เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำขนาด 12 กิโลโวลต์แอมแปร์ ที่ใช้เอสซีอาร์

นายอนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2538

ISBN 974-631-228-6

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16716382

A 12 kVA INDUCTION HEATER USING SCR

MR.ANUWAT JANGWANITLERT

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering
Department of Electrical Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
1995

ISBN 974-631-228-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์ เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำขนาด 12 กิโลโวลต์แอมแปร์ ที่ใช้เอสซีอาร์

โดย นายอนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา กุลวิทิต

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.สันติ ถุงสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.โดทม อารียา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา กุลวิทิต)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลารัศมี)

.....กรรมการ

(อาจารย์ เจิดกุล โสภาวนิตย์)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ : เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำขนาด 12 กิโลโวลต์แอมแปร์ ที่ใช้เอสซีอาร์ (A 12 kVA INDUCTION HEATER USING SCR) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ยุทธนา กุลวิทิต, 136 หน้า. ISBN 974-631-228-6

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้เสนอการออกแบบและสร้างเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ขนาด 12 กิโลโวลต์แอมแปร์ ที่ใช้สำหรับการลดความเครียดในแท่งเหล็ก ภาคอินเวอร์เตอร์ของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำใช้เอสซีอาร์เป็นสวิตช์ การคอมมิวเตทเอสซีอาร์ใช้การคอมมิวเตทโดยโหลด อินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่ 3.5 กิโลเฮิรตซ์ ให้กำลังออกที่ชิ้นงาน 5.35 กิโลวัตต์ เมื่อใช้ชิ้นงานเป็นเหล็กผสมคาร์บอน 0.45 % ที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลมตัน เส้นผ่าศูนย์กลาง 42 มิลลิเมตร ขดลวดเหนี่ยวนำมีการออกแบบให้มีค่าอิมพีแดนซ์เหมาะสม เพื่อให้สามารถต่อตรงเข้ากับอินเวอร์เตอร์ โดยไม่ใช้หม้อแปลง ขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าตัวประกอบกำลัง 0.36 ประสิทธิภาพ 82.5% เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ มีประสิทธิภาพรวม 74.0% มีค่าตัวประกอบกำลังด้านขาเข้า 0.95 สามารถให้ความร้อนกับชิ้นงาน โดยสามารถเพิ่มอุณหภูมิชิ้นงานขึ้นเป็น 305 องศาเซลเซียส ภายในระยะเวลา 1.30 นาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2537 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

C415364 : MAJOR POWER ELECTRONICS
KEY WORD:

INDUCTION HEATING /SCR /LOAD COMMUTATION

ANUWAT JANGWANITLERT : A 12 kVA INDUCTION HEATER USING SCR.

THESIS ADVISOR : ASST.PROF.YOUTHANA KULVITIT,Dr.Ing. 136 pp.

ISBN 974-631-228-6

This thesis presents the design, construction and testing of a 12 kVA induction heater. It will be used for an annealing process of a steel bar. The inverter of the induction heater is implemented by a half-bridge series resonance converter using SCR's as switching devices. In this circuit, load commutation is used for turning off the SCR's. The inverter operates at 3.5 kHz. The power transferred to the load is 5.35 kW. In the performance test of this system, an annealing process has been conducted on a 42-mm-diameter solid cylindrical bar of carbon steel with 0.45% carbon. The induction coil has been designed to achieve a suitable impedance so that it can work with the inverter without the matching transformer. This coil has a power factor of 0.36 and an efficiency of 82.5%. The overall efficiency of the induction heater is 74.0%. The input power factor is 0.95. The 305 °C temperature rise can be achieved within 1.30 minutes.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2537 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา กุลวิทิต อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งท่านได้ให้คำชี้แนะและให้ความสนับสนุนมาโดยตลอด รวมทั้ง รองศาสตราจารย์ ดร.โคทม อารียา รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลารัศมี อาจารย์เจิดกุล โสภาวนิตย์ และ ศาสตราจารย์ ดร.มงคล เดชนครินทร์ ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ และเนื่องจากทุนวิจัยครั้งนี้บางส่วนได้รับมาจากทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา และพี่สาว ที่สนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ
กิตติกรรมประกาศ..... ฉ
สารบัญตาราง..... ญ
สารบัญภาพ..... ฏ

บทที่ 1 บทนำ
ความเบื้องต้น..... 1
วัตถุประสงค์การวิจัย..... 3
ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย..... 4
ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน..... 4
ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย..... 4
บทที่ 2 การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ
บทนำ..... 6
ทฤษฎีเบื้องต้นของการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ..... 12
1) การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำกับชิ้นงานในอุดมคติ..... 12
2) การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวกับชิ้นงานทรงกระบอกตัน.... 22
ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับคุณสมบัติของชิ้นงาน..... 28
1) ความต้านทานจำเพาะของโลหะกับอุณหภูมิ..... 28
2) ความซึมซาบของโลหะกับอุณหภูมิและความเข้มสนามแม่เหล็ก.. 30
การเลือกความถี่ที่ใช้ในการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ..... 32
วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำและการออกแบบ..... 35
1) การคำนวณวงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำ..... 35
2) การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ..... 41

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การออกแบบและสร้างเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ
แหล่งจ่ายไฟตรงภาคกำลังของระบบ..... 49
1) วงจรกรอง..... 53
2) ผลการจำลองการทำงานของแหล่งจ่ายไฟตรงด้วย
คอมพิวเตอร์..... 58
3) การคำนวณค่าความต้านทานที่ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ..... 60
ภาคอินเวอร์เตอร์..... 62
1) การออกแบบค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์..... 64
2) ผลการจำลองการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์
ด้วยคอมพิวเตอร์..... 68
3) การเลือกพิกัดอุปกรณ์ในวงจรอินเวอร์เตอร์..... 81
ก) การเลือกพิกัดของเอสซีอาร์..... 81
ข) การเลือกพิกัดของไดโอด..... 81
ค) การเลือกชนิดและออกแบบค่าตัวเก็บประจุ C_T 82
ง) การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ L_2 และ L_3..... 82
การออกแบบวงจรจุดชนวน..... 90
1) วงจรกำเนิดสัญญาณจุดชนวน..... 90
2) วงจรขับนำ..... 92
วงจรควบคุมและป้องกัน..... 94
1) วงจรควบคุมการปิด-เปิดเครื่อง..... 94
2) วงจรป้องกันกระแสเกินพิกัด..... 95
3) วงจรป้องกันแรงดันเกินและแรงดันต่ำกว่ากำหนด..... 97
4) วงจรป้องกันอันตรายจากเฟสหาย..... 98
5) วงจรป้องกันอุณหภูมิเกิน..... 98
บทที่ 4 การทดสอบเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ
การทดสอบทางไฟฟ้า..... 100

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

การทดสอบทางด้านโลหะ..... 115
บทที่ 5 ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ
ข้อสรุปในการวิจัย..... 116
ปัญหาและข้อเสนอแนะในการปรับปรุง..... 118
เอกสารอ้างอิง..... 120
ภาคผนวก..... 122
ประวัติผู้เขียน..... 136

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ค่า ρ และ α ของสารชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 20° C..... 28
2.2 การเลือกความถี่ในการใช้งานสำหรับความลึกผิวและ
เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานที่ค่าต่าง ๆ กัน..... 34
2.3 แสดงข้อมูลการวัดของขดลวดเหนี่ยวนำ..... 45
2.4 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับการวัดของขดลวดเหนี่ยวนำ
และชิ้นงาน..... 47
3.1 แสดงค่า K_g กับขนาดของแกนที่จะพันเป็นตัวเหนี่ยวนำ..... 85

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำอย่างง่าย.....	6
2.2	วงจรสมมูลของหม้อแปลงทั่วไป.....	7
2.3	วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน.....	7
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับระยะทางจากผิวของชิ้นงาน.....	8
2.5	ทิศทางการไหลของกระแสที่ผิว.....	9
2.6	แสดงแผ่นคลื่นของชิ้นงาน.....	9
2.7	แสดงประเภทและลักษณะการใช้งานของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำในย่านความถี่ต่าง ๆ	10
2.8	การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำกับชิ้นงานในอุดมคติ.....	12
2.9	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับระยะจากผิวชิ้นงาน..	15
2.10	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียต่อพื้นที่ผิวกับระยะจากผิวชิ้นงาน...	20
2.11	เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กและแรงดัน.....	21
2.12	เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กและแรงดันในกรณีที่ตัวขดลวดไม่อุดมคติ.....	21
2.13	วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน.....	22
2.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสที่ระยะใด ๆ (J_r/J_s) กับระยะทางจากจุดศูนย์กลางไปยังจุดใด ๆ บนทรงกระบอก (r/δ) สำหรับทรงกระบอกตันที่มีรัศมี R ที่ค่าต่าง ๆ (R/δ)	24
2.15	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง p และ q กับ d/δ	26
2.16	เฟสเซอร์ไดอะแกรมของปริมาณต่าง ๆ	27
2.17	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานจำเพาะกับอุณหภูมิของโลหะชนิดต่าง ๆ	30

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.18	ประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำกับขนาดของชิ้นงานโดยชิ้นงานที่เป็นเหล็กผสมคาร์บอน 0.45 % และมีความแตกต่างระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของขดลวดเหนี่ยวนำและเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกของชิ้นงานเท่ากับ 3 มม.	32
2.19	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการให้ความร้อน ความหนาแน่นกำลังงานต่อพื้นที่ผิวและความถี่โดยมีความลึกผิวเป็นพารามิเตอร์....	33
2.20	(a) ฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่คล้องผ่านชิ้นงานกับขดลวดเหนี่ยวนำ.....	35
	(b) เฟสเซอร์ไดอะแกรมของระบบ.....	35
2.21	(a) วงจรสมมูลทางแม่เหล็ก.....	38
	(b) วงจรสมมูลทางไฟฟ้า.....	38
2.22	วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำกรณีที่ไม่มีโหลด.....	41
2.23	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง B กับกำลังงานต่อน้ำหนักและความถี่....	43
2.24	กราฟแสดงกำลังสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ต่อน้ำหนักและความถี่.....	44
2.25	แสดงประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำที่ความถี่ต่าง ๆ กัน.....	46
2.26	แสดงตัวประกอบกำลังของขดลวดเหนี่ยวนำที่ความถี่ต่าง ๆ กัน.....	46
2.27	ขดลวดเหนี่ยวนำ.....	48
3.1	แสดงโครงสร้างของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ.....	49
3.2	วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ชนิด 3 เฟส.....	50
3.3	รูปคลื่นแรงดันออกของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ชนิด 3 เฟส.....	51
3.4	ไดอะแกรมของลำดับการนำกระแสของไดโอด.....	52
3.5	(a) วงจรกรอง LC แบบผ่านต่ำ.....	54
	(b) อัตราการส่งผ่านสัญญาณของวงจรกรองในรูปที่ 3.5(a) ที่ความถี่ต่าง ๆ กัน.....	54
3.6	แสดงกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุด้านขาออกในตอนเริ่มเปิดเครื่อง.....	55
3.7	แสดงผลการคำนวณผลตอบเชิงความถี่ของวงจรกรอง.....	57

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.8	แสดงกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุในตอนเริ่มเปิดเครื่องโดยมีความต้านทาน 5 โอห์ม ต่ออนุกรมกับวงจรกรอง.....	57
3.9	แสดงกระแสกระชากขาเข้าของเครื่องเฟส a และแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ Vac ในตอนเริ่มเปิดเครื่อง.....	58
3.10	แสดงกระแสขาเข้าของเครื่องเฟส C (i_{vc}) และแรงดันระหว่างเฟส A และ B (v_{AB}).....	59
3.11	แสดงรูปคลื่นกระแสผ่านไดโอดตัวที่ 1 เฟส A (i_{VAD}) และแรงดันตกคร่อมไดโอดตัวที่ 1 (v_{D1}).....	59
3.12	แสดงรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ(i_L) และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง(v_o)	60
3.13	แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์.....	63
3.14	แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ต่อใช้งาน.....	63
3.15	แสดงวงจรสมมูลของโหลดอินเวอร์เตอร์.....	64
3.16	แสดงวงจรสมมูลในการวิเคราะห์สนับเบอร์แบบขนานของเอสซีอาร์ช่วงเวลาฟื้นตัว.....	66
3.17	ค่าพารามิเตอร์ของสนับเบอร์ที่ใช้สำหรับการออกแบบค่า R_s และ C_s ให้มีค่าที่เหมาะสม.....	67
3.18	แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันของเอสซีอาร์ตัวที่ 1	69
3.19	แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันของเอสซีอาร์ตัวที่ 2	69
3.20	แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุ C_T	70
3.21	แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน R_1	70
3.22	แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_2 และ L_3	71
3.23	แสดงทิศทางการนำกระแสไฟฟ้าในช่วงเวลา $t_0 < t < t_1$	71
3.24	แสดงทิศทางการนำกระแสไฟฟ้าในช่วงเวลา $t_2 < t < t_3$	72
3.25	แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันของไดโอดตัวที่ 1	74

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.26	แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันของไดโอดตัวที่ 2	75
3.27	แสดงทิศทางการนำกระแสไฟฟ้าในช่วงเวลา $t_1 < t < t_2$	75
3.28	แสดงทิศทางการนำกระแสไฟฟ้าในช่วงเวลา $t_3 < t < t_4$	76
3.29	แสดงรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 และ L_3	77
3.30	แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันของขดลวดเหนี่ยวนำพร้อมชิ้นงาน....	78
3.31	แสดงรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านสนับเบอร์ทั้บสอง.....	79
3.32	แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันของเอสซีอาร์ตัวที่ 1 ในภาวะชั่วครู่..	80
3.33	แสดงแรงดันอาร์เอ็มเอสกับความถี่ที่ใช้งานของตัวเก็บประจุ.....	82
3.34	แสดงการสูญเสียในแกนต่อน้ำหนักกับความถี่.....	86
3.35	แสดงไดอะแกรมเวลาของสัญญาณจุดชนวน.....	91
3.36	แสดงไดอะแกรมเวลาของสัญญาณออกจากวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์.....	91
3.37	แสดงสัญญาณออกของวงจรขับนำ.....	92
3.38	แสดงวงจรจุดชนวนเอสซีอาร์.....	93
3.39	แสดงวงจรควบคุมการปิด-เปิดเครื่อง.....	94
3.40	แสดงวงจรกระแสเกิน.....	95
3.41	แสดงวงจรป้องกันแรงดันเกินและต่ำกว่าพิกัด.....	97
3.42	แสดงการต่อวงจรป้องกันอุณหภูมิเกิน.....	99
4.1	แสดงรูปคลื่นกระแสขาเข้าตอนเริ่มเดินเครื่อง.....	101
4.2	แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันของเอสซีอาร์ตอนเริ่มเดินเครื่อง....	102
4.3	แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันไฟตรงด้านขาเข้าอินเวอร์เตอร์.....	103
4.4	แสดงรูปคลื่นของกระแส(i_{DC}) และแรงดันไฟตรง(v_{DC}) ด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์	104
4.5	แสดงสัญญาณการจุดชนวนเอสซีอาร์.....	105
4.6	แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันของเอสซีอาร์ตัวที่ 2	106
4.7	แสดงกระแสผ่านไดโอดกับแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดตัวที่ 1	107

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.8	แสดงรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านเอสซีอาร์.....	108
4.9	แสดงรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านไดโอด.....	109
4.10	แสดงรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 และ L_3	110
4.11	แสดงรูปคลื่นกระแสผ่านโหลดและแรงดันคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำพร้อมชิ้นงานและตัวเก็บประจุ C_T	111
4.12	แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_T	112
4.13	แสดงรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านสนับเบอร์.....	113
4.14	แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำพร้อมชิ้นงาน	114

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย