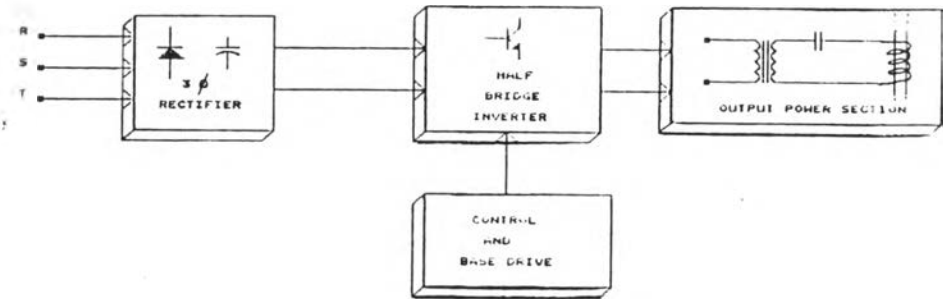
หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

โครงสร้างและการออกแบบเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

<u>โครงสร้างของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ</u>

เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ได้วิจัยและพัฒนาขึ้นนี้ เป็นเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่หน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 เฮิรตซ์ จากสายส่งให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง โดยมีวงจรเรียงกระแสเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงป้อนให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงจ่ายให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลในชิ้นงานอันจะเป็นผลทำให้เกิดความร้อนขึ้นในชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.1 นอกจากนี้เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำต้องมีระบบควบคุมการทำงานและระบบป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นจากความผิดปกติที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากไฟฟ้ากระสลับจากสายส่ง จากชิ้นงาน และจากภายในเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำเอง อีกทั้งต้องมีระบบระบายความร้อนที่เกิดจากกำลังสูญเสียของขดลวดเหนี่ยวนำและอุปกรณ์ภายในอื่น ๆ เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นจากอุณหภูมิที่สูงเกินไป หน้าที่และลักษณะการทำงานเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำมีดังนี้คือ



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

1. วงจรภาคกำลัง

วงจรภาคกำลังทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 เฮิรตซ์ จากสายส่งเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงสำหรับป้อนให้กับขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงขึ้นในชิ้นงาน อันจะเป็นผลทำให้เกิดความร้อนขึ้นในชิ้นงาน วงจรภาคกำลังประกอบด้วยวงจรย่อยดังนี้

1.1 วงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

วงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ซึ่งมีแรงดันระหว่างสาย 380 โวลต์ เป็นไฟฟ้ากระแสตรง วงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงประกอบด้วย วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 3 เฟส (Three phase bridge rectifier) และตัวเก็บประจุซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรกรอง

1.2 วงจรอินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระกระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง โดยจะทำหน้าที่จ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงให้กับขดลวดเหนี่ยวนำโดยผ่านหม้อแปลงความถี่สูง วงจรที่ใช้ในภาคนี้อาจจะเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ (Full Bridge Inverter) หรือ วงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ (Half Bridge Inverter) ก็ได้ สำหรับกำลังออกของอินเวอร์เตอร์ที่เท่า ๆ กัน การใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์จะต้องใช้สวิตช์ไวงานจำนวน 4 ตัว แต่พิกัดกระแสสวิตช์จะเป็นครึ่งหนึ่งของพิกัดกระแสของสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ที่ใช้สวิตช์ไวงาน 2 ตัว สวิตช์ไวงานที่มีพิกัดกระแสต่ำโดยทั่วไปจะมีเวลาในการเปลี่ยนสถานะ (Switching Time) ต่ำกว่าสวิตช์ไวงานที่มีพิกัดกระแสสูง ดังนั้นจึงเป็นการง่ายที่จะควบคุมให้สวิตช์ทำงานที่ความถี่สูงส่วนในการควบคุมให้สวิตช์ไวงานที่มีพิกัดกระแสสูงให้สามารถทำงานที่ความถี่สูงนั้น จะต้องใช้เทคนิคในการควบคุมที่ยุ่งยากมากขึ้น สำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยซึ่งมีขนาด 4.2 kVA การใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ซึ่งใช้อุปกรณ์น้อยกว่าวงจรมีรูปแบบการทำงานที่ไม่ยุ่งยาก ทำให้มีความเชื่อถือได้สูงจะมีความเหมาะสม และสามารถที่จะควบคุมให้สวิตช์ไวงานทำงานในช่วงความถี่ 19.5 - 22.5 กิโลเฮิรตซ์ ได้

1.3 หม้อแปลงแยกโดดความถี่สูงและส่งผ่านกำลัง

จากผลการวัดและการคำนวณทางทฤษฎีจะเห็นได้ว่า ค่าความต้านทาน และค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำที่มีชิ้นงานเป็นลวดตัวนำอะลูมิเนียมตีเกลียวจะมีค่าต่ำสำหรับกำลังออกที่ต้องการ ซึ่งแรงดันที่ใช้จะมีค่าต่ำ ในขณะที่แรงดันออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าโดยตรงจากสายส่งไฟฟ้ามีค่าสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้หม้อแปลงเพื่อปรับระดับแรงดันออกของ

อินเวอร์เตอร์ให้มีความเหมาะสมกับแรงดันของโหลด นอกจากนี้ยังทำหน้าที่แยกโดดขดลวดเหนี่ยวนำที่มีชิ้นงานออกจากสายส่งไฟฟ้าเพราะวงจรทางด้านโหลดจะต้องมีการระบายความร้อนด้วยการใช้น้ำไหลในท่อทองแดงของขดลวดเหนี่ยวนำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องแยกโดดวงจรส่วนนี้ออกจากระบบไฟ 3 เฟส รวมทั้งป้องกันอันตรายที่จะเกิดจากไฟฟ้าลัดวงจรจากเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำผ่านผู้ใช้ลงดินด้วย

1.4 ตัวเก็บประจุเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง

จากการศึกษาคุณสมบัติของขดลวดเหนี่ยวนำที่มีลวดตัวนำอะลูมิเนียมตีเกลียวขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร เป็นชิ้นงาน ในบทที่ 2 พบว่า ที่ความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์ ตัวประกอบกำลังของขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าต่ำมา คือประมาณ 0.2 เท่านั้น ซึ่งจะเป็นผลให้ต้องใช้อินเวอร์เตอร์ที่มี kVA สูงมาก เพื่อเป็นการลดขนาดของอินเวอร์เตอร์จะต้องมีการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังของโหลดให้สูงขึ้น เนื่องจากตัวประกอบกำลังของขดลวดเหนี่ยวนำที่มีชิ้นงานเป็นลวดตัวนำอะลูมิเนียมตีเกลียว มีกระแสล้าหลังแรงดัน ดังนั้นจึงต้องใช้ตัวเก็บประจุในการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง การเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังของขดลวดเหนี่ยวนำอาจจะทำได้โดยการต่อตัวเก็บประจุ อนุกรมหรือขนานกับขดลวดเหนี่ยวนำก็ได้ การเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังโดยการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมกับขดลวดเหนี่ยวนำจะทำให้แรงดันของโหลดรวมลดลง ส่วนกระแสโหลดจะมีค่าคงเดิม ในขณะที่การเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังโดยการต่อตัวเก็บประจุขนานกับขดลวดเหนี่ยวนำ จะทำให้กระแสของโหลดรวมลดลง ส่วนแรงดันโหลดจะมีค่าคงเดิม ได้มีการศึกษาเปรียบเทียบเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่มีการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังของขดลวดเหนี่ยวนำ โดยการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมและขนานกับขดลวดเหนี่ยวนำ โดยมีการเปรียบเทียบอุปกรณ์ที่ใช้ ความยุ่งยากของวงจร พฤติกรรมของวงจรทั้งในภาวะอยู่ตัวและในตอนเริ่มเดินเครื่องพบว่า การเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังของขดลวดเหนี่ยวนำ โดยการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมกับขดลวดเหนี่ยวนำจะมีความเหมาะสมมากกว่า ดังนั้นจึงเลือกใช้วิธีการต่อตัวเก็บประจุเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังอนุกรมกับขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อทำเครื่องต้นแบบ

1.5 ขดลวดเหนี่ยวนำ

ขดลวดเหนี่ยวนำทำหน้าที่ เหนี่ยวนำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำขึ้นในชิ้นงาน จากผลการศึกษาในบทที่ 2 ขดลวดเหนี่ยวนำจะใช้ท่อทองแดงกลวงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร หนา 0.5 มิลลิเมตร พันเป็นขดลวดจำนวน 25 รอบ ขดลวดเหนี่ยวนำจะเป็นรูปทรงกระบอกยาว 20 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายในประมาณ 27 มิลลิเมตร มีระยะห่างระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำกับลวดตัวนำอะลูมิเนียมประมาณ 6 มิลลิเมตร

2 วงจรควบคุม

วงจรควบคุม ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ และจังหวะการทำงานของสวิตช์ไวงาน เพื่อให้ได้รูปคลื่นของแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ตามต้องการ และไม่ทำให้เกิดความเสียหายขึ้นกับอุปกรณ์ของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ วงจรควบคุมประกอบด้วยวงจรกำเนิดสัญญาณกำหนดจังหวะการทำงานของสวิตช์ไวงานและวงจรขับนำสวิตช์ไวงาน วงจรกำเนิดสัญญาณกำหนดจังหวะการทำงานของสวิตช์ไวงานอาจจะได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณอิสระ ซึ่งสามารถกำหนดความถี่ได้อย่างอิสระหรืออาจจะได้จากการป้อนกลับของกระแสหรือแรงดันของโหลด วงจรกำเนิดสัญญาณอิสระจะมีข้อดีในแง่ความสะดวกในการกำหนดความถี่ ซึ่งจะทำให้สามารถควบคุมกำลังออกของอินเวอร์เตอร์ได้ ส่วนการใช้การป้อนกลับของกระแสหรือแรงดันของโหลด จะมีข้อดีในแง่ของความง่ายของวงจรและป้องกันการรบกวนจากสัญญาณภายนอกได้ดีกว่า อันจะเป็นผลดีในแง่ความเชื่อถือได้ของวงจร ดังนั้นจึงได้เลือกวิธีการควบคุมโดยการป้อนกลับของกระแสโหลดในวงจรกำเนิดสัญญาณกำหนดจังหวะการทำงาน

3 วงจรป้องกัน

วงจรป้องกันทำหน้าที่ป้องกันหรือลดความเสียหายที่จะเกิดกับเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ อันเนื่องมาจากความผิดปกติของไฟฟ้ากระแสสลับด้านขาเข้า ความผิดปกติของโหลด หรือความผิดปกติที่จะเกิดขึ้นในเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำเอง วงจรป้องกันประกอบด้วย

1. วงจรป้องกันแรงดันเข้าเกินพิกัด
2. วงจรป้องกันแรงดันเข้าต่ำกว่าพิกัด
3. วงจรป้องกันกระแสเข้าเกินพิกัด
4. วงจรป้องกันจากเฟสหาย
5. วงจรป้องกันอุณหภูมิเกิน

4 อุปกรณ์หล่อเย็น

เนื่องจากความหนาแน่นของกระแสในขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าสูง ซึ่งจะเป็นผลทำให้เกิดความร้อนขึ้นในขดลวดเหนี่ยวนำมาก ไม่สามารถใช้วิธีการระบายความร้อนของขดลวดเหนี่ยวนำโดยใช้ลม ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้วิธีการหล่อเย็นโดยการผ่านน้ำเย็นเข้าไปในท่อทองแดงกลวงที่ใช้เป็นขดลวดเหนี่ยวนำ

<u>การวิเคราะห์และออกแบบวงจรภาคกำลัง</u>

เนื่องจากโหลดจะเป็นตัวกำหนดขนาดของอินเวอร์เตอร์ วงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ตลอดจนอุปกรณ์ตัดต่อและอุปกรณ์ป้องกันต่าง ๆ ดังนั้นการวิเคราะห์และออกแบบจึงควรเริ่มจากโหลดย้อนกลับไปสู่วงจรด้านขาเข้า อย่างไรก็ดี คุณสมบัติของวงจรด้านขาเข้าก็มีส่วนในการกำหนดคุณสมบัติของวงจรที่อยู่ถัดไปทางโหลด ทำให้ต้องนำมาพิจารณาด้วยเช่นกัน

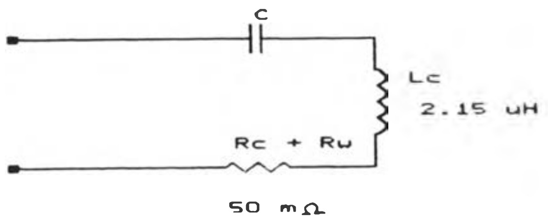
1. โหลด

ขดลวดเหนี่ยวนำเป็นโหลดที่มีวงจรสมมูลทางไฟฟ้าเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ดังนั้นกระแสของขดลวดเหนี่ยวนำจะล้าหลังแรงดัน จากการศึกษาคุณสมบัติของขดลวดเหนี่ยวนำในบทที่ 2 จะเห็นได้ว่าขดลวดเหนี่ยวนำที่มีชิ้นงานเป็นลวดตัวนำอะลูมิเนียมตีเกลียวขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร จะมีค่าตัวประกอบกำลังต่ำมาก ดังนั้นการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมกับขดลวดเหนี่ยวนำอย่างเหมาะสมจะทำให้โหลดซึ่งประกอบด้วยขดลวดเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ มีค่าตัวประกอบกำลังสูงขึ้น โดยตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมกับขดลวดเหนี่ยวนำจะทำให้แรงดันของโหลดลดลงเมื่อเทียบกับแรงดันของขดลวดเหนี่ยวนำ ในขณะที่กระแสโหลดจะยังคงมีค่าเท่ากับกระแสของขดลวดเหนี่ยวนำ

เนื่องจากการทำงานของอินเวอร์เตอร์ต้องการโหลดที่มีกระแสล้าหลังแรงดัน เพื่อให้สวิตช์ไวงานทำงานแบบเรโซแนนซ์ในภาคแรงดันศูนย์ (Zero voltage resonant switch) อันเป็นการช่วยลดกำลังสูญเสียในสวิตช์ไวงานของอินเวอร์เตอร์ลงได้มาก จากเหตุผลดังกล่าวจึงได้ออกแบบตัวเก็บประจุเพื่อให้กระแสล้าหลังแรงดันที่ความถี่การทำงานของสวิตช์ เพื่อให้หม้อแปลงมีขนาดเล็ก reactive power ที่ถ่ายเทระหว่างตัวเก็บประจุและขดลวดเหนี่ยวนำจะต้องไม่ผ่านหม้อแปลง ดังนั้นจึงต้องต่อตัวเก็บประจุไว้ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเช่นเดียวกับขดลวดเหนี่ยวนำ ขนาดของตัวเก็บประจุจะต้องสูงพอที่จะยังคงทำให้กระแสออกของอินเวอร์เตอร์ล้าหลังแรงดันประมาณ 45 - 60 องศา หรือค่าตัวประกอบกำลังของโหลดสำหรับอินเวอร์เตอร์มีค่าประมาณ 0.7 - 0.5

การเลือกตัวเก็บประจุที่ใช้ในการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังให้มีค่าตามต้องการนั้นจะหาจากวงจรสมมูลของโหลดของอินเวอร์เตอร์สำหรับแรงดันที่มีรูปคลื่นเป็นซายน์ที่ความถี่ประมาณ 20 กิโลเฮิรตซ์ ในรูปที่ 3.2

จากรูปที่ 3.2 ค่า L_c และค่า R_c,R_w ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ของขดลวดเหนี่ยวนำที่ได้จากบทที่ 2 ค่าตัวประกอบกำลังของโหลดที่มีการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังโดยใช้ตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกับขดลวดเหนี่ยวนำ จะหาความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในวงจรตามสมการ 3.1



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลของโหลดของอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์

$$PF = \cos\theta = \frac{R_w + R_c}{Z} \qquad (3.1)$$

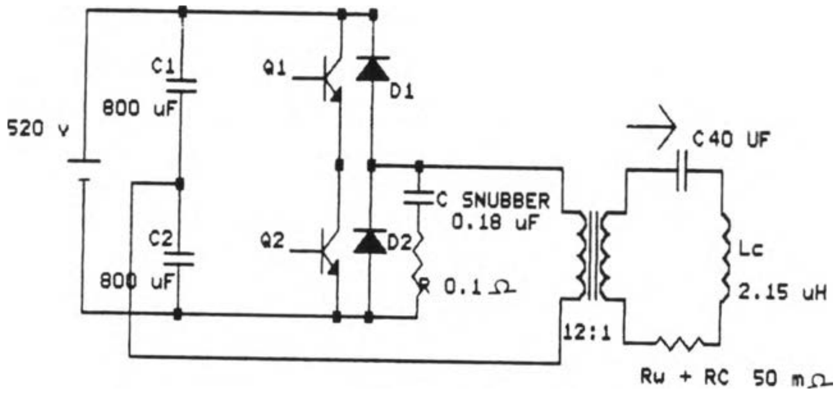
โดยที่

$$Z = \sqrt{(R_w + R_c)^2 + (\omega L_c - \frac{1}{\omega C})^2}$$

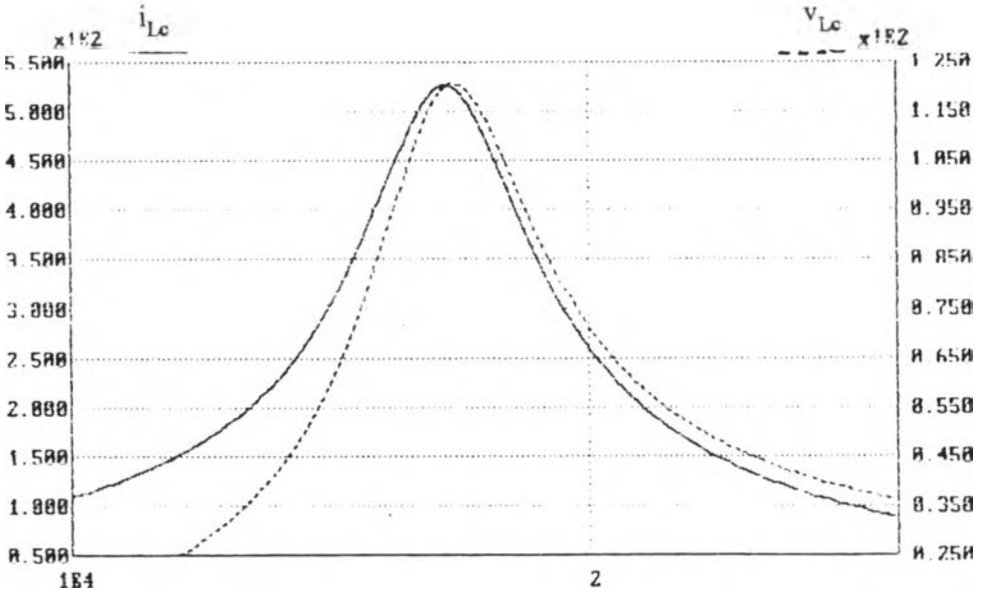
จากสมการที่ 3.1 ถ้าต้องการให้ค่าตัวประกอบกำลังของโหลดเพิ่มขึ้นเป็น 0.55 จะต้องใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุขนาด 41 ไมโครฟารัด ในที่นี้เลือกใช้ค่า 40 ไมโครฟารัด ซึ่งเป็นค่าที่หาได้ในท้องตลาดทั่วไป

ในการหาค่าอัตราส่วนการแปลงแรงดันของหม้อแปลงแยกโดดความถี่สูงนั้น จะได้จากการที่กำหนดให้กำลังออกที่ชิ้นงานซึ่งแทนด้วยความต้านทานสมมูล 32 มิลลิโอห์ม มีค่าประมาณ 1.2 กิโลวัตต์ กระแสในขดลวดเหนี่ยวนำจะต้องมีค่ายอดประมาณ 274 แอมแปร์ ซึ่งจะต้องใช้แรงดันด้านขาเข้าของโหลดที่มีค่ายอดประมาณ 23.8 โวลต์ จากแรงดันไฟตรงที่ป้อนให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีค่าเท่ากับ 520 โวลต์ จะได้แรงดันออกรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีค่ายอดประมาณ 260 โวลต์ คิดเป็นความถี่หลักมูลของแรงดันที่มีรูปคลื่นเป็นไซน์ที่มีค่ายอด 331 โวลต์ ดังนั้นหม้อแปลงแยกโดดความถี่สูงควรจะมีอัตราส่วนการแปลงแรงดันเท่ากับ 13.9 : 1 แต่เนื่องจากมีแรงดันตกคร่อมในตัวหม้อแปลงและตัวเก็บประจุ ดังนั้น จึงเลือกอัตราการแปลงแรงดันเป็น 12 : 1

จากเงื่อนไขการออกแบบดังกล่าวข้างต้น สามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆที่เป็นโหลดของอินเวอร์เตอร์ได้ รูปที่ 3.3 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ป้อนกำลังให้ขดลวดเหนี่ยวนำโดยผ่านหม้อแปลงความถี่สูง ได้ทำการวิเคราะห์ผลตอบเชิงความถี่ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงกับความถี่

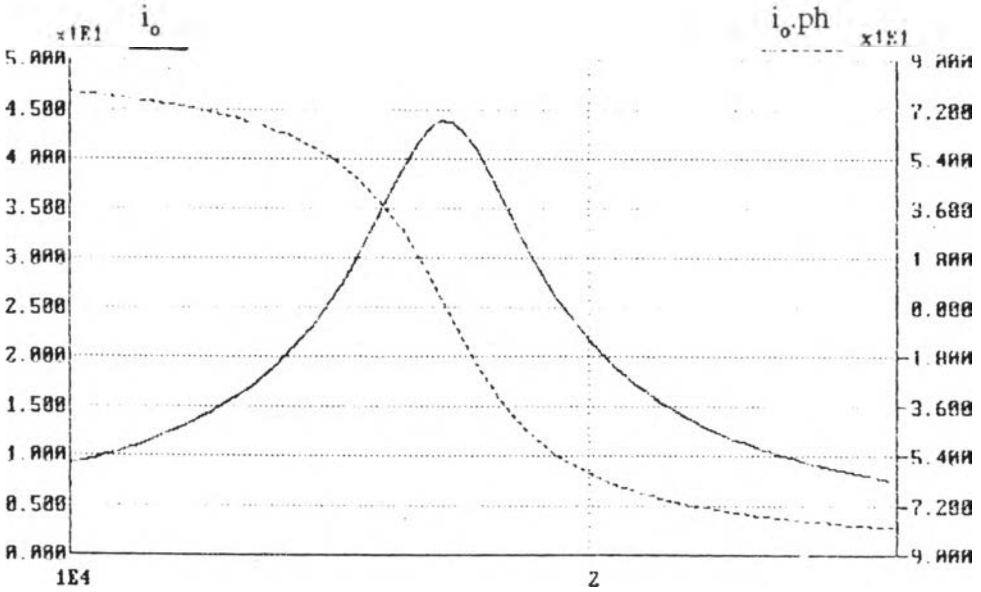


รูปที่ 3.3 วงจรภาคกำลังของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ



รูปที่ 3.4 ผลตอบเชิงความถี่ของกระแสและแรงดันของขดลวดเหนี่ยวนำที่มีลวดตัวนำอะลูมิเนียมตีเกลียวเป็นชิ้นงาน สำหรับกรณีที่แรงดันออกของอินเวอร์เตอร์มีรูปคลื่นเป็นไซน์ ที่มีค่ายอด 331 โวลต์

รูปที่ 3.4 แสดงผลตอบเชิงความถี่ของกระแสและแรงดันของขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้ตัวเก็บประจุในการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง สำหรับกรณีที่แรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ที่มีรูปคลื่นเป็นไซน์ที่มีค่ายอด 331 โวลต์ จะเห็นได้ว่าในช่วงความถี่ระหว่าง 10 - 30 กิโลเฮิรตซ์ กระแสและแรงดันของโหลดจะมีการเปลี่ยนแปลงกับความถี่มาก ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าถ้าให้อินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่ประมาณ 20 กิโลเฮิรตซ์ โดยมีค่ายอดของแรงดันที่ความถี่หลักมูล 331 โวลต์ ซึ่งเกิดจากแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ที่มีค่ายอด 260 โวลต์ จะได้ค่ายอดของกระแสและแรงดันในขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าประมาณ 263 แอมแปร์ และ 72 โวลต์ ตามลำดับ



รูปที่ 3.5 ผลตอบเชิงความถี่ของขนาดและเฟสของกระแสออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์

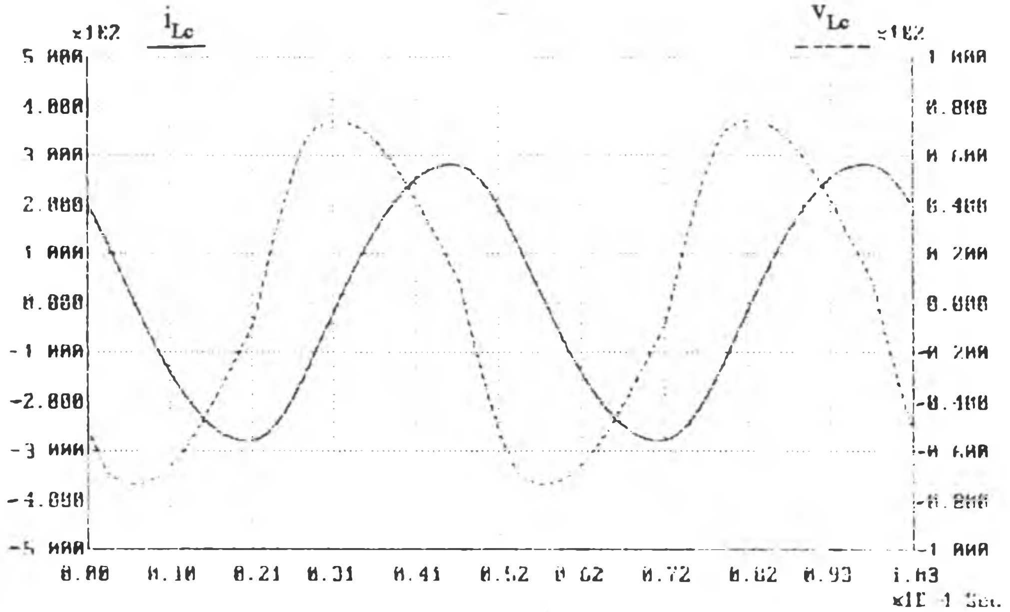
รูปที่ 3.5 แสดงผลตอบเชิงความถี่ของกระแสออก และเฟสของกระแสออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ประมาณ 20 กิโลเฮิรตซ์ กระแสออกจะมีค่าประมาณ 22 แอมแปร์ และล้าหลังแรงดันประมาณ 60 องศา

เพื่อจะทำให้ทราบขนาดและรูปร่างของกระแสและแรงดัน ในอุปกรณ์ต่าง ๆ ของวงจร ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการเลือกชนิดและพิกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจร ได้ทำการวิเคราะห์ผลตอบเชิงเวลาของโหลด สำหรับแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ที่มีรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ซึ่งมีค่ายอดเท่ากับครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าตรงด้านขาออกของวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (260 โวลต์)

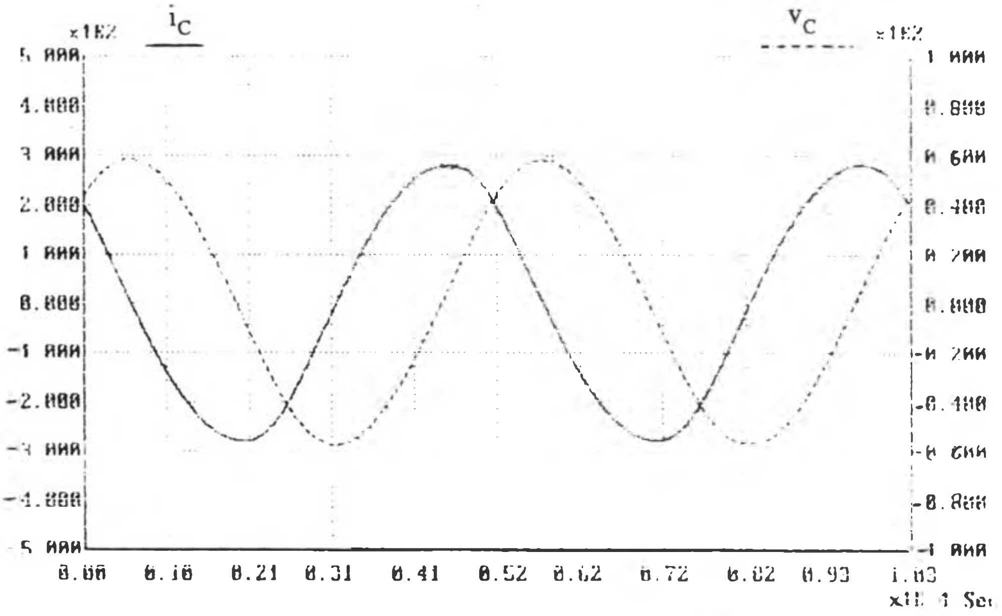
จากการทดลองจริงพบว่า อินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่ ประมาณ 19.5 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งจากผลตอบเชิงความถี่ในรูปที่ 3.4 และ 3.5 จะเห็นได้ว่าค่ายอดของกระแสและแรงดันของขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าประมาณ 285 แอมแปร์ และ 79 โวลต์ ตามลำดับซึ่งจะให้กำลังออกที่ชิ้นงานมีค่าประมาณ 1.3 กิโลวัตต์ และกระแสออกของอินเวอร์เตอร์มีค่ายอดประมาณ 24 แอมแปร์ และล้าหลังแรงดันประมาณ 56 องศา เพื่อให้สามารถเปรียบผลการคำนวณทางทฤษฎีกับผลการทดลอง จึงได้มีการวิเคราะห์การทำงานของวงจรที่ความถี่ 19.5 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นความถี่ของอินเวอร์เตอร์ที่ให้กำลังออกเท่ากับค่าที่ต้องการและออกแบบชนิดและอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจร

ในการพัฒนาเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำในงานวิจัยนี้เราได้ออกแบบให้เครื่องสามารถปรับกำลังที่ชิ้นงานให้อยู่ระหว่างประมาณ 100 เปอร์เซนต์ ลงมาถึงประมาณ 30เปอร์เซนต์ จากผลตอบสนองเชิงความถี่ในรูปที่ 3.4 และ 3.5 จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ประมาณ 22.5 กิโลเฮิรตซ์ จะมีค่ายอดของกระแสและแรงดันของขดลวดเหนี่ยวนำประมาณ 160 แอมแปร์ และ 53 โวลต์ ตามลำดับ ซึ่งให้กำลังออกที่ชิ้นงานประมาณ 409 วัตต์ ซึ่งคิดเป็น ประมาณ 30 เปอร์เซนต์ของกำลังออกที่ชิ้นงานของการทำงานของวงจรที่ความถี่ 19.5 กิโลเฮิรตซ์ และกระแสออกของอินเวอร์เตอร์มีค่ายอดประมาณ 14.5 แอมแปร์และล้าหลังแรงดันประมาณ 70.7 องศา ดังนั้นในการออกแบบชนิดและอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรจะใช้การวิเคราะห์การทำงานที่ความถี่ 19.5 กิโลเฮิรตซ์ เป็นตัวกำหนดในการออกแบบครั้งนี้เนื่องจากเป็นความถี่ที่ทำให้ทราบพิกัดสูงสุดอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจร

จากรูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่ากระแสของขดลวดเหนี่ยวนำมีรูปคลื่นใกล้เคียงซายน์มาก โดยมีค่ายอดของกระแสประมาณ 285 แอมแปร์ ส่วนแรงดันคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำจะมีลักษณะเป็นผลบวกของแรงดันรูปไซน์ที่มีค่ายอดประมาณ 57 โวลต์ กับแรงดันรูปสี่เหลี่ยมที่มีค่ายอดประมาณ 20 โวลต์ โดยมีความแตกต่างของเวลาที่แรงดันและกระแสผ่านศูนย์ประมาณ 0.23 ของคาบ

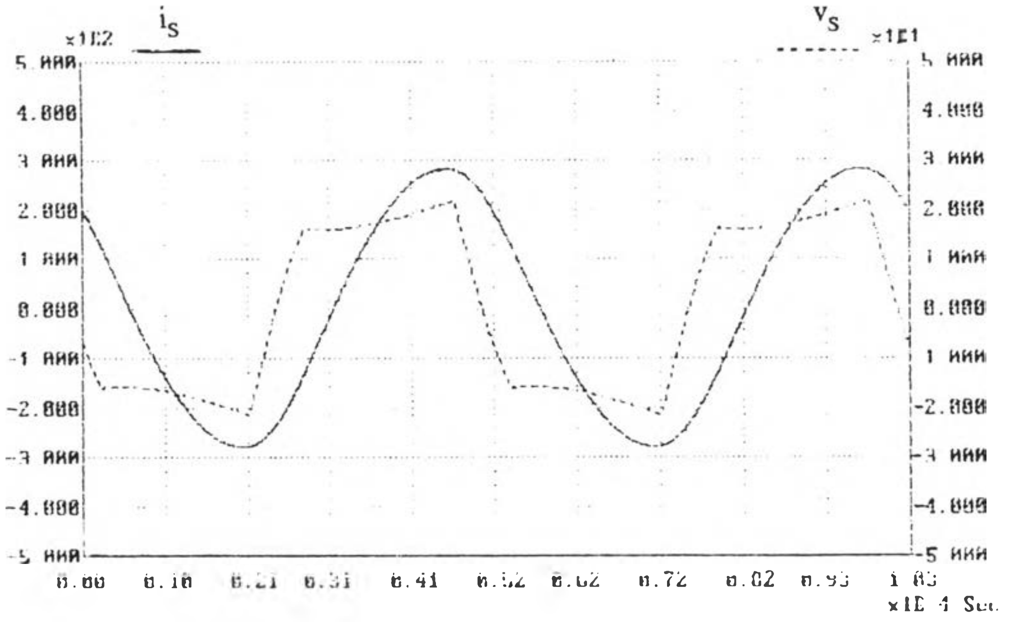


รูปที่ 3.6 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันของขดลวดเหนี่ยวนำที่มีลวดตัวนำอะลูมิเนียมตีเกลียว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร เป็นชิ้นงานเมื่อแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์มีค่ายอด 260 โวลต์



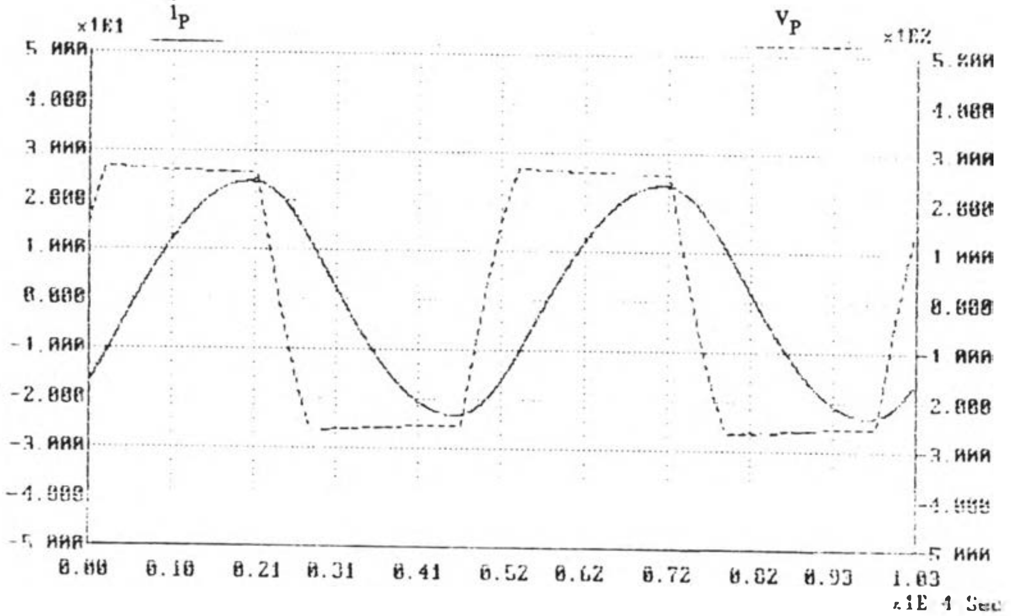
รูปที่ 3.7 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังของโหลด โดยมีเงื่อนไขเดียวกับรูปที่ 3.6

จากรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าทั้งกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุมีรูปคลื่นใกล้เคียงไซน์ โดยมีค่ายอดประมาณ 285 แอมแปร์ และ 59 โวลต์ ตามลำดับ แรงดันนี้จะใช้ในการเลือกพิกัดแรงดันของตัวเก็บประจุที่ใช้ต่ออนุกรมกับขดลวดเหนี่ยวนำ เพื่อเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังของโหลด



รูปที่ 3.8 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงปรับระดับแรงดัน โดยมีเงื่อนไขเดียวกับรูปที่ 3.6

จากรูปที่ 3.8 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงปรับระดับแรงดัน จะเห็นได้ว่ากระแสออกของหม้อแปลง ซึ่งจะเป็นกระแสปริมาณเดียวกันกับที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ มีรูปคลื่นใกล้เคียงไซน์และมีค่ายอด 285 แอมแปร์ หรือค่ายังผลประมาณ 202 แอมแปร์ ส่วนแรงดันออกของหม้อแปลงจะมีลักษณะเป็นผลบวกของแรงดันรูปไซน์ที่มีค่ายอดประมาณ 3.6 โวลต์ กับแรงดันรูปสี่เหลี่ยมที่มีค่ายอดประมาณ 19 โวลต์ เวลาผ่านศูนย์ของกระแสล้าหลังแรงดันประมาณ 0.16 ของคาบ แรงดันดังกล่าวจะมีพื้นที่ใต้รูปคลื่นสมมูลกับแรงดันไซน์ที่ค่ายังผลประมาณ 20 โวลต์ กระแสและแรงดันที่ได้จะใช้ในการออกแบบจำนวนรอบและขนาดของขดลวดทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง

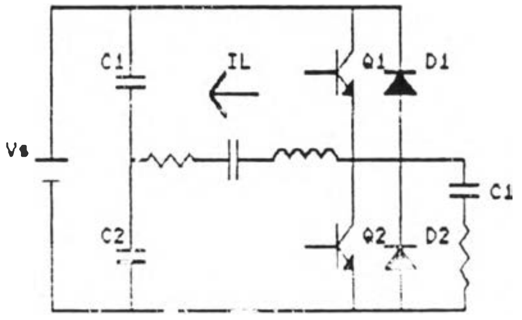


รูปที่ 3.9 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงปรับระดับแรงดัน โดยมีเงื่อนไขเดียวกับรูปที่ 3.6

รูปที่ 3.9 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงปรับระดับแรงดัน รูปคลื่นของกระแสและแรงดันมีลักษณะเหมือนกับรูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านทุติยภูมิตามลำดับ โดยมีค่ายอดของกระแส 24 แอมแปร์ หรือค่ายังผลประมาณ 17 แอมแปร์ และรูปคลื่นของแรงดันซึ่งมีพื้นที่ใต้รูปคลื่นของแรงดันสมมูลกับแรงดันไซน์ ที่มีค่ายังผลประมาณ 252 โวลต์ ค่ากระแสและแรงดันนี้จะใช้ในการออกแบบจำนวนรอบและขนาดของขดลวดทางปฐมภูมิของหม้อแปลง

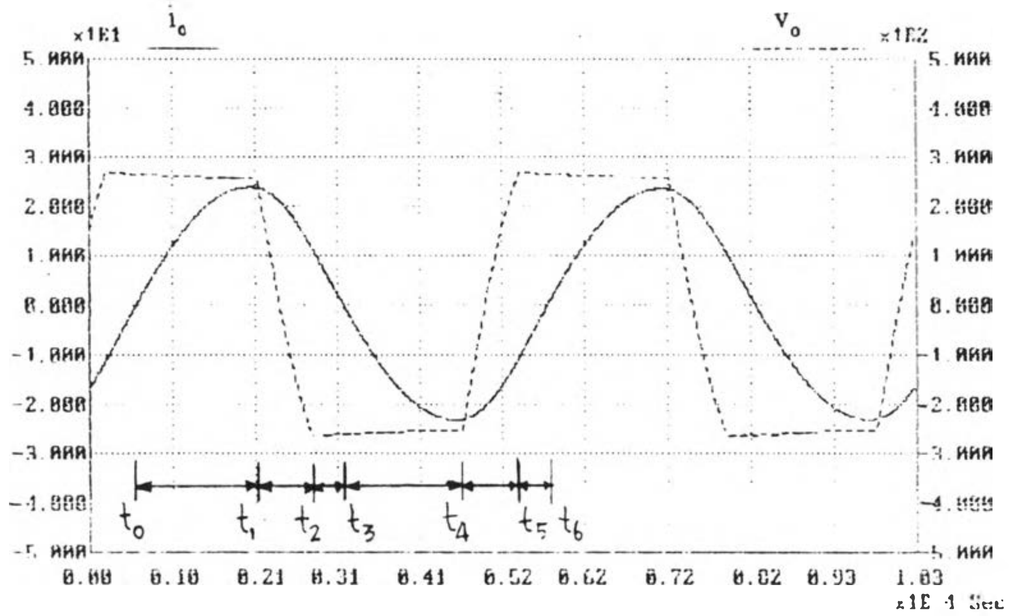
2 อินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์หรือกึ่งบริดจ์นั้นในแต่ละกิ่งของวงจรจะประกอบด้วยสวิตช์ 2 ตัว ต่ออนุกรมกันและจะสลับกันนำกระแส เนื่องจากกระแสและแรงดันของโหลดมีเฟสต่างกัน ดังนั้น สวิตช์ที่ใช้จะต้องเป็นสวิตช์ที่นำกระได้ 2 ทาง ซึ่งทำได้โดยการต่อไดโอดขนานกับทรานซิสเตอร์ดัง แสดงในรูปที่ 3.10 ทรานซิสเตอร์จะทำหน้าที่ ส่งผ่านพลังงานไปสู่โหลด ส่วนพลังงานจากโหลดที่ ไหลย้อนกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟตรงจะไหลผ่านไดโอด อย่างไรก็ดีในปัจจุบันนี้ทรานซิสเตอร์ที่ใช้ สำหรับอินเวอร์เตอร์ทั่วไปมักจะมีไดโอดต่ออยู่แทบทั้งสิ้น

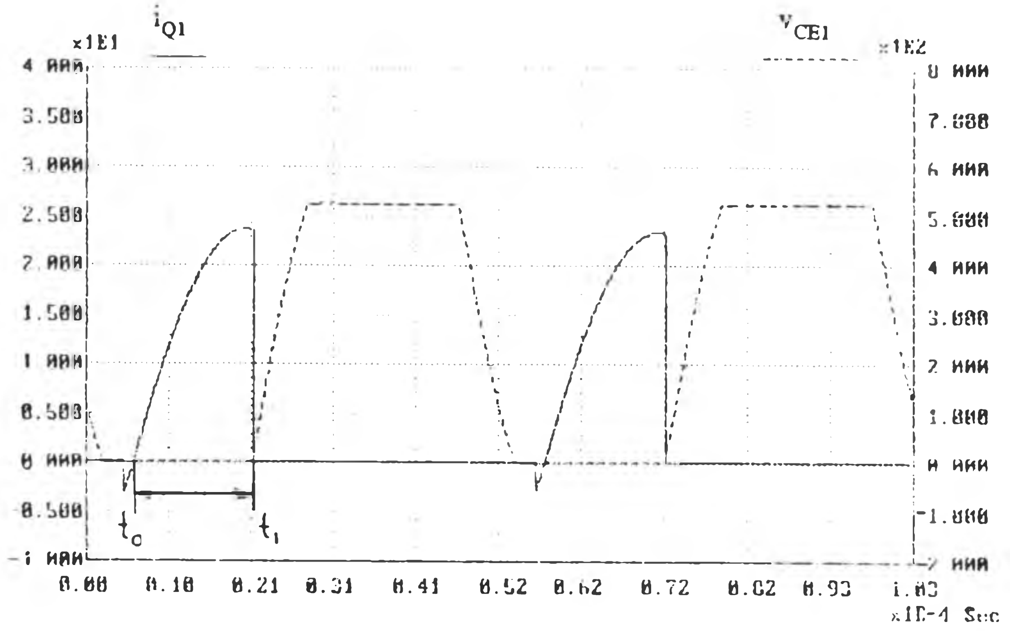


รูปที่ 3.10 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์

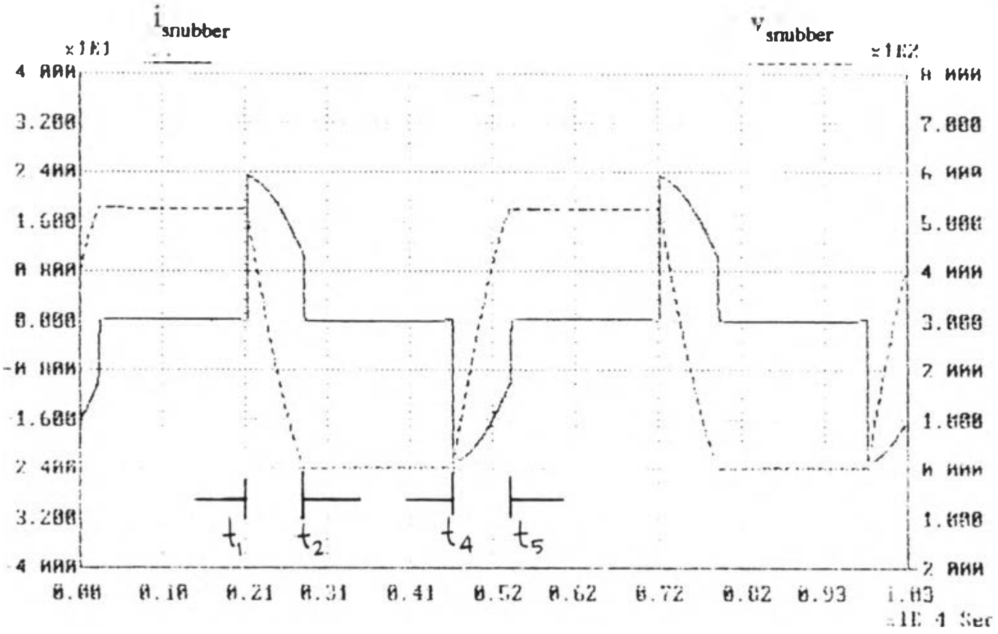
สำหรับเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่สร้างขึ้นนี้ เนื่องจากขดลวดด้านปฐมภูมิของ หม้อแปลงต่อเข้ากับอินเวอร์เตอร์โดยตรง ดังนั้นรูปคลื่นของกระแสและแรงดันออกของอิน เวอร์เตอร์ในรูปที่ 3.11 จะเหมือนรูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านขาเข้าของหม้อแปลงดังแสดงใน รูปที่ 3.9 จะเห็นได้ว่าเวลาผ่านศูนย์ของกระแสออกของอินเวอร์เตอร์จะล้าหลังแรงดันออกประมาณ 0.16 ของคาบ



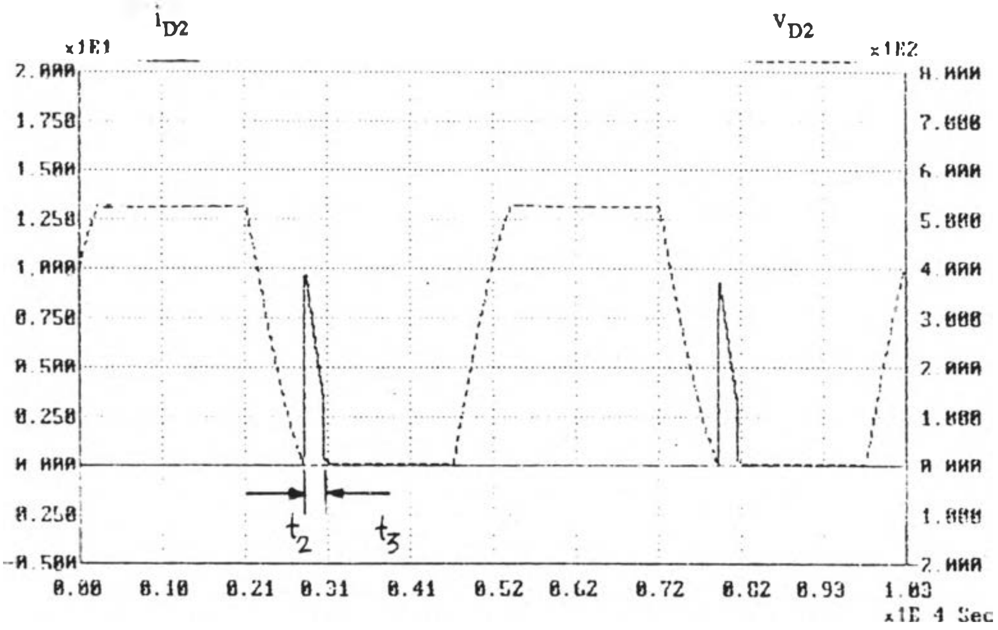
รูปที่ 3.11 แสดงรูปกระแสและแรงดันออกของวงจรอินเวอร์เตอร์



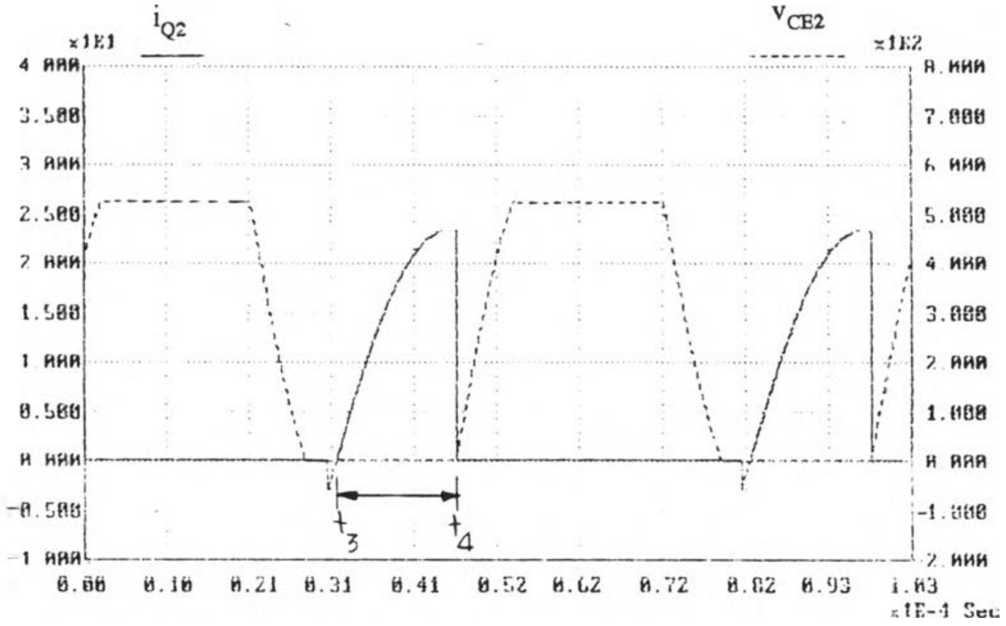
รูปที่ 3.12 แสดงช่วงเวลาการนำกระแสและแรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์ Q_1



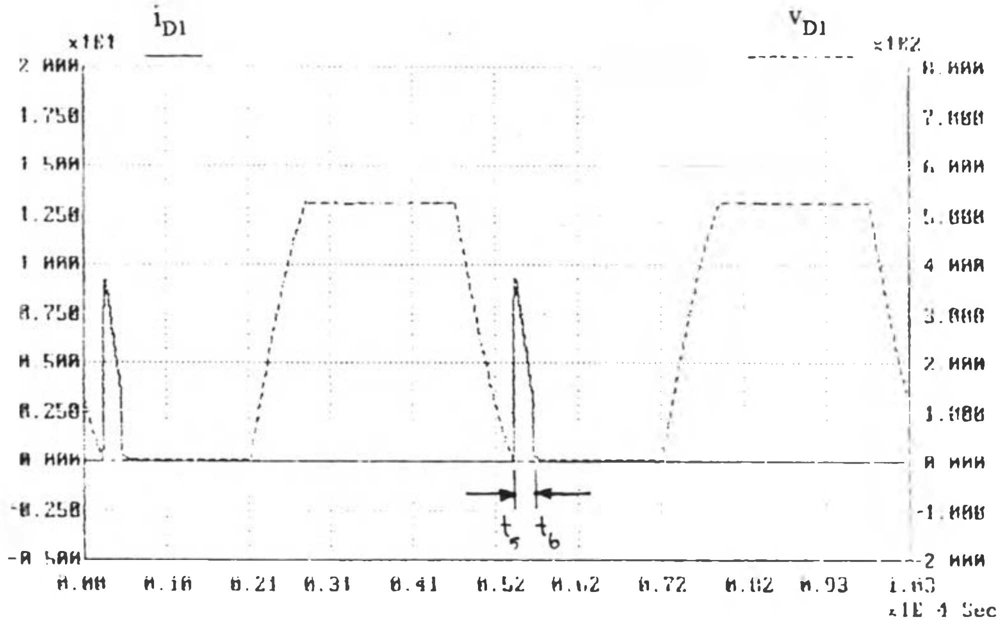
รูปที่ 3.13 แสดงช่วงเวลาที่กระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุและแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุที่ใช้เป็นสนับเบอร์



รูปที่ 3.14 แสดงช่วงเวลาการนำกระแสและแรงดันคร่อมไดโอด D_2



รูปที่ 3.15 แสดงช่วงเวลาการนำกระแสและแรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์ Q_2



รูปที่ 3.16 แสดงช่วงเวลาการนำกระแสและแรงดันคร่อมไดโอด D_1

2.1 หลักการทำงานของวงจร

จากรูปที่ 3.10 ทรานซิสเตอร์ Q_1 จะทำงานสลับกันกับทรานซิสเตอร์ Q_2 ทำให้แรงดันออกของวงจรจะเป็นรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งจะมีค่ายอดเท่ากับครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟตรงของแหล่งจ่ายไฟตรง และมีความถี่เท่ากับความถี่ที่สั่งให้สวิตช์ทำงาน ในรูปที่ 3.12 แสดงรูปคลื่นของกระแสผ่านทรานซิสเตอร์ Q_1 และแรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์ Q_1 จะเห็นว่าช่วงเวลา $t_0 < t < t_1$ ในรูปที่3.11 เป็นช่วงที่ทรานซิสเตอร์ Q_1 นำกระแส กระแสโหลดและกระแสในตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าเป็นบวก เมื่อสั่งให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 หยุดนำกระแส (t_1) กระแสที่ไหลผ่านโหลดและตัวเหนี่ยวนำจะยังไม่เปลี่ยนแปลงทิศทันที กระแสนี้จะย้ายไปไหลผ่านตัวเก็บประจุซึ่งทำหน้าที่เป็นสนับเบอร์ ในช่วงเวลา $t_1 < t < t_2$ ในรูปที่3.13 ตัวเก็บประจุนี้จะช่วยหน่วงแรงดันในระหว่างการ Turn Off ของทรานซิสเตอร์ให้มีการเปลี่ยนแปลงช้าลง เพื่อให้กระแสทรานซิสเตอร์ในตกลงมาก่อน ทำให้กำลังสูญเสียในการหยุดนำกระแสของทรานซิสเตอร์แต่ละครั้งมีค่าน้อยลง [ยุทธนา กุลวิทิต , 2532] เมื่อตัวเก็บประจุคายประจุจนแรงดันคร่อมไดโอด D_2 ได้รับไบแอสตรง ในช่วง $t_2 < t < t_3$ ในรูปที่3.14 กระแสนี้จะย้ายไปไหลผ่านไดโอด D_2 ซึ่งเป็นไดโอดที่ขนานอยู่กับทรานซิสเตอร์ Q_2 ซึ่งเป็นการคืนพลังงานให้กับแหล่งจ่ายไฟตรง และถ้าทรานซิสเตอร์ Q_2 ถูกสั่งให้นำกระแสในช่วงนี้ ทรานซิสเตอร์ Q_2 ก็จะยังไม่นำกระแสเนื่องจากกระแสของโหลดยังไม่เปลี่ยนทิศทาง เพื่อให้กระแสไหลอย่างต่อเนื่อง จะต้องมีการควบคุมให้ทรานซิสเตอร์ Q_2 ที่ต่อขนานกับไดโอด D_2 ที่กำลังนำกระแสเข้าสู่สภาวะที่จะนำกระแส ในขณะที่มีกระแสไหลผ่านไดโอด D_2 ที่ต่อขนานกับทรานซิสเตอร์ Q_2 นั้น จะทำให้เกิดการเข้าสู่การนำกระแสในขณะที่แรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์น้อย เป็นผลให้มีกำลังสูญเสียจากการเข้าสู่สภาวะการนำกระแสน้อย และจะไม่มีกระแสกระชากในทรานซิสเตอร์อันเป็นผลจากกระแสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอดที่ต่อขนานกับทรานซิสเตอร์อันเป็นการลดความเค้นของทรานซิสเตอร์ และเพิ่มความเชื่อถือได้ของวงจร ซึ่งเราเรียกการทำงานของสวิตช์ในวงจรแบบนี้เป็นแบบเรโซแนนซ์ในภาคการสวิตช์แรงดันศูนย์ (Zero Voltage Resonant Switch) เมื่อกระแสโหลดเปลี่ยนทิศทางการไหล ในช่วง $t_3 < t < t_4$ ในรูปที่3.15 ทรานซิสเตอร์ Q_2 จึงจะเริ่มนำกระแสต่อจากไดโอด D_2 และเมื่อทรานซิสเตอร์ Q_2 หยุดนำกระแส กระแสที่ไหลผ่านโหลดและตัวเหนี่ยวนำก็ยังไม่เปลี่ยนทิศทาง ในช่วงเวลา $t_4 < t < t_5$ กระแสนี้จะย้ายไปไหลผ่านตัวเก็บประจุซึ่งทำหน้าที่เป็นสนับเบอร์ ตัวเก็บประจุนี้จะช่วยหน่วงแรงดันในระหว่างการ Turn Off ของทรานซิสเตอร์ให้มีการเปลี่ยนแปลงช้าลงเพื่อให้กระแสในสวิตช์ตกลงมาก่อน เมื่อตัวเก็บประจุชาร์จประจุจนแรงดันคร่อมไดโอด D_1 ได้รับไบแอสตรง ดังนั้นในช่วงเวลา $t_5 < t < t_6$ ในรูปที่ 3.16

กระแสโหลดจะย้ายไปไหลผ่านไดโอด D_1 ซึ่งเป็นไดโอดที่ต่อขนานกับทรานซิสเตอร์ Q_1 ในช่วงนี้ถ้าสั่งให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 นำกระแส แต่ทรานซิสเตอร์ Q_1 ก็จะยังไม่นำกระแสจนกว่ากระแสโหลดจะเปลี่ยนทิศทางการไหล เพื่อให้กระแสไหลอย่างต่อเนื่อง จะต้องมีการควบคุมให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 ที่ต่อขนานกับไดโอด D_1 ที่กำลังนำกระแสเข้าสู่สภาวะที่จะนำกระแส ในขณะที่มีกระแสไหลผ่านไดโอด D_1 ที่ต่อขนานกับทรานซิสเตอร์ Q_1 นั้น จะทำให้เกิดการเข้าสู่การนำกระแสในขณะที่แรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์น้อย เป็นผลให้มีกำลังสูญเสียจากการเข้าสู่สภาวะการนำกระแสน้อย และจะไม่มีกระแสกระชากในทรานซิสเตอร์อันเป็นผลจากกระแสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอดที่ต่อขนานกับทรานซิสเตอร์อันเป็นการลดความเค้นของทรานซิสเตอร์ และเมื่อกระแสโหลดเปลี่ยนทิศทาง ทรานซิสเตอร์ Q_1 ก็จะเริ่มนำกระแสเป็นลำดับต่อไปซึ่งเป็นการครบวงรอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์

2.2 การเลือกค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรสนับเบอร์

ในการออกแบบวงจรสนับเบอร์แบบขนานที่ทำงานร่วมกับทรานซิสเตอร์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ทำงานแบบเรโซแนนซ์ในภาคแรงดันศูนย์นั้น การออกแบบจะต้องทำให้ความลาดเอียงของแรงดันคร่อมสวิตซ์มีค่าเหมาะสมโดยจะต้องมีค่าไม่น้อยเกินไป เพื่อไม่ให้กำลังสูญเสียมีค่ามาก ทั้งนี้ความลาดเอียงน้อยจะทำให้กระแสและแรงดันที่เวลาเดียวกันในตอนหยุดนำกระแสมีค่ามกทำให้เกิดการสูญเสินมาก แต่ถ้าความลาดเอียงของแรงดันคร่อมสวิตซ์ในตอนหยุดนำกระแสมีค่ามากเกินไปทำให้แรงดันที่สวิตซ์ตัวที่จะนำกระแสไม่ลดลงเป็นศูนย์ทำให้เกิดกระแสกระชากในสวิตซ์ในตอนเริ่มนำกระแสเป็นผลทำให้เกิดกำลังสูญเสียในขณะเริ่มนำกระแสมาก ในการออกแบบค่าความจุของตัวเก็บประจุจะทำได้โดยการแทนค่าลงไปในการวิเคราะห์วงจรด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อให้สนับเบอร์ทำงานอย่างเหมาะสม ตัวเก็บประจุที่ใช้ต่อในวงจรต้องเป็นชนิดที่ใช้กับความถี่สูง อีกทั้งต้องทนแรงดันและกระแสได้ ซึ่งจากการวิเคราะห์เลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ 0.25 ไมโครฟารัด จะเลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิดPolypropylene MKP10 ซึ่งมีค่าการสูญเสียต่ำ ส่วนความต้านทานในวงจรสนับเบอร์ จริง ๆ แล้วไม่จำเป็นต้องมีก็ได้เพราะการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์เป็นแบบกระแสล้าหลังแรงดันแล้วการ Turn On จะเกิดขึ้นขณะที่แรงดันเป็นศูนย์(Zero Voltage Turn On) [Joseph H.Rockot,1987)ทำให้ไม่มีการคายประจุผ่านสวิตซ์โดยตรง อีกทั้งยังเป็นการลดกำลังสูญเสียในการ สวิตซ์ขณะ Turn On ด้วย

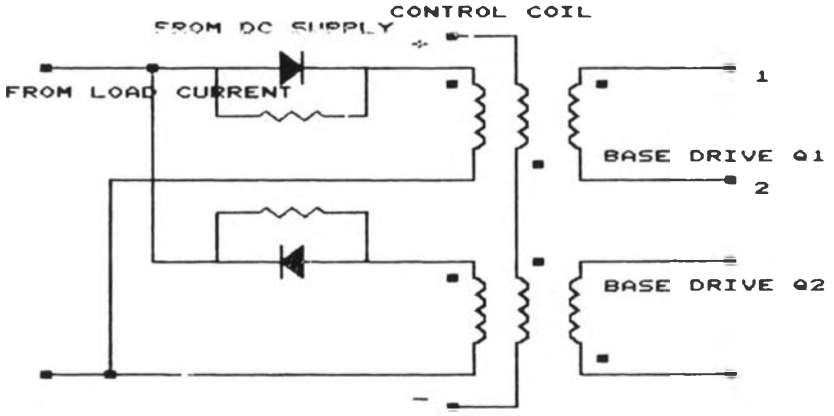
รูปที่ 3.12 และ 3.15 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันของทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2ตามลำดับ กระแสผ่านทรานซิสเตอร์Q_1และ Q_2 จะมีค่ายอดประมาณ 24 แอมแปร์ ส่วนแรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2ขณะหยุดนำกระแสมีค่าประมาณ 520 โวลต์

รูปที่ 3.14 และ 3.16 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันของไดโอด D_1 และ D_2 ตามลำดับ กระแสผ่านไดโอด D_1 และ D_2 มีค่ายอดประมาณ 9 แอมแปร์ ส่วนแรงดันคร่อมไดโอด D_1 และ D_2 จะมีค่าเท่ากับแรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 ซึ่งมีค่ายอดประมาณ 520 โวลต์

3 วงจรควบคุม

วงจรในส่วนนี้ทำหน้าที่สร้างสัญญาณไปขับนำเบสของทรานซิสเตอร์กำลังทั้งสองตัวในวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะต้องควบคุมลำดับการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ และจังหวะการทำงานของทรานซิสเตอร์กำลังเพื่อให้ได้รูปคลื่นของแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ตามต้องการและไม่ทำให้เกิดความเสียหายขึ้นกับอุปกรณ์ของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำวงจรควบคุมจะประกอบด้วย

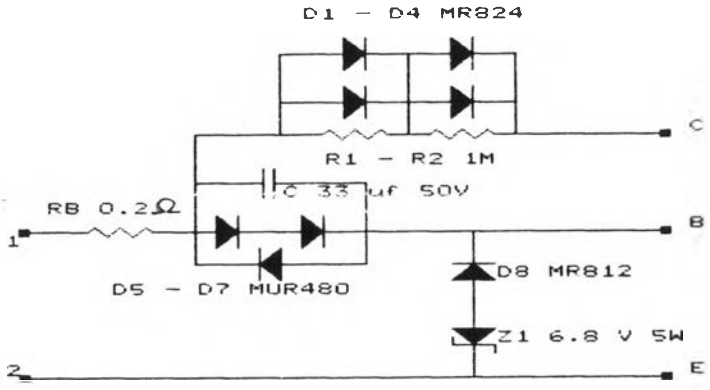
3.1 วงจรกำเนิดสัญญาณกำหนดจังหวะการทำงานของวงจร



รูปที่ 3.17 วงจรกำเนิดสัญญาณกำหนดจังหวะการทำงานของวงจร

วงจรกำเนิดสัญญาณกำหนดจังหวะการทำงานของทรานซิสเตอร์กำลัง อาจจะได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณอิสระ ซึ่งสามารถกำหนดความถี่ได้อย่างอิสระหรืออาจจะได้จากการป้อนกลับของกระแสหรือแรงดันของโหลด วงจรกำเนิดสัญญาณอิสระมีข้อดีในแง่ของความสะดวกในการกำหนดความถี่ ซึ่งจะทำให้สามารถควบคุมกำลังออกของอินเวอร์เตอร์ได้ ส่วนการใช้การป้อนกลับของกระแสหรือแรงดันโหลดนั้น จะมีข้อดีในแง่ของความง่ายของวงจรและป้องกันการรบกวนจากสัญญาณภายนอกได้ดีกว่า อันจะเป็นผลดีในแง่ความเชื่อถือได้ของวงจร ดังนั้นจึงได้เลือกใช้วงจร

กำเนิดสัญญาณกำหนดจังหวะการทำงานโดยการป้อนกลับของกระแสโหลด เพื่อใช้ในวงจรขับนำเบสของทรานซิสเตอร์ในเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ โดยที่กระแสโหลดจะมีลักษณะเป็น sine wave และป้อนให้กับหม้อแปลงของวงจรกำเนิดสัญญาณกำหนดจังหวะการทำงานของวงจร ซึ่งได้รับจากการป้อนกลับของกระแสโหลดโดยต่อเข้ากับหม้อแปลงขับนำแต่ละตัว ซึ่งขดทางด้านปฐมภูมิจะมีขั้วเหมือนกัน แต่ขดทางด้านทุติยภูมิจะมีขั้วตรงกันข้ามกันเพื่อที่จะขับนำทรานซิสเตอร์ให้สลับกันนำกระแสทั้งนี้จะต้องใช้หม้อแปลงที่มีขนาดเท่ากัน จำนวนรอบทั้งทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเท่ากันทั้งสองตัว เพื่อป้องกันการเกิดความผิดพลาดในการขับนำเบสของทรานซิสเตอร์ อันจะทำให้เกิดการทะลุผ่านในแต่ละกิ่งได้



รูปที่ 3.18 แสดงวงจรขับนำเบสที่ใช้ขับนำทรานซิสเตอร์แต่ละตัว

3.2 วงจรขับนำเบส

วงจรขับนำเบส มีหน้าที่ในการขับนำทรานซิสเตอร์ให้นำกระแสและหยุดนำกระแสได้ตามรูปแบบลำดับการทำงานของสัญญาณที่ได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณกำหนดจังหวะการทำงานของอินเวอรเตอร์ ในการออกแบบวงจรขับนำนั้นเราพยายามที่จะใช้วงจรที่ง่ายไม่ซับซ้อนเพื่อให้วงจรมีความเชื่อถือได้สูง ดังนั้นจึงออกแบบให้วงจรขับนำเบสของทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัว มีการแยกโดด (Isolate)จากกันโดยวงจรแต่ละชุดจะมีลักษณะดังแสดงในรูป 3.17 จะเห็นได้ว่าวงจรขับนำเบสของทรานซิสเตอร์แต่ละชุดจะรับสัญญาณควบคุมจากวงจรกำเนิดสัญญาณแต่ละชุด

การ Turn Off ทรานซิสเตอร์ของวงจรขับนำเบส จะเริ่มทันทีที่แกนเริ่มอิ่มตัว จากการทดลองจะพบว่าช่วง Turn Off จะมีแรงดัน ($-V_{BE}$)ประมาณ -7 โวลต์ ให้กับรอยต่อของเบสอิมิตเตอร์ในขณะที่ทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแสด้วย เมื่อพิจารณาวงจรขับนำเบสจะเห็นได้ว่าปริมาณ$-V_{BE}$ ในช่วง Turn Off นี้ขึ้นอยู่กับ ไดโอด (D_8) และซีนเนอร์ไดโอด (Z_1) ที่ต่ออยู่ $-V_{BE}$จะมีค่ามากเกินไปไม่ได้เพราะ$-V_{BE}$ที่มากเกินไปจะทำให้พื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยของทรานซิสเตอร์ (Reverse Safe Operating Area) แคบลง โดยเฉพาะ Secondary Breakdown Limit [Keith H.Billings,1989] ทำให้อาจเป็นอันตรายต่อทรานซิสเตอร์ โดยเฉพาะในแง่การทนแรงดัน 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)ซึ่งหมายถึง ไดโอด D_1-D_4 ในวงจรขับนำเบสในรูป 3.18 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่า ไดโอด D_5-D_6 จะทำหน้าที่ยกระดับ แรงดัน V_{CEsat}ให้สูงขึ้น ซึ่งก็คือการลดปริมาณกระแสเบสที่จ่ายให้กับทรานซิสเตอร์ ทำให้ทรานซิสเตอร์อิ่มตัวน้อยลงนั่นเองสำหรับปริมาณของไดโอดที่ใช้ในการยกระดับแรงดันในที่นี้ใช้ไดโอดจำนวน 2 ตัว ซึ่งได้จากการทดลองต่อวงจรเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ Storage Time มีค่าต่ำและแรงดัน V_{CEsat} มีค่าไม่สูงเกินไปเพราะถ้า V_{CEsat} มีค่าสูง กำลังสูญเสียในการสวิตช์ในขณะนำกระแสจะมีค่าสูง

สำหรับสัญญาณที่ออกจากวงจรกำเนิดสัญญาณ ซึ่งได้จากการป้อนกลับของกระแสโหลดนั้นเปรียบเสมือนกับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ (Current Source) ซึ่งจะส่งผ่านหม้อแปลงขับนำที่ใช้แกนแม่เหล็กเป็นแบบแกน Toriod มายังวงจรขับนำเบส ซึ่งช่วงบวกของกระแสโหลดจะทำให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 นำกระแส และช่วงลบของกระแสโหลดก็จะทำให้ ทรานซิสเตอร์ Q_2 นำกระแส โดยมีความถี่ในการนำกระแสเท่ากับความถี่ของกระแสโหลด สัญญาณที่ใช้ขับนำทรานซิสเตอร์ เพื่อให้วงจรอินเวอ์เตอร์ทำงานแบบเรโซแนนซ์ในภาคแรงดันศูนย์เพื่อลดกำลังสูญเสียในช่วงเริ่มนำกระแส และการทำงานของตัวเก็บประจุที่ทำหน้าที่เป็นสนับเบอร์เป็นไปอย่างเหมาะสมเพื่อลดกำลังสูญเสียในช่วงแรกของการหยุดนำกระแสของทรานซิสเตอร์ สัญญาณขับนำจะต้องเป็นแบบ 3 สถานะ ในการสร้างสัญญาณดังกล่าวจะใช้เทคนิคแกนอิ่มตัว (Saturable Core) กล่าวคือในการออกแบบหม้อแปลง Toroid จะต้องออกแบบให้หม้อแปลงทำงานในช่วงเวลาจำกัด คือ จะทำให้หม้อแปลงส่งผ่านสัญญาณขับนำให้เท่ากับช่วงเวลาที่ต้องการให้ทรานซิสเตอร์นำกระแส จากนั้นแกนหม้อแปลงจะอิ่มตัว และเมื่อแกนอิ่มตัวแล้วจะไม่มีการส่งผ่านพลังงานโดยแหล่งจ่ายกระแสจาก

ขดปฐมภูมิไปยังขดทุติยภูมิ เพราะเมื่อแกนอิ่มตัว ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (μ) ของแกนจะเท่ากับค่าความซึมซาบของอากาศ (μ_0) ทำให้การ Coupling ของสัญญาณระหว่างขดทุกขดของหม้อแปลงหมดไป ค่าความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก (Magnetizing Inductance)ของขดทุติยภูมิจึงลดลงเหลือเท่ากับความเหนี่ยวนำที่มีแกนเป็นอากาศ หรือกล่าวได้ว่า ขดทุติยภูมิแต่ละขดจะกลายเป็นวงจรลัด อันเป็นการทำให้ทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแส [K.Haradd,H.Sakamoto and M.Shoyama,1986]

3.3 การเลือกขนาดของแกนหม้อแปลงขับนำในวงจรกำเนิดสัญญาณ

วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้เทคนิคแกนอิ่มตัว (Saturable Core) จะต้องมีการเลือกขนาดของแกนแม่เหล็กอย่างเหมาะสมเพื่อให้สัญญาณขับนำมีลักษณะตามที่ได้กำหนดไว้ ในที่นี้ใช้แกนเฟอร์ไรต์ที่มีลักษณะเป็น Toroid หม้อแปลงขับนำแต่ละตัวจะมีขนาดเท่ากัน จำนวนรอบทั้งทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิมีจำนวนรอบเท่ากัน แตกต่างกันที่ขั้วของขดทุติยภูมิเท่านั้น ในทางปฏิบัติเลือกใช้แกน Toroid ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 19 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 10 มิลลิเมตร ความหนา 10 มิลลิเมตร และพื้นที่หน้าตัด 42.30 ตารางมิลลิเมตร แล้วใช้แกนขนาดดังกล่าวพันขดปฐมภูมิจำนวน 2 รอบ ขดทุติยภูมิจำนวน 2 รอบ เราสามารถปรับช่วงเวลาที่ทรานซิสเตอร์นำกระแส (ปรับความ เร็ว-ช้าในการอิ่มตัวของแกน) โดยปรับจำนวนรอบของขดทุติยภูมิหรือปรับแรงดันคร่อมหม้อแปลง กล่าวคือ ถ้าให้จำนวนรอบทุติยภูมิสูงขึ้น จะได้ช่วงเวลาที่ทรานซิสเตอร์นำกระแสมากขึ้นหรือแกนอิ่มตัวช้าลง ในทางกลับกันถ้าจำนวนรอบทุติยภูมิต่ำลงแกนจะอิ่มตัวเร็วขึ้น หรือช่วงเวลาที่ทรานซิสเตอร์นำกระแสจะลดลง ส่วนการปรับระยะเวลานำกระแสของทรานซิสเตอร์โดยการปรับแรงดันคร่อมหม้อแปลง จะทำได้โดยการปรับค่าความต้านทาน R_B ในวงจรขับนำเบส เพราะถ้าแรงดันคร่อม R_B มีค่าสูงขึ้น แรงดันคร่อมขดทุติยภูมิของหม้อแปลงก็จะสูงขึ้นด้วยซึ่งจะทำให้แกนอิ่มตัวไวขึ้น ช่วงเวลาที่ทรานซิสเตอร์นำกระแสจึงลดลง แต่ในทางกลับกันถ้าเปลี่ยนค่าความต้านทาน R_B มีค่าต่ำลง ก็จะทำให้แกนอิ่มตัวช้าลงและทำให้ช่วงเวลาที่ทรานซิสเตอร์นำกระแสมีค่ามากขึ้น

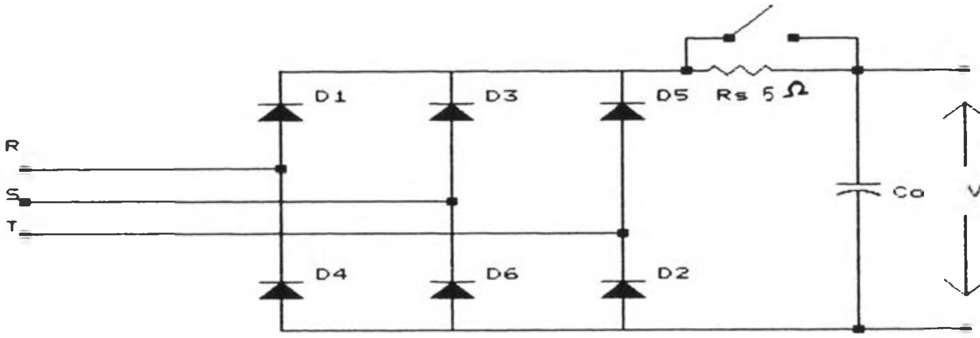
3.4 การควบคุมความถี่ในการทำงานของวงจร

การใช้เทคนิคแกนอิ่มตัว (Saturable Core) และการป้อนกลับของกระแสโหลดในการขับนำทรานซิสเตอร์นั้น ความถี่ในการทำงานของอินเวอร์เตอร์จะขึ้นอยู่กับขนาดของแกนToroid จำนวนรอบของขดลวด กระแสโหลด ดังนั้นถ้าเราต้องการปรับความถี่ในการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ก็สามารถทำได้โดยการปรับค่าสนามแม่เหล็กอิ่มตัวของแกนหม้อแปลง (B_{max}) ซึ่งสามารถ

ทำได้โดยการเปลี่ยนขนาดของแกน เปลี่ยนจำนวนรอบของขดลวด หรือป้อนไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายภายนอกโดยการเพิ่มชุดขดลวดให้กับหม้อแปลงขับนำแต่ละชุด แต่การปรับความถี่การทำงานของอินเวอร์เตอร์โดยการเปลี่ยนขนาดของแกน หรือเปลี่ยนจำนวนรอบของขดลวดจะไม่สะดวกในการควบคุมความถี่ จึงเลือกใช้วิธีการป้อนไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายภายนอกให้กับหม้อแปลงขับนำโดยการเพิ่มชุดขดลวดให้กับหม้อแปลงขับนำแต่ละชุดดังรูป 3.17 เพื่อให้สามารถปรับความถี่ได้ในช่วง 19.5 - 22.5 กิโลเฮิรตซ์ ถ้าเราป้อนไฟกระแสตรงทางด้านบวกก็จะทำให้แกนของหม้อแปลงขับนำอิ่มตัวเร็วขึ้นก็จะเป็นผลให้ช่วงเวลาที่ขับนำทรานซิสเตอร์ให้นำกระแสสั้นลง ซึ่งหมายถึง ความถี่การทำงานของวงจรจะสูงขึ้น ในทางกลับกันถ้าเราป้อนไฟลบให้กับหม้อแปลงขับนำ การอิ่มตัวของแกนหม้อแปลงจะช้าลง ทำให้ช่วงการนำกระแสของทรานซิสเตอร์จะนานขึ้น ก็จะทำให้ความถี่การทำงานของวงจรจะลดลง ซึ่งจะมีผลทำให้กระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ตามที่ได้วิเคราะห์ผลตอบเชิงความถี่ เมื่อความถี่การทำงานของวงจรสูงขึ้นก็จะทำให้กระแสโหลดมีค่าลดลง ทำให้กำลังออกมีค่าลดลง ในทางกลับกัน ถ้าความถี่การทำงานลดลงก็จะทำให้กระแสโหลดมีค่าสูงขึ้น นั่นคือการปรับค่าความถี่ของการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์จะเป็นการปรับกำลังด้านขาออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ด้วย ในงานวิจัยนี้สามารถปรับความถี่การทำงานของวงจรได้ในช่วง 19.5 - 22.5 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งจะเป็นการปรับกำลังด้านขาออกได้ 100 - 30 เปอร์เซ็นต์

4 วงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

จากการพิจารณาโหลดจะเห็นได้ว่า ขดลวดเหนี่ยวนำที่มีชิ้นงานเป็นลวดตัวนำอะลูมิเนียมตีเกลียวขนาด 15 มิลลิเมตร กำลังงานความร้อนในชิ้นงานและกำลังความร้อนที่สูญเสียในขดลวดเหนี่ยวนำมีค่ารวมกับประมาณ 2,030 วัตต์ ถ้าประมาณประสิทธิภาพของ Converter ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟ้ากระแสสลับเพื่อจ่ายให้แก่ขดลวดเหนี่ยวนำซึ่งประกอบด้วย อินเวอร์เตอร์ หม้อแปลง และตัวเก็บประจุที่ใช้ในการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง ให้มีค่าประมาณ 90 % ดังนั้นกำลังออกของวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงจะมีค่าประมาณ 2,260 วัตต์ ถ้าแรงดันไฟตรงมีค่าเฉลี่ยประมาณ 520 โวลต์ กระแสออกของวงจรจะมีค่าประมาณ 4.35 แอมแปร์ วงจรอินเวอร์เตอร์อาจจะสามารถแทนได้ด้วยความต้านทานขนาด 119 โอห์ม วงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงจะประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 3 เฟส และตัวเก็บประจุที่ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองเพื่อลดการกระเพื่อมของแรงดันดังแสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 3 เฟส

การออกแบบวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ประกอบด้วยการเลือกชนิดและการกำหนดพิกัดกระแสและแรงดันของไดโอดในวงจรเรียงกระแส การเลือกชนิด การกำหนดขนาดและพิกัดแรงดันของตัวเก็บประจุในวงจรกรอง เพื่อให้ได้ขนาดของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านขาออก และเปอร์เซ็นต์การกระเพื่อมของแรงดันตามที่ต้องการ ชนิดและพิกัดต่าง ๆ ของไดโอดและตัวเก็บประจุขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสและแรงดันออก ความถี่และอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ รวมทั้งอิมพีแดนซ์ของไดโอด และตัวเก็บประจุที่ใช้สำหรับความถี่ 50 เฮิรตซ์ ไดโอดของวงจรเรียงกระแสจะใช้ไดโอดเรียงกระแสธรรมดา (rectifying diode) ส่วนตัวเก็บประจุจะใช้ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโตรไลติก (electrolytic capacitor) ซึ่งมีขนาดน้ำหนักและราคาต่อปริมาณพลังงานที่เก็บสะสมได้ต่ำสุด

รูปที่ 3.19 ความต้านทานที่ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุมีหน้าที่จำกัดกระแสเมื่อวงจรเริ่มทำงาน เพราะในช่วงเวลานี้แรงดันที่ตัวเก็บประจุยังมีค่าประมาณศูนย์โวลต์ ทำให้กระแสที่ใช้อัดประจุให้แก่ตัวเก็บประจุมีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งกระแสจำนวนนี้จะไหลผ่านไดโอดของวงจรเรียงกระแสอันอาจ

ทำให้ไดโอดเสียหายได้ เมื่อแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเพิ่มขึ้นถึงระดับที่เหมาะสมแล้วตัวต้านทานนี้จะถูกลัดวงจรด้วย Contact ของ Relay เพื่อไม่ให้เกิดกำลังสูญเสียที่ตัวต้านทานขณะวงจรทำงาน และวงจรเรียงกระแสจะได้ส่งผ่านกำลังได้เต็มที่

4.1 การออกแบบค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ใช้กรองแรงดัน

แรงดันไฟตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสเมื่อผ่านวงจรกรองจะมีค่ายอดประมาณ 537.4 โวลต์

ให้แรงดันกระเพื่อมมีค่ายอดถึงยอดเป็น 7 เปอร์เซ็นต์แรงดันยอดมีค่า = 537.4 x .07

= 37.6 โวลต์

แรงดันเฉลี่ยที่ตัวเก็บประจุจะมีค่า = 519 โวลต์

จากสูตร $$C = \frac{it}{v} \qquad (3.2)$$

โดยที่ i คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ

t คือ ช่วงเวลาที่ตัวเก็บประจุจ่ายกระแส

v คือ ค่าแรงดันกระเพื่อมจากยอดถึงยอดคร่อมตัวเก็บประจุ

C คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ใช้เป็นวงจรกรอง

จากวงจรในรูปที่ 3.19 ประมาณว่าที่ความถี่ 19.5 กิโลเฮิรตซ์ กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุในช่วงที่ตัวเก็บประจุจ่ายกระแสมีค่าเท่ากับกระแสโหลดซึ่งมีค่าประมาณ 4.3 แอมแปร์ และช่วงเวลาที่ตัวเก็บประจุจ่ายกระแสมีค่าประมาณ หนึ่งในหก ของคาบเวลา เนื่องจากเป็นวงจรเรียงกระแสแบบ 3 เฟส เต็มคลื่น ช่วงเวลาดังกล่าวซึ่งมีค่าประมาณ 3.3 มิลลิวินาที แทนค่าในสมการที่ 3.2 จะได้

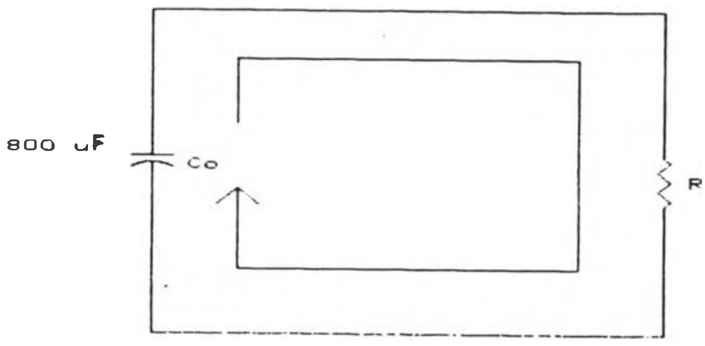
$$C = \frac{4.3\times 3.33\times 10^{-3}}{37.6}$$

$$= 381 \quad \text{ไมโครฟารัด}$$

ในทางปฏิบัติจะเลือกค่าตัวเก็บประจุขนาด 400 ไมโครฟารัด ที่ทนแรงดันได้สูงกว่าแรงดันไฟตรง แต่ตัวเก็บประจุที่หาได้มีขนาด 400 ไมโครฟารัด ทนแรงดันได้เพียง 350 โวลต์ ดังนั้นจึงใช้ตัวเก็บประจุขนาด 400 ไมโครฟารัด แรงดัน 350 โวลต์ มาต่ออนุกรมกัน 2 ตัว แต่ค่าความจุจะลดลงครึ่งหนึ่ง จึงใช้ตัวเก็บประจุขนาดเดียวกันอีก 2 ตัว มาต่ออนุกรมกัน แล้วนำชุดตัวเก็บประจุทั้ง 2 ชุดมาขนานกัน จะทำให้ได้ค่าความจุรวมเป็น 400 ไมโครฟารัด และทนแรงดันได้ 700 โวลต์ ซึ่งเป็นค่าที่มากกว่าค่าที่คำนวณได้ มีผลให้แรงดันกระเพื่อมที่ตัวเก็บประจุมีค่าลดลง

4.2 การคำนวณค่าความต้านทานที่ต่อขนานตัวเก็บประจุ

ตัวต้านทานที่ต่อขนานกับตัวเก็บประจุมีหน้าที่ในการคายประจุที่สะสมอยู่ที่ตัวเก็บหลังจากเลิกการใช้งาน เพื่อมิให้เกิดอันตราย ตามมาตรฐานของ วสท. 40 กำหนดให้ตัวเก็บประจุที่ใช้กับแรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 600 โวลต์ จะต้องมีตัวต้านทานสำหรับคายประจุมีแรงดันเหลือ 50 โวลต์ ภายใน 1 นาที และสามารถคำนวณค่าความต้านทานจากความสัมพันธ์ในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 การคายประจุของตัวเก็บประจุ

จากรูปที่ 3.20 ให้ V_f คือแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุที่เวลาใด ๆ และ V_1 คือแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุก่อนการคายประจุผ่านตัวต้านทาน เนื่องจากในวงจรกรองใช้ชุดตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน 2 ชุด เพื่อให้รับไฟตรงประมาณ 520 โวลต์ แสดงว่าตัวเก็บประจุแต่ละชุดจะรับแรงดันชุดละประมาณ 260 โวลต์ จากรูปที่ 3.20 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุที่เวลาใด ๆ จะมีความสัมพันธ์กับแรงดันที่คร่อมตัวเก็บประจุก่อนการคายประจุดังสมการ 3.3

$$V_f = V_1 \exp\left(\frac{-t}{RC}\right) \tag{3.3}$$

แทนค่าแรงดัน $V_1 = 260$ โวลต์

$V_f = 50$ โวลต์

$C = 800$ ไมโครฟารัด

$t = 1$ นาที

จะได้ R = 45.5 กิโลโอห์ม

จากการคำนวณพบว่าค่าความต้านทานที่ใช้ในการคายประจุแต่ละชุดมีค่า 45.5 กิโลโอห์ม ซึ่งตัวต้านทานแต่ละตัวจะมีกำลังสูญเสียประมาณ 1.5 วัตต์ ในวงจรกรองนี้จะมีตัวต้านทานต่ออยู่ 2 ตัว กำลังสูญเสียรวมจะมค่าประมาณ 3 วัตต์ ในทางปฏิบัติจึงเลือกใช้ความต้านทาน 45 กิโลโอห์ม ขนาด 2 วัตต์ ทำให้มีกำลังสูญเสียรวม 3 วัตต์

4.3 การวิเคราะห์หากระแสผ่านไดโอดในวงจรเรียงกระแส

การคำนวณหากระแสผ่านไดโอดโดยตรงค่อนข้างยุ่งยาก ในทางปฏิบัติจะสามารถหาขนาดกระแสผ่านไดโอด โดยใช้โปรแกรม Lek6.0 ทำการซิมมูเลต เพื่อวิเคราะห์ค่ากระแสอาร์เอ็มเอส และค่ากระแสยอดที่ผ่านไดโอด

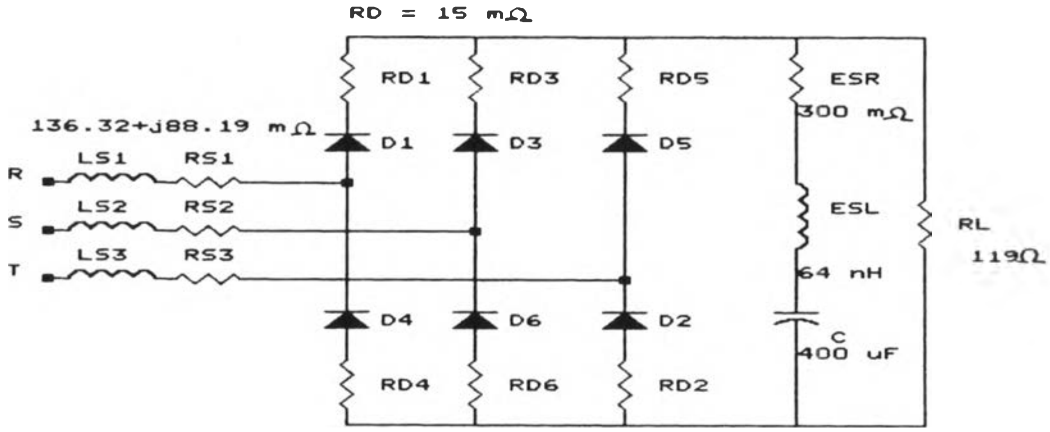
จากการแทนวงอินเวอร์เตอร์ด้วยความต้านทาน 119 โอห์ม ถ้าประมาณว่าใช้สายไฟในแต่ละเฟสที่ต่อจากหม้อแปลงกำลัง ที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังของการไฟฟ้านครหลวงยาวจนถึงเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำมีขนาด 6 มม^2 ยาว 40 เมตร ต่อเฟสแล้ว สายไฟดังกล่าวจะมีค่าอิมพิแดนซ์ต่อเฟสเท่ากับ 128 + j64 มิลลิโอห์ม (ธนบูรณ์ ศศิภานุเดช ,2530) ถ้าประมาณว่าหม้อแปลงแหล่งจ่ายกำลังของการไฟฟ้านครหลวงมีขนาด 250 กิโลโวลต์แอมแปร์ จะพบว่าหม้อแปลงจะมีอิมพีแดนซ์ขนาด 8.32+j24.19 มิลลิโอห์ม ซึ่งถ้ารวมอิมพีแดนซ์ของสายไฟในแต่ละเฟส จะทำให้ขนาดของอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายมีขนาด (136.32 + j88.19) ดังแสดงในรูป 3. 21

สำหรับไดโอดพิกัด 10 - 20 แอมแปร์ ขนาดแรงดัน 800 โวลต์ จะมีค่าความต้านทานอนุกรมประมาณ 15 - 30 มิลลิโอห์ม และแรงดันคัทอิน 0.6 โวลต์ ส่วนตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโตรไลติก ขนาด 200 - 400 ไมโครฟารัด แรงดัน 350 โวลต์ จะมีค่าอิมพีแดนซ์ดังนี้

ค่าความต้านอนุกรม (ESR) = 300 มิลลิโอห์ม

ค่าความเหนี่ยวนำอนุกรม (ESL) = 64 ไมโครเฮนรี่

จากค่าประมาณของอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ออกแบบให้แรงดันของวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงดังแสดงในรูป 3.21

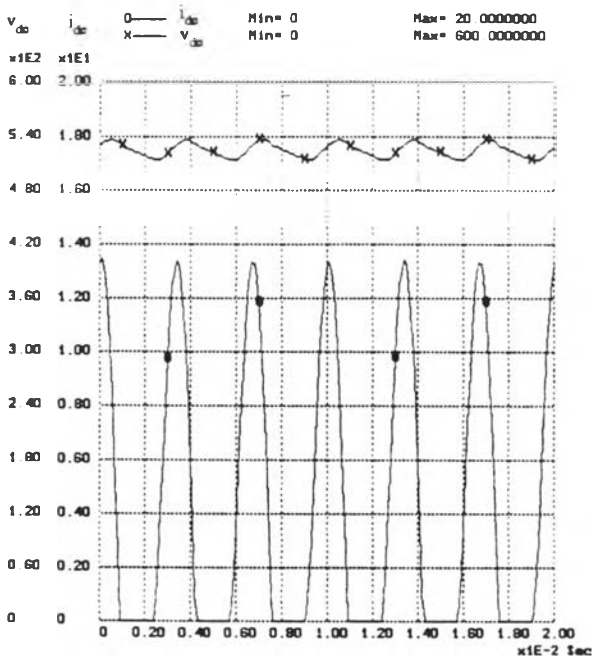


รูปที่ 3.21วงจรที่ใช้ในการซิมูเลตด้วยโปรแกรมวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าเพื่อหาค่ากระแสผ่านไดโอด

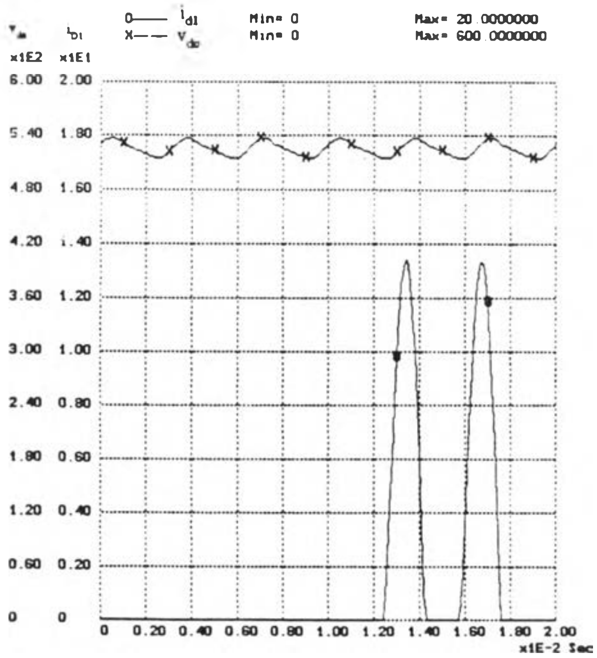
จากการวิเคราะห์การทำงานของวงจรสมมูลในรูปที่ 3.21 ในการซิมมูเลตโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า LEK 6.0 (เอกชัย ลีลารัศมี ,2530) จะคิดที่สภาวะอยู่ตัว จึงไม่มีตัวต้านทานจำกัดค่ากระแสต่ออยู่ จะได้รูปคลื่นของกระแสออกวงจรเรียงกระแสและแรงดันออกในภาวะอยู่ตัวดังแสดงในรูป 3.22 จะเห็นได้ว่าแรงดันออกของวงจรจะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 527 โวลต์ และมีค่ายอดถึงยอดของแรงดันกระเพื่อมประมาณ 20 โวลต์ หรือประมาณ 3.8 เปอร์เซนต์ของแรงดันเฉลี่ย ค่าเฉลี่ยของกระแสประมาณ 4.3 แอมแปร์ ส่วนรูปที่ 3.23 เป็นรูปคลื่นของกระแสในไดโอดและแรงดันออกของวงจร โดยที่ไดโอดแต่ละตัวจะมีการนำกระแสเป็นช่วงโดยในแต่ละคาบจะมีการนำกระแสสองครั้ง โดยมีค่ายอดประมาณ 13 แอมแปร์ ซึ่งเมื่อคำนวณค่ายังผลของกระแสไดโอดแล้วจะได้ประมาณ 3.8 แอมแปร์ สำหรับค่ายอดของแรงดันย้อนกลับของไดโอด (Vprv) จะมีค่าเท่ากับแรงดันออกคือ จะมีค่าสูงสุดเมื่อแรงดันเข้าของสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับมีค่าเท่ากับ 380 + 10 เปอร์เซ็นต์ ตามสมการ

$$V_{prv} = 1.1 \times \sqrt{2} \times 380$$

$$= 591 \quad \text{โวลต์}$$



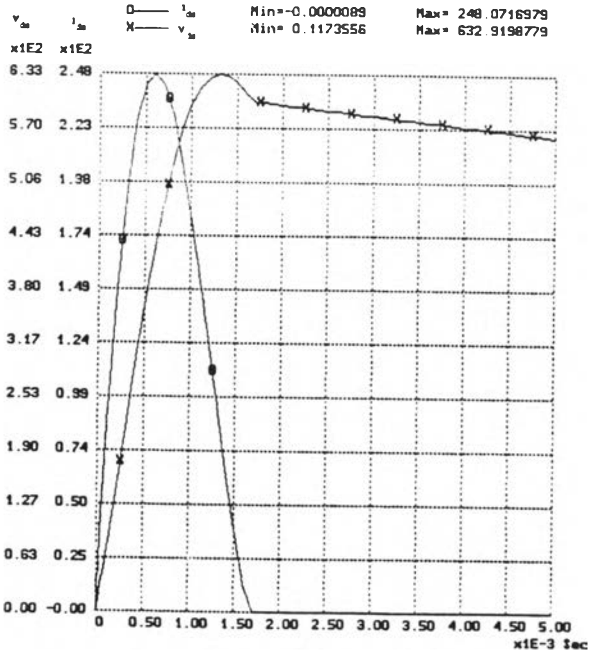
รูปที่ 3.22 รูปคลื่นของกระแสออกของวงจรเรียงกระแสและแรงดันออกของวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง



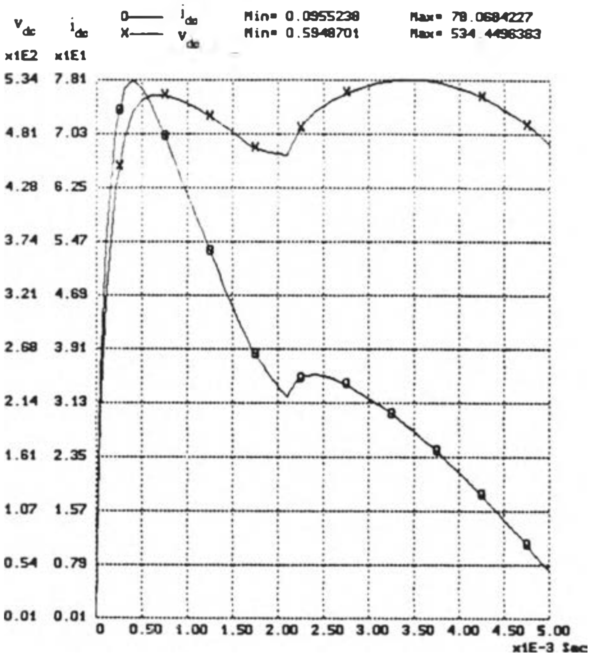
รูปที่ 3.23 รูปคลื่นของกระแสไดโอดและแรงดันออกของวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

4.4 การออกแบบค่าความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ

จากการวิเคราะห์ในวงจรในขณะเปิดเครื่อง รูปที่ 3.24 แสดงรูปคลื่นของกระแสในไดโอดและแรงดันออกในขณะเปิดเครื่องในจังหวะที่แรงดันระหว่างสายคู่หนึ่งมีค่าสูงสุดและแรงดันก่อนเปิดเครื่องของตัวเก็บประจุที่ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองเท่ากับศูนย์ จะเห็นได้ว่ากระแสผ่านไดโอดมีค่าสูงถึง 248 แอมแปร์ ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อไดโอดของวงจรเรียงกระแสได้เพื่อเป็นการจำกัดกระแสกระชากในตอนเปิดเครื่อง จึงต้องต่อความต้านทานขนาด 5 โอห์ม แทรกระหว่างด้านขาออกของวงจรเรียงกระแสกับตัวเก็บประจุที่ทำหน้าที่เป็นวงจรกรอง รูปที่ 3.25 แสดงรูปคลื่นของกระแสผ่านไดโอดและแรงดันออกในขณะเปิดเครื่องในเงื่อนไขเดียวกันกับรูปที่ 3.24 จะเห็นได้ว่าความต้านทานอนุกรมจะช่วยจำกัดกระแสกระชากในตอนเริ่มเปิดเครื่องลงมาจนมีค่ายอดประมาณ 78 แอมแปร์ ความต้านทานที่ใช้ในการจำกัดกระแสกระชากในตอนเปิดเครื่องจะถูกลัดวงจรโดย Contact ของ Relay เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 20 มิลลิวินาที เพื่อลดกำลังสูญเสียในความต้านทานดังกล่าวในขณะที่เครื่องทำงานในสภาวะอยู่ตัว ดังนั้นจึงเลือกค่าความต้านทาน 5 โอห์ม ขนาด 40 วัตต์ ต่อระหว่างด้านขาออกของวงจรเรียงกระแสกับตัวเก็บประจุที่ทำหน้าที่เป็นวงจรกรอง



รูปที่ 3.24 แสดงกระแสกระชากของไดโอดและแรงดันออกของวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงในขณะเปิดเครื่อง



รูปที่ 3.25 แสดงกระแสกระชากของไดโอดและแรงดันออกของวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงในขณะเปิดเครื่อง เมื่อต่อความต้านทานขนาด 5 โอห์ม คั่นระหว่างวงจรเรียงกระแสกับตัวเก็บประจุของวงจรกรอง

<u>การออกแบบและสร้างอุปกรณ์</u>

หลังจากการออกแบบและวิเคราะห์การทำงานของวงจรภาคกำลัง ทั้งผลตอบเชิงความถี่และผลตอบเชิงเวลาของวงจร ทำให้ทราบทั้งขนาดและรูปร่างของกระแสและแรงดันของอุปกรณ์ต่าง ๆ ทำให้สามารถเลือกใช้และออกแบบอุปกรณ์ต่าง ๆ ในวงจรภาคกำลังได้ ซึ่งประกอบด้วยการเลือกชนิดและพิกัดของตัวเก็บประจุ การออกแบบและสร้างหม้อแปลงและการเลือกขนาดของสวิตช์ไวงาน

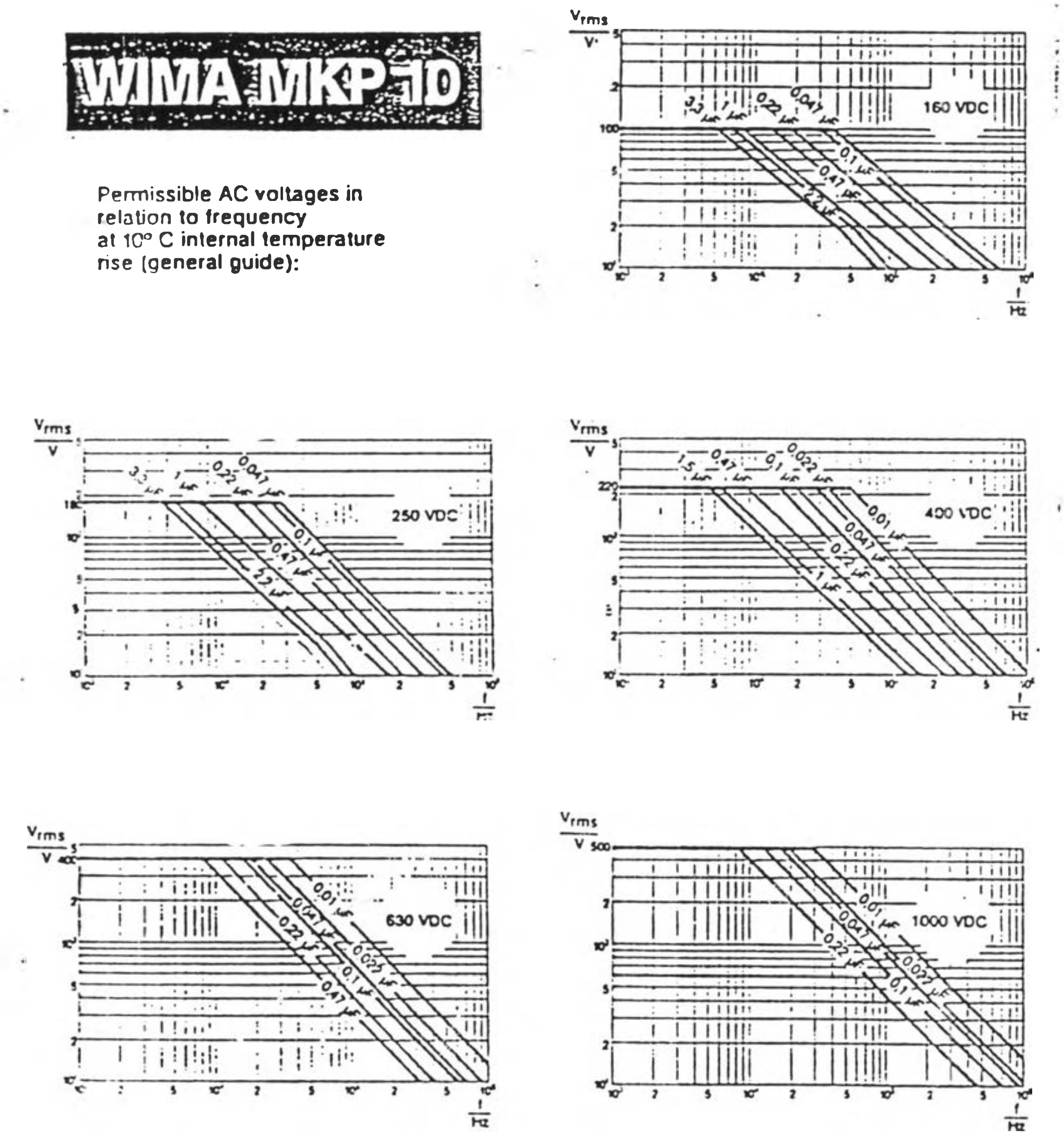
1 ตัวเก็บประจุเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง

จากการออกแบบค่าตัวเก็บประจุเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 40 ไมโครฟารัด และการวิเคราะห์วงจรด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากรูปที่ 3.7 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง จากการวิเคราะห์จะพบว่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุที่ความถี่ 19.5 กิโลเฮิรตซ์ มีค่าประมาณ 59 โวลต์ ดังนั้นในการ

สร้างตัวเก็บประจุจะต้องเลือกตัวเก็บประจุชนิดที่ใช้ได้กับความถี่สูงและสามารถทนพิกัดแรงดันได้สูงพอ ในทางปฏิบัติแล้วเนื่องจากตัวเก็บประจุที่จำหน่ายมีค่าความจุต่ำกว่าค่าที่ได้ออกแบบไว้ ดังนั้นจึงต้องนำตัวเก็บประจุมาต่อขนานกันเพื่อที่ให้ได้ค่าความจุตามต้องการ

ตัวเก็บประจุโดยทั่วไปจะมีค่าความต้านทานอนุกรม(Equivalent Series Resistance ESR) และความเหนี่ยวนำอนุกรม (Equivalent Series Inductance ESL) ค่าความต้านทานอนุกรมจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นในตัวเก็บประจุ เมื่อกระแสไหลผ่าน โดยกำลังสูญเสียจะแปรตามกระแสกำลังสอง ซึ่งกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะขึ้นอยู่กับความถี่และแรงดัน ส่วนความเหนี่ยวนำอนุกรมจะทำให้ค่าความจุเปลี่ยนแปลงกับความถี่ โดยจะมีผลมากขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น เนื่องจากตัวเก็บประจุที่ใช้ในการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังต้องทำงานที่ความถี่สูงดังนั้นจึงต้องใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่า ESR และ ESL ต่ำ ตัวเก็บประจุที่มีความเหมาะสมกับความถี่สูงได้แก่ ตัวเก็บประจุที่มีโครงสร้างแบบ multilayer และมี loss tangent ต่ำ ได้แก่ ตัวเก็บประจุชนิด Metalize Plastic Film ที่มีสารไดอิเล็กตริกเป็น Polypropylene (MKP10) ตัวเก็บประจุชนิดนี้มีค่า ESL และ ESR ต่ำสามารถใช้ได้ที่ความถี่สูงและทนพิกัดกระแสได้สูง นอกจากนั้นยังมีค่าแม่นยำ ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ แต่อย่างไรก็ตามตัวเก็บประจุชนิดนี้มีค่าความจุต่อตัวค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบค่าที่ต้องการใช้งาน ดังนั้นจึงใช้วิธีนำตัวเก็บประจุหลาย ๆ ตัวมาต่อขนานกันเพื่อให้ได้ความจุตามที่ต้องการ ตัวเก็บประจุยี่ห้อ WIMA ชนิด MKP-10 จึงเป็นตัวเก็บประจุที่มีความเหมาะสมในการใช้งานวิจัยนี้ ในการเลือกตัวเก็บตัวเก็บประจุว่าจะใช้ค่าเท่าไรและทนพิกัดแรงดันเท่าไรนั้น จะต้องใช้รูปกราฟพิกัดแรงดันอาร์เอ็มเอสกับความถี่ ซึ่งมีค่าความจุเป็นพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุแต่ละขนาดในการพิจารณาซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3.26 [WIMA 1985]

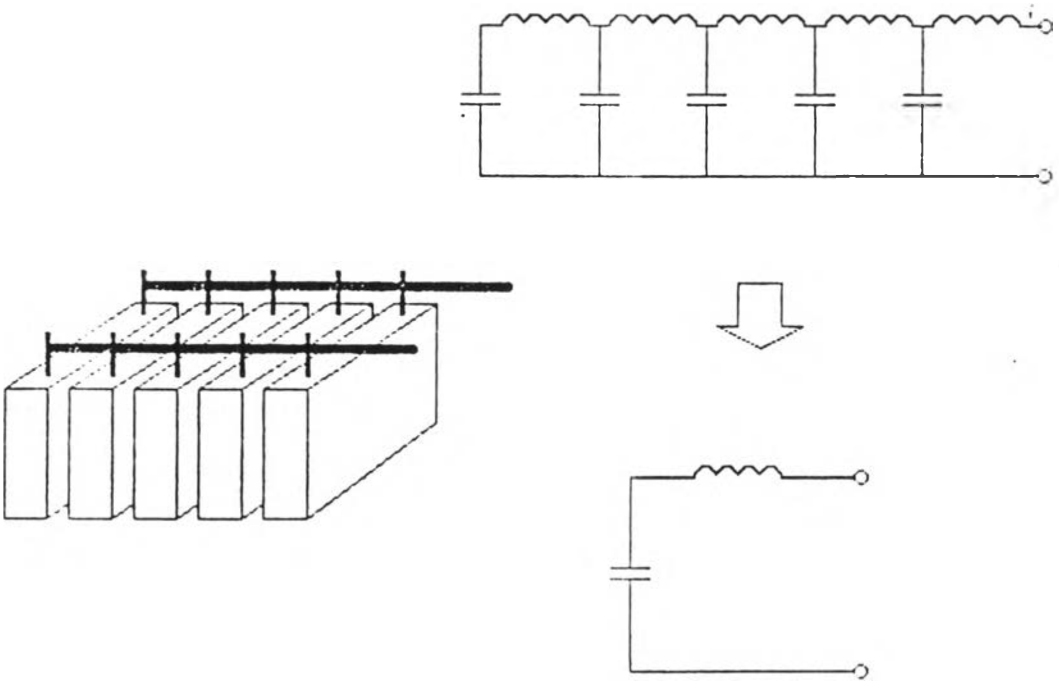
จากการพิจารณารูปกราฟดังกล่าว ประกอบกับการสำรวจราคาและความเป็นไปได้ในท้องตลาดจึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุค่า 1ไมโครฟารัด ขนาดแรงดัน 400 โวลต์ดีซี ชนิด MKP-10 มาต่อขนานกันเพื่อให้ได้ค่าความจุ 40 ไมโครฟารัด ตามที่ต้องการได้ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟในรูป 3.26 แล้วจะเห็นได้ว่าที่ความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์ สำหรับ Temperature rise 10 องศาเซลเซียส ตัวเก็บประจุค่านี้จะมีพิกัดแรงดันอาร์เอ็นเอสสูงสุดเท่ากับ 65 โวลต์ และถ้าเปรียบเทียบกับแรงดันอาร์เอ็มเอสตกคร่อมตัวเก็บประจุสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 42 โวลต์ ก็จะเห็นได้ว่าพิกัดแรงดันของตัวเก็บประจุนี้ยังมีค่ามากกว่าพอสมควร ซึ่งเพียงพอกับการทำงานได้เป็นอย่างดี ดังนั้นจะใช้ตัวเก็บประจุ MKP10 ค่าความจุ 1 ไมโครฟารัด 40 ตัว ขนานกันเพื่อให้ได้ค่าความจุ 40 ไมโครฟารัด โดยมีค่า Temperature rise ประมาณ 5 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.26 รูปกราฟพิกัดแรงดันอาร์เอ็มเอสกับความถี่ของตัวเก็บประจุแต่ละขนาด

ในการนำตัวเก็บประจุมาต่อขนานกันเพื่อให้ได้ค่าความจุตามที่ต้องการนั้น ถ้าใช้วิธีต่อขนานด้วยลวดทองแดงธรรมดา ดังรูปที่ 3.27 ก็จะทำให้เกิดความเหนี่ยวนำขึ้นในลวดทองแดงที่ใช้ต่อระหว่างตัวเก็บประจุแต่ละตัว ดังวงจรสมมูลที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.28 ถึงแม้ว่าความเหนี่ยวนำนี้จะเป็นค่าเล็ก ๆ แต่ตัวเก็บประจุนี้ต้องทำงานที่ความถี่สูง อีกทั้งต้องต่อขนานกันเป็นจำนวนมาก จึงส่งผลให้ค่าความเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดผลเสียกับค่าความจุของตัวเก็บประจุรวม ทำให้ตัวเก็บประจุรวม

ไม่สามารถทำงานได้ที่ความถี่สูง เพราะที่ความถี่สูง ผลของความเหนี่ยวนำจะมากกว่าผลของความจุในตัวเก็บประจุ ทำให้ที่ความถี่สูงตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกันแบบนี้จะกลายเป็นตัวเหนี่ยวนำไป [อมร ตันวรรณรักษ์,2536]



รูปที่ 3.27 a) การต่อตัวเก็บประจุแบบใช้ลวดทองแดงธรรมดา

b) วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของตัวเก็บประจุและลวดเหนี่ยวนำ

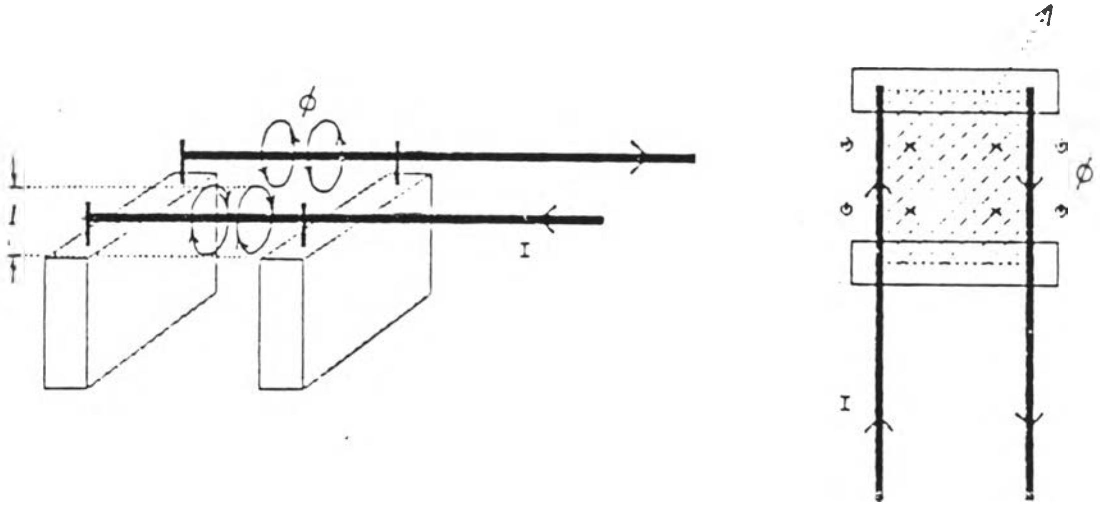
จากสูตรคำนวณค่าความเหนี่ยวนำ $L = \frac{N^2 \mu A}{l}$

โดยที่ A คือ พื้นที่หน้าตัดที่ฟลักซ์คล้องผ่าน

l คือ ความยาวเส้นทางแม่เหล็กที่ฟลักซ์คล้องผ่าน

ถ้าพิจารณาค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในลวดทองแดงที่ใช้ต่อตัวเก็บประจุแต่ละตัวจากรูป 3.28 จะเห็นได้ว่าค่าความเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัด (A) และความยาว (l) ดังนั้นในการต่อตัวเก็บประจุขนานกัน ถ้าต้องการให้ค่าความเหนี่ยวนำมีค่าต่ำ จะต้องออกแบบให้การต่อขนานกันมีพื้นที่หน้าตัดฟลักซ์แม่เหล็กคล้องผ่าน (A) มีค่าต่ำหรือให้ความยาวเส้นทางแม่เหล็ก (l) มีค่าสูง ซึ่ง

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบการต่อตัวเก็บประจุโดยใช้แผ่นทองแดงหนา 1 มิลลิเมตร 2 แผ่น ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นขั้วของตัวเก็บประจุและเชื่อมต่อกันด้วยการบัดกรี ดังแสดงในรูป 3.29 การต่อตัวเก็บประจุขนานกันโดยวิธีดังกล่าวจะช่วยลดพื้นที่หน้าตัดที่ฟลักซ์สนามแม่เหล็ก ทำให้ค่า ESL มีค่าน้อยล ะ จากการทดลองพบว่าค่า ESL ไม่มีผลต่อการทำงานของวงจรที่ความถี่ 19.5 - 22.5 กิโลเฮิรตซ์

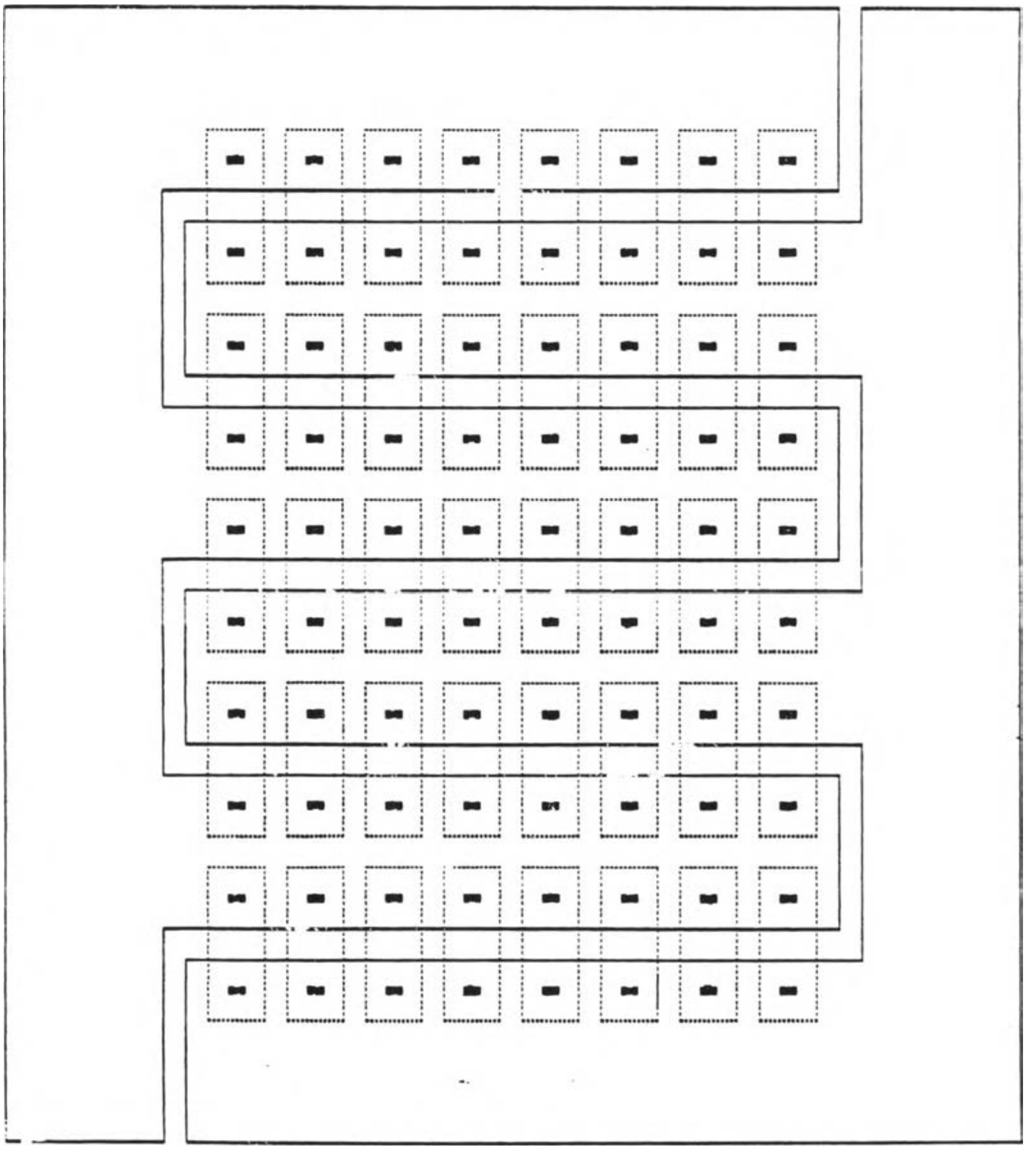


ภาพมองด้านข้าง ภาพมองด้านบน

รูปที่ 3.28 แสดงฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่คล้องผ่านลวดทองแดงที่ใช้ต่อตัวเก็บประจุแต่ละตัว

สำหรับการประกอบตัวเก็บประจุ ตัวเก็บประจุแต่ละตัวถูกบัดกรียึดกับแผ่นทองแดงทั้งสองแผ่น และเมื่อบัดกรีครบแล้ว จะใช้แผ่นเบกาไลต์ที่เป็นฉนวนปิดส่วนที่บัดกรีไว้แล้วนำไปประกอบกับโครงตู้ของเครื่องให้ความร้อนแบบบเหนี่ยวนำด้านหน้าเพื่อจะใช้ยึดติดกับขดลวดเหนี่ยวนำโดยการขันน็อตทองเหลืองยึดแผ่นทองแดงที่บัดกรีติดไว้กับขดลวดเหนี่ยวนำกับขั้วของตัวเก็บประจุแต่ละขั้ว ในการต่อขั้วของชุดตัวเก็บประจุกับขดลวดเหนี่ยวนำแบบนี้ทำให้สะดวกต่อการถอดเปลี่ยนขดลวดเหนี่ยวนำเข้าออกได้ตามต้องการ การใช้แผ่นทองแดงเป็นขั้วของตัวเก็บประจุ ยังช่วยการนำกระแสได้ดีขึ้น เพราะปริมาณกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุนี้มีค่าสูงมากอีกทั้งยังช่วยระบายความร้อนได้ดีอีกด้วย

เมื่อนำตัวเก็บประจุที่ประกอบเสร็จแล้วไปทำการวัดค่าความจุและค่าความต้านทานอนุกรมสมมูล (ESR) ด้วยเครื่อง Impedance Analyzer ที่ความถี่ในช่วง 19.5 - 22.5 kHz มีค่า 40.4 ไมโครฟารัด ค่าความต้านทานอนุกรมสมมูล (ESR) มีค่า 1 มิลลิโอห์ม



รูปที่ 3.29 แสดงการต่อตัวเก็บประจุบนแผ่นทองแดงสองแผ่น

2 การออกแบบหม้อแปลงแยกโคดความถี่สูง

การออกแบบหม้อแปลงแยกโคดความถี่สูง ที่ใช้ในการลดแรงดันออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ก่อนเข้าขดลวดเหนี่ยวนำ ให้มีค่าเหมาะสมกับแรงดันที่โหลดต้องการนั้น สิ่งที่ต้องคำนวณและเลือกใช้ก็คือ ชนิด ลักษณะโครงสร้างและขนาดของแกนแม่เหล็ก อัตราส่วนจำนวนรอบและจำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ ขนาดของเส้นลวดที่ใช้พัน ฉนวนทางไฟฟ้า ความร้อนของเส้นลวด จากการวิเคราะห์วงจรด้วยโปรแกรมวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า เราสามารถกำหนดขนาดของกระแสและแรงดันทั้งทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ ตลอดจนความถี่การทำงานของหม้อแปลงได้ดังนี้

แรงดันทางด้านปฐมภูมิเท่ากับ	252	โวลต์
แรงดันทางด้านทุติยภูมิเท่ากับ	20	โวลต์
กระแสทางด้านปฐมภูมิเท่ากับ	17	แอมแปร์
กระแสทางด้านทุติยภูมิเท่ากับ	202	แอมแปร์
ความถี่ในการทำงาน	19.5	กิโลเฮิรตซ์

จากการที่หม้อแปลงที่ออกแบบเป็นชนิดหม้อแปลงความถี่สูง ดังนั้นจึงต้องใช้แกนแม่เหล็กเป็นแกน Ferrite เพื่อลดกำลังกำลังสูญเสียในแกนแม่เหล็กเนื่องจากแกนแม่เหล็กที่ใหญ่ที่สุดที่หาได้สะดวกเป็นแกนขนาด PM 87/70 มีขนาดไม่เพียงพอสำหรับใช้ทำหม้อแปลงตามข้อกำหนดดังกล่าวข้างต้น ดังนั้นจึงได้ใช้หม้อแปลง 2 ตัวแทน เพื่อเป็นการควบคุมการแบ่งกำลังออกของหม้อแปลงที่ทำงานร่วมกันและช่วยลดอัตราส่วนของขดลวดด้านปฐมภูมิอนุกรมกันและด้านทุติยภูมิไม่ให้สูงเกินไป จึงได้ออกแบบหม้อแปลงเพื่อที่จะต่อขดลวดทางด้านปฐมภูมิอนุกรมกันและขดลวดด้านทุติภูมิขนานกัน การต่อขดลวดปฐมภูมิอนุกรมกัน จะทำให้กระแสด้านปฐมภูมิเท่ากัน ซึ่งจะเป็นการบังคับให้ให้กระแสด้านทุติยภูมิมีค่าใกล้เคียงกันส่วนการต่อขดลวดด้านทุติภูมิขนานกันจะทำให้แรงดันด้านทุติยภูมิเท่ากัน จะเป็นการบังคับให้แรงดันด้านปฐมภูมิประมาณเท่ากัน การต่อหม้อแปลงตามลักษณะดังกล่าวจะทำให้พิกัดแรงดันด้านปฐมภูมิลดลงครึ่งหนึ่งและพิกัดกระแสทุติยภูมิลดลงครึ่งหนึ่ง ดังนั้นพิกัดของหม้อแปลง แต่ละตัวจะเป็นดังนี้

แรงดันทางด้านปฐมภูมิเท่ากับ	126	โวลต์
แรงดันทางด้านทุติยภูมิเท่ากับ	20	โวลต์
กระแสทางด้านปฐมภูมิเท่ากับ	17	แอมแปร์
กระแสทางด้านทุติยภูมิเท่ากับ	101	แอมแปร์

ส่วนลวดตัวนำที่ใช้เป็นลวดตัวนำแบบ Litz wire เพื่อลดการเพิ่มค่าความต้านทานเนื่องจากผลของ Skin Effect

2.1 การคำนวณขนาดของแกนแม่เหล็ก

สำหรับการคำนวณขนาดของแกนแม่เหล็กก็มีวิธีการคำนวณหลายวิธี แต่ในที่นี้จะใช้วิธี Core Geometry Kg Approach (Slobodan Cuk and R.D. Middlebrook ,1983) ซึ่งเป็นวิธีการออกแบบที่ใช้กำลังสูญเสียในทองแดง (P_{cu}) ของขดลวดเป็นพารามิเตอร์ในการออกแบบ กล่าวคือจะใช้วิธีกำหนดค่า P_{cu} ให้กับหม้อแปลงเลย ซึ่งการออกแบบให้กับหม้อแปลงเลย ซึ่งการออกแบบขนาดของหม้อแปลงด้วยวิธีนี้ก็คือ การกำหนดว่าจะยอมให้หม้อแปลงร้อนได้แค่ไหน ถ้าต้องการให้กำลังสูญเสียต่ำหรือไม่ร้อนมาก หม้อแปลงจะมีขนาดใหญ่ ในทางกลับกันถ้ายอมให้หม้อแปลงร้อนได้หรือยอมให้กำลังสูญเสียในตัวมาก หม้อแปลงก็จะมีขนาดเล็ก ซึ่งสูตรในการคำนวณของ K_g Approach เป็นดังนี้

$$K_g = \frac{WS^2}{t} = \frac{\rho[V_1^2 I_{1rms}^2 + V_2^2 I_{2rms}^2]}{8kB_{max}^2 f^2 P_{cu}} = \frac{\rho P_{out}^2}{4kB_{max}^2 f^2 P_{cu}} \qquad (3.4)$$

โดยที่ W คือ พื้นที่ช่องหน้าต่างของแกนหม้อแปลง

S คือ ขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกนหม้อแปลง

t คือ ความยาวเฉลี่ยของเส้นลวดที่ใช้พันแกนหนึ่งรอบ

ρ คือ ค่าต้านทานจำเพาะของทองแดง

k คือ Utilization Factor

B_{max} คือ ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด

f คือ ค่าความถี่ที่ใช้งาน

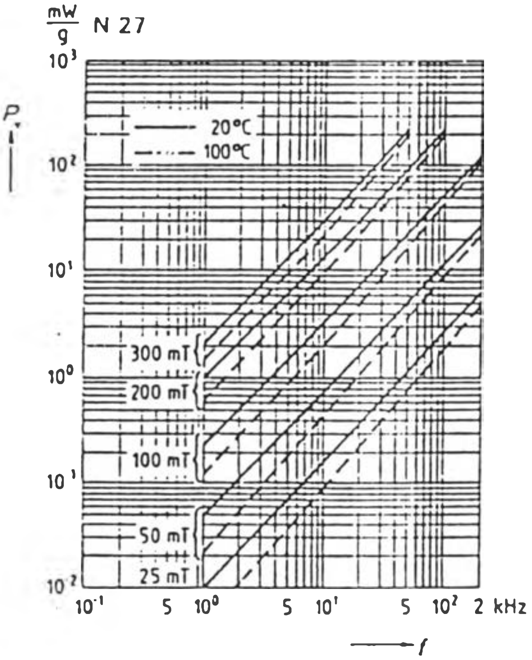
P_{out} คือ กำลังงานที่หม้อแปลงส่งผ่าน = $V_1 I_{1rms} \cong V_2 I_{2rms}$

P_{cu} คือ ค่ากำลังสูญเสียในขดลวดทองแดง

จากสมการที่ 3.4 ค่า K_g ที่คำนวณได้จะมีความสัมพันธ์กับขนาดของหม้อแปลงโดยตรง ทั้งนี้เพราะ K_g จะแปรผันตามกับพื้นที่ช่องหน้าต่างของแกนซึ่งเป็นพื้นที่ที่ใช้ในการพันขดลวด และจะแปรผันตามกับพื้นที่หน้าตัดของแกนกำลังสอง ค่า K_g ที่คำนวณ ได้จะบ่งบอกถึงขนาดของหม้อแปลง พร้อมทั้งค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของหม้อแปลง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

CORE TYPE	W (mm^2)	S (mm^2)	t (mm)	K_g (mm^5)
EI19	34	20	42	323.81
EI25	52	42	51.2	1791.56
EI26	43	58	65.6	2205.06
EI28	46	77	60	4545.57
EI28I	40	82	68	3955.29
EI30	56	110	64	10587.5
EI33	102	118	56	25361.57
EC70	469	201	97	195340.92
PM6249	270	470	120	497025
PM7459	442	630	140	1253070
PM8770	630	700	158	1953797.46

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแกนหม้อแปลง



รูปที่ 3.30 กราฟแสดงกำลังสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ต่อน้ำหนัก กับความถี่

การแทนค่าในสมการที่ 3.4 นั้น จะต้องเลือกหรือกำหนดค่าของตัวแปรในสมการให้มีค่าที่เหมาะสม เพื่อให้หม้อแปลงทำงานได้โดยไม่ร้อนจนเกินไปและไม่เกิด การอิ่มตัว ซึ่งจะอธิบายการกำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้

การเลือกค่า B_{max} การเลือกค่านี้ จะเป็นการเลือกค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่จะยอมให้มีได้ในแกนหม้อแปลง ซึ่งการเลือกค่าที่เหมาะสมจะพิจารณาประกอบกับกำลังสูญเสียในแกนเฟอไรต์และความถี่ ดังกราฟความถี่กับกำลังสูญเสียในแกนเฟอไรต์ต่อน้ำหนักแกนในรูปที่ 3.30 (Siemens Component Service,1983)

จากรูปที่ 3.30 จะเห็นได้ว่า ที่ความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์และค่า Bmax มีค่าเท่ากับ 0.2 เทสลา จะมีกำลังสูญเสียในแกนประมาณ 30 มิลลิวัตต์ต่อกรัม และแกน PM8770 มีน้ำหนัก 770 กรัม ดังนั้นกำลังสูญเสียในแกนจะมีปริมาณ 23.1 วัตต์ ค่า B_{max} ที่ออกแบบจะนำไปใช้ในการคำนวณหาจำนวนรอบของขดปฐมภูมิและทุติยภูมิต่อไป

Window Utilization Factor (k) ค่านี้ คือค่าสัมประสิทธิ์ในการใช้ช่องหน้าต่างของหม้อแปลงในการพันขดลวดซึ่งค่าไม่เกินหนึ่ง โดยปกติแล้วจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.3 - 0.6 แล้วแต่วิธีการพันและขนาดของเส้นลวดที่ใช้พัน เนื่องจากในที่นี้ได้ใส่ปลอกฉนวนใยแก้วกับขดลวดทั้งสองขด เพื่อป้องกันปัญหาเนื่องจากความร้อนและการหลุดลอกของฉนวนในขณะพันรวมทั้งลวดที่ใช้พันเป็นลวดตัวนำแบบ Litz Wire จึงเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพในการใช้ช่องหน้าต่างลดลงจึงเลือกใช้ค่า 0.22 ในการออกแบบ

WindowUtilizationRatio of Coil No 1.(α) คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราส่วนในการใช้ช่องหน้าต่างในการพันของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ

Window Utilization Ratio of Coil No 2.(β)คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราส่วนในการใช้ช่องหน้าต่างในการพันของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ

ในการออกแบบนี้จะใช้ค่าα เท่ากับ 0.5 และค่าβ เท่ากับ 0.5

การเลือกความถี่ (f) ความถี่ที่ใช้ในงานเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการกำหนดขนาดของหม้อแปลง จากสมการ 3.4 ขนาดของหม้อแปลงจะแปรผันกับส่วนกลับของความถี่กำลังสอง ดังนั้นถ้าความถี่ที่ใช้งานมีค่าสูงจะทำให้ขนาดของหม้อแปลงเล็กลง แต่อย่างไรก็ตาม ในที่นี้การเลือกความถี่ที่ใช้งานถูกกำหนดด้วยความสามารถของภาคอินเวอร์เตอร์ ซึ่งออกแบบให้สามารถทำงานได้ในช่วงความถี่ 19.5 - 22.5 กิโลเฮิรตซ์ ดังนั้นค่าความถี่ที่นำไปใช้ในการคำนวณหาค่า K_g จึงเป็น 19.5 กิโลเฮิรตซ์ เพื่อให้ได้ขนาดหม้อแปลงที่ สามารถทำงานได้ในช่วงความถี่ต่ำสุด

การเลือกกำลังสูญเสียในทองแดง (P_{cu}) ค่านี้เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญของการออกแบบ K_g Approachดังที่ได้กล่าวไว้แล้วตอนต้น ค่าP_{cu} ที่ยอมให้มีได้ในหม้อแปลงโดยทั่วไปแล้วมักออกแบบให้มีค่าอยู่ในช่วง 0.5 - 1 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังที่หม้อแปลงส่งผ่าน ในการออกแบบกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 9 วัตต์ คิดเป็นประมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์ของกำลังที่หม้อแปลงส่งผ่าน

ค่าสภาพความต้านทานของทองแดง (ρ) ค่านี้เป็นคุณสมบัติเฉพาะของทองแดงซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วย ถ้ากำหนดให้อุณหภูมิของหม้อแปลงขณะทำงานแบบโหลดเต็มที่มีค่าประมาณ 60 องศาเซลเซียส ค่า ρ_{cu} จะมีค่าเท่ากับ 2.00×10^{-8} โอห์มเมตร

ดังนั้นเมื่อเรากำหนดค่าตัวแปรต่างๆไว้เรียบร้อยแล้ว แทนค่าตัวแปรต่างๆที่กำหนดไว้ในสมการที่ 3.4 จะได้ค่า K_g = 1482000 mm^5 จากค่าที่คำนวณได้นี้เมื่อเปรียบเทียบกับค่าจากตารางที่ 3.1 จะพบว่า มีค่าที่ใกล้เคียงกับค่า K_g ของแกนหม้อแปลงเบอร์ PM8770 ซึ่งจะเลือกใช้แกนของหม้อแปลงเบอร์นี้

การคำนวณจำนวนรอบของขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิ จำนวนรอบของขดลวดมีความสำคัญต่อการอิ่มตัวของแกนแม่เหล็กของหม้อแปลง ในการคำนวณจำนวนรอบนี้จะใช้สมการที่ 3.5 และ 3.6 จะให้ค่าจำนวนรอบต่ำสุดที่ใช้งานได้โดย B_{max} ไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ และจะพิจารณาเฉพาะในกรณีที่ไม่มีกระแสตรงไหลเข้าหม้อแปลง อีกทั้งแรงดันตกคร่อมหม้อแปลงจะต้องเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่สมมาตร ในการคำนวณจำนวนรอบจะแยกออกเป็นจำนวนรอบทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิโดยที่สูตรการคำนวณจะได้ว่า

$$N_p = \frac{V_p}{4 B_{max} S f} \qquad (3.5)$$

$$N_s = \frac{V_s}{4 B_{max} S f} \qquad (3.6)$$

โดยที่ V_p คือ ค่ายอดของแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดด้านปฐมภูมิ

V_s คือ ค่ายอดของแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดด้านทุติยภูมิ

N_p คือ จำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิ

N_s คือ จำนวนรอบของขดลวดด้านทุติยภูมิ

B_{max} คือ ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสูงสุดที่ยอมให้เกิดในแกนเหล็ก

S คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนแม่เหล็กของหม้อแปลง

f คือ ความถี่ที่ใช้งาน

แทนค่าในสูตรจะได้จำนวนรอบทางด้านขดปฐมภูมิ (N_p) เท่ากับ 16.392 รอบ ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่าจำนวนรอบของขดปฐมภูมิเท่ากับ 18 รอบ และค่าจำนวนรอบที่เลือกนำกลับไปคำนวณค่าB_{max} เพื่อตรวจสอบว่าไม่เกินค่าที่ได้กำหนดไว้จะได้ค่า B_{max} = 0.182 เทสลา และขดทางด้านทุติยภูมิ (N_s) เท่ากับ 2.564 รอบ เลือกจำนวนขดทุติยภูมิเท่ากับ 3 รอบ ค่า B_{max} = 0.171 เทสลา ซึ่งค่า B_{max} ทั้งสองค่าไม่เกินค่าที่เราได้กำหนดไว้ ดังนั้นจึงเลือกค่าจำนวนรอบดังกล่าวสำหรับใช้ในการพันหม้อแปลง

การคำนวณขนาดของเส้นลวด ขนาดของเส้นลวดทองแดงที่ใช้พันหม้อแปลง จะมีความสัมพันธ์กับกำลังสูญเสียในทองแดง (P_{Cu})ของหม้อแปลงโดยตรงในการคำนวณจะมีหลายวิธี แล้วแต่จะเริ่มที่จุดไหนก่อนและในแต่ละวิธีจะต้องอาศัยการทดลองสุ่มและทดลองพัน เพื่อให้ได้จำนวนรอบและค่ากำลังสูญเสียของทองแดงตามที่ได้กำหนดไว้โดยใช้ช่องหน้าต่างในการพันให้มากที่สุด ในการคำนวณขนาดของเส้นลวดใช้สูตรดังนี้

$$A_{wp} = \frac{\alpha kW}{N_p} \qquad (3.7)$$

$$A_{ws} = \frac{\beta kW}{N_s} \qquad (3.8)$$

โดยที่ k คือ Utilization Factor

W คือ พื้นที่ช่องหน้าต่างของแกนหม้อแปลง

N_p คือ จำนวนรอบของขดปฐมภูมิ

N_s คือ จำนวนรอบของขดทุติยภูมิ

A_{wp} คือ พื้นที่หน้าตัดเส้นลวดตัวนำของขดปฐมภูมิ

A_{ws} คือ พื้นที่หน้าตัดเส้นลวดตัวนำของขดทุติยภูมิ

α คือ window utilization factor of coil No.1

β คือ window utilization factor of coil No.2

จากตารางที่ 3.1 แกนขนาด PM87/70 จะมี W = 630 ตารางมิลลิเมตร แทนค่าต่างๆตามที่ได้กำหนดไว้แล้วข้างต้นจะได้ค่า A_{wp} = 3.85 mm^2 และ A_{ws} = 23.1 mm^2 ซึ่งค่าพื้นที่หน้าตัดที่คำนวณได้จะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ จึงเลือกใช้ลวดตัวนำแบบ Litz wire เพื่อลดการเพิ่มค่าความต้านทานเนื่องจากผลของ Skin Effect จึงเลือกใช้เส้นลวดตัวนำเบอร์ SWG#29 ที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 0.09372 ตารางมิลลิเมตร ซึ่งต้องใช้ลวดตัวนำด้านปฐมภูมิจำนวนเท่ากับ $\frac{3.85}{0.09372}$ = 41.08 ใน

ทางปฏิบัติเลือกใช้จำนวน 41 เส้น ส่วนด้านทุติยภูมิเท่ากับ $\frac{23.1}{0.09372}$ = 246.5 ในทางปฏิบัติเลือกใช้จำนวน 246 เส้น

เมื่อได้ค่าที่ต้องการทั้งหมดแล้วนำมาคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียในทองแดงได้จาก

$$P_{cu} = I_p^2 R_p + I_s^2 R_s \qquad (3.9)$$

$$R_p = N_p \frac{\rho_{cu} l}{N_{wp} A} \qquad (3.10)$$

$$R_s = N_s \frac{\rho_{cu} l}{N_{ws} A} \qquad (3.11)$$

โดยที่ I_p คือ กระแส *rms* ที่ไหลผ่านขดปฐมภูมิ

I_s คือ กระแส *rms* ที่ไหลผ่านขดทุติยภูมิ

R_p คือ ความต้านทานของขดปฐมภูมิ

R_s คือ ความต้านทานของขดทุติยภูมิ

A คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวด

N_{wp} คือ จำนวนเส้นลวดที่ใช้พันทางด้านขดปฐมภูมิ

N_{ws} คือ จำนวนเส้นลวดที่ใช้พันทางด้านทุติยภูมิ

l คือ ความยาวของขดลวดต่อรอบประมาณเท่ากับความยาวเฉลี่ยของขดลวดที่ใช้พันต่อรอบ(t)

แทนค่าต่างๆในสมการแล้วจะได้

$$R_p = 18\frac{2\times10^{-8}\times158\times10^{-3}}{41\times9.372\times10^{-8}} = 0.015 \quad \Omega$$

$$R_s = 3\frac{2\times10^{-8}\times158\times10^{-3}}{246\times9.372\times10^{-8}} = 4.253\times10^{-4} \quad \Omega$$

$$P_{cu} = (17^2\times0.015)+(101^2\times4.253\times10^{-3}) = 8.764 \quad W$$

ค่ากำลังสูญเสียในทองแดงจะมีค่าเท่ากับ 8.764 วัตต์ ซึ่งไม่เกินค่าที่ได้กำหนดไว้ในการออกแบบ เมื่อรวมกับกำลังสูญเสียในแกนจะมีค่าเท่ากับ 31.864 วัตต์ คิดเป็นประมาณ 1.5 เปอร์เซนต์ ของกำลังที่ส่งผ่านหม้อแปลง

3 การเลือกสวิตช์ไวงานที่ใช้ในวงจรกึ่งบริดจ์

สวิตช์ไวงานที่ใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์มีด้วยกันหลายประเภท ซึ่งแต่ละประเภทจะมีข้อดีและขีดจำกัดแตกต่างกัน และเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น SCR และ GTO จะมีข้อดีในแง่ที่สามารถทนแรงดันและกระแสได้สูง แต่จะควบคุมการตัดวงจรได้ไม่สะดวกและทำงานได้ในช่วงความถี่ต่ำเท่านั้นคือ ประมาณไม่เกิน 10 กิโลเฮิรตซ์ การประยุกต์ใช้งานจึงมีขีดจำกัดในเรื่องความถี่ ส่วนทรานซิสเตอร์แบบ MOSFET จะมีข้อดีในเรื่องความเร็วในการสวิตช์ ทำให้สามารถทำงานได้ในช่วงความถี่สูงถึง 200 กิโลเฮิรตซ์ [Fuji Semiconductor Catalog , 1988] และยังสามารถควบคุมการตัดต่อวงจรหรือขับนำได้ง่ายแต่จะมีขีดจำกัดในเรื่องของพิกัดของกระแสและแรงดันที่มีค่าไม่มากนัก ทำให้ต้องแก้ปัญหาโดยการใช้ MOSFET หลาย ๆ ตัวมาต่อขนานกัน เพื่อให้สามารถรับกระแสได้สูงขึ้นหรือนำมาอนุกรมกันโดยใช้วงจร Tri-State Bridge เพื่อให้สามารถรับแรงดันได้สูงขึ้น [ธนากร ศุภจินตกุล , 2535] แต่อย่างไรก็ตามวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ได้ก็จะมีความซับซ้อนมากขึ้นด้วย สำหรับในงานวิจัยนี้ วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้มีขนาดกำลังออกประมาณ 4.2 kVA ซึ่งเป็นขนาดที่ไม่ใหญ่นักถ้าเลือกใช้ MOSFET เป็นสวิตช์จะต้องใช้วงจรที่ซับซ้อนขึ้น เนื่องจากมีข้อจำกัดในเรื่องความสามารถในการทนต่อแรงดันและกระแสได้ไม่สูงนัก อีกทั้งยังมีราคาค่อนข้างสูงและถ้าเลือกสวิตช์ประเภท GTO หรือ SCR ก็จะมีปัญหาในเรื่องความถี่ของการทำงานช่วง 19.5 - 22.5 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งสูงเกินไปที่สวิตช์ประเภท GTO หรือ SCR จะสามารถทำงานที่ความถี่ดังกล่าวได้ ดังนั้นจึงเลือกใช้สวิตช์ที่เป็นแบบทรานซิสเตอร์ กำลังแบบไบโพลาร์ (BJT) ซึ่งเป็นสวิตช์ที่หาง่าย ราคาถูก และมีพิกัดของแรงดันและกระแสสูง ทำให้ไม่จำเป็นต้องนำทรานซิสเตอร์หลาย ๆ ตัว มาต่ออนุกรมหรือขนานกัน เพื่อให้สามารถรับแรงดันและกระแสได้สูงขึ้น เป็นผลให้สามารถใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ได้ ทำให้ความซับซ้อนของวงจรกำลังน้อยลง มีความทนทานมากขึ้นและมีความเชื่อถือได้ของวงจรสูง

ในการเลือกพิกัดของกระแสและแรงดันของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ (BJT) ซึ่งจะใช้เป็นสวิตช์ไวงานนั้นจะต้องเลือกพิกัดของทรานซิสเตอร์กำลังเพื่อให้ทางเดินของจุดทำงานของสวิตช์ไวงานอยู่ในพื้นที่ปลอดภัยของทรานซิสเตอร์กำลังในทุกเงื่อนไขของการทำงาน จากรูป 3.12 เป็นผลจากวิเคราะห์ของการซิมมูเลต จะพบว่ากระแสสูงสุดของสวิตช์ไวงานทำงานที่ความถี่ 19.5 กิโลเฮิรตซ์ ในภาวะปกติมีค่ายอดของกระแสเท่ากับ 24 แอมแปร์ แต่จากการพิจารณาผลตอบเชิงความถี่ของกระแสออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าในช่วงความถี่ 16.5 กิโลเฮิรตซ์ ค่ายอดของกระแสสูงกว่าการทำงานที่ความถี่ 19.5 กิโลเฮิรตซ์ประมาณ 1.9 เท่า และเผื่อค่า safety factor ประมาณ 1.5 เท่า ดังนั้นจึงต้องเลือกขนาดของทรานซิสเตอร์กำลังที่สามารถรับค่ายอดของ

กระแสได้ประมาณ 68.4 แอมแปร์ อย่างไรก็ดีผู้ผลิตมักจะกำหนดกระแสของทรานซิสเตอร์กำลังสำหรับอุณหภูมิตัวถังเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส และในกรณีที่อุณหภูมิตัวถังมีค่าประมาณ 70 องศาเซลเซียส จะต้องลดพิกัดกระแสลงมาเหลือ 60 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดเมื่ออุณหภูมิของตัวถังเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส จากเหตุผลดังกล่าวจึงต้องเลือกทรานซิสเตอร์กำลังที่มีพิกัดกระแสสำหรับอุณหภูมิของตัวถัง 25 องศาเซลเซียส ประมาณ 114 แอมแปร์ สำหรับพิกัดของแรงดันนั้น ถ้าพิจารณาขนาดแรงดันของวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง จะเห็นได้ว่าค่าสูงสุดในภาวะไม่มีโหลด และแรงดันเข้าสูงขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่าสูงสุดตามสมการ

$$V_{max} = 1.1\times\sqrt{2}\times V_{line} \qquad (3.12)$$

เมื่อพิกัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับระหว่างสาย (V_{line}) เท่ากับ 380 โวลต์ แรงดันไฟตรงสูงสุดจะมีค่า 590 โวลต์ จึงต้องเลือกใช้ทรานซิสเตอร์กำลังที่ทนแรงดันได้ 800 - 1000 โวลต์ จากการวิเคราะห์และตรวจสอบทรานซิสเตอร์กำลังที่มีขายภายในประเทศที่มีค่าใกล้เคียงกับที่ได้ออกแบบไว้ จึงเลือกใช้ทรานซิสเตอร์กำลังขนาด 150 แอมแปร์ ทนแรงดันได้ 1000 โวลต์ ซึ่งมีลักษณะเป็นโมดูล โดยหนึ่งโมดูลจะมีทรานซิสเตอร์กำลังอยู่ 2 ตัว และแต่ละตัวจะมีไดโอดฟื้นตัวเร็ว (Fast Recovery Diode)ขนาด 150 แอมแปร์ แรงดัน 1000 โวลต์ ต่อขนานอยู่กับทรานซิสเตอร์กำลังเรียบร้อยแล้ว สำหรับรายละเอียดของข้อมูลจำเพาะของทรานซิสเตอร์เบอร์นี้ได้แสดงไว้ในภาคผนวก

4 ไดโอดของวงจรเรียงกระแส

จากผลการวิเคราะห์การทำงานของวงจรเรียงกระแสพบว่า ค่ายังผลของกระแสผ่านไดโอดมีค่าประมาณ 3.8 แอมแปร์ ถ้าอุณหภูมิของตัวถังมีค่าประมาณ 70 องศาเซลเซียส พิกัดของไดโอดที่ใช้สำหรับอุณหภูมิของตัวถังเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส จะต้องมีค่ามากกว่า 6.4 แอมแปร์ แต่อย่างไรก็ดี เมื่อคำนึงกระแสกระชากของไดโอดตอนเริ่มเดินเครื่องซึ่งมีค่าประมาณ 100 แอมแปร์ และใช้อัตราส่วนของกระแสกระชากต่อกระแสพิกัดประมาณ 7 เท่า จึงได้เลือกใช้ไดโอดที่มีพิกัดที่ 25 องศาเซลเซียส เท่ากับ 20 แอมแปร์ และพิกัดแรงดันเท่ากับ 800 โวลต์ ซึ่งมีพิกัดกระแสที่ 70 องศาเซลเซียส ประมาณ 12 แอมแปร์ ก็สามารถรับกระแสในภาวะอยู่ตัวและกระแสกระชากในขณะเปิดเครื่องได้ เนื่องจากไดโอดสามารถจะรับกระแสกระชากได้ประมาณ 7 - 15 เท่า ของกระแสพิกัด

5 ตัวเก็บประจุของวงจรกรอง

ตัวเก็บประจุของวงจรกรองที่ออกแบบไว้ใช้ตัวเก็บประจุขนาด 400 ไมโครฟารัด พิกัดแรงดันมากกว่า 600 โวลต์ ดังนั้นจึงใช้ตัวเก็บประจุขนาด 400 ไมโครฟารัด พิกัดแรงดัน 350 โวลต์ มาต่ออนุกรมกัน 2 ตัว เพื่อให้สามารถทนแรงดันได้ 700 โวลต์ แต่จะทำให้ค่าความจุลดลงไปครึ่ง

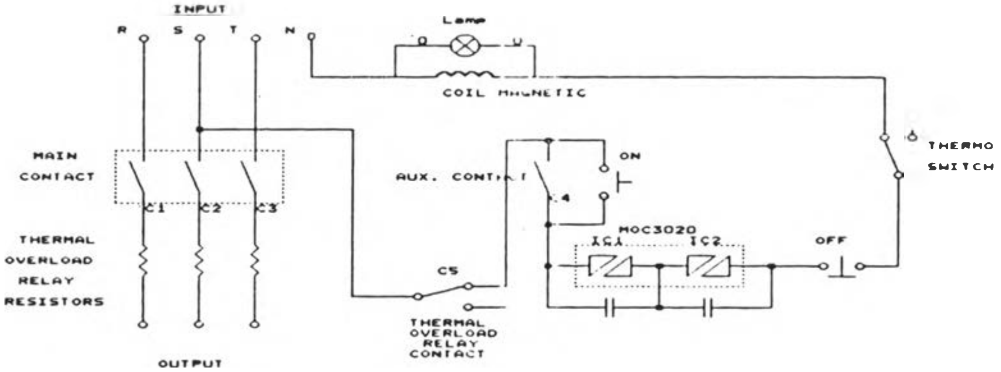
หนึ่ง จึงต้องนำตัวเก็บประจุขนาด 400 ไมโครฟารัด ที่สามารถทนแรงดันไฟตรงได้ 700 โวลต์ มาต่ออนุกรมกัน 2 ตัวอีกหนึ่งชุด แล้วนำมาต่อขนานกันเพื่อให้ได้ความจุรวมทั้งหมดเป็น 400 ไมโครฟารัด และทนแรงดันได้สูงสุด 700 โวลต์ ตัวเก็บประจุที่ใช้จะเป็นแบบอิเล็กโตรไลติกคาปาซิเตอร์ (Electrolytic Capacitor)

6 วงจรควบคุมการเปิด-ปิดเครื่องและวงจรป้องกัน

วงจรควบคุมการเปิด-ปิดเครื่องและวงจรป้องกันจะมีส่วนประกอบที่ทำหน้าที่ต่าง ๆ กันดังต่อไปนี้คือ

1 วงจรควบคุมการเปิด-ปิดเครื่อง

การป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 380 โวลต์ เข้าเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนั้น จะต้องผ่านแมกเนติกคอนแทกเตอร์ (magnetic contactor) ซึ่งมีหน้าสัมผัสหลัก (main contact) 3 ชุดคือ C1 , C2 ,C3 และมีหน้าสัมผัสช่วย(auxiliary contact) 2 ชุดคือ C4 และ C5 โดยคอยล์ของแมกเนติกควบคุมหน้าสัมผัส (contact) C4 และหน้าสัมผัสของ C1,C2 ,C3 ส่วนหน้าสัมผัส C5 เป็นหน้าสัมผัสของ Thermal overload reray โดยมีการต่อวงจรดังรูปที่ 3.31



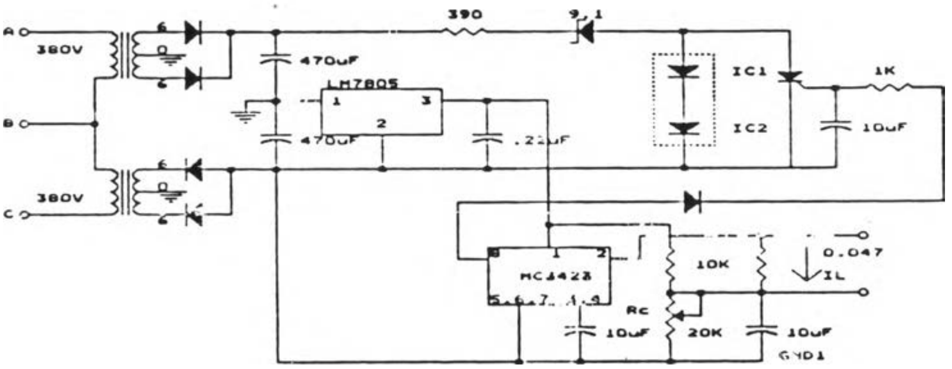
รูปที่ 3. 31 แสดงวงจรควบคุมการเปิด- ปิดเครื่อง

คอยล์ของแมกเนติกจะได้รับไฟเลี้ยงเมื่อกดปุ่ม ON โดยได้รับไฟเลี้ยง 220 โวลต์ ทำให้หน้าสัมผัสหลักของแมกเนติก C1,C2,C3 และหน้าสัมผัสช่วย C4 ต่อวงจรเครื่องก็จะเริ่มทำงาน ถ้าต้องการปิดเครื่องให้กดปุ่ม OFF ซึ่งเป็นการตัดวงจรกระแสไฟฟ้าที่ไปเลี้ยงคอยล์ของแมกเนติก ทำ

ให้หน้าสัมผัสของแมกเนติกคอนแทกเตอร์เปิดวงจรออก หรือถ้ามีกระแสเกินพิกัด แรงดันเกินหรือต่ำกว่าพิกัด หรืออุณหภูมิของขดลวดเกินกว่ากำหนด ก็จะทำให้วงจรป้องกันทำงานตัดกระแสที่ไปเลี้ยงคอยล์ของแมกเนติก C4 ก็จะเปิดวงจรทำให้ C1-C4 อยู่ในสภาพเปิดวงจรตลอดไปจนกว่าจะมีการเปิดเครื่องใหม่

2. วงจรป้องกันกระแสเกินพิกัด

การป้องกันกระแสเกินพิกัดจะใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งจะวัดกระแสไฟตรงที่ภาคแหล่งจ่ายไฟตรง เพื่อนำไปเปรียบเทียบค่าอ้างอิง ที่เป็นขีดจำกัดสูงสุดของโหลด ค่าอ้างอิงนี้สามารถปรับค่าได้ระหว่าง 10 - 125 เปอร์เซนต์ ของกระแสกำหนด วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ป้องกันกระแสเกินพิกัดนั้น มีรายละเอียดของวงจรดังแสดงในรูปที่ 3.32



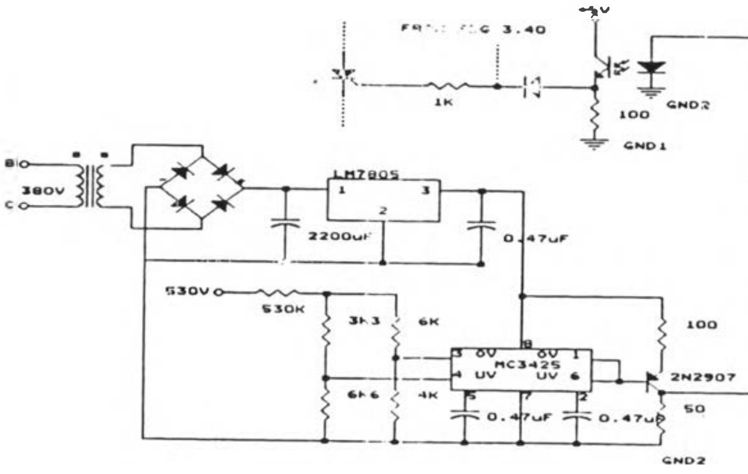
รูปที่ 3.32 แสดงวงจรป้องกันกระแสเกิน

การทำงานของวงจรจะเป็นดังนี้คือ ในภาวะปกติ SCR1 จะไม่ทำงานทำให้มีกระแสมาเลี้ยง LED ของ IC1 และ IC2 ไตรแอคของ IC1 และ IC2 นำกระแสจึงมีไฟไปเลี้ยงคอยล์ของแมกเนติกในรูป 3.31 ปกติกระแส I_L ซึ่งจะไหลผ่านตัวต้านทานทาน 0.047 โอห์ม (ต่อระหว่างตัวต้านทาน 5 โอห์ม กับ ตัวเก็บประจุในวงจรกรอง) จะมีค่าไม่เกินกว่าค่าที่กำหนด (6 แอมแปร์) ทำให้วงจรไม่ทำงาน เมื่อใดกระแสมีค่าสูงกว่าค่าที่กำหนด ไอซี MC3423 ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดันจะส่งสัญญาณออกจากขา 8 เพื่อไปจุดชนวน SCR1 ให้นำกระแส ซึ่งเมื่อ SCR1 นำกระแสจะทำให้ไม่มีกระแสไปเลี้ยง LED ของ IC1 และ IC2 อันเป็นผลให้ไตรแอคของ IC1 และ IC2 หยุดนำกระแส ทำให้ไม่มีกระแสไปเลี้ยงคอยล์ของแมกเนติก หน้าสัมผัส C1-C4 จะตัดวงจรออกจากภาคแหล่งจ่ายไฟตรง และจะตัดทั้งระบบออกไป

การตรวจจับกระแสเกินพิกัดโดยใช้ Thermal overload relay วิธีนี้ใช้หลักการขยายตัวที่แตกต่างกันของ bimetals เมื่อได้รับความร้อนแล้วจะไปตัดหน้าสัมผัส C5 ซึ่งก็คือ การตัดไฟเลี้ยงคอยล์ของแมกเนติก ทำให้หน้าสัมผัส C1-C4 ตัดไฟฟ้ากระแสสลับออกจากเครื่อง การขยายตัวที่แตกต่างกันของ bimetals จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของ bimetals ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่านลวดความร้อนของ Thermal overload relay เมื่อไฟฟ้ากระแสสลับไหลเข้าภาคแหล่งจ่ายไฟตรงสูงเกินพิกัด Thermal overload relay ก็จะตัดไฟเลี้ยงของคอยล์แมกเนติก ในการตั้งพิกัดกระแสสามารถตั้งได้ระหว่าง 85 -135 % ของกระแสที่กำหนด จากการทดลอง Thermal overload relay จะมีการตอบสนองช้ากว่าการตรวจจับกระแสเกินที่ใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นการมีThermal overload relay ไว้ก็เพื่อเป็นการสำรองในกรณีที่วงจรอิเล็กทรอนิกส์เกิดขัดข้อง

นอกจากนี้ระบบป้องกันกระแสเกินพิกัดยังมีระบบป้องกันที่ใช้ฟิวส์ต่อไว้ที่ด้านขาเข้าของแมกเนติกคอนแทกเตอร์ โดยใช้ฟิวส์ขนาด 10 แอมแปร์

3. วงจรป้องกันแรงดันเกินและแรงดันต่ำกว่ากำหนด



รูปที่ 3.33แสดงวงจรป้องกันแรงดันเกินและต่ำกว่าพิกัด

วงจรป้องป้องกันแรงดันเกินและต่ำกว่ากำหนดจะตรวจจับแรงดันทางด้านขาออกของแหล่งจ่ายไฟตรง โดยใช้แรงดันเป็นตัวแบ่งแรงดัน ทั้งแรงดันเกินและต่ำกว่าพิกัด โดยจะตั้งค่าแรงดันในการใช้งานอยู่ในช่วงระหว่าง ± 10 % ของแรงดันปกติ (520 โวลต์) การทำงานของวงจรมีดังนี้ ในภาวะปกติวงจรจะไม่ทำงาน เมื่อใดที่แรงดันขา 3 สูงกว่ากำหนด หรือแรงดันขา 4 ต่ำกว่ากำหนด โดยมี C_{Dly} ที่ต่อไว้ที่ขา 2 และขา 5 เป็นตัวกำหนดเวลาในการส่งสัญญาณไปยังขา 1 หรือ ขา 6 เพื่อ

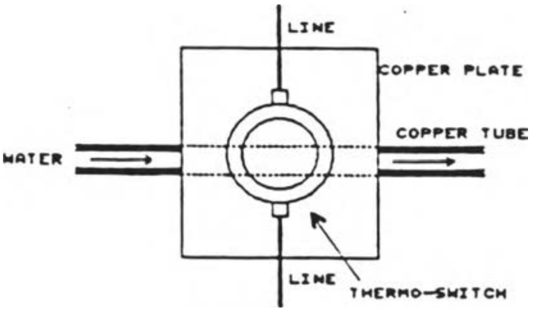
บ่งบอกถึงแรงดันสูงกว่าหรือต่ำกว่าค่าที่กำหนดตามลำดับ เพื่อไปขับนำเบสของทรานซิสเตอร์ 2N2907 และส่งสัญญาณไปยังออบโตไอโซเลเตอร์ 4N25 เพื่อให้นำกระแส จุดชนวนเอสซีอาร์ ในรูป 3.32 ส่งผลให้ไม่มีไฟเลี้ยง LED ของ IC1 และ IC2 ทำให้ไตรแอคของ IC1 และ IC2 ในรูป 3.31 หยุดนำกระแส เมื่อไม่มีกระแสไปเลี้ยงคอยล์ของแมกเนติก เครื่องจึงหยุดทำงาน

4. วงจรป้องกันจากเฟสหาย

เมื่อมีเฟสใดเฟสหนึ่งของไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส หายไป วงจรป้องกันเฟสหายจะตัดไฟฟ้ากระแสสลับออกจากเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำทันที โดยวงจรเฟสหายจะอยู่ร่วมกับวงจรป้องกันกระแสเกินพิกัด มีการทำงานดังนี้ วงจรทางด้านปฐมภูมิของหม้อแลงเป็นแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงให้กับ LED ของ IC1 และ IC2 นั้น จะต่อแบบ open delta ส่วนวงจรไฟตรงที่ได้จากขาออกของหม้อแปลงทั้งสองจะต่ออนุกรมกัน ซึ่งในภาวะปกติจะให้แรงดันออก 15 โวลต์ เพื่อจ่ายกระแสให้กับ LED ของ IC1 และ IC2 โดยผ่านความต้านทาน 390 โอห์ม ถ้าไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านขาเข้าของหม้อแปลงเฟสใดเฟสหนึ่งหายไปจะทำให้แรงดันไฟตรงที่จ่ายให้กับ LED ของ IC1 และ IC2 ลดลงครึ่งหนึ่ง แรงดันที่เหลือจะไม่เพียงพอที่จะทำให้ไตรแอคของ IC1 และ IC2 นำกระแสได้ ดังนั้นจะทำให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าไปเลี้ยงคอยล์ของแมกเนติกและหน้าสัมผัส C1 - C4 จะตัดวงจรไฟฟ้ากระแสสลับทั้ง 3 เฟส ออก ทำให้เครื่องหยุดทำงาน

5. วงจรป้องกันอุณหภูมิเกิน

ในการป้องกันอุณหภูมิของขดลวดเหนี่ยวนำเกินค่าที่กำหนด จะใช้สวิตช์ที่ควบคุมด้วยอุณหภูมิ (Thermo Switch) ในการตัดต่อวงจรโดยติดตั้งไว้ที่แผ่นทองแดงที่ติดกับขดลวดเหนี่ยวนำแล้งทำการต่อดังในรูปที่ 3.34 สวิตช์ดังกล่าวจะต่ออนุกรมกับคอยล์ของแมกเนติกดังแสดงในรูป3.31 สวิตช์ควบคุมจะหยุดการทำงานของเครื่องเมื่ออุณหภูมิของขดลวดเหนี่ยวนำสูงเกินกว่าที่กำหนด โดยตั้งสวิตช์ที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 80 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.34แสดงการต่อวงจรป้องกันอุณหภูมิเกิน