เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง ที่ใช้อินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ

นาย ธนากร ศุภจินตกุล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2535

ISBN 974-581-486-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

018485

A HIGH FREQUENCY INDUCTION HEATER USING TRI-STATE INVERTER

MR. TANAKORN SUPAJINTAKUL

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submmitted in Partial Fulfilment of the Requirement
for the Degree of Master of Engineering
Department of Electrical Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
1992

ISBN 974-581-486-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง ที่ใช้อินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ
โดย	นาย ธนากร ศุภจินตกุล
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. โคทม อารียา

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร. ถาวร วัชราภัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยุทธนา กุลวิทิต)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. โคทม อารียา)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สัณห์ ศิวารัตน์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ จงชัยกิจ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

ธนากร ศุภจินตกุล : เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง ที่ใช้อินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ (A HIGH FREQUENCY INDUCTION HEATER USING TRI-STATE INVERTER) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.โคทม ดารียา, 173 หน้า. ISBN 974-581-486-5

เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ออกแบบและสร้างขึ้นเป็นเครื่องต้นแบบที่ประกอบด้วย วงจรเรียงกระแส วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะที่ใช้มอสเฟตกำลัง หม้อแปลงความถี่สูง และขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนี้ทำงานในช่วงความถี่ 125 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 140 กิโลเฮิรตซ์ กำลังปรากฏด้านเข้าอาจมีค่าสูงถึง 14 kVA ทั้งนี้ขึ้นกับลักษณะชิ้นงานที่เป็นโหลด เมื่อทดลองให้ความร้อนแก่ชิ้นงานที่เป็นเหล็กผสมคาร์บอน 0.5% ลักษณะทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2 เซนติเมตร วัดกำลังปรากฏด้านเข้าได้ 13.5 kVA และประมาณค่ากำลังที่ชิ้นงานได้รับเท่ากับ 6.3 kW เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนี้สามารถนำไปใช้ในการชุบแข็งชิ้นงานเหล็กผสมคาร์บอน 0.5% ที่มีความแข็งก่อนชุบ 226 Hv เพื่อเพิ่มความแข็งเป็น 701 Hv หลังจากผ่านขบวนการชุบแข็งแล้ว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต ธนากร ศุภจินตกุล

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา โคทม

ปีการศึกษา 2534 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

C115882 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD : TRI-STATE INVERTER/SKIN EFFECT/SKIN DEPTH

TANAKORN SUPAJINTAKUL : A HIGH FREQUENCY INDUCTION HEATER USING TRI-STATE INVERTER. THESIS ADVISOR : ASSO.PROF. DR. GOTHOM ARYA,173 pp. ISBN 974-581-486-5

A prototype of an induction heating system was designed and constructed. The prototype comprised a rectifier, a tri-state inverter using power MOSFET, a high frequency transformer and an induction coil. The working frequency of the prototype can be varied from 125 kHz to 140 kHz. It is capable of receiving an apparent input power of 14 kVA depending on the work piece loading. When used to heat a 0.5% carbon steel bar of 2 - cm diameter, the prototype receives an apparent input power of 13.5 kVA, and the power received by the work piece is estimated to be 6.3 kW. The prototype was tested as a surface hardening equipment. In case of the 0.5% carbon steel, before hardening the hardness is 226 Hv, but after hardening the hardness is 701 Hv.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต ธนากร สุภจินตกุล
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา [illegible]
ปีการศึกษา 2534 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจาก รศ.ดร.โดทม อารียา ที่ได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา อีกทั้ง รศ.สัณห์ ศิวารัตน์ ศ.ดร.มงคล เดชนครินทร์ ผศ.ดร.ยุทธนา กุลวิทิต และ อาจารย์ เจิดกุล โสภาวนิตย์ ซึ่งท่านได้ให้ความรู้และคำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ข้าพเจ้าจึงขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้กล่าวมาข้างต้น นอกจากนี้ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ช่วยเหลือการออกแบบทางกล และภาควิชาโลหะการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการวัดข้อมูลทางโลหะ รวมทั้งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา เป็นอย่างสูง ซึ่งสนับสนุนด้านการเงิน และกำลังใจให้แก่ข้าพเจ้าจนสำเร็จการศึกษา

ธนากร ศุภจินตกุล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

2.1 ค่า a และค่าสภาพความต้านทานของสารที่ 20° C..... 23
2.2 การเปรียบเทียบสารที่ใช้ในการ Quenching และเวลาที่ใช้..... 31
2.3 ระดับความลึกผิวและช่วงความถี่ในการชุบแข็งชิ้นงานที่เหมาะสม..... 34
3.1 ขนาดสายไฟที่สามารถรับภาระกระแสโดยที่แรงดันตกคร่อมสายไฟ ไม่เกิน 3%..... 47
3.2 อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงกำลัง..... 48
3.3 ผลการวัดค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงแยกโดดและส่งผ่านกำลังชุดที่ 1... 76
3.4 ผลการวัดค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงแยกโดดและส่งผ่านกำลังชุดที่ 2... 76
3.5 ผลการวัดค่าพารามิเตอร์ของขดลวดให้ความร้อนที่ภาวะไร้โหลด..... 83
3.6 ผลการวัดค่าพารามิเตอร์ของขดลวดให้ความร้อนที่ภาวะโหลดชนิดที่ 1.... 84
3.7 ผลการวัดค่าพารามิเตอร์ของขดลวดให้ความร้อนที่ภาวะโหลดชนิดที่ 2.... 84
3.8 ผลการวัดค่าพารามิเตอร์ของขดลวดให้ความร้อนที่ภาวะโหลดชนิดที่ 3.... 85
3.9 ผลการวัดค่าพารามิเตอร์ของขดลวดให้ความร้อนที่ภาวะโหลดชนิดที่ 4.... 85
3.10 ผลการวัดค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุปรับปรุงตัวประกอบกำลัง..... 92
3.11 ผลการวัดค่าพารามิเตอร์หม้อแปลงขับนำ..... 103
4.1 ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานประเภทที่ 1..... 115
4.2 ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานประเภทที่ 2..... 115
4.3 ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานประเภทที่ 3..... 116
4.4 ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานประเภทที่ 4..... 116
4.5 ข้อมูลของชิ้นงานทั้ง 4 ประเภท..... 119
4.6 กำลังของแหล่งจ่ายไฟตรงที่ภาวะต่างๆ..... 150
4.7 กำลังปรากฏของแหล่งจ่ายไฟสลับที่ภาวะต่างๆ..... 151
4.8 กำลังที่ขดลวดให้ความร้อนหรือกำลังที่ออกจากหม้อแปลงความถี่สูง..... 152
4.9 แรงดันที่ขดลวดให้ความร้อนที่ภาวะต่างๆ..... 155
4.10 กำลังสูญเสียที่ตัวเก็บประจุปรับปรุงตัวประกอบกำลัง..... 155
4.11 กำลังของขดลวดให้ความร้อนและชิ้นงาน..... 156
4.12 กำลังที่ชิ้นงาน..... 156
4.13 ค่ากระแสอาร์เอ็มเอสที่ผ่านหม้อแปลงความถี่สูง..... 157
4.14 กำลังสูญเสียที่หม้อแปลงความถี่สูง..... 157

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

4.15 กำลังสูญเสียที่วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ..... 159
4.16 ประสิทธิภาพของวงจรอินเวอร์เตอร์และของหม้อแปลงส่งผ่านกำลัง ที่ภาวะต่างๆ..... 162
4.17 ประสิทธิภาพของระบบโดยรวม..... 163
4.18 ตัวประกอบกำลังของระบบ..... 163

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่

2.1 การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำอย่างง่าย..... 4
2.2 วงจรสมมูลของหม้อแปลงทั่วไป..... 5
2.3 วงจรสมมูลของขดลวดให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ..... 5
2.4 ทิศทางการไหลของกระแสที่ผิว..... 6
2.5 ความต้านทานเสมือนของชิ้นงาน..... 6
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับระยะจากผิวของชิ้นงาน..... 6
2.7 ประเภทและลักษณะการใช้งานของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ในย่านความถี่ต่างๆ..... 8
2.8 การให้ความร้อนกับชิ้นงานลักษณะอุดมคติ..... 9
2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับระยะจากผิวชิ้นงาน..... 11
2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียต่อพื้นที่กับระยะจากผิวชิ้นงาน..... 15
2.11 เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มสนามแม่เหล็กกับแรงดัน..... 15
2.12 เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็ก กับแรงดันกรณีที่ตัวขดลวดไม่อุดมคติ..... 16
2.13 วงจรสมมูลของขดลวดให้ความร้อนและชิ้นงาน..... 16
2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสที่ระยะใดๆ กับระยะจากผิว ชิ้นงาน โดยมีขนาดรัศมีชิ้นงานเป็นตัวพารามิเตอร์..... 18
2.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง p และ q กับ d/δ..... 19
2.16 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของปริมาณต่างๆ..... 20
2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ระยะใดๆกับระยะจากผิวชิ้นงาน..... 20
2.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง p และ a/δ..... 21
2.19 ค่าสภาพความต้านทานกับอุณหภูมิ..... 24
2.20 แผนภาพสมดุลเหล็กคาร์บอน..... 26
2.21 ขบวนการการชุบแข็ง..... 29
2.22 ขบวนการการชุบแข็ง..... 29
2.23 ขบวนการการชุบแข็ง..... 30
2.24 ขบวนการการชุบแข็ง..... 30
2.25 ขบวนการการชุบแข็ง..... 30

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่

2.26 ขบวนการการชุบแข็ง..... 30
2.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความลึกผิว ความหนาแน่นกำลังต่อพื้นผิว และระยะเวลาในการให้ความร้อน โดยมีความถี่เป็นตัวพารามิเตอร์..... 33
2.28 ประสิทธิภาพขดลวดให้ความร้อนกับขนาดชิ้นงาน..... 35
2.29 ฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่คล้องผ่านชิ้นงานและขดลวดให้ความร้อน..... 37
2.30 เส้นทางของฟลักซ์สนามแม่เหล็ก..... 39
2.31 วงจรสมมูลทางไฟฟ้า..... 39
2.32 ขดลวดให้ความร้อนที่มีจำนวนรอบ N_c รอบ..... 42
3.1 โครงสร้างทางไฟฟ้าของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ..... 43
3.2 วงจรแหล่งจ่ายไฟตรง..... 43
3.3 การคายประจุของตัวเก็บประจุกำลัง..... 45
3.4 วงจรที่ใช้ในการชิมมูเลตเพื่อวิเคราะห์กระแสผ่านไดโอดในภาวะอยู่ตัว..... 46
3.5 กระแสและแรงดันที่ไดโอดในภาวะอยู่ตัว..... 48
3.6 วงจรที่ใช้ในการชิมมูเลตเพื่อเลือกค่าความต้านทานจำกัดกระแส..... 49
3.7 ผลการชิมมูเลตเพื่อพิจารณาค่าความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ..... 50
3.8 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะสองชุดขนานกัน..... 51
3.9 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะชุดเดียวในทางปฏิบัติ..... 53
3.10 ผลการชิมมูเลตแรงดันและกระแสที่ขาออกของอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ..... 54
3.11 วงจรสมมูลของโหลดของอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ..... 55
3.12 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ..... 56
3.13 สัญญาณที่ขับมอสเฟตกำลังแต่ละตัว..... 56
3.14 กระแสและแรงดันที่ขาออกของอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ..... 57
3.15 เส้นทางการไหลของกระแสในช่วงเวลา $t = 0$ ถึง $t = t_1$..... 57
3.16 เส้นทางการไหลของกระแสในช่วงเวลา $t = t_1$ ถึง $t = t_2$ 58
3.17 เส้นทางการไหลของกระแสในช่วงเวลา $t = t_2$ ถึง $t = t_3$ 59
3.18 เส้นทางการไหลของกระแสในช่วงเวลา $t = t_3$ ถึง $t = t_4$ 59
3.19 เส้นทางการไหลของกระแสในช่วงเวลา $t = t_4$ ถึง $t = t_5$ 60

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่

3.20 เส้นทางการไหลของกระแสในช่วงเวลา $t = t_5$ ถึง $t = t_8$ 61

3.21 วงจรที่ใช้ในการชิมมูเลตการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ..... 62

3.22 กระแส ISA1 และ ISB1..... 63

3.23 กระแส ISC1 และ ISD1..... 63

3.24 กระแส ISC1 และ IL1..... 64

3.25 กระแส ISD1 และ IL1..... 64

3.26 กระแสไดโอด ID1 และ ID2..... 65

3.27 แรงดันคร่อมมอสเฟตกำลัง SA1 และ SB1..... 65

3.28 แรงดันคร่อมมอสเฟตกำลัง SC1 และ SD1 66

3.29 แรงดันขาออกสามสถานะและกระแสจากแหล่งจ่ายไฟตรง..... 66

3.30 กระแสผ่านหม้อแปลงและกระแสผ่านขดลวดให้ความร้อน..... 67

3.31 แรงดันคร่อมไดโอด D1 และ D2..... 67

3.32 การขนานอินเวอร์เตอร์สองชุด..... 68

3.33 การต่อหม้อแปลงให้อัตราการแปลงเป็น 9:1..... 69

3.34 แรงดันที่คร่อมขดปฐมภูมิของหม้อแปลงแต่ละตัว..... 70

3.35 แรงดันคร่อมขดปฐมภูมิของหม้อแปลงโดยประมาณ..... 70

3.36 การพันหม้อแปลงแต่ละตัวให้อัตราการแปลงเป็น 3:1..... 74

3.37 วงจรสมมูลของหม้อแปลงแต่ละชุด..... 75

3.38 รูปร่างขดลวดให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ..... 78

3.39 วงจรสมมูลของขดลวดให้ความร้อนที่ภาวะต่างๆ..... 80

3.40 วงจรสมมูลของขดลวดให้ความร้อนขณะไร้โหลด..... 82

3.41 วงจรสมมูลขดลวดให้ความร้อนขณะมีโหลด..... 82

3.42 ผลของลวดตัวนำที่ใช้ในการขนานตัวเก็บประจุปรับปรุงตัวประกอบกำลัง... 87

3.43 ความเหนี่ยวนำซึ่งอาจเกิดขึ้นในกรณีที่ขดลวดให้ความร้อนและตัวเก็บประจุอยู่ห่างกันและมีช่องอากาศให้ฟลักซ์สนามแม่เหล็กสามารถคล้องผ่านได้.... 87

3.44 วงจรสมมูลโหลดชนิดที่1 จากการวัด..... 88

3.45 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของกระแสที่ขดลวดและที่ตัวเก็บประจุปรับปรุงตัวประกอบกำลัง..... 89

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่

3.46a วงจรสมมูลของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ..... 90
3.46b เฟสเซอร์ไดอะแกรมเมื่อปรับตัวประกอบกำลังแล้ว..... 90
3.47 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ..... 93
3.48 สัญญาณขับนำมอสเฟตกำลัง..... 94
3.49 วงจรสร้างสัญญาณขับนำ..... 95
3.50 ความสัมพันธ์ของแรงดันที่ขา4 และ ขา3 ของไอซี 566..... 95
3.51 สัญญาณที่ส่วนต่างๆในวงจรสร้างสัญญาณขับนำ..... 96
3.52 วงจรขับนำเกทแบบแยกโดดของอินเวอร์เตอร์..... 99
3.53 วงจรขับนำเกทแบบแยกโดดชุดเดียว..... 100
3.54 วงจรขับนำเกทที่ใช้ในการชิมมูเลต..... 103
3.55a ผลการชิมมูเลตเมื่อวัฏจักรงานเป็น 35% ขณะไร้มอสเฟตกำลัง..... 104
3.55b ผลการชิมมูเลตเมื่อวัฏจักรงานเป็น 55% ขณะไร้มอสเฟตกำลัง..... 105
3.56a ผลการชิมมูเลตเมื่อวัฏจักรงานเป็น 35% ขณะมีมอสเฟตกำลัง..... 105
3.56b ผลการชิมมูเลตเมื่อวัฏจักรงานเป็น 55% ขณะมีมอสเฟตกำลัง..... 106
3.57a รูปคลื่นกระแสผ่าน ISA1 หรือ ISA2 กับกระแสปฐมภูมิของหม้อแปลง..... 107
3.57b รูปคลื่นกระแสผ่าน ISB1 หรือ ISB2 กับกระแสปฐมภูมิของหม้อแปลง..... 107
3.57c รูปคลื่นกระแสผ่าน ISC1 หรือ ISC2 กับกระแสปฐมภูมิของหม้อแปลง..... 108
3.57d รูปคลื่นกระแสผ่าน ISD1 หรือ ISD2 กับกระแสปฐมภูมิของหม้อแปลง..... 108
3.58 วงจรป้องกันกระแสเกินของอินเวอร์เตอร์ทั้ง 2 ชุด..... 109
3.59 วงจรป้องกันแรงดันเกิน..... 111
3.60 วงจรควบคุมสัญญาณป้องกัน..... 112
4.1 ความแข็งของชิ้นงานชนิดที่ 1 หลังจากผ่านการชุบแข็ง..... 117
4.2 ความแข็งของชิ้นงานชนิดที่ 2 หลังจากผ่านการชุบแข็ง..... 117
4.3 ความแข็งของชิ้นงานชนิดที่ 3 หลังจากผ่านการชุบแข็ง..... 118
4.4 ความแข็งของชิ้นงานชนิดที่ 4 หลังจากผ่านการชุบแข็ง..... 118

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่

4.5 โครงสร้างทางโลหวิทยาของเหล็กชนิดที่ 1 ก่อนการชุบแข็ง..... 121
4.6 โครงสร้างทางโลหวิทยาของเหล็กชนิดที่ 2 ก่อนการชุบแข็ง..... 121
4.7 โครงสร้างทางโลหวิทยาของเหล็กชนิดที่ 3 ก่อนการชุบแข็ง..... 122
4.8 โครงสร้างทางโลหวิทยาของเหล็กชนิดที่ 4 ก่อนการชุบแข็ง..... 122
4.9 โครงสร้างทางโลหวิทยาของเหล็กชนิดที่ 1 เมื่อผ่านการชุบแข็ง 5 วินาที.. 123
4.10 โครงสร้างทางโลหวิทยาของเหล็กชนิดที่ 2 เมื่อผ่านการชุบแข็ง 5 วินาที. 123
4.11 โครงสร้างทางโลหวิทยาของเหล็กชนิดที่ 3 เมื่อผ่านการชุบแข็ง 5 วินาที. 124
4.12 โครงสร้างทางโลหวิทยาของเหล็กชนิดที่ 4 เมื่อผ่านการชุบแข็ง 5 วินาที. 124
4.13 โครงสร้างทางโลหวิทยาของเหล็กชนิดที่ 1 เมื่อผ่านการชุบแข็ง 15 วินาที 125
4.14 โครงสร้างทางโลหวิทยาของเหล็กชนิดที่ 2 เมื่อผ่านการชุบแข็ง 15 วินาที 125
4.15 โครงสร้างทางโลหวิทยาของเหล็กชนิดที่ 3 เมื่อผ่านการชุบแข็ง 15 วินาที 126
4.16 โครงสร้างทางโลหวิทยาของเหล็กชนิดที่ 4 เมื่อผ่านการชุบแข็ง 15 วินาที 126
4.17 โครงสร้างทางโลหวิทยาของเหล็กชนิดที่ 1 เมื่อผ่านการชุบแข็ง 20 วินาที 127
4.18 โครงสร้างทางโลหวิทยาของเหล็กชนิดที่ 2 เมื่อผ่านการชุบแข็ง 20 วินาที 127
4.19 โครงสร้างทางโลหวิทยาของเหล็กชนิดที่ 3 เมื่อผ่านการชุบแข็ง 20 วินาที 128
4.20 โครงสร้างทางโลหวิทยาของเหล็กชนิดที่ 4 เมื่อผ่านการชุบแข็ง 20 วินาที 128
4.21 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามสถานะ..... 129
4.22 สัญญาณขับนำเกทมอสเฟตกำลัง SA1 และ SD1..... 130
4.23 สัญญาณขับนำเกทมอสเฟตกำลัง SD1 และ SC1..... 130
4.24 สัญญาณขับนำเกทมอสเฟตกำลัง SB1 และ SC1..... 131
4.25 สัญญาณขับนำเกทมอสเฟตกำลัง SA1 และ SB1..... 131
4.26 แรงดันคร่อมมอสเฟตกำลัง SA1..... 132
4.27 แรงดันคร่อมมอสเฟตกำลัง SB1..... 132
4.28 แรงดันคร่อมมอสเฟตกำลัง SC1..... 133
4.29 แรงดันคร่อมมอสเฟตกำลัง SD1..... 133
4.30 แรงดันคร่อมมอสเฟตกำลัง SD2..... 134
4.31 แรงดันคร่อมมอสเฟตกำลัง SC2..... 134
4.32 แรงดันคร่อมมอสเฟตกำลัง SB2..... 135
4.33 แรงดันคร่อมมอสเฟตกำลัง SA2..... 135

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่

4.34 แรงดันคร่อมไดโอดระบายกระแสโหลด D1..... 136
4.35 แรงดันคร่อมไดโอดระบายกระแสโหลด D2..... 136
4.36 แรงดันแบบสามสถานะของอินเวอร์เตอร์ชุดที่1..... 137
4.37 แรงดันแบบสามสถานะของอินเวอร์เตอร์ชุดที่2..... 138
4.38 กระแสอินเวอร์เตอร์ชุดที่1..... 138
4.39 กระแสอินเวอร์เตอร์ชุดที่2..... 139
4.40 กระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวด
ให้ความร้อนที่ภาวะไร้โหลด ความถี่ 125 กิโลเฮิรตซ์..... 140
4.41 กระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวด
ให้ความร้อนที่ภาวะมีโหลด ความถี่ 125 กิโลเฮิรตซ์..... 141
4.42 กระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวด
ให้ความร้อนที่ภาวะโหลดร้อนแดง ความถี่ 125 กิโลเฮิรตซ์..... 141
4.43 กระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวด
ให้ความร้อนที่ภาวะไร้โหลด ความถี่ 128 กิโลเฮิรตซ์..... 142
4.44 กระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวด
ให้ความร้อนที่ภาวะมีโหลด ความถี่ 128 กิโลเฮิรตซ์..... 142
4.45 กระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวด
ให้ความร้อนที่ภาวะโหลดร้อนแดง ความถี่ 128 กิโลเฮิรตซ์..... 143
4.46 กระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวด
ให้ความร้อนที่ภาวะไร้โหลด ความถี่ 131.6 กิโลเฮิรตซ์..... 143
4.47 กระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวด
ให้ความร้อนที่ภาวะมีโหลด ความถี่ 131.6 กิโลเฮิรตซ์..... 144
4.48 กระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวด
ให้ความร้อนที่ภาวะโหลดร้อนแดง ความถี่ 131.6 กิโลเฮิรตซ์..... 144
4.49 กระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวด
ให้ความร้อนที่ภาวะไร้โหลด ความถี่ 135 กิโลเฮิรตซ์..... 145
4.50 กระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวด
ให้ความร้อนที่ภาวะมีโหลด ความถี่ 135 กิโลเฮิรตซ์..... 145
4.51 กระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ
กิตติกรรมประกาศ..... ฉ
สารบัญตาราง..... ช
สารบัญภาพ..... ญ
บทที่
1. บทนำ..... 1
2. การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ..... 4
3. โครงสร้างทางไฟฟ้าของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ..... 43
4. การทดสอบเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ..... 114
5. ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ..... 167
เอกสารอ้างอิง..... 172
ประวัติผู้เขียน..... 173

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่

ให้ความร้อนที่ภาวะโหลดร้อนแดง ความถี่ 135 กิโลเฮิรตซ์..... 146
4.52 กระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวด
ให้ความร้อนที่ภาวะไร้โหลด ความถี่ 139 กิโลเฮิรตซ์..... 146
4.53 กระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวด
ให้ความร้อนที่ภาวะมีโหลด ความถี่ 139 กิโลเฮิรตซ์..... 147
4.54 กระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวด
ให้ความร้อนที่ภาวะโหลดร้อนแดง ความถี่ 139 กิโลเฮิรตซ์..... 147
4.55 กระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวด
ให้ความร้อนที่ภาวะไร้โหลด ความถี่ 143 กิโลเฮิรตซ์..... 148
4.56 กระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวด
ให้ความร้อนที่ภาวะมีโหลด ความถี่ 143 กิโลเฮิรตซ์..... 148
4.57 กระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงและแรงดันคร่อมขดลวด
ให้ความร้อนที่ภาวะโหลดร้อนแดง ความถี่ 143 กิโลเฮิรตซ์..... 149
4.58 การวัดกำลังและตัวแปรต่างๆในวงจร..... 149
4.59 ผลคูณกระแสอินเวอร์เตอร์และแรงดันคร่อมขดลวดให้ความร้อน
ที่ภาวะไร้โหลด ความถี่ 139 กิโลเฮิรตซ์..... 154
4.60 ผลคูณกระแสอินเวอร์เตอร์และแรงดันคร่อมขดลวดให้ความร้อน
ที่ภาวะมีโหลด ความถี่ 139 กิโลเฮิรตซ์..... 155
4.61 ผลคูณกระแสอินเวอร์เตอร์และแรงดันคร่อมขดลวดให้ความร้อน
ที่ภาวะโหลดร้อนแดง ความถี่ 139 กิโลเฮิรตซ์..... 155
4.62 แรงดันสามสถานะและกระแสอินเวอร์เตอร์..... 160
4.63 กระแสและแรงดันของแหล่งจ่ายไฟตรงเมื่อใส่ชิ้นงานในขดลวดให้ความร้อน 162

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย