

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2541

เตาหุงต้มอาหาร โดยการเหนี่ยวนำ โดยใช้วงจรรอสซิลเลตด้วยตัวเอง
INDUCTION COOKING USING SELF - OSCILLATE



โดย
นายจักรพันธ์ เอกวานันต์
นายสหเทพ วงษ์อนันต์
นายจรัส ตั้งวงศ์ภูเกตุ
นายวัชรพล ลิปิกร โกสศ

อาจารย์ที่ปรึกษา
อ.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ
ดร.วิจิตร กิณเรศ

เลขที่.....
เลขทะเบียน 34157
วัน, เดือน, ปี - 6 ต.ค. 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ในการนี้ ได้แจ้งให้ผู้ยืมให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2541

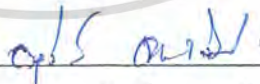
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เตาหุงต้มอาหาร โดยการเหนี่ยวนำโดยใช้วงจรออสซิลเลตด้วยตัวเอง

ผู้จัดทำ

- 
1. นายจักรพันธ์ เอกวานันต์
 2. นายสหเทพ วงษ์อนันต์
 3. นายจรัส ตั้งวงศ์ชูเกตุ
 4. นายวีรพล ลิปิกร โภสศ



อาจารย์ที่ปรึกษา

(อ. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ)



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร. วิจิตร กิณเรศ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตาหุงต้มอาหารโดยการเหนี่ยวนำโดยใช้วงจรถออสซิลเลตด้วยตัวเอง

นายจักรพันธ์	เอกวานันต์	
นายสหเทพ	วงษ์อนันต์	
นายจรัส	ตั้งวงศ์ชูเกตุ	
นายวัชรพล	ลิขิตโกศล	
อ.อนุวัฒน์	จางวนิชเลิศ	อาจารย์ที่ปรึกษา
ดร.วิจิตร	กนิเรศ	อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2541

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอการออกแบบและการสร้างเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำขนาด 1 กิโลวัตต์ ที่ใช้สำหรับการหุงต้มอาหาร ภาคอินเวอร์เตอร์ของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำใช้ทรานซิสเตอร์เป็นสวิตช์ การทำงานของทรานซิสเตอร์ใช้หลักการออสซิลเลตด้วยตัวเอง ทำให้ทนต่อสัญญาณรบกวนได้ดีและวงจรถออสซิลเลตขับนำทรานซิสเตอร์ไม่ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟตรงเพื่อจ่ายไฟเลี้ยงให้กับวงจรถออสซิลเลตขับนำทรานซิสเตอร์ ทำให้วงจรถออสซิลเลตที่อาศัยหลักการดังกล่าวใช้อุปกรณ์ในการทำงานน้อยและมีความน่าเชื่อถือสูง อินเวอร์เตอร์จะทำงานที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ให้กำลังด้านออกที่ภาชนะ 1 กิโลวัตต์ ประสิทธิภาพรวมของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำเท่ากับ 89 เปอร์เซ็นต์ สามารถให้ความร้อนกับภาชนะที่บรรจุน้ำ 1 ลิตร โดยสามารถเพิ่มอุณหภูมิที่ภาชนะขึ้นเป็น 100 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 8 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INDUCTION COOKING USING SELF - OSCILLATE

Mr.Jakkaphan	Akvassananan	
Mr.Sahathap	Vonganan	
Mr.Jarun	Thangwongchuket	
Mr.Watcharapon	Lipikornkosol	
Mr.Anuwat	Jangwanitlert	Advisor
Dr.Vijit	Kinnares	Advisor

1999

ABSTRACT

This project presents the design, construction and testing of a 1 kW induction cooking. It will be used for cooking. The inverter of the induction cooking is implemented by a Self Oscillated half – bridge series resonance inverter using power transistors as switching devices. The power transistors operating in this mode do not require any external source to provide their base current. Hence, it can yield high noise immunity. The inverter operates at 20 kHz. The power transferred to the load is 1 kW. The overall efficiency of the induction cooking is 89 %. The 100° C temperature rise can be achieved within 8 minutes.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญ	III
สารบัญรูปภาพ	VI
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ	3
2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของการให้ความร้อน โดยการเหนี่ยวนำ	8
2.2 หลักการเรโซแนนซ์	16
2.2.1 วงจรแปลงผันไฟตรง – ไฟสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมโหลด	19
2.2.2 วงจรแปลงผันไฟตรง – ไฟสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบขนานโหลด	21
2.2.3 วงจรแปลงผันไฟตรง – ไฟสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม-ขนาน โหลด	23
บทที่ 3 การออกแบบและสร้างเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ	26
3.1 แหล่งจ่ายไฟตรง	26
3.1.1 การออกแบบค่าและพิกัดของตัวเก็บประจุในวงจรกรอง	27
3.1.2 การเลือกพิกัดของไดโอดกำลังขาเข้า	29
3.1.3 การเลือกความต้านทานอนุกรมที่ใช้จำกัดกระแสอัดประจุขณะเริ่ม เปิดเครื่อง	33
3.1.4 ความต้านทานขนานที่ใช้ในการคายประจุเมื่อตอนปิดเครื่อง	34
3.2 แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง	35
3.2.1 หลักการทำงานของวงจร	35
3.2.2 การเลือกสวิตช์ที่ใช้ในวงจรกึ่งบริดจ์	36
3.2.3 วงจร snubber (Snubber Circuit)	45
3.3 การควบคุมและภาคขั้วนำเบส	47
3.3.1 วงจรกำเนิดสัญญาณกำหนดจังหวะการทำงานของวงจร	47
3.3.2 วงจรขั้วนำเบสของทรานซิสเตอร์	47
3.3.3 การเลือกขนาดของแกนหม้อแปลงขั้วนำในวงจรขั้วนำเบส	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.4 การควบคุมความถี่ในการทำงานของวงจร	50
3.4 ภาคกำลังด้านเอาต์พุต	51
3.4.1 การออกแบบหม้อแปลง	51
3.4.1.1 ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กสูงสุด	52
3.4.1.2 สัมประสิทธิ์การใช้ช่องหน้าต่างของแกน	53
3.4.1.3 การเลือกค่ากำลังการสูญเสียในสวดตัวนำ	53
3.4.1.4 ค่าความต้านทานจำเพาะของเส้นลวดทองแดง	53
3.4.1.5 การคำนวณหาจำนวนรอบของเส้นลวดทองแดง	54
3.4.1.6 การคำนวณขนาดของเส้นลวดตัวนำ	54
3.4.1.7 การหาวงจรสมมูลย์ของหม้อแปลง	56
3.4.2 การออกแบบภาระทางค่าน โหลด	57
3.4.3 ตัวเก็บประจุคเซยตัวประกอบกำลังทางค่าน โหลด	58
3.4.3.1 การสร้างตัวเก็บประจุคเซยตัวประกอบกำลังทางค่าน โหลด	60
3.4.4 การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำที่อนุกรมค่านปฐมภูมิของหม้อแปลง	61
3.4.4.1 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ	64
3.4.4.2 การคำนวณหาจำนวนรอบของเส้นลวดทองแดง	65
3.4.4.3 การคำนวณขนาดเส้นลวดตัวนำ	65
3.4.4.4 การคำนวณหาขนาดของช่องว่างอากาศ	66
3.4.4.5 การคำนวณผลของฟลักซ์ที่ขอบ	66
3.4.5 ตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมทางค่านปฐมภูมิ	66
บทที่ 4 การทดสอบเครื่องให้ความร้อน โดยการเหนี่ยวนำ	68
4.1 รูปคลื่นสัญญาณขับนำทรานซิสเตอร์	68
4.2 รูปคลื่นกระแสผ่านทรานซิสเตอร์และแรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์กำลัง	69
4.3 รูปคลื่นกระแสและแรงดันคคร่อมตัวเก็บประจุ (วงจรสับเบอร์)	70
4.4 รูปคลื่นกระแสและแรงดันค่านออกของอินเวอร์เตอร์	71
4.5 รูปคลื่นกระแสและแรงดันคคร่อมตัวเก็บประจุทางค่านปฐมภูมิ	72
4.6 รูปคลื่นกระแสและแรงดันคคร่อมตัวเหนี่ยวนำทางค่านปฐมภูมิ	72
4.7 รูปคลื่นกระแสและแรงดันค่านปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.8 รูปคลื่นกระแสและแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง	74
4.9 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันที่โหลด	75
4.10 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสไฟฟ้าสลับทางค่านเข้า	75
4.11 การวัดกำลังและตัวประกอบกำลังทางค่านเข้า	76
4.12 การวัดกำลังค่านออกและประสิทธิภาพ	77
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป	83
ภาคผนวก	
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำอย่างง่าย	3
2.2 วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงทั่วไป	4
2.3 วงจรสมมูลย์ของขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน	4
2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับระยะทางจากผิวของชิ้นงาน	5
2.5 ทิศทางการไหลของกระแสที่ผิว	5
2.6 แสดงแผ่นคลื่นของชิ้นงาน	6
2.7 แสดงประเภทและลักษณะการใช้งานของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำในย่านความถี่ต่างๆ	7
2.8 การให้ความร้อน โดยการเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน ในอุดมคติ	8
2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับระยะจากผิวชิ้นงาน	11
2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียต่อพื้นที่ผิวกับระยะจากผิวชิ้นงาน	14
2.11 เฟสเซอร์โคอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กและแรงดัน	15
2.12 เฟสเซอร์โคอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับแรงดันในกรณีที่ตัวขดลวดไม่อุดมคติ	15
2.13 วงจรสมมูลย์ของขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน	16
2.14 แสดงวงจรแปลงผันไฟตรง – ไฟสลับกึ่งบริดจ์แบบเรโซแนนซ์	18
2.15 แสดงวงจรสมมูลย์ที่เป็นโหลดของอินเวอร์เตอร์	19
2.16 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรผันไฟตรง – ไฟสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมโหลด	21
2.17 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรแปลงผันไฟตรง – ไฟสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบขนานโหลด	22
2.18 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรแปลงผันไฟตรง – ไฟสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม – ขนานโหลดเมื่อ $C_s = C_p$	24
2.19 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรแปลงผันไฟตรง – ไฟสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม – ขนานโหลดเมื่อ $C_s = 2C_p$	24
3.1 บล็อกโคอะแกรมแสดงส่วนประกอบของเครื่องให้ความร้อน โดยการเหนี่ยวนำ	26
3.2 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์และวงจรกรอง	27
3.3 วงจรเรียงกระแสที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับครูช่างานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 3.3 วงจรเรียงกระแสที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์
 ไม่วารณใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจากการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์	29
3.5 กระแสในไดโอดและกระแสลัดด้านเข้า	30
3.6 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสผ่านไดโอดในตอนเริ่มเปิดเครื่องเมื่อแรงดันไฟสลับด้านเข้าเป็นรูปคลื่นไซน์	32
3.7 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสผ่านไดโอดในตอนเริ่มเปิดเครื่องเมื่อแรงดันไฟสลับด้านเข้าเป็นรูปคลื่นโคไซน์	33
3.8 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสผ่านไดโอดในตอนเริ่มเปิดเครื่องเมื่อมีความต้านทานจำกัดกระแสและแรงดันไฟสลับด้านเข้าเป็นรูปคลื่นโคไซน์	34
3.9 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์	35
3.10 วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์	35
3.11 รูปวงจรที่ใช้วิเคราะห์ค่าที่ย้ายโอนจากทางด้านทุติยภูมิมายังด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง	38
3.12 แสดงผลตอบสนองความถี่ที่โหลดที่ต่อกับอินเวอร์เตอร์	38
3.13 แสดงกระแสและแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ที่มีทรานซิสเตอร์เป็นสวิทช์	39
3.14 แสดงกระแสผ่านทรานซิสเตอร์กำลังและแรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์กำลัง	40
3.15 แสดงกระแสและแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_s	41
3.16 แสดงกระแสและแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_s	42
3.17 แสดงกระแสด้านปฐมภูมิและแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง	43
3.18 แสดงกระแสด้านทุติยภูมิและแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง	44
3.19 แสดงกระแสและแรงดันทางด้านโหลด	45
3.20 แสดงวงจรสับเบอร์ดแรงดันในวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ที่ใช้ในการซิมูเลต	46
3.21 รูปวงจรขั้วนำเบสของทรานซิสเตอร์กำลังแบบ BJT	48
3.22 วงจรปรับค่าสนามแม่เหล็กอิมิตัวของแกนหม้อแปลง	50
3.23 แสดงวงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงส่งผ่านกำลัง	56
3.24 แสดงการต่อตัวเก็บประจุชดเชยตัวประกอบกำลังและตัวเหนี่ยวนำ	58
3.25 แสดงวงจรสมมูลย์ทางไฟฟ้าทางด้านโหลดและเฟสเซอร์ไคอะแกรม	59
3.26 แสดงรูปกราฟพิกัดแรงดันอาร์เอ็มเอสกับความถี่ของตัวเก็บประจุไมวารณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้	61

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.27 แสดงวงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางด้าน โหลด	62
3.28 แสดงวงจรสมมูลย์ไฟฟ้าทางด้าน โหลด และเฟสเซอร์ไคอะแกรมของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ	62
3.29 วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงกำลังเมื่อย้ายความเหนี่ยวนำรั่วไหลมารวมที่ด้านปฐมภูมิ	63
3.30 แสดงแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุอนุกรมเทียบกับความถี่	67
4.1 รูปคลื่นกระแสเบสและแรงดันเบสอิมิตเตอร์ที่ขั้วนำทรานซิสเตอร์กำลัง	69
4.2 รูปคลื่นกระแสผ่านทรานซิสเตอร์และแรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์ Q_1	70
4.3 รูปคลื่นกระแสและแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ (วงจรสับเบอร์)	71
4.4 รูปคลื่นกระแสและแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์	71
4.5 รูปคลื่นกระแสและแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุทางด้านปฐมภูมิ	72
4.6 รูปคลื่นกระแสและแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำทางด้านปฐมภูมิ	73
4.7 รูปคลื่นกระแสและแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง	74
4.8 รูปคลื่นกระแสและแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง	74
4.9 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่โหลดที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์	75
4.10 รูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าสลับทางด้านเข้า	76
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิเทียบกับเวลาที่โหลด 250 มิลลิลิตร	79
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิเทียบกับเวลาที่โหลด 500 มิลลิลิตร	80
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิเทียบกับเวลาที่โหลด 750 มิลลิลิตร	80
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิเทียบกับเวลาที่โหลด 1000 มิลลิลิตร	81
4.15 รูปโครงการน 1	81
4.16 รูปโครงการน 2	82
4.17 รูปโครงการน 3 (หม้อแปลงขั้วนำทรานซิสเตอร์)	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงค่ากำลังและตัวประกอบกำลังทางด้านเข้าของเครื่อง	77
4.2 แสดงค่ากำลังด้านออกและประสิทธิภาพของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ	77
4.3 เปรียบเทียบเตาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำกับเตาให้ความร้อนแบบขดลวดความร้อน	78



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันเครื่องหุงต้มอาหารภายในครัวเรือนต่างๆ ยังคงใช้แก๊สหุงต้มจากธรรมชาติ ซึ่งประเทศไทยนั้นมีข้อได้เปรียบในด้านทรัพยากรนี้ก็คือไม่ต้องสูญเสียเงินตราให้กับต่างประเทศเพื่อนำแก๊สเข้า เนื่องจากประเทศไทยยังมีแหล่งของแก๊สธรรมชาติอยู่เพียงพอ แต่นับวันทรัพยากรเหล่านี้ก็ยิ่งจะหมดไป ดังนั้นถ้าเราสามารถศึกษาและพัฒนาเครื่องให้ความร้อนแบบใหม่โดยใช้การเหนี่ยวนำซึ่งไม่ต้องใช้แก๊สในการหุงต้มอาหารนั้นก็เป็นการช่วยในเรื่องของการประหยัดทรัพยากรธรรมชาติ อีกทั้งยังเป็นการพึ่งพาเทคโนโลยีของตัวเอง โดยไม่จำเป็นต้องสูญเสียเงินตราในการซื้อเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำจากต่างประเทศ และยังเป็นพื้นฐานในการพัฒนาเครื่องหุงต้มอาหารต่อไปในภายภาคหน้า

การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำเป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้เกิดความร้อนในชิ้นงานที่เป็นโลหะ โดยการเหนี่ยวนำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งค้นพบโดย Michael Faraday ในปี ค.ศ. 1831 จากการทดลองของ Michael Faraday พบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในวงจรทางขดปฐมภูมิ จะก่อให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้นทางด้านทุติยภูมิ ถ้าขดลวดทุติยภูมิเป็นวงจรปิด ต่อมา Lenz และ Neumann พบว่า กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางที่ตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กที่เป็นตัวเหนี่ยวนำ หลักการเหล่านี้ได้นำไปใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์ หม้อแปลง และอื่นๆ กระแสที่เกิดจากการเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ดังกล่าวข้างต้น มักก่อให้เกิดความร้อนที่เป็นกำลังการสูญเสียและไม่เป็นที่ต้องการอย่างเช่นกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นกับแกนหม้อแปลงและมอเตอร์ แต่ปรากฏการณ์นี้ก็ยังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ เช่น ใช้ในการให้ความร้อนแก่ภาชนะที่เป็นโลหะ โดยการเหนี่ยวนำ

เครื่องให้ความร้อน โดยการเหนี่ยวนำจะประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ จ่ายพลังงานให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ ขดลวดเหนี่ยวนำจะสร้างสนามแม่เหล็กคล่องผ่านภาชนะหรือชิ้นงาน ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลวนรอบชิ้นงาน (Eddy current) ผลดังกล่าวทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ชิ้นงาน โดยไม่มีการสัมผัสกันทางไฟฟ้าระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงานหรือภาชนะ และยังเป็นการสร้างความร้อนให้เกิดขึ้นที่ชิ้นงาน โดยตรงการให้ความร้อนโดยวิธีการเหนี่ยวนำสามารถทำให้เกิดความร้อนเฉพาะตำแหน่งได้ และช่วยลดปัญหามลภาวะเป็นพิษในอากาศ เมื่อเทียบกับการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานหรือภาชนะโดยการใช้เตา

ปรากฏการณ์ผิว (Skin Effect) เป็นปรากฏการณ์ที่สนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า คล่องผ่านชิ้นงานหรือภาชนะ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลวนรอบชิ้นงาน และจะหนาแน่นบริเวณผิวมากขึ้นเรื่อยๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลเบื้องหลังและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใกล้ผิวของชิ้นงานหรือภาชนะ ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นกับความถี่ที่นำมาใช้งาน โดยความถี่ที่นำมาใช้งานจะมีผลต่อความลึกผิว (Skin Depth) ของชิ้นงาน ถ้าต้องการให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลวนรอบชิ้นงาน ที่ความลึกผิวไม่มาก ก็จะต้องใช้ความถี่สูง และถ้าต้องการให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลวนรอบชิ้นงาน ที่ความลึกผิวมาก ก็จะต้องใช้ความถี่ที่ไม่สูงมาก

การจำแนกเครื่องให้ความร้อน โดยการเหนี่ยวนำที่ใช้งานในปัจจุบันเมื่อพิจารณาจากลักษณะการใช้งานและความถี่ในการทำงาน สามารถแยกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ประเภทแรก ใช้สำหรับการชุบแข็งผิวชิ้นงาน ที่ใช้ความถี่สูง ซึ่งได้จากหลอดสุญญากาศและที่ใช้ความถี่ปานกลาง ซึ่งได้จากสิ่งประดิษฐ์ประเภทสารกึ่งตัวนำ จำพวกทรานซิสเตอร์ มอสเฟต ประเภทที่สองใช้สำหรับการให้ความร้อนทั่วทั้งชิ้นงาน เช่นการหลอม การขึ้นรูปชิ้นงาน และการลดความเครียดในชิ้นงาน โดยความถี่ที่ใช้งานคือความถี่ต่ำซึ่งได้จากไฟฟ้ากระแสสลับจากโรงไฟฟ้า และความถี่ปานกลางที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขับเคลื่อนมอเตอร์ และสิ่งประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำจำพวกไทรสเตอร์

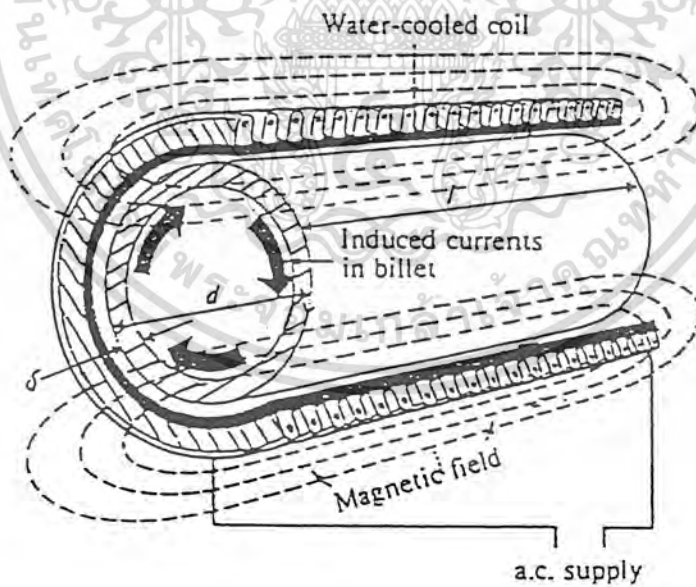
เครื่องให้ความร้อน โดยการเหนี่ยวนำที่ทำการวิจัยและพัฒนาขึ้นนี้ มีวัตถุประสงค์ในการใช้งานแทนเตาหุงต้มอาหารในปัจจุบันที่ยังคงใช้แก๊สอยู่ อีกทั้งการควบคุมของวงจรที่ใช้มีความยุ่งยากของวงจรมีความน่าเชื่อถือได้สูง โดยใช้หลักการการอสซิลเลตด้วยตัวเอง ซึ่งมีโครงสร้างการทำงานแบบกึ่งบริดจ์ที่มีข้อดีในเรื่องการใช้สวิตซ์ไวงานน้อยกว่าโครงสร้างแบบบริดจ์และไม่มีองค์ประกอบไฟตรงของกระแส ทำให้สามารถใช้หม้อแปลงความถี่สูงอย่างมีประสิทธิภาพ ข้อเสียคือมีปัญหาการลัดวงจรในกึ่งของสวิตซ์ไวงานในกึ่งเดียวกัน แต่สามารถแก้ไขได้โดยการออกแบบสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตซ์ให้เป็นแบบสามสถานะ (Tri-State) และวงจรจะทำงานแบบซีรีเรโซแนนซ์ภาคแรงดันศูนย์ ทำให้ลดการสูญเสียในขณะที่สวิตซ์เปลี่ยนจากหยุดนำกระแสมาเป็นการนำกระแส (Turn on) และภาคการควบคุมเป็นแบบอสซิลเลตด้วยตัวเอง (Self-Oscillate) เป็นผลทำให้วงจรการควบคุมการทำงานของสวิตซ์ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ

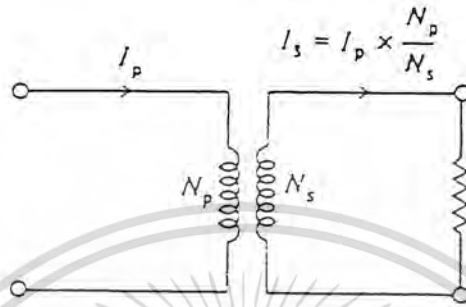
การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ (Induction Heating) เป็นปรากฏการณ์ทั้งทางไฟฟ้าและทางความร้อนร่วมกันซึ่งประกอบด้วยการเหนี่ยวนำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Induction) ปรากฏการณ์ผิว (Skin Effect) และการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) จากปรากฏการณ์มูลฐานทั้งสาม สามารถอธิบายการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำโดยย่อได้ดังนี้เมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไปในขดลวดเหนี่ยวนำที่มีชิ้นงานอยู่ภายใน กระแสไฟฟ้าสลับจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นในขดลวดคล้องผ่านชิ้นงานเนื่องจากชิ้นงานเป็น โลหะสนามแม่เหล็กคล้องผ่านชิ้นงานจะเหนี่ยวนำให้มีกระแสไหล โดยกระแสส่วนมากจะไหลผ่านชิ้นงาน ในระดับความลึกผิว (Skin Depth) กระแสที่ไหลวนรอบชิ้นงานจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่บริเวณผิวของชิ้นงาน ความร้อนนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสที่เหนี่ยวนำ และความต้านทานสมมูลย์ของเส้นทางที่กระแสไหลผ่านและความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทไปบริเวณอื่น โดยการนำ การพา และการแผ่รังสีที่บริเวณผิว



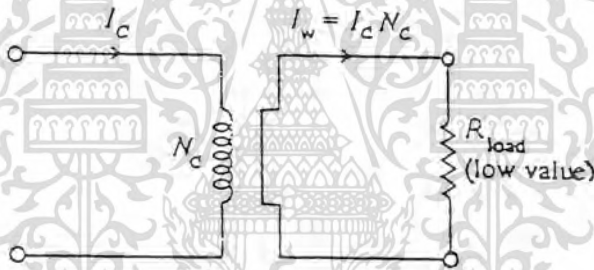
รูปที่ 2.1 การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำอย่างง่าย

รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำอย่างง่ายกล่าวคือ ถ้าวางชิ้นงานไว้ในขดลวดหรือใกล้กับขดลวด ชิ้นงานนั้นจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนขึ้นถ้าพิจารณาทั้งระบบว่าเป็นหม้อแปลงชิ้นหนึ่งขดลวดเหนี่ยวนำจะเป็นเสมือนขดปฐมภูมิของหม้อแปลงที่มีไมวากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนรอบเท่ากับจำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ ส่วนที่ชิ้นงานจะเปรียบเสมือนขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง ที่มีจำนวนรอบเป็นหนึ่งรอบ และมีโหลดต่อแบบเก็บบัดวงจร เพราะความต้านทานสมมูลย์ของโลหะที่เป็นชิ้นงานจะมีค่าค่อนข้างต่ำ



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงทั่วไป



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลย์ของขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน

รูปที่ 2.2 แสดงวงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงทั่วไป ส่วนรูปที่ 2.3 แสดงวงจรสมมูลย์ของขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน จะเห็นว่าถ้า I_c เป็นกระแสที่ไหลในขดลวดเหนี่ยวนำและ I_w เป็นกระแสที่ไหลในชิ้นงาน โดยอาศัยความสัมพันธ์ของหม้อแปลงจะทำให้กระแสทั้งสองมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$I_w = N_c I_c \quad (2.1)$$

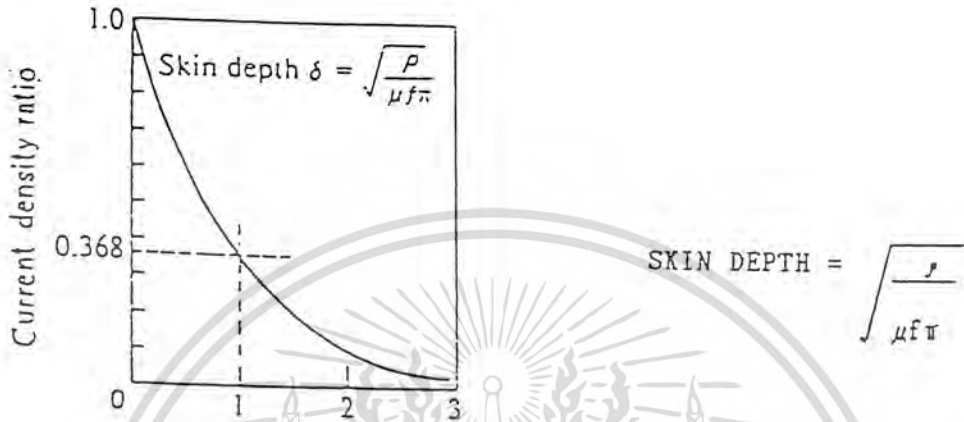
โดยที่ N_c คือจำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ และกำลังสูญเสียเป็นความร้อนในชิ้นงานจะมีค่าเท่ากับ

$$P_w = N_c^2 I_c^2 R_w \quad (2.2)$$

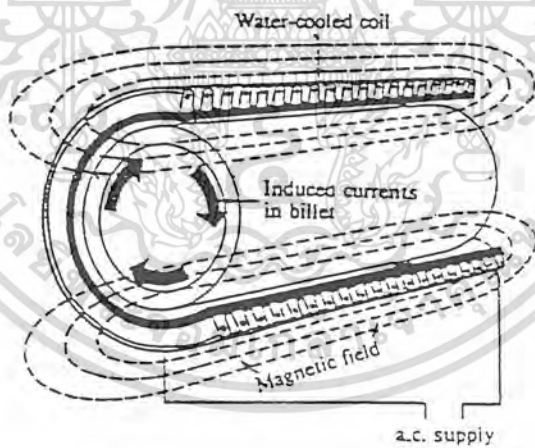
โดยที่ R_w คือความต้านทานสมมูลย์ของชิ้นงาน

รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับระยะทางจากผิวของเอกสารถือเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรในหน่วยงานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ชิ้นงานเนื่องจากปรากฏการณ์ที่ผิว ทำให้ความหนาแน่นกระแสที่ความถี่กับระยะทางจากผิวไม่วางกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียล ที่ระดับความลึกผิว (Skin depth) ความหนาแน่นกระแสจะมีค่าเพียง 0.368 เท่าของความหนาแน่นกระแสที่ผิวชิ้นงาน จึงประมาณว่ากระแสโดยมากจะไหลอยู่ในระดับความลึกผิวนี้ (δ)



รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับระยะทางจากผิวของชิ้นงาน



รูปที่ 2.5 ทิศทางการไหลของกระแสที่ผิว

รูปที่ 2.5 แสดงทิศทางการไหลของกระแสที่ชิ้นงานผลของปรากฏการณ์ผิวจะทำให้กระแสส่วนมากอยู่ในระดับความลึกผิว เราสามารถหาความต้านทานสมมูลของชิ้นงานได้โดยการพิจารณารูปที่ 2.6 ซึ่งเมื่อทำการคลี่ชิ้นงานออก และประมาณว่ากระแสไหลเป็นแผ่นบางและมีความหนาแน่นเท่ากับความลึกผิว (δ) ความยาวเท่ากับขนาดเส้นรอบวงของชิ้นงานทรงกระบอก (πd) ทำให้ได้ค่าความต้านทานของชิ้นงานดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$R_w = \frac{2\pi R_p}{\delta l_w} \quad (2.3)$$
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

ρ คือ ความต้านทานจำเพาะของชิ้นงาน

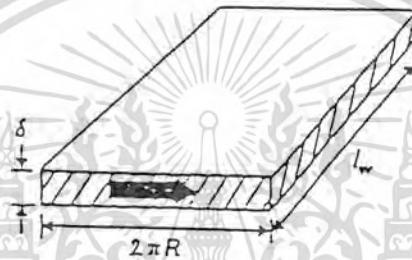
$$\delta \text{ คือ ความลึกผิว} = \sqrt{\frac{\rho}{\mu f \pi}} = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu \omega}}$$

μ คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของชิ้นงาน และ f, ω คือ ความถี่

R คือ รัศมีของชิ้นงาน

l_w คือ ความยาวของชิ้นงานซึ่งมีค่าเท่ากับความสูงของขดลวดเหนี่ยวนำ

จากสมการ (2.3) จะเห็นได้ว่าความต้านทานสมมูลจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะของชิ้นงาน ความลึกผิวและลักษณะทางเรขาคณิตของชิ้นงานด้วย



รูปที่ 2.6 แสดงแผ่นค้ำของชิ้นงาน

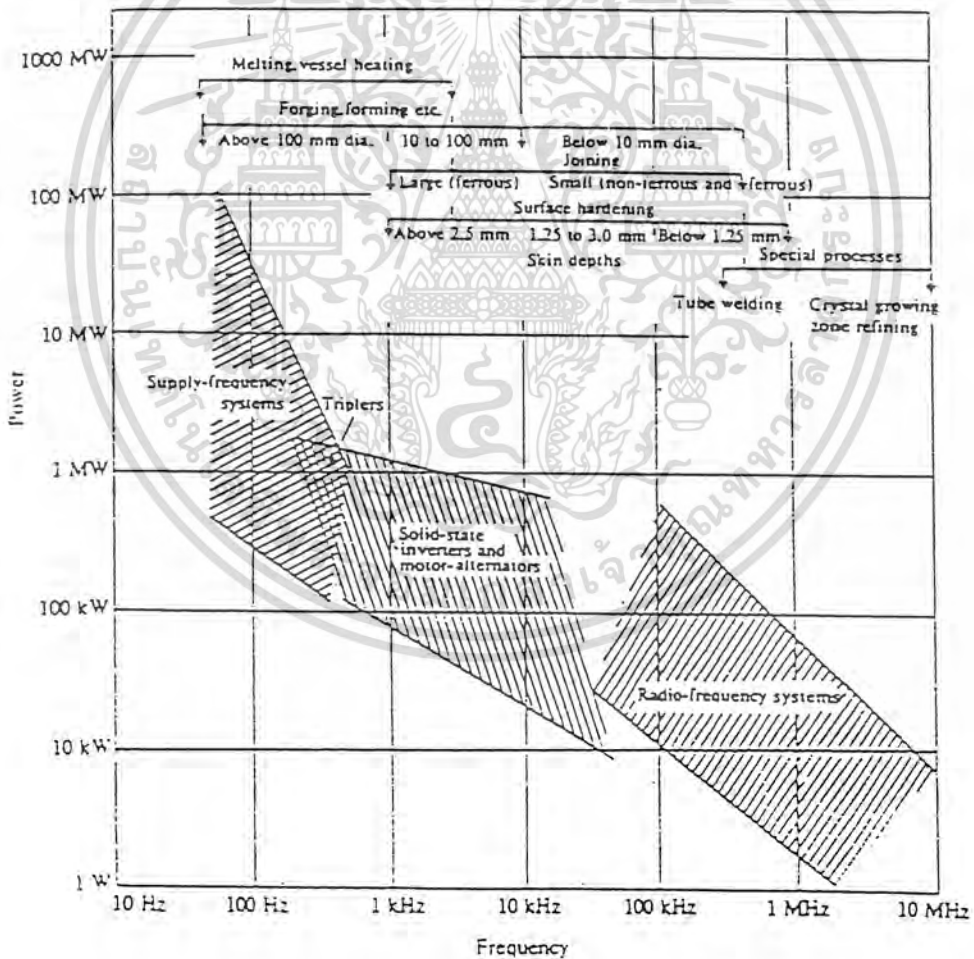
การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำนี้ไม่ได้ใช้แหล่งความร้อนจากภายนอก แต่ความร้อนที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นในชิ้นงานเอง อีกทั้งชิ้นงานก็ไม่จำเป็นต้องสัมผัสกับแหล่งจ่ายพลังงาน ซึ่งได้แก่ขดลวดเหนี่ยวนำ การให้ความร้อนจึงทำได้โดยสะดวก การให้ความร้อนแบบนี้สามารถทำให้เกิดความร้อนสูง เฉพาะตำแหน่งที่ต้องการ ทั้งยังสามารถควบคุมเวลาที่ให้ความร้อนตลอดจนพื้นที่และความลึกของชิ้นงานที่ได้รับความร้อน การกำหนดพื้นที่ที่กำหนดได้จากรูปร่างลักษณะของขดลวดเหนี่ยวนำที่แตกต่างกันและความลึกผิวที่เลือกใช้ความถี่ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่เหมาะสมจากรูปที่ 2.7 แสดงชนิดของแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและลักษณะการใช้งานของเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำแต่ละแบบ ที่มีความถี่ในการใช้งานกำลังออกต่างๆ กัน สามารถจำแนกได้ดังนี้

1) เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ใช้พลังงานจากโรงไฟฟ้าโดยตรง ไฟฟ้ากระแสสลับจากโรงงานไฟฟ้ามีความถี่ 50/60 เฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำ ความลึกผิว จะมีค่าสูง ในบางครั้งจะใช้เครื่องทวีคูณความถี่ซึ่งประกอบด้วยหม้อแปลงอิมพัลส์ได้ เครื่องทวีคูณความถี่จะนำฮาร์โมนิกส์ที่ 3 (150/180 เฮิร์ตซ์) หรือ ฮาร์โมนิกส์ที่ 5 (250/300 เฮิร์ตซ์) มาใช้ในการเหนี่ยวนำ โดยปรกติเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำชนิดนี้ จะใช้งานหลอมโลหะ ซึ่งมีกำลังหลายร้อยเมกะวัตต์

2) เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ใช้ระบบมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำชนิดนี้ใช้พลังงานจากโรงไฟฟ้ามาขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

และใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีความถี่สูงกว่าความถี่ของโรงไฟฟ้า โดยมีความถี่อยู่ในย่าน 500 เฮิร์ตซ์ถึง 10 กิโลเฮิร์ตซ์ ระบบเช่นนี้ให้กำลังหลายร้อยกิโลวัตต์ และเหมาะสำหรับการเผาเหล็ก การขึ้นรูปและการเชื่อมโลหะ การชุบแข็ง เป็นต้น

3) เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสถิตย์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์เป็นแบบพลวัตซึ่งมีขีดจำกัดทางด้านกลศาสตร์ทำให้ไม่สามารถเพิ่มความถี่สูงมากได้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสถิตย์ใช้ถึงประคิษฐ์สารกึ่งตัวนำจำพวก ทรานซิสเตอร์ กำลัง มอสเฟตกำลัง หรือพวกไทรสเตอร์ เพื่อแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าให้เป็นไฟตรง โดยใช้วงจรเรียงกระแสแล้วแปลงผันให้เป็นไฟสลับที่มีความถี่สูงขึ้นโดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสถิตย์นี้สามารถสร้างความถี่ได้ถึงหลายร้อยกิโลเฮิร์ตซ์และตัวอย่างการใช้งานเหมือนข้อ 2



รูปที่ 2.7 แสดงประเภทและลักษณะการใช้งานของเครื่องให้ความร้อน

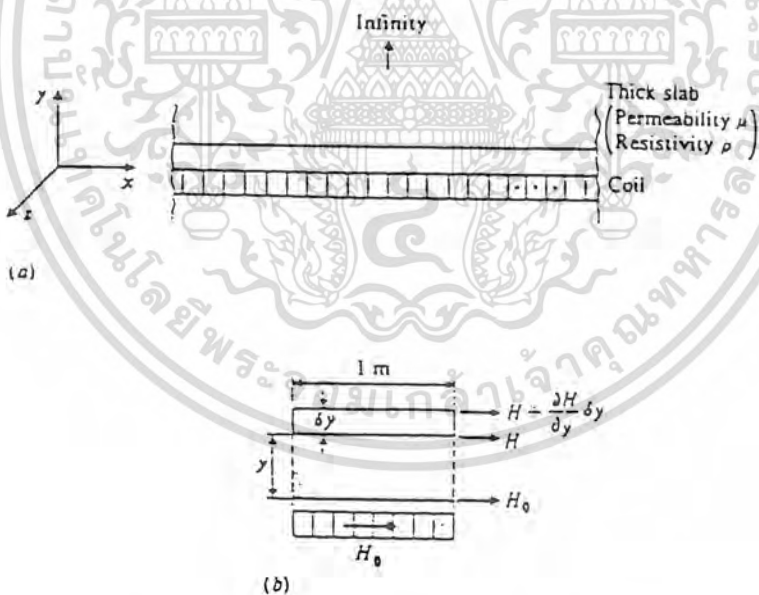
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภาควิชาวิศวกรรมเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าแบบเหนี่ยวนำในย่านความถี่ต่าง ๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าความถี่วิทยุ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบนี้จะใช้ความถี่วิทยุ โดยมีย่านความถี่ระดับหลายร้อยกิโลเฮิร์ตซ์ถึงหลายเมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งปัจจุบันนี้ยังคงใช้หลอดสูญญากาศเพราะถึงประสิทธิภาพสูงถึงตัวนำ ยังมีสมรรถนะในการใช้งานที่มีความถี่สูงๆ ไม่ดีพอเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้หลอดสูญญากาศให้กำลังได้หลายกิโลวัตต์ เหมาะสำหรับการชุบแข็งที่ผิว

2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของการให้ความร้อน โดยการเหนี่ยวนำ

ทฤษฎีการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำสามารถอธิบายให้เข้าใจ โดยอาศัยทฤษฎีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในที่นี้จะอธิบายการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำกับชิ้นงานที่มีลักษณะอุดมคติ ที่เรียกว่า Semi Infinite Slab เป็นเบื้องต้นก่อนซึ่งสามารถอธิบาย ตามสมการคณิตศาสตร์ที่ง่ายในรูปของฟังก์ชันไซน์และเอกซ์โปเนนเชียลจะทำให้เข้าใจการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนกับชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกตันได้ง่ายขึ้น ซึ่งผลที่ได้จะเป็นสมการคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนในรูปของ Bessel Function และ Hyperbolic Function



รูปที่ 2.8 การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำกับชิ้นงานในอุดมคติ

รูปที่ 2.8 แสดงระบบที่ประกอบด้วยขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กและชิ้นงาน โดยถือว่าชิ้นงานยาวมากและหนามาก โดยชิ้นงานจะวางอยู่ในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กชิ้นงานที่มีลักษณะอุดมคติดัง

กล่าวอาจเทียบได้กับไหลตรงทรงกระบอกที่มีรัศมีเป็นอนันต์ ทำให้สมมติได้ว่าที่ผิวของชิ้นงานมีค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนได้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ในอนุภาคไหนๆ ไม่ใช่ประโยชน์ด้านการศึกษาความเข้มสนามแม่เหล็กเป็น H_0 เท่ากับความเข้มสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสร้างขึ้น โดยความเข้มไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามแม่เหล็กจะมีการเปลี่ยนแปลงกับเวลาในทิศทางตามแกน X และเป็นปริมาณเวกเตอร์โดยจะเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสไหลที่ผิวของชิ้นงานในทิศทางแกน Z จะชี้ไปตามความหนาของชิ้นงานในที่นี้จะสมมติเงื่อนไขขอบเขตของสนามแม่เหล็กที่ผิวชิ้นงานดังนี้

$$\begin{aligned} H_{x(y=0)} &= H_{om} \cos \omega t \\ H_y &= 0 \\ H_z &= 0 \end{aligned} \tag{2.4}$$

โดยที่ H_{om} คือค่ายอดของ H_x ที่ผิวของชิ้นงาน ($y=0$)

จากสมการพื้นฐานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

$$\nabla^2 \vec{H} = \frac{\mu \partial \vec{J}}{\partial t} \tag{2.5a}$$

$$\nabla^2 \vec{E} = -\frac{\mu \partial \vec{J}}{\partial t} \tag{2.5b}$$

$$\nabla^2 \vec{J} = \frac{\mu \partial \vec{J}}{\partial t} \tag{2.5c}$$

จากสมการ (2.5a)

$$\nabla^2 H = \frac{\partial^2 H}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial Z^2} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial}{\partial t} (H_x + H_y + H_z)$$

แต่เนื่องจาก $H_y = H_z = 0$ ดังนั้น $H = H_x$ เท่านั้นและเนื่องจากสนามแม่เหล็กไม่มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดที่เวลาใดเวลาหนึ่งตามแนวแกน X และแกน Z ดังนั้น

$$\nabla^2 H = \frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} = \frac{\mu \partial H_x}{\partial t} \tag{2.6}$$

คำตอบของสมการอนุพันธ์จะมีผลเฉลยอยู่ในรูป $H_x = H_x(y) \cos \omega t$ โดยที่ $H_x(y)$ คือการเปลี่ยนแปลงของ H_x กับระยะทางตามแนวแกน y (ความลึกของชิ้นงาน) ซึ่งสามารถเขียน H_x ในรูปของฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียล โดยพิจารณาเฉพาะส่วนจริงของ $H_x(y) e^{j\omega t}$ แล้วเมื่อแทนค่าสมการ (2.6) ผลเฉลยที่ได้จะนำค่าส่วนจริง (Real Part) ไปใช้

$$\frac{d^2 H_x}{dy^2} - \frac{\mu j \omega H_x}{\rho} = 0$$

ให้ $\alpha^2 = \frac{\mu \omega}{2\rho} = \frac{1}{\delta^2}$

$$\frac{d^2 H_x}{dy^2} - 2j\alpha^2 H_x = 0$$

เขียนสมการใหม่ได้

$$\frac{d^2 H_x}{dy^2} - k^2 H_x = 0$$

โดยที่ $k^2 = 2j\alpha^2$ สมการข้างบนจะมีผลเฉลยดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_x(y) = A_1 e^{ky} + A_2 e^{-ky} \tag{2.7}$$

จากเงื่อนไขขอบเขต เมื่อ $y = \alpha$ และ H_x มีค่าจำกัดค่าใดค่าหนึ่ง จะได้ $A_1 = 0$ และที่ขอบเขต $y = 0$ ค่า $H_x(y) = H_{om} e^{(j\omega t)}$ ดังนั้นจะได้ $A_2 = H_{om} e^{(j\omega t)}$ แทนค่าในสมการ (2.7) จะได้

$$H_x(y) = H_{om} e^{(-\alpha y \sqrt{2j})} e^{(j\omega t)}$$

แต่ $\sqrt{2j} = 1 + j$ ดังนั้น

$$\begin{aligned} H_x(y) &= H_{om} e^{-(1+j)\alpha t + j\omega t} \\ &= H_{om} e^{(-\alpha t)} e^{[j(\omega t - \alpha y)]} \end{aligned}$$

ใช้ค่าตอบเฉพาะส่วนจริง

$$H_x(y) = H_{om} e^{(-\alpha y)} \cos(\omega t - \alpha y) \quad (2.8)$$

จากสมการ (2.8) พบว่าที่บริเวณผิวของชิ้นงาน $y = 0$ จะได้ค่า $H_x = H_{om} \cos \omega t$ ตามเงื่อนไขขอบเขตที่สมมติไว้ในสมการ (2.4) และที่ระยะทางใด ๆ จากผิวของชิ้นงานในทิศทางแกน y ขนาดของสนามแม่เหล็กจะลดลงเป็นเอ็กซ์โปเนนเชียล และการเปลี่ยนแปลงของมุมที่ระยะใด ๆ จากผิวของชิ้นงานจะเป็นแบบตัวกำลังเมื่อเทียบกับมุมเฟสที่ผิวเป็นปริมาณ $\alpha y = \frac{y}{\delta}$ จากสมการ (2.8) เมื่อ $y = \frac{1}{\alpha}$ ปริมาณของ H จะลดลงเป็น e^{-1} เท่าของค่า H_0 ที่ผิวและเฟสจะเปลี่ยนไป 1 เรเดียน (57.3 องศา) ที่ความลึกซึ่งขนาดของ H เป็น $\frac{1}{e} = 0.368$ เท่าของค่าที่ผิวค่า y ที่จุดนี้เป็นปริมาณสำคัญซึ่งนิยามให้เรียกว่า ความลึกผิว (Skin Depth or depth of penetration) แทนด้วยสัญลักษณ์ (δ)

จากที่นิยามไว้ $\alpha^2 = \frac{\mu\omega}{2\rho}$ ดังนั้น

$$\text{ความลึกผิว} \quad \delta = \frac{1}{\alpha} = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_r \mu_0}} \quad (2.9)$$

จากรูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับระยะจากผิวชิ้นงานซึ่งบอกเป็นอัตราส่วน $\frac{y}{\delta}$ หรือจำนวนเท่าของความลึกผิวซึ่งเป็นระยะทางจากผิวของชิ้นงานที่นิยมใช้ในการงานของการเหนี่ยวนำความร้อนมาจากค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (\vec{H}) จะสามารถหาค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (\vec{B}) ความหนาแน่นกระแส (\vec{j}) และความเข้มสนามไฟฟ้า (\vec{E}) ได้ โดยใช้ความสัมพันธ์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าดังนี้

$$\text{จาก } \vec{B} = \mu \vec{H}$$

แทน H จากสมการ (2.7)

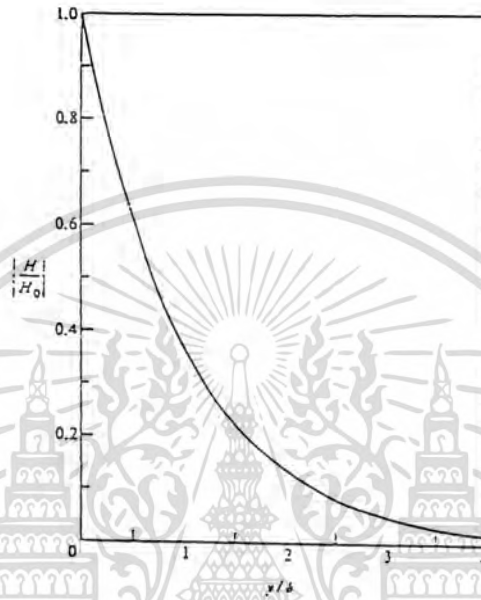
$$B_x(y) = B_{om} e^{(-\alpha y)} \cos(\omega t - \alpha y) \quad (2.10)$$

จากสมการของแมกซ์เวลล์

$$\vec{J} = \text{curl}(\vec{H})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{curl } (\vec{H}) = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ H_x & H_y & H_z \end{vmatrix}$$



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับระยะจากผิวชิ้นงาน เนื่องจาก $H_y = H_z = 0$ และไม่มีการเปลี่ยนแปลงของ H ในทิศทางตามแกน X และแกน Z ดังนั้น

$$\text{curl } (\vec{H}) = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ H_x & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

และจาก

$$\vec{J} = \text{curl } (\vec{H})$$

แสดงว่า

$$\begin{aligned} J_z &= -\vec{k} \frac{\partial H_x}{\partial y} = \vec{k} \left\{ -e^{(j\omega t)} \left[\frac{\partial e^{(-\alpha y \sqrt{2j})}}{\partial y} \right] \right\} H_{om} \\ &= \vec{k} \left[\alpha \sqrt{2j} e^{(-\alpha y \sqrt{2j} + j\omega t)} \right] H_{om} \end{aligned}$$

แต่ $\sqrt{2j} = 1 + j = \sqrt{2} e^{j\frac{\pi}{4}}$

ดังนั้น

$$J_z = \vec{k} \left[\alpha \sqrt{2} e^{[-\alpha y(1+j) + j\omega t + j\frac{\pi}{4}]} \right] H_{om} \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้เฉพาะส่วนจริง $J_z = \bar{k} \left[\alpha \sqrt{2j} e^{(-\alpha y) \cos\left(\omega t - \alpha y + \frac{\pi}{4}\right)} \right] H_{om} \quad (2.12)$

จะเห็นว่าความหนาแน่นกระแสที่เหนี่ยวนำมีทิศทางตั้งฉากกับความเข้มสนามแม่เหล็กเสมอ กล่าวคือ กระแสมีทิศทางตามแกน Z และมีมุมเฟสหน้ากับความเข้มสนามแม่เหล็กอยู่ 45 องศา หรือ $\left(\frac{\pi}{4}\right)$

เมื่อ $y=0$; $J_{z0} = \sqrt{2} H_{om} \alpha e^{j\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right)} = \sqrt{2} H_{xo} \alpha e^{j\left(\frac{\pi}{4}\right)}$
 ดังนั้น $J_z(y) = J_{om} e^{j(\omega t - \alpha y \sqrt{2j})}$
 ใช้เฉพาะส่วนจริง $J_z(y) = J_{om} e^{(-\alpha y)} \cos(\omega t - \alpha y) \quad (2.13)$

จากผลเฉลยความหนาแน่นของกระแสสามารถหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้าจากความสัมพันธ์ทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดังนี้

จาก $\vec{E} = \rho \vec{J}$
 ดังนั้น $E_z = \rho J_z$
 $E_z(y) = \rho J_{om} e^{(-\alpha y)} \cos(\omega t - \alpha y) \quad (2.14)$

จากผลเฉลยของสมการข้างต้นจะพบว่าปริมาณ $\vec{H}, \vec{B}, \vec{J}$ และ \vec{E} จะมีลักษณะที่เหมือนกันคือเป็นไปตามปรากฏการณ์ผิว

จากค่าความหนาแน่นของกระแสสามารถหาค่ากระแสรวมต่อหน่วยความยาวได้ดังนี้

แล้ว

$$I = \int_0^\alpha J_z dy \quad (*1)$$

$$= \int_0^\alpha J_{om} e^{(-\alpha y)} \cos(\omega t - \alpha y) dy$$

$$= J_{om} \operatorname{Re} \left[\int_0^\alpha e^{[j\omega t - (1+j)\alpha y]} dy \right]$$

$$= J_{om} \operatorname{Re} \left[\frac{e^{(j\omega t)}}{(1+j)\alpha} \right] = \frac{J_{om} e^{(j\omega t)}}{\alpha \sqrt{2} e^{j\left(\frac{\pi}{4}\right)}}$$

ใช้เฉพาะส่วนจริง $I = \frac{J_{om}}{\sqrt{2}\alpha} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right) \quad (2.15)$

จากผลเฉลยของสมการ (2.15) จะพบว่ากระแสรวมต่อหนึ่งหน่วยความยาวจะมีมุมเฟสล่าหลังมุมเฟสของความหนาแน่นกระแสที่ผิวอยู่ 45 องศา $\left(\frac{\pi}{4}\right)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 แดงจาก $J_{om} = \sqrt{2} H_{om} \alpha e^{j\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right)}$
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = \sqrt{2} H_{om} \alpha e^{j(\omega t - \frac{\pi}{4})} \frac{e^{-j\pi}}{\sqrt{2}\alpha}$$

$$I = H_{om} e^{j\omega t}$$

ใช้เฉพาะส่วนจริง

$$I = H_{om} \cos \omega t \tag{2.16}$$

จากสมการ (2.16) กระแสต่อหนึ่งหน่วยความยาวมีค่าเท่ากับความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผิวซึ่งสอดคล้องกับกฎของฟาราเดย์ที่ว่า

$$\oint H \cdot dl = I$$

$$H_{om} \times l = I$$

หรือ

$$I = H_{om} \cos \omega t$$

จากที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อมีกระแสไหลในชั้นงานย่อมเกิดความร้อนขึ้น กำลังสูญเสียต่อ I ตารางเมตรที่ผิวชั้นงานจะมีค่า

$$\begin{aligned} P_s &= \int_0^\alpha \rho J_z^2(y) dy (\times 1)(\times 1) \\ &= \rho J_{om}^2 \int_0^\alpha e^{-2\alpha y} \cos^2(\omega t - \alpha y) dy dt \end{aligned}$$

เนื่องจากความหนาแน่นกระแสแปรตามเวลาเป็นรายคาบ ในการหาค่ากำลังสูญเสียต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่จึงต้องหาค่าเฉลี่ยของกำลังต่อ I คาบเวลาด้วยสมการข้างต้นจึงเป็น

$$\begin{aligned} P_s &= \frac{\rho}{T} J_{om}^2 \int_0^\alpha \int_0^T e^{-2\alpha y} \cos^2(\omega t - \alpha y) dy dt \\ P_s &= \frac{\rho J_{om}^2}{2} \int_0^\alpha e^{-2\alpha y} dy \end{aligned} \tag{2.17}$$

$$P_s = \frac{\rho J_{om}^2}{4\alpha} = \frac{\rho J_{om}^2 \delta}{4} \tag{2.18}$$

แต่จาก $|J_{om}| = \sqrt{2}|H_{om}| \alpha = \sqrt{2} \frac{|H_{om}|}{\delta}$

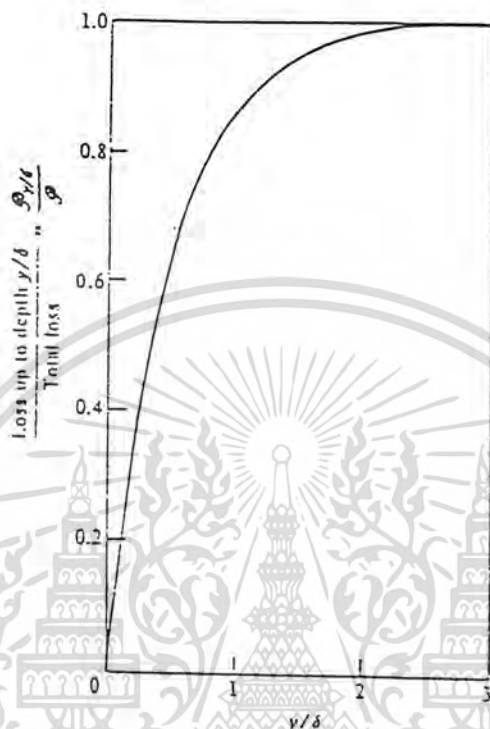
$$\begin{aligned} P_s &= \frac{\rho H_{om}^2}{2\delta} \\ &= \frac{\rho H_o^2}{\delta} \end{aligned} \tag{2.19}$$

โดยที่ H_o เป็นค่าอาร์เอ็มเอสของ H ที่ผิว

จากสมการ (2.17) เราสามารถหาลำลังสูญเสียต่อ I หน่วยได้อย่างง่ายโดยแสดงเป็นสัดส่วนของกำลังสูญเสียจากผิวถึงระดับ ความลึก y (P_{sy}) ต่อกำลังสูญเสียของชั้นงาน (P_s) ด้วยวิธีการเปลี่ยนขอบเขตจำกัดบนของการอินทิเกรต ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{P_{sy}}{P_s} = 1 - e^{(-2\alpha y)} \quad (2.20)$$



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียต่อพื้นที่ผิวกับระยะจากผิวชั้นงาน จากรูป 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของ P_{sy} และ P_s กับสัดส่วนของระยะทางจากผิวและความลึกผิว โดยจะเห็นว่ากำลังสูญเสียเกือบ 90 % จะเกิดขึ้นในช่วงความลึกผิว ทำให้สามารถใช้ประโยชน์สำหรับการทำให้ผิวภาชนะร้อน

จากค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (B) ในสมการ (2.20) สามารถหาค่าฟลักซ์สนามแม่เหล็กผลรวมต่อหนึ่งหน่วยความยาวและค่าแรงเคลื่อนสนามไฟฟ้าที่เกิดจากฟลักซ์สนามแม่เหล็กดังกล่าวได้ดังนี้

$$\phi = \mu H_{om} \int_0^{\alpha} e^{[j\omega t - (1+j)\alpha y]} (dy * 1)$$

ใช้เฉพาะส่วนจริง

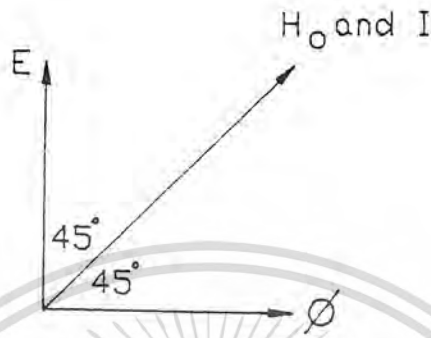
$$\phi = \frac{\mu H_{om} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right)}{\sqrt{2} \alpha} \quad (2.21)$$

และจาก

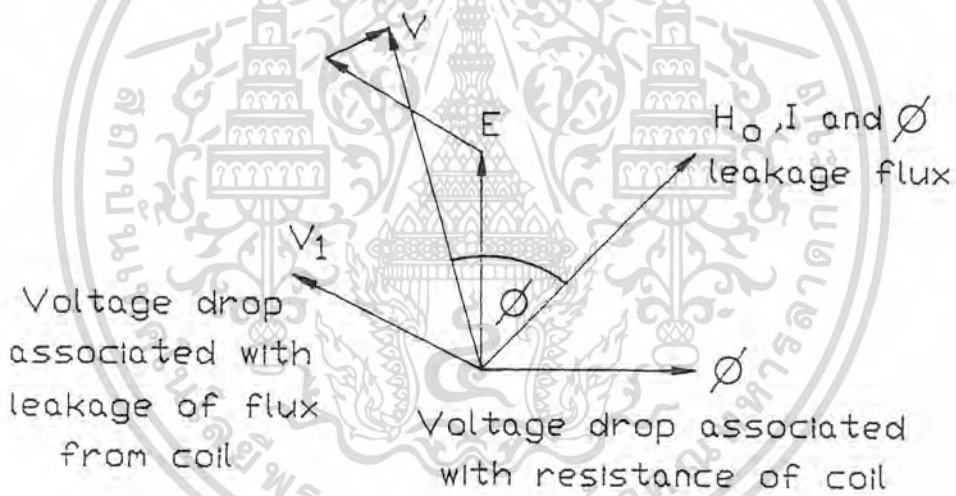
$$E = \frac{N d\phi}{dt}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเอกสารตีพิมพ์เท่านั้น กรุณาอย่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{\mu H_{om} N \omega \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right)}{\sqrt{2} \alpha} \quad (2.22)$$



รูปที่ 2.11 เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กและแรงดัน



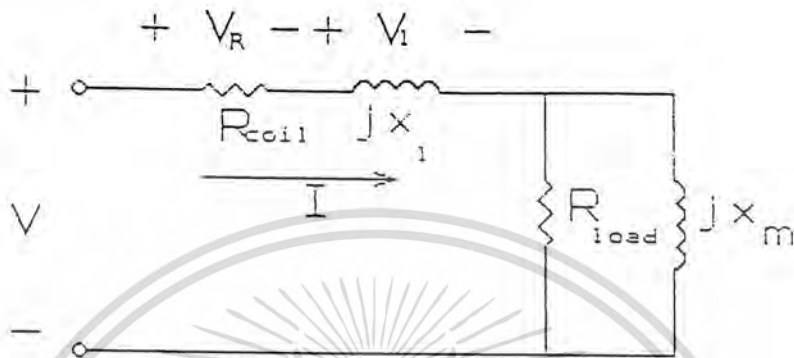
รูปที่ 2.12 เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับแรงดันในกรณีที่ว่าขดลวดไม่อุดมคติ

จากสมการ (2.21) และ (2.22) ผลรวมฟลักซ์สนามแม่เหล็กจะเป็นสัดส่วนกับค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) และมุมเฟสจะล้าหลังมุมเฟสของความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ผิวอยู่ 45 องศา $\left(\frac{\pi}{4}\right)$ ส่วนแรงดันที่เกิดขึ้นจะนำหน้ากระแสผลรวมอยู่ $\frac{\pi}{4}$ โดยในขณะที่ผลรวมของกระแสที่ไหลในขดลวดจะมีมุมเฟสเดียวกันกับความเข้มสนามแม่เหล็ก ดังนั้นตัวประกอบกำลังของขดลวดจึงหาได้จาก

ความสัมพันธ์ระหว่าง E และ I โดยดูจากเฟสเซอร์ไดอะแกรมดังรูปที่ 2.11 ซึ่งจากไดอะแกรมตัวประกอบกำลังจะเป็นแบบล้าหลังมีค่าเป็น 0.707 แสดงว่าส่วนประกอบในส่วนจินตภาพของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิมพีแดนซ์ ในวงจรสมมูลจะมีค่าเท่ากัน แต่ในความจริงขดลวดเหนี่ยวนำก็มีความต้านทานอยู่ค่าหนึ่งแล้วทำให้เฟสเซอร์ไดอะแกรมของระบบเปลี่ยนแปลงไปดังในรูปที่ 2.12 และสามารถเขียนวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของระบบได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน

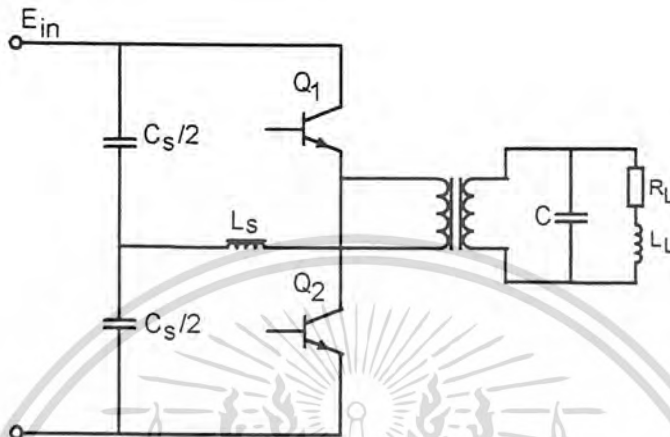
จากแบบจำลองของระบบที่มีชิ้นงานที่เรียกว่า Slab นี้อาจมองว่าเป็นรีแอคเตอร์ (Reactor) แกนเหล็กที่มีโพลเป็นลักษณะพิเศษ คือมีค่าความต้านทานและค่ารีแอคเตอร์เท่ากัน ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านรีแอคเตอร์ก็คือแมกนีโตอิงค์ฟลักซ์นั่นเอง

2.2 หลักการเรโซแนนซ์

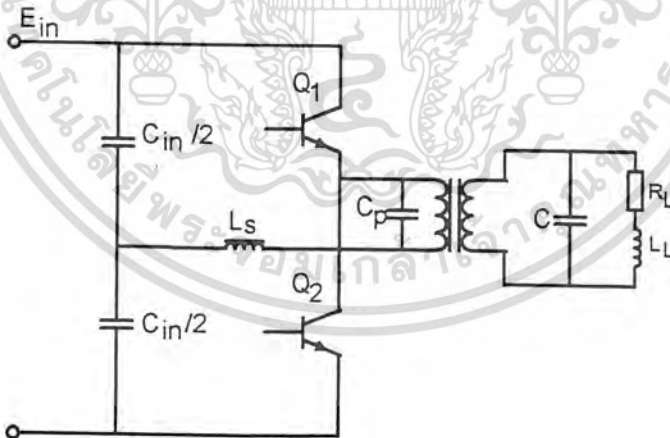
วงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับแบบเรโซแนนซ์ (Resonant DC - AC Inverter) มีโครงสร้างของวงจรเช่นเดียวกับวงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับแบบพื้นฐาน หรือวงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับ ที่พัฒนามาจากวงจรพื้นฐาน แต่จะแตกต่างกันที่มีตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเป็นองค์ประกอบของวงจรซึ่งทำให้เกิดการเรโซแนนซ์และอาศัยปรากฏการณ์ของเรโซแนนซ์เพื่อทำให้กำลังสูญเสียในคอนสวิตซ์ต่ำและการควบคุมแรงดันด้านขาออกของวงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับแบบเรโซแนนซ์ จะใช้วิธีควบคุมความถี่หรือควบคุมเฟสแทนการควบคุมวัฏจักรงานในกรณีที่วงจรเรโซแนนซ์ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุและความต้านทานโพล จะมีลักษณะการต่อวงจรของตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุและความต้านทานโพลที่แตกต่างกันซึ่งอาจจะแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะ ได้แก่ วงจรแบบอนุกรม วงจรแบบขนานและวงจรแบบผสม ทำให้สามารถจำแนกวงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับแบบเรโซแนนซ์ตามลักษณะการต่อตัวเหนี่ยวนำตัวเก็บประจุและความต้านทานโพลออกเป็น 3 ลักษณะ คือ Series - Resonant Inverter

Parallel - Resonant Inverter และ Combination Series - Parallel Resonant Inverter ดังแสดงในรูป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการขออนุญาตจากผู้จัดทำเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 2.14 วงจรดังกล่าวเป็นวงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับแบบเรโซแนนซ์ที่มีโครงสร้างของวงจรแบบกึ่งบริดจ์

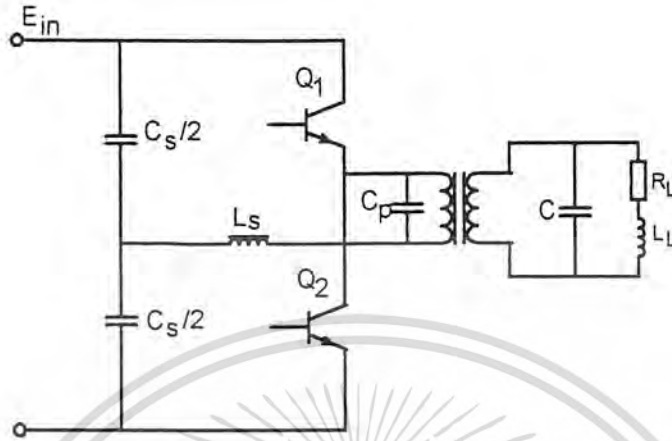


ก. วงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมโหด



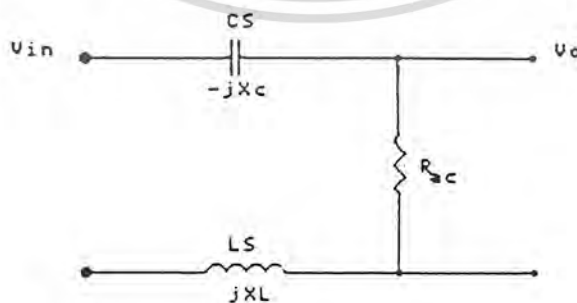
ข. วงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบขนานโหด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



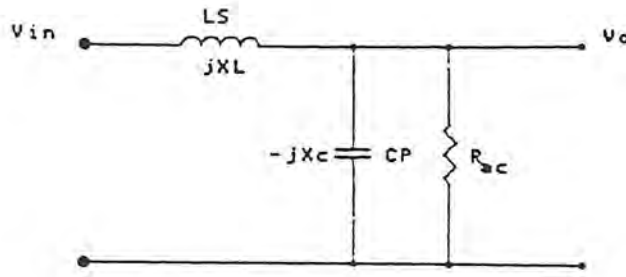
ค. วงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม - ขนานโหลด
รูปที่ 2.14 แสดงวงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับกึ่งบริดจ์แบบเรโซแนนซ์
(HALF - BRIDGE RESONANT INVERTER)

เนื่องจากสวิตช์ของวงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับแบบกึ่งบริดจ์จะสลับกันทำงานทำให้ได้แรงดันออกเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นวงจรกึ่งบริดจ์ทำหน้าที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ของวงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับ ส่วนตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่เป็นองค์ประกอบของวงจรซึ่งทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ จึงถือว่าเป็นโหลดของวงจรอินเวอร์เตอร์ รูปที่ 2.15 แสดงวงจรมมูลค์ของโหลดของอินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะการต่อวงจรของตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุและความต้านทานโหลดแบบต่างๆกัน

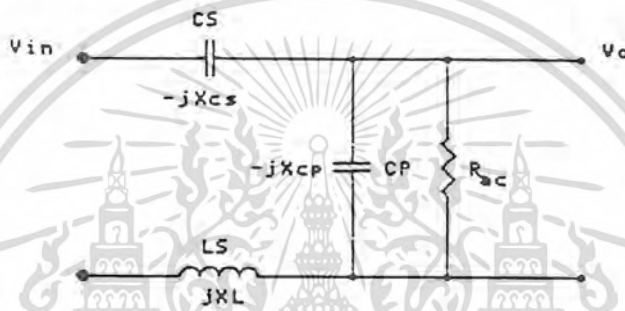


ก. วงจรมมูลค์ของโหลดแบบอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข. วงจรสมมูลย์ของโหนดแบบขนาน



ค. วงจรสมมูลย์ของโหนดแบบอนุกรม - ขนาน

รูปที่ 2.15 แสดงวงจรสมมูลย์ที่เป็นโหนดของอินเวอร์เตอร์

2.2.1. วงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมโหนด

จากวงจรในรูปที่ 2.14 (ก) ถ้าตัวเก็บประจุ $C_s/2$ มีค่าเล็กและทำหน้าที่เรโซแนนซ์กับตัวเหนี่ยวนำ L_s วงจรสมมูลย์ของโหนดของอินเวอร์เตอร์จะมีลักษณะที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุ C_s ตัวเหนี่ยวนำ L_s และความต้านทานโหนด R_{lc} ต่ออนุกรมกันดังแสดงในรูป 2.15 (ก) ดังนั้นจึงเรียกวงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับชนิดนี้ว่า วงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมโหนด (Series Loaded Resonant Inverter) วงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับชนิดนี้มีข้อดีตรงที่ตัวเก็บประจุที่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์ C_s ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงจะทำหน้าที่ปิดกั้นไฟตรงไม่ให้ไหลผ่านหม้อแปลง ทำให้วงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับชนิดนี้ไม่ทำให้เกิดความไม่สมมาตรของแรงดันคร่อมหม้อแปลง (Volt - Sec Unbalance) นอกจากนี้วงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมโหนด ยังมีข้อดีที่กระแสที่ไหลผ่านสวิตช์จะลดลงตามกระแสโหนด เมื่อความต้านทานของโหนดเพิ่มทำให้กำลังงานสูญเสียในสวิตช์ลดลง เมื่อความต้านทาน

โหนดเพิ่มขึ้น การป้องกันการลัดวงจรที่โหนดสามารถทำได้โดยการออกแบบให้โหนดของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 อินเวอร์เตอร์มีค่า Q ค่อนข้างสูงซึ่งจะทำให้กระแสโหนดเปลี่ยนแปลงกับค่าความต้านทานของ
 ไม่วารณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งหามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โหลดน้อย จนเมื่อความต้านทานเป็นศูนย์กระแสผ่านสวิตช์จะเพิ่มขึ้นไม่มากนัก ข้อเสียของวงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมโหลด คือไม่สามารถควบคุมค่าแรงดันด้านออกเมื่อไม่มีโหลด เนื่องจากแรงดันด้านออกจะไม่ขึ้นกับความถี่ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 2.16 ที่ $Q = 1$ แรงดันออกจะเปลี่ยนตามความถี่น้อยลง และถ้าเป็นกรณีไม่มีโหลดค่า $Q = 0$ เส้นกราฟนี้ จะแสดงเป็นเส้นตรงในแนวนอน ดังนั้นจึงไม่สามารถควบคุมค่าแรงดันด้านออกในขณะไม่มีโหลดได้ แต่เราสามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยการใช้ภาคควบคุมการทำงานของสวิตช์ ที่เป็นแบบฮอสซิลเลตด้วยตัวเองทำให้วงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับหยุดทำงานขณะไม่มีโหลดและจะเริ่มทำงานใหม่ขณะมีโหลดต่อเข้ากับวงจร การวิเคราะห์และออกแบบวงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมโหลดสามารถใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบเอซี (ac Analysis Technique) ซึ่งจะง่ายต่อการวิเคราะห์และออกแบบวงจร แต่ผลการวิเคราะห์และออกแบบวงจรโดยวิธีนี้จะเป็นค่าโดยประมาณเพื่อใช้เป็นค่าเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์วงจรด้วยคอมพิวเตอร์ต่อไป เมื่อใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบเอซีจะได้รับความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆดังนี้

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{\left[1 + j\left(\frac{X_L}{R_{ac}} - \frac{X_C}{R_{ac}}\right)\right]} \quad (2.23)$$

$$E_d = \frac{E_{in}}{2} \quad (2.24)$$

$$R_{ac} = \left(\frac{8}{\pi^2}\right) R_L \quad (2.25)$$

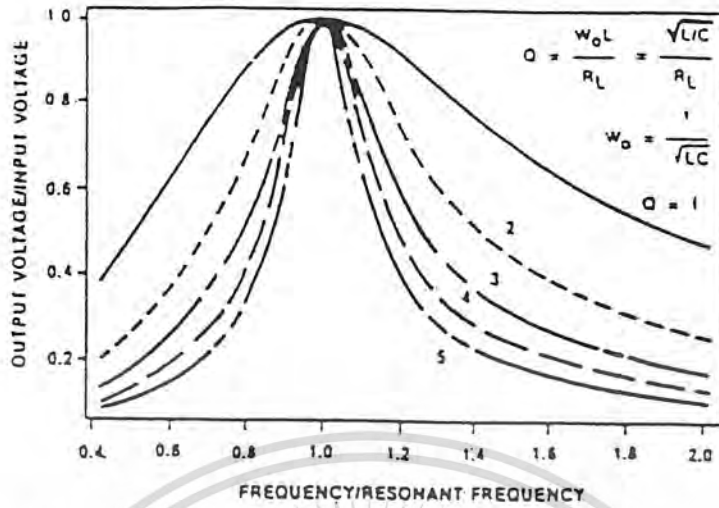
$$Q = \frac{\omega_o L_S}{R_L} \quad (2.26)$$

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_S C_S}} \quad (2.27)$$

$$\frac{E_o}{E_d} = \frac{1}{\left[1 + j\left(\frac{\pi^2}{8}\right) Q \left[\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega}\right]\right]} \quad (2.28)$$

จากสมการ (2.28) เมื่อนำไปคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านออกต่อแรงดันด้านเข้าสำหรับความถี่ต่างๆ เมื่อ Q มีค่าระหว่าง 1 ถึง 5 จะได้กราฟดังรูป 2.16 ซึ่งจากกราฟจะแสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมโหลดจะเห็นว่าเมื่อความต้านทานโหลดมีค่าน้อยจะทำให้ Q มีค่ามากแรงดันด้านออกจะเปลี่ยนตามความถี่ค่อนข้างมาก แต่เมื่อความต้านทานโหลดมีค่ามากจะทำให้ Q มีค่าน้อยแรงดันด้านออกจะเปลี่ยนตามความถี่น้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรผันไฟตรง - ไฟสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมโหลด

2.2.2 วงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบขนานโหลด

จากวงจรในรูปที่ 2.14 (ข) ถ้าตัวเก็บประจุ $C_p/2$ มีค่าใหญ่จะทำหน้าที่แบ่งแรงดันด้านเข้าเท่านั้นไม่เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เรโซแนนซ์กับตัวเหนี่ยวนำ L_s แต่จะมีตัวเก็บประจุ C_p ทำหน้าที่เรโซแนนซ์กับตัวเหนี่ยวนำ L_s จะเห็นได้ว่าตัวเก็บประจุ C_p และความต้านทานโหลด R_{ac} จะต่อขนานกันดังแสดงในรูป 2.15 (ข) ดังนั้นจึงเรียกวงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับชนิดนี้ว่า วงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบขนานโหลด (Parallel Loaded Resonant Inverter) ข้อดีของวงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบขนานโหลดคือสามารถลัดวงจรที่โหลดได้โดยตรงเพราะเมื่อลัดวงจรที่โหลดกระแสจะถูกจำกัดโดยตัวเหนี่ยวนำที่ทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ แต่ข้อเสียของวงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบขนานโหลดคือเมื่อลดโหลดโดยการเพิ่มความต้านทาน กระแสออกของอินเวอร์เตอร์จะไม่ลดลงตามโหลดแต่กลับจะเพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพของวงจรต่ำ เมื่อใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบเอชซีจะมีความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ในวงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบขนานโหลดดังนี้

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{\left[1 - \frac{X_L}{X_C} + j \left(\frac{X_L}{R_{ac}} \right) \right]} \tag{2.29}$$

$$V_o = \frac{\pi E_o}{(2\sqrt{2})} \tag{2.30}$$

$$V_{in} = \frac{2\sqrt{2} E_d}{2} \tag{2.31}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง (2.32) นำไปใช้

$$Q = \frac{R_L}{\omega_0 L_S} \quad (2.33)$$

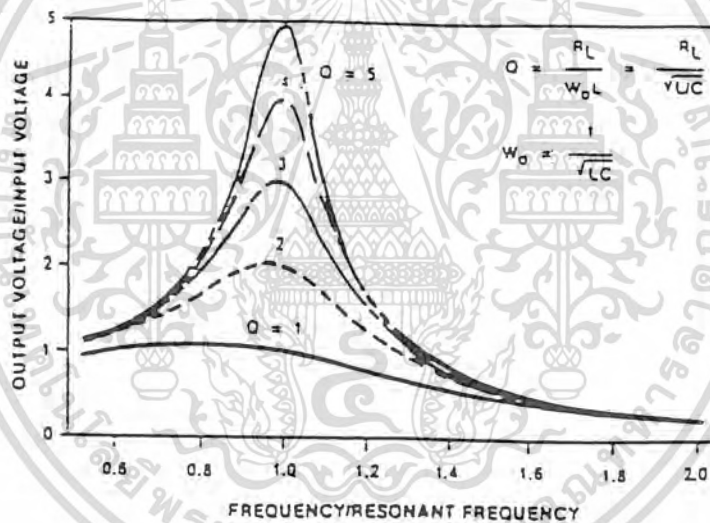
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_S C_P}} \quad (2.34)$$

$$R_{ac} = \frac{\pi^2 R_L}{8} \quad (2.35)$$

ดังนั้นจากสมการ (2.29) จะได้

$$\frac{E_O}{E_d} = \frac{1}{\left[\left(\frac{\pi^2}{8} \right) \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right] + j \left[\frac{\omega}{\omega_0} \right] \left(\frac{1}{Q} \right) \right]} \quad (2.36)$$

จากสมการ (2.36) เมื่อนำไปคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันคัตตันออกต่อแรงดันคัตตันเข้าสำหรับความถี่ต่างๆเมื่อ Q มีค่าระหว่าง 1 ถึง 5 จะได้กราฟ ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบขนานโหลด

จากกราฟผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบขนานโหลดจะเห็นว่าเมื่อความต้านทานโหลดมีค่ามากทำให้ Q มีค่ามากแรงดันขาออกจะเปลี่ยนตามความถี่ค่อนข้างมาก แต่เมื่อความต้านทานโหลดมีค่าน้อยจะทำให้ Q มีค่าน้อยแรงดันขาออกจะเปลี่ยนตามความถี่น้อยลง จะเห็นได้ว่าวงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบขนานโหลดจะสามารถควบคุมค่าแรงดันขาออกขณะที่ไม่มีโหลดโดยวิธีเพิ่มความถี่ในการสวิตช์ให้สูงขึ้นซึ่งเป็นข้อดีของวงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบขนานโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 วงจรแปลงผันไฟตรง – ไฟสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม-ขนานโหลด

จากวงจรในรูป 2.14 (ค) ถ้าตัวเก็บประจุ C_s และ C_p มีค่าไม่ใหญ่นักและทำหน้าที่เรโซแนนซ์กับตัวเหนี่ยวนำ L_s จะเห็นได้ว่าเมื่อทำให้แหล่งกำเนิดแรงดันเป็นศูนย์กลางตัวเก็บประจุที่ทำหน้าที่เรโซแนนซ์ทั้งสองตัวกับตัวเหนี่ยวนำจะมีลักษณะการต่อวงจรร่วมกับโหลดเป็นทั้งวงจรแบบอนุกรมและวงจรแบบขนานดังแสดงในรูป 2.15 (ค) จึงเรียกวงจรแปลงผันไฟตรง – ไฟสลับชนิดนี้ว่า วงจรแปลงผันไฟตรง – ไฟสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม – ขนานโหลด (Series – Parallel Loaded Resonant Inverter) รูปที่ 2.18 และ 2.19 แสดงกราฟผลตอบแทนเชิงความถี่ของวงจรแปลงผันไฟตรง – ไฟสลับชนิดนี้ซึ่งจะมีคุณสมบัติของวงจรแปลงผันไฟตรง – ไฟสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมและแบบขนานโหลดรวมกันอยู่ ถ้าความต้านทานของโหลดมีค่าน้อยกว่ารีแอกแตนซ์ของ C_p มาก เราสามารถละเลยตัวเก็บประจุ C_p ได้ ทำให้มีคุณสมบัติวงจรแบบอนุกรม ในทางตรงกันข้ามถ้าความต้านทานของโหลดมีค่ามากกว่ารีแอกแตนซ์ของ C_s มาก เราไม่สามารถละเลย C_p ได้ จะเห็นได้ว่าจะมีตัวเก็บประจุ C_p ขนานกับโหลดทำให้มีคุณสมบัติของวงจรแบบขนาน ดังนั้นวงจรแปลงผันไฟตรง – ไฟสลับแบบนี้เหมาะกับการที่มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดกว้างๆ แต่ข้อเสียคือในกรณีทั้งความต้านทานของโหลดมีค่าต่ำและความต้านทานของโหลดมีค่าสูง กระแสออกของวงจรอินเวอร์เตอร์จะมีค่าสูง เมื่อใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบเอชซีจะได้ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ในวงจรแปลงผันไฟตรง – ไฟสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม – ขนานโหลดดังนี้

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1 + \frac{X_{Cs}}{X_{Cp}} - \frac{X_L}{X_{Cp}} + j \left(\frac{X_L}{R_{ac}} - \frac{X_{Cs}}{R_{ac}} \right)} \quad (2.37)$$

$$Q_s = \frac{X_L}{R_L} \quad (2.38)$$

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}} \quad (2.39)$$

$$E_o = \frac{2\sqrt{2} V_o}{\pi} \quad (2.40)$$

$$V_{in} = \frac{2\sqrt{2} E_d}{\pi} \quad (2.41)$$

ดังนั้นจากสมการ (2.37) จะได้

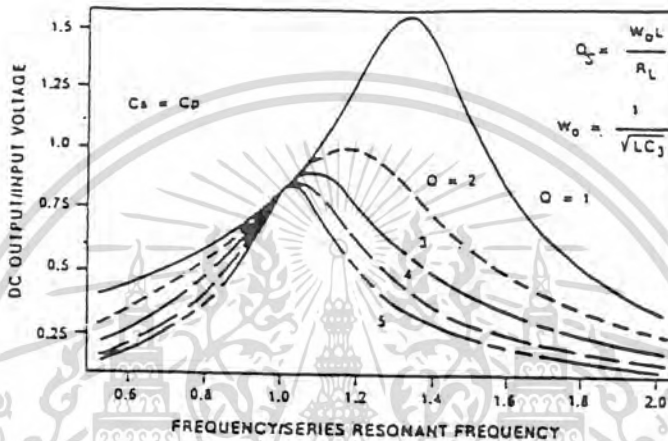
$$\frac{E_o}{E_d} = \frac{1}{\left[\left(\frac{\pi^2}{8} \right) \left[1 + \frac{C_p}{C_s} - \omega^2 L C_p \right] + j Q_s \left(\frac{\omega}{\omega_s} - \frac{\omega_s}{\omega} \right) \right]} \quad (2.42)$$

กรณี $C_s = C_p$ จะได้

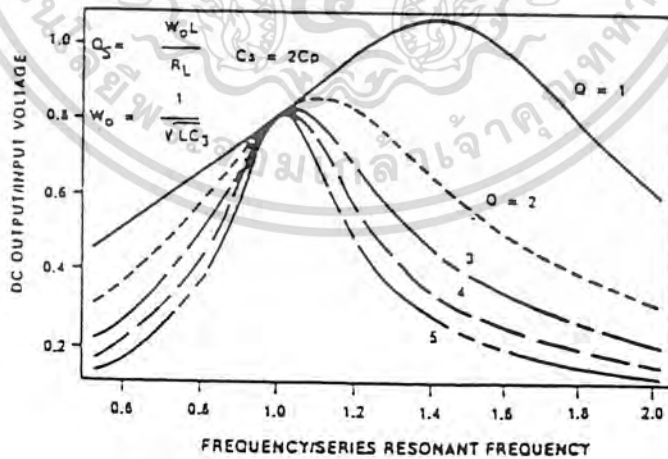
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{E_o}{E_d} = \frac{1}{\left[\left(\frac{\pi^2}{8} \right) \left[2 - \left(\frac{\omega}{\omega_s} \right)^2 \right] + jQ_s \left(\frac{\omega}{\omega_s} - \frac{\omega_s}{\omega} \right) \right]} \quad (2.43)$$

จากสมการ (2.43) เมื่อนำไปคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านออกต่อแรงดันด้านเข้าสำหรับความถี่ต่างๆ เมื่อ Q มีค่าระหว่าง 1 ถึง 5 จะได้กราฟดังรูป 2.18



รูปที่ 2.18 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับ ชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม - ขนานโหลดเมื่อ $C_s = C_p$



รูปที่ 2.19 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับ ชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม - ขนานโหลดเมื่อ $C_s = 2C_p$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณี $C_s = 2C_p$ จะได้

$$\frac{E_o}{E_d} = \frac{1}{\left[\left(\frac{\pi^2}{16} \right) \left[3 - \left(\frac{\omega}{\omega_s} \right)^2 \right] + jQ_s \left(\frac{\omega}{\omega_s} - \frac{\omega_s}{\omega} \right) \right]} \quad (2.44)$$

จากสมการ (2.44) เมื่อนำไปคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาออกต่อแรงดันขาเข้าสำหรับความถี่ค่าต่างๆเมื่อ Q มีค่าระหว่าง 1 ถึง 5 จะได้กราฟดังรูป 2.19

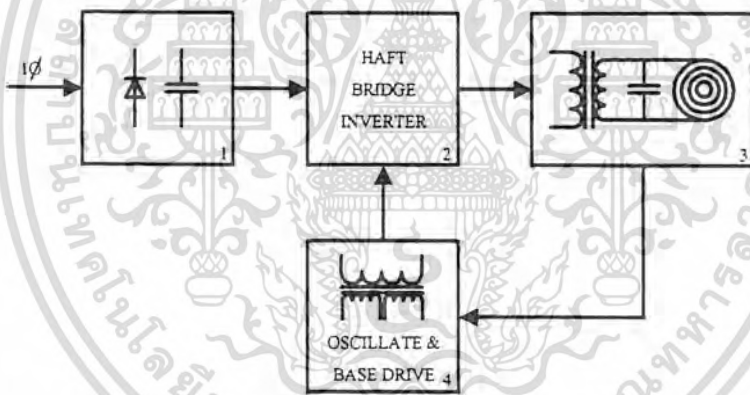
จากวงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับแบบเรโซแนนซ์ที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าวงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบขนานโหลด และวงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับแบบอนุกรม - ขนานโหลด มีข้อเสียที่ในขณะที่ไม่ต่อโหลดจะมีกระแสไหลผ่านสวิตช์และองค์ประกอบที่ทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ เป็นผลทำให้เกิดกำลังสูญเสียในขณะที่ไม่ต่อโหลด จึงไม่เหมาะที่จะใช้กับงานให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงเลือกวงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมโหลด ที่มีข้อดีในแง่ไม่เกิดกระแสไหลในวงจรขณะไม่ต่อโหลดและเมื่อใช้ภาคควบคุมการทำงานของสวิตช์เป็นแบบออสซิลเลตด้วยตัวเองทำให้วงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟสลับชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมโหลดหยุดทำงาน ขณะไม่มีโหลดและจะเริ่มทำงานใหม่ขณะมีโหลดซึ่งเหมาะที่จะใช้เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับเครื่องให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและสร้างเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ได้พัฒนาและวิจัยขึ้นนี้ จัดว่าเป็นประเภทที่สร้างไฟฟ้ากระแสสลับด้วยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโดยมีวงจรอินเวอร์เตอร์เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (Voltage Source Inverter) ซึ่งมีความถี่สูงประมาณ 20 กิโลเฮิร์ตซ์จ่ายให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ใช้ได้แก่ทรานซิสเตอร์กำลังแบบไบโพลาร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ (Device) กำลังขนาดใหญ่ที่หาได้ง่าย ราคาถูก และทนพิกัดทั้งกระแสและแรงดันได้สูงแต่ต้องใช้การขับน้ำที่ยุ่งยาก โดยเฉพาะถ้าต้องพยายามขับน้ำให้ทำงานที่ความถี่สูงเพื่อให้ใช้กับงานให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและสร้างเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ โดยแยกอธิบายส่วนประกอบของเครื่องแต่ละส่วน ซึ่งส่วนประกอบของเครื่องให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำนี้แบ่งตามหน้าที่และความสำคัญได้ 4 ส่วน ดังแสดงในบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.1

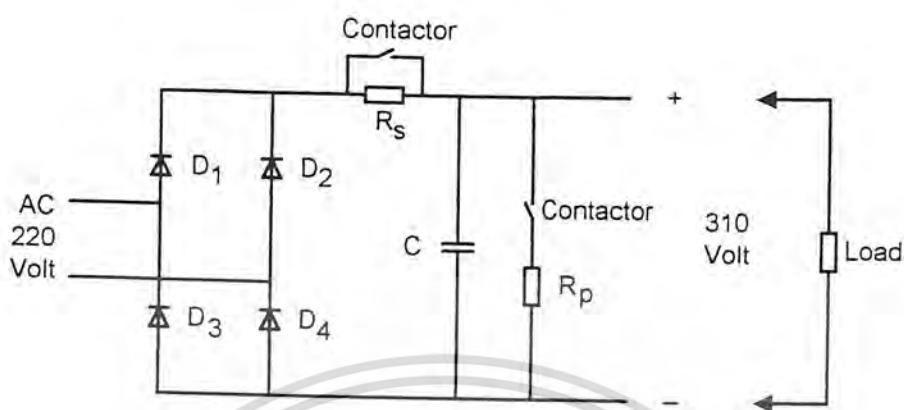


รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบของเครื่องให้ความร้อน โดยการเหนี่ยวนำ

3.1 แหล่งจ่ายไฟตรง

ภาคนี้แสดงไว้ในบล็อกที่ 1 ของรูปที่ 3.1 วงจรนี้จะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังให้แก่เครื่องให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ โดยจะรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสขนาดแรงดัน 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ผ่านวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์และวงจรกรองที่ใช้ตัวเก็บประจุ ทำให้ได้ค่าแรงดันไฟตรงประมาณ 310 โวลต์ วงจรส่วนนี้แสดงรายละเอียดไว้ในรูปที่ 3.2 และจากรูปที่ 3.2 ความต้านทานที่ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ จะมีหน้าที่จำกัดกระแสเมื่อเริ่มทำงาน เพราะในช่วงเวลานี้ แรงดันที่ตัวเก็บประจุยังมีค่าประมาณศูนย์โวลต์ทำให้กระแสที่ไหลอัดประจุให้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ตัวเก็บประจุมีค่าค่อนข้างสูง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์และวงจรกรอง

ซึ่งกระแสจำนวนนี้จะไหลผ่านไดโอดของวงจรเรียงกระแส อันอาจทำให้ไดโอดเสียหายได้ เมื่อแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเพิ่มขึ้นถึงระดับที่เหมาะสมแล้ว ตัวต้านทานนี้จะถูกตัดวงจรด้วยแมกเนติกคอนแทกเตอร์ เพื่อไม่ให้เกิดกำลังสูญเสียที่ R_s ขณะที่วงจรทำงาน และวงจรเรียงกระแสจะได้ส่งผ่านกำลังเต็มที่ ส่วนค่าความต้านทานที่ต่อขนานกับตัวเก็บประจุมีหน้าที่คายประจุทิ้งไปเมื่อวงจรหยุดทำงาน เพื่อป้องกันมิให้เกิดอันตรายเนื่องจากประจุที่ค้างอยู่ ทั้งนี้เพราะประจุที่ค้างอยู่มีปริมาณมากและมีแรงดันสูง รายละเอียดเกี่ยวกับการออกแบบค่าต่างๆ ในภาคเรียงกระแสนี้จะกล่าวถึงเป็นหัวข้อถัดไป

การออกแบบค่าอุปกรณ์ของวงจรเรียงกระแสและวงจรกรองประกอบด้วยการออกแบบค่าและพิกัดของตัวเก็บประจุของวงจรกรอง ไดโอดกำลังขาเข้า ความต้านทานอนุกรมที่ใช้จำกัดกระแสขณะเริ่มเปิดเครื่อง และความต้านทานขนานที่ใช้ในการคายประจุเมื่อตอนปิดเครื่อง โดยกล่าวรายละเอียดดังต่อไปนี้

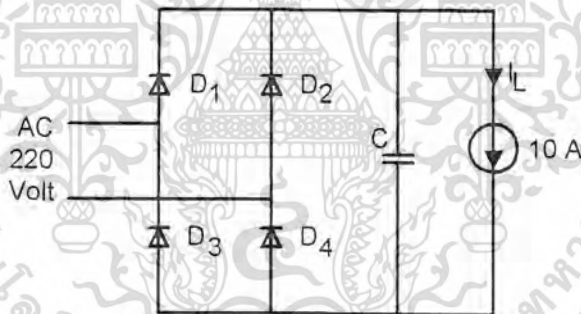
3.1.1 การออกแบบค่าและพิกัดของตัวเก็บประจุในวงจรกรอง

ในการออกแบบเบื้องต้นจะเป็นการเลือกค่าตัวเก็บประจุโดยอาศัยกราฟของ O.H.-Schade (The Voltage Regulator Handbook Texas Instruments, 1977) โดยดูจากภาคผนวก การออกแบบค่าของตัวเก็บประจุในวงจรกรองนี้จะต้องรู้ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงจ่ายกำลังและอิมพีแดนซ์ของสายป้อนแรงดัน ในที่นี้ประมาณว่าหม้อแปลงจ่ายกำลังของการไฟฟ้ามีขนาด 250 กิโลโวลต์แอมแปร์ ซึ่งจะมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ $8.23 + j24.2$ มิลลิโอห์ม และประมาณว่าสายป้อนมีขนาด 6 มิลลิเมตร ยาว 50 เมตรซึ่งจะมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ $150 + j4.8$ มิลลิโอห์ม ข้อกำหนดในการออกแบบวงจรเรียงกระแสมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
- แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านขาเข้า 220 โวลต์ 1 เฟส
ไม่จำกัดใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

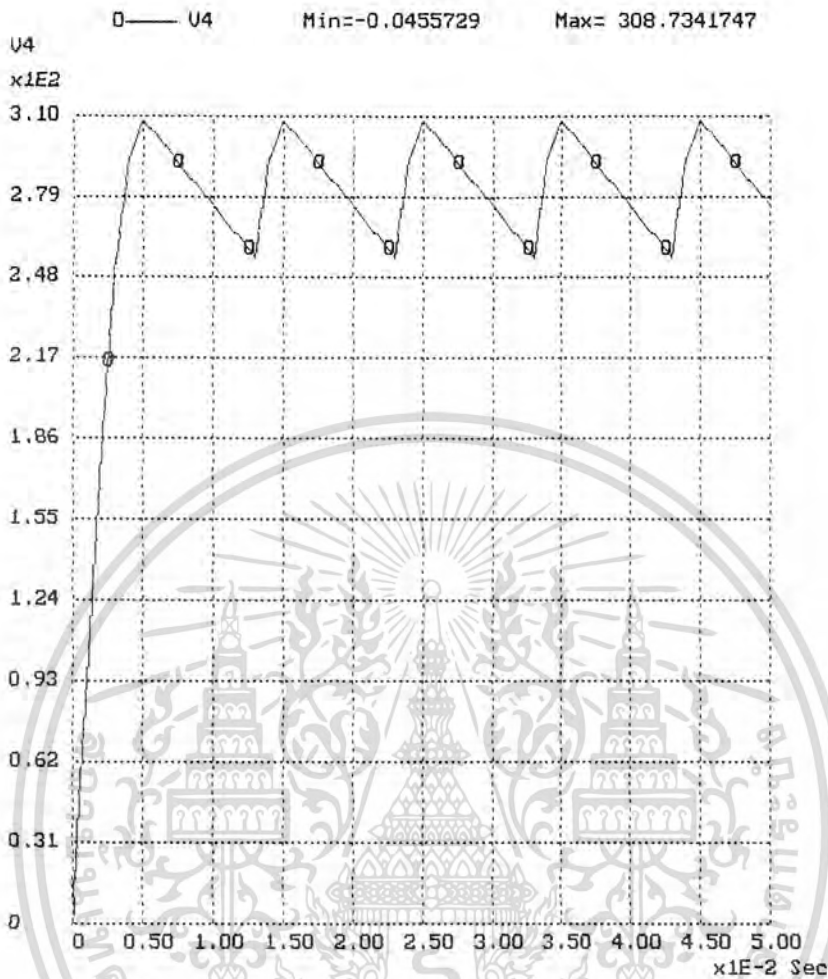
- ค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟตรงต่อค่าสูงสุดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับค่าน่าเข้ามีค่าระหว่าง 90 – 95 เปอร์เซ็นต์
- การกระเพื่อมของแรงดันไฟตรงมีค่ายอดถึงค่ายอดประมาณ 10 – 15 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟตรงเฉลี่ย
- กำลังขาออกของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ 1 กิโลวัตต์
- ประมาณค่าประสิทธิภาพของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำเท่ากับ 80 เปอร์เซ็นต์

จากข้อกำหนดในการออกแบบดังกล่าวข้างต้นได้มีการออกแบบค่าตัวเก็บประจุโดยอาศัยกราฟของ O.H. Schade ได้ค่าตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ 1750 ไมโครฟารัด ในทางปฏิบัติเลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาด 1500 ไมโครฟารัด ชนิดอิเล็กโทรไลติก (electrolytic) ทนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ 450 โวลต์ ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่มีจำหน่าย เมื่อนำตัวเก็บประจุค่า 1500 ไมโครฟารัดและข้อกำหนดต่างๆของวงจรไปวิเคราะห์วงจรตามรูปที่ 3.3 ด้วยคอมพิวเตอร์ โดยได้ผลการวิเคราะห์วงจรดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 วงจรเรียงกระแสที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



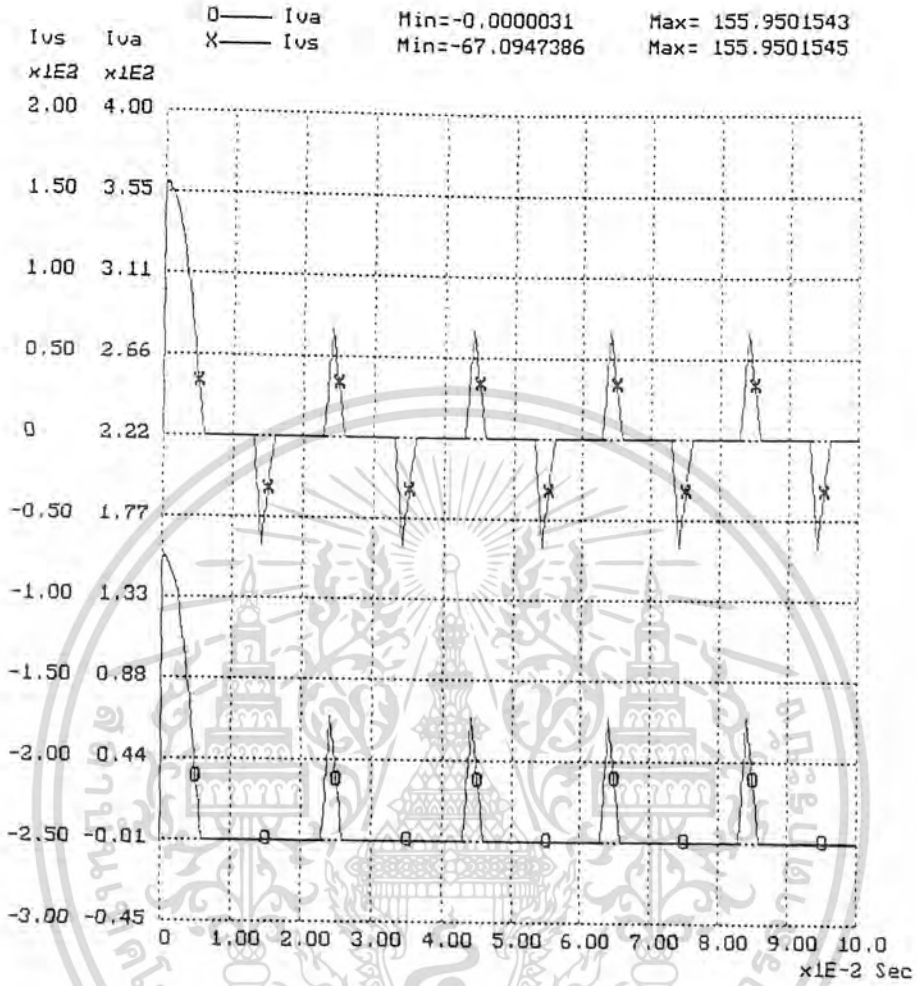
รูปที่ 3.4 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจากการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์

จากรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าระหว่าง 255 โวลต์และ 309 โวลต์ โดยมีแรงดันไฟตรงเฉลี่ย เท่ากับ 282 โวลต์ คิดเป็น 90 เปอร์เซ็นต์ของส่วนแรงดันคายอด และแรงดันกระแสเฟืองเท่ากับ 54 โวลต์ คิดเป็น 17 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟตรง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าแรงดันไฟตรงเฉลี่ยและแรงดันกระแสเฟืองมีค่าใกล้เคียงกับการออกแบบโดยอาศัยกราฟของ O.H. Schade และอยู่ในพิสัยที่ออกแบบไว้โดยมีแรงดันไฟตรงเฉลี่ยจะค่อนข้างสูงและแรงดันกระแสเฟืองค่อนข้างสูง เนื่องจากได้เลือกค่าตัวเก็บประจุที่มีขนาดน้อยกว่าค่าที่ออกแบบไว้

3.1.2 การเลือกพิสัยของไดโอดกำลังขาเข้า

รูปที่ 3.5 แสดงรูปคลื่นของกระแสผ่านไดโอดกำลังและกระแสสลับด้านเข้าที่เป็นผลมาจากการวิเคราะห์ห้วงจรด้วยคอมพิวเตอร์จากรูปคลื่นของกระแสที่ผ่านไดโอด จะสามารถคำนวณ

หากระแสแอมป์เอมที่ไหลผ่านไดโอดแต่ละตัว โดยประมาณกระแสเป็นรูปคลื่นไซน์ครึ่งรอบ ค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า กระแสแอมป์เอมจะคำนวณได้จากสมการที่ 3.1
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ออกกฎหมายให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 กระแสในไดโอดและกระแสลัดด้านเข้า

$$I_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_{peak} \sqrt{\frac{t}{T}} \tag{3.1}$$

จากรูปคลื่นของกระแสในไดโอด ค่ากระแสยอด (I_{peak}) เท่ากับ 65 แอมแปร์ ช่วงเวลาที่นำกระแส (t) เท่ากับ 2.1 มิลลิวินาที คาบเวลารูปคลื่นกระแส (T) เท่ากับ 20 มิลลิวินาที จากสมการ (3.1) ได้ค่ากระแสอาร์เอ็มเอสเท่ากับ 15 แอมแปร์ ส่วนค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสลัดด้านเข้านั้นจะคำนวณจากสมการ (3.1) โดยใช้คาบเวลาเท่ากับ $T/2$ จะได้ค่าอาร์เอ็มเอสเท่ากับ 21 แอมแปร์

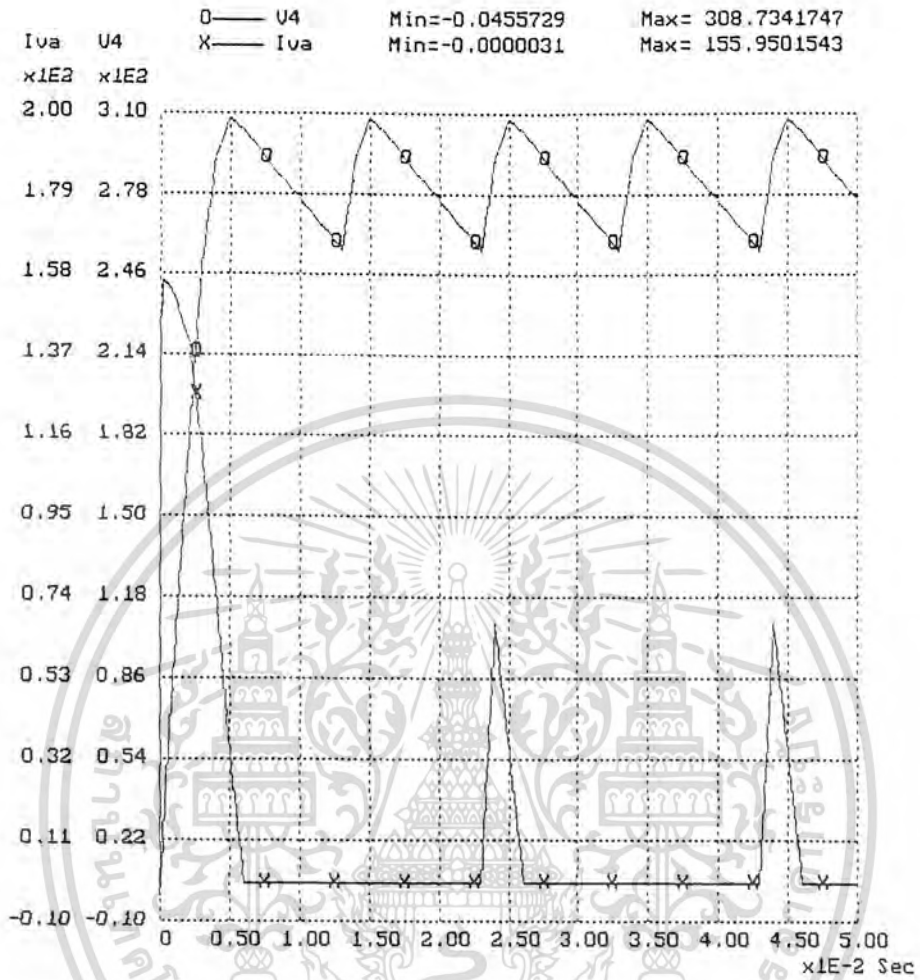
โดยทั่วไปการกำหนดพิคคของไดโอดจะเป็นการกำหนดพิคคที่ 25 องศาเซลเซียส แต่การเลือกพิคคใช้งานต้องคำนึงถึงอุณหภูมิขณะทำงาน ในการออกแบบได้มีการประเมินอุณหภูมิที่ตัวถังขณะทำงาน เมื่อมีแผ่นระบายความร้อนให้ตัวถังของไดโอดมีอุณหภูมิไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส และประเมินอุณหภูมิห้องมีค่าไม่เกิน 45 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณา Thermal

derating factor ของสารกึ่งตัวนำ พิกคของกระแสไดโอดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จะลดลงไม่มากนักใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหลือประมาณ 0.7 เท่าของพิกัด เมื่ออุณหภูมิที่ตัวถังเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส เท่ากับ 21 แอมแปร์ และเมื่อคำนึงถึงการ overload ประมาณ 1.5 เท่า กับค่า safety factor ประมาณ 1.5 เท่าจะต้องใช้ ไคโอดที่มีพิกัดของกระแสที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเท่ากับ 47 แอมแปร์

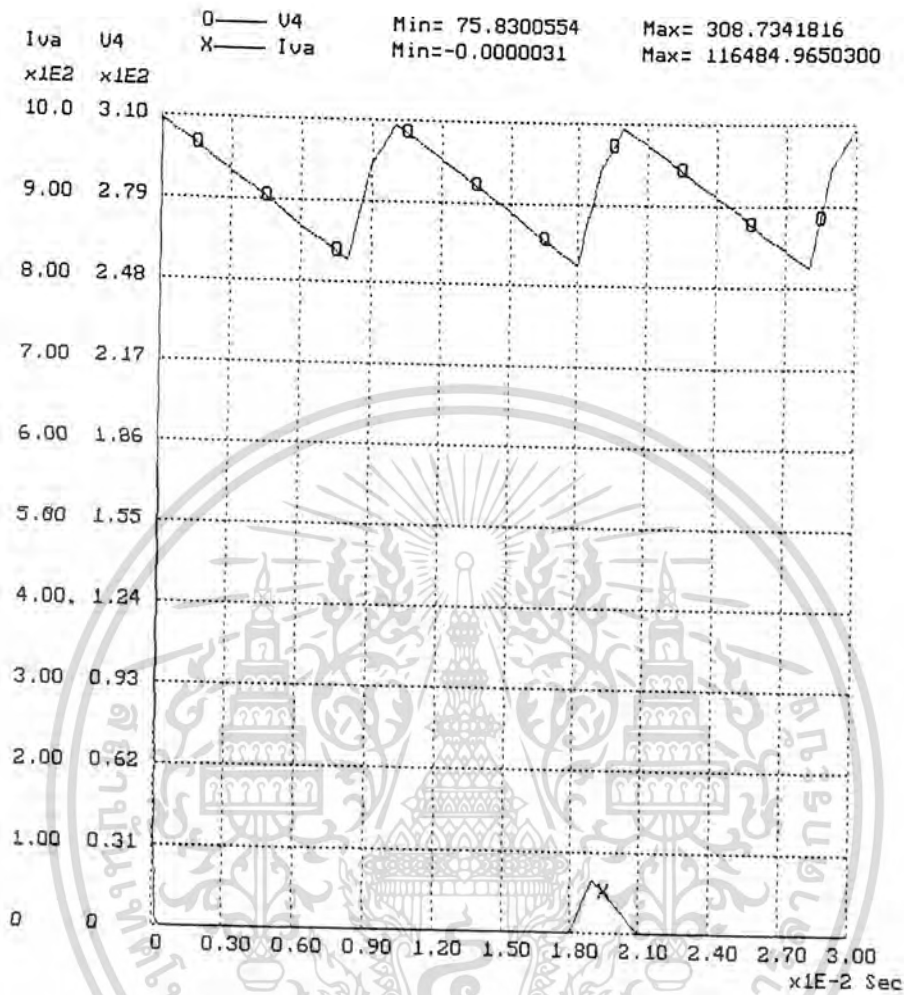
แต่อย่างไรก็ตาม ไคโอดที่มีพิกัดของกระแส 47 แอมแปร์ ไม่เป็นค่าที่มีจำหน่ายจึงเลือก ไคโอดที่มีพิกัดกระแสต่ำสุดที่สุดที่มีจำหน่ายโดยมีค่าสูงกว่า 47 แอมแปร์ โดยเลือกใช้ไคโอดที่มี พิกัดของกระแสอาร์เอ็มเอสเมื่ออุณหภูมิห้องของตัวถัง 25 องศาเซลเซียส มีค่าประมาณ 50 แอมแปร์ ซึ่งสามารถทนค่ายอดของกระแส (I_{peak}) ในช่วงเวลาหนึ่งไซเกิลได้ 500 แอมแปร์ ส่วน พิกัดแรงดันของไคโอดจะเลือกให้ทนต่อทั้งแรงดันภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัวประมาณ 1.5 เท่า จึงเลือกใช้ไคโอดที่มีพิกัดแรงดัน 400 โวลต์ ในรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7 แสดงรูปคลื่นของกระแสใน ตอนเริ่มเปิดเครื่องที่ได้จากการวิเคราะห์วงจรด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้กระแสสลับด้านเข้าเป็นรูป คลื่นไซน์และรูปคลื่น โคไซน์ จะเห็นได้ว่าค่ายอด กระแสในตอนเริ่มเปิดเครื่อง เมื่อแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับด้านเข้ามีรูปคลื่นเป็นไซน์มีค่ายอดของกระแสประมาณ 155 แอมแปร์ ซึ่งไม่เกินพิกัด ของไคโอดที่ออกแบบไว้ แต่ในกรณีแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้ามีรูปคลื่นเป็น โคไซน์ ค่ายอด ของกระแสในตอนเริ่มเปิดเครื่องมีค่าสูงมาก ซึ่งมีค่าสูงกว่าพิกัดของ ไคโอดที่ใช้งาน ดังนั้นเพื่อที่จะ จำกัดค่ายอดจะต้องใช้ค่าความต้านทาน R_s ค่อนนุกรมก่อนเข้าตัวเก็บประจุ เพื่อจำกัดค่ายอดกระแส ในช่วงแรกในตอนเริ่มเปิดเครื่องไม่ให้เกินพิกัดของกระแส ไคโอดที่เลือกใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสผ่าน ไดโอดในคอนเริ่มเปิดเครื่องเมื่อแรงดันไฟสลับด้านเข้าเป็นรูปคลื่นไซน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสผ่านไดโอดในตอนเริ่มเปิดเครื่องเมื่อแรงดันไฟสลับด้านเข้าเป็นรูปคลื่น โคไซน์

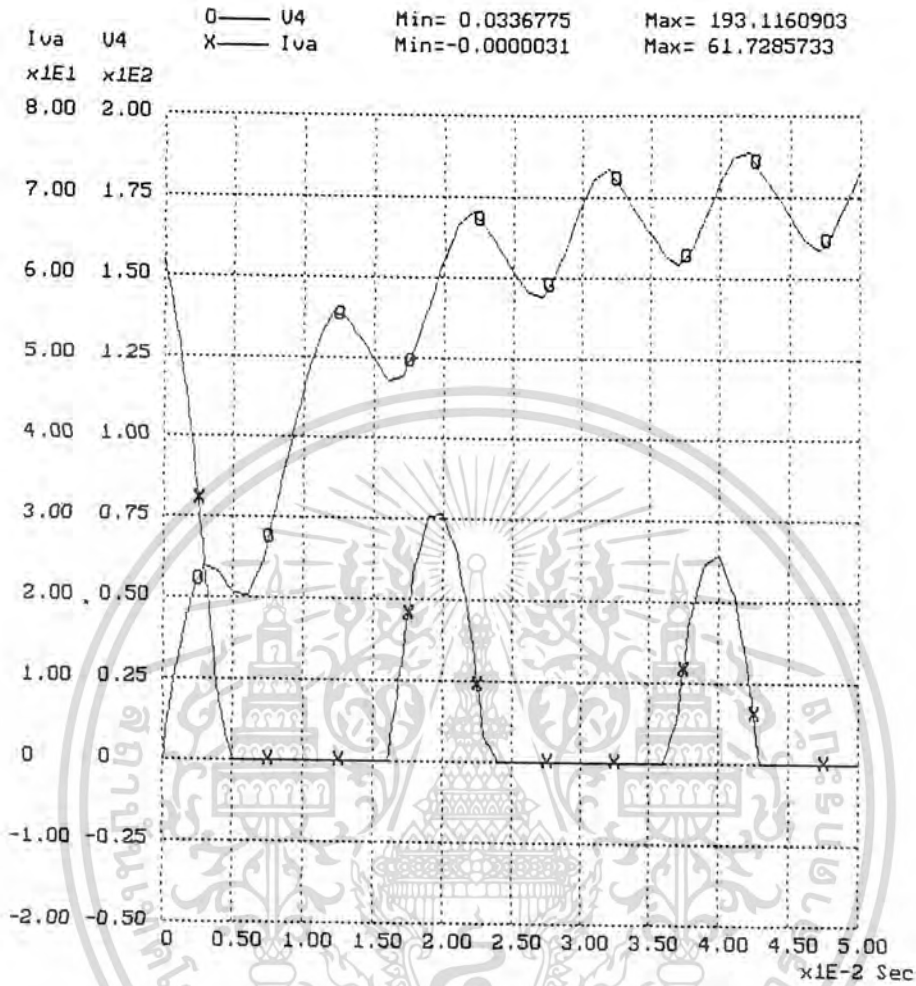
3.1.3 การเลือกความต้านทานอนุกรมที่ใช้จำกัดกระแสอัดประจุขณะเริ่มเปิดเครื่อง

ในการเลือกพิกัดของตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมเพื่อจำกัดกระแสในตอนเริ่มเปิดเครื่องเมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้าเป็นรูปคลื่น โคไซน์ จะใช้วิธีการประมาณค่าเบื้องต้นและวิเคราะห์วงจรโดยใช้คอมพิวเตอร์แล้วปรับค่าจนกระทั่งกระแสในตอนเริ่มเปิดเครื่องมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของพิกัดกระแสชั่วขณะสูงสุด (I_{peak}) ของไดโอดที่เลือกใช้ปรากฏว่าต้องใช้ค่าความต้านทานประมาณ 5 โอห์ม ซึ่งจะทำให้ได้ค่ายอดของกระแสประมาณ 65 แอมแปร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 สำหรับพิกัดกำลังของความต้านทานนั้น เนื่องจากไม่สามารถค้นพิกัดกำลังในสภาวะชั่วคราวของความต้านทานได้ ดังนั้นจึงได้ทดลองใช้ความต้านทานที่มีพิกัดกำลังในภาวะอยู่ตัว 100 วัตต์

โดยใช้ตัวต้านทานขนาด 50 โอห์ม ขนาด 10 วัตต์ต่อขนานกัน ซึ่งสามารถรับกำลังในสภาวะชั่วคราว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่เป็นการค้า
ภายใต้ลิขสิทธิ์ได้ถึงประมาณ 500 เท่าของภาวะอยู่ตัว

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ผลและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสผ่านไดโอดในคอนเริ่มเปิดเครื่องเมื่อมีความต้านทานจำกัดกระแสและแรงดันไฟสถับด้านเข้าเป็นรูปคลื่นโคไซน์

3.1.4 ความต้านทานขนาดที่ใช้ในการคายประจุเมื่อคอนปิดเครื่อง

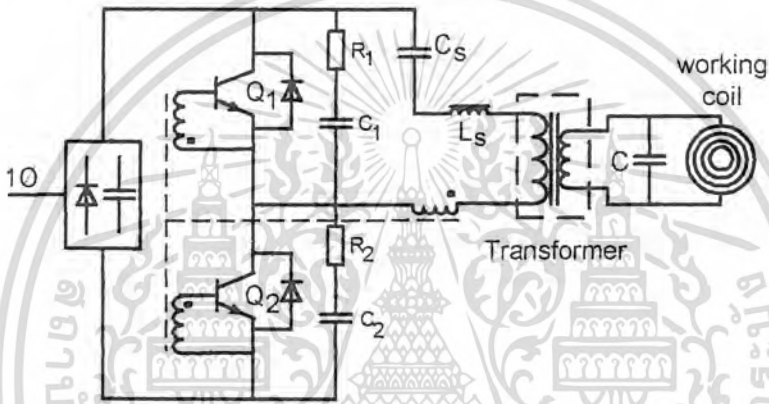
การคำนวณหาค่าความต้านทานที่ใช้ในการคายประจุตามมาตรฐานของ วสท. 408 กำหนดให้ตัวเก็บประจุที่ใช้กับแรงดันไม่เกิน 600 โวลต์ จะต้องมีค่าความต้านทานต่ออยู่เพื่อช่วยให้ตัวเก็บประจุคายประจุให้แรงดันเหลือ 50 โวลต์ ภายในเวลา 1 นาที ค่าความต้านทานในการคายประจุหาได้จากสมการที่ 3.2

$$e_c = 1.1 V_{DC} e^{-\frac{60}{RC}} \tag{3.2}$$

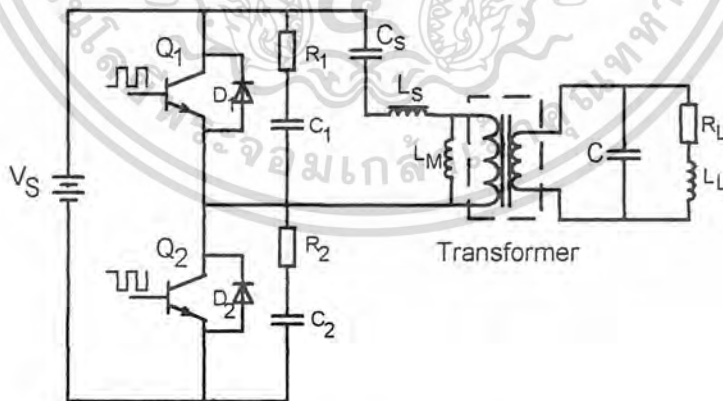
เมื่อ $V_{DC} = 310$ โวลต์ $e_c = 50$ โวลต์ $C = 1500$ ไมโครฟาร์ัด จากข้อกำหนดข้างต้นจะได้ค่าความต้านทานที่ใช้ในการคายประจุประมาณเท่ากับ 27 กิโลโอห์ม และกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นใน ตัวต้านทานในการคายประจุเท่ากับ 10 วัตต์ เลือกใช้ความต้านทานในการคายประจุ 27 กิโลโอห์ม ไม่นาน 10 วัตต์ ล้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง

ภาคนี้ได้แสดงไว้ในบล็อกที่ 2 ของรูปที่ 3.1 วงจรนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนไฟตรงที่รับมาจากแหล่งจ่ายไฟตรงให้เป็นไฟสลับที่มีความถี่สูงประมาณ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (Voltage Source Inverter) ให้กับขดลวดเหนี่ยวนำโดยผ่านหม้อแปลงความถี่สูง วงจรที่ใช้ในภาคนี้เป็นวงจรกึ่งบริดจ์ ซึ่งเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์กำลังที่มีรูปแบบการทำงานง่ายไม่ซับซ้อนทำให้มีความเชื่อถือได้สูง ในวงจรนี้จะประกอบไปด้วยสวิทช์ 2 ตัว พร้อมทั้งวงจรสับเบรคแรงดัน ดังรายละเอียดในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์



รูปที่ 3.10 วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.2.1 หลักการทำงานของวงจร

การทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง-ไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงในรูปที่ 3.10 ทราบกันดีว่า Q_1 และ Q_2 ของวงจรอินเวอร์เตอร์จะสลับกันนำกระแส ทำให้แรงดันที่ออกจากร่างงานอินเวอร์เตอร์เป็นรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งมีค่าอยู่ถึงค่ายอดเท่ากับแรงดันไฟตรง (DC Bus) และมี

ความถี่เท่ากับคาบของการทำงานของสวิตช์ การทำงานของวงจรถออินเตอร์แบบเรโซแนนซ์ในภาคแรงดันศูนย์จะเป็นดังนี้

สมมติให้ทรานซิสเตอร์ Q_2 นำกระแสก่อนกระแสจะไหลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า กระแสตรงผ่านตัวเก็บประจุ C_s ผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_s ผ่านหม้อแปลงกำลัง และผ่านทรานซิสเตอร์ Q_2 เมื่อทรานซิสเตอร์ Q_2 นำกระแสได้ระยะหนึ่งเราจะสั่งให้ทรานซิสเตอร์ Q_2 หยุดนำกระแสโดยไม่มีคำสั่งให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 นำกระแส ในขณะที่กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ยังคงไหลในทิศทางเดิม แต่จะถ่ายโอนจากทรานซิสเตอร์ Q_2 ไปยังตัวเก็บประจุ C_2 ทำให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ C_2 เพิ่มสูงขึ้นในขณะที่แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 ลดต่ำลง จนกระทั่งแรงดันที่ขั้วเอาโนดเทียบกับคาโรคของไดโอด D_1 เป็นบวก กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_2 จะถ่ายโอนมาไหลผ่านไดโอด D_1 แทน ในช่วงนี้แรงดันที่ตกคร่อมทรานซิสเตอร์ Q_1 มีค่าเป็นลบน้อยๆจนอาจถือได้ว่าเป็นศูนย์ ทรานซิสเตอร์ Q_1 จะถูกขับนำให้สามารถนำกระแสได้ ก่อนที่กระแสในตัวเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนทิศทาง เมื่อกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเริ่มเปลี่ยนทิศทาง กระแสที่ไหลผ่านไดโอด D_1 จะถ่ายโอนมาไหลผ่านทรานซิสเตอร์ Q_1 ผ่านตัวเก็บประจุ C_s ผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_s ผ่านหม้อแปลงกำลัง จะเห็นได้ว่าการเริ่มนำกระแสของสวิตช์จะเริ่มนำกระแสในขณะที่มีแรงดันประมาณศูนย์ (Zero Voltage Turn on) ตามที่ได้ออกแบบไว้เมื่อทรานซิสเตอร์ Q_1 นำกระแสได้ระยะหนึ่งเราจะสั่งให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 หยุดนำกระแสโดยไม่มีคำสั่งให้ทรานซิสเตอร์ Q_2 นำกระแส ในขณะที่กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ยังคงไหลในทิศทางเดิม แต่จะถ่ายโอนจากทรานซิสเตอร์ Q_1 ไปยังตัวเก็บประจุ C_1 ทำให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 เพิ่มสูงขึ้นในขณะที่แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ C_2 ลดต่ำลง จนกระทั่งแรงดันที่ขั้วเอาโนดเทียบกับคาโรคของไดโอด D_2 เป็นบวก กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_1 จะถ่ายโอนมาไหลผ่านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ผ่านไดโอด D_2 แทน ในช่วงนี้แรงดันที่ตกคร่อมทรานซิสเตอร์ Q_2 มีค่าเป็นลบน้อยๆจนอาจถือได้ว่าเป็นศูนย์ ทรานซิสเตอร์ Q_2 จะถูกขับนำให้สามารถนำกระแสได้ ก่อนที่กระแสในตัวเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนทิศทาง เมื่อกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเริ่มเปลี่ยนทิศทาง กระแสที่ไหลผ่านไดโอด D_2 จะถ่ายโอนมาไหลผ่านทรานซิสเตอร์ Q_2 ผ่านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ผ่านตัวเก็บประจุ C_s ผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_s ผ่านหม้อแปลงกำลัง เมื่อทรานซิสเตอร์ Q_2 นำกระแสได้ระยะหนึ่งเราจะสั่งให้ทรานซิสเตอร์ Q_2 หยุดนำกระแส ต่อจากนั้นจะเริ่มต้นวัฏจักรใหม่ตามที่ได้กล่าวมา

3.2.2 การเลือกสวิตช์ที่ใช้ในวงจรกึ่งบริดจ์

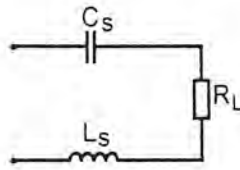
สวิตช์ที่ใช้ในวงจรกึ่งบริดจ์มีด้วยกันหลายประเภท ซึ่งแต่ละประเภทจะมีข้อดีและข้อ

จำกัดแตกต่างกันและเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในงานที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น SCR และ GTO
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่มีการค้า
จะมีข้อดีในแง่ที่สามารถทนแรงดันและกระแสได้สูงและจะควบคุมการตัดวงจรได้ไม่สะดุด และ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำเผยแพร่

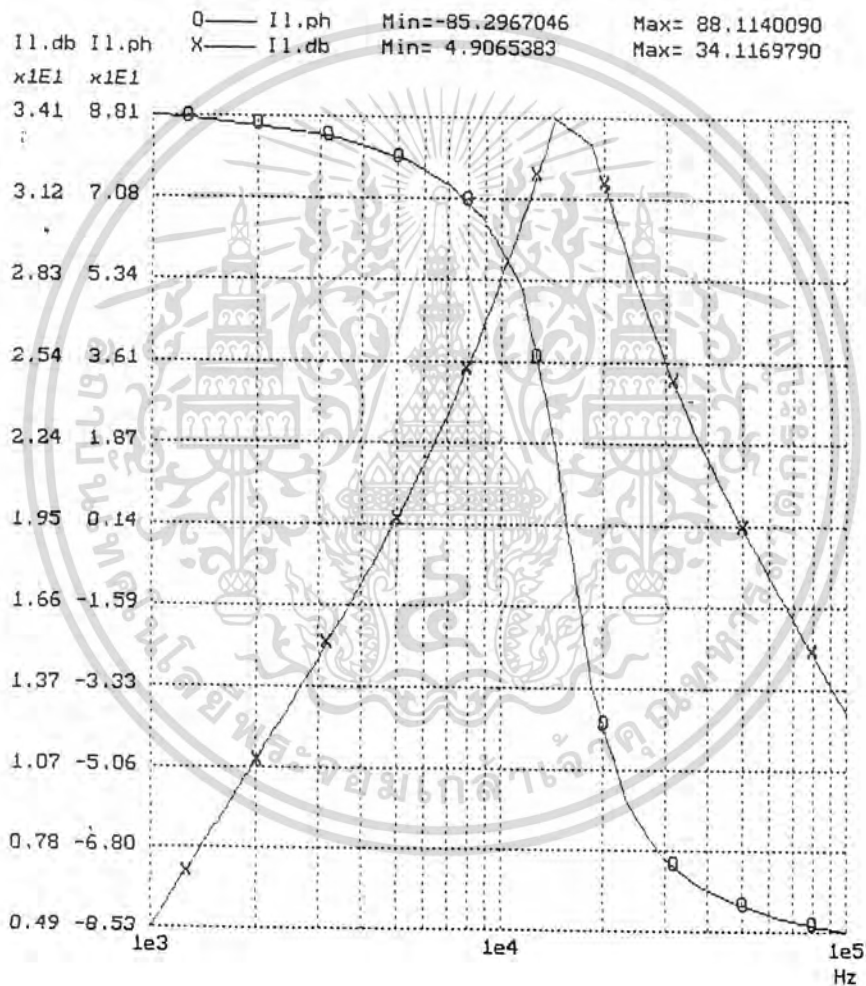
ทำงานได้ในช่วงความถี่ต่ำเท่านั้น คือประมาณไม่เกิน 10 กิโลเฮิร์ตซ์ การประยุกต์ใช้งานจึงมีข้อจำกัดในเรื่องของความถี่ ส่วนทรานซิสเตอร์แบบมอสเฟต (MOSFET) จะมีข้อดีในเรื่องความเร็ว ทำให้สามารถใช้งานได้ในความถี่สูงถึง 200 กิโลเฮิร์ตซ์ และยังคงควบคุมการตัดต่อวงจรหรือขับนำได้ง่าย แต่จะมีข้อจำกัดในเรื่องพิกัดของแรงดันและกระแสที่มีค่าไม่มากทำให้ต้องแก้ปัญหาโดยการใช่มอสเฟตหลายๆตัวมาต่อขนานกัน เพื่อให้จ่ายกระแสได้สูงขึ้น หรือนำมาต่ออนุกรมกันโดยใช่วงจร Tri-State Bridge เพื่อให้รับแรงดันได้สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามวงจรถานอินเวอร์เตอร์ที่ได้ ก็จะมี ความซับซ้อนมากขึ้นด้วย

สำหรับงานวิจัยนี้ วงจรถานอินเวอร์เตอร์ที่ใช้จะมีขนาดกำลังประมาณ 1 กิโลวัตต์ และ วงจรการขับนำจะใช้วงจรถานอสซิลเลตด้วยตัวเองโดยการป้อนกลับของกระแส ถ้าใช้มอสเฟตเป็น สวิตช์จะต้องใช้วงจรถานที่ซับซ้อนมาก และเมื่อทำงานที่ความถี่ประมาณ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ จะเป็นความถี่ ที่สูงเกินไปสำหรับสวิตช์ประเภท GTO หรือ SCR ดังนั้นจึงเลือกใช้ทรานซิสเตอร์กำลังแบบ ไบโพลาร์ซึ่งเป็นสวิตช์ที่หาง่าย ราคาถูก และมีพิกัดด้านแรงดันสูง และกระแสสูง ทำให้ไม่จำเป็นต้องนำทรานซิสเตอร์หลายๆตัวมาต่ออนุกรม หรือต่อขนานกัน เพื่อรับแรงดันหรือกระแส เป็นผล ให้สามารถใช่วงจรถานอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ธรรมดาได้ ทำให้ความซับซ้อนของวงจรถานลดลง และมีความทนทานมากขึ้น สำหรับเรื่องความเร็วในการสวิตช์ ทรานซิสเตอร์กำลังชนิดนี้มีความเร็วในการสวิตช์ได้ไม่เท่ากับของ MOSFET แต่ก็ดีกว่า GTO หรือ SCR กล่าวคือ โดยทั่วไปจะ ใช้งานประมาณไม่เกิน 5 กิโลเฮิร์ตซ์ อย่างไรก็ตามสำหรับงานวิจัยนี้ จะขับนำทรานซิสเตอร์กำลัง แบบไบโพลาร์ที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งต้องอาศัยเทคนิคการขับนำที่ยุ่งยาก ทั้งนี้เพราะ ทรานซิสเตอร์ชนิดนี้มีค่า Turn off Time ที่ยาวถึง 12 ไมโครวินาที ซึ่งมีค่ามากเมื่อเทียบกับครึ่งคาบ ของความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ที่มีค่าเท่ากับ 25 ไมโครวินาที ในการเลือกขนาดพิกัดทั้งกระแสและ แรงดันของทรานซิสเตอร์นี้ จะใช้วิธีการวิเคราะห์โดยการชิมมูลดวงจรในรูปที่ 3.10 ด้วยโปรแกรม วิเคราะห์วงจรไฟฟ้าโดยวงจรทางไฟฟ้าทางด้านโหลดของวงจรถานที่ใช้วิเคราะห์นี้เป็นวงจรสมมูลย์ ของขดลวดแบบมีโหลด ที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ประกอบ กับมีตัวเก็บประจุขดลวดตัวประกอบกำลังและตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุที่ต่อทางด้านอนุกรม ด้านปฐมภูมิที่ออกแบบไว้ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป ค่าที่นำมาวิเคราะห์นี้เป็นค่าที่ย้ายโอนจากทาง ด้านทุติยภูมิมายังด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเรียบร้อยแล้ว โดยใช้อัตราส่วนของหม้อแปลงที่ออกแบบไว้ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป จากรูปที่ 3.11 จะเห็นได้ว่าวงจรถานที่ใช้วิเคราะห์นั้นมีผลการตอบสนอง ความถี่สูงและถ้านำมาวิเคราะห์ผลตอบสนองความถี่โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์วงจรทาง ไฟฟ้าในรูปที่ 3.12 จะเห็นได้ว่าย่านความถี่ที่ตอบสนองได้ดีจะอยู่ในช่วง 10 - 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นต้นการคำ เป็นย่านความถี่ที่กว้าง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



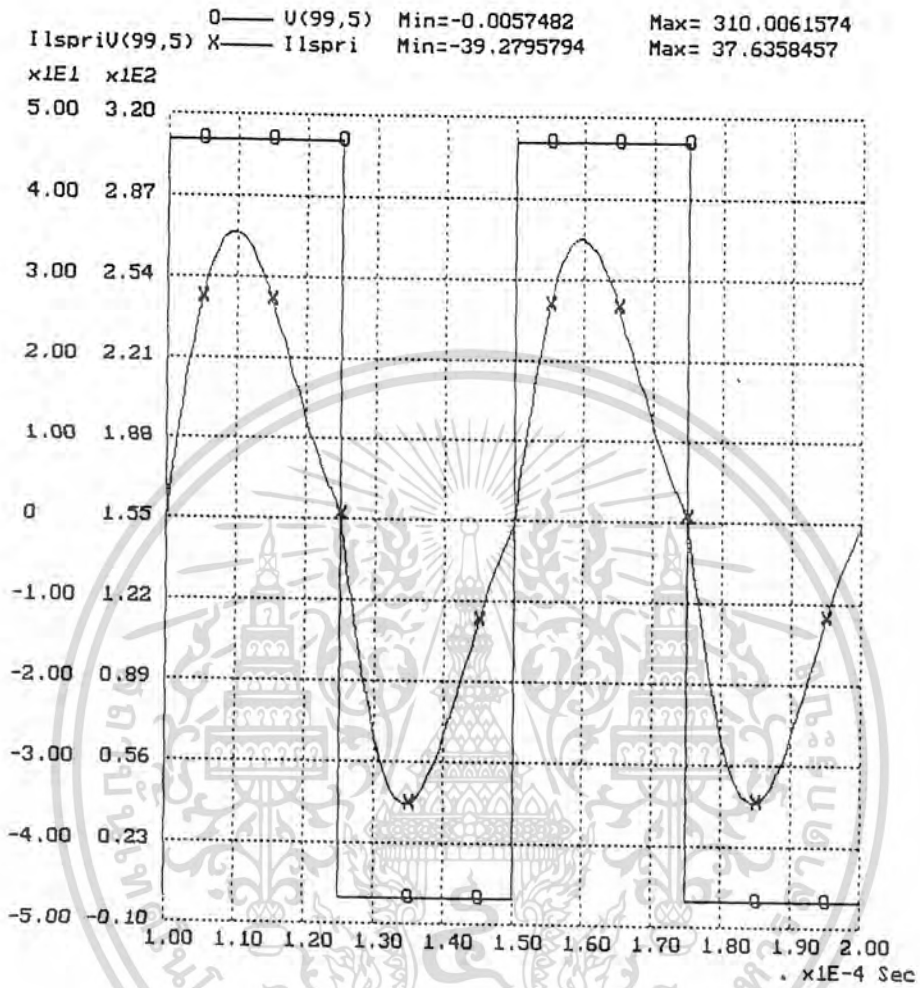
รูปที่ 3.11 รูปวงจรที่ใช้วิเคราะห์ค่าที่ขยายโอนจากทางค้ำนทุติยภูมิมายังค้ำนปฐมภูมิของหม้อแปลง



รูปที่ 3.12 แสดงผลตอบสนองความถี่ที่โหลดที่ต่อกับอินเวอร์เตอร์

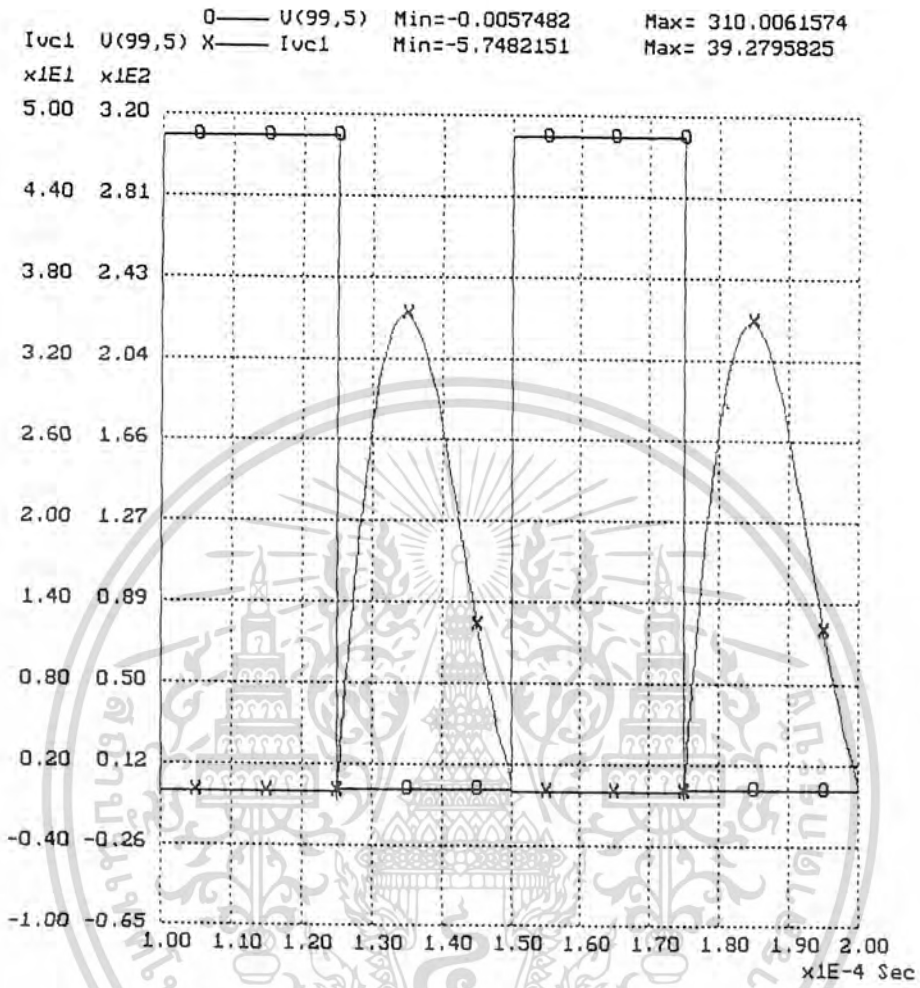
จากรูปที่ 3.13 - 3.19 เป็นผลจากการวิเคราะห์ในรูปวงจรที่ 3.10 โดยผลที่ได้นี้จะนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองในบทต่อไป โดยการวิเคราะห์การทำงานของวงจรด้วยคอมพิวเตอร์จะทำการวิเคราะห์การทำงานในช่วงเวลา 2 วัฏจักร (cycle) การทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



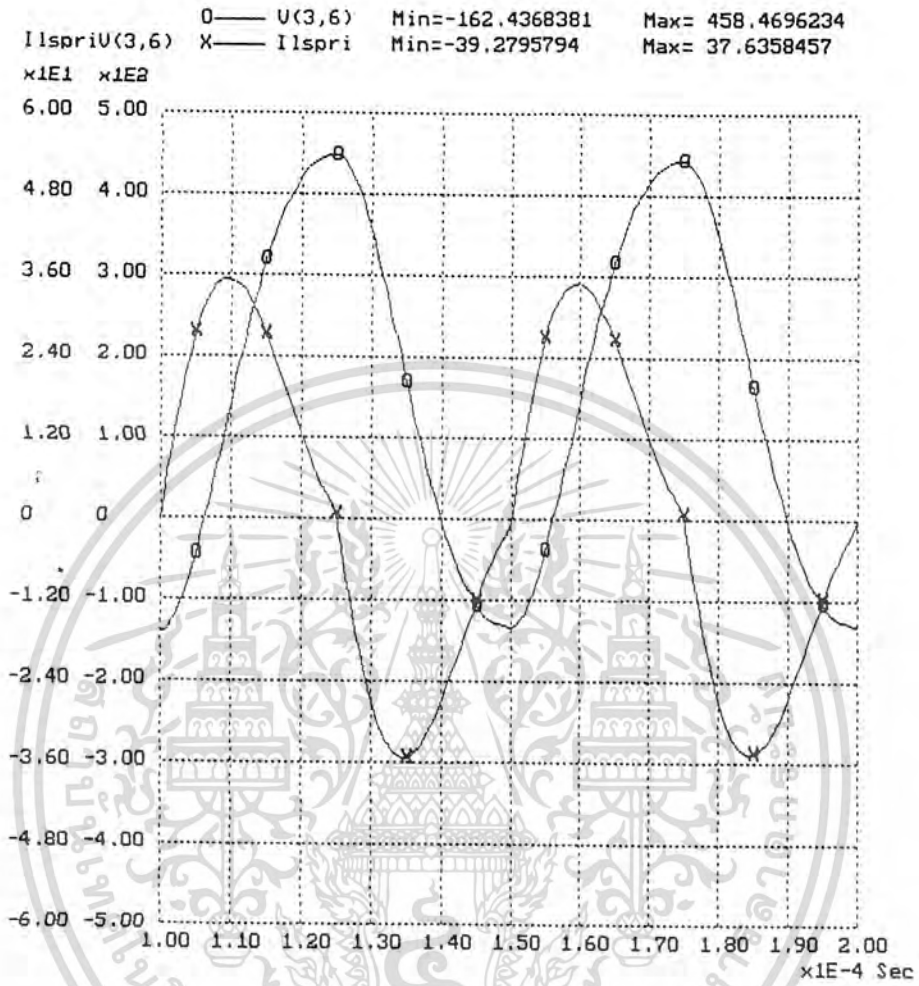
รูปที่ 3.13 แสดงกระแสและแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ที่มีทรานซิสเตอร์กำลังเป็นสวิตช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



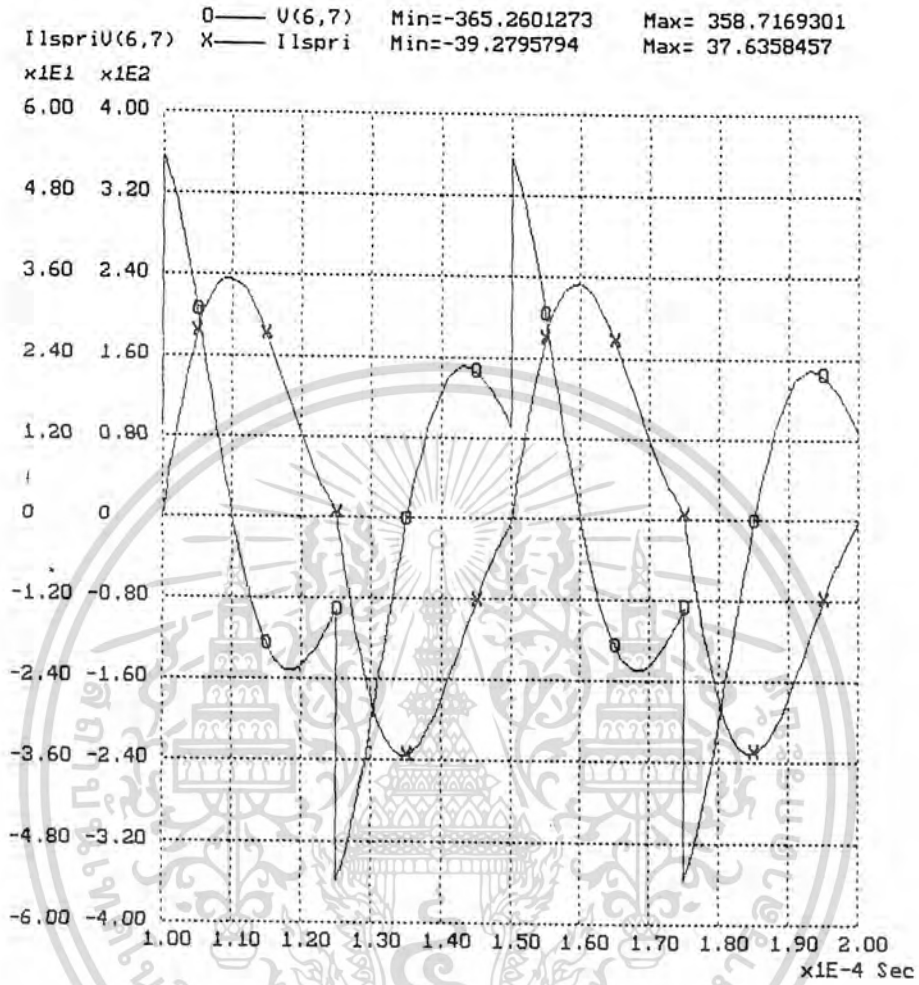
รูปที่ 3.14 แสดงกระแสผ่านทรานซิสเตอร์กำลังและแรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์กำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



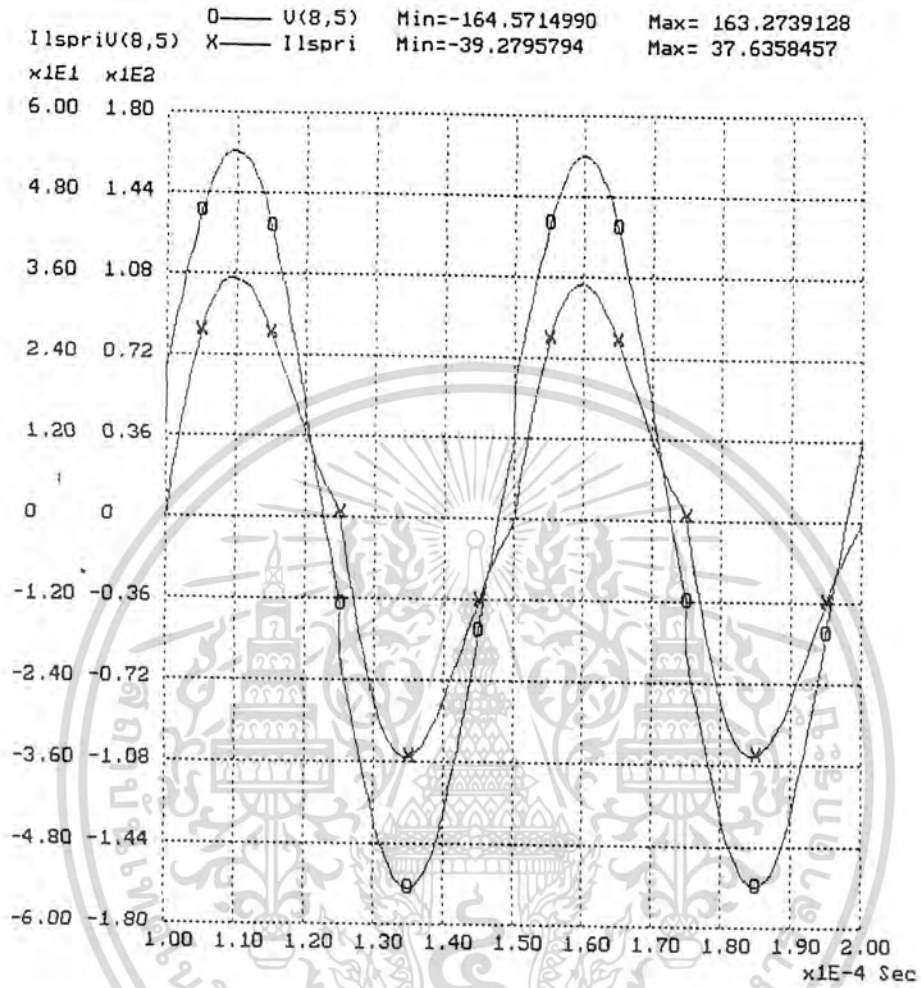
รูปที่ 3.15 แสดงกระแสและแรงดันที่คกคร่อมตัวเก็บประจุ C_s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



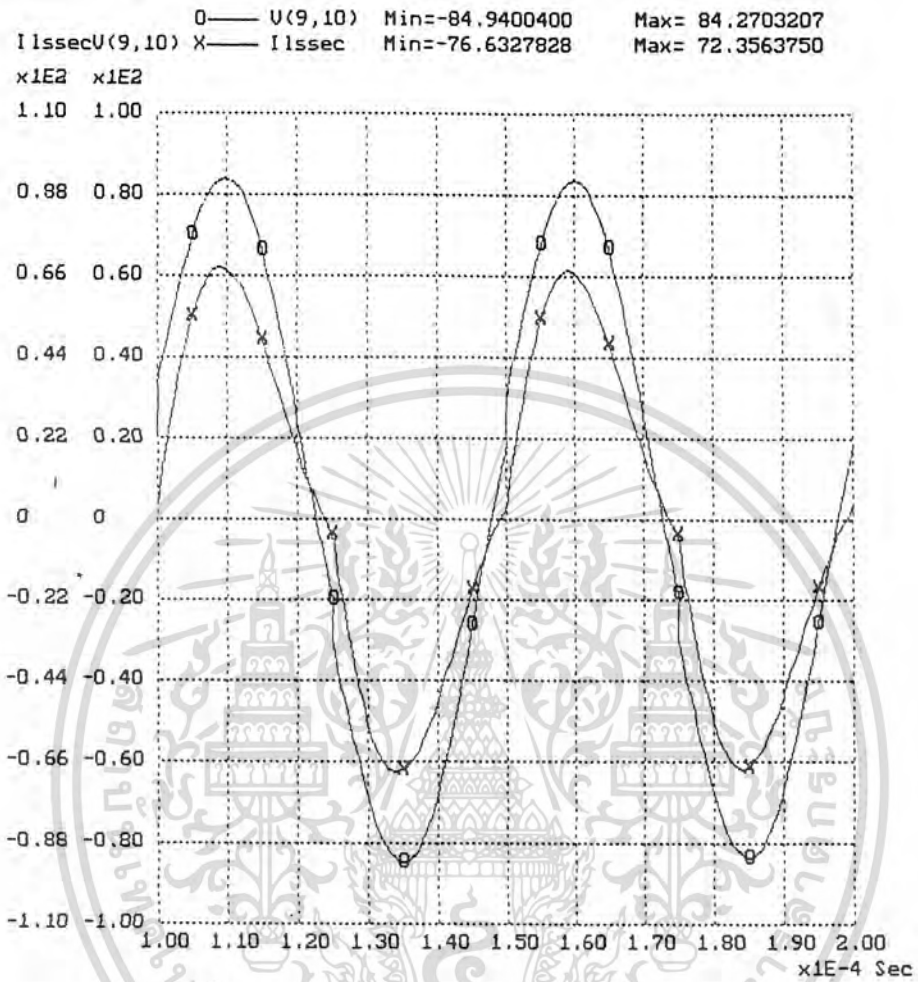
รูปที่ 3.16 แสดงกระแสและแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



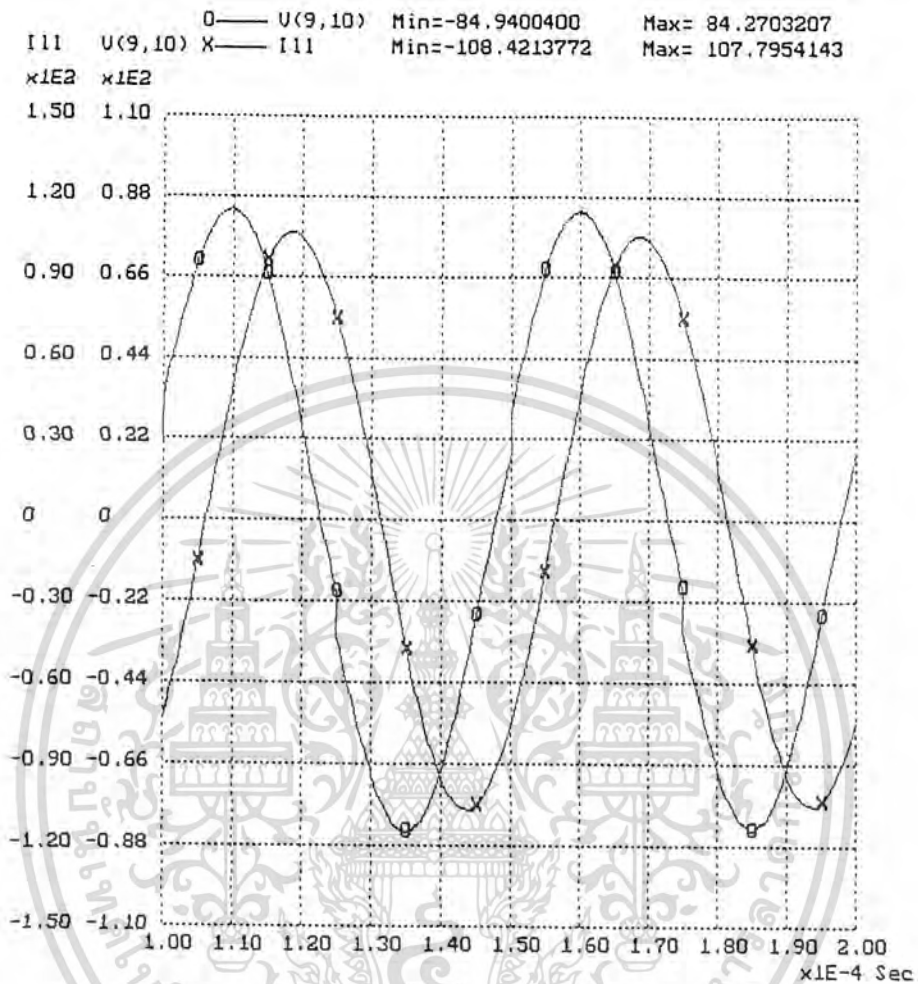
รูปที่ 3.17 แสดงกระแสต้านปฐมภูมิและแรงดันต้านปฐมภูมิของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 แสดงกระแสด้านทุติยภูมิและแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 แสดงกระแสและแรงดันทางด้านโหลด

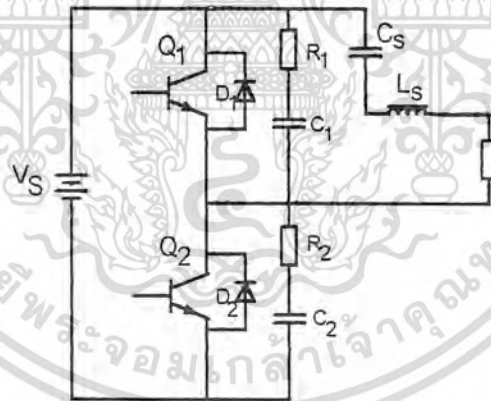
จากผลการซิมูเลตในรูปที่ 3.14 พบว่าค่าขดของกระแสมีค่าเท่ากับ 35 แอมแปร์ ส่วนค่าขดของแรงดันคร่อมสวิตช์มีค่าเท่ากับ 310 โวลต์ จากข้อดีของทรานซิสเตอร์กำลังแบบไบโพลาร์ที่มีพิกัดสูง ทำให้สามารถใช้สวิตช์ตัวเดียวโดยไม่ต้องนำสวิตช์หลายๆตัวมาต่ออนุกรมหรือขนานกัน จึงเลือกใช้ทรานซิสเตอร์ขนาด 50 แอมแปร์ 600 โวลต์ ซึ่งได้คิดเผื่อค่าแรงดันและกระแสไว้ประมาณ 1.5 เท่าแล้ว ทรานซิสเตอร์นี้มีลักษณะของตัวถังเป็นแบบ TO-3 และแต่ละตัวจะติดตั้งไดโอดพื้นตัวเร็วขนาด 30 แอมแปร์ 600 โวลต์ ซึ่งต่อขนานอยู่กับทรานซิสเตอร์กำลังเรียบร้อยแล้ว

3.2.3 วงจร snubber (Snubber Circuit)

จากรูปที่ 3.14 จะเห็นว่ากระแสที่ไหลผ่านสวิตช์และแรงดันที่คร่อมสวิตช์จะมีการ

Cross กัน ในจังหวะการ Turn off ซึ่งส่งผลให้เกิดการสูญเสียในการสวิตช์อย่างมาก ดังนั้นเพื่อลด
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่มีการ
 กำลึงสูญเสียจากสาเหตุนี้ จึงต้องมีวงจร snubber แรงดัน (Shunt Snubber) ซึ่งประกอบด้วย
 ไมวารณได้ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำเผยแพร่

ตัวเก็บประจุ ตัวต้านทานและไดโอด ดังแสดงในรูปที่ 3.20 ตัวเก็บประจุนี้จะมาช่วยหน่วงแรงดันในระหว่างการ Turn off ของทรานซิสเตอร์ให้ขึ้น ช้าเพื่อให้กระแสในการสวิตช์ ตกลงมาก่อนระดับของการ Cross กันของกระแสและแรงดันจึงลดต่ำลง การออกแบบค่าความจุของเก็บประจุและค่าความต้านทาน ทำได้โดยทางทดลองแทนค่าแล้วทำการซิมูเลตด้วยโปรแกรมวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า ซึ่งค่าที่ได้จากการซิมูเลตโดยใช้คอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์นั้น การ Cross กันของกระแสและแรงดันจะลดต่ำลงมาเหลือเพียงเล็กน้อย ตัวเก็บประจุที่ใช้ต่อในวงจรต้องเป็นชนิดที่ใช้กับความถี่สูงอีกทั้งต้องทนแรงดันและกระแสได้ ซึ่งในที่นี้ใช้ตัวเก็บประจุชนิด MKP-10 มีค่าเท่ากับ 0.1 ไมโครฟารัด ส่วนค่าความต้านทานในวงจรสับเบอรันั้นไม่จำเป็นต้องมีก็ได้ เนื่องจากวงจรกึ่งบริดจ์นี้ ถ้าให้ทำงานแบบกระแสต่ำหลังแรงดันแล้วการ Turn on จะเกิดขึ้นขณะที่แรงดันเป็นศูนย์ (Zero Voltage Turn on) ทำให้ไม่มีการคายประจุผ่านสวิตช์โดยตรง อีกทั้งยังเป็นการลดกำลังสูญเสียในการสวิตช์ขณะ Turn on ด้วย แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากโหลดของวงจรอินเวอร์เตอร์นี้มีค่าไม่คงที่เพราะมีการเปลี่ยนแปลงตามสถานะอุณหภูมิของโหลด เป็นผลทำให้บางสถานะของโหลด โดยเฉพาะขณะที่โหลดมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้เกิดการ Turn on ขณะที่แรงดันไม่เป็นศูนย์



รูปที่ 3.20 แสดงวงจรสับเบอรัแรงดันในวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ที่ใช้ในการซิมูเลต ทำให้กระแสที่เกิดจากการคายประจุค่าสูงไหลผ่านสวิตช์ดังนั้นจึงต้องมีความต้านทานนี้ใส่ในวงจรสับเบอรัแรงดันซึ่งจากการทดลองค่าความต้านทานที่เหมาะสมคือค่าที่สามารถจำกัดยอดแหลมของกระแสไม่ให้มีค่าสูง โดยกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นที่ตัวต้านทานนี้มีค่าไม่มากนัก แต่เนื่องจากวงจรอินเวอร์เตอร์ต้องทำงานเป็นระยะเวลาานาน ทำให้ต้องมีการออกแบบกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นที่ตัวต้านทานเผื่อไว้ ซึ่งในที่นี้ใช้ค่า 1 โอห์ม 100 วัตต์ โดยใช้ความต้านทานแบบกำลังไฟฟ้าสูง

(Power Resistor) ขนาด 10 โอห์ม 10 วัตต์ ต่อขนานกันจำนวน 10 ตัว และติดตั้งบนแผ่นระบาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักผู้ใดเห็นใจประโยชน์ในการค้า

ความร้อน ไม่ว่าจะผิดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การควบคุมและภาคับนำเบส

วงจรถูกกำหนดหน้าที่สร้างสัญญาณไปขับนำเบสของทรานซิสเตอร์กำลังทั้งสองตัว ในวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะต้องควบคุมลำดับการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆและจังหวะการทำงานของทรานซิสเตอร์กำลังเพื่อให้ได้รูปคลื่นของแรงดันของอินเวอร์เตอร์ตามต้องการและไม่ทำให้เกิดความเสียหายขึ้นกับอุปกรณ์ของเครื่องให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ ซึ่งวงจรถูกควบคุมจะประกอบ

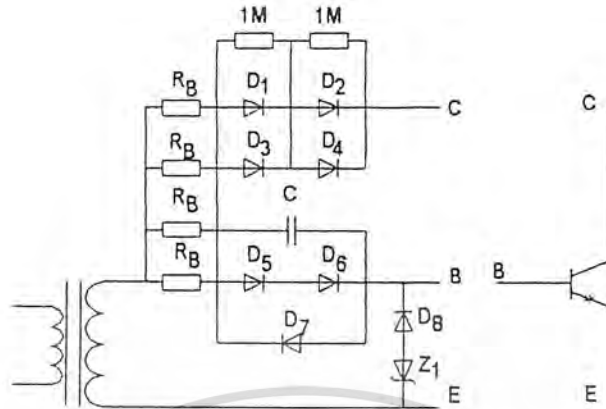
3.3.1 วงจรกำเนิดสัญญาณกำหนดจังหวะการทำงานของวงจรถูก

วงจรถูกกำเนิดสัญญาณกำหนดจังหวะการทำงานของทรานซิสเตอร์กำลังอาจจะได้จากวงจรถูกกำเนิดสัญญาณอิสระ ซึ่งสามารถกำหนดความถี่ได้อย่างอิสระหรืออาจจะได้จากการป้อนกลับของกระแสหรือแรงดันของโหลด วงจรถูกกำเนิดสัญญาณอิสระมีข้อดีในแง่ของความสะดวกในการกำหนดความถี่ ซึ่งจะทำได้ตามความต้องการกำลังออกของอินเวอร์เตอร์ได้ ส่วนการใช้การป้อนกลับของกระแสหรือแรงดันโหลดนั้น จะมีข้อดีในแง่ของความง่ายของวงจรถูกและป้องกันการรบกวนจากสัญญาณภายนอกได้ดีกว่า อันจะเป็นผลดีในแง่ความเชื่อถือได้ของวงจรถูก ดังนั้นจึงได้เลือกใช่วงจรถูกกำเนิดสัญญาณกำหนดจังหวะการทำงานของทรานซิสเตอร์ในเครื่องให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ โดยที่กระแสโหลดจะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ และป้อนให้กับหม้อแปลงของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณกำหนดจังหวะการทำงานของวงจรถูก ซึ่งได้รับจากการป้อนกลับของกระแสโหลดโดยต่อเข้ากับหม้อแปลงขับนำแต่ละตัว ซึ่งขดทางด้านปฐมภูมิจะมีขั้วเหมือนกัน แต่ขดทางด้านทุติยภูมิจะมีขั้วตรงกันข้ามกันเพื่อที่จะขับนำทรานซิสเตอร์ให้สลับกันนำกระแสทั้งนี้จะต้องใช้หม้อแปลงที่มีขนาดเท่ากัน จำนวนรอบทั้งทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเท่ากันทั้งสองตัว เพื่อป้องกันการเกิดความผิดพลาดในการขับนำเบสของทรานซิสเตอร์ อันจะทำให้เกิดการทะลุผ่านในแต่ละกิ่งได้

3.3.2 วงจรขับนำเบสของทรานซิสเตอร์

มีหน้าที่ในการขับนำทรานซิสเตอร์ให้นำกระแสและหยุดนำกระแสได้ตามรูปแบบลำดับการทำงานของสัญญาณที่ได้จากวงจรถูกกำเนิดสัญญาณกำหนดจังหวะการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ในการออกแบบวงจรถูกขับนำนั้นเราพยายามที่จะใช้วงจรถูกที่ง่ายไม่ซับซ้อนเพื่อให้วงจรถูกมีความเชื่อถือได้สูง ดังนั้นจึงออกแบบให้วงจรถูกขับนำเบสของทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวมีการแยกโดด (Isolate) จากกันโดยวงจรถูกแต่ละชุดจะมีลักษณะดังแสดงในรูป 3.21 จะเห็นได้ว่าวงจรถูกขับนำเบสของทรานซิสเตอร์แต่ละชุดจะรับสัญญาณควบคุมจากวงจรถูกกำเนิดสัญญาณแต่ละชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 รูปวงจรขับนำเบสของทรานซิสเตอร์กำลังแบบ BJT

การ Turn off ทรานซิสเตอร์ของวงจรขับนำเบสจะเริ่มทันทีที่แกนเริ่มอิ่มตัวจากการทดลองจะพบว่าช่วง Turn off จะมีแรงดัน ($-V_{BE}$) ประมาณ -8 โวลต์ ให้กับรอยต่อของเบส - อิมิตเตอร์ในขณะที่ทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแสด้วย เมื่อพิจารณาวงจรขับนำเบสจะเห็นได้ว่า ปริมาณ ($-V_{BE}$) ในช่วง Turn off นี้ขึ้นอยู่กับตัวเก็บประจุ (C_2) ไดโอด (D_5) และซีเนอร์ไดโอด (Z_1) ที่ต่ออยู่ เนื่องจากกระแสเบสที่ดึงออกในตอน Turn off นี้คือพาหนะส่วนเกินในรอยต่อเบส และอิมิตเตอร์ ปริมาณนี้จึงแปรผันตามปริมาณกระแสคอลเลกเตอร์ ซึ่งสัมพันธ์อยู่กับกระแสโหลด ดังนั้นในการออกแบบจึงต้องใช้วิธีทดลองแทนค่าโดยการต่อวงจรจริงเพื่อให้ได้เงื่อนไขในสถานะ กระแสโหลด แต่อย่างไรก็ตาม ($-V_{BE}$) จะมีค่ามากเกินไปไม่ได้เพราะ ($-V_{BE}$) ที่มากเกินไปจะทำให้ พื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยของทรานซิสเตอร์ (Reverse Safe Operating Area) แคบลง โดยเฉพาะ ด้าน Secondary Breakdown limit ทำให้อาจเป็นอันตรายต่อทรานซิสเตอร์โดยเฉพาะในแง่การทน แรงดัน เพราะเมื่อปริมาณ ($-V_{BE}$) สูงขึ้น พื้นที่ปลอดภัยด้านแรงดันจะลดลงเรื่อยๆ คุณสมบัติของ ทรานซิสเตอร์กำลังที่เลือกใช้กำหนดให้ ($-V_{BE}$) มีค่าไม่ต่ำกว่า -10 โวลต์ เมื่อให้ทรานซิสเตอร์ ทำงานได้ในพื้นที่ที่ปลอดภัย

เนื่องจากปริมาณ Storage Time จะแปรผันกับการอิ่มตัวของทรานซิสเตอร์ ดังนั้นในวงจร ขับนำเบสจึงต้องมีไดโอดที่ใช้ป้องกันการอิ่มตัวเกินควร (Anti - Saturation) ซึ่งหมายถึงไดโอด $D_1 - D_4$ ในวงจรขับนำเบสในรูป 3.21 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าไดโอด D_1, D_4 จะทำหน้าที่ยกระดับ แรงดัน $V_{CE(sat)}$ ให้สูงขึ้น ซึ่งก็คือการลดปริมาณกระแสเบสที่จ่ายให้กับทรานซิสเตอร์ ทำให้ ทรานซิสเตอร์อิ่มตัวน้อยลงนั่นเอง สำหรับปริมาณของไดโอดที่ใช้ในการยกระดับแรงดันในที่นี้ใช้ ไดโอดจำนวน 2 ตัว ซึ่งได้จากการทดลองต่อวงจรเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ Storage

Time มีค่าต่ำและแรงดัน $V_{CE(sat)}$ มีค่าไม่สูงเกินไป เพราะถ้า $V_{CE(sat)}$ มีค่าสูงกำลังสูญเสียในการ สวิตซ์ในขณะที่นำกระแสจะมีค่าสูง

สำหรับสัญญาณที่ออกจากวงจรกำเนิดสัญญาณ ซึ่งได้จากการป้อนกลับของกระแสไหลค นั้นเปรียบเสมือนกับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ (Current Source) ซึ่งจะส่งผ่านหม้อแปลง ขั้วนำที่ใช้แกนแม่เหล็กเป็นแบบแกน Toroid มายังวงจรขั้วนำเบสซึ่งช่วงบวกของกระแสไหลคจะทำให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 นำกระแส และช่วงลบของกระแสไหลคก็จะทำให้ทรานซิสเตอร์ Q_2 นำกระแส โดยมีความถี่ในการนำกระแสเท่ากับความถี่ของกระแสไหลคสัญญาณที่ใช้ขั้วนำ ทรานซิสเตอร์เพื่อให้งจรอินเวอร์เตอร์ทำงานแบบเรโซแนนซ์ในภาคแรงดันศูนย์เพื่อลดกำลังสูญเสียในช่วงเริ่มนำกระแสและการทำงานของตัวเก็บประจุที่ทำหน้าที่เป็นสแน็บเบอร์เป็นไปอย่างเหมาะสม เพื่อลดกำลังสูญเสียในช่วงแรกของการหยุดนำกระแสของทรานซิสเตอร์สัญญาณขั้วนำ จะต้องเป็นแบบ 3 สถานะ ในการสร้างสัญญาณดังกล่าวจะใช้เทคนิคแกนอิ่มตัว (Saturable Core) กล่าวคือในการออกแบบหม้อแปลง Toroid จะต้องออกแบบให้หม้อแปลงทำงานในช่วงเวลาจำกัด คือจะทำให้หม้อแปลงส่งผ่านสัญญาณขั้วนำให้เท่ากับช่วงเวลาที่ต้องการให้ทรานซิสเตอร์นำกระแส จากนั้นแกนหม้อแปลงจะอิ่มตัวและเมื่อแกนอิ่มตัวแล้ว จะไม่มีการส่งผ่านพลังงานโดยแหล่งจ่ายกระแสจากขดปฐมภูมิไปยังขดทุติยภูมิ เพราะเมื่อแกนอิ่มตัวค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (μ_r) ของแกนจะเท่ากับค่าความซึมซาบของอากาศ ทำให้การ Coupling ของสัญญาณระหว่างขดทุกขดของหม้อแปลงหมดไปค่าความเหนี่ยวนำทางแม่เหล็ก (Magnetizing Inductance) ของขดทุติยภูมิ จึงลดลงเหลือเท่ากับค่าความเหนี่ยวนำที่มีแกนเป็นอากาศ หรือกล่าวได้ว่าขดทุติยภูมิแต่ละขดจะกลายเป็นขดลัดวงจร อันเป็นการทำให้ทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแส

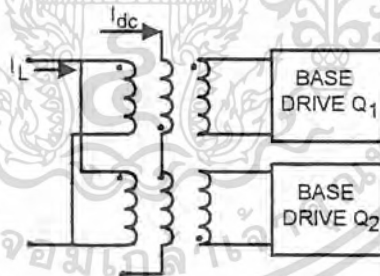
3.3.3 การเลือกขนาดของแกนหม้อแปลงขั้วนำในวงจรขั้วนำเบสของทรานซิสเตอร์

วงจรขั้วนำทรานซิสเตอร์ที่ใช้เทคนิคแกนอิ่มตัว (Saturable Core) จะต้องมีการเลือกขนาดของแกนแม่เหล็กอย่างเหมาะสม เพื่อให้สัญญาณขั้วนำมีลักษณะตามที่ได้กำหนดไว้ในที่นี้ใช้แกนเฟอร์ไรต์ที่มีลักษณะเป็น Toroid หม้อแปลงขั้วนำแต่ละตัวจะมีขนาดเท่ากันจำนวนรอบทั้งทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิมีจำนวนรอบเท่ากัน แตกต่างกันที่ขั้วของขดทุติยภูมิต่างกัน ในทางปฏิบัติเลือกใช้แกน Toroid ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 19 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 10 มิลลิเมตร ความหนา 10 มิลลิเมตร และพื้นที่หน้าตัด 42.30 ตารางมิลลิเมตร แล้วใช้แกนขนาดดังกล่าวพันขดปฐมภูมิจำนวน 2 รอบ พันขดทุติยภูมิ จำนวน 3 รอบ ต่อขานกันจำนวน 2 ชุด และยังสามารถปรับช่วงเวลาที่ทรานซิสเตอร์นำกระแส (ปรับความเร็ว - ซ้ำในการอิ่มตัวของแกน) โดยปรับจำนวนรอบของขดทุติยภูมิหรือปรับแรงดันคร่อมหม้อแปลงกล่าวคือ ถ้าให้จำนวนรอบขดทุติยภูมิสูงขึ้นจะได้ช่วงเวลาที่ทรานซิสเตอร์นำกระแสมากขึ้นหรือแกนอิ่มตัวช้าลงในทางกลับกันถ้าจำนวนรอบขดทุติยภูมิต่ำลงแกนจะอิ่มตัวเร็วขึ้น หรือช่วงเวลาที่ทรานซิสเตอร์นำกระแสจะลดลงส่วนการเลือกสวิตช์เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นาเบเซบระยะเห็นทานการค่าปรับระยะเวลาการนำกระแสของทรานซิสเตอร์โดยการปรับแรงดันคร่อมหม้อแปลง จะทำได้โดยการไม่วารณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มาใช้งานไปใช้

ปรับค่าความต้านทาน R_B ในวงจรขั้วนำเบสเพราะถ้าแรงดันคร่อม R_B มีค่าสูงขึ้น แรงดันคร่อมขดทุติยภูมิของหม้อแปลงก็จะสูงขึ้นด้วยซึ่งจะทำให้แกนอิมตัวไวขึ้นช่วงเวลาที่ทรานซิสเตอร์นำกระแสจึงลดลง แต่ในทางกลับกันถ้าเปลี่ยนค่าความต้านทาน R_B มีค่าต่ำลงก็จะทำให้แกนอิมตัวช้าลง ส่งผลทำให้ช่วงเวลาที่ทรานซิสเตอร์นำกระแสมีค่ามากขึ้น

3.3.4 การควบคุมความถี่ในการทำงานของวงจร

การใช้เทคนิคแกนอิมตัว (Saturable Core) และการป้อนกลับของกระแสไหลตดในการขั้วนำทรานซิสเตอร์นั้นความถี่ในการทำงานของอินเวอร์เตอร์จะขึ้นอยู่กับขนาดของแกน Toroid จำนวนรอบของขดลวด กระแสไหลตด ดังนั้นถ้าเราต้องการปรับความถี่ในการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ก็สามารถทำได้โดยการปรับค่าสนามแม่เหล็กของแกนหม้อแปลง (B_{max}) ซึ่งสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนขนาดของแกน เปลี่ยนจำนวนรอบของขดลวด หรือป้อนไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายภายนอกโดยการเพิ่มขดขดลวดให้กับหม้อแปลงขั้วนำแต่ละขดแต่การปรับความถี่การทำงานของอินเวอร์เตอร์โดยการเปลี่ยนขนาดของแกน หรือเปลี่ยนจำนวนรอบของขดลวดจะไม่สะดวกในการควบคุมความถี่ จึงเลือกใช้วิธีการป้อนไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายภายนอกให้กับหม้อแปลงขั้วนำ โดยการเพิ่มขดขดลวดให้กับหม้อแปลงขั้วนำแต่ละขดดังรูป 3.22 เพื่อให้สามารถปรับความถี่ได้ในย่านแคบๆประมาณ 19 - 22 กิโลเฮิร์ตซ์



รูปที่ 3.22 วงจรปรับค่าสนามแม่เหล็กอิมตัวของแกนหม้อแปลง

ในกรณีที่ป้อน ไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านบวกให้กับแกนก็จะทำให้แกนของหม้อแปลงขั้วนำอิมตัวเร็วขึ้นก็จะเป็นผลให้ช่วงเวลาที่ขั้วนำทรานซิสเตอร์ให้นำกระแสสั้นลง ซึ่งหมายถึงความถี่ในการทำงานของวงจรจะสูงขึ้น ในทางกลับกันถ้าป้อน ไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านลบให้กับหม้อแปลงขั้วนำ การอิมตัวของแกนหม้อแปลงจะช้าลงทำให้ช่วงการนำกระแสของทรานซิสเตอร์จะนานขึ้น ก็จะทำให้ความถี่การทำงานวงจรจะลดลง ซึ่งจะมีผลทำให้กระแสไหลตดมีการเปลี่ยนแปลงตาม

ความถี่ตามที่ไว้วิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ เมื่อความถี่การทำงานวงจรสูงขึ้นก็จะทำให้กระแสไหลตดมีค่าลดลงทำให้กำลังออกมีค่าลดลง ในทางกลับกันถ้าความถี่การทำงานลดลงก็จะทำให้ไม่วารมีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้กระแสไหลดมีค่าสูงขึ้น นั่นคือการปรับค่าความถี่ของการทำงานของวงจรถืออินเวอร์เตอร์จะเป็น การปรับกำลังด้านออกของวงจรถืออินเวอร์เตอร์ด้วย

3.4 ภาคกำลังด้านเอาต์พุต

ภาคนี้แสดงไว้ในบล็อกที่ 3 ของรูปที่ 3.1 ซึ่งได้รับอินพุตมาจากภาคอินเวอร์เตอร์ วงจรในส่วนนี้ประกอบไปด้วยส่วนของวงจรถือกำลังที่สำคัญได้แก่ หม้อแปลงแยกโดดความถี่สูงซึ่ง จะทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังจากภาคอินเวอร์เตอร์ไปยังวงจรของโหลดที่ประกอบไปด้วยขดลวดให้ความ ร้อนแบบเหนี่ยวนำพร้อมชิ้นงาน และตัวเก็บประจุชดเชยตัวประกอบกำลังขนานอยู่ทางด้าน ขดลวดขดลวดของหม้อแปลงกำลัง นอกจากนี้จะมีตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุต่ออนุกรมทางด้าน ขดลวดขดลวดของหม้อแปลงกำลังด้วย

3.4.1 การออกแบบหม้อแปลง

หม้อแปลงนี้มีหน้าที่ในการแยกโดด (Isolate) วงจรทางด้านโหลด (ขดลวดเหนี่ยวนำ- พร้อมชิ้นงาน) ออกจากวงจรถือกำลังที่ต่ออยู่กับไฟ 1 เฟสของการไฟฟ้า อีกทั้งยังเป็นการลดแรงดันที่ ได้จากภาคอินเวอร์เตอร์ไปยังวงจรของโหลด และยังเป็นการป้องกันอันตรายที่เกิดจากไฟฟ้า ลัดวงจรจากเครื่องให้ความร้อนผ่านผู้ใช้ลงดิน ดังนั้นหม้อแปลงจึงเป็นตัวกลางในการส่งผ่านกำลัง จากวงจรถืออินเวอร์เตอร์ไปยังขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน และเนื่องจากสัญญาณที่ส่งผ่านเป็น สัญญาณที่มีทั้งกำลังและความถี่สูง ในการออกแบบหม้อแปลงจะต้องใช้แกนเฟอร์ไรต์ และต้อง เป็นแกนที่มีขนาดใหญ่พร้อมทั้งลวดทองแดงขนาดใหญ่ เพื่อให้มีความสามารถในการส่งผ่านกำลัง งานไปยังโหลดได้อย่างเพียงพอ ในการออกแบบหม้อแปลงกำลังความถี่สูง สิ่งที่จะต้องคำนวณและ เลือกใช้ก็คือ ชนิด ลักษณะ โครงสร้างและขนาดของแกนแม่เหล็ก อัตราส่วนของจำนวนรอบ และ จำนวนรอบของขดลวดขดลวดและขดลวดขดลวด ขนาคของเส้นลวดที่ใช้พัน ฉนวนทางไฟฟ้า ความร้อน ของเส้นลวด จากการประมาณกำลังงานที่ชิ้นงานเท่ากับ 1 กิโลวัตต์ และประเมินประสิทธิภาพของ หม้อแปลงความถี่สูงเท่ากับ 95 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นกำลังงานที่เข้าสู่ขดลวดขดลวดจะมีค่าประมาณ 1.2 กิโลวัตต์

เนื่องจากความถี่ในการทำงานของอินเวอร์เตอร์มีค่าสูง แกนเหล็กจึงไม่เหมาะในการ นำมาใช้งานในวงจรถืออินเวอร์เตอร์ เพราะจะเกิดกำลังการสูญเสียในแกนเหล็กค่อนข้างมาก นอก จากนี้แกนเหล็กยังมีการตอบสนองต่อความถี่สูงได้ไม่ดีนัก เนื่องจากค่าความซึมซาบของสนาม-แม่เหล็กที่ความถี่สูงจะมีค่าสูงกว่าค่าความซึมซาบของสารแม่เหล็กที่ความถี่ต่ำ ดังนั้นจึงได้เลือก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลือกขนาดของแกนเฟอร์ไรต์จะใช้วิธีการคำนวณแบบ Core Geometry K_g Approach ซึ่งเป็นวิธีการออกแบบที่ใช้กำลังการสูญเสียของลวดทองแดง (P_{cu}) ในการกำหนดขนาดของแกนแม่เหล็กแทนการใช้ค่าอุณหภูมิเพิ่มหรือความหนาแน่นของกระแสในลวดตัวนำ ซึ่งในการออกแบบโดยวิธีนี้จะกำหนดค่าความสูญเสียของลวดตัวนำทองแดงเป็นหลัก โดยต้องการให้กำลังการสูญเสียของลวดตัวนำทองแดงเป็นเท่าไร ซึ่งหมายถึงว่าหม้อแปลงที่ออกแบบ จะมีความร้อนเกิดขึ้นในลวดตัวนำมากหรือน้อยแค่ไหน สูตรในการคำนวณค่า K_g ซึ่งขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของตัวหม้อแปลงและเป็นตัวกำหนดขนาดของแกนเฟอร์ไรต์ที่จะใช้พันหม้อแปลงดังนี้คือ

$$K_g = \frac{WS^2}{t} = \rho \frac{V_1^2 I_{1rms}^2 + V_2^2 I_{2rms}^2}{8k B_{max}^2 f^2 P_{cu}} \quad (3.3)$$

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

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 (3.3) เราจะคำนวณค่า K_g โดยใช้ข้อกำหนดต่างๆ ของตัวหม้อแปลงและข้อกำหนดของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสูงสุด (B_{max}) ข้อกำหนดด้านการระบายความร้อน (P_{cu}) ตลอดจนสัมประสิทธิ์การใช้ช่องหน้าต่างของแกน (k) ข้อกำหนดและขีดจำกัดเหล่านี้จะมีความสัมพันธ์กับขนาดแกน จากค่า K_g ที่คำนวณได้จากข้อกำหนดและขีดจำกัดดังกล่าวข้างต้น เราจะต้องเลือกแกนที่มีพื้นที่ช่องหน้าต่างของแกน ขนาดของพื้นที่หน้าตัดของแกนและความยาวเฉลี่ยของเส้นลวดที่ใช้พันแกนในหนึ่งรอบ เพื่อให้ค่า K_g ที่คำนวณจากขนาดของแกนสูงกว่า K_g ที่คำนวณได้จากข้อกำหนด และขีดจำกัดดังกล่าวข้างต้น ข้อกำหนดของตัวเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับลักษณะการทำงานของวงจร ส่วนขีดจำกัดต่างๆจะมีแนวทางในการเลือกดังนี้คือ

3.4.1.1 ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กสูงสุด (B_{max}) เป็นค่าความหนาแน่นของ

สนามแม่เหล็กสูงสุดที่ยอมรับได้ อาจจะถูกกำหนดโดยกำลังสูญเสียในแกนแม่เหล็ก (core loss) เอกสาร หรือการอิ่มตัวของแกนแม่เหล็ก (saturation core) ขึ้นอยู่กับว่าข้อกำหนดอันไหนที่ให้ค่า B_{max} ค่าที่ใช้

จากความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับกำลังสูญเสียในแกนต่อน้ำหนักจะพบว่าที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์และ B_{max} มีค่าเท่ากับ 0.25 เทสลา สูญเสียในแกนประมาณ 59 มิลลิวัตต์ต่อกรัมและแกน EE80/76 มีน้ำหนัก 354 กรัม ดังนั้นกำลังสูญเสียในแกนหม้อแปลงประมาณ 20 วัตต์ ค่า B_{max} ที่ออกแบบไปใช้ในการคำนวณหาจำนวนรอบของขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิต่อไป

3.4.1.2 สัมประสิทธิ์การใช้ช่องหน้าต่างของแกน (Window Utilization) ปกติจะใช้ค่าระหว่าง 0.3-0.6 แล้วแต่การพันและขนาดเส้นลวดที่ใช้พัน แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้การพันเป็นแบบไบฟิลลาร์ (Bifillar) คือพันขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิไปพร้อมกัน เพื่อลดค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล (Leakage Inductance) ของหม้อแปลง และต้องใส่ปลอกฉนวนหุ้มเส้นลวดทั้งสองขด เพื่อป้องกันปัญหาการลัดวงจรระหว่างขดเส้นลวดตัวนำทั้งสองขด รวมทั้งลวดแต่ละเส้นมีขนาดค่อนข้างใหญ่จึงเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพในการใช้ช่องหน้าต่างลดลงจึงเลือกใช้ k เท่ากับ 0.4

3.4.1.3 การเลือกค่ากำลังการสูญเสียในลวดตัวนำ (P_{cu}) การเลือกค่ากำลังการสูญเสียในลวดตัวนำ มีความสำคัญสำหรับการออกแบบโดยวิธี K_g Approach ซึ่งในการออกแบบจะมีการกำหนดกำลังการสูญเสียในขดลวดตัวนำทั้งสองขด เมื่อกำหนดหาขนาดของแกนจากค่าของ P_{cu} ที่กำหนดจากขนาดของแกนที่คำนวณได้จะต้องพิจารณาว่าความร้อนที่เกิดขึ้นในลวดตัวนำมีค่าสูงเกินไปหรือไม่ถ้าอุณหภูมิของลวดตัวนำมีค่าสูงหรือต่ำเกินไปจะต้องมีการเริ่มค่า P_{cu} ใหม่จนกว่า P_{cu} จะมีค่าเหมาะสมกับขนาดของแกน ค่า P_{cu} ที่ยอมให้ในหม้อแปลงโดยทั่วไปแล้วมักจะออกแบบให้ มีค่าอยู่ในช่วง 0.5 - 1.5 เปอร์เซ็นต์ของหม้อแปลงที่ส่งผ่าน

3.4.1.4 ค่าความต้านทานจำเพาะของเส้นลวดทองแดง (ρ) ค่านี้เป็นคุณสมบัติของทองแดงที่ขึ้นกับอุณหภูมิ โดยกำหนดให้อุณหภูมิของหม้อแปลงขณะมีการะ (load) เต็มพิกัด มีค่าประมาณ 60 องศาเซลเซียส ค่า ρ มีค่าเท่ากับ 2×10^{-8} โอห์ม-เมตร

จากข้อกำหนดและขีดจำกัดดังกล่าวข้างต้น ได้คำนวณหาค่า K_g และเลือกขนาดของแกนในที่นี้เลือกแกน EE80/76 จำนวน 1 ตัว และมีกำลังการสูญเสียของขดลวดทองแดงประมาณ 1.5 วัตต์ รวมกับกำลังสูญเสียในแกนอีก 20 วัตต์ ได้กำลังสูญเสียในตัวหม้อแปลงรวมทั้งหมด 21.5 วัตต์ ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของหม้อแปลงไม่สูงเกินไป

เมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ห้วงจรด้วยคอมพิวเตอร์ ในรูปที่ 3.17 และรูปที่ 3.18 พบว่าค่ายอดแรงดันปฐมภูมิเท่ากับ 150 โวลต์ ค่ายอดของกระแสค่านปฐมภูมิเท่ากับ 30 แอมแปร์ ส่วนค่ายอดแรงดันทุติยภูมิเท่ากับ 80 โวลต์และค่ายอดของกระแสค่านทุติยภูมิเท่ากับ 60 แอมแปร์ ดังนั้นหม้อแปลงที่นำมาต่อในวงจรจะมีกระแสอาร์เอ็มเอส (I_{rms}) เท่ากับ 30 แอมแปร์ ค่าแรงดันแต่ละ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้นไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตามสงวนลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้นไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

สมการ (3.3) พบว่าค่า K_g ของแกน EE80/76 เท่ากับ 1.298×10^{-9} เมตร มีค่ามากกว่า K_g ที่คำนวณได้จากข้อกำหนดและขีดจำกัดของหม้อแปลง ดังนั้นการเลือกใช้แกน EE80/76 ในการทำหม้อแปลง

3.4.1.5 การคำนวณหาจำนวนรอบของเส้นลวดทองแดง (N) คือการคำนวณหาจำนวนรอบของขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิ จำนวนรอบของขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิมีความสำคัญต่อการอิ่มตัวของแกนแม่เหล็กของหม้อแปลง ในการคำนวณจำนวนรอบนี้จะใช้สมการที่ 3.5 เป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณจำนวนรอบต่ำสุดที่ใช้งานได้โดย B_{max} ไม่เกินค่าที่กำหนดไว้และจะพิจารณาเฉพาะในกรณีที่ไม่มีการเสียดรงไหลเข้าหม้อแปลงอีกทั้งแรงดันที่คร่อมหม้อแปลงจะต้องเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่สมมาตร

$$N = \frac{V}{4B_{max}Sf} \tag{3.5}$$

- โดยที่
- V คือค่ายอดของแรงดันที่ตกคร่อมหม้อแปลง
 - B_{max} คือค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสูงสุดที่ยอมให้เกิดในแกนเหล็ก
 - S คือพื้นที่หน้าตัดของแกนแม่เหล็กของหม้อแปลง
 - f คือความถี่ที่ใช้งาน

เมื่อแทนค่าแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงเท่ากับ 155 โวลต์ และจากข้อมูลของแกนเหล็กเบอร์ EE80/76 จะมีพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กเท่ากับ 377 ตารางมิลลิเมตร ส่วนความถี่ที่ใช้งานนี้มีค่าเท่ากับ 20 กิโลเฮิรตซ์ สำหรับ B_{max} ในที่นี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.25 เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆลงในสมการ (3.5) จะได้ค่าจำนวนรอบเท่ากับ 20 รอบ

3.4.1.6 การคำนวณขนาดของเส้นลวดตัวนำ ในการคำนวณขนาดของเส้นลวดตัวนำใช้สูตรดังต่อไปนี้

$$kW = N_p AW_p + N_s AW_s \tag{3.6}$$

เนื่องจาก $N_p = 2N_s$ ดังนั้น $3AW_p = AW_s$ จะได้ว่า

$$kW = 2.5 N_p AW_p \tag{3.7}$$

- โดยที่
- k คือ Utilization Factor
 - W คือพื้นที่ช่องหน้าต่างของแกนหม้อแปลง
 - N_p คือจำนวนรอบของขดปฐมภูมิ
 - N_s คือจำนวนรอบของขดทุติยภูมิ
 - AW_p คือพื้นที่หน้าตัดเส้นลวดตัวนำของขดปฐมภูมิ
 - AW_s คือพื้นที่หน้าตัดเส้นลวดตัวนำของขดทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่สามารถนำออกเผยแพร่ได้ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลของแกนขนาด EE80/76 จะมีพื้นที่ช่องหน้าค่างของแกนเท่ากับ 1480 ตารางมิลลิเมตร และจากหัวข้อที่แล้วจะได้ว่า N_p เท่ากับ 20 รอบ และ k เท่ากับ 0.4 เมื่อแทนค่าลงในสมการ (3.7) จะได้ค่า AW_p เท่ากับ 14.8 ตารางมิลลิเมตร

จากพื้นที่หน้าตัดของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ ที่คำนวณได้จะมีขนาดใหญ่ ในทางปฏิบัติจะไม่ใช้ลวดตัวนำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดดังกล่าว เนื่องจากลวดตัวนำกระแสที่มีความถี่สูงจึงเกิดปรากฏการณ์นำกระแสเฉพาะที่ผิวลวดตัวนำ (Skin Depth) เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวจึงใช้เส้นลวดขนาดเล็กๆ หลายเส้นมาต่อขนานกัน เพื่อให้พื้นที่หน้าตัดในการนำกระแสเท่าเดิม ในการเลือกขนาดของเส้นลวดตัวนำขนาดเล็กจะต้องเลือกให้มีรัศมีที่เล็กกว่าความลึกผิวของทองแดงที่ความถี่สูงสุดที่ใช้งานจากสูตรการหา Skin Depth มีค่าตามสมการที่ 3.8

$$\delta = \frac{K_m}{\sqrt{f}} \tag{3.8}$$

- โดยที่
- δ คือความลึกผิวที่อิเล็กทรอนิกส์สามารถเคลื่อนที่ได้ (มิลลิเมตร)
 - f คือความถี่ที่ใช้งาน (เฮิรตซ์)
 - K_m คือค่าคงที่ (สำหรับทองแดงมีค่า 65.5 ที่ 20 องศาเซลเซียส)

ดังนั้นที่ความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์ ความลึกผิวของทองแดงมีค่าเท่ากับ 0.463 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงเลือกใช้ลวดตัวนำเบอร์ SWG#27 ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.416 มิลลิเมตร และมีพื้นที่หน้าตัด 0.1363 ตารางมิลลิเมตร แสดงว่าต้องใช้ลวดตัวนำ จำนวนเท่ากับ 108 เส้นและกำลังสูญเสียในทองแดง (P_{cu}) ของหม้อแปลงแต่ละตัวสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 3.9

$$P_{cu} = 2 \left(\frac{I_{rms}^2 p_{cu} l}{A} \right) \tag{3.9}$$

- โดยที่
- I_{rms} คือค่ากระแสอาร์เอ็มเอสที่ไหลผ่านแต่ละขดของหม้อแปลง
 - l คือความยาวของขดลวดแต่ละขด
 - A คือพื้นที่หน้าตัดของทองแดงแต่ละขด
 - p คือความต้านทานจำเพาะของทองแดง

ค่ากระแสอาร์เอ็มเอส (I_{rms}) ที่ไหลผ่านหม้อแปลงแต่ละขด จากการวิเคราะห์ห้วงจรด้วยคอมพิวเตอร์มีค่าเท่ากับ 30 แอมแปร์ ส่วนความยาวของขดลวด (l) สามารถคำนวณได้โดยใช้ค่าความยาวเฉลี่ยต่อรอบ (t) ของแกน EE80/76 ซึ่งจะได้ว่า 1 เท่ากับ 3.24 เมตร และพื้นที่หน้าตัดของทองแดง (A) เท่ากับ 0.1363 ตารางมิลลิเมตร เมื่อคิดรวม 108 เส้น จะได้ A เท่ากับ 14.72 ตารางมิลลิเมตร แทนค่าในสมการ (3.9) จะได้ค่า P_{cu} ประมาณ 2 วัตต์

จากค่ากำลังสูญเสียในทองแดง เมื่อรวมกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนแม่เหล็ก (Core - Loss) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 20 วัตต์ จะได้กำลังสูญเสีย รวมของหม้อแปลงเท่ากับ 22 วัตต์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อักษรห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1.7 การหาจรรยาสมมูลย์ของหม้อแปลง

เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลและค่าความเหนี่ยวนำในการสร้างสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงนั้นมีผลต่อการทำงานของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ โดยเฉพาะค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลเป็นค่าที่ต้องสนใจมาก เพราะในวงจรกำลังทางด้านเอาต์พุตจะต้องมีตัวเหนี่ยวนำมาต่ออนุกรมกับขดปฐมภูมิของหม้อแปลง ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำที่มาก่อเพิ่มนี้จะต้องรวมกับค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลงที่มีอยู่แล้วสำหรับการวัดค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงจะทำการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ (Impedance Analyzer) ซึ่งสามารถวัดค่าได้ตามความถี่ที่ต้องการและเมื่อนำไปวัดค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลและค่าความเหนี่ยวนำในการสร้างสนามแม่เหล็กของหม้อแปลง เพื่อหาจรรยาสมมูลย์ของหม้อแปลงที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ จะได้จรรยาสมมูลย์ของหม้อแปลงแสดงได้ดังรูปที่ 3.23

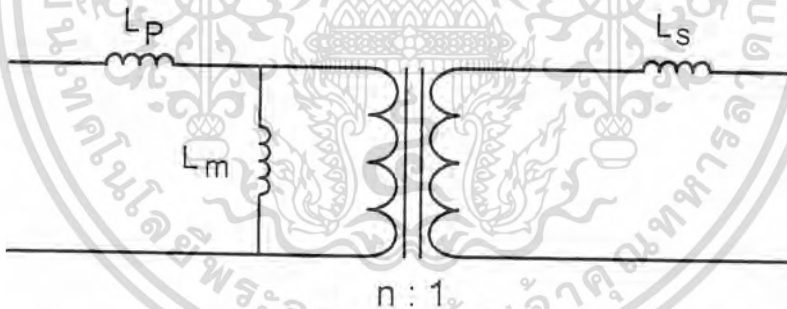
โดยที่

L_p คือค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลทางด้านปฐมภูมิ

L_s คือค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลทางด้านทุติยภูมิ

L_m คือค่าความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กที่อ้างอิงไว้ทางด้านปฐมภูมิ

N คืออัตราส่วนการแปลงแรงดัน



รูปที่ 3.23 แสดงจรรยาสมมูลย์ของหม้อแปลงส่งผ่านกำลัง

ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในวงจรสมมูลย์จะทำให้โดยการวัดที่จุดต่างๆดังต่อไปนี้

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

ค่าที่วัดได้แต่ละค่าจะมีความสัมพันธ์กันกับจรรยาสมมูลย์ของหม้อแปลงดังสมการต่อไปนี้

$$L_{11} = L_p + L_m \tag{3.10}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$L_{22} = L_s + \frac{L_m}{n^2} \tag{3.11}$$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและเผยแพร่ข้อมูลใดๆ ทั้งสิ้นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้ง

$$L_{11,S} = L_P + \frac{L_M n^2 L_S}{L_M + n^2 L_S} \quad (3.12)$$

$$L_{22,S} = L_S + \left[\frac{L_M L_P}{L_M + L_P} \right] \frac{1}{n^2} \quad (3.13)$$

$$n = \sqrt{\frac{L_{11}}{L_{22}}} \quad (3.14)$$

เมื่อนำหม้อแปลงมาวัดที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์หิมพิเคนซ์จะได้ค่าดังนี้

$$L_{11} = 47.181 \mu\text{H}$$

$$L_{22} = 124.33 \mu\text{H}$$

$$L_{11,S} = 8.1543 \mu\text{H}$$

$$L_{22,S} = 2.125 \mu\text{H}$$

แทนค่าต่างๆลงในสมการแล้วจะได้ค่าประมาณที่เป็นค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงดังนี้

$$L_M = 473.2080 \mu\text{H}$$

$$L_P = 3.9729 \mu\text{H}$$

$$L_S = 1.15 \mu\text{H}$$

$$n = 1.96$$

3.4.2 การออกแบบกระเบื้องด้านไหล

ในการออกแบบจะเริ่มต้นโดยการพันขดลวด Working coil จากขดลวดทองแดง แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้จะต้องใช้การเหนี่ยวนำที่ความถี่สูง จะทำให้มีผลของ Skin depth ซึ่งเป็นผลมาจากการที่กระแสจะไหลเฉพาะบริเวณผิวของตัวนำโดยสามารถหาค่าได้จากสมการที่ 3.15

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu \pi f}} \quad (3.15)$$

เมื่อ	ρ	คือ สภาพความต้านทานของทองแดง
	μ	คือ ค่าความซึมซาบสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$
	f	คือ ความถี่ใช้งาน (20 กิโลเฮิร์ตซ์)

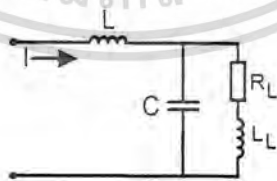
เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆลงในสมการ (3.15) จะพบว่ากระแสจะไหลที่ผิวที่ความลึกผิวของทองแดงเท่ากับ 0.463 มิลลิเมตร ดังนั้นลวดทองแดงที่จะนำมาพันที่จะต้องเลือกลวดที่มีขนาดครีมีน้อยกว่าความลึกผิวเพื่อให้กระแสไหลได้เต็มพื้นที่หน้าตัดและจากผลลัพท์ที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ 3.15 ปรากฏว่าตรงกับคุณสมบัติของขดลวดทองแดงที่มีฉนวนหุ้มเบอร์ SWG27 ซึ่งมีเส้น

ผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 0.416 มิลลิเมตรและเมื่อคิดค่าความหนาแน่นของกระแสเท่ากับ 4 แอมแปร์ต่อตารางมิลลิเมตร จะได้จำนวนเส้นลวดทองแดงที่ใช้พันจำนวน 63 เส้น จากนั้นนำมาตีเกลียวเข้าด้วย

กันจนเป็นเส้นเดียวกัน และขดลวดทองแดงที่พันตีเกลียวเรียบร้อยแล้วเป็นรูปกันหอยที่มีลักษณะเป็นรูปวงกลมแบนมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 12 เซนติเมตร โดยขดลงในแผ่นเบก้าไลต์ จากนั้นนำไปวัดค่าอิมพีแดนซ์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยวัดค่าความต้านทานได้ 27.63 มิลลิโอห์ม และมีค่าความเหนี่ยวนำ 10.06 ไมโครเฮนรี แต่ในการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่ถูกต้องจะต้องมีภาชนะวางอยู่ที่ขดลวดทองแดงที่ขดเป็นรูปกันหอยที่มีลักษณะเป็นรูปวงกลมแบน จึงได้ทำการวัดค่าใหม่ซึ่งค่าที่ได้ปรากฏว่ามีค่าความต้านทานมากขึ้นแต่ค่าความเหนี่ยวนำกลับมีค่าลดลง โดยมีค่าความต้านทานเท่ากับ 390 มิลลิโอห์ม และมีค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 5.26 ไมโครเฮนรี โดยถ้าอยู่ในรูปของระบบเชิงมุมจะมีค่าเท่ากับ 0.766 ที่มุม 59.42 องศา ซึ่งในที่นี้จะมีค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.508 ดังนั้นจึงต้องมีการแก้ไขค่าตัวประกอบกำลังโดยใช้ตัวเก็บประจุชดเชยตัวประกอบกำลัง ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

3.4.3 ตัวเก็บประจุชดเชยตัวประกอบกำลังทางด้านโหลด

จากผลการวัดและการคำนวณวงจรจรสมมูลย์ของขดลวดเหนี่ยวนำ มุมประกอบกำลังของขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงานจะเป็นแบบล่าหลังค่อนข้างมากหรือกล่าวได้ว่าตัวประกอบกำลังจะเปลี่ยนแปลงตามความถี่ และมีค่าอยู่ในช่วง 0.5 - 0.6 การที่ตัวประกอบกำลังทางด้านโหลดนี้มีค่าต่ำจะทำให้กำลังปรากฏที่ต้องให้แก่ขดลวดเหนี่ยวนำ (เพื่อให้ได้กำลังทางด้านโหลดเท่าเดิม) มีค่าสูงมากเป็นผลทำให้หม้อแปลงแยกโคตที่ใช้ในการส่งผ่านกำลังงานต้องมีขนาดใหญ่ รวมไปถึงขนาดของวงจรอินเวอร์เตอร์และวงจรเรียงกระแสก็ต้องมีขนาดใหญ่มากขึ้นเพื่อให้สามารถรองรับกับกำลังที่ต้องจ่ายให้กับ โหลด เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จึงต้องใส่ตัวเก็บประจุชดเชยตัวประกอบกำลังให้แก่ขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งในที่นี้ได้เลือกใช้ตัวเก็บประจุชดเชยตัวประกอบกำลังให้เป็นแบบขนาน โดยการต่อตัวเก็บประจุขนานกับขดลวดเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 3.24

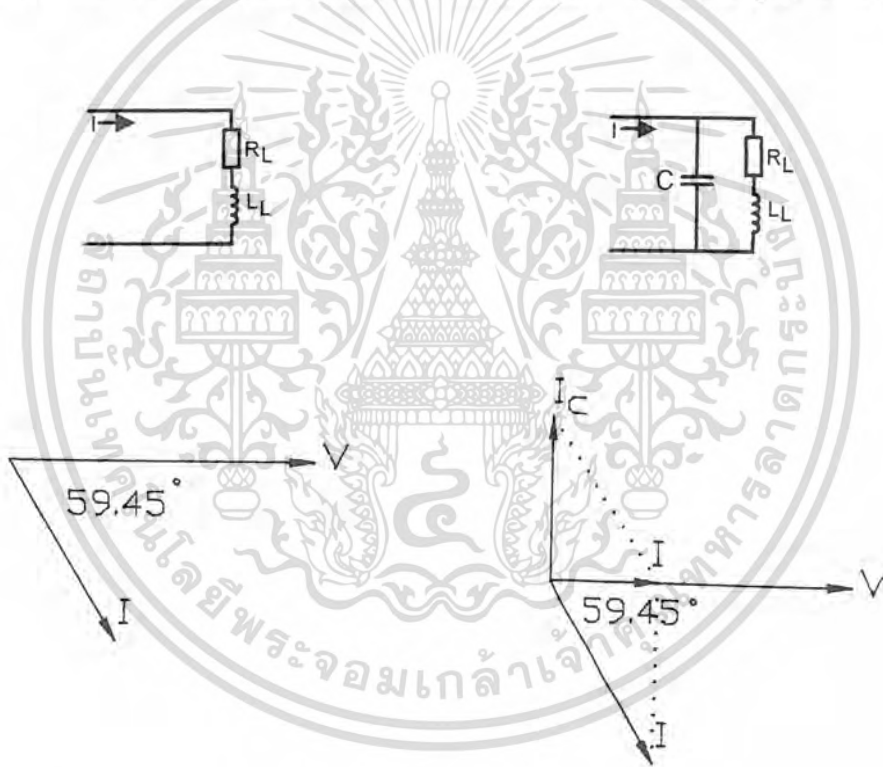


รูปที่ 3.24 แสดงการต่อตัวเก็บประจุชดเชยตัวประกอบกำลังและตัวเหนี่ยวนำ

ในการออกแบบค่าของตัวเก็บประจุจะเริ่มจากการคำนวณค่าตัวเก็บประจุที่ทำให้วงจรทางด้านโหลดมีตัวประกอบกำลังเป็น 1 ก่อนแล้วจึงเลือกค่าที่เหมาะสมอีกครั้ง เพราะยังจะต้องออกแบบค่าของตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรมอยู่ในวงจรทางด้านโหลดอีก สำหรับการเลือกค่าที่เหมาะสมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของตัวเก็บประจุคเซยและตัวเหนี่ยวนำอนุกรม นั้น จะใช้วิธีคำนวณและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า

จากวงจรสมมูลย์ของขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงานที่วัดได้ที่มีความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ $R_{LOAD} = 390$ มิลลิโอห์ม และ $L_{LOAD} = 5.26$ ไมโครเฮนรี่ ถ้ากำหนดให้กำลังที่โหลดมีค่า 1 กิโลวัตต์ กระแสผ่านโหลด I จะมีค่าเท่ากับ 50 แอมแปร์ และแรงดันคร่อมโหลดจะมีค่าเท่ากับ 80 โวลต์ เมื่อเขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันคร่อมโหลด (V) กับกระแสผ่านโหลด (I) จะได้ดังรูปที่ 3.25 ก) จะเห็นว่ามุมประกอบกำลังล่าช้าอยู่ประมาณ 59 องศา ทำให้กำลังปรากฏที่ต้องจ่ายให้วงจรมีค่าสูง ($P = VI$) เมื่อใส่ตัวเก็บประจุคเซยขนานกับวงจรกระแสจากตัวเก็บประจุ (I_C) จะช่วยจ่ายกระแสรีแอกทีฟแทน ทำให้กระแสที่ไหลเข้าในวงจรมีค่าลดลง กำลังที่ปรากฏจึงมีค่าลดลงด้วย



รูปที่ 3.25 แสดงวงจรสมมูลย์ทางไฟฟ้าทางด้านโหลดและเฟสเซอร์ไดอะแกรม

ก) กรณีที่ไม่มีตัวเก็บประจุคเซย

ข) กรณีที่มีตัวเก็บประจุคเซย

จากวงจรสมมูลย์ทางไฟฟ้า ถ้าต้องการให้ได้ตัวประกำลังเป็น 1 สามารถหาได้จากสมการที่ 3.16

$$C = \frac{1}{L \left[(2\pi f)^2 + \frac{R^2}{L^2} \right]} \quad (3.16)$$

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆลงในสมการ (3.16) จะได้ค่าตัวเก็บประจุคเซยประมาณเท่ากับ 9 ไมโครฟารัด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาติให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต ไม่ควรกรณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3.1 การสร้างตัวเก็บประจุคเซยตัวประกอบกำลังทางด้านโหลด

จากการออกแบบค่าของตัวเก็บประจุคเซยและการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์วงจรทางไฟฟ้าได้ผลออกมาว่า ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 9 ไมโครฟารัด และเป็นตัวเก็บประจุที่ต้องทำงานที่ความถี่สูงถึง 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งจากการวิเคราะห์ ถ้าขณะที่ภาวะโหลดเต็มที่แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์นี้จะสูงถึง 80 โวลต์อาร์เอ็มเอส ดังนั้นจึงสามารถคำนวณกระแสที่ผ่านตัวเก็บประจุจากค่าแรงดันได้ตามสมการที่ 3.17

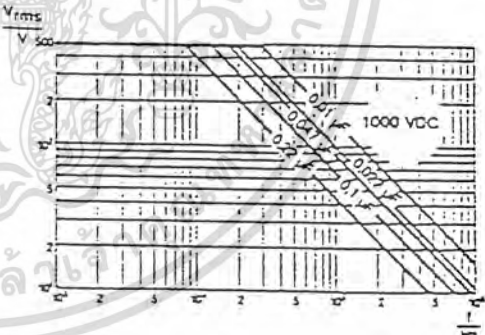
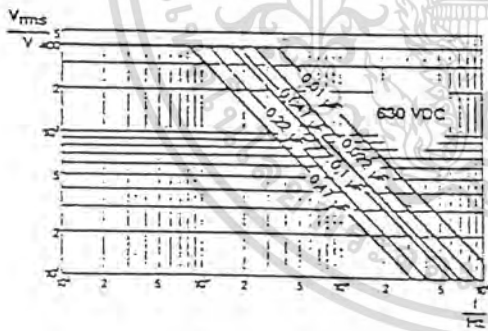
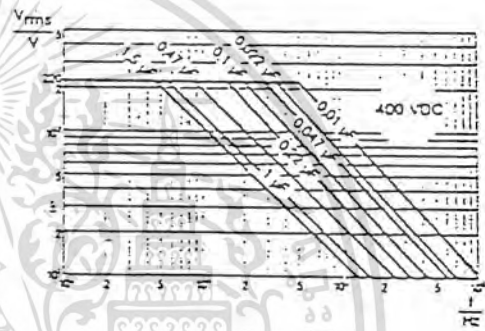
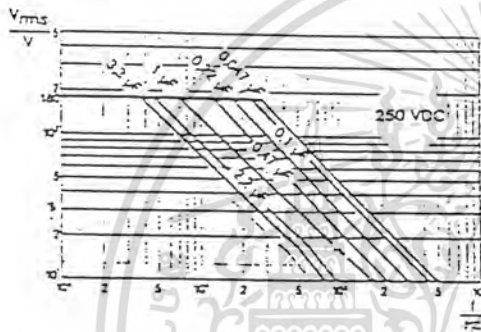
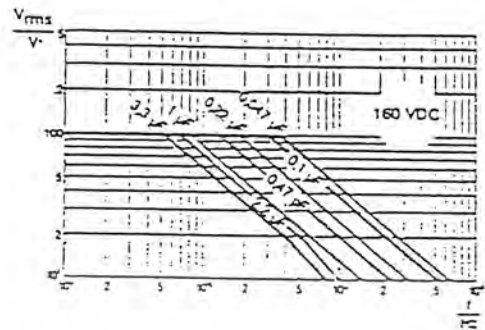
$$I = V \omega C \quad (3.17)$$

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆลงในสมการที่ 3.17 จะพบว่าค่ากระแสที่คำนวณได้จะมีค่าเท่ากับ 90 แอมแปร์ จะเห็นว่าค่าของกระแสเหล่านี้มีปริมาณสูงมาก ดังนั้นการสร้างตัวเก็บประจุคเซย จะต้องเลือกใช้ตัวเก็บประจุ ชนิดที่ใช้กับความถี่สูงๆได้และต้องทนพิกัดของกระแสใช้งานสูงสุดได้และใช้ตัวเก็บประจุหลายๆตัวมาต่ออนุกรมหรือขนานกันเพื่อให้ได้ค่าความจุและพิกัดแรงดันที่ต้องการ ซึ่งในทางปฏิบัติได้เลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิด Metalized Plastic Film ที่มีสารไดอิเล็กทริกเป็น PolyPropylene (MKP) ตัวเก็บประจุนี้มีค่าความเหนียวนำและความต้านทานในตัวต่ำ จึงสามารถใช้ได้กับความถี่สูงและทนพิกัดกระแสได้สูง นอกจากนี้ยังมีค่าเม้นยำ ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ แต่อย่างไรก็ตามตัวเก็บประจุชนิดนี้มีค่าความจุค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับค่าที่ต้องใช้งาน ดังนั้นจึงใช้วิธีนำตัวเก็บประจุหลายๆตัวมาต่อขนานกันเพื่อให้ได้ค่าความจุที่ต้องการ ซึ่งในที่นี้ได้เลือกใช้ตัวเก็บประจุ ยี่ห้อ WIMA ชนิด MKP10 ซึ่งเป็นชนิดที่สามารถทนพิกัดกระแสสูงที่สุด(High Current Rating) ในการเลือกตัวเก็บประจุว่าจะใช้ค่าอะไร และมีขนาดเท่าไรนั้น จะใช้รูปกราฟพิกัดแรงดันอาร์เอ็มเอสกับความถี่ ซึ่งมีค่าความจุเป็นพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุแต่ละขนาดในการพิจารณาซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3.26 จากการพิจารณารูปกราฟดังกล่าว ประกอบกับการสำรวจราคาและความเป็นไปได้ในท้องตลาด จึงได้เลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุค่า 1 ไมโครฟารัด 160 โวลต์ดีซี MKP-10 มาต่อขนานกันเพื่อให้ได้ค่าความจุเท่ากับ 9 ไมโครฟารัดตามที่ต้องการ ซึ่งเมื่อพิจารณารูปกราฟในรูปที่ 3.26 แล้วจะเห็นว่าที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ตัวเก็บประจุค่านี้จะมีพิกัดแรงดันอาร์เอ็มเอสสูงสุดเท่ากับ 80 โวลต์ และถ้าเปรียบเทียบกับแรงดันอาร์เอ็มเอสตกคร่อมตัวเก็บประจุสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ จะเห็นว่าพิกัดแรงดันของตัวเก็บประจุนี้ยังมีค่ามากกว่าพอควร ซึ่งเพียงพอกับการทำงานได้เป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

WIMA MKP 10

Permissible AC voltages in relation to frequency at 10° C internal temperature rise (general guide):



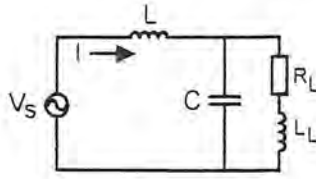
รูปที่ 3.26 แสดงรูปภาพพิกัดแรงดันอาร์เอ็มเอสกับความถี่ของตัวเก็บประจุ

3.4.4 การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำที่อนุกรมด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง

สำหรับตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรมด้านปฐมภูมิ เป็นตัวเหนี่ยวนำที่ใส่เพื่อให้วงจรไฟฟ้าทางด้านโหลดมีมุมประกอบกำลังแบบล่าหลัง เนื่องจากวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ จะมีปัญหาในเรื่องการเกิดการทะลุผ่าน เพราะปัญหาจากเวลาที่พื้นตัวของไดโอดที่ต่อขนานอยู่กับสวิตช์ ถ้า

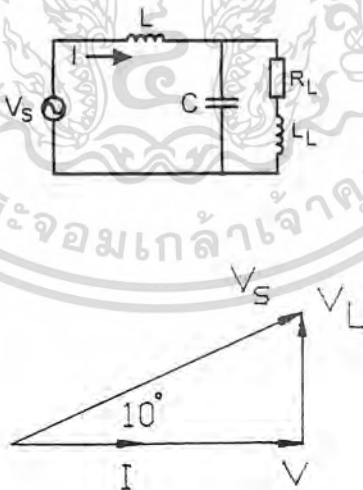
มองวงจรไฟฟ้าทางด้านโหลด หรือมองออกมาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงโดยการย้ายตัวเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์โดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้จัดทำเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหนี่ยวนำมาที่ขดลวดขึงจะได้อำนาจไฟฟ้าดังรูปที่ 3.27 ซึ่งเป็นวงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางด้านโหลดต่อไป



รูปที่ 3.27 แสดงวงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางด้านโหลด

เนื่องจากการต่อตัวเหนี่ยวนำอนุกรมจะช่วยให้กระแสไหลของวงจรอินเวอร์เตอร์ตามหลังแรงดัน ถ้ากำหนดให้มุมประกอบกำลังแบหลังที่วงจรอินเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้ดีอยู่ในย่านประมาณ 10 - 45 องศา ในการคำนวณค่าของตัวเหนี่ยวนำจะคำนวณโดยคิดว่า วงจรไฟฟ้าทางด้านโหลดประกอบด้วยตัวเก็บประจุค่าที่ออกแบบไว้ในหัวข้อที่แล้วและวงจรสมมูลย์ทางไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงานซึ่งเป็นค่าที่วัดที่ความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์ ดังรูปที่ 3.28 การคำนวณค่าของตัวเหนี่ยวนำนี้เป็นการคำนวณเพื่อให้รู้ค่าโดยประมาณเท่านั้น ในการเลือกค่าที่เหมาะสมจะใช้วิธีการคำนวณและวิเคราะห์จากผลตอบสนองทางด้านความถี่ ซึ่งจะกล่าวมาแล้วในตอนต้น



รูปที่ 3.28 แสดงวงจรสมมูลย์ไฟฟ้าทางด้าน โหลด และเฟสเซอร์ไคอะแกรมของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

จากวงจรสมมูลย์ทาง ไฟฟ้าและเฟสเซอร์ไคอะแกรมในรูปที่ 3.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_s = V_L + V \quad (3.18)$$

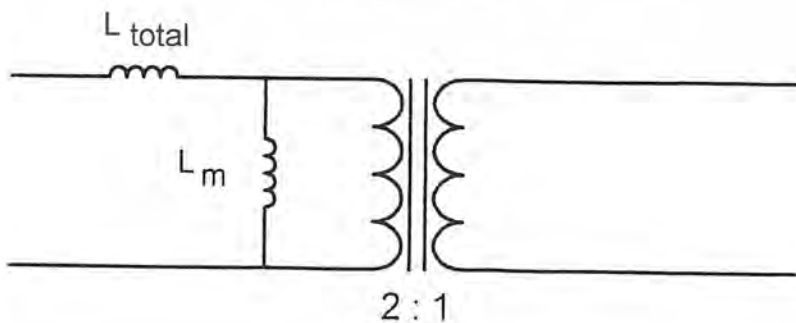
ถ้าต้องการให้กระแสล้าหลังแรงดัน อยู่ 10 องศาจะได้ว่า

$$V_L = V \tan(\theta) \quad (3.19)$$

$$L = \frac{V_L}{I\omega} \quad (3.20)$$

แทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆลงในสมการ (3.20) จะได้ค่าตัวเหนี่ยวนำ (L) ประมาณ 5 ไมโครเฮนรี่

จากการออกแบบ โดยการคำนวณและการประมาณค่าของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำในหัวข้อที่ผ่านมา เพื่อเป็นแนวทางในการทำความเข้าใจและเลือกค่าเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์วงจรทางไฟฟ้า สาเหตุที่ต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์เพราะว่า ในการวิเคราะห์คือวิเคราะห์ในเชิงความถี่ และพารามิเตอร์แต่ละตัวก็เป็นฟังก์ชันของความถี่ด้วยและจากการออกแบบค่าของตัวเหนี่ยวนำอนุกรมและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์วงจรทางไฟฟ้าจะพบว่า ค่าความเหนี่ยวนำที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 5 ไมโครเฮนรี่ โดยที่ค่าที่ออกแบบมานี้เป็นค่าที่วิเคราะห์ในส่วนของวงจรทางด้านโหลด ซึ่งต่ออยู่ทางด้านขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงส่งผ่านกำลังงานแต่การต่อตัวเหนี่ยวนำอนุกรม เราจะต้องไว้ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเพื่อความสะดวกในการสร้างตัวเหนี่ยวนำ เพราะทางด้านปฐมภูมินี้ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าต่ำกว่ากระแสที่ไหลทางด้านทุติยภูมิ ดังนั้นในการสร้างตัวเหนี่ยวนำให้ต่อทางด้านปฐมภูมิจึงทำได้ง่ายกว่าและเนื่องจากหม้อแปลงส่งผ่านกำลังงานที่สร้างขึ้น มีค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลต่ออนุกรมอยู่แล้วซึ่งจากวงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงที่วัดได้ในหัวข้อ 3.4.1 เมื่อย้ายค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลทั้งสองด้านมารวมไว้ทางด้านปฐมภูมิ จะได้วงจรสมมูลย์ใหม่ดังรูปที่ 3.29 ซึ่งมีค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลเท่ากับ 4 ไมโครเฮนรี่ ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องใส่เพิ่มทางด้านปฐมภูมิ จะมีค่าเท่ากับ 80 ไมโครเฮนรี่ จากค่าความเหนี่ยวนำนี้ จึงนำมาสร้างตัวเหนี่ยวนำโดยใช้วิธีการคำนวณแบบ Core Geometry K_g Approach ซึ่งเป็นวิธีการออกแบบที่ใช้กำลังการสูญเสียของลวดทองแดง (P_{cu})



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.29 วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงกำลังเมื่อย้ายความเหนี่ยวนำรั่วไหลมารวมที่ด้านปฐมภูมิ

3.4.4.1 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ

ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำสิ่งที่ต้องคำนึงในการเลือกใช้อุปกรณ์คือลักษณะโครงสร้างและขนาดของแกนแม่เหล็ก จำนวนรอบ ขนาดของเส้นลวดที่ใช้ในการพันฉนวนไฟฟ้า ฉนวนความร้อนของเส้นลวดจากค่าตัวเหนี่ยวนำที่ได้ออกแบบไว้ ค่ายอดของกระแสและค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสที่ได้จากการวิเคราะห์ห้วงจรด้วยคอมพิวเตอร์จะสามารถนำไปใช้ออกแบบตัวเหนี่ยวนำได้ ในการเลือกขนาดของแกนเฟอร์ไรต์จะใช้วิธีการคำนวณแบบ Core Geometry K_g Approach ข้อกำหนดและข้อจำกัดของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสูงสุด (B_{max}) ข้อจำกัดด้านการระบายความร้อน (P_{cu}) ตลอดจนสัมประสิทธิ์การใช้ช่องหน้าต่างของแกน (k) จะเหมือนกับข้อกำหนดและขีดจำกัดของการออกแบบหม้อแปลงกำลังดังรายละเอียดที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น

สูตรในการคำนวณค่า K_g ซึ่งขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของตัวเหนี่ยวนำและเป็นตัวกำหนดขนาดของแกนเฟอร์ไรต์ที่จะใช้ในการพันตัวเหนี่ยวนำ เป็นดังนี้คือ

$$K_g = \frac{WS^2}{l} = p \frac{L^2 I_{rms}^2 I_{peak}^2}{k B_{max}^2 P_{cu}} \quad (3.21)$$

โดยที่

W	คือพื้นที่ช่องหน้าต่างของแกนเฟอร์ไรต์
S	คือขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกนเฟอร์ไรต์
l	คือความยาวเฉลี่ยของเส้นลวดที่ใช้พันแกนในหนึ่งรอบ
p	คือความต้านทานจำเพาะของเส้นลวดทองแดง
L	คือค่าความเหนี่ยวนำที่ใช้ในการออกแบบ
I_{rms}	คือค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสที่ไหลในตัวนำทองแดงรับได้
I_{peak}	คือค่ายอดของกระแสที่ไม่ทำให้แกนแม่เหล็กอิ่มตัว
k	คือ Window Utilization Factor
B_{max}	คือค่าความหนาแน่นสูงสุดของสนามแม่เหล็ก
P_{cu}	คือค่ากำลังการสูญเสียในเส้นลวดทองแดง

จากหัวข้อการออกแบบวงจรภาคกำลัง เราได้ค่าตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรม (L_s) มีค่าเท่ากับ 80 ไมโครเฮนรี และกระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำจากผลการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 3.16 มีค่ายอดกระแสเท่ากับ 34 แอมแปร์ประมาณค่ากระแสอาร์เอ็มเอสเท่ากับ 24 แอมแปร์ ดังนั้นจากข้อกำหนดของตัวเหนี่ยวนำและขีดจำกัดดังกล่าวข้างต้น ได้คำนวณหาค่า K_g และเลือกขนาดของแกน ในที่นี้เลือกแกน EE80/76 จำนวน 1 ตัว โดยมีกำลังการสูญเสียของขดลวดทองแดงประมาณ 5 วัตต์ รวมกับกำลังสูญเสียในแต่ละแกนอีก 22 วัตต์ ได้กำลังสูญเสียใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับตัวเหนี่ยวนำจะมีขนาดเท่ากับ 80 ไมโครเฮนรี ใช้กับกระแสอาร์เอ็มเอส (I_{rms}) เท่ากับ 24 แอมแปร์ ค่ายอดกระแส (I_{peak}) เท่ากับ 34 แอมแปร์ เมื่อใช้พารามิเตอร์ k, f, P_{cu} ดังได้กล่าวไว้ข้างต้น เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆลงในสมการ (3.21) จะได้ค่า K_g เท่ากับ 5.662×10^{-10} เมตร³

จากการแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆลงในสมการ (3.4) พบว่าค่า K_g ของแกน EE80/76 เท่ากับ 6.492×10^{-10} เมตร³ มีค่ามากกว่า K_g ที่คำนวณได้จากข้อกำหนดและขีดจำกัดของตัวเหนี่ยวนำ ดังนั้นจึงเลือกใช้แกน EE80/76 ในการทำตัวเหนี่ยวนำของอินเวอร์เตอร์

3.4.4.2 การคำนวณจำนวนรอบของเส้นลวดทองแดง (N) จากขนาดของแกนที่เลือกใช้ตลอดจนข้อกำหนดและขีดจำกัดด้านการอิ่มตัวของแกนแม่เหล็กสามารถคำนวณจำนวนรอบของตัวเหนี่ยวนำได้จากสมการที่ 3.22

$$N = \frac{LI_{peak}}{B_{max} S} \quad (3.22)$$

แทนค่าตัวแปรต่างๆ ลงในสมการ (3.22) จะได้ว่าจำนวนรอบที่จะพันบนแกนเท่ากับ 28 รอบ

3.4.4.3 การคำนวณขนาดเส้นลวดตัวนำ (A_w) จะใช้สูตรการคำนวณขนาดเส้นลวดตัวนำดังสมการที่ 3.23

$$A_w = \frac{kW}{N} \quad (3.23)$$

จากข้อมูลของแกนขนาด EE80/76 จะมีพื้นที่ช่องหน้าต่างของแกนเท่ากับ 1480 ตารางมิลลิเมตร และจากหัวข้อที่ผ่านมา N เท่ากับ 28 รอบ และให้ k เท่ากับ 0.5 เมื่อแทนค่าในสมการ (3.23) จะได้ค่า A_w เท่ากับ 30.83 ตารางมิลลิเมตร เราเลือกลวดตัวนำเบอร์ SWG#27 มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.416 มิลลิเมตรและมีพื้นที่หน้าตัด 0.1363 ตารางมิลลิเมตร แสดงว่าต้องใช้ลวดจำนวน 97 เส้น ในการพันตัวเหนี่ยวนำจะใช้ลวดจำนวน 97 เส้นมาตีเกลียวให้กลมเป็นเส้นเดียวกัน แล้วใส่ปลอกฉนวนไฟฟ้าก่อนทำการพันลวด กำลังการสูญเสียในทองแดง (P_{cu}) จะคำนวณได้จากสมการที่ 3.24

$$P_{cu} = \frac{I_{rms}^2 \times P_{cu} \times l}{A_w} \quad (3.24)$$

โดยที่ค่ากระแส I_{rms} ที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำเท่ากับ 24 แอมแปร์ ส่วนความยาวของขดลวด (l) สามารถคำนวณได้จากค่าความยาวเฉลี่ยต่อรอบ (t) ของแกน EE80/76 ซึ่งจะได้ว่า l เท่ากับ 4.643 เมตร และพื้นที่หน้าตัดทองแดง (A) เท่ากับ 0.1363 เมื่อคิดรวม 97 เส้นจะได้ A_w เท่ากับ 30.8038 ตารางมิลลิเมตรแทนค่าในสมการ (3.24) ได้กำลังการสูญเสียในลวดตัวนำเท่ากับ 4.1 วัตต์จากค่ากำลังการสูญเสียในทองแดง เมื่อรวมกับกำลังการสูญเสียที่เกิดจากแกนเหล็ก (core loss) จะมีค่าเท่ากับ 27 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.4.4 การคำนวณหาขนาดของช่องว่างอากาศ (Air Gap; l_g) เนื่องจากในการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำต้องมีช่องอากาศโดยจะเป็นไปตามสมการที่ 3.25

$$l_g = \frac{N^2 \mu_0 S}{L} \quad (3.25)$$

โดยที่ μ_0 คือค่าความซึมซาบของอากาศ มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ H/m
 S คือพื้นที่หน้าตัดของแกน
 N คือจำนวนรอบของการพัน

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆลงในสมการ (3.25) จะได้ค่า l_g เท่ากับ 4.643 มิลลิเมตร

3.4.4.5 การคำนวณผลของฟลักซ์ที่ขอบ (Fring Flux; F) การคำนวณฟลักซ์ที่ขอบทำให้พื้นที่หน้าตัดของช่องว่างอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ค่า Permeance มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยค่าฟลักซ์ที่ขอบหาได้จากสมการที่ 3.26

$$F = 1 + \frac{l_g}{\sqrt{S}} \times \ln \frac{2G}{l_g} \quad (3.26)$$

โดยที่ l_g คือขนาดของช่องว่างอากาศ
 S คือพื้นที่หน้าตัดของแกน
 G คือความสูงของช่องหน้าต่าง 40 มิลลิเมตร

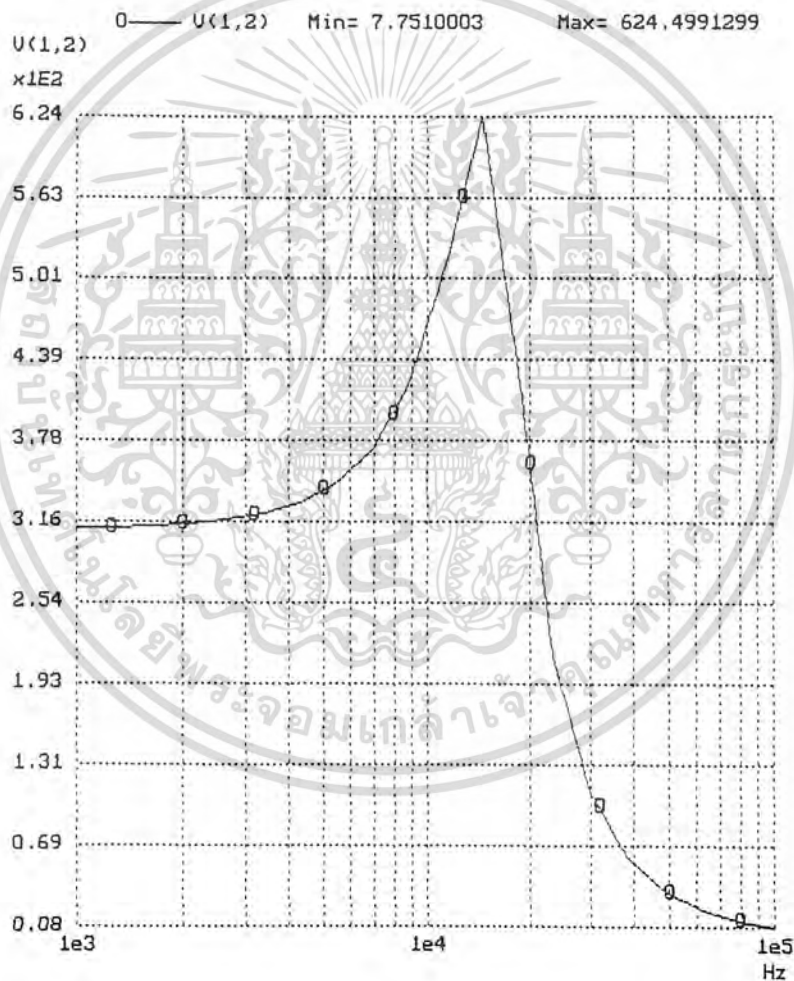
เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆลงในสมการ (3.26) จะได้ค่า F เท่ากับ 1.6807

ผลจากปรากฏการณ์ขอบอันเนื่องมาจากฟลักซ์ที่ขอบทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นจึงได้ทำการปรับ l_g จนได้ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการ

3.4.5 ตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมทางด้านปฐมภูมิ

จากรูปที่ 3.13 จะเห็นว่าที่วงจรกำลังด้านเอาต์พุตจะมีตัวเก็บประจุ (C_s) ต่ออนุกรมอยู่ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงส่งกำลัง ตัวเก็บประจุนี้จะทำหน้าที่ปิดกั้นไฟตรงไม่ให้เข้ามาที่หม้อแปลงซึ่งส่งผลให้หม้อแปลงอึดตัวได้ ที่เป็นเช่นนี้เพราะ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงที่สร้างจากวงจรอินเวอร์เตอร์ อาจจะไม่สมมาตรในด้านบวกและด้านลบ จึงทำให้มีแรงดันไฟตรงรวมมาด้วย ในการออกแบบจะพิจารณาว่าตัวเก็บประจุนี้เหมือนวงจรกรองความถี่สูง ซึ่งจะปล่อยให้แต่ความถี่สูงผ่านไปเท่านั้น ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุจึงต้องมีค่าต่ำ เพื่อให้ไม่มีผลกระทบต่อวงจรโดยในที่นี้กำหนดไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์ ในการวิเคราะห์เพื่อความสะดวกจะใช้โปรแกรมวิเคราะห์วงจรทางไฟฟ้าช่วยในการทดลองแทนค่าความจุ และวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุอนุกรมกับความถี่ แล้วเลือกค่าความจุที่ทำให้แรงดันในช่วงความถี่ที่ใช้งานไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ของแรงดันไฟฟ้กระแสสลับเมื่อคิดทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง และในการวิเคราะห์นี้จะต้องไม่วางกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนึงถึงค่าความคงทนของตัวเก็บประจุกับแรงดันที่ใช้งานด้วย เนื่องมาจากการทำงานในภาวะเปิด - ปิดของทรานซิสเตอร์กำลัง นั้นหมายถึงตัวเก็บประจุจะมีการเก็บพลังงานและคายพลังงานอย่างรวดเร็ว ประกอบกับพลังงานสะสมที่อยู่ในตัวเหนี่ยวนำอาจทำให้แรงดันที่เกิดจากการเก็บและคายของประจุนั้นมีค่าสูงกว่าแรงดันใช้งานเล็กน้อย ดังนั้นในการออกแบบตัวเก็บประจุจะใช้โปรแกรมวิเคราะห์วงจรทางไฟฟ้าในการปรับเปลี่ยนหาค่าตัวเก็บประจุ ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 0.9 ไมโครฟารัด ซึ่งเมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์วงจรทางไฟฟ้าแล้ววาดกราฟแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุนี้เทียบกับความถี่ได้ดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 แสดงแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุนุกรมเทียบกับความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบเครื่องให้ความร้อน โดยการเหนี่ยวนำ

การทดสอบเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการทดสอบทางด้านไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วยการวัดคุณสมบัติต่างๆและการบันทึกรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ภาคต่างๆของเครื่อง การวัดและการบันทึกรูปคลื่นของกระแสและแรงดันจะทำเฉพาะตัวแปรที่สำคัญๆ ส่วนที่สองเป็นการทดสอบทางด้านปริมาณความร้อน ตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยคือมีการหาข้อเด่นและข้อด้อยของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำกับเครื่องให้ความแบบขดลวดความร้อน

การทดสอบทางไฟฟ้า

การทดสอบเริ่มโดยการปรับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับจาก 0 - 170 โวลต์ เข้าไปในวงจร และกดสวิทช์เพื่อให้วงจรเริ่มทำงานในการบันทึกสัญญาณที่ภาคต่างๆของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนั้น ไม่สามารถวัดสัญญาณเพื่อเปรียบเทียบพร้อมๆกันหลายช่องสัญญาณได้ เนื่องจากมีขีดจำกัดจากเครื่องมือวัดที่สามารถวัดได้ครั้งละ 2 ช่องสัญญาณ และแต่ละช่องสัญญาณก็ไม่ได้มีการแยกโคจรทางไฟฟ้าจากกัน ดังนั้นจึงทำการวัดสัญญาณที่จุดต่างๆอ้างอิงกับสัญญาณกระแส ซึ่งจะช่วยให้ช่องสัญญาณทั้งสองของเครื่องมือวัดแยกโคจรจากกันและใช้สัญญาณกระแสเป็นสัญญาณอ้างอิงในการวัดสัญญาณอื่นๆ เพื่อเปรียบเทียบจังหวะการทำงานของสัญญาณต่างๆ

ในการวัดคุณสมบัติที่จุดต่างๆของวงจรมันจะใช้เครื่องมือช่วยในการบันทึกรูปคลื่นสัญญาณ การบันทึกรูปคลื่นนั้นจะทำการบันทึกรูปคลื่นในภาวะอยู่ตัว (Steady State) เพื่อที่จะสามารถนำไปเทียบกับรูปคลื่นที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ การทดสอบทางไฟฟ้านี้จะบันทึกรูปสัญญาณไปทีละส่วน โดยเรียงเป็นหัวข้อไว้ดังต่อไปนี้

4.1. รูปคลื่นสัญญาณขั้วนำทรานซิสเตอร์

รูปที่ 4.1 แสดงรูปคลื่นของกระแสเบส (I_B) และรูปคลื่นของแรงดันเบสอิมิตเตอร์ (V_{BE}) ที่ความถี่ประมาณ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ จากรูปเมื่อนำมาพิจารณาจะเห็นว่า ช่วงเวลาที่กระแสเป็นบวกก็คือ ช่วงเวลาที่วงจรขั้วนำให้ทรานซิสเตอร์นำกระแส (Turn on Time) ซึ่งที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ มีค่าประมาณ 18 ไมโครวินาที ในขณะที่ช่วงเวลาที่กระแสเบสเป็นลบคือ ช่วงเวลาที่

วงจรขั้วนำเบสสั่งให้ทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแส การที่กระแสเบสเป็นลบเนื่องจากมีกระแสไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรทางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางธุรกิจ
นอกจากเบสของทรานซิสเตอร์ช่วงเวลานี้เป็นค่า Storage Time ของทรานซิสเตอร์ ที่ความถี่
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20 กิโลเฮิร์ตซ์ มีค่าประมาณ 5 ไมโครวินาที สำหรับรูปคลื่นของกระแสและแรงดันเบสอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์อีกตัวนั้นจะมีขนาดและรูปร่างเหมือนกับรูปคลื่นของกระแสเบสและแรงดันเบสอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ที่วัดดังรูปที่ 4.1 แต่จะมีเฟสต่างกัน 180 องศา



รูปที่ 4.1 รูปคลื่นกระแสเบสและแรงดันเบสอิมิตเตอร์ที่ขั้วนำทรานซิสเตอร์กำลัง

4.2 รูปคลื่นกระแสผ่านทรานซิสเตอร์และแรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์กำลัง

รูปที่ 4.2 แสดงรูปคลื่นกระแสผ่านทรานซิสเตอร์และแรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์กำลัง

Q_1 ที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ช่วงกระแสที่เป็นบวกคือช่วงที่ทรานซิสเตอร์นำกระแส ส่วนช่วงลบเป็นช่วงที่ทรานซิสเตอร์ไหลผ่านไดโอด ในช่วงที่เริ่มขับนำให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 นำกระแส ทรานซิสเตอร์ Q_1 จะยังไม่นำกระแส เนื่องจากช่วงนี้กระแสจะยังคงไหลผ่านไดโอดจึงทำให้แรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์ Q_1 เป็นลบแต่มีค่าลบน้อยๆจนถึงว่าเป็นศูนย์ได้ การเริ่มนำกระแสที่ทรานซิสเตอร์จึงเป็นแบบภาคแรงดันศูนย์ (Zero Voltage Turn on) ทำให้กำลังสูญเสียในขณะเริ่มนำกระแสมีค่าต่ำและในช่วงหยุดนำกระแสขณะที่กระแสกำลังลดลงสลับเบสแรงดันจะช่วยหน่วงการเพิ่มขึ้นของแรงดันทำให้แรงดันคร่อมสวิตช์ในขณะที่มีกระแสไหลผ่านสวิตช์มีค่าไม่สูงมากนัก กระแสผ่านสวิตช์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์ที่วัดได้จะรวมกระแสที่ไหลผ่านไดโอดที่ขนานกับ

ทรานซิสเตอร์ด้วยเนื่องจากไดโอดถูกต่อตรงระหว่างขาคอลเล็กเตอร์และอิมิตเตอร์ของ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ทรานซิสเตอร์อยู่ด้วย โดยมีค่าของกระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์กำลังประมาณ 16 แอมแปร์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และค่าของแรงดันที่ตกคร่อมทรานซิสเตอร์กำลังประมาณ 200 โวลต์ สำหรับรูปคลื่นของกระแสผ่านทรานซิสเตอร์และแรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์ Q_2 นั้นจะมีขนาดและรูปร่างเหมือนกับรูปคลื่นของกระแสผ่านทรานซิสเตอร์และแรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์ Q_1 แต่จะมีเฟสต่างกัน 180 องศา

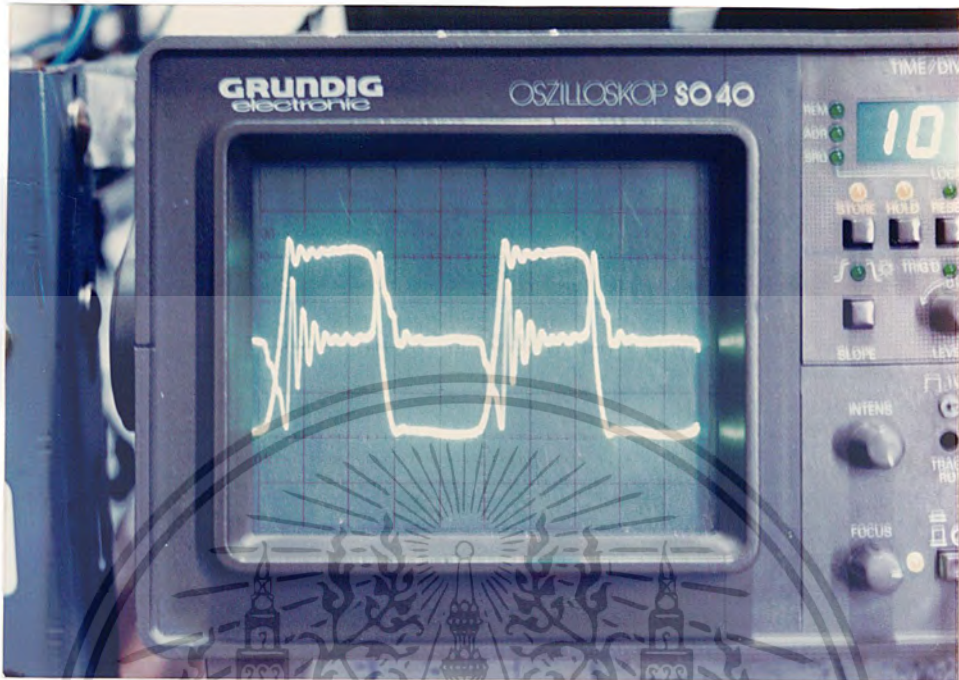


รูปที่ 4.2 รูปคลื่นกระแสผ่านทรานซิสเตอร์และแรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์ Q_1

4.3 รูปคลื่นกระแสและแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ (วงจรถนั้บเบอร์)

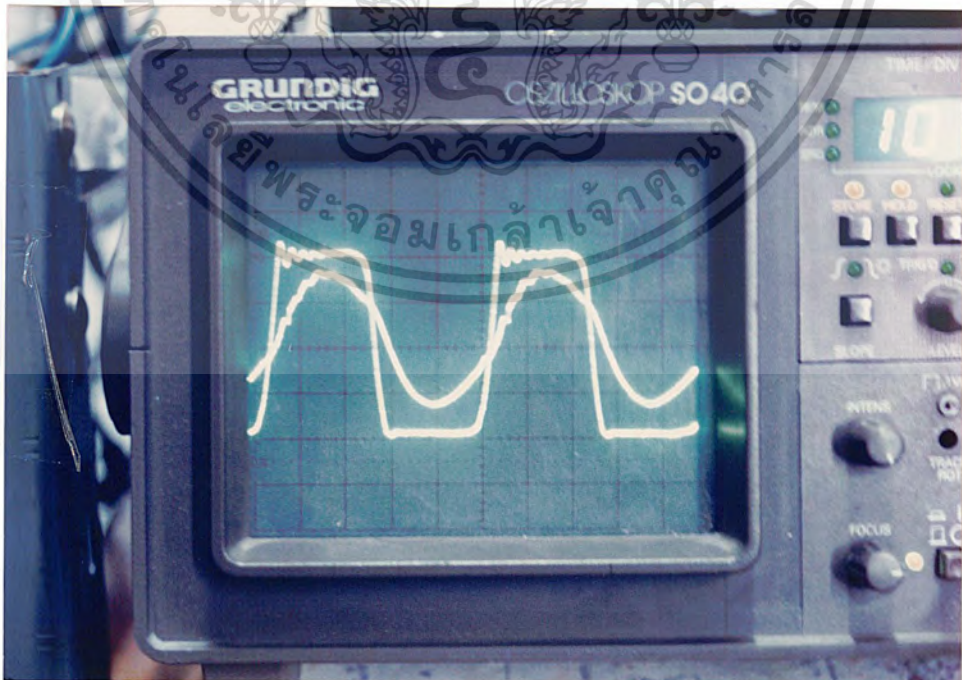
รูปที่ 4.3 แสดงรูปคลื่นกระแสผ่านตัวเก็บประจุและแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุในวงจรถนั้บเบอร์ที่ความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์ จากรูปเมื่อนำมาพิจารณาจะเห็นว่าในขณะที่แรงดันตกคร่อมที่ทรานซิสเตอร์กำลังจะเปลี่ยนสถานะจากเปิดไปเป็นปิดจะมีแรงดันส่วนหนึ่งที่ได้มาจากตัวเก็บประจุในวงจรถนั้บเบอร์มาต้านกับแรงดันที่จะเปลี่ยนสถานะจากเปิดไปเป็นปิด ซึ่งในช่วงนี้จะเป็นการหน่วงให้การเพิ่มขึ้นของแรงดันที่ตกคร่อมทรานซิสเตอร์กำลังคืนสู่ภาวะปกติช้าลง ส่งผลให้การไขว้ (Cross) กันระหว่างกระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์กำลังกับแรงดันที่ตกคร่อมทรานซิสเตอร์กำลังลดน้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 รูปคลื่นกระแสและแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ (วงจรถ่ายเบอร์)

4.4 รูปคลื่นกระแสและแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.4 รูปคลื่นกระแสและแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.4 แสดงรูปคลื่นกระแสและรูปคลื่นแรงดันคั่นด้านออกของอินเวอร์เตอร์จะเห็นได้ว่ากระแสจะล่าหลังแรงดันซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขที่ต้องการให้อินเวอร์เตอร์ทำงานแบบเรโซแนนซ์ภาคแรงดันศูนย์ รูปคลื่นกระแสจะมีลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ ส่วนแรงดันมีลักษณะคล้ายรูปสี่เหลี่ยมซึ่งใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์วงจรด้วยคอมพิวเตอร์ โดยจะมีค่ายอดของกระแสที่ไหลออกจากอินเวอร์เตอร์ประมาณ 16 แอมแปร์

4.5 รูปคลื่นกระแสและแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุทางด้านปฐมภูมิ

รูปที่ 4.5 แสดงรูปคลื่นกระแสและรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุทางด้านปฐมภูมิที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ จากรูปเมื่อนำมาพิจารณาจะเห็นว่ากระแสที่ได้มีความต่อเนื่องโดยมีค่ายอดของกระแสเท่ากับ 16 แอมแปร์ ค่ายอดของแรงดันทางด้านซีกบวกเท่ากับ 250 โวลต์ และค่ายอดของแรงดันทางด้านซีกลบเท่ากับ -20 โวลต์

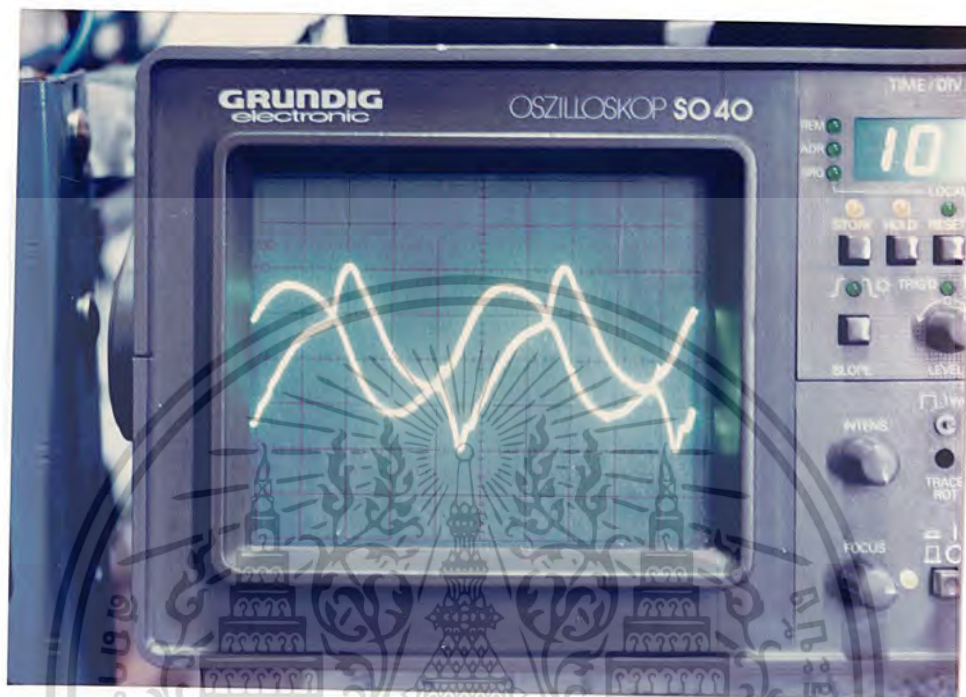


รูปที่ 4.5 รูปคลื่นกระแสและแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุทางด้านปฐมภูมิ

4.6 รูปคลื่นกระแสและแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำทางด้านปฐมภูมิ

รูปที่ 4.6 แสดงรูปคลื่นกระแสและรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำทางด้านปฐมภูมิที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ จะเห็นได้ว่ากระแสจะล่าหลังแรงดันซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการ โดยมีค่ายอดของกระแสเท่ากับ 16 แอมแปร์ ค่ายอดของแรงดันเท่ากับ 200 โวลต์ ซึ่งรูปคลื่นที่ได้ใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์วงจรด้วยคอมพิวเตอร์

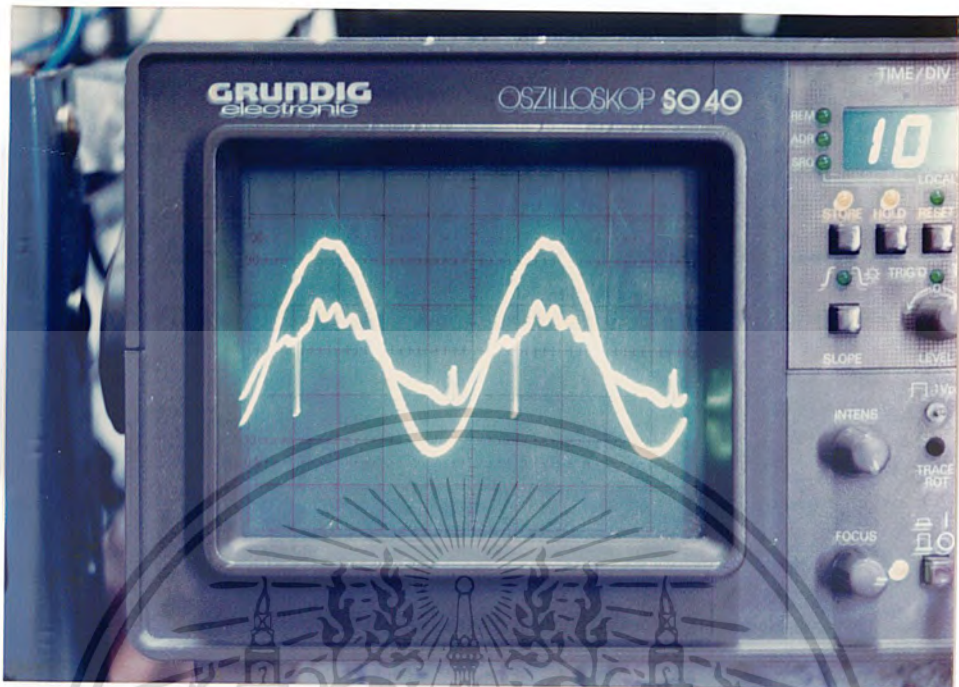


รูปที่ 4.6 รูปคลื่นกระแสและแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำทางด้านปฐมภูมิ

รูปที่ 4.7 รูปคลื่นกระแสและแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง

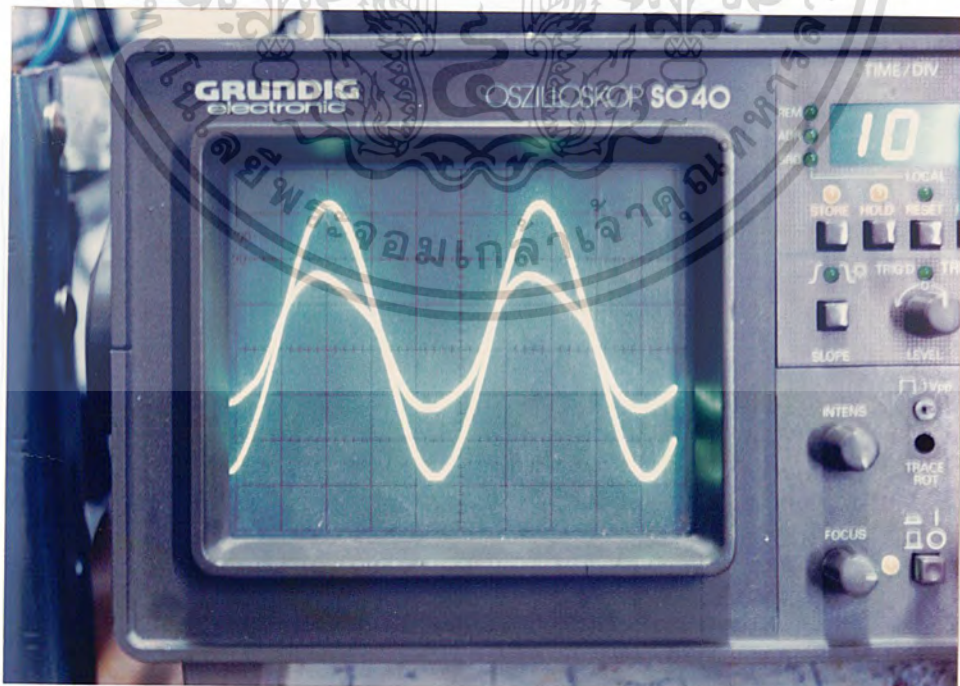
รูปที่ 4.7 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง เมื่อเปรียบเทียบกับกระแสและแรงดันด้านทุติยภูมิจะเห็นว่ารูปคลื่นของกระแสจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณจากอัตราส่วนของจำนวนรอบปฐมภูมิต่อจำนวนรอบทุติยภูมิ จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นกระแสจะมีลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ ส่วนรูปคลื่นแรงดันควรจะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม เนื่องจากผลของตัวเก็บประจุ แต่จากผลการทดลองพบว่ารูปคลื่นที่ได้มีลักษณะไม่เป็นรูปสี่เหลี่ยมที่เดียว ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลงและแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรมอยู่ระหว่างหม้อแปลงทางด้านปฐมภูมิกับตัวเก็บประจุทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง โดยมีค่ายอดของกระแสประมาณ 16 แอมแปร์ และค่ายอดของแรงดันประมาณ 200 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 รูปคลื่นกระแสและแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง

4.8 รูปคลื่นกระแสและแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง

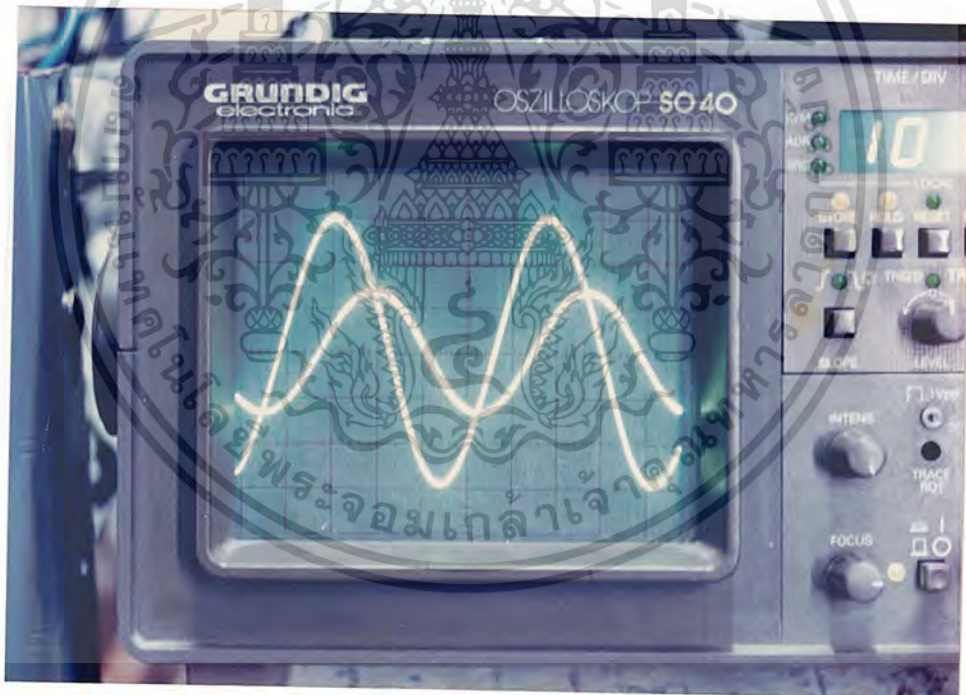


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ในนามของเว็บไซต์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นการค้า
รูปที่ 4.8 รูปคลื่นกระแสและแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.8 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกำลังความถี่สูงที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ รูปคลื่นของกระแสและแรงดันจะมีลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ จะสังเกตเห็นได้ว่ารูปคลื่นที่ได้จากทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงจะมีสัญญาณรูปคลื่นใกล้เคียงกับสัญญาณที่เข้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง แต่จะต่างกันที่ระดับของแรงดันและกระแสที่ใช้งาน โดยมีค่ายอดของกระแสประมาณ 30 แอมแปร์ และค่ายอดของแรงดันประมาณ 60 โวลต์

4.9 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันที่โหลด

รูปที่ 4.9 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันที่โหลดเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ จะสังเกตเห็นได้ว่ารูปคลื่นของกระแสและแรงดันนั้นจะมีมุมล้ำหัดกัน อันเนื่องมาจากค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากการพันขดลวดทางด้านโหลด โดยมีค่ายอดของกระแสที่ไหลผ่านโหลดประมาณ 67.5 แอมแปร์และค่ายอดของแรงดันที่ตกคร่อมโหลดประมาณ 60 โวลต์



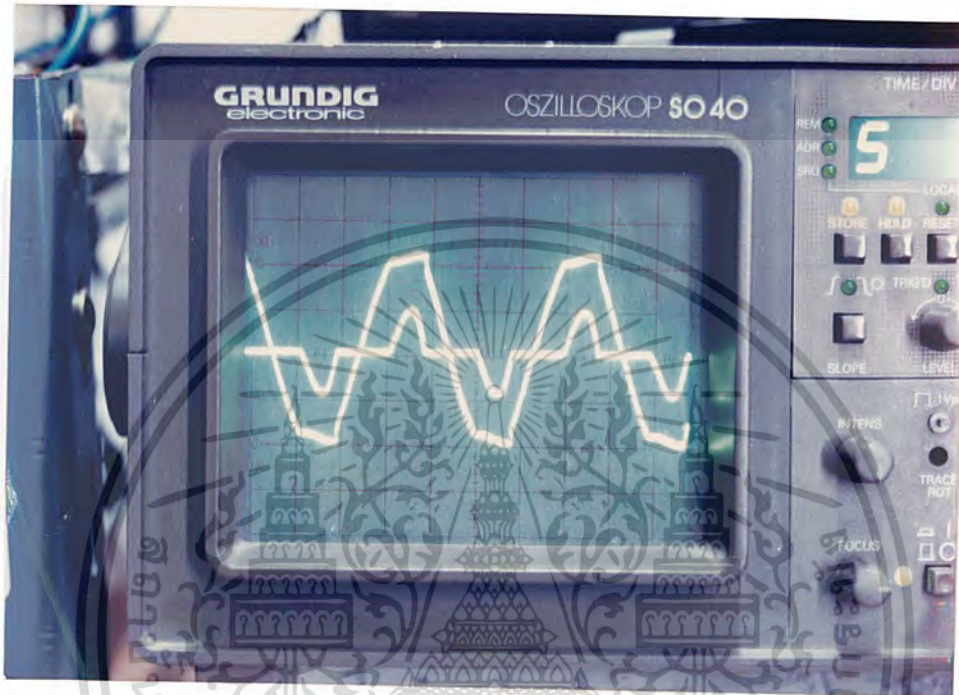
รูปที่ 4.9 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่โหลดที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์

4.10 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสไฟฟ้าสลับทางด้านเข้า

รูปที่ 4.10 แสดงรูปคลื่นของแรงดัน ไฟฟ้ากระแสสลับ (V_{ac}) และกระแสไฟฟ้าสลับ

(I_{ac}) ทางด้านเข้าเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าสลับมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ ส่วนกระแสไฟฟ้าสลับจะเป็นพัลส์ (Pulse) มีลักษณะเป็นไม่วากรณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนหนึ่งของรูปคลื่นไซน์ ผลจากการทดลองที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับมีค่า ยอดประมาณ 200 โวลต์ กระแสมีค่ายอดประมาณ 16 แอมแปร์ และมีความกว้างพัลส์ ประมาณ 3 มิลลิวินาที ประมาณเป็นค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสประมาณ 6.7 แอมแปร์



รูปที่ 4.10 รูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าสลับทางด้านเข้า

4.11 การวัดกำลังและตัวประกอบกำลังทางด้านขาเข้า

ในการวัดกำลังปรากฏ (VA) กำลังใช้งาน (Watt) และค่าตัวประกอบกำลังทางด้านขาเข้าของเครื่อง จะใช้เครื่องมือที่สามารถวัดค่ากำลังใช้งานจริง (True RMS) โดยไม่คำนึงถึงผลกระทบเกี่ยวกับฮาร์โมนิกส์ ซึ่งสามารถอ่านค่ากระแสใช้งาน แรงดัน ค่ากำลังใช้งานและค่าตัวประกอบกำลังได้โดยตรง และเมื่อให้อินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ค่ากระแสใช้งาน แรงดัน ค่ากำลังเฉลี่ย และค่าตัวประกอบกำลังแสดงอยู่ในตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัดทางด้านเข้าวงจร	
แรงดันกระแสสลับ (โวลต์)	170
กระแส (แอมแปร์)	6.7
กำลังใช้งาน (วัตต์)	999
ค่าตัวประกอบกำลัง	0.877

ตารางที่ 4.1 แสดงค่ากำลังและตัวประกอบกำลังทางด้านเข้าของเครื่อง

4.12 การวัดกำลังด้านออกและประสิทธิภาพ

ในการวัดค่ากำลังขาออกและประสิทธิภาพของเครื่องให้ความร้อน โดยการเหนี่ยวนำ จะทำการวัดค่าต่างๆเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ กำลังด้านออกของเครื่องให้ความร้อน โดยการเหนี่ยวนำได้จากผลคูณของค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสและค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของเครื่องให้ความร้อน โดยการเหนี่ยวนำส่วนประสิทธิภาพคำนวณได้จากอัตราส่วนของกำลังใช้งานใช้งานเฉลี่ยด้านออกของเครื่องให้ความร้อน โดยการเหนี่ยวนำต่อกำลังใช้งานเฉลี่ยด้านเข้าของเครื่องให้ความร้อน โดยการเหนี่ยวนำ จากผลการทดลองแสดงอยู่ในตารางที่ 4.2

วัดทางด้านออก (โหลด)	
แรงดันกระแสสลับ (โวลต์)	40
กระแส (แอมแปร์)	45
กำลังใช้งาน (วัตต์)	900
ค่าตัวประกอบกำลัง	0.5

ตารางที่ 4.2 แสดงค่ากำลังด้านออกและประสิทธิภาพของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

จากตารางที่ 4.1 และ 4.2 สามารถหาประสิทธิภาพโดยรวมของวงจรได้ โดยคิดจากอัตราส่วนของกำลังใช้งานด้านออกของเครื่องให้ความร้อน โดยการเหนี่ยวนำต่อกำลังใช้งานด้านเข้าของเครื่องให้ความร้อน โดยการเหนี่ยวนำ ซึ่งมีประสิทธิภาพโดยรวมของวงจรประมาณ 89 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

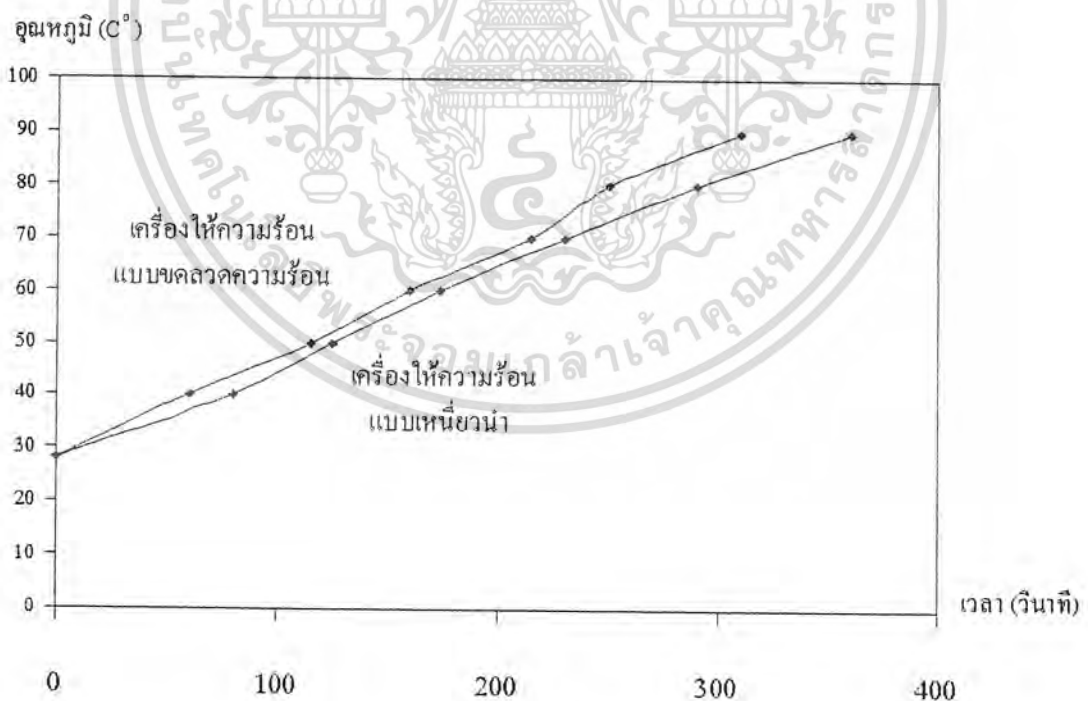
ทดสอบทางด้านปริมาณความร้อน

จากการเปรียบเทียบเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำกับเครื่องให้ความร้อนแบบ
ขดลวดความร้อนสามารถสรุปเป็นตารางได้ดังนี้

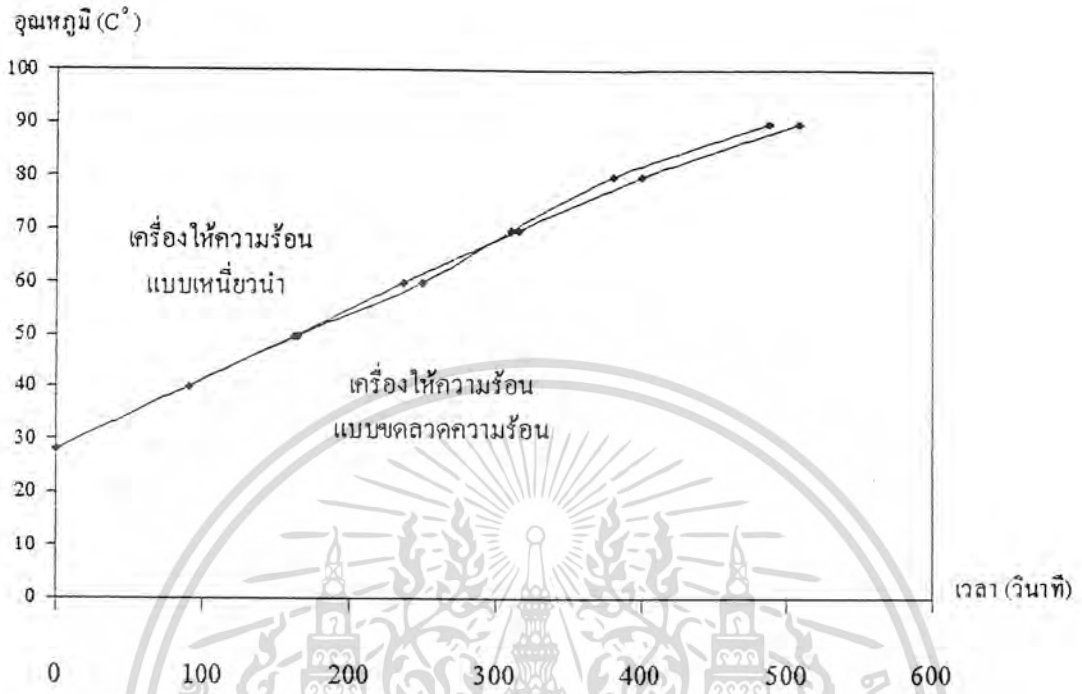
ปริมาณน้ำ (ml)	อุณหภูมิ (C ^o)	เตาแบบเหนี่ยวนำ		เตาแบบขดลวดความร้อน	
		Δt (sec)	ความร้อน (kJ)	Δt (sec)	ความร้อน (kJ)
250	40	80	12.57	60	12.57
	50	45	23.05	55	23.05
	60	49	33.52	45	33.52
	70	56	43.99	55	43.99
	80	60	54.47	35	54.47
	90	70	64.95	60	64.95
500	40	90	25.14	90	25.14
	50	73	46.09	75	46.09
	60	74	67.04	85	67.04
	70	78	87.99	60	87.99
	80	85	108.94	70	108.94
	90	108	129.89	107	129.89
750	40	120	37.71	120	37.71
	50	100	69.13	110	69.13
	60	110	100.56	115	100.56
	70	100	131.98	71	131.98
	80	130	163.41	129	163.41
	90	139	194.83	160	194.83
1000	40	160	50.28	186	50.28
	50	130	92.18	139	92.18
	60	135	134.08	115	134.08
	70	142	175.98	130	175.98
	80	163	217.88	150	217.88
	90	182	259.78	185	259.78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบเตาให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำกับเตาให้ความร้อนแบบขดลวดความร้อนใช้

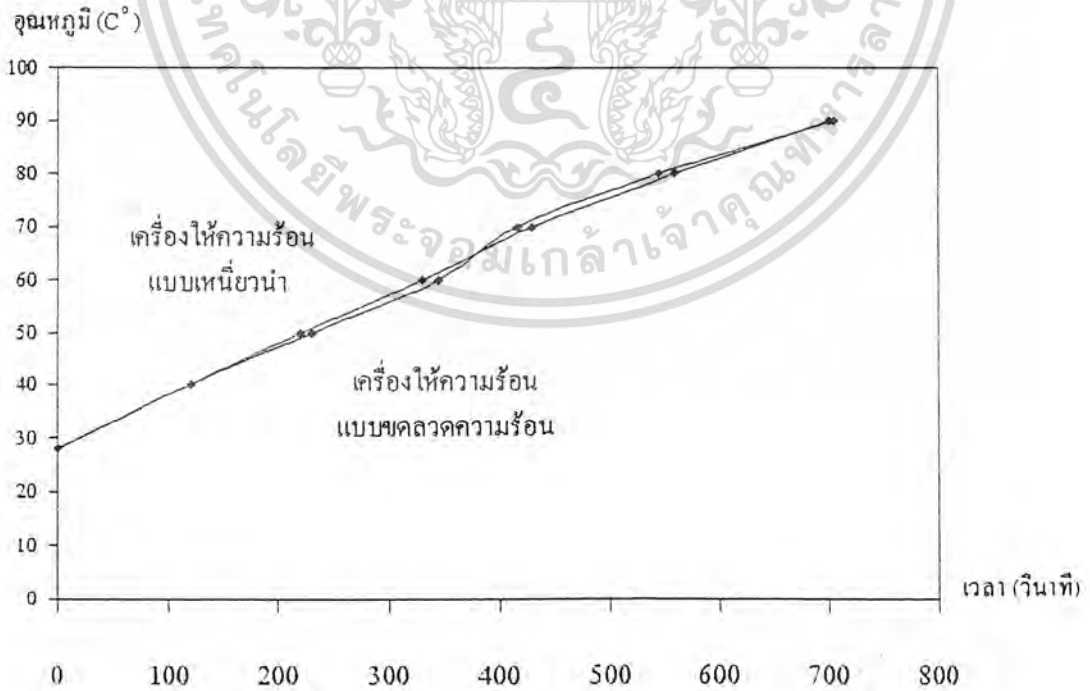
จากการเปรียบเทียบผลการทดลองในตารางที่ 4.3 สามารถกล่าวได้ว่าเตาให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพสูงในช่วงแรกและจะมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อมีการใช้เป็นระยะเวลานานๆ เนื่องจากในช่วงแรกของการทำงาน ค่าอิมพีแดนซ์ต่างๆทางด้านโหลดนั้นตรงกับที่ออกแบบไว้ จึงทำให้เตาให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพสูง และเมื่อมีการใช้เป็นระยะเวลานานๆ ความร้อนที่เกิดจากภาชนะจะแผ่ความร้อนลงสู่ขดลวดที่พันตีเกลียวขดเป็นฐานไว้ ความร้อนนี้จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่ออกแบบไว้เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย ทำให้ความสามารถในการทำงานลดลงไป และที่ภาวะต่างๆเตาให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าเตาให้ความร้อนแบบขดลวดความร้อน เนื่องจากเตาให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำจะร้อนจากภาชนะบริเวณผิวและแผ่ออกมายังโหลด (น้ำ) ในกรณีที่ภาระโหลดน้อยจะทำให้การนำพาความร้อนออกสู่โหลดนั้นเป็นไปได้ลำบากแต่เตาให้ความร้อนแบบขดลวดความร้อนนั้นความร้อนที่ได้จะเป็นความร้อนจากกันของภาชนะจึงทำให้โหลดได้รับความร้อนได้รวดเร็วกว่าเตาให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ สังเกตได้จากกราฟรูปที่ 4.11 - 4.14 ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิเทียบกับเวลา ณ ภาระโหลดต่างๆ โดยเปรียบเทียบที่พิกัดกำลังทางด้านอินพุตเท่ากับ 450 วัตต์



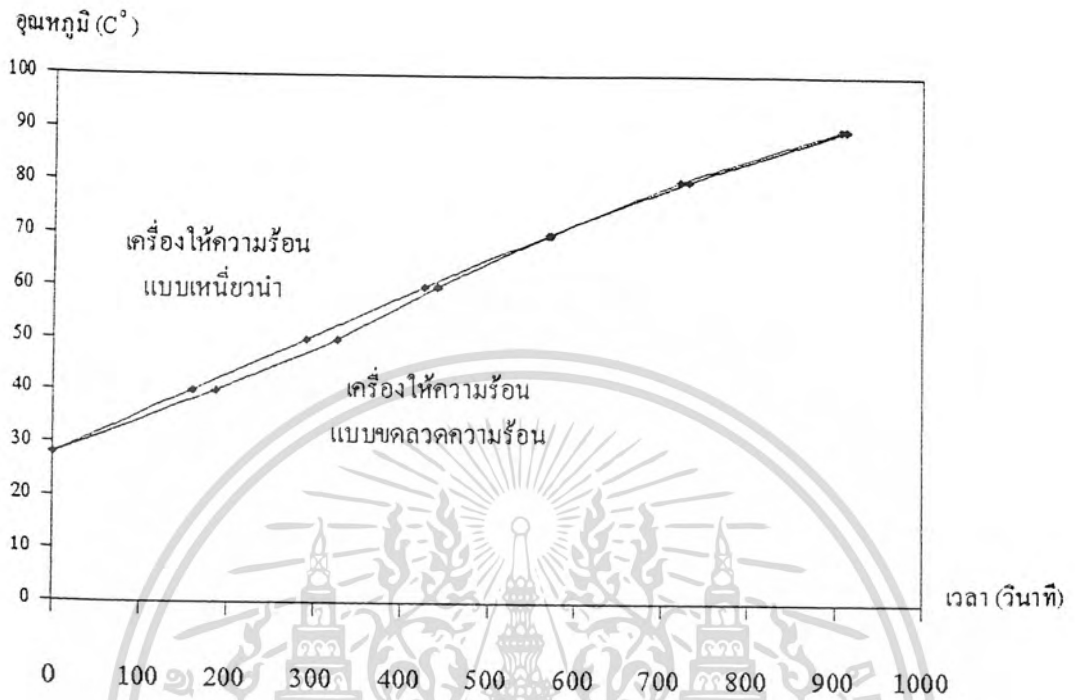
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิเทียบกับเวลาที่โหลด 250 มิลลิลิตร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยไว้ล่วงหน้า



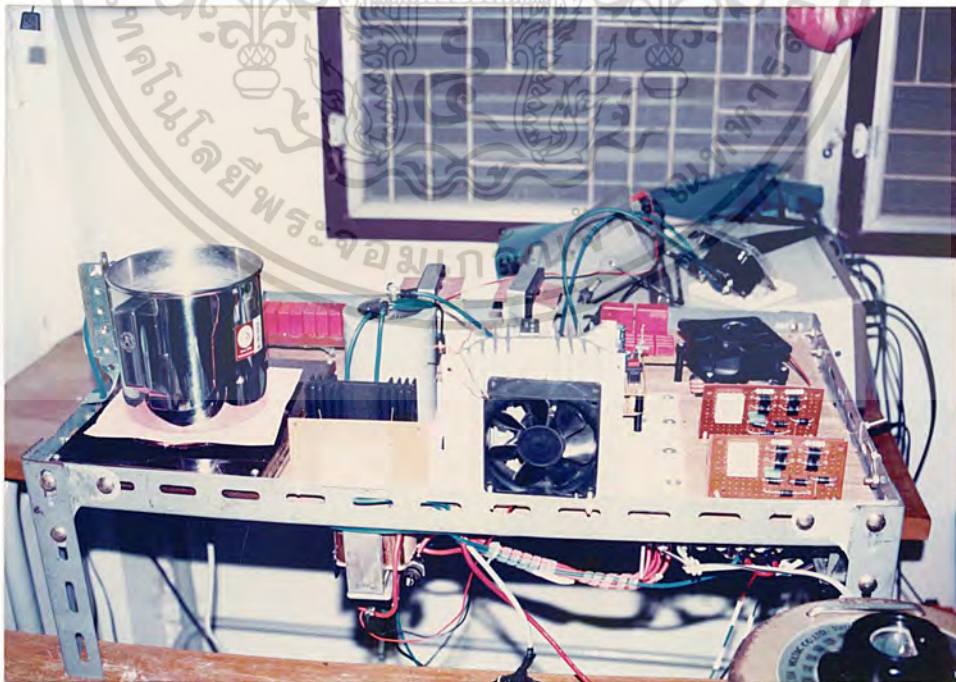
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิเทียบกับเวลาที่ไหลค 500 มิลลิลิตร



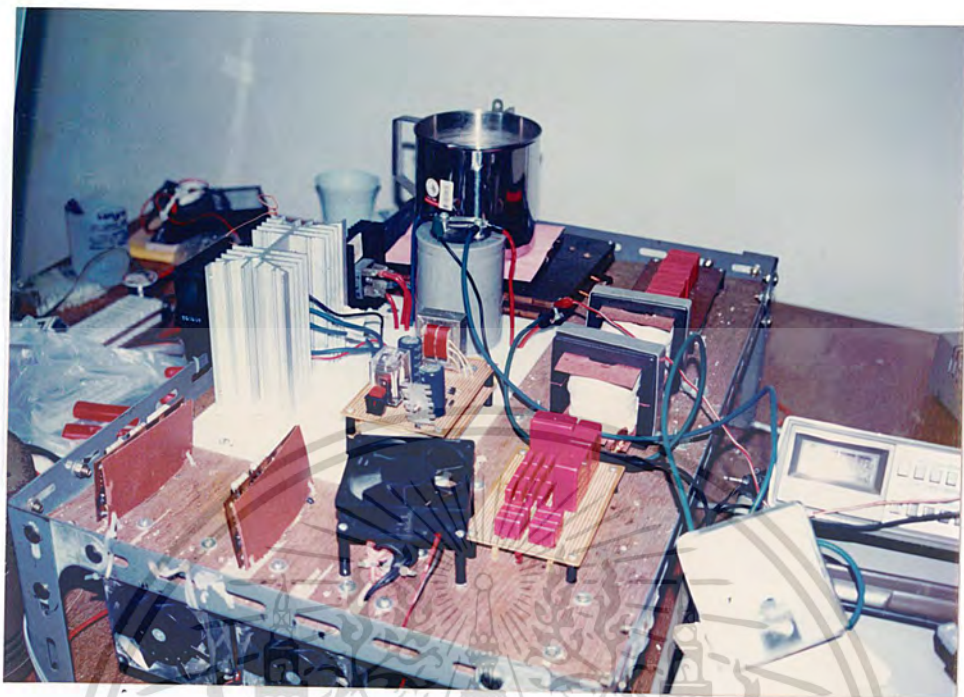
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิเทียบกับเวลาที่ไหลค 750 มิลลิลิตร
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



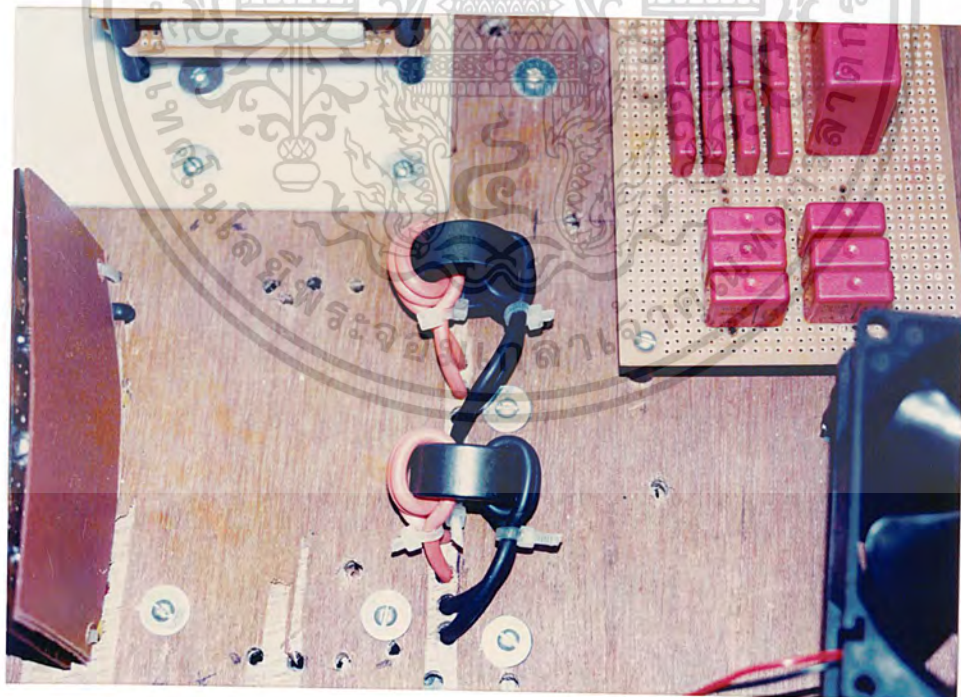
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิเทียบกับเวลาที่ไหลค 1000 มิลลิลิตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานรูปที่ 4.15 รูปโครงการ 1 เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 รูปโครงการงาน 2



รูปที่ 4.17 รูปโครงการงาน 3 (หม้อแปลงขั้วนำทรานซิสเตอร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
บทวิจารณ์และสรุป

เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่สร้างขึ้นนี้ เป็นเครื่องต้นแบบที่ยังต้องได้รับการปรับปรุงและพัฒนาต่อไปอีกระดับหนึ่งถึงจะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมครัวเรือนได้อย่างเหมาะสม เพราะขนาดกำลังออกที่ภาชนะ จากการทดสอบมีค่าประมาณ 900 วัตต์ ในขณะที่กำลังทางด้านเข้าประมาณ 1000 วัตต์ ซึ่งจัดว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างต่ำ ถ้านำไปใช้ในโรงงานครัวเรือนจริงสำหรับกำลังที่ภาชนะขนาดนี้ เมื่อทดสอบให้ความร้อนกับภาชนะสแตนเลส ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร ที่ความถี่ประมาณ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ จะสามารถให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำแก่ภาชนะที่บรรจุน้ำ 1 ลิตร โดยสามารถเพิ่มอุณหภูมิที่ภาชนะขึ้นเป็น 100 องศา ภายในเวลา 8 นาที

เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่สร้างขึ้นนี้ ต่างจากเครื่องที่ใช้ในปัจจุบันตรงที่มีการควบคุมการทำงานโดยการออสซิลเลต โดยตัวมันเองแทนการใช้ชุดควบคุมจากภายนอกและใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภททรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์แทนการใช้หลอดสูญญากาศในการกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพและความเชื่อมั่นของวงจรสูงขึ้น

ส่วนประกอบต่างๆที่สำคัญของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำแบบวิธีสวิตซ์ที่สร้างขึ้น กล่าวโดยสรุปได้ดังนี้

5.1 แหล่งจ่ายไฟตรงประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสและวงจรกรอง ซึ่งวงจรส่วนนี้จะรับไฟ 1 เฟส 50 เฮิร์ตซ์ ขนาด 220 โวลต์ ผ่านวงจรเรียงกระแส 1 เฟสแบบบริดจ์ เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง และเพื่อจะกรองแรงดันไฟตรงให้เรียบ จึงต่อวงจรกรองโดยใช้ตัวเก็บประจุเป็นตัวกรองแรงดันกระเพื่อมทำให้ได้ไฟตรงที่มีค่าประมาณ 310 โวลต์ และมีแรงดันกระเพื่อมประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ที่ทางเข้าของวงจรเรียงกระแสยังมี Magnetic - Contractor ที่ทำหน้าที่ปิดเปิดวงจร และทำหน้าที่ตัดต่อการคายประจุของตัวเก็บประจุในตอนปิดเครื่อง

5.2 แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง ประกอบด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ ซึ่งทำหน้าที่แปลงไฟตรงขนาดประมาณ 310 โวลต์ ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งจ่ายให้กับขดลวดเหนี่ยวนำโดยผ่านหม้อแปลงความถี่สูง ในวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ ซึ่งเป็นวงจรพื้นฐานที่มีความเชื่อถือได้สูง และใช้ทรานซิสเตอร์กำลัง

แบบไบโพลาร์ทำงานเป็นสวิตซ์ซึ่งมีข้อดีในแง่ราคาถูก หาง่าย มีความสามารถในการทนต่อแรงดันการค้ำ
ไม่จำเป็นต้องนำทรานซิสเตอร์หลายตัวมาต่ออนุกรมหรือต่อขนานกันเพื่อรับใช้

แรงดันหรือกระแส เป็นผลให้ส่วนของวงจรถืออินเวอร์เตอร์นี้มีความซับซ้อนน้อยลง ความน่าเชื่อถือของระบบจึงสูงขึ้น การทำงานของวงจรถือออกแบบให้เป็นแบบกระแสตามหลังแรงดัน เพื่อป้องกันการลัดวงจรในกึ่งเดียวกัน (Shoot Through) เนื่องจากสาเหตุช่วงเวลาพื้นตัวของไดโอดเพราะวงจรถือทำงานในช่วงความถี่สูง

5.3 วงจรขับนำเบส ส่วนนี้อาจถือได้ว่าเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดของการพัฒนาและวิจัยเครื่องต้นแบบก็ได้ เพราะพยายามที่จะใช้วงจรที่ง่ายไม่ซับซ้อนและให้วงจรมีความเชื่อถือได้สูง แต่ความยากหรือปัญหาหลักของโครงการนี้ก็คือ การขับนำทรานซิสเตอร์ให้ทำงานได้ที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยการออสซิลเลตโดยตัวเองโดยใช้หม้อแปลงขับนำ (Toroid) ในการส่งสัญญาณขับนำมาควบคุมทรานซิสเตอร์ ดังนั้นวงจรที่ใช้ขับนำเบสนี้ จะต้องออกแบบให้มีการดึงกระแสเบสตอนช่วง Turn off ได้เร็ว เพื่อลดค่า Storage Time ซึ่งเป็น Delay Time ในการ Turn off และเพื่อค่า Dead Time ก่อนการ Turn on ด้วย นอกจากนี้การขับนำของสวิตช์ขับนำเบสนี้ยังมีข้อดีของการเป็นภาคแรงดันศูนย์ (Zero Voltage Turn on) และสัญญาณขับนำคอนจิงหวะ Turn on ก็มีลักษณะที่ค่อยเป็นค่อยไป (Soft Drive) ทำให้ความเครียดและกำลังสูญเสียคอนจิงหวะ Turn on ที่เกิดกับสวิตช์มีค่าต่ำ ส่วนการออกแบบหม้อแปลงขับนำเบสจะใช้เทคนิคแกนอิ่มตัว (Saturable Core) ในการสร้างสัญญาณแบบ 3 สถานะซึ่งจะทำให้วงจรขับนำเบสมีความซับซ้อนน้อยลง

5.4 วงจรกำลังด้านเอาต์พุต ส่วนนี้คือส่วนของวงจรถือกำลังที่รับสัญญาณต่อจากวงจรถืออินเวอร์เตอร์ผ่านหม้อแปลงความถี่สูง ไปยังขดลวดเหนี่ยวนำและภาชนะซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้

5.4.1 หม้อแปลงความถี่สูง มีอัตราส่วนการแปลงแรงดันเป็น 2:1 ออกแบบให้เป็นหม้อแปลงขนาด EE-80/76 พันแบบ 2:1 จำนวน 1 ตัว

5.4.2 ขดลวดเหนี่ยวนำ เป็นส่วนที่ใช้สำหรับการสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนที่ภาชนะ ในโครงการที่วิจัยนี้ได้ออกแบบให้พันเป็นขดลวดวงกลมแบนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 12 เซนติเมตร ทั้งนี้เพื่อให้กำลังที่จ่ายไปสู่ชิ้นงานมีความหนาแน่นกำลังต่อพื้นที่ผิวมากที่สุด

5.4.3 ตัวเก็บประจุชดเชยตัวประกอบกำลัง เป็นตัวเก็บประจุที่ใช้ต่อขนานกับขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งต้องเป็นชนิดที่ใช้งานได้ที่ความถี่สูงและมีค่ากำลังสูญเสียในตัวต่ำ เนื่องจากตัวเก็บประจุที่ใช้มีค่าความจุถึง 9 ไมโครฟารัด ทำให้ต้องใช้ตัวเก็บประจุหลายๆตัวมาต่อขนานกัน

5.4.4 ตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรมทางด้านปฐมภูมิ มีไว้เพื่อปรับให้กระแสไหลลดตามหลังแรงดัน โดยใช้ขดลวดพันบนแกนเหล็ก EE-80/76 จำนวน 1 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.5 ตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมทางด้านปฐมภูมิ มีไว้เพื่อปิดกั้นองค์ประกอบไฟฟ้า กระแสตรงไม่ให้เข้าหม้อแปลงความถี่สูง

จากการพิจารณาผลงานวิจัยที่ได้ทำมาสามารถบอกข้อดีและข้อเสียได้ดังนี้

ข้อดี :

- ระบบควบคุมที่ใช้ในการทำงานไม่ยุ่งยากเนื่องจากใช้วงจรรอสซิลเลคด้วยตัวเองจึงตัดปัญหาการควบคุมจากวงจรภายนอก
- ลดปัญหาที่เกิดจากการรบกวนของสัญญาณภายนอกที่ส่งผลกระทบต่อการทำงาน
- ประหยัดการใช้ทรัพยากรที่เกิดจากการใช้เกสในการหุงต้มอาหาร

ข้อเสีย:

- เมื่อเทียบกับเครื่องให้ความร้อนแบบขดลวดที่ขายตามท้องตลาดแล้ว ยังถือว่าประสิทธิภาพยังไม่ดีพอเท่าที่ควร
- เสถียรภาพของระบบควบคุมยังไม่ดีพอ เนื่องจากในสถานะที่ชิ้นงานหรือภาชนะเกิดความร้อนจะทำให้ความถี่เปลี่ยนแปลงไป โดยอาจจะทำให้ทรานซิสเตอร์ชำรุดหรือเสียหายได้

ข้อเสนอแนะ

1. จากการออกแบบและติดตั้งสับเบรคแรงดันนั้น จะเห็นว่าถ้าเราประยุกต์การใช้งานใหม่ โดยให้มีการควบคุมการตัดต่อการทำงานของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ (สถานะที่มีโหลดตลอดและภาระคงที่) จะทำให้สับเบรคแรงดันที่ใช้มีเพียงตัวเก็บประจุเพียงอย่างเดียวพอไม่จำเป็นต้องมีความต้านทานที่ใช้จำกัดกระแสอัดประจุหรือคายประจุทำให้ไม่มีการสูญเสียที่ความต้านทานนี้ ประสิทธิภาพรวมของเครื่องจะ ได้สูงขึ้น

2. เครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นนี้ยังไม่มีการป้องกันอุณหภูมิสูงเกิน เช่น อุณหภูมิที่ขดลวดเหนี่ยวนำ และที่ตัวระบายความร้อนของทรานซิสเตอร์กำลัง ทั้งนี้เพราะถ้าระบบระบายความร้อนด้วยพัดลมของทรานซิสเตอร์กำลังเกิดเสียหาย หรือขัดข้อง จะ ได้ป้องกันความเสียหายได้ทัน

3. จากปัญหาการขับนำสวิตซ์ให้ทำงานที่ความถี่สูง และใช้ในวงจรกำลังสูง เราอาจเลือกอุปกรณ์ที่เป็นสวิตซ์ชนิดใหม่ เช่น IGBT (Isolated Gate Bipolar Transistor) ซึ่งโครงสร้างมี

ลักษณะที่ผสมกันระหว่างทรานซิสเตอร์กำลังชนิดไบโพลาร์ และมอสเฟตกำลัง ซึ่งทำให้สามารถรับค่า
ไม่ต่ำกว่า 1000V ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำงานที่ความถี่สูงได้ดีกว่าทรานซิสเตอร์ กำลังชนิดไบโพลาร์และมีขนาดกำลังสูงกว่ามอสเฟตอีก
ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม Math CAD ช่วยออกแบบทรานสฟอร์มเมอร์

*****> Transformer specifications : <*****

Peak voltage of coil no.1: $V_1 := 155$ V
 Peak voltage of coil no.2: $V_2 := 80$ V
 RMS current in coil no.1 $I_{rms1} = 10$ A
 RMS current in coil no.2 $I_{rms2} = 30$ A
 Window utilization ration of coil no.1; $\alpha := 0.5$
 Window utilization ration of coil no.2; $\beta := 0.5$
 Converter type factor $\lambda := 4$
 Operating Frequency $f := 20 \times 10^3$ Hz

*****> Designed specifications: <*****

Maximum flux density ; $B_{max} := 0.25$ Tesla
 Window utilization factor ; $k := 0.4$
 Copper loss; $P_{cu} := 5$ Watts

$$K_{gr} := \left[\frac{\rho}{\lambda^2} \right] \left[\frac{V_1^2 \frac{I_{rms1}^2}{\alpha}}{k \cdot B_{max}^2 \cdot f \cdot s^2 \cdot P_{cu}} + \frac{V_2^2 \frac{I_{rms2}^2}{\beta}}{k \cdot B_{max}^2 \cdot f \cdot s^2 \cdot P_{cu}} \right]$$

Required Kgr : $K_{gr} = 4.222 \times 10^{-10}$ M^5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม Math CAD ช่วยออกแบบทรานสฟอร์เมอร์ (ต่อ)

*****> Core selection ; <*****

For EI19 core size ; TYPE EI19 ;

CSS:= EE80

CSS := CSS - 1

W := DW_{CS}

S := DS_{CS}

t := DT_{CS,1}

$K_g := W \frac{S^2}{t}$

W = 0.001

S = 3.77 x 10⁻⁴

t = 0.162

Kg parameter for EE 80 core is;

$K_g = 1.298 \times 10^{-9} M^5$

*****> Calculated results <*****

Selected wire gauge :

SWG_s := SWG27

Number of turns :

$N_1 := \frac{V_1}{\lambda \cdot B_{max} \cdot S \cdot f_s}$

N₁ = 20.557 Turns

Number of turns selected ;

N_{1s} := 20 Turns

Total wire area :

$A_{w1} := \frac{k \cdot \alpha \cdot w}{N_{1s}}$

A_{w1} = 1.48 x 10⁻⁵ M²

Number of wires ;

$N_{1wire} := \frac{A_{w1}}{SWG_s}$

N_{1wire} = 108.584 Wires

Number of wires selec

N_{1wires} := 108 Wires

Selected wire area ;

A_{w1s} := N_{1wires} SWG_s

Total wire length :

W_{length} := t N_{1s}

W_{length} = 3.24 Meter

Core B_{max} ;

$B_{maxc} := \frac{V_1}{N_{1s} \cdot S \cdot f_s}$

B_{maxc} = 0.257 Tesla

Total wire resistance ;

$R_{wil} := \rho \cdot N_{1s} \frac{t}{A_{w1s}}$

R_{wil} = 0.005 Ohms

Copper loss ;

P_{cuwil} := I_{rmsl}² R_{wil}

P_{cuwil} = 0.455 Watts

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม Math CAD ช่วยออกแบบทรานสฟอร์มเมอร์ (ต่อ)

Selected wire gauge for N2; SWGs := SWG27
 Number of turns ; $N2 := \frac{V2}{\lambda \cdot B_{max} \cdot s \cdot fs}$ N2 = 10.61 Turns
 Number of turns selected ; N2s := 10 Turns
 Total wire area ; $Aw2 := \frac{K \cdot \beta \cdot W}{N2s}$ AW2 = 2.96×10^{-5} M²
 Number of wires ; $N2wire := \frac{Aw2}{SWGs}$ N2wire = 217.168 Wires
 Number of wires selected ; N2wires := 218 Wires
 Selected wire area ; Aw2s := N2wires . SWGs
 Total wire length ; $W2length := t \cdot N2s$ W2length = 1.62 Meters
 Core Bmax ; $Bmaxc := \frac{V2}{\lambda \cdot N2s \cdot S \cdot fs}$ Bmaxc = 0.265 Tesla
 Total wire resistance ; $Rwi2 := \rho \cdot N2s \cdot \frac{t}{Aw2s}$ Rwi2 = 0.001 Ohms
 Copper loss ; $Pcuwi2 := I_{rms}^2 \cdot Rwi2$ Pcuwi2 = 1.015 Watts
 Total copper loss $Pcut := Pcuwi1 + Pcuwi2$
 Pcut = 1.47

Core loss per weight ; $Pw := 9.5623 \times 10^{-6} \cdot Bmaxc^{2.22} \cdot fs^{1.192}$
 Pw := 0.059 Watts per gm
 Core weight ; $Wc := DWC_{cs}$ Wc = 354 gm
 Core loss by weight ; $Pcorew := Pw \cdot Wc$ Pcorew = 20.884 Watts

***** END *****

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม Math CAD ช่วยออกแบบตัวเหนี่ยวนำ

*****> Inductor specifications ; <*****

Inductance ; $L := 80 \times 10^{-6} \text{ H}$
 Peak inductor current ; $I_p := 34 \text{ Amps}$
 Effective inductor current ; $I_{rms} := \frac{I_p}{\sqrt{2}} \text{ Amps} ; I_{rms} = 24.04 \text{ Amps}$

*****> Designed specifications: <*****

Maximum flux density ; $B_{max} := 0.25 \text{ Tesla}$
 Window utilization factor ; $k := 0.5$
 Copper loss ; $P_{cu} := 5 \text{ Watt}$
 Operating frequency ; $f_s := 20 \times 10^3 \text{ Hz}$

$$K_{gr} := 4\rho \cdot \frac{\left[\left[\frac{1}{2} \right] \cdot L \cdot I_p^2 \right] \left[\left[\frac{1}{2} \right] L I_{rms}^2 \right]}{k \cdot B_{max}^2 \cdot P_{cu}}$$

Required K_{gr} $K_{gr} = 5.662 \times 10^{-10} \text{ M}^5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม Math CAD ช่วยออกแบบตัวเหนี่ยวนำ (ต่อ)

*****> Core selection : <*****

For EI19 core size ; TYPE EI19 ;

CSS ; = EE80

CS : = C_{ss} - l

W : = DW_{CS}

S : = DS_{CS}

t : = DT_{CS,1}

Kg : = w $\frac{S^2}{t}$

W = 7.4 x 10⁻⁴

S = 3.77 x 10⁻⁴

t = 0.162

Kg parameter for EE80 core is ;

Kg = 6.492 x 10⁻¹⁰ M⁵

*****> Calculated results <*****

Number of turns ;

Nw : = L $\frac{I_p}{B_{max} S}$

Nw = 28.85

Turns

Number of turns selected :

Nws : = 28

Selected wire gauge ;

SWGs : = SWG27

Total wire area ;

Aw : = $\frac{k.W}{Nws}$

Aw = 1.321 x 10⁻⁵ M²

Number of wires ;

Nwire : = $\frac{Aw}{SWGs}$

Nwire = 96.95 Wires

Number of wires selected ;

Nwires : = 97

Aws : = Nwires

Total wire length ;

Wlength : = t . Nw

Wlength = 4.675 Meter

Core Bmax ;

Bmaxc : = $\frac{L.I_p}{Nws.S}$

Bmaxc = 0.258 Tesla

Air-gap length ;

lg : = Nws² $\frac{\mu_0.S.10^3}{L}$

lg = 4.643 mm

Total wire resistance ;

Rwi : = $\rho \frac{Wlength}{Aws}$

Rwi = 0.007 Ohms

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ห้ามมิให้คัดลอกหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

โปรแกรม Math CAD ช่วยออกแบบตัวเหนี่ยวนำ (ต่อ)

Copper loss ; $P_{cuwi} = I_{rms}^2 R_{wi}$ $P_{cuwi} = 4.1$
Core loss per weight ; $P_w = 9.5623 \cdot 10^{-6} B_{maxc}^{2.22} f_s^{1.1}$
 $P_w = 0.059$ Watts per gm
Core weight ; $W_c = DW_{Cs}$ $W_c = 354$ gm
Core loss by weight ; $P_{corew} = P_w W_c$ $P_{corew} = 22.334$ Watts

***** END *****



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

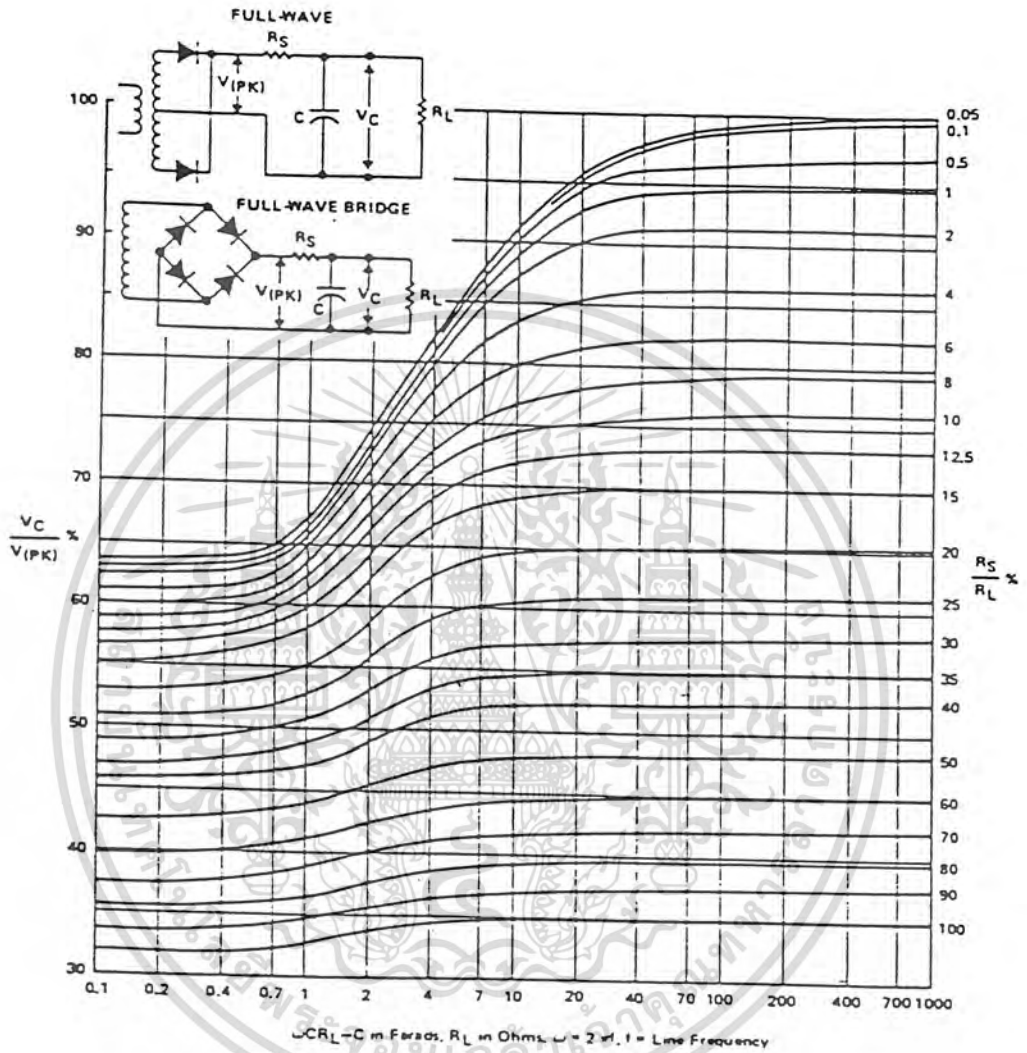


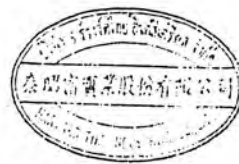
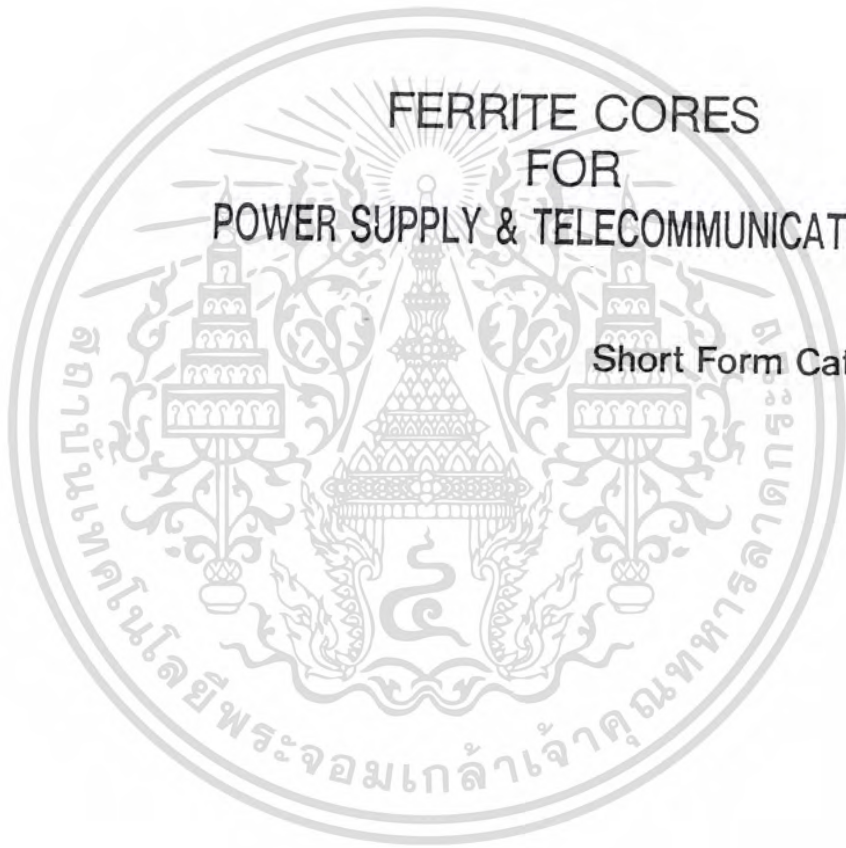
Figure 7.5. Relation of Applied Alternating Peak Voltage to Direct Output Voltage in Full-Wave Capacitor-Input Circuits (From O. H. Schade, Proc. IRE, Vol. 31, p. 344, 1943)

กราฟ O.H. Schade

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FERRITE CORES
FOR
POWER SUPPLY & TELECOMMUNICATIONS

Short Form Catalog

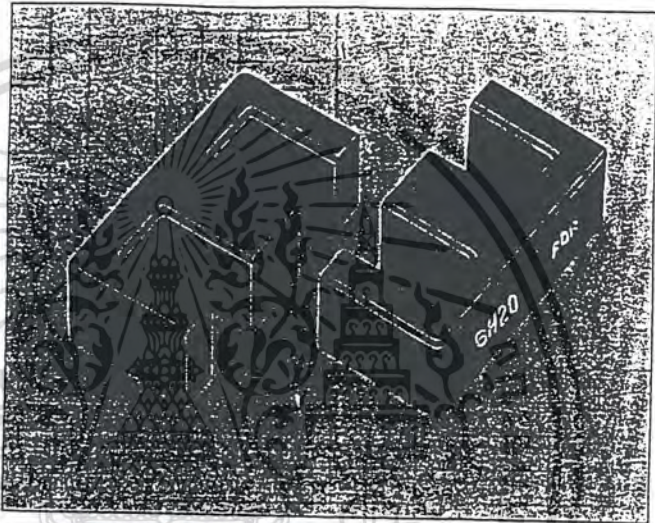


Fuji Electrochemical Co.,Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10 หมู่ที่ 6 อ.เอกชัย-เศรษฐกิจ ต.บางน้ำจืด อ.เมือง จ.สมุทรสาคร 74000
 10 MOO 6 EKACHAI-SETAKIT RD.TAMBON BANGNUMJUED
 AMPHUR MUANG SAMUTSAKORN 74000
 TEL: 034-823-484-5, 01-431-1050, 01-485-5848, 01-432-1492 FAX : 034-823-507

EE CORES



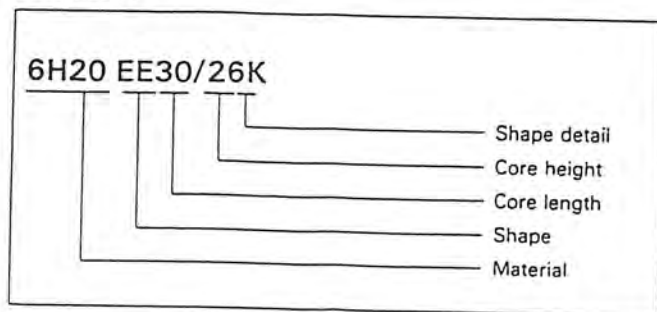
Features

- ① Customers are invited to select the most suitable products from a wide selection of shapes.
- ② Various types of bobbins with pins are available.

Applications

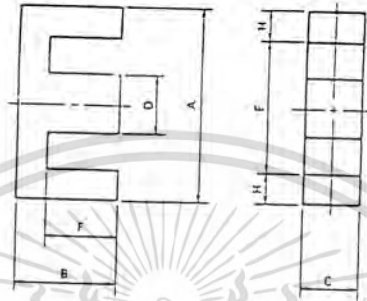
Switching regulators, choke coils, transformers for strobo use, pulse transformers, etc.

Designation



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Summary



Shape code	Dimensions (mm)							General standard
	A	B	C	D	E min.	F	H	
EE12.6/13	12.6±0.50	6.40±0.10	3.55±0.15	3.55±0.15	8.9	4.65±0.15	1.70	
EE13/13B	13.0±0.20	6.40±0.10	7.00±0.10	3.55±0.15	8.9	4.65±0.15	1.90	
EE16/14K	16.0±0.30	7.20±0.10	4.80±0.20	3.80±0.20	11.7	5.20±0.15	2.00	JIS
EE19/16K	19.1±0.30	7.95±0.15	5.00±0.20	4.55±0.15	14.2	5.60±0.10	2.30	JIS
EE19/16Z	19.3±0.32	8.10±0.18	4.76±0.13	4.76±0.08	14.1	5.72±0.13	2.38	
EE22/20	22.0±0.30	10.2±0.20	5.75±0.25	4.75±0.25	17.0	7.70±0.20	2.75	
EE25/19A	25.8±0.40	9.65±0.13	6.35±0.20	6.40±0.13	18.8	6.73±0.25	3.20	
EE25/19Z	25.4±0.38	9.53±0.25	6.35±0.25	6.35±0.13	18.7	6.38±0.17	3.18	JIS
EE25/20	25.0±0.30	10.2±0.20	6.40±0.30	6.40±0.30	18.2	6.65±0.15	3.25	
EE30/26K	30.0±0.50	13.2±0.20	10.7±0.30	10.7±0.30	19.5	8.15±0.15	5.00	JIS
EE30/30	30.0±0.50	14.8±0.25	6.90±0.30	6.90±0.20	19.5	10.2±0.25	5.00	
EE34/28A	34.6±0.45	14.2±0.20	9.27±0.25	9.27±0.25	25.4	9.90±0.25	4.38	
EE40/34B	40.0±0.60	16.8±0.40	11.7±0.40	11.7±0.40	26.8	10.7±0.15	6.35	
EE40/34K	40.0±0.50	17.0±0.30	10.7±0.30	10.7±0.30	27.4	10.3±0.30	6.00	JIS
EE40/35A	40.8±0.55	16.6±0.25	12.4±0.30	12.5±0.30	28.6	10.7±0.28	5.85	
EE40/44	40.1±0.60	22.3±0.30	11.7±0.40	11.7±0.40	27.3	15.2±0.20	6.05	
EE42/42-15W	42.2±0.90	21.0±0.20	15.0±0.30	12.0±0.30	29.5	15.2±0.40	6.03	JIS
EE42/42-20W	42.2±0.90	21.0±0.20	19.6±0.40	12.0±0.30	29.5	15.2±0.40	6.03	JIS
EE43/34	42.6±0.85	17.0±0.30	12.6±0.40	12.6±0.30	28.1	10.5±0.30	6.86	
EE47/39A	47.2±0.60	19.6±0.30	15.5±0.40	15.7±0.35	31.8	12.4±0.35	7.44	
EE50/42K	50.0±0.70	21.3±0.30	14.6±0.40	14.6±0.40	34.2	12.8±0.30	7.50	JIS
EE55/55A	55.2±1.10	27.5±0.30	20.7±0.30	17.0±0.30	37.5	18.9±0.40	8.52	JIS
EE56/47A	56.6±0.65	23.6±0.30	18.7±0.45	13.8±0.25	38.1	14.8±0.35	9.02	
EE80/76	80.0±1.00	38.1±0.40	19.8±0.40	19.8±0.40	61.2	28.2±0.30	8.90	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EE CORES

Shape code	Magnetic parameter				Center leg area A_c (mm ²)	Minimum cross sectional area A_{min} (mm ²)	Window area A_w (mm ²)	Approx. weight (g/pr.)	Test data (page)	Bobbin (page)	
	C_1 (mm ⁻¹)	A_p (mm ²)	ℓ_c (mm)	V_c (mm ³)							
EE12.6/13	2.4057	12.4	29.7	367	12.6	12.1	L	26.3	1.90	—	—
EE13/13B	1.1934	25.1	30.0	752	24.9	23.8	B	26.6	3.70	47	—
EE16/14K	1.8662	18.9	35.2	663	18.2	18.2	C	42.6	3.20	48	59
EE19/16K	1.7168	23.1	39.6	915	22.8	22.8	C	55.7	4.58	49	—
EE19/16Z	1.7715	22.7	40.1	909	22.7	22.7	LBC	55.9	4.56	—	—
EE22/20	1.9594	26.1	51.2	1340	24.4	24.4	C	102	13.8	—	—
EE25/19A	1.2387	39.8	49.2	1960	41.1	37.1	B	85.6	9.96	—	—
EE25/19Z	1.1970	40.2	48.1	1940	40.3	40.0	B	81.0	10.3	50	—
EE25/20	1.1561	42.6	49.3	2100	41.0	41.0	C	80.5	10.3	—	—
EE30/26K	0.52756	110	57.9	6360	114	107	L	75.8	32.2	51	59
EE30/30	1.1538	57.3	66.1	3790	47.6	47.6	C	134	20.7	52	—
EE34/28A	0.85153	82.1	69.9	5750	85.9	79.7	B	164	29.5	—	—
EE40/34B	0.54389	142	77.5	11000	137	137	C	167	52.0	53	—
EE40/34K	0.60762	127	77.4	9860	114	114	C	178	52.0	54	60
EE40/35A	0.52569	149	78.1	11600	155	145	L	178	58.8	—	—
EE40/44	0.66917	145	97.2	14100	137	137	C	248	71.7	—	—
EE42/42-15W	0.54243	190	97.8	17600	180	160	BC	276	86.9	55	—
EE42/42-20W	0.41512	236	97.8	23000	235	235	BC	276	118	56	—
EE43/34	0.47780	165	78.7	13000	159	159	C	171	65.0	—	—
EE47/39A	0.38524	232	89.5	20800	243	223	B	206	106	—	—
EE50/42K	0.42677	226	96.3	21700	213	213	C	261	113	57	60
EE55/55A	0.34989	353	124	43700	352	352	C	400	218	58	—
EE56/47A	0.31597	339	107	36400	352	329	B	292	186	—	—
EE80/76	0.49137	377	185	69700	392	352	L	1480	354	—	—

Note: Minimum cross sectional area B: Back area C: Center leg area L: Side leg area

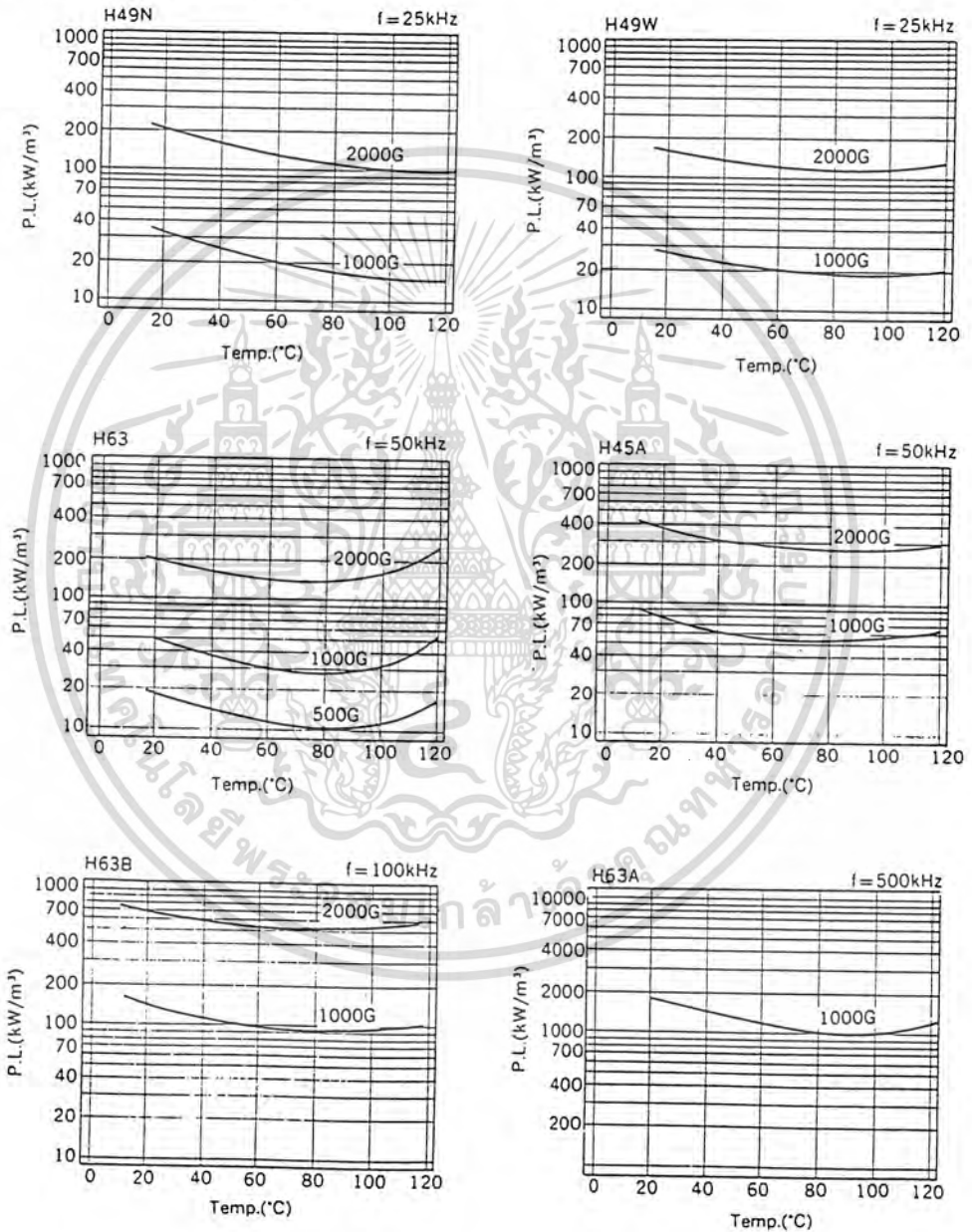
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

H 21 B	H 22 Z	H 23 B	H 24 B	H 24 A	H 24 Z	H 25 Z	H 28 B	H 49 N	H 49 B	H 45	H 63	H 63 B	H 45, A	H 63 A
2000 ±20%	2000 ±20%	3500 ±20%	4000 ±20%	5000 ±20%	7000 ±25%	12000 ±30%	3500 ±20%	1600 ±20%	1700 ±20%	2500 ±20%	2500 ±20%	2000 ±20%	2400 ±20%	1250 ±20%
< 3.5 100kHz	< 2.5 100kHz	< 3.0 10kHz	< 15 100kHz	< 40 100kHz	< 7 10kHz	< 8 10kHz	< 50 100kHz	< 5 100kHz	< 8 100kHz	< 4 100kHz	< 4 100kHz	< 5 100kHz	< 5 100kHz	< 3 100kHz
0.5~2 0.5~2	0.4~1.2 0.4~1.2	0~2.0 0~2.0	0~1.5 0~1.5	-0.5~2 -0.5~2	0~2.0 0~2.0	0~1.5 0~1.5	-3~3 -3~3							
4100 410	4200 420	4000 400	4400 440	4500 450	4000 400	4600 400	4700 470	5000 500	5300 530	4700 470	5200 520	5000 500	4800 480	4700 470
1100 110	800 80	900 90	1500 150	1500 150	900 90	950 95	1000 100	1500 150	1800 180	1000 100	1200 120	1500 150	1200 120	3100 310
0.30 24.0	0.15 12.0	0.30 24.0	0.13 10.4	0.13 10.4	0.13 10.4	0.05 4.0	0.20 16.0	0.16 12.8	0.20 16.0	0.16 12.8	0.16 12.8	0.16 12.8	0.16 12.8	0.25 20.0
< 0.4 10kHz	< 0.4 10kHz	< 1.0 10kHz	< 1.0 10kHz	< 1.0 10kHz	< 1.0 10kHz	< 1.0 10kHz	< 0.8 100kHz							
< 3.0	< 2.0	< 3.0	< 3.0	< 3.0	< 3.0	< 2.0	< 3.0							
> 160 400	> 170 500	> 125 20	> 145 20	> 145 10	> 125 3	> 125 3	> 200 100	> 230 100	> 230 1000	> 200 100	> 230 100	> 200 100	> 200 100	> 270 1000
4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.9	4.9	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

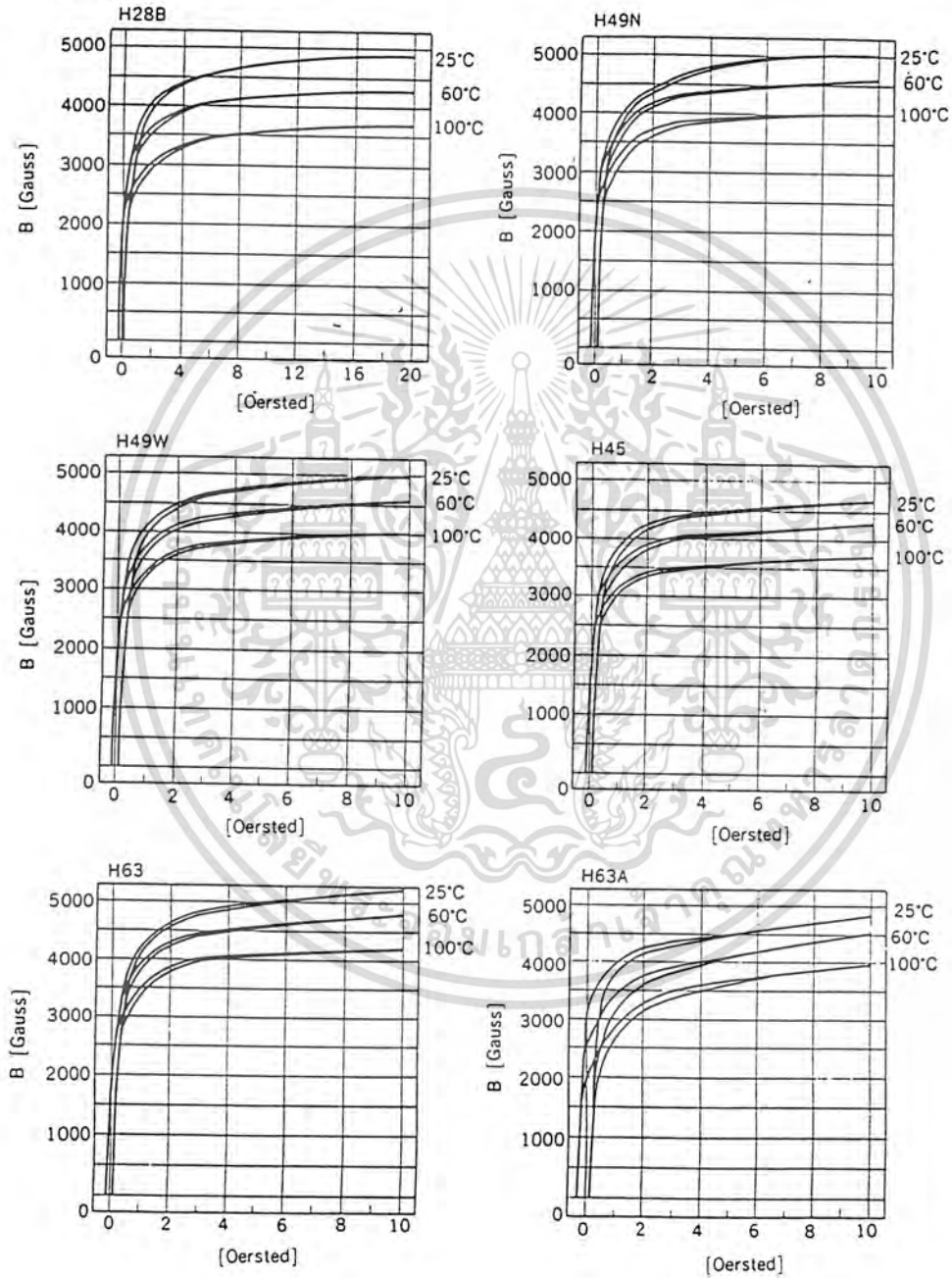
FERRITE MATERIALS

Power loss vs. temperature



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

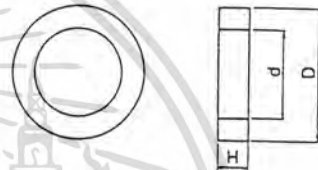
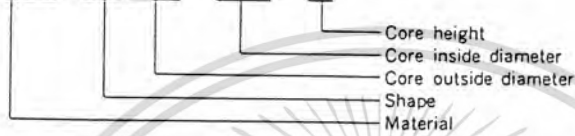
Static magnetization curves



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TOROIDAL CORES

H24A FR 8φ / 3φ / 6



Core name	Dimension (mm)			AL value (nH/N ²)				
	φD	φd	H	H 45 (±25%)	H 24 B (±25%)	H 24 A (±25%)	H 24 Z (±25%)	H 25 Z (±30%)
FR 4 φ / 2.2 φ / 2.7	4.0 ± 0.2	2.2 ± 0.2	2.7 ± 0.2	800	1250	1600	2200	3800
FR 5 φ / 3.2 φ / 3	5.0 ± 0.2	3.2 ± 0.2	3.0 ± 0.2	650	1100	1350	1850	3200
FR 8 φ / 3 φ / 6	8.0 ± 0.3	3.0 ± 0.2	6.0 ± 0.3	2700	4300	5400	7600	13000
FR 11 φ / 5 φ / 3	11.0 ± 0.3	5.0 ± 0.2	3.0 ± 0.3	1100	1750	2200	3100	5300
FR 13 φ / 7 φ / 5	13.0 ± 0.4	7.0 ± 0.3	5.0 ± 0.3	1500	2400	3000	4700	(7100)
FR 14 φ / 7 φ / 7	14.0 ± 0.4	7.0 ± 0.3	7.0 ± 0.3	2300	3700	4600	6500	(11000)
FR 15 φ / 9 φ / 13	15.0 ± 0.3	9.0 ± 0.3	13.0 ± 0.3	3250	5200	6500	9100	(15000)
FR 16 φ / 10 φ / 7	16.0 ± 0.5	10.0 ± 0.5	7.0 ± 0.3	1600	2600	3200	4500	(7000)
FR 16 φ / 12 φ / 8	16.0 ± 0.3	12.0 ± 0.3	8.0 ± 0.3	1150	1800	2300	3200	
FR 19 φ / 10 φ / 10	18.45 ± 0.3	9.75 ± 0.3	10.25 ± 0.3	3000	4800	6000	(8300)	
FR 20 φ / 12 φ / 4	19.95 ± 0.3	12.05 ± 0.3	4.15 ± 0.3	3400	5500	7000	(9700)	
FR 25 φ / 15 φ / 12	25.0 ± 0.5	15.0 ± 0.5	12.0 ± 0.5	3000	4800	6000	(8300)	
FR 31 φ / 20 φ / 10	31.0 ⁺⁰ _{-0.8}	20.0 ⁺⁰ _{-0.5}	10.0 ⁺⁰ _{-0.6}	2100	3500	4300	(6000)	
FR 38 φ / 19 φ / 13	38.1 ± 0.5	19.0 ± 0.5	12.7 ± 0.5	4300	(6900)	(8500)		
FR 40 φ / 20 φ / 12	40.0 ⁺⁰ _{-1.0}	20.0 ⁺⁰ _{-0.5}	12.0 ⁺⁰ _{-0.6}	5000	(8000)	(9800)		
FR 50 φ / 25 φ / 10	50.0 ⁺⁰ _{-1.2}	25.0 ⁺⁰ _{-0.6}	10.0 ⁺⁰ _{-0.6}	3300	(5300)	(6500)		

() : Upon request

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Summary

TOROIDAL CORES



Shape code	Dimensions (mm)			AL value (nH/N ²)							
	ϕD	ϕd	H	2H03 ($\pm 20\%$)	2H04 ($\pm 20\%$)	2H06 ($\pm 20\%$)	2H07 ($\pm 25\%$)	2H10 ($\pm 30\%$)	2H15 ($\pm 30\%$)	2H18 ($\pm 30\%$)	
FR4/2.2/2.7	4.0 \pm 0.2	2.2 \pm 0.2	2.7 \pm 0.2	800	1250	1750	2350	3100	4700	5600	
FR5.9/3.1/3	5.9 \pm 0.2	3.1 \pm 0.2	3.2 \pm 0.2	1000	1600	2200	2800	4000	5900	7100	
FR8/3/6	8.0 \pm 0.3	3.0 \pm 0.2	6.0 \pm 0.3	2700	4300	6000	8100	10800	16300	19500	
FR10/6/4	10.0 \pm 0.3	6.0 \pm 0.2	4.0 \pm 0.2	1000	1600	2200	2800	4000	5900	7100	
FR11/5/3	11.0 \pm 0.3	5.0 \pm 0.3	3.0 \pm 0.3	1100	1750	2400	3300	4500	6700	8000	
FR12/6/4	12.0 \pm 0.4	6.0 \pm 0.3	4.0 \pm 0.3	1350	2150	2950	3750	5300	7900	9500	
FR13/7/5	13.0 \pm 0.4	7.0 \pm 0.4	5.0 \pm 0.4	1500	2400	3200	4400	5900	8900	10700	
FR14/7/9.5	14.0 \pm 0.4	7.0 \pm 0.4	9.5 \pm 0.4	3150	5050	5700	8800	12500	18000	—	
FR15/9/13	15.0 \pm 0.3	9.0 \pm 0.3	13.0 \pm 0.3	3200	5200	7100	9700	13000	19500	—	
FR16/10/7	16.0 \pm 0.5	10.0 \pm 0.5	7.0 \pm 0.5	1600	2550	3500	4800	6400	9600	—	
FR16/12/8	16.0 \pm 0.3	12.0 \pm 0.3	8.0 \pm 0.3	1150	1800	2500	3400	4500	6800	—	
FR19/10/10	18.45 \pm 0.3	9.75 \pm 0.3	10.25 \pm 0.3	3100	5000	6900	9400	12600	—	—	
FR20/12/8	19.95 \pm 0.3	12.05 \pm 0.3	8.0 \pm 0.3	2000	3200	4500	6100	8100	—	—	
FR25/15/12	25.0 \pm 0.5	15.0 \pm 0.5	12.0 \pm 0.5	3000	4800	6600	9000	12000	—	—	
FR31/20/10	30.6 \pm 0.4	20.25 \pm 0.25	9.7 \pm 0.3	2000	3200	4300	5900	—	—	—	
FR38/19/13	38.1 \pm 0.5	19.0 \pm 0.5	12.7 \pm 0.5	4200	6800	9300	12700	—	—	—	
FR40/20/12	39.5 \pm 0.5	20.25 \pm 0.25	12.3 \pm 0.3	4000	6300	8700	11500	—	—	—	
FR50/25/10	49.4 \pm 0.6	25.3 \pm 0.3	10.3 \pm 0.3	3300	5300	7300	9900	—	—	—	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FERRITE MATERIALS

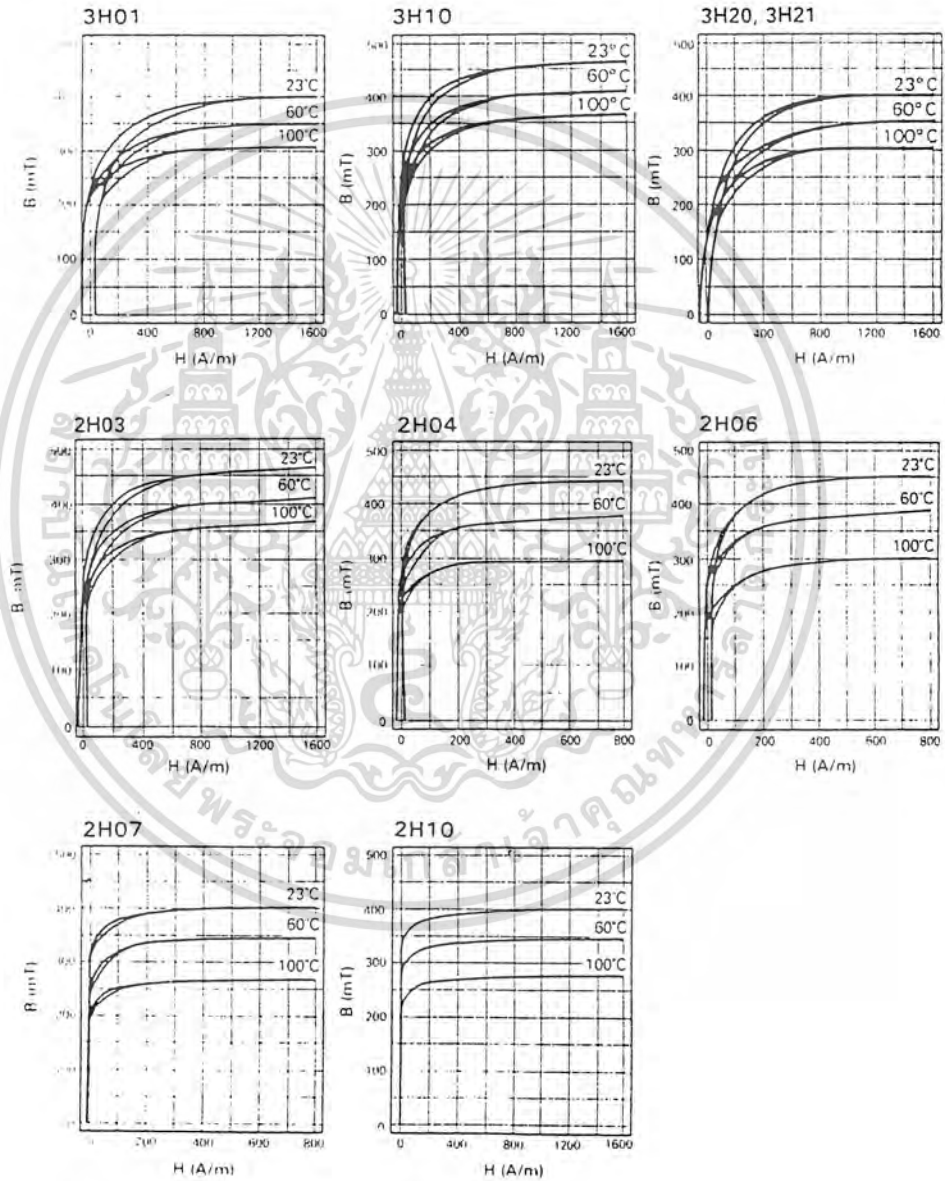
Material characteristics

Material	Symbol	Unit	H 56 Z	H 55 Z	H 54 Z	H 53 Z	H 52-A	H 52 B	H 52 Z	H 51 A	H 51 Z
Initial permeability	μ_{iac}		11 ±20%	17 ±20%	50 ±20%	130 ±20%	250 ±20%	800 ±20%	1200 ±20%	1200 ±20%	1200 ±15%
Relative loss factor	$\frac{\tan \delta}{\mu}$	$\times 10^{-4}$	<200 40MHz <250 100MHz	<160 40MHz <220 100MHz	<60 5 MHz <80 10MHz	<30 1 MHz <120 10MHz	<25 1 MHz <60 5 MHz	<20 0.5MHz <40 1 MHz	<5 0.1MHz <12 0.5MHz	<3 0.1MHz <8 0.5MHz	<1.5 0.1MHz <4 0.5MHz
Temperature factor -30~20 °C 20~55 °C 20~70 °C	$\alpha \mu r$	$\times 10^{-4}$				3~10 4~20		0~2	1.5~7 1.5~7		0.3~2 0.2~1
Saturation flux density	Bs	Gauss	2000	2100	2500	2900	3300	3900	3800	4650	4650
		mT	200	210	250	290	330	390	380	465	465
Residual flux density	Br	Gauss	1100	1200	1300	1600	2200	1700	1600	1500	1500
		mT	110	120	130	160	220	170	160	150	150
Coercive force	Hc	Oe	12	10	8.0	3.0	2.0	0.7	0.5	0.5	0.5
		A/m	960	800	640	240	160	56	40	40	40
Hysteresis material constant	η_B	$\frac{\times 10^{-4}}{mT}$						<1.8 10kHz	<0.5 10kHz	<0.6 100kHz	<0.4 100kHz
Disaccommodation factor	DF	$\times 10^{-4}$	<50	<50	<30	<20	<10	<20	<10	<6	<4
Curie temperature	Tc	°C	>450	>450	>400	>350	>300	>250	>230	>200	>200
Resistivity	ρ	$\Omega\text{-cm}$	10^8	10^8	10^8	10^8	10^8	500	500	500	500
Density	d	g/cm ³	4.3	4.3	4.5	4.5	4.4	4.6	4.7	4.7	4.7

- Note : 1) The values were obtained with toroidal cores (FR 25 ϕ / 15 ϕ / 5).
 2) The values were obtained at 23±2 °C unless otherwise specified.
 3) Initial permeability were measured at 10 kHz, 0.8 A/m.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

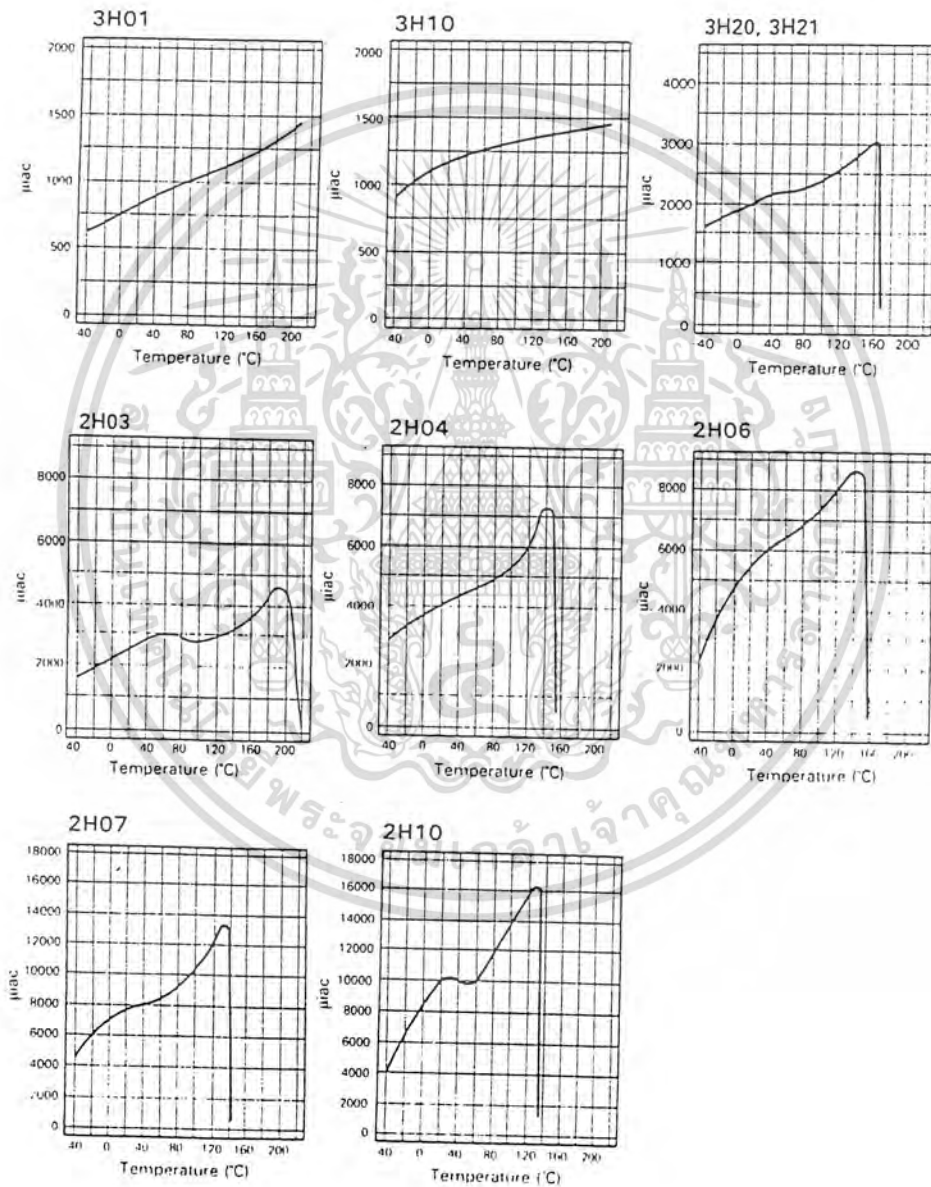
Material characteristics curves (Linear material) B vs. H



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

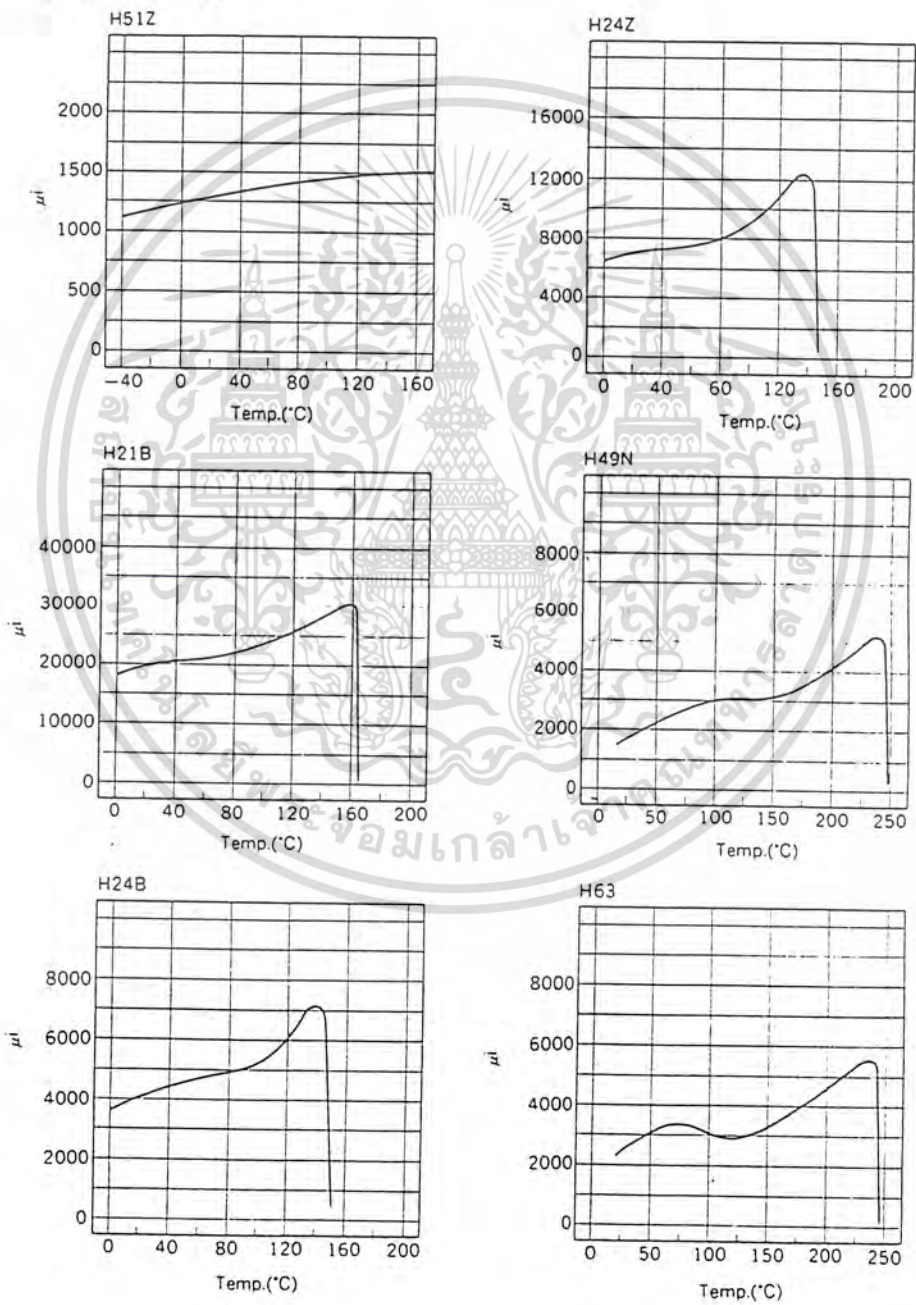
Material characteristics curves

(Linear material)
 μiac vs. temperature



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

μ_i vs. temperature

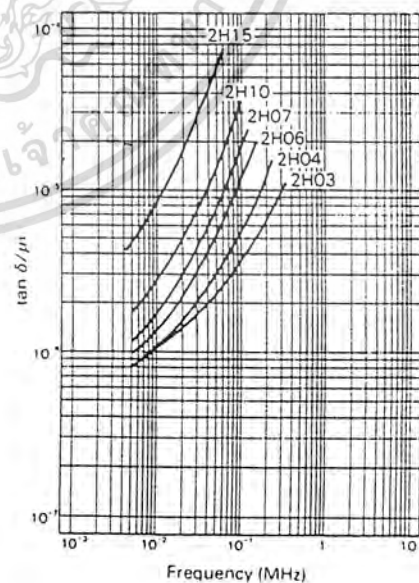
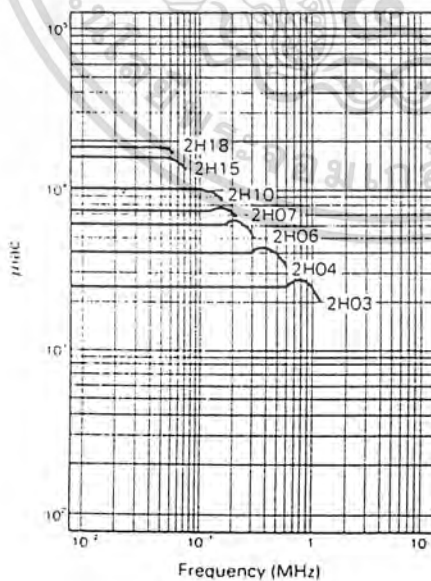


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Standard material characteristics (Linear material)

Property	Symbol	Unit	2H03	2H04	2H06	2H07	2H10	2H15	2H18	
Initial permeability	μ_{ic}		2500 ±20%	4000 ±20%	5500 ±20%	7500 ±25%	10000 ±30%	15000 ±30%	18000 ±30%	
Relative loss factor	$\frac{\tan \delta}{\mu}$	$\times 10^{-4}$	< 4 (100kHz)	< 10 (100kHz)	< 30 (100kHz)	< 5 (10kHz)	< 7.0 (10kHz)	< 15 (10kHz)	< 90 (10kHz)	
Temperature coefficient	$\sigma \mu r$	$\times 10^{-6}$		0 to 2.0	0 to 2.0	0 to 2.0	0 to 1.5	0 to 1.5	0 to 1.5	
			-30 to 20°C							
			20 to 55°C							
			0 to 2.0	0 to 2.0	0 to 2.0	-0.5 to 1.5	-0.5 to 1.5	-0.5 to 1.5		
Saturation magnetic flux density	B_s	Gauss	4700	4200	4200	4100	4000	4000	4000	
		mT	470	420	420	410	400	400	400	
Residual magnetic flux density	B_r	Gauss	1000	800	800	600	600	600	800	
		mT	100	80	80	60	60	60	80	
Coercivity	H_c	Oe	0.16	0.10	0.10	0.05	0.025	0.02	0.02	
		A/m	12.8	8	8	4	2	1.6	1.6	
Hysteresis material constant	η_b	$\times 10^{-6}$		< 0.8 (10kHz)	< 0.9 (10kHz)	< 0.6 (10kHz)	< 1.0 (10kHz)	< 2.0 (10kHz)	< 2.0 (10kHz)	
		mT								
Disaccommodation factor	DF	$\times 10^{-6}$	< 3.0	< 3.0	< 3.0	< 2.0	< 1.0	< 1.0		
Curie temperature	T_c	°C	> 200	> 140	> 140	> 130	< 120	< 120	< 120	
Resistivity	ρ	$\Omega \cdot m$	1	1	0.2	0.1	0.01	0.01	0.01	
Density	d	$kg/m^3 \times 10^3$	4.8	4.8	4.8	4.9	4.9	4.9	5.0	

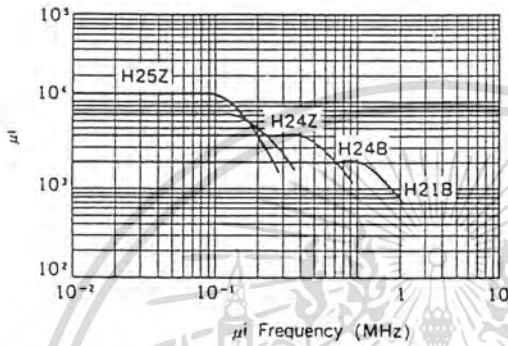
- Note
- 1) The values were obtained with toroidal cores (FR25/15/5).
 - 2) The values were obtained at $23 \pm 2^\circ C$ unless otherwise specified.
 - 3) Initial permeability was measured at 10kHz, 0.8A/m.



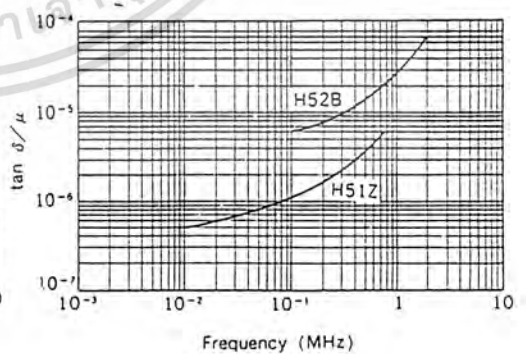
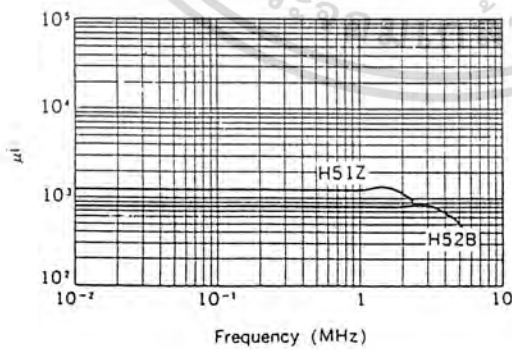
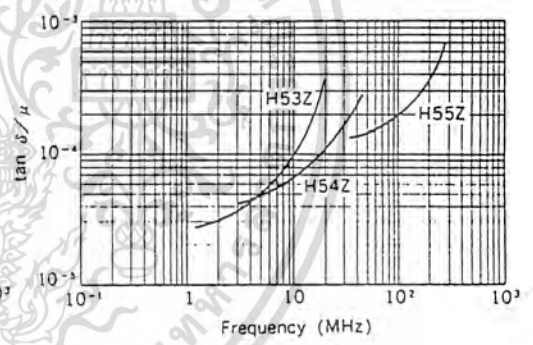
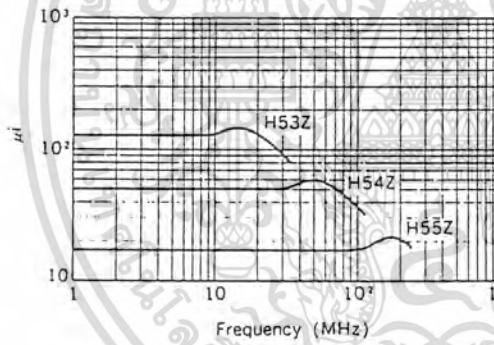
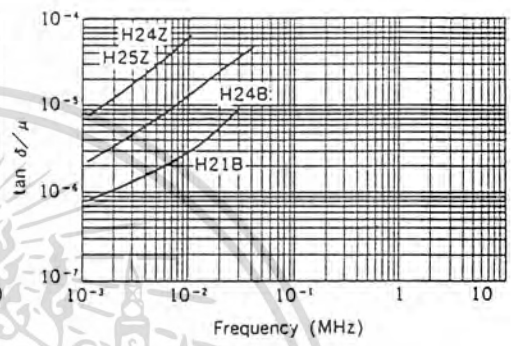
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FERRITE MATERIALS

μ_i vs. frequency



$\tan \delta / \mu_i$ vs. frequency



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้จัดทำขอขอบคุณ

1. อาจารย์ อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและแนะนำแนวทางการทำโครงการตลอดเวลา
2. อาจารย์ กิจจา ลักษณะอำนาจพร อาจารย์ประจำภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยี-ราชมงคลวิทยาเขตพระนครเหนือ ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนวทางการทำงาน
3. นายโรมัส ธรรมาธิชฐาน ที่ช่วยจุดประกายความคิดและแนวทางการแก้ไขปัญหาอุปสรรคในการทำโครงการ
4. โรงเรียนช่างอุตสาหกรรมกรุงเทพ ที่ให้ยืมเครื่องมือในการทำโครงการด้วยดีตลอดมา
5. การไฟฟ้านครหลวงเขตคลองเตย ที่ให้ยืมเครื่องมือและอุปกรณ์ใช้งานต่างๆ

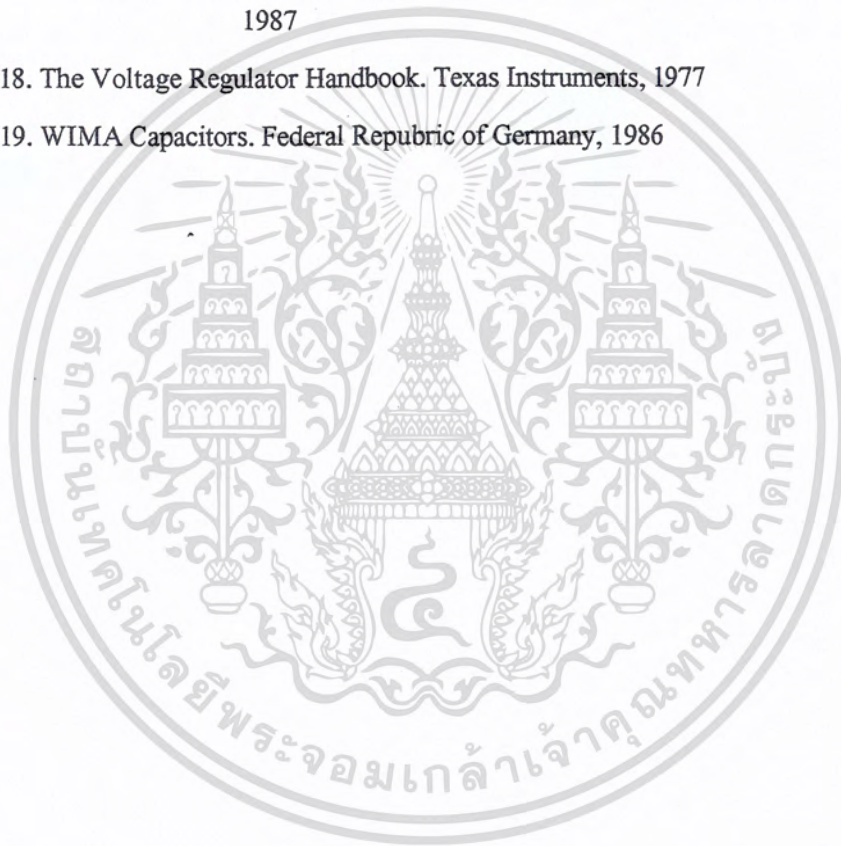


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. กิจจา ลักษณ์อำนวยพร. เครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงแบบสวิตซ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
2. คณะกรรมการ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า. ศัพท์เทคนิควิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2535
3. บัณฑิต จามรภูติ. คู่มือการใช้โปรแกรม Orcad / SDT & PROTEL. กรุงเทพมหานคร: บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น, 2536.
4. พันธุ์ศักดิ์ พุฒมานิตพงศ์. วงจรพัลส์และสวิตซ์ซิ่ง. กรุงเทพมหานคร: บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น, 2531.
5. สุทธิ บรรจงจิตร. เทคนิคและการออกแบบระบบไฟฟ้า. กรุงเทพมหานคร: บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น, 2530.
6. สมบูรณ์ มาลานนท์, สมคิด วิริยะประสิทธิ์ชัย. แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซ์ซิ่ง. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์พิสติกส์เซ็นเตอร์, 2539.
7. สุวัฒน์ คั่น. เทคนิคการออกแบบสวิตซ์ซิ่งเพาเวอร์ซัพพลาย. กรุงเทพมหานคร: บริษัทอินเทลไทย, 2535.
8. อมร คันวรรณรักษ์. เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง ขนาด 10 กิโลวัตต์ วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.
9. เอกชัย ลีสารศรี. คู่มือการใช้งาน " เล็กเร็ว 6.5 " ซอฟต์แวร์สำหรับวิเคราะห์วงจร - อิเล็กทรอนิกส์เชิงเส้นแบบท่อน. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.
10. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ. เครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำขนาด 12 กิโลวัตต์แอมป์ ที่ใช้เอสซีอาร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
11. Chrysis George. High – Frequency Switch Power Supper. New York: Mcgraw – Hill Book Company, 1984
12. Kieth H. Billing. Handbook of Switchmode Power Supplies. New York: Mcgraw – Hill Publishing Company, 1989
13. MathSoft, Inc. Mathcad Release Note Version 2.5. One Kendal Square Cambridge, Massachusetts MA 02139, 1989

14. Motorola Inc. Rectify and Zener Diode Data. 1992
15. M.H.Rashid. Power Electronics Ciuicts, Devices and Application. Prentice Hall, Inc., 1988
Mohan, Undeland, Robbins. Power Electronics: Converters,
Applications and Design. Wiley International Editions, 1989
16. P.G. Simpson. Induction Heating : coil and System Design. New York: Mcgraw – Hill, 1966
Masaaki Fujii, Shizuo Hayashi, Toshihironomura “ High – Frequency
Inverters For Induction Heating “ , 1988
17. S. Zinn, S.L. Semiatin. Elements of Induction Heating Electric Power Research Institue , Inc
1987
18. The Voltage Regulator Handbook. Texas Instruments, 1977
19. WIMA Capacitors. Federal Republic of Germany, 1986



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้