



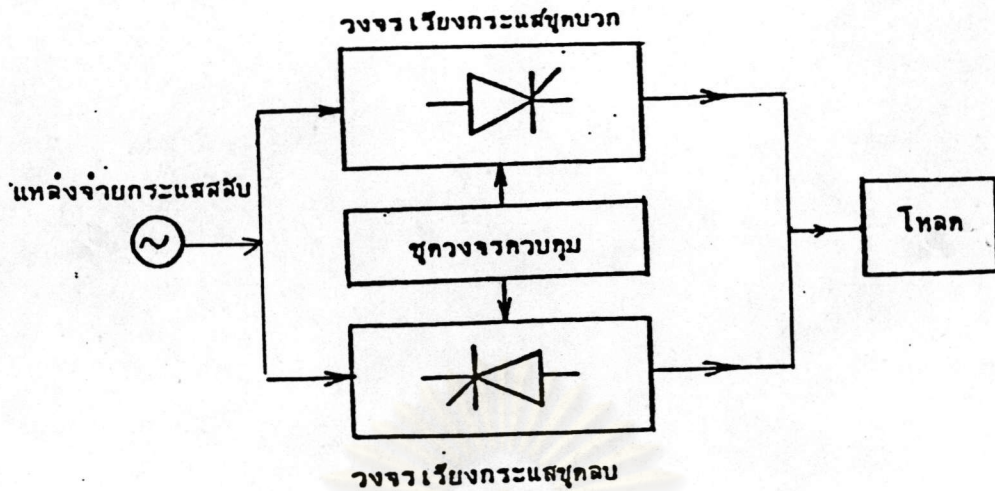
## บทที่ 2

### หลักการทํางานของไซโคลคอนเวอร์เตอร์

#### 2.1 คำนำ

ไซโคลคอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบลดความถี่ คือเป็นวงจรที่แปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ค่าหนึ่ง ไปเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่อีกค่าหนึ่ง ซึ่งต่ำกว่าความถี่ค่าแรก โดยไม่ต้องแปลงผันแรงดันกระแสสลับให้เป็นแรงดันกระแสตรงเสียก่อน อย่างที่ทําในวงจรเปลี่ยนความถี่แบบที่ใช้เครื่องอินเวอร์เตอร์ (inverter)

เมื่อพิจารณาในแง่การทํางาน เราจะพบว่าไซโคลคอนเวอร์เตอร์ประกอบด้วยวงจรเรียงกระแส (rectifier circuit) 2 ชุด ซึ่งรับแรงดันกระแสสลับจากแหล่งจ่ายเดียวกัน แต่ผลิตกันจ่ายแรงดันให้แก่โหลดในทิศทางที่กลับกันชุดละครึ่งรอบของแรงดันด้านออก รูปที่ 1 แสดงแผนภาพของส่วนประกอบหลักที่สำคัญ ๆ ของระบบไซโคลคอนเวอร์เตอร์ ในรูปนี้แหล่งจ่ายกระแสสลับอาจเป็นแบบเฟสเดียวหรือหลายเฟสก็ได้ วงจรเรียงกระแสชุดบวกจะให้แรงดันเฉลี่ยค่าบวกคร่อมโหลดในครึ่งรอบแรกของแรงดันด้านออก ในระหว่างนี้วงจรเรียงกระแสชุดลบจะถูกบังคับมิให้ทํางาน ต่อมาในครึ่งรอบหลังของแรงดันด้านออก วงจรชุดลบจะให้แรงดันเฉลี่ยค่าลบคร่อมโหลด ส่วนวงจรชุดบวกถูกบังคับมิให้ทํางาน การปิดเปิดสวิตซ์ชนิดสารกึ่งตัวนำคืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกว่า ไทริสเตอร์ (thyristor) ในวงจรเรียงกระแส อาจทำได้โดยใช้ชุดวงจรตรรกแบบธรรมดา หรือใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ก็ได้



รูปที่ 1 แผนภาพส่วนประกอบหลักที่สำคัญ ๆ ของระบบไซโคลคอนเวอร์เตอร์

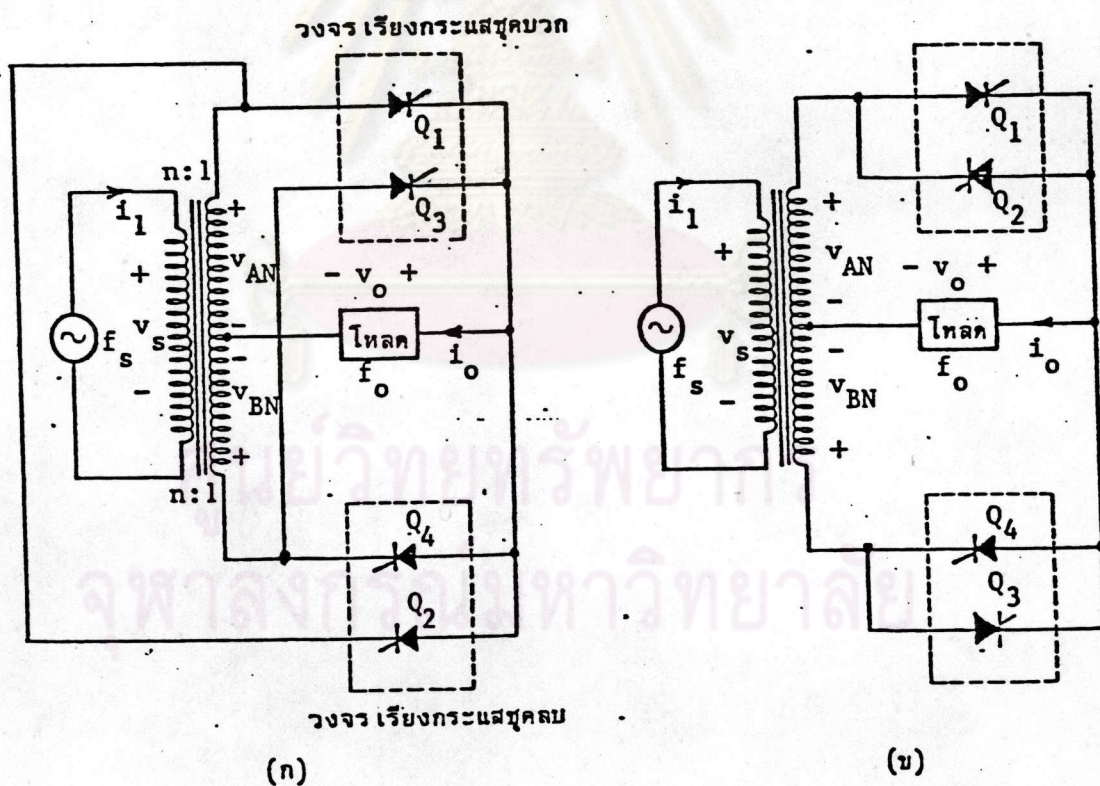
การควบคุมแรงดันด้านออกของไซโคลคอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้ได้แอมพลิจูดและความถี่ตามต้องการและเพื่อลดปริมาณฮาร์มอนิกนั้น สามารถทำได้โดยการปรับค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายและปรับการทำงานของชุดวงจรควบคุมการจุดชนวนไทรสเตอร์ให้พอเหมาะ วิธีเพื่อการนี้มีอยู่ด้วยกัน 2 วิธี คือ วิธีควบคุมเฟส (phase control) หรือควบคุมค่ามุมที่จุดชนวนไทรสเตอร์ให้เริ่มนำกระแส กับวิธีที่ไม่ใช่การควบคุมเฟสซึ่งก็ให้แรงดันด้านออกของไซโคลคอนเวอร์เตอร์เป็นเอนVELOPE (envelope) หรือขอบของรูปคลื่นแรงดันด้านเข้า

ในบทนี้ จะขอกล่าวถึงรายละเอียดของการทำงานของไซโคลคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการควบคุมเฟส โดยจะเริ่มจากไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบที่ง่ายที่สุด คือแบบที่แปลงผันแรงดันกระแสสลับเฟสเดียวเป็นแรงดันกระแสสลับเฟสเดียว ไปจนถึงแบบที่ซับซ้อน คือแบบที่แปลงผันแรงดันกระแสสลับ 3 เฟส เป็นแรงดันกระแสสลับ 3 เฟส ในตอนท้ายของบทนี้ จะขอกล่าวถึงการทำงานของไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบให้แรงดันรูปเอนVELOPE และการใช้งานไซโคลคอนเวอร์เตอร์อย่างสังเขปด้วย (ท่านผู้อ่านที่สนใจการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในรายละเอียดมากขึ้น อาจศึกษาได้จากตำราทางอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น เอกสารอ้างอิง [13] และ [14] เป็นต้น)

## 2.2 หลักการเบื้องต้นของไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบควบคุมเฟส

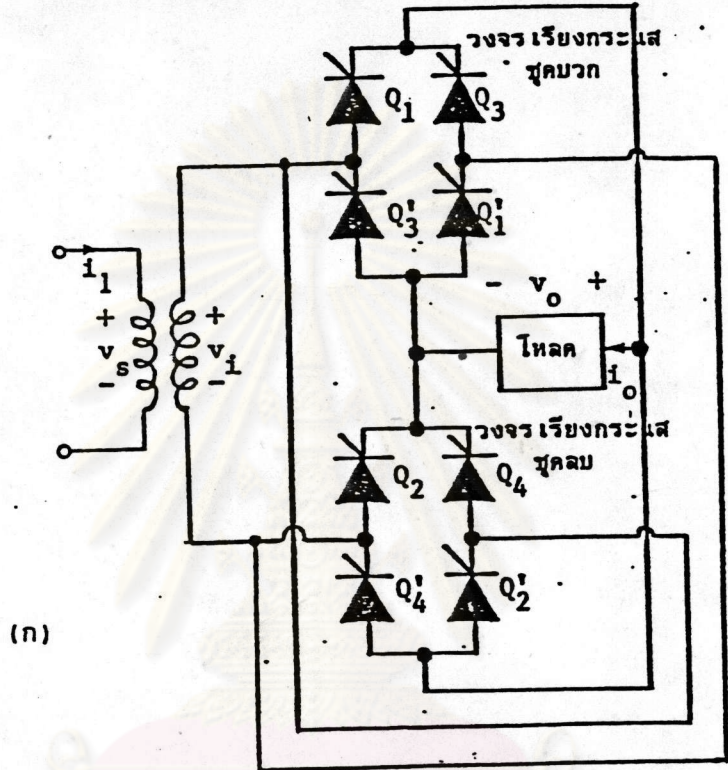
### 2.2.1 ไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบเข้าเฟสเดียวออกเฟสเดียว

รูปที่ 2ก และ 2ข แสดงแผนภาพของวงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบเข้าเฟสเดียวออกเฟสเดียว (1-phase to 1-phase cycloconverter) ซึ่งใช้หม้อแปลงแบบมีจุดต่อแยกกลางสำหรับลดแรงดันต้นจากแหล่งจ่ายเฟสเดียว ก่อนที่จะป้อนเข้าสู่ชุดวงจรเรียงกระแสของไซโคลคอนเวอร์เตอร์ รูปที่ 2ก เน้นการแยกชุดวงจรเรียงกระแสเป็นชุดบวกและชุดลบ ส่วนรูปที่ 2ข เน้นการต่อไทรสเตอร์ [ซึ่งในที่นี้เป็น ตัวเรียงกระแสควบคุม (silicon controlled rectifier) หรือ เอลซีอาร์ (SCR)] 2 ตัวขนานกลับทิศทาง ในรูปทั้งสองนี้ ไม่ได้แสดงชุดวงจรควบคุมเอาไว้อย่าง ชัดเจนก็เพื่อมิให้แผนภาพซับซ้อนเกินไป

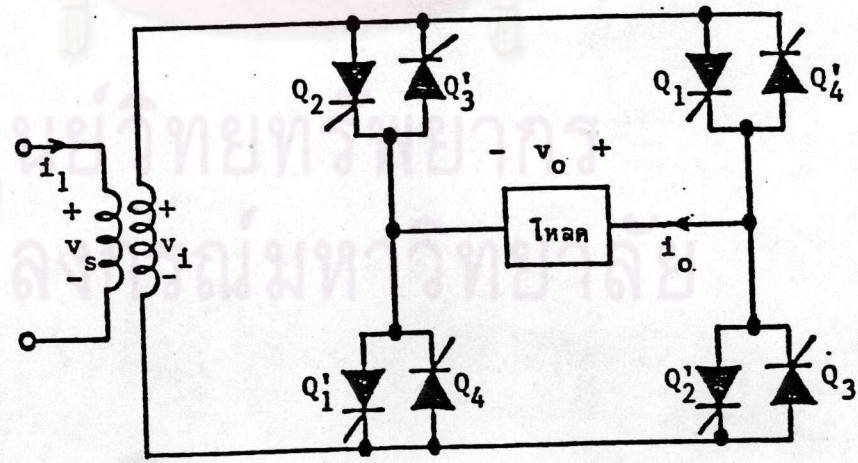


รูปที่ 2 แผนภาพวงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบเข้าเฟสเดียวออกเฟสเดียวซึ่งใช้หม้อแปลงมีจุดต่อแยกกลาง (ก) เมื่อเน้นการแยกชุดวงจรเรียงกระแสเป็นชุดบวกกับชุดลบ (ข) เมื่อเน้นการต่อไทรสเตอร์ขนานกลับทิศทาง

ถ้าไม่ต้องการใช้จุดต่อแยกกลางของหม้อแปลง เราอาจใช้วงจรเรียงกระแสแบบ  
 บริดจ์เฟสเดียว (single-phase bridge rectifier) ดังในรูปที่ 3ก หรือรูปที่ 3ข ก็ได้  
 ในกรณีนี้ไทรสเตอร์จะเพิ่มจำนวนขึ้นเป็น 2 เท่าเมื่อเทียบกับรูปที่ 2ก หรือ 2ข แต่หลักการ  
 ทำงานของวงจรในรูปที่ 3 ก็ยังคงเป็นอย่างเดียวกับของวงจรในรูปที่ 2



(ก)



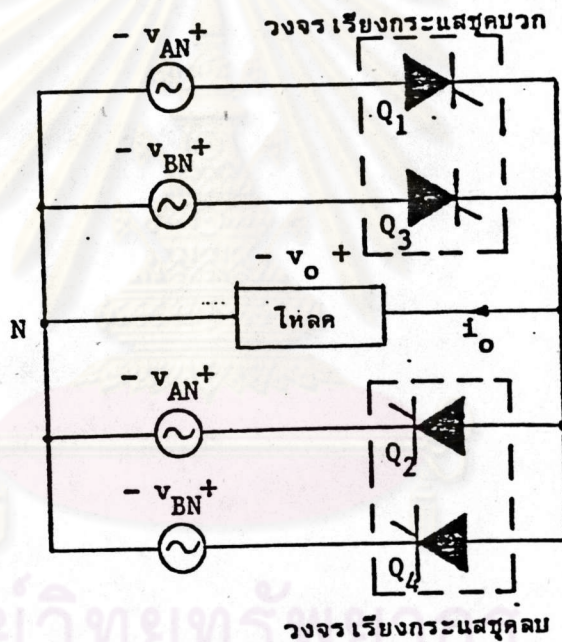
(ข)

รูปที่ 3 แผนภาพวงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบเข้าเฟสเดียวออกเฟสเดียวใช้วงจรเรียงกระแส  
 แบบบริดจ์ (ก) เมื่อเน้นการแยกชุดวงจรเรียงกระแสเป็นชุดบวกกับชุดลบ  
 (ข) เมื่อเน้นการต่อไทรสเตอร์ขนานกลับทางกัน

เพื่อความสะดวกในการอธิบายหลักการทำงานของวงจรในรูปที่ 2 เราจะเขียนแทนวงจรดังกล่าวเสียด้วยวงจรสมมูล (equivalent circuit) ตามรูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของแรงดัน  $v_{AN}$  กับ  $v_{BN}$  ในรูปที่ 4 นี้จะพิจารณาได้จากแรงดันตกขั้วของหม้อแปลงในวงจรตามรูปที่ 2 เป็น

$$v_{AN} = -v_{BN} \quad (1)$$

นั่นคือ  $v_{AN}$  กับ  $v_{BN}$  มีแอมพลิจูดเท่ากันแต่มีวัฏภาค (phase) ทางไฟฟ้าต่างกันอยู่เป็นมุม  $180^\circ$  กล่าวอีกอย่างหนึ่งก็คือ  $v_{AN}$  กับ  $v_{BN}$  มีขนาดเท่ากันแต่ทิศทางกลับกันตลอดเวลา



รูปที่ 4 วงจรสมมูลของวงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์ในรูปที่ 2

เราจะสมมุติได้ว่า เราต้องการให้แรงดันด้านออกมีความถี่  $f_o$  เป็น  $1/3.5$  เท่าของความถี่  $f_u$  ของแรงดันด้านเข้า ในกรณีนี้ เครื่องรอกการเปลี่ยนแปลงของแรงดันด้านออก  $v_o$  จะต้องใช้เวลาระหว่าง 3 กับ 4 เท่าของครึ่งรอบของแรงดัน  $v_u$  ในตอนแรกเราจะกำหนดให้ครึ่งรอบบวกของ  $v_o$  ใช้เวลาเป็น 3 เท่าของครึ่งรอบของ  $v_u$  และครึ่งรอบลบของ  $v_o$  ใช้เวลาเป็น 4 เท่าของครึ่งรอบของ  $v_u$  ในตอนหลังเราอาจสลับให้ครึ่งรอบบวกของ  $v_o$  ใช้

เวลาเป็น 4 เท่าของครึ่งรอบของ  $v_{\text{e}}$  และครึ่งรอบลบของ  $v_{\text{e}}$  ใช้เวลาเป็น 3 เท่าของครึ่งรอบของ  $v_{\text{e}}$  บ้างก็ได้

ในช่วงเวลาที่แรงดันจากแหล่งจ่าย คือ  $v_{\text{e}}$  มีค่าเป็นบวก(ครึ่งแรก)นั้น  $v_{\text{AN}}$  จะมีค่าเป็นบวก แต่  $v_{\text{BN}}$  จะมีค่าเป็นลบ ในภาพนี้เราเห็นได้ชัดจากรูปที่ 4 ว่า ไทริสเตอร์  $Q_1$  กับ  $Q_2$  ได้รับแรงดันไบแอสไปหน้า(forward bias) ส่วนไทริสเตอร์  $Q_2$  กับ  $Q_3$  ได้รับแรงดันไบแอสย้อนกลับ (reverse bias) ดังนั้นถ้าเราจุดชนวนให้  $Q_1$  ในวงจรเรียงกระแสชุดบวกเริ่มนำกระแส โดยประวิงเวลาเอาไว้เป็นมุม  $\alpha_1$  เทียบกับขณะเวลาตอนที่  $v_{\text{e}} = 0$  ก็จะมีส่วนของแรงดัน  $v_{\text{AN}}$  ไปปรากฏเป็นแรงดัน  $v_{\text{e}}$  อันมีค่าเฉลี่ยเป็นบวกอยู่คร่อมโหนด ในระหว่างนี้เราต้องไม่จุดชนวนให้  $Q_2$  ในวงจรเรียงกระแสชุดลบเริ่มนำกระแส เพราะจะเกิดการลัดวงจรคร่อมขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง และอุปกรณ์ต่าง ๆ อาจเสียหายได้

ต่อมาเมื่อถึงช่วงเวลาที่  $v_{\text{e}}$  มีค่าเป็นลบ(ครึ่งแรก)  $v_{\text{AN}}$  จะมีค่าเป็นลบด้วย แต่  $v_{\text{BN}}$  จะมีค่าเป็นบวก ในช่วงนี้ รูปที่ 4 ชี้ให้เห็นว่า  $Q_2$  กับ  $Q_3$  ได้รับแรงดันไบแอสไปหน้า แต่  $Q_1$  กับ  $Q_4$  ได้รับแรงดันไบแอสย้อนกลับ เนื่องจากในตอนนี้เราต้องการแรงดัน  $v_{\text{e}}$  ที่มีค่าเป็นบวกอยู่ เราจึงต้องจุดชนวนให้  $Q_3$  ของวงจรเรียงกระแสชุดบวกเริ่มนำกระแส (โดยมีการประวิงเวลาเป็นมุม  $\alpha_3$  เทียบกับตอนที่  $v_{\text{e}} = 0$ ) แต่ไม่จุดชนวน  $Q_2$  ของวงจรเรียงกระแสชุดลบ

ครั้นเมื่อ  $v_{\text{e}}$  (และ  $v_{\text{AN}}$ ) กลับมามีค่าบวก (ครั้งที่ 2) ในรอบการเปลี่ยนแปลงรอบใหม่ ไทริสเตอร์  $Q_1$  กับ  $Q_4$  ก็จะกลับมาได้รับแรงดันไบแอสไปหน้าอีกครั้ง ในขณะที่  $Q_2$  กับ  $Q_3$  ได้รับแรงดันไบแอสย้อนกลับ ในตอนนี้เราจะจุดชนวนให้  $Q_1$  เริ่มนำกระแส เพื่อให้ได้  $v_{\text{e}}$  มีค่าเฉลี่ยเป็นบวกเป็นครั้งที่ 3 เทียบกับการเปลี่ยนแปลงรายครึ่งรอบของ  $v_{\text{e}}$

หลังจากนี้เราจะให้  $v_{\text{e}}$  มีค่าเฉลี่ยเป็นลบ ในช่วงเวลา 4 เท่าของครึ่งรอบของ  $v_{\text{e}}$  เริ่มด้วยตอนที่  $v_{\text{e}}$  (และ  $v_{\text{AN}}$ ) มีค่าเป็นลบ (ครั้งที่ 2) เราจะจุดชนวน  $Q_2$  (โดยประวิงเวลาไว้เป็นมุม  $\alpha_2$  เทียบกับตอนที่  $v_{\text{e}} = 0$ ) แต่ไม่จุดชนวน  $Q_3$  ต่อมาเมื่อ  $v_{\text{e}}$  (และ  $v_{\text{AN}}$ ) มีค่าเป็นบวก (ครั้งที่ 3) เราก็จุดชนวน  $Q_4$  (โดยประวิงเวลาไว้เป็นมุม  $\alpha_4$  เทียบกับตอนที่  $v_{\text{e}} = 0$ ) แต่ไม่จุดชนวน  $Q_1$  เมื่อ  $v_{\text{e}}$  (และ  $v_{\text{AN}}$ ) มีค่าเป็นลบ(ครั้งที่ 3) เราก็จุดชนวน  $Q_2$  และในตอนท้ายสุด เมื่อ  $v_{\text{e}}$  (และ  $v_{\text{AN}}$ ) มีค่าเป็นบวก(ครั้งที่ 4) เราก็จุดชนวน  $Q_4$  ในตอนนี้ก็เป็นอันว่าเราได้แรงดัน  $v_{\text{e}}$  ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นบวกในช่วงเวลา 3 เท่า ของครึ่งรอบของ  $v_{\text{e}}$  และมีค่าเฉลี่ยเป็นลบในช่วง 4 เท่าของครึ่งรอบของ  $v_{\text{e}}$  ตามต้องการแล้ว

การจุดชนวนไทรสเตอร์ต่าง ๆ ดังที่กล่าวถึงข้างบนนี้ สามารถสรุปได้เป็นความสัมพันธ์ตามตารางที่ 1 ในกรณีที่เรต้องการให้เครื่องรอบวงของ  $v_o$  ใช้เวลาเป็น 4 เท่าของเครื่องรอบของ  $v_s$  และให้เครื่องรอบลบของ  $v_o$  ใช้เวลาเป็น 3 เท่าของเครื่องรอบของ  $v_s$  เราต้องใช้จังหวะจุดชนวนไทรสเตอร์ต่าง ๆ ตามที่สรุปไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 จังหวะการจุดชนวนไทรสเตอร์ของไซโคลคอนเวอร์เตอร์สำหรับอัตราส่วน  $f_o/f_s = 1/3.5$  โดยที่ ช่วงแรงดัน  $v_o$  เฉลี่ยเป็นบวก/ช่วงแรงดัน  $v_o$  เฉลี่ยเป็นลบ = 3/4

หมายเลขเครื่องรอบของแรงดัน $v_s$	แรงดัน $v_s$ มีค่า + หรือ -	ไทรสเตอร์ที่ถูกจุดชนวน	ค่าเฉลี่ยของ $v_o$ มีค่าเป็น + หรือ -
1	+ (ครั้งที่ 1)	$Q_1$	+
2	- (ครั้งที่ 1)	$Q_3$	+
3	+ (ครั้งที่ 2)	$Q_1$	+
4	- (ครั้งที่ 2)	$Q_2$	-
5	+ (ครั้งที่ 3)	$Q_4$	-
6	- (ครั้งที่ 3)	$Q_2$	-
7	+ (ครั้งที่ 4)	$Q_4$	-

รูปที่ 5 และรูปที่ 6 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสต่าง ๆ ในวงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบเข้าเฟสเดียวออกเฟสเดียวตามรูปที่ 2 เมื่อมีการจุดชนวนไทรสเตอร์ตามตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับ ในรูปทั้งสองนี้เราจะเห็นแรงดันรูปคลื่นไซน์  $v_{AN}$  กับ  $v_{BN}$  อยู่ทางด้านบนสุดของรูป ถัดลงมาจะเป็นสัญญาณ P และ N ที่ใช้กำหนดเครื่องรอบการทำงานของวงจรเรียงกระแสชุดบวกและชุดลบ ตามลำดับ ต่อจากสัญญาณ P และ N ลงมาเป็นสัญญาณ  $i_{x1}$ ,  $i_{x2}$ ,  $i_{x3}$  และ  $i_{x4}$  ซึ่งใช้จุดชนวนไทรสเตอร์  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  และ  $Q_4$  ตามลำดับ ส่วนที่แรงขาของสัญญาณเหล่านี้ ในรูปที่ 5 และรูปที่ 6 เป็นส่วนที่ถูกกระบังไว้ด้วยสัญญาณ  $P = 0$

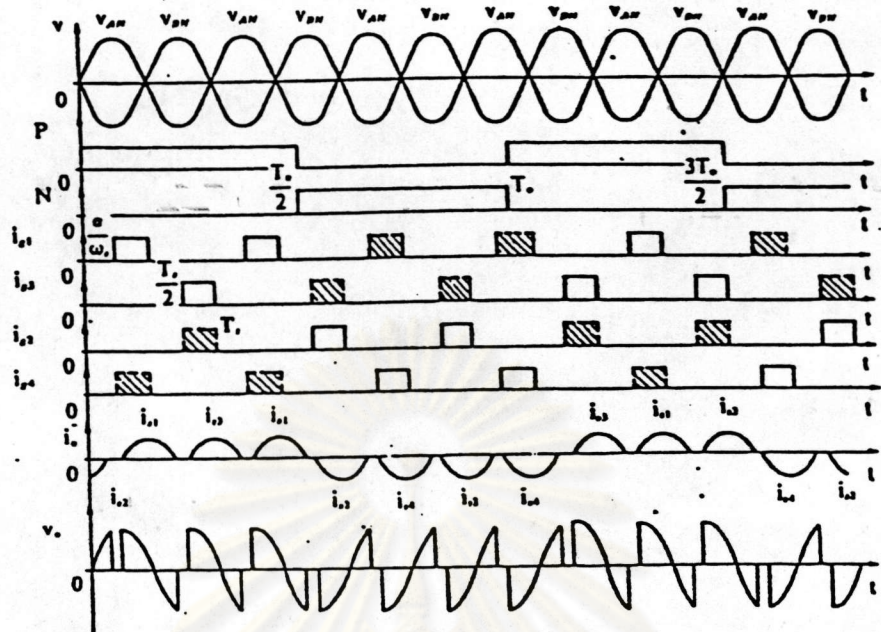
(สำหรับ  $i_{\alpha_1}$  กับ  $i_{\alpha_3}$ ) หรือสัญญาณ  $N = 0$  (สำหรับ  $i_{\alpha_3}$  กับ  $i_{\alpha_4}$ ) เพื่อมิให้ไปจุดชนวน ไทริสเตอร์ที่ยังไม่ถึงเวลาทำงาน

ตารางที่ 2 จังหวะการจุดชนวนไทริสเตอร์ของไซโคลคอนเวอร์เตอร์สำหรับอัตราส่วน  $f_o/f_s = 1/3.5$  โดยที่ ช่วงแรงดัน  $v_o$  เฉลี่ยเป็นบวก/ช่วงแรงดัน  $v_o$  เฉลี่ยเป็นลบ =  $4/3$

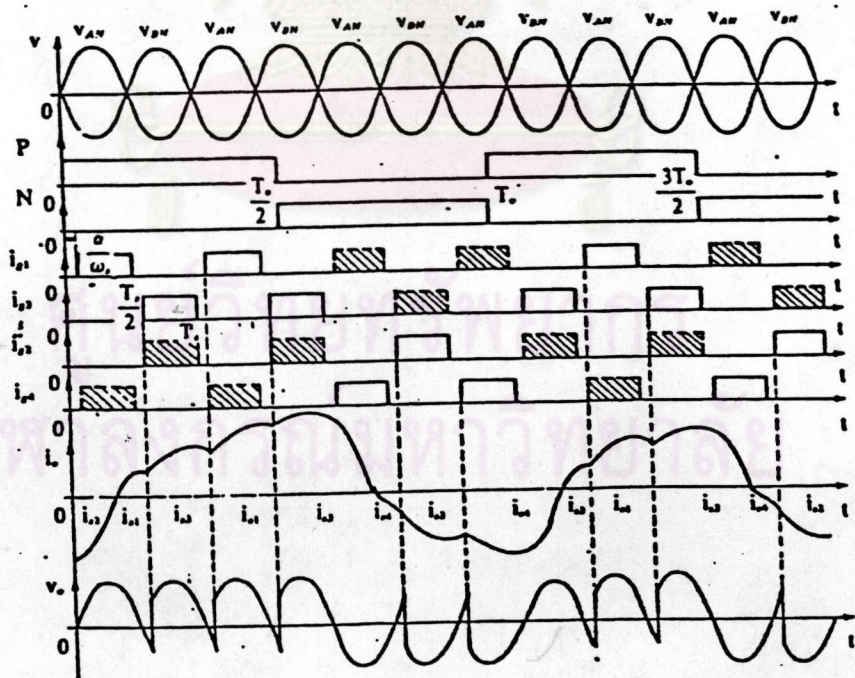
หมายเลขครึ่งรอบ ของแรงดัน $v_s$	แรงดัน $v_s$ มีค่า + หรือ -	ไทริสเตอร์ ที่ถูกจุดชนวน	ค่าเฉลี่ยของ $v_o$ มีค่าเป็น + หรือ -
1	+ (ครึ่งที่ 1)	$Q_1$	+
2	- (ครึ่งที่ 1)	$Q_3$	+
3	+ (ครึ่งที่ 2)	$Q_1$	+
4	- (ครึ่งที่ 2)	$Q_3$	+
5	+ (ครึ่งที่ 3)	$Q_4$	-
6	- (ครึ่งที่ 3)	$Q_2$	-
7	+ (ครึ่งที่ 4)	$Q_1$	-

ศูนย์วิทยพัทยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 5 รูปคลื่นแรงดันและกระแสต่าง ๆ ในวงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์ตามรูปที่ 2 เมื่อมีการจุดชนวนไทรสเตอร์ตามตารางที่ 1 และได้กระแส  $i_o$  แบบขาดตอน



รูปที่ 6 รูปคลื่นแรงดันและกระแสต่าง ๆ ในวงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์ตามรูปที่ 2 เมื่อมีการจุดชนวนไทรสเตอร์ตามตารางที่ 2 และได้กระแส  $i_o$  แบบต่อเนื่อง

รูปคลื่นกระแสต้านออก  $i_o$  และแรงดันต้านออก  $v_o$  ในรูปที่ 5 แสดงถึงการทำงานแบบกระแสขาดตอน (discontinuous-current operation) ของไซโคลคอนเวอร์เตอร์ในรูปที่ 2 เมื่อโหลดเป็นแบบเหนี่ยวนำ (inductive) โดยมีความต้านทาน  $R$  และความเหนี่ยวนำ  $L$  และมีมุมจุดชาน  $\alpha_j$  ( $j = 1, 2, 3, 4$ ) ของไทรสเตอร์ทุกตัวอยู่ในช่วง

$$\phi \leq \alpha_j < \pi \quad (2)$$

โดยที่

$$\phi = \tan^{-1}(\omega L/R) \quad (3)$$

และ

$$\omega = 2\pi f \quad (4)$$

(จาก Dewan and Straughen [3])

ในรูปที่ 6 รูปคลื่นกระแสต้านออก  $i_o$  และแรงดันต้านออก  $v_o$  แสดงถึงการทำงานแบบกระแสต่อเนื่อง (continuous-current operation) ของไซโคลคอนเวอร์เตอร์ในรูปที่ 2 ขณะที่โหลดเป็นแบบเหนี่ยวนำโดยมีความต้านทาน  $R$  และความเหนี่ยวนำ  $L$  และมีมุมจุดชาน  $\alpha_j$  ( $j = 1, 2, 3, 4$ ) ของไทรสเตอร์ทุกตัวมีค่าอยู่ในช่วง

$$0 \leq \alpha_j < \phi \quad (5)$$

โดยที่  $\phi$  มีค่าตามสมการ (3) (จาก Dewan and Straughen [3])

ถ้าหากเราเปลี่ยนจากวงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบเข้าเฟสเดียวออกเฟสเดียวตามรูปที่ 2 ไปใช้วงจรตามรูปที่ 3 เราจะต้องจุดชานไทรสเตอร์ครึ่งละ 2 ตัวพร้อมกัน เช่น ถ้าเราจุดชานไทรสเตอร์  $Q_1$  ในรูปที่ 2 เราจะต้องจุดชานไทรสเตอร์  $Q_1$  และ  $Q_3$  ในรูปที่ 3 พร้อมกันจึงจะได้ผลอย่างเดียวกัน โปรดสังเกตว่า  $v_1$  ในรูปที่ 3 ก็คือ  $v_{AN}$  หรือ  $-v_{BN}$  ในรูปที่ 2 นั้นเอง



รูปคลื่นของแรงดัน  $v_o$  และกระแส  $i_o$  ในรูปที่ 5 และรูปที่ 6 ได้มาจากการจุด  
ชนวน  $Q_1$  ถึง  $Q_4$  โดยที่มุมประวิงการจุดชนวน  $\alpha_1$  ถึง  $\alpha_4$  มีค่าเป็น  $\alpha$  เท่ากันหมด รูปคลื่น  
เหล่านี้มีฮาร์มอนิกเป็นปริมาณสูง ซึ่งก็เป็นผลเสียต่อการใช้งานไซโคลคอนเวอร์เตอร์ เพื่อจะ  
ลดปริมาณฮาร์มอนิกใน  $v_o$  และ  $i_o$  เราจำเป็นต้องใช้ค่ามุมประวิง  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  และ  $\alpha_4$   
ต่าง ๆ กัน ค่าของมุมเหล่านี้สามารถหาได้จากจุดที่เส้นโค้งไซน์  $v_o^*$  ซึ่งแทน  $v_o$  ในอุดมคติ ตัด  
กับเส้นโค้ง  $v_{AN}$  และ  $v_{BN}$  ซึ่งเลื่อนเฟสไป  $90^\circ$  ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 7 แต่ทั้งนี้อัตราส่วน  
ความถี่  $f_c/f_o$  ควรมีค่าน้อยเท่ากับ 9 (โปรดดูรายละเอียดใน [3])

เมื่อเปรียบเทียบ  $v_o$  ในรูปที่ 7 กับ  $v_o$  ในรูปที่ 5 และรูปที่ 6 แล้ว เราจะเห็น  
ว่า  $v_o$  ในรูปที่ 7 มีรูปคลื่นใกล้เคียงไซน์มากกว่า  $v_o$  ในรูปที่ 5 และรูปที่ 6 นั่นคือ  $v_o$  ใน  
รูปที่ 7 มีปริมาณฮาร์มอนิกน้อยกว่า อย่างไรก็ตาม กระแส  $i_o$  ในขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลง  
ในรูปที่ 2 และรูปที่ 3 จะมีรูปคลื่นแบบ เอเอ็ม (AM) คือแอมพลิจูดของคลื่นความถี่  $f_s$  ถูก  
มอดูเลตด้วยความถี่  $f_o$  ดังนั้นรูปคลื่นนี้จะมีส่วนประกอบความถี่  $f_s + f_o$  และส่วนประกอบ  $f_s$   
 $- f_o$  ปนอยู่กับส่วนประกอบหลักมูลซึ่งมีความถี่  $f_s$

ที่ความถี่ต่ำ วงจรเรียงกระแสแต่ละชุดของไซโคลคอนเวอร์เตอร์จะทำงานต่อเนื่อง  
กันเป็นเวลานาน ดังนั้นจึงต้องคำนวณขนาดพิกัด (rating) ของชิ้นส่วนต่าง ๆ ในวงจร ให้  
เท่ากับของวงจรเรียงกระแสที่ทำงานต่อเนื่องทั่วไป ยกเว้นเพียงขนาดพิกัดของแผงระบาย  
ความร้อน ซึ่งอาจลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่าพิกัดของเอสซีอาร์ ที่ใช้ในวงจรเรียงกระแสธรรมดา  
ทั้งนี้เนื่องจากกำลังสูญเสียในวงจรเรียงกระแสแต่ละวงจรของไซโคลคอนเวอร์เตอร์ มีค่าเท่ากับครึ่ง  
หนึ่งของกำลังสูญเสียในวงจรเรียงกระแสธรรมดา

จากการวิเคราะห์โดย Dewan and Straughen ([3]) เราได้พิกัดของค่าอาร์-  
เอ็มเอสของกระแสต้านออก มีค่าเท่ากับ

$$I_{RMS} = I = (V_{om})^* / Z_o \quad (6)$$

โดยที่  $(V_{om})^*$  เป็นค่าอาร์เอ็มเอสสูงสุดของแรงดันต้านออกอุดมคติ  $v_o^*$  ที่ต้องการ  
[( $V_{om})^* = 2V/\pi$  โดยที่  $V$  เป็นค่าอาร์เอ็มเอสของ  $v_{AN}$  และ  $v_{BN}$ )]

$Z_o$  เป็นค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรโหลดที่ความถี่  $\omega_o$

ค่ากระแสอาร์เอ็มเอสของเอสซีอาร์มีค่าเท่ากับ

$$I_{SCR, RMS} = I / 1.414 \quad (7)$$

ค่ากระแสชั่วขณะสูงสุดที่ไหลผ่านเอสซีอาร์ มีค่าเท่ากับ

$$i_{P(SCR)} = 1.414 (V_{om})^* / Z_o \quad (8)$$

ค่ากระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านเอสซีอาร์ มีค่าเท่ากับ

$$I_{SCR, AVG} = (2/\pi) I \quad (9)$$

ค่าแรงดันยอดสูงสุดที่บ่อนเข้าเอสซีอาร์ในวงจรของรูปที่ 4 มีค่าเท่ากับ

$$V_{P(SCR)} = \pm 2.828 V \quad (10)$$

ค่ากำลังต้านออกสูงสุดของไซโคลคอนเวอร์เตอร์ [สอดคล้องกับ  $(V_{om})^*$ ] มีค่าเป็น

$$P_o = (V_{om})^* I \cos(\phi_o) \quad (11)$$

โดยที่  $\phi_o$  เป็นมุมอิมพีแดนซ์ของวงจรโหลดที่ความถี่ต้านออก  $\omega_o$

ค่าตัวประกอบกำลังต้านเข้าเมื่อกำลังต้านออกมีค่าสูงสุด [สอดคล้องกับ  $(V_{om})^*$ ] คือ

$$PF = 0.636 \cos(\phi_o) \quad (12)$$

จากสมการที่ (12) จะเห็นว่าค่าตัวประกอบกำลังด้านเข้าจะมีค่าสูงสุดเพียง 0.636 เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากกระแสด้านเข้ามีอาร์มอนิกปนอยู่ ซึ่งเป็นข้อเสียเปรียบของไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบนี้

จากหลักการทำงานของไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบเข้าเฟสเดียวออกเฟสเดียว ดังที่อธิบายมาแล้วนี้ เราพอจะสรุปได้ว่าชุดวงจรควบคุมการจุดชนวนไทริสเตอร์ในวงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์ควรทำหน้าที่ต่อไปนี้ คือ

- (ก) สร้างสัญญาณ P และ N เพื่อกำหนดครั้งรอบการทำงานของวงจรเรียงกระแสชุดบวก และวงจรเรียงกระแสชุดลบ
- (ข) กำหนดตำแหน่งค่าศูนย์ของแรงดัน  $v_{AN}$  และ  $v_{BN}$
- (ค) กำหนดค่ามุมประวิงการจุดชนวน  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  และ  $\alpha_4$  ของไทริสเตอร์  $Q_1, Q_2, Q_3$  และ  $Q_4$
- (ง) ตรวจสอบทิศทางการไหลของกระแส  $i_o$  และกำหนดตำแหน่งค่าศูนย์ของ  $i_o$  เพื่อประกอบการกำหนดค่ามุมประวิงการจุดชนวนไทริสเตอร์ที่จะไม่ทำให้เกิดการลัดวงจร เนื่องจากวงจรเรียงกระแสชุดบวกและชุดลบทำงานเหลื่อมกัน


ในการทำหน้าที่ตามข้อ (ง) ชุดวงจรควบคุมการจุดชนวนไทริสเตอร์จะต้องรอให้กระแสไหลออกจากวงจรเรียงกระแสชุดที่กำลังทำงานอยู่กลายเป็นศูนย์ และคงค่าศูนย์อยู่เป็นช่วงเวลาที่ยาวนานกว่าเวลาจรตัดกระแส (turn-off time) ของไทริสเตอร์ ก่อนที่จะจุดชนวนไทริสเตอร์ของวงจรเรียงกระแสอีกชุดหนึ่ง ซึ่งจะให้กระแสไหลผ่านไหลในทิศทางตรงข้ามกับตอนแรก ลักษณะการให้กระแสไหลมีช่วงค่าศูนย์ก่อนที่จะเปลี่ยนทิศทางนี้ จะเห็นได้จากรูปที่ 7 ซึ่งแสดงการลดอาร์มอนิกในแรงดันด้านออก  $v_o$

## 2.2.2 ไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบเข้า 3 เฟสออกเฟสเดียว

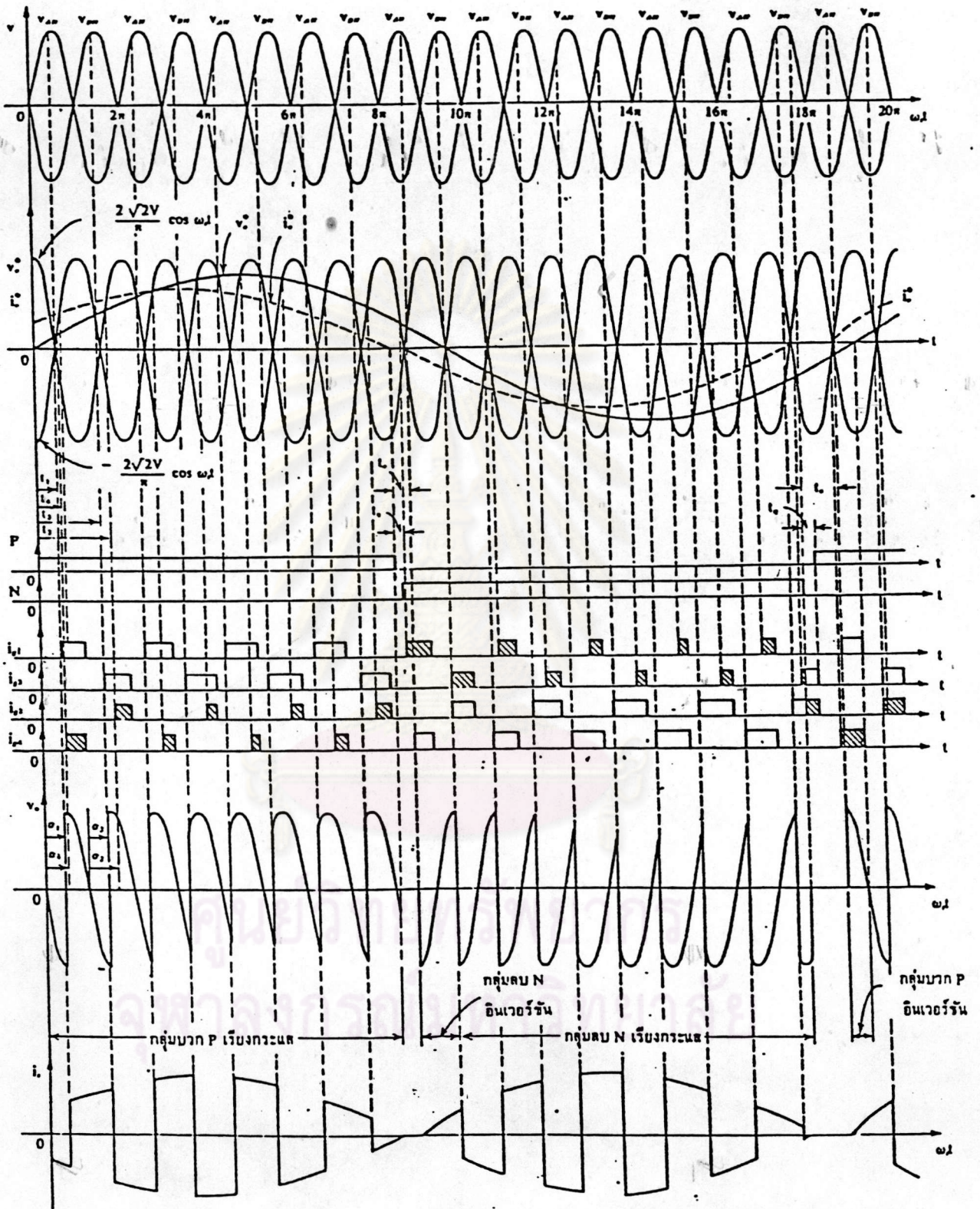
ไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบนี้นิยมใช้วงจรเรียงกระแสชุดบวกและลบ ที่ต่อแบบบริดจ์ 3 เฟส โดยประกอบขึ้นจากไทริสเตอร์ 6 ตัวในแต่ละชุด ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 8 ก รูปนี้เขียน

ในอีกรูปแบบหนึ่งได้เป็นรูปที่ 8 ข เพื่อแสดงว่ามีการต่อไทรสเตอร์ขนานกันเป็นคู่ ๆ ในทิศทางที่กลับกัน

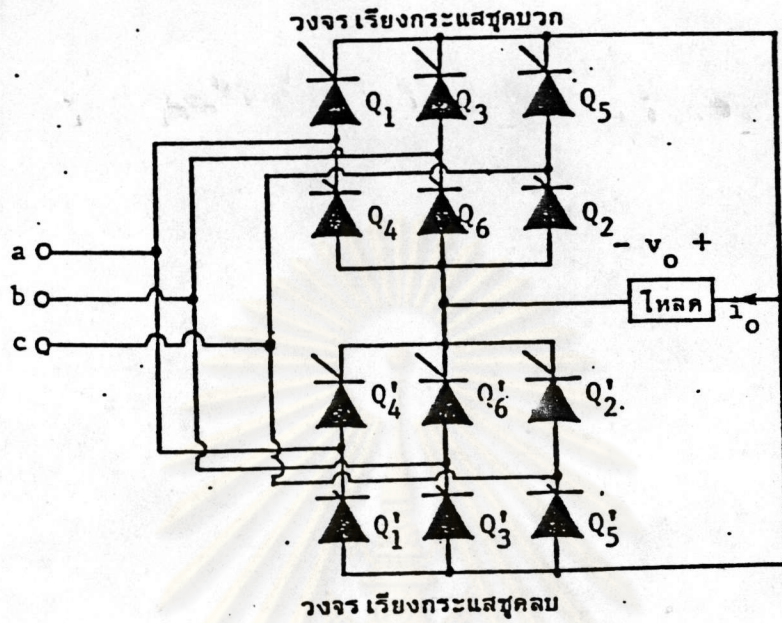
เนื่องจากระบบจ่ายแรงดัน 3 เฟส 3 สาย ตามรูปที่ 8 มีแรงดันระหว่างสายให้เลือกใช้กับวงจรบริดจ์ 3 เฟสได้ถึง 6 แรงดัน คือ  $v_{ab}$ ,  $v_{bc}$ ,  $v_{ca}$ ,  $v_{ba}$ ,  $v_{cb}$  และ  $v_{ac}$  ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการอธิบายหลักการทำงานของไซโคลคอนเวอร์เตอร์ในรูปดังกล่าว เราจึงเขียนวงจรสมมูลของวงจรในรูปที่ 8 ดังในรูปที่ 9 ซึ่งก็คล้ายกับวงจรสมมูลของไซโคลคอนเวอร์เตอร์เฟสเดียวในรูปที่ 4 แรงดันรวมทั้งไทรสเตอร์ที่จะนำกระแสของวงจรในรูปที่ 8 และวงจรในรูปที่ 9 มีความสัมพันธ์สอดคล้องกันตามตารางที่ 3



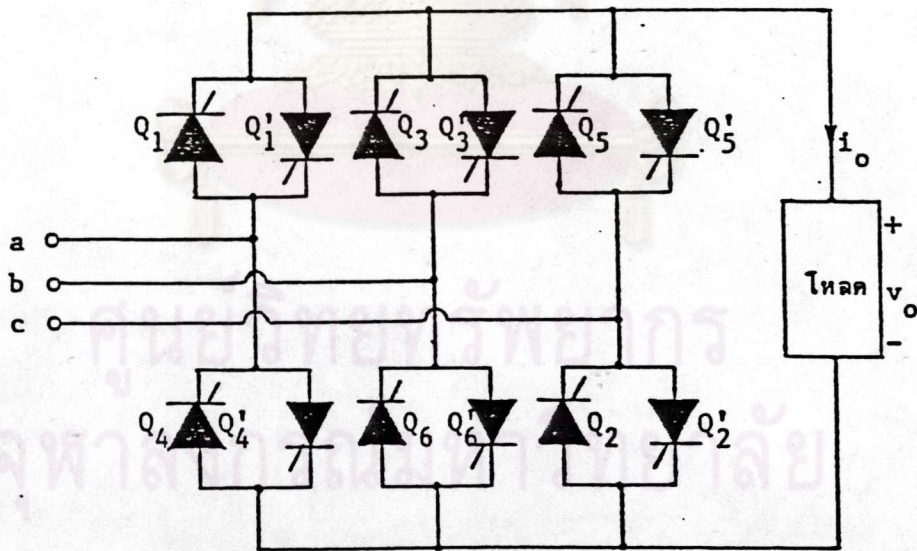
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7 การลดปริมาณฮาร์มอนิกในแรงดันด้านออกโดยการแปรค่ามุมประวิงการจุดชนวน  
 ไทริสเตอร์ในวงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบเข้าเฟสเดียวออกเฟสเดียว



(ก)



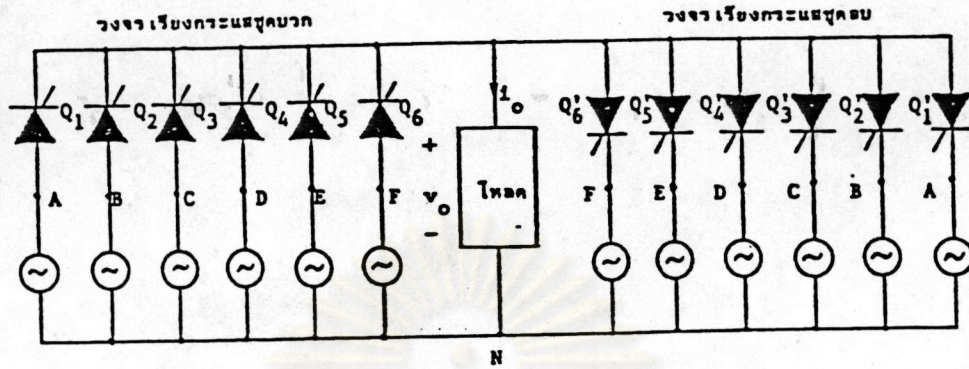
(ข)

รูปที่ 8 แผนภาพวงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบเข้า 3 เฟสออกเฟสเดียว

(ก) เมื่อเน้นการแยกชุดวงจรเรียงกระแสเป็นชุดบวกกับชุดลบ

(ข) เมื่อเน้นการต่อไทรสเตอร์ขนานกลับทางกัน





รูปที่ 9 วงจรสมมูลของไซโคลคอนเวอเตอร์ในรูปที่ 8

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างวงจรไซโคลคอนเวอเตอร์ในรูปที่ 8 กับวงจรสมมูลในรูปที่ 9

	วงจรในรูปที่ 8		วงจรสมมูลในรูปที่ 9				
	แรงดันที่ต่อถึงโหลด	ไทรสเตอร์ที่นำกระแส		แรงดันที่ต่อถึงโหลด		ไทรสเตอร์ที่นำกระแส	
		ชุกบวก	ชุกลบ	ชุกบวก	ชุกลบ	ชุกบวก	ชุกลบ
$\pi/3 - 2\pi/3$	$v_{ab}$	$Q_6, Q_1$	$Q_3', Q_4'$	$v_{AN}$	$v_{DN}$	$Q_1$	$Q_4'$
$2\pi/3 - \pi$	$v_{ac}$	$Q_1, Q_2$	$Q_4', Q_5'$	$v_{BN}$	$v_{EN}$	$Q_2$	$Q_5'$
$\pi - 4\pi/3$	$v_{bc}$	$Q_2, Q_3$	$Q_5', Q_6'$	$v_{CN}$	$v_{FN}$	$Q_3$	$Q_6'$
$4\pi/3 - 5\pi/3$	$v_{ba}$	$Q_3, Q_4$	$Q_6', Q_1'$	$v_{DN}$	$v_{AN}$	$Q_4$	$Q_1'$
$5\pi/3 - 2\pi$	$v_{ca}$	$Q_4, Q_5$	$Q_1', Q_2'$	$v_{EN}$	$v_{BN}$	$Q_5$	$Q_2'$
$2\pi - 7\pi/3$	$v_{cb}$	$Q_5, Q_6$	$Q_2', Q_3'$	$v_{FN}$	$v_{CN}$	$Q_6$	$Q_3'$

การสร้างรูปคลื่นแรงดันด้านออก  $v_o$  จะทำได้โดยการเลือกจุดชนวนไตรสเตอร์ใน วงจรเรียงกระแสชุดบวก ( $Q_1 - Q_6$  ในรูปที่ 9) และไตรสเตอร์ในวงจรเรียงกระแสชุดลบ ( $Q_1' - Q_6'$  ในรูปที่ 9) พร้อมทั้งกำหนดมุมประวิงการจุดชนวน  $\alpha_j$  ( $j = 1 - 6$ ) ให้ พอเหมาะ ชุดวงจรควบคุมการจุดชนวนไตรสเตอร์ในกรณีนี้ จะต้องทำหน้าที่ทำนองเดียวกับชุด วงจรควบคุมของไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบเข้าเฟสเดียวออกเฟสเดียว คือนำที่ตามข้อ (ก) - (ง) ในหัวข้อย่อย 2.2.1 ยกเว้นที่ต่างกันก็คือในข้อ (ข) และในข้อ (ค) นั้น ชุดวงจร ควบคุมของไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบเข้า 3 เฟสออกเฟสเดียว ต้องสามารถกำหนดตำแหน่งค่า ศูนย์ของแรงดัน 6 แรงดันของระบบ 3 เฟสทางด้านเข้าได้ และต้องกำหนดค่ามุมประวิงการ จุดชนวนของไตรสเตอร์จำนวน 12 ตัวได้ด้วย แทนที่จะเป็นแรงดัน 2 แรงดันกับค่ามุมประวิง การจุดชนวนของไตรสเตอร์เพียง 4 ตัว ตัวอย่างของการสร้างแรงดัน  $v_o$  ที่ใกล้เคียงรูปคลื่น ไซน์มีแสดงไว้ในรูปที่ 10 (โปรดดูรายละเอียดจากเอกสารอ้างอิง [3] หน้า 483 - 489)

เมื่อเปรียบเทียบรูปคลื่น  $v_o$  ในรูปที่ 10 (ซึ่งมีความถี่  $f_o = f_s/3.5$ ) กับรูปคลื่น  $v_o$  ในรูปที่ 7 (ซึ่งมีความถี่  $f_o = f_s/9.5$ ) เราจะเห็นว่ารูปคลื่น  $v_o$  ในรูปที่ 10 มีลักษณะ ใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ดีกว่า ทั้ง ๆ ที่มีความถี่สูงกว่าราว 3 เท่า เหตุผลก็คือวงจรในรูปที่ 7 มี โอกาสเลือกใช้แรงดันด้านเข้าเพียง 2 แรงดันเท่านั้น ด้วยเหตุนี้วงจรในรูปที่ 10 ซึ่งใช้แรงดัน 3 เฟสมาสร้างแรงดันเฟสเดียวจึงได้รับความนิยมมากกว่า และการลดฮาร์มอนิกในแรงดันด้าน- ออก  $v_o$  โดยวิธีแปรค่ามุมจุดชนวนเอสซีอาร์จะเริ่มทำได้ที่อัตราส่วนความถี่  $f_s/f_o$  ต่ำกว่า คือ ทำได้ที่  $f_s/f_o > 3$  แทนที่จะเป็น  $f_s/f_o > 9$  อย่างในกรณีของรูปที่ 7 [3]

จากการวิเคราะห์ในเอกสารอ้างอิง[3] พิกัดของกระแสด้านออกค่าอาร์เอ็มเอสมีค่า

$$I_{RMS} = I = (V_{om})^* / Z_o \quad (13)$$

โดยที่  $(V_{om})^*$  เป็นค่าอาร์เอ็มเอสสูงสุดของแรงดันด้านออกที่ต้องการ [ $(V_{om})^* = 3V/\pi$ ,  $V =$  ค่าอาร์เอ็มเอสของ  $v_{AN}$ ,  $v_{BN}$  และ  $v_{CN}$ ] และ  $Z_o$  เป็นอิมพีแดนซ์ของโหลดที่ความถี่  $\omega_o$

ค่ากระแสอาร์เอ็มเอสของเอสซีอาร์มีค่าเท่ากับ

$$I_{SCR,RMS} = I / 1.732 \quad (14)$$

ค่ากระแสชั่วขณะสูงสุดที่ไหลผ่านเอสซีอาร์ มีค่าเท่ากับ

$$i_{P(SCR)} = 1.414(V_{om})^*/Z_o \quad (15)$$

กระแสด้านออกเฉลี่ยครึ่งวัฏจักร มีค่าเท่ากับ

$$I_{o,AVG} = 2.8281/\pi \quad (16)$$

เนื่องจากเอสซีอาร์แต่ละตัวในวงจรของรูปที่ 8 ทำหน้าที่นำกระแส 2 หัวง ในจำนวนกระแส 6 หัวงในแต่ละวัฏจักร ดังนั้นค่ากระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านเอสซีอาร์จึงมีค่าเท่ากับ

$$I_{SCR,AVG} = (2.828/3\pi) I \quad (17)$$

ค่าแรงดันยอดสูงสุดที่กระทำต่อเอสซีอาร์ในวงจรของรูปที่ 8 มีค่าเท่ากับ

$$V_{P(SCR)} = \pm 1.414V \quad (18)$$

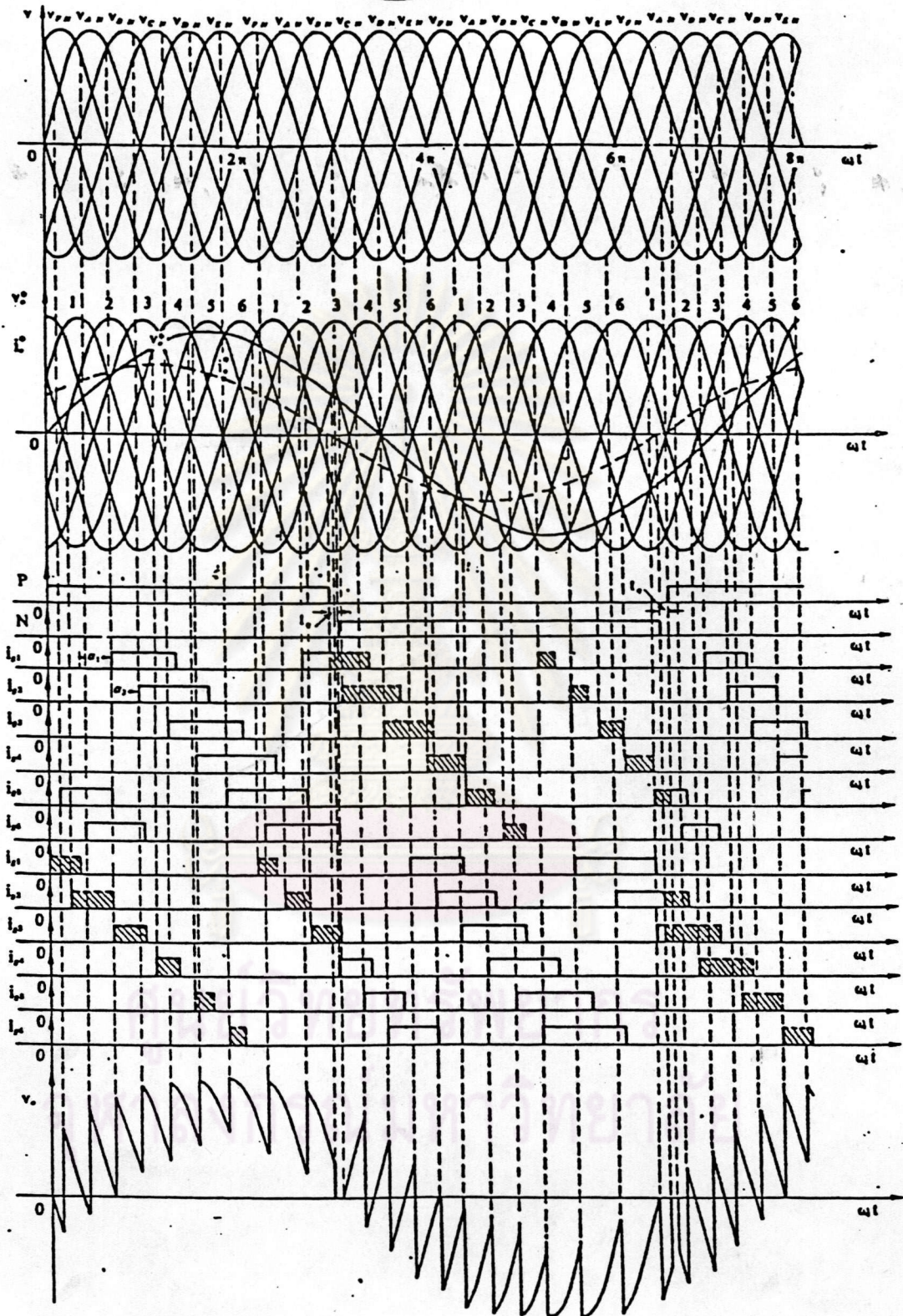
ค่ากำลังด้านออกสูงสุดของไซโคลคอนเวอร์เตอร์ [สอดคล้องกับ  $(V_{om})^*$ ] มีค่าเป็น

$$P_{o(max)} = (V_{om})^* I \cos(\phi_o) \quad (19)$$

ตัวประกอบกำลังด้านเข้าเมื่อกำลังด้านออกมีค่าสูงสุด [สอดคล้องกับ  $(V_{om})^*$ ] ก็คือ

$$PF = 0.675 \cos(\phi_o) \quad (20)$$

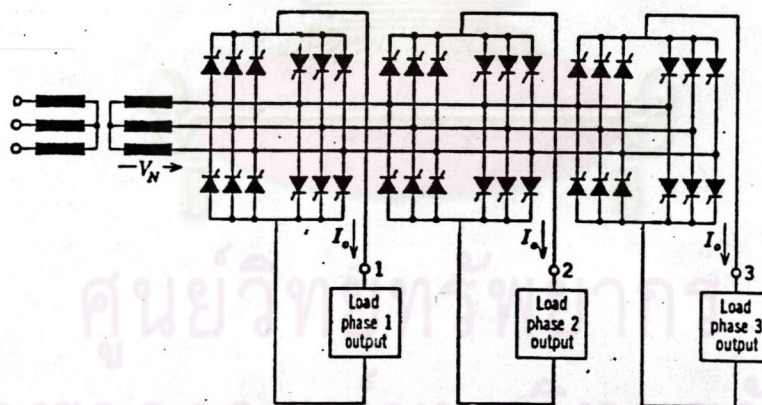
จะเห็นว่า ค่าตัวประกอบกำลังด้านเข้าของไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบนี้สูงกว่าแบบเข้าเฟสเดียวออกเฟสเดียว ทั้งนี้เนื่องจากค่ากระแสฮาร์โมนิกที่ลดลงไปนั่นเอง



รูปที่ 10 รูปคลื่นแรงดันด้านออกของไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบเข้า 3 เฟสออกเฟสเดียว  
เมื่อมีการลดอาร์มอนิกในแรงดันด้านออกโดยการแปรค่ามุมจุดชานาทรিসเตอร์

### 2.2.3 ไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบเข้า 3 เฟสออก 3 เฟส

ไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบนี้ได้จากการต่อไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบเข้า 3 เฟสออกเฟสเดียวรวม 3 ชุดเข้าด้วยกัน โดยจัดให้แรงดันด้านออกรวม 3 แรงดันมีเฟสต่างกันเป็นมุม  $120^\circ$  ทางไฟฟ้าตามหลักของระบบไฟฟ้า 3 เฟส ตัวอย่างรูปลักษณะวงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบเข้า 3 เฟสออก 3 เฟส มีแสดงไว้ในรูปที่ 11 แต่ละเฟสของไซโคลคอนเวอร์เตอร์ในรูปนี้ มีหลักการทำงานเหมือนกับไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบเข้า 3 เฟสออกเฟสเดียวในรูปที่ 8 ทุกประการ และรูปคลื่นแรงดันด้านออกก็มีลักษณะคล้ายคลึงกัน อย่างไรก็ตาม รูปคลื่นแรงดันด้านออกทั้ง 3 แรงดันของไซโคลคอนเวอร์เตอร์ในรูปที่ 11 จะมีรายละเอียดต่างกันอยู่บ้าง ทั้งนี้ก็เพราะรูปคลื่นแรงดันทั้งสามนี้ ได้มาจากรูปคลื่นแรงดันของแหล่งจ่าย 3 เฟสที่ขณะเวลาต่างกัันนั่นเอง



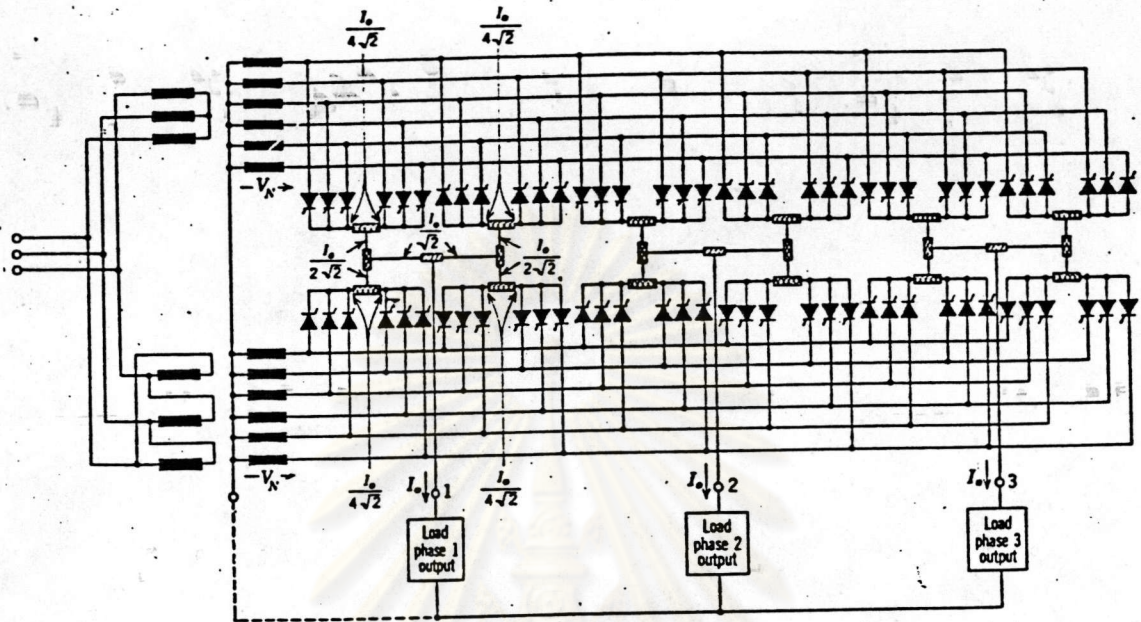
รูปที่ 11 ตัวอย่างรูปลักษณะวงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบเข้า 3 เฟสออก 3 เฟส

ดังได้กล่าวมาในหัวข้อ 2.1 แล้วว่าไซโคลคอนเวอร์เตอร์ประกอบด้วยวงจรเรียงกระแส 2 วงจร ผลัดกันจ่ายกระแสให้แก่โหลดในทิศทางที่กลับกันชุดละครึ่งรอบของกระแสด้านออก เราสามารถที่จะควบคุมการจุดชนวนไทริสเตอร์ให้แรงดันด้านออกมีขนาดและสภาพขั้ว (polarity) ตามต้องการได้ และเนื่องจากไซโคลคอนเวอร์เตอร์เป็นเครื่องแปลงผันแบบสี่จตุภาค (four-quadrant convertor) จึงสามารถใช้งานได้กับโหลดในทุกสภาวะที่ตัวประกอบกำลังนำหน้าหรือล้าหลังก็ได้ กำลังไฟฟ้าสามารถไหลผ่านไซโคลคอนเวอร์เตอร์ได้ทั้ง 2 ทิศทาง กล่าวคือสามารถใช้กับโหลดประเภทเฉื่อยงาน (passive load) หรือประเภทส่งพลังงานกลับออกมาได้ (regenerative load)

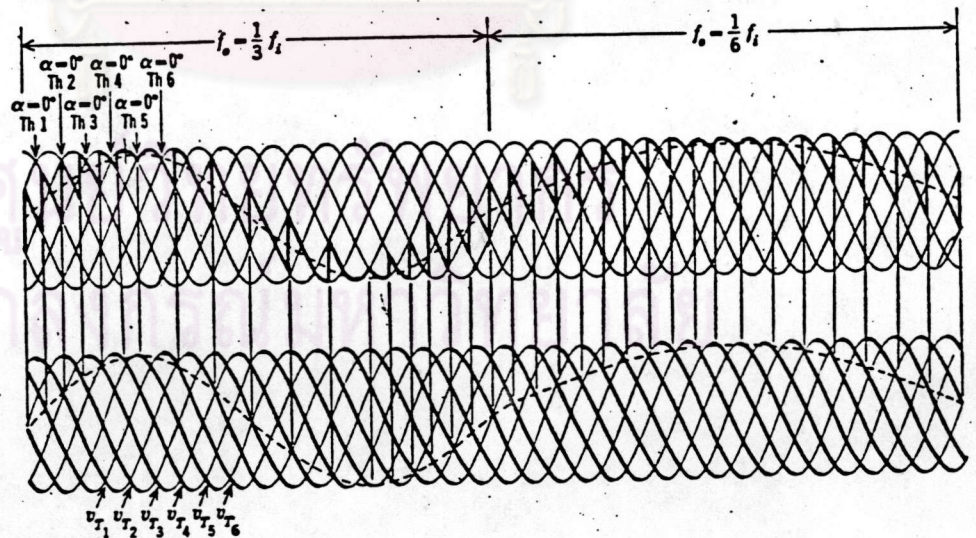
รูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่ารูปคลื่นของแรงดันด้านออกต่างกับรูปคลื่นองค์ประกอบหลักมูล (fundamental component) เพราะรูปคลื่นแรกมีความเพี้ยนฮาร์มอนิก เราสามารถที่จะกรององค์ประกอบฮาร์มอนิกออกจากแรงดันด้านออก เพื่อให้ได้รูปคลื่นที่ใกล้เคียงไซน์มากขึ้น ความเพี้ยนของแรงดันด้านออกจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ ดังนี้

1. จำนวนพัลส์ของไซโคลคอนเวอร์เตอร์
2. อัตราส่วนระหว่างความถี่ของแรงดันด้านออกต่อความถี่ของแรงดันด้านเข้า
3. อัตราส่วนระหว่างแรงดันด้านออกต่อแรงดันด้านเข้า
4. ลักษณะของโหลดและการไหลของกระแสไฟฟ้า
5. วิธีการควบคุมการจุดชนวน

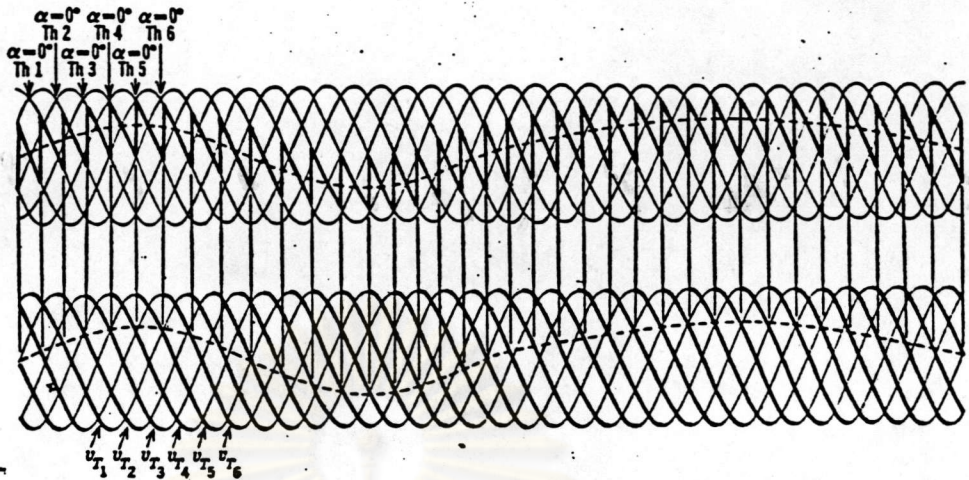
รูปที่ 12 แสดงวงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบสิบสองพัลส์ต่อจุดกลาง (twelve-pulse midpoint cycloconverter) ซึ่งประกอบด้วยไทริสเตอร์ 72 ตัว ทำให้สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าด้านออก ให้มีความละเอียดกว่าวงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบบริดจ์หกพัลส์ (six-pulse bridge cycloconverter) ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มาก แต่วงจรควบคุมและโปรแกรมควบคุมก็จะต้องมีความยุ่งยากซับซ้อนมากขึ้นไปด้วย



รูปที่ 12 วงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบสิบสองพัลส์ต่อจุดกลาง  
(twelve-pulse midpoint cycloconverter)



รูปที่ 13 ลักษณะของแรงดันไฟฟ้าต้านออกของไซโคลคอนเวอร์เตอร์ของ  
 $f_o = 1/3(f_i)$  และ  $f_o = 1/6(f_i)$  ที่ 100% ของแรงดันต้านออก



รูปที่ 14 ลักษณะของแรงดันไฟฟ้าด้านออกของไซโคลคอนเวอร์เตอร์ของ  
 $f_o = 1/3(f_s)$  และ  $f_o = 1/6(f_s)$  ที่ 50% ของแรงดันด้านออก

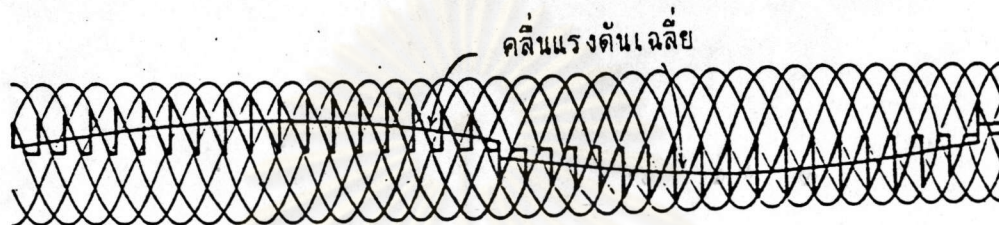
เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าด้านออกของไซโคลคอนเวอร์เตอร์ ได้มาจากการตัดต่อแรงดัน  
 ไฟฟ้าด้านเข้าด้วยไทริสเตอร์ ดังนั้นถ้าอัตราส่วนระหว่างความถี่ของแรงดันไฟฟ้าด้านออกต่อ  
 ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า มีค่าต่ำมาก ๆ (นั่นคือความถี่ของแรงดันไฟฟ้าด้านออกมีค่าต่ำ  
 มาก ๆ) ก็จะทำให้ในช่วงหนึ่งรอบของแรงดันด้านออก มีชิ้นส่วนของแรงดันด้านเข้าที่ตัดต่อด้วย  
 ไทริสเตอร์มากขึ้น รูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออกจึงมีค่าฮาร์มอนิกน้อยลง ดังในรูปที่ 13 ซึ่ง  
 แสดงถึงรูปคลื่นของแรงดันด้านออกที่มีค่าเต็มตามนิกิต ส่วนรูปที่ 14 แสดงถึงรูปคลื่นของแรงดัน  
 ด้านออกที่มีค่า 50 % ของนิกิต

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 13 (100% ของแรงดันด้านออกที่กำหนด) และรูปที่ 14  
 (50% ของแรงดันด้านออกที่กำหนด) เราจะพบว่ารูปที่ 13 ไกลเคียงรูปไซน์มากกว่ารูปที่ 14  
 และเมื่อค่าอัตราส่วนระหว่างแรงดันด้านออกต่อแรงดันด้านเข้ามีค่าต่ำลง ค่าฮาร์มอนิกของแรงดัน  
 ด้านออกก็จะมีค่าสูงขึ้น

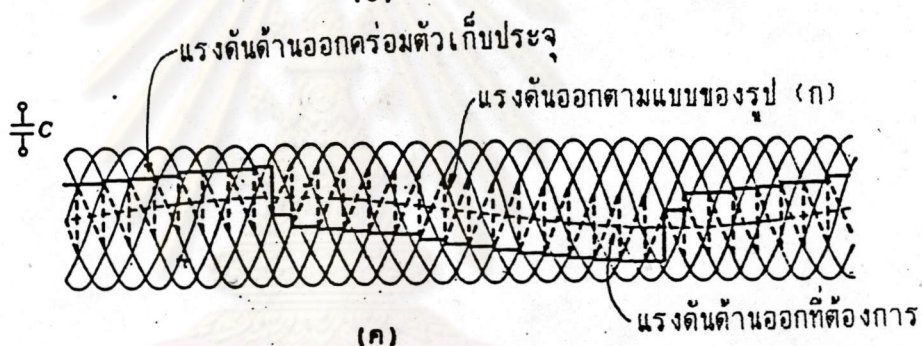




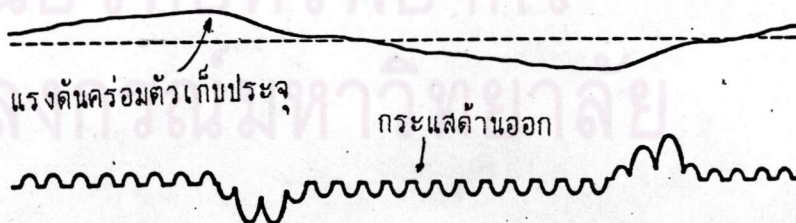
(ก)



(ข)



(ค)



$$\frac{L}{T} = \frac{1}{5}$$

รูปที่ 15 รูปคลื่นแรงดันด้านนอกของไซโคลคอนเวอร์เตอร์ในภาวะต่าง ๆ (ก) กระแสไหลต่อเนื่อง, ตัวประกอบการกระจัดของโหลด = 1 (ข) โหลดที่เป็นความต้านทาน (ค) โหลดที่เป็นตัวเก็บประจุ (ง) โหลดที่เป็นตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ

เมื่อเราจัดชนวนเอสซิวาร์ ให้ทำงานในช่วงกระแสไหลต่อเนื่องโดยที่ตัวประกอบการกระจัด(displacement factor)ของไหลต่ำกว่า 1 (คือส่วนประกอบหลักมูลของกระแสเฟสของไหลร่วมวฏภาคกับแรงดันเฟสของไหล) เราจะได้รูปคลื่นแรงดันด้านออกที่ค่าอาร์มอนิกต่าง ๆ อยู่ชุดหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 15 ก แต่เมื่อใช้ลักษณะการชนวนไตรสเตอร์แบบเดียวกันนี้กับไหลที่เป็นความต้านทานในช่วงกระแสไหลไม่ต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 15 ข ก็จะได้เห็นว่าค่าเฉลี่ยในครึ่งรอบของรูปคลื่นแรงดันด้านออกมีขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้ก็เพราะการที่กระแสไหลไม่ต่อเนื่องทำให้แรงดันด้านออกในครึ่งรอบใด ๆ มีค่าบวกตลอดหรือมีค่าลบตลอด ไม่มีค่าบวกและลบปนกันครึ่งรอบเดียวกันอย่างในรูปที่ 15 ก ความเพี้ยนของแรงดันด้านออกจะเห็นชัดเจนขึ้น เมื่อไหลเป็นตัวเก็บประจุ หรือตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 15 ค และ รูปที่ 15 ง ตามลำดับ ในรูปทั้งสองนี้ กระแสไหลจะไม่ต่อเนื่องทำนองเดียวกับในรูปที่ 15 ข

กล่าวโดยสรุป วิธีการควบคุมการชนวนก็เป็นส่วนสำคัญที่จะลดค่าอาร์มอนิกลง ถ้าเราจัดชนวนเอสซิวาร์ด้วยค่ามูชนวนที่คงตัวทั้งในช่วงครึ่งรอบบวกและครึ่งรอบลบ เราจะได้รูปคลื่นแรงดันกระแสสลับที่มีค่าอาร์มอนิกสูง ดังนั้นจึงต้องแปรค่ามูชนวนให้เหมาะสมในช่วงเวลาต่าง ๆ โดยใช้วิธีการดังนี้

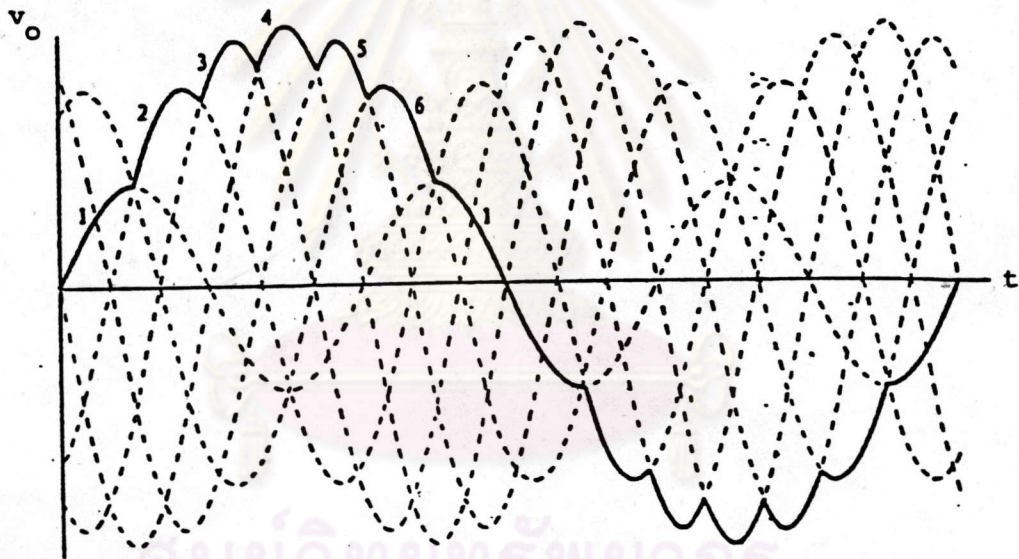
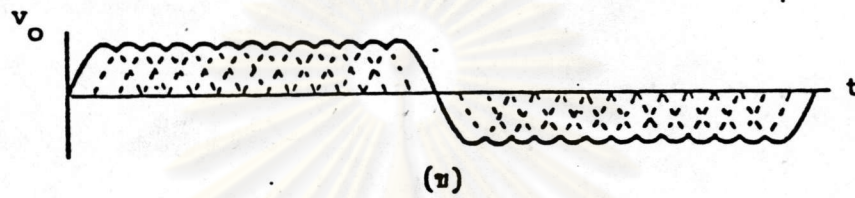
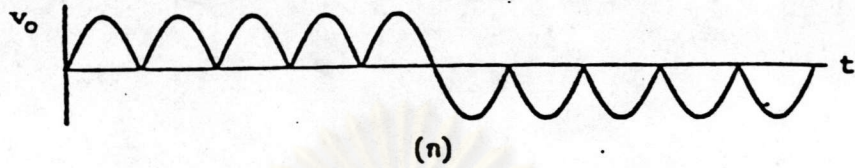
- 1) cosine wave crossing pulse timing method [4]
- 2) integral control [4]
- 3) phase-locked oscillator [4]
- 4) pre-integration control [15]

เนื่องจาก cosine wave crossing pulse timing method เป็นวิธีที่สะดวกไม่ซับซ้อน และให้ผลในทางปฏิบัติที่ดีกว่า จึงเลือกใช้วิธีนี้ในการควบคุมการทำงานของระบบนี้

### 2-3 ไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบให้แรงดันรูปเอนVELOPE

ไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบนี้ มีรูปลักษณะวงจรเหมือนกับไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบควบคุมเฟสในหัวข้อ 2.2 แต่มีหลักการทำงานต่างกันไป คือจะจัดชนวนให้ไตรสเตอร์ใน

วงจรเรียงกระแสนำกระแสตรงจุดเริ่มต้นครึ่งรอบของแรงดันด้านเข้า โดยไม่มีการประวิงเวลา ผลก็คือแรงดันด้านออกจะมีรูปคลื่นเป็นขอบรอบนอกหรือเอนเวโลป(envelope) ของแรงดันด้านเข้า ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันด้านออกแบบเอนเวโลปมีแสดงไว้ในรูปที่ 16 ก - ค



รูปที่ 16 รูปคลื่นแรงดันด้านออกแบบเอนเวโลปที่ได้จากไซโคลคอนเวอร์เตอร์ (ก) แรงดันแบบ 2 เฟส (ข) แรงดันแบบ 6 เฟส (ค) แรงดันแบบ 6 เฟสจากวงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบมีการปรับตั้งค่าแรงดันด้านเข้า

รูปคลื่นแรงดันด้านออกตามรูปที่ 16 ก ได้มาจากไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบเข้าเฟสเดียวออกเฟสเดียวในรูปที่ 2 หรือรูปที่ 3 รูปคลื่นแรงดันตามรูปที่ 16 ข ได้มาจากไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบเข้า 3 เฟสออกเฟสเดียวในรูปที่ 8 โดยที่แรงดัน 3 เฟสทางด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสเป็นแบบสมมาตร(symmetric) ส่วนรูปคลื่นแรงดันตามรูปที่ 16 ค แสดงถึงการลดฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันออก โดยการใช้น้ำมือแปลงสำหรับเปลี่ยนแรงดัน 3 เฟส จากแหล่งจ่ายไปเป็นแรงดัน 6 เฟส และปรับแรงดันของเฟสที่ 1 ถึงเฟสที่ 6 ให้เป็นอัตราส่วน 33



: 73 : 93 : 100 : 93 : 73 ก่อนที่จะป้อนเข้าสู่ชุดวงจรเรียงกระแส 6 เฟส 2 ชุดของ  
ไซโคลคอนเวอร์เตอร์ต่อไป (เอกสารอ้างอิง [13] หน้า 486)

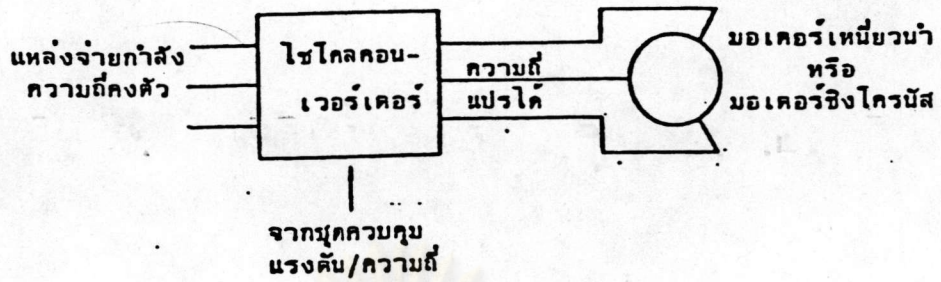
ไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบให้แรงดันรูปเอนเวโลปมีข้อดีคือใช้วงจรที่ง่ายและประหยัด  
กว่าไซโคลคอนเวอร์เตอร์แบบควบคุมเฟส ส่วนข้อเสียก็คือ (1) รูปคลื่นแรงดันด้านออกมักค่อนข้าง  
ไปทางรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมากกว่ารูปคลื่นไซน์ (2) อัตราส่วนความถี่ด้านออกต่อความถี่ด้านเข้า  
( $f_o/f_i$ ) มีค่าเป็นเลขจำนวนเต็มที่ไม่อาจแปรได้อย่างต่อเนื่อง (3) วงจรเรียงกระแสแต่ละ  
ชุดไม่อาจถ่ายเทกำลังไฟฟ้าจากโหลดกลับไปสู่แหล่งจ่ายกำลังได้ โหลดที่ใช้จึงต้องเป็นแบบความ  
ต้านทานล้วน ๆ เท่านั้น

## 2.4 การใช้งานไซโคลคอนเวอร์เตอร์

### 2.4.1 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสสลับ

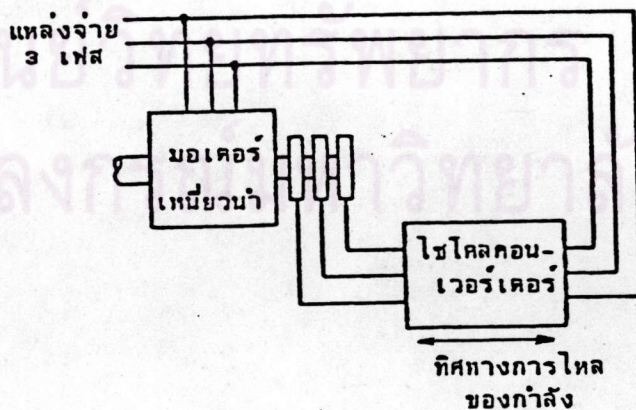
ไซโคลคอนเวอร์เตอร์สามารถใช้ควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสสลับได้ 2 วิธี  
คือใช้ป้อนแรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำให้แก่ตัวอยู่กับที่หรือสเตเตอร์ (stator) ของมอเตอร์ชนิด  
เหนี่ยวนำ หรือมอเตอร์ชนิดซิงโครนัส และใช้ป้อนแรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำให้แก่ตัวหมุน  
แบบพันเป็นชุดขดลวด (wound rotor) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบมีวงแหวนลื่น (slip-ring  
induction motor)

การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ตามวิธีที่ 1 มีแผนภาพการใช้งานไซโคลคอนเวอร์ต์-  
เตอร์ตามรูปที่ 17 ข้อจำกัดของวิธีนี้ก็คือ ความถี่ของแรงดันที่ไซโคลคอนเวอร์เตอร์ป้อนให้  
แก่มอเตอร์นั้นจะไม่เกิน  $1/3$  ของความถี่จากแหล่งจ่าย วิธีนี้จึงเหมาะกับมอเตอร์ขนาดใหญ่ที่  
หมุนด้วยความเร็วต่ำ ๆ สำหรับงานอุตสาหกรรมบางประเภท อย่างเช่นมอเตอร์ขนาด 8,750  
แรงม้า ความเร็ว 14.5 รอบต่อนาที ซึ่งใช้หมุนเตาเผาส่วนผสมวัตถุขี้เถ้าในโรงงานปูนซีเมนต์  
(เอกสารอ้างอิง [16]) เป็นต้น ข้อจำกัดอย่างอื่น ๆ ของไซโคลคอนเวอร์เตอร์ ก็คือปริมาณ  
ฮาร์มอนิกค่าสูงในแรงดันด้านออกและในกระแสด้านเข้า รวมทั้งการที่ตัวประกอบกำลังทางด้าน-  
เข้ามีค่าต่ำ



รูปที่ 17 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสสลับโดยใช้ไซโคลคอนเวอร์เตอร์  
ป้อนแรงดันให้แก่ตัวอยู่กับที่ของมอเตอร์

การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ตามวิธีที่ 2 มีแผนภาพการใช้งาน  
ไซโคลคอนเวอร์เตอร์ตามรูปที่ 18 วิธีนี้เป็นการควบคุมสลลิป (slip)  $s$  (คือผลต่างระหว่าง  
ความเร็วซิงโครนัสกับความเร็วของมอเตอร์ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของความเร็วซิงโครนัส)  
ของมอเตอร์ และจะใช้ได้เฉพาะเมื่อ  $s$  มีค่าไม่เกิน 33 % เท่านั้น ในทางปฏิบัติ วิธีการนี้สิ้น  
เปลืองค่าโลหะสูงและใช้วงจรควบคุมไซโคลคอนเวอร์เตอร์ที่มีความซับซ้อนสูง จึงไม่ค่อยนิยมใช้

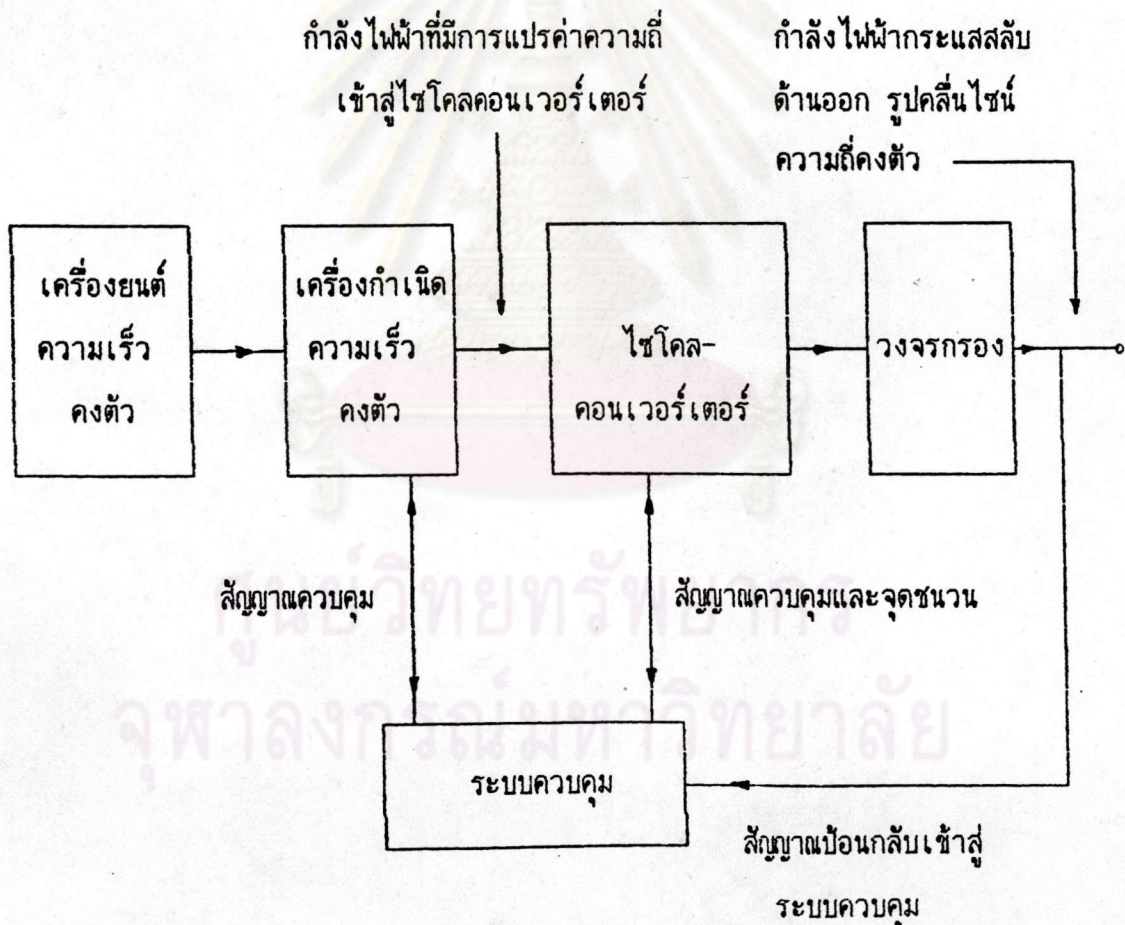


รูปที่ 18 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบมีวงแหวนลื่นโดยใช้  
ไซโคลคอนเวอร์เตอร์ป้อนแรงดันให้แก่ตัวหมุนของมอเตอร์

## 2.4.2 การควบคุมการคงค่าความถี่ของแรงดันด้านออก

[variable speed constant frequency (VSCF)]

ในการประยุกต์อีกอย่างหนึ่ง เราสามารถใช้ไซโคลคอนเวอร์เตอร์ควบคุมความถี่ของแรงดันด้านออกให้คงที่ ในขณะที่ความถี่ของแรงดันด้านเข้าเปลี่ยนแปลงได้ เช่น ในระบบไฟฟ้าของเครื่องบินจะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับต่อโดยตรงกับเครื่องยนต์ของเครื่องบิน ทำให้ความถี่ของแรงดันที่ผลิตได้มีการผันแปรตลอดเวลาตามความเร็วของเครื่องยนต์ จึงต้องผ่านวงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์ เพื่อที่จะควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้าในเครื่องบินให้คงที่อยู่ตลอดเวลา ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 19



รูปที่ 19 แผนภาพแสดงการควบคุมการคงค่าความถี่ของแรงดันด้านออกด้วยไซโคลคอนเวอร์เตอร์

### 2.4.3 การระบายความร้อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบซิงโครนัส

ในโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ อาจมีปัญหาเกี่ยวกับการหยุดเครื่องหรือหยุดการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบเทอร์โบ (turbo-alternator) ถ้าให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้หยุดทำงานพร้อมกับปล่อยให้เย็นไปตามธรรมชาติ ส่วนหมุนของกังหัน (turbine) อาจอและบิดเบี้ยวได้ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า "ฮ็อกกิง" (hogging) ในการเริ่มต้นเครื่องเพื่อนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้กลับเข้าสู่การทำงานจะทำให้เกิดฮ็อกกิงด้วยเช่นกัน จึงจำเป็นต้องมีวิธีป้องกัน โดยการหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบนี้อย่างช้า ๆ ขณะปล่อยให้เย็น เพื่อที่ความร้อนจะได้แผ่กระจายไปทั่ว ๆ กันทุก ๆ แห่งบนส่วนหมุน วิธีการที่กล่าวนี้สามารถลดปรากฏการณ์ฮ็อกกิงให้น้อยลงได้ และได้ชื่อเรียกว่า "บาร์ริง" (barring)

เราสามารถเปลี่ยนเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ให้ทำงานเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ โดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าความถี่ต่ำเพื่อให้อัตราหมุนด้วยอัตราเร็วต่ำ ใช้กำลังป้อนเข้าแต่น้อย เพียงเพื่อให้ชนะค่าความผิด และอาจเร่งให้อัตราเร็วสูงขึ้นได้ตามต้องการ วิธีที่นิยมกันก็คือใช้ไซโคลคอนเวอร์เตอร์ในการควบคุมการทำงานของระบบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย