

เครื่องให้ความร้อนแบบเหนียวนำชนิดโรเซนซ์ชานที่มีกระแสอาร์มอิกต่ำในสายกำลัง

นายลักษมณ์ กิจจักษ์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2539

ISBN 974-636-674-2

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**A LOW LINE HARMONIC CURRENT PARALLEL RESONANT INDUCTION
HEATER**

MR. LUCK KITJARAK

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

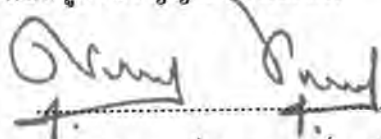
Academic Year 1996

ISBN 974-636-674-2

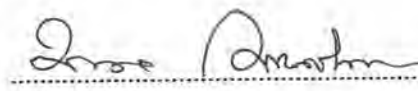
หัวข้อวิทยานิพนธ์ เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำชนิดรีโซแนนซ์ขนาน
ที่มีกระแสอาร์โมนิกต่ำในสายกำลัง


โดย นายลักขมณั กิจจักษ์
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.โคทม อารียา

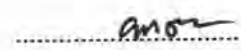
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

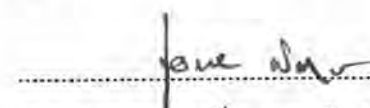

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ สุภวัฒน์ ชูติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. มงคล เดชนครินทร์)


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


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา กุลวิทิต)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีสารสมิ์)

พิมพ์ต้นฉบับบทความวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว



ลักษณะ กิจการักษ์ : เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำชนิดเรโซแนนซ์ขนานที่มีกระแสฮาร์มอนิกต่ำในสายกำลัง (A LOW LINE HARMONIC CURRENT PARALLEL RESONANT INDUCTION HEATER) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.โคทม อาริยา , 144 หน้า. ISBN 974-636-674-2.

เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ออกแบบและสร้างขึ้นนี้ มีความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสในสายกำลังต่ำ เครื่องให้ความร้อนประกอบด้วย วงจรกรอง แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง หม้อแปลงความถี่สูง และขดลวดเหนี่ยวนำ แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงเป็นวงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์ ที่มี IGBT และ ไดโอด เป็นสวิตช์ ด้านเข้าของไซโคลคอนเวอร์เตอร์เป็นสายกำลัง 3 เฟส ด้านออกเป็นแรงดันความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ การขับนำสวิตช์อย่างเหมาะสม ทำให้กระแสด้านเข้าเป็นไซน์มีเฟสเกือบตรงกับแรงดัน โดยมีความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ วงจรขับนำเกตของ IGBT เป็นวงจรที่ไม่ซับซ้อน ซึ่งใช้อุปกรณ์เชื่อมโยงทางแสงความเร็วสูงเพื่อการแยกโดด การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำและวงจรชดเชยตัวประกอบกำลังที่เหมาะสม ทำให้สามารถคำนวณกำลังด้านออกได้ตามที่ต้องการ เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่สร้างขึ้น สามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้เมื่อกำลังมีค่าต่ำ แต่เนื่องจากมีกระแส และแรงดันยอดแหลมที่สวิตช์ จึงไม่ได้ทำการทดสอบที่กำลังสูง

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา อิเล็กทรอนิกส์ กำลัง
ปีการศึกษา ๒5๖๑

ลายมือชื่อนิสิต โคทม อาริยา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา โคทม อาริยา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

C615551 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD:

INDUCTION HEATING / LOW LINE HARMONIC CURRENT / PARALLEL RESONANT

LUCK KITJARAK : A LOW LINE HARMONIC CURRENT PARALLEL RESONANT INDUCTION HEATER

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. GOTHOM ARYA, Ph.D. 144 pp. ISBN 974-636-674-2.

This thesis presents the design and construction of a low line harmonic current parallel resonant induction heater. The designed heater comprises of a filter circuit, a high frequency AC generator, a high frequency transformer and an induction coil. The high frequency AC generator is a cycloconverter using IGBTs and diodes as switches and operates at 30 kHz. Judicious switch drive yields sinusoidal input currents, almost in phase with the line voltages with less than 10 percent THD. The IGBT gate drive signals are generated by a simple circuit using high speed opto-couplers. The design of the induction coil as well as an appropriate power factor corrector allows for the calculation of the desired output power. The constructed heater operates at low power level in accordance with the design. But because of the presence of current and voltage spikes at the switches, it was not possible to test the heater at nominal output power.

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขาวิชา.....อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ปีการศึกษา..... ๒๕๓๙

ลายมือชื่อนิสิต..... ลักษณ์ ปลอดภัย

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... อ. ก.

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร.โคทม อาริยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัย ด้วยดีมาโดยตลอด รวมทั้งอาจารย์และบุคลากรอีกหลายท่าน ที่ให้คำปรึกษา และแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอย่างมาก

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา เป็นอย่างสูง ซึ่งสนับสนุนด้านการเงิน และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมา จนสำเร็จการศึกษา

ลักขมณี กิจจาร์ักษ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเบื้องต้น.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	6
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ.....	7
2.1 บทนำ.....	7
2.2 ทฤษฎีของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ.....	12
2.2.1 การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำกับชิ้นงานอุดมคติ.....	12
2.2.2 การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำกับชิ้นงานทรงกระบอกตัน.....	22
2.3 การวิเคราะห์หาจรรยาสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำ.....	27
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับคุณสมบัติของชิ้นงาน.....	33
2.4.1 สภาพความต้านทานของโลหะกับอุณหภูมิ.....	33
2.4.2 ความซึมซาบได้ของโลหะกับอุณหภูมิและความเข้มสนามแม่เหล็ก.....	36
2.4.3 โครงสร้างทางโลหะของเหล็กผสมคาร์บอนกับอุณหภูมิ.....	36
บทที่ 3 การวิเคราะห์และออกแบบวงจรกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง.....	39
3.1 กรณีแหล่งเป็นกึ่งกระแส.....	40
3.1.1 การวิเคราะห์รูปแบบการขับนำสวิตซ์.....	40
3.1.2 การวิเคราะห์รูปคลื่นกระแสที่โหลด.....	44
3.2 กรณีแหล่งเป็นกึ่งแรงดัน.....	51

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.1	การวิเคราะห์รูปแบบการขับนำสวิทช์.....	51
3.2.2	การวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมที่โหลด	55
3.3	การวิเคราะห์ห้องค้ประกอบหลักมูล	55
3.3.1	องค์ประกอบหลักมูลของกระแสด้านออกของ ไซโคลคอนเวอร์เตอร์.....	56
3.3.2	องค์ประกอบหลักมูลของแรงดันด้านออกของ ไซโคลคอนเวอร์เตอร์.....	60
3.4	กรณีโหลดเป็นวงจรเรโซแนนซ์.....	61
3.5	กรณีโหลดเป็นความต้านทาน.....	65
บทที่ 4	การออกแบบและสร้างเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ.....	66
4.1	วงจรฟิวเตอร์.....	66
4.2	แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง.....	74
4.2.1	หลักการทํางาน.....	75
4.2.2	การคำนวณกระแสด้านเข้า.....	77
4.2.3	รูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านออก.....	78
4.2.4	การเลือกสวิทช์ใช้งาน.....	79
4.2.5	วงจรสับเบอร์.....	85
4.3	วงจรควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์.....	88
4.3.1	วงจรสร้างสัญญาณขับนำเกต.....	89
4.3.2	วงจรขับนำเกตและการแยกโดดด้วยอุปกรณ์ opto coupler.....	94
4.4	วงจรป้องกันและควบคุม.....	97
4.4.1	วงจรป้องกันแรงดันเกินพิกัด.....	97
4.4.2	วงจรป้องกันกระแสเกินพิกัด.....	99
4.5	ภาคกำลังด้านออก.....	99
4.5.1	หม้อแปลงแยกโดดความถี่สูงและส่งผ่านกำลัง.....	99
4.5.2	ขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงานที่มีตัวเก็บประจุชดเชย ตัวประกอบกำลัง.....	111

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การทดสอบเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ.....	121
5.1 สัญญาณขั้วนำเกต.....	121
5.2 รูปคลื่นแรงดันคร่อม IGBT กำลัง และกระแสผ่าน IGBT กำลัง.....	122
5.3 รูปคลื่นแรงดันด้านออกของวงจรถูกกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง.....	123
5.4 รูปคลื่นแรงดันทางด้านทุติยภูมิ และกระแสปฐมภูมิ ของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง.....	124
5.5 รูปคลื่นกระแสด้านเข้าและแรงดันคร่อมสวิตช์.....	125
5.6 การวัดกำลัง และตัวประกอบกำลังทางด้านเข้า.....	126
5.7 การวัดกำลังที่ชิ้นงาน.....	128
บทที่ 6 ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ.....	131
6.1 ข้อสรุปในการวิจัย.....	131
6.1.1 วงจรฟิลเตอร์.....	131
6.1.2 แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง.....	131
6.1.3 วงจรขั้วนำเกต.....	132
6.1.4 วงจรป้องกัน.....	132
6.1.5 วงจรกำลังด้านออก.....	132
6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะในการปรับปรุง.....	133
6.2.1 การออกแบบและติดตั้งสับเบอร์ดแรงดัน.....	133
6.2.2 การระบายความร้อน.....	133
6.2.3 สวิตช์ IGBT	134
6.2.4 ความกลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์ของวงจรถูกผลิตด้านโหลด.....	134
6.2.5 ความเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลง	134
รายการอ้างอิง.....	135
ภาคผนวก.....	137
ประวัติผู้เขียน.....	144

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าสภาพความต้านทาน ρ และค่าสัมประสิทธิ์ α ของโลหะชนิดต่างๆที่ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส.....	35
3.1 ค่าองค์ประกอบหลักมูลของแรงดันทางด้านออกที่ค่า ϕ ต่างๆ.....	60
4.1 ข้อมูลของแกนเฟอร์ไรต์ EC-70 เนื้อสาร N27.....	72
4.2 ผลการวัดค่าตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์.....	74
4.3 ลอจิกของสัญญาณขั้วนำสวิตช์.....	90
4.4 ตารางแสดงด้านออกของวงจรมับ 4 บิต.....	91
4.5 ตารางแสดงการเลือกใช้ด้านออกบางส่วนของวงจรมับมาใช้เป็นด้านเข้า ในการสร้างสัญญาณขั้วนำเกต.....	92
4.6 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของหม้อแปลงเฟอร์ไรต์แกนชนิด EE.....	102
4.7 ผลการวัดค่าพารามิเตอร์ของขดลวดเหนี่ยวนำที่สภาวะมีโหลด.....	112
5.1 ค่ากำลังสูญเสียที่จุดต่างๆ และ กำลังที่ขึ้นงาน	131

สารบัญญภาพ

รูปที่	หน้า	
1.1	บล็อกไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ.....	4
2.1	การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำแบบง่าย.....	7
2.2	วงจรมูลของหม้อแปลงทั่วไป.....	8
2.3	วงจรมูลของขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน.....	8
2.4	แผ่นคลื่นของชิ้นงาน.....	9
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับระยะทางจากผิวของชิ้นงาน.....	10
2.6	ประเภทและลักษณะการใช้งานของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำในย่าน ความถี่ต่างๆ.....	10
2.7	การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำกับชิ้นงานลักษณะอุดมคติ.....	13
2.8	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับระยะทางจากผิวชิ้นงาน.....	16
2.9	ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียต่อพื้นที่กับระยะจากผิวชิ้นงาน.....	19
2.10	เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับ แรงดันในกรณีที่ขดลวดเหนี่ยวนำเป็นแบบอุดมคติ.....	20
2.11	เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับ แรงดันในกรณีที่ขดลวดเหนี่ยวนำไม่เป็นแบบอุดมคติ.....	21
2.12	วงจรมูลของขดลวดให้ความร้อนและชิ้นงาน.....	21
2.13	การกระจายของความหนาแน่นกระแสในการเหนี่ยวนำความร้อนของชิ้นงาน ทรงกระบอกตัน.....	23
2.14	ความสัมพันธ์ระหว่าง p และ q กับ d / δ	25
2.15	เฟสเซอร์ไดอะแกรมของปริมาณต่างๆที่ชิ้นงาน.....	26
2.16	ฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่คล่องผ่านชิ้นงานกับขดลวดเหนี่ยวนำ.....	27
2.17	วงจรมูลของขดลวดเหนี่ยวนำกรณีมีชิ้นงาน.....	30
2.18	วงจรมูลทางไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำกรณีไม่มีโหลด.....	32
2.19	ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพความต้านทานกับอุณหภูมิของโลหะชนิดต่างๆ.....	35
2.20	แผนภาพสมมูลเหล็กผสมคาร์บอน.....	37
3.1	ไซโคลคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส - 1 เฟส ที่จ่ายกำลังความถี่สูง.....	39
3.2	วงจรมูลของโหลดแบบขนาน.....	40
3.3	การขั้วนำสวิตซ์กรณีแหล่งเป็นกึ่งกระแส.....	41

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่

หน้า

3.4	วงจรสมมูลขณะสวิตช์ทำงานในช่วงเวลาที่ 1 กรณีแหล่งเป็นกึ่งกระแส $i = i_a + i_c = -i_b$	41
3.5	วงจรสมมูลขณะสวิตช์ทำงานในช่วงเวลาที่ 2 กรณีแหล่งเป็นกึ่งกระแส $i = i_b$	42
3.6	วงจรสมมูลขณะสวิตช์ทำงานในช่วงเวลาที่ 3 กรณีแหล่งเป็นกึ่งกระแส $i = i_a + i_b = -i_c$	42
3.7	วงจรสมมูลขณะสวิตช์ทำงานในช่วงเวลาที่ 4 กรณีแหล่งเป็นกึ่งกระแส $i = i_b$	43
3.8	วงจรสมมูลขณะสวิตช์ทำงานในช่วงเวลาที่ 5 กรณีแหล่งเป็นกึ่งกระแส $i = i_b + i_c = -i_a$	43
3.9	วงจรสมมูลขณะสวิตช์ทำงานในช่วงเวลาที่ 6 กรณีแหล่งเป็นกึ่งกระแส $i = i_c$	44
3.10	รูปคลื่นแสดงกระแสเฟส i_a, i_b, i_c	45
3.11	รูปคลื่นกระแสที่ไหลคเมื่อ $\phi = 0^\circ$	46
3.12	รูปคลื่นกระแสที่ไหลคเมื่อ $\phi = 15^\circ$	46
3.13	รูปคลื่นกระแสที่ไหลคเมื่อ $\phi = 30^\circ$	47
3.14	รูปคลื่นกระแสที่ไหลคเมื่อ $\phi = 45^\circ$	48
3.15	รูปคลื่นกระแสที่ไหลคเมื่อ $\phi = 60^\circ$	48
3.16	รูปคลื่นกระแสที่ไหลคเมื่อ $\phi = 90^\circ$	49
3.17	รูปคลื่นกระแสที่ไหลคเมื่อ $\phi = 120^\circ$	50
3.18	รูปคลื่นกระแสที่ไหลคเมื่อ $\phi = 150^\circ$	50
3.19	รูปคลื่นกระแสที่ไหลคเมื่อ $\phi = 180^\circ$	51
3.20	วงจรสมมูลของไหลคแบบอนุกรม.....	51
3.21	การขับนำสวิตช์กรณีแหล่งเป็นกึ่งแรงดัน.....	52
3.22	วงจรสมมูลขณะสวิตช์ทำงานในช่วงเวลาที่ 1 กรณีแหล่งเป็นกึ่งแรงดัน $v = v_{ab}$	52
3.23	วงจรสมมูลขณะสวิตช์ทำงานในช่วงเวลาที่ 2 กรณีแหล่งเป็นกึ่งแรงดัน $v = v_{ac}$	53
3.24	วงจรสมมูลขณะสวิตช์ทำงานในช่วงเวลาที่ 3 กรณีแหล่งเป็นกึ่งแรงดัน $v = v_{bc}$	53
3.25	วงจรสมมูลขณะสวิตช์ทำงานในช่วงเวลาที่ 4 กรณีแหล่งเป็นกึ่งแรงดัน $v = v_{ba}$	54
3.26	วงจรสมมูลขณะสวิตช์ทำงานในช่วงเวลาที่ 5 กรณีแหล่งเป็นกึ่งแรงดัน $v = v_{ca}$	54
3.27	วงจรสมมูลขณะสวิตช์ทำงานในช่วงเวลาที่ 6 กรณีแหล่งเป็นกึ่งแรงดัน $v = v_{cb}$	55
3.28	แผนภาพเฟสเซอร์แสดงตำแหน่งของกระแส i_0 ในช่วงเวลาต่าง ๆ ของการสวิตช์....	59
3.29	วงจรสมมูลของไซโคลคอนเวอร์เตอร์กรณีไหลคเป็นวงจรเรโซแนนซ์.....	61
3.30	วงจรสมมูลของไซโคลคอนเวอร์เตอร์กรณีแหล่งเป็นกึ่งกระแส.....	65
4.1	บล็อกไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ.....	66
4.2	วงจรฟีดเดอร์ทั้ง 3 เฟส.....	67

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3(ก) วงจรฟีดแบ็คเฟส a.....	67
4.3(ข) แผนภาพเฟสเซอร์ของกระแสและแรงดันในวงจรฟีดแบ็คเฟส a.....	67
4.4 วงจรที่ใช้วิเคราะห์หาค่า L, C ในวงจรฟีดแบ็ค.....	69
4.5 รูปคลื่นของกระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำ I_{L_a} และแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_d ในวงจรฟีดแบ็คของเฟส a.....	69
4.6 กราฟแสดงกำลังสูญเสียของแกนเฟอร์ไรต์ต่อน้ำหนักกับความถี่.....	70
4.7(ก) ข้อมูลของแกนเฟอร์ไรต์ EC-70 เนื้อสาร N27.....	71
4.7(ข) ข้อมูลของแกนเฟอร์ไรต์ EC-70 เนื้อสาร N27.....	71
4.7(ค) ข้อมูลของแกนเฟอร์ไรต์ EC-70 เนื้อสาร N27.....	72
4.7(ง) ข้อมูลของแกนเฟอร์ไรต์ EC-70 เนื้อสาร N27.....	72
4.8 วงจรสมมูลที่ใช้ในการวัดค่าตัวเหนี่ยวนำ.....	74
4.9 ภาควัดไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง.....	75
4.10 รูปแบบการขับนำสวิทช์ของสวิทช์ทั้ง 6 ชุด.....	75
4.11 รูปแบบการขับนำสวิทช์ที่มีช่วงเวลาพัก.(dead time).....	76
4.12 เส้นทางการไหลของกระแสในช่วงเวลาพักของช่วงเวลา $t_0 - t_1$	77
4.13 รูปสัญญาณระหว่างกระแสและแรงดันด้านออกของไซโคลคอนเวอร์เตอร์.....	78
4.14 วงจรที่ใช้ในการขมิบเลดที่กำลังด้านออก 4140 วัตต์.....	79
4.15(ก) รูปคลื่นของกระแสผ่านสวิทช์และแรงดันคร่อมสวิทช์ในช่วงเวลา 20 มิลลิวินาที.....	80
4.15(ข) รูปคลื่นของกระแสผ่านสวิทช์และแรงดันคร่อมสวิทช์ในช่วงเวลา ต่าง ๆ.....	80
4.15(ค) รูปคลื่นของกระแสผ่านสวิทช์และแรงดันคร่อมสวิทช์ในช่วงเวลาต่าง ๆ.....	81
4.15(ง) รูปคลื่นของกระแสผ่านสวิทช์และแรงดันคร่อมสวิทช์ในช่วงเวลาต่าง ๆ.....	81
4.15(จ) รูปคลื่นของกระแสผ่านสวิทช์และแรงดันคร่อมสวิทช์ในช่วงเวลาต่าง ๆ.....	82
4.15(ฉ) รูปคลื่นของกระแสผ่านสวิทช์และแรงดันคร่อมสวิทช์ในช่วงเวลาต่าง ๆ.....	82
4.15(ช) รูปคลื่นของกระแสผ่านสวิทช์และแรงดันคร่อมสวิทช์ในช่วงเวลาต่าง ๆ.....	83
4.16 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันที่ขดลวดเหนี่ยวนำขณะมีโหลด.....	83
4.17 การต่อ IGBT และ ไดโอดเป็นสวิทช์สำหรับกระแสและแรงดันสองทิศทาง.....	84
4.18 การต่อ ไดโอด และ IGBT เป็นสวิทช์ในวงจรกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง.....	85
4.19 แรงดันคร่อมสวิทช์ และกระแสผ่านสวิทช์ ขณะไม่ต่อวงจรสับเบอรี่.....	86

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 วงจรสับเบอร์ดแรงดันในวงจรกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง.....	87
4.21 รูปคลื่นแรงดันคร่อมสวิตช์ และกระแสผ่านสวิตช์เมื่อต่อวงจรสับเบอร์ด.....	88
4.22 วงจรกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงพร้อมชุดขั้วนำเกิดและแยกโคด.....	89
4.23 รูปแบบการสวิตช์เปรียบเทียบกับสัญญาณนาฬิกา.....	90
4.24 วงจรกำเนิดรูปแบบสัญญาณในการขั้วนำเกิดของ IGBT.....	93
4.25 บล็อกโคดอะแกรมวงจรขั้วนำเกิดแบบแยกโคด.....	94
4.26 วงจรภายในของวงจรขั้วนำเกิดและแยกโคดแบบ Opto isolation ของไอซี TLP250.....	94
4.27 วงจรขั้วนำเกิดโดยใช้ ไอซี TLP250 แต่ละชุด.....	96
4.28 วงจรตรวจจับและป้องกันแรงดันและกระแสเกินพิกัด.....	98
4.29 การต่อหม้อแปลง 4 ตัว ให้มีอัตราส่วนการแปลงแรงดันเป็น 12 : 1.....	100
4.30 กราฟแสดงกำลังสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ต่อปริมาตรกับอุณหภูมิที่ความถี่ 50 kHz.....	103
4.31 กราฟแสดงความสามารถในการส่งผ่านกำลังของแกนขนาดต่างๆ.....	105
4.32 วงจรสมมูลของหม้อแปลงส่งผ่านกำลัง.....	109
4.33 การต่อตัวเก็บประจุคเซยตัวประกอบกำลัง.....	111
4.34 รูปร่างของขดลวดให้ความร้อน.....	112
4.35 การชดเชยตัวประกอบกำลังที่ขดลวดเหนี่ยวนำ.....	113
4.36 การต่อตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิ.....	114
4.37 วงจรสมมูลของโพลรวมหม้อแปลง.....	115
4.38 รูปกราฟพิกัดแรงดัน อาร์เอ็มเอส กับความถี่ของตัวเก็บประจุแต่ละขนาด.....	117
4.39(ก) การต่อตัวเก็บประจุแบบใช้ลวดทองแดงต่อธรรมดา.....	118
4.39(ข) วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของตัวเก็บประจุและขดลวดเหนี่ยวนำ.....	118
4.40 ฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่คดโค้งผ่านลวดทองแดงที่ใช้ต่อตัวเก็บประจุแต่ละตัว.....	118
4.41 ภาพการต่อตัวเก็บประจุบนแผ่นทองแดงที่ขนานกัน.....	119
4.42 แผงตัวเก็บประจุที่ยึดติดกับขดลวดเหนี่ยวนำ.....	120
5.1 แรงดันที่ขั้วนำเกิดของ IGBT กำลัง.....	121
5.2 ตำแหน่งการวัดกระแส และแรงดันในวงจรกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง.....	122
5.3 กระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ และแรงดันคร่อมสวิตช์.....	123
5.4 แรงดันขาออกของวงจรกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง (100 V / ช่อง).....	125

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.5 กระแสต้านปฐมภูมิและแรงดันต้านหตุยภูมิของหม้อแปลงกำลังความถี่สูงที่แรงดันเฟส 33 V _{rms}	125
5.6 กระแสต้านเข้าและแรงดันกร่อมสวิตซ์.....	126
5.7 กระแสและแรงดันที่จุดต่างๆในบล็อกไดอะแกรมของระบบ.....	126
5.8 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันต้านเข้าเฟส a.....	127