

การพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงแบบประหยัด

ธีระยุทธ เพลิดพริ้ง เดโช ทองอร่าม* กมลทิพย์ พลอยกระจำจ

ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Email: fntdta@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงแบบประหยัดขนาด 2000 V ที่กระแส 1 mA สำหรับหัววัดรังสี NaI(Tl) โดยการนำวัสดุอุปกรณ์ที่หาได้ภายในประเทศมาออกแบบสร้างวงจรจึงทำให้ต้นทุนในการสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงลดลง อีกทั้งยังง่ายต่อการซ่อมบำรุง นอกจากนี้ยังได้ออกแบบวงจรให้สามารถรองรับการเชื่อมโยงกับคอมพิวเตอร์เพื่อประโยชน์ในการจัดการข้อมูลและการควบคุมการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง ผลการทดสอบพบว่า แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงที่พัฒนาขึ้นสามารถจ่ายศักดาไฟฟ้าได้ 2000 V ที่กระแส 1 mA มีแรงดันริบเปิ้ลน้อยกว่า 30 mVp-p และมีประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 60 ที่โหลดสูงสุด มีความเป็นเชิงเส้นในการควบคุมศักดาไฟฟ้าทั้งแบบปรับด้วยมือ และแบบปรับอัตโนมัติ ที่ R^2 เท่ากับ 0.9986 และ 0.9997 ตามลำดับ

คำสำคัญ: แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง วงจรทวีแรงดัน ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

Development of an Economic High Voltage Power Supply

Theerayuth Plirdping¹ Decho Thong-Aram^{2*} Kamontip Ploykrachang³

Department of Nuclear Technology Faculty of Engineering Chulalongkorn University

Email: fntdta@eng.chula.ac.th

Abstract

A 2000 V, 1 mA economical high voltage power supply for NaI(Tl) detector was developed. The purpose of this study was to design an electrical circuit upon local component availability for cost effective and ease maintenance. Besides, this circuit was designed to support computer interfacing for data manipulation and controls. The designed circuit showed capability of 2000 V, 1 mA high voltage power supply with ripple voltage less than 30 mVp-p and higher than 60 percent efficiency at maximum load. The linearity of high voltage adjustment in manual and automatic mode was found to be excellent with $R^2 = 0.9982$ and 0.9997 respectively.

Keywords: High voltage power supply, Voltage multiplier, Flyback converter

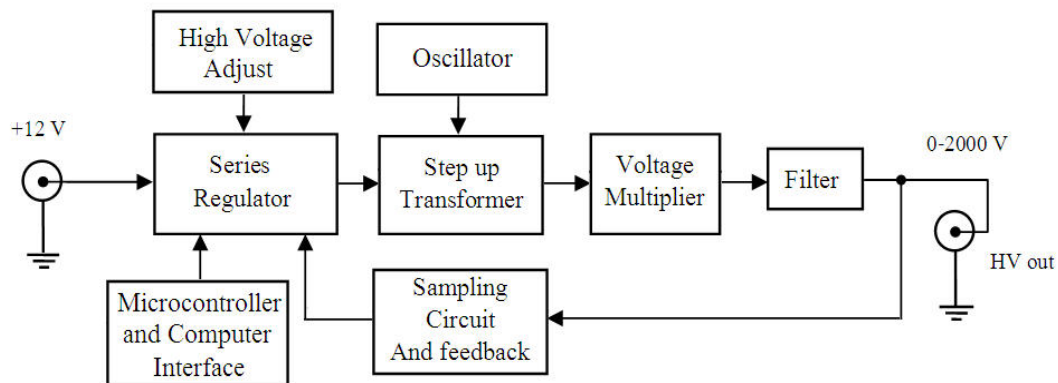
บทนำ

แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่งของระบบวัดรังสี ทั้งนี้เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงจะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงให้กับหัววัดรังสีชนิดต่าง ๆ เช่น หัววัดไกเกอร์ หัววัดชนิด NaI(Tl) เพื่อที่จะทำให้หัววัดรังสีต่าง ๆ เหล่านี้สามารถทำการตรวจวัดรังสีได้เมื่อเกิดมีรังสีเข้ามาตกกระทบมาที่หัววัด ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาอุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงทั้งหมดต้องสั่งนำเข้ามาจากต่างประเทศ จึงทำให้ราคาของอุปกรณ์ชนิดนี้มีราคาที่สูงอีกทั้งการบำรุงรักษาค่อนข้างยุ่งยากเมื่อเกิดการชำรุดเสียหายขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงแบบประหยัด โดยพยายามมุ่งเน้นการออกแบบวงจรเพื่อนำไปใช้กับหัววัดรังสีชนิด NaI(Tl) ด้วยการนำเอาอุปกรณ์ที่หาได้ภายในประเทศมาใช้ในการพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงนี้ทั้งหมด เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการสร้างและสามารถหาอุปกรณ์มาทำการซ่อมบำรุงได้ง่าย ถ้าหากเกิดการชำรุดเสียหายกับอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นภายหลัง นอกจากนี้ยังได้ออกแบบวงจรเพื่อรองรับการเชื่อมโยงสัญญาณกับไมโครคอนโทรลเลอร์และไมโครคอมพิวเตอร์ได้เพื่อความสะดวกในการใช้งาน

วิธีการ

1. ออกแบบวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง

วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงที่พัฒนาขึ้นนี้ได้ถูกออกแบบวงจรให้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงชนิดปรับค่าศักดาไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 2000 โวลต์ที่สามารถจ่ายกระแสสูงสุดได้ 1 มิลลิแอมป์ ด้วยหม้อแปลงสวิตชิงความถี่สูงที่มีรูปแบบการขับวงจรหม้อแปลงเป็นแบบฟลายแบค (FLY BACK) ที่ความถี่ใช้งาน 74 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ได้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้าขนาด +12 โวลต์ ที่กระแส 500 มิลลิแอมป์ และมีแผนภาพการทำงานดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยวงจรต่างได้แก่ วงจรกำเนิดความถี่ (Oscillator) วงจรซีรี่ส์เรกูเลเตอร์ (Series Regulator) หม้อแปลงแบบเพิ่มศักดาไฟฟ้า (Step up transformer) วงจรทวีศักดาไฟฟ้า (Voltage multiplier) วงจรกรองกระแส (Filter) วงจรเปรียบเทียบศักดาไฟฟ้า (Voltage comparator) และวงจรควบคุมการปรับค่าไฟฟ้าศักดาสูง (High voltage adjust) ทั้งแบบปรับด้วยมือและแบบอัตโนมัติผ่านทางไมโครคอนโทรลเลอร์และ/หรือไมโครคอมพิวเตอร์ สำหรับแนวคิดในการออกแบบวงจรแต่ละส่วนได้พยายามใช้วงจรที่ง่าย ๆ ไม่ซับซ้อนแต่มีสมรรถนะในการทำงานที่สูงและใช้กำลังไฟฟ้าต่ำ โดยเลือกใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่สามารถหาซื้อได้จากตลาดบ้านหม้อมาออกแบบสร้างเป็นเครื่องต้นแบบของงานวิจัยนี้ และที่สำคัญอย่างยิ่งในงานวิจัยนี้ได้แสดงหลักการและวางแนวทางที่ง่ายสำหรับนักวิจัยและนักประดิษฐ์รุ่นใหม่ด้วย



รูปที่ 1 แผนภาพการทำงานของวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง

1.1 ออกแบบวงจรขับหม้อแปลงแบบฟลายแบคสำหรับหม้อแปลงแบบเพิ่มศักดาไฟฟ้า

ก่อนที่จะทำการออกแบบวงจรขับหม้อแปลงไฟฟ้าผู้ทำวิจัยได้เลือกซื้อหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสวิตชิงความถี่สูงสำเร็จรูปขนาดเล็กจากบ้านหม้อมาหลายรุ่นเพื่อนำมาศึกษาหาข้อมูลความเป็นไปได้ที่จะใช้ออกแบบสร้างเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง ซึ่งพารามิเตอร์หลัก ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดนี้ที่ควรรู้ได้แก่ ค่าอินดักแตนซ์และขนาดเส้นลวดทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการคำนวณหาความถี่ตอบสนองของหม้อแปลง จากนั้นก็ทดลองป้อนความถี่ตามที่คำนวณได้ให้กับหม้อแปลงเพื่อหาค่าอัตราต่อรอบ (Turn Ratio) ของขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิสำหรับใช้เป็นข้อมูลออกแบบวงจรทวิตคาไฟฟ้าต่อไป เมื่อได้ข้อมูลทั้งหมดแล้วจึงได้ออกแบบวงจรขับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบฟลายแบคที่ทำงานที่ความถี่ 74 kHz โดยมีค่าดีวีไซเคิล (Duty cycle) ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์สำหรับเหตุผลที่ได้เลือกออกแบบวงจรขับเป็นแบบวงจรฟลายแบคเนื่องจากมีประสิทธิภาพการทำงานที่สูงและตัววงจรใช้อุปกรณ์น้อยไม่ซับซ้อน

1.2 วงจรกำเนิดความถี่

การออกแบบสร้างวงจรกำเนิดความถี่สำหรับวงจรขับหม้อแปลงสวิตชิงความถี่สูง ได้นำไอซีเนนเกตชมิทริกเกอร์ (NAND Gate Schmitttrigger) ตระกูลซีมอสที่ประหยัดพลังงานมาใช้ในการออกแบบสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณลอจิกพัลส์ที่มีความถี่ 74 kHz มีดีวีไซเคิล (Duty cycle) ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์และใช้เนนเกตชมิทริกเกอร์ที่เหลือใช้จากวงจรกำเนิดความถี่มาสร้างเป็นวงจรบัฟเฟอร์เพิ่มกระแสที่ใช้ในการขับขาเกตของมอสเฟตที่อยู่ในส่วนของวงจรขับหม้อแปลงและวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด -12 โวลต์สำหรับจ่ายให้กับอปแอมป์

1.2 ออกแบบวงจรทวีคูณไฟฟ้า

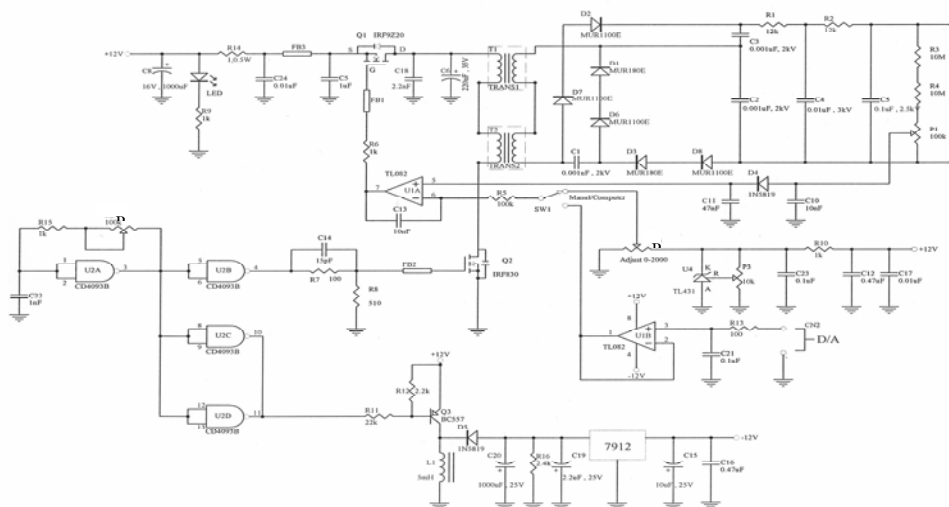
จากข้อมูลการทดสอบหม้อแปลงในข้อ 1.1 ได้ค่าอัตราต่อรอบประมาณ 1 ต่อ 20 จึงได้นำมาออกแบบวงจรทวีคูณไฟฟ้าขนาด 3 เท่าชนิดเต็มคลื่น (Full Wave Triple Voltage Multiplier) เพื่อใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติที่ดีของวงจรทวีคูณไฟฟ้าขนาด ชนิดเต็มคลื่นที่สามารถช่วยลดขนาดของตัวเก็บประจุ (Capacitor) วงจรกรองกระแส (Output filter) ด้านทางออกของแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงได้ สำหรับวงจรกรองกระแสด้านทางออกของแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงใช้วงจรแบบกรองกระแสแบบอาร์ซี (RC filter) 2 สเตจ เพื่อให้ได้ค่าของแรงดันริปเปิล (Ripple Voltage) ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ไม่เกิน 30 มิลลิโวลต์

1.3 ออกแบบวงจรซีรี่ย์เร็กกูเลเตอร์

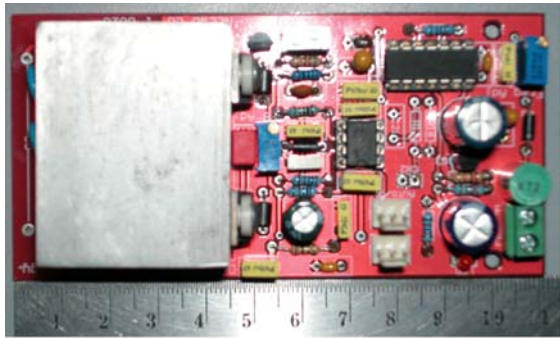
ในส่วนของวงจรซีรี่ย์เร็กกูเลเตอร์อาศัยการทำงานร่วมกันของมอสเฟตและเพดอปแอมป์สำหรับการควบคุมค่าแรงดันของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้กับวงจรขับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบฟลายแบคให้สอดคล้องกับค่าการปรับที่รับมาจากวงจรควบคุมไฟฟ้าศักดาสูง อีกทั้งยังช่วยรักษาระดับของศักดาไฟฟ้าด้านทางออกของแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงให้คงที่ตลอดเวลาที่ได้ตั้งค่าใช้งานไว้

1.4 ออกแบบวงจรควบคุมไฟฟ้าศักดาสูง

วงจรควบคุมแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงได้ออกแบบให้สามารถปรับค่าศักดาไฟฟ้าสูงได้ทั้งแบบปรับด้วยมือและแบบอัตโนมัติ ซึ่งในปรับด้วยมือทำได้โดยการปรับโพเทนชิโอมิเตอร์แบบ 10 รอบ (10 Turn Potentiometer) บนหน้าปัดส่วนการปรับแบบอัตโนมัติจะปรับโดยการตั้งค่าจากไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านทางพอร์ตขนาน (Parallel Port) ไปยังวงจรเชื่อมโยงสัญญาณที่มีวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกขนาด 10 บิตจึงทำให้มีความละเอียดในการปรับค่าประมาณ 2 โวลต์ต่อสเตป



รูปที่ 2 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงที่พัฒนาขึ้น

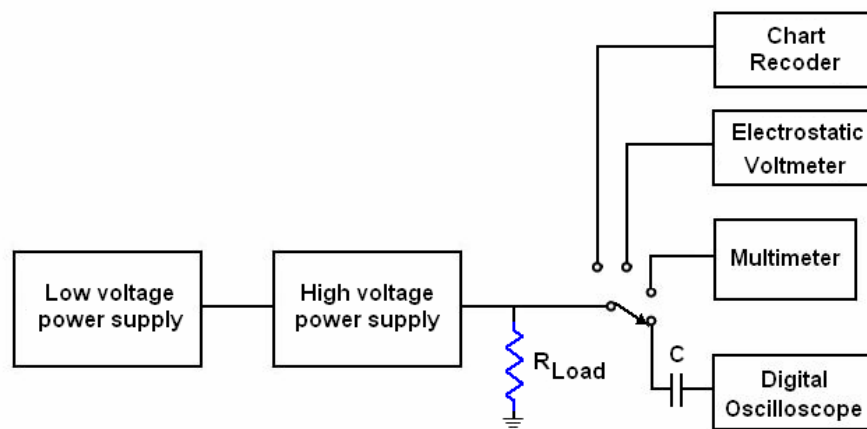


รูปที่ 3 แผงวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง

3. ทดสอบการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง

การทดสอบการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงที่พัฒนาขึ้นนั้น ได้จัดอุปกรณ์สำหรับการทดสอบได้ดังรูปที่ 4 ซึ่งได้ทำการทดสอบสมรรถนะด้านต่างๆ ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง ดังนี้คือ

- 3.1 ทดสอบความสามารถในการจ่ายกระแสสูงสุด
- 3.2 ทดสอบความเป็นเชิงเส้นของสเกลปรับศักดาไฟฟ้า
- 3.3 ทดสอบความเสถียรของสัญญาณไฟฟ้าทางออก
- 3.4 ทดสอบ Ripple ของสัญญาณไฟฟ้าทางออก



รูปที่ 4 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. ผลการทดสอบความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงสุดแสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบการจ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูงสุดของศักดาไฟฟ้าสูง

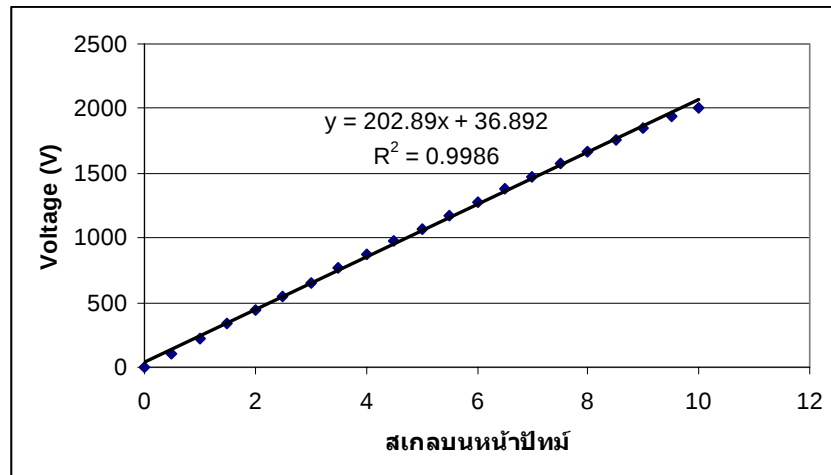
Load Voltage	0.5 MΩ	1 MΩ	2 MΩ	4 MΩ	6 MΩ
	I (mA)	I (mA)	I (mA)	I (mA)	I (mA)
0	0	0	0	0	0
250	0.5	0.25	0.125	0.063	0.042
500	1	0.50	0.250	0.125	0.083
750	1.5	0.75	0.375	0.188	0.125
1000	2	1	0.500	0.250	0.167
1250	2.5	1.25	0.625	0.313	0.208
1500	2.8	1.5	0.750	0.375	0.250
1750	2.89	1.75	0.875	0.438	0.292
2000	2.92	1.86	1	0.500	0.333

2. ผลการทดสอบประสิทธิภาพที่โหลดสูงสุด โดยใช้โหลดที่ค่า 2 MΩ แสดงดังตารางที่ 2

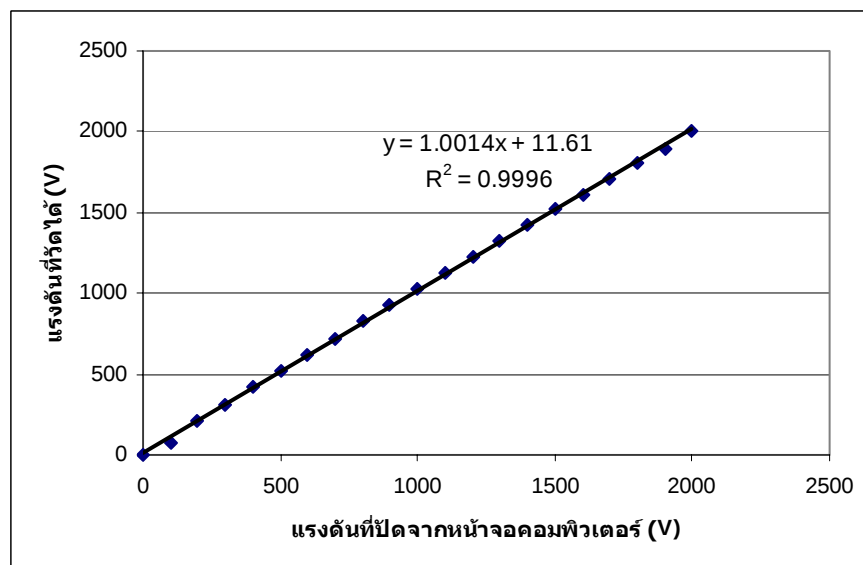
ตารางที่ 2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพที่โหลดสูงสุด

V_{adj} (V)	V_{in} (V)	I_{in} (mA)	P_{in} (mW)	V_{out} (V)	I_{out} (mA)	P_{out} (mW)	η (%)
0.0	12	0	0	0	0	0	0
0.5	12	20	260	207	0.10	21.32	7.95
1.0	12	50	610	412	0.21	84.87	13.72
1.5	12	80	940	613	0.31	187.58	19.97
2.0	12	110	1280	819	0.41	334.97	26.01
2.5	12	140	1630	1027	0.51	526.85	32.23
3.0	12	170	1980	1220	0.61	744.20	37.57
3.5	12	190	2330	1419	0.71	1006.07	43.21
4.0	12	220	2660	1612	0.81	1299.27	48.76
4.5	12	250	3000	1803	0.90	1624.50	54.26
5.0	12	280	3310	2000	1	2000	60.38

3. ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของสเกลปรับศักดาไฟฟ้าทั้งแบบปรับมือและปรับอัตโนมัติ
แสดงดังรูปที่ 5 และรูปที่ 6

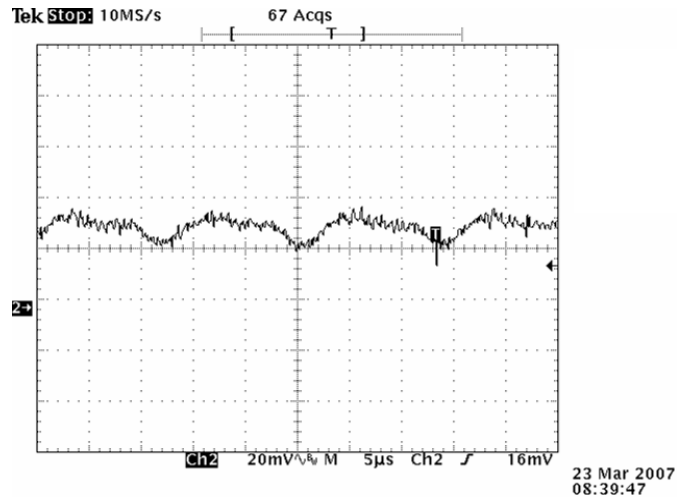


รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ของสเกลบนหน้าปัดและศักดาไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง

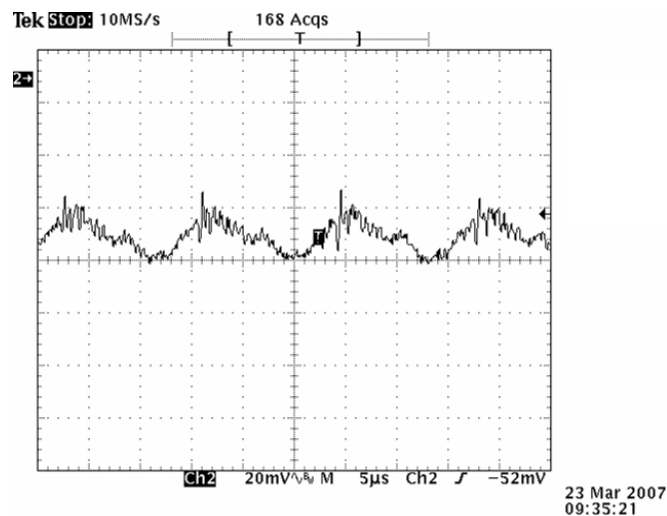


รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์การปรับค่าแรงดันไฟฟ้าศักดาสูงกับวงจรเชื่อมโยงสัญญาณ

4. ผลการทดสอบแรงดันรีปเปิ้ลของแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงที่โหลดสูงสุด แสดงได้ดังรูปที่ 7 และรูปที่ 8



รูปที่ 7 Ripple ของสัญญาณไฟฟ้าศักดาสูงขณะไม่มีโหลด



รูปที่ 8 Ripple ของสัญญาณไฟฟ้าศักดาสูงขณะมีโหลด

สรุป

จากผลการทดสอบพบว่า แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงที่พัฒนาขึ้นสามารถจ่ายศักดาไฟฟ้าได้ 2000 V ที่กระแส 1 mA มีประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 60 ที่โหลดสูงสุด มีความเป็นเชิงเส้นในการควบคุมศักดาไฟฟ้าทั้งแบบปรับด้วยมือ และแบบปรับอัตโนมัติ ที่ R^2 เท่ากับ 0.9986 และ 0.9997 ตามลำดับ และมีแรงดันรีปเปิ้ลน้อยกว่า 30 mVp-p

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์เดโช ทองอร่าม ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ ที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาและองค์ความรู้ต่างๆ ให้คำปรึกษาชี้แนะ อีกทั้งให้โอกาสในการศึกษาและทำงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญเทคโนโลยีสำหรับวิเคราะห์และทดสอบวัสดุที่ได้อำนวยความสะดวกด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

1. เดโช ทองอร่าม, 2538. การพัฒนาระบบควบคุมความหนาแบบนิวคลีโอนิกสำหรับเครื่องรีดโลหะบาง.วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 29-31
2. Brow, Marty. Power Supply Cookbook, Second Edition, Newnes is a imprint of Elsevier, U.S.A., 2001.
2. MOTOROLA INC., 1989. LINEAR/SWITCHMODE VOLTAGE REGULATOR HANDBOOK. 4th ed. U.S.A .
3. Gad Shani, Ph.D., 1966. Electronics for Radiation Measurements Volume 2. U.S.A, p.233 – 252