

แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงย่านความถี่ต่ำสำหรับการกำเนิด พลาสมาอุณหภูมิต่ำ

*กอบชัย จันทร์ศรี สุวิทย์ ปุณณชัยยะ และพงษ์แพทย์ เฟ่งวานิชย์
ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
โทรศัพท์ 081 0959321 โทรสาร 02 218 6780 E-mail: nt-04@hotmail.com

บทคัดย่อ

ได้พัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงย่านความถี่ต่ำขนาดกำลังไฟฟ้า 50 W แบบประหยัดที่มีสมรรถนะเพียงพอการใช้งานด้านการกำเนิดพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่ความดันบรรยากาศ โดยส่วนกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับจุดหลอดนีออนทำงานร่วมกับระบบขับสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่สามารถแปรเปลี่ยนความถี่และแรงดันไฟฟ้าได้ต่อเนื่อง ผลทดสอบสมรรถนะของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นพบว่าสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าและกระแสสูงสุดที่ 28 kVpp และ 5 mA (rms) ตามลำดับ ซึ่งสามารถใช้กำเนิดพลาสมาชนิดไดอิเล็กทริกแบร์ริเออร์ดิสชาร์จทั้งแบบแผ่นคู่ขนานและแบบโคแอ็กเซียลที่ความถี่ระหว่าง 100 Hz ถึง 750 Hz

คำสำคัญ : แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง พลาสมาอุณหภูมิต่ำ หม้อแปลงนีออน ไดอิเล็กทริกแบร์ริเออร์ดิสชาร์จ

Low-Frequency High-Voltage Power Supply for Non-Thermal Plasma Generation

*Kopchai Jansee, Suvit Punnachaiya and Phongphaeth Pengvanich
Department of Nuclear technology, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University
Phone: 081 0959321, Fax: 0 2218 6780, E-mail: nt-04@hotmail.com

Abstract

An economical 50-watts low-frequency high-voltage power supply with suitable performance for non-thermal atmospheric plasma generation has been developed. A neon transformer has been employed in conjunction with a sine-wave driving circuit whose frequency and output voltage can be varied. It is found from the performance test that the maximum voltage and current of 28 kVpp and 5 mA (rms), respectively, can be achieved. This power supply can be utilized for a dielectric barrier discharge plasma source, of both the coaxial and the parallel-plate types at frequency range between 100 Hz to 750 Hz.

Keywords: high voltage power supply, non-thermal plasma, neon transformer, dielectric barrier discharge

บทนำ

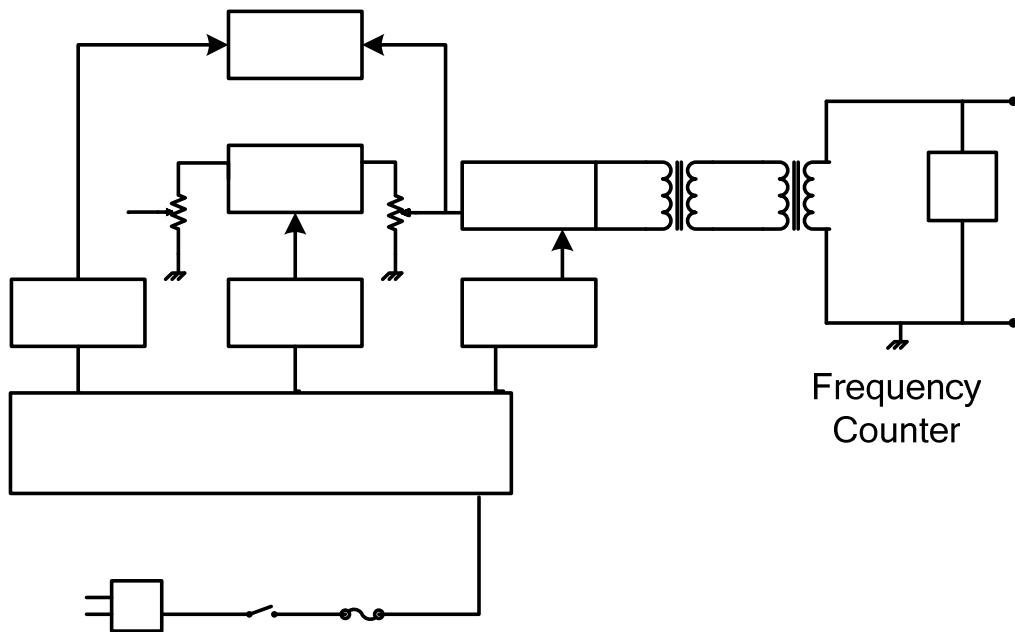
ปัจจุบันมีการนำพลาสมาอุณหภูมิต่ำ (non-thermal plasma) มาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย เช่น การปรับปรุงสมบัติของพื้นผิววัสดุแผ่นฟิล์ม การผลิตโอโซนสำหรับบำบัดน้ำเสีย การฆ่าเชื้อโรคทางการแพทย์ และการผลิตสารไฮโดรคาร์บอนทางอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เป็นต้น การกำเนิดพลาสมาอุณหภูมิต่ำแบบไดอิเล็กทริกแบร์ริเออร์ดิสชาร์จ (dielectric barrier discharge) ที่ความดันบรรยากาศ เป็นเทคนิคที่ประหยัดอุปกรณ์และไม่ต้องการระบบสุญญากาศ [1] อุปกรณ์หลักในการกำเนิดพลาสมา คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูง ในการศึกษาคุณลักษณะของพลาสมานั้น แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงจะต้องแปรเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าและความถี่ที่ต้องการได้ และจากการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการกำเนิดพลาสมาความถี่ต่ำจะใช้ความถี่ในย่านความถี่เสียงและแรงดันไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 5-20 กิโลโวลต์พีคทูพีค (kVpp) [1,2] แต่เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงสมรรถนะสูงที่ผลิตในเชิงพาณิชย์มีราคาแพง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงรูปคลื่นไซน์ย่านความถี่ระหว่าง 20 Hz – 5,000 Hz ขนาดกำลังไฟฟ้า 50 W แบบประหยัดที่มีสมรรถนะเพียงพอในการกำเนิดพลาสมาในระดับห้องปฏิบัติการ โดยออกแบบให้ใช้ชิ้นส่วนที่หาได้ง่ายในประเทศเพื่อง่ายต่อการบำรุงรักษา จัดการฉนวนชิ้นส่วนและอุปกรณ์เพื่อป้องกันการอาร์ก (arc) จากไฟฟ้าแรงดันสูง [4] นอกจากนี้ยังศึกษาผลตอบแทนความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงและการปรับชดเชยแรงดันไฟฟ้าที่เกินย่านความถี่จำกัด (cut off frequency)

วิธีการออกแบบ

จากข้อมูลความต้องการด้านเทคนิคของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงได้นำมาออกแบบโครงสร้างของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงที่แปรเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าและความถี่ได้ดังแผนภาพในรูปที่ 1 ประกอบด้วย หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง วงจรขับหม้อแปลงไฟฟ้า วงจรกำเนิดความถี่ปรับค่าได้ วงจรนับความถี่ วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำและวงจรสำหรับตรวจวัดค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าของโหลด (load)

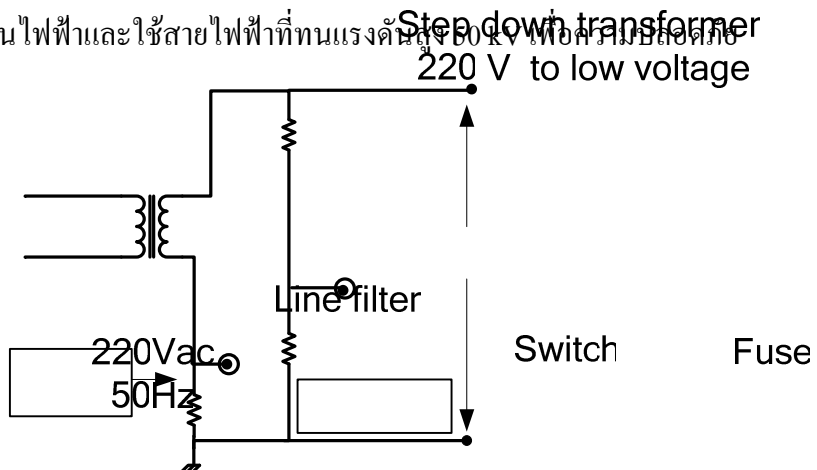
การทำงานของระบบเริ่มจากวงจรกำเนิดความถี่รูปคลื่นไซน์ผลิตสัญญาณที่มีความถี่และขนาดตามค่าซึ่งปรับไว้ ป้อนเข้าวงจรขยายสัญญาณย่านความถี่เสียงเพื่อสร้างสัญญาณขับผ่านหม้อแปลงขับ (driving transformer) แบบแยกฉนวนทนแรงดันสูงระหว่างขดปฐมภูมิและทุติยภูมิ ความถี่ที่ผลิตได้แสดงผลด้วยวงจรถ่ายความถี่ สัญญาณขับนี้จะส่งเข้าขดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงก่อให้เกิดการเหนี่ยวนำเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นตามอัตรารอบของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายให้แก่โหลด

โดยขนาดของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าสามารถตรวจวัด (monitor) ผ่านวงจรลดทอนและวงจรแปลงผันกระแสเป็นแรงดันไฟฟ้าได้ตามลำดับด้วยเครื่องอ่านรูปสัญญาณ (oscilloscope)



รูปที่ 1 แผนภาพโครงสร้างของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงที่ออกแบบเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง

งานวิจัยนี้เลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับจุดโหลดนีออนป้ายโฆษณาของบริษัท Senza Coltelli รุ่น 10.000/30CM เนื่องจากมีราคาประหยัด หม้อแปลงที่เลือกเป็นหม้อแปลงแกนเหล็กมีอัตรารอบ 1:45 สามารถแปลงแรงดันไฟฟ้าจาก 220 Vrms เป็น 10 kVrms โดยคิดเป็น $2 \times \sqrt{2} \times 10 = 28 \text{ kVpp}$ จ่ายกระแสได้มากถึง 15 mA (rms) ทางเข้าขดปฐมภูมิหรือขดปฐมภูมิขดทุติยภูมิของหม้อแปลงขับ ส่วนขดทุติยภูมิจ่ายไฟฟ้าให้โหลดโดยมีวงจรสำหรับตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องอ่านรูปสัญญาณ ได้แก่ วงจรลดทอน 1:1000 และวงจรแปลงผันกระแสเป็นแรงดันไฟฟ้าที่สัดส่วน 0.5 mA /V ดังแสดงในรูปที่ 2 วงจรส่วนนี้ทั้งหมดจะประกอบในโครงบรรจุที่เป็นวัสดุฉนวนไฟฟ้าและใช้สายไฟฟ้าที่ทนแรงดันสูง 50 kV เพื่อความปลอดภัย

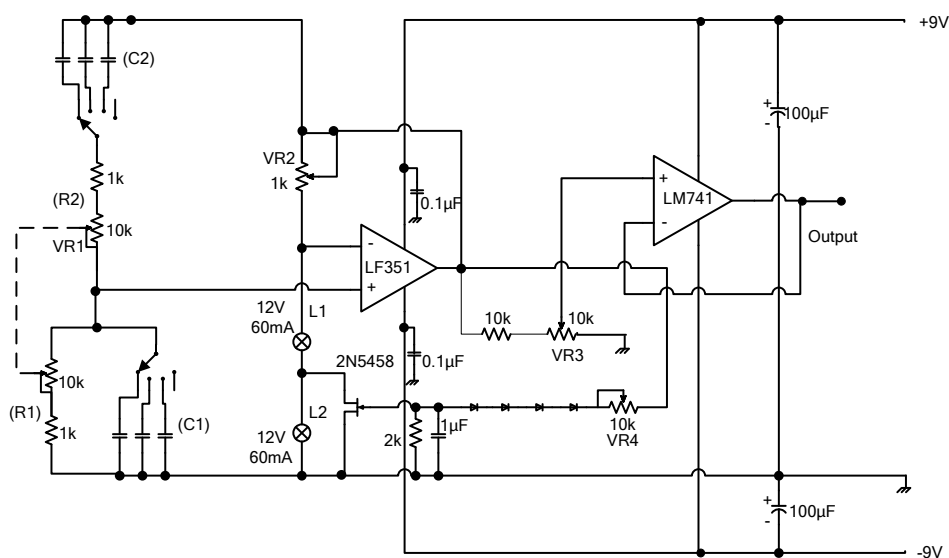


รูปที่ 2 วงจรสำหรับตรวจวัดค่า V-I ของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง

วงจรกำเนิดความถี่รูปคลื่นซายน์

วงจรกำเนิดความถี่รูปคลื่นซายน์ที่ออกแบบแสดงในรูปที่ 3 เลือกใช้ไอซีเบอร์ LF351 จัดวงจรแบบเวนบริดจ์ (Wien Bridge Oscillator) โดยคำนวณย่านความถี่ด้วยสมการ (1) [3] แบ่งความถี่เป็น 3 ช่วง คือ 15 -150 Hz, 0.15 – 1.5 kHz และ 1.5 – 15 kHz จากวงจรที่ออกแบบ VR1 เป็นตัวต้านทานปรับค่าได้แบบ 2 ชั้น แต่ละชั้นเป็นส่วนของ (R1), (R2) ในสมการ ใช้ปรับความถี่ร่วมกับการเลือกค่า (C1), (C2) ส่วน VR2 ใช้ปรับอัตราขยายวงจรเพื่อแก้ความผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณ ขณะที่ L1, L2 เป็นหลอดไฟชนิดไส้ขนาด 12 V, 60 mA ซึ่งความต้านทานไส้จะขึ้นกับอุณหภูมิที่เกิดจากผลของกระแสสัญญาณไหลผ่าน ทำหน้าที่รักษาความเสถียรอัตราขยายวงจรในลักษณะของ Automatic Gain-Control (AGC) และเพื่อให้เกิดความเสถียรของระดับสัญญาณขณะแปรเปลี่ยนความถี่ L2 จะจัดให้ขนานกับความต้านทานภายในระหว่างเดรนและซอร์ซของทรานซิสเตอร์ชนิด JFET เบอร์ 2N5458 ที่แปรเปลี่ยนจากผลของสัญญาณป้อนกลับทางเกต ช่วยลดการกระเพื่อมสัญญาณจาก 28.5 % เหลือเพียง 1.5 % ของขนาดสัญญาณที่ 6 Vpp ส่วน VR3 ใช้ปรับเพื่อแปรเปลี่ยนสัญญาณทางออกในช่วง 0-4 V ป้อนให้ไอซีเบอร์ LM741 ซึ่งจัดวงจรในรูปบัฟเฟอร์ (buffer) ส่งสัญญาณให้วงจรขยายกำลังย่านความถี่เสียง (audio power amplifier) ต่อไป

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{R1R2C1C2}} \dots\dots\dots (1)$$



รูปที่ 3 วงจรกำเนิดความถี่รูปคลื่นซายน์แบบเวนบริดจ์ที่ออกแบบขึ้น

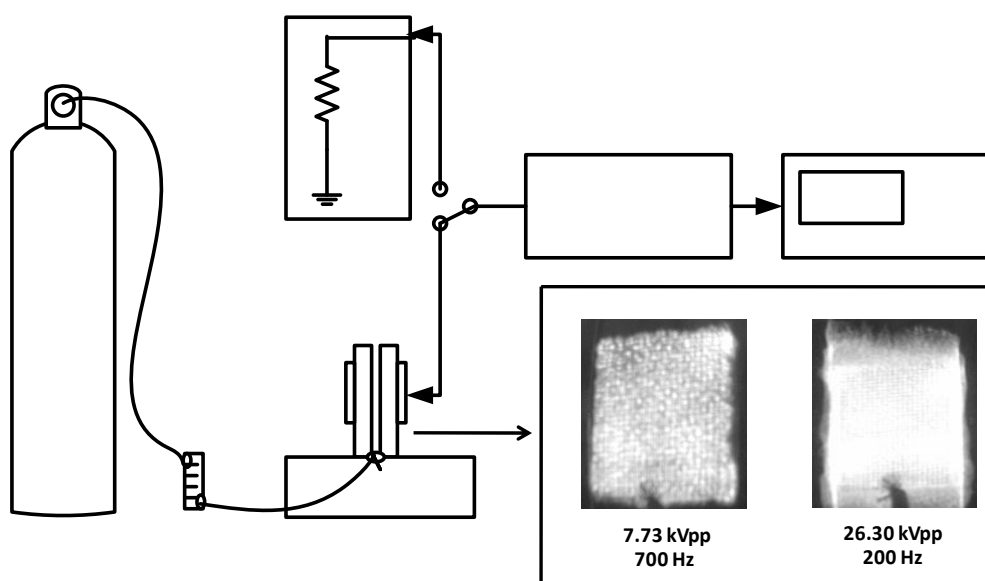
ระบบขับสัญญาณย่านความถี่เสียง

ระบบขับสัญญาณประกอบด้วย วงจรขยายกำลังย่านความถี่เสียงขนาดกำลัง 100 W และหม้อแปลงขนาด 70 W การกำเนิดสัญญาณขับเริ่มจากป้อนสัญญาณจากวงจรกำเนิดความถี่เข้า

วางกระจายสัญญาณส่งให้หม้อแปลงไฟฟ้าขับที่ออกแบบแยกฉนวนขดปฐมภูมิและทุติยภูมิเฉพาะเพื่อป้องกันการอาร์กจากการเหนี่ยวนำผ่านสถานะตัวเก็บประจุ (capacitance induce) ของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงขณะขับสัญญาณ หม้อแปลงขับนี้มีอัตรารอบ 1:9 สามารถรับแรงดันทางเข้า 24 Vrms และแปลงแรงดันไฟฟ้าทางออกเป็น 220 Vrms จากการทดสอบการจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบขับสัญญาณให้โหลดที่เป็นหลอดไฟฟ้าชนิดไส้ ขนาด 60 W, 220 V พบว่าสามารถขับโหลดได้ในย่านความถี่ระหว่าง 100 Hz - 5 kHz ซึ่งเป็นย่านที่รูปคลื่นขายน้จากหม้อแปลงขับไม่ผิดเพี้ยน

วิธีการทดสอบ

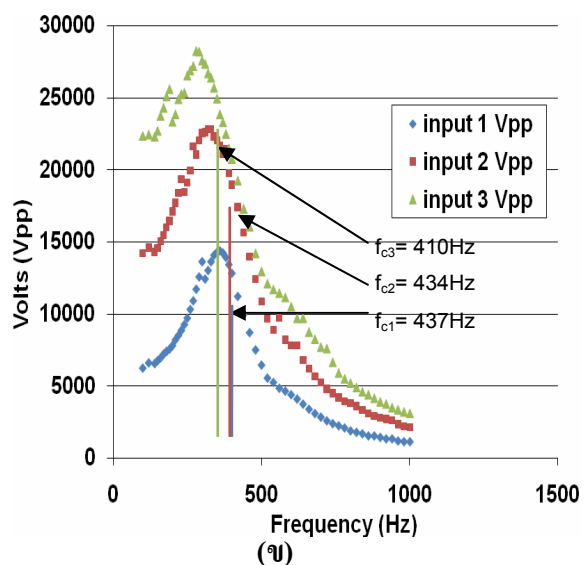
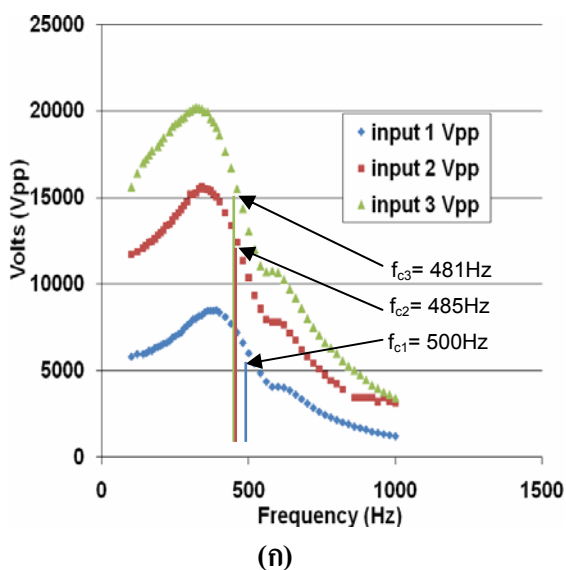
การทดสอบสมรรถนะแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นทำโดยจัดระบบทดสอบดังแผนภาพรูปที่ 4 แบ่งการทดสอบเป็น 2 กรณี คือ กรณีแรกทดสอบด้วยการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้หลอดตัวต้านทาน 10 M Ω ขนาด 10 W ที่บรรจุในถังฉนวนน้ำมัน กรณีที่สองทดสอบการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดที่เป็นชุดกำเนิดพลาสมาแบบเบริเออร์ดิสชาร์จที่มีโครงสร้างเป็นแผ่นคู่ขนาน ใช้แก๊วหนา 2 mm เป็นวัสดุไดอิเล็กทริกซึ่งมีช่องว่างระหว่างกัน 1 mm ประกบด้วยขั้วอิเล็กโทรดทำด้วยแผ่นทองแดงและอะลูมิเนียมแบบกริดขนาดพื้นที่ 5 x 5 cm² ป้อนแก๊สอาร์กอนด้วยอัตราการไหล 0.5 l/min ทั้ง 2 กรณีทดสอบโดยแปรเปลี่ยนความถี่ระหว่าง 20 Hz – 1 kHz ที่ระดับสัญญาณจากวงจรกำเนิดความถี่ครั้งที่ 1, 2 และ 3 Vpp และวัดแรงดันไฟฟ้าทางออก ได้ผลการทดลองดังกราฟรูปที่ 5 ก. และ 5 ข. ตามลำดับ และบันทึกสัญญาณรูปขายน้ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าขณะกำเนิดพลาสมาที่ความถี่ 100 Hz และ 400 Hz ดังในรูปที่ 6



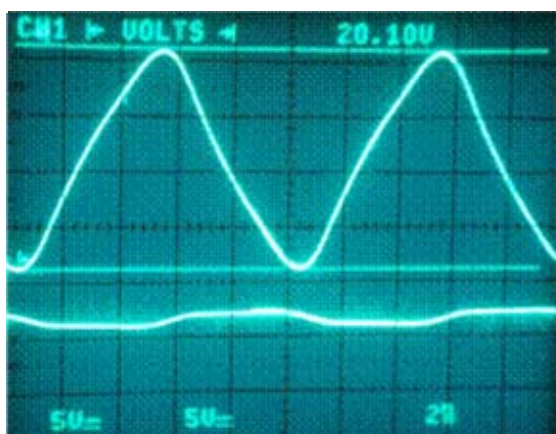
รูปที่ 4 แผนภาพระบบทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น

ผลการทดลองและวิจารณ์

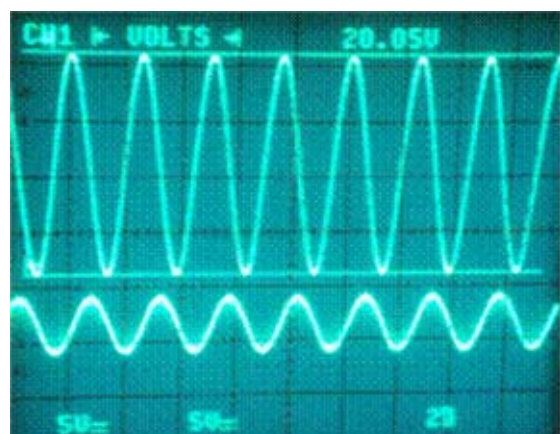
จากกราฟเปรียบเทียบผลของแรงดันไฟฟ้าเมื่อแปรเปลี่ยนความถี่ของจ่ายกำลังไฟฟ้าในรูปที่ 5 พบว่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าสามารถขับแรงดันไฟฟ้าแก๊สหลอดที่เป็นตัวต้านทานและหลอดที่เป็นชุดกำเนิดพลาสมาได้สูงสุด ณ ความถี่ 400 Hz ระดับสัญญาณป้อน 3 Vpp ให้ค่าแรงดันไฟฟ้า 20 kVpp และ 28.25 kVpp ตามลำดับ และพบว่ามีความถี่จำกัดที่ประมาณ 450 Hz โดยแรงดันไฟฟ้าสูงสุดสามารถไหลกระแสได้ 5 mA (rms) ส่วนในรูปที่ 6 แสดงสัญญาณคิซาร์จบนรูปคลื่นกระแสบริเวณใกล้ค่าพิกกระแสไฟฟ้าและจะสังเกตเห็นว่ารูปคลื่นชานซ์ขณะทำงานที่ความถี่ต่ำกว่า 100 Hz จะเริ่มผิดเพี้ยน



รูปที่ 5 ผลของแรงดันไฟฟ้าเมื่อแปรเปลี่ยนความถี่ของจ่ายกำลังไฟฟ้า : (ก) โหลดเป็นตัวต้านทาน 10 M Ω ขนาด 10 W และ (ข) โหลดเป็นชุดกำเนิดพลาสมาชนิดแผ่นไดอิเล็กทริกแบบคู่ขนาน



(ก)



(ข)

รูปที่ 6 รูปสัญญาณของแรงดันไฟฟ้า (เส้นบน) และกระแสไฟฟ้า (เส้นล่าง) ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้าหลอดที่เป็นชุดกำเนิดพลาสมา : (ก) ที่ 20.10 kVpp ความถี่ 100 Hz และ (ข) ที่ 20.05 kVpp ความถี่ 400 Hz

จากผลการทดสอบที่พบว่าแรงดันไฟฟ้าตกลงเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นเกิดจากการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในหม้อแปลงขับและการที่แหล่งจ่ายมีความถี่จำกัดที่ประมาณ 450 Hz เนื่องจากโครงสร้างของขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงมีค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุระหว่างชั้นขดลวดสูง ทำให้มีสภาพสมมูลเป็นตัวกรองความถี่ต่ำ (LC low pass filter) ส่งผลถึงการตอบสนองความถี่ในย่านแคบ ซึ่งจะต้องปรับปรุงระบบให้สามารถชดเชยแรงดันไฟฟ้าในย่านตอบสนองความถี่ให้สูงขึ้น

สรุป

ผลการพัฒนาสรุปได้ว่าการนำหม้อแปลงจุดหลอดนีออนมาพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงช่วยให้ประหยัดและมีสมรรถนะเพียงพอในการกำเนิดพลาสมาแบบแบรีเออร์ ดิสชาร์จทั้งแบบแผ่นคู่ขนานและแบบโคแอ็กเซียล โดยสามารถแปรเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าสูงสุดได้ระหว่าง 0 - 28 kVpp และกระแสไฟฟ้าสูงสุด 5 mA ที่ความถี่ 400 Hz ส่วนขนาดแรงดันไฟฟ้าในย่านความถี่ตั้งแต่ 450-750 Hz สามารถแปรเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 0-10 kVpp โดยปรับชดเชยเพิ่มด้วยระดับสัญญาณจากวงจรกำเนิดความถี่ให้มากกว่า 3 Vpp

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยและพัฒนาอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องมือนิวเคลียร์ ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และหน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลาสมาและนิวเคลียร์ฟิวชัน ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อและสนับสนุนเครื่องมือตลอดจนอุปกรณ์วิจัย ทำให้การดำเนินงานสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

1. Ulrich Kogelschatz., 2002. Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications. Plasma Chemistry and Plasma Processing. Vol 23, 1-9.
2. H. Homma, H. Katayama, and K. Yasuoka., 2008. Pulsed Dielectric Barrier Discharge of Argon Gas in Gas-Liquid Two –Phase Flow. IEEE Transaction on Plasma Science. Vol 36, No. 4.
3. Stephen R.Freeman., 1990, Electronic Devices; Discrete and Integrated. Prentice-Hall International, Inc. N.J.
4. E. Kuffel and W.S. Zaengl., 1988, 2nd Edition, High-Voltage Engineering. Pergamon Press. UK.