

การออกแบบเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำด้วยสวิตช์ความถี่สูงแบบแวล์วำดับ

นายปณตพล แยมศรวล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2553

DESIGN OF HIGH FREQUENCY SWITCHING FOR THE ARRAY INDUCTION HEATING

Panotphon Yaemsuan

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Telecommunication Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2010

การออกแบบเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำด้วยสวิตช์ความถี่สูงแบบแอวลำดับ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.ชาญชัย ทองโสภณ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ จำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ปกคพล แยมสรวล : การออกแบบเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำด้วยสวิตช์ความถี่สูง
แบบแถวลำดับ (DESIGN OF HIGH FREQUENCY SWITCHING FOR THE ARRAY
INDUCTION HEATING) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภณ,
104 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาและออกแบบการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ
สนามแม่เหล็กด้วยการให้ความร้อนของขดลวดเหนี่ยวนำแบบต่าง ๆ สำหรับนำไปปรับปรุงและ
พัฒนาเครื่องถืดและขึ้นรูปพลาสติก มีการพันขดลวดเหนี่ยวนำสามแบบ คือแบบเดี่ยว แบบคู่ และ
แบบสามแถวลำดับ เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด 2 3 และ 4 เซนติเมตร ขดลวดเหนี่ยวนำแบบคู่
และแบบ 3 แถวลำดับแบ่งการพันขดลวดเป็นสองลักษณะ คือพันในทิศทางเดียวกันทุกแถวลำดับ
และ พันในทิศทางตรงข้ามกันในแต่ละแถวลำดับที่ 2 ด้วยวิธีจำลองผลการทดลองจากโปรแกรม CST
EM STUDIO 2009 และการวัดผลจริง เครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดลอง ที่มีการ
ทำงานแบบฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ 28 kHz กำลังไฟฟ้า 200 W โดย
กำหนดให้ขดลวดเหนี่ยวนำ (แต่ละแบบ) ที่ใช้จำลองผลและในการทดลองทั้งหมด
มีค่าความเหนี่ยวนำและระยะห่างระหว่างแถวลำดับเท่ากัน จากการวิจัยการให้ความร้อน
ด้วยขดลวดเหนี่ยวนำแบบต่าง ๆ พบว่าขดลวดเหนี่ยวนำแบบแถวลำดับ 3 แถวที่มีการพันขดลวด
ในทิศทางเดียวกันทั้งหมด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร มีพื้นที่การให้ความร้อน
และสามารถให้ความร้อนได้สูงที่สุด

PANOTPHON YAEMSUAN : DESIGN OF HIGH FREQUENCY

SWITCHING FOR THE ARRAY INDUCTION HEATING. THESIS

ADVISOR : ASST. PROF. CHANCHAI THONGSOPA, D.Eng., 104 PP.

HIGH FREQUENCY INVERTER/MULTIPLE COIL/INDUCTION HEATING

In this paper, the research propose to study and design of high frequency switching for the array induction heating to improve and develop an injection molding machine. The induction coil has 3 cases are single, double and triple diameter is 2, 3 and 4 cm. An array induction coil has two types. First, all the array induction coil are in the same direction and second, the array induction coil are opposite direction with Simulation by CST EM STUDIO 2009 and actual experiment. The Induction heating experiment in this paper working with full bridge inverter, 28 kHz, 200 W. Which the induction coil (each case) used in simulation and experiment with all the inductance and the spacing between the arrays are equal. At last, the triple induction heating coils in the same direction all 2 cm diameter can be the highest temperature and the most area of heating.

School of Telecommunication Engineering Student's Signature _____

Academic Year 2010

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภิน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำ ปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไข วิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุทธารสกุล หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรณ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุติมา พรหมมาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี หัตถกรรม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อุทธารสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ กระจกลคนอก และ อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ วาณิชxonันต์ชัย อาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้ทางวิชาการและ ให้โอกาสในการศึกษา

ขอขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีต และปัจจุบันที่คอยให้ความช่วยเหลือ และคอยให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด และ นางสาวปณิษฐาท์ อาจหาญ ที่ช่วยดูแลในเรื่องเอกสารต่าง ๆ ระหว่างศึกษาจนสำเร็จการศึกษาไป ด้วยดี และขอบคุณ นายสำราญ สันทาอุทัย สำหรับการให้คำแนะนำในการจัดทำรูปเล่ม วิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้ง ในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ให้ความรักความอบอุ่น และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดย ตลอด อีกทั้งเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ในยามที่ผู้วิจัยท้อแท้และท้อใจ ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จ ในชีวิตเรื่อยมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่ยรักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่านที่ได้ ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยทั้งในอดีตและปัจจุบัน จนสำเร็จการศึกษาไปด้วยดี

ปณดพล แยมศรวล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ช
สารบัญตาราง	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฐ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของเบื้องต้น	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.7 ทัศนวิสัยวรรณกรรม	4
1.8 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์	6
2 หลักการและทฤษฎีเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง	7
2.1 กล่าวนำ	7
2.2 หลักการพื้นฐานของการเหนี่ยวนำความร้อนความถี่สูง	7
2.2.1 หลักการการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก	11
2.2.2 ความลึกผิว	12
2.2.3 ค่าความต้านทานจำเพาะของโลหะกับอุณหภูมิ	14
2.2.4 ความซึมซาบทางแม่เหล็กของโลหะกับอุณหภูมิ	17
2.2.5 ความถี่เครื่องให้ความร้อนวิธีเหนี่ยวนำ	19

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.6	การหาค่าความเหนี่ยวนำ	20
2.3	ลักษณะของวงจรเครื่องให้ความร้อนวิธีเหนี่ยวนำด้วยสวิตซ์ความถี่สูง	21
2.3.1	วงจรกำเนิดสัญญาณและวงจรขับนำเกต	22
2.3.2	อินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ (full bridge inverter)	23
2.3.3	ไอจีบีที (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)	24
2.4	วงจรเรโซแนนซ์	25
2.5	การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำแบบแถวลำดับ	27
2.6	การประมาณกำลังงานของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน	32
2.7	สรุป	32
3	การออกแบบและหลักการทำงานของวงจร	34
3.1	กล่าวนำ	34
3.2	วงจรเพาเวอร์ซัพพลาย	35
3.2.1	เพาเวอร์ซัพพลายที่ใช้ในส่วนของวงจรควบคุมจากแรงดัน	35
3.2.2	เพาเวอร์ซัพพลายที่ใช้ในส่วนของวงจรขับนำเกต	38
3.2.3	เพาเวอร์ซัพพลายที่ใช้ในส่วนของวงจรภาคกำลัง	40
3.3	การออกแบบวงจรควบคุมในโหมดของแรงดัน	41
3.4	การออกแบบวงจรขับนำเกต	44
3.5	การออกแบบวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์	46
3.6	การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ	48
3.6.1	ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด	48
3.6.2	ค่าความเหนี่ยวนำแฝงของขดลวด	51
3.7	การจำลองผลจากโปรแกรม	52
3.7.1	ขดลวดเหนี่ยวนำ A1	53
3.7.2	ขดลวดเหนี่ยวนำ A2	54
3.7.3	ขดลวดเหนี่ยวนำ A3	55
3.7.4	ขดลวดเหนี่ยวนำ B1 และ B4	56

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.7.5	ขดลวดเหนี่ยวนำ B2 และ B5	57
3.7.6	ขดลวดเหนี่ยวนำ B3 และ B6	58
3.7.7	ขดลวดเหนี่ยวนำ C1 และ C4	59
3.7.8	ขดลวดเหนี่ยวนำ C2 และ C5	60
3.7.9	ขดลวดเหนี่ยวนำ C3 และ C6	61
3.8	สรุป	65
4	การทดสอบและผลการทดสอบเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน	66
4.1	กล่าวนำ	66
4.2	การทดสอบวงจรควบคุมในโหมดของแรงดัน	67
4.3	การทดสอบภาคขับเคลื่อนของไอจีบีที	74
4.4	การทดสอบอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง	76
4.5	ผลการทดลอง	78
4.5.1	ขดลวดเหนี่ยวนำแบบเดี่ยว	82
4.5.2	ขดลวดเหนี่ยวนำแบบคู่	83
4.5.3	ขดลวดเหนี่ยวนำแถวลำดับแบบ 3 แถวลำดับ	85
4.6	สรุป	90
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	91
5.1	สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์	91
5.2	ปัญหาและข้อเสนอแนะ	92
5.3	แนวทางการพัฒนาในอนาคต	92
	รายการอ้างอิง	93
	ภาคผนวก	95
	ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์	95
	ภาคผนวก ข. รายละเอียดวงจรพิมพ์	101
	ประวัติผู้เขียน	104

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรพื้นฐานแบบคลื่นสนามไฟฟ้าที่ให้ภาวะความต้านทานสูง	8
2.1 วงจรแบบคลื่นสนามแม่เหล็กที่ให้ภาวะความต้านทานต่ำ	8
2.3 การให้ความร้อนหลักการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำอย่างง่าย	9
2.4 วงจรพื้นฐานของหม้อแปลงไฟฟ้า	10
2.5 วงจรพื้นฐานของขดลวดเหนี่ยวนำกับภาระทางไฟฟ้า	11
2.6 ความหนาแน่นของกระแสและค่าของความลึกเชิงผิว	13
2.7 ชิ้นงานที่ถูกกลึงออกเป็นแผ่น	13
2.8 สภาพความต้านทานของโลหะกับอุณหภูมิ	16
2.9 ลักษณะการใช้งานของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำในย่านความถี่ต่าง ๆ	20
2.10 โครงสร้างเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง	22
2.11 ลักษณะของสัญญาณที่ใช้ขับเคลื่อนของ IGBT และสัญญาณเอาต์พุต (E1-E3) ที่ตัดกร่อมขดลวดเหนี่ยวนำความถี่สูง	23
2.12 วงจรภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง (high frequency inverter)	24
2.13 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน	25
2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตกับความถี่ต้นกำเนิด	26
2.15 การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำกับค่าอินดักแตนซ์	27
2.16 ตัวอย่างของขดลวดเหนี่ยวนำชนิดต่าง ๆ	28
2.17 การกระจายตัวของค่าความจุและความต้านทานอนุกรมขดลวดเหนี่ยวนำ	29
2.18 ขดลวดเหนี่ยวนำแกนอากาศแบบแถวลำดับ	30
2.19 อินทรีกัลเชิงวงรีแบบชนิดที่หนึ่ง	30
2.20 อินทรีกัลปีเชิงวงรีแบบชนิดที่สอง	31
3.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ	35
3.2 วงจรเพาเวอร์ซัพพลาย	36
3.3 เพาเวอร์ซัพพลายในส่วนของวงจรควบคุมจากแรงดัน	37
3.4 วงจรจริงของเพาเวอร์ซัพพลาย	37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5	วงจรจริงของเพาเวอร์ซัพพลายในส่วนของวงจรควบคุมจากแรงดัน 38
3.6	เพาเวอร์ซัพพลายในส่วนของวงจรขับเคลื่อน (หนึ่งในสี่ชุด) 39
3.7	วงจรจริงของเพาเวอร์ซัพพลายในส่วนของวงจรขับนำเกต 39
3.8	เพาเวอร์ซัพพลายในส่วนของวงจรภาคกำลัง 40
3.9	วงจรจริงของเพาเวอร์ซัพพลายในส่วนของวงจรภาคกำลัง 41
3.10	ลักษณะวงจรของไอซีเบอร์ UC3879N 42
3.11	วงจรจริงของไอซีเบอร์ UC3879N 43
3.12	ลักษณะของสัญญาณที่ใช้ขับเคลื่อนของ IGBT และสัญญาณเอาต์พุต (Vout) ที่ติดคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำความถี่สูง 44
3.13	แสดงวงจรขับนำเกตผ่านไอซีเบอร์ PC929 45
3.14	วงจรจริงของวงจรขับนำเกตผ่านไอซีเบอร์ PC929 46
3.15	วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ 47
3.16	วงจรจริงของฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ 48
3.17	โครงสร้างของขดลวดเหนี่ยวนำ 51
3.18	ค่าความเหนี่ยวนำแฝงของขดลวดขนาดต่าง ๆ 51
3.19	ขดลวดเหนี่ยวนำ A1 53
3.20	กระแสบนผิวชิ้นงานของขดลวดเหนี่ยวนำ A1 53
3.21	ขดลวดเหนี่ยวนำ A2 54
3.22	กระแสบนผิวชิ้นงานของขดลวดเหนี่ยวนำ A2 54
3.23	ขดลวดเหนี่ยวนำ A3 55
3.24	การกระแสบนผิวชิ้นงานของขดลวดเหนี่ยวนำ A3 55
3.25	ขดลวดเหนี่ยวนำ B1 และ B4 56
3.26	กระแสบนผิวชิ้นงานของขดลวดเหนี่ยวนำ B1 และ B4 56
3.27	ขดลวดเหนี่ยวนำ B2 และ B5 57
3.28	กระแสบนผิวชิ้นงานของขดลวดเหนี่ยวนำ B2 และ B5 57
3.29	ขดลวดเหนี่ยวนำ B3 และ B6 58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.30 กระแสบนผิวชิ้นงานของขดลวดเหนี่ยวนำ B3 และ B6	58
3.31 ขดลวดเหนี่ยวนำ C1 และ C4	59
3.32 กระแสบนผิวชิ้นงานของขดลวดเหนี่ยวนำ C1 และ C4	59
3.33 ขดลวดเหนี่ยวนำ C2 และ C5	60
3.34 กระแสบนผิวชิ้นงานของขดลวดเหนี่ยวนำ C2 และ C5	60
3.35 ขดลวดเหนี่ยวนำ C3 และ C6	61
3.36 กระแสบนผิวชิ้นงานของขดลวดเหนี่ยวนำ C3 และ C6	61
3.37 ค่ากระแสบนผิวชิ้นงานของขดลวดเหนี่ยวนำแบบเดี่ยว	62
3.38 ค่ากระแสบนผิวชิ้นงานของขดลวดแบบคู่ที่พันขดลวดในทิศทางเดียวกัน	63
3.39 ค่ากระแสบนผิวชิ้นงานของขดลวดแบบคู่ที่พันขดลวดใน ทิศทางตรงข้ามกันในแฉวลำดับที่ 2	63
3.40 ค่ากระแสบนผิวชิ้นงานของขดลวดแฉวลำดับแบบ 3 แฉว ที่พันขดลวดในทิศทางเดียวกัน	64
3.41 ค่ากระแสบนผิวชิ้นงานของขดลวดแบบแฉวลำดับ 3 แฉวลำดับที่พันขดลวด ในทิศทางตรงข้ามกันในแฉวลำดับที่ 2	64
4.1 เครื่องให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำ	66
4.2 ลักษณะของสัญญาณ OUT A จากไอซี UC3879N	67
4.3 ลักษณะของสัญญาณ OUT B จากไอซี UC3879N	68
4.4 ลักษณะของสัญญาณ OUT C จากไอซี UC3879N	68
4.5 ลักษณะของสัญญาณ OUT D จากไอซี UC3879N	69
4.6 ลักษณะของสัญญาณ OUT A เปรียบเทียบกับ OUT D ของไอซี UC3879N	70
4.7 ลักษณะของสัญญาณ OUT A เปรียบเทียบกับ OUT B ของไอซี UC3879N	70
4.8 ลักษณะของสัญญาณ OUT A เปรียบเทียบกับ OUT C ของไอซี UC3879N	71
4.9 ลักษณะของสัญญาณ OUT B เปรียบเทียบกับ OUT C ของไอซี UC3879N	71
4.10 ลักษณะของสัญญาณ OUT B เปรียบเทียบกับ OUT D ของไอซี UC3879N	72
4.11 ลักษณะของสัญญาณ OUT C เปรียบเทียบกับ OUT D ของไอซี UC3879N	72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 สัญญาณเอาต์พุตจากไอซี UC3879N ของ OUT A ที่ทำงานพร้อมกับ OUT D และ OUT B ที่ทำงานพร้อมกับ OUT C	73
4.13 สัญญาณเอาต์พุตจากไอซี UC3879N ของ OUT A ที่ทำงานไม่พร้อมกับ OUT B และ OUT B ที่ทำงานพร้อมกับ OUT D	74
4.14 สัญญาณทั้งสี่ของไอซี UC3879N	75
4.15 สัญญาณขับเกทไอจีบีทีที่ออกจากไอซี UC3879N ที่ OUT A เปรียบเทียบกับ OUT B	75
4.16 สัญญาณก่อนและหลังวงจรขยายสัญญาณ ของ OUT A	76
4.17 ลำดับการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง	77
4.18 ลักษณะสัญญาณที่ขดลวดเหนี่ยวนำ	78
4.19 ลักษณะของขดลวดเหนี่ยวนำแบบเดี่ยวขนาดต่าง ๆ	79
4.20 ลักษณะของขดลวดเหนี่ยวนำแบบคู่ขนาดต่าง ๆ	80
4.21 ลักษณะของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแถวลำดับ 3 แถวลำดับขนาดต่าง ๆ	80
4.22 การพันขดลวดเหนี่ยวนำในทิศทางตรงข้ามกันในแถวลำดับที่ 2	81
4.23 การพันขดลวดเหนี่ยวนำในทิศทางเดียวกัน	81
4.24 อุณหภูมิบนผิวชิ้นงานของขดลวดเหนี่ยวนำแบบเดี่ยว	82
4.25 อุณหภูมิบนผิวชิ้นงานของขดลวดเหนี่ยวนำแบบคู่ที่พันขดลวดในทิศทางเดียวกัน	83
4.26 อุณหภูมิบนผิวชิ้นงานของขดลวดเหนี่ยวนำแบบคู่ที่พันขดลวดในทิศทางตรงข้ามกัน	84
4.27 อุณหภูมิบนผิวชิ้นงานของขดลวดเหนี่ยวนำแบบ 3 แถวที่พันขดลวดในทิศทางเดียวกัน	85
4.28 อุณหภูมิบนผิวชิ้นงานของขดลวดเหนี่ยวนำแบบ 3 แถวที่พันขดลวดในทิศทางตรงข้ามกันในแถวลำดับที่ 2	86
4.29 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของขดลวดเหนี่ยวนำแบบคู่ เส้นผ่านศูนย์กลาง 2, 3 และ 4 เซนติเมตร ที่พันขดลวดแตกต่างกัน	87

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.30 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของขวดวดเหนียวน้ำแบบ 3 แฉวลำดับเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 3 และ 4 เซนติเมตร ที่พื้นขวดวดแตกต่างกันสลับกัน	88
ข.1 วงจรกำเนิดสัญญาณด้านหน้า.....	102
ข.2 วงจรกำเนิดสัญญาณด้านหลัง.....	102
ข.3 วงจรขยายขับสัญญาณเกทส่วนหน้า.....	103
ข.4 วงจรขยายขับสัญญาณเกทส่วนหลัง.....	103

สารบัญตาราง

รูปที่

หน้า

3.1	คุณลักษณะของขดลวดเหนี่ยวนำ	49
-----	----------------------------------	----

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	ศักย์เวกเตอร์แม่เหล็ก
B	=	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก
C	=	คาปาซิเตอร์
E	=	electric field
H	=	magnetic field
l	=	ความยาว
δ	=	penetration depth
ϵ_r	=	relative permittivity
ϵ_0	=	permittivity of free space
μ_0	=	permeability of free space
μ_r	=	relative permeability
f	=	frequency
ρ	=	ความหนาแน่นของวัสดุ
C_p	=	specific heat
ω	=	angular frequency
λ	=	wavelength
L	=	ตัวเหนี่ยวนำ
C	=	ตัวเก็บประจุ
J_s	=	ความหนาแน่นประจุไฟฟ้า
$K(k_m)$	=	elliptic integrals of the first kinds
$E(k_m)$	=	elliptic integrals of the second kinds
a	=	diameter of coil
d	=	ระยะห่างระหว่างขดลวด
M_1	=	mutual inductance
N	=	จำนวนรอบขดลวดเหนี่ยวนำ
n	=	จำนวนแถวลำดับ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

IEEE	= the Institute of Electrical and Electronics Engineers
BJT	= bipolar junction transistor
IGBT	= insulated gate bipolar transistor
PCB	= printed circuit board
PWM	= pulse width modulation
ZVS	= zero voltage switching

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้อุปกรณ์กำเนิดพลังงานความร้อนมีอยู่มากมายหลายชนิดด้วยกัน เพื่อตอบสนองความต้องการของชีวิตที่หลากหลายมากขึ้น นอกจากจะมีการพัฒนาให้ตัวผลิตภัณฑ์ใช้งานได้ง่ายขึ้นแล้ว รูปแบบของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานความร้อนยังมีหลากหลายประเภทไม่ว่าจะเป็นขดลวดความร้อน หรือแก๊ส ในขณะที่ขดลวดความร้อนโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำได้ถูกนำมาใช้เพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ แทนที่ขดลวดความร้อนและแก๊ส เนื่องจากความก้าวหน้าทางด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงการพัฒนาจอร์อินเวอร์เตอร์ความถี่สูงที่สามารถจ่ายโหลดความร้อนเหนี่ยวนำด้วยเพาเวอร์ระดับสูงมากขึ้น โดยเลือก IGBT ซึ่งมีความไวในการสวิตช์สูงมาสร้าง ทำให้อุปกรณ์ถูกพัฒนาให้มีขนาดที่เล็กลง น้ำหนักเบาขึ้น และวิธีการใช้งานที่ง่ายขึ้น

การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำนี้ ความร้อนจะเกิดขึ้นที่ผิวของภาชนะโดยตรง เนื่องจากเกิดกระแสไหลวน (eddy current) ทำให้เกิดความร้อนได้ในเวลาอันรวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ขดลวดความร้อนหรือแก๊ส ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงการถ่ายเทความร้อนภายใน จะพบว่าความร้อนที่เกิดจากขดลวดความร้อนหรือแก๊สจะถ่ายเทจากขดลวดหรือเปลวไฟไปสู่โลหะตัวกลางหรือชิ้นงาน จึงเป็นไปได้ที่ประสิทธิภาพของการใช้ขดลวดความร้อนหรือแก๊สจะลดต่ำลงเมื่อเทียบกับการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำที่มีหลักการทำงานดังนี้คือ เมื่อป้อนกระแสสลับความถี่สูงให้กับขดลวดเหนี่ยวนำที่พันอยู่รอบชิ้นงาน ขดลวดเหนี่ยวนำนี้จะสร้างสนามแม่เหล็ก (magnetic flux) เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวน (eddy current) ขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานนั้นเกิดความร้อนโดยตรง โดยความร้อนที่เกิดขึ้นจะไม่มีการสัมผัสกันทางไฟฟ้าระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน ไม่มีเปลวไฟ ทำให้มีความปลอดภัยต่อการใช้งาน และประสิทธิภาพดีขึ้นมากอีกด้วย

จากปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การให้ความร้อนด้วยเครื่องให้ความร้อนวิธีเหนี่ยวนำด้วยสวิตช์ความถี่สูงส่วนใหญ่เป็นแบบ หนึ่งเครื่องต่อหนึ่งขดลวดเหนี่ยวนำ ทำให้มีพื้นที่การให้ความร้อนกับชิ้นงานน้อย ด้วยเหตุผลดังกล่าวผู้วิจัยจึงเสนอแนวคิดที่จะใช้เครื่องให้ความร้อน วิธีเหนี่ยวนำด้วยสวิตช์ความถี่สูงสามารถเพิ่มพื้นที่การให้ความร้อนได้

มากกว่าเดิม โดยการเพิ่มขดลวดเหนี่ยวนำให้เป็นแบบแถวลำดับ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและพื้นที่การให้ความร้อนของเครื่องให้ความร้อนวิธีเหนี่ยวนำด้วยสวิตช์ความถี่สูง ยิ่งไปกว่านั้นยังสนใจการเสริมและหักล้างกันของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวดเหนี่ยวนำแบบแถวลำดับแต่ละแบบ และระยะห่างระหว่างแถวลำดับของขดลวดเหนี่ยวนำที่ส่งผลให้เกิดการเสริมและหักล้างกันของสนามแม่เหล็กอีกด้วย ดังนั้น วิทยานิพนธ์นี้จึงต้องการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำที่สามารถให้พลังงานความร้อนได้ดีที่สุด โดยพิจารณาถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดและระยะห่างระหว่างแถวลำดับ เพื่อความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานในการให้ความร้อนในครัวเรือน หรือในภาคอุตสาหกรรมต่อไป

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาให้เข้าใจถึงหลักการทำงานของเครื่องให้ความร้อนวิธีเหนี่ยวนำด้วยสวิตช์ความถี่สูง
- 1.2.2 เพื่อศึกษา ออกแบบ และพัฒนาวงจรที่เกี่ยวข้องกับเครื่องให้ความร้อนวิธีเหนี่ยวนำด้วยสวิตช์ความถี่สูง
- 1.2.3 เพื่อศึกษาให้เข้าใจถึงประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแถวลำดับ
- 1.2.4 สามารถวิเคราะห์ถึงสาเหตุและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และระยะห่างระหว่างแถวลำดับต่างกันได้

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1.3.1 ออกแบบและสร้างวงจรควบคุมในโหมดของแรงดัน
- 1.3.2 ออกแบบและสร้างวงจรขับนำเกต
- 1.3.3 ออกแบบและสร้างวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์
- 1.3.4 ออกแบบ จำลองผล และสร้างขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนแบบแถวลำดับ
- 1.3.5 ทดสอบวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงจรและการให้ความร้อนของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแถวลำดับ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 ออกแบบและสร้างวงจรควบคุมในโหมดของแรงดัน วงจรขับนำเกต และวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์

- 1.4.2 ออกแบบและจำลองผลการให้ความร้อนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำแบบแถวลำดับ โดยใช้โปรแกรม CST EM Studio 2009
- 1.4.3 ทดสอบผลการทดลองและเก็บผลการทดลอง
- 1.4.4 วิเคราะห์ประสิทธิภาพในการให้ความร้อนของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแถวลำดับ

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1.5.1 แนวทางการดำเนินงาน

- 1) สำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 2) ออกแบบและสร้างเครื่องให้ความร้อนวิธีเหนี่ยวนำด้วยสวิตซ์ความถี่สูง
- 3) สร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม CST EM Studio 2009
- 4) สร้างขดลวดเหนี่ยวนำแบบแถวลำดับตามแบบจำลอง และวัดอุณหภูมิเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากโปรแกรม
- 5) ทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลอง

1.5.2 ระเบียบวิธีวิจัยเป็นวิทยานิพนธ์ประยุกต์ ซึ่งดำเนินการตามกรอบงานดังต่อไปนี้

- 1) สำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) ออกแบบวิเคราะห์การเหนี่ยวนำความร้อน เพื่อหาคุณสมบัติที่เหมาะสม
- 3) ออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำแบบแถวลำดับ และสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม CST EM Studio 2009
- 4) สร้างขดลวดเหนี่ยวนำแบบแถวลำดับตามแบบจำลอง และวัดอุณหภูมิเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากโปรแกรม
- 5) วิเคราะห์ผลจากการให้ความร้อนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำแบบแถวลำดับชนิดต่าง ๆ

1.5.3 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องวิจัยและปฏิบัติการสื่อสารไร้สาย อาคารเครื่องมือ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

สุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

1.5.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 1) คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
- 2) โวลต์-แอมป์มิเตอร์
- 3) เทอร์โมมิเตอร์
- 4) ออสซิลโลสโคป

1.5.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

- 1) เก็บรวบรวมข้อมูลจากการสำรวจปรีทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
- 2) เก็บรวบรวมผลจากการออกแบบ สร้าง และวัดทดสอบวงจรของเครื่องให้ความร้อนวิธีเหนี่ยวนำด้วยสวิตซ์ความถี่สูง โดยใช้ฮอสซิลโลสโคป
- 3) เก็บผลการทดสอบที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST EM Studio 2009
- 4) เก็บผลทดสอบการให้ความร้อนที่ได้จากการทดสอบขดลวดเหนี่ยวนำแบบแถวลำดับ

1.5.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลความรู้เกี่ยวกับการสร้างวงจรเครื่องให้ความร้อนวิธีเหนี่ยวนำด้วยสวิตซ์ความถี่สูง สำหรับการเหนี่ยวนำความร้อนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำแบบแถวลำดับจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิควิธีเฉพาะทางวิศวกรรม

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 ได้วงจรเครื่องให้ความร้อนวิธีเหนี่ยวนำด้วยสวิตซ์ความถี่สูง อย่างมีประสิทธิภาพ
- 1.6.2 ได้ขดลวดเหนี่ยวนำแบบแถวลำดับ อย่างมีประสิทธิภาพ
- 1.6.3 สามารถนำความรู้ที่ได้จากการที่ได้ศึกษาและวิจัยมาประกอบวิชาชีพได้
- 1.6.4 สามารถนำความรู้ที่ได้ทางทฤษฎีมาประยุกต์ใช้ได้
- 1.6.5 สามารถนำความรู้ที่ได้ทั้งทางทฤษฎีและปฏิบัติมาประยุกต์ใช้งานอื่น ๆ ได้
- 1.6.6 ได้ทักษะการคิด การวิเคราะห์และการออกแบบ

1.7 ปรีทัศน์วรรณกรรม

เพื่อให้ทราบถึงแนวทางและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผลการดำเนินการวิจัย ตลอดจนปัญหาและข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพื่อนำไปสู่วัตถุประสงค์หลักที่ได้ตั้งไว้ โดยได้มีการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมาและอาศัยฐานข้อมูลที่มีอยู่ ซึ่งฐานข้อมูลที่ใช้ในการสืบค้นงานวิจัยนี้เป็นฐานข้อมูลที่มีชื่อเสียงและได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวาง เช่น ฐานข้อมูล IEEE นอกจากนี้ยังได้มีการสืบค้นงานวิจัยจากแหล่งอื่น ๆ เช่น จากเครือข่ายอินเทอร์เน็ต หรือจากห้องสมุดของมหาวิทยาลัยต่าง ๆ โดยจากผลการสืบค้นที่ได้นั้นจะใช้เป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัยต่อไป สำหรับเนื้อหาในส่วนนี้จะได้กล่าวถึง ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ

เครื่องให้ความร้อนวิธีเหนี่ยวนำด้วยสวิตช์ความถี่สูงนั้นแบ่งออกเป็นกลุ่มต่าง ๆ ได้ดังนี้
คือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับส่วนของวงจรภาคกำลัง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับขดลวดเหนี่ยวนำ

งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับส่วนของวงจรภาคกำลัง โดยงานวิจัยในส่วนของวงจรภาคกำลังนี้ถือว่าเป็นส่วนสำคัญ เพราะเป็นเหมือนส่วนที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังงานให้กับส่วนการให้ความร้อนหรือขดลวดเหนี่ยวนำ โดยงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาและออกแบบวงจรภาคกำลังที่เป็นลักษณะวงจรสวิตช์ซิงแบบฮาล์ฟบริดจ์ (Hsu Chun-Liang, 2007) ซึ่งวงจรลักษณะนี้จะได้พลังงานเพียงครึ่งเดียว ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกวงจรสวิตช์ซิงแบบฟูลบริดจ์ (Yongyuth, Viriya, and Matsuse, 2007) ที่สามารถให้พลังงานได้มากกว่า โดยวิทยานิพนธ์นี้ยังได้ศึกษาถึงลำดับการทำงานของสวิตช์ และประสิทธิภาพของเครื่องให้ความร้อนวิธีเหนี่ยวนำด้วยสวิตช์ความถี่สูง เมื่อความถี่เรโซแนนซ์เปลี่ยนไป

งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพของการให้ความร้อน โดยงานวิจัยในส่วนนี้ที่ผ่านมาก็ได้มีการศึกษาและออกแบบทั้งในส่วนของการขดลวดเหนี่ยวนำ และการออกแบบให้ชิ้นงานสามารถให้ความร้อนได้มากขึ้น (Sugimura, Ahmed, Orabi, Hyun-Woo, and Nakaoka, 2004) โดยส่วนใหญ่จะออกแบบให้ภายในชิ้นงานมีกริด หรือแพ็คเกจให้มีพื้นที่ภายในในการให้ความร้อนมากขึ้น งานวิจัยลักษณะนี้สามารถเพิ่มอัตราการให้ความร้อนได้เร็วมากขึ้นแต่ยากในการติดตั้งเพราะต้องใส่กริดหรือแพ็คเกจภายในชิ้นงาน และไม่สามารถใช้ได้กับการให้ความร้อนกับชิ้นงานที่เป็นชิ้นงานปิด งานวิจัยที่ศึกษาในส่วนของขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน โดยการเพิ่มขดลวดเหนี่ยวนำ (Fujita, Uchida, and Ozaki, 2007) งานวิจัยนี้ยังคงใช้วงจรภาคกำลังเพียงหนึ่งชุดต่อขดลวดเหนี่ยวนำหนึ่งชุด ซึ่งสามารถเพิ่มพื้นที่การให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจริง แต่สิ้นเปลืองพลังงานมากขึ้นด้วย

งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับวงจรการเหนี่ยวนำความร้อน โดยงานวิจัยในส่วนนี้ ที่ผ่านมาก็ได้มีการศึกษาและออกแบบในส่วนของวงจรภาคการเหนี่ยวนำความร้อน โดยส่วนใหญ่จะมีการออกแบบวงจรในลักษณะที่เป็นวงจรแบบเรโซแนนซ์ ซึ่งลักษณะของวงจรเรโซแนนซ์ จะมีทั้งแบบอนุกรมและแบบขนาน โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการใช้วงจรเรโซแนนซ์ทั้งสองแบบสำหรับการเหนี่ยวนำความร้อน ซึ่งลักษณะของวงจรแบบอนุกรมในสถานะที่เกิดการเรโซแนนซ์ค่ากระแสที่ไหลในวงจร จะมีค่าสูงสุด เนื่องจากมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ำ ในทางตรงกันข้ามลักษณะของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานจะค่าอิมพีแดนซ์ที่สูง ทำให้ที่สถานะเรโซแนนซ์ค่าของกระแสที่ไหลในวงจรมีค่าต่ำ ดังนั้นการออกแบบวงจรส่วนของภาคการเหนี่ยวนำความร้อนที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด จะต้องคำนึงถึงการออกแบบวงจรเรโซแนนซ์ ให้เหมาะสมกับความถี่ที่ต้องใช้งานและลักษณะของการใช้งานของวงจรในแต่ละแบบ เพื่อให้ได้วงจรที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งจากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถนำข้อมูลจากการศึกษามาออกแบบและสร้าง

เครื่องให้ความร้อนวิธีเหนี่ยวนำด้วยสวิตช์ความถี่สูง และขดลวดเหนี่ยวนำที่ให้ประสิทธิภาพสูงต่อไปได้

1.8 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท และ ภาคผนวก

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ ขอบเขตวิทยานิพนธ์ สมมติฐานของวิทยานิพนธ์ ข้อตกลงเบื้องต้น วิธีดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีการให้ความร้อนของเครื่องให้ความร้อนวิธีเหนี่ยวนำด้วยสวิตช์ความถี่สูง ซึ่งประกอบไปด้วยการหาค่าความเหนี่ยวนำ ส่วนประกอบของเครื่องให้ความร้อนวิธีเหนี่ยวนำด้วยสวิตช์ความถี่สูง การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำแบบแถวลำดับ และการออกแบบความถี่เรโซแนนซ์

บทที่ 3 กล่าวถึงวงจรของเครื่องให้ความร้อนวิธีเหนี่ยวนำด้วยสวิตช์ความถี่สูง และการจำลองผลในโปรแกรม CST EM Studio 2009

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการซึ่งประกอบด้วยการทดสอบวงจรของเครื่องให้ความร้อนวิธีเหนี่ยวนำด้วยสวิตช์ความถี่สูง และผลการทดสอบการให้ความร้อนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำแบบแถวลำดับ

บทที่ 5 กล่าวถึงการสรุปผล ข้อเสนอแนะแนวทางแก้ไข และแนวทางการพัฒนาในอนาคต

บทที่ 2

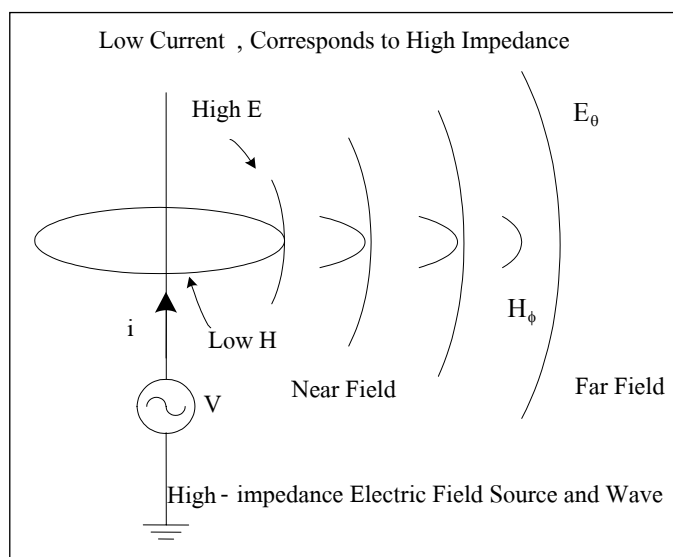
หลักการและทฤษฎีเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง

2.1 กล่าวนำ

การทำงานของเครื่องเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนด้วยสนามแม่เหล็กนี้ อาศัยความร้อนจากการเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ชิ้นงานที่เหนี่ยวนำไฟฟ้าได้ เช่น เหล็กหรือสแตนเลสบางชนิด โดยที่อุปกรณ์ที่ไม่เหนี่ยวนำแม่เหล็ก จะไม่สามารถทำให้เกิดความร้อนได้ เช่น อลูมิเนียม แก้ว เซรามิก เป็นต้น เครื่องเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนด้วยสนามแม่เหล็กประกอบด้วยส่วนประกอบหลายอย่างที่สำคัญ ทั้งส่วนของวงจรกำเนิดสัญญาณ วงจรภาคกำลัง และการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งส่วนต่าง ๆ เหล่านี้จำเป็นต้องมีการศึกษาถึงทฤษฎีของหลักการการทำงานของวงจร การประยุกต์ใช้งานและโครงสร้างของตัวอุปกรณ์เพื่อนำมาซึ่งการออกแบบและสร้างให้ได้กำลังงานและประสิทธิภาพได้ดีที่สุด โดยเนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการการทำงานของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง การออกแบบและการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดแบบแฉวลำดับ เพื่อวิเคราะห์ถึงการให้พลังงานที่สูงที่สุดของขดลวดเหนี่ยวนำแต่ละแบบ

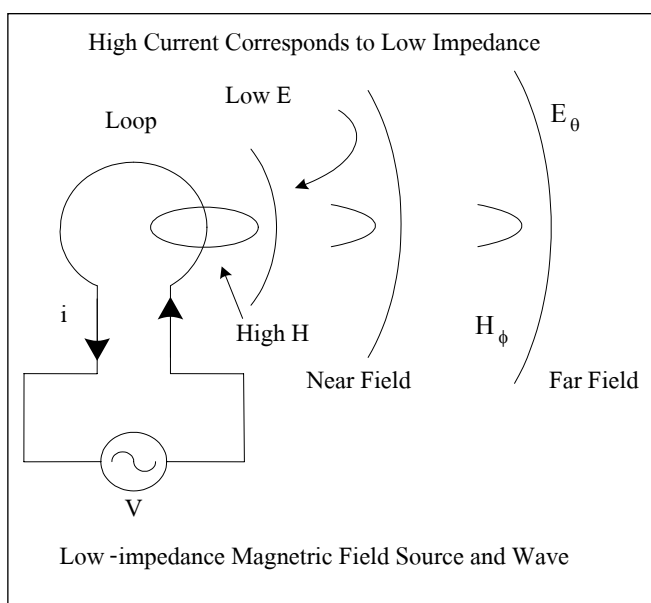
2.2 หลักการพื้นฐานของการเหนี่ยวนำความร้อนความถี่สูง

การจำแนกภาวะของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปใช้งานสามารถจำแนกโดยสังเขปได้ว่าการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กและการแพร่กระจายสนามไฟฟ้าโดยจะอาศัยกระบวนการพื้นฐานจากวงจรและแหล่งจ่าย โดยพิจารณาถึงภาวะกระแสและความต้านทานของวงจรที่กำเนิดคลื่นตามหลักการของฟาราเดย์ที่ว่า สนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นรอบลวดตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านและจะเกิดสนามไฟฟ้าที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กนั้น ซึ่งการนำสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าไปใช้งานสามารถพิจารณาได้จากปริมาณของสนามดังกล่าวพิจารณาจากรูปที่ 2.1 เนื่องจากวงจรพื้นฐานแบบคลื่นสนามไฟฟ้าที่ให้ภาวะความต้านทานสูงนั้น พบว่าวงจรภายในเป็นลักษณะเปิดทำให้กระแสที่ไหลจากแหล่งจ่ายมีค่าน้อยทำให้การเกิดสนามเหล็ก H ในช่วงต้นมีค่าน้อย (low H) แต่ให้ผลต้านสนามไฟฟ้า E ที่มีมาก (high E) ทำให้เกิดภาวะสมดุลด้านกำลังงานการพิจารณาระยะเริ่มต้นนี้มักใช้ชื่อเรียกว่าสนามระยะใกล้ (near field) ส่วนมากจะพิจารณากำลังงานจากสนามไฟฟ้าเป็นส่วนใหญ่



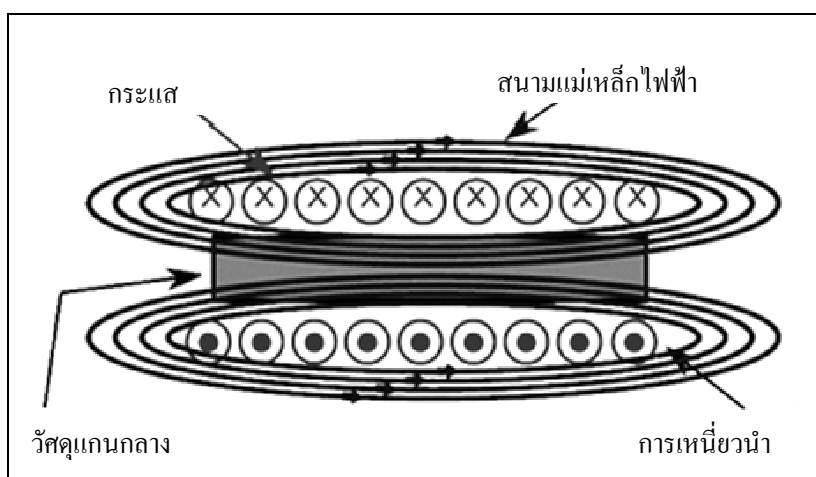
รูปที่ 2.1 วงจรพื้นฐานแบบคลื่นสนามไฟฟ้าที่ให้ภาวะความต้านทานสูง

นอกจากวงจรพื้นฐานแบบคลื่นสนามไฟฟ้าที่ให้ภาวะความต้านทานสูงจากรูปที่ 2.1 แล้ว ยังมีวงจรแบบคลื่นสนามแม่เหล็กที่ให้ภาวะความต้านทานต่ำ เมื่อพิจารณาจากรูปว่ามีลักษณะครบรอบ (loop) ทำให้กระแสสามารถไหลได้ในปริมาณที่มากเมื่อมีกระแสไหลในลวดตัวนำได้มากจึงทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก H ลวดตัวนำในช่วงต้นได้มากเช่นกันแสดงได้ดังรูปที่ 2.22



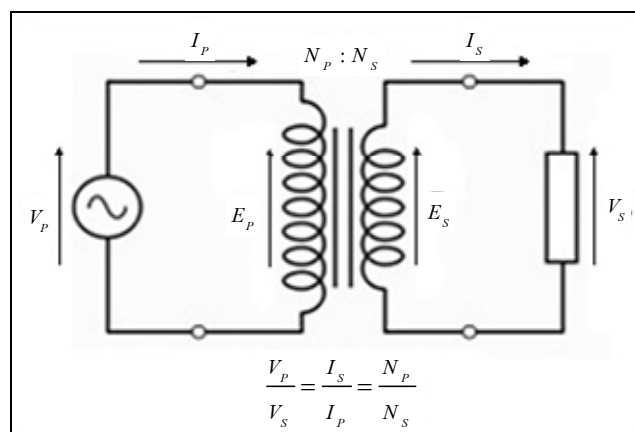
รูปที่ 2.2 วงจรแบบคลื่นสนามแม่เหล็กที่ให้ภาวะความต้านทานต่ำ

เมื่อพิจารณารูปที่ 2.22 ในขณะที่สนามไฟฟ้าจะเกิดขึ้นในลักษณะทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กแต่จะมีปริมาณสนามไฟฟ้าที่น้อยทำให้เกิดสถานะสมดุลด้านกำลังงาน การพิจารณาระยะเริ่มต้นนี้ใช้ชื่อเรียกว่าสนามระยะใกล้ (near field) เช่นกัน และการจะพิจารณากำลังงานจากสนามแม่เหล็กเป็นส่วนใหญ่อการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำเกิดจากทฤษฎีทางไฟฟ้าและความร้อนร่วมกันโดยมีสาเหตุมาจากการเหนี่ยวนำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic induction) ปรากฏการณ์ที่ผิว (skin effect) และการถ่ายเทความร้อน (heat transfer) ซึ่งจากปรากฏการณ์ทั้งสามทำให้สามารถอธิบายการให้ความร้อนหลักการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยย่อได้ดังนี้ เมื่อให้ไฟฟ้ากระแสสลับผ่านเข้าสู่ขดลวดเหนี่ยวนำที่มีโลหะอยู่ภายใน กระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ขดลวดเหนี่ยวนำจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นในขดลวดล้องผ่านโลหะภายใน เนื่องจากวัสดุภายในเป็นโลหะสนามแม่เหล็กที่ล้องผ่านชิ้นงานจะเหนี่ยวนำให้มีกระแสไฟฟ้าไหล โดยกระแสส่วนมากจะไหลผ่านชิ้นงานในบริเวณความถี่ระดับผิวของวัสดุ โดยกระแสที่ไหลวนรอบวัสดุทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่บริเวณผิวของวัสดุ ซึ่งความร้อนนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสที่เหนี่ยวนำและความต้านทานสมมูลของเส้นทางที่กระแสไหลผ่าน โดยความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดการถ่ายเทไปสู่บริเวณอื่น ๆ โดยการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีที่บริเวณผิวของโลหะที่เกิดความร้อน จากหลักการให้ความร้อนด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำอย่างง่ายกล่าวคือ เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวดซึ่งพันอยู่รอบโลหะจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆ ขดลวดนั้น โดยโลหะนั้นจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวนภายในและเกิดความร้อนขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.3 การให้ความร้อนหลักการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำอย่างง่าย

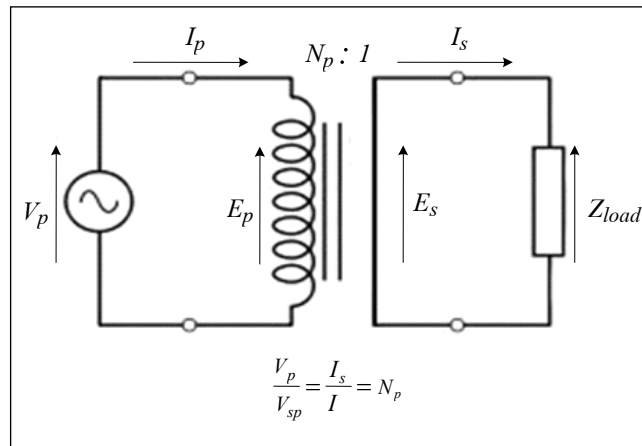
จากรูปที่ 2.3 เป็นการแสดงถึงหลักการให้ความร้อนด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำอย่างง่าย โดยให้มีกระแสไหลผ่านขดลวดที่พันอยู่รอบโลหะแล้วทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆ ขดลวดนั้น ถ้าพิจารณาทั้งระบบจะพบว่าคล้ายกับเป็นหม้อแปลงชุดหนึ่ง โดยที่ขดลวดเหนี่ยวนำจะเป็นเสมือนขดลวดปฐมภูมิ (primary coil) ของหม้อแปลงที่มีจำนวนรอบเท่ากับจำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำในวัสดุโลหะที่ถูกให้ความร้อนจะถูกเปรียบเสมือนขดลวดทุติยภูมิ (secondary coil) ของหม้อแปลงที่มีจำนวนรอบเป็น 1 รอบเท่านั้น เมื่อไฟฟ้ากระแสสลับที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นในโลหะจะไหลอยู่ภายในเนื้อโลหะ ซึ่งสามารถเปรียบได้เป็นภาระทางไฟฟ้าที่มีสภาพเกือบจะลัดวงจร เนื่องจากความต้านทานสมมูลของในวัสดุค่อนข้างต่ำมาก โดยจากการอธิบายข้างต้นหากจะเขียนเป็นวงจรสมมูลเพื่อเปรียบเทียบกันระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้ากับการให้ความร้อนหลักการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจน ในรูปที่ 2.44 แสดงให้เห็นถึงวงจรพื้นฐานของหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไป และรูปที่ 2.55 แสดงถึงวงจรพื้นฐานของขดลวดเหนี่ยวนำและในวัสดุภาระทางไฟฟ้า



รูปที่ 2.4 วงจรพื้นฐานของหม้อแปลงไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.5 วงจรพื้นฐานของขดลวดเหนี่ยวนำกับภาระทางไฟฟ้าถ้า I_p เป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำเป็นสาเหตุให้เกิดการเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้า I_s ไหลวนอยู่ในโลหะจากกฎความสัมพันธ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าจะทำให้กระแสทั้งสองมีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ 2.1

$$I_s = N_p I_p \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.5 วงจรพื้นฐานของขดลวดเหนี่ยวนำกับภาระทางไฟฟ้า

โดยที่ N_p คือจำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งกำลังสูญเสียเป็นความร้อนในวัสดุจะมีค่าเท่ากับสมการที่ 2.2 เมื่อ R_w คือความต้านทานสมมูลในวัสดุ

$$P_w = (N_p I_p)^2 R_w \quad (2.2)$$

2.2.1 หลักการการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ 2.3 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะเกิดขึ้นรอบ ๆ ขดลวดซึ่งสอดคล้องกับกฎของแอมแปร์ (ampere's law) ซึ่งวัตถุที่ใส่เข้าไปในพื้นที่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการเคลื่อนไหวเกี่ยวกับสนามแม่เหล็ก ความหนาแน่นต่อพื้นที่ การเกิดสนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นที่บริเวณตรงกลางจากพื้นผิวมากที่สุด ซึ่งคล้ายกับกฎของฟาราเดย์ (faraday's law) เมื่อจ่ายกระแสเข้ากับพื้นผิวของวัตถุที่สามารถนำไฟฟ้าได้ จะมีความสัมพันธ์กลับกันกับกระแสนวนวงจรการเหนี่ยวนำ ดังสมการที่ 2.3 เกิดกระแสไหลวนบนพื้นผิวของวัตถุ

$$E = \frac{d\lambda}{dt} = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.3)$$

ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้เกิดพลังงานทางไฟฟ้าจากกระแสนวนแปลงเป็นพลังงานในรูปของความร้อน ดังสมการที่ 2.4

$$P = \frac{E^2}{R} = i^2 R \quad (2.4)$$

ซึ่งค่าของตัวต้านทานได้จากค่าของความหนาแน่นและค่าความซึมซาบได้ของวัตถุที่สามารถนำไฟฟ้าได้ ส่วนกระแสได้จากค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า พลังงานความร้อนจะเกิดขึ้นได้โดยมีความสัมพันธ์กับค่าของความลึกผิว ถ้าวัตถุที่สามารถนำไฟฟ้าได้ เช่น เหล็ก พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยจำนวนของพลังงานความร้อนที่ได้จะมากขนาดไหนขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุด้วย พลังงานจะเพิกเฉยถ้าวัตถุมีขนาดเล็กมาก ๆ เนื่องจากพลังงานมีการสูญเสียมากกว่า 10 เปอร์เซนต์

2.2.2 ความลึกผิว

ปรากฏการณ์ที่สัญญาณความถี่สูงไหลที่ผิวและความถี่ต่ำไหลลึกลงไปในตัวเรียบ ๆ ตามความถี่ที่ลดลง ดังสมการที่ 2.5 และสมการที่ 2.6 เราเรียกว่าเกิดปรากฏการณ์ที่ผิว (skin effect)

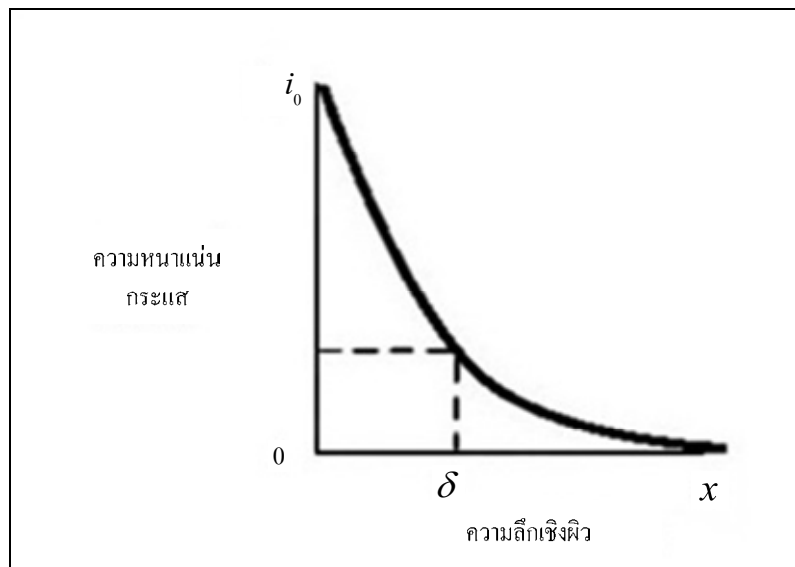
$$i_x = i_0 e^{-x/\delta} \quad (2.5)$$

เมื่อ	i_x	คือ ความหนาแน่นของกระแสที่ x
	i_0	คือ ความหนาแน่นของกระแสนบนความลึกผิว
	δ	คือ ความลึกผิว

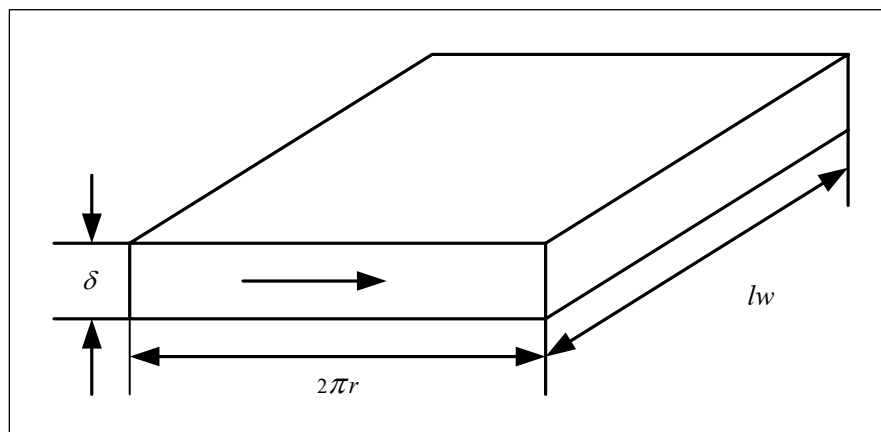
$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} \quad (2.6)$$

เมื่อ	ρ	คือ ความควบแน่น
	μ	คือ ความซึมซาบได้
	ω	คือ ความถี่ที่กระแสไหลผ่านวัตถุ

จากสมการที่ 2.7 จะเห็นว่าค่าความลึกผิวที่ได้ขึ้นอยู่กับ ค่าความควบแน่น ค่าความซึมซาบได้ของวัตถุ และความถี่ของวัตถุ รูปที่ 2.6 เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของกระแสและค่าของความลึกเชิงผิว



รูปที่ 2.6 ความหนาแน่นของกระแสและค่าของความลึกเชิงผิว



รูปที่ 2.7 ชิ้นงานที่ถูกคลี่ออกเป็นแผ่น

ถ้าพิจารณาว่ากระแสโดยส่วนมากไหลอยู่ในระดับความลึกผิว และความต้านทานสมมูลของชิ้นงานจะพิจารณาชิ้นงานทรงกระบอก เมื่อทำการคลี่ออกเป็นแผ่นบาง มีระยะทางการไหลของกระแสมีค่าเท่ากับขนาดเส้นรอบวงของชิ้นงานทรงกระบอก ($2\pi r$) ที่มีความหนาเท่ากับ ความลึกผิว (δ)

จากค่าความต้านทาน $R = \rho l / A$ ดังนั้นค่าความต้านทานของชิ้นงานรูปทรงกระบอกที่ถูกคลี่ออกเป็นแผ่นดังรูปที่ 2.7 จะมีความหนาของชิ้นงานเท่ากับความลึกผิว โดยค่าความลึกผิวสามารถหาได้จากสมการ 2.7

$$R_w = \rho \frac{2\pi R}{\delta l_w} \quad (2.7)$$

ดังนั้น

$$R_w \propto \frac{\rho}{\delta} = \sqrt{\rho \mu f} \quad (2.8)$$

สรุปได้ว่า ค่าความต้านทานของชิ้นงานจะแปรผันโดยตรงกับรากที่สองของค่าความต้านทานจำเพาะของชิ้นงาน รากที่สองของค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กของชิ้นงาน และรากที่สองของความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ดังสมการที่ 2.8

2.2.3 ค่าความต้านทานจำเพาะของโลหะกับอุณหภูมิ

ค่าความต้านทานจำเพาะโดยทั่วไปจะขึ้นกับสารที่เป็นชิ้นงาน โดยปกติสารที่เป็นพวกโลหะเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความต้านทานจำเพาะจะเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้นความสัมพันธ์ ในลักษณะทั่วไปจะเป็นดังสมการที่ 2.9

$$\rho_\theta = \rho_1 [1 + \alpha(\theta - \theta_1)] \quad (2.9)$$

โดยที่ ρ_θ คือค่าความต้านทานจำเพาะ (Ωm) ที่อุณหภูมิ θ ($^{\circ}C$) ใด ๆ และ ρ_1 คือค่าความต้านทานจำเพาะที่อุณหภูมิ θ_1 ส่วน α คือค่าสัมประสิทธิ์ของสารชนิดต่าง ๆ ในทางปฏิบัติจะพบว่าค่าความต้านทานจำเพาะของชิ้นงานจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ในการคำนวณค่าความต้านทานจำเพาะสมมุติจะพิจารณาจากค่าลึงที่ชิ้นงาน โดยค่าลึงที่ชิ้นงานจะแปรตาม ρ/δ หรืออีกนัยหนึ่งคือแปรตาม $\sqrt{\rho}$ ดังนั้นถ้าให้ตัวแปรอื่นคงที่และพิจารณาว่าค่าความต้านทานจำเพาะของชิ้นงานจะแปรผันกับอุณหภูมิเป็นเชิงเส้นจะได้ว่า

$$\rho_0 = \rho_1 + \frac{\theta - \theta_1}{\theta_2 - \theta_1}(\rho_2 - \rho_1) \quad (2.10)$$

และ

$$\frac{d\theta}{dt} = c\sqrt{\rho} \quad (2.11)$$

โดยที่ $C =$ ค่าคงที่
จัดรูปสมการที่ 2.10 ใหม่จะได้

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{d\theta}{\sqrt{\rho_1 + \frac{\theta - \theta_1}{\theta_2 - \theta_1}(\rho_2 - \rho_1)}} = \int_0^1 C dt \quad (2.12)$$

ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนจนอุณหภูมิ θ_1 เปลี่ยนเป็น θ_2 เท่ากับ

$$t = 2 \frac{(\theta_2 - \theta_1)}{(\rho_2 - \rho_1)} \frac{(\sqrt{\rho_2} - \sqrt{\rho_1})}{c} \quad (2.13)$$

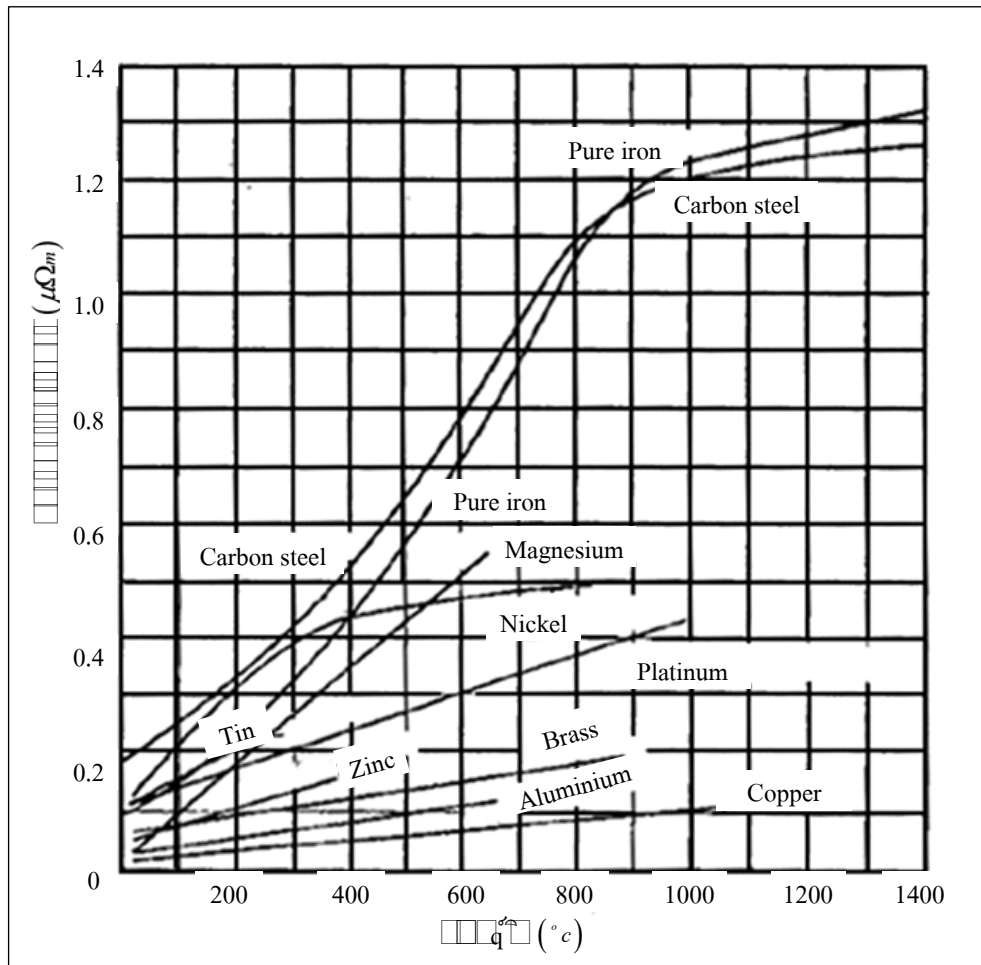
ถ้าสมมติให้ค่าความต้านทานจำเพาะมีค่าคงที่ และมีค่าเป็น ρ_m ตลอดช่วงอุณหภูมิการใช้งาน (θ_1 ถึง θ_2) เมื่อแทนในสมการ 2.11 จะได้

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} d\theta = \int_0^1 c\sqrt{\rho_m} dt$$

$$t = \frac{(\theta_2 - \theta_1)}{c\sqrt{\rho_m}} \quad (2.14)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการ 2.13 กับ 2.14 จะได้ว่า

$$\rho_m = \frac{(\sqrt{\rho_2} + \sqrt{\rho_1})^2}{4} \quad (2.15)$$



รูปที่ 2.8 สภาพความต้านทานของโลหะกับอุณหภูมิ

จากสมการ 2.15 ค่าความต้านทานจำเพาะสมมูลที่ได้อาจจะใช้ได้กับโลหะบางประเภทที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็นเชิงเส้น และจากภาพที่ 2.8 จะเห็นได้ว่าโลหะที่เป็นสารเฟอร์โรแมกเนติกจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่า ρ กับอุณหภูมิจะไม่เป็นเชิงเส้นตลอดช่วงอุณหภูมิเหมือนสมมติฐานในสมการ 2.11 ดังนั้นการคำนวณโดยใช้ค่า ρ_m จึงต้องแยกพิจารณากราฟที่เป็นเชิงเส้นออกเป็นช่วง ๆ ที่ละช่วงไป

2.2.4 ความซึมซาบทางแม่เหล็กของโลหะกับอุณหภูมิ

ความซึมซาบทางแม่เหล็กของโลหะนั้นปกติจะมีค่าค่อนข้างคงที่ แต่สำหรับสารที่มีคุณสมบัติเป็นสารเฟอร์โรแมกเนติกนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสนามแม่เหล็กกับความซึมสนามแม่เหล็กจะไม่เป็นเชิงเส้น

นอกจากนี้ค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กของสารเฟอร์โรแมกเนติกยังมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิด้วย โดยปกติแล้วความซึมซาบทางแม่เหล็กของสารประเภทนี้จะค่อนข้างมีค่าคงที่เมื่อเทียบกับอุณหภูมิ แต่ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงจุดคูรี (curie point) แล้วค่าความซึมซาบของสารนั้นจะลดลงเป็นค่าซึมซาบของอากาศ ($\mu_r=1$) ทันที มีผลให้สารนั้นหมดสภาพความเป็นแม่เหล็กนั่นเอง

จากความสัมพันธ์ของค่าความซึมซาบทางแม่เหล็ก ค่าความต้านทานภายใน กระแสที่ไหลบนผิวของชิ้นงาน และค่าความนำ สามารถคำนวณหาการกระจายอุณหภูมิภายในก้อนวัตถุที่มีคุณสมบัติดูดซับกำลังงาน โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ใช้การคำนวณหาการสูญเสียกำลังงานของตัวกลางที่มีการสูญเสียดังนี้ (Minoune et al., 1996; Bottomley et al., 1978; Kuster et al., 1992)

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho} = \frac{J^2}{\sigma \rho} \quad (2.16)$$

$$P = \rho SAR \quad (2.17)$$

$$P = \frac{J^2}{\sigma} \quad (2.18)$$

เมื่อ	P	คือ ค่าความหนาแน่นของกำลังงานที่สูญเสีย (W / m^3)
	SAR	คือ อัตราการดูดซับกำลังงาน (W / kg)
	σ	คือ ค่าความนำ (S / m)
	J	คือ ความหนาแน่นของกระแส (A / m^2)

การคำนวณหาการกระจายอุณหภูมิภายในก้อนวัตถุที่มีคุณสมบัติดูดซับกำลังงานนั้น จะใช้การคำนวณจากสนามแม่เหล็กในการคำนวณหาสนามแม่เหล็ก B สามารถดำเนินการได้โดยเลียงไปคำนวณหาศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A เนื่องจากสามารถคำนวณได้ง่ายกว่า

โดยสนามแม่เหล็ก B สามารถคำนวณได้ด้วยการเคิร์ลศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A เท่านั้น ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้ (Balanis, 1989; Renhart et al., 1992)

$$B_A = \mu H_A = \nabla \times A \quad (2.19)$$

$$H_A = \frac{1}{\mu} \nabla \times A \quad (2.20)$$

$$\nabla \times E_A = -j\omega\mu H_A = -j\omega \nabla \times A \quad (2.21)$$

$$\nabla \times [E_A + j\omega A] = 0 \quad (2.22)$$

จากเวกเตอร์เอกลักษณ์ $\nabla \times (-\nabla \varphi) = 0$ จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$E_A + j\omega A = -\nabla \varphi \quad (2.23)$$

$$E_A = -\nabla \varphi - j\omega A \quad (2.24)$$

จากสมการ Maxwell สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\nabla \times H_A = J + \sigma E_A \quad (2.25)$$

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) + \sigma \frac{\partial}{\partial t} A + \sigma \nabla \varphi = J \quad (2.26)$$

เมื่อ H_A คือความเข้มสนามแม่เหล็ก J คือความหนาแน่นของกระแส (forced current density) σ คือสภาพนำทางไฟฟ้า (electrical conductivity) E_A คือความเข้มของสนามไฟฟ้าและ φ คือโพเทนเชียลไฟฟ้า

2.2.5 ความถี่เครื่องให้ความร้อนวิธีเหนี่ยวนำ

งานให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำแต่ละประเภท จะใช้ช่วงความถี่และระดับกำลังแตกต่างกันไปดังที่แสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งจะได้รับกำลังจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งได้มาจากแหล่งกำเนิดชนิดต่าง ๆ ซึ่งสามารถจำแนกได้ดังนี้

ค่าความต้านทานจำเพาะค่าน้อยจะส่งผลให้สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำขึ้นงานให้เกิดความร้อนได้ดีกว่าชิ้นงานที่มีค่าความต้านทานจำเพาะมาก

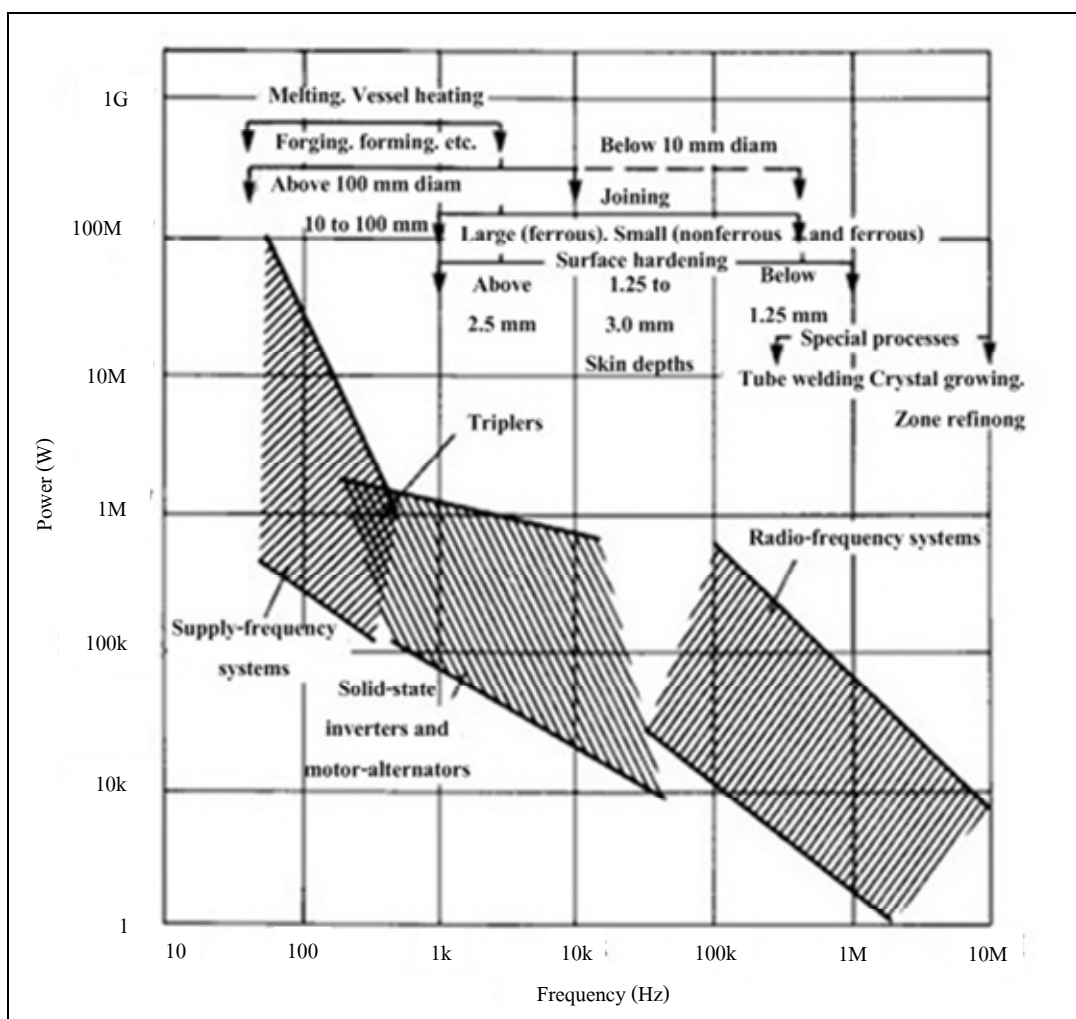
1. เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ใช้แหล่งจ่ายจากการไฟฟ้าโดยตรง แรงดันไฟฟ้าจากการไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่ค่อนข้างต่ำจึงทำให้ระดับความลึกผิวในการให้ความร้อนมีค่ามากตั้งแต่ 10 – 100 มิลลิเมตร โดยปกติเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำประเภทนี้จะใช้ในงานการหลอมโลหะมีกำลังสูงได้ถึงหลายร้อยเมกะวัตต์

2. เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ใช้มอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ให้ความถี่อยู่ในย่าน 500 เฮิรซ์ ถึง 10 กิโลเฮิรซ์ เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำชนิดนี้จะใช้พลังงานจากการไฟฟ้ามาขับเคลื่อนมอเตอร์ และใช้มอเตอร์ไปขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกที โดยสามารถให้กำลังได้หลายร้อยกิโลวัตต์ และให้ระดับความลึกผิวดังแต่ 1 – 10 มิลลิเมตร

3. เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำโดยวงจรแปลงผันแรงดันโดยใช้สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ จำพวกทรานซิสเตอร์กำลัง มอสเฟตกำลัง หรือพาว์ไทรสเตอร์ แปลงผันแรงดันไฟฟ้าจากการไฟฟ้าให้เป็นไฟสลับอีกครั้งแต่มีความถี่สูงขึ้น โดยใช้งานในย่านความถี่ 500 เฮิรซ์ ถึง 50 กิโลเฮิรซ์ การเลือกใช้อุปกรณ์สวิตช์จะต้องคำนึงถึงความเร็วในการสวิตช์ และขนาดกำลังของอุปกรณ์สวิตช์ให้เหมาะสม

4. เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่มีการทำงานย่านความถี่วิทยุ โดยเครื่องประเภทนี้จะทำงานตั้งแต่ความถี่ 50 กิโลเฮิรซ์ จนถึง 50 เมกะเฮิรซ์ ซึ่งปัจจุบันนี้ สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำยังมีสมรรถนะในการใช้งานที่ความถี่สูง ๆ ได้ไม่ดีพอ โดยความลึกผิวอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 2 มิลลิเมตร ซึ่งเหมาะสำหรับงานชุบแข็งที่ผิว เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนี้จะให้กำลังงานค่อนข้างต่ำ

จะเห็นว่าความถี่ของเครื่องนั้นเป็นตัวแปรสำคัญต่อประสิทธิภาพ ความลึกผิวในชิ้นงาน และกำลังขาเข้าที่ใช้ของชิ้นงาน โดยที่เมื่อความถี่สูงขึ้น ความลึกผิวจะลดลงประสิทธิภาพ และกำลังขาเข้าของชิ้นงานจะสูงขึ้น



รูปที่ 2.9 ลักษณะการใช้งานของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำในย่านความถี่ต่าง ๆ

2.2.6 การหาค่าความเหนี่ยวนำ

ค่าความเหนี่ยวนำถูกกำหนดโดย 4 ปัจจัยดังนี้

1. จำนวนรอบของขดลวด ถ้าตัวเหนี่ยวนำมีจำนวนรอบของขดลวดมากขึ้น สนามแม่เหล็กที่เกิดจากการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าในขดลวดก็จะเกิดขึ้นมากด้วย สนามแม่เหล็กปริมาณมากนี้ จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นในตัวเหนี่ยวนำ และจากการที่มีเส้นแรงแม่เหล็กจำนวนมากตัดกับขดลวด จึงส่งผลให้ค่าความเหนี่ยวนำมากตามไปด้วย ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำ จึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนรอบของขดลวด

2. พื้นที่ของขดลวด ถ้าพื้นที่ของขดลวดเพิ่มขึ้นสำหรับขดลวดที่มีจำนวนรอบใด ๆ จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กมีจำนวนมากขึ้นด้วย และการมีสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นตาม ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำ จึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ของขดลวด

3. ความยาวของขดลวด ถ้าทำให้ขดลวดจำนวน 4 รอบขยายพื้นที่ออก ผลรวมของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวดแต่ละขดจะมีปริมาณลดลง ในทางกลับกันถ้าขดลวดที่มีจำนวนเท่าเดิมนี้นำมาพันให้อยู่ชิดกันมากขึ้น ความยาวของขดลวดสั้นลงสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดในแต่ละขดจะเสริมซึ่งกันและกัน ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มีปริมาณมากขึ้น ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำจึงเป็นสัดส่วนผกผันกับความยาวของขดลวด

4. วัสดุที่นำมาใช้ทำขดลวด ตัวเหนี่ยวนำส่วนมากมีแกนที่ทำจากวัสดุจำพวก นิกเกิล โคบอลต์ เหล็ก เพอร์ไรต์ หรืออัลลอย ซึ่งแกนเหล่านี้มีคุณสมบัติที่จะช่วยรวมหรือเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็ก ดังนั้นค่าความซาบซึมได้ (permeability) จึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำ โดยถ้าค่าความซาบซึมได้ของวัสดุที่ใช้ทำแกนมีค่ามาก ก็จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย

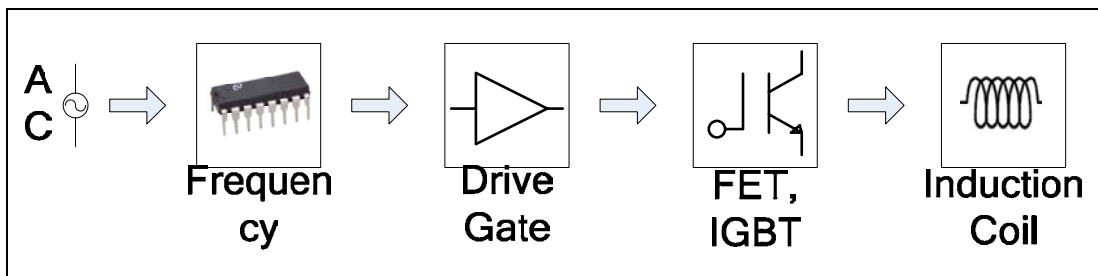
จากปัจจัยทั้ง 4 ประการที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำ ดังนั้นจึงสามารถนำมาเขียนได้ตามสมการ 2.27 เพื่อคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำได้ดังนี้

$$L = \frac{a^2 N^2}{9a + 10b} \quad (2.27)$$

โดยที่	L	คือ ค่าความเหนี่ยวนำ (μH)
	N	คือ จำนวนรอบของขดลวด
	a	คือ รัศมีของขดลวดเหนี่ยวนำที่พันแล้ว (นิ้ว)
	b	คือ ความสูงของขดลวดเหนี่ยวนำที่พันแล้ว (นิ้ว)

2.3 ลักษณะของวงจรเครื่องให้ความร้อนวิธีเหนี่ยวนำด้วยสวิตช์ความถี่สูง

โครงสร้างเครื่องให้ความร้อนวิธีเหนี่ยวนำด้วยสวิตช์ความถี่สูง ประกอบไปด้วยส่วนของวงจรแปลงกระแสไฟฟ้า วงจรกำเนิดความถี่ เพื่อควบคุมลำดับการทำงานของสวิตช์ความถี่สูง วงจรขยายสัญญาณ เพื่อขับให้สวิตช์ความถี่สูงทำงาน วงจรภาคกำลังที่มี IGBT เป็นสวิตช์ความถี่สูง และสุดท้ายเป็นขดลวดเหนี่ยวนำในการให้กำเนิดความร้อน ดังรูปที่ 2.10



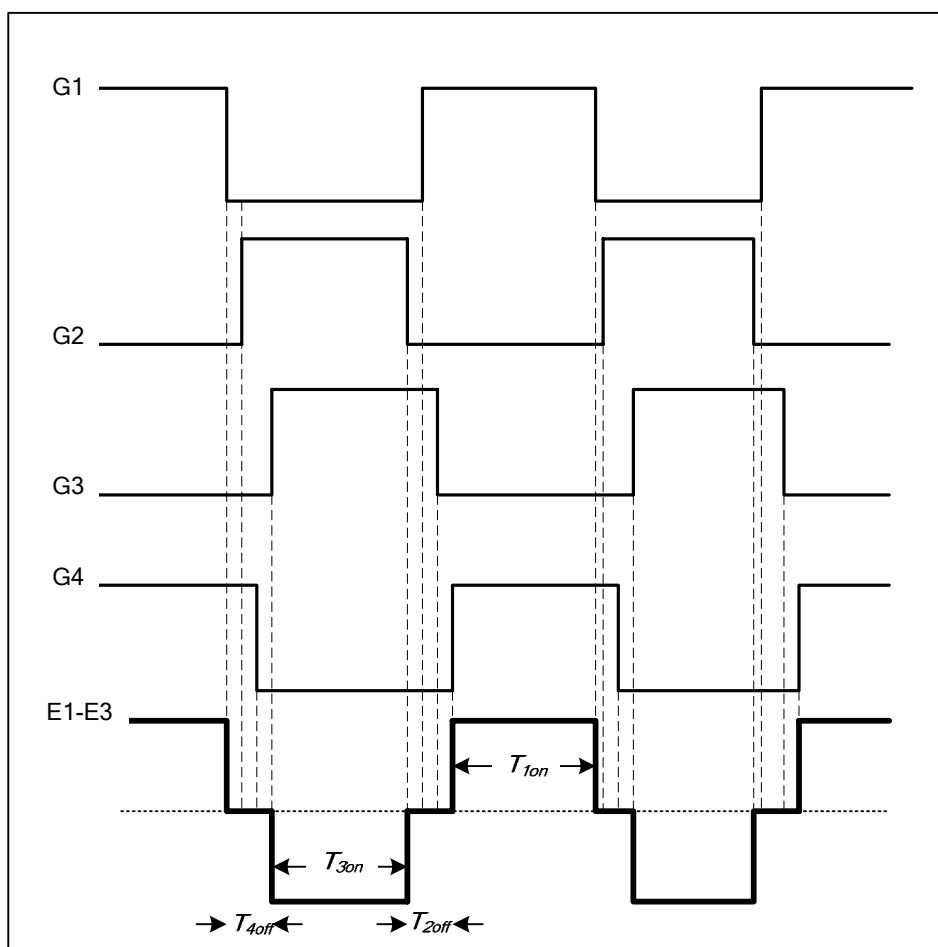
รูปที่ 2.10 โครงสร้างเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง

2.3.1 วงจรกำเนิดสัญญาณและวงจรขับนำเกต

อุปกรณ์สวิตช์ไोजิปีที่จะทำงานได้จะต้องมีสัญญาณมาขับที่ขาเกตของมัน และสัญญาณที่จะนำมาขับนั้นจะต้องอยู่ภายใต้ข้อกำหนดที่ไोजิปีที่ต้องการด้วย เช่น จะต้องสามารถจ่ายกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่เพียงพอต่อการชาร์จจากเกตได้ ซึ่งสัญญาณควบคุมโดยทั่ว ๆ ไป จะไม่สามารถนำมาขับที่ขาเกตของไोजิปีที่ได้โดยตรง แต่จะต้องผ่านการขยายกระแสและแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นเพื่อให้เพียงพอความต้องการของไोजิปี และวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ไอซีเบอร์ PC929 เพื่อขยายสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากไอซีเบอร์ UC3879N ทั้ง 4 สัญญาณ ซึ่งเป็นเหมือนตัวกำเนิดสัญญาณให้กับไोजิปีทั้ง 4 ชุดนั่นเอง

วงจรขับของไोजิปีที่จะเหมือนกับวงจรขับมอสเฟต เป็นวงจร Gate Source Driver Voltage โดยจะต้องสามารถจ่ายกระแสได้อย่างมากพอที่จะชาร์จตัวเก็บประจุที่อยู่ภายในได้ออย่างรวดเร็วและการออกแบบจะต้องให้สายที่ต่อจากวงจรขับไปยังขาเกตสั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อไม่ให้เกิดการรอสชเลทหรือจะแก้ไขได้โดยการต่อความต้านทานอนุกรมที่ขาเกต

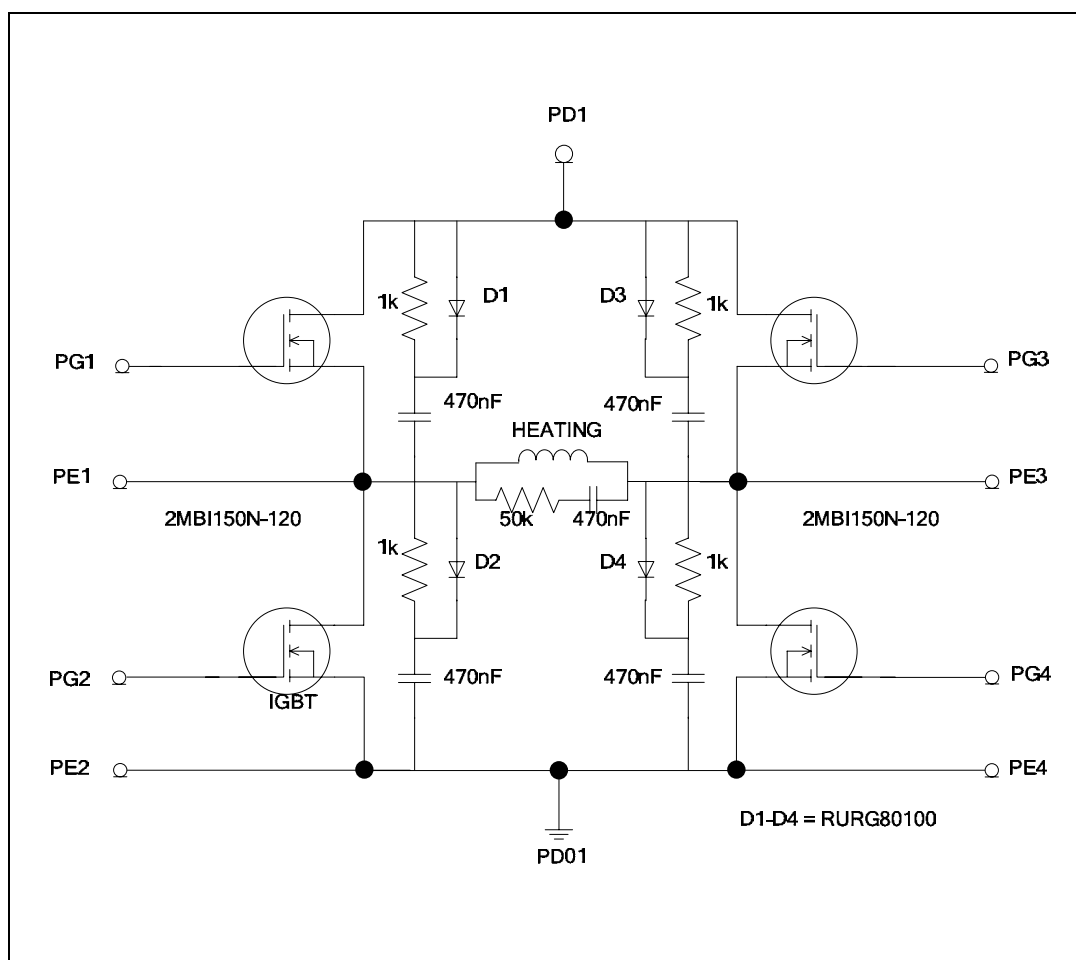
เพื่อให้วงจรภาคกำลังทำงานให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดแล้ว สิ่งที่สำคัญคือลำดับการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์แต่ละตัว วงจรในการควบคุมสวิตช์ความถี่สูงนี้ใช้วงจรควบคุมเป็นแบบมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation, PWM) วงจรเป็นแบบเต็มบริดจ์ ใช้ไอซีเบอร์ UC3879N ซึ่งเป็นไอซีที่มี 4 เอาต์พุตเป็นสัญญาณอินพุต (G1-G4) ดังรูปที่ 2.11 สัญญาณอินพุตนี้ใช้ควบคุมการทำงานที่ขาเกตของ IGBT โดยเรากำหนดให้สัญญาณอินพุตทำงานไม่พร้อมกัน เพื่อให้เกิดช่วงการนำกระแสเป็นศูนย์ (ZVS) การทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ โดยช่วงนำกระแสเป็นศูนย์คือช่วง T_{2off} และ T_{4off} ของกราฟ V_{out} ในรูปที่ 2.11 และส่วนของกราฟด้านบวกช่วง T_{1on} คือช่วงที่ G1 และ G4 ทำงาน กราฟด้านลบช่วง T_{3on} คือช่วงที่ G2 และ G3 ทำงาน ทั้งนี้สวิตช์ทั้ง 4 ตัวยังทำงานไม่พร้อมกันอีกด้วย



รูปที่ 2.11 ลักษณะของสัญญาณที่ใช้ขับเคลื่อนของ IGBT และสัญญาณเอาต์พุต (E1-E3) ที่ตกรวมขดลวดเหนี่ยวนำความถี่สูง

2.3.2 อินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ (full bridge inverter)

อินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ เป็นวงจรที่ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่สูง จากรูป วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ประกอบด้วยสวิตช์ 4 ตัว ไอจีบีทีและไดโอดซึ่งทำหน้าที่เป็นทางผ่านกระแสย้อนกลับขณะไอจีบีทีหยุดนำกระแส อินเวอร์เตอร์แบบ เต็มบริดจ์สามารถให้กำลังงานได้สูง ดังนั้นจึงเหมาะกับการใช้งานที่ต้องการกำลังสูง ๆ จากรูปที่ 2.12 ไอจีบีทีจะทำงานสลับกันเป็นคู่ โดยที่ SW1 และ SW4 จะทำงานในเวลาเดียวกันจะเกิดแรงดัน V_s ตกรวมขดลวดเหนี่ยวนำและสลับให้ SW2 และ SW3 ทำงานในเวลาเดียวกัน แรงดันที่ตกรวมขดลวดเหนี่ยวนำจะกลับขั้วเป็น $-V_s$ ในขณะที่ไอจีบีทีแต่ละคู่ปิดจะเกิดแรงดันย้อนกลับมีค่าเป็น V_s เราจึงเรียกว่อินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ (full bridge inverter)



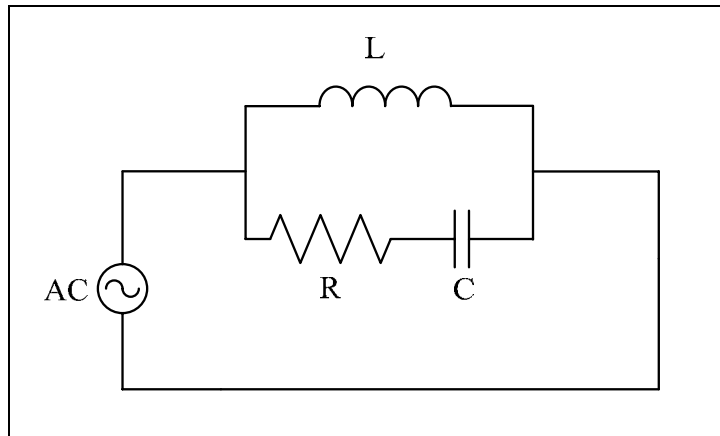
รูปที่ 2.12 วงจรภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง (high frequency inverter)

2.3.3 ไอจีบีที (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)

บีเจที (Bipolar Junction Transistor, BJT) และมอสเฟต (MOSFET) ต่างก็มีข้อดีต่างกันก็คือ บีเจทีจะมีกำลังสูญเสียขณะนำกระแสต่ำและยังมีอัตราทนแรงดันสูง แต่จะมีความเร็วในการสวิตช์ต่ำและมีช่วงหยุดนำกระแสนาน ส่วนมอสเฟต สามารถที่จะเริ่มนำกระแสและหยุดนำกระแสได้อย่างรวดเร็ว จากข้อดีของอุปกรณ์ทั้งสองจึงทำให้มีการประดิษฐ์อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดใหม่ขึ้นมาโดยนำบีเจทีและมอสเฟตรวมลงในเวเฟอร์เดียวกัน เรียกว่า Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT ซึ่งคาดว่าจะมีการนำไปใช้อย่างแพร่หลายในอนาคต ในส่วนนี้เราจะกล่าวถึงโครงสร้างและคุณสมบัติต่าง ๆ รวมทั้งค่าการจัดการทำงาน

2.4 วงจรเรโซแนนซ์

วงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่เกิดภาวะเรโซแนนซ์ (resonance) หมายถึงวงจรที่มีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ของวงจรเท่ากับหนึ่ง นั่นคือกระแสที่ไหลในวงจรจะมีเฟสตรงกันกับแรงดันที่จ่ายให้กับวงจรและค่าอิมพีแดนซ์เทียบเท่าภายในวงจรจะเหลือแต่ค่าความต้านทานเพียงอย่างเดียวเท่านั้น เพราะค่าอินดักทีฟรีแอคแตนซ์ (inductive reactance) และค่าคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ (capacitive reactance) จะหักล้างกันหมด โดยการพิจารณาวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2.13 โดยกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานจะมีมุมอินเฟสกับแรงดันของแหล่งจ่ายกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีมุมเฟสล่าช้าไป 90 องศา ส่วนกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะนำหน้าแรงดันอยู่ 90 องศา นั่นคือ มีการส่งพลังงานกลับไปมาระหว่างตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเนื่องจากความเป็นจริงในตัวเหนี่ยวนำจะมีความต้านทานรวมอยู่ด้วย ส่วนที่ตัวเก็บประจุมีค่าความต้านทานภายในตัวอยู่น้อยมาก จุดเรโซแนนซ์ของวงจรที่ต่อแบบขนานจะมีค่า ดังสมการที่ 2.28 และจากการพิจารณาสมการที่ 2.28 เพื่อหาค่าของสมการของความถี่เรโซแนนซ์จะได้ดังสมการที่ 2.29



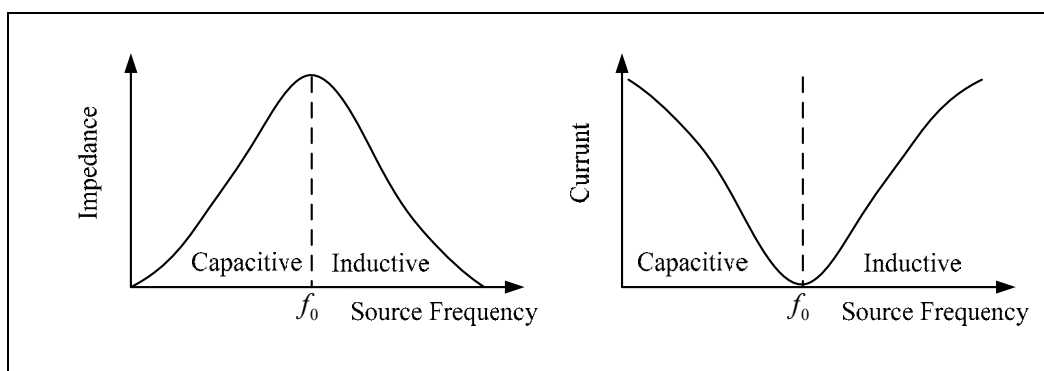
รูปที่ 2.13 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน

$$X_C = \frac{R^2 + X_L^2}{X_L} \quad (2.28)$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.29)$$

โดยที่ f คือ ความถี่ (MHz)
 L คือ ค่าความเหนี่ยวนำ
 C คือ ค่าตัวเก็บประจุ

จากสมการทั้งหมดจะเห็นได้ว่าความต้านทานมีผลน้อยมากต่อวงจรส่วนมากจะเป็นค่าความเหนี่ยวนำ ค่าตัวเก็บประจุมากกว่าที่ทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ รูปพลังงานที่ได้จะมีลักษณะที่เป็นครีฟดังรูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตกับความถี่ต้นกำเนิด จะเห็นได้ว่าเมื่อความถี่ที่น้อยไปหรือมากไปทำให้เกิดการไม่แมตช์กันค่าของกำลังงานที่ได้ก็จะมีค่าน้อย แต่เมื่อค่าของค่าความเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุเกิดการแมตช์กันก็จะทำให้อิมพีแดนซ์ที่ได้มีค่าสูงสุดและค่าของกระแสจะมีค่าต่ำทำให้ได้กำลังงานสูงสุดในการเกิดช่วงความถี่เรโซแนนซ์ ด้วยจะเห็นได้ว่าในพื้นที่ของการปรับเปลี่ยนความถี่ให้มากหรือน้อยกว่าช่วงความถี่เรโซแนนซ์ค่าความเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเป็นส่วนที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับการปรับเปลี่ยนความถี่



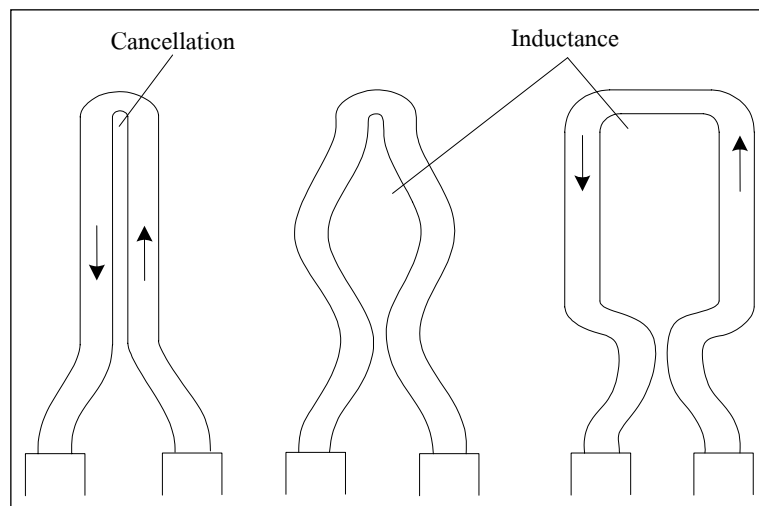
รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตกับความถี่ต้นกำเนิด

ลักษณะของวงจรเรโซแนนซ์ จะมีทั้งแบบอนุกรมและแบบขนาน ซึ่งลักษณะของวงจรแบบอนุกรมในสถานะที่เกิดการเรโซแนนซ์ค่ากระแสที่ไหลในวงจรจะมีค่าสูงสุด เนื่องจากมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ำ ในทางตรงกันข้ามลักษณะของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานจะค่าอิมพีแดนซ์ที่สูง ทำให้ที่สถานะเรโซแนนซ์ค่าของกระแสที่ไหลในวงจรมีค่าต่ำ ดังนั้นการออกแบบวงจรส่วนของภาคการเหนี่ยวนำความร้อนที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด จะต้องคำนึงถึงการออกแบบวงจรเรโซแนนซ์ ให้เหมาะสมกับความถี่ที่ต้องใช้งานและลักษณะของการใช้งานของวงจรในแต่ละแบบ เพื่อให้ได้วงจรที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

2.5 การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำแบบแถวลำดับ

ขดลวดเหนี่ยวนำหรือขดลวดให้ความร้อน คือขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กไปเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ชิ้นงาน การออกแบบรูปร่าง ขนาด หรือจำนวนรอบขึ้นอยู่กับปัจจัยหลาย ๆ ประการเช่น ขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่างและชนิดของวัสดุที่ใช้ทำขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน ตลอดจนความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้ป้อนให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ ดังนั้นทั้งประสิทธิภาพ และตัวประกอบดังกล่าวข้างต้น หลักการพื้นฐานประกอบไปด้วย

1. ขดลวดเหนี่ยวนำจะต้องอยู่ใกล้ชิ้นงานให้มากที่สุดเท่าที่ทำได้ เพื่อให้เกิดการส่งผ่านพลังงานสูงสุด สามารถอธิบายได้โดยการที่มีจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กตัดผ่านชิ้นงานได้มากขึ้นเมื่ออยู่ใกล้ชิ้นงานมากขึ้น
2. ในกรณีที่ขดลวดเหนี่ยวนำเป็นขดโซลินอยด์ เส้นแรงแม่เหล็กจะคล่องผ่านภายในขดลวดมากที่สุด ซึ่งตำแหน่งนี้จะให้อัตราการให้ความร้อนมากที่สุด
3. เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กจะมีความหนาแน่นมากที่สุดที่ตำแหน่งใกล้ขดลวดเหนี่ยวนำ และจะลดลงเมื่อห่างออกไป โดยที่ตำแหน่งศูนย์กลางของขดลวดเหนี่ยวนำจะมีเส้นแรงแม่เหล็กน้อยที่สุด ดังนั้นถ้าชิ้นงานถูกวางไม่ตรงกลางขดลวดเหนี่ยวนำ พื้นที่ที่อยู่ใกล้กับขดลวดเหนี่ยวนำ จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนมากกว่า ทำให้ไม่ได้รับความร้อนสม่ำเสมอ



รูปที่ 2.15 การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำกับค่าอินดักแตนซ์

4. ที่จุดต่อของเส้นลวดตัวนำกับขดลวดเหนี่ยวนำ สนามแม่เหล็กจะมีค่าอ่อนมาก ดังนั้น ศูนย์กลางสนามแม่เหล็กไม่จำเป็นจะต้องเป็นศูนย์กลางทางเรขาคณิต ด้วยเหตุนี้จะมีผลอย่างมาก สำหรับขดลวดเหนี่ยวนำที่มีจำนวนรอบรอบเดียว แต่ถ้ามีจำนวนรอบมากขึ้นสภาวะนี้จะมีผล น้อยลง ในทางปฏิบัติแล้วจะจับชิ้นงานหมุนไปด้วยขณะที่มีการให้ความร้อน เพื่อให้ชิ้นงานได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอ

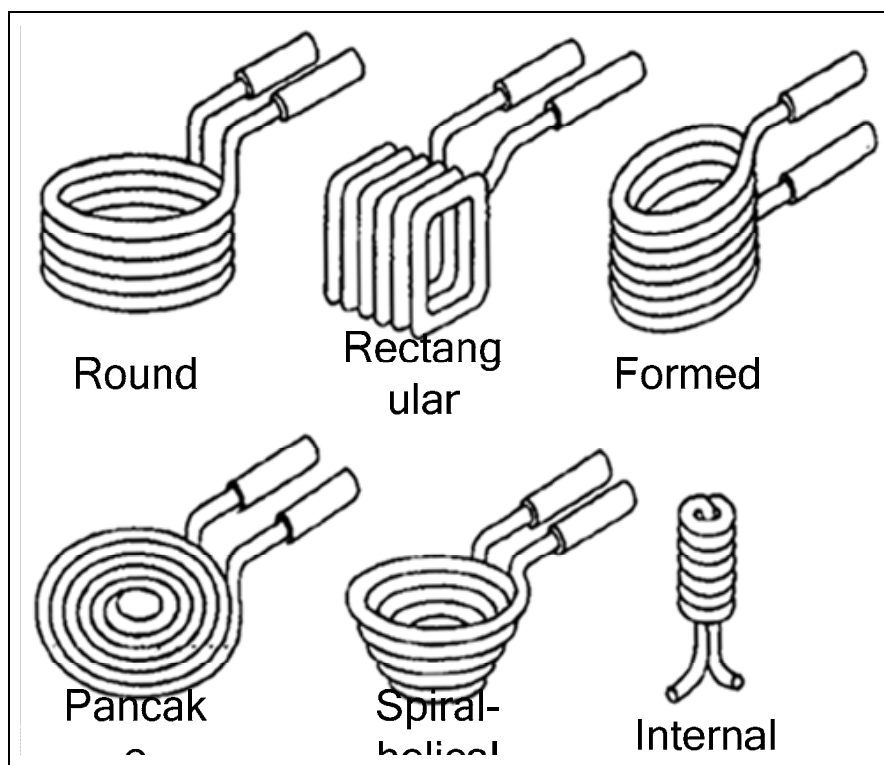
5. การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำจะต้องไม่ทำให้เกิดการหักล้างสนามแม่เหล็กซึ่งกัน ดังรูปที่ 2.15 ด้านซ้ายสุดจะไม่มีค่าอินดักแตนซ์ เพราะว่าด้านตรงข้ามของขดลวดเหนี่ยวนำอยู่ใกล้ กันมากเกินไป การทำให้เกิดวงรอบในขดลวดเหนี่ยวนำจะทำให้เกิดค่าอินดักแตนซ์เพิ่มขึ้น การออกแบบในรูปที่ 2.15 ด้านขวาเป็นการออกแบบที่ดี

เนื่องจากเหตุผลข้างต้น ขดลวดเหนี่ยวนำจะต้องสามารถทำให้เกิดความหนาแน่นของ เส้นแรงแม่เหล็กในพื้นที่ที่ต้องการให้ความร้อนได้ ตัวอย่างเช่น

A helical solenoid จะให้ความร้อนแก่ชิ้นงานภายในขดลวดเหนี่ยวนำ

A pancake coil จะให้ความร้อนเฉพาะบริเวณผิวหน้าด้านหนึ่งของชิ้นงาน

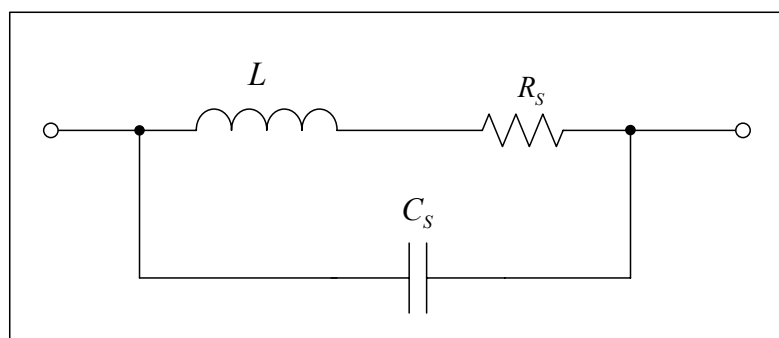
An internal coil จะให้ความร้อนบริเวณรอบนอกของขดลวดเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างของขดลวดเหนี่ยวนำชนิดต่าง ๆ

โดยทั่วไปแล้วขดลวดเหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้นจากท่อทองแดงกลวง ทั้งนี้เพราะทองแดงเป็น ตัวนำไฟฟ้าที่ดี ทำให้มีกำลังสูญเสียในขดลวดเหนี่ยวนำต่ำ ซึ่งจะมีผลให้ระบบมีประสิทธิภาพสูง อย่างไรก็ตามเนื่องจากความหนาแน่นของกระแสในขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าสูง ความร้อนที่เกิดจาก กระแสที่ไหลในขดลวดเหนี่ยวนำจะมีค่ามาก ดังนั้นจึงต้องใช้ท่อทองแดงกลวง เพื่อให้สามารถ ระบายความร้อนที่เกิดขึ้นภายในขดลวดเหนี่ยวนำได้ด้วยของเหลว เช่น น้ำน้ำผ่านเข้าไปในท่อ

รูปแบบโดยทั่วไปของขดลวดเหนี่ยวนำจะได้มาจากการนำเอาเส้นลวดเส้นตรง ทรงกระบอกมาทำลักษณะที่เป็นขด ซึ่งการนำเอาเส้นลวดมาทำเป็นขดจะเกิดค่าความต้านทานขึ้น นอกเหนือจากการเกิดค่าความเหนี่ยวนำและยังขึ้นอยู่กับความถี่ด้วย นอกจากนั้นขดลวดที่อยู่เคียงข้างกันยังสามารถเกิดค่าความจุแฝงและจะเพิ่มขึ้นถ้าจำนวนรอบเพิ่มขึ้นสามารถแสดงผลที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การกระจายตัวของค่าความจุและความต้านทานอนุกรมขดลวดเหนี่ยวนำ

สำหรับวงจรสมมูลของขดลวดแสดงได้ดังรูปที่ 2.17 ซึ่งจะมีค่าความจุแฝงขนานอยู่คือ C_s และค่าความต้านทานอนุกรม คือ R_s ตามลำดับ ซึ่งการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำแกนอากาศแบบ แฉวลำดับที่มีจำนวนแฉวลำดับ 3 แฉว เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังรูปที่ 2.18 ดังนั้นสามารถ คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ได้จากสมการที่ 2.30

$$L = n \frac{a^2 N^2}{9a + 10b} + (n-1)M_1 \quad (2.30)$$

โดยที่ L คือ ค่าความเหนี่ยวนำ
 n คือ จำนวนแฉวลำดับ

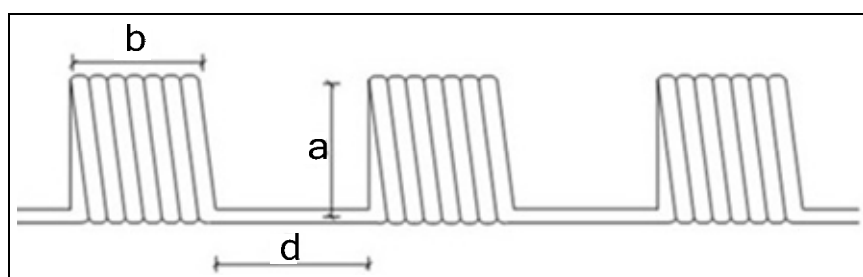
a คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดเหนี่ยวนำ

b คือ ความยาวของขดลวดเหนี่ยวนำ

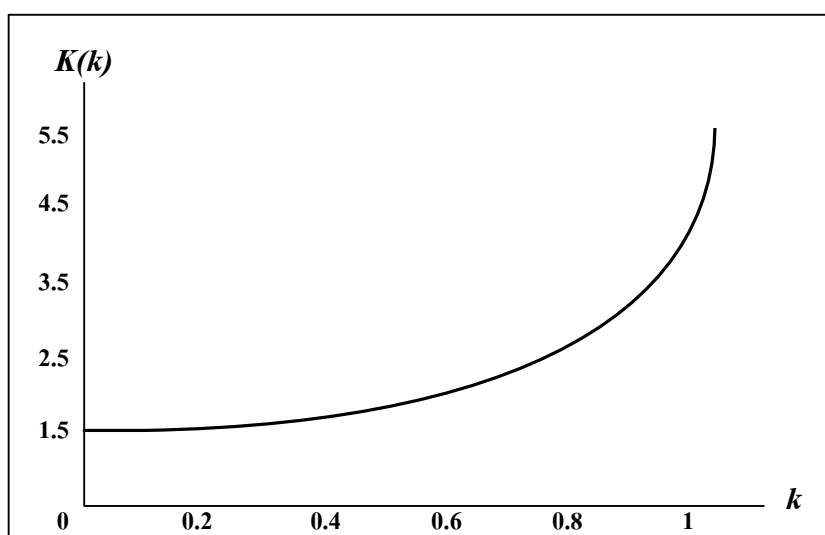
N คือ จำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ

M_1 คือ ค่าความเหนี่ยวนำระหว่างขดลวด

M_1 คือ ค่าความเหนี่ยวนำระหว่างขดลวด ค่าความเหนี่ยวนำ (mutual, M_1) นี้ เกิดจากการวางขดลวดเหนี่ยวนำสองขดที่อยู่ติดกัน ดังรูปที่ 2.18 เราสามารถคำนวณค่าความเหนี่ยวนำ (mutual) ระหว่างขดลวดแฉวลำดับที่ 1 และ แฉวลำดับที่ 2 ได้จากสมการ 2.31 และสมการ 2.32 ตามลำดับ



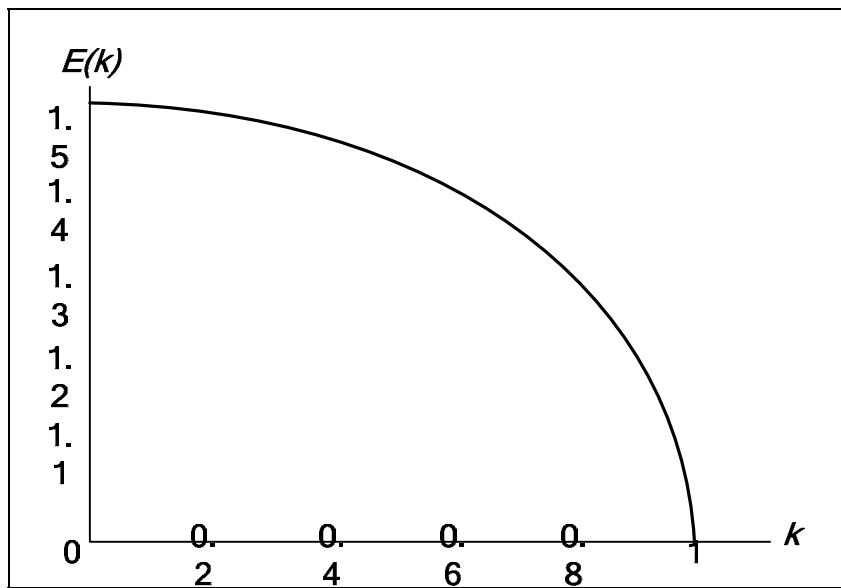
รูปที่ 2.18 ขดลวดเหนี่ยวนำแกนอากาศแบบแฉวลำดับ



รูปที่ 2.19 อินทิกรัลเชิงวงรีแบบชนิดที่หนึ่ง

$$M_1 = \mu_0 a \left[\left(\frac{2}{k_M} - k_M \right) K(k_M) - \frac{2}{k_M} E(k_M) \right] \quad (2.31)$$

$$k_M^2 = \frac{4a^2}{(2a)^2 + d^2} \quad (2.32)$$



รูปที่ 2.20 อินทิกรัลเชิงวงรีแบบชนิดที่สอง

M_1 สามารถคำนวณจากค่าของ $K(k_m)$ และ $E(k_m)$ โดยที่ $K(k_m)$ และ $E(k_m)$ คืออินทิกรัลเชิงวงรีแบบชนิดที่หนึ่งและชนิดที่สอง elliptic integrals of the first and second kinds (Landau, and Lifshits, 1960) ความสัมพันธ์นี้สามารถเขียนกราฟดังรูปที่ 2.19 และ 2.20 ตามลำดับ โดยที่เราสามารถคำนวณ k_m จากสมการที่ 2.22 พารามิเตอร์ต่างๆ แสดงดังรูป 2.18 โดยที่ a คือขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของขดลวดเหนี่ยวนำ และ d คือ ระยะห่างของแกนลำดับ และ $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$

2.6 การประมาณกำลังงานของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน

การประมาณกำลังงานที่ได้ของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนความถี่สูงนั้นเราพิจารณาจากพลังงานความร้อนที่ชิ้นงานดูดกลืนได้ตลอดช่วงของการทดลอง โดยพิจารณาจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงาน จากสมการที่ 2.33 แสดงถึงพลังงานที่ชิ้นงาน (P_w) ต้องการได้รับในการเพิ่มอุณหภูมิ

$$P_w = mc \frac{T_f - T_{in}}{t} \quad (2.33)$$

โดยที่	P_w	คือ พลังงานที่ต้องการ (Watts)
	m	คือ มวลของชิ้นงาน (กิโลกรัม, kg)
	c	คือ ค่าความร้อนจำเพาะของชิ้นงาน ($J/kg \text{ } ^\circ C$)
	T_{in}	คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของชิ้นงาน ($^\circ C$)
	T_f	คือ อุณหภูมิสุดท้ายของชิ้นงาน ($^\circ C$)
	t	คือ เวลาที่ใช้ (วินาที, s)

2.7 สรุป

จากหลักการพื้นฐานการให้ความร้อนโดยวิธีเหนี่ยวนำด้วยความถี่สูงเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ดังที่กล่าวมาแล้วนั้นสามารถทำการสรุปเป็นข้อ ๆ ได้ดังนี้

- คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ ที่นำมาใช้เป็นภาชนะหุงต้ม หรือชิ้นงานในการให้ความร้อนจะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวัสดุนั้น ไม่ว่าจะเป็นสภาพความต้านทานทางไฟฟ้า ρ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กไฟฟ้า μ , ความลึกผิว δ สภาพความต้านทานของภาชนะหุงต้มหรือชิ้นงานในการให้ความร้อน R_p จำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ N และความถี่กระแสสลับที่ขดลวดเหนี่ยวนำ f ซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ทำให้ค่าความต้านทานเทียบเท่าและอินดักแตนซ์เทียบเท่าของวงจรเรโซแนนซ์เปลี่ยนไป โดยที่ภาชนะหุงต้มหรือชิ้นงานในการให้ความร้อนที่ทำด้วยสารนอนเฟอร์โรแมกเนติก เช่น อลูมิเนียมและทองแดงจะมีค่าสภาพความต้านทานของภาชนะหุงต้ม R_p ต่ำมากเมื่อเทียบกับภาชนะที่ทำด้วยสารเฟอร์โรแมกเนติ เช่น สเตนเลส และเหล็ก เป็นต้น โดยจะมีความแตกต่างกันถึงประมาณ 50 เท่า ดังนั้นเมื่อนำวัสดุที่ทำด้วย สารนอนเฟอร์โรแมกเนติก มาใช้เป็นภาชนะหุงต้มหรือชิ้นงานในการให้ความร้อนจะทำให้มีกระแสมากเกินไป เป็นผลให้ชุดอินเวอร์เตอร์เสียหายได้

ขณะเดียวกันถ้าเลือกชิ้นงานในการให้ความร้อนที่ทำจากสาร เพอร์โรแมกเนติก ก็จะทำให้กระแสความถี่สูงจากวงจรอินเวอร์เตอร์ลดลงได้มาก

2. วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบขนานเหมาะที่จะนำมาใช้กับเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนความถี่สูง เนื่องจากต้องการกำลังงานมาก ดังนั้นวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานที่สามารถให้กระแสได้มากจึงถูกนำมาใช้กับเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนความถี่สูง

3. ชุดอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบขนานที่เหมาะสมกับเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนความถี่สูงจะเป็นอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ เนื่องจากสามารถให้กำลังงานได้สูง

4. สำหรับการควบคุมกำลังไฟฟ้า จะเลือกวิธีการปรับขนาดของสัญญาณพัลส์ ที่ใช้ขับเคลื่อนเกทของไอจีบีที คือถ้าขนาดของสัญญาณพัลส์กว้าง จะให้กำลังงานสูง

5. ความถี่เป็นตัวแปรสำคัญต่อประสิทธิภาพ ความลึกผิวในชิ้นงาน และกำลังเข้าของชิ้นงาน โดยที่เมื่อความถี่สูงขึ้น ความลึกผิวจะลดลงประสิทธิภาพและกำลังเข้าของชิ้นงานจะสูงขึ้น

6. เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูงจะมีประสิทธิภาพสูงสุด เมื่อทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์

บทที่ 3

การออกแบบและหลักการทำงานของวงจร

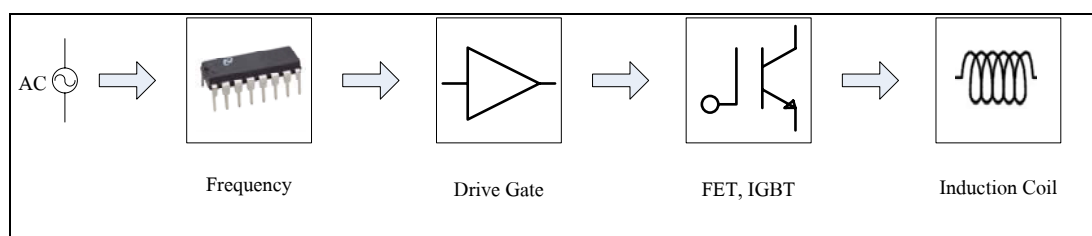
3.1 กล่าวนำ

บทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ และหลักการทำงานของวงจรที่ใช้ควบคุมเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ โดยสามารถแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ วงจรเรียงกระแสและกรองกระแสทางด้านอินพุต (rectifier & filter) วงจรอินเวอร์เตอร์ (inverter) วงจรควบคุมอินเวอร์เตอร์ และ โหลดรีโซแนนซ์ (load resonant) การออกแบบจะต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพที่จะได้ โดยทำการคัดสรรค่าไอซีและอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อให้วงจรมีคุณสมบัติตามที่ต้องการ

เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ได้รับการพัฒนาขึ้นนี้มีหลักการทำงานดังรูปที่ 3.1 เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนี้ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส 220 โวลต์ 50 เฮิรซ์ โดยมีวงจรเรียงกระแสและวงจรกรองแรงดันเพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงป้อนให้กับวงจรต่าง ๆ ทั้งส่วนของวงจรควบคุมจากแรงดันที่เป็นส่วนให้กำเนิดสัญญาณความถี่ ส่วนวงจรขยายสัญญาณ ส่วนของบัฟเฟอร์และส่วนของวงจรภาคกำลัง ซึ่งส่วนของวงจรภาคกำลังจะใช้วงจรการทำงาน อินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ที่ใช้ IGBT เป็นอุปกรณ์สวิตช์ โดยจะใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ UC3879N ในการควบคุมการทำงานอุปกรณ์สวิตช์ IGBT นี้ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง เพื่อจ่ายให้กับขดลวดเหนี่ยวนำที่พันรอบชิ้นงานทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำไหลในชิ้นงานและทำให้เกิดความร้อนขึ้น ชิ้นงานนั้นก็เปรียบเสมือนโหลดนั่นเอง

สำหรับระบบควบคุมที่ใช้ไอซีเบอร์ UC3879N ในการควบคุมความถี่ของสัญญาณจุดนำสวิตช์ผ่านวงจรขับนำเกต โดยทำงานจากโหมดควบคุมแรงดันและจะมีสัญญาณเอาต์พุต 4 ค่าคือ ที่ขา 8 9 13 และ 14 โดยสัญญาณที่ออกมาจะมีลักษณะเป็นสัญญาณพัลส์รูปสี่เหลี่ยมที่สลับการทำงานกัน เพื่อควบคุม IGBT ให้ทำงานสลับกัน แต่สัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมที่ได้มีแรงดันเอาต์พุตน้อยเกินกว่าที่จะทำให้ IGBT ทำงานได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวงจรขยายโดยใช้ทรานซิสเตอร์เป็นตัวขยายสัญญาณให้ได้แรงดันตามที่ต้องการ แต่ลักษณะของพัลส์ยังไม่ดีพอจึงใช้วงจรบัฟเฟอร์ เข้ามาช่วยเพื่อให้ได้ลักษณะของสัญญาณและแรงดันตามที่ต้องการ

สัญญาณที่ได้จะป้อนเข้าสู่ส่วนของวงจรภาคกำลัง ซึ่งต่อวงจรแบบฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ เพื่อควบคุมลำดับการทำงานของ IGBT แต่ละตัว และกระแสที่ออกจากส่วนของวงจรภาคกำลัง จะป้อนเข้าที่วงจรเรโซแนนซ์ ตัวเก็บประจุและส่วนของขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อทำให้เกิดความร้อน



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

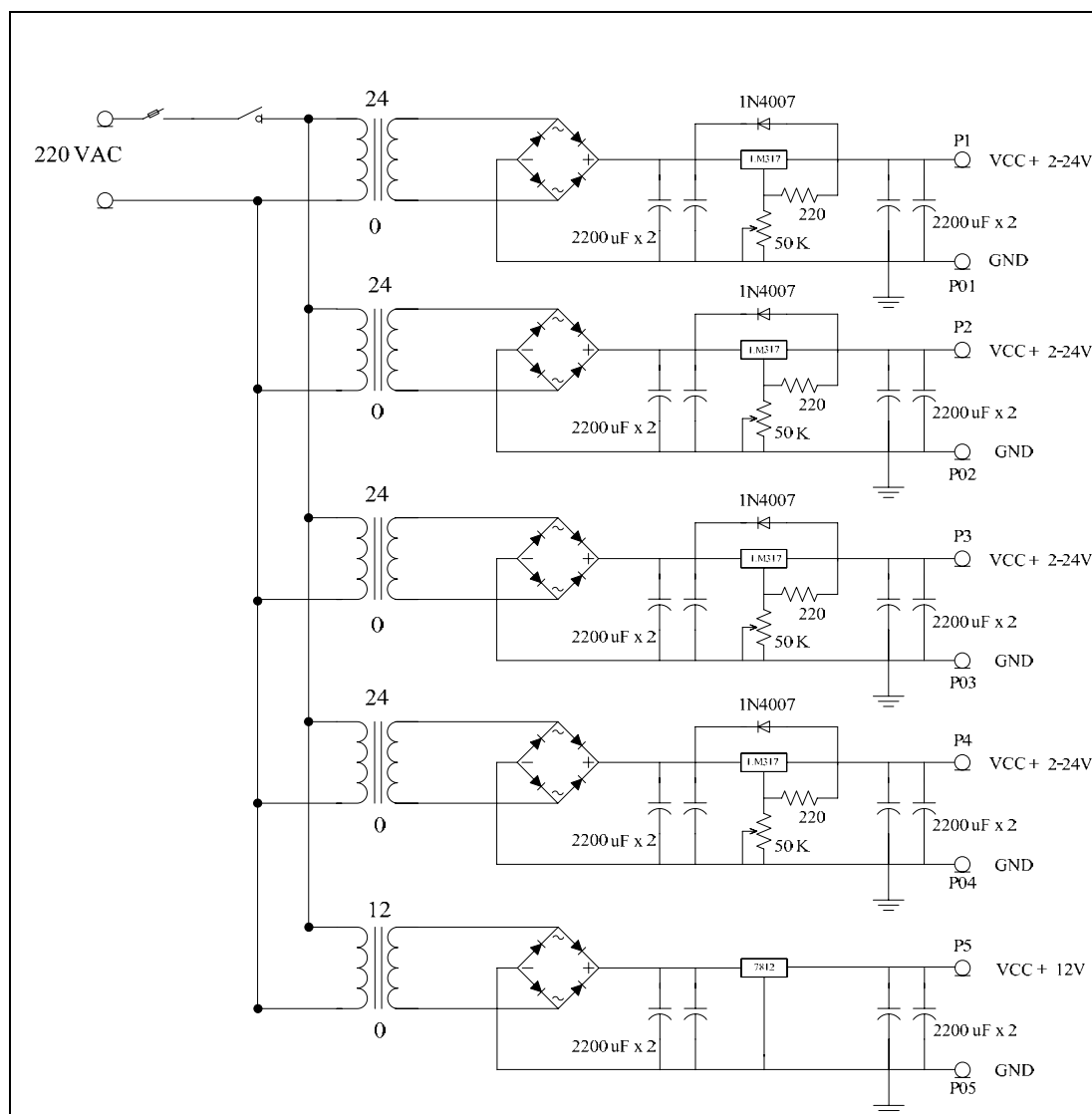
3.2 วงจรเพาเวอร์ซัพพลาย

วงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับ แรงดัน 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรซ์ เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ประกอบด้วย วงจรเรียงกระแส แบบบริดจ์ และตัวเก็บประจุซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรกรองแรงดัน จากรูป 3.2 เพาเวอร์ซัพพลายซึ่งเป็นส่วนที่จ่ายไฟให้กับวงจรต่าง ๆ ทั้งส่วนของวงจรควบคุมจากแรงดันที่เป็นส่วนกำเนิดสัญญาณ ความถี่ ส่วนของวงจรขับนำเกต และส่วนของวงจรภาคกำลัง ซึ่งแต่ละส่วนต้องการแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงต้องออกแบบเพื่อจ่ายไฟแต่ละส่วนให้พอดีกับอุปกรณ์ส่วนนั้น ๆ เพื่อประสิทธิภาพของแต่ละวงจร โดยที่เราสามารถแยกวงจรเพาเวอร์ซัพพลายได้ทั้งหมดเป็น 3 ส่วนด้วยกันคือ เพาเวอร์ซัพพลายที่ใช้ในส่วนของวงจรควบคุมจากแรงดัน, เพาเวอร์ซัพพลายที่ใช้ในส่วนของวงจรขับนำเกต และเพาเวอร์ซัพพลายที่ใช้ในส่วนของวงจรภาคกำลัง

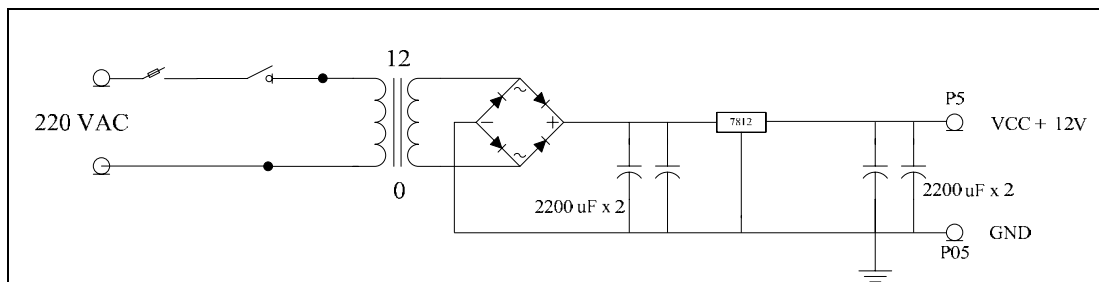
3.2.1 เพาเวอร์ซัพพลายที่ใช้ในส่วนของวงจรควบคุมจากแรงดัน

จากรูปที่ 3.3 วงจรชุดนี้เป็นวงจรที่ต้องการเอาต์พุต $12 V_{dc}$ เพื่อเป็นวงจรจ่ายไฟให้กับชุดวงจรควบคุมจากแรงดัน โดยวงจรชุดนี้จะรับไฟกระแสสลับแรงดัน 220 V ผ่านหม้อแปลง $12 V_{ac}$ เพื่อทำการแปลงแรงดันลง แล้วผ่านเข้าวงจรบริดจ์ไดโอดเพื่อทำการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟกระแสตรง ที่มีแรงดัน $17 V_{dc}$ แต่แรงดันที่ได้อาจยังมีค่าไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นถ้าต้องการให้วงจรแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่สม่ำเสมอขึ้นจึงต้องมีวงจรกรองกระแส โดยที่วงจรกรองกระแสประกอบด้วยตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกันอยู่นั่นเอง วงจรชุดนี้ต้องการแรงดันไฟที่จ่ายให้กับวงจรเพียงแค่ $12 V_{dc}$ เท่านั้น แต่แรงดันหลังจากผ่าน

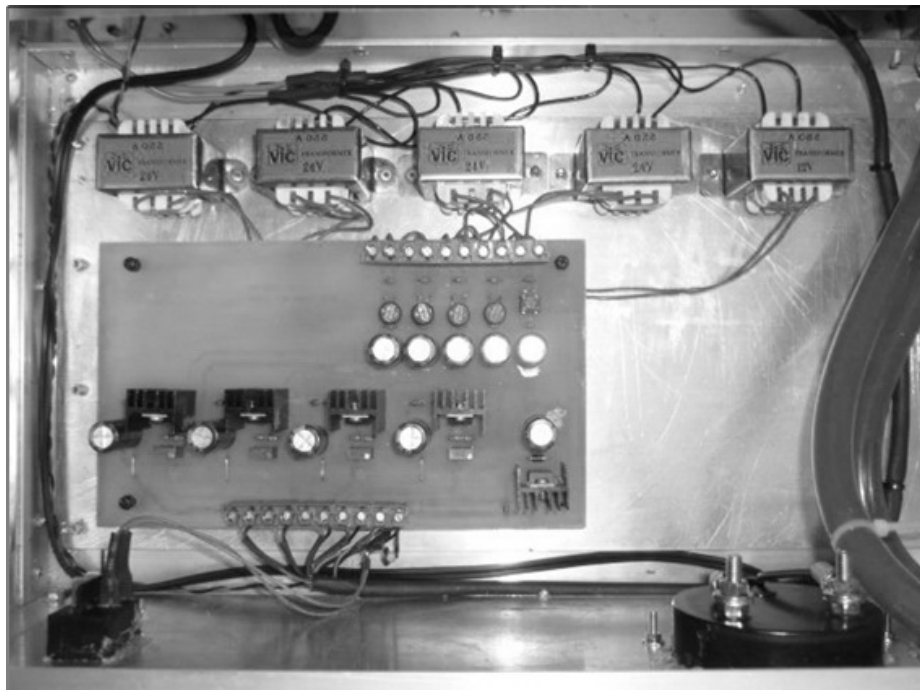
วงจรบริดจ์มีค่าถึง 17 V_{dc} ดังนั้นเราจึงใช้ไอซีเบอร์ 7812 เพื่อปรับแรงดันให้ได้ 12 V_{dc} ตามต้องการ โดยที่วงจรเพาเวอร์ซัพพลายรวมที่สร้างขึ้นจริงแสดงไว้ดังรูปที่ 3.4 และ รูปที่ 3.5 แสดงถึงวงจรจริงของเพาเวอร์ซัพพลายในส่วนของวงจรควบคุมจากแรงดัน



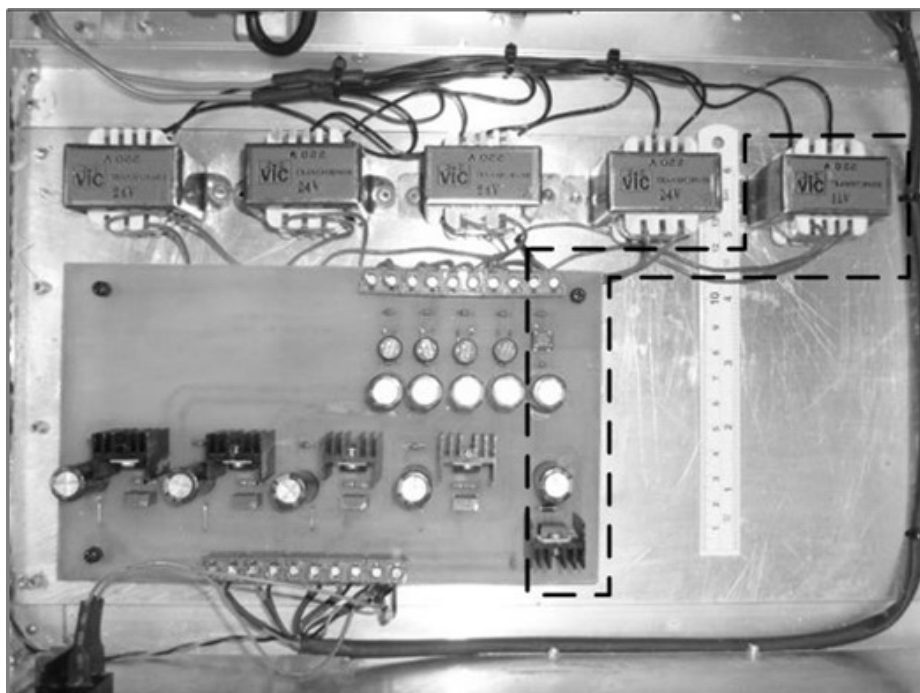
รูปที่ 3.2 วงจรเพาเวอร์ซัพพลาย



รูปที่ 3.3 เพาเวอร์ซัพพลายในส่วนของวงจรควบคุมจากแรงดัน



รูปที่ 3.4 วงจรจริงของเพาเวอร์ซัพพลาย



รูปที่ 3.5 วงจรจริงของเพาเวอร์ซัพพลายในส่วนของวงจรควบคุมจากแรงดัน

3.2.2 เพาเวอร์ซัพพลายที่ใช้ในส่วนของวงจรขับนำเกต

วงจรขับนำเกตเป็นวงจรที่ต้องการไฟฟ้ากระแสสลับแรงดัน 24 V_{dc} ทั้งหมด 4 ชุด ดังนั้นเราจึงต้องออกแบบวงจรเพาเวอร์ซัพพลายที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V ผ่านหม้อแปลง 24 V_{ac} เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้าลงให้เหลือ 24 V แล้วผ่านบริดจ์ไดโอดเพื่อทำการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง และผ่านวงจรกรองกระแสที่ใช้ตัวเก็บประจุเช่นกันดังรูป 3.6

วงจรในส่วนนี้จะต้องการแรงดันไฟเข้าวงจร 24 V_{dc} เท่านั้นแต่เมื่อแรงดันผ่านบริดจ์ไดโอดและวงจรเรียงกระแสแล้วจะมีค่าแรงดันเท่ากับ 24 คูณ $\sqrt{2}$ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 34 V_{dc} และใช้ไอซีเบอร์ LM317 เพื่อปรับแรงดันให้ได้ 24 V_{dc} ตามต้องการ โดยวงจรที่สร้างขึ้นจริงของเพาเวอร์ซัพพลายในส่วนของวงจรขับนำเกตแสดงไว้ตามรูป 3.7

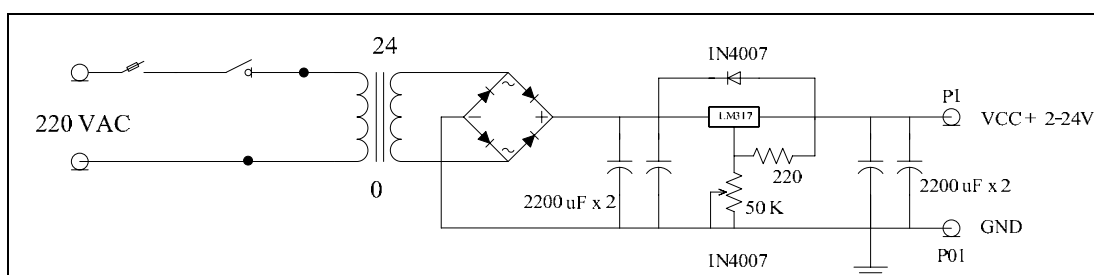
การออกแบบ LM317 ที่ต้องการเอาต์พุต 24 V_{dc} จากสูตร

$$V_{OUT} = 1.25V \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + I_{ADJ} R_2$$

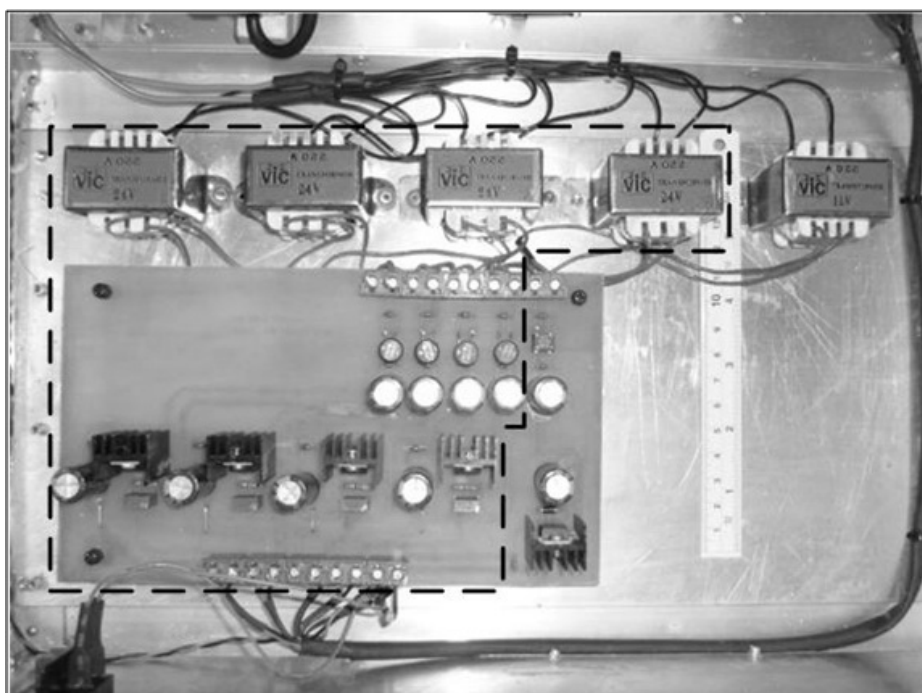
โดยที่ R_1 มีค่าเท่ากับ 220 โอห์ม จะได้

$$24V = 1.25V(1 + \frac{R_2}{220}) + I_{ADJ}R_2$$

$$R_2 = 5k\Omega$$



รูปที่ 3.6 เพาเวอร์ซัพพลายในส่วนของวงจรขับเกท (หนึ่งในสี่ชุด)



รูปที่ 3.7 วงจรจริงของเพาเวอร์ซัพพลายในส่วนของวงจรขับนำเกท

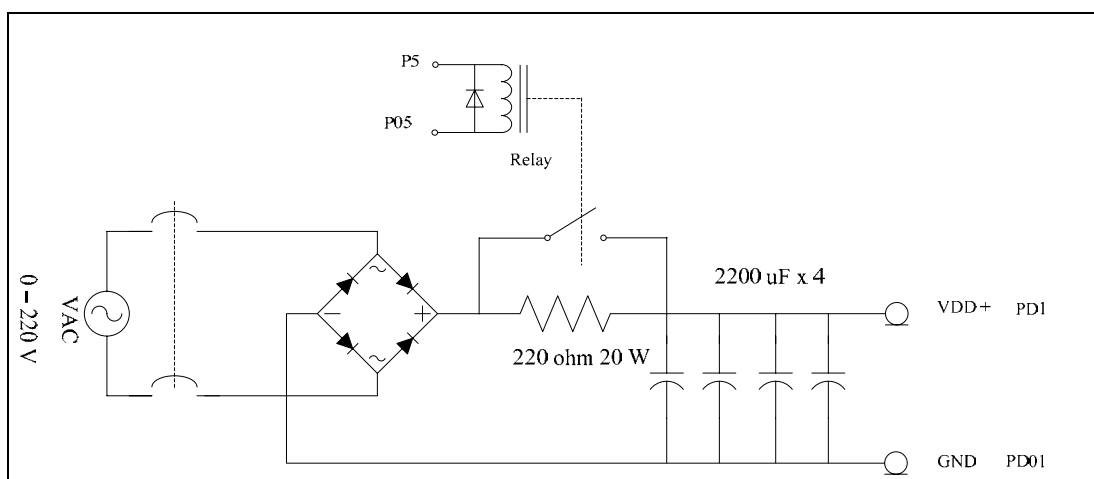
3.2.3 เพาเวอร์ซัพพลายที่ใช้ในส่วนของวงจรภาคกำลัง

เพาเวอร์ซัพพลายที่ใช้ในส่วนของวงจรภาคกำลังแสดงดังรูป 3.8 วงจรชุดนี้ต้องการแรงดันไฟฟ้า 320 V_{dc} มาเป็นไฟเลี้ยงให้กับระบบของวงจรภาคกำลัง โดยวงจรส่วนนี้จะรับไฟกระแสสลับ 220 V เข้ามาผ่านชุดวงจรบริดจ์ไดโอดเพื่อทำการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง เอาท์พุทที่ออกจากบริดจ์ไดโอดจะต่อเข้ากับตัวเก็บประจุขนาด $4700\text{ }\mu\text{F}$ ที่ต่อขนานกันอยู่ 2 ตัว จากวงจรส่วนนี้เราสามารถคำนวณค่าไฟฟ้ากระแสตรงจากสมการ 3.1 ได้ 320 V จากรูป 3.8 แสดงส่วนของวงจรเพาเวอร์ซัพพลายที่ใช้ในส่วนของวงจรภาคกำลัง ส่วนวงจรจริงของเพาเวอร์ซัพพลายในส่วนของวงจรภาคกำลัง แสดงดังรูป 3.9

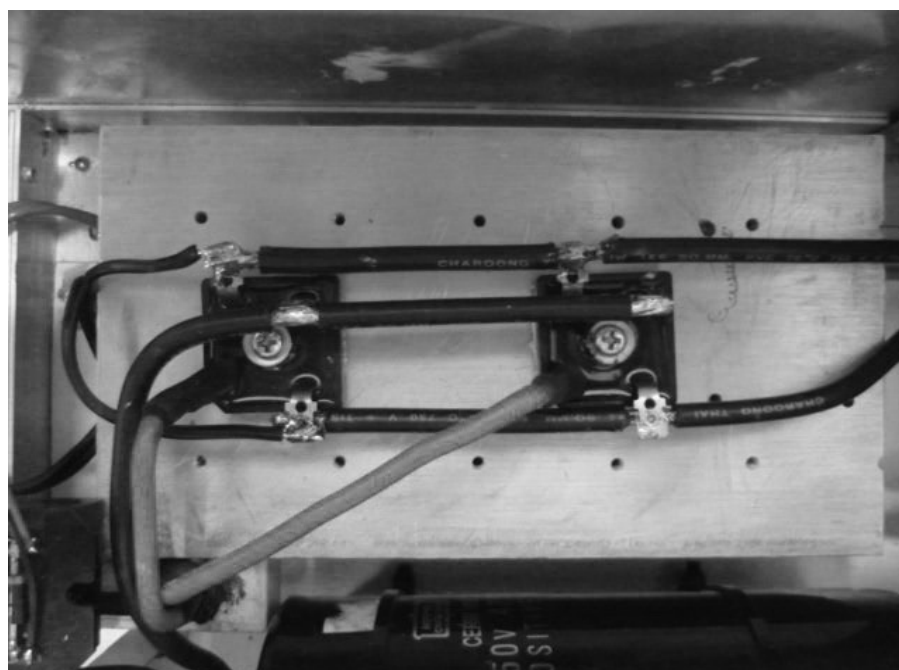
$$V_{DC} = \sqrt{2} \times V_S - V_D \quad (3.1)$$

เมื่อ V_S คือ แรงดันที่ใช้งาน
 V_D คือ แรงดันที่ตกคร่อมไดโอด

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } V_{DC} &= (\sqrt{2} \times 220) - (2 \times 0.7) \\ &= 310\text{ V} \end{aligned}$$



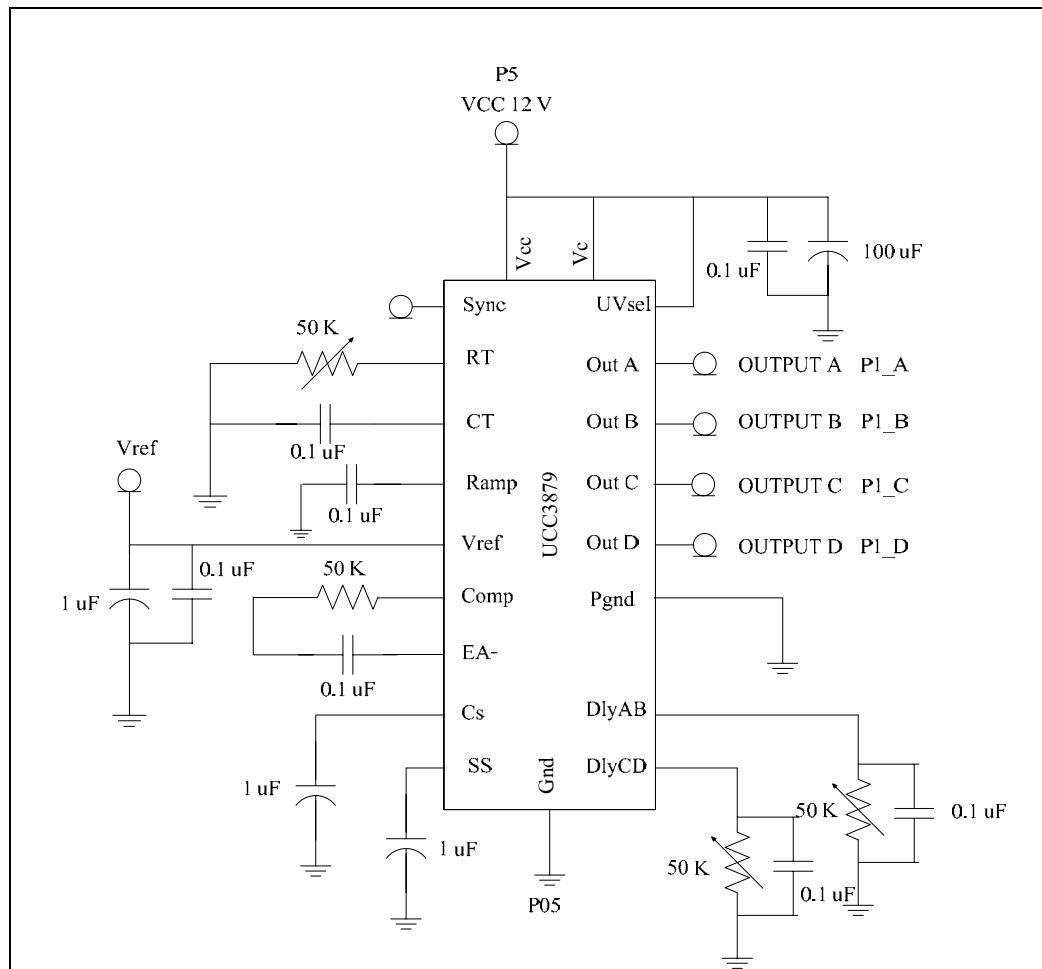
รูปที่ 3.8 เพาเวอร์ซัพพลายในส่วนของวงจรภาคกำลัง



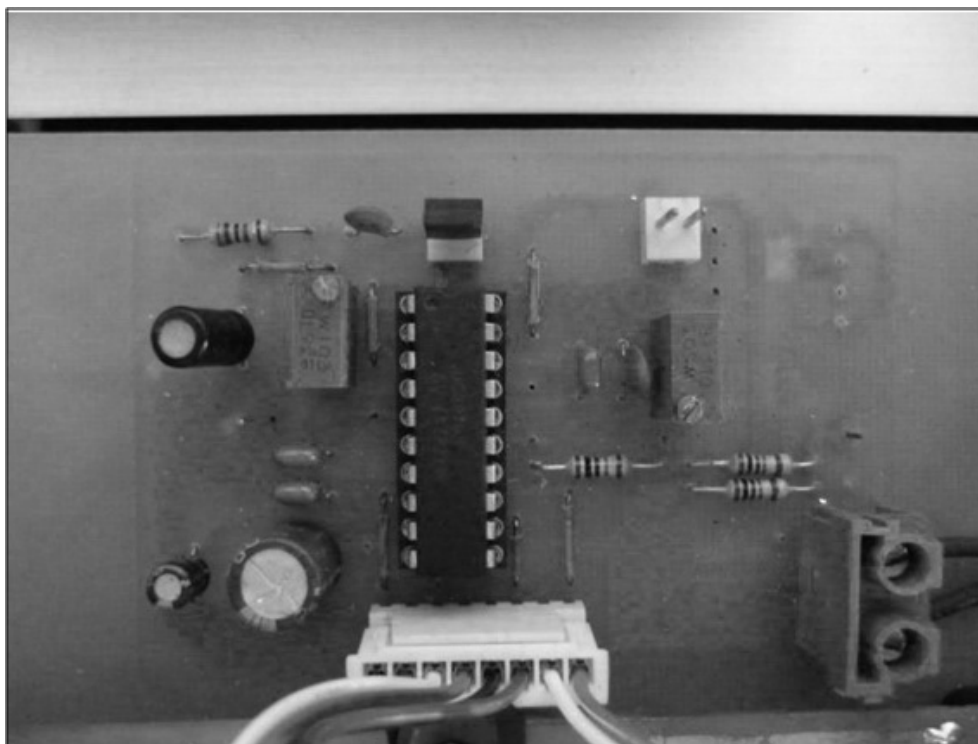
รูปที่ 3.9 วงจรจริงของเพาเวอร์ซัพพลายในส่วนของวงจรภาคกำลัง

3.3 การออกแบบวงจรควบคุมในโหมดของแรงดัน

สำหรับวงจรควบคุมในโหมดของแรงดันนี้จะเป็นส่วนที่ใช้ควบคุมการทำงานของวงจรภาคกำลังอีกที เพื่อเป็นการกำหนดการทำงานของ IGBT แต่ละตัว โดยที่ส่วนของวงจรภาคกำลังมีแบบวงจรเป็นแบบเต็มบริดจ์ ดังนั้นจึงต้องใช้ไอซีที่สามารถกำเนิดเอาต์พุตได้ 4 ค่ามาควบคุม จึงได้เลือกใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ UC3879N ซึ่งเป็นไอซีที่มี 4 เอาต์พุต และมีคุณสมบัติพร้อมที่จะนำมาใช้เป็นวงจรควบคุม จากรูป 3.10 แสดงการต่อวงจรของไอซีเบอร์ UC3879N โดยใช้แรงดันไฟกระแสตรง 12 V ในการทำให้ไอซีทำงาน เราจะได้สัญญาณที่ออกมาในรูปของแรงดัน 4 เอาต์พุต แรงดันที่ได้นี้จะเป็นตัวกำหนดการทำงานของวงจรขับเคลื่อนอีกทีหนึ่ง โดยที่เราสามารถปรับการประวิง (delay) สัญญาณพัลส์ OUT A และ OUT B ได้ที่ตัวต้านทานที่ต่อกับขา 5 ของไอซี และตัวต้านทานที่ต่อกับขา 15 ของไอซี สำหรับปรับการประวิงสัญญาณพัลส์ของ OUT C และ OUT D สำหรับการปรับเวลาไร้ผลสนอง (dead time) สามารถปรับได้โดยการปรับตัวต้านทานที่ขา 1-3 ของไอซี วงจรจริงของไอซีเบอร์ UC3879N แสดงไว้ดังรูปที่ 3.11

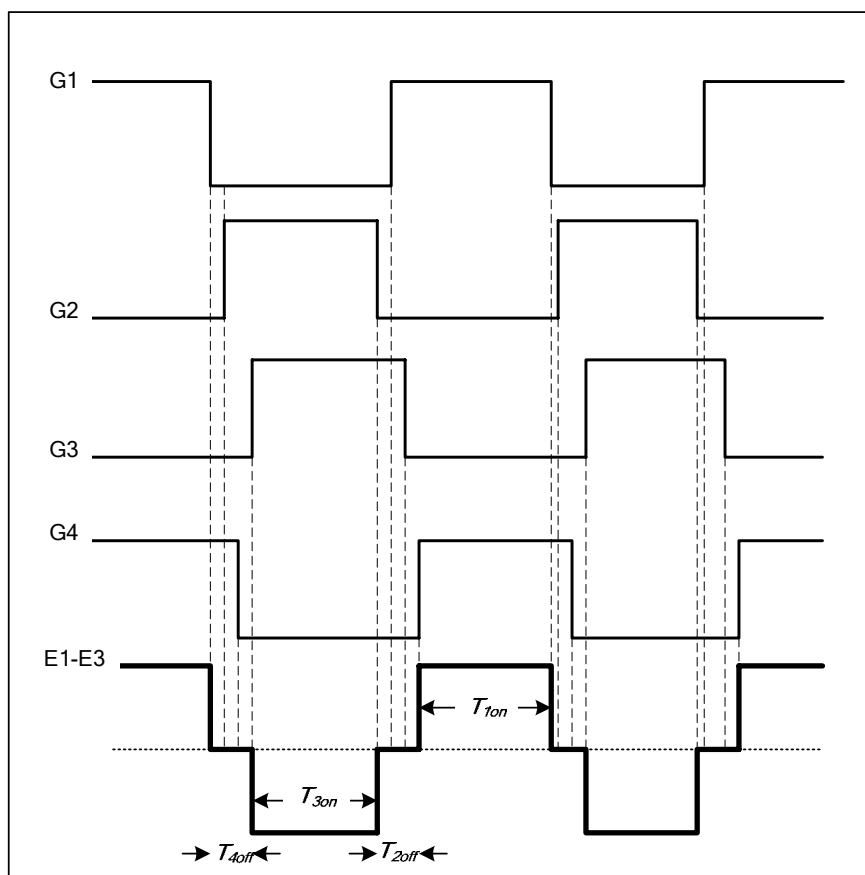


รูปที่ 3.10 ลักษณะวงจรของไอซีเบอร์ UC3879N



รูปที่ 3.11 วงจรจริงของไอซีเบอร์ UC3879N

แรงดันเอาต์พุตที่ได้จะนำไปจะนำไปเป็นสัญญาณอินพุตของวงจรจับนำเกิด โดยเรากำหนดให้สัญญาณอินพุตทำงานไม่พร้อมกัน เพื่อให้เกิดช่วงการนำกระแสเป็นศูนย์ (Zero Voltage Switching, ZVS) การทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ โดยช่วงนำกระแสเป็นศูนย์คือช่วง T_{2off} และ T_{4off} ของกราฟ V_{out} ในรูปที่ 3.12 และส่วนของกราฟด้านบวกช่วง T_{1on} คือช่วงที่ G1 และ G4 ทำงาน กราฟด้านลบช่วง T_{3on} คือช่วงที่ G2 และ G3 ทำงาน ทั้งนี้สวิตช์ทั้ง 4 ตัวยังทำงานไม่พร้อมกันอีกด้วย โดยที่กราฟ V_{out} คือลักษณะของสัญญาณที่ขดลวดเหนี่ยวนำ



รูปที่ 3.12 ลักษณะของสัญญาณที่ใช้ขับเคลื่อนของ IGBT และสัญญาณเอาต์พุต (V_{out}) ที่ตกคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำความถี่สูง

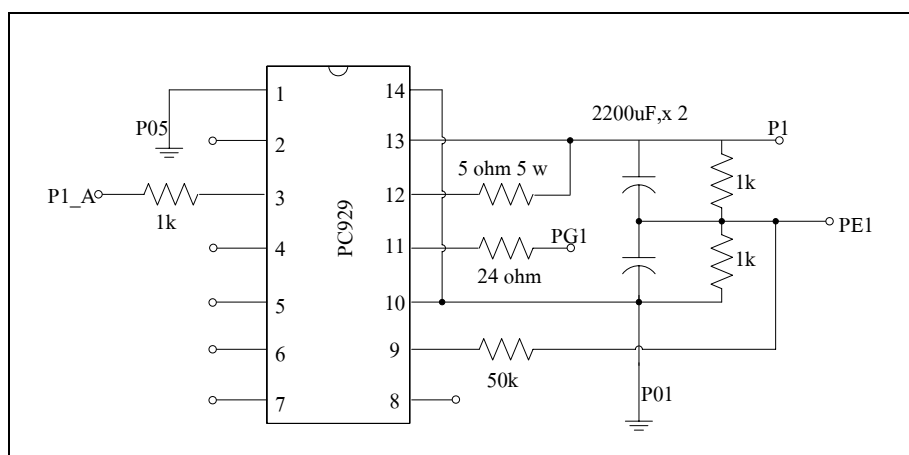
3.4 การออกแบบวงจรขับนำเกต

IGBT จะทำงานเมื่อมีแรงดันมาทำให้เกิดการนำกระแสผ่านคอลเลกเตอร์-ผู้มิเตอร์ แรงดันที่เกตสามารถที่จะจ่ายได้จากวงจรหลายแบบ วงจรขับนำเกตจึงควรมีทั้งไบอัสบวกเพื่อให้ นำกระแส และไบอัสลบเพื่อให้หยุดนำกระแส การที่ต้องมีไบอัสลบเพื่อป้องกันการเกิดการ นำกระแสเนื่องจากมีสัญญาณรบกวนเข้ามาทางเกต

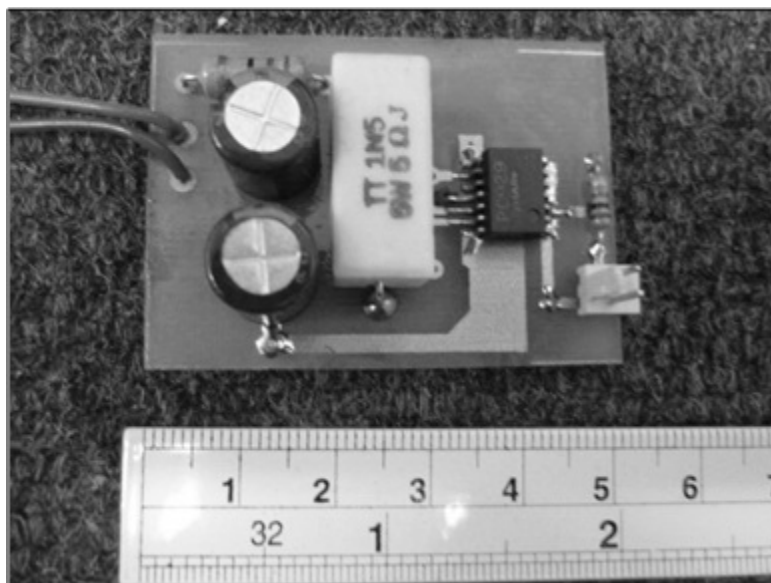
แรงดันขับเคลื่อนสำหรับช่วงนำกระแส แรงดันเกตควรอยู่ที่ระดับแรงดัน 12 V ค่านี้จะสูง เพียงพอที่จะทำให้ IGBT อิ่มตัวเต็มที่ และมีค่าสูญเสียในขณะนำกระแสน้อย และ IGBT จะหยุด นำกระแสเมื่อแรงดันเกตเป็นศูนย์ แต่อย่างไรก็ตาม เพื่อความมั่นใจควรมีไบอัสลบเพื่อป้องกันการรบกวนของสัญญาณเนื่องจาก dv/dt ของแรงดันคอลเลกเตอร์-มิเตอร์ นอกจากนี้การให้ ไบอัสลบยังช่วยลดกำลังสูญเสียในขณะหยุดการนำกระแสอีกด้วย

ตัวต้านทานอนุกรมที่เกต R_g มีความสำคัญอย่างมาก เพราะค่าของความต้านทานที่ขาเกตนี้ จะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของ IGBT เมื่อระบบเริ่มนำกระแสและเริ่มหยุดนำกระแส โดยการเก็บประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุเกต ค่าความต้านทานที่ต่ำจะทำให้การเก็บประจุและคายประจุที่รวดเร็ว ทำให้ลดเวลาในการทำงานของสวิตช์ และลดกำลังสูญเสียในการสวิตช์ ถ้าให้ตัวต้านทานเกตมีค่าน้อยเกินไปอาจจะทำให้เกิดการรบกวนของสัญญาณที่เกตได้ง่าย และอาจนำไปสู่ปัญหาการแกว่งระหว่างตัวเก็บประจุเกต-อิมิตเตอร์ กับค่าความเหนี่ยวนำอื่น ๆ ที่ปนเข้ามา (parasitic inductance) ในวงจรขับนำเกต จากการวิจัยทางผู้วิจัยเลือกใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ PC929 ดังที่แสดงในรูปที่ 3.13 และวงจรจริงของวงจรขับนำเกตผ่านไอซีเบอร์ PC929 แสดงดังรูปที่ 3.14 ข้อที่ต้องพิจารณาของชุดวงจรขับนำเกต

1. ภายในวงจรระหว่างเอาต์พุตของวงจรขับนำเกต และ IGBT จะต้องมีความเหนี่ยวนำแฝงน้อยที่สุด โดยค่าความเหนี่ยวนำแฝงที่เกิดขึ้นอยู่กับการทำให้ loop area ที่เกิดจากเอาต์พุตของวงจรขับนำเกตต่อเนื่องถึงขาเกต-อิมิตเตอร์ของ IGBT เล็กที่สุดเท่าที่จะทำได้
2. จะต้องหลีกเลี่ยงค่าความเหนี่ยวนำเชื่อมโยงระหว่างวงจรกำลังและวงจรควบคุม ซึ่งอาจทำได้โดยการแยกชุดขับนำเกตออก หรือ ปิดกั้นวงจรขับนำเกต
3. ควรจะมี auxiliary emitter terminal ต่อเข้ากับชุดขับนำเกต



รูปที่ 3.13 แสดงวงจรขับนำเกตผ่านไอซีเบอร์ PC929



รูปที่ 3.14 วงจรจริงของวงจรขับนำเกตผ่านไอซีเบอร์ PC929

4. ถ้าการเชื่อมต่อโดยตรงระหว่างแผ่น PCB (Printed Circuit Board) ของวงจรขับนำเกตกับขั้วของ IGBT ไม่สามารถทำได้ ให้ใช้สายพันตีเกลียวหรือ strip line แทน

5. วงจรป้องกันแรงดันเกินจะต้องอยู่ใกล้กับจุดต่อเกต-อิมิตเตอร์ ของ IGBT ให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้

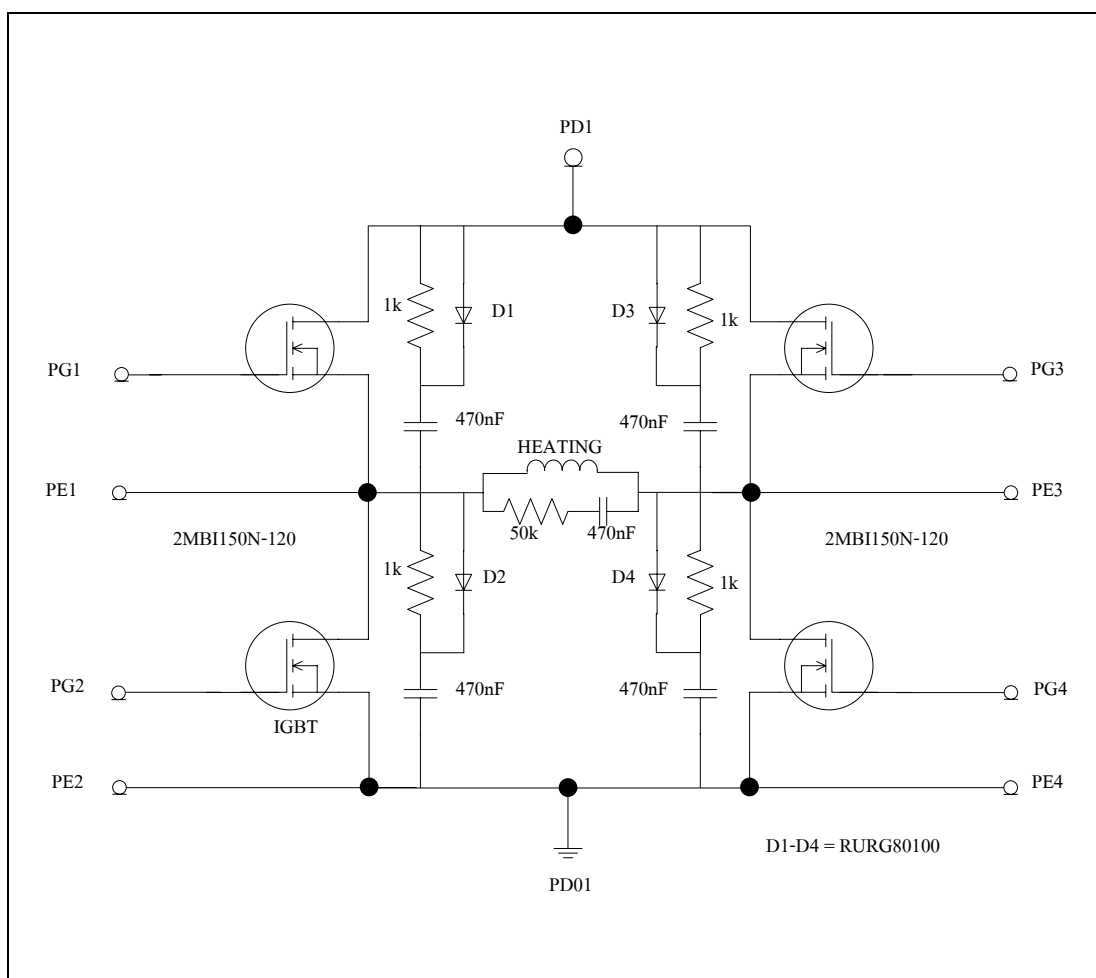
6. สำหรับลายวงจรบนแผ่นวงจรจะต้องไม่เดินใกล้กันเพื่อหลีกเลี่ยงการเหนี่ยวนำระหว่างอุปกรณ์ (mutual potential change) ระหว่างที่ IGBT กำลังทำการสวิตช์ ค่า dv/dt สูง ๆ อาจทำให้เกิดสัญญาณรบกวนผ่านค่าความจุแฝง ถ้าไม่สามารถเลี่ยงการตัดกันหรือขนานกันใกล้เกินไปของลายวงจรบนแผ่นวงจรพิมพ์ก็ควรจะต้องปิดกั้นลายวงจรระหว่างกัน

7. ค่าความจุแฝงระหว่างด้านแรงดันสูงและด้านแรงดันต่ำของวงจรขับเกต และวงจรควบคุมอาจทำให้เกิดปัญหาการเชื่อมโยงสัญญาณรบกวนได้ หม้อแปลงของแหล่งจ่ายที่มีขดลวดหลายชุด อาจทำให้เกิดตัวเก็บประจุระหว่างกัน จนทำให้เป็นแหล่งเชื่อมโยงการเกิดสัญญาณรบกวนได้เช่นกัน จะต้องทำการวัดเพื่อลดค่าความแฝง

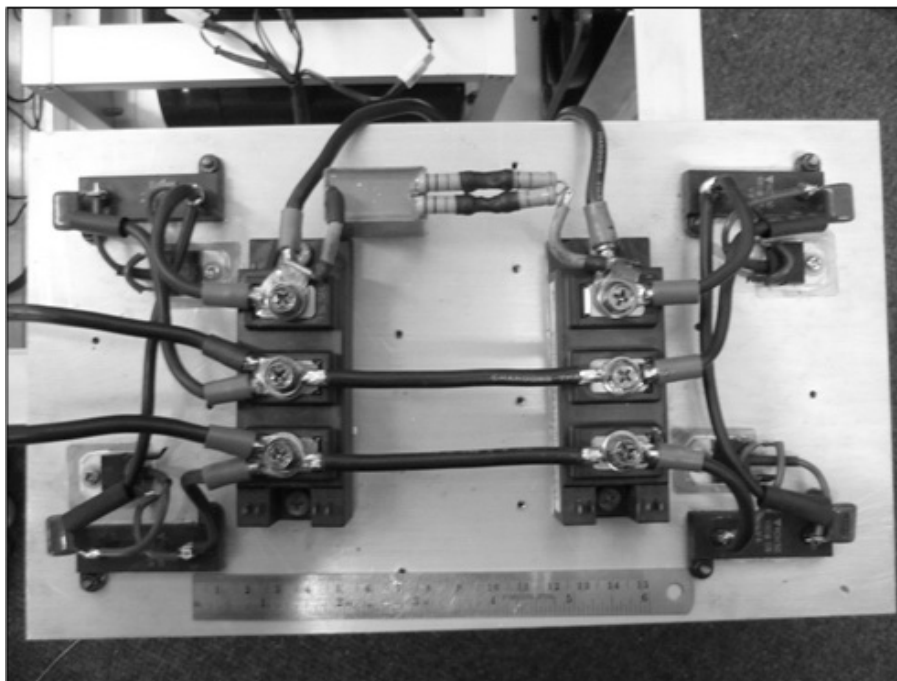
3.5 การออกแบบวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 3.15 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้ 320 V จะป้อนให้กับวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ IGBT เบอร์ 2MBI100-120 จำนวน 2 ตัว เป็นอุปกรณ์สวิตช์ โดยที่ IGBT ทั้ง 4 ตัวจะทำงานเป็นคู่สลับกันคือ คู่ SW1 และ SW4 จะนำกระแสพร้อมกันในช่วงครึ่งคาบ

สัญญาณแรก ในส่วนครึ่งคาบสัญญาณหลัง SW2 และ SW3 นำกระแสแทน ส่วนสวิตช์คู่ SW1 และ SW4 หยุดนำกระแสทำให้แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ขดลวดเหนี่ยวนำมีค่ายอดถึงยอดเท่ากับสองเท่าของแรงดันไฟตรง (V_s) ที่ป้อนให้กับวงจรภาคกำลังและมีความถี่เท่ากับการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation, PWM) ที่ขับให้กับ IGBT ทำงาน และวงจรจริงของฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ แสดงดังรูป 3.16



รูปที่ 3.15 วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์



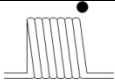
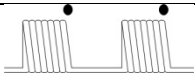
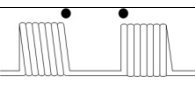
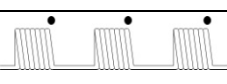
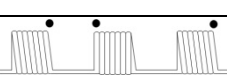
รูปที่ 3.16 วงจรจริงของฟลูบรีดจิ้นเวอร์เตอร์

3.6 การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ

3.6.1 ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด

ส่วนที่สำคัญของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูงนั้นคือส่วนที่ให้ความร้อนกับชิ้นงานนั่นเอง และเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดขดลวดเหนี่ยวนำนั้นจะต้องมีค่าความเหนี่ยวนำสัมพันธ์กับความถี่ของเครื่อง แต่ปัจจุบันเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนที่ใช้อยู่ทั่วไปนั้นจะมีขดลวดความร้อนเพียงหนึ่งชุด ต่อเครื่องเท่านั้น ทางผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่ทำให้เครื่องเหนี่ยวนำความร้อนสามารถให้พลังงานความร้อนได้มากกว่าหนึ่งชุดต่อเครื่องและศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้น โดยการจำลองผลและการทดลองจริง และเพื่อนำมาเปรียบเทียบกันจึงกำหนดให้ขดลวดทุกขดมีค่าความเหนี่ยวนำและความต้านทานภายในขดเท่ากัน โครงสร้างของขดลวดเหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 3.17 ผู้วิจัยจำแนกการจำลองผลของขดลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เท่ากัน 3 แบบ คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (a) 2 3 และ 4 cm โดยแต่ละแบบมีระยะห่างระหว่างแถวลำดับ (d) 5 cm ขดลวดแบบ 2 แถวและ 3 แถว มีการพันขดลวด 2 ลักษณะคือ พันในทิศทางเดียวกันทั้งหมด (inverse) และในแถวลำดับที่ 2 พันในทิศตรงข้ามกับแถวลำดับที่ 1 (reverse) ขดลวดเหนี่ยวนำทุกขด ในการจำลองผลมีค่าความเหนี่ยวนำต่อแถวลำดับประมาณ 13-14 μH คุณลักษณะของขดลวดที่ใช้ในการจำลองผลและการทดลองจริงแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของขดลวดเหนี่ยวนำ

โครงสร้างของขดลวด	ชนิดของขดลวด	a (cm)	b (cm)
	A1	2	6
	A2	3	4
	A3	4	3
 Inverse	B1	2	6
	B2	3	4
	B3	4	3
 Reverse	B4	2	6
	B5	3	4
	B6	4	3
 Inverse	C1	2	6
	C2	3	4
	C3	4	3
 Reverse	C4	2	6
	C5	3	4
	C6	4	3

ขดลวดเหนี่ยวนำชนิด A1 ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ความยาวต่อแถวลำดับ 6 เซนติเมตร จำนวนรอบแต่ละแถวลำดับ 27 รอบ จะมีค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดดังนี้

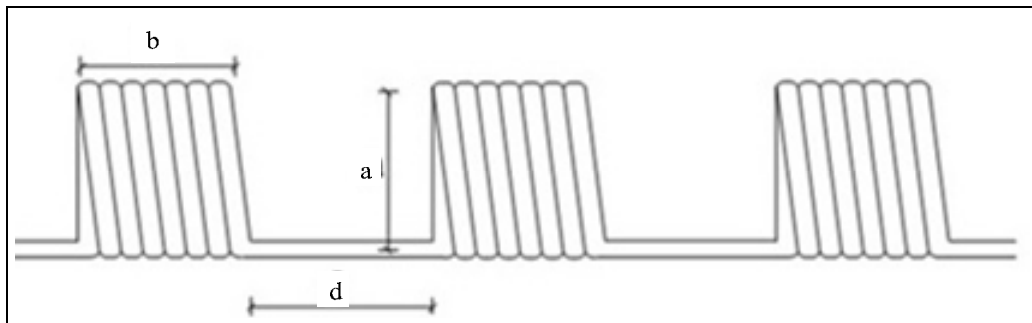
$$L = \frac{a^2 N^2}{9a + 10b} = \frac{(0.78)^2 (27)^2}{9(0.78) + (26.57)} = 13.6 \mu H$$

ขดลวดเหนี่ยวนำชนิด A2 ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร ความยาวต่อแถวลำดับ 4 เซนติเมตร จำนวนรอบแต่ละแถวลำดับ 16 รอบ จะมีค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดดังนี้

$$L = \frac{a^2 N^2}{9a + 10b} = \frac{(1.2)^2 (16)^2}{9(1.2) + (15.6)} = 13.6 \mu H$$

ขดลวดเหนี่ยวนำชนิด A3 ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร ความยาวต่อแถวลำดับ 3 เซนติเมตร จำนวนรอบแต่ละแถวลำดับ 12 รอบ จะมีค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดดังนี้

$$L = \frac{a^2 N^2}{9a + 10b} = \frac{(1.57)^2 (12)^2}{9(1.57) + (11.7)} = 13.8 \mu H$$

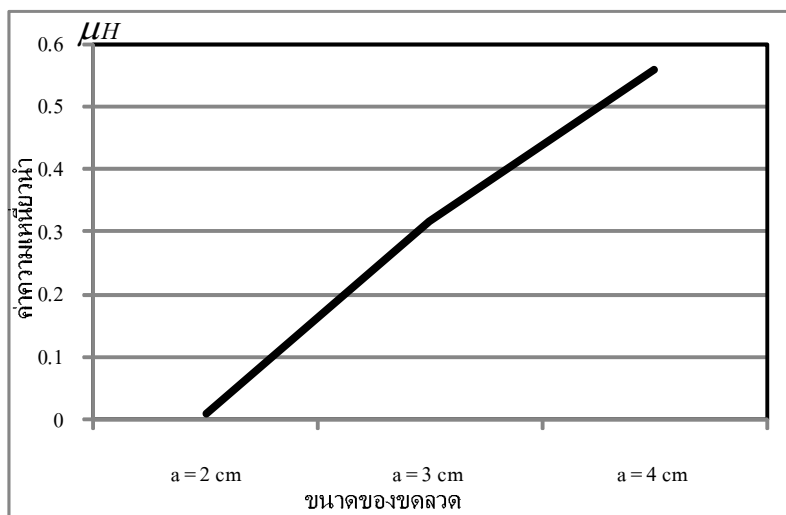


รูปที่ 3.17 โครงสร้างของขดลวดเหนี่ยวนำ

ค่าความเหนี่ยวนำที่ได้นี้เป็นค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเพียงแถวลำดับเดียวเท่านั้น ทั้งนี้ระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำแต่ละแถวลำดับยังมีค่าความเหนี่ยวนำแฝง (M_1) อีกด้วย

3.6.2 ค่าความเหนี่ยวนำแฝงของขดลวด

ค่าความเหนี่ยวนำแฝงเกิดจากขดลวดเหนี่ยวนำที่วางติดกัน โดยค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณจากสมการ 2.20 ค่าของความเหนี่ยวนำแฝงที่คำนวณได้นี้แสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ค่าความเหนี่ยวนำแฝงของขดลวดขนาดต่าง ๆ

จากค่าตัวเหนี่ยวนำที่คำนวณได้เราจะเลือกค่าความเหนี่ยวนำที่มีค่าน้อยที่สุดเพื่อให้ได้ความถี่มากที่สุดเพราะที่ความถี่ต่ำกว่าหรือเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์อุปกรณ์สวิตช์ความถี่สูงยังคงทำงานได้ แต่ถ้าความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์สวิตช์ความถี่สูงอาจเกิดการเสียหายได้ โดยสามารถนำไปคำนวณหาความถี่เรโซแนนซ์ได้จากสมการ 2.18 เมื่อค่าตัวเก็บประจุที่ความถี่เรโซแนนซ์มีค่า $830nF$ ดังนี้

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{830nF \times 40.8\mu H}} = 27.35kHz$$

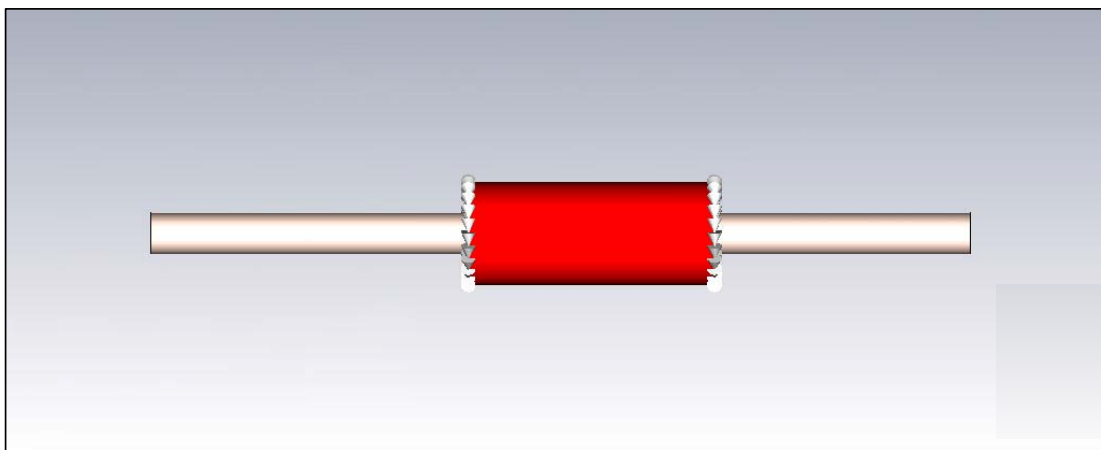
จากผลการคำนวณที่ได้ความถี่เรโซแนนซ์ คือ 27.35 kHz อย่างไรก็ตามจากการทดลองใน ของการพันขดลวดเหนี่ยวนำทั้งแบบตามกัน และแบบทิสทางตรงกันข้าม ได้ตั้ง

ค่าความถี่เรโซแนนซ์ของระบบไว้ที่ 28 kHz ซึ่งสูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ที่คำนวณไว้เล็กน้อย เพราะว่า ความถี่เรโซแนนซ์อาจจะเปลี่ยนแปลงได้เล็กน้อยจากค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของวงจร เมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น

3.7 การจำลองผลจากโปรแกรม

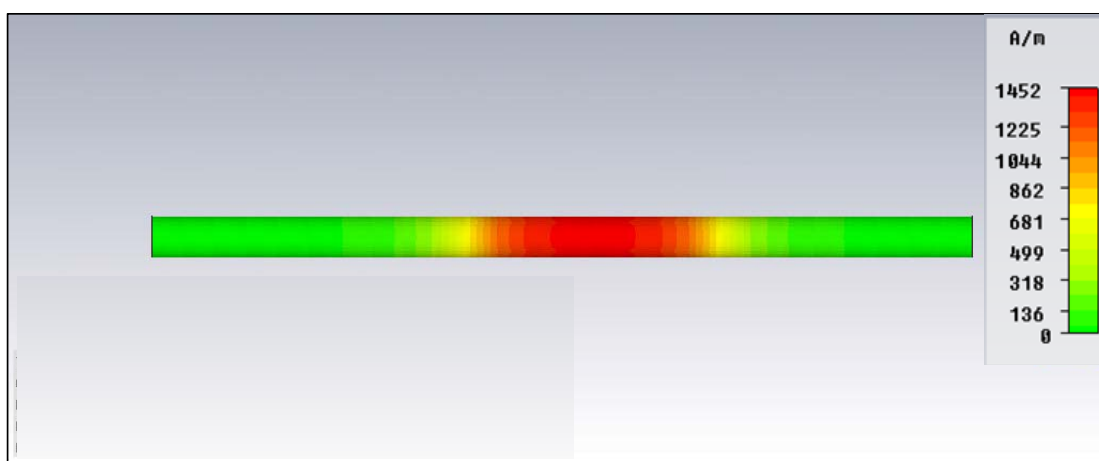
การจำลองผลในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้โปรแกรม CST EM STUDIO 2009 ในการจำลองผล และเนื่องจากโปรแกรมไม่สามารถแสดงผลเป็นค่าของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของชิ้นงานได้ ทางผู้วิจัยจึงแสดงให้เห็นถึงปริมาณกระแสที่ไหลบนผิวของชิ้นงานแทน เพราะกระแสที่ไหลบนผิวของชิ้นงานนี้จะเปลี่ยนเป็นความร้อนที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานโดยตรงดังที่กล่าวมาข้างต้น โดยในการจำลองผลการทดลอง การกำหนดขอบเขตของการเกิดสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก ค่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ และความถี่เรโซแนนซ์ถูกตั้งให้มีค่าเท่ากันทั้งหมด โดยที่กระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ (I_L) คือ 2 A และความถี่เรโซแนนซ์ในการจำลองผล 28 kHz โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำแบบ 2 แกวลำดับ และแบบ 3 แกวลำดับ ของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกวลำดับคือ 5 เซนติเมตร ขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกวลำดับทั้ง 2 ขนาดยังมีการพันขดลวดเหนี่ยวนำต่างกัน 2 ลักษณะอีกด้วย คือ ขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกวลำดับที่พันในทิศทางเดียวกันทั้งหมด และขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกวลำดับที่พันในทิศตรงข้ามกันในแกวลำดับที่ 2 ชิ้นงานในการจำลองผลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ยาว 35 เซนติเมตร ชนิดของชิ้นงานในการจำลองผลเป็น Steel-1008

3.7.1 ขดลวดเหนี่ยวนำ A1



รูปที่ 3.19 ขดลวดเหนี่ยวนำ A1

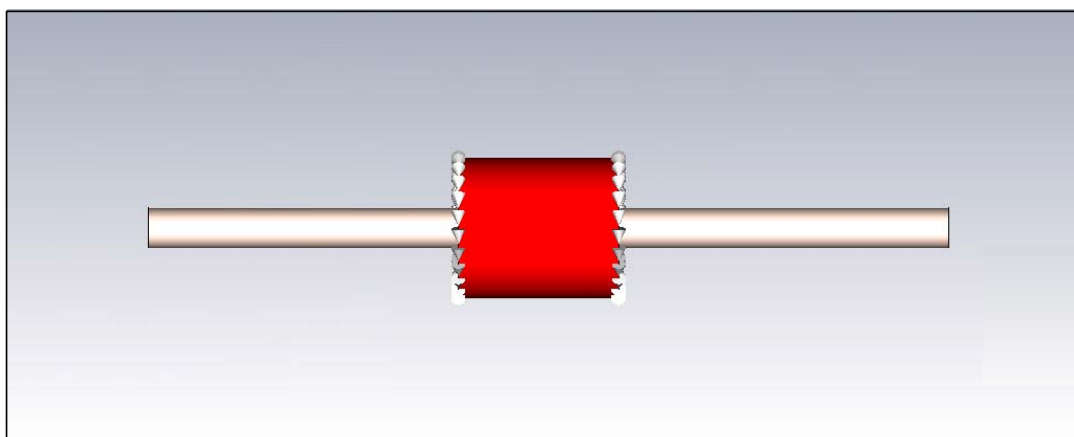
ขดลวดเหนี่ยวนำชนิด A1 เป็นขดลวดเหนี่ยวนำแบบเดี่ยว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร มีพื้นที่การให้ความร้อนรวมทั้งหมด 6 เซนติเมตร ลักษณะของขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้ในการจำลองผลแสดงดังรูป 3.19 จากการจำลองผลกระแสสูงสุดที่ไหลบนผิวของชิ้นงานมีค่า 1452 A/m ดังรูป 3.20



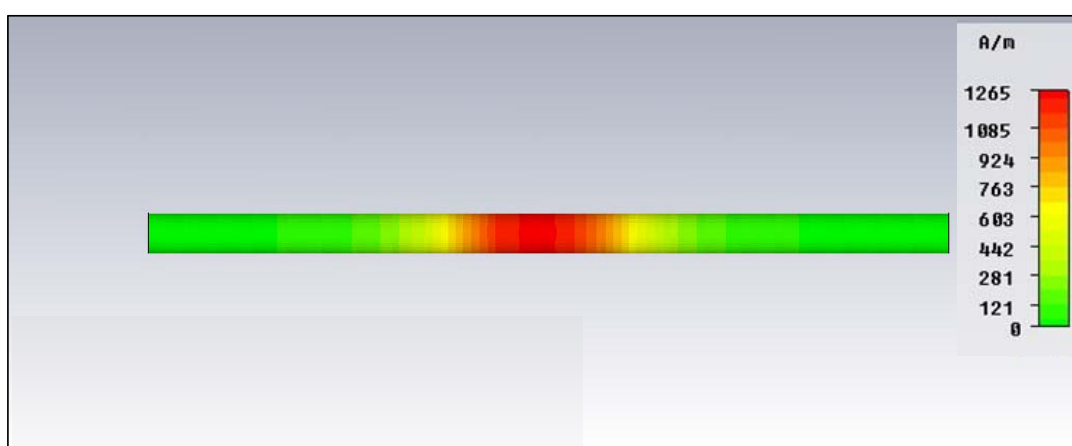
รูปที่ 3.20 กระแสบนผิวชิ้นงานของขดลวดเหนี่ยวนำ A1

3.7.2 ขดลวดเหนี่ยวนำ A2

ขดลวดเหนี่ยวนำชนิด A2 เป็นขดลวดเหนี่ยวนำแบบเดี่ยว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร มีพื้นที่การให้ความร้อนรวมทั้งหมด 4 เซนติเมตร ลักษณะของขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้ในการจำลองผลแสดงดังรูป 3.21 จากการจำลองผลกระแสสูงสุดที่ไหลบนผิวของชิ้นงานมีค่า 1265 A/m ดังรูป 3.22



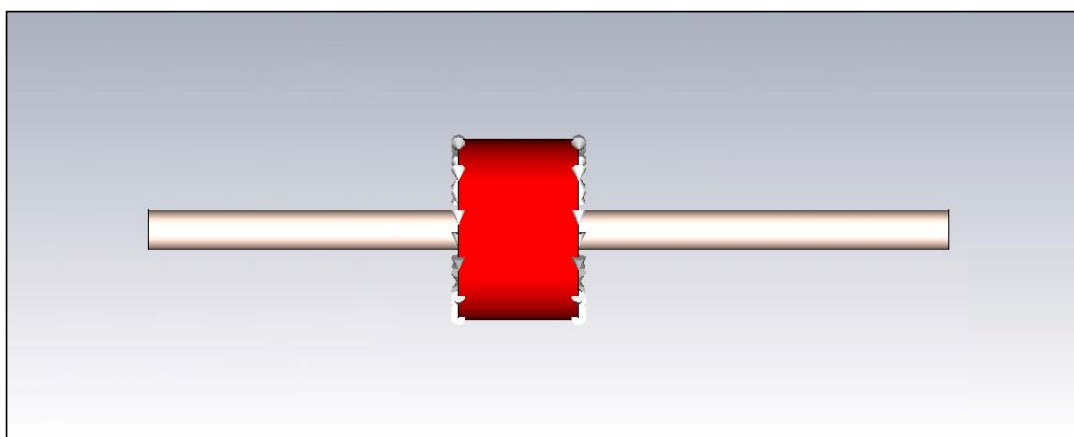
รูปที่ 3.21 ขดลวดเหนี่ยวนำ A2



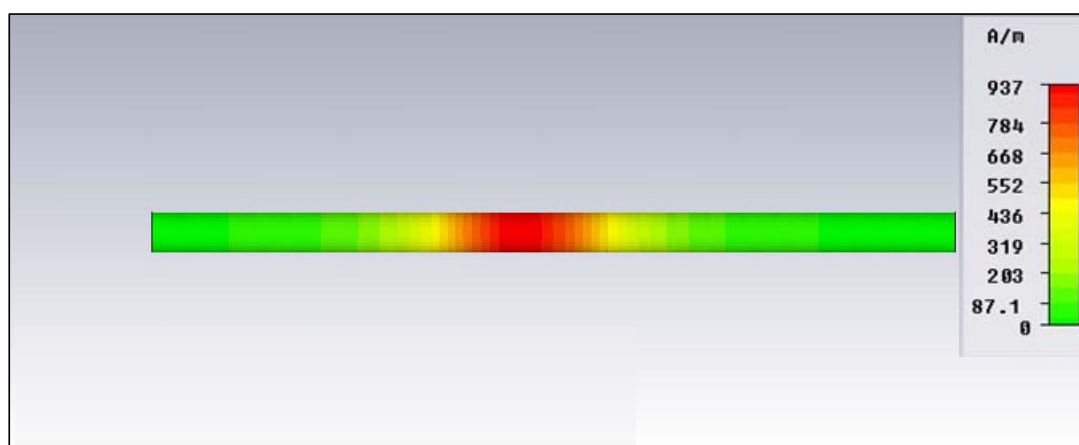
รูปที่ 3.22 กระแสบนผิวชิ้นงานของขดลวดเหนี่ยวนำ A2

3.7.3 ขดลวดเหนี่ยวนำ A3

ขดลวดเหนี่ยวนำชนิด A3 เป็นขดลวดเหนี่ยวนำแบบเดี่ยว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร มีพื้นที่การให้ความร้อนรวมทั้งหมด 3 เซนติเมตร ลักษณะของขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้ในการจำลองผลแสดงดังรูป 3.23 จากการจำลองผลกระแสสูงสุดที่ไหลบนผิวของชิ้นงานมีค่า 937 A/m ดังรูป 3.24



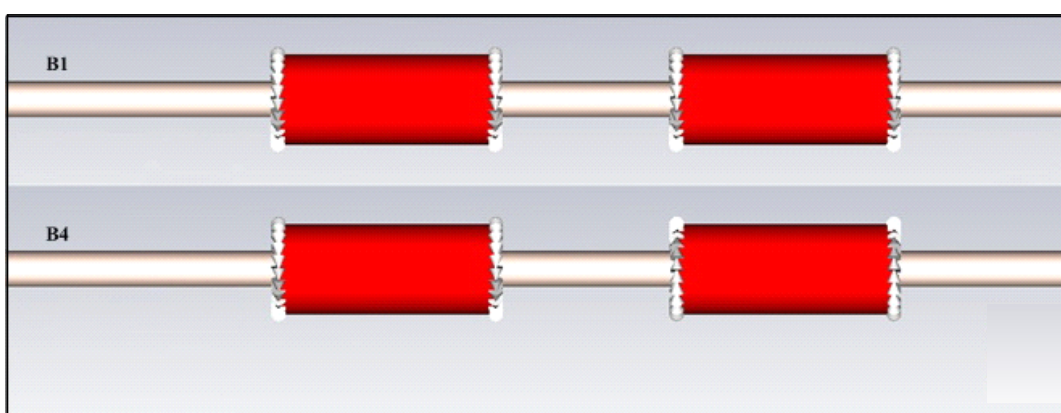
รูปที่ 3.23 ขดลวดเหนี่ยวนำ A3



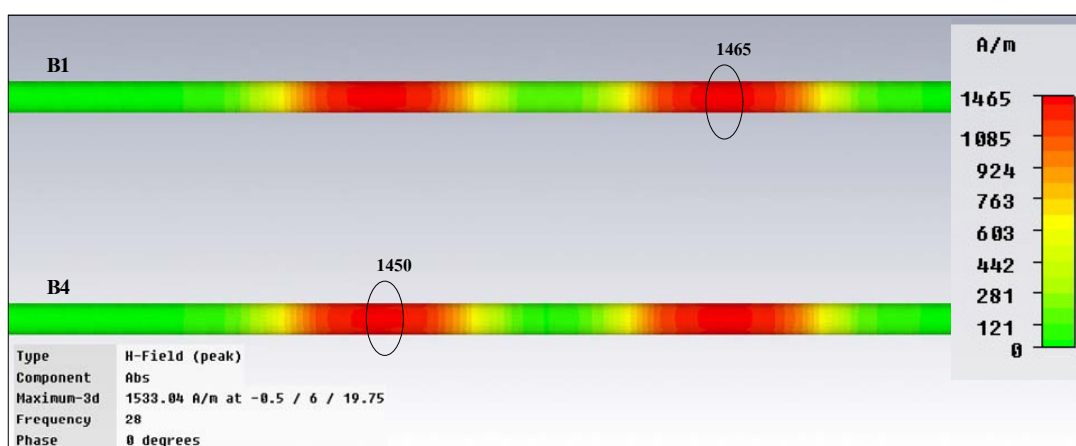
รูปที่ 3.24 กระแสบนผิวชิ้นงานของขดลวดเหนี่ยวนำ A3

3.7.4 ขดลวดเหนี่ยวนำ B1 และ B4

ขดลวดเหนี่ยวนำชนิด B1 และขดลวดเหนี่ยวนำ B4 เป็นขดลวดเหนี่ยวนำแบบคู่ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร มีพื้นที่การให้ความร้อนรวมทั้งหมด 17 เซนติเมตร ลักษณะของขดลวดเหนี่ยวนำในการจำลองผลแสดงดังรูป 3.25 โดยที่ขดลวด B1 มีการพันขดลวดทิศทางเดียวกันทั้งหมด และขดลวด B4 พันขดลวดในทิศตรงข้ามกัน จากการจำลองผลกระทบสูงสุดที่ไหลบนผิวของชิ้นงานของขดลวด B1 บริเวณแถวลำดับที่ 2 มีค่า 1465 A/m ส่วนขดลวด B4 มีค่า 1450 A/m บริเวณแถวลำดับที่ 1 ดังรูป 3.26



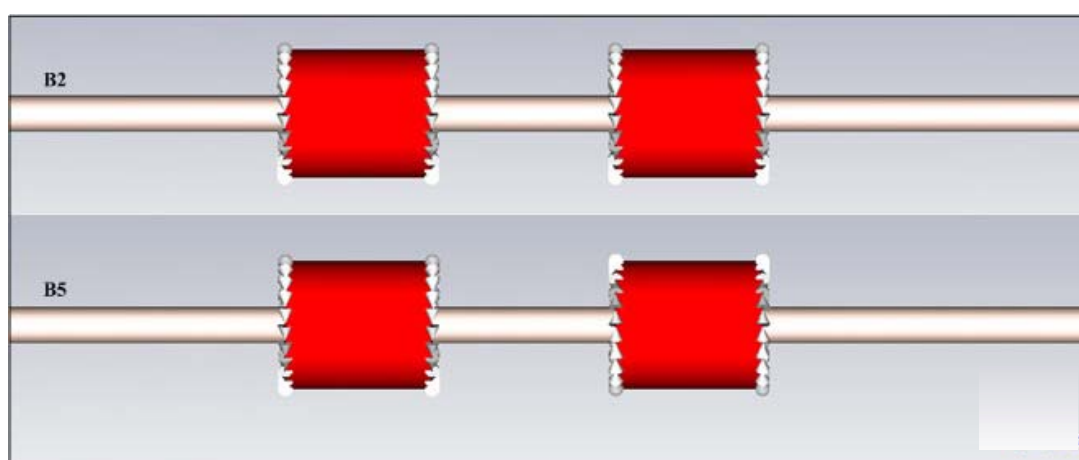
รูปที่ 3.25 ขดลวดเหนี่ยวนำ B1 และ B4



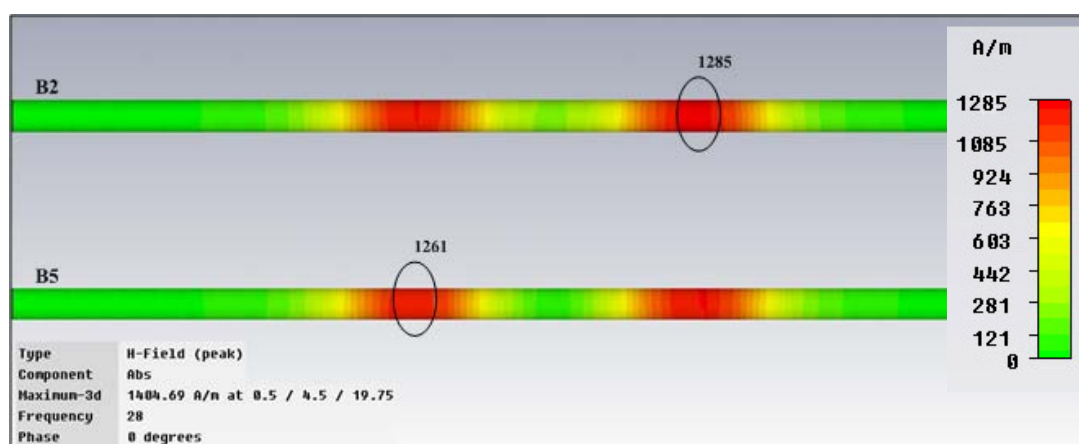
รูปที่ 3.26 กระแสบนผิวชิ้นงานของขดลวดเหนี่ยวนำ B1 และ B4

3.7.5 ขดลวดเหนี่ยวนำ B2 และ B5

ขดลวดเหนี่ยวนำชนิด B2 และขดลวดเหนี่ยวนำ B5 เป็นขดลวดเหนี่ยวนำแบบคู่ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร มีพื้นที่การให้ความร้อนรวมทั้งหมด 13 เซนติเมตร ลักษณะของขดลวดเหนี่ยวนำในการจำลองผลแสดงดังรูป 3.27 โดยที่ขดลวด B2 มีการพันขดลวดในทิศทางเดียวกันทั้งหมด และขดลวด B5 พันในทิศตรงข้ามกัน จากการจำลองผลกระแสสูงสุดที่ไหลบนผิวของชิ้นงานบริเวณแถวลำดับที่ 2 ของขดลวด B2 มีค่า 1285 A/m ส่วนขดลวด B5 มีค่า 1261 A/m บริเวณแถวลำดับที่ 1 ดังรูป 3.28



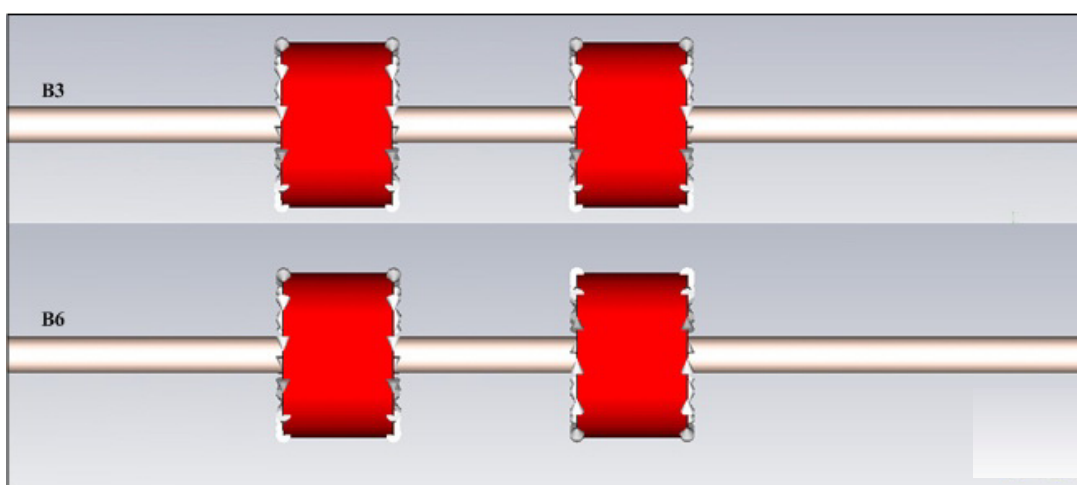
รูปที่ 3.27 ขดลวดเหนี่ยวนำ B2 และ B5



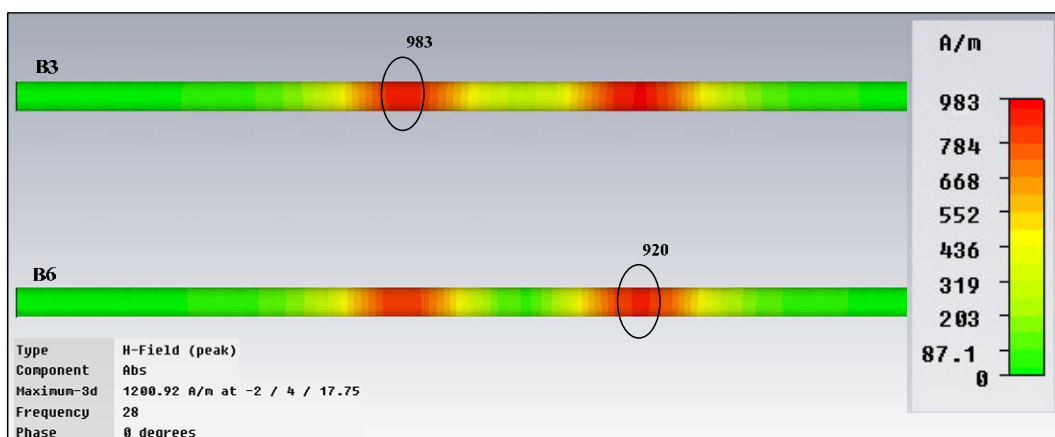
รูปที่ 3.28 กระแสบนผิวชิ้นงานของขดลวดเหนี่ยวนำ B2 และ B5

3.7.6 ขดลวดเหนี่ยวนำ B3 และ B6

ขดลวดเหนี่ยวนำชนิด B3 และขดลวดเหนี่ยวนำ B6 เป็นขดลวดเหนี่ยวนำแบบคู่ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร มีพื้นที่การให้ความร้อนรวมทั้งหมด 11 เซนติเมตร ลักษณะของขดลวดเหนี่ยวนำในการจำลองผลแสดงดังรูป 3.29 โดยที่ขดลวด B3 มีการพันขดลวดทิศทางเดียวกันทั้งหมด และขดลวด B6 พันในทิศตรงข้ามกัน จากการจำลองผลกระแสสูงสุดที่ไหลบนผิวของชิ้นงานบริเวณแถวลำดับที่ 1 ของขดลวด B2 มีค่า 983 A/m ส่วนขดลวด B5 มีค่า 920 A/m บริเวณแถวลำดับที่ 2 ดังรูป 3.30



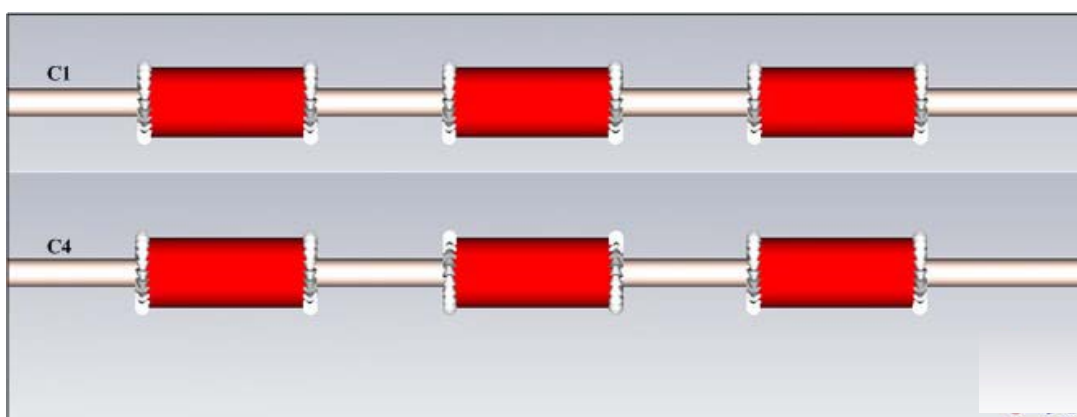
รูปที่ 3.29 ขดลวดเหนี่ยวนำ B3 และ B6



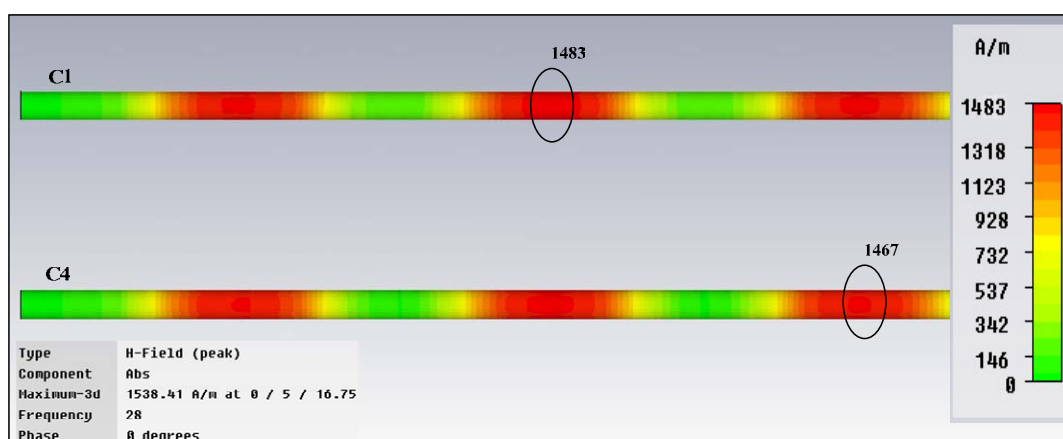
รูปที่ 3.30 กระแสบนผิวชิ้นงานของขดลวดเหนี่ยวนำ B3 และ B6

3.7.7 ขดลวดเหนี่ยวนำ C1 และ C4

ขดลวดเหนี่ยวนำชนิด C1 และขดลวดเหนี่ยวนำ C4 เป็นขดลวดเหนี่ยวนำแบบ แกวลำดับ 3 แกวลำดับ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขดลวด 2 เซนติเมตร พื้นที่การให้ความร้อนรวม ทั้งหมด 28 เซนติเมตร ลักษณะของขดลวดเหนี่ยวนำในการจำลองผลแสดงดังรูป 3.31 โดยที่ ขดลวดเหนี่ยวนำ C1 มีการพันขดลวดทิศทางเดียวกันทั้งหมด และขดลวด C4 พันขดลวดในทิศ ตรงข้ามกันในแต่ละลำดับที่ 2 จากการจำลองผลกระแสสูงสุดที่ไหลบนผิวของชิ้นงานบริเวณ แกวลำดับที่ 2 ของขดลวด C1 มีค่า 1483 A/m ส่วนขดลวด C4 มีค่า 1467 A/m บริเวณแกวลำดับ ที่ 3 ดังรูป 3.32



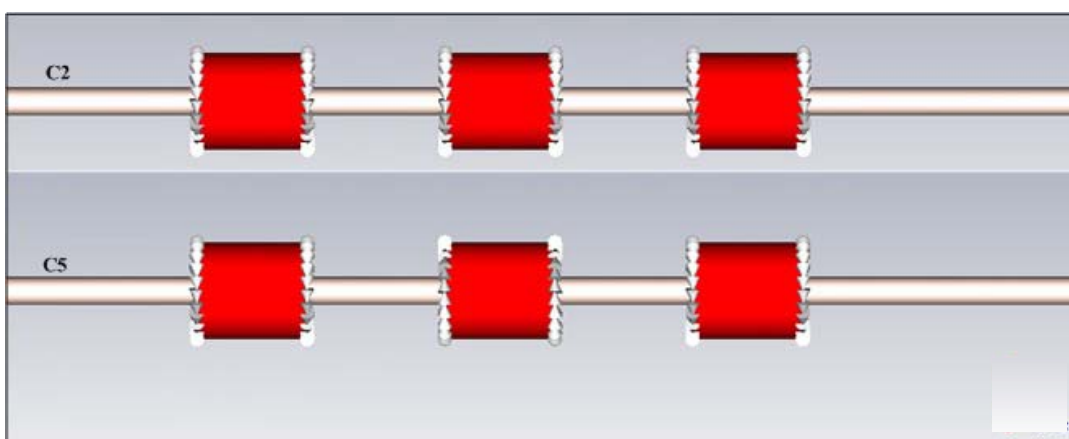
รูปที่ 3.31 ขดลวดเหนี่ยวนำ C1 และ C4



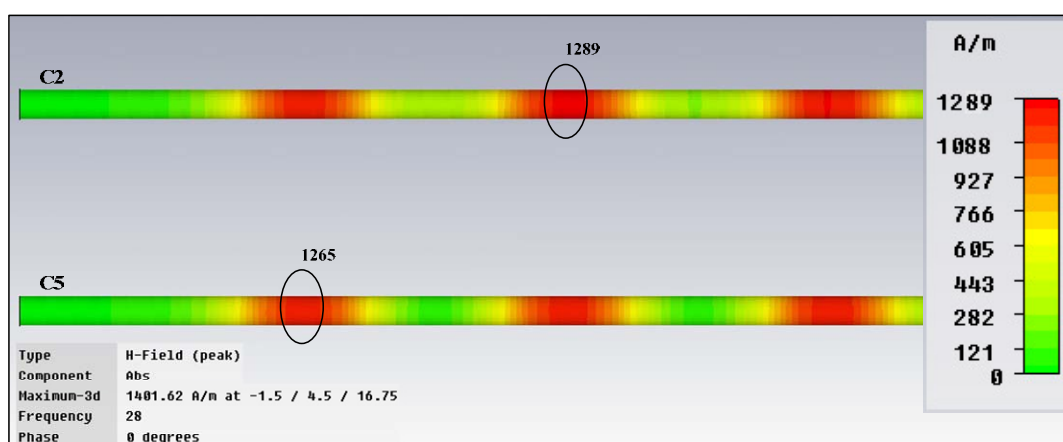
รูปที่ 3.32 กระแสบนผิวชิ้นงานของขดลวดเหนี่ยวนำ C1 และ C4

3.7.8 ขดลวดเหนี่ยวนำ C2 และ C5

ขดลวดเหนี่ยวนำชนิด C2 และขดลวดเหนี่ยวนำ C5 เป็นขดลวดเหนี่ยวนำแบบ แกวลำดับ 3 แกวลำดับ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขดลวด 3 เซนติเมตร พื้นที่การให้ความร้อนรวม ทั้งหมดยาว 22 เซนติเมตร ลักษณะของขดลวดเหนี่ยวนำในการจำลองผลแสดงดังรูป 3.33 โดยที่ ขดลวดเหนี่ยวนำแบบ C2 มีการพันขดลวดทิศทางเดียวกันทั้งหมด และขดลวดเหนี่ยวนำ แบบ C5 พันในทิศตรงข้ามกันในแต่ละลำดับที่ 2 จากการจำลองผลกระแสสูงสุดที่ไหลบนผิวของ ชิ้นงานบริเวณแกวลำดับที่ 2 ของขดลวดเหนี่ยวนำ C2 มีค่า 1289 A/m ส่วนขดลวดเหนี่ยวนำ C5 มีค่า 1265 A/m บริเวณแกวลำดับที่ 1 ดังรูป 3.34



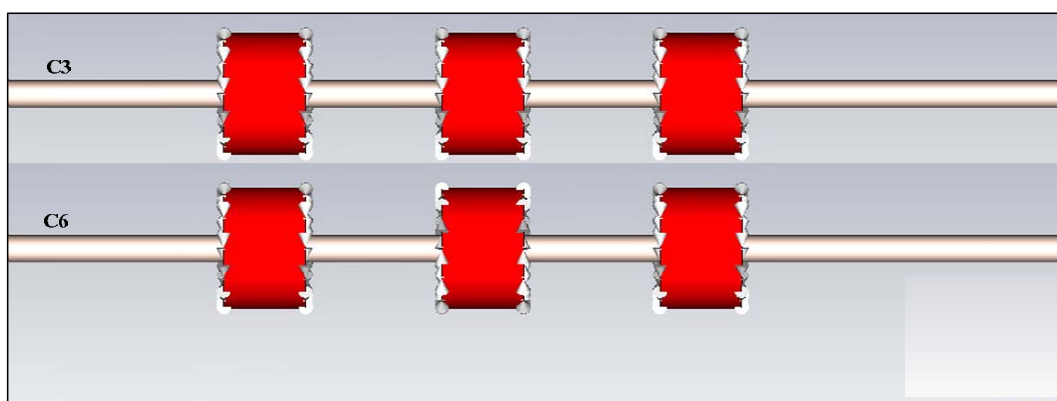
รูปที่ 3.33 ขดลวดเหนี่ยวนำ C2 และ C5



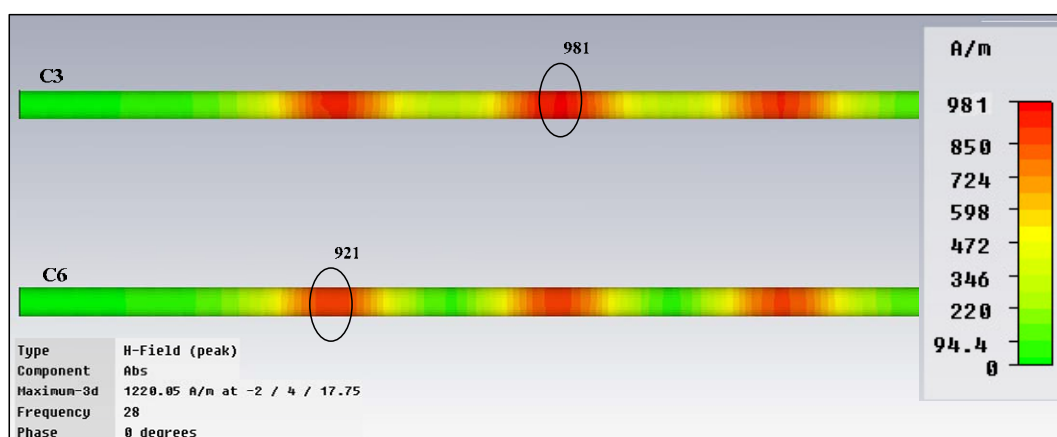
รูปที่ 3.34 กระแสบนผิวชิ้นงานของขดลวดเหนี่ยวนำ C2 และ C5

3.7.9 ขดลวดเหนี่ยวนำ C3 และ C6

ขดลวดเหนี่ยวนำชนิด C3 และขดลวดเหนี่ยวนำ C6 เป็นขดลวดเหนี่ยวนำแบบ แกวลำดับ 3 แกวลำดับ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขดลวด 4 เซนติเมตร พื้นที่การให้ความร้อนรวม ทั้งหมด 19 เซนติเมตร ลักษณะของขดลวดเหนี่ยวนำในการจำลองผลแสดงดังรูป 3.35 โดยที่ ขดลวดเหนี่ยวนำแบบ C3 มีการพันขดลวดทิศทางเดียวกันทั้งหมด และขดลวดเหนี่ยวนำ แบบ C6 พันขดลวดในทิศตรงข้ามกันในแต่ละลำดับที่ 2 จากการจำลองผลกระแสสูงสุดที่ไหลบน ผิวของชิ้นงานบริเวณแกวลำดับที่ 2 ของขดลวดเหนี่ยวนำแบบ C3 มีค่า 981 A/m ส่วนขดลวด เหนี่ยวนำแบบ C6 มีค่า 921 A/m บริเวณแกวลำดับที่ 1 ดังรูป 3.36



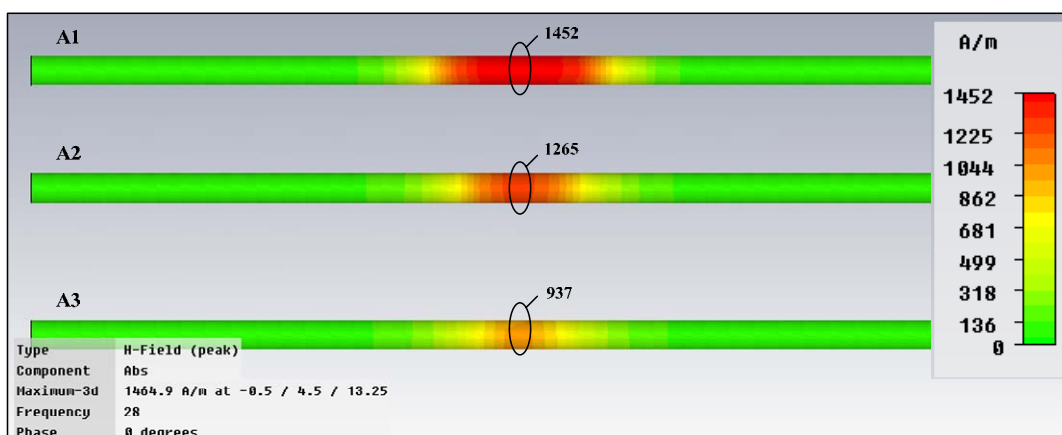
รูปที่ 3.35 ขดลวดเหนี่ยวนำ C3 และ C6



รูปที่ 3.36 กระแสบนผิวชิ้นงานของขดลวดเหนี่ยวนำ C3 และ C6

ในการจำลองผลสามารถทั้ง 15 กรณี สามารถเปรียบเทียบค่ากระแสที่ไหลบนผิวชิ้นงานของขดลวดเหนี่ยวนำแบบเดี่ยว ดังรูป 3.37 ค่ากระแสสูงสุดเกิดที่ขดลวดเหนี่ยวนำแบบ A1 รองลงมาคือขดลวดเหนี่ยวนำแบบ A2 และสุดท้ายเป็นขดลวดเหนี่ยวนำแบบ A3 โดยที่ขดลวดเหนี่ยวนำแบบ A1 สามารถให้พื้นที่ความร้อนได้มากกว่าอีกด้วย

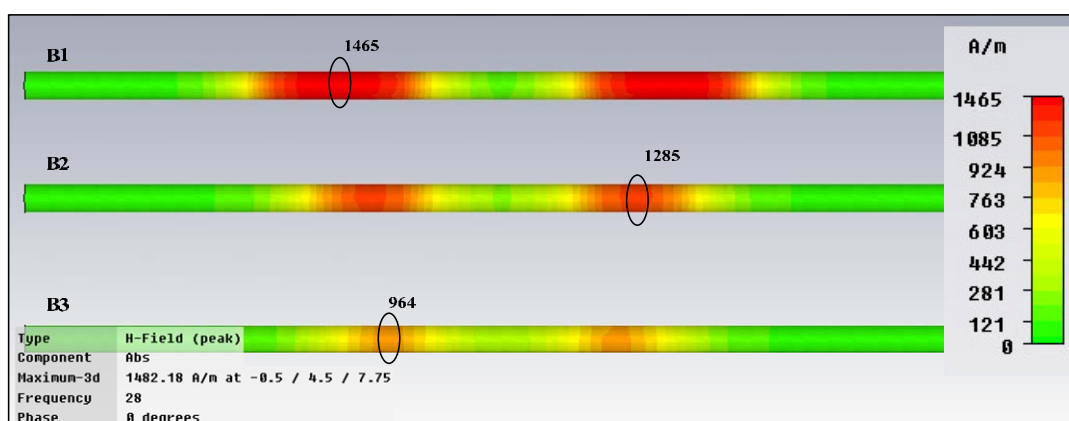
กระแสที่ไหลบนขดลวดเหนี่ยวนำแบบคู่ที่มีการพันขดลวดในทิศทางเดียวกันนั้น สามารถเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 3.38 จะเห็นว่าขดลวดเหนี่ยวนำแบบ B1 นั้นสามารถให้ค่ากระแสได้สูงสุดเช่นเดียวกันส่วนขดลวดเหนี่ยวนำแบบ B2 สามารถให้ค่ากระแสรองลงมา สุดท้ายขดลวดเหนี่ยวนำแบบ B3 ให้ค่ากระแสบนผิวของชิ้นงานได้น้อยสุดแต่ขดลวด B3 สามารถให้ค่ากระแสที่กระจายตัวมากกว่าขดลวดชนิดอื่น เพราะว่ามีค่าความเหนี่ยวนำแฝงมากกว่าขดลวดชนิดอื่นนั่นเอง



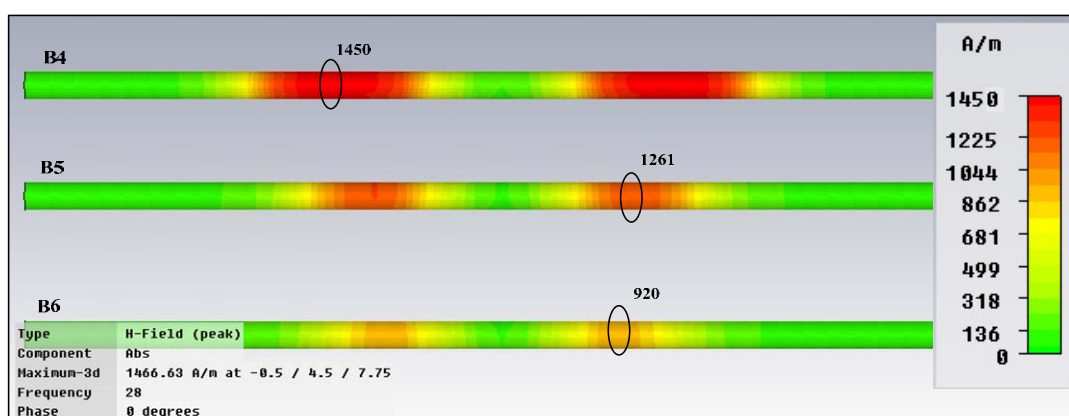
รูปที่ 3.37 ค่ากระแสบนผิวชิ้นงานของขดลวดเหนี่ยวนำแบบเดี่ยว

ในทางตรงกันข้ามการพันขดลวดเหนี่ยวนำแบบคู่ที่มีการพันในทิศทางตรงข้ามกันนั้นค่ากระแสที่ไหลบนพื้นผิวของชิ้นงานมีลักษณะคล้ายกันกับการพันขดลวดในทิศทางเดียวกันทั้งหมดดังรูป 3.39 แต่ค่ากระแสที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่า และค่ากระแสกระจายในขดลวดชนิด B6 ยังน้อยกว่าการพันขดลวด B3 อย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าการพันขดลวดในทิศทางตรงข้ามกันนั้นมีความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กน้อยกว่าหรือเกิดการหักล้างกันของฟลักซ์แม่เหล็ก ส่วนการพันขดลวดในทิศทางเดียวกันทั้งหมดนั้นมีความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กมากกว่า หรือเกิดการเสริมกันของฟลักซ์แม่เหล็กนั่นเอง

การพันขดลวดเหนี่ยวนำแบบแถวลำดับ 3 แถวลำดับที่มีการพันขดลวดเหนี่ยวนำในทิศทางเดียวกันทั้งหมดนั้นแสดงดังรูปที่ 3.40 ค่ากระแสสูงสุดที่เกิดบนผิวของชิ้นงานนั้นเกิดในบริเวณแถวลำดับที่ 2 ของขดลวดทั้งหมด โดยที่ขดลวดเหนี่ยวนำแบบ C1 ค่ากระแสสูงสุดบนผิวของชิ้นงานมีค่า 1483 A/m ซึ่งเป็นค่ากระแสบนชิ้นงานที่สูงที่สุดของขดลวดเหนี่ยวนำแบบ 3 แถวลำดับ ส่วนขดลวดเหนี่ยวนำแบบ C2 มีค่ากระแสบนชิ้นงาน 1289 A/m ในทำนองเดียวกันขดลวดเหนี่ยวนำแบบ C3 มีค่ากระแส 981 A/m ตามลำดับ

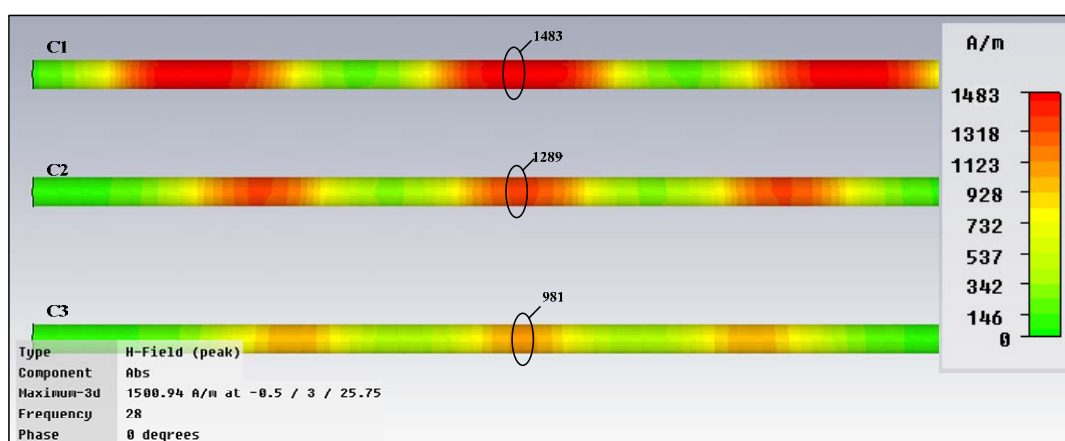


รูปที่ 3.38 ค่ากระแสบนผิวชิ้นงานของขดลวดแบบคู่ที่พันขดลวดในทิศทางเดียวกัน

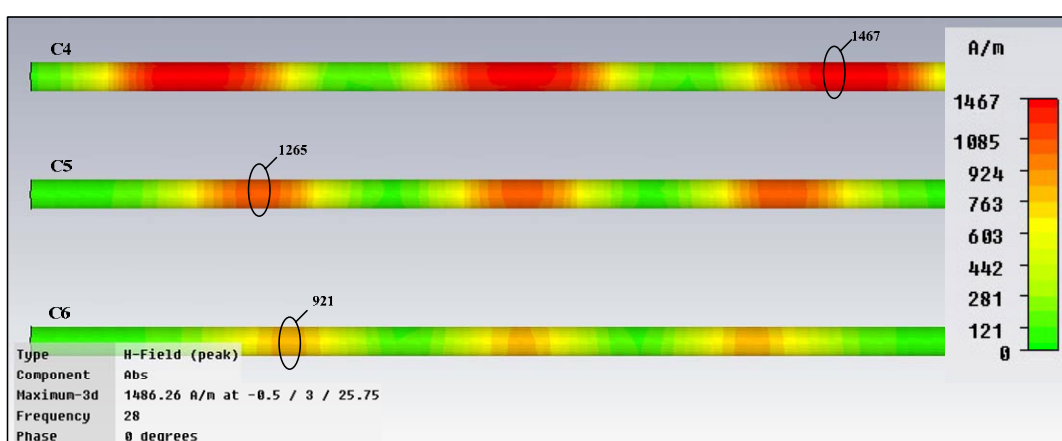


รูปที่ 3.39 ค่ากระแสบนผิวชิ้นงานของขดลวดแบบคู่ที่พันขดลวดในทิศทางตรงข้ามกัน
ในแถวลำดับที่ 2

ในทางตรงข้ามกันขดลวดเหนี่ยวนำแวลำดับแบบ 3 แวลำดับที่มีการพันขดลวดในทิศทางตรงข้ามกันในแวลำดับที่ 2 นั้น ค่ากระแสสูงสุดเกิดในบริเวณขดลวดแวลำดับที่ 1 หรือแวลำดับที่ 3 แทนดังรูปที่ 3.41 โดยที่ขดลวดเหนี่ยวนำแบบ C4 มีค่ากระแสบนชิ้นงานสูงสุด 1467 A/m บนแวลำดับที่ 3 ส่วนขดลวดเหนี่ยวนำ C5 และ C6 มีค่ากระแสสูงสุด 1265 A/m และ 921 A/m แต่กระแสที่ไหลบนชิ้นงานเกิดที่ขดลวดเหนี่ยวนำแวลำดับที่ 1 ทั้งนี้ค่ากระแสที่กระจายออกยังน้อยกว่าการพันขดลวดเหนี่ยวนำแบบทิศทางเดียวกันอีกด้วย



รูปที่ 3.40 ค่ากระแสบนผิวชิ้นงานของขดลวดแวลำดับแบบ 3 แวลำดับที่พันขดลวดในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 3.41 ค่ากระแสบนผิวชิ้นงานของขดลวดแบบแวลำดับ 3 แวลำดับที่พันขดลวดในทิศทางตรงข้ามกันในแวลำดับที่ 2

แสดงให้เห็นว่าการพันขดลวดในทิศทางตรงข้ามกันนั้นมีความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กน้อยกว่าหรือเกิดการหักล้างกันของฟลักซ์แม่เหล็ก ส่วนการพันขดลวดในทิศทางเดียวกันทั้งหมดนั้นมีความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กมากกว่า หรือเกิดการเสริมกันของฟลักซ์แม่เหล็ก และเป็นเช่นเดียวกันกับขดลวดเหนี่ยวนำแบบคู่

3.8 สรุป

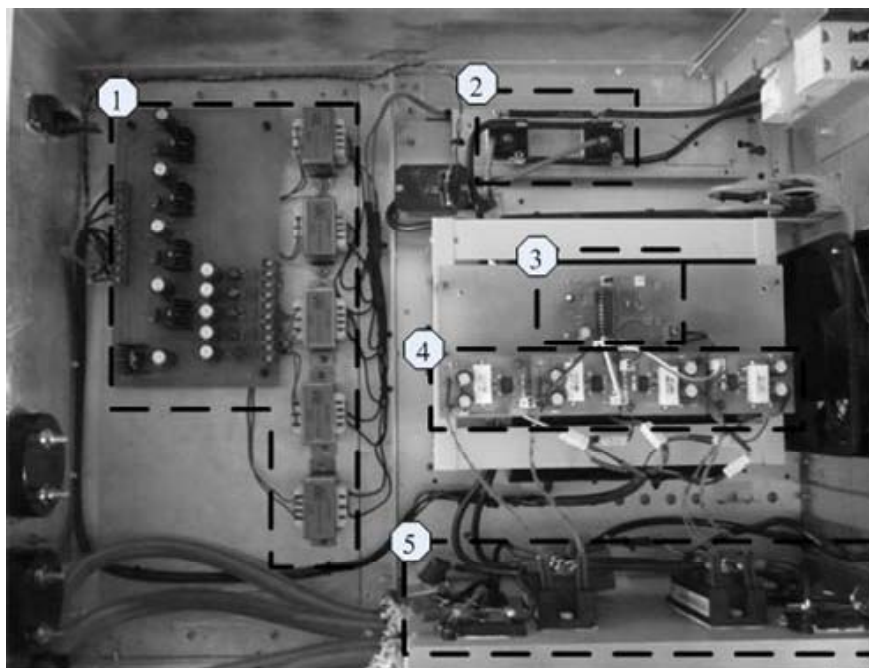
จากการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST EM STUDIO 2009 ขดลวดเหนี่ยวนำแต่ละขนาดที่สามารถทำให้เกิดกระแสไหลในชิ้นงานได้มากที่สุดคือ ขดลวดชนิด C1 เป็นขดลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ค่ากระแสบนผิวของชิ้นงาน 1483 A/m ส่วนขดลวดเหนี่ยวนำแบบคู่ มีกระแสสูงสุดที่ไหลในขดลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร มีกระแสสูงสุดอยู่ที่ 1465 A/m ของขดลวด B1 และกระแสสูงสุดของขดลวดเหนี่ยวนำแบบเดี่ยว เกิดที่ขดลวดเหนี่ยวนำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร เช่นเดียวกัน มีค่า 1452 A/m ของขดลวด A1 ซึ่งขดลวดแบบแฉวลำดับมีการพันขดลวดในทิศทางเดียวกันทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าการพันขดลวดในทิศทางเดียวกันเกิดการเสริมกันของฟลักซ์แม่เหล็กมากกว่าการพันขดลวดในทิศทางตรงข้ามกัน และการพันขดลวดแต่ละขนาดยังเกิดค่าเหนี่ยวนำแผ่ไม่เท่ากันด้วย โดยขดลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร เกิดการกระจายของกระแสบนผิวของชิ้นงานมากกว่าขดลวดเหนี่ยวนำขนาดอื่น ทั้งนี้ขดลวดที่สามารถให้ค่ากระแสสูงสุดของขดลวดแต่ละขนาด เป็นขดลวดที่มีขนาดใกล้เคียงกับชิ้นงานมากที่สุด แต่ขดลวดที่สามารถแผ่พลังงานความร้อนได้มากที่สุดเป็นขดลวดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุด

บทที่ 4

การทดสอบและผลการทดสอบเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน

4.1 กล่าวนำ

บทนี้กล่าวถึงการทดสอบการทำงานในส่วนต่าง ๆ ของวงจร ผลของการทดสอบการทำงานของวงจรต่าง ๆ ของเครื่องเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนโดยสามารถแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ วงจรเรียงกระแสและกรองกระแสทางด้านอินพุต (rectifier & filter) วงจรอินเวอร์เตอร์ (inverter) วงจรควบคุมอินเวอร์เตอร์ และ โหลดรีโซแนนซ์ (load resonant) และ การให้ความร้อนของเครื่องเหนี่ยวนำกับขดลวดเหนี่ยวนำแบบเกลวลำดับชนิดต่าง ๆ ซึ่งเราสามารถแยกส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องได้ ดังรูปที่ 4.1

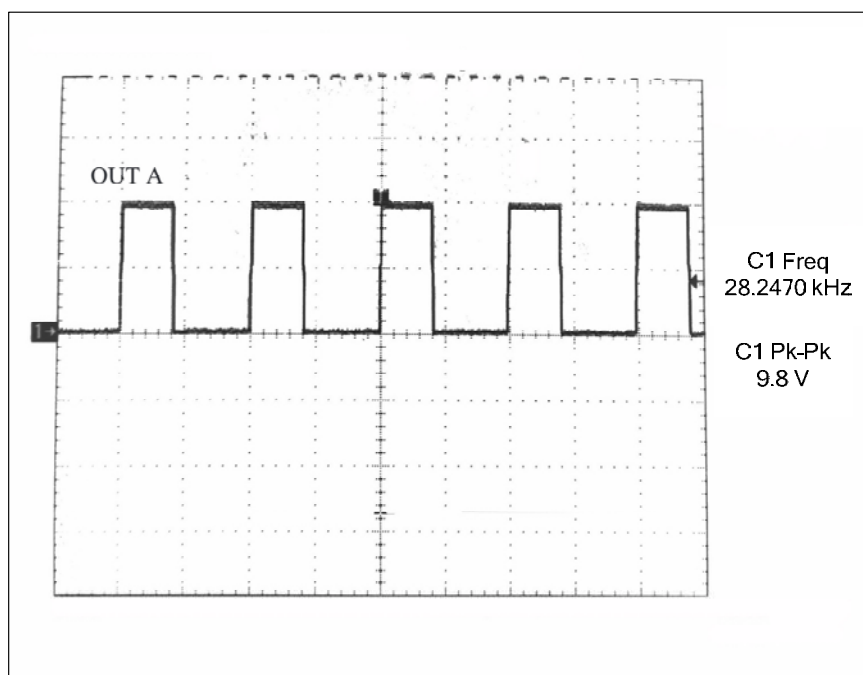


รูปที่ 4.1 เครื่องให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำ

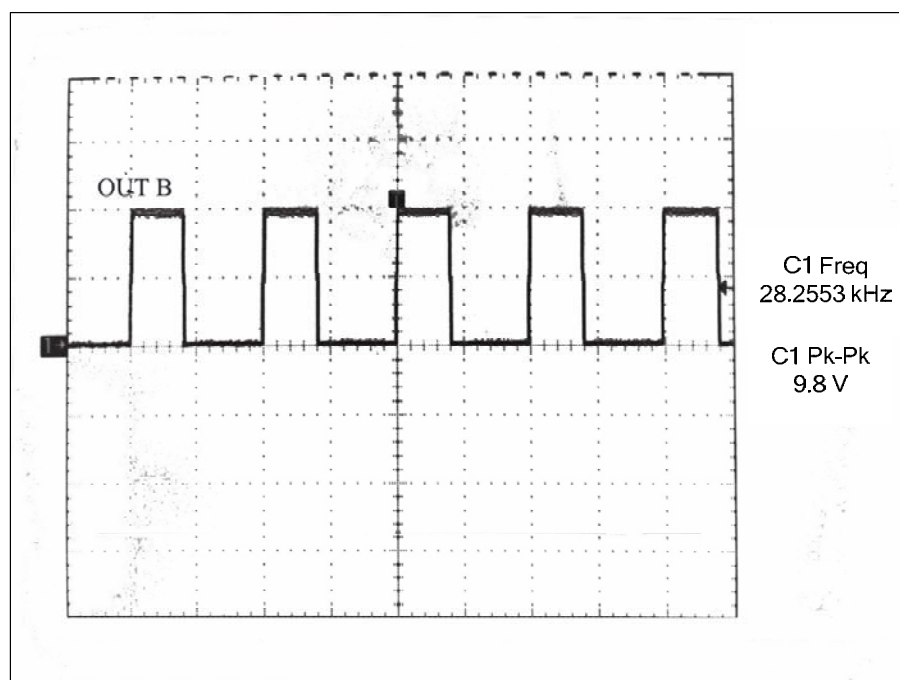
- โดยที่
- 1) เพาเวอร์ซัพพลายที่ใช้ในส่วนของวงจรควบคุมจากแรงดันและวงจรขับเคลื่อน
 - 2) เพาเวอร์ซัพพลายที่ใช้ในส่วนของวงจรภาคกำลัง
 - 3) วงจรควบคุมในโหมดของแรงดัน
 - 4) วงจรขับเคลื่อน
 - 5) วงจรฟลูตบริจอินเวอร์เตอร์

4.2 การทดสอบวงจรควบคุมในโหมดของแรงดัน

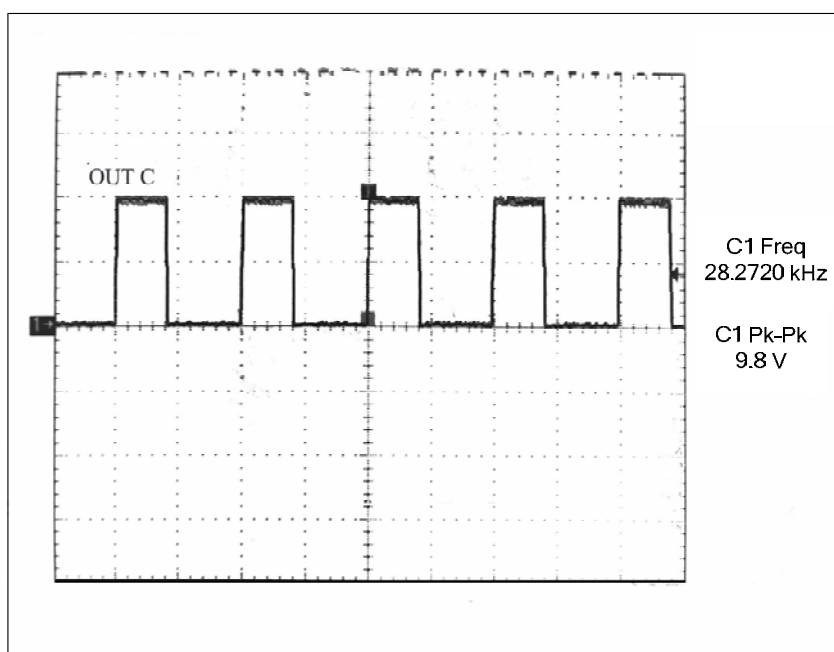
ในส่วนของการทดสอบวงจรควบคุมในโหมดของแรงดันนี้ วงจรนี้เป็นวงจรที่เป็นตัวกำเนิดสัญญาณพัลส์ขึ้นมา 4 สัญญาณ เพื่อนำสัญญาณพัลส์เหล่านั้นไปเป็นสัญญาณอินพุตในการควบคุมลำดับการทำงานของสวิตช์ความถี่สูง ทางผู้วิจัยได้เลือกใช้ไอซีเบอร์ UC3879N เพราะไอซีเบอร์นี้นั้นสามารถที่จะเลือกปรับความถี่ของสัญญาณเอาต์พุต และปรับเฟสของสัญญาณแต่ละตัว



รูปที่ 4.2 ลักษณะของสัญญาณ OUT A จากไอซี UC3879N

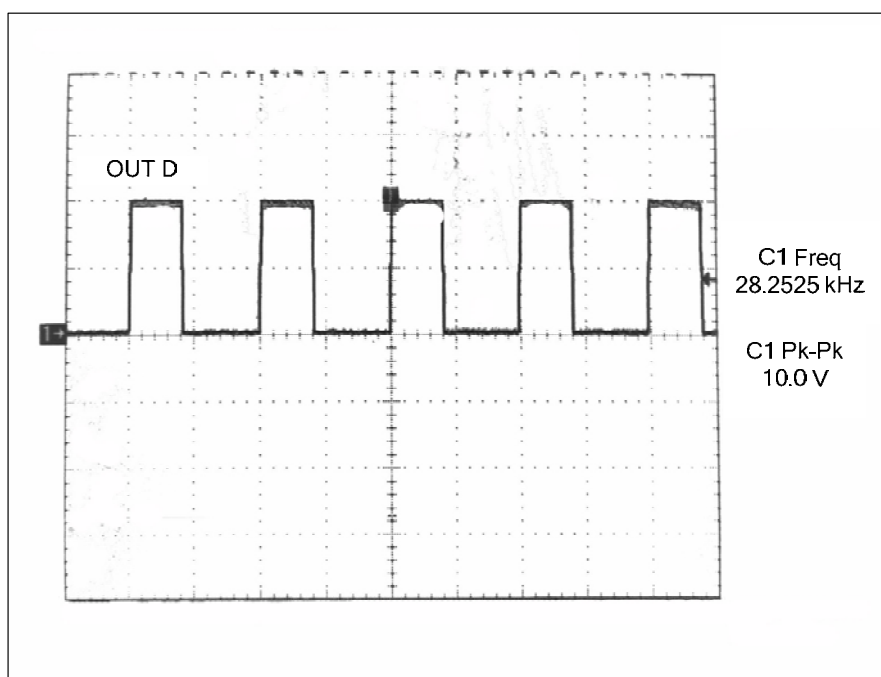


รูปที่ 4.3 ลักษณะของสัญญาณ OUT B จากไอซี UC3879N



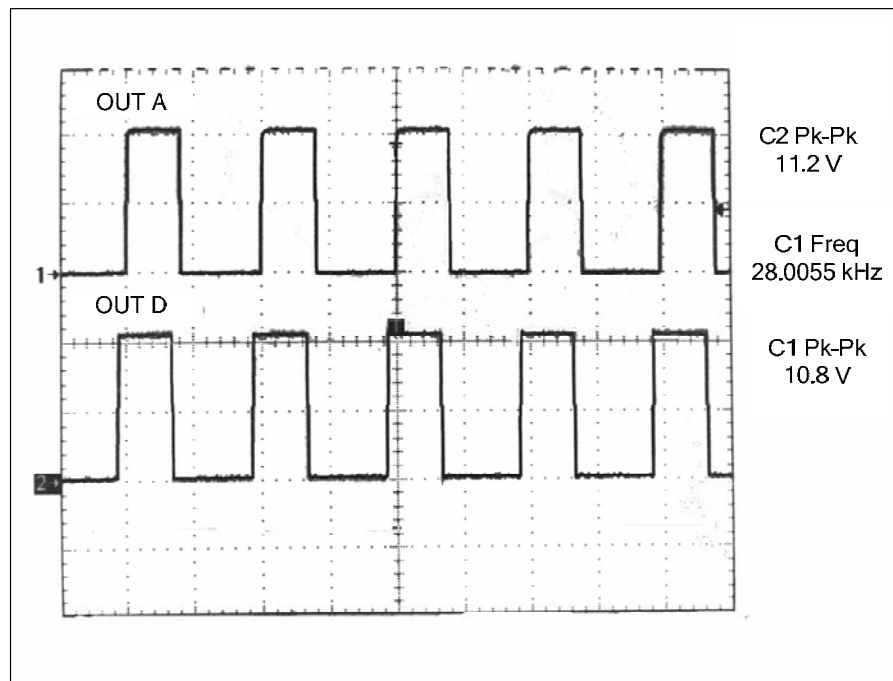
รูปที่ 4.4 ลักษณะของสัญญาณ OUT C จากไอซี UC3879N

เพื่อให้ได้ลำดับการทำงานตามที่ต้องการ โดยสัญญาณ OUT A จะได้สัญญาณเอาต์พุตจากขา 13 ลักษณะของสัญญาณแสดงดังรูปที่ 4.2 สัญญาณ OUT B จะได้สัญญาณเอาต์พุตจากขา 12 ลักษณะของสัญญาณแสดงดังรูปที่ 4.3 สัญญาณ OUT C จะได้สัญญาณเอาต์พุตจากขา 8 ลักษณะของสัญญาณแสดงดังรูปที่ 4.4 และสัญญาณ OUT D จะได้สัญญาณเอาต์พุตจากขา 7 ลักษณะของสัญญาณแสดงดังรูปที่ 4.5

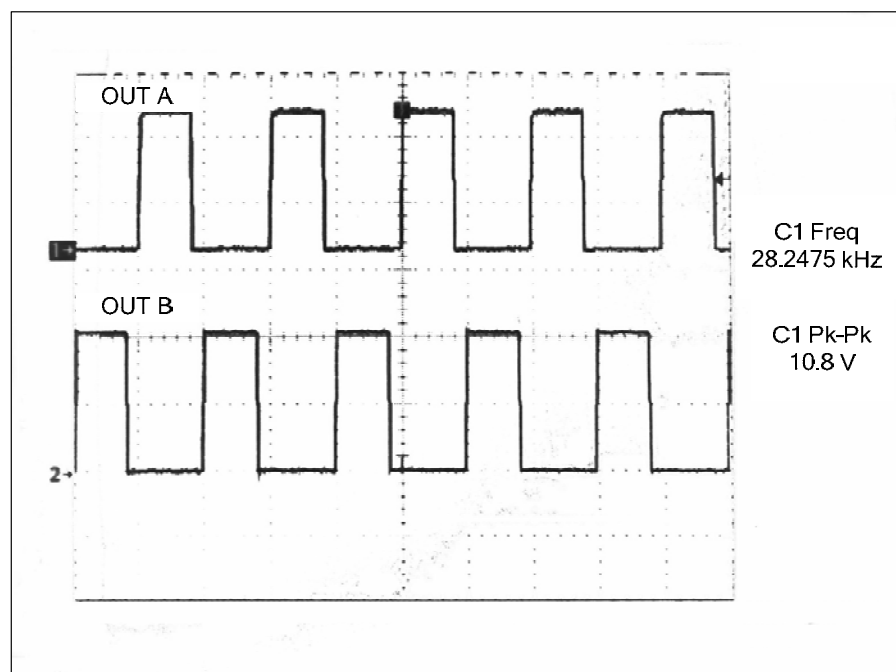


รูปที่ 4.5 ลักษณะของสัญญาณ OUT D จากไอซี UC3879N

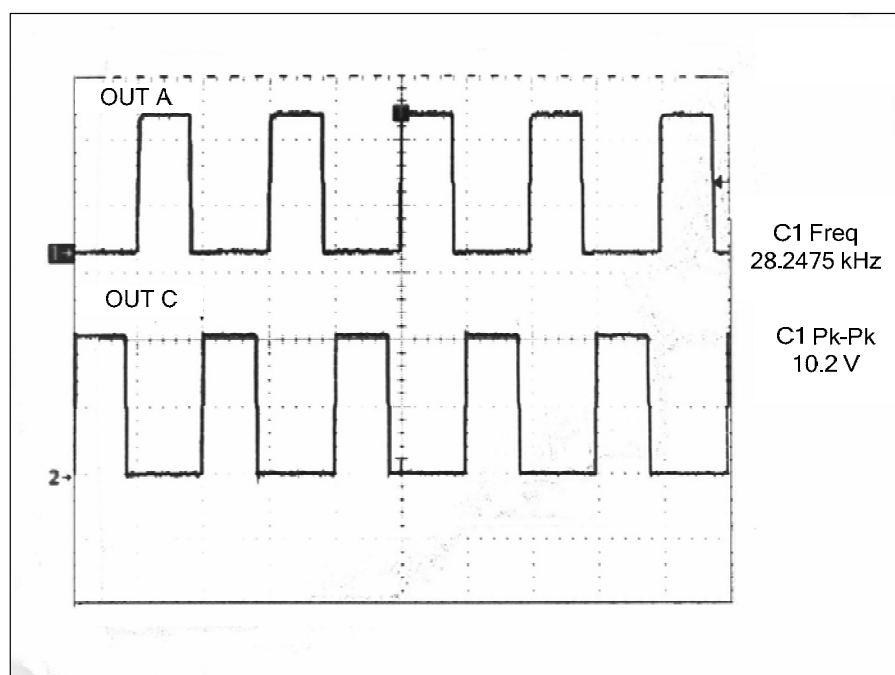
ลักษณะของสัญญาณที่ได้ทั้ง 4 นั้นจริง ๆ แล้วมีเฟสของสัญญาณแต่ละสัญญาณต่างกันไป เพื่อเป็นการกำหนดลำดับการทำงานของสวิตช์ความถี่สูงแต่ละตัวให้ทำงานไม่พร้อมกันแต่สอดคล้องกันนั่นเอง โดยเราสามารถเปรียบเทียบลักษณะของสัญญาณแต่ละสัญญาณได้ดังรูปที่ 4.6 แสดงลักษณะของสัญญาณ OUT A เปรียบเทียบกับ OUT D ซึ่งมีลำดับการทำงานในช่วงของพัลส์บวกเหมือนกัน รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะของสัญญาณ OUT A เปรียบเทียบกับ OUT B โดยที่สัญญาณทั้งสองจะทำงานคนละช่วงเวลา คือ ถ้า OUT A ทำงาน OUT B จะหยุดทำงาน ในทำนองเดียวกันถ้า OUT A หยุด OUT B จะทำงาน ลักษณะการทำงานนี้เหมือนกันกับรูปที่ 4.8 ซึ่งแสดงลักษณะการทำงานของสัญญาณ OUT A เปรียบเทียบกับ OUT C รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะของ



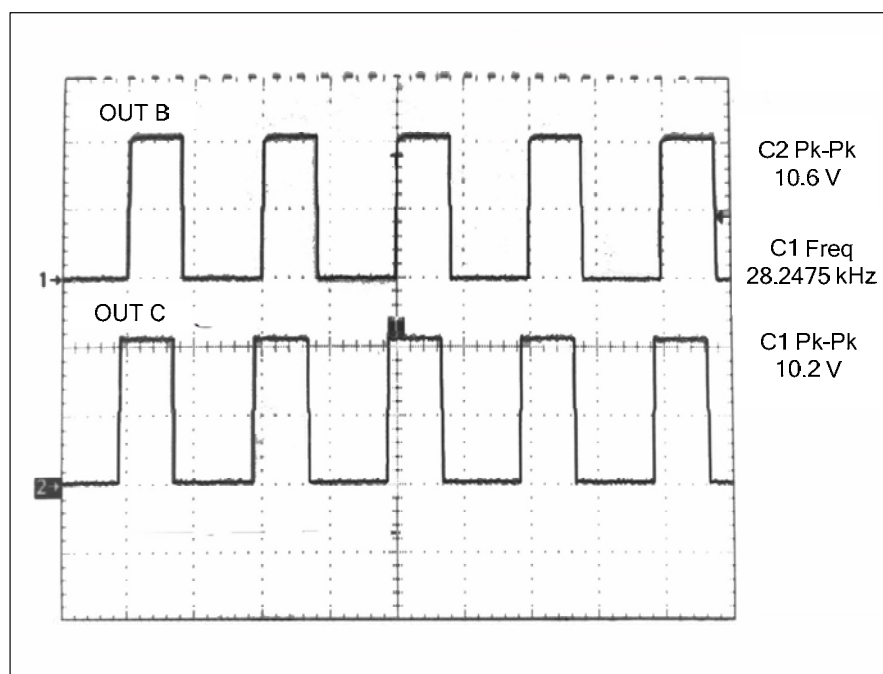
รูปที่ 4.6 ลักษณะของสัญญาณ OUT A เปรียบเทียบกับ OUT D ของไอซี UC3879N



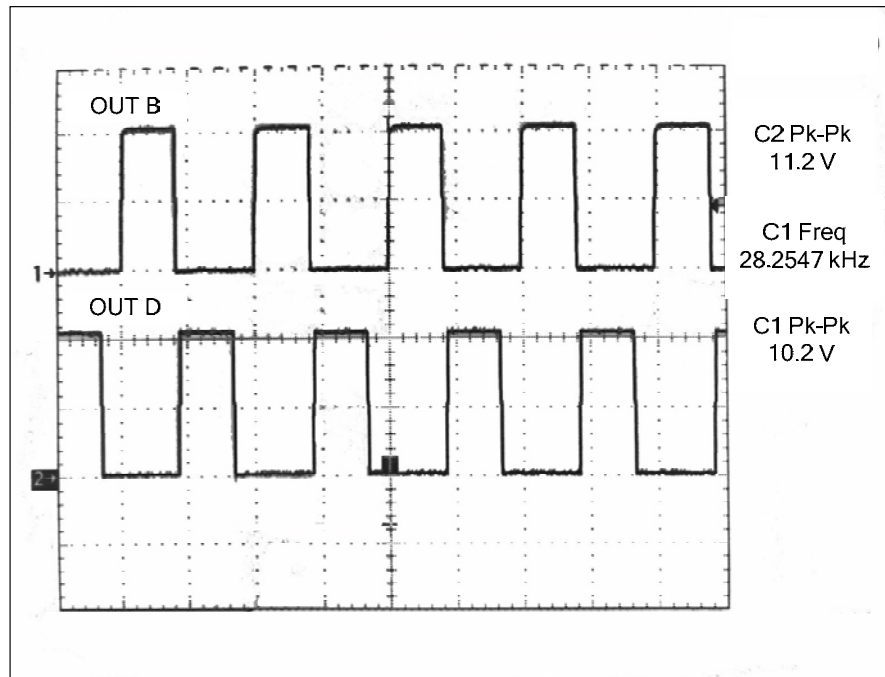
รูปที่ 4.7 ลักษณะของสัญญาณ OUT A เปรียบเทียบกับ OUT B ของไอซี UC3879N



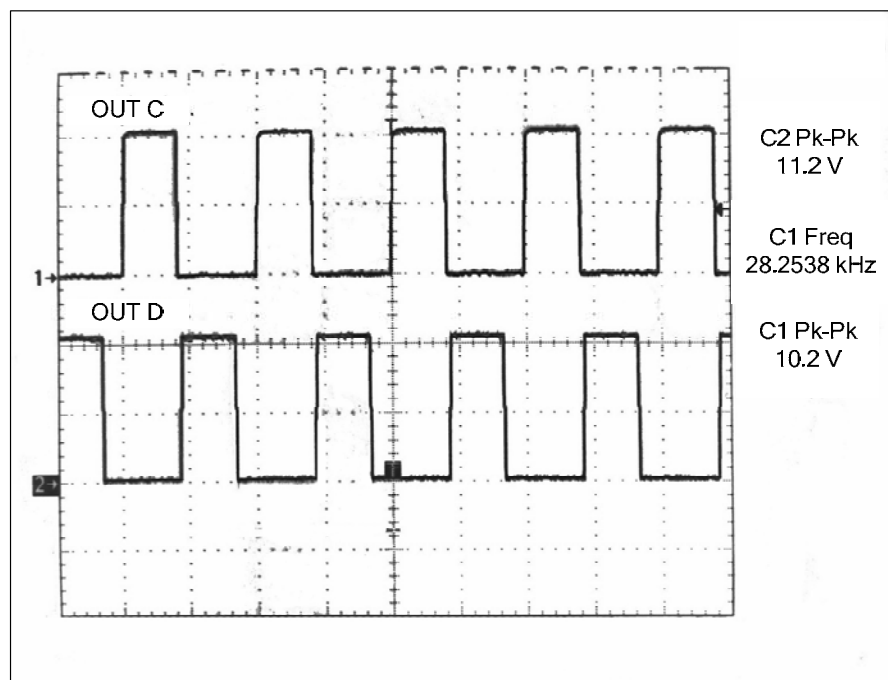
รูปที่ 4.8 ลักษณะของสัญญาณ OUT A เปรียบเทียบกับ OUT C ของไอซี UC3879N



รูปที่ 4.9 ลักษณะของสัญญาณ OUT B เปรียบเทียบกับ OUT C ของไอซี UC3879N



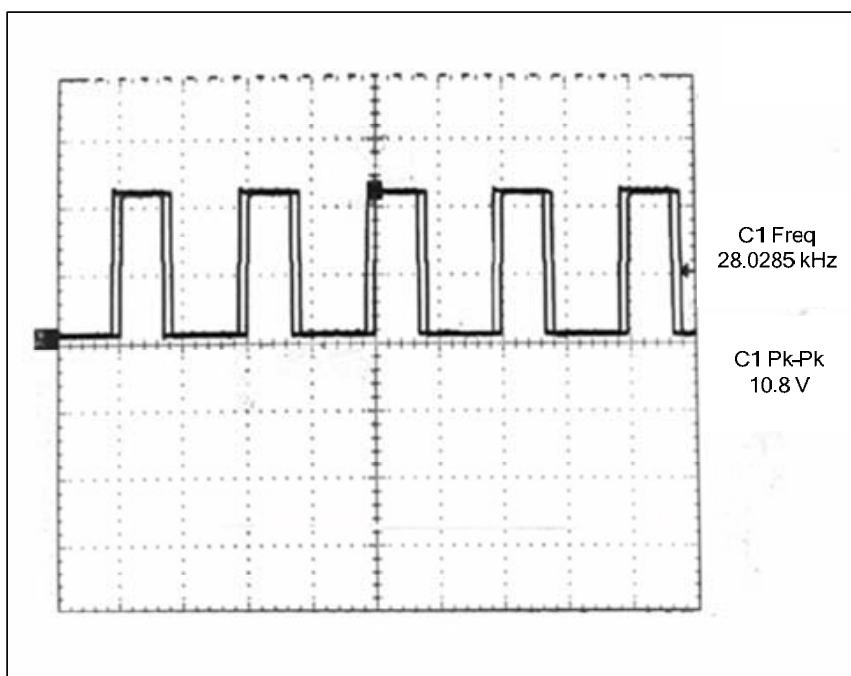
รูปที่ 4.10 ลักษณะของสัญญาณ OUT B เปรียบเทียบกับ OUT D ของไอซี UC3879N



รูปที่ 4.11 ลักษณะของสัญญาณ OUT C เปรียบเทียบกับ OUT D ของไอซี UC3879N

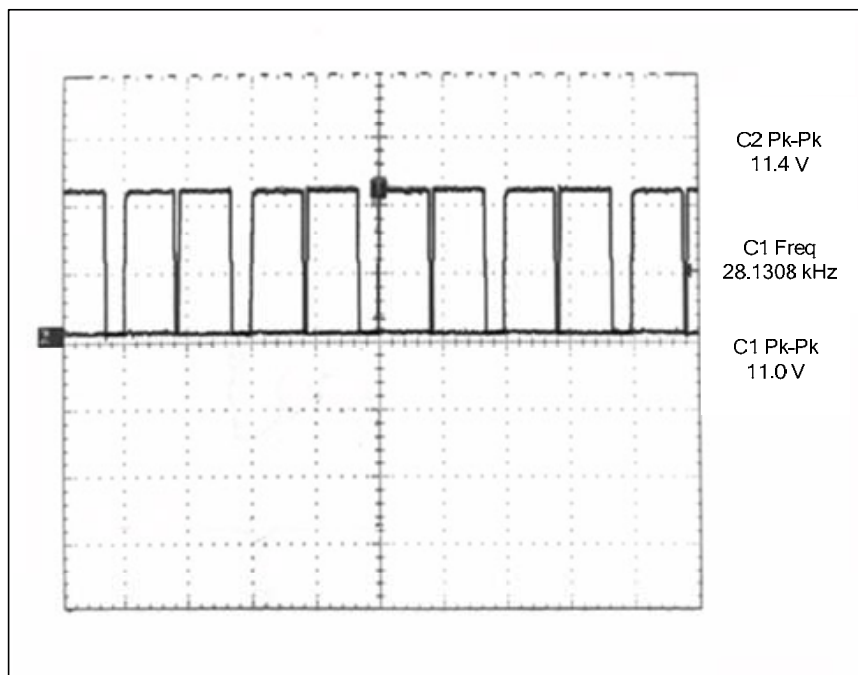
สัญญาณ OUT B เปรียบเทียบกับ OUT C รูปที่ 4.10 แสดงลักษณะของสัญญาณ OUT B เปรียบเทียบกับ OUT D และรูปที่ 4.11 แสดงลักษณะของสัญญาณ OUT C เปรียบเทียบกับสัญญาณ OUT D ตามลำดับ

ดังที่กล่าวมาแล้วว่าหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงนั้นสวิทช์ตัวที่ 1 จะทำงานพร้อมกันกับสวิทช์ตัวที่ 4 และสวิทช์ตัวที่ 2 จะทำงานพร้อมกันกับสวิทช์ตัวที่ 3 ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาจากไอซี UC3879N ของ OUT A ที่ทำงานพร้อมกันกับ OUT D และ OUT B ที่ทำงานพร้อมกันกับ OUT C นั้น เมื่อนำมาซ้อนกันจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 สัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาจากไอซี UC3879N ของ OUT A ที่ทำงานพร้อมกันกับ OUT D และ OUT B ที่ทำงานพร้อมกันกับ OUT C

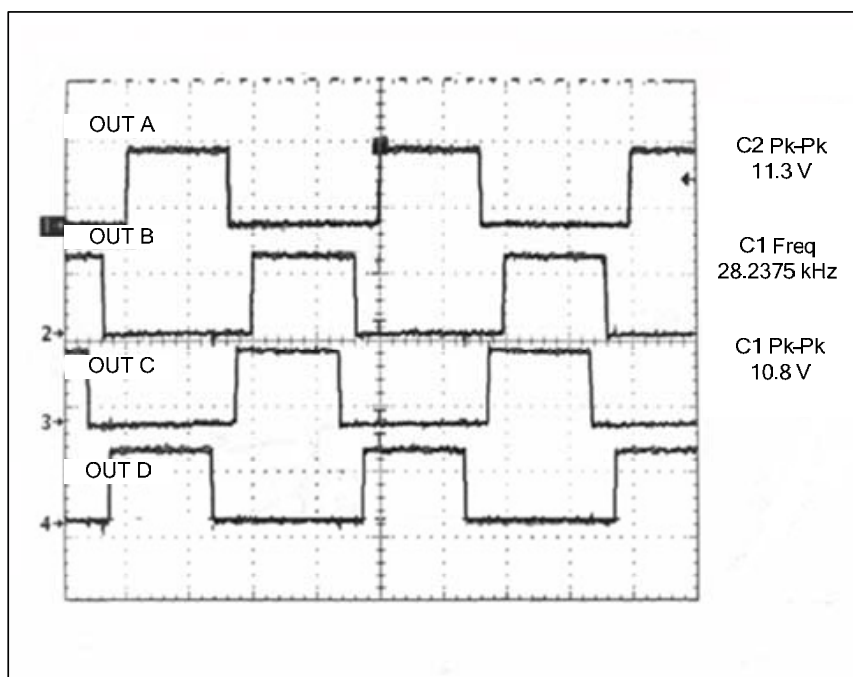
ในทำนองเดียวกันหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง สวิทช์ตัวที่ 1 จะทำงานไม่พร้อมกันกับสวิทช์ตัวที่ 2 และสวิทช์ตัวที่ 3 สวิทช์ตัวที่ 2 ทำงานไม่พร้อมกัน กับสวิทช์ตัวที่ 1 และสวิทช์ตัวที่ 4 ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาจากไอซี UC3879N ของ OUT A ที่ทำงานไม่พร้อมกันกับ OUT B และ OUT C สัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาจากไอซี UC3879N ของ OUT B ที่ทำงานไม่พร้อมกันกับ OUT A และ OUT B สัญญาณที่ได้นั้นเมื่อนำมาซ้อนกันจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.13 และสัญญาณทั้งสองของไอซี UC3879N แสดงไว้ในรูปที่ 4.14



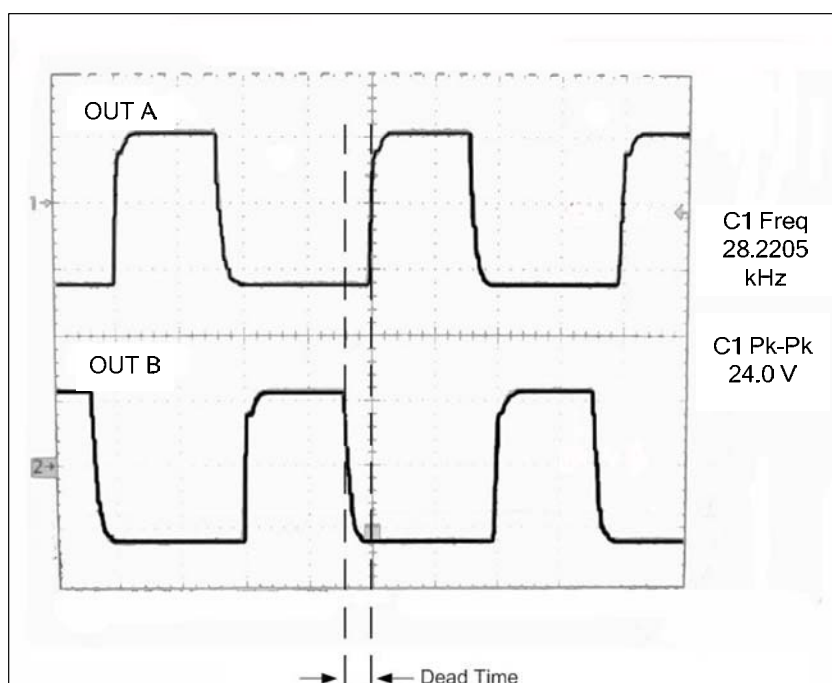
รูปที่ 4.13 สัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาจากไอซี UC3879N ของ OUT A ที่ทำงานไม่พร้อมกัน
OUT B และ OUT B ที่ทำงานพร้อมกัน OUT D

4.3 การทดสอบภาคขับเคลื่อนของไอจีบีที

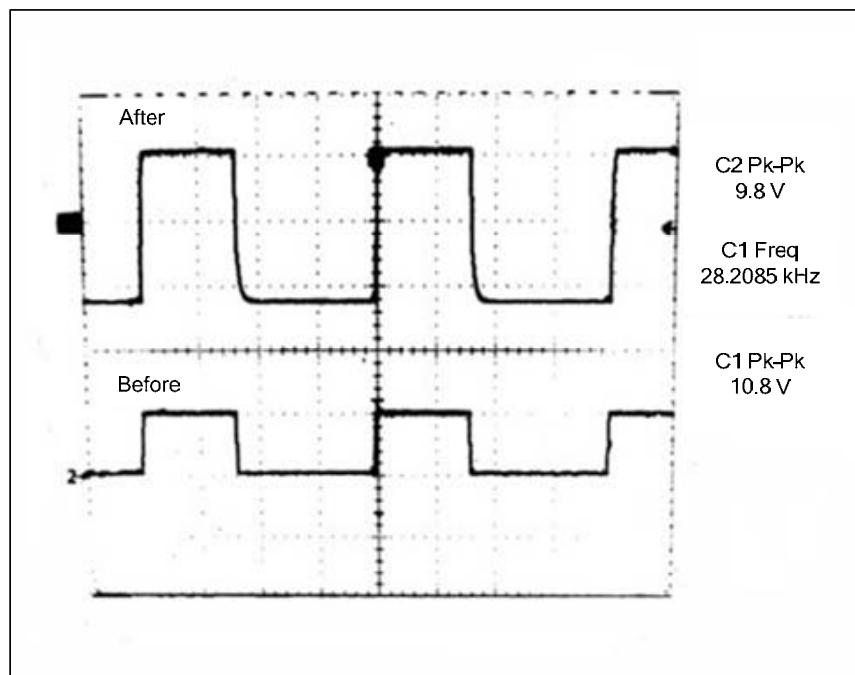
เนื่องจากสัญญาณที่จะนำไปขับไอจีบีทีให้ทำงานในวงจรอินเวอร์เตอร์นั้น สัญญาณในการขับอุปกรณ์สวิตช์แต่ละคู่จะต้องมีการเพื่อกเวลาซึ่งกันและกันเอาไว้ (dead time) ดังรูป 4.15 โดยวิทยานิพนธ์นี้ อาศัยหลักการทำงานแบบ PWM ที่มีรีจิสเตอร์ในการกำหนดค่าเวลาในส่วนนี้อยู่แล้ว โดยในรูปที่ 4.16 เป็นสัญญาณก่อนที่จะเข้าวงจรขยายสัญญาณ เปรียบเทียบกับสัญญาณหลังจากผ่านวงจรขยายสัญญาณของ OUT A



รูปที่ 4.14 สัญญาณทั้งสี่ของไอซี UC3879N



รูปที่ 4.15 สัญญาณขับเกทไอจีบีทีที่ออกจากไอซี UC3879N ที่ OUT A เปรียบเทียบกับ OUT B



รูปที่ 4.16 สัญญาณก่อนและหลังวงจรขยายสัญญาณ ของ OUT A

4.4 การทดสอบอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง

เราสามารถจำลองการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงได้ตามลำดับดังรูป 4.17

Mode 1: เมื่อเริ่มทำงาน SW4 ทำงานก่อน

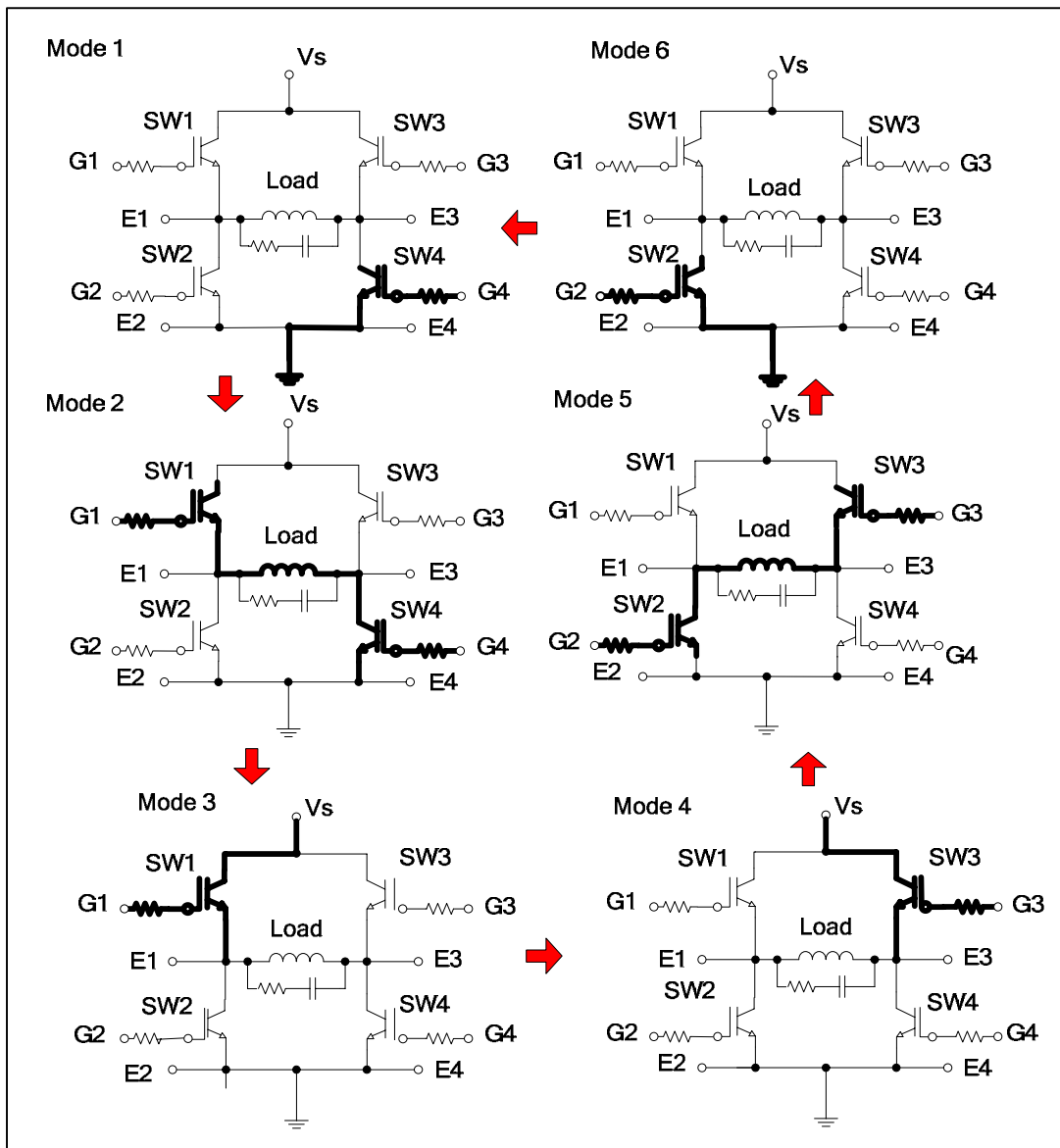
Mode 2: ที่ T_{ion} : SW1 เริ่มทำงาน และ SW4 ยังคงทำงานอยู่ มีกระแสไหลผ่านไปยังขดลวดเหนี่ยวนำ จนกระทั่งมีแรงดันตกคร่อม เท่ากับ 2 เท่าของแรงดันอินพุต (V_s)

Mode 3: ที่ T_{4off} : SW1 ยังคงทำงาน แต่ SW4 หยุดทำงาน จนกระทั่งขดลวดเหนี่ยวนำเกิดการยุบตัวของสนามแม่เหล็ก และแรงดันคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำเป็นศูนย์

Mode 4: SW1 หยุดทำงาน และ SW3 เริ่มทำงาน

Mode 5: ที่ T_{3on} : SW3 ทำงานพร้อมกันกับ SW2 ทำให้มีกระแสไหลไปยังขดลวดเหนี่ยวนำ จนกระทั่งมีแรงดันตกคร่อม เท่ากับ 2 เท่าของแรงดันอินพุต

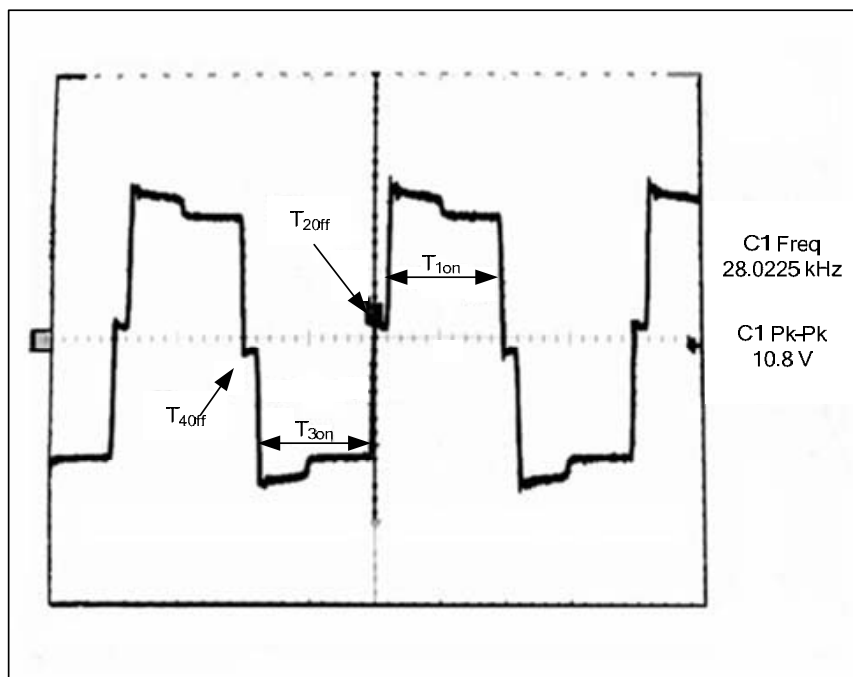
Mode 6: ที่ T_{2off} : SW3 หยุดทำงานแต่ SW2 ยังคงทำงาน จนกระทั่งขดลวดเหนี่ยวนำเกิดการยุบตัวของสนามแม่เหล็ก และแรงดันคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำเป็นศูนย์



รูปที่ 4.17 ลำดับการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง

เมื่อจบการทำงานของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูงใน Mode 6 แล้วเครื่องจะลำดับการทำงานตาม Mode 1 ต่อไป

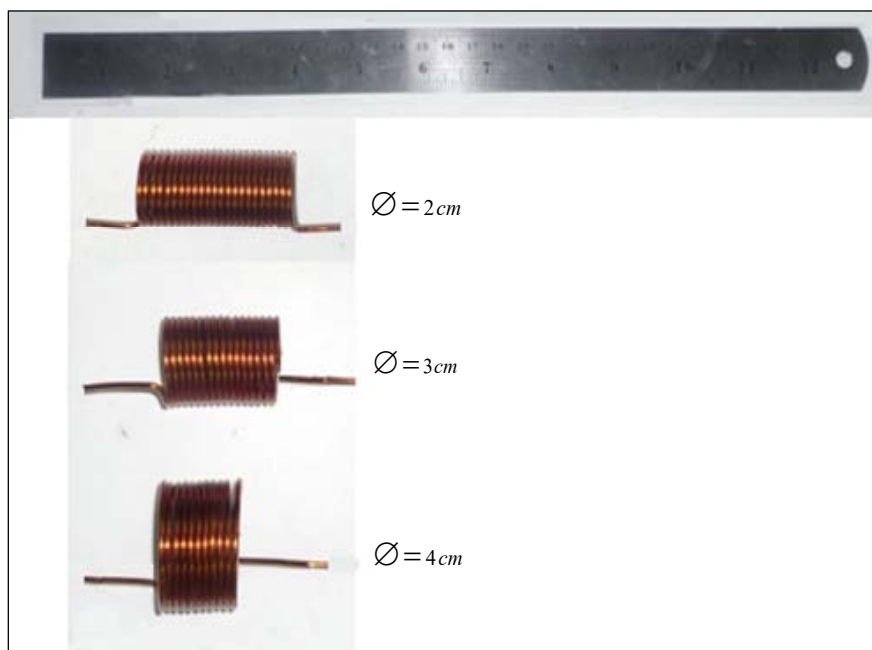
จากการจัดลำดับการทำงานของอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง ที่ขดลวดเหนี่ยวนำจะมีลักษณะของสัญญาณดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ลักษณะสัญญาณที่ขดลวดเหนี่ยวนำ

4.5 ผลการทดลอง

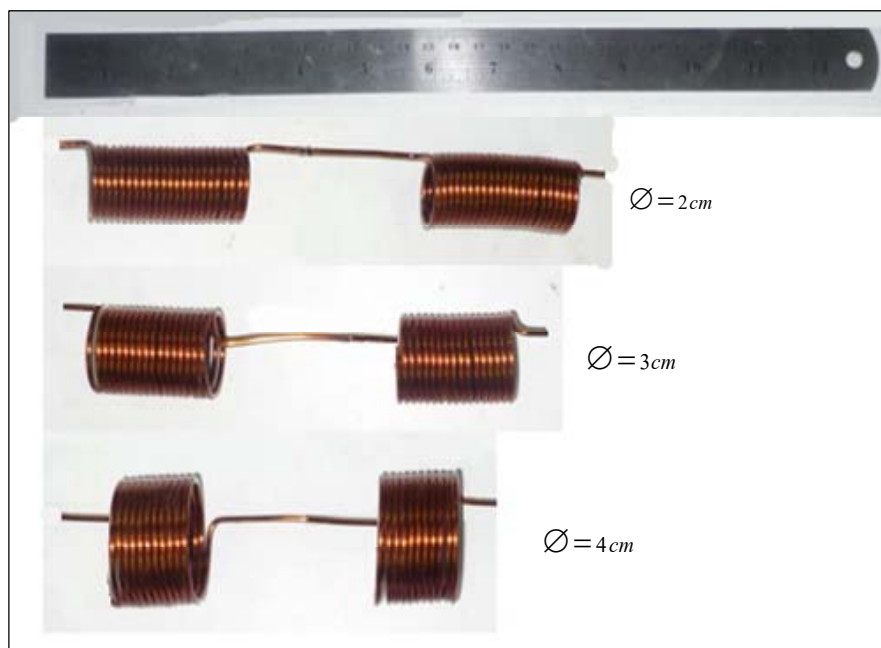
ในการทดลองการให้ความร้อนด้วยเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ที่มีการทำงานแบบฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ วัดผลจริงกับขดลวดเหนี่ยวนำแบบแถวลำดับที่ได้ออกแบบตามการจำลองผลทั้ง 15 แบบ โดยจะวัดอุณหภูมิที่บริเวณผิวของชิ้นงานเป็นองศาเซลเซียส ด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermal Imaging Cameras) TESTO 880 ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบเป็นเหล็กโครงสร้างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ยาว 35 เซนติเมตร ความถี่ที่ใช้ในการทดลองคงที่ 28 kHz กำลังไฟฟ้า 200 W ระยะเวลาในการให้ความร้อนกับชิ้นงาน 120 วินาที หลังจากนั้นจึงนำออกจากขดลวดเพื่อถ่ายภาพความร้อน เส้นลวดที่ใช้ทำขดลวดเป็นลวดทองแดงเบอร์ 13 พื้นที่หน้าตัดของขดลวดเหนี่ยวนำในการทดลอง 2.5 ตารางมิลลิเมตร โดยที่ขดลวดเหนี่ยวนำแบบเดี่ยวในการทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2, 3 และ 4 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 4.19 ขดลวดเหนี่ยวนำแบบคู่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2, 3 และ 4 เซนติเมตร มีระยะห่างระหว่างขดลวด 5 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 4.20 และลักษณะของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแถวลำดับ 3 แถวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2, 3 และ 4 เซนติเมตร มีระยะห่างระหว่างแถวลำดับ 5 เซนติเมตรเช่นกัน มีลักษณะดังรูปที่ 4.21 ตามลำดับ ลักษณะของการพันขดลวดเหนี่ยวนำแต่ละแบบ ทั้งแบบทิศทางเดียวกันทั้งหมด และทิศทางตรงข้ามกันในแถวลำดับที่ 2 แสดงดังรูปที่ 4.22 และ 4.23



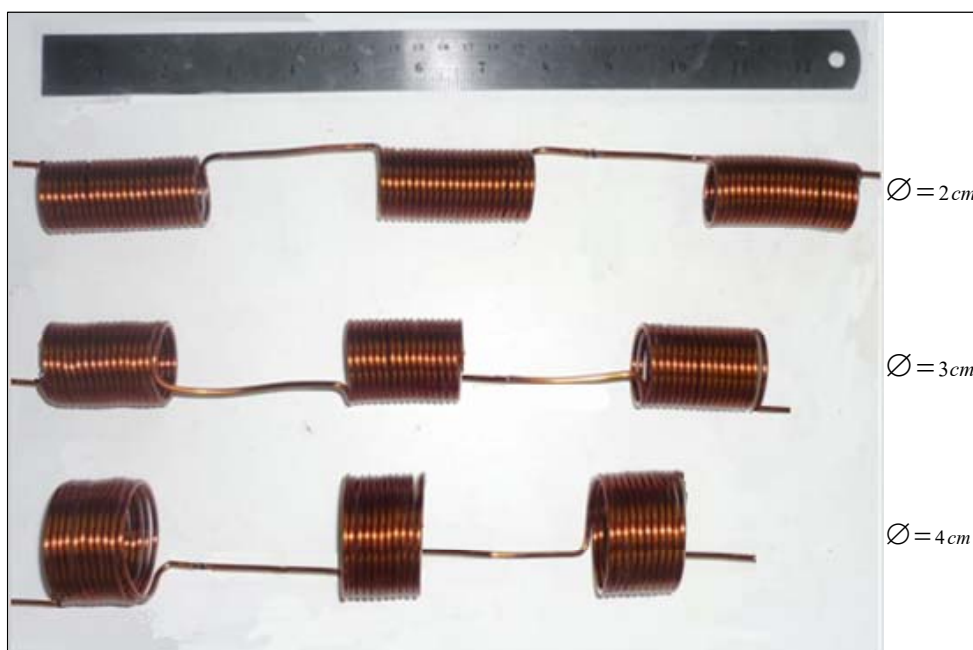
รูปที่ 4.19 ลักษณะของขดลวดเหนี่ยวนำแบบเดี่ยวขนาดต่าง ๆ

ทั้งนี้ขดลวดเหนี่ยวนำแต่ละชนิดทั้งแบบเดี่ยว แบบคู่ และแบบแถวลำดับ 3 แถวลำดับยังมีค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดแต่ละชนิดเท่ากันอีกด้วย กล่าวคือขดลวดเหนี่ยวนำแบบเดี่ยวทั้ง 3 ขนาด มีค่าความเหนี่ยวนำประมาณ $13.6 \mu H$ ขดลวดเหนี่ยวนำแบบคู่ทั้ง 3 ขนาดมีค่าความเหนี่ยวนำประมาณ $27.7 \mu H$ และขดลวดเหนี่ยวนำแถวลำดับแบบ 3 แถวลำดับทั้ง 3 ขนาดมีค่าความเหนี่ยวนำประมาณ $41.8 \mu H$ ทั้งนี้เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบการให้ความร้อนกับชิ้นงานของขดลวดที่มีการพันขดลวดในทิศทางเดียวกัน และขดลวดที่มีการพันในทิศตรงข้ามกัน

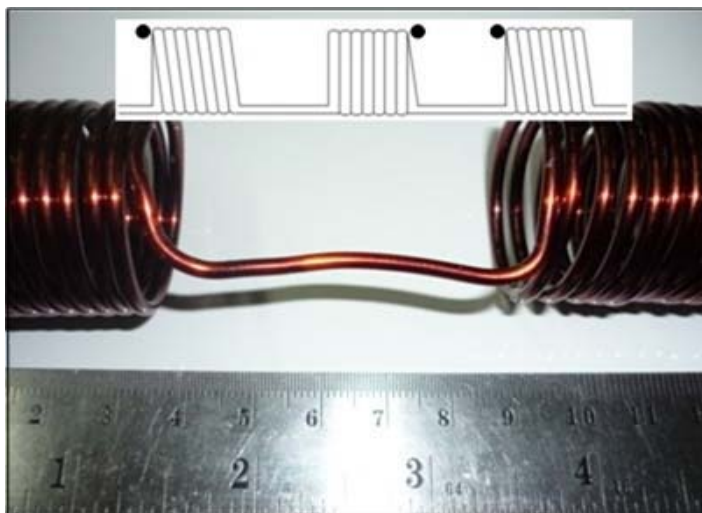
ขณะทำการทดลอง ผู้ทดลองพยายามกำหนดให้อุณหภูมิเริ่มต้นของชิ้นงานในการวิจัยประมาณ 25-27 องศาเซลเซียส ส่วนหลังจากให้ความร้อนเป็นเวลา 120 วินาทีแล้ว เมื่อนำชิ้นงานออกจากขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อถ่ายภาพความร้อนนั้นไม่เกิน 5 วินาที เพื่อให้ชิ้นงานมีการถ่ายเทความร้อนสู่อากาศให้น้อยที่สุดนั่นเอง



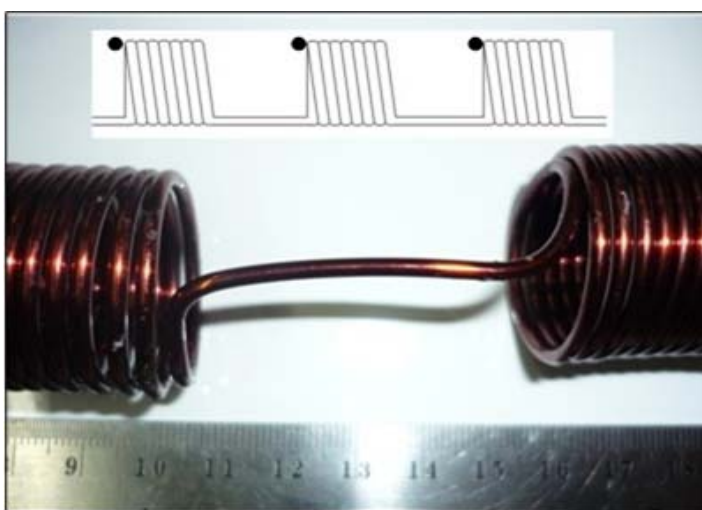
รูปที่ 4.20 ลักษณะของขดลวดเหนี่ยวนำแบบคู่ขนาดต่าง ๆ



รูปที่ 4.21 ลักษณะของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแถวลำดับ 3 แถวลำดับขนาดต่าง ๆ



รูปที่ 4.22 การพันขดลวดเหนี่ยวนำในทิศทางตรงข้ามกันในแกนลำดับที่ 2

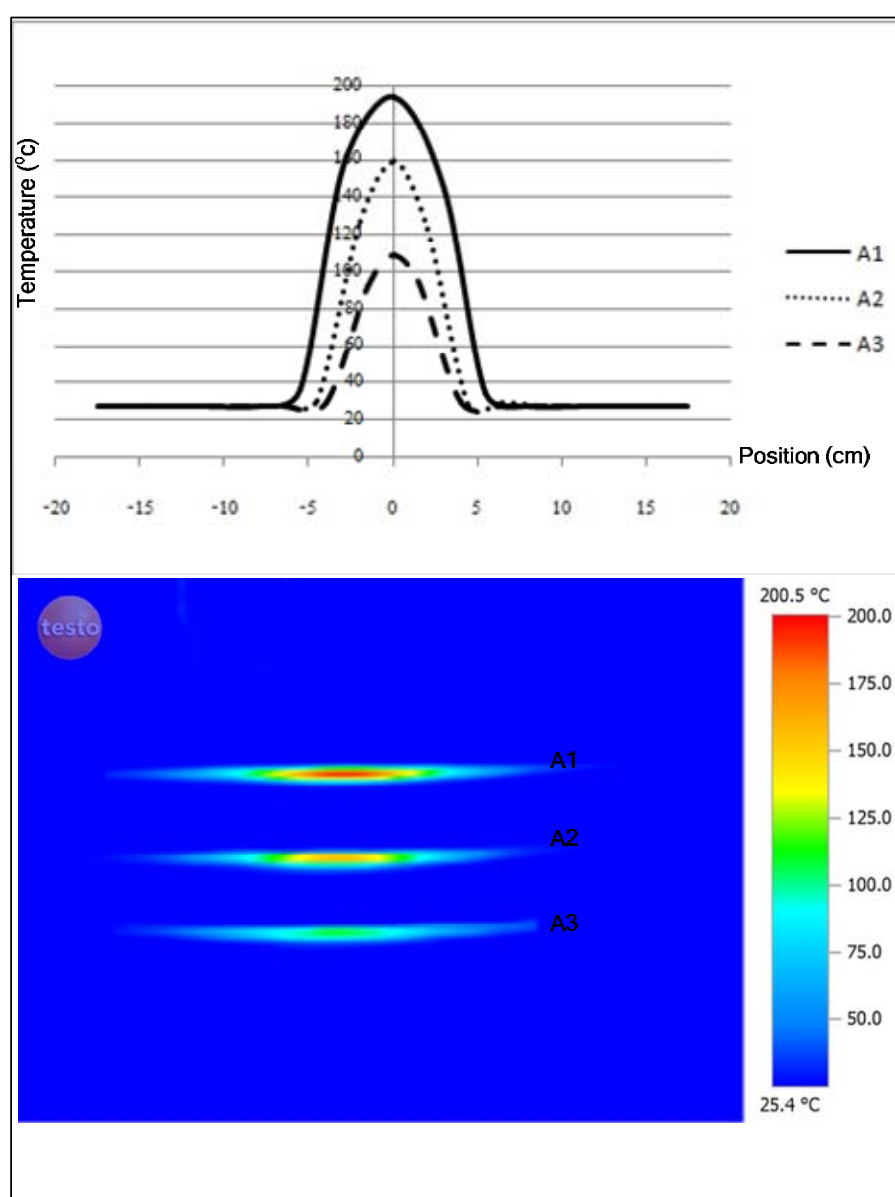


รูปที่ 4.23 การพันขดลวดเหนี่ยวนำในทิศทางเดียวกัน

ในการทดลองจะวัดอุณหภูมิโดยวัดที่บริเวณผิวของชิ้นงานเป็นองศาเซลเซียส ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบเป็นเหล็กทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ยาว 35 เซนติเมตร ความถี่ที่ใช้ในการทดลองคงที่ 28 kHz กำลังไฟฟ้าขาเข้า 200 W จากการทดลองเราสามารถแบ่งตามลักษณะของขดลวดเหนี่ยวนำได้ ดังนี้

4.5.1 ขดลวดเหนี่ยวนำแบบเดี่ยว

จากผลการทดลองเราสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นบนชิ้นงานตามความยาวจริงได้ดังรูปที่ 4.24 เห็นได้ว่าขดลวดเหนี่ยวนำชนิด A1 สามารถให้ความร้อนได้สูงที่สุด 193.9 องศาเซลเซียส ที่ตำแหน่งกลางของขดลวดเหนี่ยวนำ ขดลวดเหนี่ยวนำ A2 สามารถให้ความร้อนสูงสุด 158.7 องศาเซลเซียสบริเวณกลางขดลวด และขดลวดเหนี่ยวนำ A3 ให้ความร้อนได้สูงสุด 108.9 องศาเซลเซียสในบริเวณเดียวกัน

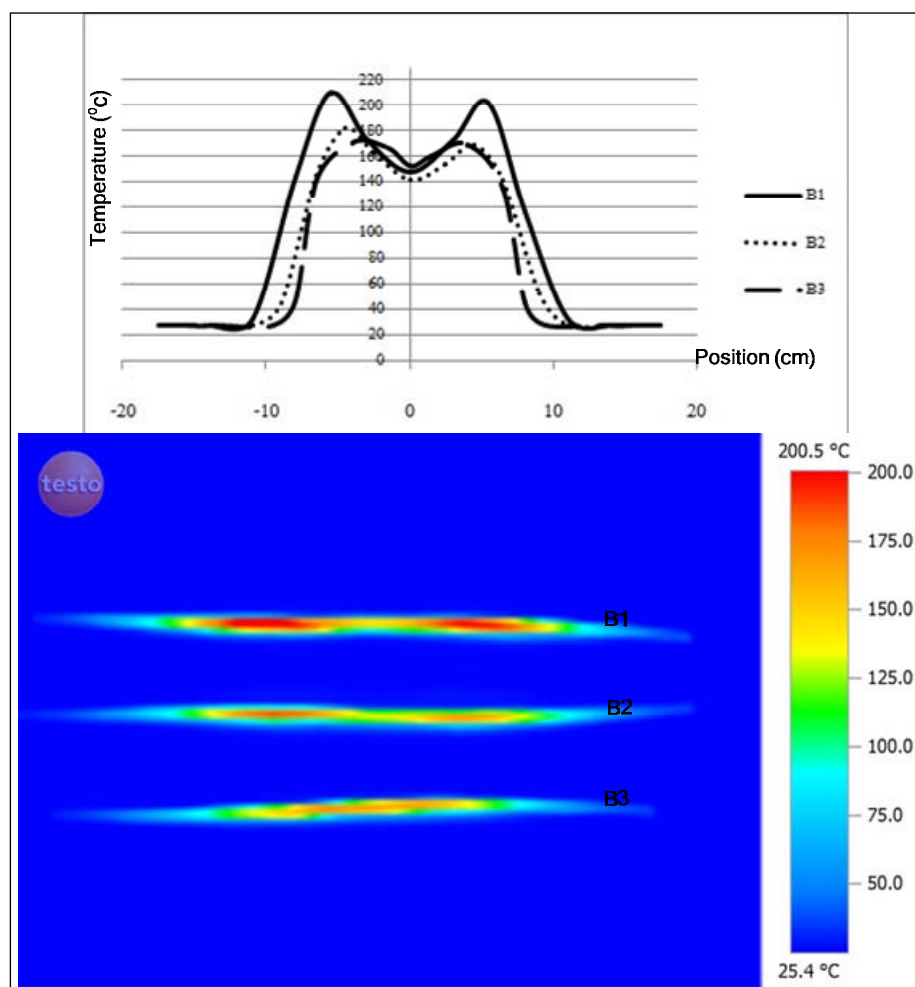


รูปที่ 4.24 อุณหภูมิบนผิวชิ้นงานของขดลวดเหนี่ยวนำแบบเดี่ยว

4.5.2 ขดลวดเหนี่ยวนำแบบคู่

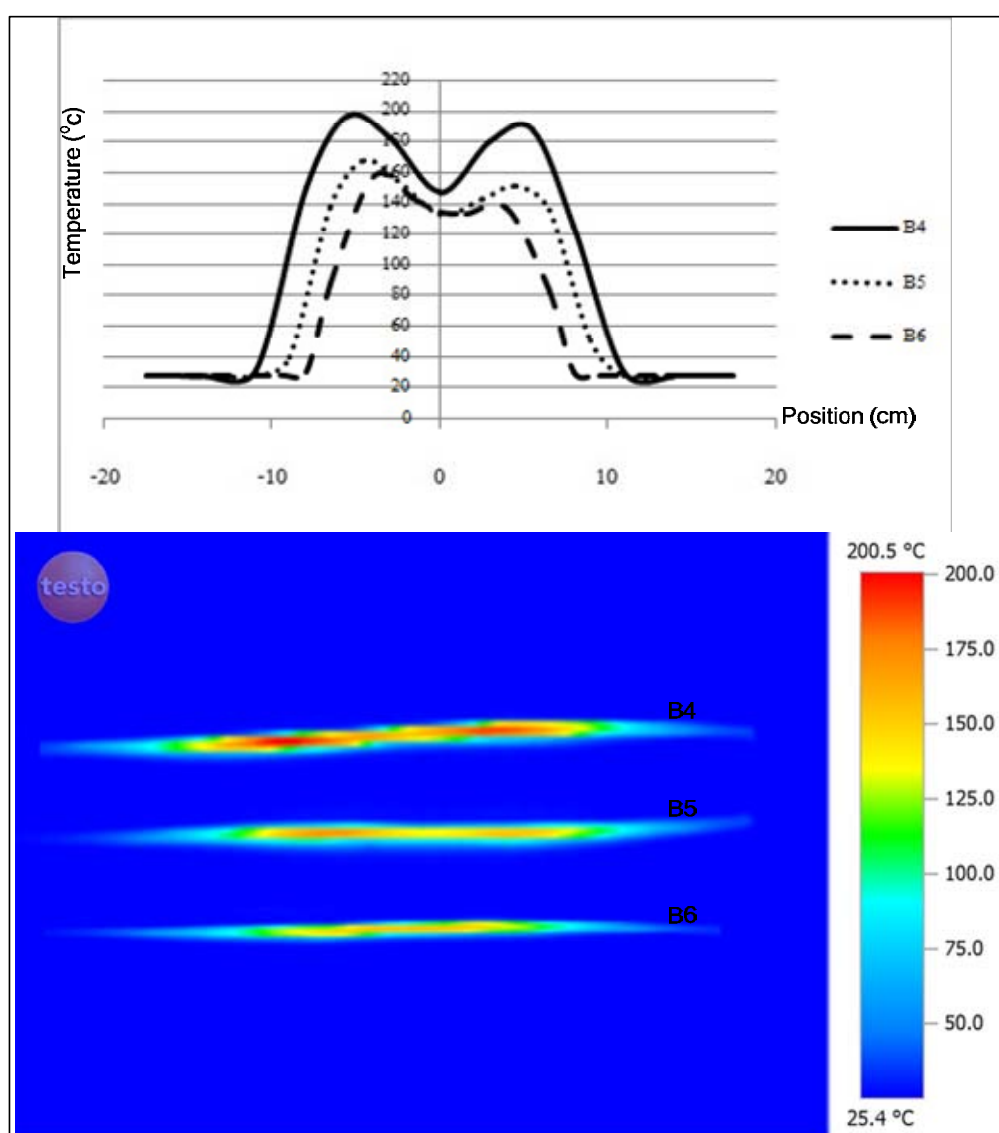
ขดลวดเหนี่ยวนำแบบคู่ในการทดลองจริงนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณีด้วยกัน คือขดลวดเหนี่ยวนำแบบคู่ที่พันในทิศทางเดียวกันทั้งหมด และขดลวดเหนี่ยวนำแบบคู่ที่มีแฉกลำดับที่ 1 และแฉกลำดับที่ 2 พันทิศในทางตรงข้ามกัน

รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ผิวของชิ้นงานในตำแหน่งต่าง ๆ ของขดลวดเหนี่ยวนำแบบคู่ที่พันขดลวดเหนี่ยวนำในทิศทางเดียวกันทั้งหมดจะเห็นว่า ขดลวดเหนี่ยวนำ B1 สามารถให้ความร้อนกับชิ้นงานได้สูงสุด 209.9 องศาเซลเซียส บริเวณขดลวดเหนี่ยวนำแฉกลำดับที่ 1 ขดลวดเหนี่ยวนำ B2 สามารถให้ความร้อนสูงสุดอยู่ที่ 181.9 องศาเซลเซียส บริเวณขดลวดเหนี่ยวนำแฉกลำดับที่ 1 และขดลวดเหนี่ยวนำ B3 ให้ความร้อนสูงสุดกับชิ้นงาน 170.9 องศาเซลเซียส บริเวณขดลวดเหนี่ยวนำแฉกลำดับที่ 1 เช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.25 อุณหภูมิบนผิวชิ้นงานของขดลวดเหนี่ยวนำแบบคู่ที่พันขดลวดในทิศทางเดียวกัน

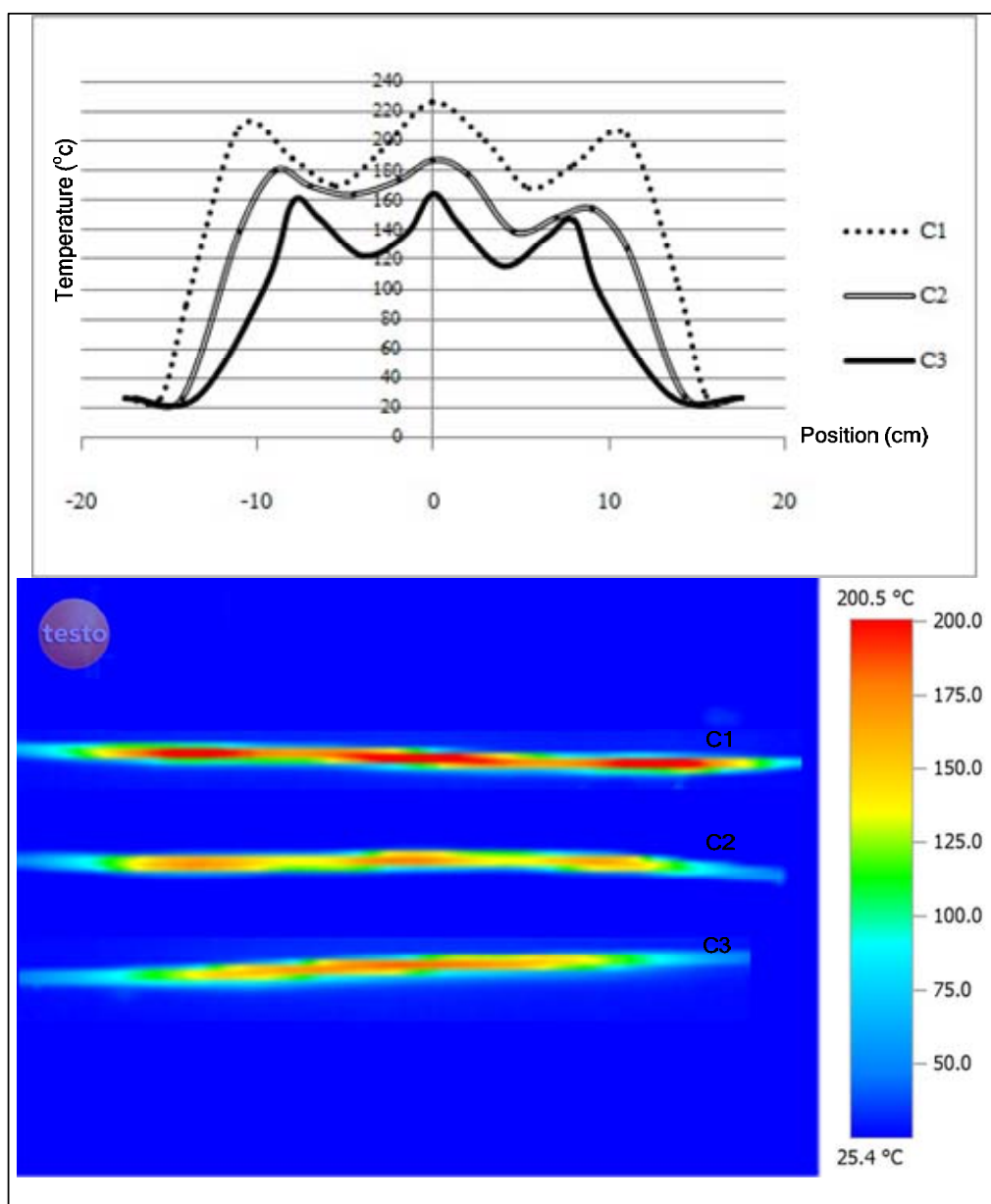
ในทำนองเดียวกันขดลวดเหนี่ยวนำแบบคู่ที่มีการพันขดลวดในทิศทางตรงข้ามกันนั้นอุณหภูมิสูงสุดบนผิวของชิ้นงาน 196.5 องศาเซลเซียส เกิดที่ขดลวดแถวลำดับที่ 1 ของขดลวดเหนี่ยวนำแบบ B4 ส่วนของขดลวดเหนี่ยวนำ B5 อุณหภูมิสูงสุดเกิดที่ขดลวดเหนี่ยวนำแถวลำดับที่ 1 บนผิวของชิ้นงาน อุณหภูมิอยู่ที่ 167.6 องศาเซลเซียส และ 156.6 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิสูงสุดในบริเวณแถวลำดับที่ 1 ของขดลวดเหนี่ยวนำ B6 ดังรูป 4.26 เห็นได้ว่าการพันขดลวดแถวลำดับแบบคู่ นั้น การพันขดลวดในทิศทางเดียวกันสามารถให้อุณหภูมิในชิ้นงานได้มากที่สุด



รูปที่ 4.26 อุณหภูมิบนผิวชิ้นงานของขดลวดเหนี่ยวนำแบบคู่ที่พันขดลวดในทิศทางตรงข้ามกัน

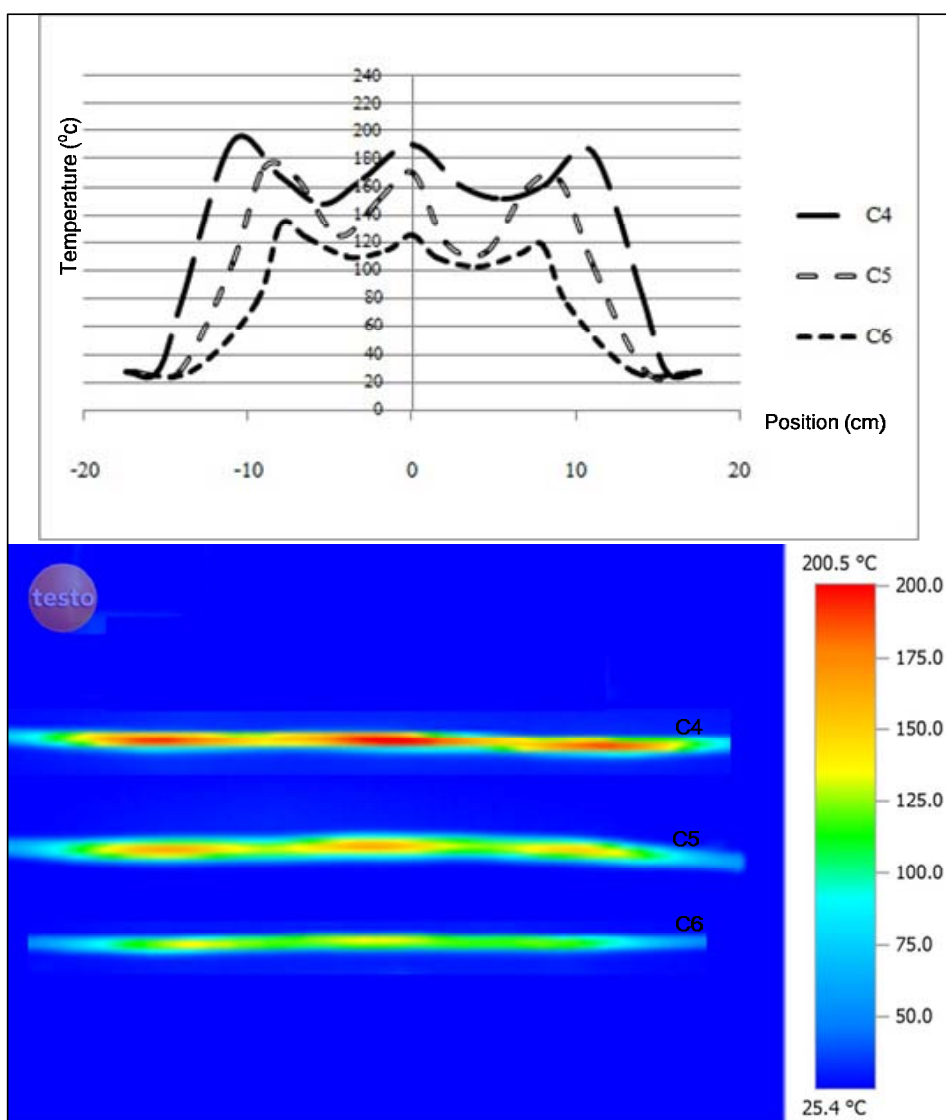
4.5.3 ขดลวดเหนี่ยวนำแฉวลำดับแบบ 3 แฉวลำดับ

ขดลวดเหนี่ยวนำแฉวลำดับแบบ 3 แฉวลำดับ ในการทดลองจริงนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณีด้วยกันคือขดลวดเหนี่ยวนำแฉวลำดับแบบ 3 แฉวลำดับ ที่พันในทิศทางเดียวกันทั้งหมด และขดลวดเหนี่ยวนำแฉวลำดับแบบ 3 แฉวลำดับ ที่มีแฉวลำดับที่ 2 พันทิศในทางตรงข้ามกับกับแฉวลำดับที่ 1 และแฉวลำดับที่ 3

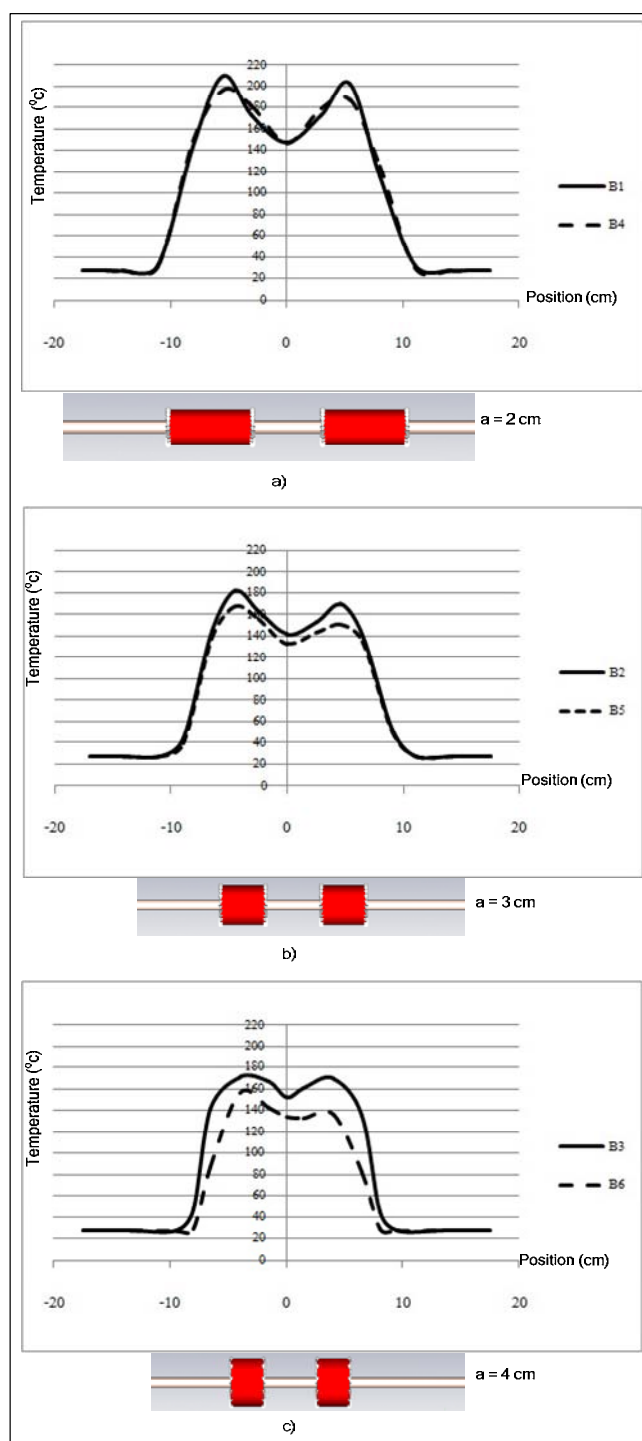


รูปที่ 4.27 อุณหภูมิบนผิวชิ้นงานของขดลวดเหนี่ยวนำแบบ 3 แฉวที่พันขดลวดในทิศทางเดียวกัน

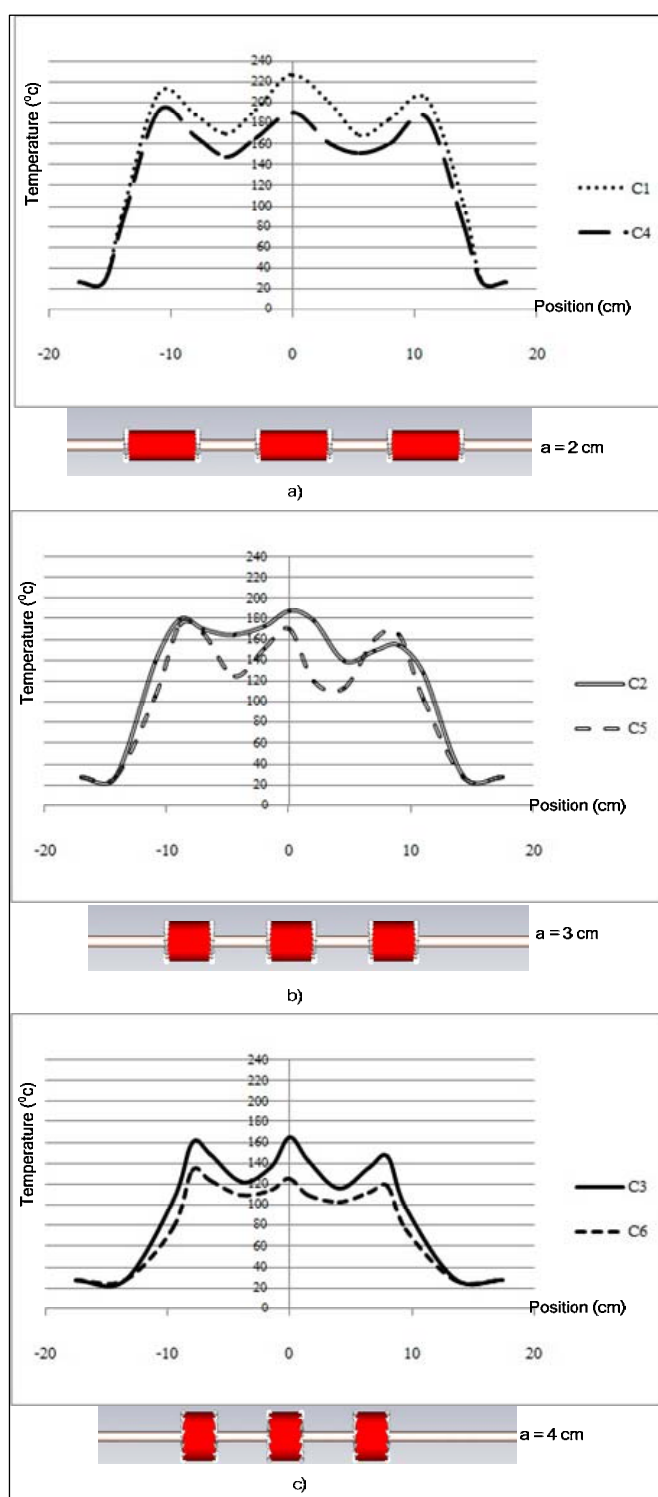
อุณหภูมิบนผิวของชิ้นงานของขดลวดเหนี่ยวนำแบบ 3 แกวลำดับที่มีการพันขดลวดในทิศทางเดียวกันทั้งหมดนั้นแสดงดังรูปที่ 4.27 อุณหภูมิที่ผิวของชิ้นงานสูงสุดเกิดที่แกวลำดับกลางของขดลวดเหนี่ยวนำชนิด C1 อุณหภูมิ 227.3 องศาเซลเซียส ส่วนขดลวดชนิด C2 และ C3 มีอุณหภูมิสูงสุด 187.5 องศาเซลเซียส และ 165 องศาเซลเซียส ตามลำดับในบริเวณขดลวดแกวลำดับที่ 2 เช่นเดียวกัน แต่เมื่อมีการพันขดลวดแบบแกวลำดับ 3 แกวลำดับแบบทิศทางการพันขดลวดสลับกันในแกวลำดับที่ 2 แล้ว อุณหภูมิสูงสุดเกิดที่ขดลวด C4



รูปที่ 4.28 อุณหภูมิบนผิวชิ้นงานของขดลวดเหนี่ยวนำแบบ 3 แกวลำดับที่พันขดลวดในทิศทางตรงข้ามกันในแกวลำดับที่ 2



รูปที่ 4.29 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของขดลวดเหนี่ยวนำแบบคู่เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 3 และ 4 เซนติเมตร ที่พื้นที่ขดลวดแตกต่างกัน



รูปที่ 4.30 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของขดลวดเหนี่ยวนำแบบ 3 แฉกลำดับเส้นผ่านศูนย์กลาง
2 3 และ 4 เซนติเมตร ที่พื้นที่ขดลวดแตกต่างกันสลับกัน

อุณหภูมิ 192.3 องศาเซลเซียส บริเวณแถวลำดับที่ 1 ส่วนของขดลวด C5 และ ขดลวด C6 อุณหภูมิสูงสุดเกิดในบริเวณแถวลำดับที่ 1 เช่นกัน อุณหภูมิ 173.6 องศาเซลเซียส และ 133.5 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยแสดงดังรูปที่ 4.28 แสดงให้เห็นว่าเกิดการหักล้างกันของสนามแม่เหล็กมากขึ้นเมื่อขดลวดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการจำลองผล

เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบรูปที่ 4.29 a) b) และ c) เป็นอุณหภูมิของขดลวดแบบแถวลำดับแบบคู่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 3 และ 4 เซนติเมตร ซึ่งมีการพันขดลวดต่างกัน ขดลวดทั้ง 3 ขนาดมีอุณหภูมิสูงสุดที่ขดลวดที่มีการพันในทิศทางเดียวกัน เช่นเดียวกับขดลวดแบบแถวลำดับแบบ 3 แถว ดังรูปที่ 4.30 a) b) และ c) โดยรูปที่ 4.30 a) เป็นการเปรียบเทียบอุณหภูมิของขดลวดเหนี่ยวนำแบบ 3 แถวลำดับ เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร อุณหภูมิสูงสุด 183.6 องศาเซลเซียส เกิดที่ขดลวด แถวลำดับที่ 2 ของขดลวด C1 ในขณะที่ ขดลวดเหนี่ยวนำ C4 มีอุณหภูมิสูงสุดเพียงแค่ 144.7 องศาเซลเซียส บริเวณขดลวดเหนี่ยวนำแถวลำดับที่ 2 เช่นเดียวกัน รูปที่ 19 b) เป็นอุณหภูมิของขดลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร อุณหภูมิสูงสุด 157 °c เกิดที่ขดลวดแถวลำดับที่ 2 ของขดลวด C2 แต่ในขดลวดแบบ C5 อุณหภูมิสูงสุด 128.8 องศาเซลเซียส เกิดที่ขดลวดแถวลำดับที่ 1 และรูป 19 c) เป็นอุณหภูมิของขดลวดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร อุณหภูมิสูงสุด 128.2 องศาเซลเซียส เกิดที่ขดลวดแถวลำดับที่ 2 ของขดลวดเหนี่ยวนำ C3 แต่ในขดลวดเหนี่ยวนำแบบ C6 อุณหภูมิสูงสุด 100 องศาเซลเซียส เกิดที่ขดลวดแถวลำดับที่ 1

จากการทดลองจะเห็นว่าการพันขดลวดในทิศทางสลับกันนั้นทำให้อุณหภูมิของชิ้นงานเพิ่มขึ้นน้อยกว่าการพันขดลวดแบบทิศเดียวกันทั้งหมดจากการทดลองจะเห็นว่าการพันขดลวดในทิศทางเดียวกันนั้น อุณหภูมิของชิ้นงานเพิ่มขึ้นอย่างมาก แสดงให้เห็นว่าการพันขดลวดทิศทางเดียวกันนั้นเกิดการเสริมกันของสนามแม่เหล็ก ในทางตรงกันข้าม หากพันขดลวดในทิศทางตรงข้ามกันจะเกิดการหักล้างกันของสนามแม่เหล็กทำให้อุณหภูมิของชิ้นงานนั้นลดลงและอุณหภูมิสูงสุดของชิ้นงานเกิดที่ขดลวดแถวลำดับที่ 1 หรือแถวลำดับที่ 2 แทน โดยที่การเสริมและหักล้างกันของสนามแม่เหล็กนี้ จะเห็นผลมากขึ้นเมื่อขดลวดเหนี่ยวนำแบบแถวลำดับมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้นอีกด้วย

จากการจำลองผลและการทดลองจริง เห็นได้ว่าเราสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการให้ความร้อนของขดลวดเหนี่ยวนำได้โดยการเพิ่มแถวลำดับให้กับขดลวดเหนี่ยวนำโดยที่แถวลำดับเหล่านั้นต้องมีการพันขดลวดในทิศทางเดียวกันทั้งหมด และขดลวดเหนี่ยวนำที่มีค่าความเหนี่ยวนำเท่ากันสามารถให้ความร้อนได้สูงสุดเป็นขดลวดเหนี่ยวนำที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง

ใกล้เคียงชิ้นงานมากที่สุด ส่วนขดลวดที่สามารถแผ่พลังงานได้มากที่สุดเป็นของขดลวดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุด

4.6 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงการทดสอบวงจรในส่วนต่างของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำด้วยสวิตซ์ความถี่สูง นอกจากนี้ยังได้แสดงผลการให้ความร้อนด้วยเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนที่ใช้ขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 15 ชนิด ที่ถูกสร้างขึ้นจริง เพื่อเปรียบเทียบถึงการให้ความร้อนของขดลวดเหนี่ยวนำแต่ละแบบ ผลการทดลองทั้งหมดนี้สามารถยืนยันได้ว่า การพันขดลวดในทิศทางเดียวกันทั้งหมดนั้น ค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเสริมกันทำให้มีกระแสไหลที่ชิ้นงานมากขึ้นในบริเวณแวลลำดับที่ 2 ของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแวลลำดับทั้งสองชนิด และในการพันขดลวดทิศทางตรงข้ามกันในแวลลำดับที่ 2 สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะหักล้างกัน ทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในการพันขดลวดเหนี่ยวนำแบบทิศทางเดียวกันนั้นสูงกว่าการพันขดลวดเหนี่ยวนำในทิศทางตรงข้ามกันสลับกัน และขดลวดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตรสามารถทำให้อุณหภูมิและพื้นที่การให้ความร้อนที่ผิวของชิ้นงานมากที่สุดอีกด้วย

บทที่ 5

สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์

เนื่องจากพลังงานความร้อนทั้งในภาคอุตสาหกรรมและภาคครัวเรือนมีความต้องการมากขึ้น การเหนี่ยวนำความร้อนด้วยสวิตช์ความถี่สูงจึงเป็นพลังงานทางเลือกอีกอย่างหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถทดแทนการให้พลังงานความร้อนทั้งในครัวเรือน และในอุตสาหกรรมได้อย่างดี วิทยานิพนธ์นี้จึงทำการออกแบบและสร้างเครื่องให้ความร้อนวิธีเหนี่ยวนำด้วยสวิตช์ความถี่สูงที่สามารถใช้ได้ทั้งในภาคครัวเรือนและภาคอุตสาหกรรม จากปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การให้ความร้อนจากเครื่องให้ความร้อนวิธีเหนี่ยวนำด้วยสวิตช์ความถี่สูงส่วนใหญ่เป็นแบบ หนึ่งเครื่องต่อหนึ่งขวดวดเหนี่ยวนำ ทำให้มีพื้นที่การให้ความร้อนกับชิ้นงานน้อย ดังนั้น วิทยานิพนธ์นี้จึงเสนอแนวคิดที่จะใช้เครื่องให้ความร้อนวิธีเหนี่ยวนำด้วยสวิตช์ความถี่สูงสามารถเพิ่มพื้นที่การให้ความร้อนได้มากกว่าเดิม โดยการเพิ่มขวดวดเหนี่ยวนำให้เป็นแบบแถวลำดับ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและพื้นที่การให้ความร้อนของเครื่องให้ความร้อนวิธีเหนี่ยวนำด้วยสวิตช์ความถี่สูง ยิ่งไปกว่านั้น วิทยานิพนธ์นี้ยังสนใจการเสริมและหักล้างกันของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขวดวดเหนี่ยวนำแบบแถวลำดับแต่ละแบบ ที่ส่งผลให้เกิดการเสริมและหักล้างกันของสนามแม่เหล็กอีกด้วย ดังนั้น วิทยานิพนธ์นี้จึงต้องการออกแบบขวดวดเหนี่ยวนำที่สามารถให้พลังงานความร้อนได้ดีที่สุด โดยพิจารณาถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขวดวด และทิศทางการพันขวดวดเหนี่ยวนำแต่ละแถวลำดับ เพื่อความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ในครัวเรือนหรือในภาคอุตสาหกรรมต่อไป โดย วิทยานิพนธ์นี้ได้มีการจำลองผลในโปรแกรม CST EM Studio 2009 จากนั้นจึงสร้างขวดวดเหนี่ยวนำแบบแถวลำดับตามการจำลองแบบขึ้นจริง และนำขวดวดเหนี่ยวนำที่สร้างจริงไปทดสอบเพื่อสังเกตการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิบนผิวของชิ้นงานเพื่อยืนยันว่าขวดวดเหนี่ยวนำแบบแถวลำดับสามารถให้ความร้อนได้จริงตามการจำลองผลในโปรแกรม นอกจากนี้ยังสามารถเปรียบเทียบถึงอุณหภูมิที่ผิวของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากทิศทางการพันขวดวดของขวดวดแบบแถวลำดับได้อีกด้วย

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

- 1) เครื่องให้ความร้อนวิธีเหนี่ยวนำด้วยสวิตช์ความถี่สูงควรปรับปรุงแก้ไขให้สามารถควบคุมกำลังความร้อนได้ง่ายขึ้น และละเอียดขึ้น รวมทั้งปรับปรุงเพิ่มเติมส่วนป้องกันอันตรายจากกระแสไฟฟ้า เช่น ไฟตก ไฟเกิน เพื่อความปลอดภัยของเครื่องผู้ใช้งานมากขึ้น
- 2) จากการทดสอบเครื่องให้ความร้อนวิธีเหนี่ยวนำด้วยสวิตช์ความถี่สูง ที่อุปกรณ์สวิตช์ จะเกิดการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนออกมามากทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์สวิตช์ ไม่แสดงออกมาเต็มที่ ดังนั้นถ้าเพิ่มทางเดินให้น้ำไหลผ่านซิงค์เพื่อระบายความร้อนของอุปกรณ์ สวิตช์จะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องดีขึ้น
- 3) ควรปรับปรุงให้เครื่องมีขนาดและน้ำหนักลดลง เพื่อสะดวกต่อการใช้งานมากขึ้น
- 4) ระบบที่สร้างขึ้นควรจะปรับเปลี่ยนความถี่ให้เข้าใกล้ความถี่เรโซแนนซ์ได้ง่าย เพราะเมื่อมีการเปลี่ยนรูปร่างของโหลด หรือชิ้นงานที่ต้องการให้ความร้อน ขนาดและรูปร่างของขดลวดเหนี่ยวนำจะต้องเปลี่ยนไปตามรูปร่างของภาชนะ ดังนั้นเพื่อประสิทธิภาพที่สูงที่สุดแล้วจะต้องมีการปรับความถี่ของเครื่องให้เข้าใกล้กับความถี่เรโซแนนซ์มากที่สุด
- 5) การวัดอุณหภูมิในขณะที่ทำการทดลองค่าที่ได้อาจจะไม่สม่ำเสมอเนื่องจากเทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้วัดเป็นแบบทาบบนผิวของชิ้นงานที่ละแวกลำดับ ดังนั้นควรใช้ภาพถ่ายความร้อนเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ชัดเจนในทุกแวกลำดับของขดลวดพร้อม ๆ กัน

5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

สำหรับ วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องให้ความร้อนวิธีเหนี่ยวนำด้วยสวิตช์ความถี่สูง และขดลวดเหนี่ยวนำแบบแฉวลำดับทั้งหมด 15 กรณี แต่ถ้าเปลี่ยนขนาดของชิ้นงานในการให้ความร้อนจะต้องเปลี่ยนความถี่เรโซแนนซ์ด้วยทุกครั้ง ดังนั้นสำหรับงานวิจัยในอนาคตจึงควรมีการออกแบบให้เครื่องให้ความร้อนวิธีเหนี่ยวนำด้วยสวิตช์ความถี่สูงสามารถใช้งานได้ครอบคลุมขนาดของชิ้นงานมากขึ้น โดยไม่ต้องเปลี่ยนความถี่เรโซแนนซ์

รายการอ้างอิง

- Bottomley, P., and Andrew, E. (1978). **RF Magnetic Field Penetration Phase Shift and Power Dissipation in Biological Tissue : Implications for NMR Imaging**. Phys. Med. Biol., Vol. 23 : pp. 630-643.
- Constantine, Balanis. (1997) **Advanced Engineering Electromagnetic**. New York Wiley.
- Davies, E.J. (1990) **Conduction and Induction Heating**. IEE Power Engineering Series II. Peter Peregrinus Ltd.
- Forest, F., Labouré, E., Costa, F., and Gaspard, J. Y. (2000). **Principle of a multi load/single converter system for low power induction heating**. IEEE Trans. Power Electron., Vol.15 : pp 223–230.
- Fujita, H., Uchida, N., and Ozaki, K. (1997). **Zone Controlled Induction Heating (ZCIH) A New Concept in Induction Heating**. Power Electronics and Drive Systems, International Conference, Vol.1 : Page(s):153 – 162.
- Hsu, Chun-Liang. (2007). **Circuit Analysis of Inductive Heating-Device with Half-Bridge Resonanted Inverter**. Proceeding of the 11th WSEAS International Conference on CIRCUITS, Agios Nikolaos, Crete Island, Greece. pp 26-30.
- Hui, Cai, Rong, Xiang-Zhao, Shi, Ping-Wang. (2007). **Analysis and Design of Multiple Frequency IGBT High Frequency Inverter Supply for Induction Heating**. Proceeding of International Conference on Electrical Machine and Systems, PP.118-122.
- Kubota, S., Sato, M., Ito, F., Shimaoka, Y., and K. Nishioka (2008). **Soft Switching PWM Inverter for Induction Heating Applied to Heating of Ferromagnetic Metal**. International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC 2008), pp. 1309-1315.
- Kurose, Y., Muraoka, S., Chandhaket, S., Okuno, A., and Nakaoka, M. (2002). **An improved zero voltage soft switching PWM high-frequency inverter with active inductor snubber for induction heated roller**. Proc. IEE Japan, Vol. 2 : pp. 446-451.

- Kuster, N. and Balzano, Q. (1992). **Energy Absorption Mechanism by Biological Bodies in the Near-Field of Dipole Antennas above 300 MHz**. IEEE Trans. Vehicul. Technol., Vol. VT-41 : pp. 17-23.
- Llorente, S., Monterde, F., Burdio, J.M., and Acero, J. (2002). **A comparative study of resonant inverter topologies used in induction cookers**. Proc. 17th Annual IEEE Allied power electronics Conf., Dallas, USA, Vol. 2 : pp 1168-1174.
- Minoune, S. Fouladgar, J., Centaur B. and Devely, G. (2002). **A 3D Impedance Calculation for an Induction Heating System for Materials with Poor Conductivity**. IEEE Trans. Magnetics, Vol.32, No.3 : pp. 1605-1608.
- Sugimura, H., Ahmed, T., Orabi, M., Lee, Hyun-Woo, and Nakaoka, M. (2004). **Commercial Utility Frequency AC to High Frequency AC Soft Switching Power Conversion Circuit with Non Smoothing DC Link for IH Dual Packs Heater**. Industrial Electronics Society 30th Annual Conference of IEEE., pp. 1155-1160.
- Valery, R., Raymond L., and Micah, A. (2003). **Handbook of Induction Heating Marcel Dekker AG**, New York.

ภาคผนวก ก

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

ปณดพล แยมศรวล และ ชาญชัย ทองโสภา. (2552). การออกแบบสร้างเครื่องต้มน้ำด้วยวิธีเหนี่ยวนำความร้อนโดยใช้หลักการฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32 (EECON-32), ปราจีนบุรี, ประเทศไทย, เล่ม 2 : หน้า PE 037

Yaemsuan, P., and Thongsopa, C. (2010). **Thermals Analysis of Multi-Layered Induction Coils for IH Applications.** (Submitted)

การออกแบบสร้างเครื่องต้มน้ำด้วยวิธีเหนี่ยวนำความร้อนโดยใช้หลักการฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ Design and Construction of Induction Heating Boiler Machine with Full-Bridge Inverter

ปณศพล แยมศรวล และ ชาญชัย ทองโสกา

สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 โทรศัพท์ : 08-5180-7805

E-mail: panotphon@gmail.com and Chan@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความร้อนสูงสำหรับหม้อต้มน้ำ (Boiler) โดยใช้หลักการเหนี่ยวนำทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ชิ้นงาน ซึ่งเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนี้ทำงานด้วยวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ โดยใช้ IGBT เป็นอุปกรณ์สวิตช์ ทำงานที่ความถี่ 21 กิโลเฮิร์ตซ์ ภายใต้การทำงานแบบ ZVS-PWM โดยไม่ใช้หม้อแปลงความถี่สูงภาคสุดท้ายในการเหนี่ยวนำขดลวดให้ความร้อน โดยทำงานที่แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ กระแสอินพุตประมาณ 15 แอมแปร์ เมื่อนำมาทดสอบ โดยการต้มน้ำ 4.5 ลิตร ในเวลา 5 นาที ทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 73 องศาเซลเซียส จากอุณหภูมิเริ่มต้น 25.5 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพของเครื่องประมาณ 93% การออกแบบเครื่องนี้ใช้ต้นทุนต่ำ สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานอุตสาหกรรมให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสำหรับหม้อต้มน้ำต่อไปได้

คำสำคัญ: การเหนี่ยวนำความร้อน, วงจรสวิตช์ความถี่สูง, หม้อต้มน้ำ

Abstract

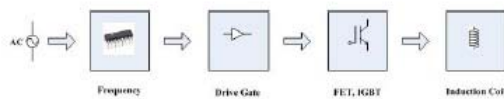
This research present the design and construction on the Induction Heating for boiler machine with electromagnetic induction heating, which incorporates a constant frequency 21 kHz. It operating on ZVS-PWM. A part of high power inverter circuits used IGBT devices for a switch without a high frequency transformer for induction heating. The inductance design and construction a prototype of Induction Heating for boiler machine work for input voltage 220 volts at frequency 50 hertz with a current input approximate 15 Amperes, when the test 4.5 liters of boiling at 5 minutes. It increased water temperatures to 73 degree Celsius from 25.5 degree Celsius therefore efficiency of it about 93 percents. which is more suitable and acceptable for industrial and consumer energy utilizations from a practical point of view.

Keywords : Induction Heating, High frequency Inverter, Boiler

1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้อุปกรณ์กำเนิดพลังงานความร้อนมีอยู่มากมายหลายชนิดด้วยกัน เพื่อตอบสนองความต้องการของชีวิตที่หลากหลายมากขึ้น นอกจากจะมีการพัฒนาให้ตัวผลิตภัณฑ์ใช้งานได้จริงแล้ว รูปแบบของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานความร้อนยังมีหลากหลายประเภท ไม่ว่าจะเป็น ขดลวดความร้อนหรือแก๊ส ในขณะที่การกำเนิดความร้อนโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำได้ถูกนำมาใช้เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ทั้งในครัวเรือน เช่น หม้อต้มน้ำ เตapotไฟฟ้า เครื่องทำน้ำร้อน เป็นต้น และภาคอุตสาหกรรม เช่น การขึ้นรูปโลหะ การหลอมโลหะ เตารีดร้อน เป็นต้น เนื่องจากความก้าวหน้าทางด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงการพัฒนาของอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง ที่สามารถจ่ายโหลดความร้อนเหนี่ยวนำด้วยกำลังระดับสูงมากขึ้น โดยเลือก IGBT เป็นอุปกรณ์สวิตช์ ทำให้อุปกรณ์ถูกพัฒนาให้มีขนาดที่เล็กลง น้ำหนักเบา และวิธีการใช้งานที่ง่าย การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำนี้ ความร้อนเกิดขึ้นที่ผิวของภาชนะ โดยตรง เนื่องจากเกิดกระแสไหลวนที่ผิวของภาชนะ ทำให้เกิดความร้อนได้ในเวลาอันรวดเร็ว คือ เมื่อป้อนกระแสสลับความถี่สูงให้กับขดลวดเหนี่ยวนำที่พันอยู่รอบภาชนะ ขดลวดเหนี่ยวนำนี้จะสร้างสนามแม่เหล็ก (Magnetic flux) เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวน (Eddy current) ขึ้นที่ผิวของภาชนะ และถ่ายเทความร้อนไปยังของเหลวหรือน้ำที่อยู่ในภาชนะนั้นโดยตรง โดยความร้อนที่เกิดขึ้นจะไม่มีการสัมผัสกันทางไฟฟ้าระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำกับภาชนะ ทำให้มีความปลอดภัยต่อการใช้งาน และประสิทธิภาพดีขึ้นมากอีกด้วย [1] ดังนั้นผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษาการเหนี่ยวนำความร้อนความถี่สูง จึงได้ออกแบบและสร้างเครื่องต้มน้ำที่ใช้หลักการเหนี่ยวนำความร้อน โดยเน้นการให้กำลังงานสูงเพื่อประสิทธิภาพของการใช้งาน ลักษณะโครงสร้างของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูงจะเป็นดังรูปที่ 1 ซึ่งจะประกอบด้วยภาคของวงจรแหล่งจ่าย, วงจรกำเนิดความถี่, วงจรสัญญาณขับเคลื่อนขาเกตของ IGBT, วงจรสวิตช์ความถี่สูง และ ส่วนของขดลวดเหนี่ยวนำ รายงานฉบับนี้แสดงให้เห็นถึง การออกแบบและพัฒนาของอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงแบบฟูลบริดจ์โดยใช้อุปกรณ์ประเภท IGBT เป็นอุปกรณ์สวิตช์ความถี่สูง [2] ที่ถูกควบคุมด้วยวงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์ ที่ใช้การทำให้แรงดันไฟฟ้าขณะสวิตช์ทำงานมีค่าเป็นศูนย์ ทำให้การสูญเสียในช่วงนำกระแส

(conduction loss) เป็นศูนย์ (ZVS) โดยไม่ใช้หม้อแปลงภาคท้ายในการเหนี่ยวนำขดลวดให้เกิดความร้อนที่แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ 50 Hz และได้พลังงานเอาต์พุตที่ 2.85 กิโลวัตต์ ประสิทธิภาพประมาณ 93% เพื่อง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องต้มน้ำภาคครัวเรือน หรืออุตสาหกรรมต่อไป



รูปที่ 1 โครงสร้างของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง

2. หลักการของการเหนี่ยวนำความร้อน

การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำเกิดจากทฤษฎีทางไฟฟ้าและความร้อนร่วมกันประกอบไปด้วย การเหนี่ยวนำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic induction), ปรากฏการณ์ที่ผิว (Skin effect) และการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer)

การค้นพบของไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) ที่กล่าวว่าเมื่อมีไฟฟ้ากระแสสลับไหลผ่านขดลวดจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบๆ ขดลวดนั้น โดยที่ปริมาณความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ ขดลวดนั้นจะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวด ซึ่งสนามแม่เหล็กที่เคลื่อนผ่านชิ้นงานเป็นโลหะ จะเหนี่ยวนำให้มีกระแสไหลในชิ้นงาน โดยกระแสส่วนมากจะไหลผ่านชิ้นงานในระดับความลึกผิว, δ (Skin Depth) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กทำให้เกิดมีการเหนี่ยวนำบริเวณผิวของชิ้นงานปิด ทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน โดยระดับความลึกผิวที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ 1 มีค่า 0.246 มิลลิเมตร ที่ความถี่ (f) 21 กิโลเฮิร์ตซ์ หรือประมาณ 1 ใน 4 ของความหนาของภาชนะ โดยที่ ρ คือ ความต้านทานกระแสไฟฟ้า และ μ คือ ค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็ก

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}} \quad (1)$$

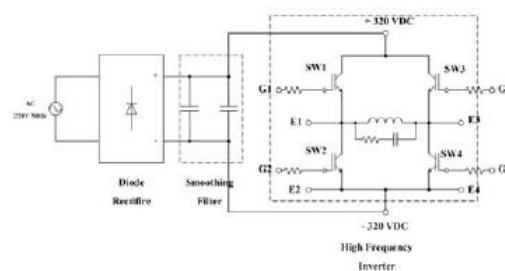
ความร้อนที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสเหนี่ยวนำความต้านทานสมมูลย์ของเส้นทางที่กระแสไหลผ่าน ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทไปบริเวณอื่น โดยการพาความร้อน, การนำความร้อน และการแผ่รังสีที่บริเวณผิว ซึ่งพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้สู่ระบบสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2 [3] โดยที่ P_c คือปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทมาสู่ระบบ (kW), m คือมวล (kg), c คือ ความร้อนจำเพาะในน้ำ (4.187 J/g), T_f คือ อุณหภูมิสุดท้าย ($^{\circ}\text{C}$), T_i คือ อุณหภูมิเริ่มต้น ($^{\circ}\text{C}$) และ t เป็นเวลาที่ใช้ (s)

$$P_w = mc \frac{T_f - T_i}{t} \quad (2)$$

3. การทำงานของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนความถี่สูง

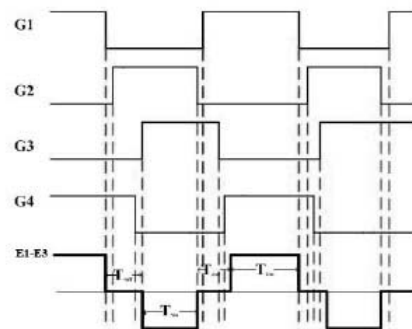
3.1 ลักษณะการทำงานของเครื่อง

จากรูป 2 แสดงให้เห็นถึงระบบการทำงานของวงจรในส่วนกำลังความถี่สูง การทำงานของวงจรแปลงกระแสตรงเป็นกระแสสลับความถี่สูงด้วย IGBT เป็นอุปกรณ์สวิตช์ และถูกควบคุมด้วยวงจรกำเนิดสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse width modulation, PWM) ที่ใช้การทำให้แรงดันไฟฟ้าขณะสวิตช์ทำงาน มีค่าเป็นศูนย์ ทำให้การสูญเสียในช่วงนำกระแส เป็นศูนย์ (ZVS)



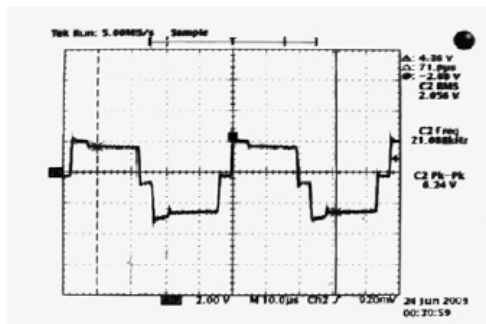
รูปที่ 2 ชุดการทำงานในส่วนของวงจรกำลังความถี่สูง

ชุดของวงจรแปลงกระแสตรงเป็นกระแสสลับใช้แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ ผ่านวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ ได้ไฟฟ้ากระแสตรงแรงดัน 320 โวลต์ เพื่อนำไปจ่ายให้กับวงจรกำลังความถี่สูงต่อไป สำหรับวงจรควบคุมเป็นแบบมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse width modulation, PWM) นี้ วงจรเป็นแบบเต็มบริดจ์ ใช้ไอซีเบอร์



รูปที่ 3 ลักษณะของสัญญาณที่ใช้ขับเคลื่อนของ IGBT และสัญญาณเอาต์พุต (E1-E3) ที่ติดพร้อมขดลวดเหนี่ยวนำความถี่สูง

UC3879N ซึ่งเป็นไอซีที่มี 4 เอาต์พุตเป็นสัญญาณอินพุต (G1-G4) ดังรูปที่ 3 สัญญาณอินพุตนี้ใช้ควบคุมการทำงานที่ขาเกตของ IGBT โดยเรากำหนดให้สัญญาณอินพุตทำงานไม่พร้อมกัน เพื่อให้เกิดช่วงการนำกระแสเป็นศูนย์ (ZVS) การทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ โดยช่วงนำกระแสเป็นศูนย์คือช่วง T_{2off} และ T_{4off} ของกราฟ V_{out} ในรูปที่ 3 และส่วนของกราฟด้านบวกช่วง T_{1on} คือช่วงที่ G1 และ G4 ทำงาน กราฟด้านลบช่วง T_{3on} คือช่วงที่ G2 และ G3 ทำงาน ทั้งนี้สวิตช์ทั้ง 4 ตัวยังทำงานไม่พร้อมกันอีกด้วย โดยมีสัญญาณที่วัดได้จริงที่เอาต์พุตของขดลวดเหนี่ยวนำแสดงในรูปที่ 4



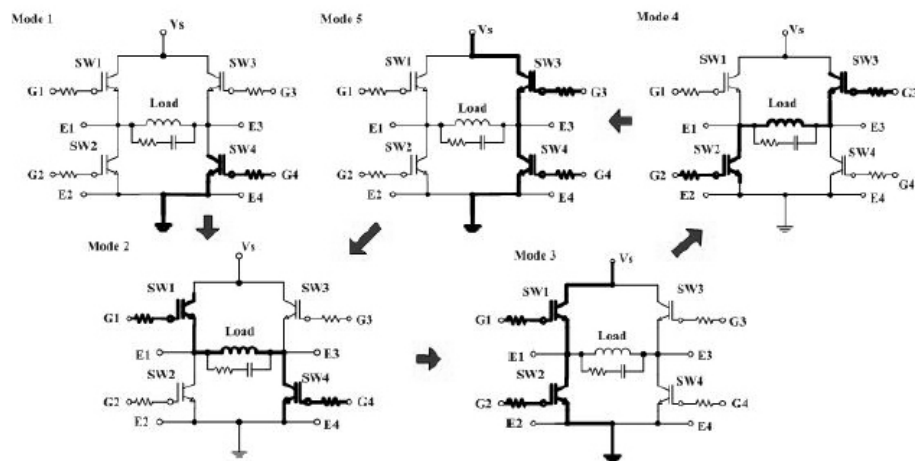
รูปที่ 4 ลักษณะของสัญญาณเอาต์พุตที่ขดลวดเหนี่ยวนำ

3.2 การทำงานของวงจรภาคกำลัง

จากรูปที่ 5 เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะเริ่มต้น เราสามารถจำลองลำดับการทำงานของวงจรภาคกำลังในรูปของสวิตช์ (SW) ได้ดังนี้

Mode 1: เมื่อเริ่มทำงาน SW4 ทำงานก่อน

Mode 2: ที่ T_{1on} : SW1 เริ่มทำงาน และ SW4 ยังคงทำงานอยู่ มีกระแสไหล



รูปที่ 5 ลำดับการทำงานของวงจรภาคกำลังความถี่สูง

ผ่านไปยังขดลวดเหนี่ยวนำ จนกระทั่งมีแรงดันตกคร่อม เท่ากับ 2 เท่าของแรงดันอินพุต (V_s)

Mode 3: ที่ T_{2off} : SW1 ยังคงทำงาน และ SW2 เริ่มทำงาน ทำให้กระแสไหลลงกราวด์ จนกระทั่งขดลวดเหนี่ยวนำเกิดการยุบตัวของสนามแม่เหล็ก และแรงดันคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำเป็นศูนย์

Mode 4: ที่ T_{3on} : SW1 หยุดทำงาน และ SW3 เริ่มทำงาน ทำให้มีกระแสไหลไปยังขดลวดเหนี่ยวนำ จนกระทั่งมีแรงดันตกคร่อม เท่ากับ 2 เท่าของแรงดันอินพุต

Mode 5: ที่ T_{4off} : SW2 หยุดทำงานและ SW4 เริ่มทำงาน ทำให้กระแสไหลลงกราวด์ จนกระทั่งขดลวดเหนี่ยวนำเกิดการยุบตัวของสนามแม่เหล็ก และแรงดันคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำเป็นศูนย์

เมื่อจบการทำงานของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ความถี่สูงใน Mode 5 แล้วเครื่องจะลำดับการทำงานตาม Mode 2 ต่อไป

4. ผลการทดลอง

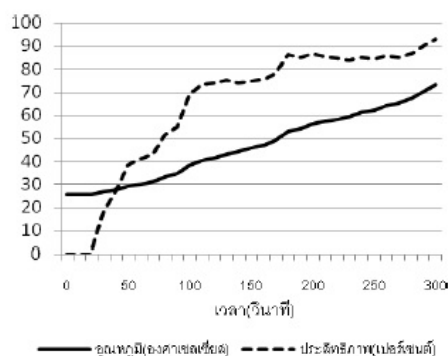
จากการทดลองต้มน้ำปริมาตร 4.5 ลิตร โดยภาชนะต้มน้ำมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 230 มิลลิเมตร สูง 215 มิลลิเมตรแบบเปิดฝา และขดลวดเหนี่ยวนำมีขนาด 6.25 มิลลิเมตร พันรอบภาชนะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 255 มิลลิเมตร จำนวน 14 รอบเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง และขดลวดเหนี่ยวนำที่พันรอบภาชนะที่ใช้ทดลอง แสดงในรูปที่ 6

จากรูปที่ 7 กราฟเส้นทึบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำในภาชนะกับเวลาที่ใช้ จากการทดลองที่อุณหภูมิห้อง 25.5 องศาเซลเซียส ในช่วง 30 วินาทีแรก ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทสู่น้ำทำให้อุณหภูมิของน้ำเปลี่ยนแปลงไปน้อยมาก แต่เมื่อเวลาผ่านไป 60 วินาที อุณหภูมิของน้ำในภาชนะหม้อต้ม เริ่มเปลี่ยนแปลงเป็นแบบกราฟเส้นตรงที่มีความชันเพิ่มขึ้น จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองในเวลา 300

วันที่ น้ำอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึง 73 องศาเซลเซียส โดยวัดอุณหภูมิบริเวณกลางภาชนะที่ใช้ต้ม และระหว่างการวัดอุณหภูมิมีการกระตุ้นน้ำในภาชนะด้วยการกวน เพื่อให้การถ่ายเทความร้อนจากผิวของภาชนะสู่น้ำได้ดีขึ้น กราฟเส้นประในรูปที่ 7 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง ณ เวลาต่างๆ ช่วงแรกอุณหภูมิของน้ำยังคงที่ เมื่อเวลาผ่านไป 30 วินาที อุณหภูมิของน้ำเริ่มเปลี่ยนแปลงทำให้ ความชันของกราฟเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่ง เมื่อจบการทดลองประสิทธิภาพของเครื่องคิดจากปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นต่อกำลังไฟฟ้าที่ใช้คิดได้เป็น 92.88% โดยเรคคิตค่ากระแสเฉลี่ยที่ผ่านขดลวดเหนี่ยวนำมีค่า 15.3 แอมแปร์



รูปที่ 6 เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิของน้ำในหม้อต้ม และประสิทธิภาพของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูงกับเวลา

5.สรุป

เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูงทำงานด้วยวงจรพูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ โดยใช้ IGBT เป็นอุปกรณ์สวิตช์ ทำงานที่ความถี่ 21 กิโลเฮิร์ตซ์ ภายใต้การทำงานแบบ ZVS-PWM จากการทดลองใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ ค่ากระแสเฉลี่ยที่ผ่านขดลวดเหนี่ยวนำมีค่า 15.3 แอมแปร์ โดยทำการต้มน้ำ 4.5 ลิตร ใน

เวลา 300 วินาที อุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นจาก 25.5 องศาเซลเซียส จนถึง 73 องศาเซลเซียส เราสามารถคำนวณปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทสู่น้ำได้เท่ากับ 2.85 กิโลวัตต์ จากปริมาณความร้อนที่ได้ เราสามารถคำนวณประสิทธิภาพของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูงได้ 92.88% สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสำหรับหม้อต้มน้ำและวิจัยพัฒนาต่อไป

6.กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสถานวิจัย สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Ogura, L. Gamage, T. Ahmed, M. Nakaoka, I. Hirota, H. Yamashita and H. Omori, "Performance evaluation of edge-resonant ZVS-PWM high-frequency inverter using trench-gate IGBTs for consumer induction cooking heater" IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 151, No. 5, September 2004, PP.563-568
- [2] Hui Cai, Rong Xiang Zhao, Shi Ping Wang, " Analysis and Design of Multiple Frequency IGBT High Frequency Inverter Supply for Induction Heating " Proceeding of International Conference on Electrical Machine and Systems 2007,PP.118-122
- [3] Valery Rudnev, Don Loveless, Raymond Cook and Micah Black "Handbook of induction heating"



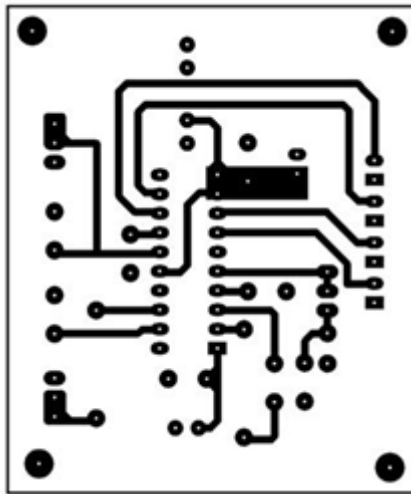
พล.ต.ท. ยัมมทรวล สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปี 2544 ปัจจุบันศึกษาในระดับปริญญาโท สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี งานวิจัยที่สนใจ การออกแบบวงจรทางด้านความถี่สูง



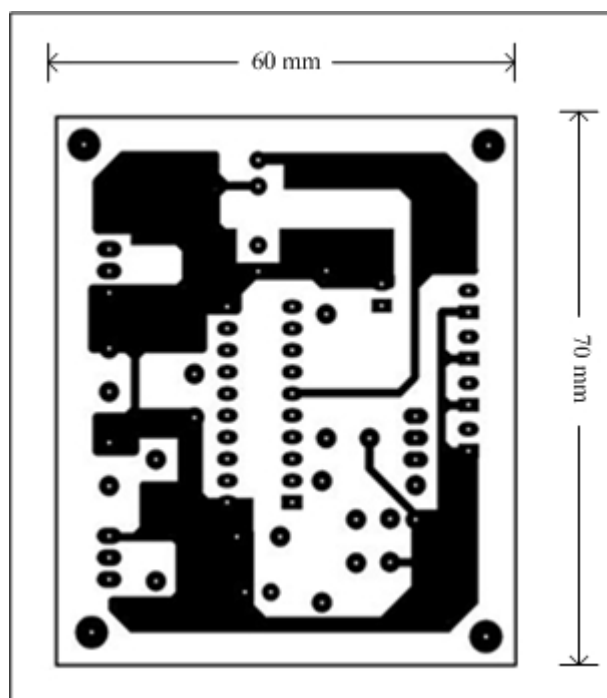
ชาญชัย ทองโสภณ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี อิเล็กทรอนิกส์ (เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปี 2535 ปริญญาโท ไฟฟ้า-สื่อสาร จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน ปี 2539 และปริญญาเอก ไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปี 2542 ปัจจุบันเป็นผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านวงจรทางด้านความถี่สูง สายอากาศแอคทีฟ และการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ภาคผนวก ข

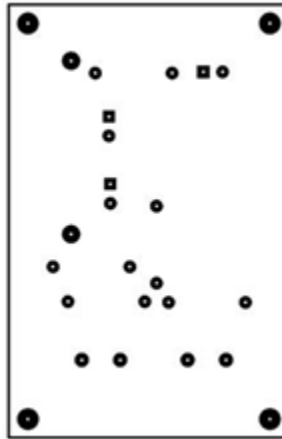
รายละเอียดวงจรพิมพ์



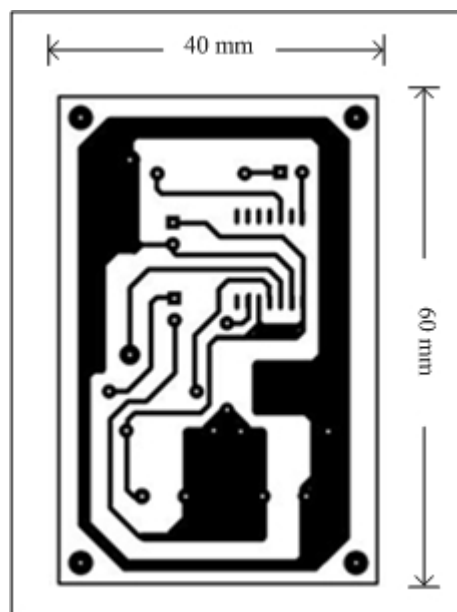
รูปที่ ข.1 วงจรกำเนิดสัญญาณด้านหน้า



รูปที่ ข.2 วงจรกำเนิดสัญญาณด้านหลัง



รูปที่ ข.3 วงจรขยายจับสัญญาณเกตส่วนหน้า



รูปที่ ข.4 วงจรขยายจับสัญญาณเกตส่วนหลัง

ประวัติผู้เขียน

นายปณตพล แยมศรวล เกิดเมื่อวันที่ 28 เมษายน พ.ศ. 2524 ที่จังหวัดราชบุรี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเบญจมราชูทิศ จังหวัดราชบุรี ปีการศึกษา 2540 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี 2544 ระหว่างศึกษาในระดับปริญญาตรีได้ร่วมกิจกรรมของมหาวิทยาลัยดังนี้ (1) รองประธานสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมรุ่นที่ 6 (2) ประธานชมรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ปีการศึกษา 2543 และได้เข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกรประจำบริษัทเนติก (ไทยแลนด์) จำกัด จนถึงปี 2551

ในปี พ.ศ. 2551 ได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยได้เป็นผู้ช่วยสอนปฏิบัติการรายวิชาต่าง ๆ ของสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม จำนวน 2 รายวิชา ดังนี้ (1) 427333 ปฏิบัติการวิศวกรรมโทรคมนาคม 1 และ (2) รายวิชา 427434 ปฏิบัติการวิศวกรรมโทรคมนาคม 2 และขณะที่ศึกษาในระดับปริญญาโท ได้มีผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ทั้งในระดับชาติ 1 ฉบับในปี 2552 ในงานการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32 (EECON-32) ในหัวข้อ “DESIGN AND CONSTRUCTION OF INDUCTION HEATING BOILER MACHINE WITH FULL BRIDGE INVERTER”