

การพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบสวิตชิงความถี่สูง  
สำหรับเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ทางการแพทย์

นายพงศกร กองผัด

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2556  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

DEVELOPMENT OF HIGH VOLTAGE HIGH FREQUENCY SWITCHING POWER SUPPLY  
FOR MEDICAL X-RAY GENERATOR

Mr. Pongsakron Kongput

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Nuclear Technology

Department of Nuclear Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบสวิตชิงความถี่สูง สำหรับเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ทางการแพทย์
โดย	นายพงศกร กองผัด
สาขาวิชา	นิเวศลิษฐ์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ เดโช ทองอร่าม

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(อาจารย์ เดโช ทองอร่าม)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(อาจารย์ ดร. บุญช่วย ศรีธรรมศักดิ์)

พงศกร กองผัด : การพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบสวิตชิงความถี่สูงสำหรับเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ทางการแพทย์. (DEVELOPMENT OF HIGH VOLTAGE HIGH FREQUENCY SWITCHING POWER SUPPLY FOR MEDICAL X-RAY GENERATOR) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : อ.เดโช ทองอร่าม, 91 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบสวิตชิงความถี่สูงสำหรับเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ทางการแพทย์ ด้วยการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงให้สามารถตอบสนองการทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ 100 kHz โดยใช้แกนเฟอร์ไรต์แบบ EC และบอบบินเพฟลอนรวมทั้งใช้เทคนิคการลดค่าความจุของตัวเก็บประจุแฝงในหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีจำนวนรอบทุติยภูมิสูง การแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงด้วยความถี่สูงเลือกใช้การทำงานแบบ LLC เรโซแนนซ์ขนาน ขับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงด้วยอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ซึ่งใช้มอสเฟตเป็นอุปกรณ์สวิตช์กำลัง ควบคุมไฟฟ้าแรงดันสูงด้านทางออกให้คงที่ด้วยเทคนิคพัลส์วิดท์มอดูเลชันและปรับค่าแรงดันไฟฟ้าด้วยการแปรเปลี่ยนดิวิตีไซเคิล ผลการทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นพบว่าสามารถกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงได้ 40-120 kV ที่กระแสไฟฟ้า 20 mA และระบบมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา รวมทั้งมีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบที่ใช้ความถี่ต่ำ ผลการทดลองถ่ายภาพรังสีเอกซ์ที่เงื่อนไขเดียวกันพบว่าให้คุณภาพของภาพทัดเทียมกับระบบที่ผลิตในเชิงพาณิชย์

ภาควิชา.....วิศวกรรมนิวเคลียร์.....ลายมือชื่อ.....  
 สาขาวิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา.....2556.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

# 5370289221 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS : HIGH FREQUENCY HIGH VOLTAGE TRANSFORMER / PARASITIC CAPACITANCE / DC-DC CONVERTER / LLC RESONANCE / X-RAY GENERATOR

PONGSAKRON KONGPUT : DEVELOPMENT OF HIGH VOLTAGE HIGH FREQUENCY SWITCHING POWER SUPPLY FOR MEDICAL X-RAY GENERATOR. ADVISOR : ASST. PROF. SUVIT PUNNACHAIYA, CO-ADVISOR : DECHO TONG-ARAM, 91 pp.

This thesis aimed to develop a high voltage high frequency switching power supply for medical x-ray generator. A high voltage high frequency (HVHF) transformer was designed in order to operate at frequency response of 100 kHz by using the EC shaped ferrite core and Teflon bobbin, also applying the technique for reduction of parasitic capacitance in a large number of secondary winding. The LLC parallel resonant full-bridge DC-DC converter configuration was applied to drive the HVHF transformer with voltage multiplier. The MOSFET and PWM regulation technique were employed in power switching circuit and high voltage output could be adjusted by duty cycle varying. The tested results showed that a 40-120 kV and 20 mA output could be generated from the developed power supply. It was found that the developed system had small size, light weight and more efficiency than that low frequency system. The radiographic tested at same exposure conditions revealed that its image quality comparable to the commercial system.

Department : Nuclear Engineering

Field of Study : Nuclear Technology

Academic Year : 2013

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์เดโช ทองอร่าม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้คอยให้คำปรึกษา และให้การสนับสนุนด้านต่างๆ ในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยและพัฒนาอิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์นิวเคลียร์ ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือและอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณบริษัทคงศักดิ์เอกซเรย์การแพทย์และอุตสาหกรรมจำกัดที่สนับสนุนขึ้นส่วนอุปกรณ์ในการวิจัยและให้คำแนะนำด้านเทคนิค

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต

ขอขอบคุณหน่วยรังสีวินิจฉัย ภาควิชารังสีวิทยา คณะแพทยศาสตร์รามาธิบดี มหาวิทยาลัยมหิดลที่ให้ความอนุเคราะห์ถ่ายภาพหุ่นจำลองด้วยระบบเอกซเรย์ที่ทันสมัย

ขอขอบคุณ นางสาวลีดดา มิตรายน และ นายธิตี เรืองรังสีสำราญ ที่คอยช่วยเหลือช่วยเหลือในงานวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้ที่คอยให้คำปรึกษาในด้านต่างๆ ให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนทางการเงิน รวมถึงสมาชิกทุกคนในครอบครัวที่คอยให้กำลังใจมาโดยตลอด

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2. ทฤษฎีและหลักการ.....	6
2.1 หลักการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ทางการแพทย์.....	6
2.2 หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์.....	7
2.2.1 หลักการกำเนิดรังสีเอกซ์ด้วยหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์.....	7
2.2.2 ส่วนประกอบของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์.....	10
2.2.3 จุดโฟกัสของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์.....	13
2.2.4 ลักษณะทางไฟฟ้าของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์.....	14

บทที่	หน้า
2.3	วิวัฒนาการของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์.....16
2.3.1	เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิด 1 เฟส..... 18
2.3.2	เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิด 3 เฟส.....19
2.3.3	เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ความถี่สูง..... 20
2.4	ส่วนประกอบหลักเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ความถี่สูง.....21
2.4.1	วงจรอินเวอร์เตอร์..... 21
2.4.2	หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง.....22
2.4.3	วงจรทวิแรงดัน..... 25
2.5	ผลของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่มีต่อปริมาณรังสีเอกซ์..... 28
3.	การออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ทางการแพทย์..... 32
3.1	การออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง..... 32
3.1.1	การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง..... 33
3.1.2	การออกแบบวงจรทวิแรงดันไฟฟ้า..... 38
3.1.3	การออกแบบชุดแสดงผลแรงดันและกระแสไฟฟ้า.....39
3.1.4	การออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชัน..... 41
3.1.5	การออกแบบวงจรขับเคลื่อน (Gate Drive)..... 42
3.1.6	การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์.....43
3.1.7	การออกแบบวงจรควบคุมไฟฟ้าแรงดันสูง.....44
3.2	การออกแบบแหล่งจ่ายสำหรับจุดไส้หลอด.....45
3.3	การประกอบถังบรรจุอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง..... 47
3.4	การประกอบระบบควบคุมการกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง..... 48
4.	การทดลองและผลการทดลอง.....50
4.1	การทดสอบระบบควบคุมการกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง..... 50
4.1.1	เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง.....50
4.1.2	การทดลองและผลการทดลอง..... 51
4.2	การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง..... 54
4.2.1	เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง.....54
4.2.2	การทดลองและผลการทดลอง..... 54



บทที่	หน้า
4.3 การทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับจุดใส่หลอด.....	57
4.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง.....	58
4.3.2 การทดลองและผลการทดลอง.....	58
4.4 การทดสอบประสิทธิภาพของระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง.....	59
4.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง.....	59
4.4.2 การทดลองและผลการทดลอง.....	60
4.5 การทดสอบคุณภาพของรังสีเอกซ์ที่ผลิตได้.....	61
4.5.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง.....	61
4.5.2 การทดลองและผลการทดลอง.....	61
4.6 การทดลองถ่ายภาพรังสีเอกซ์.....	62
4.6.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง.....	62
4.6.2 การทดลองและผลการทดลอง.....	63
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	67
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	67
5.2 วิเคราะห์ผลการวิจัย.....	68
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	69
รายการอ้างอิง.....	70
ภาคผนวก.....	72
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	91

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	การเปลี่ยนแปลงความเข้มและคุณภาพของรังสีเอกซ์จากปัจจัย ที่มีผลต่อสเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์.....31
3.1	คุณสมบัติเทฟลอน ของ Dupont Teflon ที่ $f = 1$ MHz..... 35
4.1	ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าควบคุมกับดิวิตีไซเคิล.....52
4.2	ความสัมพันธ์ของดิวิตีไซเคิลกับแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมโหลด..... 53
4.3	ความสัมพันธ์ของความถี่และแรงดันไฟฟ้าทางออกของหม้อแปลงไฟฟ้า..... 55
4.4	เปรียบเทียบดิวิตีไซเคิลกับแรงดันไฟฟ้าขณะจุดได้โหลด.....58
4.5	ผลการทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากับโหลดกำเนิดรังสีเอกซ์.....60
4.6	ผลการทดสอบวัตต์พลังงานรังสีเอกซ์..... 62

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	กราฟความสัมพันธ์ของ mR/mAs ที่ kVp ต่างๆ จากเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์แบบ 1 เฟสเปรียบเทียบกับเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ความถี่สูง.....2
2.1	การถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ทางการแพทย์..... 6
2.2	หลักการกำเนิดรังสีเอกซ์ด้วยหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์..... 7
2.3	อันตรายกิริยาของการเกิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง..... 8
2.4	อันตรายกิริยาของการเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว.....9
2.5	สเปกตรัมของรังสีเอกซ์จากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์.....10
2.6	หลักการทำงานของโฟกัสซิงค์ฟ..... 11
2.7	ไส้หลอดที่วางอยู่ในแอ่งของโฟกัสซิงค์ฟ..... 11
2.8	หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ขั้วแอโนดแบบอยู่นิ่ง..... 12
2.9	หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ขั้วแอโนดแบบหมุนได้..... 13
2.10	จุดโฟกัสของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์..... 14
2.11	วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าเบื้องต้นสำหรับจ่ายให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์..... 14
2.12	คุณลักษณะทางไฟฟ้าของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์..... 15
2.13	วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์..... 16
2.14	ระบบเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์..... 17
2.15	วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบ 1 เฟสและรูปคลื่นไฟฟ้าแรงดันสูงแบบเต็มคลื่น..... 18
2.16	วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบ 3 เฟส (12 พัลส์) และรูปคลื่นไฟฟ้าแรงดันสูง..... 19
2.17	แผนภาพแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบความถี่สูงของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์.....20
2.18	โครงสร้างของวงจรอินเวอร์เตอร์.....21
2.19	โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า..... 22
2.20	วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง.....23
2.21	วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงเมื่อโอนย้ายตัวเก็บประจุแฝงไว้ทางขดลวดปฐมภูมิ.....24
2.22	วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ Full bridge LCC เรโซแนนซ์.....25
2.23	วงจรเพิ่มแรงดันไฟฟ้าสองเท่าแบบครึ่งคลื่น..... 25

รูปที่	หน้า
2.24	วงจรมัดเพิ่มแรงดันไฟฟ้าสองเท่าแบบเต็มคลื่น..... 27
2.25	วงจรมัดทวีแรงดันไฟฟ้าต่อเนื่อง..... 28
2.26	รูปรีปเปิลของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบต่างๆของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์..... 29
2.27	ความสัมพันธ์ของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากับช่วงเวลาการเพิ่มความเข้มรังสี..... 29
2.28	เปรียบเทียบความเข้มรังสีเอกซ์จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าต่างๆ ที่ kVp เท่ากัน..... 30
3.1	แผนภาพของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง..... 32
3.2	ขนาดของแกนเฟอร์ไรต์แบบอีซี..... 33
3.3	โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง..... 34
3.4	บอบบิ้นของหม้อแปลงไฟฟ้า..... 35
3.5	ลักษณะการพันขดลวดทุติยภูมิในร่อง..... 36
3.6	ภาพขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงที่ออกแบบและสร้างขึ้น..... 37
3.7	ภาพหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงที่ออกแบบและสร้างขึ้น..... 37
3.8	วงจรมัดทวีแรงดันไฟฟ้า 16 เท่า..... 38
3.9	ภาพแผ่นวงจรมัดทวีแรงดันไฟฟ้าที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้น..... 39
3.10	วงจรมัดแสดงผลแรงดันและกระแสไฟฟ้า..... 39
3.11	วงจรมัดกำเนิดสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชัน..... 41
3.12	วงจรมัดขั้วเกิดของมอดูเลเตอร์..... 42
3.13	วงจรมัดอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ที่มีวงจรมัดดับเบอรั..... 43
3.14	วงจรมัดควบคุมไฟฟ้าแรงดันสูง..... 44
3.15	วงจรมัดแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำสำหรับจุดให้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์..... 45
3.16	ภาพแผ่นวงจรมัดดับเบอรัหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันต่ำสำหรับจุดให้หลอด..... 46
3.17	ภาพหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันต่ำสำหรับจุดให้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์..... 46
3.18	ภาพอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง..... 47
3.19	ภาพถังบรรจุอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงแบบฉนวนน้ำมัน..... 48
3.20	ภาพระบบควบคุมการกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง..... 49
4.1	แผนภาพการจัตุอุปกรณ์ทดสอบระบบควบคุมการกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง..... 51
4.2	สัญญาณพัลส์วิดท์จากวงจรมัดกำเนิดสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชัน..... 51
4.3	กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าควบคุมกับดิวิตีไซเคิล..... 52
4.4	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าดับไหลดหลอดไฟฟ้า..... 53

รูปที่	หน้า
4.5	กราฟความสัมพันธ์ของดิฟฟิไซเคิลกับแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมโหนด..... 53
4.6	แผนภาพระบบทดสอบการตอบสนองของควมถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้า.....55
4.7	เส้นกราฟตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า.....56
4.8	แผนภาพระบบทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงขณะมีโหนด.....56
4.9	เส้นกราฟแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ควมถี่และโหนดต่างกัน.....57
4.10	แผนภาพการจักระบบทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้าจุดใส่หลอด..... 58
4.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างดิฟฟิไซเคิลกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ ใส่หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์.....59
4.12	แผนภาพการจักระบบทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้า กระแสตรงแรงดันสูง.....60
4.13	ภาพระบบวัดพลังงานรังสีเอกซ์.....61
4.14	ภาพการจักระบบถ่ายภาพรังสีเอกซ์.....63
4.15	ภาพถ่ายหุ่่นจำลองที่ 60 kV <sub>p</sub> และ Exposure 5 mAs จากระบบที่พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบกับระบบเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ผลิตใช้ในเชิงพาณิชย์..... 64
4.16	ภาพถ่ายหุ่่นจำลองที่ 70 kV <sub>p</sub> และ Exposure 5 mAs จากระบบที่พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบกับระบบเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ผลิตใช้ในเชิงพาณิชย์..... 65
4.17	ภาพถ่ายหุ่่นจำลองที่ 80 kV <sub>p</sub> และ Exposure 5 mAs จากระบบที่พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบกับระบบเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ผลิตใช้ในเชิงพาณิชย์..... 66

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

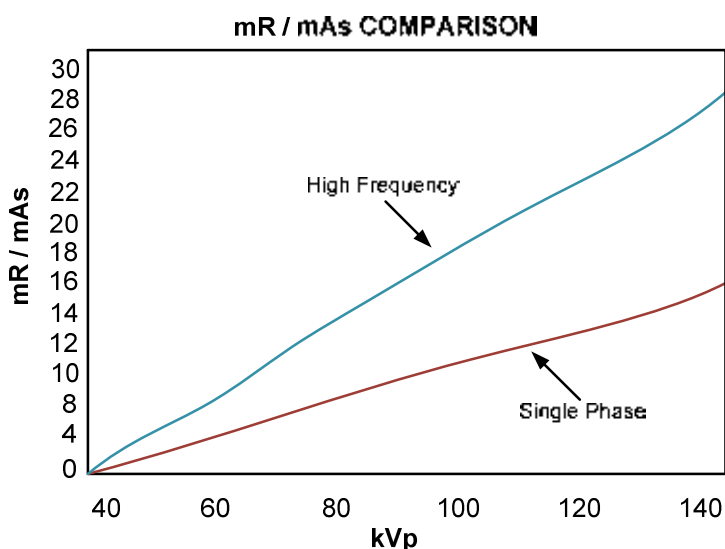
ศาสตราจารย์วิลเฮล์ม คอนราด เรินต์เกน (Prof. Wilhelm Conrad Rontgen) ได้ค้นพบรังสีเอกซ์ เมื่อปี ค.ศ. 1895 จากนั้นได้มีการนำเอารังสีเอกซ์มาประยุกต์ในงานด้านเทคโนโลยีนิวเคลียร์หลายด้าน โดยเฉพาะการใช้รังสีเอกซ์ถ่ายภาพอวัยวะเพื่อการตรวจวินิจฉัยโรค ทำให้วิทยาการด้านรังสีวินิจฉัยทั่วโลกก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว จนเป็นที่ยอมรับกันว่าการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อวงการแพทย์ อุปกรณ์หลักในงานถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ คือ เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ซึ่งมีองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน ได้แก่ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ ส่วนตั้งเวลาถ่ายภาพและชุดควบคุมการทำงานของระบบ

เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ในรุ่นแรกใช้ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส ความถี่ 50/60 เฮิรตซ์ รูปคลื่นซายน์ ซึ่งไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์กระแสตรงได้จากการเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (half wave) ด้วยหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์เอง ต่อมาปรับเป็นการเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (full wave) เนื่องจากไฟฟ้าแรงดันสูงจากการเรียงกระแสความถี่ต่ำที่จ่ายให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์มีริบเปิล (ripple) สูงมาก ทำให้ประสิทธิภาพการกำเนิดรังสีเอกซ์ต่ำ และความเข้มของลำของรังสีเอกซ์ที่ออกมามีการกระเพื่อมมาก ส่งผลต่อคุณภาพของภาพถ่ายรังสีเอกซ์ ก่อให้เกิดความไม่แม่นยำในการวินิจฉัยโรค ประกอบกับผลทางเทคนิคเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นพัลส์จะต้องขับกระแสสูงทำให้ผิวเป้าแอโนดบริเวณจุดโฟกัสของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์เกิดความร้อนสูงเฉพาะจุด (hot spots) เกิดหลุมรอยแตกที่ผิวเป้าแอโนด อันเป็นสาเหตุของการสูญเสียโฟกัสของลำรังสีเอกซ์และอายุการใช้งานของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์สั้นลง

หลังจากนั้นได้มีการพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ โดยการเรียงกระแสจากระบบไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 50/60 เฮิรตซ์ ได้ไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์กระแสตรงที่มีริบเปิลต่ำลง ทำให้ประสิทธิภาพในการกำเนิดรังสีเอกซ์ได้สูงขึ้น ความเข้มของลำรังสีกระแสเพื่อม่น้อยกว่าระบบ 1 เฟส แต่เนื่องจากระบบไฟฟ้า 3 เฟสมีข้อจำกัดในเรื่องของการติดตั้ง เพราะสถานที่ติดตั้งเครื่องจะต้องมีระบบไฟฟ้า 3 เฟสและหากจะจัดหาระบบไฟฟ้า 3 เฟสใหม่จะต้องใช้ค่าใช้จ่ายที่สูง โดยเพิ่มค่าใช้จ่ายในการติดตั้งเพิ่มขึ้นเป็น 3 เท่า เมื่อเทียบกับระบบไฟฟ้า 1 เฟส อีกทั้งหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงในเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์แบบ 3 เฟสความถี่ต่ำ มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก เปรียบเสมือนต้องใช้อย่างหม้อแปลง 1 เฟส จำนวน 3 ตัว มาจัดเป็นระบบ 3

เฟส อย่างไรก็ตามในทางเทคนิคระบบไฟฟ้าความถี่ต่ำนอกจากหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก และไฟฟ้ากระแสตรงจากการเรียงกระแสยังมีรีปเปิลอยู่ถึง 3 เปอร์เซ็นต์แล้ว ระบบยังมีประสิทธิภาพต่ำเมื่อเทียบกับหม้อแปลงความถี่สูง

ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ปัญหาด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์แบบเรียงกระแสไฟฟ้าจากความถี่ต่ำทั้งระบบ 1 เฟส และ 3 เฟส จึงมีการพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงที่เรียงกระแสไฟฟ้าจากความถี่สูง ซึ่งใช้เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (power electronic) ช่วยให้มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา มีแรงดันไฟฟ้าคงที่ (constant potential) รังสีเอกซ์ที่ออกมามีประสิทธิภาพสูง มีความเข้มของลำรังสีเอกซ์คงที่ ทำให้ภาพถ่ายรังสีที่ได้มีความคมชัดและวินิจฉัยโรคได้แม่นยำ ไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่จ่ายให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์มีรีปเปิลน้อย (<1%) มีเวลาขาขึ้นและขาลงที่สั้น [1] จึงควบคุมเอกซโพเชอริในการถ่ายภาพ (mAs) ได้แม่นยำ ในรูปที่ 1.1 แสดงผลเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของปริมาณรังสีต่อเอกซโพเชอริในการถ่ายภาพ (mR/mAs) และไฟฟ้าแรงดันสูงในช่วง 40-140 kVp ระหว่างเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงจากการเรียงกระแสไฟฟ้าแบบ 1 เฟส 50 เฮิรตซ์ กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงจากการเรียงกระแสไฟฟ้าจากความถี่สูง



รูปที่ 1.1 กราฟความสัมพันธ์ของ mR/mAs ที่ kVp ต่างๆ จากเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์แบบ 1 เฟส เปรียบเทียบกับเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ความถี่สูง

จะเห็นได้ว่าปริมาณรังสีต่อเอกซโพเชอริในการถ่ายภาพ ที่ได้จากเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ความถี่สูงมีปริมาณรังสีที่ผลิตออกมามากกว่าเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์แบบ 1 เฟส 50 เฮิรตซ์ ประมาณ 2 เท่า มีผลทำให้คนไข้ได้รับปริมาณรังสีเฉลี่ยลดลง 26 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับเครื่อง

กำเนิดรังสีเอกซ์แบบ 1 เฟส 50 เฮิร์ตซ์ [2] เนื่องจากเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ความถี่สูงใช้เวลาในการถ่ายภาพสั้นที่ปริมาณรังสีที่ผลิตออกมาเท่ากัน และยังส่งผลให้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์มีอายุการใช้งานที่นานกว่าเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ความถี่ต่ำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมผลิตเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ทางการแพทย์ในประเทศต้องนำเข้าแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงทำให้ต้นทุนในการผลิตค่อนข้างสูงและต้องพึ่งพาผู้ผลิตในต่างประเทศ ดังนั้นหากมีการพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงโดยนำเข้าเฉพาะชิ้นส่วนที่จำเป็นและใช้ชิ้นส่วนที่หาได้ในประเทศเป็นหลักจะช่วยลดต้นทุนและลดการสูญเสียทางเศรษฐกิจ จึงมีความสนใจในการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงแบบสวิตชิงความถี่สูงสำหรับใช้ในทางการแพทย์ โดยการศึกษาและออกแบบจะมุ่งเน้นในการใช้ข้อมูลเชิงวิชาการประกอบกับความต้องการทางเทคนิคจากการแลกเปลี่ยนข้อมูลจากผู้ผลิตเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ทางการแพทย์ในประเทศเพื่อให้เหมาะกับการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบที่มีอยู่เดิม

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อออกแบบและสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบสวิตชิงความถี่สูงสำหรับเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ทางการแพทย์

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาและออกแบบโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแรงดันสูงเพื่อทวิแรงดันไฟฟ้าขนาด 120 กิโลโวลต์ และจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ไม่น้อยกว่า 20 มิลลิแอมป์พร้อมแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้หลอด
2. ออกแบบและสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบสวิตชิงความถี่สูงที่สามารถปรับค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าได้ พร้อมระบบควบคุมการทำงาน
3. ประกอบระบบและทดสอบการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์
4. เปรียบเทียบผลการถ่ายภาพรังสีระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงที่ผลิตจากต่างประเทศ

## 1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาและทดลองการตอบสนองของแกนเฟอร์ไรต์เพื่อออกแบบโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง



3. ออกแบบและสร้างวงจรประกอบ ได้แก่ วงจรแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (power supply) วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟลูบริดจ์ (full bridge inverter) วงจรทวีแรงดันไฟฟ้า (voltage multiplier) วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ไส้หลอด (filament power supply) และวงจรควบคุมการทำงานของระบบ
4. ประกอบระบบและทดสอบการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงพร้อมแหล่งจ่ายไส้หลอดกับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์
5. ทดสอบและปรับปรุงระบบที่พัฒนาขึ้น
6. วิเคราะห์ผลการทดลองและเขียนวิทยานิพนธ์

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบสวิตชิงความถี่สูงสำหรับเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ทางการแพทย์ และได้แนวทางในการออกแบบและสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงที่มีประสิทธิภาพสูง มีขนาดเล็กและมีความเสถียรสูง

### 1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. พ.ศ. 2541 นายฉัตรชัย อัสदार [3] ได้ทำวิจัยเรื่องการพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบสวิตชิงสำหรับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ขนาด 100 กิโลโวลต์ กระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมป์ เพื่อนำมาใช้แทนแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่ต่ำในเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ ซึ่งมีขนาดใหญ่และประสิทธิภาพการทำงานที่ต่ำ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นใช้วงจรแปลงแรงดันไฟฟ้าแบบฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งทำงานที่ความถี่ 6 กิโลเฮิรตซ์ จ่ายแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกด้วยวงจรทวีแรงดันไฟฟ้าสองเท่า อุปกรณ์สวิตชิงใช้มอสเฟตเบอร์ IRFP50 ขนาดกันเพื่อรับภาระกำลังไฟฟ้าสูงได้และควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้านออกแบบปรับความกว้างของพัลส์ (PWM) ด้วยไอซีสำเร็จรูปเบอร์ SG3526 ผลการพัฒนาการออกแบบในส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงแบบสวิตชิงมีข้อจำกัดในเรื่องขนาดของแกนเฟอร์ไรต์ที่ใช้กันทั่วไปมีขนาดไม่เพียงพอ ผลจากการทดสอบถ่ายภาพรังสีด้วยหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดเดียวกัน พบว่าภาพถ่ายรังสีเอกซ์จากการจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงจากแหล่งจ่ายแบบสวิตชิงความถี่สูงใช้เวลาในการถ่ายภาพสั้นกว่าและมีแนวโน้มความคมชัดมากกว่า เมื่อเทียบกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่ต่ำ

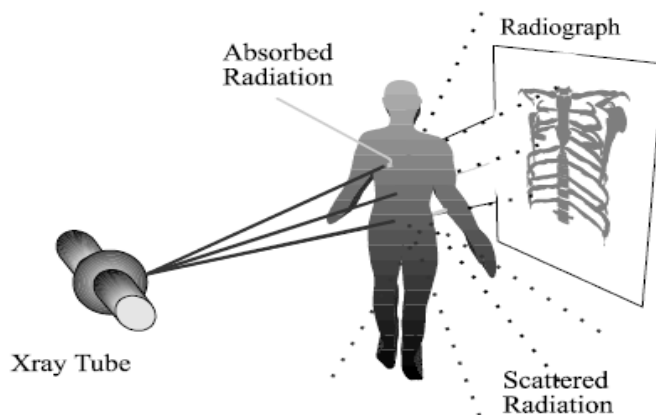
2. พ.ศ. 2550 Shahid Iqbal, Rosli Besar and C.Venkateseshiah [4] ได้ออกแบบ วงจรทรีแรงดันที่มีรีปเปิลต่ำสำหรับเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์โดยใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้า กระแสสลับ 3 เฟส ความถี่ 39 กิโลเฮิร์ตซ์ เพื่อจ่ายให้กับหม้อแปลงความถี่สูง 3 เฟส โดยการออกแบบวงจรทรีแรงดันใช้วงจรทรีแรงดัน 3 ชุดและนำเอาต์พุตแต่ละชุดมาต่ออนุกรมกัน ผลการทดลองที่แรงดันไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ กระแสไฟฟ้า 100 มิลลิแอมป์ มีรีปเปิลทางด้านเอาต์พุตต่ำลงเหลือ 0.77 เปอร์เซ็นต์
3. พ.ศ. 2551 Weitao Luo, Xu Wang [5] ได้พัฒนาระบบควบคุมแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง ที่ใช้สำหรับเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ในทางการแพทย์ โดยใช้อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์อนุกรมแบบบริดจ์ในการกำเนิดแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมความถี่สูง การควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตมีการป้องกันกลับมากที่ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID) เพื่อรักษาความเสถียรของแรงดันและกระแสไฟฟ้า ระบบควบคุมทั้งหมดถูกออกแบบไว้ในระบบการประมวลผลเชิงตัวเลข โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (ARM-7) เป็นตัวประมวลผลสัญญาณในการควบคุม สามารถควบคุมเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ผ่านระบบหน้าจอแบบสัมผัสหรือคอมพิวเตอร์ และสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด 80 กิโลวัตต์ ที่แรงดันไฟฟ้า 150 กิโลโวลต์
4. พ.ศ. 2551 Juan A. Martin-Ramos, Alberto M. Pernia, Juan Diaz [6] ได้ศึกษาเรื่อง Power Supply for a High-Voltage Application โดยได้ออกแบบและสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงเพื่อไปประยุกต์ใช้กับเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ทางการแพทย์ สามารถปรับแรงดันไฟฟ้า 40-150 กิโลโวลต์ ที่กำลังไฟฟ้า 50 กิโลวัตต์ ด้วยวิธีการเปลี่ยนความถี่ในการสวิตซ์ในช่วง 40-75 กิโลเฮิร์ตซ์ เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์และใช้เทคนิคเรโซแนนซ์ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงเพื่อลดอัตราส่วนจนวนรอบของหม้อแปลงทำให้เกิดค่าตัวประจุตัวแฝงที่อยู่ในหม้อแปลงน้อยมากเพียง 500 nF ใช้ PCBs FR4 เป็นบอบบินสำหรับพันขดลวดของหม้อแปลง จากการทดลองกับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ 150 กิโลโวลต์ ที่กระแส 433 มิลลิแอมป์ ได้ประสิทธิภาพแหล่งจ่ายไฟฟ้า 92 เปอร์เซ็นต์และรังสีเอกซ์ที่ได้มีคุณภาพสูง

## บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

### 2.1 หลักการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ทางการแพทย์

การถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ทางการแพทย์อาศัยความสามารถของรังสีในการทะลุผ่านร่างกายของผู้ป่วยเพื่อตรวจและวินิจฉัยโรค รังสีที่ทะลุผ่านอวัยวะในร่างกายของผู้ป่วยจะถูกบันทึกบนแผ่นฟิล์มด้วยผลการทำปฏิกิริยาของสารไวรังสีที่ฉาบบนฟิล์ม ก่อให้เกิดภาพแฝง (latent image) ซึ่งจะปรากฏให้เห็นบนฟิล์มหลังจากการล้างฟิล์ม บริเวณความดำที่ปรากฏจะเข้มมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณรังสีที่ทะลุผ่านอวัยวะในร่างกายของผู้ป่วยไปตกกระทบบนฟิล์ม สำหรับอวัยวะของร่างกายที่มีความหนาแน่นสูงเช่น กระดูก รังสีทะลุผ่านได้น้อยฟิล์มจึงดำน้อยจะได้ภาพเป็นสีขาว ส่วนอวัยวะของร่างกายที่มีความหนาแน่นต่ำ เช่น เนื้อเยื่อหรือไขมัน รังสีทะลุผ่านมากกว่าฟิล์มจึงดำกว่าจะได้ภาพเป็นสีเทา ภาพถ่ายรังสีบนฟิล์มจะเป็นภาพฉาย 2 มิติของอวัยวะภายในร่างกายผู้ป่วย ที่มีรูปลักษณะตามผลของปริมาณรังสีที่ทะลุผ่านบริเวณต่างๆ ของอวัยวะผู้ป่วย ดังรูปที่ 2.1

การถ่ายภาพรังสีเอกซ์นิยมนำมาใช้ในการถ่ายภาพโครงสร้างกระดูกและอวัยวะที่มีความหนาแน่นค่อนข้างสูงเช่น กระเพาะและปอด โดยภาพที่ได้จะมีความเปรียบต่าง (contrast) ค่อนข้างสูง แต่การถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์อาจไม่เหมาะกับการถ่ายภาพอวัยวะที่มีความหนาแน่นต่ำและมีน้ำเป็นส่วนประกอบมาก เช่น เนื้อเยื่อหรือมดแดง เนื่องจากภาพจะมีความเปรียบต่างต่ำ (low contrast) และขาดความคมชัด อย่างไรก็ตามเนื่องจากเซลล์ในร่างกายประกอบด้วยน้ำจึงก่อให้เกิดรังสีกระเจิง (scattered radiation) สูง ดังนั้นในการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์เพื่อให้ได้ภาพที่มีความคมชัดจะต้องอาศัยนักรังสีเทคนิคที่มีประสบการณ์และความชำนาญ

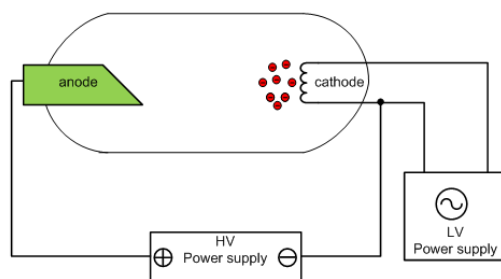


รูปที่ 2.1 การถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ทางการแพทย์ [1]

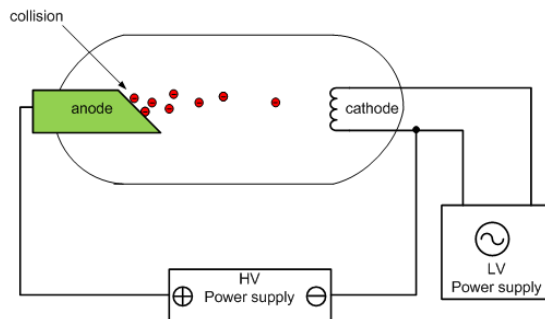
## 2.2 หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

### 2.2.1 หลักการกำเนิดรังสีเอกซ์ด้วยหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

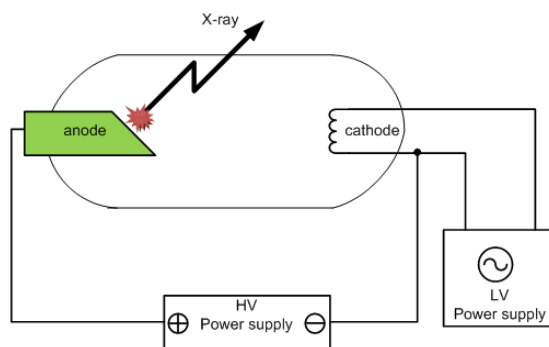
การกำเนิดรังสีเอกซ์อาศัยอุปกรณ์สำคัญ 2 ส่วน ได้แก่ หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์และระบบจ่ายไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้า 2 ชุด ชุดแรกเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำสำหรับจุดไส้หลอด (filament power supply) ชุดที่สองเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงสำหรับสร้างสนามไฟฟ้าเร่งอิเล็กตรอนจากไส้หลอดไปยังเป้า หรือจากขั้วไฟฟ้าแคโทด (cathode) ไปยังแอโนด (anode) การเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้หลอดจะมีผลโดยตรงต่อปริมาณหรือความเข้มของรังสีเอกซ์ ส่วนการเปลี่ยนแปลงขนาดของไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงจะมีผลต่อพลังงานของอิเล็กตรอนหรือพลังงานของรังสีเอกซ์ต่อเนื้อที่ที่เกิดขึ้นและยังมีผลต่อความเข้มของรังสีเอกซ์ด้วย



ก. ไส้หลอดร้อนมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา



ข. อิเล็กตรอนถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าจากไส้หลอดไปยังเป้า

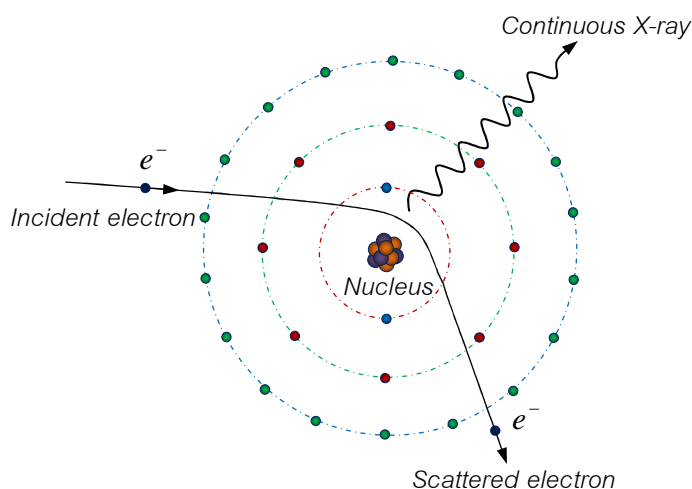


ค. อิเล็กตรอนพลังงานสูงชนเป้าก่ออันตรกิริยากำเนิดรังสีเอกซ์  
รูปที่ 2.2 หลักการกำเนิดรังสีเอกซ์ด้วยหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

โครงสร้างของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ภายในมีสภาพเป็นสุญญากาศ ปลายด้านหนึ่งเป็นไส้หลอดมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ เมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำให้กับไส้หลอดจะมีกระแสไหลผ่านไส้หลอดทำให้ไส้หลอดร้อนและปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากผิวของไส้หลอด เรียกอิเล็กตรอนจากไส้หลอดนี้ว่าเทอร์โมอิเล็กตรอน (thermo-electron) ปลายอีกด้านหนึ่งเป็นเป้า เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงศักย์ไฟฟ้าบวกให้กับเป้าของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ จะทำอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากไส้หลอดได้รับการเร่งด้วยแรงไฟฟ้า อิเล็กตรอนจะมีพลังงานสูงสุดเท่ากับไฟฟ้าแรงดันสูงที่จ่ายให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนชนเป้าจะทำให้เกิดการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ดังรูป 2.2 รังสีเอกซ์ที่กำเนิดจากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

#### 1. รังสีเอกซ์ต่อเนื่อง (continuous x-ray)

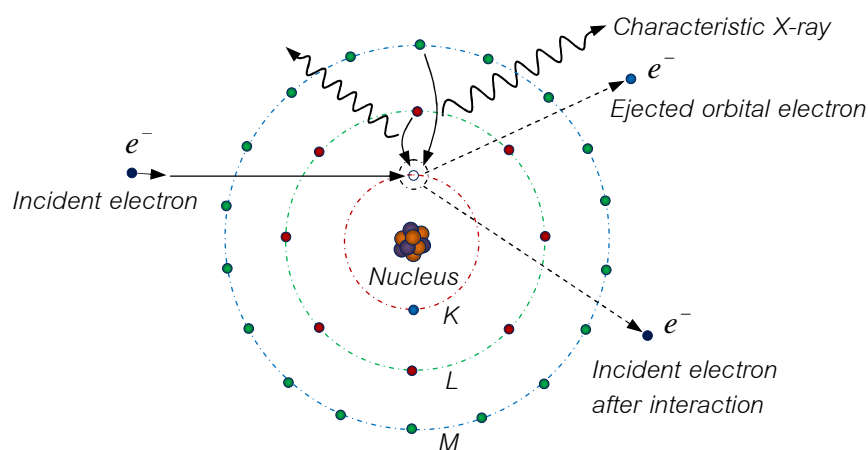
การเกิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่องนี้เกิดจากการที่อิเล็กตรอนพลังงานสูงเคลื่อนผ่านชั้นโคจรอิเล็กตรอนเข้าสู่บริเวณสนามไฟฟ้าใกล้นิวเคลียส อิเล็กตรอนจะทำอันตรกิริยากับความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าสถิต มีการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่และลดความเร็วลงพร้อมทั้งสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็วด้วยการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา เรียกรังสีเอกซ์ชนิดนี้ว่า “เบรมสตราห์ลุง (bremsstrahlung)” หรือ “breaking radiation” แสดงดังรูปที่ 2.3 โดยความเข้มของรังสีเอกซ์และความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์จะกระจายอย่างต่อเนื่องดังสเปกตรัมในรูปที่ 2.5 ความเข้มของรังสีเอกซ์ต่อเนื่องที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับเลขอะตอมของธาตุที่ใช้ทำเป้าของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์



รูปที่ 2.3 อันตรกิริยาของการเกิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง

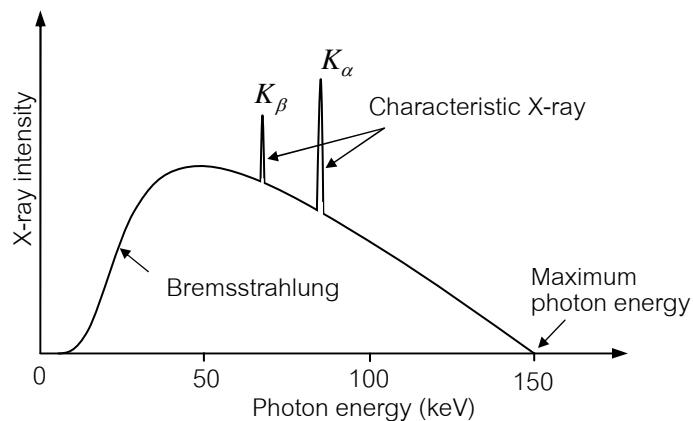
## 2. รังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic x-ray)

ปรากฏการณ์ของการเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวจะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอน หรืออนุภาคที่มีประจุชนิดอื่นๆ หรือโฟตอนพลังงานสูงเคลื่อนเข้าทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นในของอะตอม เช่น ชั้น K, L หรือ M และเกิดการถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนในชั้นที่ได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นเกินพลังงานยึดเหนี่ยวของชั้นโคจร (binding energy) จะหลุดออกจากวงโคจร เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนในชั้นโคจรนั้นทำให้อะตอมอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นและจะลดระดับพลังงานลงสู่สภาวะปกติในเวลาอันสั้น โดยอิเล็กตรอนของวงโคจรชั้นถัดไปจะลดระดับพลังงานลงมาแทนที่ในวงโคจรชั้นที่ว่างโดยการการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปรังสีเอกซ์



รูปที่ 2.4 อันตรกิริยาของการเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว

พลังงานส่วนเกินนี้จะมีพลังงานงานเท่ากับความต่างระดับพลังงานยึดเหนี่ยวเฉพาะชั้นโคจรของอิเล็กตรอนและชนิดของธาตุนั้นๆ และจะมีพลังงานเฉพาะค่า รังสีเอกซ์ชนิดนี้จึงเรียกว่า “รังสีเอกซ์เฉพาะตัว” ดังรูปที่ 2.4 ดังนั้นในกระบวนการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ถ้าพลังงานของอิเล็กตรอนสูงพอที่จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ปลดปล่อยรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ สเปกตรัมของรังสีเอกซ์จากเป้าของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ก็จะมีสเปกตรัมของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวซ้อนอยู่บนรังสีเอกซ์ต่อเนื่องด้วยดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 สเปกตรัมของรังสีเอกซ์จากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

### 2.2.2 ส่วนประกอบของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

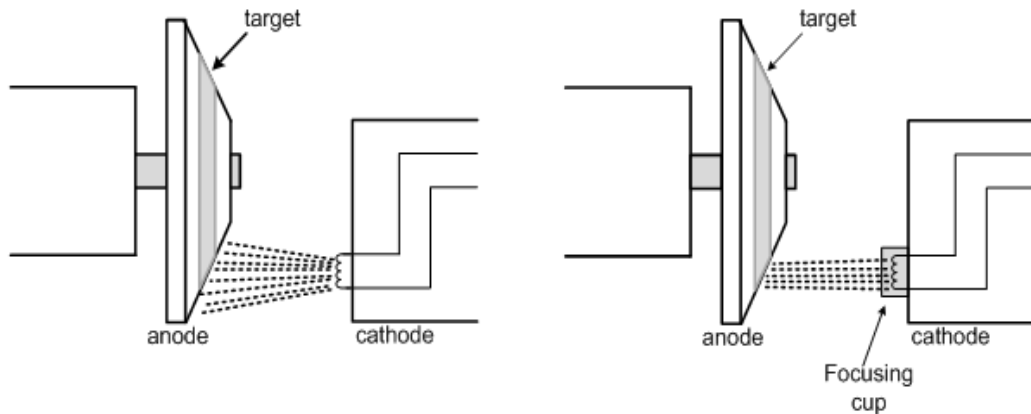
#### 1. หลอดแก้ว (glass envelope)

เป็นโครงสร้างภายนอกของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ทำหน้าที่เป็นส่วนที่ยึดชิ้นส่วนประกอบหลักของการกำเนิดรังสีเอกซ์ได้แก่ ไส้หลอด และเป้า ให้อยู่ในตำแหน่งทำงานที่เหมาะสม ภายในมีสภาพเป็นสุญญากาศซึ่งจะช่วยให้ไส้หลอดที่มีอุณหภูมิสูงมากไม่ร้อนจากปฏิกิริยาของอากาศ พร้อมทั้งเป็นฉนวนเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการอาร์กกระหว่างเป้ากับไส้หลอดและช่วยให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งด้วยไฟฟ้าแรงดันสูงไม่สูญเสียพลังงานก่อนถึงเป้า หลอดแก้วทำจากแก้วโพเร็กซ์หรือเซรามิก ซึ่งทนต่อความร้อนและสภาวะสุญญากาศประมาณ  $10^{-7} - 10^{-8}$  มิลลิเมตรปรอท

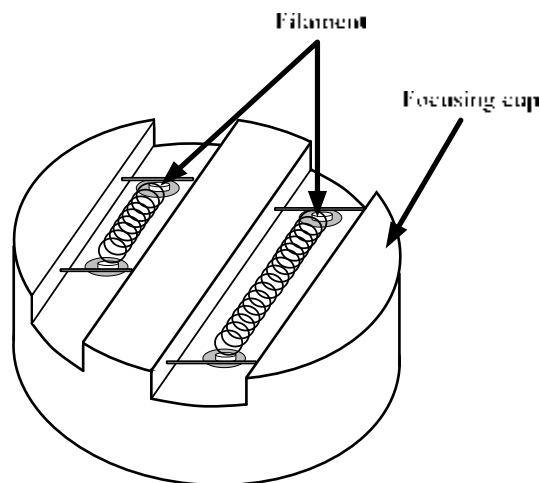
#### 2. ไส้หลอด (filament)

เป็นขดลวดทังสเตนทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอน ด้วยหลักการปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากผลของความร้อนหลังจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านเส้นลวดทังสเตน ขณะที่อยู่ในสภาวะผลิตรังสีเอกซ์ไส้หลอดจะเป็นขั้วลบของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ กลุ่มอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งจากขั้วลบไปยังขั้วบวกของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์จะมีการผลัดกันด้วยแรงสนามไฟฟ้าต่อกัน จะก่อให้เกิดการกระจายตัวของอิเล็กตรอนขณะเคลื่อนไปยังขั้วบวกหรือเป้า จึงมีวิธีควบคุมโดยใช้โฟกัสซิงค์คัพ (focusing cup) ดังรูป 2.6 ตำแหน่งของไส้หลอดจะวางอยู่ในแอ่งของโฟกัสซิงค์คัพดังรูป 2.7 ซึ่งโฟกัสซิงค์คัพจะมีศักย์ไฟฟ้าเดียวกับไส้หลอดและได้รับการออกแบบให้สร้างแนวเส้นแรงไฟฟ้าบังคับลำอิเล็กตรอนให้กลุ่มอิเล็กตรอนบรรจบกันไปตกกระทบบนเป้าของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ให้ได้ขนาดจุดโฟกัส (focal spot) ตามที่ต้องการ ปกติจะใช้โมลิบดีนัมทำเป็นโฟกัสซิงค์คัพล้อมรอบไส้หลอด 2 ขนาด สำหรับจุดโฟกัสขนาดใหญ่และเล็ก ในการใช้งานแต่ละครั้งจะใช้ไส้หลอดเพียงไส้เดียว ไส้หลอดที่

ยาวกว่า (large focal spot) จะใช้งานถ่ายภาพรังสีเอกซ์ขนาดใหญ่ที่ต้องการความเข้มของรังสีเอกซ์สูง



รูปที่ 2.6 หลักการทำงานของโฟกัสซิงค์ฟ [2]



รูปที่ 2.7 ไล่หลอดที่วางอยู่ในอ่างของโฟกัสซิงค์ฟ [2]

### 3. เป้า (target)

เป็นบริเวณที่ทำหน้าที่ผลิตรังสีเอกซ์เมื่ออิเล็กตรอนพลังงานสูงเคลื่อนเข้าชนเป้า ขณะที่เป้าอยู่ในสภาวะผลิตรังสีเอกซ์จะเป็นขั้วบวกของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ เป้าส่วนใหญ่ทำมาจากทังสแตน การเลือกใช้ทังสแตนมาทำเป็นเป้าหมายมีเหตุผล 3 ประการ [2]

1. ทังสแตนมีเลขอะตอมสูง (high atomic number) คือ 74 ทำให้ประสิทธิภาพการเกิดรังสีเอกซ์สูงเนื่องจากความเข้มรังสีเอกซ์จะแปรผันตรงกับเลขอะตอมที่ใช้ทำเป้า

2. การนำความร้อนได้สูง (high thermal conductivity) ทังสแตนมีความสามารถนำความร้อนได้ใกล้เคียงกับทองแดง ดังนั้นจึงช่วยในการระบายความร้อนออกจากเป้าได้ดี

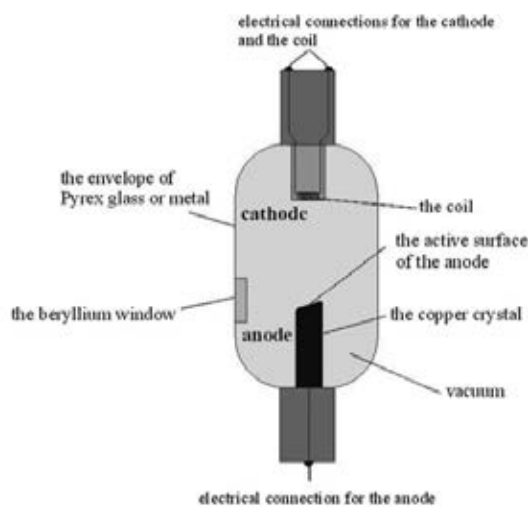


3. จุดหลอมเหลวสูง (high melting point) คือ 3400 องศาเซลเซียส จึงทนทานต่ออุณหภูมิสูงเมื่อเทียบกับทองแดงที่ทนอุณหภูมิสูงสุดได้ 1100 องศาเซลเซียส แต่ถ้าใช้ทองคำขาวที่มีเลขอะตอมเท่ากับ 78 แต่มีข้อเสียเนื่องจากทองคำขาวมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าคือ 1770 องศาเซลเซียส

เป้าของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์หรือเรียกว่า แอโนด แบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบอยู่นิ่งและแบบหมุน

#### 1. แอโนดแบบอยู่นิ่ง (stationary anode)

โครงสร้างแอโนดชนิดนี้ทำด้วยแผ่นทังสเตนหนาประมาณ 2-3 มิลลิเมตร ฝังอยู่ในแท่งทองแดงขนาดใหญ่ แผ่นทังสเตนอาจมีพื้นที่รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือวงกลม แท่งทองแดงที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้านอกจากจะนำไฟฟ้าได้ดีแล้วยังสามารถระบายความร้อนได้ดีอีกด้วย หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดขั้วแอโนดแบบอยู่นิ่งแสดงดังรูปที่ 2.8 จะใช้กับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ทำงานด้วยกำลังไฟฟ้าไม่สูงมาก เหมาะกับเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ทางด้านอุตสาหกรรม เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ทางทันตกรรมและเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์แบบเคลื่อนย้ายได้ที่ไม่ต้องการกำลังสูงมาก

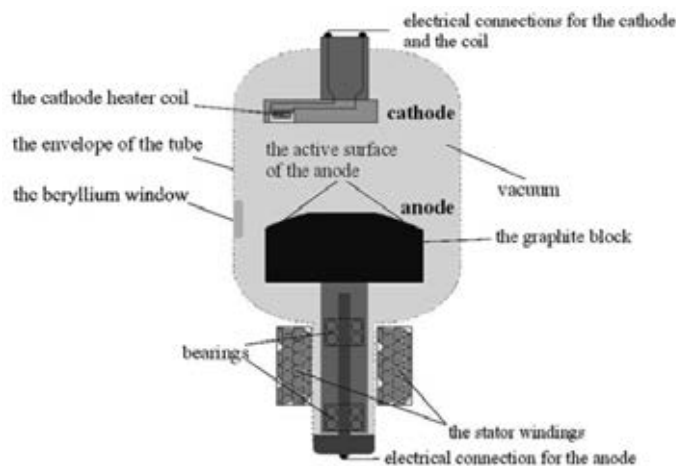


รูปที่ 2.8 หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดแอโนดแบบอยู่นิ่ง [3]

#### 2. แอโนดแบบหมุน (rotating anode)

หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดแอโนดแบบอยู่นิ่ง จะมีข้อจำกัดการใช้งานกับเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ต้องการกำลังสูงๆ เนื่องจากปัญหาเป้าเกิดความร้อนและเกิดการสึกกร่อนเร็ว จึงได้มีการออกแบบหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดแอโนดแบบหมุนได้เป็นรูปจานเพื่อให้สามารถกระจายความร้อนได้มากกว่าแอโนดแบบอยู่นิ่ง ขั้วแอโนดประกอบด้วยแผ่นทังสเตนขนาดใหญ่ หรือ โลหะผสม

ระหว่างทั้งสแตนท์กับโมลิบดีนัม ขั้วแอโนดจะหมุนด้วยความเร็ว 3000 - 3600 รอบต่อนาที ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วและจำนวนขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ การหมุนของขั้วแอโนดจะใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ (induction motor) โดยที่ตัวโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเชื่อมต่อกับแท่งโมลิบดีนัมไปยังขั้วแอโนดแบบหมุน ภายในหลอดแก้วที่มีสภาวะเป็นสุญญากาศ รอบโรเตอร์ซึ่งอยู่ด้านนอกของหลอดแก้วจะมีขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้ขดลวดสเตเตอร์จะเกิดการเหนี่ยวนำการไหลของกระแสในโรเตอร์ทำให้เกิดการหมุนของโรเตอร์ ดังรูปที่ 2.9 เนื่องจากโรเตอร์ต่อเชื่อมอยู่กับขั้วแอโนดจึงทำให้ขั้วแอโนดเกิดการหมุน หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดนี้จะใช้งานที่กำลังสูงต่อเนื่องเป็นเวลานาน เช่น งานทางการแพทย์ที่ตรวจวิเคราะห์ด้วยการเรืองรังสีบนฉาก (fluorescence screen) และเครื่องสร้างภาพตัดขวางของรังสีเอกซ์ด้วยคอมพิวเตอร์ (computed tomography) ที่ต้องใช้เวลาและกระแสแอโนดสูง

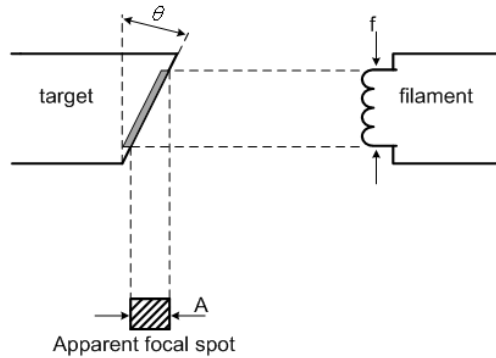


รูปที่ 2.9 หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดขั้วแอโนดแบบหมุน [3]

### 2.2.3 จุดโฟกัสของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

ขนาดของจุดโฟกัสมีผลต่อความคมชัดของภาพถ่ายรังสีเอกซ์ ดังนั้นการออกแบบหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์จึงพยายามควบคุมให้มีจุดโฟกัสเล็กโดยเฉพาะงานถ่ายภาพรังสีที่ต้องการรายละเอียดของภาพสูงจะต้องใช้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัส แต่พลังงานส่วนใหญ่ของอิเล็กตรอนที่เข้าไปชนเป้าของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ถูกเปลี่ยนเป็นความร้อน มีเพียง 1% ที่ถูกเปลี่ยนเป็นรังสีเอกซ์ ความร้อนที่เกิดขึ้นที่เป้าจะแผ่กระจายไปตามบริเวณของจุดโฟกัส ดังนั้นพื้นที่รองรับจุดโฟกัสจึงต้องมีขนาดใหญ่ สามารถรับความร้อนที่เกิดขึ้นได้โดยไม่สูงจนเป่าหลอดละลายในการใช้งานเพื่อให้จุดโฟกัสปรากฏ (apparent focal spot) มีขนาดเล็กจึงต้องออกแบบให้เป้าทำมุมเอียงกับแนวตั้ง 6 - 20 องศา มุมเอียงเล็กน้อยจะได้จุดโฟกัสปรากฏเล็ก ในขณะที่พื้นที่ของจุด

โฟกัสของเป้าจริง (true focal spot) ขนาดของจุดโฟกัสนั้นจะกล่าวถึงในเทอมของบริเวณจุดโฟกัสปรากฏ เช่น ขนาด 0.3 มิลลิเมตร ,0.6 มิลลิเมตร ,1.2 มิลลิเมตร เป็นต้น



รูปที่ 2.10 จุดโฟกัสของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

จากรูปที่ 2.10 จากภาพฉายเรขาคณิตของแนวตกกระทบของอิเล็กตรอนสามารถคำนวณขนาดของจุดโฟกัสปรากฏได้ดังสมการ

$$A = f \tan \theta \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

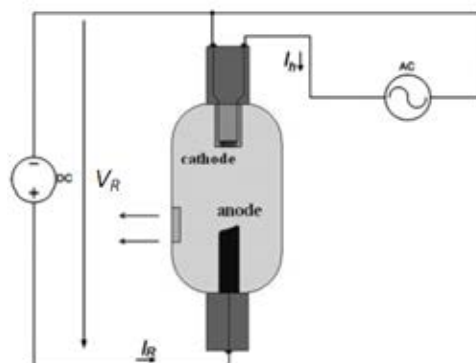
เมื่อ A คือ ขนาดความยาวของไส้หลอดในแนวตั้งฉากกับเป้า

f คือ ขนาดความยาวกับไส้หลอดในแนวขนานกับเป้า

$\theta$  คือ มุมเป้าผลิตรังสีเอกซ์

2.2.4 ลักษณะทางไฟฟ้าของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

เมื่อพิจารณาด้านการออกแบบและหลักการทำงานของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์จะมีลักษณะเหมือนหลอดสุญญากาศทั่วไป เช่น หลอดไดโอด ซึ่งมีระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าเบื้องต้นสำหรับจ่ายให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ ดังรูปที่ 2.11



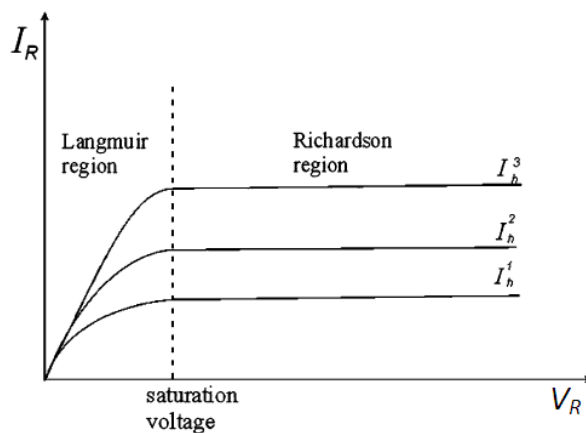
รูปที่ 2.11 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าเบื้องต้นสำหรับจ่ายให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ [3]

- เมื่อ  $V_R$  คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ตกคร่อมระหว่างขั้วของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์
- $I_R$  คือ กระแสที่ไหลผ่านหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์หรือกระแสแอโนด
- $I_h$  คือ กระแสที่จ่ายให้กับไส้หลอด

ความสัมพันธ์ของตัวแปรทางไฟฟ้าทั้งหมดมีผลต่อการทำงานของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ แสดงได้ด้วยเส้นกราฟรูปที่ 2.12 ซึ่งเป็นไปตามสมการของ Child Langmuir

$$I_R(V_R) = 2.34 \times 10^6 \frac{S_{anode}}{d_{ak}^2} V_R^{3/2} \dots\dots\dots (2.2)$$

- เมื่อ  $S_{anode}$  คือ พื้นที่ของเป้าที่ถูกอิเล็กตรอนชน
- $d_{ak}$  คือ ระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทดของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์



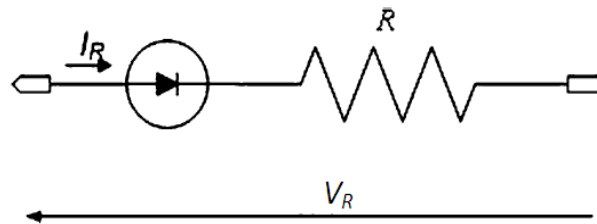
รูปที่ 2.12 คุณลักษณะทางไฟฟ้าของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ [3]

จากรูปที่ 2.12 แสดงคุณลักษณะของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ ที่ค่ากระแสไส้หลอดที่แตกต่างกัน ช่วงที่กระแสแอโนดยังไม่อิ่มตัวหรือพื้นที่ใช้งานของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ เรียกว่า Langmuir region ส่วนช่วงที่กระแสแอโนดอิ่มตัวเรียกว่า Richardson region ช่วงที่อิ่มตัวนั้นคุณลักษณะของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ ถูกจำกัดด้วยจำนวนของอิเล็กตรอนที่มาจากไส้หลอด สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ได้จาก

$$R = \frac{V_R}{I_R} = C \frac{1}{V_R^{3/2}} \dots\dots\dots (2.3)$$

เมื่อ C คือ coefficient of proportionality

คุณลักษณะทางไฟฟ้าของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์เขียนเป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้าได้ดังรูป 2.13 ประกอบด้วย ตัวต้านทานต่ออนุกรมกับไดโอด ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลได้ทางเดียว



รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ [3]

กำลังผลิตความเข้มรังสีของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์หาได้จาก

$$P = kV_R^2 I_R Z \dots\dots\dots (2.4)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่  $\cong 10^{-9}$

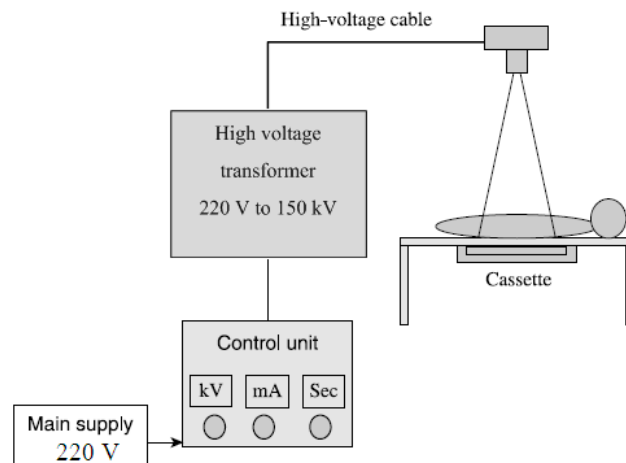
Z คือ เลขอะตอมของเป้าแอโนดสำหรับทั้งสแตนมีค่าเท่ากับ 74

### 2.3 วิวัฒนาการของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์

การกำเนิดรังสีเอกซ์จากเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์มีปัจจัยในการควบคุมคุณภาพและปริมาณของรังสีที่ผลิตออกมาจากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์เพื่อการถ่ายภาพ 3 ตัวแปร คือ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ระหว่างแอโนดกับแคโทด (kVp) กระแสแอโนด (mA) และ เวลาในการถ่ายภาพรังสีเอกซ์ (time) ซึ่งตัวแปรทั้ง 3 ตัวนี้ต่างก็มีผลกระทบอย่างมากต่อคุณภาพของภาพ ผลคูณของตัวแปรทั้งสามจะเป็นผลของความร้อนที่สะสมบนแอโนดของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ในหน่วย Heat unit (HU) ซึ่งต้องระบายออกเพื่อไม่ให้เกินกำลังที่หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ทนได้ ดังสมการ

$$HU = kVp \times mA \times time \dots\dots\dots (2.5)$$

เพื่อให้สามารถควบคุมคุณภาพของการผลิตลำรังสีเอกซ์ได้ โครงสร้างของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ จึงประกอบด้วยส่วนสำคัญ 5 ส่วน ได้แก่ หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง แหล่งจ่ายไฟฟ้าใส่หลอด ระบบควบคุมปัจจัยการผลิตรังสีเอกซ์และระบบระบายความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ระบบเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์

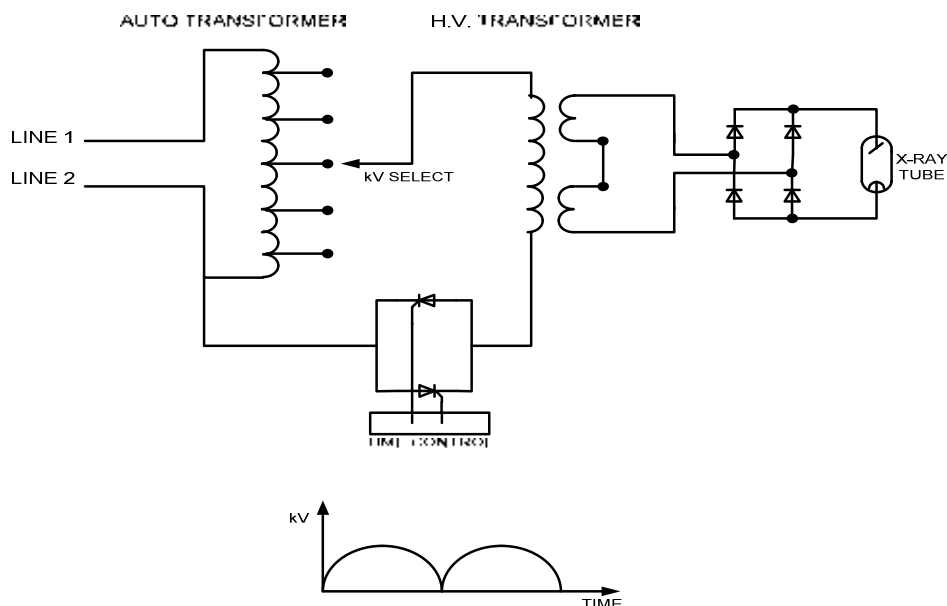
ส่วนประกอบที่สำคัญ คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง 1 เฟส แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง 3 เฟส และแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง โดยแต่ละชนิดจะมีวิธีการกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่จ่ายให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์แตกต่างกัน คุณภาพของไฟฟ้ากระแสตรงจะพิจารณาที่ขนาดของไฟฟ้ากระแสสลับที่กระเพื่อมอยู่บนไฟฟ้ากระแสตรง เรียกว่า ริปเปิล (ripple) ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของลำรังสีเอกซ์ หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์จะผลิตรังสีเอกซ์ที่ประสิทธิภาพและคุณภาพสูงต่อเมื่อไฟฟ้าแรงดันสูงที่จ่ายให้แอโนดและแคโทดเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่เรียบ มีริปเปิลต่ำ ดังนั้นตัวชี้วัดคุณภาพของไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าจึงอ้างถึงแฟกเตอร์ริปเปิล(ripple factor;  $r$ ) สามารถคำนวณจากสมการ

$$r = \left( \frac{V_{rms}}{V_{dc}} \right) \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

เมื่อ  $V_{rms}$  คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสเพือม

$V_{dc}$  คือ แรงดันไฟฟ้าสูงที่จ่ายให้แอโนดและแคโทด

### 2.3.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์แบบ 1 เฟส



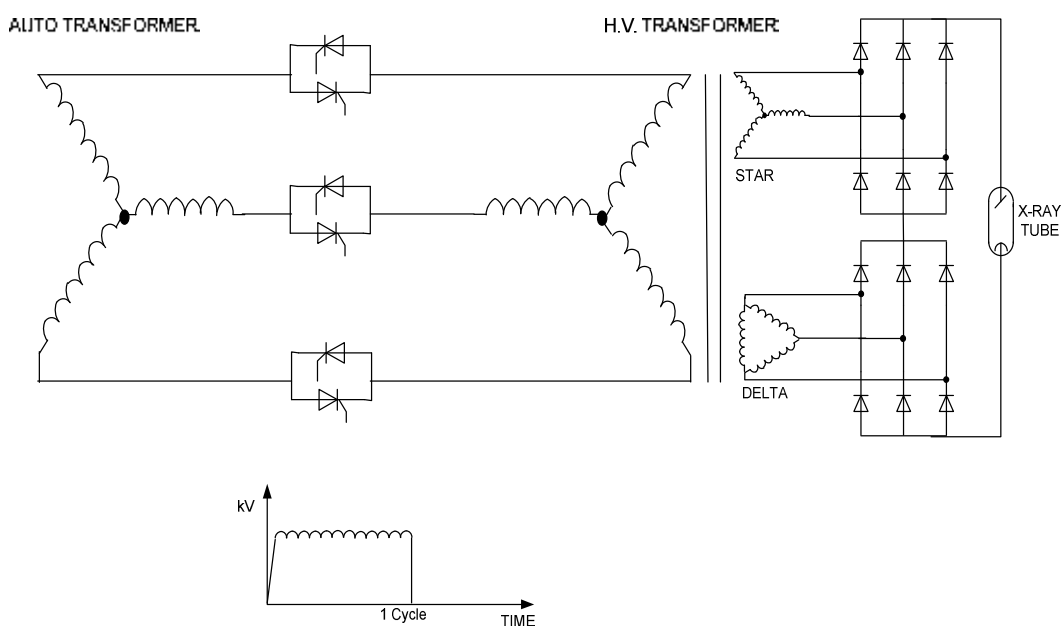
รูปที่ 2.15 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบ 1 เฟสและรูปคลื่นไฟฟ้าแรงดันสูงแบบเต็มคลื่น

เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบ 1 เฟส (single phase generator) เป็นเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์รุ่นแรกที่ถูกผลิตขึ้นมา ถึงแม้ว่าทุกวันนี้จะยังมีใช้กันอยู่ แต่เครื่องกำเนิดรังสีชนิดนี้จะมีประสิทธิภาพในการกำเนิดรังสีเอกซ์ต่ำที่สุด และคนไข้จะได้รับปริมาณรังสีมากกว่าเมื่อเทียบกับเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดอื่น

จากรูปที่ 2.15 จะเห็นว่าวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์แบบ 1 เฟส มีอุปกรณ์ที่น้อยชิ้นไม่ซับซ้อน การปรับขนาดแรงดันไฟฟ้า (kVp) ที่จ่ายให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ใช้สวิตช์เลือกขนาดแรงดันไฟฟ้าจากหม้อแปลงแบบออโต (autotransformer) แรงดันไฟฟ้าที่ได้จะถูกแปลงเป็นไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยหม้อแปลงแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้า (step up transformer) และแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงจากการเรียงกระแสด้วยไดโอดบริดจ์เพื่อจ่ายให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ ทำให้มีราคาถูก การบำรุงรักษาทำได้ง่าย แต่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่มีแพ็คเกจรีปเปิลสูงถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ทำให้รังสีเอกซ์ที่ผลิตออกมามีความแปรปรวนของความเข้มรังสีสูง ซึ่งจะมีผลให้คุณภาพของภาพถ่ายไม่คมชัดและทำให้เกิดความไม่แม่นยำต่อการวินิจฉัยโรคของคนไข้

### 2.3.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์แบบ 3 เฟส

เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบ 3 เฟส (three phase generator) ถูกพัฒนาขึ้นจากเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ 1 เฟส สามารถจ่ายกำลังได้มากกว่า ประสิทธิภาพในการกำเนิดรังสีเอกซ์สูงกว่าและคนไข้ได้รับปริมาณรังสีที่น้อยลงที่แรงดันไฟฟ้าของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ (kVp) เดียวกัน



รูปที่ 2.16 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบ 3 เฟส (12 พัลส์) และรูปคลื่นไฟฟ้าแรงดันสูง

จากรูปที่ 2.16 แรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่รับมาแต่ละเฟสจะมีมุมเฟสแตกต่างกัน  $120^\circ$  การควบคุมแรงดันไฟฟ้าจะควบคุมผ่านไทรสเตอร์ (thyristor) ซึ่งทำหน้าที่เสมือนสวิตช์ปิดเปิดคาบ รูปคลื่นชานน์เป็นการเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันต่ำ เพื่อจ่ายให้กับขดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่มีขดทุติยภูมิแบ่งครึ่งแรงดันไฟฟ้า โดยจัดขดแต่ละขดในแบบเดลตา (Delta) และวาย (Wye) ซึ่งมีการเลื่อนเฟสกันอยู่  $30^\circ$  ส่งผลให้ได้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจำนวน 12 พัลส์ต่อ 1 คาบ และแพกเตอริปเปิลลดลงเหลือเพียง 4 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าขดทุติยภูมิจัดแบบวายทั้งคู่จะได้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจำนวน 6 พัลส์ต่อ 1 คาบ และมีแพกเตอริปเปิลสูงขึ้นไปเป็น 13 เปอร์เซ็นต์

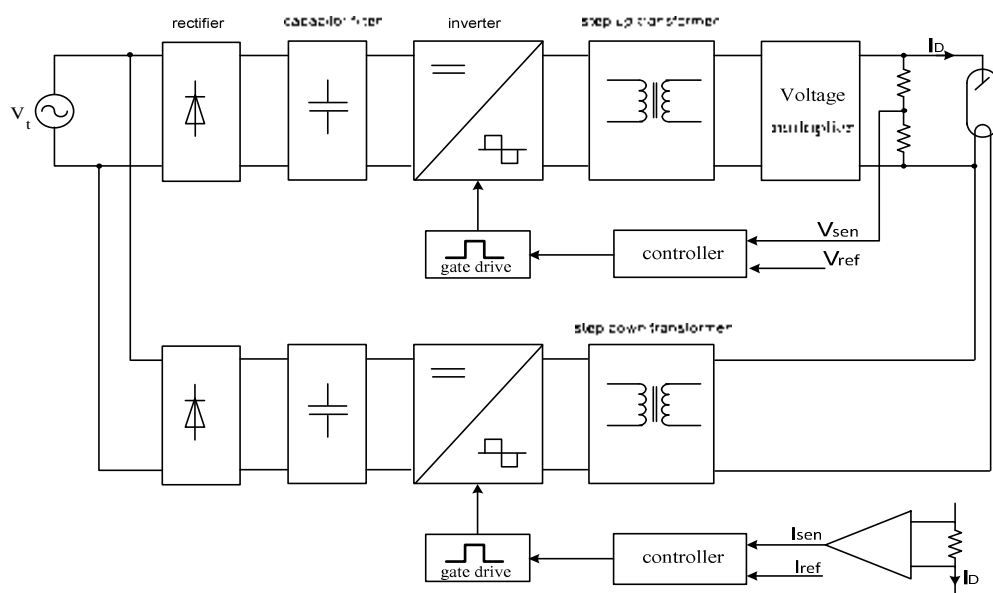
แม้ว่าระบบจ่ายไฟฟ้าแบบ 3 เฟส (12 พัลส์) จะให้ไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่มีริปเปิลต่ำกว่าและมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบ 1 เฟส แต่มีข้อจำกัดการติดตั้ง เนื่องจากสถานที่ติดตั้งจะต้องมี



ระบบไฟฟ้า 3 เฟส และหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่ต่ำยังมีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก การเรียงกระแสนังมีรูปเปลืองเหลืออยู่

### 2.3.3 แหล่งจ่ายไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์แบบความถี่สูง

เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบความถี่สูง มีข้อเด่นจากใช้เทคโนโลยีสวิตซิงและอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ทำให้มีประสิทธิภาพในการแปลงผันไฟฟ้าสูง มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบาและให้ไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่มีแฟกเตอร์ริปเปิลน้อยกว่า 1% จึงให้คุณภาพของลำรังสีเอกซ์สูงและคนไข้ได้รับปริมาณรังสีน้อย



รูปที่ 2.17 แผนภาพแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบความถี่สูงของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์

เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์แบบความถี่สูงใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าความถี่สูงทั้ง 2 ส่วน คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงสำหรับจ่ายให้แอโนดและแคโทดของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงสำหรับจ่ายให้ไส้หลอด (filament) จากแผนภาพรูปที่ 2.17 แสดงการทำงานของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์แบบความถี่สูง เริ่มจากไฟฟ้ากระแสสลับ 50 เฮิรตซ์ จะถูกเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวงจรเรียงกระแสและกรองแรงดันไฟฟ้าให้เรียบด้วยวงจรกรองแบบตัวเก็บประจุ วงจรอินเวอร์เตอร์จะเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงเนื่องจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงที่ได้นี้ยังมีแรงดันไฟฟ้าต่ำ จะต้องเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง ไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงความถี่สูงถูกส่งไปแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงด้วยวงจรทวิแรงดันไฟฟ้าจ่ายให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ ใน

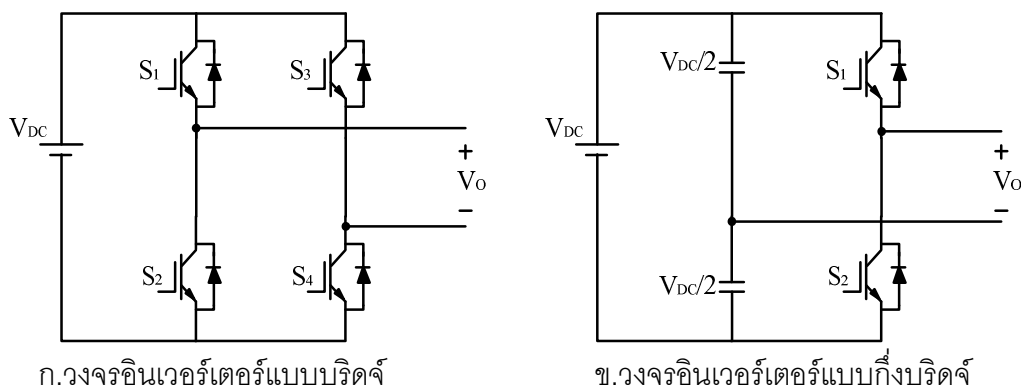
การปรับค่าแรงดันไฟฟ้าและรักษาความเสถียรของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์จะมีการจัดวงจรป้องกันกลับแรงดันไฟฟ้าที่สู่มแบ่งจากไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงมายังวงจรควบคุมเพื่อควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์ให้ปรับคาบเวลาของการนำกระแสมากขึ้นหรือน้อยลง (PWM control) ซดเซยตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

แหล่งจ่ายไฟฟ้าความถี่สูงที่จ่ายให้กับหลอดมีรูปแบบการทำงานคล้ายกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงที่จ่ายให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ เพียงแต่แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหลอดนั้นเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำที่มีกระแสสูง ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องมีวงจรทวิแรงดันไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้เป็นแบบลดแรงดันไฟฟ้า

## 2.4 ส่วนประกอบหลักเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ความถี่สูง

### 2.4.1 วงจรอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ (Inverter) เป็นวงจรทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่และขนาดแรงดันไฟฟ้าตามต้องการ โดยใช้เทคนิคการตัดต่อสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งอุปกรณ์สวิตช์กำลังอาจใช้ทรานซิสเตอร์มอสเฟต (MOSFET) หรือ ไอจีบีที (IGBT) รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์จะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือรูปคลื่นสี่เหลี่ยม กับรูปคลื่นซายน์ ขึ้นอยู่กับเทคนิคการสวิตช์ วงจรอินเวอร์เตอร์มีหลายรูปแบบ เช่น วงจรบริดจ์ วงจรกึ่งบริดจ์ วงจรพูช-พูล ซึ่งแต่ละวงจรจะมีข้อดีข้อเสียต่างกัน การจะเลือกใช้แบบใดขึ้นอยู่กับภาระจะนำไปใช้งานประเภทใด มีกำลังไฟฟ้าน้อยเพียงใด ตัวอย่างโครงสร้างของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้อุปกรณ์สวิตช์กำลังชนิดไอจีบีที (IGBT) แสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 โครงสร้างของวงจรอินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ในรูปที่ 2.18.ก จะประกอบด้วย ไอจีบีที (IGBT) 4 ตัว ทำหน้าที่เป็นสวิตช์มีการนำกระแสพร้อมกันเป็นคู่เพื่อให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม เช่น ช่วงเวลา 0 ถึง 0.5 คาบ  $S_1, S_4$  นำกระแส และ  $S_3, S_2$  หยุดนำกระแส ช่วงเวลา 0.5 ถึง 1 คาบ  $S_1, S_4$  หยุดนำกระแส และ  $S_3, S_2$  นำกระแส แรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีขนาดเท่ากับค่าของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ส่วนอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ในรูป 2.18.ข จะประกอบด้วย ไอจีบีที 2 ตัว ด้วยที่  $S_1$  และ  $S_2$  สลับกันนำกระแสครั้งละครึ่งคาบแรงดันไฟฟ้าทางออกเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมขนาดเท่ากับครึ่งของแรงดันไฟฟ้าสูงสุด

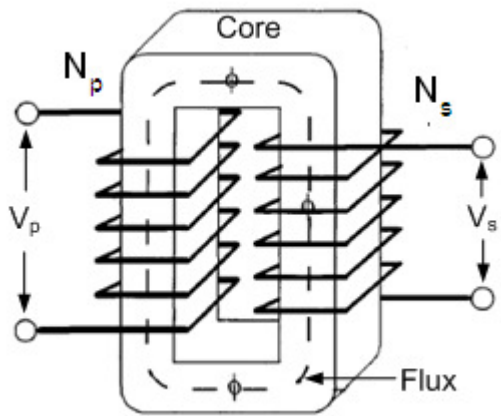
เงื่อนไขที่สำคัญสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์และกึ่งบริดจ์ คือ การทำงานของตัวสวิตช์  $S_1, S_2$  และ  $S_3, S_4$  ต้องไม่นำกระแสพร้อมกันในทุกช่วงเวลา มิฉะนั้นจะเกิดการลัดวงจรระหว่างบัสบวกกับบัสลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้าซึ่งช่วงเวลาที่ทั้งคู่ไม่นำกระแส เรียกว่า เดดไทม์ (dead time)

2.4.2 หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง

หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงเป็นส่วนประกอบหลักของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์แบบความถี่สูง มีโครงสร้างดังในรูป 2.19 หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงทำหน้าที่ในการเพิ่มขนาดของแรงดันไฟฟ้าให้มีขนาดสูงขึ้นตามที่ต้องการ โดยความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและอัตรารอบของหม้อแปลงไฟฟ้าจะเป็นไปตามสมการที่ 2.7

$$N_p/N_s = V_p/V_s \dots\dots\dots (2.7)$$

- เมื่อ  $N_p$  คือ จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ
- $N_s$  คือ จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ
- $V_p$  คือ แรงดันไฟฟ้าของขดลวดปฐมภูมิ
- $V_s$  คือ แรงดันไฟฟ้าของขดลวดทุติยภูมิ



รูปที่ 2.19 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า

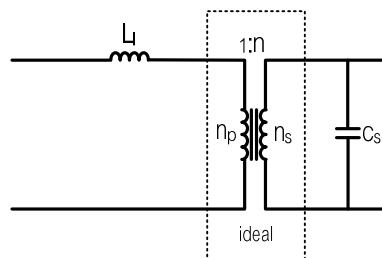
จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ ( $N_p$ ) คำนวณได้จากกฎของฟาราเดย์ตามสมการที่ 2.8

$$N_p = \frac{V_p \times 10^6}{4B_m A_c f} \dots\dots\dots (2.8)$$

- เมื่อ  $V_p$  คือ แรงดันไฟฟ้าด้านขดลวดปฐมภูมิ  
 $A_c$  คือ พื้นที่หน้าตัดของแกน  
 $B_m$  คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด  
 $f$  คือ ความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้า

ดังนั้นจำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงจึงมีจำนวนมากมีผลทำให้เกิดค่าความจุของตัวเก็บประจุแฝง (Parasitic capacitance) ระหว่างชั้นขดลวดในหม้อแปลงไฟฟ้าสูง [4-5] ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงเนื่องจากค่าความจุของตัวเก็บประจุแฝงในหม้อแปลงไฟฟ้างกล่าวก่อให้เกิดการจำกัดการตอบสนองความถี่สูงและในการทำงานแบบสวิตช์ค่าความจุของตัวเก็บประจุแฝงนี้ยังก่อให้เกิดกระแสไปก้ (Spike current) [6] ซึ่งเป็นสาเหตุให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังและวงจรถูกเกี่ยวข้องเกิดการเสียหายได้

พารามิเตอร์แฝงเกิดจากโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีจำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิจำนวนมากทำให้เกิดความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำรั่ว ( $L_r$ ) สะท้อนมาอยู่ด้านขดลวดปฐมภูมิและเกิดค่าความจุของตัวเก็บประจุแฝง ( $C_s$ ) ระหว่างชั้นขดลวดทางด้านขดลวดทุติยภูมิดังแสดงวงจรสมมูลในรูปที่ 2.20

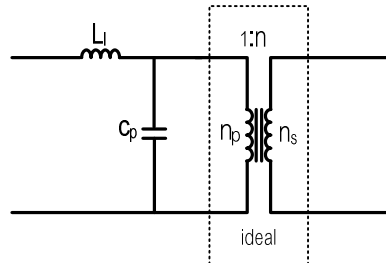


รูปที่ 2.20 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง

สำหรับค่าความจุของตัวเก็บประจุแฝงที่เกิดขึ้นด้านขดลวดทุติยภูมิ ( $C_s$ ) จะส่งผลสะท้อนมาปรากฏเป็นค่าความจุของตัวเก็บประจุแฝงด้านขดลวดปฐมภูมิ  $C_p$  [5] ดังวงจรสมมูลในรูปที่ 2.21 โดยค่าความจุแฝง  $C_p$  สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$C_p = n^2 C_s \dots\dots\dots (2.9)$$

เมื่อ  $n$  คือ อัตรารอบขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 2.21 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง  
เมื่ออินย่ายตัวเก็บประจุแผ่งไว้ทางขดลวดปฐมภูมิ

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.21 จะเห็นว่าพารามิเตอร์แผ่งที่อินย่ายมาด้านขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจะพิจารณาได้ 2 ลักษณะ คือ เป็นวงจรกรองความถี่ต่ำ (LC low pass filter) แผ่ง ซึ่งมีผลต่อการจำกัดการตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าในกรณีทำงานในระบบสวิตซ์ที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าคงที่แบบพัลส์วิตท์มอดูเลชัน (PWM) ทั่วไปและเป็นวงจรแทงค์ (LC Tank circuit) ในกรณีทำงานในระบบสวิตซ์แบบเรโซแนนซ์คอนเวอร์เตอร์ซึ่งมีความถี่เรโซแนนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าตามสมการ

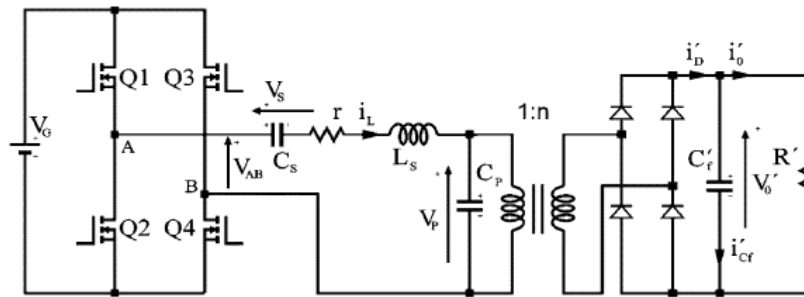
$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_p}} \dots\dots\dots (2.10)$$

หรือ

$$f_r = \frac{1}{2\pi n\sqrt{L_1 C_p}} \dots\dots\dots (2.11)$$

ในสภาวะเรโซแนนซ์ดังสมการที่ 2.10 และ 2.11 นั้น หม้อแปลงไฟฟ้าจะมีความถี่เพิ่มแรงดันไฟฟ้า ( $V_o/V_i$ ) สูงมากและมีความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (Power density) สูง ดังนั้นการใช้งานในบริเวณใกล้ความถี่เรโซแนนซ์ จะช่วยให้หม้อแปลงไฟฟ้ามี่ขนาดเล็กและประหยัดพื้นที่ แต่ควรหลีกเลี่ยงไม่ให้หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานที่ความถี่นี้พอดีเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับหม้อแปลงไฟฟ้าอันเนื่องมาจากเป็นจุดวิกฤติที่อาจทำให้อนวนไม่สามารถทนแรงดันไฟฟ้าสไปก์ (Spike voltage) ที่เกิดขึ้นได้

การนำพารามิเตอร์แฝงของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงมาประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเรโซแนนซ์ (DC-DC resonant converter) ดังรูปที่ 2.22 จะช่วยลดการสูญเสียจากการสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นผลให้วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูง และอัตราส่วนจํานวนรอบของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงมีจํานวนลดลงจากอัตราส่วนจํานวนรอบปกติทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงจะมีขนาดที่เล็กลง

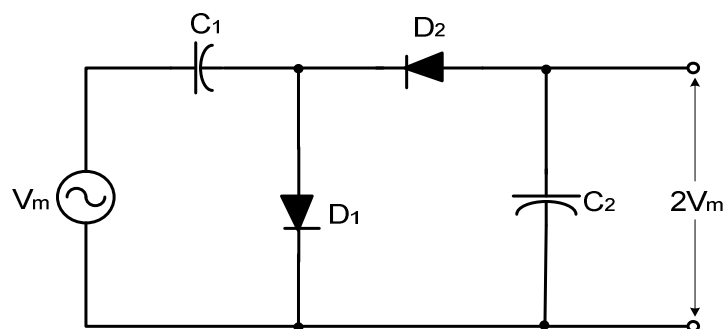


รูปที่ 2.22 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ Full bridge LCC เรโซแนนซ์ [6]

#### 2.4.3 วงจรทวีแรงดันไฟฟ้า

วงจรทวีแรงดันไฟฟ้า (Voltage multiplier circuit) เป็นวงจรเรียงกระแสที่สามารถเพิ่มแรงดันไฟฟ้าด้านออกให้มีค่าสูงขึ้นเป็นจํานวนเท่า เช่น 2 เท่า 3 เท่า 4 เท่า ฯลฯ ของค่ายอดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านเข้าจากผลการอันดับแรงดันไฟฟ้าย่อยบนตัวเก็บประจุ วงจรทวีแรงดันไฟฟ้าจะประกอบด้วย ตัวเก็บประจุทำหน้าที่เก็บประจุและถ่ายโอนประจุในแต่ละครึ่งไซเคิลของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านเข้าโดยไดโอดทำหน้าที่เป็นสวิตช์ปิดเปิดวงจร

##### 2.4.3.1 วงจรทวีแรงดันไฟฟ้าสองเท่าแบบครึ่งคลื่น



รูปที่ 2.23 วงจรเพิ่มแรงดันไฟฟ้าสองเท่าแบบครึ่งคลื่น

ในรูปที่ 2.23 แสดงวงจรทวิแรงดันไฟฟ้าสองเท่าแบบครึ่งคลื่น มีการทำงานของวงจรเริ่มจากแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นซายน์ทางด้านเข้าไซเคิลบวกจะทำให้ไดโอด  $D_1$  ถูกไบแอสตรง ไดโอด  $D_1$  จึงเสมือนสวิตช์ปิด มีผลทำให้  $C_1$  ถูกอัดประจุจนมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเท่ากับค่าสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า เมื่อแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าเปลี่ยนเป็นไซเคิลลบไดโอด  $D_1$  ถูกไบแอสกลับ ส่วนไดโอด  $D_2$  จะมีภาวะไบแอสตรง ในช่วงนี้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม  $C_1$  มีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของด้านเข้า และมีทิศทางที่เสริมกับชั่วแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าทำให้  $C_2$  ถูกอัดประจุโดยมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเท่ากับ  $2V_m$  หลังจากช่วงเวลาแล้วไดโอดทั้งสองตัวจะถูกไบแอสกลับเปรียบเสมือนสวิตช์ที่เปิดวงจรอยู่ตลอดเวลาทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกมีค่าเป็น  $2V_m$  เนื่องจากตัวเก็บประจุ  $C_2$  ถูกประจุเพียงแคครึ่งไซเคิลเท่านั้น และตัวเก็บประจุ  $C_2$  ก็เป็นตัวจ่ายกระแสให้แก่โหลด ดังนั้นวงจรนี้จึงมีข้อเสียที่ไม่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าให้โหลดได้มาก ตัวเก็บประจุ  $C_1$  ควรใช้อัตราทนแรงดันไฟฟ้ามากกว่า  $V_m$  ส่วนตัวเก็บประจุ  $C_2$  ควรทนแรงดันไฟฟ้าได้มากกว่า  $2V_m$  และไดโอดควรมีทนแรงดันไบแอสกลับได้มากกว่า  $2V_m$

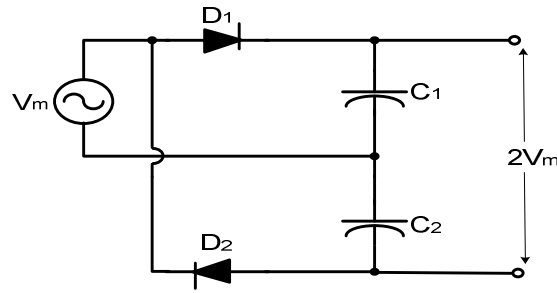
จากวงจรทวิแรงดันไฟฟ้าสองเท่าแบบครึ่งคลื่นสามารถคำนวณหาแรงดันรีปเปิล  $\Delta V$  ได้จาก

$$\Delta V = \frac{I_d}{2fC_2} \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

- เมื่อ  $I_d$  คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลด  
 $f$  คือ ความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับที่แปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง  
 $C_2$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

#### 2.4.3.2 วงจรทวิแรงดันไฟฟ้าสองเท่าแบบเต็มคลื่น

วงจรทวิแรงดันไฟฟ้าสองเท่าแบบเต็มคลื่น ดังในรูปที่ 2.24 มีข้อดีคือ สามารถที่จะเพิ่มแรงดันไฟฟ้าด้านออกได้ทั้งไซเคิลบวกและลบของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านออกของวงจรมีตัวเก็บประจุสองตัวเพื่อเป็นตัวรับประจุ จากการอัดประจุไฟฟ้าทางด้านเข้าตัวละครึ่งไซเคิล



รูปที่ 2.24 วงจรเพิ่มแรงดันไฟฟ้าสองเท่าแบบเต็มคลื่น

การทำงานของวงจรเริ่มจากที่แรงดันไฟฟ้าด้านเข้าไซเคิลบวกไดโอด  $D_1$  ถูกไบแอสตรง ขณะที่ไดโอด  $D_2$  ถูกไบแอสกลับ ทำให้  $C_1$  ถูกอัดประจุมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเท่ากับ  $V_m$  ส่วนไดโอด  $D_3$  ถูกไบแอสกลับยังไม่นำกระแสทำให้  $C_2$  ยังไม่ถูกอัดประจุ แต่เมื่อแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าเปลี่ยนเป็นไซเคิลลบไดโอด  $D_2$  ไบแอสตรงและนำกระแสทำให้  $C_2$  ถูกอัดประจุผ่านไดโอด  $D_2$  ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าด้านออกจะเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสองรวมกัน คือ  $2V_m$

จากวงจรทวีแรงดันไฟฟ้าสองเท่าแบบเต็มคลื่นสามารถคำนวณหาแรงดันรีปเปิล  $\Delta V$  ได้จาก

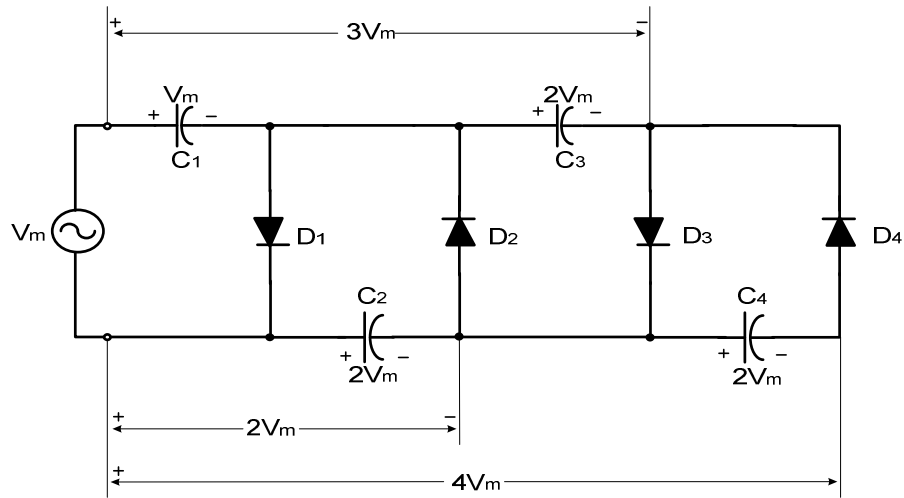
$$\Delta V = \frac{I_d}{f} \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) \dots\dots\dots (2.13)$$

- เมื่อ  $I_d$  คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลด
- $f$  คือ ความถี่ไฟฟ้ากระแสลับที่แปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง
- $C_{1,2}$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

2.4.3.3 วงจรทวีแรงดันไฟฟ้าต่อเนื่อง

รูปที่ 2.25 แสดงวงจรทวีแรงดันไฟฟ้าต่อเนื่อง หรือในระบบเร่งอนุภาคมักเรียกว่าวงจร Cockroft-Walton สามารถเลือกแรงดันไฟฟ้าเป็นจำนวนเท่าของแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า เช่น 2 เท่า 3 เท่า และ 4 เท่า หรือ ต่อเนื่องออกไปอีก วงจรทวีแรงดันไฟฟ้าต่อเนื่องนี้พัฒนามาจากวงจรทวีแรงดันไฟฟ้าสองเท่าแบบครึ่งคลื่น





รูปที่ 2.25 วงจรทวิแรงดันไฟฟ้าต่อเนื่อง

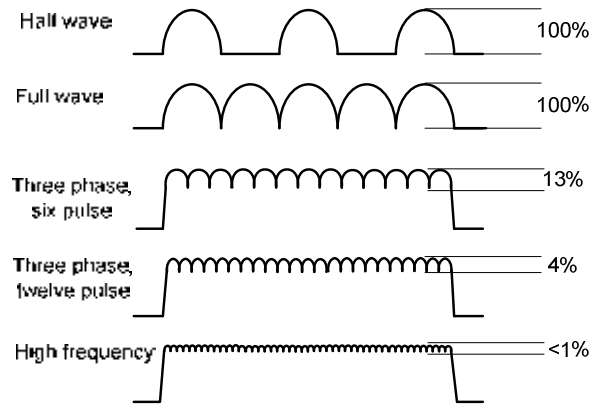
จากวงจรทวิแรงดันไฟฟ้าต่อเนื่องสามารถคำนวณหาแรงดันรีปเปิล  $\Delta V$ ได้จาก

$$\Delta V = \frac{I_d}{2fC} n \left( \frac{n+1}{2} \right) \dots\dots\dots (2.14)$$

- เมื่อ  $I_d$  คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลด
- $f$  คือ ความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับที่แปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง
- $n$  คือ จำนวนเท้าของการทวิแรงดันไฟฟ้าด้านออก
- $C$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

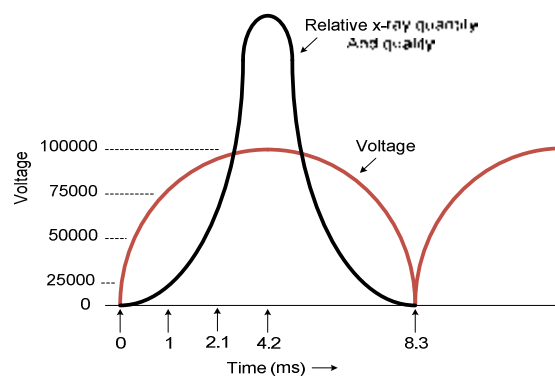
2.5 ผลของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่มีต่อปริมาณรังสีเอกซ์ [2]

คุณภาพของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์พิจารณาจากรีปเปิลแฟกเตอร์ ในรูป 2.26 แสดงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า 5 แบบจากระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่จ่ายให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ แต่ละรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจะมีแรงดันรีปเปิลที่แตกต่างกันและมีผลต่อการกระเพื่อมของความเข้มรังสีเอกซ์ โดยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงความถี่สูงมีรีปเปิลแฟกเตอร์ต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์



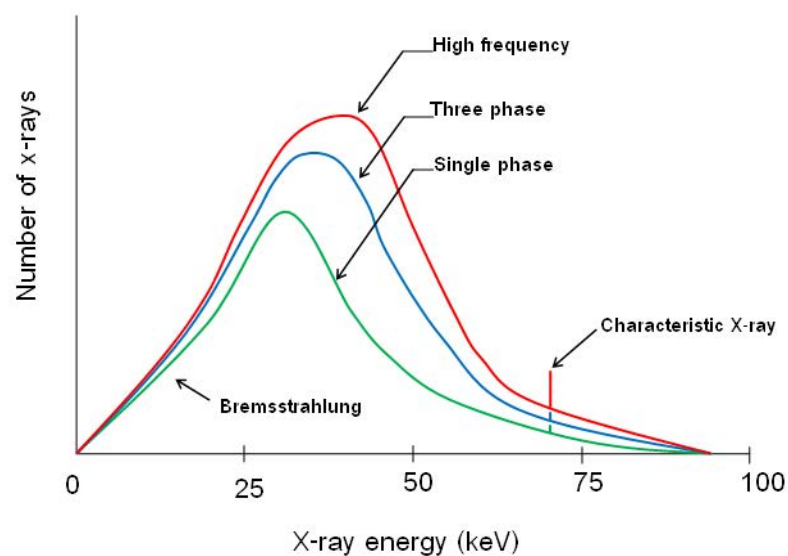
รูปที่ 2.26 ริปเปิลของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบต่างๆ ของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์

รูปที่ 2.27 แสดงความสัมพันธ์ของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากับช่วงเวลาการเพิ่มความเข้มรังสีในแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบ 1 เฟสเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นสำหรับการถ่ายภาพรังสีเอกซ์ที่ 100 kV จะเห็นว่าที่เวลาเท่ากับศูนย์ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์เท่ากับศูนย์ ซึ่งในเวลานี้ไม่มีกระแสอิเล็กตรอนไหลผ่านหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์และไม่กำเนิดรังสีเอกซ์ ที่เวลา 1 ms แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์เพิ่มขึ้นเป็น 10 kV จุดนี้เริ่มมีการกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ความเข้มต่ำและพลังงานต่ำน้อยกว่า 10 keV เมื่อเวลาผ่านไปที่ 2.1 ms แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์เพิ่มเป็นประมาณ 25 kV จากนั้นที่เวลา 4.2 ms แรงดันตกไฟฟ้าคร่อมหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์สูงสุดและรังสีเอกซ์มีความเข้มมากที่สุด และเมื่อเวลาผ่านไปจาก 4.2 ms ความเข้มของรังสีเอกซ์และพลังงานของรังสีเอกซ์ลดลงจนถึงเวลา 8.3 ms จะลดลงเป็นศูนย์อีกครั้ง จะเห็นได้ว่าความเข้มของรังสีเอกซ์แต่ละช่วงแรงดันไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอและมีลักษณะเป็นพัลส์แคบกว่ารูปคลื่นไซน์ ดังนั้นแฟกเตอร์ริปเปิลของความเข้มรังสีจึงสูงกว่าแฟกเตอร์ริปเปิลของแรงดันไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส หรือ รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าความถี่สูงจะให้ความเข้มของรังสีเอกซ์มากกว่าแบบ 1 เฟส



รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากับช่วงเวลาการเพิ่มความเข้มรังสี

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มหรือปริมาณรังสีเอกซ์ และชนิดของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง เป็นสิ่งสำคัญที่นักรังสีเทคนิคจะต้องเข้าใจ กล่าวคือ ถ้าใช้เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์แบบ 1 เฟส ที่ 75 kVp เปรียบเทียบกับเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ 3 เฟส จะต้องใช้ประมาณ 64 kVp ลดลง 12% ในขณะที่เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ความถี่สูงอาจจะต้องใช้ kVp ลดลงถึง 16% ในกรณีที่ใช้ kVp เดียวกันจะต้องลด mAs ลงประมาณ 2 เท่า ของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ 1 เฟส เนื่องจากเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ 3 เฟส และเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ความถี่สูงมีแรงดันรีปเปลน้อยกว่าเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ 1 เฟส จึงมีผลทำให้ความเข้มของรังสีเอกซ์สูงกว่า



รูปที่ 2.28 เปรียบเทียบความเข้มรังสีเอกซ์จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าต่างๆ ที่ kVp เท่ากัน

ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ปริมาณความเข้มของรังสีเอกซ์ได้สเปกตรัมพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์แบบ 1 เฟส เรียงกระแสแบบเต็มคลื่น เปรียบเทียบกับเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์แบบ 3 เฟส และเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์แบบความถี่สูง ทำงานที่ 92 kVp และที่ mAs เท่ากัน สามารถสรุปผลการวัดสเปกตรัมพลังงานรังสีเอกซ์ได้ดังกราฟรูปที่ 2.28 โดยพบว่าเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์แบบความถี่สูงให้ประสิทธิภาพในการกำเนิดรังสีเอกซ์สูงที่สุด เนื่องจากมีพื้นที่ปริมาณความเข้มรังสีเอกซ์ได้สเปกตรัมพลังงานต่อเนื่อง (continuous x-ray) สูงกว่าโดยค่อนข้างไปทางด้านพลังงานสูง ส่วนรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic x-ray) ยังคงมีพลังงานคงที่แต่มีปริมาณของรังสีเอกซ์เพิ่มขึ้น เนื่องจากจำนวนของอิเล็กตรอนที่ทำอันตรกิริยากับชั้น K มากขึ้น

ตารางที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มและคุณภาพของรังสีเอกซ์จากปัจจัยที่มีผลต่อสเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์

เพิ่มขึ้น	ผลของรังสีเอกซ์
กระแสไฟฟ้า (mA)	ความเข้มเพิ่มขึ้น , คุณภาพไม่เปลี่ยนแปลง
แรงดันไฟฟ้า (kVp)	ความเข้มเพิ่มขึ้น , คุณภาพเพิ่มขึ้น
กรองรังสี (filtration)	ความเข้มลดลง , คุณภาพเพิ่มขึ้น
เลขอะตอมของเป้า	ความเข้มเพิ่มขึ้น , คุณภาพเพิ่มขึ้น
แรงดันรีปเปิล	ความเข้มลดลง , คุณภาพลดลง

จากตารางที่ 2.1 เป็นตารางสรุปผลของปริมาณรังสีเอกซ์และคุณภาพของรังสีเอกซ์จากแต่ละปัจจัยของเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ แม้ว่าจะมีถึง 5 ปัจจัยในตารางแต่ในการใช้งานถ่ายภาพรังสีเอกซ์จริงมีเพียง 2 ปัจจัยเท่านั้น คือ kVp และ mA ในรูปของการกำหนดเอกซ์โพเซเจอร์ (mAs) ที่ถูกควบคุมโดยนักเทคนิครังสี

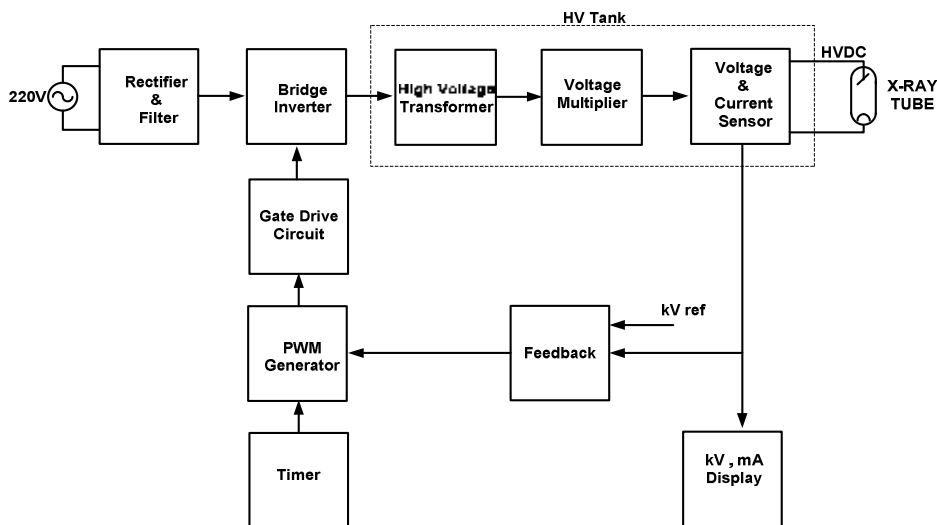
### บทที่ 3

## การออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ ทางการแพทย์

แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงจากการเรียงกระแสไฟฟ้าความถี่สูงที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ทางการแพทย์ในการวินิจฉัยโรค แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงใช้เทคนิคการสวิตช์ (switching technique) ซึ่งมีข้อดี คือ หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และการสวิตช์แรงดันไฟฟ้าที่ความถี่สูงจะทำให้ระบบตอบสนองการปรับระดับแรงดันไฟฟ้าที่คาบเวลาสั้นได้แม่นยำทำให้ระบบมีความเสถียรและประสิทธิภาพสูง โดยมีรายละเอียดด้านการออกแบบดังต่อไปนี้

### 3.1 การออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่สร้างขึ้นออกแบบให้ปรับค่าได้ระหว่าง 40-120 kV ที่กำลังทางด้านออก 2 kW เพื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ทางการแพทย์และออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงให้ทำงานที่ความถี่ 100 kHz การควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์เพื่อควบคุมพลังงานในการกำเนิดรังสีเอกซ์ใช้การควบคุมดิวตีไซเคิล (duty cycle) ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงผ่านวงจรรีเลย์เตอร์ ดังแผนภาพการทำงานในรูปที่ 3.1



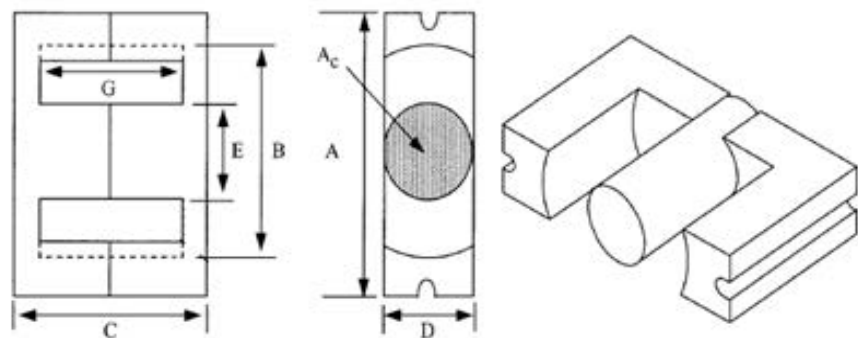
รูปที่ 3.1 แผนภาพของระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

### 3.1.1 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงจะแตกต่างจากการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันต่ำความถี่ต่ำทั่วไป เนื่องจากต้องคำนึงถึงการทำงานที่สภาพไฟฟ้าแรงดันสูงและผลของไฟฟ้าความถี่สูงซึ่งมีข้อพิจารณาดังต่อไปนี้

1. แกนหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงต้องเป็นแกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite core) ที่มีขนาดเพียงพอต่อกำลังไฟฟ้าที่ต้องการ
2. วัสดุฉนวนที่ใช้ในการออกแบบบอบบิ้นสำหรับพันขดลวดทุติยภูมิจะต้องมีค่าไดอิเล็กทริกต่ำ และต้องทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมได้
3. ระยะห่างระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิต้องห่างกันเพียงพอที่จะไม่ให้เกิดการอาร์คระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ
4. การใช้ฉัตรารอบของขดลวดต่ำและปรับรูปทรงขดลวดทุติยภูมิเพื่อลดพารามิเตอร์แฝงที่จะเกิดขึ้นกับหม้อแปลงให้มีค่าน้อยที่สุดเพื่อที่จะทำให้หม้อแปลงมีผลตอบสนองของความถี่สูง

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงที่แรงดันทางด้านขดลวดทุติยภูมิ 7 kV ที่กำลังไฟฟ้า 2 kW แรงดันไฟฟ้าทางด้านขดลวดปฐมภูมิประมาณ 310 VDC ต้องการให้ทำงานที่ความถี่ 100 kHz เลือกใช้หม้อแปลงชนิดแกนเฟอร์ไรต์แบบอีซี (EC-Core) มีขนาดดังรูปที่ 3.2



Core type	A mm	B mm	C mm	D mm	E mm	G mm
EC-Core	90	70	90	30	30	70

รูปที่ 3.2 ขนาดของแกนเฟอร์ไรต์แบบอีซี

จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ ( $N_p$ ) คำนวณได้จากสมการที่ 3.1 ได้จำนวน 6 รอบ

$$N_p = \frac{V_p \times 10^6}{4B_m A_c f} \dots\dots\dots (3.1)$$

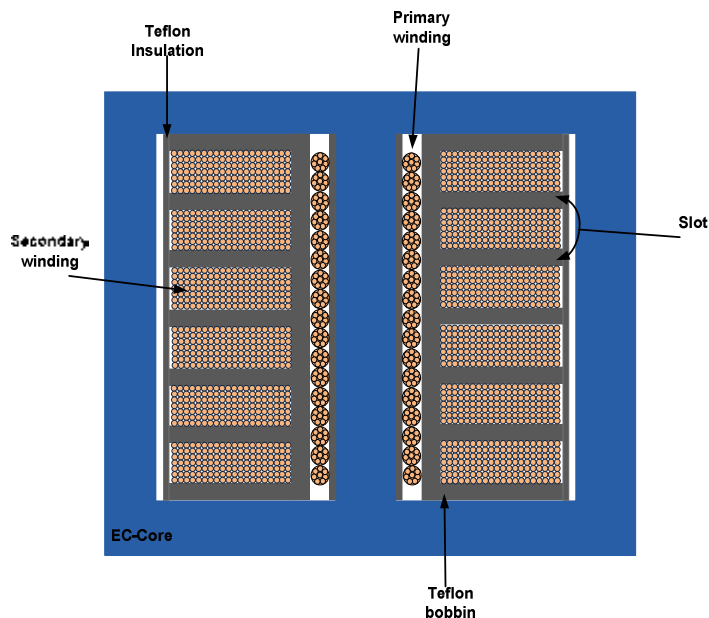
$V_p$  คือ แรงดันไฟฟ้าด้านขดลวดปฐมภูมิ (310 V)

$A_c$  คือ พื้นที่หน้าตัดของแกน (683 mm<sup>2</sup>)

$B_m$  คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (0.2 T)

$f$  คือ ความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้า (100 kHz)

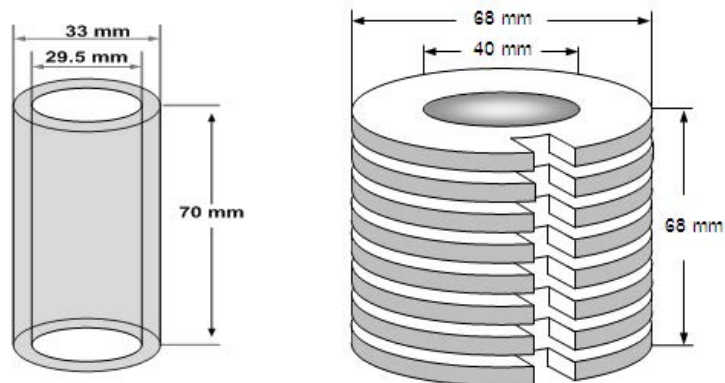
จากการทดลองหาข้อมูลเบื้องต้นที่จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ 6 รอบ พบว่ามีกระแสไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิสูงมาก เป็นผลทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์ไม่สามารถทนกระแสได้เกิดการเสียหาย จึงได้เพิ่มจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิเป็น 25 รอบเพื่อลดกระแสที่ไหลทางด้านขดลวดปฐมภูมิ และปรับอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวด ( $N_p/N_s$ ) เป็น 1: 30 ได้จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิเท่ากับ 735 รอบ โดยมีโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้างดรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง

การพันขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งทำงานที่ความถี่สูงจะต้องคำนึงถึงผลของปรากฏการณ์นำกระแสไฟฟ้าเพียงที่ผิวของตัวนำ (skin effect) ที่ความถี่สูง ดังนั้นเพื่อเพิ่ม

พื้นที่ผิวในการนำกระแสของเส้นลวดทองแดงเคลือบฉนวน จะใช้เส้นลวดทองแดงเคลือบฉนวนเบอร์ AWG#26 จำนวน 6 เส้นมาตีเกลียวในการพันขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงและใช้บอบบินแบบร่องเดี่ยวทรงกระบอกกลางแสดงในรูปที่ 3.4 ก ส่วนขดลวดทุติยภูมิพันด้วยเส้นลวดทองแดงเคลือบฉนวนเบอร์ AWG#26 โดยใช้บอบบินแบบแยกร่องเพื่อลดแรงดันไฟฟ้าระหว่างขดลวดดังในรูปที่ 3.4 ข



(ก) บอบบินขดลวดปฐมภูมิ

(ข) บอบบินขดลวดทุติยภูมิ

รูปที่ 3.4 บอบบินของหม้อแปลงไฟฟ้า

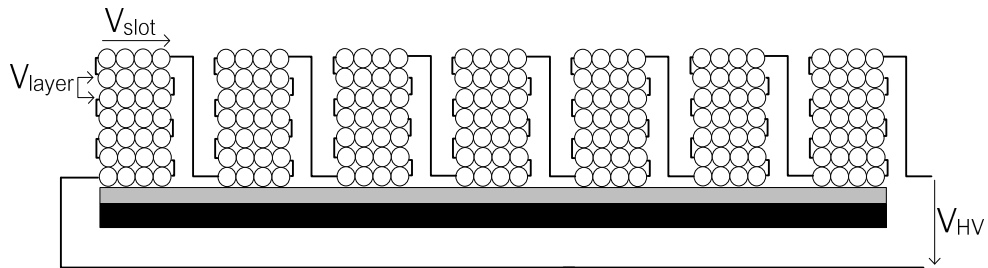
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติเทฟลอน ของ Dupont Teflon ที่  $f = 1 \text{ MHz}$

Dielectric constant, $\epsilon_r$	2.10	-
Dielectric strength	30.00	kV/mm
Dissipation factor, $\tan(\delta)$	0.0002	-
Bulk resistivity	$10^{16}$	$\Omega \cdot m$

วัสดุที่ใช้ทำบอบบินเลือกใช้เทฟลอน (PTFE) ซึ่งมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าดังตารางที่ 3.1 เนื่องจากมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำ ทนต่อแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง การออกแบบบอบบินสำหรับขดลวดทุติยภูมินั้นแท่งเทฟลอนจะถูกเจาะร่องเพื่อใช้พันขดลวดเรียกว่า สล็อต (Slot) จำนวน 7 ร่อง เพื่อเป็นการแบ่งแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดแต่ละขดและแยกย่อยค่าความจุแฝง โดยแต่ละร่องจะมีความกว้างสำหรับพันขดลวด 4 มิลลิเมตรและระหว่างช่องจะถูกคั่นด้วยผนังเทฟลอนหนา 5 มิลลิเมตร เพื่อความแข็งแรงในการรองรับการพันขดลวด นอกจากนี้ร่องพันขดลวด



จะเขาระ่องทะลุถึงกันเพื่อเปิดไว้สำหรับให้เส้นลวดพาดผ่านไปพันขดลวดร่องถัดไป ลักษณะของการพันขดลวดแสดงไว้ในรูปที่ 3.5 เส้นลวดจะถูกพันต่อกันเป็นชั้นๆ ในแต่ละร่องของบอบบิน



รูปที่ 3.5 ลักษณะการพันขดลวดทุติยภูมิในร่อง

ขดลวดทุติยภูมิในแต่ละร่องจะต่ออนุกรมกัน ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมแต่ละร่องเท่ากับ 1.4 kV สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$V_{slot} = \frac{\sqrt{2}V_{HV}}{n_{slot}} \dots\dots\dots (3.2)$$

$V_{HV}$  คือ แรงดันไฟฟ้าด้านออกของหม้อแปลง (7kV)

$n_{slot}$  คือ จำนวนร่องของบอบบิน (7slot)

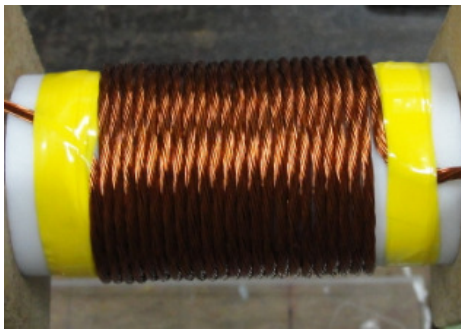
แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขดลวดทุติยภูมิแต่ละชั้น (Layer to layer voltage) ในแต่ละร่องของบอบบินเท่ากับ 108.79 V

$$V_{layer} = \frac{V_{slot}}{n_{layer}} \dots\dots\dots (3.3)$$

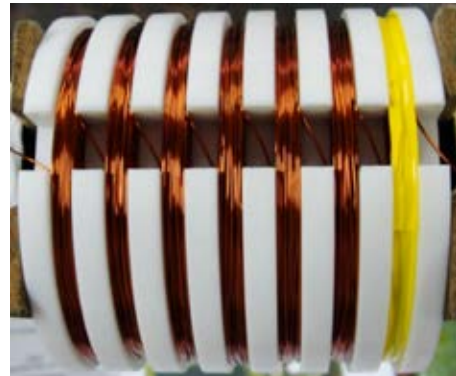
$n_{layer}$  คือ จำนวนชั้นของขดลวดในแต่ละร่อง (13 layer)

ชุดขดลวดทุติยภูมิและชุดขดลวดปฐมภูมิที่สร้างขึ้นแสดงในรูปที่ 3.6 นำมาประกอบร่วมกันในแกนเฟอร์ไรต์โดยขดลวดปฐมภูมิจะอยู่ด้านในของหม้อแปลงและมีขดลวดทุติยภูมิสวมทับอยู่ด้านนอก ดังโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าในรูปที่ 3.7 ขดลวดทั้งสองชุดต้องมีระยะห่างกันเนื่องจากเป็นหม้อแปลงแบบเพิ่ม (Step up transformer) ด้วยขดลวดทุติยภูมิจะมีแรงดันสูงกว่าขดลวดปฐมภูมิอยู่มาก ดังนั้นจะต้องคำนึงถึงการฉนวนระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิเพื่อไม่ให้เกิดการอาร์กกันระหว่างขดทั้งสอง โดยออกแบบให้ผนังด้านในของบอบบินขดลวด

ทุติยภูมิหนา 5 มิลลิเมตรกั้นระหว่างขดลวดทั้งสอง และ ใช้น้ำมันฉนวนหม้อแปลง (Shell Diala Oils A & Ax) เป็นฉนวนช่องว่างในขดลวดของหม้อแปลง การใช้น้ำมันเป็นฉนวนเนื่องจากสร้าง ภาวะใส่ง่าย มีคุณสมบัติที่เป็นฉนวนที่ดี มีความทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้สูง (high dielectric strength) 28 kV/mm และน้ำมันสามารถไหลแทรกช่องว่างในหม้อแปลงเพื่อทำหน้าที่เป็นฉนวน ระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า รวมถึงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สำหรับทวิแรงดันไฟฟ้าและสุมค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ควบคุมการขับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ อยู่ในถึงบรรจุน้ำมันหม้อแปลงและยังช่วยในการระบายความร้อนจากหม้อแปลงได้ดีพอสมควร แต่จะมีข้อเสีย คือ ถึงภาวะบรรจุน้ำมันฉนวนหม้อแปลงมีน้ำหนักมาก

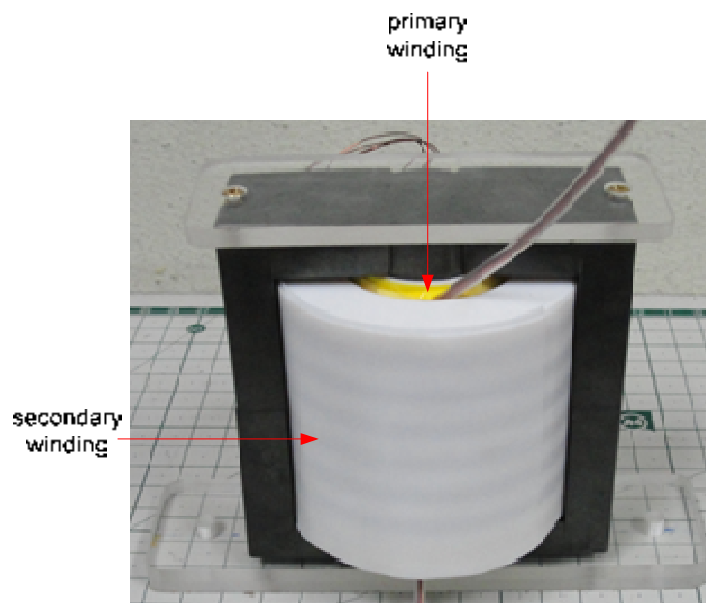


(ก) ขดลวดปฐมภูมิ



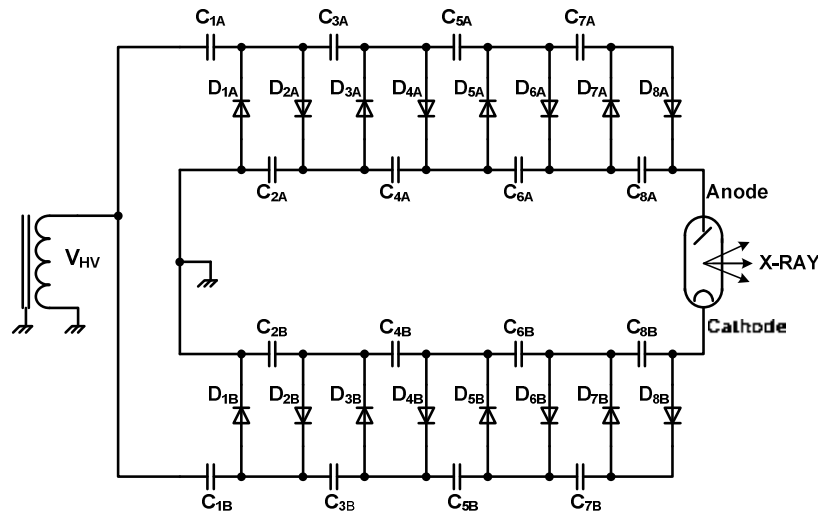
(ข) ขดลวดทุติยภูมิ

รูปที่ 3.6 ภาพขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงที่ออกแบบและสร้างขึ้น



รูปที่ 3.7 ภาพหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงที่ออกแบบและสร้างขึ้น

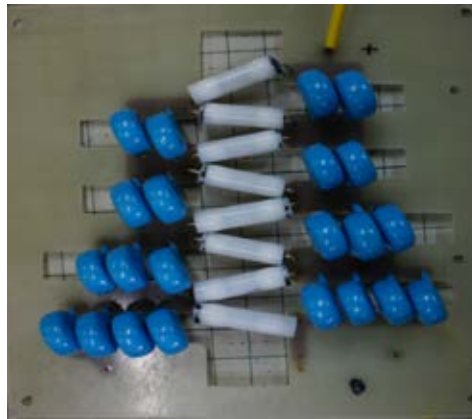
### 3.1.2 การออกแบบวงจรทวิแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 3.8 วงจรทวิแรงดันไฟฟ้า 16 เท่า

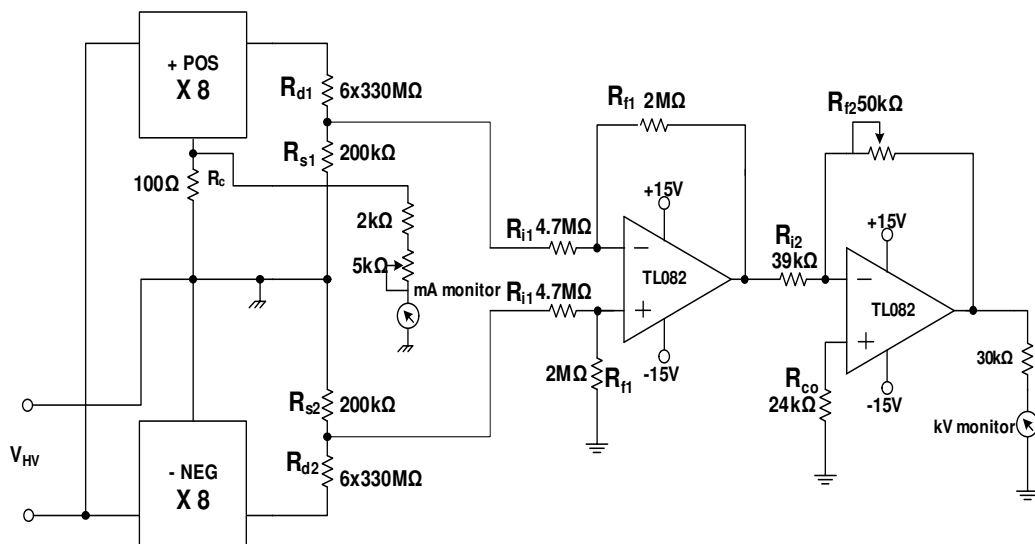
วงจรทวิแรงดันไฟฟ้าออกแบบให้เพิ่มแรงดันไฟฟ้าและเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง งานวิจัยนี้ออกแบบวงจรทวิแรงดันไฟฟ้าชุดละ 8 เท่า 2 ชุด สำหรับทวิแรงดันไฟฟ้าด้านบวก (positive multiplier) และทวิแรงดันไฟฟ้าด้านลบ (negative multiplier) โดยสามารถเพิ่มแรงดันไฟฟ้าด้านออกได้สูงสุดชุดละ 50 kV ที่พิกัดกระแสไฟฟ้ามากกว่า 20 mA ชุดวงจรทวิแรงดันไฟฟ้าด้านบวกจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขั้วแอโนดของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์และชุดวงจรทวิแรงดันไฟฟ้าด้านลบจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขั้วแคโทดของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ ดังวงจรในรูปที่ 3.8 ผลรวมแรงดันไฟฟ้าของวงจรทวิแรงดันทั้ง 2 ชุดที่จ่ายให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์จะเท่ากับแรงดันไฟฟ้า 100 kV ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงจะเผื่อการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับวงจรทวิแรงดันไฟฟ้าสูงสุดไว้ที่  $7 \text{ kV}_{\text{rms}}$  ดังนั้นไดโอดของวงจรทวิแรงดันไฟฟ้าจะต้องทนแรงดันไฟฟ้าอย่างน้อยเท่ากับ  $2\sqrt{2} \times 7 \text{ kV}_{\text{rms}} = 20 \text{ kV}$  ได้เลือกใช้ไดโอดเบอร์ 1N6519 ขนาดทนแรงดันไฟฟ้า 10 kV พิกัดกระแส 500 mA ต่ออนุกรมกัน 2 ตัวเพื่อให้ทนแรงดันไฟฟ้าที่ 20 kV โดยหุ้มส่วนต่อเชื่อมกันด้วยท่อเทฟลอนเพื่อเป็นฉนวนป้องกันการอาร์ก ส่วนตัวเก็บประจุต้องทนแรงดันไฟฟ้าได้อย่างน้อยเท่ากับ  $2\sqrt{2} \times 7 \text{ kV}_{\text{rms}} = 20 \text{ kV}$  ยกเว้นตัวเก็บประจุ  $C_{1A}$ ,  $C_{1B}$  ที่สามารถทนแรงดันไฟฟ้าอย่างน้อยเท่ากับ  $\sqrt{2} \times 7 \text{ kV}_{\text{rms}} = 10 \text{ kV}$  ดังนั้นในการออกแบบจึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาดแรงดันไฟฟ้า 20 kV แต่เนื่องจากกระแสไฟฟ้าของวงจรทวิแรงดันไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุลำดับแรกจะสูงกว่าลำดับสุดท้าย จึงออกแบบให้เพิ่มค่าความจุโดยการต่อขนานตัวเก็บประจุ  $C_{1A}$ ,  $C_{2A}$ ,  $C_{1B}$ ,  $C_{2B}$  มีค่าเท่ากับ  $4 \times 0.001 \text{ uF} / 20 \text{ kV}$  และ  $C_{3A}$ ,  $C_{4A}$ ,  $C_{3B}$ ,  $C_{4B}$  มีค่าเท่ากับ

3x0.001 uF / 20 kV ส่วนตัวเก็บประจุที่เหลือ มีค่าเท่ากับ 2x0.001 uF / 20 kV ตัวเก็บประจุและไดโอดออกแบบให้บัดกรีรวมกันในแผ่นพิมพ์ลายวงจรที่ทำด้วยอีพ็อกซี่ (epoxy) ดังแสดงในรูปที่ 3.9 แผ่นพิมพ์ลายวงจรที่ใช้อุปกรณ์ส่วนที่ไม่มีลายทองแดงจะถูกตัดออกเพื่อให้ น้ำมันฉนวนเข้าไปแทรกช่องว่างให้มีความเป็นฉนวนไฟฟ้ามากขึ้น ซึ่งเป็นวิธีการช่วยลดการอาร์ระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในวงจรวีแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 3.9 ภาพแผ่นวงจรวีแรงดันไฟฟ้าที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้น

### 3.1.3 การออกแบบชุดแสดงผลแรงดันและกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 3.10 วงจรแสดงผลแรงดันและกระแสไฟฟ้า

การแสดงผลแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงจะใช้วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า (voltage divider) เพื่อลดทอนไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงให้มีขนาดแรงดันไฟฟ้าต่ำลงและอ่านค่า

แรงดันไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยออกแบบให้วัดแรงดันไฟฟ้าด้านนอกของวงจรที่แรงดันไฟฟ้าทั้งด้านบวกและด้านลบที่จ่ายให้กับขั้วไฟฟ้าของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ กำหนดให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทานที่ใช้วัดแรงดันไฟฟ้ามีค่า 1 V ต่อ 10 kV ในการออกแบบวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าได้เลือกใช้ตัวต้านทาน 330 M $\Omega$  / 15 kV ( $R_d$ ) จำนวน 6 ตัว ในการแบ่งแรงดันไฟฟ้าวรร่วมกับตัวต้านทาน 200 k $\Omega$  ( $R_s$ ) แรงดันไฟฟ้าลดทอนที่ตกคร่อมตัวต้านทานแต่ละด้านคำนวณได้จาก

$$V_s = \frac{50 \times 10^3 \times 200 \times 10^3}{6 \times 330 \times 10^6 + 200 \times 10^3} = 5.05V \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

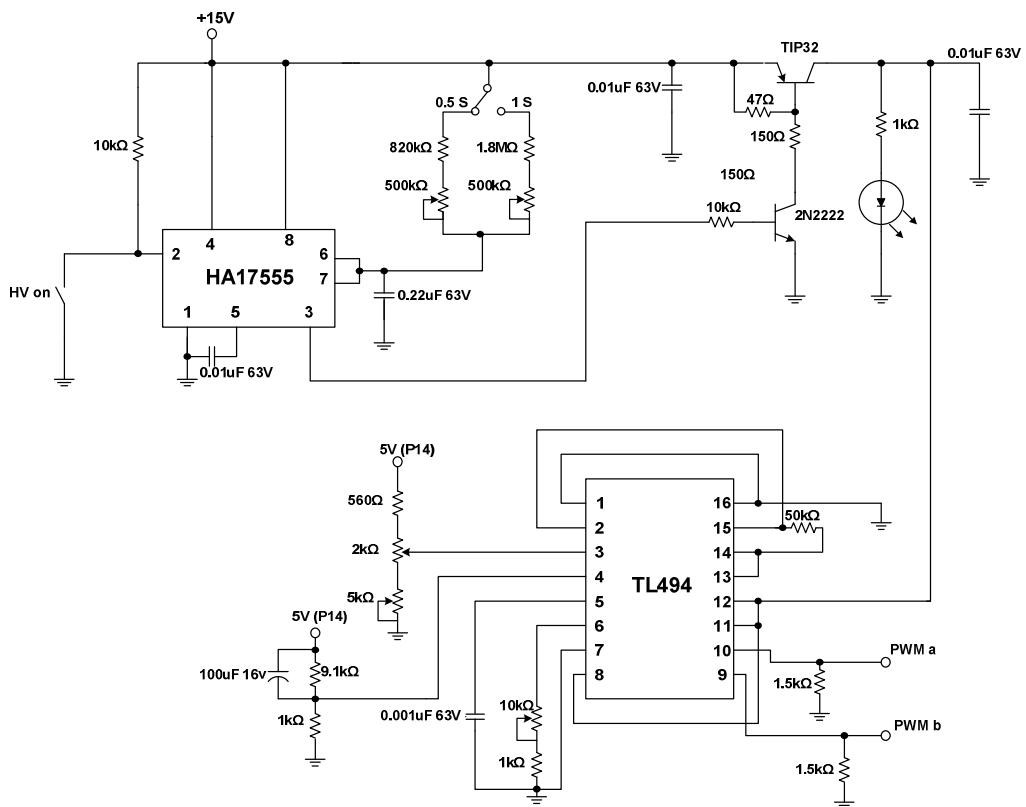
แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการแบ่งแรงดันไฟฟ้าด้านบวกและลบซึ่งตกคร่อมตัวต้านทาน ( $R_{s1}$ ,  $R_{s2}$ ) จะส่งให้วงจรปรับแต่งสัญญาณที่ประกอบด้วยวงจรขยายสัญญาณผลต่าง ( $A_1$ ) และวงจรขยายสัญญาณกลับเฟส ( $A_2$ ) ตามลำดับ การกำหนดค่าตัวต้านทานด้านทางเข้าของวงจรขยายผลต่างต้องมากกว่าตัวต้านทานลดทอนแรงดันไฟฟ้าของวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าประมาณ 10 เท่า ( $R_i \gg 10R_s$ ) เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบจาก loading effect ซึ่งจะมีผลให้แรงดันไฟฟ้าที่อ่านค่าออกมาคลาดเคลื่อน สัญญาณที่ได้จากวงจรขยายสัญญาณจะแสดงผลด้วยโวลต์มิเตอร์ และจะต้องทำการปรับเทียบค่าวัดแรงดันไฟฟ้าที่แสดงผลเปรียบเทียบกับค่าที่วัดโดยใช้โพรบวัดไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยการปรับตัวต้านทาน  $R_{i2}$  ของวงจรปรับแต่งสัญญาณเพื่อให้ค่าที่แสดงผลถูกต้อง ซึ่งวงจรขยายสัญญาณมีอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าวรร่วมดังนี้

$$\frac{V_o}{\Delta V_i} = \frac{R_{f1}}{R_{i1}} \times \frac{R_{f2}}{R_{i2}} \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

การแสดงผลกระแสแอมแปร์ของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ขณะทำงาน จะใช้วิธีการวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวงจรที่แรงดันไฟฟ้าด้านบวกและลบโดยการต่อตัวต้านทาน 100  $\Omega$  ( $R_c$ ) อนุกรมกับวงจรที่แรงดันไฟฟ้าด้านบวกแล้วอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมด้วยโวลต์มิเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานจะมีค่าเท่ากับ 1 V ต่อกระแสที่จ่ายให้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ 10 mA ดังแสดงวงจรวัดกระแสแอมแปร์ในรูปที่ 3.10

### 3.1.4 การออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชัน

วงจรถัดไปเป็นตัวอย่างของวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชัน ประกอบด้วยส่วนสำคัญหลัก 2 ส่วน คือ วงจรตั้งเวลา ปิด-เปิดสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันเพื่อควบคุมเวลาในการกำเนิดรังสีเอกซ์ และวงจรถัดไปเป็นตัวอย่างของวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชัน ซึ่งเลือกใช้ไอซี TL494



รูปที่ 3.11 วงจรถัดไปเป็นตัวอย่างของวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชัน

การออกแบบวงจรถัดไปเป็นตัวอย่างของวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันใช้วงจรถัดไปเป็นตัวอย่างของวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันแบบโมโนสเตเบิลโดยเลือกใช้ไอซี HA17555 สามารถตั้งเวลาได้ 2 ค่า คือ 0.5 วินาที และ 1 วินาที ตั้งค่าเวลาด้วยวิธีการเปลี่ยนค่าตัวต้านทานที่ขา 6 ของไอซี HA17555 สัญญาณจะส่งไปควบคุมทรานซิสเตอร์ 2N2222 ที่เป็นตัวขับเคลื่อนของทรานซิสเตอร์ TIP32 ซึ่งทำหน้าที่เป็นสวิตช์หลักในการ ปิด- เปิด แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่จ่ายให้กับไอซี TL494 ในการกำเนิดสัญญาณ โดยสัญญาณทางออก (PWM a,b) มีลักษณะเป็นพัลส์รูปคลื่นสี่เหลี่ยมสามารถปรับความกว้างของพัลส์ได้ มีความถี่คงที่และสัญญาณด้านทางออก 2 สัญญาณ มีมุมเฟสต่างกัน 180 องศาทางไฟฟ้า ความถี่

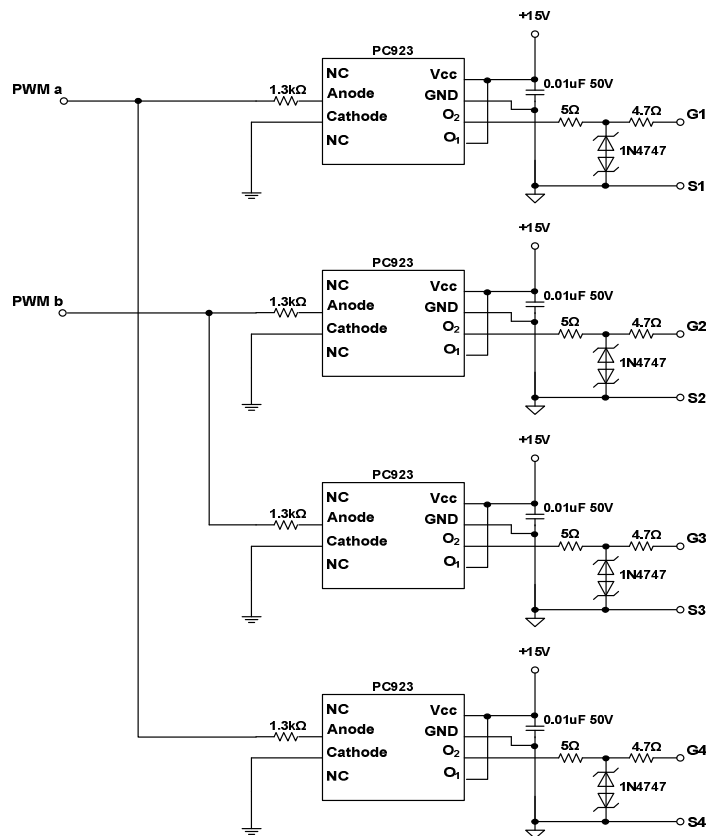
ของสัญญาณที่ได้จาก TL494 กำหนดได้ด้วยตัวต้านทานและตัวเก็บประจุซึ่งต่อภายนอกที่ขา 5 และขา 6 ของไอซี ดังวงจรในรูปที่ 3.11 ความถี่ในการทำงานสามารถคำนวณได้ดังนี้

เมื่อต้องการความถี่ในการทำงานที่ 100 kHz

$$f = \frac{1}{RC} \dots\dots\dots (3.6)$$

เลือก C = 0.001 uF จากสมการ 3.6 จะได้ค่า R = 10 kΩ แต่ในการทดลองขับหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงที่ออกแบบขึ้นต้องการแปรเปลี่ยนความถี่ได้กว้าง จึงเลือกใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ 10 kΩ และป้องกันกระแสกระชากขณะเริ่มทำงานโดยที่ขา 4 ของไอซี TL494 จะเป็น ขา soft-start ของไอซี จะใส่ตัวตัวเก็บประจรร่วมกับตัวต้านทานที่เป็นวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าไว้เพื่อช่วยลดการเปิดของสัญญาณพัลส์ขณะเริ่มทำงานฉับพลัน เป็นการป้องกันไม่ให้มอเตอร์กำลังของวงจรอินเวอร์เตอร์เสียหายขณะเริ่มทำงาน และการควบคุมดีวีดีไอเคิลของสัญญาณจะเป็นการปรับแรงดันไฟฟ้าที่ขา 3 ของไอซี โดยใช้วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าจากจุด P14

3.1.5 การออกแบบวงจรขับเกต (Gate Drive)

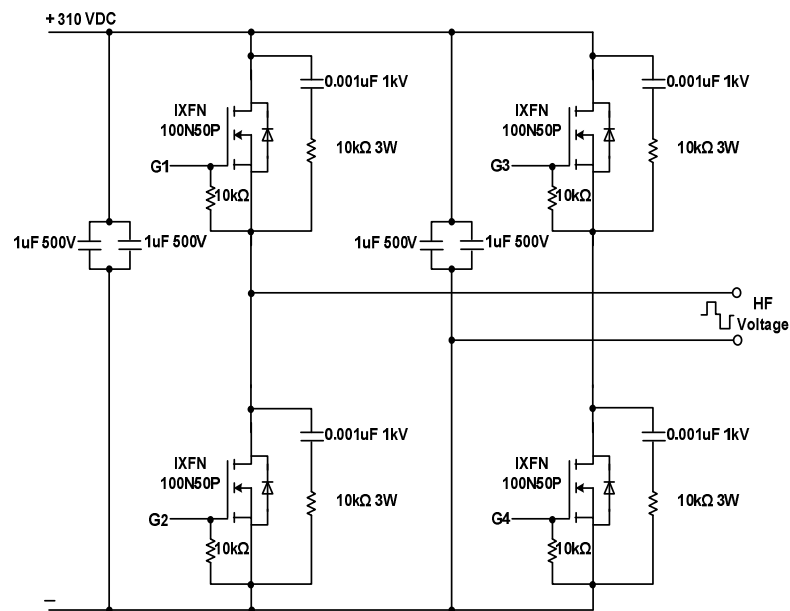


รูปที่ 3.12 วงจรขับเกตของมอเตอร์

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สวิตช์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ซึ่งเลือกใช้ MOSFET ทำงานที่ความถี่ 100 kHz ดังนั้นอุปกรณ์ขับเคลื่อนต้องเลือกให้เหมาะสมที่สามารถตอบสนองของความถี่สูงได้ งานวิจัยนี้เลือกใช้ไอซีขับเคลื่อนความเร็วสูง (high speed gate drive) เบอร์ PC923 ที่ประยุกต์ใช้สำหรับขับเคลื่อน MOSFET และไอซีพีที เนื่องจากใช้อินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ประกอบด้วย MOSFET 4 ตัว ดังนั้นจึงออกแบบวงจรขับเคลื่อนจำนวน 4 ชุด โดยแต่ละชุดจะมีแหล่งจ่ายไฟฟักระแสตรงให้กับไอซีขับเคลื่อนที่แยกกราวด์กัน (isolated ground) เพื่อป้องกันการลัดวงจรขณะขับเคลื่อน ได้ออกแบบสัญญาณที่จ่ายให้ขาเกตของ MOSFET นำกระแสไฟฟัที่แรงดันไฟฟ้า 15 V และให้หยุดนำกระแสไฟฟัที่แรงดันไฟฟ้า 0 V ทำงานตามสัญญาณความถี่และดีวีดีไซเคิลที่กำเนิดจากไอซี TL494 และออกแบบวงจรป้องกันแรงดันเกินที่จ่ายให้กับขาเกตของ MOSFET โดยใช้วงจรขลิบ (clip) สัญญาณ 2 ซีก ไม่ให้เกิน  $\pm 20$  V โดยใช้ไดโอดเบอร์ 1N4747 ต่ออนุกรมกัน 2 ตัว ขนานกับวงจรทางออกก่อนที่จะจ่ายให้ขาเกตของ MOSFET ดังในรูปที่ 3.12

### 3.1.6 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์

การแปลงผันไฟฟัจากแหล่งจ่ายไฟฟักระแสตรงเป็นไฟฟัแรงดันสูงความถี่สูงเลือกการทำงานแบบ LLC เรโซแนนท์คอนเวอร์เตอร์ชนิด parallel resonant ขับหม้อแปลงไฟฟัแรงดันสูงความถี่สูงด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ (full bridge)

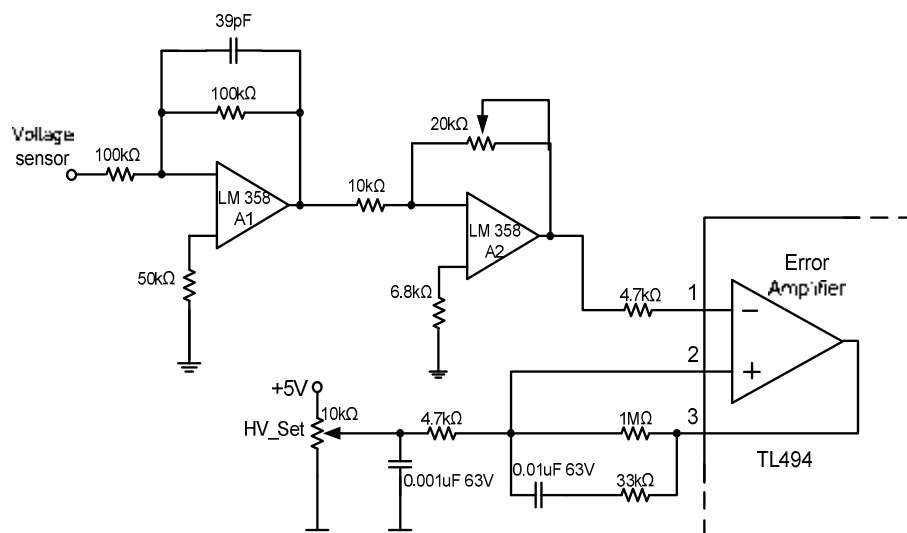


รูปที่ 3.13 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ที่มีวงจรนับเบอร์



วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริจด์ดังรูปที่ 3.13 ทำหน้าที่แปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงเพื่อขับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงผ่านขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรเรโซแนนท์ขนาด  $14 \mu\text{H}$  อุปกรณ์ที่นำมาใช้ทำหน้าที่เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์มีอยู่ 2 ชนิด คือ ไอจีบีทีและมอสเฟต งานวิจัยนี้ใช้มอสเฟตเนื่องจากมีการตอบสนองความถี่สูงกว่าไอจีบีทีและกำลังการสูญเสียต่ำ ได้เลือกใช้มอสเฟตเบอร์ IXYS 100N50P สามารถทนกระแสไฟฟ้าได้  $90 \text{ A}$  พิกัดแรงดันไฟฟ้า  $500 \text{ V}$  และได้ออกแบบวงจรสับเบอริให้กับมอสเฟตแต่ละตัว เพื่อทำหน้าที่ในการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการสวิตช์และป้องกันแรงดันไฟฟ้าจ่ายเกินพิกัดของมอสเฟต การออกแบบวงจรสับเบอรินี้จะใช้วงจร RC สับเบอริเท่านั้นไม่จำเป็นต้องใช้ไดโอดเนื่องจากภายในตัวมอสเฟตมีไดโอดที่ต่อคร่อมอยู่ระหว่างขาเดรน (D) และซอร์ส (S) อยู่แล้ว อย่างไรก็ตามขณะที่ขาเกตเปิดวงจรอยู่อาจเกิดประจุไฟฟ้าสะสมระหว่างขาเกตกับขาซอร์สเป็นผลทำให้มอสเฟตนำกระแสไฟฟ้าเองในขณะที่ยังไม่มีการจ่ายสัญญาณพัลส์วิตช์มอดูเลชันได้ หากมอสเฟตนำกระแสไฟฟ้าเองพร้อมกันจะเกิดการลัดวงจรของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้า กระแสไฟฟาลัดวงจรที่สูงมากจะผ่านตัวมอสเฟตทำให้มอสเฟตเสียหาย ดังนั้นเพื่อป้องกันเหตุดังกล่าวจะใส่ตัวต้านทาน  $10 \text{ k}\Omega$  ต่ออยู่ระหว่างขาเกตและซอร์สเพื่อใช้ในการคายประจุไม่ให้มอสเฟตนำกระแสของไม่จ่ายสัญญาณพัลส์วิตช์มอดูเลชัน

### 3.1.7 การออกแบบวงจรควบคุมไฟฟ้าแรงดันสูง

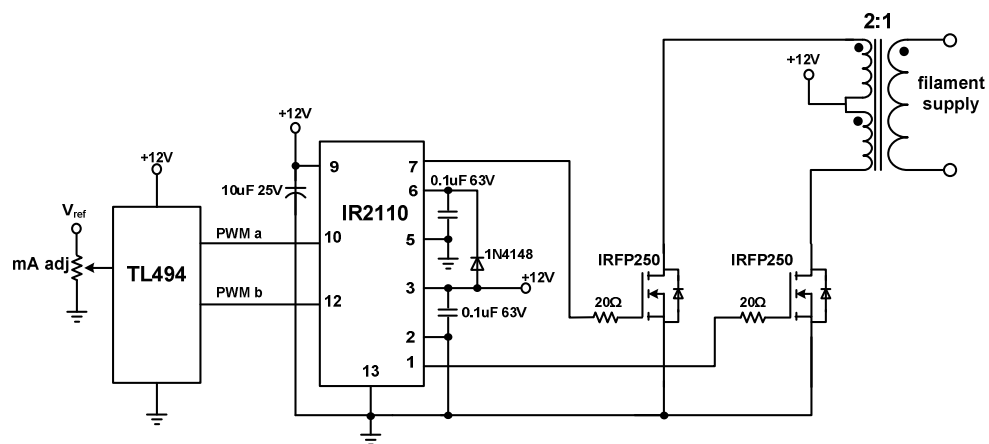


รูปที่ 3.14 วงจรควบคุมไฟฟ้าแรงดันสูง

วงจรควบคุมไฟฟ้าแรงดันสูงที่จ่ายให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์เพื่อควบคุมการกำเนิดรังสีเอกซ์แสดงในรูปแบบที่ 3.14 วงจรนี้ทำหน้าที่ปรับระดับไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงให้คงที่ตามค่าที่ตั้งไว้ การควบคุมแรงดันไฟฟ้าใช้หลักการควบคุมดิวตี้ไซเคิล (duty cycle) ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงผ่านวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยแรงดันไฟฟ้าลดทอนที่สุ่มได้จากวงจรแสดงผลแรงดันไฟฟ้าจะถูกกรองสิ่งรบกวนและส่งป้อนกลับ (feedback) เข้าที่ทางเข้า  $A_1$  เพื่อปรับเวลาในการตอบสนองของสัญญาณและปรับอัตราขยายสัญญาณด้วย  $A_2$  สัญญาณที่ได้จะส่งเข้าขา 1 ของไอซี TL494 เพื่อเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงที่ขา 3 ของไอซี TL494 ผลต่างของแรงดันที่ได้จาก Error Amplifier (ในไอซี TL494) จะควบคุมดิวตี้ไซเคิลที่ขา 3 ของไอซี TL494 ในวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันให้ทำการปรับชดเชยแรงดันไฟฟ้าสูงทางออกให้คงที่

### 3.2 การออกแบบแหล่งจ่ายสำหรับจุดไส้หลอด

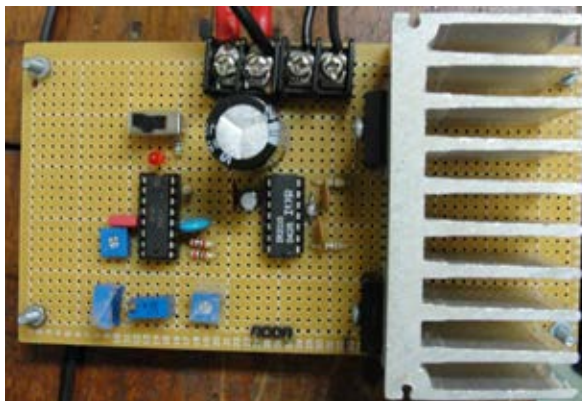
ระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำที่สร้างขึ้นออกแบบให้สามารถปรับแรงดันไฟฟ้าที่ 0-10  $V_{rms}$  จ่ายกระแสไฟฟ้าได้ 5 A ทำหน้าที่ในการจ่ายกระแสให้กับไส้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ เพื่อทำให้ไส้หลอดร้อนและปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากไส้หลอด วงจรนี้ประกอบด้วยวงจรย่อย 3 ส่วน ได้แก่ วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชัน วงจรขับเกต และอินเวอร์เตอร์แบบ พูช-พูล (push-pull) ดังวงจรรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำสำหรับจุดไส้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

การควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้านออกใช้การควบคุมดิวตี้ไซเคิล (Duty cycle) ระหว่าง 0-40% จากแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่ายด้านเข้า 24 VDC เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออก 0-10  $V_{rms}$  ที่ความถี่คงที่ 15 kHz โดยเลือกใช้ไอซี TL494 ในการกำเนิดสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันส่งสัญญาณให้

ไอซีขับเกต IR2110 เพื่อใช้ในการขับมอสเฟตเบอร์ IRFP 250N จำนวน 2 ตัว จัดการทำงานแบบ พุช-พูล สลับกันนำกระแสแต่ละครึ่งไซเคิลเพื่อจ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันต่ำ (step-down transformer) ที่มีอัตราส่วนจำนวนรอบ 2:1 แผงวงจรต้นแบบแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ภาพแผงวงจรขับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันต่ำสำหรับจุดได้หลอด

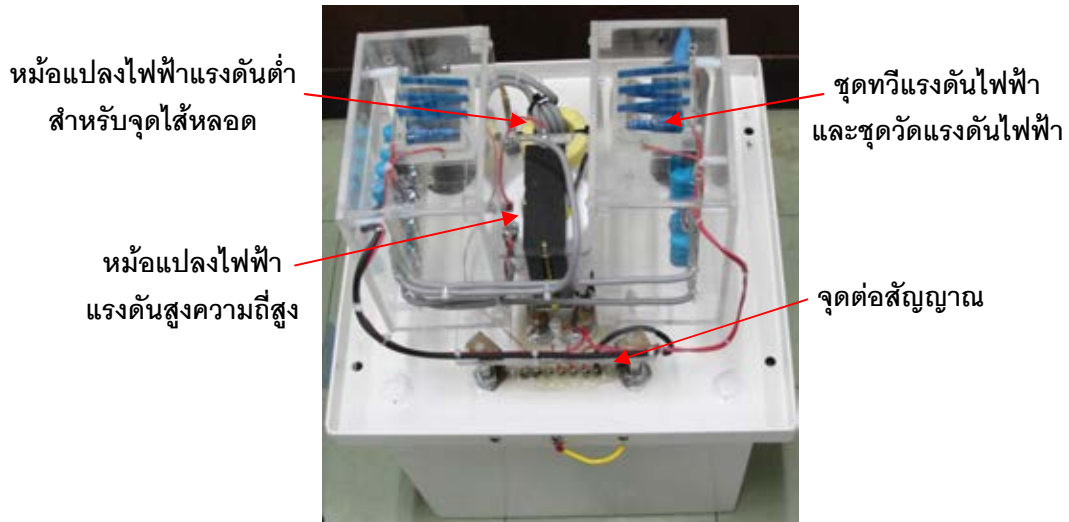
การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันต่ำจะต้องออกแบบให้สามารถทนแรงดันไฟฟ้าที่ชั่ว แคลโทดของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ไม่น้อยกว่า 50 kV ได้เลือกใช้แกนรูปทรงทอรอยด์ (toroidal shape) พันขดลวดทุติยภูมิและขดลวดปฐมภูมิอยู่ตรงข้ามกันของแกน ดังรูปที่ 3.17 ขดลวดปฐม ภูมิใช้ลวดทองแดงเคลือบฉนวน AWG#26 ร้อยอยู่ในท่อพลาสติกเพื่อเป็นฉนวนอีกชั้น และขดลวด ทุติยภูมิใช้สายไฟฟ้าทนแรงดันสูงขนาด 30 kV ในการพันเป็นขดลวด โดยหม้อแปลงอินเวอร์เตอร์ แบบพุช-พูลจะติดตั้งไว้ร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงและชุดวงจรทวิแรงดันไฟฟ้าในถังน้ำมัน



รูปที่ 3.17 ภาพหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันต่ำสำหรับจุดได้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

### 3.3 การประกอบถังบรรจุอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง

หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าแรงดันต่ำสำหรับจุดไล่หลอด ชุดทวีแรงดันไฟฟ้า และชุดวัตต์แรงดันไฟฟ้า จะประกอบประกอบรวมกันอยู่ในถังเหล็กบรรจุฉนวนน้ำมัน เพื่อป้องกันการอาร์ก ดังในรูป 3.18



รูปที่ 3.18 ภาพอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

ชุดทวีแรงดันไฟฟ้าและชุดวัตต์แรงดันไฟฟ้าจะถูกออกแบบใส่ไว้ในกล่องอะคริลิกหนา 5 มิลลิเมตร เจาะช่องให้น้ำมันฉนวนเข้าได้เพื่อป้องกันการอาร์กระหว่างชุดทวีแรงดันไฟฟ้าและชุดวัตต์แรงดันไฟฟ้ากับหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูงที่ติดตั้งใกล้กันบนส่วนของฝาถัง ส่วนของฝาถังด้านหนึ่งเป็นที่ติดตั้งขั้วไฟฟ้าต่อไฟฟ้าของแอโนดและแคโทดของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ อีกด้านหนึ่งติดตั้งขั้วต่อสัญญาณควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ภายในถัง ผนังถังเหล็กจะต่อกับระบบกราวด์เพื่อถ่ายประจุที่เกิดจากการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิตลงสู่พื้นดิน ป้องกันการดิสชาร์จประจุใส่ผู้ใช้งาน ขณะเดียวกันระบบถังโลหะปิดยังช่วยป้องกันการเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าแรงดันสูงไปรบกวนการทำงานของระบบอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมการกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงที่ติดตั้งอยู่นอกถังฉนวนน้ำมัน นอกจากนี้ผนังด้านในถังยังออกแบบให้คั่นด้วยผนังกล่องอะคริลิกหนา 5 มิลลิเมตร เพื่อเป็นฉนวนชั้นในป้องกันการอาร์กจากหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงและชุดทวีแรงดันไฟฟ้ากับผนังถังเหล็กที่เป็นระบบกราวด์ โครงสร้างของการติดตั้งอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงแสดงดังรูปที่ 3.19 เมื่อบรรจุน้ำมันฉนวนลงในถังน้ำมันแล้วถังบรรจุอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงจะถูกนำไปเข้าระบบสุญญากาศเพื่อดูดเอาฟองอากาศและความชื้นที่แทรกระหว่างฉนวนน้ำมันออกโดย

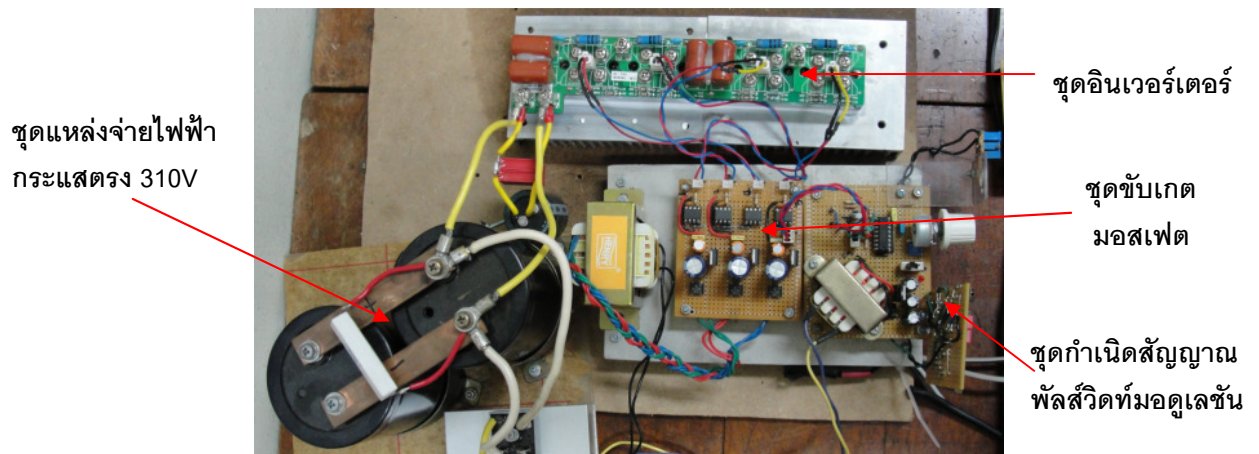
ใช้เวลาประมาณ 12 ชั่วโมง ก่อนการทดสอบการทำงานที่ไฟฟ้าแรงดันสูงเกิน 60 kV สำหรับน้ำหนักรวมของถังบรรจุอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงแบบฉนวนน้ำมันที่ออกแบบและสร้างขึ้นนี้มีน้ำหนัก 40 กิโลกรัม



รูปที่ 3.19 ภาพถังบรรจุอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงแบบฉนวนน้ำมัน

### 3.4 การประกอบระบบควบคุมการกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง

ระบบควบคุมการกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงประกอบด้วยวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ วิดท์มอดูเลชัน วงจรชั้บเกต ชุดอินเวอร์เตอร์ที่มีวงจรสับเบอ์ วงจรควบคุมไฟฟ้าแรงดันสูงและแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 310 V ประกอบรวมอยู่ด้วยกันดังในรูปที่ 3.20 ระบบควบคุมทั้งหมดติดตั้งอยู่นอกถังกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ระบบจะส่งสัญญาณชั้บจากวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อจ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงผ่านทางจุดต่อสัญญาณที่อยู่ด้านบนฝาถังฉนวนน้ำมัน และสัญญาณของชุดวัดแรงดันไฟฟ้าและชุดวัดกระแสไฟฟ้าจะส่งสัญญาณออกมาจากจุดต่อสัญญาณเพื่อใช้ในการควบคุมป้อนกลับในการปรับระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ตามค่าที่ตั้งไว้



รูปที่ 3.20 ภาพระบบควบคุมการกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

งานวิจัยเพื่อการพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงสำหรับเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ทางการแพทย์นี้ ได้มีการศึกษาออกแบบและสร้างส่วนต่างๆ ที่สำคัญต่อการกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับแอมป์ที่ปรับค่าได้จาก 40 -120 kV จ่ายกระแสแอมป์ได้ 20 mA ในการพัฒนาได้แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานเป็น 3 ส่วน คือ 1) การออกแบบระบบควบคุมการกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง ความถี่สูง หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง ความถี่สูง และแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับจุดให้หลอด 2) การสร้างและประกอบเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์แบบความถี่สูง 3) การทดสอบคุณภาพของรังสีเอกซ์ที่ผลิตได้ ในการทดลองเพื่อทดสอบระบบได้แบ่งขั้นตอนไว้ดังนี้

- ก. การทดสอบระบบควบคุมการกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง
- ข. การศึกษาและทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง
- ค. การทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับจุดให้หลอด
- ง. การทดสอบสมรรถนะระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง
- จ. การทดสอบคุณภาพของรังสีเอกซ์ที่ผลิตได้
- ฉ. การทดสอบถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์

#### 4.1 การทดสอบระบบควบคุมการกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง

การทดสอบการทำงานร่วมกันของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในระบบควบคุมการกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงประกอบด้วย วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชัน วงจรขับเคลื่อน วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์ วงจรควบคุมไฟฟ้าแรงดันสูงและแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เป็นการทดสอบสภาวะขับโหลดตัวต้านทาน เพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของสัญญาณ

##### 4.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง

เครื่องมือในการทดสอบการทำงานของวงจรรบบควบคุมการกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงประกอบด้วย

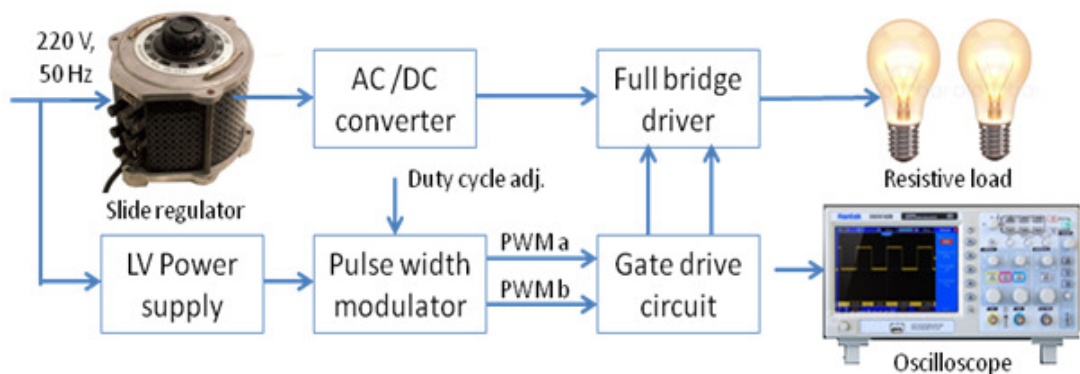
1. เครื่องอ่านรูปสัญญาณ (oscilloscope) ของ Hantek รุ่น DSO5202B
2. ดิจิทัลมัลติมิเตอร์ของ Sanwa รุ่น PC5000

3. สไลด์เรกกูเลเตอร์ 0-250 V ขนาดกำลัง 4 kW ของ Matsunaga
4. โหลดตัวต้านทานซึ่งใช้หลอดไฟฟ้านิตจุดไส้ขนาด 200 W, 220 V
5. ระบบควบคุมการกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงที่พัฒนาขึ้น

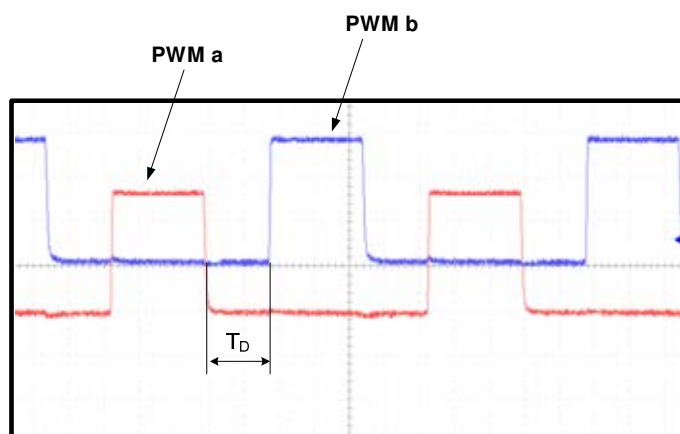
#### 4.1.2 การทดลองและผลการทดลอง

ก.) การทดสอบสัญญาณพัลส์วิตช์มอดูเลชัน

จัดระบบทดสอบดังแผนภาพในรูปที่ 4.1 ปรับสไลด์เรกกูเลเตอร์เพื่อให้ได้ไฟฟ้ากระแสตรง 220 VDC จากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและปรับความถี่ของวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ที่ 100 kHz อ่านรูปสัญญาณพัลส์วิตช์ที่ทางออกสัญญาณ PWM a และ PWM b ได้สัญญาณดังรูปที่ 4.2 จากนั้นแปรเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าควบคุมด้วยดีไซเคิล 0-40 % พร้อมทั้งอ่านคาบเวลาสัญญาณพัลส์วิตช์ ได้ความสัมพันธ์ตามตารางที่ 4.1 และเส้นกราฟในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.1 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบระบบควบคุมการกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง

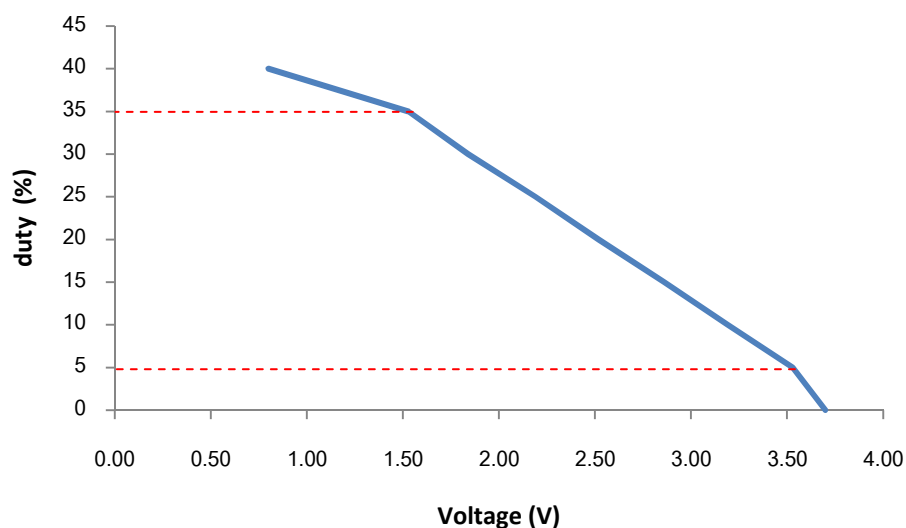


รูปที่ 4.2 สัญญาณพัลส์วิตช์จากวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์วิตช์มอดูเลชัน



ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าควบคุมกับดิวตี้ไซเคิล

แรงดันไฟฟ้า (V)	3.70	3.53	3.19	2.86	2.52	2.19	1.84	1.53	0.80
ดิวตี้ไซเคิล (%)	0	5	10	15	20	25	30	35	40

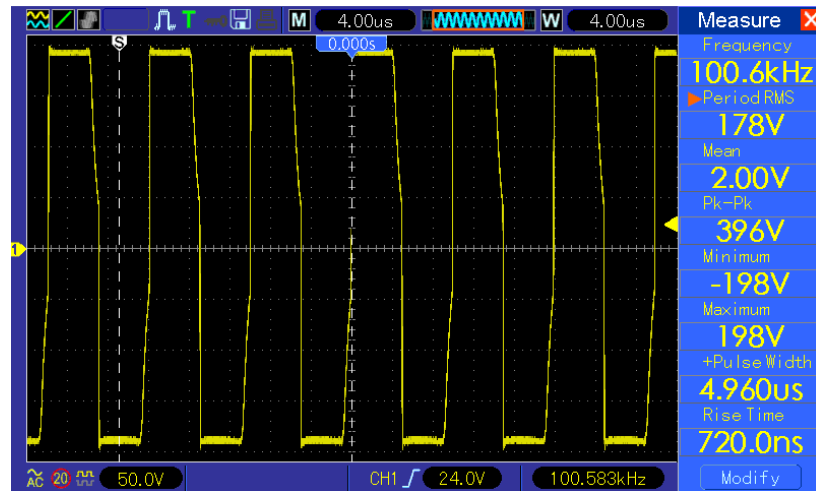


รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าควบคุมกับดิวตี้ไซเคิล

ผลการอ่านรูปสัญญาณพบว่ารูปสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชันทั้งสอง คือ PWM a และ PWM b สลับกันทำงานในช่วงเวลาที่ต่างกัน โดยสามารถปรับความกว้างของพัลส์ได้ (duty cycle) 0-40 % ที่ความถี่คงที่ 100 kHz และมีช่วงเวลาเดดไทม์ (dead time,  $T_D$ ) สำหรับป้องกันการลัดวงจรระหว่างแรงดันไฟฟ้าด้านบวกกับด้านลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้อินเวอร์เตอร์ และจากการทดสอบความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าควบคุมกับดิวตี้ไซเคิล 0-40 % พบว่ามีความเป็นเชิงเส้นสูงระหว่าง 5-35 %

#### ข.) การทดสอบการขับโหลดของวงจรฟูลบริดจ์

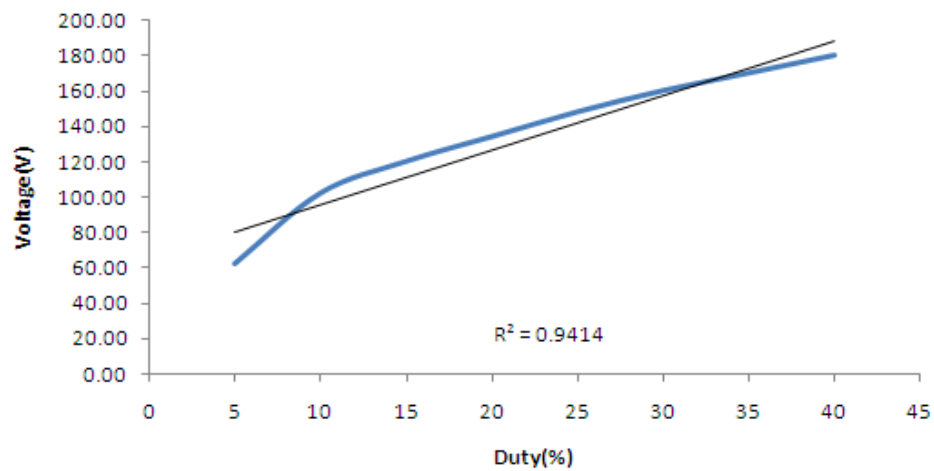
จัดอุปกรณ์ทดสอบและใช้เงื่อนไขทดสอบเช่นเดียวกับข้อ 4.1.2.ก ส่งสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันให้วงจรขับเกตมอสเฟตในวงจรฟูลบริดจ์เพื่อขับโหลดหลอดไฟฟ้า 200 W และอ่านรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโหลดได้ผลดังรูปที่ 4.4 จากนั้นแปรเปลี่ยนดิวตี้ไซเคิลที่วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์วิดท์จาก 5-40 % และอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าขับโหลดได้ความสัมพันธ์ตามตารางที่ 4.2 และเส้นกราฟในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขับโหลดหลอดไฟฟ้า

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของดิวตี้ไซเคิลกับแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมโหลด

ดิวตี้ไซเคิล (%)	5	10	15	20	25	30	35	40
แรงดันไฟฟ้า (V)	62	102	120	134	148	160	170	180



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ของดิวตี้ไซเคิลกับแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมโหลด

ผลการอ่านรูปสัญญาณพบว่ารูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงจากวงจรขับแบบฟูลบริดจ์ของระบบอินเวอร์เตอร์ที่ใช้มอสเฟตเป็นสวิตช์ มีรูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยมมีแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 396 V<sub>pp</sub> โดยมีความถี่และดิวตี้ไซเคิลเท่ากับสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชันจากวงจรกำเนิด

สัญญาณพัลส์วิดท์ จากการแปรเปลี่ยนดิวิตไชเคิลที่วงจรถ้าเนดสัญญาณพัลส์วิดท์จาก 5-40 % พบว่ามีความเป็นสัดส่วนกับแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมโหลด มีความเป็นเชิงเส้นโดย  $R = 0.94$

## 4.2 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง

การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงเป็นการทดสอบคุณลักษณะการตอบสนองของความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นใน 2 ลักษณะ คือ การตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลดและขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานร่วมกับวงจรถ้าเนดแรงดันไฟฟ้าในการแปลงผันไฟฟ้ากระแสลับความถี่สูงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงในรูปแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้า

### 4.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง

เครื่องมือในการทดสอบคุณลักษณะในการตอบสนองความถี่หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงของประกอบด้วย

1. เครื่องอ่านรูปสัญญาณ (oscilloscope) ของ Hantek รุ่น DSO5202B
2. โพรบวัดไฟฟ้าแรงดันสูง ของ Fluke รุ่น 80k-40
3. ดิจิทัลมัลติมิเตอร์ ของ Sanwa รุ่น PC5000
4. เครื่องวัด LCR ของ Hewlett Packard รุ่น 4262A
5. เครื่องกำเนิดรูปสัญญาณ
6. หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงที่สร้างขึ้น
7. ระบบควบคุมการกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงที่พัฒนาขึ้น

### 4.2.2 การทดลองและผลการทดลอง

ก.) การทดสอบตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า

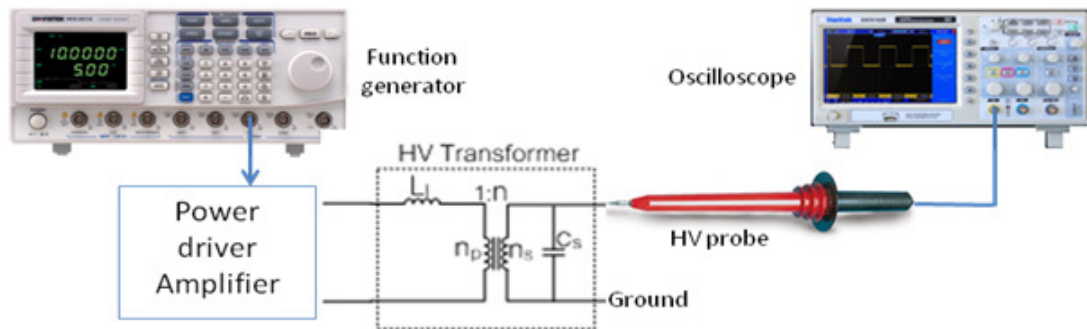
จัดอุปกรณ์ทดสอบดังแผนภาพรูปที่ 4.6 บ่อนแรงดันไฟฟ้ากระแสลับรูปคลื่นไซน์ที่มีขนาด  $2 V_{pp}$  คงที่จากเครื่องกำเนิดสัญญาณเข้าทางขดลวดปฐมภูมิและอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าทางออกที่ขดลวดทุติยภูมิด้วยเครื่องอ่านรูปสัญญาณ จากนั้นแปรเปลี่ยนความถี่พร้อมวัดแรงดันไฟฟ้าทางออกของหม้อแปลงและคำนวณอัตราขยาย ( $V_o/V_i$ ) ในสมการที่ 4.1

$$\frac{N_s}{N_p} = \frac{V_o}{V_i} \dots\dots\dots (4.1)$$

$N_s$  คือ จำนวนรอบขดลวดทุติยภูมิ

$N_p$  คือ จำนวนรอบขดลวดปฐมภูมิ

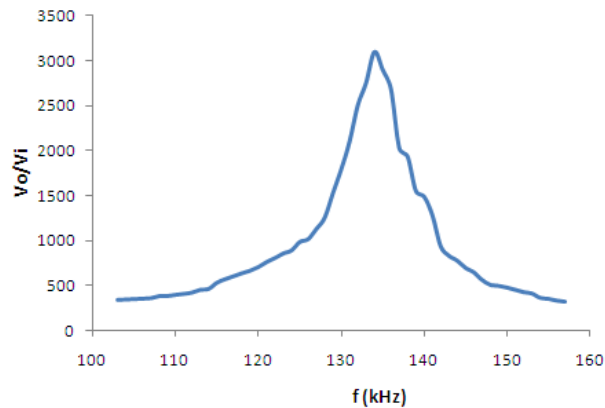
ได้ผลทดลองตามตารางที่ 4.3 และเส้นกราฟตอบสนองความถี่ช่วงเรโซแนนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 แผนภาพระบบทดสอบการตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้า

ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของความถี่และแรงดันไฟฟ้าทางออกของหม้อแปลงไฟฟ้า

ความถี่ (kHz)	อัตราขยาย ( $V_o/V_i$ )	ความถี่ (kHz)	อัตราขยาย ( $V_o/V_i$ )	ความถี่ (kHz)	อัตราขยาย ( $V_o/V_i$ )
102	333.5	120	756	138	1550
103	338	121	800	139	1485
104	342	122	850.5	140	1275
105	346.5	123	885	141	930
106	352.5	124	980	142	825
107	374	125	1010	143	770
108	376	126	1125	144	690
109	389.5	127	1250	145	640
110	400.5	128	1525	146	555
111	414.5	129	1790	147	500
112	445	130	2100	148	490
113	456.5	131	2505	149	470
114	525	132	2754.5	150	445
115	565	133	3100	151	420
116	597	134	2900	152	405
117	630	135	2685	153	356.5
118	658.5	136	2025	154	345
119	700	137	1935	155	325

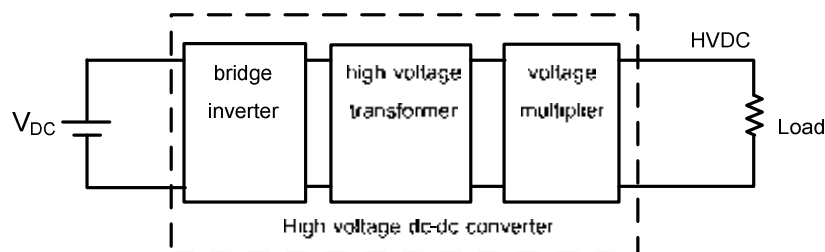


รูปที่ 4.7 เส้นกราฟตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า

ผลการทดลองได้ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับอัตราแรงดันไฟฟ้าทางออกต่อทางเข้าดัง กราฟรูปที่ 4.7 ซึ่งพบว่าหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลดจะมีอัตราเพิ่มแรงดันไฟฟ้า ( $V_o/V_i$ ) สูงสุดที่ ความถี่เรโซแนนซ์ 133 kHz ซึ่งสูงกว่าอัตราเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากอัตรารอบของหม้อแปลง ไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำทั่วไป

ข.) การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าทำงานร่วมกับวงจรทีวีแรงดันไฟฟ้า

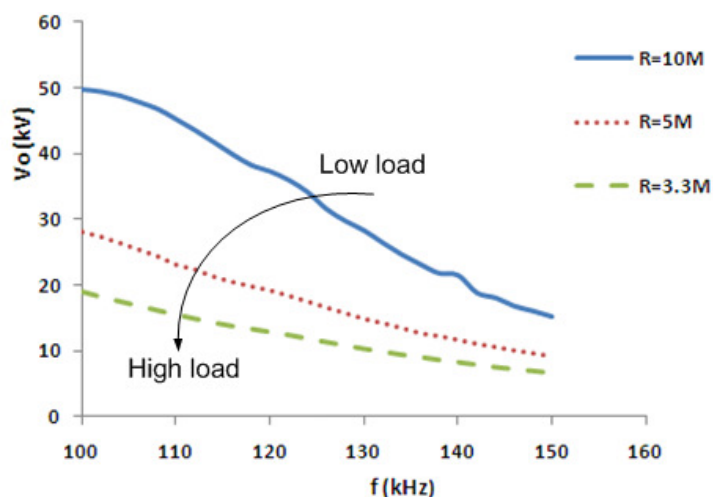
การทดสอบทำโดยประกอบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงและวงจรทีวีแรงดันไฟฟ้า 16 เท้า ซึ่งประกอบด้วยวงจรทีวีแรงดันไฟฟ้าด้านบวก 8 เท้า และวงจรทีวีแรงดันไฟฟ้าด้านลบ 8 เท้าและบรรจุลงในถังฉนวนน้ำมัน จากนั้นขับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ แบบฟูลบริดจ์ เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดตัวต้านทานในถังฉนวนน้ำมัน ดังแผนภาพระบบ ทดสอบรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แผนภาพระบบทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงขณะมีโหลด

จากการทดลองหาความถี่เรโซแนนซ์ด้วยแปรเปลี่ยนความถี่ของวงจรถูกกำเนิดพัลส์วิดท์และ วัดค่าแรงดันไฟฟ้าทางออกของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ประกอบขึ้น ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลด 10  $M\Omega$  พบว่าความถี่เรโซแนนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าจะเลื่อนต่ำลงอยู่ที่ 100 kHz เมื่อเลือกใช้งาน

หม้อแปลงในสถานะเหนือความถี่เรโซแนนซ์ (above resonance) จึงได้ทดสอบการขับโหลด  $10\text{ M}\Omega$  โดยเริ่มแปรเปลี่ยนความถี่จาก  $100\text{ kHz}$  และปรับแรงดันไฟฟ้าจ่ายโหลดเริ่มต้นที่  $50\text{ kV}$  เพื่อหาอัตราแรงดันไฟฟ้าที่สถานะเหนือความถี่เรโซแนนซ์ จากนั้นเปลี่ยนโหลดเป็น  $5\text{ M}\Omega$  และ  $3.3\text{ M}\Omega$  ตามลำดับ ได้ผลการทดลองดังกราฟรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 เส้นกราฟแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ความถี่และโหลดต่างกัน

ผลการทดลองพบว่าความถี่เรโซแนนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าเลื่อนต่ำลง เนื่องจากความจุแฝงในหม้อแปลงด้านขดทุติยภูมิเพิ่มขึ้นจากผลการขนานกับค่าความจุในวงจรที่แรงดันไฟฟ้าที่ทำงานร่วมกัน และจากการทดสอบการขับโหลดดังเส้นกราฟแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้าในรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าที่โหลดค่าความต้านทานต่ำแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกลดลง อย่างไรก็ตามบนความชันของเส้นกราฟสามารถเลือกใช้อัตราขยายของหม้อแปลงที่จุดหนึ่งและปรับชุดเซยแรงดันไฟฟ้าแก่โหลดด้วยการปรับความถี่ได้

#### 4.3 การทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับจุดไส้หลอด

การทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสลับสำหรับจุดไส้หลอดเป็นการทดสอบกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำแบบสวิตชิงความถี่สูงที่เพียงพอต่อการจ่ายกระแสไส้หลอดของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ตามเส้นกราฟคุณลักษณะเฉพาะทางเทคนิคของผู้ผลิต ในการควบคุมปริมาณของกระแสแอโนดรวมกับการตั้งเวลาในการถ่ายภาพรังสี หรือ เอกซ์โพเซอ์ mAs

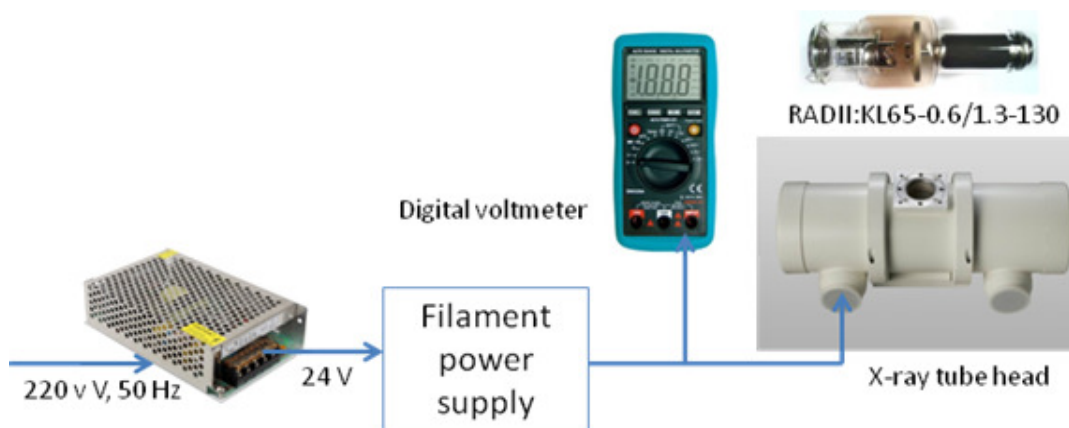
#### 4.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง

เครื่องมือในการทดสอบการทดสอบกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำแบบสวิตชิง ความถี่สูงประกอบด้วย

1. หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์
2. ดิจิทัลมัลติมิเตอร์ ของ Sanwa รุ่น PC5000
3. แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำแบบสวิตชิง 24 V 3A
4. แหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับจุดไส้หลอดที่พัฒนาขึ้น

#### 4.3.2 การทดลองและผลการทดลอง

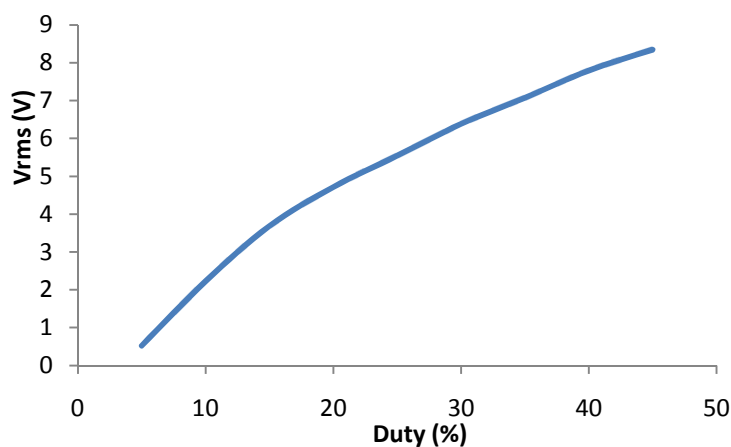
จัดอุปกรณ์ทดสอบดังแผนภาพรูปที่ 4.10 จากเส้นกราฟคุณลักษณะของกระแสวิกอินด และแรงดันไฟฟ้าจุดไส้หลอดของหลอดรังสีเอกซ์บริษัท RDII รุ่น KL65-0.6/1.3-130 ในภาคผนวก พบว่าต้องการแรงดันไฟฟ้าจุดไส้หลอดในย่าน 0-10 V การทดสอบความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าทำได้โดยแปรเปลี่ยนดิวิตีไซเคิลของแหล่งจ่ายไฟฟ้าจาก 0-8.34 V พร้อมทั้งวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขณะจุดไส้หลอดหรือจ่ายโหลด ได้ผลการทดลองตามตารางที่ 4.4 และเส้นกราฟในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.10 แผนภาพการจัดระบบทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้าจุดไส้หลอด

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบดิวิตีไซเคิลกับแรงดันไฟฟ้าขณะจุดไส้หลอด

ดิวิตีไซเคิล (%)	5	10	15	20	25	30	35	40	45
แรงดันไฟฟ้า ( $V_{rms}$ )	0.52	2.22	3.68	4.71	5.54	6.38	7.07	7.79	8.34



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างดิวตีไซเคิลกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ  
ไส้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

ผลการทดลองพบว่าแรงดันไฟฟ้าจุดไส้หลอดมีความสัมพันธ์กับการปรับดิวตีไซเคิลค่อนข้างเป็นเชิงเส้น สำหรับใช้เป็นข้อมูลในการควบคุมกระแสแอโนดแบบปิดวงจรต่อไป

#### 4.4 การทดสอบประสิทธิภาพของระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงจากเทคนิคสวิตชิงความถี่สูงในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ที่แรงดันไฟฟ้าแอโนด 40- 120 kV ขณะจุดไส้หลอดที่กระแสแอโนดคงที่

##### 4.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง

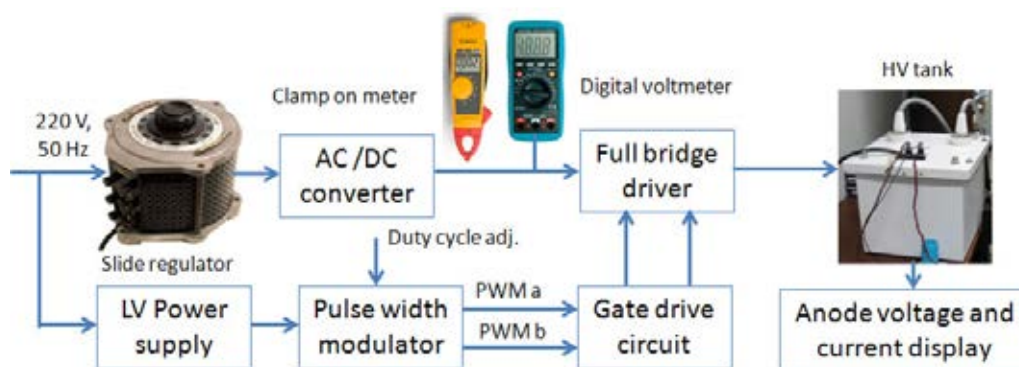
เครื่องมือในการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงประกอบด้วย

1. ดิจิทัลแคลมป์แอมป์มิเตอร์ของ Fluke รุ่น 365
2. ดิจิทัลมัลติมิเตอร์ ของ Sanwa รุ่น PC5000
3. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น
4. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำสำหรับจุดไส้หลอดที่พัฒนาขึ้น
5. ชุดวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น
6. หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์



#### 4.4.2 การทดลองและผลการทดลอง

จัดอุปกรณ์ทดสอบดังแผนภาพในรูปที่ 4.12 ทดสอบจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์โดยแปรเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า 40-120 kV ปรับกระแสแอโนดของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์คงที่ 10 mA ที่เวลา 0.5 s ทุกช่วงแรงดันไฟฟ้า อ่านค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางเข้าจากวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้าตรง พร้อมทั้งอ่านแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางออกจากวงจรแสดงผลไฟฟ้าแรงดันสูงและกระแสแอโนด ได้ผลการทดลองตามตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.12 แผนภาพการจักระบบทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

$V_o$ (kV)	$V_i$ (V)	$I_i$ (A)	$I_o$ (mA)	$\eta$ (%)
40	250	3.1	10	51.61
50	276	4.7	10	38.54
60	244	5.2	10	47.28
70	263	5.3	10	50.21
80	288	6.3	10	44.09
90	275	6.2	10	52.78
100	291	7.9	10	43.49
110	298	10.2	10	45.01
120	305	12.5	10	37.47

#### 4.5 การทดสอบคุณภาพของรังสีเอกซ์ที่ผลิตได้

การทดสอบคุณภาพของรังสีเอกซ์จากการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงแบบสวิตซิงที่ออกแบบและสร้างขึ้น เป็นการทดสอบวัดพลังงานรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องวัดพลังงานรังสีเอกซ์ ขณะที่จ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงที่ตั้งค่าไว้ให้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

##### 4.5.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง

เครื่องมือในการทดสอบคุณภาพของรังสีเอกซ์ที่ผลิตได้จากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงแบบสวิตซิงที่ออกแบบและสร้างขึ้น ประกอบด้วย

1. เครื่องวัดพลังงานรังสีเอกซ์ของ Radiation measurements รุ่น 240A
2. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น
3. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำที่พัฒนาขึ้น
4. ชุดวัดกระแสและแรงดันไฟที่พัฒนาขึ้น
5. หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

##### 4.5.2 การทดลองและผลการทดลอง

จัดระบบวัดดังรูปที่ 4.13 จัดระยะห่างระหว่างหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์กับเครื่องวัดพลังงานรังสีเอกซ์ที่ 50 เซนติเมตร แปรเปลี่ยนไฟฟ้าแรงดันสูงที่จ่ายให้แอมป์ในช่วง 40- 120 kV อ่านค่าพลังงานสูงสุดที่วัดได้จากเครื่องวัดพลังงาน ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.13 ภาพระบบวัดพลังงานรังสีเอกซ์

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบวัดพลังงานรังสีเอกซ์

แหล่งจ่ายไฟฟ้า (kV)	เครื่องวัดพลังงานรังสีเอกซ์ (keV)	ความคลาดเคลื่อน (%)
40	41	3.38
50	52	4.40
60	62	0.83
70	71	-1.16
80	81	2.08
90	91	1.64
100	103	3.57

ผลการทดสอบพบว่าค่าพลังงานที่ตั้งจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงมีความคลาดเคลื่อนจากผลการวัดด้วยเครื่องวัดพลังงานรังสีเอกซ์ไม่เกิน 4.5%

#### 4.6 การทดลองถ่ายภาพรังสีเอกซ์

การทดสอบถ่ายภาพรังสีเอกซ์เป็นการทดลองถ่ายภาพหุ่นจำลองด้วยเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงแบบสวิตชิงความถี่สูงที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ด้วยเงื่อนไขการถ่ายภาพเหมือนกัน

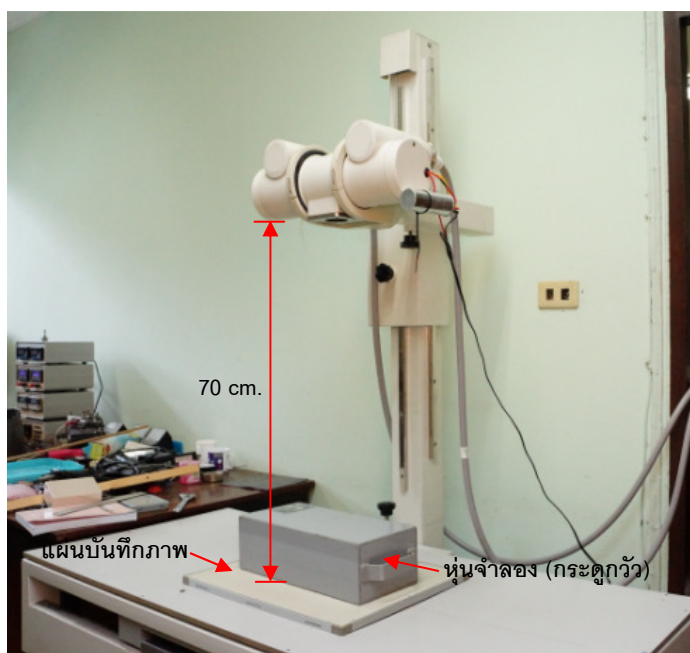
##### 4.6.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง

เครื่องมือในการทดสอบการถ่ายภาพรังสีเอกซ์ประกอบด้วย

1. แผ่นบันทึกภาพ Fujifilm รุ่น BAS-MS ขนาด 35x43 เซนติเมตร
2. เครื่องอ่านแผ่นภาพ Fujifilm รุ่น FLA-5100
3. หุ่นจำลองกระดูกวัว
4. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น
5. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำที่พัฒนาขึ้น
6. หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์
7. อุปกรณ์ถ่ายภาพรังสีเอกซ์

#### 4.6.2 การทดลองและผลการทดลอง

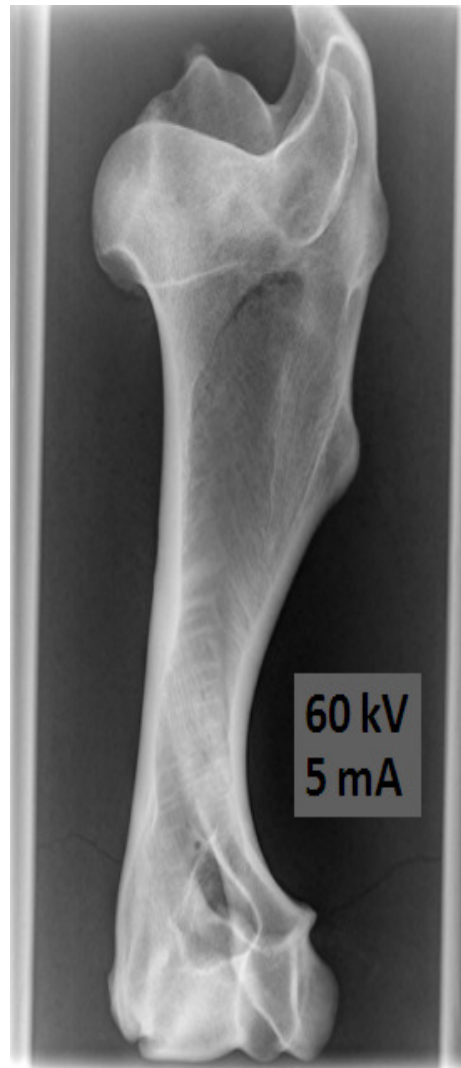
จัดระบบถ่ายภาพด้วยเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พัฒนาขึ้นดังรูปที่ 4.14 ทดลองถ่ายภาพหุ่นจำลองกระดูกวัวด้วยแผ่นบันทึกภาพ (imaging plate) ที่ระยะห่างระหว่างหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์และแผ่นบันทึกภาพ 70 เซนติเมตร โดยแปรเปลี่ยนไฟฟ้าแรงดันสูงระหว่าง 60 kV , 70 kV และ 80 kV ที่ Exposure 5 mAs ได้ผลของภาพถ่ายรังสีเอกซ์ดังรูปที่ 4.15 ถึง 4.17



รูปที่ 4.14 ภาพการจัดระบบถ่ายภาพรังสีเอกซ์



(ก) ภาพถ่ายจากระบบเครื่องกำเนิด  
รังสีเอกซ์ที่พัฒนาขึ้น

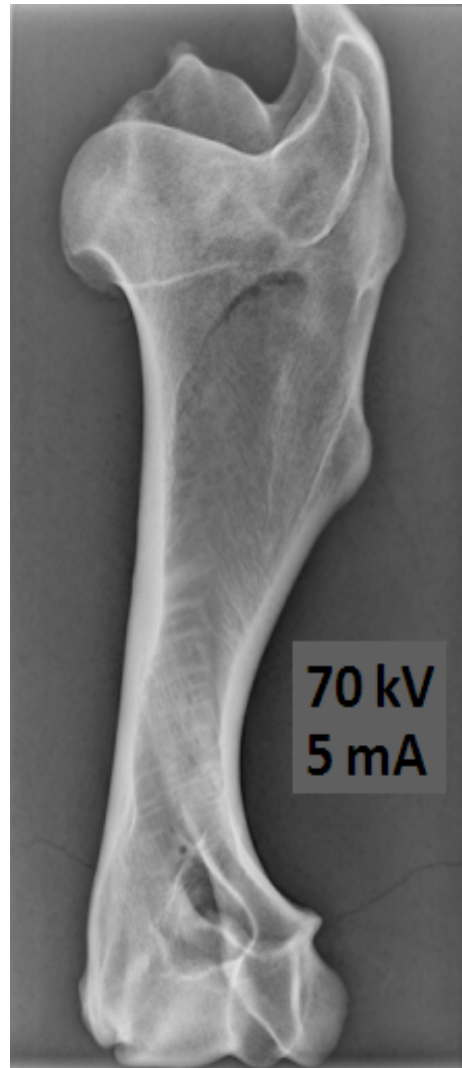


(ข) ภาพถ่ายจากระบบเครื่องกำเนิด  
รังสีเอกซ์ที่ผลิตในเชิงพาณิชย์

รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายหุ่นจำลองที่ 60 kV<sub>p</sub> และ Exposure 5 mAs จากระบบที่พัฒนาขึ้น  
เปรียบเทียบกับระบบเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ผลิตในเชิงพาณิชย์



(ก) ภาพถ่ายจากระบบเครื่องกำเนิด  
รังสีเอกซ์ที่พัฒนาขึ้น

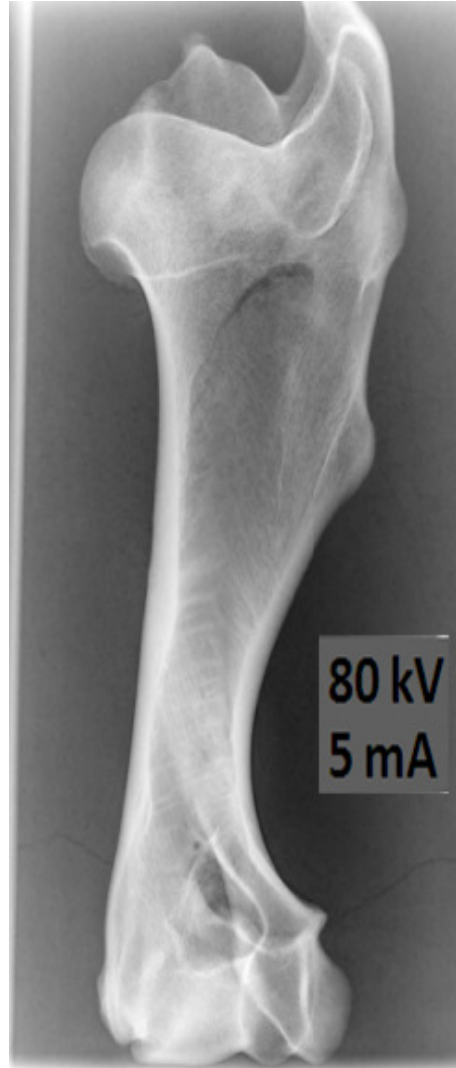


(ข) ภาพถ่ายจากระบบเครื่องกำเนิด  
รังสีเอกซ์ที่ผลิตใช้ในเชิงพาณิชย์

รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายหุ่นจำลองที่ 70 kV<sub>p</sub> และ Exposure 5 mAs จากระบบที่พัฒนาขึ้น  
เปรียบเทียบกับระบบเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ผลิตในเชิงพาณิชย์



(ก) ภาพถ่ายจากระบบเครื่องกำเนิด  
รังสีเอกซ์ที่พัฒนาขึ้น



(ข) ภาพถ่ายจากระบบเครื่องกำเนิด  
รังสีเอกซ์ที่ผลิตใช้ในเชิงพาณิชย์

รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายหุ่นจำลองที่ 80 kV<sub>p</sub> และ Exposure 5 mAs จากระบบที่พัฒนาขึ้น  
เปรียบเทียบกับระบบเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ผลิตใช้ในเชิงพาณิชย์

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การลดค่าความจุของตัวเก็บประจุแฝงในหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงซึ่งเกิดจากขดลวดทุติยภูมิที่มีจำนวนรอบมากเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลให้หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงถูกจำกัดการตอบสนองของความถี่สูงและมีประสิทธิภาพลดลง การลดค่าความจุของตัวเก็บประจุแฝงในหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง สามารถทำได้โดยเลือกใช้บอบบินที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำ เช่น เทฟลอนสำหรับพันขดลวดทุติยภูมิให้เป็นร่องหลายร่องแยกกัน นอกจากนี้ช่วยลดความจุของตัวเก็บประจุแฝงในหม้อแปลงไฟฟ้าแล้วยังช่วยลดแรงดันไฟฟ้าระหว่างชั้นขดลวดทุติยภูมิเพื่อป้องกันการอาร์คที่ไฟฟ้าแรงดันสูง ผลการวิจัยพบว่าหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นสามารถตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่ 133 kHz

5.1.2 อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าหม้อแปลงไฟฟ้าปกติจากอัตรารอบขดลวดที่ออกแบบไว้ ( $N_p/N_s$ ) เท่ากับ 1:30 แต่อัตราขยายแรงดันไฟฟ้า ( $N_p/N_s = V_o/V_i$ ) ที่ความถี่ เรโซแนนซ์สูงถึง 3100 เท่า ซึ่งสูงกว่าอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าปกติจากอัตรารอบขดลวดถึง 103 เท่า และที่ความถี่ทำงานพบว่าแรงดันไฟฟ้าทางออกขณะมีโหลดและไม่มีโหลดจะแตกต่างกันมาก จึงต้องจัดวงจรควบคุมความเสถียรของแรงดันไฟฟ้าปิดลูปให้ตอบสนองการปรับแรงดันไฟฟ้าที่รวดเร็ว

5.1.3 เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงทำงานร่วมกับวงจรทรีแรงดันไฟฟ้าพบว่าความถี่เรโซแนนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าเลื่อนต่ำลง เนื่องจากความจุแฝงในหม้อแปลงด้านขดทุติยภูมิเพิ่มขึ้นจากผลการขนานกับค่าความจุในวงจรทรีแรงดันไฟฟ้า แต่ยังสามารถทำงานที่ความถี่ 100 kHz

5.1.4 แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบสวิตชิงความถี่สูงสำหรับเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ทางการแพทย์ ที่พัฒนาขึ้นเลือกการทำงานแบบ LLC เรโซแนนซ์ขนาน ขั้วหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงด้วยอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ (full bridge) ที่ใช้มอสเฟตเป็นอุปกรณ์สวิตซ์กำลัง ควบคุมแรงดันด้านออกคงที่แบบพัลส์วิดท์มอดูเลชันและปรับค่าแรงดันไฟฟ้าด้วยการแปรเปลี่ยนดิวิตีไซเคิล ผลการทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นพบว่าสามารถกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง 40-120 kV ที่กระแสไฟฟ้า 20 mA ระบบมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบากว่าระบบที่ใช้ความถี่ต่ำ มีประสิทธิภาพเฉลี่ยที่ 45%



5.1.5 ผลการทดสอบการถ่ายภาพรังสีเอกซ์หุ่นจำลองด้วยเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงที่พัฒนาขึ้นพบว่าให้คุณภาพของภาพถ่ายทัดเทียมกับเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ เมื่อใช้เงื่อนไขการถ่ายภาพเหมือนกัน

## 5.2 วิจารณ์ผลการวิจัย

5.2.1 งานพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบสวิตชิงความถี่สูงซึ่งมีเป้าหมายที่จะใช้อุปกรณ์ที่หาได้ง่ายในประเทศเป็นหลัก แต่จากการดำเนินการวิจัยพบว่ามีข้อจำกัดด้านอุปกรณ์สำคัญ เช่น แกนเฟอร์ไรต์สำหรับสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง มอสเฟตที่มีอัตราทนกระแสไฟฟ้าเกิน 40 A ไดโอดสวิตซ์ที่ความถี่สูงและทนแรงดันไฟฟ้าสูงกว่า 10 kV รวมทั้งตัวเก็บประจุที่ทนแรงดันไฟฟ้าสูงระดับ 10 kV ไม่สามารถหาซื้อได้ในประเทศ

5.2.2 ในการทำงานแบบ LLC เรโซแนนซ์ขนาน การปรับค่าขดลวดเหนี่ยวนำอันดับด้านขดปฐมภูมิให้เหมาะสมกับความถี่เรโซแนนซ์ใช้งานเป็นสิ่งจำเป็น และการทำงานที่ความถี่สูงในการสวิตซ์แรงดันไฟฟ้าขับหม้อแปลงไฟฟ้าจะทำให้ระบบตอบสนองการปรับระดับแรงดันไฟฟ้าที่คาบเวลาสั้น ทำให้แรงดันไฟฟ้าทางออกมีความเสถียรและให้คุณภาพของรังสีเอกซ์สูง

5.2.3 แม้ว่าถึงบรรลุอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงแบบฉนวนน้ำมันจะมีขนาดและน้ำหนักน้อยกว่าถึงของระบบที่ใช้ความถี่ต่ำ แต่หากออกแบบให้ใช้ฉนวนแบบแก๊ส SF<sub>6</sub> เช่นเดียวกับเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ในทางอุตสาหกรรมจะสามารถลดน้ำหนักลงได้มาก แต่จะออกแบบถึงบรรลุอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงยุ่งยากขึ้น

5.2.4 ขนาดของถังบรรจุอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงยังมีขนาดใหญ่เนื่องจากยังมีปัญหาด้านการป้องกันการอาร์กที่ไฟฟ้าแรงดันสูงของชุดวงจรทวิแรงดันที่มีขนาดใหญ่และใช้พื้นที่การติดตั้งมาก

5.2.5 แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นยังไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าที่สูงได้เนื่องจากการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าด้วยวงจรทวิแรงดันหลายเท่า จึงจ่ายกระแสได้น้อยที่ระดับแรงดันไฟฟ้าทางออกของแหล่งจ่ายไฟฟ้ามีค่าสูง ดังนั้นถ้าใช้ถ่ายภาพรังสีเอกซ์ให้กับคนไข้ที่ต้องการถ่ายภาพที่ค่า Exposure มาก จะต้องเพิ่มเวลาในการถ่ายภาพเพื่อให้ได้ค่า Exposure ตามที่ต้องการ การเพิ่มเวลาในการถ่ายภาพจะทำให้ได้ภาพที่ไม่คมชัดเนื่องจากอวัยวะของคนไข้มีการเคลื่อนไหว

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ควรออกแบบระบบควบคุมกระแสของโหลดกำเนิดรังสีเอกซ์เพื่อควบคุมปริมาณรังสีเอกซ์ให้มีค่าคงที่เมื่อเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลดกำเนิดรังสีเอกซ์

5.3.2 ออกแบบระบบฉนวนหม้อแปลงใช้ก๊าซ SF<sub>6</sub> เป็นฉนวนแทนน้ำมันเพื่อตัวเครื่องจะได้มีน้ำหนักที่เบา

5.3.3 ควรมีการศึกษาและออกแบบขนาดของแกนหม้อแปลงให้มีขนาดเล็กที่สุดและเพียงพอต่อการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ต้องการเพื่อที่จะลดขนาดของแกนหม้อแปลง

5.3.4 ควรจะออกแบบให้โหลดกำเนิดรังสีเอกซ์อยู่ร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้าและวงจรวทิวแรงดัน จะเป็นการประหยัดต้นทุนการผลิตเนื่องจากไม่ต้องใช้สายเคเบิลไฟฟ้าแรงดันสูงที่ต่อระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงและโหลดกำเนิดรังสีเอกซ์

5.3.5 เพื่อที่จะออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงให้สามารถจ่ายกำลังได้สูงขึ้นและลดการอาร์กของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงควรออกแบบให้หม้อแปลงมีขดลวดทุติยภูมิหลายขด โดยแต่ละขดต่อเข้ากับวงจรวทิวแรงดันสองเท่าเพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าและนำวงจรวทิวแรงดันต่ออนุกรมกันเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายสูงขึ้น

## รายการอ้างอิง

- [1] Panichello, Josep J. X-ray repair : a comprehensive guide to the installation and servicing of radiographic equipment. 2<sup>nd</sup>ed. CHARLES C THOMAS PUBLISHER, LTD. 2004
- [2] Google. The 100 kHz High Frequency Story[Online]. Available from : <http://www.bennettxray.net/uploads/pdf/100kHzStory.pdf> [2012, September 10]
- [3] ฉัตรชัย อัสดาธร. การพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงแบบสวิตซิงสำหรับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ขนาด 100 กิโลโวลต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541
- [4] Shahid Iqbal, Rosli Besar and C. Venkataseshiah. A Low Ripple Voltage Multiplier for X-ray Power Supply. IEEE International Conference on Power Energy, 2008 PECon.IEEE 2<sup>nd</sup> International. pp.1451-1455. (December 2008)
- [5] Weitao Luo, Xu Wang. Development of Electric Control High Power Medical-Use X-ray Generator. ICIECS 2009. International conference. Vol.1-5. (December 2009)
- [6] Martin-Ramos J.A., Pernia A.M., Diaz J., Nuno F., Martinez J.A., Power supply for a high-voltage application. IEEE Transactions On Power Electronics. Vol.23, 1608-1619.(December 2009)
- [7] Chris Guy, Dominic ffytche. An Introduction to The Principles of Medical Imaging. Revised ed. USA : Imperial College Press, Inc. 2005
- [8] Stewart C. Bushong. Radiologic Science for Technologists Physics, Biology, and Protection. 8<sup>th</sup>ed. USA : Elsevier Mosby, Inc. 2004
- [9] Robert Cierniak. X-Ray Computed Tomography in Biomedical Engineering. 1<sup>st</sup>ed. USA : Springer, Inc. 2010
- [10] Fothergill J.C., Devine P.W., Lefley P.W. A novel prototype design for a transformer for high voltage, high frequency, high power use. IEEE transactions on power delivery. Vol. 16(1), 89-98.(January 2001)

- [11] Perez M.A., Blanco C., Rico M., Linera F.F. A new topology for high voltage, high frequency transformers. APEC'95 Conference Proceedings. Vol.2, 554-559.(March 1995)
- [12] Johnson S.D., Witulski A.F., Erickson R.W. Comparison of resonant topologies in high-voltage dc applications. IEEE transactions on aerospace and electronic systems. Vol.24, 263-274.(May 1988)

ภาคผนวก

# SHELL DIALA<sup>®</sup> OILS A & AX

## Electrical insulating oil

### Product Description

Shell DIALA<sup>®</sup> Oils A & AX meet standard specifications required by both ANSI/ASTM D 3487 and NEMA TR-P8-1975 for domestic electrical oil applications. These products have high electrical resistance and are thermally and oxidatively stable.

Two oils, designated Type I and Type II, are covered in these specifications. Type I oil is intended for use where normal oxidation resistance is required. Type II oil is for more severe service applications requiring greater oxidation resistance.

### Applications

- intended for use in transformers, circuit breakers, oil-filled switches and in X-ray equipment

### Features and Benefits

- proven product reliability
- manufactured under stringent quality control procedures
- excellent physical, chemical, and electrical properties
- two domestic refinery sources (Texas and California)

### Approvals and Recommendations

- ANSI/ASTM D 3487
- NEMA TR-P8-1975
- U.S. Government Military Specification VV-I-530A and Amendment 2 for Class I and Class II fluids (Type I and Type II, respectively); supersedes the Department of the Navy specification OS-1023
- NATO symbol S-756, British Standard BS 148:1972

Table 1/ Physical Properties of Shell DIALA A/AX Oils

	Test Method	ANSI/ASTM/NEMA Limits - Type I and II	DIALA A/AX Oils Typical Values
Aniline Point, °C	D 611	63-84	74
Color	D 1500	0.5 max	<0.5
Flash Point, °C	D 92	145 min	156
Interfacial Tension, dynes/cm @ 25°C	D 971	40 min	47
Pour Point, °C	D 97	-40 min	-47
Specific Gravity, 15/15°C	D 1298	0.91 max	0.885
Viscosity:	D 445/ D 88		
@ 0°C, cSt/SUS		76.0/350 max	62.3/288
@ 40°C, cSt/SUS		12.0/66 max	9.1/55.8
@ 100°C, cSt/SUS		3.0/36 max	2.31/33.9

SOC: 39-12/02

Visual Examination	D 1524	Clear & Bright	Clear & Bright
--------------------	--------	----------------	----------------

**Table 2/ Electrical Properties of Shell DIALA A/AX Oils**

	Test	ANSI/ASTM/NEMA	DIALA A/AX
	Method	Limits - Type I and II	Oils Typical Values
Dielectrical Breakdown Voltage @ 60 Hz, Disc electrodes, kV @ 60 Hz, VDE electrodes, kV 0.040 - inch (1.02 mm) gap 0.080 - inch (2.03 mm) gap	D 877	30 min	> 35
	D 1816 (1)	28 min	> 28
		56 min	> 56
Dielectric Breakdown Voltage Impulse @ 25°C, needle-to-sphere grounded 1-inch (25.4 mm) gap, kV	D 3300	145 min	> 180
Power Factor, 60 Hz: @ 25°C, % @ 100°C, %	D 924	0.05 max	0.003
		0.30 max	0.06
Gassing Tendency, $\mu\text{L}/\text{min}$	D 2300	+30 max	+12

(1). New, filtered, dehydrated and degassed oil.

**Table 3/ Chemical Properties of Shell DIALA A/AX Oils**

	Test Method	Requirement		Typical Values	
		Type I	Type II	DIALA A	DIALA AX
Oxidation Inhibitor Content, %w 2,6-ditertiary butyl paracresol	D 2668 or D 1473	0.08 max	0.3 max	None	0.23
Corrosive Sulfur	D 1275	Non-Corrosive		Non-Corrosive	
Water, ppm	D 1533	35 max	35 max	<30	<30
Neutralization No, mg KOH/g	D 974	0.03 max	0.03 max	<0.01	<0.01
Oxidation Stability @ 72 hrs. Sludge, %w TAN-C, mg KOH/g	D 2440	0.15 max	0.1 max	0.08	0.01
		0.5 max	0.3 max	0.33	0.01
Oxidation Stability @ 164 hrs. Sludge, wt% TAN-C, mg KOH/g	D 2440	0.3	0.2	0.10	0.01
		0.6	0.4	0.30	0.03
Oxidation Stability Rotating Bomb, min.	D 2112	N/A	195 min	N/A	220
PCB Content, ppm	D 4059	ND	ND	ND	ND

N/A- Not Applicable

ND - Not Detectable, which is reported as <2 ppm.

#### Storage Precautions

The critical electrical properties of **Diala Oils** are easily compromised by minute concentrations of contaminants. Typically encountered contaminants include moisture, particulates, fibers and surfactants. Therefore, it is imperative that electrical insulating oils be kept clean and dry. It is strongly recommended that

storage containers be dedicated for electrical oil service and include air-tight seals. It is further recommended that electrical insulating oils be stored indoors in climate controlled environments.

#### Handling & Safety Information

For information on the safe handling and use of this product, refer to its Material Safety Data Sheet at <http://www.equivashellmsds.com>. For more information and availability, call 1+800-782-7852 or visit the World Wide Web: <http://www.shell-lubricants.com/>.



## PolarHV™ HiPerFET IXFN 100N50P Power MOSFET

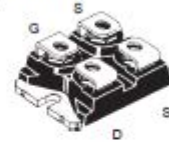
N-Channel Enhancement Mode  
Avalanche Rated  
Fast Intrinsic Diode



$$\begin{aligned} V_{DSS} &= 500 \text{ V} \\ I_{D25} &= 90 \text{ A} \\ R_{DS(on)} &\leq 49 \text{ m}\Omega \\ t_{tr} &\leq 200 \text{ ns} \end{aligned}$$

Symbol	Test Conditions	Maximum Ratings	
		Value	Unit
$V_{DSS}$	$T_J = 25^\circ\text{C}$ to $150^\circ\text{C}$	500	V
$V_{DSM}$	$T_J = 25^\circ\text{C}$ to $150^\circ\text{C}$ ; $R_{\theta(jc)} = 1 \text{ M}\Omega$	500	V
$V_{GS}$	Continuous	$\pm 30$	V
$V_{GSM}$	Transient	$\pm 40$	V
$I_{DM}$	$T_C = 25^\circ\text{C}$	90	A
$I_{DM(ESD)}$	External lead current limit	75	A
$I_{DM}$	$T_C = 25^\circ\text{C}$ , pulse width limited by $T_{JM}$	250	A
$I_{AM}$	$T_C = 25^\circ\text{C}$	100	A
$E_{AM}$	$T_C = 25^\circ\text{C}$	100	mJ
$E_{AS}$	$T_C = 25^\circ\text{C}$	5	J
$dv/dt$	$I_B \leq I_{DM}$ , $di/dt \leq 100 \text{ A}/\mu\text{s}$ , $V_{DS} \leq V_{DSM}$ $T_J \leq 150^\circ\text{C}$ , $R_{\theta(jc)} = 2 \Omega$	20	V/ns
$P_D$	$T_C = 25^\circ\text{C}$	1040	W
$T_J$		-55 ... +150	$^\circ\text{C}$
$T_{JM}$		150	$^\circ\text{C}$
$T_{Mg}$		-55 ... +150	$^\circ\text{C}$
$L_s$	1.6 mm (0.062 in.) from case for 10 s	300	$^\circ\text{C}$
$V_{RMS}$	50/60 Hz, RMS	$t = 1 \text{ min}$ 2500	V~
	$I_{RMS} \leq 1 \text{ mA}$	$t = 1 \text{ s}$ 3000	V~
$M_t$	Mounting torque	1.5 / 13	Nm/lb.in.
	Terminal connection torque	1.5 / 13	Nm/lb.in.
Weight	SOT-227B	30	g

miniBLOC, SOT-227 B (IXFN)  
E153432



G = Gate  
S = Source  
D = Drain

Either Source terminal S can be used as the Source terminal or the Kelvin Source (gate return) terminal.

### Features

- International standard package
- Encapsulating epoxy meets UL94 V-0, flammability classification
- miniBLOC with Aluminum nitride isolation
- † Fast recovery diode
- † Undamped Inductive Switching (UIS) rated
- † Low package inductance - easy to drive and to protect

Symbol	Test Conditions ( $T_J = 25^\circ\text{C}$ , unless otherwise specified)	Characteristic Values		
		Min.	Typ.	Max.
$BV_{DSS}$	$V_{GS} = 0 \text{ V}$ , $I_D = 3 \text{ mA}$	500		V
$V_{DS(ESD)}$	$V_{GS} = V_{DS}$ , $I_D = 8 \text{ mA}$	3.0		5.0 V
$I_{DSS}$	$V_{GS} = \pm 30 \text{ V}$ , $V_{DS} = 0$			$\pm 200 \text{ nA}$
$I_{DSS}$	$V_{DS} = V_{DSS}$ $V_{GS} = 0 \text{ V}$			25 $\mu\text{A}$ 2000 $\mu\text{A}$
$R_{DS(on)}$	$V_{GS} = 10 \text{ V}$ , $I_D = I_J$ , Note 1			49 m $\Omega$

### Advantages

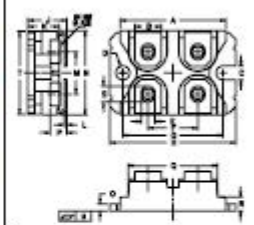
- † Easy to mount
- † Space savings
- † High power density



**IXYS** **IXFN 100N50P**

Symbol	Test Conditions	Characteristic Values (T <sub>j</sub> = 25° C, unless otherwise specified)		
		Min.	Typ.	Max.
$\beta_{sat}$	$V_{GS} = 20\text{ V}; I_D = I_T$ , Note 1	50	80	S
$C_{iss}$	$V_{GS} = 0\text{ V}, V_{DS} = 25\text{ V}, f = 1\text{ MHz}$		20	nF
$C_{oss}$			1700	pF
$C_{res}$			140	pF
$t_{spk0}$	$V_{GS} = 10\text{ V}, V_{DS} = 0.5 V_{DS(sat)}, I_D = I_T$ $R_{th} = 1\ \Omega$ (External)		36	ns
$t_r$			29	ns
$t_{spk1}$			110	ns
$t_f$			26	ns
$Q_{spk1}$	$V_{GS} = 10\text{ V}, V_{DS} = 0.5 V_{DS(sat)}, I_D = I_T$		240	nC
$Q_{sp2}$			96	nC
$Q_{sp3}$			78	nC
$R_{th(j-c)}$			0.12	°C/W
$R_{th(c-a)}$			0.05	°C/W

SOT-227B Outline



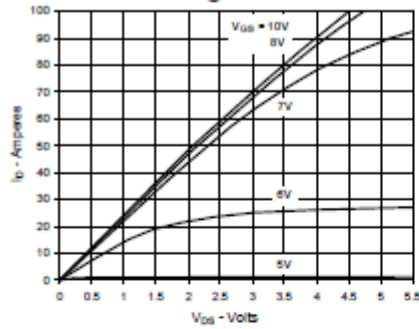
SYM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	1.240	1.255	31.53	31.88
B	0.7	0.8	17.81	20.32
C	0.16	0.19	4.09	4.79
D	0.16	0.19	4.09	4.79
E	0.16	0.19	4.09	4.79
F	0.07	0.08	1.78	2.03
G	0.06	0.07	1.52	1.78
H	1.496	1.525	38.00	38.71
J	0.460	0.48	11.68	12.22
K	0.20	0.20	5.08	5.08
L	0.28	0.31	7.15	7.87
M	0.95	0.95	24.13	24.13
N	0.95	1.00	24.13	25.40
O	0.78	0.84	19.81	21.33
P	0.15	0.25	3.81	6.35
Q	1.045	1.075	26.54	27.31
R	0.15	0.14	3.81	3.54
S	0.18	0.15	4.57	3.81
T	0.63	0.67	16.01	17.02
U	0.02	0.04	0.51	1.02

Symbol	Test Conditions	Characteristic Values (T <sub>j</sub> = 25° C, unless otherwise specified)		
		Min.	Typ.	Max.
$I_s$	$V_{GS} = 0\text{ V}$			100 A
$I_{DM}$	Repetitive			250 A
$V_{SO}$	$I_c = I_s, V_{GS} = 0\text{ V}$ , Note 1			1.5 V
$t_n$	$I_c = 25\text{ A}, -di/dt = 100\text{ A}/\mu\text{s}$ $V_{GS} = 100\text{ V}$			200 ns
$Q_{SM}$			0.6	$\mu\text{C}$
$I_{SM}$			6.0	A

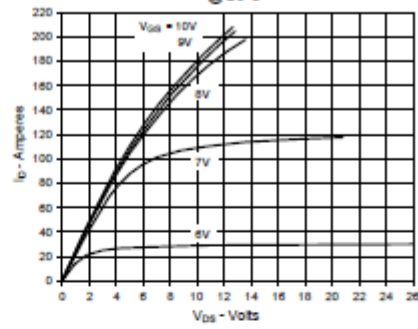
Notes:  
 1. Pulse test,  $t \leq 300\ \mu\text{s}$ , duty cycle  $d \leq 2\%$   
 Test current  $I_s = 50\text{ A}$

IXYS reserves the right to change limits, test conditions, and dimensions.  
 IXYS MOSFETs and IGBTs are covered by 4,635,592 4,921,044 5,048,991 5,237,491 6,182,965 8,404,085 B1 8,603,344 8,727,565  
 one or more of the following U.S. patents: 4,650,072 5,017,508 5,083,307 5,361,025 6,229,123 B1 8,534,343 8,710,405B2 8,759,892  
 4,661,106 5,034,796 5,187,117 5,486,715 6,308,728 B1 8,583,505 8,710,460 8,771,479 B2

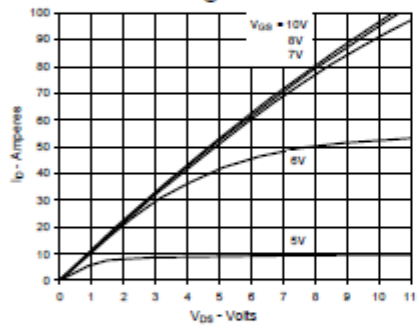
**Fig. 1. Output Characteristic**  
@ 25°C



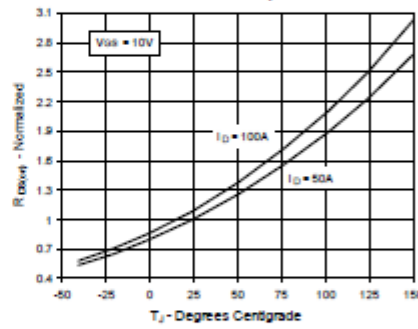
**Fig. 2. Extended Output Characteristic**  
@ 25°C



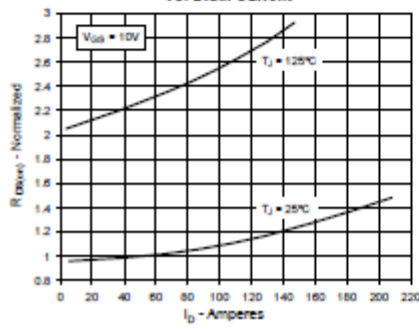
**Fig. 3. Output Characteristic**  
@ 125°C



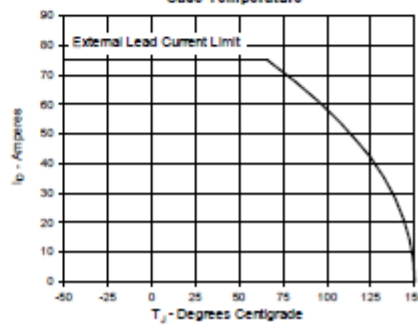
**Fig. 4.  $R_{DS(on)}$  Normalized to  $I_D = 60A$  Value vs. Junction Temperature**

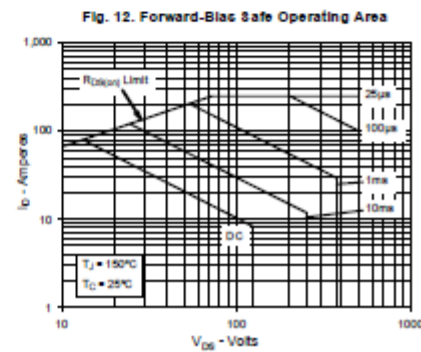
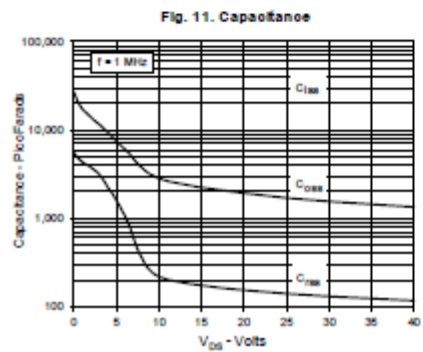
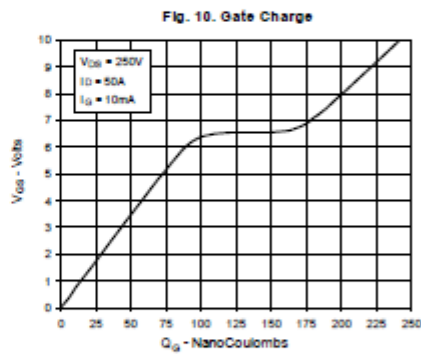
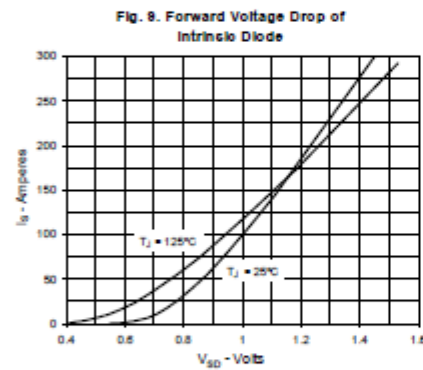
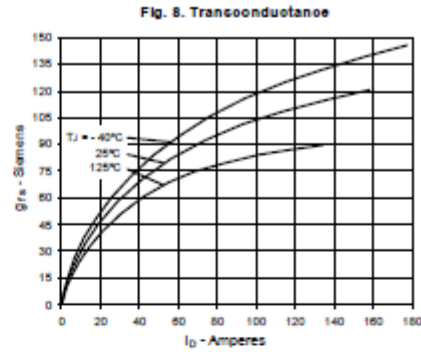
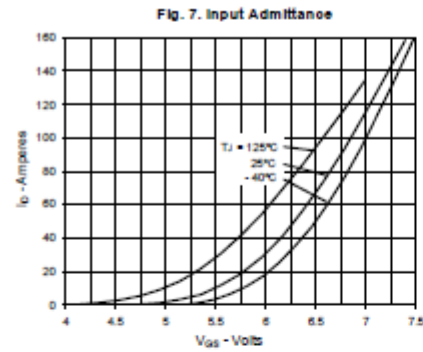


**Fig. 5.  $R_{DS(on)}$  Normalized to  $I_D = 60A$  Value vs. Drain Current**



**Fig. 6. Maximum Drain Current vs. Case Temperature**

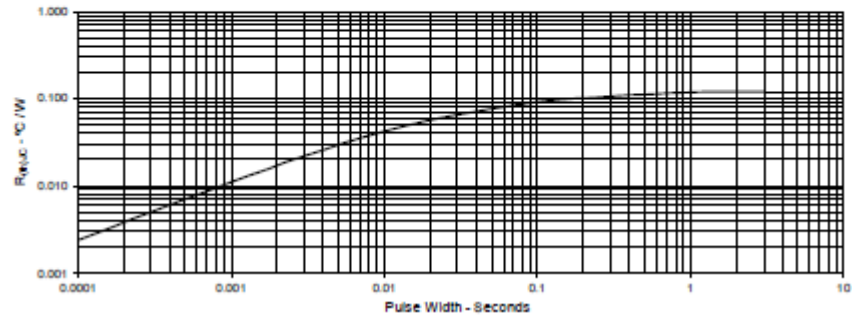




IXYS reserves the right to change limits, test conditions, and dimensions.



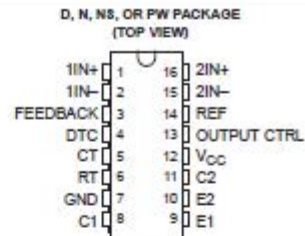
Fig. 13. Maximum Transient Thermal Resistance



## TL494 PULSE-WIDTH-MODULATION CONTROL CIRCUITS

SLV8074B – JANUARY 1985 – REVISED JULY 1999

- Complete PWM Power Control Circuitry
- Uncommitted Outputs for 200-mA Sink or Source Current
- Output Control Selects Single-Ended or Push-Pull Operation
- Internal Circuitry Prohibits Double Pulse at Either Output
- Variable Dead Time Provides Control Over Total Range
- Internal Regulator Provides a Stable 5-V Reference Supply With 5% Tolerance
- Circuit Architecture Allows Easy Synchronization



### description

The TL494 incorporates all the functions required in the construction of a pulse-width-modulation (PWM) control circuit on a single chip. Designed primarily for power-supply control, this device offers the flexibility to tailor the power-supply control circuitry to a specific application.

The TL494 contains two error amplifiers, an on-chip adjustable oscillator, a dead-time control (DTC) comparator, a pulse-steering control flip-flop, a 5-V, 5%-precision regulator, and output-control circuits.

The error amplifiers exhibit a common-mode voltage range from  $-0.3\text{ V}$  to  $V_{CC} - 2\text{ V}$ . The dead-time control comparator has a fixed offset that provides approximately 5% dead time. The on-chip oscillator can be bypassed by terminating RT to the reference output and providing a sawtooth input to CT, or it can drive the common circuits in synchronous multiple-rail power supplies.

The uncommitted output transistors provide either common-emitter or emitter-follower output capability. The TL494 provides for push-pull or single-ended output operation, which can be selected through the output-control function. The architecture of this device prohibits the possibility of either output being pulsed twice during push-pull operation.

The TL494C is characterized for operation from  $0^{\circ}\text{C}$  to  $70^{\circ}\text{C}$ . The TL494I is characterized for operation from  $-40^{\circ}\text{C}$  to  $85^{\circ}\text{C}$ .

FUNCTION TABLE

INPUT TO OUTPUT CTRL	OUTPUT FUNCTION
$V_i = \text{GND}$	Single-ended or parallel output
$V_i = V_{ref}$	Normal push-pull operation



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production procuring does not necessarily include testing of all parameters.

**TEXAS  
INSTRUMENTS**

POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

Copyright © 1999, Texas Instruments Incorporated

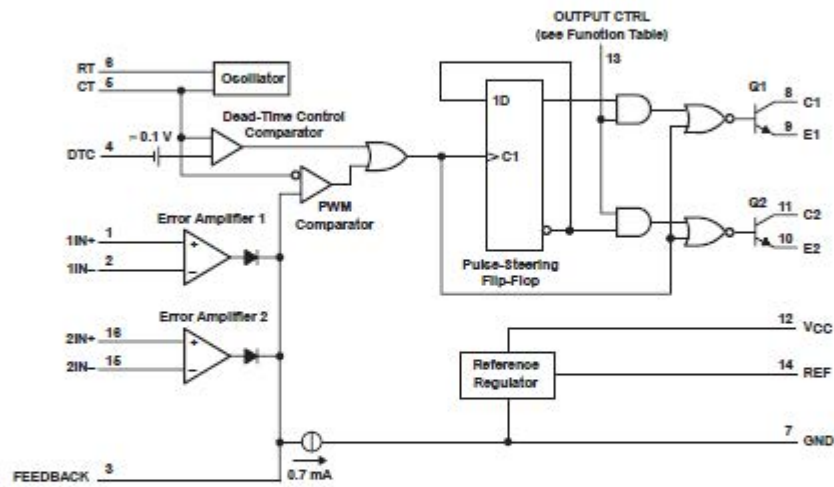
**TL494**  
**PULSE-WIDTH-MODULATION CONTROL CIRCUITS**

SLV9374B – JANUARY 1983 – REVISED JULY 1999

AVAILABLE OPTIONS					
T <sub>A</sub>	PACKAGED DEVICES				CHIP FORM (Y)
	SMALL OUTLINE (D)	PLASTIC DIP (N)	SMALL OUTLINE (NS)	SHRINK SMALL OUTLINE (PW)	
0°C to 70°C	TL494CD	TL494CN	TL494CNS	TL494CPW	TL494Y
-40°C to 85°C	TL494ID	TL494IN	—	—	—

The D, NS, and PW packages are available taped and reeled. Add the suffix R to device type (e.g., TL494CDR). Chip forms are tested at 25°C.

functional block diagram



## TL494

### PULSE-WIDTH-MODULATION CONTROL CIRCUITS

SLY9274B – JANUARY 1983 – REVISED JULY 1999

absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)<sup>†</sup>

		TL494	UNIT	
Supply voltage, $V_{CC}$ (see Note 1)		41	V	
Amplifier input voltage, $V_i$		$V_{CC}+0.3$	V	
Collector output voltage, $V_O$		41	V	
Collector output current, $I_O$		250	mA	
Package thermal impedance, $\theta_{JA}$ (see Notes 2 and 3)	D package	73	°C	
	N package	88		
	NS package	64		
	PW package	108		
Lead temperature 1.6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds		D, N, or PW package	260	°C
Storage temperature range, $T_{stg}$			-65 to 150	°C

<sup>†</sup> Stresses beyond those listed under "absolute maximum ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under "recommended operating conditions" is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

- NOTES:
- All voltage values, except differential voltages, are with respect to the network ground terminal.
  - Maximum power dissipation is a function of  $T_J(\max)$ ,  $\theta_{JA}$ , and  $T_A$ . The maximum allowable power dissipation at any allowable ambient temperature is  $P_D = (T_J(\max) - T_A)/\theta_{JA}$ . Operating at the absolute maximum  $T_J$  of 150°C can impact reliability.
  - The package thermal impedance is calculated in accordance with JEDEC 51, except for through-hole packages, which use a trace length of zero.

recommended operating conditions

	TL494		UNIT	
	MIN	MAX		
Supply voltage, $V_{CC}$	7	40	V	
Amplifier input voltage, $V_i$	-0.3	$V_{CC}-2$	V	
Collector output voltage, $V_O$		40	V	
Collector output current (each transistor)		200	mA	
Current into feedback terminal		0.3	mA	
Oscillator frequency, $f_{OSC}$	1	300	kHz	
Timing capacitor, $C_T$	0.47	10000	nF	
Timing resistor, $R_T$	1.8	500	kΩ	
Operating free-air temperature, $T_A$	TL494C	0	70	°C
	TL494I	-40	85	



POST OFFICE BOX 855303 • DALLAS, TEXAS 75285

## TL494 PULSE-WIDTH-MODULATION CONTROL CIRCUITS

SLV9274B – JANUARY 1983 – REVISED JULY 1999

electrical characteristics over recommended operating free-air temperature range,  $V_{CC} = 15\text{ V}$ ,  $f = 10\text{ kHz}$  (unless otherwise noted)

### reference section

PARAMETER	TEST CONDITIONS†	TL494C, TL494I			UNIT
		MIN	TYP‡	MAX	
Output voltage (REF)	$I_O = 1\text{ mA}$	4.75	5	5.25	V
Input regulation	$V_{CC} = 7\text{ V to }40\text{ V}$	2		25	mV
Output regulation	$I_O = 1\text{ mA to }10\text{ mA}$	1		15	mV
Output voltage change with temperature	$\Delta T_A = \text{MIN to MAX}$	2		10	mV/V
Short-circuit output current‡	REF = 0 V		25		mA

† For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions.

‡ All typical values, except for parameter changes with temperature, are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

§ Duration of the short circuit should not exceed one second.

oscillator section,  $C_T = 0.01\ \mu\text{F}$ ,  $R_T = 12\ \text{k}\Omega$  (see Figure 1)

PARAMETER	TEST CONDITIONS†	TL494, TL494I			UNIT
		MIN	TYP‡	MAX	
Frequency			10		kHz
Standard deviation of frequency‡	All values of $V_{CC}$ , $C_T$ , $R_T$ , and $T_A$ constant		100		Hz/kHz
Frequency change with voltage	$V_{CC} = 7\text{ V to }40\text{ V}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$		1		Hz/kHz
Frequency change with temperature‡	$\Delta T_A = \text{MIN to MAX}$			10	Hz/kHz

† For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions.

‡ All typical values, except for parameter changes with temperature, are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

§ Standard deviation is a measure of the statistical distribution about the mean as derived from the formula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x_n - \bar{X})^2}{N - 1}}$$

¶ Temperature coefficient of timing capacitor and timing resistor are not taken into account.

### error-amplifier section (see Figure 2)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	TL494, TL494I			UNIT
		MIN	TYP‡	MAX	
Input offset voltage	$V_O(\text{FEEDBACK}) = 2.5\text{ V}$		2	10	mV
Input offset current	$V_O(\text{FEEDBACK}) = 2.5\text{ V}$		25	250	nA
Input bias current	$V_O(\text{FEEDBACK}) = 2.5\text{ V}$		0.2	1	$\mu\text{A}$
Common-mode input voltage range	$V_{CC} = 7\text{ V to }40\text{ V}$		-0.3 to $V_{CC}-2$		V
Open-loop voltage amplification	$\Delta V_O = 3\text{ V}$ , $R_L = 2\ \text{k}\Omega$ , $V_O = 0.5\text{ V to }3.5\text{ V}$		70	95	dB
Unity-gain bandwidth	$V_O = 0.5\text{ V to }3.5\text{ V}$ , $R_L = 2\ \text{k}\Omega$		800		kHz
Common-mode rejection ratio	$\Delta V_O = 40\text{ V}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$		65	80	dB
Output sink current (FEEDBACK)	$V_{ID} = -15\text{ mV to }-5\text{ V}$ , $V(\text{FEEDBACK}) = 0.7\text{ V}$		0.3	0.7	mA
Output source current (FEEDBACK)	$V_{ID} = 15\text{ mV to }5\text{ V}$ , $V(\text{FEEDBACK}) = 3.5\text{ V}$		-2		mA

‡ All typical values, except for parameter changes with temperature, are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .



## TL494 PULSE-WIDTH-MODULATION CONTROL CIRCUITS

SLS074B – JANUARY 1983 – REVISED JULY 1989

electrical characteristics over recommended operating free-air temperature range,  $V_{CC} = 15\text{ V}$ ,  $f = 10\text{ kHz}$ ,  $T_A = 25^\circ\text{C}$  (unless otherwise noted)

### reference section

PARAMETER	TEST CONDITIONS†	TL494Y			UNIT
		MIN	TYP‡	MAX	
Output voltage (REF)	$I_O = 1\text{ mA}$		5		V
Input regulation	$V_{CC} = 7\text{ V to }40\text{ V}$		2		mV
Output regulation	$I_O = 1\text{ mA to }10\text{ mA}$		1		mV
Short-circuit output current‡	REF = 0 V		25		mA

† All typical values, except for parameter changes with temperature, are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

‡ Duration of the short circuit should not exceed one second.

### oscillator section, $C_T = 0.01\ \mu\text{F}$ , $R_T = 12\text{ k}\Omega$ (see Figure 1)

PARAMETER	TEST CONDITIONS†	TL494Y			UNIT
		MIN	TYP‡	MAX	
Frequency			10		kHz
Standard deviation of frequency§	All values of $V_{CC}$ , $C_T$ , $R_T$ , and $T_A$ constant		100		Hz/kHz
Frequency change with voltage	$V_{CC} = 7\text{ V to }40\text{ V}$		1		Hz/kHz

† All typical values, except for parameter changes with temperature, are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

§ Standard deviation is a measure of the statistical distribution about the mean as derived from the formula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2}{N - 1}}$$

### error-amplifier section (see Figure 2)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	TL494Y			UNIT
		MIN	TYP‡	MAX	
Input offset voltage	$V_O$ (FEEDBACK) = 2.5 V		2		mV
Input offset current	$V_O$ (FEEDBACK) = 2.5 V		25		nA
Input bias current	$V_O$ (FEEDBACK) = 2.5 V		0.2		$\mu\text{A}$
Open-loop voltage amplification	$\Delta V_O = 3\text{ V}$ , $R_L = 2\text{ k}\Omega$ , $V_O = 0.5\text{ V to }3.5\text{ V}$		95		dB
Unity-gain bandwidth	$V_O = 0.5\text{ V to }3.5\text{ V}$ , $R_L = 2\text{ k}\Omega$		800		kHz
Common-mode rejection ratio	$\Delta V_O = 40\text{ V}$		80		dB
Output sink current (FEEDBACK)	$V_{ID} = -15\text{ mV to }-5\text{ V}$ , $V$ (FEEDBACK) = 0.7 V		0.7		mA

† All typical values, except for parameter changes with temperature, are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .



POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

## TL494 PULSE-WIDTH-MODULATION CONTROL CIRCUITS

SLV9074B – JANUARY 1983 – REVISED JULY 1999

electrical characteristics over recommended operating free-air temperature range,  $V_{CC} = 15\text{ V}$ ,  $f = 10\text{ kHz}$  (unless otherwise noted)

### output section

PARAMETER	TEST CONDITIONS	TL484, TL494Y			UNIT
		MIN	TYP†	MAX	
Collector off-state current	$V_{CE} = 40\text{ V}$ , $V_{CC} = 40\text{ V}$		2	100	$\mu\text{A}$
Emitter off-state current	$V_{CC} = V_C = 40\text{ V}$ , $V_E = 0$		-100		$\mu\text{A}$
Collector-emitter saturation voltage	Common emitter	$V_E = 0$ , $I_C = 200\text{ mA}$	1.1	1.3	V
	Emitter follower	$V_{O(C1\text{ or }C2)} = 15\text{ V}$ , $I_E = -200\text{ mA}$	1.5	2.5	
Output control input current	$V_I = V_{ref}$			3.5	mA

† All typical values except for temperature coefficient are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

### dead-time control section (see Figure 1)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	TL484, TL494Y			UNIT
		MIN	TYP†	MAX	
Input bias current (DEAD-TIME CTRL)	$V_I = 0\text{ to }5.25\text{ V}$		-2	-10	$\mu\text{A}$
Maximum duty cycle, each output	$V_I$ (DEAD-TIME CTRL) = 0, $C_T = 0.1\ \mu\text{F}$ , $R_T = 12\text{ k}\Omega$		45%		
Input threshold voltage (DEAD-TIME CTRL)	Zero duty cycle		3	3.3	V
	Maximum duty cycle		0		

† All typical values except for temperature coefficient are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

### PWM comparator section (see Figure 1)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	TL484, TL494Y			UNIT
		MIN	TYP†	MAX	
Input threshold voltage (FEEDBACK)	Zero duty cycle		4	4.5	V
Input sink current (FEEDBACK)	$V$ (FEEDBACK) = 0.7 V	0.3	0.7		mA

† All typical values except for temperature coefficient are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

### total device

PARAMETER	TEST CONDITIONS	TL484, TL494Y			UNIT
		MIN	TYP†	MAX	
Standby supply current	$R_T = V_{ref}$ , All other inputs and outputs open	$V_{CC} = 15\text{ V}$	6	10	mA
		$V_{CC} = 40\text{ V}$	9	15	
Average supply current	$V_I$ (DEAD-TIME CTRL) = 2 V, See Figure 1		7.5		mA

† All typical values except for temperature coefficient are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

### switching characteristics, $T_A = 25^\circ\text{C}$

PARAMETER	TEST CONDITIONS	TL484, TL494Y			UNIT
		MIN	TYP†	MAX	
Rise time	Common-emitter configuration, See Figure 3		100	200	ns
Fall time		25	100		
Rise time	Emitter-follower configuration, See Figure 4		100	200	ns
Fall time		40	100		

† All typical values except for temperature coefficient are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .



POST OFFICE BOX 955303 • DALLAS, TEXAS 75295



**TL494**  
**PULSE-WIDTH-MODULATION CONTROL CIRCUITS**

SLV9274B – JANUARY 1983 – REVISED JULY 1999

**PARAMETER MEASUREMENT INFORMATION**

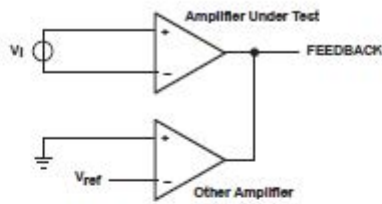
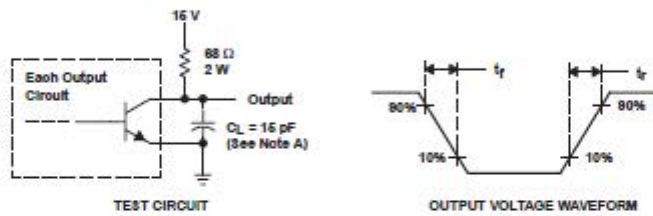
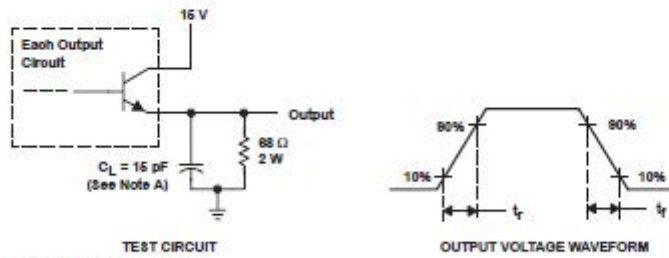


Figure 2. Amplifier Characteristics



NOTE A:  $C_L$  includes probe and jig capacitance.

Figure 3. Common-Emitter Configuration









NOTE A:  $C_L$  includes probe and jig capacitance.

Figure 4. Emitter-Follower Configuration

## Rotating X-ray tube

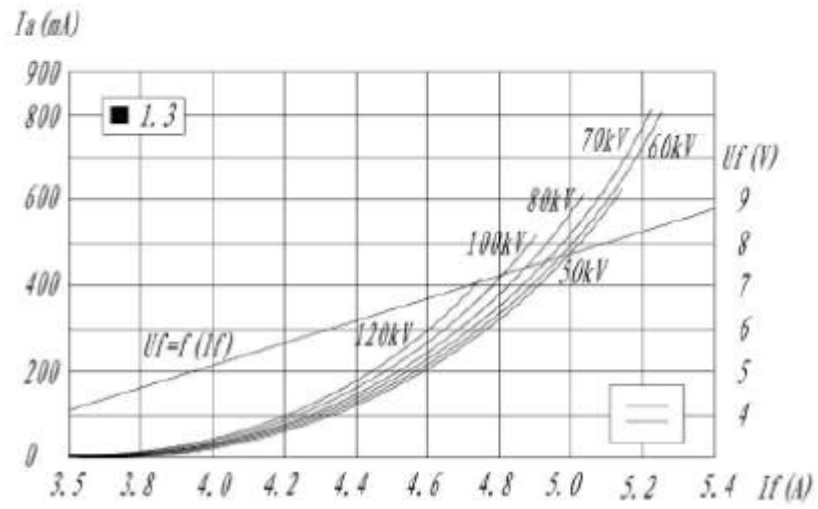
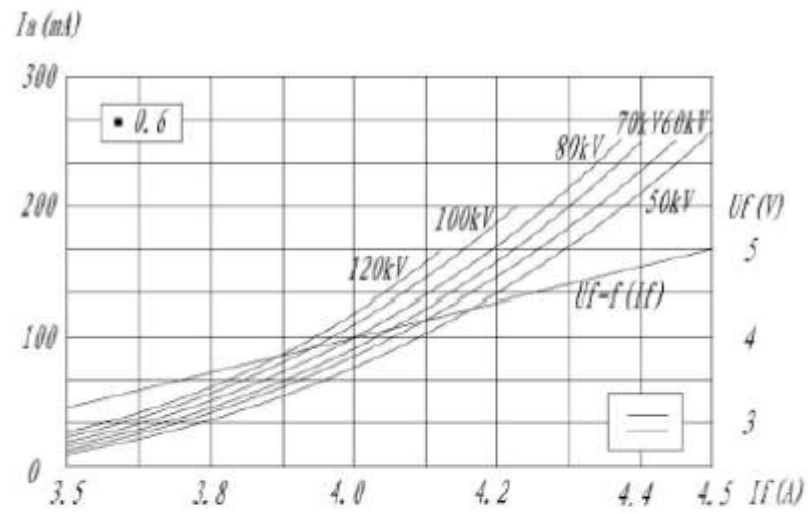
**Technical Data**

Property	Specification		Standard
Type	KL65-0.6/1.3-130		
Nominal input power(s) of the anode	F 1	F 2	IEC 60613
			
	11 kW(50Hz)	32kW(50Hz)	
Anode heat storage capacity	75.6kJ(107 kWh)		IEC 60613
Maximum cooling capacity of the anode	300W		
Anode material	Rhenium-Tungsten-TZM (RTM)		
Anode top coating material	Rhenium-Tungsten (RT)		
Target angle (Ref: reference axis) X-ray tube and X-ray tube assembly	15°		IEC 60788
Focal spot nominal value(s) Ref: Reference axis	F1 (small focus)	F2 (large focus)	IEC 60336
	0.6 	1.3 	

X-ray tube nominal voltage	130 kV		IEC 60613
Data on cathode heating	≈ /AC, < 20 kHz		
	F 1	F 2	
			
Max. current	5.4A	5.4 A	
Max voltage	≈7 V	≈13 V	
Data on anode drive Anode rotary frequency	50Hz		

Operation Limits	Transport and Storage Limits
Ambient temperature	From 10 °C to 40 °C
Relative humidity	From 30 % to 75 %
Barometric pressure	From 700 hPa to 1060hPa

Emission curves of the cathode



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพงศกร กองผัด เกิดวันที่ 21 พฤศจิกายน พ.ศ. 2530 ที่จังหวัดน่าน ได้รับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตเกียรตินิยมอันดับสอง สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์กำลัง จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553