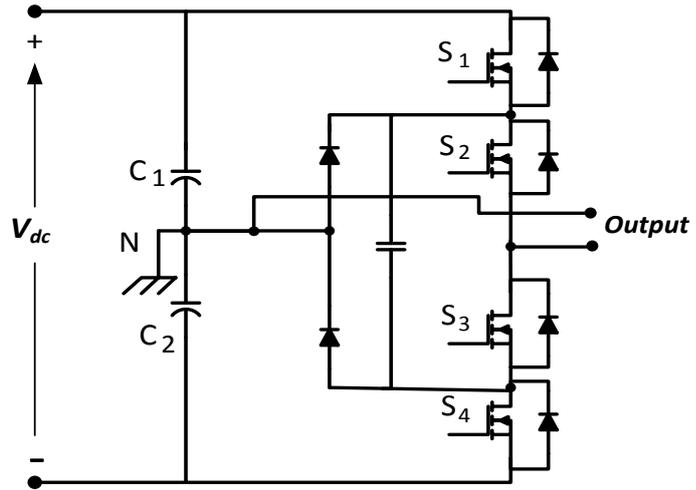


ในวงจรอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบสามระดับนั้นจะประกอบไปด้วยกึ่งสวิตช์เพียงกึ่งเดียวและมีสวิตช์จำนวน 4 อยู่ภายในกึ่งนั้น ส่วนวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์แบบสามระดับนั้นจะประกอบไปด้วยกึ่งสวิตช์สองกึ่งคือ leading-leg และ lagging-leg ซึ่งแต่ละกึ่งจะประกอบด้วยสวิตช์กึ่งละ 4 ตัว เช่นเดียวกันแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบกันระหว่างวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์กับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์นั้นจะพบว่าวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์มีกำลังไฟฟ้าสูงกว่าแบบกึ่งบริดจ์ 2 เท่า จึงมีความเหมาะสมที่จะเลือกใช้เมื่อต้องการจ่ายกำลังไฟฟ้าโหลดสูงขึ้น ดังนั้นหากต้องการเพิ่มพิกัดกำลังไฟฟ้าของวงจรให้สูงขึ้น สามารถกระทำได้โดยนำอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับหรืออินเวอร์เตอร์แบบ NPC ต่อขนานกันให้มีลักษณะเป็นวงจรแบบเต็มบริดจ์หรือวงจรแบบสามเฟสดังรูปที่ 2.4

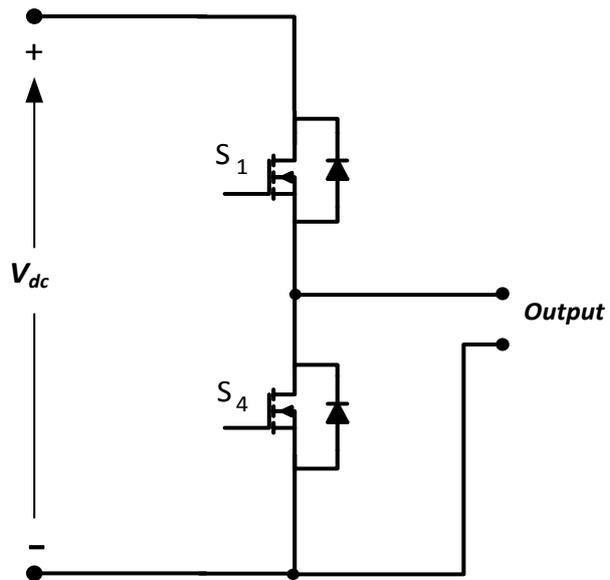
เงื่อนไขสำคัญที่สำคัญอีกประการหนึ่งของอินเวอร์เตอร์นั้นคือการทำงานของสวิตช์ในกึ่งเดียวกันจะต้องไม่ทำงานพร้อมกันในช่วงเวลาเดียวกัน มิฉะนั้นแล้วจะเกิดการลัดวงจรระหว่างบัสบวกและบัสลบ ในทางอุดมคติเวลาการสวิตช์ของคู่สวิตช์จะตรงข้ามกัน แต่ในทางปฏิบัติแล้วจะมีช่วงเวลาที่ยกเว้นที่สวิตช์ทั้งคู่ไม่นำกระแส ซึ่งจะเรียกว่าช่วงเวลาเดดไทม์ (dead time) โดยเดดไทม์จะอยู่ในช่วงเวลาก่อนการเปลี่ยนแปลงสถานะของสวิตช์จากการนำกระแสเป็นช่วงในการไม่นำกระแส หรือจากไม่นำกระแสเป็นนำกระแสซึ่งวงจรแบบสามระดับที่จะนำมาใช้ในการศึกษาวิจัยนี้จะมีการเผื่อช่วงเวลาเดดไทม์ของคู่สวิตช์  $S_1$  กับ  $S_4$  และคู่สวิตช์  $S_2$  กับ  $S_3$  ดังรูปที่ 2.5

**ตารางที่ 2.1** การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสองระดับกับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ

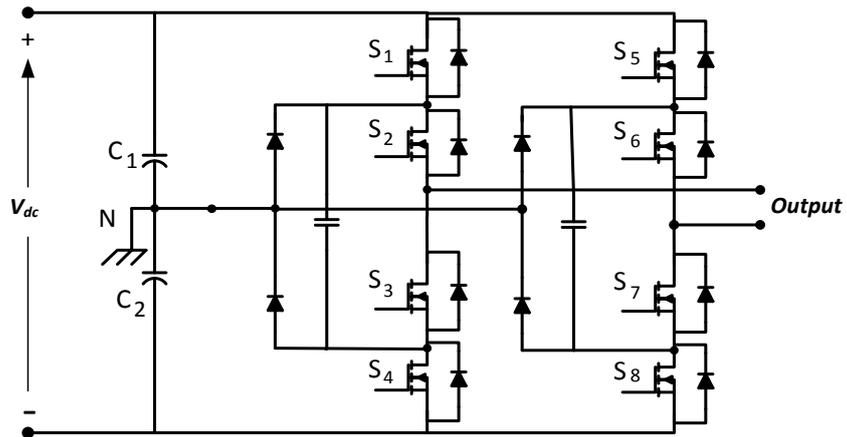
	วงจรอินเวอร์เตอร์ แบบสองระดับ	วงจรอินเวอร์เตอร์ แบบสามระดับ
1. แรงดันตกคร่อมสวิตช์ ในช่วงของการหยุดนำกระแส	มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสวิตช์เท่ากับแรงดันไฟฟ้าขาเข้า	มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสวิตช์เพียงครึ่งเดียวแรงดันไฟฟ้าขาเข้า
2. รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์	แรงดันเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์มีเพียงสองระดับ ( $V_{dc}$ , $-V_{dc}$ ) ซึ่ง THDv เท่ากับ 48.3%	แรงดันเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์มีสามระดับ ( $V_{dc}/2$ , $-V_{dc}/2$ , $0$ ) ซึ่ง THDv เท่ากับ 30%
3. จำนวนสวิตช์ที่ใช้ใน 1 สวิตช์	ใช้สวิตช์จำนวน 2 ตัว	ใช้สวิตช์จำนวน 4 ตัว
4. ความสูญเสียกำลังไฟฟ้าเมื่อพิกัดกำลังไฟฟ้าเท่ากัน	สูญเสียกำลังน้อยกว่าเนื่องจากจำนวนอุปกรณ์น้อยกว่า	สูญเสียกำลังมากกว่าเนื่องจากจำนวนอุปกรณ์มากกว่า



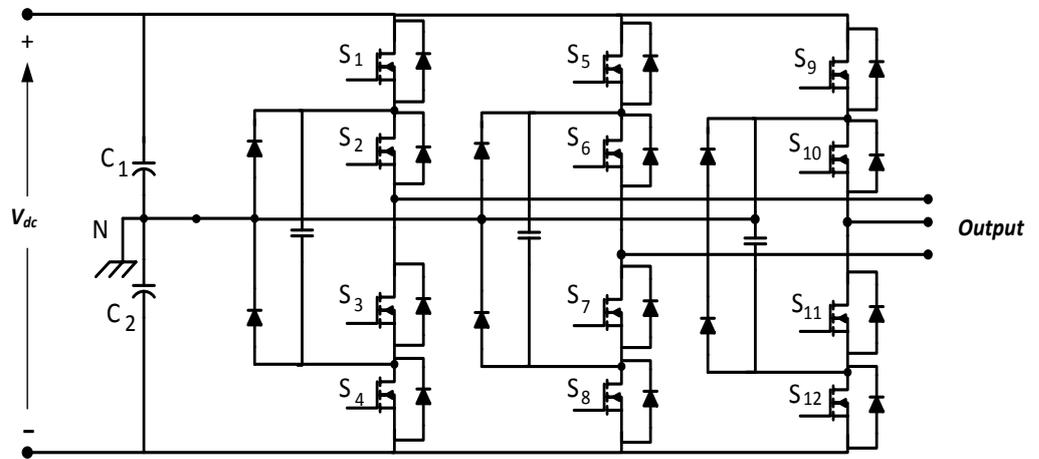
รูปที่ 2.1 วงจรอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบสามระดับ



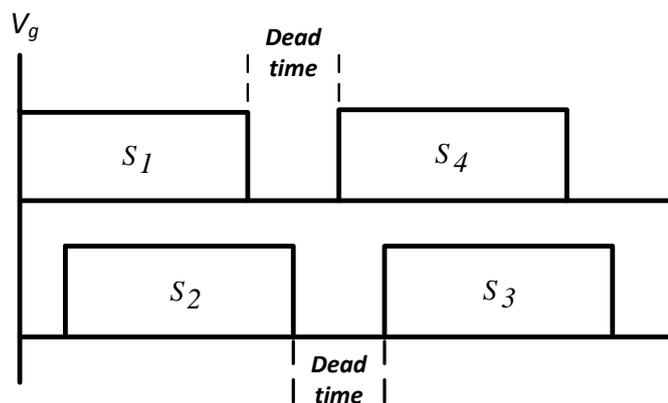
รูปที่ 2.2 วงจรอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบสองระดับ



รูปที่ 2.3 วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์แบบสามระดับ



รูปที่ 2.4 วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสแบบสามระดับ

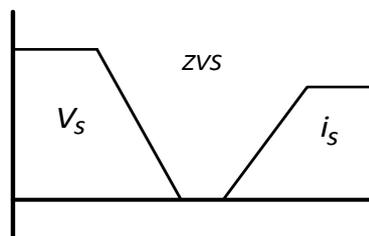


รูปที่ 2.5 ช่วงเวลาเดดไทม์ (Dead time) ของสวิตช์

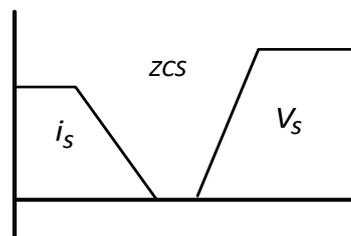
## 2.2 ทฤษฎีการสวิตช์ของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบต่างๆ

ในปัจจุบันนี้ได้มีเทคนิคการสวิตช์หลายวิธีในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับวงจรคอนเวอร์เตอร์ เนื่องจากวงจรคอนเวอร์เตอร์ส่วนใหญ่โดยเฉพาะวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีพิกัดกำลังสูงนั้นมักจะเกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในช่วงระหว่างการสวิตช์ (Switching losses) ซึ่งจะเรียกการสวิตช์ในลักษณะนี้ว่าการสวิตช์แบบฮาร์ดสวิตช์ (Hard switching) ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเทคนิคการสวิตช์เพื่อที่จะลดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในช่วงของการสวิตช์และเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรคอนเวอร์เตอร์ซึ่งเรียกว่าเทคนิคการสวิตช์แบบซอฟต์สวิตช์ (Soft switching) ยกตัวอย่างเช่นการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์ (Zero-voltage switching : ZVS) , การสวิตช์แบบกระแสศูนย์ (Zero-current switching : ZCS) และการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์ (Zero-voltage zero-current switching : ZVZCS) เป็นต้น โดยลักษณะของการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์ (ZVS) นั้นจะเกิดในช่วงระหว่างการเริ่มนำกระแส (Turn on) สามารถสังเกตได้เมื่อทำการวัดรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมสวิตช์และกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์จะพบว่าแรงดันตกคร่อมสวิตช์ตกลงเป็นศูนย์ก่อนที่จะกระแสจะเริ่มไหลผ่านสวิตช์ดังรูปที่ 2.6 (ก) ทำให้ไม่เกิดการช้อนทับกันระหว่างแรงดันและกระแสดังนั้นจึงไม่เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในช่วงของการเริ่มนำกระแส ส่วนลักษณะของการสวิตช์แบบกระแสศูนย์ (ZCS) นั้นจะเกิดในช่วงระหว่างการหยุดนำกระแส (Turn off) โดยรูปคลื่นกระแสจะลดลงจนเป็นศูนย์ก่อนที่จะมีแรงดันตกคร่อมสวิตช์เกิดขึ้นดังนั้นจึงไม่เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในช่วงของการหยุดนำกระแส ซึ่งแสดงได้รูปที่ 2.6 (ข)

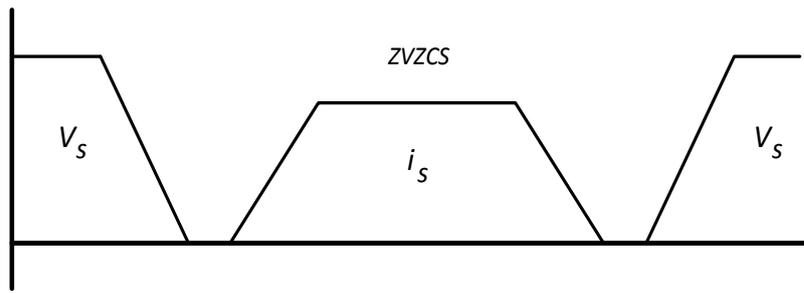
การสวิตช์แบบแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์ (ZVZCS) เป็นการนำเทคนิคการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์ (ZVS) และแบบกระแสศูนย์ (ZCS) รวมเข้าด้วยกันดังนั้นจึงทำให้ไม่เกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าทั้งในช่วงของการเริ่มนำกระแส (Turn on) และในช่วงของการหยุดนำกระแส (Turn off) ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.6 (ค) ส่วนในรูปที่ 2.7 คือลักษณะการสวิตช์แบบฮาร์ดสวิตช์



(ก)

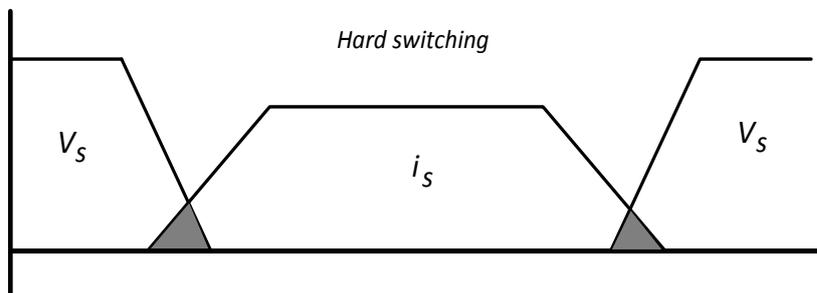


(ข)



(ค)

รูปที่ 2.6 ลักษณะการสวิตช์แบบซอฟต์สวิตช์

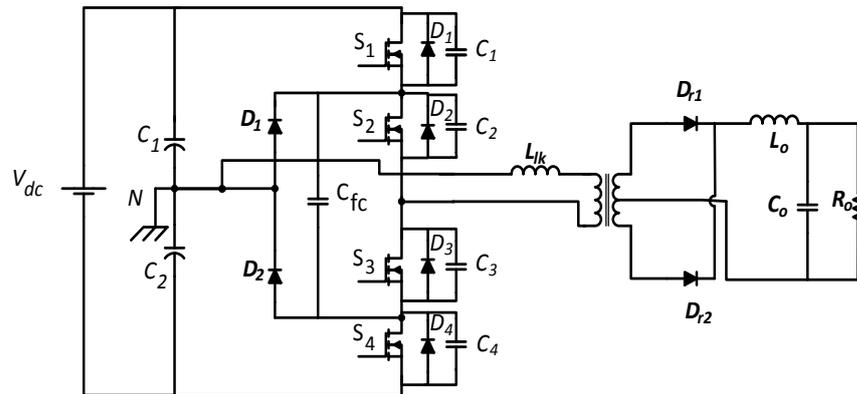


รูปที่ 2.7 ลักษณะการสวิตช์แบบฮาร์ดสวิตช์

### 2.3 วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีการสวิตช์แบบซอฟต์สวิตช์

เทคนิคการสวิตช์แบบซอฟต์สวิตช์ได้มีใช้งานกันอย่างแพร่หลายในหัวข้อนี้จะได้ทำการนำเสนอวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสามระดับที่ใช้เทคนิคการสวิตช์แบบซอฟต์สวิตช์ด้วยวิธีการต่างๆ ซึ่งจะช่วยทำให้วงจรคอนเวอร์เตอร์นั้นทำงานได้ที่ความถี่สูงและกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น โดยวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่จะได้กล่าวถึงนั้นจะใช้สัญญาณควบคุมสวิตช์พีดับบลิวเอ็มแบบที่มีการเลื่อนเฟส (Phase-shift Pulse width modulation)

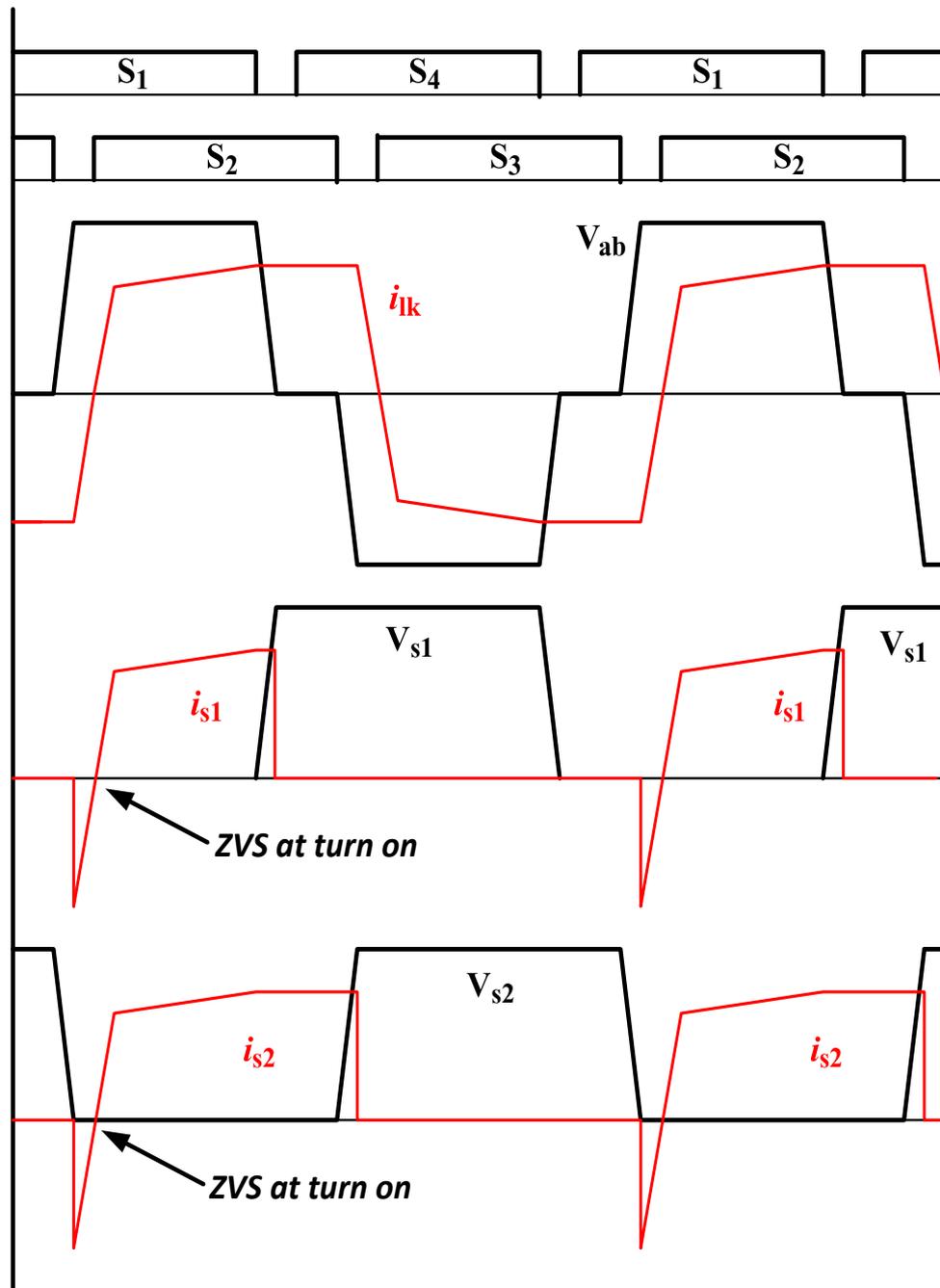
### 2.3.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบสามระดับโดยใช้เทคนิคการสวิตช์แบบ ZVS



รูปที่ 2.8 วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบสามระดับ

วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์สามระดับแบบ ZVS สามารถแสดงดังรูปที่ 2.8 โดยวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบนี้จะทำงานโดยใช้สัญญาณควบคุม PWM แบบเลื่อนเฟส และเกิดการ ทำงานแบบ ZVS ในขณะ turn on โดยใช้พลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล (leakage inductance :  $L_{lk}$ ) ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ในการดิซชาร์จตัวเก็บประจุภายในสวิตช์และชาร์จสวิตช์อีกตัวที่เป็นคู่สวิตช์ของกันและกัน ( $S_1$  คู่กับ  $S_4$  และ  $S_2$  คู่กับ  $S_3$ ) ผ่านทางตัวเก็บประจุปลายอิ่ง  $C_{fc}$  โดยการดิซชาร์จนี้จะเกิดในช่วงการพรีวิล กระแสและแรงดันในด้านปฐมภูมิจะแสดงดังรูปที่ 2.9 สวิตช์  $S_2$  และไดโอด  $D_1$  จะนำกระแสหลังจากที่สวิตช์  $S_1$  turn off ภายใต้สภาวะฮาร์ดสวิตซ์ซึ่ง โดยจะเกิดความสูญเสียปริมาณเล็กน้อย เนื่องจาก  $C_1$  จะประพดีตัวคล้ายกับ turn off snubber ต่อมาสวิตช์  $S_2$  จะถูก turn off ในลักษณะคล้ายกับสวิตช์  $S_1$  โดยกระแสปฐมภูมิชาร์จประจุเข้าสู่  $C_2$  และจะดิซชาร์จประจุ  $C_3$  จากนั้นจะเกิดการพรีวิลลิ่งของไดโอด  $D_{r1}$  และ  $D_{r2}$  หลังจากสิ้นสุดโหมดของการพรีวิลลิ่ง สวิตช์  $S_3, S_4$  จะสามารถ turn on ได้ภายใต้เงื่อนไขการทำงานแบบ ZVS ได้ อย่างไรก็ตามสวิตช์  $S_3, S_4$  จะสามารถ turn on ในภายใต้เงื่อนไขการทำงานแบบ ZVS ได้เมื่อพลังงานที่สะสมอยู่ใน leakage inductance มากกว่าพลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเก็บประจุแผง  $C_3$  และ  $C_4$  ดังนั้น  $C_3$  และ  $C_4$  จะต้องทำการดิซชาร์จอย่างสมบูรณ์ ก่อนที่สวิตช์  $S_3$  และ  $S_4$  จะเริ่มนำกระแส

ข้อเสียของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ ZVS นั่นคือ จะเกิดกระแสไหลวนในอุปกรณ์สวิตช์และหม้อแปลงในช่วงพรีวิลลิ่ง ทำให้มีการสูญเสียเกิดขึ้นในวงจรคอนเวอร์เตอร์



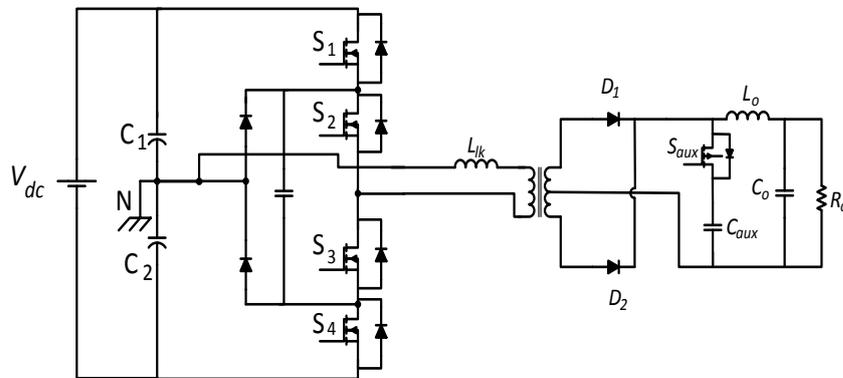
รูปที่ 2.9 รูปคลื่นของวงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบสามระดับที่ทำงานแบบ ZVS

### 2.3.2 วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบสามระดับโดยใช้เทคนิคการสวิตช์แบบ ZVZCS

จากหัวข้อที่ 2.3.1 พบว่าวงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบสามระดับที่ทำงานแบบ ZVS นั้นยังมีข้อเสียบางประการเช่นเกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในช่วงของการหยุดนำกระแสของอุปกรณ์สวิตช์ในวงจรและยังมีความสูญเสียกำลังไฟฟ้าซึ่งเกิดจากกระแสไหลวนเป็นต้น ดังนั้นเพื่อที่จะต้องการลดความสูญเสียที่เกิดขึ้นดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนาเทคนิคการสวิตช์แบบ ZVZCS โดยหลักการการทำงานจะมีลักษณะคล้ายกันกับวงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบ ZVS แต่จะแตกต่างกันที่

จะมีการลดช่วงเวลาในการพรีวิลของกระแสปฏุมุมิลง ซึ่งเทคนิคที่ได้นำมาใช้มีด้วยกันหลายเทคนิค ซึ่งจะได้ทำการนำเสนอ ดังนี้

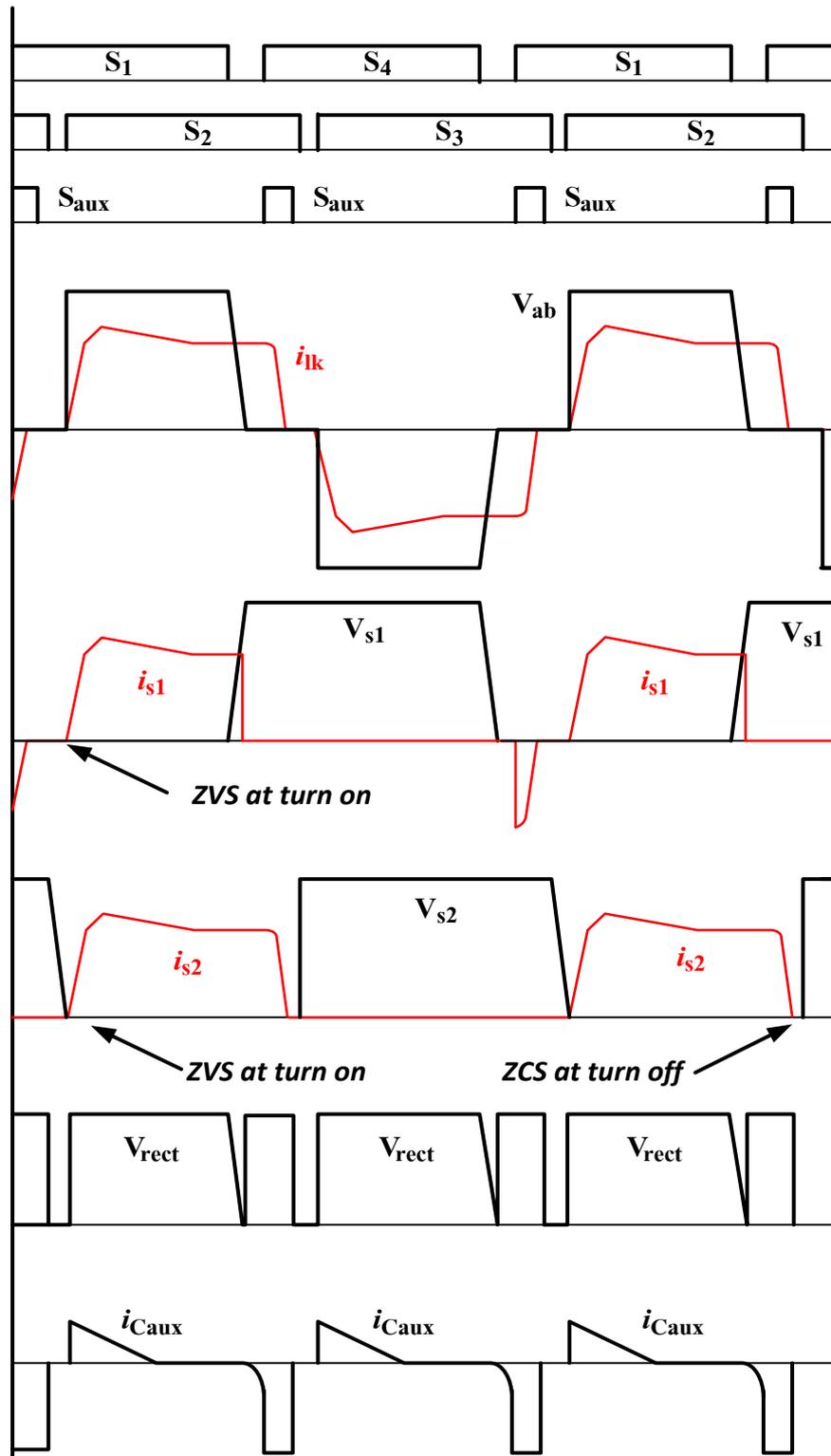
### 2.3.2.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบ ZVZCS โดยใช้ Auxilaly switch



รูปที่ 2.10 วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบ ZVZCS โดยใช้เทคนิค active clamping

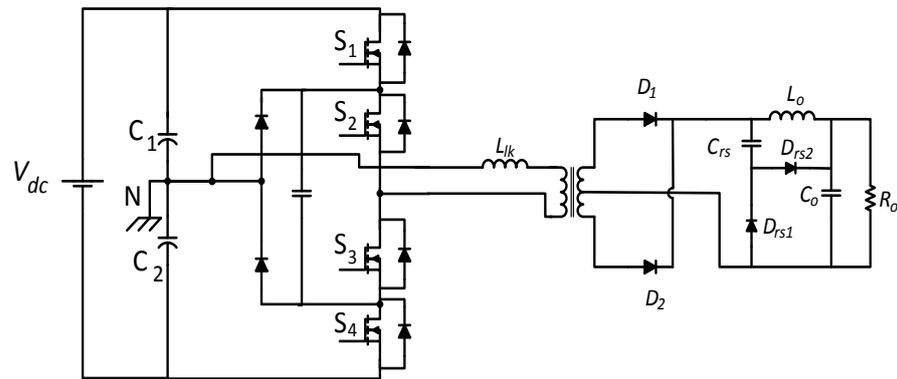
วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบ ZVZCS โดยใช้เทคนิค active clamping [10] สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าที่ด้านทุติยภูมิมีการต่อสวิตช์ และตัวเก็บประจุ ( $C_{aux}$ ) ซึ่งเรียกรวมกันว่า active clamping ซึ่งเทคนิคนี้สามารถทำให้เกิดลักษณะการทำงานภายใต้เงื่อนไขกระแสศูนย์ (ZCS) กับสวิตช์วงใน ( $S_2, S_3$ ) ได้ โดยในช่วงโหมดของการพรีวิลของกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงนั้น สวิตช์ ( $S_{aux}$ ) จะถูกสั่งให้เกิดการทำงาน (Turn on) ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ ( $C_{aux}$ ) ส่งผลต่อตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล ( $L_{lk}$ ) ของหม้อแปลง ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้กระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงนั้นลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ จึงทำให้เทคนิคนี้ช่วยลดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในช่วงหยุดนำกระแสของสวิตช์วงในและความสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนได้ แต่อย่างไรก็ตามที่สวิตช์วงนอก ( $S_1, S_4$ ) ยังเกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในช่วงหยุดนำกระแสอยู่และทำงานภายใต้เงื่อนไขการสวิตช์แบบ ZVS เพียงอย่างเดียวเท่านั้นต่างจากสวิตช์วงในที่สามารถทำงานได้ภายใต้เงื่อนไข ZVZCS ดังนั้นสวิตช์วงใน ( $S_2, S_3$ ) จึงไม่เกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการสวิตช์ โดยรูปคลื่นต่างๆที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.11

ข้อเสียของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบนี้คือ จำเป็นต้องมีการใช้สวิตช์เพิ่มและต้องมีชุดควบคุมเพิ่มเพื่อใช้กับชุด Active clamping จึงทำให้ต้นทุนสูงขึ้น



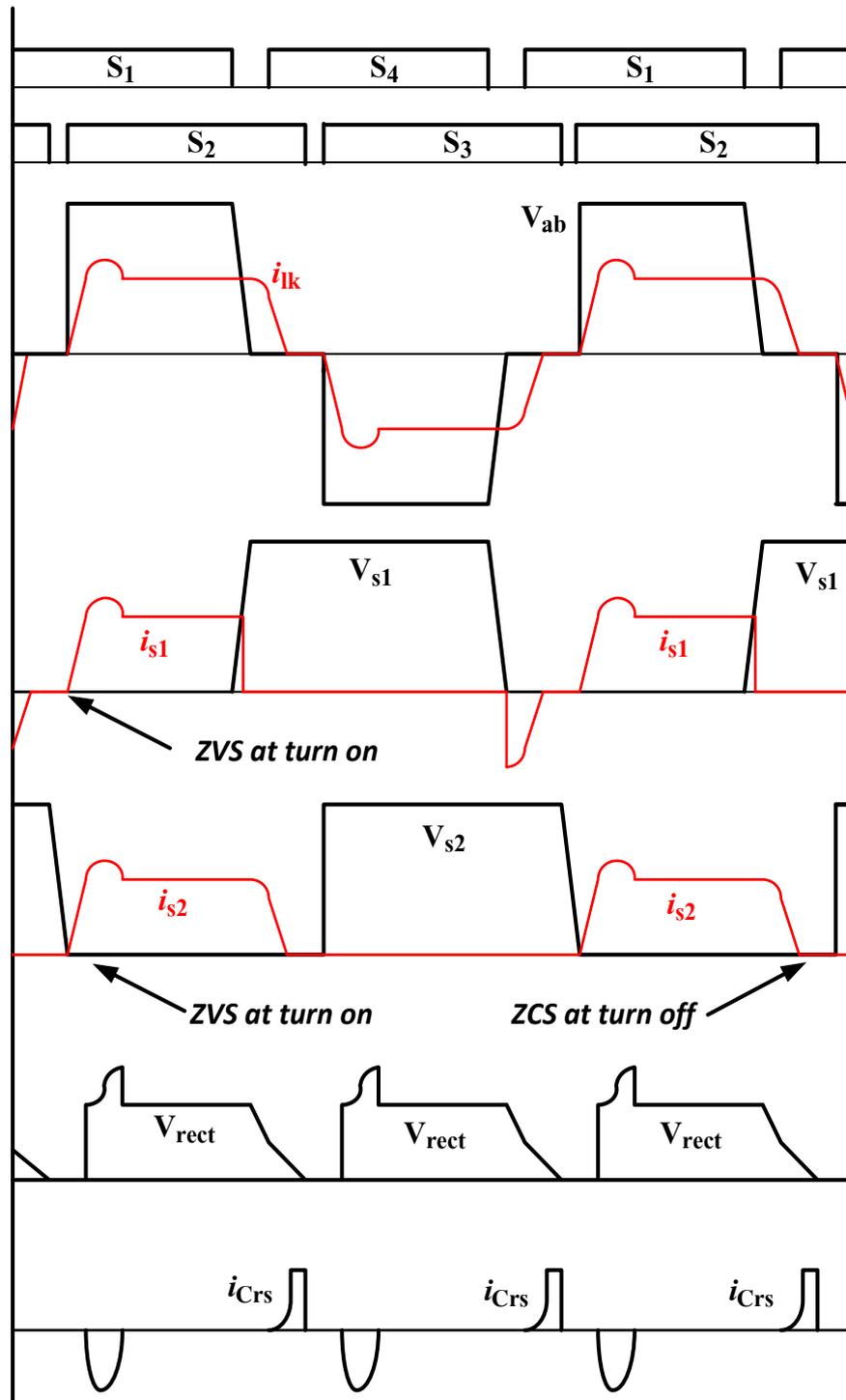
รูปที่ 2.11 รูปคลื่นของวงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ที่ทำงานแบบ ZVZCS โดยใช้ active clamping

### 2.3.2.2 วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบ ZVZCS โดยใช้ passive clamping



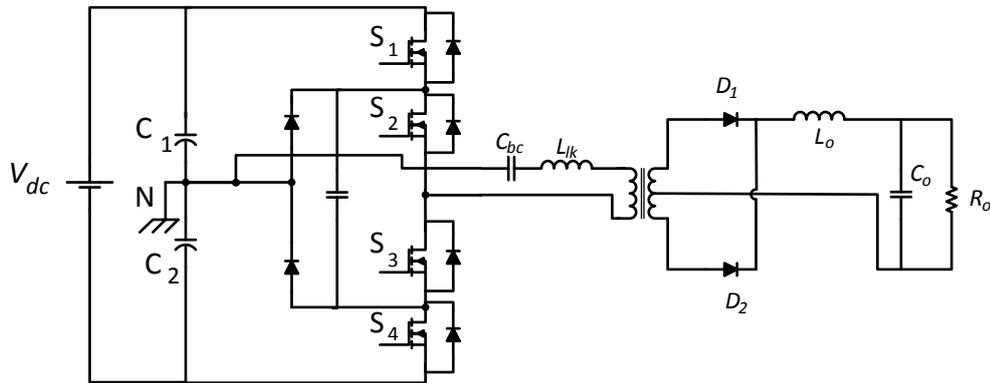
รูปที่ 2.12 วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบ ZVZCS โดยใช้เทคนิค passive clamping

วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบ ZVZCS โดยใช้เทคนิค passive clamping [11] สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าที่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ามีการต่อไดโอด  $D_{rs1}$ ,  $D_{rs2}$  และตัวเก็บประจุ  $C_{rs}$  ซึ่งจะเรียกอุปกรณ์เหล่านี้รวมกันว่า passive clamping ซึ่งเทคนิคนี้สามารถทำให้เกิดลักษณะการทำงานภายใต้เงื่อนไขกระแสศูนย์ (ZCS) กับสวิตช์วงใน ( $S_2$ ,  $S_3$ ) ได้ โดยในช่วงโหมดของการฟรีวิลของกระแสต้านปฐมภูมิของหม้อแปลงนั้น ไดโอด ( $D_{rs1}$ ) จะถูกไปอัสให้เกิดการทำงาน (Turn on) ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ ( $C_{rs}$ ) ส่งผลต่อตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล ( $L_{lk}$ ) ของหม้อแปลง กล่าวคือตัวเก็บประจุ ( $C_{rs}$ ) จะส่งผลทำให้แรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงนั้นลดลงด้วยอัตราที่ช้ากว่าแรงดันปฐมภูมิของหม้อแปลงทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าของทั้งสองฝั่งของหม้อแปลง ความแตกต่างของแรงดันที่เกิดขึ้นนี้จะตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล ( $L_{lk}$ ) ของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้กระแสต้านปฐมภูมิของหม้อแปลงนั้นลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ จึงทำให้เทคนิคนี้ช่วยลดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในช่วงหยุดนำกระแสของสวิตช์วงในและความสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนได้ แต่อย่างไรก็ตามที่สวิตช์วงนอก ( $S_1$ ,  $S_4$ ) ยังเกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในช่วงหยุดนำกระแสอยู่และทำงานภายใต้เงื่อนไขการสวิตช์แบบ ZVS เพียงอย่างเดียวเท่านั้นต่างจากสวิตช์วงในที่สามารถทำงานได้ภายใต้เงื่อนไข ZVZCS ดังนั้นสวิตช์วงใน ( $S_2$ ,  $S_3$ ) จึงไม่เกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการสวิตช์ โดยรูปคลื่นต่างๆที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.13 แต่ยังคงมีข้อเสียคือจะเกิดแรงดันเกินและแรงดันเกิน (Overshoot) ที่ไดโอดเรียงกระแสอันเนื่องมาจากการรีโซแนนซ์ของพารามิเตอร์ที่ต่อเข้าไปในวงจร



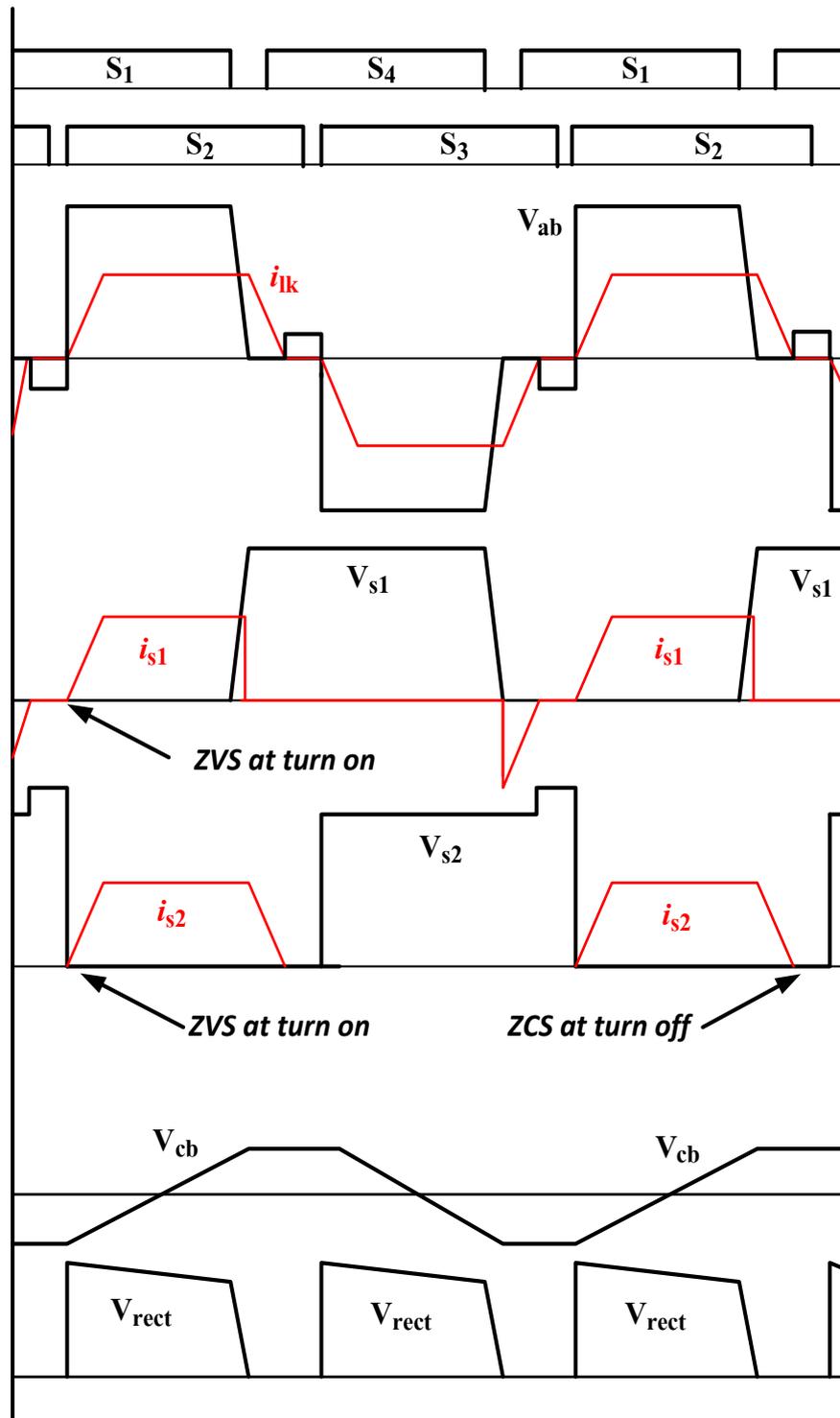
รูปที่ 2.13 รูปคลื่นของวงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ที่ทำงานแบบ ZVZCS โดยใช้ passive clamping

### 2.3.2.3 วงจรกึ่งบริดจ์แบบ ZVZCS โดยใช้ DC-blocking capacitor



รูปที่ 2.14 วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบ ZVZCS โดยใช้เทคนิค DC-blocking capacitor

วงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบ ZVZCS โดยใช้เทคนิค DC-blocking capacitor [12] สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าที่ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ามีการต่อตัวเก็บประจุบล็อกกิ้ง ( $C_{bc}$ ) ซึ่งเทคนิคนี้สามารถทำให้เกิดลักษณะการทำงานภายใต้เงื่อนไขกระแสศูนย์ (ZCS) กับสวิตช์ช่วงใน ( $S_2, S_3$ ) ได้เช่นเดียวกับกับเทคนิคที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ โดยในช่วงโหมดของการ ฟรีวิลของกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงนั้น แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุบล็อกกิ้ง ( $C_{bc}$ ) ส่งผลต่อตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล ( $L_{lk}$ ) ของหม้อแปลง กล่าวคือแรงดันของตัวเก็บประจุ ( $C_{bc}$ ) จะตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล ( $L_{lk}$ ) ของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้กระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงนั้นลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ จึงทำให้เทคนิคนี้ช่วยลดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในช่วงหยุดนำกระแสของสวิตช์ช่วงในและความสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนได้ แต่สวิตช์ช่วงนอก ( $S_1, S_4$ ) ยังคงเกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในช่วงหยุดนำกระแสอยู่และทำงานภายใต้เงื่อนไขการสวิตช์แบบ ZVS เพียงอย่างเดียวเท่านั้นต่างจากสวิตช์ช่วงในที่สามารถทำงานได้ภายใต้เงื่อนไข ZVZCS ดังนั้น สวิตช์ช่วงใน ( $S_2, S_3$ ) จึงไม่เกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการสวิตช์ โดยรูปคลื่นต่างๆที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.15 ข้อดีของเทคนิคนี้คือมีความง่ายในการออกแบบประหยัดต้นทุน เพราะไม่จำเป็นต้องใช้ชุดคอนโทรลเพิ่มเติม แต่ก็ยังมีข้อเสียบางประการคือ การใช้ DC-blocking capacitor จะทำให้เกิด voltage drop ขึ้นที่ตัวเก็บประจุบล็อกกิ้งทำให้แรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ามักลดลงจึงทำให้มีผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของวงจรคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.15 รูปคลื่นของวงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ที่ทำงานแบบ ZVZCS โดยใช้ DC-blocking capacitor

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบเทคนิคการสวิตช์คอนเวอร์เตอร์ แบบฮาร์ดสวิตช์ , ZVS และ ZVZCS

เทคนิคการสวิตช์	ข้อดี	ข้อเสีย
ฮาร์ดสวิตช์	1. ได้พิกัดกำลังเอาท์พุทมาก	1. เกิดกำลังการสูญเสียที่อุปกรณ์สวิตช์ 2. อุปกรณ์ต้องทนพิกัดสูง 3. ส่วนการระบายความร้อนมีขนาดใหญ่
ZVS	1. ลดกำลังการสูญเสียขณะ turn on สวิตช์ได้ 2. ราคาต้นทุนต่ำกว่าแบบฮาร์ดสวิตช์	1. ไม่สามารถลดกำลังขณะสูญเสีย turn off ได้ 2. กระแสไหลวนในอุปกรณ์สวิตช์และหม้อแปลงในช่วงฟรีวีลิ่งจะมีค่าสูง
ZVZCS	1. ลดกำลังขณะสูญเสียได้ทั้ง turn on และ turn off ทำให้ประสิทธิภาพสูง 2. ส่วนระบายความร้อนมีขนาดเล็ก 3. มีเทคนิคการสวิตช์หลายรูปแบบให้เลือกใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะงาน	1. วงจรมีความซับซ้อนมากขึ้น

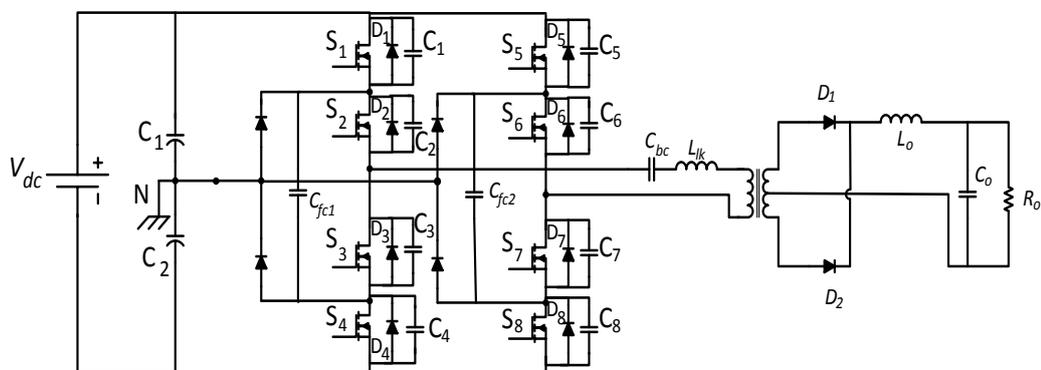
วงจร ZVZCS แบบต่างๆ จะมีข้อดีที่คล้ายคลึงกันดังตารางที่ 2.2 แต่จะมีข้อบกพร่องที่แตกต่างกันดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบข้อบกพร่อง ZVZCS แต่ละแบบ

วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบที่มี active clamping ด้านทุติยภูมิ	วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบที่มี passive clamping ด้านทุติยภูมิ	วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบมี DC-blocking capacitor และ ตัวเหนี่ยวนำแบบอิมิตัว
1. มีการใช้สวิตช์เพิ่มและต้องมีชุดควบคุมเพิ่มเพื่อใช้กับชุด active clamping จึงทำให้ต้นทุนสูงขึ้น 2. ต้องใช้ Caux ที่มีขนาดใหญ่เพื่อที่จะจ่ายกระแสให้ตัวเหนี่ยวนำฟิลเตอร์ได้เพียงพอ	1. ต้องมีการเพิ่มไดโอดและตัวเก็บประจุเข้าไปในวงจรด้านทุติยภูมิแต่ต้นทุนต่ำกว่าแบบ active clamping 2. แร่งดันเค้นและแรงดันเกินมีค่าสูงที่ไดโอดเรียงกระแสเป็นผลมาจากการรีโซแนนซ์	1. มีการใช้ตัวเก็บประจุ DC-blocking capacitor ทำให้เกิด voltage drop ที่ตัวเก็บประจุ

จากตารางที่ 2.3 ข้างต้นจะพบว่า มีเทคนิคหลายแบบที่ทำให้เกิดการทํางานของสวิตช์แบบแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์ (ZVZCS) โดยในงานวิจัยนี้จะทำการเลือกใช้เทคนิคของ DC-Blocking capacitor ในการทำให้เกิดการสวิตช์แบบกระแสศูนย์ เนื่องจากมีความง่ายต่อการออกแบบและค่าของ DC-Blocking capacitor ยังมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการลดลงของกระแสป้อนหรือที่เรียกว่าช่วงเวลารีเซ็ต “Reset time” ซึ่งมีความน่าสนใจต่อการทํางานวิจัย แต่เนื่องจากวงจรคอนเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบสามระดับที่ได้ยกตัวอย่างนั้น ยังไม่สามารถตอบสนองต่อลักษณะงานที่ต้องการกำลังงานไฟฟ้าที่สูงได้ ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้งจรคอนเวอร์เตอร์สามารถทํางานได้ที่พิกัดกำลังงานไฟฟ้าที่สูงขึ้น จึงได้มีการนำเสนอวงจรคอนเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์แบบสามระดับที่ใช้การสวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์ขึ้น

#### 2.3.2.4 วงจรเต็มบริดจ์แบบ ZVZCS โดยใช้ DC-blocking capacitor



รูปที่ 2.16 วงจรคอนเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์แบบ ZVZCS โดยใช้เทคนิค DC-blocking capacitor

วงจรคอนเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์แบบสามระดับ [13] สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าจะประกอบได้ด้วยกิ่งสวิตช์สองกิ่งคือกิ่งสวิตช์หน้า (leading switches) และกิ่งสวิตช์หลัง (lagging switches) ซึ่งทั้งสองกิ่งจะมีลักษณะคล้ายกันโดยประกอบไปด้วยสวิตช์กิ่งละ 4 ตัวคือ S1-S4 สำหรับสวิตช์กิ่งหน้าและ S5-S8 สำหรับสวิตช์กิ่งหลัง ซึ่งลักษณะการทํางานของวงจรเต็มบริดจ์นี้จะมีลักษณะคล้ายคลึงกันกับวงจรแบบกึ่งบริดจ์แต่จะสามารถทํางานที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงกว่าเป็นสองเท่า โดยเทคนิคที่ใช้ทำให้เกิดการทํางานภายใต้เงื่อนไข ZVZCS คือการใช้ DC-blocking capacitor โดยลักษณะรูปคลื่นของการทำงานของวงจรสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.17

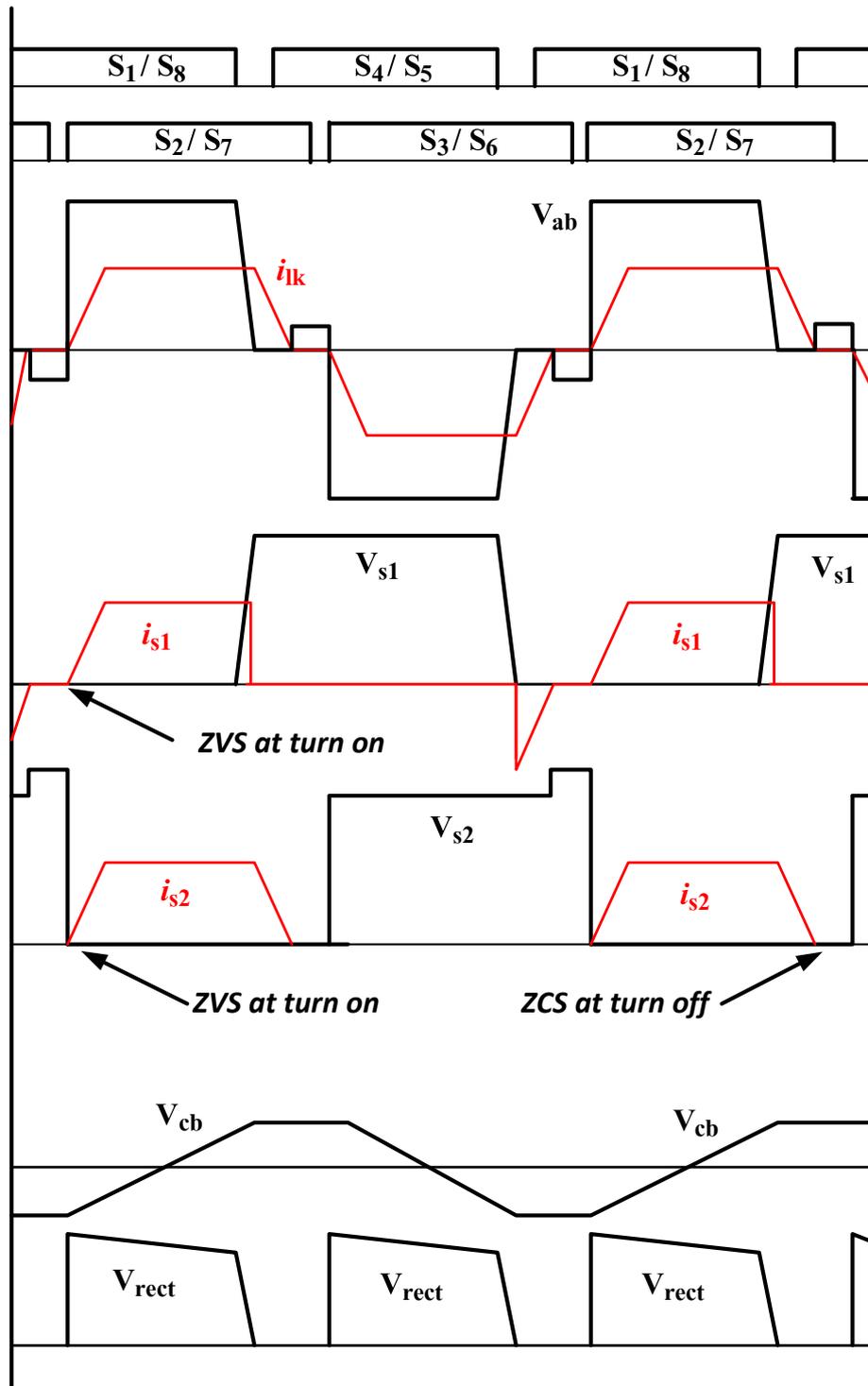
นอกจากนี้ยังพบอีกว่าช่วงเวลารีเซ็ต “Reset time” ของกระแสต้านป้อนมีนั้นสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยขึ้นอยู่กับค่าของตัวเก็บประจุบล็อกกิ่ง (DC-blocking capacitor) ซึ่งสามารถที่จะหาค่าของช่วงเวลารีเซ็ตได้จากสมการที่ 2.1 หากค่าตัวเก็บประจุบล็อกกิ่ง ( $C_{bc}$ ) มีค่ามากทำให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุบล็อกกิ่ง ( $V_{bc}$ ) มีค่าน้อยเมื่อค่าแรงดัน  $V_{bc}$  มีค่าน้อยก็จะทำให้กระแสป้อนของหม้อแปลงไฟฟ้าลดลงค่อนข้างช้าหมายความว่าเวลารีเซ็ตจะมีค่ามาก แต่ถ้าหากค่าตัวเก็บประจุบล็อกกิ่ง ( $C_{bc}$ ) มีค่าน้อยลงก็จะทำให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุบล็อกกิ่ง ( $V_{bc}$ ) มีค่ามากขึ้นเมื่อค่าแรงดัน  $V_{bc}$  มีค่ามากขึ้นก็จะทำให้กระแสป้อนของหม้อแปลงไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็วมากขึ้น

หมายความว่าเวลารีเซ็ตจะมีค่าน้อยลง ซึ่งช่วงเวลารีเซ็ตของกระแสปฐมภูมินั้นส่งผลต่อความสูญเสียในอุปกรณ์สวิตช์, ไดโอดและหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยเนื่องจากถ้าหากช่วงเวลารีเซ็ตมีค่ามากกระแสปฐมภูมินั้นก็จะไหลวนผ่านอุปกรณ์ภายในวงจรมากทำให้มีความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในช่วงฟรีวิลมากตามไปด้วยแต่ถ้าหากช่วงเวลารีเซ็ตมีค่าน้อยทำให้มีความสูญเสียในช่วงฟรีวิลน้อยลง การที่ใช้ค่าตัวเก็บประจุบล็อกกิ้ง ( $C_{bc}$ ) น้อยนั้นมีข้อดีตรงที่ทำให้ความสูญเสียในช่วงฟรีวิลน้อยลงแต่ก็มีข้อเสียตรงที่แรงดันที่ตัวเก็บประจุบล็อกกิ้ง ( $C_{bc}$ ) จะมีค่ามากขึ้นทำให้แรงดันไฟฟ้าขาเข้าหม้อแปลงมีค่าต่ำลงทำให้ส่งผลถึงประสิทธิภาพของวงจรคอนเวอร์เตอร์ด้วย ดังนั้นการออกแบบเพื่อค่าตัวเก็บประจุบล็อกกิ้งนั้นควรจะมีความเหมาะสมเนื่องจากต้องพิจารณาในเรื่องแรงดัน voltage drop ภายในตัวเก็บประจุด้วย

$$T_{reset} = \frac{L_{lk} \cdot i_{Peak}}{V_{cbP}} \quad (2.1)$$

โดยที่ค่า  $L_{lk}$  คือค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลงไฟฟ้า

$V_{cbP}$  คือแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุบล็อกกิ้งสูงสุด

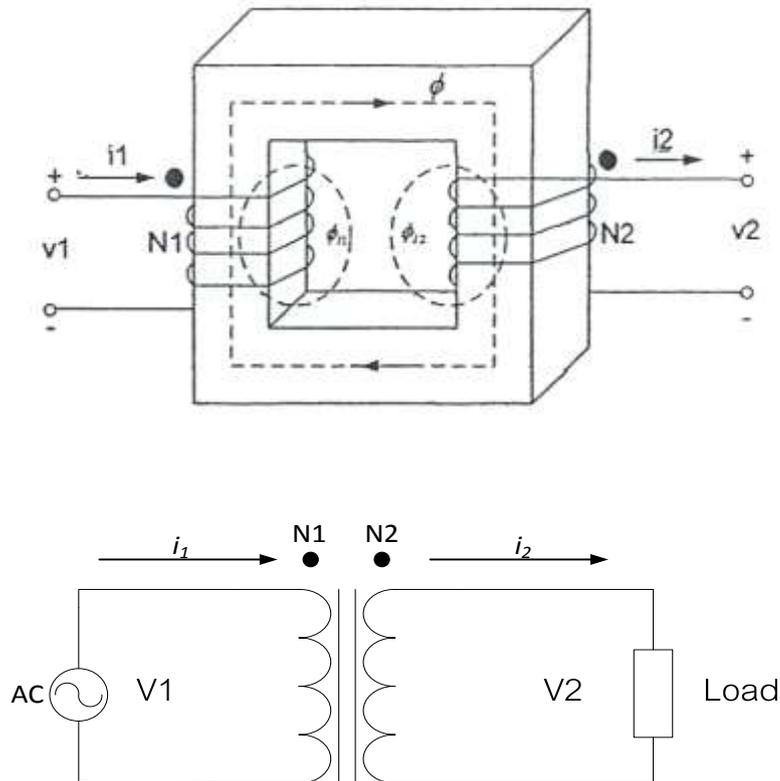


รูปที่ 2.17 รูปคลื่นของวงจรคอนเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์ที่ทำงานแบบ ZVZCS โดยใช้ DC-blocking capacitor

## 2.4 หลักการพื้นฐานของอุปกรณ์แม่เหล็ก

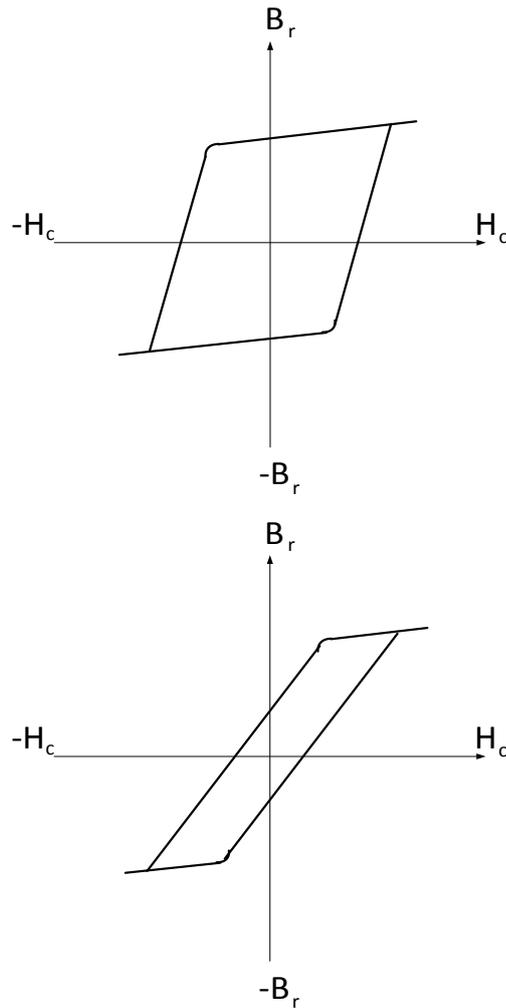
อุปกรณ์แม่เหล็กที่ใช้ในการทำวิจัยนี้ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง (high frequency transformer) และตัวเหนี่ยวนำ (inductor) ซึ่งแต่ละแบบมีรายละเอียดดังนี้

### 2.4.1 หม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 2.18 หม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงเป็นอุปกรณ์แม่เหล็กพื้นฐานที่ใช้ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า คุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าก็คือ จะต้องมีความซึมซาบได้สูง เพื่อลดค่าเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล และเพื่อให้ค่ากระแสทำแม่เหล็กมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ นอกจากนั้นค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจะต้องมีค่าต่ำ โดยที่สารแม่เหล็กที่นิยมใช้ทำเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าจะแสดงกราฟความสัมพันธ์ของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็ก (B-H curve) ให้มีลักษณะแคบเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากวงจรฮิสเตอร์ซิสติงแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 วงรอบฮิสเทอรีซิสสำหรับแม่เหล็กถาวรและสำหรับทำหม้อแปลงไฟฟ้า

#### 2.4.2 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงด้วยวิธีผลคูณพื้นที่ (High-Frequency Transformer Design Using Area Product Design)

หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงเป็นอุปกรณ์แม่เหล็กพื้นฐานที่ใช้ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า เช่น อินเวอร์เตอร์และแหล่งจ่ายกำลังสวิตชิง เป็นต้น สำหรับในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงโดยเฉพาะสำหรับแหล่งจ่ายกำลังสวิตชิง และด้วยหลักการพื้นฐานเดียวกันสามารถประยุกต์ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับงานอื่นๆได้ วงจรพื้นฐานที่ใช้ในแหล่งจ่ายกำลังสวิตชิงจะได้แก่

- (ก) วงจรฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ (Forward Converter)
- (ข) วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์และวงจรเต็มบริดจ์ (Half-Bridge and Full-Bridge Converter)
- (ค) วงจรพุช-พูลคอนเวอร์เตอร์ (Push Pull Converter)
- (ง) วงจรฟลายแบ็กคอนเวอร์เตอร์ (Fly Back Converter)

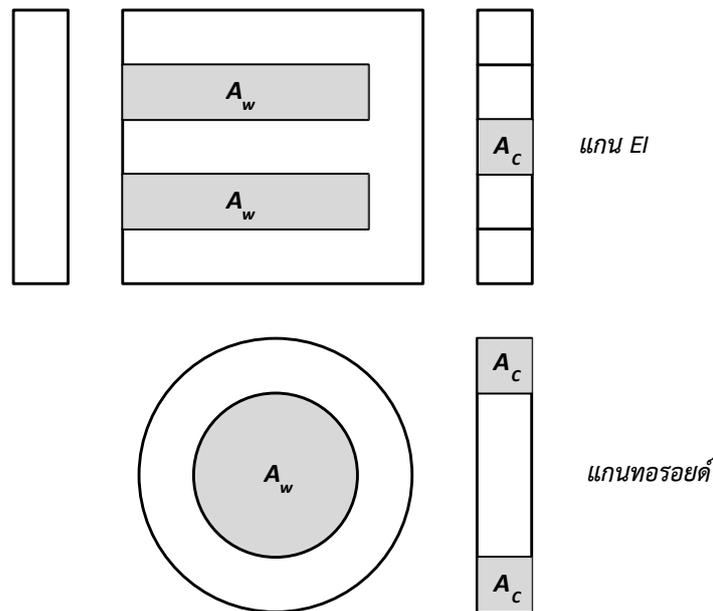
โดยทั่วไปแล้ว ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจะนิยมใช้วิธีผลคูณพื้นที่ [14] (Area Product) ซึ่งนิยามไว้ในสมการดังนี้

$$A_p = \text{area product} = \text{core cross section } (A_c) \times \text{window area } (A_w) \quad (2.2)$$

เมื่อ  $A_c$  หมายถึงพื้นที่หน้าตัดแกน (core area)

$A_w$  หมายถึงพื้นที่ภายในกรอบว่างของแกน (window area)

เมื่อ  $A_c$  และ  $A_w$  เป็นพื้นที่ของแกนเหล็กเฟอร์ไรต์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ตัวอย่างพื้นที่  $A_c$  และ  $A_w$  สำหรับแกนแม่เหล็กแบบต่างๆ

จากสมการแรงดันเหนี่ยวนำย้อนกลับของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$E_{rms} = K_f \cdot E_{av} = 4K_f \cdot f \cdot B_m \cdot A_c \quad (2.3)$$

โดยที่  $K_f$  มีค่า 1 สำหรับกรณีรูปคลื่นแรงดันสี่เหลี่ยม

$K_f$  มีค่า 1.11 สำหรับกรณีรูปคลื่นแรงดันไซน์

$N$  หมายถึง จำนวนรอบขดลวด

$f$  หมายถึงความถี่ (Hz)

$B_m$  หมายถึงค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด ( $wb/m^2$ )

$A_c$  หมายถึงพื้นที่หน้าตัดของแกน ( $m^2$ )

จะได้ค่าจำนวนรอบด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิมีค่าเท่ากับ

$$N_1 = \frac{E_1}{4K_f \cdot A_c \cdot B_m \cdot f} \quad (2.4)$$

$$N_2 = \frac{E_2}{4K_f \cdot A_c \cdot B_m \cdot f} \quad (2.5)$$

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดมีค่าเท่ากับ

$$I = J \cdot a_{wire} \quad (2.6)$$

โดยที่  $J$  หมายถึง ความหนาแน่นกระแส ( $A/m^2$ )

$a_{wire}$  หมายถึง พื้นที่หน้าตัดของตัวนำซึ่งกระแสไหลผ่าน ( $m^2$ )

กำหนดให้ขดลวดตัวนำด้านปฐมภูมิ ( $N_1$ ) มีพื้นที่หน้าตัดของตัวนำทั้งหมดจะมีค่าเท่ากับ  $a_1$  และขดลวดตัวนำด้านทุติยภูมิ ( $N_2$ ) มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ  $a_2$  ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดของตัวนำทั้งหมดจะมีค่าเท่ากับ  $N_1 a_1 + N_2 a_2$  โดยปกติแล้วพื้นที่หน้าตัดของตัวนำทั้งหมดควรจะพอดีกับพื้นที่หน้าต่าง ( $Window\ area : K_w$ ) แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติแล้วขดลวดไม่ได้ประกอบด้วยตัวนำเท่านั้น แต่จะประกอบด้วยอย่างอื่นอีก เช่น ฉนวนของขดลวดกระดาฉนวนระหว่างขดลวดและช่องว่างอากาศ เพื่อระบายความร้อน เป็นต้น ดังนั้นถ้า  $K_w$  หมายถึง Window utilization ซึ่งเป็นแฟกเตอร์ที่ใช้ในการชดเชยผลดังกล่าวและโดยทั่วไปจะมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$K_w \cdot A_w = N_1 \cdot a_1 + N_2 \cdot a_2 \quad (2.7)$$

เมื่อแทนค่า  $a_{wire} = I/J$  ลงในสมการที่ (2.7) จะได้ว่า

$$K_w \cdot A_w \cdot J = N_1 \cdot I_1 + N_2 \cdot I_2 \quad (2.8)$$

โดยที่  $I_1$  หมายถึง ค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของกระแสปฐมภูมิ (A)

$I_2$  หมายถึง ค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของกระแสทุติยภูมิ (A)

$N_1$  หมายถึง จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ

$N_2$  หมายถึง จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ

แทนค่า  $N_1$  และ  $N_2$  ในสมการที่ (2.4), (2.5) ลงในสมการที่ (2.8) จะได้

$$K_w \cdot A_w \cdot J = \frac{E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2}{4K_f \cdot A_c \cdot B_m \cdot f} \quad (2.9)$$

$$A_p = A_c \cdot A_w = \frac{E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2}{4K_f \cdot K_w \cdot J \cdot B_m \cdot f} \quad (2.10)$$

$K_f$  หมายถึง Form factor (มีค่าเท่ากับ 1.11 สำหรับรูปคลื่นสัญญาณไซน์และเท่ากับ 1 สำหรับรูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยม)

$K_w$  หมายถึง Window utilization factor

โดยทั่วไปทางปฏิบัติจะกำหนดให้  $K_w$  มีค่าประมาณเท่ากับ 0.3-0.4 และค่าความหนาแน่นกระแส ( $J$ ) จะมีค่าประมาณเท่ากับ 3 - 5 A/mm<sup>2</sup>

ในการเลือกแกนแม่เหล็กที่มีใช้อยู่ทั่วไปให้เหมาะสมกับการใช้งานจะทำได้โดยการคำนวณหา ค่า  $A_p$  จากสมการที่ (2.10) เพื่อเปรียบเทียบกับค่า  $A_p$  ที่กำหนดโดยบริษัทผู้ผลิตแกนจากนั้นทำการเลือกแกนเหล็กขนาดที่มีค่า  $A_p$  ให้มากกว่า  $A_p$  ที่ได้จากการคำนวณ

### 2.4.3 ตัวเหนี่ยวนำ

ตัวเหนี่ยวนำมีหน้าที่เก็บสะสมพลังงานในวงจรไฟฟ้า คุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำที่ดัดนั้นคือ กราฟความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็กต้องมีความเป็นเชิงเส้น (linearity) อย่างไรก็ตามสารเฟอร์โรแมกเนติกจะมีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นแต่มีค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็กสูง ในขณะที่แกนอากาศหรือแกนที่ทำจากสารที่ไม่ใช่เฟอร์โรแมกเนติก ค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็กมีค่า  $\mu = \mu_0$  ซึ่งจะมีค่าความเป็นเชิงเส้นสูง แต่จะทำให้ได้ค่าเหนี่ยวนำต่ำ และด้วยข้อจำกัดดังกล่าวจึงทำให้เป็นการยากในทางปฏิบัติที่จะออกแบบตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าความเหนี่ยวนำคงที่ได้ อย่างไรก็ตามวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวในทางปฏิบัติก็คือเพิ่มช่องอากาศในแกนแม่เหล็ก ซึ่งจะมีผลทำให้แกนแม่เหล็กที่ทำจากสารเฟอร์โรแมกเนติกให้ค่าความซึมซาบได้ที่สูง ในขณะที่ช่องอากาศจะมีผลทำให้ค่าความซึมซาบมีค่าคงที่โดยที่ช่องอากาศที่เพิ่มเข้าไปในแกนเฟอร์ไรต์ นอกจากจะใช้ในการสะสมพลังงานแม่เหล็กเท่านั้น แต่ยังทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมีความเป็นเชิงเส้นอีกด้วย นอกจากสารเฟอร์โรแมกเนติกแล้ว ยังมีสารแกนโลหะแบบผง (powder metal core) ซึ่งมีสารแม่เหล็กที่มีช่องอากาศกระจายอยู่ภายใน ซึ่งจะให้ผลเหมือนกับการเพิ่มช่องอากาศเข้าไปในแกนเฟอร์ไรต์นั่นเอง

## 2.5 วงจรกรอง LC ฟิลเตอร์

การแปลงกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงหรือวงจรเรียงกระแส แรงดันที่ผ่านการเรียงกระแสแล้วนั้นจะไม่เรียบเหมือนแรงดันไฟตรงที่ได้จากแบตเตอรี่ จากจะเกิดการกระเพื่อน

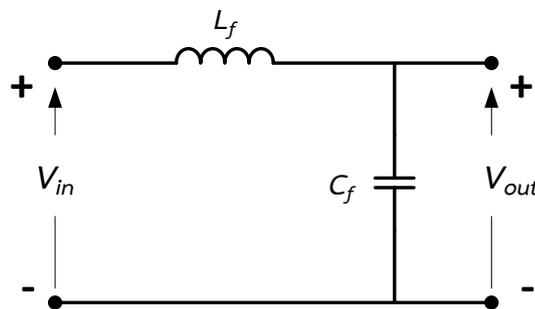
เป็นช่วงๆตามความถี่ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เมื่อนำไปใช้งานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะเกิดการรบกวนของส่วนกระเพื่อมเหล่านี้ทำให้เกิดปัญหาในการใช้งาน ดังนั้นแรงดันไฟตรงที่ต้องการจะต้องเป็นไฟตรงเรียบใกล้เคียงแรงดันจากแบตเตอรี่ ดังนั้นแรงดันที่ผ่านวงจรเรียงกระแสแล้วจึงต้องผ่านวงจรฟิลเตอร์อีกครั้งหนึ่ง เพื่อให้แรงดันที่ได้เป็นแรงดันไฟตรงเรียบ อุปกรณ์ที่นำมาทำวงจรฟิลเตอร์มีตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ การต่อวงจรฟิลเตอร์จะมีตัวเก็บประจุต่อขนานกับเอาต์พุต ทำหน้าที่เสริมแรงดันให้มีขนาดใกล้เคียงกันตลอดเวลา และมีตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับเอาต์พุตทำหน้าที่ต้านการเปลี่ยนแปลงของกระแสให้ไหลผ่านเอาต์พุตมีระดับคงที่มากขึ้น ซึ่งวงจรฟิลเตอร์ที่ใช้ นั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.21 โดยสามารถคำนวณหาค่าความถี่คัทออฟได้ดังสมการ (2.11)

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_f \cdot C_f}} \quad (2.11)$$

โดยที่  $f_c$  คือ ความถี่คัทออฟ

$L_f$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำฟิลเตอร์

$C_f$  คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุฟิลเตอร์



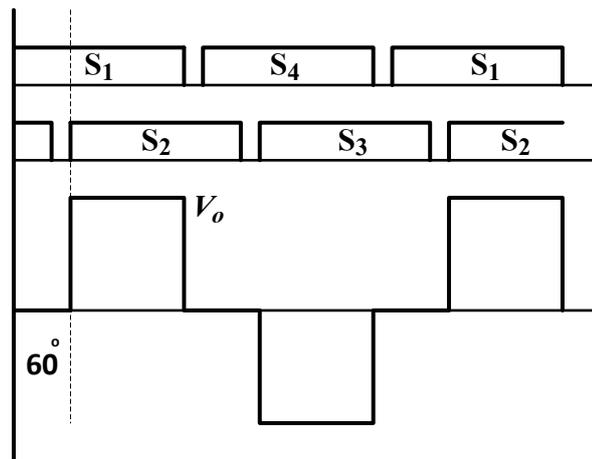
รูปที่ 2.21 วงจร LC ฟิลเตอร์

## 2.6 วิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าของวงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับ

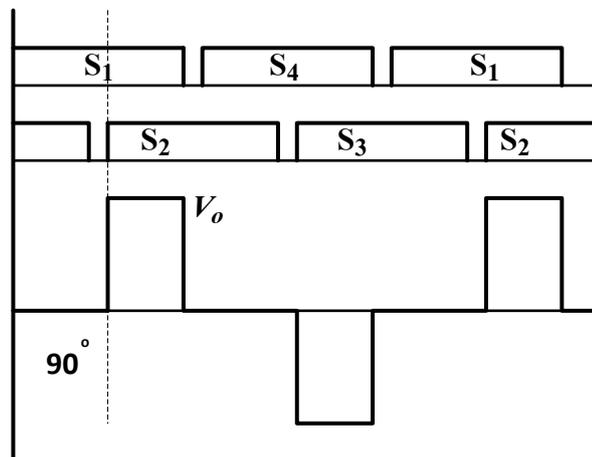
การควบคุมกำลังไฟฟ้าของวงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสามระดับที่สวิตซ์ด้วยแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์นั้นสามารถทำได้โดยการปรับกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการปรับมุมเลื่อนเฟสของสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม ซึ่งการปรับมุมเลื่อนเฟส (Phase shift angle) ระหว่างสวิตซ์วงในและสวิตซ์วงนอกนี้จะทำให้แรงดันเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสนั้นเปลี่ยนแปลงไปทำให้กระแสเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์เปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้กำลังไฟฟ้านำเข้าด้านเอาต์พุตของวงจรคอนเวอร์เตอร์นั้นเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยกำลังไฟฟ้าของวงจรคอนเวอร์เตอร์นี้จะมีค่ามากที่สุดเมื่อมุมเลื่อนเฟสของสัญญาณมีค่าเป็นศูนย์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.22(ก) และเมื่อทำการปรับมุมเลื่อนเฟสของสัญญาณให้มีค่ามากขึ้นเป็น 60 องศาและ 90 องศา ดังรูปที่ 2.22(ข) และ 2.22(ค) ตามลำดับก็จะทำ

ให้ได้รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ลดน้อยลงทำให้กระแสเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์น้อยลงไปด้วย ดังนั้นกำลังไฟฟ้าของวงจรคอนเวอร์เตอร์จึงมีค่าน้อยลงเมื่อทำการปรับมุมเฟสของสัญญาณมีค่ามากขึ้น

(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.22 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มุมเฟสต่างๆ (ก) มุมเฟส 0 องศา (ข) มุมเฟส 60 องศา (ค) มุมเฟส 90 องศา

## 2.7 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยโดยได้อธิบายเกี่ยวกับความแตกต่างและข้อดีข้อเสียของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสองระดับ ซึ่งพบว่าอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับนั้นจะให้แรงดันเอาต์พุตที่มีค่าความผิดเพี้ยนรวมทางฮาร์มอนิกส์ที่มีค่าน้อยกว่าแบบสองระดับและนอกจากนั้นสวิตช์จะมีแรงดันตกคร่อมในช่วงของการหยุดนำกระแสเพียงครึ่งเดียวของแรงดันขาเข้าซึ่งทำให้มีความปลอดภัยต่อสวิตช์มากกว่าแบบสองระดับ จากนั้นได้กล่าวถึงเทคนิคการสวิตช์แบบ ZVS และแบบ ZVZCS โดยวิธีต่างๆรวมทั้งข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธี โดยในงานวิจัยได้เลือกวิธีการใช้ตัวเก็บประจุล้อยกก็งเนื่องจากมีความง่ายต่อการออกแบบ นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงหลักการพื้นฐานของอุปกรณ์แม่เหล็กที่ใช้ในวงจร เช่นหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง ตัวเหนี่ยวนำ เป็นต้น อีกทั้งยังอธิบายถึงการปรับกำลังไฟฟ้าโดยวิธีการปรับมุมเลื่อนเฟสของสัญญาณพีดับบลิวเอ็มอีกด้วย