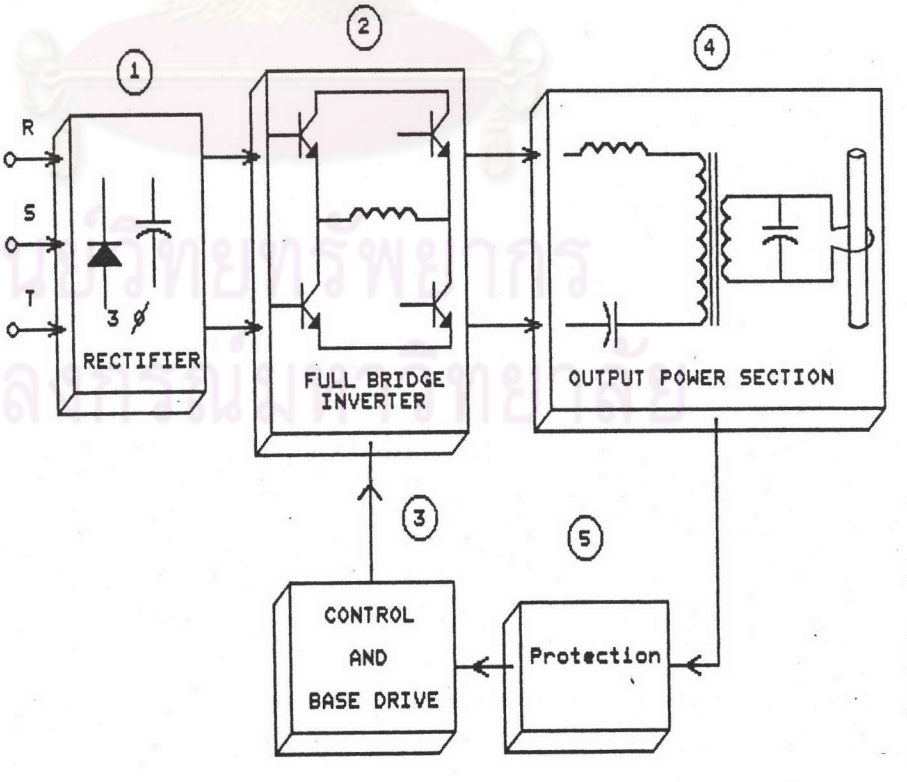
บทที่ 4

การออกแบบและสร้างเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

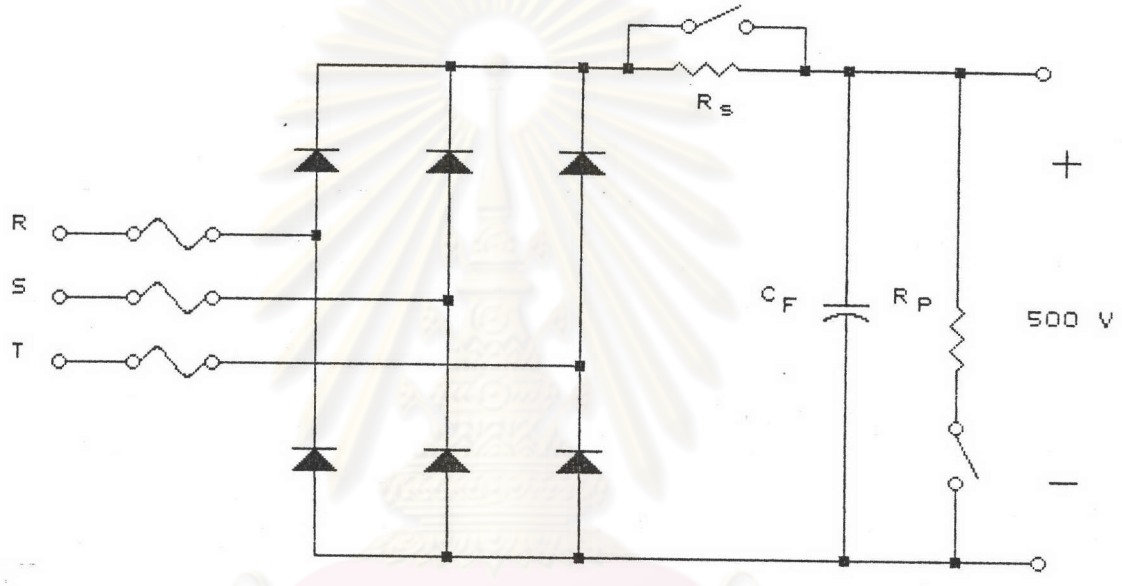
เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ได้พัฒนาและวิจัยขึ้นนี้ จัดว่าเป็นประเภทที่สร้างไฟฟ้ากระแสสลับด้วยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ โดยมีวงจรอินเวอร์เตอร์เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (Voltage Source Inverter) ซึ่งมีความถี่สูงประมาณ 50 กิโลเฮิรตซ์จ่ายให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ใช้ได้แก่ทรานซิสเตอร์กำลังแบบไบโพลาร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ (Device) กำลังขนาดใหญ่ที่หาได้ง่าย ราคาถูก และทนพิกัดทั้งกระแสและแรงดันได้สูงแต่ต้องใช้การขับนำที่ยุ่งยาก โดยเฉพาะถ้าต้องพยายามขับนำให้ทำงานที่ความถี่สูงเพื่อให้ใช้กับงานชุบแข็งผิวได้ดี ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและสร้างเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ โดยแยกอธิบายส่วนประกอบของเครื่องทีละส่วน ซึ่งส่วนประกอบของเครื่องให้ความร้อนนี้แบ่งตามหน้าที่และความสำคัญได้ 5 ส่วน ดังแสดงในบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

4.1 <u>แหล่งจ่ายไฟตรง</u>

ภาคนี้แสดงไว้ในบล็อกที่ 1 ของรูป วงจรในส่วนนี้ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังให้แก่เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ โดยจะรับแรงดันไฟกระแสสลับ 3 เฟสขนาด 380 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ผ่านวงจรเรียงกระแส 3 เฟส แบบบริดจ์ แล้วผ่านวงจรกรอง โดยใช้ตัวเก็บประจุ ทำให้ได้ค่าแรงดันไฟตรงประมาณ 500 โวลต์ วงจรในส่วนนี้แสดงรายละเอียดไว้ในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 วงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบบริดจ์

จากรูปที่ 4.2 ความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ มีหน้าที่จำกัดกระแสเมื่อวงจรเริ่มทำงาน เพราะในช่วงเวลานี้ แรงดันที่ตัวเก็บประจุยังมีค่าประมาณศูนย์โวลต์ ทำให้กระแสที่ไหลอัดประจุให้แก่ตัวเก็บประจุมีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งกระแสจำนวนนี้จะไหลผ่านไดโอดของวงจรเรียงกระแส อันอาจทำให้ไดโอดเสียหายได้ เมื่อแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเพิ่มขึ้นถึงระดับที่เหมาะสมแล้ว ตัวต้านทานนี้จะถูกลัดวงจรด้วยแมคเนติคคอนแทกเตอร์ เพื่อไม่ให้เกิดกำลังสูญเสียที่ R_s ขณะวงจรทำงาน และวงจรเรียงกระแสจะได้ส่งผ่านกำลังได้เต็มที่ ส่วนความต้านทานที่ต่อขนานกับตัวเก็บประจุมีหน้าที่คายประจุทิ้งไป เมื่อวงจรหยุดทำงานแล้ว เพื่อป้องกันมิให้เกิดอันตรายเนื่องจากประจุที่ค้างอยู่ ทั้งนี้เพราะประจุที่ค้างอยู่มีปริมาณมากและมีแรงดันสูง รายละเอียดเกี่ยวกับการออกแบบค่าต่าง ๆ ในภาคเรียงกระแสนี้จะกล่าวถึงเป็นหัวข้อต่อไป

4.1.1 การออกแบบค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ใช้กรองแรงดัน

ข้อมูลในการออกแบบ

แรงดันไฟตรงที่ได้จากการเรียงกระแสเมื่อผ่านวงจรกรองจะมีค่ายอด = 537.4 โวลต์

ให้แรงดันกระเพื่อมมีค่ายอดถึงยอดเป็น 2 เปอร์เซนต์ของแรงดันยอด = 537.4x0.02

= 10.8 โวลต์

แรงดันเฉลี่ยที่ตัวเก็บประจุจะมีค่า = 532 โวลต์

จากสูตร $$C = \frac{It}{V} \qquad (4.1)$$

โดยที่ I คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ

t คือ ช่วงเวลาที่ตัวเก็บประจุจ่ายกระแส

V คือ ค่าแรงดันกระเพื่อมจากยอดถึงยอดคร่อมตัวเก็บประจุ

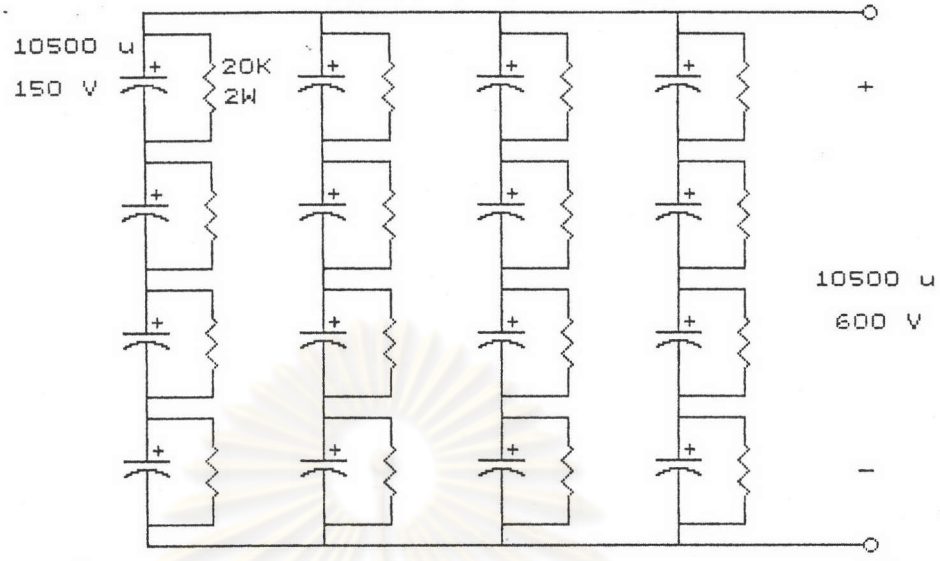
C คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุที่เป็นวงจรกรอง

จากวงจรในรูปที่ 4.2 ประมาณว่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุในช่วงที่ตัวเก็บประจุจ่ายกระแสมีค่าเท่ากับกระแสโหลด ซึ่งมีค่าประมาณ 25 แอมแปร์ และช่วงเวลาที่ตัวเก็บประจุจ่ายกระแสมีค่าประมาณ หนึ่งในหกของคาบเวลาเนื่องจากเป็นวงจรเรียงกระแสแบบ 3 เฟสเต็มคลื่น ช่วงเวลาดังกล่าวจึงมีค่าประมาณ 3.3 มิลลิวินาทีดังนั้นแทนค่าในสมการที่ (4.1) จะได้

$$C = \frac{25 \times 3.33 \times 10^{-3}}{10.8} = 7,716 \text{ ไมโครฟารัด}$$

ในทางปฏิบัติการเลือกตัวเก็บประจุจะเลือกให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้ และเลือกตัวเก็บประจุที่สามารถรับแรงดันไฟตรงอย่างน้อยที่สุด 540 โวลต์ และเผื่อการที่แรงดันไฟฟ้า 3 เฟส มีการขึ้นลงอีก 20 เปอร์เซนต์ จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาด 10500 ไมโครฟารัดที่สามารถทนแรงดันไฟตรงได้ 150 โวลต์ มาต่ออนุกรมกัน 4 ตัว เพื่อให้สามารถทนแรงดันไฟตรงได้ถึง 600 โวลต์ แต่การต่ออนุกรมเพื่อให้รับแรงดันได้สูงขึ้นจะทำให้ค่าความจุลดลงไปจึงต้องนำตัวเก็บประจุเช่นนี้ 4 ชุดมาต่อขนานดังรูปที่ 4.3 ทำให้ความจุรวมทั้งหมดเป็น 10500 ไมโครฟารัด และทนแรงดันได้สูงสุด 600 โวลต์ จะเห็นว่าค่าความจุที่ใช้มีค่ามากกว่าค่าที่คำนวณ ซึ่งจะส่งผลให้แรงดันกระเพื่อมที่ตัวเก็บประจุมีค่าลดลง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



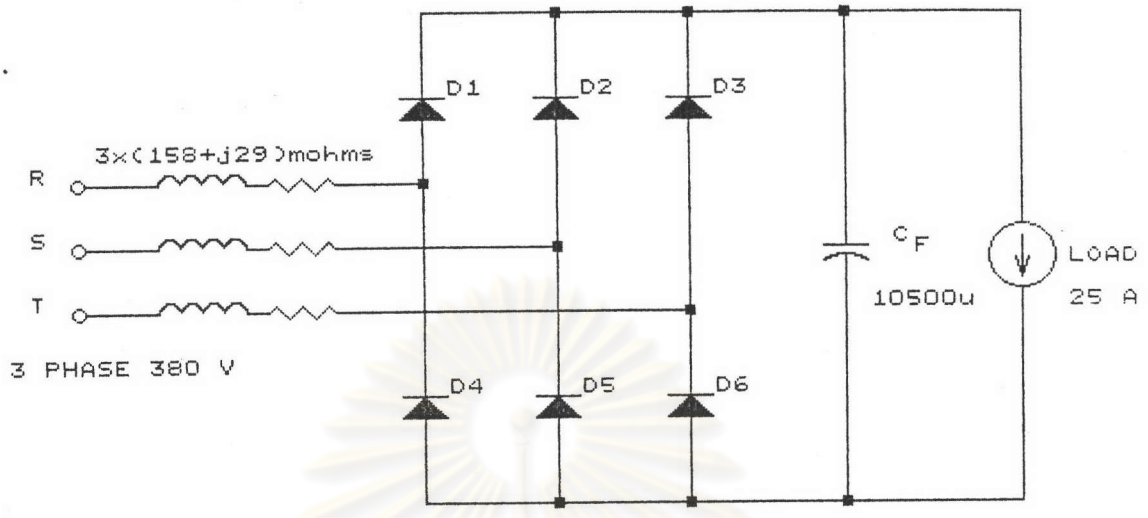
รูปที่ 4.3 แสดงการต่อตัวเก็บประจุ

นอกจากนี้ ควรจะมีความต้านทานค่าสูง ๆ เพื่อไม่ให้เกิดกำลังสูญเสียมากต่อขนานกับตัวเก็บประจุทุกตัว เพื่อช่วยให้ตัวเก็บประจุที่อนุกรมกันทุกตัวรับแรงดันได้เท่ากัน ซึ่งในที่นี้ได้เลือกใช้ความต้านทานขนาด 20 กิโลโอห์ม 2 วัตต์

4.1.2 การออกแบบไดโอดที่ใช้ในวงจรเรียงกระแส

การคำนวณขนาดของกระแสที่ผ่านไดโอดโดยตรงนั้น ค่อนข้างจะยุ่งยาก ในทางปฏิบัติจะใช้วิธีหาขนาดกระแสที่ผ่านไดโอด โดยการชิมมูเลตด้วยโปรแกรมวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า LEC (เอกชัย ลีลารัศมี,2530) เพื่อวิเคราะห์หาค่ากระแสอาร์เอ็มเอส และค่ากระแสยอดที่ผ่านไดโอดเพื่อนำไปใช้ในการเลือกค่าพิกัดของไดโอด วงจรที่ใช้ในการชิมมูเลตแสดงไว้ดังรูปที่ 4.4

จากรูปที่ 4.4 หากประมาณว่ากำลังงานที่เข้าสู่ระบบมีค่าประมาณ 13.3 กิโลวัตต์ แหล่งจ่ายไฟตรงจะต้องจ่ายกระแสโหลดประมาณ 25 แอมแปร์ (จึงแทนวงจรทางด้านโหลดด้วยแหล่งจ่ายกระแสตรง 25 แอมแปร์) สำหรับอิมพีแดนซ์ของระบบไฟสามเฟสคำนวณอย่างประมาณได้จาก อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงจากการไฟฟ้า บวกกับอิมพีแดนซ์ของสายที่ต่อจากหม้อแปลงมายังเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ โดยถ้าประมาณว่าหม้อแปลงจ่ายกำลังของการไฟฟ้ามีขนาด 250 กิโลโวลต์แอมแปร์ จากตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงขนาดอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงกำลัง (ธนบูรณ์ ศศิภาณุเดช, 2530) จะพบว่าหม้อแปลงขนาดนี้ จะมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ 8.32 + j24.19 มิลลิโอห์ม ส่วนอิมพีแดนซ์ของสายที่ต่อมายังเครื่องให้ประมาณว่าสายไฟที่ใช้มีขนาด 6 มม. และมีความยาวจากหม้อแปลงการไฟฟ้าถึงเครื่องเท่ากับ 50 เมตร



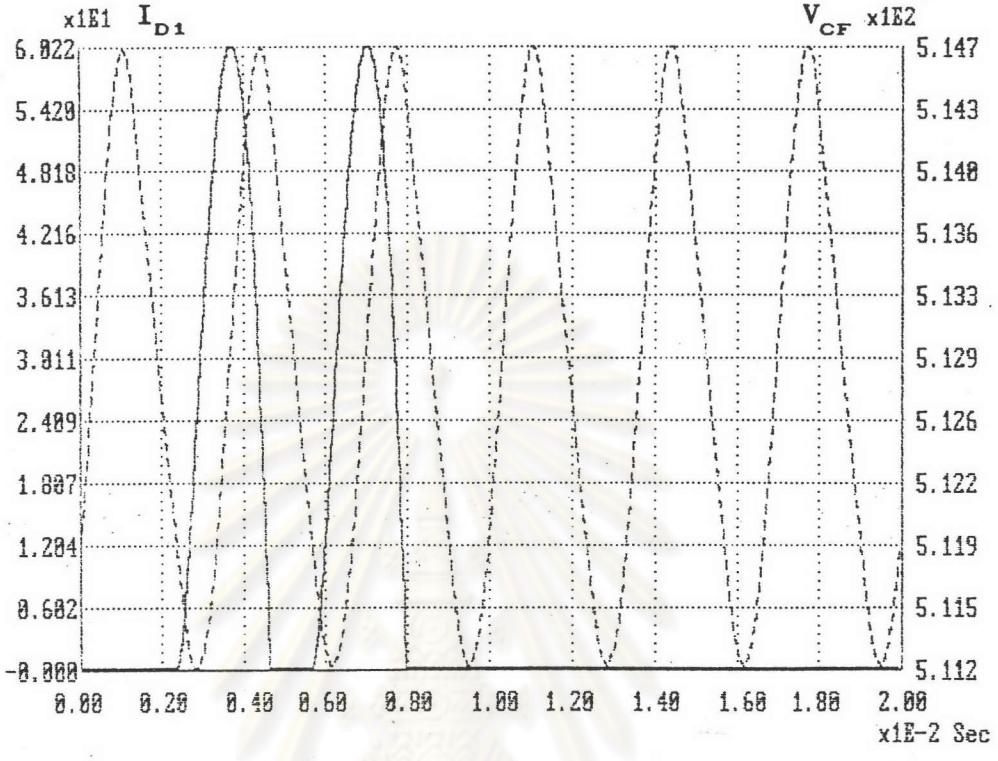
รูปที่ 4.4 วงจรที่ใช้ในการชิมมูเลตเพื่อวิเคราะห์กระแสที่ผ่านไดโอด

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

ตารางที่4.1 แสดงอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

จากตาราง และจากการคำนวณค่าความต้านทาน และค่ารีแอกแตนซ์ของสายไฟตามหนังสืออ้างอิง (ธนบูรณ์ สสิภาณุเดช, 2530) จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ต่อเฟสเท่ากับ 150 + j4.79 มิลลิโอห์ม

ดังนั้นอิมพีแดนซ์ของระบบไฟสามเฟสที่จ่ายให้กับภาคเรียงกระแสจึงเท่ากับ 158 + j29.0 มิลลิโอห์มและจากวงจรในรูปที่ 4.4 เมื่อนำไปวิเคราะห์โดยการชิมมูเลตด้วยโปรแกรม LEC ซึ่งจะพิจารณาในภาวะอยู่ตัว ทำให้ได้รูปกระแสผ่านไดโอดแต่ละตัว (ID1)



รูปที่ 4.5 แสดงกระแสไดโอดและแรงดันของตัวเก็บประจุที่ได้จากการชิมมูเลต

แรงดันคร่อม C_F ดังรูปที่ 4.5 และจากรูปที่ได้นำมาคำนวณหาพิกัดของไดโอดได้ดังนี้

ไดโอดที่ใช้จะต้องทนค่ากระแสอาร์เอ็มเอสอย่างน้อย 20 แอมแปร์

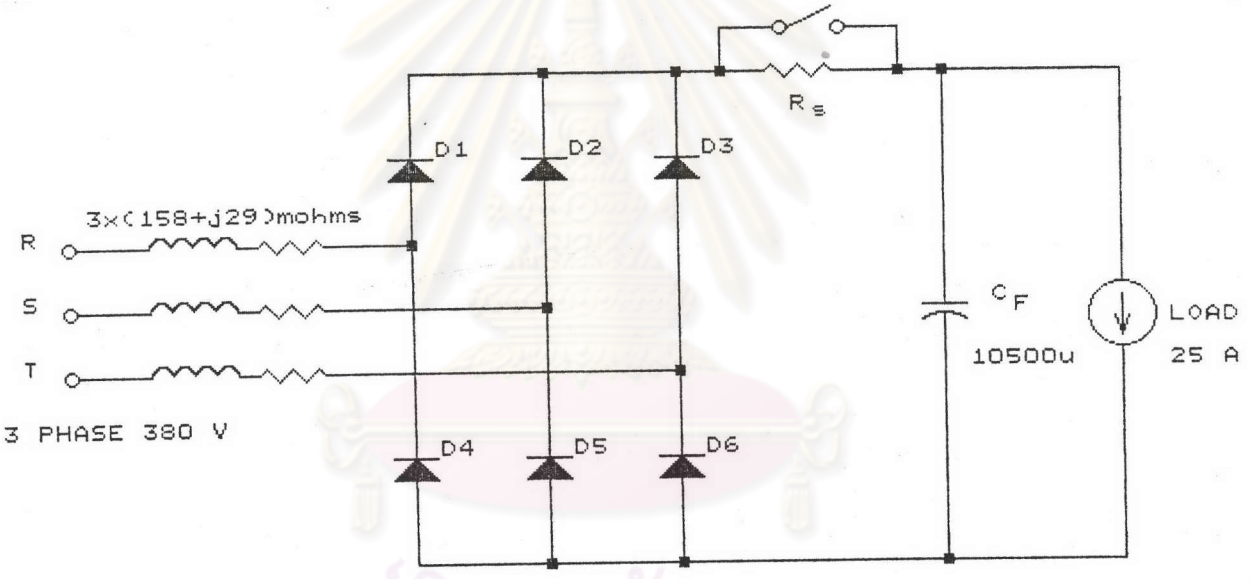
และทนค่ากระแสยอดได้ 60 แอมแปร์

และทนแรงดันขณะไม่นำกระแสได้ 540 โวลต์

ในทางปฏิบัติเพื่อความสะดวกในการติดตั้ง จึงเลือกใช้ไดโอดแบบโมดูลที่ภายในมีไดโอดต่ออยู่ 6 ตัว ในลักษณะวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 3 เฟส ซึ่งโมดูลที่ใช้ไดโอดแต่ละตัวมีพิกัดของกระแสอาร์เอ็มเอสเท่ากับ 50 แอมแปร์ และสามารถทนแรงดันขณะไม่นำกระแสได้ 800 โวลต์ อีกทั้งยังทนกระแสเสิร์จไปหน้าแบบไม่ซ้ำได้ 300 แอมแแปร์ ซึ่งกระแสเสิร์จค่านี้จะเป็นตัวกำหนดค่าความต้านทานที่ใช้จำกัดกระแสอัดตัวเก็บประจุ ซึ่งจะคำนวณในหัวข้อต่อไป

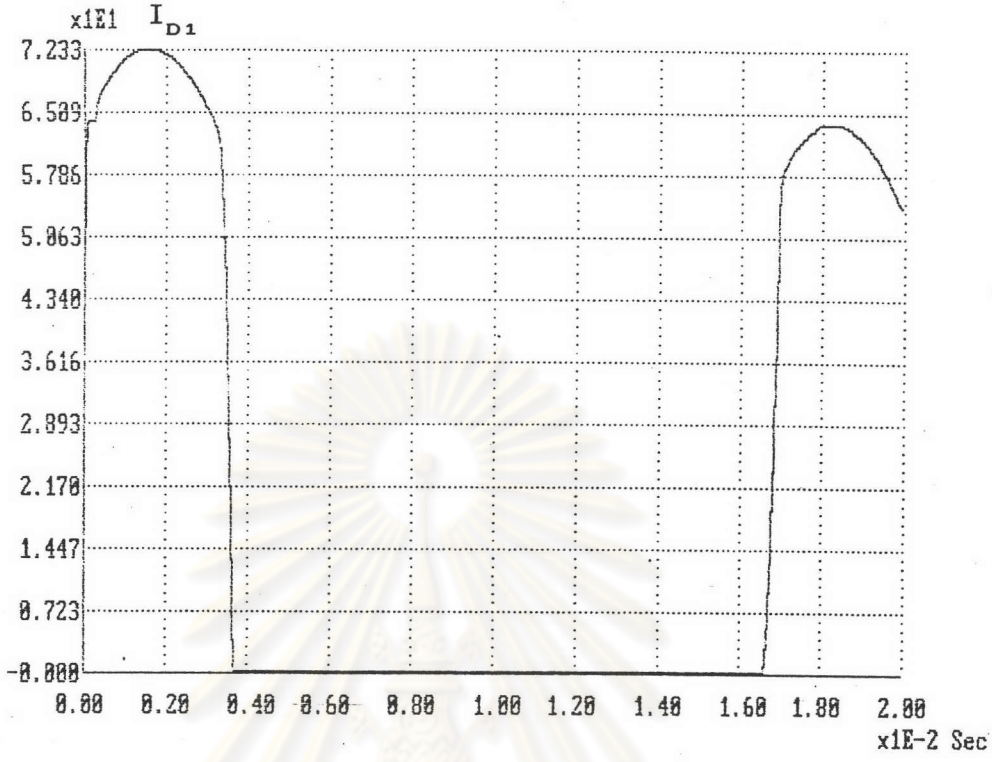
4.1.3 การออกแบบค่าความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ

การคำนวณค่าความต้านทานจำกัดกระแสที่ผ่านไดโอด ค่อนข้างยุ่งยากในทางปฏิบัติจึงใช้วิธีชิมมูเลตด้วยโปรแกรม LEC (เอกชัย ลีลารัศมี, 2530) เช่นเดียวกับการออกแบบไดโอด รูปวงจรที่ใช้จำลองการทำงานจะเป็นดังรูปที่ 4.6 ซึ่งจะมีตัวต้านทานต่อขนานกับหน้าคอนแทกของแมกเนติคคอนแทคเตอร์ ซึ่งต่ออนุกรมอยู่ระหว่างวงจรเรียงกระแสและตัวเก็บประจุ ในการชิมมูเลตจะใช้วิธีเลือกค่าความต้านทาน และช่วงเวลาที่ต้องการให้ตัวต้านทานนำกระแสก่อนที่จะให้หน้าสัมผัสของคอนแทกนำกระแสแทน จากนั้นจึงพิจารณาผลการชิมมูเลตที่ได้ โดยค่ากระแสเสิร์จไปหน้าที่ผ่านไดโอดแต่ละตัวต้องมีค่าไม่เกินค่ากระแสเสิร์จไปหน้าแบบไม่ซ้ำของไดโอดที่เลือกไว้ ซึ่งสำหรับไดโอดตัวนี้มีค่า 300 แอมแปร์



รูปที่ 4.6 แสดงวงจรที่ใช้ในการชิมมูเลต เพื่อวิเคราะห์หาค่าความต้านทานจำกัดกระแส

และหลังจากการชิมมูเลต โดยการเลือกค่าความต้านทาน และช่วงเวลาที่เหมาะสมอยู่หลายค่าจะพบว่าถ้าใช้ความต้านทาน 7 โอห์ม และช่วงเวลา 0.3 วินาที กระแสเสิร์จไปหน้าผ่านไดโอด จะมีค่าสูงสุดดังรูปที่ 4.7 ซึ่งมีค่าไม่เกิน 73 แอมแปร์ สำหรับช่วงเวลา 0.3 วินาทีนี้ ใช้วงจรหน่วงเวลาที่สร้างขึ้นจากไอซี LM 555 (Timer) ในการควบคุมการทำงานของแมคเนติกคอนแทกเตอร์ เนื่องจากกระแสที่ผ่านความต้านทานตัวนี้มีค่าสูงมาก ถึงแม้ว่าจะเป็นช่วงเวลาเพียงสั้น ๆ จึงต้องออกแบบเผื่อค่าพัลส์ของกระแสนี้ด้วย โดยให้ความต้านทานมีขนาด 100 วัตต์



รูปที่ 4.7 แสดงกระแสไดโอดที่เป็นกระแสเสิร์จ ซึ่งได้จากการชิมมูเลต

4.1.4 การออกแบบค่าความต้านทานที่ใช้ในการคายประจุ

เนื่องจากตัวเก็บประจุมีค่าสูง และแรงดันคร่อมตัวตัวเก็บประจุก็มีค่ามาก ดังนั้นจึงต้องมีการคายประจุออกเพื่อป้องกันอันตรายหลังจากวงจรหยุดทำงาน หรือเพื่อความปลอดภัยสำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์ในขณะที่เริ่มเปิดเครื่องทันที การออกแบบค่าความต้านทานนี้ขึ้นอยู่กับค่าคงตัวเวลาของการคายประจุซึ่งคำนวณได้มาจากสมการที่ (4.2) โดยกำหนดให้แรงดันเริ่มต้นก่อนคายประจุเท่ากับ 532 โวลต์ แรงดันหลังคายประจุเท่ากับ 10 โวลต์ และเวลาที่ใช้ในการคายประจุเท่ากับ 1 วินาที

จากสูตร $$V_f = V_i \exp\left[\frac{-t}{RC}\right] \qquad (4.2)$$

แทนค่า $V_i = 532$ โวลต์ , $V_f = 10$ โวลต์ , $t = 1$ วินาที

$C = 10500$ ไมโครฟารัด

จะได้ $R = 24$ โอห์ม

และสามารถคำนวณพลังงานที่ตัวเก็บประจุคายให้แก่ความต้านทานด้วยสูตร ดังนี้

พลังงานที่คายออก $= \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \times 10500 \times 10^{-6} \times (532)^2$

$= 1.486$ กิโลจูล

และคิดเป็นกำลังงาน Power $= \frac{\text{Energy}}{\text{Time}}$

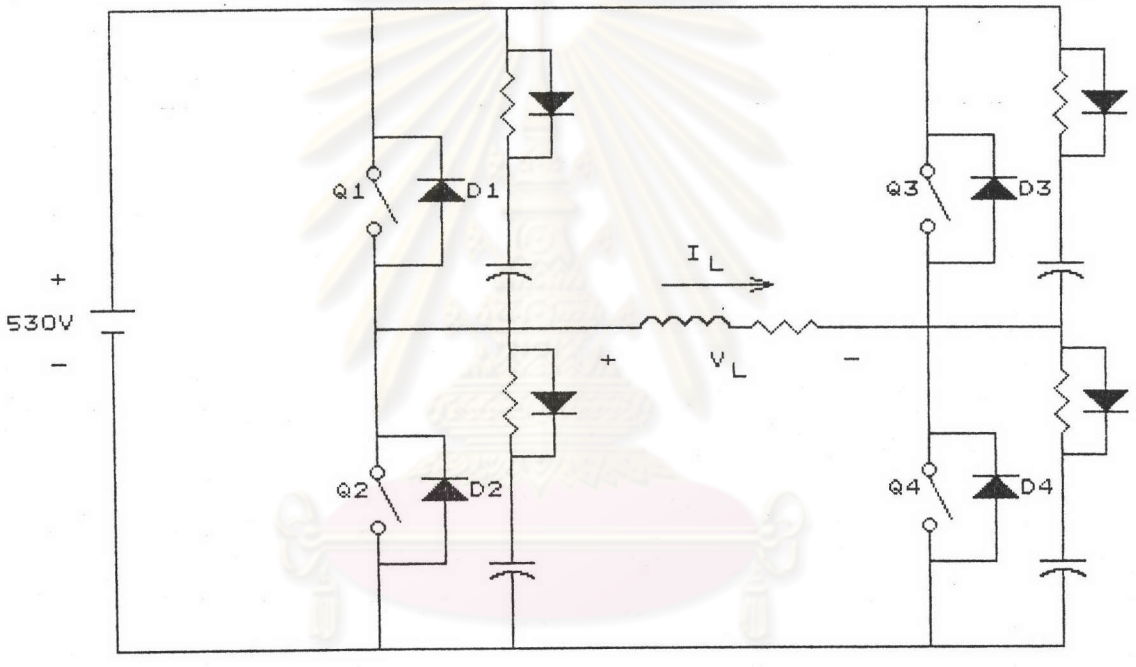
$= \frac{1.486}{1} = 1.486$ กิโลวัตต์

แต่เนื่องจากการคายประจุเกิดขึ้น เพียงช่วงเวลาสั้นๆ อย่างไม่ต่อเนื่อง หรือเกิดขึ้นเพียงครั้งเดียวหลังปิดเครื่อง โดยจะคายประจุผ่านหน้าคอนแทกของแมคเนติกคอนแทกเตอร์ที่อนุกรมอยู่กับความต้านทาน ดังรูปที่ 4.2 ดังนั้นจึงออกแบบให้ใช้ความต้านทานขนาด 6 โอห์ม 50 วัตต์ ต่ออนุกรมกัน 4 ตัว พร้อมทั้งติด Heat Sink เพื่อช่วยระบายความร้อนด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง

ภาคนี้แสดงไว้ในบล็อกที่ 2 ของรูปที่ 4.1 วงจรในส่วนนี้ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟตรงที่รับมาจากแหล่งจ่ายไฟตรงให้เป็นไฟสลับที่ความถี่สูงในช่วง 30 กิโลเฮิรตซ์ - 50 กิโลเฮิรตซ์ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (Voltage Source Inverter) ให้กับขดลวดเหนี่ยวนำโดยผ่านหม้อแปลงความถี่สูง วงจรที่ใช้ในภาคนี้เป็นวงจรบริดจ์ซึ่งเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์กำลังที่มีรูปแบบการทำงานง่ายไม่ซับซ้อนทำให้มีความเชื่อถือได้สูง วงจรในส่วนนี้จะประกอบไปด้วยสวิตช์ 4 ตัว พร้อมทั้งวงจรสนับเบอร์แรงดัน ดังรายละเอียดในรูปที่ 4.8

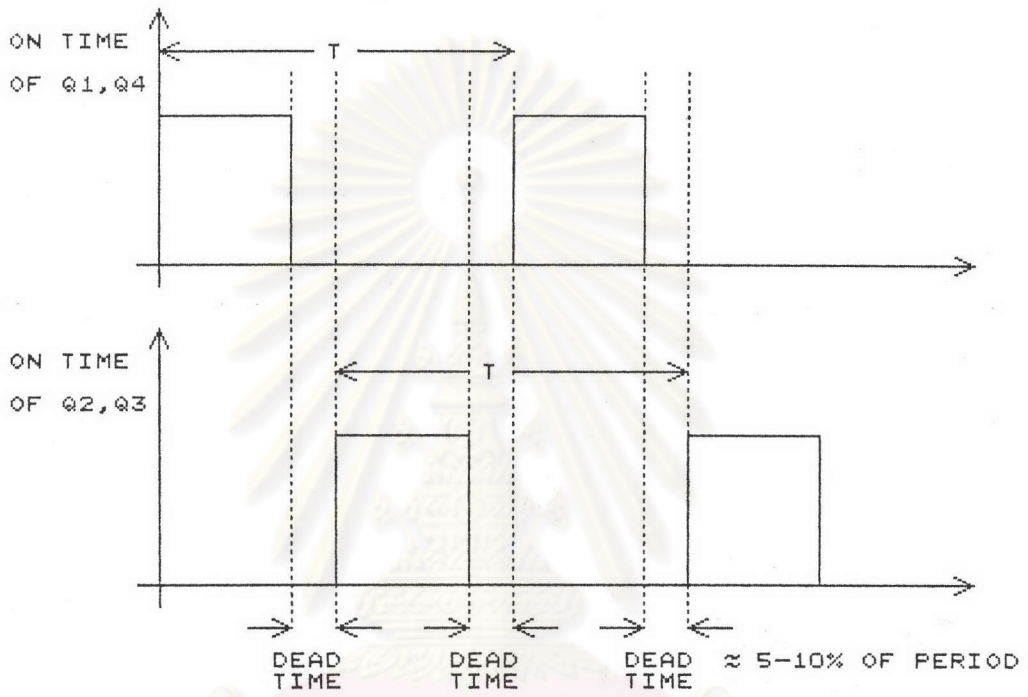


รูปที่ 4.8 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ Full Bridge

4.2.1 หลักการทำงานของวงจร

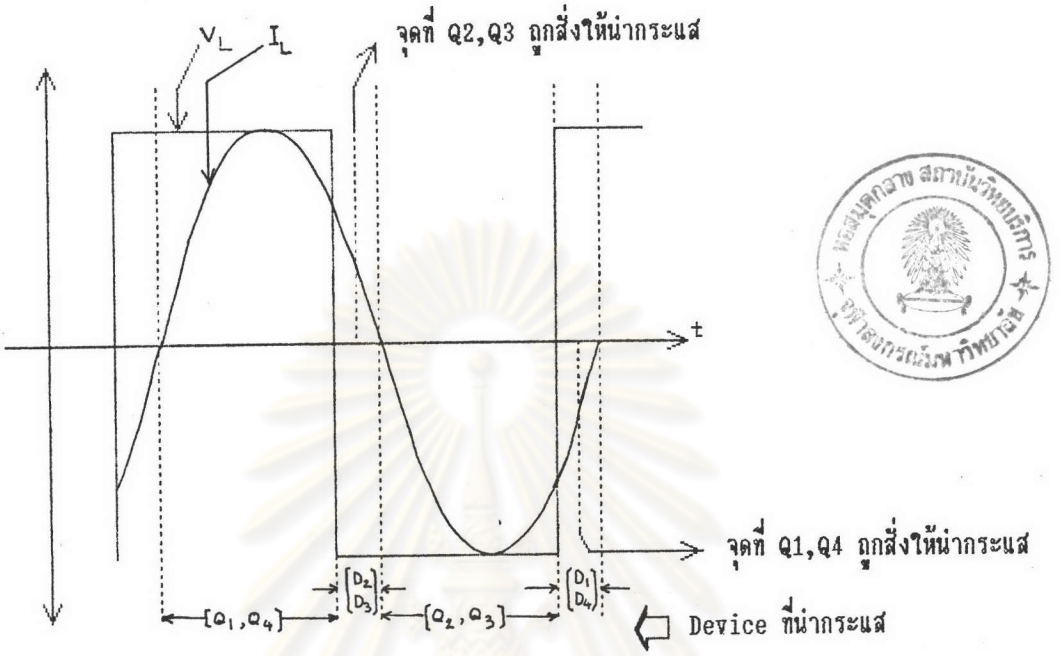
จากรูปที่ 4.8 สวิตช์ Q_1 และ Q_4 จะได้รับการสั่งให้นำกระแสพร้อมกันโดยทำงานสลับกันกับสวิตช์ Q_3 และ Q_4 ทำให้แรงดันคร่อมโหลดเป็นรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งมีค่ายอดเท่ากับแรงดันไฟตรง (DC BUS) และมีความถี่เท่ากับความถี่ที่สั่งให้สวิตช์ทำงาน สมมุติว่า Q_1 และ Q_4 นำกระแสก่อนเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง กำหนดให้กระแสในหม้อแปลงไหลในทิศทางตามลูกศร เมื่อถึงเวลาสั่งให้ Q_1 และ Q_4 หยุดนำกระแส ถ้าในขณะนั้นสั่งให้ Q_2 และ Q_4 นำกระแสทันทีอาจจะทำให้เกิดการนำกระแสทะลุผ่าน (Shoot Through) กล่าวคือมีกระแสจำนวนมากไหลผ่านกิ่งหนึ่งกิ่งใดของบริดจ์ ตัวอย่างเช่น ในกิ่ง Q_1Q_2 การนำกระแส

ทะลุผ่านจะเกิดขึ้นเมื่อ Q_2 เริ่มนำกระแสก่อนที่ Q_1 จะหยุดนำกระแสอย่างสนิท ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงการนำกระแสทะลุฝาน จึงต้องทำให้เกิดช่วงเวลาพัก (Dead Time) กล่าวคือ เมื่อสั่งให้ Q_1 และ Q_4 หยุดนำกระแสจะต้องให้เวลาผ่านไปประมาณ 5-10 % ของคาบก่อนที่จะสั่งให้ Q_2 และ Q_3 เริ่มนำกระแส ดังแสดงในรูปที่ 4.9



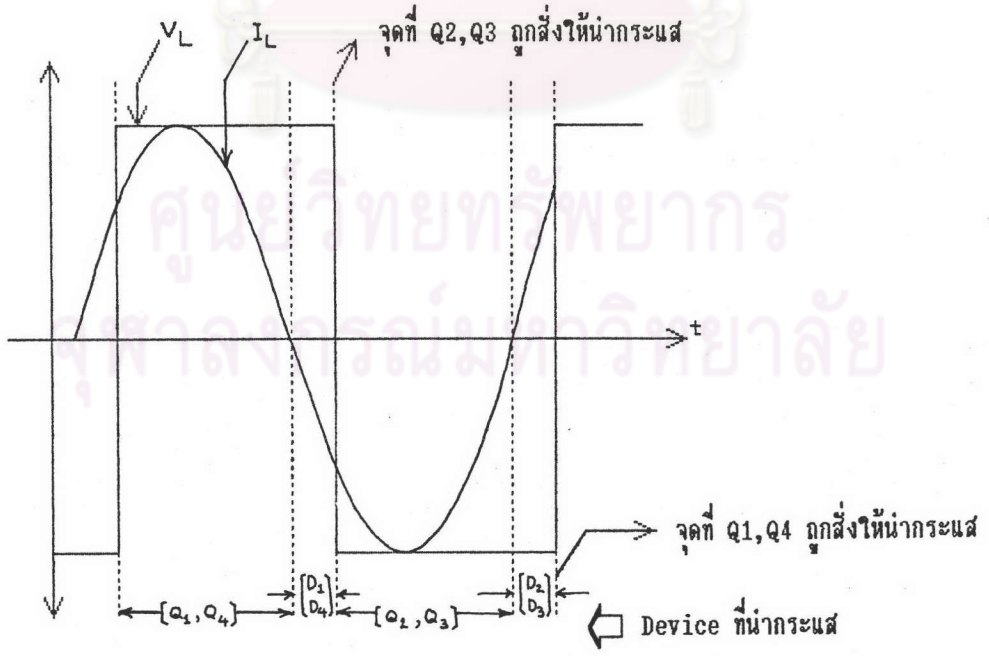
รูปที่ 4.9 แสดงช่วงเวลาการนำกระแสของสวิตช์ในวงจร Full Bridge

หลังจากที่ Q_1 และ Q_4 หยุดนำกระแสแล้วกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำจะยังไม่เปลี่ยนทิศทันที ถ้ากระแสโหลด (I_L) มีทิศทางดังรูป กระแสนี้จะย้ายไปไหลผ่านไดโอด D_2 และ D_3 ซึ่งเป็นไดโอดที่ขนานอยู่กับสวิตช์ ซึ่งจะเป็นการคืนพลังงานกลับให้แก่แหล่งจ่ายไฟตรง การนำกระแสของไดโอดเช่นนี้มีผลทำให้แรงดันคร่อมหม้อแปลงกลับทิศทาง และถ้า Q_2 และQ_3 ถูกสั่งให้นำกระแสก่อนที่ I_L จะกลับทิศ(เปลี่ยนค่าเป็นลบ) Q_2 และ Q_3 จะยังไม่นำกระแสจนกว่า I_L จะเริ่มเป็นลบจึงจะรับช่วงนำกระแสแทน D_2 และ D_3 การที่ลำดับการนำกระแสเป็นเช่นนี้ หมายความว่ากระแสตามหลังแรงดัน (Phase Lag) ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งการสวิตช์จะดำเนินไปด้วยดี



หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.10 แสดงรูปกระแสผ่านโหลด I_L และแรงดันคร่อมโหลด V_L ในกรณี Phase Lag



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.11 แสดงรูปกระแสผ่านโหลด I_L และแรงดันคร่อมโหลด V_L ในกรณี Phase Lead

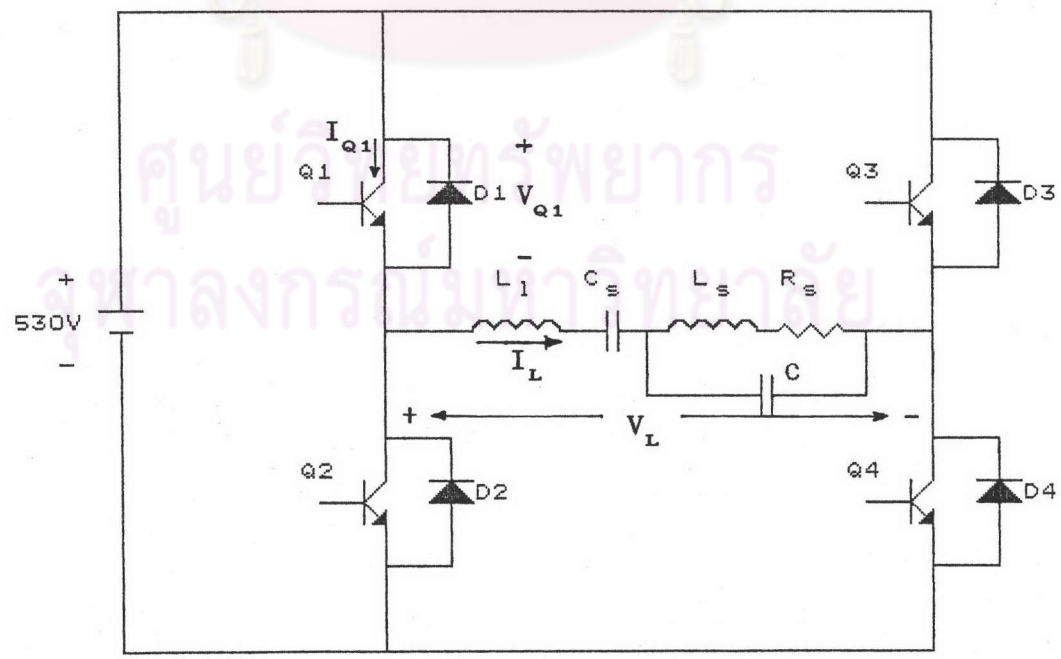
แต่ถ้าเป็นกรณีที่กระแสนำหน้าแรงดัน (Phase Lead) เมื่อกระแส I_L กลับทิศเป็นลบโดยจะไหลผ่านไดโอด D_1 และ D_2 แรงดันคร่อมหม้อแปลงจะยังไม่กลับทิศ และถ้า Q_2 กับ Q_3 ถูกสั่งให้นำกระแสในขณะที่ I_L มีค่าเป็นลบหรือกำลังไหลผ่าน D_1 กับ D_4 จะทำให้แรงดันคร่อมหม้อแปลงกลับทิศ ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งในขณะนี้ D_1 และ D_4 จะยังไม่หยุดนำกระแสในทันทีเนื่องจากต้องการเวลาฟื้นตัว(Reverse Recovery Time) ซึ่งในช่วงเวลาฟื้นตัวนี้จะมีกระแสผ่าน(Shoot Through) D_1 มายัง Q_2 (ไหลย้อนลูกศรของ D_1) และทะลุผ่าน Q_3 มายัง D_4 ดังนั้นจึงควรเลี่ยงปรากฏการณ์นี้ โดยการสั่งให้ Q_2 และ Q_3นำกระแสก่อนที่ I_L จะเปลี่ยนค่าเป็นลบ หรือกล่าวได้ว่าให้วงจรนี้ทำงานแบบกระแสตามหลังแรงดัน [โคทม อารียา และ วิจิตรวรรณ ประกอบสันติสุข,2531]

4.2.2 การเลือกสวิตช์ที่ใช้ในวงจรบริดจ์

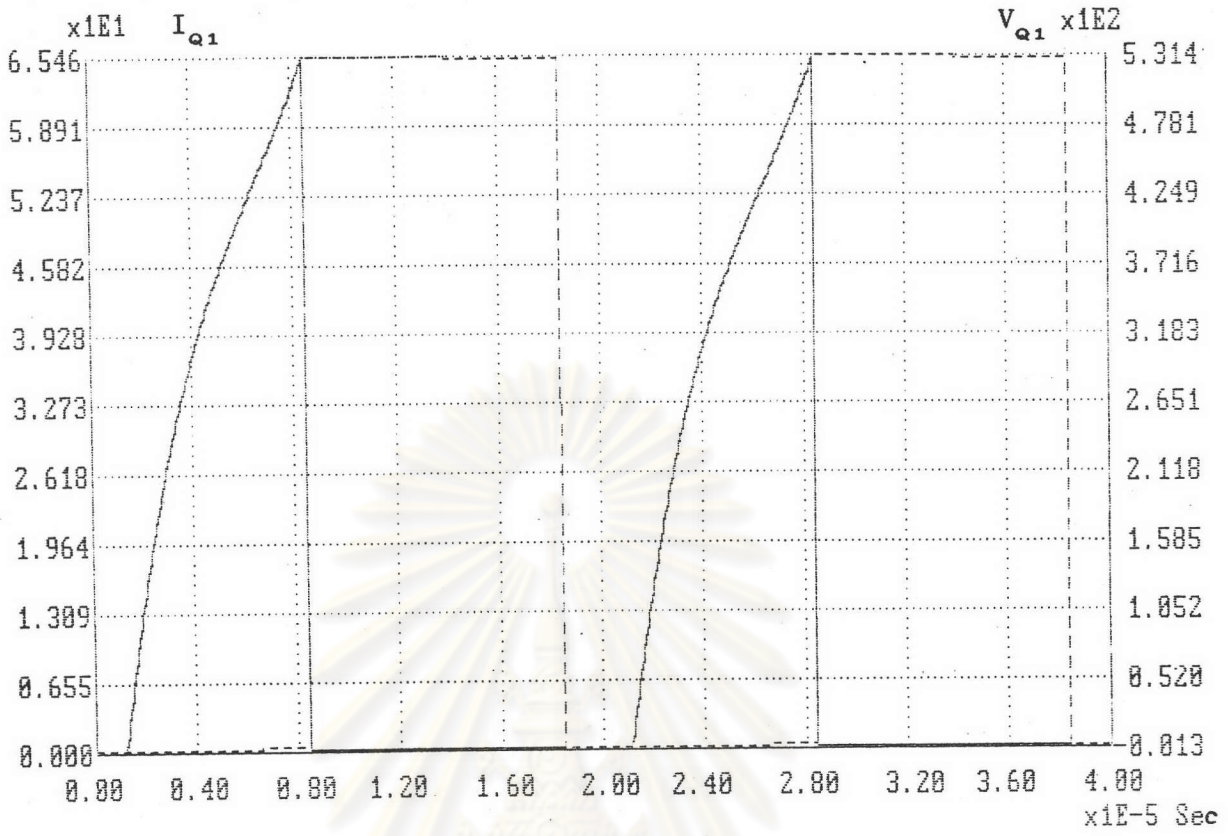
สวิตช์ที่ใช้ในในวงจรบริดจ์มีด้วยกันหลายประเภท ซึ่งแต่ละประเภทจะมีข้อดีและข้อจำกัดแตกต่างกันและเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น SCR และ GTO จะมีข้อดีในแง่ที่สามารถทนแรงดันและกระแสได้สูงแต่จะควบคุมการตัดวงจรได้ไม่สะดวก และทำงานได้ในช่วงความถี่ต่ำเท่านั้น คือ ประมาณไม่เกิน 10 กิโลเฮิรตซ์ การประยุกต์ใช้งานจึงมีข้อจำกัดในเรื่องความถี่ ส่วนทรานซิสเตอร์แบบ MOSFET จะมีข้อดีในเรื่องความเร็ว ทำให้สามารถใช้งานได้ในความถี่สูงถึง 200 กิโลเฮิรตซ์ [Fuji Semiconductor Catalog,1988] และยังควบคุมการตัดต่อวงจรหรือขับนำได้ง่าย แต่จะมีมีข้อจำกัดในเรื่องพิกัดของแรงดันและกระแสที่มีค่าไม่มากทำให้ต้องแก้ปัญหาโดยการใช้MOSFET หลาย ๆ ตัวมาต่อขนานกัน เพื่อให้รับกระแสได้สูงขึ้น หรือนำมาอนุกรมกันโดยใช้วงจร Tri-State Bridge เพื่อให้รับแรงดันได้สูงขึ้น (ธนากร ศุภจินตกุล,2535) แต่อย่างไรก็ตามวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ได้ก็จะมีความซับซ้อนมากขึ้นด้วย

สำหรับในงานวิจัยนี้ วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้มีขนาดกำลัง ประมาณ 16 กิโลโวลต์แอมป์ (kVA) ซึ่งเป็นขนาดที่ค่อนข้างสูง ถ้าจะใช้ MOSFET เป็นสวิตช์จะต้องใช้วงจรที่ซับซ้อน และเมื่อทำงานที่ความถี่ประมาณ 50 กิโลเฮิรตซ์ จะเป็นความถี่สูงเกินไปสำหรับสวิตช์ประเภท GTO หรือ SCR ดังนั้นจึงเลือกใช้ทรานซิสเตอร์กำลังแบบไบโพลาร์ซึ่งเป็นสวิตช์ที่หาง่าย ราคาถูก และมีพิกัดด้านแรงดัน และกระแสสูง ทำให้ไม่จำเป็นต้องนำทรานซิสเตอร์หลาย ๆ ตัวมาต่ออนุกรม หรือต่อขนานกัน เพื่อรับแรงดันหรือกระแส เป็นผลให้สามารถใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบ Full Bridge ธรรมดาได้ ทำให้ความซับซ้อนของวงจรกำลังน้อยลง และมีความทนทานมากขึ้น สำหรับเรื่องความเร็วในการสวิตช์ ทรานซิสเตอร์กำลังชนิดนี้มีความเร็วในการสวิตช์ได้ไม่เท่ากับของ MOSFET แต่ก็ดีกว่า GTO หรือ SCR

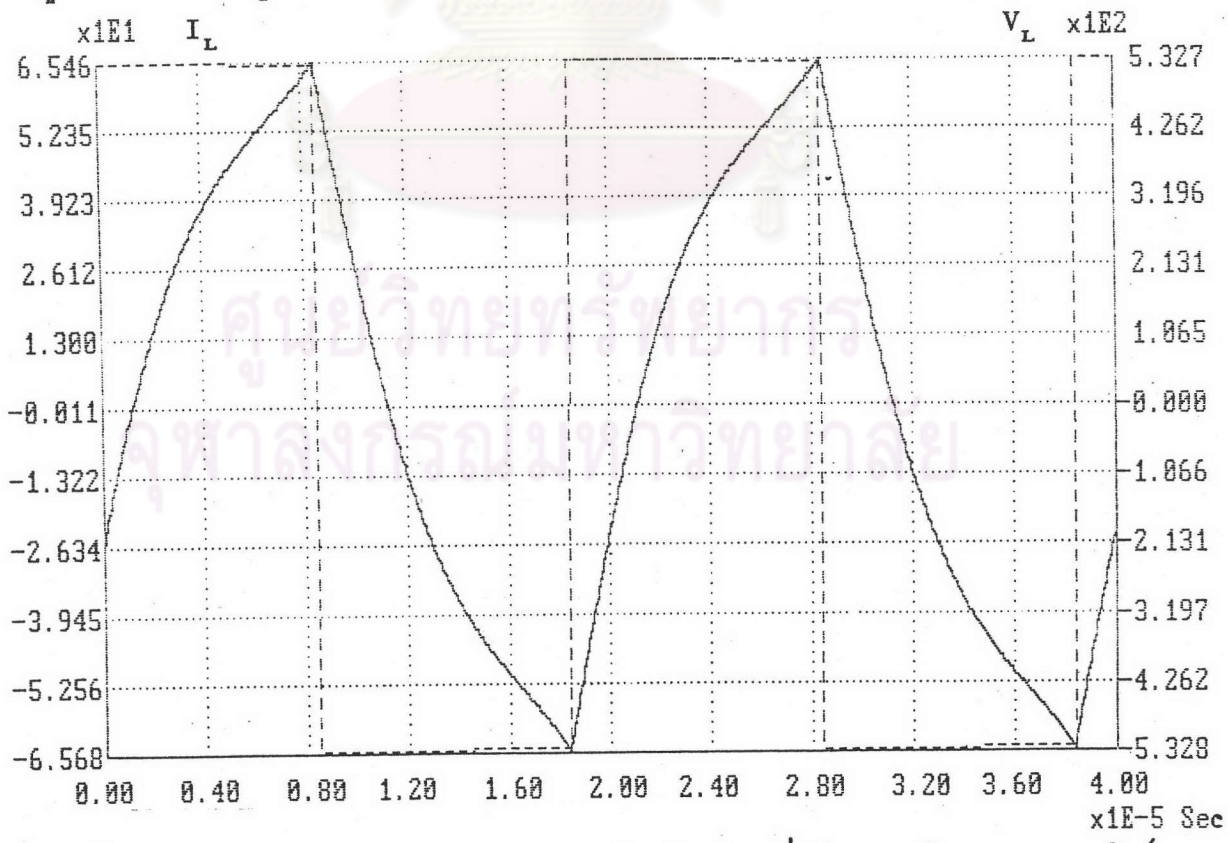
กล่าวคือ โดยทั่วไปจะใช้งานประมาณไม่เกิน 5 กิโลเฮิรตซ์ [Fuji Semiconductor Catalog,1988] อย่างไรก็ตามสำหรับงานวิจัยนี้ เราพยายามขับนำให้ทรานซิสเตอร์กำลังแบบไบโพลาร์ทำงานได้ที่ความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งต้องอาศัยเทคนิคการขับนำที่ยุ่งยาก ทั้งนี้เพราะทรานซิสเตอร์ชนิดนี้มี Turn off Time ที่ยาวถึง 18 ไมโครวินาที ซึ่งมีค่ามากเมื่อเทียบกับครึ่งคาบของความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ที่มีค่าเท่ากับ 10 ไมโครวินาที ในการเลือกขนาดพิกัดทั้งกระแสและแรงดันของทรานซิสเตอร์นี้ จะใช้วิธีการวิเคราะห์โดยการชิมมูเลตวงจรในรูปที่ 4.12 ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า LEC (เอกชัย ลีลารัศมี,2530) โดยวงจรทางไฟฟ้าทางด้านโหลดของวงจรที่ใช้วิเคราะห์นี้เป็นวงจรสมมูลของขดลวดแบบมีโหลด ที่วัดได้จากบทที่แล้ว ประกอบกับมีตัวเก็บประจุชดเชยตัวประกอบกำลัง และตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมด้านปฐมภูมิที่ออกแบบไว้ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป ค่าที่นำมาใช้วิเคราะห์นี้เป็นค่าที่คิดย้ายโอนจากทางด้านทุติยภูมิมายังด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเรียบร้อยแล้ว โดยใช้ Turn Ratio ของหม้อแปลงที่ออกแบบไว้ซึ่งจะกล่าวอีกทีในหัวข้อถัดไป รูปคลื่นของกระแสผ่านสวิตช์ และแรงดันที่คร่อมสวิตช์ที่ได้จากการชิมมูเลตที่ความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ แสดงอยู่ในรูปที่ 4.13 ส่วนรูปคลื่นของกระแสผ่านโหลดกับแรงดันที่คร่อมโหลดแสดงในรูปที่ 4.14 จากผลการชิมมูเลตจะเห็นว่ากระแสตามหลังแรงดันหรือตัวประกอบกำลังเป็นแบบล้าหลัง ทั้งนี้เป็นเพราะผลของตัวเหนี่ยวนำอนุกรมที่ใส่เข้าไปซึ่งจะทำให้การทำงานของวงจรบริดจ์เป็นไปด้วยดี เนื่องจากไม่เกิดกระแสทะลุผ่านในช่วงเวลาฟื้นตัวของไดโอด ดังที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้นแล้ว



รูปที่ 4.12 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ที่มี BJT เป็นสวิตช์ที่ใช้ในการชิมมูเลต



รูปที่ 4.13 แสดงรูปกระแสที่ผ่านสวิตช์ และแรงดันคร่อมสวิตช์ที่ได้จากการชิมมูเลตวงจรบริดจ์

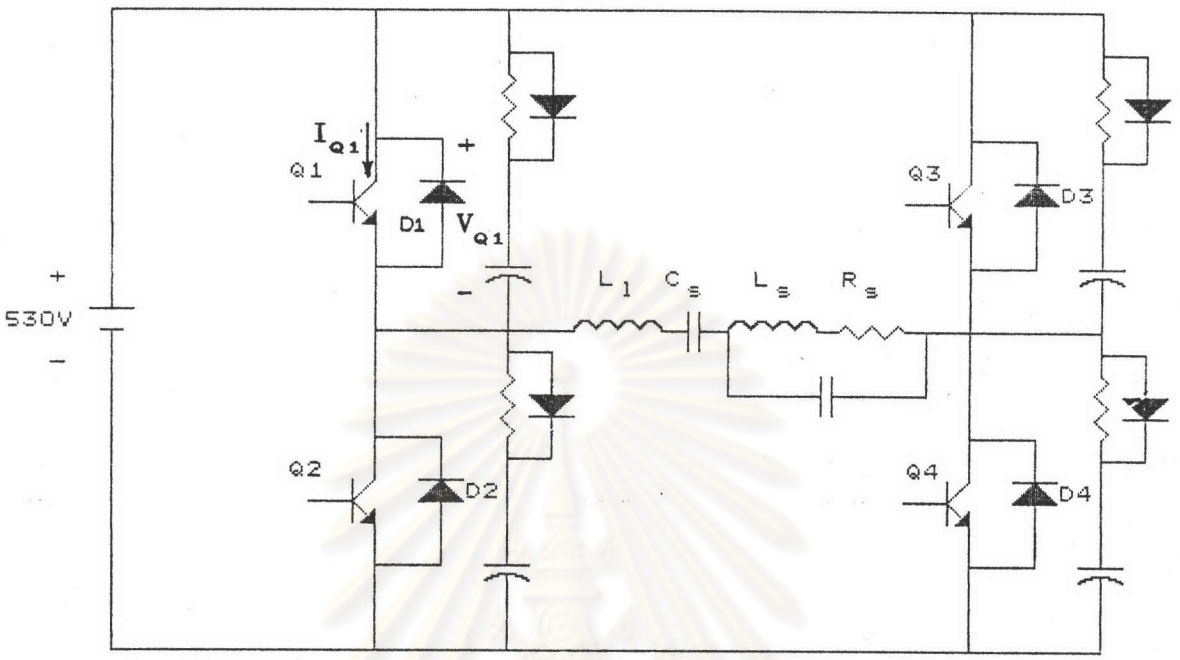


รูปที่ 4.14 แสดงรูปกระแสผ่านโหลด และแรงดันคร่อมโหลดที่ได้จากการชิมมูเลตวงจรบริดจ์

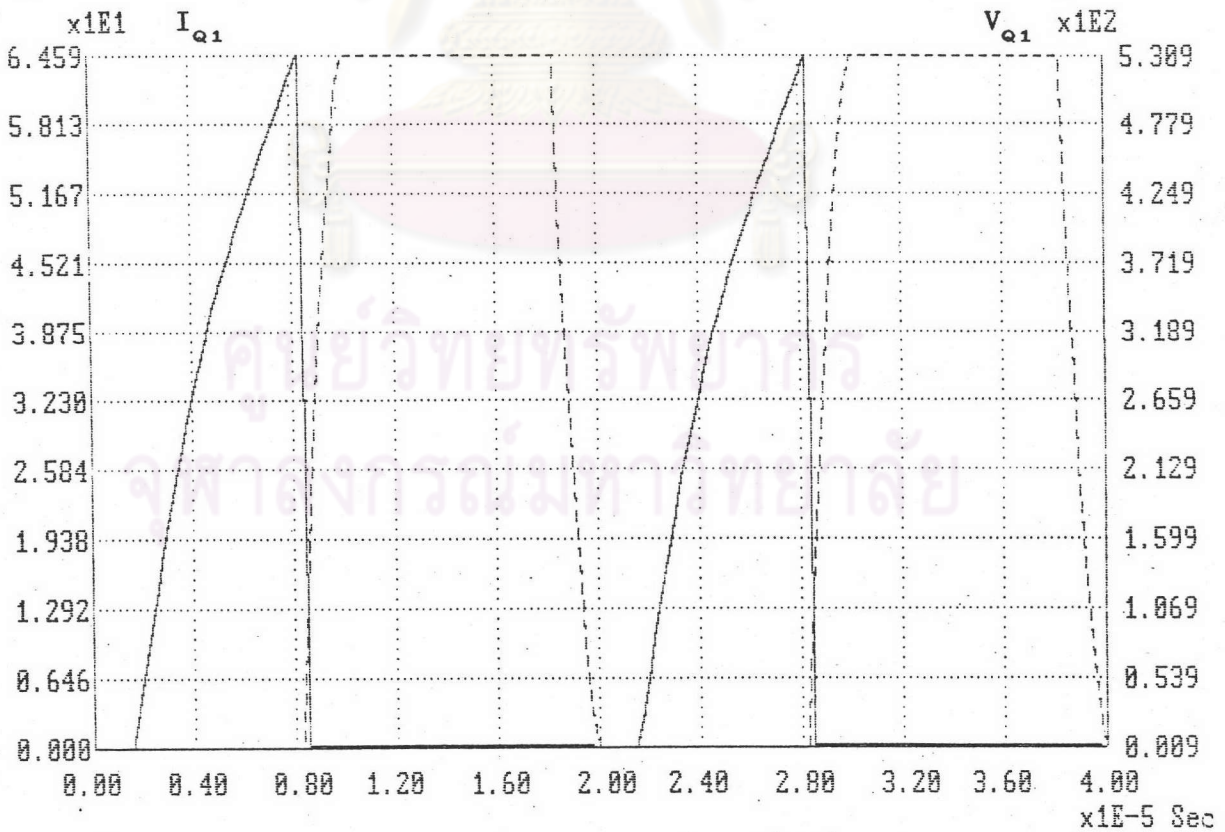
จากผลของการชิมมูเลตในรูปที่ 4.13 พบว่าค่ายอดของกระแสมีค่าเท่ากับ 65.5 แอมแปร์ ส่วนค่ายอดของแรงดันคร่อมสวิตช์มีค่าเท่ากับ 531 โวลต์ จากข้อดีของทรานซิสเตอร์กำลังแบบไบโพลาร์ที่มีพิกัดสูง ทำให้สามารถใช้สวิตช์ตัวเดียวโดยไม่ต้องนำสวิตช์หลาย ๆ ตัวมาต่ออนุกรมหรือขนานกัน จึงได้เลือกใช้ทรานซิสเตอร์ขนาด 100 แอมแปร์, 1000 โวลต์ซึ่งได้คิดเผื่อค่าแรงดันและกระแสไว้ประมาณ 2 เท่าแล้ว ทรานซิสเตอร์นี้มีลักษณะเป็นโมดูล โดยหนึ่งโมดูลจะมีทรานซิสเตอร์กำลังอยู่ 2 ตัว และแต่ละตัวจะมีไดโอดฟื้นตัวเร็ว (Fast Recovery Diode) ขนาด 100 แอมแปร์,1000 โวลต์ ต่อขนานอยู่กับทรานซิสเตอร์กำลังเรียบร้อยแล้ว สำหรับรายละเอียดของข้อมูลจำเพาะของทรานซิสเตอร์เบอร์นี้ได้แสดงไว้ในภาคผนวก

4.2.3 วงจรสนับเบอร์ (Snubber Circuit)

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นว่ากระแสผ่านสวิตช์และแรงดันคร่อมสวิตช์จะมีการ Cross กันในตำแหน่งที่สูงในจังหวะการ Turn Off ซึ่งส่งผลให้เกิดการสูญเสียในการสวิตช์อย่างมาก ดังนั้นเพื่อลดกำลังสูญเสียจากสาเหตุนี้ จึงต้องมีวงจรสนับเบอร์แรงดัน (Shunt Snubber) ซึ่งประกอบด้วยตัวเก็บประจุ ตัวต้านทาน และไดโอด ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ตัวเก็บประจุนี้จะช่วยหน่วงแรงดันในระหว่างการ Turn Off ของทรานซิสเตอร์ให้ขึ้นช้าเพื่อให้กระแสในสวิตช์ตกลงมาก่อน ระดับของการ Cross กันของกระแส และแรงดันจึงลดต่ำลง [ยุทธนา กุลวิทิต,2532] การออกแบบค่าความจุของตัวเก็บประจุและค่าความต้านทาน ทำได้โดยทดลองแทนค่าแล้วชิมมูเลตด้วยโปรแกรม LEC (เอกชัย ลีลารัศมี, 2530) ซึ่งได้ผลการชิมมูเลตดังรูปที่ 4.16 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าการ Cross กันของกระแสและแรงดันจะลดต่ำลงมาเหลือเพียง 20% ตัวเก็บประจุที่ใช้ต่อในวงจรต้องเป็นชนิดที่ใช้กับความถี่สูง อีกทั้งต้องทนแรงดันและกระแสได้ ซึ่งในที่นี้ใช้ตัวเก็บประจุชนิด MKP ค่าเท่ากับ 100 นาโนฟารัด ส่วนความต้านทานในวงจรสนับเบอร์นี้จริง ๆ แล้วไม่จำเป็นต้องมีก็ได้ เพราะวงจรบริดจ์นี้ถ้าให้ทำงานแบบกระแสล้าหลังแรงดันแล้วการ Turn on จะเกิดขึ้นขณะที่แรงดันเป็นศูนย์ (Zero Voltage Turn on) [Joseph H.Rockot,1987] ทำให้ไม่มีการคายประจุ (Discharge)ผ่านสวิตช์โดยตรง อีกทั้งยังเป็นการลดกำลังสูญเสียในการสวิตช์ขณะ Turn on ด้วย ทำให้ไม่ต้องมีวงจรสนับเบอร์กระแส (Series Snubber) แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากโหลดของวงจรอินเวอร์เตอร์นี้มีค่าไม่คงที่เพราะมีการเปลี่ยนแปลงตามขนาด ชนิด และสภาวะของโหลด รวมทั้งตอนมีโหลดและไม่มีโหลดด้วย เป็นผลทำให้บางสภาวะของโหลด โดยเฉพาะขณะที่กำลังแหย่โหลดจะทำให้เกิดการ Turn on ขณะที่แรงดันไม่เป็นศูนย์ ทำให้มีกระแสที่



รูปที่ 4.15 แสดงวงจรสนับเบอร์แรงดันในวงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ที่ใช้ในการซิมมูเลต



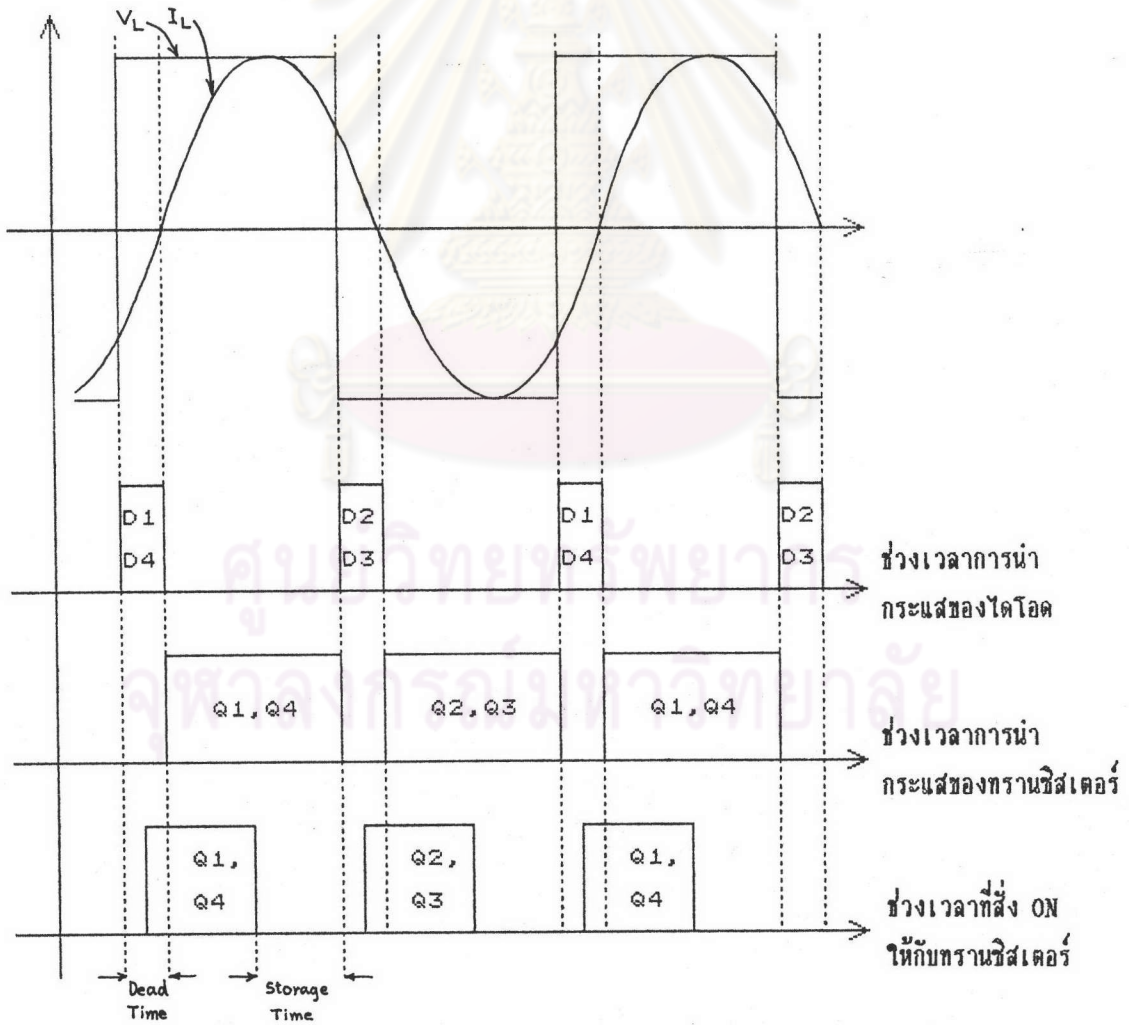
รูปที่ 4.16 แสดงรูปกระแสผ่านสวิตช์และแรงดันคร่อมสวิตช์ที่ได้จากการซิมมูเลต วงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ที่มีวงจรสนับเบอร์แรงดัน

เกิดจากการคายประจุค่าสูงไหลผ่านสวิตช์ ดังนั้นจึงต้องมีความต้านทานนี้ใส่ในวงจรสนับเบอร์แรงดัน ซึ่งจากการทดลองค่าความต้านทานที่เหมาะสม คือค่าที่สามารถจำกัดยอดแหลมของกระแสไม่ให้มีค่าสูง โดยที่กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นที่ตัวต้านทานนี้มีค่าไม่มากนัก ซึ่งในที่นี้ใช้ค่า 7.5 โอห์ม 200 วัตต์ โดยใช้ความต้านทานแบบอลูมิเนียมขนาด 50 วัตต์ 4 ตัว ที่ติดตั้งบนแผ่นระบายความร้อน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 <u>ภาคขับนำเบส และควบคุม</u>

ภาคนี้แสดงไว้ในบล็อกที่ 3 ของรูปที่ 4.1 วงจรในส่วนนี้ทำหน้าที่สร้างสัญญาณไปขับนำเบสของทรานซิสเตอร์กำลังทั้ง 4 ตัวในวงจร Full Bridge เนื่องจากทรานซิสเตอร์ที่ใช้เป็นแบบไบโพลาร์ ซึ่งต้องการการขับนำด้วยกระแส จึงทำให้การขับนำเบสมีความยุ่งยากกว่าการขับนำเกตของทรานซิสเตอร์แบบ MOSFET ซึ่งขับนำด้วยแรงดัน จากที่ได้กล่าวแล้วว่าการทำงานของวงจร Full Bridge ต้องเป็นแบบกระแสตามหลังแรงดันนั้นเมื่อนำมาพิจารณารวมกับลำดับการ on และ off ของสวิตช์แต่ละตัวจะได้ดังรูปที่ 4.17 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าทรานซิสเตอร์แต่ละตัวจะถูกสั่งให้ on ขณะที่ไดโอดที่ขนานกับตัวมันกำลังนำกระแสอยู่ เพื่อให้ได้ข้อดีของการเป็น Zero Voltage Turn on อีกทั้งจะต้องมีช่วงเวลา Dead Time เพื่อเป็นการเผื่อเวลาให้ทรานซิสเตอร์ที่อยู่บนกิ่งเดียวกันหยุดนำกระแสสนิท จะได้ไม่เกิดการทะลุ



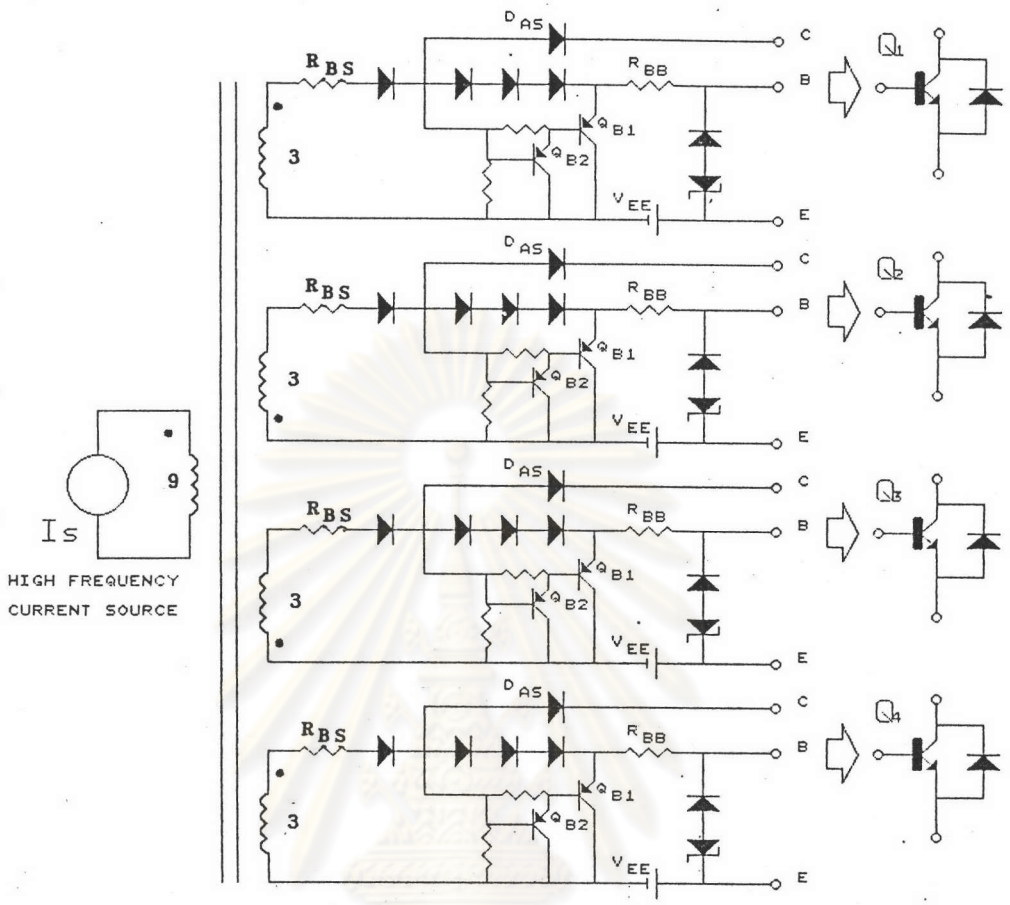
รูปที่ 4.17 แสดงลำดับการสวิตช์เมื่อเทียบกับกระแสผ่านโหลด และแรงดันคร่อมโหลด

ผ่านของกระแส (Shoot Through) และเนื่องจากการที่ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์มีปัญหาในการ Turn off กล่าวคือ เมื่อเริ่มสั่งให้หยุดนำกระแสจะต้องรอเป็นระยะเวลาหนึ่งทรานซิสเตอร์ถึงจะหยุดนำกระแสสนิทโดยช่วงเวลานี้ประกอบไปด้วย Storage Time[T_{stg}] รวมกับ Fall Time[T_f] ซึ่งจากข้อมูลจำเพาะของทรานซิสเตอร์[Fuji Semiconductors Data Book,1991] มี T_{stg} = 12.0 ไมโครวินาที ,T_f = 2.0 ไมโครวินาที จากข้อมูลที่ได้จะเห็นว่าช่วงเวลานี้เป็นเสมือน Delay Time ในการ Turn off ดังนั้นนอกจากจะต้องเผื่อช่วง Dead Time แล้ว ยังจะต้องเผื่อช่วง Storage Time ซึ่งเป็น Delay Time ในการ Turn off ด้วย ช่วงเวลาที่มีการขับนำสวิตช์จึงเป็นพัลส์ (Pulse) แคบ ๆ ดังที่เปรียบเทียบไว้ในรูปที่ 4.17

4.3.1 วงจรขับนำเบส

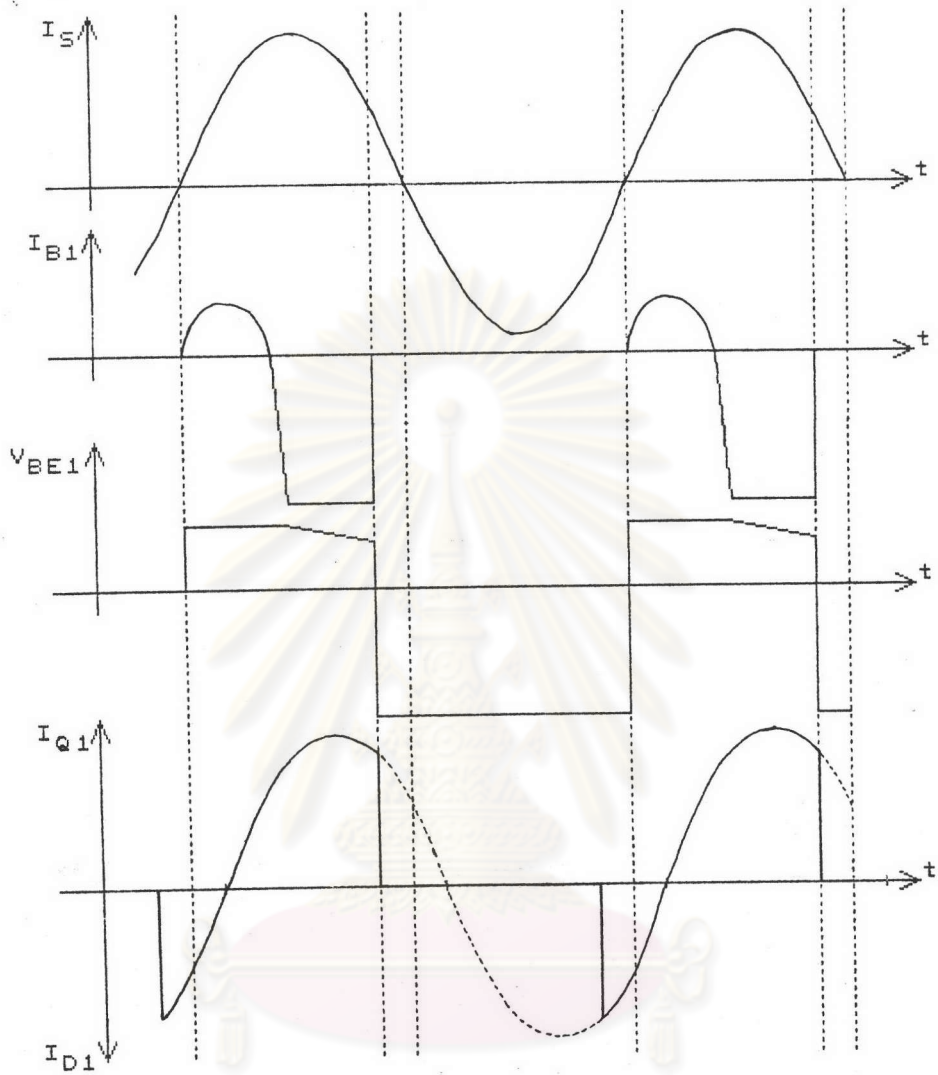
วงจรในส่วนนี้มีหน้าที่ในการขับนำสวิตช์ให้นำกระแส และหยุดนำกระแสได้ตามรูปแบบลำดับการทำงานของสวิตช์ดังที่กล่าวไว้แล้ว ในการออกแบบเราพยายามจะใช้วงจรที่ง่ายไม่ซับซ้อนเพื่อให้วงจรมีความเชื่อถือมากขึ้น ดังนั้นจึงออกแบบให้วงจรขับนำเบสของทรานซิสเตอร์ทั้ง 4 มีการแยกโดด (Isolated) จากกันโดยใช้หม้อแปลงขับนำเพียงตัวเดียว ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่า ขดที่ 1 กับขดที่ 4 ของหม้อแปลงมีขั้วตรงกัน แต่จะมีขั้วตรงกันข้ามกับขดที่ 2 และขดที่ 3 ซึ่งจะเป็นการสร้างสัญญาณ 2 รูปแบบที่กลับกัน เพื่อไปขับนำสวิตช์ทั้ง 2 ชุด(Q_1,Q_4 และ Q_2,Q_3) ด้วยวิธีที่ง่ายมาก อีกทั้งสัญญาณ 2 สัญญาณที่กลับกันนี้ยังถูกบังคับด้วยการเชื่อมโยง (Coupling) ผ่านหม้อแปลงแกนเดียวกัน ทำให้ไม่มีโอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดแล้วทำให้เกิดสัญญาณ 2 รูปแบบนี้พร้อมกันพอดีจึงเป็นการตัดปัญหาที่เกิดจากสัญญาณรบกวนที่จะทำให้สัญญาณขับนำสวิตช์ผิดพลาด (Fault Triggering) อันจะเป็นผลให้เกิดกระแสทะลุผ่านในแต่ละกิ่งได้

สัญญาณที่ใช้ในการขับนำสวิตช์ในช่วงTurn on จะมาจากแหล่งจ่ายกระแสไฟสลับ ($\tilde{I}_g$) ที่มีความถี่เท่ากับความถี่ในการสวิตช์ของวงจร Full Bridge โดยส่งผ่านหม้อแปลงแกน Toroid มายังวงจรขับนำเบส ซึ่งช่วงบวกของกระแสไฟสลับจะทำหน้าที่ Turn on สวิตช์คู่ใดคู่หนึ่งและช่วงลบของกระแสไฟสลับก็จะทำหน้าที่ Turn on สวิตช์อีกคู่หนึ่ง จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่ใช้ในการขับนำเป็นสัญญาณที่สร้างขึ้นได้ง่ายไม่ต้องมีรูปแบบหรือเรียงลำดับการสวิตช์ที่ยุ่งยาก เพียงแต่ต้องเป็นแหล่งจ่ายกระแสเท่านั้น ซึ่งรายละเอียดของวงจรสร้างกระแสไฟสลับที่ใช้ในการขับนำนี้จะกล่าวอีกทีในหัวข้อถัดไป จากรูปที่ 4.17 จะเห็นว่าสัญญาณที่ใช้ในการขับนำสวิตช์จะต้องมีช่วง Dead Time และช่วง Delay Time ในการ Turn off หรือเป็นพัลส์แคบๆซึ่งการสร้างสัญญาณรูปแบบนี้ผ่านหม้อแปลงตัวเดียวเราได้ใช้เทคนิคแกนอิ่มตัว



รูปที่ 4.18 แสดงวงจรขับนำเบสโดยผ่านหม้อแปลง

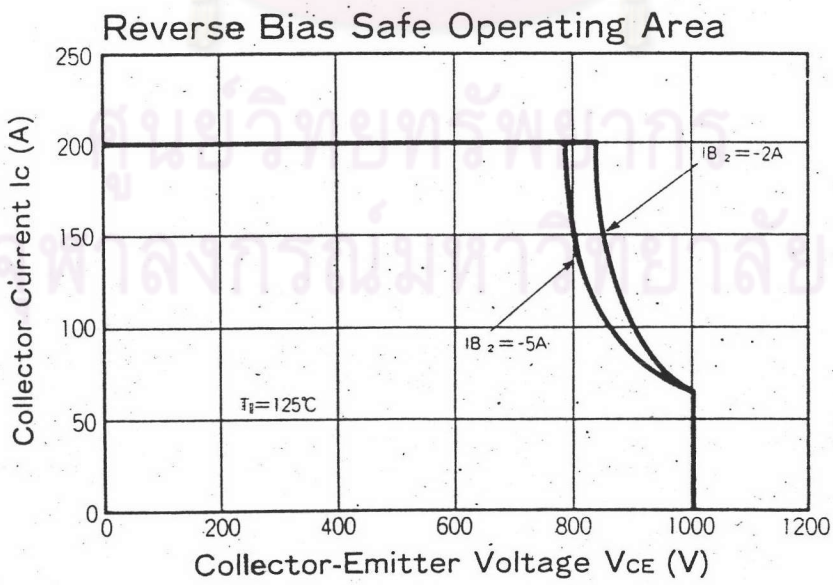
(Saturable Core) ในการสร้าง กล่าวคือ ในการออกแบบหม้อแปลง Toroid จะต้องออกแบบให้หม้อแปลงทำงานในช่วงเวลาจำกัด คือ ให้เท่ากับช่วงเวลาที่สั่ง on ให้กับทรานซิสเตอร์พอดี จากนั้นก็ปล่อยให้แกนหม้อแปลงอิ่มตัวเมื่อหม้อแปลงอิ่มตัวแล้วการส่งผ่านพลังงานโดยแหล่งจ่ายกระแสจากขดปฐมภูมิไปยังขดทุติยภูมิก็จะถูกตัดทิ้ง เพราะเมื่อแกนอิ่มตัวค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (μ) ของแกนจะเท่ากับ ค่าความซึมซาบของอากาศ (μ_o) ทำให้การ Coupling ของสัญญาณระหว่างขดทุกขดของหม้อแปลงหมดไป ค่าความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก (Magnetizing Inductance) ของขดทุติยภูมิแต่ละขดจึงลดลงเหลือเท่ากับความเหนี่ยวนำที่มีแกนเป็นอากาศ หรือกล่าวได้ว่าขดทุติยภูมิแต่ละขดกลายเป็นขดลัดวงจรทำให้วงจรขับนำเบสที่กำลังสั่งให้ทรานซิสเตอร์ on อยู่เปลี่ยนกลับเป็นสั่งให้ off ทันที(K.Harada ,H.Sakamotoand M.Shoyama,1986) ซึ่งลำดับการ Turn on และ Turn off หรือช่วงเวลาการสั่งให้ on แสดงไว้ในรูปที่ 4.19 ซึ่งประกอบด้วยรูปสัญญาณของแหล่งจ่ายกระแสไฟสลับ(I_S) กระแสเบส(I_B) แรงดันที่เบสอิมิตเตอร์(V_{BE}) และกระแสคอลเลคเตอร์ (I_C)



รูปที่ 4.19 แสดงลำดับการ Turn on และ Turn off ของวงจรขับนำเบส

การ Turn off ทรานซิสเตอร์ของวงจรขับนำเบสนี้จะเริ่มเกิดขึ้นทันทีที่แกนเริ่มอิ่มตัว โดยการใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP ต่อเป็นแบบดาร์ลิงตัน (Q_{B1} , Q_{B2}) เพราะต้องรับค่ากระแสยอดสูง เพื่อช่วยในการกระชากกระแสเบสลบ (I_B) ออกจากรอยต่อ (Junction) เบสอิมิตเตอร์ และใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรง (V_{EE}) ช่วยเร่งการคายประจุออกจากรอยต่อ อีกทั้งยังเป็นการไบแอสไฟลบให้กับรอยต่อเบสอิมิตเตอร์ในขณะที่ทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแสด้วย เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนเข้ามา Turn on ทรานซิสเตอร์และยังช่วยทำให้แรงดันเบรกดาวน์ของทรานซิสเตอร์มีค่าสูงขึ้น (Thomson - CSF Semiconductor Devision,1979)

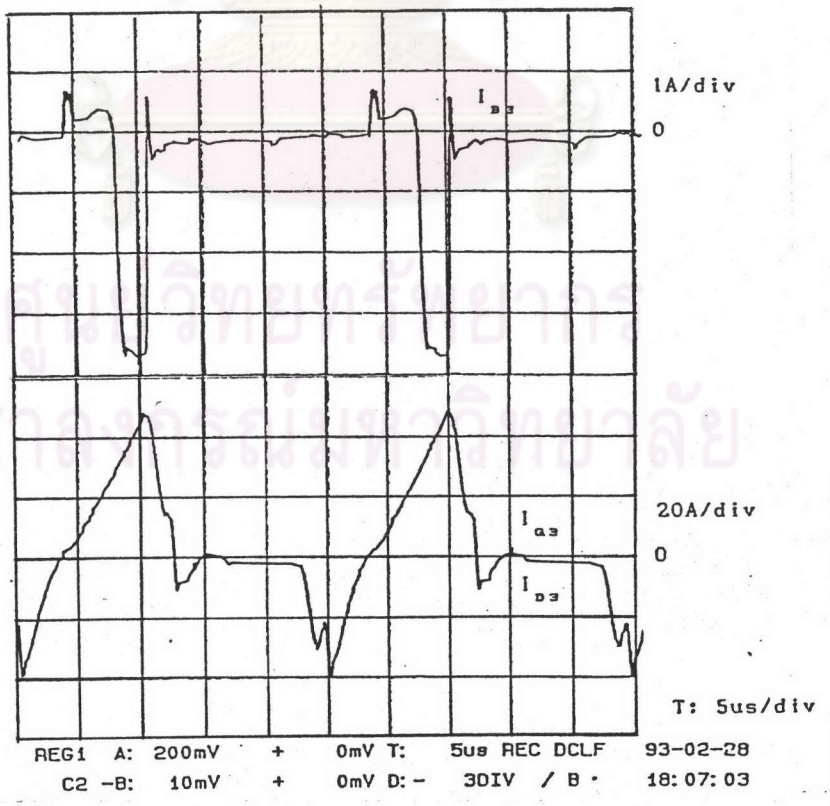
และเนื่องจากทรานซิสเตอร์ชนิดนี้มีค่า Storage Time ที่ยาวถึง 12 ไมโครวินาที ในขณะที่ต้องการขับนำสวิตช์ให้ได้ความถี่สูงขึ้น 50 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งที่ความถี่นี้การขับนำสวิตช์ในวงจร Full Bridge ต้องให้ช่วงเวลาการนำกระแสไม่เกิน 10 ไมโครวินาที (การ Turn on และ Turn off ต้องเสร็จภายในครึ่งคาบ) ทำให้วงจรขับนำเบสนี้ต้องสามารถดึงพาหะส่วนเกินออกจากรอยต่อเบสอิมิตเตอร์ได้เร็วที่สุดซึ่งจากวงจรในรูปที่4.18 เมื่อพิจารณาวงจรเบสจะเห็นได้ว่า ปริมาณกระแสลบที่จะดึงออกในตอน Turn off นี้ขึ้นอยู่กับแหล่งจ่ายไฟตรง (V_{EE}) และความต้านทานที่ต่ออนุกรมกับขั้วเบส (R_{BB}) เนื่องจากกระแสเบสที่ดึงออกในตอน Turn off นี้ (I_B) คือพาหะส่วนเกินในรอยต่อเบสอิมิตเตอร์ ปริมาณนี้จึงแปรผันตามปริมาณกระแสคอลเลกเตอร์ซึ่งสัมพันธ์อยู่กับกระแสโหลด ดังนั้นในการออกแบบค่าแหล่งจ่ายไฟตรง V_{EE} และค่าความต้านทาน R_{BB} จึงใช้การคำนวณโดยตรงไม่ได้ ต้องใช้วิธีทดลองแทนค่าโดยการต่อในวงจรจริงเพื่อให้ได้เงื่อนไขในสภาวะกระแสโหลด แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณกระแสเบสลบที่ดึงออกจากรอยต่อจะมีค่ามากเกินไป หรือดึงเร็วเกินไปไม่ได้ เพราะการดึงกระแสเบสลบที่เร็วมาก หรือความชันสูง จะทำให้พื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยของทรานซิสเตอร์ (Reverse Safe Operating Area) แคบลง โดยเฉพาะด้าน Secondary Breakdown Limit (Keith H.Billings,1989) ทำให้อาจเป็นอันตรายต่อทรานซิสเตอร์โดยเฉพาะในแง่การทนแรงดัน เพราะเมื่อปริมาณการดึงกระแสเบสลบสูงขึ้น พื้นที่ปลอดภัยด้านแรงดันจะลดลงเรื่อย ๆซึ่งจากข้อมูลจำเพาะของทรานซิสเตอร์ขนาด 100 แอมป์ 1000 โวลต์



รูปที่ 4.20 Reverse Biased Safe Operating Area

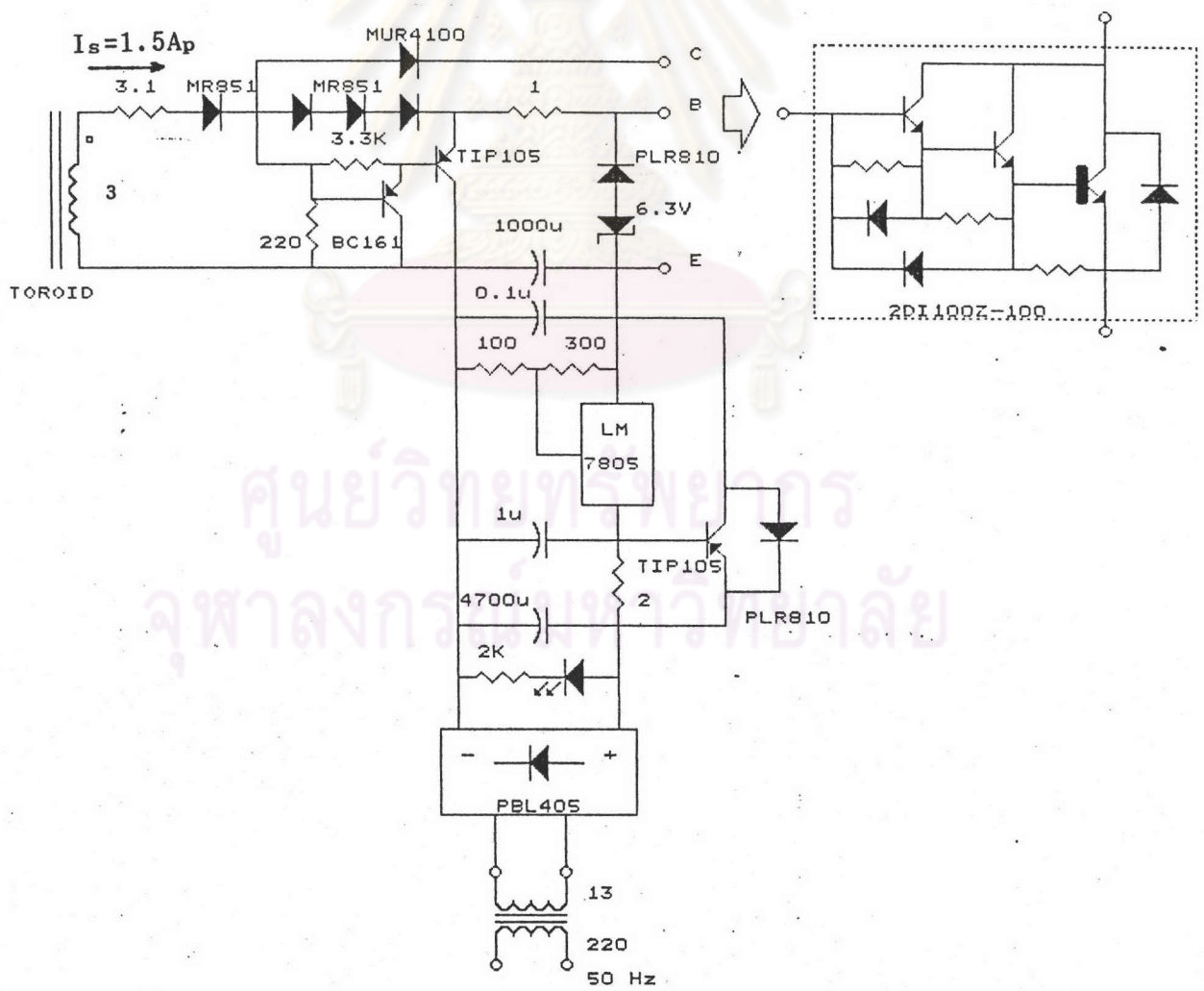
ได้แสดงพื้นที่การทำงานที่ปลอดภัย เมื่อดึงกระแสเบสลบเท่ากับ -2 แอมป์ และ -5 แอมป์ ที่อุณหภูมิรอยต่อ 25 องศาเซลเซียส ไว้ดังรูปที่ 4.20 (SanRex Power Semiconductors Data Book, 1990)

จากการทดลองต่อวงจรจริงแล้วแทนค่า V_{EE} และ R_{BB} ค่าต่าง ๆ เมื่อให้วงจรทำงานที่ภาวะโหลดเต็มที่ กล่าวคือขั้นแรงดันไฟตรงประมาณ 530 โวลต์ สวิตช์ที่ความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ และแหย่โหลดขนาด 22 มม. จะได้ว่า V_{EE} เท่ากับ 7 โวลต์ และ R_{BB} เท่ากับ 1 โอห์ม เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด ที่สามารถดึงกระแสเบสลบได้เร็วพอที่วงจรจะทำงานที่ความถี่นี้ได้ทัน โดยที่ทรานซิสเตอร์ในวงจร Full Bridge ยังทำงานได้อย่างปลอดภัย ได้มีการวัดรูปกระแสเบสโดยการวัดแรงดันคร่อม R_{BB} และกระแสผ่านสวิตช์ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 4.21 โดยได้เขียนแสดงช่วงเวลาการสั่งนำกระแสของวงจรขับนำเบสซึ่งวัดได้จากความกว้างของพัลส์บวกของกระแสเบส และช่วง Storage Time ซึ่งวัดได้จากความกว้างของพัลส์ลบของกระแสเบส จะเห็นได้ว่าช่วงเวลานำกระแสจริง ๆ ของสวิตช์ ก็คือผลรวมของช่วงเวลาทั้งสองนี้นั่นเอง



รูปที่ 4.21 แสดงรูปกระแสเบส และกระแสผ่านสวิตช์ที่วัดจากวงจรจริง

สำหรับการเลือกชนิดของตัวต้านทาน R_{BB} ควรจะใช้ความต้านทานที่มีค่าความเหนี่ยวนำในตัวน้อยที่สุด เพราะความต้านทานตัวนี้อยู่ในตำแหน่งที่เป็น loop ของการ Turn off ดังนั้นเพื่อให้ความชันของกระแสเบสมีค่าสูง อันจะเป็นการเพิ่มความเร็วในการดึงพาหะส่วนเกินออกจากรอยต่อจึงต้องให้ความเหนี่ยวนำภายใน loop มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งรวมไปถึงการออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์ด้วย จึงได้เลือกใช้ความต้านทานชนิดคาร์บอนขนาด 2 วัตต์ค่า 1 โอห์ม ต่อขนานและอนุกรมกัน 4 ตัวจนได้เป็นความต้านทาน 1 โอห์ม ขนาด 8 วัตต์ ส่วนการออกแบบแหล่งจ่ายไฟตรง V_{EE} ได้ใช้วิธีสร้างแหล่งจ่ายไฟตรงแบบเชิงเส้นขึ้นมา 4 ตัวที่มีการแยกโดด (Isolation) ออกจากกันโดยใช้หม้อแปลงความถี่ต่ำ (50 เฮิรตซ์) แล้วคุมค่าแรงดันโดยใช้ไอซีเรกูเลเตอร์LM7805 ซึ่งรายละเอียดของวงจรนี้พร้อมทั้งของวงจรขับนำเบสแสดงไว้ในรูปที่ 4.22 จากรูปจะเห็นว่าได้ใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP ต่อช่วยในการจ่ายกระแสให้กับไอซีเรกูเลเตอร์ด้วย สาเหตุที่ต้องสร้างแหล่งจ่ายไฟตรงที่สามารถจ่ายแรงดันคงที่



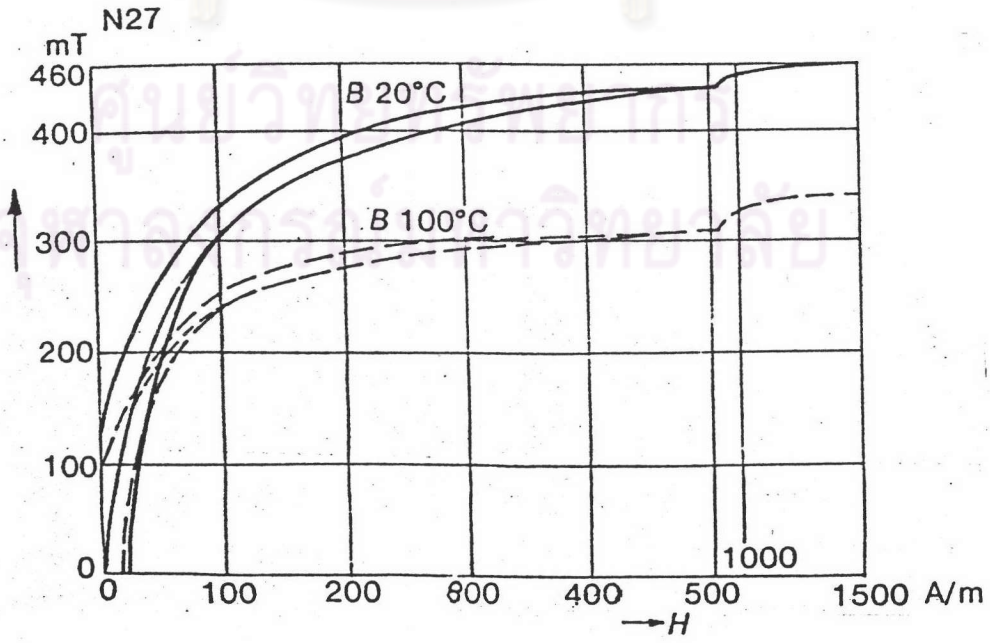
รูปที่ 4.22 แสดงรายละเอียดของวงจรขับนำเบส

และจ่ายกระแสได้อย่างเพียงพอเพราะว่าในจังหวะการ Turn off ปริมาณกระแสเบสที่ดึงออกมีค่าสูง แต่ปริมาณกระแสเบสในการ Turn on มีค่าต่ำและเป็นพัลส์ที่แคบทำให้ไม่สามารถสร้างแหล่งจ่ายไฟตรงได้เองโดยใช้ตัวเก็บประจุ และซีเนอร์ไดโอดแบบธรรมดา

เนื่องจากปริมาณของ Storage Time จะแปรผันกับการอิ่มตัวของทรานซิสเตอร์ (Thomson-CSF Semiconductor Devision,1979) ดังนั้นในวงจรขับนำเบสจึงต้องมีไดโอดที่ใช้ป้องกันการอิ่มตัวเกินควร ซึ่งหมายถึง D_{AS} ในวงจรขับนำเบสในรูปที่ 4.22 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าไดโอด D_1 - D_3 จะทำหน้าที่ยกระดับแรงดัน V_{CEsat} ให้สูงขึ้นซึ่งก็คือการลดปริมาณกระแสเบสที่จ่ายให้กับทรานซิสเตอร์ ทำให้ทรานซิสเตอร์อิ่มตัวน้อยลงนั่นเอง สำหรับปริมาณของไดโอดที่ใช้ในการยกระดับแรงดันในที่นี้ใช้ไดโอด 3 ตัว (D_1-D_3)ซึ่งได้จากการทดลองต่อในวงจรเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมเพื่อให้ Storage Time มีค่าต่ำและแรงดัน V_{CEsat} มีค่าไม่สูงเกินไปเพราะถ้า V_{CEsat}มีค่าสูงกำลังสูญเสียในการสวิตช์ในขณะนำกระแสจะมีค่าสูงซึ่งจากวงจรขับนำเบสนี้จะได้ V_{CEsat} ประมาณ 3.5 โวลต์ (ประมาณ 5 รอยต่อ)

4.3.2 การออกแบบหม้อแปลงในวงจรขับนำเบส

จากที่กล่าวมาแล้วว่า เราได้ใช้เทคนิคแกนอิ่มตัว (Saturable Core) ในการสร้างสัญญาณของวงจรขับนำเบส โดยอาศัยคุณสมบัติการอิ่มตัวทางแม่เหล็กของวัสดุที่ใช้ทำเป็นแกนหม้อแปลง ซึ่งในที่นี้ใช้แกนเฟอไรต์ รูปทอรอยด์ที่เป็นวัสดุชนิด N27 และมี B-H Curve ดังรูปที่ 4.23 ซึ่งจากรูปสารแม่เหล็กชนิดนี้จะเริ่มอิ่มตัว เมื่อค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (B) มีค่าประมาณ 0.33 เทสลา



รูปที่ 4.23 B-H Curve ของเฟอไรต์ชนิด N27 [Siemens Component Service,1983]

ในการออกแบบหม้อแปลงนี้ สิ่งที่ต้องการออกแบบก็คือ ขนาดของแกน Toroid (พื้นที่หน้าตัด ; A) และจำนวนรอบของขดปฐมภูมิ และขดทุติยภูมิทั้ง 4 ขด ที่ทำให้หม้อแปลงนี้ทำงานแล้วอิ่มตัวได้พอดี โดยมีช่วงเวลาที่สั่ง on ให้กับทรานซิสเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.17 จากกฎของฟาราเดย์ .

$$V = \frac{N d\phi}{dt} \qquad (4.3)$$

$$\int V dt = N\phi$$

ถ้าประมาณให้แรงดันคร่อมขดลวดของหม้อแปลงเป็นรูปสี่เหลี่ยมจะได้

$$\text{Volt Sec} = N\phi = NBA \qquad (4.4)$$

โดยที่ Volt = ค่ายอดของแรงดันคร่อมหม้อแปลง (โวลต์)

Sec = ช่วงเวลาของแรงดันคร่อมหม้อแปลง หรือ ช่วงเวลาที่จ่ายแรงเคลื่อนแม่เหล็กให้กับหม้อแปลง ซึ่งก็คือช่วงเวลาที่สั่ง on ให้กับทรานซิสเตอร์ (วินาที)

และเนื่องจากไม่มี DC Magnetizing Current ในหม้อแปลง การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์สนามแม่เหล็กจึงเริ่มจากจุดอิ่มตัวทางด้านหนึ่งไปยังจุดอิ่มตัวอีกด้านหนึ่ง ดังนั้น

$$\text{Volt Sec} = 2 NB_{max} A \qquad (4.5)$$

แรงดันที่คร่อมหม้อแปลงในที่นี้จะพิจารณาทางด้านทุติยภูมิ ซึ่งจากสมการแรงดันโดยกฎของเคอร์ชอฟในวงจรขับนำเบสดังรูปที่ 4.22 จะได้

$$\text{Volt} = I_s R_{BS} + 4(V_D) + I_B R_{BB} + V_{BE} + V_{EE}$$

$$\text{Volt} = 1.5(3.1) + 4(0.7) + 0.3(1) + 2.1 + 7$$

$$\text{Volt} = 4.65 + 2.8 + 0.3 + 2.1 + 7$$

$$\text{Volt} = 16.85 \text{ V}$$

ส่วนช่วงเวลาที่สั่ง on ให้กับทรานซิสเตอร์ เมื่อพิจารณาที่ความถี่ 50 กิโลเฮริตซ์ ออกแบบค่าให้เป็น

$$\text{Sec} = 4 \quad \mu s$$

และกำหนดให้ขดทุติยภูมิ $N = 3$ รอบ , $B_{max} = 0.3$

แทนค่าในสมการที่ (4.5)

$$16.85 \times 4\ \mu s = 2 \times 3 \times 0.3 \times A$$

$$A = 37.4 \quad \text{ตารางมิลลิเมตร}$$

ในทางปฏิบัติได้เลือกแกน Toroid ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 24 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 15 มิลลิเมตร ความหนา 9.5 มิลลิเมตร และมีพื้นที่หน้าตัด 43 ตารางมิลลิเมตร แล้วใช้แกนขนาดดังกล่าวแล้วพันขดปฐมภูมิ 9 รอบ และพันขดทุติยภูมิ 4 ขด ขดละ 3 รอบ ซึ่งเมื่อทดลองต่อวงจรจริงจะได้ช่วงเวลาที่สั่ง on ให้กับทรานซิสเตอร์เท่ากับความกว้างของพัลส์กระแสเบสด้านบวก ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งมีค่าประมาณ 4 ไมโครวินาที อย่างไรก็ตามเราสามารถปรับช่วงเวลาที่สั่ง on(ปรับความเร็ว-ช้าในการอิ่มตัวของแกน) โดยปรับจำนวนรอบของขดทุติยภูมิ (N) หรือปรับแรงดันคร่อมหม้อแปลง (Volt) กล่าวคือถ้าให้จำนวนรอบสูงขึ้น จะได้ช่วงเวลาที่สั่ง on มากขึ้นหรือแกนอิ่มตัวช้าลง ในทางกลับกันถ้าจำนวนรอบต่ำลงแกนก็จะอิ่มตัวไวขึ้น หรือช่วงเวลาที่สั่ง on จะลดลง และอีกวิธีหนึ่ง คือการปรับแรงดันคร่อมหม้อแปลง โดยการปรับค่าความต้านทาน R_{BS} หรือการปรับค่า I_S เพราะถ้าแรงดันคร่อม R_{BS} มีค่าสูงขึ้น แรงดันคร่อมขดทุติยภูมิของหม้อแปลงก็จะสูงขึ้นด้วยซึ่งจะทำให้แกนอิ่มตัวไวขึ้น ช่วงเวลาที่สั่ง on จึงลดลง แต่ในทางกลับกันถ้าเปลี่ยนค่า R_{BS} หรือ I_S ให้แรงดันคร่อม R_{BS} มีค่าต่ำลงก็จะทำให้แกนอิ่มตัวช้าลง และทำให้ช่วงเวลาที่สั่ง on มีค่ามากขึ้น

สำหรับการออกแบบจำนวนรอบของขดปฐมภูมิ ขึ้นอยู่กับว่าต้องการให้อัตราส่วนการแปลงกระแสจากขดปฐมภูมิไปยังขดทุติยภูมิทั้ง 4 เป็นเท่าไร ซึ่งถ้ามองเหตุผลที่ว่าเพื่อให้ปริมาณกระแสของแหล่งจ่ายกระแสสลับที่ต้องจ่ายให้กับขดปฐมภูมิของหม้อแปลงมีค่าต่ำสุดและสามารถสร้างขึ้นได้ง่าย เราก็ควรออกแบบให้จำนวนรอบของขดปฐมภูมิมีค่ามากที่สุด ซึ่งในทางปฏิบัติแล้ว จำนวนรอบที่สามารถพันได้มากที่สุดโดยใช้แกน Toroid ที่ออกแบบไว้ได้เพียงแค่ 9 รอบ ทั้งนี้เพราะในการพันขดปฐมภูมิ หรือขดทุติยภูมิเส้นลวดที่ใช้มีขนาดที่ใหญ่

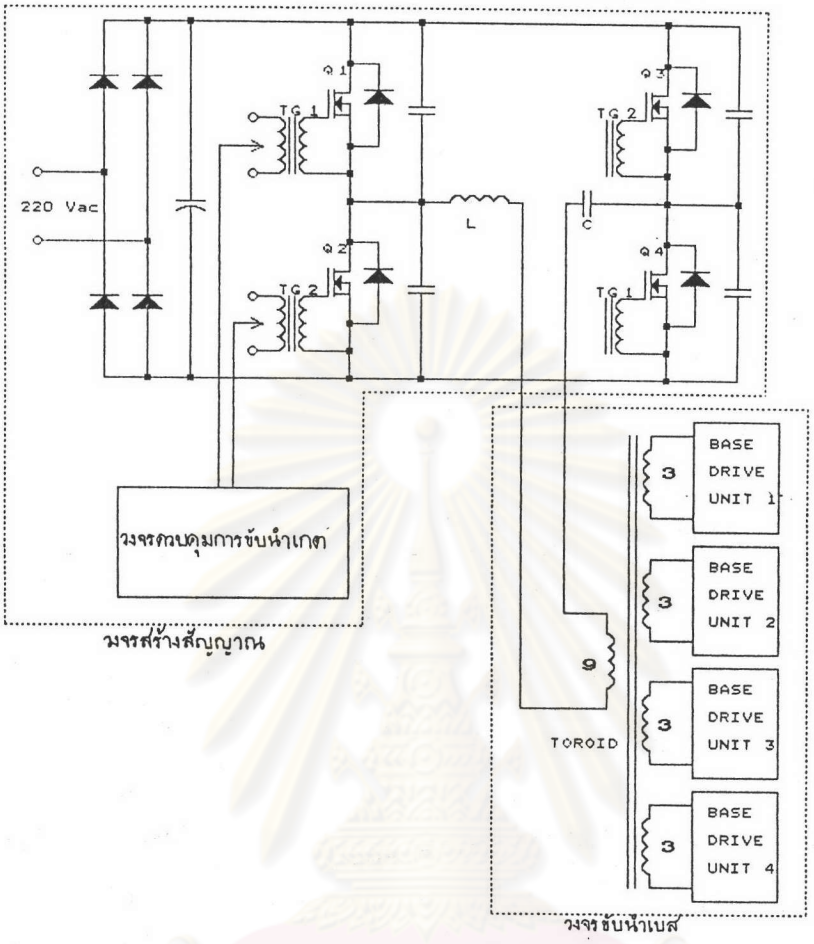
และประกอบด้วยลวดเส้นเล็กหลายๆเส้นตีเกลียวกัน เพื่อให้กระแสไหลได้เต็มพื้นที่ของลวด เพื่อลดผลเสียเนื่องจาก Skin Effect อีกทั้งยังต้องใส่ปลอกฉนวนที่เป็นใยแก้วเคลือบด้วย เพื่อเป็นฉนวนความร้อนและฉนวนไฟฟ้า เพราะในจังหวะการทำงานของวงจร ขดทุติยภูมิแต่ละขดจะมีศักย์ไฟฟ้าต่างกันสูงถึง 500 โวลต์ จึงทำให้ไม่สามารถพันจำนวนรอบได้มาก นอกจากนั้นแกน Toroid ที่ใช้ยังต้องติดแผ่นระบายความร้อน เพื่อถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากกำลังสูญเสียในแกน (Core Loss) ที่เป็นเช่นนี้เพราะหม้อแปลงทำงานที่ความถี่สูง และค่าความหนาแน่นของฟลักซ์สนามแม่เหล็กสูง อีกทั้งพื้นที่ในการระบายความร้อนมีน้อย จึงทำให้เกิดความร้อนสูงที่แกนหม้อแปลง และถ้าอุณหภูมิของแกนสูง ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่มีผลต่อวงจรขับนำเบสจะเปลี่ยน เช่น ค่าความหนาแน่นของฟลักซ์สนามแม่เหล็กสูงสุด (B_{max}) ของสารแม่เหล็กที่ใช้ทำแกนหม้อแปลงจะลดลง รวมไปถึงค่าความซึมซาบทางแม่เหล็ก (μ) ของแกนก็ลดลงด้วย

4.3.3 วงจรสร้างสัญญาณเพื่อจ่ายให้กับวงจรขับนำเบส

วงจรส่วนนี้ ก็คือ แหล่งจ่ายกระแสไฟสลับที่ใช้ในการกำหนดความถี่ในการขับนำสวิตช์ ซึ่งมีหน้าที่สร้างสัญญาณจ่ายให้กับวงจรขับนำเบสทั้ง 4 โดยส่งผ่านหม้อแปลงแกน Toroid สัญญาณที่วงจรนี้จะสร้างขึ้นต้องเป็นสัญญาณไฟสลับ ซึ่งจะมีรูปร่างเป็นอะไรก็ได้ขอให้มีความสมมาตรทั้งด้านบวกและด้านลบ และมีความถี่เท่ากับความถี่ที่ใช้ในการขับนำสวิตช์ อีกทั้งต้องมีคุณสมบัติเป็นแหล่งจ่ายกระแส (Current Source) ที่จ่ายได้เพียงพอกับกระแสที่ใช้ในวงจรขับนำเบส ในทางปฏิบัติได้ใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบ Full Bridge ที่มีโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำ ดังแสดงในรูปที่ 4.29 ทำให้ได้แหล่งจ่ายกระแสที่มีรูปสัญญาณเป็นรูปสามเหลี่ยม

ในการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์นี้ จะใช้วิธีการทดลองต่อวงจรเป็นหลัก ทั้งนี้เพราะสัญญาณกระแสที่สร้างขึ้นเป็นรูปสามเหลี่ยม ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์หรือคำนวณค่ากระแสที่ต้องจ่ายให้กับหม้อแปลงได้โดยตรง ถึงแม้ว่าจะรู้ความต้องการกระแสของวงจรขับนำเบสและอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงแล้วก็ตาม ดังนั้นในการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำ (L) ที่เป็นโหลดของวงจรอินเวอร์เตอร์ จึงใช้วิธีการทดลองต่อในวงจรจริงซึ่งได้ผลออกมาว่าค่าความเหนี่ยวนำที่เหมาะสม ที่ทำให้ได้กระแสค่ายอดทางด้านขดทุติยภูมิ ของหม้อแปลงเท่ากับ 1.5 แอมป์(ค่ากระแสเบสสูงสุดที่วงจรขับนำเบสจะจ่ายได้) มีค่าเท่ากับ 0.74 มิลลิเฮนรี ซึ่งผลการวัดกระแสโหลดของวงจรอินเวอร์เตอร์แสดงไว้ในรูปที่ 4.25

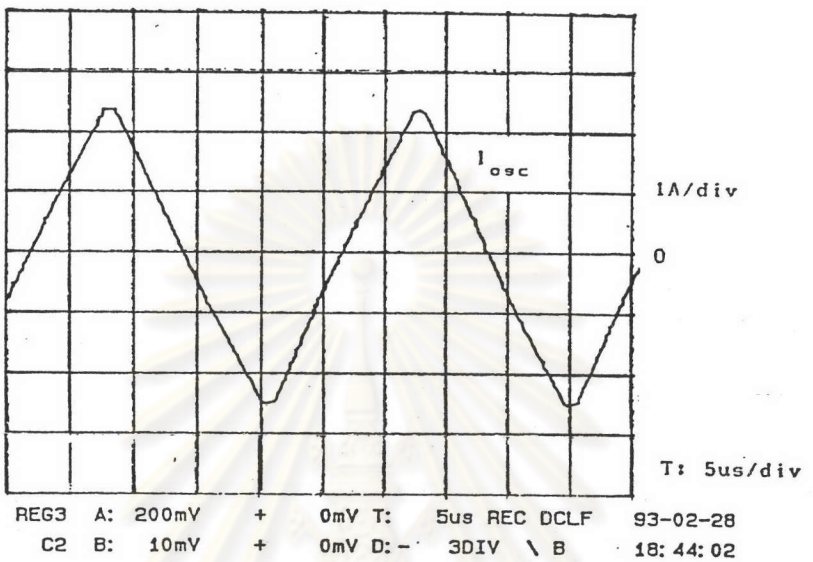
ในการออกแบบสวิตช์ที่ใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์ได้เลือกทรานซิสเตอร์ชนิด MOSFET เพราะสามารถขับนำได้ง่ายและพิกัดของกระแสกับแรงดันในวงจรมีค่าไม่สูงนัก ซึ่งตามรูปที่ 4.25 จะเห็นว่าค่ายอดของกระแสเท่ากับ 2.4 แอมป์ ดังนั้นเผื่อเป็นการเผื่อไว้



รูปที่ 4.24 แสดงวงจรสร้างสัญญาณเพื่อจ่ายให้กับวงจรขับนำเบส

จึงเลือกใช้ MOSFET เบอร์ IRF 840 ซึ่งทนกระแสได้ 8 แอมป์และทนแรงดันได้ 500 โวลต์ ส่วนไดโอดจะมีอยู่แล้วในตัวของ MOSFET สำหรับตัวเก็บประจุที่ต่อขนานสวิตช์ทำหน้าที่เป็นวงจรสนับเบอร์แรงดัน ที่จะช่วยหน่วงแรงดันคร่อมสวิตช์ให้ขึ้นช้า เพื่อรอให้กระแสผ่านสวิตช์ตกลงมาก่อนการตัดกันของกระแสกับแรงดันจะได้ลดลง ซึ่งจะทำให้กำลังสูญเสียในสวิตช์มีค่าลดลง ในการออกแบบค่าความจุนี้จะมีความสัมพันธ์กับปริมาณกระแสโหลด และความถี่ในการสวิตช์ ซึ่งจากการทดลองได้ออกแบบให้มีค่าเท่ากับ 5 นาโนฟารัด

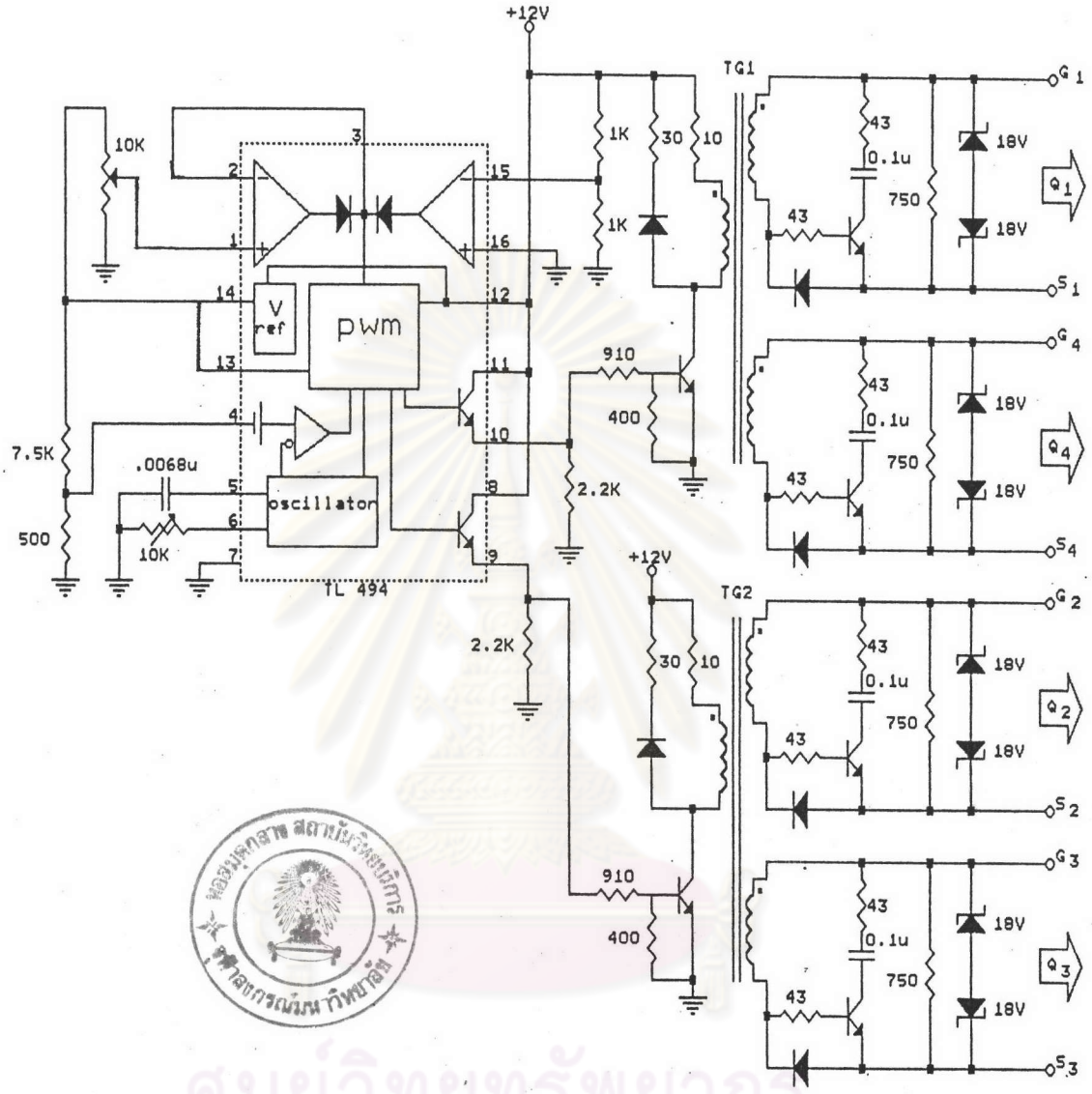
สำหรับการออกแบบวงจรควบคุมการขับนำเกตได้ใช้ไอซีเบอร์ TL 494 ซึ่งเป็นไอซีที่ใช้สำหรับงาน Pulse Width - Modulation Control (Motorola Handbook, 1983) ในการสร้างสัญญาณไปขับนำ MOSFET ทั้ง 4 ตัว โดยไอซีนี้จะให้เอาต์พุตออกมา 2 สัญญาณซึ่งมีรูปแบบลำดับการสวิตช์ของแต่ละสัญญาณดังรูปที่ 4.9 ซึ่งเป็นรูปแบบทั่วไปของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ Bridge จากรูป สัญญาณหนึ่งจะไปขับนำสวิตช์ Q_1 กับ Q_4



รูปที่ 4.25 แสดงสัญญาณกระแสที่จ่ายให้กับหม้อแปลงของวงจรขับนำเบส ซึ่งวัด จากวงจรจริง

ส่วนอีกสัญญาณหนึ่งจะไปขับนำสวิตช์ Q_2 กับ Q_3 โดยการขับนำจะส่งสัญญาณทั้งสองนี้ผ่านหม้อแปลงแยกโดด 2 ตัว (T_{G1},T_{G2}) เพื่อทำหน้าที่แยกโดดวงจรขับนำเกต เพราะว่าจุดร่วมของการขับนำของสวิตช์ทั้ง 4 ตัวไม่ได้อยู่จุดเดียวกัน และเพื่อเพิ่มสัญญาณจาก 2 ให้เป็น 4 จึงให้หม้อแปลงแต่ละตัวมีขดทุติยภูมิ 2 ขด ซึ่งรายละเอียดของวงจรควบคุม Pulse Width Modulation ที่ประยุกต์ใช้งานจากไอซีเบอร์ TL 494 พร้อมทั้งหม้อแปลง 2 ตัว และวงจรขับนำเกตได้แสดงไว้ ดังรูปที่ 4.26

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.26 วงจรควบคุมการขับนำเกตโดยใช้ไอซีเบอร์ TL 494

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 ภาคกำลังด้านเอาต์พุต

ภาคนี้แสดงไว้ในบล็อกที่4 ของวงจรรูปที่ 4.1 ซึ่งรับอินพุตมาจากภาคอินเวอร์เตอร์ วงจรในส่วนนี้ประกอบไปด้วยส่วนของวงจรกำลังที่สำคัญ ได้แก่ หม้อแปลงแยกโดดความถี่สูง ซึ่งจะทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังจากภาคอินเวอร์เตอร์ไปยังวงจรของโหลด ที่ประกอบไปด้วยขดลวดให้ความร้อนพร้อมชิ้นงาน และตัวเก็บประจุชดเชยตัวประกอบกำลังขนานอยู่ทางด้านขดทุติยภูมิ นอกจากนั้นจะมีตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุต่ออนุกรมอยู่ทางด้านขดปฐมภูมิด้วย

4.4.1 หม้อแปลงแยกโดดความถี่สูงและส่งผ่านกำลัง

หม้อแปลงนี้มีหน้าที่ในการแยกโดด(Isolate)วงจรทางด้านโหลด(ขดลวดเหนี่ยวนำพร้อมชิ้นงาน) ออกจากวงจรกำลังที่ต่ออยู่กับไฟ 3 เฟสของการไฟฟ้า เพราะวงจรทางด้านโหลดจะต้องมีระบบน้ำเดินผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุชดเชยตัวประกอบกำลัง เพื่อระบายความร้อน ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องแยกโดดวงจรส่วนนี้ออกจากระบบไฟ 3 เฟส รวมทั้งเพื่อป้องกันอันตรายที่เกิดจากไฟฟ้ารั่วลงจรจากเครื่องให้ความร้อนผ่านผู้ใช้ลงดินด้วย

ดังนั้นหม้อแปลงจึงเป็นตัวกลางในการส่งผ่านกำลังจากวงจรอินเวอร์เตอร์ไปยังขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน และเนื่องจากสัญญาณที่ส่งผ่านเป็นสัญญาณกำลังสูงและมีความถี่สูง ในการออกแบบหม้อแปลงจะต้องใช้แกนเฟอไรต์ และต้องเป็นแกนที่มีขนาดใหญ่ พร้อมทั้งใช้ลวดทองแดงขนาดใหญ่ แต่อย่างไรก็ตาม แกนเฟอไรต์ขนาดใหญ่ที่เพียงพอกับงานกำลังสูงไม่สามารถหาได้ในทองตลาด จึงจำเป็นจะต้องออกแบบโดยใช้แกนหม้อแปลงขนาดใหญ่ที่สุดที่สามารถหาซื้อได้แล้วนำมาต่อขนานหรืออนุกรมกันหลาย ๆ ตัว เพื่อให้ความสามารถในการส่งผ่านกำลังรวมมีค่ามากขึ้นตามต้องการ

4.4.1.1 การออกแบบหม้อแปลง

ในการออกแบบหม้อแปลง สิ่งที่จะต้องคำนวณและเลือกใช้ก็คือ ชนิด ลักษณะโครงสร้างและขนาดของแกนแม่เหล็ก อัตราส่วนของจำนวนรอบ และจำนวนรอบของขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิ ขนาดของเส้นลวดที่ใช้พัน ฉนวนทางไฟฟ้า ความร้อนของเส้นลวดการออกแบบในที่นี้ จะพิจารณาเผื่อในกรณีที่อาจมีการพัฒนา หรือเพิ่มกำลังของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำให้สูงขึ้นโดยยังสามารถใช้หม้อแปลงเดิมได้ จึงออกแบบโดยประมาณให้กำลังที่ชิ้นงานได้รับเป็น 10 กิโลวัตต์และขดลวดเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงประมาณ 80 เปอร์เซนต์ กำลังที่ขดลวดให้ความร้อนจะมีขนาด 12.5 กิโลวัตต์ และถ้าให้ตัวประกอบกำลังของวงจรทางด้านโหลด (ขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน พร้อมทั้งตัวเก็บประจุ

ชดเชย) มีค่าประมาณ 0.85 กำลังที่หม้อแปลงต้องจ่ายได้จะเท่ากับ 14.71 กิโลโวลต์แอมป์ และถ้าให้ประสิทธิภาพของหม้อแปลงความถี่สูงมีค่าประมาณ 95 เปอร์เซนต์ ดังนั้นกำลังที่เข้าสู่ขดปฐมภูมิจะมีขนาดประมาณ 15.5 กิโลโวลต์แอมป์

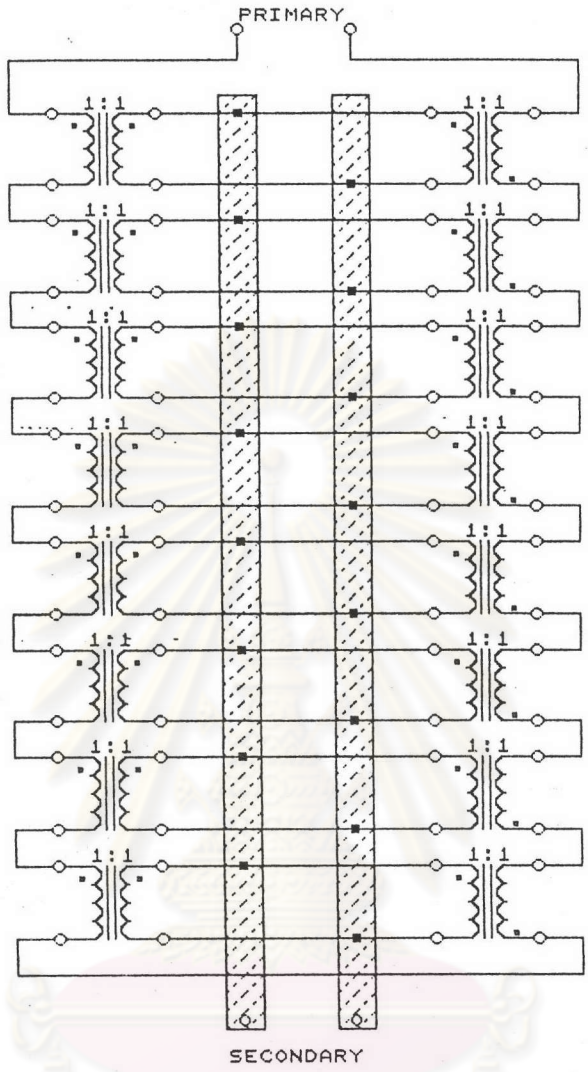
เนื่องจากแกนเฟอไรต์ขนาดใหญ่ที่สุดที่หาได้ในท้องตลาด คือ เบอร์ EC-70 แกนแม่เหล็กเป็นวัสดุชนิด N27 ซึ่งจากข้อมูลของ (Siemens Component Service , 1983) พบว่าหม้อแปลงความถี่สูงที่มีแกนขนาดนี้สามารถส่งผ่านกำลังงานได้ประมาณ 1 กิโลโวลต์แอมป์ที่ความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ดังนั้นจึงต้องใช้หม้อแปลงทั้งหมด 16 ตัว ในการส่งผ่านกำลังจากภาคอินเวอร์เตอร์ไปยังโหลด สำหรับอัตราการแปลงแรงดันจากการวิเคราะห์และได้กล่าวไว้ในหัวข้อ4.4.2.3 จะต้องมีค่าเท่ากับ 16:1 ดังนั้นเพื่อให้สะดวกในการต่อวงจรและลดความซับซ้อนในการพันหม้อแปลง และเพื่อให้การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการแปลงแรงดันทำได้ง่ายจึงใช้วิธีพันหม้อแปลงแต่ละตัวเป็นแบบ 1:1 โดยพันแบบ Bifillar คือ พันขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิไปพร้อมๆกัน เพื่อลดค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล (Leakage Inductance) ของหม้อแปลง(Slobodan Cuk and R.D.Middlebrook,1983) แล้วนำขดปฐมภูมิของหม้อแปลงทั้ง 16 ตัวมาต่ออนุกรม ในขณะที่ทางขดทุติยภูมิของหม้อแปลงให้นำมาต่อขนานกันดังรูปที่ 4.27 ซึ่งจะทำให้หม้อแปลงทั้ง 16 ตัว มีอัตราส่วนการแปลงแรงดันรวมเป็น 16:1 และสามารถส่งผ่านกำลังงานได้ขนาด 16 กิโลโวลต์แอมป์

4.4.1.2 การคำนวณขนาดของแกนแม่เหล็ก

สำหรับการคำนวณขนาดของแกนแม่เหล็ก ก็มีวิธีในการคำนวณหลายวิธี แต่ในที่นี้จะใช้วิธี Core Geometry K_g Approach (Slobodan Cuk and R.D. Middlebrook,1983) ซึ่งเป็นวิธีการออกแบบที่ใช้กำลังสูญเสียในทองแดง (P_{cu}) ของขดลวดเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการออกแบบ กล่าวคือ จะใช้วิธีกำหนดค่า P_{cu} ให้กับหม้อแปลงเลย ซึ่งการออกแบบขนาดของหม้อแปลงด้วยวิธีนี้ ก็คือ การกำหนดว่าจะยอมให้หม้อแปลงร้อนได้แค่ไหน ถ้าต้องการให้กำลังสูญเสียต่ำหรือร้อนไม่มาก หม้อแปลงก็จะมีขนาดใหญ่ ในทางกลับกันถ้ายอมให้หม้อแปลงร้อนได้หรือยอมให้กำลังสูญเสียในตัวได้มาก หม้อแปลงก็จะมีขนาดเล็ก ซึ่งสูตรในการคำนวณของ K_g Approach เป็นดังนี้

$$K_g = \frac{WS^2}{t} = \frac{\rho[\, V_1^2\, I_{1rms}^2 + V_2^2\, I_{2rms}^2\,]}{8kB_{max}^2 f^2 P_{cu}} \qquad (4.6)$$

$$K_g = \frac{WS^2}{t} = \rho\, \frac{P_{out}^2}{4kB_{max}^2 f^2 P_{cu}} \qquad (4.7)$$



รูปที่ 4.27 แสดงการต่อหม้อแปลง 16 ตัวให้มีอัตราส่วนการแปลงแรงดันเป็น 16:1

โดยที่ W คือ พื้นที่ช่องหน้าต่างของแกนหม้อแปลง

S คือ ขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกนหม้อแปลง

t คือ ความยาวเฉลี่ยของเส้นลวดที่ใช้พันแกนหนึ่งรอบ

ρ คือ ค่าต้านทานจำเพาะของทองแดง

P_{out} คือ กำลังงานที่หม้อแปลงส่งผ่าน = $V_1 I_{1rms} \simeq V_2 I_{2rms}$

k คือ Utilization Factor

B_{max} คือ ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด

f คือ ความถี่ที่ใช้งาน

P_{cu} คือ ค่ากำลังสูญเสียในทองแดงของขดลวด

จากสมการที่ (4.6) หรือ (4.7) ค่า K_g ที่คำนวณได้จะมีความสัมพันธ์กับขนาดของหม้อแปลงโดยตรงทั้งนี้เพราะK_g แปรผันตามกับพื้นที่ช่องหน้าต่างของแกนซึ่งเป็นพื้นที่ที่ใช้ในการพันขดลวด และแปรผันตามกับพื้นที่หน้าตัดของแกนกำลังสอง ค่า K_g ที่คำนวณได้จะบ่งบอกถึงขนาดของหม้อแปลงโดยประมาณ ซึ่งจะมีตารางเปรียบเทียบค่า K_g กับขนาดของหม้อแปลงพร้อมทั้งค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของหม้อแปลง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.1

การแทนค่าในสมการที่ (4.6) หรือ (4.7) นั้น จะต้องเลือกหรือกำหนดค่าของตัวแปรในสมการให้มีค่าเหมาะสม เพื่อให้หม้อแปลงทำงานได้โดยที่ไม่ร้อนจนเกินไป และไม่เกิดการอิ่มตัว ซึ่งจะอธิบายการกำหนดค่าต่าง ๆ เป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

4.4.1.2.1 การเลือกค่า B_{max} การเลือกค่านี้จะเป็นการเลือกค่าความหนาแน่นฟลักซ์สนามแม่เหล็กสูงสุดที่จะยอมให้มีได้ในแกนหม้อแปลง ซึ่งการเลือกค่าที่เหมาะสมจะพิจารณาประกอบกับกำลังสูญเสียในแกนเฟอไรต์ และความถี่ ดังกราฟความถี่กับกำลังสูยเสียในแกนต่อน้ำหนักแกน ในรูปที่ 4.28 (Siemens Component Service, 1983) จากรูปจะเห็นได้ว่า ที่ความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ และ B_{max} มีค่าเท่ากับ 0.15 เทสลา จะมีกำลังสูญเสียในแกนประมาณ 35 มิลลิวัตต์ต่อกรัม และแกน EC-70 มีน้ำหนัก 126 กรัม ดังนั้นกำลังสูญเสียในแกนจะประมาณ 4.4 วัตต์ ค่า B_{max} ที่ออกแบบมานี้จะนำไปใช้ในการคำนวณหาจำนวนรอบของขดปฐมภูมิ และขดทุติยภูมิต่อไป

4.4.1.2.2 กำลังที่หม้อแปลงส่งผ่าน เนื่องจากกำลังที่ต้องส่งผ่านไปยังภาคของโหลดทั้งหมดประมาณ 16 กิโลโวลต์แอมป์ และจากการออกแบบให้ใช้หม้อแปลงจำนวน 16 ตัว ดังนั้น กำลังที่ส่งผ่านหม้อแปลงแต่ละตัวประมาณ 1 กิโลวัตต์แอมป์

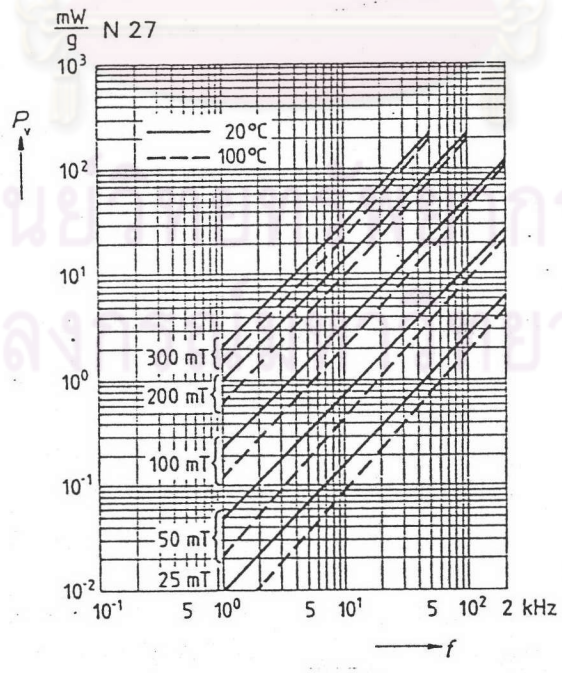
4.4.1.2.3 Utilization Factor ค่านี้คือประสิทธิภาพในการใช้ช่องหน้าต่างของหม้อแปลงในการพันขดลวดซึ่งมีค่าไม่เกินหนึ่ง โดยปกติแล้วจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.3-0.6 แล้วแต่วิธีการพันและขนาดของเส้นลวดที่ใช้พัน เนื่องจากในที่นี้ได้ออกแบบให้พันหม้อแปลงในลักษณะไบฟิลลาร์ คือพันขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิไปพร้อมๆ กัน และใส่ปลอกฉนวนใยแก้วกับขดลวดทั้งสอง เพื่อป้องกันปัญหาเนื่องจากความร้อนและการหลุดลอกของฉนวนในขณะพัน รวมทั้งลวดที่ใช้พันมีขนาดค่อนข้างใหญ่ จึงเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพในการใช้ช่องหน้าต่างลดลง จึงเลือกให้มีขนาด

$k = 0.3$

CORE TYPE	WINDOW $(mm)^2$	t (mm)	A $(mm)^2$	K_g $(m)^3$	A_p $(mm)^4$
EI-16	28.90	36.0	19.20	2.96×10^{-13}	555
EI-19	29.52	46.0	25.00	4.01×10^{-13}	736
EI-25	52.80	51.2	42.25	1.84×10^{-12}	2231
EI-28	46.00	60.8	77.38	4.53×10^{-12}	3559
EI-30	34.20	66.0	110.25	6.30×10^{-12}	3771
EI-33	97.80	76.0	120.65	1.87×10^{-11}	11800
EI-35	96.00	80.0	100.00	1.20×10^{-11}	9600
EI-40	112.14	88.0	132.25	2.23×10^{-11}	14831
EI-50	182.74	108.0	210.25	7.48×10^{-11}	38423
EE-34	115.50	61.0	92.0	1.58×10^{-11}	10575
EE-39	200.19	72.0	123.0	4.17×10^{-11}	24556
EE-43	209.99	79.0	172.0	7.91×10^{-11}	36109
EE-70	491.99	102.0	222.0	2.37×10^{-10}	109007

ตารางที่ 4.1 แสดงค่า K_g กับขนาดของหม้อแปลง

(Siemens Component Service, 1983)



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงกำลังสูญเสียในแกนเฟอไรต์ต่อน้ำหนัก กับความถี่

4.4.1.2.4 การเลือกความถี่ ความถี่ที่ใช้ในงานเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการกำหนดขนาดของหม้อแปลง จากสมการที่ (4.6) และ (4.7) ขนาดของหม้อแปลงจะแปรผันกับส่วนกลับของความถี่กำลังสอง ดังนั้นถ้าความถี่ที่ใช้งานมีค่าสูงจะทำให้ขนาดของหม้อแปลงเล็กลง แต่อย่างไรก็ตาม ในที่นี้การเลือกความถี่ถูกกำหนดด้วย ความสามารถของภาคอินเวอร์เตอร์ ซึ่งออกแบบให้ทำงานได้ในช่วงความถี่ 3Ø - 5Ø กิโลเฮิรตซ์ ดังนั้นค่าความถี่ที่นำไปใช้ในการคำนวณหาค่า K_g จึงเป็น 3Ø กิโลเฮิรตซ์ เพื่อให้ได้ขนาดของหม้อแปลงที่สามารถทำงานได้ในช่วงความถี่ต่ำที่สุด

4.4.1.2.5 การเลือกค่ากำลังสูญเสียในทองแดง (P_{cu}) ค่านี้เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญของการคำนวณแบบ K_g Approach ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในตอนต้น ค่า P_{cu} ที่ยอมให้มีได้ในหม้อแปลงโดยทั่วไปแล้วมักจะออกแบบให้มีค่าอยู่ในช่วง Ø.5 - 1 % ของกำลังที่หม้อแปลงส่งผ่าน สำหรับในที่นี้ได้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 7.1 วัตต์ ซึ่งคิดเป็น Ø.71% ของกำลังที่หม้อแปลงส่งผ่าน (1 กิโลวัตต์)

4.4.1.2.6 ค่าสภาพความต้านทานของทองแดง ค่านี้เป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของทองแดงซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วย ถ้ากำหนดให้อุณหภูมิของหม้อแปลงขณะทำงานแบบโหลดเต็มที่มีค่าประมาณ 6Ø องศาเซลเซียส ค่า ρ_{cu} จะมีค่าเท่ากับ $2.ØØ \times 1Ø^{-8}$ โอห์มเมตร แทนค่าตัวแปรต่างๆที่กำหนดไว้ในสมการที่(4.7) จะได้ค่า $K_g = 1.16 \times 1Ø^{-10}$ จากค่าที่คำนวณได้นี้เมื่อเปรียบเทียบกับตารางที่ 4.1 จะพบว่า มีค่าใกล้เคียงกับค่า K_g ของหม้อแปลงเบอร์ EC-7Ø แสดงว่าการเลือกใช้หม้อแปลงขนาดนี้เป็นการเหมาะสมแล้ว

4.4.1.3 การคำนวณจำนวนรอบของขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิ จำนวนรอบของขดปฐมภูมิ และขดทุติยภูมิมีความสำคัญต่อการอิ่มตัวของแกนแม่เหล็กของหม้อแปลง ในการคำนวณจำนวนรอบนี้จะใช้สมการที่ (4.8) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณ และจะให้ค่าจำนวนรอบที่ต่ำที่สุดที่ใช้งานได้โดย B_{max} ไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ และจะพิจารณาเฉพาะในกรณีที่ไม่มีกระแสไฟตรงไหลเข้าหม้อแปลง อีกทั้งแรงดันที่คร่อมหม้อแปลงจะต้องเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่สมมาตร

$$N = \frac{V}{4B_{max}Sf} \qquad (4.8)$$

โดยที่ V คือ ค่ายอดของแรงดันที่ตกคร่อมหม้อแปลง

B_{max} คือ ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสูงสุดที่ยอมให้เกิดในแกนเหล็ก

S คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนแม่เหล็กของหม้อแปลง

f คือ ความถี่ที่ใช้งาน

เมื่อพิจารณาหม้อแปลงทั้งหมด 16 ตัว ที่ต่อกันดังรูปที่ 4.27 จะเห็นว่า ขดปฐมภูมิของหม้อแปลงแต่ละตัวจะต่ออนุกรมกันหมด ในขณะที่ขดทุติยภูมิของแต่ละตัวจะต่อขนานกันหมด จึงทำให้แรงดันที่หม้อแปลงแต่ละตัวจะต้องรับเป็น 1/16 เท่าของแรงดันทั้งหมด ถ้าประมาณว่าแรงดันของหม้อแปลงรวมมีรูปเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีค่ายอดเท่ากับแรงดันไฟตรงจากภาคเรียงกระแสซึ่งเท่ากับซึ่งเท่ากับ 530 โวลต์จะได้ว่าแรงดันที่ตกคร่อมขดปฐมภูมิของหม้อแปลงแต่ละตัวจะมีค่ายอดเท่ากับ 33.1 โวลต์

จากข้อมูลในตารางที่ 4.1 แกนแม่เหล็กของหม้อแปลงเบอร์ EC-70 มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 222 ตารางมิลลิเมตร ส่วนความถี่จะต้องแทนค่าความถี่ที่ต่ำสุดที่ใช้งาน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 30 กิโลเฮิร์ตซ สำหรับค่า B_{max} ในที่นี้กำหนดให้มีค่า 0.15 จากนั้นแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในสมการที่ (4.8) จะได้ค่า N เท่ากับ 7.8 ดังนั้นจึงเลือกให้จำนวนรอบของขดปฐมภูมิเป็น 8 รอบ และเนื่องจากหม้อแปลงแต่ละตัวมีอัตราส่วนเป็น 1:1 ดังนั้นจำนวนรอบของขดทุติยภูมิจึงเป็น 8 รอบด้วย

4.4.1.4 การคำนวณขนาดของเส้นลวด

ขนาดของเส้นลวดที่ใช้พันหม้อแปลง จะมีความสัมพันธ์กับกำลังสูญเสียในทองแดง (P_{cu}) ของหม้อแปลงโดยตรง ในการคำนวณจะมีหลายวิธี แล้วแต่จะเริ่มที่จุดไหนก่อน และในแต่ละวิธีก็จะต้องอาศัยการทดลองสุ่มและทดลองพัน เพื่อให้ได้จำนวนรอบและค่ากำลังสูญเสียของทองแดงตามที่กำหนดไว้ โดยใช้ช่องหน้าต่างในการพันให้มากที่สุด ในการคำนวณขนาดของเส้นลวดใช้สูตรดังต่อไปนี้

$$kW = N_p A_{wp} + N_s A_{ws} \qquad (4.9)$$

เนื่องจาก $N_p = N_s$ ดังนั้น $A_{wp} = A_{ws}$ จะได้ว่า

$$kW = 2 N_p A_{wp} \qquad (4.10)$$

โดยที่ k คือ Utilization Factor

W คือ พื้นที่ช่องหน้าต่างของแกนหม้อแปลง

N_p คือ จำนวนรอบของขดปฐมภูมิ

N_s คือ จำนวนรอบของขดทุติยภูมิ

A_{wp} คือ พื้นที่หน้าตัดเส้นลวดตัวนำของขดปฐมภูมิ

A_{ws} คือ พื้นที่หน้าตัดเส้นลวดตัวนำของขดปฐมภูมิ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตารางที่ 4.1 แกนขนาด EC-7Ø จะมี W = 97Ø962 cmil หรือ 492 ตารางมิลลิเมตร และจากหัวข้อที่แล้วจะได้ว่า N_p = 8 รอบ และสมมติให้ k = Ø.3 เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 4.1Ø จะได้ค่า A_{wp} = 9.23 ตารางมิลลิเมตร

จากพื้นที่หน้าตัดของขดลวดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิที่คำนวณได้จะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ในทางปฏิบัติจะไม่ใช้ลวดตัวนำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดดังกล่าว เนื่องจากลวดตัวนำกระแสที่มีความถี่สูงจึงเกิดปรากฏการณ์การนำกระแสเฉพาะที่ผิวลวดตัวนำ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวจึงใช้เส้นลวดขนาดเล็ก ๆ หลายเส้นมาต่อขนานกัน เพื่อให้พื้นที่หน้าตัดในการนำกระแสเท่าเดิม ในการเลือกขนาดของเส้นลวดตัวนำขนาดเล็กจะต้องเลือกให้มีรัศมีที่เล็กกว่าความลึกผิวของทองแดงที่ความถี่สูงสุดที่ใช้งานซึ่งเท่ากับ 5Ø กิโลเฮิรตซ์ ที่ความถี่นี้ความลึกผิวของทองแดงมีค่าเท่ากับ Ø.296 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงเลือกใช้ลวดตัวนำเบอร์ SWG#36 ที่มีขนาดรัศมี Ø.Ø965 มิลลิเมตร และมีพื้นที่หน้าตัด Ø.Ø2927 ตารางมิลลิเมตร (ไม่รวมฉนวนที่เคลือบไว้) ถ้าคิดฉนวนที่เคลือบเส้นลวดไว้ด้วย จะมีพื้นที่หน้าตัดเป็น Ø.Ø3733 ตารางมิลลิเมตร แสดงว่าต้องใช้ลวดตัวนำจำนวน 9.23/Ø.Ø3733 = 247 เส้น ในทางปฏิบัติจะเลือกใช้ลวด 25Ø เส้น นำมาตีเกลียวให้กลมติดกันเป็นเส้นเดียว เพื่อความสะดวกในการพัน แล้วใส่ปลอกฉนวนใยแก้วหุ้มไว้อีกชั้นหนึ่งเพื่อให้เป็นฉนวนไฟฟ้า หลังจากนั้นนำไปพันเป็นขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิด้วยวิธีการพันแบบไบฟิลลาร์กล่าวคือ พันทั้งขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิคู่ไปพร้อม ๆ กัน และค่ากำลังสูญเสียในทองแดง (P_{cu}) ของหม้อแปลงแต่ละตัวสามารถคำนวณ ได้โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$P_{cu} = 2\left[\frac{I^2_{rms}\ \rho_{cu}\ l}{A}\right] \qquad (4.11)$$

โดยที่ I_{rms} คือ ค่ากระแสอาร์เอ็มเอสที่ไหลผ่านขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิของหม้อแปลงแต่ละตัว

l คือ ความยาวของขดลวดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิ

A คือ พื้นที่หน้าตัดของทองแดงของขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิ

ค่ากระแสอาร์เอ็มเอส (I_{rms}) ที่ไหลผ่านหม้อแปลงแต่ละตัวก็คือค่ากระแสอาร์เอ็มเอสที่ไหลผ่านขดปฐมภูมิของหม้อแปลงรวมนั่นเอง เพราะว่าขดปฐมภูมิของหม้อแปลงทุกตัวต่ออนุกรมกันหมด และจากการวิเคราะห์โดยการชิมมูเลต ในหัวข้อที่ 4.2.2 ดังรูปที่ 4.14 ซึ่งจะคำนวณค่ากระแสอาร์เอ็มเอสโดยประมาณได้ค่าเท่ากับ 4Ø แอมป์

ส่วนความยาวของขดลวด (l) สามารถคำนวณได้โดยใช้ค่าความยาวเฉลี่ยต่อรอบ (t) ที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ของแกน EC-70 ซึ่งจะได้ว่า

$$l = 102 \times 10^{-3} \times 8 = 816 \times 10^{-3} \text{ เมตร}$$

สำหรับพื้นที่หน้าตัดของทองแดง(A)ค่าที่นำมาใช้แทนในสมการนี้จะต้องเป็นพื้นที่หน้าตัดของเนื้อทองแดงที่ใช้นำกระแสจริงไม่นับรวมส่วนที่เป็นฉนวน ซึ่งจากข้อมูลของลวดเบอร์ SWG#36 ที่กล่าวไปแล้วตอนต้น จะมีพื้นที่หน้าตัดของทองแดงที่ไม่รวมฉนวนเท่ากับ 0.02927 ตารางมิลลิเมตร เมื่อคิดรวมทั้งหมด 250 เส้น จะได้

$$A = 0.02927 \times 250 = 7.3175 \text{ ตารางมิลลิเมตร}$$

แทนค่าดังกล่าวลงในสมการที่ 4.11

$$P_{cu} = 2\left[\frac{(40)^2 \times (2 \times 10^{-8}) \times (816 \times 10^{-3})}{(7.3175 \times 10^{-6})}\right]$$

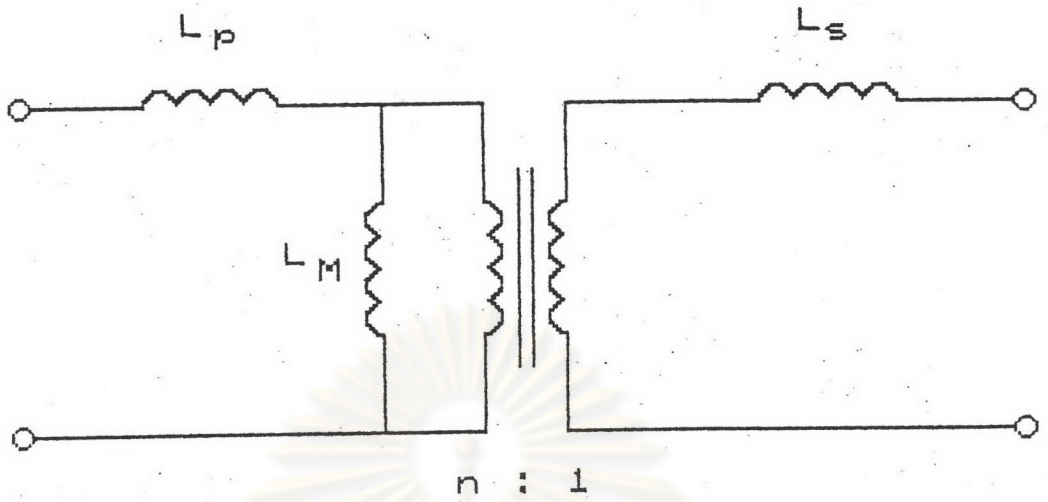
$$P_{cu} = 7.1 \quad W$$

จากค่ากำลังสูญเสียในทองแดง เมื่อรวมกับกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนแม่เหล็ก (Core Loss) จากหัวข้อที่ 4.4.1.2.1 ซึ่งเท่ากับ 4.4 วัตต์ จะได้กำลังสูญเสียรวมของหม้อแปลงเท่ากับ 11.5 วัตต์ ซึ่งคิดเป็น 1.15% ของกำลังที่ส่งผ่านหม้อแปลง และเป็นค่าที่ไม่มากนักสำหรับหม้อแปลงขนาด EC-70 นี้

<u>หมายเหตุ</u> ในการคำนวณขนาดของเส้นลวดที่กล่าวไปแล้วข้างบนนี้ได้ผ่านการทดลอง และผิดพลาด (Trial and Error) และทดลองพันใหม่หลายครั้งจนได้ครั้งที่ดีที่สุดดังที่ยกมาอธิบายไว้ข้างบน

4.4.1.5 การหาวงจรสมมูลย์ของหม้อแปลง

เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล และค่าความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กของหม้อแปลงจะมีผลต่อการทำงานของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ โดยเฉพาะค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลเป็นค่าที่ต้องสนใจมาก เพราะในวงจรกำลังทางด้านเอาท์พุตจะต้องมีตัวเหนี่ยวนำมาต่ออนุกรมขดปฐมภูมิของหม้อแปลง ซึ่งค่าของตัวเหนี่ยวนำที่นำมาต่อเพิ่มนี้จะต้องรวมกับค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลงที่มีอยู่แล้ว สำหรับการวัดค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงจะวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ (Impedance Analyzer) ซึ่งสามารถวัดค่าได้ตามความถี่ที่ต้องการ และวงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงแสดงได้ดังรูปที่ 4.29



รูปที่4.29 แสดงวงจรสมมูลของหม้อแปลงส่งผ่านกำลัง

โดยที่ L_p คือ ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลทางด้านปฐมภูมิ

L_s คือ ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลทางด้านทุติยภูมิ

L_M คือ ค่าความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กที่อ้างอิงไว้ทางด้านปฐมภูมิ

n คือ อัตราส่วนการแปลงแรงดัน

ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในวงจรสมมูล จะทำได้โดยการวัดที่จุดต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- วัดทางด้านขดปฐมภูมิ ในขณะที่เปิดวงจรทางด้านทุติยภูมิ กำหนดให้เป็น L_{11}
- วัดทางด้านขดทุติยภูมิ ในขณะที่เปิดวงจรทางด้านปฐมภูมิ กำหนดให้เป็น L_{22}
- วัดทางด้านขดปฐมภูมิ ในขณะที่ลัดวงจรทางด้านทุติยภูมิ กำหนดให้เป็น $L_{11,s}$
- วัดทางด้านขดทุติยภูมิ ในขณะที่ลัดวงจรทางด้านปฐมภูมิ กำหนดให้เป็น $L_{22,s}$

ค่าที่วัดได้แต่ละค่า จะมีความสัมพันธ์กันกับวงจรสมมูลของหม้อแปลงดังสมการต่อไปนี้ (Slobodan Cuk and R.D.Middlebrook,1983)

$$L_{11} = L_p + L_M \tag{4.12}$$

$$L_{22} = L_s + \frac{L_M}{n^2} \tag{4.13}$$

$$L_{11,s} = L_p + \frac{L_M n^2 L_s}{L_M + n^2 L_s} \tag{4.14}$$

$$L_{22,s} = L_s + \left[\frac{L_M L_p}{L_M + L_p}\right]\frac{1}{n^2} \qquad (4.15)$$

$$n = \sqrt{\frac{L_{11}}{L_{22}}} \qquad (4.16)$$

เมื่อนำหม้อแปลงทั้ง 16 ตัวมาต่อรวมกัน ดังรูปที่ 4.28 แล้วทำการวัดที่จุดต่าง ๆ ดังกล่าวโดยวัดที่ความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ได้ค่าออกมาดังนี้

$$L_{11} = 3.746 \quad \mu H$$

$$L_{22} = 14.71 \quad \mu H$$

$$L_{11,s} = 13.56 \quad \mu H$$

$$L_{22,s} = 53.50 \quad \mu H$$

แทนค่าที่วัดได้ลงในสมการที่ (4.12)-(4.16) แล้วแก้สมการจะได้ผลเฉลยที่เป็นค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของหม้อแปลงดังต่อไปนี้

$$L_M = 3.7397 \quad \mu H$$

$$L_p = 6.320 \quad \mu H$$

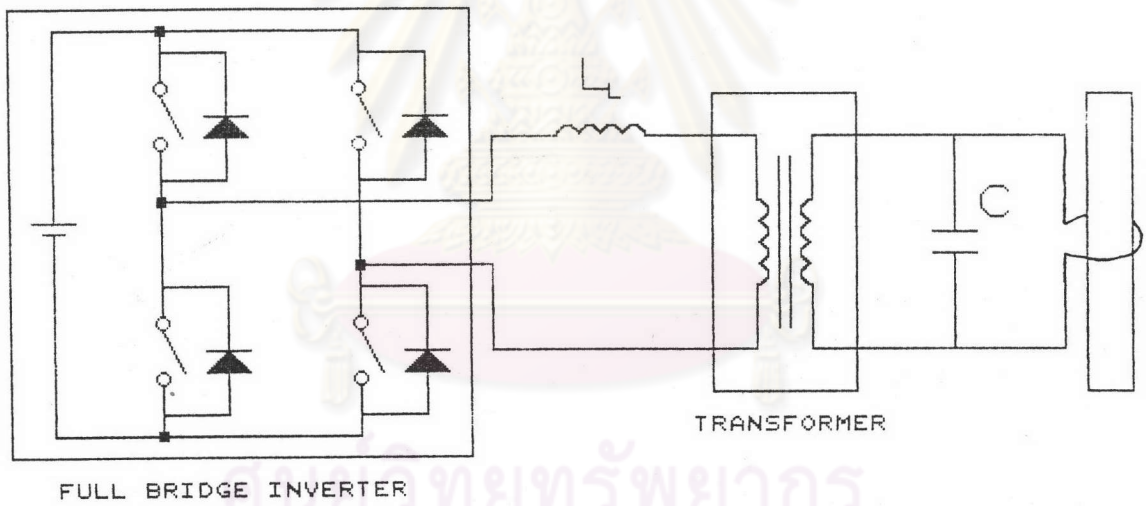
$$L_s = 28.481 \quad \mu H$$

$$n = 16.0$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

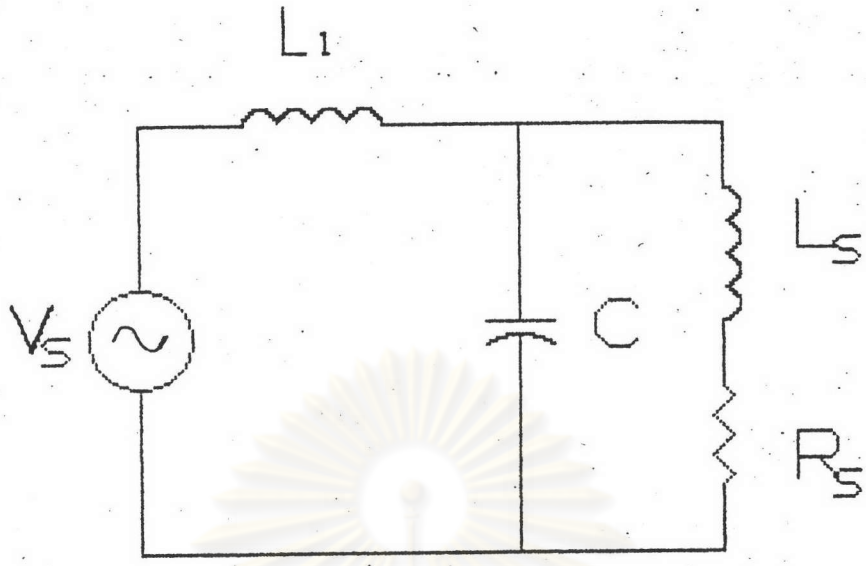
4.4.2 ตัวเก็บประจุชดเชยตัวประกอบกำลัง และ ตัวเหนี่ยวนำ ที่ต่ออนุกรมด้านปฐมภูมิ

จากผลการวัดและการคำนวณวงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำ มุมประกอบกำลังของขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงานจะเป็นแบบล้าหลังค่อนข้างมาก หรือกล่าวได้ว่าตัวประกอบกำลังจะเปลี่ยนแปลงตามความถี่ และมีค่าอยู่ในช่วง Ø.4 - Ø.5 การที่ตัวประกอบกำลังทางด้านโหลดนี้มีค่าต่ำจะทำให้กำลังปรากฏที่ต้องให้แก่ขดลวดเหนี่ยวนำ (เพื่อให้ได้กำลังที่โหลดเท่าเดิม) มีค่าสูงมากเป็นผลให้หม้อแปลงแยกโดด และส่งผ่านกำลังต้องมีขนาดใหญ่ รวมไปถึงขนาดของวงจรอินเวอร์เตอร์และวงจรเรียงกระแส ก็ต้องมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะจ่ายกำลังปรากฏนี้ด้วย เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จึงต้องใส่ตัวเก็บประจุชดเชยตัวประกอบกำลังให้แก่ขดเหนี่ยวนำ ซึ่งในที่นี้ได้เลือกการชดเชยตัวประกอบกำลังให้เป็นแบบขนาน โดยการต่อตัวเก็บประจุขนานกับขดลวดเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 4.3Ø



รูปที่ 4.3Ø แสดงการต่อตัวเก็บประจุชดเชยตัวประกอบกำลังและตัวเหนี่ยวนำ

สำหรับตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรมด้านปฐมภูมิ เป็นตัวเหนี่ยวนำที่ใส่เพื่อให้วงจรไฟฟ้าทางด้านโหลด มีมุมประกอบกำลังเป็นแบบล้าหลัง เนื่องจากวงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ จะมีปัญหาเรื่องการเกิดกระแสทะลุผ่าน เพราะปัญหาจากเวลาฟื้นตัวของไดโอดที่ต่อขนานอยู่กับสวิตช์ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.2.1 ถ้ามองวงจรไฟฟ้าเฉพาะทางด้านโหลด หรือมองออกมาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงโดยการย้ายตัวเหนี่ยวนำมาที่ขดทุติยภูมิจะได้วงจรไฟฟ้าดังรูปที่ 4.31 ซึ่งเป็นวงจรไฟฟ้าที่จะใช้ในการวิเคราะห์ทางด้านโหลดต่อไป

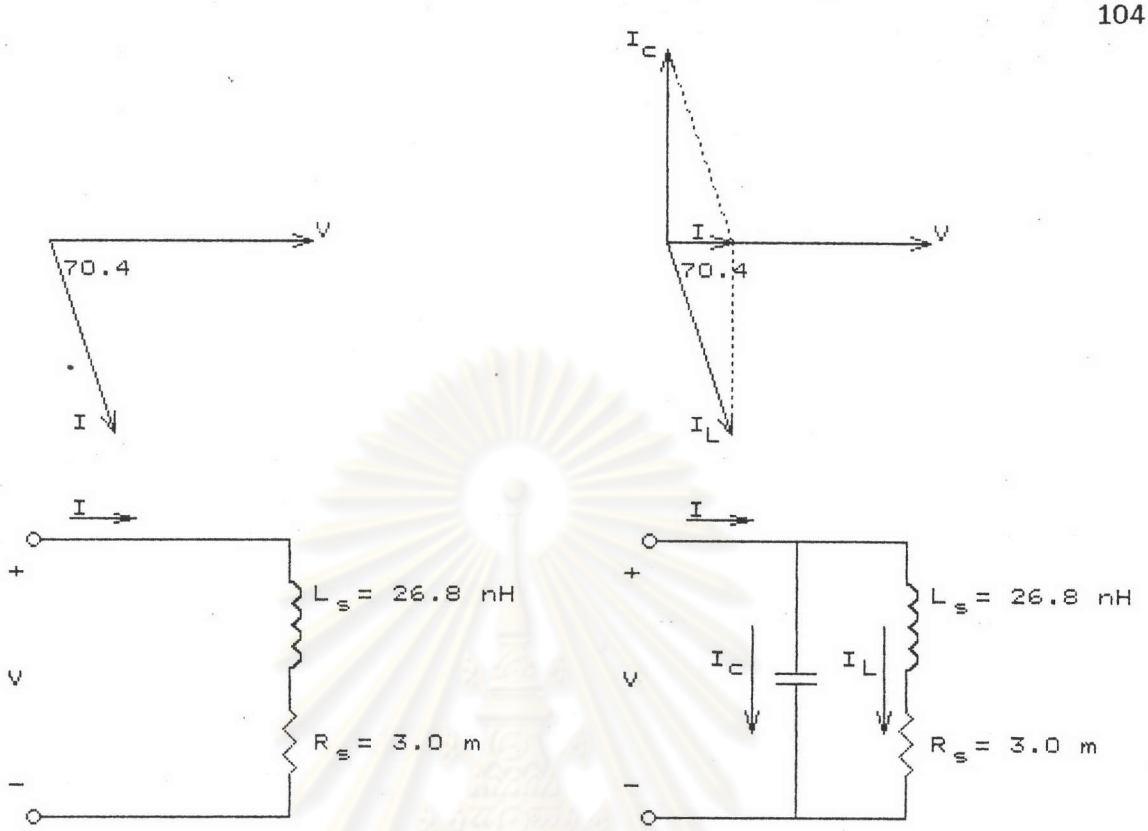


รูปที่ 4.31 แสดงวงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางด้านโหลด

4.4.2.1 การออกแบบค่าตัวเก็บประจุชดเชยตัวประกอบกำลัง

ในการออกแบบค่าของตัวเก็บประจุ จะเริ่มจากการคำนวณค่าตัวเก็บประจุที่ทำให้วงจรทางด้านโหลดมีตัวประกอบกำลังเป็น 1 ก่อน แล้วจึงเลือกค่าที่เหมาะสมอีกครั้ง เพราะยังจะต้องออกแบบค่าของตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรมอยู่ในวงจรทางด้านโหลดอีกสำหรับการเลือกค่าที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุชดเชยและตัวเหนี่ยวนำอนุกรมนั้น จะใช้วิธีคำนวณและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Math CAD อีกที ซึ่งกล่าวไว้ในหัวข้อถัดไป

จากวงจรสมมูลของชดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงานที่วัดได้ที่ความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ L_s = 26.8 นาโนเฮนรี่ , R_s = 3.0 มิลลิโอห์ม ถ้ากำหนดให้กำลังที่ชิ้นงานมีค่าเป็น 10 กิโลเฮิรตซ์ กระแสผ่านโหลด I จะมีค่าเท่ากับ 1826 A_{rms} และแรงดันคร่อมโหลด V จะมีค่าเท่ากับ 16.32 โวลต์ เมื่อเขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันคร่อมโหลด V กับกระแสผ่านโหลด I จะได้ดังรูปที่ 4.32 ก) จะเห็นว่ามีมุมตัวประกอบกำลังล้าหลังอยู่ 70.4 องศา ทำให้กำลังปรากฏที่ต้องจ่ายให้วงจรมีค่าสูง (P = VI) เมื่อใส่ตัวเก็บประจุชดเชยขนานกับวงจรกระแสจากตัวเก็บประจุ (I_c) จะช่วยจ่ายกระแสรีแอกทีฟแทน ทำให้กระแสไหลเข้าในวงจรมีค่าลดลง กำลังที่ปรากฏจึงมีค่าลดลงด้วย



รูปที่ 4.32 แสดงวงจรสมมูลทางไฟฟ้าทางด้านโหลดและเฟสเซอร์ไดอะแกรม
ก) กรณีที่ไม่มีตัวเก็บประจุชดเชย ข) กรณีที่ไม่มีตัวเก็บประจุชดเชย

จากวงจรสมมูลทางไฟฟ้าและเฟสเซอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 4.32 ข)

$$I = I_C + I_L$$

ถ้าต้องการให้ได้ตัวประกอบกำลังเป็น 1 I_C จะต้องรวมกับ I_L แล้วได้ I ที่มุมทับกับ V พอดี หรือกล่าวได้ว่า จะต้องมีค่าเท่ากับกระแสรีแอกทีฟของ I_L พอดี นั่นคือ

$$I = I_C + I_L$$

$$I_C = I_L \sin(70.4)$$

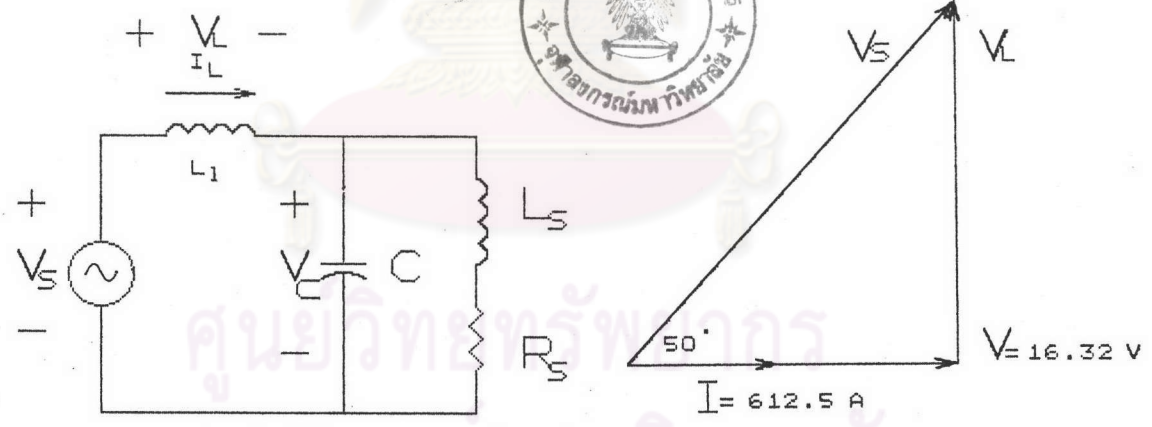
$$V \omega C = I_L \sin(70.4)$$

$$C = \frac{I_L \sin(70.4)}{Vw} \qquad (4.17)$$

แทนค่า จะได้ C = 336 ไมโครฟารัด

4.4.2.2 การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรมด้านปฐมภูมิ

เนื่องจากการต่อตัวเหนี่ยวนำอนุกรม จะช่วยให้กระแสโหลดของวงจรอินเวอร์เตอร์ตามหลังแรงดัน ถ้ากำหนดให้มุมประกอบกำลังแบบล้าหลังที่วงจรอินเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้ดี มีค่าเป็น 50 องศา ในการคำนวณค่าของตัวเหนี่ยวนำจะคำนวณโดยคิดว่า วงจรไฟฟ้าทางด้านโหลดประกอบด้วยตัวเก็บประจุค่าที่ออกแบบไว้ในหัวข้อที่แล้ว และวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงานซึ่งเป็นค่าที่วัดที่ความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ดังรูปที่ 4.33 การคำนวณค่าของตัวเหนี่ยวนำนี้เป็นการคำนวณเพื่อให้รู้ค่าโดยประมาณเท่านั้น ในการเลือกค่าที่เหมาะสมจะใช้วิธีคำนวณและวิเคราะห์ไปด้วยโปรแกรม Math CAD อีกทีซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4.33 แสดงวงจรสมมูลไฟฟ้าทางด้านโหลด และเฟสเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

จากวงจรสมมูลทางไฟฟ้าและเฟสเซอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 4.33

$$V_s = V_L + V$$

ถ้าต้องการให้กระแส I ตามหลังแรงดัน V_s อยู่ 50 องศา จะได้ว่า

$$V_L = V \tan(50)$$

จาก $$V_L = IX_L = I\omega L$$

$$L = \frac{V_L}{I\omega} = \frac{V \tan(50)}{I\omega}$$

แทนค่า จะได้ $L = 100$ nH

4.4.2.3 การวิเคราะห์ค่าของตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำในวงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำ

จากการออกแบบโดยประมาณของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำในหัวข้อที่แล้วเพื่อเป็นแนวทางในการทำความเข้าใจ และเลือกค่าเพื่อจะนำมาใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Math CAD (MathSoft, Inc, 1989) อีกครั้ง สาเหตุที่ต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณเพราะว่า ในการวิเคราะห์ต้องวิเคราะห์ในเชิงความถี่ และพารามิเตอร์แต่ละตัวในวงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำก็เป็นฟังก์ชันของความถี่ด้วย โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณพารามิเตอร์แต่ละตัวในวงจรสมมูลจะใช้สมการที่ (3.30) - (3.35) ซึ่งเป็นสมการที่ได้ปรับด้วยค่า Correction Factor แล้ว เพื่อให้ค่าที่ได้จากสมการใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ทุก ๆ ความถี่ ดังนั้นการคำนวณจะต้องมีความซับซ้อนมากขึ้น อีกทั้งในการออกแบบค่าต่างๆต้องอาศัยการทดลองสุ่มแทนค่าซ้ำไปซ้ำมาหลาย ๆ ครั้ง นอกจากนั้นการใช้โปรแกรมยังช่วยในการ คำนวณหาค่าที่สำคัญต่าง ๆ ในวงจรเพื่อนำมาเป็นข้อมูลประกอบในการวิเคราะห์ออกแบบส่วนต่างๆของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ เช่น อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลง กระแสสูงสุดที่ไหลผ่านสวิตช์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ มุมเฟสของกระแสกับแรงดัน เป็นต้น

นอกจากนี้ เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงานยังเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ และค่าซึมซาบแม่เหล็กของชิ้นงานโดยเมื่ออุณหภูมิของชิ้นงานสูงขึ้นค่าสภาพความต้านทานก็จะสูงขึ้น และเมื่ออุณหภูมิของชิ้นงานสูงจนถึงจุดคูรี ค่าซึมซาบแม่เหล็กของชิ้นงานก็จะเปลี่ยนเป็นค่าเท่ากับค่าซึมซาบแม่เหล็กของอากาศ ดังนั้นการวิเคราะห์ในโดเมนของความถี่ เราสามารถคำนวณในกรณีที่อุณหภูมิมีค่าต่างๆ ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนเลยจุดคูรีได้

จากเหตุผลที่กล่าวมาแล้วจะเห็นได้ว่า ในการวิเคราะห์และออกแบบโดยใช้โปรแกรม Math CAD จะช่วยให้การออกแบบทำได้ง่ายขึ้นและถูกต้องมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Math CAD ที่พัฒนาขึ้นมานี้จะวิเคราะห์เฉพาะวงจรสมมูลไฟฟ้าทางด้านโหลด ดังรูปที่ 4.31 ดังนั้นถ้าต้องการรู้ค่าตัวแปรต่างๆที่ไม่ได้อยู่ในส่วนของวงจรทางด้านโหลดก็ต้องใช้วิธีการคำนวณย้ายโอนผ่านหม้อแปลง และนอกจากนั้นแหล่งจ่ายไฟสลับความถี่สูงที่จ่ายให้กับวงจรทางด้านโหลดยังเป็นรูปซายน์ ซึ่งความเป็นจริงแล้วไฟสลับที่สร้างได้จากวงจรอินเวอร์เตอร์มีรูปใกล้เคียงกับรูปสี่เหลี่ยม จึงทำให้การคำนวณโดยใช้โปรแกรมนี้อาจผิดพลาดไปบ้าง

จากรูปที่ 4.31 เมื่อใช้โปรแกรม Math CAD (ดังแสดงรายละเอียดของสมการต่าง ๆ ในตัวโปรแกรมไว้ในภาคผนวก) ในการคำนวณวงจรสมมูลไฟฟ้าทางด้านโหลด ค่า L_s กับ R_s จะใช้ค่าซึ่งคำนวณตามสมการที่ (3.30) - (3.35) กล่าวคือ เป็นการคำนวณโดยใช้สมการที่ได้ปรับด้วยค่า Correction Factor แล้ว โดยการคำนวณในที่นี้จะใช้ขนาดของชิ้นงานเท่ากับ 22 มม. และมีค่าความชิมชาบแม่เหล็กสัมพัทธ์เท่ากับ 9.4 และคำนวณโดยใช้ค่าสภาพความต้านทานของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส สำหรับการเลือกค่า V_s, L_1 และ C ที่เหมาะสมจะใช้วิธีการทดลองแทนค่าโดยจะแทนค่า L_1 และ C ที่คำนวณได้ในหัวข้อที่แล้วก่อน แล้วจึงปรับค่าไปเรื่อย ๆ เพื่อหาค่าที่เหมาะสม ซึ่งพิจารณาค่าที่เหมาะสมจะพิจารณาในช่วงความถี่ 30 kHz- 50 kHz โดยดูค่ากำลังที่ชิ้นงาน ค่ากระแสที่ไหลเข้าสู่วงจรทางด้านโหลด และค่ามุมของกระแสเทียบกับแรงดันจากวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจากการทดลองแทนค่าและปรับค่าจะได้ค่าที่เหมาะสมดังนี้

$$V_s = 40\ V_p\ ,\ L_1 = 190 \text{ นาโนเฮนรี}\ ,\ C = 330 \text{ ไมโครฟารัด}$$

ในการปรับค่า C และ L_1 จะทำให้รูปกราฟของกำลังที่ชิ้นงาน และกระแสที่ไหลเข้าสู่วงจรทางด้านโหลด เลื่อนไปมาทางด้านซ้ายและขวา โดยถ้าค่า C และ L_1 มีค่าลดลงรูปกราฟจะเลื่อนไปทางขวา ในขณะที่ค่า C และ L_1 มีค่าสูงขึ้น รูปกราฟจะเลื่อนมาทางซ้าย

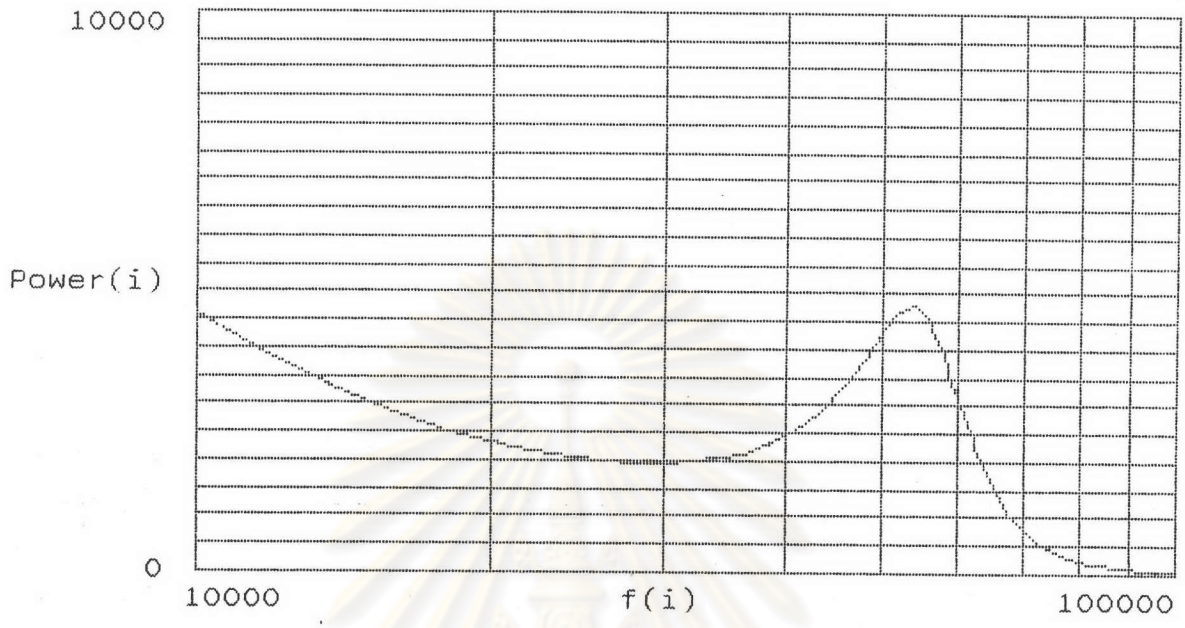
จากรูปที่ 4.34 จะเห็นว่าค่ากำลังที่ชิ้นงานจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 4.8 กิโลวัตต์ที่ความถี่ 53 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งในการออกแบบจะให้ความถี่ที่เราต้องการทำงานอยู่ทางด้านซ้ายของกราฟรูปภูเขาซึ่งในที่นี้คือช่วงความถี่ 30 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 50 กิโลเฮิรตซ์ จากการออกแบบแบบนี้ จะทำให้กำลังที่ชิ้นงานแปรตามความถี่ กล่าวคือเมื่อเพิ่ม

ความถี่จาก 30 กิโลเฮิรตซ์ไป 50 กิโลเฮิรตซ์ กำลังที่ชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นจาก 2 กิโลวัตต์ไปยัง 4.3 กิโลวัตต์ ส่วนรูปที่ 4.35 ทำให้ทราบว่าค่ากระแสสูงสุดในช่วงความถี่ 30 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 50 กิโลเฮิรตซ์ มีค่าเท่ากับ 650 แอมป์ ซึ่งถ้าคิดโอนย้ายไปทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงจะได้ค่ากระแสสูงสุดเท่ากับ 41 แอมป์ และจากรูปที่ 4.36 จะเห็นว่า มุมของกระแสเทียบกับแรงดันจากอินเวอร์เตอร์จะตามหลังตลอดช่วงความถี่ โดยจะมีค่าเปลี่ยนแปลงจากค่าตามหลัง 76 องศาไปจนถึง ตามหลัง 62 องศา ในช่วงความถี่ 30 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 50 กิโลเฮิรตซ์ ตามลำดับ นอกจากนั้น ยังสามารถคำนวณหา ค่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ เพื่อนำไปใช้ในการเลือกชนิดและขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้ต่อวงจรจริง โดยจะคำนวณในโดเมนของความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 4.37 ซึ่งจะเห็นว่า ค่าแรงดันสูงสุดของตัวเก็บประจุในช่วงความถี่ที่ใช้งานมีค่าเท่ากับ 11 โวลต์อาร์เอ็มเอส ที่ความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์

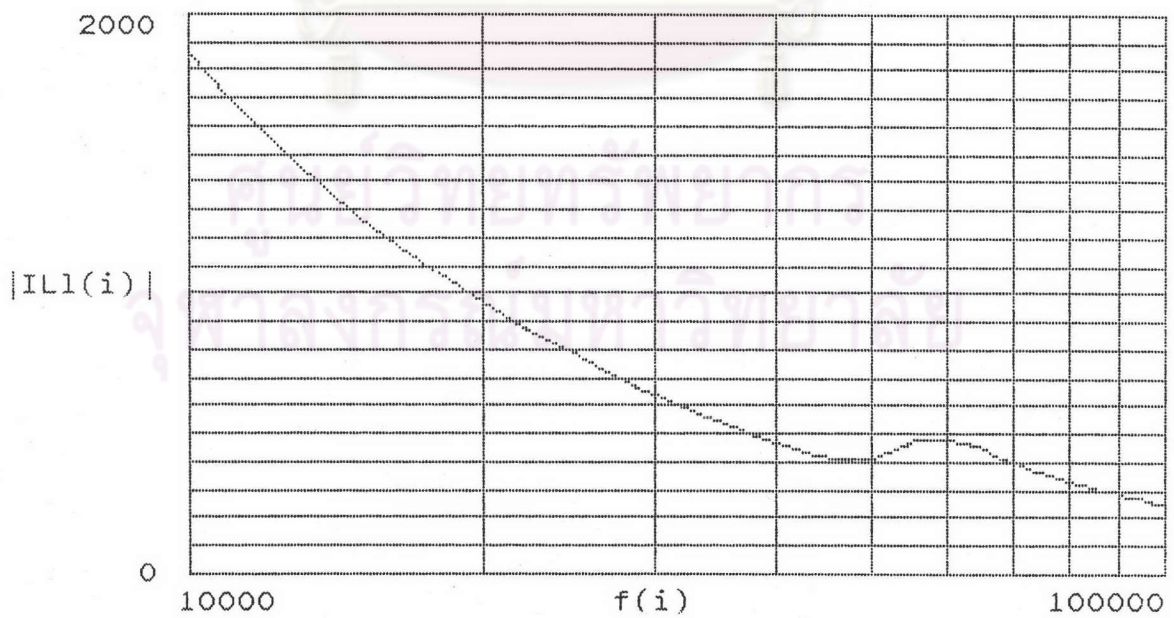
กล่าวโดยสรุป ค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการวิเคราะห์ในเชิงความถี่ด้วยโปรแกรม Math CAD ทำให้เราได้ค่าความเหนี่ยวนำอนุกรมที่พิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเท่ากับ 120 นาโนเฮนรีและค่าความจุของตัวเก็บประจุชดเชยตัวประกอบกำลังมีค่าเท่ากับ 330 ไมโครฟารัด รวมทั้งค่าแรงดันไฟสลับจากวงจรอินเวอร์เตอร์ เท่ากับ 40 โวลต์ (ค่ายอด) ซึ่งจากค่านี้สามารถที่จะวิเคราะห์หาอัตราส่วนการแปลงแรงดันของหม้อแปลงส่งผ่านกำลังจากวงจรอินเวอร์เตอร์มายังวงจรทางด้านโหลดได้ดังนี้

จากแรงดันไฟสลับที่สร้างโดยวงจรอินเวอร์เตอร์มีค่าประมาณ	500	V_{rms}
หรือคิดเป็นแรงดันค่ายอดได้ประมาณ	700	v
ดังนั้นถ้าต้องการแรงดันที่ขดทุติยภูมิ	40	v
อัตราส่วนการแปลงแรงดันต้องเท่ากับ	700/40 หรือ 17.5 : 1	

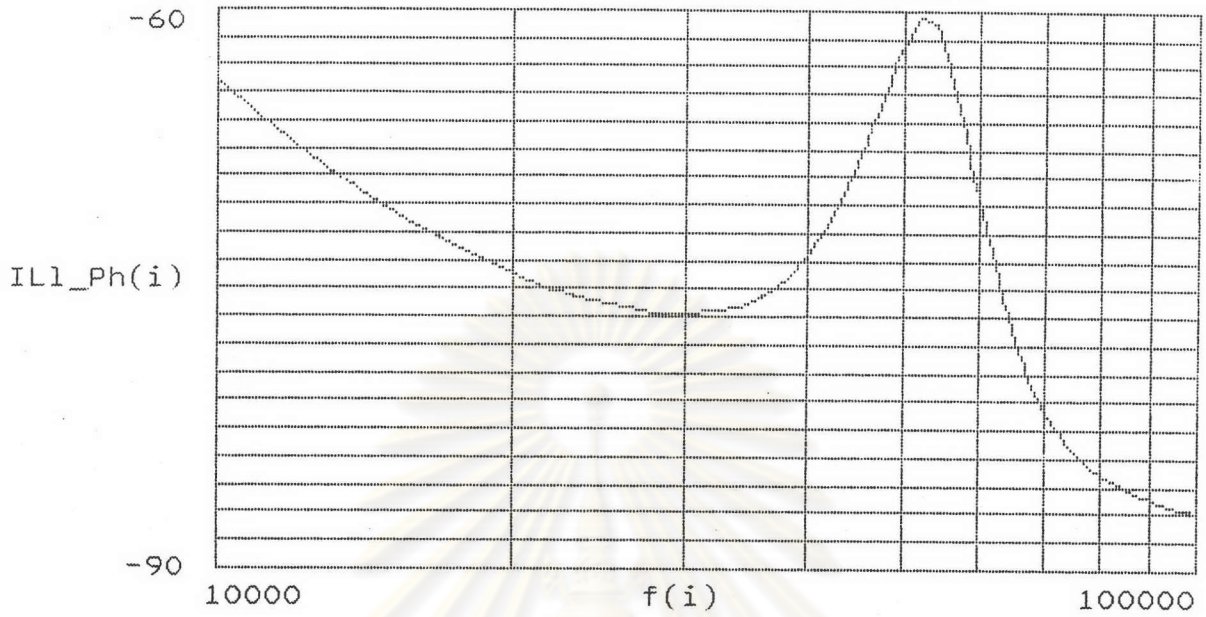
แต่เนื่องจากทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงมีตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุอนุกรมอยู่ทำให้มีกำลังสูญเสียในอุปกรณ์เหล่านั้น จึงต้องออกแบบอัตราส่วนการแปลงแรงดันให้เผื่อไว้ด้วย และนอกจากนี้เพื่อให้อัตราส่วนนี้สอดคล้องกับจำนวนหม้อแปลงทั้งหมดที่ต้องใช้ซึ่งออกแบบไว้ให้มี 16 ตัว จึงได้เลือกออกแบบให้อัตราส่วนการแปลงแรงดันของหม้อแปลงส่งกำลังนี้มีค่าเท่ากับ 16 : 1



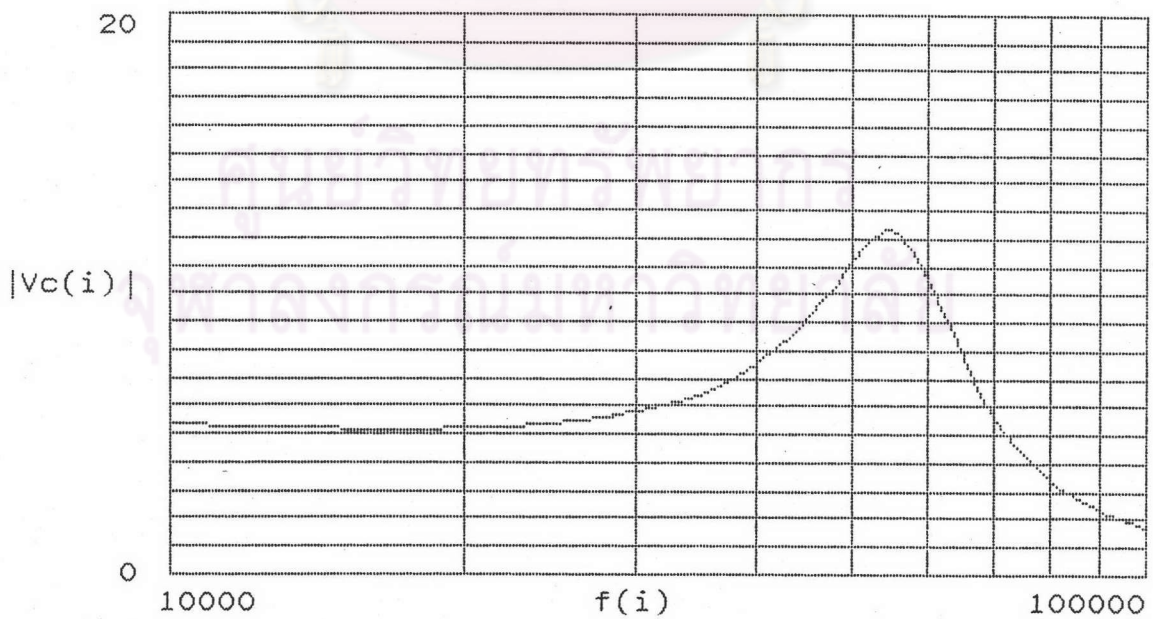
รูปที่ 4.34 แสดงค่ากำลังที่ชิ้นงานกับความถี่



รูปที่ 4.35 แสดงค่ากระแสที่ไหลเข้าสู่วงจรทางด้านโหลดกับความถี่



รูปที่ 4.36 แสดงค่ามุมของกระแสที่ไหลเข้าสู่วงจรทางด้านโหลดเทียบกับแรงดันจากวงจรอินเวอร์เตอร์ กับความถี่



รูปที่ 4.37 แสดงค่าแรงดันที่คร่อมตัวเก็บประจุกับความถี่

จากที่กล่าวไปแล้วในตอนต้นว่า ค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงานจะเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ และค่าความซึมซาบแม่เหล็กของชิ้นงาน โดยที่อุณหภูมิจะมีผลต่อค่าสภาพความต้านทานและความซึมซาบแม่เหล็ก ซึ่งในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Math CAD นี้ จะใช้วิธีเปลี่ยนค่าสภาพต้านทานไปทีละค่าตามค่าของอุณหภูมิ และเมื่ออุณหภูมิสูงเกินจุดคูรี่ ก็จะเปลี่ยนค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ของชิ้นงานให้เป็น 1 ด้วย ที่ทำเช่นนี้เพราะไม่สามารถแทนการเปลี่ยนแปลงด้วยสมการได้ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงมีลักษณะไม่เชิงเส้นตลอดช่วง

จากการคำนวณที่อุณหภูมิต่าง ๆ แล้ววาดกราฟแสดงความต้านทานและความเหนี่ยวนำอนุกรมของวงจรสมมูลไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน กำลังที่ชิ้นงาน กระแสที่ไหลเข้าสู่วงจรด้านโหลด มุมเฟสของกระแสเทียบกับแรงดันของวงจรอินเวอร์เตอร์ และแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุในโดเมนของความถี่ได้ดังรูปที่ 4.38 ถึง 4.40 โดยจะคำนวณที่อุณหภูมิดังต่อไปนี้

- อุณหภูมิ 550 องศา สภาพความต้านทานของชิ้นงาน $\rho_w = 49.7 \times 10^{-8}$ โอห์มเมตร ความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ $\mu_r = 9.4$
- อุณหภูมิ 756 องศา สภาพความต้านทานของชิ้นงาน $\rho_w = 10.4 \times 10^{-7}$ โอห์มเมตร ความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ $\mu_r = 9.4$
- อุณหภูมิ 1032 องศา (เลยจุดคูรี) สภาพความต้านทานของชิ้นงาน $\rho_w = 12.1 \times 10^{-8}$ โอห์มเมตร ความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ $\mu_r = 1$

จากรูปจะเห็นว่ากำลังที่ชิ้นงานจะมีค่าสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนกระทั่งอุณหภูมิเลยจุดคูรี กำลังที่ชิ้นงานจึงตกลงมาเท่า ๆ กับตอนที่อุณหภูมิเป็น 20 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เพราะเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าสภาพต้านทานของชิ้นงานก็สูงขึ้น จึงทำให้ความต้านทานในวงจรสมมูลของชิ้นงานมีค่าสูงขึ้น ตัวประกอบกำลังของโหลดจึงมากขึ้น กำลังที่ชิ้นงานจึงมีค่าสูงขึ้นด้วย แต่พอเลยจุดคูรีชิ้นงานจะเปลี่ยนจาก Ferro Magnetic Material ไปเป็น Non-Ferro Magnetic Material ทำให้อิมพิแดนซ์ในวงจรสมมูลของชิ้นงานมีค่าลดลงทันทีทำให้กำลังที่ชิ้นงานตกลง

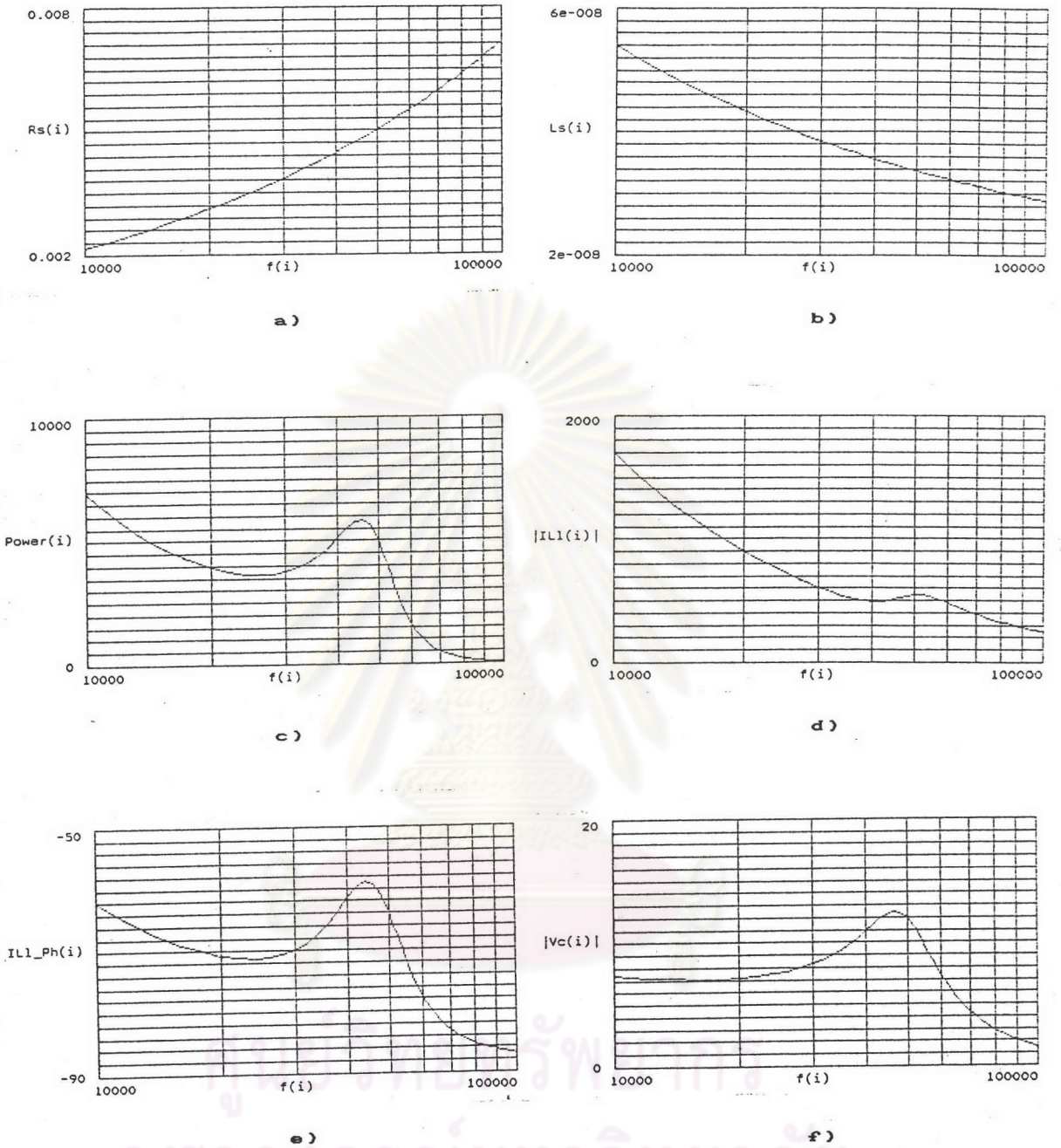
นอกจากนั้นยังสังเกตได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจุดยอดของกราฟทุกรูป (กราฟรูปภูเขา) จะเลื่อนลงมาทางซ้าย ซึ่งแสดงว่าค่าความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรทางด้านโหลดมีค่าลดลง และพออุณหภูมิสูงเลยจุดคูรี จุดยอดของกราฟจะเลื่อนกลับมาทางขวาหรือ

ค่าความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรกลับมีค่าสูงขึ้น

สำหรับกรณีที่ไม่มีชิ้นงานในขดลวดเหนี่ยวนำหรือกรณีNo Load ก็สามารถวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Math CAD ได้ เพียงแต่แทนค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำอนุกรมของวงจรสมมูลด้วยค่าเฉพาะสำหรับกรณี No Load ซึ่งได้แก่ $R_{nl} = R_c$ และ $L_{nl} = L_c + L_{gn}$ (ดังที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3) ทำให้ได้ผลการคำนวณ ดังรูปที่ 4.41

จากรูปที่ 4.41 จะเห็นได้ว่า ในช่วงความถี่ที่ใช้งาน 30 กิโลเฮิรตซ์ถึง 50 กิโลเฮิรตซ์ กำลังที่ด้านโหลดจะมีค่าต่ำไม่เกิน 1 กิโลวัตต์ ซึ่งกำลังที่คำนวณได้นี้ก็คือ กำลังสูญเสียในทองแดงของขดลวดเหนี่ยวนำนั่นเอง ส่วนค่ากระแสที่ไหลเข้าสู่วงจรทางด้านโหลดก็มีค่าสูงสุดเท่า ๆ กับกรณีมีโหลด คือ ประมาณ 650 แอมป์ หรือเท่ากับ 41 แอมป์ เมื่อโอนย้ายมาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงส่งผ่านกำลัง ส่วนค่ามุมของกระแสเทียบกับแรงดันจากวงจรอินเวอร์เตอร์ก็ยังเป็นแบบตามหลังตลอดช่วงความถี่ที่ใช้งานนี้ และสำหรับแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุก็มีค่าสูงสุดเท่ากับกรณีมีโหลด คือ ประมาณ 11 โวลต์ และจากการสังเกตจะเห็นว่า จุดยอดของกราฟทุกรูปจะมีค่าสูงกว่าในกรณีมีโหลดมาก แต่เนื่องจากค่าความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรในกรณีไม่มีโหลดนี้มีค่าสูงขึ้น หรือจุดยอดของกราฟเลื่อนมาทางขวา ทำให้ไม่อยู่ในช่วงความถี่ที่ทำงาน วงจรจึงสามารถทำงานได้ปกติโดยไม่เป็นอันตราย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.38 แสดงกราฟของค่าที่สำคัญต่าง ๆ ที่คำนวณได้ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส

a) ความต้านทานอนุกรมของขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน (R_s)

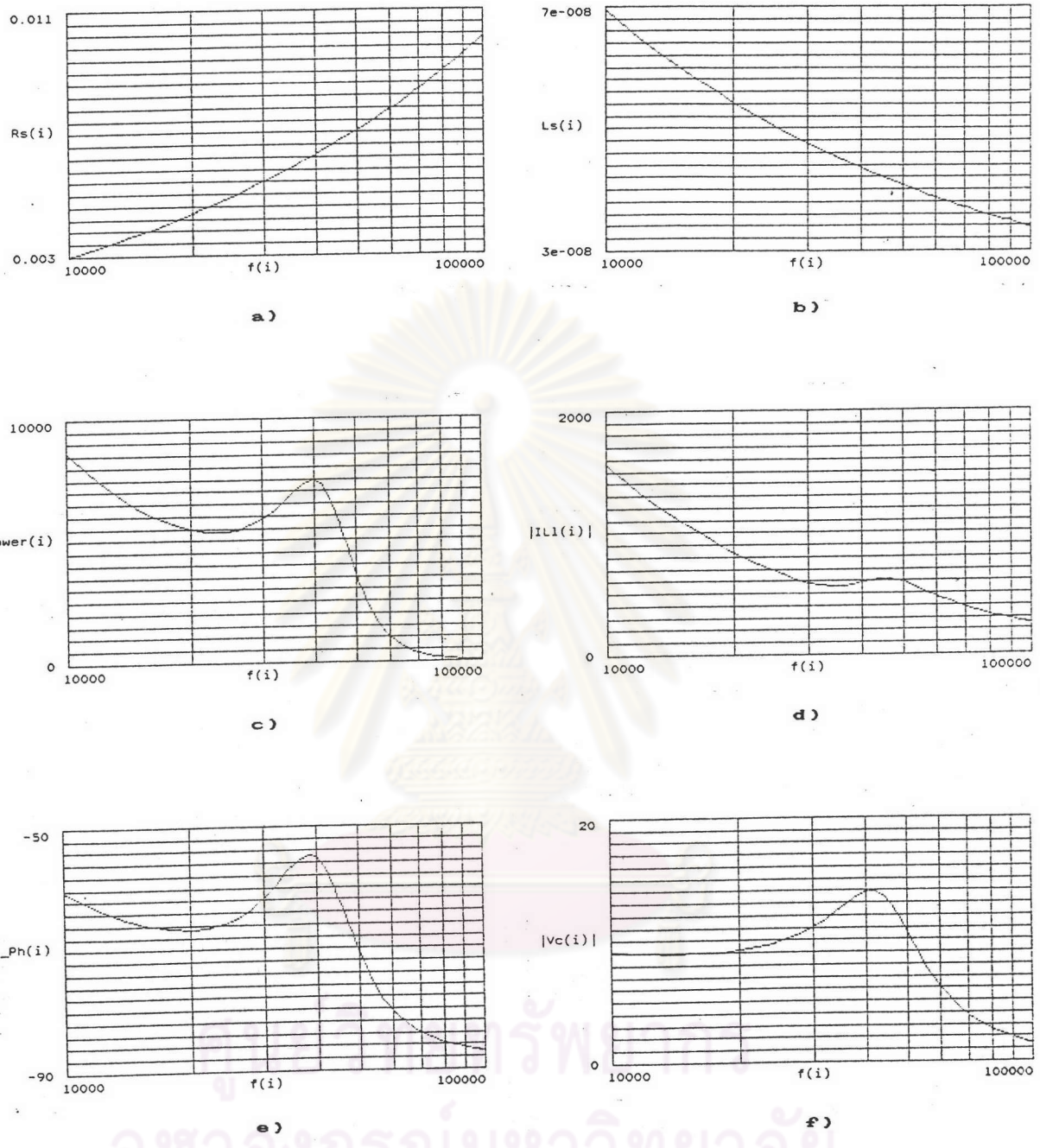
b) ความเหนี่ยวนำอนุกรมของขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน (L_s)

c) กำลังที่ชิ้นงาน (Power)

d) กระแสที่ไหลข้ามสู่วงจรทางด้านโหลด ($\left|I_{L1}\right|$)

e) มุมเฟสของกระแสเทียบกับแรงดันของวงจรอินเวอร์เตอร์ (I_{L1}-ph)

f) แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ (V_c)



รูปที่ 4.39 แสดงกราฟของค่าที่สำคัญต่าง ๆ ที่คำนวณได้ที่อุณหภูมิ 756 องศาเซลเซียส

a) ความต้านทานอนุกรมของขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน (R_s)

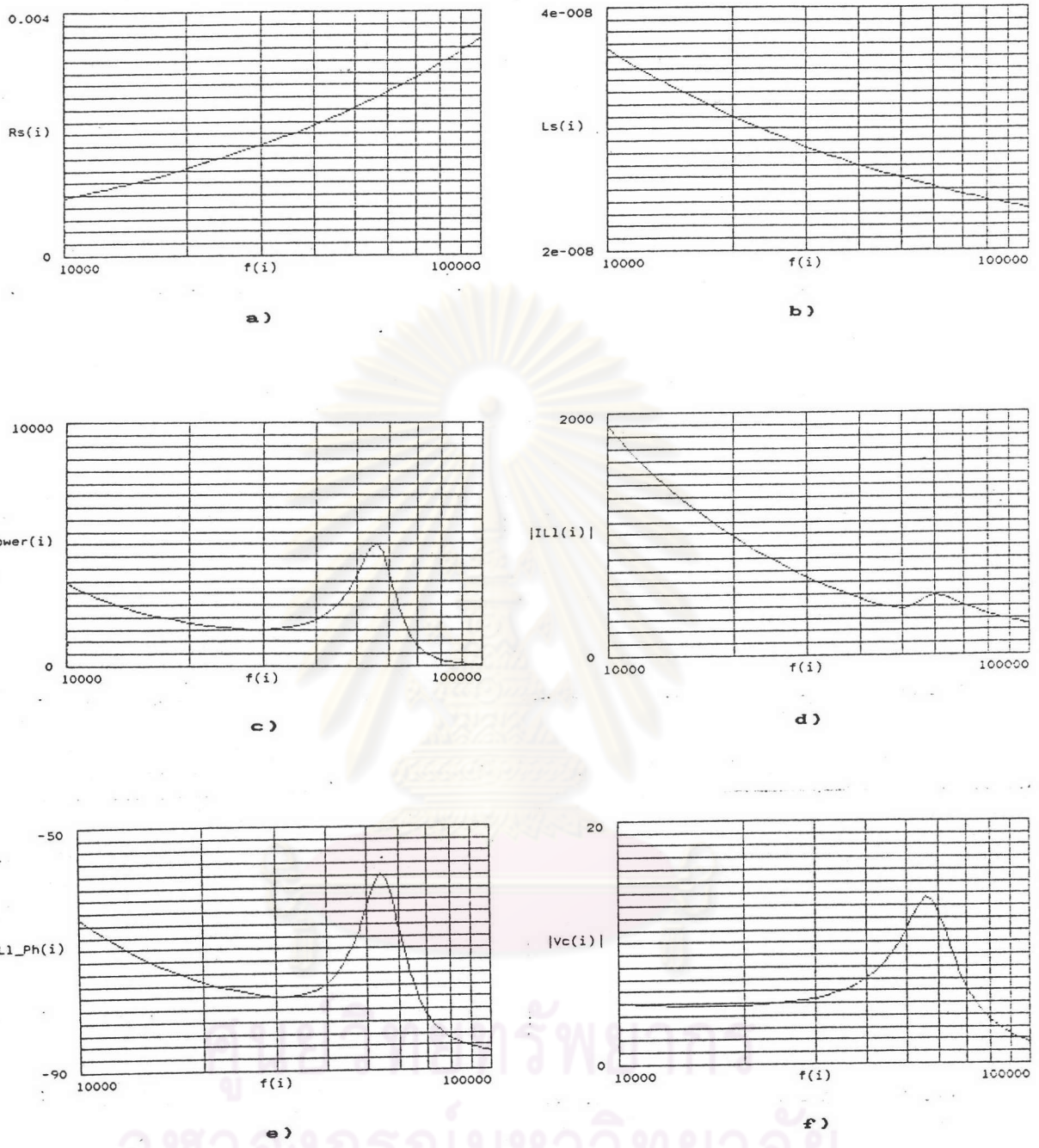
b) ความเหนี่ยวนำอนุกรมของขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน (L_s)

c) กำลังที่ชิ้นงาน (Power)

d) กระแสที่ไหลข้ามสู่วงจรทางด้านโหลด ($\left|I_{L1}\right|$)

e) มุมเฟสของกระแสเทียบกับแรงดันของวงจรอินเวอร์เตอร์ (I_{L1}-ph)

f) แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ (V_c)



รูปที่ 4.40 แสดงกราฟของค่าที่สำคัญต่าง ๆ ที่คำนวณได้ที่อุณหภูมิ 1032 องศาเซลเซียส

a) ความต้านทานอนุกรมของขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน (R_s)

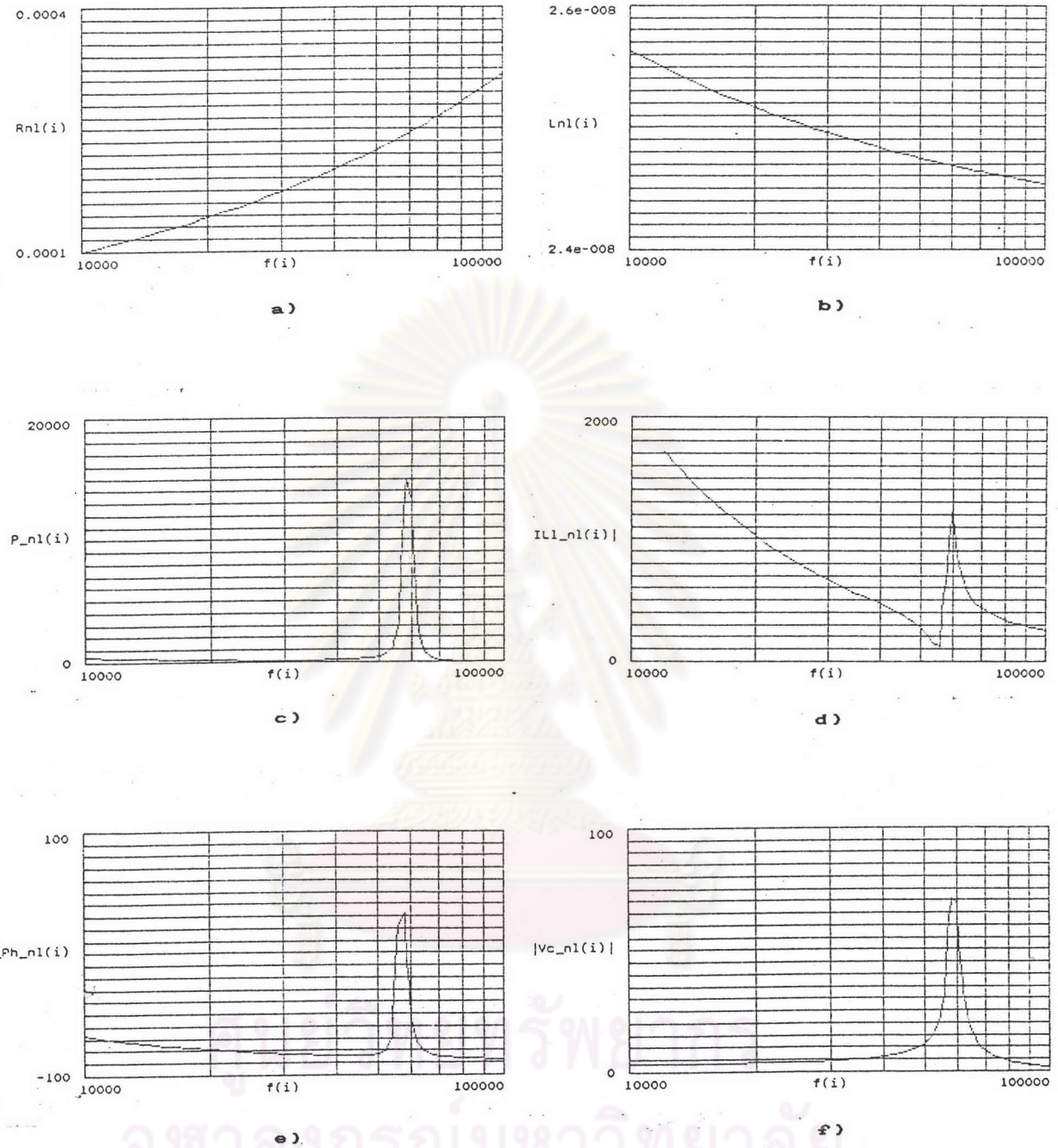
b) ความเหนี่ยวนำอนุกรมของขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน (L_s)

c) กำลังที่ชิ้นงาน (Power)

d) กระแสที่ไหลข้ามสู่วงจรทางด้านโหลด ($\left|I_{L1}\right|$)

e) มุมเฟสของกระแสเทียบกับแรงดันของวงจรอินเวอร์เตอร์ (I_{L1}-ph)

f) แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ (V_c)



รูปที่ 4.41 แสดงกราฟของค่าที่สำคัญต่าง ๆ ที่คำนวณได้ในกรณีไม่มีชิ้นงาน (No Load)

a) ความต้านทานอนุกรมของขดลวดเหนี่ยวนำ (R_{nl})

b) ความเหนี่ยวนำอนุกรมของขดลวดเหนี่ยวนำ (L_{nl})

c) กำลังสูญเสียที่ขดลวดเหนี่ยวนำ (P_nl)

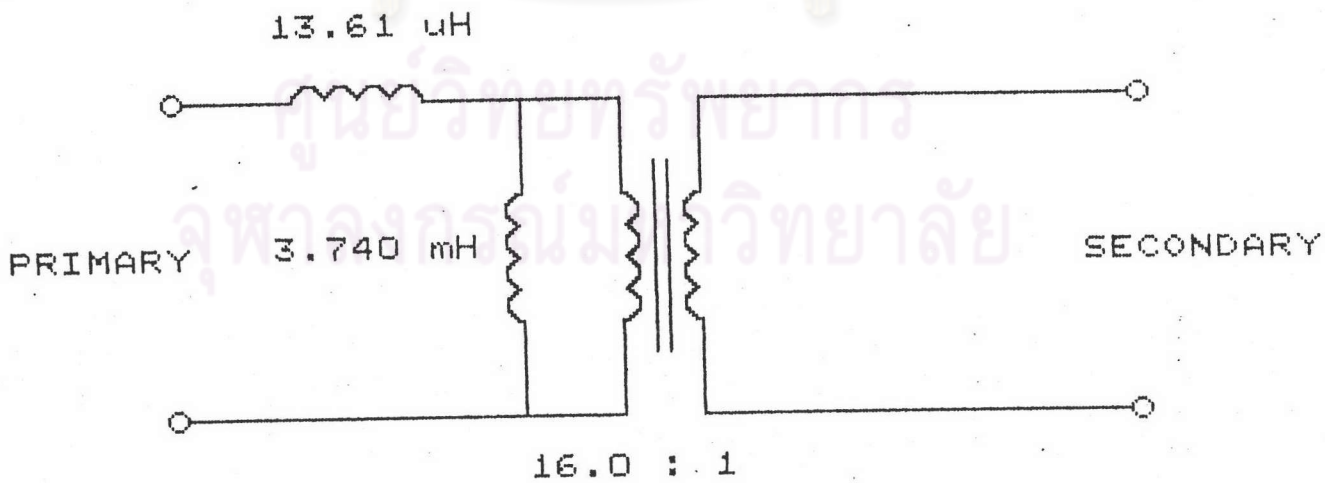
d) กระแสที่ไหลข้ามสู่วงจรทางด้านโหลด ($\left|I_{L1}\text{-}nl\right|$)

e) มุมเฟสของกระแสเทียบกับแรงดันของวงจรอินเวอร์เตอร์ (I_{L1}-ph_nl)

f) แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ (V_c_nl)

4.4.2.4 การสร้างตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรม

จากการออกแบบค่าของตัวเหนี่ยวนำอนุกรมและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Math CAD ได้พบว่า ค่าความเหนี่ยวนำที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 120 นาโนเฮนรี โดยที่ค่าที่ออกแบบมานี้เป็นค่าที่วิเคราะห์ในส่วนของวงจรด้านโหลด ซึ่งต่ออยู่ทางด้านขดทุติยภูมิของหม้อแปลงส่งผ่านกำลังแต่การต่อตัวเหนี่ยวนำอนุกรม เราจะต่อไว้ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเพื่อความง่ายในการสร้างตัวเหนี่ยวนำ เพราะทางด้านนี้ค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าต่ำกว่า ดังนั้นการสร้างตัวเหนี่ยวนำให้ต่ออยู่ที่ด้านปฐมภูมิจึงทำได้ง่ายกว่า และเนื่องจากหม้อแปลงส่งผ่านกำลังที่สร้างขึ้น มีค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลต่ออนุกรมอยู่แล้ว ซึ่งจากวงจรสมมูลของหม้อแปลงที่วัดได้ในหัวข้อที่ 4.4.1.5 เมื่อย้ายความเหนี่ยวนำรั่วไหลทั้งสองด้านมารวมกันที่ด้านปฐมภูมิจะได้วงจรสมมูลใหม่ดังรูปที่ 4.42 ซึ่งมีความเหนี่ยวนำรั่วไหลเท่ากับ 13.61ไมโครเฮนรี ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องใส่เพิ่มทางด้านปฐมภูมิจะมีค่าเท่ากับ 17.1 ไมโครเฮนรีจากค่าความเหนี่ยวนำที่ไม่มากนัก จึงสร้างตัวเหนี่ยวนำให้เป็นแบบแกนอากาศ โดยใช้ลวดทองแดงเบอร์ SWG#36 จำนวน 375 เส้น ตีเกลียวแล้วหุ้มด้วยฉนวนใยแก้วพันรอบแกนพลาสติกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 ซ.ม. จำนวน 19 รอบ จึงได้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 17.5 ไมโครเฮนรี และจากการคำนวณหากำลังสูญเสียในทองแดงของตัวเหนี่ยวนำที่โหลดเต็มที่ จะได้ค่าประมาณ 10 วัตต์ ซึ่งเป็นค่าที่ไม่มากนักสำหรับตัวเหนี่ยวนำขนาดนี้



รูปที่ 4.42 วงจรสมมูลของหม้อแปลงส่งผ่านกำลังเมื่อย้ายความเหนี่ยวนำรั่วไหลมารวมที่ด้านปฐมภูมิ

4.4.2.5 การสร้างตัวเก็บประจุชุดเชยตัวประกอบกำลัง

จากการออกแบบค่าของตัวเก็บประจุชุดเชยและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Math CAD ได้ผลออกมาว่า ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 330 ไมโครฟารัด และเป็นตัวเก็บประจุที่ต้องทำงานที่ความถี่สูงถึง 50 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งจากการวิเคราะห์ ถ้าขณะภาวะโหลดเต็มที่แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุที่ความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์นี้จะสูงถึง 16 โวลต์อาร์เอ็มเอส ดังนั้นจึงสามารถคำนวณกระแสที่ผ่านตัวเก็บประจุจากค่าแรงดันได้ตามสมการ ดังต่อไปนี้

$$V = I \frac{1}{\omega C}$$

$$I = V \omega C$$

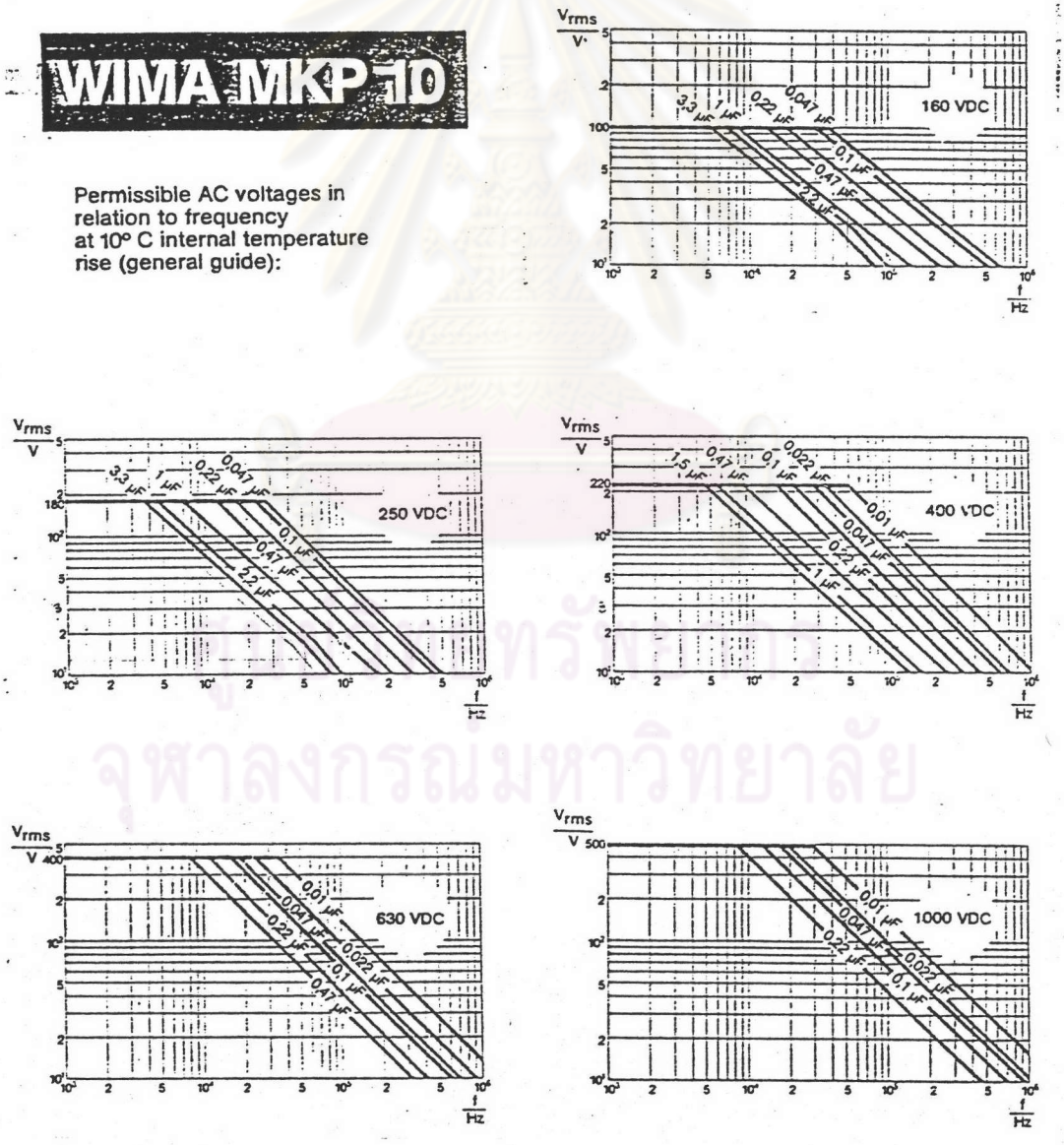
แทนค่า $$I = 16 \times 2 \times \pi \times 50\ K \times 330\ \mu$$

$$= 1,659\ A_{rms}$$

จากค่ากระแสที่คำนวณได้จะเห็นว่าเป็นปริมาณที่สูงมาก ดังนั้นในการสร้างตัวเก็บประจุชุดเชย จะต้องเลือกตัวเก็บประจุชนิดที่ใช้ได้กับความถี่สูง และทนพิกัดของกระแสได้สูงและใช้ตัวเก็บประจุหลาย ๆ ตัวมาต่อขนานกัน หรือต่ออนุกรมเพื่อให้ได้ค่าความจุ และพิกัดตามต้องการ ซึ่งในทางปฏิบัติได้เลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิด Metalized Plastic Film ที่มีสารไดอิเล็กตริกเป็น Polypropylene (MKP) ตัวเก็บประจุชนิดนี้มีค่าความเหนี่ยวนำและความต้านทานในตัวต่ำ จึงสามารถใช้ได้ที่ความถี่สูงและทนพิกัดกระแสได้สูง นอกจากนั้นยังมีค่าแม่นยำ ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

แต่อย่างไรก็ตามตัวเก็บประจุชนิดนี้ค่าความจุต่อตัวค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับค่าที่ต้องการใช้งาน ดังนั้นจึงใช้วิธีนำตัวเก็บประจุหลาย ๆ ตัวมาต่อขนานกันเพื่อให้ได้ค่าความจุที่ต้องการ ซึ่งในที่นี้ได้เลือกใช้ตัวเก็บประจุ ยี่ห้อ WIMA ชนิด MKP-10 ซึ่งเป็นชนิดที่สามารถทนพิกัดกระแสได้สูงที่สุด (High Current Rating) ในการเลือกตัวเก็บประจุว่าจะใช้ค่าอะไร และขนาดพิกัดแรงดันเท่าไรนั้น จะใช้รูปกราฟพิกัดแรงดันอาร์เอ็มเอสกับความถี่ ซึ่งมีค่าความจุเป็นพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุแต่ละขนาดในการพิจารณาซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.43 (WIMA,1985)

จากการพิจารณารูปกราฟดังกล่าวประกอบกับการสำรวจราคาและความเป็นไปได้ในท้องตลาดจึงได้เลือกใช้ตัวเก็บประจุค่า 0.47 ไมโครฟารัด,160 โวลต์ ดีซีชนิด MKP-10 มาต่อขนานกันเพื่อให้ได้ค่าความจุ 330 ไมโครฟารัด ตามที่ต้องการ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟในรูปที่ 4.43 แล้วจะเห็นว่าที่ความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ตัวเก็บประจุค่านี้จะมีพิกัดแรงดันอาร์เอ็มเอสสูงสุดเท่ากับ 35 โวลต์ และถ้าเปรียบเทียบกับแรงดันอาร์เอ็มเอสตกคร่อมตัวเก็บประจุสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ในหัวข้อ 4.4.2.3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 16 โวลต์ ก็จะเห็นว่าพิกัดแรงดันของตัวเก็บประจุนี้ยังมีค่ามากกว่าพอสมควร ซึ่งเพียงพอกับการทำงานได้เป็นอย่างดี



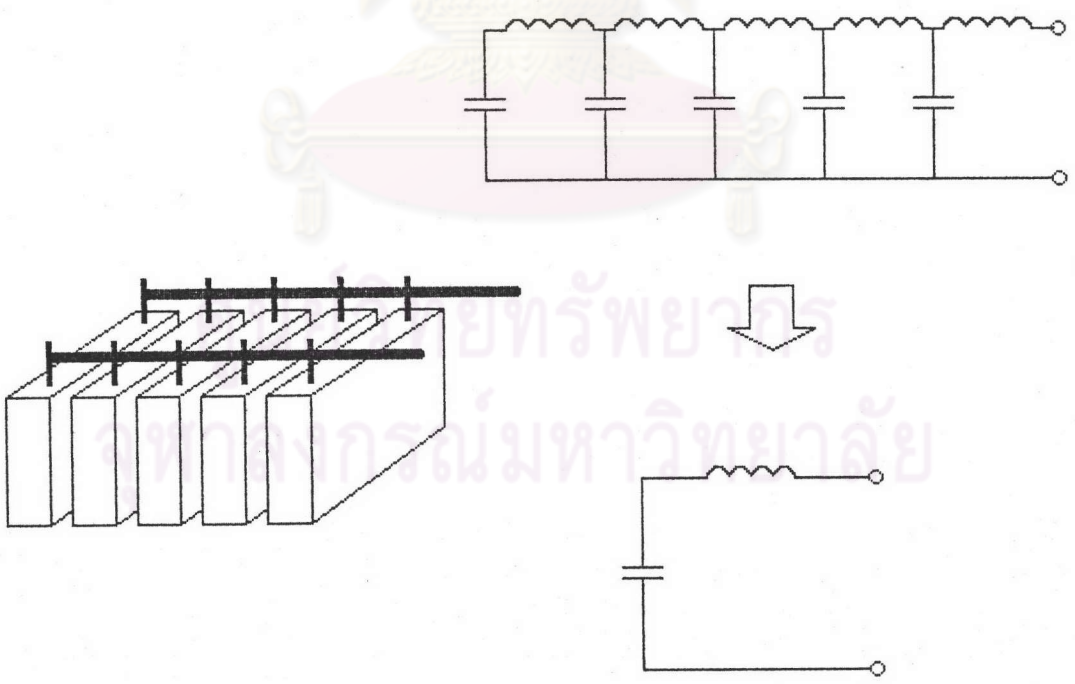
รูปที่ 4.43 แสดงรูปกราฟพิกัดแรงดันอาร์เอ็มเอสกับความถี่ของตัวเก็บประจุแต่ละขนาด

ในการนำตัวเก็บประจุมาต่อขนานกันเพื่อให้ได้ค่าความจุตามที่ต้องการนั้นถ้าใช้วิธีต่อขนานด้วยลวดทองแดงธรรมดาดังรูปที่ 4.44(a) ก็จะทำให้เกิดความเหนี่ยวนำขึ้นในลวดทองแดงที่ใช้ต่อระหว่างตัวเก็บประจุแต่ละตัว ดังวงจรสมมูลที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.44(b) ถึงแม้ว่าค่าความเหนี่ยวนำนี้จะเป็นค่าเล็ก ๆ แต่ตัวเก็บประจุนี้จะต้องทำงานที่ความถี่สูง อีกทั้งต้องต่อขนานกันเป็นจำนวนมาก จึงส่งผลให้ค่าความเหนี่ยวนำรวมมีค่าเพิ่มขึ้น จึงเกิดผลเสียกับค่าความจุของตัวเก็บประจุรวม ทำให้ตัวเก็บประจุรวมไม่สามารถทำงานได้ที่ความถี่สูง เพราะที่ความถี่สูงผลของความเหนี่ยวนำจะมากกว่าผลของความจุในตัวเก็บประจุ ทำให้ที่ความถี่สูงตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกันแบบนี้กลายเป็นตัวเหนี่ยวนำไป

จากสูตรคำนวณค่าความเหนี่ยวนำ $L = \frac{N^2 \mu A}{l}$

โดยที่ A คือ พื้นที่หน้าตัดที่ฟลักซ์คล้องผ่าน

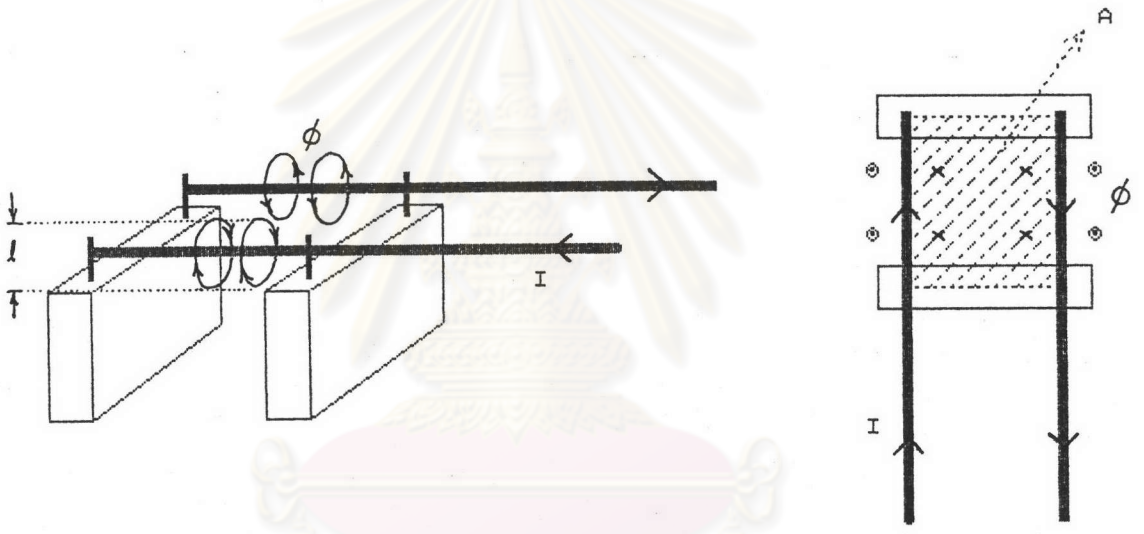
l คือ ความยาวของเส้นทางแม่เหล็กที่ฟลักซ์คล้องผ่าน



รูปที่ 4.44 a) แสดงการต่อตัวเก็บประจุแบบใช้ลวดทองแดงต่อธรรมดา

b) แสดงวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของตัวเก็บประจุและลวดเหนี่ยวนำ

ถ้าพิจารณาค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในลวดทองแดง ที่ใช้ต่อตัวเก็บประจุแต่ละตัว จากรูปที่ 4.45 จะเห็นได้ว่าค่าความเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัด A และความยาว l ดังนั้นในการต่อตัวเก็บประจุขนานกัน ถ้าต้องการให้ค่าความเหนี่ยวนำนี้มีค่าต่ำที่สุด จะต้องออกแบบให้การต่อขนานกันมีพื้นที่หน้าตัดที่ฟลักซ์แม่เหล็กคล้องผ่าน (A) มีค่าต่ำที่สุด หรือให้ความยาวของเส้นทางแม่เหล็ก (l) มีค่าสูงสุด ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบให้ต่อตัวเก็บประจุอยู่บนแผ่นทองแดงหนา 1 ม.ม. 2 แผ่นที่ขนานกันโดยมีแผ่นฉนวนเบกาไลต์คั่นกลาง ซึ่งแผ่นทองแดงแต่ละแผ่นจะทำหน้าที่เป็นขั้วของตัวเก็บประจุและจะเชื่อมต่อกันด้วยการบัดกรี ดังรูปที่ 4.46

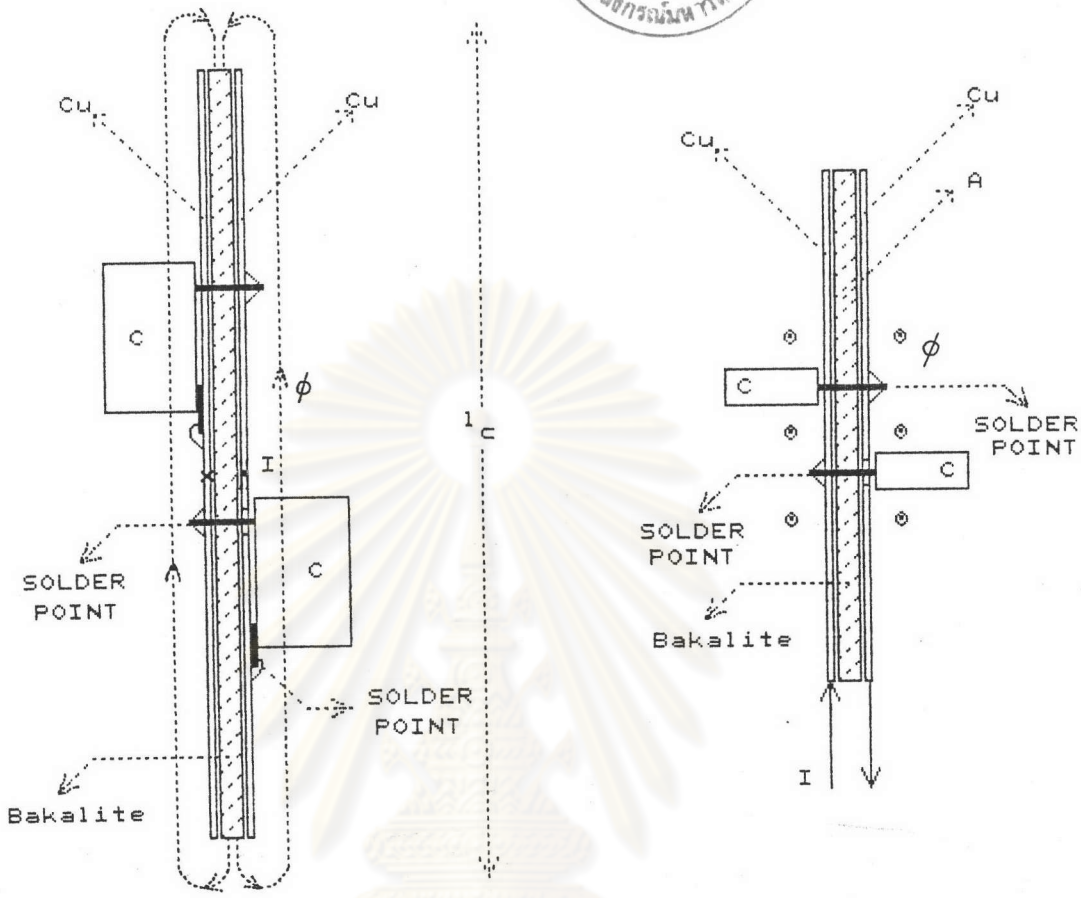


ภาพมองด้านข้าง ภาพมองด้านบน

รูปที่ 4.45 แสดงฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่คล้องผ่านลวดทองแดงที่ใช้ต่อตัวเก็บประจุแต่ละตัว

จากรูปที่ 4.46 จะเห็นได้ว่า การต่อตัวเก็บประจุขนานกันจะช่วยลดพื้นที่หน้าตัดที่ฟลักซ์คล้องผ่าน (A) มีค่าต่ำที่สุด (ดูภาพมองด้านบน) เพราะในทางปฏิบัติแผ่นเบกาไลต์ที่เป็นฉนวนคั่นกลางระหว่างแผ่นทองแดงทั้งสองแผ่น จะมีขนาดบางประมาณ 1 มิลลิเมตร และนอกจากนั้นความสูงของแผ่นทองแดงยังส่งผลให้ความยาวของเส้นทางแม่เหล็ก (l) มีค่าเพิ่มขึ้นได้มากด้วย(ดูภาพมองด้านข้าง) เพราะฟลักซ์แม่เหล็กจะถูกบังคับให้คล้องผ่านไปตามช่องว่างที่อยู่ระหว่างแผ่นทองแดงทั้งสองแผ่น ทำให้การต่อตัวเก็บประจุขนานกันด้วยวิธีนี้ช่วยลดค่าความเหนี่ยวนำที่จะเกิดขึ้นอย่างได้ผล

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

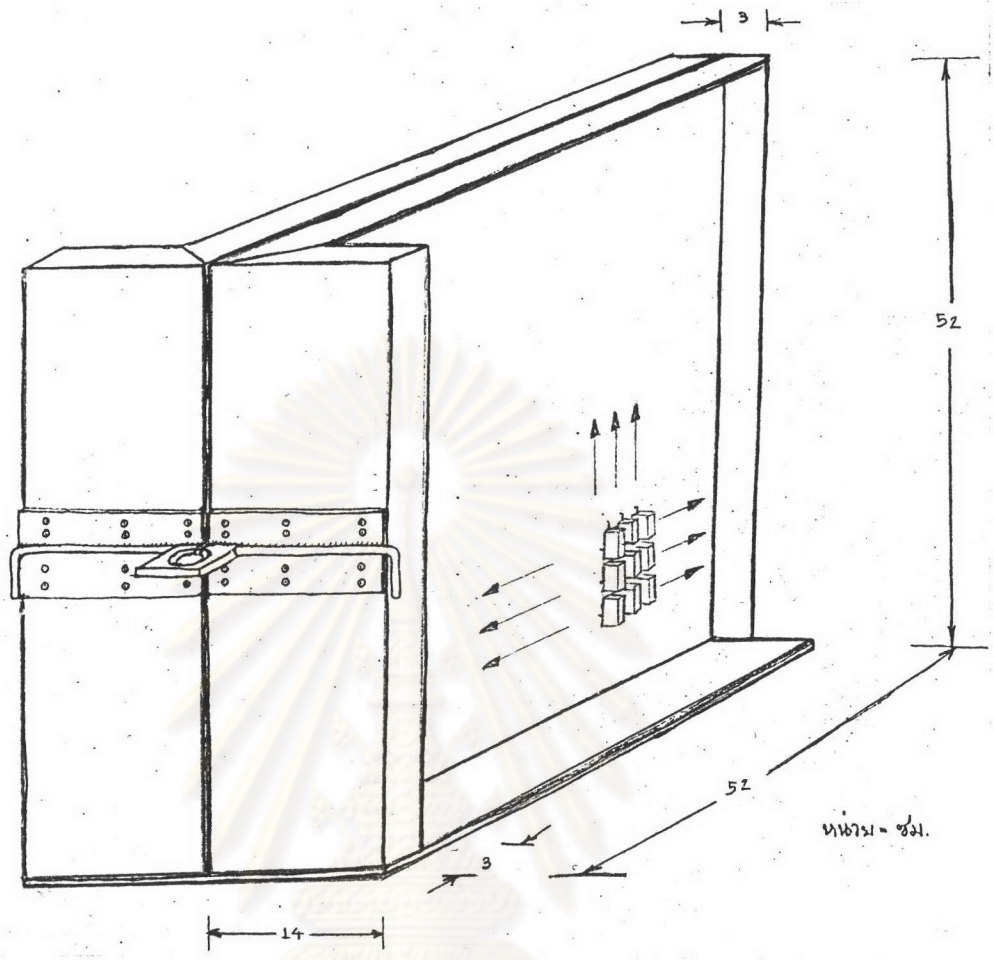


ภาพมองด้านข้าง ภาพมองด้านบน

รูปที่ 4.46 แสดงภาพการต่อตัวเก็บประจุบนแผ่นทองแดงที่ขนานกัน

เนื่องจากตัวเก็บประจุที่นำมาต่อขนานกันมีจำนวนมากประมาณ 780 ตัว ทำให้แผ่นทองแดงที่ใช้ต่อตัวเก็บประจุขนานกันต้องมีขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงออกแบบให้พับแผ่นทองแดงที่ขนานกันเป็นดังรูปที่ 4.47 เพื่อให้เป็นโครงสร้างที่แข็งแรงสำหรับการบัดกรีตัวเก็บประจุจำนวนมาก ซึ่งตัวเก็บประจุจะต่ออยู่ในตำแหน่งดังรูปทั้งสองด้าน ด้านละประมาณ 390 ตัว ส่วนด้านล่างบริเวณฐานใช้เป็นที่วางหม้อแปลงส่งผ่านกำลังทั้ง 16 ตัว โดยวางด้านละ 8 ตัว

สำหรับด้านหน้าของแผงตัวเก็บประจุ ออกแบบไว้สำหรับใช้ยึดติดกับขดลวดเหนี่ยวนำ โดยการขันน็อตทองเหลืองยึดแผ่นของขดลวดเหนี่ยวนำให้ติดกับแผงด้านหน้าของตัวเก็บประจุ ในการต่อขั้วของตัวเก็บประจุ กับขั้วของขดลวดเหนี่ยวนำแบบนี้จะช่วยให้ค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่จุดต่อมีค่าต่ำ นอกจากนั้นยังสามารถถอดเปลี่ยนขดลวด



รูปที่ 4.47 แสดงแผงตัวเก็บประจุที่ยึดติดกับขดลวดเหนี่ยวนำ

เหนี่ยวนำเข้าออกได้ตามต้องการ

การใช้แผ่นทองแดงเป็นขั้วต่อของตัวเก็บประจุ ยังช่วยให้การนำกระแสทำได้ดีขึ้น เพราะปริมาณกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุนี้มีค่าสูงมาก แต่อย่างไรก็ตามในบริเวณด้านในตำแหน่งที่ใกล้จุดต่อระหว่างตัวเก็บประจุกับขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นบริเวณที่กระแสจำนวนมากไหลมารวมกันจะมีความร้อนที่เกิดจากกำลังสูญเสียในทองแดงเกิดขึ้นในบริเวณนี้จึงจำเป็นต้องมีการระบายความร้อนที่บริเวณนี้ออกไป ซึ่งในทางปฏิบัติได้ใช้การระบายความร้อนด้วยน้ำ โดยใช้วิธีเดินท่อทองแดงขดไปมาในบริเวณดังกล่าว แล้วใช้มอเตอร์ปั๊มน้ำเพื่อระบายความร้อนตลอดเวลาที่เครื่องทำงาน

จากการบัดกรีต่อตัวเก็บประจุทั้งหมด 780 ตัว ลงบนแผ่นทองแดงที่แสดงในรูปที่ 4.47 เมื่อนำไปวัดค่าความจุ (C) และค่าความต้านทานอนุกรมสมมูล (ESR) ที่ความถี่ต่าง ๆ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งจะเห็นว่าค่าความจุที่วัดได้จะใกล้เคียงกับค่าที่ได้ออกแบบไว้ ส่วนค่าความต้านทานสมมูลที่วัดได้จะใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียในตัวเก็บประจุในบทต่อไป

ความถี่ (kHz)	ค่าความจุ (uF)	ความต้านทานอนุกรมสมมูล(mOhm)
30	325	0.07
40	333	0.10
50	340	0.13

ตารางที่ 4.3 แสดงการทดสอบวัดค่าตัวเก็บประจุชุดเชยตัวประกอบกำลัง ที่ความถี่ต่าง ๆ

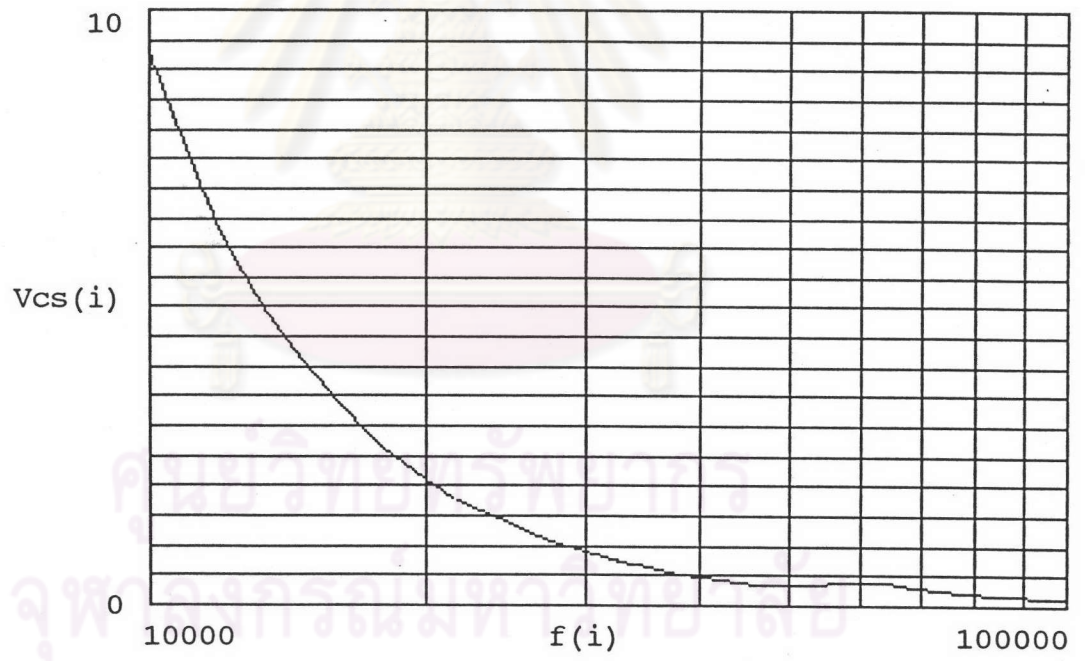
4.4.3 ตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมด้านปฐมภูมิ

จากรูปที่ 4.27 จะเห็นว่าที่วงจรกำลังด้านเอาต์พุตจะมีตัวเก็บประจุ(C_s) ต่ออนุกรมอยู่ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงส่งกำลัง ตัวเก็บประจุนี้จะทำหน้าที่ตัดไฟตรงไม่ให้เข้ามาที่หม้อแปลงซึ่งส่งผลให้หม้อแปลงเกิดการอิ่มตัวได้ ที่เป็นเช่นนี้เพราะ แรงดันไฟสลับความถี่สูงที่สร้างจากวงจรอินเวอร์เตอร์ อาจจะไม่สมมาตรในด้านบวกและด้านลบ จึงทำให้มีแรงดันไฟตรงรวมมาด้วย ในการออกแบบจะพิจารณาว่าตัวเก็บประจุนี้เป็นเหมือนวงจรกรองผ่านสูง ซึ่งจะปล่อยให้แต่สัญญาณความถี่สูงผ่านไปได้เท่านั้น ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุจึงต้องมีค่าต่ำ เพื่อให้ไม่มีผลกระทบต่อวงจรโดยในที่นี้กำหนดให้มีค่าไม่เกิน 5 % ของแรงดันไฟสลับที่ออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์

ในการวิเคราะห์เพื่อความสะดวกจะใช้โปรแกรม Math CAD ช่วยในการทดลองแทนค่าความจุ และวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุอนุกรมกับความถี่ แล้วเลือกค่าความจุที่ทำให้แรงดันในช่วงความถี่ที่ใช้งานไม่เกิน 5 % ของแหล่งจ่ายไฟสลับซึ่งเมื่อคิดทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง แรงดันนี้ต้องมีค่าไม่เกิน 0.6 โวลต์ แล้วจึง

ตรวจดูอีกครั้งว่า ตัวเก็บประจุนี้ส่งผลกระทบต่อกำลังออกหรือค่าที่สำคัญต่าง ๆ ของวงจรกำลังหรือไม่

จากการทดลองแทนค่า สำใช้ค่าความจุประมาณ 3350 ไมโครฟารัดขึ้นไป (อ้างอิงทางด้านทุติยภูมิ) จะได้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุไม่เกิน 5 %ของ แหล่งจ่ายไฟสลับ แต่เนื่องจากขนาดของตัวเก็บประจุจะขึ้นอยู่กับพิกัดของแรงดันที่ทนได้ด้วย และการออกแบบให้ค่าความจุมากก็จะทำให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าลดลง ดังนั้นจึงเลือกออกแบบให้ค่าความจุของตัวเก็บประจุอนุกรมมีค่ามากขึ้นเป็น 5500 ไมโครฟารัด หรือเท่ากับ 21.5 ไมโครฟารัด เมื่อต่อทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงซึ่งเมื่อวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Math CAD (MathSoft, Inc, 1989) แล้ววาดกราฟแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุนี้กับความถี่ได้ดังรูปที่ 4.48 และพิจารณาดูแล้วว่า ไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังออกที่ชิ้นงานและค่าสำคัญอื่น ๆ



รูปที่ 4.48 แสดงแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุอนุกรมกับความถี่