การพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้ากำลังสูงแบบสวิตชิงสำหรับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ขนาด 100 กิโลโวลต์

นายฉัตรชัย อัสดาธร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-332-419-4

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I19649713

DEVELOPMENT OF A HIGH VOLTAGE SWITCHING POWER SUPPLY FOR A 100 kV X-RAY TUBE

Mr. Chatchai Assadathorn

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Nuclear Technology

Department of Nuclear Technology

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 1998

ISBN 974-332-419-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงแบบสวิตชิงสำหรับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ขนาด 100 กิโลโวลต์
โดย	นายฉัตรชัย อัสดาธร
ภาควิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์เดโช ทองอร่าม

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์เดโช ทองอร่าม)

.....กรรมการ
(อาจารย์อรรถพร ภัทรสุมันต์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

ฉัตรชัย อัสดาธร : การพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงแบบสวิตชิงสำหรับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ขนาด 100 กิโลโวลต์ (Development of a High Voltage Switching Power Supply for a 100 kV X-ray Tube) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, อ. ที่ปรึกษาร่วม : อ. เดโช ทองอร่าม ; 142 หน้า. ISBN 974-332-419-4.

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงแบบสวิตชิงสำหรับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ขนาด $100\,kV$ กระแสไฟฟ้า $10\,mA$ โดยใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่หาได้ภายในประเทศเป็นหลัก เพื่อนำมาใช้แทนแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่ต่ำในเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ ซึ่งมีขนาดใหญ่และให้ประสิทธิภาพการทำงานต่ำ แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงแบบสวิตชิงที่พัฒนาขึ้นนี้ใช้วงจรแปลงศักดาไฟฟ้าแบบฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งทำงานที่ความถี่ $6\,kHz$ จ่ายศักดาไฟฟ้าด้านทางออกด้วยวงจรทวีศักดาไฟฟ้าสองเท่า อุปกรณ์สวิตชิงชนิดสารกึ่งตัวนำเลือกใช้มอสเฟตเบอร์ IRFPG50 ทำงานขนานกันเพื่อให้รับภาระกำลังไฟฟ้าสูงได้และควบคุมศักดาไฟฟ้าด้านทางออกแบบปรับความกว้างของพัลส์ (PWM) ด้วยไอซีสำเร็จรูปเบอร์ SG3526 รวมทั้งจัดวงจรตรวจความผิดปกติของศักดาไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเพื่อตัดการจ่ายไฟฟ้าอัตโนมัติ

ผลการวิจัยพบว่าการออกแบบในส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าศักดาสูงแบบสวิตชิงมีข้อจำกัดเรื่องขนาดของแกนเฟอร์ไรต์ที่ใช้กันทั่วไปมีขนาดไม่เพียงพอ จำเป็นต้องเพิ่มขนาดด้วยการเสริมต่อพื้นที่และต้องออกแบบบอบบินแยกขดลวดตัวนำเป็นชั้นๆ เพื่อให้ทนการเกิดอาร์คในถังบรรจุฉนวนน้ำมัน ขนาดของแหล่งจ่ายไฟฟ้าจะเล็กลงสร้างได้ง่ายและมีน้ำหนักเบา จากผลการทดสอบถ่ายภาพรังสีด้วยหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดเดียวกันเปรียบเทียบระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงแบบดั้งเดิมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าสวิตชิงที่พัฒนาขึ้น พบว่า ภาพถ่ายรังสีเอกซ์จากการจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตชิงความถี่สูงใช้เวลาถ่ายภาพสั้นกว่าและมีแนวโน้มความคมชัดภาพมากกว่า เนื่องจากสามารถผลิตรังสีเอกซ์ที่ต่อเนื่องเต็มกำลังของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2541 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

C818872 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY
KEY WORD: HIGH VOLTAGE / SWITCHING POWER SUPPLY / SWITCHING TRANSFORMER / X-RAY RADIOGRAPHY.

CHATCHAI ASSADATHORN : DEVELOPMENT OF A HIGH VOLTAGE SWITCHING POWER SUPPLY FOR A 100 kV X-RAY TUBE.
THESIS ADVISOR: ASSIST. PROF. SUVIT PUNNACHAIYA. THESIS CO-ADVISOR: DECHO THONG-ARAM. 142 pp. ISBN 974-332-419-4

The purpose of this thesis is to develop a high voltage switching power supply for a 100kV X-ray tube with a current in use of 10mA, using only materials that can be found locally. The developed high voltage switching transformer is intended to replace the large size, low efficiency, and low frequency high voltage transformers currently used in commercial X-ray generators. The developed units employed a flyback converter operating at low frequency up to 6 kHz and provide doubling voltage output of the high voltage switching transformer. MOSFETs No. IRFPG50 were selected as switching elements operating in parallel to share high power. An IC PWM No. SG3526 was selected for the control circuit to control the output voltage by adjusting pulse width based on the technique known as pulse width modulation (PWM). This IC is capable of managing voltage feed back, current sensing and automatic shutdown for circuit protection.

Results indicate that the ferrite core's size used in the transformer was too small resulting in inadequate coil's winding area. It was thus necessary to add an extra core area to increase the coil's winding area by designing bobbin to separate coil units and immersed in high voltage transformer oil for arc protection. The developed high voltage switching power supply has smaller size, simpler design and lower weight. X-ray images taken from this high voltage switching power supply provide sharper images and reduce the exposure time its due to continuous power output.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2541 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์เดโช ทองอร่าม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้การสนับสนุนช่วยเหลือ ให้คำแนะนำแนวทาง ความคิดเห็น เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิจัย ตลอดจนการตรวจสอบและการแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิศิษฐ ทวีปรังษีพร (ห้องปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมวัสดุนิวเคลียร์) ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ และเครื่องมือสำหรับทำอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณคงศักดิ์ ตติยานุกูล คุณประจักษ์ใจ สีพั่วและพนักงานของบริษัทคงศักดิ์เอกซเรย์การแพทย์อุตสากรรม จำกัด ทุกท่าน ที่กรุณาเอื้อเฟื้อให้ยืมอุปกรณ์ เครื่องมือและให้แนวคิดในการพัฒนางานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณรัฐภูมิ โคกสิริ เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ช่วยเหลือในการสร้างอุปกรณ์สำหรับงานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ให้กำลังใจและช่วยเหลือในงานวิจัย

ขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนอุดหนุนวิจัยบางส่วน

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนขอขอบพระคุณ บิดาและมารดา ผู้ให้ความรัก เมตตา ให้การศึกษา ตลอดจนสนับสนุนในทุกๆ ด้านตลอดมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบาญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ

กิตติกรรมประกาศ.....ฉ

สารบาญ.....ช

สารบาญตาราง.....ฎ

สารบาญรูป.....ฐ

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย.....1

1.2 วัตถุประสงค์.....3

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....3

1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....4

บทที่ 2 แหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์.....5

2.1 หลักการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตชิง.....5

2.2 ส่วนประกอบของชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตชิง.....9

2.2.1 หม้อแปลงไฟฟ้า.....9

ก. โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า.....10

ข. สมการพื้นฐานของหม้อแปลงไฟฟ้า.....18

ค. ประสิทธิภาพ.....23

ง. การฉนวนและการระบายความร้อน.....24

จ. ขั้นตอนการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า.....26

2.2.2 วงจรอินเวอร์เตอร์.....29

ก. ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์.....30

ข. ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์.....31

ค. พุช-พูลคอนเวอร์เตอร์.....32

(ต่อ)

สารบาญ

หน้า

ง. ฮาล์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์.....33
จ. ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์.....34
2.2.3 วงจรเรียงกระแสและวงจรกรองแรงดันไฟฟ้า.....36
ก. วงจรเรียงกระแส.....36
ข. วงจรกรองแรงดัน.....36
2.2.4 อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สวิตช์.....39
ก. ทรานซิสเตอร์.....39
ข. มอสเฟต.....40
ค. IGBTs.....40
ง. SCR.....41
2.2.5 วงจรควบคุม.....42
2.2.6 วงจรทวีศักดาไฟฟ้าสองเท่าแบบฟูลเวฟ.....43
2.3 หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์.....44
2.3.1 คุณสมบัติของรังสีเอกซ์.....44
2.3.2 กระบวนการเกิดรังสีเอกซ์.....47
ก. รังสีเอกซ์เฉพาะตัว.....47
ข. รังสีเอกซ์ต่อเนื่อง.....49
2.3.3 โครงสร้างของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์.....50
ก. Protective Housing.....52
ข. Glass Envelope.....52
ค. แคโทด.....53
ง. แอโนดหรือเป้า.....54
2.3.4 จุดโฟกัสของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์.....56
2.4 เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์.....60

(ต่อ)

สารบาญ

หน้า

บทที่ 3. การพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตชิงสำหรับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์..... 63

3.1 การออกแบบและสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงแบบสวิตชิง สำหรับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์..... 62

3.1.1 วงจรเรียงกระแสและวงจรกรองแรงดัน..... 62

ก. การออกแบบวงจรเรียงกระแส.....63

ข. การออกแบบวงจรกรองแรงดัน.....64

3.1.2 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์.....64

3.1.3 การออกแบบวงจรควบคุม..... 65

ก. ไฟเลี้ยง IC SG3526.....66

ข. ส่วนกำเนิดความถี่.....67

ค. Reset Mode..... 67

ง. Shutdown Mode..... 67

จ. Error Amplifier Connection..... 67

ฉ. Foldback Current Limiting.....68

3.1.4 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสวิตชิง.....69

ก. พิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า.....69

ข. การเลือกขนาดและชนิดของแกนหม้อแปลงไฟฟ้า.....71

ค. หาจำนวนรอบของขดลวดตัวนำทางด้านปฐมภูมิ.....71

ง. หาจำนวนรอบของขดลวดตัวนำทางด้านทุติยภูมิ..... 72

จ. ขนาดของขดลวดตัวนำ.....72

ฉ. การพันขดลวดตัวนำและการฉนวน.....73

ช. ขั้นตอนการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า.....77

บทที่ 4. การทดลองและผลการทดลอง.....80

4.1 การทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงแบบสวิตชิง สำหรับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์..... 80

(ต่อ)

สารบาญ

หน้า

ก. อุปกรณ์สำหรับการทดลอง....80
ข. ขั้นตอนการทดลอง....81
ค. ผลการทดลอง....83
4.2 การทดลองถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ด้วยหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงแบบสวิตชิง.... 90
ก. อุปกรณ์สำหรับการทดลอง....90
ข. ขั้นตอนการทดลอง....90
ค. ผลการทดลอง....94
4.3 การทดลองถ่ายภาพรังสีเอกซ์เปรียบเทียบคุณภาพของภาพถ่ายกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงแบบความถี่ต่ำ.... 97
4.3.1 การทดลองถ่ายภาพชิ้นงานเปรียบเทียบคุณภาพของภาพถ่าย....97
4.3.2 การเปรียบเทียบคุณภาพของภาพถ่ายด้วยเครื่องสแกนความดำ.. 101

บทที่ 5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ
5.1 สรุปและวิจารณ์....105
5.1.1 ปัญหาด้านอุปกรณ์....105
5.1.2 ผลของการทดสอบประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตชิงสำหรับเครื่องถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์....106
5.3 ข้อเสนอแนะ.... 107

เอกสารอ้างอิง....108
บรรณานุกรม....109
ภาคผนวก.... 111
ก. วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตชิงสำหรับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์....111
ข. ข้อมูลของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.... 121
ประวัติผู้เขียน.... 142

สารบาญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ข้อเปรียบเทียบระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้นและแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบสวิตชิง.....6

2.2 การจัดกลุ่มของเทปฉนวนตามความสามารถในการทนอุณหภูมิ..... 16

2.3 คุณสมบัติเทปฉนวนชนิดต่างๆ..... 17

2.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบต่างๆ 35

4.1 ผลการทดลองการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ศักดาไฟฟ้า 70 kV 84

4.2 ผลการทดลองที่โหลดเท่ากับ 20 $M\Omega$ 85

4.3 ผลการทดลองที่โหลดเท่ากับ 16 $M\Omega$ 85

4.4 ผลการทดลองที่โหลดเท่ากับ 12 $M\Omega$ 86

4.5 ผลการทดลองที่โหลดเท่ากับ 8 $M\Omega$ 86

4.6 ผลการทดลองที่โหลดเท่ากับ 4 $M\Omega$ 87

ก-1. รายการอุปกรณ์ของวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงแบบสวิตชิง..... 111

ก-2. รายการอุปกรณ์ของวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับวงจร IC PWM SG3526.....118

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบาญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แผนภาพการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	5
2.2	แผนภาพแสดงส่วนประกอบของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตชิง	8
2.3	แผนภาพการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า	9
2.4	สัญลักษณ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ	10
2.5	ส่วนประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้า	11
2.6	แกนหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด Tube Core	12
2.7	แกนหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด Rod Core	13
2.8	แกนหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด Toroid Core	13
2.9	แกนหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด Pot Core	14
2.10	แกนหม้อแปลงชนิด Fabricated Core	14
2.11	แกนหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดคอร์	15
2.12	แกนหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดเชลล์	15
2.13	แสดงรูปแบบวงจรพื้นฐานและการทำงานของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	30
2.14	แสดงรูปแบบวงจรพื้นฐานและการทำงานของฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์	31
2.15	แสดงรูปแบบวงจรพื้นฐานของพุช-พูลคอนเวอร์เตอร์	32
2.16	แสดงรูปแบบวงจรพื้นฐานของฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์	33
2.17	แสดงรูปแบบวงจรพื้นฐานของฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์	35
2.18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{V_{C(DC)}}{V_M}$% กับ ωCR_L ของ Half Wave Rectifier	37
2.19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{V_{C(DC)}}{V_M}$% กับ ωCR_L ของ Full Wave Rectifier	37
2.20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{I_F(PEAK)}{I_F(AV)}$ และ $\frac{I_F(RMS)}{I_F(AV)}$ กับ ωCR_L	38
2.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ripple Factor กับ ωCR_L	38

(ต่อ)

สารบาญรูป

รูปที่		หน้า
2.22	ไบโพลาร์จังชันทรานซิสเตอร์	39
2.23	ทรานซิสเตอร์ประเภทมอสเฟต	40
2.24	ทรานซิสเตอร์ประเภท IGBTs	41
2.25	ไทริสเตอร์ประเภท SCR	41
2.26	แผนภาพของ IC SG3526 และฟังก์ชันต่างๆ	42
2.27	วงจรพื้นฐานของวงจรทวีศักดาไฟฟ้าสองเท่าแบบฟูลเวฟ	43
2.28	การทำงานของวงจรทวีศักดาไฟฟ้าสองเท่าแบบฟูลเวฟ	43
2.29	สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการแบ่งย่านรังสีเอกซ์ สำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสี	44
2.30	แสดงการเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว	48
2.31	แสดงการเกิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง	50
2.32	หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์	51
2.33	Protective Housing	52
2.34	แคโทดของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์	53
2.35	การทำงานของไฟกัสชิงคัพ	54
2.36	เป้าหรือแอโนดของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์	54
2.37	หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดแอโนดนิ่งและแอโนดหมุน	55
2.38	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแปรเปลี่ยนศักดาไฟฟ้าเร่ง กับสเปกตรัมของรังสีเอกซ์	56
2.39	แสดงจุดโฟกัสของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์	57
2.40	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีกับความยาวคลื่น สำหรับเป้าที่ทำด้วยทังสเตน	58
2.41	เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดต่างๆ	60
2.42	แผนภาพส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์	61
2.43	ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์	61

(ต่อ)

สารบาญรูป

รูปที่		หน้า
3.1	วงจรพื้นฐานของวงจรเรียงกระแสและกรองแรงดัน	63
3.2	IC SG3526	66
3.3	แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับ IC SG3526	67
3.4	วงจร IC SG3526	68
3.5	วงจร OR-GATE สำหรับการ Shutdown	69
3.6	ขนาดของแกนเฟอร์ไรต์แบบ EE80/76	74
3.7	การเพิ่มเนื้อที่การพันขดลวดด้วยการต่อความยาวของแกนตัวนำ	74
3.8	แสดงแบบของบอบบิน	75
3.9	แสดงรูปตัดขวางของบอบบินที่พันขดลวดตัวนำ	76
3.10	แสดงรูปตัดขวางของบอบบินที่พันขดลวดตัวนำในทางปฏิบัติ	77
3.11	เครื่องพันขดลวด	78
3.12	หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสวิตชิงขนาด 50 กิโลโวลต์	79
4.1	แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบ	81
4.2	แสดงอุปกรณ์ทดสอบการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงแบบสวิตชิง	82
4.3	รูปสัญญาณจาก IC SG3526	83
4.4	รูปสัญญาณที่ขาเดรน (D) และขาซอร์ส (S) ของมอสเฟต	83
4.5	เส้นกราฟการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลดที่ศักดาไฟฟ้า 70 kV	84
4.6	กราฟแสดงศักดาไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าที่โหลดเท่ากับ 20 $M\Omega$	87
4.7	กราฟแสดงศักดาไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าที่โหลดเท่ากับ 16 $M\Omega$	88
4.8	กราฟแสดงศักดาไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าที่โหลดเท่ากับ 12 $M\Omega$	88
4.9	กราฟแสดงศักดาไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าที่โหลดเท่ากับ 8 $M\Omega$	89

(ต่อ)

สารบาญรูป

รูปที่		หน้า
4.10	กราฟแสดงศักดาไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าที่โหลดเท่ากับ 4 $M\Omega$	89
4.11	แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดลอง	91
4.12	แสดงการจัดอุปกรณ์การทดลอง	91
4.13	ภาพถ่ายชิ้นงานทดสอบที่ 50 kV_p Exposure 2.4 mAs	94
4.14	ภาพถ่ายชิ้นงานทดสอบที่ 100 kV_p Exposure 2.4 mAs	95
4.15	เปรียบเทียบภาพถ่าย Hardlock ที่ 50 kV_p	97
4.16	เปรียบเทียบภาพถ่าย Hardlock ที่ 100 kV_p	98
4.17	เปรียบเทียบภาพถ่าย Circuit Breaker ที่ 50 kV_p	99
4.18	เปรียบเทียบภาพถ่าย Circuit Breaker ที่ 100 kV_p	100
4.19	เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ซึ่งใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงแบบความถี่ต่ำ	101
4.20	เปรียบเทียบภาพถ่าย IQI DIN62FE 1ISO7	102
4.21	เปรียบเทียบ Density Profile ของภาพถ่ายรังสีเอกซ์บนฟิล์ม	103
5.1	สัญญาณไฟฟ้าที่ความถี่ 100 Hz เทียบกับที่ความถี่ 6 kHz	106
ก-1	แสดงวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงแบบสวิตชิง	114
ก-2	ลายแผ่นพิมพ์วงจรและตำแหน่งอุปกรณ์ของวงจร IC PWM SG3526	115
ก-3	ลายแผ่นพิมพ์วงจรของวงจร IC PWM SG3526	115
ก-4	ลายแผ่นพิมพ์วงจรและตำแหน่งอุปกรณ์ของชุด MOSFET	116
ก-5	ลายแผ่นพิมพ์วงจรของชุด MOSFET	116
ก-6	ลายแผ่นพิมพ์วงจรและตำแหน่งอุปกรณ์ของวงจรเรียงกระแสและกรองแรงดัน	117
ก-7	ลายแผ่นพิมพ์วงจรของวงจรจรเรียงกระแสและกรองแรงดัน	117
ก-8	รูปวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับวงจร IC PWM SG3526	118
ก-9	ลายแผ่นพิมพ์วงจรและตำแหน่งอุปกรณ์ของวงจร IC MCT7815	119
ก-10	รูปวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับวงจร IC MCT7815	119