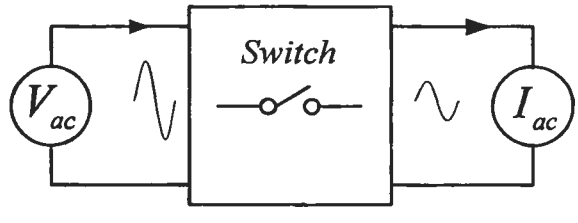
บทที่ 2

วงจรเอซีซอปเปอร์และการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์

2.1 วงจรเอซีซอปเปอร์

วงจรแปลงผันไฟสลับ-ไฟสลับถูกนำมาใช้งานเมื่อต้องการควบคุมกำลังงานไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายให้กับโหลดของงานในอุตสาหกรรม เช่น วงจรควบคุมความร้อน วงจรควบคุมแสงสว่าง วงจรลดกระแสในช่วงเริ่มหมุนของมอเตอร์ วงจรควบคุมความเร็วของปั๊มและพัดลม เดิมวงจรแปลงผันไฟสลับ-ไฟสลับจะใช้สวิตช์ความเร็วต่ำจำพวกเอสซีอาร์หรือไตรแอค แปลงผันไฟสลับ-ไฟสลับที่ความถี่เดียวกันโดยนำกระแสบนมุมเฟสต่างๆ ของแต่ละลูกคลื่น ซึ่งจะเรียกวงจรแบบนี้ว่า วงจรควบคุมแรงดันไฟสลับ การควบคุมแบบนี้มีข้อเสียคือ ตัวประกอบกำลังต่ำ มีฮาร์มอนิกอันดับต่ำและสูงทั้งด้านเข้าและด้านออก และเมื่อต้องการกำจัดฮาร์มอนิก วงจรกรองแบบพาสซีพที่ใช้จะมีขนาดใหญ่ ข้อเสียเหล่านี้สามารถแก้ได้โดยใช้วงจรเอซีซอปเปอร์ซึ่งเป็นวงจรแปลงผันไฟสลับ-ไฟสลับที่ใช้เทคนิคการควบคุมแบบพีดับเบิลยูเอ็ม การใช้วิธีนี้มีข้อดีคือ ตัวประกอบกำลังสูง ฮาร์มอนิกถูกจำกัดอยู่ที่อันดับสูงที่ความถี่การสวิตช์ ทำให้วงจรกรองพาสซีพที่ใช้มีขนาดเล็ก และรูปคลื่นกระแสและแรงดันด้านเข้าและด้านออกเป็นคลื่นรูปไซน์

โดยทั่วไปสวิตช์ที่นำมาใช้ในวงจรเอซีซอปเปอร์ต้องมีคุณสมบัตินำกระแสได้สองทิศทางและบล็อกแรงดันได้สองทิศทางหรือที่เรียกว่าสวิตช์สองทาง เนื่องจากวงจรเอซีซอปเปอร์เป็นวงจรที่เชื่อมต่อกันโดยตรงระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับกับโหลดไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 2.1 ลักษณะการทำงานของวงจรเอซีซอปเปอร์

ลักษณะการทำงานของวงจรเอซีซอปเปอร์แสดงดังรูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณด้านเข้ากับปริมาณด้านออกของวงจรเป็นดังนี้ กำหนดให้ $v_i(t) = V_{ip}\cos(\omega t)$ และ $i_o(t) = I_{op}\cos(\omega t)$

จะได้ $$v_o(t) = D \cdot v_i(t) \quad (2.1)$$

และ $$i_i(t) = D \cdot i_o(t) \quad (2.2)$$

เมื่อ $v_i(t), v_o(t)$: แรงดันด้านเข้าและด้านออกที่เวลาใดๆ

$i_i(t), i_o(t)$: กระแสด้านเข้าและด้านออกที่เวลาใดๆ

I_{op}, V_{ip} : ค่ายอดของกระแสด้านออกและแรงดันด้านเข้า

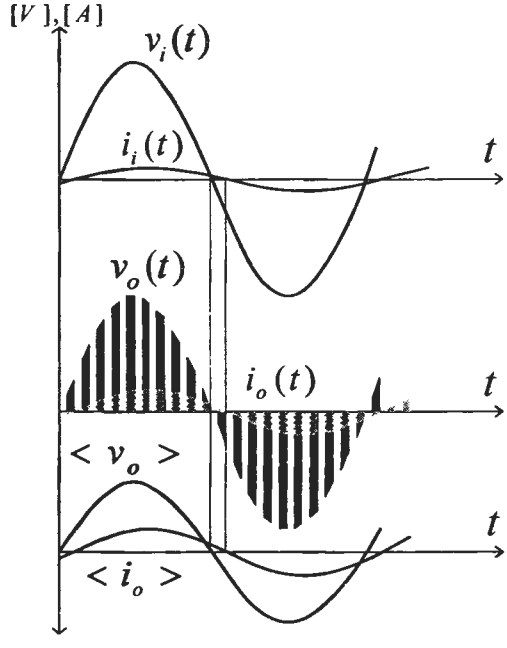
ω : ความถี่เชิงมุม

D : วัฏจักรงาน $\left(\frac{< v_o >}{v_i}\right)$

t_1, t_2 : เวลา t_1 และ t_2 ตามลำดับ

T_s : คาบเวลาการสวิตช์

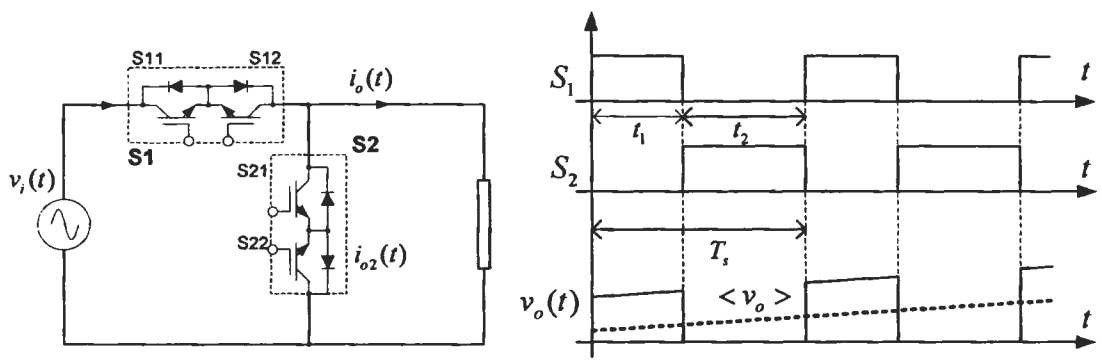
$< v_o >, < i_o >$: ค่าเฉลี่ยแรงดันและกระแสด้านออก



รูปที่ 2.2 รูปคลื่นแรงดัน,กระแสทั้งด้านเข้าและด้านออกและแรงดันเฉลี่ยด้านออก

2.2 วงจรเอซีซอปเปอร์ที่ใช้สวิตช์สองทาง

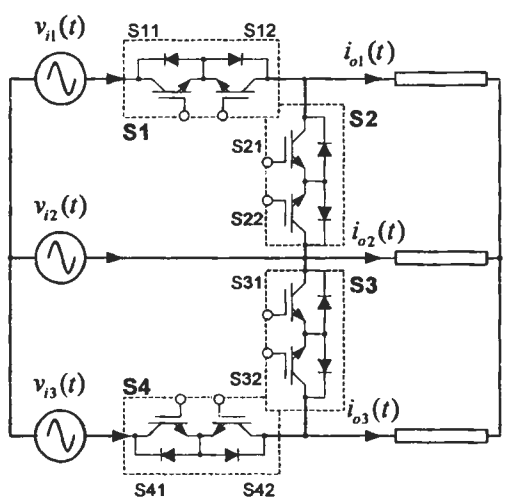
วงจรเอซีซอปเปอร์ 1 เฟสที่ใช้สวิตช์สองทางแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 ก) ภายในสวิตช์ 1 ชุด ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ 2 ตัวและไดโอด 2 ตัว และรูปที่ 2.3 ข) เป็นสัญญาณการขับนำสวิตช์ของสวิตช์ S_1 และสวิตช์ S_2 ตามลำดับ และรูปคลื่นแรงดันด้านออก



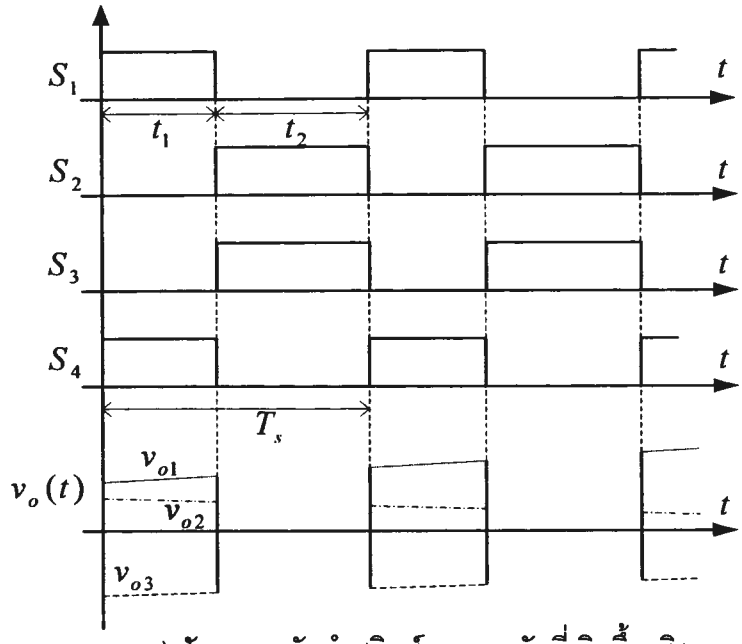
ก) วงจรเอซีซอปเปอร์แบบ 1 เฟส ข) สัญญาณขับนำสวิตช์และแรงดันที่เกิดขึ้นจริง

รูปที่ 2.3 วงจรเอซีซอปเปอร์ 1 เฟสที่ใช้สวิตช์สองทาง

วงจรเอซีซอปเปอร์ 3 เฟสที่ใช้สวิตช์สองทางแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 ก) ประกอบด้วยสวิตช์สองทางทั้งหมด 4 ชุด และรูปที่ 2.4 ข) เป็นสัญญาณการขับนำสวิตช์ของสวิตช์ S_1, S_2, S_3 และสวิตช์ S_4 ตามลำดับ และรูปคลื่นแรงดันด้านออก



ก) วงจรเอซีซอปเปอร์แบบ 3 เฟส 3 สายที่ใช้สวิตช์สองทาง



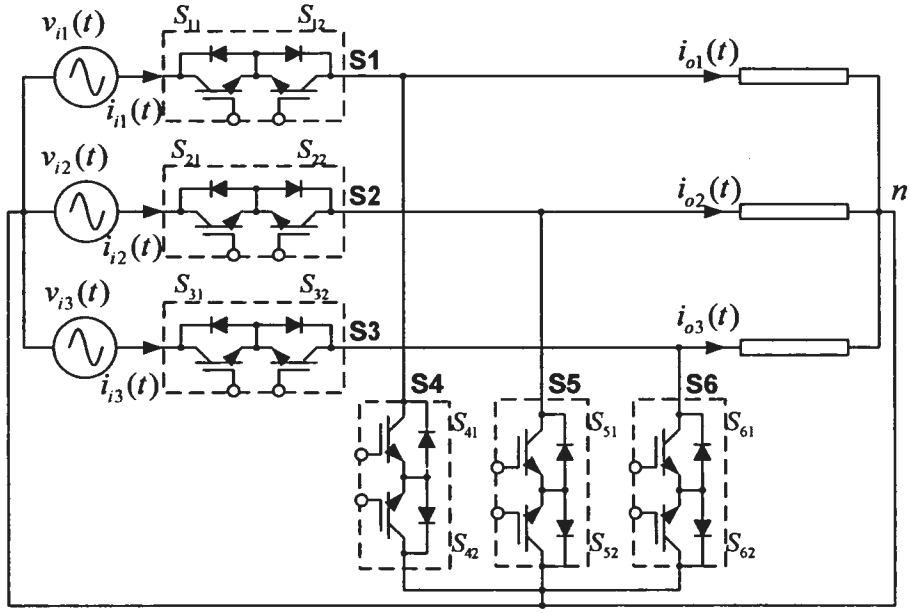
ข) สัญญาณขับนำสวิตช์และแรงดันที่เกิดขึ้นจริง

รูปที่ 2.4 วงจรเอซีชอปเปอร์ 3 เฟส 3 สายที่ใช้สวิตช์สองทาง

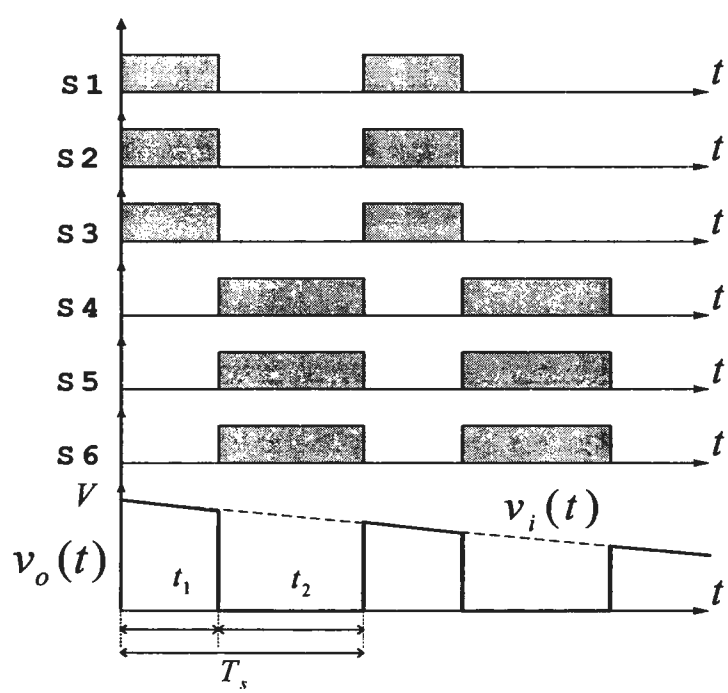
เนื่องจากโครงสร้างของวงจรเอซีชอปเปอร์มีแหล่งจ่ายด้านเข้าเป็นกิ่งแรงดันและโหลดด้านออกเป็นกิ่งกระแส ทำให้วงจรต้องมีการป้องกันการเกิดลัดวงจรที่ด้านเข้าและเปิดวงจรที่ด้านออกขณะสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ วงจรแปลงผันทั่วไปจะมีวิธีป้องกันโดยเพิ่มช่วงเวลาเดดไทม์เข้าไประหว่างการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ที่ทำงานเป็นคู่ประกอบกัน ส่งผลให้ไม่เกิดการนำกระแสพร้อมกันของสวิตช์ซึ่งเป็นสาเหตุของกระแสลัดวงจร และวงจรแปลงผันทั่วไปโดยโครงสร้างของวงจรก็จะมีทางเดินกระแสหมุนเวียนเสรีผ่านไดโอดอยู่แล้ว ส่งผลให้ช่วงเวลาเดดไทม์ที่สวิตช์ทำงานสลับกันหยุดนำกระแสทั้งคู่ พลังงานในกิ่งกระแสมีทางไหลได้โดยไม่เกิดแรงดันเกินด้านโหลด แต่โครงสร้างของวงจรเอซีชอปเปอร์ที่ใช้สวิตช์สองทางนั้นไม่มีทางเดินกระแสหมุนเวียนเสรี จึงต้องมีวิธีป้องกันการเกิดลัดวงจรด้านเข้าและเปิดวงจรด้านโหลด ดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.3 วงจรเอซีซอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สายที่ใช้สวิตช์สองทาง

วงจรเอซีซอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สายที่ใช้สวิตช์สองทางเป็นดังรูปที่ 2.5 ประกอบด้วยสวิตช์สองทาง 6 ชุด ($S_1 - S_6$: สวิตช์ 12 ตัว ไดโอด 12 ตัว)



รูปที่ 2.5 โครงสร้างวงจรเอซีซอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สายที่ใช้สวิตช์สองทาง



รูปที่ 2.6 การทำงานของสวิตช์ $S_1 - S_6$ ของวงจรเอซีซอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สาย

โครงสร้างวงจรแบบ 3 เฟส 4 สาย เป็นวงจรที่จำเป็นต้องใช้สวิตช์สองทางเพื่อให้วงจรทำงานได้ และโดยโครงสร้างของวงจรทำให้การทำงานของวงจรมีอิสระต่อกันจึงสามารถใช้งานกับโหลด 1 เฟสหรือโหลด 3 เฟส 4 สายได้ การทำงานของวงจรเอซีซอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สาย ดังรูปที่ 2.6 จะคล้ายกับวงจรแบบ 1 เฟสและแบบ 3 เฟส 3 สายที่ใช้สวิตช์สองทาง คือสวิตช์ของแต่ละเฟสทำงานเป็นคู่ประกอบกันและวงจรก็ไม่มีเส้นทางเดินกระแสหมุนเวียนเสรี ดังนั้นวงจรเอซีซอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สายจึงต้องใช้รูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ป้องกันแรงดันเกินและกระแสลัดวงจรเช่นกัน

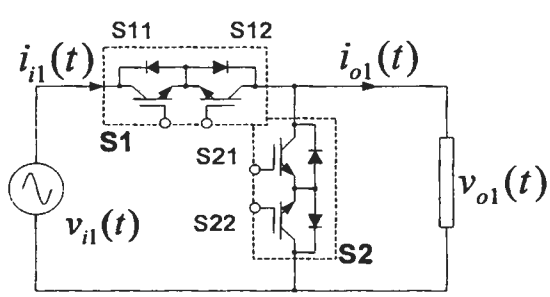
2.4 การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์(Commutation)

เนื่องจากวงจรเอซีซอปเปอร์ที่ใช้สวิตช์สองทางไม่มีทางเดินหมุนเวียนเสรี ทำให้จำเป็นต้องมีรูปแบบในการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์เพื่อป้องกันการเกิดแรงดันเกินทางด้านออกและป้องกันการเกิดกระแสลัดวงจรทางด้านเข้า รูปแบบของการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ของวงจรจำแนกตามสัญญาณอ้างอิงได้ 2 แบบดังนี้

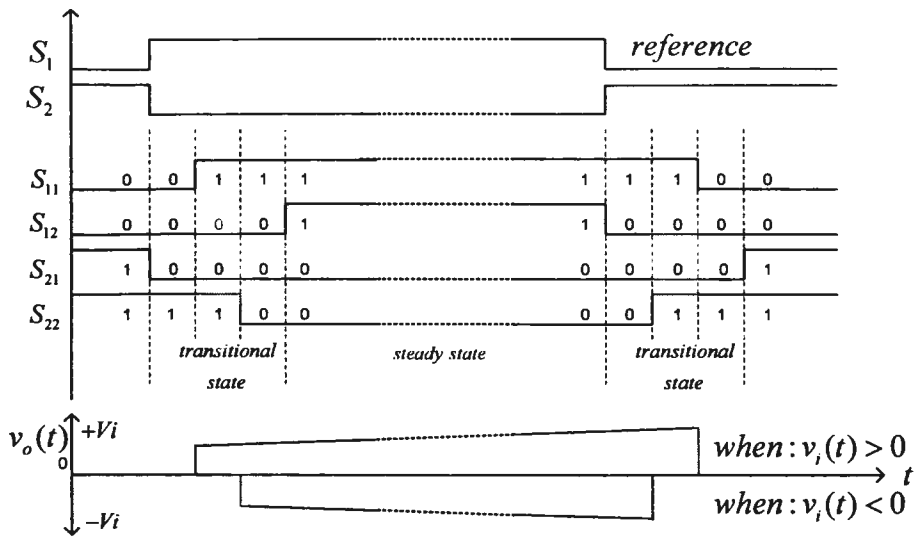
2.4.1 การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส(Current Commutation)

การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์โดยใช้สัญญาณอ้างอิงจากกระแส[3] จะใช้ทิศทางของกระแสด้านออกของวงจรเป็นสัญญาณในการควบคุม หลักการทำงานคือจะขับนำสวิตช์ตัวที่มีทิศทางสอดคล้องกับกระแสโหลด เพื่อให้เกิดทางเดินหมุนเวียนเสรีเป็นหลัก และในขณะเดียวกันก็จะไม่ทำให้เกิดลัดวงจรที่ด้านเข้า หากพิจารณาการทำงานของวงจรในหนึ่งเฟสดังแสดงในรูปที่ 2.7 จะได้รูปแบบของสัญญาณแสดงได้ดังรูปที่ 2.8 และ 2.10

โดยในที่นี้ S_i หมายถึงสัญญาณขับนำสวิตช์ และ S_{jk} หมายถึงสัญญาณขับนำทรานซิสเตอร์ jk ที่ประกอบเป็นสวิตช์ S_1 และ S_2



รูปที่ 2.7 วงจร 1 เฟส



รูปที่ 2.8 รูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส เมื่อกระแสมากกว่าศูนย์

ตัวอย่างการอธิบายลำดับการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแสดังนี้

ก) เปลี่ยนสภาวะจาก $S_1 = OFF, S_2 = ON$ ไปเป็น $S_1 = ON, S_2 = OFF$ กรณีกระแสมากกว่าศูนย์, แรงดันมากกว่าศูนย์

- (*steady state*) ที่สภาวะอยู่ตัว S_{21} กับ S_{22} ถูกสั่งให้นำกระแสทั้งคู่ ในสภาวะนี้กระแสโหลดจะไหลผ่าน S_{22} และ D_{21} ครบวงจร แรงดันด้านออกเท่ากับศูนย์

- (3) S_{21} หยุดนำกระแส กระแสโหลดยังไหลผ่าน S_{22} และ D_{21} อยู่

- (2) S_{11} นำกระแส ในสภาวะนี้ D_{12} ถูกไบอัสตรงขณะเดียวกัน D_{21} ก็ถูกไบอัสกลับโดยแหล่งจ่าย **ทำให้กระแสที่ไหลผ่าน S_{22} และ D_{21} สับเปลี่ยนมาไหลผ่านที่ S_{11} และ D_{12} ทันที** แรงดันด้านออกเท่ากับแรงดันด้านเข้า

- (1) S_{22} หยุดนำกระแส กระแสโหลดยังไหลผ่าน S_{11} และ D_{12} อยู่

- ลำดับต่อมา S_{12} นำกระแส การนำกระแสของ S_{12} เพื่อรองรับกรณีที่กระแสเปลี่ยนทิศทาง และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว

ข) เปลี่ยนสภาวะจาก $S_1 = ON, S_2 = OFF$ ไปเป็น $S_1 = OFF, S_2 = ON$ กรณีกระแสมากกว่าศูนย์, แรงดันมากกว่าศูนย์

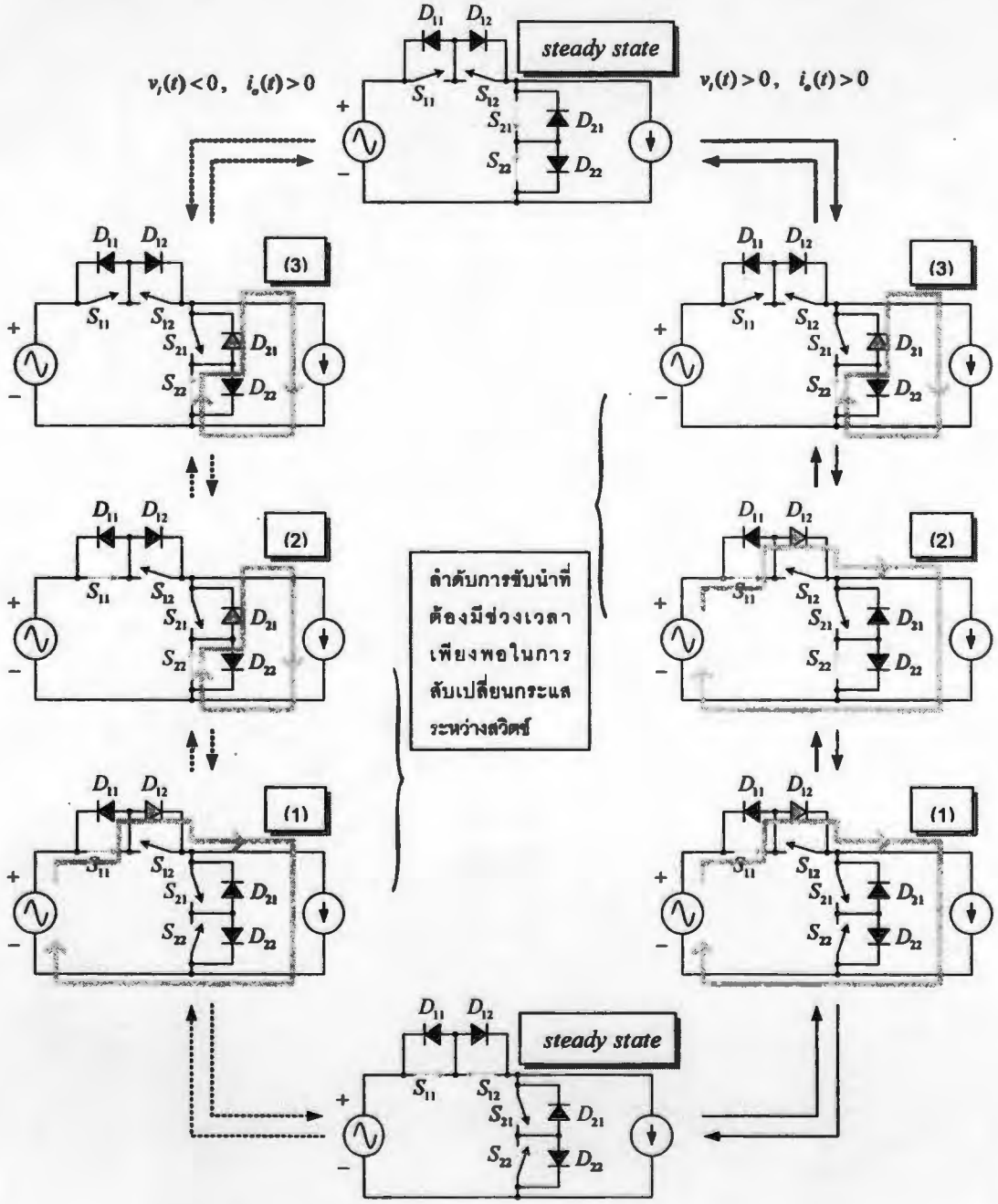
- (*steady state*) ที่สภาวะอยู่ตัว S_{11} กับ S_{12} ถูกสั่งให้นำกระแสทั้งคู่ ในสภาวะนี้กระแสจะไหลผ่าน S_{11} และ D_{12} แรงดันด้านออกเท่ากับแรงดันแหล่งจ่าย

- (1) S_{12} หยุดนำกระแส กระแสยังไหลผ่าน S_{11} และ D_{12} อยู่

- (2) S_{22} นำกระแส กระแสยังไหลผ่าน S_{11} และ D_{12} อยู่ ในสภาวะนี้เป็นลำดับการขับนำที่มีความสำคัญคือ**ต้องมีช่วงเวลาเพียงพอที่จะให้สวิตช์ S_{22} นำกระแสสมบูรณ์แล้วจึงจะให้ S_{11}**

หยุดนำกระแสในลำดับถัดไป เพราะว่าถ้า S_{22} ยังไม่นำกระแสแล้ว S_{11} หยุดนำกระแสจะทำให้เกิดสภาวะเปิดวงจรด้านโหลด

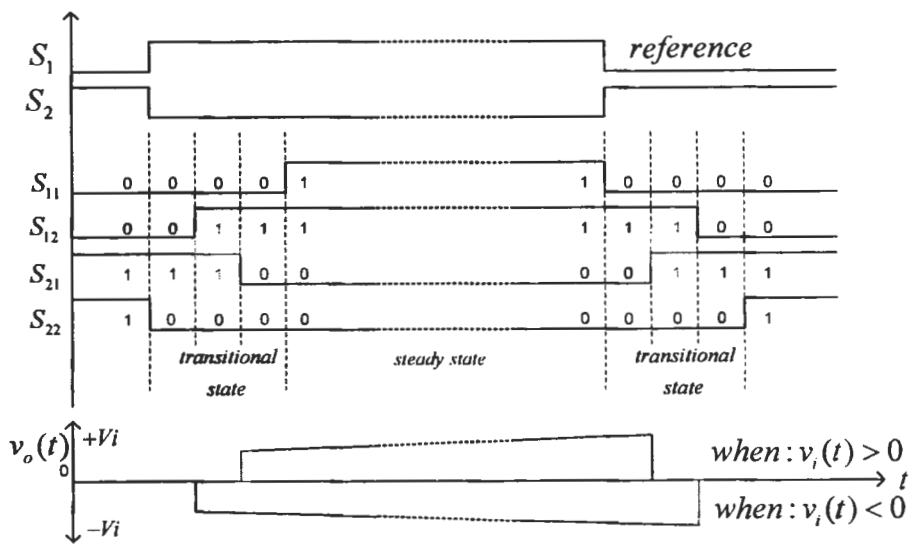
- (3) S_{11} **หยุดนำกระแส กระแสที่ไหลผ่าน** S_{11} **และ** D_{12} **สับเปลี่ยนมาไหลผ่านที่** S_{22} **ที่นำกระแสรออยู่และ** D_{21} **แรงดันด้านออกเท่ากับศูนย์**
- **ลำดับต่อมา** S_{21} **นำกระแส การนำกระแสของ** S_{21} **เพื่อรองรับกรณีที่กระแสเปลี่ยนทิศทาง**



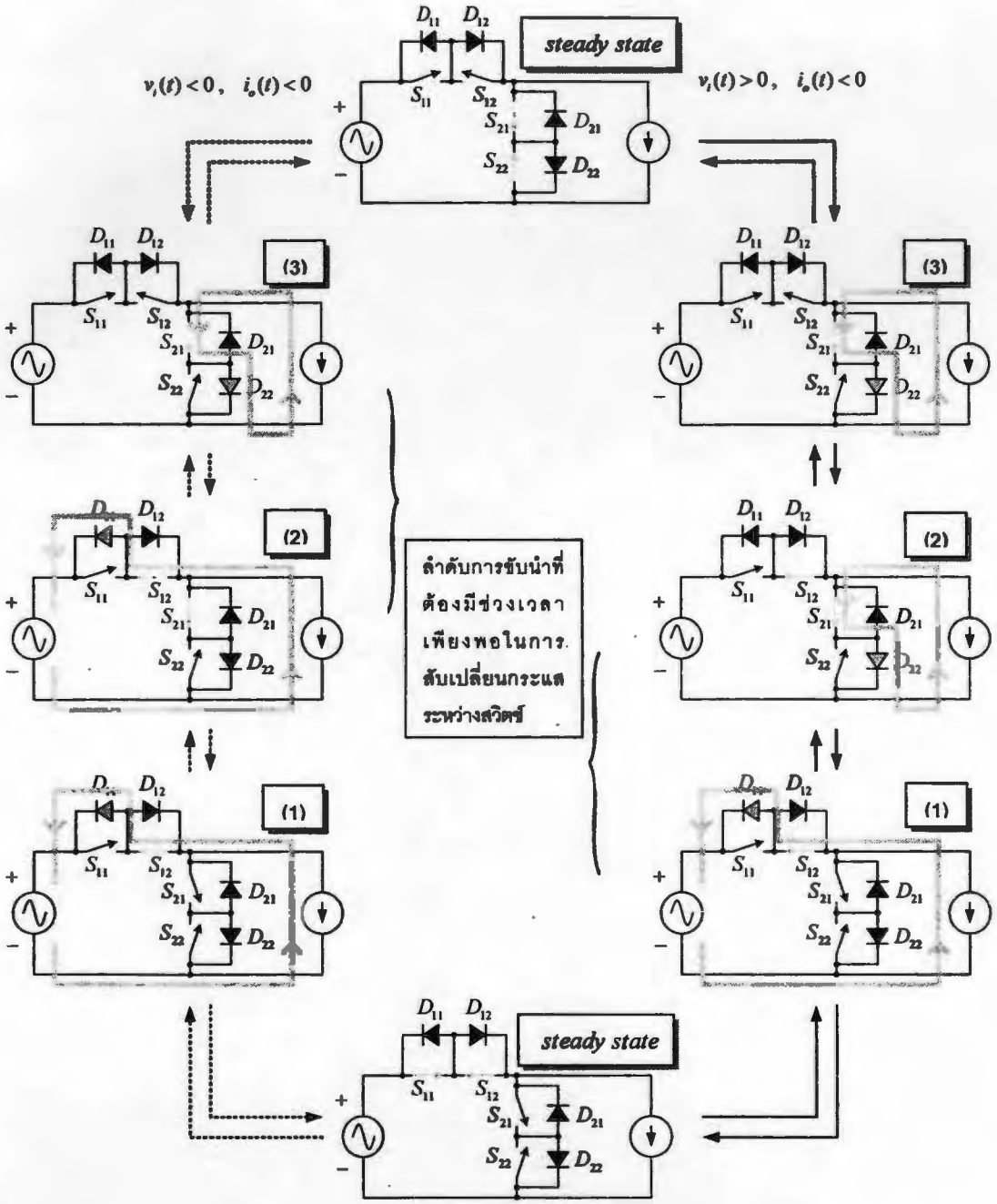
รูปที่ 2.9 ลำดับการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส เมื่อกระแสมากกว่าศูนย์

ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นคำอธิบายการทำงานการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส เมื่อกระแสมากกว่าศูนย์ ในกรณีที่แรงดันแหล่งจ่ายมีค่ามากกว่าศูนย์ สำหรับในกรณีที่แรงดันแหล่งจ่ายน้อยกว่าศูนย์การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์จะเป็นดังวงจรทางซีกซ้ายมือของรูปที่ 2.9

ส่วนการทำงานการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส เมื่อกระแสน้อยกว่าศูนย์ก็สามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกันจากรูปที่ 2.10 และ 2.11



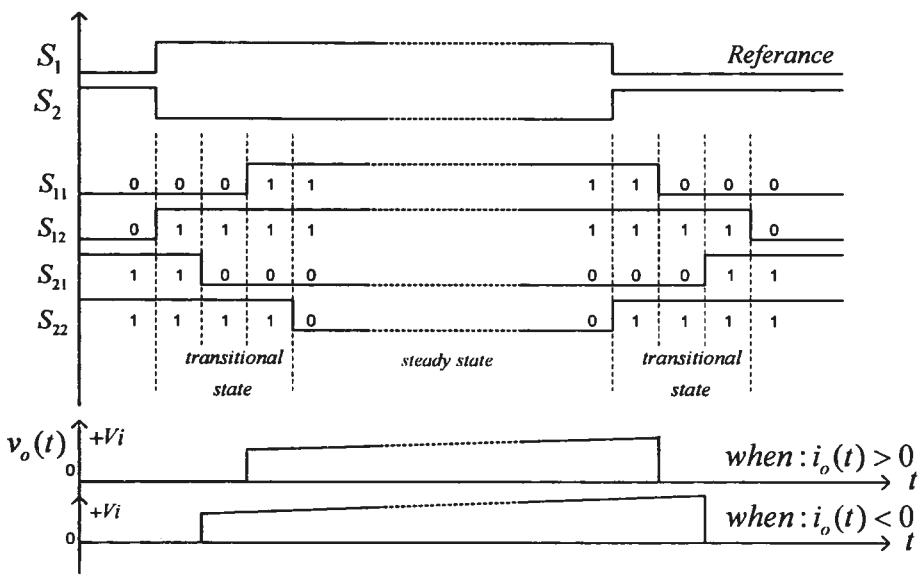
รูปที่ 2.10 รูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส เมื่อกระแสน้อยกว่าศูนย์



รูปที่ 2.11 ลำดับการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส เมื่อกระแสน้อยกว่าศูนย์

2.4.2 การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน(Voltage Commutation)

การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์โดยใช้สัญญาณอ้างอิงจากแรงดัน[11] จะใช้ทิศทางของแรงดันด้านเข้าของวงจรเป็นสัญญาณในการควบคุม หลักการทำงานคือจะขับนำสวิตช์ตัวที่มีทิศทางบล็อกแรงดันแหล่งจ่ายป้องกันลัดวงจรเป็นหลัก และในขณะเดียวกันก็จะไม่ทำให้เกิดเปิดวงจรที่ด้านออก หากพิจารณาการทำงานของวงจรในหนึ่งเฟสดังแสดงในรูปที่ 2.7 จะได้รูปแบบของสัญญาณแสดงได้ดังรูปที่ 2.12 และ 2.14



รูปที่ 2.12 รูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน เมื่อแรงดันมากกว่าศูนย์

ตัวอย่างการอธิบายลำดับการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดันดังนี้

ก) เปลี่ยนสภาวะจาก $S_1 = OFF, S_2 = ON$ ไปเป็น $S_1 = ON, S_2 = OFF$ กรณีแรงดันมากกว่าศูนย์, กระแสมากกว่าศูนย์

- (*steady state*) ที่สภาวะอยู่ตัว S_{21} กับ S_{22} ถูกสั่งให้นำกระแสทั้งคู่ ในสภาวะนี้กระแสโหลดจะไหลผ่าน S_{22} และ D_{21} ครบวงจร แรงดันด้านออกเท่ากับศูนย์

- (3) S_{12} นำกระแส ในลำดับนี้ D_{11} กับ S_{12} จะมีทิศทางบล็อกแรงดันป้องกันการลัดวงจร และขณะเดียวกัน S_{12} นำกระแสก็เพื่อรองรับการไหลของกระแสโหลดด้วย กระแสโหลดยังไหลผ่าน S_{22} และ D_{21} แรงดันด้านออกเท่ากับศูนย์

- (2) S_{21} หยุดนำกระแส ในสภาวะนี้ D_{11} และ D_{21} ก็ถูกไบอัสกลับโดยแหล่งจ่าย กระแสโหลดยังไหลผ่าน S_{22} และ D_{21} แรงดันด้านออกเท่ากับศูนย์

- (1) S_{11} นำกระแส D_{12} ถูกไบอัสตรง **กระแสที่ไหลผ่าน** S_{22} **และ** D_{21} **สับเปลี่ยนมาไหลผ่านที่** S_{11} **ที่นำกระแสรออยู่และ** D_{12} **ทันที**

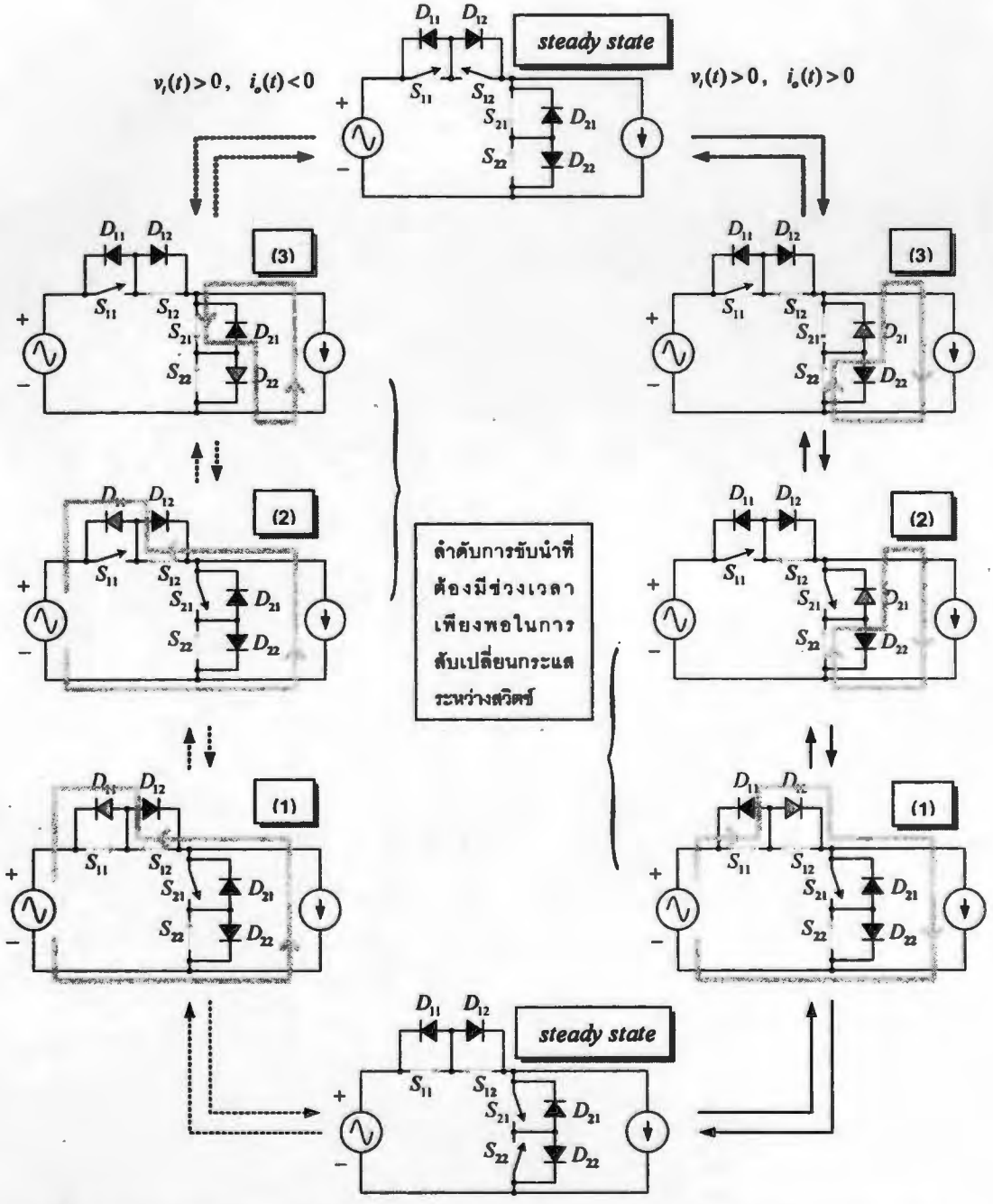
- ลำดับต่อมา S_{22} หยุดนำกระแส และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว

ข) เปลี่ยนสภาวะจาก $S_1 = ON, S_2 = OFF$ ไปเป็น $S_1 = OFF, S_2 = ON$ กรณีแรงดันมากกว่าศูนย์, กระแสมากกว่าศูนย์

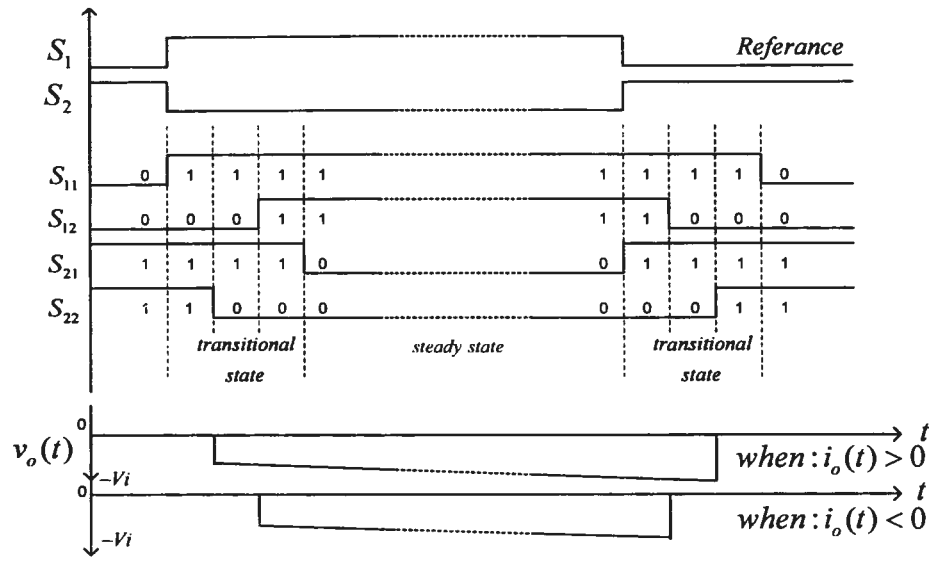
- (*steady state*) ที่สภาวะอยู่ตัว S_{11} กับ S_{12} ถูกสั่งให้นำกระแสทั้งคู่ ในสภาวะนี้กระแสจะไหลผ่าน S_{11} และ D_{12} แรงดันด้านออกเท่ากับแรงดันแหล่งจ่าย
- (1) S_{22} นำกระแส ในลำดับนี้ D_{21} กับ S_{22} จะมีทิศทางบล็อกแรงดันป้องกันการลัดวงจร และขณะเดียวกัน S_{22} นำกระแสก็เพื่อรองรับการไหลของกระแสโหลดด้วย กระแสยังไหลผ่าน S_{11} และ D_{12} อยู่ ในสภาวะนี้เป็นลำดับการขับนำที่มีความสำคัญ**คือต้องมีช่วงเวลาเพียงพอที่จะให้สวิตช์ S_{22} นำกระแสสมบูรณ์แล้วจึงจะให้ S_{11} หยุดนำกระแสในลำดับถัดไป** เพราะว่าถ้า S_{22} ยังไม่นำกระแสแล้ว S_{11} หยุดนำกระแสจะทำให้เกิดสภาวะเปิดวงจรด้านโหลด
- (2) S_{11} หยุดนำกระแส **กระแสที่ไหลผ่าน S_{11} และ D_{12} สับเปลี่ยนมาไหลผ่านที่ S_{22} ที่นำกระแสรออยู่และ D_{21} ทันที** แรงดันด้านออกเท่ากับศูนย์
- (3) S_{21} นำกระแส กระแสยังไหลผ่าน S_{22} และ D_{21} แรงดันด้านออกเท่ากับศูนย์
- ลำดับต่อมา S_{12} หยุดนำกระแส และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว

ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นคำอธิบายการทำงานการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน เมื่อแรงดันมากกว่าศูนย์ ในกรณีที่กระแสโหลดมีค่ามากกว่าศูนย์ สำหรับในกรณีที่กระแสโหลดน้อยกว่าศูนย์การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์จะเป็นดังวงจรทางซีกซ้ายมือของรูปที่ 2.13

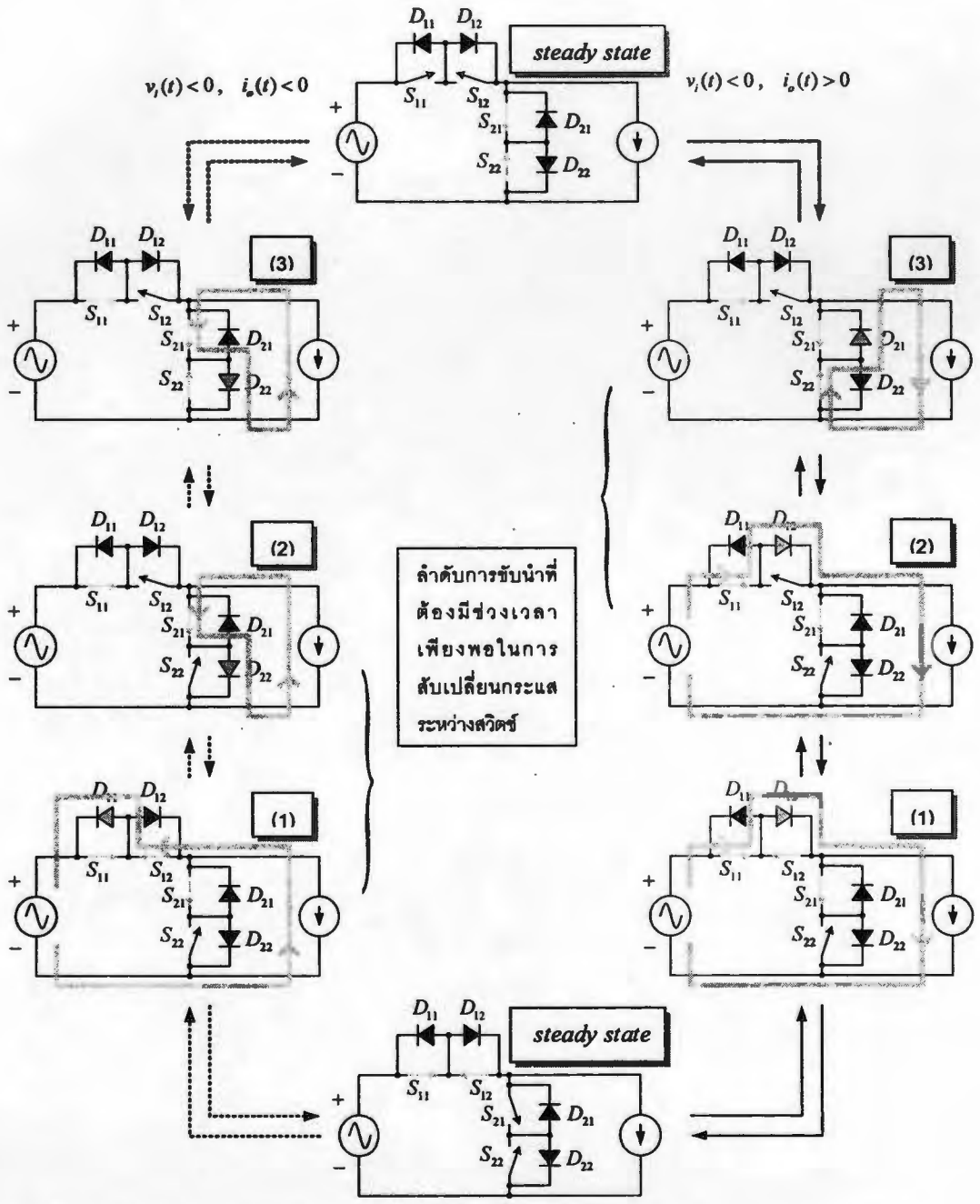
ส่วนการทำงานการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน เมื่อแรงดันน้อยกว่าศูนย์ก็สามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกันจากรูปที่ 2.14 และ 2.15



รูปที่ 2.13 ลำดับการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน เมื่อแรงดันมากกว่าศูนย์



รูปที่ 2.14 รูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน เมื่อแรงดันน้อยกว่าศูนย์



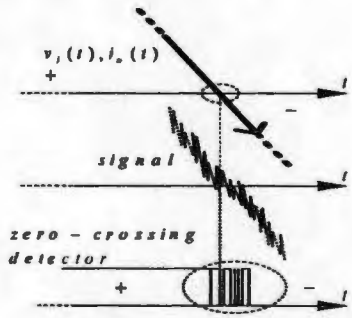
รูปที่ 2.15 ลำดับการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน เมื่อแรงดันน้อยกว่าศูนย์

รูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ของวงจรเอซีซอปเปอร์ที่ใช้สวิตช์สองทางทั้งสองแบบคือ แบบแรงกระแสและแบบแรงดัน ซึ่งมีลำดับการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ดังแสดงในรูปที่ 2.8, รูปที่ 2.10, รูปที่ 2.12 และรูปที่ 2.14 โดยมีรูปแบบการขับนำตามรูปที่ 2.9, รูปที่ 2.11, รูปที่ 2.13 และรูปที่ 2.15 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการทำงานของวงจรสามารถป้องกันการเกิดแรงดันเกินและกระแสลัดวงจรได้ขณะสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ แต่ปัญหาที่พบจากการใช้รูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ในการทำงานของวงจรเอซีซอปเปอร์ที่ใช้สวิตช์สองทางดังที่กล่าวไว้ตอนต้นนั้นก็คือ การตรวจจับเครื่องหมายของกระแสโหลดหรือแรงดัน

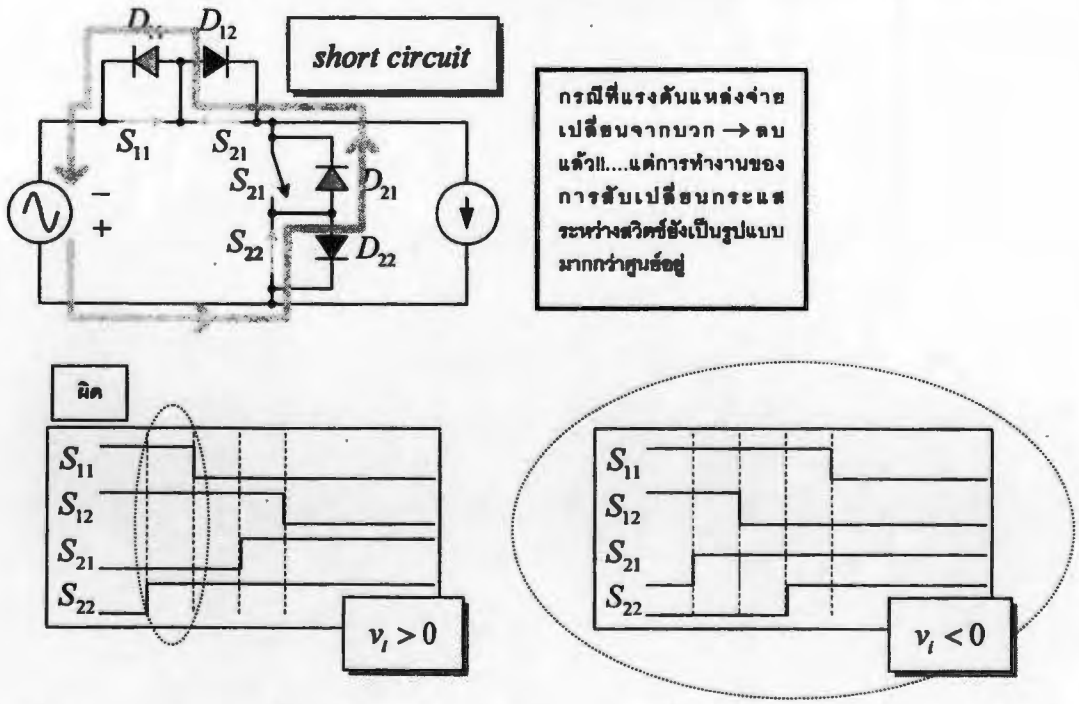
แหล่งจ่ายมาใช้ในการกำหนดรูปแบบของลำดับการขับนำสวิตช์ ซึ่งสัญญาณกระแสหรือแรงดันที่ใช้อ้างอิงในการกำหนดรูปแบบของสัญญาณขับนำที่พิจารณาจากเครื่องหมายของสัญญาณว่ามากกว่าหรือน้อยกว่าศูนย์ อาจมีความไม่แน่นอนขณะกำลังผ่านศูนย์ ซึ่งทำให้รูปแบบของสัญญาณขับนำผิดพลาดไม่สอดคล้องกับกระแสหรือแรงดันจริงขณะนั้น เป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันค่าสูงหรือกระแสลัดวงจรในวงจรได้ ดังนั้นจึงควรมีการแก้ปัญหาในส่วนนี้เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายกับวงจร

2.5 แนวทางการแก้ไขปัญหาในขณะสัญญาณอ้างอิงข้ามผ่านศูนย์

จากที่กล่าวมาข้างต้นว่าในการควบคุมรูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์นั้นอาจมีความไม่แน่นอนขณะสัญญาณอ้างอิงกำลังผ่านศูนย์ เนื่องจากถูกรบกวนหรือเพราะความไม่แม่นยำของอุปกรณ์ ซึ่งจะทำให้รูปแบบของสัญญาณขับนำผิดพลาด เป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันค่าสูงหรือกระแสลัดวงจรในวงจรได้ จึงควรมีการแก้ปัญหาในส่วนนี้เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายกับวงจร

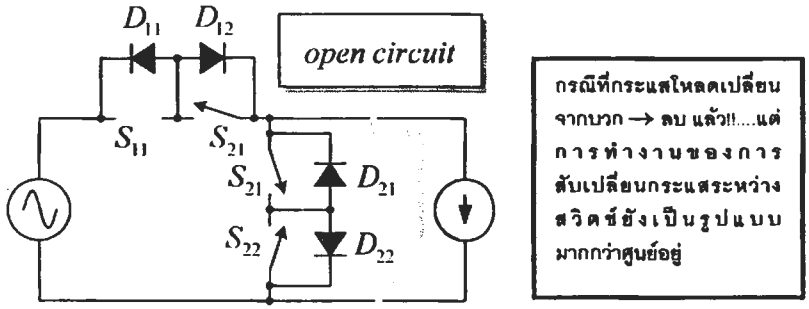


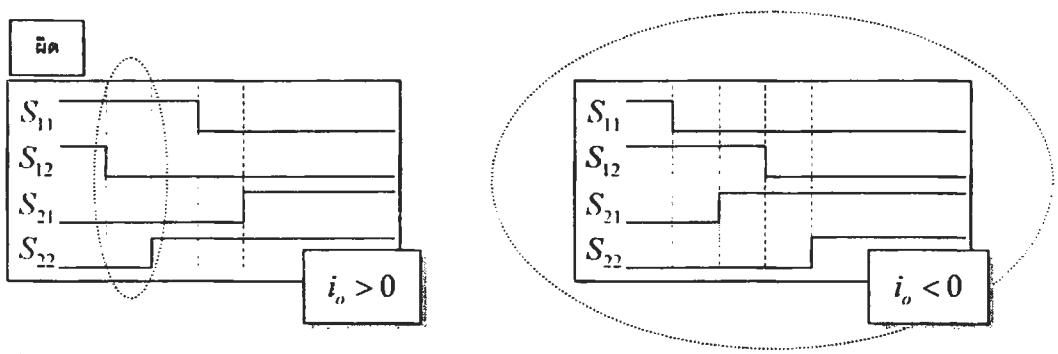
รูปที่ 2.16 รูปคลื่นสัญญาณการตรวจจับผ่านศูนย์ของสัญญาณอ้างอิงที่ถูกรบกวน



รูปที่ 2.17 การลัดวงจรเมื่อเกิดความผิดพลาดในการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน

ในกรณีที่เกิดการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดันผิดพลาดดังรูปที่ 2.17 สามารถอธิบายได้ดังนี้ กำหนดให้แรงดันผ่านศูนย์จากค่าบวกไปยังค่าลบ สัญญาณขับนำที่ให้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ถูกต้องคือรูปด้านขวาที่เป็นแบบแรงดันน้อยกว่าศูนย์ เมื่อพิจารณากรณีที่สัญญาณอ้างอิงถูกรบกวนและทำให้เลือกรูปแบบผิดพลาดดังรูปสัญญาณขับนำทางด้านซ้ายที่เป็นแบบแรงดันมากกว่าศูนย์ พบว่าเมื่อ S_{22} นำกระแส D_{21} และ D_{11} จะถูกไบอัสตรงโดยแหล่งจ่ายแรงดัน เป็นผลทำให้เกิดกระแสลัดวงจรขึ้น



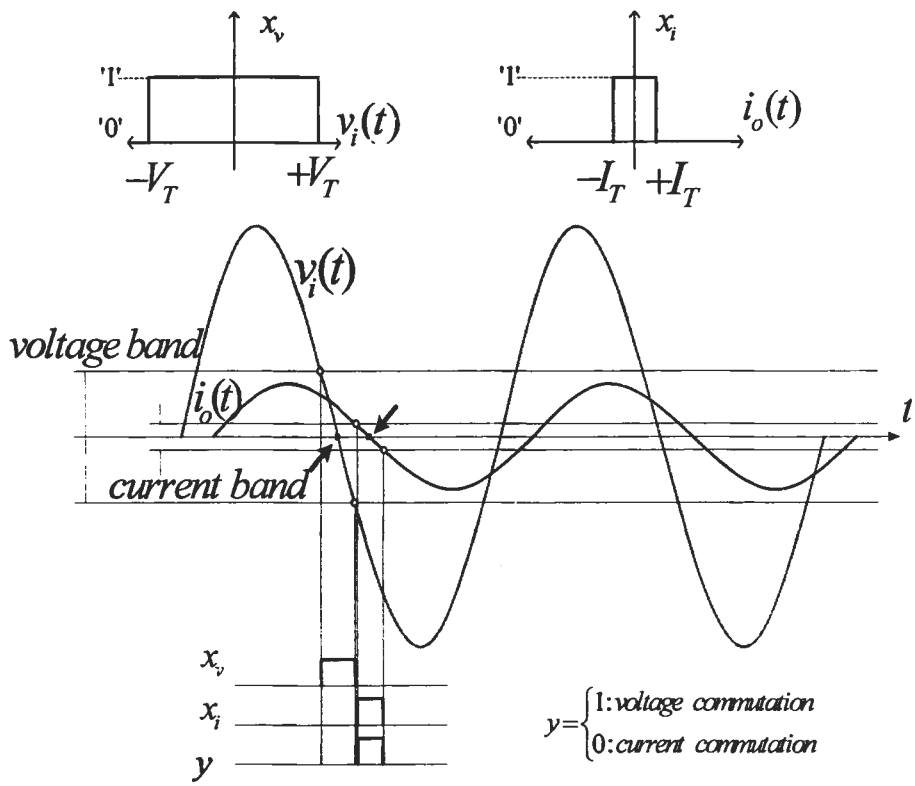


รูปที่ 2.18 การเปิดวงจรเมื่อเกิดความผิดพลาดในการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส

กรณีที่เกิดการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแสผิดพลาดดังรูปที่ 2.18 สามารถอธิบายได้ดังนี้ กำหนดให้กระแสด้านออกผ่านศูนย์จากค่าบวกไปยังค่าลบ การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ที่ถูกต้องคือรูปด้านขวาที่เป็นแบบกระแสน้อยกว่าศูนย์ แต่หากสัญญาณอ้างอิงถูกรบกวนจนเป็นสาเหตุให้เลือกใช้รูปแบบผิดพลาดดังรูปสัญญาณขับนำทางด้านซ้ายที่เป็นแบบกระแสมากกว่าศูนย์ พบว่าเมื่อ S_{12} หยุดนำกระแส กระแสโหลดจะไม่มีทางไหล เป็นผลทำให้เกิดสไปค์แรงดันขึ้นตกคร่อมสวิตช์ แต่ปัญหานี้จะไม่รุนแรงมากเนื่องจากว่ากระแสในขณะนั้นมีค่าน้อย

แนวทางการแก้ปัญหานี้ก็คือ จะผสมรูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ทั้งสองแบบร่วมกัน กล่าวคือโดยทั่วไปแล้วสัญญาณกระแสและแรงดันจะมีเฟสต่างกันจึงตัดผ่านศูนย์ไม่พร้อมกัน ปัญหาการถูกรบกวนดังกล่าวจึงเกิดไม่พร้อมกันในสองรูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ เพื่อหลีกเลี่ยงในการใช้สัญญาณอ้างอิงในย่านที่ข้ามผ่านศูนย์จึงออกแบบให้เปลี่ยนวิธีการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์โดยมีหลักการทำงานดังนี้ สัญญาณอ้างอิงประกอบด้วย สัญญาณกระแสและสัญญาณแรงดัน ซึ่งทั้งสองสัญญาณถูกกำหนดให้มีย่านรอบศูนย์ของแต่ละสัญญาณอ้างอิง เรียกว่า ย่านกระแส (current band) และย่านแรงดัน (voltage band) ดังรูปที่ 2.19 การ

ทำงานของรูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม (Mixed commutation)นี้ จะใช้สัญญาณอ้างอิงจากกระแสและรูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแสเป็นหลัก ยกเว้นกรณีที่สัญญาณอ้างอิงกระแสอยู่ภายในย่านกระแสและขณะเดียวกันสัญญาณอ้างอิงแรงดันอยู่ภายนอกย่านแรงดัน จึงจะใช้สัญญาณอ้างอิงจากแรงดันและรูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน



รูปที่ 2.19 หลักการทำงานของรูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม

กำหนดให้ $+V_T, -V_T$: ขอบเขตของย่านแรงดันบวกและแรงดันลบตามลำดับ

$+I_T, -I_T$: ขอบเขตของย่านกระแสบวกและกระแสลบตามลำดับ

x_v : ตรรกะแสดงสถานะของสัญญาณแรงดัน

x_i : ตรรกะแสดงสถานะของสัญญาณกระแส

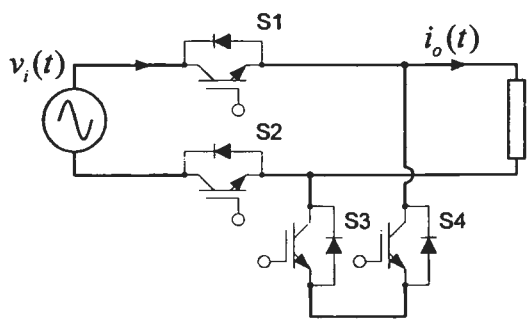
y : ตรรกะแสดงสถานะของการเลือกรูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์

การที่ใช้แบบกระแสเป็นหลักในการควบคุมสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม เนื่องจากว่า การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ทั้งสองแบบต่างก็มีโอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดในการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ เมื่อวิเคราะห์การทำงานทั้งสองแบบก็พบว่า เมื่อการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดันผิดพลาดดังรูปที่ 2.17 จะทำให้เกิดกระแสลัดวงจรขึ้น

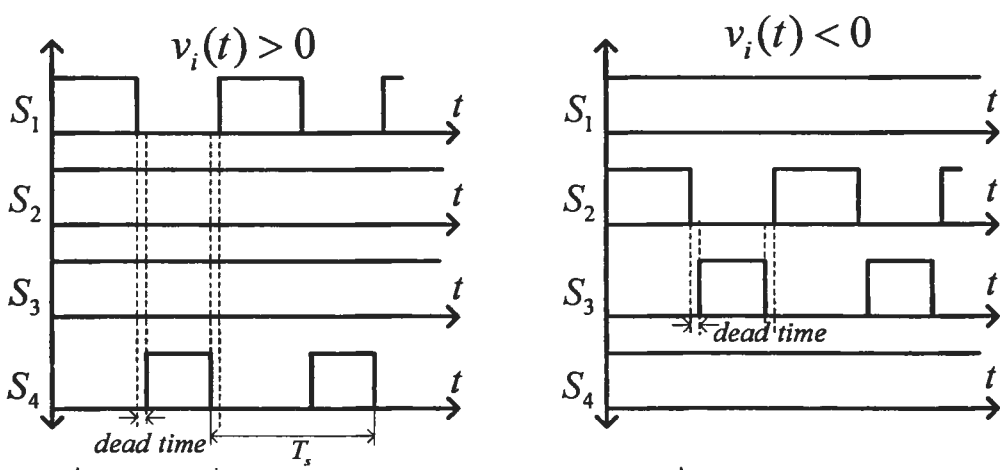
ซึ่งเป็นอันตรายต่อวงจรอย่างมาก แต่เมื่อเกิดความผิดพลาดในการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแสดังรูปที่ 2.18 ก็จะเกิดสไปค์แรงดันขึ้น แต่ก็จะถูกลดความเสียหายลงโดยสนับเบอร์ที่ต่อคร่อมสวิตช์อยู่

2.6 วงจรเอซีซอปเปอร์ที่ใช้สวิตช์ทางเดียว

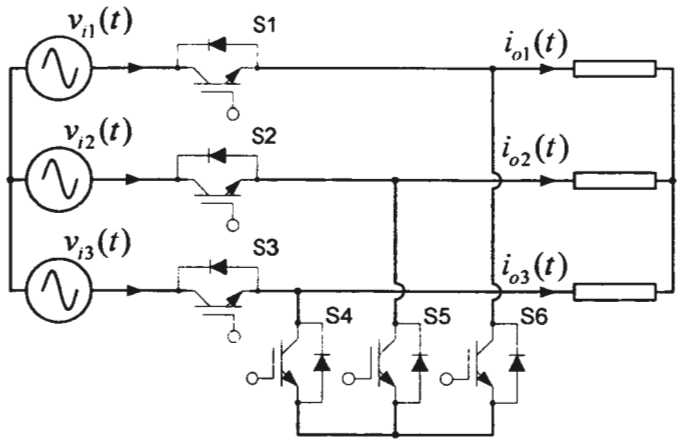
จากความยุ่งยากในการควบคุมสัญญาณขับนำสวิตช์ของวงจรเอซีซอปเปอร์ที่ใช้สวิตช์สองทาง ต่อมาจึงมีผู้คิดโครงสร้างวงจรเอซีซอปเปอร์ให้สามารถใช้สวิตช์ทางเดียวได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้สวิตช์สองทางดังแสดงในรูปที่ 2.20 และรูปที่ 2.22



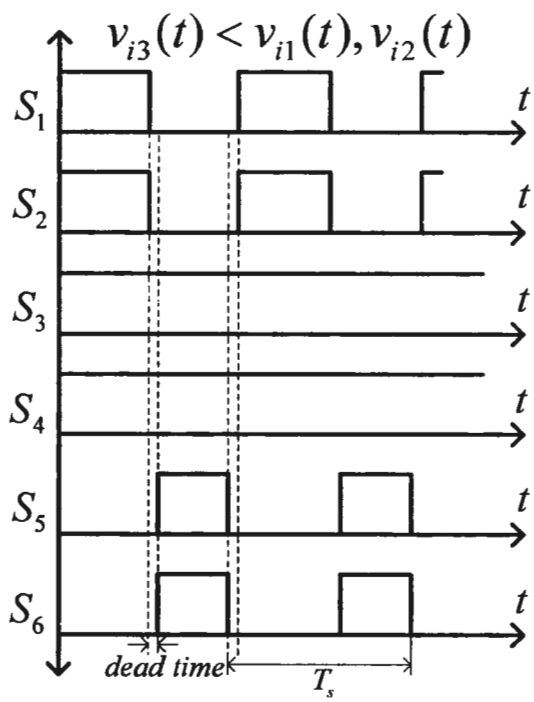
รูปที่ 2.20 วงจรเอซีซอปเปอร์ 1 เฟสที่ใช้สวิตช์ทางเดียว



รูปที่ 2.21 รูปคลื่นสัญญาณขับนำสวิตช์ของวงจร 1 เฟสที่ใช้สวิตช์ทางเดียว



รูปที่ 2.22 วงจรเอซีชอปเปอร์ 3 เฟสที่ใช้สวิตช์ทางเดียว



รูปที่ 2.23 รูปคลื่นสัญญาณขับนำสวิตช์ของวงจร 1 เฟส กรณีแรงดันเฟส 3 น้อยกว่าแรงดันเฟส 1 และแรงดันเฟส 2

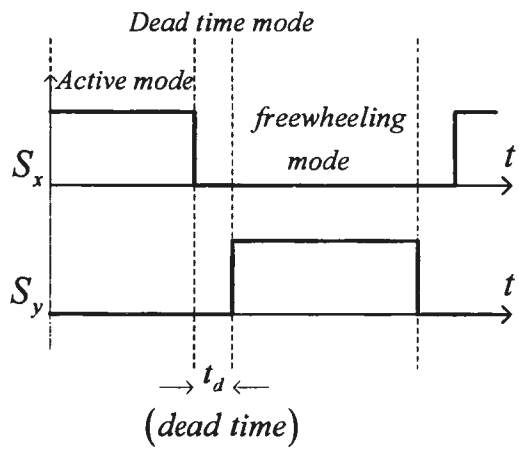
ความแตกต่างของการทำงานของวงจรที่ใช้สวิตช์ทางเดียวกับสวิตช์สองทาง คือ วงจรที่ใช้สวิตช์ทางเดียวไม่ต้องมีรูปแบบของช่วงเวลาสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ที่ทำงานเป็นคู่ประกอบกัน แต่จะต้องมีช่วงเวลาเดดไทม์เพิ่มเข้ามาแทน เพื่อป้องกันการลัดวงจรด้านแหล่งจ่าย สัญญาณขับนำสวิตช์ของวงจรเอซีชอปเปอร์ที่ใช้สวิตช์ทางเดียวดังรูปที่ 2.21 และรูปที่ 2.23 รูปแบบของสัญญาณขับนำทำให้มีเส้นทางให้กระแสด้านโหลดไหลเสมอ จึงไม่เกิดสภาวะเปิด

วงจรด้านโหลด การทำงานของสัญญาณขับนำจะพิจารณาขั้วของแรงดันแหล่งจ่าย กล่าวคือ แรงดันขั้วใดน้อยที่สุดในช่วงเวลานั้นให้สวิตช์ที่ต่ออยู่กับขั้วมีสัญญาณขับนำสวิตช์ให้นำกระแสตลอด สำหรับสวิตช์ของขั้วอื่นที่มีแรงดันมากกว่าก็ให้ทำงานเป็นคู่ประกอบกันตามวัฏจักรงานที่กำหนด การทำงานของสัญญาณขับนำสวิตช์ที่ทำงานเป็นคู่ประกอบกัน สามารถแบ่งออกได้ 3 โหมดการทำงานดังนี้ กำหนดให้สวิตช์ S_x และสวิตช์ S_y ทำงานเป็นคู่ประกอบกันดังรูปที่ 2.18

1. โหมดแอกทีฟ : สวิตช์ S_x นำกระแส แรงดันแหล่งจ่ายส่งถ่ายแรงดันไปสู่โหลด ครบวงจรโดยผ่านไดโอดที่คร่อมสวิตช์อยู่

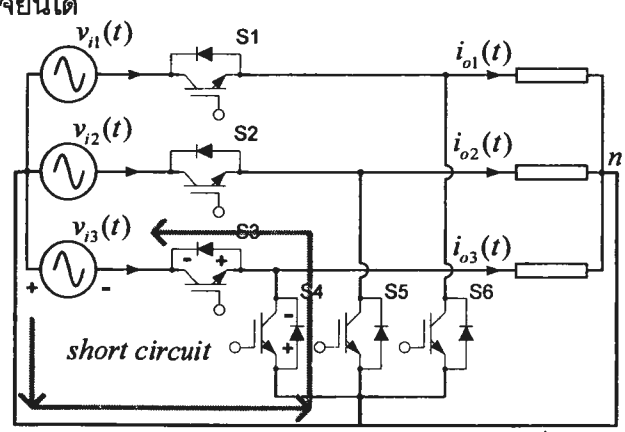
2. โหมดเดดไทม์ : สวิตช์ S_x และ S_y ที่ทำงานเป็นคู่ประกอบกันหยุดนำกระแสทั้งคู่ ด้านโหลดไม่เปิดวงจรเพราะกระแสด้านโหลดสามารถไหลผ่านไดโอดที่คร่อมสวิตช์อยู่และสวิตช์ที่มีสัญญาณขับนำกระแส

3. โหมดหมุนเวียน : สวิตช์ S_y นำกระแส แรงดันด้านออกเท่ากับศูนย์



รูปที่ 2.24 โหมดการทำงานของสัญญาณขับนำสวิตช์ของวงจรเอซีซอปเปอร์ที่ใช้สวิตช์ทางเดียว

อย่างไรก็ตามวงจรในรูปที่ 2.22 นั้นไม่สามารถนำมาพัฒนาต่อเป็นวงจร 3 เฟส 4 สายได้ เพราะเมื่อนำสายนิวตรอน (n) มาเชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายกับโหลดเพื่อสร้างรูปแบบ 3 เฟส 4 สายดังรูปที่ 2.25 แล้วจะเห็นว่าวงจรไม่สามารถรับแรงดันค่าลบได้ซึ่งจะทำให้ลัดวงจร ดังนั้นจึงไม่สามารถนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ได้



รูปที่ 2.25 การลัดวงจรของวงจรเอซีซอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สาย ที่ใช้สวิตช์ทางเดียว