

เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง ขนาด 10 กิโลวัตต์

นาย อมร ตันวรรณรักษ์



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2536

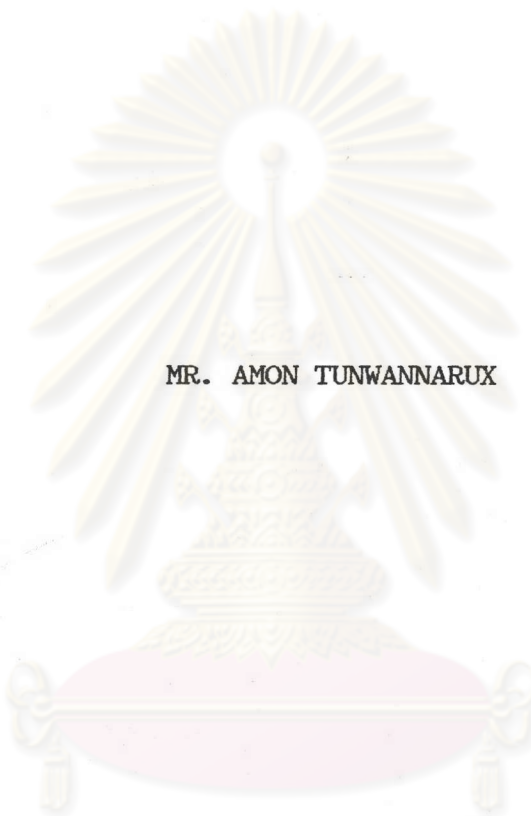
ISBN 974-583-112-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

018976

112150992

A 10-kW High-Frequency Induction Heater



MR. AMON TUNWANNARUX

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

1993


ISBN 974-583-112-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์
โดย
ภาควิชา
อาจารย์ที่ปรึกษา

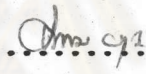
เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง ขนาด 10 กิโลวัตต์
นาย อมร ตันวรรณรักษ์
วิศวกรรมไฟฟ้า
ผศ.ดร. ยุทธนา กุลวิฑิต

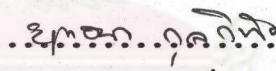


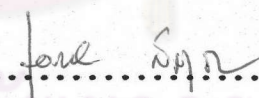
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร. ถาวร วิชัยชัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.โดทม อารียา)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา กุลวิฑิต)


.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลารัมย์)


.....กรรมการ
(อาจารย์ เจ็ดกุล โสภานันต์)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

อมร ตันวรรณรักษ์ เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูง ขนาด 10 กิโลวัตต์
(A 10-kW HIGH-FREQUENCY INDUCTION HEATER) อ.ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ยุทธนา
กุลวิทิต, 187 หน้า. ISBN 974-583-112-3

วิทยานิพนธ์นี้กล่าวถึง เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ที่ออกแบบและสร้างขึ้นเป็นเครื่อง
ต้นแบบซึ่งประกอบด้วย วงจรเรียงกระแส วงจรอินเวอร์เตอร์ หม้อแปลง ความถี่สูง และขดลวดเหนี่ยวนำ
วงจรอินเวอร์เตอร์เป็นแบบบริดจ์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์กำลังชนิดไบโพลาร์เป็นสวิตช์ โดยสามารถทำงานได้ที่
ความถี่สูงถึง 50 กิโลเฮิรตซ์ วงจรขับนำเบสของทรานซิสเตอร์เป็นวงจรที่ไม่ซับซ้อน สัญญาณขับนำสวิตช์ทุกตัว
เชื่อมโยงจากหม้อแปลงเพียงตัวเดียว โดยใช้เทคนิคการอิมิต์ของแกนในการสร้างสัญญาณขับนำซึ่งมีลักษณะ
เป็นแบบสามสถานะ เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนี้ทำงานในช่วงความถี่ 30 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 50
กิโลเฮิรตซ์ โดยกำลังเฉลี่ยต้านเข้าอาจมีค่าสูงถึง 10 กิโลวัตต์ ทั้งนี้ขึ้นกับความถี่และลักษณะของชิ้นงานที่เป็น
โหลด เมื่อทดสอบให้ความร้อนกับชิ้นงานที่เป็นเหล็กผสมคาร์บอน 0.4% ลักษณะทรงกระบอกตัน มีเส้นผ่าน
ศูนย์กลาง 22 มิลลิเมตร ที่ความถี่ 40 กิโลเฮิรตซ์ จะวัดกำลังปรากฏต้านเข้าได้ 12 กิโลวัตต์แอมป์ และ
ประมาณค่ากำลังที่ชิ้นงานได้เท่ากับ 5.1 กิโลวัตต์ ซึ่งเมื่อนำชิ้นงานนี้ไปชุบแข็งผิวโดยการให้ความร้อน
เป็นเวลา 10 วินาที ชิ้นงานจะมีความแข็งที่ผิวเพิ่มจาก 280 Hv (ก่อนชุบ) ไปเป็น 677 Hv (หลังชุบ)
โดยวัดค่าความลึกผิวที่แข็งได้ประมาณ 2.5 มิลลิเมตร



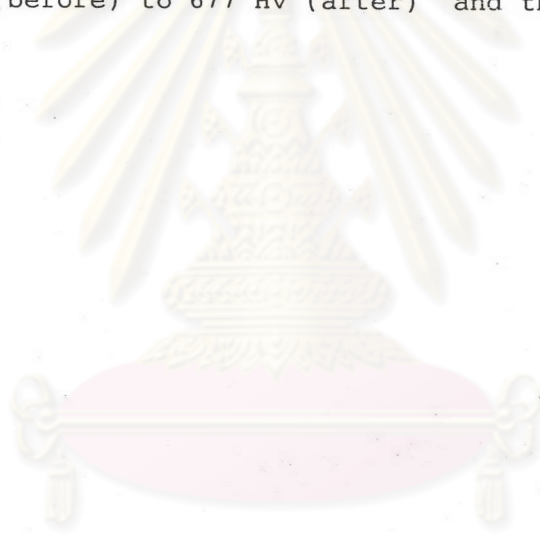
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา ออกแบบอิเล็กทรอนิกส์
ปีการศึกษา 2536

ลายมือชื่อนิติต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

#C215370 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD: INDUCTION HEATING/ HIGH FREQUENCY/ SURFACE HARDENING
AMON TUNWANNARUX : A 10-kW HIGH-FREQUENCY INDUCTION HEATER
THESIS ADVISOR : ASST.PROF.YOUTHANA KULVITIT,Dr.Ing.,187 pp.
ISBN 974-583-112-3

This thesis presents the design and construction of a prototype of an induction heating system. The prototype is comprised of a rectifier, a full bridge inverter, a high frequency transformer and an induction coil. The inverter using power bipolar junction transistors can operate at high frequencies upto 50 kHz. The tri-state basedrive signals coupling through a transformer are generated by a simple basedrive circuit which uses saturable core technique. This prototype has operating frequencies between 30 kHz to 50 kHz and it is capable of receiving average input power upto 10 kW, depending on the loading of work piece and operating frequency. A loading of work piece of 0.4 % carbon steel rod with 22 mm. diameter was tested, the protytype operating frequency was approx. 40 kHz, it consumed an apparent input power of 12 kVA and the loading piece received power of approx. 5.1 kW. In case of 10 seconds heating, the result of a surface hardening test showed an increase of surface hardness of the loading piece from 280 Hv (before) to 677 Hv (after) and the hardness depth was approx. 2.5 mm.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....
สาขาวิชา.....ออกแบบอิเล็กทรอนิกส์.....
ปีการศึกษา.....2536.....
ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ ด้วยความช่วยเหลือจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยุกตนา กุญวิต ที่ได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำ และ ข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของการวิจัย มาด้วยดีโดยตลอด รวมทั้งรองศาสตราจารย์ โศภม อารียา รองศาสตราจารย์ เอกชัย ลีลารัตน์มี และ อาจารย์ เจิดกุล โสภานิตย์ ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำ ความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน ที่ได้กล่าวมาข้างต้น

เนื่องจากทุนวิจัยในการเรียนและทำวิทยานิพนธ์นี้ ส่วนหนึ่งได้รับจากคณะกรรมการพัฒนาวิทยาศาสตร์ และ เทคโนโลยี (STDB) และจาก จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ข้าพเจ้าจึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

นอกจากนี้ ข้าพเจ้าใคร่ขอขอบพระคุณ คุณสมพร เอี่ยมสำอางค์ จากศูนย์เครื่องมื่อวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับงานทางกล คุณศิริรัตน์ สมพันธ์ และคุณพิระพันธ์ จุลโสด จากหน่วยสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และช่วยเหลือเกี่ยวกับงานทดสอบทางโลหวิทยา และขอขอบคุณ คุณเอกชัย นงษ์อิสระพันธ์ คุณสุภนันทน์ หิรัญยนิสสุทธิกุล คุณวิภา แสงพิสิทธิ์ และ นิสิตปริญญาโทห้องปฏิบัติการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่าน ที่มีได้กล่าวชื่อไว้ในที่นี้

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และ พี่ชาย ซึ่งให้การสนับสนุน และให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าเสมอมา จนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อมร ตันวารณรักษ์



สารบัญ

ซี

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเบื้องต้น.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	5
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ	
2.1 บทนำ.....	7
2.2 ทฤษฎีของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ.....	13
2.2.1 การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำกับชิ้นงานอุดมคติ.....	13
2.2.2 การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำกับชิ้นงานทรงกระบอกตัน.....	22
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับคุณสมบัติของชิ้นงาน.....	28
2.3.1 สภาพความต้านทานของโลหะกับอุณหภูมิ.....	28
2.3.2 ความซึมซาบของโลหะกับอุณหภูมิและความเข้มสนามแม่เหล็ก.....	30
2.3.3 โครงสร้างทางโลหะของเหล็กผสมคาร์บอนกับอุณหภูมิ.....	31
2.4 การชุบแข็งโดยวิธีเหนี่ยวนำความร้อน.....	33
2.4.1 กลไกการชุบแข็ง.....	33
2.4.2 การเลือกความถี่ในการชุบแข็ง.....	34

บทที่ 3	วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำและการออกแบบ	
3.1	การวิเคราะห์หาวงจรมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำ.....	38
3.2	การวิเคราะห์เพื่อแก้ไขให้วงจรมมูลมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริง.....	44
3.3	การใช้โปรแกรม Math CAD เพื่อช่วยวิเคราะห์หาวงจรมมูล.....	50
3.4	การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ.....	50
บทที่ 4	การออกแบบและสร้างเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ	
4.1	ภาคเรียงกระแส 3 เฟสแบบบริดจ์.....	60
4.1.1	การออกแบบค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ใช้กรองแรงดัน...	60
4.1.2	การออกแบบไดโอดที่ใช้ในวงจรเรียงกระแส.....	61
4.1.3	การออกแบบค่าความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ.....	64
4.1.4	การออกแบบค่าความต้านทานที่ใช้ในการคายประจุ.....	65
4.2	ภาคอินเวอร์เตอร์แบบ Full Bridge.....	67
4.2.1	หลักการทํางานของวงจร.....	67
4.2.2	การเลือกสวิตช์ที่ใช้ในวงจร.....	70
4.2.3	วงจรมัลติเพล็กซ์.....	73
4.3	ภาคชั้่นนำเบสและควบคุม.....	76
4.3.1	วงจรมัลติเพล็กซ์.....	77
4.3.2	การออกแบบหม้อแปลงในวงจรมัลติเพล็กซ์.....	83
4.3.3	วงจรมัลติเพล็กซ์เพื่อจ่ายให้กับวงจรมัลติเพล็กซ์.....	86
4.4	ภาคกำลังด้านเอาต์พุต.....	90
4.4.1	หม้อแปลงแยกโดดความถี่สูงและส่งผ่านกำลัง.....	90
4.4.1.1	การออกแบบหม้อแปลง.....	90
4.4.1.2	การคำนวณขนาดของแกนแม่เหล็ก.....	90
4.4.1.3	การคำนวณจำนวนรอบของขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิ.....	95
4.4.1.4	การคำนวณขนาดของเส้นลวด.....	96
4.4.1.5	การหาวงจรมมูลของหม้อแปลง.....	98

สารบัญ(ต่อ)

4.4.2	ตัวเก็บประจุชุดเซย์ตัวประกอบกำลัง และตัวเหนี่ยวนำที่ต่อ อนุกรมด้านปฐมภูมิ.....	101
4.4.2.1	การออกแบบค่าของตัวเก็บประจุชุดเซย์ตัวประกอบ กำลัง.....	102
4.4.2.2	การออกแบบค่าของตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรมด้าน ปฐมภูมิ.....	104
4.4.2.3	การวิเคราะห์ค่าของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ ในวงจรสมมูลของชุดลวดเหนี่ยวนำ.....	105
4.4.2.4	การสร้างตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรม.....	116
4.4.2.5	การสร้างตัวเก็บประจุชุดเซย์ตัวประกอบกำลัง.	
4.4.3	ตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมด้านปฐมภูมิ.....	117
บทที่ 5	การทดสอบเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ.....	123
5.1	การทดสอบทางไฟฟ้า.....	125
5.2	การทดสอบทางโลหวิทยา.....	159
บทที่ 6	ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ.....	169
6.1	ข้อสรุปในการวิจัย.....	169
6.2	ปัญหาและข้อเสนอในการปรับปรุง.....	173
	เอกสารอ้างอิง.....	174
	ภาคผนวก.....	176
	ประวัติผู้เขียน.....	184



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงค่าสภาพความต้านทาน ρ และค่าสัมประสิทธิ์ α ของโลหะชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส.....	29
3.1	แสดงค่าความเหนี่ยวนำที่วัดได้ของขดลวดเหนี่ยวนำแบบต่างๆโดยมีความถี่เป็นพารามิเตอร์ (วัดด้วยเครื่อง Impedance Analyzer) ..	45
3.2	แสดงค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สูตรในสมการที่ (3.25) และ (3.28).....	45
4.1	แสดงอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง.....	62
4.2	แสดงค่า K_{sc} กับขนาดของหม้อแปลง.....	94
5.1	แสดงค่ากำลังและตัวประกอบกำลังทางด้านข้างที่ภาวะโหลดต่าง ๆ ..	153
5.2	แสดงค่ากำลังสูญเสียที่จุดต่างๆ กำลังที่ขึ้นงาน และประสิทธิภาพรวมของระบบ.....	158
5.3	แสดงข้อมูลตัวอย่างขึ้นงานทั้ง 3 ประเภท.....	159
5.4	แสดงค่าความแข็งของขึ้นงาน (Hv) ที่ระยะจากผิวใด ๆ ของขึ้นงานทั้ง 3 ประเภท.....	160

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	บล็อกไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ...	4
2.1	แสดงการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำแบบง่าย.....	8
2.2	แสดงวงจรสมมูลของหม้อแปลงทั่วไป.....	8
2.3	แสดงวงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน.....	8
2.4	แสดงทิศทางการไหลของกระแสที่ผิว.....	10
2.5	แสดงแผ่นคลื่นของชิ้นงาน.....	10
2.6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส กับระยะทางจากผิวของชิ้นงาน.....	11
2.7	แสดงประเภทและลักษณะการใช้งาน ของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำในย่านความถี่ต่างๆ.....	12
2.8	แสดงการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำกับชิ้นงานลักษณะอุดมคติ.....	14
2.9	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความซึมสนามแม่เหล็ก กับระยะทางจากผิวชิ้นงาน.....	17
2.10	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียต่อพื้นที่ กับระยะจากผิวชิ้นงาน.....	20
2.11	เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความซึมสนามแม่เหล็กกับแรงดันในกรณีที่ขดลวดเหนี่ยวนำเป็นแบบอุดมคติ.....	21
2.12	เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความซึมสนามแม่เหล็กกับแรงดันในกรณีที่ตัวขดลวดไม่อุดมคติ.....	22
2.13	แบบจำลองวงจรสมมูลของขดลวดให้ความร้อนและชิ้นงาน.....	22
2.14	การกระจายของความหนาแน่นกระแสในการเหนี่ยวนำความร้อนของชิ้นงานทรงกระบอกตัน.....	24
2.15	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง α กับ $\frac{d}{\delta}$	25
2.16	เฟสเซอร์ไดอะแกรมของปริมาณต่างๆ ที่ชิ้นงาน.....	27
2.17	ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพความต้านทานกับอุณหภูมิของโลหะชนิดต่างๆ.....	30
2.18	แผนภาพสมดุลเหล็กผสมคาร์บอน.....	32

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.19	วิธีชูปื้นแบบ Single Shot..... 34
2.20	วิธีชูปื้นแบบ Scanning..... 34
2.21	แสดงประสิทธิภาพของขดลวดให้ความร้อนกับขนาดของชิ้นงานโดยใช้ชิ้นงานที่เป็นโลหะผสมคาร์บอน 0.45% และ มีความแตกต่างระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของขดลวดให้ความร้อน กับเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกของชิ้นงานเท่ากับ 3 มม. (ระยะ $g_{ab} = 3$ มม.)..... 35
2.22	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกผิว ความหนาแน่นกำลังต่อพื้นที่ผิว และระยะเวลาในการให้ความร้อนโดยมีความถี่เป็นตัวพารามิเตอร์..... 36
3.1	พล็อตสนามแม่เหล็กที่คล้องผ่านชิ้นงานกับขดลวดเหนี่ยวนำและเฟสเซอร์ไดอะแกรมของระบบ..... 38
3.2	วงจรสมมูลทางแม่เหล็ก..... 42
3.3	วงจรสมมูลทางไฟฟ้า..... 42
3.4	วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำ (ไม่มีโหลด)..... 43
3.5	แสดงภาพตัดของขดลวดเหนี่ยวนำรูปทรงกระบอก..... 46
3.6	แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าความเหนี่ยวนำที่คำนวณจากสมการ (3.25) บวก สมการ (3.28) และสมการ (3.29) กับค่าที่วัดได้จริง โดยมีความยาวรอบ และความยาวของขดลวดเป็นพารามิเตอร์..... 47
3.7	แสดง magnetic part length ของขดลวดเหนี่ยวนำ..... 47
3.8	แสดงพล็อตของสนามแม่เหล็กที่คล้องผ่านส่วนต่างๆ..... 48
3.9	แสดงขดลวดเหนี่ยวนำรวมทั้งสี่ส่วน..... 51
3.10	แสดงค่าความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำกับความถี่..... 56
3.11	แสดงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำกับความถี่..... 57
3.12	แสดงค่าประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำกับความถี่..... 57
3.13	แสดงค่าตัวประกอบกำลังของขดลวดเหนี่ยวนำกับความถี่..... 58
4.1	บล็อกไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ... 59
4.2	วงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบบริดจ์..... 60
4.3	แสดงการตัวเก็บประจุ..... 61
4.4	วงจรที่ใช้ในการซิมูเลตเพื่อวิเคราะห์กระแสที่ผ่านไดโอด..... 62

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.5	แสดงกระแสไดโอดและแรงดันของตัวเก็บประจุที่ไดจากการชั้มนุมเลต.....	63
4.6	แสดงวงจรที่ใช้ในการชั้มนุมเลต เพื่อวิเคราะห์หาค่าความต้านทานจำกัดกระแส.....	64
4.7	แสดงกระแสไดโอดที่เป็นกระแสเสีร์จ ซึ่งได้จากการชั้มนุมเลต.....	65
4.8	แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ Full Bridge.....	67
4.9	แสดงช่วงเวลาการนำกระแสของสวิตช์ในวงจร Full Bridge.....	68
4.10	แสดงรูปกระแสผ่านโหลด I_L และแรงดันคร่อมโหลด V_L ในกรณี Phase Lag.....	69
4.11	แสดงรูปกระแสผ่านโหลด I_L และแรงดันคร่อมโหลด V_L ในกรณี Phase Lead.....	69
4.12	แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ Full Bridge ซึ่งใช้ในการชั้มนุมเลต....	71
4.13	แสดงรูปกระแสที่ผ่านสวิตช์ และแรงดันคร่อมสวิตช์ที่ได้จากการชั้มนุมเลตวงจร Full Bridge Inverter.....	72
4.14	แสดงรูปกระแสผ่านโหลด และแรงดันคร่อมโหลดที่ได้จากการชั้มนุมเลตวงจร Full Bridge Inverter.....	72
4.15	แสดงวงจรสับเบอ์แรงดันในวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ Full Bridge ที่ใช้ในการชั้มนุมเลต.....	74
4.16	แสดงรูปกระแสผ่านสวิตช์และแรงดันคร่อมสวิตช์ ที่ได้จากการชั้มนุมเลตวงจร Full Bridge Inverter แบบมีวงจรสับเบอ์แรงดัน.....	74
4.17	แสดงลำดับการสวิตช์ เมื่อเทียบกับกระแสผ่านโหลดและแรงดันคร่อมโหลด...	76
4.18	แสดงวงจรขับนำเบสโดยผ่านหม้อแปลง.....	78
4.19	แสดงลำดับการ Turn on และ Turn off ของวงจรขับนำเบส.....	79
4.20	Reverse Biased Safe Operating Area.....	80
4.21	แสดงรูปกระแสเบส และกระแสผ่านสวิตช์ที่วัดจากวงจรจรง	81
4.22	แสดงรายละเอียดของวงจรขับนำเบส.....	82
4.23	B-H Curve ของเฟอไรต์ชนิด N ₂₇ [Siemens Component Service, 1983].....	83
4.24	แสดงวงจรสร้างสัญญาณเพื่อจ่ายให้กับวงจรขับนำเบส.....	87

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25 แสดงสัญญาณกระแสที่จ่ายให้กับหม้อแปลงของวงจรขับนำเบส ซึ่งวัดจาก วงจรจริง.....	88
4.26 วงจรควบคุมการขับนำเกิดโดยใช้ไอซีเบอร์ TL 494.....	89
4.27 แสดงการต่อหม้อแปลง 16 ตัวให้มีอัตราส่วนการแปลงแรงดันเป็น 16:1	92
4.28 กราฟแสดงกำลังสูญเสียในแกนเฟอไรต์ต่อน้ำหนัก กับความถี่.....	94
4.29 แสดงวงจรสมมูลของหม้อแปลงส่งผ่านกำลัง.....	99
4.30 แสดงการต่อตัวเก็บประจุชดเชยตัวประกอบกำลังและตัวเหนี่ยวนำ	101
4.31 แสดงวงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางด้านโพลด.....	102
4.32 แสดงวงจรสมมูลทางไฟฟ้าทางด้านโพลดและเฟสเซอร์ไดอะแกรม.....	103
4.33 แสดงวงจรสมมูลไฟฟ้าทางด้านโพลดและเฟสเซอร์ไดอะแกรมของเครื่อง ให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ.....	104
4.34 แสดงค่ากำลังที่ขึ้นงานกับความถี่.....	108
4.35 แสดงค่ากระแสที่ไหลเข้าสู่วงจรทางด้านโพลดกับความถี่.....	108
4.36 แสดงค่ามุมของกระแสที่ไหลเข้าสู่วงจรทางด้านโพลดเทียบกับแรงดันจาก วงจรอินเวอร์เตอร์ กับความถี่.....	109
4.37 แสดงค่าแรงดันที่คร่อมตัวเก็บประจุกับความถี่.....	109
4.38 แสดงกราฟของค่าที่สำคัญต่าง ๆ ที่คำนวณได้ที่อุณหภูมิ 550 องศา เซลเซียส.....	112
4.39 แสดงกราฟของค่าที่สำคัญต่าง ๆ ที่คำนวณได้ที่อุณหภูมิ 756 องศา เซลเซียส.....	113
4.40 แสดงกราฟของค่าที่สำคัญต่าง ๆ ที่คำนวณได้ที่อุณหภูมิ 1032 องศา เซลเซียส.....	114
4.41 แสดงกราฟของค่าที่สำคัญต่าง ๆ ที่คำนวณได้ในกรณีไม่มีชิ้นงาน (No Load).....	115
4.42 วงจรสมมูลของหม้อแปลงส่งผ่านกำลังเมื่อย้ายความเหนี่ยวนำรั่วไหลมา รวมที่.....	116
4.43 แสดงรูป กราฟพิกัดแรงดันอาร์เอ็มเอสกับความถี่ของตัวเก็บประจุแต่ละ ขนาด.....	118

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.44 a) แสดงการต่อตัวเก็บประจุแบบใช้ลวดทองแดงต่อธรรมดา.....	119
b) แสดงวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของตัวเก็บประจุและลวดเหนี่ยวนำ.....	119
4.45 แสดงพล็อตสัญญาณแม่เหล็กที่คล้องผ่านลวดทองแดงที่ใช้ต่อตัวเก็บประจุแต่ ละตัว.....	120
4.46 แสดงภาพการต่อตัวเก็บประจุบนแผ่นทองแดงที่ขนานกัน.....	121
4.47 แสดงแผงตัวเก็บประจุที่ยึดติดกับขดลวดเหนี่ยวนำ.....	122
4.48 แสดงแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุอนุกรมกับความถี่.....	124
5.1 แสดงวงจรต่าง ๆ ในภาคชั้นนำเบส.....	127
5.2 แสดงกระแสเบสที่ชั้นนำทรานซิสเตอร์กำลัง Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 ในกรณีไม่มี ชิ้นงาน.....	128
5.3 แสดงกระแสเบสที่ชั้นนำทรานซิสเตอร์กำลัง Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 ในกรณีมี ชิ้นงาน.....	129
5.4 แสดงการเปรียบเทียบกระแสเบสที่ชั้นนำทรานซิสเตอร์กำลัง Q_3 ในกรณี ไม่มีชิ้นงานและกรณีมีชิ้นงาน	130
5.5 แสดงแรงดันที่เบสอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์กำลัง Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 ใน กรณีไม่มีชิ้นงาน	131
5.6 แสดงแรงดันที่เบสอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์กำลัง Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 ใน กรณีมีชิ้นงาน	132
5.7 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณกระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงชั้นนำ เบส กระแสเบส แรงดันเบส-อิมิตเตอร์ และกระแสผ่านทรานซิสเตอร์ ในกรณีไม่มีโหลด	133
5.8 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณกระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงชั้นนำ เบส กระแสเบส แรงดันเบส-อิมิตเตอร์ และกระแสผ่านทรานซิสเตอร์ ในกรณีมีโหลด	134
5.9 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบ Full Bridge	136
5.10 แรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์กำลัง Q_1 และ Q_2 (กรณีไม่มีโหลด)	137
5.11 แรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์กำลัง Q_3 และ Q_4 (กรณีไม่มีโหลด)	137
5.12 แรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์กำลัง Q_1 และ Q_2 (กรณีมีโหลด)	138

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.13 แรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์กำลัง Q_3 และ Q_4 (กรณีมีโหลด)	138
5.14 แรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์กำลัง Q_1 และ Q_2 (กรณีโหลดร้อนแดง)	139
5.15 แรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์กำลัง Q_3 และ Q_4 (กรณีโหลดร้อนแดง)	139
5.16 กระแสผ่านทรานซิสเตอร์กำลัง Q_3 (กรณีไม่มีโหลด)	140
5.17 กระแสผ่านทรานซิสเตอร์กำลัง Q_4 (กรณีไม่มีโหลด)	140
5.18 กระแสผ่านทรานซิสเตอร์กำลัง Q_3 (กรณีมีโหลด)	141
5.19 กระแสผ่านทรานซิสเตอร์กำลัง Q_4 (กรณีมีโหลด)	141
5.20 กระแสผ่านทรานซิสเตอร์กำลัง Q_3 (กรณีโหลดร้อนแดง)	142
5.21 กระแสผ่านทรานซิสเตอร์กำลัง Q_4 (กรณีโหลดร้อนแดง)	142
5.22 กระแสประจุของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง (กรณีไม่มีโหลด)	143
5.23 กระแสประจุของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง (กรณีมีโหลด)	144
5.24 กระแสประจุของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง (กรณีโหลดร้อนแดง)	144
5.25 กระแสศักติของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง 1 ใน 16 (กรณีไม่มีโหลด) ..	145
5.26 กระแสศักติของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง 1 ใน 16 (กรณีมีโหลด)	145
5.27 กระแสศักติของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง 1 ใน 16 (กรณีโหลดร้อนแดง) 146	
5.28 แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ (กรณีไม่มีโหลด)	147
5.29 แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ (กรณีมีโหลด)	147
5.30 แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ (กรณีโหลดร้อนแดง)	148
5.31 แรงดันคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำ (กรณีไม่มีโหลด)	149
5.32 แรงดันคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำ (กรณีมีโหลด)	149
5.33 แรงดันคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำ (กรณีโหลดร้อนแดง)	150
5.34 แรงดันคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำ และ กระแสศักติของหม้อแปลงกำลัง ความถี่สูง 1 ใน 16 (กรณีไม่มีโหลด)	150
5.35 แรงดันคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำ และ กระแสศักติของหม้อแปลงกำลัง ความถี่สูง 1 ใน 16 (กรณีมีโหลด)	151
5.36 แรงดันคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำ และ กระแสศักติของหม้อแปลงกำลัง ความถี่สูง 1 ใน 16 (กรณีโหลดร้อนแดง)	151
5.37 แสดงแรงดันและกระแสที่จุดต่าง ๆ ในบล็อกไดอะแกรมของระบบ	152

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.38 รูปแสดงแรงดันไฟสลับ V_{AC} และกระแสไฟสลับ I_{AC} (กรณีไม่มีโหลด)	153
5.39 แรงดันไฟสลับ V_{AC} และกระแสไฟสลับ I_{AC} (กรณีมีโหลด)	154
5.40 แรงดันไฟสลับ V_{AC} และกระแสไฟสลับ I_{AC} (กรณีโหลดร้อนแดง)	154
5.41 แรงดันไฟตรง V_{DC} และกระแสไฟตรง I_{DC} (กรณีไม่มีโหลด)	155
5.42 แรงดันไฟตรง V_{DC} และกระแสไฟตรง I_{DC} (กรณีมีโหลด)	155
5.43 แรงดันไฟตรง V_{DC} และกระแสไฟตรง I_{DC} (กรณีโหลดร้อนแดง)	156
5.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่กับระยะจากผิวของชิ้นงาน ประเภทที่ 1 (S50C)	161
5.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่กับระยะจากผิวของชิ้นงาน ประเภทที่ 2 (S45C)	161
5.46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่กับระยะจากผิวของชิ้นงาน ประเภทที่ 3 (SCM4)	162
5.47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่กับระยะจากผิวของชิ้นงาน ประเภทที่ 4 (SCM21)	162
5.48 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความถี่ของชิ้นงานทั้ง 3 ประเภท หลัง ผ่านการชุบแข็ง	163
5.49 โครงสร้างทางโลหะวิทยาของเหล็กประเภทที่ 1 (S50C) ก่อนชุบแข็ง (ภาพขยาย 200 เท่า)	164
5.50 โครงสร้างทางโลหะวิทยาของเหล็กประเภทที่ 2 (S45C) ก่อนชุบแข็ง (ภาพขยาย 200 เท่า)	165
5.51 โครงสร้างทางโลหะวิทยาของเหล็กประเภทที่ 3 (SCM4) ก่อนชุบแข็ง (ภาพขยาย 200 เท่า)	165
5.52 โครงสร้างทางโลหะวิทยาของเหล็กประเภทที่ 4(SCM21) ก่อนชุบแข็ง (ภาพขยาย 200 เท่า)	166
5.53 โครงสร้างทางโลหะวิทยาของเหล็กประเภทที่ 1 (S50C) หลังชุบแข็ง (ภาพขยาย 200 เท่า)	166
5.54 โครงสร้างทางโลหะวิทยาของเหล็กประเภทที่ 2 (S45C) หลังชุบแข็ง (ภาพขยาย 200 เท่า)	167

5.55	โครงสร้างทางโลหะวิทยาของเหล็กประเภทที่ 3 (SCM4) หลังชุบแข็ง (ภาพขยาย 200 เท่า)	167
5.56	โครงสร้างทางโลหะวิทยาของเหล็กประเภทที่ 4 (SCM21) หลังชุบแข็ง (ภาพขยาย 200 เท่า)	168



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย