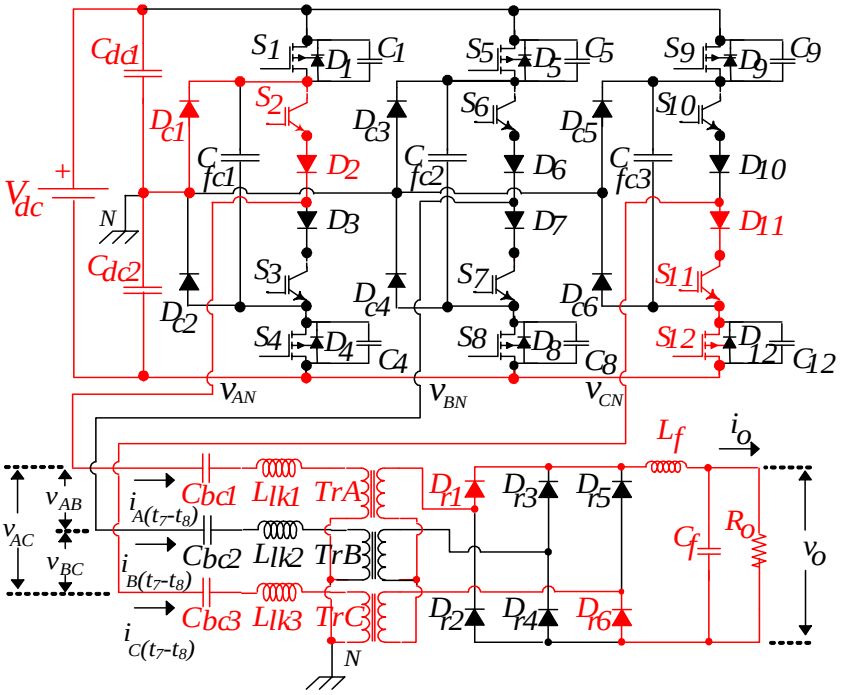
(จ) โหมดการทำงานที่ 5 ($t_4 - t_5$)



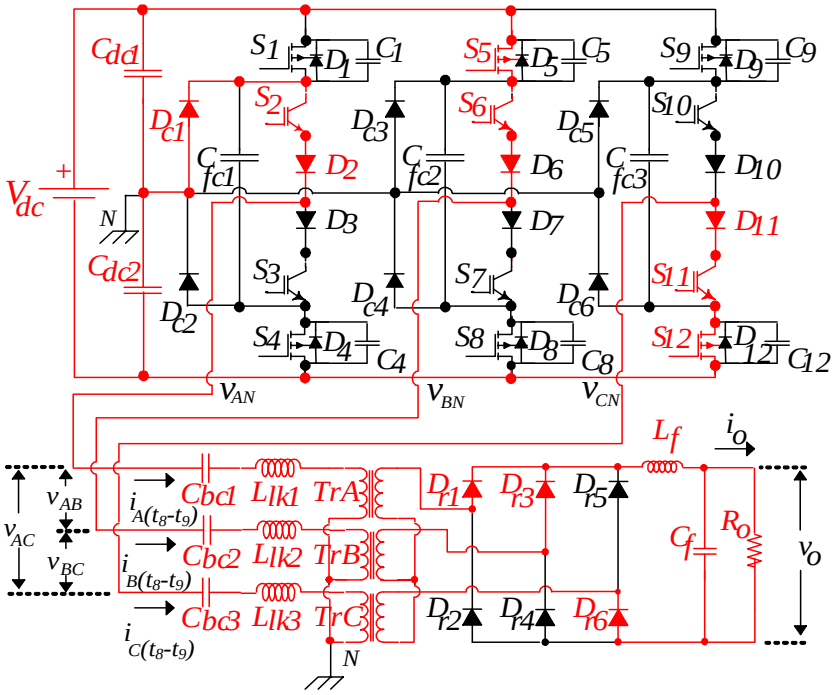
(ฉ) โหมดการทำงานที่ 6 ($t_5 - t_6$)



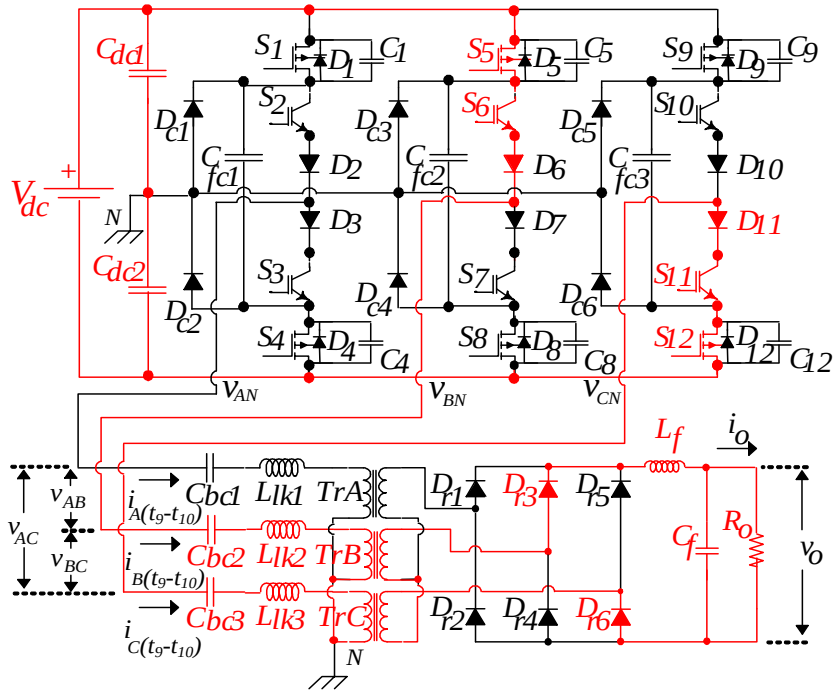
(ซ) โหมดการทำงานที่ 7 ($t_6 - t_7$)



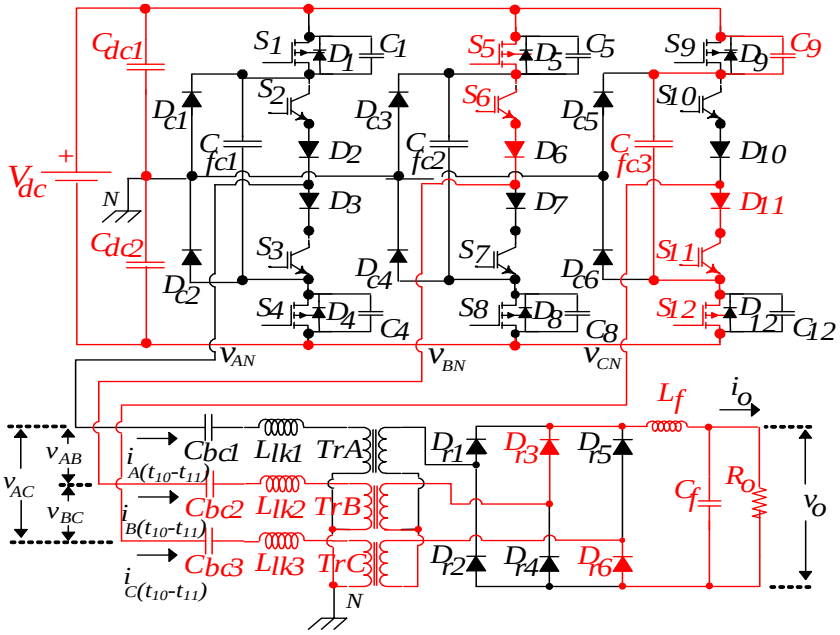
(ซ) โหมดการทำงานที่ 8 ($t_7 - t_8$)



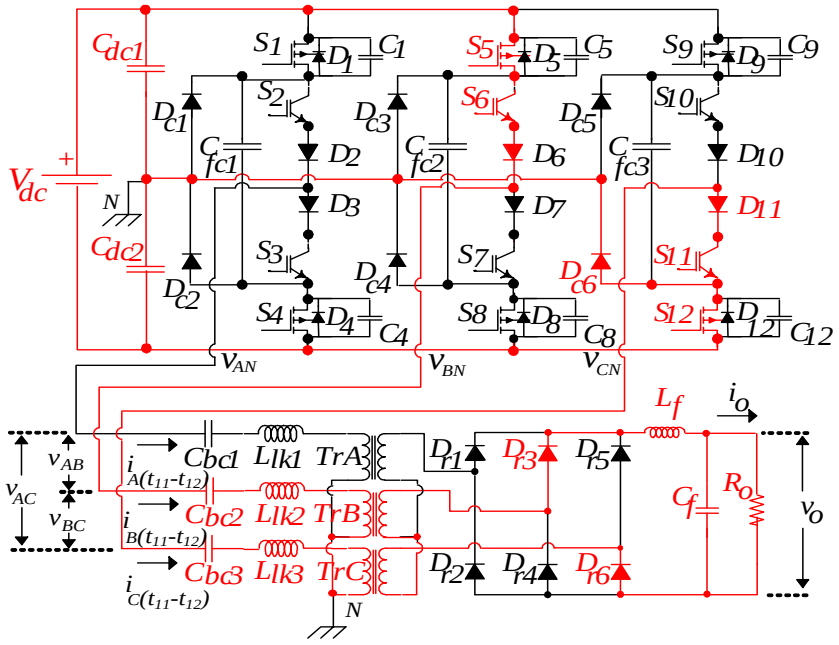
(ฌ)โหมดการทำงานที่ 9 ($t_8 - t_9$)



(ญ) โหมดการทำงานที่ 10 ($t_9 - t_{10}$)



(ฎ) โหมดการทำงานที่ 11 ($t_{10} - t_{11}$)



(ฎ) โหมดการทำงานที่ 12 ($t_{11} - t_{12}$)

รูปที่ 3.4 โหมดการทำงานที่ 1 – 12

โหมดการทำงานที่ 1($t_0 - t_1$)

ก่อนเวลา t_0 สวิตช์ S_1, S_7, S_8 และ S_{10} ได้รับสัญญาณเกตให้ ON ค้างไว้ ทันทีที่เวลา t_0 สวิตช์ S_2 จะได้รับสัญญาณเกตสั่งให้ ON ทำให้กระแส i_A เริ่มไหลผ่านสวิตช์ S_1 และ S_2 เข้าสู่หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงเฟส A ตามสมการที่ (3.1) และชาร์จตัวเก็บประจุบล็อกกิ้ง C_{bc1} ซึ่งเวลานี้เราสามารถพิจารณาได้ว่า S_1 จะนำกระแสภายใต้เงื่อนไขแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) และสวิตช์ S_2 จะสามารถพิจารณาว่านำกระแสภายใต้เงื่อนแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) เช่นเดียวกัน อันเนื่องมาจากตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล (L_{lk1}) ของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟส A ในช่วงเวลาเดียวกันนั้นเมื่อกระแส i_A เริ่มไหลผ่านสวิตช์ก็จะส่งผลให้กระแส i_C เริ่มมีขนาดลดลงโดยไหลผ่านทางแคล้มป์ไดโอด D_{c5} และสวิตช์ S_{10} ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามหลักความสมดุลของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส ซึ่งผลรวมของกระแสในสายนิวทรัลมีค่าเป็นศูนย์ $i_N = 0$ แสดงได้ดังสมการที่ (3.2) และ (3.3) ซึ่งโหมดนี้จะสิ้นสุดลงเมื่อกระแส i_C ลดลงจนเป็นศูนย์ ซึ่งจะเรียกช่วงเวลาที่กระแสเริ่มลดลงจนเป็นศูนย์นี้ว่า “เวลารีเซ็ต (Reset Time)” ตามสมการที่ (3.4) นอกจากนี้ยังพบว่าแรงดันตกคร่อมตัวประจุบล็อกกิ้งจะส่งผลต่อช่วงเวลารีเซ็ตของกระแส i_C อีกด้วย ส่วนทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ไดโอดเรียงกระแสสามเฟส D_{r1},D_{r4} และ D_{r5} จะนำกระแสด้านทุติยภูมิไปยังโหลด

$$i_A = \left[\frac{\frac{V_{dc}}{2} + 2V_{cbP}}{2 \cdot L_{lk}} \right] (t - t_0) \tag{3.1}$$

$$i_N = i_A + i_B + i_C = 0 \tag{3.2}$$

เมื่อ $i_B = -i_{Peak}$ นำสมการที่ (3.1) แทนใน (3.2) จะได้

$$i_C = i_{Peak} - \left[\frac{V_{dc} + 4 \cdot V_{cbP}}{4 \cdot L_{lk}} \right] (t - t_0) \tag{3.3}$$

$$T_{reset} = \frac{4 \cdot L_{lk} \cdot i_{Peak}}{V_{dc} + 4 \cdot V_{cbP}} \tag{3.4}$$

เมื่อ $L_{lk1} = L_{lk2} = L_{lk3} = L_{lk}$

และ V_{cbP} คือแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุบล็อกกิ้งสูงสุด

โหมดการทำงานที่ 2 ($t_1 - t_2$)

ที่เวลา t_1 กระแส i_A จะมีค่าเท่ากับกระแสสูงสุด ขณะกระแส i_C จะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น สวิตช์ S_{10} จึงสามารถหยุดนำกระแสได้ภายใต้เงื่อนไขกระแสเป็นศูนย์ (ZCS) ได้ภายหลังจากนี้ แรงดันเฟส V_{AN} , V_{BN} และ V_{CN} ยังคงมีค่าเหมือนกันกับโหมดก่อนหน้านี้ ส่วนทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง จะมีเพียงไดโอดเรียงกระแส D_{r1} และ D_{r4} เท่านั้นที่นำกระแสทุติยภูมิไปยังโหลด

$$V_{AN} = -V_{BN} = \frac{V_{dc}}{2} \tag{3.5}$$

$$V_{CN} = 0 \tag{3.6}$$

โหมดการทำงานที่ 3 ($t_2 - t_3$)

ที่เวลา t_2 สวิตช์ S_8 จะได้รับสัญญาณเกตสั่งให้ OFF กระแส i_B จะทำการชาร์จประจุ C_8 ภายในสวิตช์ S_8 และทำการคายประจุ C_5 ภายในสวิตช์ S_5 ผ่านทางตัวเก็บประจุฟลายอิ้ง C_{fc2} แรงดันตกคร่อม C_8 จะเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นตามสมการที่ (3.7) และแรงดันตกคร่อม C_5 จะลดลงแบบเชิงเส้นตามสมการที่ (3.8) ตามลำดับ ทำให้แรงดันเฟส V_B จะลดขนาดลงอย่างเป็นเส้นตรงในโหมดนี้ ส่วนแรงดันเฟส V_{AN} และ V_{CN} ยังคงมีขนาดเท่ากับโหมดที่ 2 กระแส i_A และ i_B ยังคงไหลในทิศทางเดิม ซึ่งโหมดนี้จะสิ้นสุดลงเมื่อ V_{BN} มีค่าเท่ากับ 0 ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง ไดโอด D_{r1} และ D_{r4} ยังคงนำกระแสเช่นเดียวกันกับในโหมดที่ 2

$$V_{C8} = \frac{i_{Peak}}{2 \cdot C_r}(t - t_2) \tag{3.7}$$

$$V_{C5} = \frac{V_{dc}}{2} - \frac{i_{Peak}}{2 \cdot C_r}(t - t_2) \tag{3.8}$$

เมื่อ $C_5 = C_8 = C_r$

โหมดการทำงานที่ 4 ($t_3 - t_4$)

ที่เวลา t_3 เมื่อมีการขนถ่ายประจุเสร็จเรียบร้อยแล้ว S_5 จะไม่มีแรงดันตกคร่อมสวิตช์ซึ่งจะทำให้สวิตช์ S_5 จะสามารถนำกระแสภายใต้เงื่อนไขแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) ได้หลังจากนี้ ในโหมดการทำงานนี้แรงดันเฟส V_{BN} จะมีค่าเป็น 0 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุบล็อกกิ้ง C_{bc2} จะถูกกระแส i_B ชาร์จจนมีค่าสูงสุดเท่ากับ $-V_{cbP}$ ภายในโหมดนี้ โดยกระแส i_B จะไหลผ่านทางแคล้มป์ไดโอด D_{c4} และสวิตช์ S_7 ในโหมดนี้ ส่วนทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ไดโอด D_1 และ D_4 ยังคงนำกระแสเช่นเดียวกันกับในโหมดที่ 3 โดยในโหมดนี้แรงดันไลน์ V_{AB} จะมีค่าเท่ากับ

$$V_{AB} = \frac{V_{dc}}{2} \tag{3.9}$$

โหมดการทำงานที่ 5 ($t_4 - t_5$)

ที่เวลา t_4 สวิตช์ S_{11} จะได้รับสัญญาณเกตสั่งให้ ON ทำให้กระแส i_C เริ่มไหลผ่านสวิตช์ S_{11} และ S_{12} ในทิศไหลออกจากหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงเฟส C ตามสมการที่ (3.10) และชาร์จตัวเก็บประจุบล็อกกิ้ง C_{bc3} ซึ่งเวลานี้สามารถพิจารณาได้ว่า S_{11} เริ่มนำกระแสได้ภายใต้เงื่อนไขแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) และสวิตช์ S_2 จะสามารถพิจารณาว่านำกระแสได้ภายใต้เงื่อนแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) เช่นเดียวกัน อันเนื่องมาจากตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล L_{lk3} ของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟส C โดยในช่วงเวลาเดียวกันที่กระแส i_C เริ่มไหลผ่านสวิตช์ก็จะส่งผลให้กระแส i_B เริ่มมีขนาดลดลงโดยไหลผ่านทางแคล้มป์ไดโอด D_{c4} และสวิตช์ S_7 ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามหลักความสมดุลของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส คือผลรวมของกระแสในสายนิวทรัลมีค่าเป็นศูนย์ $i_N = 0$ โดยแสดงได้ดังสมการที่ (3.11) และ (3.12) ซึ่งโหมดนี้จะสิ้นสุดลงเมื่อกระแส i_B มีขนาดลดลงจนเป็นศูนย์ ซึ่งจะเรียกช่วงเวลารีเซ็ตเป็นไปตามสมการที่ (3.13) ซึ่งจะพบว่าแรงดันตกคร่อมตัวประจุบล็อกกิ้งจะส่งผลต่อช่วงเวลารีเซ็ตของกระแส i_B ส่วนทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ไดโอดเรียงกระแสสามเฟส D_{r1}, D_{r4} และ D_{r6} จะนำกระแสด้านทุติยภูมิไปยังโหลด

$$i_C = -\left[\frac{\frac{V_{dc}}{2} + 2V_{cbP}}{2 \cdot L_{lk}}\right](t - t_4) \tag{3.10}$$

$$\boldsymbol{i_N = i_A + i_B + i_C = 0} \tag{3.11}$$

เมื่อ $\boldsymbol{i_A = i_{Peak}}$ นำสมการที่ (3.10) แทนใน (3.11) จะได้

$$i_B = -i_{Peak} + \left[\frac{V_{dc} + 4 \cdot V_{cbP}}{4 \cdot L_{lk}}\right](t - t_4) \tag{3.12}$$

$$T_{reset} = \frac{4 \cdot L_{lk} \cdot i_{Peak}}{V_{dc} + 4 \cdot V_{cbP}} \tag{3.13}$$

เมื่อ $\boldsymbol{L_{lk1} = L_{lk2} = L_{lk3} = L_{lk}}$

และ $\boldsymbol{V_{cbP}}$ คือแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุบล็อกกิ้งสูงสุด

โหมดการทำงานที่ 6 ($t_5 - t_6$)

ที่เวลา t_5 กระแส i_C จะมีขนาดเท่ากับกระแสสูงสุดในทิศไหลออกจากหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงขณะกระแส i_B จะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นสวิตช์ S_7 จึงสามารถหยุดนำกระแสได้ภายใต้เงื่อนไขกระแส

เป็นศูนย์ (ZCS) ได้ภายหลังจากนี้ แรงดันเฟส V_{AN}, V_{BN} และ V_{CN} ยังคงมีค่าเหมือนกันกับโหมดก่อนหน้านี้ ส่วนทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง จะมีเพียงไดโอดเรียงกระแส D_{r1} และ D_{r6} เท่านั้นที่นำกระแสทุติยภูมิไปยังโหลด

$$V_{AN} = -V_{CN} = \frac{V_{dc}}{2} \tag{3.14}$$

$$V_{BN} = 0 \tag{3.15}$$

โหมดการทำงานที่ 7 ($t_6 - t_7$)

ที่เวลา t_6 สวิตช์ S_1 จะได้รับสัญญาณเกตสั่งให้ OFF กระแส i_A จะทำการชาร์จประจุ C_1 ภายในสวิตช์ S_1 และทำการคายประจุ C_4 ภายในสวิตช์ S_4 ผ่านทางตัวเก็บประจุฟลายอิ้ง C_{fc1} ทำให้แรงดันตกคร่อม C_1 จะเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นตามสมการที่ (3.16) และแรงดันตกคร่อม C_4 จะลดลงแบบเชิงเส้นตามสมการที่ (3.17) ตามลำดับ แรงดันเฟส V_{AN} จะลดขนาดลงอย่างเป็นเส้นตรงในโหมดนี้ ส่วนแรงดันเฟส V_{BN} และ V_{CN} ยังคงมีขนาดเท่ากับโหมดที่ 6 กระแส i_A และ i_C ยังคงไหลในทิศทางเดิม ซึ่งโหมดนี้จะสิ้นสุดลงเมื่อ V_{AN} มีค่าเท่ากับ 0 ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง ไดโอด D_{r1} และ D_{r6} ยังคงนำกระแสเช่นเดียวกันกับในโหมดที่ 6

$$V_{C1} = \frac{i_{Peak}}{2 \cdot C_r}(t - t_6) \tag{3.16}$$

$$V_{C4} = \frac{V_{dc}}{2} - \frac{i_{Peak}}{2 \cdot C_r}(t - t_6) \tag{3.17}$$

เมื่อ $C_1 = C_4 = C_r$

โหมดการทำงานที่ 8 ($t_7 - t_8$)

เมื่อมีการขนถ่ายประจุเสร็จเรียบร้อยแล้ว S_4 จะไม่มีแรงดันตกคร่อมสวิตช์ ดังนั้นสวิตช์ S_4 จึงสามารถนำกระแสภายใต้เงื่อนไขแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) ภายหลังจากนี้ ในโหมดการทำงานนี้ แรงดันเฟส V_{AN} จะมีค่าเป็น 0 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุบล็อกกิ้ง C_{bc1} จะถูกกระแส i_A ชาร์จจนมีค่าสูงสุดเท่ากับ V_{cbP} ภายในโหมดนี้ โดยกระแส i_A จะไหลผ่านทางแคล้มป์ไดโอด D_{c1} และสวิตช์ S_2 ในโหมดนี้ ส่วนทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ไดโอด D_{r1} และ D_{r6} ยังคงนำกระแสเช่นเดียวกันกับในโหมดที่ 7 โดยในโหมดนี้แรงดันไลน์ V_{AB} จะมีค่าเท่ากับ

$$V_{AB} = -\frac{V_{dc}}{2} \tag{3.18}$$

โหมดการทำงานที่ 9 ($t_8 - t_9$)

ที่เวลา t_8 สวิตช์ S_6 จะได้รับสัญญาณเกตสั่งให้ ON ทำให้กระแส i_B เริ่มไหลผ่านสวิตช์ S_5 และ S_6 ในทิศไหลเข้าสู่หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงเฟส B ตามสมการที่ (3.19) และชาร์จตัวเก็บประจุบล็อกกิ้ง C_{bc2} ซึ่งเวลานี้สามารถพิจารณาได้ว่า S_5 เริ่มนำกระแสได้ภายใต้เงื่อนไขแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) และสวิตช์ S_6 จะสามารถพิจารณาว่านำกระแสได้ภายใต้เงื่อนแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) เช่นเดียวกัน อันเนื่องมาจากตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล L_{lk2} ของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟส B โดยในช่วงเวลาเดียวกันที่กระแส i_B เริ่มไหลผ่านสวิตช์ก็จะส่งผลให้กระแส i_A เริ่มมีขนาดลดลงโดยไหลผ่านทางแคล้มป์ไดโอด D_{c1} และสวิตช์ S_2 ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามหลักความสมดุลย์ของหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส คือผลรวมของกระแสในสายนิวทรัลมีค่าเป็นศูนย์ $i_N = 0$ โดยแสดงได้ดังสมการที่ (3.20) และ (3.21) ซึ่งโหมดนี้จะสิ้นสุดลงเมื่อกระแส i_A มีขนาดลดลงจนเป็นศูนย์ ซึ่งจะเรียกช่วงเวลารีเซ็ตเป็นไปตามสมการที่ (3.22) ซึ่งจะพบว่าแรงดันตกคร่อมตัวประจุบล็อกกิ้งจะส่งผลต่อช่วงเวลารีเซ็ตของกระแส i_A ด้วย ส่วนทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ไดโอดเรียงกระแสสามเฟส D_{r1}, D_{r3} และ D_{r6} จะนำกระแสด้านทุติยภูมิไปยังโหลด

$$i_B = \left[\frac{\frac{V_{dc}}{2} + 2V_{cbP}}{2 \cdot L_{lk}} \right] (t - t_8) \tag{3.19}$$

$$i_N = i_A + i_B + i_C = 0 \tag{3.20}$$

เมื่อ $i_C = -i_{Peak}$ นำสมการที่ (3.19) แทนใน (3.20) จะได้

$$i_A = i_{Peak} - \left[\frac{V_{dc} + 4 \cdot V_{cbP}}{4 \cdot L_{lk}} \right] (t - t_8) \tag{3.21}$$

$$T_{reset} = \frac{4 \cdot L_{lk} \cdot i_{Peak}}{V_{dc} + 4 \cdot V_{cbP}} \tag{3.22}$$

เมื่อ $L_{lk1} = L_{lk2} = L_{lk3} = L_{lk}$

และ V_{cbP} คือแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุบล็อกกิ้งสูงสุด

โหมดการทำงานที่ 10 ($t_9 - t_{10}$)

ที่เวลา t_9 กระแส i_B จะเท่ากับกระแสสูงสุดในทิศไหลเข้าสู่จากหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ขณะกระแส i_A จะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นสวิตช์ S_2 จึงสามารถหยุดนำกระแสได้ภายใต้เงื่อนไขกระแส

เป็นศูนย์ (ZCS) ได้ภายหลังจากนี้ แรงดันเฟส V_{AN}, V_{BN} และ V_{CN} ยังคงมีค่าเหมือนกันกับโหมดก่อนหน้านี้ ส่วนทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง จะมีเพียงไดโอดเรียงกระแส D_{r3} และ D_{r6} เท่านั้นที่นำกระแสทุติยภูมิไปยังโหลด

$$V_{BN} = -V_{CN} = \frac{V_{dc}}{2} \tag{3.23}$$

$$V_{AN} = 0 \tag{3.24}$$

โหมดการทำงานที่ 11 ($t_{10} - t_{11}$)

ที่เวลา t_{10} สวิตช์ S_{12} จะได้รับสัญญาณเกตสั่งให้ OFF กระแส i_C จะทำการชาร์จประจุ C_{12} ภายในสวิตช์ S_{12} และทำการคายประจุ C_9 ภายในสวิตช์ S_9 ผ่านทางตัวเก็บประจุฟลายอิ้ง C_{fc3} ทำให้แรงดันตกคร่อม C_{12} จะเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นตามสมการที่ (3.25) และแรงดันตกคร่อม C_9 จะลดลงแบบเชิงเส้นตามสมการที่ (3.26) ตามลำดับ แรงดันเฟส V_{CN} จะลดขนาดลงอย่างเป็นเส้นตรงในโหมดนี้ ส่วนแรงดันเฟส V_{AN} และ V_{BN} ยังคงมีขนาดเท่ากับโหมดที่ 10 กระแส i_B และ i_C ยังคงไหลในทิศทางเดิม ซึ่งโหมดนี้จะสิ้นสุดลงเมื่อ V_{CN} มีค่าเท่ากับ 0 ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง ไดโอด D_{r3} และ D_{r6} ยังคงนำกระแสเช่นเดียวกันกับในโหมดที่ 10

$$V_{C12} = \frac{i_{Peak}}{2 \cdot C_r}\left(t - t_{10}\right) \tag{3.25}$$

$$V_{C9} = \frac{V_{dc}}{2} - \frac{i_{Peak}}{2 \cdot C_r}\left(t - t_{10}\right) \tag{3.26}$$

เมื่อ $C_9 = C_{12} = C_r$

โหมดการทำงานที่ 12 ($t_{11} - t_{12}$)

เมื่อมีการขนถ่ายประจุเสร็จเรียบร้อยแล้ว S_9 จะไม่มีแรงดันตกคร่อมสวิตช์ ดังนั้นสวิตช์ S_9 จึงสามารถนำกระแสภายใต้เงื่อนไขแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) ภายหลังจากนี้ ในโหมดการทำงานนี้ แรงดันเฟส V_{CN} จะมีค่าเป็น 0 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุบล็อกกิ้ง C_{bc3} จะถูกกระแส i_C ชาร์จจนมีค่าสูงสุดเท่ากับ - V_{cbP} ภายในโหมดนี้ โดยกระแส i_C จะไหลผ่านทางแคล้มป์ไดโอด D_{c6} และสวิตช์ S_{11} ในโหมดนี้ ส่วนทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ไดโอด D_{r3} และ D_{r6} ยังคงนำกระแสเช่นเดียวกันกับในโหมดที่ 11 โดยในโหมดนี้แรงดันไลน์ V_{AB} จะมีค่าเท่ากับ

$$V_{AB} = -V_{dc} \tag{3.27}$$

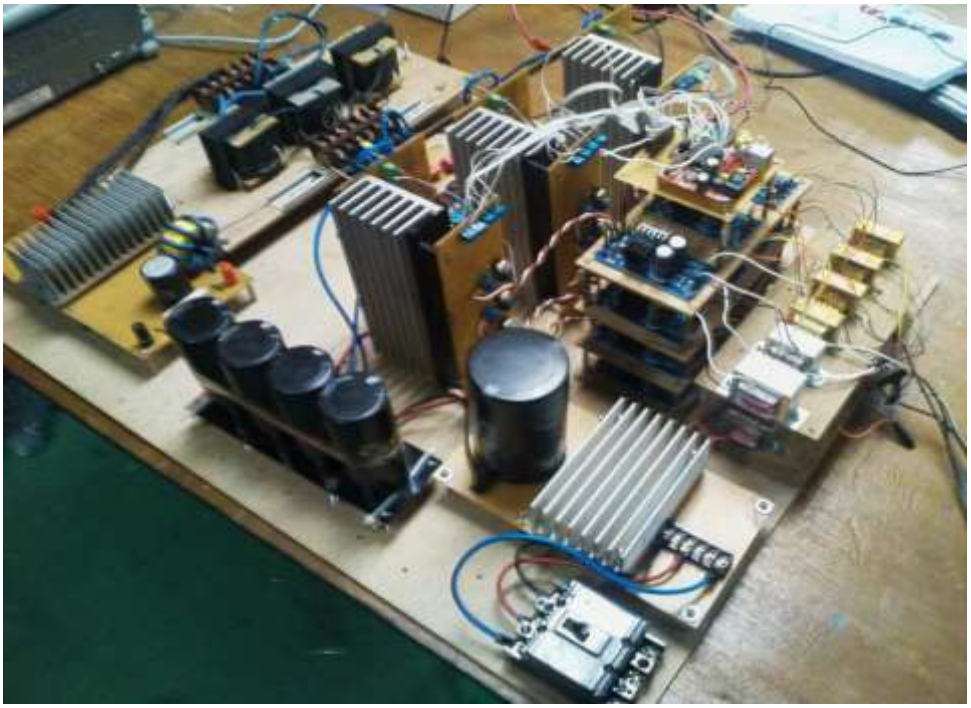
โหมดการทำงานที่ 13 – 24 กระแส i_A จะไหลสวนทิศทางกันกับโหมดการทำงานที่ 1 - 12 และจะมีลักษณะการทำงานคล้ายกับที่กล่าวมา กระแส i_A, i_B, i_C จะมีมุมเฟสต่างกัน 120 องศา เช่นเดียวกันกับแรงดันเฟส V_{AN}, V_{BN}, V_{CN} และแรงดันไลน์ V_{AB}, V_{BC}, V_{CA}

ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าในการทำงานของวงจรจะเกิด ZVS ที่ S_1, S_5, S_9, S_4, S_8 และ S_{12} และจะเกิด ZVZCS ที่ S_2, S_3, S_6, S_7, S_{10} และ S_{11}

3.5 การออกแบบและสร้างวงจรดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับ ที่สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์กระแสศูนย์

3.5.1 โครงสร้างของวงจร

สำหรับวงจรที่ได้ทำการออกแบบและสร้างขึ้นจริงนั้นสามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 3.5 รายละเอียดของแต่ละส่วนประกอบรวมทั้งวิธีการออกแบบและแนวคิดในการสร้างของแต่ละส่วนจะได้ทำการอธิบายให้เห็นเป็นลำดับต่อไป



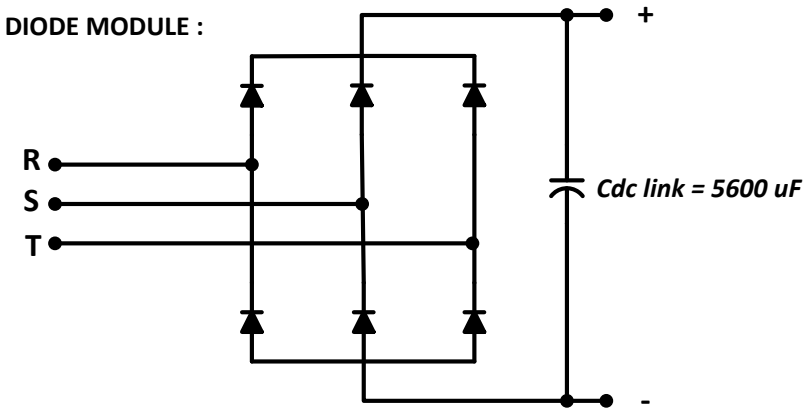
รูปที่ 3.5 โครงสร้างของวงจรจริงที่ได้ทำการสร้างขึ้น

จากรูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างทั้งหมดของวงจรที่ถูกสร้างขึ้นจริงเพื่อทำการทดสอบในรายงานฉบับนี้โดยในแต่ละส่วนจะประกอบไปด้วยดังต่อไปนี้

1. ส่วนของภาคเปลี่ยน AC เป็น DC ด้านอินพุต
2. ส่วนของตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน C_{dc1} และ C_{dc2}

3. ส่วนของภาคกำลังอินเวอร์เตอร์
4. ส่วนของตัวเก็บประจุบล็อกกิ้ง C_{bc1} - C_{bc3}
5. ส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสามเฟส
6. ส่วนของภาคเปลี่ยน AC เป็น DC ด้านเอาท์พุต
7. ส่วนของ LC ฟิลเตอร์
8. ส่วนของวงจรขับเกต
9. ส่วนของตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC33ep512u810

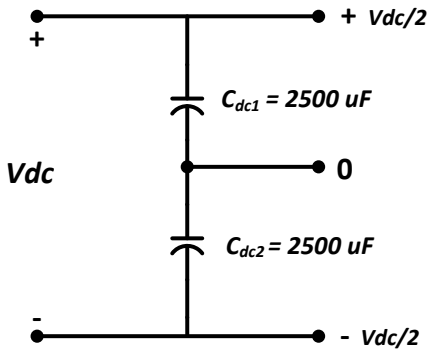
3.5.2 ส่วนของภาคเปลี่ยน AC เป็น DC ด้านอินพุต



รูปที่ 3.6 วงจรภาคเปลี่ยน AC เป็น DC ด้านอินพุต

วงจรที่ใช้ในการทดสอบจะใช้แรงดันไฟฟ้าขาเข้า 380 V_{L-L} 3 เฟส นำมาผ่านวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟสเพื่อเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้วยไดโอดเรียงกระแสแบบโมดูล และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จะถูกทำให้เป็นไฟตรงเรียบด้วยตัวเก็บประจุ $C_{dc\text{-}link}$ เพื่อที่จะนำไปใช้งานเป็นอินพุตของภาคส่วนอินเวอร์เตอร์

3.5.3 ส่วนของตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน C_{dc1} และ C_{dc2}

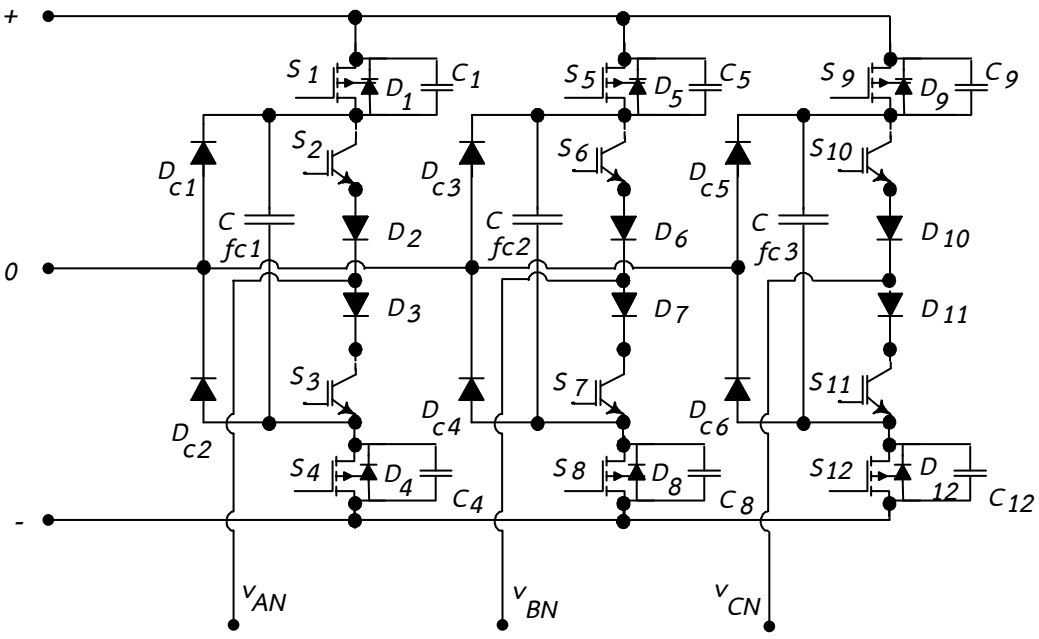


รูปที่ 3.7 ตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน C_{dc1} และ C_{dc2}

จากรูปที่ 3.7 เป็นส่วนของตัวเก็บประจุแบ่งแรงดันซึ่งจะถูกต่ออยู่ด้านหน้าของวงจรอินเวอร์เตอร์ซึ่งตัวเก็บประจุแบ่งแรงดันทั้งสองตัวนี้จะทำหน้าที่แบ่งแรงดันขาเข้าให้เหลือเพียงครึ่งเดียวและทำให้เกิดความเป็นสามระดับของแรงดันเอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์ โดยการติดตั้งใช้งานจริงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.8

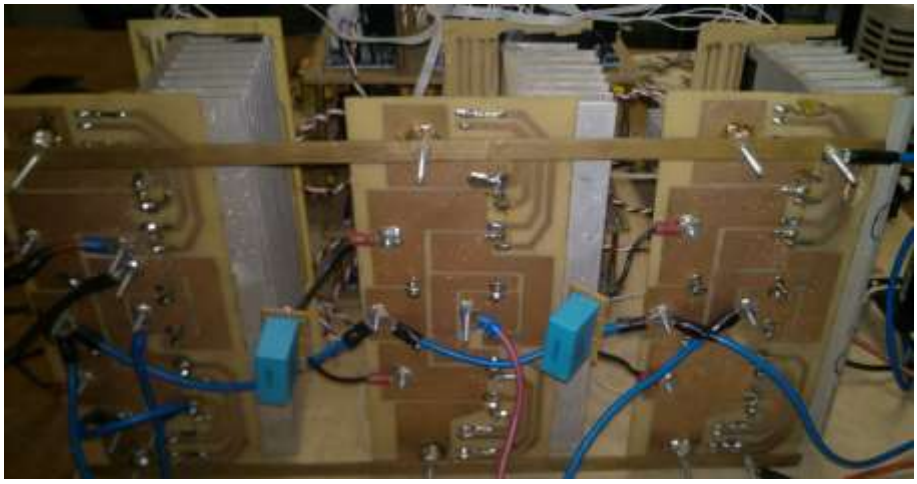
รูปที่ 3.8 ตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน C_{dc1} และ C_{dc2} ที่ใช้งานจริง

3.5.4 ส่วนของภาคกำลังอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.9 ส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับ

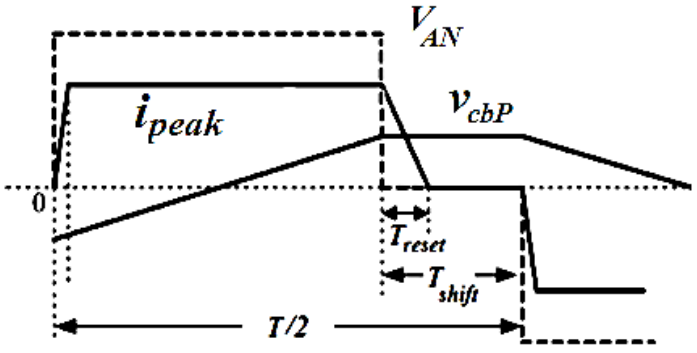
ในรูปที่ 3.9 เป็นส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับ ซึ่งการใช้วงจรแบบสามระดับนี้จะทำให้อุปกรณ์สวิตช์นั้นแบกรับภาระแรงดันในช่วงของการหยุดนำกระแสนั้นเพียงครึ่งเดียวของแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเท่านั้น และรูปที่ 3.10 เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์จริงที่ได้ทำการสร้างขึ้น โดยสวิตช์วงนอกเลือกใช้มอสเฟต (SPW47N60C3) และสวิตช์วงในเลือกใช้ไอจีบีที (IRG4PC50U) บล็อกกิ้งไดโอด *(D_1-D_6)* และแคล้มป์ไดโอด *(D_{c1}-D_{c6})* เลือกใช้เบอร์ MUR1560 และตัวเก็บประจุฟลายอิ้ง *(C_{fc1} - C_{fc3})* ใช้ขนาด 1 ไมโครฟารัด



รูปที่ 3.10 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับที่ใช้จริงในวงจร

3.5.5 ส่วนของตัวเก็บประจุบล็อกกิ้ง C_{bc1} - C_{bc3}

ในการออกแบบตัวเก็บประจุบล็อกกิ้งนั้นสามารถกระทำได้โดยพิจารณาในรูปที่ 3.11 ซึ่งการที่จะทำให้สวิตช์วงในสามารถหยุดนำกระแสได้ภายใต้สภาวะกระแสเป็นศูนย์นั้น ช่วงเวลารีเซ็ต *(T_{reset})* จะต้องมีค่าน้อยกว่าช่วงเวลาเลื่อนเฟส *(T_{shift})* เนื่องจากกระแสต้องลดลงเป็นศูนย์ก่อนที่จะมีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้น



รูปที่ 3.11 ลักษณะการเกิด ZCS

การที่จะทำให้กระแสลดลงเป็นศูนย์ได้รวดเร็วมากขึ้นนั้นสามารถกระทำได้โดยใช้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุบล็อกกิ้งหากค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุบล็อกกิ้งมีค่ามากก็จะทำให้กระแสลดลงได้รวดเร็วขึ้น ซึ่งแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุบล็อกกิ้งนั้นสามารถหาได้จาก

$$V_{cbP} = \left(\frac{i_{peak}}{2 \cdot C_{bc}} \right) \cdot \left(\frac{T}{2} - T_{shift} \right) \tag{3.28}$$

เมื่อนำสมการที่ 3.28 แทนลงในสมการที่ 3.4 จะได้

$$T_{reset} = \frac{4 \cdot L_{lk} \cdot i_{Peak}}{V_{dc} + 4 \cdot \left[\left(\frac{i_{peak}}{2 \cdot C_{bc}} \right) \cdot \left(\frac{T}{2} - T_{shift} \right) \right]} \tag{3.29}$$

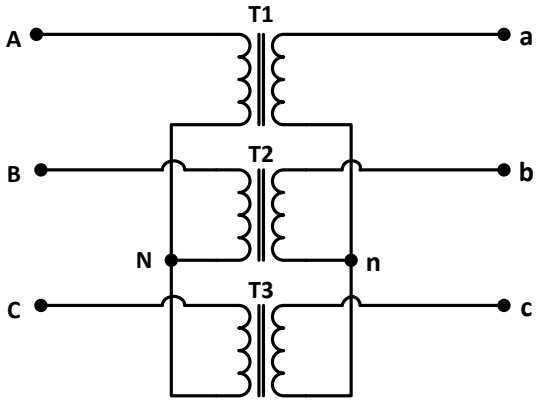
ดังนั้นค่าตัวเก็บประจุบล็อกกิ้งสามารถหาได้จาก

$$C_{bc} = \frac{i_{peak} \cdot (\frac{T}{2} - T_{shift})}{(\frac{2 \cdot L_{lk} \cdot i_{peak}}{T_{reset}} - \frac{V_{dc}}{2})} \tag{3.30}$$

การใช้ตัวเก็บประจุบล็อกกิ้งช่วยทำให้กระแสตกลงจนมีค่าเป็นศูนย์นั้นมีข้อดีคือง่ายต่อการออกแบบแต่ว่ามีข้อเสียคือการเกิดแรงดันดร็อบขึ้นทำให้เกิดความสูญเสียกำลังงานก่อนเข้าหม้อแปลง ดังนั้นทำให้กำลังไฟฟ้าขาเข้าหม้อแปลงมีค่าลดลง เพราะฉะนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงแรงดันดร็อปของตัวเก็บประจุบล็อกกิ้งให้มีความเหมาะสมด้วย

3.5.6 ส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสามเฟส

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสามเฟสนั้นจะใช้หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบหนึ่งเฟสจำนวน 3 ตัวต่อกันแบบสตาร์-สตาร์ (Y-Y) ในลักษณะดังรูปที่ 3.12 โดยหม้อแปลงแต่ละตัวนั้นจะทำการเลือกใช้แกน EE-80 ในการสร้าง โดยการออกแบบจะใช้วิธีผลคูณพื้นที่ซึ่งจะทำการกำหนดตัวแปรดังนี้



รูปที่ 3.12 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสามเฟส

กำหนดให้ V_1 = 300 V

V_2 = 75 V

f_s = 50 kHz

B_m = 0.3 Tesla

K_w = 0.4

i_{in} = 10 A

i_{out} = 40 A

J = 4 A/mm^2

วิธีการออกแบบ

ก) คำนวณค่า A_P จากสมการที่ 2.10

$$A_p = \frac{300\times10 + 75\times40}{4\times0.3\times4\times10^6\times0.3\times50\times10^3} \quad \text{m}^4$$

$$A_p = 8.33\times10^{-8} \quad \text{m}^4$$

เมื่อทำการคำนวณ ได้ค่า *Ap* มาแล้วทำการเลือกแกนให้มีขนาดค่า *Ap* ให้มีขนาดมากกว่าค่าที่คำนวณได้ ดังนั้นจึงเลือกแกน EE80 ซึ่งจากตารางข้อมูลของผู้ผลิตจะพบว่า

$$A_c = 400\times10^{-6} \quad \text{m}^2$$

$$A_w = 1100\times10^{-6} \quad \text{m}^2$$

ดังนั้นค่า A_P ของแกน EE80 ที่ได้ทำการเลือกจึงมีค่าเป็น

$$A_p = A_c \cdot A_w = 44\times10^{-8} \quad \text{m}^4$$

ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าที่คำนวณได้ ดังนั้นจึงสามารถใช้แกน EE80 ในการทำวิจัยได้

ข) หาจำนวนรอบของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง

จำนวนรอบด้านปฐมภูมิได้จากสมการที่ 2.4 ดังนี้

$$N_1 = \frac{300}{4\times400\times10^{-6}\times0.3\times50\times10^{3}} \quad \text{รอบ}$$

$$N_1 = 12.5 \quad \text{รอบ}$$

จำนวนรอบด้านปฐมภูมิได้จากสมการที่ 2.5 ดังนี้

$$N_2 = \frac{75}{4\times400\times10^{-6}\times0.3\times50\times10^{3}} \quad \text{รอบ}$$

$$N_2 = 3.125 \quad \text{รอบ}$$

จะได้อัตราส่วนของหม้อแปลง *(turn ratio)* คือ 4

ดังนั้นทำการเลือก $N_1 = 28$ รอบ

$$N_2 = 7 \quad \text{รอบ}$$

ค) คำนวณหาค่าพื้นที่หน้าตัดของขดลวดจากสมการที่ 2.6 ดังนี้

จะได้ $a_1 = \frac{i_{in}}{J}$ และ $a_2 = \frac{i_{out}}{J}$

แทนค่าพารามิเตอร์โดยเลือกค่าความหนาแน่นของกระแส $J = 4$ A/mm^2

$$a_1 = \frac{10}{4\times10^{6}} = 2.5\times10^{-6} \quad \text{m}^2$$

$$a_2 = \frac{40}{4\times10^{6}} = 10\times10^{-6} \quad \text{m}^2$$

ทำการเลือกขนาดของตัวนำที่ใช้น้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ ทำการเลือกขดลวดตัวนำเบอร์ SWG28 ซึ่งมีขนาด 0.1134 mm^2 ดังนั้นด้านปฐมภูมิจะใช้ลวดตีเกลียวเป็นจำนวนเท่ากับ $\frac{2.5\times10^{-6}}{0.1134\times10^{-6}} = 22.0458$ เส้น ดังนั้นด้านปฐมภูมิจึงเลือก 23 เส้น ดังนั้นด้านทุติยภูมิจะใช้ลวดตีเกลียวเป็นจำนวนเท่ากับ $\frac{10\times10^{-6}}{0.1134\times10^{-6}} = 88.1834$ เส้น ดังนั้นด้านทุติยภูมิจึงเลือก 89 เส้น

ง) ตรวจสอบความถูกต้อง

ตรวจสอบความเป็นไปได้ของการออกแบบดังสมการที่ (3.31)

$$A_w \cdot K_w \geq \sum_{i=1}^{n}(a_i \cdot N_i) \tag{3.31}$$

เมื่อ n คือจำนวนขดลวดของหม้อแปลง

ดังนั้นจากแกนที่ได้ทำการเลือกก่อนหน้านี้พบว่า $A_w \cdot K_w = 1100\times10^{-6}\times0.4 = 440$ mm^2

และจากการคำนวณก่อนหน้านี้จะได้ว่า

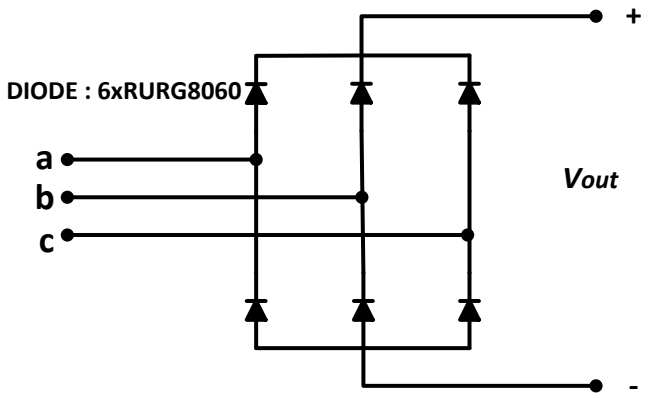
$$a_1 \cdot N_1 + a_2 \cdot N_2 = (2.5\times10^{-6}\cdot 28) + (10\times10^{-6}\cdot 7)$$

$$= 140 \quad mm^2$$

จะพบว่าค่าที่ได้เป็นไปตามสมการที่ (3.31) ซึ่งแสดงว่าการออกแบบมีความเป็นไปได้ จึงได้ทำการสร้างหม้อแปลงทั้งสามลูกจากนั้นนำมาต่อกับแบบสตาร์-สตาร์ (Y-Y) ดังรูปที่ 3.13

รูปที่ 3.13 หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสามเฟสที่ใช้จริง

3.5.7 ส่วนของภาคเปลี่ยน AC เป็น DC ด้านเอาท์พุต

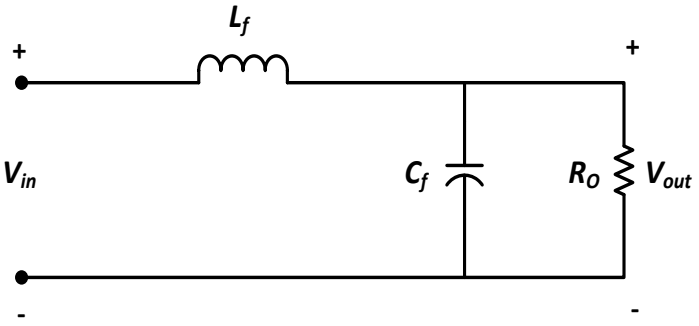


รูปที่ 3.14 ภาคเปลี่ยน AC เป็น DC ด้านเอาท์พุต

ในส่วนนี้เป็นส่วนที่เชื่อมต่ออยู่กับด้านทุติยภูมิหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสามเฟส เพื่อที่จะทำการเรียงไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้จากหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสามเฟสเป็นไฟฟ้ากระแสตรงอีกครั้ง โดยการออกแบบจะเลือกใช้ไดโอดแบบ fast recovery ที่ทนกระแสได้สูง (RURG8060) จำนวน 6 ตัว นำมาต่อกันเป็นวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟส

3.5.8 ส่วนของ LC ฟิลเตอร์

วงจร LC ฟิลเตอร์ด้านเอาท์พุตจะประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำฟิลเตอร์ (L_f) ตัวเก็บประจุฟิลเตอร์ (C_f) และตัวต้านทานโหลด (R_o) ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 วงจร LC ฟิลเตอร์ด้านเอาท์พุต

วงจรฟิลเตอร์จะสามารถลดผลขององค์ประกอบไฟสลับที่ความถี่สูงกว่าความถี่คัตออฟ (Cut-off frequency) ซึ่งความถี่คัตออฟของวงจรฟิลเตอร์จะมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}}$ เพื่อที่จะทำให้ผลของอัตราส่วนแรงดัน V_{out}/V_{in} มีค่าน้อยลง สำหรับอัตราส่วน V_{out}/V_{in} จะสามารถหาได้จาก

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{\sqrt{(1-(\frac{f}{f_o})^2)^2 + ((\frac{1}{R_o})\cdot\sqrt{\frac{L_f}{C_f}}\cdot(\frac{f}{f_o}))^2}} \quad (3.32)$$

โดยค่า V_{out}/V_{in} จะขึ้นอยู่กับ Q (Quality factor) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $Q = \frac{R_o}{\sqrt{C_f / L_f}}$ ที่ความถี่คัตออฟ (f_o) ในขณะที่ $f = f_o$ อัตราส่วน V_{out}/V_{in} จะมีค่าเท่ากับ Q แต่ในการออกแบบนี้จะเลือกอัตราส่วน V_{out}/V_{in} ให้มีค่าน้อยกว่า 1 เพราะจะสามารถทำให้ลดองค์ประกอบของไฟสลับของวงจรเรียงกระแสซึ่งจะส่งผลทำให้ริปเปิ้ลของแรงดันเอาท์พุตมีค่าลดลง โดยจะทำการเลือกใช้ค่าตัวเหนี่ยวนำฟิลเตอร์มีค่าเท่ากับ 20 μH และค่าตัวเก็บประจุฟิลเตอร์มีค่าเท่ากับ 680 μF โดยค่าความต้านทานที่พิกัดเป็น 3.2 Ω

วิธีการออกแบบตัวเหนี่ยวนำฟิลเตอร์

กำหนดให้ L_f = 20 μH

f_s = 50 kHz

B_m = 0.3 Tesla

K_w = 0.6

i_o = 40 A

Δi = 1 A

J = 4 A/mm^2

ก) คำนวณหาผลคูณพื้นที่ (A_P)

เริ่มจากการคำนวณพลังงานสะสม

$$E = \frac{1}{2}\cdot L\cdot i_m{}^2 \quad (3.33)$$

โดย

$$i_m = i_o + \frac{\Delta i}{2} \quad (3.34)$$

เมื่อแทนค่าต่างๆลงในสมการจะได้

$$E = 16.4\times10^{-3} \quad \text{J}$$

คำนวณหา (A_P) จาก

$$A_p = A_w \cdot A_c = \frac{2\cdot E}{K_w \cdot K_c \cdot J \cdot B_m} \tag{3.35}$$

$$A_p = 4.56\times10^{-8} \quad \text{m}^4$$

ทำการเลือกขนาดแกนแม่เหล็กโดยเลือกให้มีค่าให้มากกว่าที่คำนวณได้ ดังนั้นจึงทำการเลือกแกน Powder core (55906A2) ซึ่งมีค่า A_P = 40.8×10^{-8} m^4, A_W = 17.99×10^{-4} m^2, A_C = 2.27×10^{-4}m^2 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าที่คำนวณได้

ข) คำนวณหาจำนวนรอบในการพันตัวเหนี่ยวนำ

สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$N = \frac{L_f \cdot i_m}{A_c \cdot B_m} \tag{3.36}$$

เมื่อทำการแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆลงในสมการที่ 3.36 จะได้ N = 12 รอบ

ค) คำนวณหาขนาดลวดตัวนำ

สามารถคำนวณได้จากสมการ $a = \frac{i_o}{J}$ (3.37)

แทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆลงในสมการจะได้ a = 10×10^{-6} m^2

ดังนั้นจำเป็นต้องใช้ลวดตัวนำตีเกลียวเพื่อให้ได้พื้นที่หน้า 10×10^{-6} m^2 ดังนั้นจึงทำการเลือกลวดทองแดงเบอร์ SWG28 ซึ่งมีขนาด 0.1134 mm^2 ดังนั้นใช้ลวดตีเกลียวเป็นจำนวนเท่ากับ $\frac{10\times10^{-6}}{0.1134\times10^{-6}} = 88.1834$ เส้น ดังนั้นจึงเลือกตีเกลียว 89 เส้น

ง) ตรวจสอบการออกแบบ

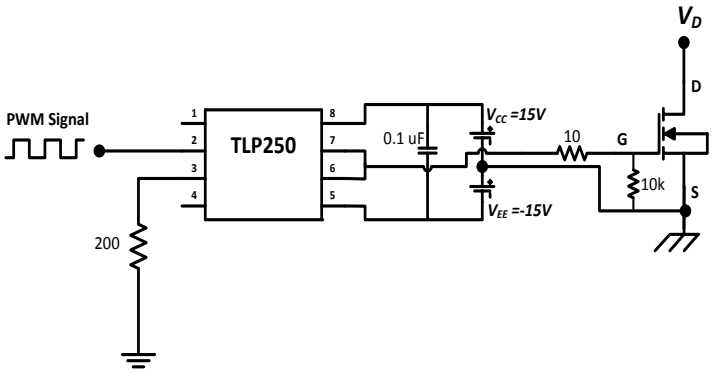
ตรวจสอบการออกแบบจากเงื่อนไข $A_w \cdot K_w \geq a \cdot N$ (3.38)

ดังนั้นจะได้ว่า $A_w \cdot K_w = 17.99\times10^{-4}\times0.6 = 10.794\times10^{-4}$ m^2

$$a \cdot N = 10 \times 10^{-6} \times 12 = 1.2 \times 10^{-4} \quad \text{m}^2$$

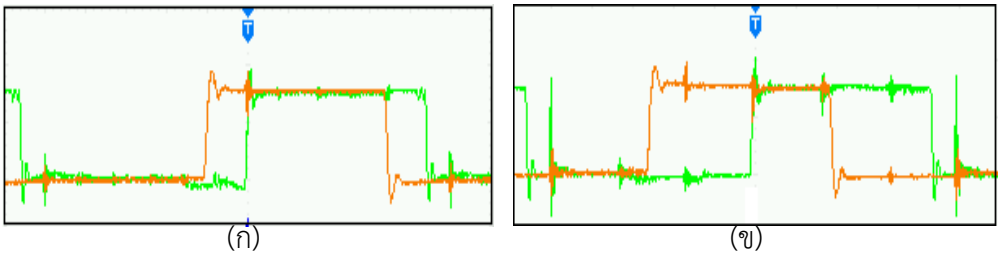
จะเห็นว่าเป็นไปตามเงื่อนไขที่ทำการตรวจสอบ ซึ่งหมายความว่าสามารถพันขดลวดลงในพื้นที่หน้าต่างของแกนเหล็กที่ทำการเลือกได้

3.5.9 ส่วนของวงจรขับเกต



รูปที่ 3.16 วงจรขับเกต

จากรูปที่ 3.16 เป็นวงจรขับเกตสวิตช์มอสเฟตและไอจีบี โดยจะใช้การแยกโดดสัญญาณระหว่างวงจรควบคุมกับวงจรกำลังด้วยการแยกโดดทางแสงโดยใช้ไอซีเบอร์ TLP250 จำนวน 12 ชุด สำหรับสวิตช์ทั้งหมด 12 ตัว สัญญาณ PWM จากไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC33ep512u810 จะถูกต่อเข้ากับขาที่ 2 ของ TLP250 จะทำให้ได้สัญญาณเอาท์พุทของ TLP250 ออกที่ขา 6 โดยในวงจรนี้จะใช้การขับเกตมอสเฟตแบบบวกลบโดยจะต่อสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง +15 V เข้าที่ขา 8 และ -15V เข้าที่ขา 5 ของ TLP250 เพื่อทำให้สวิตช์มอสเฟตสามารถหยุดนำกระแสได้รวดเร็วขึ้น



(ก) (ข)

รูปที่ 3.17 สัญญาณพีดับบลิวเอ็มจากวงจรขับสวิตช์ (ก) มุมเลื่อนเฟส 30 องศา
(ข) มุมเลื่อนเฟส 90 องศา

3.5.10 ส่วนของตัวสร้างสัญญาณไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC33e

รูปที่ 3.18 ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC33ep512mu810

การสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มเพื่อใช้ขับสวิตช์ทั้ง 12 ตัว โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC33ep512mu810 ดังรูปที่ 3.18 ซึ่งจะสามารถสร้างสัญญาณได้ทั้งหมด 12 สัญญาณ โดยที่แต่ละสัญญาณจะมีค่าดิวตี้ไซเกิ้ลประมาณ 50 % โดยตั้งค่าที่รีจิสเตอร์ PDCx โดยสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่มีความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซึ่งสามารถตั้งค่าได้ที่รีจิสเตอร์ PTPER จากนั้นจำเป็นต้องมีการตั้งค่าเวลาเดดไทม์ระหว่างคู่สัญญาณสวิตช์ซึ่งสามารถเซ็ตค่าได้ที่รีจิสเตอร์ DTRxและ ALTDTRx ภายในโมดูลสร้างสัญญาณ PWM ของไมโครคอนโทรลเลอร์ นอกจากนั้นยังได้ออกแบบโปรแกรมให้มีการปรับมุมเลื่อนเฟสของสัญญาณพีดับบลิวเอ็มโดยรับค่าผ่านทางโมดูล A/D (Analog to Digital Converter)

3.6 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงหลักการทำงานและวิเคราะห์โหมดการทำงานของวงจรดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับที่สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์โดยได้อธิบายถึงการเกิดการทำงานภายใต้เงื่อนไขแรงดันเป็นศูนย์ของสวิตช์วงนอกและการทำงานภายใต้เงื่อนไขแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์ของสวิตช์วงใน นอกจากนั้นได้กล่าวถึงออกแบบวงจรกำลังในภาคส่วนต่างๆ อันได้แก่ วงจรเรียงกระแสสามเฟส ตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน วงจรอินเวอร์เตอร์ หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสามเฟสและวงจร LC ฟิลเตอร์ที่ใช้จริงในวงจร รวมไปถึงส่วนของวงจรควบคุม อันได้แก่วงจรขับเกต และไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC33ep512mu810