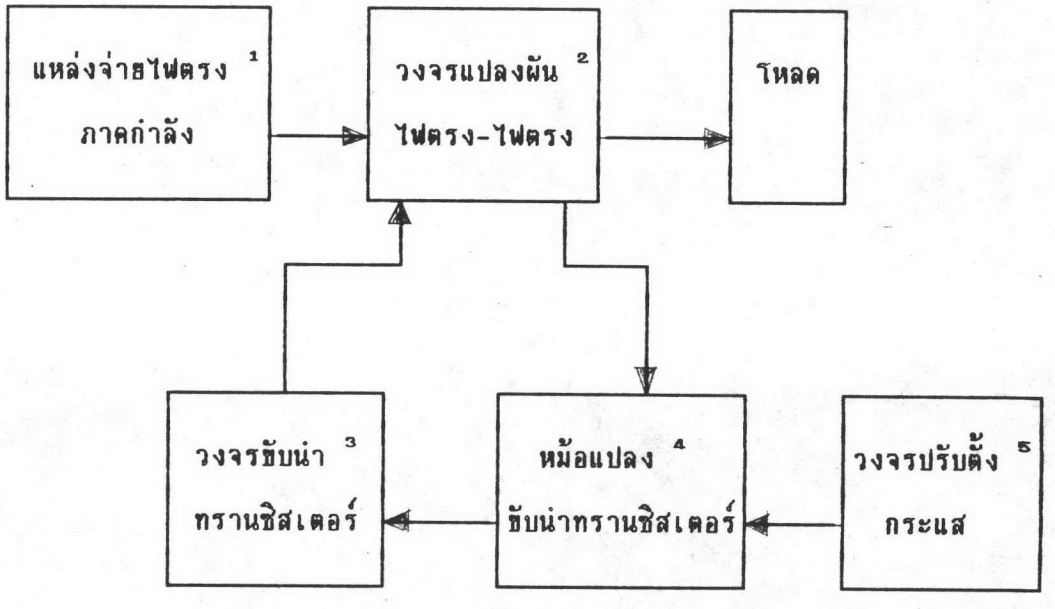
หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การออกแบบและการจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง

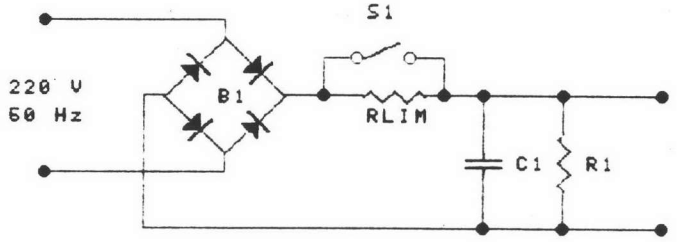
จากบทที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าเราได้เลือกวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบวิธีสวิตช์ที่มีโครงสร้างแบบกึ่งบริดจ์ชนิดชีรีเรโซแนนซ์ เพื่อทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟตรงของเครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงแบบวิธีสวิตช์ ในบทนี้แสดงการออกแบบส่วนต่าง ๆ ของเครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงแบบวิธีสวิตช์และออกแบบค่าอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์วงจรด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาและปรับปรุงระบบให้ดีขึ้น นอกจากนี้ผลจากวิเคราะห์วงจรด้วยคอมพิวเตอร์ยังใช้ในการกำหนดพิกัดและออกแบบอุปกรณ์ ตลอดจนใช้ในการเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากชุดวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงที่สร้างขึ้น โครงสร้างของเครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงแบบวิธีสวิตช์ แสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 5 ส่วนดังนี้



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมเครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงแบบวิธีสวิตช์

<u>แหล่งจ่ายไฟตรงภาคกำลัง</u>

รูปที่ 3.2 เป็นวงจรของแหล่งจ่ายไฟตรงซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังให้แก่เครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงแบบวิธีสวิตช์ โดยรับแรงดันไฟกระแสสลับ 220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ 1 เฟส ผ่านวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์และวงจรกรองที่ใช้ตัวเก็บประจุทำให้ได้ค่าแรงดันไฟตรงประมาณ 300 โวลต์ ตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่กรององค์ประกอบไฟฟ้ากระแสสลับออกจากไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้กับวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ทำให้แรงดันออกของวงจรกรองมีการกระเพื่อมน้อยลง โดยมีการกระเพื่อมน้อยกว่า 15 เปอร์เซนต์ของปริมาณไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 3.2 วงจรเรียงกระแสและวงจรกรอง

ความต้านทานที่ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุมีหน้าที่จำกัดกระแสในตอนเปิดเครื่อง เพราะในช่วงเวลานี้แรงดันที่ตัวเก็บประจุยังมีค่าเป็นศูนย์ ทำให้กระแสที่ไหลอัดประจุให้แก่ตัวเก็บประจุมีค่าค่อนข้างสูง กระแสจำนวนนี้จะไหลผ่านไดโอดของวงจรเรียงกระแสอันอาจทำให้ไดโอดเสียหายได้ เมื่อแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเพิ่มขึ้นถึงระดับที่เหมาะสมแล้ว ตัวต้านทานนี้จะถูกลัดวงจรด้วยแมกเนติคคอนแทกเตอร์ เพื่อไม่ให้เกิดกำลังสูญเสียในความต้านทาน $R_{_}$ การควบคุมการตัดต่อของสวิตช์ S_1 จะอาศัยเวลาล่าช้าของการต่อวงจรของตัวแมกเนติคคอนแทกเตอร์เองซึ่งมีค่าประมาณ 10 มิลลิวินาที กล่าวคือก่อนเปิดเครื่อง S_1 จะเปิดวงจรและเมื่อเปิดเครื่องจะมีกระแสไปประจุตัวเก็บประจุโดยผ่านความต้านทาน $R_{_}$ เนื่องจากเวลาล่าช้าของตัวแมกเนติคคอนแทกเตอร์ หลังจากนั้น S_1 จะปิดวงจรเอง ส่วนตัวต้านทานที่ต่อขนานกับตัวเก็บประจุมีหน้าที่คายประจุทิ้งไปเมื่อวงจรหยุดทำงานแล้ว เพื่อป้องกันมิให้เกิดอันตรายเนื่องจากประจุที่ค้างอยู่ทั้งนี้เพราะประจุที่ค้างอยู่มีปริมาณมากและมีแรงดันสูง รายละเอียดเกี่ยวกับการออกแบบค่าของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในภาคเรียงกระแสนี้จะกล่าวถึงเป็นหัวข้อต่อไป

การออกแบบค่าอุปกรณ์ของวงจรเรียงกระแสและวงจรกรองประกอบด้วยการออกแบบค่าและพิกัดของ ตัวเก็บประจุของวงจรกรอง ไดโอดกำลังด้านขาเข้า ความต้านทานอนุกรมที่ใช้จำกัดกระแสขณะเริ่มเปิดเครื่อง และความต้านทานขนานที่ใช้ในการคายประจุเมื่อตอนปิดเครื่อง โดยจะกล่าวรายละเอียดดังต่อไปนี้

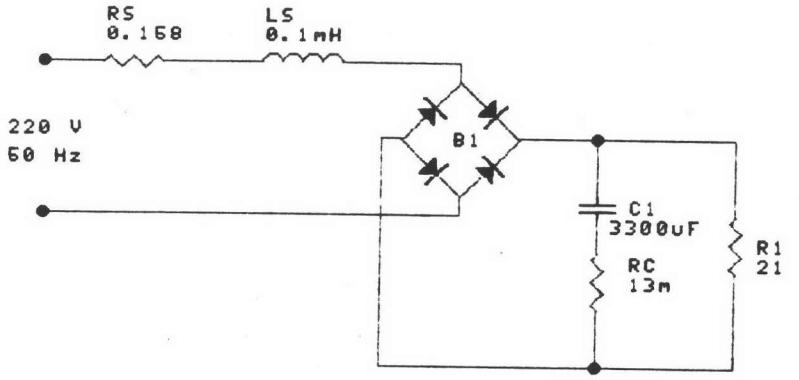
1. <u>การออกแบบค่าและพิกัดของตัวเก็บประจุในวงจรกรอง</u>

ในการออกแบบเบื้องต้นจะเป็นการเลือกค่าตัวเก็บประจุ โดยอาศัยกราฟของ O.H.Schade (The Voltage Regulator Handbook Texas Instruments,1977) (ดูภาคผนวก) การออกแบบค่าของตัวเก็บประจุ ในวงจรกรองนี้จะต้องรู้ค่าอิมพิแดนซ์ของหม้อแปลงจ่ายกำลังและอิมพิแดนซ์ของสายป้อนแรงดัน ในที่นี้ประมาณว่าหม้อแปลงจ่ายกำลังของการไฟฟ้ามีขนาด 250 กิโลโวลต์แอมแปร์ ซึ่งจะมีค่าอิมพิแดนซ์เท่ากับ 8.23 + j24.2 มิลลิโอห์ม(ธนบูรณ์ ศศิภานุเดช,2530) และประมาณว่าสายป้อนมีขนาด 6 มิลลิเมตร ยาว 50 เมตรซึ่งจะมีค่าอิมพิแดนซ์เท่ากับ 150 +j4.8 มิลลิโอห์ม ข้อกำหนดในการออกแบบวงจรเรียงกระแสมีดังนี้

- แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านขาเข้า 220 โวลต์ 1 เฟส
- ค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟตรงต่อค่าสูงสุดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านขาเข้ามีค่าระหว่าง 90-95 เปอร์เซนต์
- การกระเพื่อมของแรงดันไฟตรงมีค่ายอดถึงยอดประมาณ 10-15 เปอร์เซนต์ของแรงดันไฟตรงเฉลี่ย
- โดยที่กำลังขาออกของเครื่องเชื่อม 2.90 กิโลวัตต์
- ประมาณค่าประสิทธิภาพของเครื่องเชื่อมเท่ากับ 75 เปอร์เซนต์

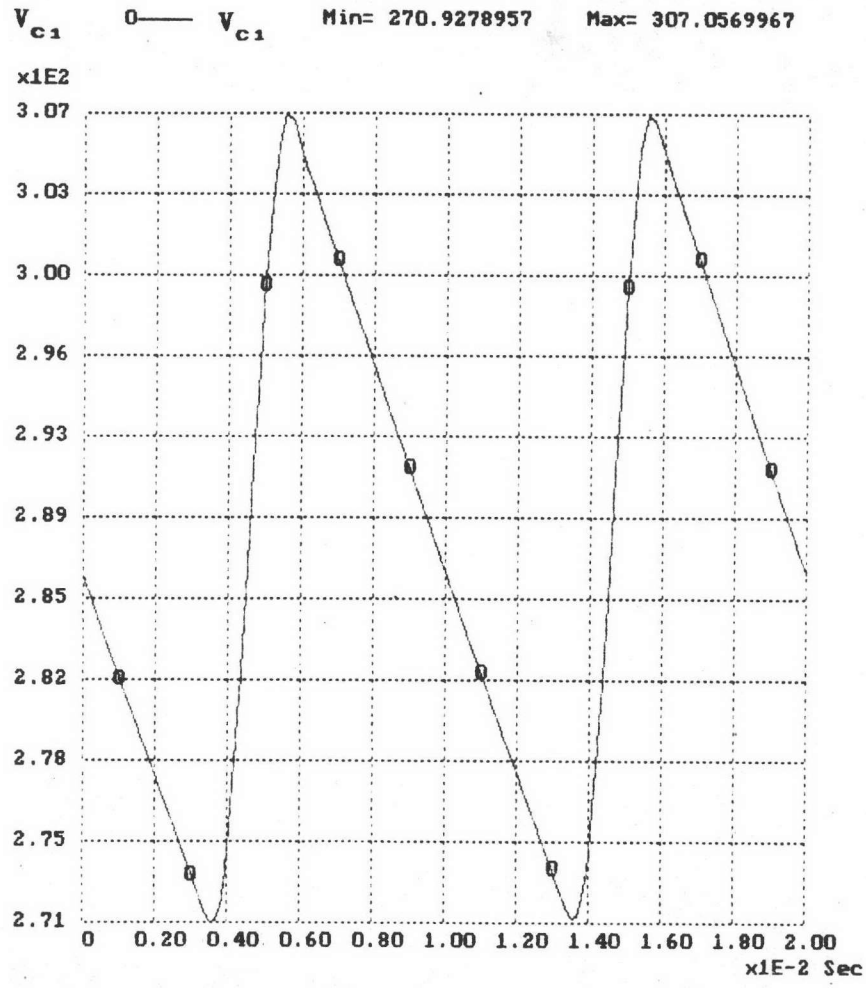
จากข้อกำหนดในการออกแบบดังกล่าวข้างต้นได้มีการออกแบบค่าตัวเก็บประจุโดยอาศัยกราฟของ O.H.Schade ได้ค่าตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ 2894 ไมโครฟารัด ในทางปฏิบัติเลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาด 3300 ไมโครฟารัด ชนิดอิเล็กโตรไลติก (electrolytic) ทนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ 400 โวลต์ ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่มีจำหน่าย มีความต้านทานอนุกรมในตัวเก็บประจุประมาณ 13 มิลลิโอห์ม การใช้ตัวเก็บประจุค่า 3300 ไมโครฟารัดและข้อกำหนดต่าง ๆ ของวงจรจะได้อัตราส่วนของ V_{DC}/V_{Peak} เท่ากับ 93 เปอร์เซนต์ และแรงดันกระเพื่อมเท่ากับ 13 เปอร์เซนต์จะเห็น

ได้ว่าอยู่ในช่วงที่ออกแบบไว้ เมื่อนำตัวเก็บประจุค่า 3300 ไมโครฟารัดและข้อกำหนดต่าง ๆ ของวงจรไปใช้ในการวิเคราะห์วงจรตามรูปที่ 3.3 ด้วยคอมพิวเตอร์ ได้ผลการวิเคราะห์วงจรดังแสดงในรูป 3.4



รูปที่ 3.3 วงจรเรียงกระแสที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์

จากรูป 3.4 จะเห็นได้ว่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าอยู่ระหว่าง 270 โวลต์และ 307 โวลต์ โดยมีแรงดันไฟตรงเฉลี่ยเท่ากับ 289 โวลต์ คิดเป็น 93 เปอร์เซนต์ของส่วนแรงดันค่ายอด และแรงดันกระเพื่อมเท่ากับ 37 โวลต์ คิดเป็น 12 เปอร์เซนต์ของแรงดันไฟตรง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าทั้งแรงดันไฟตรงเฉลี่ยและแรงดันกระเพื่อมมีค่าใกล้เคียงกับการออกแบบโดยอาศัยกราฟของ O.H.Schade และอยู่ในพิกัดที่ออกแบบไว้ โดยแรงดันไฟตรงเฉลี่ยจะค่อนไปทางด้านสูงและแรงดันกระเพื่อมค่อนไปทางด้านต่ำ เนื่องจากได้เลือกค่าตัวเก็บประจุที่ใหญ่กว่าค่าตัวเก็บประจุที่ออกแบบไว้

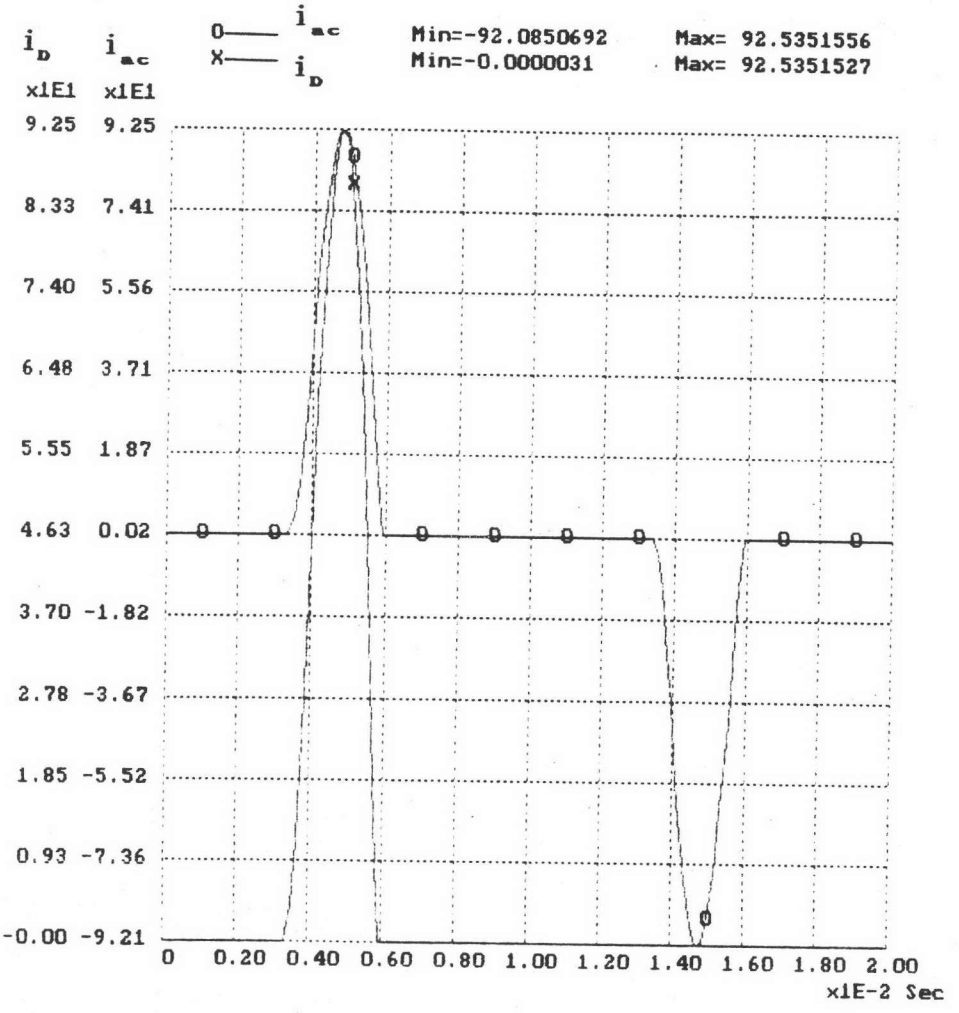


รูปที่ 3.4 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจากการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์

2. <u>การเลือกพิกัดของไดโอดกำลังด้านเข้า</u>

รูปที่ 3.5 แสดงรูปคลื่นของกระแสผ่านไดโอดกำลังและกระแสสลับด้านเข้าที่เป็นผลจากการวิเคราะห์วงจรด้วยคอมพิวเตอร์จากรูปคลื่นของกระแสที่ผ่านไดโอด จะสามารถคำนวณหาค่ากระแสยังผล(RMS)ที่ไหลผ่านไดโอดแต่ละตัว โดยประมาณกระแสเป็นคลื่นรูปไซน์ครึ่งรอบ ค่ากระแสอาร์เอ็มเอสจะคำนวณได้จากสมการ(3.1)

I1674893



รูปที่ 3.5 กระแสในไดโอดและกระแสสลับด้านเข้า

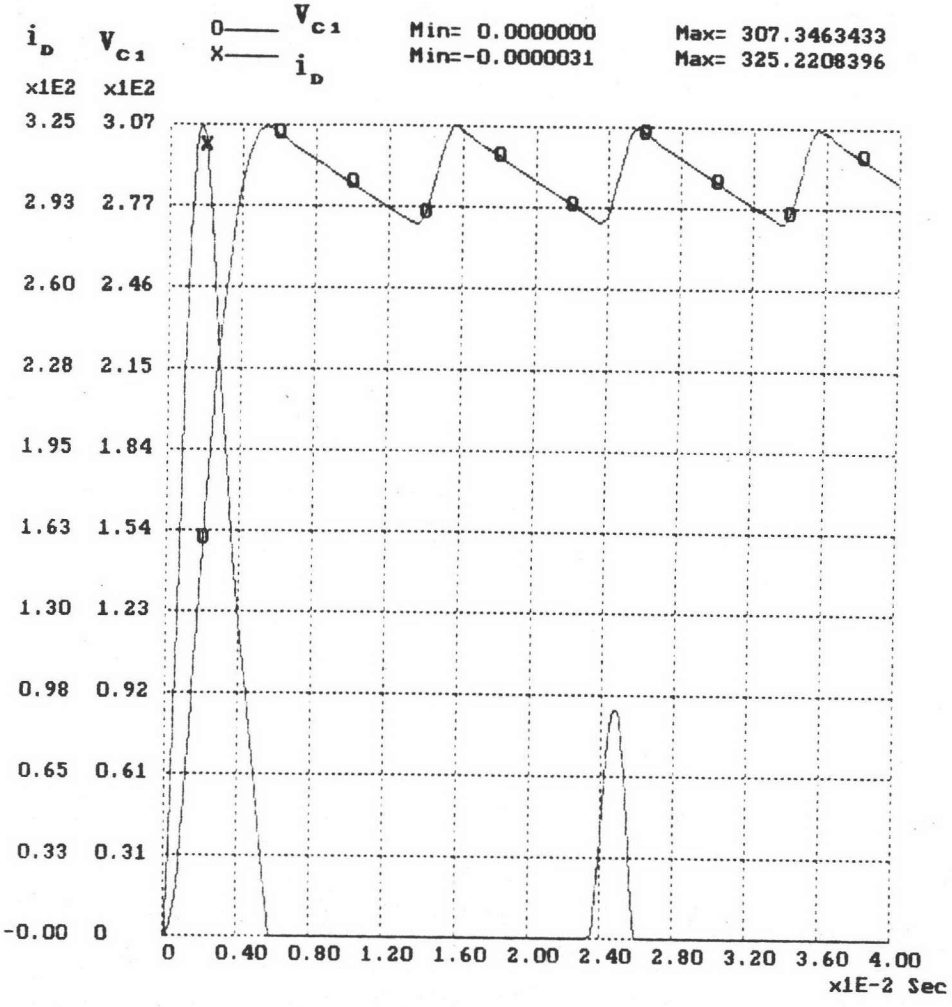
$$I_{rms} = (1/\sqrt{2}) \times I_{peak} \times \sqrt{(t/T)} \qquad (3.1)$$

จากรูปคลื่นของกระแสในไดโอด ค่ากระแสยอด (I_{peak}) เท่ากับ 92 แอมแปร์ ช่วงเวลาที่นำกระแส (t) เท่ากับ 2.1 มิลลิวินาที คาบเวลารูปคลื่นกระแส (T) เท่ากับ 20 มิลลิวินาที จากสมการ(3.1) ได้ค่ากระแสอาร์เอ็มเอสเท่ากับ 21 แอมแปร์ ส่วนค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสสลับด้านเข้านั้นจะคำนวณจากสมการ (3.1) โดยใช้คาบเวลาเท่ากับ T/2 ได้ค่ากระแสอาร์เอ็มเอสเท่ากับ 29.8 แอมแปร์

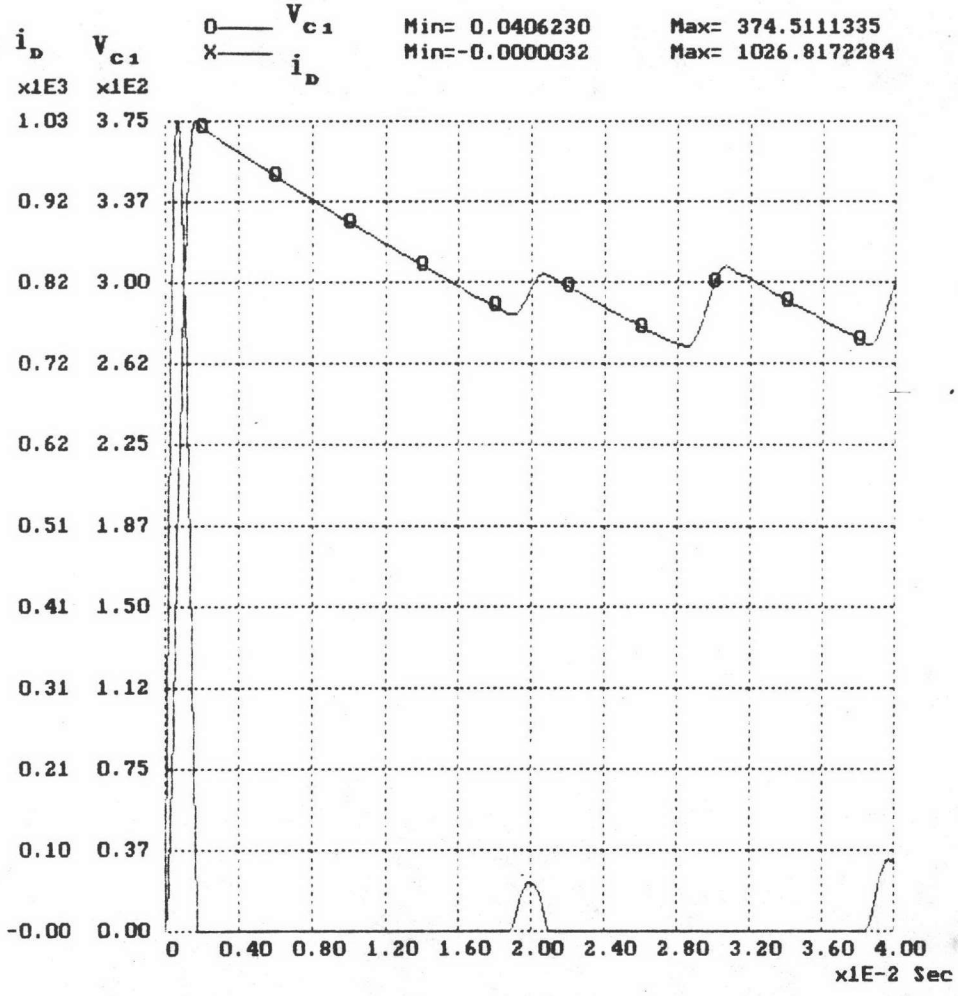
โดยทั่วไปการกำหนดพิกัดของไดโอดจะเป็นการกำหนดพิกัดที่ 25 องศาเซลเซียส แต่การเลือกพิกัดใช้งานต้องคำนึงถึงอุณหภูมิขณะทำงาน ในการออกแบบได้มีการประเมินอุณหภูมิ

ที่ตัวถังขณะทำงาน เมื่อมีแผ่นระบายความร้อนให้ตัวถังของไดโอดมีอุณหภูมิไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส และประเมินอุณหภูมิห้องมีค่าไม่เกิน 45 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณา thermal derating factor ของสารกึ่งตัวนำพิกัดของกระแสไดโอดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จะลดลงเหลือประมาณ 0.7 เท่าของพิกัดเมื่ออุณหภูมิที่ตัวถังเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ดังนั้นจะต้องใช้ไดโอดที่มีพิกัดกระแสที่อุณหภูมิของตัวถัง 25 องศาเซลเซียส เท่ากับ 30 แอมแปร์ และเมื่อคำนึงถึงการ overload ประมาณ 1.5 เท่า กับค่า safety factor ประมาณ 1.5 เท่าจะต้องใช้ไดโอดที่มีพิกัดของกระแสที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเท่ากับ 68 แอมแปร์

แต่อย่างไรก็ตามไดโอดที่มีพิกัดของกระแส 68 แอมแปร์ ไม่เป็นค่าที่มีจำหน่าย จึงเลือกใช้ไดโอดที่มีพิกัดกระแสต่ำที่สุดที่มีจำหน่ายโดยมีค่าสูงกว่า 68 แอมแปร์ โดยเลือกใช้ไดโอดที่มีพิกัดกระแสอาร์เอ็มเอสเมื่ออุณหภูมิของตัวถัง 25 องศาเซลเซียส มีค่าประมาณ 80 แอมแปร์ ซึ่งสามารถทนค่ายอดกระแส(I_{FSM}) ในช่วงเวลาหนึ่ง ไซเคิลได้ 800 แอมแปร์ (MOTOROLA INC., 1992) ส่วนพิกัดแรงดัน ของไดโอดจะเลือกให้ทนต่อทั้งแรงดันภาวะชั่วครู่และภาวะอยู่ตัวประมาณ 2 เท่า จึงเลือกใช้ไดโอดที่มีพิกัดแรงดัน 600 โวลต์ ในรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7 แสดงรูปคลื่นของกระแสในตอนเริ่มเปิดเครื่องที่ได้จากการวิเคราะห์วงจรด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้กระแสสลับด้านเข้าเป็นเป็นไซน์และโคไซน์ จะเห็นได้ว่าค่ายอดกระแสในตอนเริ่มเปิดเครื่อง เมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้ามีรูปคลื่นเป็นไซน์มีค่ายอดของกระแสประมาณ 325 แอมแปร์ ซึ่งไม่เกินพิกัดของไดโอดที่ออกแบบไว้ แต่ในกรณีแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้ามีรูปคลื่นเป็นโคไซน์ ค่ายอดของกระแสในตอนเริ่มเปิดเครื่องมีค่าเท่ากับ 1026 แอมแปร์ ซึ่งมีค่าสูงกว่าพิกัดของไดโอดที่ใช้ ดังนั้นเพื่อที่จะจำกัดค่ายอดจะต้องใช้ความต้านทาน R_{LIM} ต่ออนุกรมก่อนเข้าตัวเก็บประจุ เพื่อจำกัดค่ายอดกระแสในช่วงแรกในตอนเริ่มเปิดเครื่องไม่ให้เกิดพิกัดของกระแสไดโอดที่เลือกใช้



รูปที่ 3.6 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสผ่านไดโอดในตอนเริ่มเปิดเครื่องเมื่อแรงดันไฟสลับด้านเข้าเป็นไซน์

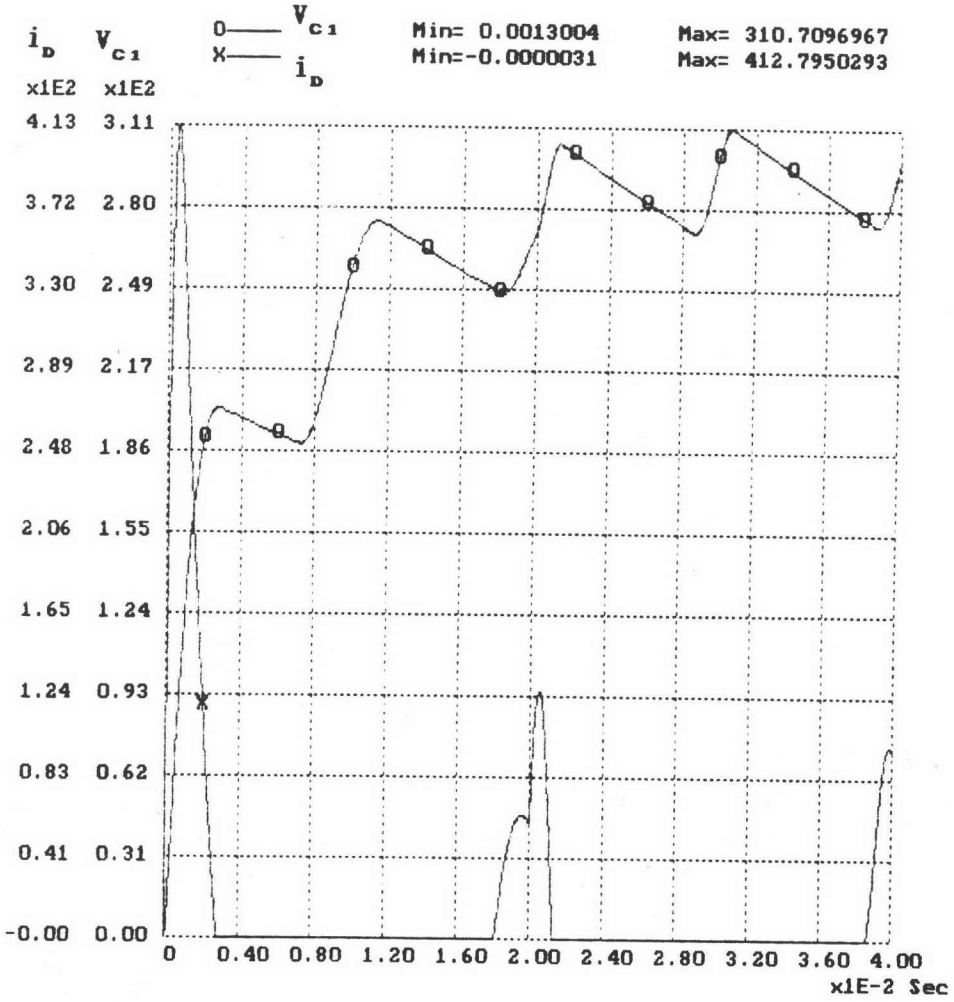


รูปที่ 3.7 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสผ่านไดโอดในตอนเริ่มเปิดเครื่องเมื่อแรงดันไฟสลับด้านเข้าเป็นโคไซน์

3. การเลือกความต้านทานอนุกรมที่ใช้จำกัดกระแสขณะเริ่มเปิดเครื่อง

ในการเลือกพิกัดของตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมเพื่อจำกัดกระแสในตอนเริ่มเปิดเครื่องเมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้าเป็นโคไซน์ จะใช้วิธีการประมาณค่าเบื้องต้นและวิเคราะห์วงจรโดยใช้คอมพิวเตอร์แล้วปรับค่าจนกระทั่งกระแสในตอนเริ่มเปิดเครื่องมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของพิกัดกระแสชั่วขณะสูงสุด (I_{fsm}) ของไดโอดที่เลือกใช้ปรากฏว่าต้องใช้ความต้านทาน 0.5 โอห์ม ซึ่งจะทำให้ค่ายอดของกระแสมีค่าประมาณ 412 แอมแปร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 สำหรับพิกัดกำลังของความต้านทานนั้น เนื่องจากไม่สามารถหาพิกัดกำลังในภาวะชั่วครู่ของความต้านทานได้ ดังนั้นจึงได้ทดลองใช้ความต้านทานที่มีพิกัดกำลังในภาวะ

อยู่ตัว 100 วัตต์ ซึ่งสามารถรับกำลังในภาวะชั่วครู่ภายในครึ่งคาบได้ถึงประมาณ 500 เท่าของภาวะอยู่ตัว



รูปที่ 3.8 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสผ่านไดโอดในตอนเริ่มเปิดเครื่องเมื่อมีความต้านทานจำกัดกระแสและแรงดันไฟสลับด้านเข้าเป็นโคไซน์

4. <u>ความต้านทานขนานที่ใช้ในการคายประจุเมื่อตอนปิดเครื่อง</u>

การคำนวณหาค่าความต้านทานที่ใช้ในการคายประจุตามมาตรฐานของ วสท. 408 กำหนดให้ตัวเก็บประจุที่ใช้กับแรงดันไม่เกิน 600 โวลต์ จะต้องมีความต้านทานต่ออยู่เพื่อช่วยให้ตัวเก็บประจุคายประจุให้แรงดันลดลงเหลือ 50 โวลต์ ภายใน

1 นาที ค่าความต้านทานในการคายประจุ หาได้จากสมการ (3.2)

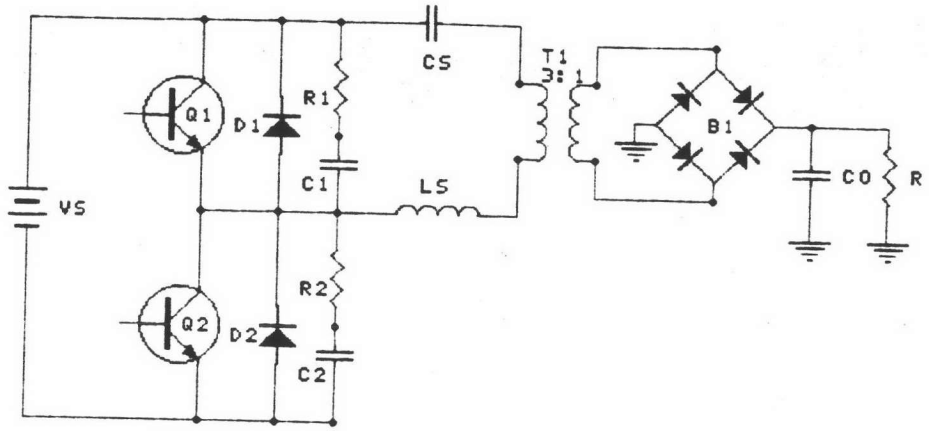
$$e_c = 1.1 \times V_{DC} \times EXP(-60/RC) \qquad (3.2)$$

เมื่อ V_{DC} = 310 โวลต์ e_c = 50 โวลต์ C = 3300 ไมโครฟารัด จากข้อกำหนดข้างต้นจะได้ความต้านทานที่ในการคายประจุประมาณเท่ากับ 9.5 กิโลโอห์ม และกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในตัวต้านทานในการคายประจุเท่ากับ 10 วัตต์เลือกใช้ความต้านทานในการคายประจุ 10 กิโลโอห์ม 15 วัตต์

<u>วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง</u>

วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงในบล็อกที่ 2 ของรูปที่ 3.1 ประกอบด้วยวงจรกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง และวงจรกำลังด้านออกดังแสดงในรูปที่ 3.9

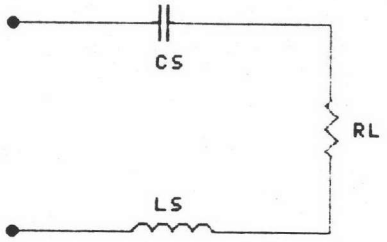
แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง ประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์ชนิดกึ่งบริดจ์ที่ทำงานแบบเรโซแนนซ์ภาคแรงดันศูนย์ ซึ่งเป็นวงจรที่มีประสิทธิภาพและความเชื่อถือได้สูง ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงขนาดประมาณ 285 โวลต์ ให้เป็นแรงดันไฟสลับความถี่ระหว่าง 19.2-24.4 กิโลเฮิรตซ์ ส่วนวงจรกำลังด้านออกประกอบด้วยตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมกับหม้อแปลงด้านปฐมภูมิ ทำหน้าที่ปิดกั้นองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรงไม่ให้เข้าหม้อแปลงความถี่สูง ตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรมด้านปฐมภูมิทำให้กระแสโหลดตามหลังแรงดันและทำให้สามารถลัดวงจรด้านออกได้ หม้อแปลงความถี่สูงทำหน้าที่ลดแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้มีแรงดันและกระแสที่เหมาะสมสำหรับงานเชื่อม และทำให้มีการแยกโดดระหว่างเครื่องเชื่อมกับชิ้นงาน หม้อแปลงความถี่สูงมีอัตราส่วนของจำนวนรอบปฐมภูมิต่อทุติยภูมิเท่ากับ 3:1 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสไฟฟ้าสลับความถี่สูงที่ส่งผ่านหม้อแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อส่งให้กับโหลด ซึ่งจะทำให้ความเหนี่ยวนำของสายไฟเชื่อมไม่มีผลต่อการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ ตัวเก็บประจุทางด้านออกทำหน้าที่กรองแรงดันและกระแสเชื่อมตลอดจนช่วยให้วงจรอินเวอร์เตอร์ทำงานอย่างต่อเนื่องในขณะทำการเชื่อม



รูปที่ 3.9 แสดงวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง

1. การออกแบบค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์

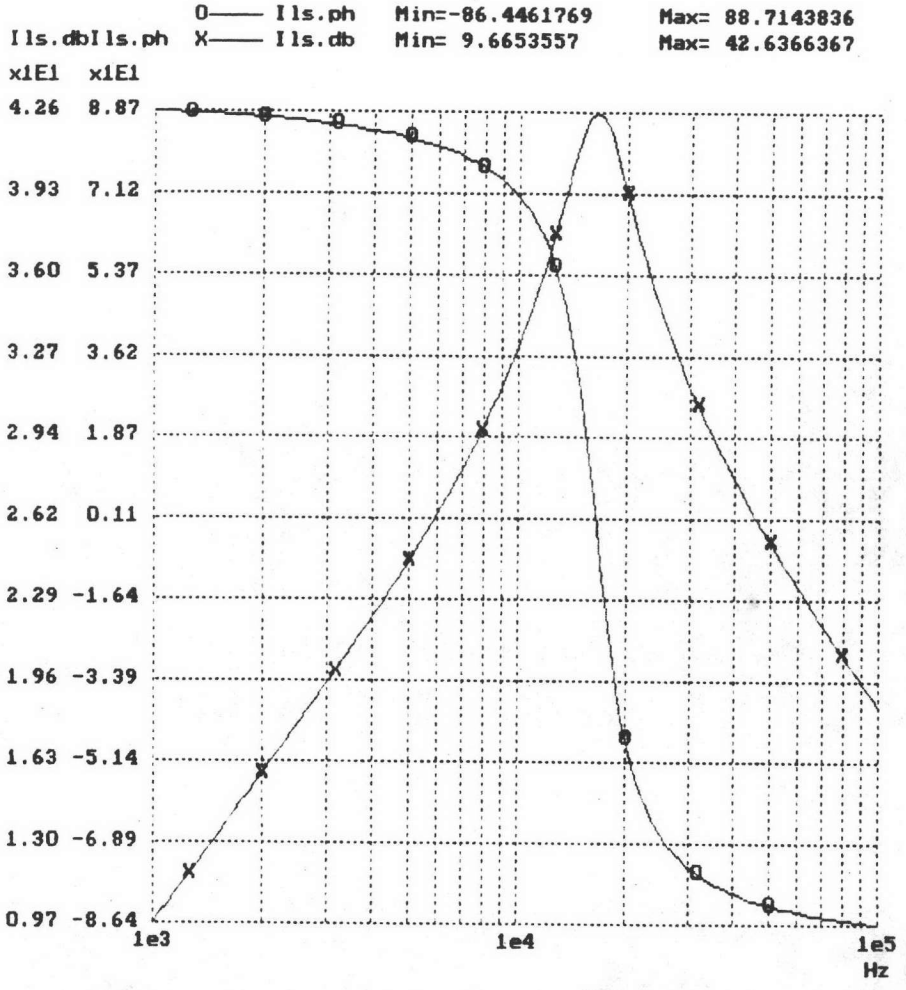
การวิเคราะห์และออกแบบค่าเบื้องต้นของอุปกรณ์วงจรอินเวอร์เตอร์ใช้การวิเคราะห์โดยวิธี ac complex ซึ่งเป็นวิธีที่คำนึงเฉพาะส่วนของแรงดันที่ความถี่หลักมูล(Vac) ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (square wave) ที่เป็นแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ โดยในการเลือกค่าตัวเก็บประจุ C_s และตัวเหนี่ยวนำ L_s จะอาศัยวงจรในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงวงจรสมมูลของโหลดอินเวอร์เตอร์

เนื่องจากการทำงานของอินเวอร์เตอร์ต้องการโหลดที่มีกระแสล้าหลังแรงดันเพื่อให้สวิตช์ไวงานทำงานแบบเรโซแนนซ์ในภาคแรงดันศูนย์ (Zero voltage resonant switch) อันเป็นการช่วยลดกำลังสูญเสียในสวิตช์ไวงานของอินเวอร์เตอร์ลงได้มาก จึงต้องออกแบบให้โหลดของอินเวอร์เตอร์มีตัวประกอบกำลังแบบล้าหลัง (Lagging Power Factor) และความถี่ในการทำงานของสวิตช์จะต้องสูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ (Ws>Wo)

จากข้อกำหนดของเครื่องเชื่อม แรงดันไฟตรงเฉลี่ยด้านออกเท่ากับ 24 โวลต์ กระแสด้านออกเท่ากับ 120 แอมแปร์ กำลังด้านออกเท่ากับ 2,880 วัตต์ การออกแบบโดยอาศัยวิธี ac complex ร่วมกับการปรับค่าละเอียดเพื่อให้ได้ผลขั้นสุดท้ายโดยการใช้ผลการวิเคราะห์การทำงานของวงจรด้วยคอมพิวเตอร์นั้น จะได้ค่าอุปกรณ์ต่าง ๆ ในวงจรอินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 3.10 ดังนี้คือ L_s เท่ากับ 36.9 ไมโครเฮนรี่ R_1 เท่ากับ 1.8 โอห์ม C_s เท่ากับ 2.54 ไมโครฟารัด



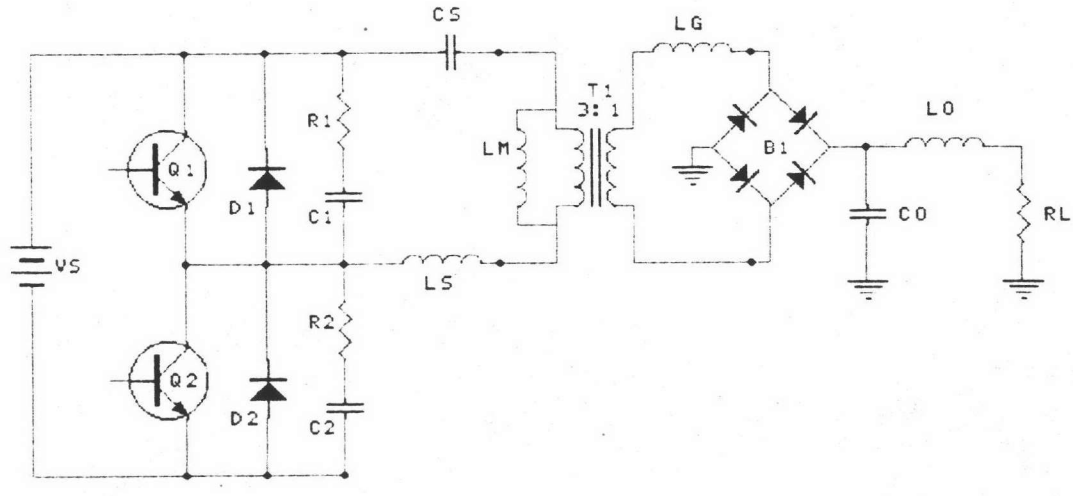
รูปที่ 3.11 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ของโหลดที่ต่อกับอินเวอร์เตอร์

รูปที่ 3.11 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของโหลดที่ต่ออยู่กับอินเวอร์เตอร์ จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ 19.2 กิโลเฮิรตซ์ซึ่งเป็นความถี่การทำงานของสวิตช์ โหลดจะมีตัว

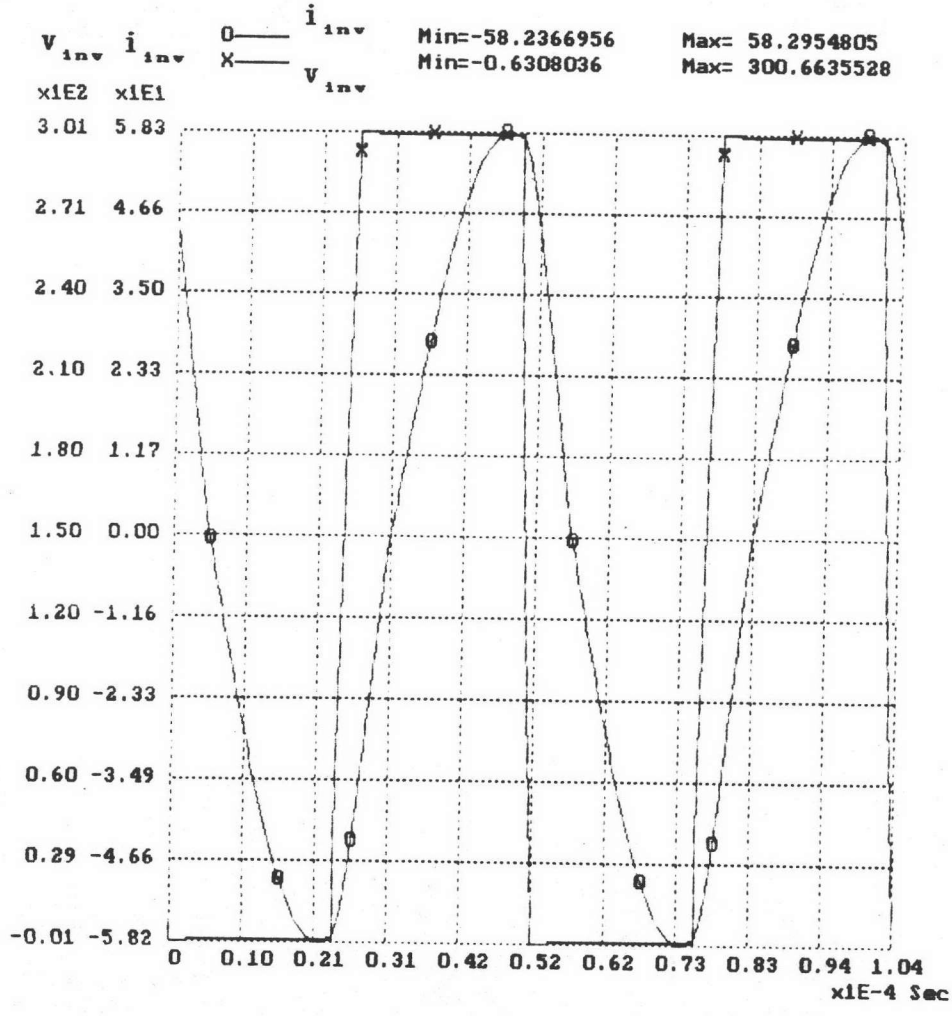
ประกอบกำลังแบบล้าหลัง(Lagging Power Factor) ตามต้องการโดยตัวประกอบกำลังจะมีค่าประมาณ 0.73 ซึ่งจะทำให้ได้กำลังออกสูงสุดแต่ยังทำให้การทำงานเป็นแบบเรโซแนนซ์ภาคแรงดันศูนย์ตามต้องการ

2. การวิเคราะห์การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ด้วยคอมพิวเตอร์

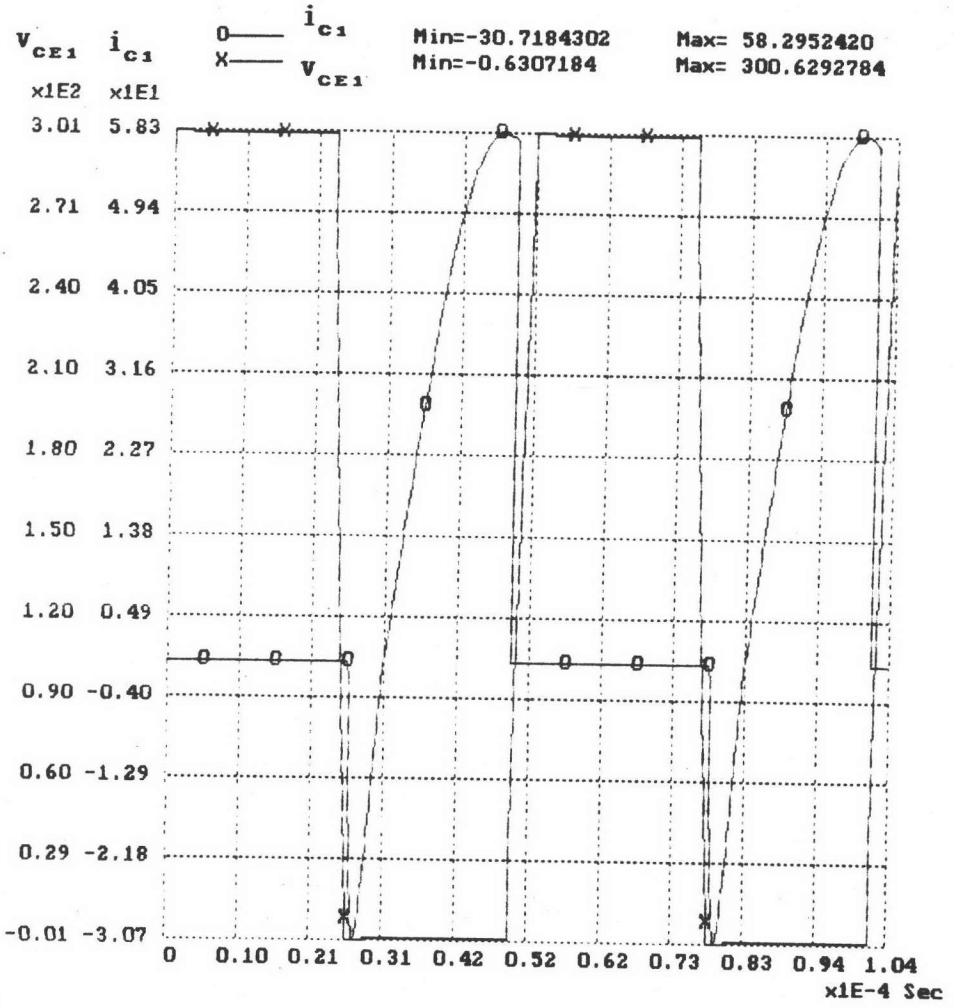
ในการวิเคราะห์การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์รูปที่ 3.12 ด้วยคอมพิวเตอร์จะทำให้เข้าใจการทำงานของอินเวอร์เตอร์(เมื่อ LM เป็นค่าความเหนี่ยวนำสร้างสนามแม่เหล็กค่าเท่ากับ 1.2 มิลลิเฮนรี่ LG เป็นค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลงและค่าความเหนี่ยวนำของสายต่อวงจรมีค่าเท่ากับ 1 ไมโครเฮนรี่ ส่วน LO เป็นค่าความเหนี่ยวนำของสายไฟเชื่อมมีค่าเท่ากับ 4 ไมโครเฮนรี่) และสามารถปรับค่าอุปกรณ์ให้ได้กำลังงานด้านออกตรงตามที่เราต้องการ นอกจากนี้จะทำให้ทราบขนาดและรูปร่างของกระแสและแรงดันของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในวงจร ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการเลือกชนิดและออกแบบพิกัดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการวิเคราะห์การทำงานของวงจรด้วยคอมพิวเตอร์ในภาวะอยู่ตัวได้รูปคลื่นของกระแสและแรงดันในภาวะอยู่ตัวที่สำคัญ ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.13-3.20 ผลจากการวิเคราะห์การทำงานของวงจรด้วยคอมพิวเตอร์จะได้นำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองในบทต่อไป การวิเคราะห์การทำงานของวงจรด้วยคอมพิวเตอร์จะทำการวิเคราะห์การทำงานในช่วงเวลา 2 วัฏจักร (cycle)การทำงาน



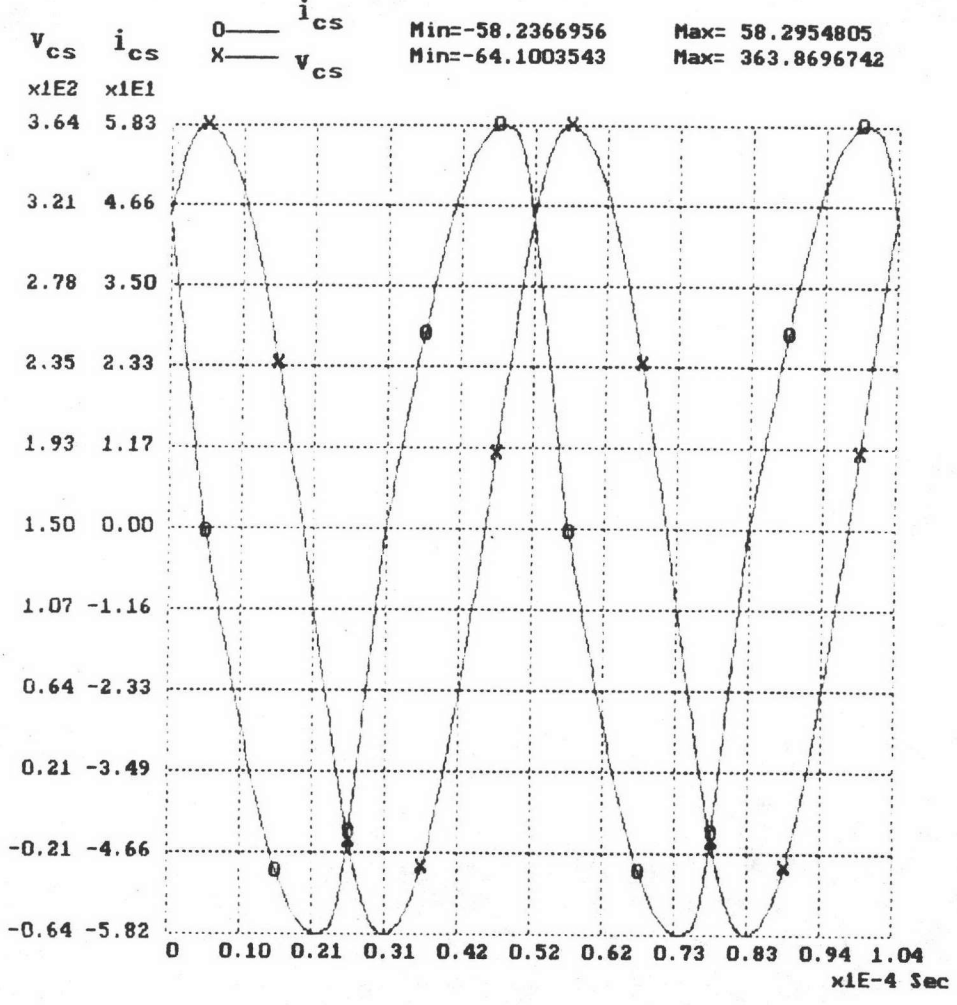
รูปที่ 3.12 แสดงวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์



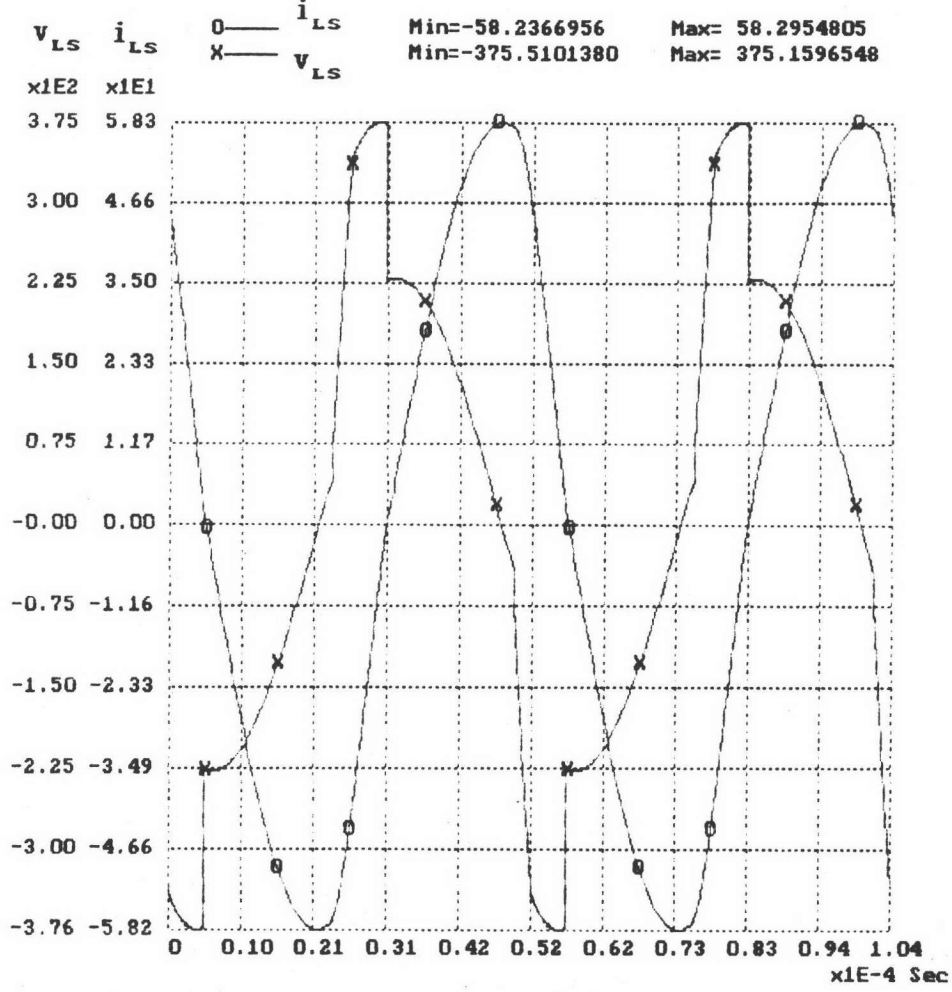
รูปที่ 3.13 กระแสและแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์



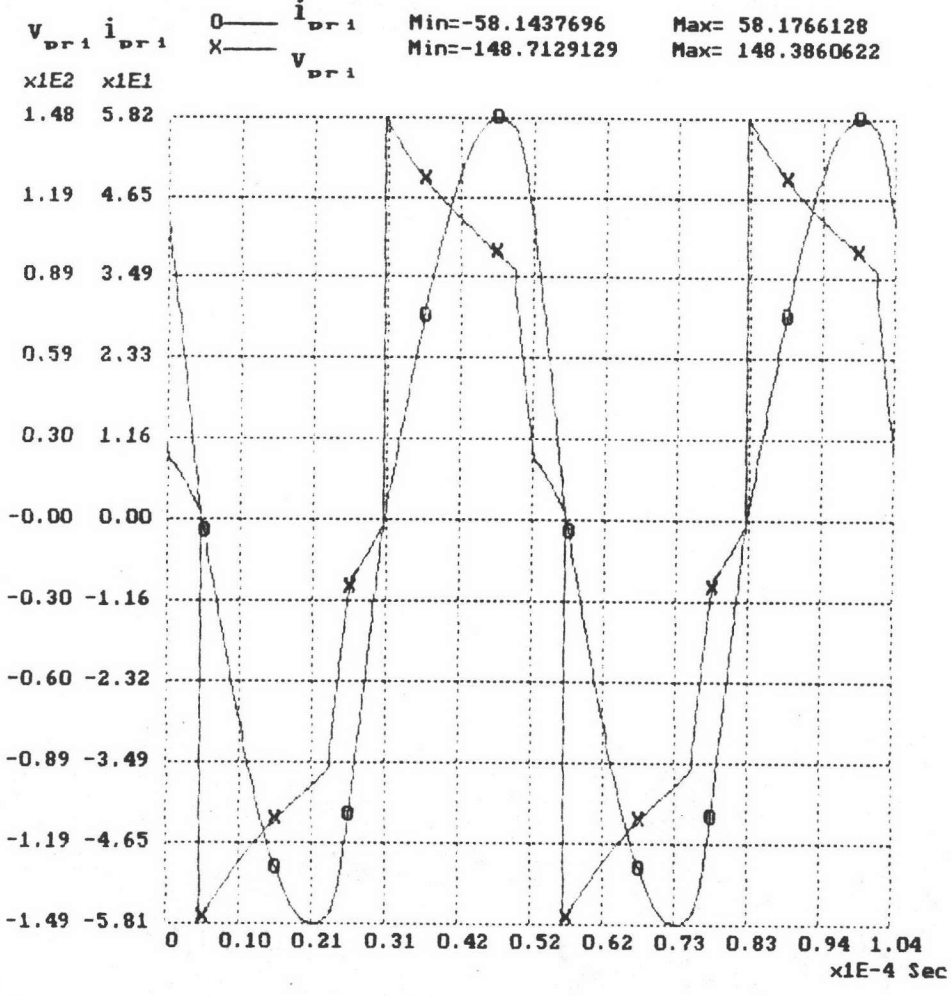
รูปที่ 3.14 กระแสผ่านทรานซิสเตอร์กำลังซึ่งมีไดโอดขนานอยู่และแรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์กำลัง



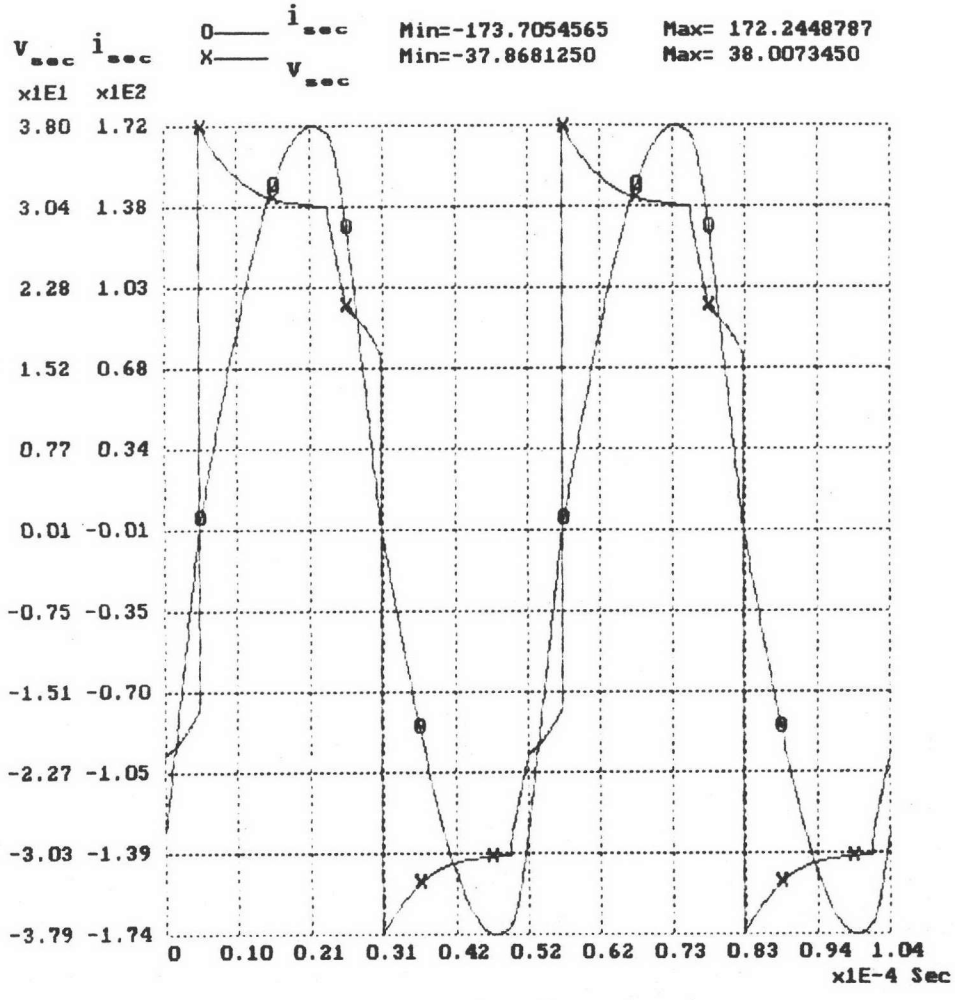
รูปที่ 3.15 แสดงกระแสและแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_s



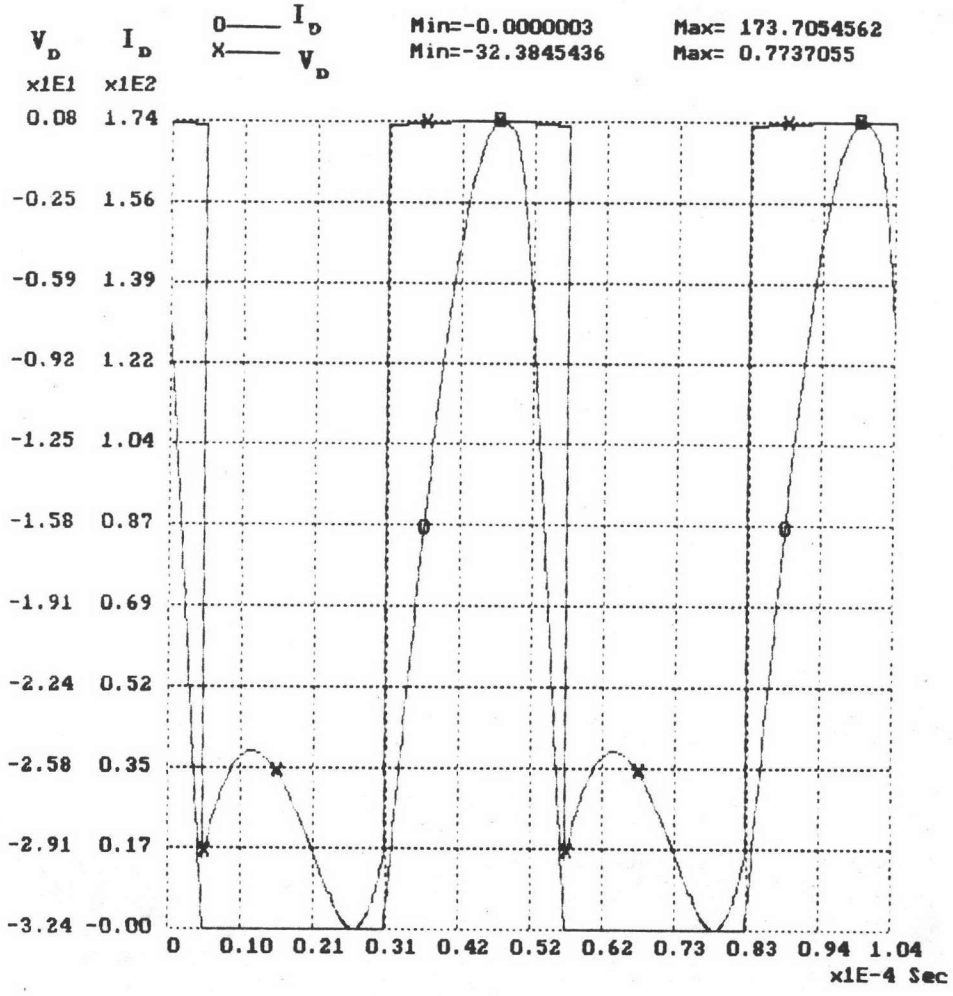
รูปที่ 3.16 แสดงกระแสและแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_s



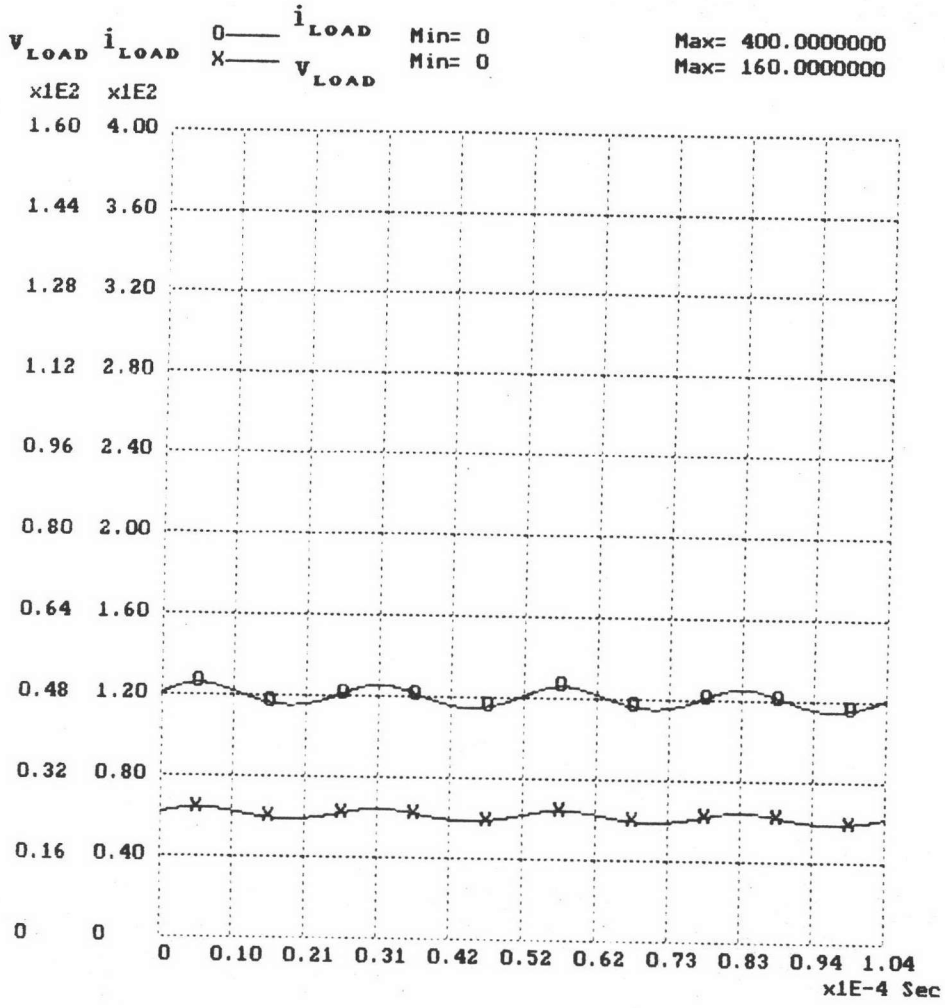
รูปที่ 3.17 แสดงกระแสด้านปฐมภูมิและแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง



รูปที่ 3.18 แสดงกระแสด้านทุติยภูมิและแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง



รูปที่ 3.19 กระแสผ่านไดโอดกำลังและแรงดันคร่อมไดโอดกำลัง



รูปที่ 3.20 กระแสและแรงดันคร่อมโหลด

3. <u>การทำงานของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง</u>

การทำงานของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงในรูปที่ 3.12 ทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 ของวงจรอินเวอร์เตอร์จะสลับกันนำกระแส ทำให้แรงดันออกของอินเวอร์เตอร์เป็นรูปสี่เหลี่ยมซึ่งมีค่ายอดถึงยอดเท่ากับแรงดันไฟตรง (DC Bus) และมีความถี่เท่ากับคาบของการทำงานของสวิตช์ การทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบเรโซแนนซ์ในภาคแรงดันศูนย์จะเป็นดังนี้ สมมุติว่าให้ทรานซิสเตอร์ Q_2 นำกระแสก่อนกระแสจะไหลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงผ่านตัวเก็บประจุ Cs ผ่านหม้อแปลงกำลัง ผ่านตัวเหนี่ยวนำ Ls และผ่านทรานซิสเตอร์ Q_2 เมื่อทรานซิสเตอร์ Q_2 นำกระแสได้ระยะหนึ่งเราจะสั่งให้ทรานซิสเตอร์ Q_2 หยุดนำกระแส

โดยไม่มีการสั่งให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 นำกระแส ในขณะนี้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำยังคงไหลในทิศทางเดิม แต่จะถ่ายโอนจากทรานซิสเตอร์ Q_2 ไปยังตัวเก็บประจุ C_2 ทำให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ C_2 เพิ่มสูงขึ้นในขณะที่แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 ลดต่ำลง จนกระทั่งแรงดันที่ขั้วอาโนดเทียบกับคาโธดของไดโอด D_1 เป็นบวก กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_2 จะถ่ายโอนมาไหลผ่านไดโอด D_1 แทน ในช่วงนี้แรงดันที่ตกคร่อมทรานซิสเตอร์ Q_1 มีค่าเป็นลบน้อย ๆ จนอาจถือได้ว่าเป็นศูนย์ ทรานซิสเตอร์ Q_1 จะถูกขับนำให้สามารถนำกระแสได้ก่อนที่กระแสในตัวเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนทิศทาง เมื่อกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวเริ่มเปลี่ยนทิศทางกระแสที่ไหลผ่านไดโอด D_1 จะถ่ายโอนมาไหลผ่านทรานซิสเตอร์ Q_1 ผ่านตัวเหนี่ยวนำ Ls ผ่านหม้อแปลงกำลัง และผ่านตัวเก็บประจุ Cs จะเห็นได้ว่าการเริ่มนำกระแสของสวิตช์จะเริ่มนำกระแสในขณะที่มีแรงดันประมาณศูนย์ (Zero Voltage Turn On) ตามที่ได้ออกแบบไว้ เมื่อทรานซิสเตอร์ Q_1 นำกระแสได้ระยะหนึ่งเราจะสั่งให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 หยุดนำกระแส โดยไม่มีการสั่งให้ทรานซิสเตอร์ Q_2 นำกระแส ในขณะนี้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำยังคงไหลในทิศทางเดิม แต่จะถ่ายโอนจากทรานซิสเตอร์ Q_1 ไปยังตัวเก็บประจุ C_1 ทำให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ C_2 ลดต่ำลงจนกระทั่งแรงดันที่ขั้วอาโนดเทียบกับคาโธดของไดโอด D_2 เป็นบวก กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_1 จะถ่ายโอนมาไหลผ่านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ผ่านไดโอด D_2 แทน ในช่วงนี้แรงดันที่ตกคร่อมทรานซิสเตอร์ Q_2 มีค่าเป็นลบน้อย ๆ จนอาจถือได้ว่าเป็นศูนย์ ทรานซิสเตอร์ Q_2 จะถูกขับนำให้สามารถนำกระแสได้ก่อนที่กระแสในตัวเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนทิศทาง เมื่อกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวเริ่มเปลี่ยนทิศทาง กระแสที่ไหลผ่านไดโอด D_2 จะถ่ายโอนมาไหลผ่านทรานซิสเตอร์ Q_2 ผ่านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ผ่านตัวเก็บประจุ Cs ผ่านหม้อแปลงกำลัง และไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ Ls เมื่อทรานซิสเตอร์ Q_2 นำกระแสได้ระยะหนึ่งเราจะสั่งให้ทรานซิสเตอร์ Q_2 หยุดนำกระแส ต่อจากนั้นจะเริ่มต้นวัฏจักรใหม่ตามที่กล่าวมา

4. <u>การเลือกพิกัดของทรานซิสเตอร์และไดโอดกำลังด้านขาออก</u>

ในการเลือกขนาดพิกัดของทรานซิสเตอร์และไดโอดกำลัง จะใช้วิธีการพิจารณาแรงดันที่ตกคร่อมตัวอุปกรณ์และกระแสที่ไหลผ่านตัวอุปกรณ์ต่าง ๆ จากการวิเคราะห์วงจรในรูปที่ 3.12 ด้วยคอมพิวเตอร์จะได้รูปคลื่นของกระแสผ่านทรานซิสเตอร์และแรงดัน

คร่อมทรานซิสเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ส่วนรูปคลื่นกระแสผ่านไดโอดกำลังและแรงดันคร่อมไดโอดกำลังที่ได้จากการวิเคราะห์วงจรด้วยคอมพิวเตอร์ แสดงในรูปที่ 3.19

4.1 <u>การเลือกพิกัดของทรานซิสเตอร์</u> จากผลของการวิเคราะห์วงจรในรูป 3.12 ด้วยคอมพิวเตอร์ค่ายอดของกระแสผ่านทรานซิสเตอร์กำลังมีค่าเท่ากับ 58 แอมแปร์ โดยทั่วไปการกำหนดพิกัดของทรานซิสเตอร์จะเป็นการกำหนดพิกัดที่ 25 องศาเซลเซียส แต่การเลือกพิกัดใช้งานต้องคำนึงถึงอุณหภูมิขณะทำงาน ในการออกแบบได้มีการประเมินอุณหภูมิที่ตัวถังขณะทำงาน เมื่อมีแผ่นระบายความร้อนให้ตัวถังของทรานซิสเตอร์มีอุณหภูมิไม่เกิน 60 องศาเซลเซียสและประเมินอุณหภูมิห้องมีค่าไม่เกิน 45 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณา thermal derating factor ของสารกึ่งตัวนำพิกัดของกระแสทรานซิสเตอร์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสจะลดลงเหลือประมาณ 0.7 เท่าของพิกัดเมื่ออุณหภูมิที่ตัวถังเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ดังนั้นจะต้องใช้ทรานซิสเตอร์ที่มีพิกัดกระแสที่อุณหภูมิของตัวถัง 25 องศาเซลเซียสเท่ากับ 82 แอมแปร์ และเมื่อคำนึงถึงการ overload ประมาณ 1.5 เท่ากับค่า safety factor ประมาณ 1.5 เท่าจะต้องใช้ทรานซิสเตอร์ที่มีพิกัดของกระแสที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเท่ากับ 184 แอมแปร์ แต่อย่างไรก็ตามทรานซิสเตอร์ที่มีพิกัดของกระแส 184 แอมแปร์ ไม่เป็นค่าที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด จึงเลือกใช้ทรานซิสเตอร์ที่มีพิกัดของกระแสที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเท่ากับ 200 แอมแปร์ ส่วนค่ายอดของแรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์มีค่าเท่ากับ 300 โวลต์ ในการเลือกพิกัดแรงดันของทรานซิสเตอร์จะต้องทนต่อภาวะชั่วครู่และภาวะอยู่ตัวประมาณสองเท่าจึงเลือกใช้พิกัดแรงดัน 600 โวลต์ ทรานซิสเตอร์ที่เลือกจะเป็นแบบโมดูล (Fuji Simiconductor, 1988) โดยในหนึ่งโมดูลจะมีทรานซิสเตอร์กำลังอยู่สองตัวและแต่ละตัวมีไดโอดฟื้นตัวเร็ว (Fast Recovery Diode) ต่อขนานอยู่กับทรานซิสเตอร์กำลังอยู่ภายใน

4.2 <u>การเลือกพิกัดของไดโอดกำลังด้านขาออก</u> จากผลการวิเคราะห์วงจรด้วยคอมพิวเตอร์ในรูป 3.18 พบว่าค่ายอดของกระแสผ่านไดโอดกำลังด้านขาออกมีค่าเท่ากับ 173 แอมแปร์ ประมาณค่าปั้นกระแสอาร์เอ็มเอสเท่ากับ 85 แอมแปร์ ในการออกแบบพิกัดของไดโอดกำลังด้านขาออกนั้นจะเหมือนกับการออกแบบพิกัดไดโอดกำลังด้านขาเข้า ดังรายละเอียดที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น โดยจะคำนึงถึงค่า thermal derating factor ประมาณ 0.7 เท่าของพิกัดเมื่ออุณหภูมิที่ตัวถังเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ค่า overload ประมาณ 1.5 เท่าและค่า safety factor ประมาณ 1.5 เท่า ดังนั้นจะต้องใช้ไดโอดที่มี

พิกัดของกระแสที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเท่ากับ 273 แอมแปร์ แต่อย่างไรก็ตาม ไดโอดที่มีพิกัดของกระแส 273 แอมแปร์ ไม่เป็นค่าที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดจึงเลือกใช้ไดโอดที่มีพิกัดของกระแสที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเท่ากับ 300 แอมแปร์ และพิกัดแรงดัน 100 โวลต์ที่มีขายตามท้องตลาดมาใช้งาน

5. การเลือกชนิดและพิกัดตัวเก็บประจุ C_s

จากผลการวิเคราะห์วงจรด้วยคอมพิวเตอร์ในรูป 3.15 ทำให้ทราบขนาดของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ ที่จะใช้ในการกำหนดพิกัดแรงดันของตัวเก็บประจุ จะเห็นได้ว่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีรูปคลื่นใกล้เคียงไซน์ มีความถี่ประมาณ 19.2 กิโลเฮิรตซ์ และมีแรงดันค่ายอดเท่ากับ 363 โวลต์ ตัวเก็บประจุที่ใช้ต้องเป็นชนิดที่ใช้กับความถี่สูงอีกทั้งต้องทนแรงดันได้จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิด POLYPROPYLENE (MKP10) ขนาด 0.047 μF ที่มีพิกัดแรงดันไฟตรงได้เท่ากับ 630 โวลต์ หรือพิกัดแรงดันเอซีอาร์เอ็มเอส(Vrms)ได้เท่ากับ 400 โวลต์ที่ความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์ (WIMA INC.,1986) จำนวน 54 ตัวต่อขนานกัน ทำให้ตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ 2.54 ไมโครฟารัด ซึ่งจะนำมาใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์

6. วงจรสนับเบอร์ (Snubber Circuit)

ในการออกแบบวงจรสนับเบอร์แบบขนานที่ทำงานร่วมกับทรานซิสเตอร์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ทำงานแบบเรโซแนนซ์ภาคแรงดันศูนย์นั้น การออกแบบจะต้องทำให้ความลาดเอียงของแรงดันคร่อมสวิตช์มีค่าเหมาะสมโดยจะต้องมีค่าไม่น้อยเกินไป เพื่อไม่ให้กำลังสูญเสียมีค่ามาก ทั้งนี้ถ้าความลาดเอียงน้อยจะทำให้กระแสและแรงดันที่เวลาเดียวกันในตอนหยุดนำกระแสมีค่ามากทำให้เกิดการสูญเสียมาก แต่ถ้าความลาดเอียงของแรงดันคร่อมสวิตช์ในตอนหยุดนำกระแสมีค่ามากเกินไปทำให้แรงดันที่สวิตช์ตัวที่จะนำกระแสไม่ลดลงจนเป็นศูนย์ทำให้เกิดกระแสกระชากในสวิตช์ในตอนที่นำกระแสเป็นผลทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียในขณะเริ่มนำกระแสมาก ในการออกแบบค่าตัวเก็บประจุของสนับเบอร์ ในการออกแบบเบื้องต้นจะประมาณค่าตัวเก็บประจุ โดยสมมุติให้กระแสเป็นไซน์และให้ Ampare-Sec ของกระแสโหลด(I_L) ในช่วงที่สวิตช์หยุดนำกระแสจนถึงกระแสโหลดเปลี่ยนทิศทางมีค่าเพียงพอที่จะทำให้การเปลี่ยนแปลงของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าไม่น้อยกว่าแรงดันของแหล่งจ่ายไฟตรง จากนั้นจะมีการปรับค่าตัวเก็บประจุโดยใช้การวิเคราะห์วงจรด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อให้สนับเบอร์ทำงาน

อย่างเหมาะสมในสภาวะต่าง ๆ ของโหลดซึ่งจะได้ค่าตัวเก็บประจุสุดท้ายเท่ากับ 0.22 ไมโครฟารัด สำหรับความต้านทานที่มีอยู่ในวงจรทำหน้าที่เป็นตัว damp เพื่อไม่ให้เกิดการแกว่งของกระแสและแรงดัน ซึ่งจากการออกแบบโดยวิธีดังกล่าวได้ค่าตัวต้านทานเท่ากับ 1 โอห์ม ผลจากการวิเคราะห์วงจรด้วยคอมพิวเตอร์แสดงดังรูป 3.14 จากรูปจะเห็นว่าที่เวลาเดียวกันทั้งกระแสและแรงดันในตอนหยุดนำกระแสมีค่าน้อยและไม่เกิดกระแสกระชากในสวิตช์

7. การออกแบบหม้อแปลงกำลังความถี่สูง

ในการออกแบบหม้อแปลงกำลังความถี่สูง สิ่งที่จะต้องคำนวณและเลือกใช้ก็คือ ชนิดลักษณะโครงสร้างและขนาดของแกนแม่เหล็ก อัตราส่วนของจำนวนรอบ และจำนวนรอบของขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิ ขนาดของเส้นลวดที่ใช้พัน ฉนวนทางไฟฟ้า ความร้อนของเส้นลวด จากการประมาณกำลังงานที่ขั้นงานเท่ากับ 3 กิโลวัตต์และประเมินประสิทธิภาพของหม้อแปลงความถี่สูงเท่ากับ 95 เปอร์เซนต์ ดังนั้นกำลังงานที่เข้าสู่ขดปฐมภูมิจะมีค่าประมาณ 3.16 กิโลวัตต์

เนื่องจากความถี่ในการทำงานของอินเวอร์เตอร์มีค่าสูง แกนเหล็กจึงไม่เหมาะสมนักในการนำมาใช้งานในวงจรอินเวอร์เตอร์ เพราะจะเกิดกำลังการสูญเสียในแกนเหล็กค่อนข้างมาก นอกจากนี้แกนเหล็กยังมีการตอบสนองต่อความถี่สูงได้ไม่ดีนัก เนื่องจากค่าความซึมซาบของสารแม่เหล็กที่ความถี่สูงจะมีค่าต่ำกว่าค่าความซึมซาบของสารแม่เหล็กที่ความถี่ต่ำมาก ดังนั้นจึงได้เลือกใช้แกนเฟอร์ไรต์เป็นแกนแม่เหล็กของตัวหม้อแปลงกำลัง

การเลือกขนาดของแกนเฟอร์ไรต์จะใช้วิธีการคำนวณแบบ Core Geometry K_g Approach (Slobodan Ćuk and R.D.Middlebrook,1983) ซึ่งเป็นวิธีการออกแบบที่ใช้กำลังการสูญเสียของลวดทองแดง(P_{cu}) ในการกำหนดขนาดของแกนแม่เหล็กแทนการใช้ค่าอุณหภูมิเพิ่มหรือความหนาแน่นของกระแสในลวดตัวนำ ซึ่งในการออกแบบโดยวิธีนี้จะกำหนดลงไปเลยว่าต้องการให้กำลังการสูญเสียของลวดตัวนำทองแดงเท่าไร ซึ่งหมายถึงว่าตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบจะมีความร้อนเกิดขึ้นในลวดตัวนำมากหรือน้อยแค่ไหน สูตรในการคำนวณค่า K_g ซึ่งขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของตัวเหนี่ยวนำและเป็นตัวกำหนดขนาดของแกนเฟอร์ไรต์ที่จะใช้ในการพันตัวเหนี่ยวนำเป็นดังนี้คือ

$$K_g = WS^2/t$$

$$= \rho [V_1^2 I_{1rms}^2 + V_2^2 I_{2rms}^2]/[8k B_{max}^2 f^2 P_{cu}] \quad (3.3)$$

$$K_g = WS^2/t = \rho P_{out}^2/[4k B_{max}^2 f^2 P_{cu}] \quad (3.4)$$

โดยที่

W คือพื้นที่ช่องหน้าต่างของแกนหม้อแปลง

S คือขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกนหม้อแปลง

t คือความยาวเฉลี่ยของเส้นลวดที่ใช้พันแกนหนึ่งรอบ

ρ คือค่าความต้านทานจำเพาะของทองแดง

P_{out} คือกำลังงานที่หม้อแปลงส่งผ่าน = $V_1 I_{1rms}$ ประมาณ $V_2 I_{2rms}$

k คือ Window Utilization Factor

B_{max} คือค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด

f คือความถี่ที่ใช้งาน

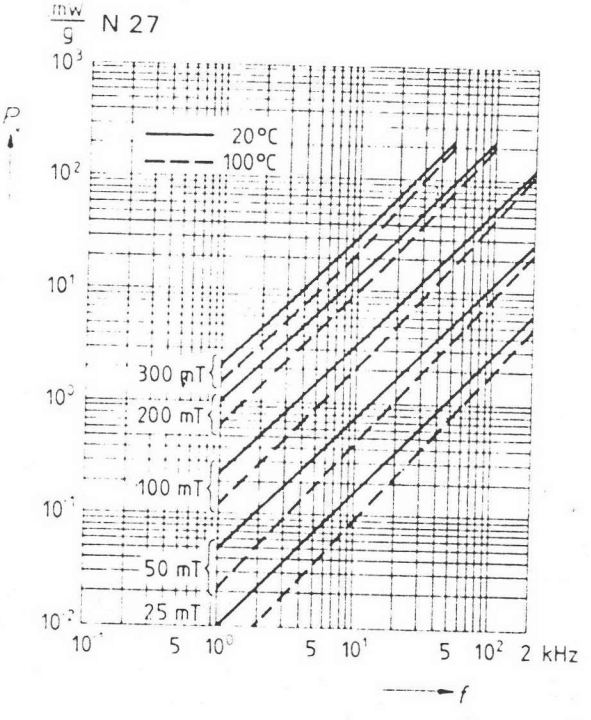
P_{cu} คือค่ากำลังสูญเสียในทองแดงของขดลวด

จากสมการ (3.10) เราจะคำนวณค่า K_g โดยใช้ข้อกำหนดต่าง ๆ ของตัวหม้อแปลงและข้อจำกัดของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสูงสุด(B_{max}) ข้อจำกัดด้านการระบายความร้อน(P_{cu}) ตลอดจนสัมประสิทธิ์การใช้ช่องหน้าต่างของแกน(k) ข้อกำหนดและขีดจำกัดเหล่านี้จะมีความสัมพันธ์กับขนาดแกน จากค่า K_g ที่คำนวณได้จากข้อกำหนดและขีดจำกัดดังกล่าวข้างต้น เราจะต้องเลือกแกนที่มีพื้นที่ช่องหน้าต่างของแกน ขนาดของพื้นที่หน้าตัดของแกนและความยาวเฉลี่ยของเส้นลวดที่ใช้พันแกนในหนึ่งรอบ เพื่อทำให้ค่า K_g ที่คำนวณจากขนาดของแกนสูงกว่า K_g ที่คำนวณได้จากข้อกำหนดและขีดจำกัดดังกล่าวข้างต้น ข้อกำหนดของตัวเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับลักษณะการทำงานของวงจร ส่วนขีดจำกัดต่าง ๆ จะมีแนวทางในการเลือกดังนี้คือ

7.1 <u>ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กสูงสุด</u> (B_{max}) เป็นค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กสูงสุดที่ยอมให้มีได้ อาจจะถูกกำหนดโดยกำลังสูญเสียในแกนแม่เหล็ก (coreloss) หรือการอิ่มตัวของแกนแม่เหล็ก (saturation core) ขึ้นอยู่กับว่าข้อจำกัดอัน

ไหนที่ให้ค่า B_{max} ต่ำกว่า

จากกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับกำลังสูญเสียในแกนต่อน้ำหนักแกนในรูปที่ 3.21 (Siemens Ferrites Soft - Magnetic Material Data Book, 1986/87) จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ 19.2 กิโลเฮิรตซ์และ B_{max} มีค่าเท่ากับ 0.15 เทสล่า จะมีกำลังสูญเสียในแกนประมาณ 19 มิลลิวัตต์ต่อกรัมและแกน EC-70 มีน้ำหนัก 126 กรัมต่อชิ้น ดังนั้นกำลังสูญเสียในแกนหม้อแปลงประมาณ 5 วัตต์ต่อตัว ค่า B_{max} ที่ออกแบบมานี้จะนำไปใช้ในการคำนวณหาจำนวนรอบของขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิต่อไป



รูปที่ 3.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ต่อน้ำหนักกับความถี่

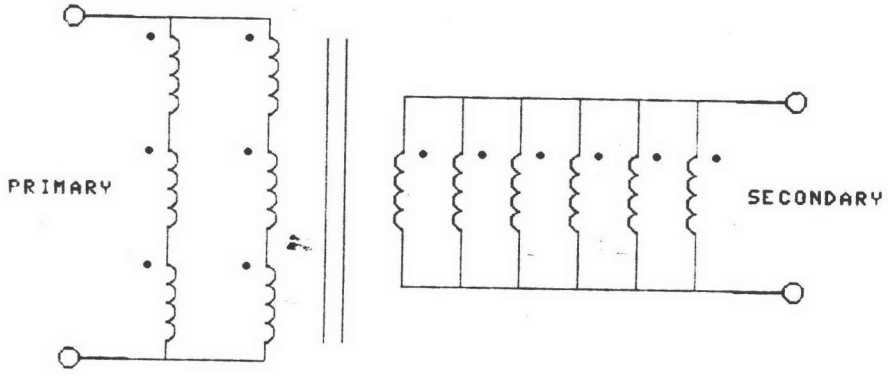
7.2 <u>สัมประสิทธิ์การใช้ช่องหน้าต่างของแกน</u> (Window Utilization Factor) ปกติจะใช้ค่าระหว่าง 0.3 - 0.6 แล้วแต่การพันและขนาดเส้นลวดที่ใช้พัน แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้การพันเป็นแบบไบฟิลลาร์ (Bifillar) คือพันขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิไปพร้อม ๆ กัน เพื่อลดค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล (Leakage Inductance) ของหม้อแปลง

(Slobodan Ćuk and R.D. Middlebrook, 1983) และต้องใส่ปลอกฉนวนใยแก้วหุ้มเส้นลวดทั้งสองขด เพื่อป้องกันปัญหาการลัดวงจรระหว่างขดเส้นลวดตัวนำทั้งสองขด รวมทั้งลวดที่ใช้พันมีขนาดค่อนข้างใหญ่จึงเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพในการใช้ช่องหน้าต่างลดลงจึงเลือกให้มีขนาด K = 0.35

7.3 <u>การเลือกค่ากำลังการสูญเสียในลวดตัวนำ</u> (P_{cu}) การเลือกค่ากำลังการสูญเสียในลวดตัวนำ มีความสำคัญสำหรับการออกแบบโดยวิธี K_g Approach ซึ่งในการออกแบบจะมีการกำหนดกำลังการสูญเสียในขดลวดตัวนำทั้งสองขด เมื่อคำนวณหาขนาดของแกนจากค่าของ P_{cu} ที่กำหนดจากขนาดของแกนที่คำนวณได้จะต้องพิจารณาว่าความร้อนที่เกิดขึ้นในลวดตัวนำมีค่าสูงเกินไปหรือไม่ ถ้าอุณหภูมิของลวดตัวนำมีค่าสูงหรือต่ำเกินไปจะต้องมีการปรับค่า P_{cu} ใหม่จนกว่า P_{cu} จะมีค่าเหมาะสมกับขนาดของแกน ค่า P_{cu} ที่ยอมให้มีได้ในหม้อแปลงโดยทั่วไปแล้วมักจะออกแบบให้มีค่าอยู่ในช่วง 0.5 - 1.5 เปอร์เซนต์ของกำลังหม้อแปลงที่ส่งผ่าน

7.4 <u>ค่าความต้านทานจำเพาะของเส้นลวดทองแดง</u> (ρ) ค่านี้เป็นคุณสมบัติของทองแดงที่ขึ้นกับอุณหภูมิ โดยกำหนดให้อุณหภูมิของตัวเหนี่ยวนำขณะมีภาระ (load) เต็มที่มีค่าประมาณ 60 องศาเซลเซียส ค่า ρ มีค่าเท่ากับ $2*10^{-8}$ โอห์ม-เมตร

จากข้อกำหนดและขีดจำกัดดังกล่าวข้างต้น ได้คำนวณหาค่า K_g และเลือกขนาดของแกนในที่นี้เลือกแกน EC70 ประมาณว่าใช้แกนทั้งหมด 6 ตัว และแต่ละตัวมีกำลังการสูญเสียของขดลวดทองแดงประมาณ 5 วัตต์ รวมกับกำลังสูญเสียในแต่ละแกนอีก 5 วัตต์ ได้กำลังสูญเสียในตัวหม้อแปลงทั้งหมด 10 วัตต์ ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของตัวเหนี่ยวนำไม่สูงเกินไป และเพื่อให้สะดวกในการต่อวงจรและลดความซับซ้อนในการพันหม้อแปลง จึงใช้วิธีพันหม้อแปลงแต่ละตัวเป็นแบบ 1:1 แล้วนำหม้อแปลงมาต่อกันดังรูป 3.22



รูปที่ 3.22 แสดงการต่อหม้อแปลงกำลังความถี่สูง

เมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์วงจรด้วยคอมพิวเตอร์ ในรูปที่ 3.17 และรูปที่ 3.18 พบว่าค่ายอดแรงดันปฐมภูมิเท่ากับ 148 โวลต์ ค่ายอดของกระแสด้านปฐมภูมิเท่ากับ 58 แอมแปร์ ส่วนค่ายอดแรงดันทุติยภูมิเท่ากับ 38 โวลต์และค่ายอดของกระแสด้านทุติยภูมิเท่ากับ 172 แอมแปร์ ดังนั้นหม้อแปลงแต่ละตัวที่นำมาต่อในวงจรจะมีกระแสอาร์เอ็มเอส I_{rms} = 20 แอมแปร์ ค่าแรงดันแต่ละขด V_p = 38 โวลต์และใช้พารามิเตอร์ k , ρ , P_{cu} ดังได้กล่าวไว้ข้างต้น เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ลงในสมการ (3.3) จะได้

$$K_g = 1.948*10^{-10} \quad \text{เมตร}^5$$

จากตารางที่ 3.1 พบว่าค่า K_g ของแกน EC70 เท่ากับ $2.15*10^{-10}$ เมตร^5 มีค่ามากกว่า K_g ที่คำนวณได้จากข้อกำหนดและขีดจำกัดของหม้อแปลง ดังนั้นจึงเลือกใช้แกน EC70 ในการทำหม้อแปลง

ตารางที่ 3.1 แสดงค่า K_g กับขนาดของหม้อแปลง

(SIEMEMS COMPONENT SERVICE, 1983)

CORE TYPE	WINDOW $(mm)^2$	t (mm)	A $(mm)^2$	K_g $(m)^5$	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
EC-35	97.00	52.0	71.00	9.23×10^{-12}	6887
EC-41	134.00	62.0	106.00	2.43×10^{-11}	14204
EC-52	212.00	74.0	141.00	5.70×10^{-11}	29892
EC-70	469.00	97.0	211.00	2.15×10^{-10}	98959

7.5 <u>การคำนวณหาจำนวนรอบของเส้นลวดทองแดง</u> (N) คือการคำนวณหาจำนวนรอบของขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิ จำนวนรอบของขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิมีความสำคัญต่อการอิ่มตัวของแกนแม่เหล็กของหม้อแปลง ในการคำนวณจำนวนรอบนั้น จะใช้สมการที่ (3.5) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณจำนวนรอบต่ำสุดที่ใช้งานได้โดย B_{max} ไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ และจะพิจารณาเฉพาะในกรณีที่ไม่มีกระแสไฟตรงไหลเข้าหม้อแปลง อีกทั้งแรงดันที่คร่อมหม้อแปลงจะต้องเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่สมมาตร

$$N = V/4B_{max}Sf \qquad (3.5)$$

โดยที่ V คือค่ายอดของแรงดันที่ตกคร่อมหม้อแปลง

B_{max} คือค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสูงสุดที่ยอมให้เกิดในแกนเหล็ก

S คือพื้นที่หน้าตัดของแกนแม่เหล็กของหม้อแปลง

f คือความถี่ที่ใช้งาน

เมื่อพิจารณาหม้อแปลงทั้งหมด 6 ตัวต่อกันดังรูปที่ 3.23 จะเห็นว่าแรงดันตกคร่อมขดปฐมภูมิของหม้อแปลงแต่ละตัวมีค่ายอดเท่ากับ 38 โวลต์ จากข้อมูลในตารางที่ 3.1 แกนแม่เหล็กของหม้อแปลงเบอร์ EC-70 มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 211 ตารางมิลลิเมตร ส่วนความถี่จะต้องแทนค่าความถี่ที่ต่ำที่สุดที่ใช้งานซึ่งเท่ากับ 19.2 กิโลเฮิรตซ์ สำหรับ B_{max} ในที่นี้กำหนดให้มีค่า 0.15 จากนั้นแทนค่าต่าง ๆ ในสมการที่ 3.5 จะได้ค่า N เท่ากับ 16 รอบ และเนื่องจากหม้อแปลงมีอัตราส่วน 1:1 ดังนั้นจำนวนรอบขดทุติยภูมิจึงเป็น 16 รอบด้วย

7.6 <u>การคำนวณขนาดของเส้นลวดตัวนำ</u> ในการคำนวณขนาดของเส้นลวดตัวนำใช้สูตรดังต่อไปนี้

$$KW = NpAwp + NpAws \qquad (3.6)$$

เนื่องจาก Np = Ns ดังนั้น Awp = Aws จะได้ว่า

$$KW = 2NpAwp \qquad (3.7)$$

โดยที่ k คือ Utilization Factor

W คือ พื้นที่ช่องหน้าต่างของแกนหม้อแปลง

Np คือ จำนวนรอบของขดปฐมภูมิ

Ns คือ จำนวนรอบของขดทุติยภูมิ

Awp คือ พื้นที่หน้าตัดเส้นลวดตัวนำของขดปฐมภูมิ

Aws คือ พื้นที่หน้าตัดเส้นลวดตัวนำของขดทุติยภูมิ

จากตารางที่ 3.1 แกนขนาด EC-70 จะมี W = 469 ตารางมิลลิเมตร และจากหัวข้อที่แล้วจะได้ว่า Np = 16 รอบ และ k = 0.35 เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 3.7 จะได้ค่า Awp เท่ากับ 5.13 ตารางมิลลิเมตร

จากพื้นที่หน้าตัดของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิที่คำนวณได้จะมีขนาดใหญ่ ในทางปฏิบัติจะไม่ใช้ลวดตัวนำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดดังกล่าว เนื่องจากลวดตัวนำกระแสที่มีความถี่สูงจึงเกิดปรากฏการณ์นำกระแสเฉพาะที่ผิวลวดตัวนำ (Skin Depth) เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวจึงใช้เส้นลวดขนาดเล็ก ๆ หลายเส้นมาต่อขนานกัน เพื่อให้พื้นที่หน้าตัดในการนำกระแสเท่าเดิม ในการเลือกขนาดของเส้นลวดตัวนำขนาดเล็กจะต้องเลือกให้มีรัศมีที่เล็กกว่าความลึกผิวของทองแดงที่ความถี่สูงสุดที่ใช้งานจากสูตรการหา Skin Depth (δcu) (Keith H. Billings, 1989) มีค่าตามสมการ (3.18)

$$\delta = Km/\sqrt{f} \qquad (3.8)$$

โดยที่ δ คือ ความลึกผิวที่อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ (มิลลิเมตร)

f คือ ความถี่ที่ใช้งาน (เฮิรตซ์)

Km คือ ค่าคงที่ (สำหรับทองแดงมีค่า 65.5 ที่ 20 องศาเซลเซียส)

ดังนั้นที่ความถี่ 30 กิโลเฮิรตซ์ ความลึกผิวของทองแดงมีค่าเท่ากับ 0.463 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงเลือกใช้ลวดตัวนำเบอร์ SWG#33 ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.254 มิลลิเมตรและมีพื้นที่หน้าตัด 0.05067 ตารางมิลลิเมตร แสดงว่าต้องใช้ลวดตัวนำจำนวน 5.13/0.05067 = 101 เส้น และค่ากำลังสูญเสียในทองแดง (P_{cu}) ของหม้อแปลงแต่ละตัวสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$P_{cu} = 2[(I_{rms}^{2} \rho_{cu} l)/A] \qquad (3.9)$$

โดยที่ I_{rms} คือ ค่ากระแสอาร์เอ็มเอสที่ไหลผ่านแต่ละขดของหม้อแปลง

l คือ ความยาวของขดลวดแต่ละขด

A คือ พื้นที่หน้าตัดของทองแดงแต่ละขด

ρ_{cu} คือ ความต้านทานจำเพาะของทองแดง

ค่ากระแสอาร์เอ็มเอส (Irms) ที่ไหลผ่านหม้อแปลงแต่ละขดจากการวิเคราะห์วงจรด้วยคอมพิวเตอร์มีค่าเท่ากับ 20 แอมแปร์ ส่วนความยาวของขดลวด (l) สามารถคำนวณได้โดยใช้ค่าความยาวเฉลี่ยต่อรอบ (t) ของแกน EC-70 ซึ่งจะได้ว่า l เท่ากับ $97 \times 10^{-3} \times 16 = 1.552$ เมตร และพื้นที่หน้าตัดของทองแดง (A) เท่ากับ 0.05067 ตารางมิลลิเมตร เมื่อคิดรวม 101 เส้น จะได้ $A = 5.11$ ตารางมิลลิเมตร แทนค่าในสมการที่ 3.9 ได้

$$P_{cu} = 2[(20^{2} \times 2 \times 10^{-8} \times 1.552)/5.11 \times 10^{-6}]$$

$$P_{cu} = 4.86 \quad W$$

จากค่ากำลังสูญเสียในทองแดง เมื่อรวมกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนแม่เหล็ก (Core Loss) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5 วัตต์ จะได้กำลังสูญเสียรวมของหม้อแปลงเท่ากับ 9.68 วัตต์

8. <u>การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ</u>

ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ สิ่งที่ต้องคำนึงในการเลือกใช้อุปกรณ์คือลักษณะโครงสร้างและขนาดของแกนแม่เหล็ก จำนวนรอบ ขนาดของเส้นลวดที่ใช้ในการพันฉนวนไฟฟ้า ฉนวนความร้อนของเส้นลวด จากค่าตัวเหนี่ยวนำที่ได้ออกแบบไว้ ค่ายอดของกระแสและค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสที่ได้จากการวิเคราะห์วงจรด้วยคอมพิวเตอร์จะสามารถนำไปใช้ออกแบบตัวเหนี่ยวนำได้

ในการเลือกขนาดของแกนเฟอร์ไรต์จะใช้วิธีการคำนวณแบบ Core Geometry K_g Approach ข้อกำหนดและข้อจำกัดของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสูงสุด(B_{max}) ข้อจำกัดด้านการระบายความร้อน (P_{cu}) ตลอดจนสัมประสิทธิ์การใช้ช่องหน้าต่างของแกน (k) จะเหมือนกับข้อกำหนดและขีดจำกัดของการออกแบบหม้อแปลงกำลังดังรายละเอียดที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น

สูตรในการคำนวณค่า K_g ซึ่งขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของตัวเหนี่ยวนำและเป็นตัวกำหนดขนาดของแกนเฟอร์ไรต์ที่จะใช้ในการพันตัวเหนี่ยวนำ เป็นดังนี้คือ

$$K_g = Ws^2/t = \rho(L^2 I_{rms}^2 I_{peak}^2)/(kB_{max}^2 P_{cu}) \qquad (3.10)$$

โดยที่ w คือ พื้นที่ช่องหน้าต่างของแกนเฟอร์ไรต์

s คือ ขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกนเฟอร์ไรต์

t คือ ความยาวเฉลี่ยของเส้นลวดที่ใช้พันแกนในหนึ่งรอบ

ρ คือ ความต้านทานจำเพาะของเส้นลวดทองแดง

L คือ ค่าความเหนี่ยวนำที่ใช้ในการออกแบบ

I_{rms} คือ ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสที่ไหลในตัวนำทองแดงรับได้

I_{peak} คือ ค่ายอดของกระแสที่ไม่ทำให้แกนแม่เหล็กอิ่มตัว

k คือ Window Utilization Factor

B_{max} คือ ค่าความหนาแน่นสูงสุดของสนามแม่เหล็กในแกนแม่เหล็กที่ค่ายอดกระแส

P_{cu} คือ ค่ากำลังการสูญเสียในเส้นลวดทองแดง

จากหัวข้อการออกแบบวงจรภาคกำลัง เราได้ค่าตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรม (Ls) มีค่าเท่ากับ 36.9 ไมโครเฮนรี่ และกระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำจากผลการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ดังรูป 3.16 มีค่ายอดกระแสเท่ากับ 58 แอมแปร์ประมาณค่ากระแสอาร์เอ็มเอสเท่ากับ 41 แอมแปร์

ดังนั้นจากข้อกำหนดของตัวเหนี่ยวนำและขีดจำกัดดังกล่าวข้างต้น ได้คำนวณหาค่า K_g และเลือกขนาดของแกน ในที่นี้เลือกแกน EC70 ประมาณว่าใช้แกนทั้งหมด 4 ตัว ต่ออนุกรมกันและแต่ละแกนมีกำลังการสูญเสียของขดลวดทองแดงประมาณ 6 วัตต์ รวมกับกำลังสูญเสียในแต่ละแกนอีก 5 วัตต์ ได้กำลังสูญเสียในตัวเหนี่ยวนำทั้งหมด 11 วัตต์ ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของตัวเหนี่ยวนำไม่สูงเกินไป

สำหรับตัวเหนี่ยวนำแต่ละตัวที่นำมาอนุกรมกันจะมีขนาด L = 9.22 ไมโครเฮนรี่ ใช้กับกระแสอาร์เอ็มเอส I_{rms} = 41 แอมแปร์ ค่ายอดกระแส I_{peak} = 58 แอมแปร์ เมื่อใช้พารามิเตอร์ k , γ , P_{cu} ดังได้กล่าวไว้ข้างต้น เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ลงในสมการ (3.10) จะได้

$$K_g = 2.106*10^{-10} \quad \text{เมตร}^5$$

จากตารางที่ 3.1 พบว่าค่า K_g ของแกน EC70 เท่ากับ $2.15*10^{-5}$ เมตร^5 มีค่ามากกว่า K_g ที่คำนวณได้จากข้อกำหนดและขีดจำกัดของตัวเหนี่ยวนำ ดังนั้นจึงเลือกใช้แกน EC70 ในการทำตัวเหนี่ยวนำของอินเวอร์เตอร์

8.1 <u>การคำนวณจำนวนรอบของเส้นลวดทองแดง</u> (N) จากขนาดของแกนที่เลือกใช้ตลอดจนข้อกำหนดและขีดจำกัดด้านการอิ่มตัวของแกนแม่เหล็กสามารถคำนวณจำนวนรอบของตัวเหนี่ยวนำได้จากสมการ

$$N = LI_{peak}/(B_{max} S) \qquad (3.11)$$

แทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ลงในสมการ (3.11) จะได้ว่า จำนวนรอบที่จะพันบนแกนเท่ากับ 17 รอบ

8.2 <u>การคำนวณขนาดเส้นลวดตัวนำ</u> (A_w) จะใช้สูตรการคำนวณขนาดเส้นลวดตัวนำดังนี้

$$A_w = (KW)/N \qquad (3.12)$$

จากตารางที่ 3.1 แกนขนาด EC-70 จะมี W เท่ากับ 469 ตารางมิลลิเมตร และจากหัวข้อที่แล้ว N = 17 รอบ และให้ K = 0.35 เมื่อแทนค่าในสมการที่ (3.12) จะได้ค่า A_w เท่ากับ 9.66 ตารางมิลลิเมตร เราเลือกลวดตัวนำเบอร์ SWG#33 มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.254 มิลลิเมตรและมีพื้นที่หน้าตัด 0.05067 ตารางมิลลิเมตร แสดงว่าต้องใช้ลวดจำนวน 9.66/0.05067 = 190 เส้น ในการพันตัวเหนี่ยวนำจะใช้ลวดจำนวน 190 เส้นมาตีเกลียวให้กลมเป็นเส้นเดียวกัน แล้วใส่ปลอกฉนวนใยแก้วเป็นฉนวนไฟฟ้าก่อนทำการพันขดลวด

กำลังการสูญเสียในทองแดง(P_{cu}) จะคำนวณได้จากสมการ

$$P_{cu} = [I_{rms}^2 \times \rho_{cu} \times l]/A_w \qquad (3.13)$$

โดยที่ค่ากระแส I_{rms} ที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำเท่ากับ 41 แอมแปร์ ส่วนความยาวของขดลวด (l) สามารถคำนวณได้จากค่าความยาวเฉลี่ยต่อรอบ (t)ของแกน EC-70 ซึ่งจะได้ว่า l เท่ากับ $97 \times 10^{-3} \times 17 = 1.649$ เมตร และพื้นที่หน้าตัดทองแดง (A_w) เท่ากับ 0.05067 เมื่อคิดรวม 190 เส้นจะได้ $A_w = 9.63$ ตารางมิลลิเมตร แทนค่าในสมการ 3.13 ได้กำลังสูญเสียในลวดตัวนำ

$$P_{cu} = [41^2 \times 2 \times 10^{-8} \times 1.649]/9.63^{-6}$$

$$P_{cu} = 5.76 \text{ วัตต์}$$

จากค่ากำลังการสูญเสียในทองแดง เมื่อรวมกับกำลังการสูญเสียที่เกิดจากแกนเหล็ก (core loss) แล้วจะมีค่าเท่ากับ 10.76 วัตต์

8.3 <u>การคำนวณหาขนาดของช่องว่างอากาศ</u> (Air Gap):lg เนื่องจากในการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำต้องมีช่องว่างอากาศ โดยจะเป็นไปตามสมการ

$$lg = N^2 \mu_o S/L \qquad (3.14)$$

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

S เป็นพื้นที่หน้าตัดของแกน

N เป็นจำนวนรอบของการพัน

เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ 3.14 จะได้ l_g = 8.311 มิลลิเมตร

8.4 <u>การคำนวณผลของฟลักซ์ที่ขอบ</u> (Fringing Flux :F) การคำนวณฟลักซ์ที่ขอบทำให้พื้นที่หน้าตัดของช่องว่างอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ค่า Permeance มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยค่าฟลักซ์ที่ขอบหาได้จากสมการ (3.15)

$$F = 1+(lg/\sqrt{S}) \times \ln(2G/lg) \qquad (3.15)$$

โดยที่ lg เป็นขนาดของช่องว่างอากาศ

S เป็นพื้นที่หน้าตัดของแกน

G เป็นความสูงของช่องหน้าต่าง 48.5 มิลลิเมตร

เมื่อแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ลงในสมการ (3.15) จะได้

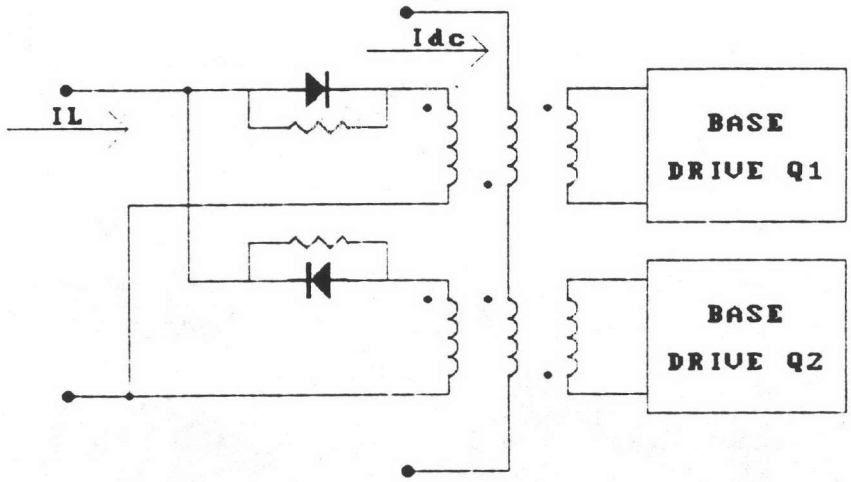
$$F = 2.406$$

ผลจากปรากฏการณ์ขอบอันเนื่องมาจากฟลักซ์ที่ขอบทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น จึงได้ทำการปรับ lg จนได้ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการ

วงจรควบคุม

วงจรในส่วนนี้ทำหน้าที่สร้างสัญญาณไปขับนำเบสของทรานซิสเตอร์กำลังทั้งสองตัวในวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะต้องควบคุมลำดับการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ และจังหวะการทำงานของทรานซิสเตอร์กำลัง เพื่อให้ได้รูปคลื่นของแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ตามต้องการ และไม่ทำให้เกิดความเสียหายขึ้นกับอุปกรณ์ของเครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงแบบวิธีสวิตช์ วงจรควบคุมจะประกอบด้วย

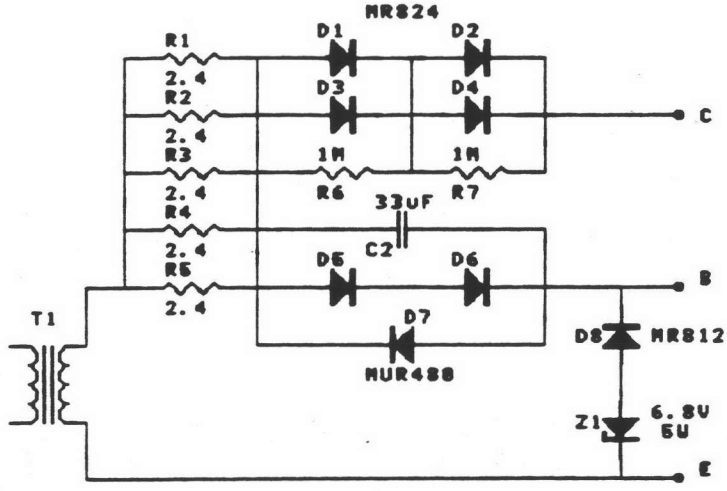
1. วงจรกำเนิดสัญญาณกำหนดจังหวะการทำงานของวงจร



รูปที่ 3.23 วงจรกำเนิดสัญญาณกำหนดจังหวะการทำงานของวงจร

วงจรกำเนิดสัญญาณกำหนดจังหวะการทำงานของทรานซิสเตอร์กำลังอาจจะได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณอิสระ ซึ่งสามารถกำหนดความถี่ได้อย่างอิสระหรืออาจจะได้จากการป้อนกลับของกระแสหรือแรงดันของโหลด วงจรกำเนิดสัญญาณอิสระมีข้อดีในแง่ของความสะดวกในการกำหนดความถี่ ซึ่งจะทำให้สามารถควบคุมกำลังออกของอินเวอร์เตอร์ได้ ส่วนการใช้การป้อนกลับของกระแสหรือแรงดันโหลดนั้น จะมีข้อดีในแง่ของความง่ายของวงจรและป้องกันการรบกวนจากสัญญาณภายนอกได้ดีกว่า อันจะเป็นผลดีในแง่ความเชื่อถือได้ของวงจร ดังนั้นจึงได้เลือกใช้วงจรกำเนิดสัญญาณกำหนดจังหวะการทำงานโดยการป้อนกลับของกระแสโหลดเพื่อใช้ในวงจรขับนำเบสของทรานซิสเตอร์ในเครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงแบบวิธีสวิตช์ โดยที่กระแสโหลดจะมีลักษณะเป็น sine wave และป้อนให้กับหม้อแปลงของวงจรกำเนิดสัญญาณ

กำหนดจังหวะการทำงานของวงจร ซึ่งได้รับจากการป้อนกลับของกระแสโหลดโดยต่อเข้ากับหม้อแปลงขับนำแต่ละตัว ซึ่งขดทางด้านปฐมภูมิจะมีขั้วเหมือนกัน แต่ขดทางด้านทุติยภูมิจะมีขั้วตรงกันข้ามกันเพื่อที่จะขับนำทรานซิสเตอร์ให้สลับกันนำกระแสทั้งนี้จะต้องใช้หม้อแปลงที่มีขนาดเท่ากัน จำนวนรอบทั้งทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเท่ากันทั้งสองตัว เพื่อป้องกันการเกิดความผิดพลาดในการขับนำเบสของทรานซิสเตอร์ อันจะทำให้เกิดการทะลุผ่านในแต่ละกิ่งได้



รูปที่ 3.24 แสดงวงจรขับนำเบสที่ใช้ขับนำทรานซิสเตอร์แต่ละตัว

2. วงจรขับนำเบสของทรานซิสเตอร์

มีหน้าที่ในการขับนำทรานซิสเตอร์ให้นำกระแสและหยุดนำกระแสได้ตามรูปแบบลำดับการทำงานของสัญญาณที่ได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณกำหนดจังหวะการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ในการออกแบบวงจรขับนำนั้นเราพยายามที่จะใช้วงจรที่ง่ายไม่ซับซ้อนเพื่อให้วงจรมีความเชื่อถือได้สูง ดังนั้นจึงออกแบบให้วงจรขับนำเบสของทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวมีการแยกโดด (Isolate) จากกัน โดยวงจรแต่ละชุดจะมีลักษณะดังแสดงในรูป 3.24 จะเห็นได้ว่าวงจรขับนำเบสของทรานซิสเตอร์แต่ละชุดจะรับสัญญาณควบคุมจากวงจรกำเนิดสัญญาณแต่ละชุด

การ Turn Off ทรานซิสเตอร์ของวงจรขับนำเบสจะเริ่มทันทีที่แกนเริ่มอิ่มตัวจากการทดลองจะพบว่าช่วง Turn Off จะมีแรงดัน ($-V_{BE}$) ประมาณ -8 โวลต์ ให้กับรอยต่อของเบสอิมิตเตอร์ในขณะที่ทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแสด้วย เมื่อพิจารณาวงจรขับนำเบสจะเห็นได้ว่าปริมาณ $-V_{BE}$ ในช่วง Turn Off นี้ขึ้นอยู่กับตัวเก็บประจุ (C_1)

ไดโอด(D_B) และซีนเนอร์ไดโอด(Z_1) ที่ต่ออยู่ เนื่องจากกระแสเบสที่ดึงออกในตอน Turn Off นี้คือพาหะส่วนเกินในรอยต่อเบส-อิมิตเตอร์ ปริมาณนี้จึงแปรผันตามปริมาณกระแสคอลเลคเตอร์ ซึ่งสัมพันธ์อยู่กับกระแสโหลด ดังนั้นในการออกแบบจึงต้องใช้วิธีทดลองแทนค่าโดยการต่อวงจรจริงเพื่อให้ได้เงื่อนไขในสภาวะกระแสโหลด แต่อย่างไรก็ตาม $-V_{BE}$ จะมีค่ามากเกินไปไม่ได้เพราะ $-V_{BE}$ ที่มากเกินไปจะทำให้พื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยของทรานซิสเตอร์ (Reverse Save Operating Area) แคบลง โดยเฉพาะด้าน Secondary Breakdown Limit (Keith H.Billings, 1989) ทำให้อาจเป็นอันตรายต่อทรานซิสเตอร์โดยเฉพาะในแง่การทนแรงดัน เพราะเมื่อปริมาณ $-V_{BE}$ สูงขึ้น พื้นที่ปลอดภัยด้านแรงดันจะลดลงเรื่อย ๆ คุณสมบัติของทรานซิสเตอร์กำลังที่เลือกใช้กำหนดให้ $-V_{BE}$ มีค่าไม่ต่ำกว่า -10 โวลต์ เพื่อให้ทรานซิสเตอร์ทำงานได้ในพื้นที่ที่ปลอดภัย

เนื่องจากปริมาณ Storage Time จะแปรผันกับการอิ่มตัวของทรานซิสเตอร์ (Thomson CSF Semiconductor Devision, 1979) ดังนั้นในวงจรขับนำเบสจึงต้องมีไดโอดที่ใช้ป้องกันการอิ่มตัวเกินควร(Anti-Saturation) ซึ่งหมายถึงไดโอด D_1-D_4 ในวงจรขับนำเบสในรูป 3.24 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าไดโอด D_1-D_4 จะทำหน้าที่ยกระดับแรงดัน $V_{CE_{sat}}$ ให้สูงขึ้น ซึ่งก็คือการลดปริมาณกระแสเบสที่จ่ายให้กับทรานซิสเตอร์ ทำให้ทรานซิสเตอร์อิ่มตัวน้อยลงนั่นเอง สำหรับปริมาณของไดโอดที่ใช้ในการยกระดับแรงดันในที่นี้ใช้ไดโอดจำนวน 2 ตัว ซึ่งได้จากการทดลองต่อวงจรเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ Storage Time มีค่าต่ำและแรงดัน $V_{CE_{sat}}$ มีค่าไม่สูงเกินไป เพราะถ้า $V_{CE_{sat}}$ มีค่าสูงกำลังสูญเสียในการสวิตช์ในขณะนำกระแสจะมีค่าสูง

สำหรับสัญญาณที่ออกจากวงจรกำเนิดสัญญาณ ซึ่งได้จากการป้อนกลับของกระแสโหลดนั้นเปรียบเสมือนกับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ (Current Source) ซึ่งจะส่งผ่านหม้อแปลงขับนำที่ใช้แกนแม่เหล็กเป็นแบบแกน Toroid มายังวงจรขับนำเบสซึ่งช่วงบวกของกระแสโหลดจะทำให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 นำกระแส และช่วงลบของกระแสโหลดก็จะทำให้ทรานซิสเตอร์ Q_2 นำกระแส โดยมีความถี่ในการนำกระแสเท่ากับความถี่ของกระแสโหลด สัญญาณที่ใช้ขับนำทรานซิสเตอร์เพื่อให้วงจรอินเวอร์เตอร์ทำงานแบบเรโซแนนซ์ในภาคแรงดันศูนย์เพื่อลดกำลังสูญเสียในช่วงเริ่มนำกระแสและการทำงานของตัวเก็บประจุที่ทำหน้าที่เป็นสนับเบอร์เป็นไปอย่างเหมาะสม เพื่อลดกำลังสูญเสียในช่วงแรกของการหยุดนำกระแสของทรานซิสเตอร์

สัญญาณขับนำจะต้องเป็นแบบ 3 สถานะ ในการสร้างสัญญาณดังกล่าวจะใช้เทคนิคแกนอิ่มตัว (Saturable Core) กล่าวคือในการออกแบบหม้อแปลง Toroid จะต้องออกแบบให้หม้อแปลงทำงานในช่วงเวลาจำกัดคือ จะทำให้หม้อแปลงส่งผ่านสัญญาณขับนำให้เท่ากับช่วงเวลาที่ต้องการให้ทรานซิสเตอร์นำกระแส จากนั้นแกนหม้อแปลงจะอิ่มตัวและเมื่อแกนอิ่มตัวแล้วจะไม่มีการส่งผ่านพลังงานโดยแหล่งจ่ายกระแสจากขดปฐมภูมิไปยังขดทุติยภูมิ เพราะเมื่อแกนอิ่มตัวค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (μ) ของแกนจะเท่ากับค่าความซึมซาบของอากาศ (μ_0) ทำให้การ Coupling ของสัญญาณระหว่างขดทุกขดของหม้อแปลงหมดไปค่าความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก (Magnetizing Inductance) ของขดทุติยภูมิจึงลดลงเหลือเท่ากับความเหนี่ยวนำที่มีแกนเป็นอากาศ หรือกล่าวได้ว่าขดทุติยภูมิแต่ละขดจะกลายเป็นวงจรลัดอันเป็นการทำให้ทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแส (K.Haradd, H.Sakamoto and M.Shoyama, 1989)

3. <u>การเลือกขนาดของแกนหม้อแปลงขับนำในวงจรขับนำเบสของทรานซิสเตอร์</u>

วงจรขับนำทรานซิสเตอร์ที่ใช้เทคนิคแกนอิ่มตัว (Saturable Core) จะต้องมีการเลือกขนาดของแกนแม่เหล็กอย่างเหมาะสม เพื่อให้สัญญาณขับนำมีลักษณะตามที่ได้กำหนดไว้ ในที่นี้ใช้แกนเฟอร์ไรต์ที่มีลักษณะเป็น Toroid หม้อแปลงขับนำแต่ละตัวจะมีขนาดเท่ากันจำนวนรอบทั้งทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิมีจำนวนรอบเท่ากัน แตกต่างกันที่ขั้วของขดทุติยภูมิเท่านั้น ในทางปฏิบัติเลือกใช้แกน Toroid ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 19 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 10 มิลลิเมตร ความหนา 10 มิลลิเมตร และพื้นที่หน้าตัด 42.30 ตารางมิลลิเมตร แล้วใช้แกนขนาดดังกล่าวพันขดปฐมภูมิจำนวน 2 รอบ พันขดทุติยภูมิจำนวน 3 รอบ เราสามารถปรับช่วงเวลาที่ทรานซิสเตอร์นำกระแส (ปรับความเร็ว-ช้าในการอิ่มตัวของแกน) โดยปรับจำนวนรอบของขดทุติยภูมิหรือปรับแรงดันคร่อมหม้อแปลง กล่าวคือถ้าให้จำนวนรอบทุติยภูมิสูงขึ้นจะได้ช่วงเวลาที่ทรานซิสเตอร์นำกระแสมากขึ้นหรือแกนอิ่มตัวช้าลง ในทางกลับกันถ้าจำนวนรอบทุติยภูมิต่ำลงแกนจะอิ่มตัวเร็วขึ้น หรือช่วงเวลาที่ทรานซิสเตอร์นำกระแสจะลดลง ส่วนการปรับระยะเวลานำกระแสของทรานซิสเตอร์โดยการปรับแรงดันคร่อมหม้อแปลง จะทำได้โดยการปรับค่าความต้านทาน R_B ในวงจรขับนำเบสเพราะถ้าแรงดันคร่อม R_B มีค่าสูงขึ้น แรงดันคร่อมขดทุติยภูมิของหม้อแปลงก็จะสูงขึ้นด้วยซึ่งจะทำให้แกนอิ่มตัวไวขึ้นช่วงเวลาที่ทรานซิสเตอร์นำกระแสจึงลดลง แต่ในทางกลับกันถ้าเปลี่ยนค่าความต้านทาน R_B มีค่าต่ำลงก็จะทำให้แกนอิ่มตัวช้าลงและทำให้ช่วงเวลาที่ทรานซิสเตอร์นำกระแสมีค่ามากขึ้น

4. <u>การควบคุมความถี่ในการทำงานของวงจร</u>

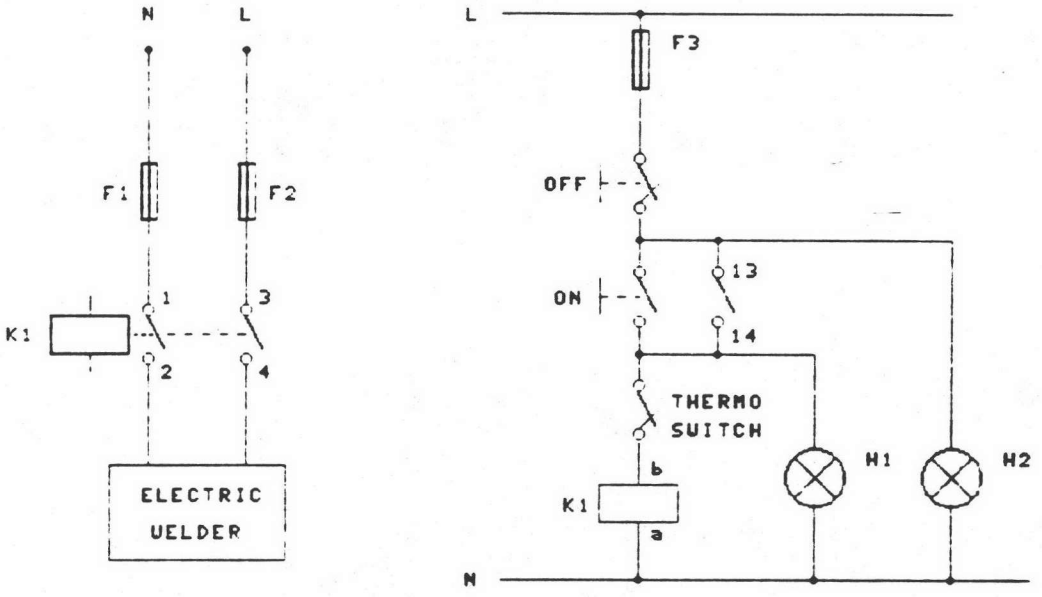
การใช้เทคนิคแกนอิ่มตัว (Saturable Core) และการป้อนกลับของกระแสโหลดในการขับนำทรานซิสเตอร์นั้น ความถี่ในการทำงานของอินเวอร์เตอร์จะขึ้นอยู่กับขนาดของแกน Toroid จำนวนรอบของขดลวด กระแสโหลด ดังนั้นถ้าเราต้องการปรับความถี่ในการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ก็สามารถทำได้โดยการปรับค่าสนามแม่เหล็กอิ่มตัวของแกนหม้อแปลง(B_{max}) ซึ่งสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนขนาดของแกน เปลี่ยนจำนวนรอบของขดลวดหรือป้อนไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายภายนอกโดยการเพิ่มชุดขดลวดให้กับหม้อแปลงขับนำแต่ละชุดแต่การปรับความถี่การทำงานของอินเวอร์เตอร์โดยการเปลี่ยนขนาดของแกน หรือเปลี่ยนจำนวนรอบของขดลวดจะไม่สะดวกในการควบคุมความถี่ จึงเลือกใช้วิธีการป้อนไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายภายนอกให้กับหม้อแปลงขับนำ โดยการเพิ่มชุดขดลวดให้กับหม้อแปลงขับนำแต่ละชุดดังรูป 3.23 เพื่อให้สามารถปรับความถี่ได้ในช่วง 19.2-24.4 กิโลเฮิรตซ์ ถ้าเราป้อนไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านบวกก็จะทำให้แกนของหม้อแปลงขับนำอิ่มตัวเร็วขึ้นก็จะเป็นผลให้ช่วงเวลาที่ขับนำทรานซิสเตอร์ให้นำกระแสสั้นลง ซึ่งหมายถึงความถี่ในการทำงานของวงจรจะสูงขึ้น ในทางกลับกันถ้าเราป้อนไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านลบให้กับหม้อแปลงขับนำ การอิ่มตัวของแกนหม้อแปลงจะช้าลงทำให้ช่วงการนำกระแสของทรานซิสเตอร์จะนานขึ้น ก็จะทำให้ความถี่การทำงานของวงจรจะลดลง ซึ่งจะมีผลทำให้กระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ตามที่ได้วิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ เมื่อความถี่การทำงานของวงจรสูงขึ้นก็จะทำให้กระแสโหลดมีค่าลดลงทำให้กำลังออกมีค่าลดลง ในทางกลับกันถ้าความถี่การทำงานลดลงก็จะทำให้กระแสโหลดมีค่าสูงขึ้น นั่นคือการปรับค่าความถี่ของการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์จะเป็นการปรับกำลังด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ด้วย ในงานวิจัยนี้สามารถปรับความถี่การทำงานของวงจรได้ในช่วง 19.2-24.4 กิโลเฮิรตซ์ โดยป้อนกระแสไฟตรงเข้าขดลวดชุดดังกล่าวจาก 0 ถึง 90 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งจะเป็นการปรับกำลังด้านออกได้ 100 - 40 เปอร์เซนต์ ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เปรียบเทียบค่ากระแสไบอัส, ความถี่, กำลังงานที่โหลด และเปอร์เซนต์

กระแสไบอัส(mA)	ความถี่(kHz)	กำลังงานที่โหลด(kW)	คิดเป็น %
0.0	19.2	2.88	100.00
10.0	20.8	2.07	71.88
90.0	24.4	1.20	41.67

5. วงจรป้องกันอุณหภูมิเกิน

ในการป้องกันอุณหภูมิของทรานซิสเตอร์กำลังเกินพิกัดนั้น จะใช้สวิตช์ที่ควบคุมด้วยอุณหภูมิ(Thermo Switch) ในการตัดวงจรโดยติดตั้งไว้ที่แผ่นระบายความร้อนใกล้กับตัวทรานซิสเตอร์ สวิตช์ดังกล่าวต่ออนุกรมกับคอยล์ของแมกเนติคสวิตช์ดังแสดงในรูป 3.25



รูปที่ 3.25 แสดงวงจรที่ใช้ป้องกันอุณหภูมิเกิน

การทำงานของวงจรป้องกันอุณหภูมิของทรานซิสเตอร์กำลังเกินพิกัดนั้นถ้าอุณหภูมิที่แผ่นระบายความร้อนของทรานซิสเตอร์ร้อนเกินพิกัด สวิตช์ที่ใช้ควบคุมด้วยอุณหภูมิจะหยุดการทำงานของเครื่อง โดยตัดแหล่งจ่ายกำลังที่ป้อนให้กับคอยล์ของแมกเนติคสวิตช์ทำให้คอนแทคเมนของแมกเนติคสวิตช์ ตัดแหล่งจ่ายกำลังที่ป้อนให้กับเครื่องเชื่อมไฟฟ้าสวิตช์ที่ควบคุมด้วยอุณหภูมิจะทำงานที่ 80 องศาเซลเซียส