

การศึกษาการออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง สำหรับหลอดเอ็กซเรย์

ศิริโรตม์ เกตุแก้ว *

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

ถนนรามคำแหง หัวหมาก บางกะปิ กรุงเทพฯ 10240. E – mail : siseerot@eng.ru.ac.th, siseerot@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาการออกแบบและการสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงแบบสวิตชิ่ง สำหรับหลอดเอ็กซเรย์ ซึ่งใช้หลักการของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์และใช้ไอซี SG3526 ควบคุมการทำงานของเพาเวอร์มอสเฟตเบอร์ K1342 โดยออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์ให้ทำงานที่ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ต ผ่านหม้อแปลงฟลายแบค เพื่อให้ได้ไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงขนาด 65 กิโลโวลต์ โดยนำไปประยุกต์ใช้กับหลอดเอ็กซเรย์ในเครื่องเอ็กซเรย์ขนาดเล็ก

คำสำคัญ : เอ็กซเรย์, ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์, สวิตชิ่ง

Siseerot Ketkaew *

Faculty of Engineering, Ramkhamhaeng University (RU), Bangkok, Bangkok Thailand 10240

E-mail siseerot@hotmail.com

Abstract

This research presents a study of design and construction of high voltage DC switching power supply for x-ray tube. The high voltage generating circuit is based on a flyback converter. The converter was designed to operate at 50 kHz switching frequency through a high frequency flyback transformer. The circuit is capable of producing up to 65 kV_{DC} by adapting the x-ray tube in small x-ray apparatus.

Keywords : x-ray, flyback converter, switching

บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีด้านต่างๆ ได้มีการพัฒนาเป็นอย่างมาก รวมถึงเรื่องของการนำไฟฟ้า กระแสตรงแรงดันสูงมาใช้ประโยชน์ เช่น ทางทางการแพทย์ใช้สำหรับเครื่องฉายรังสีต่างๆ เครื่องผลิต ก๊าซไอโซน ประโยชน์ทางด้านเทคนิค ใช้ทดลองเกี่ยวกับวัสดุเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีและ ฟิสิกส์ เช่น ทำคริสตัลโพลิทีลีน โดยการฉายรังสีลงบนวัสดุนั้น การพ่นสีโดยใช้อิเล็กโตรสแตติกส์ เครื่องกรองเขม่าควัน และเครื่องคัดแยกพลาสติกด้วยไฟฟ้าสถิตแรงสูง เป็นต้น เพราะฉะนั้น การศึกษาหลักการการทำงานการออกแบบและการสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงแบบสวิตซ์ จึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อพัฒนาแหล่งจ่ายให้มีประสิทธิภาพที่สูงและมีขนาดเล็กลง

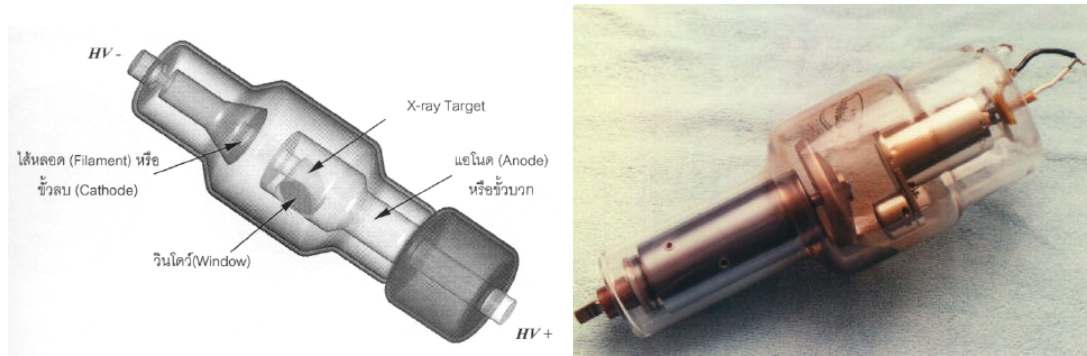
ดังนั้นในบทความวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากการออกแบบ และการพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้า กระแสตรงแรงสูงความถี่สูงแบบฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ โดยนำหม้อแปลงฟลายแบคมาใช้จ่าย แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงให้กับหลอดอิเล็กตรอน เพื่อนำมาใช้กับเครื่องเอกซเรย์ขนาดเล็ก ทั่วๆไป

ทฤษฎี

หลอดรังสีเอกซ์

การทำงานของหลอดรังสีเอกซ์เริ่มจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าแรงดันต่ำเข้าไปยังไส้หลอดทำให้ไส้หลอดร้อนขึ้น ส่งผลให้อิเล็กตรอนหลุดจากผิวของไส้หลอดเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ภายในหลอดรังสีเอกซ์ (Space Charge) ซึ่งไส้หลอดนี้โดยส่วนใหญ่จะเป็น ทังสเตน (Tungsten) เนื่องจาก Tungsten จะมีค่า Work Function อยู่ในกลุ่มที่ต่ำ จึงสามารถปล่อยอิเล็กตรอนได้ง่าย อีกทั้งยังมีจุดหลอมเหลวสูง (3,370 degree C) ทำให้สามารถทนต่อความร้อนที่เกิดจากการเกิด อันตรกิริยาได้ดี เมื่อเร่งอิเล็กตรอนด้วยไฟฟ้าศักดาสูง (High Voltage) ทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดออก จากไส้หลอดซึ่งเป็นขั้วลบ (Cathode) วิ่งไปยังขั้วบวก (Anode) โดยอิเล็กตรอนจะทำอันตรกิริยากับ เป้า (Target) หรือ แอโนด (Anode) (ใช้ Tungsten เนื่องจากสามารถระบายความร้อนได้ดีและอาจใช้ ทองแดงช่วยระบายความร้อนจาก tungsten อีกต่อหนึ่ง) แล้วปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา กระแส อิเล็กตรอนภายในหลอดเรียกว่า กระแสหลอด (Tube Current) โดยกระแสหลอดนี้จะเพิ่มหรือลดได้ ด้วยการปรับแหล่งจ่ายไฟฟ้าต่ำที่จ่ายให้กับไส้หลอดและการปรับค่าไฟฟ้าศักดาสูงหรือ kV ของ หลอดในการปรับค่าไฟฟ้าศักดาต่ำและไฟฟ้าศักดาสูงของหลอดรังสีเอกซ์ ต้องปรับให้สัมพันธ์กัน เพื่อไม่ให้เกิดอิเล็กตรอนตกค้างที่ไส้หลอด (Residual Space Charge) ทั้งนี้โดยภาพรวม เมื่อกระแส หลอดเพิ่มขึ้นก็ทำให้ปริมาณของรังสีเอกซ์ต่อวินาทีเพิ่มขึ้นทำให้ความเข้มของรังสี (Intensity) มีค่า เพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มไฟฟ้าศักดาสูงของหลอดมากขึ้น ก็ส่งผลทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงาน จลน์สูงขึ้น ทำให้ความสามารถในการทะลุทะลวง (Penetration) ของรังสีมีมากขึ้น สำหรับภาพของ

หลอดรังสีเอกซ์แสดงไว้ดังรูปที่ 1 เมื่อรังสีได้ถูกปลดปล่อยจากหลอดรังสีเอกซ์โดยผ่านออกมาทางหน้าต่าง (Window) ของหลอด จะถูกทำการจัดรูปแบบรังสีได้โดยใช้ชุดบังคับลำรังสี ซึ่งชุดบังคับลำรังสีเป็นรูปลักษณะเป็นแนวเส้นเปิด เมื่อลำรังสีผ่านจะถูกจัดรูปแบบเป็นรูปพัด (Fan-Shaped Beam)

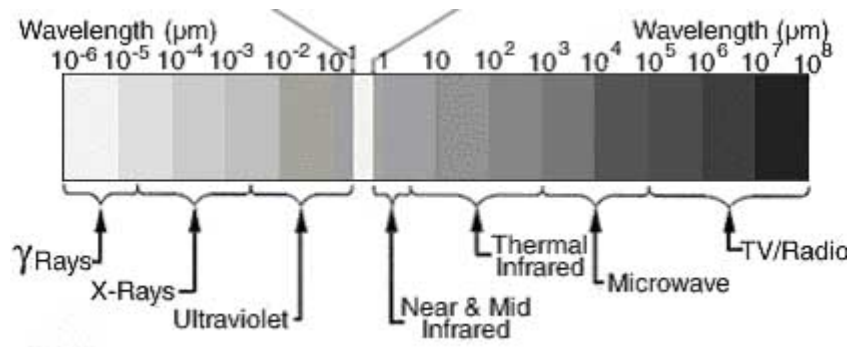


รูปที่ 1 หลอดรังสีเอกซ์และส่วนประกอบของหลอด [1]

คุณสมบัติของรังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์ถูกค้นพบโดย Roentgen เมื่อปี พ.ศ. 2438 บางครั้งจึงเรียกรังสีเอกซ์ว่า รังสีเรินเกน (Roentgen Ray) รังสีเอกซ์เป็นรังสีที่มีคุณสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Radiation) เกิดขึ้นจากการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินภายในภายหลังการเกิดอันตรกิริยาทางนิวเคลียร์ของอะตอมของธาตุที่บริเวณชั้นโคจรของอิเล็กตรอน (Electron Shell) มักจะมีความยาวคลื่นในช่วงประมาณ 0.0001 ถึง 100 Å (อังสตรอม) ในแถบสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับงานถ่ายภาพไมโครด้วยรังสีเอกซ์นั้นนักวิทยาศาสตร์ได้จัดแบ่งย่านของรังสีเอกซ์จากลักษณะการใช้งานไว้ตามความสามารถในการทะลุทะลวง หรือระดับพลังงานที่ใช้ถ่ายภาพไมโครไว้ ดังในรูปที่ 2

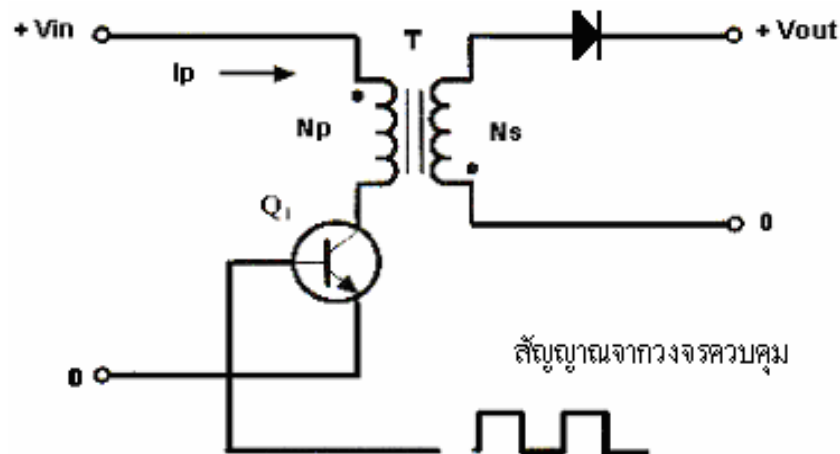
- รังสีเอกซ์พลังงานสูงมาก (Ultrahard x-ray) จัดอยู่ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.1 Å (124 keV) ขึ้นไป
- รังสีเอกซ์พลังงานสูง (Hard x-ray) จัดอยู่ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 1.0 Å ถึง 0.1 Å (12.4 keV ถึง 124 keV)
- รังสีเอกซ์พลังงานต่ำ (Soft x-ray) จัดอยู่ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 10 Å ถึง 1 Å (12.4 keV ถึง 124 keV)



รูปที่ 2 ช่วงความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [2]

หลักการของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

มีหลักการทำงาน คือ เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ (Q) จะนำกระแสและหยุดนำกระแสสลับกันตามความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าจากวงจรควบคุม ขณะที่ทรานซิสเตอร์ทำงานกระแส (I_{in}) จะไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิ (N_p) ไดโอด (D) จะไม่ทำงานเนื่องจากถูกรีเวิร์สไบอัส (Reverse Bias) กระแสจึงไม่ไหลผ่านโหลด (R_L) ขดลวดปฐมภูมิจึงสะสมพลังงานไว้และเมื่อเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์หยุดทำงาน ไดโอดก็จะทำงานเนื่องจากขดลวดปฐมภูมิทำให้เกิดกระแสที่ขดลวดทุติยภูมิไหลไปประจุลงคาปาซิเตอร์ (C_{out}) และจ่ายให้โหลด ดังรูปที่ 3 [3]

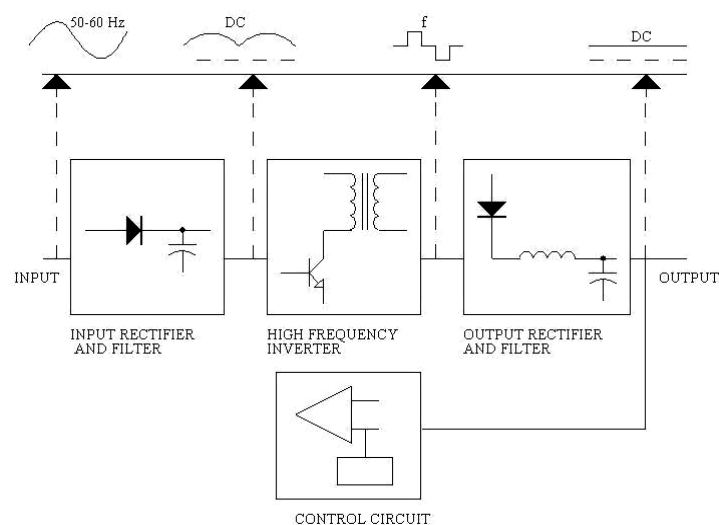


รูปที่ 3 ลักษณะวงจรพื้นฐานของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ [3]

การออกแบบ

โครงสร้างโดยรวมของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงแบบสวิตชิ่ง แบบฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ จะประกอบไปด้วย 4 ส่วนด้วยกัน ดังรูปที่ 4

1. ส่วนของเรกติไฟเออร์ และฟิลเตอร์
2. ส่วนของอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง
3. ส่วนของเรกติไฟเออร์ และฟิลเตอร์
4. ส่วนของวงจรควบคุม



รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงแบบสวิตชิ่ง

การออกแบบหม้อแปลงฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

ต้องการออกแบบหม้อแปลงฟลายแบค ให้มีความถี่เท่ากับ 50 kHz แรงดันกระแสตรงอินพุตของหม้อแปลงประมาณ 310 V_{DC} และแรงดันเอาต์พุตกระแสตรงสูงสุด 65 กิโลโวลต์

เลือกขนาดแกนที่เหมาะสม

$$\begin{aligned}
 A_e A_c &= \frac{(0.68 P_{out} D) \times 10^3}{f B_{max}} && \text{cm}^4 \\
 &= \frac{[(0.68) \times (60\text{W}) \times (400\text{cm/A})] \times 10^3}{(50\text{kHz}) \times (1950\text{G})} && \text{cm}^4 \\
 &= 0.167 && \text{cm}^4
 \end{aligned}$$

เลือกขนาดของแกนจากเอกสารขนาดของแกนจะเลือกขนาดของแกนให้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับขนาดที่คำนวณไว้ เพราะฉะนั้น จะได้แกนขนาด EE42/42/15 มีค่า $A_e A_c$ เท่ากับ 3.24 cm^4 ซึ่ง $A_e = 1.81 \text{ cm}^2$, $A_c = 1.81 \text{ cm}^2$

คำนวณหาจำนวนรอบขดลวดปฐมภูมิ N_p

$$\begin{aligned} N_p &= \frac{(V_p) \times 10^8}{4fB_{\max} A_e} \\ &= \frac{310 \text{ V} \times 10^8}{4 \times (50\text{kHz}) \times (1950\text{G}) \times (1.81 \text{ cm}^2)} \\ &= 44 \text{ รอบ} \end{aligned}$$

คำนวณหาจำนวนรอบขดลวดทุติยภูมิ N_s

$$\begin{aligned} \frac{N_p}{N_s} &= \frac{V_p}{V_s} \\ \frac{44}{N_s} &= \frac{310}{65000} \\ N_s &= 9,000 \text{ รอบ} \end{aligned}$$

หากระแสต้านปฐมภูมิ

$$\begin{aligned} I_{PP} &= \frac{2P_{\text{out}}}{\eta V_{\text{in}} \delta_{\max}} \\ &= \frac{2 \times 150}{0.65 \times 310\text{V} \times 0.45} \\ &= 3.30 \text{ A} \end{aligned}$$

คำนวณหาขนาดเส้นลวดต้านปฐมภูมิ

$$\begin{aligned} \text{ขนาดของเส้นลวด} &= \text{ความหนาแน่นกระแส} \times \text{กระแส} \\ &= (400\text{cm/A}) (3.30\text{A}) \\ \text{ขนาดของเส้นลวด} &= 121 \text{ circular mils} \end{aligned}$$

คำนวณหาขนาดเส้นลวดต้านทุติยภูมิ

$$\begin{aligned} \text{ขนาดของเส้นลวด} &= \text{ความหนาแน่นกระแส} \times \text{กระแส} \\ &= (400 \text{ cm/A}) (900 \text{ mA}) \\ \text{ขนาดของเส้นลวด} &= 444 \text{ circular mils} \end{aligned}$$

การออกแบบไอซีเบอร์ TL494

การออกแบบไอซีเบอร์ TL 494 เป็นตัวควบคุมวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ ให้มีความถี่เท่ากับ 50 kHz จะมีคาบเวลาเท่ากับ 20 μ sec ดังนั้น

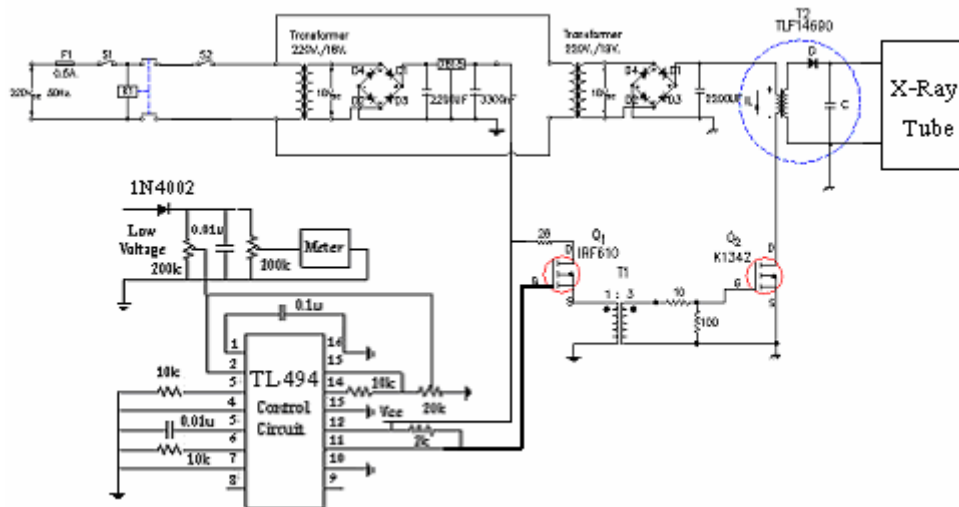
$$T = \frac{R_T C_T}{1.1}$$

$$20 \times 10^{-6} = \frac{0.01 \times 10^{-6}}{1.1}$$

$$R_T = 2.2 \text{ k}\Omega \text{ เลือกใช้ ความต้านทานปรับค่าได้เท่ากับ 5 k}\Omega$$

วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงแบบสวิตชิ่ง

งานวิจัยนี้ได้นำไอซีเบอร์ TL494 มาใช้ในวงจรควบคุมการทำงานในโหมดแรงดัน ซึ่งเป็นวงจรพัลส์วิดมอดูเลเตอร์ที่ใช้สัญญาณที่มีความชันคงที่ โดยที่คาบเวลาการทำงานของเอาต์พุตพัลส์สามารถกำหนดจากค่าของ R_T และ C_T จากภายนอกตรงขา 9 และขา 10 ของ TL494 โดยมีวงจรการทำงานแบบฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ และใช้หม้อแปลงฟลายแบคเป็นตัวเพิ่มระดับแรงดัน ซึ่งใช้ความถี่สวิตชิ่ง 50 kHz สร้างแรงดันสูงได้ 65 kV_{dc}



รูปที่ 5 วงจรสร้างไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงแบบสวิตชิ่งที่สร้างขึ้น

การทดสอบพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงแบบสวิตชิ่ง

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง (โดยมีความถี่ 50 kHz คงที่) ขณะจ่ายให้กับหลอดเอ็กซเรย์

$V_{in(rms)}$ (V)	$I_{in(rms)}$ (A)	P_{in} (W)	PF	V_{out} (kV _{dc})
310	1.27	115.9	0.83	65

$V_{in(rms)}$ คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับอินพุทของคอนเวอร์เตอร์

$I_{in(rms)}$ คือ กระแสไฟฟ้ากระแสสลับอินพุทของคอนเวอร์เตอร์

P_{in} คือ กำลังไฟฟ้าอินพุทของคอนเวอร์เตอร์

PF คือ เพาเวอร์แฟคเตอร์ทางด้านอินพุทของคอนเวอร์เตอร์

V_{out} คือ แรงดันเอาต์พุทที่จ่ายให้กับหลอดอิเล็กทรอนิกส์

สรุป

จากผลการทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงตามตารางที่ 2 จะเห็นว่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ออกแบบสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เพียงพอโดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อวงจร และสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงได้ตามที่ต้องการคือ 65 กิโลโวลต์ โดยมีความเหมาะสมในการนำไปใช้กับหลอดอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก ซึ่งเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กสามารถนำไปใช้ในงานด้านอื่นๆ ที่มีประโยชน์ต่อสังคม คือ งานทางด้านการแพทย์ ด้านการศึกษา และด้านอุตสาหกรรมอื่นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจนำแนวทางการออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้านี้ไปใช้ในการพัฒนางจรสวิตชิงให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น โดยจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องอิเล็กทรอนิกส์สูงขึ้นต่อไปในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ของผู้วิจัยที่คอยให้กำลังใจตลอดมา ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง ที่ให้เครื่องมือในการทดสอบ และขอขอบคุณท่านรองศาสตราจารย์ประภาส ไพรสุวรรณา ที่ให้คำปรึกษาจนงานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

1. <http://dic.moohin.com/x/X-ray-tube-94.shtml>
2. <http://www.gisthai.org/about-gis/electromagnetic.html>
3. สุวัฒน์ ดั่น, 2537. เทคนิคและการออกแบบสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย. บริษัท เอนเทลไทย จำกัด, พิมพ์ครั้งที่ 1
4. L.L. Alston. 1968. High-Voltage Technology. Oxford University Press. London.
5. Muhammad H. Rashid, "Power Electronics" Second Edition, Prentice-Hall International, Inc.
6. คิสิโรตม์ เกตุแก้ว, ปีที่ 22 ฉบับที่ 2 เดือนมิถุนายน 2548. การศึกษาเทคนิคการผลิตก๊าซไอโซนโดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงความถี่สูง แบบแรงดันกระแสเพื่่อมสูง. วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 1-6.