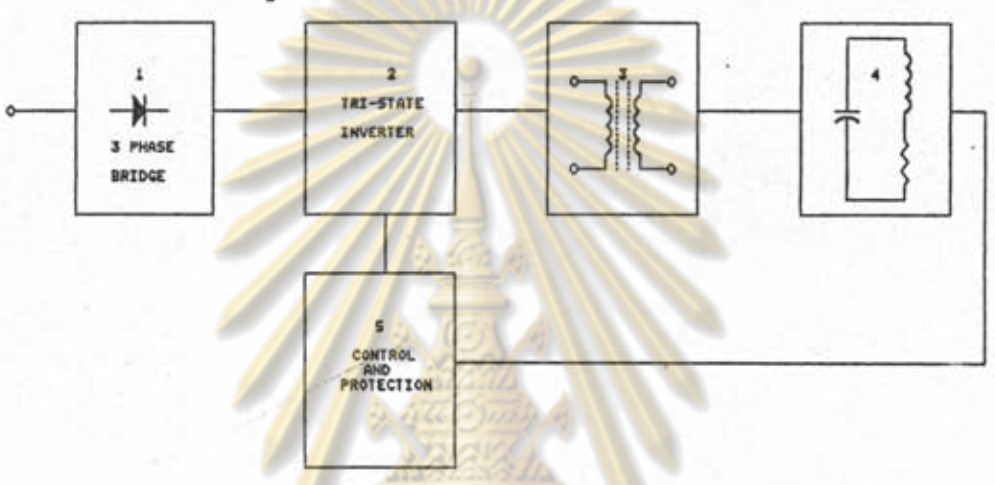
บทที่ 3

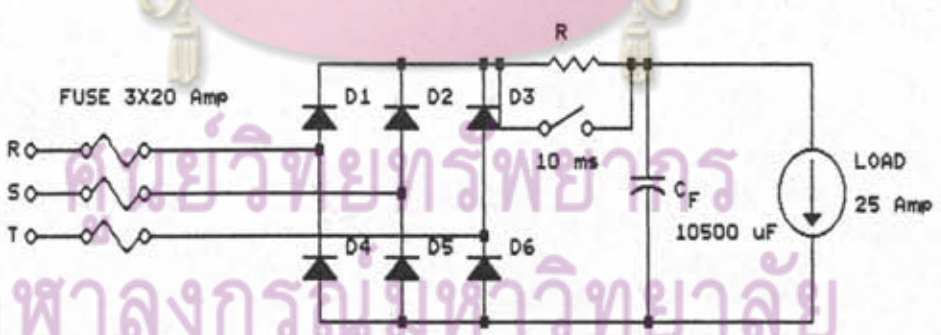
โครงสร้างทางไฟฟ้าของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

โครงสร้างทางไฟฟ้าของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ สามารถเขียนเป็น Block Diagram ได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างทางไฟฟ้าของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 3.1 สามารถอธิบายรายละเอียดในแต่ละส่วนได้ดังนี้



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.2 วงจรแหล่งจ่ายไฟตรงภาคกำลัง

3.1 ภาคแหล่งจ่ายไฟกำลังของระบบ

ส่วนที่ 1 วงจรในส่วนนี้จะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังให้แก่เครื่องให้ความร้อนแบบ

เหนี่ยวนำ โดยจะรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ขนาด 380 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ผ่านวงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบบริดจ์ และผ่านวงจรกรองโดยใช้ตัวเก็บประจุ วงจรในส่วนนี้แสดงดังรูปที่ 3.2

จากรูปที่ 3.2 พบว่าในวงจรจะมีตัวต้านทานจำกัดกระแสตอนวงจรเริ่มการทำงาน เพราะขณะที่วงจรเริ่มการทำงาน แรงดันที่คร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าประมาณศูนย์โวลต์ทำให้กระแสที่ไหลอัดประจุให้แก่ตัวเก็บประจุมีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งกระแสจำนวนนี้จะไหลผ่านบริดจ์ไดโอดที่เป็นวงจรเรียงกระแส และอาจทำให้ไดโอดเสียหายได้ จึงต้องใส่ความต้านทานจำกัดกระแสไว้ในช่วงเริ่มการทำงาน หลังจากนั้นเมื่อแรงดันที่คร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเพิ่มถึงระดับที่เหมาะสม จะให้หน้าสัมผัสของแมคเนติคคอนแทกเตอร์ทำงานซึ่งเป็นการลัดวงจรความต้านทานที่ต่ออันดับกับบริดจ์ไดโอด กระแสที่ไหลผ่านบริดจ์ไดโอดจะไปอัดประจุตัวเก็บประจุโดยตรงแต่จะไม่สามารถทำให้บริดจ์ไดโอดเสียหายได้ เพราะขณะนี้กระแสที่ไหลในวงจรจะมีค่าไม่สูงมากนักเนื่องจากมีแรงดันคร่อมที่ตัวเก็บประจุแล้ว นอกจากนี้ที่ตัวเก็บประจุจะมีตัวต้านทานต่อขนานอยู่เพื่อทำการคายประจุที่ตัวเก็บประจุเมื่อวงจรหยุดการทำงานแล้ว เพื่อป้องกันมิให้เกิดอันตรายเนื่องจากประจุที่สะสมไว้ จากรูปจะมีแหล่งกระแสขนาดคงที่ซึ่งในที่นี้ประมาณว่าคือขนาดของโหลดที่แหล่งจ่ายไฟตรงจะต้องจ่ายให้

3.1.1 การเลือกค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการกรองแรงดัน

แรงดันไฟฟ้า 3 เฟสเมื่อผ่านวงจรกรองจะมีค่ายอด = 537.4 โวลต์

ถ้าให้แรงดันกระเพื่อมที่ตัวเก็บประจุมีค่าจากยอดถึงยอด 2 เปอร์เซนต์ของแรงดันยอด = 10.8 โวลต์

แรงดันเฉลี่ยที่ตัวเก็บประจุจะมีค่า = 532 โวลต์

ประจุที่คายออกจากตัวเก็บประจุ $Q = I \times t$ (3.1)

$$Q = C \times V \quad (3.2)$$

$$C = \frac{I \times t}{V} \quad (3.3)$$

โดยที่ Q คือประจุที่คายออกจากตัวเก็บประจุ

และ I คือค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ

t คือช่วงเวลาที่ตัวเก็บประจุจ่ายกระแส

C คือค่าความเก็บประจุของตัวเก็บประจุที่เป็นวงจรกรอง

V คือค่าแรงดันกระเพื่อมจากยอดถึงยอดคร่อมตัวเก็บประจุ

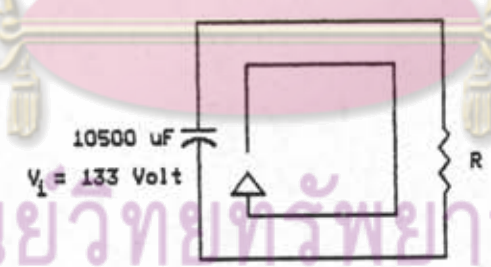
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากวงจรในรูปที่ 3.2 ประมาณว่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุในช่วงที่ตัวเก็บประจุจ่ายกระแสให้โหลดมีค่าเท่ากับกระแสโหลดและช่วงเวลาที่ตัวเก็บประจุจ่ายกระแสจะมีค่าประมาณหนึ่งในหกของคาบเวลา เนื่องจากวงจรกรองที่ใช้เป็นวงจรบริดจ์แบบ 3 เฟส ช่วงเวลาดังกล่าวมีค่าประมาณ 3.33 มิลลิวินาที (เกษียร สุขีโมกข์, 2534) และเพื่อเป็นการออกแบบเผื่อไว้ให้สามารถขยายกำลังได้ในอนาคต จะให้แหล่งจ่ายไฟตรงนี้สามารถจ่ายกระแสโหลดได้สูงสุด 25 แอมแปร์ แทนค่าแรงดันกระเพื่อมคร่อมตัวเก็บประจุ เวลา และกระแสที่ตัวเก็บประจุจ่ายในสมการที่ (3.3)

$$C = \frac{25 \times 3.33 \times 10^{-3}}{10.8}$$

$$C = 7716 \text{ ไมโครฟารัด}$$

ในทางปฏิบัติ จะเลือกค่าความเก็บประจุให้มีค่าใกล้เคียงกับที่คำนวณได้ เนื่องจากตัวเก็บประจุค่านี้จะต้องสามารถทนแรงดันไฟตรงอย่างน้อยที่สุดเท่ากับ 540 โวลต์ และในกรณีที่แรงดันไฟฟ้า 3 เฟส มีการกระเพื่อมขึ้นตัวเก็บประจุจะต้องสามารถทนแรงดันที่สูงขึ้นด้วย จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาด 10500 ไมโครฟารัด ที่สามารถทนแรงดันได้ 150 โวลต์ เพื่อให้สามารถทนแรงดันได้ 600 โวลต์ จึงใช้ตัวเก็บประจุค่านี้ต่ออันดับกัน 4 ตัว แต่จะได้ค่าความเก็บประจุรวมลดลง จึงต้องนำตัวเก็บประจุเช่นนี้ 4 ชุดต่อขนานกัน จะได้ค่าความจุรวมเป็น 10500 ไมโครฟารัด ซึ่งจะเป็นค่าที่มากกว่าที่คำนวณได้มีผลให้แรงดันกระเพื่อมที่ตัวเก็บประจุมีค่าลดลง



รูปที่ 3.3 การคายประจุของตัวเก็บประจุ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.2 การคำนวณค่าความต้านทานที่ต่อขนานตัวเก็บประจุ

ดังที่กล่าว ตัวต้านทานที่ต่อขนานกับตัวเก็บประจุมีหน้าที่ในการคายประจุที่สะสมอยู่ที่ตัวเก็บประจุหลังจากเลิกการใช้งาน เพื่อมิให้เกิดอันตราย ตามมาตรฐานของ วสท. 40 กำหนดให้ตัวเก็บประจุที่ใช้กับแรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 600 โวลต์ จะต้องมีตัวต้านทาน

สำหรับคายประจุให้ตัวเก็บประจุมีแรงดันเหลือ 50 โวลต์ ภายในเวลา 1 วินาที และสามารถคำนวณค่าความต้านทานจากความสัมพันธ์ในรูปที่ 3.3

จากรูปที่ 3.3 ให้ V_f คือแรงดันคร่อมตัวเก็บที่เวลาใดๆ และ V_i คือแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุก่อนการคายประจุผ่านตัวต้านทาน เนื่องจากในวงจรกรองจะใช้ตัวเก็บประจุต่ออันดับกัน 4 ตัวเพื่อรับแรงดันไฟตรงประมาณ 532 โวลต์ แสดงว่าตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะรับแรงดันเพียงตัวละ 133 โวลต์ และจากรูปที่ 3.3 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุที่เวลาใดๆ จะมีความสัมพันธ์กับแรงดันที่คร่อมตัวเก็บประจุก่อนการคายประจุดังสมการที่ (3.4)

$$V_f = V_i \exp\left[\frac{-t}{RC}\right] \qquad (3.4)$$

แทนค่าแรงดัน $V_i = 133$ โวลต์

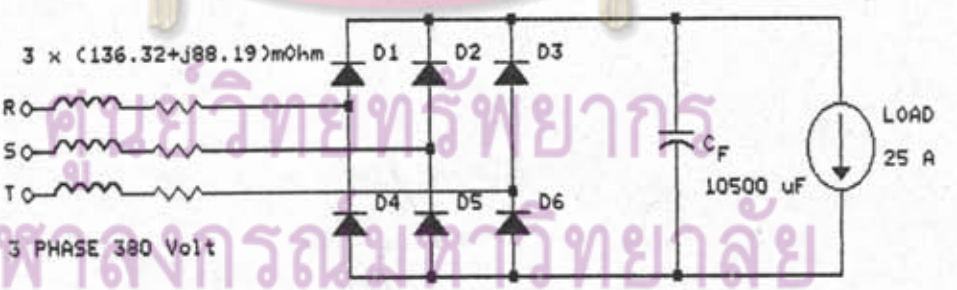
$V_f = 50$ โวลต์

$C = 10500$ ไมโครฟารัด

$t = 1$ วินาที

ลงในสมการที่ (3.4) ได้ $R = 5.84$ กิโลโอห์ม

จากการคำนวน พบว่าค่าความต้านทานที่ใช้ในการคายประจุตัวเก็บประจุแต่ละตัวมีค่า 5.84 กิโลโอหม์ ซึ่งความต้านทานแต่ละตัวจะมีกำลังสูญเสียประมาณ 3.03 วัตต์ ในวงจรกรองนี้จะมีตัวต้านทานที่ต่ออยู่ทั้งหมด 16 ตัวกำลังสูญเสียรวมจะมีค่าประมาณ 48 วัตต์ ในทางปฏิบัติจะละเลยข้อกำหนด วสท.40 เพราะทำให้มีกำลังสูญเสียที่ค่อนข้างมาก จึงเลือกใช้ความต้านทาน 56 กิโลโอห์ม ขนาด 2 วัตต์ แทน ทำให้มีกำลังสูญเสียรวมเพียง 5.1 วัตต์



รูปที่ 3.4 วงจรที่ใช้ในการชิมมูเลตเพื่อวิเคราะห์กระแสผ่านไดโอดในภาวะอยู่ตัว

3.1.3 การเลือกไดโอดที่ใช้ในวงจรเรียงกระแส

การคำนวณหาขนาดของกระแสที่ผ่านไดโอดโดยตรงจะค่อนข้างยุ่งยาก ใน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทางปฏิบัติจะสามารถหาขนาดกระแสที่ผ่านไดโอด โดยใช้โปรแกรม LEC(เอกชัย ลีลารัศมี, 2530) ทำการชิมมูเลต เพื่อวิเคราะห์ ค่ากระแสอาร์เอ็มเอส และค่ากระแสยอดที่ผ่านไดโอด และจะทำการชิมมูเลตตามรูปที่ 3.4

220 V 1 ø 2 สาย 50 Hz PF 90%							
โหลดกระแส	ขนาดสาย (mm²) เดินแกะไปกับผนังตึกหรือไม้						
(A)	2 x 35	2 x 25	2 x 16	2 x 10	2 x 6	2 x 4	2 x 2.5
15	370	250	189	121	62	41	30
20	277	187	142	90	47	31	
25	222	150	113	72	37		
30	185	125	94	60	31		
35	158	107	81	51	26		
40	138	93	71	45			
45	123	83	63	40			
50	111	75	56	36			
55	101	68	51				
60	92	62	47				
65	85	57	43				
70	79	53	40				
75	74	50					
80	69	46					
85	65	44					
90	61	41					
95	58	39					
100	55						

ตารางที่ 3.1 ขนาดสายไฟที่สามารถรับภาระกระแส
โดยที่แรงดันตกคร่อมสายไฟไม่เกิน 3%

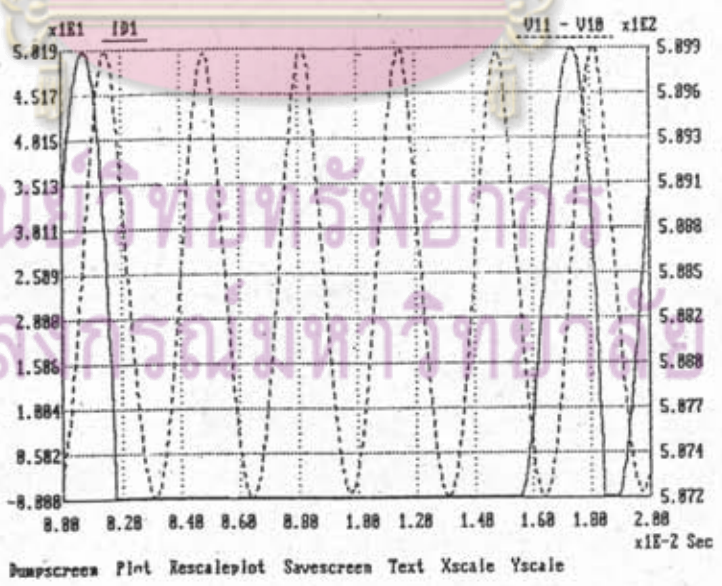
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 3.4 ถ้าประมาณว่ากำลังงานที่เข้าสู่ระบบมีค่าประมาณ 13.30 กิโลวัตต์ แหล่งจ่ายไฟตรงจะสามารถจ่ายกระแสโหลดได้ 25 แอมแปร์ ถ้าประมาณว่าตัวประกอบกำลังของระบบมีค่า 0.75 แสดงว่ากำลังปรากฏที่เข้าสู่ระบบจะมีค่า 17.73 กิโลโวลต์แอมแปร์ กระแสที่ไหลในแต่ละเฟสจะมีค่า 26.9 แอมแปร์ จากขนาดของกระแสที่ไหล และจากตารางที่ 3.1 แสดงขนาดสายไฟ(ชนบูรณ์ ศศิภาณุเดช, 2530) พบว่าต้องเลือกสายไฟที่มีขนาด 6 มม^2. และถ้าประมาณว่าสายไฟในแต่ละเฟสที่ต่อจากหม้อแปลงกำลัง ที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังของการไฟฟ้านครหลวงยาวจนถึงเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวมีค่า 40 เมตรต่อเฟสแล้ว สายไฟดังกล่าวจะมีค่าอิมพีแดนซ์ต่อเฟสเท่ากับ (128 + j64) มิลลิโอห์ม และ

ถ้าประมาณว่าหม้อแปลงแหล่งจ่ายกำลังของการไฟฟ้านครหลวงมีขนาด 250 กิโลโวลต์แอมแปร์ จากตารางที่ 3.2 ซึ่งแสดงขนาดอิมพีแดนซ์ และพิกัดกำลังของหม้อแปลง(ธนบูรณ์ ศศิภาณุเดช, 2530)จะพบว่าหม้อแปลงขนาด 250 กิโลโวลต์แอมแปร์จะมีอิมพีแดนซ์ขนาด (8.32+j24.19) มิลลิโอห์ม ซึ่งถ้ารวมกับอิมพีแดนซ์ของสายไฟในแต่ละเฟส จะทำให้ขนาดอิมพีแดนซ์รวมของแหล่งจ่ายมีขนาด (136.32 + j88.19) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และในการชิมมูเลตจะคิดที่สภาวะอยู่ตัวดังนั้นวงจรในรูปที่ 3.4 จึงไม่มีตัวต้านทานจำกัดค่ากระแสต่ออยู่ ผลการชิมมูเลตแสดงดังรูปที่ 3.5

ขนาดหม้อแปลง (kVA)	กระแสพิกัด (A)	กำลังสูญเสีย (kW)	Zk (%)	ความต้านทาน (mΩ)	รีแอกแตนซ์ (mΩ)
250	360	3.250	4	8.32	24.19
315	455	3.900	4	6.30	19.30
400	580	4.600	4	4.60	15.32
500	720	5.500	4	3.52	12.32
630	910	6.500	6	2.62	15.01
800	1150	11.000	6	2.75	11.68
1000	1440	13.500	6	2.16	9.36
1250	1800	16.400	6	1.68	7.49
1600	2300	19.800	6	1.24	5.87
2000	2880	20.900	6	0.81	4.70

ตารางที่ 3.2 อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงกำลัง



รูปที่ 3.5 กระแสไดโอดและแรงดันของตัวเก็บประจุในภาวะอยู่ตัว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

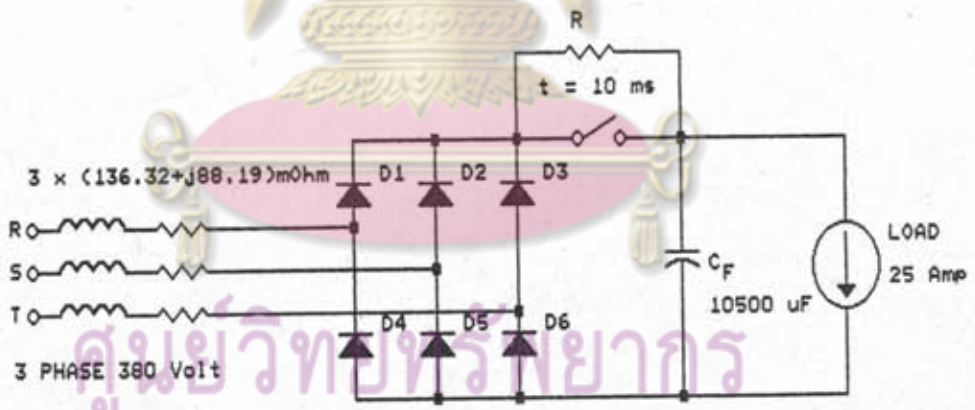
จากรูปที่3.5 จะพบว่า

ไดโอดที่ใช้จะต้องทนค่ากระแสอาร์เอ็มเอสอย่างน้อย	18	แอมแปร์
และสามารถทนค่ากระแสยอด	50	แอมแปร์
และแรงดันขณะไม่นำกระแส	540	โวลต์

ในทางปฏิบัติเพื่อความสะดวกในการติดตั้งจึงเลือก ไดโอดแบบโมดูล ที่ภายในมีไดโอดต่ออยู่ 6 ตัวในลักษณะวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 3 เฟส ซึ่งไดโอดแต่ละตัวจะสามารถทนกระแสอาร์เอ็มเอสได้ 50 แอมแปร์ และสามารถทนแรงดันขณะไม่นำกระแสได้ 800 โวลต์ นอกจากนี้จะสามารถทนค่ากระแสเสิร์จไปหน้าแบบไม่ซ้ำได้ 300 แอมแปร์ ซึ่งกระแสเสิร์จค่านี้จะเป็นตัวกำหนดค่าความต้านทานที่ใช้จำกัดกระแสอัดประจุ

3.1.4 การเลือกค่าความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ

การเลือกค่าความต้านทานจำกัดกระแสที่ผ่านไดโอดโดยวิธีการคำนวณ จะค่อนข้างยุ่งยาก ในทางปฏิบัติจะใช้วิธีซิมมูเลตด้วยโปรแกรม LEC(เอกชัย ลีลารัศมี, 2530) เช่นเดียวกับการเลือกขนาดไดโอด รูปวงจรที่ใช้จำลองการทำงานจะเป็นดังรูปที่ 3.6 จากรูป

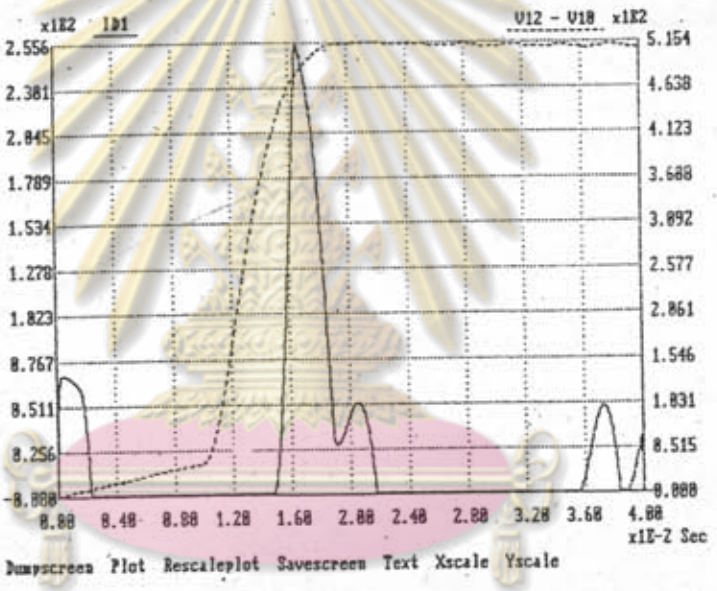


รูปที่ 3.6 วงจรที่ใช้ในการซิมมูเลตเพื่อเลือกค่าความต้านทานจำกัดกระแส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จะพบว่ามีตัวต้านทานต่อขนานอยู่กับ หน้าคอนแทกของแมคเนติคคอนแทกเตอร์ ซึ่งต่ออันดับอยู่ในวงจรระหว่างวงจรเรียงกระแส และ ตัวเก็บประจุ ในการซิมมูเลตจะใช้วิธีเลือกค่าความต้านทาน และ ช่วงเวลาที่ต้องการให้ตัวต้านทานนำกระแสก่อนที่จะให้หน้าสัมผัสนำกระแส

แทน จากนั้นจะพิจารณาผลการชิมมูเลตที่ได้ โดยค่ากระแสเสิร์จไปหน้าที่ผ่านไดโอดแต่ละตัวจะต้องมีค่าต่ำกว่าค่ากระแสเสิร์จไปหน้าแบบไม่ซ้ำของไดโอดที่เลือกไว้ ในกรณีนี้มีค่า 300 แอมแปร์ ซึ่งหลังจากการลองเลือกค่าความต้านทาน และช่วงเวลาที่เหมาะสมอยู่หลายค่า พบว่าถ้าใช้ค่าความต้านทาน 7.5 โอห์ม และ ช่วงเวลาเป็น 10 มิลลิวินาที ซึ่งช่วงเวลานี้จะเท่ากับเวลาตอบสนองที่หน้าสัมผัสของแมคเนติคคอนแทกเตอร์จะทำงาน หลังจากที่ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กได้รับไฟเลี้ยง ซึ่งจะเป็นการหน่วงเวลาที่ค่อนข้างสะดวก เพราะใช้เวลาตอบสนองของแมคเนติคคอนแทกเตอร์ แต่ถ้าจะใช้เวลาค่าอื่นก็สามารถทำได้เพียงแต่ต้องสร้างวงจรหน่วงเวลาขึ้นตามค่าที่ต้องการ เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นที่ตัวต้านทานจำกัดกระแสนี้จะมีค่าค่อนข้างสูงมาก แต่เกิดขึ้นเพียงระยะเวลาสั้นๆเท่ากับระยะเวลาที่จำกัดกระแส จึงเลือกค่าความต้านทาน 7.5 โอห์ม ขนาด 50 วัตต์ ซึ่งผลการชิมมูเลตจะแสดงดังรูปที่ 3.7

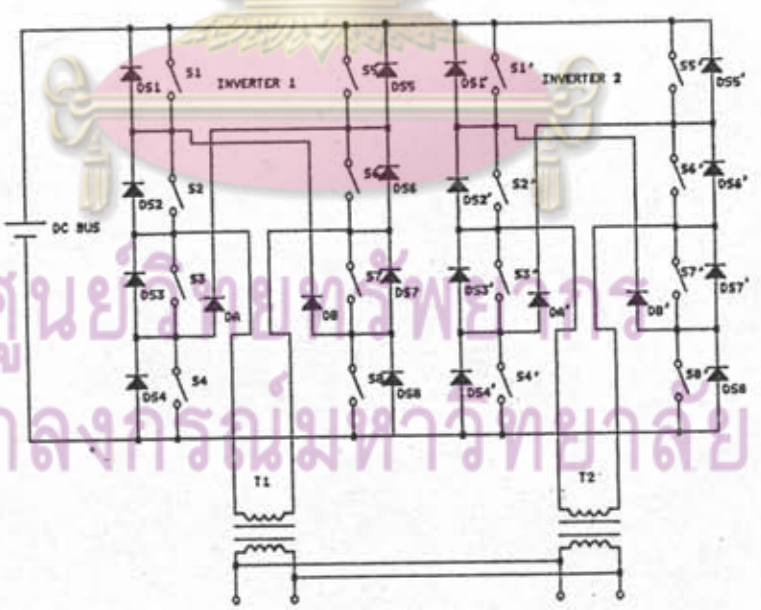


รูปที่ 3.7 ผลการชิมมูเลตเพื่อพิจารณาค่าความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ

ส่วนที่2 วงจรในส่วนนี้จะมีหน้าที่หลักในการแปลงแรงดัน จากแหล่งจ่ายไฟตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง โดยจะใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ และเนื่องจากกำลังที่ต้องส่งผ่านวงจรอินเวอร์เตอร์มีค่าค่อนข้างสูง และจากพิกัดความสามารถในการส่งผ่านกำลังของมอสเฟตกำลังในวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะไม่เพียงพอ จึงต้องออกแบบให้ระบบประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะสองชุดต่อลักษณะขนานกัน โดยการขนานจะใช้วิธีต่อขนานกันทางขดทุติยภูมิของหม้อแปลงแยกโดดส่งผ่านกำลัง เหตุที่ใช้วิธีนี้เพราะจะปลอดภัยมากกว่า ที่จะทำการขนานอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะสองชุดโดยตรงเพราะถ้าอินเวอร์เตอร์ทั้งสองชุดให้แรงดันออกมามีค่าไม่เท่ากัน จะเกิดการลัดวงจรขึ้นที่ขาออกของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะทั้งสองชุดซึ่งอาจทำให้อินเวอร์เตอร์เสียหายได้ และจะมีโอกาสเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวค่อนข้างสูงเนื่องจากมอสเฟตกำลัง อาจมีคุณสมบัติทางด้านเวลาที่แตกต่างกันบ้างเล็กน้อย และที่ไม่ใช้วิธีการขนานมอสเฟตกำลัง เพราะอาจเกิดปัญหาเรื่องการแบ่งกระแสโหลดที่ไหลผ่านมอสเฟตกำลังแต่ละตัวไม่เท่ากัน และคุณสมบัติทางด้านเวลาที่ไม่เท่ากันซึ่งอาจมีผลให้มอสเฟตกำลังตัวใดตัวหนึ่งรับภาระกระแสเกินพิกัดและเสียหายได้ แต่การเพิ่มกำลังของระบบโดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์สองชุด และต่อขนานกันทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง



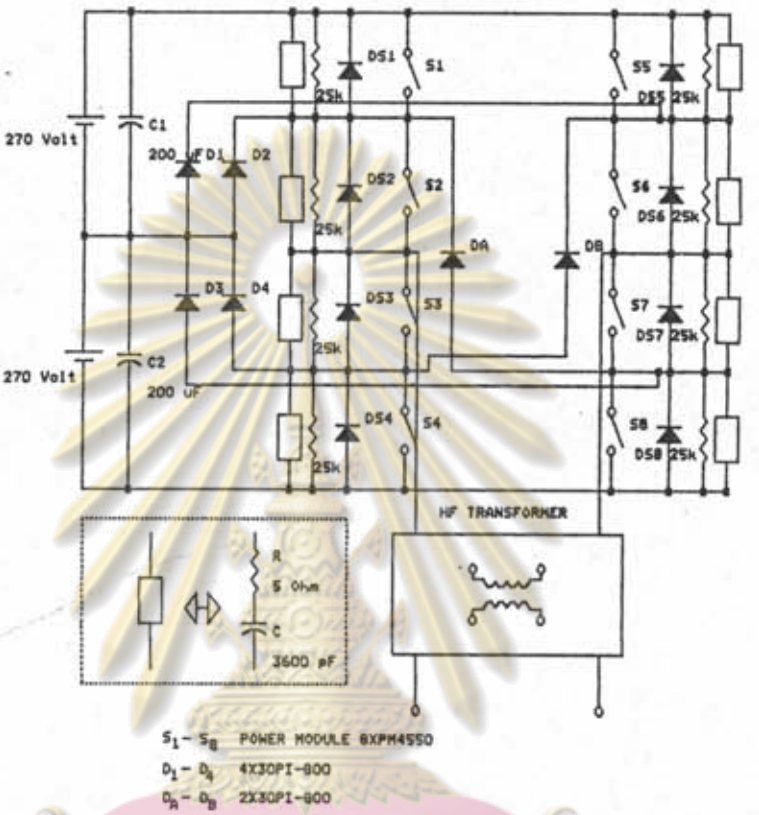
รูปที่ 3.8 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะสองชุดขนานกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แยกโดดส่งผ่านกำลัง จะไม่เกิดปัญหาดังกล่าวเพราะถ้าแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ทั้งสองชุดมีขนาดไม่เท่ากันจะไม่เกิดการลัดวงจร แต่จะเกิดการไหลของกระแสที่แตกต่างกัน ในวงจรอินเวอร์เตอร์แต่ละชุด ทั้งนี้เนื่องจากแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์แต่ละชุดจะต่ออยู่กับด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงแยกโดดส่งผ่านกำลัง ดังนั้นถ้าแรงดันที่ขาออกของอินเวอร์เตอร์แต่ละชุดมีค่าไม่เท่ากันกระแสที่ไหลในวงจรอินเวอร์เตอร์แต่ละชุดจะยังโดนจำกัดไว้ด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงแต่ละชุด ซึ่งมีผลให้หม้อแปลงร้อนและการแบ่งกระแสไม่เท่ากันไม่ถึงกับทำให้วงจรอินเวอร์เตอร์แต่ละชุดเสียหายได้ โดยวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะส่วนนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.8

จากรูปที่ 3.8 พบว่าวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะแต่ละชุดจะต้องใช้มอสเฟตกำลังถึง 8 ตัวเหตุที่ต้องใช้มอสเฟตกำลังมากเนื่องจากพิกัดความสามารถในการทนแรงดันขณะไม่นำกระแสของมอสเฟตกำลังแต่ละตัวมีค่าเพียง 450 โวลต์ ในขณะที่ต้องสามารถทนแรงดันในขณะไม่นำกระแสขนาด 532 โวลต์ จากภาคแหล่งจ่ายไฟตรง วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะเป็นวงจรที่มีภาคควบคุมการขับนำมอสเฟตกำลังแต่ละตัว ให้เสมือนกับว่าขณะใดๆจะมีมอสเฟตกำลังสองตัวต่ออันดับกันเพื่อรับแรงดันขณะไม่นำกระแส จึงทำให้มอสเฟตกำลังที่ทนแรงดันขณะไม่นำกระแสมีภาระการรับแรงดันลดลงเหลือเพียงครึ่งเดียว ทำให้มอสเฟตกำลังที่มีพิกัดทนแรงดัน 450 โวลต์ สามารถใช้งานได้กับแหล่งจ่ายไฟตรงขนาด 532 โวลต์ จากรูปที่ 3.8 ในวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะแต่ละชุดจะมีไดโอดต่ออยู่สองตัว เพื่อเป็นทางระบายกระแสโหลดให้สามารถไหลได้ครบวงจร ในกรณีที่มอสเฟตกำลังบางตัวถูกควบคุมให้หยุดนำกระแส ในทางปฏิบัติแรงดันที่คร่อมมอสเฟตกำลังแต่ละตัวในขณะไม่นำกระแส จะไม่เป็นลักษณะอุดมคติเหมือนกับที่ได้จากการซิมมูเลต สาเหตุเนื่องมาจากความไม่เป็นอุดมคติของมอสเฟตกำลังแต่ละตัว ในการพิจารณาตอนแรกสมมติให้ขณะที่มอสเฟตกำลังไม่นำกระแสจะเสมือนเปิดวงจรและให้มอสเฟตกำลังแต่ละตัวมีความต้านทานเท่ากันและมีค่าเป็นอนันต์ จึงทำให้แรงดันที่คร่อมมอสเฟตกำลังในช่วงไม่นำกระแสมีการแบ่งแรงดันที่เท่ากัน แต่ตามความจริงเนื่องจากมอสเฟตกำลังแต่ละตัวจะมีคุณสมบัติที่ไม่เป็นอุดมคติ กล่าวคือขาเดรนและขาซอร์ซของมอสเฟตกำลังจะเสมือนเป็นตัวเก็บประจุขนาดเล็กๆประมาณ 2 นาโนฟารัด ซึ่งค่าความเก็บประจุของมอสเฟตกำลังก็อาจจะมีค่าไม่เท่ากัน ถ้าพิจารณาในลักษณะของอิมพีแดนซ์ของมอสเฟตกำลังแต่ละตัวในช่วงไม่นำกระแสจะทำให้อิมพีแดนซ์ของมอสเฟตกำลังแต่ละตัว มีค่าแตกต่างกัน นอกจากนี้ช่วงเวลาที่มอสเฟสกำลังสองตัวใดๆที่ช่วยกันรับแรงดันยังมีค่าไม่เท่ากัน ทำให้การแบ่งแรงดันของมอสเฟตกำลังสองตัวใดๆไม่สมดุลย์ อาจทำให้มอสเฟตกำลังเสียหายได้ จึงต้องพยายามทำให้อิมพีแดนซ์ของมอสเฟตกำลังแต่ละตัวมีใกล้เคียงกันมากๆ วิธีที่สะดวกและง่ายคือการใช้ความต้านทานที่มีขนาดพอสมควรต่อขนานกับมอสเฟตกำลังแต่ละตัว เพื่อให้ความต้านทาน

ส่วนนี้มีผลเหนือกว่าอิมพีแดนซ์ที่มาจากตัวเก็บประจุของมอสเฟตกำลัง ทำให้การแบ่งแรงดันของมอสเฟตกำลังแต่ละตัวดีขึ้น ในการออกแบบเลือกใช้ค่าความต้านทานขนาด 25 กิโลโอห์ม 5 วัตต์ ซึ่งวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะที่ใช้จริงเป็นดังรูปที่ 3.9



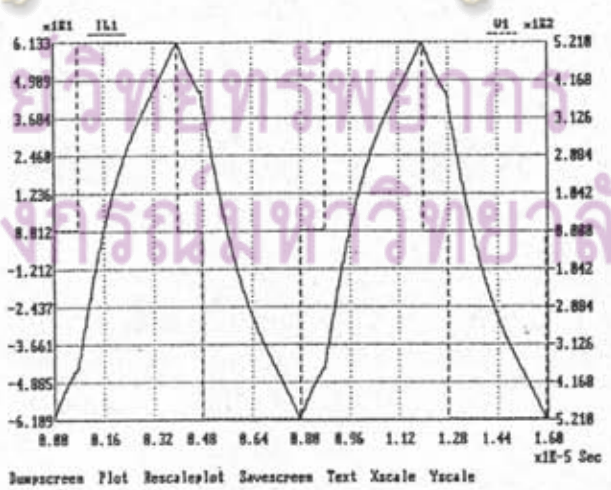
รูปที่ 3.9 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะชุดเดียวในทางปฏิบัติ

จากรูปที่ 3.9 นอกจากจะมีตัวต้านทานขนาด 25 กิโลโอห์ม ต่อขนานกับมอสเฟตกำลังแต่ละตัวแล้ว ยังมีวงจรสนับเบอร์แรงดันต่อขนานกับมอสเฟตกำลังแต่ละตัวด้วย เนื่องจากถึงแม้การแบ่งแรงดันของมอสเฟตกำลังแต่ละตัวจะค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่ที่มอสเฟตกำลังแต่ละตัวจะมีสัญญาณสไปก์เป็นยอดแหลมซึ่งมีค่าสูงมาก และอาจทำให้มอสเฟตกำลังเสียหายได้ ซึ่งแรงดันสไปก์เหล่านี้มักจะเกิดในวงจรประเภทสวิตชิงความถี่สูง เนื่องจากมีความเหนี่ยวนำต่ออยู่ในเส้นทางที่กระแสไหลผ่าน โดยทั่วไปคือสายไฟที่เชื่อมต่อระหว่างมอสเฟตกำลังแต่ละตัว เมื่อมอสเฟตกำลังซึ่งเดิมนำกระแสอยู่ถูกควบคุมให้หยุดนำกระแส กระแสที่ไหลในสายไฟตัวนำจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันสไปก์ขึ้น และแรงดันสไปก์นี้จะปรากฏที่มอสเฟตกำลังด้วย เพื่อที่จะลดแรงดันสไปก์มิให้เป็นอันตรายต่อมอสเฟตกำลัง จึงต้องใส่วงจรสนับเบอร์แรงดันขนานมอสเฟตกำลังแต่ละตัวเพื่อที่จะให้วงจรสนับเบอร์รับพลังงานส่วนเกินที่เป็นผลมาจาก กระแสที่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ไหลในสายไฟตัวนำ และค่าความเหนี่ยวนำสมมูลของสายไฟตัวนำนั้น ในการออกแบบใช้ตัวต้านทานขนาด 5 โอห์ม 10 วัตต์ ต่ออันดับกับตัวเก็บประจุขนาด 2400 พิโคฟารัด ทนแรงดัน 1500 โวลต์ เป็นวงจรสนับเบอร์แรงดัน ในขณะที่มอสเฟตกำลังนำกระแสตัวเก็บประจุของวงจรสนับเบอร์จะคายประจุผ่านตัวต้านทานและมอสเฟสกำลังตัวที่นำกระแสอยู่นั้น จนเมื่อมอสกำลังถูกควบคุมให้หยุดนำกระแส ตัวเก็บประจุดังกล่าวจะถูกอัดประจุผ่านตัวต้านทานจากกระแสที่เดิมไหลในสายไฟตัวนำและมอสเฟตกำลังตัวที่ถูกควบคุมให้หยุดนำกระแส

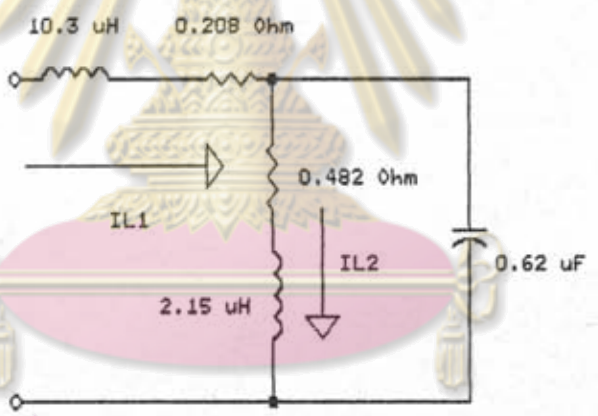
จากรูปที่ 3.9 พบว่ามีไดโอด D_1 ถึง D_4 ต่อในลักษณะวงจรแคลมป์แรงดันที่คร่อมมอสเฟตกำลังแต่ละตัวมิให้มีค่าเกินครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟตรง เพราะขั้วแอโนดของไดโอด D_1 และไดโอด D_2 ต่ออยู่กับจุดกลางของตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 ซึ่งแรงดันที่จุดนี้จะมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของแหล่งจ่ายไฟตรง ถ้าแรงดันที่คร่อมมอสเฟตกำลัง S_2 หรือ S_6 มีค่าต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของแหล่งจ่ายไฟตรง ไดโอด D_1 หรือ D_2 จะถูกทำให้นำกระแสซึ่งเป็นการตรึงแรงดันคร่อมมอสเฟต S_2 หรือ S_6 มิให้มีค่าต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของแหล่งจ่ายไฟตรง ในลักษณะเช่นเดียวกันขั้วแคโทดของไดโอด D_3 และ ไดโอด D_4 จะต่อกับจุดกึ่งกลางของตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 ดังนั้นถ้าแรงดันคร่อมมอสเฟตกำลัง S_4 หรือ S_8 มีค่ามากกว่าครึ่งหนึ่งของแหล่งจ่ายไฟตรงไดโอด D_3 หรือ D_4 จะถูกทำให้นำกระแสแรงดันคร่อมมอสเฟตกำลัง S_4 หรือ S_8 จึงถูกตรึงให้มีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของแหล่งจ่ายไฟตรง ในทางปฏิบัติตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 จะต้องมีค่าความจุมากพอสมควรเพราะต้องใช้ตรึงแรงดัน จึงเลือกตัวเก็บประจุขนาด 200 ไมโครฟารัด ทนแรงดันได้ 400 โวลต์ และไดโอด D_1 ถึง D_4 จะต้องสามารถทนแรงดันเท่ากับครึ่งหนึ่งของแหล่งจ่ายไฟตรง และกระแสที่สูงพอสมควร จึงเลือกไดโอดที่สามารถทนแรงดันได้ 800 โวลต์ และกระแสขนาด 30 แอมแปร์



รูปที่ 3.10 ผลการชิมมูเลตแรงดันและกระแสที่ขาออกของอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.10 แสดงผลการชิมมูเลต ได้รูปแรงดันและกระแสที่ขาออกของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ โดยพิจารณาว่าโหลดของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะเป็นดังรูปที่ 3.11 ซึ่งเป็นการแทนขดลวดให้ความร้อนและชิ้นงานด้วยวงจรสมมูลตัวต้านทานต่ออันดับกับตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าดังแสดง และตัวเก็บประจุที่ต่อขนานอยู่ มีไว้เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังของขดลวดให้ความร้อนและชิ้นงานให้ดีขึ้น ตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออันดับอยู่ในวงจรคือตัวเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลงแยกโดดส่งผ่านกำลัง และ ตัวเหนี่ยวนำจำกัดกระแสที่ผ่านมอสเฟตกำลังจากรูปแรงดันและกระแสที่ขาออกของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ จะพบว่าสัญญาณกระแสจะล้าหลังสัญญาณแรงดันด้วยมุมเฟสค่าหนึ่ง โดยสัญญาณแรงดันจะมีลักษณะเป็นแบบสามสถานะ คือจะมีระดับแรงดันเป็น 532 โวลต์ -532 โวลต์ และ ศูนย์โวลต์ ดังแสดง และสัญญาณกระแสจะมีลักษณะเป็นเชิงท่อนใกล้เคียงกับสัญญาณไซน์ สัญญาณกระแสนี้ตามปรกติจะเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะของโหลด และช่วงความถี่ที่ใช้งาน ค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำที่ใช้ชิมมูเลตนำมาจากการวัดขดลวดให้ความร้อน และ ชิ้นงานที่มีลักษณะทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางรัศมี 2 เซนติเมตร โดยเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ และความถี่ที่ใช้ในการชิมมูเลตคือ 125 กิโลเฮิรตซ์



รูปที่ 3.11 วงจรสมมูลของโหลดของอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

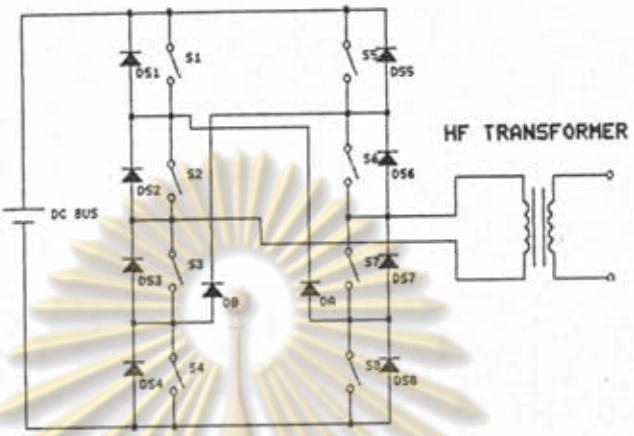
3.2.1 การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ

รูปที่ 3.12 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ ส่วนรูปที่ 3.13 แสดงวงจรที่ขับนำมอสเฟตกำลังแต่ละตัว และรูปที่ 3.14 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ขาออกอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ การทำงานของวงจรจะเป็นดังนี้

สัญญาณที่ขับนำมอสเฟตกำลัง S_1 และ S_8 คือสัญญาณ GS_1

สัญญาณที่ขับนำมอสเฟตกำลัง S_2 และ S_7 คือสัญญาณ GS_2

สัญญาณที่ขับนำมอสเฟตกำลัง S_3 และ S_8 คือสัญญาณ GS_3
สัญญาณที่ขับนำมอสเฟตกำลัง S_4 และ S_5 คือสัญญาณ GS_4

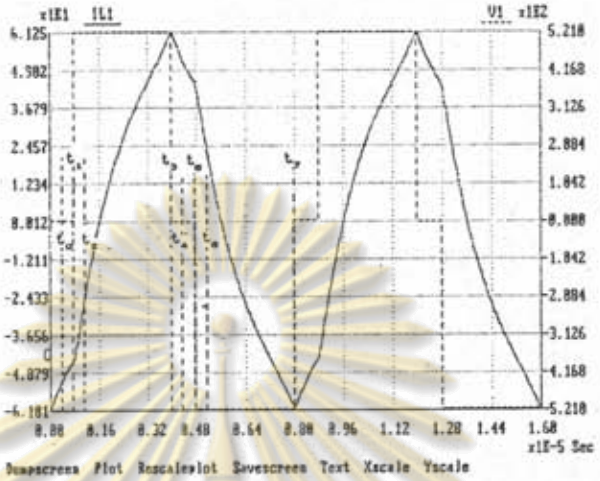


รูปที่ 3.12 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ

รูปที่ 3.13 สัญญาณที่ขับนำมอสเฟตกำลังแต่ละตัว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

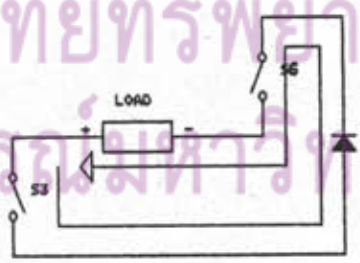
จากสัญญาณขับนำมอสเฟตกำลังทั้ง 4 เพื่อความสะดวกจะยกตัวอย่างในกรณีที่ความถี่ที่ใช้ในวงจรมีค่า 125 กิโลเฮิรตซ์ โดยสามารถแบ่งช่วงการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะออกเป็น 8 ช่วงดังนี้



รูปที่ 3.14 กระแสและแรงดันที่ขาออกของอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ

3.2.1.1 ช่วงเวลานี้จะเริ่มจากเวลา $t = 0$ ถึง $t = t_0$ ในช่วงเวลานี้จะมีสัญญาณขับนำมอสเฟตกำลัง GS_3 เท่านั้นจึงมีแต่มอสเฟตกำลัง S_3 และ S_6 เท่านั้นที่สามารถนำกระแสได้ แต่จากช่วงคาบเวลาก่อนหน้านี้กระแสโหลดที่ไหลในวงจรมีทิศทางเป็นลบ เนื่องจากโหลดมีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำ กระแสจึงต้องไหลในทิศทางเดิมกระแสดังกล่าวจึงไหลวนผ่าน มอสเฟตกำลัง S_3 ไดโอด D_B มอสเฟตกำลัง S_6 และผ่านโหลดดังแสดงในรูปที่ 3.15 ในช่วงเวลานี้เนื่องจากตัวโหลดเสมือนเกือบโดนลัดวงจร แรงดันคร่อมโหลดจึงเกือบเป็นศูนย์โวลต์ และกระแสโหลดจะมีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 3.14

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

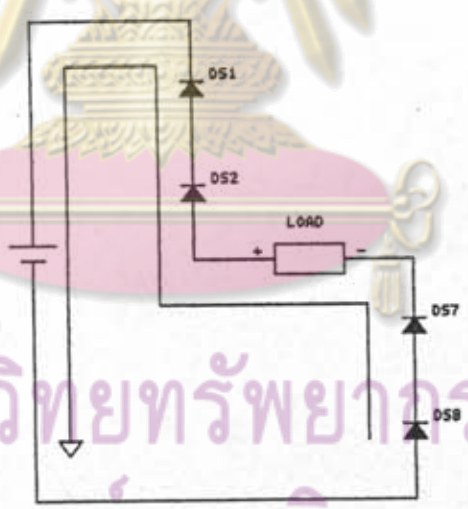


รูปที่ 3.15 เส้นทางการไหลของกระแสในช่วงเวลา $t = 0$ ถึง $t = t_1$

3.2.1.2 ช่วงเวลาจาก $t = t_0$ ถึง $t = t_1$ ในช่วงเวลานี้จะ

มีสัญญาณขับนำ GS_2 และ GS_3 ทำให้มอสเฟตกำลัง S_2 S_3 S_8 และ S_7 สามารถที่จะนำกระแสได้ แต่เนื่องจากเดิมในวงจรมีกระแสทิศทางเป็นลบไหลอยู่ กระแสดังกล่าวจึงมีเส้นทางการไหลเช่นเดิม ทำให้โหลดเกือบเสมือนลัดวงจร และ แรงดันคร่อมโหลดจะมีค่าประมาณศูนย์โวลต์ ในช่วงเวลานี้ถึงแม้ว่ามอสเฟตกำลัง S_2 และ S_7 จะถูกขับนำให้สามารถนำกระแสได้ แต่จะไม่มีกระแสไหลผ่านมอสเฟตกำลังทั้งสองได้ เนื่องจากไดโอด D_A ถูกไบอัสกลับทาง โดยวงจรการไหลของกระแสจะเป็นดังรูปที่ 3.15

3.2.1.3 ช่วงเวลานี้เริ่มจาก $t = t_1$ ถึง $t = t_2$ ในช่วงเวลานี้วงจรขับนำ GS_2 จะมีสัญญาณมาขับนำมอสเฟตกำลัง S_2 และ S_7 ให้สามารถนำกระแสได้แต่ในความเป็นจริงมอสเฟตกำลังทั้ง 2 ตัวจะไม่สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากโหลดที่มีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำจะพยายามให้กระแสไหลในทิศทางเดิมคือเป็นลบ ดังนั้นกระแสโหลดดังกล่าวจึงต้องมีทิศทางการไหลย้อนกลับผ่าน ไดโอด DS_1 DS_2 DS_7 และไดโอด DS_8 ผ่านแหล่งจ่ายไฟตรงและตัวโหลดเอง ช่วงเวลานี้จะมีการคืนกำลังงานให้แก่แหล่งจ่ายไฟตรง ในช่วงเวลานี้จะพบว่าแรงดันคร่อมโหลดมีค่าเป็น 532 โวลต์ แต่กระแสจะมีค่าเป็นลบและมีขนาดลดลงดังในรูปที่ 3.14 วงจรการไหลของกระแสโหลดในช่วงเวลานี้จะเป็นดังรูปที่ 3.16

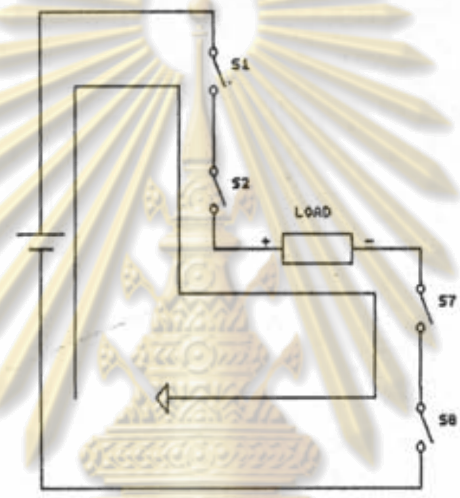


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.16 เส้นทางการไหลของกระแสในช่วงเวลา $t = t_1$ ถึง $t = t_2$

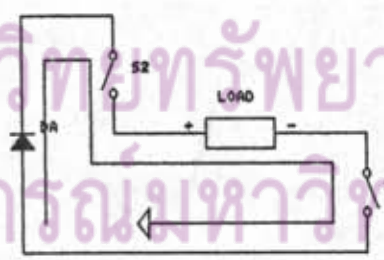
3.2.1.4 ช่วงเวลานี้เริ่มจาก $t = t_2$ ถึง $t = t_3$ ในช่วงเวลานี้วงจรขับนำจะมีสัญญาณไปขับนำให้มอสเฟตกำลัง S_1 S_2 S_7 และ S_8 นำกระแส แต่ในความเป็นจริงมอสเฟตกำลังทั้ง 4 ตัวจะไม่สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากคุณสมบัติของโหลดที่เป็น

ตัวเหนี่ยวนำ จะต้องพยายามให้กระแสมีทิศทางการไหลในทิศทางเดิม ดังนั้นกระแสดังกล่าวจึงต้องไหลผ่านไดโอดที่ต่อขนานอยู่ภายในมอสเฟตกำลัง คือไดโอด DS_1 DS_2 DS_7 และไดโอด DS_8 ผ่านแหล่งจ่ายไฟตรง และโหลดในช่วงเวลานี้จะมีการคืนกำลังงานให้แก่แหล่งจ่ายไฟตรง โดยแรงดันคร่อมโหลดจะมีค่า 532 โวลต์ ส่วนกระแสจะมีทิศทางเป็นลบและมีขนาดลดลง จนกระทั่งมีขนาดเป็นศูนย์แอมแปร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.14 โดยเส้นทางการไหลของกระแสโหลดจะเป็นดังรูปที่ 3.16 หลังจากที่กระแสโหลดมีค่าเป็นศูนย์แล้ว กระแสโหลดจะเริ่มมีทิศทางเป็นบวกเนื่องจากมอสเฟตกำลัง S_1 S_2 S_7 และ S_8 ถูกควบคุมให้สามารถนำกระแสได้ตั้งแต่เวลา t_2 ช่วงที่กระแสโหลดเริ่มเป็นบวกนี้จะมีเส้นทางการไหลของกระแสดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 เส้นทางการไหลของกระแสในช่วงเวลา $t = t_2$ ถึง $t = t_3$ เมื่อกระแสโหลดเป็นบวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

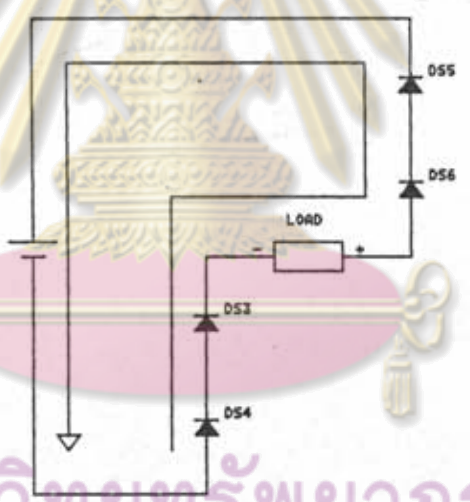


รูปที่ 3.18 เส้นทางการไหลของกระแสในช่วงเวลา $t = t_3$ ถึง $t = t_4$

3.2.1.5 ช่วงเวลาจาก $t = t_3$ ถึง $t = t_4$ ในช่วงเวลานี้วงจรขับนำจะมีสัญญาณไปขับนำมอสเฟตกำลัง S_2 S_7 ให้สามารถนำกระแส แต่เนื่องจากโหลดมี

ลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำจึงพยายามรักษาให้ทิศทางการไหลของกระแสมีทิศทางเดิม ดังนั้น เส้นทางที่กระแสไหลจะเป็น มอสเฟตกำลัง S_2 มอสเฟตกำลัง S_7 ไดโอด D_A และโหลดจะเห็นว่าในช่วงเวลานี้โหลดจะเกือบถูกโดนลัดวงจร แรงดันคร่อมโหลดจะมีค่าประมาณศูนย์โวลต์ โดยกระแสโหลดจะยังคงมีทิศทางการไหลเป็นบวก แต่มีขนาดลดลงซึ่งเป็นลักษณะจากตัวโหลด วงจรการไหลของกระแสในช่วงเวลานี้จะเป็นดังรูปที่ 3.18

3.2.1.6 ช่วงเวลานี้เริ่มจาก $t = t_4$ ถึง $t = t_5$ ในช่วงเวลานี้จะมีสัญญาณขับนำ GS_2 และ GS_3 ไปขับนำมอสเฟตกำลัง S_2 S_3 S_6 S_7 ให้สามารถนำกระแสเนื่องจากโหลดเป็นประเภทตัวเหนี่ยวนำจึงพยายามรักษาทิศทางการไหลให้มีทิศทางเดิม เส้นทางการไหลของกระแสโหลดในช่วงเวลานี้คือ มอสเฟตกำลัง S_2 S_7 ไดโอด D_A และโหลดในช่วงเวลานี้โหลดจะเสมือนถูกลัดวงจร ทำให้แรงดันคร่อมโหลดมีค่าประมาณศูนย์โวลต์ โดยกระแสโหลดในช่วงเวลานี้จะมีขนาดลดลง ดังรูปที่ 3.14 ส่วนเส้นทางการไหลของกระแสแสดงดังรูปที่ 3.18



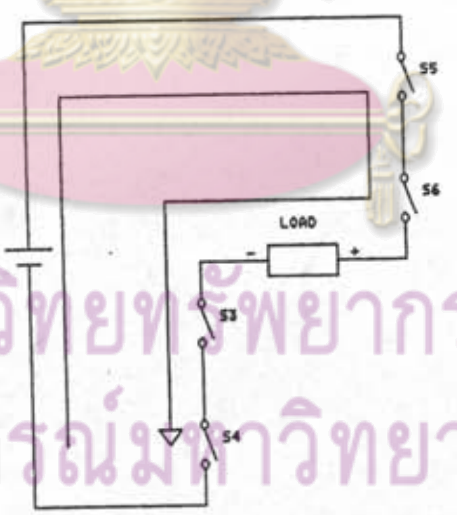
รูปที่ 3.19 เส้นทางการไหลของกระแสในช่วงเวลา $t = t_5$ ถึง $t = t_6$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.1.7 ช่วงเวลานี้เริ่มจากเวลา $t = t_5$ ถึง $t = t_6$ ในช่วงเวลานี้วงจรขับนำจะมีสัญญาณขับนำ GS_3 ไปขับนำมอสเฟตกำลัง S_3 และ S_6 ให้สามารถนำกระแสได้ แต่เนื่องจากโหลดมีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำจึงพยายามรักษาทิศทางการไหล ให้มีทิศทางเดิม กระแสโหลดจึงต้องไหลผ่านไดโอด DS_3 DS_4 DS_5 และไดโอด DS_6 ซึ่งต่อขนานอยู่ภายในมอสเฟตกำลัง S_3 S_4 S_5 และ S_6 ตามลำดับ แหล่งจ่ายไฟตรง และโหลด ในช่วง

เวลานี้ถ้าพิจารณาจะพบว่ากระแสโหลดจะไหลคืนพลังงานให้แก่แหล่งจ่ายไฟตรง ทำให้แรงดันที่คร่อมโหลดมีค่าเป็นลบขนาด 532 โวลต์ แต่ทิศทางของกระแสที่ไหลยังคงมีทิศทางเป็นบวกและมีขนาดลดลงดังแสดงในรูปที่ 3.14 เส้นทางการไหลของกระแสโหลดในช่วงเวลานี้ เป็นดังรูปที่ 3.19

3.2.1.8 ช่วงเวลานี้เริ่มจากเวลา $t = t_6$ ถึง $t = t_7$ ในช่วงเวลานี้จะมีสัญญาณขับนำ GS_3 และ GS_4 ไปขับนำมอสเฟตกำลัง S_3 S_4 S_5 และ S_6 แต่มอสเฟตกำลังทั้งสี่จะยังไม่สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากโหลดมีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำจึงพยายามที่จะรักษาทิศทางการไหลให้มีทิศทางเดิม กระแสโหลดจึงไหลผ่านไดโอดที่อยู่ภายในมอสเฟตกำลัง DS_3 DS_4 DS_5 และไดโอด DS_6 แหล่งจ่ายไฟตรงและโหลด ในช่วงนี้จะมีการคืนพลังงานให้แก่แหล่งไฟตรง และขนาดกระแสจะมีค่าลดลงจนกระทั่งมีขนาดเป็นศูนย์แอมแปร์ และแรงดันยังคงมีค่าเป็นลบเช่นเดิมดังรูปที่ 3.14 เมื่อกระแสมีค่าเป็นศูนย์แล้วมอสเฟตกำลัง S_3 S_4 S_5 และ S_6 จะสามารถเริ่มนำกระแสได้ เพราะแรงดันที่ขาเดรนของมอสเฟตกำลังที่กล่าวข้างต้น จะมีค่ามากกว่าแรงดันที่ขาซอร์ช และมอสเฟตกำลังดังกล่าวถูกสัญญาณขับนำให้สามารถนำกระแสได้ตั้งแต่เวลา $t = t_6$ ในช่วงเวลานี้แรงดันคร่อมโหลดจะมีค่าเป็นลบ และมีขนาดเป็น 532 โวลต์ ส่วนกระแสจะมีทิศทางเป็นลบเช่นเดียวกัน และ มีขนาดเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 3.14 และเส้นทางการไหลของกระแสโหลดในช่วงเวลานี้จะเป็นดังรูปที่ 3.20

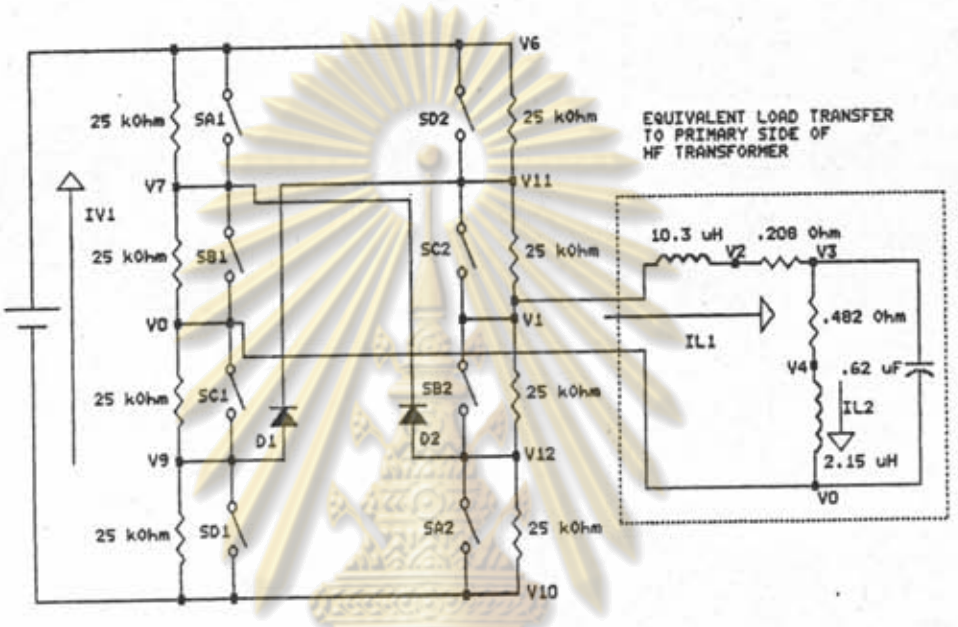


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.20 เส้นทางการไหลของกระแสในช่วงเวลา $t = t_6$ ถึง $t = t_7$ เมื่อกระแสโหลดเป็นลบ

3.2.2 ผลการชิมมูเลตวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ

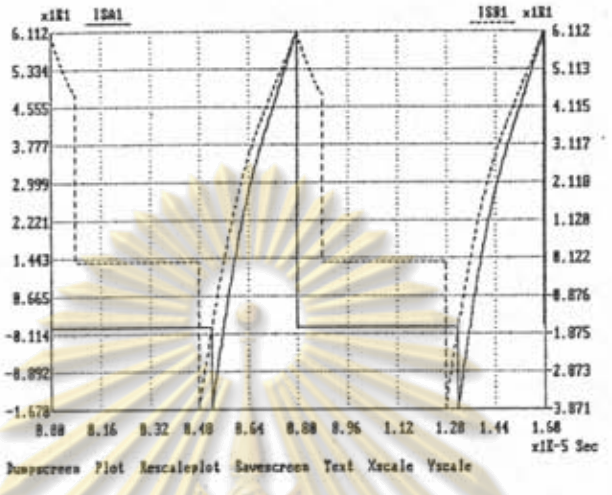
การชิมมูเลตวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะเพื่อศึกษา การทำงานของวงจรว่ากระแส และ แรงดัน ที่มอสเฟตกำลังและไดโอดแต่ละตัว มีรูปร่างและขนาดเป็นอย่างไร นอกจากนี้จะรวมทั้งการพิจารณา กระแสและแรงดันที่ผ่านหม้อแปลง และขดลวดให้ความร้อน วงจรที่ใช้ในการชิมมูเลตเป็นดังรูปที่ 3.21



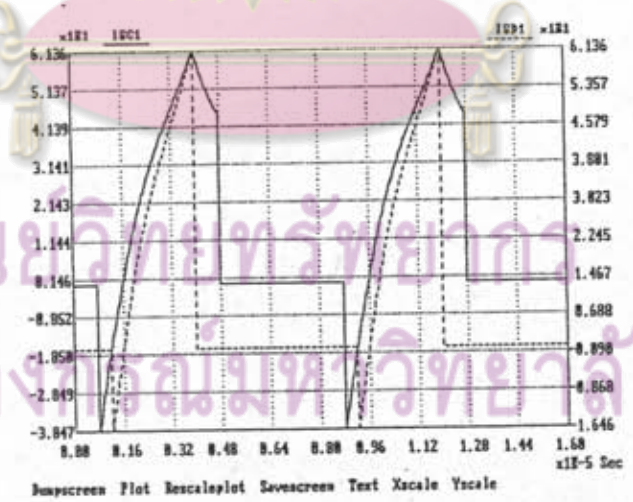
รูปที่ 3.21 วงจรที่ใช้ในการชิมมูเลตการทำงานของ
วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 3.21 โหลดของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะคือหม้อแปลงส่งผ่านกำลัง ขดลวดให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุชดเชยตัวประกอบกำลัง โดยค่าที่แสดงในรูปที่ 3.21 ได้จากการวัดค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ส่วนนั้น โดยเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ ที่ความถี่ 125 kHz ในการชิมมูเลตจะพิจารณาว่าหม้อแปลงที่ต่อขนานกันเป็นอุดมคติ สามารถพิจารณาเป็นหม้อแปลงชุดเดียวที่มีอิมพีแดนซ์ลดลงครึ่งหนึ่ง ผลการชิมมูเลตแสดงดังรูปที่ 3.22 ถึงรูปที่ 3.31

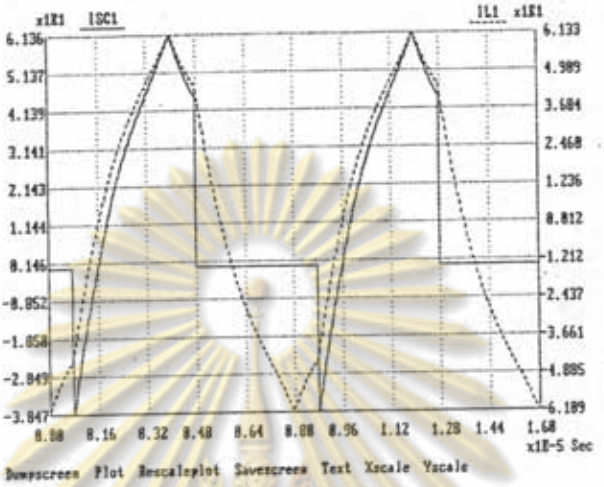


รูปที่ 3.22 กระแส ISA1 และ ISB1

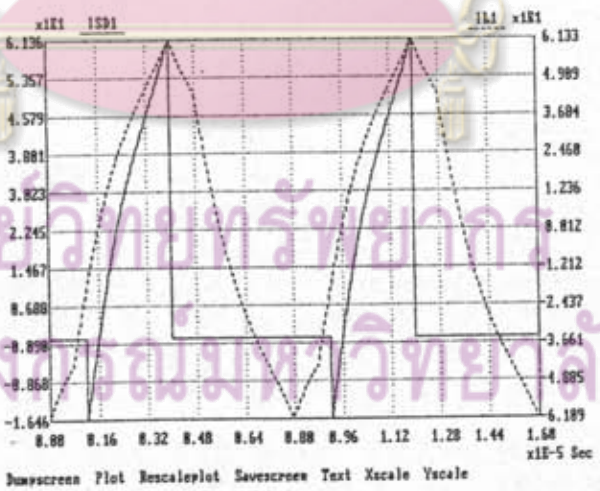


รูปที่ 3.23 กระแส ISC1 และ ISD1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

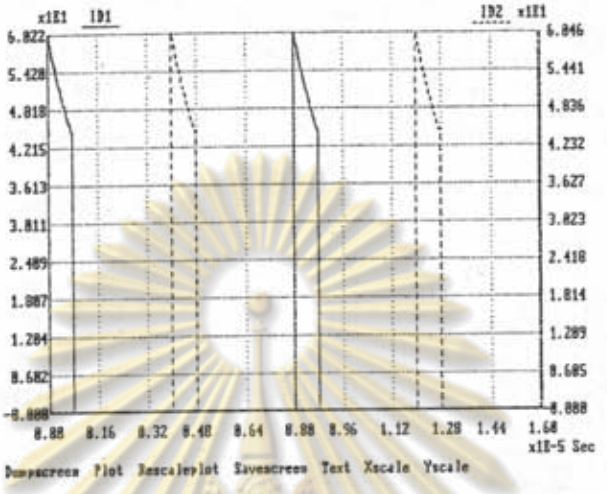


รูปที่ 3.24 กระแส ISC1 และ IL1

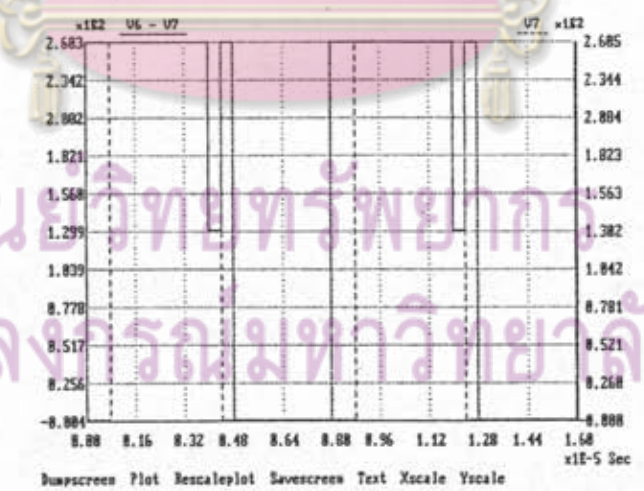


รูปที่ 3.25 กระแส ISD1 และ IL1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

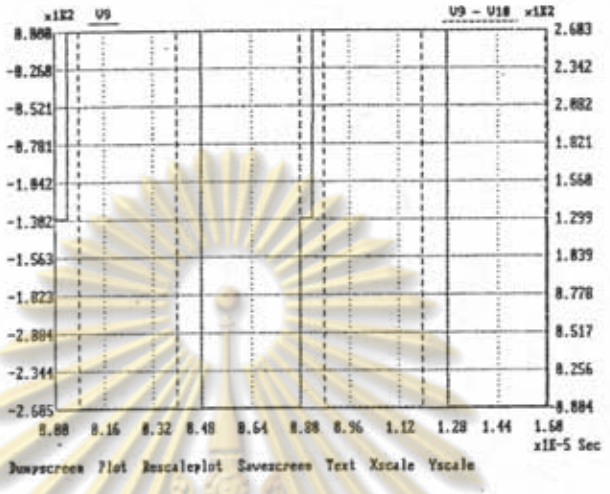


รูปที่ 3.26 กระแสไดโอด ID1 และ ID2

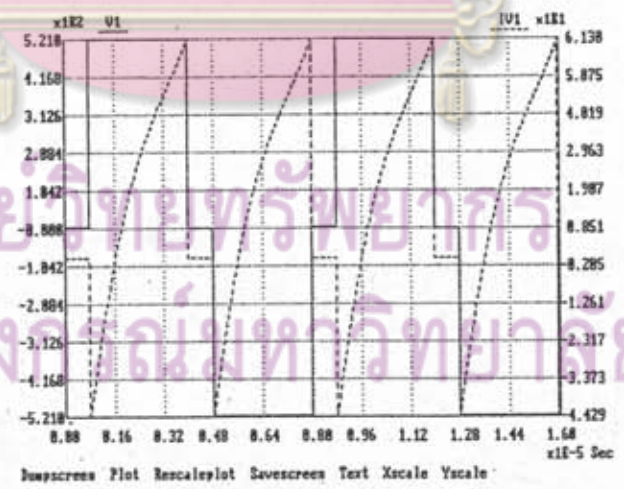


รูปที่ 3.27 แรงดันคร่อมมอสเฟตกำลัง SA1 และ SB1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

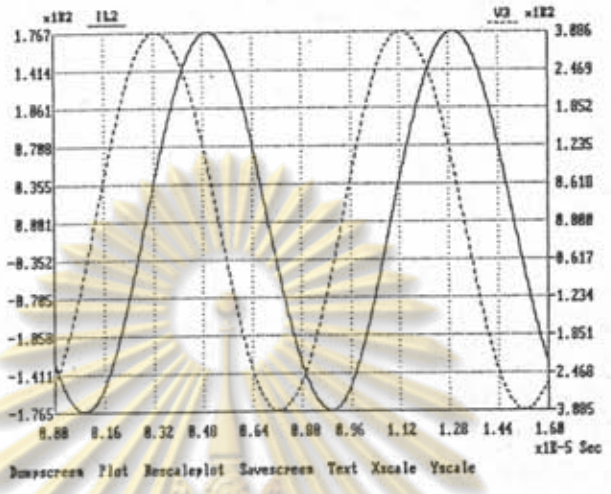


รูปที่ 3.28 แรงดันคร่อมมอสเฟตกำลัง SC1 และ SD1

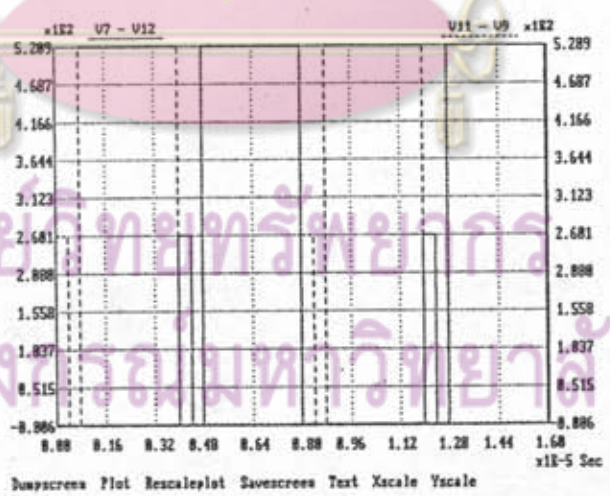


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.29 แรงดันขาออกสามสถานะและกระแสจากแหล่งจ่ายไฟตรง



รูปที่ 3.30 กระแสผ่านหม้อแปลงและกระแสผ่านขดลวดให้ความร้อน

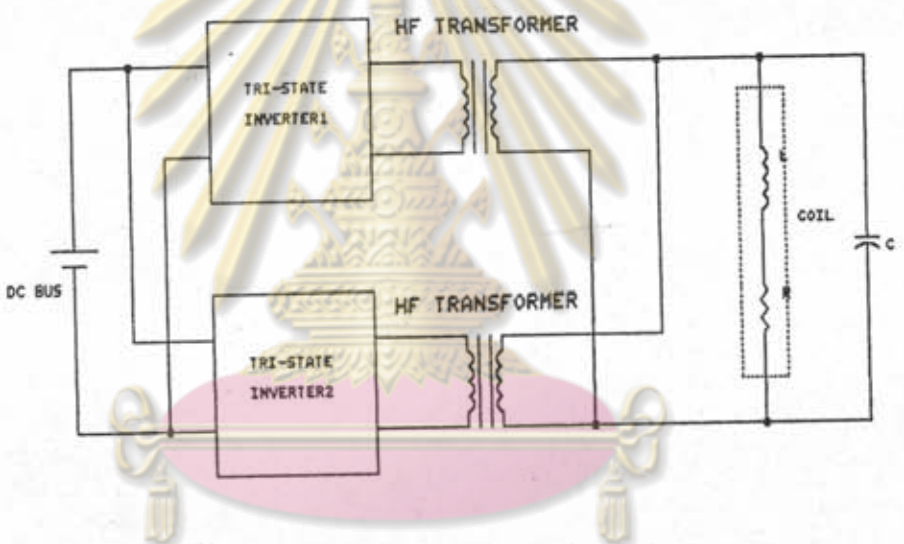


รูปที่ 3.31 แรงดันคร่อมไดโอด D1 และ D2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 หม้อแปลงแยกโดดความถี่สูงและส่งผ่านกำลัง

ส่วนที่3 ส่วนนี้จะประกอบด้วยหม้อแปลงความถี่สูงที่ใช้ในการส่งผ่านกำลังงานสองชุด โดยขดปฐมภูมิของหม้อแปลงแต่ละชุด จะต่อกับสัญญาณที่ออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะแต่ละชุดตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.32 ส่วนขดทุติยภูมิของหม้อแปลงแต่ละชุดจะต่อขนานกันและต่อเข้ากับโหลดดังแสดงในรูปที่ 3.32 ในกรณีนี้โหลดคือขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำพร้อมชิ้นงาน และ ตัวเก็บประจุปรับปรุงตัวประกอบกำลัง เนื่องจากในระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำต้องส่งผ่านกำลังจากหม้อแปลงความถี่สูงจำนวนมาก และในทางปฏิบัติไม่สามารถหาแกนหม้อแปลงความถี่สูงที่สามารถส่งผ่านกำลังงานในขนาดนี้ได้ จึงจำเป็นต้องใช้แกนหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่และสามารถหาซื้อได้ ต่อขนานหรือต่ออันดับเพื่อให้ความสามารถในการส่งผ่านกำลังงานรวมมีค่ามากขึ้นตามต้องการ



รูปที่ 3.32 การขนานวงจรอินเวอร์เตอร์สองชุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

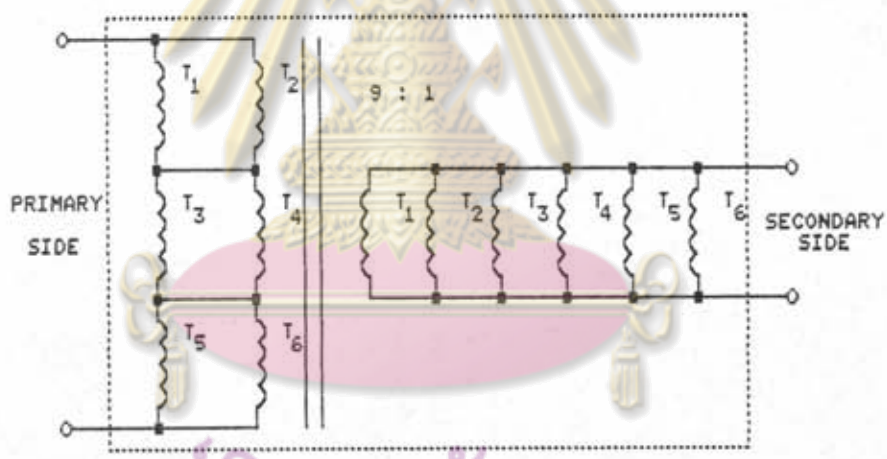
3.3.1 การคำนวณขนาดแกนหม้อแปลงและขนาดเส้นลวดตัวนำ

ในการคำนวณขนาดแกนของหม้อแปลงความถี่สูง จะพิจารณาในกรณีที่อาจมีการพัฒนาและเพิ่มกำลังของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวให้สูงขึ้น โดยยังสามารถใช้แกนหม้อแปลงเดิมได้ ในกรณีนี้จึงออกแบบขนาดแกนหม้อแปลงโดยประมาณว่าถ้ากำลังที่ชิ้นงานได้รับเป็น 10 กิโลวัตต์ และขดลวดให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงประมาณ 85 เปอร์เซนต์ กำลังที่ขดลวดให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำจะมีขนาด 11.76 กิโลวัตต์ และถ้าให้ประสิทธิภาพของหม้อแปลงความถี่สูงมีค่าประมาณ 95 เปอร์เซนต์ กำลังที่เข้าสู่ขดปฐมภูมิ

ของหม้อแปลงความถี่สูงจะมีขนาด 12.38 กิโลวัตต์

ดังที่กล่าวข้างต้นเนื่องจากระบบจะประกอบด้วย วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะและหม้อแปลงความถี่สูงสองชุด หม้อแปลงความถี่สูงแต่ละชุดต้องส่งผ่านกำลังงานขนาด 6.19 กิโลวัตต์ เนื่องจากกำลังงานขนาดนี้จะมีค่าสูง จึงต้องใช้หม้อแปลงขนาดเล็กที่สามารถหาได้ต่อร่วมกันเพื่อเพิ่มกำลังงาน จาก (Siemens Component Service, 1983) พบว่าหม้อแปลงความถี่สูงที่มีแกนขนาด EC-70 หนึ่งตัว สามารถส่งผ่านกำลังงานประมาณ 1 กิโลวัตต์ จึงประมาณว่าจะต้องใช้หม้อแปลงความถี่สูงแกนขนาด EC-70 จำนวน 6 ตัว ในการส่งผ่านกำลังงานสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะแต่ละชุด

เนื่องจากหม้อแปลงแต่ละชุดจะต้องมีอัตราการแปลงแรงดันเป็น 9:1 ดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 3.4.2.1 เพื่อให้สะดวกจึงออกแบบให้หม้อแปลงแต่ละตัวมีอัตราการแปลงแรงดันเป็น 3:1 และต่อหม้อแปลงทั้ง 6 ตัว ดังรูปที่ 3.33



ศูนย์วิทยทรัพยากร

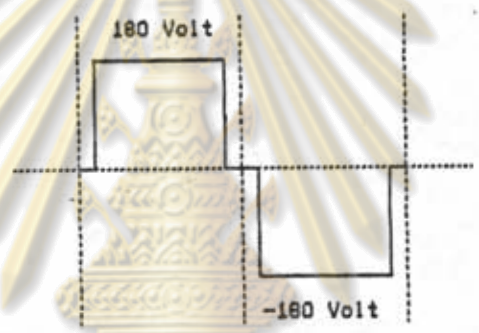
รูปที่ 3.33 การต่อหม้อแปลงให้อัตราการแปลงเป็น 9:1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

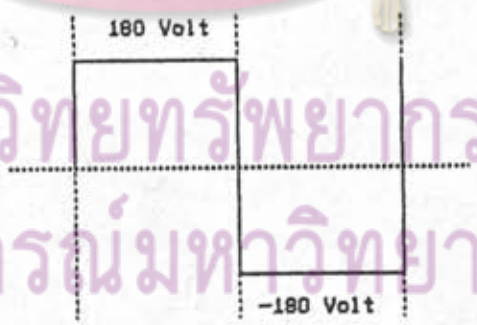
จากรูปที่ 3.33 เนื่องจากหม้อแปลงแต่ละตัวมีอัตราการแปลงแรงดันเป็น 3:1 จึงนำขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิของหม้อแปลงสองตัวเช่น T_1 และ T_2 ต่อขนานกันจะพบว่าอัตราการแปลงแรงดันของหม้อแปลงสองตัวดังกล่าวยังคงเป็น 3:1 เช่นเดิม จึงนำหม้อแปลงที่เหลืออีกสี่ตัวต่อให้เป็นหม้อแปลงสองชุดย่อยคือ T_3 กับ T_4 และ T_5 กับ T_6 ให้มีอัตราการแปลงแรงดันเป็น 3:1 จากนั้นนำขดปฐมภูมิของหม้อแปลงย่อยแต่ละชุดต่ออันดับกันและขดทุติยภูมิต่อขนานกันจะได้ดังรูปที่ 3.33 หม้อแปลงทั้งหกตัวจะมีอัตราการแปลงแรงดันรวมเป็น 9:1 แต่

สามารถส่งผ่านกำลังงานขนาด 6.19 กิโลวัตต์ได้

จากลักษณะการต่อหม้อแปลงดังกล่าว พบว่าขดปฐมภูมิของหม้อแปลงแต่ละตัวจะรับแรงดันเพียงหนึ่งในสามของแรงดันที่จ่ายให้แก่หม้อแปลงแต่ละชุด เนื่องจากแรงดันที่จ่ายให้แก่หม้อแปลงแต่ละชุดจะเป็นแบบสามสถานะแรงดันที่ปรากฏคร่อมขดปฐมภูมิของหม้อแปลงแต่ละตัวจะเป็นดังรูปที่ 3.34 เนื่องจากแรงดันที่คร่อมขดปฐมภูมิของหม้อแปลงแต่ละตัวเป็นแบบสามสถานะ ถ้าใช้รูปคลื่นแรงดันดังกล่าวในการคำนวณหาขนาดแกนของหม้อแปลง จะค่อนข้างยุ่งยาก จึงประมาณรูปคลื่นแรงดันที่คร่อมขดปฐมภูมิของหม้อแปลงแต่ละตัวให้เป็นคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีวัฏจักรงานเป็น 50 เปอร์เซนต์ดังแสดงในรูปที่ 3.35 ในการคำนวณขนาดของแกนหม้อแปลงจะใช้วิธี Area Product Approach (R.D. Middlebrook and Slobodan Cuk, 1983) ซึ่งมีสูตรในการคำนวณดังนี้



รูปที่ 3.34 แรงดันที่คร่อมขดปฐมภูมิของหม้อแปลงแต่ละตัว



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.35 แรงดันคร่อมขดปฐมภูมิของหม้อแปลงโดยประมาณ

$$Ap = ws = \frac{V_1 I_1 + V_2 I_2}{4kfB_m} \qquad (3.5)$$

$$Ap = ws = \frac{P}{2kfB_m} \qquad (3.6)$$

โดยที่ w คือพื้นที่ช่องหน้าต่างของแกนหม้อแปลง

s คือขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกนหม้อแปลง

P คือกำลังงานที่หม้อแปลงส่งผ่าน

k คือ Utilization Factor

f คือความถี่ที่ใช้งาน

J คือค่าความหนาแน่นกระแส

B_m คือความหนาแน่นฟลักซ์สนามแม่เหล็ก

3.3.1.1 การเลือค่าความหนาแน่นฟลักซ์สนามแม่เหล็ก

เนื่องจากหม้อแปลงที่ใช้ จะต้องใช้งานที่ความถี่สูงระดับร้อยกิโลเฮิรตซ์ การเลือกค่าความหนาแน่นของฟลักซ์สนามแม่เหล็กควรจะให้มีค่าค่อนข้างต่ำเพราะกำลังสูญเสียที่หม้อแปลงตามปกติสามารถแบ่งเป็น

3.3.1.1.1 การสูญเสียเนื่องจากลวดตัวนำ การสูญเสียชนิดนี้เกิดจากการนำไฟฟ้าของเส้นลวดตัวนำ โดยปกติขึ้นกับขนาดเส้นลวดตัวนำที่ใช้และปริมาณกระแสโหลด เนื่องจากที่ความถี่สูงๆ เส้นลวดตัวนำจะเกิดปรากฏการณ์ผิวทำให้พื้นที่หน้าตัดในการนำกระแสของเส้นลวดตัวนำมีขนาดเล็กลง ทำให้ความต้านทานเสมือนมีค่ามากขึ้น ในทางปฏิบัติอาจแก้ไขโดยใช้เส้นลวดตัวนำขนาดเล็กที่มีรัศมีน้อยกว่าความลึกผิวที่ความถี่ใช้งานหลายๆ เส้นขนานกันให้มีพื้นที่ในการนำกระแสเท่าเดิม จะสามารถลดผลของปรากฏการณ์ผิวได้

3.3.1.1.2 การสูญเสียในแกนหม้อแปลง การสูญเสียในแกนหม้อแปลงยังสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนและอีกส่วนคือการสูญเสียเนื่องจากฮีสเตอร์รีซีส ซึ่งกำลังงานที่สูญเสียในส่วนนี้จะแปรตามความถี่และค่าความหนาแน่นฟลักซ์สนามแม่เหล็ก เนื่องจากความถี่ที่ใช้ค่อนข้างสูงถ้าจะให้พลังงานสูญเสียส่วนนี้มีค่าต่ำแล้ว จะต้องให้ความหนาแน่นฟลักซ์สนามแม่เหล็กมีค่าต่ำ

ในทางปฏิบัติจึงเลือก $B_m = 0.09$ เทสลา

3.3.1.2 กำลังที่หม้อแปลงส่งผ่าน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เนื่องจากในระบบจะประกอบด้วยหม้อแปลงทั้งหมดหกตัว ต่ออินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะหนึ่งชุดแสดงว่าหม้อแปลงแต่ละตัวจะต้องส่งผ่านกำลังงานขนาด

$$P = 1.03 \text{ กิโลวัตต์}$$

3.3.1.3 Utilization Factor

Utilization Factor คือค่าประสิทธิภาพในการใช้ช่องหน้าต่างของหม้อแปลงในการพันขดลวด มีค่ามากสุดเป็นหนึ่ง และขึ้นกับวิธีการพันหม้อแปลงด้วย เนื่องจากในการออกแบบการพันหม้อแปลง จะพันในลักษณะแบบไบฟิลลาร์ คือพันขดปฐมภูมิและทุติยภูมิไปพร้อมกันให้ครบรอบในหนึ่งชั้น และขึ้นชั้นใหม่ก็พันลักษณะเดิมอีก เนื่องจากขดปฐมภูมิและทุติยภูมิ อยู่ใกล้กันมากจึงอาจเกิดปัญหาเนื่องจากความร้อนที่เกิดในลวดตัวนำ หรือปัญหาฉนวนของขดลวดไฟฟ้าอาจหลุดลอกขณะพัน เพื่อป้องกันมิให้เกิดปัญหาทางความร้อนและไฟฟ้าจึงใส่ปลอกฉนวนใยแก้วแก่ขดลวดทุติยภูมิและระหว่างชั้นมีแผ่นไมลาร์กั้นจึงทำให้ Utilization Factor ของหม้อแปลงที่ออกแบบมีค่าค่อนข้างต่ำ จึงให้มีขนาด

$$k = 0.24$$

3.3.1.4 ค่าความหนาแน่นกระแส

ปกติในการออกแบบจะให้ค่าความหนาแน่นกระแสมีค่าระหว่าง 250 A/cm^2 ถึง 1000 A/cm^2 ถ้าค่าความหนาแน่นกระแสมีค่ามากแสดงว่าในตัวนำที่มีขนาดเท่ากันจะให้กระแสไหลมากกว่า ทำให้การสูญเสียเนื่องจากเส้นลวดตัวนำมีค่ามากขึ้น กรณีนี้ให้

$$J = 500 \text{ แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร}$$

3.3.1.5 ความถี่ที่ใช้งาน

เนื่องจากในการออกแบบ ความถี่ที่ใช้งานช่วงแรกได้ออกแบบให้สามารถทำงานได้ในช่วง 100 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 140 กิโลเฮิรตซ์ จึงใช้ความถี่ 100 กิโลเฮิรตซ์ แทน แต่อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าถ้าจะใช้งานที่ความถี่สูงขึ้นหม้อแปลงดังกล่าวจะยังคงสามารถใช้การได้ โดยไม่ทำให้แกนร้อนมากนัก เพราะได้กำหนดให้ค่าความหนาแน่นของฟลักซ์สนามแม่เหล็กมีค่าค่อนข้างต่ำอยู่แล้ว

$$f = 100 \text{ กิโลเฮิรตซ์}$$

จากค่าตัวแปรที่กำหนดแทนค่าลงในสมการที่ (3.6) ได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$Ap = 47762 \text{ มม.}^4$$

จากค่า Ap ที่คำนวณได้พบว่าหม้อแปลงที่มีแกนขนาด EC-70 จะมีค่า Ap ใกล้เคียงที่สุดซึ่งเป็นไปตามที่คาดคะเนไว้ เมื่อได้ขนาดแกนหม้อแปลงแล้วจะทำการคำนวณจำนวนรอบที่พันและขนาดของเส้นลวดตัวนำที่ใช้จากสูตร

$$N_p = \frac{V_p}{4fsB_m} \quad (3.7)$$

$$N_s = \frac{N_p}{n} \quad (3.8)$$

$$Aw_p = \frac{kw_p}{N_p} \quad (3.9)$$

$$Aw_s = nAw_p \quad (3.10)$$

โดยที่ V_p คือค่าแรงดันยอดที่คร่อมขดปฐมภูมิมีขนาด 180 โวลต์

N_p คือจำนวนรอบของขดปฐมภูมิ

N_s คือจำนวนรอบของขดทุติยภูมิ

Aw_p คือพื้นที่หน้าตัดเส้นลวดตัวนำขดปฐมภูมิ

Aw_s คือพื้นที่หน้าตัดเส้นลวดตัวนำขดทุติยภูมิ

n คืออัตราส่วนการแปลงแรงดันของหม้อแปลงมีค่าเท่ากับ 3

และจาก(Siemens Component Service, 1983) แกนขนาด EC-70 จะมี s = 201 ตารางมิลลิเมตร

แทนค่าลงในสมการที่ (3.7) ได้ N_p เท่ากับ 25 รอบ แต่เนื่องจากต้องการให้อัตราการแปลงแรงดันเป็น 3 จึงให้ N_p มีค่าเป็น 27 รอบ เพื่อจะได้เป็นเลขลงตัวของ 3 และจำนวนรอบทางทุติยภูมิจะมีขนาด 9 รอบ ในการพันหม้อแปลงแต่ละตัวจะพันในลักษณะที่ใกล้เคียงกับแบบที่เรียกว่าไบฟิลลาร์ คือจะพันขดปฐมภูมิและทุติยภูมิขนานกันไปในแต่ละชั้นและพันให้เต็มแกนหม้อแปลง จากนั้นนำขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิมาต่อเพื่อให้อัตราการแปลงแรงดันเป็นไปตามที่ต้องการ การพันในลักษณะนี้จะมีข้อดีในการสามารถปรับเปลี่ยนอัตราการแปลงแรงดันของหม้อแปลงได้ค่อนข้างสะดวก

เนื่องจากแกน EC-70 จะมีพื้นที่ช่องหน้าต่างในการพันเส้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลวดตัวนำ w = 617 ตารางมิลลิเมตร และถ้าพิจารณาให้พื้นที่ช่องหน้าต่างในการพันลวดตัวนำของขดปฐมภูมิ และขดทุติยภูมิมีค่าเท่ากันแล้วแสดงว่า

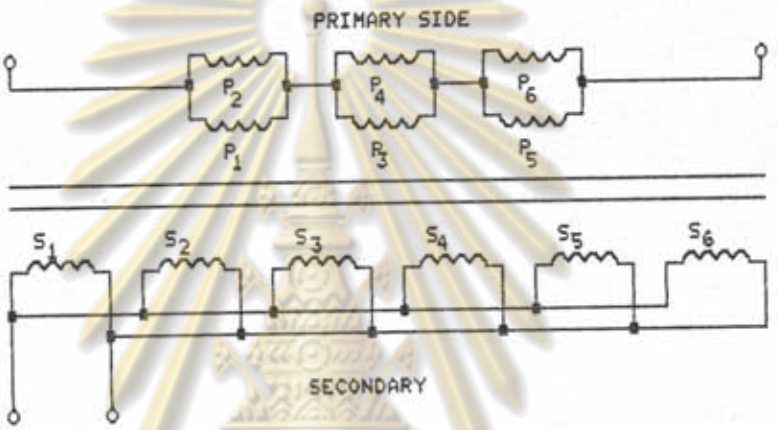
$$W_p = 309 \quad \text{ตารางมิลลิเมตร}$$

$$W_s = 309 \quad \text{ตารางมิลลิเมตร}$$

แทนค่าลงในสมการที่ (3.9) และสมการที่ (3.10) ได้

$$AW_p = 2.75 \quad \text{ตารางมิลลิเมตร}$$

$$AW_s = 8.25 \quad \text{ตารางมิลลิเมตร}$$



รูปที่ 3.36 การพันหม้อแปลงแต่ละตัวให้อัตราการแปลงเป็น 3:1

จากพื้นที่หน้าตัดของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิที่คำนวณได้จะพบว่ามีขนาดค่อนข้างใหญ่ ในทางปฏิบัติจะไม่ใช้ลวดตัวนำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดดังกล่าว เนื่องจากลวดตัวนำต้องนำกระแสความถี่สูง จึงเกิดปรากฏการณ์ผิวที่ลวดตัวนำดังที่อธิบาย เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว จึงใช้เส้นลวดตัวนำที่มีขนาดเล็กๆมาต่อขนานกัน เพื่อให้พื้นที่หน้าตัดในการนำกระแสเท่าเดิม ในการเลือกขนาดเส้นลวดตัวนำขนาดเล็ก จะให้รัศมีมีค่าเล็กกว่าความลึกผิวของทองแดงที่ความถี่ใช้งานที่ความถี่ 140 กิโลเฮิรตซ์ ทองแดงจะมีความลึกผิว 1.766×10^{-4} เมตร จึงเลือกใช้ลวดตัวนำ SWG#36 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1930 มิลลิเมตร และมีพื้นที่หน้าตัด 0.02927 ตารางมิลลิเมตร แสดงว่าต้องใช้ลวดตัวนำจำนวน 94 เส้นสำหรับขดปฐมภูมิเนื่องจากการพันจะใช้วิธีไบฟิลลาร์ จึงแบ่งเส้นลวดตัวนำออกเป็น 2 ชุดชุดละ 47 เส้น ส่วนขดทุติยภูมิจะต้องมีพื้นที่หน้าตัดในการนำกระแสเป็น 3 เท่าของขดปฐมภูมิ จึงใช้เส้นลวดตัวนำ SWG#36 จำนวน 47 เส้น 6 ชุดขนานกัน เนื่องจากพันเป็นแบบไบฟิลลาร์ จึงพันโดยใช้เส้นลวด SWG#36 47 เส้นต่อชุดจำนวน 2 ชุดพันขนานกันโดยชุดหนึ่งเป็นของขดทุติยภูมิและ

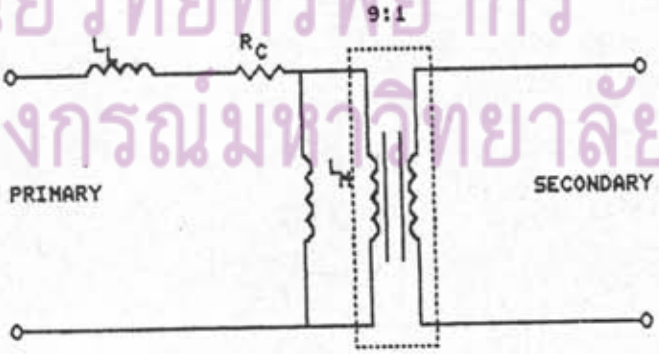
อีกชุดเป็นของขดปฐมภูมิ ซึ่งสามารถพันได้ 6 ชั้นและชั้นละ 9 รอบ เพื่อที่จะให้อัตราการแปลงเป็น 3:1 จึงต้องต่อหม้อแปลงแต่ละขดดังรูปที่ 3.36

จากขนาดขดลวดตัวนำที่เลือกใช้ จะพบว่าทางขดปฐมภูมิของหม้อแปลงแต่ละตัว จะมีเส้นลวดตัวนำ SWG#36 จำนวน 188 เส้น และมีพื้นที่ในการนำกระแสจำนวน 5.503 ตารางมิลลิเมตร จากที่กำหนดให้ความหนาแน่นกระแสมีค่า $5x10^{6}$ แอมแปร์ต่อตารางเมตร แสดงว่าขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงแต่ละชุดจะสามารถนำกระแสได้ 27.5 แอมแปร์ และขดทุติยภูมิของหม้อแปลงจะสามารถนำกระแสได้ 247.6 แอมแปร์ ถ้าพิจารณาทั้งระบบมีหม้อแปลงสองชุด จะสามารถจ่ายกำลังให้ขดลวดให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำได้ 495.25 แอมแปร์

3.3.2 การหาค่าวงจรสมมูลของหม้อแปลง

เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล ค่าความต้านทานเนื่องจากลวดตัวนำและค่าความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กของหม้อแปลง จะมีผลต่อการทำงานของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ จึงจำเป็นต้องวัดค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ ในการวัดค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะวัดโดยเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ซึ่งสามารถวัดค่าได้ตามความถี่ที่ต้องการ ถ้าให้วงจรสมมูลของของหม้อแปลงแต่ละชุดเป็นดังรูปที่ 3.37 จะสามารถวัดค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล และความต้านทานเนื่องจากลวดตัวนำเมื่อเทียบกับภาคปฐมภูมิ โดยการลัดวงจรที่ขดทุติยภูมิ แล้ววัดค่าอิมพีแดนซ์ที่ขดปฐมภูมิ ส่วนค่าความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก สามารถวัดโดยเปิดวงจรขดลวดทุติยภูมิและวัดค่าอิมพีแดนซ์ทางขดปฐมภูมิ ผลการวัดค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงทั้งสองชุดแสดงดังตารางที่ 3.3 และ ตารางที่ 3.4 ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.37 วงจรสมมูลของหม้อแปลงแต่ละชุด

จากผลการวัดค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงทั้งสองชุด จะพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้ใกล้เคียงกันพอสมควร ถ้าค่าพารามิเตอร์แตกต่างกันมากจะทำให้การแบ่งกระแสของหม้อแปลงและอินเวอร์เตอร์แต่ละชุดมีค่าไม่เท่ากัน ถ้าหม้อแปลงและอินเวิร์เตอร์ชุดใดรับภาระกระแสโหลดมากเกินขนาดอาจทำให้อินเวอร์เตอร์ชุดนั้นเสียหายได้ ถ้าพิจารณาค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลที่วัดได้ จะพบว่าค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลงแต่ละชุดจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น ส่วนค่าความต้านทานเนื่องจากลวดตัวนำจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

ความถี่ (kHz)	ความเหนี่ยวนำรั่วไหล (uH)	ความต้านทานเนื่องจากลวดตัวนำ (Ohm)	ความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก(mH)
120	5.347	0.253	5.237
125	5.369	0.259	5.55
130	5.365	0.265	6.244
135	5.361	0.271	7.434
140	5.358	0.278	14.90
145	5.354	0.283	20.60

ตารางที่ 3.3 ผลการวัดค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงแยกโดดและส่งผ่านกำลังชุดที่ 1

ความถี่ (kHz)	ความเหนี่ยวนำรั่วไหล (uH)	ความต้านทานเนื่องจากลวดตัวนำ (Ohm)	ความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก(mH)
120	5.853	0.228	5.35
125	5.850	0.233	5.6
130	5.847	0.238	6.5
135	5.844	0.244	7.43
140	5.841	0.249	15.2
145	5.836	0.260	20.86

ตารางที่ 3.4 ผลการวัดค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงแยกโดดและส่งผ่านกำลังชุดที่ 2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อความถี่สูงขึ้น และความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กของหม้อแปลงแต่ละชุด จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น ถ้าพิจารณาค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล และค่าความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กของหม้อแปลงที่ความถี่ใดๆ จะพบว่าค่าความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กจะมีค่ามากกว่าค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลเป็นอันมาก จึงอาจละเลยค่าความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กออกจากวงจรสมมูลได้

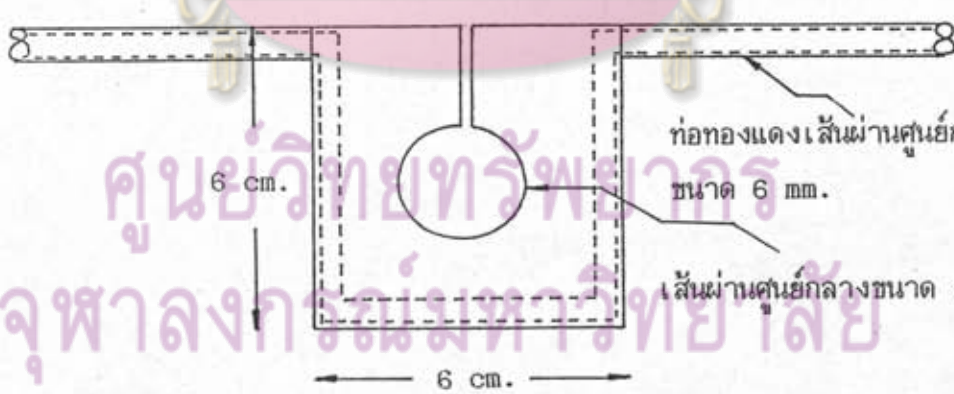
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กและตัวเก็บประจุปรับปรุงตัวประกอบกำลัง

เนื่องจากขดลวดให้ความร้อนหรือขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก และ ตัวเก็บประจุจะมีกระแสไหลผ่านเป็นจำนวนมาก ในการออกแบบจึงต้องคำนึงถึง เรื่องการระบายความร้อนและการเชื่อมต่อระหว่างขดลวดให้ความร้อน ตัวเก็บประจุ และขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงให้เกิดความร้อนน้อยที่สุด เนื้อหาในส่วนนี้จึงเกี่ยวข้องกับทางกลเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจะไม่ขอกล่าวรายละเอียดทางกล แต่จะกล่าวถึงรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับทางไฟฟ้าเป็นหลัก โดยสามารถแบ่งเป็น

3.4.1 ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก

ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่ออกแบบเป็นแบบง่าย คือเป็นขดเดียวเพราะต้องการเพิ่มค่าของกำลังต่อพื้นที่ผิว ขดลวดทำจากทองแดงตันมีขนาดหนา 6 มิลลิเมตร เจาะรูตรงกลางเพื่อให้เป็นรูสำหรับชิ้นงานโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มิลลิเมตร ปกติที่ขดลวดให้ความร้อนจะมีความร้อนค่อนข้างสูง เนื่องจากกระแสที่ผ่านขดลวดให้ความร้อนจะมีปริมาณมาก และยังได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีจากชิ้นงานด้วย ขดลวดให้ความร้อนจึงไม่สามารถระบายความร้อนออกได้รวดเร็วพอ ในทางปฏิบัติจึงต้องใช้น้ำช่วยในการระบายความร้อนออกจากขดลวด ขดลวดที่ออกแบบจะมีรูให้น้ำสามารถไหลระบายความร้อนได้ ขดลวดให้ความร้อนที่สร้างขึ้นแสดงดังรูปที่ 3.38



รูปที่ 3.38 รูปร่างของขดลวดให้ความร้อน

จากรูปจะพบว่ามีท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตรเชื่อมติดกับขดลวดที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นทางให้น้ำเข้าและออก การใช้น้ำช่วยระบายความร้อนขณะทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ใช้ปั๊มสูบหอยโข่งที่มีพิกัดดังนี้

กำลัง 0.45 แรงม้า

หัวน้ำ 42 - 7 เมตร

อัตราการไหล 5 - 40 ลิตรต่อวินาที

3.4.1.1 การคำนวณวงจรสมมูลของขดลวดให้ความร้อน

จากขนาดของขดลวดให้ความร้อน สามารถคำนวณวงจรสมมูล โดยพิจารณาตามหัวข้อที่ 2.5 เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณมีดังนี้

d_c = 22 มิลลิเมตร

d_w = 20 มิลลิเมตร

l_c = 6 มิลลิเมตร

f = 130 กิโลเฮิรตซ์

k_r = 1.15

μ_c = 1

μ_w = 9.4 (ก่อนถึงอุณหภูมิกูรี)

ρ_c = 2.044×10^{-8} โอห์ม-เมตร (ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส)

ρ_w = 1.03×10^{-6} โอห์ม-เมตร(ที่อุณหภูมิ 740 องศาเซลเซียส)

ρ_w = 1.688×10^{-7} โอห์ม-เมตร(ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส)

δ_c = 1.996×10^{-4} เมตร (ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส)

δ_w = 4.62×10^{-4} เมตร (ที่อุณหภูมิ 740 องศาเซลเซียส)

δ_w = 1.87×10^{-4} เมตร (ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส)

A_c = 6.597×10^{-1} ตารางเซนติเมตร

A_{cn} คือพื้นที่หน้าตัดของขดลวดขณะไร้โหลด = 3.801 ตารางเซนติเมตร

เนื่องจาก $\frac{d_w}{\delta_w}$ มีค่ามากกว่า 8 แสดงว่า

p = 0.045 ที่อุณหภูมิ 740 องศาเซลเซียส

p = 0.0185 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

q = 0.045 ที่อุณหภูมิ 740 องศาเซลเซียส

q = 0.0185 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

K = 171.073 โอห์มต่อตารางเมตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

และสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์สมมูลของขดลวดให้ความร้อนได้ดังนี้

R_w = 0.0227 โอห์ม (ที่อุณหภูมิ 740 องศาเซลเซียส)

R_w = 9.346×10^{-3} โอห์ม (ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส)

R_c = 1.357×10^{-3} โอห์ม (ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส)

X_w = 0.0227 โอห์ม (ที่อุณหภูมิ 740 องศาเซลเซียส)

L_w = 0.0278 ไมโครเฮนรี

X_w = 9.346×10^{-3} โอห์ม (ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส)

L_w = 0.0114 ไมโครเฮนรี

X_c = 1.357×10^{-3} โอห์ม (ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส)

L_c = 1.661 นาโนเฮนรี

X_g = 1.129×10^{-2} โอห์ม

L_g = 13.82 นาโนเฮนรี

L_{gn} = 79.63 นาโนเฮนรี

L_{gn} คือความเหนี่ยวนำของขดลวดขณะไร้โหลด

ซึ่งวงจรสมมูลย์ของขดลวดให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำพร้อมชิ้นงาน ที่เป็นเหล็กผสมคาร์บอนสามารถคำนวณได้ดังรูปที่ 3.39

รูปที่ 3.39 วงจรสมมูลของขดลวดให้ความร้อนที่ภาวะต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยที่ $R_{eq} = R_c + R_w$ = 24.057 มิลลิโอห์ม (ที่ 740 องศาเซลเซียส)

= 10.703 มิลลิโอห์ม (ที่ 30 องศาเซลเซียส)

$L_{eq} = L_g + L_c + L_w$ = 43.28 นาโนเฮนรี (ที่ 740 องศาเซลเซียส)

= 26.88 นาโนเฮนรี (ที่ 30 องศาเซลเซียส)

โดยที่ $R_{eq} = R_c$ = 1.357 มิลลิโอห์ม (ที่ภาวะไร้โหลด)

$L_{eq} = L_{gn} + L_c$ = 81.29 นาโนเฮนรี (ที่ภาวะไร้โหลด)

จากที่คำนวณข้างต้น เป็นการคำนวณโดยสมมติขดลวดให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำเป็นอุดมคติ คือ ขดลวดยาวมากๆ การกระจายของฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่คล้องผ่านอากาศขณะมีชิ้นงาน และไม่มีชิ้นงาน มีลักษณะสม่ำเสมอ และขนาดหรือรูปร่างของขดลวดให้ความร้อนไม่มีผลต่อการกระจายฟลักซ์สนามแม่เหล็กแต่ในทางปฏิบัติลักษณะของขดลวดให้ความร้อนจะมีผลต่อการกระจายของฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่คล้องผ่านแกนอากาศ ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้อาจผิดพลาดได้ ในที่นี้จึงทำการคำนวณเฉพาะส่วนความเหนี่ยวนำเนื่องจากแกนอากาศใหม่โดยการคำนวณจะอ้างอิงตามสูตรพื้นฐาน(Kjeld Thorborg, 1985) ในหัวข้อที่2.5 ลักษณะของขดลวดให้ความร้อนจะมีผลต่อการกระจายฟลักซ์สนามแม่เหล็ก จากรูปร่างของขดลวดให้ความร้อนสามารถคำนวณค่าความเหนี่ยวนำได้ดังนี้

d = 3.6 เซนติเมตร

γ = 0.1667

β = 0.3889

λ = 0.9593 ไมโครเฮนรีต่อเมตร

L_{gn} = 34.5 นาโนเฮนรี

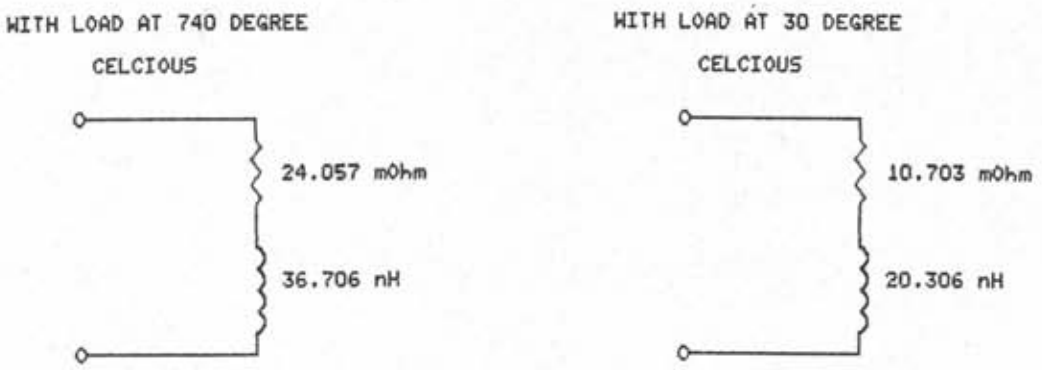
เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำที่คำนวณได้เป็นค่าความเหนี่ยวนำในช่องอากาศทั้งหมดซึ่งเปรียบเสมือนค่าความเหนี่ยวนำจากแกนอากาศ ในกรณีที่ขดลวดให้ความร้อนไม่มีชิ้นงานอยู่ ถ้าในช่วงที่มีชิ้นงาน ค่าความเหนี่ยวนำเนื่องจากแกนอากาศจะลดลงอีก เพราะพื้นที่หน้าตัดที่ฟลักซ์สนามแม่เหล็กคล้องผ่านจะลดลง ซึ่งอาจประมาณค่าความเหนี่ยวนำจากแกนอากาศขณะมีชิ้นงานได้ดังนี้

$L_g = 0.0345 \times [A_g / A_{gn}]$ ไมโครเฮนรี

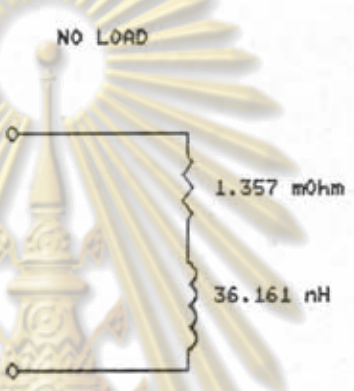
L_g = 7.245 นาโนเฮนรี

ดังนั้นวงจรสมมูลที่แก้ไขแล้วจะเป็นดังรูปที่ 3.40 ในขณะไม่มีโหลด และเมื่อมีโหลดวงจรสมมูลจะเป็นดังรูปที่ 3.41

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.40 วงจรสมมูลของขดลวดให้ความร้อนขณะไร้โหลด



รูปที่ 3.41 วงจรสมมูลของขดลวดให้ความร้อนขณะมีโหลด

3.4.1.2 ค่าพารามิเตอร์ของขดลวดให้ความร้อนจากการวัด

จากค่าพารามิเตอร์ของขดลวดให้ความร้อน จากการคำนวณเป็นเพียงค่าที่ได้จากทฤษฎี ในทางปฏิบัติจะทำการวัดค่าพารามิเตอร์สมมูลของขดลวดให้ความร้อนและชิ้นงานโดยตรงโดยใช้เครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์วัดซึ่งสามารถวัดค่าอิมพีแดนซ์ได้ที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้จะเป็นค่าที่อุณหภูมิห้อง แต่ในขณะที่ชิ้นงานได้รับความร้อนคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแม่เหล็กของชิ้นงานจะเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้จะเป็นเพียงแนวโน้มเท่านั้น ถ้าต้องการค่าพารามิเตอร์ที่อุณหภูมิอื่น อาจต้องพิจารณาตามความสัมพันธ์ที่ได้จากการคำนวณ โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดเป็นค่าอ้างอิงที่อุณหภูมิห้อง

ในการวัดค่าพารามิเตอร์ของขดลวด จะวัดในขณะที่ขดลวดให้ความร้อนไม่มีโหลด และ ในขณะที่ขดลวดให้ความร้อนมีโหลดเป็นชิ้นงานทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2 เซนติเมตร ในการทดลองจะเลือกเหล็กผสมคาร์บอนที่มีเปอร์เซนต์ต่างๆ กัน 4 ชนิดโดยเหล็กแต่ละชนิดมีคุณสมบัติดังนี้

เหล็กชนิดที่ 1 มีชื่อทางการค้าว่าเหล็กแดง หรือ S50C มีส่วนประกอบดังนี้ คาร์บอน 0.5 เปอร์เซนต์ ซิลิกอน 0.25 เปอร์เซนต์ แมงกานีส 0.75 เปอร์เซนต์ โครเมียม 0.030 เปอร์เซนต์ และโมลิบดินัม 0.035 เปอร์เซนต์ ใช้ทำอะไหล่

เหล็กชนิดที่ 2 มีชื่อทางการค้า S45C มีส่วนประกอบดังนี้ คาร์บอน 0.45 เปอร์เซนต์ ซิลิกอน 0.25 เปอร์เซนต์ แมงกานีส 0.75 เปอร์เซนต์ โครเมียม 0.030 เปอร์เซนต์ และ โมลิบดินัม 0.035 เปอร์เซนต์ ใช้ทำอะไหล่ทั่วไป

เหล็กชนิดที่ 3 มีชื่อทางการค้าว่าเหล็กฟ้า หรือ SCM4 มีส่วนประกอบดังนี้ คาร์บอน 0.40 เปอร์เซนต์ ซิลิกอน 0.25 เปอร์เซนต์ แมงกานีส 0.8 เปอร์เซนต์ โครเมียม 1.0 เปอร์เซนต์ และ โมลิบดินัม 0.20 เปอร์เซนต์ ใช้ทำเพลา เฟือง และข้อเหวี่ยง

เหล็กชนิดที่ 4 มีชื่อทางการค้าว่าเหล็กเขียวหรือ SCM21 มีส่วนประกอบดังนี้ คาร์บอน 0.15 เปอร์เซนต์ ซิลิกอน 0.25 เปอร์เซนต์ แมงกานีส 0.80 เปอร์เซนต์ โครเมียม 1.0 เปอร์เซนต์ และโมลิบดินัม 0.20 เปอร์เซนต์ ใช้ทำเพลา และเฟือง

ความถี่ (kHz)	ความเหนี่ยวนำ (nH)	ความต้านทาน (mOhm)	มุมประกอบกำลัง (Degree)
80	28.051	0.5	87.97
90	27.764	0.6	87.81
100	27.852	0.6	88.04
110	27.924	0.7	87.92
120	27.852	0.7	88.09
130	27.791	0.8	87.97
140	27.738	0.7	88.36
150	27.693	0.8	88.24

ตารางที่ 3.5 ผลการวัดค่าพารามิเตอร์ของขดลวดให้ความร้อนที่ภาวะไร้โหลด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความถี่ (kHz)	ความเหนี่ยวนำ (nH)	ความต้านทาน (mOhm)	มุมประกอบกำลัง (Degree)
80	28.648	4.2	73.74
90	28.117	4.6	73.86
100	27.534	5.0	73.88
110	27.201	5.4	73.97
120	26.658	5.8	73.90
130	26.322	6.1	74.61
140	25.92	6.4	74.32
150	25.677	6.7	74.52

ตารางที่ 3.6 ผลการวัดค่าพารามิเตอร์ของขดลวดให้ความร้อนที่ภาวะโหลดชนิดที่ 1

ความถี่ (kHz)	ความเหนี่ยวนำ (nH)	ความต้านทาน (mOhm)	มุมประกอบกำลัง (Degree)
80	28.70	4.2	73.77
90	26.922	4.4	73.88
100	27.054	4.9	73.92
110	27.207	5.4	73.98
120	26.67	5.7	74.17
130	26.327	6.0	74.41
140	25.96	6.4	74.34
150	25.681	6.6	74.52

ตารางที่ 3.7 ผลการวัดค่าพารามิเตอร์ของขดลวดให้ความร้อนที่ภาวะโหลดชนิดที่ 2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความถี่ (kHz)	ความเหนี่ยวนำ (nH)	ความต้านทาน (mOhm)	มุมประกอบกำลัง (Degree)
80	27.852	3.8	74.81
90	26.88	4.2	75.07
100	26.579	4.6	74.60
110	26.333	5.0	74.64
120	25.863	5.3	74.79
130	25.342	5.6	74.86
140	25.124	5.8	75.29
150	24.828	6.2	75.16

ตารางที่ 3.8 ผลการวัดค่าพารามิเตอร์ของขดลวดให้ความร้อนที่ภาวะโหลดชนิดที่ 3

ความถี่ (kHz)	ความเหนี่ยวนำ (nH)	ความต้านทาน (mOhm)	มุมประกอบกำลัง (Degree)
80	25.664	3.5	74.82
90	24.934	3.8	74.92
100	24.51	4.2	74.74
110	24.307	4.6	74.69
120	24.138	4.8	75.23
130	23.751	5.1	75.27
140	23.532	5.3	75.64
150	23.237	5.5	75.90

ตารางที่ 3.9 ผลการวัดค่าพารามิเตอร์ของขดลวดให้ความร้อนที่ภาวะโหลดชนิดที่ 4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

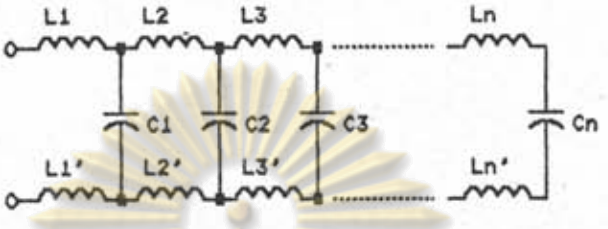
จากการวัด สามารถสรุปผลได้ดังตารางที่ 3.5 ถึงตารางที่ 3.9 โดยตารางที่ 3.5 แสดงผลการวัดค่าพารามิเตอร์ที่ภาวะไม่มีโหลด และตารางที่ 3.9 แสดงผลการวัดค่าพารามิเตอร์เมื่อมีโหลดเป็นชนิดที่ 4 ส่วนโหลดชนิดอื่นจะเรียงตามลำดับจากตารางที่ 3.6 ถึงตารางที่ 3.8 ถ้าพิจารณาผลการวัดค่าพารามิเตอร์ที่ได้พบว่าค่าความเหนี่ยวนำสมมูลที่วัดได้มีแนวโน้มมีค่าลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น ส่วนค่าความต้านทานสมมูลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น และมุมประกอบกำลังของขดลวดให้ความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามค่าความเหนี่ยวนำสมมูลของขดลวดให้ความร้อนจะลดลงไม่มากนักเมื่อความถี่สูงขึ้น แต่ค่าความต้านทานจะเพิ่มขึ้นค่อนข้างมากเมื่อความถี่สูงขึ้น ในสภาวะไม่มีโหลดค่าความต้านทานสมมูลจะค่อนข้างต่ำ เพราะมีเพียงค่าความต้านทานจากขดลวดให้ความร้อน เมื่อมีโหลดในขดลวดให้ความร้อนค่าความต้านทานที่วัดได้จะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากผลของตัวโหลด และพบว่าพารามิเตอร์สมมูลของโหลดแต่ละชนิดมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากโหลดแต่ละชนิดมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแม่เหล็กที่แตกต่างกัน ถ้าพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณและการวัดจะพบว่า ค่าความเหนี่ยวนำจะใกล้เคียงกัน ส่วนค่าความต้านทานจะต่างกันพอสมควร สาเหตุที่ต่างกันอาจเนื่องจากไม่สามารถหา ค่าสภาพความต้านทาน และความชิมชาบของชิ้นงานได้ ในการคำนวณจึงอ้างอิงจาก (John Devies and Peter Simpson, 1979)

3.4.2 ตัวเก็บประจุชดเชยตัวประกอบกำลัง

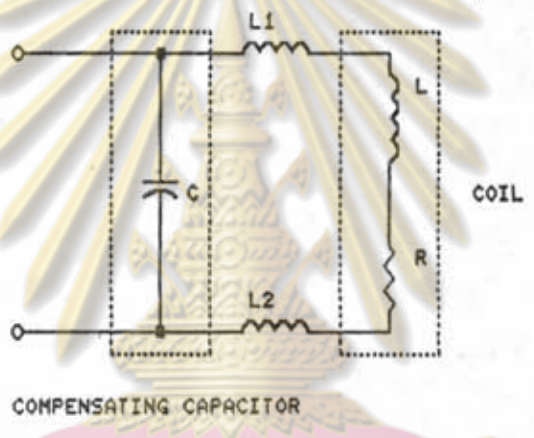
จากผลการวัดและการคำนวณวงจรสมมูลของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กพบว่าวงจรสมมูลจะมีตัวต้านทานต่ออันดับกับตัวเหนี่ยวนำ มุมประกอบกำลังของขดลวดให้ความร้อนจะเป็นแบบล้าหลังค่อนข้างมาก และในสภาวะไม่มีโหลดมุมประกอบกำลังจะมีค่าเพิ่มขึ้นอีก นอกจากนี้ที่ความถี่สูงมุมประกอบกำลังของขดลวดให้ความร้อน จะมีค่าล้าหลังมากกว่าที่ความถี่ต่ำ เนื่องจากมุมประกอบกำลังของระบบมีค่าค่อนข้างมาก ทำให้ตัวประกอบกำลังของขดลวดให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำมีค่าต่ำ จึงต้องใช้กำลังปรากฏที่ให้แก่ขดลวดให้ความร้อนเป็นปริมาณมาก และยังมีผลให้หม้อแปลงแยกโดดและส่งผ่านกำลังต้องมีขนาดกำลังปรากฏที่สูง เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงต้องใส่ตัวเก็บประจุชดเชยตัวประกอบกำลังให้แก่ขดลวดให้ความร้อน ในกรณีนี้จะใส่ตัวเก็บประจุขนานกับขดลวดให้ความร้อน เนื่องจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่คร่อมขดลวดให้ความร้อนจะมีความถี่ค่อนข้างสูง ดังนั้นตัวเก็บประจุที่เลือกใช้จะต้องสามารถใช้งานได้ที่ความถี่สูง นอกจากนี้ตัวเก็บประจุดังกล่าวยังต้องมีความต้านทานอนุกรมสมมูลต่ำด้วย เพราะความต้านทานสมมูลดังกล่าวจะเป็นสาเหตุให้ตัวเก็บประจุเกิดความร้อนขึ้น เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีปริมาณมากเพื่อชดเชยตัวประกอบกำลังของขดลวดให้ดีขึ้น นอกจาก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเลือกชนิด พิกัดแรงดันและกระแสให้เหมาะสมแล้ว ยังต้องออกแบบการขนานตัวเก็บประจุให้เหมาะสมเนื่องจากตัวเก็บประจุที่ใช้งานที่ความถี่สูงจะมีค่าต่ำ แต่ค่าความเก็บประจุที่ต้องการจะมีค่าสูง จึงต้องต่อตัวเก็บประจุขนาดเล็กขนานกัน ถ้าต่อตัวเก็บประจุเหล่านี้ขนานกันโดยใช้เส้นลวดตัวนำ เส้นลวดตัวนำเหล่านี้จะประพฤติตัวเป็นเสมือนตัวเหนี่ยวนำ ทำให้วงจรสมมูลเป็นดังรูปที่ 3.42



รูปที่ 3.42 ผลของลวดตัวนำที่ใช้ในการขนานตัวเก็บประจุปรับปรุงตัวประกอบกำลัง



รูปที่ 3.43 ความเหนี่ยวนำซึ่งอาจเกิดขึ้นในกรณีที่ขดลวดให้ความร้อนและตัวเก็บประจุอยู่ห่างกันและมีช่องอากาศให้ ฟลักซ์สนามแม่เหล็กสามารถคล้องผ่านได้

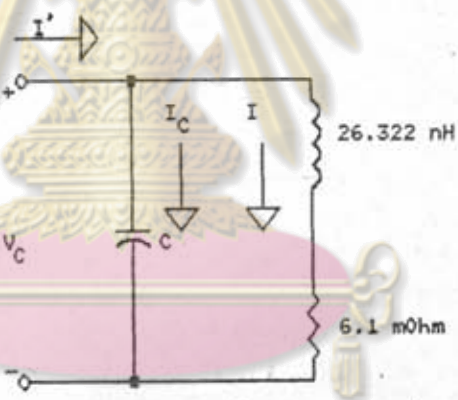
จากรูปที่ 3.42 ถ้าพิจารณาจะพบว่าค่าความเก็บประจุสมมูลจะมีค่าเปลี่ยนไปเพราะมีผลของความเหนี่ยวนำเนื่องจากลวดตัวนำด้วย ถ้าพิจารณาผลตอบเชิงความถี่ของระบบจะพบว่าที่ความถี่ค่อนข้างสูงตัวเก็บประจุ และ ตัวเหนี่ยวนำจะเกิดการแกว่งทำให้ค่าความเก็บประจุที่ออกแบบไว้ผิดพลาดไปมาก ในทางปฏิบัติจึงออกแบบให้ตัวเก็บประจุขนานกันโดยใช้แผ่นทองแดงเป็นตัวนำแทนสายไฟเพื่อจะลดผลของความเหนี่ยวนำจากสาย นอกจากนี้ในการออกแบบได้พยายามให้ความเหนี่ยวนำ เนื่องจากฟลักซ์สนามแม่เหล็กคล้องผ่านอากาศระหว่างทองแดงตัวนำน้อยที่สุด การที่จะต่อตัวเก็บประจุที่สร้างขึ้นกับขดลวดให้ความร้อนจะต้องให้ระยะทางระหว่างตัวเก็บประจุและขดลวดให้ความร้อนมีค่าน้อยสุด รวมทั้งต้องให้พื้นที่ที่ฟลักซ์สนามแม่เหล็กสามารถ คล้องผ่านมีค่าน้อยที่สุด เพราะถ้าไม่เป็นตามที่กล่าวข้างต้นจะเกิด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความเหนี่ยวนำขึ้น ในวงจร ซึ่งความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นอาจต่ออันดับอยู่กับตัวเก็บประจุ ดังรูปที่ 3.43 เนื่องจากการออกแบบต้องการที่จะปรับปรุงตัวประกอบกำลังของขดลวดให้ความร้อน แต่ถ้ามีความเหนี่ยวนำเพิ่มจากการต่อตัวเก็บประจุและขดลวดให้ความร้อน จึงเป็นการชดเชยมุมประกอบกำลังที่มากเกินจริง ในทางปฏิบัติจึงออกแบบให้ตัวเก็บประจุต่อขนานกับขดลวดให้ความร้อนชิดกันมาก และยึดติดกันโดยนอตทองเหลือง

3.4.2.1 การเลือกค่าความเก็บประจุชดเชยตัวประกอบกำลัง

ในการคำนวณค่าความเก็บประจุ จะต้องใช้วงจรสมมูลของขดลวดให้ความร้อน ในที่นี้จะอ้างอิงกับโหลดชนิดที่1 ที่ความถี่ 130 กิโลเฮิรตซ์ ถ้าในการคำนวณตั้งเป้าหมายให้กำลังที่ขึ้นงานได้รับมีค่าประมาณ 8.5 กิโลวัตต์ และจากผลการวัดค่าพารามิเตอร์ที่ภาวะไม่มีโหลด และมีโหลดชนิดที่ 1 ที่ความถี่ 130 กิโลเฮิรตซ์ พบว่าขดลวดให้ความร้อนจะมีประสิทธิภาพประมาณ 85 เปอร์เซนต์ แสดงว่ากำลังที่เข้าสู่ขดลวดให้ความร้อนจะมีค่าประมาณ 10 กิโลวัตต์ วงจรสมมูลของขดลวดให้ความร้อนที่ความถี่ 130 กิโลเฮิรตซ์แสดงดังรูปที่ 3.44



รูปที่ 3.44 วงจรสมมูลของโหลดชนิดที่1จากการวัด ที่อุณหภูมิห้อง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากกำลังที่ขดลวดให้ความร้อน = $10X10^3$ วัตต์

I^2R = $10X10^3$

R = 6.1 มิลลิโอห์ม

I = 1280 แอมแปร์

แสดงว่าแรงดันคร่อมขดลวดให้ความร้อน V_c = 28.55 โวลต์

มุมประกอบกำลังที่ขดลวดมีค่า = 74.16 องศา

ถ้าต้องการชดเชยให้มุมประกอบกำลังที่ขดลวดมีค่าเป็นศูนย์ต้องใช้ตัวเก็บประจุขนาด

C = 52.82 ไมโครฟารัด

แต่เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ของขดลวดให้ความร้อน วัดที่อุณหภูมิห้อง คาดว่าถ้าชิ้นได้รับความร้อน มุมประกอบกำลังของขดลวดให้ความร้อนจะมีค่าดีขึ้น ดังนั้นค่าความเก็บประจุดังกล่าว อาจมีค่ามากไปจึงออกแบบให้ใช้ค่าความจุประมาณ 46.5 ไมโครฟารัด อันที่จริงเราไม่ต้องการชดเชยตัวประกอบกำลังอย่างสมบูรณ์ แต่ต้องการให้มีค่าใกล้เคียง 1 แต่ยังคงล้าหลัง จากขนาดกระแสที่ขดลวด แรงดันคร่อมขดลวดและตัวเก็บประจุชดเชยตัวประกอบกำลัง สามารถเขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ของกระแสที่ขดลวดให้ความร้อน แรงดันที่คร่อมขดลวดให้ความร้อน และกระแสที่ผ่านตัวเก็บประจุดังรูปที่ 3.45

C = 52.82 uF
θ = 74.16°

C = 46.5 uF
θ' = 22.86°

รูปที่ 3.45 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของกระแสที่ขดลวดและที่ตัวเก็บประจุปรับปรุงตัวประกอบกำลัง

จากรูปที่ 3.45 เมื่อ C = 46.5 ไมโครฟารัด

I_c = 1084.38 แอมแปร์

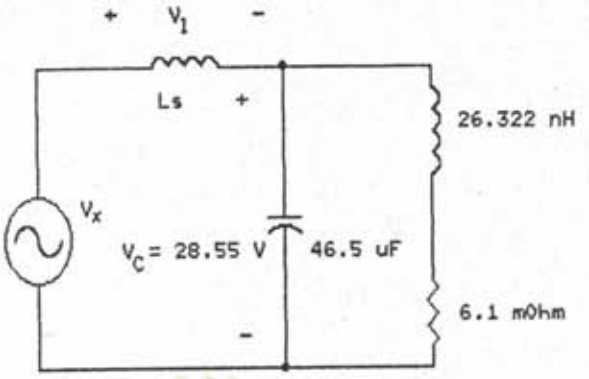
กระแสรวม I' = 379.28 แอมแปร์

แสดงว่ามุมประกอบกำลังของขดลวดและตัวเก็บประจุชดเชยตัวประกอบกำลังมีค่า

θ' = 22.86 องศา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เนื่องจากวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ จะมีปัญหาเรื่องการไหลทะลุ เนื่องจากเวลาฟื้นตัวของไดโอดที่ต่ออยู่ภายในมอสเฟตกำลัง ถ้าสัญญาณกระแสที่ขาออกมีมุมเฟสนำหน้าแรงดัน ในการออกแบบจึงต้องให้มุมเฟสของกระแสล้าหลังแรงดันอยู่ตลอดเวลา ถึงแม้อุณหภูมิของชิ้นงานจะเปลี่ยนแปลงไปก็ตาม จึงกำหนดให้วงจรอินเวอร์เตอร์มีมุมประกอบกำลังแบบล้าหลัง 45.57 องศา ซึ่งมีตัวประกอบกำลัง 0.7 เนื่องจากเดิมเมื่อขดลวดมีตัวเก็บประจุชดเชยตัวประกอบกำลังต่อขนานอยู่ จะมีมุมประกอบกำลัง 22.78 องศา แสดงว่าถ้าต้องการให้มุมประกอบกำลังของระบบเป็น 45.57 องศา จะต้องใส่ตัวเหนี่ยวนำอันดับเข้ากับวงจร ดังในรูปที่ 3.46a



รูปที่ 3.46a วงจรสมมูลของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 3.46b ถ้าต้องการมุมประกอบกำลังดังกล่าว แสดงว่าองค์ประกอบของแรงดัน V_x ที่ตั้งฉากกับกระแส I' มีขนาด

$$V'_x = 28.55 \times \cos(22.75) \times \tan(45.57)$$

$$V'_x = 26.86 \text{ โวลต์}$$

แสดงว่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ ที่ใส่เพิ่มลงในวงจรมีขนาด

$$V_1 = 26.86 - [28.55 \times \sin(22.75)]$$

$$V_1 = 15.82 \text{ โวลต์}$$

แสดงว่าค่าความเหนี่ยวนำที่ใส่อนุกรมในวงจรมีขนาด

$$L_s = \frac{15.82}{[2\times\pi\times130\times10^3\times379.28]}$$

$$L_s = 49.32 \text{ นาโนเฮนรี}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$C = 46.5$ uF , $L_s = 49.32$ nH

$\theta = 22.86^\circ$, $\alpha = 45.57^\circ$

รูปที่ 3.46b เฟสเซอร์ไดอะแกรมเมื่อปรับตัวประกอบกำลังแล้ว

ซึ่งเฟสเซอร์ไดอะแกรมของระบบ ที่มีการปรับปรุงตัวประกอบกำลังให้เป็น 45.57 องศา แสดงดังรูปที่ 3.46b แสดงว่าในวงจรจะต้องใส่ตัวเหนี่ยวนำที่มี

ขนาด 49.32 นาโนเฮนรี อนุกรมไว้เนื่องจากหม้อแปลงแยกโดดความถี่สูงจะมีความเหนี่ยวนำรั่วไหลเป็นองค์ประกอบ จึงอาจใช้ความเหนี่ยวนำส่วนดังกล่าวได้ แต่ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลดังกล่าวอาจมีค่าต่ำกว่าที่ต้องการ ในทางปฏิบัติอาจจะต้องมีตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมเพิ่มเติม จากเฟสเซอร์ไดอะแกรมจะพบว่าแรงดันที่จ่ายให้แก่ระบบมีขนาด 37.61 โวลต์ ซึ่งแรงดันปริมาณนี้จะได้รับจากขดทุติยภูมิของหม้อแปลงแยกโดดความถี่สูง ที่มีลักษณะเป็นแบบสามสถานะ ถ้าให้หม้อแปลงมีอัตราการแปลงเป็น n แสดงว่าแรงดันที่ขดทุติยภูมิมีค่ายอด $\frac{532}{n}$ โวลต์ แสดงว่าหม้อแปลงแยกโดดจะมีจำนวนรอบ

$$n = \frac{532 \times 0.707}{37.61}$$

$$n = 10 \text{ รอบ}$$

เพื่อเป็นการป้องกันมิให้เกิดแรงดันตกคร่อมขดลวด มีค่าต่ำกว่าที่คำนวณไว้จึงลดให้จำนวนรอบมีค่าเป็น 9 รอบ เพราะในทางปฏิบัติทั้งหม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำจะมีความต้านทานเนื่องจากเส้นลวดตัวนำ ทำให้มีแรงดันตกคร่อมที่ตัวต้านทานเหล่านี้ด้วย

3.4.2.2 การวัดค่าความจุของตัวเก็บประจุชุดเชยตัวประกอบกำลัง

เนื่องจากตัวเก็บประจุที่ต้องการมีขนาด 46.5 ไมโครฟารัด และต้องสามารถทนแรงดันที่คร่อมขดลวดให้ความร้อนขนาด 28.55 โวลต์ ที่ความถี่ใช้งาน 130 กิโลเฮิรตซ์ แต่ในทางปฏิบัติตัวเก็บประจุที่สามารถใช้งานที่ความถี่สูง จะมีค่าความจุค่อนข้างต่ำ และแรงดันใช้งานจะมีค่าต่ำลงถ้าเทียบกับการใช้งานที่ความถี่ต่ำ(Wima, 1895) ในทางปฏิบัติจึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิด WIMA MKP-10 0.47uF/250 V_{dc} จากข้อมูลผู้ผลิต (Wima, 1985)พบว่าที่ความถี่ดังกล่าวตัวเก็บประจุจะสามารถทนแรงดันได้ 18 โวลต์ จึงต้องใช้ตัวเก็บประจุดังกล่าว 2 ตัวต่ออันดับกันเพื่อเพิ่มแรงดัน เนื่องจากค่าความเก็บประจุที่ต้องการมีขนาดสูงมาก จึงต้องต่อตัวเก็บประจุลักษณะดังกล่าวขนานกันเป็นจำนวน 198 ชุด ในการต่อตัวเก็บประจุขนานเข้าด้วยกันจะใช้แผ่นทองแดงเป็นตัวนำ และเป็นขั้วต่อกับขดลวดให้ความร้อนและขดทุติยภูมิของหม้อแปลงกำลังด้วย การวัดค่าตัวเก็บประจุจะใช้เครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ ผลการวัดค่าความเก็บประจุแสดงดังตารางที่ 3.10

จากค่าความจุของตัวเก็บประจุที่วัดได้ พบว่าใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการมาก โดยค่าความเก็บประจุจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อความถี่สูงขึ้น และเมื่อความถี่สูงมากๆความจุที่วัดได้จะมีค่าเป็นลบ เป็นผลเนื่องจาก ตัวเหนี่ยวนำที่มีอยู่ในตัวเก็บประจุและ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ที่มีอยู่ในสายวัด ค่าความต้านทานที่วัดได้คือค่าความต้านทานสมมูลที่มีอยู่ในตัวเก็บประจุ โดยความต้านทานส่วนนี้จะเป็นสาเหตุให้ตัวเก็บประจุเกิดความร้อน จากกระแสที่ผ่านตัวเก็บประจุและขนาดความต้านทานสมมูลของตัวเก็บประจุ จะพบว่ามีกำลังงานสูญเสียไปที่ตัวเก็บประจุขนาด 471 วัตต์ ซึ่งถ้าเทียบกับกำลังที่ขดลวดให้ความร้อน กำลังสูญเสียที่ตัวเก็บประจุจะมีค่าเพียงเล็กน้อย ดังนั้นในการชิมมูเลตจะละเลยความต้านทานส่วนนี้

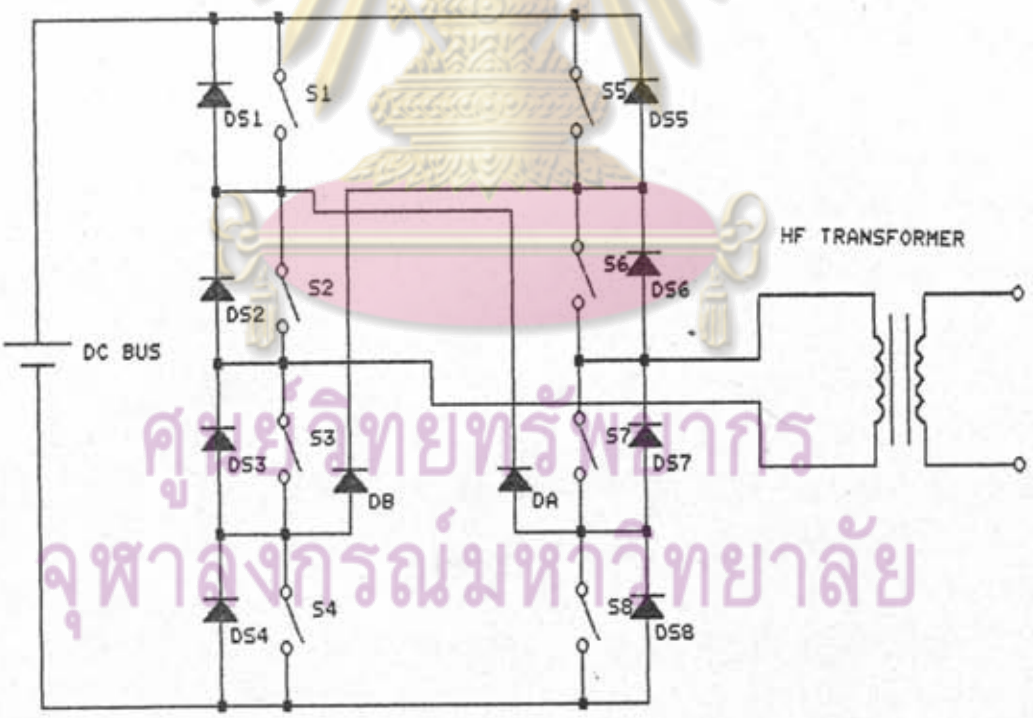
ความถี่ (kHz)	ค่าความจุสมมูล (uF)	ความต้านทานสมมูล (mOhm)
80	46.50	0.3
90	47.0	0.3
100	47.37	0.4
110	48.39	0.4
120	49.30	0.4
125	49.93	0.4
130	50.1	0.5
140	50.7	0.5
150	51.2	0.5

ตารางที่ 3.10 ผลการวัดค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุปรับปรุงตัวประกอบกำลัง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5 วงจรควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์

วงจรอิเล็กทรอนิกส์ในส่วนนี้มีหน้าที่หลักในการสร้างสัญญาณในการขับนำ และควบคุมการทำงานของมอสเฟตกำลังให้ถูกต้อง นอกจากนี้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ในส่วนนี้ยังมีหน้าที่ป้องกันวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะมิให้เกิดอันตรายเนื่องจากเกิดการผิดปกติ จากกระแส หรือแรงดัน ที่เกินพิกัดที่อินเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้ ถ้าวงจรควบคุมสามารถตรวจจับได้ว่าอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะทำงานเกินพิกัด วงจรควบคุมจะส่งสัญญาณไปขับนำให้มอสเฟตกำลังทุกตัวหยุดการทำงานพร้อมทั้งตัดแหล่งจ่ายไฟออกจากระบบ โดยวงจรอินเวอร์เตอร์จะสามารถทำงานได้ใหม่เมื่อได้รับสัญญาณรีเซทระบบ หลังจากนั้นจึงป้อนแหล่งจ่ายไฟภาคกำลังแก่ระบบใหม่วงจรอินเวอร์เตอร์จะสามารถทำงานได้ตามปกติ ในการออกแบบการควบคุมการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ จะออกแบบให้วงจรอินเวอร์เตอร์สามารถเปลี่ยนความถี่ในการใช้งานได้ โดยการเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณที่ใช้ขับนำมอสเฟตกำลัง การเปลี่ยนความถี่ทำให้สามารถเลือกระดับความลึกผิวของชิ้นงานได้ นอกจากนี้ความถี่ของระบบจะมีผลต่อกำลังที่ขดลวดให้ความร้อน และที่ชิ้นงานด้วย จึงอาจใช้ความถี่เป็นตัวปรับระดับกำลังให้ได้ตามที่ต้องการ จากที่กล่าวข้างต้นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนนี้สามารถแบ่งเป็น

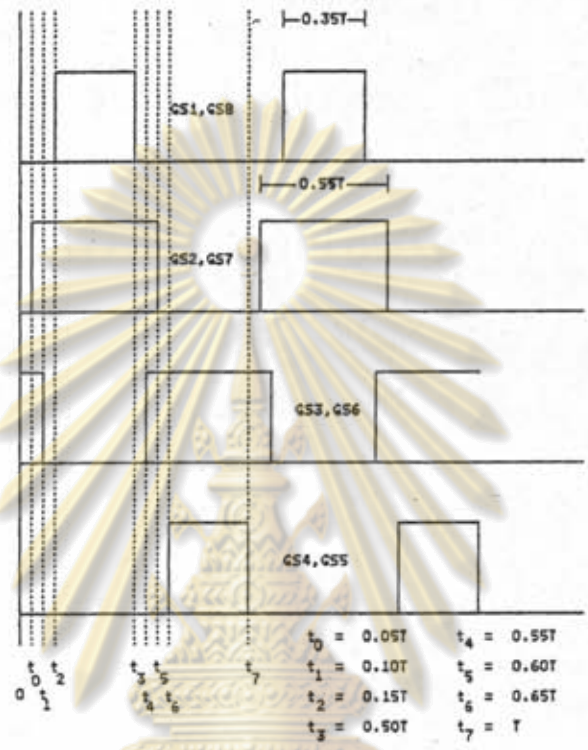


รูปที่ 3.47 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ

3.5.1 วงจรส่วนสร้างสัญญาณขับนำวงจรขับนำเกท

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วงจรส่วนนี้จะสร้างสัญญาณเพื่อให้วงจรขับนำเกท ไปขับนำมอสเฟตกำลังที่ประกอบเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะให้ทำงาน รูปที่ 3.47 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ



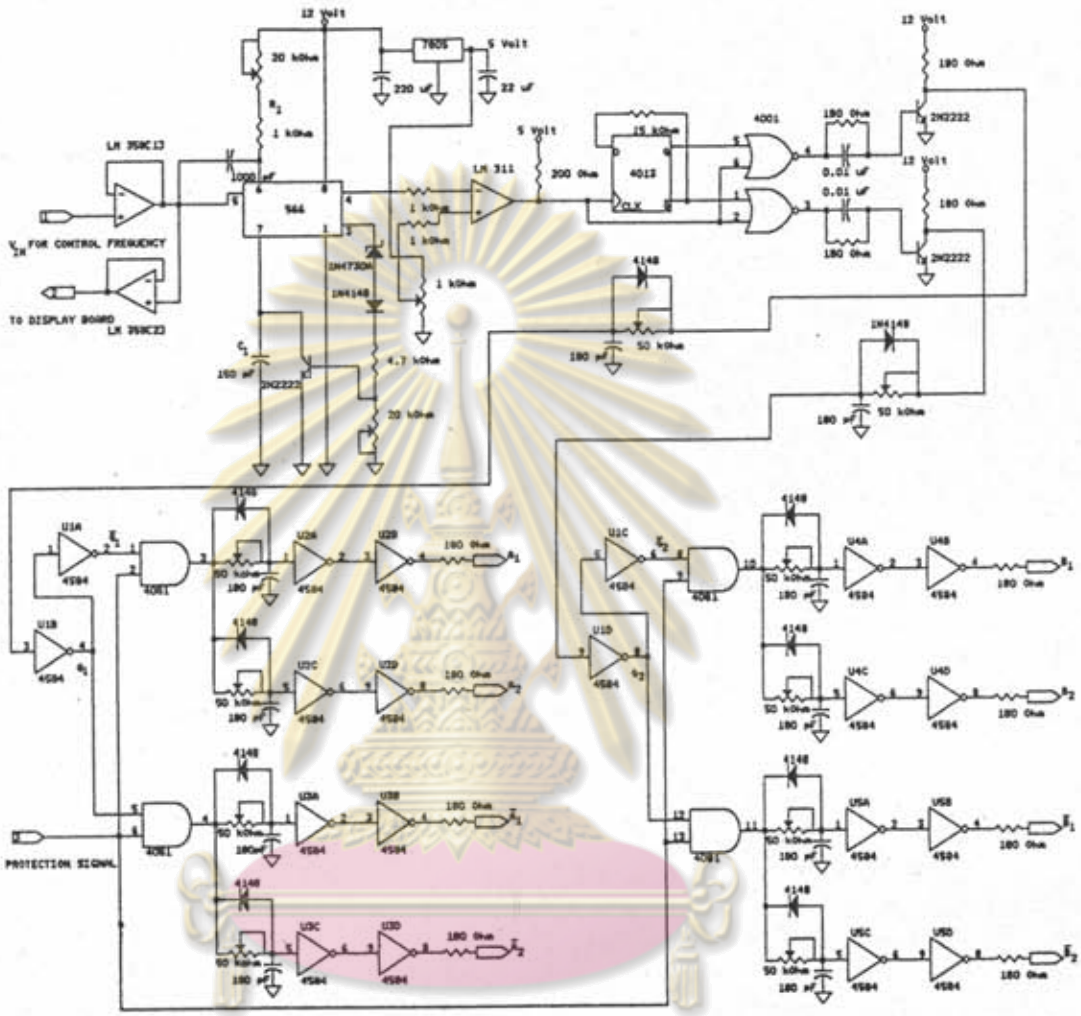
รูปที่ 3.48 สัญญาณขับนำมอสเฟตกำลัง

สัญญาณที่ขับนำมอสเฟตกำลัง S_1 ถึง S_8 แสดงดังรูปที่ 3.48 โดยสัญญาณที่ขับนำมอสเฟตกำลัง S_1 กับ S_8 จะมีลักษณะเหมือนกัน สัญญาณที่ขับนำมอสเฟตกำลัง S_2 และ S_7 จะมีลักษณะเหมือนกัน สัญญาณที่ขับนำมอสเฟตกำลัง S_3 และ S_6 จะมีลักษณะเหมือนกัน และสัญญาณที่ขับนำมอสเฟตกำลัง S_4 และ S_5 จะมีลักษณะเหมือนกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

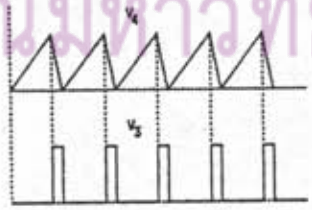
วงจรสร้างสัญญาณขับนำมอสเฟตกำลัง S_1 ถึง S_8 แสดงดังรูปที่ 3.49 จากรูปจะใช้ออปแอมป์เบอร์ LM358 ต่อเป็นวงจรบัฟเฟอร์ขาเข้าและขาออกให้แก่ไอซีเบอร์ 566 ออปแอมป์ที่ต่อเป็นบัฟเฟอร์ขาเข้า จะเป็นบัฟเฟอร์ให้แก่แรงดันที่ควบคุมความถี่ที่ไอซีเบอร์ 566 สร้างขึ้น ส่วนออปแอมป์ที่ต่อเป็นบัฟเฟอร์ขาออกจะเป็นบัฟเฟอร์ให้แก่แรงดันควบคุมที่ขา 5 ของไอซี 566 ซึ่งแรงดันที่ออกจากบัฟเฟอร์ส่วนนี้จะส่งให้วงจรแสดงผล เพื่อแสดงค่าความถี่ใช้งานขณะใดๆ เนื่องจากไอซีเบอร์ 566 เป็นไอซีที่สามารถสร้างความถี่ตามแรงดันที่ขา 5 จาก

หนังสืออ้างอิง(950 โครงงานอิเล็กทรอนิกส์ เล่ม2) ความถี่ที่ไอซี 566 กำเนิดจะมีความสัมพันธ์กับ ไฟเลี้ยงไอซี แรงดันควบคุมที่ขา5 และค่าความต้านทานกับความเก็บประจุที่ต่อกับไอซีดังนี้



รูปที่ 3.49 วงจรสร้างสัญญาณขับนำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.50 ความสัมพันธ์ของแรงดันที่ขา4 และ 3 ของไอซี 566

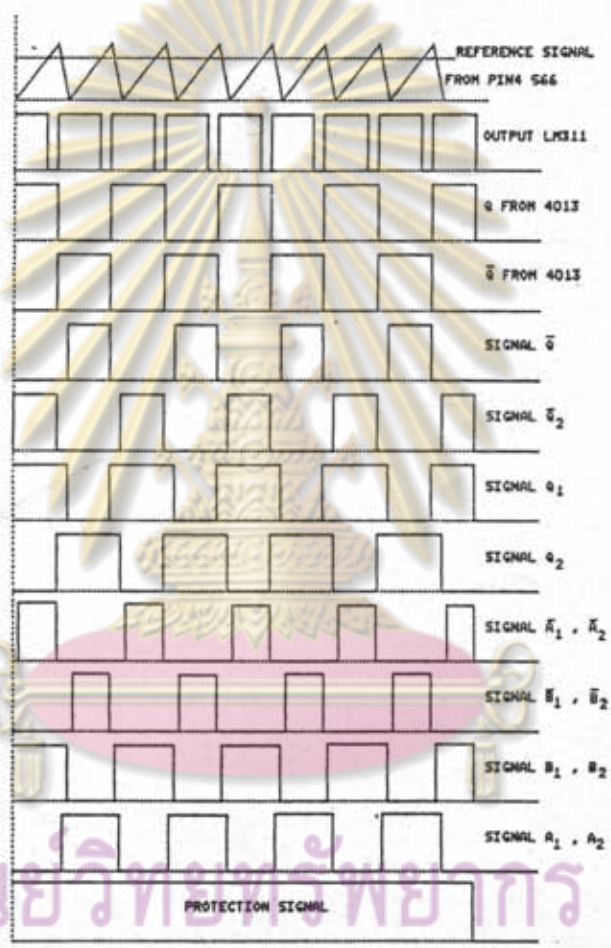
$$f_o = \frac{4(V^+ - V_5)}{R_1 C_1 V^+} \qquad (3.11)$$

โดยที่ V^+ คือแรงดันไฟเลี้ยงบวก

V_5 คือแรงดันที่ขา 5 ของไอซี 566

R_1 คือความต้านทานกำหนดความถี่ต่ออยู่ที่ขา 6 ของไอซี 566

C_1 คือความเก็บประจุกำหนดความถี่ที่ต่ออยู่ที่ขา 7 ของไอซี 566



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.51 สัญญาณที่ส่วนต่างๆในวงจรสร้างสัญญาณขับนำ

ความสัมพันธ์ของแรงดันที่ขา 4 และขา 3 ของไอซี 566 จะเป็นดังรูปที่ 3.50 โดยแรงดันที่ขา 4 จะมีลักษณะเป็นฟันเลื่อย และแรงดันที่ขา 3 จะมีลักษณะเป็นพัลส์แคบๆที่มีความถี่เท่ากับความถี่ของสัญญาณฟันเลื่อยที่กำหนดโดยสมการที่ (3.11) จากรูปเมื่อแรงดันที่ขา3 มีค่าเป็นศูนย์โวลท์ แรงดันที่คร่อมตัวเก็บประจุที่ขา 7 จะมีขนาดเพิ่มขึ้น

ลักษณะเป็นฟันเลื่อยเหมือนกับแรงดันที่ขา 4 เมื่อแรงดันที่ขา 3 มีค่าสูงจะทำให้ทรานซิสเตอร์ที่ต่อคร่อมตัวเก็บประจุที่ขา 7 เริ่มนำกระแสเป็นการคายประจุออกจากตัวเก็บประจุ แรงดันที่คร่อมตัวเก็บประจุจะลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้แรงดันที่ขา 4 ลดลงเช่นเดียวกัน จากความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่ไอซี 566 สร้างและระดับแรงดันที่ขา 5 พบว่าถ้าแรงดันที่ขา 5 มีค่าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความถี่มีค่าลดลง และถ้าแรงดันที่ขา 5 มีค่าลดลง ความถี่ของสัญญาณฟันเลื่อยจะมีค่าสูงขึ้น ในการออกแบบจะให้สัญญาณที่ไอซี 566 สร้าง มีความถี่อยู่ในช่วง 250 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 290 กิโลเฮิรตซ์ ตัวเก็บประจุ C_1 ที่ใช้ในวงจรมีค่า 150 พิโคฟารัด และตัวต้านทาน R_1 จะใช้ความต้านทานขนาด 1 กิโลโอห์ม ต่ออนุกรมกับความต้านทานปรับค่าได้ขนาด 20 กิโลโอห์ม เพื่อความสะดวกในการปรับค่าความถี่ให้ได้ตามที่ต้องการ การเลือกค่าความเก็บประจุและความต้านทานจะเลือกตามสมการที่ (3.11)

รูปที่ 3.51 แสดงสัญญาณที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของวงจร สามารถอธิบายการทำงานของวงจรได้ดังนี้ จากสัญญาณฟันเลื่อยที่ขา 5 ของไอซี 566 ที่สามารถเปลี่ยนความถี่ได้จะส่งมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง ด้วยวงจรเปรียบเทียบที่ใช้ออปแอมป์เบอร์ LM311 จะได้สัญญาณออกที่มีลักษณะเป็นคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความถี่เท่าเดิม และความกว้างของสัญญาณพัลส์ลักษณะสี่เหลี่ยมจะขึ้นกับแรงดันอ้างอิงที่ขา 3 ซึ่งเป็นขั้วเข้าไม่กลับของออปแอมป์เบอร์ LM311 ในกรณีนี้จะปรับสัญญาณอ้างอิงให้สัญญาณพัลส์ลักษณะสี่เหลี่ยมมีวัฏจักรงานประมาณ 40 เปอร์เซนต์ของคาบเวลา จากสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมจะส่งให้ไอซีเบอร์ 4013 หารความถี่ลง 2 เท่า จะได้แรงดันขาออกที่ขา Q และ $\bar{Q}$ โดยสัญญาณทั้งสองจะเป็นดังในรูปที่ 3.51 จากสัญญาณที่ออกจากไอซี 4013 และสัญญาณจากวงจรเปรียบเทียบ จะนำมาผ่านวงจรนอร์ที่ใช้ไอซีเบอร์ 4001 แล้วกลับเฟสสัญญาณทั้งสองได้สัญญาณเป็น $\bar{Q}_1$ และ $\bar{Q}_2$ ดังในรูปโดยสัญญาณ $\bar{Q}_1$ เกิดจากสัญญาณ Q และสัญญาณ $\bar{Q}_2$ เกิดจากสัญญาณ $\bar{Q}$ จากสัญญาณที่ได้ทั้งสองสัญญาณจะผ่านไอซีเบอร์ 4584 ซึ่งทำหน้าที่กลับเฟสจะได้สัญญาณ Q_1 และ Q_2 ตามลำดับ สัญญาณ $\bar{Q}_1$ และ $\bar{Q}_2$ จะมีลักษณะที่เรียกว่าพุชพุล จากสัญญาณ Q_1 Q_2 $\bar{Q}_1$ และ $\bar{Q}_2$ ที่ได้จะนำไปแอนด์กับสัญญาณป้องกันดังในรูปที่ 3.50 หลังจากนี้สัญญาณทั้งสี่จะผ่านวงจรหน่วงเวลาหน้าคลื่น เพื่อสร้างช่วงเวลาตาย(dead time) และวัฏจักรงานให้ได้ตามที่ต้องการซึ่งจะได้สัญญาณทั้งหมด 8 สัญญาณ คือชุดแรกมีสัญญาณ A_1 $\bar{A}_1$ B_1 และ $\bar{B}_1$ ชุดที่ 2 มีสัญญาณ A_2 $\bar{A}_2$ B_2 และ $\bar{B}_2$ โดยสัญญาณทั้งสองชุดจะมีลักษณะเหมือนกัน เนื่องจากเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่สร้างขึ้นจะมีวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะสองชุดต่อขนานกัน จึงต้องสร้างสัญญาณสำหรับวงจรขับนำเกทมอสเฟตกำลังเป็นสองชุดเช่นกัน สัญญาณ $\bar{A}_1$ จะใช้ขับนำมอสเฟตกำลัง S_1 และ S_8 สัญญาณ B_1 จะใช้ขับนำเกทมอสเฟตกำลัง S_2 และ S_7 สัญญาณ B_1 จะใช้ขับนำเกทมอสเฟตกำลัง S_4 และ S_5 และสัญญาณ A_1 จะใช้ขับนำมอสเฟตกำลัง S_3 และ S_6 ดังในรูปที่3.48 โดยจะปรับ

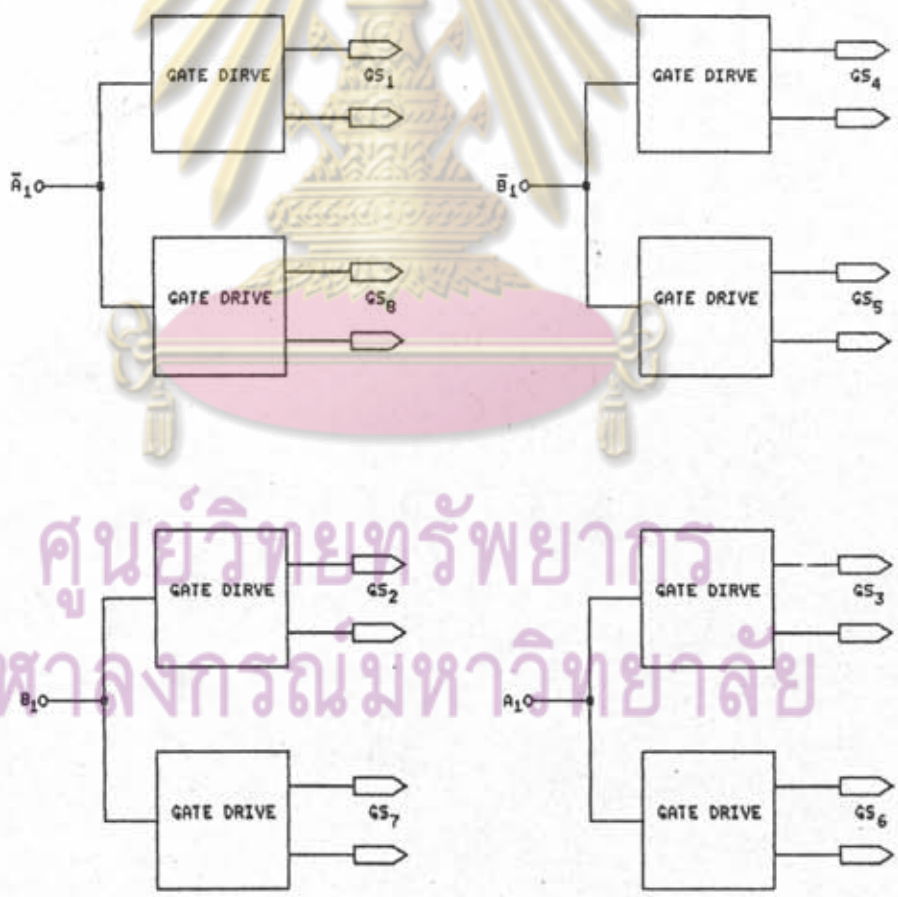
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ให้วัฏจักรงาน D_1 มีค่า 35 เปอร์เซ็นต์ของคาบเวลา และ วัฏจักรงาน D_2 มีค่า 55 เปอร์เซ็นต์ของคาบเวลา จากรูปที่ 3.50 พบว่าเมื่อสัญญาณป้องกันจากส่วนป้องกันอยู่ในภาวะปกติคือสัญญาณป้องกันมีค่าประมาณ 12 โวลต์ วงจรควบคุมจะสร้างสัญญาณขับนำที่มีความถี่ตามต้องการออกมาตามปกติ แต่ถ้าเกิดผิดปกติขึ้นและวงจรป้องกันและควบคุมสามารถตรวจจับได้ โดยภาวะผิดปกติอาจเนื่องมาจากกระแสที่อินเวอร์เตอร์เกินขีดจำกัด หรือแรงดันไฟตรงที่จ่ายให้แก่อินเวอร์เตอร์สูงเกินขนาด วงจรป้องกันและควบคุมจะส่งสัญญาณป้องกันขนาดประมาณศูนย์ โวลต์ มาแอนด์กับสัญญาณ Q_1 $\bar{Q}_1$ Q_2 และ $\bar{Q}_2$ ทำให้สัญญาณขับนำเกทมอสเฟตกำลังทั้ง 8 สัญญาณเป็นศูนย์หมด วงจรอินเวอร์เตอร์ทั้งสองจะหยุดการทำงานทันที เป็นการป้องกันมอสเฟตกำลังมิให้เกิดอันตรายได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5.2 วงจรขับนำเกทแบบแยกโดด

เนื่องจากวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะใช้มอสเฟตกำลังทั้งหมด 8 ตัวต่อวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งชุด และในเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำจะมีอินเวอร์เตอร์อยู่ 2 ชุด ในวงจรจึงมีมอสเฟตกำลังทั้งหมด 16 ตัว เนื่องจากโครงสร้างของวงจรอินเวอร์เตอร์เป็นแบบสามสถานะ ในการขับนำเกทซอร์ซของมอสเฟตกำลังในวงจรอินเวอร์เตอร์ จึงไม่สามารถอ้างอิงแรงดันที่ซาซอร์ซของมอสเฟตกำลังทุกตัวกับกราวด์ของสัญญาณไฟเลี้ยงในวงจรได้ยกเว้นมอสเฟตกำลัง S_4 และ S_8 แต่เพื่อความสะดวก และความปลอดภัย จึงแยกกราวด์ของสัญญาณไฟเลี้ยงออกจากกราวด์ของสัญญาณกำลัง ดังนั้นในการขับนำมอสเฟตกำลังทั้ง 16 ตัว จึงต้องมีสัญญาณขับนำที่แยกโดดจากสัญญาณกราวด์ไฟเลี้ยงจำนวน 16 สัญญาณเช่นกัน ในการออกแบบจึงใช้หม้อแปลงแยกโดดเพราะมีความสามารถในการแยกโดดที่ดีมาก และถูกรบกวนจากสัญญาณรบกวนค่อนข้างยาก นอกจากนี้ยังสามารถใช้งานได้ที่ความถี่สูง

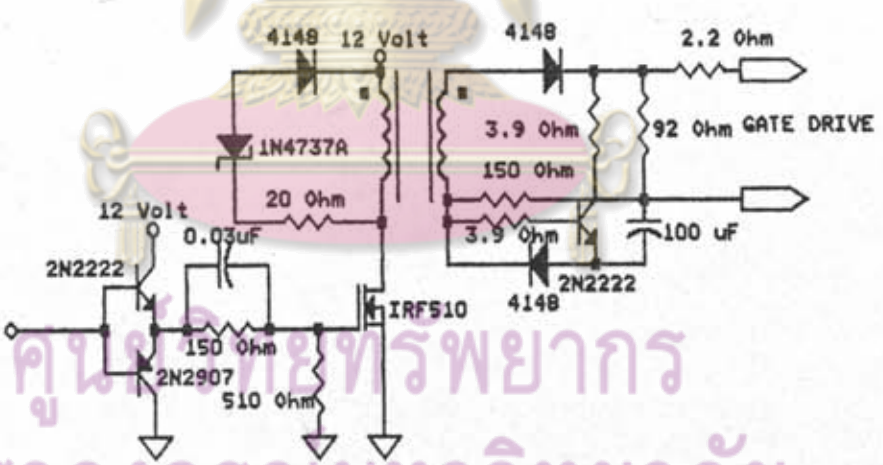


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.52 บล็อกไดอะแกรมวงจรขับนำเกทแบบแยกโดดของอินเวอร์เตอร์

จากหัวข้อที่ 3.5.1 สัญญาณขับนำวงจรขับนำเกทจะมี 4 สัญญาณต่ออินเวอร์เตอร์หนึ่งชุด พบว่าสัญญาณ $\bar{A}_1$ และ $\bar{B}_1$ จะมีวัฏจักรงานเท่ากับ 35 เปอร์เซนต์ของคาบเวลา ส่วนสัญญาณ A_1 และ B_1 จะมีวัฏจักรงาน 55 เปอร์เซนต์ของคาบเวลา ในการออกแบบวงจรขับนำแบบแยกโดด จะประมาณให้วัฏจักรงานของสัญญาณมีค่าประมาณ 50 เปอร์เซนต์ของคาบเวลา ดังนั้นวงจรขับนำแบบแยกโดดจึงมีลักษณะเหมือนกันหมดทั้ง 16 ชุดในที่นี้จะแสดงบล็อกไดอะแกรมวงจรขับนำเกทแบบแยกโดดสำหรับอินเวอร์เตอร์ชุดเดียว ดังรูปที่ 3.52

จากรูปที่ 3.52 สามารถแบ่งวงจรออกเป็น 4 ส่วนเหมือนๆกัน โดยวงจรส่วนแรกรับสัญญาณขับนำ $\bar{A}_1$ และให้สัญญาณขาออกสองสัญญาณเพื่อไปขับนำมอสเฟตกำลัง S_1 และ S_8 วงจรส่วนที่สองรับสัญญาณขับนำ B_1 และให้สัญญาณขาออกสองสัญญาณเพื่อไปขับนำมอสเฟตกำลัง S_2 และ S_7 วงจรส่วนที่สามรับสัญญาณขับนำ $\bar{B}_1$ และให้สัญญาณออกสองสัญญาณเพื่อไปขับนำมอสเฟตกำลัง S_4 และ S_5 วงจรส่วนที่สี่รับสัญญาณขับนำ A_1 และให้สัญญาณขาออกสองสัญญาณเพื่อไปขับนำมอสเฟตกำลัง S_3 และ S_6 จากรูปถ้าพิจารณาจะพบว่าวงจรในแต่ละส่วนยังสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนที่มีลักษณะเหมือนกัน ดังนั้นจะอธิบายการทำงานของวงจรขับนำเพียงส่วนเดียวก็พอ แสดงดังรูปที่ 3.53



รูปที่ 3.53 วงจรขับนำเกทแบบแยกโดดชุดเดียว

จากรูปที่ 3.53 เมื่อมีสัญญาณขับนำความถี่สูงป้อนให้แก่วงจรขับนำเกทและแยกโดดในช่วงที่สัญญาณขับนำความถี่สูงมีแรงดันประมาณ 12 โวลต์ ทรานซิสเตอร์ 2N2222 จะสามารถนำกระแสได้ ทำให้มอสเฟต IRF 510 สามารถนำกระแสได้ และมีแรงดันขนาดประมาณ 12 โวลต์ตกคร่อมขดปฐมภูมิของหม้อแปลงขับนำ เนื่องจากอัตราการแปลงดันของ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หม้อแปลงมีค่า 1:1.5 ทำให้ขณะเดียวกันที่ขดทุติยภูมิจะมีแรงดันตกคร่อมประมาณ 18 โวลต์ แรงดันที่ขดทุติยภูมิจะมีค่าขนาด 18 โวลต์ ไปจนกระทั่งสัญญาณขับนำมีค่าประมาณศูนย์โวลต์ ทรานซิสเตอร์ 2N2222 จะถูกทำให้หยุดนำกระแส ขณะเดียวกันทรานซิสเตอร์ 2N2907 จะถูกทำให้สามารถนำกระแสดังนั้นมอสเฟต IRF510 จะหยุดนำกระแสเนื่องจากจะมีแรงดันค่าลบตกคร่อมเกทและซอร์ซของมอสเฟต IRF510 จากประจุที่สะสมอยู่ที่ตัวเก็บประจุขนาด 0.03 ไมโครฟารัด ในช่วงที่ทรานซิสเตอร์ 2N2222 นำกระแส เดิมขดปฐมภูมิของหม้อแปลงขับนำสามารถนำกระแสได้โดยผ่านมอสเฟตกำลัง IRF510 แต่เนื่องจากในช่วงเวลานี้ มอสเฟต IRF510 ไม่สามารถนำกระแส เนื่องจากกระแสทำแม่เหล็กจะต้องพยายามไหลในทิศทางเดิมกระแสดังกล่าวจึงไหลผ่าน ซีเนอร์ไดโอด ตัวต้านทาน และไดโอด ที่ต่อขนานกับขดปฐมภูมิของหม้อแปลงขับนำ ในช่วงเวลานี้แรงดันคร่อมขดปฐมภูมิจะมีค่าเป็นลบเนื่องจากความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กของหม้อแปลงขับนำจะเหนี่ยวนำให้แรงดันคร่อมตัวเองกลับทิศ กระแสจึงจะสามารถไหลผ่านซีเนอร์ไดโอด และไดโอดได้

ถ้าพิจารณาทางขดทุติยภูมิของหม้อแปลงขับนำ พบว่ามีแรงดันบวกและลบตกคร่อมเช่นเดียวกับขดปฐมภูมิและมีอัตราการแปลงแรงดันเป็น 1:1.5 และสัญญาณที่เกิดจะมีความถี่เท่ากับความถี่ของสัญญาณขับนำ เนื่องจากที่ขดทุติยภูมิต่อไดโอดไว้จึงมีเฉพาะแรงดันบวกที่ผ่านไปได้ ถ้าพิจารณาจะพบว่าสัญญาณความถี่สูงที่มีเฉพาะไฟบวกจะผ่านตัวต้านทานขนาด 92 โอห์ม และตัวเก็บประจุขนาด 10 ไมโครฟารัด ตัวเก็บประจุดังกล่าวจะกรองเอาระดับไฟตรงออก และระดับไฟตรงดังกล่าวจะมีค่ามากน้อยเท่าใด ขึ้นกับวัฏจักรงานของสัญญาณขับนำ ถ้าวัฏจักรงานมีค่าต่ำแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าต่ำ ถ้าวัฏจักรงานมีค่าสูงแรงดันที่คร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าสูงตาม ดังนั้นในช่วงที่สัญญาณขับนำมีค่าประมาณ 12 โวลต์ จะมีแรงดันที่ขาออกของวงจรขับนำที่ใช้ขับนำมอสเฟตกำลังเท่ากับ 18 โวลต์ ลบด้วยแรงดันไฟตรงที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ ในช่วงเวลานี้จะมีสัญญาณออกจากวงจรขับนำไปขับนำมอสเฟตกำลัง แต่เมื่อสัญญาณขับนำมีค่าเป็นศูนย์โวลต์ แรงดันไฟลบที่ตกคร่อมขดทุติยภูมิจะไม่สามารถผ่านออกไปได้เนื่องจากไดโอดที่ต่ออยู่ที่ขดทุติยภูมิจะถูกไบอัสกลับทาง ในขณะเดียวกันเนื่องจากตัวเก็บประจุที่กรองไฟตรงจะมีประจุสะสมอยู่ ตัวเก็บประจุนี้จะคายประจุผ่านตัวต้านทานขนาด 150 โอห์ม และตัวต้านทานขนาด 3.9 โอห์ม ทำให้ทรานซิสเตอร์ 2N2222 เริ่มนำกระแส ตัวเก็บประจุจึงคายประจุผ่านตัวต้านทานขนาด 92 โอห์ม ตัวต้านทานขนาด 3.9 โอห์ม และขาคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์ 2N2222 อีกเส้นทางหนึ่ง ทำให้มีแรงดันไฟลบตกคร่อมที่สัญญาณขาออกของวงจรขับนำเกทเนื่องจากแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ ในช่วงเวลานี้มอสเฟตกำลังจะถูกสั่งให้หยุดนำกระแส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5.2.1 การออกแบบหม้อแปลงขับนำ

เนื่องจากหม้อแปลงขับนำต้องสามารถใช้งานที่ความถี่สูง ในช่วง 125 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 140 กิโลเฮิรตซ์ จึงต้องเลือกใช้หม้อแปลงแกนเฟอร์ไรท และเพื่อความสะดวกในการออกแบบ จะประมาณให้สัญญาณที่ขับนำวงจรขับนำเกทมีค่าวัฏจักรงาน 50 เปอร์เซนต์ โดยจะประมาณให้กำลังที่หม้อแปลงขับนำต้องส่งผ่านมีค่าค่อนข้างต่ำ เพราะเกทและซอร์ซของมอสเฟตกำลังจะเปรียบเสมือนกับตัวเก็บประจุขนาดเล็กประมาณ 30 นาโนฟารัด (Siemens Modules in Simpmos Technology, 1988) จึงใช้กำลังงานจากวงจรขับนำเกทในช่วงแรกที่ต้องอัดประจุให้แก่ตัวเก็บประจุสมมูลนี้ ประมาณให้กำลังที่หม้อแปลงขับนำสามารถส่งผ่านมีขนาดประมาณ 2 วัตต์

จาก $A_p = ws$

$$A_p = \frac{P}{2B_m kfJ}$$

กำหนดให้ $P = 2$ วัตต์

$B_m = 0.1$ เทสลา

$k = 0.4$

$f = 125$ กิโลเฮิรตซ์

$J = 500$ แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

จากการคำนวณ $A_p = 40$ มม.^{4}

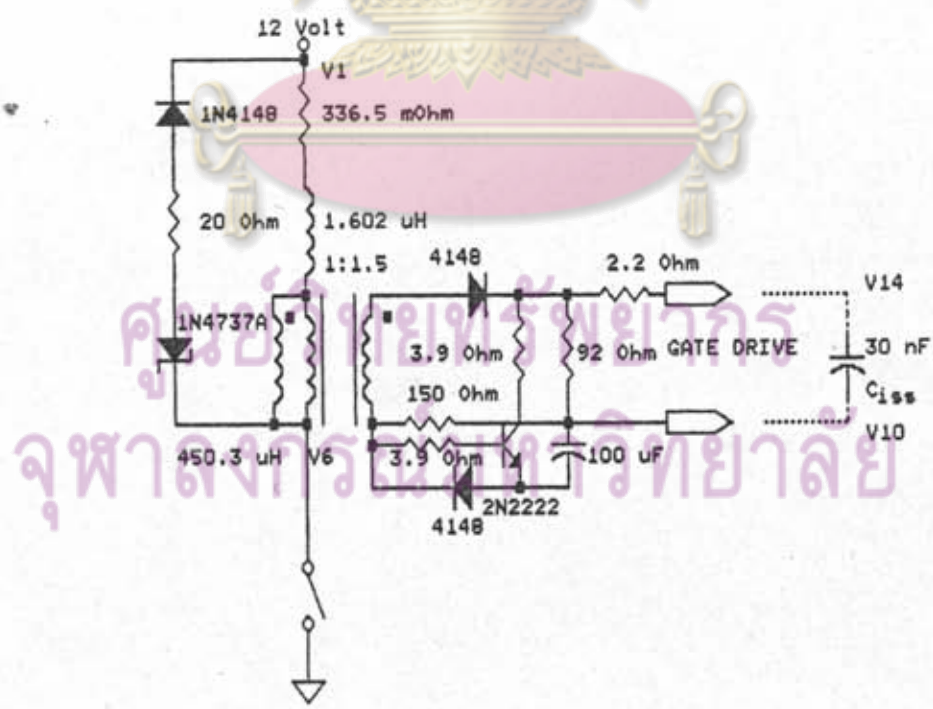
ในทางปฏิบัติจะเลือกแกนเฟอร์ไรท์ที่มีขนาด EI-19 เนื่องจากแกนที่เลือกมีขนาดใหญ่พอสมควร จึงหาขนาดเส้นลวดตัวนำที่พันโดยประมาณจากกระแสเฉลี่ย ที่ผ่านขดปฐมภูมิของหม้อแปลงขับนำ จากแรงดันเฉลี่ยที่ขดปฐมภูมิมีค่าประมาณ 6 โวลต์ กระแสเฉลี่ยที่ไหลจะมีค่า 0.333 แอมแปร์ คำนวณขนาดเส้นลวดตัวนำจากความหนาแน่นที่กำหนดไว้ 500 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ได้ขนาดเส้นลวดที่พัน SWG#31 เนื่องจากแกนที่เลือกมีขนาดใหญ่ จึงพันขดปฐมภูมิจำนวน 40 รอบและขดทุติยภูมิจำนวน 60 รอบ เมื่อพันเรียบร้อยสามารถวัดค่าสมมูลของพารามิเตอร์โดยเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ ได้ดังตารางที่ 3.11 ในการวัดค่าพารามิเตอร์จะวัดค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล และความต้านทานเนื่องจากลวดตัวนำ และความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก โดยความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กจะมีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับความเหนี่ยวนำรั่วไหล

3.5.2.2 การชิมมูเลตวงจรขับนำเกท

จากค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ จะพบว่าค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล

ความถี่ (kHz)	ความเหนี่ยวนำรั่วไหล (uH)	ความต้านทานเนื่องจากลวดตัวนำ (Ohm)	ความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก(uH)
80	1.616	0.3007	449
90	1.613	0.3136	449.1
100	1.61	0.3142	449.5
110	1.607	0.3221	449.8
120	1.604	0.3333	450.1
130	1.6	0.3397	450.5
140	1.597	0.3481	450.8
150	1.594	0.3583	451.2

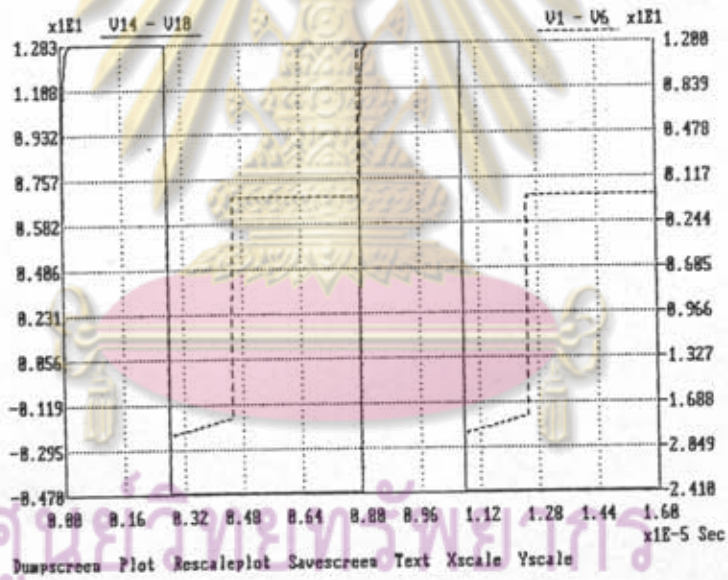
ตารางที่ 3.11 ผลการวัดค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงขับนำ



รูปที่ 3.54 วงจรขับนำเกทที่ใช้ในการชิมมูเลต

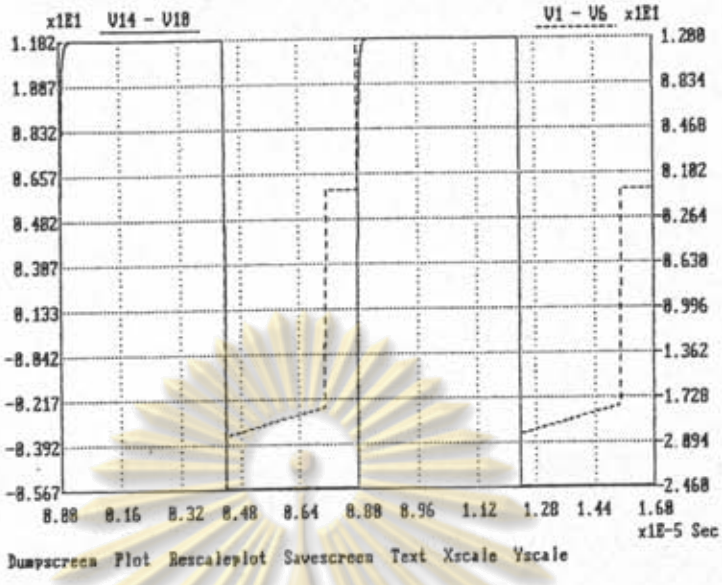
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้นแต่จะแตกต่างกันไม่มากนัก ส่วนค่าความต้านทานเนื่องจากลวดตัวนำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้นเป็นผลมาจากปรากฏการณ์ผิว และความแตกต่างจะค่อนข้างมากพอสมควร ในการชิมมูเลตจะใช้พารามิเตอร์ที่ความถี่ 125 กิโลเฮิรตซ์ วงจรที่ชิมมูเลตจะแสดงดังรูปที่ 3.54 โดยในวงจรจะพิจารณาให้เกทและซอร์ซของมอสเฟตกำลัง เป็นเสมือนตัวเก็บประจุขนาดเล็กมีค่าประมาณ 30 นาโนฟารัด ในการชิมมูเลตจะใช้โปรแกรม LEC(เอกชัย ลีลารัศมี, 2530) ผลการชิมมูเลตที่ภาวะมีมอสเฟตกำลังและไม่มีมอสเฟตกำลังแสดงดัง รูปที่ 3.55 และรูปที่ 3.56 ตามลำดับ

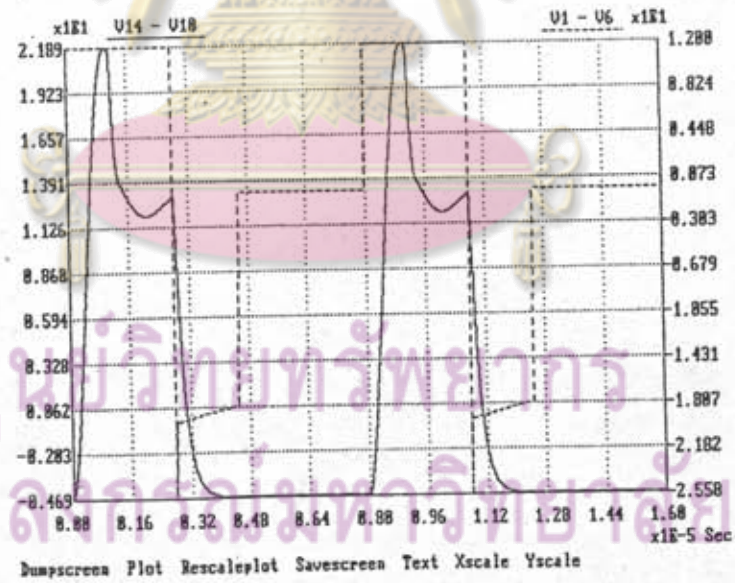


รูปที่ 3.55a ผลการชิมมูเลตเมื่อวัฏจักรงานเป็น 35% เมื่อไม่ต่อมอสเฟตกำลัง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

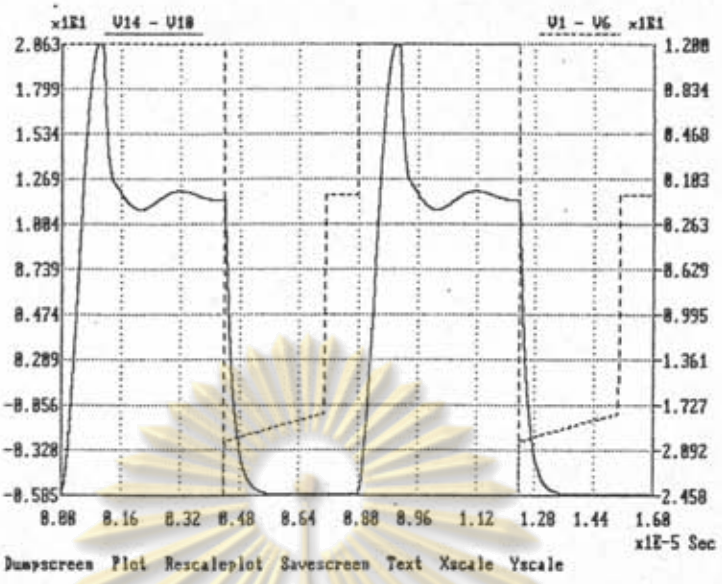


รูปที่ 3.55b ผลการชิมูเลตเมื่อวัฏจักรงานเป็น 55% เมื่อไม่ต่อมอสเฟตกำลัง



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.56a ผลการชิมูเลตเมื่อวัฏจักรงานเป็น 35% เมื่อมอสเฟตกำลัง

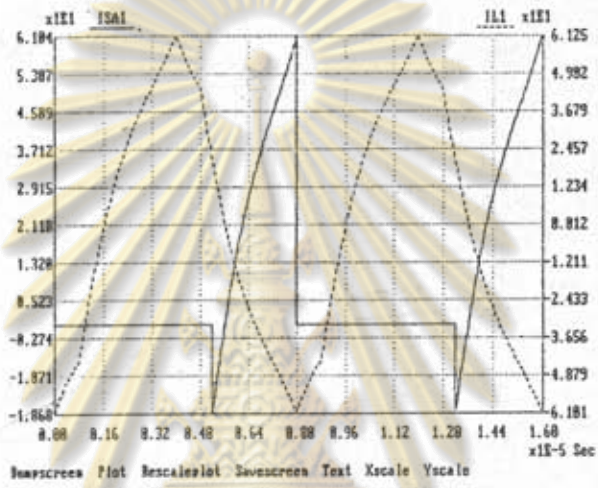


รูปที่ 3.56b ผลการซิมูเลตเมื่อวัฏจักรงานเป็น 55% เมื่อต่อมอสเฟตกำลัง

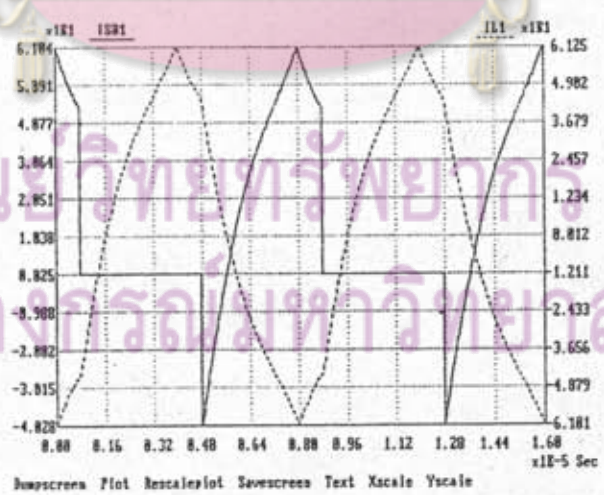
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5.3 วงจรป้องกันและควบคุม

เนื่องจากอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่มีราคาแพง และเสียหายง่ายที่สุดในวงจร คือมอสเฟตกำลังซึ่งต่อเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ ในการป้องกันวงจรจุดประสงค์หลักก็เพื่อป้องกันมอสเฟตกำลังเหล่านี้ เนื่องจากมอสเฟตกำลังอาจเสียหายได้จากกรณีที่มีกระแสไหลผ่านเกินขนาดขณะนำกระแส หรืออาจเสียหายได้เมื่อมอสเฟตกำลังได้รับแรงดันเกินในขณะหยุดนำกระแส วงจรป้องกันจึงอาจแบ่งเป็น 2 ส่วนดังนี้

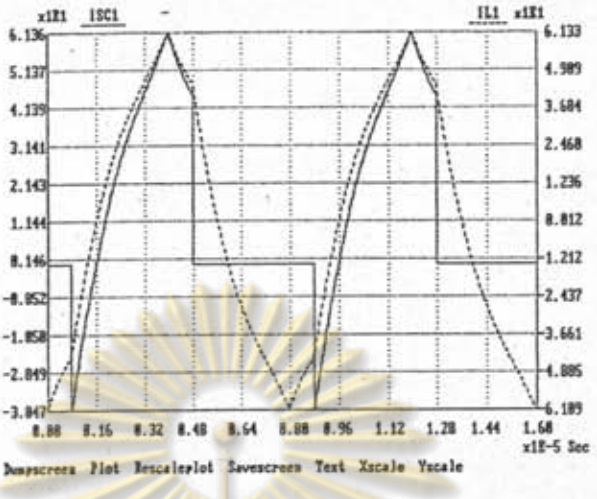


รูปที่ 3.57a รูปคลื่นกระแสผ่าน ISA1 หรือ ISA2
กับกระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลัง

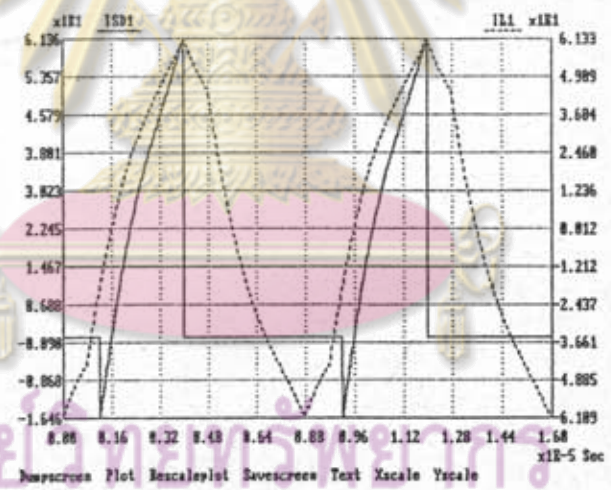


รูปที่ 3.57b รูปคลื่นกระแสผ่าน ISB1 หรือ ISB2
กับกระแสปฐมภูมิของหม้อแปลง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.57c รูปคลื่นกระแสผ่าน ISC1 หรือ ISC2
กับกระแสปฐมภูมิของหม้อแปลง



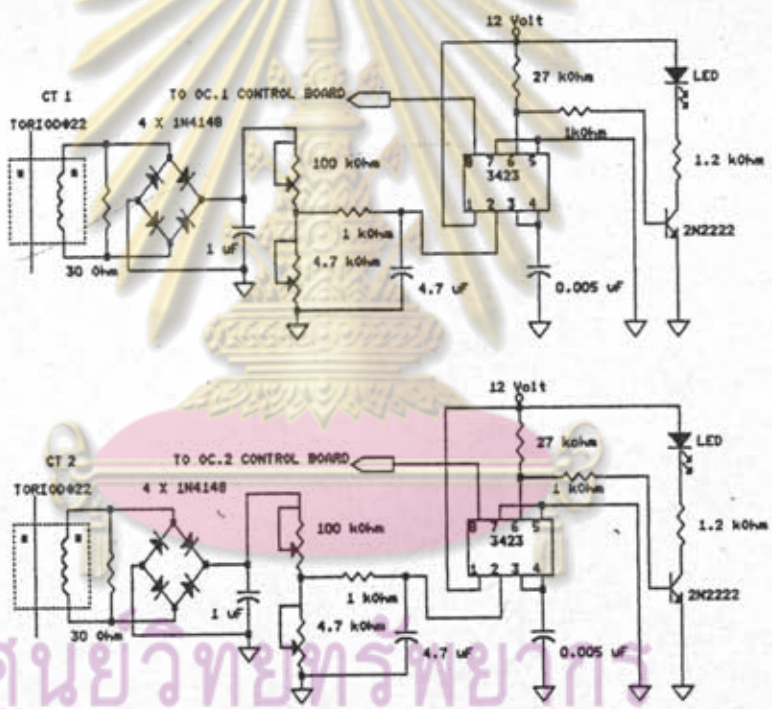
รูปที่ 3.57d รูปคลื่นกระแสผ่าน ISD1 หรือ ISD2
กับกระแสปฐมภูมิของหม้อแปลง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5.3.1 วงจรป้องกันกระแสเกิน

วงจรส่วนนี้ทำหน้าที่ตรวจค่ากระแสที่ผ่านมอสเฟตกำลังว่าเกินขีดจำกัดที่กำหนด หรือไม่ โดยถ้าเกินกว่าขีดจำกัดวงจรส่วนนี้จะส่งสัญญาณให้วงจรควบคุม เพื่อ

หยุดการขับนำมอสเฟตกำลังทุกตัว และตัดวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะจากแหล่งจ่ายไฟ พบว่าถ้าจะทำการป้องกันกระแสที่ผ่านมอสเฟตกำลังทุตัว จะเป็นการยุ่งยากและสิ้นเปลืองมาก เนื่องจากในวงจรจะมีมอสเฟตกำลังทั้งหมด 16 ตัว ในการออกแบบจึงไม่ใช้วิธีนี้ แต่ใช้วิธีตรวจค่ากระแสที่ผ่านมอสเฟตกำลังทางอ้อม โดยจะตรวจจากค่ากระแสที่ผ่านขดปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลังและแยกโดดแทน ถ้าพิจารณาจากรูปที่ 3.57 พบว่ากระแสที่ผ่านมอสเฟตกำลังจะเป็นเพียงส่วนหนึ่งของกระแสที่ผ่านขดปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลังและแยกโดด และค่ายอดของกระแสที่ผ่านขดปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลัง จะเป็นค่ายอดของกระแสที่ผ่านมอสเฟตกำลัง SB1 SB2 SC1 และ SC2 ดังที่กล่าวข้างต้นจึงสามารถตรวจค่ากระแสที่ผ่านขดปฐมภูมิของหม้อแปลงแทนได้ จากกระแสที่ผ่านขดปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลังจะเป็นกระแสสลับความถี่สูงที่มีลักษณะใกล้เคียงกับสัญญาณไซน์ จึงออกแบบวงจรป้องกันกระแสเกินดังรูปที่ 3.58



รูปที่ 3.58 วงจรป้องกันกระแสเกินของอินเวอร์เตอร์ทั้ง 2 ชุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 3.58 สามารถอธิบายได้ดังนี้ ในการตรวจวัดกระแสที่ผ่านขดปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลัง จะใช้หม้อแปลงกระแสตรวจวัด เนื่องจากความถี่ของกระแสค่อนข้างสูงจึงใช้หม้อแปลงแกนเฟอร์ไรทแบบโทรอยด์เบอร์ 22 โดยขดปฐมภูมิของหม้อแปลงกระแสคือกระแสที่ต้องการวัด ในทางปฏิบัติเพื่อความสะดวกจะให้กระแสที่ต้องการวัด

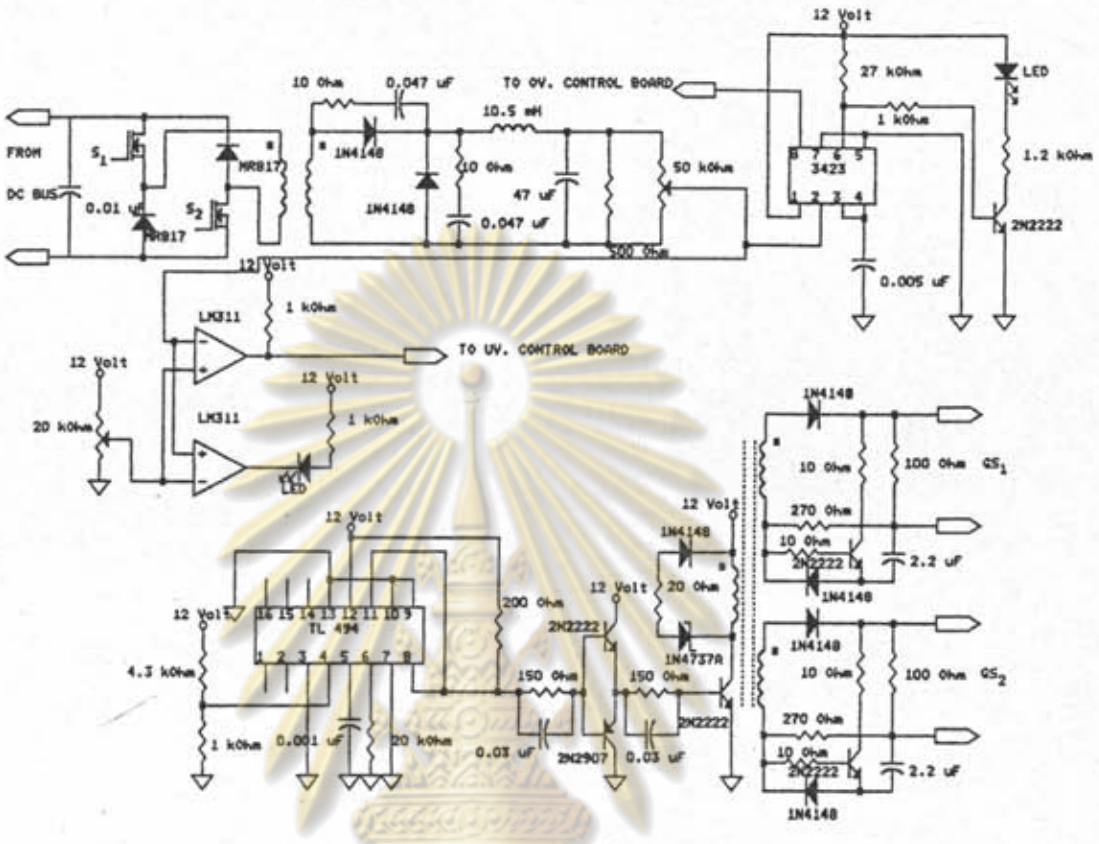
คล้องผ่านหม้อแปลงกระแสจำนวน 1 รอบ ส่วนขดทุติยภูมิจะใช้ลวด SWG#31 พันให้มีจำนวนรอบเป็น 100 รอบ กระแสที่ผ่านขดทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส จะมีรูปร่างเช่นเดียวกับกระแสที่ผ่านขดปฐมภูมิของหม้อแปลงกระแสเพียงแต่มีขนาดลดลง 100 เท่าเนื่องจากอัตราการแปลงของหม้อแปลงกระแส เมื่อได้สัญญาณกระแสที่ต้องการวัดแล้วจะเปลี่ยนสัญญาณดังกล่าวให้เป็นแรงดัน โดยให้กระแสด้านขดทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสผ่านตัวต้านทานขนาด 30 โอห์ม 5 วัตต์ แรงดันที่คร่อมตัวต้านทานจะมีลักษณะเช่นเดียวกับกระแสที่ต้องการวัด จากแรงดันกระแสสลับที่ได้จะผ่านวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ และกรองให้เรียบโดยใช้ตัวเก็บประจุขนาด 1 ไมโครฟารัด ระดับแรงดันไฟตรงที่กรองได้จะแปรตามค่ายอดของกระแสที่ต้องการตรวจวัด เมื่อได้แรงดันไฟตรงแล้วจะแบ่งแรงดันเพื่อทำการเปรียบเทียบด้วยตัวต้านทานปรับค่าได้ จากนั้นจะกรองด้วยวงจรกรองผ่านต่ำ สัญญาณที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงโดยใช้ไอซีเบอร์ 3423 (Motorola Linear/Switchmode/Voltage Regulator Hand Book, 1979) สัญญาณที่ต้องการเปรียบเทียบจะป้อนเข้าสู่ขา 2 ของไอซี 3423 เพื่อเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงภายในไอซี 3423 ที่มีขนาด 2.6 โวลต์ ถ้าสัญญาณที่ขา 2 ของไอซี 3423 มีค่าสูงกว่าแรงดันอ้างอิงภายในเป็นเวลาที่นานกว่าช่วงเวลาที่หน่วงไว้ ที่ขา 6 ของไอซี 3423 เดิมมีแรงดันประมาณ 12 โวลต์ จะมีแรงดันลดลงเป็น ศูนย์ โวลต์ ที่ขา 8 ของไอซี 3423 จะให้สัญญาณที่เป็นพัลส์ออกมา 1 พัลส์ เนื่องจากสัญญาณที่เกิดเป็นพัลส์แคบๆจึงส่งสัญญาณดังกล่าวไปสู่วงจรควบคุมเพื่อคงสถานะสภาวะกระแสเกินไว้ เมื่อวงจรส่วนควบคุมได้รับสัญญาณจะสั่งให้วงจรขับนำเกททุกตัวหยุดการทำงาน มอสเฟตทุกตัวจึงหยุดการทำงานและตัดวงจรอินเวอร์เตอร์ออกจากแหล่งจ่ายไฟ นอกจากนี้วงจรควบคุมจะแสดงภาวะผิดปกติว่ากระแสที่เกินขีดจำกัดมาจากอินเวอร์เตอร์ชุดที่ 1 หรืออินเวอร์เตอร์ชุดที่ 2 ที่ไอซี 3423 ตัวเก็บประจุที่ต่อที่ขา 3 และ 4 ขนาด 0.02 ไมโครฟารัด เป็นตัวเก็บประจุที่กำหนดช่วงเวลาที่ต้องการหน่วงไว้ เพราะบางทีอาจมีสัญญาณกวนเข้าสู่วงจรในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ถ้าไม่มีการหน่วงเวลาวงจรป้องกันกระแสเกินจะส่งสัญญาณให้วงจรควบคุมทำงานทันที ซึ่งเป็นการป้องกันที่ผิดพลาด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5.3.2 วงจรป้องกันแรงดันเกิน

ดังที่กล่าวมอสเฟตกำลังอาจเสียหาย ถ้าได้รับแรงดันเกินขีดจำกัดขณะหยุดนำกระแสจึงต้องมีวงจรป้องกันแรงดันเกิน ในการป้องกันแรงดันเกินอาจตรวจวัดจากแรงดันไฟสามเฟส หรืออาจตรวจวัดจากระดับแรงดันไฟตรงที่จ่ายให้แก่วงจรอินเวอร์เตอร์ วงจรป้องกันในที่นี้จะใช้วิธีตรวจวัดแรงดันไฟตรงเพราะแรงดันไฟตรงจะต่อเข้ากับวงจรอินเวอร์เตอร์โดยตรง การตรวจวัดจากแรงดันไฟตรงจึงเป็นการป้องกันที่รวดเร็ว เนื่องจากแรงดันไฟตรงที่ตรวจวัดจะต่ออยู่กับแรงดันไฟสามเฟส เพื่อความปลอดภัยจึงควร

แยกโดดสัญญาณที่สามารถตรวจวัดได้ออกจากแหล่งจ่ายไฟสามเฟส วงจรดังกล่าวสามารถแสดงดังรูปที่ 3.59

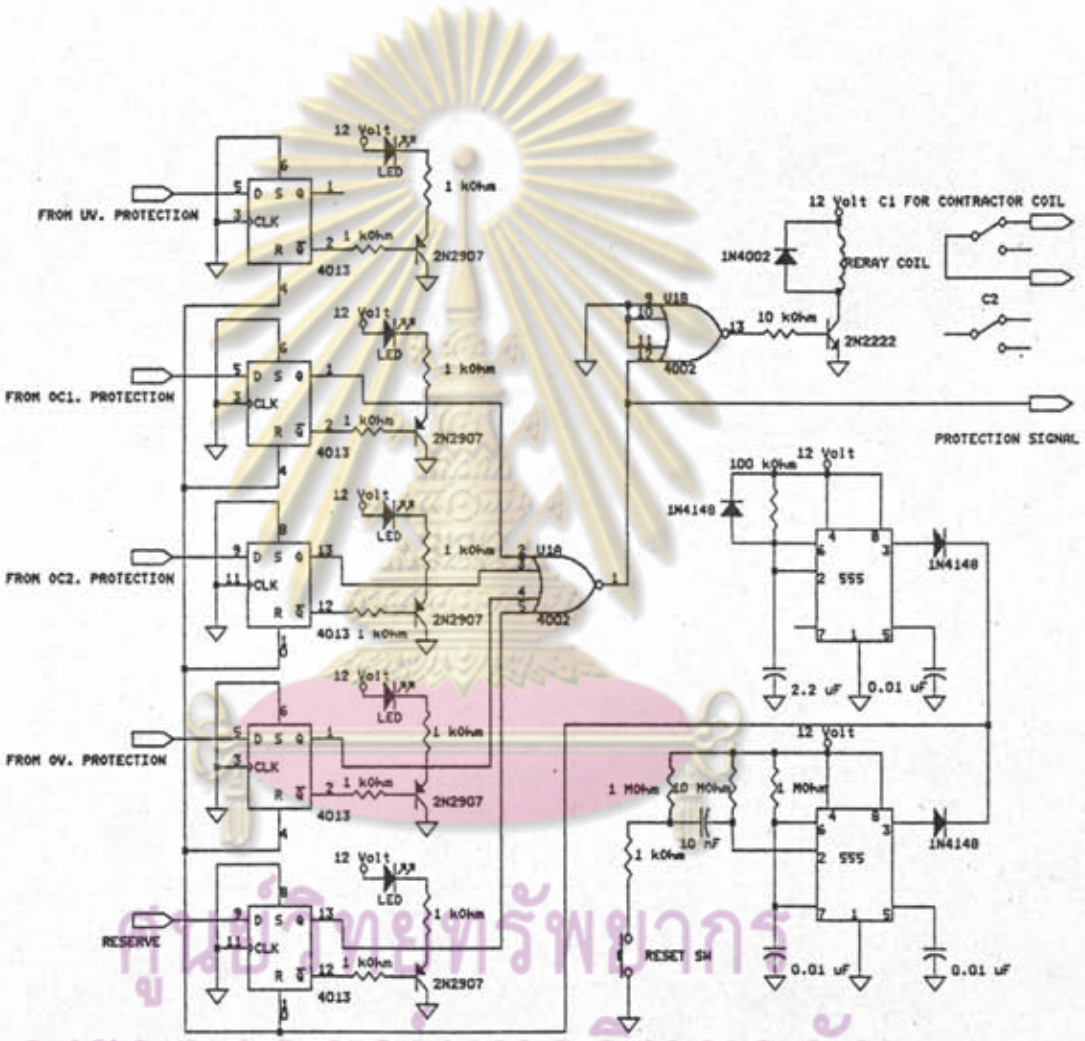


รูปที่ 3.59 วงจรป้องกันแรงดันเกิน

จากรูปที่ 3.59 วงจรตรวจวัดแรงดันไฟตรง จะใช้วงจรแปลงผันไฟตรงเป็นไฟตรงแบบอะซิมเมตตริเคิลบริดจ์ ซึ่งสร้างสัญญาณขับนำโดยใช้ไอซีเบอร์ 494 สัญญาณขับนำจะมีวัฏจักรงานประมาณ 40 เปอร์เซนต์ ที่ความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ สัญญาณขับนำนี้จะส่งให้แก่วงจรขับนำเกทมอสเฟต ที่มีสัญญาณออกสองสัญญาณเพื่อไปขับนำมอสเฟต 3N80 ที่ต่อเป็นวงจรอะซิมเมตตริเคิลบริดจ์ โดยวงจรนี้จะทำการแปลงแรงดันไฟตรงที่ตรวจวัดให้มีค่าเล็กลงตามอัตราการแปลงของหม้อแปลงแยกโดด และวัฏจักรงาน สัญญาณที่ได้จะแยกโดดออกจากสัญญาณที่ตรวจวัด และสัญญาณที่ได้จะส่งไปเปรียบเทียบกับระดับแรงดันอ้างอิงที่ตั้งค่าไว้ ถ้าระดับแรงดันไฟตรงที่ตรวจวัดมีค่ามากกว่า 560 โวลต์ เป็นเวลานานกว่าที่หน่วงเวลาไว้ วงจรป้องกันแรงดันเกินจะทำงานโดย ไอซี 3423 จะส่งสัญญาณที่เป็นพัลส์ออกมาที่ขา 8 สัญญาณที่เป็นพัลส์นี้จะถูกส่งให้วงจรควบคุมคงสภาวะไว้ และวงจรส่วนควบคุมจะส่งสัญญาณให้วงจรขับนำเกททุกตัวหยุดการทำงาน ทำให้มอสเฟตกำลังทุกตัวหยุดการทำงาน และ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัดแหล่งจ่ายไฟจากวงจรอินเวอร์เตอร์ นอกจากนี้วงจรควบคุมยังแสดงภาวะการผิดปกติเนื่องจากแรงดันเกินด้วย ในการตรวจวัดแรงดันไฟตรงจะตรวจด้วยว่าถ้าแรงดันไฟตรงมีค่าต่ำกว่า 480 โวลต์ วงจรป้องกันจะส่งสัญญาณให้วงจรควบคุมรับรู้และแสดงภาวะแรงดันต่ำกว่าปกติ แต่ในช่วงเวลานี้แม้ว่าแรงดันที่ภาคแหล่งจ่ายไฟต่ำกว่าปกติ วงจรจะยังสามารถทำงานได้เพราะภาวะแรงดันต่ำกว่าปกติจะไม่เป็นอันตรายต่อระบบ วงจรควบคุมสัญญาณป้องกันแสดงดังรูปที่ 3.60



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.60 วงจรควบคุมสัญญาณป้องกัน

จากรูปที่ 3.60 วงจรควบคุมจะรับสัญญาณที่เป็นพัลส์ จากส่วนป้องกันกระแสเกินที่มีอยู่ 2 ชุด และรับสัญญาณที่เป็นพัลส์จากวงจรส่วนป้องกันแรงดันเกิน ถ้ามี

พัลส์ของสัญญาณใดสัญญาณหนึ่งหรือของทั้งสามสัญญาณถูกส่งมาที่วงจรส่วนควบคุม จะทำให้รีเรย์ส่วนควบคุมทำงาน และหน้าคอนแทคของรีเรย์ชุดนี้จะตัดไฟเลี้ยงขดลวดทำแม่เหล็กของแมคเนติคคอนแทกเตอร์ เพื่อตัดแหล่งจ่ายไฟภาคกำลังจากวงจรอินเวอร์เตอร์ และที่วงจรควบคุมจะส่งสัญญาณอีกส่วนหนึ่งไปที่วงจรส่วนสร้างสัญญาณขับนำ เพื่อให้สัญญาณขับนำเกทของมอสเฟตกำลังทุกตัวเป็นศูนย์ มอสเฟตกำลังทุกตัวจะหยุดนำกระแส และเมื่อเกิดภาวะผิดปกติจากกระแสเกินหรือแรงดันเกินก็ตาม วงจรส่วนควบคุมจะมีไฟบอกภาวะผิดปกติด้วยว่าสาเหตุมาจากไหน เมื่อเกิดภาวะผิดปกติแล้ววงจรทั้งหมดจะสามารถทำงานได้ใหม่ เมื่อกดสวิทช์รีเซทการทำงานของระบบ วงจรควบคุมจะส่งสัญญาณไปเริ่มต้นระบบใหม่ วงจรสร้างสัญญาณขับนำจะสร้างสัญญาณขึ้นใหม่ มอสเฟตกำลังจะได้รับสัญญาณขับนำเกทตามปกติทุกตัว ขณะเดียวกันขดลวดทำแม่หล็กของแมคเนติคคอนแทกเตอร์จะได้รับไฟเลี้ยงอีกครั้ง จึงมีแหล่งจ่ายไฟภาคกำลังให้แก่อินเวอร์เตอร์ทั้งสองชุด และไฟแสดงภาวะผิดปกติจะคืนสู่ภาวะปกติ วงจรทั้งหมดจึงพร้อมทำงานอีกครั้ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย