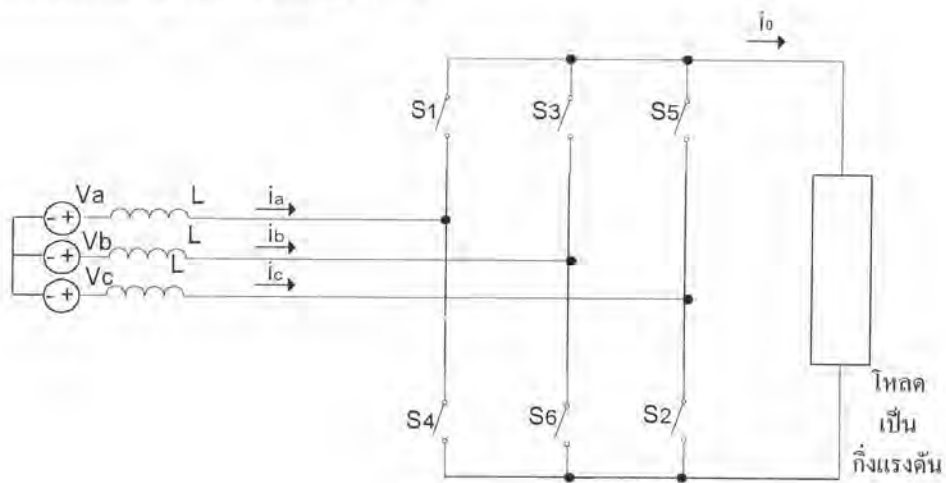


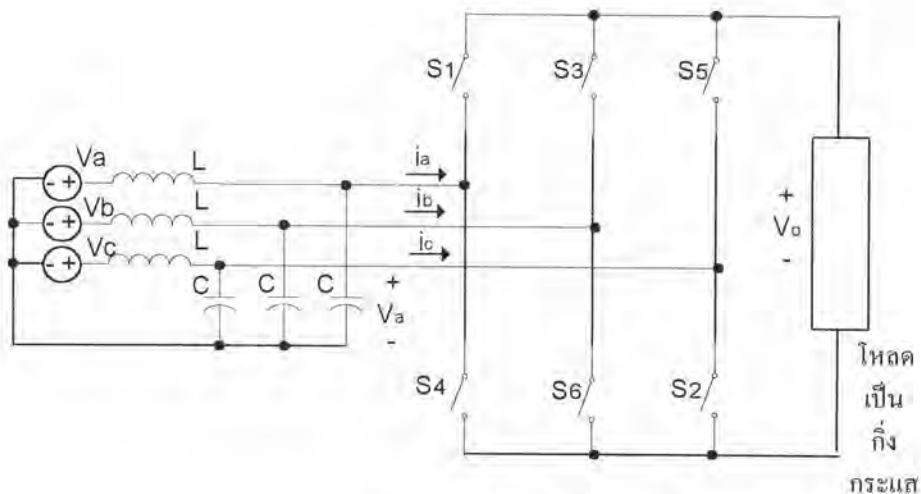
บทที่ 3

การวิเคราะห์และออกแบบวงจรกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง

เนื่องจากจุดประสงค์หลักของงานวิจัยชิ้นนี้ มุ่งเน้นในความสำเร็จของการลดความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสในสายกำลัง ซึ่งความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแส เป็นสิ่งที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของวงจร เนื่องจากวงจรมีการสวิตช์ที่ความถี่สูง ดังนั้นในการออกแบบวงจร จะต้องเลือกรูปแบบของการสวิตช์ที่เหมาะสม ตามลักษณะของวงจรกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง แสดงได้ดังรูปที่ 3.1



3.1(ก) แหล่งเป็นกิ่งกระแส



3.1(ข) แหล่งเป็นกิ่งแรงดัน

รูปที่ 3.1 ไซโคลคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส - 1 เฟส ที่จ่ายกำลังความถี่สูง

รูปที่ 3.1 แสดงแผนภาพบล็อกของแหล่งจ่ายกำลังที่ใช้ไซโคลคอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงผันไฟสลับ 3 เฟส 50 Hz เป็นไฟสลับความถี่สูง (30 kHz) โดยตรง โดยไม่ผ่านการเชื่อมโยงไฟตรง (เหมือนกรณีของอินเวอร์เตอร์) ไซโคลคอนเวอร์เตอร์จำแนกได้ตามชนิดของแหล่งและโหลดว่าเป็นกึ่งกระแสหรือแรงดันดังรูปที่ 3.1(ก) และ 3.1(ข)

รูปที่ 3.1(ก) ตัวเหนี่ยวนำด้านเข้าทำให้แหล่งมีลักษณะเป็นกึ่งกระแส ซึ่งทำให้โหลดมีลักษณะเป็นกึ่งแรงดัน เช่นเป็นวงจร RLC ขนาน ส่วนรูปที่ 3.1(ข) มีลักษณะ duality กับวงจรในรูปที่ 3.1(ก) โดยมีวงจร LC ทางด้านเข้าและโหลดเป็นกึ่งกระแส เช่นเป็นวงจร RLC อนุกรม ทั้งตัวเหนี่ยวนำ L ในกรณีแรก และวงจร LC ด้านเข้าในกรณีที่สอง ต่างก็ทำหน้าที่กรองความถี่การสวิตช์ ซึ่งต้องมีค่าสูงกว่าความถี่ของสายกำลังมาก

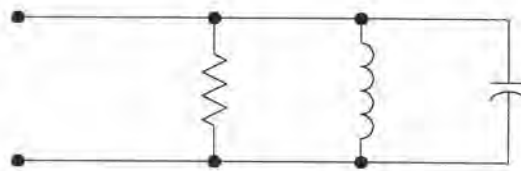
จะเห็นว่ารูปแบบการวางตัวของสวิตช์แบ่งเป็น 2 ชุดคือ สวิตช์ชุดบน ประกอบด้วยสวิตช์ S_1, S_3, S_5 และสวิตช์ชุดล่าง ประกอบด้วยสวิตช์ S_4, S_6, S_2 ซึ่งในการวิเคราะห์จะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 กรณีคือ

3.1 กรณีแหล่งเป็นกึ่งกระแส

3.2 กรณีแหล่งเป็นกึ่งแรงดัน

3.1 กรณีแหล่งเป็นกึ่งกระแส

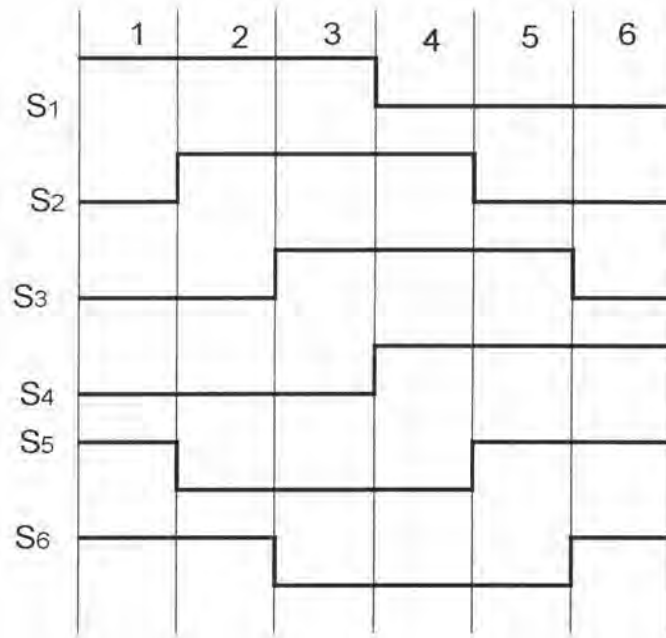
3.1.1 การวิเคราะห์รูปแบบการขับนำสวิตช์



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลของโหลดแบบขนาน

ในกรณีนี้ จะเห็นว่าต้องใช้โหลดที่มีลักษณะเป็นกึ่งแรงดันหรือโหลดเป็นแบบขนาน ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.2 เนื่องจากแหล่งจ่ายที่ขั้ว a, b, c เป็นกึ่งกระแส ดังนั้นการสวิตช์

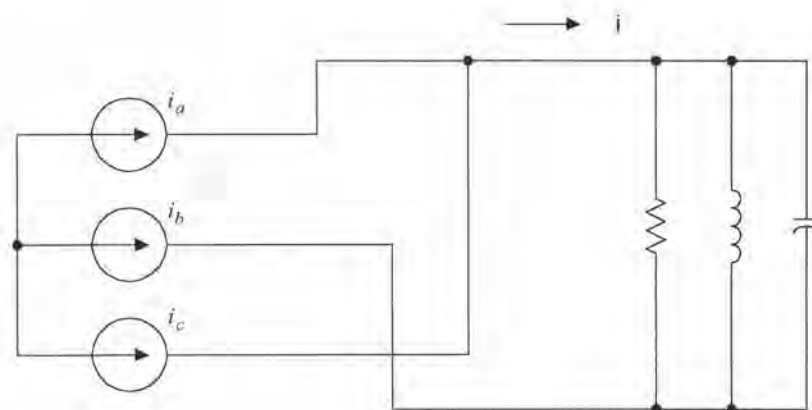
ของวงจรในรูปที่ 3.1 จะต้องระมัดระวัง ไม่ให้เกิดสถานะเปิดวงจรทางด้านแหล่งจ่าย เพราะจะทำให้ไม่มีเส้นทางไหลของกระแส ดังนั้นในการสวิตช์ จึงเลือกรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การขั้มนำสวิตช์กรณีแหล่งเป็นกึ่งกระแส

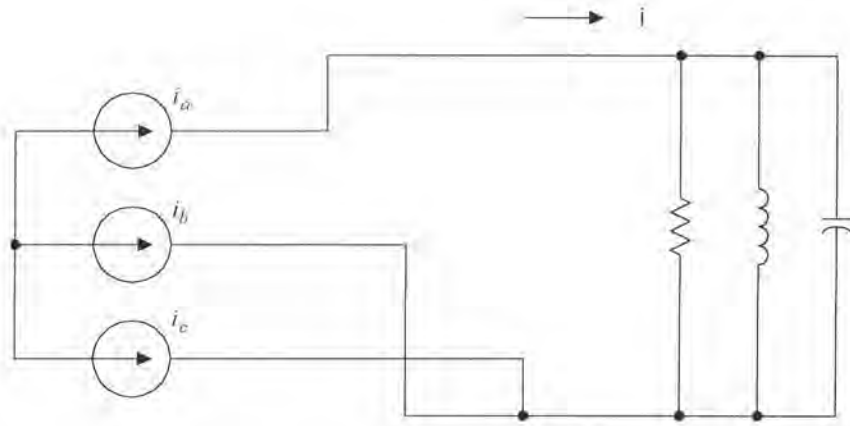
จากการขั้มนำสวิตช์ในรูปที่ 3.3 จะเห็นว่าการสวิตช์แบ่งออกได้เป็น 6 ช่วงเวลาดังนี้

ช่วงเวลาที่ 1 ในช่วงเวลานี้ มีสวิตช์ต่อวงจร 3 ตัว คือ S_1 , S_5 , และ S_6 เขียนเป็นวงจรได้ดังรูปที่ 3.4



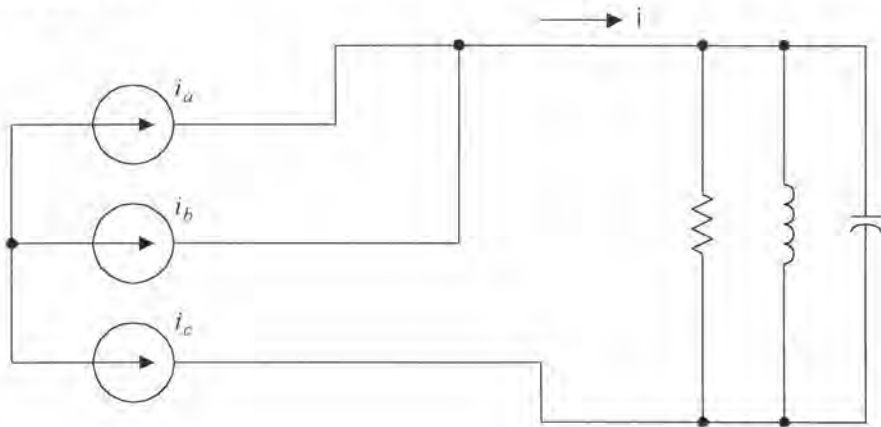
รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลขณะสวิตช์ทำงานในช่วงเวลาที่ 1 กรณีแหล่งเป็นกึ่งกระแส $i = i_a + i_c = -i_b$

ช่วงเวลา^{ที่ 2} ในช้่วงเวลานี้ มีสวิตซ์ต่อวงจร 3 ตัว คือ S_1 , S_2 , และ S_6 เขียนเป็นวงจรได้ดังรูปที่ 3.5



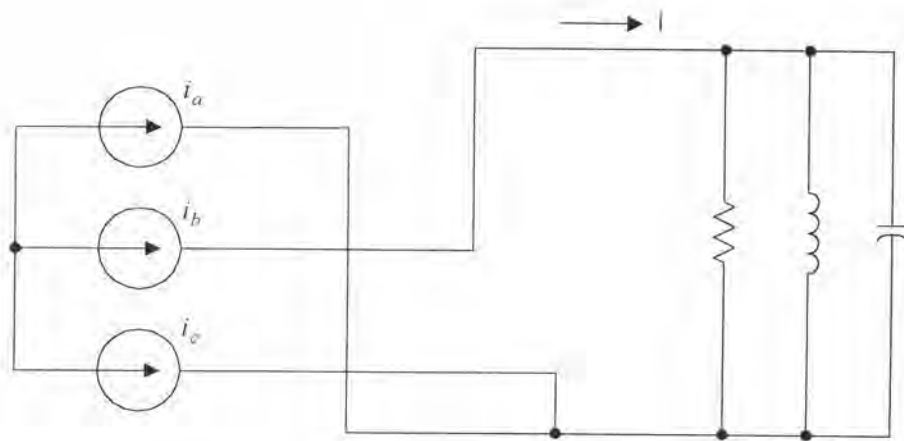
รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลขณะสวิตซ์ทำงานในช่วงเวลาที่ 2 กรณีแหล่งเป็นกึ่งกระแส $i = i_a$

ช่วงเวลา^{ที่ 3} ในช้่วงเวลานี้ มีสวิตซ์ต่อวงจร 3 ตัว คือ S_1 , S_2 , และ S_3 เขียนเป็นวงจรได้ดังรูปที่ 3.6



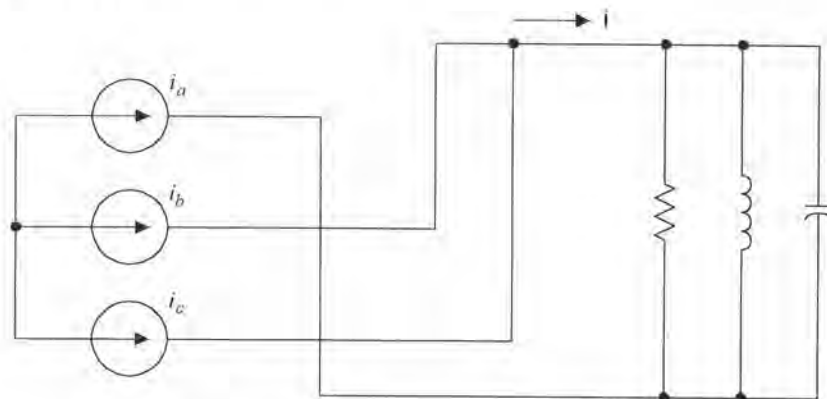
รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลขณะสวิตซ์ทำงานในช่วงเวลาที่ 3 กรณีแหล่งเป็นกึ่งกระแส $i = i_a + i_b = -i_c$

ช่วงเวลา^{ที่ 4} ในช้่วงเวลานี้ มีสวิตซ์ต่อวงจร 3 ตัว คือ S_2 , S_3 , และ S_4 เขียนเป็นวงจรได้ดังรูปที่ 3.7



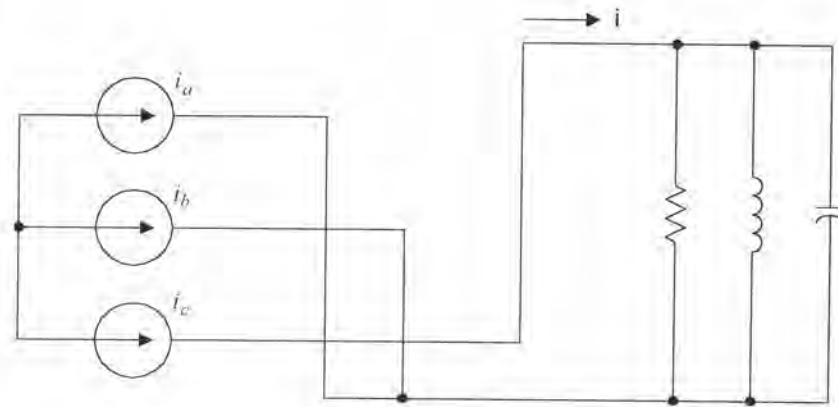
รูปที่ 3.7 วงจรสมมูลขณะสวิตช์ทำงานในช่วงเวลาที่ 4 กรณีแหล่งเป็นกึ่งกระแส $i = i_b$

ช่วงเวลาที่ 5 ในช่วงเวลานี้ มีสวิตช์ต่อวงจร 3 ตัว คือ S_3 , S_4 , และ S_5 เขียนเป็นวงจรได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรสมมูลขณะสวิตช์ทำงานในช่วงเวลาที่ 5 กรณีแหล่งเป็นกึ่งกระแส $i = i_b + i_c = -i_a$

ช่วงเวลาที่ 6 ในช่วงเวลานี้ มีสวิตช์ต่อวงจร 3 ตัว คือ S_4 , S_5 , และ S_6 เขียนเป็นวงจรได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 วงจรสมมูลขณะสวิตช์ทำงานในช่วงเวลาที่ 6 กรณีแหล่งเป็นกึ่งกระแส $i = i_c$

3.1.2 การวิเคราะห์รูปคลื่นกระแสที่โหลด

เนื่องจากต้องการให้แรงดันในสายกำลังมีฮาร์มอนิกต่ำ ดังนั้น สมมติให้กระแส i_a, i_b, i_c เป็นสัญญาณไซน์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ตามความถี่ของสายกำลัง ดังนั้น ใน 1 คาบเวลาของกระแส i_a, i_b, i_c คิดเป็น 20 มิลลิวินาที ในขณะที่วงจรสวิตช์ ทำงานด้วยความถี่สูงประมาณ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ คิดเป็นคาบเวลาประมาณ 33.33 ไมโครวินาที ซึ่งเป็นคาบเวลาที่เล็กกว่าสายกำลัง ประมาณ 600 เท่า ดังนั้น จึงพอจะอนุมานได้ว่า ในขณะที่วงจรถ่ายการตัดต่อสวิตช์ที่ความถี่สูงนั้น กระแส i_a, i_b, i_c จะเปรียบเสมือนกระแสคงตัว ในช่วงของคาบการสวิตช์ในคาบใดคาบหนึ่ง จากรูปที่ 3.1 และ 3.3 จะสังเกตได้ว่า ในช่วงเวลาที่ 1 - 6 ของการสวิตช์ กระแส i_0 มีค่าเท่ากับ $-i_b, i_a, -i_c, i_b, -i_a$ และ i_c ตามลำดับ แสดงว่า i_0 เป็นรูปคลื่นไฟสลับ

ให้กระแสด้านเข้าเป็นฟังก์ชันไซน์ ดังนั้น

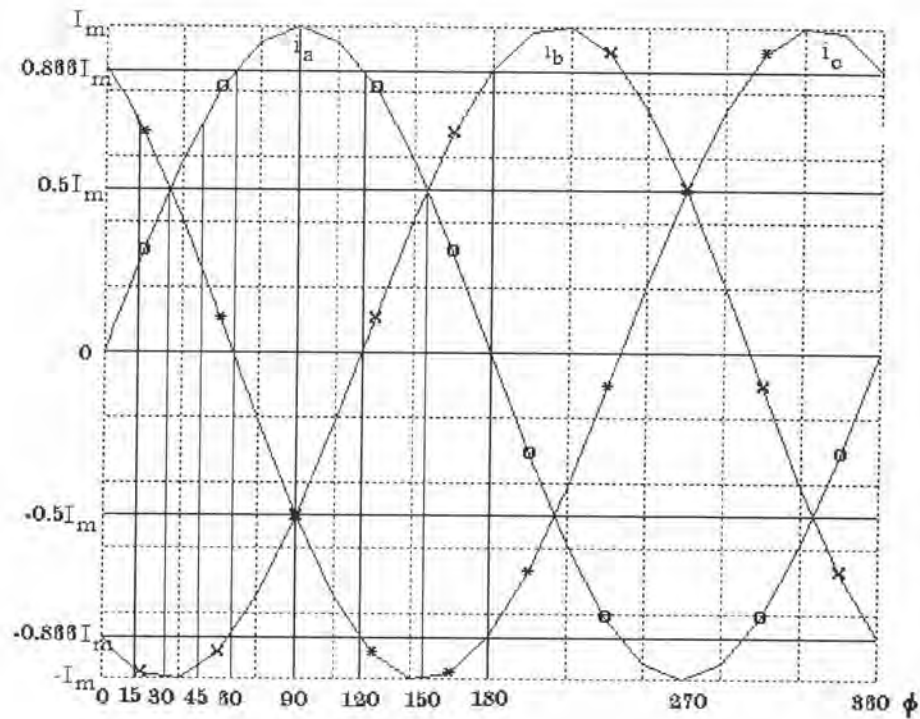
$$i_a = I_m \sin(\omega t) \quad \text{A}$$

$$i_b = I_m \sin(\omega t - 120) \quad \text{A}$$

$$i_c = I_m \sin(\omega t + 120) \quad \text{A}$$

ให้ ϕ เป็นมุมเฟสที่ความถี่สายกำลัง เนื่องจากความถี่การสวิตช์มีค่าสูงมาก ดังนั้น ที่ $\omega t = \phi$ ค่าหนึ่ง สมมติว่าตลอดช่วงของคาบการสวิตช์ $i_a, i_b,$ และ i_c มีค่าคงตัวเท่ากับ $I_m \sin \phi, I_m \sin(\phi - 120^\circ)$ และ $I_m \sin(\phi + 120^\circ)$ ตามลำดับ

i_a, i_b, i_c สามารถแสดงรูปคลื่นได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 รูปคลื่นแสดงกระแสเฟส i_a, i_b, i_c

ในการวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์ที่ตำแหน่ง ϕ ค่าต่างๆ คือ 0, 15, 30, 45, 60, 120 และ 180 องศา

ภายใต้สมมติฐานข้างต้น สามารถเขียนรูปคลื่นของกระแส i_o ที่มุม ϕ ค่าต่าง ๆ ได้ ดังรูปที่ 3.11 - 3.19

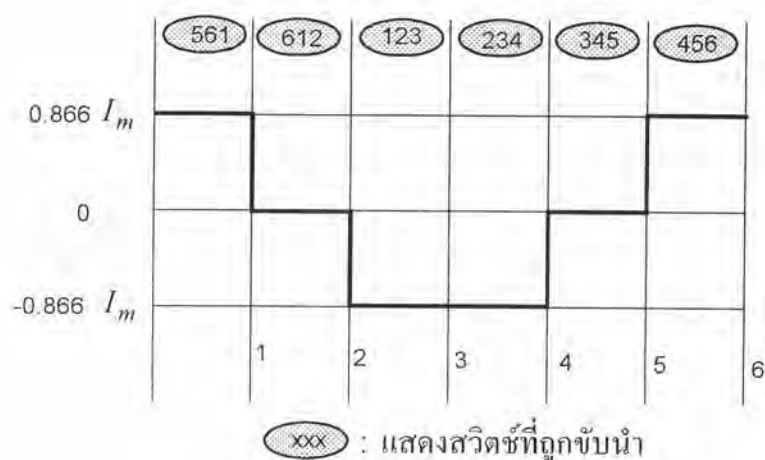
3.1.2.1 การวิเคราะห์รูปคลื่นกระแสที่ไหลล ที่ตำแหน่ง $\phi = 0^\circ$

ที่ ϕ มีค่าเท่ากับ 0° จะได้ค่า i_a, i_b, i_c ดังนี้

$$i_a = I_m \sin(0) = 0$$

$$i_b = I_m \sin(-120) = -0.866 I_m$$

$$i_c = I_m \sin(120) = 0.866 I_m$$



รูปที่ 3.11 รูปคลื่นกระแสที่ไหลคเมื่อ $\phi = 0^\circ$

3.1.2.2 การวิเคราะห์รูปคลื่นกระแสที่ไหลค ที่ตำแหน่ง $\phi = 15^\circ$

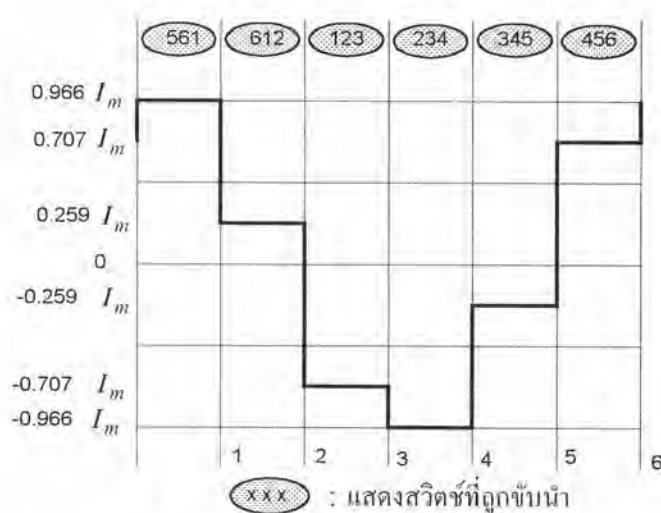
ที่ ϕ มีค่าเท่ากับ 15° จะได้ค่า i_a, i_b, i_c ดังนี้

$$i_a = I_m \sin(15) = 0.259 I_m$$

$$i_b = I_m \sin(15 - 120) = -0.966 I_m$$

$$i_c = I_m \sin(15 + 120) = 0.707 I_m$$

ในทำนองเดียวกันกับหัวข้อ 3.1.2.1 จะได้รูปคลื่นกระแสที่ไหลค ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 รูปคลื่นกระแสที่ไหลค เมื่อ $\phi = 15^\circ$

3.1.2.3 การวิเคราะห์รูปคลื่นกระแสที่โหลด ที่ตำแหน่ง $\phi = 30^\circ$

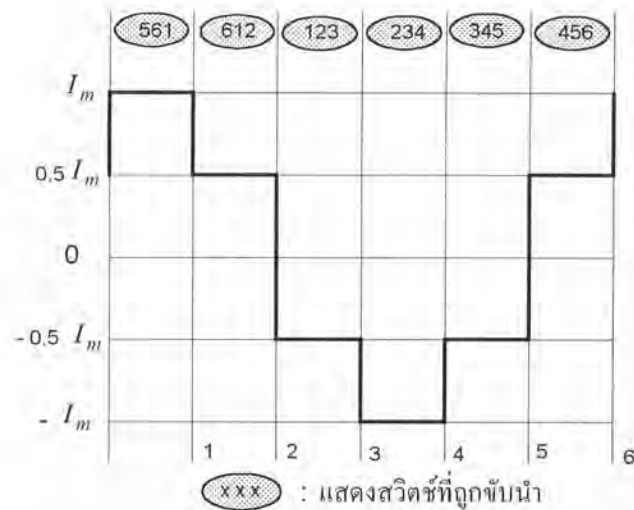
ที่ ϕ มีค่าเท่ากับ 30° จะได้ค่า i_a, i_b, i_c ดังนี้

$$i_a = I_m \sin(30) = 0.5 I_m$$

$$i_b = I_m \sin(30 - 120) = -I_m$$

$$i_c = I_m \sin(30 + 120) = 0.5 I_m$$

ในทำนองเดียวกันกับหัวข้อ 3.1.2.1 จะได้รูปคลื่นกระแสที่โหลด ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 รูปคลื่นกระแสที่โหลด เมื่อ $\phi = 30^\circ$

3.1.2.4 การวิเคราะห์รูปคลื่นกระแสที่โหลด ที่ตำแหน่ง $\phi = 45^\circ$

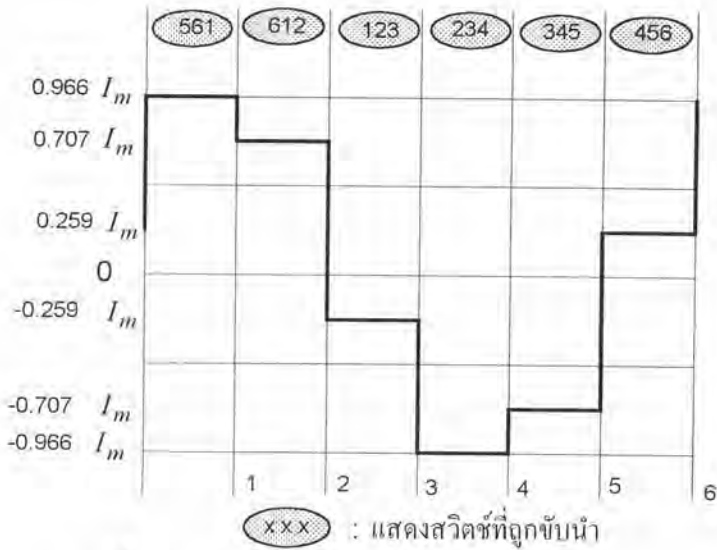
ที่ ϕ มีค่าเท่ากับ 45° จะได้ค่า i_a, i_b, i_c ดังนี้

$$i_a = I_m \sin(45) = 0.707 I_m$$

$$i_b = I_m \sin(45 - 120) = -0.966 I_m$$

$$i_c = I_m \sin(45 + 120) = 0.259 I_m$$

ในทำนองเดียวกันกับหัวข้อ 3.1.2.1 จะได้รูปคลื่นกระแสที่โหลด ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 รูปคลื่นกระแสที่โหลด เมื่อ $\phi = 45^\circ$

3.1.2.5 การวิเคราะห์รูปคลื่นกระแสที่โหลด ที่ตำแหน่ง $\phi = 60^\circ$

ที่ ϕ มีค่าเท่ากับ 60° จะได้ค่า i_a, i_b, i_c ดังนี้

$$i_a = I_m \sin(60) = 0.866 I_m$$

$$i_b = I_m \sin(60 - 120) = -0.866 I_m$$

$$i_c = I_m \sin(60 + 120) = 0$$

ในทำนองเดียวกันกับหัวข้อ 3.1.2.1 จะได้รูปคลื่นกระแสที่โหลด ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 รูปคลื่นกระแสที่โหลด เมื่อ $\phi = 60^\circ$

3.1.2.6 การวิเคราะห์รูปคลื่นกระแสที่ไหลลัด ที่ตำแหน่ง $\phi = 90^\circ$

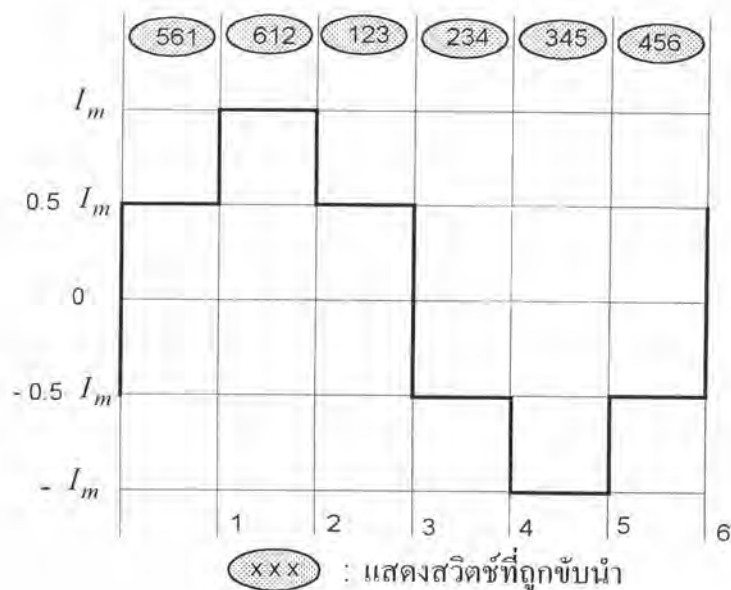
ที่ ϕ มีค่าเท่ากับ 90° จะได้ค่า i_a, i_b, i_c ดังนี้

$$i_a = I_m \sin(90) = I_m$$

$$i_b = I_m \sin(90 - 120) = -0.5 I_m$$

$$i_c = I_m \sin(90 + 120) = -0.5 I_m$$

ในการทำงานเดียวกันกับหัวข้อ 3.1.2.1 จะได้รูปคลื่นกระแสที่ไหลลัด ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 รูปคลื่นกระแสที่ไหลลัด เมื่อ $\phi = 90^\circ$

3.1.2.7 การวิเคราะห์รูปคลื่นกระแสที่ไหลลัด ที่ตำแหน่ง $\phi = 120^\circ$

ที่ ϕ มีค่าเท่ากับ 120° จะได้ค่า i_a, i_b, i_c ดังนี้

$$i_a = I_m \sin(120) = 0.866 I_m$$

$$i_b = I_m \sin(120 - 120) = 0$$

$$i_c = I_m \sin(120 + 120) = -0.866 I_m$$

ในการทำงานเดียวกันกับหัวข้อ 3.1.2.1 จะได้รูปคลื่นกระแสที่ไหลลัด ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 รูปคลื่นกระแสที่โหลด เมื่อ $\phi = 120^\circ$

3.1.2.8 การวิเคราะห์รูปคลื่นกระแสที่โหลด ที่ตำแหน่ง $\phi = 150^\circ$

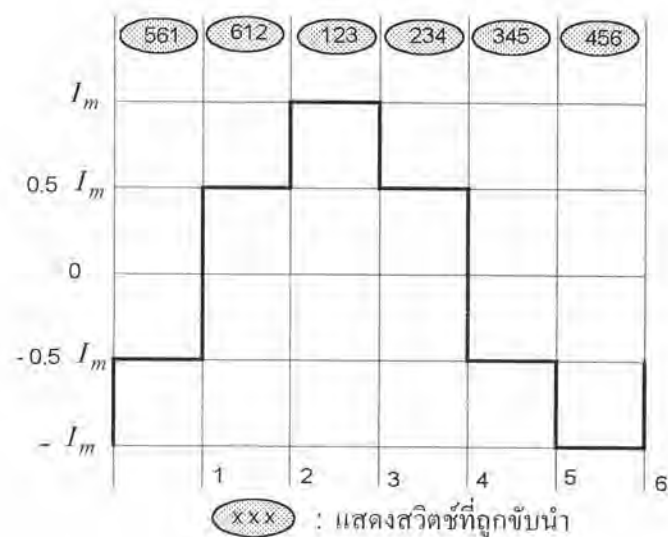
ที่ ϕ มีค่าเท่ากับ 150° จะได้ว่า i_a, i_b, i_c ดังนี้

$$i_a = I_m \sin(150) = 0.5 I_m$$

$$i_b = I_m \sin(150 - 120) = 0.5 I_m$$

$$i_c = I_m \sin(150 + 120) = -I_m$$

ในการทำงานเดียวกันกับหัวข้อ 3.1.2.1 จะได้รูปคลื่นกระแสที่โหลด ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 รูปคลื่นกระแสที่โหลด เมื่อ $\phi = 150^\circ$

3.1.2.9 การวิเคราะห์รูปคลื่นกระแสที่โหลด ที่ตำแหน่ง $\phi = 180^\circ$

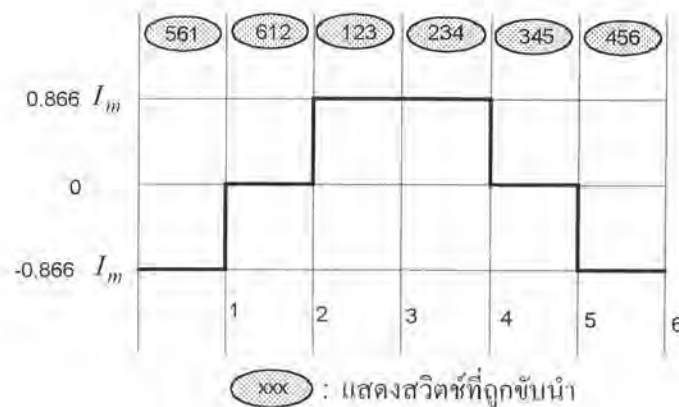
ที่ ϕ มีค่าเท่ากับ 180° จะได้ค่า i_a, i_b, i_c ดังนี้

$$i_a = I_m \sin(180) = 0$$

$$i_b = I_m \sin(180 - 120) = 0.866 I_m$$

$$i_c = I_m \sin(180 + 120) = -0.866 I_m$$

ในทำนองเดียวกันกับหัวข้อ 3.1.2.1 จะได้รูปคลื่นกระแสที่โหลด ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 รูปคลื่นกระแสที่โหลด เมื่อ $\phi = 180^\circ$

3.2 กรณีแหล่งเป็นกึ่งแรงดัน

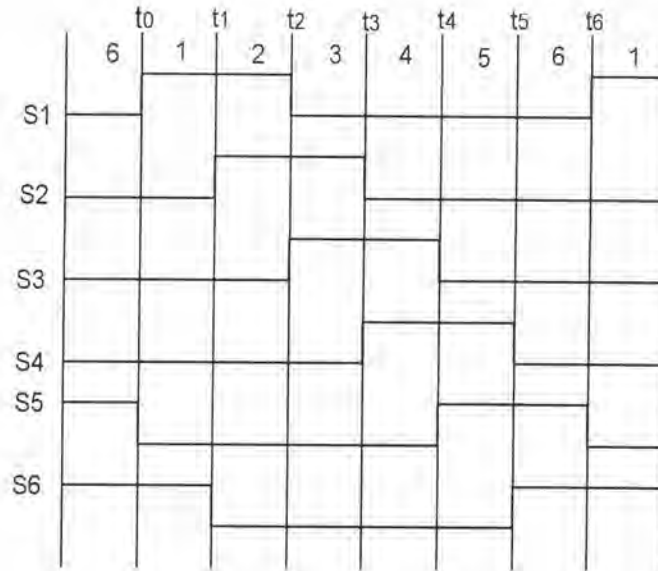
3.2.1 การวิเคราะห์รูปแบบการขั้วนำสวิตช์



รูปที่ 3.20 วงจรสมมูลของโหลดแบบอนุกรม

ในกรณีนี้เป็น duality ของกันและกัน กับกรณีแหล่งเป็นกึ่งแรงดัน โดยจะเห็นว่า โหลดในลักษณะนี้มีตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมอยู่ด้วย โหลดจึงมีลักษณะเป็นกึ่งกระแส ดังนั้นขั้ว a,

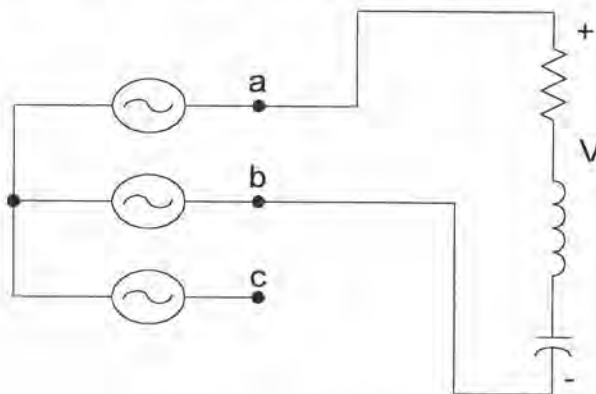
b, c ของรูปที่ 3.1 จะต้องเป็นกิ่งแรงดัน ซึ่งข้อจำกัดของแหล่งจ่ายชนิดแรงดัน คือไม่สามารถลัดวงจรของกิ่งแรงดัน ในการออกแบบรูปแบบเพื่อขับนำสวิตช์ จะต้องระมัดระวังในเรื่องของการลัดวงจรทางแหล่งจ่าย ดังนั้น ในการสวิตช์จึงเลือกรูปแบบดังแสดงได้ในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 การขับนำสวิตช์กรณีแหล่งเป็นกิ่งแรงดัน

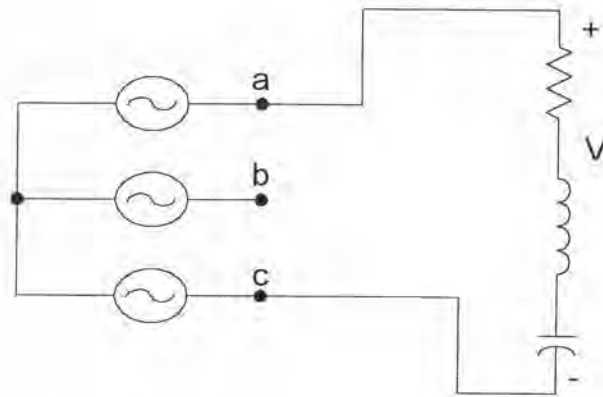
จากการขับนำสวิตช์ดังแสดงในรูปที่ 3.21 จะเห็นว่าสวิตช์ชุดบน และชุดล่างขับนำได้เพียงชุดละ 1 ตัวเท่านั้น เพื่อป้องกันการลัดวงจรของแหล่งจ่าย โดยคาบการสวิตช์ 1 คาบสามารถแบ่งออกเป็นช่วงเวลาได้ 6 ช่วงเช่นเดิม และสามารถอธิบายการทำงานของวงจรสวิตช์ได้ดังนี้

ช่วงเวลาที่ 1 ในช่วงเวลานี้ จะมีการขับนำสวิตช์ S_1 และ S_6 เพื่อต่อวงจรระหว่างแหล่งจ่ายและโหลด และเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 3.22



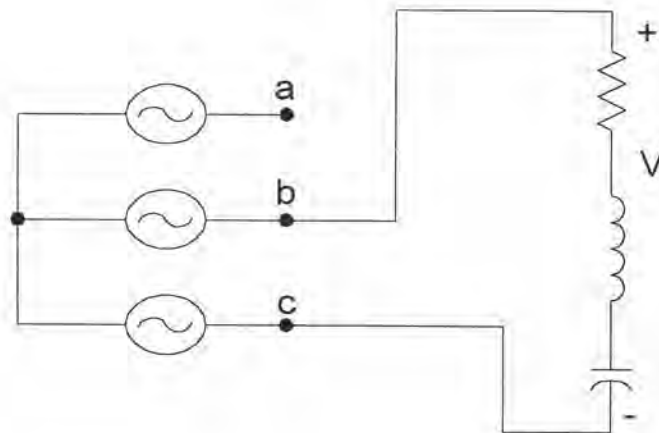
รูปที่ 3.22 วงจรสมมูลขณะสวิตช์ทำงานในช่วงเวลาที่ 1 กรณีแหล่งเป็นกิ่งแรงดัน $v = v_{ab}$

ช่วงเวลาที่ 2 ในช่วงเวลานี้ จะมีการขั้มนำสวิตช์ S_1 และ S_2 เพื่อต่อวงจรระหว่างแหล่งจ่ายและโหลด เขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 3.23



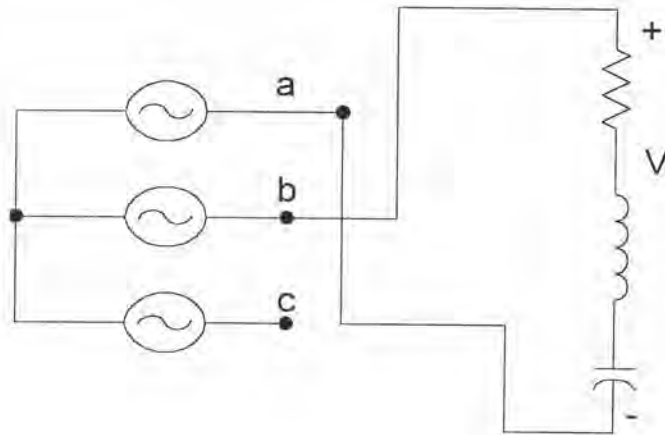
รูปที่ 3.23 วงจรสมมูลขณะสวิตช์ทำงานในช่วงเวลาที่ 2 กรณีแหล่งเป็นกึ่งแรงดัน $v = v_{ac}$

ช่วงเวลาที่ 3 ในช่วงเวลานี้ จะมีการขั้มนำสวิตช์ S_2 และ S_3 เพื่อต่อวงจรระหว่างแหล่งจ่ายและโหลด และเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 3.24



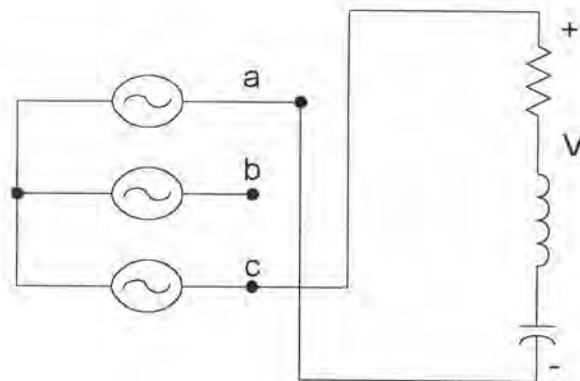
รูปที่ 3.24 วงจรสมมูลขณะสวิตช์ทำงานในช่วงเวลาที่ 3 กรณีแหล่งเป็นกึ่งแรงดัน $v = v_{bc}$

ช่วงเวลาที่ 4 ในช่วงเวลานี้ จะมีการขั้มนำสวิตช์ S_3 และ S_4 เพื่อต่อวงจรระหว่างแหล่งจ่ายและโหลด และเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 3.25



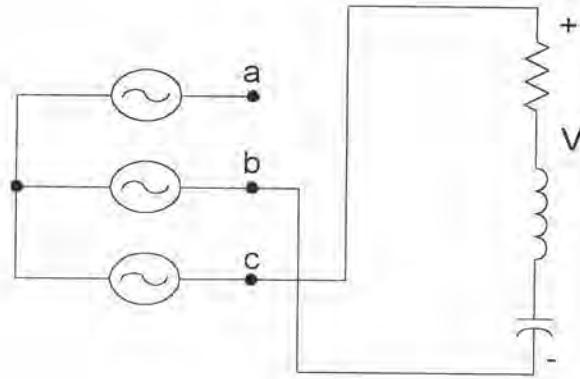
รูปที่ 3.25 วงจรสมมูลขณะสวิตช์ทำงานในช่วงเวลาที่ 4 ครึ่งแหล่งเป็นกึ่งแรงดัน $v = v_{ba}$

ช่วงเวลาที่ 5 ในช่วงเวลานี้ จะมีการขั้วนำสวิตช์ S_4 และ S_5 เพื่อต่อวงจรระหว่างแหล่งจ่ายและโหลด และเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 วงจรสมมูลขณะสวิตช์ทำงานในช่วงเวลาที่ 5 ครึ่งแหล่งเป็นกึ่งแรงดัน $v = v_{ca}$

ช่วงเวลาที่ 6 ในช่วงเวลานี้ จะมีการขั้วนำสวิตช์ S_5 และ S_6 เพื่อต่อวงจรระหว่างแหล่งจ่ายและโหลด และเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 วงจรสมมูลขณะสวิตช์ทำงานในช่วงเวลาที่ 6 กรณีแหล่งเป็นกึ่งแรงดัน $v = v_{ob}$

3.2.2 การวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมที่โหลด

ในกรณีนี้ สมมติให้แหล่งจ่าย v_a , v_b , v_c เป็นสัญญาณไซน์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ โดยมีคาบเวลามากกว่าคาบเวลาของการสวิตช์หลายๆ สามารถวิเคราะห์หารูปคลื่นของแรงดันตกคร่อมโหลด V ได้ในทำนองเดียวกับหัวข้อ 3.1.2 และจะได้รูปคลื่นของ V ที่มุม ϕ ต่างๆ เหมือนรูปคลื่นของกระแส i ในรูปที่ 3.11 ถึง 3.19 ต่างกันที่ว่าปริมาณด้านเข้า เป็นแรงดันสาย ดังนั้น แอมพลิจูดของรูปคลื่นจึงมีค่าเป็น $\sqrt{3}$ เท่าของแรงดันเฟส ดังนั้น จึงต้องแทน I_m ในข้อ 3.1 ด้วย $\sqrt{3}V_m$ ทั้งนี้ก็เป็นไปตามหลักของ duality นั้นเอง

3.3 การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบหลักมูล

จากรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่โหลดที่ได้วิเคราะห์ไว้ ในหัวข้อ 3.1.2 และ 3.2.2 สามารถเขียนอธิบายในรูปโดยใช้อนุกรมฟูริเยร์ (Fourier series) ดังนี้

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega_0 t dt ; n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega_0 t dt ; n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.1)$$

โดยที่ T คือคาบการสวิตช์เท่ากับ $\frac{2\pi}{\omega_0}$
 $\frac{a_0}{2}$ เป็นองค์ประกอบไฟตรง ซึ่งมีค่าเป็น 0

ในที่นี้จะคำนวณเพียงองค์ประกอบหลักมูล ($n=1$) เท่านั้น โดยมีสมมติฐานว่าโหลดที่เป็นวงจรเรโซแนนซ์จะกรองความถี่ฮาร์มอนิกต่างๆ ออกไป

3.3.1 องค์ประกอบหลักมูลของกระแสต้านออกของไซโคลคอนเวอร์เตอร์

ในกรณีที่ด้านเข้าของไซโคลคอนเวอร์เตอร์เป็นกึ่งกระแส องค์ประกอบหลักมูลของกระแสต้านออกสามารถคำนวณได้ดังนี้

3.3.1.1 องค์ประกอบหลักมูลของกระแส เมื่อ $\phi = 0^\circ$

จากรูปคลื่นในรูป 3.11 สามารถคำนวณองค์ประกอบหลักมูลได้ดังนี้

$$b_n = 0$$

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \cos n\omega_0 t dt \\ &= \frac{4I_m}{T} \left[\int_0^{T/6} 0.866 \cos n\omega_0 t dt + \int_{T/3}^{T/2} -0.866 \cos n\omega_0 t dt \right] \\ &= \frac{2I_m}{n\pi} \left[0.866 \left(\sin \frac{n\pi}{3} - \sin 0 \right) - 0.866 \left(\sin n\pi - \sin \frac{2n\pi}{3} \right) \right] \\ &= \frac{2I_m}{n\pi} (0.866) \left(\sin \frac{n\pi}{3} + \sin \frac{2n\pi}{3} \right) \\ &= \frac{\sqrt{3}I_m}{\pi} \left(2 \sin \frac{\pi}{3} \right) \quad ; \quad n=1 \\ &= \frac{3I_m}{\pi} \end{aligned}$$

ดังนั้นกระแสหลักมูลคือ

$$i(t)_{\phi=0} = \frac{3I_m}{\pi} \cos \omega_0 t \quad ; \quad n=1 \quad (3.2)$$

3.3.1.2 องค์ประกอบหลักมูลของกระแส เมื่อ $\phi = 15^\circ$

จากรูปคลื่นในรูป 3.12 สามารถคำนวณองค์ประกอบหลักมูลได้ดังนี้

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega_0 t dt$$

$$= \frac{\sqrt{3}(1.673)I_m}{\pi}$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega_0 t dt$$

$$= \frac{3(0.259)I_m}{\pi}$$

$$A = \sqrt{a^2 + b^2} = \frac{3I_m}{\pi}$$

$$\phi = -\tan^{-1} \frac{b_n}{a_n} = -15^\circ$$

ดังนั้นกระแสหลักมูลคือ

$$i(t)_{\phi=15} = \frac{3I_m}{\pi} \cos(\omega_0 t - 15) \quad (3.3)$$

3.3.1.3 องค์ประกอบหลักมูลของกระแส เมื่อ $\phi = 30^\circ$

จากรูปคลื่นรูปที่ 3.13 สามารถคำนวณองค์ประกอบหลักมูลได้ดังนี้

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} f(t) \cos n\omega_0 t dt$$

$$= \frac{3\sqrt{3}I_m}{2\pi}$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega_0 t dt$$

$$= \frac{3I_m}{2\pi}$$

$$A = \sqrt{a^2 + b^2} = \frac{3I_m}{\pi}$$

$$\phi = -\tan^{-1} \frac{b_n}{a_n} = 30^\circ$$

ดังนั้นกระแสหลักมูลคือ

$$i(t)_{\phi=30} = \frac{3I_m}{\pi} \cos(\omega_0 t - 30) \quad (3.4)$$

3.3.1.4 องค์ประกอบหลักมูลของกระแส เมื่อ $\phi = 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$, และ 180° ,

ในทำนองเดียวกัน จากรูปคลื่นในรูป 3.14 ถึง 3.19 สามารถคำนวณองค์ประกอบหลักมูลได้ดังนี้

$$i(t)_{\phi=45} = \frac{3I_m}{\pi} \cos(\omega_0 t - 45) \quad (3.5)$$

$$i(t)_{\phi=60} = \frac{3I_m}{\pi} \cos(\omega_0 t - 60) \quad (3.6)$$

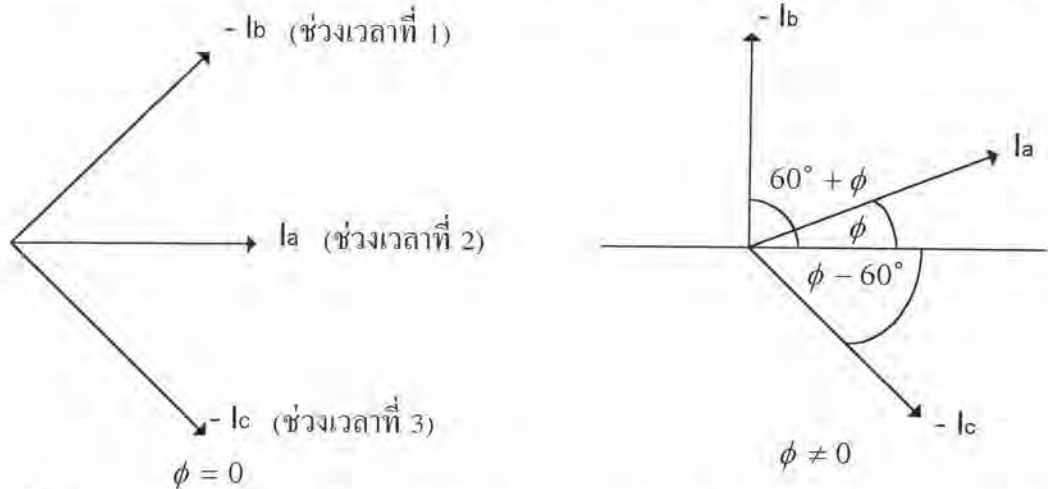
$$i(t)_{\phi=90} = \frac{3I_m}{\pi} \cos(\omega_0 t - 90) \quad (3.7)$$

$$i(t)_{\phi=120} = \frac{3I_m}{\pi} \cos(\omega_0 t - 120) \quad (3.8)$$

$$i(t)_{\phi=150} = \frac{3I_m}{\pi} \cos(\omega_0 t - 150) \quad (3.9)$$

$$i(t)_{\phi=180} = \frac{3I_m}{\pi} \cos(\omega_0 t - 180) \quad (3.10)$$

เพื่อคำนวณค่า RMS ของ i_0 จะใช้แผนภาพเฟสเซอร์ดังในรูปที่ 3.28 ซึ่งแสดงตำแหน่งของเฟสเซอร์กระแส ในครึ่งคาบแรกของการสวิตช์ (นั่นคือ $-i_b$, i_a , และ $-i_c$)



รูปที่ 3.28 แผนภาพเฟสเซอร์ แสดงตำแหน่งของกระแส i_0 ในช่วงเวลาต่าง ๆ ของการสวิตช์

จากแผนภาพเฟสเซอร์เรากำหนดค่า RMS ของ i_0 ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} I_0^2 &= \frac{I_m^2}{3} \left[\sin^2(60^\circ + \phi) + \sin^2 \phi + \sin^2(\phi - 60^\circ) \right] \\ &= \frac{I_m^2}{2} \end{aligned} \quad (3.11)$$

สมการ (3.11) แสดงว่ากระแส i_0 มีค่า RMS คงตัวไม่ขึ้นกับมุมเฟส ϕ จากสมการ (3.2) - (3.10) องค์ประกอบหลักมูล i_{01} ของกระแส i_0 แสดงได้ดังสมการ (3.12)

$$i_{01}(t) = \frac{3I_m}{\pi} \cos(\omega_0 t - \phi) \quad (3.12)$$

สมการ (3.12) แสดงว่า องค์ประกอบหลักมูล i_{01} มีค่า RMS I_{01} คงตัวเท่ากับ $3I_m / \sqrt{2}\pi$ ไม่ขึ้นกับมุมเฟส ϕ แต่ i_{01} จะมีเฟสขึ้นอยู่กั ϕ

3.3.2 องค์ประกอบหลักมูลของแรงดันด้านออกของไซโคลคอนเวอร์เตอร์

ในกรณีที่ด้านเข้าของไซโคลคอนเวอร์เตอร์เป็นกึ่งแรงดัน v_0 เป็นรูปคลื่นไฟสลับ ซึ่งมีค่าเท่ากับ v_{ab} , $-v_{ca}$, v_{bc} , $-v_{ab}$, v_{ca} และ $-v_{bc}$ ในช่วงเวลาที่ 1 ถึง 6 ของคาบการสวิตช์ตามลำดับ(ดูรูปที่ 3.22 - 3.24)

ให้แรงดันเฟสเป็นฟังก์ชันไซน์

$$\begin{aligned} v_a &= V_m \sin \omega t \\ v_b &= V_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ v_c &= V_m \sin(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \quad (3.13)$$

ในทำนองเดียวกันกับกรณีแหล่งจ่ายเป็นกึ่งกระแส เราสามารถหาค่าองค์ประกอบหลักมูลของแรงดันด้านออก ที่ ϕ ค่าต่าง ๆ ได้ดังตาราง 3.1 ซึ่งเป็นไปตามหลักของ duality

ตารางที่ 3.1 ค่าองค์ประกอบหลักมูลของแรงดันทางด้านออกที่ค่า ϕ ต่าง ๆ

ϕ°	องค์ประกอบหลักมูลของแรงดัน
0	$\frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \cos(\omega_0 t + 30)$
15	$\frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \cos(\omega_0 t + 15)$
30	$\frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \cos \omega_0 t$
45	$\frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \cos(\omega_0 t - 15)$
60	$\frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \cos(\omega_0 t - 30)$
90	$\frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \cos(\omega_0 t - 60)$
120	$\frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \cos(\omega_0 t - 90)$
150	$\frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \cos(\omega_0 t - 120)$
180	$\frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \cos(\omega_0 t - 150)$

กล่าวโดยสรุปก็คือ องค์ประกอบหลักมูลของแรงดันด้านออก v_{01} มีค่า RMS คงตัวเท่ากับ $3\sqrt{3}V_m / \sqrt{2}\pi$ ไม่ขึ้นกับมุมเฟส ϕ แต่ v_{01} จะมีเฟสที่ขึ้นอยู่กัมุม ϕ ดังนี้

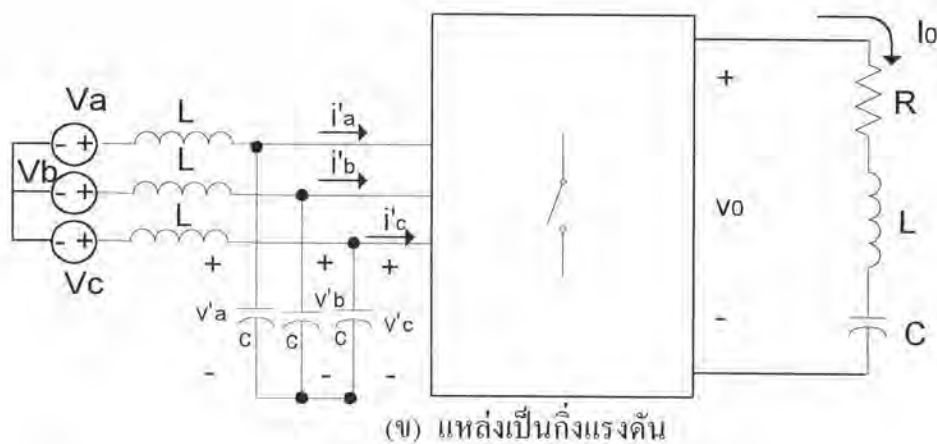
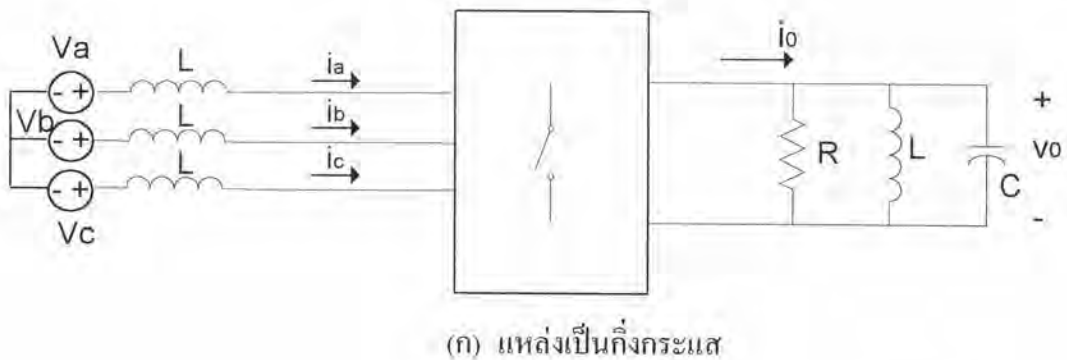
$$v_{01}(t) = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \cos(\omega_0 t + 30 - \phi) \quad (3.14)$$

เราพิสูจน์ได้ในทำนองเดียวกับกระแส i_0 ในข้อ 3.3.1 ว่าแรงดัน v_0 มีค่า RMS คงตัวไม่ขึ้นอยู่กัมุม ϕ ดังนี้

$$V_0 = \frac{\sqrt{3}V_m}{\sqrt{2}} \quad (3.15)$$

3.4 กรณีโหลดเป็นวงจรเรโซแนนซ์

รูปที่ 3.29 แสดงวงจรสมมูลของไซโคลคอนเวอร์เตอร์กรณีโหลดเป็นวงจรเรโซแนนซ์ RLC



รูปที่ 3.29 วงจรสมมูลของไซโคลคอนเวอร์เตอร์กรณีโหลดเป็นวงจรเรโซแนนซ์

สมมติว่าตัวประกอบคุณภาพ Q ของวงจรเรโซแนนซ์ มีค่าสูงและความถี่การสวิตช์ ใกล้ความถี่เรโซแนนซ์ ทำให้สามารถละเลยกำลังที่ความถี่ฮาร์มอนิกของการสวิตช์ได้

เนื่องจากกำลังฉับพลันของวงจรสวิตช์ (S1 - S6) เป็นศูนย์ เมื่อใช้ทฤษฎีบทของเทเลเจน กับวงจรในรูปที่ 3.29(ก) จะได้

$$\sum v_k i_k = \sum L \frac{di_k}{dt} i_k + v_0 i_0 \quad (3.16)$$

โดยที่ $k = a, b, c$

ถ้าทำการเฉลี่ยเฉพาะที่ (local average) โดยการอินทิเกรตในหนึ่งคาบการสวิตช์ จะได้

$$\sum \bar{v}_k \bar{i}_k = \sum L \frac{d\bar{i}_k}{dt} \bar{i}_k + I_{01}^2 R \cos^2 \theta \quad (3.17)$$

โดยที่ \bar{i}_k คือค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ หรือส่วนของ i_k ที่ไม่รวมค่าระลอกที่ความถี่การสวิตช์ จึงมีแต่องค์ประกอบความถี่ต่ำ

θ คือมุมเฟสระหว่าง i_0 และ v_0

และ I_{01} คือ ค่า RMS ขององค์ประกอบหลักมูลของกระแส i_0

โดยทั่วไปความถี่การสวิตช์มีค่าสูงมาก สามารถใช้ L ค่าเล็กในวงจรกรองความถี่สูง หมายความว่า พลังงานที่สะสมใน L ที่ความถี่ต่ำ มีค่าน้อยมาก จากสมการ (3.17) จะได้

$$\sum \bar{v}_k \bar{i}_k \approx I_{01}^2 R \cos \theta \quad (3.18)$$

จากความสัมพันธ์ของกระแส แรงดัน และกำลัง ในระบบไฟฟ้า 3 เฟส

$$p = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (3.19)$$

กรณีแหล่งเป็นกึ่งกระแสซึ่งประกอบด้วยแหล่งแรงดัน v_a, v_b, v_c อนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ L (รูปที่ 3.29(ก)) ให้

$$\begin{aligned}v_a &= V_m \sin(\omega_0 t) \\v_b &= V_m \sin(\omega_0 t - 120^\circ) \\v_c &= V_m \sin(\omega_0 t + 120^\circ)\end{aligned}\tag{3.20}$$

เนื่องจาก i_a, i_b, i_c ต่างก็เป็นฟังก์ชันรายคาบจึงสามารถเขียนในรูปอนุกรมของไซน์ได้ เช่น

$$i_a(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t)\tag{3.21}$$

$$\text{เมื่อ } \omega_0 = \frac{2\pi}{T}$$

$$\frac{a_0}{2} \text{ เป็นองค์ประกอบไฟตรงมีค่า } = 0$$

สมการ (3.21) สามารถนำมาเขียนใหม่ได้เป็น

$$i_a(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega_0 t + \phi_n)\tag{3.22}$$

โดยที่ i_a และ i_c มีเฟสช้าหลัง i_b อยู่ 120 องศา และ 240 องศา ตามลำดับ เมื่อแทนสมการ (3.20) และ (3.22) ลงในสมการ (3.19)

$$\begin{aligned}p &= V_m \sin \omega_0 t \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega_0 t + \phi_n) + V_m \sin(\omega_0 t - 120) \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega_0 t - 120 + \phi_n) + \\& \quad V_m \sin(\omega_0 t + 120) \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega_0 t + 120 + \phi_n) \\&= \frac{3V_m I_1}{2} \cos \phi_1 + \frac{3V_m I_2}{2} \cos(\omega_0 t + \phi_2) + \frac{3V_m I_3}{2} \cos(2\omega_0 t + \phi_3) + \dots\end{aligned}\tag{3.23}$$

จากสมการ (3.23) แสดงกำลังฉับพลันของระบบไฟฟ้า 3 เฟส ซึ่งประกอบด้วย ค่าคงตัวบวกฟังก์ชันของเวลาโดยที่ค่าคงตัวขึ้นกับองค์ประกอบหลักมูลของกระแส และฟังก์ชันของเวลาขึ้นอยู่กับฮาร์มอนิก จากสมการที่ (3.18) แสดงให้เห็นว่า เนื่องจาก I_{01} เป็นค่าคงตัว เท่ากับ $\frac{3I_m}{\sqrt{2\pi}}$ กำลังฉับพลันด้านเข้า จึงมีค่าคงตัว เมื่อเปรียบเทียบกับสมการ (3.23) จะเห็นว่า

$$\frac{3V_m I_2}{2} \cos(\omega_0 t + \phi_2) + \frac{3V_m I_3}{2} \cos(2\omega_0 t + \phi_3) + \dots = 0$$

นั่นคือกระแสฮาร์มอนิกทางด้านเข้า (I_2, I_3, I_4, \dots) = 0 ด้วยเหตุผลนี้ จึงสรุปได้ว่า กระแสด้านเข้าเป็นไซน์ (ไม่มีฮาร์มอนิก) และถ้าละเลยกำลังจินตภาพที่ความถี่สายกำลัง i_k จะมีเฟสตรงกับ v_k ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการออกแบบไซโคลคอนเวอร์เตอร์

ส่วนกรณีที่แหล่งเป็นกึ่งแรงดัน ดังรูปที่ 3.29(ข) สมการ (3.18) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\sum \bar{v}_k \bar{i}_k \approx V_{01}^2 R \cos \theta \quad (3.24)$$

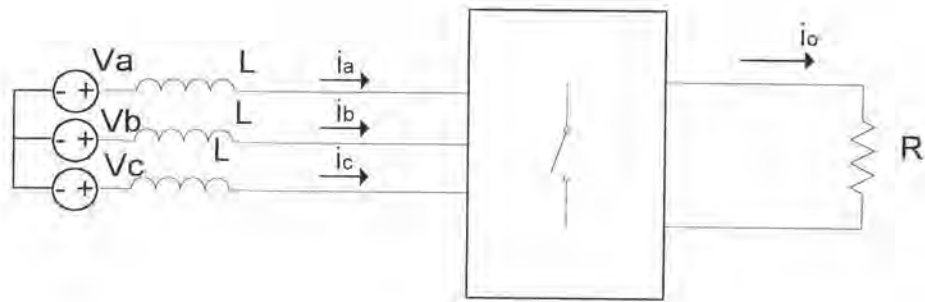
โดยที่ V_{01} คือค่า RMS ขององค์ประกอบหลักมูลของแรงดัน v_0

จากสมการ (3.23) เขียนใหม่ได้เป็น

$$P = \frac{3V_m I_1'}{2} \cos \phi_1 + \frac{3V_m I_2'}{2} \cos(\omega_0 t + \phi_2) + \frac{3V_m I_3'}{2} \cos(2\omega_0 t + \phi_3) + \dots \quad (3.25)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการ (3.24) และ (3.25) จะได้ว่า (I_2', I_3', I_4, \dots) = 0 จึงสามารถสรุปได้ว่า i_k เป็นไซน์ (ไม่มีฮาร์มอนิก) และมีเฟสตรงกับ v_k'

3.5 กรณีโหลดเป็นความต้านทาน



รูปที่ 3.30 วงจรสมมูลของไซโคลคอนเวอร์เตอร์กรณีแหล่งเป็นกึ่งกระแส

เมื่อโหลดเป็นความต้านทาน R และแหล่งจ่ายเป็นกึ่งกระแส จะได้รูปวงจรวงจรดังรูปที่ 3.30 และสมการ (3.18) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\sum \bar{v}_k \bar{i}_k = I_0^2 R \quad (3.26)$$

โดยที่ I_0 คือค่า RMS ของกระแส i_0

กำลังขับพลันด้านเข้าสามารถแสดงได้เช่นเดียวกันกับสมการที่ (3.23) และจากสมการ (3.26) แสดงให้เห็นว่าเนื่องจาก I_0^2 มีค่าคงตัว กำลังด้านเข้าจึงมีค่าคงตัว ในทำนองเดียวกันกับกรณีโหลดเรโซแนนซ์ ที่มีแหล่งจ่ายเป็นกึ่งกระแส จะได้ว่า $(I_2, I_3, I_4, \dots) = 0$ ดังนั้น กระแส i_k จึงเป็นไซน์ (ไม่มีฮาร์มอนิก) และมีเฟสตรงกันกับ v_k ถ้าละเลยกำลังจินตภาพที่ความถี่สายกำลัง

ในทำนองเดียวกัน เมื่อแหล่งจ่ายเป็นกึ่งแรงดัน สมการ (3.18) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\sum \bar{v}'_k \bar{i}'_k = V_0^2 R \quad (3.27)$$

จากสมการ (3.27) จะเห็นว่า กำลังขับพลันด้านเข้าจะมีค่าคงตัวทำนองเดียวกันกับกรณีโหลดเป็นวงจเรโซแนนซ์ ที่มีแหล่งเป็นกึ่งแรงดัน และจะได้ว่า กระแสด้านเข้า i'_k เป็นไซน์ (ไม่มีฮาร์มอนิก) และ i'_k จะมีเฟสตรงกับแรงดัน v'_k