



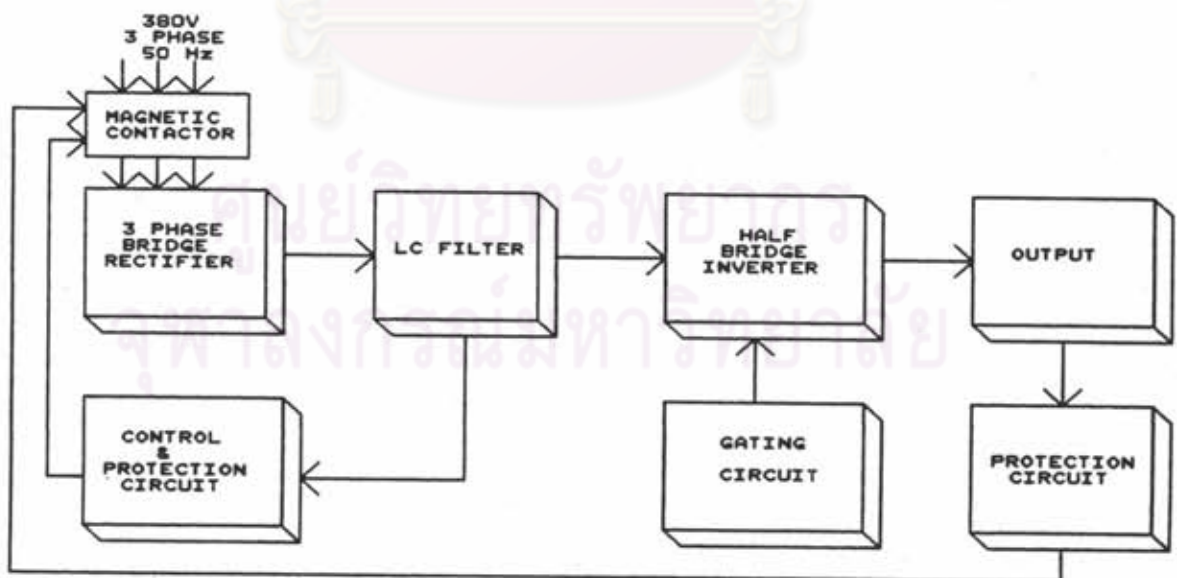
บทที่ 3

การออกแบบและสร้างเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ได้วิจัยและพัฒนาขึ้นนี้ เป็นเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่สร้างไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ประเภท ไทริสเตอร์หรือเอสซีอาร์ โดยมีอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ความถี่ 3500 เฮิรตซ์ เพื่อจ่ายกำลังให้กับขดลวดเหนี่ยวนำโดยตรง

โครงสร้างเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำแบ่งได้เป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือภาคกำลัง ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงของระบบ และวงจรอินเวอร์เตอร์ ส่วนที่สองเป็นภาคควบคุม ประกอบด้วยวงจรจุดชนวนเอสซีอาร์ วงจรควบคุมการทำงานและป้องกันเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

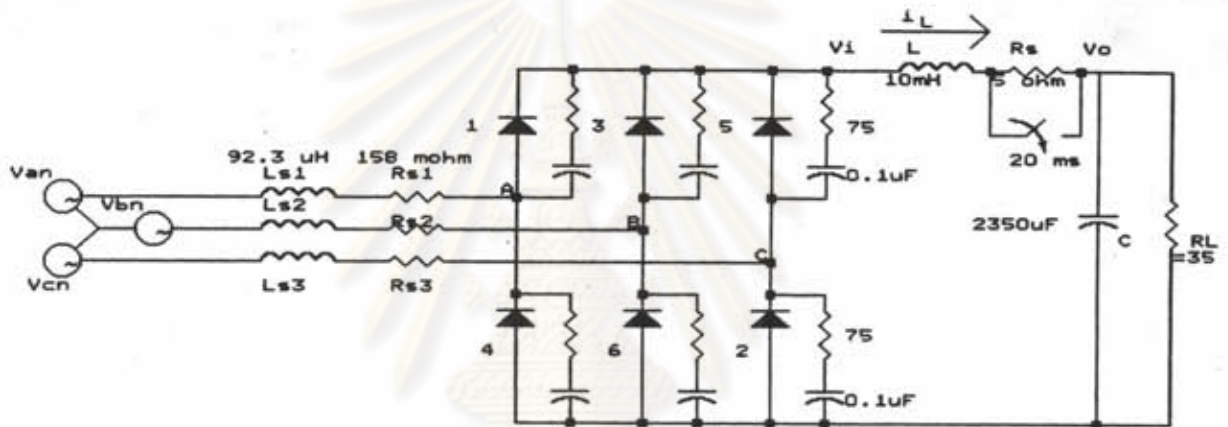
โครงสร้างของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรม ได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

แหล่งจ่ายไฟตรงภาคกำลังของระบบ

วงจรส่วนนี้ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงให้กับอินเวอร์เตอร์ของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ โดยจะรับแรงดันไฟของกระแสลับ 3 เฟส ขนาด 380 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ผ่านวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ชนิด 3 เฟส แล้วผ่านวงจรกรองที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ได้ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงดันออกประมาณ 510 โวลต์ รายละเอียดของวงจรส่วนนี้ แสดงไว้ในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ชนิด 3 เฟส

วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ชนิด 3 เฟส ในรูปที่ 3.2 มีแรงดันเข้าเป็นไฟฟ้ากระแสลับแบบ 3 เฟส ซึ่งแต่ละเฟสมีแรงดันเข้าเท่ากัน แต่เฟสต่างกัน 120 องศา ส่วนทางด้านขาออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งมีองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสลับอยู่ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.3 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านขาออก (V_i) จะแปรตามค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันระหว่างสายด้านขาเข้า ($V_{r.m.s}$) ตามสมการ(3.1)

(รายงานเครื่องจ่ายไฟตรง 0-500 V, 10 A, ยุทธนา กุลวิทิต)

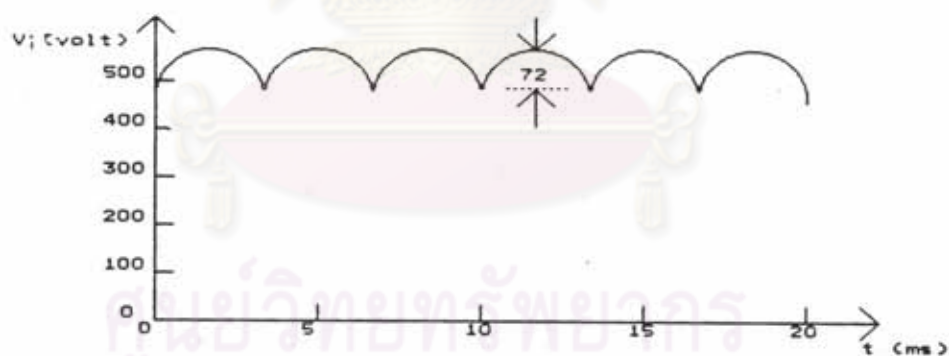
$$V_i = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{r.m.s} \quad (3.1)$$

ส่วนการกระเพื่อมของแรงดันออกจะมีความถี่ 6 เท่าของความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับของสายส่ง แรงดันกระเพื่อมมีองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งมีความถี่ต่ำสุดเท่ากับความถี่ของการกระเพื่อม ส่วนความถี่ที่สูงขึ้นไปจะเพิ่มเป็นจำนวนทวีคูณ ($6n$) ของความถี่ของการกระเพื่อม ค่ายอดถึงค่ายอดของการกระเพื่อม (V_r) และค่ายอดขององค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่างๆ (V_{6n}) จะคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$V_r = (1 - \cos \pi / 6) \sqrt{2} V_{rms} \quad (3.2)$$

$$V_{6n} = \frac{6\sqrt{2} V_{rms}}{[(6n)^2 - 1] \pi} \quad (3.3)$$

ในกรณีที่แรงดันระหว่างสายเท่ากับ 380 โวลต์ ค่ายอดของการกระเพื่อมจะเท่ากับ 72 โวลต์ ส่วนค่ายอดขององค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำสุดคือ 300 เฮิรตซ์ จะมีค่าเท่ากับ 29.3 โวลต์



รูปที่ 3.3 รูปคลื่นแรงดันออกของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ชนิด 3 เฟส

ในแต่ละคาบ (360°) ไดโอดแต่ละตัวของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ชนิด 3 เฟส จะมีช่วงการนำกระแสเท่ากับ $1/3$ คาบ (120°) โดยมีไดโอดนำกระแสครั้งละ 2 ตัวและมีลำดับการนำกระแสดังในไดอะแกรมรูปที่ 3.4

ไดโอดที่นำ กระแส	D1			D3		D5		D1		
เฟสที่มีกระแสไหล	CB	AB	AC	BC	BA	CA	CB	AB	AC	
	D6		D2		D4		D6		ไดโอดที่นำกระแส	

รูปที่ 3.4 ไดอะแกรมของลำดับการนำกระแสของไดโอด

เมื่อไดโอดนำกระแส กระแสผ่านไดโอดจะมีค่าประมาณเท่ากับกระแสออกของวงจรเรียงกระแส ซึ่งมีค่าเฉลี่ยระหว่างการนำกระแสเท่ากับกระแสไหลและในกรณีที่วงจรกรองแบบ LC มีขนาดของค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำสูง กระแสของวงจรเรียงกระแสและกระแสของไดโอดในตอนนำกระแสจะมีขนาดเท่ากับกระแสไหล (I_L) ดังนั้นกระแสเฉลี่ย (I_{av}) และค่าอาร์เอ็มเอสของกระแส (I_{rms}) ในไดโอดจะมีค่าตามสมการ (3.3) และ สมการ (3.4) ตามลำดับ คือ

$$I_{av} = (1/3) I_L \quad (3.4)$$

$$I_{rms} = (1/\sqrt{3}) I_L \quad (3.5)$$

จากสมการ (3.4) และ (3.5) เราสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพการใช้งานของไดโอด (form factor) ได้ดังนี้ คือ

$$k_D = I_{rms}/I_{av} = \sqrt{3} \quad (3.6)$$

เนื่องจากกระแสไหลตามข้อกำหนดที่ตั้งไว้คือ 20 แอมแปร์ ดังนั้นไดโอดที่ใช้จะต้องทนกระแสเฉลี่ย (I_{av}) ได้ 6.67 แอมแปร์ และทนกระแสที่มีค่าอาร์เอ็มเอส

(I_{rms}) ได้ 11.55 แอมแปร์

ในการเลือกพิกัดของไดโอด กำหนดให้อุณหภูมิที่ตัวถังของไดโอดมีอุณหภูมิไม่เกิน 64 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิห้องไม่เกิน 45 องศาเซลเซียส พิกัดของกระแสไดโอดจะลดลงเหลือประมาณ 0.8 เท่าของพิกัด เมื่ออุณหภูมิที่ตัวถังมีค่า 64 องศาเซลเซียส ซึ่งจากเงื่อนไขดังกล่าว จะต้องใช้ไดโอดที่มีพิกัดกระแสที่อุณหภูมิของตัวถัง 25 องศาเซลเซียส เท่ากับ 14.38 แอมแปร์ และเมื่อคำนึงถึงการ overload ประมาณ 1.5 เท่า กับค่า safety factor ประมาณ 1.5 เท่าจะต้องใช้ไดโอดที่มีพิกัดของกระแส ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เท่ากับ 32 แอมแปร์

แต่อย่างไรก็ตาม ไดโอดที่มีพิกัดของกระแส 32 แอมแปร์ ไม่มีขายตามท้องตลาด จึงเลือกใช้ไดโอดที่มีพิกัดกระแส 50 แอมแปร์ ทนกระแสกระชากครึ่งไซเคิลได้ 750 แอมแปร์ ซึ่งปัจจุบันราคาไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับไดโอดที่มีพิกัดกระแส 30 แอมแปร์

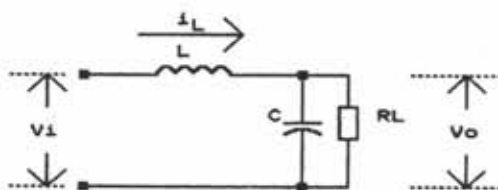
ถ้าต้องการใช้หม้อแปลง 3 เฟส ทางด้านขาเข้าของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ เพื่อแยกโหนดสายส่งกับเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ เพื่อให้ความปลอดภัยต่อผู้ใช้งานจากการถูกไฟฟ้าดูด การออกแบบพิกัดกำลังงานของหม้อแปลงสามารถทำได้โดยการคำนวณจากค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสทางด้านขาเข้าของวงจรเรียงกระแสที่มีรูปคลื่นเป็น Quasi Square Wave ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\sqrt{2/3}$ ของกระแสไฟตรงด้านขาออกของแหล่งจ่ายไฟตรงเท่ากับ 16.32 แอมแปร์ ส่วนแรงดันเป็นแรงดันระหว่างสายมีค่าประมาณ 380 โวลต์ ทำให้ต้องใช้ขนาดหม้อแปลง $\sqrt{3} * 380 * 16.32 = 10.74$ กิโลโวลต์แอมแปร์

โดยหม้อแปลง 3 เฟสที่ใช้งานทางด้านขาเข้าควรต่อแบบเดลต้า (delta) เพื่อป้องกันไม่ให้มีองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรงในสายส่ง อันเนื่องมาจากความไม่สมดุลของกระแสออกของหม้อแปลงที่อาจจะเกิดขึ้นได้ ส่วนทางด้านขาออกของหม้อแปลงควรต่อเป็นแบบสตาร์ (star) เพื่อให้มีสายนิวทรัลไว้ใช้ภายในเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

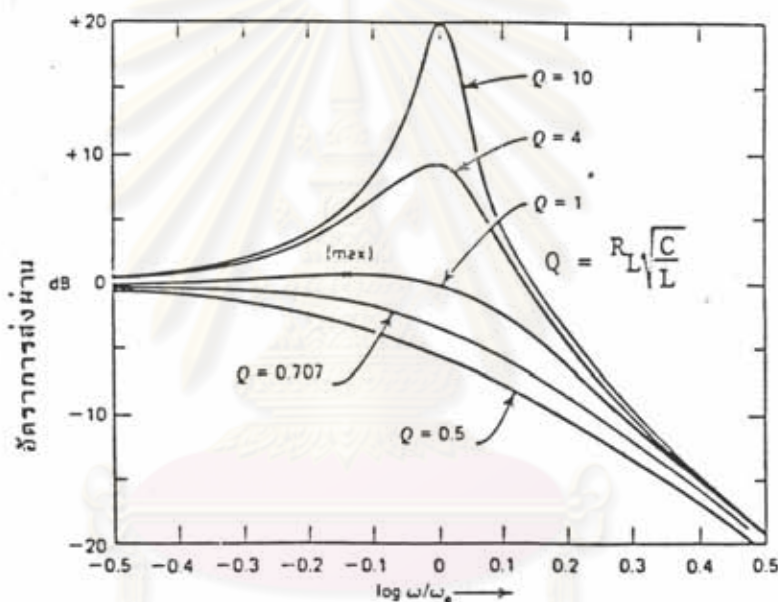
1) วงจรกรอง (Filter)

วงจรกรองที่ใช้ในการลดขนาดขององค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อลดการกระเพื่อมของแรงดันด้านขาออกของแหล่งจ่ายไฟตรงนั้น จะเป็นวงจรที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุ (C) ต่อกันเป็นวงจรกรองผ่านต่ำ (Low-pass

filter) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (a)



รูปที่ 3.5(a) วงจรกรอง LC แบบผ่านต่ำ



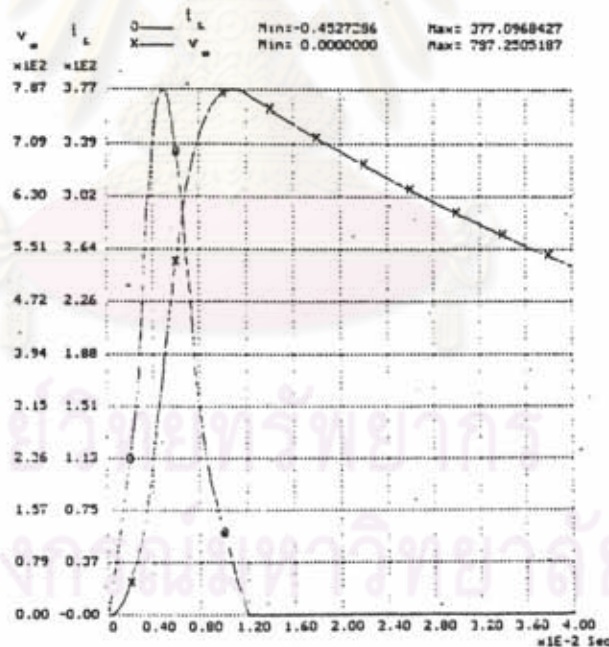
รูปที่ 3.5(b) อัตราการส่งผ่านสัญญาณของวงจรกรองในรูป 3.5(a) ที่ความถี่ต่างๆ กัน

วงจรกรองผ่านต่ำนี้จะส่งผ่านไฟฟ้ากระแสตรง โดยจะลดทอนขนาดขององค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่สูงกว่า ความถี่หักมุม (ω_0) ของวงจรกรอง โดยที่ความถี่หักมุมของวงจรกรองผ่านต่ำแบบ LC จะมีค่าเท่ากับ $1/\sqrt{LC}$ อัตราการส่งผ่านไฟฟ้ากระแสสลับ (V_o/V_i) ของวงจรกรองจะลดลงเมื่อความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.5(b) ซึ่งสามารถเขียนสมการของการเปลี่ยนแปลงของอัตราการส่งผ่านกับความถี่ได้

$$V_o/V_i = \frac{1}{\sqrt{[1-(\omega/\omega_0)^2]^2 + [(1/R_L)\sqrt{L/C}(\omega/\omega_0)]^2}} \quad (3.7)$$

จากสมการ 3.7 จะได้ว่า ที่ความถี่เท่ากับความถี่หักมุม ($\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$) อัตราการส่งผ่านไฟฟ้ากระแสสลับ จะขึ้นอยู่กับค่า Q ซึ่งมีค่าเท่ากับ $R_L\sqrt{C/L}$ และเมื่อ $\omega = \omega_0$ อัตราการส่งผ่านไฟฟ้ากระแสสลับก็จะมีค่าเท่ากับค่า Q เช่นกัน เนื่องจากค่า Q ที่ได้อาจจะมีความมากหรือน้อยกว่า 1 ก็ได้ ดังนั้นถ้าเป็นไปได้ไม่ควรให้อัตราการส่งผ่านองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับมากกว่า 1 เพราะแทนที่วงจรกรองจะลดทอนองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับกลับจะเพิ่มขนาดขององค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับที่ออกจากวงจรเรียงกระแส ซึ่งก็เป็นการเพิ่มแรงดันกระเพื่อม

ค่า Q นอกจากจะมีผลต่อแรงดันกระเพื่อมแล้ว ยังมีผลต่อผลตอบในภาวะชั่วคราว (Transient) ด้วย โดยทั่วไปแล้ว ถ้า Q มีค่าสูงจะทำให้การตอบสนองของวงจรเร็วกว่าเมื่อ Q ที่มีค่าต่ำ แต่จะทำให้ผลตอบต่อสัญญาณนั้น มี Overshoot มาก ดังจะเห็นได้จากผลการจำลองผลตอบของแรงดันออกและกระแสในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองในตอนเริ่มเปิดเครื่อง ที่ได้จากการจำลองการทำงานของแหล่งจ่ายไฟตรงในตอนเริ่มเดินเครื่องด้วยคอมพิวเตอร์ ในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุด้านขาออกในตอนเริ่มเปิดเครื่อง

โดยที่ R_L ซึ่งเป็นความต้านทานสมมูลที่ใช้แทนอินเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ 35 โอห์ม

- C เป็นตัวเก็บประจุในวงจรกรองมีค่าเท่ากับ 2350 ไมโครฟารัด
 L เป็นตัวเหนี่ยวนำในวงจรกรองมีค่าเท่ากับ 10 มิลลิเฮนรี

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น จะเห็นว่า การเลือกค่า Q ที่มีค่าต่ำน่าจะมี ความเหมาะสมมากกว่าการเลือกค่า Q ที่มีค่าสูง อย่างไรก็ตามในการออกแบบอุปกรณ์ ของวงจรกรองเพื่อให้ Q มีค่าต่ำ พบว่า ต้องใช้ L ที่มีค่าใหญ่ ซึ่งจะมีผลทำให้ตัว เหนี่ยวนำมีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก และราคาแพง จึงมีความไม่เหมาะสม การลดค่า Q นอกจากจะใช้การเพิ่มขนาดของตัวเหนี่ยวนำแล้วยังสามารถทำได้โดยการการใช้ตัวต้าน ทานต่ออนุกรมกับวงจรกรอง

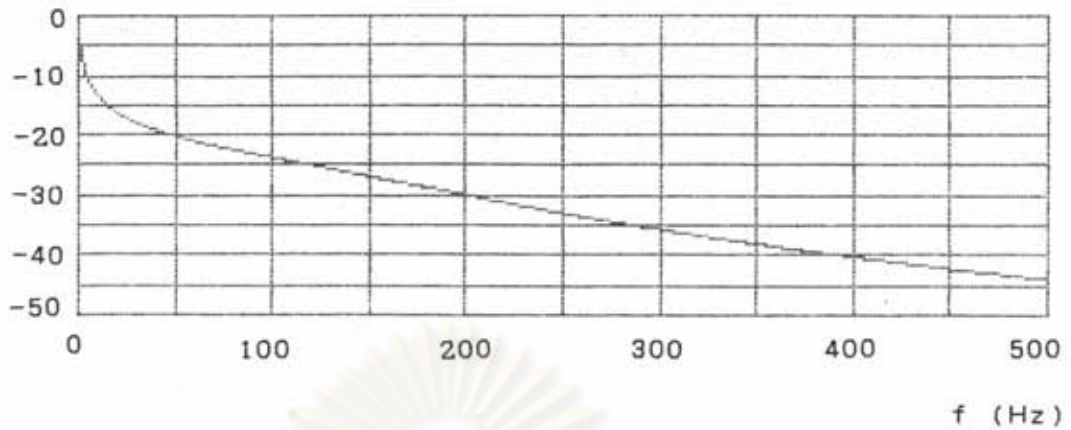
ได้มีการเลือกค่า L และ C ของวงจรกรอง ได้ค่า $L = 10$ มิลลิเฮนรี และ $C = 2350$ ไมโครฟารัด สำหรับความต้านทานของโหลด 35 โอห์ม ค่า Q ของวง จรเมื่อไม่มีความต้านทานอนุกรมมีค่าเท่ากับ 18 ซึ่งเป็นค่าที่สูงมากเมื่อใช้ค่า ความต้านทาน (R_L) 5 โอห์ม เพื่อช่วยจำกัดกระแสและระชากในตอนเริ่มต้นไม่ให้เกิน 100 แอมแปร์ โดยต่ออนุกรมกับวงจรกรอง ค่า Q ของวงจรกรองคำนวณได้จาก สมการ 3.8

$$Q = \frac{(\sqrt{R_L + R_C})(\sqrt{R_L LC})}{R_L R_C + L} \quad (3.8)$$

เมื่อแทนค่าอุปกรณ์ลงในสมการที่ 3.8 ได้ $Q = 0.012$ ซึ่งมีค่าต่ำมาก ความต้านทาน 5 โอห์ม จะช่วยจำกัดกระแส แต่จะทำให้เกิดกำลังสูญเสียในภาวะอยู่ตัวด้วย ดังนั้นเพื่อ จะลดกำลังสูญเสียในภาวะอยู่ตัว จึงได้ทำการลดวงจรความต้านทานดังกล่าว เพื่อไม่ให้ เกิดกำลังสูญเสีย เมื่อเวลาผ่านไป 20 มิลลิวินาที

รูปที่ 3.7 แสดงผลการคำนวณผลตอบเชิงความถี่ของวงจรกรองจะเห็นได้ว่า ความถี่หักมุมเท่ากับ 40 เฮิรตซ์ ทำให้อัตราการส่งผ่านองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับที่ ความถี่สูงกว่าความถี่หักมุมจะลดลง 40 dB/decade อัตราการบั่นทอน (attenuation) องค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 300 เฮิรตซ์ มีค่าเท่ากับ -36 dB

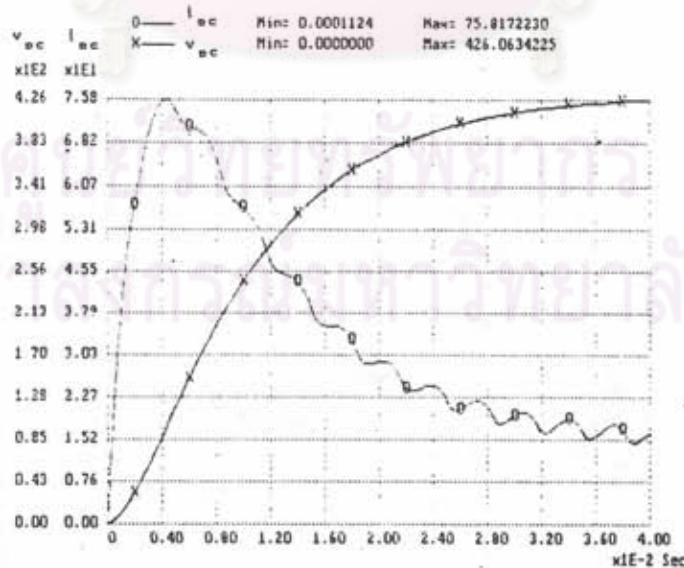
attenuation (dB)



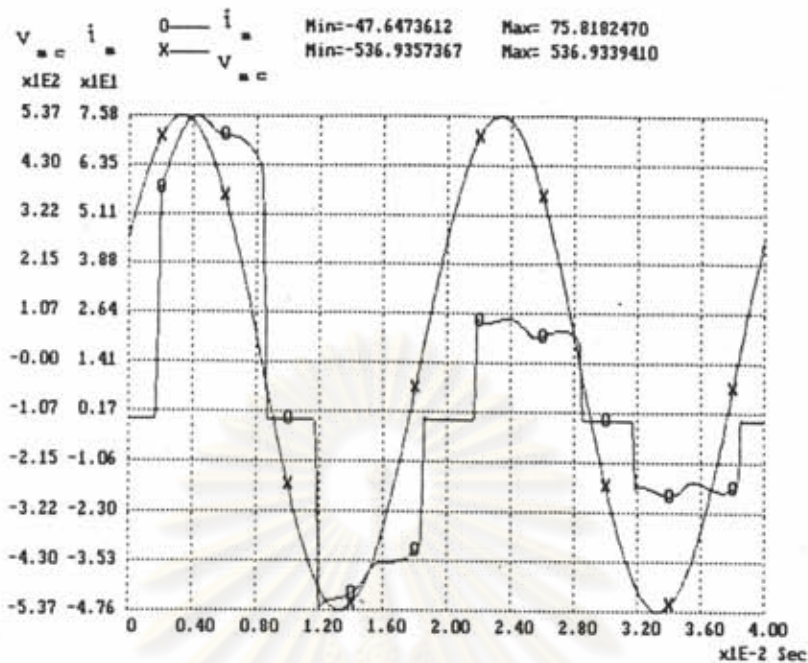
รูปที่ 3.7 แสดงผลการคำนวณผลตอบเชิงความถี่ของวงจรกรอง

รูปที่ 3.8 แสดงผลการจำลองการทำงานของแหล่งจ่ายไฟตรงในตอนเริ่มเปิดเครื่องด้วยคอมพิวเตอร์ เมื่อมีความต้านทาน 5 โอห์ม ช่วยจำกัดกระแสในตอนเริ่มเปิดเครื่อง จะเห็นได้ว่า มีค่ายอดกระแสของตัวเหนี่ยวนำไม่เกิน 76 แอมแปร์ และไม่มี Overshoot ของแรงดันออก

รูปที่ 3.9 แสดงรูปคลื่นของกระแสทางด้านขาเข้าในตอนเริ่มเปิดเครื่องและแรงดันระหว่างสาย Vac มีค่าสูงสุด จะทำให้กระแสที่ได้มีค่าสูงสุดเช่นกัน จะเห็นได้ว่า ค่ายอดของกระแสแลกระชากมีค่าไม่เกิน 100 แอมแปร์ ซึ่งส่งผลให้ไดโอดของวงจรเรียงกระแสชนิด 3 เฟส สามารถทนกระแสแลกระชากได้ด้วย



รูปที่ 3.8 แสดงกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุในตอนเริ่มเปิดเครื่องโดยมีความต้านทาน 5 โอห์มต่ออนุกรมกับวงจรกรอง



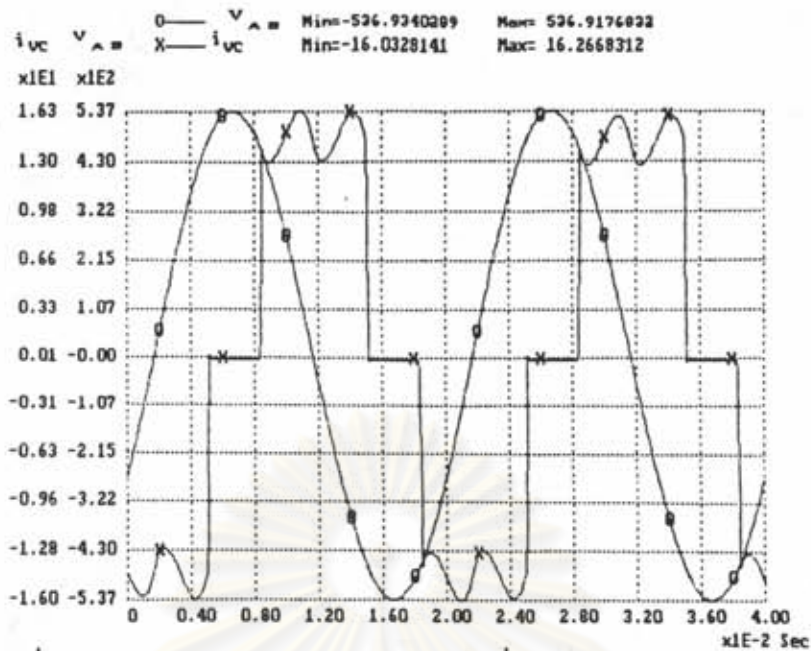
รูปที่ 3.9 แสดงกระแสระชาขาเข้าของเครื่องเฟส a และแรงดันไฟฟ้ากระแสลับ v_m ในตอนเริ่มเปิดเครื่อง

2) ผลการจำลองการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงด้วยคอมพิวเตอร์

ผลจากการจำลองการทำงานของแหล่งจ่ายไฟตรงเมื่อสภาวะอยู่ตัว

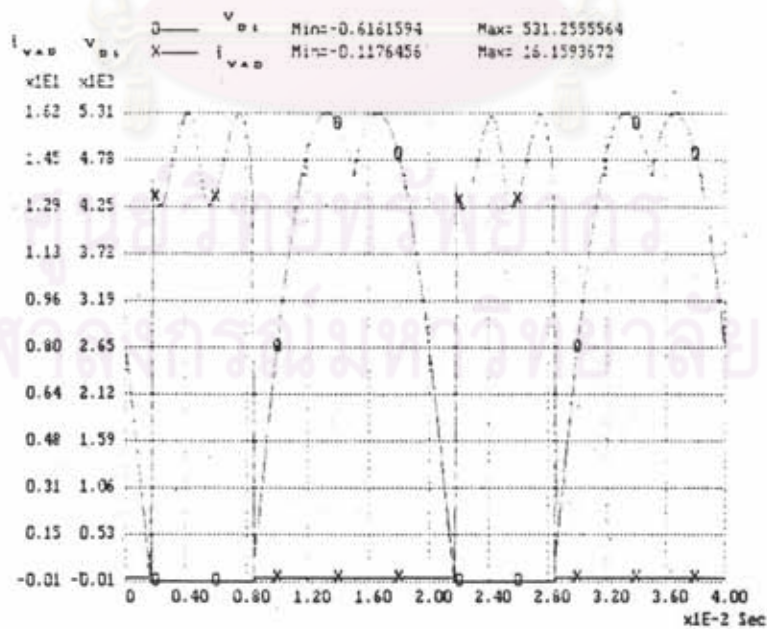
(steady state) แสดงเฉพาะจุดสำคัญ ๆ อาทิเช่น กระแสของสายจากแหล่งจ่าย แรงดันระหว่างสาย กระแสที่ไหลผ่านไดโอด แรงดันที่ตกคร่อมไดโอด กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุหรือแรงดันไฟตรง ดังแสดงในรูปที่ 3.10-3.12

รูปที่ 3.10 แสดงรูปคลื่นกระแสจากกระแสในสายจากแหล่งจ่ายทางด้านขาเข้าของเครื่องเฟส C (i_{vc}) ลักษณะเป็น Quasi Square Wave มีค่ายอดกระแสทางด้านบวกและลบเท่ากับ 16.3 แอมแปร์ ส่วนแรงดันเป็นแรงดันระหว่างสายเฟส A และ B



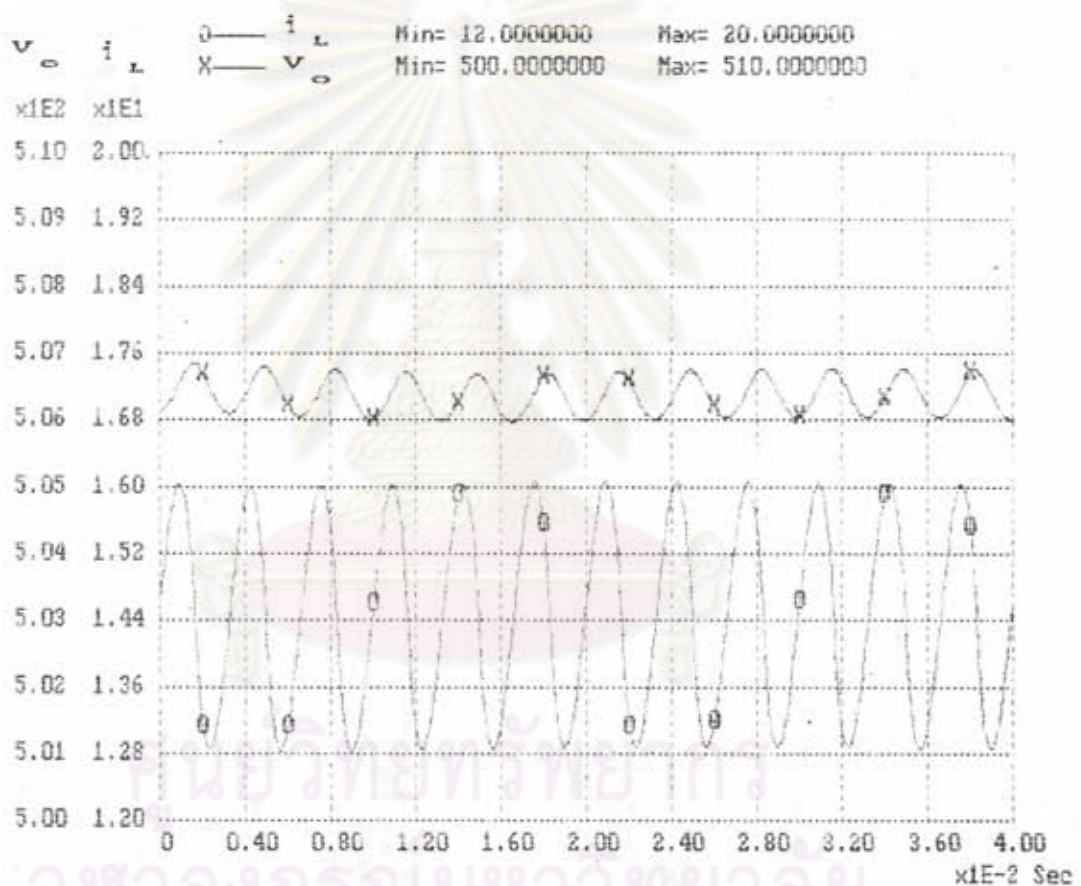
รูปที่ 3.10 แสดงกระแสขาเข้าของเครื่องเฟส C (i_{vc}) และแรงดันระหว่างสายเฟส A และ B (v_{ab})

รูปที่ 3.11 แสดงรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านไดโอดเฟส A มีลักษณะรูปคลื่นคล้ายสี่เหลี่ยม มีค่ายอดกระแส 16.2 แอมแปร์ ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดมีลักษณะรูปคลื่นประกอบไปด้วยส่วนของแรงดันด้านบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับระหว่างเฟสที่นำกระแสกับเฟสที่มีไดโอดตัวที่ 1 ต่ออยู่ มีค่ายอดของแรงดัน 530 โวลต์



รูปที่ 3.11 แสดงรูปคลื่นกระแสผ่านไดโอดตัวที่ 1 เฟส A (i_{vad}) และแรงดันตกคร่อมไดโอดตัวที่ 1 (v_{d1})

รูปที่ 3.12 แสดงรูปคลื่นของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในวงจรกรองผ่านต่ำมีการกระเพื่อมของกระแสเพียงเล็กน้อยค่าเฉลี่ยของกระแสประมาณ 14 แอมแปร์ ส่วนแรงดันไฟตรงมีการกระเพื่อมของแรงดันเล็กน้อยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 506.5 โวลต์



รูปที่ 3.12 แสดงรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_L) และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (v_o)

- 3) การคำนวณค่าความต้านทานที่ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ
ตามมาตรฐาน วสท.40 กำหนดให้ตัวเก็บประจุที่ใช้กับแรงดันไม่



เกิน 600 โวลต์ จะต้องมิตัวต้านทานสำหรับการคายประจุให้กับตัวเก็บประจุมีแรงดันเหลือ 50 โวลต์ภายใน 1 วินาที เนื่องจากในวงจรใช้ตัวเก็บประจุขนาด 2350 ไมโครฟารัด เพื่อรับแรงดันไฟตรง 510 โวลต์ แรงดันที่คร่อมตัวเก็บประจุที่เวลาใด ๆ มีความสัมพันธ์กับแรงดันที่คร่อมตัวเก็บประจุก่อนคายประจุดังสมการ

$$V_r = V_0 \exp(-t/RC) \quad (3.9)$$

โดยที่ V_0 = แรงดันที่คร่อมตัวเก็บประจุก่อนคายประจุ = 510 โวลต์
 V_r = แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุในการคายประจุภายในเวลา 1 วินาที เท่ากับ 50 โวลต์
 t = 1 วินาที
 C = 2350 ไมโครฟารัด

แทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆในสมการ (3.8) จะได้ค่า $R = 184$ โอห์ม
 พลังงานที่คายออก = $1/2CV^2 = 1/2 * 2350 * 10^{-6} * 510^2$ (3.10)
 $= 315.6$ จูล

และคิดเป็นกำลังงาน $Power = Energy/Time$ (3.11)
 $= 315.6/1 = 315.6$ วัตต์

แต่เนื่องจากการคายประจุเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆอย่างไม่ต่อเนื่องหรือเพียงครั้งเดียวหลังปิดเครื่องโดยการคายประจุผ่านหน้าคอนแทคของแมกเนติกคอนแทคเตอร์ที่อนุกรมกับความต้านทาน ดังนั้นจึงออกแบบให้ใช้ความต้านทานค่า 780 โอห์ม 10 วัตต์ต่อขนานกัน 4 ตัว ได้ค่าความต้านทาน 195 โอห์ม 40 วัตต์

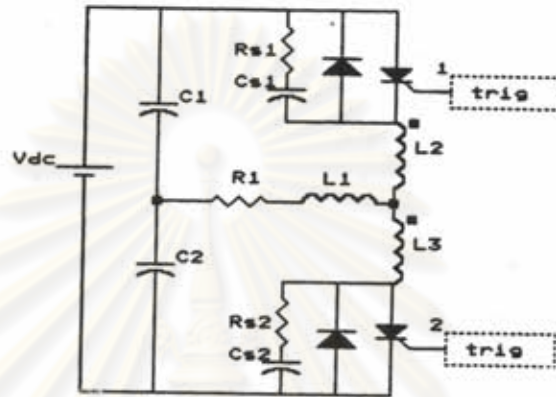
ภาคอินเวอร์เตอร์

เนื่องจากอินเวอร์เตอร์ของเครื่องที่สร้างขึ้นมีกำลังงานไม่สูงมากนัก ดังนั้นจึงเลือกใช้วงจรกึ่งบริดจ์ (Half Bridge) ซึ่งใช้เอสซีอาร์คู่หนึ่งทำหน้าที่เป็นสวิทช์ไวงาน การทำงานของเอสซีอาร์อาศัยการคอมมิวเททโดยโพลด ทำให้วงจรง่ายและใช้อุปกรณ์น้อย เมื่อใช้การคอมมิวเททโดยโพลด โพลดของอินเวอร์เตอร์จำเป็นต้องมีค่าตัวประกอบกำลังแบบนำหน้า (Leading Power Factor)

เนื่องจากขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าตัวประกอบกำลัง (PF) ต่ำ และเป็นแบบล่าหลัง (Lagging Power) ดังนั้นเพื่อให้ตัวประกอบกำลังเป็นแบบนำหน้า และมีค่าสูงขึ้นจึงได้ใช้ตัวเก็บประจุ เพื่อทำหน้าที่ปรับค่าตัวประกอบกำลังของโพลดให้มีค่าสูงขึ้น และเป็นแบบนำหน้า โดยทั่วไปเรามักต้องการให้ตัวประกอบกำลังมีค่าสูง เพื่อให้ได้กำลังออกสูงสำหรับกระแสและแรงดันออกค่าหนึ่งของอินเวอร์เตอร์ อย่างไรก็ตามการที่ตัวประกอบกำลังของโพลดที่ต่อเข้ากับอินเวอร์เตอร์ที่มีการคอมมิวเททโดยโพลดจะมีช่วงกำหนด Safety Margin Time (t_{sm}) ซึ่งเป็นเวลาที่นับตั้งแต่เอสซีอาร์หยุดนำกระแส (turn off) จนถึงเวลาที่มีแรงดันเปลี่ยนไปในทิศทางที่จะทำให้เอสซีอาร์เริ่มนำกระแสได้ ทั้งนี้เพราะว่าเวลาที่นับตั้งแต่กระแสเปลี่ยนทิศ จนถึงเวลาที่แรงดันเปลี่ยนทิศ (t_{μ}) จะขึ้นอยู่กับตัวประกอบกำลัง แต่เวลาดังกล่าวจะมีค่าเท่ากับผลบวกของเวลาการหยุดนำกระแสของเอสซีอาร์ (turn off time: t_q) และ safety margin time (t_{sm}) ดังนั้นสำหรับ t_q ค่าหนึ่งจะเห็นได้ว่า t_{sm} จะเพิ่มขึ้น กับตัวประกอบกำลัง เนื่องจาก t_{μ} จะเพิ่มตามตัวประกอบกำลัง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งสำหรับ safety margin ค่าหนึ่งจะต้องใช้เอสซีอาร์ที่มี turn off time สั้นลง ถ้าต้องการตัวประกอบกำลังสูงขึ้น ดังนั้นการกำหนดตัวประกอบกำลังของโพลดจะต้องพิจารณาถึงเวลาการหยุดนำกระแสของเอสซีอาร์ (t_q) ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดรวมทั้ง t_{sm} ที่ต้องการ อย่างไรก็ตาม t_{μ} ของวงจรในภาวะชั่วคราวจะมีค่าต่ำกว่า t_{μ} ในภาวะอยู่ตัว ดังนั้นเราจะต้องออกแบบให้ t_{μ} ของวงจรในภาวะชั่วคราว เท่ากับผลบวกของเวลาการหยุดนำกระแสของเอสซีอาร์ (t_q) และ safety margin time (t_{sm}) ที่ต้องการ ตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมกับขดลวดเหนี่ยวนำ นอกจากจะทำหน้าที่เพิ่มค่าตัวประกอบกำลังของโพลดแล้ว ยังทำหน้าที่ร่วมกับตัวเหนี่ยวนำในวงจร เกิดเป็นวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Series Resonance) ด้วย

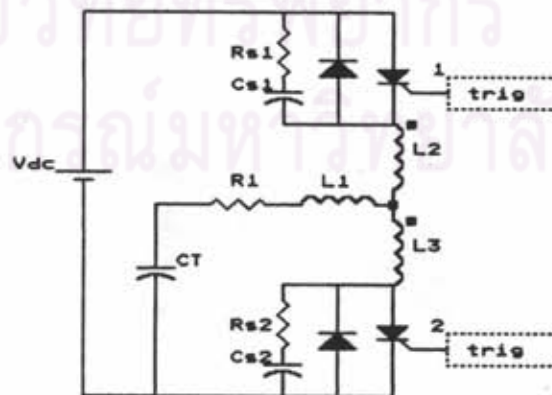
เพื่อลดกำลังสูญเสียและป้องกันการทำงานผิดปกติของเอสซีอาร์ ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายแก่เอสซีอาร์ จึงต้องมีวงจรสับเบอว์ โดยสับเบอว์

แบบอนุกรม (Series Snubber) ทำหน้าที่ลด di/dt ของเอสซีอาร์ และวงจรสแน็บ
เบอร์แบบขนาน (Parallel Snubber) ทำหน้าที่ลด dv/dt ที่คร่อมเอสซีอาร์
วงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ทั่วไปจะเป็นดังในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์

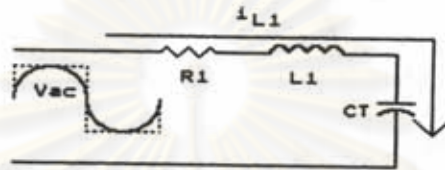
ตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 ในรูปที่ 3.13 สามารถแทนด้วยตัวเก็บประจุ
เพียงตัวเดียวได้ ดังวงจรแสดงในรูปที่ 3.14 โดยที่ C_T จะมีค่าเท่ากับ $C_1 + C_2$
ดังนั้นเราจะเลือกวงจรรูปที่ 3.14 ในการใช้งานจริง



รูปที่ 3.14 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ต่อใช้งาน

1) การออกแบบค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์

การวิเคราะห์และออกแบบค่าอุปกรณ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ใช้การวิเคราะห์โดยวิธี ac complex ซึ่งเป็นวิธีที่คำนึงเฉพาะส่วนของแรงดันที่ความถี่หลักมูล (V_{ac}) ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (square wave) ซึ่งเป็นแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ โดยในการเลือกค่าตัวเก็บประจุ C_T จะอาศัยวงจรในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แสดงวงจรสมมูลของโพลอินเวอร์เตอร์

เนื่องจากค่า t_{μ} จะเป็นตัวกำหนดค่าตัวประกอบกำลังของโพลสำหรับความถี่ในการทำงานของสวิตช์ที่กำหนด แต่ t_{μ} จะถูกกำหนดโดยเวลาการหยุดนำกระแสของเอสซีอาร์ (t_q) และ safety margin time (t_{sm}) ที่ต้องการ ดังนั้นในการออกแบบค่าตัวประกอบกำลังของโพล เราจะเริ่มด้วยการเลือกกำหนดค่า t_{sm} และต้องทราบค่าเวลาการหยุดนำกระแสของเอสซีอาร์ (t_q) เพื่อใช้ในการคำนวณหา t_{μ} จากค่า t_{μ} และความถี่การทำงานของสวิตช์ จะสามารถคำนวณหาค่าตัวประกอบกำลังของโพลเพื่อให้ได้ safety margin time (t_{sm}) สำหรับเวลาหยุดนำกระแสของเอสซีอาร์ (t_q) ที่ใช้ โดยอาศัยแนวทางในการออกแบบดังกล่าวพบว่า ถ้าต้องการใช้เอสซีอาร์ที่มี t_q เท่ากับ 15 ไมโครวินาที โดยมี safety margin time (t_{sm}) เท่ากับ 15 ไมโครวินาที และความถี่ในการทำงานของสวิตช์เท่ากับ 3500 เฮิรตซ์ ค่าตัวประกอบกำลังของโพลจะต้องมีค่าประมาณ 0.8

จากรูปที่ 3.15 ค่า L_1 และ R_1 เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากขดลวดเหนี่ยวนำ มีค่าเท่ากับ 0.1921 มิลลิเฮนรี และ 1.604 โอห์ม ตามลำดับ ค่าตัวเก็บประจุ C_T นั้นจะคำนวณได้จากสมการ

$$PF = \cos \theta = R_1 / Z$$

(3.12)

$$\text{โดยที่ } Z = \sqrt{R_s^2 + [wL_s - 1/(wC_T)]^2}$$

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ลงไปในสมการ 3.12 จะได้ค่า C_T มีค่าเท่ากับ 7.6 ไมโครฟารัด

ค่าพารามิเตอร์ที่ได้กล่าวข้างต้น ใช้ได้ในกรณีที่แรงดันออกของอินเวอร์เตอร์มีรูปคลื่นเป็นไซน์ แต่ในกรณีที่รูปคลื่นขาออกของอินเวอร์เตอร์เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจะทำให้มีแรงดันฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่สูงด้วย กระแสฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากแรงดันฮาร์โมนิกส์แต่ละความถี่ที่ความถี่สูงกว่าความถี่หลักมูล จะมีเฟสของกระแสล่าหลังแรงดันทำให้กระแสออกของอินเวอร์เตอร์รวมนำหน้าแรงดันน้อยลง ทำให้ t_{off} ที่ได้ต่ำกว่าค่าที่ต้องการ นอกจากนี้แล้ว ผลจากการวิเคราะห์วงจรด้วยคอมพิวเตอร์พบว่า ในตอนเริ่มต้นเครื่องจะมีภาวะที่กระแสล่าหลังแรงดันได้ ทำให้เอสซีอาร์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ไม่สามารถหยุดนำกระแสได้ ดังนั้นเพื่อให้ t_{off} ของวงจรในตอนเริ่มต้นเครื่องมีค่าประมาณ 15 ไมโครวินาที จะทำการปรับค่า C_T เพื่อให้ได้ t_{off} ในตอนเริ่มต้นเครื่องประมาณ 15 ไมโครวินาที ซึ่งจากการวิเคราะห์วงจรด้วยคอมพิวเตอร์ ต้องใช้ C_T เท่ากับ 6.28 ไมโครฟารัด ซึ่งจะทำให้ t_{off} ในภาวะอยู่ตัวมีค่าเท่ากับ 30 ไมโครวินาที และเมื่อใช้ C_T มีค่าเท่ากับ 6.28 ปรากฏว่า ค่าตัวประกอบกำลังของโหลดสำหรับความถี่หลักมูลจะมีค่าเท่ากับ 0.54

การออกแบบโดยอาศัยวิธี ac complex ร่วมกับการปรับค่าละเอียดเพื่อให้ได้ผลขั้นสุดท้ายโดยการใช้ผลการวิเคราะห์การทำงานของวงจรด้วยคอมพิวเตอร์นั้น จะได้ค่าอุปกรณ์ต่าง ๆ ในวงจรอินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 3.14 ดังนี้คือ L_s เท่ากับ 0.1921 มิลลิเฮนรี R_s เท่ากับ 1.604 โอห์ม C_T เท่ากับ 6.28 ไมโครฟารัด

การออกแบบสลับเบอร์ดแบบอนุกรม

การออกแบบสลับเบอร์ดแบบอนุกรมใช้การประมาณจากการวิเคราะห์การทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ร่วมกับการทดลอง เพื่อลดผลของ di/dt ไม่ให้เกินค่า specification ของเอสซีอาร์ ดังนั้น $L_2 = L_3 = 26$ ไมโครเฮนรี

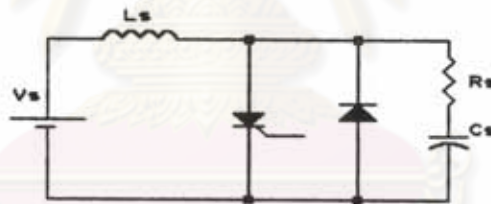
การออกแบบสลับเบอร์ดแบบขนานของเอสซีอาร์

เนื่องจากการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เอสซีอาร์ ซึ่งมีการหยุดนำกระแสโดยโหลดจะต้องมีกระแสล่าหน้าแรงดัน และในช่วงที่มีการคืนพลังงานจากโหลดเข้า

ไปยังแหล่งจ่ายไฟตรง กระแสจะไหลผ่านไดโอดที่ต่อขนานกับเอสซีอาร์ โดยมีทิศทาง การนำกระแสกลับกันกับเอสซีอาร์ ในตอนที่เอสซีอาร์คู้ประกอบเริ่มนำกระแสจะทำให้มี กระแสฟื้นตัว (Recovery current: I_r) ไหลผ่านไดโอดทางด้านกลับกันกับกระแส ไล้ไดโอด และเมื่อไดโอดหยุดนำกระแสภายหลังเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (Reverse recovery time : t_{rr}) ตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรมกับไดโอดจะทำให้เกิดแรงดัน สไปก์ (spike voltage) และอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดัน dv/dt มีค่าสูงคร่อมสวิตช์ ผลดังกล่าวอาจทำให้เอสซีอาร์เกิดการพังทลายหรือเริ่มนำกระแสอีกครั้งหนึ่ง

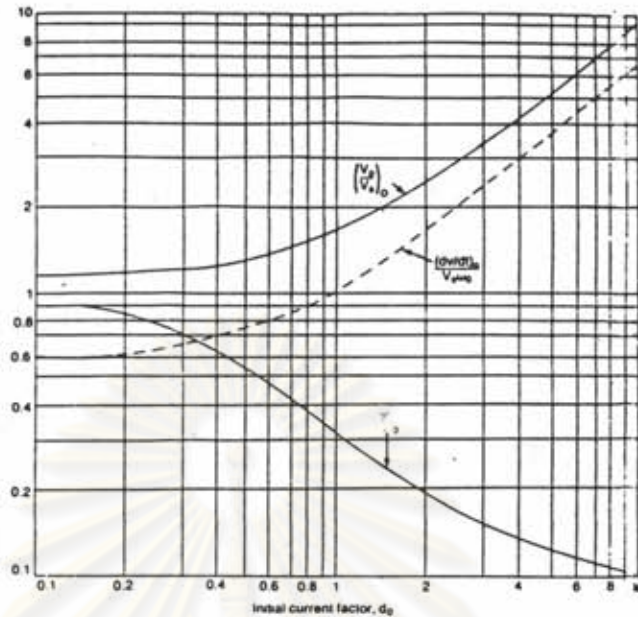
ดังนั้นเพื่อป้องกันการทำงานผิดพลาดของเอสซีอาร์ดังกล่าว จึงจำเป็นต้อง มีสแน็บเบอร์ เพื่อลดค่าของแรงดันสไปก์ และค่าของ dv/dt ดังแสดงในรูปที่ 3.14

จากรูปที่ 3.14 สามารถที่จะลดเป็นวงจรสมมูลเพื่อให้ง่ายต่อการวิ เคราะห์ ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.16 โดยที่ $V_s = V_{dc}$, $L_s = L_2 + L_3$ และ ในช่วงเวลาฟื้นตัวย้อนกลับการเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลลัดจะมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย ดังนั้นจะถือว่ามีความคงที่



รูปที่ 3.16 แสดงวงจรสมมูลในการวิเคราะห์สแน็บเบอร์แบบขนานของเอสซีอาร์ช่วง เวลาฟื้นตัว

แรงดันย้อนกลับค่ายอด (peak reverse voltage) และอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดัน dv/dt ที่ตกคร่อมเอสซีอาร์ เป็นตัวแปรสำคัญในการออกแบบ และจะต้องมีการเลือกค่าตัวประกอบการหน่วง (damping factor) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $R_s / (2\sqrt{L_s/C_s})$ ให้มีการ compromise ระหว่างแรงดันสไปก์และ dv/dt โดยในการออกแบบวงจรสแน็บเบอร์จะต้องเลือกค่าตัวประกอบการหน่วง (ζ) ตัวประกอบ กระแส (current factor : d) และอัตราส่วนระหว่างแรงดันค่ายอดต่อแรงดันไฟตรง (V_p/V_s) จากค่าดังกล่าวสามารถนำไปอ่านค่าจากกราฟรูปที่ 3.26 เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่า R_s และ C_s ที่ทำหน้าที่เป็นสแน็บเบอร์แบบขนาน



รูปที่ 3.17 ค่าพารามิเตอร์ของสับเบอร์ที่ใช้สำหรับการออกแบบค่า R_s และ C_s ให้มีค่าที่เหมาะสม โดยที่ $\zeta_o = 0.9$.

(Optimum Snubber for Power Semiconductor, McMurray)

โดยในการคำนวณค่า R_s และ C_s ที่ทำหน้าที่เป็นสับเบอร์แบบขนานจะหาได้จาก

$$C_s = L_s [I_s / V_s d_o]^2 \quad (3.13)$$

$$R_s = 2 \zeta_o \sqrt{L_s / C_s} \quad (3.14)$$

โดยที่ ζ_o เป็นค่า optimum ของตัวประกอบการหน่วง = 0.9

d_o เป็นค่า optimum ของตัวประกอบกระแส = $I_s (\sqrt{L_s / C_s}) / V_s$
= 0.15

I_s เป็นค่ากระแสพื้นฐาน = 5 แอมแปร์

V_s เป็นค่าแรงดันไฟตรงที่ให้แก่วงจร = 510 โวลต์

L_s มีค่าเท่ากับ $L_2 + L_s = 52$ ไมโครเฮนรี

$(V_s / V_{s0})_o$ เป็นอัตราส่วนของแรงดันค่ายอดต่อแรงดันไฟตรง = 1.2

แทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ลงในสมการ (3.13) จะได้ $c_u = 0.22$ ไมโครฟารัด

แทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ลงในสมการ (3.14) จะได้ $R_u = 28$ โอห์ม

แต่จากการทดลองพบว่าค่าที่ให้ผลกับสแน็บเบอร์ที่ตึ้นนั้นจะใช้ค่า R_u เท่ากับ 75 โอห์ม และ c_u เท่ากับ 0.22 ไมโครฟารัด

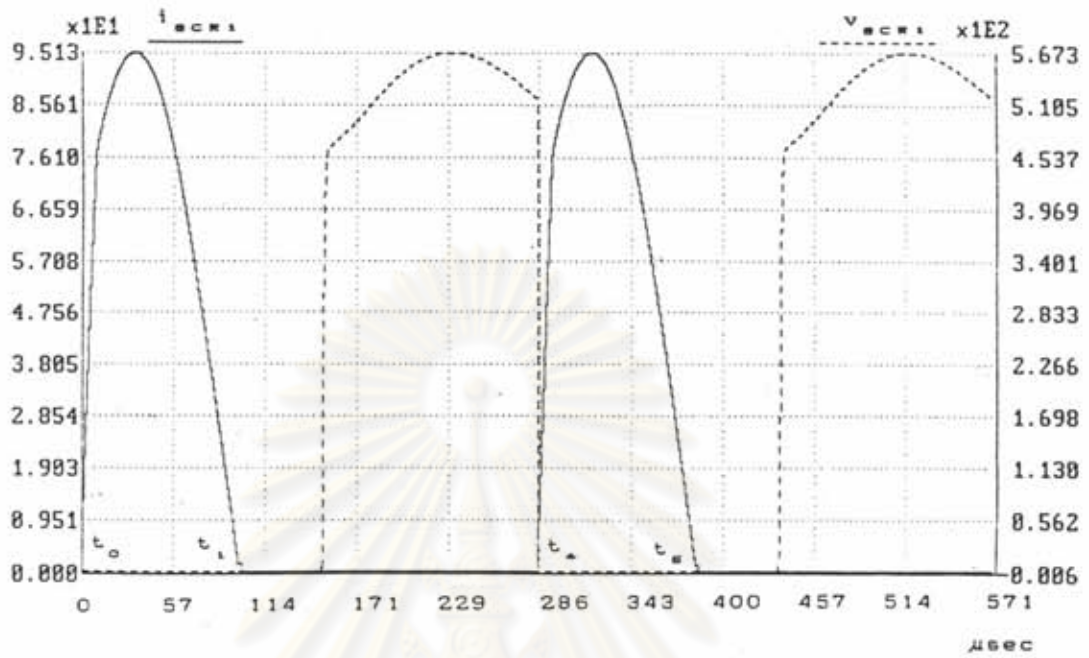
2) ผลจำลองการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ด้วยคอมพิวเตอร์

เพื่อให้ทราบขนาดและรูปร่างของกระแสและแรงดันของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในวงจร ซึ่งจะ เป็นประโยชน์ในการเลือกชนิดและออกแบบพิกัดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในวงจรได้ทำการจำลองการทำงานของวงจรด้วยคอมพิวเตอร์ ทั้งในภาวะอยู่ตัวและภาวะชั่วคราว ได้รูปคลื่นของกระแสและแรงดันในภาวะอยู่ตัวที่สำคัญ ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.18-3.30 และรูปคลื่นของกระแสและแรงดันในภาวะชั่วคราวดังแสดงในรูปที่ 3.31

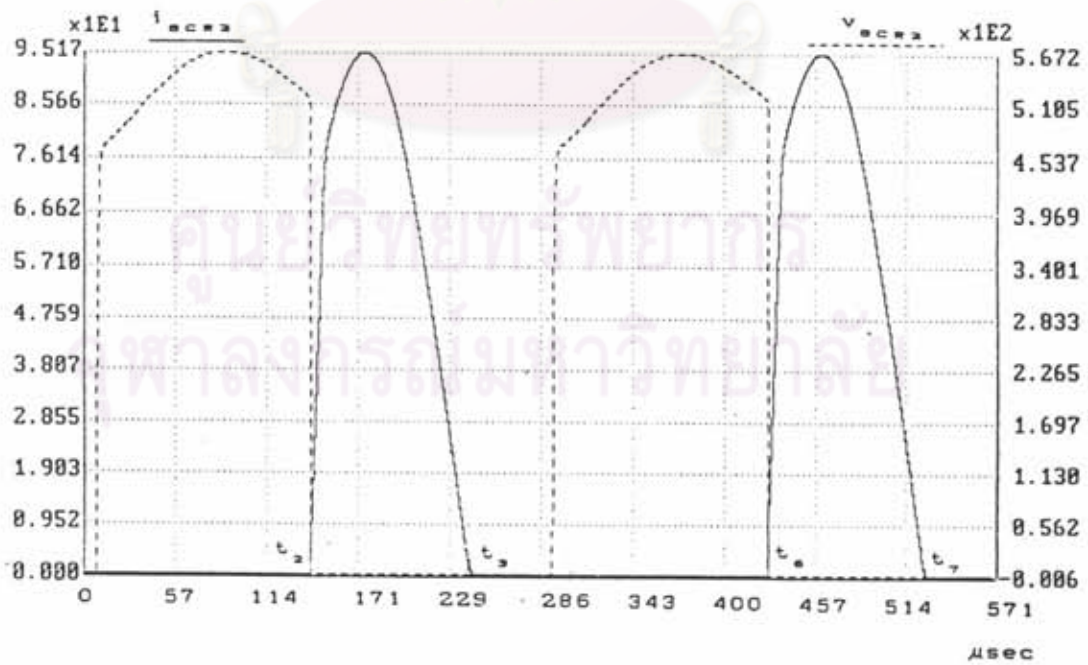
ผลจากการจำลองการทำงานของวงจรด้วยคอมพิวเตอร์จะได้นำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองในบทต่อไป

การจำลองการทำงานของวงจรด้วยคอมพิวเตอร์จะทำการจำลองในช่วงเวลา 2 วัฏจักร (cycle) การทำงาน โดยแบ่งระยะเวลา (t) เป็น 8 ช่วงการทำงานด้วยกัน

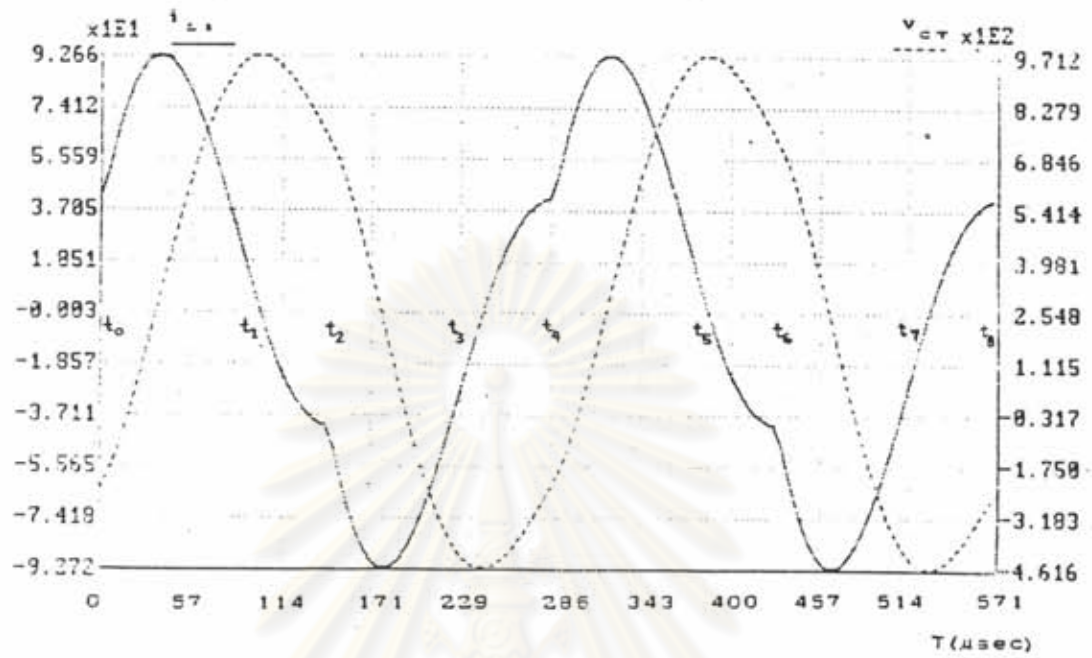
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



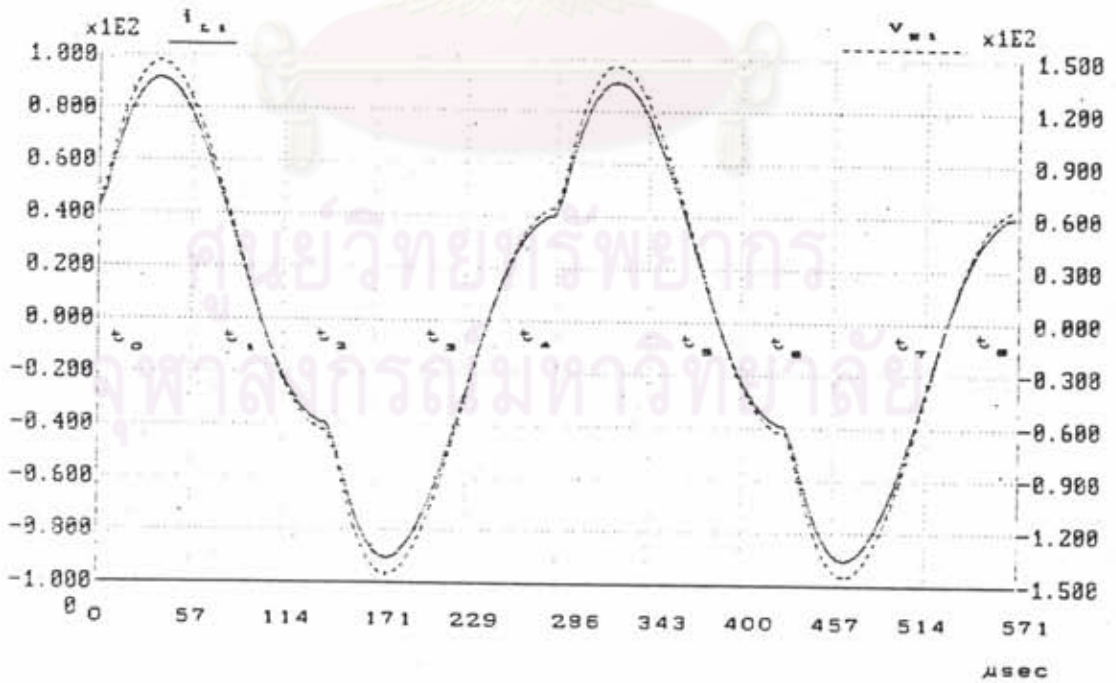
รูปที่ 3.18 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันของเอสซีอาร์ตัวที่ 1



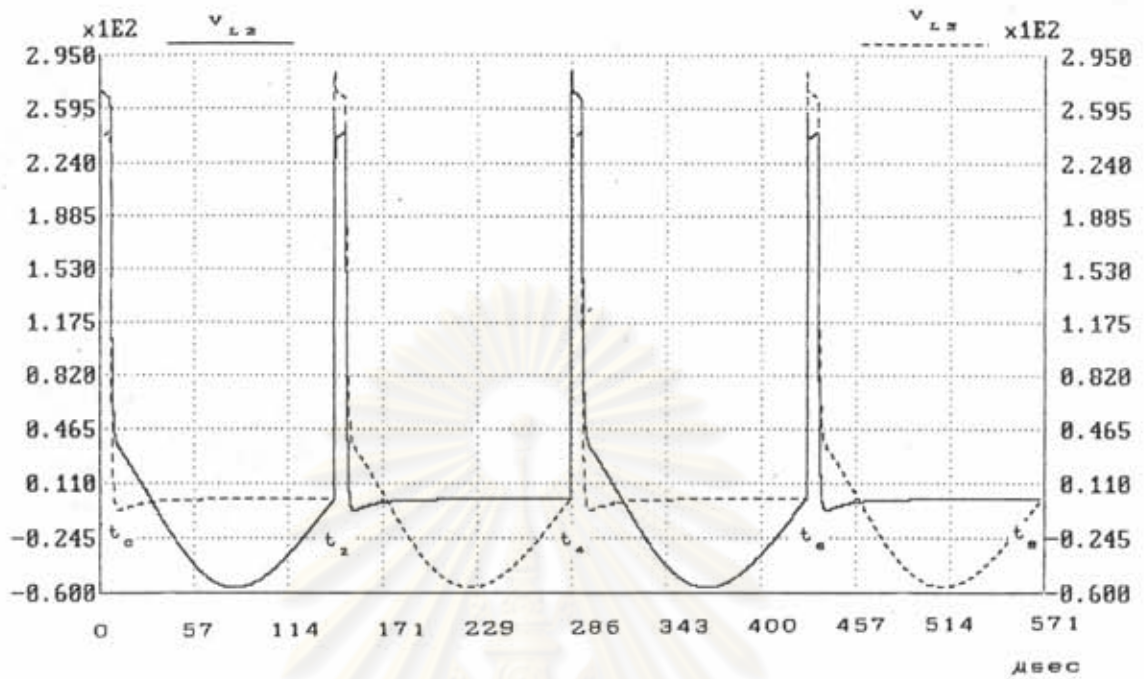
รูปที่ 3.19 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันของเอสซีอาร์ตัวที่ 2



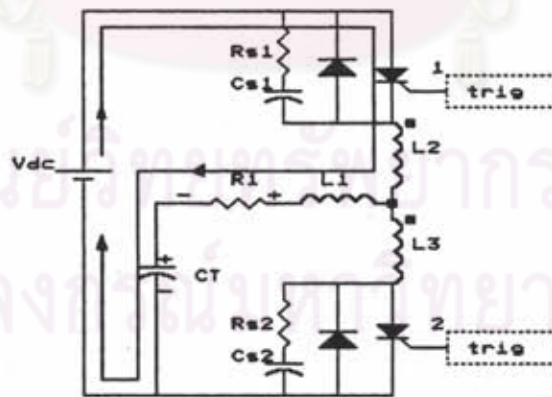
รูปที่ 3.20 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุ C_T



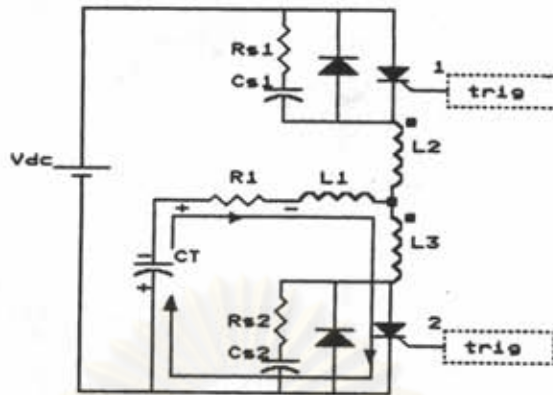
รูปที่ 3.21 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน R_1



รูปที่ 3.22 แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_2 และ L_3



รูปที่ 3.23 แสดงทิศทางกรนำกระแสไฟฟ้าในช่วงเวลา $t_0 < t < t_1$



รูปที่ 3.24 แสดงทิศทางการนำกระแสไฟฟ้าในช่วงเวลา $t_2 < t < t_3$

รูปที่ 3.18 แสดงรูปคลื่นของกระแสผ่านเอสซีอาร์ตัวที่ 1 และแรงดันที่ตกคร่อมเอสซีอาร์ตัวที่ 1 จะเห็นว่า ในช่วงเวลา $t_0 < t < t_1$ เอสซีอาร์ตัวที่ 1 จะนำกระแสทันที เมื่อมีการจุดชนวน กระแสจะไหลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงผ่านเอสซีอาร์ตัวที่ 1 ตัวเหนี่ยวนำ L_2 และโหลดที่เป็นขดลวดเหนี่ยวนำพร้อมชิ้นงาน และตัวเก็บประจุ C_T ตามทิศทางดังแสดงในรูปที่ 3.23 กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าไปในตัวเก็บประจุจะทำให้ตัวเก็บประจุ C_T มีแรงดันเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.20 เมื่อผลรวมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ C_T กับแรงดันที่ตกคร่อม R_L ที่แสดงในรูปที่ 3.21 มีค่าสูงกว่าแรงดันของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง กระแสไฟฟ้าจะค่อย ๆ ลดลง ในขณะที่แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ C_T ยังคงมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อกระแสลดลงเป็นศูนย์ แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ C_T จะมีค่าสูงสุด เมื่อกระแสกลับทิศเอสซีอาร์ตัวที่ 1 จะหยุดนำกระแสแต่กระแสจะไหลผ่านไดโอดที่ต่อขนานกับเอสซีอาร์ตัวที่ 1 จนกว่าจะมีการจุดชนวนเอสซีอาร์ตัวที่ 2 เอสซีอาร์ตัวที่ 1 จะอยู่ในภาวะหยุดนำกระแสตลอดเวลาครั้งคาบที่เอสซีอาร์ตัวที่ 2 นำกระแส และที่เวลา t_4 จะมีการจุดชนวนเอสซีอาร์ตัวที่ 1 อีกครั้งหนึ่งในวัฏจักรถัดไปให้เอสซีอาร์ตัวที่ 1 นำกระแสการทำงานเช่นเดียวกันกับวัฏจักรเวลา $t_0 < t < t_1$

จากรูปคลื่นของกระแสเอสซีอาร์ตัวที่ 1 ซึ่งมีค่ายอดประมาณ 95 แอมแปร์ สามารถประมาณค่ากระแสอาร์เอ็มเอสได้ 56 แอมแปร์ ในขณะที่เอสซีอาร์ตัวที่ 1 และไดโอดตัวที่ 1 นำกระแสในช่วงเวลา $t_0 < t < t_2$ แรงดันที่ตกคร่อมเอสซีอาร์ตัวที่ 1 และไดโอดจะมีค่าต่ำ และเมื่อเอสซีอาร์ตัวที่ 2 ถูกจุดชนวนให้นำกระแสแรงดัน

ตกคร่อมเอสซีอาร์ตัวที่ 1 จะมีค่าเท่ากับผลต่างของแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง กับแรงดันที่ตกคร่อม L_2 และ L_1 ที่แสดงในรูปที่ 3.22 ซึ่งมีค่ายอดของแรงดัน ประมาณ 567 โวลต์ โดยมีลักษณะของรูปคลื่นแรงดันคล้ายรูปคลื่นสี่เหลี่ยมปนร่วมกับรูป คลื่นไซน์

รูปที่ 3.19 แสดงรูปคลื่นของกระแสผ่านเอสซีอาร์ตัวที่ 2 และแรงดันคร่อม เอสซีอาร์ตัวที่ 2 จะเห็นว่า ในช่วงเวลา $t_2 < t < t_3$ เอสซีอาร์ตัวที่ 2 จะเริ่มนำ กระแสทันที เมื่อมีการจุดชนวน กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_T ขดลวดเหนี่ยวนำ ตัวเหนี่ยวนำ L_2 และ เอสซีอาร์ตัวที่ 2 ตามลำดับ โดยทิศทางของกระแส ที่ไหลผ่านโหลดจะไหลกลับทิศจากเดิม (ในรูปที่ 3.23) ดังแสดงในรูปที่ 3.24 แรงดัน ของตัวเก็บประจุ C_T จะเริ่มลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ และมีการกลับทิศของแรงดัน ดังใน รูปที่ 3.20 ในขณะที่เอสซีอาร์ตัวที่ 2 นำกระแส เมื่อผลรวมของแรงดันคร่อมตัวเก็บ ประจุ C_T แรงดันคร่อมโหลด และแรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_2 มีขั้วของแรงดันกลับ จากเดิมมีค่าสูงแรงดันตัวเก็บประจุ C_T กระแสไฟฟ้าจะเริ่มลดลง ในขณะที่แรงดัน คร่อมตัวเก็บประจุ C_T ยังคงมีค่าลบมากขึ้น และเมื่อกระแสลดลงเป็นศูนย์ แรงดัน คร่อมตัวเก็บประจุ C_T จะมีค่าลบสูงสุด เมื่อกระแสกลับทิศเอสซีอาร์ตัวที่ 2 จะหยุดนำ กระแสแต่กระแสจะไหลผ่านไดโอดที่ต่อขนานกับเอสซีอาร์ตัวที่ 2 จนกว่าจะมีการ จุดชนวนเอสซีอาร์ตัวที่ 1 เอสซีอาร์ตัวที่ 2 จะอยู่ในภาวะหยุดนำกระแสตลอดเวลาครั้ง คาบที่เอสซีอาร์ตัวที่ 1 นำกระแส และที่เวลา t_3 จะมีการจุดชนวนเอสซีอาร์ตัวที่ 2 อีกครั้งหนึ่งในวัฏจักรถัดไปให้เอสซีอาร์ตัวที่ 2 นำกระแส การทำงานเช่นเดียวกันกับวัฏจักรเวลา $t_2 < t < t_3$

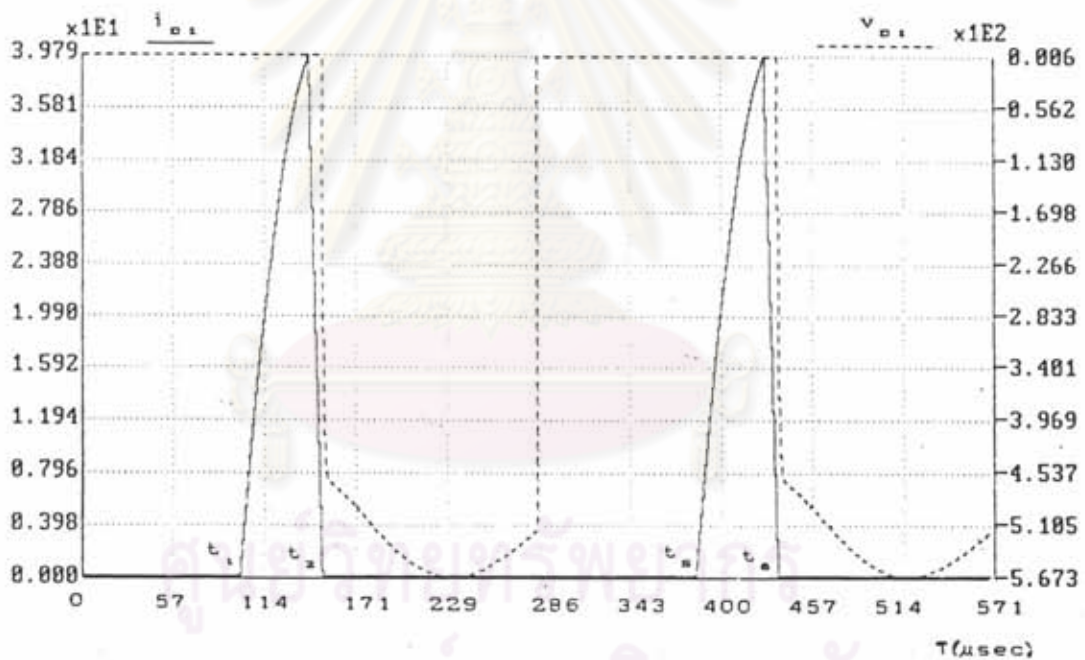
จะเห็นได้ว่า รูปคลื่นของกระแสที่ไหลผ่านเอสซีอาร์ทั้ง 2 ตัว และแรงดัน ตกคร่อมเอสซีอาร์ทั้ง 2 ตัว จะมีรูปคลื่นเหมือนกัน แต่มีเฟสแตกต่างกัน 180 องศา

เมื่อพิจารณาค่ายอดของกระแสเอสซีอาร์ตัวที่ 1 และ 2 ตามลำดับ พบว่ามี ค่าประมาณ 95 แอมแปร์ แต่กระแสที่ไหลผ่านโหลดมีค่ายอดทางบวกและลบประมาณ 92 แอมแปร์เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากจะมีกระแสที่ผ่านเอสซีอาร์ส่วนหนึ่งที่ไม่ได้ไหลผ่านโหลด แต่จะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 สลับเบอร์ตัวที่ 2 และกระแสส่วนหนึ่งไหลผ่านตัว เหนี่ยวนำ L_1 สลับเบอร์ตัวที่ 1 ตามลำดับ (รูปคลื่นของกระแสสลับเบอร์แสดงไว้ ในรูปที่ 3.31)

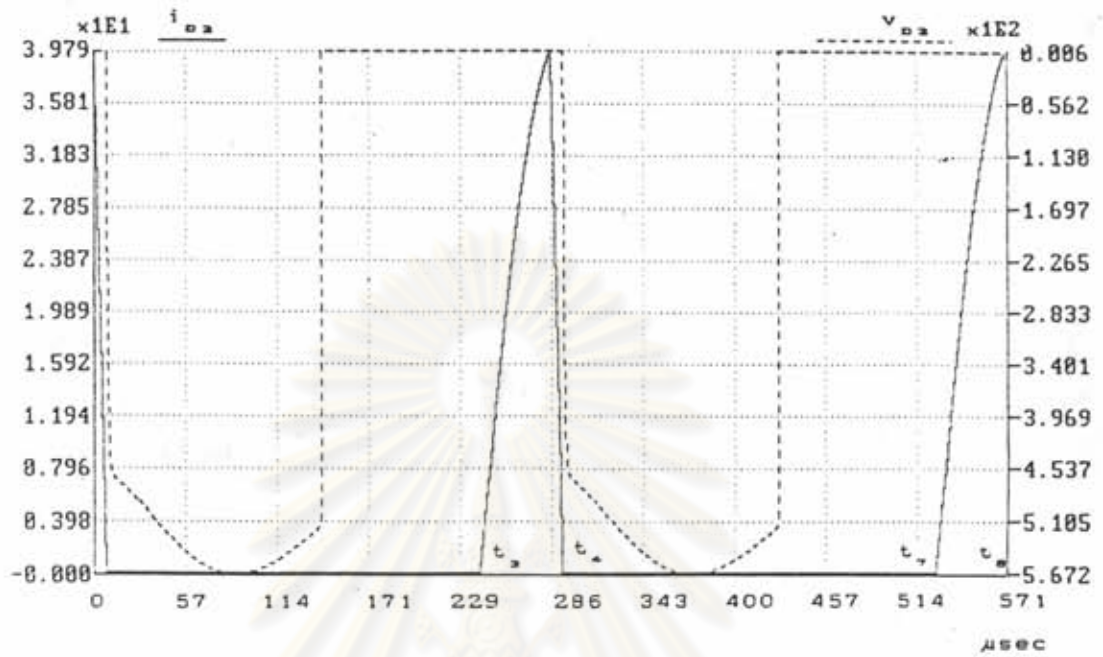
รูปที่ 3.20 แสดงรูปคลื่นของกระแสผ่านตัวเก็บประจุ C_T จะเห็นได้ว่า รูปคลื่นของกระแสมีลักษณะใกล้เคียงไซน์ โดยมีการเปลี่ยนความลาดชันของกระแสก่อน

ข้างมากในจังหวัดที่มีการจุดชนวนเอสซีอาร์ กระแสผ่าน C_T มีค่ายอดประมาณ 92 แอมแปร์ คิดเป็นกระแสอาร์เอ็มเอสประมาณ 65 แอมแปร์ และแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_T มีลักษณะใกล้เคียงไซน์ มีค่ายอดถึงยอด 1,432 โวลต์ และมีองค์ประกอบไฟตรงประมาณครึ่งหนึ่งด้านขาเข้า เนื่องจากตัวเก็บประจุดังกล่าวทำหน้าที่ปิดกั้นแรงดันไฟตรงไม่ให้ออกไปยังอินเวอร์เตอร์

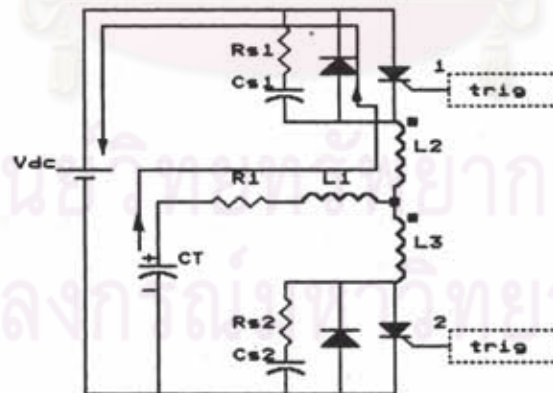
รูปที่ 3.21 แสดงรูปคลื่นกระแสไหลผ่านตัวต้านทานและแรงดันคร่อมตัวต้านทาน R_L ซึ่งเป็นความต้านทานของโหลด ทั้งกระแสและแรงดันจะมีลักษณะรูปคลื่นใกล้เคียงไซน์ โดยรูปคลื่นของกระแสจะมีปริมาณเดียวกับกระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_T ส่วนแรงดันมีค่ายอดประมาณ 148 โวลต์



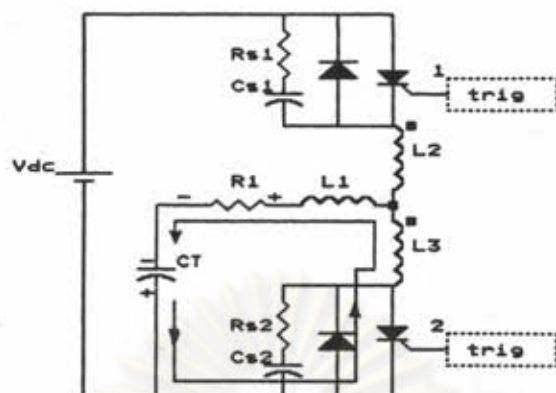
รูปที่ 3.25 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันของไดโอดตัวที่ 1



รูปที่ 3.26 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันของไดโอดตัวที่ 2



รูปที่ 3.27 แสดงทิศทางกรนำกระแสไฟฟ้าในช่วงเวลา $t_1 < t < t_2$



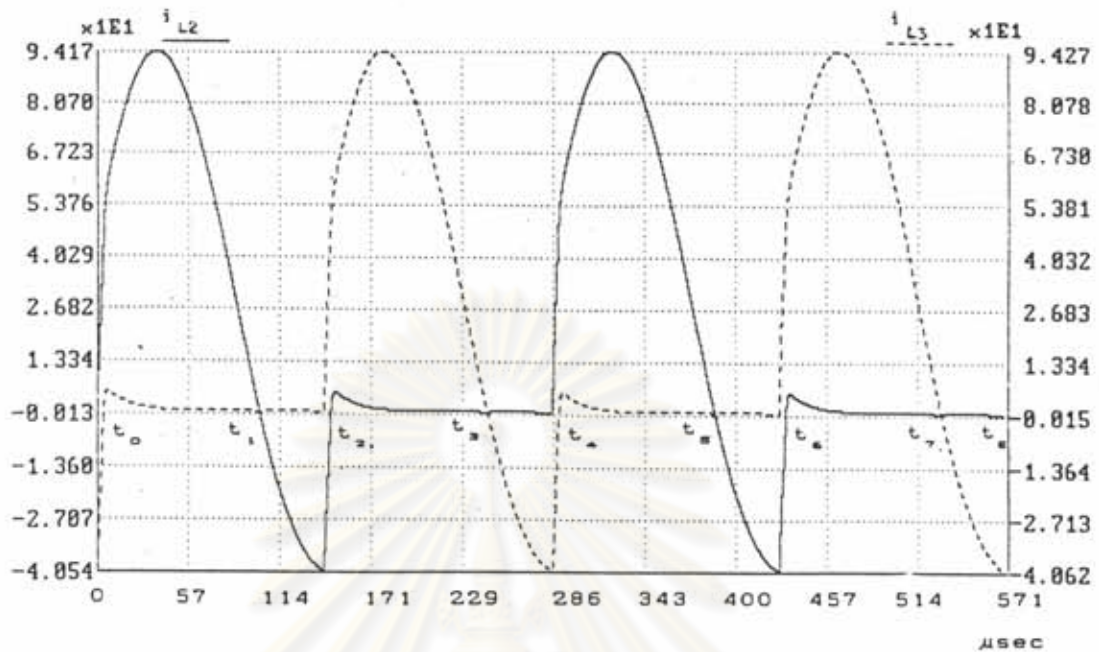
รูปที่ 3.28 แสดงทิศทางการนำกระแสไฟฟ้าในช่วงเวลา $t_2 < t < t_4$

รูปที่ 3.25 แสดงรูปคลื่นของกระแสผ่านไดโอดตัวที่ 1 และแรงดันคร่อมไดโอดตัวที่ 1 จะเห็นได้ว่า เมื่อกระแสไหลกลับทิศ ซึ่งเป็นช่วงที่พลังงานไหลกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง แอสซิวาร์ตัวที่ 1 จะหยุดนำกระแส แต่กระแสของสวิตช์จะไหลผ่านไดโอดตัวที่ 1 โดยมีทิศทางการไหลของกระแสเริ่มจากตัวเก็บประจุ C_T ตัวเหนี่ยวนำ L_2 ไดโอดตัวที่ 1 เข้าสู่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ดังแสดงในรูปที่ 3.27 ส่วนแรงดันคร่อมไดโอดตัวที่ 1 จะเป็นลักษณะเช่นเดียวกับแรงดันคร่อมแอสซิวาร์ตัวที่ 1 แต่เป็นลัดส่วนกลับกัน

จากรูปคลื่นกระแสผ่านไดโอดตัวที่ 1 มีค่ายอดกระแสประมาณ 40 แอมแปร์ คิดเป็นกระแสอาร์เอ็มเอสประมาณ 9.17 แอมแปร์

รูปที่ 3.26 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันของไดโอดตัวที่ 2 ทั้งกระแสและแรงดันจะเหมือนกับไดโอดตัวที่ 1 ทุกประการ โดยมีเฟสต่างกัน 180 องศา

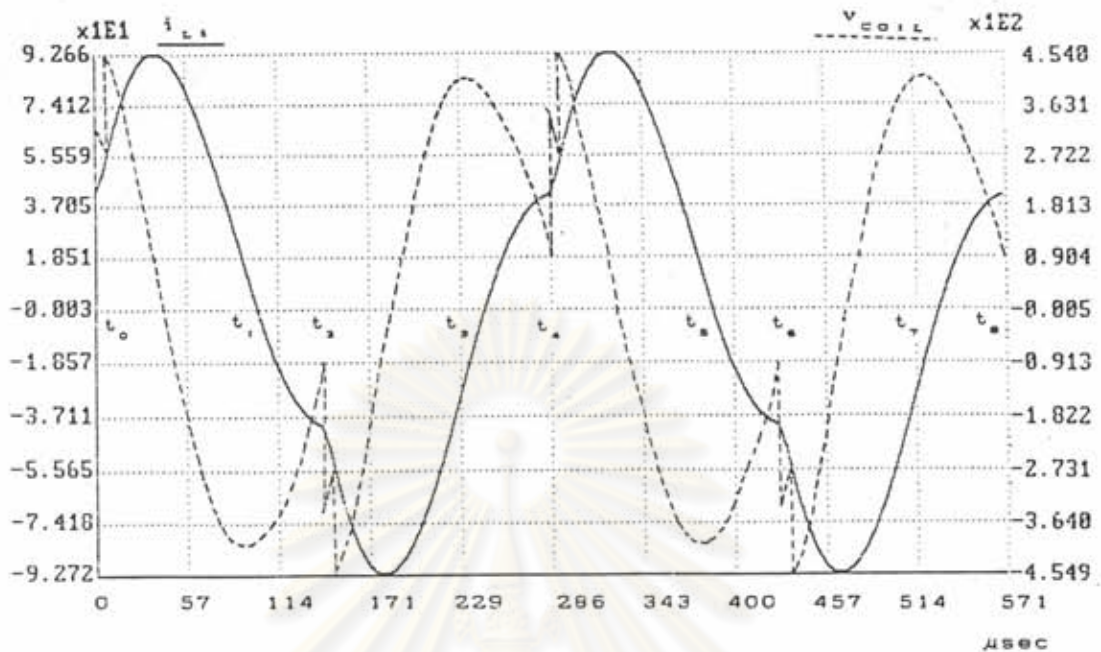
รูปที่ 3.29 - 3.31 ยังแสดงรูปคลื่นที่ภาวะอยู่ตัวเช่นกัน โดยจะแสดงที่จุดสำคัญต่าง ๆ ดังนี้



รูปที่ 3.29 แสดงรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 และ L_3

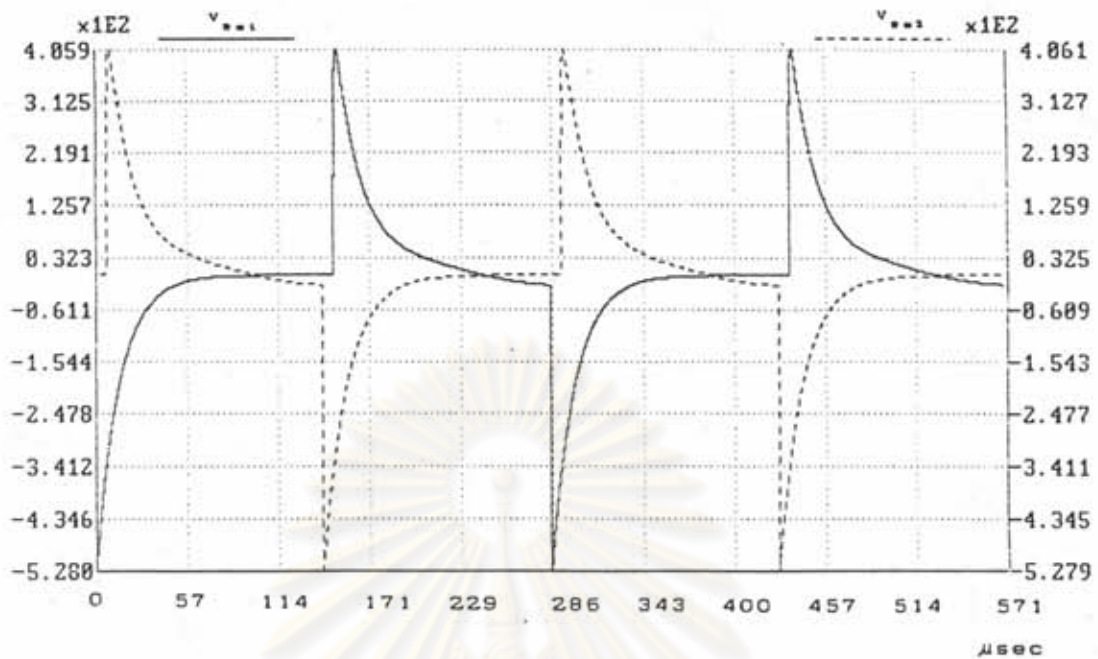
รูปที่ 3.29 แสดงรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 และ L_3 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 จะเป็นกระแสที่ผ่านสวิตช์ ซึ่งประกอบด้วยเอสซีอาร์ตัวที่ 1 ไดโอดตัวที่ 1 และสับเบอร์ตัวที่ 1 จะเห็นว่า ช่วงเวลาที่มีกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 คือช่วงเวลาระหว่าง $t_0 < t < t_2$ ส่วนกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_3 เป็นกระแสไหลผ่านสวิตช์ ซึ่งประกอบด้วยเอสซีอาร์ตัวที่ 2 ไดโอดตัวที่ 2 และสับเบอร์ตัวที่ 2 จะเห็นว่า ช่วงเวลาที่มีกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_3 คือช่วงเวลาระหว่าง $t_2 < t < t_4$

รูปคลื่นของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 และ L_3 มีเฟสต่างกัน 180 องศา



รูปที่ 3.30 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันของขดลวดเหนี่ยวนำพร้อมขึ้นงาน

รูปที่ 3.30 แสดงกระแสและแรงดันของขดลวดเหนี่ยวนำพร้อมขึ้นงานที่เป็นโพลของอินเวอร์เตอร์ กระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำพร้อมขึ้นงานเป็นปริมาณเดียวกันกับกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_T ดังได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ส่วนรูปคลื่นแรงดันจะผิดเพี้ยนจากรูปคลื่นสี่เหลี่ยมค่อนข้างมาก เนื่องจากตัวเก็บประจุ C_T อนุกรมมีค่าไม่มากนักทำให้มีค่าไม่คงที่ นอกจากนั้นแรงดันของสลับเบอร์ของตัวเหนี่ยวนำ L_2 ยังมีค่าค่อนข้างมากอีกด้วย ดังนั้นรูปคลื่นจึงเป็นลักษณะของผลบวกของแรงดันตกคร่อมความต้านทาน R_L เนื่องจากกระแสที่มีลักษณะใกล้เคียงไซน์และแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_2 ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของกระแสที่ไหลผ่านโพล



รูปที่ 3.31 แสดงรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านสับเบอร์ดึงสอง

รูปที่ 3.31 แสดงรูปคลื่นของแรงดันคร่อมความต้านทาน 75 โอห์ม ของสับเบอร์ดึงแบบขนานที่ทำหน้าที่ลดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันคร่อมเอสซีอาร์ซึ่งจะมีรูปร่างเหมือนกับกระแสที่ไหลผ่านสับเบอร์ดึง วงจรแสดงดังในรูปที่ 3.15

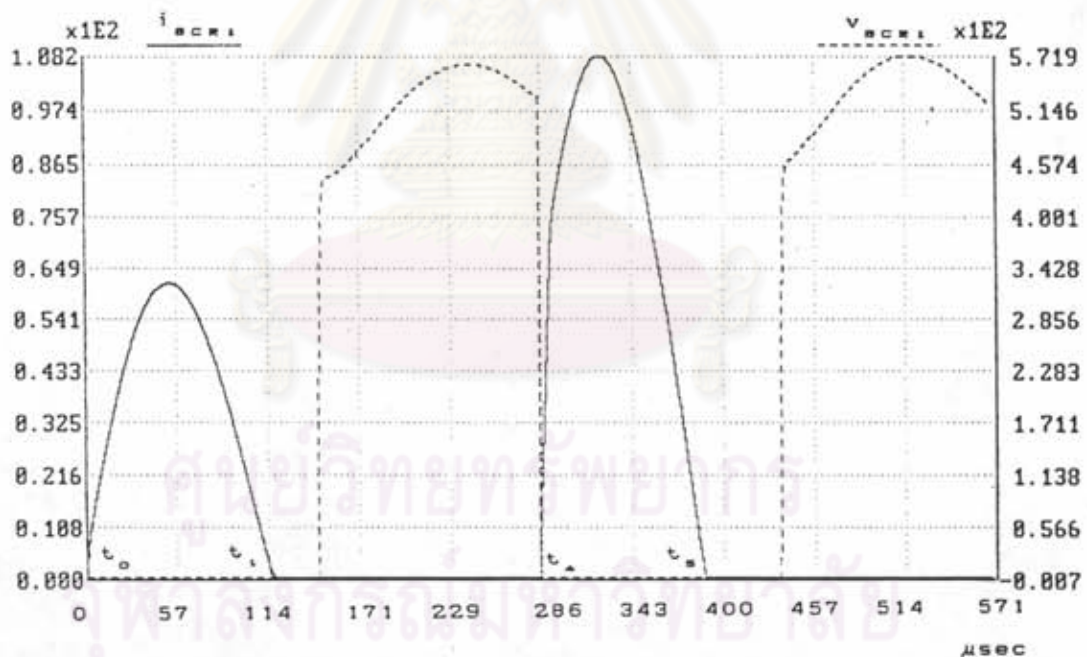
V_{r1} และ V_{r2} เป็นรูปคลื่นของแรงดันคร่อมความต้านทานของสับเบอร์ดึงของเอสซีอาร์ตัวที่ 1 และ 2 ตามลำดับ แรงดันทางด้านบวกเป็นช่วงเวลาหลังจากที่เอสซีอาร์คู่ประกอบของเอสซีอาร์ที่ต่อขนานกับสับเบอร์ดึงเริ่มนำกระแส ส่วนแรงดันทางด้านลบเป็นการคายประจุ (discharge) ตัวเก็บประจุของสับเบอร์ดึงนั้น เมื่อเอสซีอาร์ที่ต่อขนานกับสับเบอร์ดึง เริ่มนำกระแส

จากรูปคลื่นของแรงดันทั้งสอง จะเห็นได้ว่ามีค่ายอดของแรงดันทางด้านบวกประมาณ 400 โวลต์ คิดเป็นค่ายอดของกระแสทางบวกเท่ากับ 5.4 แอมแปร์ และคิดเป็นกระแสอาร์เอ็มเอสเท่ากับ 1.15 แอมแปร์ ส่วนค่ายอดของแรงดันทางด้านลบมีค่าประมาณ 528 โวลต์ คิดเป็นค่ายอดของกระแสทางลบ 7 แอมแปร์ และคิดเป็นกระแสอาร์เอ็มเอสเท่ากับ 2.6 แอมแปร์

รูปที่ 3.32 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันของเอสซีอาร์ตัวที่ 1 ในภาวะชั่วคราวเมื่อเริ่มเปิดเครื่อง ซึ่งจะใช้ในการพิจารณาถึง Safety Margin Time ของเอสซี

อาร์ ว่าเพียงพอสำหรับการทำงานของวงจรถึงอินเวอร์เตอร์ในตอนเริ่มเปิดเครื่องหรือไม่
เมื่อประมาณระยะเวลาจากรูปคลื่น จะได้ว่าช่วงเวลาที่กระแสผ่านไดโอดที่
ต่อขนานกับเอสซีอาร์ตัวที่ 1 มีค่าประมาณ 30 ไมโครวินาที ซึ่งมากกว่า turn off
time ของเอสซีอาร์ที่ระบุไว้ 15 ไมโครวินาที อยู่ 15 ไมโครวินาที ดังนั้นจะเห็นได้
ว่า Safety Margin Time ของเอสซีอาร์ในตอนเริ่มเปิดเครื่องเท่ากับ 15 ไม
โครวินาที ซึ่งต่ำกว่า Safety Margin Time ในภาวะอยู่ตัวดังในรูปที่ 3.18 ซึ่งมีค่า
30 ไมโครวินาที

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเพื่อให้มี Safety Margin ของเวลาการหยุดนำกระแส
ของเอสซีอาร์ (turn off time) ไม่น้อยกว่า 15 ไมโครวินาที จะต้องออกแบบให้
Safety Margin time ที่ภาวะอยู่ตัวมีค่าเท่ากับ 30 ไมโครวินาที



รูปที่ 3.32 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันของเอสซีอาร์ตัวที่ 1 ในภาวะชั่วคราว

3) การเลือกพิกัดอุปกรณ์ในวงจรอินเวอร์เตอร์

ก) การเลือกพิกัดของเอสซีอาร์

เนื่องจากเอสซีอาร์มีค่ายอด 95 แอมแปร์ คิดเป็นกระแสอาร์เอ็มเอส 56 แอมแปร์ ได้ทำการเลือกพิกัดของเอสซีอาร์ โดยพิจารณาอุณหภูมิที่ตัวถังของเอสซีอาร์มีอุณหภูมิไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิห้องมีค่าไม่เกิน 45 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณา thermal derating factor ของสารกึ่งตัวนำพิกัดของกระแสเอสซีอาร์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จะลดลงเหลือประมาณ 0.7 เท่าของพิกัดเมื่ออุณหภูมิที่ตัวถังเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการกำหนดพิกัดของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทั่วไป ดังนั้นจะต้องใช้เอสซีอาร์ที่มีพิกัดกระแสที่อุณหภูมิของตัวถัง 25 องศาเซลเซียส เท่ากับ 80 แอมแปร์ และเมื่อคำนึงถึงการ overload ประมาณ 1.5 เท่า กับค่า safety factor ประมาณ 1.5 เท่าจะต้องใช้เอสซีอาร์ที่มีพิกัดของกระแส ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เท่ากับ 180 แอมแปร์

แต่อย่างไรก็ตาม เอสซีอาร์ที่มีพิกัดของกระแส 180 แอมแปร์ ไม่มีขายตามท้องตลาด จึงเลือกใช้เอสซีอาร์ที่มีพิกัดกระแสต่ำที่สุดที่มีขายตามท้องตลาด โดยมีค่าสูงกว่า 180 แอมแปร์และมีเวลาการหยุดนำกระแสไม่เกิน 15 ไมโครวินาที มาใช้งาน โดยเอสซีอาร์ที่นำมาใช้งาน มีพิกัดกระแสอาร์เอ็มเอสเมื่ออุณหภูมิของตัวถังที่ 25 องศาเซลเซียส มีค่าประมาณ 450 แอมแปร์ ส่วนแรงดันของเอสซีอาร์จะต้องทนต่อภาวะชั่วคราวและภาวะอยู่ตัวประมาณ 2 เท่า จึงเลือกใช้พิกัดแรงดัน 1,200 โวลต์

ข) การเลือกพิกัดของไดโอด

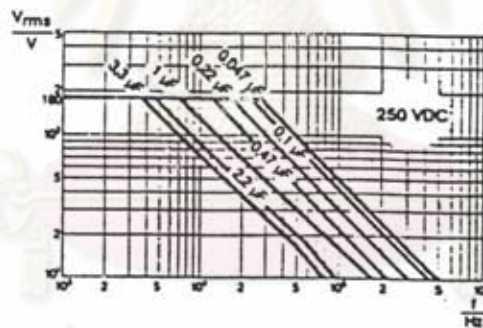
เนื่องจากกระแสอาร์เอ็มเอสของไดโอดมีค่า 9.17 แอมแปร์ ในการออกแบบพิกัดของไดโอดนั้นจะเหมือนกับการออกแบบพิกัดเอสซีอาร์ดังรายละเอียดที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น โดยจะคำนึงถึงค่า thermal derating factor 0.7 ค่า overload 1.5 เท่า และค่า safety factor 1.5 เท่า จะต้องใช้ไดโอดที่มีพิกัดของกระแส ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เท่ากับ 30 แอมแปร์

อย่างไรก็ตาม ไดโอดที่มีพิกัด 30 แอมแปร์ และสามารถทนพิกัดแรงดันได้ 1.5 เท่า จะต้องสามารถทนพิกัดแรงดันได้ 900 โวลต์เป็นอย่างน้อยแต่ไดโอดที่มีพิกัดดังกล่าวไม่มีขายตามท้องตลาด จึงเลือกใช้ไดโอดที่มีพิกัดกระแสสูงกว่า 30 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิของตัวถังเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส โดยมีค่ากระแส 60 แอมแปร์ และพิกัดแรงดัน 1,200 โวลต์ ที่มีขายตามท้องตลาดมาใช้งาน

ค) การเลือกชนิดและออกแบบค่าตัวเก็บประจุ C_T

ผลจากการจำลองทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ในรูปที่ 3.20 ทำให้ทราบขนาดของกระแสที่ไหลผ่านและแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเพื่อใช้ในการกำหนดพิกัดแรงดันของตัวเก็บประจุ C_T เนื่องจากค่ายอดถึงยอดของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุค่า 6.2 ไมโครฟาร์ดมีค่าประมาณ 1433 โวลต์ สามารถประมาณเป็นแรงดันอาร์เอ็มเอสได้ 507 โวลต์

เพื่อให้ได้ตัวเก็บประจุ C_T ค่า 6.28 ไมโครฟาร์ดที่ต้องการแรงดันอาร์เอ็มเอส 507 โวลต์ ที่ความถี่ 3500 เฮิรตซ์ จะต้องใช้ตัวเก็บประจุขนาด 2.7 ไมโครฟาร์ด ที่มีพิกัดแรงดันที่ความถี่ 3500 เฮิรตซ์เท่ากับ 180 โวลต์ ต่ออนุกรมกัน 4 ตัว และขนานกัน 9 ชุด ซึ่งจากการคำนวณจะได้ตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ 6.075 ไมโครฟาร์ด แต่เมื่อทำการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 3500 เฮิรตซ์ ตัวเก็บประจุจะมีค่าเท่ากับ 6.28 ไมโครฟาร์ด ซึ่งค่านี้จะนำมาใช้งานในวงจรอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.33 แสดงแรงดันอาร์เอ็มเอสกับความถี่ที่ใช้งานของตัวเก็บประจุ

ง) การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ L_2 และ L_3

ตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรมกับเอสซีอาร์ทำหน้าที่ลดอัตราการเพิ่มของกระแสของเอสซีอาร์ในตอนเริ่มนำกระแส โดยมีลักษณะการต่อตัวเหนี่ยวนำอนุกรมกับเอสซีอาร์ ดังแสดงในรูป 3.15 จากค่าตัวเหนี่ยวนำที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อ 3.2.1 ค่ายอดของกระแส และค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ จะสามารถนำไปใช้ออกแบบตัวเหนี่ยวนำได้ โดยในการออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำสิ่งที่ต้องคำนึงในการเลือกใช้อุปกรณ์คือ ลักษณะโครงสร้างและขนาดของ

แกนแม่เหล็ก จำนวนรอบ ขนาดของเส้นลวดที่ใช้ในการพัน ฉนวนไฟฟ้า ฉนวนความร้อนของเส้นลวด โดยในการการออกแบบจะมีการเผื่อเผื่อการพัฒนาหรือเพิ่มกำลังของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำให้สูงขึ้น โดยยังสามารถใช้ค่าความเหนี่ยวนำเดิมได้ จึงออกแบบไว้ประมาณ 26 ไมโครเฮนรี ทั้ง 2 ขด โดยจะพันเป็นแบบไบฟิลลาร์ (Bifilar) คือพันทั้ง 2 ขดไปพร้อม ๆ กัน เพื่อให้การถ่ายเทพลังงานจากขดหนึ่งไปยังอีกขดหนึ่ง เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากความเหนี่ยวนำรั่วไหลของขดลวดเหนี่ยวนำทั้งสองขดมีค่าน้อย

เนื่องจากความถี่ในการทำงานของอินเวอร์เตอร์มีค่าสูง แกนเหล็กจึงไม่เหมาะสมนักในการนำมาใช้งานในวงจรอินเวอร์เตอร์ เพราะจะเกิดกำลังการสูญเสียในแกนเหล็กค่อนข้างมาก นอกจากนี้แกนเหล็กยังมีการตอบสนองต่อความถี่สูงได้ไม่ดีนัก เนื่องจากค่าความซึมซาบของสารแม่เหล็กที่ความถี่สูงจะมีค่าต่ำกว่าค่าความซึมซาบของสารแม่เหล็กที่ความถี่ต่ำมาก ดังนั้นจึงได้เลือกใช้แกนเฟอร์ไรต์เป็นแกนแม่เหล็กของตัวเหนี่ยวนำของสลับเบอร์ที่ทำหน้าที่เพื่อลดค่า di/dt ตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

A. การคำนวณขนาดของแกนเฟอร์ไรต์

การเลือกขนาดของแกนเฟอร์ไรต์จะใช้วิธีการคำนวณแบบ Core Geometry K_u Approach (Slobodan Cuk and R.D. Middlebrook, 1983) ซึ่งเป็นวิธีการออกแบบที่ใช้กำลังการสูญเสียของลวดทองแดง (P_{cu}) ในการกำหนดขนาดของแกนแม่เหล็กแทนการใช้ค่าอุณหภูมิเพิ่มหรือความหนาแน่นของกระแสในลวดตัวนำ ซึ่งในการออกแบบโดยวิธีนี้จะกำหนดลงไปเลยว่าต้องการให้กำลังการสูญเสียของลวดตัวนำทองแดงเท่าไร ซึ่งหมายถึงว่าตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบจะมีความร้อนเกิดขึ้นในลวดตัวนำมากหรือน้อยแค่ไหน สูตรในการคำนวณค่า K_u ซึ่งขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของตัวเหนี่ยวนำและเป็นตัวกำหนดขนาดของแกนเฟอร์ไรต์ที่จะใช้ในการพันตัวเหนี่ยวนำ เป็นดังนี้คือ

$$K_u = \frac{ws^2}{t} = \frac{4\rho (1/2LI_{rms}^2)(1/2LI_{peak}^2)}{k B_{max}^2 P_{cu}} \quad (3.15)$$

โดยที่ w คือ พื้นที่ช่องหน้าต่างของแกนเฟอร์ไรต์

- s คือ ขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกนเฟอร์ไรต์
- t คือ ความยาวเฉลี่ยของเส้นลวดที่ใช้พันแกนในหนึ่งรอบ
- r คือ ความต้านทานจำเพาะของเส้นลวดทองแดง
- L คือ ค่าความเหนียวนำที่ใช้ในการออกแบบ เท่ากับ 26 ไมโครเฮนรี
- I_{max} คือ ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสที่ไหลในตัวนำทองแดงรับได้ เท่ากับ 84.8 แอมแปร์
- I_{max} คือ ค่ายอดของกระแสที่ไม่ทำให้แกนแม่เหล็กอิ่มตัว เท่ากับ 120 แอมแปร์
- k คือ Window Utilization Factor
- B_{max} คือ ค่าความหนาแน่นสูงสุดของสนามแม่เหล็กในแกนแม่เหล็กที่ค่ายอดกระแส
- P_{cu} คือ ค่ากำลังการสูญเสียในเส้นลวดทองแดง

จากสมการ (3.15) เราจะคำนวณค่า K_u โดยใช้ข้อกำหนดต่าง ๆ ของตัวเหนียวนำ และข้อจำกัดของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสูงสุด (B_{max}) ข้อจำกัดด้านการระบายความร้อน (P_{cu}) ตลอดจนสัมประสิทธิ์การใช้ช่องหน้าต่างของแกน (k) ข้อกำหนดและขีดจำกัดเหล่านี้จะมีความสัมพันธ์กับขนาดแกน จากค่า K_u ที่คำนวณได้จากข้อกำหนดและขีดจำกัดดังกล่าวข้างต้น เราจะต้องเลือกแกนที่มีพื้นที่ช่องหน้าต่างของแกน ขนาดของพื้นที่หน้าตัดของแกนและความยาวเฉลี่ยของเส้นลวดที่ใช้พันแกนในหนึ่งรอบ เพื่อให้ค่า K_u ที่คำนวณจากขนาดของแกนสูงกว่า K_u ที่คำนวณได้จากข้อกำหนดและขีดจำกัดดังกล่าวข้างต้น ข้อกำหนดของตัวเหนียวนำจะขึ้นอยู่กับลักษณะการทำงานของวงจร ส่วนขีดจำกัดต่าง ๆ จะมีแนวทางในการเลือกดังนี้คือ

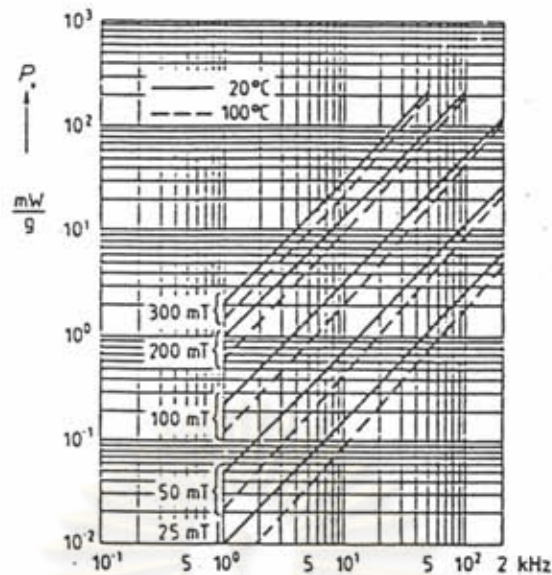
A.1. B_{max} ซึ่งเป็นค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กสูงสุดที่ยอมให้มีได้อาจจะถูกกำหนดโดยกำลังสูญเสียในแกนแม่เหล็ก (core loss) หรือการอิ่มตัวของแกนแม่เหล็ก (saturation) ขึ้นอยู่กับว่าข้อจำกัดอันไหนที่ให้ค่า B_{max} ต่ำกว่า จากกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับกำลังสูญเสียในแกนต่อน้ำหนักในรูปที่ 3.34 (Siemens Component Service, 1983) จะได้ว่า ที่ความถี่ 3500 เฮิรตซ์ สำหรับ B_{max} เท่ากับ 0.3 เทสลาและ ΔB_{max} เท่ากับ 0.6 เทสลา ซึ่งเป็นค่า B_{max} ที่ทำให้แกนอิ่มตัว มีกำลังการสูญเสียในแกนประมาณ 25 มิลลิวัตต์ต่อ

กรัม สำหรับแกน EC70 จะมีน้ำหนัก 252 กรัม ดังนั้นกำลังการสูญเสียในแกนจะประมาณ 6.3 วัตต์ เนื่องจากกำลังสูญเสียในแกนมีค่าน้อย ดังนั้นข้อจำกัดของ B_{max} น่าจะถูกจำกัดโดย B_{max} ที่ทำให้แกนอิ่มตัว

A.2 Window Utilization Factor คือ สัมประสิทธิ์การใช้ช่องหน้าต่างของแกน ปรกติจะใช้ค่าระหว่าง 0.3-0.9 แล้วแต่การพัน ลักษณะและขนาดเส้นลวดที่ใช้พัน แต่เนื่องจากการพันเป็นแบบไบฟิลลาร์ และต้องใส่ปลอกฉนวนใยแก้วหุ้มเส้นลวดทั้งสองขด เพื่อป้องกันปัญหาการลัดวงจรระหว่างขด จากเหตุผลดังกล่าวเราจะเลือกใช้สัมประสิทธิ์การใช้ช่องหน้าต่างเท่ากับ 0.6 แต่เนื่องจากเส้นลวดตัวนำของตัวเหนี่ยวนำทั้งจะผลิตกันทำงานโดยมีกระแสไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำคนละช่วงเวลา ดังนั้นในแง่ของกระแสสร้างสนามแม่เหล็กเปรียบเสมือนมีขดลวดเพียงขดเดียวที่มีกระแสไหลผ่านตลอดเวลา ดังนั้นในการเลือกสัมประสิทธิ์ของการใช้ช่องหน้าต่างของแต่ละขดจึงคิดเสมือนกับว่า ใช้ช่องหน้าต่างเพียงครั้งเดียวของช่องหน้าต่างทั้งหมด เราจึงเลือกใช้ค่า k ที่ใช้ในการคำนวณ k_w ในสมการ (3.15) มีค่าเท่ากับ 0.3

CORE TYPE	WINDOW (cm) ²	l (cm)	A (cm) ²	K_w (m) ³	A_p (cm) ²
EE-34	115.50	61.0	92.0	1.58×10^{-11}	10575
EE-39	200.19	72.0	123.0	4.17×10^{-11}	24556
EE-43	209.99	79.0	172.0	7.91×10^{-11}	36109
EE-70	491.99	102.0	222.0	2.37×10^{-10}	109007

ตารางที่ 3.1 แสดงค่า K_w กับขนาดของแกนที่จะมาพันเป็นตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 3.34 แสดงการสูญเสียในแกนต่อหน้าหน้ากับความถี่

A.3 การเลือกค่ากำลังการสูญเสียในลวดตัวนำ (P_{cu})

การเลือกค่ากำลังการสูญเสียในลวดตัวนำ มีความสำคัญสำหรับการออกแบบโดยวิธี K_u Approach ซึ่งในการออกแบบจะมีการกำหนดกำลังการสูญเสียในขดลวดตัวนำทั้งสองขด โดยค่ากำลังการสูญเสียในแต่ละขดเนื่องจากได้รับกระแสที่ไหลผ่านเท่ากันแต่คนละช่วงเวลา ซึ่งในทีก็คือมีเฟสต่างกัน 180 องศา จะมีค่ากำลังสูญเสียเท่ากัน ดังนั้นในการกำหนดค่ากำลังสูญเสียในตัวเหนี่ยวนำ (P_{cu}) จะกำหนดเป็นสองเท่าของกำลังสูญเสียในขดลวดตัวนำแต่ละขด

เมื่อคำนวณหาขนาดของแกนจากค่าของ P_{cu} ที่กำหนด จากขนาดของแกนที่คำนวณได้จะต้องพิจารณาว่าความร้อนที่เกิดขึ้นในลวดตัวนำมีค่าสูงเกินไปหรือไม่ ถ้าอุณหภูมิของลวดตัวนำมีค่าสูงหรือต่ำเกินไปจะต้องมีการปรับค่า P_{cu} ใหม่จนกว่า P_{cu} จะมีค่าเหมาะสมกับขนาดของแกน

A.4 ค่าความต้านทานจำเพาะของเส้นลวดทองแดง คำนี้นี้เป็นคุณสมบัติ

ของทองแดงที่ขึ้นกับอุณหภูมิ โดยกำหนดให้อุณหภูมิของตัวเหนี่ยวนำขณะมีภาระ (load) เต็มที่มีค่าประมาณ 60 องศาเซลเซียส ค่า ρ_c มีค่าเท่ากับ 2×10^{-8} โอห์ม-เมตร

จากข้อกำหนดและขีดจำกัดดังกล่าวข้างต้น ได้คำนวณหาค่า K_u และเลือกขนาดของแกนในที่นี้เลือกแกน EC70 ประมาณว่าใช้แกนทั้งหมด 6 แกน ต่อขนานกัน

และแต่ละแกนมีกำลังการสูญเสียของขดลวดทองแดงประมาณ 10 วัตต์ รวมกับกำลังสูญเสียในแต่ละแกนอีก 6.3 วัตต์ ได้กำลังสูญเสียในตัวเหนี่ยวนำทั้งหมด 16.3 วัตต์ ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของตัวเหนี่ยวนำไม่สูงเกินไป

สำหรับตัวเหนี่ยวนำแต่ละตัวที่นำมาขนานกันจะมีขนาด $L=156$ ไมโครเฮนรี ใช้กับกระแสอาร์เอ็มเอส $I_{rms} = 14.14$ แอมแปร์ ค่ายอดกระแส $I_{peak} = 20$ แอมแปร์ เมื่อใช้พารามิเตอร์ k, ρ, P_{cu} ดังได้กล่าวไว้ข้างต้น เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ลงในสมการ (3.15) จะได้

$$K_u = 1.712 \times 10^{-10} \text{ เมตร}^3$$

จากตารางที่ 3.1 พบว่าค่า K_u ของแกน EC70 เท่ากับ 2.37×10^{-8} เมตร³ มีค่ามากกว่า K_u ที่คำนวณได้จากข้อกำหนดและขีดจำกัดของตัวเหนี่ยวนำ ดังนั้นจึงเลือกใช้แกน EC70 ในการทำตัวเหนี่ยวนำของสลับเบอร์

A.5 การคำนวณจำนวนรอบของเส้นลวดทองแดง (N)

จากขนาดของแกนที่เลือกใช้ตลอดจนข้อกำหนดและขีดจำกัดด้านการอิ่มตัวของแกนแม่เหล็ก สามารถคำนวณขดลวดของตัวเหนี่ยวนำได้จากสมการ

$$N = LI_{peak} / (B_{max} * S) \quad (3.16)$$

แทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ลงในสมการ (3.16) จะได้ว่า จำนวนรอบที่จะพันบนแกนเท่ากับ 46 รอบ ซึ่งเป็นจำนวนที่ต้องพันทั้งสองขดบนแกนเดียวกัน

A.6 การคำนวณขนาดเส้นลวด (A_w)

จะใช้สูตรการคำนวณเส้นลวดดังนี้

$$kw = N_p A_{wp} + N_s A_{ws} \quad (3.17)$$

โดยที่ N_p เป็นจำนวนรอบของขด L_2

- N_u เป็นจำนวนรอบของขด L_u
 A_{wu} เป็นพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดทองแดงของ L_u
 A_{wl} เป็นพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดทองแดงของ L_l

เนื่องจากว่า $N_u = N_l$ และ $A_{wu} = A_{wl}$ จะได้ว่า

$$k_w = 2N_u A_{wu} \quad (3.18)$$

จากตารางที่ 3.2 แกนขนาด EC70 จะมี $w = 970962 \text{ cmil}$ หรือ 492 ตารางมิลลิเมตร จากหัวข้อที่แล้ว $N = 46$ รอบ และให้ $k = 0.6$ เมื่อแทนค่าในสมการ (3.18) จะได้ $A_{wu} = 1.6$ ตารางมิลลิเมตร

จากที่คำนวณได้พื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดทองแดงทั้งสองขดจะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ในทางปฏิบัติจะไม่ใช้ลวดตัวนำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดดังกล่าว เนื่องจากขดลวดตัวนำขนาดใหญ่จึงแข็ง จะทำให้การพันทำได้ยาก เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว จึงใช้ลวดเส้นเล็กๆหลายเส้นต่อขานานกัน เพื่อให้พื้นที่หน้าตัดการนำกระแสเท่าเดิม การเลือกขนาดเส้นลวดตัวนำขนาดเล็กได้เลือกใช้ลวดเบอร์ SWG#27 ที่มีรัศมี 0.21 มิลลิเมตร และมีพื้นที่หน้าตัด 0.1363 ตารางมิลลิเมตร (ไม่รวมฉนวนที่เคลือบไว้) ถ้าคิดฉนวนที่เคลือบเส้นลวดไว้ด้วย จะมีพื้นที่หน้าตัดเป็น 0.1416 ตารางมิลลิเมตร แสดงว่าต้องใช้ลวดตัวนำจำนวน $1.6/0.1416$ เท่ากับ 12 เส้น ในทางปฏิบัติจะใช้ลวดจำนวน 12 เส้นมาตีเกลียวให้กลมเป็นเส้นเดียวกัน แล้วใส่ปลอกฉนวนใยแก้ว เป็นฉนวนไฟฟ้า จากนั้นก็พันทั้งสองขดไปด้วยกัน

กำลังการสูญเสียในทองแดงรวมทั้งสองขด (P_{cu}) จะคำนวณได้จากสมการ

$$P_{cu} = 2 * I_{rms}^2 * R_w \quad (3.19)$$

- โดยที่
- R_w เป็นค่าความต้านทานของขดลวดที่พันแต่ละขด มีค่าเท่ากับ $\rho l/A_w$
 - I เป็นค่าความยาวของขดลวดทั้งหมด ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าความยาวเฉลี่ยต่อรอบ (τ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 102 มม. ดังในตารางที่ 3.2

ดังนั้น $l = Nt = 4.7$ เมตร

$$A_w = 0.1363 * 12 = 1.64 \text{ ตารางมิลลิเมตร}$$

แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (3.19) ได้กำลังสูญเสียในลวดตัวนำทั้งสองขด

$$P_{cu} = 11 \text{ วัตต์}$$

จากค่ากำลังการสูญเสียในทองแดง เมื่อรวมกับกำลังการสูญเสียที่เกิดจากแกนเหล็ก (core loss) แล้วจะมีค่าเท่ากับ 17.3 วัตต์

A.6 การคำนวณหาขนาดของช่องว่างอากาศ (Air Gap) : l_g
 เนื่องจากในการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำต้องมีช่องว่างอากาศ โดยจะเป็นไปตามสมการ

$$l_g = N^2 \mu_0 S / L \quad (3.20)$$

โดยที่ μ_0 เป็นค่าความซึมซาบของอากาศ มีค่าเท่ากับ $4\pi * 10^{-7}$

S เป็นพื้นที่หน้าตัดของแกน

N เป็นจำนวนรอบของการพัน

เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (3.20) จะได้ $l_g = 3.8$ มิลลิเมตร

A.7 การคำนวณ correction factor ที่ได้จากฟลักซ์ที่ขอบ (Fringing Flux : F)

เนื่องจากผลของปรากฏการณ์ขอบอันเนื่องมาจากฟลักซ์ที่ขอบ ทำให้พื้นที่หน้าตัดของช่องว่างอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ค่า Permeance มีค่าเพิ่มขึ้น และค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยค่า correction factor คำนวณได้หาได้จากสมการ (3.21)

$$F = 1 + (l_g / \sqrt{S}) \{ \ln(2G / l_g) \} \quad (3.21)$$

- โดยที่ I_r เป็นขนาดของช่องว่างอากาศ
 S เป็นพื้นที่หน้าตัดของแกน
 G เป็นความสูงของช่องหน้าต่าง 48.5 มม.

เมื่อแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ลงในสมการ (3.21) จะได้

$$F = 1.83$$

ผลจากปรากฏการณ์ขอบอันเนื่องมาจากฟลักซ์ที่ขอบทำให้ค่าความเหนียวนำเพิ่มขึ้น 1.83 เท่าของความเหนียวนำเดิม จึงได้ทำการปรับลด I_r จนได้ค่าความเหนียวนำที่ต้องการ

การออกแบบวงจรจุดชนวน

วงจรถูกจุดชนวนมีหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์เพื่อจุดชนวนเอสซีอาร์ในภาคอินเวอร์เตอร์

คุณสมบัติทางเทคนิคของวงจรถูกจุดชนวนซึ่งกำหนดได้จากลักษณะสมบัติของเอสซีอาร์และลักษณะการทำงานของวงจรถูกจุดชนวนอินเวอร์เตอร์ได้ดังนี้คือ

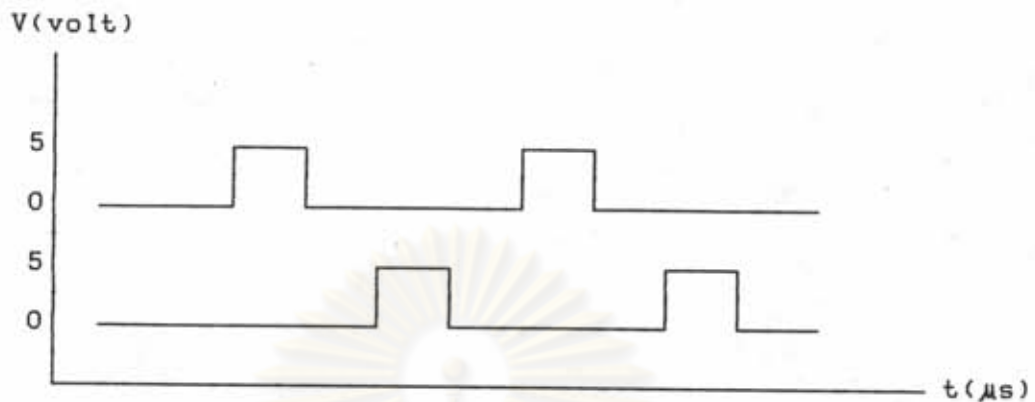
สัญญาณออก	2	สัญญาณแบบกราวด์ไม่ร่วมกัน
ความถี่ของสัญญาณจุดชนวน	3500	เฮิรตซ์
แรงดันการจุดชนวน	4	โวลต์
กระแสจุดชนวน	250	มิลลิแอมแปร์
สัญญาณจุดชนวนของเอสซีอาร์ตัวที่ 1 และ 2 ทำงานสลับกัน		

วงจรถูกจุดชนวนประกอบด้วยวงจรถูกกำเนิดสัญญาณจุดชนวน ซึ่งทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณเป็นพัลส์แคบ ๆ หลายลูกที่ต่อเนื่องกัน (pulse train) 2 ชุด ที่ทำงานสลับกัน และวงจรถูกขับนำ ซึ่งทำหน้าที่จุดชนวนเอสซีอาร์แต่ละตัว โดยได้รับสัญญาณจากวงจรถูกกำเนิดสัญญาณจุดชนวน

1) วงจรถูกกำเนิดสัญญาณจุดชนวน

วงจรถูกกำเนิดสัญญาณจุดชนวน จะสร้างสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม 2 ชุด ที่ทำงานสลับกัน โดยแต่ละชุดจะมีช่วงเวลาให้สัญญาณออกเป็นรูปสี่เหลี่ยมเท่ากับ 25 μ s

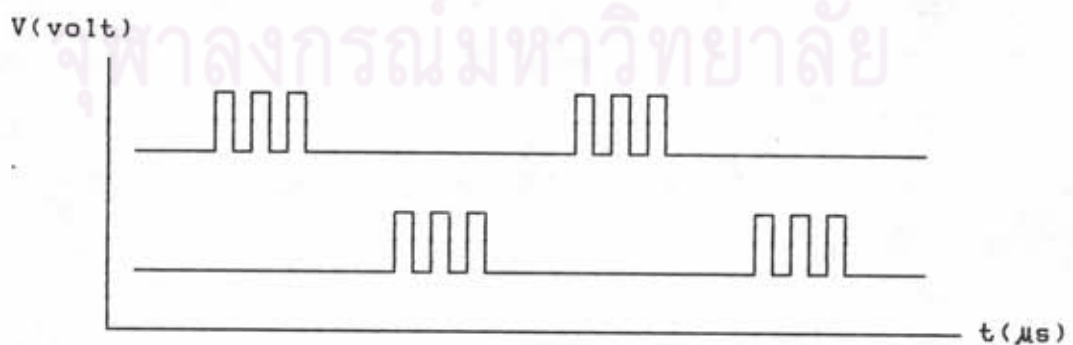
ของคาบ และช่วงเวลาที่เป็นครุณย์ 75 % ของคาบ โดยมีลักษณะสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 3.35



รูปที่ 3.35 แสดงไต่อะแกรมเวลาของสัญญาณจุดขนวน

การกำเนิดสัญญาณดังกล่าวใช้ไอซี TL494 ร่วมกับไอซี TTL 7404 ดังแสดงในรูปที่ 3.38(a)

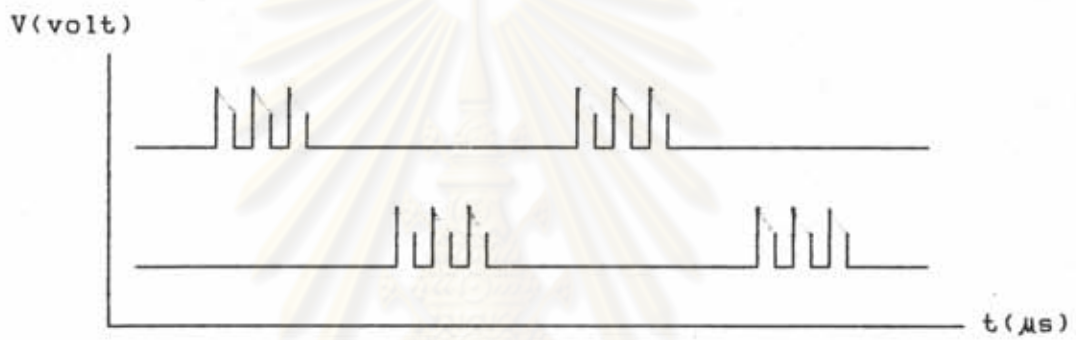
เนื่องจากสัญญาณในการจุดขนวนเอสซีอาร์ควรจะเป็นพัลส์แคบ ๆ ประมาณ 20-30 ไมโครวินาที ดังนั้นจึงใช้สัญญาณออกจากวงจรถูกกำเนิดสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม เพื่อไปควบคุมการทำงานของวงจระอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (Astable Multivibrator) โดยเมื่อสัญญาณออกของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมเป็นบวก วงจระอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ จะให้สัญญาณออกเป็นพัลส์หลาย ๆ ลูก แต่เมื่อสัญญาณออกของวงจรถูกกำเนิดรูปสี่เหลี่ยมเป็นครุณย์ วงจระอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์จะไม่ทำงาน จะให้รูปคลื่นออกแสดงในรูปที่ 3.36 สัญญาณออกของวงจระอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์จะใช้ควบคุมวงจรถับนำเอสซีอาร์



รูปที่ 3.36 แสดงไต่อะแกรมเวลาของสัญญาณออกจากวงจระอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์

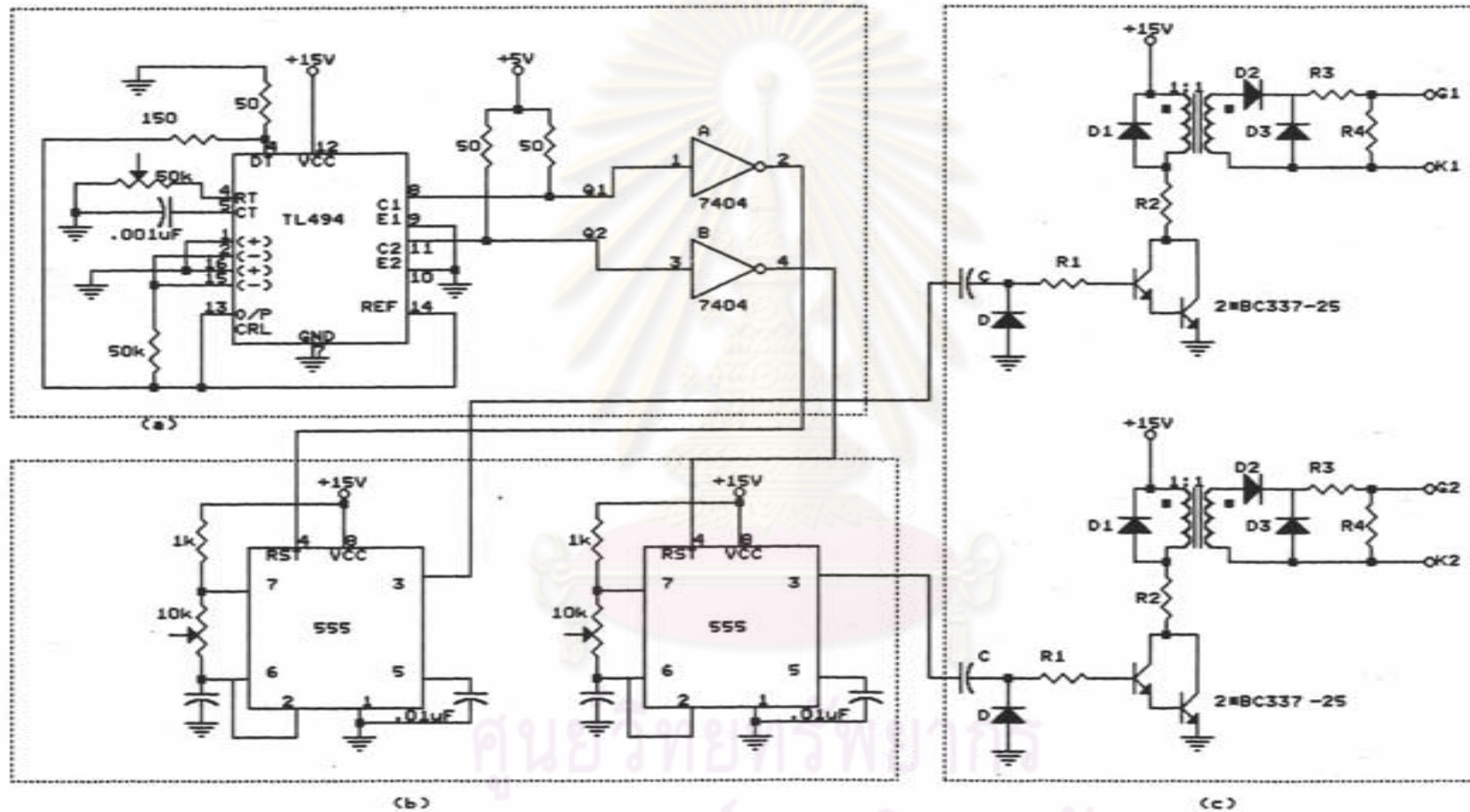
2) วงจรขั้วนำ

วงจรขั้วนำเอสซีอาร์จะทำหน้าที่ขั้วนำเอสซีอาร์โดยได้รับสัญญาณควบคุมจากวงจรกำเนิดสัญญาณจุดชนวน โดยผ่านวงจรกรองผ่านสูง (High Pass Filter) วงจรขั้วนำแต่ละชุดจะได้รับสัญญาณออกจากวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ แต่ละชุดแยกกัน สัญญาณออกที่ได้จากวงจรขั้วนำจะทำการแยกโคตโดยผ่านหม้อแปลงแยกโคตทั้ง 2 ชุด ลักษณะวงจรแสดงไว้ในรูปที่ 3.38 (b) และลักษณะของสัญญาณที่ได้แสดงได้ดังรูปที่ 3.37



รูปที่ 3.37 แสดงสัญญาณออกของวงจรขั้วนำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์สหวิทยาเขต
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รูปที่ 3.38 แสดงวงจรจุดชนวนแอลซีอาร์

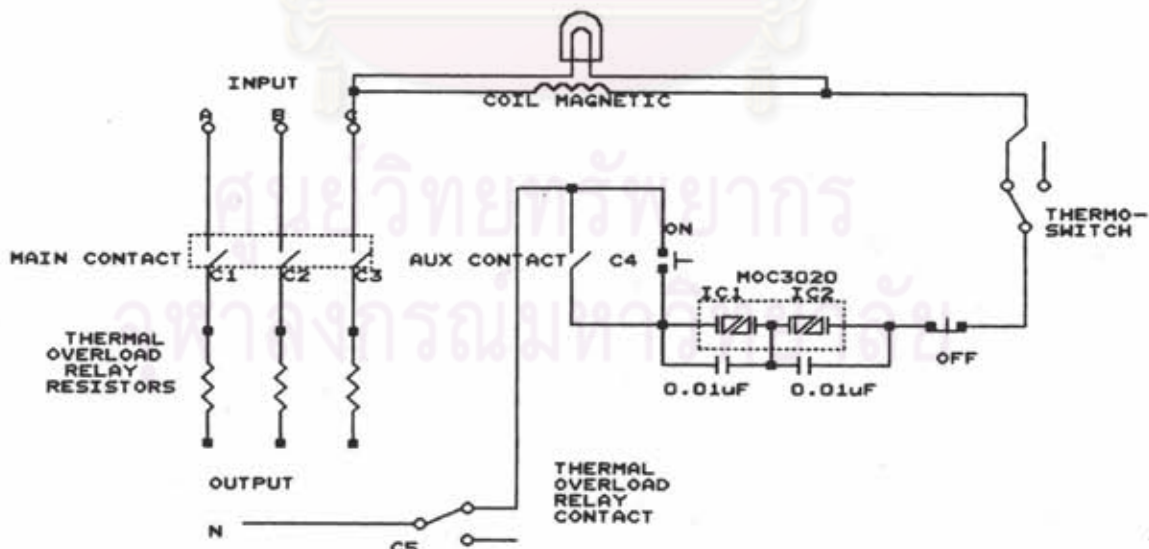
วงจรควบคุมและป้องกัน (Control and Protection circuit)

วงจรควบคุมและป้องกันจะมีส่วนประกอบที่ทำหน้าที่ต่าง ๆ กันดังต่อไปนี้ คือ

- 1) วงจรควบคุมการปิด-เปิดเครื่อง
- 2) วงจรป้องกันกระแสเกิน(Over Current)
- 3) วงจรป้องกันแรงดันเกินและแรงดันต่ำ(Over and Under Voltage)
- 4) วงจรป้องกันเฟสหาย
- 5) วงจรป้องกันอุณหภูมิเกิน(Over Temperature)

1) วงจรควบคุมการปิด-เปิดเครื่อง

การป้องกันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 380 โวลต์ เข้าเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนั้น จะต้องต่อผ่านแมกเนติกคอนแทกเตอร์ (magnetic contactor) ซึ่งมีหน้าสัมผัสหลัก(main contact) 3 ชุด คือ c1 ,c2 และ c3 และมีหน้าสัมผัสช่วย (auxiliary contact) 2 ชุด คือ c4 และ c5 โดยคอยล์ของแมกเนติกควบคุมหน้าสัมผัส(contact) c4 และหน้าสัมผัสของ c1, c2 และ c3 ส่วนหน้าสัมผัส c5 เป็นหน้าสัมผัสของ Thermal over load relay โดยมีการต่อวงจรดังรูปที่ 3.39

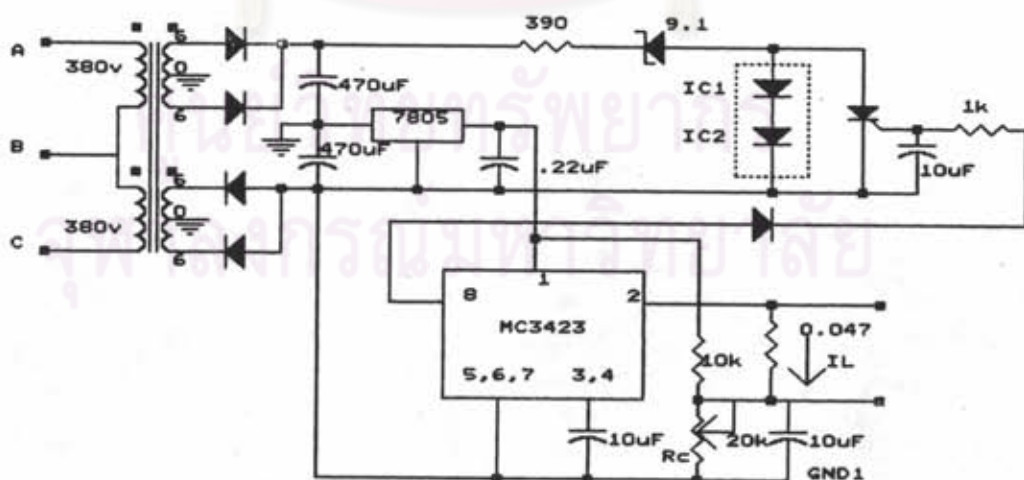


รูปที่ 3.39 แสดงวงจรควบคุมการปิด-เปิดเครื่อง

คอยล์ของแมกเนติกจะได้รับไฟเลี้ยงเมื่อมีการกดปุ่ม ON โดยได้รับไฟเลี้ยง 220 โวลต์ ทำให้หน้าสัมผัสหลักของแมกเนติก c1,c2,c3 และหน้าสัมผัสช่วย c4 ต่อดวงจร เครื่องก็จะเริ่มทำงาน เครื่องยังคงทำงานต่อไปโดยที่ปุ่ม ON ไม่ได้ต่อดวงจร เนื่องจากกระแสจะสามารถไหลผ่านทางปุ่ม OFF และไทรแอกที่ถูกรควบคุมโดย IC1 และ IC2 ดังในรูปที่ 3.40 ถ้าต้องการปิดเครื่องให้กดปุ่ม OFF ซึ่งเป็นการตัดวงจรกระแสไฟฟ้ที่ไปเลี้ยงคอยล์ของแมกเนติก ทำให้หน้าสัมผัสของแมกเนติกคอนแทกเตอร์เปิด วงจรออก หรือถ้าไทรแอกหรือ Thermal overload relay contact ตรวจจับกระแสไหลเกินพิกัดก็จะทำให้กระแสที่ไปเลี้ยงคอยล์ของแมกเนติกถูกตัดขาด c4 ก็จะเปิด วงจรทำให้ c1-c4 อยู่ในสภาพเปิดวงจรตลอดไปจนกว่าจะมีการเปิดเครื่องใหม่

2) วงจรป้องกันกระแสเกินพิกัด

สำหรับการป้องกันกระแสของไหลเกินพิกัดนั้นจะใช้การตรวจจับกระแสเกินพิกัด 3 วิธี โดยวิธีแรกใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งจะวัดกระแสไฟตรงที่ภาคแหล่งจ่ายไฟตรง เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง ที่เป็นขีดจำกัดสูงสุดของไหล ค่าอ้างอิงนี้สามารถปรับค่าได้ระหว่าง 10-125% ของกระแสที่กำหนด วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ป้องกันกระแสเกินพิกัดนั้น มีรายละเอียดของวงจร ดังแสดงในรูปที่ 3.40



รูปที่ 3.40 แสดงวงจรกระแสเกิน

การทำงานของวงจรถูกเป็นดังนี้คือ ในภาวะปรกติ SCR1 จะไม่ทำงานทำให้มีกระแสมาเลี้ยง LED ของ IC1 และ IC2 ไตรแอดของ IC1 และ IC2 นำกระแสจึงมีไฟไปเลี้ยงคอยล์ของแมกเนติกในรูปที่ 3.39 ปรกติกระแส I_L ซึ่งจะไหลผ่านตัวต้านทาน 0.047 โอห์ม (ต่อระหว่างตัวต้านทาน 5 โอห์ม กับ ตัวความเหนี่ยวนำในวงจรรอง ในรูปที่ 3.2) จะมีค่าไม่เกินกว่าค่าที่กำหนด ทำให้วงจรมิทำงาน เมื่อใดกระแสมีค่าสูงกว่าค่าที่กำหนดไอซี MC3423 ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรถือเปรียบเทียบกับแรงดันจะส่งสัญญาณออกจากขา 8 เพื่อไปจุดชนวน SCR1 ให้นำกระแส ซึ่งเมื่อ SCR1 นำกระแสจะทำให้ไม่มีกระแสไปเลี้ยง LED ของ IC1 และ IC2 อันจะเป็นผลให้ไตรแอดของ IC1 และ IC2 หยุดนำกระแส ทำให้ไม่มีกระแสไปเลี้ยงคอยล์ของแมกเนติก หน้าสัมผัสของ $c1-c4$ จะตัดวงจรออกจากภาคแหล่งจ่ายไฟตรง และจะตัดทิ้งระบบออกไปเนื่องจากแรงดันที่ขา 2 ของ MC3423 ขึ้นอยู่กับแรงดันคร่อมความต้านทาน 0.047 โอห์ม และแรงดันคร่อม R_c ดังนั้นจึงสามารถปรับตั้งค่าของกระแสจำกัดโดยการปรับค่า R_c ซึ่งทำได้ง่ายกว่าการปรับค่าความต้านทานที่กระแส I_L ไหลผ่าน โดยภาวะปรกติตั้งไว้ที่ 15 แอมป์ สำหรับการตั้งช่วงการหน่วงเวลาจะทำโดยการปรับค่า C_u ซึ่งต่อระหว่างขา 3 และ ขา 4 ของ MC3423 กับไฟลบ

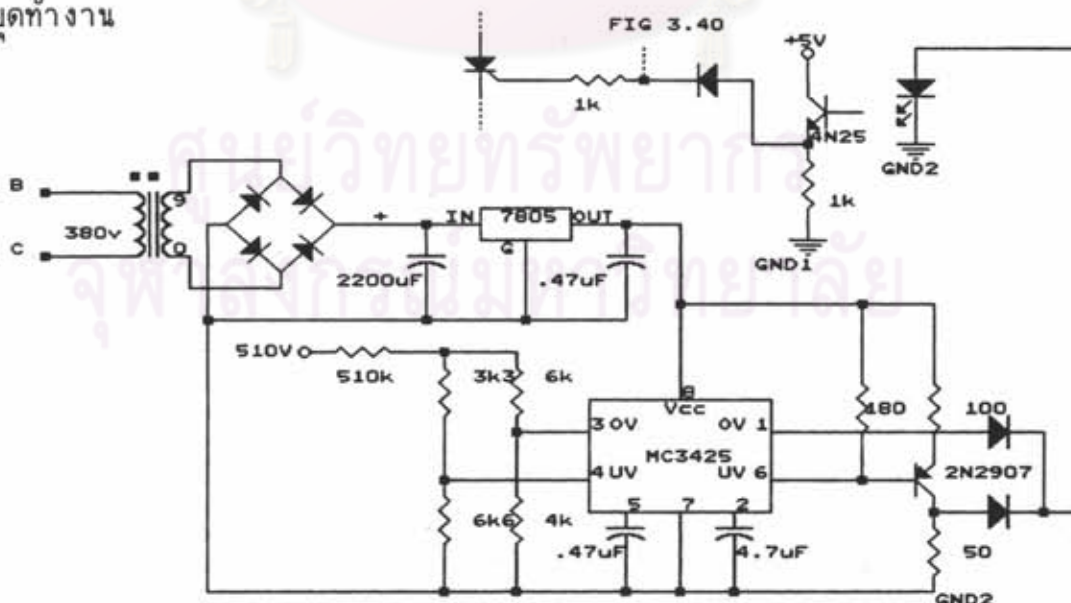
วิธีที่ 2 ในการตรวจจับกระแสเกินพิกัดโดยใช้ thermal overload relay วิธีนี้ใช้หลักการขยายตัวที่แตกต่างกันของ bimetals เมื่อได้รับความร้อนแล้วจะไปตัดหน้าสัมผัส $c5$ ซึ่งก็คือ การตัดไฟเลี้ยงคอยล์ของแมกเนติก ทำให้หน้าสัมผัส $c1-c4$ ตัดไฟฟ้ากระแสสลับออกจากเครื่อง การขยายตัวที่แตกต่างกันของ bimetals จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของ bimetals ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่านลวดความร้อนของ Thermal overload relay ซึ่งเมื่อไฟฟ้ากระแสสลับไหลเข้าภาคแหล่งจ่ายไฟตรงสูงเกินพิกัด Thermal overload relay ก็จะตัดไฟเลี้ยงของคอยล์แมกเนติก ในการตั้งพิกัดกระแสสามารถตั้งได้ระหว่าง $85-135\%$ ของกระแสที่กำหนด เนื่องจาก Thermal overload relay จะมีการตอบสนองที่ช้ากว่าการใช้วงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ยังยอมให้กระแสเกินพิกัดได้ถึง $5-6$ เท่า เป็นเวลานานกว่า 1 วินาที ดังนั้นเมื่อตั้งพิกัดกระแสของ Thermal overload relay ไว้ค่าที่กำหนด คือ 16 A แล้วปรากฏว่า เมื่อกระแสเกินพิกัดระบบตรวจจับกระแสเกินพิกัดที่ใช้วงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีการตอบสนองที่เร็วกว่า จะทำงานก่อนทุกครั้ง แต่การมี Thermal overload relay ไว้ก็เพื่อเป็นการสำรองในกรณีที่วงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์เกิดขัดข้อง

นอกจากนี้ระบบป้องกันกระแสเกินพิกัดดังกล่าวมาแล้ว เรายังมีระบบ

ป้องกันที่ใช้ฟิวส์ต่อไว้ทั้งทางด้านขาเข้าและขาออกของภาคแหล่งจ่ายไฟตรง โดยใช้ฟิวส์ขนาด 16 แอมแปร์ 500 โวลต์ ด้านขาเข้าของภาคแหล่งจ่ายไฟตรง และใช้ฟิวส์ขนาด 50 แอมแปร์ ทางด้านขาออกของภาคแหล่งจ่ายไฟตรง

3) วงจรป้องกันแรงดันเกินและแรงดันต่ำกว่ากำหนด

ในการป้องกันแรงดันเกินและต่ำกว่าที่กำหนดนั้น ใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ตรวจจับแรงดันทางด้านขาออกของแหล่งจ่ายไฟตรงในรูปที่ 3.2 โดยใช้ตัวต้านทานเป็นตัวแบ่งแรงดัน ทั้งแรงดันที่เกินและต่ำกว่าที่กำหนด โดยแรงดันปรกติจะประมาณ 510 โวลต์ แรงดันสูงกว่าพิกัดเท่ากับ 560 โวลต์ และแรงดันที่ต่ำกว่าพิกัดเท่ากับ 460 โวลต์ รายละเอียดวงจรแสดงไว้ในรูปที่ 3.41 มีการทำงานดังนี้ ในภาวะปรกติวงจรจะไม่ทำงาน เมื่อใดก็ตามที่แรงดันขา 3 สูงกว่าพิกัดที่กำหนด หรือ แรงดันที่ขา 4 ต่ำกว่าพิกัดที่กำหนด โดยมี C_{DLY} ที่ต่อไว้ที่ขา 2 และขา 5 เป็นตัวกำหนดเวลาในการส่งสัญญาณ โดยมีความสัมพันธ์ตามสมการ $t_{DLY} = 12500 C_{DLY} (\mu F)$ จากนั้นจะส่งสัญญาณไปยังขา 1 หรือ ขา 6 เพื่อข่งบอกถึงแรงดันสูงกว่าหรือต่ำกว่าพิกัด ตามลำดับ สัญญาณทั้งสองจะผ่านวงจร OR เพื่อเลือกสัญญาณที่สูงกว่าส่งสัญญาณไปยังออปโตไอโซเลเตอร์ 4N25 เพื่อให้ นำกระแส เพื่อจุดชนวนเอสซีอาร์ในรูปที่ 3.40 ให้นำกระแส ส่งผลให้ไม่มีกระแสไปเลี้ยง LED ของ IC1 และ IC2 ทำให้ไตรแอดของ IC1 และ IC2 ในรูปที่ 3.39หยุดนำกระแสไป เมื่อไม่มีกระแสไฟฟ้าไปเลี้ยงคอยล์ของแมกเนติก เครื่องจึงหยุดทำงาน



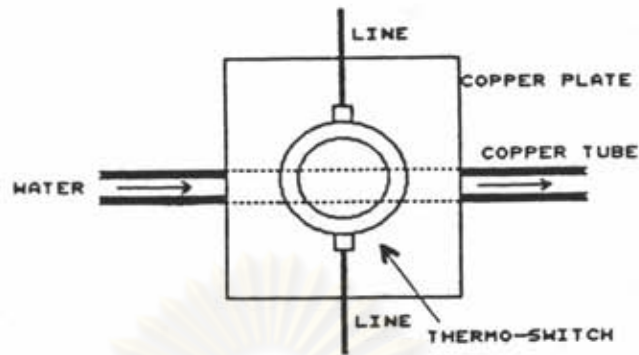
รูปที่ 3.41 แสดงวงจรป้องกันแรงดันเกินและต่ำกว่าพิกัด

4) วงจรป้องกันจากเฟลหาย

เมื่อวงจรจ่ายไฟตรงของภาคกำลัง ในรูปที่ 3.2 มีเฟลไดเฟลหนึ่ง ของไฟกระแสลับ 3 เฟล หายไป วงจรป้องกันเฟลหายจะตัดไฟฟ้ากระแสลับออกจากเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำทันที โดยวงจรป้องกันเฟลหายจะอยู่ร่วมกับวงจรป้องกันกระแสเกินพิกัด ในรูปที่ 3.40 มีการทำงานดังนี้คือ วงจรทางด้านปฐมภูมิ (primary) ของหม้อแปลง 2 ตัว ที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงให้กับ LED ของ IC1 และ IC2 นั้น จะต่อแบบ open delta ส่วนวงจรไฟตรงที่ได้จากขาออกของหม้อแปลง (secondary) ทั้งสองจะต่ออนุกรมกัน ซึ่งในภาวะปรกติจะให้แรงดันออก 15 โวลต์ เพื่อจ่ายกระแสให้กับ LED ของ IC1 และ IC2 โดยผ่านความต้านทาน 390 โอห์ม และ ซีเนอร์ไดโอด 9.1 โวลต์ ถ้าไฟฟ้ากระแสลับทางด้านขาเข้าของหม้อแปลงเฟลไดเฟลหนึ่งหายไปจะทำให้แรงดันไฟตรงที่จ่ายให้กับ LED ของ IC1 และ IC2 ลดลงครึ่งหนึ่ง แรงดันที่เหลือจะไม่เพียงพอที่จะทำให้ไทรแอกของ IC1 และ IC2 นำกระแสได้ ดังนั้นจะทำให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าไปเลี้ยงคอยล์ของแมกเนติกและหน้าลัมผัส c1-c4 จะตัดวงจรไฟฟ้ากระแสลับทั้ง 3 เฟลออก ทำให้เครื่องหยุดการทำงาน

5) วงจรป้องกันอุณหภูมิเกิน

ในการป้องกันอุณหภูมิของขดลวดเหนี่ยวนำเกินพิกัดนั้น จะใช้สวิทซ์ที่ควบคุมด้วยอุณหภูมิ (Thermo Switch) ในการตัดต่อวงจรโดยติดตั้งไว้ที่แผ่นทองแดงที่ติดกับขดลวดเหนี่ยวนำแล้วทำการต่อดังในรูปที่ 3.42 สวิทซ์ดังกล่าวอนุกรมกับคอยล์ของแมกเนติกดังแสดงในรูปที่ 3.39 มีการทำงานของวงจรป้องกันอุณหภูมิเกินพิกัดดังนี้คือเมื่อเครื่องเริ่มทำงาน กระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำทำให้ขดลวดเหนี่ยวนำ มีอุณหภูมิสูงขึ้น ถ้ามีน้ำหล่อเย็นในการระบายความร้อนจะทำให้อุณหภูมิของขดลวดเหนี่ยวนำไม่สูงจนเกินไปนัก ถ้าไม่มีน้ำหล่อเย็นระบายความร้อนที่เกิดขึ้นกับขดลวดเหนี่ยวนำ จะทำให้อุณหภูมิของขดลวดเหนี่ยวนำสูงเกินพิกัดที่กำหนด สวิทซ์ควบคุมหยุดการทำงานของเครื่อง โดยตั้งสวิทซ์ที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 80 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.42 แสดงการต่อวงจรป้องกันอุณหภูมิเกิน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย