เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำขนาด 4.2 kVAสำหรับให้ความร้อนเบื้องต้นแก่ลวดตัวนำอะลูมิเนียมตีเกลียว

นายสุระพล เธียรมนตรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ.2538

ISBN 974-631-304-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16895381

A 4.2 kVA INDUCTION HEATER FOR ALUMINIUM STRAND CONDUCTOR PRE-HEATING

MR. SURAPON THIENMONTREE

A Thesis Submittd in Partial Fuifillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1995

ISBN 974-631-304-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำขนาด 4.2 kVA สำหรับให้ความร้อนเบื้องต้นแก่ลวดตัวนำอะลูมิเนียมตีเกลียว
โดย	นายสุระพล เธียรมนตรี
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
(ดร.สมบูรณ์ แสงวงค์วาณิชย์)

.....กรรมการ
(อาจารย์ เจิดกุล โสภาวนิตย์)

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

สุระพล เธียรมนตรี : เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำขนาด 4.2 kVA สำหรับให้ความร้อนเบื้องต้นแก่ลวดตัวนำอะลูมิเนียมตีเกลียว (A 4.2 kVA INDUCTION HEATER FOR ALUMINIUM STRAND CONDUCTOR PRE-HEATING) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ยุทธนา กุลวิทิต , 131 หน้า . ISBN 974-631-304-5

บทความนำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำขนาด 4.2 กิโลโวลต์แอมแปร์ สำหรับให้ความร้อนเบื้องต้นแก่ลวดตัวนำอะลูมิเนียมตีเกลียวขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 มม. ให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 60 องศาเซลเซียสจากอุณหภูมิห้อง ในเวลา 6 วินาที ที่กำลังออกสูงสุด สำหรับใช้ในขบวนการเคลือบฉนวนสายไฟฟ้า วงจรอินเวอร์เตอร์เป็นวงจรกำธรแบบกึ่งบริดจ์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์กำลังเป็นสวิตช์ ออกแบบให้ทำงานแบบกำธรในภาคการสวิตช์แรงดันศูนย์ ซึ่งจะเป็นการลดกำลังศูนย์เสียในการสวิตช์ วงจรควบคุมได้รับการออกแบบให้สามารถปรับกำลังออกที่ขึ้นงานได้โดยการปรับความถี่ในพิสัย 19.5 - 22.5 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งทำให้สามารถปรับค่ากำลังออกได้ในช่วง 100 - 30 เปอร์เซนต์ กำลังออกที่ขึ้นงานสูงสุดเท่ากับ 1,281 วัตต์ ประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ 64 เปอร์เซนต์ ค่าตัวประกอบกำลังของโหลดของวงจรอินเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ 0.54 ประสิทธิภาพของวงจรอินเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ 95 เปอร์เซนต์ ค่าตัวประกอบกำลังด้านเข้าของเครื่องมีค่าเท่ากับ 0.60 ประสิทธิภาพรวมของเครื่องมีค่าเท่ากับ 54 เปอร์เซนต์

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2537 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

C415574 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD: INDUCTION HEATER /HALF BRIDGE / ZERO VOLTAGE RESONANT SWITCH
SURAPON THIENMONTREE : A 4.2 kVA INDUCTION HEATER FOR ALUMINIUM STRAND CONDUCTOR PRE-HEATING. THESIS ADVISOR : ASST.PROF. YOUTHANA KULVITIT,Dr.Ing. 131 pp. ISBN 974-631-304-5

The design approach and test results of a 4.2 kVA induction heater are presented. The equipment can be used to raise the temperature of aluminium strand conductor by 60 C above room temperature in 6 seconds for maximum output power. This heating procedure is required for insulation coating process of the aluminium strand. The diameter of the strand in this experiment is 15 mm. The inverter of this induction heater is implemented by the Half-Bridge Series Resonance Converter using power transistors as its switching devices. The switching loss is minimized by operating the transistors in the zero voltage switch resonant mode. The output power of the system can be controlled by varying the operating frequency of inverter. The control of the output power within the range of 100 - 30 % has been achieved by varying the operating frequencies from 19.5 to 22.5 kHZ. The maximum output power transfered to the strand is 1,281 watts. The efficiency of the induction coil is 64%. The power factor of the load driven by the inverter is 0.54. The efficiency of the inverter circuit is 95 %. The input power factor of the system is 0.66. Total efficiency of the system is 54 %.

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2537 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ ด้วยความช่วยเหลือจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา กุลวิทิต ที่ได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์และเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาซึ่งท่านได้ให้การแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของการวิจัยมาด้วยดีตลอด อีกทั้งรองศาสตราจารย์ ดร. โดทม อารียา อาจารย์เจิดกุล โสภาวนิตย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิช ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำ ความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน ที่ได้กล่าวมาข้างต้น นอกจากนี้ข้าพเจ้าใคร่ขอขอบคุณ คุณสมศรี เมืองชนะ และนิสิตปริญญาโทห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลังทุกท่าน

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และพี่ชาย ซึ่งให้การสนับสนุนและให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สุระพล เธียรมนตรี

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ ช

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญตาราง ..... ช
สารบัญภาพ ..... ฌ
บทที่ 1 บทนำ
ความเบื้องต้น 1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย 3
ขอบเขตและข้อกำหนดการวิจัย 3
ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน 4
ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย 4
บทที่ 2 การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ
บทนำ 5
ทฤษฎีเบื้องต้นของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ 11
ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับคุณสมบัติของชิ้นงาน 29
การเลือกความถี่ที่ใช้ในเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ 32
วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำและการออกแบบ 34
บทที่ 3 โครงสร้างและการออกแบบเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ
โครงสร้างของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ 47
การวิเคราะห์และออกแบบวงจรภาคกำลัง 51
การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ 77
บทที่ 4 การทดสอบเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ
การทดสอบทางไฟฟ้า 96
การทดสอบด้านความร้อน 120
บทที่ 5 ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ
ข้อสรุปในการวิจัย 121
ปัญหาและข้อเสนอในการปรับปรุง 124
รายการอ้างอิง 125
ภาคผนวก 127
ประวัติผู้เขียน 131

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 แสดงค่าสภาพความต้านทาน และค่าสัมประสิทธิ์ ของโลหะชนิดต่าง ๆ ที่ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส 30

2.2 การเลือกความถี่ในการใช้งานสำหรับความลึกผิวและเส้นผ่าศูนย์กลางของ ชิ้นงานที่ค่าต่าง ๆ 33

2.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของขดลวดเหนี่ยวนำที่ได้จากการวัดทั้งในกรณี ที่ไม่มีชิ้นงานและมีชิ้นงานเป็นลวดตัวนำอะลูมิเนียมตีเกลียว 42

3.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแกนหม้อแปลง 85

4.1 แสดงค่ากำลังปรากฏ กำลังเฉลี่ยและตัวประกอบกำลังด้านเข้าของเครื่อง 116

4.2 แสดงค่ากำลังออกและประสิทธิภาพของวงจรเรียงกระแส 117

4.3 แสดงกำลังปรากฏ กำลังออก ค่าตัวประกอบกำลัง ประสิทธิภาพของ อินเวอร์เตอร์ กำลังออกและประสิทธิภาพของหม้อแปลงความถี่สูง 118

4.4 แสดงค่ากำลังที่ชิ้นงาน ขดลวดเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุเพิ่งค่าตัวประกอบ กำลัง ประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำและประสิทธิภาพรวมของเครื่อง 119

4.5 แสดงค่าอุณหภูมิของลวดตัวนำอะลูมิเนียมตีเกลียวขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 มม.ที่เวลาต่าง ๆ (°C) 120

สารบัญภาพ

รูปที่ หน้า

2.1 แสดงการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำอย่างง่าย 5
2.2 แสดงวงจรสมมูลของหม้อแปลงทั่วไป 6
2.3 แสดงวงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน 6
2.4 แสดงทิศทางการไหลของกระแสที่ผิว 8
2.5 แสดงแผ่นคลี่ของชิ้นงาน 8
2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับระยะทางจาก ผิวของชิ้นงาน 8
2.7 แสดงประเภทและลักษณะการใช้งานของเครื่องให้ความร้อนแบบ เหนี่ยวนำในย่านความถี่ต่าง ๆ 9
2.8 แสดงการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำกับชิ้นงานลักษณะอุดมคติ 11
2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับระยะจากผิวชิ้นงาน 15
2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียต่อพื้นที่กับระยะจากผิวชิ้นงาน 21
2.11 เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนาม แม่เหล็กกับแรงดันในกรณีที่ขดลวดเหนี่ยวนำเป็นแบบอุดมคติ 22
2.12 เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนาม แม่เหล็กกับแรงดันในกรณีที่ขดลวดเหนี่ยวนำไม่อุดมคติ 23
2.13 แสดงแบบจำลองวงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน 23
2.14 การกระจายความหนาแน่นกระแสในการเหนี่ยวนำความร้อนของ ชิ้นงานทรงกระบอกตัน 25
2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง p และ q กับ $\frac{d}{\delta}$ 27
2.16 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของปริมาณต่าง ๆ 29
2.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพความต้านทานกับอุณหภูมิ 31
2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการให้ความร้อน ความหนาแน่น กำลังงานต่อพื้นผิวและความลึกผิวโดยมีความถี่เป็นพารามิเตอร์ 33

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.19 แสดงฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่คล้องผ่านชิ้นงานกับขดลวดเหนี่ยวนำและเฟสเซอร์ไดอะแกรมของระบบ 34

2.20 วงจรสมมูลทางแม่เหล็ก 37

2.21 วงจรสมมูลทางไฟฟ้า 37

2.22 แสดงวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำ (ไม่มีโหลด) 40

2.23 แสดงขดลวดเหนี่ยวนำที่ออกแบบ..... 41

2.24 แสดงค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้ท่อทองแดงตัน ซึ่งได้จากการคำนวณทางทฤษฎีที่ช่วงความถี่ระหว่าง 1 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 100 กิโลเฮิรตซ์ ในกรณีที่ไม่มีชิ้นงาน..... 43

2.25 แสดงค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้ท่อทองแดงกลวงซึ่งได้จากการวัดที่ ความถี่ระหว่าง 1 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 100 กิโลเฮิรตซ์ ในกรณีที่ไม่มีชิ้นงาน 43

2.26 แสดงค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้ท่อทองแดงตัน ซึ่งได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ที่ความถี่ระหว่าง 1 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 100 กิโลเฮิรตซ์ ในกรณีที่ชิ้นงานเป็นลวดตัวนำอะลูมิเนียมตันขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร..... 44

2.27 แสดงค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้ท่อทองแดงกลวงซึ่งได้จากการวัด ที่ความถี่ระหว่าง 1 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 100 กิโลเฮิรตซ์ ในกรณีที่ชิ้นงานเป็นแท่งอะลูมิเนียมที่ได้จากการใช้อะลูมิเนียมตีเกลียว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร..... 45

2.28 แสดงประสิทธิภาพและตัวประกอบกำลังของขดลวดเหนี่ยวนำที่มีชิ้นงานเป็นลวดอะลูมิเนียมตัน ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ที่ความถี่ระหว่าง 1 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 100 กิโลเฮิรตซ์ 46

2.29 แสดงประสิทธิภาพและตัวประกอบกำลังของขดลวดเหนี่ยวนำที่มีชิ้นงานเป็นลวดตัวนำอะลูมิเนียมตีเกลียวที่ได้จากการวัด ที่ความถี่ระหว่าง 1 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 100 กิโลเฮิรตซ์..... 46

3.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ..... 47

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.2 วงจรสมมูลของโหลดของอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์ 52
3.3 วงจรภาคกำลังของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ 53
3.4 ผลตอบเชิงความถี่ของกระแสและแรงดันของขดลวดเหนี่ยวนำที่มีลวดตัวนำอะลูมิเนียมตีเกลียวเป็นชิ้นงาน สำหรับกรณีที่แรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ มีรูปคลื่นเป็นไซน์ ที่มีค่ายอด 337 โวลต์ 53
3.5 ผลตอบเชิงความถี่ของขนาดและเฟสของกระแสออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ 54
3.6 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันของขดลวดเหนี่ยวนำที่มีลวดตัวนำอะลูมิเนียมตีเกลียวขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร เป็นชิ้นงาน เมื่อแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์มีค่ายอด 260 โวลต์ 56
3.7 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังของโหลด โดยมีเงื่อนไขเดียวกับรูปที่ 3.6 56
3.8 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงปรับระดับแรงดัน โดยมีเงื่อนไขเดียวกับรูปที่ 3.6 57
3.9 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงปรับระดับแรงดัน โดยมีเงื่อนไขเดียวกับรูปที่ 3.6 58
3.10 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ 59
3.11 แสดงรูปกระแสและแรงดันออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ 60
3.12 แสดงช่วงเวลาการนำกระแสและแรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์ Q_1 60
3.13 แสดงช่วงเวลาที่กระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุและแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุที่ใช้เป็นสนับเบอร์ 61
3.14 แสดงช่วงเวลาการนำกระแสและแรงดันคร่อมไดโอด D_2 61
3.15 แสดงช่วงเวลาการนำกระแสและแรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์ Q_2 62
3.16 แสดงช่วงเวลาการนำกระแสและแรงดันคร่อมไดโอดD_1 62
3.17 วงจรกำเนิดสัญญาณสำหรับควบคุมการทำงานของวงจร 65
3.18 แสดงวงจรขับนำเบสที่ใช้ขับนำทรานซิสเตอร์แต่ละตัว 66
3.19 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 3 เฟส 70
3.20 การคายประจุของตัวเก็บประจุ 72

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.21 วงจรที่ใช้ในการชิมูเลตด้วยโปรแกรมวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าเพื่อ
หาค่ากระแสผ่านไดโอด 74

3.22 รูปคลื่นของกระแสออกของวงจรเรียงกระแสและแรงดันออก
ของวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 75

3.23 รูปคลื่นของกระแสไดโอดและแรงดันออกของวงจรเปลี่ยน
ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 75

3.24 แสดงกระแสกระชากของไดโอดและแรงดันออกของวงจรเปลี่ยน
ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงในขณะเปิดเครื่อง 76

3.25 แสดงกระแสกระชากของไดโอดและแรงดันออกของวงจรเปลี่ยน
ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงในขณะเปิดเครื่อง เมื่อ
ต่อความต้านทานขนาด 5 โอห์ม คั่นระหว่างวงจรเรียงกระแส
กับตัวเก็บประจุของวงจรกรอง 77

3.26 กราฟพิกัดแรงดันอาร์เอ็มเอสกับความถี่ของตัวเก็บประจุแต่ละขนาด 79

3.27 a) การต่อตัวเก็บประจุแบบใช้ลวดทองแดงธรรมดา 80

b) วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของตัวเก็บประจุและลวดเหนี่ยวนำ 80

3.28 ฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่คล้องผ่านลวดทองแดงที่ใช้ต่อตัวเก็บประจุแต่ละตัว. 81

3.29 การต่อตัวเก็บประจุบนแผ่นทองแดงสองแผ่น 82

3.30 กราฟกำลังสูญเสียในแกนเฟอไรต์ต่อน้ำหนักกับความถี่ 85

3.31 แสดงวงจรควบคุมการปิด - เปิดเครื่อง 92

3.32 แสดงวงจรป้องกันกระแสเกิน 93

3.33 แสดงวงจรป้องกันแรงดันเกินและต่ำกว่าพิกัด 94

3.34 แสดงการต่อวงจรป้องกันอุณหภูมิเกิน 95

4.1 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงขับนำเบส
ของทรานซิสเตอร์ Q_1 ที่ความถี่ 19.5 กิโลเฮิรตซ์ 97

4.2 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงขับนำเบส
ของทรานซิสเตอร์ Q_1 ที่ความถี่ 21 กิโลเฮิรตซ์ 97

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.3 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงขับนำเบส ของทรานซิสเตอร์ Q_1 ที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิรตซ์ 98

4.4 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงขับนำเบสของ ทรานซิสเตอร์ Q_1 ที่ความถี่ 19.5 กิโลเฮิรตซ์ 99

4.5 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงขับนำเบสของ ทรานซิสเตอร์ Q_1 ที่ความถี่ 21กิโลเฮิรตซ์ 100

4.6 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงขับนำเบสของ ทรานซิสเตอร์ Q_1 ที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิรตซ์ 100

4.7 แสดงรูปคลื่นของกระแสเบสและแรงดันเบส-อิมิตเตอร์ของวงจรขับนำเบสของ ทรานซิสเตอร์ Q_1 ที่ความถี่ 19.5 กิโลเฮิรตซ์ 101

4.8 แสดงรูปคลื่นของกระแสเบสและแรงดันเบส-อิมิตเตอร์ของวงจรขับนำเบสของ ทรานซิสเตอร์ Q_1 ที่ความถี่ 21 กิโลเฮิรตซ์ 102

4.9 แสดงรูปคลื่นของกระแสเบสและแรงดันเบส-อิมิตเตอร์ของวงจรขับนำเบสของ ทรานซิสเตอร์ Q_1 ที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิรตซ์ 102

4.10 แสดงรูปคลื่นของแรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์กำลังและกระแสผ่าน ทรานซิสเตอร์กำลัง Q_1 ที่ความถี่ 19.5 กิโลเฮิรตซ์..... 104

4.11 แสดงรูปคลื่นของแรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์กำลังและกระแสผ่าน ทรานซิสเตอร์กำลัง Q_1 ที่ความถี่ 21 กิโลเฮิรตซ์..... 104

4.12 แสดงรูปคลื่นของแรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์กำลังและกระแสผ่าน ทรานซิสเตอร์กำลัง Q_1 ที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิรตซ์..... 105

4.13 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง ลดระดับแรงดัน ที่ความถี่ 19.5 กิโลเฮิรตซ์..... 106

4.14 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง ลดระดับแรงดัน ที่ความถี่ 21 กิโลเฮิรตซ์..... 106

4.15 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง ลดระดับแรงดัน ที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิรตซ์..... 107

4.16 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง ลดระดับแรงดันที่ความถี่ 19.5 กิโลเฮิรตซ์..... 107

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.17	แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงลดระดับแรงดันที่ความถี่ 21 กิโลเฮิรตซ์	108
4.18	แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงลดระดับแรงดันที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิรตซ์	108
4.19	แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังที่ความถี่ 19.5 กิโลเฮิรตซ์	109
4.20	แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังที่ความถี่ 21 กิโลเฮิรตซ์	110
4.21	แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิรตซ์	110
4.22	แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันของขดลวดเหนี่ยวนำที่ความถี่ 19.5 กิโลเฮิรตซ์	111
4.23	แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันของขดลวดเหนี่ยวนำที่ความถี่ 21 กิโลเฮิรตซ์	112
4.24	แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันของขดลวดเหนี่ยวนำที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิรตซ์	112
4.25	แสดงรูปคลื่นของแรงดันไฟสลับ v_{ac} และกระแสไฟสลับ i_{ac} เฟส R เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่ 19.5 กิโลเฮิรตซ์	113
4.26	แสดงรูปคลื่นของแรงดันไฟสลับ v_{ac} และกระแสไฟสลับ i_{ac} เฟส R เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่ 21 กิโลเฮิรตซ์	114
4.27	แสดงรูปคลื่นของแรงดันไฟสลับ v_{ac} และกระแสไฟสลับ i_{ac} เฟส R เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิรตซ์	114
4.28	แสดงรูปคลื่นของแรงดันไฟตรง v_{dc} และกระแสไฟตรง i_{dc} เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่ 19.5 กิโลเฮิรตซ์	115
4.29	แสดงรูปคลื่นของแรงดันไฟตรง v_{dc} และกระแสไฟตรง i_{dc} เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่ 21 กิโลเฮิรตซ์	115
4.30	แสดงรูปคลื่นของแรงดันไฟตรง v_{dc} และกระแสไฟตรง i_{dc} เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่ 22.5 กิโลเฮิรตซ์	116