

รายงานการวิจัย

เครื่องเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนสำหรับอุตสาหกรรมครัวเรือนแบบ
ปรับความถี่ได้

(Induction heating system with variable control frequency for household industry)

ผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผศ.ดร.ชาญชัย ทองโสภิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก

กองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2551

ผลงานการวิจัยนี้เป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กุมภาพันธ์ 2553

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำงานวิจัยเรื่องเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ (Induction heating) นี้ สามารถเสร็จสมบูรณ์บรรลุตามวัตถุประสงค์เนื่องด้วยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯสยามบรมราชกุมารี และความกรุณาของบุคคลจากหลายๆด้านซึ่งคอยให้คำปรึกษา ความช่วยเหลือ รวมถึงข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ และการทำโครงการครั้งนี้ ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณเป็นพิเศษ นายวงศ์วิจิต หอมโกศล นายสำราญ สันทาลุณย์ นายปณดพล เข้มศรว นักศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่เป็นผู้ร่วมออกแบบสร้างเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำตั้งแต่เริ่มต้นจนเสร็จสมบูรณ์ รวมถึงสถานที่ทำการทดลองเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลศูนย์เครื่องมือ F4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ไว้เป็นอย่างสูง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.ชาญชัย ทอง โสภา
หัวหน้าโครงการวิจัย
กุมภาพันธ์ 2553

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำด้วยสวิตช์ความถี่สูงสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร โดยใช้หลักการเหนี่ยวนำทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ชิ้นงาน ซึ่งเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนี้ทำงานด้วยวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ โดยใช้ IGBT เป็นอุปกรณ์สวิตช์ ทำงานที่ความถี่ 25 kHz ภายใต้การทำงานแบบ ZVS-PWM โดยไม่ใช้หม้อแปลงความถี่สูงภาคสุดท้ายในการเหนี่ยวนำขดลวดให้เกิดความร้อน เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำเครื่องนี้ทำงานที่แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ 50 Hz กระแสอินพุทประมาณ 22 แอมแปร์ ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กและเกิดกระแสไหลวนขึ้นที่ขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน จากผลการทดลองพบว่าที่ความถี่ เรโซแนนซ์จะมีการส่งผ่านพลังงานมากที่สุดและใช้เวลาในการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานเร็วขึ้น การเปลี่ยนขนาดของชิ้นงานก็มีผลต่อกระแสเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ เมื่อนำมาทดสอบ โดยการต้มน้ำ 15 และ 20 ลิตร สามารถทำให้น้ำเดือดได้ภายในเวลา 17 และ 19 นาทีตามลำดับ การออกแบบและสร้างเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนี้ ใช้ต้นทุนต่ำ กะทัดรัด ความปลอดภัยสูง และง่ายต่อการใช้งาน สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานอุตสาหกรรมให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสำหรับหม้อต้มน้ำต่อไปได้

Abstract

This research presents the design and Construction of Induction Heating with High Frequency Switching for Food Industrial, which incorporates a constant frequency 25 kHz. Its 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 22 Amperes, A maximum power transfer with a full bridge inverter at resonance frequency. When the test 15 and 20 liters of boiling point in 17 and 19 minutes. Which is more suitable and acceptable for industrial and consumer energy utilizations from a practical point of view.

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนของการวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง	
2.1 บทนำ.....	5
2.2 หลักการพื้นฐานของการเหนี่ยวนำความร้อนความถี่สูง.....	5
2.2.1 การหาค่าความเหนี่ยวนำ.....	8
2.2.2 การเหนี่ยวนำทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	9
2.2.3 ความลึกผิว.....	10
2.2.4 ค่าความต้านทานจำเพาะของโลหะกับอุณหภูมิ.....	12
2.2.5 ความซึมซาบทางแม่เหล็กของโลหะกับอุณหภูมิ.....	15
2.2.6 ความถี่ของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำด้วยสวิตซ์ความถี่สูง.....	16
2.3 หลักการพาความร้อน.....	17
2.4 ลักษณะของวงจรเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนความถี่สูง.....	18
2.4.1 วงจรกำเนิดสัญญาณและวงจรขับเกต.....	18
2.4.2 อินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ (Full Bridge Inverter).....	18
2.4.3 ไอจีบีที (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT).....	19
2.5 เรโซแนนซ์.....	23

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5.1 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม.....	23
2.5.2 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน.....	29
2.6 การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ.....	32
2.7 การประมาณกำลังงานของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน.....	35
2.8 สรุป.....	35
บทที่ 3 การออกแบบและหลักการทำงานของวงจร	
3.1 บทนำ.....	37
3.2 วงจรเพาเวอร์ซัพพลาย.....	38
3.2.1 เพาเวอร์ซัพพลายที่ใช้ในส่วนของวงจรควบคุมในโหมดของแรงดัน.....	38
3.2.2 เพาเวอร์ซัพพลายที่ใช้ในส่วนของวงจรขับนำเกต.....	41
3.2.3 เพาเวอร์ซัพพลายที่ใช้ในส่วนของวงจรภาคกำลัง.....	42
3.3 การออกแบบวงจรควบคุมในโหมดของแรงดัน.....	44
3.4 การออกแบบวงจรขับนำเกต.....	46
3.5 การออกแบบวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์.....	48
3.6 การออกแบบวงจรเรโซแนนซ์.....	50
3.7 ลักษณะของภาษาที่ใช้และการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ.....	51
3.8 สรุป.....	53
บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดสอบเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน	
4.1 บทนำ.....	54
4.2 การทดสอบวงจรควบคุมในโหมดของแรงดัน.....	55
4.3 การทดสอบภาคขับนำเกตของไอจีบีที.....	63
4.4 การทดสอบวงจรสวิตช์ความถี่สูง.....	65
4.5 ผลการทดลอง.....	67
4.5.1 กรณีที่ 1 น้ำ 15 ลิตร.....	69
4.5.2 กรณีที่ 2 น้ำ 20 ลิตร.....	70
4.6 สรุป.....	72
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	73

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	73
บรรณานุกรม.....	75
ภาคผนวก.....	77

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1	หลักการเหนี่ยวนำความร้อน.....2
2.1	การให้ความร้อนหลักการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำอย่างง่าย.....5
2.2	วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงไฟฟ้า.....7
2.3	วงจรสมมูลย์ของขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน.....7
2.4	ความหนาแน่นของกระแสและค่าของความลึกเชิงผิว.....11
2.5	ชิ้นงานที่ถูกคลี่ออกเป็นแผ่น.....11
2.6	ค่าความต้านทานจำเพาะกับเวลา.....15
2.7	ลักษณะการใช้งานของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำในย่านความถี่ต่างๆ.....16
2.8	วงจรภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง (High Frequency Inverter).....19
2.9	โครงสร้างของ ไอจีบีที.....20
2.10	วงจรสมมูลย์ของการถ่ายเทความร้อนออกจากไอจีบีที.....22
2.11	วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม.....24
2.12	กราฟความสัมพันธ์ของ X_L และ X_C ต่อความถี่สำหรับวงจร RLC แบบอนุกรม.....25
2.13	อิมพีแดนซ์รวมและกระแสที่ไหลในวงจร RLC แบบอนุกรม ที่ความถี่ต่างๆ กระแสในวงจรอนุกรม.....26
2.14	ลักษณะสัญญาณแรงดันของ V_R , V_C และ V_L ที่จุดเรโซแนนซ์.....28
2.15	วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน.....30
2.16	วงจรสมมูลย์ของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน.....31
2.17	กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์และกระแสกับความถี่.....31
2.18	การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำกับค่าอินดักแตนซ์.....33
2.19	ตัวอย่างของขดลวดเหนี่ยวนำชนิดต่างๆ.....34
3.1	บล็อกไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ.....38
3.2	เพาเวอร์ซัพพลาย.....39
3.3	เพาเวอร์ซัพพลายในส่วนของวงจรควบคุมจากแรงดัน.....39
3.4	วงจรจริงของเพาเวอร์ซัพพลาย.....40
3.5	วงจรจริงของเพาเวอร์ซัพพลายในส่วนของวงจรควบคุมจากแรงดัน.....40

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.6	เพาเวอร์ซัพพลายในส่วนของวงจรขับเกท (หนึ่งในสี่ชุด).....41
3.7	วงจรจริงของเพาเวอร์ซัพพลายในส่วนของวงจรขับนำเกท.....42
3.8	เพาเวอร์ซัพพลายในส่วนของวงจรภาคกำลัง.....43
3.9	วงจรจริงของเพาเวอร์ซัพพลายในส่วนของวงจรภาคกำลัง.....43
3.10	ลักษณะวงจรของไอซีเบอร์ UC3879N.....44
3.11	วงจรจริงของไอซีเบอร์ UC3879N.....45
3.12	ลักษณะของสัญญาณที่ใช้ขับเคลื่อนของ IGBT และสัญญาณเอาต์พุต (V_{out}) ที่ตกรวมตลอด หนึ่งวินาทีความถี่สูง.....45
3.13	แสดงวงจรขับนำเกทผ่าน ไอซีเบอร์ PC929.....47
3.14	วงจรจริงของวงจรขับนำเกทผ่าน ไอซีเบอร์ PC929.....47
3.15	แสดงวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์.....49
3.16	วงจรจริงของฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์.....49
3.17	ลักษณะของหม้อถ้วยเดี่ยวที่เลือกใช้.....51
3.18	ลักษณะของขดลวดเหนี่ยวนำ.....52
3.19	ลักษณะของเครื่องให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำและภาชนะที่ใช้.....52
4.1	เครื่องให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำ.....54
4.2	ลักษณะของสัญญาณ OUT A จากไอซี UC3879N.....55
4.3	ลักษณะของสัญญาณ OUT B จากไอซี UC3879N.....56
4.4	ลักษณะของสัญญาณ OUT C จากไอซี UC3879N.....56
4.5	ลักษณะของสัญญาณ OUT D จากไอซี UC3879N.....57
4.6	แสดงลักษณะของสัญญาณ OUT A เปรียบเทียบกับ OUT D ของไอซี UC3879N.....58
4.7	แสดงลักษณะของสัญญาณ OUT A เปรียบเทียบกับ OUT B ของไอซี UC3879N.....58
4.8	แสดงลักษณะของสัญญาณ OUT A เปรียบเทียบกับ OUT C ของไอซี UC3879N.....59
4.9	แสดงลักษณะของสัญญาณ OUT B เปรียบเทียบกับ OUT C ของไอซี UC3879N.....59
4.10	แสดงลักษณะของสัญญาณ OUT B เปรียบเทียบกับ OUT D ของไอซี UC3879N.....60
4.11	แสดงลักษณะของสัญญาณ OUT C เปรียบเทียบกับ OUT D ของไอซี UC3879N.....60

สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.12	สัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาจากไอซี UC3879N ของOUT A ที่ทำงานพร้อมกับ OUT D และ OUT B ที่ทำงานพร้อมกับ OUT C.....61
4.13	สัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาจากไอซี UC3879N ของOUT A ที่ทำงานไม่พร้อมกับ OUT B และ OUT B ที่ทำงานพร้อมกับ OUT D.....62
4.14	สัญญาณทั้งสี่ของไอซี UC3879N.....62
4.15	สัญญาณขั้วเกทไอจีบีทีที่ออกจากไอซี UC3879N ที่ OUT A เปรียบเทียบกับ OUT B.....63
4.16	สัญญาณก่อนที่จะเข้าวงจรขยายสัญญาณเปรียบเทียบกับหลังขยายสัญญาณของ OUT A.....64
4.17	สัญญาณที่ผ่านตัวต้านทานที่ขาเกท.....64
4.18	ลำดับการทำงานของวงจรสวิตช์ความถี่สูง.....66
4.19	ลักษณะสัญญาณที่ขดลวดเหนี่ยวนำ.....67
4.20	เครื่องเหนี่ยวนำความร้อนขณะทำการทดลอง.....68
4.21	ขณะน้ำในภาชนะเริ่มเดือด.....68
4.22	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำ 15 ลิตรกับเวลา.....69
4.23	ประสิทธิภาพของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูงกับเวลาของน้ำ 15 ลิตร....69
4.24	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำ 20 ลิตรกับเวลา.....70
4.25	ประสิทธิภาพของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูงกับเวลาของน้ำ 20 ลิตร...71

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้อุปกรณ์กำเนิดพลังงานความร้อนมีอยู่มากมายหลายชนิดด้วยกัน เพื่อตอบสนองความต้องการของชีวิตที่หลากหลายมากขึ้น นอกจากจะมีการพัฒนาให้ตัวผลิตภัณฑ์ใช้งานได้ง่ายขึ้นแล้ว รูปแบบของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานความร้อนยังมีหลากหลายประเภท ไม่ว่าจะเป็น ขดลวดความร้อนหรือแก๊ส ในขณะที่เดียวกันการกำเนิดความร้อนโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำได้ถูกนำมาใช้เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ แทนที่ขดลวดความร้อนและแก๊ส เนื่องจากความก้าวหน้าทางด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงการพัฒนางจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง ที่สามารถจ่ายโหลดความร้อนเหนี่ยวนำด้วยเพาเวอร์ระดับสูงมากขึ้น โดยเลือก IGBT ซึ่งมีความไวในการสวิตช์สูงมาสร้าง ทำให้อุปกรณ์ถูกพัฒนาให้มีขนาดที่เล็กลง น้ำหนักเบาขึ้น และวิธีการใช้งานที่ง่ายขึ้น

การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำนี้ ความร้อนจะเกิดขึ้นที่ผิวของภาชนะโดยตรง เนื่องจากเกิดกระแสไหลวน (Eddy current) ทำให้เกิดความร้อน ได้ในเวลาอันรวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ขดลวดความร้อนหรือแก๊ส ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงการถ่ายเทความร้อนภายใน จะพบว่าความร้อนที่เกิดจากขดลวดความร้อนหรือแก๊สจะถ่ายเทจากขดลวดหรือเปลวไฟไปสู่โลหะตัวกลาง แล้วจึงถ่ายเทจากโลหะตัวกลางให้กับน้ำอีกต่อหนึ่ง จึงเป็นไปได้ที่ประสิทธิภาพของการใช้ขดลวดความร้อนหรือแก๊สจะลดต่ำลงเมื่อเทียบกับการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำที่มีหลักการทำงานคือ เมื่อป้อนกระแสสลับความถี่สูงให้กับขดลวดเหนี่ยวนำที่พันอยู่รอบภาชนะ ขดลวดเหนี่ยวนำนี้จะสร้างสามแม่เหล็ก (Magnetic flux) เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวน (Eddy current) ขึ้นที่ผิวของภาชนะ และถ่ายเทความร้อนไปยังน้ำที่อยู่ในภาชนะนั้น โดยตรง โดยความร้อนที่เกิดขึ้นจะไม่มี การสัมผัสกันทางไฟฟ้าระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำกับภาชนะ ทำให้มีความปลอดภัยต่อการใช้งาน และประสิทธิภาพดีขึ้นมากอีกด้วย

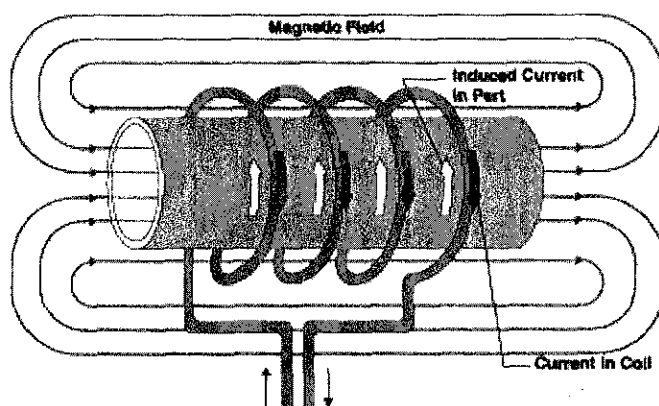
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาให้เข้าใจถึงหลักการทำงานของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง
- 2) เพื่อศึกษา ออกแบบ และพัฒนางจรที่เกี่ยวข้องกับการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง
- 3) เพื่อศึกษาให้เข้าใจถึงประสิทธิภาพการพาความร้อนของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง

4) สามารถวิเคราะห์ถึงสาเหตุและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของการพาความร้อนของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง

1.3 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย

การให้ความร้อนหลักการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induction Heating) เป็นปรากฏการณ์ทั้งทางไฟฟ้า และทางความร้อนร่วมกัน โดยมีสาเหตุจากทั้งการเหนี่ยวนำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Induction) ปรากฏการณ์ผิว (Skin Effect) และการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) จากปรากฏการณ์ทั้งสาม ทำให้สามารถอธิบายการให้ความร้อนหลักการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยย่อได้ดังนี้ เมื่อให้ไฟฟ้ากระแสสลับผ่านเข้าสู่ขดลวดเหนี่ยวนำที่มีชิ้นงานที่เป็นโลหะอยู่ภายใน กระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ขดลวดเหนี่ยวนำ จะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นในขดลวด คล้องผ่านชิ้นงาน เนื่องจากชิ้นงานเป็นโลหะ สนามแม่เหล็กที่คล้องผ่านชิ้นงาน จะเหนี่ยวนำให้มีกระแสไฟฟ้าไหล โดยกระแสส่วนมากจะไหลผ่าน ชิ้นงานในบริเวณความลึกระดับผิว (Skin Depth) ของชิ้นงาน กระแสที่ไหลวนรอบชิ้นงาน ทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่บริเวณผิวของชิ้นงาน ความร้อนนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสที่เหนี่ยวนำ และความต้านทานสมมูลของเส้นทางที่กระแสไหลผ่าน โดยความร้อนที่เกิดขึ้นนี้ จะเกิดการถ่ายเทไปสู่บริเวณอื่น ๆ โดยการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีที่บริเวณผิวของโลหะที่เกิดความร้อน



รูปที่ 1.1 หลักการเหนี่ยวนำความร้อน

รูปที่ 1.1 แสดงการให้ความร้อนด้วยหลักการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำอย่างง่าย ๆ กล่าวคือ ถ้าวางชิ้นงานไว้ในขดลวด หรือใกล้กับขดลวด ชิ้นงานนั้นจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวนภายใน

และเกิดความร้อนขึ้น ถ้าพิจารณาทั้งระบบ จะพบว่าคล้ายกับเป็นหม้อแปลงชุดหนึ่ง ขดลวดเหนี่ยวนำ จะเป็นเสมือนขดลวดปฐมภูมิ (Primary Coil) ของหม้อแปลงที่มีจำนวนรอบเท่ากับจำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ ส่วนชิ้นงานที่เป็นโลหะที่ถูกให้ความร้อน จะถูกเปรียบเสมือนขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Coil) ของหม้อแปลงที่มีจำนวนรอบเป็น 1 รอบเท่านั้น

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตการวิจัย ขั้นตอนการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการพื้นฐานของการให้ความร้อน โดยการเหนี่ยวนำความถี่สูง หลักการพาความร้อน ลักษณะของวงจรเครื่องเหนี่ยวนำความถี่สูง หลักการเรโซแนนซ์ และการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ

บทที่ 3 การออกแบบและหลักการทำงานของวงจรเพาเวอร์ซัพพลาย วงจรควบคุมในโหมดของแรงดัน วงจรขับนำเกต วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ และวงจรเรโซแนนซ์

บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดสอบเครื่องเหนี่ยวนำความถี่สูง การทดสอบวงจรควบคุมในโหมดของแรงดัน การทดสอบภาคขับขาเกทของไอจีบีที การทดสอบอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง และผลการทดลอง

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

1.5 ขั้นตอนของการวิจัย

- 1) ศึกษาและค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับหลักการเหนี่ยวนำความถี่สูง
- 2) ศึกษาและออกแบบวงจรรวมและขดลวดเหนี่ยวนำ
- 3) ทดสอบพร้อมทั้งเก็บข้อมูลเพื่อหาประสิทธิภาพของเครื่อง
- 4) วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
- 5) จัดทำรูปเล่มรายงาน

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำความรู้และเครื่องให้ความร้อนด้วยวิธีเหนี่ยวนำต้นแบบที่ได้จากการวิจัยไปพัฒนา และประยุกต์ใช้งานเพื่อความสะดวกตามความต้องการ ทั้งในภาคครัวเรือนและภาคอุตสาหกรรมต่อไป

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง

2.1 บทนำ

หม้อต้มน้ำหรือหม้อผลิตไอน้ำส่วนใหญ่จะสร้างเป็นภาชนะรูปทรงกระบอกเพื่อบรรจุน้ำหรือของเหลวแล้วให้ความร้อนแก่น้ำหรือของเหลวด้วยความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ทำให้น้ำส่วนใหญ่เปลี่ยนแปลงสถานะ โดยการระเหยเป็นไอน้ำ พลังงานจากไอน้ำที่ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านความร้อนและกำลังงานในกิจการต่างๆ เช่น การทำน้ำร้อนใน โรงแรม การรีดผ้าอบผ้าในโรงพยาบาล การผลิตไฟฟ้าในโรงจักรไฟฟ้า และการฆ่าเชื้อในอุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น

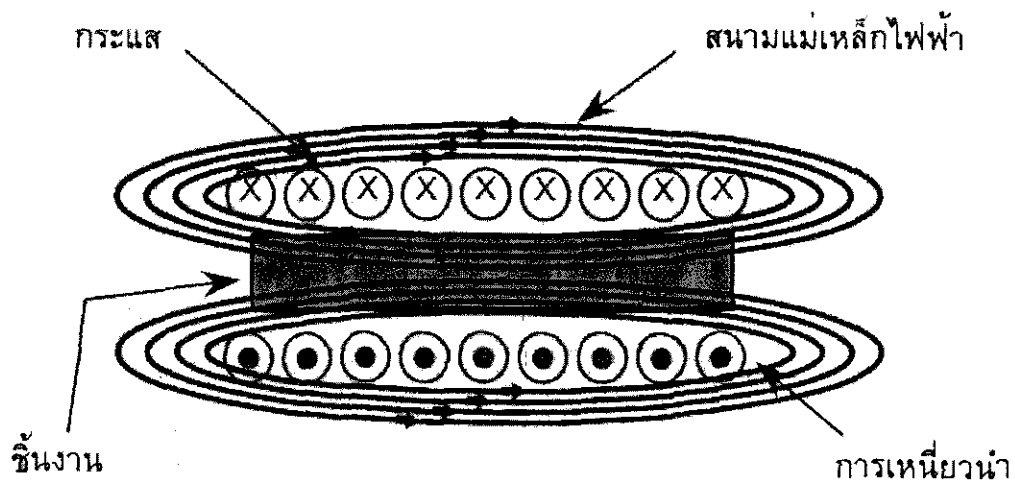
หม้อต้มน้ำหรือหม้อผลิตไอน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม จะแบ่งเป็นชนิดท่อน้ำและท่อไฟ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการจัดการแหล่งให้พลังงานความร้อนหรือก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ ไหลไปถ่ายโอนความร้อนให้แก่ น้ำซึ่งถ้าเป็นชนิดท่อน้ำแสดงว่าก๊าซร้อนหรือแหล่งให้พลังงานความร้อนอยู่ภายนอกท่อ ส่วนชนิดท่อไฟก๊าซร้อนไหลในท่อ นอกจากนี้ น้ำมันยังสามารถใช้เป็นสารตัวกลางของการให้ความร้อนโดยตรงแก่ผู้ใช้ และสามารถผลิตไอน้ำได้โดยการสร้างเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

สำหรับหม้อต้มน้ำหรือหม้อผลิตไอน้ำที่มีได้ใช้ความร้อนจากการเผาไหม้โดยตรง ได้แก่ หม้อไอน้ำที่นำเอาความร้อนที่ปล่อยทิ้งกลับมาใช้ใหม่ หม้อน้ำที่ใช้ขดลวดไฟฟ้าหรืออิเล็กทรอนิกส์ และหม้อน้ำที่ใช้การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กในการให้ความร้อน

2.2 หลักการพื้นฐานของการเหนี่ยวนำความร้อนความถี่สูง

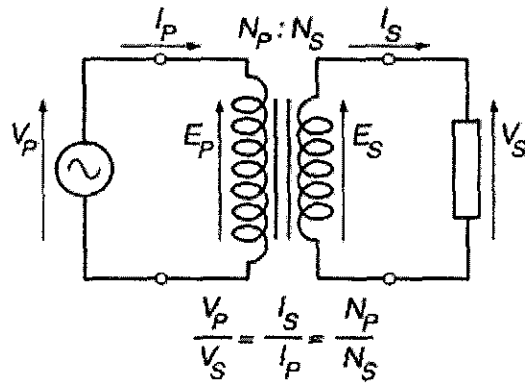
การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำเกิดจากทฤษฎีทางไฟฟ้าและความร้อนร่วมกัน โดยมีสาเหตุมาจากการเหนี่ยวนำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro-magnetic induction), ปฏิกิริยาที่ผิว (Skin effect) และ การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) จากปรากฏการณ์ทั้งสาม ทำให้สามารถอธิบายการให้ความร้อนหลักการแรงเคลื่อน ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยย่อได้ดังนี้ เมื่อให้ไฟฟ้ากระแสสลับผ่านเข้าสู่ขดลวดเหนี่ยวนำที่มีชิ้นงานที่เป็นโลหะอยู่ภายใน กระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ขดลวดเหนี่ยวนำ จะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นในขดลวดต้องผ่านชิ้นงาน เนื่องจากชิ้นงานเป็นโลหะ สนามแม่เหล็กที่เคลื่อนผ่านชิ้นงาน จะเหนี่ยวนำให้มีกระแสไฟฟ้าไหล โดยกระแสส่วนมากจะไหลผ่าน ชิ้นงาน ในบริเวณความลึกระดับผิว (Skin Depth) ของชิ้นงาน กระแสที่ไหลวนรอบชิ้นงาน ทำ

ให้เกิดความร้อนขึ้นที่บริเวณผิวของชิ้นงาน ความร้อนนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสที่เหนี่ยวนำ และความต้านทานสมมูลของเส้นทางที่กระแสไหลผ่าน โดยความร้อนที่เกิดขึ้นนี้ จะเกิดการถ่ายเทไปสู่บริเวณอื่น ๆ โดยการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีที่บริเวณผิวของโลหะที่เกิดความร้อน

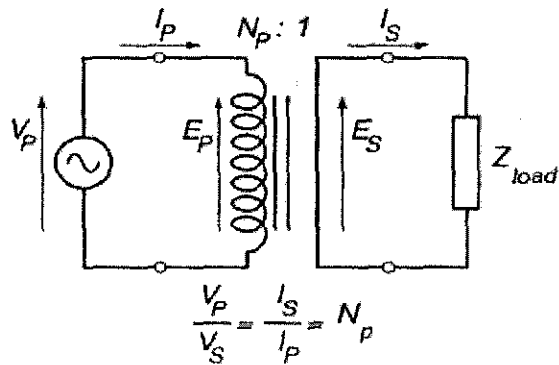


รูปที่ 2.1 การให้ความร้อนหลักการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำอย่างง่าย

จากรูปที่ 2.1 เป็นการแสดงถึงหลักการให้ความร้อนด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำอย่างง่าย กล่าวคือ เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวดซึ่งพันอยู่รอบชิ้นงาน จะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆขดลวดนั้น ชิ้นงานนั้นจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวนภายในและเกิดความร้อนขึ้น ถ้าพิจารณาทั้งระบบ จะพบว่าคล้ายกับเป็นหม้อแปลงชุดหนึ่ง โดยที่ ขดลวดเหนี่ยวนำ จะเป็นเสมือนขดลวดปฐมภูมิ (Primary Coil) ของหม้อแปลงที่มีจำนวนรอบเท่ากับจำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ ส่วนชิ้นงานที่เป็นโลหะที่ถูกให้ความร้อน จะถูกเปรียบเสมือนขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Coil) ของหม้อแปลงที่มีจำนวนรอบเป็น 1 รอบเท่านั้น เมื่อไฟฟ้ากระแสสลับที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นในชิ้นงาน จะไหลอยู่ภายในเนื้อโลหะเอง ซึ่งสามารถเปรียบได้เป็นภาระทางไฟฟ้าที่มีสภาพเกือบจะลัดวงจร เพราะว่าความต้านทานสมมูลของชิ้นงานโลหะค่อนข้างต่ำมาก จากการอธิบายข้างต้นหากจะเขียนเป็นวงจรสมมูลเปรียบเทียบกันระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้ากับการให้ความร้อนหลักการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนในรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไป และรูปที่ 2.3 แสดงถึงลักษณะวงจรสมมูลของ ขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงานโลหะ



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน

รูปที่ 2.3 ถ้า I_p เป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ เป็นสาเหตุให้เกิดการเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้า I_s ไหลวนอยู่ในชิ้นงาน จากกฎความสัมพันธ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า จะทำให้กระแสทั้งสองมีความสัมพันธ์กันดังสมการ 2.1

$$I_S = N_P I_P \quad (2.1)$$

โดยที่ N_p คือจำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ และกำลังสูญเสียเป็นความร้อนในชิ้นงาน จะมีค่าเท่ากับสมการ 2.2

$$P_W = (N_P I_P)^2 R_W \quad (2.2)$$

โดยที่ R_W คือความต้านทานสมมูลของชิ้นงาน

2.2.1 การหาค่าความเหนียวนำ

ค่าความเหนียวนำถูกกำหนดโดย 4 ปัจจัยดังนี้

1. จำนวนรอบของขดลวด

ถ้าตัวเหนียวนำมีจำนวนรอบของขดลวดมากขึ้น สนามแม่เหล็กที่เกิดจากการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าในขดลวดก็จะเกิดขึ้นมากด้วย สนามแม่เหล็กปริมาณมากนี้ จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นในตัวเหนียวนำ และจากการที่มีเส้นแรงแม่เหล็กจำนวนมากตัดกับขดลวด จึงส่งผลให้ค่าความเหนียวนำมากตามไปด้วย ดังนั้น ค่าความเหนียวนำ จึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนรอบของขดลวด

2. พื้นที่ของขดลวด

ถ้าพื้นที่ของขดลวดเพิ่มขึ้นสำหรับขดลวดที่มีจำนวนรอบใดๆ จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กมีจำนวนมากขึ้นด้วย และการมีสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความเหนียวนำเพิ่มขึ้นตาม ดังนั้น ค่าความเหนียวนำ จึงเป็นสัดส่วน โดยตรงกับพื้นที่ของขดลวด

3. ความยาวของขดลวด

ถ้าทำให้ขดลวดจำนวน 4 รอบขยายพื้นที่ออก ผลรวมของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวดแต่ละขดจะมีปริมาณลดลง ในทางกลับกันถ้าขดลวดที่มีจำนวนเท่าเดิมนำมาพันให้อยู่ชิดกันมากขึ้น ความยาวของขดลวดสั้นลงสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดในแต่ละขดจะเสริมซึ่งกันและกัน ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มีปริมาณมากขึ้น ทำให้ค่าความเหนียวนำมีค่ามากตามไปด้วย ดังนั้น ค่าความเหนียวนำจึงเป็นสัดส่วนผกผันกับความยาวของขดลวด

4. วัสดุที่นำมาใช้ทำขดลวด

ตัวเหนียวนำส่วนมากมีแกนที่ทำจากวัสดุจำพวกนิกเกิล โคบอลต์ เหล็ก เฟอร์ไรต์ หรืออัลลอย ซึ่งแกนเหล่านี้มีคุณสมบัติที่จะช่วยรวมหรือเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็ก ดังนั้น ค่าความซึมซาบได้ (Permeability) จึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อค่าความเหนียวนำ โดยถ้าค่าความซึมซาบได้ของวัสดุที่ใช้ทำแกนมีค่ามาก ก็จะทำให้ค่าความเหนียวนำมีค่ามากตามไปด้วย

จากปัจจัยทั้ง 4 ประการที่มีผลต่อค่าความเหนียวนำ ดังนั้นจึงสามารถนำมาเขียนเป็นได้ตามสมการ 2.3 กำหนดหาค่าความเหนียวนำได้ดังนี้

$$L = \frac{a^2 N^2}{9a + 10b} \quad (2.3)$$

โดยที่ L คือ ค่าความเหนี่ยวนำ (μH)

N คือ จำนวนรอบของขดลวด

a คือ รัศมีของขดลวดเหนี่ยวนำที่พันแล้ว (นิ้ว)

b คือ ความสูงของขดลวดเหนี่ยวนำที่พันแล้ว (นิ้ว)

2.2.2 การเหนี่ยวนำทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะเกิดขึ้นรอบๆ ขดลวดซึ่งสอดคล้องกับกฎของแอมแปร์ (Ampere's Law)

$$\int Hdl = Ni = F \quad (2.4)$$

$$\Phi = \mu HA$$

ซึ่งวัตถุที่ใส่เข้าไปในส่วนในพื้นที่ที่เกี่ยวกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการเคลื่อนไหวเกี่ยวกับสนามแม่เหล็ก ความหนาแน่นของส่วนพื้นที่ ที่เกิดสนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นที่บริเวณตรงกลางจากพื้นผิวมากที่สุด ซึ่งคล้ายกับกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) เมื่อจ่ายกระแสเข้ากับพื้นผิวของวัตถุที่สามารถนำไฟฟ้าได้ มีความสัมพันธ์กลับกันกับกระแสบนวงจรการเหนี่ยวนำ ดังสมการที่ 2.4 เกิดกระแสบนพื้นผิวของวัตถุ

$$E = \frac{d\lambda}{d\lambda} = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.5)$$

ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้เกิดพลังงานทางไฟฟ้าจากกระแสชุกชุมและกระแสวนแปลงเป็นพลังงานในรูปของความร้อน ดังสมการที่ 2.5

$$P = \frac{E^2}{R} = I^2 R \quad (2.6)$$

ซึ่งค่าของตัวต้านทานได้จากค่าของความหนาแน่น และ ค่าความซึมซาบได้ของวัตถุที่สามารถนำไฟฟ้าได้ ส่วนกระแสได้จากค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า พลังงานความร้อนจะเกิดขึ้นได้โดยมีความสัมพันธ์กับค่าของความถี่ผิว ถ้าวัตถุที่สามารถนำไฟฟ้าได้เช่น เหล็ก พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยจำนวนของพลังงานความร้อนที่ได้จะมากขนาดไหนขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุด้วยพลังงานจะเพิกเฉยถ้าวัตถุมีขนาดเล็กมากๆ เนื่องจากพลังงานมีการสูญเสียมากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์

2.2.3 ความถี่ผิว

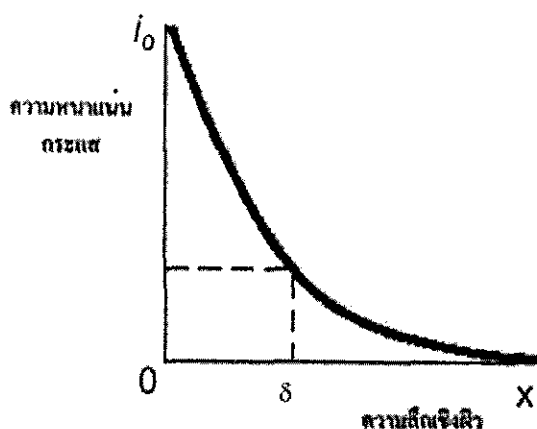
ปรากฏการณ์ที่สำคัญความถี่สูงไหลที่ผิวและความถี่ต่ำไหลลึกลงไปในตัวเรื่อยๆ ตามความถี่ที่ลดลง ดังสมการที่ 2.7 และสมการที่ 2.8 เราเรียกว่าเกิดปรากฏการณ์ Skin Effect

$$i_x = i_0 e^{-x/\delta} \quad (2.7)$$

เมื่อ i_x คือ ความหนาแน่นของกระแสที่ x
 i_0 คือ ความหนาแน่นของกระแสบนความถี่ผิว
 δ คือ ความถี่ผิว

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} \quad (2.8)$$

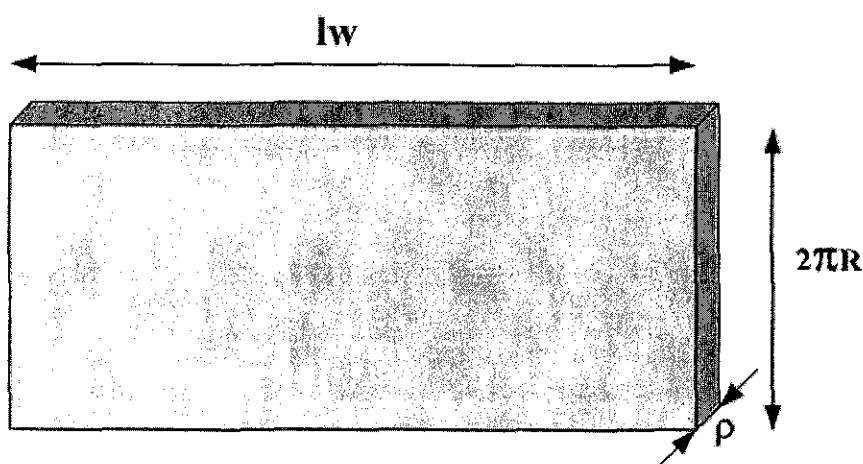
ρ คือ ความควบแน่น
 μ คือ ความซึมซาบได้
 ω คือ ความถี่ที่กระแสไหลผ่านวัตถุ



รูปที่ 2.4 ความหนาแน่นของกระแสและค่าของความลึกเชิงผิว

จากสมการที่ 2.7 จะเห็นว่าค่าความลึกผิวที่ได้ ขึ้นอยู่กับ ค่าความควบแน่น ค่าความซึมซาบได้ และค่าความถี่ของวัตถุ รูปที่ 2.4 เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของกระแสและค่าของความลึกเชิงผิว

ถ้าพิจารณาว่ากระแสโดยส่วนมากไหลอยู่ในระดับความลึกผิว และความต้านทานสมมูลย์ของชิ้นงานจะพิจารณาชิ้นงานทรงกระบอก จากการคลี่ออกเป็นแผ่นบาง มีระยะทางการไหลของกระแสมีค่าเท่ากับขนาดเส้นรอบวงของชิ้นงานทรงกระบอกที่มีความหนาเท่ากับความลึกผิว



รูปที่ 2.5 ชิ้นงานที่ถูกคลี่ออกเป็นแผ่น

จากค่าความต้านทาน $R = \frac{\rho l}{A}$ ดังนั้นค่าความต้านทานของชิ้นงานรูปทรงกระบอกที่ถูกคลี่ออกเป็นแผ่นดังรูปที่ 2.5 จะมีความหนาของชิ้นงานเท่ากับความลึกผิว โดยค่าความลึกผิวสามารถหาได้จากสมการ 2.9

$$R_w = \rho \frac{2\pi R}{\delta l_w} \quad (2.9)$$

ดังนั้น

$$RW \propto \frac{\rho}{\delta} = \sqrt{\rho \mu_f} \quad (2.10)$$

สรุปได้คร่าวๆ ว่า ค่าความต้านทานของชิ้นงานจะแปรผันโดยตรงกับรากที่สองของค่าความต้านทานจำเพาะของชิ้นงาน รากที่สองของค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กของชิ้นงาน และรากที่สองของความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ

2.2.4 ค่าความต้านทานจำเพาะของโลหะกับอุณหภูมิ

ค่าความต้านทานจำเพาะ โดยทั่วไปจะขึ้นกับสารที่เป็นชิ้นงาน โดยปกติสารที่เป็นพวกโลหะเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความต้านทานจำเพาะจะเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้นความสัมพันธ์ในลักษณะทั่วไปจะเป็นดังสมการที่ 2.11

$$\rho_\theta = \rho_1 [1 + \alpha(\theta - \theta_1)] \quad (2.11)$$

โดยที่ ρ_θ คือค่าความต้านทานจำเพาะ (Ωm) ที่อุณหภูมิ θ ($^{\circ}C$) ใดๆ และ ρ_1 คือความต้านทานจำเพาะที่อุณหภูมิ θ_1 ส่วน α คือค่าสัมประสิทธิ์ของสารชนิดต่างๆ ในทางปฏิบัติจะพบว่าค่าความต้านทานจำเพาะของชิ้นงานจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ในการคำนวณค่าความต้านทานจำเพาะ สมมุติจะพิจารณาจากกำลังที่ชิ้นงาน โดยกำลังที่ชิ้นงานจะแปรตาม ρ/δ หรืออีกนัยหนึ่งคือแปรตาม $\sqrt{\rho}$ ดังนั้นถ้าให้ตัวแปรอื่นคงที่และพิจารณาว่าค่าความต้านทานจำเพาะของชิ้นงานจะแปรผันกับอุณหภูมิเป็นเชิงเส้นจะได้ว่า

$$\rho_0 = \rho_1 + \frac{\theta - \theta_1}{\theta_2 - \theta_1} (\rho_2 - \rho_1) \quad (2.12)$$

และ

$$\frac{d\theta}{dt} = c\sqrt{\rho} \quad (2.13)$$

โดยที่ $C =$ ค่าคงที่

จัดรูปสมการที่ 2.12 ใหม่จะได้

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{d\theta}{\sqrt{\rho_1 + \frac{\theta - \theta_1}{\theta_2 - \theta_1} (\rho_2 - \rho_1)}} = \int_0^1 C dt \quad (2.14)$$

ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนจนอุณหภูมิ θ_1 เปลี่ยนเป็น θ_2 เท่ากับ

$$t = 2 \frac{(\theta_2 - \theta_1) (\sqrt{\rho_2} - \sqrt{\rho_1})}{(\rho_2 - \rho_1) c} \quad (2.15)$$

ถ้าสมมติให้ค่าความต้านทานจำเพาะมีค่าคงที่ และมีค่าเป็น ρ_m ตลอดช่วงอุณหภูมิการใช้งาน (θ_1 ถึง θ_2) เมื่อแทนในสมการ 2.13 จะได้

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

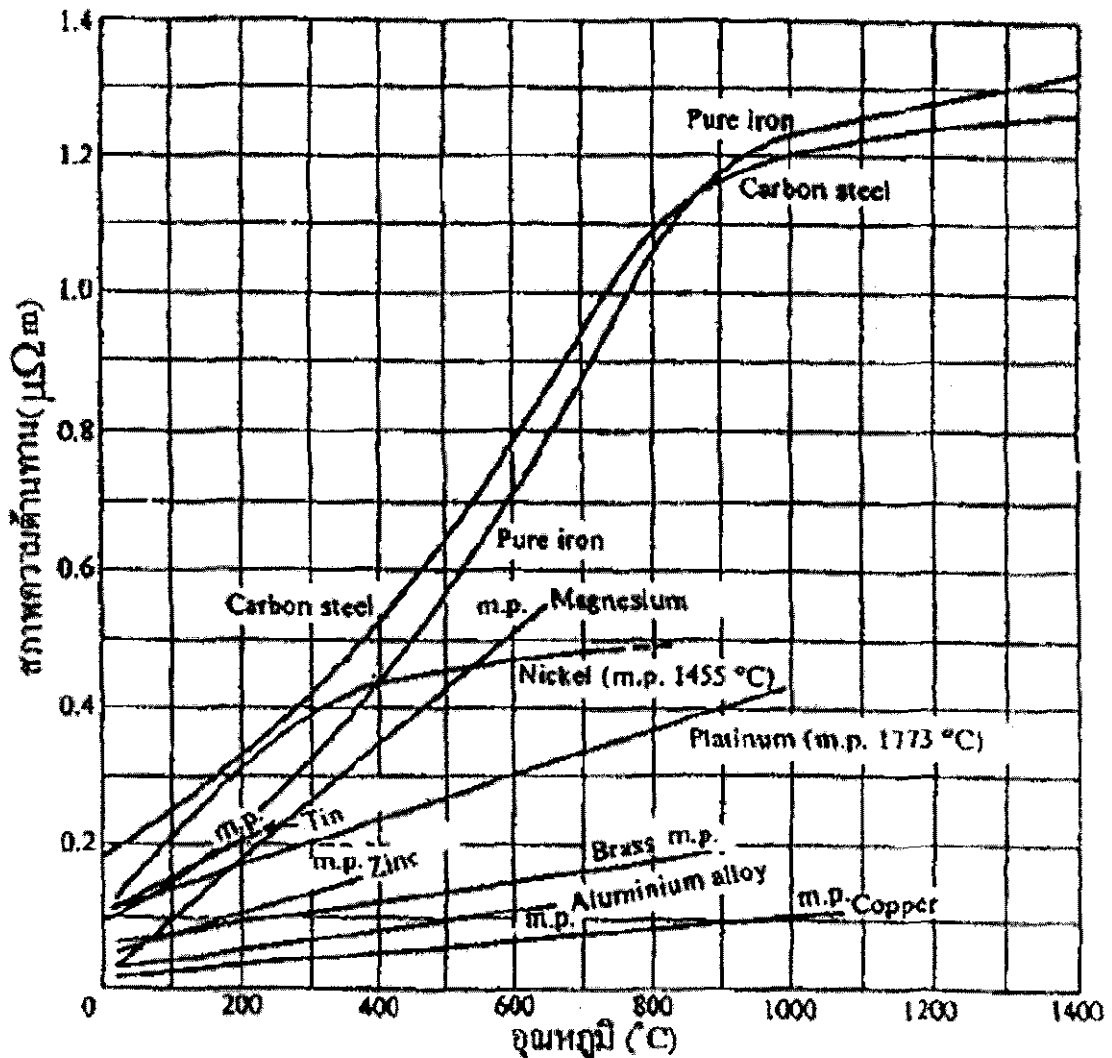
$$t = \frac{(\theta_2 - \theta_1)}{C \sqrt{\rho_m}} \quad (2.16)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการ 2.15 กับ 2.16 จะได้ว่า

$$\rho_m = \frac{(\sqrt{\rho_2} + \sqrt{\rho_1})^2}{4} \quad (2.17)$$

จากสมการ 2.17 ค่าความต้านทานจำเพาะสมมูลที่ได้อาจจะใช้ได้กับโลหะบางประเภทที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็นเชิงเส้น และจากภาพที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าโลหะที่เป็นสารเฟอร์โรแมกเนติกจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่า ρ กับอุณหภูมิจะไม่เป็นเชิงเส้นตลอดช่วงอุณหภูมิเหมือนสมมติฐานในสมการ 2.12 ดังนั้นการคำนวณโดยใช้ค่า ρ_m จึงต้องแยกพิจารณากราฟที่เป็นเชิงเส้นออกเป็นช่วงๆ ทีละช่วงไป

ค่าความต้านทานจำเพาะค่าน้อยจะส่งผลให้สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำขึ้นงานให้เกิดความร้อนได้ดีกว่าชิ้นงานที่มีค่าความต้านทานจำเพาะมาก



รูปที่ 2.6 ค่าความต้านทานจำเพาะกับเวลา

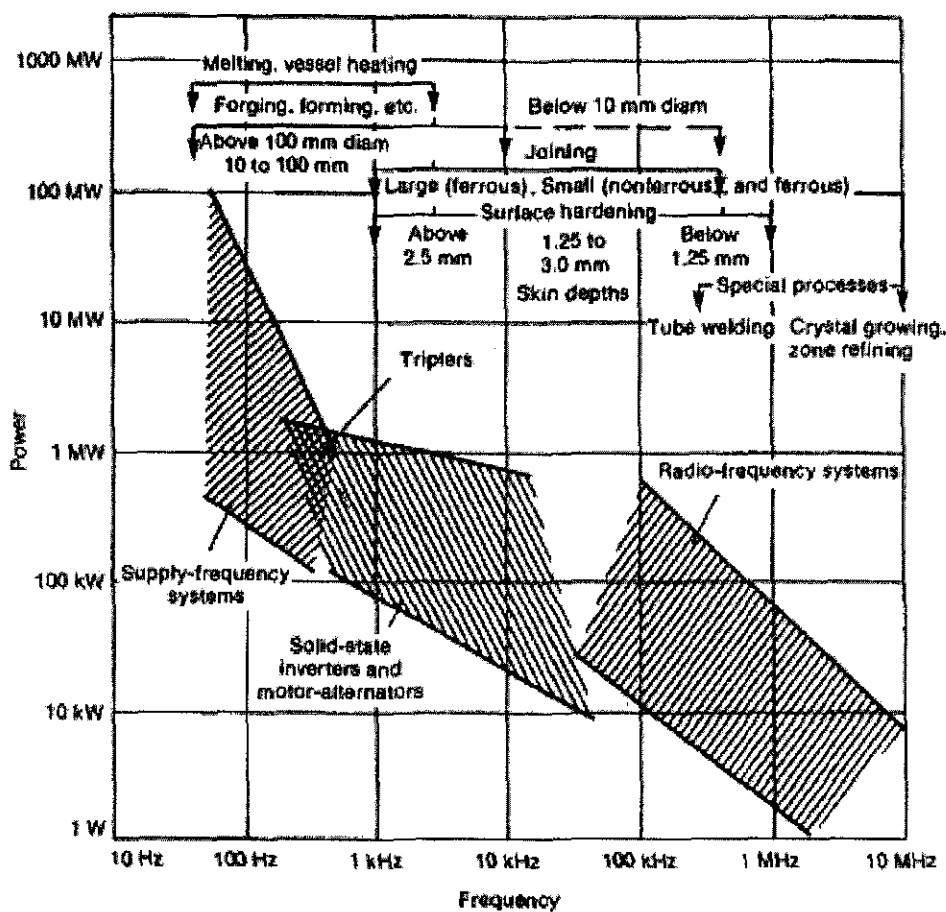
2.2.5 ความซึมซาบทางแม่เหล็กของโลหะกับอุณหภูมิ

ความซึมซาบทางแม่เหล็กของโลหะนั้นปกติจะมีค่าค่อนข้างคงที่ แต่สำหรับสารที่มีคุณสมบัติเป็นสารเฟอร์โรแมกเนติกนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสนามแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็กจะไม่เป็นเชิงเส้น

นอกจากนี้ค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กของสารเฟอร์โรแมกเนติกยังมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิด้วย โดยปกติแล้วความซึมซาบทางแม่เหล็กของสารประเภทนี้จะค่อนข้างมีค่าคงที่เมื่อเทียบกับอุณหภูมิ แต่ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงจุดคูรี (Curie point) แล้ว ค่าความซึมซาบของสารนั้นจะลดลงเป็นค่าซึมซาบของอากาศทันที $\mu_r = 1$ มีผลให้สารนั้นหมดสภาพความเป็นแม่เหล็กนั่นเอง

2.2.6 ความถี่ของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำด้วยสวิตซ์ความถี่สูง

งานให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำแต่ละประเภท จะใช้ช่วงความถี่และระดับกำลังแตกต่างกัน ไปดังที่แสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งจะได้รับกำลังจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งได้มาจากแหล่งกำเนิดชนิดต่างๆ ซึ่งสามารถจำแนกได้ดังนี้



รูปที่ 2.7 ลักษณะการใช้งานของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำในย่านความถี่ต่างๆ

1) เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ใช้แหล่งจ่ายจากการไฟฟ้าโดยตรง แรงดันไฟฟ้าจากการไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่ค่อนข้างต่ำจึงทำให้ระดับความลึกผิวในการให้ความร้อนมีค่ามากตั้งแต่ 10 – 100 มิลลิเมตร โดยปกติเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำประเภทนี้จะใช้ในงานการหลอมโลหะมีกำลังสูงได้ถึงหลายร้อยเมกะวัตต์

2) เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ใช้มอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ให้ความถี่อยู่ในย่าน 500 เฮิรซ์ ถึง 10 กิโลเฮิรซ์ เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำชนิดนี้จะใช้พลังงานจากการไฟฟ้า

มาขับเคลื่อนมอเตอร์ และใช้มอเตอร์ไปขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกที โดยสามารถให้กำลังได้หลายร้อยกิโลวัตต์ และให้ระดับความลึกผิวตั้งแต่ 1 – 10 มิลลิเมตร

3) เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำโดยวงจรแปลงผันแรงดันโดยใช้สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ จำพวกทรานซิสเตอร์กำลัง มอสเฟตกำลัง หรือพวกริซิสเตอร์ แปลงผันแรงดันไฟฟ้าจากการไฟฟ้าให้เป็นไฟสลับอีกครั้งแต่มีความถี่สูงขึ้น โดยใช้งานในย่านความถี่ 500 เฮิรซ์ ถึง 50 กิโลเฮิรซ์ การเลือกใช้อุปกรณ์สวิตช์จะต้องคำนึงถึงความเร็วในการสวิตช์ และขนาดกำลังของอุปกรณ์สวิตช์ให้เหมาะสม

4) เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ทำงานย่านความถี่วิทยุ โดยเครื่องประเภทนี้จะทำงานตั้งแต่ความถี่ 50 กิโลเฮิรซ์ จนถึง 50 เมกกะเฮิรซ์ ซึ่งปัจจุบันนี้สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำยังมีสมรรถนะในการใช้งานที่ความถี่สูงๆ ได้ไม่ดีพอ โดยความลึกผิวอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 2 มิลลิเมตร ซึ่งเหมาะสำหรับงานชุบแข็งที่ผิว เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนี้จะให้กำลังงานค่อนข้างต่ำ

จะเห็นว่าความถี่นั้นเป็นตัวแปรสำคัญต่อประสิทธิภาพ ความลึกผิวในชิ้นงาน และกำลังเข้าของชิ้นงาน โดยที่เมื่อความถี่สูงขึ้น ความลึกผิวจะลดลงประสิทธิภาพและกำลังเข้าของชิ้นงานจะสูงขึ้น

2.3 หลักการพาความร้อน

การพาความร้อน คือ วิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่ระหว่างผิวของของแข็งและของไหลคือการพาความร้อน โดยที่ของไหลจะเป็นตัวพาความร้อนมาให้ หรือพาความร้อนจากผิวของของแข็งกลไกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อน โดยการพาได้นั้น เกิดจากผลรวมของการนำความร้อน การสะสมพลังงานและการเคลื่อนที่ของการไหล การพาความร้อนยังแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ การพาโดยการบังคับ (Forced convection) และการพาตามธรรมชาติ (natural หรือ free convection)

การพาโดยการบังคับ (Forced convection) คือการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของของแข็งโดยกลไกภายนอก เช่น พัดลม หรือเครื่องสูบน้ำ

การพาตามธรรมชาติ (Natural หรือ Free convection) คือการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ไม่มีกลไกใดๆมาทำให้ของไหลเคลื่อนที่ แต่ของไหลที่อยู่ใกล้กับผิวของของแข็งก็อาจจะเคลื่อนที่ได้จากแรงลอยตัวของของไหลเอง แรงลอยตัวนี้เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหล เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นของของไหลขึ้น

การคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพา นั้นมีหลายสิ่งที่จะต้องพิจารณาร่วม เนื่องจากมีผลต่อการเคลื่อนที่ของความร้อน เป็นต้นว่า ความหนาแน่นของของไหล ความหนืด เป็นต้น ดังนั้นเราจะตัดความยุ่งยากเหล่านี้โดยเสนอสมการสำหรับคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อน q โดยการพาดังสมการ 2.18

$$q = hA(\Delta T) \quad (2.18)$$

โดยที่

q = ปริมาณความร้อนที่เกิดการถ่ายโอนเนื่องจากการพา

h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

A = พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน

ΔT = ผลต่างของอุณหภูมิ

2.4 ลักษณะของวงจรเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนความถี่สูง

2.4.1 วงจรกำเนิดสัญญาณและวงจรขับเกท

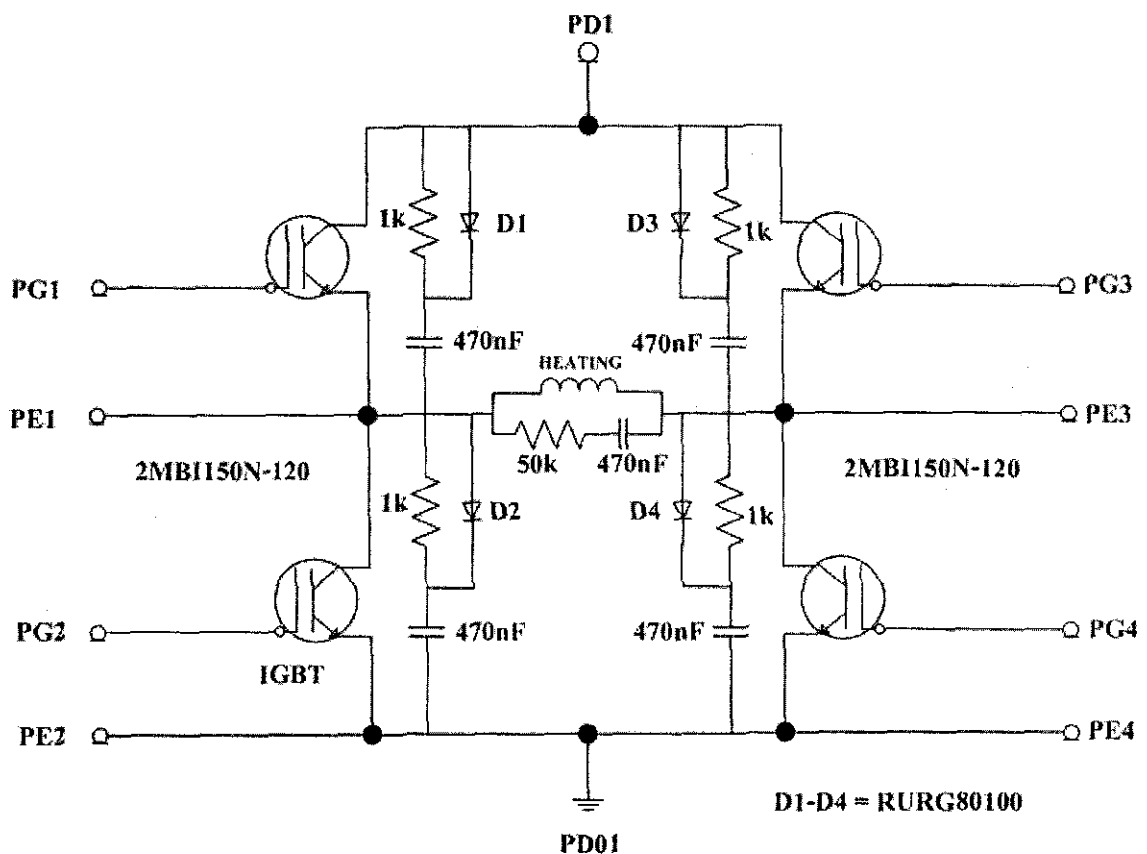
อุปกรณ์สวิตช์ไอจีบีทีที่จะทำงานได้จะต้องมีสัญญาณมาขับที่ขาเกทของมัน และสัญญาณที่จะนำมาขับนั้นจะต้องอยู่ภายใต้ข้อกำหนดที่ไอจีบีทีต้องการด้วย เช่น จะต้องสามารถจ่ายกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่เพียงพอต่อการซาร์จขาเกทได้ ซึ่งสัญญาณควบคุมโดยทั่วๆ ไปจะไม่สามารถนำมาขับที่ขาเกทของไอจีบีทีได้โดยตรง แต่จะต้องผ่านการขยายกระแสและแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของไอจีบีที และงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ไอซีเบอร์ PC929 เพื่อขยายสัญญาณเอาท์พุทที่ได้จากไอซีเบอร์ UC3879N ซึ่งเป็นเหมือนตัวกำเนิดสัญญาณให้กับไอจีบีทีทั้ง 4 จุดนั่นเอง

วงจรขับของไอจีบีทีจะเหมือนกับวงจรขับมอสเฟต เป็นวงจร Gate Source Driver Voltage โดยจะต้องสามารถจ่ายกระแสได้อย่างมากพอที่จะซาร์จตัวเก็บประจุที่อยู่ภายในได้อย่างรวดเร็วและการออกแบบจะต้องให้สายที่ต่อจากวงจรขับไปยังขาเกทสั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อไม่ให้เกิดการออสซิลเลทหรือจะแก้ไขได้โดยการต่อความต้านทานอนุกรมที่ขาเกท

2.4.2 อินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ (Full Bridge Inverter)

อินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ เป็นวงจรที่ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่สูง จากรูป วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ประกอบด้วยสวิตช์ 4 ตัว ไอจีบีที

และไดโอดซึ่งทำหน้าที่เป็นทางผ่านกระแสย้อนกลับขณะไอจีบีทีหยุดนำกระแส อินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์สามารถให้กำลังงานได้สูง ดังนั้นจึงเหมาะกับงานที่ต้องการกำลังสูงๆ จากรูปที่ 2.8 ไอจีบีทีจะทำงานสลับกันเป็นคู่ โดยที่ SW1 และ SW4 จะทำงานในเวลาเดียวกันจะเกิดแรงดัน V_s ต่กร่อมขดลวดเหนี่ยวนำและสลับให้ SW2 และ SW3 ทำงานในเวลาเดียวกันแรงดันที่ต่กร่อมขดลวดเหนี่ยวนำจะกลับขั้วเป็น $-V_s$ ในขณะที่ไอจีบีทีแต่ละคู่ปิดจะเกิดแรงดันย้อนกลับมีค่าเป็น V_s เราจึงเรียกว่าอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ (Full Bridge Inverter)



รูปที่ 2.8 วงจรภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง (High Frequency Inverter)

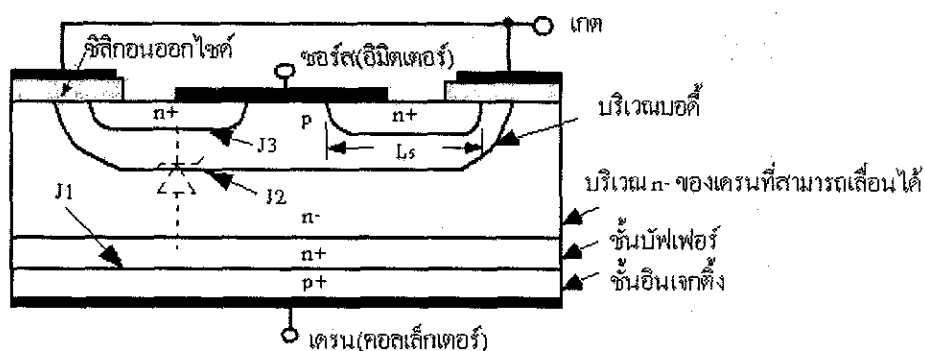
2.4.3 ไอจีบีที (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)

บีเจที (Bipolar Junction Transistor, BJT) และมอสเฟต (MOSFET) ต่างก็มีข้อดีต่างกันไป คือ บีเจทีจะมีกำลังสูญเสียขณะนำกระแสต่ำและยังมีอัตราทนแรงดันสูง แต่จะมีความเร็วในการสวิตช์ต่ำและมีช่วงหยุดนำกระแสสั้น ส่วนมอสเฟต สามารถที่จะเริ่มนำกระแสและหยุดนำกระแสได้อย่างรวดเร็ว จากข้อดีของอุปกรณ์ทั้งสองจึงทำให้มีการประดิษฐ์อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดใหม่

ขึ้นมาโดยนำบีเจทีและมอสเฟตลงในเวเฟอร์เดียวกันเรียกว่า Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT ซึ่งคาดว่าจะมีการนำไปใช้อย่างแพร่หลายในอนาคต ในส่วนนี้เราจะกล่าวถึงโครงสร้างและคุณสมบัติต่างๆ รวมทั้งค่ากำจัดการทำงาน

2.4.3.1 โครงสร้างของไอจีบีที

จากรูปที่ 2.9 โครงสร้างของ IGBT ชนิดเอ็นแชนเนลแสดงเป็นภาพตัดขวาง โครงสร้างส่วนมากจะมีลักษณะเหมือนมอสเฟต จะแตกต่างกันตรงที่ IGBT จะมีชั้น P+ หรือชั้นอิงเจกต์ติ้ง (injecting) ต่ออยู่ระหว่างขาเดรน ซึ่งในมอสเฟตจะไม่มี จากการที่ขาเกตถูกกั้นด้วยชั้นของซิลิกอนออกไซด์ (SiO₂) เป็นผลทำให้ความ



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของไอจีบีที

ต้านทานอินพุตที่ขาเกตมีค่าสูงมากเหมือนกับเพาเวอร์มอสเฟต โครงสร้างของไอจีบีทีจะเหมือนกับมีไทรสเตอร์อยู่ภายใน เนื่องจากการโด๊ปสารทำให้เกิดรอยต่อที่มีคุณสมบัติเป็นไทรสเตอร์ ความหนาของชั้นเป็นสิ่งที่สามารถปรับปรุงการทำงานของไอจีบีทีได้ โดยมีเหตุผลสำคัญอยู่สองประการคือ ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมในการนำกระแสต่ำ และมีช่วงหยุดนำกระแสสั้น แต่อย่างไรก็ตามการทำเช่นนี้จะทำให้ลดความสามารถในการทนแรงดัน (Reverse Blocking Capacity) ต่ำลงกว่าเดิม

2.4.3.2 ลักษณะการทำงานของไอจีบีที

จากรูปโครงสร้างของไอจีบีที กระแสจะถูกกั้นไว้ให้ไหลผ่านได้ในกรณีที่ให้ Negative Bias จะทำให้เป็นค่าของ Reverse Blocking Capacity เมื่อมีแรงดันบวกที่ขาคอลเล็กเตอร์แต่ยังไม่มีแรงดันไบอัสที่เกตจั้งชั้นด้านบน J2 จะได้รับ Reverse Bias และ ไอจีบีทีจะทำงานในย่าน Forward Blocking Mode อย่างไรก็ตาม ถ้ามีแรงดันมาจ่ายให้ที่เกตเพียงพอที่จะทำให้ไอเลคตรอนมารวมที่ชั้นพี (P-Base Region) ภายใต้เกต ไอจีบีทีจะอยู่ในสภาวะนำกระแสได้เพราะไอเลคตรอนขณะนี้สามารถ

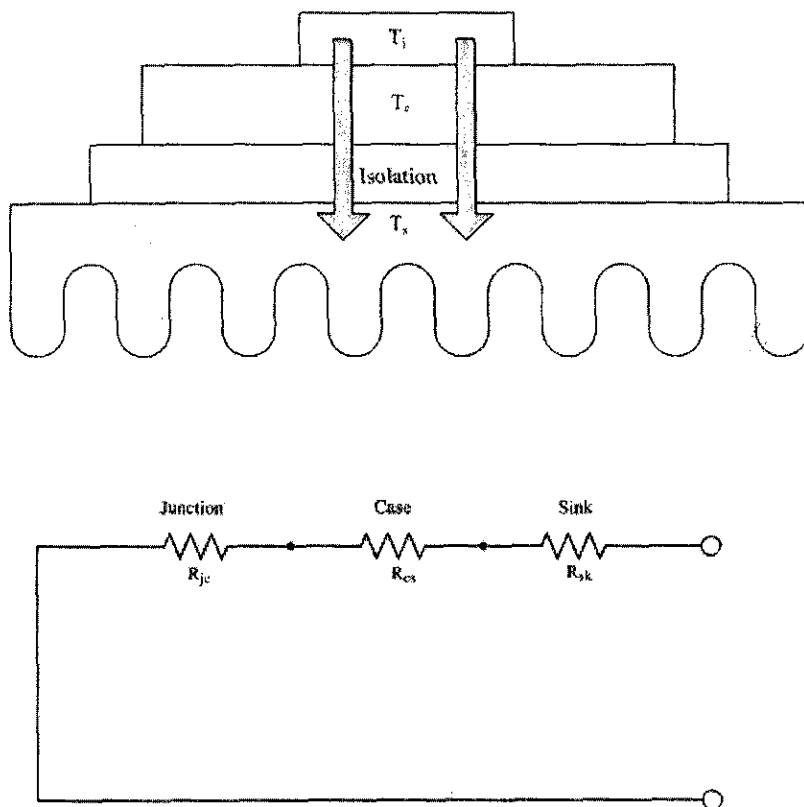
ไหลจากย่าน n^+ ไปสู่ N-Base ในสถานะนำกระแสที่ J3 จะได้รับ Forward Bias และคอลเลคเตอร์ p^+ จะฉีดโฮลไปในชั้น N-Base

2.4.3.3 การระบายความร้อนของไอจีบีที

กำลังงานสูญเสียในรูปความร้อนของไอจีบีทีขณะทำงานเป็นเรื่องที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในตัวไอจีบีทีจะทำให้เกิดความร้อนที่รอยต่อ และอุณหภูมิที่รอยต่อ (T_j) ของสารกึ่งตัวนำภายในไอจีบีทีจะมีค่าเพิ่มขึ้น หากไม่มีการระบายความร้อนไปจากตัวถังแล้ว อุณหภูมิที่รอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งค่าอุณหภูมิที่รอยต่อสูงเกิน ทำให้เกิดการเสียหายในที่สุด

ไอจีบีทีโดยทั่วไปจะมีค่าอุณหภูมิที่รอยต่อ (T_j) สูงสุดขณะทำงานประมาณ 150 – 200 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับชนิดของสารกึ่งตัวนำภายในไอจีบีที และลักษณะของวัสดุที่นำมาใช้ทำเป็นตัวถัง วิธีที่ง่ายที่สุดในการระบายความร้อนคือ การติดแผ่นระบายความร้อนเข้ากับ ไอจีบีทีโดยตรง การระบายความร้อนออกจากตัวไอจีบีทีจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อเลือกขนาดและชนิดของแผ่นระบายความร้อนได้เหมาะสมกับขนาดของไอจีบีที แผ่นระบายความร้อนที่มีขนาดเล็กจะไม่สามารถระบายความร้อนได้เพียงพอทำให้ไอจีบีทีมีอุณหภูมิสูงเกิน อายุการใช้งานของไอจีบีทีก็จะสั้นลงหรืออาจเสียหายได้

การลดความร้อนที่รอยต่อของสารกึ่งตัวนำในไอจีบีที สามารถทำได้โดยถ่ายเทความร้อน ออกจากรอยต่อผ่านตัวถังไอจีบีที และติดแผ่นระบายความร้อนที่ตัวถัง ความร้อนจะถูกถ่ายเทผ่าน แผ่นระบายความร้อนออกไปสู่อากาศรอบข้างจนเกิดความสมดุลความร้อนทำให้ความร้อนที่ รอยต่อลดลงเนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดมีการระบายความร้อนผ่านตัวมันเองได้ไม่เท่ากัน ความสามารถในการระบายความร้อนได้มากหรือน้อยของวัสดุแต่ละชนิดนั้นอาจกล่าวได้ว่า วัสดุที่มีค่าความต้านทานทางความร้อน (Thermal Resistance, R_θ) ไม่เท่ากัน คือเมื่อให้พลังงานความร้อน ผ่านวัสดุ โดยวัสดุจะสามารถระบายความร้อนผ่านตัวมัน โดยมีการต้านทานพลังงานความร้อน ไม่ให้ผ่านไปได้ง่ายๆ ซึ่งจะทำให้ตัวมันมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังนั้นการระบายความร้อนของไอจีบีที ผ่านแผ่นระบายความร้อนอาจเขียนเป็นวงจรสมมูลย์ในลักษณะความต้านทานทางความร้อนได้ดัง รูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลของการถ่ายเทความร้อนออกจากไอจีบีที

อุณหภูมิที่รอยต่อของสารกึ่งตัวนำ ภายหลังติดแผ่นระบายความร้อนอาจคำนวณได้จากสมการ 2.19

$$T_j = P_D (R_{jc} + R_{cs} + R_{sk}) + T_A \quad (2.19)$$

โดยที่

P_D คือ กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในตัวไอจีบีที (Watt)

T_A คือ อุณหภูมิแวดล้อมของระบบ ($^{\circ}\text{C}$)

R_{jc} คือ ค่าความต้านทานความร้อนระหว่างรอยต่อและตัวถัง ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)

R_{cs} คือ ค่าความต้านทานความร้อนระหว่างตัวถังและแผ่นระบายความร้อน ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)

R_{sk} คือ ค่าความต้านทานความร้อนระหว่างแผ่นระบายความร้อนและอุณหภูมิแวดล้อม ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)

ปกติบริษัทผู้ผลิตไอจีบีทีจะระบุค่าความต้านทานความร้อนต่างๆไว้ใน Datasheet ยกเว้นค่า R_{cs} และ R_{sk} จะขึ้นอยู่กับลักษณะการยึดติดของตัวถังของไอจีบีทีกับแผ่นระบายความร้อนและขนาด และวัสดุที่นำมาใช้ทำแผ่นระบายความร้อน โดยที่วัสดุที่มีค่าความต้านทานความร้อนน้อยมากเท่าไรยิ่งดี

ขนาดตัวถังของ ไอจีบีที ลักษณะของผิวสัมผัสและแรงกดยึดตัวถังของ ไอจีบีทีเข้ากับแผ่นระบายความร้อน จะมีผลโดยตรงต่อค่า R_{cs} การใช้แผ่นชนวนกั้นระหว่างตัวถังกับแผ่นระบายความร้อนจะทำให้ค่า R_{cs} เพิ่มขึ้น แต่อาจจะทำให้ลดลงได้โดยการทาครีมระบายความร้อน เช่น ครีมซิลิโคน การทาครีมระบายความร้อนจะทำให้ค่า R_{cs} ลดลงเนื่องจากครีมจะช่วยลดช่องว่างระหว่างผิวสัมผัสให้น้อยลงค่าความต้านทานความร้อนจึงลดลง

2.5 เรโซแนนซ์

วงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่เกิดสถานะเรโซแนนซ์ (Resonance) หมายถึงวงจรที่มีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ของวงจรเท่ากับหนึ่ง นั่นคือกระแสที่ไหลในวงจรจะมีเฟสตรงกันกับแรงดันที่จ่ายให้กับวงจร และค่าอิมพีแดนซ์เทียบเท่าภายในวงจรจะเหลือแต่ค่าความต้านทานเพียงอย่างเดียวเท่านั้น เพราะค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ (Inductive Reactance) และค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ (Capacitive Reactance) จะหักล้างกันหมด ในขั้นพื้นฐานสามารถพิจารณาได้ 2 ลักษณะ คือ วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม และวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน

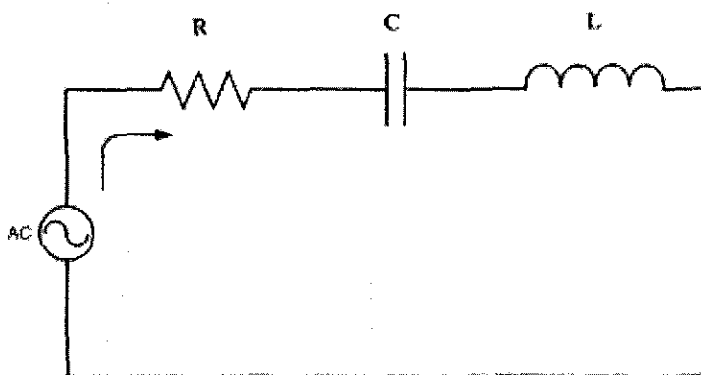
2.5.1 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Series resonance circuit)

$$Z = R + j(X_L - X_C) \quad (2.20)$$

ลักษณะพฤติกรรมทางไฟฟ้าของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมจะมีอิมพีแดนซ์ที่ตำแหน่งเรโซแนนซ์ต่ำที่สุด ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านวงจรจะมีค่ามากที่สุดทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าที่โหลดมีค่าสูงสุด วิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าทำได้โดยการลดแรงดันที่จ่ายให้วงจร หรือเลื่อนความถี่การใช้งานให้ต่ำหรือสูงกว่าตำแหน่งเรโซแนนซ์ เมื่อพิจารณาในรูปที่ 2.11 ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RLC ที่ต่อแบบอนุกรมจะมีค่าดังสมการที่ 2.20

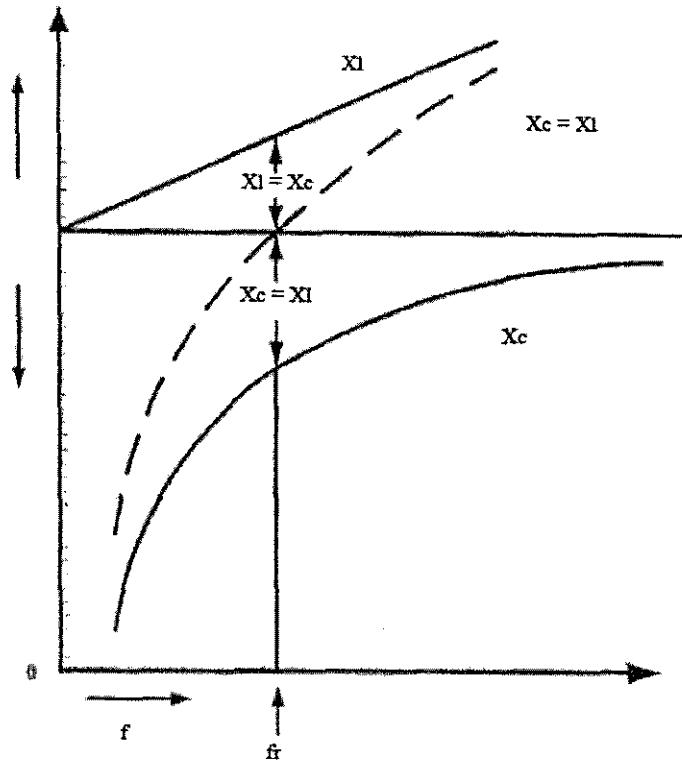
สถานะเรโซแนนซ์จะสามารถหาค่าความถี่ได้ดังสมการที่ 2.21

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.21)$$



รูปที่ 2.11 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

จากสมการ 2.21 จะพบว่า ค่าอิมพีแดนซ์จะขึ้นอยู่กับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า เนื่องจากค่า $X_L = 2\pi fL$ และ $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$ จากรูปที่ 2.12 จะเห็นว่าเมื่อความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น ค่า X_L จะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าของ X_C จะมีค่าลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นด้วย โดยผลรวมของค่ารีแอกแตนซ์จะมีค่าเท่ากับ $(X_L - X_C)$ ดังนั้นถ้าความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ามีค่าเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์จะมีผลทำให้ค่ารีแอกแตนซ์รวมมีค่าเป็นศูนย์ และอิมพีแดนซ์รวมของวงจรจะมีค่าเท่ากับค่าความต้านทาน ($Z=R$)

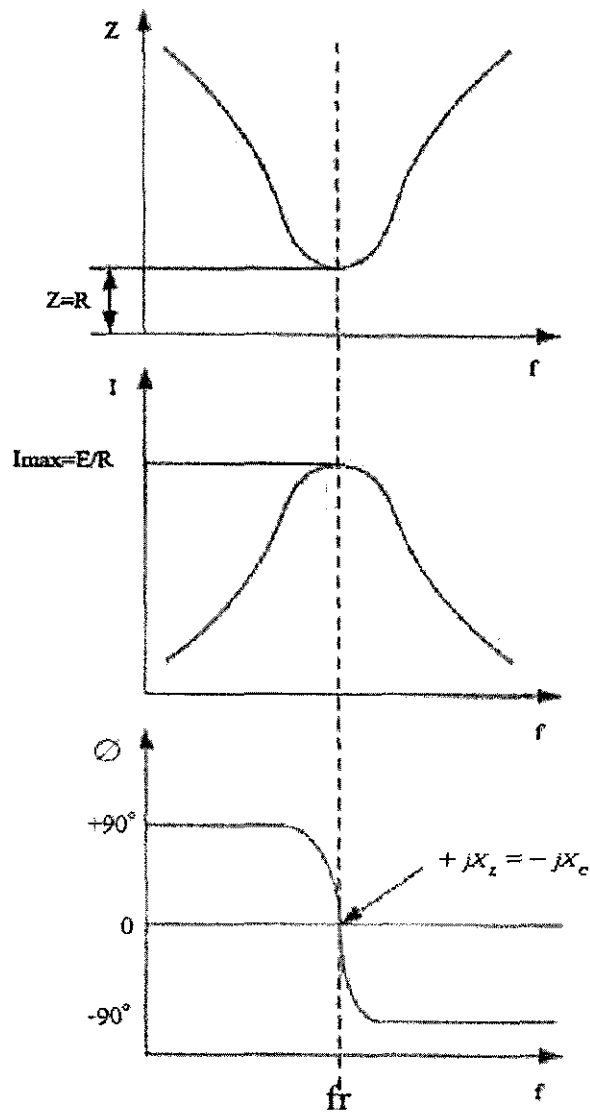


รูปที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ของ X_L และ X_C ต่อความถี่สำหรับวงจร RLC แบบอนุกรม

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (2.22)$$

$$I = \frac{V}{Z} \quad (2.23)$$

จากสมการที่ 2.22 และ 2.23 นำค่าอิมพีแดนซ์รวมและกระแสที่ไหลในวงจรที่ความถี่ใดๆ มาเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 อิมพีแดนซ์รวมและกระแสที่ไหลในวงจร RLC แบบอนุกรม ที่ความถี่ต่างๆ
กระแสในวงจรอนุกรม

$$I = \frac{V}{R + j(X_L + X_C)} \quad (2.24)$$

กระแสที่ไหลเมื่อเรโซแนนซ์ ($X_L = X_C$)

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.25)$$

จากรูป 2.13 พบว่ากราฟที่ได้จะมีค่าต่ำเมื่อความถี่ในวงจรไม่อยู่ที่จุดเรโซแนนซ์

2.5.1.1 ความถี่เรโซแนนซ์

$$X_L = 2\pi fL \quad (2.26)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2.27)$$

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2.28)$$

เมื่อ

L คือ ตัวเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็นเฮนรี (H)

C คือ ตัวเก็บประจุ มีหน่วยเป็น ฟาร์ด (F)

f คือ ความถี่ มีหน่วยเป็นเฮิรต (Hz)

2.5.1.2 แรงดันที่จุดเรโซแนนซ์

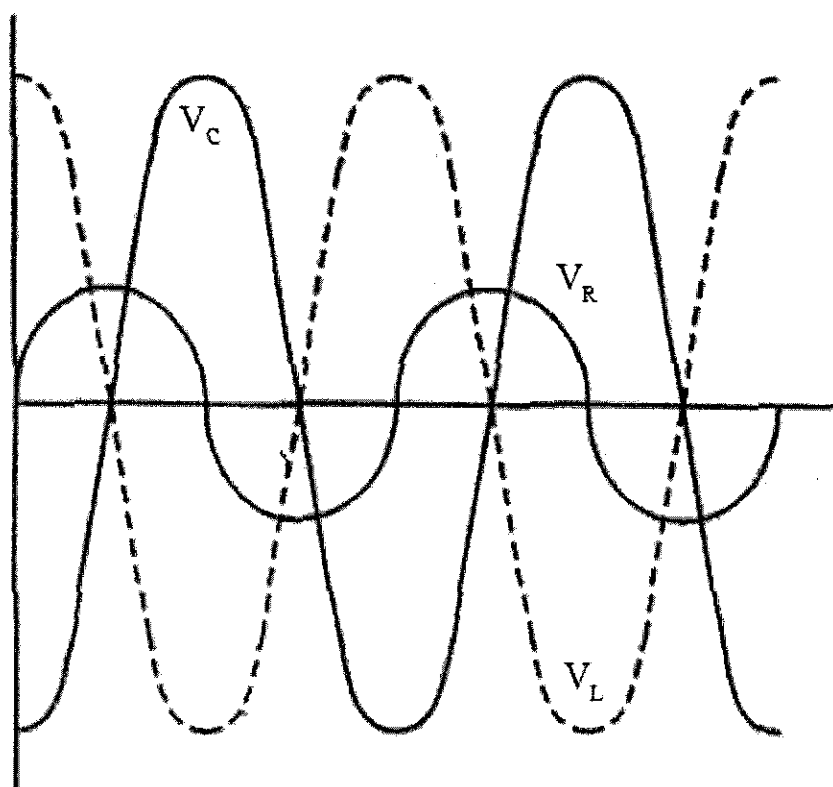
แรงดันที่จุดตกคร่อมตัวต้านทานในวงจร RLC จะมีค่าเท่ากับ $I \times R$ และที่จุดเรโซแนนซ์ แรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานจะมีค่าเท่ากับแรงดันที่แหล่งจ่าย ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าดังนี้

$$V_C = LX_C \quad (2.29)$$

$$V_L = LX_L \quad (2.30)$$

2.5.1.3 พลังงานที่ส่งผ่านระหว่าง L และ C

เมื่อนำรูปคลื่นสัญญาณของ V_R , V_C และ V_L ที่จุดเรโซแนนซ์มาพล็อตดังรูป 2.14 จะพบว่า V_L และ V_C จะกลับเฟสกัน 180 องศา ส่วน V_R จะมีค่ามากที่สุดเมื่อ V_C และ V_L มีค่าเท่ากับศูนย์ จากที่กล่าวมานี้แสดงให้เห็นว่ามีการส่งพลังงานระหว่าง L และ C กลับไปกลับมาเมื่ออยู่ในสภาวะเรโซแนนซ์



รูปที่ 2.14 ลักษณะสัญญาณแรงดันของ V_R , V_C และ V_L ที่จุดเรโซแนนซ์

2.5.1.4 Q แฟกเตอร์ของวงจรรอนุกรม LC

พิจารณาความสัมพันธ์ของ I , V_C , V_L ที่จุดเรโซแนนซ์

$$V = IR$$

$$V_L = IX_L$$

ดังนั้น

$$V_L = \frac{V \times X_L}{R}$$

$$\frac{V_L}{V} = \frac{X_L}{R}$$

อัตราส่วน $\frac{V_L}{V}$ และ $\frac{V_C}{V}$ คือค่าควอลิตี้ (Quality) ของวงจรเรโซแนนซ์หรือค่า Q แฟคเตอร์ นั่นเอง

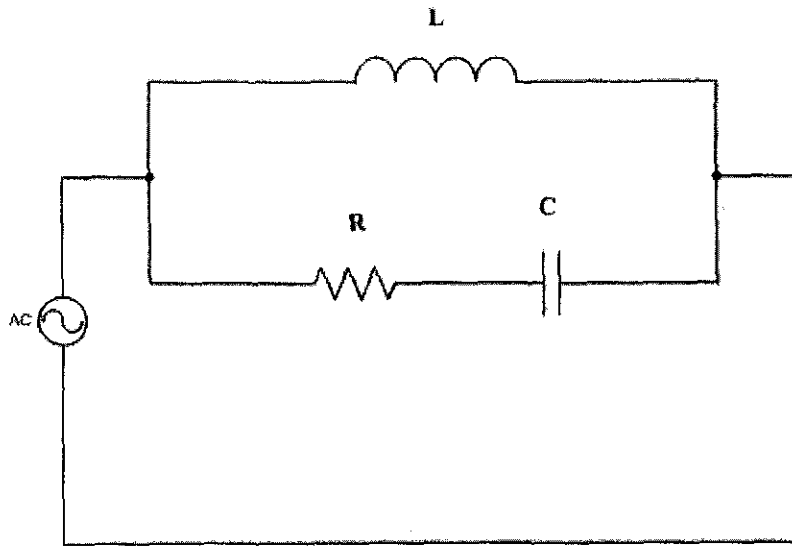
$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R} = \frac{1}{\omega CR} \quad (2.31)$$

จากสมการพบว่าค่า Q แฟคเตอร์ของวงจรอนุกรมเรโซแนนซ์สามารถเปลี่ยนแปลงได้เมื่อลดความต้านทานหรือโดยการเพิ่มอัตราส่วนของ L/C

2.5.2 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel resonance circuit)

วงจรเรโซแนนซ์แบบขนานแสดงไว้ดังรูป 2.15 ค่าแอดมิตแตนซ์ (Admittance) ของวงจรมีค่าดังสมการ 2.32

$$Y = \frac{1}{R} - j\frac{1}{X_L} + j\frac{1}{X_C} \quad (2.32)$$



รูปที่ 2.15 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน

ถ้าปรับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟไปจนกระทั่ง X_L และ X_C มีค่าเท่ากัน ค่าแอดมิตแตนซ์จะมีค่า

$$Y = \frac{1}{R_p} \quad (2.33)$$

และค่าอิมพีแดนซ์ มีค่า

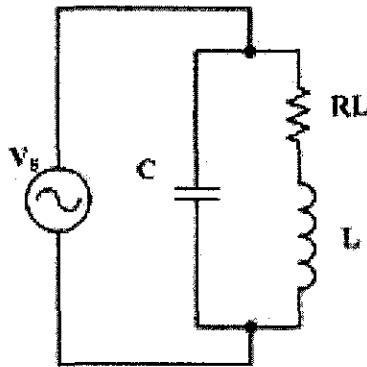
$$Y = \frac{1}{R_p} \quad (2.34)$$

กระแสจากแหล่งจ่ายมีค่า

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.35)$$

กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานจะมีมูอินเฟสกับแรงดันของแหล่งจ่าย กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีมูเฟสล่าหลังไป 90 องศา ส่วนกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะนำหน้าแรงดันอยู่ 90 องศา นั่นคือ มีการส่งพลังงานกลับไปมาระหว่างตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ

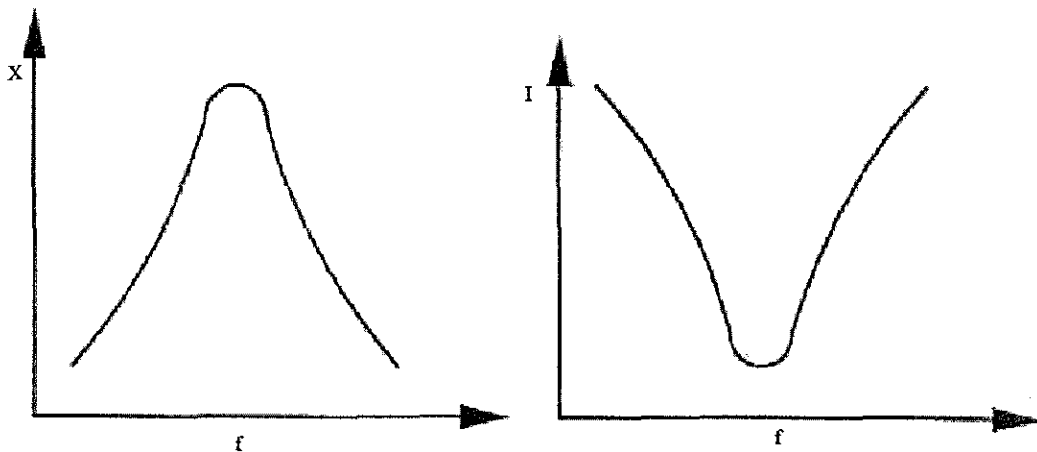
เนื่องจากความเป็นจริงในตัวเหนี่ยวนำจะมีความต้านทานรวมอยู่ด้วย ส่วนที่ตัวเก็บประจุจะมีค่าความต้านทานภายในตัวอยู่น้อยมาก สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 วงจรสมมูลของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน

เพราะฉะนั้นที่จุดเรโซแนนซ์

$$X_C = \frac{R_L^2 + X_L^2}{X_L} \tag{2.36}$$



ก) ค่าอิมพีแดนซ์กับความถี่

ข) ค่ากระแสกับความถี่

รูปที่ 2.17 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์และกระแสกับความถี่

2.5.2.1 Q แฟกเตอร์ของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน

จากรูป 2.17 พบว่าวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานจะมีค่าอิมพีแดนซ์สูงสุดที่ความถี่เรโซแนนซ์ ผลรวมของกระแสที่ไหลในวงจรที่มีความถี่เรโซแนนซ์นั้นจะมีเฟสเดียวกันกับแรงดันของแหล่งจ่าย กระแสจะมีค่าน้อยกว่า I_C และ I_L หลายเท่า ดังนั้นวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน L_C จะมีค่าการขยายกระแสค่า Q แฟกเตอร์คือค่าอัตราส่วนของ I_C หรือ I_L ต่อค่ากระแสจากแหล่งจ่าย

2.5.2.2 ความถี่ที่จุดเรโซแนนซ์

ค่าความถี่ที่จุดเรโซแนนซ์สำหรับวงจรขนาน LC เมื่อ $Q > 10$ คือ

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.37)$$

ในกรณีที่ $Q < 10$ ความถี่เรโซแนนซ์จะมีค่า

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{CR_L^2}{L}} \quad (2.38)$$

2.6 การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ

ขดลวดเหนี่ยวนำหรือขดลวดให้ความร้อน คือขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กไปเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ชิ้นงาน การออกแบบรูปร่าง ขนาด หรือจำนวนรอบขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ ประการเช่น ขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่างและชนิดของวัสดุที่ใช้ทำขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน ตลอดจนความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้ป้อนให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ ดังนั้นทั้งประสิทธิภาพ และตัวประกอบดังกล่าวข้างต้น หลักการพื้นฐานประกอบไปด้วย

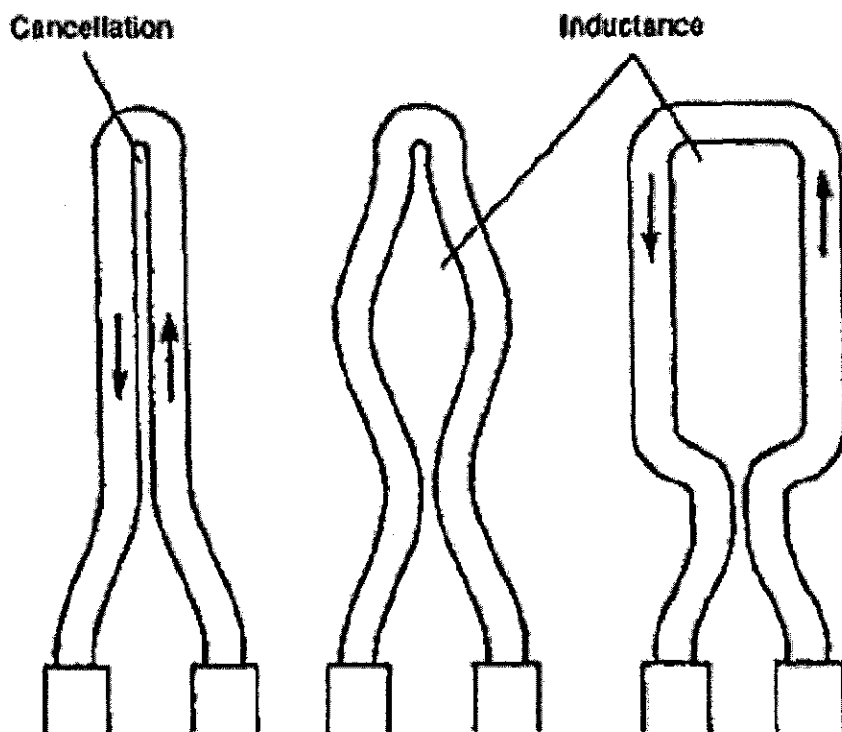
1) ขดลวดเหนี่ยวนำจะต้องอยู่ใกล้ชิ้นงานให้มากที่สุดเท่าที่ทำได้ เพื่อให้เกิดการส่งผ่านพลังงานสูงสุด สามารถอธิบายได้โดยการที่มีจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กตัดผ่านชิ้นงานได้มากขึ้นเมื่ออยู่ใกล้ชิ้นงานมากขึ้น

2) ในกรณีที่ขดลวดเหนี่ยวนำเป็นขด โซลินอยด์ เส้นแรงแม่เหล็กจะคล่องผ่านภายในขดลวดมากที่สุด ซึ่งตำแหน่งนี้จะให้อัตราการให้ความร้อนมากที่สุด

3) เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กจะมีความหนาแน่นมากที่สุดที่ตำแหน่งใกล้ขดลวดเหนี่ยวนำ และจะลดลงเมื่อห่างออกไป โดยที่ตำแหน่งศูนย์กลางของขดลวดเหนี่ยวนำจะมีเส้นแรงแม่เหล็กน้อยที่สุด ดังนั้นถ้าชิ้นงานถูกวางไม่ตรงกลางขดลวดเหนี่ยวนำ พื้นที่ที่อยู่ใกล้กับขดลวดเหนี่ยวนำ จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนมากกว่า ทำให้ไม่ได้ความร้อนสม่ำเสมอ

4) ที่จุดต่อของเส้นลวดตัวนำกับขดลวดเหนี่ยวนำ สนามแม่เหล็กจะมีค่าอ่อนมาก ดังนั้นศูนย์กลางสนามแม่เหล็กไม่จำเป็นจะต้องเป็นศูนย์กลางทางเรขาคณิต ด้วยเหตุนี้จะมีผลอย่างมาก สำหรับขดลวดเหนี่ยวนำที่มีรอบเดียว แต่ถ้ามีจำนวนรอบมากขึ้นสถานะนี้จะมีผลน้อยลง ในทางปฏิบัติแล้วจะจับชิ้นงานหมุนไปด้วยขณะที่มีการให้ความร้อน เพื่อให้ชิ้นงานได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอ

5) การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำจะต้องไม่ทำให้เกิดการหักล้างสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.18 ด้านซ้ายสุดจะไม่มีค่าอินดักแตนซ์ เพราะว่ามีตัวตรงข้ามของขดลวดเหนี่ยวนำอยู่ใกล้กันมากเกินไป การทำให้เกิดวงรอบในขดลวดเหนี่ยวนำจะทำให้เกิดค่าอินดักแตนซ์เพิ่มขึ้น การออกแบบในรูปที่ 2.18 ด้านขวาเป็นการออกแบบที่ดี

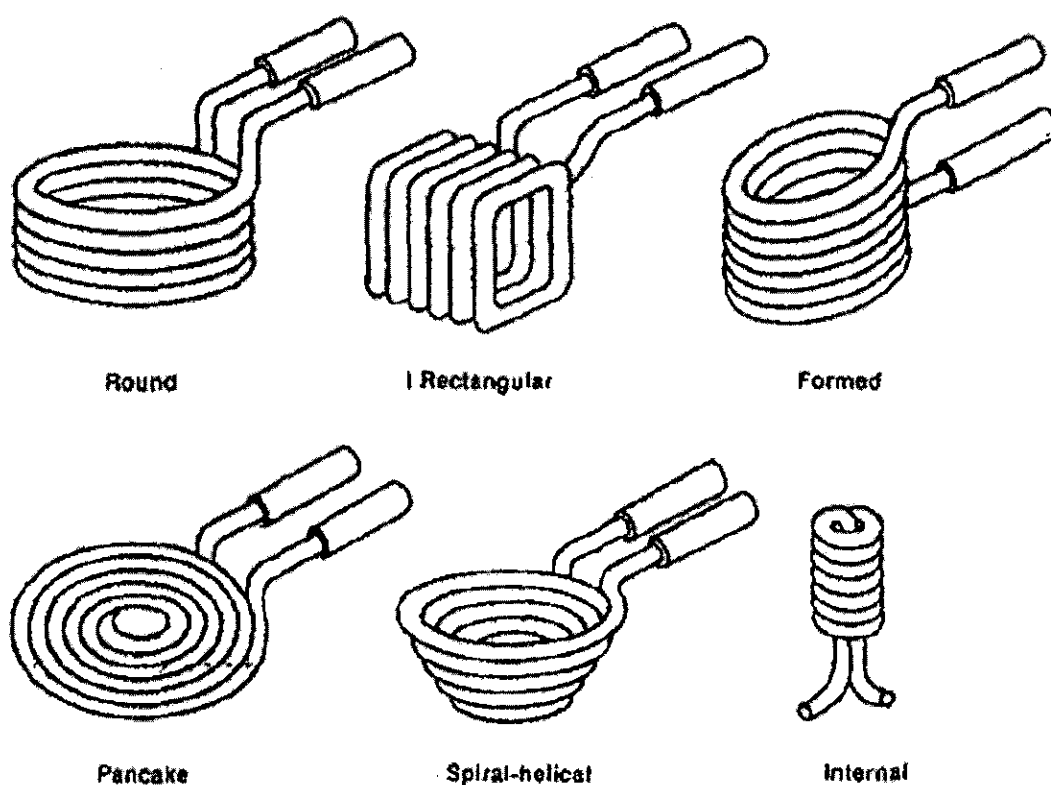


รูปที่ 2.18 การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำกับค่าอินดักแตนซ์

เนื่องจากเหตุผลข้างต้น ขดลวดเหนี่ยวนำจะต้องสามารถทำให้เกิดความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในพื้นที่ที่ต้องการให้ความร้อนได้ ตัวอย่างเช่น

- A helical solenoid จะให้ความร้อนแก่ชิ้นงานภายในขดลวดเหนี่ยวนำ
- A pancake coil จะให้ความร้อนเฉพาะบริเวณผิวหน้าด้านหนึ่งของชิ้นงาน
- An internal coil จะให้ความร้อนบริเวณรอบนอกของขดลวดเหนี่ยวนำ

โดยทั่วไปแล้วขดลวดเหนี่ยวนำจะทำขึ้นจากท่อทองแดงกลวง ทั้งนี้เพราะทองแดงเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ทำให้มีกำลังสูญเสียในขดลวดเหนี่ยวนำต่ำ ซึ่งจะมีผลให้ระบบมีประสิทธิภาพสูง อย่างไรก็ตามเนื่องจากความหนาแน่นของกระแสในขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าสูง ความร้อนที่เกิดจากกระแสที่ไหลในขดลวดเหนี่ยวนำจะมีค่ามาก ดังนั้นจึงต้องใช้ท่อทองแดงกลวง เพื่อให้สามารถระบายความร้อนที่เกิดขึ้นภายในขดลวดเหนี่ยวนำได้ด้วยของเหลว เช่น นำน้ำผ่านเข้าไปในท่อ



รูปที่ 2.19 ตัวอย่างของขดลวดเหนี่ยวนำชนิดต่างๆ

2.7 การประมาณกำลังงานของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน

การประมาณกำลังงานที่ได้ของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนความถี่สูงนั้นเราพิจารณาจากพลังงานความร้อนที่ชิ้นงานดูดกลืนได้ตลอดช่วงของการทดลอง โดยพิจารณาจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงาน จากสมการที่ 2.39 แสดงถึงพลังงานที่ชิ้นงาน (P_w) ต้องการได้รับในการเพิ่มอุณหภูมิ

$$P_w = mc \frac{T_f - T_{in}}{t} \quad (2.39)$$

โดยที่

P_w คือ กำลังงานที่ต้องการ (Watts)

m คือ มวลของชิ้นงาน (กิโลกรัม, kg)

c คือ ค่าความร้อนจำเพาะของชิ้นงาน ($J/kg^\circ C$)

T_{in} คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของชิ้นงาน ($^\circ C$)

T_f คือ อุณหภูมิสุดท้ายของชิ้นงาน ($^\circ C$)

t คือ เวลาที่ใช้ (วินาที, S)

2.8 สรุป

จากหลักการพื้นฐานการให้ความร้อนโดยวิธีเหนี่ยวนำด้วยความถี่สูงเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ดังที่กล่าวมาแล้วนั้นสามารถทำการสรุปเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

1) คุณสมบัติไฟฟ้าของวัสดุต่างๆ ที่นำมาใช้เป็นภาชนะหุงต้มจะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวัสดุนั้น ไม่ว่าจะเป็น สภาพความต้านทานทางไฟฟ้า ρ ของภาชนะหุงต้ม, ค่าซึมซาบแม่เหล็กไฟฟ้า μ , ความลึกผิว δ , สภาพความต้านทานของภาชนะหุงต้ม R_p , จำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ n และความถี่กระแสสลับที่ขดลวดเหนี่ยวนำ f ซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ทำให้ค่าความต้านทานเทียบเท่าและอินดักแตนซ์เทียบเท่าของวงจรเรโซแนนซ์เปลี่ยนไป โดยที่ภาชนะหุงต้มที่ทำด้วยสารอนเฟอร์โรแมกเนติก เช่น อลูมิเนียมและทองแดงจะมีค่าสภาพความต้านทานของภาชนะหุงต้ม R_p ต่ำมากเมื่อเทียบกับภาชนะที่ทำด้วยสาร เฟอร์โรแมกเนติก เช่น สเตนเลสและเหล็ก เป็นต้น โดยจะมีความแตกต่างกันถึงประมาณ 50 เท่า ดังนั้นเมื่อนำวัสดุที่ทำด้วยสาร อนเฟอร์โรแมกเนติก มาใช้เป็นภาชนะหุงต้มจะทำให้มีกระแสมากเกินไป เป็นผลให้ชุดอินเวอร์เตอร์เสียหายได้

ขณะเดียวกันถ้าเลือกภาชนะที่ทำจากสาร เฟอร์โรแมกเนติก ก็จะทำให้กระแสความถี่สูงจากวงจร อินเวอร์เตอร์ลดลงได้มาก

2) วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบขนานเหมาะที่จะนำมาใช้กับเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนความถี่สูง เนื่องจากต้องการกำลังงานมาก ดังนั้นวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานที่สามารถให้กระแสได้มากจึงถูกนำมาใช้กับเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนความถี่สูง

3) ชุดอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบขนานที่เหมาะสมกับเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนความถี่สูง จะเป็นอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ เนื่องจากสามารถให้กำลังงานได้สูง

4) สำหรับการควบคุมกำลังไฟฟ้า จะเลือกวิธีการปรับขนาดของสัญญาณพัลส์ ที่ใช้ขับเคลื่อน เกทของ ไอจีบีที คือถ้าขนาดของสัญญาณพัลส์กว้าง จะให้กำลังงานสูง

5) ความถี่เป็นตัวแปรสำคัญต่อประสิทธิภาพ ความลึกผิวในชิ้นงาน และกำลังเข้าของชิ้นงาน โดยที่เมื่อความถี่สูงขึ้น ความลึกผิวจะลดลงประสิทธิภาพและกำลังเข้าของชิ้นงานจะสูงขึ้น

บทที่ 3

การออกแบบและหลักการทํางานของวงจร

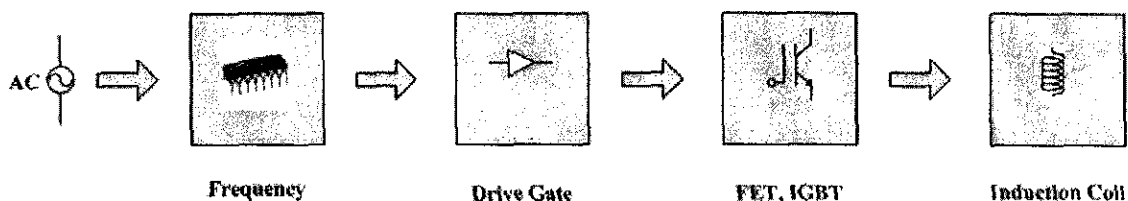
3.1 บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบ และหลักการทํางานของวงจรที่ใช้ควบคุมเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ โดยสามารถแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ วงจรเรียงกระแสและกรองกระแสทางด้านอินพุต (Rectifier & Filter), วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter), วงจรควบคุมอินเวอร์เตอร์ และ โหลดเรโซแนนซ์ (Load resonant) การออกแบบจะต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพที่จะได้ โดยทำการคัดสรรคircuit ไอซีและอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้วงจรมีคุณสมบัติตามที่ต้องการ

เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ได้รับการพัฒนาขึ้นนี้มีหลักการทํางานดังรูปที่ 3.1 เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนี้ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส 220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ โดยมีวงจรเรียงกระแสและวงจรกรองแรงดันเพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงป้อนให้กับวงจรต่างๆ ทั้งส่วนของวงจรควบคุมจากแรงดันที่เป็นส่วนให้กำเนิดสัญญาณความถี่ ส่วนวงจรรขยายสัญญาณ ส่วนของบัพเฟอร์และส่วนของวงจรภาคกำลัง ซึ่งส่วนของวงจรภาคกำลังจะใช้วงจรการทํางาน อินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ที่ใช้ IGBT เป็นอุปกรณ์สวิตช์ โดยจะใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ UC3879N ในการควบคุมการทํางานอุปกรณ์สวิตช์ IGBT นี้ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงจ่ายให้กับขดลวดเหนี่ยวนำที่พันรอบชิ้นงานทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำไหลในชิ้นงานและทำให้เกิดความร้อนขึ้น ชิ้นงานนั้นก็เปรียบเสมือนโหลดนั่นเอง

สำหรับระบบควบคุมที่ใช้ไอซีเบอร์ UC3879N ในการควบคุมความถี่ของสัญญาณจุดนำสวิตช์ผ่านวงจรขั้วนำเกิด โดยทํางานจากโหมคควบคุมแรงดันและจะมีสัญญาณเอาต์พุต 4 ค่า คือที่ขา 8, 9, 13 และ 14 โดยสัญญาณที่ออกมาจะมีลักษณะเป็นสัญญาณพัลส์รูปสี่เหลี่ยมที่สลับการทํางานกัน เพื่อควบคุม IGBT ให้ทํางานสลับกัน แต่สัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมที่ได้มีแรงดันเอาต์พุตน้อยเกินกว่าที่จะทำให้ IGBT ทํางานได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวงจรรขยายโดยใช้ทรานซิสเตอร์เป็นตัวขยายสัญญาณให้ได้แรงดันตามที่ต้องการ แต่ลักษณะของพัลส์ยังไม่ดีพอจึงใช้วงจบบัพเฟอร์ เข้ามาช่วยเพื่อให้ได้ลักษณะของสัญญาณและแรงดันตามที่ต้องการ

สัญญาณที่ได้จะป้อนเข้าสู่ส่วนของวงจรภาคกำลัง ซึ่งต่อวงจรแบบฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมการทํางานของ IGBT และสัญญาณที่ออกจากส่วนของวงจรภาคกำลัง จะป้อนเข้าที่วงจรโหลดเรโซแนนซ์ตัวเก็บประจุและส่วนของขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อให้เกิดความร้อน



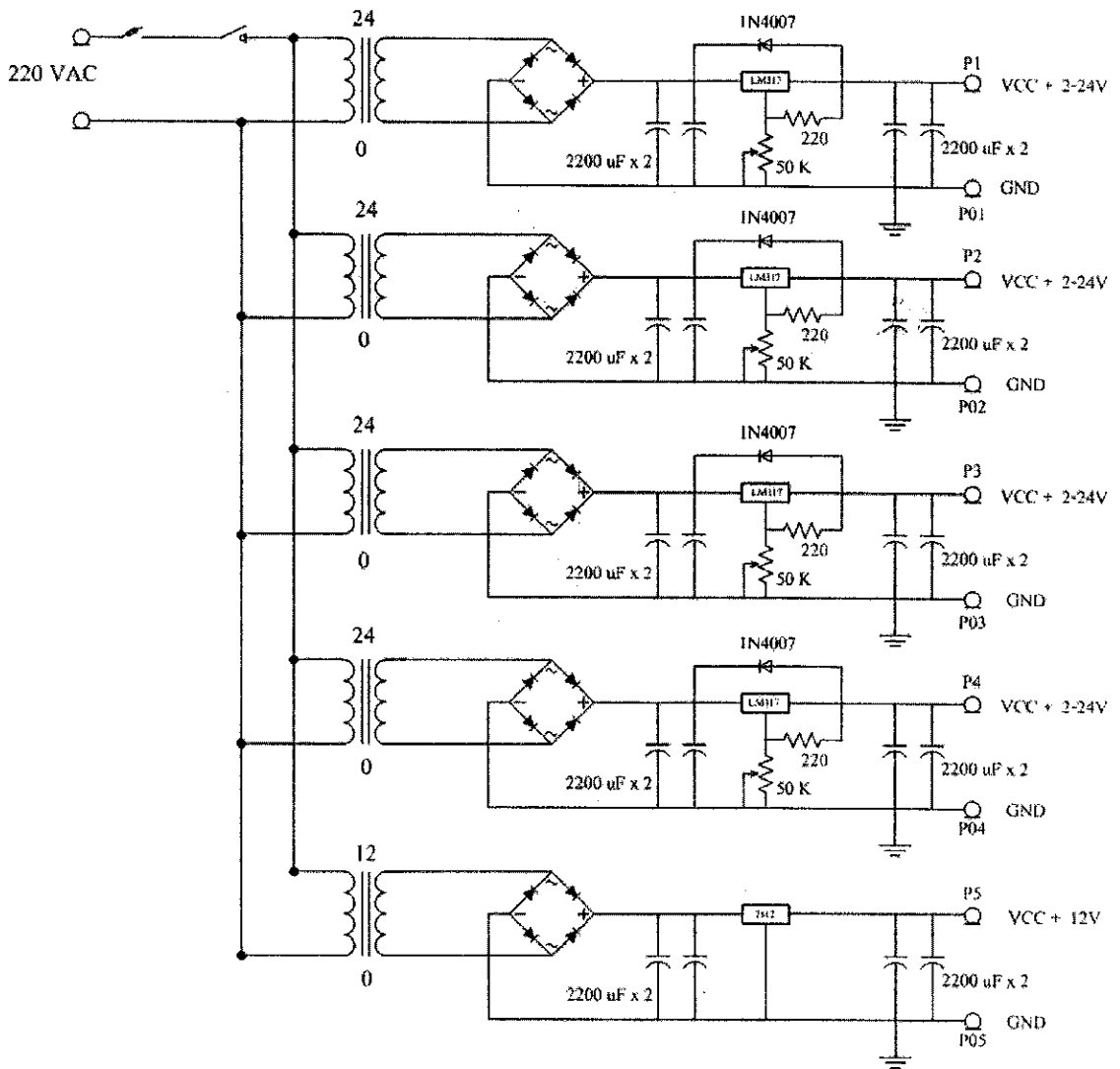
รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

3.2 วงจรเพาเวอร์ซัพพลาย

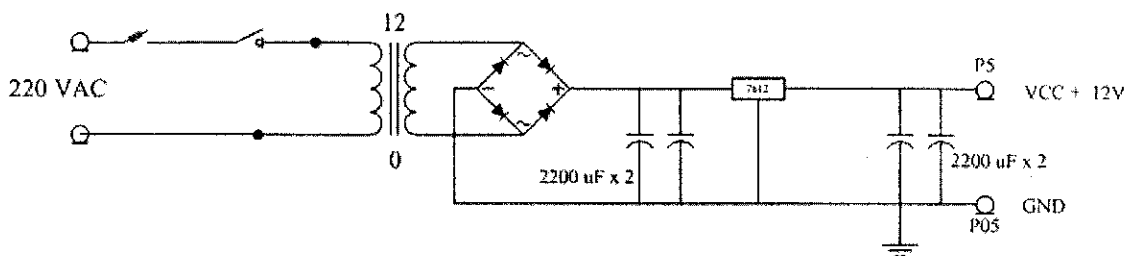
วงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับแรงดัน 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรซ์ เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ประกอบด้วย วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ และตัวเก็บประจุซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรกรองแรงดัน จากรูป 3.2 เพาเวอร์ซัพพลายซึ่งเป็นส่วนที่จ่ายไฟให้กับวงจรต่างๆ ทั้งส่วนของวงจรควบคุมจากแรงดันที่เป็นส่วนให้กำเนิดสัญญาณความถี่ ส่วนของวงจรขับนำแกด และส่วนของวงจรภาคกำลัง ซึ่งแต่ละส่วนต้องการแรงดัน ไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงต้องออกแบบเพื่อจ่ายไฟแต่ละส่วนให้พอดีกับอุปกรณ์ส่วนนั้นๆ เพื่อประสิทธิภาพของแต่ละวงจร โดยที่เราสามารถแยกวงจรเพาเวอร์ซัพพลายได้ทั้งหมดเป็น 3 ส่วนด้วยกันคือ เพาเวอร์ซัพพลายที่ใช้ในส่วนของวงจรควบคุมจากแรงดัน, เพาเวอร์ซัพพลายที่ใช้ในส่วนของวงจรขับนำแกด และ เพาเวอร์ซัพพลายที่ใช้ในส่วนของวงจรภาคกำลัง

3.2.1 เพาเวอร์ซัพพลายที่ใช้ในส่วนของวงจรควบคุมจากแรงดัน

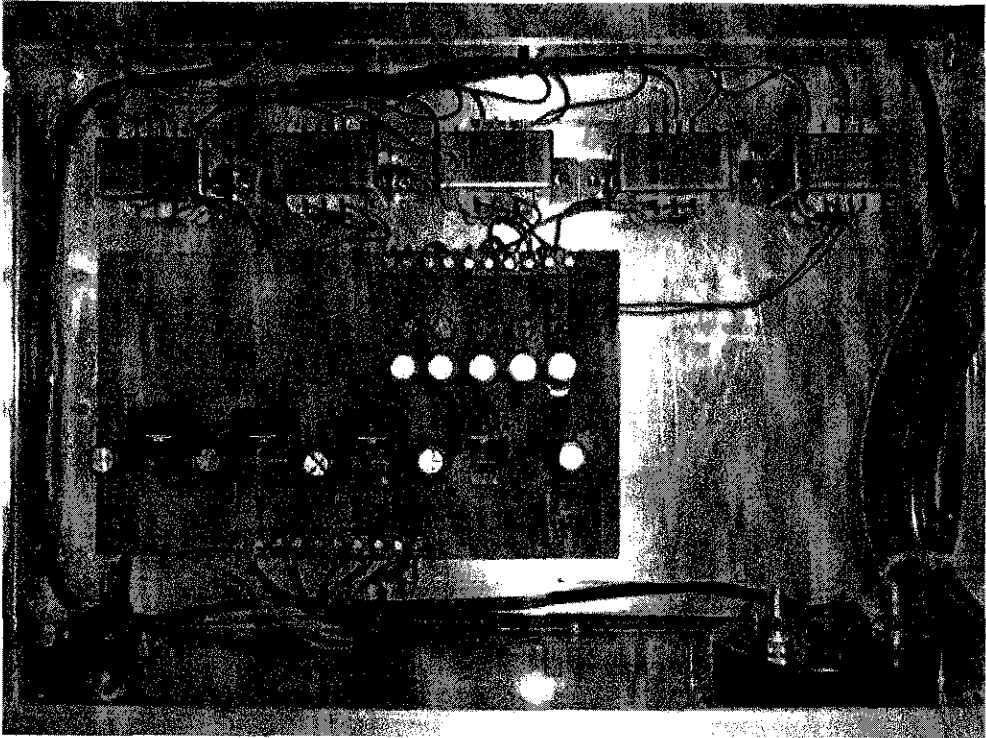
จากรูปที่ 3.3 วงจรชุดนี้เป็นวงจรที่ต้องการเอาท์พุท $12 V_{dc}$ เพื่อเป็นวงจรจ่ายไฟให้กับชุดวงจรควบคุมจากแรงดัน โดยวงจรชุดนี้จะรับไฟกระแสสลับแรงดัน 220 V ผ่านหม้อแปลง $12 V_{ac}$ เพื่อทำการแปลงแรงดันลง แล้วผ่านเข้าวงจรบริดจ์ไดโอดเพื่อทำการแปลงไฟกระแสสลับให้เป็นไฟกระแสตรง ที่มีแรงดัน $17 V_{dc}$ แต่แรงดันที่ได้อาจยังมีค่าไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นถ้าต้องการให้วงจรแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่สม่ำเสมอขึ้นจึงต้องมีวงจรกรองกระแส โดยที่วงจรกรองกระแสประกอบด้วยตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกันอยู่นั่นเอง วงจรชุดนี้ต้องการแรงดันไฟที่จ่ายให้กับวงจรเพียงแค่ $12 V_{dc}$ เท่านั้น แต่แรงดันหลังจากผ่านวงจรบริดจ์มีค่าถึง $17 V_{dc}$ ดังนั้นเราจึงใช้ไอซีเบอร์ 7812 เพื่อปรับแรงดันให้ได้ $12 V_{dc}$ ตามต้องการ โดยที่วงจรเพาเวอร์ซัพพลายรวมทั้งสร้างขึ้นจริงแสดงไว้ดังรูปที่ 3.4 และ รูปที่ 3.5 แสดงถึงวงจรจริงของเพาเวอร์ซัพพลายในส่วนของวงจรควบคุมจากแรงดัน



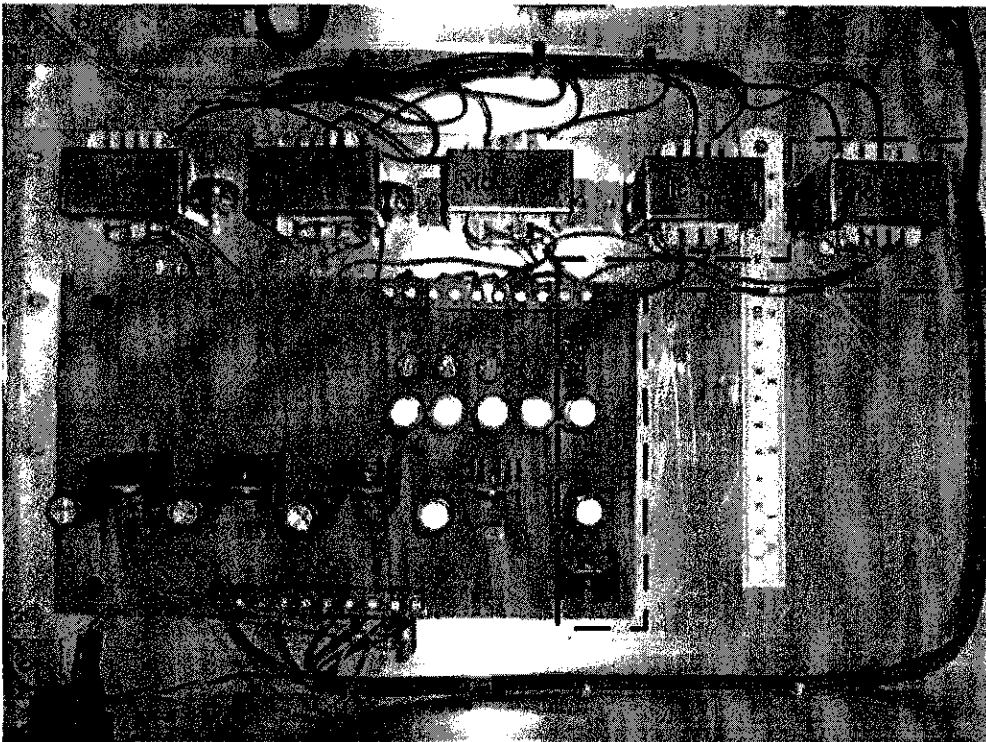
รูปที่ 3.2 วงจรเพาเวอร์ซัพพลาย



รูปที่ 3.3 เพาเวอร์ซัพพลายในส่วนของวงจรควบคุมจากแรงดัน



รูปที่ 3.4 วงจรจริงของเพาเวอร์ซัพพลาย



รูปที่ 3.5 วงจรจริงของเพาเวอร์ซัพพลายในส่วน of วงจรควบคุมจากแรงดัน

3.2.2 เพาเวอร์ซัพพลายที่ใช้ในส่วนของวงจรขั้วนำเกต

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

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

การออกแบบ LM317 ที่ต้องการเอาต์พุต 24 V_{dc}

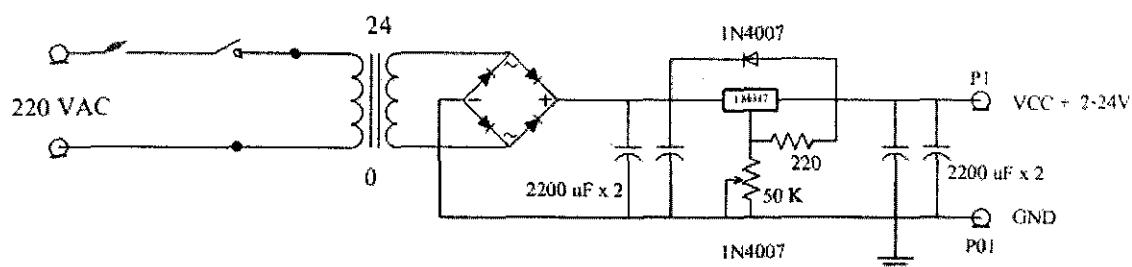
จากสูตร

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

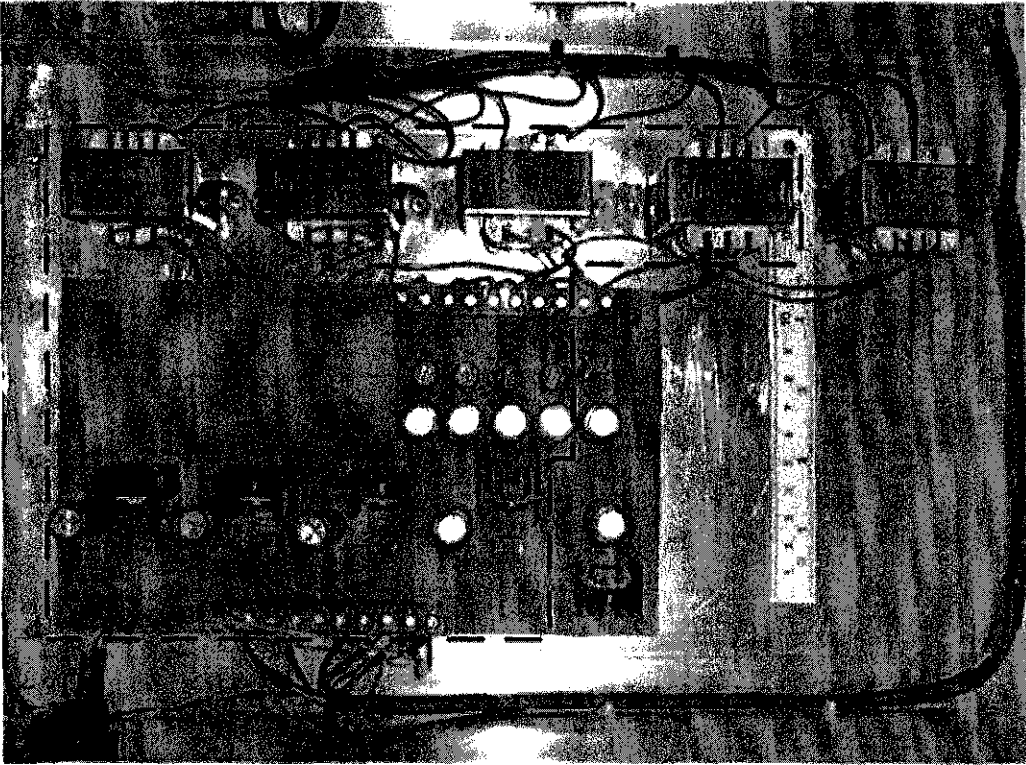
โดยที่ R₁ มีค่าเท่ากับ 220 โอห์ม จะได้

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

$$R_2 = 5k\Omega$$



รูปที่ 3.6 เพาเวอร์ซัพพลายในส่วนของวงจรขั้วนำเกต (หนึ่งในสี่ชุด)



รูปที่ 3.7 วงจรจริงของเพาเวอร์ซัพพลายในส่วนของวงจรขั้วนำเกต

3.2.3 เพาเวอร์ซัพพลายที่ใช้ในส่วนของวงจรภาคกำลัง

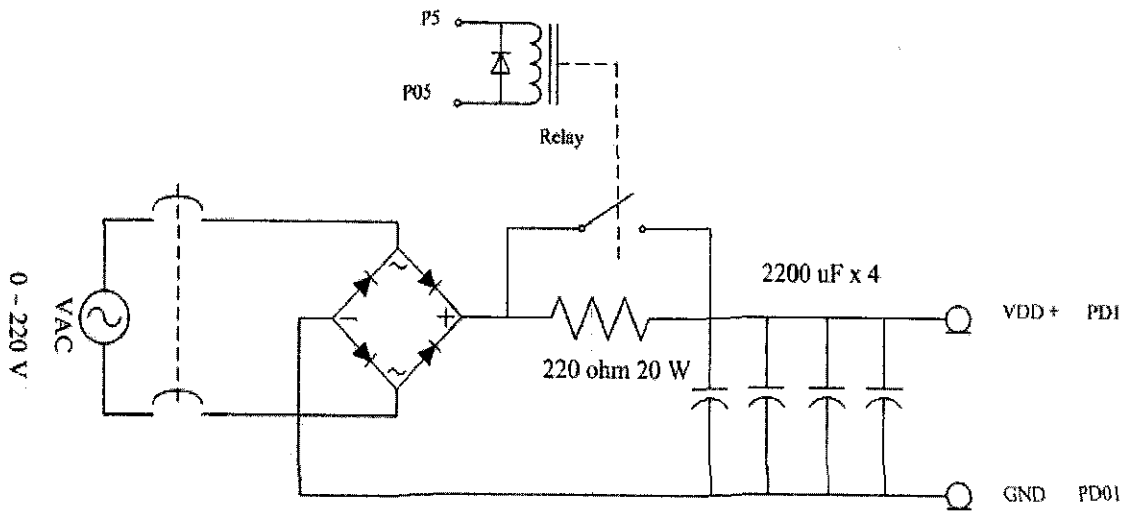
เพาเวอร์ซัพพลายที่ใช้ในส่วนของวงจรภาคกำลังแสดงดังรูป 3.8 วงจรชุดนี้ต้องการแรงดันไฟฟ้า 320 V_{dc} มาเป็นไฟเลี้ยงให้กับระบบของวงจรภาคกำลัง โดยวงจรส่วนนี้จะรับไฟกระแสสลับ 220 V เข้ามาผ่านชุดวงจรบริดจ์ไดโอดเพื่อทำการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง เอาท์พุทที่ออกจากบริดจ์ไดโอดจะต่อเข้ากับตัวเก็บประจุขนาด 4700 μ F ที่ต่อขนานกันอยู่ 2 ตัว จากวงจรส่วนนี้เราสามารถคำนวณค่าไฟฟ้ากระแสตรงจากสมการ 3.1 ได้ 320 V จากรูป 3.8 แสดงส่วนของวงจรเพาเวอร์ซัพพลายที่ใช้ในส่วนของวงจรภาคกำลัง วงจรจริงของเพาเวอร์ซัพพลายในส่วนของวงจรภาคกำลัง แสดงดังรูป 3.9

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

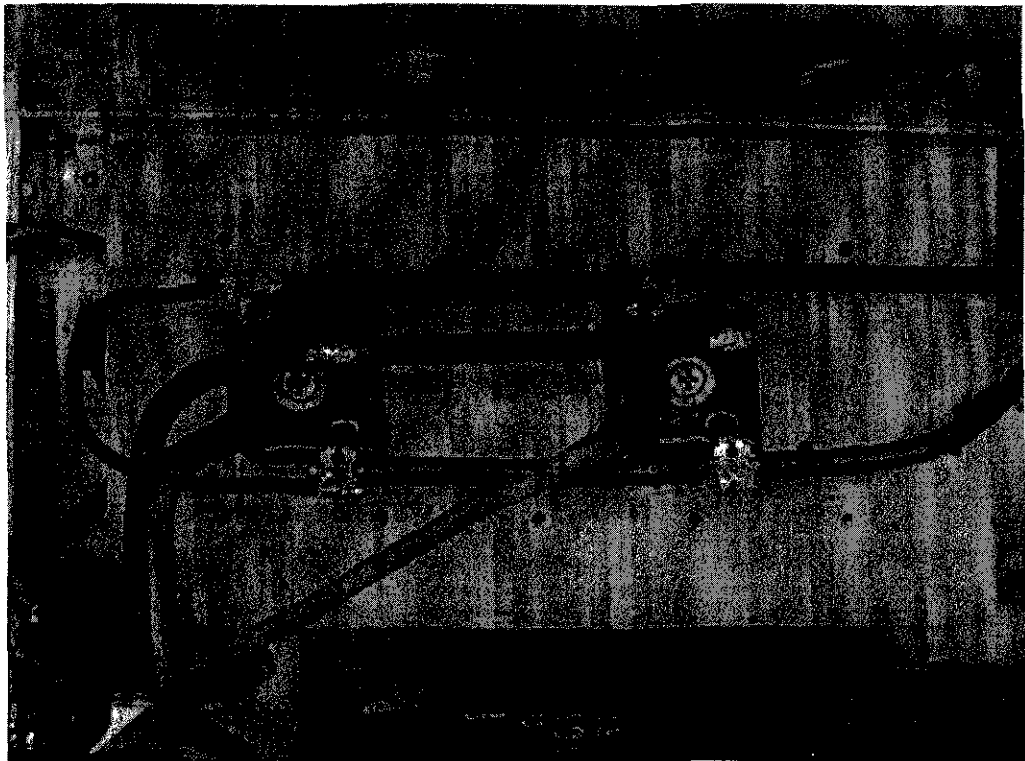
เมื่อ V_s คือ แรงดันที่ใช้งาน

V_D คือ แรงดันที่ตกคร่อมไดโอด

ดังนั้น $V_{DC} = (\sqrt{2} \times 220) - (2 \times 0.7)$
 $= 310V$



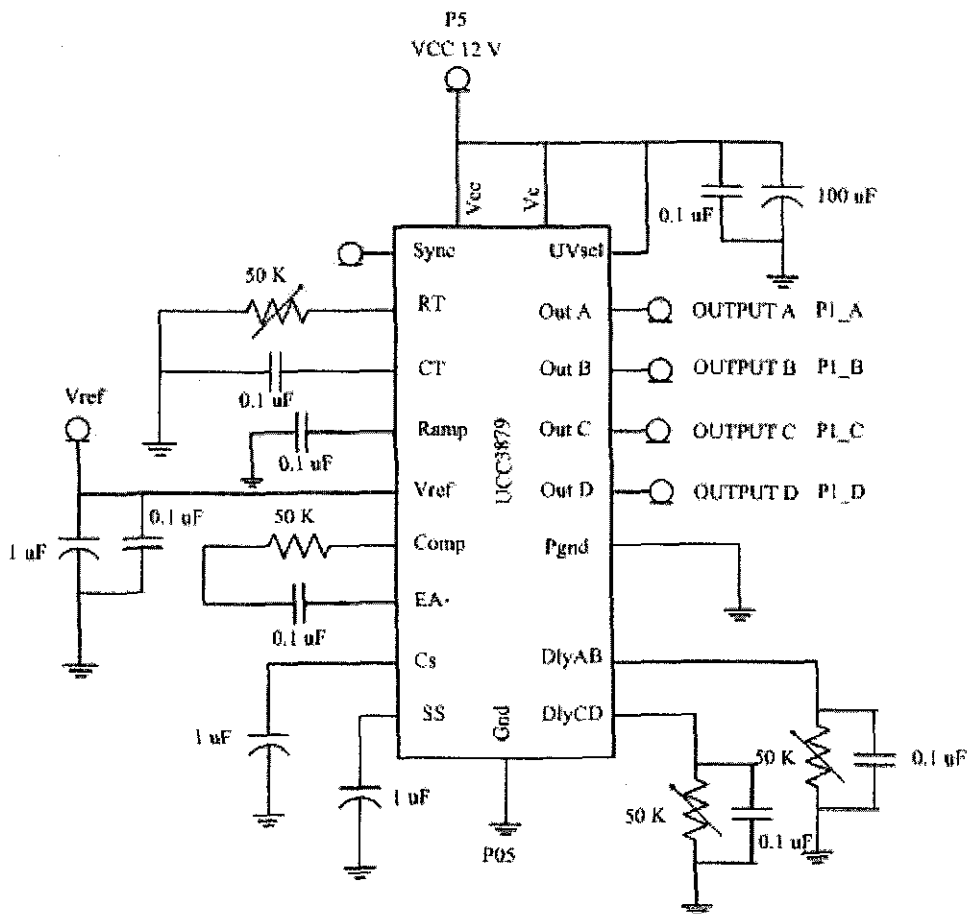
รูปที่ 3.8 เพาเวอร์ซัพพลายในส่วนของวงจรภาคกำลัง



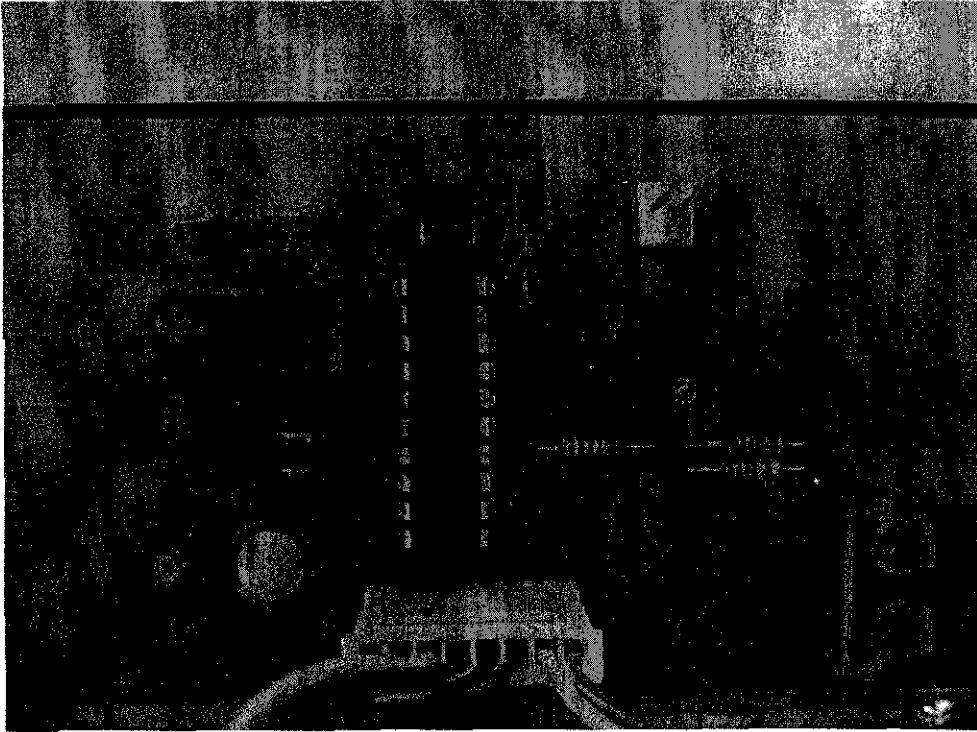
รูปที่ 3.9 วงจรจริงของเพาเวอร์ซัพพลายในส่วนของวงจรภาคกำลัง

3.3 การออกแบบวงจรควบคุมในโหมดของแรงดัน

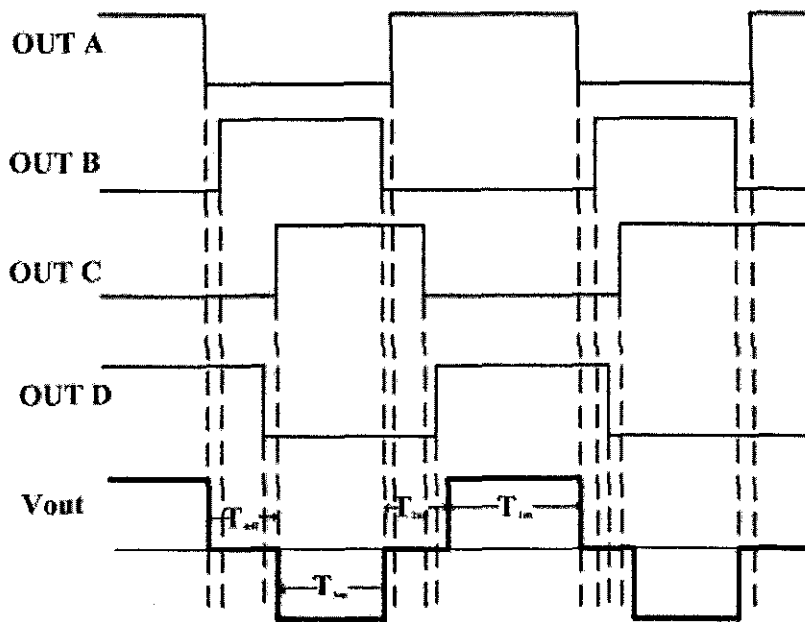
สำหรับวงจรควบคุมในโหมดของแรงดันนี้จะเป็นส่วนที่ใช้ควบคุมการทำงานของวงจรภาคกำลังอีกที เพื่อเป็นการกำหนดการทำงานของ IGBT แต่ละตัว โดยที่ส่วนของวงจรภาคกำลังมีแบบวงจรเป็นแบบเต็มบริดจ์ ดังนั้นจึงต้องใช้ไอซีที่สามารถกำเนิดเอาต์พุตได้ 4 ค่ามาควบคุม จึงได้เลือกใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ UC3879N ซึ่งเป็นไอซีที่มี 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 ของ ไอซี และตัวต้านทานที่ต่อกับขา 15 ของไอซี สำหรับปรับการประวิงสัญญาณพัลส์ของ OUT C และ OUT D สำหรับการปรับเวลาไร้ผลสนอง (Dead time) สามารถปรับได้โดยการปรับตัวต้านทานที่ขา 1-3 ของ ไอซี วงจรจริงของไอซีเบอร์ UC3879N แสดงไว้ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 ลักษณะวงจรของไอซีเบอร์ UC3879N



รูปที่ 3.11 วงจรจริงของไอซีเบอร์ UC3879N



รูปที่ 3.12 ลักษณะของสัญญาณที่ใช้ขับเคลื่อนของ IGBT และสัญญาณเอาต์พุต (V_{out}) ที่ตกร่วม
ขดลวดเหนี่ยวนำความถี่สูง

แรงดันเอาต์พุตที่ได้จะนำไปจะนำไปเป็นสัญญาณอินพุตของวงจรขับนำเกต โดยเรา กำหนดให้สัญญาณอินพุตทำงานไม่พร้อมกัน 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 กราฟ ด้านลบช่วง T_{3on} คือช่วงที่ G2 และ G3 ทำงาน ทั้งนี้สวิตช์ทั้ง 4 ตัวยังทำงานไม่พร้อมกันอีกด้วย โดย ที่กราฟ V_{out} คือลักษณะของสัญญาณที่ขดลวดเหนี่ยวนำ

3.4 การออกแบบวงจรขับนำเกต

IGBT จะทำงานเมื่อมีแรงดันมาทำให้เกิดการนำกระแสผ่านคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์ แรงดันที่เกตสามารถที่จะจ่ายได้จากวงจรหลายแบบ วงจรขับนำเกตจึงควรมีทั้ง ไบอัสบวกเพื่อให้ นำกระแส และไบอัสลบเพื่อให้หยุดนำกระแส การที่ต้องมีไบอัสลบเพื่อป้องกันการเกิดการ นำกระแสเนื่องจากมีสัญญาณรบกวนเข้ามาทางเกต

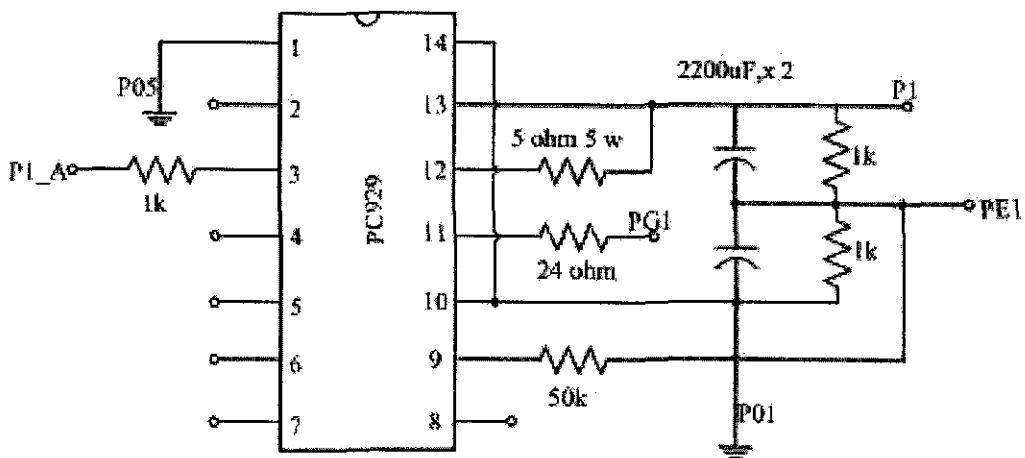
แรงดันขับเกตสำหรับช่วงนำกระแส แรงดันเกตควรอยู่ที่ระดับแรงดัน 12 V ค่านี้จะสูงเพียงพอที่จะทำให้ IGBT อิ่มตัวเต็มที่ และมีค่าสูญเสียในขณะนำกระแสน้อย และ IGBT จะหยุด นำกระแสเมื่อแรงดันเกตเป็นศูนย์ แต่อย่างไรก็ตาม เพื่อความมั่นใจควรมีไบอัสลบเพื่อป้องกันการรบกวนของสัญญาณเนื่องจาก $\frac{dv}{dt}$ ของแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์ นอกจากนี้การให้ไบอัสลบ ยังช่วยลดกำลังสูญเสียในขณะหยุดการนำกระแสอีกด้วย

ตัวต้านทานอนุกรมที่เกต R_g มีความสำคัญอย่างมาก เพราะค่าของความต้านทานที่ขาเกตนี้ จะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของ IGBT เมื่อระบบเริ่มนำกระแสและเริ่มหยุดนำกระแส โดยการเก็บ ประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุเกต ค่าความต้านทานที่ต่ำจะทำให้การเก็บประจุและคายประจุ ที่รวดเร็ว ทำให้ลดเวลาในการทำงานของสวิตช์ และลดกำลังสูญเสียในการสวิตช์ แต่ถ้าให้ตัว ต้านทานเกตมีค่าน้อยเกินไปอาจจะทำให้เกิดการรบกวนของสัญญาณที่เกตได้ง่าย และอาจนำไปสู่ ปัญหาการแกว่งระหว่างตัวเก็บประจุเกต-อิมิตเตอร์ กับ ค่าความเหนี่ยวนำอื่นๆที่ปนเข้ามา (parasitic inductance) ในวงจรขับนำเกต จากการวิจัยทางผู้วิจัยเลือกใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ PC929 ดังที่แสดง ในรูปที่ 3.13 และวงจรจริงของวงจรขับนำเกตผ่าน ไอซีเบอร์ PC929 แสดงดังรูปที่ 3.14

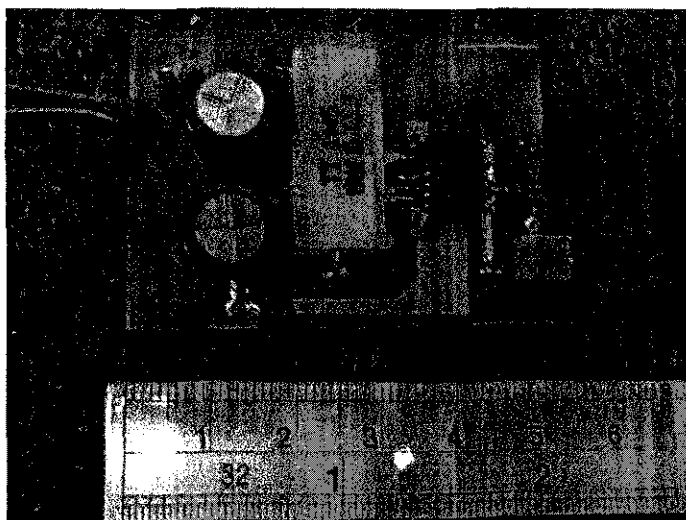
ข้อที่ต้องพิจารณาของชุดวงจรขับเกต

1. ภายในวงจรระหว่างเอาต์พุตของวงจรขับนำเกต และ IGBT จะต้องมีค่าความเหนี่ยวนำ แฉงน้อยที่สุด โดยค่าความเหนี่ยวนำแฉงที่เกิดจะขึ้นอยู่กับทำให้ loop area ที่เกิดจากเอาต์พุต ของวงจรขับนำเกตต่อเนื่องถึงขาเกต-อิมิตเตอร์ของ IGBT เล็กที่สุดเท่าที่จะทำได้

2. จะต้องหลีกเลี่ยงค่าความเหนี่ยวนำเชื่อมโยระหว่างวงจรถูกำลังและวงจรควบคุม ซึ่งอาจทำได้โดยการแยกชุดขั้วนำเกตออก หรือ ปิดกั้นวงจรขั้วนำเกต
3. ควรจะมี auxiliary emitter terminal ต่อเข้ากับชุดขั้วนำเกต
4. ถ้าการเชื่อมต่อโดยตรงระหว่างแผ่น PCB (Printed Circuit Board) ของวงจรขั้วนำเกตกับขั้วของ IGBT ไม่สามารถทำได้ ให้ใช้สายพันตีเกลียวหรือ strip line แทน
5. วงจรป้องกันแรงดันเกตจะต้องอยู่ใกล้กับจุดต่อเกต-อิมิตเตอร์ ของ IGBT ให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้



รูปที่ 3.13 แสดงวงจรขั้วนำเกตผ่านไอซีเบอร์ PC929



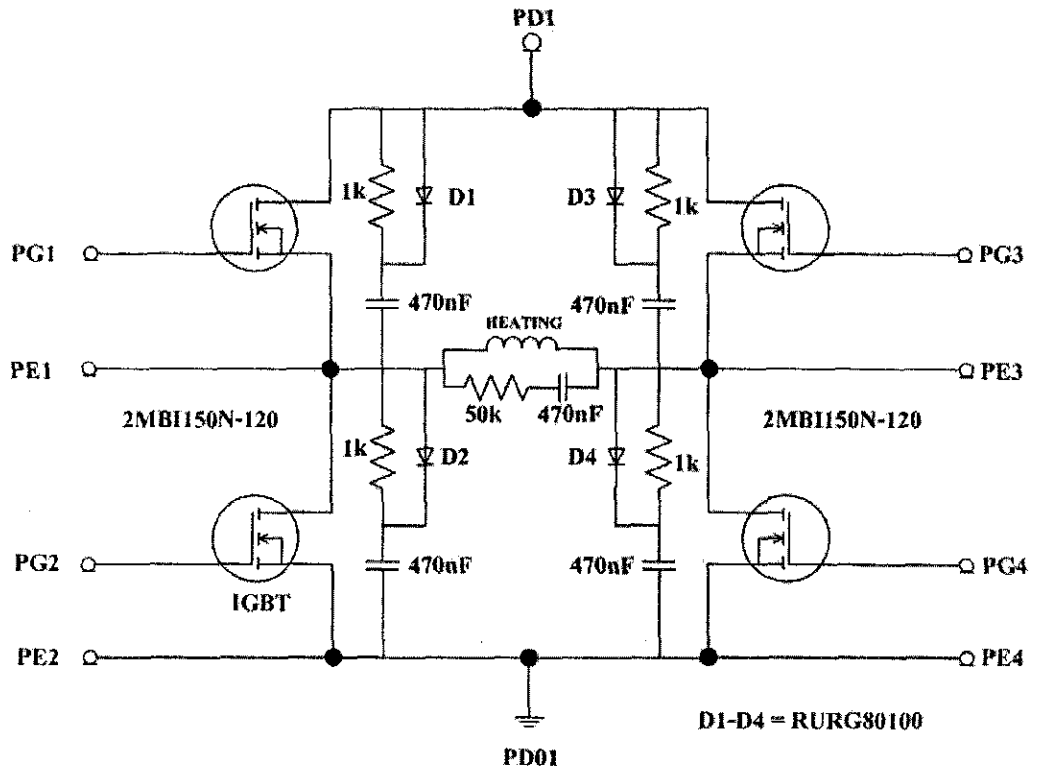
รูปที่ 3.14 วงจรจริงของวงจรขั้วนำเกตผ่านไอซีเบอร์ PC929

6. สำหรับลายวงจรบนแผ่นวงจรจะต้องไม่เดินใกล้กันเพื่อหลีกเลี่ยง mutual potential change ระหว่างที่ IGBT กำลังทำการสวิตช์ ค่า $\frac{dv}{dt}$ สูงๆ อาจทำให้เกิดสัญญาณรบกวนผ่านค่าความจุแฝง ถ้าไม่สามารถเลี่ยงการตัดกันหรือขนานกันใกล้เกินไปของลายวงจรบนแผ่นวงจรพิมพ์ก็ควรจะต้องปิดกั้นลายวงจรระหว่างกัน

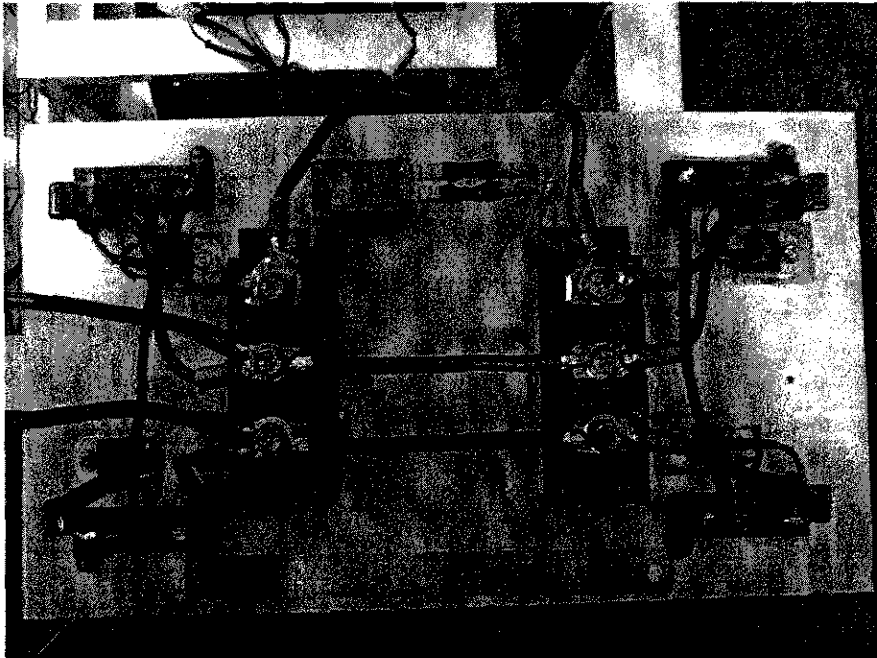
7. ค่าความจุแฝงระหว่างด้านแรงดันสูงและด้านแรงดันต่ำของวงจรขับเคลื่อน และวงจรควบคุมอาจทำให้เกิดปัญหาการเชื่อมโยงสัญญาณรบกวนได้ หม้อแปลงของแหล่งจ่ายที่มีขดลวดหลายขด อาจทำให้เกิดตัวเก็บประจุระหว่างกัน จนทำให้เป็นแหล่งเชื่อมโยงการเกิดสัญญาณรบกวนได้เช่นกัน จะต้องทำการวัดเพื่อลดค่าความจุ

3.5 การออกแบบวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 3.15 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้ 320 V จะป้อนให้กับวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ IGBT เบอร์ 2MBI100-120 จำนวน 2 ตัว เป็นอุปกรณ์สวิตช์ โดยที่ IGBT ทั้ง 4 ตัว จะทำงานเป็นคู่สลับกันคือ คู่ SW1 และ SW4 จะนำกระแสพร้อมกันในช่วงครึ่งคาบสัญญาณแรก ส่วนครึ่งคาบสัญญาณหลัง SW2 และ SW3 นำกระแสแทน ส่วน คู่ SW1 และ SW4 หยุดนำกระแส ทำให้แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าขอดถึงขอดเท่ากับสองเท่าของแรงดันไฟตรง (V_g) ที่ป้อนให้กับวงจรภาคกำลังและมีความถี่เท่ากับการทำงานของวงจรถ้าเนคสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse width modulation, PWM) ที่จับให้กับ IGBT ทำงาน และวงจรจริงของฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ แสดงดังรูป 3.16



รูปที่ 3.15 แสดงวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.16 วงจรจริงของฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์

3.6 การออกแบบวงจรเรโซแนนซ์

วงจรเรโซแนนซ์ เป็นวงจรผสมระหว่างตัวเก็บประจุกับขดลวดเหนี่ยวนำซึ่งมีความสำคัญในการใช้งานกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยผลต่อสัญญาณกระแสสลับของขดลวดและตัวเก็บประจุซึ่งแตกต่างกัน ในทางตรงกันข้าม จะทำให้เกิดผลต่อแรงดันในกระแสตรง และกระแสสลับในลักษณะต่างๆ เช่น เกิดการจ่ายและรับกระแสให้ซึ่งกันและกัน ทำให้เกิดสัญญาณกระแสสลับตกคร่อมวงจร แต่เมื่อวงจรได้รับแรงดันกระแสตรงจะเกิดการต่อต้านและยอมให้สัญญาณกระแสสลับบางความถี่ผ่านได้ เป็นต้น

จากการออกแบบวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน โดยจะใช้ตัวเก็บประจุค่า 470 nF แต่เรายังไม่ทราบค่าตัวเหนี่ยวนำค่า ดังนั้นเราสามารถคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำเพื่อนำไปคำนวณความถี่เรโซแนนซ์ ของระบบได้ดังนี้

$$L = \frac{a^2 N^2}{9a + 10b}$$

$$= \frac{8.75^2 (11)^2}{9(8.75) + 10(3.5)}$$

$$L = 81.44 \mu H$$

จากค่าตัวเหนี่ยวนำที่คำนวณได้ สามารถนำไปคำนวณหาความถี่เรโซแนนซ์ได้ดังนี้

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{470(nF) \times 81.44(\mu H)}}$$

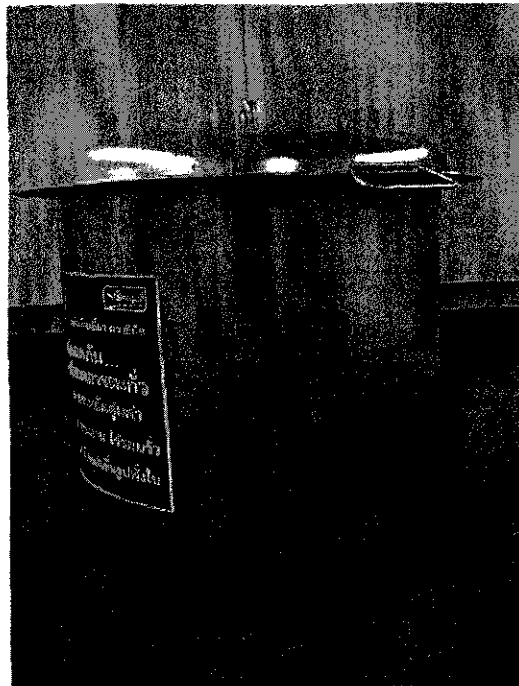
$$f = 25.72 \text{ kHz}$$

จากผลการคำนวณที่ได้ความถี่เรโซแนนซ์ คือ 25.72 kHz

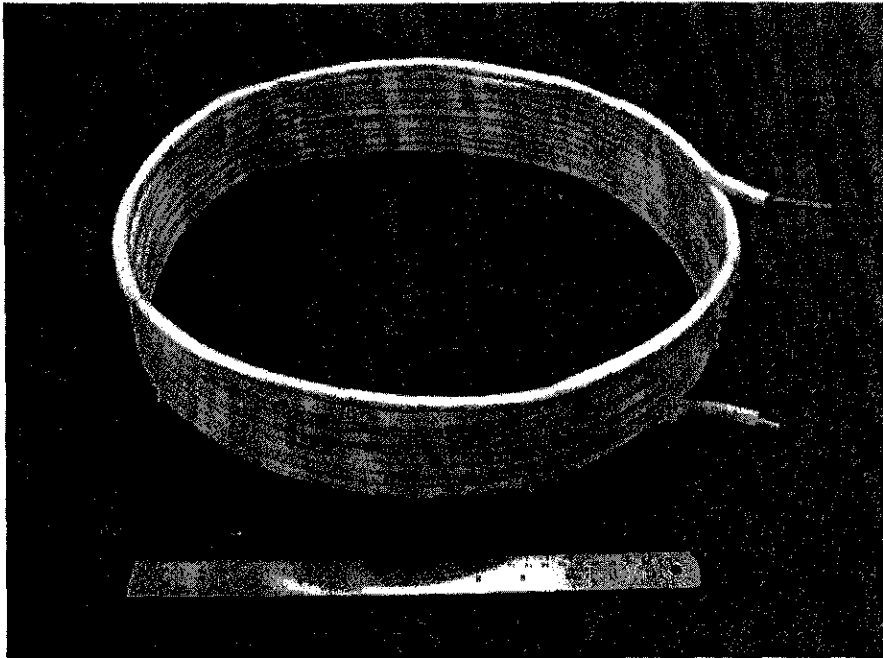
3.7 ลักษณะของภาชนะที่ใช้และการออกแบบขวดลวดเหนียวนา

เนื่องจากเครื่องเหนียวนำที่สร้างขึ้นมีจุดประสงค์เพื่อนำไปประกอบการอาหาร (หม้อก๋วยเตี๋ยว) ทางผู้วิจัยจึงเลือกใช้ภาชนะที่เป็นหม้อก๋วยเตี๋ยวจริงๆ ที่มีขายอยู่ตามท้องตลาดทั่วไปแต่มีคุณสมบัติเป็นสาร Ferro Magnetic ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของภาชนะ 40 เซนติเมตร สูง 45 เซนติเมตร ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.17

จากลักษณะของหม้อต้มก๋วยเตี๋ยวที่แสดงดังรูปที่ 3.17 ขนาดของขวดลวดที่นำมาใช้พันรอบภาชนะจึงต้องเลือกที่เหมาะสมกับขนาดของภาชนะที่ใช้ ทางผู้วิจัยจึงเลือกใช้ท่อทองแดงขนาด 0.625 เซนติเมตร พันรอบภาชนะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 43.75 เซนติเมตร จำนวน 11 รอบ ดังที่แสดงในรูปที่ 3.18

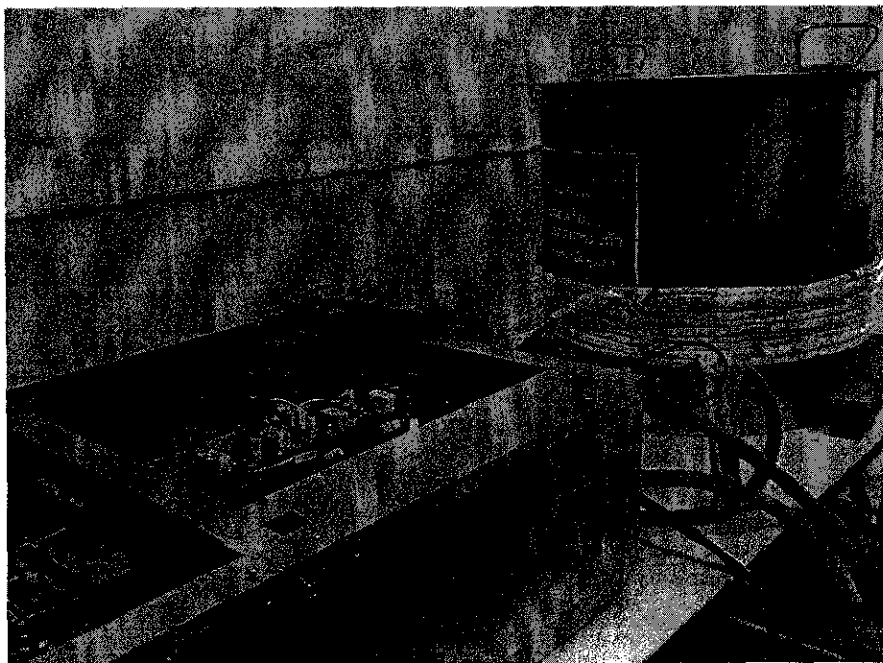


รูปที่ 3.17 ลักษณะของหม้อก๋วยเตี๋ยวที่เลือกใช้



รูปที่ 3.18 ลักษณะของขดลวดเหนี่ยวนำ

จากลักษณะของภาชนะที่ใช้และขดลวดเหนี่ยวนำที่สร้างขึ้นเมื่อนำมาประกอบกับตัวเครื่องให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำแล้วจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 ลักษณะของเครื่องให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำและภาชนะที่ใช้

3.8 สรุป

ในการออกแบบวงจรเหนี่ยวนำความร้อนด้วยสวิตช์ความถี่สูงสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งใช้หลักการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ คือ ภาควงจรขับกำลัง สัญญาณออกแบบด้วย IGBT เบอร์ 2MBI150N-120 โดยต้องมีข้อมูลที่ต้องพิจารณาในการออกแบบ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้าขาเข้า กระแสที่ใช้ วงจรสับเบอร์ วงจรเรโซแนนซ์

เช่นเดียวกับการออกแบบภาควงจรกำเนิดสัญญาณซึ่งใช้ไอซีเบอร์ UC3879N เป็นตัวควบคุมลำดับการทำงานของสวิตช์แต่ละตัว โดยการออกแบบวงจรมกำเนิดสัญญาณนี้ต้องคำนึงถึงลำดับการทำงานของสวิตช์ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

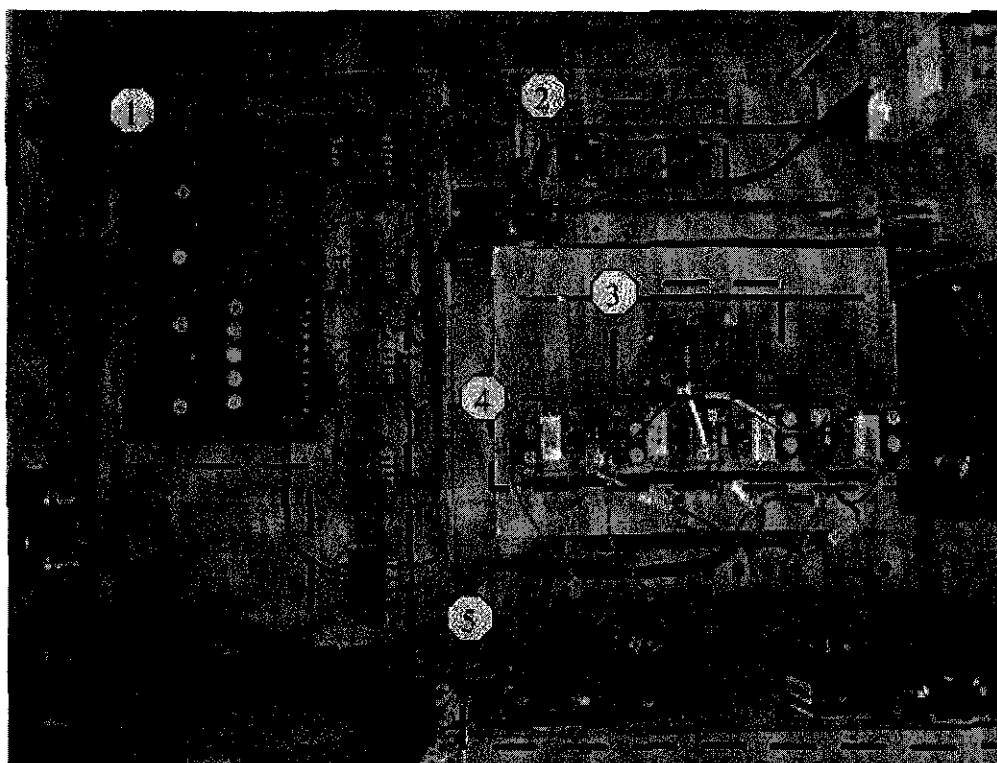
การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับการให้ความร้อนของวงจรเหนี่ยวนำความร้อนด้วยสวิตช์ความถี่สูง พิจารณาการใช้ขดลวดทองแดงพันเป็นขด ที่สามารถเกิดการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีที่สุดและเหมาะสมกับงานมากที่สุดและพิจารณาการเรโซแนนซ์ของวงจรภาคกำลังซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดสำหรับการให้ความร้อน

บทที่ 4

การทดสอบและผลการทดสอบเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน

4.1 บทนำ

บทนี้กล่าวถึงการทดสอบการทำงานของวงจร และผลการทดสอบวงจรต่างๆ ของให้ความร้อน โดยการเหนี่ยวนำด้วยสวิตซ์ความถี่สูง ซึ่งเราสามารถแยกส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่อง ได้ดังรูปที่ 4.1

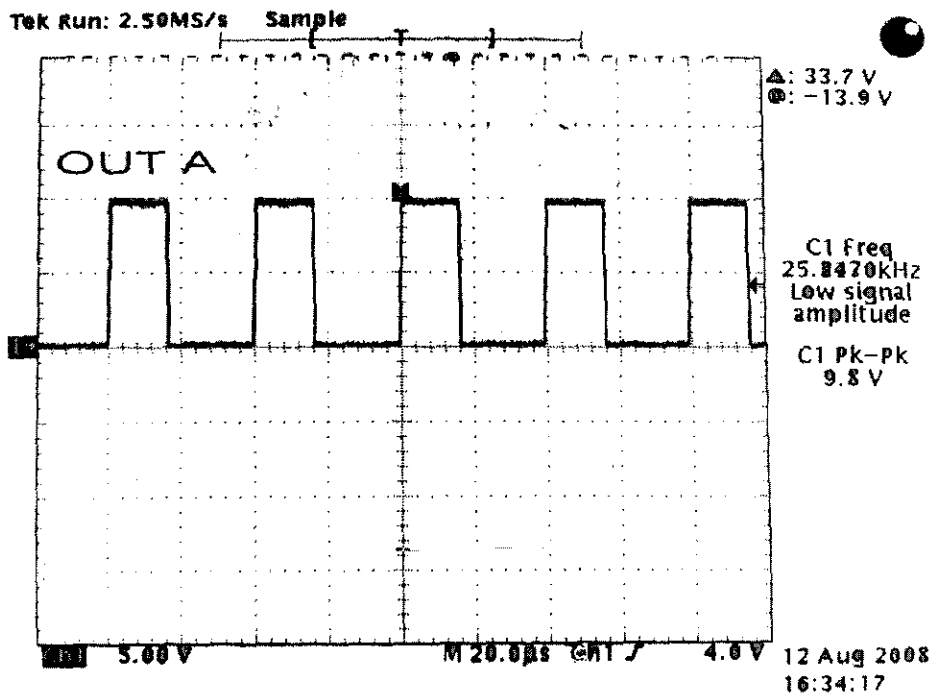


รูปที่ 4.1 เครื่องให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำ

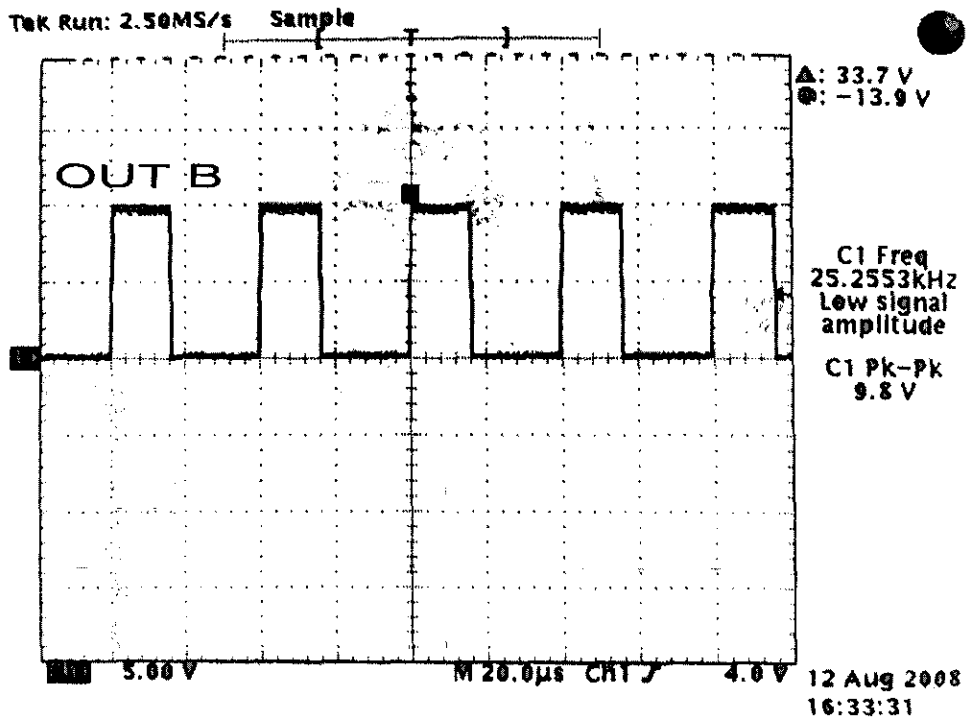
- โดยที่
- 1) เพาเวอร์ซัพพลายที่ใช้ในส่วนของวงจรควบคุมจากแรงดันและวงจรขับเคลื่อน
 - 2) เพาเวอร์ซัพพลายที่ใช้ในส่วนของวงจรภาคกำลัง
 - 3) วงจรควบคุมในโหมดของแรงดัน
 - 4) วงจรขับนำเกต
 - 5) วงจรฟลูบริดจ์อินเวอร์เตอร์

4.2 การทดสอบวงจรควบคุมในโหมดของแรงดัน

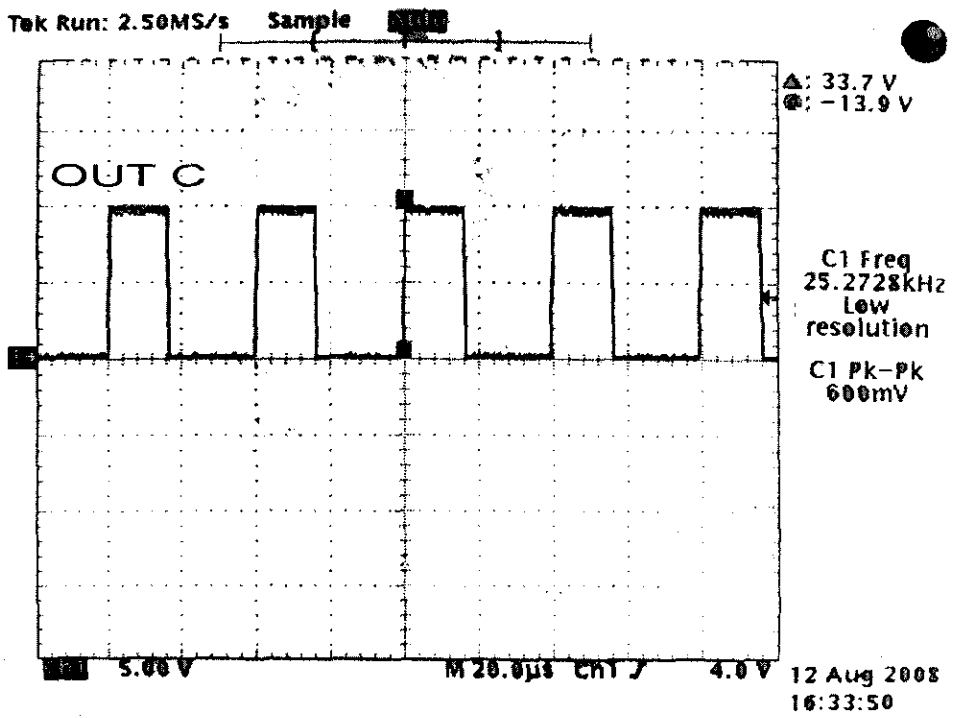
ในส่วนวงจรควบคุมในโหมดของแรงดันนี้ เป็นการสร้างสัญญาณพัลส์ขึ้นมา 4 สัญญาณ เพื่อนำเป็นสัญญาณอินพุตให้กับวงจรขับเคลื่อนอีกทีหนึ่ง โดยที่สัญญาณที่ได้จากไอซีเบอร์ UC3879N นั้นเราสามารถที่จะปรับความถี่ของสัญญาณและปรับเฟสของสัญญาณแต่ละตัวได้ เพื่อให้ได้สัญญาณตามที่ต้องการ โดยสัญญาณ OUT A จะได้สัญญาณเอาต์พุตจากขา 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



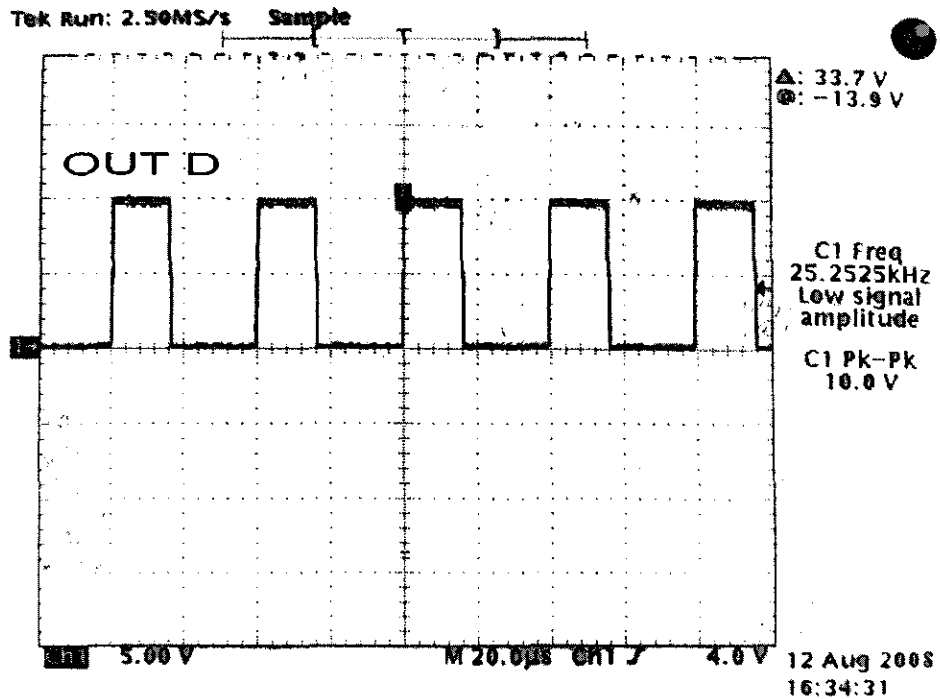
รูปที่ 4.2 ลักษณะของสัญญาณ OUT A จากไอซี UC3879N



รูปที่ 4.3 ลักษณะของสัญญาณ OUT B จากไอซี UC3879N



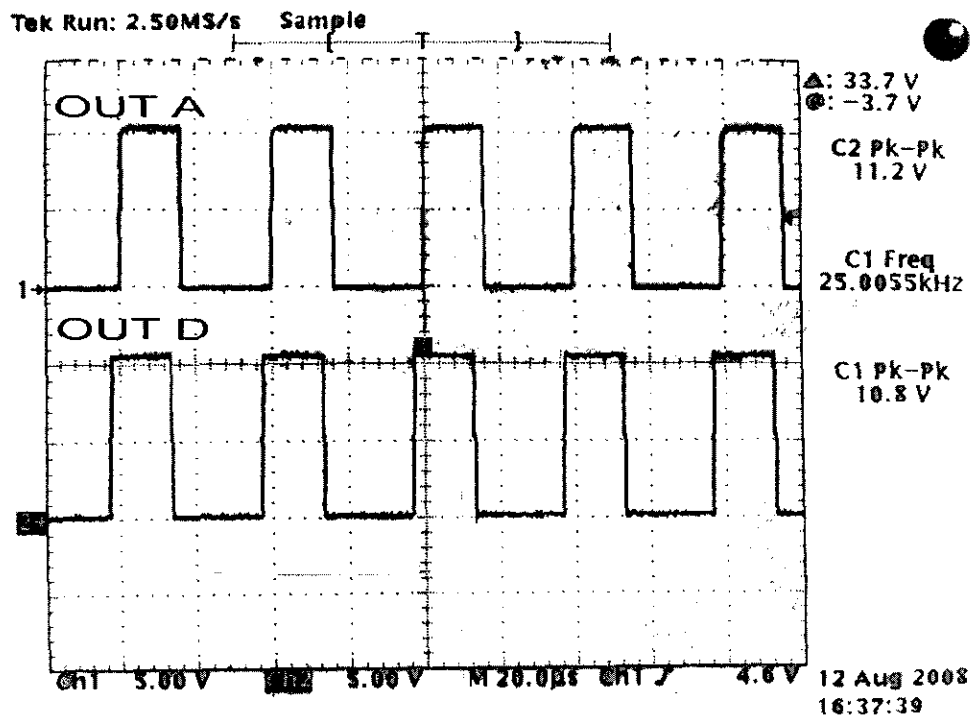
รูปที่ 4.4 ลักษณะของสัญญาณ OUT C จากไอซี UC3879N



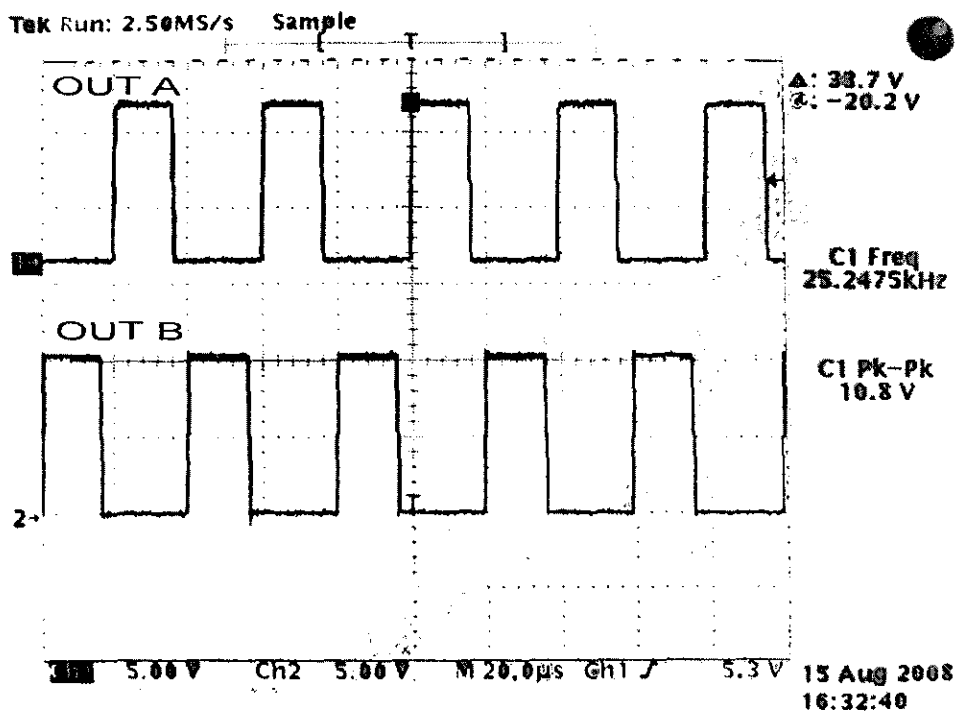
รูปที่ 4.5 ลักษณะของสัญญาณ OUT D จากไอซี UC3879N

ลักษณะของสัญญาณที่ได้ทั้ง 4 นั้นจริงๆ แล้วมีเฟสของสัญญาณแต่ละสัญญาณต่างกันไป เพื่อเป็นการกำหนดให้ไอจีบีทีแต่ละตัวทำงานไม่พร้อมกันนั่นเอง โดยเราสามารถเปรียบเทียบลักษณะของสัญญาณแต่ละสัญญาณได้ดังรูปที่ 4.6 แสดงลักษณะของสัญญาณ OUT A เปรียบเทียบกับ OUT D รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะของสัญญาณ OUT A เปรียบเทียบกับ OUT B รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะของสัญญาณ OUT A เปรียบเทียบกับ OUT C รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะของสัญญาณ OUT B เปรียบเทียบกับ OUT C รูปที่ 4.10 แสดงลักษณะของสัญญาณ OUT B เปรียบเทียบกับ OUT D และรูปที่ 4.11 แสดงลักษณะของสัญญาณ OUT C เปรียบเทียบกับ OUT D ตามลำดับ

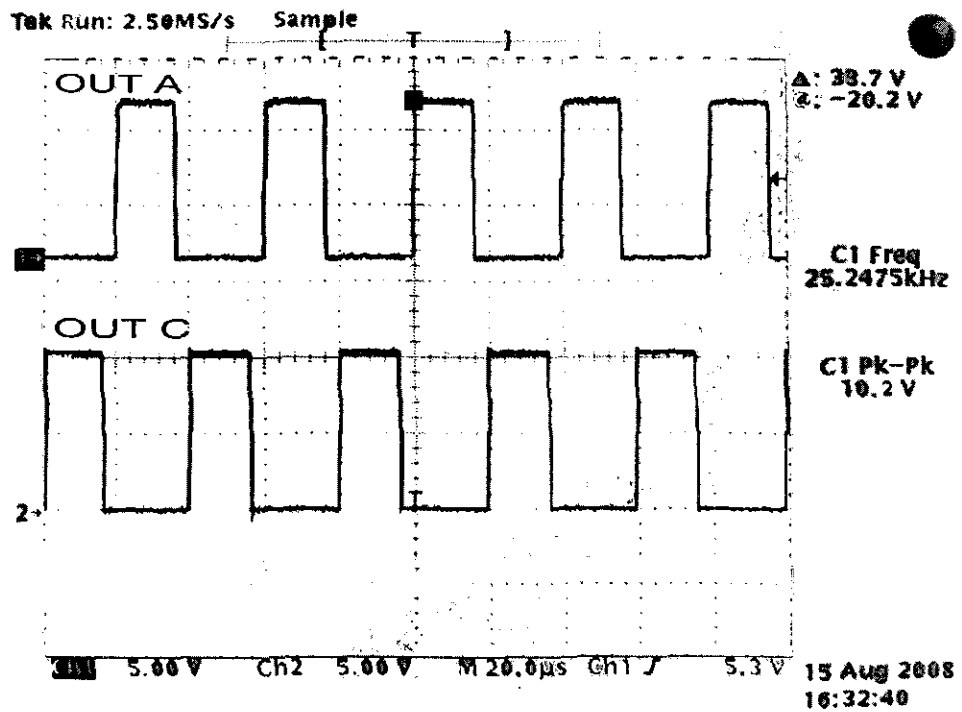
ดังที่กล่าวมาแล้วว่าหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงนั้นสวิตซ์ตัวที่ 1 จะทำงานพร้อมกันกับสวิตซ์ตัวที่ 4 และสวิตซ์ตัวที่ 2 จะทำงานพร้อมกับสวิตซ์ตัวที่ 3 ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาจากไอซี UC3879N ของ OUT A ที่ทำงานพร้อมกับ OUT D และ OUT B ที่ทำงานพร้อมกับ OUT C นั้น เมื่อนำมาซ้อนกันจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.12



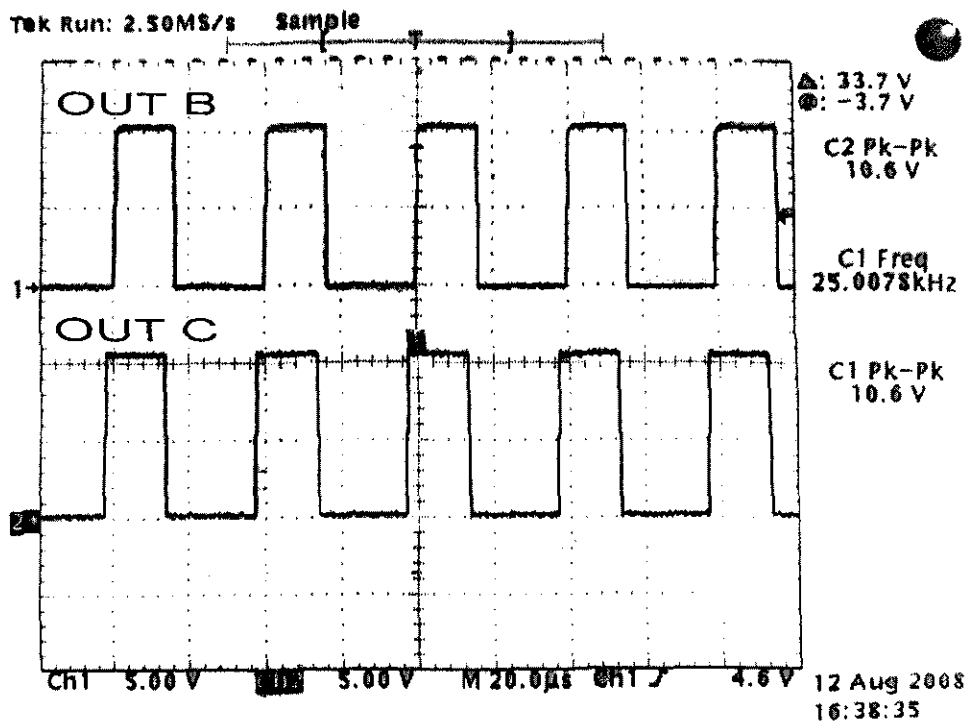
รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะของสัญญาณ OUT A เปรียบเทียบกับ OUT D ของ ไอซี UC3879N



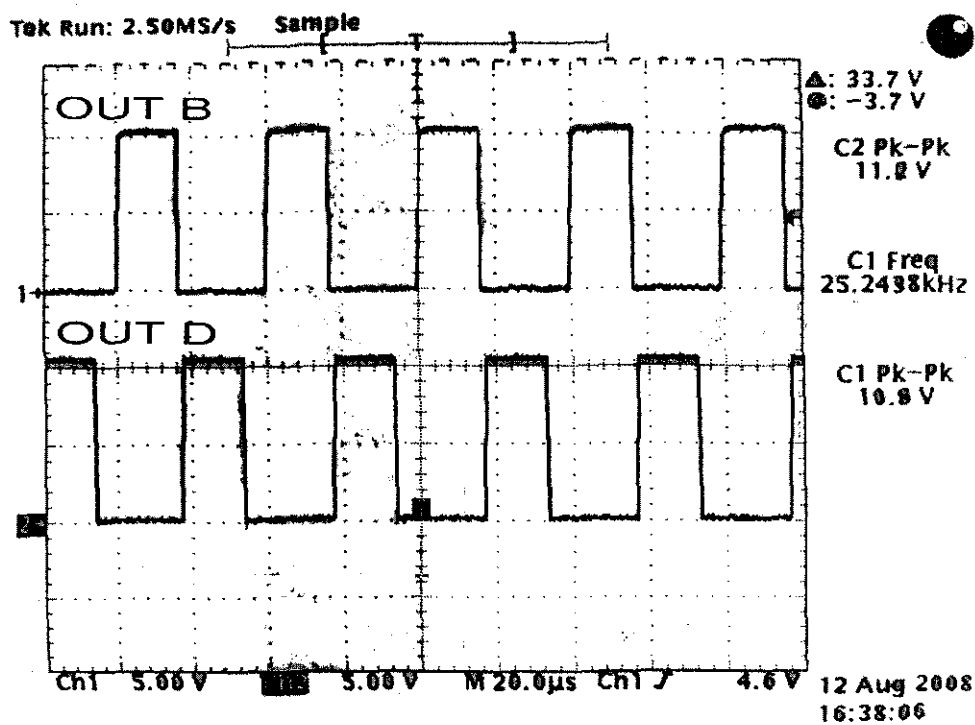
รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะของสัญญาณ OUT A เปรียบเทียบกับ OUT B ของ ไอซี UC3879N



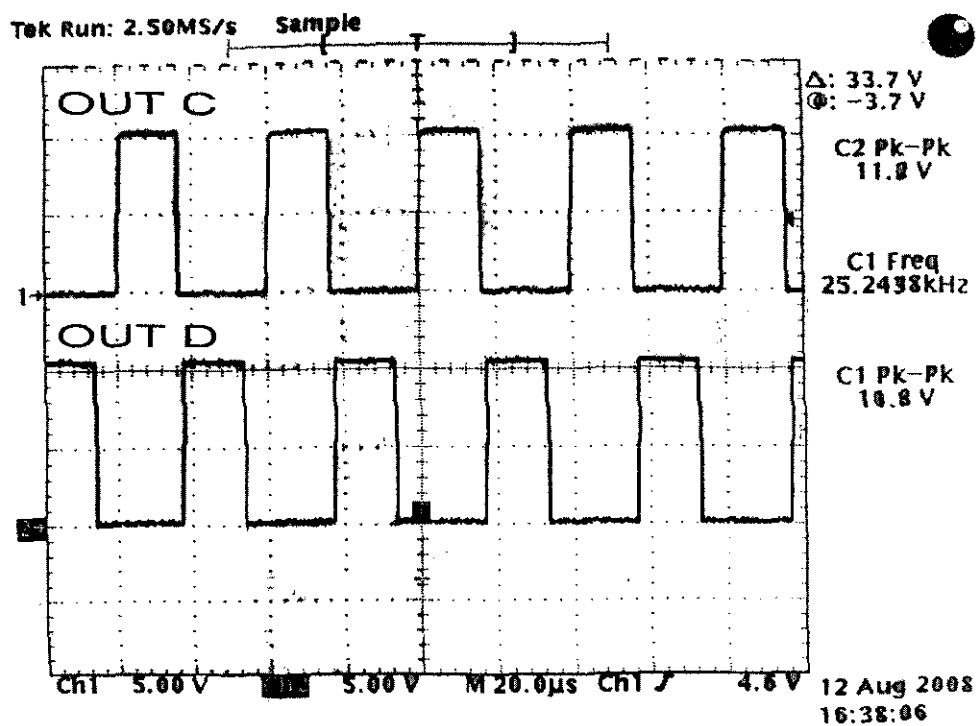
รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะของสัญญาณ OUT A เปรียบเทียบกับ OUT C ของไอซี UC3879N



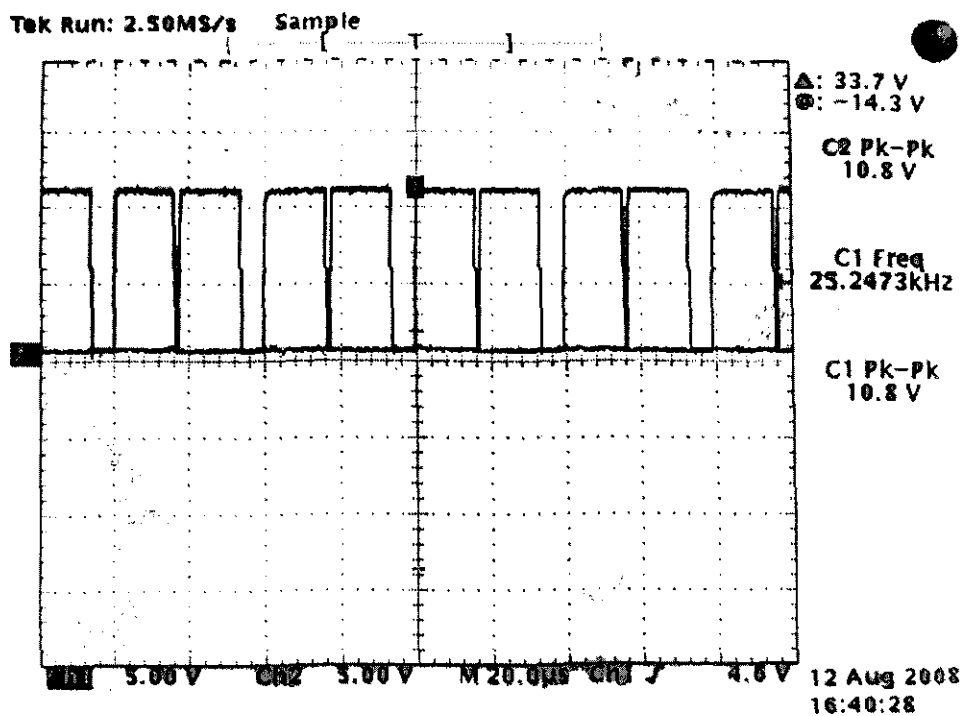
รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะของสัญญาณ OUT B เปรียบเทียบกับ OUT C ของไอซี UC3879N



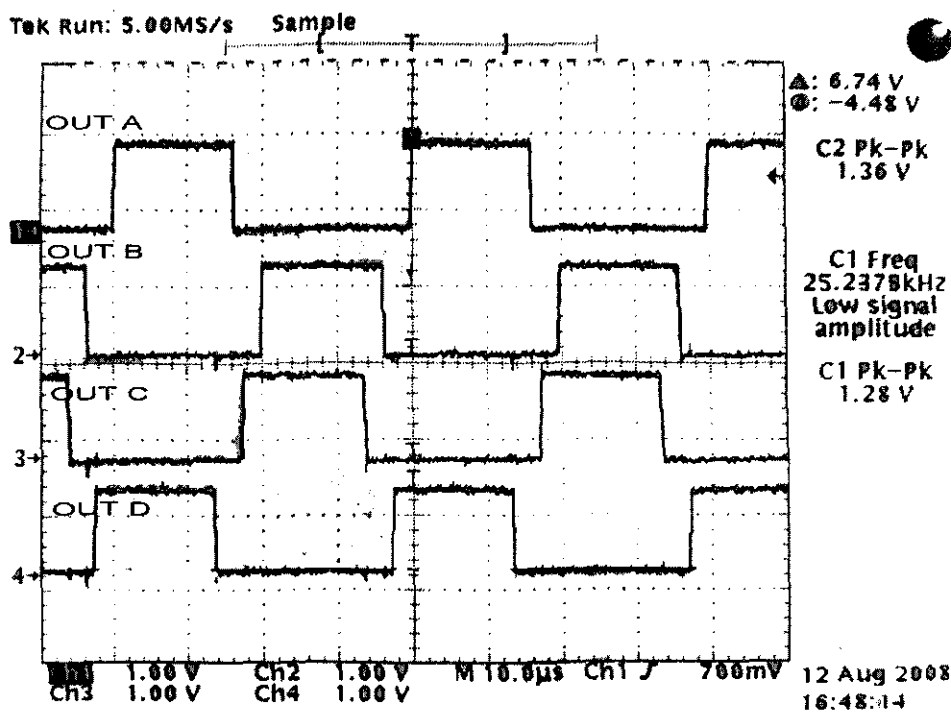
รูปที่ 4.10 แสดงลักษณะของสัญญาณ OUT B เปรียบเทียบกับ OUT D ของไอซี UC3879N



รูปที่ 4.11 แสดงลักษณะของสัญญาณ OUT C เปรียบเทียบกับ OUT D ของไอซี UC3879N



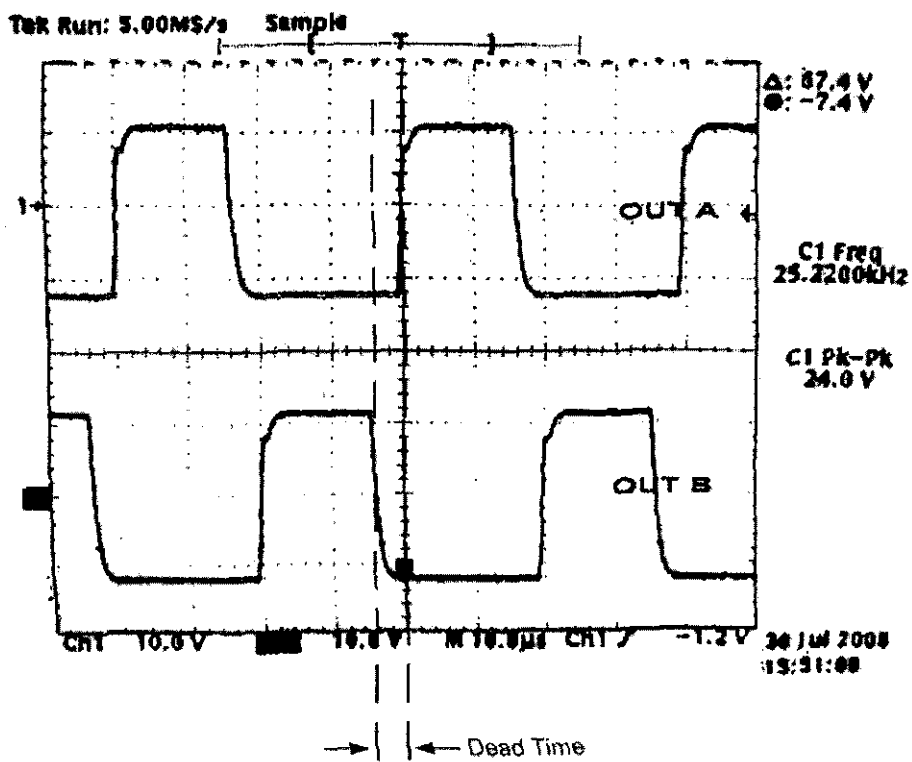
รูปที่ 4.13 สัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาจากไอซี UC3879N ของOUT A ที่ทำงานไม่พร้อมกัน
OUT B และ OUT B ที่ทำงานพร้อมกับ OUT D



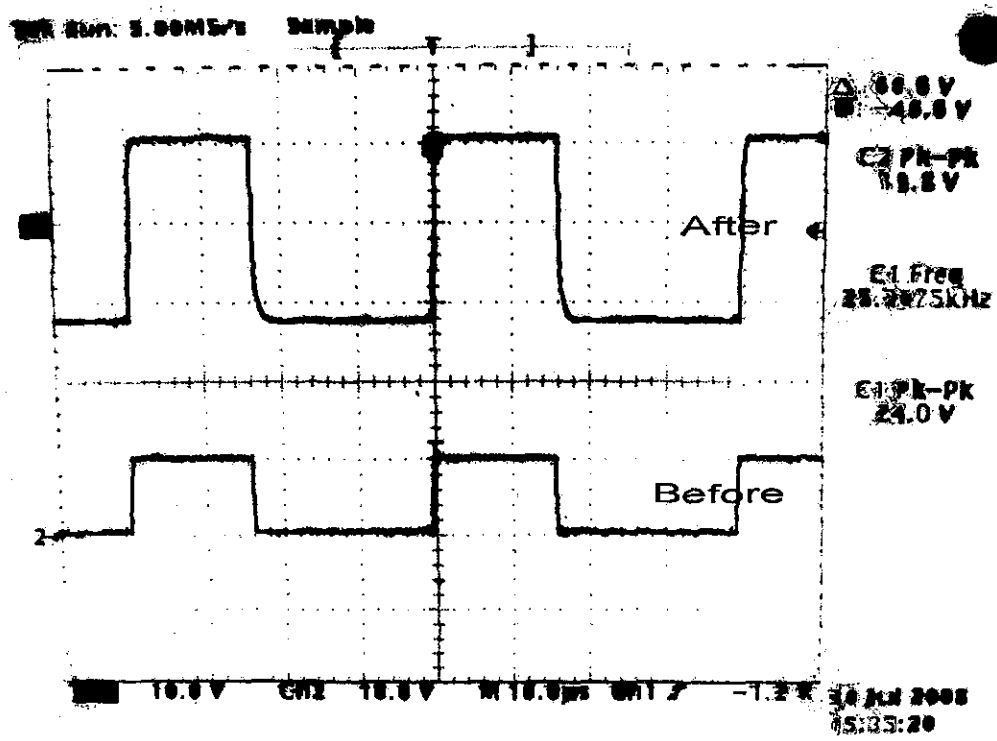
รูปที่ 4.14 สัญญาณทั้งสี่ของไอซี UC3879N

4.3 การทดสอบภาคขับเคลื่อนของไอจีบีที

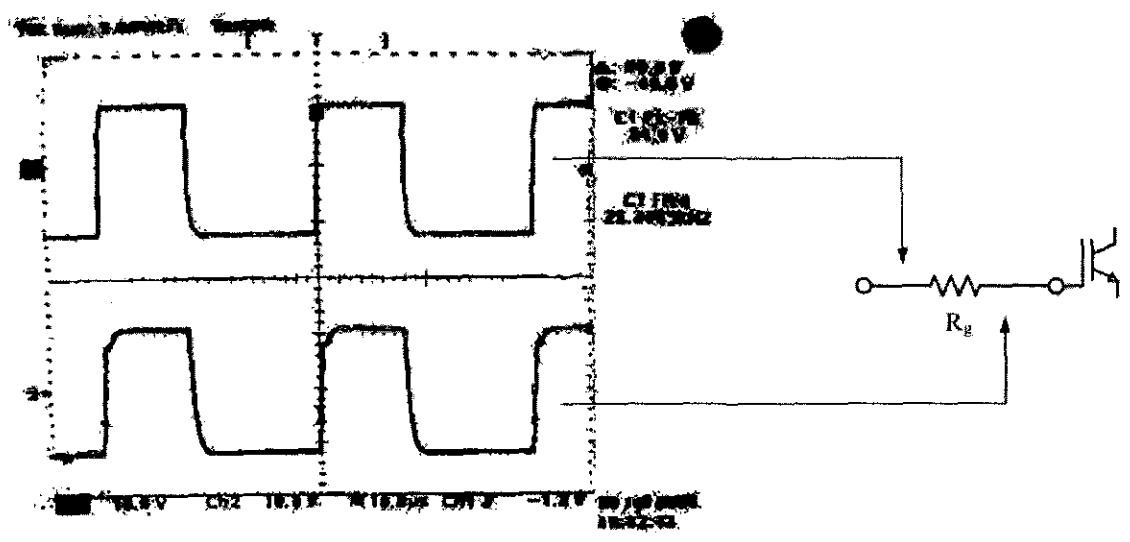
เนื่องจากสัญญาณที่จะนำไปขับ ไอจีบีทีให้ทำงานในวงจรอินเวอร์เตอร์นั้นสัญญาณในการขับแต่ละคู่หนึ่งจะต้องมีการเผื่อเวลาซึ่งกันและกันเอาไว้ (Dead Time) ดังรูป 4.15 โดยงานวิจัยนี้อาศัยหลักการทำงานแบบ PWM ที่มีรีจิสเตอร์ในการกำหนดค่าเวลาในส่วนนี้อยู่แล้ว ในรูป 4.16 จะเป็นสัญญาณก่อนที่จะเข้าวงจรขยายสัญญาณเปรียบเทียบกับหลังขยายสัญญาณ ของ OUT A และในรูป 4.17 จะเป็นสัญญาณที่ผ่านการตัวต้านทานที่ขาเกต และพร้อมที่จะทำให้อิจีบีทีทำงานได้



รูปที่ 4.15 สัญญาณขับเคลื่อนไอจีบีทีที่ออกจากไอซี UC3879N ที่ OUT A เปรียบเทียบกับ OUT B



รูปที่ 4.16 สัญญาณก่อนที่จะเข้าวงจรขยายสัญญาณเปรียบเทียบกับหลังขยายสัญญาณ ของ OUT A



รูปที่ 4.17 สัญญาณที่ผ่านตัวต้านทานที่ขาเกต

4.4 การทดสอบวงจรสวิตช์ความถี่สูง

เราสามารถจำลองการทำงานของวงจรสวิตช์ความถี่สูงได้ตามลำดับผังรูป 4.18

Mode 1: เมื่อเริ่มทำงาน SW4 ทำงานก่อน

Mode 2: ที่ T_{1on} : SW1 เริ่มทำงาน และ SW4 ยังคงทำงานอยู่ ทำให้มีกระแสไหล ผ่านไปยังขดลวดเหนี่ยวนำ จนกระทั่งมีแรงดันตกคร่อม เท่ากับ 2 เท่าของแรงดันอินพุท (Vs)

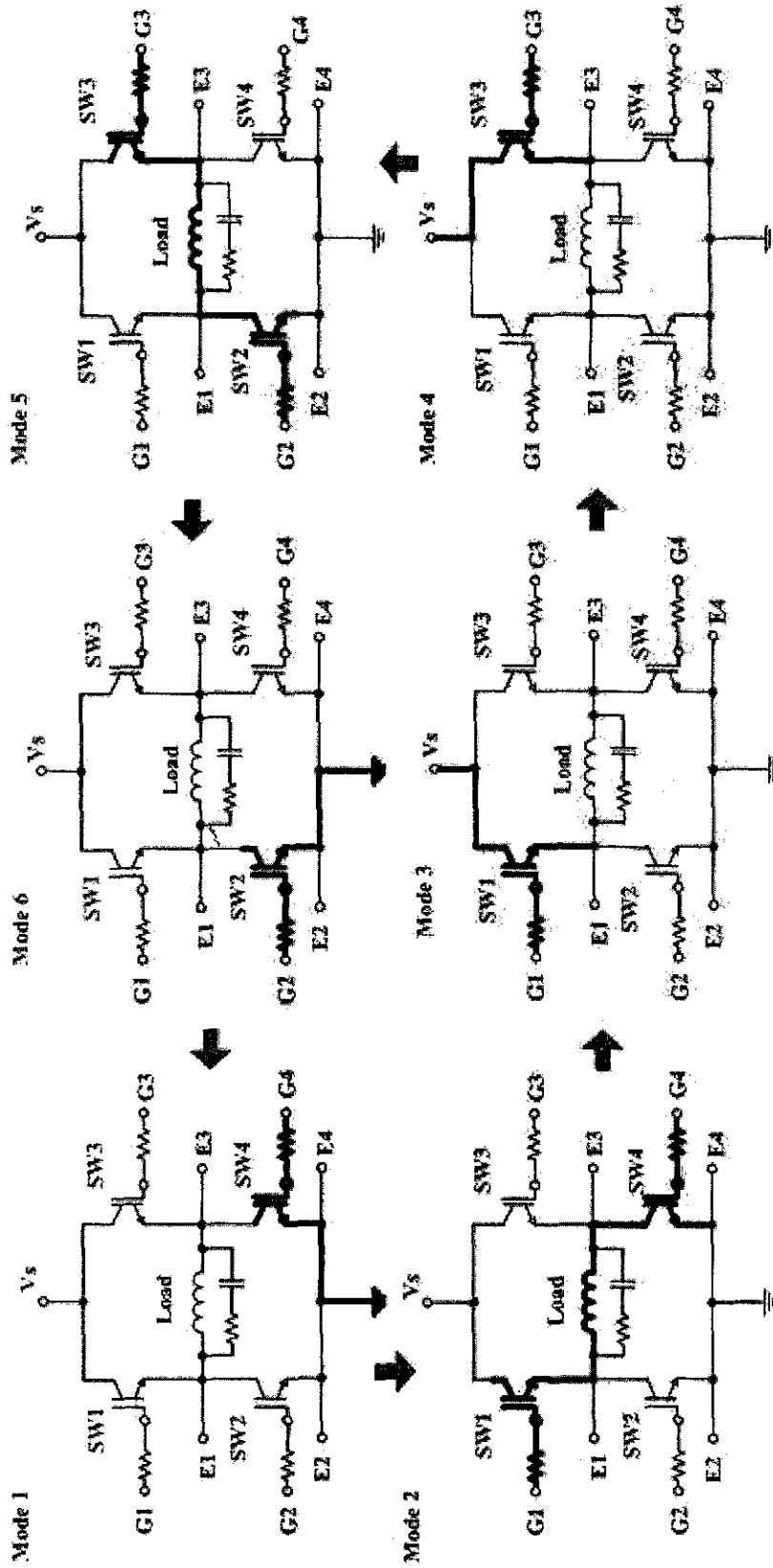
Mode 3: ที่ T_{4off} : SW1 ยังคงทำงาน และ SW4 หยุดการทำงาน จนกระทั่งขดลวดเหนี่ยวนำเกิดการยุบตัวของสนามแม่เหล็ก และแรงดันคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำเป็นศูนย์

Mode 4: ที่ T_{3on} : SW1 หยุดทำงาน และ SW3 เริ่มทำงาน

Mode 5: ที่ T_{2on} : SW2 เริ่มทำงานและ SW3 คงการทำงาน ทำให้มีกระแสไหลไปยังขดลวดเหนี่ยวนำ จนกระทั่งมีแรงดันตกคร่อม เท่ากับ 2 เท่าของแรงดันอินพุท

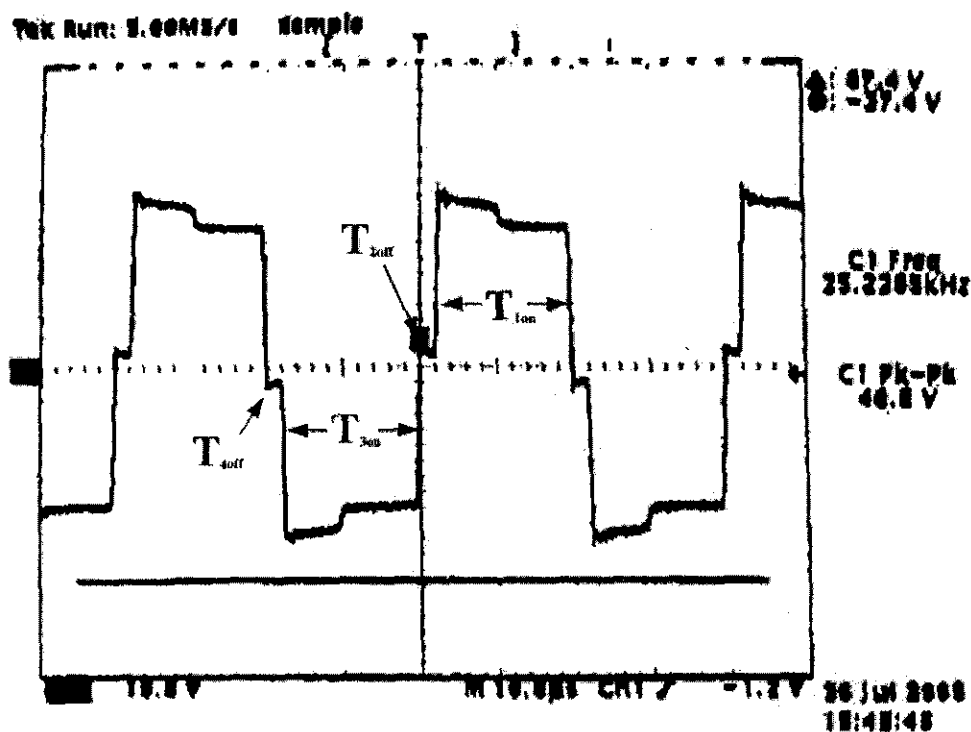
Mode 6: ที่ T_{3off} : SW2 ยังคงทำงาน ส่วน SW3 หยุดการทำงาน จนกระทั่งขดลวดเหนี่ยวนำเกิดการยุบตัวของสนามแม่เหล็ก และแรงดันคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำเป็นศูนย์

เมื่อจบการทำงานของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูงใน Mode 6 แล้วเครื่องจะลำดับการทำงานตาม Mode 1 ต่อไป



รูปที่ 4.18 ลำดับการทำงานของวงจรสวิตซ์ความถี่สูง

จากลำดับการทำงานของอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง ที่ขดลวดเหนี่ยวนำมีสัญญาณดังรูปที่ 4.19



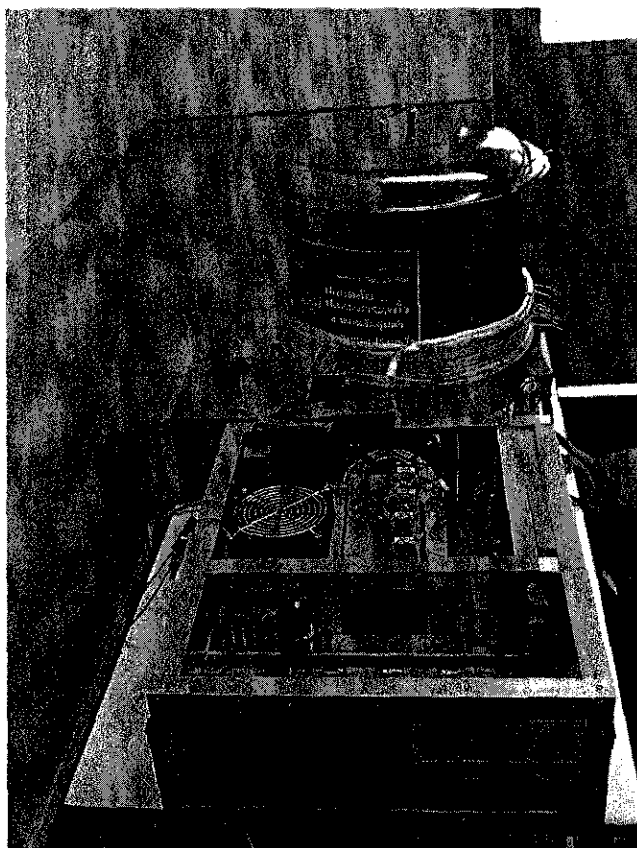
รูปที่ 4.19 ลักษณะสัญญาณที่ขดลวดเหนี่ยวนำ

4.5 ผลการทดลอง

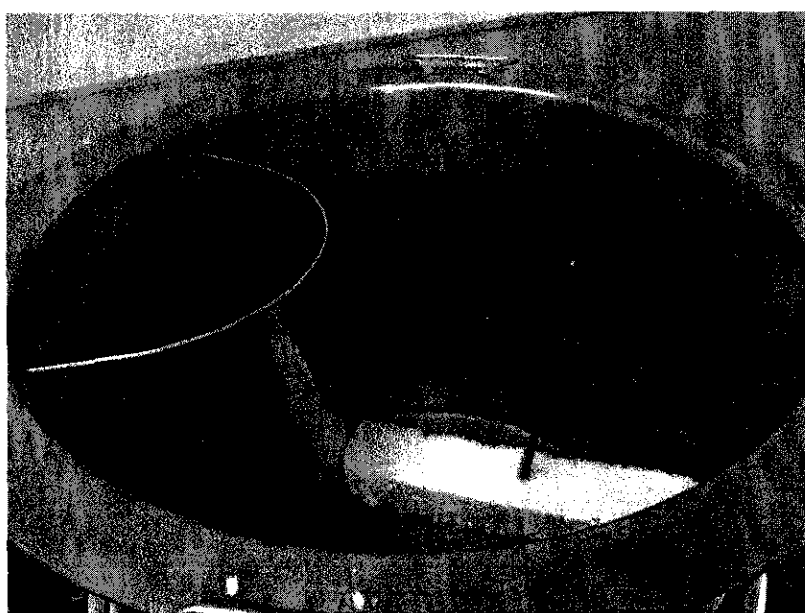
จากการทดลองคัมน์น้ำปริมาตร 15 ลิตรและ 20 ลิตร โดยเริ่มทดลองจากอุณหภูมิห้อง 27 องศาเซลเซียสเท่ากันและลักษณะการทดลองเหมือนกันทุกขั้นตอน โดยมีข้อสังเกตขณะทำการทดลอง ดังนี้

- 1) ทำการทดลองโดยการปิดฝาของภาชนะที่ใช้ทดลองตลอดช่วงการทดลอง โดยทำการทดลองเป็นช่วง ช่วงละ 10 นาที
- 2) เปิดฝาของภาชนะที่ใช้ทดลองทุก 1 นาที เพื่อสังเกตอุณหภูมิของน้ำ
- 3) หลังจาก 10 นาทีแรก ผู้วิจัยได้ทำการกวนน้ำเพื่อให้การถ่ายเทความร้อนภายในภาชนะดีขึ้น และสังเกตอุณหภูมิของน้ำ
- 4) หลังจากกวนน้ำในภาชนะ 1 นาที ทำการทดลองต่อจนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งมีอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (น้ำเดือด)

โดยขณะทำการทดลองและเมื่อน้ำในภาชนะมีอุณหภูมิถึง 100 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.20 และ รูปที่ 4.21 ตามลำดับ



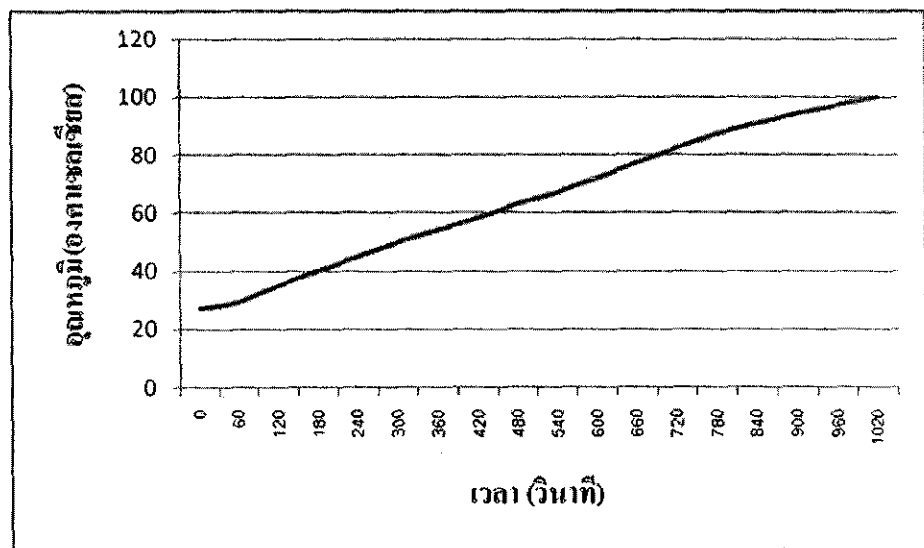
รูปที่ 4.20 เครื่องเหนี่ยวนำความร้อนขณะทำการทดลอง



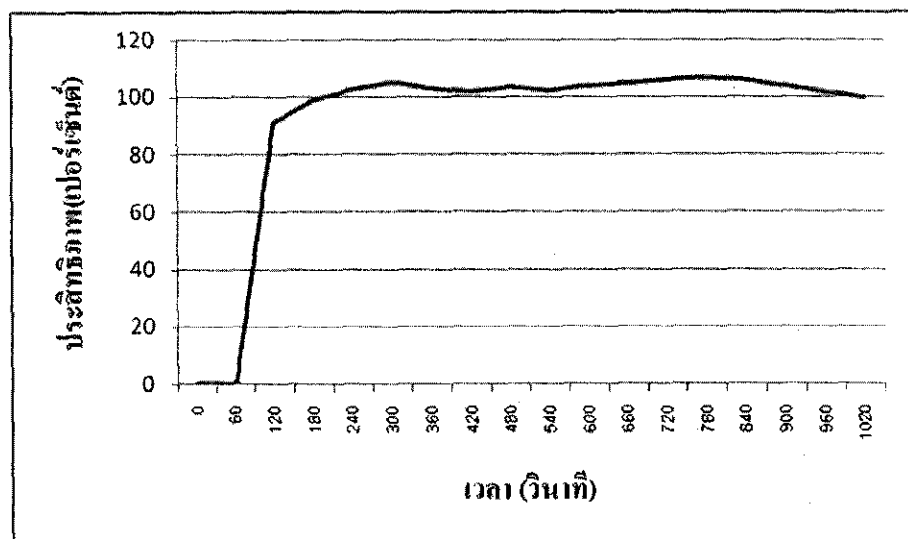
รูปที่ 4.21 ขณะน้ำในภาชนะเริ่มเดือด

4.5.1 กรณีที่ 1 น้ำ 15 ลิตร

จากรูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำในภาชนะกับเวลาที่ใช้ จากการทดลองที่อุณหภูมิห้อง 27 องศาเซลเซียส ในช่วง 60 วินาทีแรก ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทสู่น้ำทำให้อุณหภูมิของน้ำเปลี่ยนแปลงไปน้อยมาก แต่เมื่อเวลาผ่านไป 120 วินาที อุณหภูมิของน้ำในภาชนะหม้อต้ม เริ่มเปลี่ยนแปลงเป็นแบบกราฟเส้นตรงที่มีความชันเพิ่มขึ้น จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองในเวลา 1020 วินาที น้ำมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนถึง 100 องศาเซลเซียส โดยวัดอุณหภูมิบริเวณกลางภาชนะที่ใช้ต้ม



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำ 15 ลิตรกับเวลา

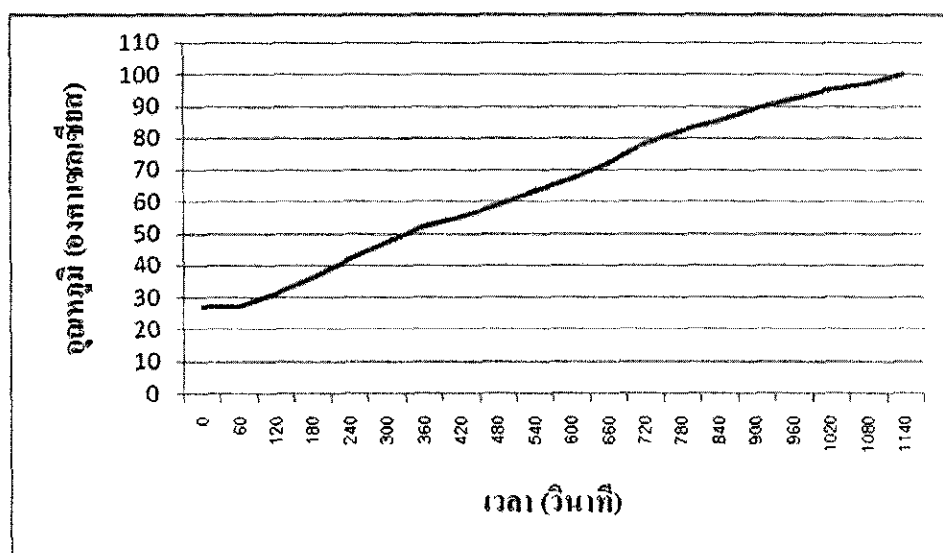


รูปที่ 4.23 ประสิทธิภาพของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูงกับเวลาของน้ำ 15 ลิตร

กราฟในรูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ความถี่สูง ณ เวลาต่างๆ จะเห็นว่าในช่วงแรกยังหาประสิทธิภาพของเครื่องไม่ได้เพราะอุณหภูมิของ น้ำยังคงที่ เมื่อเวลาผ่านไป 60 วินาที ความชันของกราฟเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก เมื่อจบการทดลอง ประสิทธิภาพของเครื่องคิดจากปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นต่อกำลังไฟฟ้าที่ใช้คิด ได้เป็น 99.95 % โดยเราคิดกระแสไฟฟ้าจริง ตามช่วงเวลาต่างๆ ที่ทำการทดลอง

4.5.2 กรณีที่ 2 น้ำ 20 ลิตร

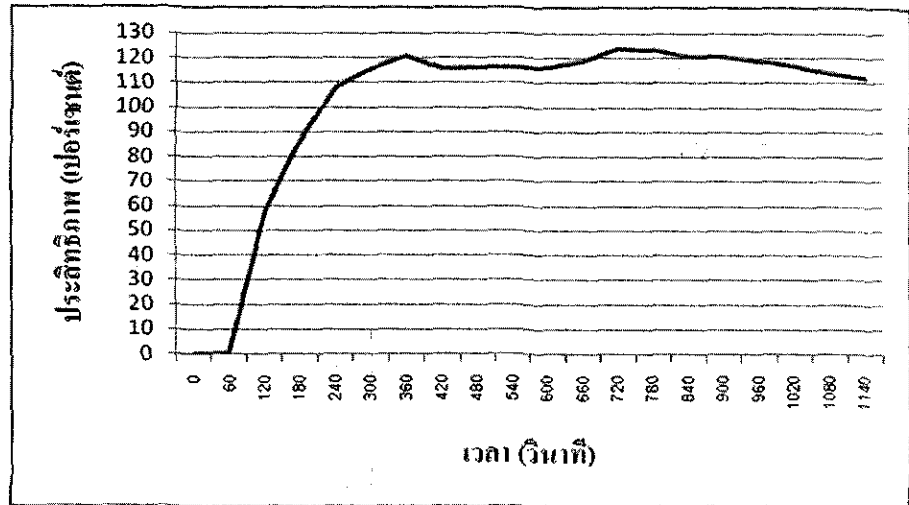
จากรูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำในภาชนะกับเวลาที่ใช้ จากการทดลองที่อุณหภูมิห้อง 27 องศาเซลเซียส ในช่วง 60 วินาทีแรก ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทสู่น้ำทำ ให้อุณหภูมิของน้ำเปลี่ยนแปลงไปน้อยมาก แต่เมื่อเวลาผ่านไป 120 วินาที อุณหภูมิของน้ำใน ภาชนะหม้อต้ม เริ่มเปลี่ยนแปลงเป็นแบบกราฟเส้นตรงที่มีความชันเพิ่มขึ้น จนกระทั่งสิ้นสุดการ ทดลองในเวลา 1140 วินาที น้ำมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนถึง 100 องศาเซลเซียส โดยวัดอุณหภูมิบริเวณ กลางภาชนะที่ใช้ต้ม



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำ 20 ลิตรกับเวลา

กราฟในรูปที่ 4.25 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ความถี่สูง ณ เวลาต่างๆ ของการทดลองที่ใช้น้ำ 20 ลิตร จะเห็นว่าในช่วงแรกยังหาประสิทธิภาพของ เครื่องไม่ได้เพราะอุณหภูมิของน้ำยังคงที่ เมื่อเวลาผ่านไป 60 วินาที ความชันของกราฟเพิ่มสูงขึ้น

อย่างมาก เมื่อจบการทดลองประสิทธิภาพของเครื่องคิดจากปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นต่อกำลังไฟฟ้าที่ใช้คิดได้เป็น 112.17 % โดยเราก็คงกระแสไฟฟ้าจริง ตามช่วงเวลาต่างๆ ที่ทำการทดลอง



รูปที่ 4.25 ประสิทธิภาพของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูงกับเวลาของน้ำ 20 ลิตร

จากผลการทดลองเมื่อเรานำผลที่ได้มาคำนวณหาค่าไฟฟ้า โดยคิดค่ากระแสเฉลี่ยที่ 22 แอมแปร์ และค่าไฟฟ้าเฉลี่ยหน่วยละ 3 บาท จะได้ผลดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าไฟฟ้า(บาทต่อชั่วโมง)} &= \frac{P_{IN} \times Hr}{1000} \times \text{ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย} \\
 &= \frac{(220 \times 22) \times 1}{1000} \times 3 \\
 &= 14.52 \text{ บาทต่อชั่วโมง}
 \end{aligned}$$

จากการตรวจสอบอัตราการใช้แก๊สหุงต้มแบบแรงดันสูง(หัวฟู) ขนาด 7 นิ้ว จะมีอัตราการใช้แก๊สประมาณ 1 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ดังนั้นแก๊สหนึ่งถังจะใช้ได้ 15 ชั่วโมงคิดเป็นเงิน

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าแก๊สหุงต้ม(บาทต่อชั่วโมง)} &= \frac{300}{15} \\
 &= 20 \text{ บาทต่อชั่วโมง}
 \end{aligned}$$

จะเห็นได้ว่าการใช้แก๊สหุงต้มทั่วไปจะมีอัตราค่าใช้จ่ายมากกว่า และการใช้เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูงยังสามารถให้ความร้อนได้รวดเร็วกว่าอีกด้วย

4.6 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอการวัดและผลการทดลองของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำด้วยสวิตซ์ความถี่สูงสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร โดยได้วัดสัญญาณของภาควงจรต่างๆ และการให้ความร้อนกับภาชนะหม้อต้มอาหาร ซึ่งผลการวัดภาควงจรกำเนิดสัญญาณ มีลักษณะของสัญญาณเอาต์พุททั้งสี่ดังรูป 4.14 ภาควงจรสวิตซ์ความถี่สูง มีลักษณะของสัญญาณที่ขดลวดเหนี่ยวนำดังรูป 4.19 สำหรับการให้ความร้อนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำซึ่งให้ความร้อนกับกับภาชนะหม้อต้มถ้วยเดี่ยวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหม้อ 40 เซนติเมตร สูง 45 เซนติเมตร จากการทดลองต้มน้ำ 15 ลิตร สามารถให้ความร้อนจนน้ำถึงจุดเดือดได้ภายในเวลา 17 นาที ประสิทธิภาพของเครื่องคิดจากปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นต่อกำลังไฟฟ้าที่ใช้คิดได้เป็น 99.95 % และกรณีที่ 2 ต้มน้ำ 20 ลิตร สามารถให้ความร้อนจนน้ำถึงจุดเดือดได้ภายในเวลา 19 นาที ประสิทธิภาพของเครื่องคิดจากปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นต่อกำลังไฟฟ้าที่ใช้คิดได้เป็น 112.17 % เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แก๊สหุงต้มตามปกติสามารถประหยัดได้ 5.48 บาทต่อชั่วโมง ซึ่งผลที่ได้ทำให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพมากต่อการใช้งานเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้ในการให้ความร้อนในรูปแบบต่างๆและพัฒนาต่อไป

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การวิจัยฉบับนี้นำเสนอการวิเคราะห์ ออกแบบ ทดสอบ และเปรียบเทียบผลของการวัดผล วงจรเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำด้วยสวิตช์ความถี่สูง จากการวิเคราะห์ผลการให้ความร้อนและ ประสิทธิภาพของเครื่องสามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

การให้ความร้อนด้วยวิธีเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไปที่ชิ้น โลหะนี้ รอบๆขดลวด เหนี่ยวนำจะเกิดกระแสไหลวน เป็นกระแสที่เกิดขึ้นในโลหะเมื่อสนามแม่เหล็กรอบๆ เกิดการ เปลี่ยนแปลง กระแสไหลวนนี้ก่อให้เกิดพลังงานความร้อนที่ต้องการในชิ้น โลหะ สำหรับวงจรที่ใช้ แบ่งออกเป็น 4 ส่วนคือ วงจรเพาเวอร์ซัพพลาย ที่ใช้เป็นตัวจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับวงจรต่างๆ ส่วนที่สอง เป็นวงจรกำเนิดความถี่ที่สร้างความถี่เพื่อไปขับสวิตช์ IGBT ที่สามารถปรับความถี่และ ขนาดของแรงดันได้โดยการปรับความต้านทาน ส่วนที่สาม เป็นวงจรขับเกทของสวิตช์ IGBT ทำ หน้าที่ขยายสัญญาณจากส่วนที่หนึ่งเพื่อกำหนดให้ IGBT ทำงาน ส่วนที่สุดท้าย เป็นวงจรภาคกำลังที่ ประกอบด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ มี IGBT เป็นอุปกรณ์สวิตช์ ทำงานที่ ความถี่ 25 กิโลเฮิร์ตซ์ ภายใต้การทำงานแบบ ZVS-PWM และเอาท์พุทที่ต่อกับขดลวดเหนี่ยวนำ โดยตรง โดยไม่ใช้หม้อแปลงความถี่สูงภาคสุดท้ายในการเหนี่ยวนำขดลวดให้ความร้อน

จากการทดสอบเครื่องให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำที่สร้างขึ้น พบว่าระบบต้องใช้เวลา อย่างน้อยประมาณ 1 นาทีในการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำให้สูงขึ้นมา และการเพิ่มอุณหภูมิ น้ำ 20 ลิตรให้ ถึงจุดเดือดจะต้องใช้เวลาประมาณ 19 นาที ประสิทธิภาพของวงจรอินเวอร์เตอร์ประมาณ 112.17 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่าวงจรสวิตช์ความถี่สูงที่ออกแบบให้มีการทำงานที่ความถี่ใกล้ความถี่เรโซแนนซ์นั้น ประสิทธิภาพที่ได้จะสูงมากเพราะว่าเกิดการสูญเสียที่อุปกรณ์สวิตช์จึงน้อย

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) เครื่องให้ความร้อนด้วยวิธีเหนี่ยวนำควรปรับปรุงแก้ไขให้สามารถควบคุมกำลังความร้อน ได้ง่ายขึ้น และละเอียดขึ้น รวมทั้งปรับปรุงเพิ่มเติมส่วนป้องกันอันตรายจากกระแสไฟฟ้า เช่น ไฟตก ไฟเกิน เพื่อความปลอดภัยของเครื่องผู้ใช้งานมากขึ้น

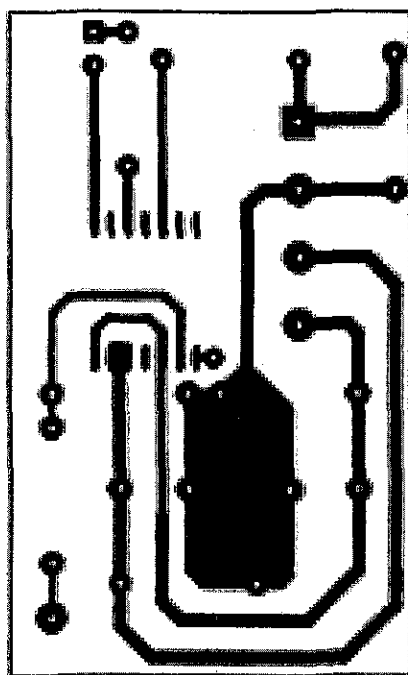
- 2) จากการทดสอบเครื่องให้ความร้อนด้วยวิธีเหนี่ยวนำ ที่อุณหภูมิต่ำจะเกิดการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนออกมาทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์สวิตช์ไม่แสดงออกมาเต็มที่ ดังนั้นถ้าเพิ่มทางเดินให้น้ำไหลผ่านซิงค์เพื่อระบายความร้อนของอุปกรณ์สวิตช์จะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องดีขึ้น
- 3) ขดลวดเหนี่ยวนำควรออกแบบให้มีรูปร่างที่ใช้งานได้ดีกับภาชนะหลากหลายมากขึ้น
- 4) ควรปรับปรุงให้เครื่องมีขนาดและน้ำหนักลดลง เพื่อสะดวกต่อการใช้งานมากขึ้น
- 5) ระบบที่สร้างขึ้นควรปรับเปลี่ยนความถี่ให้เข้าใกล้ความถี่เรโซแนนซ์ได้ง่าย เพราะเมื่อมีการเปลี่ยนรูปร่างของโหลด หรือภาชนะที่ต้องการให้ความร้อน ขนาดและรูปร่างของขดลวดเหนี่ยวนำจะต้องเปลี่ยนไปตามรูปร่างของภาชนะ ดังนั้นเพื่อประสิทธิภาพที่สูงที่สุดแล้วจะต้องมีการปรับความถี่ของเครื่องให้เข้าใกล้กับความถี่เรโซแนนซ์มากที่สุด

บรรณานุกรม

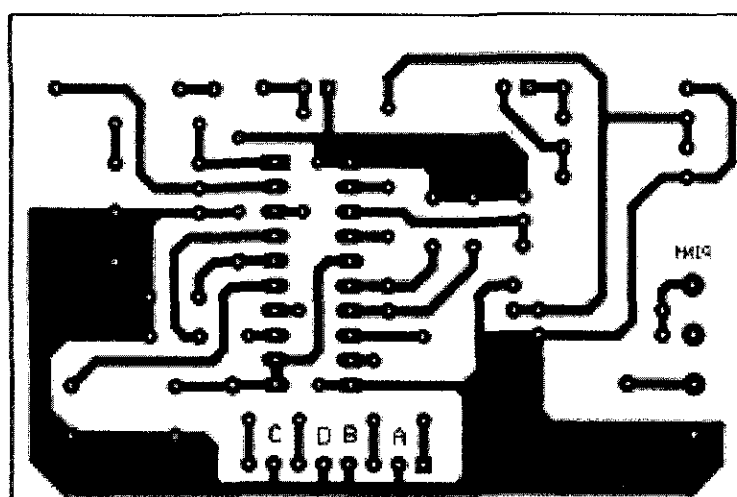
- [1] Terai, H., Sadakata, H., Omori, H., Yamashita, H., and Nakaoka, M. "High frequency soft switching inverter for fluid-heating appliance using induction eddy current-based involuted type heat exchanger". Proc. IEEE 33rd Annual Power electronics specialists Conf. (PESC), Cairns, Australia, June 2002, Vol. 4, pp. 1874-1878
- [2] Kurose, Y., Muraoka, S., Chandhaket, S., Okuno, A., and Nakaoka, M. "An improved zero voltage soft switching PWM high-frequency inverter with active inductor snubber for induction heated roller", Proc. IEE Japan, April 2002, Vol. 2, pp. 446-451
- [3] Wang, S., Izaki, K., Hirota, I., Yamashita, H., Omori, H., and Nakaoka, M. "Induction-heated cooking appliance using new quasi-resonant ZVS-PWM inverter with power factor correction", IEEE Trans. Ind. Appl., 1998, 34, (4), pp. 705-712
- [4] Lee, D., Hyun, D., and Choy, I. "A new hybrid control scheme using active-clamped class-E inverter with induction heating jar for high power applications". Proc. 17th Annual IEEE Allied power electronics Conf., Dallas, USA, March, 2002, Vol. 2, pp. 1148-1153
- [5] Llorente, S., Monterde, F., Burdio, J.M., and Acero, J. "A comparative study of resonant inverter topologies used in induction cookers". Proc. 17th Annual IEEE Allied power electronics Conf., Dallas, USA, March, 2002, Vol. 2, pp. 1168-1174
- [6] Fujita, H., and Akagi, H. "Pulse-density-modulated power control of a 4 kW, 450 kHz voltage-source inverter for induction melting applications", IEEE Trans. Ind. Appl., 1996, 32, (2), pp. 279-286
- [7] Yamato, M., Iseki, T., Kajiyama, A., G. Bin. and M. Nakaoka. "Latest Electromagnetic Induction-based Fluid-Heating Equipment using High-Frequency PWM Load Resonant Inverter", Power Electronics and Drive Systems, 1997. Proceedings., 1997 International Conference on Vol.1, 26-29 May 1997 Page(s):153 – 162
- [8] Sugimura, H., Ahmed, T., Orabi, M., Hyun-Woo Lee, Nakaoka, M., "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, 2004. 30th Annual Conference of IEEE. 2-6 Nov 2004, pp. 1155-1160
- [9] 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
- [10] 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
- [11] E.J.Davies “Conduction and Induction Heating”
- [12] UC3879. Unitrode Products from Texas Instruments, Phase Shift Resonant Controller, Available from: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/uc3879.pdf>
- [13] LM317. National Semiconductor, LM117/LM317A/LM317,3-Terminal Adjustable Regulator, Available from: <http://www.national.com/mpf/LM/LM317.html>
- [14] Valery Rudnev, Don Loveless, Raymond Cook and Micah Black “Handbook of induction heating”

ภาคผนวก
รายละเอียดวงจรมพิมพ์



วงจรถับเกท



วงจรถ้าเนิดความถี่