12

เครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงแบบวิธีสวิตช์

นายกิจจา ลักษณ์อำนวยพร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

น.ศ. 2538

ISBN 974-631-305-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16748931

SWITCHMODE DC ELECTRIC WELDER

MR.KITJA LUCKAMNUYPORN

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 974-631-305-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์ เครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงแบบวิธีสวิตช์

โดย นายกิจจา ลักษณ์อำนวยพร

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

(อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงค์วาณิชย์)

.....กรรมการ

(อาจารย์ เจิดกุล โสภาวนิตย์)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

กิจจา ลักษณ์อำนวยพร : เครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงแบบวิธีสวิตช์ (SWITCHMODE DC ELECTRIC WELDER) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ยุทธนา กุลวิทิต , 110 หน้า. ISBN 974-631-305-3

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เสนอการออกแบบและสร้างเครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงแบบวิธีสวิตช์ที่ใช้ความถี่ 19.2 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งทำให้อุปกรณ์มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา ภาควงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงเป็นวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมแบบกึ่งบริดจ์ที่มีกำลังสูญเสียต่ำ การทำงานของวงจรขับนำสวิตช์ใช้หลักการออสซิเลตด้วยตัวเอง ทำให้ทนต่อสัญญาณรบกวนได้ดีและวงจรกำเนิดสัญญาณขับนำทรานซิสเตอร์ไม่ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟตรงเพื่อจ่ายไฟเลี้ยงให้วงจรกำเนิดสัญญาณขับนำทรานซิสเตอร์ การปรับความถี่การทำงานของสวิตช์ไวงานเพื่อควบคุมกระแสออกใช้หลักการทางแม่เหล็ก(Magnetic) โดยใช้ขดลวดควบคุมที่มีการแยกโดดทางไฟฟ้ากับภาคกำลังทำให้ง่ายต่อการควบคุม วงจรอินเวอร์เตอร์ที่อาศัยหลักการดังกล่าวใช้อุปกรณ์น้อยชิ้นและมีความเชื่อถือได้สูง การออกแบบองค์ประกอบที่ทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ที่เหมาะสมจะทำให้วงจรสามารถทนสภาวะการลัดวงจรทางด้านออกได้ โดยไม่ต้องเพิ่มอุปกรณ์ป้องกันจากภายนอก

เครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงแบบวิธีสวิตช์มีกำลังด้านออก 2.8 กิโลวัตต์ กระแสเชื่อมปรับได้ในช่วง 60-120 แอมแปร์ โดยการปรับความถี่ในช่วง 24.4-19.2 กิโลเฮิรตซ์ ประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงเท่ากับ 74 เปอร์เซนต์

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2537 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

C415417 : MAJOR POWER ELECTRONICS
KEY WORD: SWITCHMODE / ELECTRIC WELDER / RESONANCE

KITJA LUCKAMNUYPORN : SWITCHMODE DC ELECTRIC WELDER. THESIS ADVISOR : ASST.PROF.YOUTHANA KULVITIT,Dr.Ing., 110 pp.
ISBN 974-631-305-3

The design approach and test results of a Switchmode DC Electric Welder are presented. The design offers several advantages such as compact size, low weight, and high efficiency. The inverter of the system is implemented by a Self Oscillated Half Bridge Series Resonance converter. The power transistors operating in this mode do not require any external source to provide their base current. Hence, it can yield high noise immunity. The output current of the system can be controlled by varying the operating frequency of the inverter. The control of the output current ranging from 60-120 A correspond to the variation of operating frequency from 24.4-19.2 kHz. The control of the operating frequency is achieved by varying the biasing magnetic flux in toroid cores.

The converter, with proper design, can temporarily withstand short-circuit at the output by itself. Overall, the implemention of the system requires low component count. Hence, it yields high reliability. The operating frequency is 19.2 kHz. The welding voltage is 24 V. The inverter efficiency is 74 %

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2537 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา กุลวิทิต อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งท่านได้ให้คำชี้แนะและให้ความสนับสนุนมาโดยตลอดรวมทั้ง รองศาสตราจารย์ ดร.โคทม อารียา อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงค์วาณิชย์ อาจารย์เจิดกุล โสภาวนิตย์ และ ศาสตราจารย์ ดร.มงคล เดชนครินทร์ ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ และเนื่องจากทุนวิจัยครั้งนี้บางส่วนได้รับมาจากทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณภรรยาที่ช่วยพิมพ์วิทยานิพนธ์นี้และกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่สนับสนุนและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

กิจจา ลักษณ์อำนวยพร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญภาพ ..... ฎ

บทที่ 1 บทนำ

ความเป็นมาของปัญหา 1

วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

ขอบเขตการวิจัย 3

ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน 3

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 ทฤษฎีเครื่องเชื่อมอาร์คไฟฟ้าและแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบวิธีสวิตช์

บทนำ 4

ทฤษฎีเครื่องเชื่อมไฟฟ้า 6

1. เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบเอเนอร์เรเตอร์ 7

2. เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบหม้อแปลงไฟฟ้า 7

3. เครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่ต่ำ หรือเครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบเรกติฟาย 8

การเลือกชิ้นงานเชื่อม 10

1. การเชื่อมด้วยกระแสไฟตรงต่อชิ้นงานตรง 10

สารบัญ(ต่อ)

		หน้า
	2. การเชื่อมด้วยกระแสไฟตรงต่อกลับขั้ว.....	10
	แหล่งจ่ายไฟตรงแบบวิธีสวิตช์	10
	1. วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง	11
	1.1 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบพื้นฐาน	11
	1.2 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงที่พัฒนามาจากวงจรพื้นฐาน	14
	วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบเรโซแนนซ์	19
	1. วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมโหลด	22
	2. วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดเรโซแนนซ์แบบขนานโหลด	24
	3. วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม-ขนานโหลด	26
	วงจรภาคควบคุม	29
บทที่ 3	การออกแบบและการจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง	
	แหล่งจ่ายไฟตรงภาคกำลัง	32
	1. การออกแบบค่าและพิกัดของตัวเก็บประจุในวงจรกรอง	33
	2. การเลือกพิกัดของไดโอดกำลังด้านเข้า	35
	3. การเลือกความต้านทานอนุกรมที่ใช้จำกัดกระแสขณะเริ่มเปิดเครื่อง .	39
	4. ความต้านทานขนานที่ใช้ในการคายประจุเมื่อตอนปิดเครื่อง	40
	วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง	41
	1. การออกแบบค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์	42
	2. การวิเคราะห์การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ด้วยคอมพิวเตอร์ ..	44
	3. การทำงานของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง	52
	4. การเลือกพิกัดของทรานซิสเตอร์และไดโอดกำลังด้านขาออก	53
	5. การเลือกชนิดและพิกัดตัวเก็บประจุ C_s	55
	6. วงจรสนับเบอร์	55
	7. การออกแบบหม้อแปลงกำลังความถี่สูง	56
	8. การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ	65

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

วงจรควบคุม 69
1. วงจรกำเนิดสัญญาณกำหนดจังหวะการทำงานของวงจร 69
2. วงจรขับนำเบสของทรานซิสเตอร์ 70
3. การเลือกขนาดของแกนหม้อแปลงขับนำในวงจรขับนำเบสของทรานซิสเตอร์ 72
4. การควบคุมความถี่ในการทำงานของวงจร 73
5. วงจรป้องกันอุณหภูมิเกิน 74
บทที่ 4 การทดสอบเครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรง
การทดสอบทางไฟฟ้า 76
1. รูปคลื่นของสัญญาณขับนำทรานซิสเตอร์ 76
2. รูปคลื่นกระแสผ่านทรานซิสเตอร์และแรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์กำลัง 79
3. รูปคลื่นกระแสและแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ 82
4. รูปคลื่นกระแสและแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง .. 84
5. รูปคลื่นกระแสและแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง .. 87
6. รูปคลื่นของกระแสและแรงดันที่โหลด 90
7. รูปคลื่นของแรงดันและกระแสไฟฟ้าสลับทางด้านเข้า 92
8. การวัดกำลังและตัวประกอบกำลังทางด้านเข้า 94
9. การวัดค่ากำลังด้านออกและประสิทธิภาพ 95
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ
ข้อสรุปในการวิจัย 97
ข้อเสนอแนะ 99
รายการอ้างอิง 100
ภาคผนวก 102
ประวัติผู้เขียน 110

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของเครื่องเชื่อมแต่ละชนิด	9
3.1	แสดงค่า K_g กับขนาดของหม้อแปลง	61
3.2	เปรียบเทียบค่ากระแสไบอัส, ความถี่, กำลังงานที่โหลด และเปอร์เซนต์	74
4.1	แสดงค่ากำลังและตัวประกอบกำลังทางด้านเข้าของเครื่อง	95
4.2	แสดงค่ากำลังด้านออกและประสิทธิภาพของเครื่องเชื่อม	96

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	เปรียบเทียบข้อแตกต่างระหว่างการเชื่อมอัดและการเชื่อมหลอมเหลว	4
2.2	ผังแสดงกรรมวิธีการเชื่อมอาร์คไฟฟ้าแบบหลอมเหลว	5
2.3	การเชื่อมอาร์คไฟฟ้าแบบหลอมเหลวโดยใช้ลวดเชื่อมโลหะ	6
2.4	แสดงโครงสร้างเครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบเยเนอร์เรเตอร์	7
2.5	แสดงโครงสร้างเครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบหม้อแปลงไฟฟ้า	8
2.6	แสดงวงจรของเครื่องเชื่อมไฟตรงที่ใช้หม้อแปลงความถี่ต่ำ	8
2.7	แสดงวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบพื้นฐาน	
	ก.วงจรทอนระดับ(Buck)	12
	ข.วงจรทบระดับ(Boost)	12
	ค.วงจรทอนทบระดับภาคแรงดัน(Buck-Boost)	12
	ง. วงจรทอนทบระดับภาคกระแส(Cuk)	13
2.8	วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงที่พัฒนามาจากวงจรพื้นฐาน	
	ก. วงจรบินกลับ(Flyback)	14
	ข. วงจรไปหน้า(Forward)	15
	ค. วงจรทอนทบระดับภาคกระแสที่มีการแยกโดด(Isolated Cuk)	15
	ง. วงจรพุช-พูล ภาคแรงดัน(Push-Pull)	15
	จ. วงจรกึ่งบริดจ์(Half-Bridge)	16
	ช. วงจรบริดจ์เต็ม(Full-Bridge)	16
	ช. วงจรบริดจ์ไม่สมมาตร(Asymmetrical Bridge)	16

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.9	แสดงวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงกึ่งบริดจ์แบบเรโซแนนซ์ (Half-Bridge Resonant Converter)	
	ก. วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมโหลด	20
	ข. วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดเรโซแนนซ์แบบขนานโหลด	20
	ค. วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม-ขนานโหลด ..	21
2.10	แสดงวงจรสมมูลที่เป็นโหลดของอินเวอร์เตอร์	
	ก. วงจรสมมูลของโหลดแบบอนุกรม	21
	ข. วงจรสมมูลของโหลดแบบขนาน	22
	ค. วงจรสมมูลของโหลดแบบอนุกรม-ขนาน	22
2.11	แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมโหลด	24
2.12	แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ชนิดเรโซแนนซ์แบบขนานโหลด	26
2.13	แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม-ขนานโหลดเมื่อ $C_s = C_p$	28
2.14	แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม-ขนานโหลดเมื่อ $C_s = 2C_p$	28
3.1	บล็อกไดอะแกรมเครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงแบบวิธีสวิตช์	31
3.2	วงจรเรียงกระแสและวงจรกรอง	32
3.3	วงจรเรียงกระแสที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์	34
3.4	แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจากการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์	35
3.5	กระแสในไดโอดและกระแสสลับด้านเข้า	36
3.6	แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสผ่านไดโอดในตอนเริ่มเปิดเครื่องเมื่อแรงดันไฟสลับด้านเข้าเป็นไซน์	38

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.7	แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสผ่านไดโอดในตอนเริ่มเปิดเครื่องเมื่อแรงดันไฟสลับด้านเข้าเป็นโคไซน์	39
3.8	แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสผ่านไดโอดในตอนเริ่มเปิดเครื่องเมื่อมีความต้านทานจำกัดกระแสและแรงดันไฟสลับด้านเข้าเป็นโคไซน์	40
3.9	แสดงวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง	42
3.10	แสดงวงจรสมมูลของโหลดอินเวอร์เตอร์	42
3.11	แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ของโหลดที่ต่อกับอินเวอร์เตอร์	43
3.12	แสดงวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์	44
3.13	กระแสและแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์	45
3.14	กระแสผ่านทรานซิสเตอร์กำลังซึ่งมีไดโอดกำลังขนานอยู่และแรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์กำลัง	46
3.15	แสดงกระแสและแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_s	47
3.16	แสดงกระแสและแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_s	48
3.17	แสดงกระแสด้านปฐมภูมิและแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง	49
3.18	แสดงกระแสด้านทุติยภูมิและแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง	50
3.19	กระแสผ่านไดโอดกำลังและแรงดันคร่อมไดโอดกำลัง	51
3.20	กระแสและแรงดันคร่อมโหลด	52
3.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ต่อน้ำหนักกับความถี่	58
3.22	แสดงการต่อหม้อแปลงกำลังความถี่สูง	60
3.23	วงจรกำเนิดสัญญาณกำหนดจังหวะการทำงานของวงจร	69
3.24	แสดงวงจรขับน่าเบสที่ใช้ขับน่าทรานซิสเตอร์แต่ละตัว	70
3.25	แสดงวงจรที่ใช้ป้องกันอุณหภูมิเกิน	74

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.1	แสดงกระแสเบสและแรงดันเบสอิมิตเตอร์ที่ขับนำทรานซิสเตอร์ กำลัง Q_2 ที่ความถี่ 19.2 กิโลเฮิรตซ์	78
4.2	แสดงกระแสเบสและแรงดันเบสอิมิตเตอร์ที่ขับนำทรานซิสเตอร์ กำลัง Q_2 ที่ความถี่ 20.8 กิโลเฮิรตซ์	78
4.3	แสดงกระแสเบสและแรงดันเบสอิมิตเตอร์ที่ขับนำทรานซิสเตอร์ กำลัง Q_2 ที่ความถี่ 24.4 กิโลเฮิรตซ์	79
4.4	กระแสผ่านทรานซิสเตอร์และแรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์ Q_1 ที่ความถี่ 19.2 กิโลเฮิรตซ์	80
4.5	กระแสผ่านทรานซิสเตอร์และแรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์ Q_1 ที่ความถี่ 20.8 กิโลเฮิรตซ์	81
4.6	กระแสผ่านทรานซิสเตอร์และแรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์ Q_1 ที่ความถี่ 24.4 กิโลเฮิรตซ์	81
4.7	กระแสและแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ที่ความถี่ 19.2 กิโลเฮิรตซ์	83
4.8	กระแสและแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ที่ความถี่ 20.8 กิโลเฮิรตซ์	83
4.9	กระแสและแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ที่ความถี่ 24.4 กิโลเฮิรตซ์	84
4.10	รูปคลื่นกระแสและแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง ที่ความถี่ 19.2 กิโลเฮิรตซ์	85
4.11	รูปคลื่นกระแสและแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง ที่ความถี่ 20.8 กิโลเฮิรตซ์	86
4.12	รูปคลื่นกระแสและแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง ที่ความถี่ 24.4 กิโลเฮิรตซ์	86

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.13 รูปคลื่นกระแสด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง ที่ความถี่ 19.2 กิโลเฮิรตซ์ 87

4.14 รูปคลื่นกระแสและแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง ที่ความถี่ 19.2 กิโลเฮิรตซ์ 88

4.15 รูปคลื่นกระแสและแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง ที่ความถี่ 20.8 กิโลเฮิรตซ์ 89

4.16 รูปคลื่นกระแสและแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง ที่ความถี่ 24.4 กิโลเฮิรตซ์ 89

4.17 กระแสและแรงดันที่โหลดเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ ความถี่ 19.2 กิโลเฮิรตซ์ 91

4.18 กระแสและแรงดันที่โหลดเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ ความถี่ 20.8 กิโลเฮิรตซ์ 91

4.19 กระแสและแรงดันที่โหลดเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ ความถี่ 24.4 กิโลเฮิรตซ์ 92

4.20 แสดงแรงดันไฟสลับและกระแสไฟสลับด้านเข้าเมื่ออินเวอร์เตอร์ ทำงานที่ความถี่ 19.2 กิโลเฮิรตซ์ 93

4.21 แสดงแรงดันไฟสลับและกระแสไฟสลับด้านเข้าเมื่ออินเวอร์เตอร์ ทำงานที่ความถี่ 20.8 กิโลเฮิรตซ์ 93

4.22 แสดงแรงดันไฟสลับและกระแสไฟสลับด้านเข้าเมื่ออินเวอร์เตอร์ ทำงานที่ความถี่ 24.4 กิโลเฮิรตซ์ 94