บทที่ 3

การออกแบบแหล่งกำเนิดแรงดันสูงที่ความถี่สูง

ประเภทของแหล่งกำเนิดแรงดันสูงที่ความถี่สูง

แหล่งกำเนิดแรงดันสูงที่ความถี่สูงที่ใช้ในการปล่อยประจุไฟฟ้าโคโรนา แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้หลักการแปลงผันพลังงานกลไฟฟ้า เหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับทั่ว ๆ ไป แต่มีขั้วแม่เหล็กมากกว่าเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าที่กำเนิดขึ้นมีความถี่สูง แต่ความถี่ก็สูงได้ไม่มากเนื่องจากมีข้อขีดจำกัดหลายอย่าง เช่น จำนวนขั้วแม่เหล็ก ความสามารถในการขับเคลื่อน ปัญหาปรากฏการณ์ผิว (SKIN EFFECT) ของขดลวด และขีดจำกัดทางกล สำหรับขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นก็มีขนาดไม่สูงเนื่องจากมีขีดจำกัดในเรื่องของความสามารถในการทนแรงดันไฟฟ้าของฉนวนขดลวด ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องใช้หม้อแปลงเพื่อแปลงให้ขนาดแรงดันสูงขึ้นตามต้องการ ข้อเสียของแหล่งกำเนิดแรงดันสูงเช่นนี้ คือ มีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก และความถี่ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าไม่สูงมาก ปัจจุบันไม่นิยมนำไปใช้

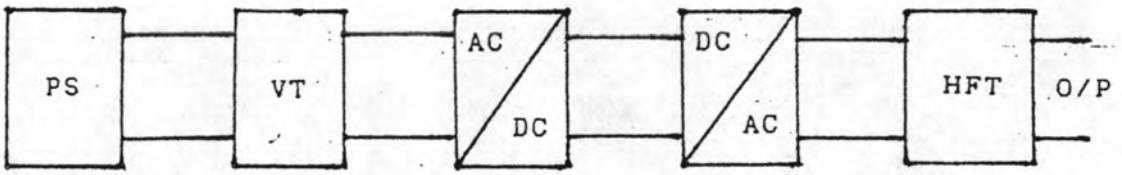
2. อินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์ ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ ที่สอดคล้องกับส่วนประกอบและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรไฟฟ้า ด้านเข้าของระบบของแหล่งกำเนิดแรงดันสูงที่ความถี่สูง เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ จากระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 1 เฟส 220

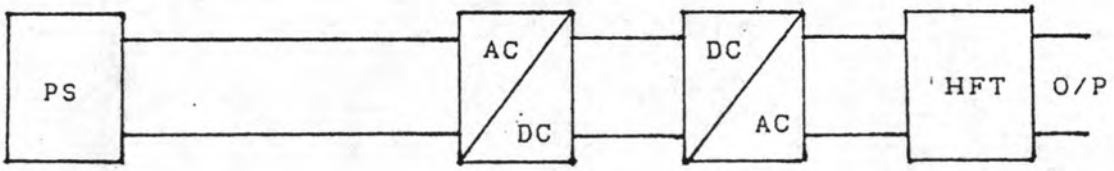
โวลต์ 50 เฮิรตซ์ ซึ่งนำมาแปลงผันเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้วงจรเรียงกระแส แล้วจึงป้อนให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ แล้วจ่ายให้กับหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่สูงเพื่อให้ได้ขนาดของแรงดันไฟฟ้าตามต้องการ สำหรับป้อนระบบอิเล็กโทรด

<u>วิธีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้านออก</u>

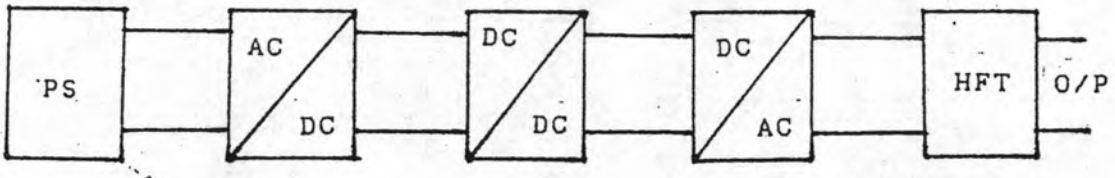
แหล่งกำเนิดแรงดันสูงที่ความถี่สูง ที่นำมาใช้ในกระบวนการปรับผิวพลาสติกในปัจจุบัน จะต้องสามารถเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าไปตามความหนาและชนิดของฟิล์มพลาสติก เพื่อให้เกิดการปล่อยประจุไฟฟ้าโคโรนาไปยังผิวฟิล์มพลาสติกได้อย่างเหมาะสม และไม่เกิดความเสียหาย (เนื่องจากความหนาและชนิดของฟิล์มพลาสติก ต้องการขนาดแรงดันไฟฟ้า ที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์มีค่าไม่เท่ากัน) การควบคุมแรงดันด้านออกของแหล่งกำเนิดแรงดันมี 3 วิธี ดังรูปที่ 22 ก. ข. และ ค.



ก.



ข.



ค.

รูปที่ 22
การควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้านออก

1. <u>วิธีปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ต่ำ</u>

การปรับแรงดันไฟฟ้าวิธีนี้ อาศัยการปรับขนาดของแรงดันไฟฟ้าความถี่ต่ำ ซึ่งได้รับจากระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า โดยใช้หม้อแปลงชนิด AUTO-TRANSFORMER ที่ปรับอัตราการเปลี่ยนแปลงได้ (ดูรูปที่ 22 ก.) ข้อเสียของวิธีนี้คืออุปกรณ์ มีขนาดใหญ่ และน้ำหนักมาก แต่ระบบไม่ยุ่งยาก

2. <u>วิธีปรับความถี่การสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์</u>

วิธีนี้ใช้หลักการที่ว่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความถี่ ตามผลการตอบสนองต่อความถี่ (FREQUENCY RESPONSE) ของวงจรด้านออกของอินเวอร์เตอร์ โดยทั่วไปความถี่ที่ใช้จะต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ ดังนั้นการเพิ่มความถี่การสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ จะมีผลทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกมีขนาดสูงขึ้น (ดูรูปที่ 22 ข.)

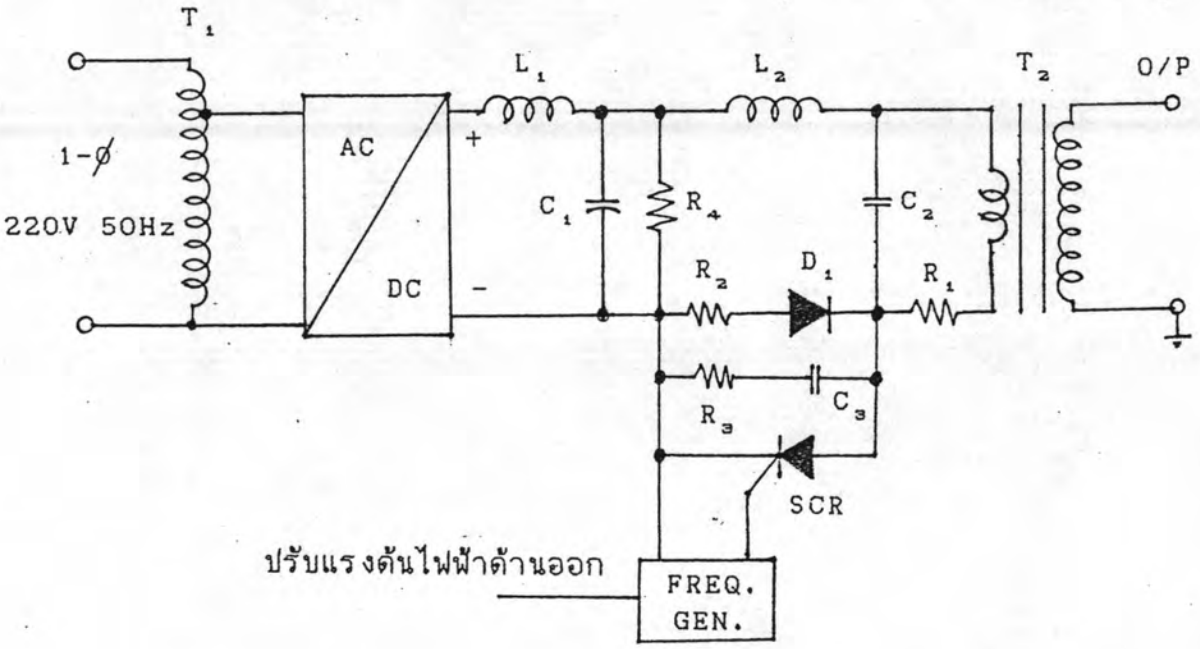
3. <u>วิธีปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง</u>

วิธีนี้มีลักษณะคล้าย ๆ กับวิธีแรก ตรงที่ว่า ใช้หลักการของการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดันไฟฟ้าเช่นเดียวกัน แต่เป็นการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (ดูรูปที่ 22 ค.) ถ้าใช้วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแส

ตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสวิตชิงการควบคุมอัตราการแปลงผันกระทำโดยการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาการทำงานของสวิตช์ในวงจรแปลงผัน ข้อเสียของการควบคุมด้วยวิธีนี้ คือ ความยุ่งยากซับซ้อน

<u>แหล่งกำเนิดแรงดันสูงที่ความถี่สูงที่มีขาย</u>

ในการปรับผิวพลาสติกในปัจจุบัน ได้นำเข้าแหล่งกำเนิดแรงดันสูงที่ความถี่สูงจากต่างประเทศในราคาแพง ทำให้นำไปใช้งานได้อย่างไม่ทั่วถึง และระบบของวงจรไฟฟ้าเป็นระบบที่ใช้เทคโนโลยีไม่สูงมาก จึงทำให้มีข้อเสียหลายประการ วงจรไฟฟ้าของผู้ผลิตรายหนึ่ง แสดงดังรูปที่ 23



รูปที่ 23
ตัวอย่างระบบวงจรไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดแรงดันสูงที่ความถี่สูงที่มีขาย

จากรูปที่ 23 แหล่งกำเนิดแรงดันสูงที่ความถี่สูง จะรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 1 เฟส 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ จากระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าป้อนสู่หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำชนิด AUTO-TRANSFORMER เพื่อ

แปลงขนาดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้ลดลงเหลือประมาณ 150 โวลต์อาร์เอ็มเอส แล้วจึงแปลงผันให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ ตามด้วยวงจรกรองซึ่งประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และ ตัวต้านทาน ทำให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เรียบ มีขนาดแรงดันสูงสุดประมาณ 150 โวลต์ วงจรอินเวอร์เตอร์จะแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงนี้ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่สูง มีรูปคลื่นเกือบเป็นไซน์ ขนาดสูงสุดประมาณ 350 โวลต์ มีความถี่ประมาณ 15 กิโลเฮิรตซ์ โดยวงจรอินเวอร์เตอร์นี้เป็นแบบสวิตช์ตัวเดียว ซึ่งเป็นเอสซีอาร์ แรงดันที่ได้จะป้อนสู่หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าความถี่สูงต่อไป เพื่อแปลงให้มีขนาดแรงดันสูงสุดประมาณ 10 กิโลโวลต์ วงจรนี้ใช้หลักการที่ง่ายและใช้เอสซีอาร์เป็นสวิตช์เพียงตัวเดียว จึงมีข้อดีในด้านความเชื่อถือได้ แต่ก็มีข้อเสียหลายประการดังนี้

1. <u>ขนาดและน้ำหนัก</u>

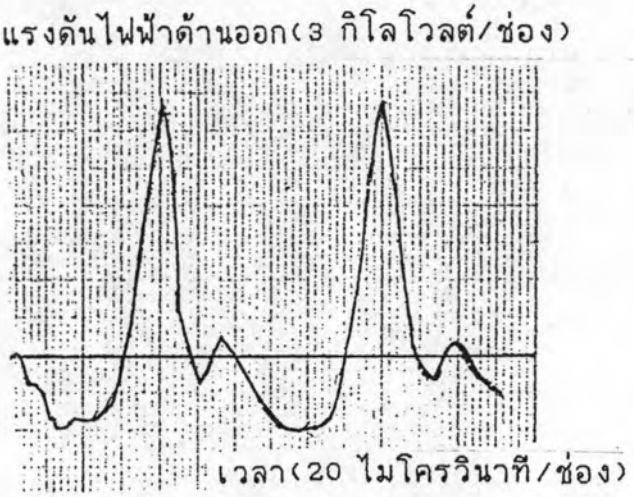
แหล่งกำเนิดแรงดันสูงที่ความถี่สูง ในรูปที่ 23 มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก เนื่องจากใช้หม้อแปลง และตัวเหนี่ยวนำ ที่ความถี่ต่ำ

2. <u>ประสิทธิภาพการใช้กำลังไฟฟ้าต่ำ</u>

จากรูปที่ 23 จะเห็นว่า มีตัวต้านทาน (R_1 ถึง R_4) รวมอยู่ในวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เอสซีอาร์ ซึ่งมีผลทำให้เกิดการสูญเสียเป็นความร้อน วงจรจึงมีประสิทธิภาพต่ำ อีกทั้งต้องมีระบบระบายความร้อนที่ดีอีกด้วย

3. <u>ความสม่ำเสมอของการปล่อยประจุไฟฟ้าโคโรนา</u>

แรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ได้ มีรูปคลื่นไม่เป็นไซน์ และไม่สมมาตร เนื่องจากช่วงเวลาทำงาน และไม่ทำงานของสวิตช์ในวงจรอินเวอร์เตอร์มีค่าไม่เท่ากัน (ดูรูปที่ 24) เป็นผลทำให้การปล่อยประจุไฟฟ้าโคโรนาบนผิวของฟิล์มพลาสติกไม่สม่ำเสมอ และประสิทธิภาพของการปรับผิวฟิล์มพลาสติกก็จะต่ำลงด้วย



รูปที่ 24

รูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออกของแหล่งกำเนิดฯที่มีขาย

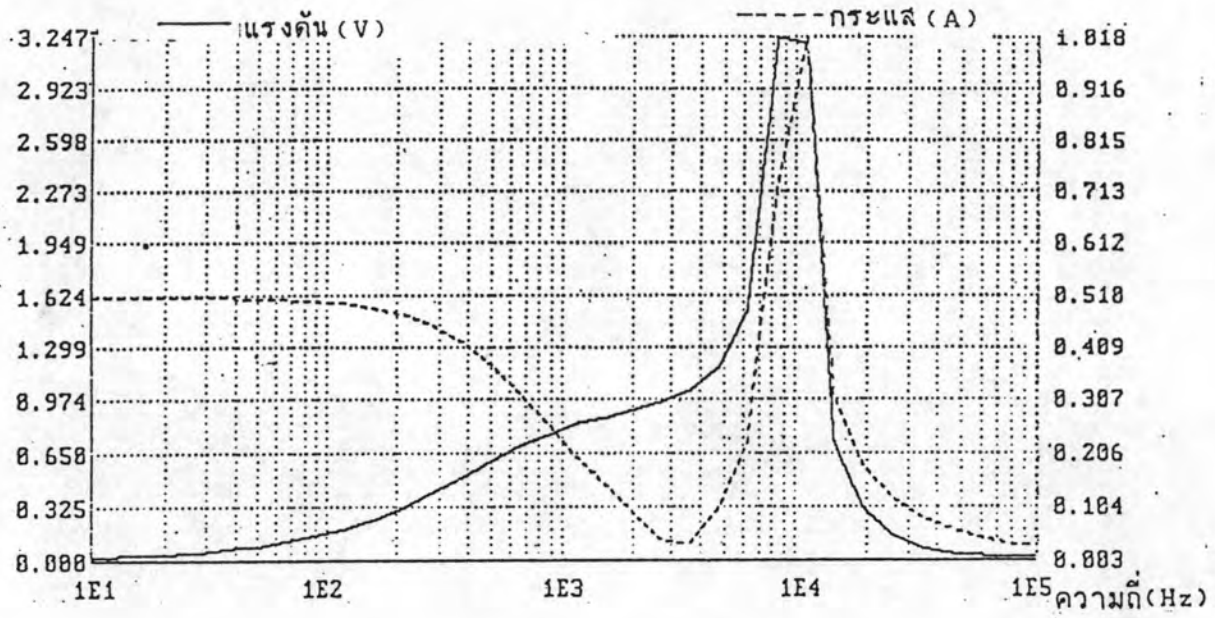
4. <u>การรบกวนโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า</u>

การรบกวนโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูง มีขนาด และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูง (ดูรูปที่ 25) ที่เป็นเช่นนี้ เพราะเกิดการเรโซแนนซ์แบบหน่วงขาด (UNDERDAMPED)

รูปที่ 25

กระแสด้านปฐมภูมิของแหล่งกำเนิดฯที่มีขาย

5. การเลือกจุดทำงาน



รูปที่ 26
การตอบสนองต่อความถี่ของแรงดันและกระแสด้านปฐมภูมิ
ของหม้อแปลง T_2 ในรูที่ 23

ได้มีการวัดค่าองค์ประกอบวงจรของอินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 23 แล้วนำค่าที่ได้ไปซีมูเลตด้วยคอมพิวเตอร์โปรแกรม LEC 0.5[14] ถ้าให้แรงดันไฟฟ้าด้านเข้าเท่ากับ 1 โวลต์ จะได้แรงดันและกระแสที่ปฐมภูมิของหม้อแปลง ซึ่งมีขนาดที่แปรผันไปกับความถี่ดังแสดงในรูปที่ 26 จุดการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์อยู่ที่ความถี่ประมาณ 15 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นช่วงที่วงจรไฟฟ้ามีการทำงานแบบกระแสนำหน้าแรงดัน สังเกตจากรูปที่ 26 ได้ว่ากระแสและแรงดันมีขนาดที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วกับความถี่ ซึ่งจะต้องปรับแต่งความถี่อย่างระมัดระวังเมื่อเปลี่ยนโหลด อนึ่งถ้าอินเวอร์เตอร์ที่มีโครงสร้างเป็นบริดจ์ควรให้กระแสล้าหลังแรงดันเพื่อลดปัญหาเวลาฟื้นตัวของไดโอด

ข้อกำหนดของแหล่งกำเนิดแรงดันสูงที่ความถี่สูงที่ออกแบบ

การออกแบบแหล่งกำเนิดแรงดันสูงที่ความถี่สูง ใช้การควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้านออกด้วยวิธีปรับความถี่ของวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นระบบที่ไม่ยุ่งยากมากนัก และมีเสถียรภาพดีทางสมการ ข้อกำหนดของแหล่งกำเนิดแรงดันสูงที่ความถี่สูงที่ออกแบบมีดังนี้

1. แรงดันไฟฟ้าด้านเข้า

แรงดันไฟฟ้าด้านเข้าเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส ขนาด 220 โวลต์ $\pm$10% ความถี่ 50 เฮิรตซ์

2. แรงดันไฟฟ้าด้านออก

แรงดันไฟฟ้าด้านออกเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับรูปไซน์ ปรับขนาดของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดได้ตั้งแต่ 9 - 12 กิโลโวลต์ ในย่านความถี่ตั้งแต่ 10 - 15 กิโลเฮิรตซ์

3. ระบบอิเล็กโทรดที่ใช้งาน

ใช้กับระบบอิเล็กโทรดที่มีไดอิเล็กตริกเป็นแก้วควอตซ์มีความหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร ขนาดช่องวางอากาศอิเล็กโทรดประมาณ 1.5 - 3 มิลลิเมตร ความยาวอิเล็กโทรดปรับได้ตั้งแต่ 280 - 540 มิลลิเมตร และปรับผิวพลาสติกด้านเดียวหรือสองด้านก็ได้

4. ความเร็วการเคลื่อนที่ฟิล์มพลาสติก

ความเร็วการเคลื่อนที่ฟิล์มพลาสติก ผ่านช่องว่างอากาศสูงสุดประมาณ 2 ฟุตต่อวินาที

5. ขนาดความหนาของฟิล์มพลาสติก

ฟิล์มพลาสติกที่สามารถนำมาทำการปรับผิวได้ มีขนาดความหนา

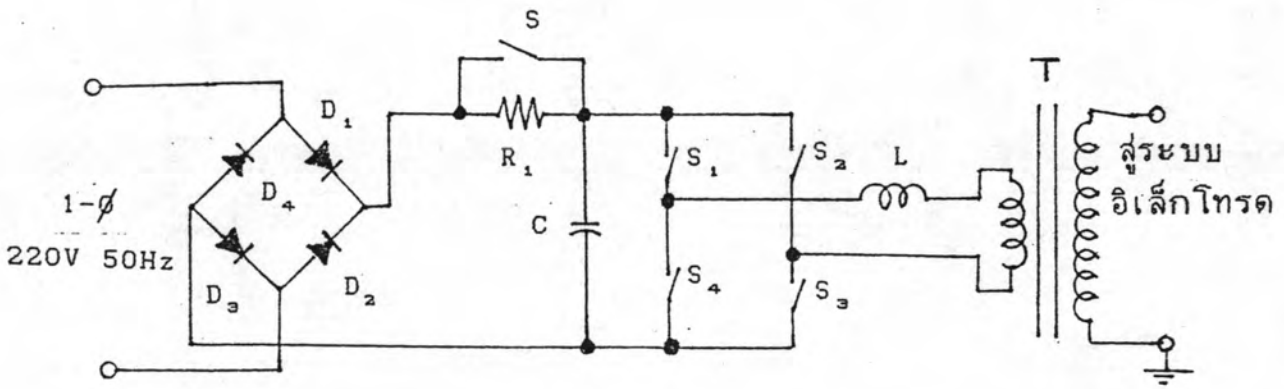
ระหว่าง 0.006 ถึง 0.1 มิลลิเมตร

การออกแบบ

ในการออกแบบ จะแบ่งระบบวงจรไฟฟ้าเป็น 2 ส่วน คือ วงจรไฟฟ้ากำลัง และวงจรควบคุม ซึ่งมีรายละเอียดในการออกแบบแต่ละส่วนดังนี้

1. วงจรไฟฟ้ากำลัง

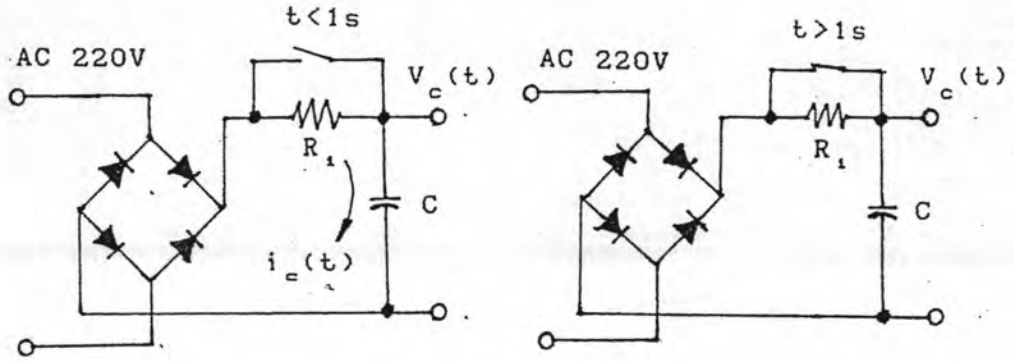
เราต้องการแรงดันไฟฟ้าแรงสูงเป็นรูปคลื่นไซน์ และกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงต้องมีรูปคลื่นเกือบเป็นไซน์ให้มากที่สุด โดยที่กระแสมีเฟสล้าหลังแรงดัน โครงสร้างและองค์ประกอบของวงจรไฟฟ้ากำลังเป็นดังรูปที่ 27



รูปที่ 27
โครงสร้างของวงจรไฟฟ้ากำลัง

1.1 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง และวงจรกรอง 50 เฮิรตซ์ แหล่งกำเนิดแรงดันสูงที่ความถี่สูงนี้รับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส ขนาด 220 โวลต์ $\pm$10% ความถี่ 50 เฮิรตซ์ จากระบบ

จ่ายกำลังไฟฟ้ามาเรียงกระแสให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วงจรไดโอดต่อแบบบริดจ์ แรงดันไฟฟ้านี้ถูกกรองให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการกระเพื่อมเพียงเล็กน้อย และมีค่าประมาณ 300 โวลต์ โดยใช้วงจรกรอง 50 เฮิรตซ์ ที่ประกอบด้วย ตัวเก็บประจุ และตัวต้านทาน ทำหน้าที่ลดขนาดของกระแสไฟฟ้าในช่วงแรก ขณะที่ตัวเก็บประจุยังไม่มีประจุอยู่เลย และมีแรงดันตกคร่อมเป็นศูนย์ ในช่วงต่อมาเมื่อตัวเก็บประจุเก็บประจุเกือบเต็มแล้ว กระแสในการเก็บประจุมีค่าต่ำลง จนไม่เกิดเป็นอันตรายต่อไดโอดก็จะใช้สวิตช์ลัดวงจรตัวต้านทานเพื่อลดกำลังสูญเสีย (ดูรูปที่ 28 ก. และ ข.)



ก. เริ่มต้นทำงาน ข. ทำงานสภาวะปกติ

รูปที่ 28

การทำงานของวงจรกรอง 50 เฮิรตซ์

การต่อวงจรเรียงกระแส โดยตรงเข้ากับสายกำลังเช่นนี้เป็นการเลี่ยงการใช้หม้อแปลงแรงดันความถี่ต่ำทำให้สามารถลดน้ำหนักลงได้ ในกรณีวงจรกรอง 50 เฮิรตซ์ ก็เช่นกัน คือการไม่ใช้ตัวเหนี่ยวนำจะลดปัญหาเนื่องจากน้ำหนัก แต่มีข้อเสียคือ ตัวเก็บประจุของวงจรมีขนาดใหญ่กว่าวงจรกรองที่มีตัวเหนี่ยวนำ ในขณะที่การกระเพื่อมมีขนาดเท่ากัน และ กระแสที่ไหลในตัวไดโอดมีค่ายอดสูง แต่ก็มีข้อดีคือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีขนาดเกือบเท่ากับค่ายอดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของระบบจ่ายกำลัง

ในการออกแบบ เราเลือก ค่ายอดถึงค่ายอด ของแรงดันกระเพื่อมเท่ากับ 1.5%

1.1.1 ตัวเก็บประจุ ค่าความจุไฟฟ้า C คำนวนได้ดังนี้

แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้า	= 220	โวลต์
ค่ายอดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ V_M	= 220x1.414	โวลต์
	= 310	โวลต์
แรงดันกระเพื่อม V_r	= 0.015x310	โวลต์
	= 4.65	โวลต์
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเฉลี่ย	= $V_M - V_r/2$	โวลต์
	= 310 - 2.3	โวลต์
	= 308	โวลต์

แต่ในการปรับผิวพลาสติกใช้กำลังไฟฟ้าด้านเข้าสูงสุดประมาณเท่ากับ 400 วัตต์ ค่าตัวเก็บประจุ C หาได้ดังสมการ (3.1)

$$C = It/V_r \qquad (3.1)$$

โดยที่

I = กำลังไฟฟ้าขาเข้าสูงสุด /แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเฉลี่ย
= 400/308 แอมป์
= 1.4 แอมป์

เวลา t = 1/2 ของคาบเวลาไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้า

= 10 มิลลิวินาที

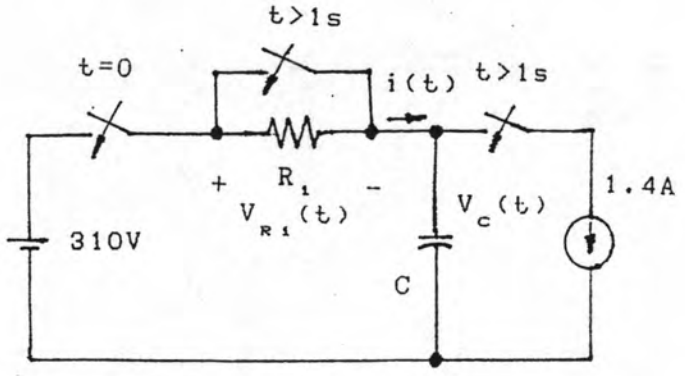
ฉะนั้น

C = 1.4x0.01/4.65 ฟารัด

= 3000 ไมโครฟารัด

ในการใช้งานเลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาด 3500 ไมโครฟารัด ทนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ 350 โวลต์

1.1.2 ตัวต้านทาน R_1 ตัวต้านทานนี้ทำหน้าที่จำกัดกระแสเมื่อปิดสวิตช์ควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้า แต่ยังไม่เกิดการปล่อยประจุไฟฟ้าโคโรนา และถูกต่ออันดับกับตัวเก็บประจุจนกว่าจะกดสวิตช์ควบคุมการปล่อยประจุไฟฟ้าโคโรนา นั้นคือกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานจะเป็นกระแสที่ใช้ในการเก็บประจุของตัวเก็บประจุเพียงอย่างเดียว(ดูรูปที่ 29) และในการเก็บประจุกำหนดให้ตัวเก็บประจุสามารถเก็บประจุได้ 95 % ของค่ายอดแรงดัน ในเวลา 1วินาที ซึ่งเป็นเวลาที่สามารถกดสวิตช์ควบคุมการปล่อยประจุไฟฟ้าโคโรนาเร็วที่สุด



รูปที่ 29

วงจรที่ใช้ในการคำนวนหาค่าความต้านทาน R_1

การคำนวนออกแบบพิจารณารูปที่ 29

$$v_{R1}(t) = V - V_c(t) \qquad (3.2)$$

$V_c(t)$ $= V - V\exp(-t/RC)$ (3.3)

$i(t)$ $= [V/R]\exp(-t/RC)$ (3.4)

โดยที่

t $= 1$ วินาที

V $= 310$ โวลต์

C $= 3500$ ไมโครฟารัด

$v_c(1)$ $= 295$ โวลต์

ฉะนั้นจากสมการ (3.3)

295 $= 310-310\exp(-1/3500\times10^{-6}R_1)$

R_1 $= -1/[3500\times10^{-6}\times\ln\{(310 - 295)/310\}]$

$= 94.34$ โอห์ม

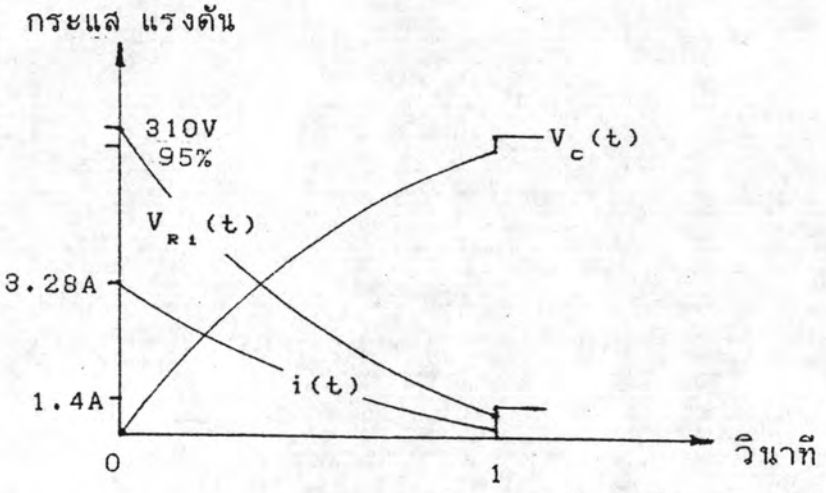
กระแสขณะเริ่มปิดสวิตช์ควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้า $i(0)$ เป็นดังนี้

จากสมการ (3.4)

$i(0)$ $= 310/94.34$

$= 3.28$ แอมป์

$i(t)$ $v_{R1}(t)$ และ $v_c(t)$ มีลักษณะดังรูปที่ 30



รูปที่ 30

ลักษณะของ $v_c(t)$ $v_{R1}(t)$ และ $i(t)$

1.1.3 ตัวต้านทาน R_2 ตัวต้านทานนี้ใช้ในการคายประจุเมื่อเลิกใช้งานเพื่อไม่ให้เป็นอันตรายต่อผู้ใช้งานหรือซ่อมบำรุง โดยถูกต่อกับวงจร (ดูรูปที่ 31) เมื่อสวิตช์ควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเปิด ตามมาตรฐานของ วสท.408 กำหนดไว้ว่า ตัวเก็บประจุที่ใช้แรงดันไม่เกิน 600 โวลต์ ต้องมีตัวความต้านทานต่อไว้ใช้ในการคายประจุไฟฟ้าออกให้เหลือแรงดัน 50 โวลต์ ในเวลา 1 นาที และตามมาตรฐาน IEC NO.70 กำหนดให้ตัวเก็บประจุเก็บประจุแรงดันได้ 1.1 เท่าของแรงดันปกติ

ในการหาตัวความต้านทาน หาได้จากสมการที่ 3.5 และพิจารณาจากรูปที่ 31 ก. และ ข.

$$v_c(t) = V \exp(-t/R_2C)$$

$$R_2 = -t/[C\{\ln v_c(t)/V\}] \qquad (3.5)$$

$$= -60/[3500\times10^{-6}\{\ln 50/310\}]$$

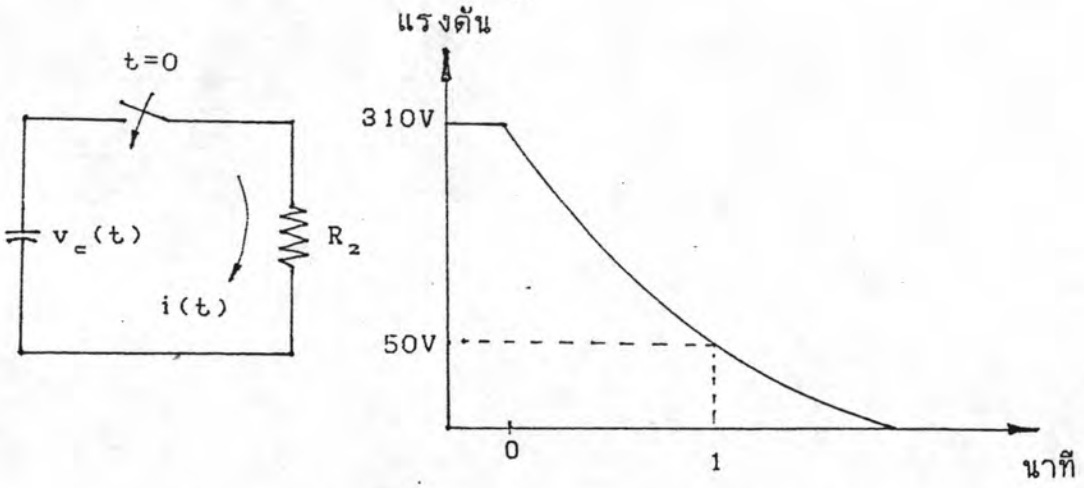
$$\simeq 9400 \text{ โอห์ม}$$

กระแสไหลผ่าน R_2 เริ่มต้น $= 310/9400$ แอมป์

$$\simeq 0.033 \text{ แอมป์}$$

ฉะนั้น

ตัวความต้านทานที่ใช้งานมีขนาด 9400 โอห์ม



ก. เลิกใช้ทำงาน ข. แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ

รูปที่ 31

วงจรและรูปใช้ในการหาค่าตัวความต้านทาน R_2

1.1.4 ไดโอด การหาขนาดของไดโอดเราต้องรู้อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายกำลัง แต่อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายนั้นไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่าง แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากับสถานที่ตั้งแหล่งกำเนิดแรงดันสูงที่ความถี่สูง ในที่นี้ สมมุติว่าแหล่งกำเนิดแรงดันสูงที่ความถี่สูงใช้สายขนาด 2.5 ตารางมิลลิเมตร ยาว 10 เมตร ต่อจากหม้อแปลงจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 250 กิโลโวลต์แอมป์ ซึ่งถือว่าติดตั้งในตำแหน่งที่ใกล้แหล่งจ่ายมากที่สุดเพื่อทำให้อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายต่ำที่สุด และเกิดกระแสไหลผ่านไดโอดสูงสุด การหาอิมพีแดนซ์ใช้ตารางรูปที่ 32 และ 33

จากตารางในรูปที่ 32 ได้ค่าความต้านทานและรีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงจ่ายกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 8.32 มิลลิโอห์ม และ 24.19 มิลลิโอห์ม ตามลำดับ

จากตารางรูปที่ 33 แรงดันในสายลดลง 3% เมื่อสายยาวสูงสุด 30 เมตร กระแส 15 แอมป์ ตัวประกอบกำลัง 0.9 และ

อิมพีแดนซ์ของสายมีค่ารีแอกแตนซ์ต่อความยาวประมาณ 1 ต่อ 6

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

รูปที่ 32

ตารางพิกัดและค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงจ่ายกำลังไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย

ฉะนั้น

สายยาว 10 เมตร มีอิมพีแดนซ์ = แรงดันxอัตราส่วนระยะทาง/กระแส

โดยที่

แรงดัน	= 220x3%	โวลต์
	= 6.6	โวลต์
กระแส	= 15	แอมป์
อัตราส่วนระยะทาง	= 10/30	
	= $^1/_3$	

220 V 1 ø 2 สาย 50 Hz PF. 90%							
กระแส (A)	ขนาดสาย (mm^2) เดินเกาะไปกับผนังตึกหรือไม้						
	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						

รูปที่ 33

ตารางความยาวของสายสูงสุด(M) ที่แรงดันตกในสายสูงสุดไม่เกิน 3%

จากสมการ (3.6)

อิมพีแดนซ์ของสาย = $(6.6x^{1}/_{3})/15$

= 146.67 มิลลิโอห์ม

มุมของอิมพีแดนซ์ = $\tan^{-1}$(รีแอกแตนซ์/ความต้านทาน) (3.7)

= 9.46 องศา

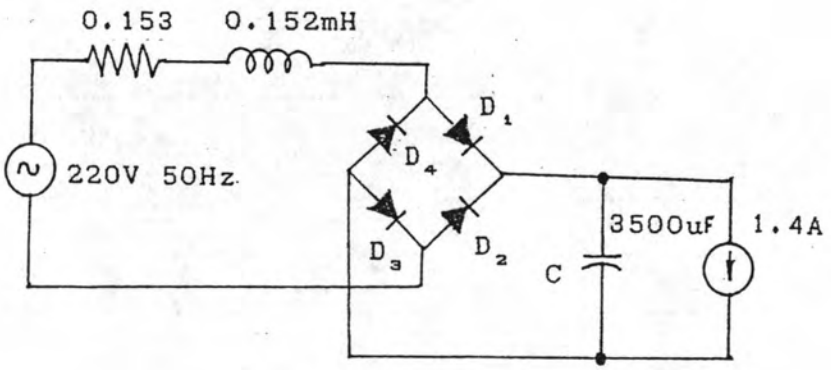
อิมพีแดนซ์ของสาย = 145 + j24 มิลลิโอห์ม

อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย = อิมพีแดนซ์สาย
+อิมพีแดนซ์หม้อแปลงจ่ายกำลังไฟฟ้า

= 145 + j24 + 8.32 + j24.19

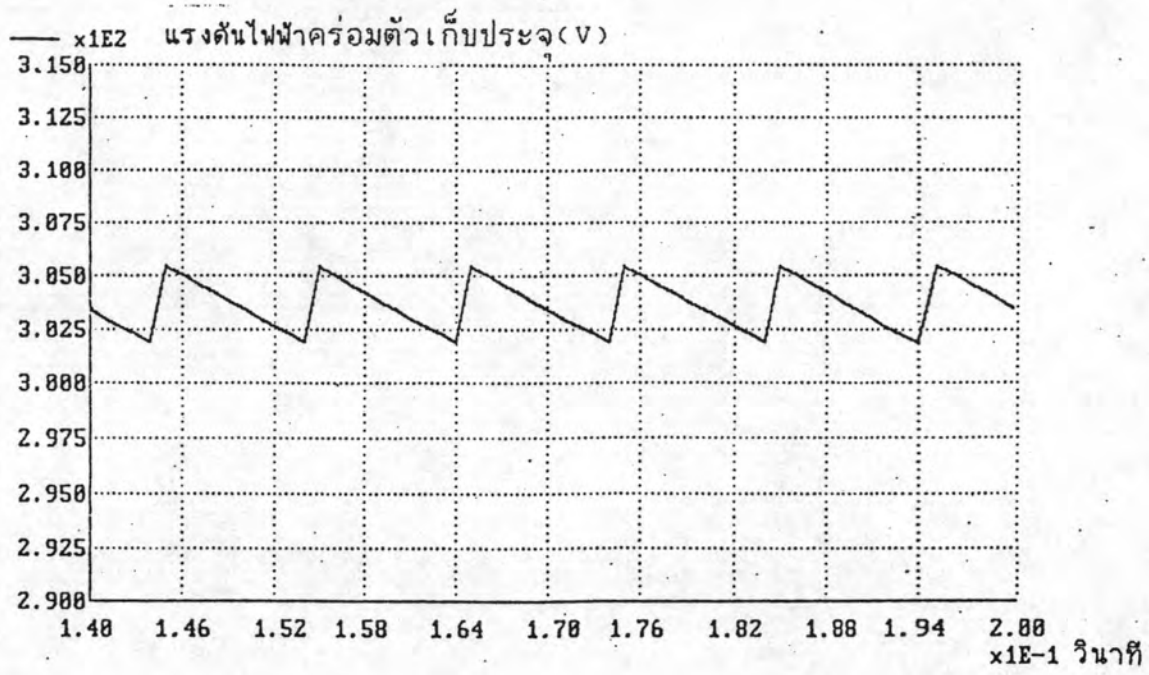
= 153 + j48 มิลลิโอห์ม

จากค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายที่ได้นี้ นำไปซีมูเลตโดยใช้วงจรสมมูลรูปที่ 34 และโปรแกรม LEC 5.0



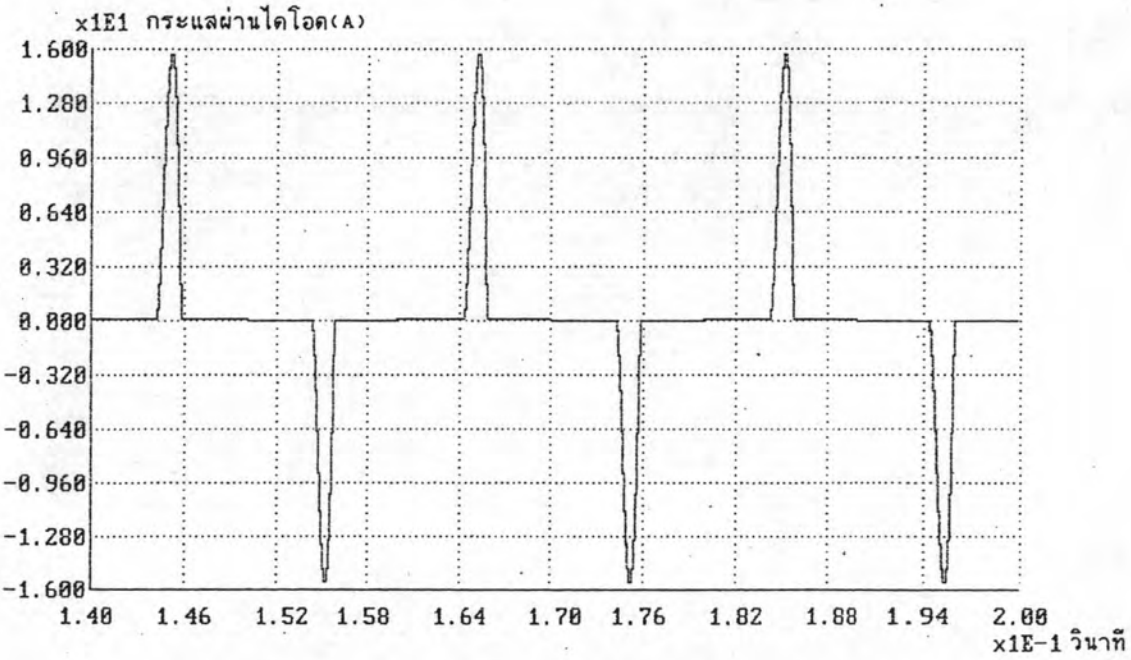
รูปที่ 34
วงจรสมมูลเพื่อซีมูเลตหาค่ากระแสผ่านไดโอด

การซีมูเลตวงจรสมมูลในรูปที่ 34 ให้รูปคลื่นของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสผ่านไดโอด ดังรูปที่ 35 และ 36 ตามลำดับ



รูปที่ 35

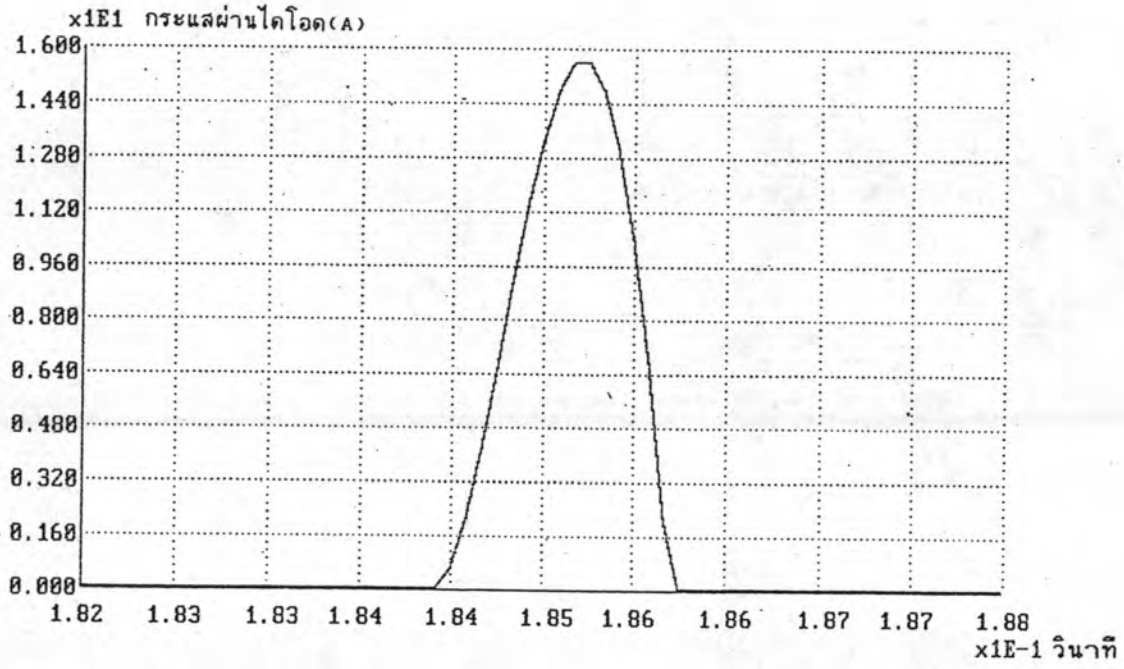
รูปคลื่นของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุที่ได้จากการซีมูเลต



รูปที่ 36

รูปคลื่นของกระแสผ่านไดโอด

จากรูปที่ 35 เห็นได้ว่า รูปคลื่นของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีลักษณะใกล้เคียงกับที่คำนวนไว้ สำหรับกระแสผ่านไดโอดมีลักษณะที่ยากต่อการคำนวณหาค่าอาร์เอมเอส จึงหาโดยประมาณค่า สมมุติว่ารูปคลื่นของกระแสผ่านไดโอดเป็นรูปไซน์ครึ่งคาบ (ดูรูปที่ 37) ซึ่งเราคำนวนค่าอาร์เอมเอสได้ดังนี้



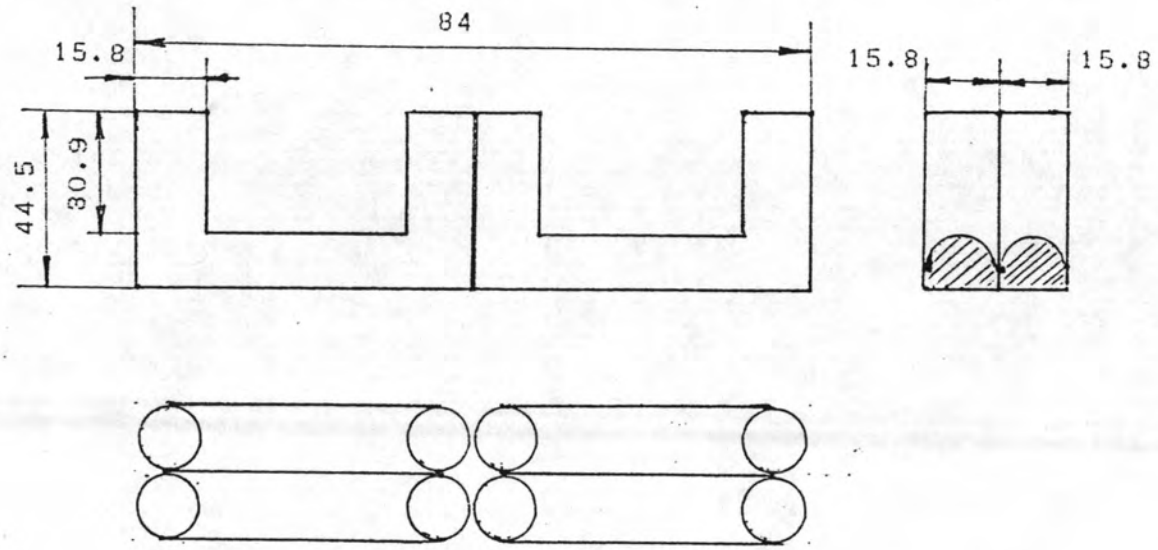
รูปที่ 37
รูปคลื่นของกระแสผ่านไดโอดที่ใช้หาค่าอาร์เอมเอส

$$I_{rms} = \sqrt{\int_0^{2ms} [15 \sin (2\pi 250t)dt]^2} /20 \qquad (3.8)$$

$$= 4.6 \text{ แอมป์}$$

1.2 <u>หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่สูง</u> เป็นหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ใช้แกนเฟอร์ไรต์ เพราะแกนเฟอร์ไรต์มีคุณสมบัติที่ดีต่อการนำไปใช้งานที่ความถี่สูงโดยทำให้เกิดการสูญเสียในแกนต่ำ แกนเฟอร์ไรต์ที่ใช้เป็นแกนที่ใช้ในหม้อแปลงความถี่สูงในโทรทัศน์ซึ่งมีรูปตัว C และนำมาประกอบกันเป็นรูปตัว E

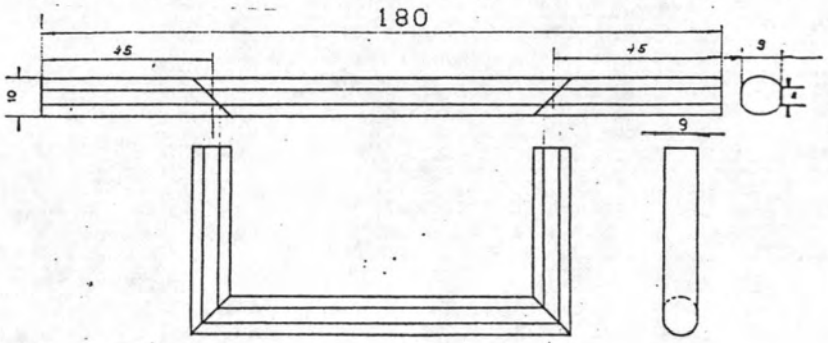
ดังรูปที่ 38 เพื่อให้ได้พื้นที่หน้าตัดของแกนมากขึ้น โดยที่แกนทั้งหมดเป็นแบบ E-E และแกนรูปตัว E หนึ่ง ใช้แกนตัว C สี่แกน นอกจากนี้ยังได้ออกแบบแกนเฟอร์ไรต์ขึ้นมาใหม่อีกเพื่อนำมาใช้ในกรณีที่หาแกนเฟอร์ไรต์รูปตัว C ไม่ได้ โดยการนำแท่งแกนเฟอร์ไรต์ ที่ใช้พันตัวเหนี่ยวนำในเครื่องรับวิทยุมาตัด-ต่อและประกอบกัน ดังรูปที่ 39 ปรากฏว่าแกนทั้งสองมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน



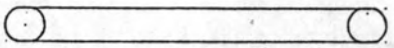
รูปที่ 38

แกนเฟอร์ไรต์ที่ใช้ในโทรทัศน์ประกอบเป็นแกนหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่สูง

แท่งแกนเฟอร์ไรต์



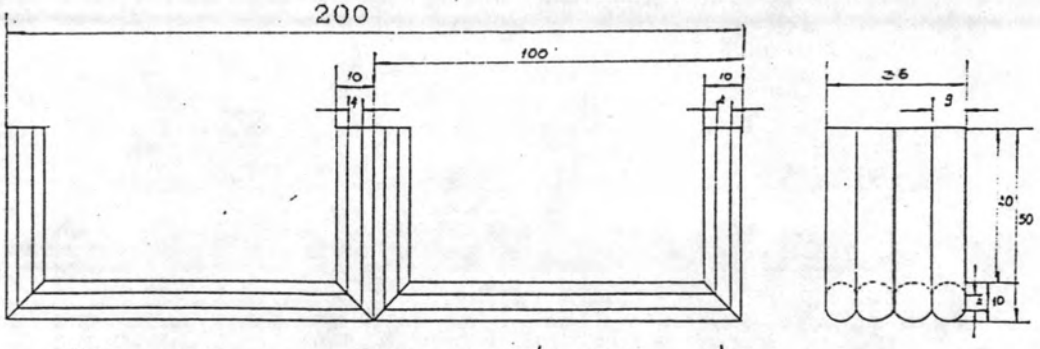
การตัด-ต่อเป็นรูปตัวC



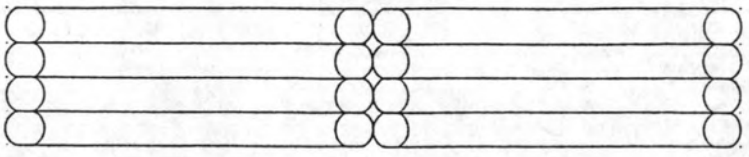
$V_{ต}$ =27 cm^3/คู่

$l_{ต}$ =36 cm/คู่

$A_{ต}$ =0.75 cm^2



การใช้แกนรูปตัวC แปดแกนประกอบเป็น รูปตัวE หนึ่งแกน



$V_{ต}$ =216 cm^3/ชุด

$l_{ต}$ =36 cm/ชุด $A_{ต}$ =6 cm^2

รูปที่ 39

การตัด-ต่อและประกอบแท่งแกนเฟอร์ไรต์ที่ใช้พันตัวเหนี่ยวนำ

เป็นแกนหม้อแปลงความถี่สูง

ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูง ถ้าให้ความเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (L_m) มีค่าสูง กระแสปฐมภูมิจะเกิดขึ้นเนื่องจากตัวภาระ (โหลด) ที่ต่อด้านทุติยภูมิเกือบทั้งหมด และเนื่องจากตัวภาระเป็นเสมือนตัวเก็บประจุ ดังนั้นกระแสปฐมภูมิจะนำหน้าแรงดัน ถ้าใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ลักษณะกระแสดังกล่าวจะทำให้เกิดปัญหาต่อเวลาฟื้นตัวของไดโอดที่ขนานอยู่กับ MOSFET ที่เป็นสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ ฉะนั้นเราจะเลือกความเหนี่ยวนำแม่เหล็กมีค่าต่ำลง เพื่อให้กระแสปฐมภูมิล้าหลังแรงดัน การปรับค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็กทำได้โดยการปรับช่องอากาศ (gap) ด้วยวิธีลองผิดลองถูก (Trial and error)

1.2.1 การออกแบบ แหล่งกำเนิดแรงดันสูงที่ความถี่สูงที่ใช้กับระบบอิเล็กโทรดที่มีไดอิเล็กตริกเป็นแก้วควอตซ์ มีแรงดันไฟฟ้าด้านออกสูงสุด (V_m) 12 กิโลโวลต์ ความถี่ประมาณ 10 กิโลเฮิรตซ์ แรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงจะมีลักษณะเกือบเป็นไซน์ เนื่องจากโหลดเป็นวงจรเรโซแนนซ์ ประมาณค่ายอดของแรงดันปฐมภูมิเท่ากับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนให้อินเวอร์เตอร์ นั้นคือ 310 โวลต์

ฉะนั้น ได้ว่า

อัตราส่วนของหม้อแปลง a = แรงดันขดทุติยภูมิ/แรงดันขดปฐมภูมิ
= จำนวนรอบขดทุติยภูมิ
/จำนวนรอบขดปฐมภูมิ (3.9)
= 12000/310
$\simeq$ 38.7

สามารถหาจำนวนรอบของขดลวดทั้งสองได้โดยใช้สมการ (3.9) (3.10) และ คุณสมบัติของแกนเฟอร์ไรต์

แรงดันสูงสุดของขดลวด $= 2\pi f N B_m A \times 10^{-4}$ โวลต์ (3.10)

โดยที่

f	ความถี่ของแรงดัน	10000	เฮิรตซ์
N	จำนวนรอบของขดลวด		รอบ
B_m	ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของแกน	0.33	เทสลา
A	พื้นที่หน้าตัดแกนหม้อแปลง	7.48	ตารางเซนติเมตร

จากสมการ (3.10)

จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ $= 310 / [2\pi \times 10000 \times 0.33 \times 7.48 \times 10^{-4}]$

$\simeq 21$ รอบ

จากสมการ (3.9)

จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ $= 38.7 \times 21$ รอบ

$\simeq 800$ รอบ

แรงดันไฟฟ้าต่อรอบของขดลวด = แรงดันไฟฟ้า/จำนวนรอบ

= 15 โวลต์ต่อรอบ

กำหนดให้ แรงดันไฟฟ้าต่อชั้นของขดลวดทั้งสองเท่ากับ 375 โวลต์ต่อชั้น ซึ่งเป็นค่าที่ไม่สูงมากนักเพื่อป้องกันการเบรกดาวน์ระหว่างชั้นของขดลวด

จำนวนรอบในแต่ละชั้นของขดลวด = แรงดันไฟฟ้าต่อชั้นของขดลวด /แรงดันไฟฟ้าต่อรอบของขดลวด

= 25 รอบต่อชั้น

จำนวนชั้นของขดลวด = จำนวนรอบของขดลวด /จำนวนรอบในแต่ละชั้นของขดลวด

จำนวนชั้นของขดลวดปฐมภูมิ = 1 ชั้น

จำนวนชั้นของขดลวดทุติยภูมิ = 32 ชั้น

จากรายละเอียดของแกนเฟอร์ไรต์รูปตัวC การสูญเสียเนื่องจากแกนที่เกิดขึ้น ที่ความถี่ 16 กิโลเฮิรตซ์ และที่ความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็กดังกล่าว มีค่าประมาณ 5.7 วัตต์ต่อคู่ ในกรณีนี้ใช้ 4 คู่ [15]

ฉะนั้น

การสูญเสียเนื่องจากแกน = 22.8 วัตต์

กำลังไฟฟ้าใช้ในการปรับผิวสูงสุด = 400 วัตต์

กระแสปฐมภูมิ = กำลังไฟฟ้า/แรงดัน

= $\sqrt{2}$x400/315

= 1.8 แอมป์

กระแสทุติยภูมิ = กระแสปฐมภูมิ/a

= 0.05 แอมป์

นำกระแสที่ไหลผ่านขดลวดทั้งสอง มาหาขนาดของตัวนำได้โดยใช้ตารางในรูปที่ 40 [19] ซึ่งขนาดตัวนำของขดลวดปฐมภูมิมีค่าเป็น 1000 x 1.8 เท่ากับ 1800 cmil ได้ตัวนำที่ใช้พันหม้อแปลงความถี่สูงเบอร์ 17 AWG และขนาดตัวนำของขดลวดทุติยภูมิมีค่า 1000x0.05 เท่ากับ 50 cmil ได้ตัวนำเบอร์ 33 AWG

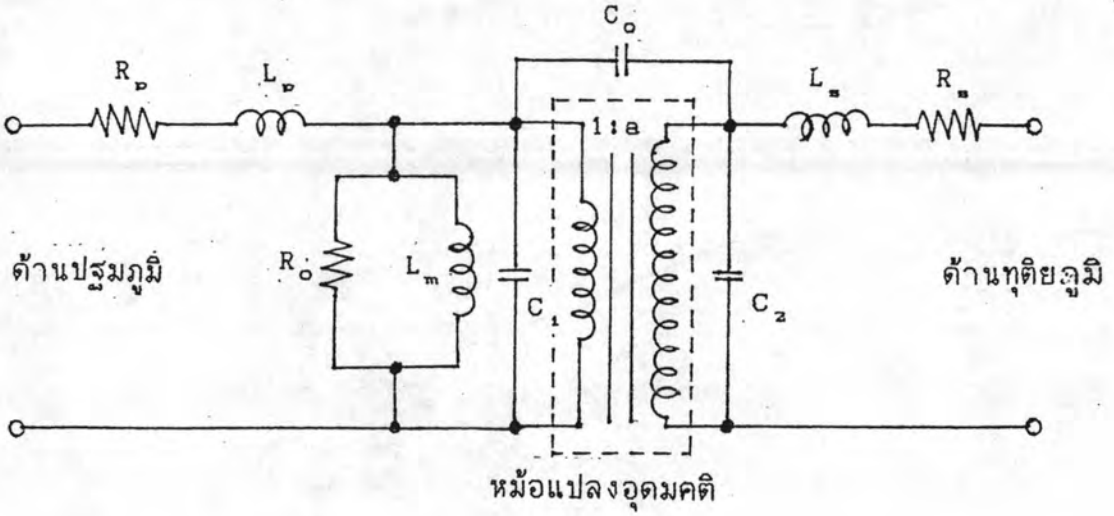
AWG	Diameter over insulation (inches) Min.	Max.	Nominal circular mil area	Resistance per 1000 ft	Current capacity in milliamperes based on 1000 c.m./A	AWG
8	0.130	0.133	16510	0.6281	16510	8
9	0.116	0.119	13090	0.7925	13090	9
10	0.104	0.106	10380	0.9985	10380	10
11	0.0928	0.0948	8230	1.261	8226	11
12	0.0829	0.0847	6530	1.588	6529	12
13	0.0741	0.0757	5180	2.001	5184	13
14	0.0667	0.0682	4110	2.524	4109	14
15	0.0595	0.0609	3260	3.181	3260	15
16	0.0532	0.0545	2580	4.020	2581	16
17	0.0476	0.0488	2050	5.054	2052	17
18	0.0425	0.0437	1620	6.386	1624	18
19	0.0380	0.0391	1290	8.046	1289	19
20	0.0340	0.0351	1020	10.13	1024	20
21	0.0302	0.0314	812	12.77	812.3	21
22	0.0271	0.0281	640	16.20	640.1	22
23	0.0244	0.0253	511	20.30	510.8	23
24	0.0218	0.0227	404	25.67	404	24
25	0.0195	0.0203	320	32.37	320.4	25
26	0.0174	0.0182	253	41.02	252.8	26
27	0.0157	0.0164	202	51.44	201.6	27
28	0.0141	0.0147	159	65.31	158.8	28
29	0.0127	0.0133	128	81.21	127.7	29
30	0.0113	0.0119	100	103.7	100	30
31	0.0101	0.0108	79.2	130.9	79.21	31
32	0.0091	0.0098	64	162	64	32
33	0.0081	0.0088	50.4	205.7	50.41	33
34	0.0072	0.0078	39.7	261.3	39.69	34
35	0.0064	0.0070	31.4	330.7	31.36	35

รูปที่ 40

ขนาดของเส้นลวดพันหม้อแปลง

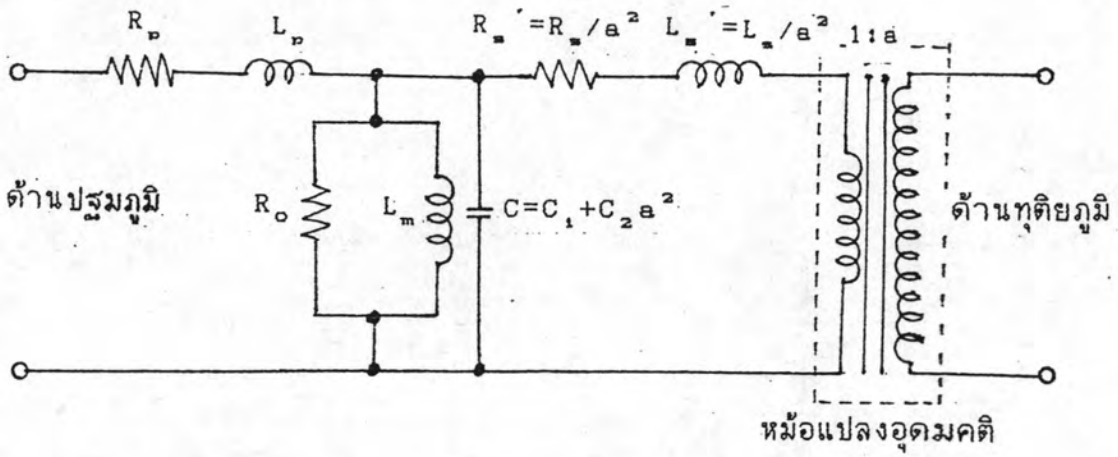
1.2.2 การหาค่าพารามิเตอร์ ในทางอุดมคติหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าจะไม่มีการสูญเสียใดๆ ทั้งสิ้น แต่ในทางความเป็นจริงแล้วหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า ประกอบด้วย แกนหม้อแปลงและขดลวดตัวนำ ซึ่งมีผลทำให้เกิดการสูญเสีย ซึ่งมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดและคุณสมบัติของตัวมันเอง โดยหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าประกอบด้วยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ความต้านทาน R_p เกิดขึ้นเนื่องจากลวดตัวนำของขดลวดปฐมภูมิมีความต้านทาน ความต้านทาน R_s เกิด

ขึ้นเนื่องจากลวดตัวนำของขดลวดทุติยภูมิมีความต้านทาน ตัวความต้านทาน R_s เกิดขึ้นเนื่องจากมีการสูญเสียในแกนหม้อแปลง ตัวเหนี่ยวนำ L_p เกิดขึ้นเนื่องจากมีสนามแม่เหล็กรั่วไหลในขดลวดปฐมภูมิ ตัวเหนี่ยวนำ L_s เกิดขึ้นเนื่องจากมีสนามแม่เหล็กรั่วไหลในขดลวดทุติยภูมิ ตัวเหนี่ยวนำ L_m ที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ตัวเก็บประจุ C_1 เกิดขึ้นเนื่องจากการวางตัวนำของขดลวดปฐมภูมิมีระยะห่างระหว่างตัวนำกับตัวนำ ตัวเก็บประจุ C_2 เกิดขึ้นในลักษณะเช่นเดียวกัน แต่เกิดขึ้นที่ขดลวดทุติยภูมิ และตัวเก็บประจุ C_0 เกิดขึ้นเนื่องจากมีระยะห่างในการวางขดลวดทั้งสอง เราสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลของหม้อแปลงได้ดังรูปที่ 41



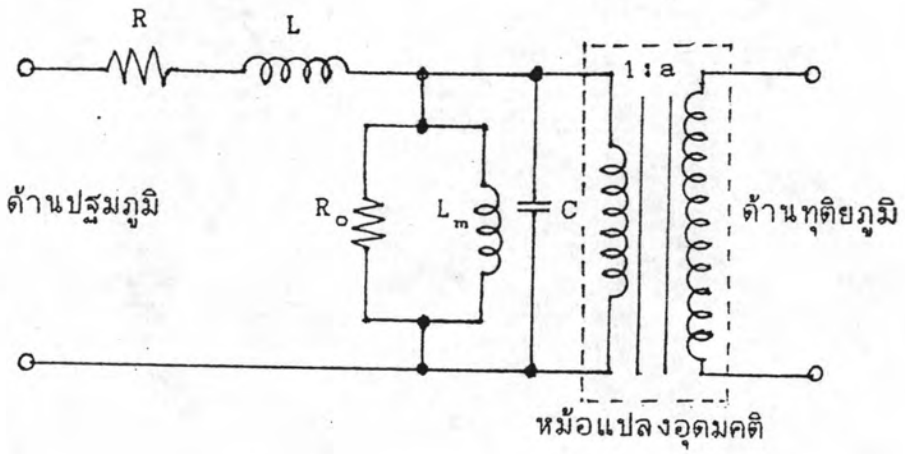
รูปที่ 41
วงจรสมมูลของหม้อแปลง

ในกรณีหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่สูง การวางขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมินั้นมีระยะห่างกันประมาณ 5 มิลลิเมตร ซึ่งมีผลให้ค่าตัวเก็บประจุ C_0 มีจำนวนน้อยมากจึงตัดทิ้ง และสามารถโอนย้ายตัวพารามิเตอร์ต่าง ๆ ด้านทุติยภูมิให้ไปอยู่ด้านปฐมภูมิได้ แสดงดังรูปที่ 42 โดยที่ C_1 และ C_2 จะถูกรวมเข้าด้วยกันเป็น C



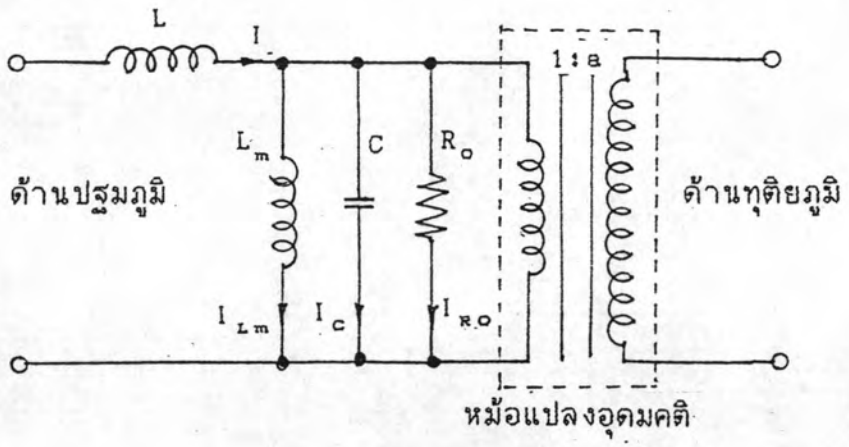
รูปที่ 42
วงจรสมมูลที่ 1 ของหม้อแปลง

จากรูปที่ 42 เราสามารถรวมตัวความต้านทาน R_s กับ R_p และตัวเหนี่ยวนำ L_s กับ L_p เข้าด้วยกันได้ ผลของการรวมตัวต้านทานกำหนดให้เป็นตัวความต้านทาน R ซึ่งแทนการสูญเสียเนื่องจากตัวนำของขดลวดทั้งสอง และผลรวมของตัวเหนี่ยวนำกำหนดให้เป็นตัวเหนี่ยวนำ L ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากสนามแม่เหล็กรั่วไหลของหม้อแปลงทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 43



รูปที่ 43
วงจรสมมูลที่ 2 ของหม้อแปลง

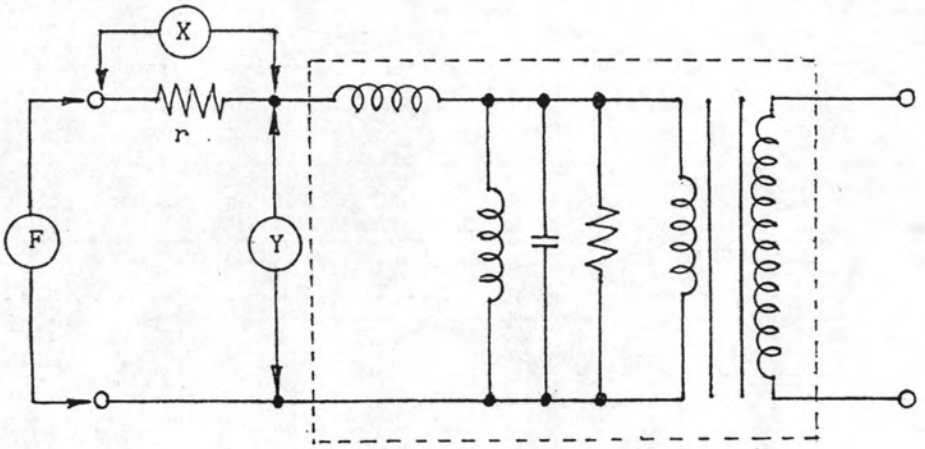
ตัวต้านทาน R ในรูปที่ 43 มีค่าต่ำ จึงจะขอละเลยเสีย วงจรสมมูลที่ได้แสดงในรูปที่ 44 ซึ่งจะใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 44

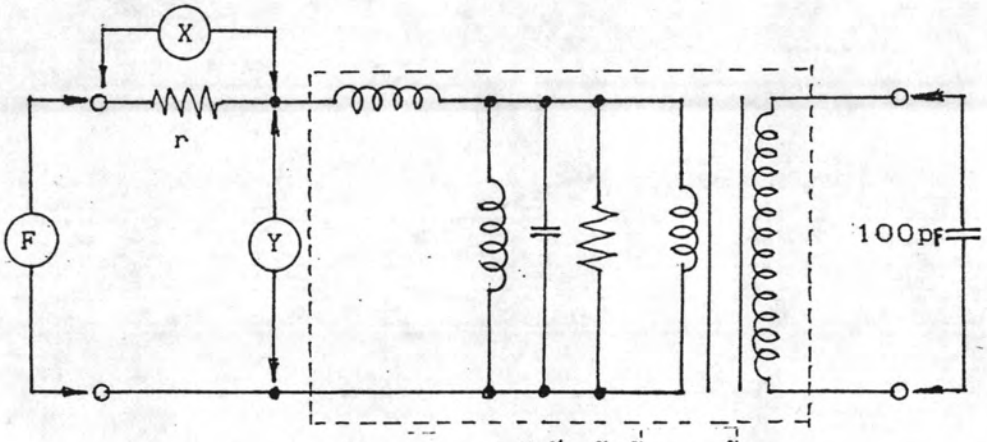
วงจรสมมูลแบบใกล้เคียงของหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่สูง

ค่าตัวเหนี่ยวนำ L L_m และ ตัวเก็บประจุ C ของวงจรสมมูลในรูปที่ 44 สามารถหาได้โดยอาศัยการเกิดเรโซแนนซ์ซึ่งจะทำให้กระแสด้านขดปฐมภูมิต่ำสุดและสูงสุด การหาค่า ทำได้โดยป้อนสัญญาณไฟฟ้ารูปไซน์ จากเครื่องกำเนิดสัญญาณ F ให้กับหม้อแปลงเมื่อไม่มีการต่อตัวภาระ และ ปรับความถี่พร้อมทั้งวัดสัญญาณกระแสปฐมภูมิ โดยใช้ออสซิโลสโคป X วัดแรงดันคร่อมความต้านทานอนุกรม r หาความถี่ที่กระแสปฐมภูมิต่ำสุดและสูงสุด ในลักษณะเดียวกัน หาความถี่ที่กระแสปฐมภูมิต่ำสุดและสูงสุดเมื่อมีการต่อตัวเก็บประจุ (100pF) ที่ขดทุติยภูมิ วงจรที่ใช้ทดลองแสดงดังรูปที่ 45 ก. และ ข. ตามลำดับ



หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่สูง

ก.



หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่สูง

ข.

รูปที่ 45
วงจรทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลง

จากรูปที่ 45 ก. กระแสต่ำสุดเกิดที่ประมาณความถี่เรโซแนนซ์ระหว่าง L_m กับ C

ได้ว่า

ความถี่ที่กระแสต่ำสุด $f_{min} = 1/2\pi\sqrt{L_m C}$

ฉะนั้น

$$L_m C = 1/40f^2_{min} \quad (3.11)$$

กระแสสูงสุดเกิดขึ้นที่ประมาณความถี่เรโซแนนซ์ระหว่าง C กับ L_m ขนานกับ L

ได้ว่า

ความถี่ที่กระแสสูงสุด $f_{max} = 1/2\pi\sqrt{CL_m L/(L_m+L)} \quad (3.12)$

จากรูปที่ 45 ข. ตัวเก็บประจุ 100p จะถูกโอนย้ายไปสู่ด้านปฐมภูมิและจะรวมกับตัวเก็บประจุ C โดยที่อัตราการแปลง a = 38.7 (ดูสมการที่ 3.9)

นั่นคือ

$$C + 100p \times a^2 = C + 145\times10^{-9}$$

จากสมการ (3.11) จะได้ว่า

$$L_m(C + 145\times10^{-9}) = 1/40f^2_{min} \quad (3.13)$$

ในการทดลอง ความถี่ที่กระแสต่ำสุด กรณีไม่มีตัวเก็บประจุต่อด้านทุติยภูมิ มีค่า 37.2 กิโลเฮิรตซ์ กรณีมีตัวเก็บประจุต่ออยู่มีค่า 14.3 กิโลเฮิรตซ์ ค่าความถี่ที่กระแสสูงสุด มีค่า 240 กิโลเฮิรตซ์ และ 92 กิโลเฮิรตซ์ สำหรับกรณีทั้งสองตามลำดับ

จากสมการ (3.11)

$L_m = (18.6 \times 10^{-12})/C$

จากสมการ (3.13) แทนค่า L_m และความถี่ ได้

C $\simeq$ 25 นาโนฟารัด

L_m $\simeq$ 720 ไมโครเฮนรี

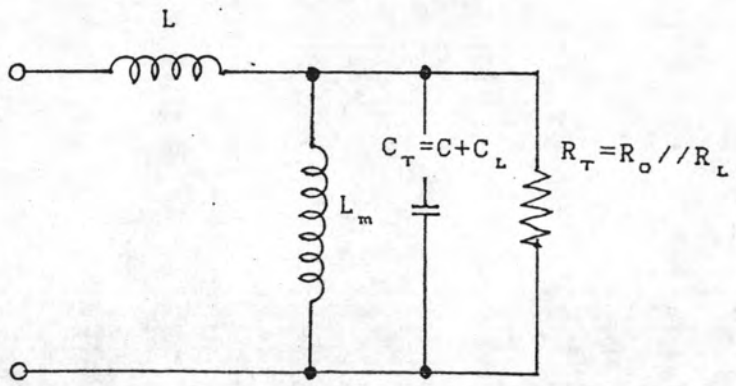
จากสมการ (3.12) แทนค่า C และ L_m ได้

L $\simeq$ 18 ไมโครเฮนรี

สำหรับความต้านทาน R_o จะคิดรวมกันกับค่าความต้านทานของตัวภาระ (อิเล็กโทรด) ที่ต่ออยู่ด้านขดทุติยภูมิ โดยโอนย้ายมาอยู่ด้านขดปฐมภูมิ

1.2.3 หาค่าพารามิเตอร์ของตัวภาระ ตัวภาระประกอบด้วยอิเล็กโทรด 4 อัน สามารถปรับความยาวได้จาก 280 ถึง 540 มิลลิเมตร มีช่องว่างอากาศในการใช้งาน 3 มิลลิเมตร ในการหาค่าพารามิเตอร์จะหา ค่าตัวเก็บประจุต่ำสุด ค่าตัวเก็บประจุสูงสุด ค่าความต้านทานต่ำสุด และค่าความต้านทานสูงสุด เพื่อนำไปกำหนดขอบเขตของความถี่ในการทำงานของอินเวอร์เตอร์ โดยที่ค่าตัวเก็บประจุต่ำสุด และความต้านทานสูงสุด เป็นกรณีปรับผิวฟิล์มพลาสติกด้านเดียวใช้ อิเล็กโทรด 2 อัน มีความยาว 280 มิลลิเมตร ไม่คิดผลเนื่องจากความเร็วที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าโคโรนาต่อพื้นที่ และค่าตัวเก็บประจุสูงสุด และความต้านทานต่ำสุด เป็นกรณีปรับผิวฟิล์มพลาสติกสองด้าน ใช้อิเล็กโทรด 4 อัน มีความยาว 540 มิลลิเมตร ที่เงื่อนไขเช่นเดียวกัน สำหรับวิธีการหาใช้วิธีเดียวกันกับการหาค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงความถี่สูง โดยต่อตัวภาระที่ด้านทุติยภูมิแทนตัวเก็บประจุ 100 พิกโกฟารัด (ในรูปที่ 45 ข.) และได้วงจรสมมูลดังรูปที่ 46 ซึ่งตัวต้านทาน R_T เป็นผลรวมของตัวต้านทาน R_o กับตัวต้านทาน R_L ของ ตัวภาระ ที่โอนย้ายมาอยู่ด้านปฐมภูมิ และตัวเก็บประจุ C_T เป็นผลรวมของตัวประจุ C กับตัวเก็บ

ประจุ C_L ของ ตัวภาระ ที่โอนย้ายมาอยู่ด้านปฐมภูมิเช่นกัน วงจรในรูปนี้เป็นวงจรสมมูลที่ใช้ในการซีมูเลตต่อไปด้วย



รูปที่ 46
วงจรสมมูลของหม้อแปลงความถี่สูงและตัวภาระที่ใช้ในการซีมูเลต

ในการทดลองเพื่อหาค่าตัวเก็บประจุ C_T และความต้านทาน R_T พบว่า ในกรณีปรับผิวฟิล์มพลาสติกด้านเดียวเกิดกระแสต่ำสุดเมื่อความถี่เป็น 12.7 กิโลเฮิรตซ์ มีสัญญาณแรงดัน 8 โวลต์ และสัญญาณกระแส 24 มิลลิแอมป์ สำหรับกรณีปรับผิวฟิล์มพลาสติกสองด้านเกิดกระแสต่ำสุด เมื่อความถี่ 9.3 กิโลเฮิรตซ์ มีสัญญาณแรงดัน 8 โวลต์ และสัญญาณกระแส 38 มิลลิแอมป์

จากสมการ (3.11) ได้ว่า

$$L_m(C_L + 25\times10^{-9}) = 1/40f^2_{min}$$

$$C_L = 34.72/f^2_{min} - 25\times10^{-9} \quad (3.14)$$

ฉะนั้น

ตัวเก็บประจุ C_L ต่ำสุดด้านปฐมภูมิ

= 194 นาโนฟารัด

ตัวเก็บประจุ C_L ต่ำสุดด้านทุติยภูมิ

= 132 พิโกฟารัด

ตัวเก็บประจุ C_L สูงสุดด้านปฐมภูมิ

= 367 นาโนฟารัด

ตัวเก็บประจุ C_L สูงสุดด้านทุติยภูมิ

= 260 พิโกฟารัด

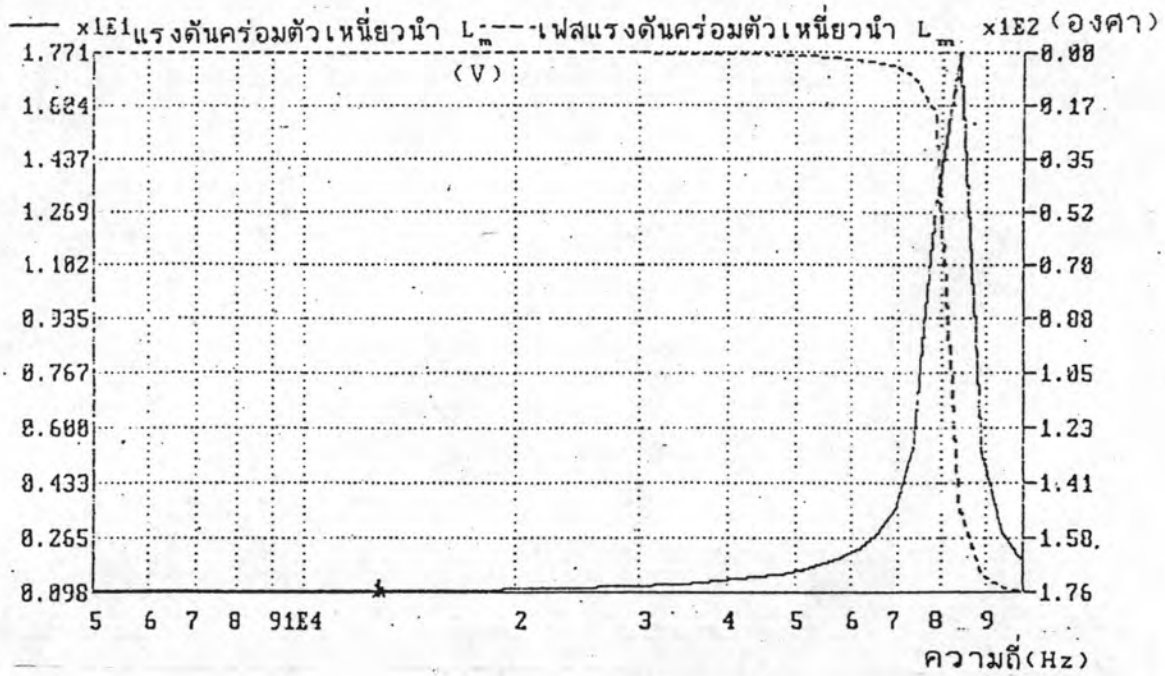
จากการทดลอง กรณีปรับผิวฟิล์มพลาสติกสองด้าน ใช้อิเล็กโทรด 4 อัน ความยาว 540 มิลลิเมตร ใช้กำลังไฟฟ้าในการปรับผิว 230 วัตต์ และกรณีปรับผิวฟิล์มพลาสติกด้านเดียว ใช้อิเล็กโทรด 2 อัน ความยาว 280 มิลลิเมตร ใช้กำลังไฟฟ้าในการปรับผิว 150 วัตต์ ซึ่งกระแสและแรงดันด้านปฐมภูมิทับเฟสกัน

ฉะนั้น

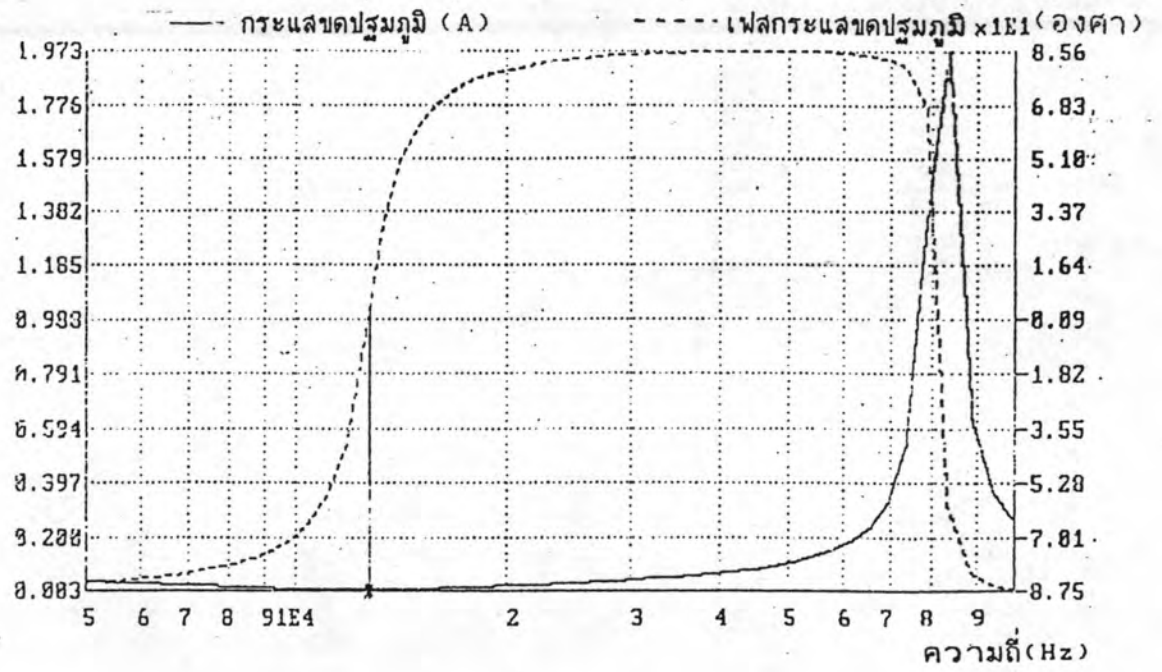
ตัวความต้านทาน R_T สูงสุด = 326 โอห์ม

ตัวความต้านทาน R_T ต่ำสุด = 210 โอห์ม

นำค่าพารามิเตอร์ที่หาได้ ไปใช้ในการซีมูเลตเพื่อหาการตอบสนองต่อความถี่ของแรงดันและกระแส ซึ่งจะนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ ปรับ และหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้เหมาะสม เพื่อให้การทำงานของอินเวอร์เตอร์เป็นไปตามเป้าหมายที่กำหนดไว้คือ 10 กิโลเฮิรตซ์ขึ้นไป ผลของการซีมูเลตได้ดังรูปที่ 47 และ 48 ในกรณีปรับผิวฟิล์มพลาสติกด้านเดียวและสองด้านตามลำดับ



ก.

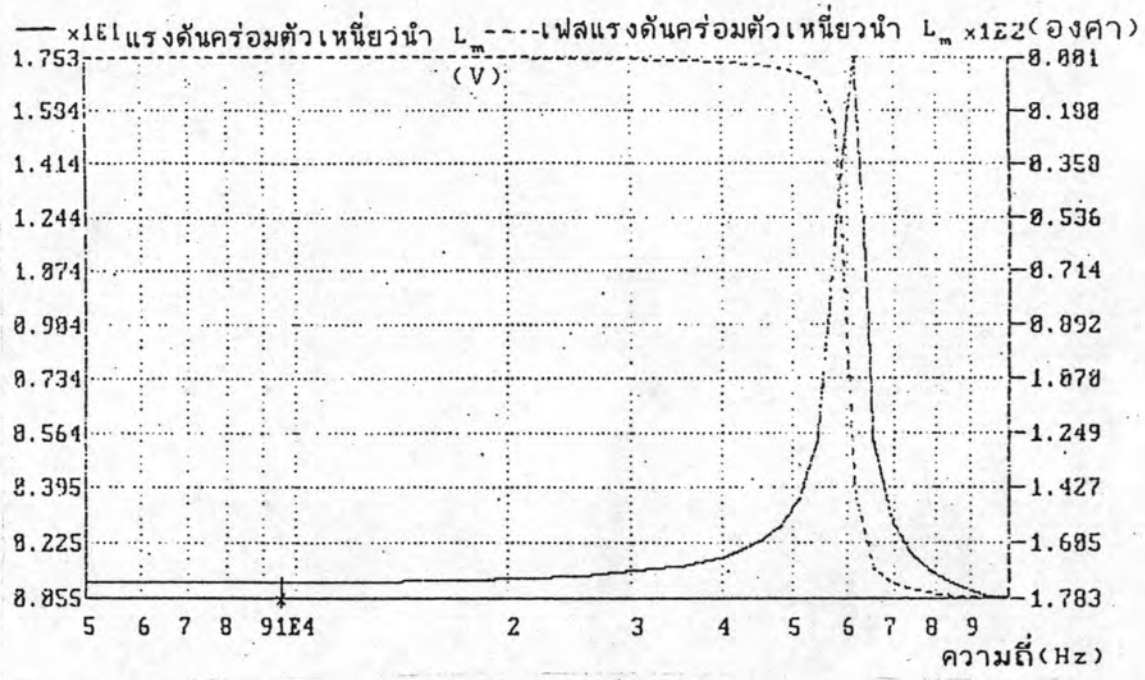


ข.

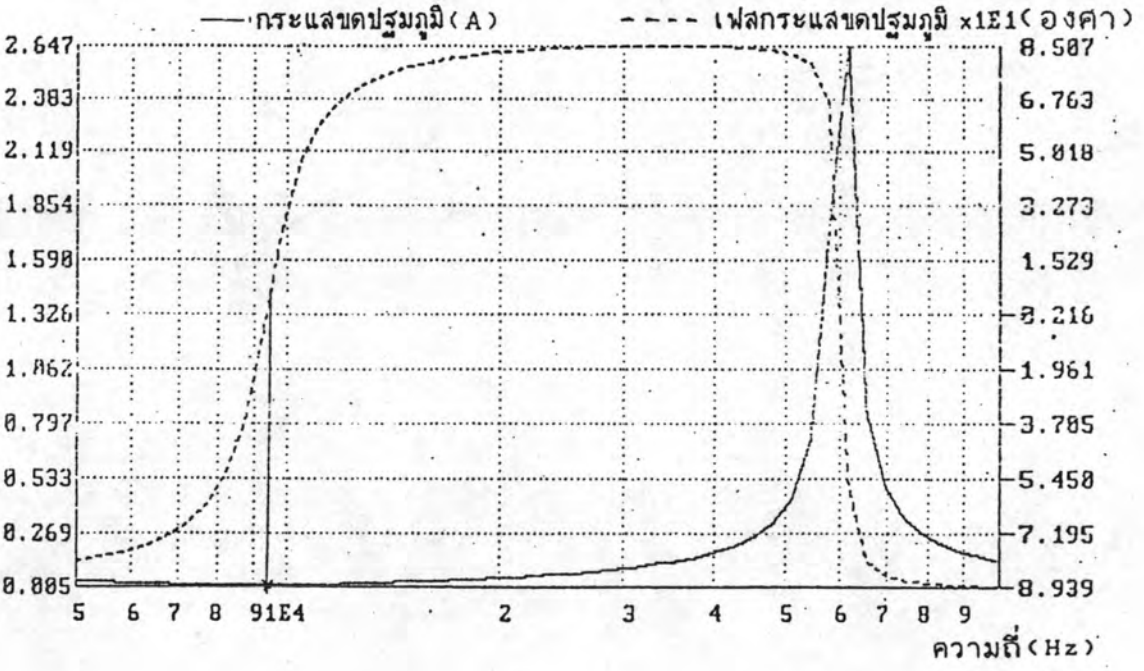
รูปที่ 47

การตอบสนองต่อความถี่ของวงจรรูปที่ 46 กรณีปรับผิวฟิล์มพลาสติกด้านเดียว

(แรงดันด้านเข้า = 1 V)



ก.



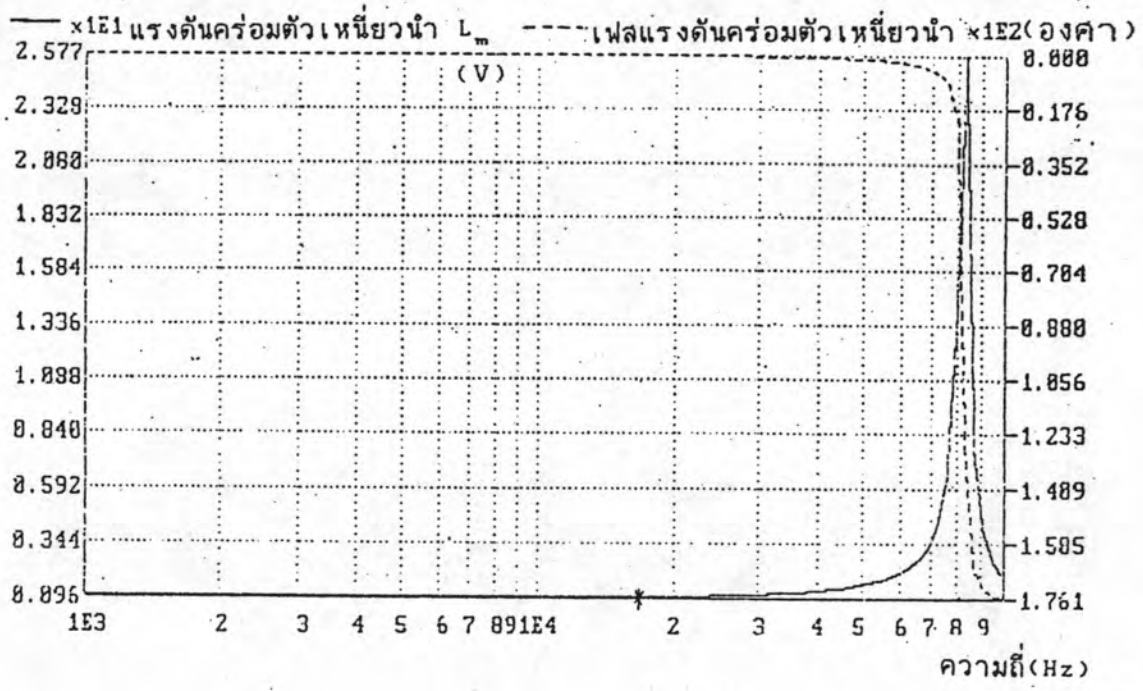
ข.

รูปที่ 48

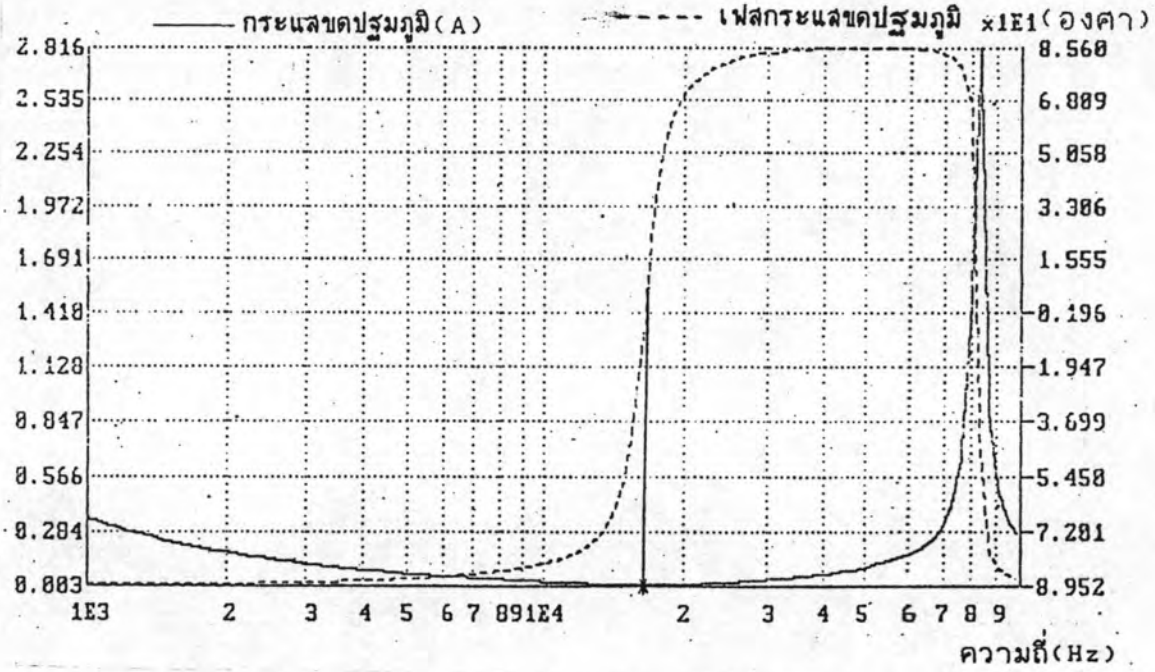
การตอบสนองต่อความถี่ของวงจรรูปที่ 46 กรณีปรับผิวฟิล์มพลาสติกสองด้าน

(แรงดันด้านเข้า = 1 V)

จากรูปที่ 47 และ 48 พบว่า จุดที่ให้วงจรอินเวอร์เตอร์ ทำงานเกิดความเหมาะสม เป็นจุดที่ทำให้เกิดกระแสล้าหลังแรงดัน ซึ่งอยู่ใกล้กับความถี่ที่เกิดกระแสต่ำสุด เพราะว่าจุดนี้จะทำให้เกิดพลังงานสูงสุดเป็นไปตามตัวภาระ โดยผลของการซีมูเลตได้ความถี่ประมาณ 9 กิโลเฮิรตซ์ขึ้นไป แต่ความถี่ที่ได้มีค่าต่ำกว่าที่ต้องการ ฉะนั้นจำเป็นต้องปรับค่าของตัวเหนี่ยวนำ L_m ให้ลดลง (พิจารณาสมการ 3.11) เพื่อให้ความถี่สูงขึ้น นั่นคือ ถ้าต้องการความถี่ต่ำสุดในกรณีปรับผิวฟิล์มพลาสติกสองด้านเป็น 12 กิโลเฮิรตซ์ จากสมการที่ 3.14 ได้ว่า ตัวเหนี่ยวนำ L_m มีค่าประมาณ 430 ไมโครเฮนรี และนำค่าตัวเหนี่ยวนำ L_m ที่ได้ไปแทนค่าเดิม แล้วทำการซีมูเลตใหม่ ได้ผลการตอบสนองดังรูปที่ 49 และ 50 ในกรณีปรับผิวฟิล์มพลาสติกด้านเดียว และสองด้านตามลำดับ ซึ่งได้ความถี่ตามต้องการ



ก.

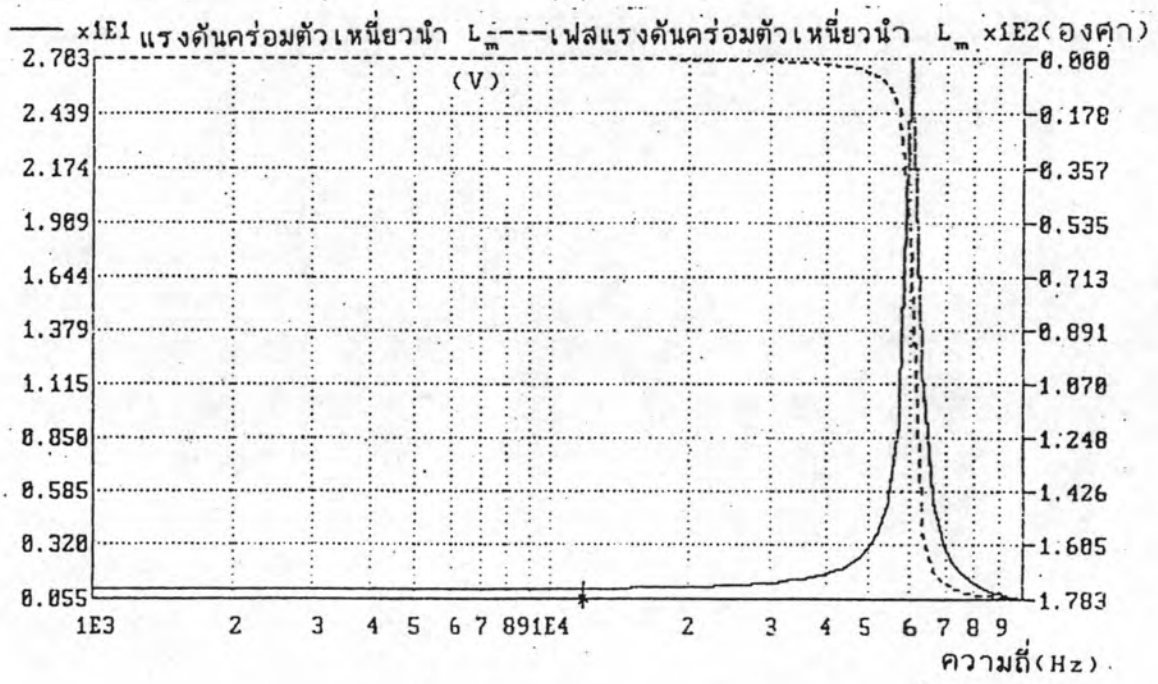


ข.

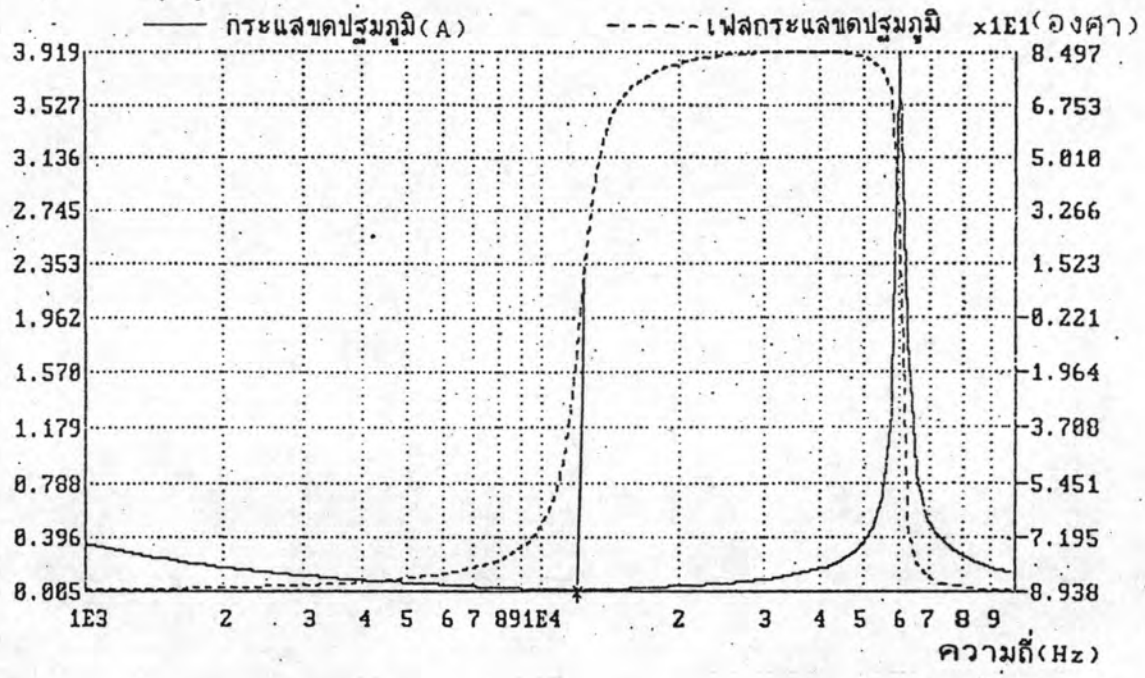
รูปที่ 49

การตอบสนองต่อความถี่ของวงจรในรูปที่ 46 กรณี L_m = 430 μH

เมื่อปรับผิวฟิล์มพลาสติกด้านเดียว (แรงดันด้านเข้า = 1 V)



ก.



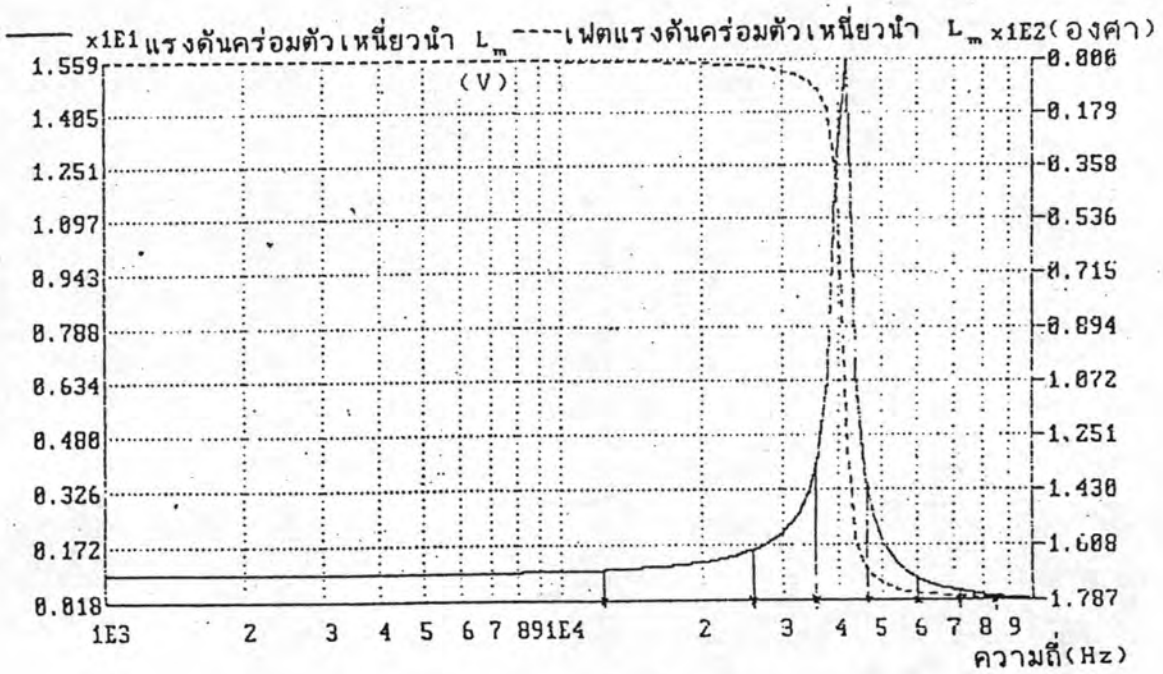
ข.

รูปที่ 50

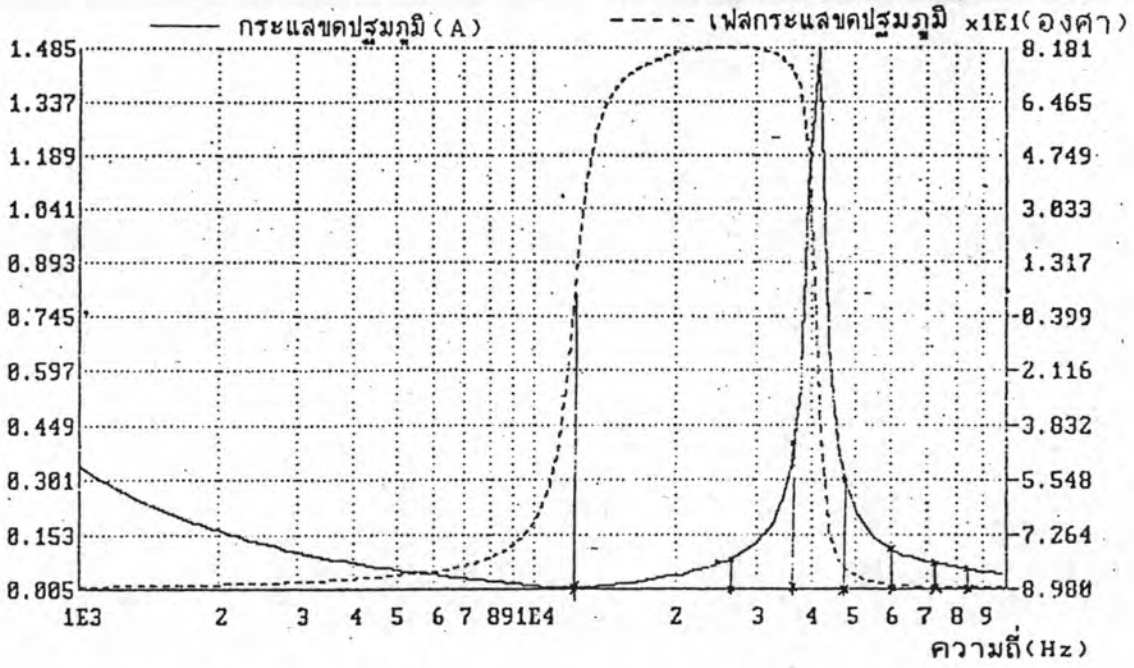
การตอบสนองต่อความถี่ของวงจรในรูปที่ 46 กรณี L_m = 430 μH
เมื่อปรับผิวฟิล์มพลาสติกสองด้าน (แรงดันด้านเข้า = 1 V)

เมื่อนำหม้อแปลงความถี่สูง มาปรับช่องว่างแกนหม้อแปลงเพื่อให้ค่าตัวเหนี่ยวนำ L_m มีค่าเป็น 430 ไมโครเฮนรีแล้ว ต้องหาค่าของตัวเหนี่ยวนำ L ใหม่ เพราะการปรับช่องว่างแกนหม้อแปลงจะเกิดผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเหนี่ยวนำ L ซึ่งในการหาค่าก็ใช้วิธีตามที่กล่าวมาแล้ว และหาค่าได้เป็น 42 ไมโครเฮนรี

นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปซีมูเลต โดยใช้วงจรเดิมในรูปที่ 46 ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 51 ก. และ ข. เป็นกรณีปรับผิวฟิล์มพลาสติกสองด้าน



ก.



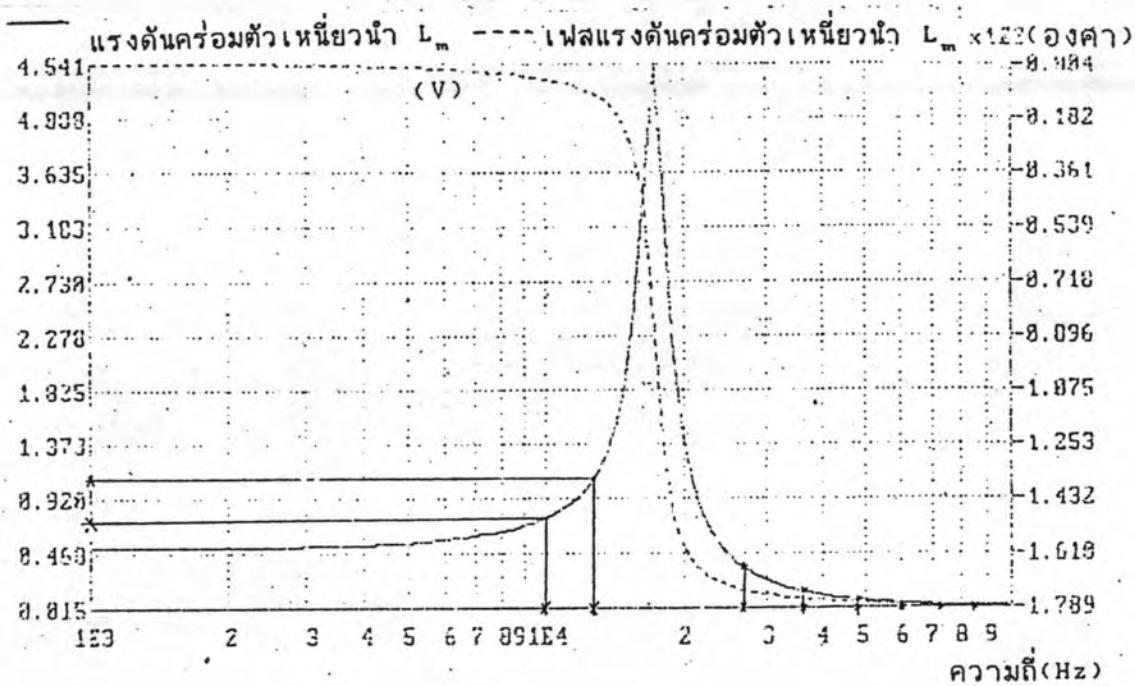
ข.

รูปที่ 51

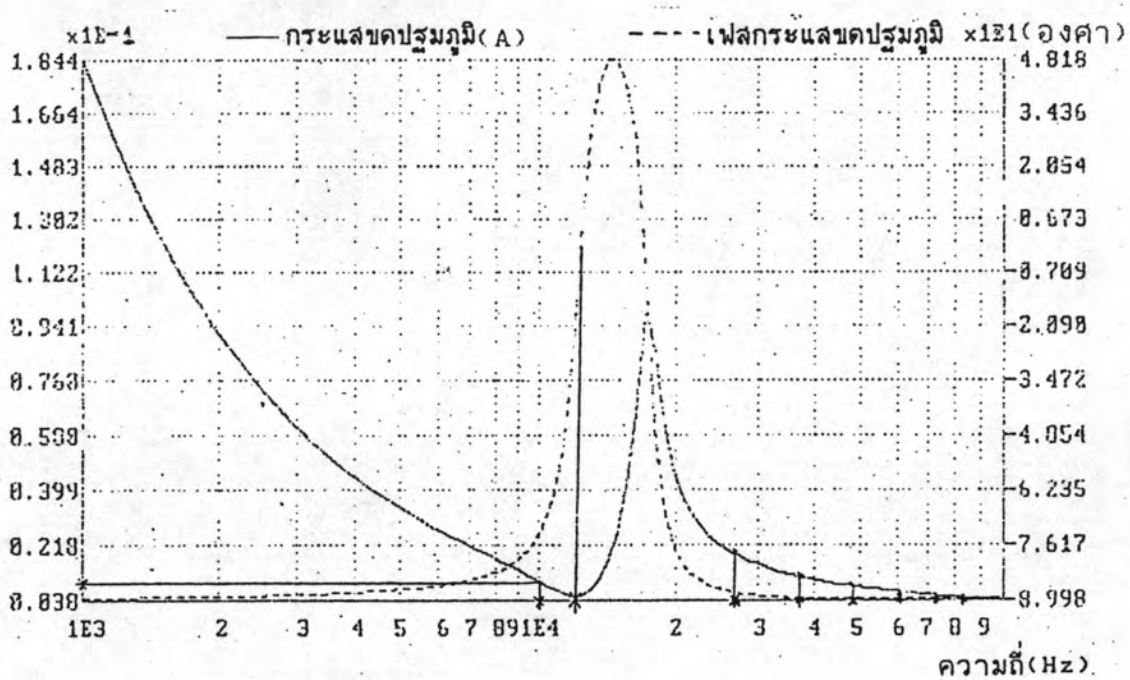
การตอบสนองต่อความถี่ เมื่อ L_m = 430 μH และ L = 42 μH

กรณีปรับผิวฟิล์มพลาสติกสองด้าน (แรงดันด้านเข้า = 1 V)

พิจารณาผลการซีมูเลตในรูปที่ 51 ก. และ ข. พบว่า การตอบสนองต่อความถี่ของวงจรที่ทำให้เกิดกระแสและแรงดัน ที่ความถี่ประมาณ 10 ถึง 15 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นช่วงที่กำหนดให้วงจรอินเวอร์เตอร์ทำงานนั้น ปรากฏว่าแรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_m และกระแสปฐมภูมิ ประกอบด้วยฮาร์มอนิกต่าง ๆ มากมายและมีขนาดสูงมาก เช่น ฮาร์โมนิกที่ 3 มีขนาดสูงประมาณ 5 ถึง 10 เท่าขององค์ประกอบหลักมูล ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องกำจัดฮาร์มอนิกต่าง ๆ นี้ให้ลดลง โดยเพิ่มวงจรกรองให้ทำหน้าที่กรองแรงดันที่ได้จากวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งผลจากการซีมูเลตพบว่า วงจรกรองนี้ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ 1 ตัว มีค่าโดยประมาณรวมกับตัวเหนี่ยวนำ L เท่ากับ 430 ไมโครเฮนรี ผลของการซีมูเลตเป็นดังรูปที่ 52 ก. และ ข.



ก.



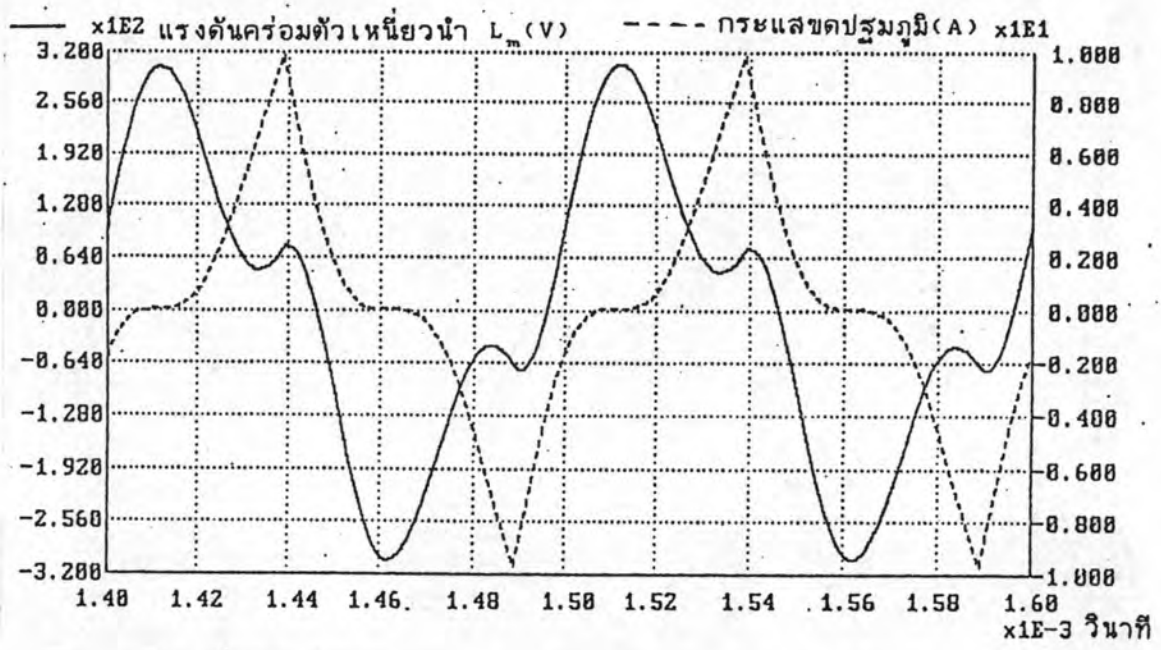
ข.

รูปที่ 52

การตอบสนองต่อความถี่ เมื่อ L_m = 430 μH และ L = 430 μH

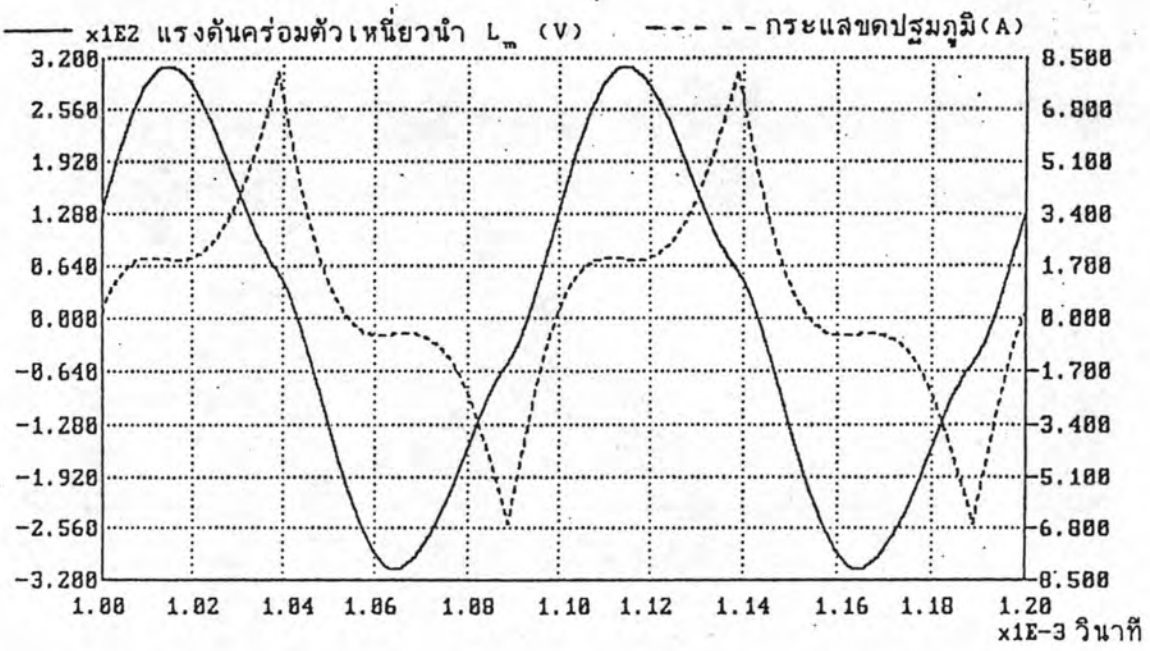
กรณีปรับผิลฟิล์มพลาสติกสองด้าน (แรงดันด้านเข้า = 1 V)

นำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว ไปซีมูเลตหารูปคลื่นของกระแสปฐมภูมิ และของแรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_m การซีมูเลตทำได้โดยป้อนสัญญาณแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมแทนรูปคลื่นไซน์ที่ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ ผลของการซีมูเลตเป็นดังรูปที่ 53 ถึง 56



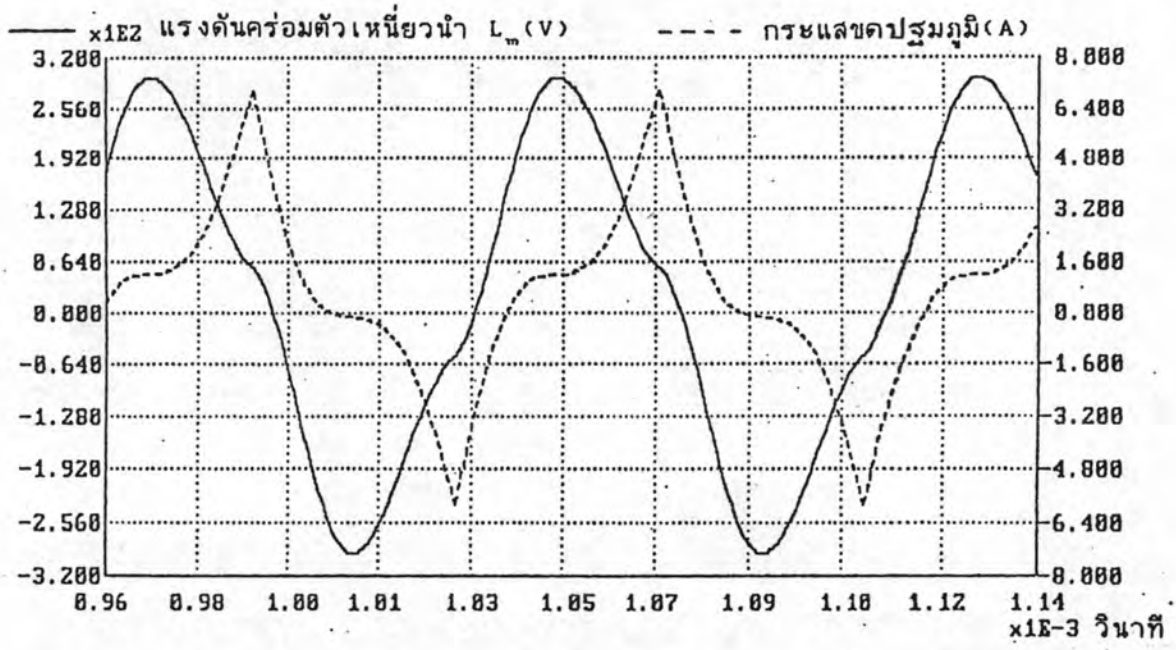
รูปที่ 53

รูปคลื่นแรงดันและกระแส กรณีปรับผิวด้านเดียวที่ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์



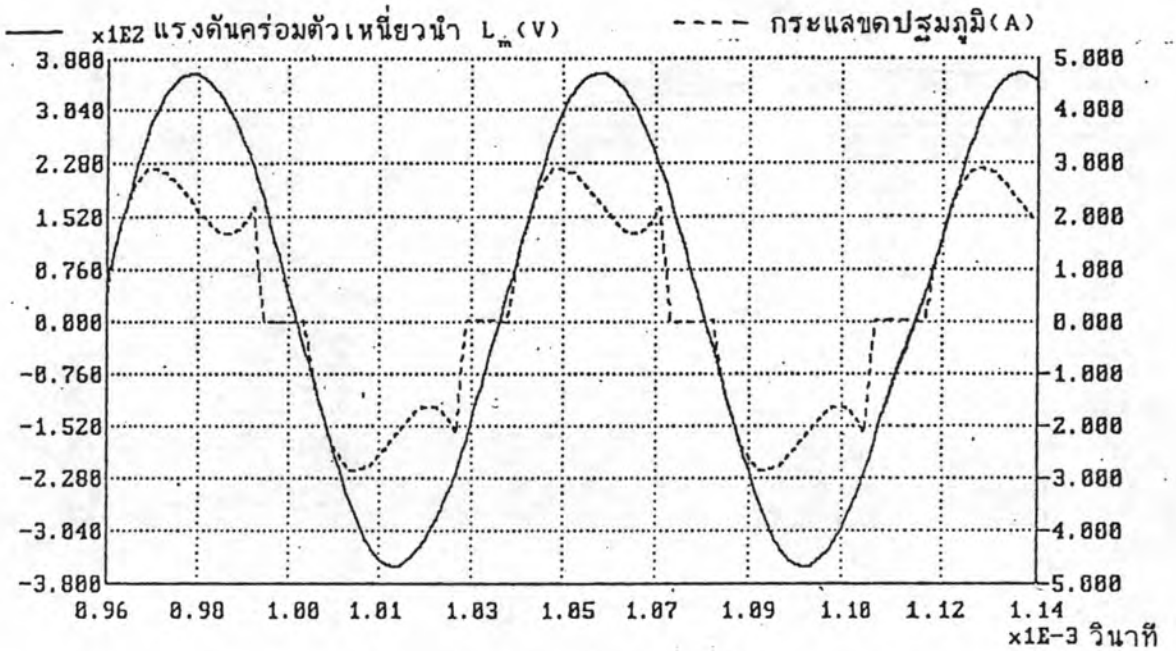
รูปที่ 54

รูปคลื่นแรงดันและกระแส กรณีปรับผิวสองด้านที่ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์



รูปที่ 55

รูปคลื่นแรงดันและกระแส กรณีปรับผิวด้านเดียวที่ความถี่ 14 กิโลเฮิรตซ์



รูปที่ 56

รูปคลื่นแรงดันและกระแส กรณีปรับผิวสองด้านที่ความถี่ 14 กิโลเฮิรตซ์

1.3 <u>วงจรกรอง</u> จากผลของการซีมูเลตในรูปที่ 53 ถึง 56 พบว่า กรณีตัวเหนี่ยวนำ L เท่ากับ 430 ไมโครเฮนรี ค่ายอดของกระแสจะไม่เกิน 10 แอมป์ ซึ่งพอจะยอมรับได้ ตัวเหนี่ยวนำที่เป็นวงจรกรองนี้ ใช้ตัวเหนี่ยวนำชนิดแกนอากาศ ซึ่งไม่มีการสูญเสียเนื่องจากแกนของตัวเหนี่ยวนำ แต่มีการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานของลวดตัวนำ ตัวเหนี่ยวนำมีค่าต่ำเท่ากับ 388 ไมโครเฮนรี จึงสามารถทำการพันได้โดยที่มีขนาดไม่ใหญ่นัก

ในการพัน ใช้ลวดตัวนำเบอร์ 26 จำนวน 12 เส้น รวมเป็นเส้นเดียวแล้วพันเป็นตัวเหนี่ยวนำ เพื่อลดการสูญเสียในตัวนำที่เกิดขึ้นเนื่องจากปรากฏการณ์ผิว สำหรับแกนอากาศใช้เส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวขนาด 4 และ 5 เซนติเมตร ตามลำดับ จำนวนรอบที่พันตัวเหนี่ยวนำหาได้จากสมการ (3.15)

$$\text{จำนวนรอบ } N = \sqrt{L(9a+10l)}/0.4a^2 \qquad (3.15)$$

โดยที่

N	จำนวนรอบที่พันตัวเหนี่ยวนำ	รอบ
L	ค่าตัวเหนี่ยวนำที่พัน	ไมโครเฮนรี
a	รัศมีของแกนอากาศ	เซนติเมตร
l	ความยาวของแกนอากาศ	เซนติเมตร

นั่นคือ

$$N = \sqrt{388(9x2+10x5)}/0.4x4$$

จำนวนรอบที่พันตัวเหนี่ยวนำ = 128 รอบ

1.4 <u>วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ</u>

วงจรนี้มีชื่อเรียกทั่วไปว่าวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับชนิด 1 เฟส โครงสร้างของวงจรอินเวอร์เตอร์ทั่วไปแบ่ง 3 แบบ คือ วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ตัวเดียว วงจรอินเวอร์เตอร์

แบบสวิตช์ 2 ตัว และวงจรอินเวอร์แบบสวิตช์ 4 ตัว ซึ่งการนำไปใช้งานขึ้นอยู่กับเงื่อนไขและความเหมาะสมของระบบ ในกรณีนี้ใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ 4 ตัว มีโครงสร้างดังรูปที่ 27 และมีเฟตเป็นสวิตช์

1.4.1 สาเหตุที่เลือกใช้วงจรอินเวอร์แบบสวิตช์ 4 ตัว เนื่องจาก โครงสร้างของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบนี้ทำให้เกิดผลดีต่อระบบ ที่สำคัญ ๆ ได้แก่

1.4.1.1 มีผลทำให้โครงสร้าง และการควบคุมระบบไม่ยุ่งยาก มีองค์ประกอบน้อย เหมาะสำหรับสร้างแหล่งกำเนิดแรงดันสูงที่ความถี่สูงไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม

1.4.1.2 ค่ายอดของแรงดันด้านออก ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบนี้เท่ากับแรงดันไฟตรงด้านเข้า คือ ประมาณ 310 โวลต์ ซึ่งสูงกว่าอินเวอร์เตอร์แบบอื่น ๆ มีผลทำให้แรงดันต่อจำนวนรอบและจำนวนรอบขดลวดของหม้อแปลงความถี่สูงมีค่าต่ำลง

1.4.1.3 กระแสผ่านสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ต่ำ ทำให้สามารถออกแบบสวิตช์เผื่อไว้ในกรณีต้องการขยายขอบเขตการใช้งาน ให้มีขนาดความกว้างของฟิล์มพลาสติกมากกว่าที่กำหนดไว้ โดยปรับค่าพารามิเตอร์ของระบบเท่านั้น

1.4.2 สาเหตุที่เลือกใช้สวิตช์เฟต ที่สำคัญมีดังนี้

1.4.2.1 การขับสวิตช์เฟตให้ทำงาน จะง่ายกว่าการขับสวิตช์ที่เป็นทรานซิสเตอร์ BJT

1.4.2.2 เฟตสามารถทำงานที่ความถี่สูงกว่าทรานซิสเตอร์ BJT

1.4.2.3 มีความเร็วการสวิตช์สูง ทำให้สามารถลดเวลาสงบ (dead time) ที่ใช้ป้องกันการลัดวงจรไฟฟ้าผ่านสวิตช์ในกิ่งเดียวกัน

1.4.3 การหาขนาดของสวิตช์

1.4.3.1 แรงดันสูงสุดที่สวิตช์ ของวงจรอินเวอร์เตอร์ได้รับ มีค่าเป็น 310 โวลต์ ในกรณีแรงดันจากระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า

เป็น 220 โวลต์ และสามารถหาขนาดแรงดันของสวิตช์ได้โดยใช้สมการ(3.16)

ขนาดแรงดันของสวิตช์เฟต = แรงดันสูงสุด x ค่าเผื่อความปลอดภัย (3.16)

นั้นคือ

ขนาดแรงดันของสวิตช์เฟต = 310 x 1.3

= 443 โวลต์

กรณีใช้ค่าเผื่อความปลอดภัย 1.3

1.4.3.2 ในการหาขนาดกระแสของสวิตช์เฟต จะอาศัย ผลของการซีมูเลตในกรณีปรับผิวฟิล์มพลาสติก ที่ทำให้เกิดกระแสสูงสุด (กรณีปรับผิวฟิล์มพลาสติกด้านเดียว มีขนาดความกว้าง 280 มิลลิเมตร เพราะเนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับค่ากระแสสูงสุดของสวิตช์มีค่าไม่สัมพันธ์กัน และเมื่อใช้การควบคุมแบบวงรอบเปิด) ซึ่งผลของการซีมูเลตเป็นดังรูปที่ 57 โดยค่าตัวเหนี่ยวนำ L 430 ไมโครเฮนรี ตัวเหนี่ยวนำ L_m 430 ไมโครเฮนรี ตัวความต้านทาน R_T 326 โอห์ม และ ตัวเก็บประจุ C_T 180 นาโนฟารัด(ค่าโดยประมาณเผื่อผลของความเร็วการเคลื่อนที่ฟิล์มพลาสติก) และใช้สมการ (3.17)

จากรูปที่ 57 กระแสสูงสุดที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L มีค่าเป็น 10 แอมป์ ซึ่งเป็นกระแสสูงสุดของสวิตช์เฟตด้วย

ขนาดกระแสของสวิตช์เฟต = (กระแสสูงสุดที่ไหลผ่าน / 2) x ค่าเผื่อความปลอดภัย (3.17)

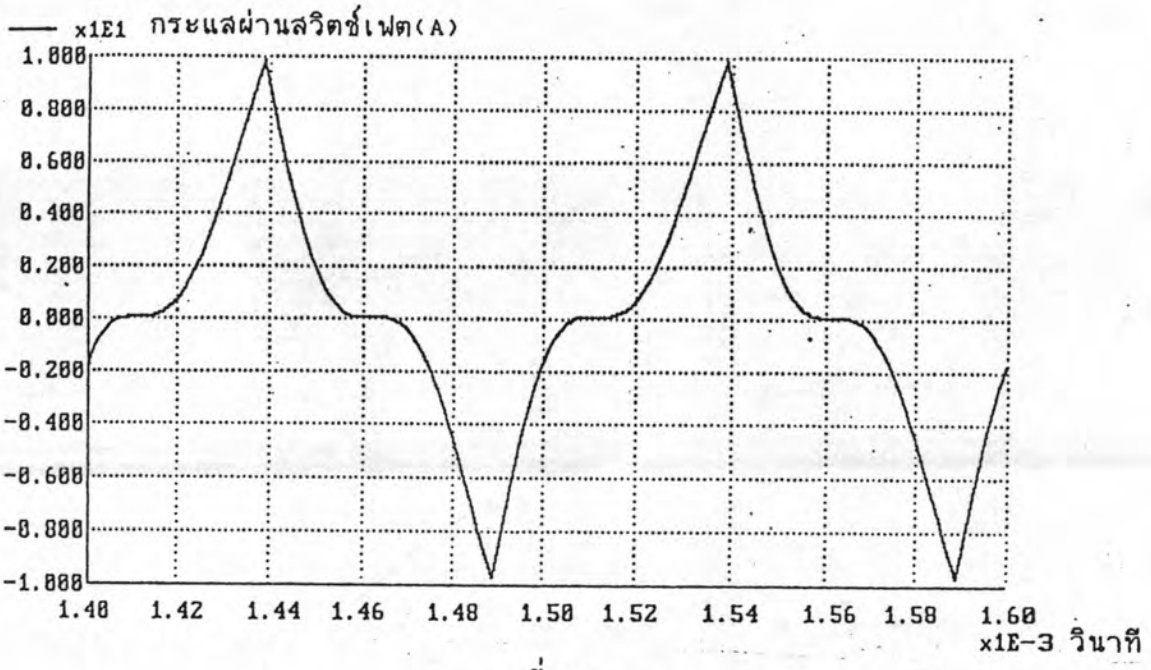
นั้นคือ

ขนาดกระแสของสวิตช์เฟต = 5x1.5

= 7.5 แอมป์

กรณีใช้ค่าเผื่อความปลอดภัย 1.5

ฉะนั้น ขนาดของสวิตช์เฟตที่จะนำมาใช้ต้องมีขนาดเป็น 443 โวลต์ 7.5 แอมป์ หรือสูงกว่า พร้อมไดโอด



รูปที่ 57

รูปคลื่นกระแสที่ได้จากการซีมูเลตเพื่อหาขนาดของสวิตช์เฟต

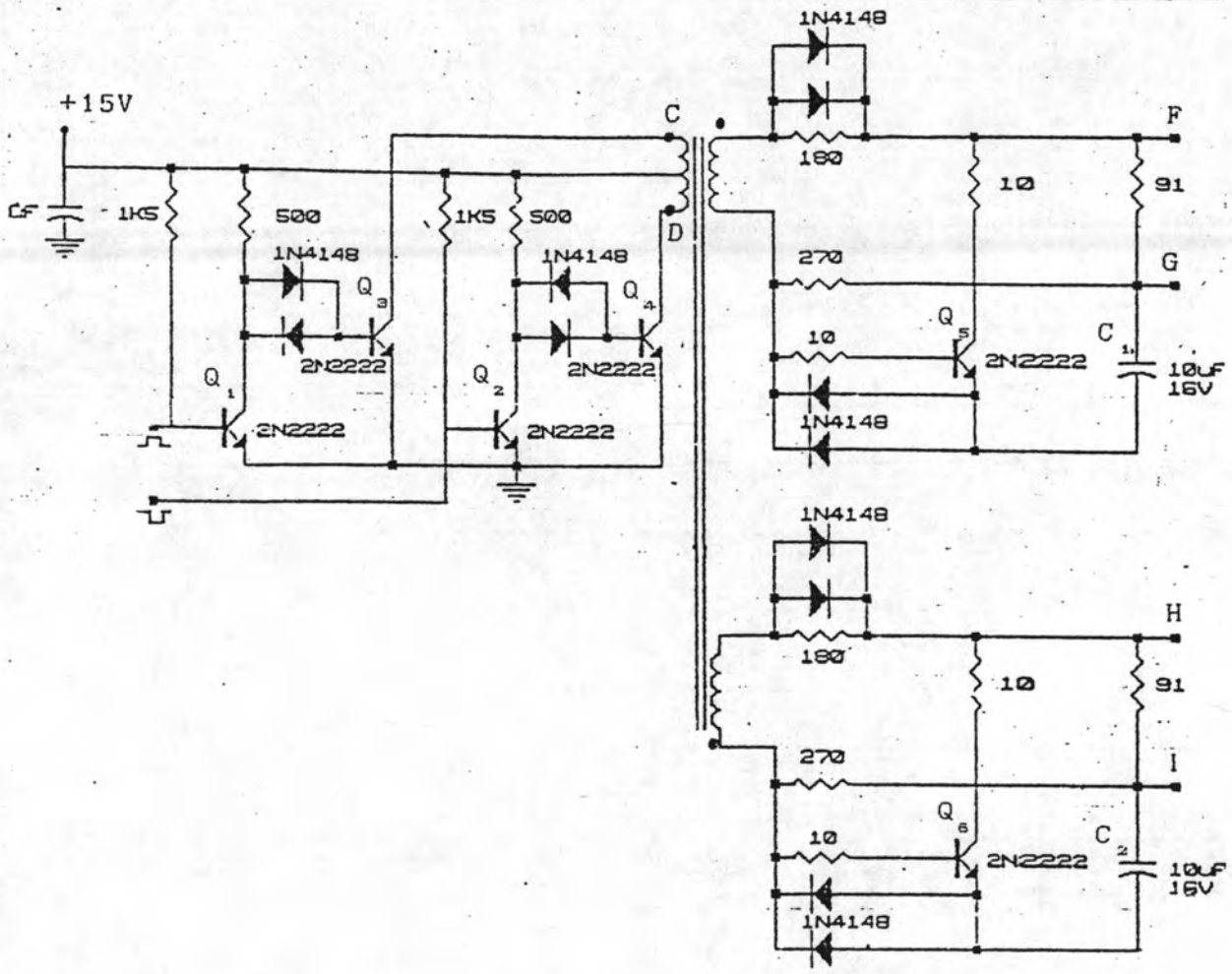
2. <u>การควบคุม</u>

ในการออกแบบแหล่งกำเนิดแรงดันสูงที่ความถี่สูง เพื่อสร้างใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมนั้น ได้ออกแบบระบบการควบคุมไว้ 2 แบบ คือ การควบคุมแบบวงรอบเปิด และการควบคุมแบบวงรอบปิด เพื่อเลือกใช้ตามความสำคัญและเหมาะสมของงาน

2.1 <u>การควบคุมแบบวงรอบเปิด</u> ออกแบบไว้เพื่อใช้ในกรณีที่ระบบการปรับผิวฟิล์มพลาสติกมีความแน่นอนตายตัวหรือมีการเปลี่ยนแปลงบ้าง แต่ไม่บ่อยครั้ง (ซึ่งการเริ่มต้นกระบวนการปรับผิวฟิล์มพลาสติกแต่ละครั้ง จะต้องมีการตั้งค่าแรงดันด้านออกของแหล่งกำเนิดแรงดันสูงที่ความถี่สูง ให้ตรงตามต้อง

การก่อนเสมอ) และ ความเร็วการเคลื่อนที่ฟิล์มพลาสติก ความหนา และความกว้างของฟิล์มพลาสติกก็มีค่าคงที่ แรงดันไฟฟ้าด้านออกที่ใช้ในการเกิดประจุไฟฟ้าโคโรนาก็จะคงที่ด้วยเช่นกัน จึงไม่จำเป็นต้องใช้การควบคุมแบบวงรอบปิด ส่วนองค์ประกอบของการควบคุมแบบนี้สามารถแบ่งย่อยออกเป็นดังนี้คือ

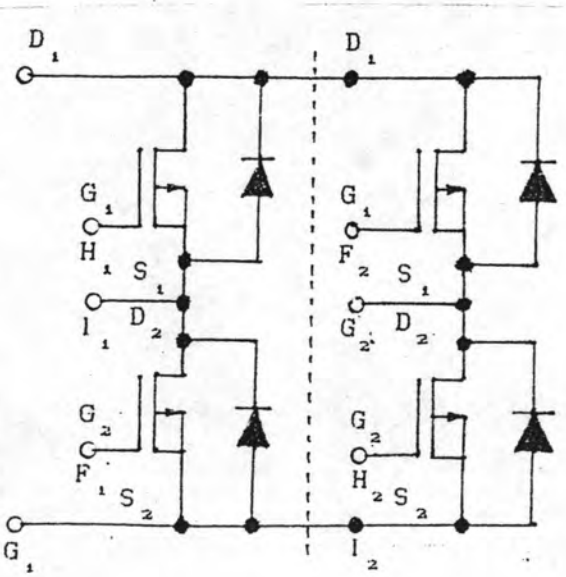
2.1.1 วงจรขับสวิตช์ วงจรนี้ทำหน้าที่ขยายสัญญาณแรงดันที่ได้รับจากวงจรกำเนิดสัญญาณ ให้มีขนาดที่เหมาะสมกับการขับนำเกตของเฟต คือ ประมาณ 15 โวลต์ สวิตช์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ จะทำงานเป็นคู่ ๆ



รูปที่ 58
วงจรขับสวิตช์

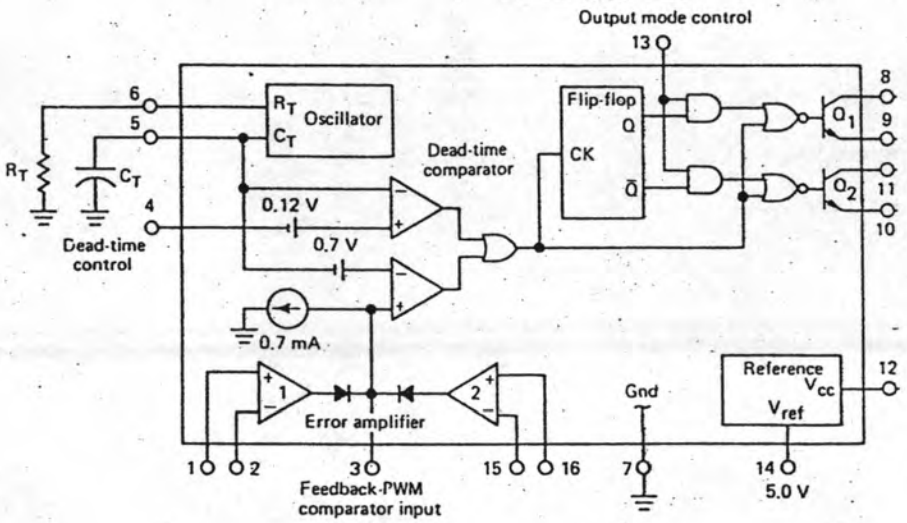
ในกิ่งตรงข้าม ฉะนั้นวงจรขับสวิตช์จึงต้องมีการแยกโดดทางไฟฟ้า และมีจำนวน 2 ชุด ในการออกแบบวงจร การแยกโดดทางไฟฟ้าใช้หม้อแปลง และมีการทำงานของวงจรเป็นแบบดึงดัน ดังแสดงในรูปที่ 58

จากรูปที่ 58 ขั้ว A และขั้ว B รับสัญญาณ A และ B ตามลำดับ มาจากวงจรกำเนิดสัญญาณเพื่อควบคุมให้วงจรอินเวอร์เตอร์ทำงานตามต้องการ สัญญาณทั้งสองมีลักษณะคู่ประกอบ(COMPLEMENTARY)โดยมีช่วงเวลาหยุด(DEAD TIME)เพื่อลดโอกาสที่สวิตช์เฟตของวงจรอินเวอร์เตอร์ในกิ่งเดียวกันจะทำงานพร้อมกัน สัญญาณ A จะบังคับให้ทรานซิเตอร์ Q_1 กับ Q_3 ทำงาน และสัญญาณ B บังคับให้ทรานซิเตอร์ Q_2 กับ Q_4 ทำงาน ทำให้เกิดสัญญาณแรงดันรูปคลื่นเกือบสี่เหลี่ยม(QUASI SQUARE) ขึ้นระหว่างขั้ว C กับ D ของหม้อแปลง และได้สัญญาณแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ระหว่างขั้ว F กับ G และขั้ว H กับ I โดยมีลักษณะตรงข้ามกัน สัญญาณนี้มีขนาดแรงดันด้านบวก 15 โวลต์ และด้านลบ 5 โวลต์ สำหรับการต่อวงจรขับสวิตช์เข้ากับวงจรอินเวอร์เตอร์นั้นแสดงดังรูปที่ 59 โดยที่ขั้ว F_1 G_1 I_1 และH_1 และF_2 G_2 I_2 และH_2 เป็นขั้วของวงจรขับสวิตช์(รูปที่ 58)ชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 59
การต่อวงจรขับสวิตช์กับสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์

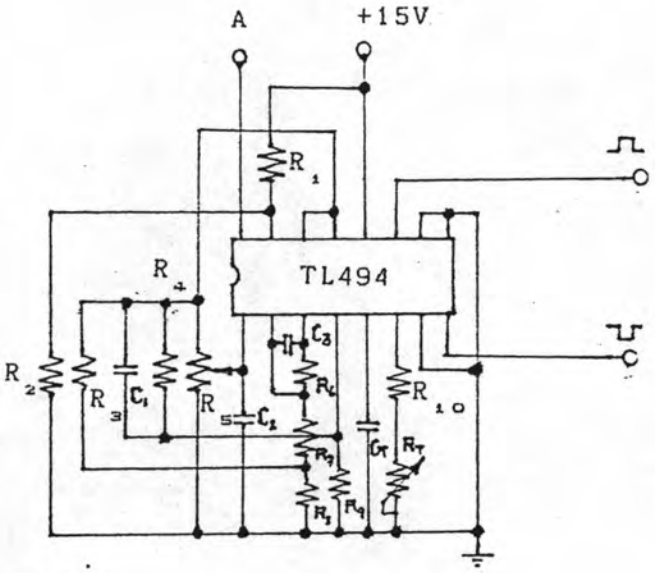
2.1.2 วงจรกำเนิดสัญญาณ ในการกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ในช่วงความถี่ 10 - 15 กิโลเฮิรตซ์เพื่อใช้ในการควบคุมสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์นั้นจะใช้ไอซีหมายเลข TL494 ซึ่งนิยมใช้อยู่ทั่วไป ไอซีนี้กำเนิดสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม มีวัฏจักรการทำงาน(DUTY CYCLE) 50 เปอร์เซ็นต์ สองสัญญาณในลักษณะคู่ประกอบ แผนภาพบล็อกของวงจรไอซีหมายเลข TL494 และการต่อไอซีเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณแสดงดังในรูปที่ 60 และ 61 ตามลำดับ



รูปที่ 60
แผนภาพบล็อกวงจรไอซีหมายเลข TL494

จากรูปที่ 60 และ 61 ตัวความต้านทาน R_T และตัวเก็บประจุ C_T ที่ต่อกับขา 6 และ 5 ของไอซีหมายเลขTL494 ตามลำดับ เป็นตัวกำหนดความถี่ของสัญญาณสี่เหลี่ยมที่ต้องการ ซึ่งปรากฏที่ขา 8 และขา 11 โดยความถี่ของสัญญาณนี้หาได้โดยใช้สมการ (3.18)

$$f = 1.1/R_T C_T \qquad (3.18)$$

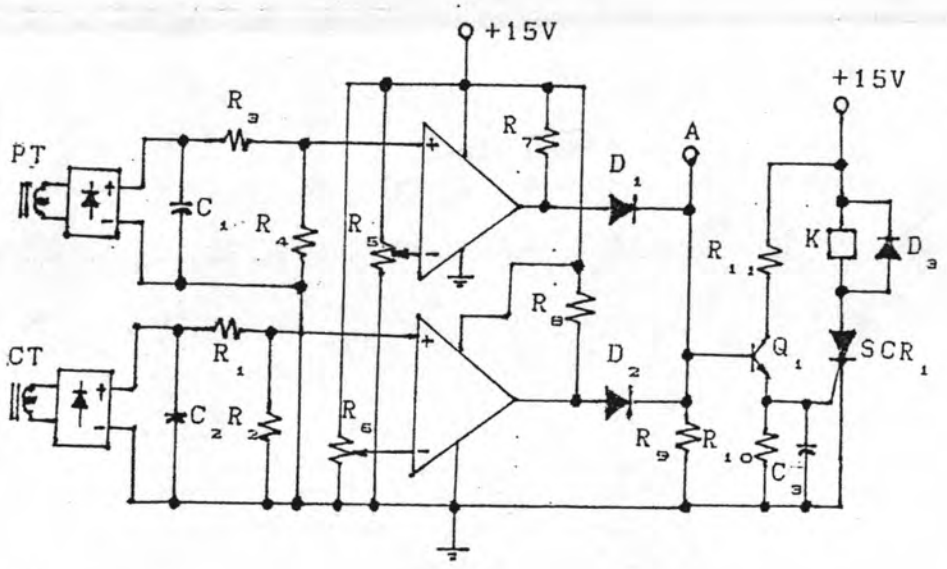


รูปที่ 61
วงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมที่ใช้ในการควบคุมแบบวงจรรอบเปิด

เราต้องการความถี่ของสัญญาณอยู่ในช่วง10-15 กิโลเฮิรตซ์ เราเลือกค่าตัวเก็บประจุ C_T = 0.015 ไมโครฟารัด จากสมการ 3.18 ความต้านทาน R_T ที่ใช้ต้องปรับค่าได้อยู่ในช่วง 4.9 - 7.3 กิโลโอห์ม เมื่อตัวความต้านทาน R_T มีค่าเป็น 7.3 กิโลโอห์ม ความถี่ของสัญญาณที่ได้จะเป็น 10 กิโลเฮิรตซ์ เมื่อตัวความต้านทาน R_T มีค่าเป็น 4.9 กิโลโอห์ม ความถี่ของสัญญาณที่ได้จะเป็น 15 กิโลเฮิรตซ์

ไอซีหมายเลข TL494 มีวงจรขยายความคลาดเคลื่อน 2 ชุด(ดูรูปที่ 60) โดยปกติเมื่อใช้ไอซีนี้สำหรับกำเนิดสัญญาณ PWM ของแหล่งจ่ายไฟตรงแบบสวิตชิง วงจรขยายทั้งสองจะใช้ในการป้อนกลับเพื่อคงค่าแรงดันวงจรหนึ่ง อีกวงจรหนึ่งใช้สำหรับการจำกัดกระแสเพื่อป้องกันกระแสเกินในที่นี้ ที่ขา 4 ของไอซีหมายเลข TL494 เป็นขาที่ใช้ในการควบคุมช่วงเวลาหยุด(DEAD TIME) เพื่อป้องกันการทำงานพร้อมกันของสวิตช์ในกิ่งเดียวกันของวงจรอินเวอร์เตอร์ ช่วงเวลาดังกล่าวมีค่าประมาณ 10 ไมโครวินาที

2.1.3 วงจรป้องกันระบบ วงจรป้องกันระบบประกอบด้วย การป้องกันกระแสเกิน และแรงดันเกิน การป้องกันกระแสเกินเป็นการจำกัดกระแสไม่ให้มีค่ามากเกินกว่า ที่สวิตช์เฟตของวงจรอินเวอร์เตอร์จะรับได้ เนื่องจากในการปรับผิวฟิล์มพลาสติก เมื่อตัวภาระมีค่าประจุต่ำ ค่ายอดของกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์จะมีค่าสูง สำหรับการป้องกันแรงดันเกินนั้นเป็นการป้องกันไม่ให้ระบบทำงานในย่านสูงกว่าจุดเรโซแนนซ์ ซึ่งเกิดสถานะกระแสไหลนำหน้าแรงดัน ส่วนในกรณีเกิดเหตุการณ์แรงดันของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้ามีขนาดสูงกว่าปกตินั้น ไม่มีความจำเป็นต้องมีการป้องกัน เนื่องจากเหตุการณ์นี้จะเกิดแรงดันสูงมากที่สุดประมาณ 240 โวลต์ ซึ่งทำให้ขนาดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์มีประมาณ 340 โวลต์ สวิตช์เฟตของวงจรนั้นสามารถทนได้ วงจรป้องกันระบบแสดงดันรูปที่ 62



รูปที่ 62
วงจรป้องกันระบบในการควบคุมแบบวงรอบเปิด

ในการวัด แรงดันด้านขดปฐมภูมิ ของหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่สูงนั้นใช้ขดลวดเพียงรอบเดียวพันรอบแกนของหม้อแปลง ซึ่ง

ให้ค่ายอดของแรงดันประมาณ 15 โวลต์ เมื่อแรงดันด้านขดปฐมภูมิของหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่สูงมีค่ายอดเป็น 315 โวลต์ แรงดันนี้ถูกเรียงกระแสให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและหารลง 2 เท่า เพื่อป้อนให้กับวงจรเปรียบเทียบแรงดันซึ่งใช้ออปแอมป์หมายเลข LM311 การป้องกันกระแสเกินก็มีลักษณะเช่นเดียวกัน ในการวัดกระแสใช้หม้อแปลงกระแส(CURRENT TRANSFORMER)และใช้ออปแอมป์หมายเลข LM311 เป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดัน ในกรณีที่เกิดแรงดันเกินหรือกระแสเกิน ที่ขั้วออกของไอซีหมายเลข LM311 จะมีแรงดันเป็นบวกที่จุด A แรงดันก็จะเป็นบวกด้วยโดยที่จุดนี้ต่ออยู่กับขา 16 ของไอซีหมายเลข TL494 เป็นผลให้ไอซี TL494 หยุดการกำเนิดสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมทันที เป็นการหยุดการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ สัญญาณดังกล่าวยังสั่งให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 และ SCR_1 ทำงานเป็นผลให้รีเลย์ที่ใช้ในระบบป้องกันตัดการจ่ายกำลังไฟฟ้าทันทีด้วย

หาขนาดของตัวต้านทาน R_1 และ R_2 ที่ใช้เปลี่ยนสัญญาณกระแสให้เป็นสัญญาณแรงดันเพื่อป้อนสู่วงจรเปรียบเทียบแรงดัน โดยกำหนดให้หม้อแปลงกระแสมีจำนวนรอบด้านปฐมภูมิเป็น 1 รอบ ด้านทุติยภูมิเป็น 450 รอบ ฉะนั้นถ้ากระแสปฐมภูมิมีค่ายอดเป็น 10 แอมป์ จะได้กระแสทุติยภูมิ I_s ดังนี้

$$I_s = 10/450 \quad \text{แอมป์}$$

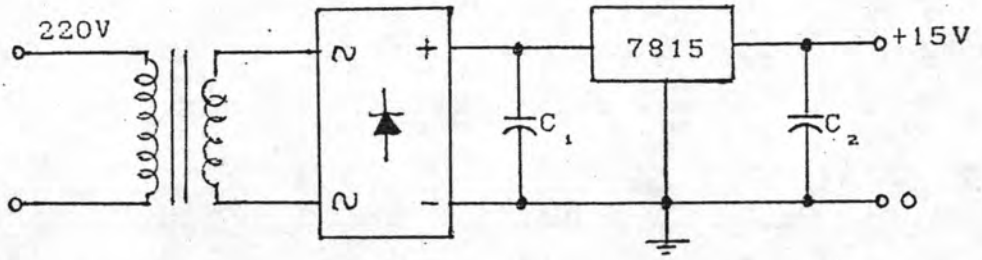
กระแสทุติยภูมินี้ถูกเรียงกระแสโดยมีตัวกรอง C ดังนั้นกระแส I ซึ่งไหลผ่านตัวต้านทาน R_1 และ R_2(ดูรูปที่ 62)จึงมีค่าประมาณเท่ากับค่ายอดของ I_s เราต้องการแรงดัน V ซึ่งเป็นรงดันที่คร่อมตัวเก็บประจุ C_1 เท่ากับ 10 โวลต์ (ต้องการให้มีตัวเลขสัมพันธ์กับตัวเลขของกระแส I_p)

ถ้าเลือก $R_1=R_2$ จะได้

$$R_1=R_2 = 10/(2x10/450)$$

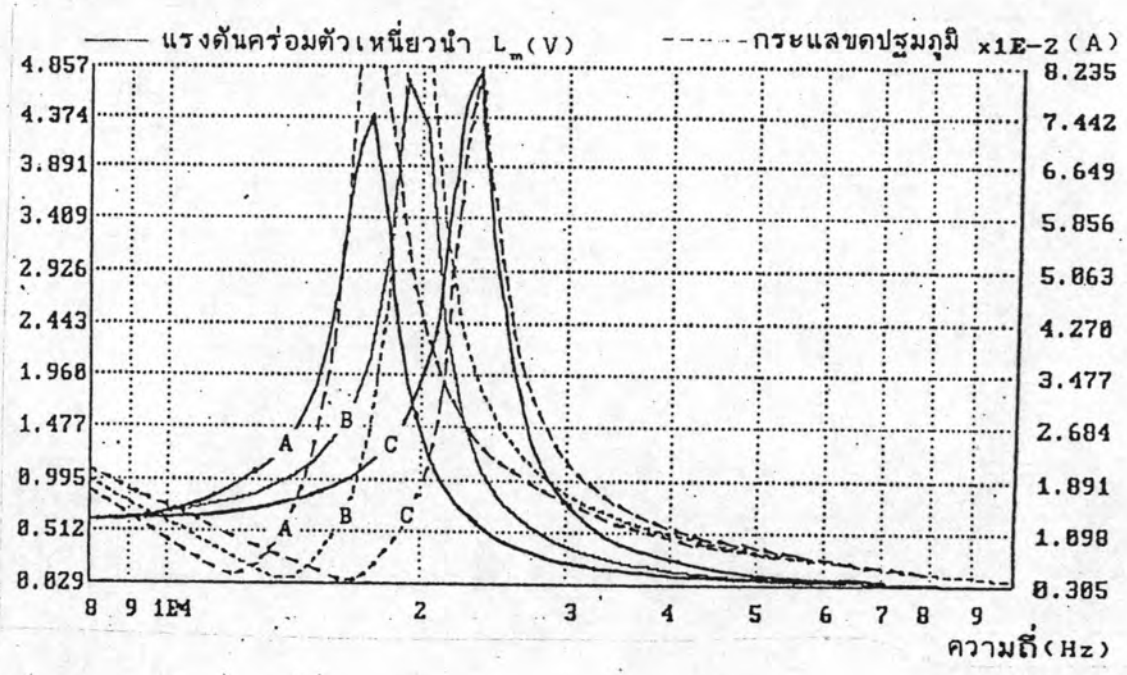
$$= 250 \quad \text{โอมห์}$$

2.1.4 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับวงจรการควบคุมแบบวงรอบเปิด แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ต้องการมีค่า 15 โวลต์ เราจึงใช้ไอซีหมายเลข 7815 สำหรับคงค่าแรงดัน แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระตรงแสดงอยู่ในรูปที่ 63



รูปที่ 63
แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับวงจรการควบคุมแบบวงรอบเปิด

2.2 <u>การควบคุมแบบวงรอบปิด</u> ในการใช้งานของแหล่งกำเนิดแรงดันสูงที่ความถี่สูง กรณีที่มีการควบคุมแบบวงรอบเปิดจะต้องมีการตั้งค่าแรงดันด้านออกเสมอ เมื่อความกว้าง และความเร็วการเคลื่อนที่ฟิล์มพลาสติกเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงได้ออกแบบวงจรควบคุมแบบวงจรปิดไว้ควบคุมแรงดันด้านออกให้มีค่าคงที่ โดยไม่ต้องมีการตั้งค่าแรงดันด้านออกอีกจนกว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มพลาสติก ในการควบคุมแรงดันด้านออกให้คงที่นั้นเราพิจารณารูปที่ 64 ซึ่งได้จากการซีมูลเลตวงจรในรูปที่ 46 โดยให้ค่าความจุไฟฟ้า C ของตัวภาระมีค่าเปลียนแปลงไป ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความกว้าง ความหนาและความเร็วการเคลื่อนที่ของฟิล์มพลาสติก โดยที่กราฟ A B และC ตรงกับค่าความจุไฟฟ้าของตัวภาระ เท่ากับ 260 190 และ120 พิกโกฟารัด (อยู่ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง) ตามลำดับ



รูปที่ 64

การตอบสนองต่อความถี่ของวงจรที่ต่อด้านออก

ของวงจรอินเวอร์เตอร์ขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงตัวภาระ

จากรูปที่ 64 สรุปได้ว่า

เมื่อความถี่ f คงที่ แรงดัน V เปลี่ยนแปลงไปตามค่าความจุไฟฟ้า C

เมื่อแรงดัน V คงที่ ความถี่ f เปลี่ยนแปลงไปตามส่วนกลับของค่าความจุไฟฟ้า C

เมื่อค่าความจุไฟฟ้า C คงที่ แรงดัน V เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ f

แต่ค่าความจุไฟฟ้า C ของ ตัวภาระจะเปลี่ยนไป เมื่อความหนา t ความกว้าง l และความเร็ว v ของฟิล์มพลาสติกเปลี่ยนแปลง ซึ่งสรุปได้ดังนี้

ค่าความจุไฟฟ้า C เปลี่ยนแปลงไปตามส่วนกลับของความเร็ว v

ค่าความจุไฟฟ้า C เปลี่ยนแปลงไปตามความกว้าง l

ค่าความจุไฟฟ้า C เปลี่ยนแปลงไปตามส่วนกลับของความหนา t

นั่นคือ

ค่าความจุไฟฟ้า C เปลี่ยนแปลงไปตาม 1/vt

ฉะนั้น

เมื่อความถี่ f คงที่ แรงดัน V เปลี่ยนแปลงไปตาม 1/vt

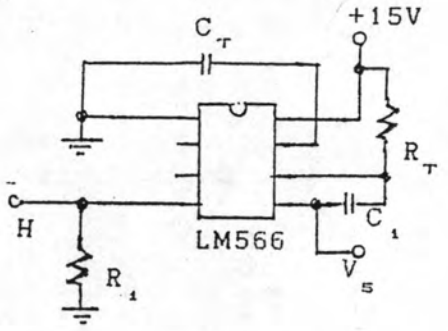
เมื่อแรงดัน V คงที่ ความถี่ f เปลี่ยนแปลงไปตาม vt/1

เมื่อความกว้าง 1 ความหนา t และความเร็ว v คงที่ แรงดัน V เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ f

แต่ในการควบคุมแบบวงรอบปิดต้องการให้แรงดันด้านออกคงที่เมื่อความกว้าง 1 และความเร็ว v เปลี่ยนแปลง และต้องการปรับแรงดันด้านออกเมื่อต้องการปรับระดับของการปรับผิว ฉะนั้นจะต้องป้อนกลับแรงดันด้านออกเพื่อนำมาควบคุมความถี่ f โดยจะต้องให้มีความสัมพันธ์กันดังนี้ คือ ถ้าเกิดเหตุการณ์แรงดัน V ลดลงความถี่จะต้องเพิ่มขึ้น และถ้าแรงดัน V เพิ่มขึ้นความถี่ต้องลดลง ความถี่ f นี้เป็นความถี่การสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งวงจรควบคุมแบบวงรอบปิดประกอบด้วยวงจรต่าง ๆ ดังนี้

2.2.1 วงจรขับสวิตช์ วงจรนี้เหมือนกับวงจรขับสวิตช์ที่ใช้ในวงจรควบคุมแบบวงรอบเปิดทุกประการ (ดูรูปที่ 58)

2.2.2 วงจรกำเนิดสัญญาณ วงจรนี้แตกต่างจากวงจรที่ใช้ในการควบคุมแบบวงรอบเปิด เพราะมีการป้อนกลับแรงดันเพื่อให้ความถี่ของสัญญาณที่เกิดเปลี่ยนไปตามที่กล่าวมาแล้ว ในการกำเนิดสัญญาณใช้ไอซีหมายเลข LM566 ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรแกว่งที่ควบคุมด้วยแรงดัน(VCO) ถ้าแรงดันควบคุมเพิ่มขึ้นความถี่ของสัญญาณจะลดลง วงจรกำเนิดสัญญาณแสดงดังรูปที่ 65



รูปที่ 65
วงจรกำเนิดสัญญาณของการควบคุมแบบวงรอบปิด

สัญญาณคลาดเคลื่อนที่ใช้ควบคุม VCO เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งป้อนเข้าที่ขา 5 ของไอซีหมายเลข LM566 ความสัมพันธ์ของแรงดันควบคุม V_s กับความถี่ของสัญญาณ f_o เป็นดังสมการ (3.20) และพิจารณาจากรูปที่ 64

$$f_o = 2(V-V_s)/R_TC_TV \quad \text{เฮิรตซ์} \quad (3.20)$$

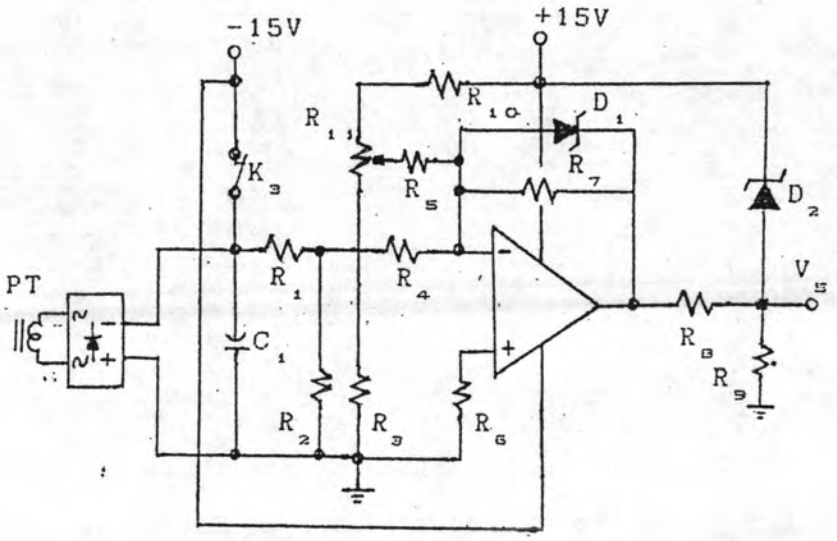
โดยที่

V	แรงดันของแหล่งจ่ายไฟตรง	โวลต์
R_T	ตัวความต้านทานในการกำเนิดสัญญาณปกติมีค่าระหว่าง 2 kΩ ถึง 20 kΩ	
C_T	ตัวเก็บประจุที่ใช้ในการกำเนิดสัญญาณ	ฟารัด

ในการออกแบบใช้แรงดัน V 15 โวลต์ แรงดันควบคุม V_s ที่ทำให้เกิดความถี่ f_o อยู่ในช่วงประมาณ 10 - 15 กิโลเฮิรตซ์ เป็น 13.8 - 13.2 โวลต์ (ในช่วงที่กำหนดของไอซีหมายเลข LM566) และใช้ตัวเก็บประจุ C_T 0.0033 ไมโครฟารัด ฉะนั้นจากสมการที่ (3.20) ตัว

ต้านทาน R_T ที่ใช้เป็น 4.8 กิโลโอห์ม

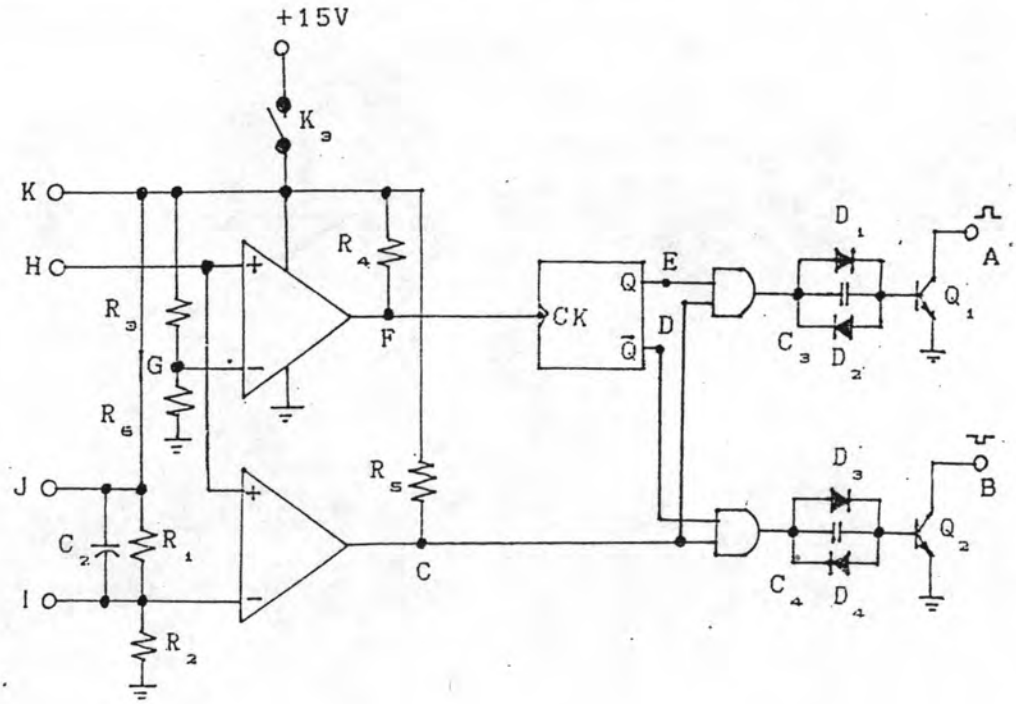
2.2.3 วงจรป้อนกลับแรงดัน แรงดันควบคุม V_s ของไอซีหมายเลข LM566 มีค่า 13.2 - 13.8 โวลต์ เป็นไฟฟ้ากระแสตรง แต่แรงดันด้านปฐมภูมิเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ฉะนั้นจึงต้องมีการเรียงกระแสให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง และมีการจำกัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้ให้มีค่าอยู่ในช่วงดังกล่าว วงจรป้อนกลับแสดงดังรูปที่ 66



รูปที่ 66
วงจรป้อนกลับแรงดัน

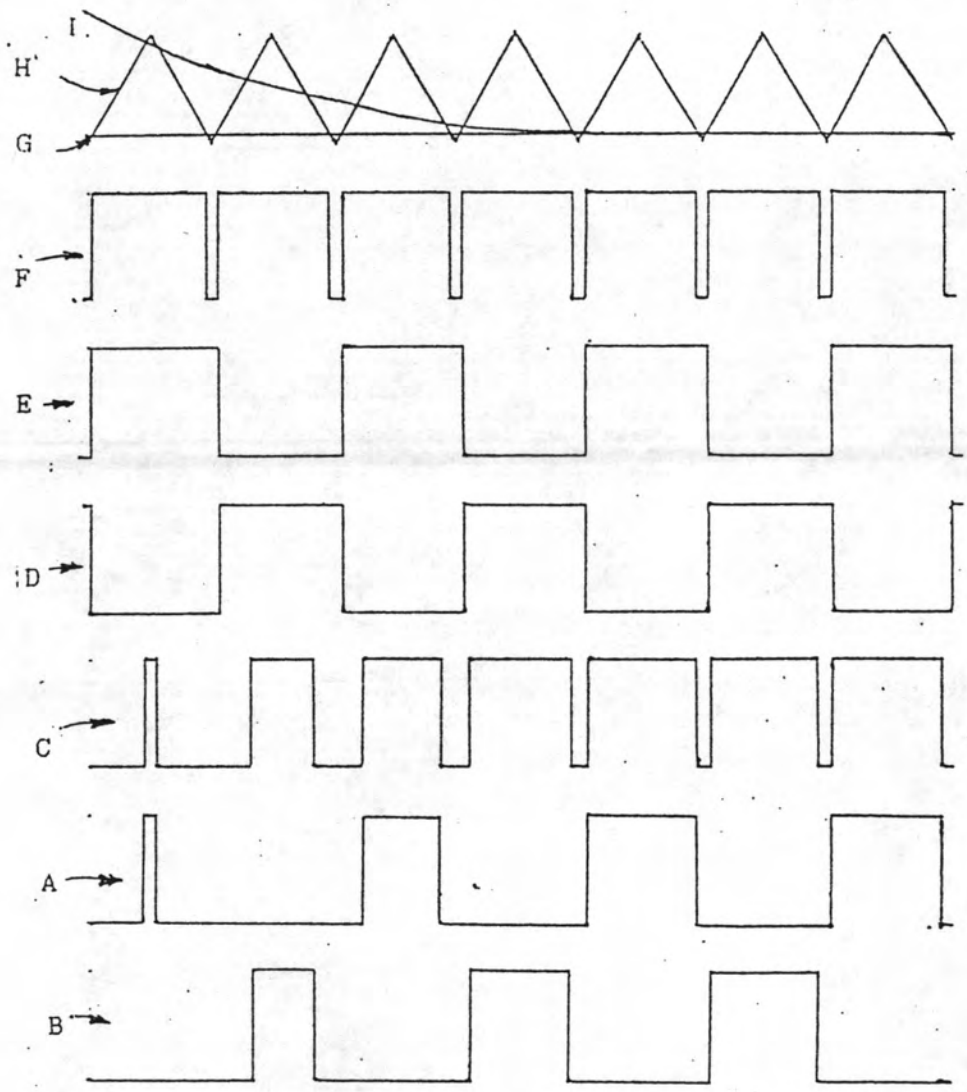
จากรูปที่ 66 แรงดันที่อ่านได้ถูกเรียงกระแสให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง มีค่าเป็นลบป้อนสู่วงจรจำกัดค่าแรงดัน ซึ่งใช้ไอซีหมายเลข LM741 การปรับค่าแรงดันทำได้โดยปรับตัวความต้านทาน R_1 การจำกัดค่าแรงดันใช้ซีเนอร์ไดโอด D_1 และ D_2 โดยที่ซีเนอร์ไดโอด D_1 ทำหน้าที่จำกัดแรงดันไม่ให้เกิน 13.8 โวลต์ และซีเนอร์ไดโอด D_2 ทำหน้าที่จำกัดแรงดันไม่ให้ต่ำกว่า 13.2 โวลต์

2.2.4 วงจรเริ่มต้นทำงาน (SOFT START) วงจรเริ่มต้นการทำงานเป็นวงจรป้องกันความผิดพลาดหรืออันตราย ในการเริ่มทำงานของระบบวงจรไฟฟ้ากำลัง วงจรนี้ทำหน้าที่ควบคุมให้มีการเริ่มต้นทำงานด้วยแรงดันต่ำ(VOLTAGE SOFT START) และการเริ่มต้นการทำงานด้วยกระแสต่ำ (CURRENT SOFT START) ทั้งนี้เนื่องจากแรงดันปฐมภูมิที่สุ่มมาได้ ก่อนเริ่มทำงานมีค่าเป็นศูนย์ ทำให้ความถี่การสวิตช์มีค่าสูง แรงดันด้านออกของแหล่งกำเนิดแรงดันสูงก็มีค่าสูงตามด้วย และอาจทำให้การทำงานของระบบมีกระแสนำหน้าแรงดันก็ได้ จึงจำเป็นต้องลดความถี่ดังกล่าวให้ต่ำลง เมื่อความถี่ดังกล่าวต่ำลงค่ายอดของกระแสที่ไหลในสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์มีค่าสูงทำให้เป็นอันตรายต่อสวิตช์ ดังนั้นต้องทำให้ค่ายอดของกระแสมีค่าต่ำลงโดยการจำกัดช่วงเวลาการทำงานของสวิตช์ให้ต่ำกว่าปกติ แล้วค่อย ๆ ปรับให้สูงขึ้นเข้าสู่ปกติ วงจรเริ่มต้นทำงานแสดงดังรูปที่ 67



รูปที่ 67
วงจรเริ่มต้นการทำงานของระบบวงจรไฟฟ้ากำลัง

การเริ่มต้นทำงานด้วยแรงดันต่ำจะอาศัยการคาย
ประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ C_1 (ดูรูปที่ 66) ซึ่งก่อนที่สวิตช์ของรีเลย์(K_3,NC)

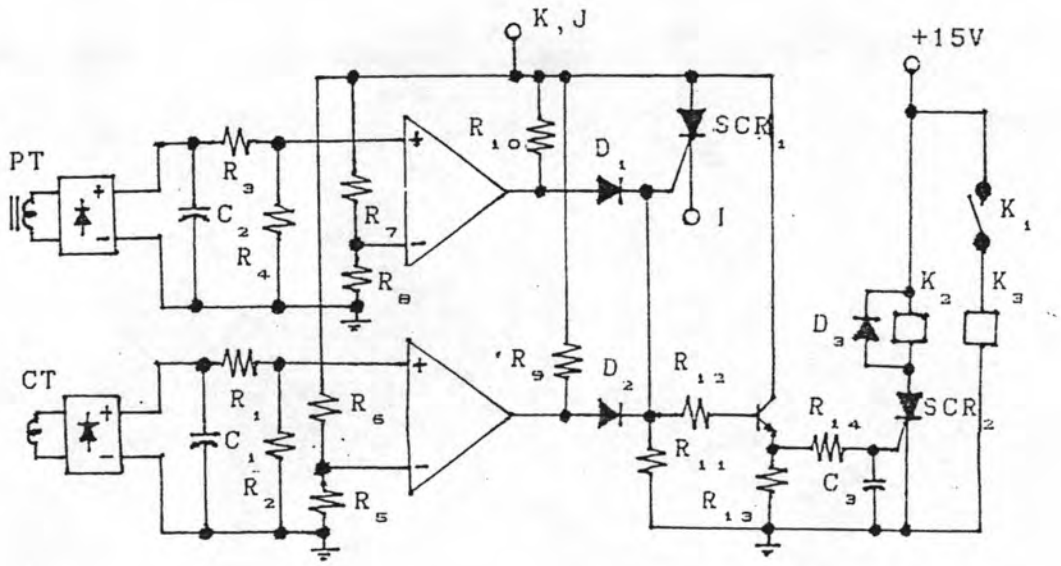


รูปที่ 68

สัญญาณแรงดัน ณ.จุดต่าง ๆ เมื่อวงจรควบคุมแบบวงรอบปิดเริ่มต้นทำงาน

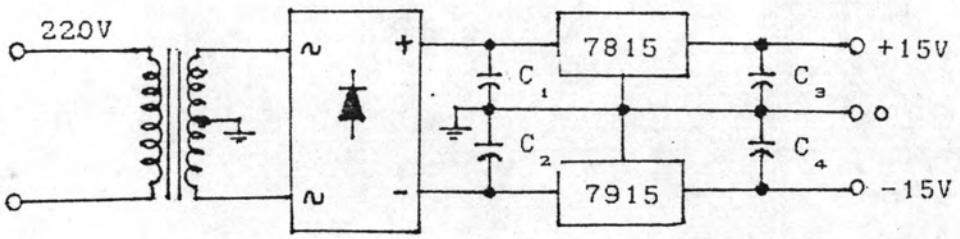
จะตัดแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุนี้(V_{c_1}) มีค่าเท่ากับ -15โวลต์ เมื่อสวิตช์ของรีเลย์(K_3,NC)ตัด ขนาดของแรงดัน V_{c_1} ก็จะลดลงพร้อมกันนั้นแรงดันป้อนกลับจะมีค่าสูงขึ้นจนถึงสถานะปกติ ทำให้ความถี่ที่ได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณ (ดูรูปที่ 65) เปลี่ยนจากความถี่ต่ำสู่ความถี่สถานะปกติด้วย สำหรับการเริ่มต้นทำงานด้วยกระแสต่ำจะอาศัยการเก็บประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ C_2 (ดูรูปที่ 67) เมื่อสวิตช์ของรีเลย์(K_3,NO)เริ่มต่อวงจร แรงดันที่ขั้ว I ค่าเท่ากับ 15 โวลต์ และจะค่อย ๆ ลดลงจนถึงสถานะปกติ ทำให้ช่วงการทำงานของสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์เพิ่มขึ้นและเข้าสู่สถานะปกติเช่นกันด้วย ซึ่งรูปคลื่นของสัญญาณที่จุดต่างๆ ของวงจรในรูปที่ 67 แสดงดังรูปที่ 68

2.2.5 วงจรป้องกันระบบ วงจรป้องกันระบบในการควบคุมแบบวงรอบปิด มีลักษณะของการทำงานและการควบคุมเหมือนกับวงจรป้องกันที่มีการควบคุมแบบวงรอบเปิด(ดูรูปที่ 62)แต่ในที่นี้ได้ใช้ไอซีหมายเลข LM399 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 69



รูปที่ 69
วงจรป้องกันระบบในการควบคุมแบบวงรอบปิด

2.2.6 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับวงจรการควบคุมแบบวงรอบปิด แรงดันที่ใช้ในวงจรการควบคุมแบบนี้ มีขนาด 15 และ -15 โวลต์ เราใช้วงจรหมายเลข 7815 และ 7915 สำหรับการคงคงค่าแรงดันดังแสดงในรูปที่ 70



รูปที่ 70

แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับวงจรการควบคุมแบบวงรอบปิด