



การออกแบบแหล่งกำเนิดไฟฟ้าสัณยสูงความถี่ปานกลางสำหรับไดอิเล็กตริก
แบริเออร์คิสซาร์จ

**Design of High Voltage Power Supply at Medium Frequency for
Dielectric Barrier Discharge**

อาหลี ตำหมัน

Arlee Tamman

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Physics
Prince of Songkla University**

2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์	การออกแบบแหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูงความถี่ปานกลางสำหรับ ไดอิเล็กตริกแบริเออร์ดีสชาร์จ
ผู้เขียน	นายอาหลี คำหมั่น
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2554

บทคัดย่อ

พลาสมาดีสชาร์จชนิดผ่านฉนวนที่ความดันบรรยากาศสามารถสร้างได้โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้าภายในห้องพลาสมาเพื่อสร้างสนามไฟฟ้า สนามไฟฟ้าสามารถสร้างได้หลายวิธี เช่นการใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ ไฟฟ้ากระแสตรง และไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์ งานวิจัยนี้ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 6 ถึง 14 กิโลเฮิร์ตซ์ แอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 35 กิโลโวลต์ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสร้างขึ้นโดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์เพื่อเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ สัญญาณที่ได้จ่ายเข้าสู่หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง ความถี่ปานกลาง หม้อแปลงไฟฟ้าใช้สำหรับเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจากไฟฟ้าแรงดันต่ำเป็นไฟฟ้าแรงดันสูงแรงดันไฟฟ้าขาออกจากหม้อแปลงจะต้องมีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าแตกตัวของแก๊สจึงสามารถสร้างพลาสมาได้ โดยสัญญาณไฟฟ้าแรงดันสูงที่ได้จะจ่ายให้กับขั้วไฟฟ้าภายในห้องพลาสมาชนิดผ่านฉนวนเพื่อสร้างพลาสมา

กำลังไฟฟ้าของพลาสมาสามารถควบคุมได้โดยการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของสัญญาณ ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงความถี่ อีกวิธีหนึ่งคือการเปลี่ยนแปลงจำนวนพัลส์ของสัญญาณที่จ่ายแก่ขั้วไฟฟ้าในหนึ่งหน่วยเวลา วิธีนี้เรียกว่าการปรับเปลี่ยนความหนาแน่นของพัลส์ การควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยใช้การปรับเปลี่ยนความหนาแน่นของพัลส์คือการสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับและสัญญาณไฟฟ้าแรงดันศูนย์ เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยของสัญญาณขาออก สำหรับงานวิจัยนี้ เมื่อใช้การควบคุมโดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า สามารถเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของพลาสมาได้ตั้งแต่ 1 ถึง 33 วัตต์ ที่แรงดันไฟฟ้าสูงสุดคือ 15 กิโลโวลต์ ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ แต่ที่กำลังไฟฟ้าม่าพลาสมาที่เกิดขึ้นไม่มีความสม่ำเสมอ เมื่อใช้การควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยความถี่จะได้กำลังของพลาสมา ตั้งแต่ 20 ถึง 42 วัตต์ โดยเปลี่ยนแปลงความถี่ตั้งแต่ 6 ถึง 14 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่แรงดันไฟฟ้าคงที่คือ 15 กิโลโวลต์ พลาสมาที่เกิดขึ้นมีความสม่ำเสมอ แต่เปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าได้ในช่วงสั้นๆ เทคนิคการปรับเปลี่ยนความหนาแน่นของพัลส์สามารถสร้างพลาสมาที่สม่ำเสมอและควบคุมกำลังไฟฟ้าได้ในช่วงกว้างโดยมีกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 1 ถึง 33 วัตต์

Thesis Title	Design of High Voltage Power Supply at Medium Frequency for Dielectric Barrier Discharge
Author	Mr. Arlee Tamman
Major Program	Physics
Academic Year	2011

ABSTRACT

Atmospheric dielectric barrier discharges (DBD) were generated by applying an electric field to a reactor. An electric field can be generated by various voltage sources such as ac-voltage, dc-voltage, and pulse dc-voltage. For this research, an electric field was generated by using an ac-voltage of 6-14 kHz frequency with a maximum voltage of 35 kV_p. The ac-voltage power supply used a full-bridge inverter by switching dc to ac-voltage. The signals ultimately drive a primary winding of a step-up high voltage, medium frequency transformer. The high voltage, medium frequency transformer was used to convert the low square wave ac-voltage to a high sin-wave ac-voltage. The transformer output is equally high to or slightly higher than the breakdown of the neutron gas, which can generate plasma. These high voltage signals were supplied to the parallel electrodes of the DBD plasma reactor to produce the plasma discharges.

The plasma discharge power was controlled with various formations of the signal input, thus changing potential and frequency. Another way to control the plasma power can be done through a varied number of pulse signals that are applied to parallel electrodes in unit time, which is called pulse-density-modulation (PDM). The PDM technique creates an ac-voltage state and a zero state to control the average output voltage. In this research, a plasma discharge power of 1 to 33 watts was used, with variations of the voltage from 10 kV_p to 15 kV_p but it created unstable plasma at low powers. A power range of 20 to 42 watts can achieve steady state plasma discharge by adjusting frequencies from 6 kHz to 14 kHz at 15 kV_p, but it has a short range of power control. However, PDM can be used to control a wider range of plasma discharge power and the plasma discharge power can be varied from 1 to 33 watts and by this still creating steady plasma.

กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงได้เพราะได้รับความกรุณาจากบุคคลหลายท่าน ข้าเจ้าจึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ประจักษ์ แซ่อึ้ง และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา ฐิระวุฒิษฐ์กุล ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา และชี้แนะแนวทาง ตลอดจนการสนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พิบูล วณิชภินาติ สำหรับการอนุเคราะห์อุปกรณ์ในการวัดสัญญาณทางไฟฟ้า

ขอขอบคุณ คุณจรัส ฌ สุวรรณ และคุณเจริญ อัมโร สำหรับความช่วยเหลือและคำแนะนำในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือช่าง

ขอขอบคุณ อาจารย์ไพโรจน์ แสงอำไพ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับคำปรึกษาและคำแนะนำในการออกแบบและสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง ความถี่ปานกลาง

ขอขอบคุณ โครงการพัฒนากำลังคนด้านวิทยาศาสตร์ (ทุนเรียนดีวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย) ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับทุนสนับสนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่อนุเคราะห์สถานที่และอุปกรณ์สำหรับการศึกษาและทำวิจัย

ขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ และเพื่อนๆ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ พี่ๆ น้องๆ และเพื่อนๆ โครงการพัฒนากำลังคนด้านวิทยาศาสตร์ (ทุนเรียนดีวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย) ทุกคนที่คอยช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาในด้านต่างๆ

ขอขอบคุณ คุณวานิตา เจาะสามะ สำหรับกำลังใจ และคำปลอบโยน

ขอขอบคุณ คุณแม่หรือมิอะ คุณป้าหวันลิหมีะ และญาติๆ ทุกคนที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนด้วยดีเสมอมา

อาหลี คำหมั้น

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(8)
รายการภาพประกอบ	(9)
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1. บทนำตั้งเรื่อง	1
1.2. การตรวจเอกสาร	2
1.3. วัตถุประสงค์	17
1.4. ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	17
2 ทฤษฎี	18
2.1. วงจรไฟฟ้า	18
2.2. หม้อแปลงไฟฟ้า	21
2.3. กระบวนการพื้นฐานของการเกิดพลาสมา	25
2.4. การสร้างพลาสมาและแหล่งกำเนิดพลาสมา	29
2.5. พลาสมาแบบดิจิทัลจัมปนนวน	32
3 วิธีการวิจัย	43
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	43
3.2 วิธีการดำเนินงาน	43
3.3 การศึกษาคุณสมบัติของแหล่งจ่าย	61
3.4 การศึกษาคุณสมบัติของพลาสมา	62
4 ผลและการอภิปรายผลการทดลอง	64
4.1 การศึกษาคุณสมบัติของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง	64
4.2 การศึกษาคุณสมบัติของพลาสมา	75
5 บทสรุป	89
5.1 สรุปผลการทดลอง	89
5.2 ข้อเสนอแนะ	91

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม	92
ภาคผนวก	94
ภาคผนวก (ก) โปรแกรมควบคุมแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง	95
ภาคผนวก (ข) โปรแกรมนับสัญญาณกระแสดิซาร์จ	100
ภาคผนวก (ค) ภาพประกอบจากการวิจัย	102
ภาคผนวก (ง) ผลงานเผยแพร่จากวิทยานิพนธ์	110
ประวัติผู้เขียน	124

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของไมโครดิสชาร์จ์โดยมีช่องว่างอากาศ 1 มม. ที่ความดัน 1 บาร์	37
3.1 แสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟแรงสูง	43
3.2 คุณลักษณะของหม้อแปลงที่ใช้ในการออกแบบ	55
4.1 ข้อมูลจากการวัดกำลังไฟฟ้าของวงจรถออินเวอร์เตอร์	67
4.2 ทดสอบหม้อแปลงแบบขึ้นบันไดแบบต่อโหลดและไม่ต่อโหลด	72
4.3 กำหนดคุณลักษณะของหม้อแปลงเมื่อทดสอบแบบต่อโหลดและไม่ต่อ โหลด	72
4.4 กำลังของพลาสมาเมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า	76
4.5 กำลังของพลาสมาเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่	83
4.6 กำลังของพลาสมาเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพัลส์	87

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า
1.1 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าภายในหนึ่งคาบ	3
1.2 สนามไฟฟ้าและความหนาแน่นประจุที่ตำแหน่งต่างๆ ระหว่างขั้วไฟฟ้า	3
1.3 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์แบบสองทิศทาง	4
1.4 ลักษณะการทำงานของวงจรแต่ละช่วง	4
1.5 แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของสัญญาณพัลส์สองทิศทาง (ก) บวก-ลบ (ข) ลบ-บวก	5
1.6 โครงสร้างของห้องพลาสมาแบบดิสชาร์จแบบข้ามฉนวน และรูปแบบการจัดอุปกรณ์ของ Wanho Shin	6
1.7 ภาพจากกล้องซีซีดีจับภาพการดิสชาร์จแบบข้ามฉนวน เมื่อแรงดันไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ ความกว้างของสัญญาณ 1 ไมโครวินาที ที่ความถี่ (ก) 1 กิโลเฮิร์ตซ์ (ข) 5 กิโลเฮิร์ตซ์ (ค) 10 กิโลเฮิร์ตซ์	6
1.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสลายตัวของก๊าซมีเทนกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายแก่ขั้วไฟฟ้า	6
1.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสลายตัวของก๊าซมีเทนกับความกว้างของพัลส์เมื่อใช้ความถี่ 5 กิโลเฮิร์ตซ์	6
1.10 วงจรไฟฟ้ากำลังที่ใช้โมดูล IGBT	7
1.11 ขั้วไฟฟ้าและการต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้า	7
1.12 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าและขั้วไฟฟ้า	7
1.13 การทำงานในโหมดสวิตชิงของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์	8
1.14 หลักการควบคุมแบบเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพัลส์เมื่อความหนาแน่นของพัลส์มีค่า 3/4	9
1.15 แผนภาพการทำงานของวงจรควบคุมความหนาแน่นของพัลส์	10
1.16 สัญญาณที่ได้จากวงจรควบคุมความหนาแน่นของพัลส์	10
1.17 สัญญาณไฟฟ้าแรงดันสูงเมื่อกำลังไฟฟ้าสูงสุด	11
1.18 สัญญาณไฟฟ้าแรงดันสูงเมื่อกำลังไฟฟ้าเป็นครึ่งหนึ่ง	11
1.19 สัญญาณไฟฟ้าแรงดันสูงที่ได้เมื่อกำลังไฟฟ้าน้อยที่สุด	12

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
1.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันสูงสุดของ V_2 กับกำลังของไฟฟ้ากระแสตรง	12
1.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่สับเปลี่ยนเฉลี่ยกับกำลังไฟฟ้ากระแสตรง	12
1.22 แผนภาพแสดงการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบพัลส์สองทิศทาง	13
1.23 สัญญาณพัลส์สอง ทิศทางที่ได้จากแหล่งจ่ายไฟฟ้า	13
1.24 โครงสร้างและลักษณะของขั้วไฟฟ้า	14
1.25 สัญญาณพัลส์สองทิศทางที่ได้จากการทดลองเมื่อ V_D คือแรงดันคิซาร์จ I_D คือ กระแสคิซาร์จ	14
1.26 พลาสมาของอาร์กอน เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าเป็นสัญญาณพัลส์สองทิศ ทางที่ความถี่ 5 กิโลเฮิรตซ์	14
1.27 การจับคู่ปรกรณ์และการวัดค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของพลาสมา	14
1.28 (ก) ภาพตัดขวางของห้องพลาสมาแบบคิซาร์จข้ามฉนวน (ข) ห้องพลาสมาแบบคิซาร์จข้ามฉนวนที่ใช้ในการทดลอง	15
1.29 วงจรเทียบเท่าทางไฟฟ้าที่เกิดจากห้องพลาสมาคิซาร์จข้ามฉนวน (ก) วงจรเทียบเท่าทางไฟฟ้า (ข) วงจรที่ใช้จำลองแบบใน โปรแกรม Simulink	15
1.30 การเกิดคิซาร์จอย่างสม่ำเสมอของก๊าซอาร์กอน เมื่อใช้สัญญาณพัลส์ความถี่ 45.7 กิโลเฮิรตซ์ แรงดันไฟฟ้า 2.4 กิโลโวลต์	16
1.31 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าและกระแสคิซาร์จที่เวลาต่าง ๆ โดยใช้ก๊าซอาร์กอน ความดัน 1000 มิลลิบาร์ สัญญาณพัลส์ความถี่ 45.7 กิโลเฮิรตซ์ แรงดันไฟฟ้า 2.4 กิโลโวลต์ (ก) ผลจากการทดลอง และ (ข) ผลจากการคำนวณตามแบบจำลอง	16
2.1 แผนภาพการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์	18
2.2 (ก) วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่น (ข) S1 และ S2 ปิด (ค) 3 และ S4 ปิด (ง) S2 และ S4 ปิด	20
2.3 ทิศทางของสนามแม่เหล็กเมื่อมีกระแสไหลในเส้นลวด (ก) สนามแม่เหล็กมีทิศวนเข็มนาฬิกา (ข) สนามแม่เหล็กมีทิศตามเข็มนาฬิกา	21
2.4 สนามแม่เหล็กที่เกิดจาก (ก) ลวดหนึ่งเส้น (ข) ลวดสองเส้น	21
2.5 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากลวดหลายเส้น	22

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
2.6 การส่งผ่านสนามแม่เหล็กของหม้อแปลง	23
2.7 การต่อหม้อแปลงชนิดขึ้นบันได	24
2.8 แสดงการพิจารณาค่า Effective collision area	26
2.9 ภาควัดขวางของการเกิดไอออนไนเซชันจากการชนอิเล็กตรอนของก๊าซ นีออน(ก) นีออนพลังงานสูง (ข) อาร์กอน (ค)อาร์กอนพลังงานสูง(ง)	27
2.10 หลักการพื้นฐานในการสร้างพลาสมา ภายในกรอบเส้นประเป็นระบบที่จะสร้างขึ้น	31
2.11 การแบ่งพลาสมาโดยใช้ความหนาแน่นและอุณหภูมิอิเล็กตรอน	31
2.12 รูปแบบการวางตำแหน่งของแผ่นฉนวนและขั้วไฟฟ้า	32
2.13 (ก) การดิสชาร์จข้ามฉนวนที่มีฉนวนหนึ่งชั้น (ข) วงจรเทียบเท่าของการดิสชาร์จข้ามฉนวน	33
2.14 แสดงการจัดอุปกรณ์เพื่อวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า (วัดโดยใช้ตัวต้านทาน R_{meas}) และความสัมพันธ์ระหว่างประจุและแรงดัน (วัดโดยใช้ตัวเก็บประจุ C_{meas})	33
2.15 ภาพจำลองการเกิดไมโครดิสชาร์จ โดยแผ่นฉนวนอยู่ที่ขั้วแอโนด	36
2.16 ขั้นตอนการเกิดดิสชาร์จแบบเส้น โดยใช้หลักการ steamer	36
2.17 รูปจำลองการเกิดไมโครดิสชาร์จเพียง 1 เส้น เมื่อ r_{max} คือรัศมีของไมโครดิสชาร์จ และ r_0 คือรัศมีของการดิสชาร์จบนแผ่นฉนวน	37
2.18 การเกิดไมโครดิสชาร์จขนาด 6 x 6 ซม. (เปิดหน้าต่างกล้อง 20 มิลลิวินาที)	37
2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ที่จ่าย $U(t)$ และกระแสดิสชาร์จ $I(t)$	39
2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างประจุและความต่างศักย์	39
2.21 การดิสชาร์จเรืองแสงและการกระจายของแรงดัน สนามไฟฟ้า และความหนาแน่นของอนุภาคไฟฟ้า	41
3.1 วงจรภาคควบคุมและอินเวอร์เตอร์ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง	44
3.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง	44
3.3 แสดงแผนผังการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่ปานกลาง	45
3.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM-7 รุ่น ADUC7024	47

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
3.5 หน้าต่างการควบคุมแหล่งจ่ายผ่านพอร์ท RS-232	47
3.6 ผังงานของโปรแกรมหลักและคำอธิบายการทำงาน	48
3.7 ผังงานของโปรแกรมหลักและคำอธิบายการทำงาน	49
3.8 วงจรการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	50
3.9 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์	51
3.10 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์	51
3.11 วงจรขับเคลื่อนแรงดันสูง	52
3.12 วงจรขับเคลื่อนแรงดันต่ำ	52
3.13 การต่อวงจรของไอซี IR2113 เพื่อใช้ขับ Power MOSFET	53
3.14 โครงสร้างภายในของไอซี IR2113	53
3.15 วงจรขับ Power MOSFET ที่ใช้ไอซี IR2113	54
3.16 สัญญาณออกของวงจรอินเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณขาเข้า	54
3.17 สัญญาณออกของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ Full-bridge	54
3.18 หม้อแปลงชนิดขึ้นบันไดที่สร้างขึ้น	57
3.19 โครงสร้างของห้องพลาสติก	57
3.20 ขั้วต่อไฟฟ้าแรงดันสูง	59
3.21 กล้องซีซีดีสำหรับจับภาพพลาสติก	59
3.22 ออสซิลโลสโคปรุ่น Tektronix TDS3014B (100 เมกกะเฮิรตซ์)	59
3.23 โพรบวัดแรงดันสูงรุ่น Tektronix P6015A	60
4.1 สัญญาณออกของ Power MOSFET เทียบกับแรงดันขาเข้า	64
4.2 สัญญาณออกของ Power MOSFET เทียบกับแรงดันที่ใช้ขับ Power MOSFET ด้านแรงดันต่ำและด้านแรงดันสูง	64
4.3 แสดง Rise time ของสัญญาณจาก Power MOSFET	65
4.4 สัญญาณออกของ Power MOSFET เมื่อขับด้วยไอซี	65
4.5 แสดง Rise time ของสัญญาณจาก Power MOSFET เมื่อขับด้วยไอซี	66

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสของอินเวอร์เตอร์	68
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและความต่างศักย์ของอินเวอร์เตอร์	68
4.8 สัญญาณขาเข้า และขาออกของหม้อแปลงแบบหนึ่งตัว	70
4.9 แสดงลักษณะของสัญญาณเมื่อค่า α ไม่เท่ากับ 0	70
4.10 สัญญาณขาเข้า และขาออกของหม้อแปลงแบบขึ้นบันได	71
4.11 สัญญาณขาออกของหม้อแปลงตัวที่ 1 (V_{out-1}) และหม้อแปลงตัวที่ 2 (V_{out-2}) เมื่อต่อหม้อแปลงแบบขึ้นบันได	71
4.12 กำลังที่ได้จากหม้อแปลงขึ้นบันไดเมื่อทดสอบแบบต่อโหลด	73
4.13 แรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงขึ้นบันได	74
4.14 ภาพถ่ายจากกล้องซีซีดีของพลาสมาเมื่อเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้า จาก 9.44 10 12 14 16 และ 18 กิโลโวลต์ ซึ่งแสดงในภาพ ก ถึง ฉ ตามลำดับ	75
4.15 แผนภาพลิสซาจัวส์ของการเกิดดิซชาร์จ เมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 9.44 10 12 14 16 และ 18 กิโลโวลต์ ซึ่งแสดงในภาพ ก ถึง ฉ ตามลำดับ	76
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของพลาสมาและแรงดันไฟฟ้า	77
4.17 ภาพ ก1 ถึง ก6 แสดงกระแสดิซชาร์จเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายแก่ขั้วไฟฟ้า และภาพ ข1 ถึง ข6 แสดงจำนวนยอดกระแสต่อครั้งคลื่นแรงดันไฟฟ้า เมื่อเปลี่ยน แปลงแรงดันไฟฟ้า 9.44 10 12 14 16 และ 18 กิโลโวลต์ ตามลำดับ	78
4.18 ภาพถ่ายจากกล้องซีซีดีของพลาสมาเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ตั้งแต่ 6 8 10 12 และ 14 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งแสดงดังภาพ ก ถึง จ ตามลำดับ	80
4.19 ภาพ ก1 ถึง ก5 แสดงกระแสดิซชาร์จเทียบกับแรงดันไฟฟ้า และ ข1 ถึง ข5 แสดง จำนวนกระแสที่นับในแต่ละช่วงกระแส เมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ตั้งแต่ 6 8 10 12 และ 14 กิโลเฮิรตซ์ ตามลำดับ	81
4.20 แผนภาพลิสซาจัวส์ของการเกิดดิซชาร์จ เมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ตั้งแต่ 6 8 10 12 และ 14 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งแสดงดังภาพ ก ถึง จ ตามลำดับ	82
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ใช้สร้างพลาสมาและแรงดันไฟฟ้า	83

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
4.22 ภาพจากกล้องซีซีดีของพลาสติกที่ใช้การควบคุมกำลังโดยการเปลี่ยนความหนาแน่นของพัลส์ เมื่อ ก ข และ ค มีความหนาแน่นของพัลส์ 20/20 10/20 และ 1/20 ตามลำดับ	86
4.23 แผนภาพลิตซาจัวส์ที่ใช้การควบคุมกำลังของพลาสติกโดยการเปลี่ยนความหนาแน่นของพัลส์ เมื่อ ก ข และ ค มีความหนาแน่นของพัลส์ 20/20 10/20 และ 1/20 ตามลำดับ	86
4.24 แรงดันไฟฟ้าและกระแสดิซชาร์จของพลาสติกที่ควบคุมกำลังโดยการเปลี่ยนความหนาแน่นของพัลส์ ก ข และ ค มีความหนาแน่นของพัลส์ 20/20 10/20 และ 1/20 ตามลำดับ	87
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของสร้างพลาสติกและความหนาแน่นของพัลส์	87

บทที่ 1

บทนำ

1.1. บทนำตั้งเรื่อง

ปัจจุบันมีการวิจัยเพื่อพัฒนาองค์ความรู้ทางด้านต่างๆ อย่างรวดเร็ว ควบคู่กับการรณรงค์เพื่อรักษาสิ่งแวดล้อม เพื่อลดผลกระทบจากการพัฒนาทางด้านการผลิตและอุตสาหกรรม องค์ความรู้ทางด้านฟิสิกส์พลาสมาสามารถตอบสนองความต้องการทั้งสอง นั่นคือการแทนที่กระบวนการผลิตที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ด้วยกระบวนการทางด้านฟิสิกส์พลาสมา เช่น การทำความสะอาดผิวเส้นลวดด้วยพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ (Atmospheric Dielectric Barrier Discharge) ในอุตสาหกรรมผลิตแม่เหล็ก แทนการใช้สารเคมีในการทำความสะอาด (1, 1, 1, -ไตรคลอโรอีเทน) ซึ่งเป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม[1] การใช้พลาสมาในการปรับปรุงผิวของเมมเบรนเพื่อเพิ่มหรือลดอัตราการไหลของสารในการกรอง หรือปรับปรุงผิวของเมมเบรนให้ชอบ/ไม่ชอบน้ำ แทนการใช้สารเคมี เป็นต้น

แหล่งกำเนิดไฟฟ้าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งในการสร้างพลาสมา ปัจจุบันได้มีการใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับหรือแบบพัลส์แทนการใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับงานวิจัยนี้จะออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับสวิตช์สูงความถี่ปานกลาง รวมถึงการออกแบบและสร้างวงจรควบคุมกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่าย และศึกษาคุณลักษณะของพลาสมาที่ได้เพื่อประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ ในเบื้องต้นจะใช้เพื่อปรับปรุงผิวของเยื่อเลือกผ่านซึ่งสังเคราะห์ได้จากห้องปฏิบัติการของสถานวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เมมเบรน ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

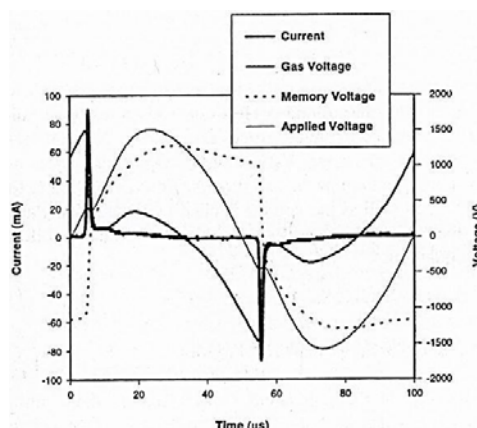
1.2. การตรวจเอกสาร

Francoise Massines และคณะ [2] ได้ทดลองเพื่อศึกษาการเกิดดิสชาร์จเรืองแสง (Glow discharge) โดยอาศัยชั้นของฉนวน (Dielectric barrier) เพื่อควบคุมการเกิดดิสชาร์จ อุปกรณ์กำเนิดพลาสมาจะประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.00 เซนติเมตร ใช้อะลูมินา (Alumina) ความหนา 0.06 เซนติเมตร เป็นชั้นของฉนวนเคลือบผิวที่ขั้วแคโทดและแอโนด โดยสามารถเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองตั้งแต่ 0 ถึง 2 เซนติเมตร แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงมีความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 กิโลโวลต์ และสามารถเปลี่ยนแปลงความถี่ตั้งแต่ 1 ถึง 100 กิโลเฮิรตซ์ การทดลองใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้า 1 กิโลโวลต์ ที่ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้า 5 มม. ความดัน 0.1 MPa และใช้การวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเพื่อศึกษาลักษณะของสัญญาณที่เกิดขึ้น การวัดกระแสดิสชาร์จ (I_d) สามารถวัดได้โดยการต่อตัวต้านทานขนาด 50 โอห์มอนุกรมระหว่าง ground และขั้วแคโทด โดยความต่างศักย์ระหว่างชั้นของก๊าซ (V_g) สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (1.1) โดยที่ V_m คือความต่างศักย์จำ (Memory Voltage) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1.2)

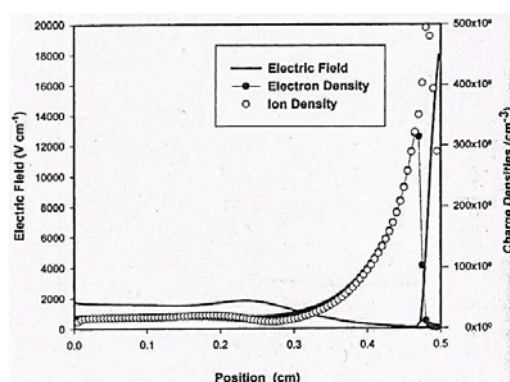
$$V_g(t) = V_a(t) - V_m(t) \quad (1.1)$$

$$V_m(t) = 1/C_{ds} \int_{t_0}^t I_a(t) dt + V_m(t_0) \quad (1.2)$$

เมื่อ C_{ds} คือตัวเก็บประจุเทียบเท่าที่เกิดจากแผ่นอะลูมินา I_d คือกระแสดิสชาร์จ $V_m(t_0)$ คือความต่างศักย์ไฟฟ้าของแผ่นอะลูมินาที่เกิดจากการสะสมของประจุจากรอบคลื่นที่ผ่านมา ซึ่ง C_{ds} ของระบบนี้มีค่า 70 พิโกฟารัด จากการทดลองและวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของการดิสชาร์จ แสดงดังภาพประกอบที่ 1.1 ซึ่งกระแสมากที่สุดคือ 90 มิลลิแอมป์เกิดขึ้นในช่วงเวลาประมาณ 1 ไมโครวินาทีและลดลงอย่างรวดเร็วจนมีค่า 7 มิลลิแอมป์ ภายใน 2 ไมโครวินาที การเปลี่ยนแปลงของ $V_g(t)$ และ $V_m(t)$ สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (1.1) และ (1.2) โดยเมื่อเริ่มจ่ายแรงดันไฟฟ้า ค่า $V_a = 0$ โวลต์และ $V_g = -V_m(t_0) = 1,150$ โวลต์ เมื่อ V_a เพิ่มขึ้นจนถึง 400 โวลต์ ซึ่งมากพอที่จะทำให้เกิดการดิสชาร์จได้ จากอุปกรณ์การทดลองที่กล่าวไว้ข้างต้น สนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอจะมีค่า 3.1 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ประจุไฟฟ้าที่เกิดจากการดิสชาร์จและการสะสมของประจุบนผิวแผ่นฉนวนทั้งสองจะชักนำให้ V_g มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งกระแสมีค่าน้อยมากเพื่อชดเชยการเพิ่มขึ้นของความต่างศักย์ภายนอก (V_a) ครึ่งรอบคลื่นต่อมา ความต่างศักย์ภายนอกและความต่างศักย์จำมีค่าเพิ่มขึ้น ความต่างศักย์ของก๊าซมีค่าเพิ่มขึ้นที่ละน้อยจนมากกว่าแรงดันไฟฟ้าแตกตัว และการดิสชาร์จก็จะเริ่มใหม่อีกครั้ง ซึ่งการทดลองใช้กำลังในการเกิดดิสชาร์จ 300 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร



ภาพประกอบที่ 1.1 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าภายในหนึ่งคาบ[2]

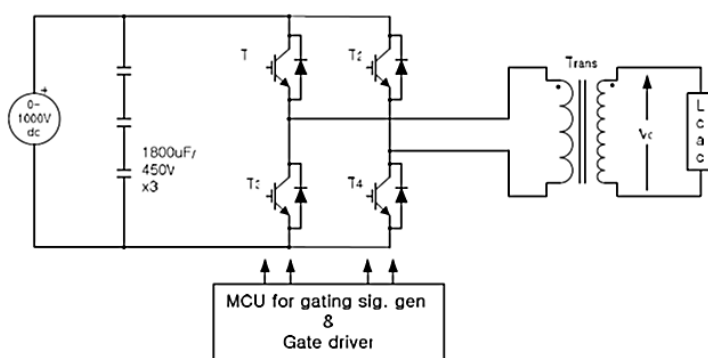


ภาพประกอบที่ 1.2 สนามไฟฟ้าและความหนาแน่นประจุที่ตำแหน่งต่างๆ ระหว่างขั้วไฟฟ้า[2]

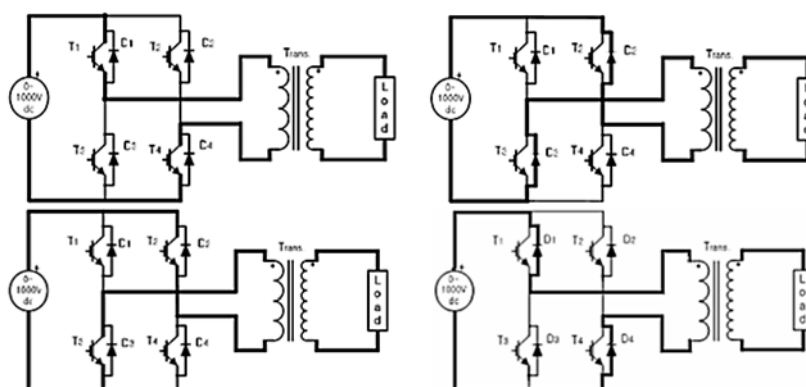
จากภาพประกอบที่ 1.2 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นของประจุที่ตำแหน่งต่าง ๆ ระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด โดยลักษณะของสนามไฟฟ้า แสดงถึงการเกิดพลาสมาแบบเรืองแสง (Glow Discharge) โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดของการเกิดในบทที่ 2 ที่ระยะ 0 เซนติเมตร เป็นด้านขั้วแอโนด และ 0.5 เซนติเมตรเป็นด้านขั้วแคโทด

- ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ขั้วแคโทดมีค่ามากที่สุด คือ 18 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร และที่ตำแหน่ง 0.3 มิลลิเมตรจากขั้วแคโทด ความหนาแน่นของไอออนมีค่ามากที่สุดคือ 5×10^{11} ไอออนต่อตารางเซนติเมตร
- ตำแหน่งของการเรืองแสงด้านขั้วลบ (Negative Glow) ห่างจากขั้วแคโทด 0.8 มิลลิเมตร จะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมากที่สุด คือ 3×10^{11} อิเล็กตรอนต่อตารางเซนติเมตร
- มีช่วงที่ความหนาแน่นสนามไฟฟ้ามีค่าคงที่ นั่นคือที่ตำแหน่ง 2.5 มิลลิเมตร จากขั้วแอโนด ซึ่งมีค่า 1.8 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร

Wanho Shin และคณะ [3] ได้รายงานการออกแบบแหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์สองทิศทาง (Bidirectional pulse) เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับสร้างพลาสมาเพื่อปรับปรุงคุณภาพอากาศและสร้างก๊าซไอโซน โดยแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0 ถึง 20 กิโลโวลต์ ความถี่ของสัญญาณพัลส์คือ 1 ถึง 10 กิโลเฮิรตซ์ และความกว้างของสัญญาณพัลส์ 1 ถึง 10 ไมโครวินาที ระบบนี้สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าให้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีแรงดันไฟฟ้าสูงสุดมากขึ้นเพื่อเพิ่มระดับพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนในพลาสมาให้สูงขึ้นและทำให้พลาสมามีความสม่ำเสมอ ส่งผลให้พลาสมาที่ได้มีพลังงานและความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูง ซึ่งการใช้สัญญาณไซน์สามารถสร้างพลาสมาที่มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงแต่พลังงานต่ำ ภาพประกอบที่ 1.3 แสดงวงจรไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถปรับแรงดันไฟฟ้า 0 ถึง 1 กิโลโวลต์ กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์ขนาด 1800 ไมโครฟารัด 450 โวลต์ จำนวน 3 ตัว ต่ออนุกรมภายในวงจรเพื่อเพิ่มความสม่ำเสมอของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายแก่ระบบ วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์เพื่อเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ หม้อแปลงไฟฟ้าโพลและไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับควบคุมการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์



ภาพประกอบที่ 1.3 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์แบบสองทิศทาง[3]

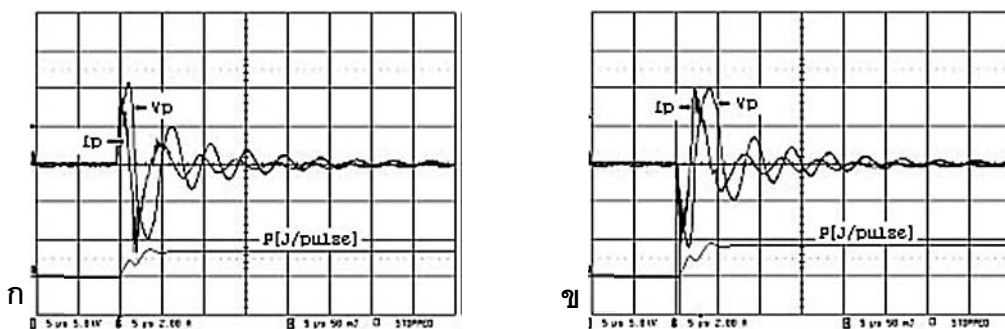


ภาพประกอบที่ 1.4 ลักษณะการทำงานของวงจรแต่ละช่วง[3]

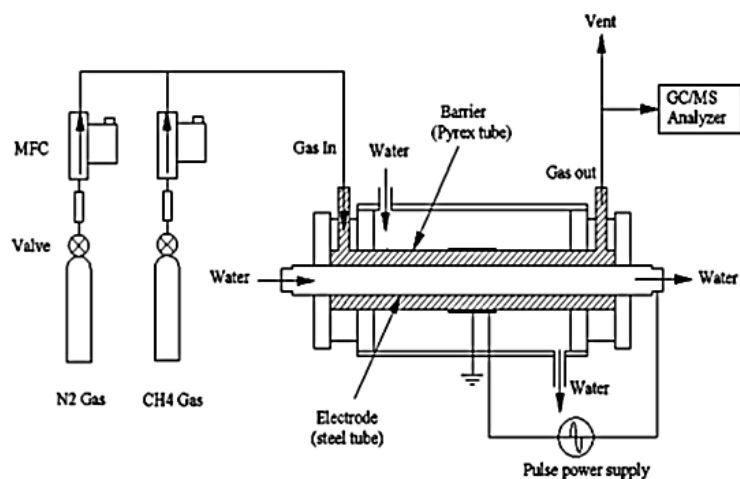
ภาพประกอบที่ 1.4 ใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ที่ใช้สวิตช์สารกึ่งตัวนำ (T1-T4) ซึ่งเป็น BiMOSFETs เบอร์ IXBH42N170 ทนแรงดันได้ 1700 โวลต์ กระแส 42 แอมแปร์ และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมการเปิด-ปิดการทำงานสวิตช์สารกึ่งตัวนำ โดยมีรายละเอียดการทำงาน ดังนี้

- ช่วงที่ 1 เปิดสวิตช์สารกึ่งตัวนำ T1 และ T4 พร้อมกัน ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่าน T1 และ T4 ไปยังหม้อแปลงไฟฟ้า เกิดเป็นแรงดันไฟฟ้าด้านบวก
- ช่วงที่ 2 ปิดสวิตช์สารกึ่งตัวนำ T1 และ T4 พลังงานซึ่งสะสมอยู่ในหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายกลับมายังวงจรอินเวอร์เตอร์ ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับผ่านไดโอด D2 และ D3 ซึ่งต่อขนานกับ T2 และ T3 และแรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงก็จ่ายไปยังโหลดด้วย
- ช่วงที่ 3 เปิดสวิตช์สารกึ่งตัวนำ T2 และ T3 พร้อมกัน ทำให้กระแสเคลื่อนที่ผ่าน T2 และ T3 ไปยังหม้อแปลงไฟฟ้า เกิดเป็นแรงดันไฟฟ้าด้านลบที่ขาออกของหม้อแปลง เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีทิศตรงกันข้ามกับช่วงที่ 1
- ช่วงที่ 4 ปิดสวิตช์สารกึ่งตัวนำ T2 และ T3 ทำให้พลังงานที่สะสมอยู่ในหม้อแปลงถูกจ่ายกลับมายังวงจรอินเวอร์เตอร์ ทำให้กระแสไหลย้อนกลับผ่านไดโอด D1 และ D4 ซึ่งต่อขนานกับ T1 และ T4 ในขณะเดียวกันแรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงก็จ่ายไปยังโหลด

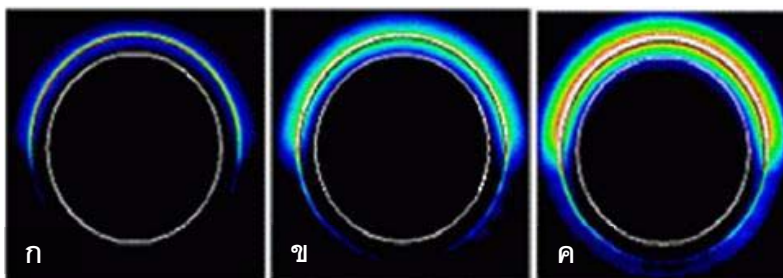
ลักษณะของสัญญาณพัลส์สองทิศทาง จากช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2 ได้สัญญาณดังภาพประกอบที่ 1.5 (ก) และการทำงานในช่วงที่ 3 และช่วงที่ 4 ได้สัญญาณดังภาพประกอบที่ 1.5 (ข) ทำให้สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีทิศกลับไปกลับมาตามทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า ส่งผลให้ไอออนบวกเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด และจากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนดสลับกัน ในการทดสอบประสิทธิภาพของแหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์สองทิศทางจะจัดอุปกรณ์ดังภาพประกอบที่ 1.6 และบันทึกภาพพลาสมาที่เกิดขึ้นด้วยกล้องซีซีดี โดยใช้ฟิวเตอร์เพื่อให้แสงความยาวคลื่น



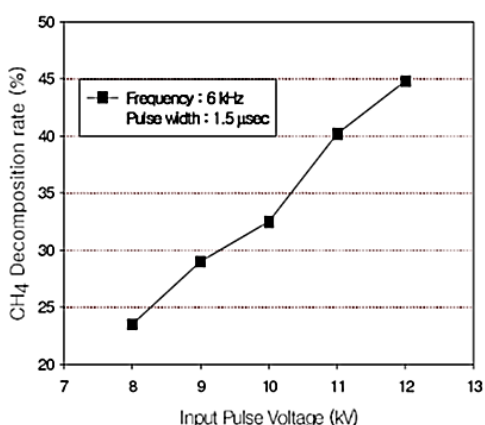
ภาพประกอบที่ 1.5 แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของสัญญาณพัลส์สองทิศทาง (ก) บวก-ลบ (ข) ลบ-บวก[3]



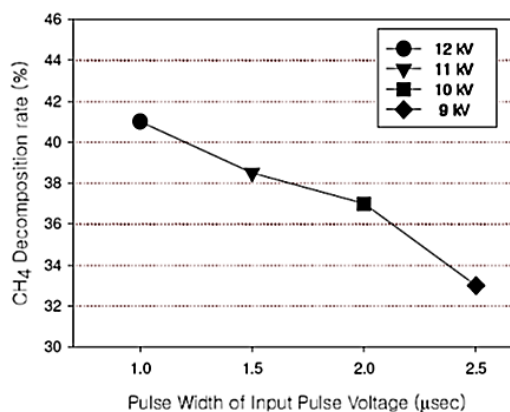
ภาพประกอบที่ 1.6 โครงสร้างของห้องพลาสมาแบบดิสชาร์จแบบข้ามฉนวน และรูปแบบการจัดอุปกรณ์ของ Wanho Shin[3]



ภาพประกอบที่ 1.7 ภาพจากกล้องซีซีดีจับภาพการดิสชาร์จแบบข้ามฉนวน เมื่อแรงดันไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ ความกว้างของสัญญาณ 1 ไมโครวินาที ที่ความถี่ (ก) 1 กิโลเฮิร์ตซ์ (ข) 5 กิโลเฮิร์ตซ์ (ค) 10 กิโลเฮิร์ตซ์[3]



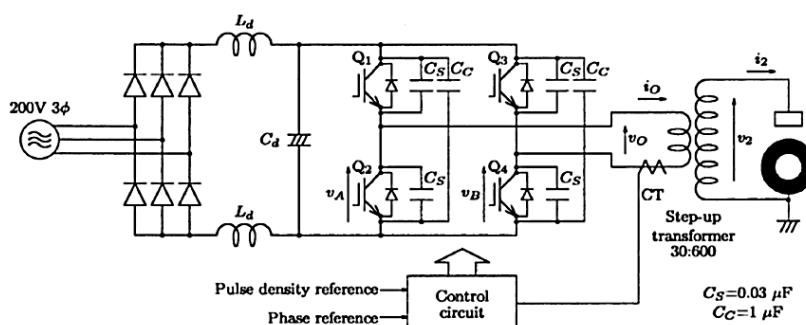
ภาพประกอบที่ 1.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสลายตัวของก๊าซมีเทนกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายแก่ขั้วไฟฟ้า[3]



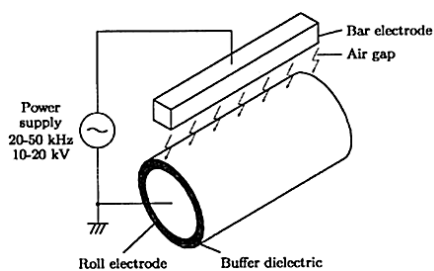
ภาพประกอบที่ 1.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสลายตัวของก๊าซมีเทนกับความกว้างของพัลส์ ความถี่ 5 กิโลเฮิร์ตซ์[3]

ต่ำกว่า 400 นาโนเมตร สามารถผ่านได้ เพราะแสงที่เกิดจากการดิสซาร์จะอยู่ในช่วงยูวี และเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนด้วย เมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณพัลส์ โดยใช้แรงดันไฟฟ้าและความกว้างของสัญญาณพัลส์เท่าเดิม จากการทดลองพบว่า ที่ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ จะเกิดพลาสมาที่ให้ความเข้มแสงมากที่สุด ซึ่งแสดงคังภาพประกอบที่ 1.7 (ค) พิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การสลายตัวของก๊าซมีเทน เมื่อเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์การสลายตัวของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพประกอบที่ 1.8 เมื่อพิจารณาที่ความถี่ 5 กิโลเฮิร์ตซ์ และเปลี่ยนแปลงค่าช่วงความกว้างของสัญญาณพัลส์ ผลที่ได้พบว่า ประสิทธิภาพการสลายตัวของก๊าซมีเทนสูงขึ้น เมื่อความกว้างของสัญญาณพัลส์แคบลงดังแสดงในภาพประกอบที่ 1.9

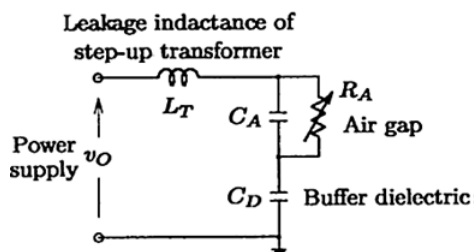
Hideaki Fujita และคณะ [4] ได้ศึกษาการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ง่ายเพื่อสร้างโคโรนาดิสซาร์จโดยใช้เทคนิคการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพัลส์ (Pulse Density Modulation, PDM) ที่ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ และกำลัง 6 กิโลวัตต์ ซึ่งสามารถควบคุมกำลังของแหล่งจ่ายได้ตั้งแต่ 0.5 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ โครนาดิสซาร์จที่เกิดขึ้นจะนำไปใช้สำหรับการปรับปรุงผิวของวัสดุ จากภาพประกอบที่ 1.10 แสดงวงจรไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ซึ่งทำงานที่ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ กำลังไฟฟ้า 6 กิโลวัตต์ ประกอบด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ โดยใช้



ภาพประกอบที่ 1.10 วงจรไฟฟ้ากำลังที่ใช้โมดูล IGBT[4]

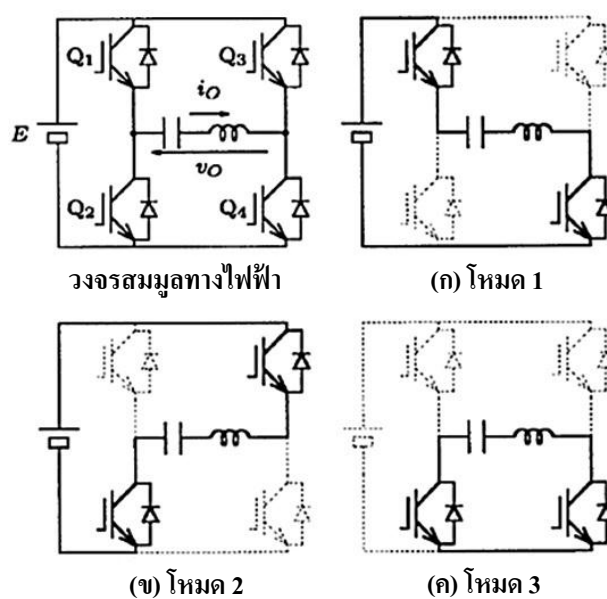


ภาพประกอบที่ 1.11 ขั้วไฟฟ้าและการต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้า[4]

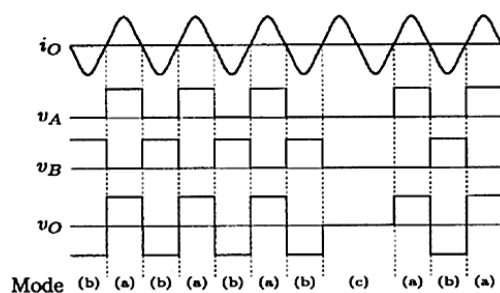


ภาพประกอบที่ 1.12 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าและขั้วไฟฟ้า[4]

โมดูล IGBT สองตัว โมดูลแต่ละตัวจะมี IGBT สองตัว ซึ่งสามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้ 600 โวลต์ และกระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์ การจัดอุปกรณ์แสดงดังภาพประกอบที่ 1.11 ภาพประกอบที่ 1.12 แสดงวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าและขั้วไฟฟ้า ค่าตัวเก็บประจุสมมูล (C_A) และตัวต้านทานสมมูล (R_A) แสดงถึงค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากช่องว่างของอากาศ ตัวแปร L_T คือการรั่วไหลของสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากหม้อแปลงไฟฟ้า ตัวแปร C_D คือค่าตัวเก็บประจุที่เกิดจากชั้นของฉนวน ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของการเกิดโคโรนาดิสชาร์จมีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นเพราะว่าความต้านทานสมมูลแปรผันตรงตามแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายแก่ขั้วไฟฟ้า ความต้านทานสมมูลมีค่าเข้าสู่อินฟินิตี้เมื่อแรงดันไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าแตกตัวและไม่มี การเกิดดิสชาร์จ เมื่อแรงดันไฟฟ้ามีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าแตกตัว ความต้านทานสมมูลลดลง ทำให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเก็บประจุสมมูล ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลมีค่ามาก



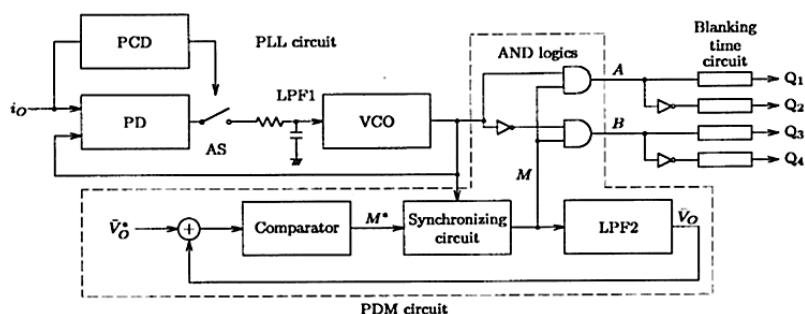
ภาพประกอบที่ 1.13 การทำงานแต่ละโหมดของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์[4]



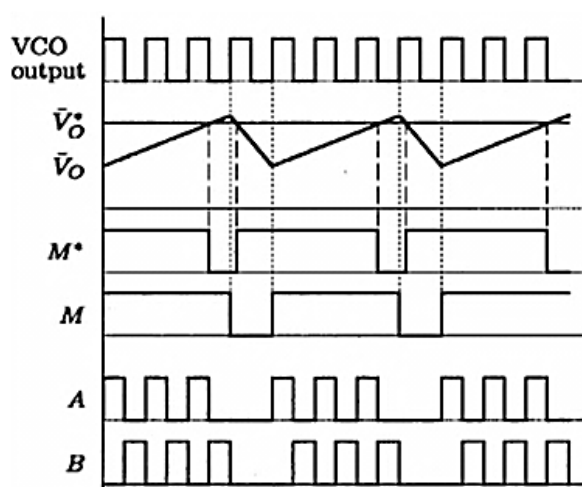
ภาพประกอบที่ 1.14 หลักการควบคุมแบบเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพัลส์เมื่อความหนาแน่นของพัลส์มีค่า $3/4$ [4]

จากภาพประกอบที่ 1.13 แสดงลักษณะการเปิด-ปิดสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์เพื่อใช้ในการควบคุมกำลังโดยการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพัลส์ และวงจรสมมูล LCR ที่เกิดจากห้องพลาสมาและหม้อแปลงไฟฟ้า การสร้างคลื่นสี่เหลี่ยมสามารถสร้างได้โดยอาศัยการทำงานในโหมดต่างๆ ของวงจรอินเวอร์เตอร์ดังนี้ โหมด 1 ภาพประกอบที่ 1.13 (ก) และ โหมด 2 แสดงดังภาพประกอบที่ 1.13 (ข) โดยโหมด 1 และ โหมด 2 ทำงานร่วมกันเพื่อสร้างคลื่นสี่เหลี่ยม และ โหมด 3 จะสร้างแรงดันไฟฟ้าศูนย์โวลต์ จากภาพประกอบที่ 1.14 แสดงลักษณะของสัญญาณเมื่อใช้การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพัลส์ควบคุมกำลังไฟฟ้า โดยสัญญาณขาออกจะเกิดจากการทำงานของ โหมด 1 โหมด 2 และ โหมด 3 ซึ่งจะใช้โหมด 3 ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จ่ายแก่ห้องพลาสมา ในลักษณะของการเปิด-ปิด การทำงานของโหมด 3 จากภาพประกอบที่ 1.14 V_0 แสดงสัญญาณไฟฟ้าเมื่อความหนาแน่นของพัลส์มีค่า $3/4$ นั่นคือโหมด 1 และ โหมด 2 ทำงานสลับกัน 3 ครั้งแล้ว โหมด 3 จะทำงาน 1 ครั้ง

ภาพประกอบที่ 1.15 ภายในเส้นประแสดงวงจรควบคุมความหนาแน่นของพัลส์ โดยใช้หลักการควบคุมแบบป้อนกลับ ซึ่งสัญญาณที่ได้แสดงดังภาพประกอบที่ 1.16 เมื่อแรงดันไฟฟ้า V_0^* ทำหน้าที่ควบคุมความหนาแน่นของพัลส์โดยการเพิ่มหรือลดระดับแรงดันไฟฟ้าของ V_0^* ถ้า V_0^* มีค่ามาก ความหนาแน่นของพัลส์ก็จะมาก และถ้า V_0^* มีค่าน้อย ความหนาแน่นของพัลส์จะมีค่าน้อย ซึ่งความหนาแน่นของพัลส์จะอยู่ในช่วง $1/50$ ถึง 1 นั่นคือ ถ้าความถี่ของสัญญาณพัลส์ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ สัญญาณที่ทำหน้าที่ควบคุมความหนาแน่นของพัลส์มีความถี่ 600 เฮิร์ตซ์ ($30 \text{ กิโลเฮิร์ตซ์}/50$) สัญญาณลอจิกของสถานะอ้างอิง M^* ได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณแบบอนาล็อกระหว่าง V_0^* และ V_0



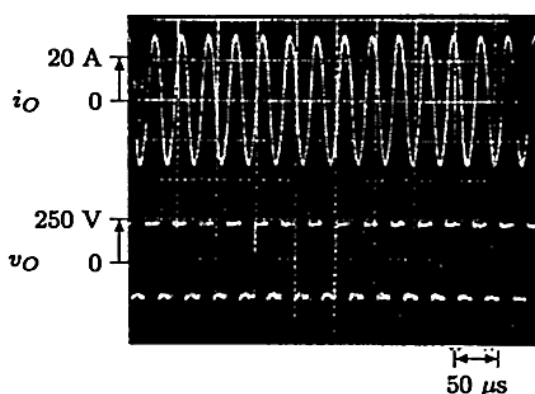
ภาพประกอบที่ 1.15 แผนภาพการทำงานของวงจรควบคุมความหนาแน่นของพัลส์[4]



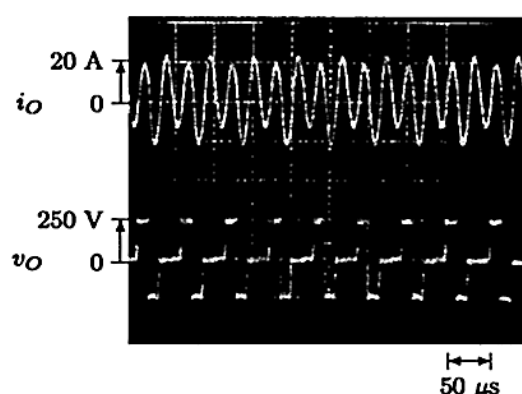
ภาพประกอบที่ 1.16 สัญญาณที่ได้จากวงจรควบคุมความหนาแน่นของพัลส์[4]

จากภาพประกอบที่ 1.15 วงจรเชิงโครโมโซมประกอบด้วยคิวิตอลเกตแบบฟลิป-ฟลอป ชนิด D โดยมี M^* เป็นสัญญาณขาเข้าและสัญญาณขาออกของ VCO เป็นสัญญาณนาฬิกา และ M เป็นสัญญาณขาออก การทำงานของฟลิป-ฟลอป จะทำงานที่ช่วงขาขึ้นของสัญญาณนาฬิกา นั่นคือ เมื่อสัญญาณ M^* เป็นสถานะ 0 และสัญญาณนาฬิกา (VCO) เป็นช่วงขาขึ้นจะทำให้สัญญาณ M เป็นสถานะ 0 ถ้าสถานะของสัญญาณ M^* เป็น 1 และสัญญาณนาฬิกาเป็นช่วงขาขึ้นจะทำให้สถานะของสัญญาณ M เป็น 1 สัญญาณ M จะเข้าสู่ขาหนึ่งของแอนเกต ทั้งสองตัว สัญญาณขาออกจาก VCO เข้าสู่อีกขาแอนเกต ตัวที่ 1 อีกสัญญาณผ่านอินเวอร์เตอร์เกต ก่อนแล้วเข้าสู่อีกขาหนึ่งของแอนเกตตัวที่ 2 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 1.15 สัญญาณขาออกของแอนเกตคือ A และ B ซึ่งแต่ละเส้นจะแยกเป็นสองสัญญาณ สัญญาณหนึ่งผ่านอินเวอร์เตอร์เกต อีกสัญญาณไม่ผ่าน และเข้าสู่วงจรหน่วงสัญญาณ (Blanking time circuit) สำหรับสร้างช่องว่างของสัญญาณควบคุมอีก 2 ไมโครวินาที เพื่อป้องกันการลัดวงจรของสัญญาณกระแสตรง สัญญาณที่ได้ใช้ในการควบคุมการเปิด - ปิด ของ สวิตช์สารกึ่งตัว 4 ตัว ภาพประกอบที่ 1.17 ถึง 1.19 แสดงรูปสัญญาณที่ได้จากการทดลองเมื่อใช้

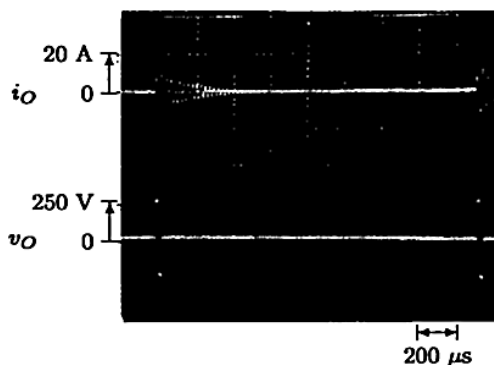
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงคงที่ 250 โวลต์ ภาพประกอบที่ 1.17 แสดงสัญญาณเมื่อกำลังไฟฟ้ามกที่สุด ซึ่งความหนาแน่นของพัลส์คือ 1 มีกำลังไฟกระแสตรง 5.6 กิโลวัตต์ ภาพประกอบที่ 1.18 แสดงสัญญาณที่ได้เมื่อกำหนดความหนาแน่นของพัลส์ที่ 1/2 นั่นคือจะมีสัญญาณสี่เหลี่ยม บวก-ลบ สลับกัน แล้วคั่นด้วยสัญญาณ 0 โวลต์ ซึ่งกำลังที่ได้ควรเป็นครึ่งหนึ่งของกำลังสูงสุด แต่กำลังไฟฟ้ากระแสตรงจะได้เพียง 1.9 กิโลวัตต์ คิดเป็น 33 เปอร์เซ็นต์ของกำลังไฟฟ้าสูงสุด (5.6 กิโลวัตต์) ภาพประกอบที่ 1.19 เมื่อความหนาแน่นของพัลส์น้อยที่สุดก็คือ 1/50 นั่นคือมีสัญญาณกระแสสลับ 1 รอบในช่วง 50 รอบ และอีก 49 รอบ เป็นสัญญาณ 0 โวลต์ กำลังไฟกระแสตรงที่ได้คือ 28 วัตต์ คิดเป็น 0.5 เปอร์เซ็นต์ของกำลังไฟฟ้ามกสุด (5.6 กิโลวัตต์) นั่นคือสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ใช้สำหรับสร้างพลาสมาในช่วงกว้างตั้งแต่ 0.5 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ภาพประกอบที่ 1.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟกระแสตรงและความต่างศักย์สูงสุด (V_2) ซึ่งกำลังไฟฟ้าสูงสุดคือ 3.6 กิโลวัตต์ โดยเปรียบเทียบการควบคุมกำลังไฟฟ้า 3 แบบคือ การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง การควบคุมความถี่และการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพัลส์ ผลที่ได้แสดงดังภาพประกอบที่ 1.20 เมื่อพิจารณาที่กำลังไฟกระแสตรง 1 กิโลวัตต์ การควบคุม 2 วิธีแรก แรงดันไฟฟ้า V_2 มีค่าต่ำกว่า 10 กิโลโวลต์ สำหรับการควบคุมโดยใช้การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพัลส์ กำลังไฟฟ้า 1.5 ถึง 3.6 กิโลวัตต์ มีแรงดันไฟฟ้า V_2 สูงสุด 15 กิโลโวลต์ และเมื่อกำลังไฟฟ้าต่ำกว่า 1.5 กิโลวัตต์ แรงดัน V_2 จะมีค่าลดลง และที่กกำลังไฟฟ้า 0.1 กิโลวัตต์ แรงดันจะลดลงเหลือ 10 กิโลโวลต์ แต่ยังคงเกิดโคโรนาดีสชาร์จที่สม่ำเสมอระหว่างช่องว่างของอากาศ ภาพประกอบที่ 1.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟกระแสตรงและความถี่สับเปลี่ยนเฉลี่ย (Average switching frequency, f_{sw}) ซึ่งก็คือเวลาที่ใช้ในการสับเปลี่ยนสัญญาณพัลส์ต่อ 1 วินาที (f_{sw}) พิจารณาที่ค่าความหนาแน่นของสัญญาณพัลส์น้อยที่สุดคือ 1/50 หรือมีกำลังไฟฟ้าเป็น 28 วัตต์ จะมีค่า



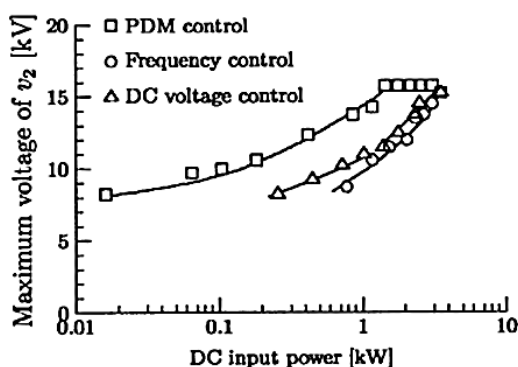
ภาพประกอบที่ 1.17 สัญญาณไฟฟ้าแรงสูงเมื่อ กำลังไฟฟ้าสูงสุด[4]



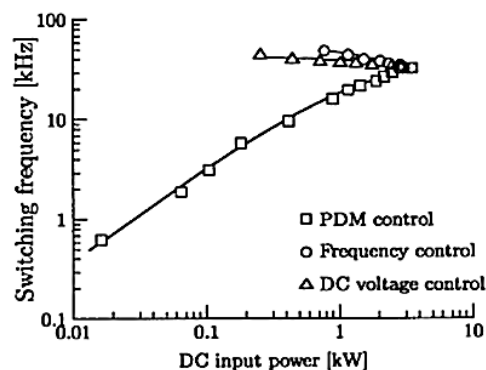
ภาพประกอบที่ 1.18 สัญญาณไฟฟ้าแรงสูง เมื่อกำลังไฟฟ้าเป็นครึ่งหนึ่ง[4]



ภาพประกอบที่ 1.19 สัญญาณไฟฟ้าแรงสูงที่ได้เมื่อกำลังไฟฟ้าน้อยที่สุด[4]



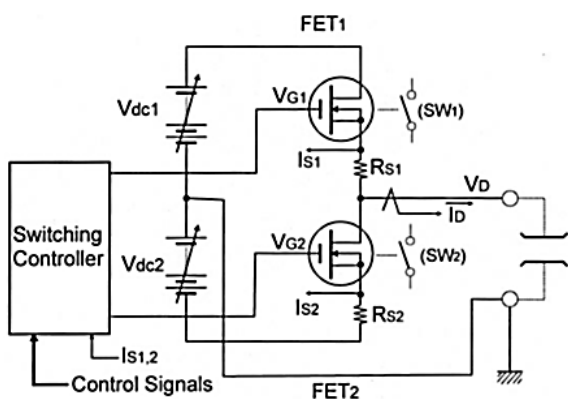
ภาพประกอบที่ 1.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของ V_2 กับกำลังของไฟฟ้ากระแสตรง[4]



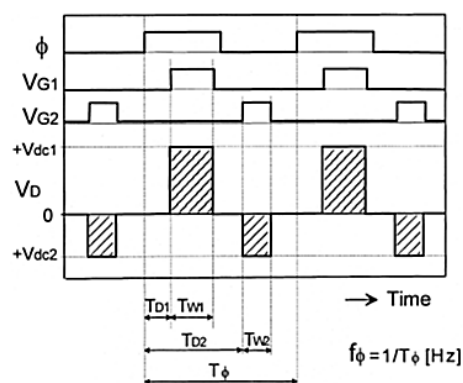
ภาพประกอบที่ 1.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่สับเปลี่ยนเฉลี่ยกับกำลังไฟฟ้ากระแสตรง[4]

ความถี่สับเปลี่ยนเฉลี่ยต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการควบคุมกำลังโดยการปรับระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและการควบคุมกำลังโดยใช้ความถี่ เนื่องจากการผลิตสัญญาณ 0 โวลต์ (โหมด 3 ในภาพประกอบที่ 1.13) ของการควบคุมกำลังของพลาสมาโดยการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพัลส์จะไม่มี การ เปิด-ปิด ของสวิตช์สารกึ่งตัวนำทั้ง 4 ตัว ทำให้ไม่มีการสูญเสียพลังงานที่เกิดจากการทำงานของสวิตช์สารกึ่งตัวนำ เมื่อทำงานที่ กำลังไฟฟ้าน้อยๆ ทำให้ค่าความถี่สับเปลี่ยนเฉลี่ยน้อยลง พิจารณาความเข้มของโคโรนาดีสชาร์จ เมื่อเกิดโคโรนาดีสชาร์จอย่างเข้มข้นบริเวณช่องว่างของอากาศเปรียบเสมือนว่ามีการลัดวงจรเกิดขึ้น นั่นคือเปรียบเสมือนว่าไม่มีค่าตัวเก็บประจุที่เกิดจากช่องว่างของอากาศ ส่งผลให้ค่าตัวเก็บประจุรวมของทั้งระบบก็คือตัวเก็บประจุบัฟเฟอร์ (Buffer capacitance : ตัวเก็บประจุที่เกิดจากชั้นของแผ่นฉนวน) และถ้าความเข้มของโคโรนาดีสชาร์จมีค่าน้อย ค่าตัวเก็บประจุรวมจะลดลง เนื่องจากมีค่าตัวเก็บประจุที่เกิดจากช่องว่างของก๊าซเกิดขึ้นด้วย ซึ่งต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุบัฟเฟอร์ การใช้เทคนิคการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพัลส์ในการควบคุมกำลังของพลาสมาสามารถสร้างโคโรนาดีสชาร์จที่มีความสม่ำเสมอและไม่สร้างความเสียหายที่ไม่ต้องการบนผิววัสดุที่ทำการปรับปรุง

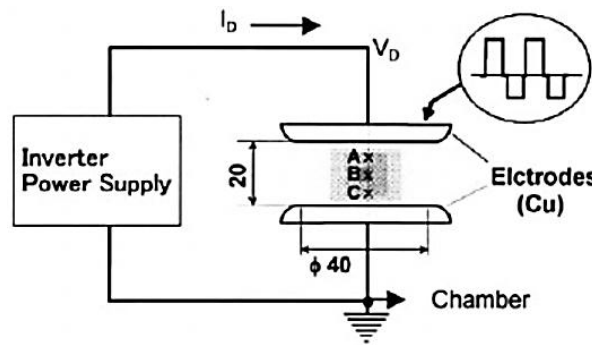
Satoshi Sugimoto และคณะ [5] ได้ศึกษาการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับสร้างพลาสมาดิสชาร์จเรืองแสงที่ความดัน 10^1 ถึง 10^3 พาสกาล โดยใช้ขั้วไฟฟ้าแบบขนาน แรงดันไฟฟ้าแตกตัวสำหรับก๊าซจะอยู่ในช่วง 300 ถึง 500 โวลต์ ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 50 มิลลิเมตร โดยใช้สัญญาณพัลส์สองทิศทาง (Bipolar pulses) ที่ไม่สมมาตรระหว่างด้านบวกและด้านลบ และไม่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้า จากภาพประกอบที่ 1.22 สวิตช์ SW_1 และสวิตช์ SW_2 เป็นสวิตช์ที่แสดงถึงการทำงานของ MOSFET 1 และ MOSFET 2 (2SK1317, Hitachi Ltd.) ใช้ในการสร้างสัญญาณพัลส์ เมื่อสวิตช์ SW_1 เปิดเป็นการสร้างสัญญาณพัลส์บวก และเมื่อสวิตช์ SW_2 เปิดเป็นการสร้างสัญญาณพัลส์ลบเพื่อจ่ายแก่ห้องพลาสมา โดยความถี่อยู่ในช่วง 0 ถึง 50 กิโลเฮิรตซ์ และแรงดันไฟฟ้าจากขดลวดเส้นบวกถึงขดลวดเส้นลบคือ 1.2 กิโลโวลต์ ภาพประกอบที่ 1.23 แสดงลักษณะของสัญญาณที่ต้องการ โดย T_{w1} และ T_{w2} คือความกว้างของสัญญาณพัลส์บวกและลบตามลำดับ T_{D1} และ T_{D2} คือช่องว่างระหว่างสัญญาณเพื่อใช้ในการควบคุมสัญญาณ V_{G1} และ V_{G2} ตามลำดับ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้างดกล่าวใช้ผลิตพลาสมาโดยใช้ก๊าซอาร์กอนที่ความดัน 100 พาสกาล โดยใช้ขั้วไฟฟ้าแบบขนาน แสดงดังภาพประกอบที่ 1.24 ลักษณะสัญญาณไฟฟ้าที่ได้แสดงดังภาพประกอบที่ 1.25 และพลาสมาที่เกิดขึ้นแสดงดังภาพประกอบที่ 1.26 เมื่อ V_D คือแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายแก่ระบบ I_D คือกระแสดิสชาร์จ ความเข้มแสงจากการดิสชาร์จ ที่ตำแหน่ง A B และ C คือ E_A E_B และ E_C ตามลำดับโดยกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วไฟฟ้ามีกำลัง 600 วัตต์ ที่ $V_D = 700$ โวลต์ และ $I_D = 0.9$ แอมแปร์ สัญญาณด้านบวกยาว 2 ไมโครวินาที โดยสามารถสร้างพลาสมาที่มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนประมาณ 1×10^{10} ถึง 6×10^{10} อิเล็กตรอนต่อตารางเซนติเมตรและอุณหภูมิพลาสมาอยู่ในช่วง 2 ถึง 6 อิเล็กตรอนโวลต์ โดยเทคนิคนี้ได้มีการนำไปใช้ในการปรับปรุงผิวของแผ่นฉนวน



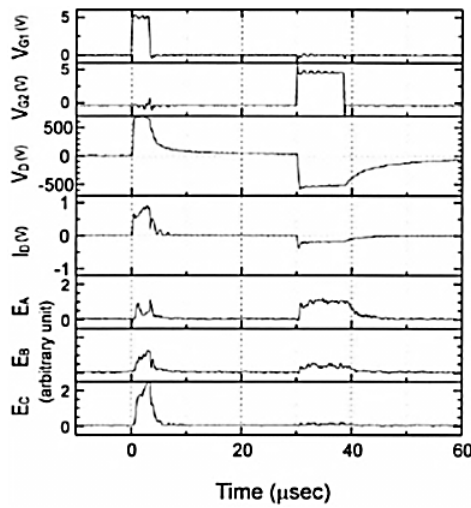
ภาพประกอบที่ 1.22 แผนภาพแสดงการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบพัลส์สองทิศทาง[5]



ภาพประกอบที่ 1.23 สัญญาณพัลส์สองทิศทางที่ได้จากแหล่งจ่ายไฟฟ้า[5]

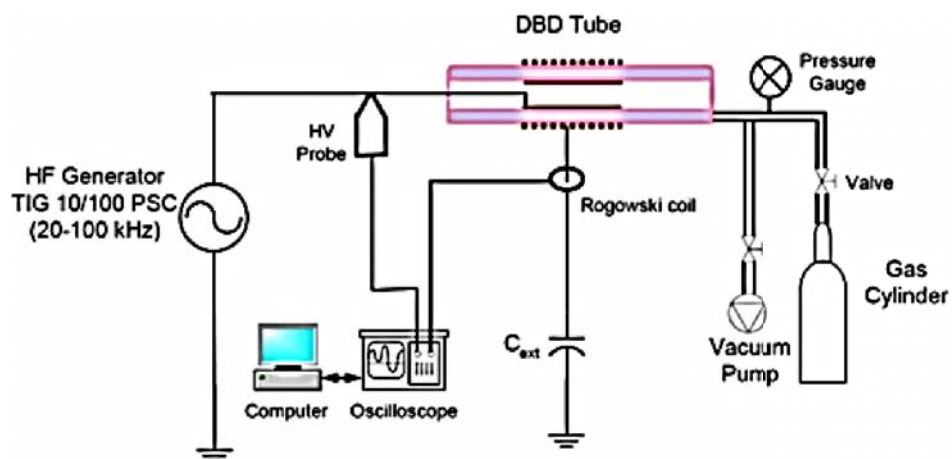


ภาพประกอบที่ 1.24 โครงสร้างและลักษณะของขั้วไฟฟ้า[5]



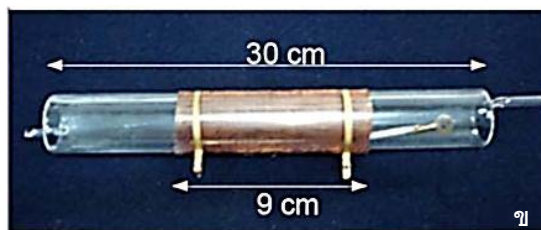
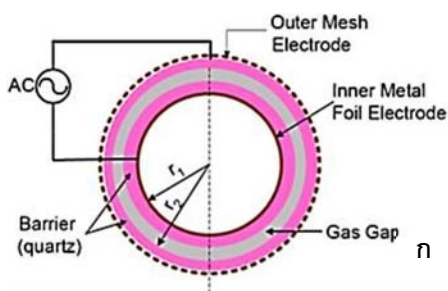
ภาพประกอบที่ 1.25 สัญญาณพัลส์สองทิศทางที่ได้จากการทดลองเมื่อ V_D คือแรงดันคิซาร์จ I_D คือกระแสคิซาร์จ[5]

ภาพประกอบที่ 1.26 พลาสมาของอาร์กอนเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าเป็นสัญญาณพัลส์สองทิศทางที่มีความถี่ 5 กิโลเฮิร์ตซ์[5]

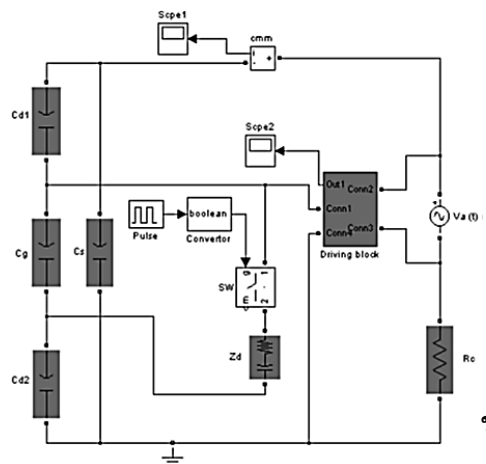
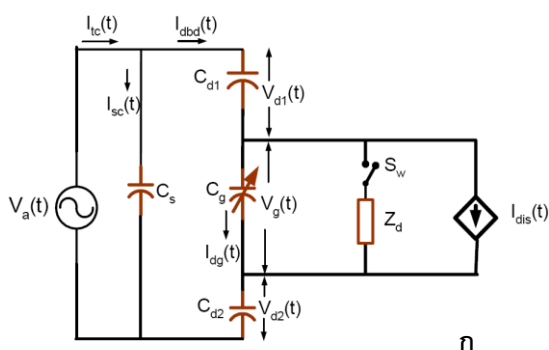


ภาพประกอบที่ 1.27 การจัดอุปกรณ์และการวัดค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าของพลาสมา[6]

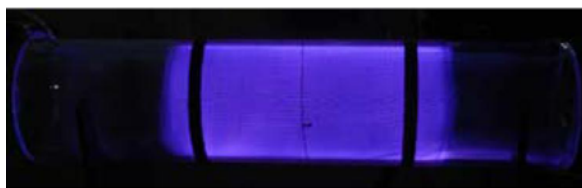
Pal และคณะ [6] ได้ศึกษาการเกิดดิสชาร์จแบบข้ามฉนวนเปรียบเทียบกับ การจำลองแบบ การจัดอุปกรณ์การทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ 1.27 โดยใช้โครงสร้างของขั้วไฟฟ้าแบบทรงกระบอกดังภาพประกอบที่ 1.28 และมีวงจรเทียบเท่าทางไฟฟ้าดังภาพประกอบที่ 1.29 (ก) ใช้แรงดันไฟฟ้าขนาด 2.4 กิโลโวลต์ ที่ความถี่ 20 ถึง 100 กิโลเฮิร์ตซ์ ห้องพลาสมามีความดัน 1000 มิลลิบาร์ วงจรเทียบเท่าทางไฟฟ้าประกอบด้วยตัวเก็บประจุสามตัวต่ออนุกรมกัน กำหนดให้ C_{d1} และ C_{d2} เป็นตัวเก็บประจุที่เกิดจากชั้นของหลอดควอร์ทด้านนอกและด้านใน ตามลำดับและ C_g เป็นตัวเก็บประจุที่เกิดจากชั้นของก๊าซ ซึ่ง C_{d1} C_{d2} และ C_g ต่ออนุกรมกัน ค่าความต้านทานเชิงความถี่ของไมโครดิสชาร์จกำหนดให้เป็น Z_d ต่อขนานอยู่กับ C_g สวิตช์ S_w ต่ออนุกรมกับ Z_d โดยสวิตช์ S_w เป็นวงจรเทียบเท่าทางไฟฟ้ากรณีที่เกิดการอาร์ทขึ้น การดิสชาร์จของพลาสมาเกิดจากการควบคุมกระแสไฟฟ้าโดยแหล่งจ่ายกระแส I_{dis} การนำกระแสไฟฟ้าโดยการดิสชาร์จขึ้นกับความต่างศักย์ V_g เมื่อนำวงจรเทียบเท่าทางไฟฟ้าที่จำลองโดยใช้โปรแกรม Simulink จะได้ดังภาพประกอบที่ 1.29 (ข) โดยวงจรดังกล่าวไม่รวมถึงคุณสมบัติของก๊าซ



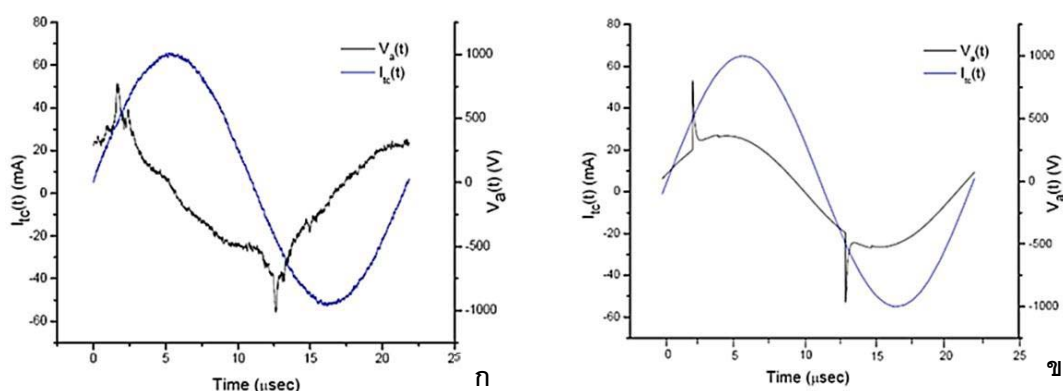
ภาพประกอบที่ 1.28 (ก) ภาพตัดขวางของห้องพลาสมาแบบดิสชาร์จข้ามฉนวน (ข) ห้องพลาสมาแบบดิสชาร์จข้ามฉนวนที่ใช้ในการทดลอง[6]



ภาพประกอบที่ 1.29 วงจรเทียบเท่าทางไฟฟ้าที่เกิดจากห้องพลาสมาดิสชาร์จข้ามฉนวน (ก) วงจรเทียบเท่าทางไฟฟ้า (ข) วงจรที่ใช้จำลองแบบในโปรแกรม Simulink[6]



ภาพประกอบที่ 1.30 การเกิดดิซชาร์จอย่างสม่ำเสมอของก๊าซอาร์กอน เมื่อใช้สัญญาณพัลส์ความถี่ 45.7 กิโลเฮิร์ตซ์ แรงดันไฟฟ้า 2.4 กิโลโวลต์[6]



ภาพประกอบที่ 1.31 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าและกระแสดิซชาร์จที่เวลาต่าง ๆ โดยใช้ก๊าซอาร์กอน ความดัน 1000 มิลลิบาร์ สัญญาณพัลส์ความถี่ 45.7 กิโลเฮิร์ตซ์ แรงดันไฟฟ้า 2.4 กิโลโวลต์ (ก) ผลจากการทดลอง และ (ข) ผลจากการคำนวณตามแบบจำลอง[6]

จากระบบข้างต้นทำให้สามารถสร้างพลาสมาดิซชาร์จข้ามฉนวนที่มีความสม่ำเสมอดังภาพประกอบที่ 1.30 และจากการทดลองและสร้างแบบจำลองโดยใช้วงจรเทียบเท่าทางไฟฟ้าทำให้ได้คุณลักษณะทางไฟฟ้าแสดงดังภาพประกอบที่ 1.31 ภาพประกอบที่ 1.31 (ก) เป็นกราฟที่ได้จากการทดลองโดยใช้พลาสมาของก๊าซอาร์กอน ที่ความดัน 1000 มิลลิบาร์ แหล่งจ่ายเป็นแบบพัลส์ที่ความถี่ 45.7 กิโลเฮิร์ตซ์ แรงดันไฟฟ้า 2.4 กิโลโวลต์ ภาพประกอบที่ 1.31 (ข) เป็นกราฟที่ได้จากการจำลองแบบ ซึ่งกราฟทั้งสองมีความสอดคล้องกัน

WU Jun และคณะ [7] ได้ศึกษาความสามารถในการละลายของเซลล์โลสทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงผิวด้วย Dielectric barrier discharge plasma (DBD Plasma) โดยใช้เครื่อง X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) และ scanning electron microscopy (SEM) ผลการทดลองที่ได้พบว่า การปรับปรุงโดยใช้ DBD Plasma นั้นสามารถลดความแรงของพันธะไฮโดรเจนในเซลล์โลสได้ ทำให้เซลล์โลสสามารถละลายในสารละลายโซเดียมออกไซด์ได้ใกล้เคียง 100% [8]

1.3. วัตถุประสงค์

- 1.3.1. ออกแบบวงจรไฟฟ้าเพื่อสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่ปานกลางและการควบคุมกำลังไฟฟ้า
- 1.3.2. ศึกษาการควบคุมกำลังของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบพัลส์ สำหรับประยุกต์ใช้ในงานด้านพลาสมา
- 1.3.3. ศึกษาคุณลักษณะของพลาสมาที่ได้จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าสวิตช์สูงความถี่ปานกลางที่สร้างขึ้น

1.4. ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

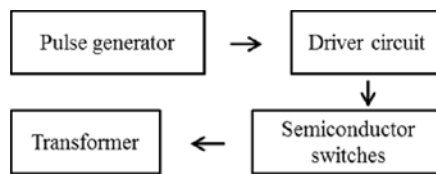
- 1.4.1. สร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าความต่างศักย์สูง 15 กิโลโวลต์ ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ โดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ และหม้อแปลงไฟฟ้า
- 1.4.2. ศึกษาการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยใช้การควบคุมความหนาแน่นของพัลส์ (PDM) ควบคุมโดยการเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้า และการควบคุมโดยเปลี่ยนแปลงความถี่
- 1.4.3. ศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของการเกิดดิสชาร์จเพื่อพิจารณาชนิดของการดิสชาร์จที่เกิดขึ้น
- 1.4.4. ศึกษาความเข้มแสงและสเปกตรัมของพลาสมาที่ได้โดยใช้เทคนิค Optical Emission Spectroscopy

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 วงจรไฟฟ้า

2.1.1 วงจรอินเวอร์เตอร์



ภาพประกอบที่ 2.1 แผนภาพการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์เป็นวงจรไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อใช้สำหรับเครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ หรือใช้ในงานเฉพาะทาง วงจรอินเวอร์เตอร์สามารถแบ่งโดยอาศัยการทำงานของวงจรได้หลายรูปแบบ เช่น วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ (Full-bridge inverter) วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์ (Half-bridge inverter) วงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multilevel inverter) เป็นต้น ผังการทำงานโดยทั่วไปของวงจรอินเวอร์เตอร์แสดงดังภาพประกอบที่ 2.1 ประกอบด้วย วงจรกำเนิดสัญญาณควบคุม (Pulse generator) วงจรขับ (Driver circuit) สวิตซ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor switches) และหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)

- วงจรกำเนิดสัญญาณควบคุม

วงจรกำเนิดสัญญาณควบคุมทำหน้าที่สร้างสัญญาณควบคุมการเปิด-ปิด ของสวิตซ์สารกึ่งตัวนำแต่ละตัว เพื่อตัดต่อวงจรไฟฟ้าสำหรับสร้างสัญญาณตามรูปแบบที่ต้องการ วงจรนี้สามารถสร้างได้หลายวิธี เช่น สร้างจากวงจรถ่ายกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยม สร้างจากไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นต้น สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้ได้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวกำเนิดสัญญาณควบคุม และป้อนค่าต่าง ๆ ผ่านพอร์ต RS232 ของคอมพิวเตอร์

- วงจรขับ

วงจรขับทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ได้จากวงจรถ่ายกำเนิดสัญญาณควบคุมให้ระดับแรงดันหรือกระแสเพียงพอต่อการควบคุมการทำงานของสวิตซ์สารกึ่งตัวนำ ซึ่งรูปแบบวงจรขับจะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับชนิดของสวิตซ์สารกึ่งตัวนำที่เลือกใช้ งานวิจัยนี้เลือกใช้

Power MOSFET เป็นสวิตช์สารกึ่งตัวนำ และส่วนหนึ่งของงานวิจัยได้ศึกษาการใช้วงจรรวม Boot strap ที่สร้างจาก MOSFET เป็นวงจรรวม เปรียบเทียบกับการใช้วงจรรวมเบอร์ IR2113 เป็นตัวขับ

- สวิตช์สารกึ่งตัวนำ

สวิตช์สารกึ่งตัวนำเช่น ทรานซิสเตอร์กำลัง (Bipolar Junction Transistors : BJT หรือ Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistors : MOSFET) และ ไทริสเตอร์ เป็นต้น อุปกรณ์ดังกล่าวทำหน้าที่ในการเปิด-ปิดวงจรไฟฟ้า เพื่อให้กระแสไหลผ่านโหลดในทิศทางที่ต้องการ งานวิจัยชิ้นนี้เลือกใช้ Power MOSFET ซึ่งมีความสามารถในการเปิดปิดที่รวดเร็ว และสามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย

- หม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าสามารถแบ่งได้หลายชนิด ตามลักษณะของการนำไปใช้งาน เช่น หม้อแปลงลดแรงดันไฟฟ้า (Step down transformer) หม้อแปลงเพิ่มแรงดันไฟฟ้า (Step up transformer) หม้อแปลงไฟฟ้าอัตโนมัติ (Autotransformer) เป็นต้น หม้อแปลงลดแรงดันไฟฟ้าและหม้อแปลงเพิ่มแรงดันไฟฟ้า ประกอบด้วยขดลวดด้านปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ โดยหม้อแปลงลดแรงดันไฟฟ้าจะมีจำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิมากกว่าด้านทุติยภูมิ และหม้อแปลงเพิ่มแรงดันไฟฟ้ามีจำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิน้อยกว่าด้านทุติยภูมิ

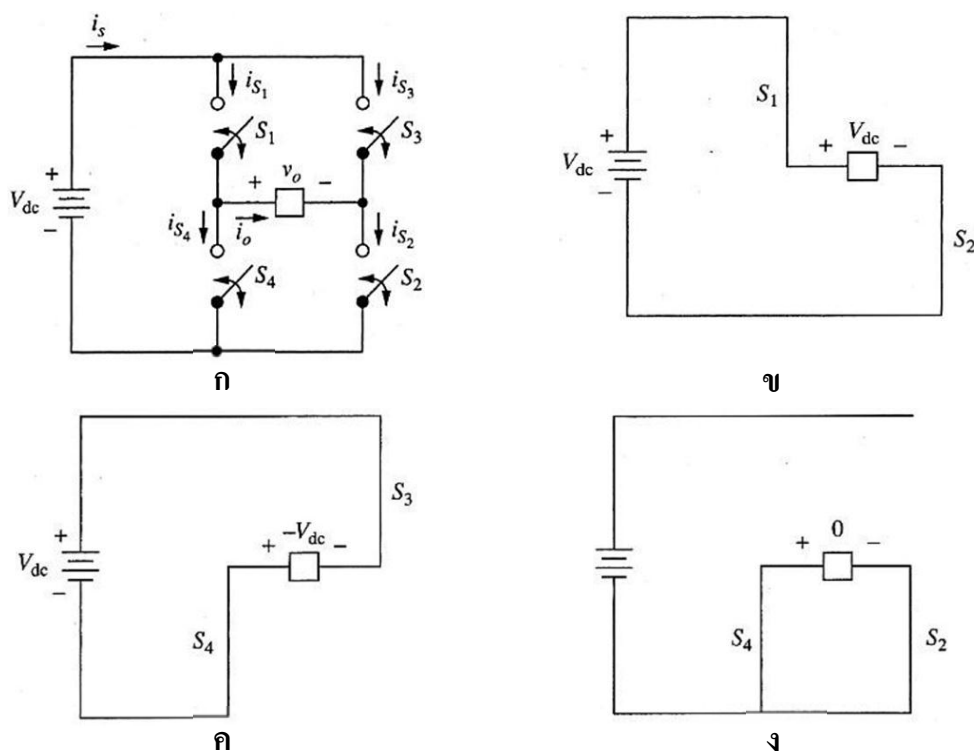
2.1.2 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่น

การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่น (Full-bridge inverter) แสดงดังภาพประกอบที่ 2.2 ซึ่งประกอบด้วย สวิตช์จำนวนสี่ตัว แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และเครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ (load) สวิตช์ทั้งสี่ตัวทำหน้าที่ เปิด-ปิดวงจรไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อให้ไฟฟ้าที่จ่ายต่อโหลดมีลักษณะของสัญญาณเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ จากภาพประกอบที่ 2.2 (ก) แผนภาพแสดงการต่อสวิตช์เข้ากับวงจรไฟฟ้ากระแสตรงและโหลด การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่นสามารถแบ่งการทำงานได้เป็น 3 โหมด

โหมดที่ 1 วงจรไฟฟ้างานประกอบที่ 2.2 (ข) แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าเมื่อจ่ายสัญญาณควบคุมให้แก่สวิตช์ S_1 และ S_2 เพื่อปิดวงจร ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลจากขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงผ่านสวิตช์ S_1 เข้าสู่โหลดด้านขั้วบวกและผ่านสวิตช์ S_2 กลับเข้าสู่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ปรากฏต่อโหลดเป็นแรงดันไฟฟ้าบวก

โหมดที่ 2 วงจรไฟฟ้าดังภาพประกอบที่ 2.2 (ค) แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าเมื่อจ่ายสัญญาณควบคุมให้แก่สวิตช์ S_3 และ S_4 เพื่อปิดวงจร ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลจากขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงผ่านสวิตช์ S_3 เข้าสู่โหลดด้านซ้ายและผ่านสวิตช์ S_4 กลับเข้าสู่แหล่งจ่าย ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ปรากฏต่อโหลดเป็นโพลบ

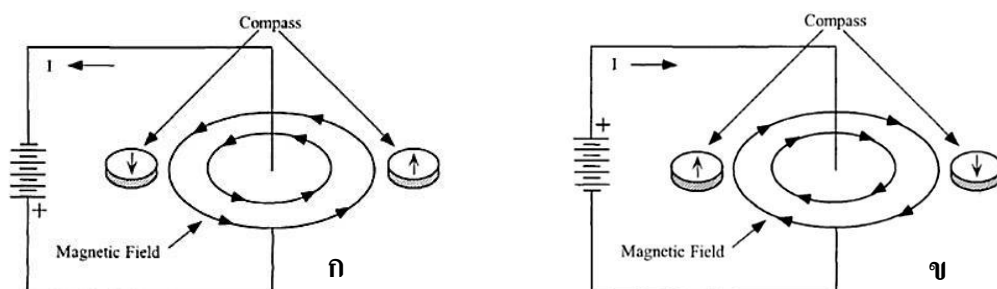
โหมดที่ 3 วงจรไฟฟ้าดังภาพประกอบที่ 2.2 (ง) แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าเมื่อจ่ายสัญญาณควบคุมให้แก่สวิตช์ S_2 และ S_4 เพื่อปิดวงจร ทำให้กระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลจากขั้วบวกของแหล่งจ่ายเข้าสู่โหลดได้ ทำให้ไม่มีแรงดันไฟฟ้าปรากฏต่อโหลด



ภาพประกอบที่ 2.2 (ก)วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่น (ข) S_1 และ S_2 ปิด (ค) S_3 และ S_4 ปิด (ง) S_2 และ S_4 ปิด [9]

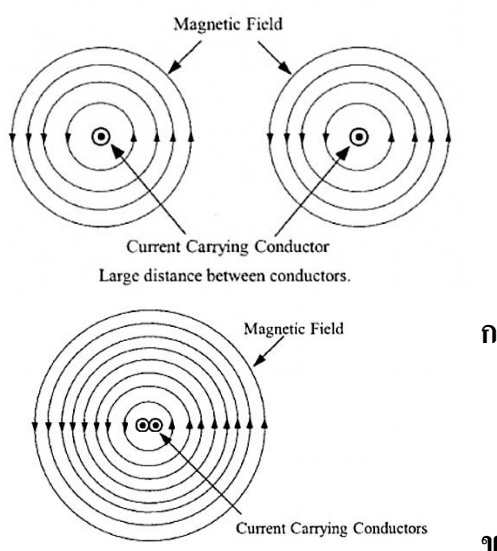
2.2 หม้อแปลงไฟฟ้า

2.2.1 สนามแม่เหล็กในขดลวด



ภาพประกอบที่ 2.3 ทิศทางของสนามแม่เหล็กเมื่อมีกระแสไหลในเส้นลวด (ก) สนามแม่เหล็กมีทิศทวนเข็มนาฬิกา (ข) สนามแม่เหล็กมีทิศตามเข็มนาฬิกา[10]

เมื่อมีกระแสไหลผ่านเส้นลวด จะส่งผลให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบๆ เส้นลวด ทิศทางของสนามแม่เหล็กหาได้โดยใช้กฎมือขวา นั่นคือ ให้นิ้วหัวแม่มือชี้ในทางเดียวกันกับทิศทางไหลของกระแสและกำเส้นลวดไว้ สนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นรอบ ๆ เส้นลวดในทิศทางที่นิ้วทั้งสี่ชี้ไป นั่นคือเมื่อกระแสไฟฟ้าวิ่งไปทางหนึ่งก็จะเกิดสนามไฟฟ้าขึ้น และเมื่อกระแสไฟฟ้าวิ่งในทิศทางตรงกันข้าม ทิศทางสนามแม่เหล็กก็เปลี่ยนไปในทางตรงกันข้าม ดังแสดงในภาพประกอบ 2.3 (ก) และ(ข)



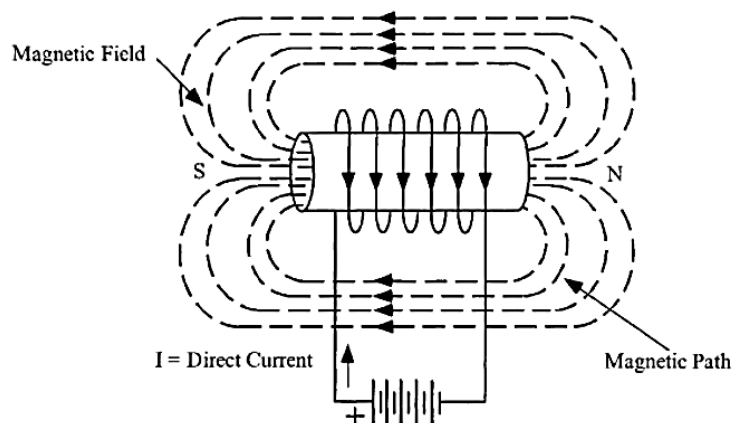
ภาพประกอบที่ 2.4 สนามแม่เหล็กที่เกิดจาก (ก) ลวดหนึ่งเส้น (ข) ลวดสองเส้น[10]

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (2.1)$$

$$B = \mu_0 H \quad (2.2)$$

เมื่อ H คือแรงทางแม่เหล็ก
 B คือสนามแม่เหล็ก
 r คือ รัศมีของวงแอมแปร์
 I คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลในเส้นลวด
 μ_0 คือ Permeability (สัดส่วนของ B/H)

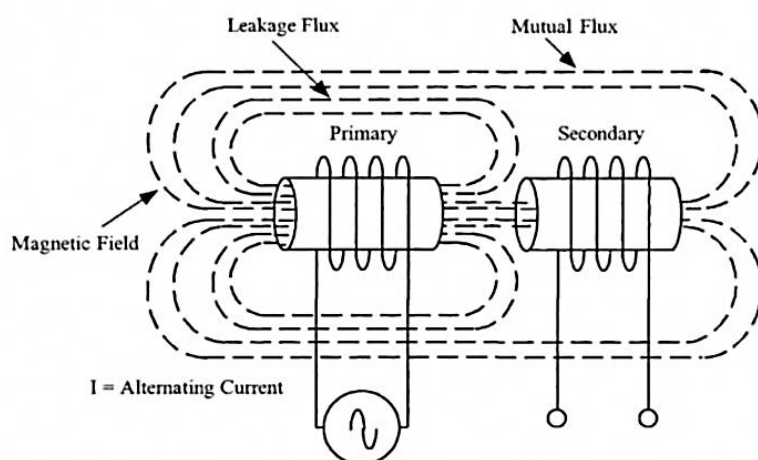
เมื่อพิจารณาลวดสองเส้นที่อยู่ห่างกันและมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในทิศเดียวกัน จะเกิดสนามแม่เหล็กล้อมรอบลวดแต่ละเส้นดังภาพประกอบที่ 2.4(ก) แต่เมื่อนำลวดสองมาอยู่ใกล้กัน กระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางเดียวกัน จะเกิดสนามแม่เหล็กล้อมรอบลวดทั้งสองและทำให้เกิดความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มเป็นสองเท่าดังภาพประกอบที่ 2.4 (ข) โดยแรงทางแม่เหล็กที่เกิดขึ้นคำนวณได้จากสมการที่ (2.1) และสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแสที่ไหลผ่านลวดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.2)



ภาพประกอบที่ 2.5 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากลวดหลายเส้น[10]

พิจารณาภาพประกอบที่ 2.5 แสดงสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดหลายเส้น ลักษณะของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเหมือนกับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแท่งแม่เหล็กถาวร

2.2.2 หม้อแปลงไฟฟ้าความต่างศักย์สูง



ภาพประกอบที่ 2.6 การส่งผ่านสนามแม่เหล็กของหม้อแปลง[10]

หม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยขดลวดสองขดที่ใช้สนามไฟฟ้าร่วมกัน โดยขดลวดปฐมภูมิ (Primary) จะต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ เมื่อกระแสไหลผ่านขดลวดทำให้เกิดสนามไฟฟ้าโดยมีทิศทางจากด้านหนึ่งไปอีกด้านของขดลวด และ ขดลวดทุติยภูมิ (Secondary) จะถูกเหนี่ยวนำโดยสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดปฐมภูมิ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดเมื่อสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งความต่างศักย์ที่เกิดในขดลวดทุติยภูมิจะเป็นสัดส่วนของจำนวนขดลวดทั้งสอง ดังสมการที่ (2.3) จำนวนขดลวดด้านปฐมภูมิสามารถคำนวณได้จากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) ดังสมการที่ 2.4

$$V_s = \frac{N_s}{N_p} V_p \quad (2.3)$$

เมื่อ V_s คือความต่างศักย์ของขดลวดทุติยภูมิ N_s คือจำนวนขดลวดด้านทุติยภูมิ

V_p คือความต่างศักย์ของขดลวดปฐมภูมิ N_p คือจำนวนขดลวดด้านปฐมภูมิ

$$N_p = \frac{V_p (10^4)}{A_c B_{uc} f k_f} \quad (2.4)$$

เมื่อ A_c คือพื้นที่หน้าตัดของแกน (cm^2)

f คือความถี่ของสัญญาณขาเข้า (Hz)

B_{uc} คือความหนาแน่นฟลักซ์ (Tesla)

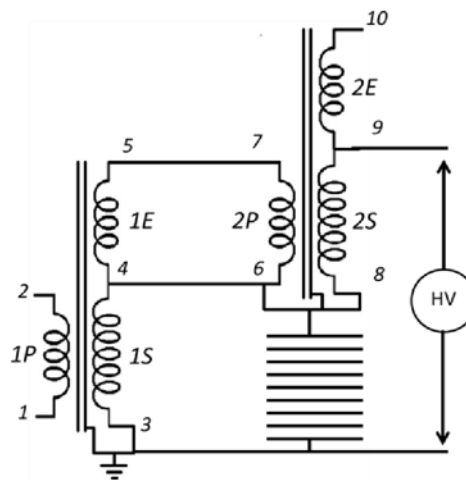
k_f คือค่าสัมประสิทธิ์รูปคลื่น

= 4.44 สำหรับสัญญาณรูป sin

= 4.00 สำหรับสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม

2.2.3 หม้อแปลงชนิดขั้นบันได

การต่อหม้อแปลงชนิดขั้นบันได (Cascade Transformer) เป็นเทคนิคในการต่อหม้อแปลงเพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงให้มากขึ้น โดยไม่ต้องเพิ่มจำนวนสัญญาณขาเข้าของหม้อแปลง โดยหม้อแปลงที่นำมาใช้ต้องเป็นหม้อแปลงชนิด 3 ขด (Tertiary Winding) ซึ่งประกอบด้วย ขดลวดปฐมภูมิ (Primary Windings) ขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Windings) และ ขดลวดกระตุ้น (Excitation Windings)



ภาพประกอบที่ 2.7 การต่อหม้อแปลงชนิดขั้นบันได

ภาพประกอบที่ 2.7 แสดงการต่อหม้อแปลงสองตัวแบบขั้นบันได โดยการต่อสัญญาณขาเข้าทาง 1 และ 2 และต่อขดลวดกระตุ้นของหม้อแปลงตัวแรกเข้ากับขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงตัวที่สอง (5 ต่อกับ 7 และ 4 ต่อกับ 6) และต่อขดลวดเส้นที่ 8 เข้ากับเส้นที่ 6

เมื่อพิจารณาแรงดันขาออกของแต่ละตัว แรงดันขาออกของหม้อแปลงตัวที่สอง (9) เทียบกับ 8) จะมีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับแรงดันขาออกของหม้อแปลงตัวแรก (ขา 4 เทียบกับขา 3) แต่เมื่อพิจารณาแรงดันไฟฟ้าที่ขา 9 เทียบกับกราวด์ แรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงตัวที่สอง (9) จะมีแรงดันไฟฟ้าเป็นสองเท่าของแรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงตัวแรก (4) ซึ่งแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงที่นำไปใช้จะใช้เส้นที่ 9 เทียบกับกราวด์

เมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงตัวแรกต้องมีค่าเป็นสองเท่าของตัวที่สอง (กรณีที่ใช้หม้อแปลงสองตัว) เนื่องจากหม้อแปลงตัวแรกต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าส่วนหนึ่งให้กับหม้อแปลงตัวที่สองด้วย ซึ่งกำลังไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบขั้นบันไดก็คือกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงตัวแรกนั่นเอง

2.3 กระบวนการพื้นฐานของการเกิดพลาสมา

สิ่งที่สำคัญสำหรับการสร้างพลาสมาคือการถ่ายเทพลังงานให้กับแก๊ส ซึ่งสามารถทำได้ผ่านการชนของอนุภาคที่ถูกเร่งให้มีพลังงานสูงขึ้น ภาคตัดขวางของการชนเป็นตัวแปรที่บอกถึงโอกาสในการชน เมื่อเกิดการชนขึ้นจะมีการถ่ายเทพลังงาน การสูญเสียอิเล็กตรอนและการรับอิเล็กตรอน ทำให้เกิดอนุภาคที่มีประจุ ซึ่งอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า จึงมีการเคลื่อนที่ของอนุภาคในทิศทางตามสนามไฟฟ้า และสวนทางกับสนามไฟฟ้า โดยขึ้นอยู่กับประจุของอนุภาคนั้น กระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ที่เกิดการแตกตัวของแก๊ส นั่นคือก๊าซสามารถนำไฟฟ้าได้

2.3.1 การชน (Collisions)

การชนของอนุภาคเป็นการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างอนุภาคของก๊าซ โดยการชนสามารถแบ่งเป็น 2 แบบ [3] คือ

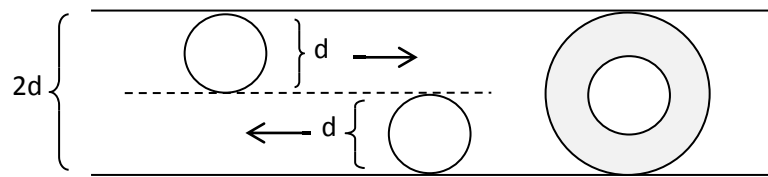
2.3.1.1 การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision) เป็นการชนที่มีการแลกเปลี่ยนพลังงานจลน์ระหว่างอนุภาคที่ชน แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของอนุภาค จึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอะตอมหรือโมเลกุล พลังงานเฉลี่ยที่ถ่ายเทจากอนุภาคมวล m ไปยังอนุภาคมวล M เป็นไปตามสมการ

$$K.E. = \frac{2mM}{(m+M)^2} \cong \frac{2m}{M} \quad (2.5)$$

2.3.1.2 การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic collision) เมื่ออิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอ และชนกับอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายใน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของอะตอม หรือโมเลกุลที่ถูกชน ทำให้อิเล็กตรอนของอะตอมอยู่ในสถานะกระตุ้น หรือเกิดไอออนไนเซชัน

2.3.2 ภาคตัดขวางของการชน (Collision cross section)

การชนของอนุภาคในก๊าซเป็นไปอย่างไร้ระเบียบ นั่นคือโอกาสที่แต่ละอนุภาคจะชนนั้นมีความไม่แน่นอน และลักษณะของการชนก็ไม่มีที่แน่นอน นั่นคืออาจชนโดยที่จุดศูนย์กลางมวลอยู่ในแนวเดียวกัน หรืออาจจะไม่อยู่ในแนวเดียวกันก็ได้ ดังนั้นการชนจะพิจารณาถึงโอกาส (Probability) และระยะทางเฉลี่ยที่อนุภาคเคลื่อนที่โดยไม่มีอาการชน (Mean free path)



ภาพประกอบที่ 2.8 แสดงการพิจารณาค่า Effective collision area

จากภาพประกอบที่ 2.8 เมื่ออนุภาคทรงกลมตันเส้นผ่าศูนย์กลาง d เมตร 2 ตัววิ่งเข้าหากัน อาจมี หรือ ไม่มีการชนกัน โดยพื้นที่ที่อนุภาคทั้งสองใช้ในการเคลื่อนที่มากที่สุดคือกรณีที่ไม่มี การชน นั่นคือพื้นที่ของวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง $2d$ (πd^2) เรียกว่า Effective collision area หรือ Effective collision cross section [11] เมื่ออนุภาคทั้งสองเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฉลี่ย v เมตรต่อวินาที พิจารณาที่เวลา t วินาที ปริมาตรที่อนุภาคทั้งสองจะเคลื่อนที่กวาดไปมีค่า $\pi d^2 vt$ ดังนั้นอนุภาคทั้งหมดที่เคลื่อนที่ผ่านใน t วินาที หรือจำนวนครั้งในการชนภายในเวลา t คือ $\pi d^2 vt n_v$ เมื่อ n_v คือ จำนวนอนุภาคต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของแก๊ส ดังนั้น Mean free path คืออัตราส่วนระหว่างระยะทางต่อจำนวนครั้งของการชน

$$\text{Mean free path } (\lambda) = \frac{vt}{\pi d^2 vt n_v} = \frac{1}{\pi d^2 n_v} \quad (2.6)$$

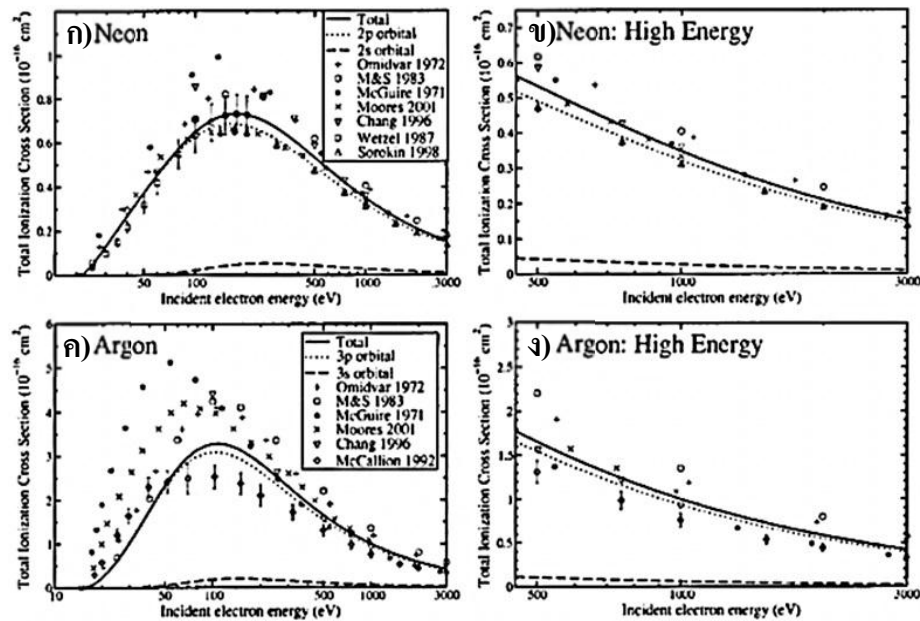
เมื่อพิจารณาการกระจายความเร็วของอนุภาค แต่ละอนุภาคไม่ได้เคลื่อนที่ในแนวเดียวกันและความเร็วไม่เท่ากัน จึงใช้ความเร็วเฉลี่ยสัมพัทธ์ คือ $v\sqrt{2}$ จะได้ Mean free path คือ

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n_v} \quad (2.7)$$

โอกาสของการชนของอนุภาค (P) คือส่วนกลับของ Mean free path จะได้

$$P = \frac{1}{\lambda} \quad (2.8)$$

การชนของอนุภาคต่าง ๆ ในก๊าซจะให้ภาคตัดขวางของการชนต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาคที่เข้าชน อนุภาคเป้า และยังขึ้นอยู่กับพลังงานของอนุภาคด้วย เช่น การชนกันของอิเล็กตรอนกับอะตอมก๊าซ การชนระหว่างอนุภาคที่เคลื่อนที่กับอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซทำให้เกิดกระบวนการต่างๆ เช่น การไอออนไนเซชัน การกระตุ้น การจับอิเล็กตรอน เป็นต้น ซึ่งแต่ละกระบวนการจะมีภาคตัดขวางของการชนต่างกัน จากภาพประกอบที่ 2.9 แสดงความแตกต่างของภาคตัดขวางของการชนของอนุภาคก๊าซนีออนและก๊าซอาร์กอน ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างภาคตัดขวางของการชนกับพลังงานของอิเล็กตรอนที่เข้าชนอนุภาคของก๊าซ



ภาพประกอบที่ 2.9 ภาคตัดขวางของการเกิดไอออนไนเซชันจากการชนของอิเล็กตรอนกับ (ก) แก๊สนีออน (ข) แก๊สนีออนพลังงานสูง (ค) แก๊สอาร์กอน (ง) แก๊สอาร์กอนพลังงานสูง [12]

2.3.3 โมบิลิตี (Mobility, μ)

เมื่อพิจารณาอนุภาคก๊าซที่มีประจุ เมื่อจ่ายสนามไฟฟ้า E อนุภาคมีประจุจะถูกเร่งจนมีความเร็วเฉลี่ย v ในทิศทางของสนามไฟฟ้าในกรณีของประจุบวก และจะมีทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าสำหรับประจุลบ โดยค่าโมบิลิตีสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.9)

$$\mu = \frac{v}{E} \quad (2.9)$$

2.3.4 การนำไฟฟ้าของก๊าซ (Electrical conductivity of gas)

ก๊าซประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุบวก อิเล็กตรอนและอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้า เมื่ออยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า จะทำให้อนุภาคอิเล็กตรอนและไอออนบวกเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v_e และ v_i ตามลำดับ แต่เนื่องจากมีประจุไฟฟ้าตรงข้ามกันทำให้ทิศทางการเคลื่อนที่ตรงข้ามกันด้วย สามารถหาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J จาก

$$J = n_i e v_i + n_e (-e) v_e = neE(\mu_i + \mu_e) \quad (2.10)$$

เมื่อ $n_i = n_e = n$ เป็นความหนาแน่นของไอออนบวก อิเล็กตรอน และอะตอม เป็นกลางตามลำดับ เนื่องจากอิเล็กตรอนมีมวลน้อยมากเมื่อเทียบกับไอออนบวก ทำให้

$$\mu_e \gg \mu_i \quad (2.11)$$

ดังนั้น

$$J \cong ne\mu_e E \quad (2.12)$$

และสามารถคำนวณ ความนำไฟฟ้า (σ) จาก

$$\sigma = \frac{J}{E} = ne\mu_e \quad (2.13)$$

2.3.5 การแพร่กระจาย (Diffusion)

อนุภาคของก๊าซมีการแพร่กระจายจากบริเวณที่มีความหนาแน่นมากไปยังบริเวณที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า ความเร็วของการแพร่ขึ้นกับความหนาแน่นของอนุภาค (n) นั่นคือ

$$v = -\frac{D}{n} \Delta n \quad (2.14)$$

เมื่อ D คือสัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจาย

จากสมการความเร็วในการแพร่จะมีเครื่องหมายลบอยู่ด้านหน้า แสดงให้เห็นว่าการแพร่กระจายเกิดขึ้นในทิศทางที่ความหนาแน่นมากไปยังความหนาแน่นน้อย สามารถคำนวณฟลักซ์การแพร่ของอนุภาคได้จาก

$$\phi = nv \quad (2.15)$$

2.4 การสร้างพลาสมาและแหล่งกำเนิดพลาสมา

2.4.1 การสร้างพลาสมา

พลาสมาคือก๊าซที่เกิดการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งประกอบด้วยไอออนบวก ไอออนลบ และอิเล็กตรอน โดยเกิดขึ้นได้เมื่อก๊าซได้รับพลังงานมากพอจนสามารถแตกตัวได้ ระดับของการแตกตัวสามารถเกิดได้ตั้งแต่ 100 เปอร์เซ็นต์ (เกิดการแตกตัวของก๊าซทั้งหมดในห้องพลาสมา) จนถึงการแตกตัวเพียงเล็กน้อย สถานะพลาสมาถือเป็นสถานะที่ 4 ของสสาร ซึ่งสสารส่วนมากที่มองเห็นได้ในอวกาศอยู่ในสถานะพลาสมา พลาสมาที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ พลาสมาอุณหภูมิสูง (High-temperature plasma) หรือพลาสมาที่เกิดภายในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ฟิวชัน (Fusion plasma) อีกกลุ่มหนึ่งคือ พลาสมาอุณหภูมิต่ำ (Low-temperature plasma) หรือก๊าซดิสชาร์จ (Gas discharge) [13] พลาสมาสามารถสร้างขึ้นโดยการจ่ายพลังงานให้แก่ก๊าซ ทำให้เกิดอิเล็กตรอนและไอออน เมื่ออิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอและชนกับอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซที่จ่ายเข้าไปทำให้เกิด การรับอิเล็กตรอน (Electron-impact) การเกิดไอออนไนเซชัน (Ionization) หรือการเกิดโฟโตไอออนไนเซชัน (Photoionization) การเพิ่มพลังงานให้แก่อิเล็กตรอนนั้นสามารถทำได้หลายวิธีซึ่งแสดงในภาพประกอบที่ 2.10 [14] เช่น

- การให้พลังงานความร้อนแก่ระบบ เช่น ในการเผาไหม้
- ปฏิกิริยาเคมีแบบคายความร้อนของโมเลกุลของสารที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง
- การให้พลังงานกลแก่ระบบ เช่น อากาศที่ถูกอัดตัวอย่างรวดเร็ว โดยไม่มีการสูญเสียความร้อน (Adiabatic compression) จนทำให้แรงดันและความร้อนสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งมากพอต่อการเกิดพลาสมา
- การให้พลังงานกับก๊าซที่เป็นกลาง โดยใช้ลำอนุภาค ซึ่งถูกเร่งให้มีพลังงานที่สูงขึ้นโดยใช้สนามไฟฟ้า ลำอนุภาคถูกใช้ในการสร้างพลาสมาครั้งแรกสำหรับให้พลังงานแก่พลาสมาในอุปกรณ์สำหรับสร้างปฏิกิริยาฟิวชัน
- การใช้สนามไฟฟ้าเพื่อเร่งอนุภาคที่มีประจุ วิธีนี้เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดสำหรับสร้างพลาสมาที่อุณหภูมิต่ำ ภายในก๊าซที่ใช้สำหรับสร้างพลาสมามีอิเล็กตรอนและไอออนบวกเป็นองค์ประกอบอยู่ ซึ่งอิเล็กตรอนอิสระอาจเกิดจากรังสีคอสมิก (Cosmic ray) จากดวงอาทิตย์ หรือเกิดจากการแผ่รังสีของสารกัมมันตรังสีในธรรมชาติ อิเล็กตรอนจะถูก

เร่งโดยสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงขึ้นและเข้าชนกับอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซ ทำให้เกิดประจุอิสระอื่นๆ ตามมาอีก เมื่ออัตราการเกิดประจุอิสระและอัตราการรวมตัวมีค่าเท่ากันก็จะทำให้เกิดพลาสมาที่มีความคงตัวขึ้น (Steady-state plasma)

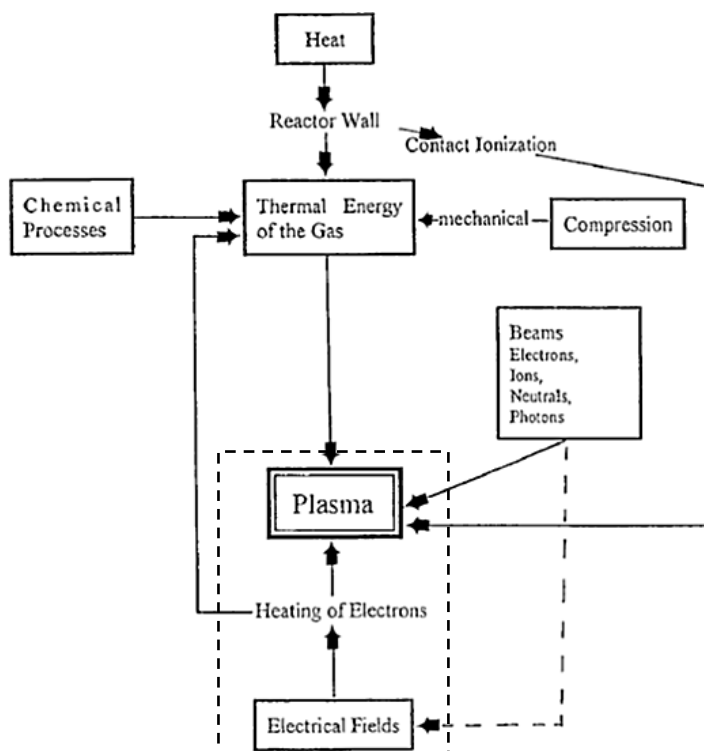
2.4.2 ประเภทของพลาสมา

การจำแนกพลาสมาสามารถแบ่งได้โดยอาศัยคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น

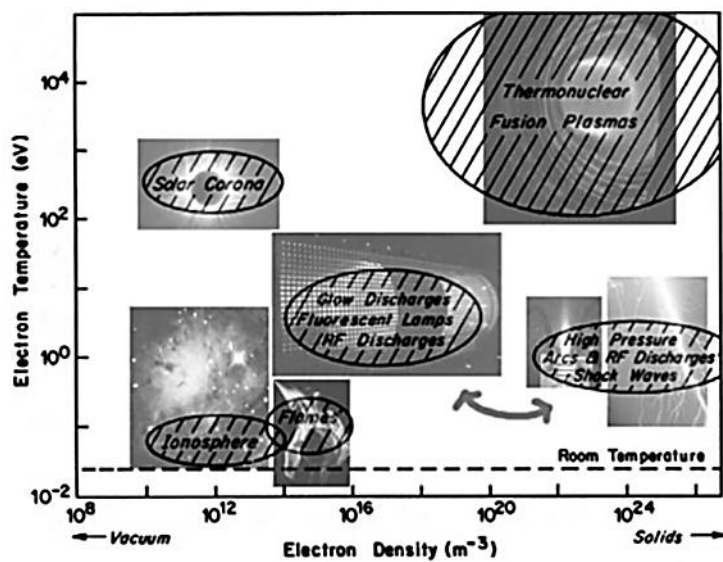
1. จำแนกตามสมดุลเทอร์โมไดนามิกส์ เช่น ความสมดุลของพลาสมา (Thermal equilibrium plasma) หรือความไม่สมดุลของพลาสมา (Non-thermal equilibrium plasma) ซึ่งพิจารณาจากอุณหภูมิไอออนและอิเล็กตรอน ถ้าเท่ากันเรียกว่าสภาวะสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ และถ้าไม่เท่ากันเรียกว่าสภาวะไม่สมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์
2. จำแนกตามเปอร์เซ็นต์การแตกตัวของพลาสมา เช่น ถ้าอะตอมแตกตัวน้อยกว่า 1 % เรียกว่า Weakly ionized plasma ตัวอย่างเช่น พลาสมาในหลอดดิสชาร์จไฟฟ้าธรรมดา ถ้าแตกตัว 100 % เรียกว่า Fully ionized plasma เช่น พลาสมาในดวงอาทิตย์, ฟิวชั่นพลาสมา
3. จำแนกตามความดัน ถ้าความดันสูงเรียกว่า high pressure plasma ได้แก่ พลาสมาในอาร์คไฟฟ้า ส่วนความดันต่ำเรียกว่า low pressure plasma
4. จำแนกตามชีวิต (life time) เช่น Steady state plasma หรือ DC plasma, Pulse plasma หรือ Transient plasma ส่วน After glow plasma หมายถึงพลาสมาเรืองแสงที่กำลังสลายตัวหรือดับ

การจัดกลุ่มพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ (Atmospheric pressure plasma) ซึ่งสร้างขึ้นโดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ เมื่อพิจารณาจากคุณสมบัติต่างๆ ข้างต้น ดังนี้ พิจารณาจากสมดุลเทอร์โมไดนามิกส์ สามารถจัดอยู่ในกลุ่มของพลาสมาที่ไม่สมดุล เมื่อจำแนกตามเปอร์เซ็นต์การแตกตัวของพลาสมาจะอยู่ในกลุ่มของพลาสมาที่มีการแตกตัวน้อย และถ้าจำแนกตามความดันจะอยู่ในกลุ่มของพลาสมาที่ความดันสูง

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (Electron density) และอุณหภูมิอิเล็กตรอน (Electron temperature) สามารถแบ่งพลาสมาออกเป็นกลุ่มย่อยๆ ได้ดังภาพประกอบที่ 2.11 [15]



ภาพประกอบที่ 2.10 หลักการพื้นฐานในการสร้างพลาสมา ภายในกรอบเส้นประเป็นระบบที่จะสร้างขึ้น [14]

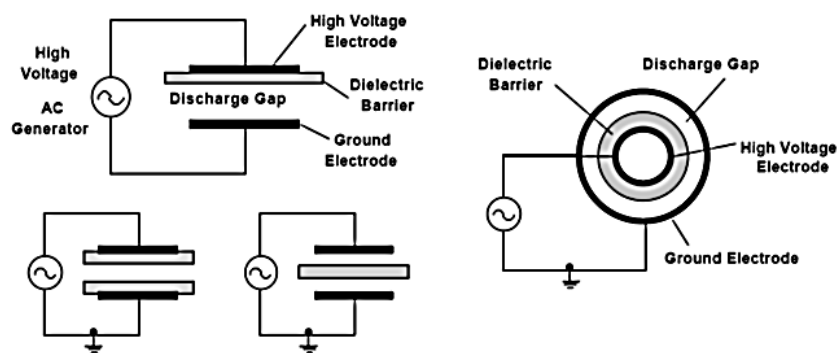


ภาพประกอบที่ 2.11 การแบ่งพลาสมาโดยใช้ ความหนาแน่นและอุณหภูมิของอิเล็กตรอน [15]

2.5 พลาสมาแบบดิสชาร์จข้ามฉนวน

2.5.1 โครงสร้างอุปกรณ์ของการดิสชาร์จข้ามฉนวน

ดิสชาร์จข้ามฉนวน (Dielectric barrier discharges, DBD) หรือ เกิดจากการนำแผ่นฉนวนอย่างน้อยหนึ่งแผ่นวางไว้ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง สามารถทำได้ทั้งแบบแผ่นและแบบทรงกระบอก แผ่นฉนวนทำหน้าที่ในการจำกัดกระแสและลดการเกิดประกายไฟ (Spark) หรือการเกิด Arc-discharge โดยสามารถออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าตั้งแต่ 1 ถึง 100 มม. ชนิดของแผ่นฉนวนที่ใช้ เช่น แก้ว ควอร์ต เซรามิก หรือการเคลือบโพลีเมอร์ลงบนขั้วไฟฟ้า ลักษณะของการดิสชาร์จที่เกิดขึ้นอาจเป็นเส้น ๆ หรือมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการทดลองเช่น ชนิดของก๊าซ ความดัน ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้า ความถี่ของไฟฟ้า ผิวของแผ่นฉนวน เป็นต้น [6] การดิสชาร์จข้ามฉนวนไม่สามารถสร้างพลาสมาที่มีความสม่ำเสมอได้โดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของแผ่นฉนวนระหว่างขั้วไฟฟ้าส่งผลให้มีตัวเก็บประจุเกิดขึ้น ทำให้ไฟฟ้ากระแสตรงไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านไปได้อีกหรือไม่สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุได้ จึงจำเป็นต้องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อจ่ายให้แก่การดิสชาร์จข้ามฉนวน ซึ่งกระแสสามารถเคลื่อนที่ผ่านตัวเก็บประจุได้ แหล่งกำเนิดที่ใช้อาจเป็นคลื่นรูปไซน์ คลื่นรูปสี่เหลี่ยม ความถี่ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางคือ 500 เฮิร์ตซ์- 500 กิโลเฮิร์ตซ์[16] จากภาพประกอบที่ 2.12 เมื่อพิจารณารูปแบบของขั้วไฟฟ้า สามารถแบ่งเป็นสองกลุ่มคือ แบบขนานและทรงกระบอก และเมื่อพิจารณาดำแหน่งของแผ่นฉนวน สามารถแบ่งได้เป็นสามรูปแบบคือ 1) แผ่นฉนวนหนึ่งแผ่นอยู่ที่ขั้วไฟฟ้า 2) แผ่นฉนวนหนึ่งแผ่นอยู่ตรงกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง 3) แผ่นฉนวนสองแผ่นอยู่ที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง [15]

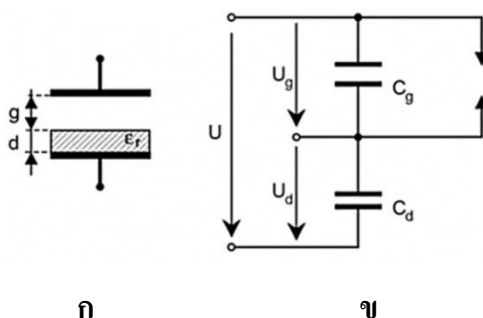


ภาพประกอบที่ 2.12 รูปแบบการวางตำแหน่งของแผ่นฉนวนและขั้วไฟฟ้า [16]

2.5.2 วงจรเทียบเท่าทางไฟฟ้า (Equivalent circuit)

กรณีโครงสร้างอย่างง่ายของการดิสชาร์จผ่านฉนวนดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าสองขั้วและมีแผ่นฉนวนหนึ่งแผ่น ถ้าความต่างศักย์ U_g มีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าแตกตัว จะไม่เกิดการดิสชาร์จขึ้น เราจึงสามารถเปรียบเทียบโครงสร้างของการดิสชาร์จข้ามฉนวนเหมือนตัวเก็บประจุสองตัวที่ต่ออนุกรมกันดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.13 คือตัวเก็บประจุที่เกิดจากช่องว่างของก๊าซ (C_d) และตัวเก็บประจุที่เกิดจากชั้นของแผ่นฉนวน (C_g) ซึ่งค่าของตัวเก็บประจุสามารถรวมกันได้ ทำให้ตัวเก็บประจรวมคือ C ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.16) [17]

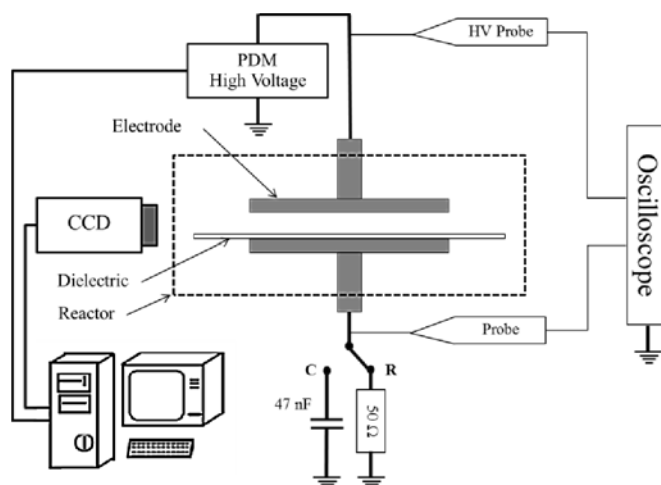
$$C = \frac{C_d C_g}{C_d + C_g} = \frac{C_g}{1 + C_g/C_d} = \frac{C_g}{1 + d/(\epsilon_r g)} \quad (2.16)$$



ก

ข

ภาพประกอบที่ 2.13 (ก) การดิสชาร์จข้ามฉนวนที่มีฉนวนหนึ่งชั้น (ข) วงจรเทียบเท่าของการดิสชาร์จข้ามฉนวน[17]



ภาพประกอบที่ 2.14 แสดงการจัดอุปกรณ์เพื่อวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า (วัดโดยใช้ตัวต้านทาน R_{meas}) และความสัมพันธ์ระหว่างประจุและแรงดัน (วัดโดยใช้ตัวเก็บประจุ C_{meas})

ตัวแปรที่สำคัญของการดิสชาร์จข้ามฉนวนคือ ความต่างศักย์ดิสชาร์จ (U_d) กระแสดิสชาร์จ (I) การถ่ายโอนประจุ (Q) กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบ (P_e) ค่าเฉลี่ยการลดลงของสนามไฟฟ้า ซึ่งตัวแปรเหล่านี้สามารถวัดได้จากการจัดอุปกรณ์ดังภาพประกอบที่ 2.14

2.5.3 การจำลองแบบ (Modeling)

การจำลองทางไฟฟ้าของการเกิดพลาสมาเป็นวิธีที่สามารถประเมินคุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณลักษณะของพลาสมาที่เกิดขึ้นได้ คุณสมบัติทางไฟฟ้า เช่น gas gap voltage, memory voltage, barrier voltage, discharge current, consumed discharge power เป็นตัวแปรหลักในการใช้วิเคราะห์ทางทฤษฎีถึงประสิทธิภาพของการดิสชาร์จข้ามฉนวน การจำลองทางไฟฟ้าทำให้สามารถเข้าใจถึงปรากฏการณ์การเกิดการดิสชาร์จข้ามฉนวนโดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าและความดันของก๊าซที่ใช้ในการจำลองและดูการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางพลาสมาที่เปลี่ยนแปลงไป [6] ซึ่งวงจรที่ใช้ในการจำลอง จะเป็นวงจรเทียบเท่าทางไฟฟ้า เช่น กรณีโครงสร้างของการดิสชาร์จข้ามฉนวน แบบแผ่นขั้วไฟฟ้าขนานและมีชั้นของฉนวนหนึ่งชั้น แสดงดังภาพประกอบที่ 2.13 (ก) จะมีวงจรเทียบเท่าทางไฟฟ้าง่ายกว่าประกอบที่ 2.13 (ข) เป็นต้น

รูปแบบการเกิดดิสชาร์จข้ามฉนวนมี 2 รูปแบบคือ การดิสชาร์จแบบเส้น (Filamentary barrier discharge) และการดิสชาร์จเรืองแสง (Glow barrier discharges) ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

2.5.4 การเกิดดิสชาร์จแบบเส้นผ่านฉนวน (Filamentary barrier discharge)

รูปแบบหนึ่งของการดิสชาร์จผ่านแผ่นฉนวนเรียกว่า การดิสชาร์จแบบเส้น (Filamentary) เมื่อสนามไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ก๊าซมีค่ามากพอ จะเกิดการ breakdown ขึ้นหลายๆ จุด และพัฒนาไปเป็นเส้น เรียกว่าการเกิดดิสชาร์จขนาดเล็ก (Microdischarges) [17]

จากวงจรในภาพประกอบที่ 2.13 (ข) และสมการที่ (2.16) เมื่อใช้แก้วเป็นแผ่นฉนวนวางอยู่บนขั้วไฟฟ้า จะมีค่า $\epsilon_r = 5$ ถึง 10 และ g มีค่าใกล้เคียงกับ d พจน์

$$\frac{C_g}{C_d} = \frac{d}{\epsilon_r g} \approx \frac{V_d}{V_g} \ll 1 \quad (2.17)$$

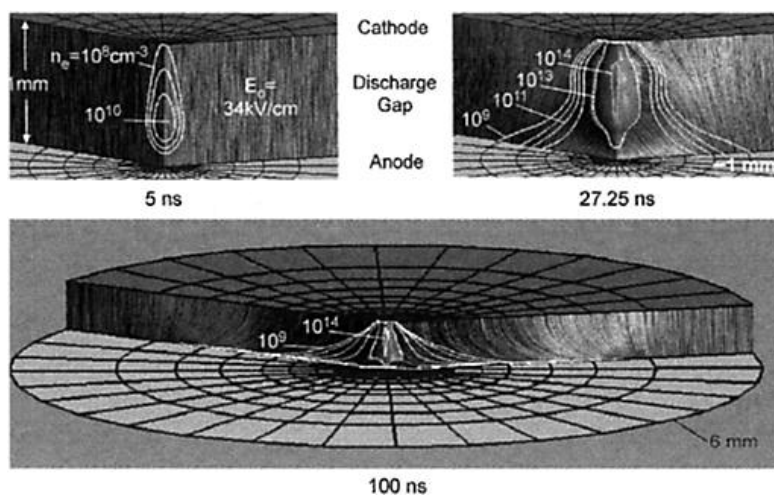
$$\text{เมื่อ } c = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon A}{d}$$

เมื่อ V_d คือแรงดันไฟฟ้าระหว่างชั้นฉนวน A คือพื้นที่หน้าตัด จะทำให้ค่าตัวเก็บประจุ C มีค่าขึ้นกับค่าตัวเก็บประจุที่เกิดจากชั้นของก๊าซ (C_g) เท่านั้น ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคล่อมชั้นของก๊าซมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าภายนอก $V(t)$ และเมื่อ V_g มีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าแตกตัวก็จะเกิดไมโครดิสชาร์จขึ้น ในขณะที่เกิดการดิสชาร์จ ทุกๆ ครั้งรอบคลื่น แรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ (V_d) จะมีค่าคงที่ และมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าของชั้นก๊าซ (V_g) แรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของก๊าซ ความดัน และช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้า [17]

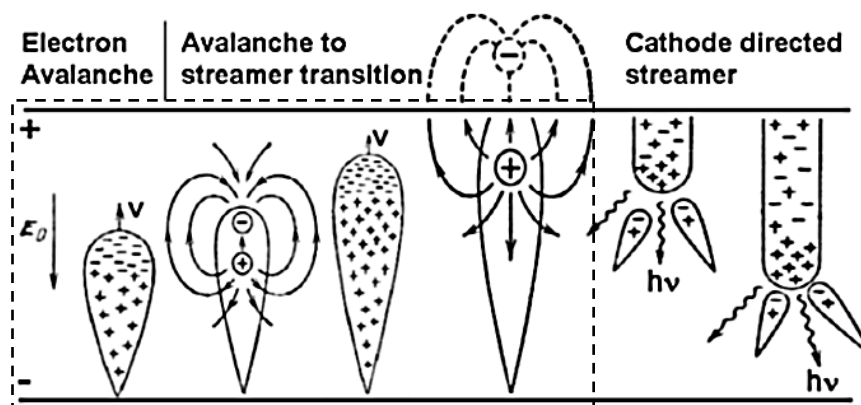
การเกิดเบรคดาวน์ทางไฟฟ้า (Electrical breakdown) ภายในช่องว่างของก๊าซในห้องพลาสมา เริ่มขึ้นจากหลายๆ จุดบนผิวและพัฒนาต่อไปเป็นไมโครดิสชาร์จ ขั้นตอนในการเปลี่ยนแปลงจากการแตกตัวทางไฟฟ้าไปเป็นไมโครดิสชาร์จสามารถแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ [17]

1. **เฟสก่อนแตกตัว (Pre-breakdown phase)** อิเล็กตรอนและไอออนลบจะสะสมอยู่ที่หน้าผิวขั้วแอโนด เมื่ออยู่ร่วมกันจะทำให้เกิดสภาพมีขั้ว (Polarity) ในช่วงครึ่งรอบคลื่นของแรงดันไฟฟ้า เมื่อความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ผิวหน้าขั้วแอโนดสูงขึ้นจนถึงภาวะวิกฤต ก็จะเกิดการแตกตัวเริ่มจากผิวของขั้วแอโนด แสดงดังภาพประกอบที่ 2.16 ภายในเส้นประ
2. **เฟสของการแพร่ (The propagation phase)** การแพร่กระจายจะเกิดเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ตกคล่อมชั้นของก๊าซมีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าแตกตัวซึ่งทำให้อิเล็กตรอนและไอออนลบมีความเร็วเพิ่มขึ้นและชนกับอะตอมหรือโมเลกุลของสารอื่นทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระและไอออนอื่นอีก คลื่นของการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization wave) มีทิศทางจากบริเวณที่มีความเข้มของสนามไฟฟ้าสูง ไปยังขั้วแคโทด ซึ่งระหว่างทางของการเคลื่อนที่ที่เกิดไอออนและอิเล็กตรอนอิสระขึ้น
3. **เฟสสลายตัว (The decay phase)** อิเล็กตรอนและไอออนลบเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทด เกิดการร่วมตัวกันของไอออน ทำให้ลดความสามารถในการนำไฟฟ้าของพลาสมา และเกิดประจุบนแผ่นฉนวน ส่งผลให้สนามไฟฟ้าบริเวณที่เกิดไมโครดิสชาร์จมีค่าลดลง ความเข้มแสงจะลดลงและการไหลของกระแสบริเวณนั้นลดลงจนกระทั่งไม่มีการเกิดดิสชาร์จบริเวณนั้น

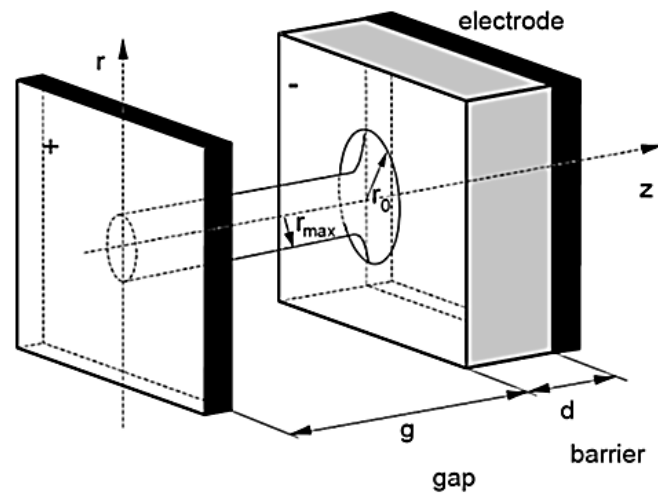
เมื่อแรงดันไฟฟ้าครึ่งรอบคลื่นต่อมา เหตุการณ์ที่ชั่วฟ้าซึ่งเกิดไมโครดิสชาร์จจะเกิดตรงข้ามกันระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด การถ่ายโอนประจุและพลังงานจากการดิสชาร์จข้ามฉนวนเป็นตัวจำกัดขอบเขตการเกิดประจุที่ขั้วของแผ่นฉนวน ขนาดของไมโครดิสชาร์จจะใหญ่กว่าเส้นการเกิดดิสชาร์จบริเวณช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้างภาพประกอบที่ 2.15



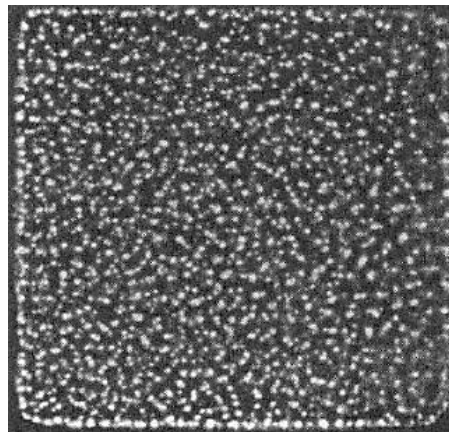
ภาพประกอบที่ 2.15 ภาพจำลองการเกิดไมโครดิสชาร์จ โดยแผ่นฉนวนอยู่ที่ขั้วแอโนด[18]



ภาพประกอบที่ 2.16 ขั้นตอนการเกิดดิสชาร์จแบบเส้น โดยอาศัยหลักการ streamer[19]



ภาพประกอบที่ 2.17 รูปจำลองการเกิดไมโครดิสชาร์จเพียง 1 เส้น เมื่อ r_{\max} คือรัศมีของไมโครดิสชาร์จ และ r_0 คือรัศมีของการดิสชาร์จบนแผ่นฉนวน[17]



ภาพประกอบที่ 2.18 การเกิดไมโครดิสชาร์จขนาด 6 x 6 ซม. (เปิดหน้าต่างกล้อง 20 มิลลิวินาที)[16]

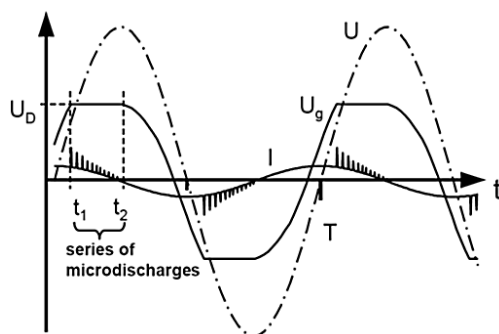
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของไมโครดิสชาร์จ ช่องว่างอากาศ (Gas gap) 1 มม. ที่ความดัน 1 บาร์ [16]

Duration:	10^{-9} - 10^{-8} s	Total Charge:	10^{-10} - 10^{-9} C
Filament Radius:	about 10^{-4} m	Electron Density:	10^{20} - 10^{21} m ⁻³
Peak Current	0.1 A	Mean Electron Energy:	1-10 eV
Current Density:	10^6 - 10^7 A m ⁻²	Filament Temperature:	close to average gas temperature in the gap

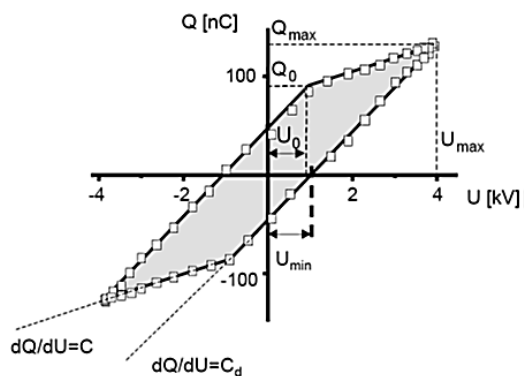
การถ่ายโอนประจุจะเป็นสัดส่วนกับช่องว่างของอากาศและค่า permittivity ของแผ่นฉนวน แต่จะไม่ขึ้นกับความดันของก๊าซ ความหนาแน่นกระแสในการเกิดไมโครดิสชาร์จอยู่ในช่วง 100 ถึง 1000 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร การเพิ่มความต่างศักย์ภายนอกหลังจากการเกิด

ดิสชาร์จแล้ว จะทำให้ไมโครดิสชาร์จเพิ่มขึ้นซึ่งจะเกิดขึ้นบริเวณตำแหน่งอื่นที่ไม่เคยเกิดดิสชาร์จขนาดเล็ก เพราะตำแหน่งเดิมที่เคยเกิดไมโครดิสชาร์จจะมีประจุบนแผ่นฉนวนซึ่งจะลดความเข้มของสนามไฟฟ้าบริเวณนั้น ดังนั้นเมื่อใช้ความต่างศักย์สูงความถี่ต่ำจะทำให้ไมโครดิสชาร์จเกิดแพร่กระจายออกไป แต่กรณีที่ใช้ความต่างศักย์ต่ำ ความถี่สูงจะเกิดไมโครดิสชาร์จซ้ำบริเวณที่เคยเกิดมาแล้วในทุกๆ ครั้งรอบคลื่น คุณสมบัติของไมโครดิสชาร์จแสดงดังตารางที่ 2.1 คุณสมบัติดังกล่าวไม่ได้ขึ้นอยู่กับแหล่งจ่ายกำลังภายนอกแต่จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของก๊าซ ความดัน และรูปแบบของขั้วไฟฟ้าที่ใช้ [16]

การดิสชาร์จข้ามฉนวนมีลักษณะเหมือนกับตัวเก็บประจุที่ต่อกับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ รูปแบบของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการดิสชาร์จสามารถวัดได้จากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน R ($R = 50$ โอห์ม) และความสัมพันธ์ระหว่างประจุและแรงดันไฟฟ้า (Charge-voltage characteristic) สามารถวัดได้จากแรงดันไฟฟ้าที่ตกตลอดตัวเก็บประจุ C ($C = 47$ nF) ซึ่งมีรูปแบบการต่อวงจรแสดงดังภาพประกอบที่ 2.14 นำแรงดันไฟฟ้าที่ตกตลอดตัวเก็บประจุมาคำนวณหาค่าประจุไฟฟ้าจากความสัมพันธ์ $Q = CV$ เมื่อ Q คือค่าประจุไฟฟ้า และ V คือแรงดันไฟฟ้าที่ตกตลอดตัวเก็บประจุ โดยแสดงลักษณะของสัญญาณและบันทึกข้อมูล โดยใช้เครื่องแสดงรูปสัญญาณไฟฟ้า (Oscilloscope) และใช้หัววัดแรงดันไฟฟ้าที่สามารถทนแรงดันไฟฟ้าสูงได้ (High voltage probe) ภาพประกอบที่ 2.19 แสดง ความต่างศักย์และกระแสดิสชาร์จของไมโครดิสชาร์จที่เกิดขึ้น เมื่อจ่ายสัญญาณรูปไซน์ให้กับระบบ ภาพประกอบที่ 2.20 เรียกว่า แผนภาพลิสซัจว์ส (Lissajous diagram) เพื่อหาแรงดันไฟฟ้าน้อยสุด ที่จ่ายให้กับห้องพลาสมา และยังสามารถเกิดการดิสชาร์จได้ ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไปต่อหนึ่งรอบคลื่น (E_d) และกำลังไฟฟ้า (P_d) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.20) และสมการที่ (2.21) ตามลำดับ



ภาพประกอบที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ที่จ่าย $U(t)$ และกระแสดิซชาร์จ $i(t)$ [17]



ภาพประกอบที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างประจุและความต่างศักย์ [17]

$$E_{el} = \oint U(t)dQ = C_{meas} \oint U(t)dU_{meas} \quad (2.18)$$

$$= 4C_d \frac{1}{1 + \frac{C_g}{C_d}} U_{min}(U_{max} - U_{min}) \quad (2.19)$$

$$= 2(U_{max}Q_0 - Q_{max}U_0) \equiv \text{AREA of } (Q - U)\text{diagram} \quad (2.20)$$

$$P_{el} = \frac{1}{T} E_{el} = f E_{el} \quad (2.21)$$

เมื่อ f คือความถี่ของแหล่งจ่าย

แรงดันไฟฟ้าดิซชาร์จ (U_D) จะเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไฟฟ้า U_{min} ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.22)

$$U_D = U_{min} \frac{1}{1 + C_g/C_d} \quad (2.22)$$

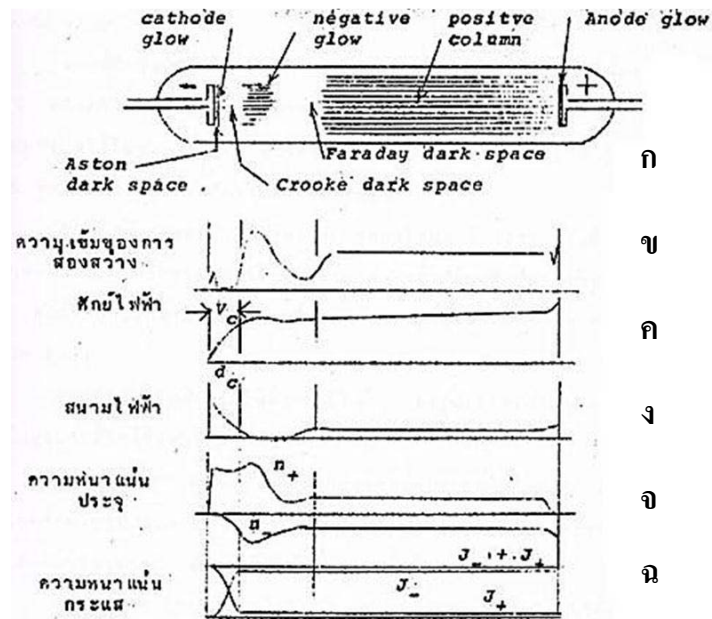
จำนวนไมโครดิสชาร์จที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องกันในครึ่งรอบคลื่น ($N_{T/2}$) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.23) โดยการประมาณให้การถ่ายโอนประจุแต่ละไมโครดิสชาร์จมีค่าเท่ากันคือ ΔQ

$$N_{T/2} \approx \frac{2C_d}{\Delta Q} (U_{max} - U_{min}) \quad (2.23)$$

ถ้าการเกิดไมโครดิสชาร์จทั้งหมดมีความต่อเนื่องกัน และมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน จะได้ $\Delta Q \approx nq$ เมื่อ n คือจำนวนไมโครดิสชาร์จทั้งหมด และ q คือประจุที่ถูกถ่ายโอนโดยการเกิดไมโครดิสชาร์จหนึ่งครั้ง

2.5.5 การเกิดดิสชาร์จเรืองแสงผ่านฉนวน (Glow barrier discharge)

การเกิดดิสชาร์จเรืองแสงเกิดขึ้น โดยการจำกัดกระแสให้มีค่าน้อย ซึ่งการเกิดดิสชาร์จเรืองแสงจะมีส่วนสว่างและมีสลับกันไป การเกิดดิสชาร์จเรืองแสงสามารถเกิดได้ทั้งกรณีที่ใช้แผ่นฉนวนเพื่อจำกัดกระแส (Dielectric barrier discharge) และกรณีที่ไม่ใช้แผ่นฉนวน แต่ใช้เทคนิคอื่น เช่น การใช้ตัวต้านทานเพื่อจำกัดกระแส เป็นต้น การเกิดดิสชาร์จเรืองแสงจะมีลักษณะของศักย์ไฟฟ้า สนามไฟฟ้า ความหนาแน่นประจุ และความหนาแน่นกระแส ที่จำเพาะซึ่งแสดงดังภาพประกอบที่ 2.21



ภาพประกอบที่ 2.21 การดิซชาร์จเรืองแสงและการกระจายของแรงดัน สนามไฟฟ้า และความหนาแน่นของอนุภาคไฟฟ้า [20]

จากภาพประกอบที่ 2.21 (ก) เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ออกจากขั้วลบซึ่งมีความเร็วไม่สูงมากทำให้ไม่มีพลังงานมากพอที่จะทำให้เกิดการเรืองแสง จึงเกิดแถบมืดขึ้นบริเวณใกล้ขั้วแคโทด เรียกว่า Aston Dark Space เมื่ออิเล็กตรอนมีความเร็วสูงขึ้นและชนกับโมเลกุลของก๊าซ ทำให้ก๊าซถูกกระตุ้น แต่ก๊าซไม่มีความเสถียรเมื่ออยู่ในสถานะถูกกระตุ้น จึงมีการลดระดับพลังงานลงมายังสถานะเดิม พลังงานที่ลดลงจะเปลี่ยนเป็นพลังงานแสง เกิดการเปล่งแสงออกมา เรียกว่า Cathode Glow และเมื่ออิเล็กตรอนถูกเร่งจนมีพลังงานมากพอที่ทำให้ก๊าซที่ถูกชนเกิดการแตกตัวเป็นไอออนขึ้น แต่กรณีนี้จะไม่มีการเปล่งแสงออกมา เนื่องจากไม่มีการลดระดับพลังงานเหมือนก๊าซที่ถูกกระตุ้น (การกระตุ้นน้อยลง) เรียกช่วงนี้ว่า Cathode dark space หรือส่วนมืดของ Crook ด้านที่อยู่ใกล้ขั้วแคโทดของ Cathode dark space จะมีประจุบวกมาสะสมอยู่ ทำให้เกิดความต่างศักย์และทำให้ความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงขึ้น ดังภาพประกอบที่ 2.21 (ง) แรงดันไฟฟ้าที่ต่อกับขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะมาตกอยู่ที่ส่วนนี้มากดังภาพประกอบที่ 2.21 (ค) เรียกว่าแรงดันไฟฟ้าตกตลอดขั้วลบ (Cathode Voltage Drop) ทำให้สนามไฟฟ้ามีค่าลดลง อิเล็กตรอนที่เสียพลังงานจากการชนจนทำให้โมเลกุลก๊าซแตกตัวเป็นไอออน จะมีความเร็วน้อยลง ซึ่งอยู่ในช่วงพลังงานที่สามารถกระตุ้นให้ก๊าซอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นได้ และเกิดการปล่อยแสงออกมา เกิดเป็นแถบสว่างเรียกว่า

Negative Glow บริเวณนี้สนามไฟฟ้ามีค่าน้อยทำให้อิเล็กตรอนและไอออนบวกรวมตัวกันและปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินในรูปแบบของแสงออกมา หลังจากนั้นอิเล็กตรอนที่มีพลังงานน้อยจะถูกเร่งให้มีพลังงานสูงขึ้นทำให้การรวมตัวกันเกิดได้ยากขึ้น และอิเล็กตรอนยังมีพลังงานไม่สูงพอที่จะไปกระตุ้นโมเลกุลของก๊าซ ทำให้ไม่มีการเปล่งแสง เกิดเป็นแถบมืดขึ้นเรียกว่า Faraday Dark Space เมื่ออิเล็กตรอนมีพลังงานสูงขึ้นจนมีพลังงานมากพอจนทำให้โมเลกุลของก๊าซถูกกระตุ้นส่งผลให้เกิดแถบสว่างขึ้นเรียกว่า แสงบวก หรือ Positive Column บริเวณนี้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและประจุบวกจะมีค่าเท่ากันดังภาพประกอบที่ 2.21(จ) และอยู่ในสถานะพลาสมาที่ขั้วแอโนดจะมีประจุลบไปสะสมอยู่มาก ทำให้สนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น และเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงขึ้น จนเกิดเป็นแถบสว่างจากโมเลกุลของก๊าซที่ถูกกระตุ้น เรียกว่า Anode Glow และเมื่อพลังงานสูงขึ้นจนทำให้ก๊าซแตกตัว จะเกิดแถบมืดเรียกว่า Anode Dark Space ซึ่งอยู่ติดกับขั้วแอโนด [21]

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของพลาสมา ซึ่งประกอบด้วย

- 3.1.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง
- 3.1.2 ห้องพลาสมา
- 3.1.3 กล้องซีซีดี
- 3.1.4 ออสซิลโลสโคป
- 3.1.5 โพรบวัดไฟฟ้าแรงดันสูง

โดยแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงและห้องพลาสมา เป็นอุปกรณ์ที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการทดลองในครั้งนี้ โดยรายละเอียดการออกแบบและการทดสอบจะกล่าวถึงในภายหลัง

3.2 วิธีการดำเนินงาน

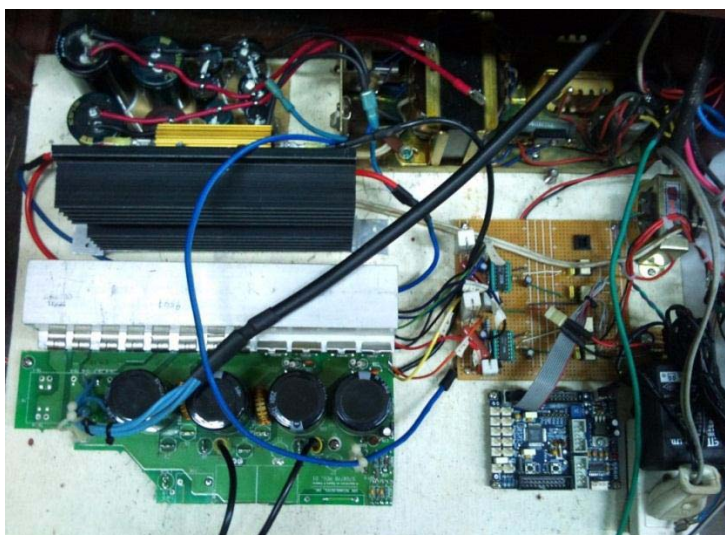
3.2.1 การออกแบบและสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่ปานกลาง

ตารางที่ 3.1 แสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง

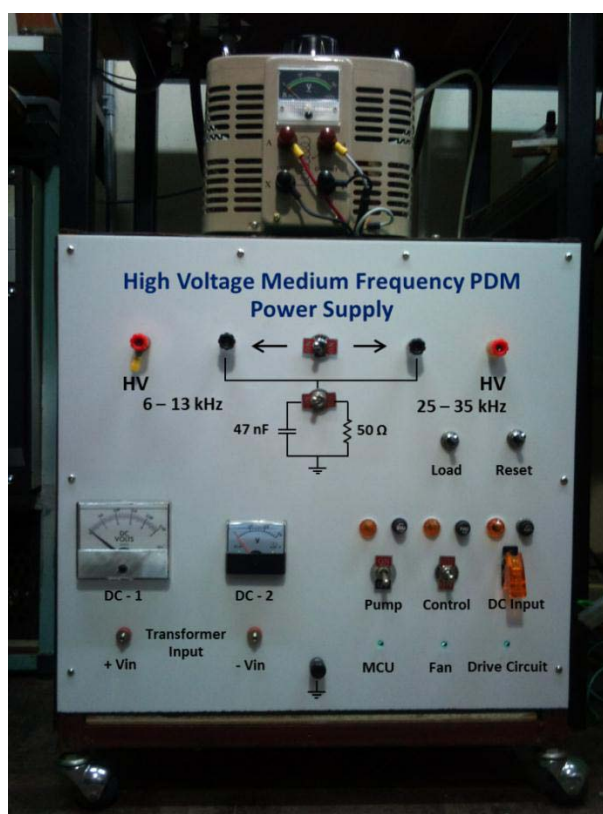
แรงดันไฟฟ้า	0 – 35 กิโลโวลต์
กำลังไฟฟ้า	510 วัตต์
สัญญาณขาออก	คลื่นไซน์
ความถี่	6 – 13 กิโลเฮิรตซ์

แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงที่ใช้ในการทดลองได้ออกแบบและสร้างขึ้นโดยมีคุณลักษณะทางไฟฟ้าดังตารางที่ 3.1 แรงดันไฟฟ้าที่สร้างขึ้นต้องมากพอที่จะทำให้เกิดการแตกตัวของก๊าซได้ที่มีความดันบรรยากาศ และการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีความถี่สูงขึ้นจะช่วยลดระดับแรงดันไฟฟ้าแตกตัวของก๊าซได้ ทำให้ก๊าซสามารถแตกตัวได้ง่ายกว่าการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าความถี่ต่ำ โดยองค์ประกอบของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแสดงดังภาพประกอบที่ 3.1 ภาพประกอบที่ 3.2

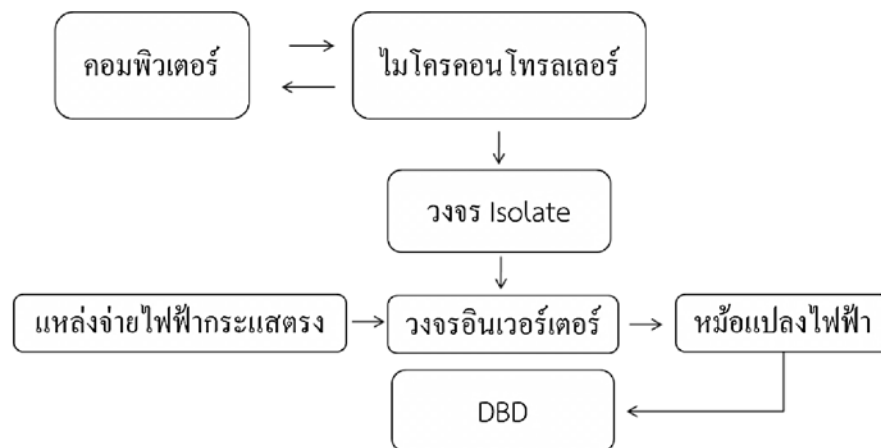
แสดงรูปแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงที่ออกแบบและสร้างขึ้น เพื่อใช้ในการสร้างพลาสมาและศึกษาคุณสมบัติของพลาสมาต่อไป



ภาพประกอบที่ 3.1 วงจรภาคควบคุมและอินเวอร์เตอร์ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง



ภาพประกอบที่ 3.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง



ภาพประกอบที่ 3.3 แสดงแผนผังการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่ปานกลาง

การทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่ปานกลางแสดงดังภาพประกอบที่ 3.3 โดยมีคอมพิวเตอรืทำหน้าที่ส่งและรับข้อมูลจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์จะสร้างสัญญาณเพื่อควบคุมการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งมีวงจร ไอโซเลต (Isolate circuit) ทำหน้าที่ป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับไมโครคอนโทรลเลอร์และคอมพิวเตอรื โดยการแยกสัญญาณไฟฟ้าระหว่างสัญญาณไฟฟ้าแรงดันต่ำและสัญญาณไฟฟ้าแรงดันสูง สัญญาณควบคุมถูกส่งเข้าสู่วงจรอินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมการเปิด - ปิดสวิตช์สารกึ่งตัวนำ เพื่อเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และจ่ายเข้าสู่หม้อแปลงไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นเพื่อจ่ายให้กับขั้วไฟฟ้าสำหรับสร้างพลาสมาต่อไป โดยรายละเอียดการทำงานของแต่ละส่วนจะแสดงในหัวข้อถัดไป

3.2.1.1 วงจรกำเนิดสัญญาณควบคุม (ไมโครคอนโทรลเลอร์)

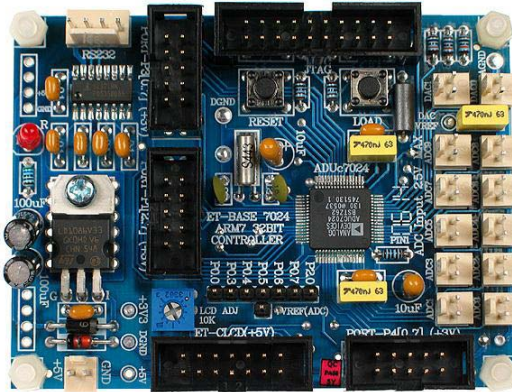
วงจรกำเนิดสัญญาณควบคุมใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล ARM-7 รุ่น ADUC7024 ของบริษัท Analog Device ทำงานที่สัญญาณนาฬิกา 41.78 เมกกะเฮิร์ตซ์ โดยเขียนโปรแกรมควบคุมด้วยภาษา C เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง. การทำงานของโปรแกรมแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ โปรแกรมหลัก โปรแกรมสำหรับ Interrupt และโปรแกรมสำหรับติดต่อคอมพิวเตอรื

3.2.1.1.1 โปรแกรมหลัก ทำหน้าที่รับค่าข้อมูล คำนวณค่า กำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรต่างๆ ตั้งค่าการ Interrupt ของไมโครคอนโทรลเลอร์ และสั่งงานเพื่อเริ่มต้น Interrupt การทำงานของโปรแกรมหลักแสดงผังการทำงานดังภาพประกอบที่ 3.6

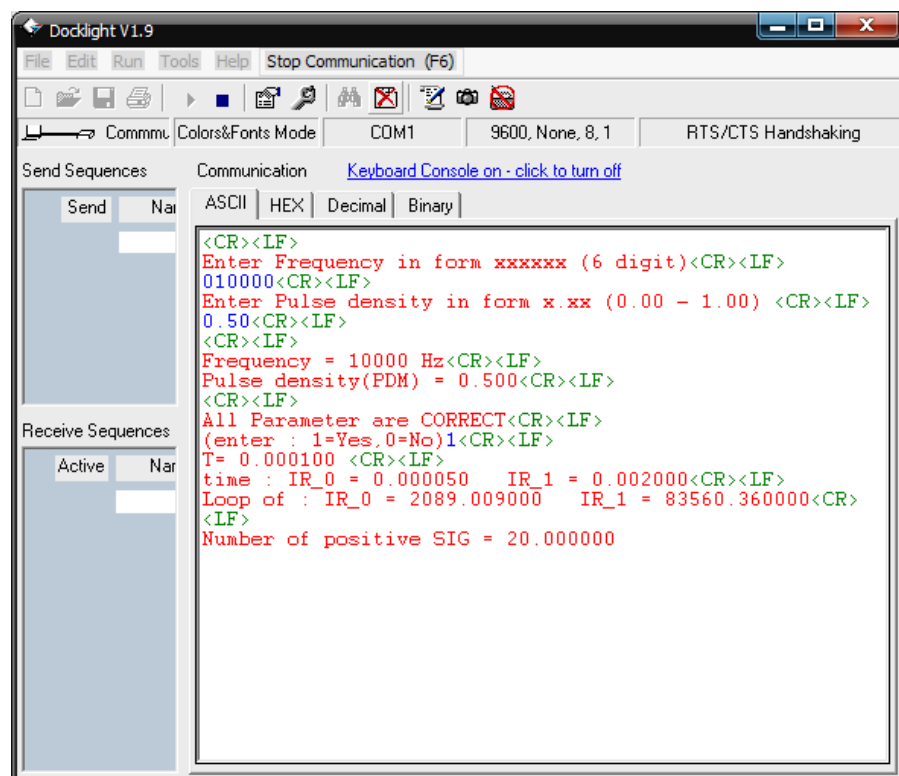
3.2.1.1.2 โปรแกรมสำหรับ Interrupt การ Interrupt เป็นลักษณะการทำงานของ ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สามารถกำหนดค่าช่วงเวลาในการเรียกใช้งาน โปรแกรมสำหรับ Interrupt โดยการกำหนดค่าให้กับตัวแปรภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ทำหน้าที่เก็บค่าการนับ การทำงานของการ Interrupt สำหรับโปรแกรมสร้างสัญญาณควบคุมจะใช้การ Interrupt สองตัว คือ Interrupt-0 และ Interrupt-1 การทำงานของโปรแกรมแสดงผังการทำงานดังภาพประกอบที่ 3.7

- **Interrupt-0** ทำหน้าที่ Interrupt ตามการเปิด-ปิดของสวิทซ์ที่ผู้ตั้งไว้เพื่อควบคุมสัญญาณขาออกของวงจรรีจิสเตอร์ให้มีความถี่และคาบของเวลาตามต้องการ Interrupt-0 จะควบคุมด้วยตัวแปร 2 ตัวคือ IRQSTA0 และ IRO_STA โดยที่ IRQSTA0 เป็นตัวแปรที่เปลี่ยนเมื่อเกิดการ Interrupt ของไมโครคอนโทรลเลอร์ และIRO_STA เป็นตัวแปรที่เปลี่ยนด้วยคำสั่งของโปรแกรมที่เขียนขึ้น เพื่อควบคุมการ Interrupt ให้ถูกต้องมากขึ้น โดยการ Interrupt ของ Interrupt-0 จำนวน 2 ครั้งสามารถสร้างสัญญาณได้หนึ่งลูก โดยมีตัวแปร PDM_Count ทำหน้าที่นับจำนวนลูกคลื่นที่สร้างขึ้นเพื่อให้ได้จำนวนลูกคลื่นตามต้องการตามที่ผู้ใช้ระบุใน โปรแกรมหลัก และเมื่อได้ลูกคลื่นครบตามจำนวนที่ต้องการแล้ว จะเปลี่ยนสถานะการ Interrupt ของ Interrupt-0 เป็น 0 (ไม่ทำงาน) ผ่านตัวแปร IRO_STA เพื่อหยุดการสร้างคลื่นสัญญาณขาออก (เปิดสวิทซ์ 4 และ 2 ในวงจรรีจิสเตอร์) ทำให้สัญญาณที่ปรากฏต่อโหลดเป็น 0 โวลต์ และเปิดการทำงานของ Interrupt-1 โดยการกำหนดค่าของตัวแปร IR1_STA เป็น 1 เพื่อรอให้ Interrupt-1 ทำงาน พร้อมกับรีเซ็ตค่าของตัวแปร PDM_Count เป็น 0 เพื่อรอการทำงานในรอบต่อไป
- **Interrupt-1** ทำหน้าที่ Interrupt ตามช่วงความถี่ของ PDM นั่นคือ Interrupt-1 จะทำงานทุกช่วงการเปิด-ปิด ของ PDM เช่น กรณีนี้กำหนดให้ PDM=20/20 หมายถึงคลื่นสัญญาณ 20 ลูก ดังนั้น Interrupt-1 จะทำงานทุก ๆ 20 ลูกของสัญญาณขาออก โดยช่วงเวลาการ Interrupt จะคำนวณจาก $20 \times T$ เมื่อ T คือคาบของสัญญาณควบคุม การทำงานของ Interrupt-1 ควบคุมผ่านตัวแปร 2 ตัวเช่นกัน คือ IRQSTA1 และ IR1_STA โดยที่ IRQSTA1 เป็นตัวแปรที่เปลี่ยนค่าจากการ Interrupt ของไมโครคอนโทรลเลอร์ และIR1_STA เป็นตัวแปรที่เปลี่ยนตามโปรแกรมที่เขียนขึ้น Interrupt-1 จะเริ่มต้นนับตั้งแต่คลื่นลูกแรก และจะ Interrupt เมื่อครบ 20 ลูก เมื่อ Interrupt-1 ทำงานจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปร IRO_STA ให้มีค่าเป็น 1 เพื่อเปิดการทำงานของ Interrupt-0 อีกครั้ง และเปลี่ยนค่า IR1_STA ให้เป็น 0 เพื่อปิดการทำงานของ Interrupt-1

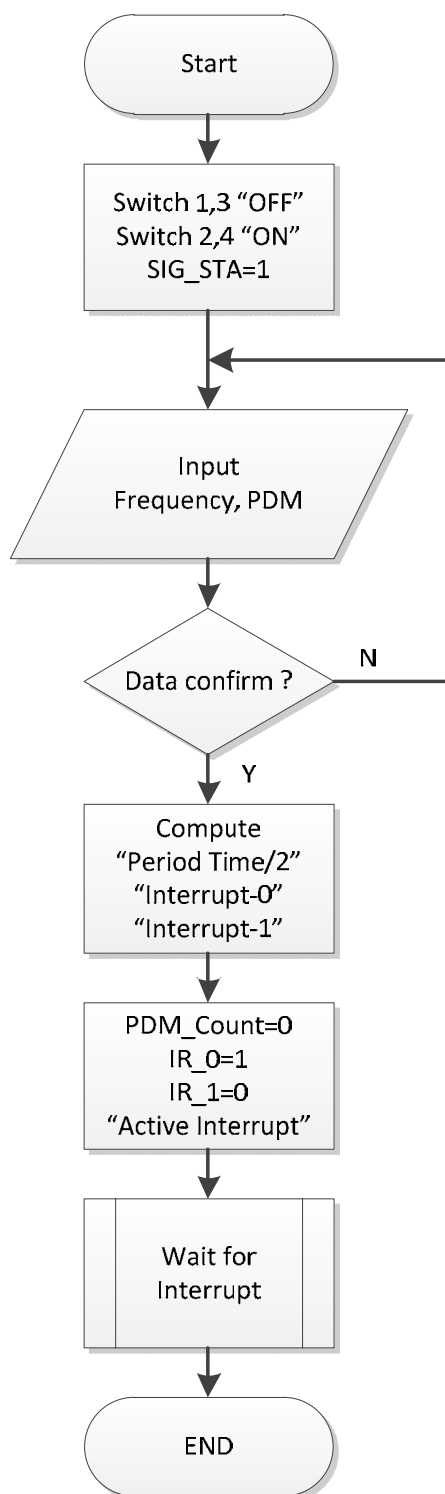
3.2.1.1.3 โปรแกรมสำหรับติดต่อคอมพิวเตอร์ ทำหน้าที่รับและส่งข้อมูลระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ กับ ไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อป้อนค่าต่างๆ ให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ และเพื่อแสดงผลข้อมูล โดยใช้พอร์ท RS232 ในการติดต่อ



ภาพประกอบที่ 3.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM-7 รุ่น ADUC7024

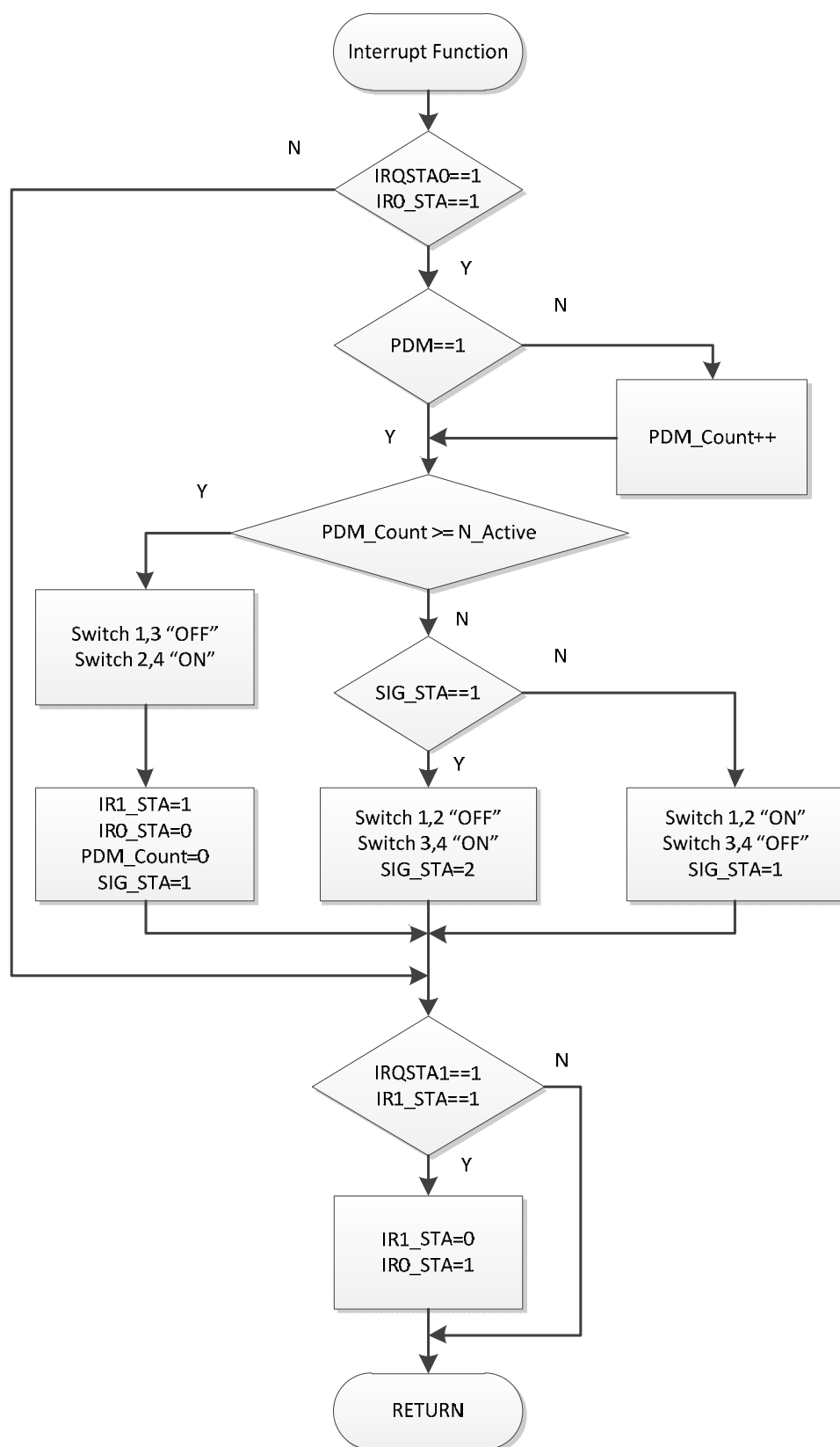


ภาพประกอบที่ 3.5 หน้าต่างการควบคุมแหล่งจ่ายผ่านพอร์ท RS-232



1. เริ่มต้นโปรแกรมโดยพิจารณาการทำงานควบคู่กับภาพประกอบที่ 2.2
2. สวิตช์ที่ 1,3 ปิด สวิตช์ที่ 2,4 เปิดให้สถานะของสัญญาณเป็น 1
3. รับค่า ความถี่ และค่า PDM จากผู้ใช้
4. ให้ผู้ใช้ตรวจสอบข้อมูล และยืนยันข้อมูลที่ได้อ่านไปแล้ว
5. คำนวณคาบ/2 และนำค่าดังกล่าวไปคำนวณจำนวนรอบในการรอเพื่อ Interrupt-1 และ Interrupt-2
6. ตั้งค่า PDM_Count=0 ตั้งค่า IR_0=1 และ IR_1=0 เพื่อจัดลำดับการ interrupt และเริ่มต้นการ Interrupt (อนุญาตให้ Interrupt)
7. รอการ Interrupt
8. จบโปรแกรม

ภาพประกอบที่ 3.6 ผังงานของโปรแกรมหลักและคำอธิบายการทำงาน

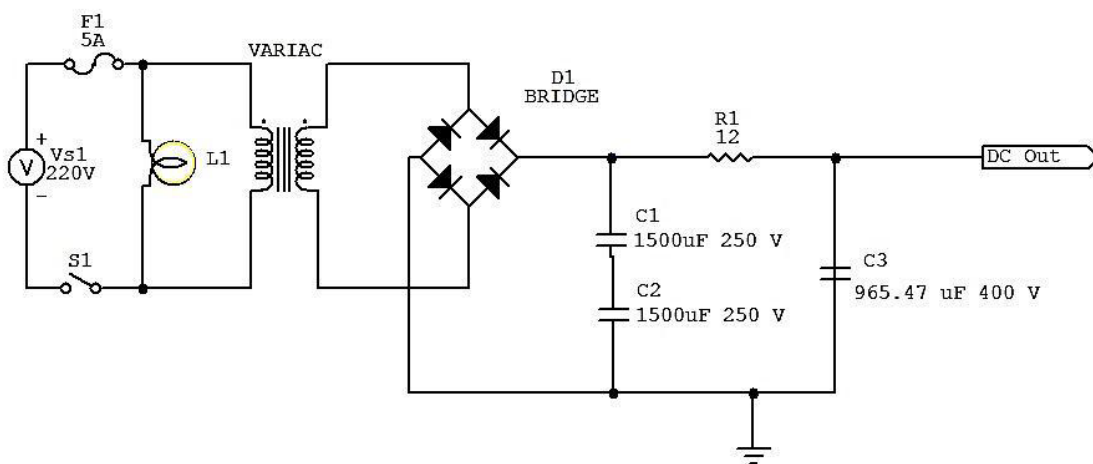


ภาพประกอบที่ 3.7 ฟังก์ชันของโปรแกรมหลักและคำอธิบายการทำงาน

3.2.1.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

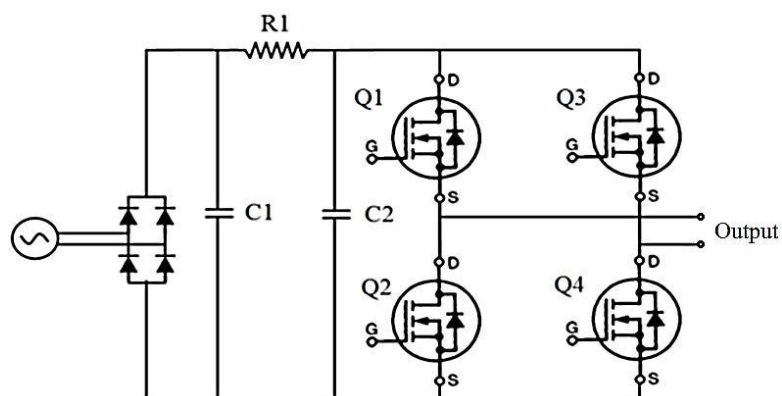
แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อจ่ายเข้าสู่วงจรรีเลย์เตอร์ วงจรแสดงการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแสดงดังภาพประกอบที่ 3.8 ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ

- หม้อแปลงชนิดปรับค่าได้ (Variable Transformer) ทำหน้าที่เปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่เข้าสู่วงจรเรียงกระแสเพื่อควบคุมระดับแรงดันขาออกของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง
- วงจรเรียงกระแส (Rectifier Circuit) ทำหน้าที่เปลี่ยนจากสัญญาณกระแสสลับเป็นสัญญาณกระแสตรง โดยอาศัยการทำงานของไดโอดสี่ตัวที่ต่อแบบบริดจ์ (Bridge Diode) ซึ่งเป็นวงจรเรียงกระแสแบบฟูลบริดจ์ (Full Bridge Rectifier)
- วงจรกรองแรงดัน (Voltage Filter Circuit) ทำหน้าที่กรองสัญญาณที่ได้จากวงจรเรียงกระแส ซึ่งสัญญาณที่ได้ยังไม่เรียบ สัญญาณที่ได้จากวงจรกรองแรงดันจะเรียบมากขึ้น วงจรกรองแรงดันที่เลือกใช้เป็นวงจรแบบ RC นั่นคือประกอบด้วยตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน วงจรที่นำไปใช้งานจะอยู่บนบอร์ดเดียวกับวงจรรีเลย์เตอร์ ซึ่งแสดงในภาพประกอบที่ 3.10



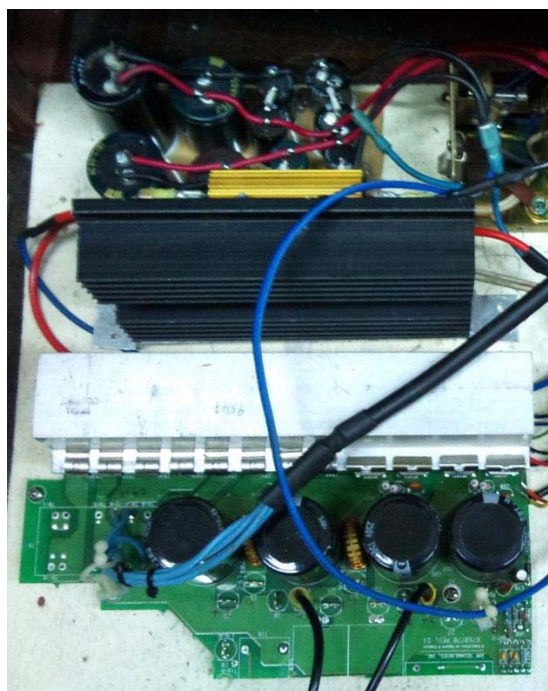
ภาพประกอบที่ 3.8 วงจรการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

3.2.1.3 วงจรอินเวอร์เตอร์



ภาพประกอบที่ 3.9 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์

วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ ลักษณะแสดงดังภาพประกอบที่ 3.9 ซึ่งประกอบด้วยสวิตช์สารกึ่งตัวนำสี่ตัว และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้ Power MOSFET ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ โดย Power MOSFET จะยึดติดกับแท่งอลูมิเนียมเพื่อระบายความร้อนที่เกิดขึ้น และตัวต้านทานของวงจรกรองแรงดันก็มีการยึดติดกับแท่งอลูมิเนียมเพื่อระบายความร้อนเช่นกัน ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.10

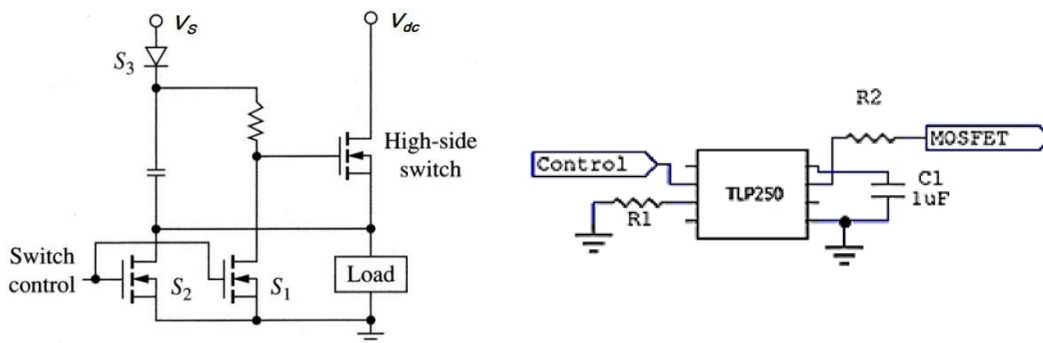


ภาพประกอบที่ 3.10 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ Full Bridge

3.2.1.4 วงจรขับ Power MOSFET

การออกแบบวงจรสำหรับขับ Power MOSFET แบ่งออกเป็น 2 วงจร คือ วงจรขับด้วย MOSFET และวงจรขับที่ใช้ไอซี IR2113

3.2.1.4.1 วงจรขับ Power MOSFET

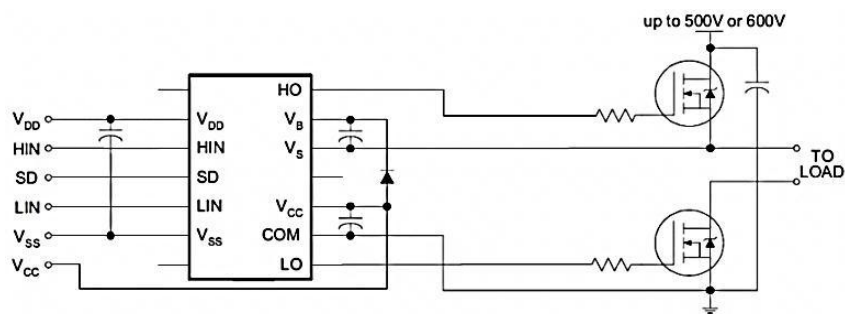


ภาพประกอบที่ 3.11 วงจรขับด้านแรงดันสูง [9] ภาพประกอบที่ 3.12 วงจรขับด้านแรงดันต่ำ

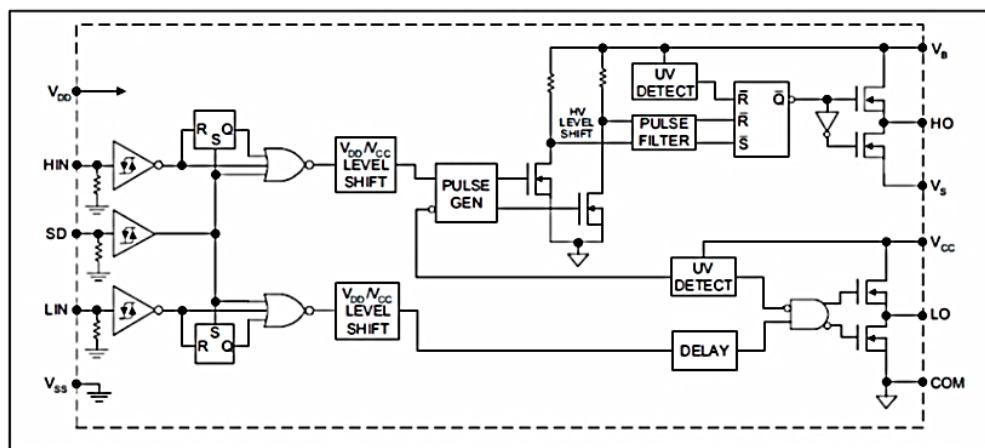
วงจรขับด้านแรงดันสูงจะใช้ขับ Power MOSFET ที่ขา Source ไม่ได้ต่อกับขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง หรือต่ออยู่กับโหนด นั่นคือ Power MOSFET ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ ในตำแหน่ง Q_1 และ Q_3 ในภาพประกอบที่ 3.9 ภาพประกอบที่ 3.11 และภาพประกอบที่ 3.12 แสดงโครงสร้างของวงจรขับด้านแรงดันสูง ประกอบด้วย ไดโอด ตัวเก็บประจุ ตัวต้านทาน และ MOSFET จำนวน 2 ตัว เมื่อสัญญาณควบคุมมีสถานะเป็นบวกจะทำให้ MOSFET ทั้งสอง (S_1 และ S_2) อยู่ในสถานะนำกระแส ส่งผลให้ตัวเก็บประจุถูกชาร์จจาก V_S ผ่านไดโอด ทำให้แรงดันในตัวเก็บประจุมีค่า V_S และสัญญาณที่ขา Gate ของ Power MOSFET ด้านแรงดันสูง (High-side switch) เป็นศูนย์ เมื่อสัญญาณควบคุมมีสถานะเป็นศูนย์ ทำให้ MOSFET ทั้ง 2 หยุดนำกระแส แรงดัน V_S ซึ่งตกคร่อมในตัวเก็บประจุจะถูกจ่ายผ่านตัวต้านทานเพื่อจ่ายแก่ขา Gate ทำให้ Power MOSFET นำกระแส สัญญาณไฟฟ้าจาก V_{dc} ผ่าน Power MOSFET และชาร์จเข้าสู่ตัวเก็บประจุ ทำให้สัญญาณที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่า $V_S + V_{dc}$ ส่งผลให้สัญญาณที่จ่ายแก่ขา Gate มีค่า $V_S + V_{dc}$ ความต่างศักย์ระหว่างขา Gate และขา Source จึงมีค่าคงที่เป็น V_S ส่งผลให้ Power MOSFET จ่ายกระแสได้ วงจรข้างต้นเรียกว่าวงจร Bootstrap ภาพประกอบที่ 3.12 แสดงโครงสร้างของวงจรขับด้านแรงดันต่ำโดยใช้ไอซี TLP250 เพื่อแยกภาคควบคุมออกจากภาคแรงดันสูง (วงจร Isolate) และเพิ่มกระแสให้กับสัญญาณควบคุม เพื่อขับขา Gate ของ Power MOSFET และวงจรมีใช้ในการขับ MOSFET ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ (S_1 และ S_2) ในวงจรขับด้านแรงดันสูงดังภาพประกอบที่ 3.11

3.2.1.4.2 วงจรขับด้วยไอซี

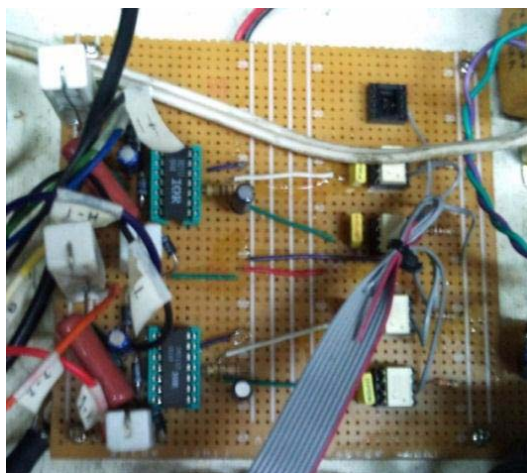
วงจรขับด้วยไอซีจะใช้ไอซีเบอร์ IR2113 ซึ่งมีวงจรขับด้านแรงดันสูงและวงจรถับด้านแรงดันต่ำอยู่ในตัว ทำให้สามารถลดอุปกรณ์ในการสร้างวงจรและลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นได้ ไอซี IR2113 จะมีวงจร Bootstrap อยู่ภายในแต่ต้องมีการเพิ่มตัวเก็บประจุและไดโอดเพื่อสนับสนุนการทำงานของไอซี รูปแบบการต่อวงจรของไอซี IR2113 แสดงดังภาพประกอบที่ 3.13 โครงสร้างภายในแสดงดังภาพประกอบที่ 3.14 เมื่อพิจารณาวงจรถับด้านขา ลักษณะการทำงานของวงจรถับเหมือนกับวงจรถับ Bootstrap แต่ต้องมีการต่อตัวเก็บประจุและไดโอดให้กับไอซี ซึ่งวงจรถับสร้างขึ้นแสดงดังภาพประกอบที่ 3.15



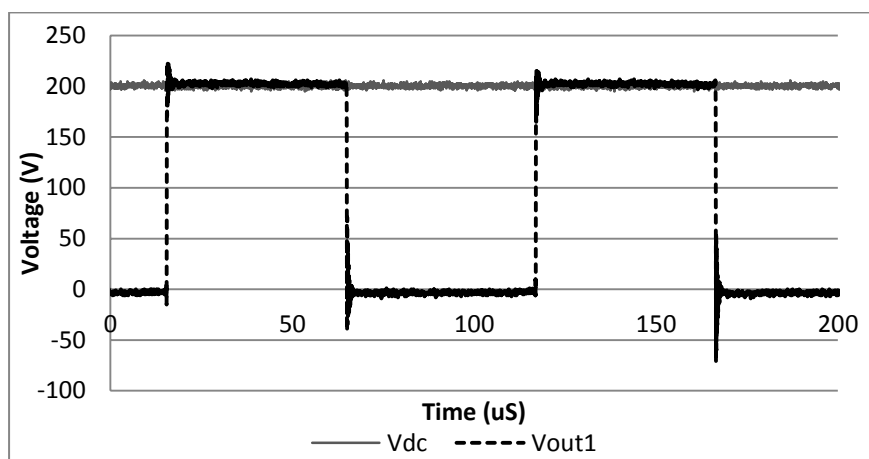
ภาพประกอบที่ 3.13 การต่อวงจรของไอซี IR2113 เพื่อใช้ขับ Power MOSFET



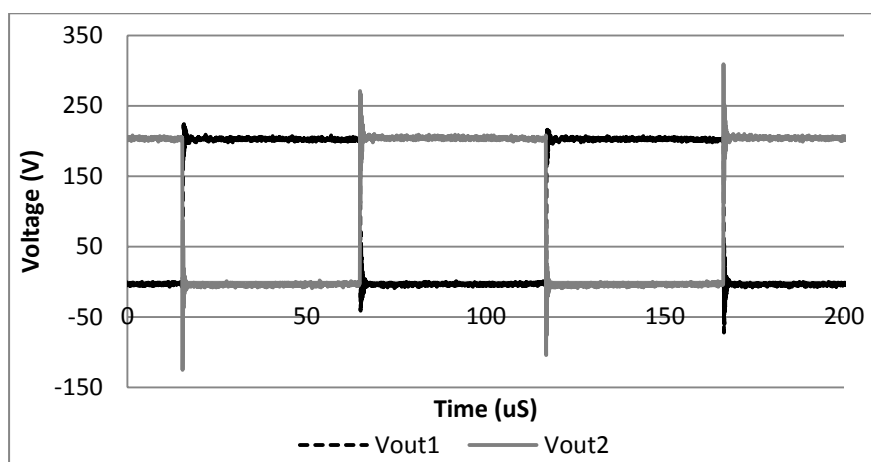
ภาพประกอบที่ 3.14 โครงสร้างภายในของไอซี IR2113



ภาพประกอบที่ 3.15 วงจรขับ Power MOSFET ที่ใช้ไอซี IR2113



ภาพประกอบที่ 3.16 สัญญาณออกของวงจรถิณเวอร์เตอร์เทียบกับสัญญาณขาเข้า



ภาพประกอบที่ 3.17 สัญญาณออกของวงจรถิณเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์

ภาพประกอบที่ 3.16 เปรียบเทียบระดับสัญญาณขาเข้า (V_{dc}) และสัญญาณขาออก (V_{out1}) ซึ่งมีระดับแรงดันที่เท่ากัน และการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันของสัญญาณขาออก จากระดับต่ำไปยังระดับสูงทำได้รวดเร็วกว่าเมื่อเทียบกับวงจรขับด้วย MOSFET แสดงว่าการใช้ไอซี IR2113 นั้นสามารถเปิด-ปิด การนำกระแสของ Power MOSFET ได้ดีกว่าการใช้วงจรขับด้วย MOSFET ภาพประกอบที่ 3.17 แสดงสัญญาณขาออกของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ซึ่งสัญญาณดังกล่าวจะจ่ายเข้าสู่หม้อไฟฟ้าแรงดันสูงต่อไป

3.2.1.5 หม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าทำหน้าที่ในการขยายแรงดันไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้าขาเข้าให้มีแรงดันไฟฟ้าขาออกที่มากพอสำหรับสร้างพลาสมาที่ความดันบรรยากาศได้ คุณสมบัติของหม้อแปลงที่สร้างขึ้นมีดังนี้

ตารางที่ 3.2 คุณลักษณะของหม้อแปลงที่ใช้ในการออกแบบ

คุณลักษณะ	ขาเข้า	ขาออก
กำลังไฟฟ้า(วัตต์)	600	510
แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	310	15000
กระแส (แอมแปร์)	1.9	0.034
ความถี่ (กิโลเฮิรตซ์)	10	10

ข้อมูลในตารางแสดงคุณลักษณะของหม้อแปลงที่ออกแบบไว้ โดยให้ประสิทธิภาพของหม้อแปลงอยู่ที่ 85% และใช้แกนหม้อแปลงเป็นเฟอร์ไรต์เบอร์ EE80 มีสนามแม่เหล็กอิ่มตัวอยู่ที่ 0.48 เทสลา โดยใช้สมการ 2.4 ในบทที่ 2 เพื่อคำนวณหาจำนวนรอบด้านปฐมภูมิ

คำนวณจำนวนรอบด้านปฐมภูมิ

จากสมการ 2.4

$$N_p = \frac{V_p(10^4)}{A_c B_{uc} f k_f}$$

เมื่อ

$$V_p = 310 \text{ โวลต์}$$

$$A_c = 3.92 \text{ ตารางเซนติเมตร}$$

$$B_{uc} = B_{sat}/2 = 0.48/2 = 0.24 \text{ เทสลา}$$

$$f = 10 \text{ กิโลเฮิรตซ์}$$

$$k_f = 4 \text{ (สำหรับสัญญาณสี่เหลี่ยม)}$$

แทนค่า

$$N_p = \frac{310(10^4)}{3.92 \times 0.24 \times 10 \times 10^3 \times 4}$$

$$= 82.38 \approx 82 \text{ รอบ}$$

คำนวณจำนวนรอบด้านทุติยภูมิ

จากสมการที่ 2.3

$$V_s = \frac{N_s}{N_p} V_p$$

แทนค่าจากตารางที่ 3.1 และจำนวนรอบด้านปฐมภูมิที่คำนวณได้ จะได้

$$N_s = \frac{N_p}{V_p} V_s = \frac{82}{310} \times 15000 = 3967 \text{ รอบ}$$

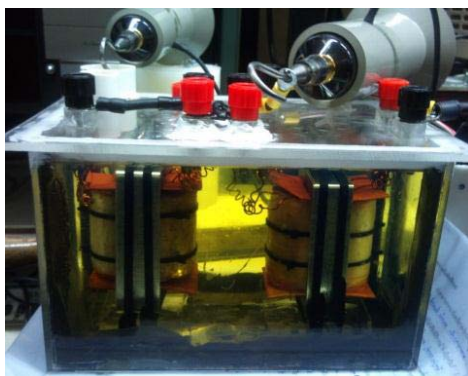
ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า

จำนวนรอบด้านปฐมภูมิ = 82 รอบ

จำนวนรอบด้านทุติยภูมิ = 3,967 รอบ

ดังนั้น จะได้ $N_s/N_p = 3967/82 = 48.39$

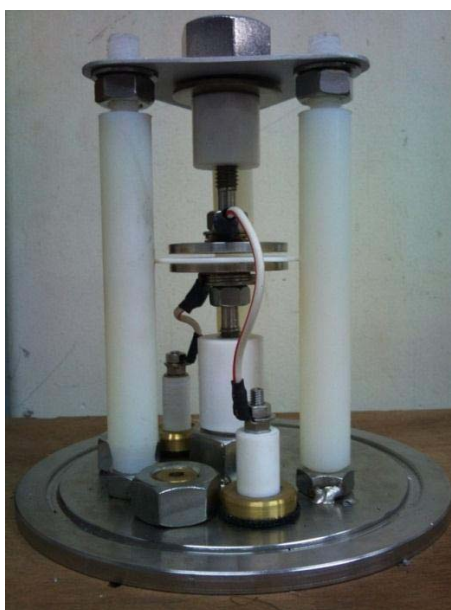
การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าจะใช้เทคนิคการต่อหม้อแปลงชนิดชั้นบันได ซึ่งจะ
มีขดลวดกระตุ้นเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งขด มีจำนวนรอบเท่ากับขดลวดด้านปฐมภูมิ การสร้างหม้อแปลงทั้ง
สองตัว จะมีคุณลักษณะเหมือนกันและนำมาต่อใช้งานร่วมกันเพื่อเพิ่มความต่างศักย์ของหม้อแปลง
จากภาพประกอบที่ 3.18 แสดงภาพหม้อแปลงไฟฟ้าที่สร้างขึ้น ซึ่งเป็นชนิดชั้นบันได ใช้หม้อแปลง
สองลูกและใช้น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวน ทำให้ได้อัตราขยายเป็น $48.39 \times 2 = 96.75$ เท่า



ภาพประกอบที่ 3.18 หม้อแปลงชนิดชั้นบันไดที่สร้างขึ้น

3.2.1.6 การออกแบบและสร้างห้องพลาสมา

ห้องพลาสมาใช้สำหรับสร้างพลาสมา แสดงดังภาพประกอบที่ 3.19 โดยระบบที่สร้างขึ้นจะเป็นห้องพลาสมาแบบดิสชาร์จข้ามฉนวน (DBD) ที่ใช้แผ่นฉนวน 1 แผ่นวางอยู่บนขั้วไฟฟ้าแบบแผ่นที่ต่ออยู่กับกราวด์ และมีช่องว่างของอากาศอยู่ระหว่างแผ่นฉนวนกับขั้วไฟฟ้าแบบแผ่นซึ่งต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูง ห้องพลาสมาประกอบด้วย



ภาพประกอบที่ 3.19 โครงสร้างของห้องพลาสมา

3.2.1.6.1 ขั้วไฟฟ้าแบบแผ่น

ห้องพลาสมาประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าแบบแผ่นวงกลมสองแผ่นที่วางขนานกัน มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 เซนติเมตร หนา 0.4 เซนติเมตร สามารถเปลี่ยนแปลงช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (Gas gap) ในช่วง 0 – 2 เซนติเมตร และสามารถเปลี่ยนแผ่นฉนวนได้ (dielectric plate) โดยขั้วไฟฟ้าด้านบนต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง และด้านล่างต่อกับกราวด์

3.2.1.6.2 แผ่นฉนวน

ใช้เทฟลอน (Teflon) เป็นแผ่นฉนวน ซึ่งสามารถทนความร้อนได้สูงถึง 360 องศาเซลเซียส และไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีต่อสารเคมี แผ่นฉนวนที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 72 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร

3.2.1.6.3 ขั้วต่อไฟฟ้าแรงดันสูง

ขั้วต่อไฟฟ้าแรงดันสูงแสดงดังภาพประกอบที่ 3.20 ทำหน้าที่ส่งผ่านแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกเข้าสู่ห้องพลาสมาโดยไม่มีการรั่วไหลของไฟฟ้าแรงดันสูงไปยังตัวนำไฟฟ้ารอบข้างและไม่ทำให้ห้องพลาสมาเสียความเป็น-สูญญากาศ (กรณีใช้ที่ความดันต่ำ) ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้าง 3 ส่วน

- **ส่วนนำไฟฟ้า** นำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าเข้าสู่ห้องพลาสมา วัสดุที่ใช้ทำเป็นสแตนเลสทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร ที่ปลายทั้งสองกลึงเกลียวเพื่อใช้ยึดกับสายไฟ
- **ส่วนฉนวน** ทำหน้าที่ป้องกันการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่างส่วนนำไฟฟ้าและแผ่นสแตนเลสของห้องพลาสมา ทำจากแท่งเทฟลอนทรงกระบอก ยาว 90 มิลลิเมตรและเจาะรูตรงกลางเพื่อใส่ส่วนนำไฟฟ้า
- **ส่วนยึดติด** ทำหน้าที่ยึดติดกับห้องพลาสมา โดยเป็นส่วนนอกสุดของขั้วต่อไฟฟ้าแรงดันสูง ทำจากทองเหลืองทรงกระบอกยาว 43 มิลลิเมตร และเจาะรูตรงกลางเพื่อใส่ส่วนฉนวน



ภาพประกอบที่ 3.20 ขั้วต่อไฟฟ้าแรงดันสูง

3.2.1.7 กล้องซีซีดี

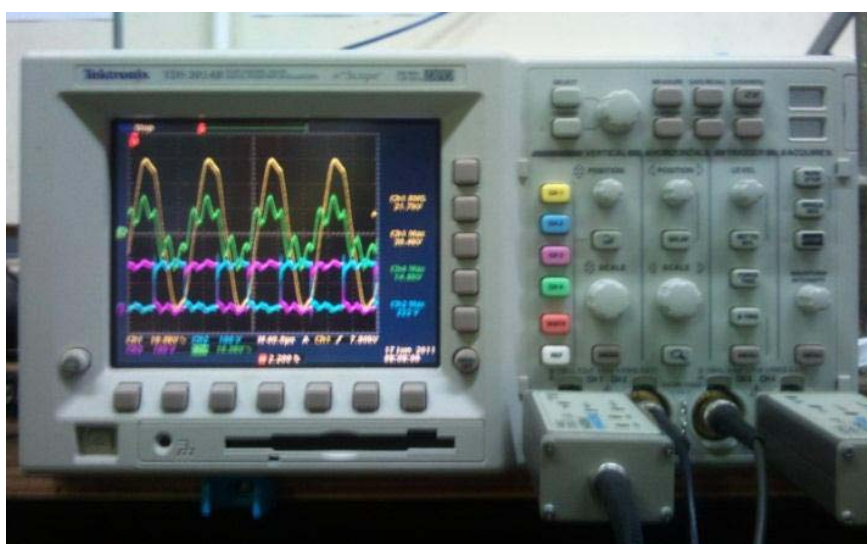
กล้องซีซีดีทำหน้าที่บันทึกภาพพลาสมาที่เกิดขึ้นเพื่อดูความหนาแน่นของพลาสมาที่เกิดขึ้น โดยกล้องที่ใช้เป็นรุ่น XCD-V60CR ของบริษัทโซนิ ความละเอียดอยู่ที่ 330,000 พิกเซล และถ่ายภาพด้วยความเร็วสูงสุดที่ 90 ภาพต่อวินาที แสดงดังภาพประกอบที่ 3.21



ภาพประกอบที่ 3.21 กล้องซีซีดี สำหรับจับภาพพลาสมา

3.2.1.8 ออสซิลโลสโคป

ออสซิลโลสโคปทำหน้าที่แสดงผลสัญญาณและบันทึกข้อมูลสัญญาณต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง เช่น สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายแก่ห้องพลาสมา สัญญาณกระแสดิสชาร์จ เป็นต้น ซึ่งทำให้สามารถวิเคราะห์ลักษณะการเกิดพลาสมาได้ แสดงดังภาพประกอบที่ 3.22



ภาพประกอบที่ 3.22 ออสซิลโลสโคปรุ่น Tektronix TDS3014B (100 เมกกะเฮิร์ตซ์)

3.2.1.9 โพรบวัดไฟฟ้าแรงดันสูง

โพรบวัดไฟฟ้าแรงดันสูง (High Voltage Probe) ทำหน้าที่ลดระดับแรงดันไฟฟ้าให้น้อยลง เพื่อนำสัญญาณดังกล่าวไปแสดงผลบนออสซิลโลสโคป โดยออสซิลโลสโคปทำหน้าที่ในการคูณค่าของแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ ตามสัดส่วนการลดระดับแรงดันของโพรบที่ใช้ โดยโพรบที่ใช้รุ่น Tektronix P6015A แสดงดังภาพประกอบที่ 3.23 มีสัดส่วนการลดระดับแรงดันไฟฟ้าคือ 1:1000 สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุด 20,000 โวลต์ เมื่อใช้กับไฟฟ้ากระแสตรง และ 40,000 โวลต์ สำหรับไฟฟ้ากระแสสลับ



ภาพประกอบที่ 3.23 โพรบวัดแรงดันสูงรุ่น Tektronix P6015A

3.3 การศึกษาคุณสมบัติของแหล่งจ่าย

3.3.1 ศึกษาคุณลักษณะของสัญญาณที่ได้จาก Power MOSFET เมื่อใช้วงจรขับต่างกัน

3.3.1.1 สร้างวงจรขับ Power MOSFET แบบใช้ MOSFET โดยต่อรูปแบบของวงจรแบบ Bootstrap

3.3.1.2 ทดสอบเพื่อวัดสัญญาณที่ออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ Full Bridge

3.3.1.3 วิเคราะห์สัญญาณที่ได้โดยใช้วงจรขับแต่ละแบบ โดยพิจารณาจาก

- การเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันต่อเวลาโดยพิจารณาจาก t_{rise}
- เปอร์เซ็นต์ของแรงดันด้านบวกของสัญญาณ

3.3.2 วัดกำลังของวงจรอินเวอร์เตอร์

3.3.2.1 ทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์โดยใช้การทดสอบ 2 แบบ คือ Open load และแบบ Full Load

3.3.2.2 กำหนดกระแสที่ผ่าน Load โดยใช้กฎของโอมและคำนวณกำลังไฟฟ้า

3.3.2.3 วิเคราะห์ผลและเขียนความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า

3.3.3 ศึกษาคุณลักษณะของสัญญาณที่ได้จากหม้อแปลงแรงดันสูง

3.3.3.1 วัดสัญญาณที่ได้จากหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง 1 ตัว

3.3.3.2 วัดสัญญาณที่ได้จากหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง ซึ่งต่อใช้งานแบบขั้วบนขั้วใด โดยมีเงื่อนไขดังนี้

- เปลี่ยนแปลงระดับแรงไฟฟ้าด้านขาเข้า เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงไฟฟ้าตัวแรกและตัวที่สอง
- ทดสอบแบบต่อ โหลดโดยใช้ตัวต้านทาน 300 กิโลโอห์ม เพื่อศึกษากำลังไฟฟ้าที่ได้จากหม้อแปลงไฟฟ้า

3.3.3.3 วิเคราะห์ผลการศึกษาโดยการคำนวณสัดส่วนขยายแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้าตัวแรกและตัวที่สอง

3.3.3.4 วิเคราะห์ผลการศึกษาโดยการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ได้จากหม้อแปลงไฟฟ้าแบบขั้วบนขั้วใด

3.4 การศึกษาคุณสมบัติของพลาสมา

3.4.1 ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของพลาสมาเมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า

3.4.1.1 สร้างพลาสมา โดยควบคุมชนิดและความหนาของแผ่นฉนวน ช่องว่างของแก๊สและเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วไฟฟ้าโดยทำการทดลองที่ความดันบรรยากาศ ในสภาวะอากาศปกติ เปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายแก่ห้องพลาสมา โดยมีเงื่อนไขในการศึกษาคือ

- แผ่นฉนวน : เทฟลอน ความหนา 2 มิลลิเมตร. รัศมี 72 มิลลิเมตร
- ช่องว่างของแก๊ส : 2 มิลลิเมตร
- ความดัน : 1 บรรยากาศ
- ชนิดของแก๊ส : อากาศ
- ความถี่ : 10 กิโลเฮิรตซ์
- แรงดันไฟฟ้า : 9.44 – 18 กิโลโวลต์
- PDM : 20/20

3.4.1.2 ศึกษากำลังของพลาสมาที่เกิดขึ้น โดยการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ

3.4.1.3 เขียนแผนภาพ Lissajous และคำนวณกำลังที่ได้

3.4.1.4 ศึกษาลักษณะกระแสดิซชาร์จ์ โดยการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานไฟฟ้า

3.4.1.5 วิเคราะห์ผลและสรุปผลที่ได้จากการศึกษา

3.4.2 ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของพลาสมาเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ของแหล่งจ่าย

3.4.2.1 สร้างพลาสมา โดยควบคุมชนิดและความหนาของแผ่นฉนวน ช่องว่างของแก๊สและเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วไฟฟ้าโดยทำการทดลองที่ความดันบรรยากาศ ในสภาวะอากาศปกติ เปลี่ยนแปลงความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่จ่ายแก่ห้องพลาสมา โดยมีเงื่อนไขในการศึกษาคือ

- แผ่นฉนวน : เทฟลอน ความหนา 2 มิลลิเมตร. รัศมี 72 มิลลิเมตร
- ช่องว่างของแก๊ส : 2 มิลลิเมตร
- ความดัน : 1 บรรยากาศ
- ชนิดของแก๊ส : อากาศ

- ความถี่ : 6 - 13 กิโลเฮิรตซ์
- แรงดันไฟฟ้า : 15 กิโลโวลต์
- PDM : 20/20

3.4.2.2 ศึกษากำลังไฟฟ้าของพลาสมาที่เกิดขึ้น โดยวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ

3.4.2.3 เขียนแผนภาพ Lissajous และคำนวณกำลังที่ได้

3.4.2.4 ศึกษาลักษณะกระแสดิซชาร์จ์ โดยการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานไฟฟ้า

3.4.2.5 วิเคราะห์ผลและสรุปผลที่ได้จากการศึกษา

3.4.3 ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของพลาสมาเมื่อใช้การควบคุมแบบ PDM

3.4.3.1 สร้างพลาสมา โดยควบคุมชนิดและความหนาของแผ่นฉนวน ช่องว่างของแก๊สและเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วไฟฟ้า โดยทำการทดลองที่ความดันบรรยากาศ ในสภาวะอากาศปกติ เปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของสัณฐาน (PDM) ที่จ่ายแก่ห้องพลาสมา โดยมีเงื่อนไขในการศึกษาคือ

- แผ่นฉนวน : เทฟลอน ความหนา 2 มิลลิเมตร รัศมี 72 มิลลิเมตร
- ช่องว่างของแก๊ส : 2 มิลลิเมตร
- ความดัน : 1 บรรยากาศ
- ชนิดของแก๊ส : อากาศ
- ความถี่ : 10 กิโลเฮิรตซ์
- แรงดันไฟฟ้า : 15 กิโลโวลต์
- PDM : 1/20 – 20/20

3.4.3.2 ศึกษากำลังไฟฟ้าของพลาสมาที่เกิดขึ้น โดยการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ

3.4.3.3 เขียนแผนภาพ Lissajous และคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ได้

3.4.3.4 ศึกษาลักษณะกระแสดิซชาร์จ์ โดยการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานไฟฟ้า

3.4.3.5 วิเคราะห์ผลและสรุปผลที่ได้จากการศึกษา

บทที่ 4

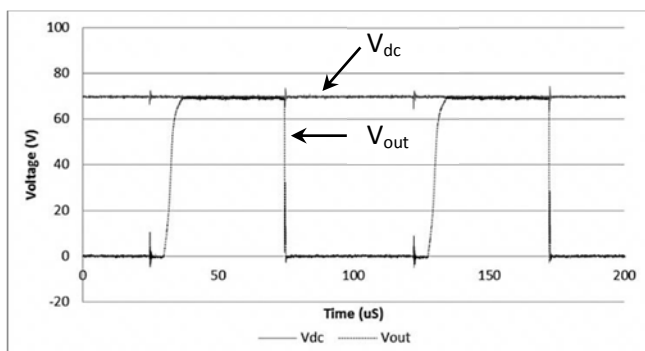
ผลและการอภิปรายผลการทดลอง

4.1 การศึกษาคุณสมบัติของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง

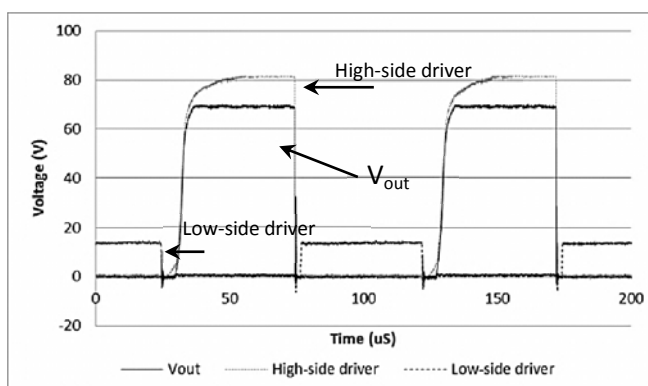
การศึกษาคูณสมบัติของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงโดยทำการทดสอบการทำงานของวงจรไฟฟ้าในแต่ละส่วน รวมถึงหม้อแปลงไฟฟ้า และนำวงจรไฟฟ้าหรือหม้อแปลงไฟฟ้าที่ให้ผลการทดสอบดีที่สุดมาใช้เพื่อสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับสร้างพลาสมาและศึกษาคูณสมบัติของพลาสมา โดยมีการศึกษาต่างๆ ดังนี้

4.1.1 ศึกษาคุณลักษณะของสัญญาณที่ได้จาก Power MOSFET เมื่อใช้วงจรขับต่างกัน

4.1.1.1 วงจรขับด้วย MOSFET



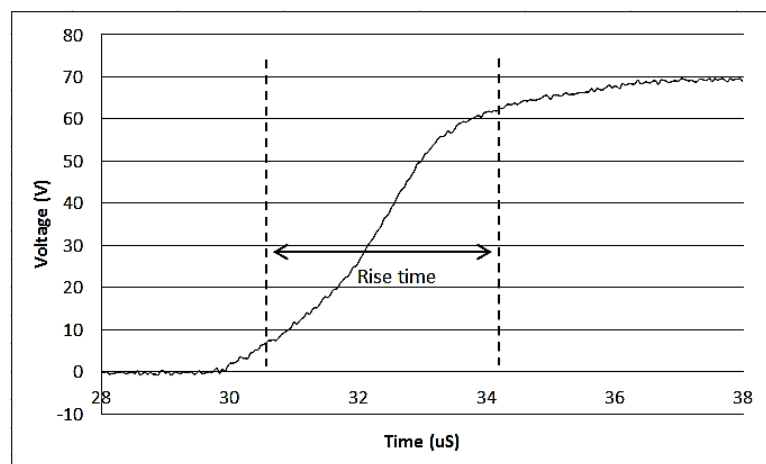
ภาพประกอบที่ 4.1 สัญญาณออกของ Power MOSFET เทียบกับแรงดันขาเข้า



ภาพประกอบที่ 4.2 สัญญาณขาออกของ Power MOSFET เทียบกับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ขับ Power MOSFET ด้านไฟฟ้าแรงดันต่ำและด้านไฟฟ้าแรงดันสูง

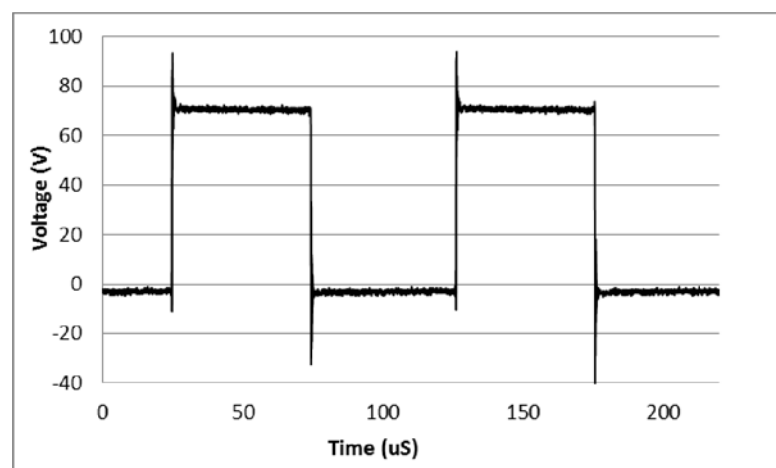
ภาพประกอบที่ 4.1 แสดงสัญญาณที่ได้จากการใช้วงจรขับด้วย MOSFET ทำให้ได้สัญญาณที่มีระดับแรงดันเท่ากับแรงดันขาเข้า (V_{dc}) เมื่อพิจารณาภาพประกอบที่ 4.2 พบว่าการตอบสนองของวงจรขับด้านแรงดันสูง (High-side driver) ทำงานได้ช้ากว่า นั้นส่งผลให้ช่วงเวลาด้านบวกของสัญญาณ (Positive Duty cycle) มีค่าน้อยลงกว่าสัญญาณควบคุม

ภาพประกอบที่ 4.3 แสดงสัญญาณที่ขยายจากภาพประกอบ 4.1 เพื่อศึกษาการตอบสนองของสัญญาณขาออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์โดยพิจารณาจากเวลาที่แรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนจาก 10% ถึง 90 % ของค่าสูงสุด หรือเรียกว่าค่า Rise time (t_{rise}) ซึ่งจากภาพจะมีค่า 3.72 ไมโครวินาที

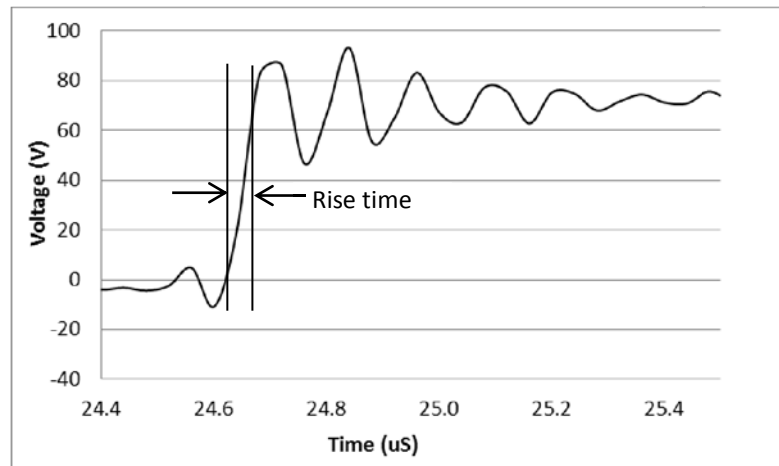


ภาพประกอบที่ 4.3 แสดง Rise time ของสัญญาณจาก Power MOSFET

4.1.1.2 วงจรขับด้วยไอซี



ภาพประกอบที่ 4.4 สัญญาณออกของ Power MOSFET เมื่อขับด้วยไอซี



ภาพประกอบที่ 4.5 แสดง Rise time ของสัญญาณจาก Power MOSFET เมื่อขับด้วยไอซี

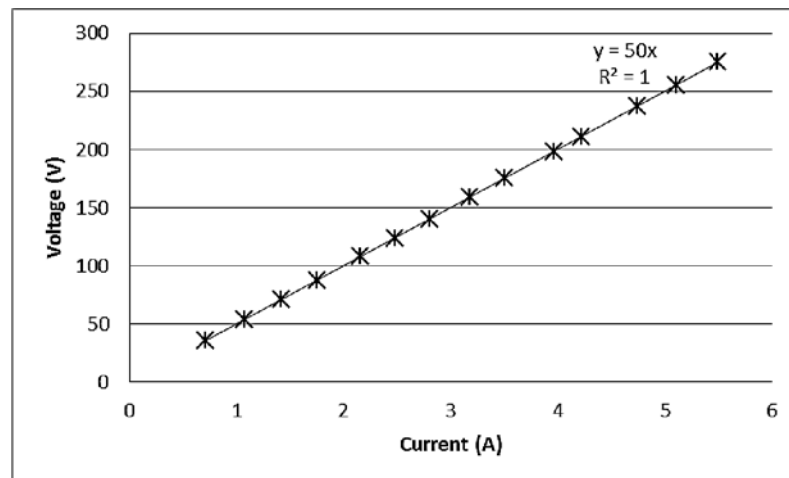
ภาพประกอบที่ 4.4 แสดงสัญญาณออกจากวงจรถ่ายโอนสัญญาณที่ใช้ไอซีในการขับ Power MOSFET เมื่อใช้แรงดันขาเข้าเป็น 70 โวลต์ ทำให้ได้สัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีความสูงของสัญญาณเท่ากับแรงดันขาเข้าคือ 70 โวลต์ ภาพประกอบที่ 4.5 แสดงสัญญาณที่ขยายจากภาพประกอบ 4.4 เพื่อศึกษาการตอบสนองของสัญญาณ โดยพิจารณาจากค่า t_{rise} จากภาพจะมีค่า 32 นาโนวินาที นั่นคือการตอบสนองของ Power MOSFET ทำได้เร็วกว่าการใช้วงจรถ่ายโอนด้วย MOSFET การตอบสนองที่เร็วขึ้นทำให้ช่วงเวลาที่ Power MOSFET นำกระแส (Positive Duty Cycle) ของสัญญาณมีค่ามากขึ้น นั่นคือมีค่าเข้าใกล้ 50% มากขึ้น

4.1.2 ศึกษากำลังของวงจรรีโวลต์เตอร์

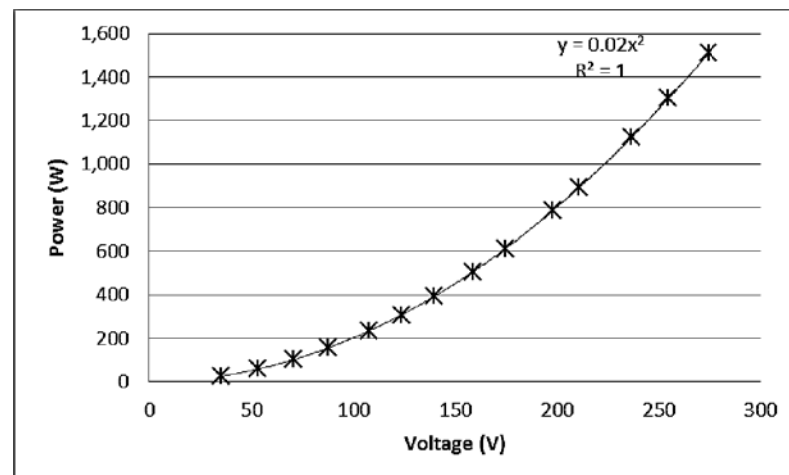
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลจากการวัดกำลังไฟฟ้าของวงจรรีโวลต์เตอร์

แรงดันไฟฟ้า			กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)
ไม่ต่อโหลด (V_{ms})	ต่อโหลด 50 โอห์ม (V_{ms})	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง (ไม่ต่อโหลด – ต่อโหลด)		
40	36	10.33	0.71	25
61	54	11.72	1.07	57
81	71	12.11	1.42	101
101	88	13.17	1.75	154
122	108	11.48	2.16	233
141	124	12.06	2.48	308
161	140	13.04	2.80	392
181	159	12.15	3.18	506
201	175	12.94	3.50	612
222	198	10.81	3.96	784
242	211	12.81	4.22	890
261	237	9.20	4.74	1,123
282	255	9.57	5.10	1,300
300	275	8.33	5.50	1,512
ค่าเฉลี่ย				
				11±2

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบเมื่อต่อสัญญาณที่ได้จากวงจรรีโวลต์เตอร์เพื่อใช้การทดสอบแบบไม่ต่อโหลด (Open Load) และการทดสอบแบบต่อโหลด (Full Load) โดยการทดสอบแบบต่อโหลด ใช้โหลดเป็นตัวต้านทานขนาด 50 โอห์มและเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ที่จ่ายแก่โหลด ทำให้สามารถคำนวณกระแสที่ผ่านโหลดได้ จากการทดสอบได้กระแสสูงสุดที่ 5.50 แอมแปร์ ที่ความต่างศักย์ 275 โวลต์ โดยเปอร์เซ็นต์การลดลงของแรงดันไฟฟ้าระหว่างการทดสอบแบบไม่ต่อโหลดและแบบต่อโหลดอยู่ในช่วง 11 ± 2 % ซึ่งเกิดจากการดึงกระแสของโหลดที่ใช้ทดสอบ และความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ที่จ่ายและกำลังไฟฟ้าแสดงดังภาพประกอบที่ 4.7



ภาพประกอบที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสของอินเวอร์เตอร์



ภาพประกอบที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและความต่างศักย์ของอินเวอร์เตอร์

ทำให้ทราบว่าวงจรอินเวอร์เตอร์สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดที่ 1,512 วัตต์ นั่นคือสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีกำลังไฟฟ้าสูงได้ถึง 1,512 วัตต์

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์แสดงดังภาพประกอบที่ 4.6 ซึ่งเป็นไปตามกฎของโอห์ม ลักษณะของกราฟในภาพประกอบที่ 4.7 แสดงแนวโน้มของกำลังไฟฟ้ายังสามารถเพิ่มขึ้นได้ โดยการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า และจะทำให้กระแสที่ไหลผ่านเพิ่มมากขึ้นด้วยส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ได้เพิ่มขึ้น

4.1.3 ศึกษาคุณลักษณะของสัญญาณที่ได้จากหม้อแปลงแรงดันสูง

4.1.3.1 สัญญาณที่ได้จากหม้อแปลงแรงดันสูง 1 ตัว

การทดสอบโดยจ่ายสัญญาณเข้าสู่หม้อแปลงไฟฟ้า 1 ตัว และวัดสัญญาณขาออก เพื่อเปรียบเทียบสัญญาณขาเข้าและสัญญาณขาออกของหม้อแปลง สัญญาณที่ได้แสดงดังภาพประกอบที่ 4.8 พบว่า สัญญาณขาเข้า 1 ลูกคลื่น (สัญญาณบวก 1 ลูก และสัญญาณลบ 1 ลูก) ทำให้ได้สัญญาณออก 3 ลูก นั่นคือทำให้ความถี่ของสัญญาณขาออกเพิ่มขึ้น ภาพประกอบที่ 4.8 ระหว่างเส้นทึบ ก และเส้นทึบ ข แสดงสัญญาณขาเข้า 1 ลูกคลื่นและสัญญาณขาออก 3 ลูกคลื่น ความถี่ของสัญญาณที่เพิ่มขึ้นเป็นผลจากฮาร์โมนิกที่ 3 ของความถี่มูลฐาน นั่นคือจะมีความถี่เป็น 3 เท่าของความถี่มูลฐาน ซึ่งกรณีนี้มีความถี่มูลฐานเป็น 10 กิโลเฮิร์ตซ์ ทำให้ได้สัญญาณฮาร์โมนิกที่ 3 ที่ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ฮาร์โมนิกดังกล่าวเกิดจากการจ่ายสัญญาณขาเข้าที่มี Positive Duty Cycle เป็น 50 % สามารถลดฮาร์โมนิกได้โดยการลด Positive Duty Cycle ลง หรือการเพิ่มค่า α ในสมการที่ 4.1 สัญญาณที่ได้จากการเพิ่มค่า α แสดงดังภาพประกอบที่ 4.9 แต่การเพิ่มค่า α จะทำให้แอมพลิจูดของสัญญาณขาออกของหม้อแปลงลดลงด้วย แอมพลิจูดของสัญญาณในแต่ละฮาร์โมนิกจะมีค่าไม่เท่ากัน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.1 [9]

$$V_n = \frac{4V_{dc}}{n\pi} \cos(n\alpha) \quad 4.1$$

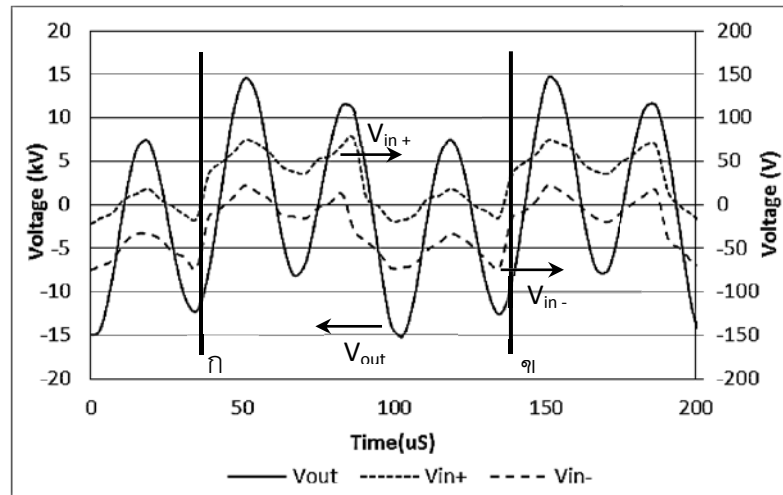
เมื่อ V_n คือ แรงดันไฟฟ้าของฮาร์โมนิกที่ n

n คือ เลขฮาร์โมนิก

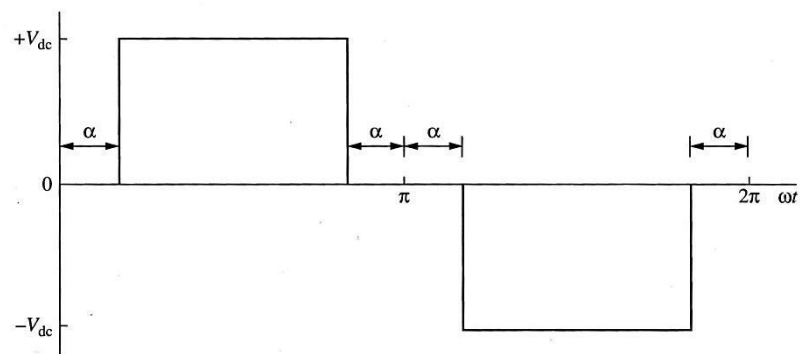
V_{dc} คือ แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

α คือ มุมระหว่างสัญญาณพัลส์ขาออก กับ มุม π ดังภาพประกอบที่ 4.9

จากสมการที่ 4.1 ส่งผลให้สัญญาณที่ได้จากหม้อแปลงแรงดันสูงมีแอมพลิจูด ที่ไม่เท่ากันเนื่องจากมีสัญญาณที่เกิดจากฮาร์โมนิกที่ 3 เกิดขึ้นด้วย ซึ่งสัญญาณดังกล่าวจะมีค่าแอมพลิจูด น้อยกว่าสัญญาณของความถี่มูลฐาน



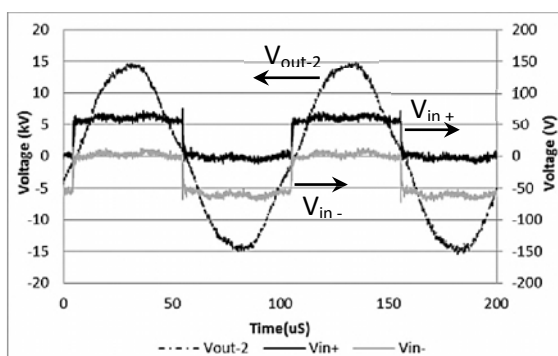
ภาพประกอบที่ 4.8 สัญญาณขาเข้า และขาออกของหม้อแปลงแบบหนึ่งตัว



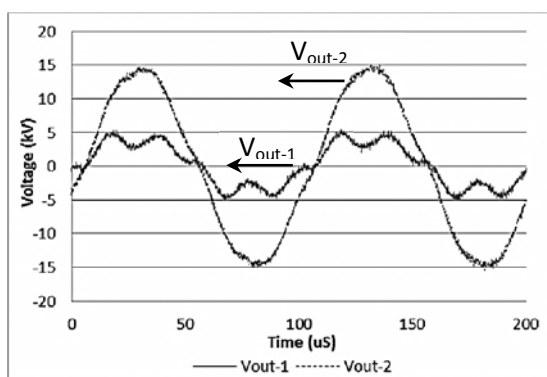
ภาพประกอบที่ 4.9 แสดงลักษณะของสัญญาณเมื่อค่า α ไม่เท่ากับ 0 [9]

4.1.3.2 สัญญาณที่ได้จากหม้อแปลงแรงดันสูงแบบชั้นบันได

การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงแบบชั้นบันได โดยการจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าของสัญญาณขาเข้า 60 โวลต์ และวัดสัญญาณขาออกจากหม้อแปลงแบบชั้นบันไดแบบ Open Load ได้แอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ และค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square , RMS) มีค่า 10 กิโลโวลต์ สัญญาณที่ได้แสดงดังภาพประกอบที่ 4.10 พิจารณาลักษณะของสัญญาณเมื่อจ่ายสัญญาณขาเข้า 1 ลูก จะได้สัญญาณขาออก 1 ลูก นั่นคือมีความถี่ตรงกัน สาเหตุที่ความถี่ของสัญญาณขาออกของหม้อแปลงแรงดันสูงแบบชั้นบันไดมีความถี่ตรงกับความถี่ขาเข้า เนื่องจากแอมพลิจูดของสัญญาณฮาร์โมนิกที่เกิดจากหม้อแปลงไฟฟ้าตัวแรกมีค่าน้อย และสัญญาณจากหม้อแปลงตัวแรกที่ออกจากขดลวดกระตุ้นเพื่อต่อเข้าสู่ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงตัวที่สองมีจำนวนรอบเท่ากับจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ นั่นคือแรงดันไฟฟ้าที่ได้มีค่าแอมพลิจูดที่ต่ำ เมื่อสัญญาณดังกล่าวผ่านเข้าสู่หม้อแปลงตัวที่สองสัญญาณฮาร์โมนิกที่ถูกส่งมาจะสูญเสียไปภายในหม้อแปลงตัวที่สอง



ภาพประกอบที่ 4.10 สัญญาณไฟฟ้าขาเข้า และขาออกของหม้อแปลงแบบชั้นบันได



ภาพประกอบที่ 4.11 สัญญาณไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงตัวที่ 1 (V_{out-1}) และหม้อแปลงตัวที่ 2 (V_{out-2}) เมื่อต่อหม้อแปลงแบบชั้นบันได

ภาพประกอบที่ 4.11 แสดงสัญญาณขาออกของหม้อแปลงตัวที่ 1 (V_{out-1}) เปรียบเทียบกับสัญญาณขาออกของหม้อแปลงตัวที่ 2 (V_{out-2}) ซึ่งแอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากหม้อแปลงตัวแรกมีค่าน้อยกว่าแอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากหม้อแปลงตัวที่สอง การทดสอบหม้อแปลงแบบขึ้นบันไดจะทดสอบแบบไม่ต่อโหลดและแบบต่อโหลด สำหรับการทดสอบแบบต่อโหลดจะใช้ตัวต้านทานขนาด 300 กิโลโอห์ม 200 วัตต์ เป็นโหลด และพิจารณาค่าแรงดัน RMS จากการทดสอบทั้ง 2 แบบ ข้อมูลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.2 นำข้อมูลมาคำนวณค่าต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.3 จากตารางที่ 4.3 พิจารณาสัดส่วนการขยายแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า (Ratio) เมื่อต่อแบบขึ้นบันได

ตารางที่ 4.2 ทดสอบหม้อแปลงแบบขึ้นบันไดแบบต่อโหลดและไม่ต่อโหลด

แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (V_{rms})		แรงดันไฟฟ้าขาออก			
		V_{out-1} (V_{rms})		V_{out-2} (V_{rms})	
ไม่ต่อโหลด	ต่อโหลด	ไม่ต่อโหลด	ต่อโหลด	ไม่ต่อโหลด	ต่อโหลด
40.72	31.11	2073.89	1267.28	6739.43	3480.52
60.00	46.67	3091.12	1855.07	10166.25	5250.59
80.89	59.15	4083.16	2303.33	13536.45	6557.16

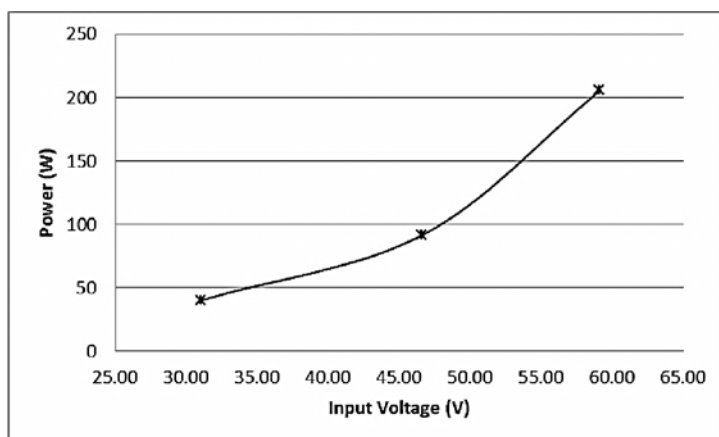
ตารางที่ 4.3 คำนวณคุณลักษณะของหม้อแปลงเมื่อทดสอบแบบต่อโหลดและไม่ต่อโหลด

แรงดันไฟฟ้า ขาเข้า (V_{rms}) (ไม่ต่อโหลด)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์) (ต่อโหลด)	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง (ไม่ต่อโหลด – ต่อโหลด)			สัดส่วนขยายแรงดัน			
					V_{out-1}		V_{out-2}	
		ขาเข้า	V_{out-1}	V_{out-2}	ไม่ต่อโหลด	ต่อโหลด	ไม่ต่อโหลด	ต่อโหลด
40.72	40.38	23.60	38.89	48.36	50.93	40.74	165.51	111.88
60.00	91.90	22.22	39.99	48.35	51.52	39.75	169.44	112.50
80.89	205.79	26.88	43.59	51.56	50.48	38.94	167.34	110.86
ค่าเฉลี่ย		24.23	40.82	49.42	50.98	39.81	167.43	111.75

พิจารณาสัดส่วนขยายแรงดัน ไฟฟ้า (Ratio) ซึ่งคำนวณได้จากสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าขาออกกับแรงดัน ไฟฟ้าขาเข้าโดยผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.3 กรณีการทดสอบแบบไม่ต่อโหลด จะมีสัดส่วนการขยายแรงดัน ไฟฟ้าของหม้อแปลงแบบขึ้นบันได 167 เท่า สัดส่วนการขยายแรงดัน ไฟฟ้าของหม้อแปลงตัวแรกคือ 51 เท่า และสัดส่วนการขยายแรงดัน ไฟฟ้าของหม้อแปลงตัวที่สองคือ $167-51=116$ เท่า สัดส่วนแรงดันที่สูงขึ้นของหม้อแปลงตัวที่ 2 มาจากระดับแรงดันของ

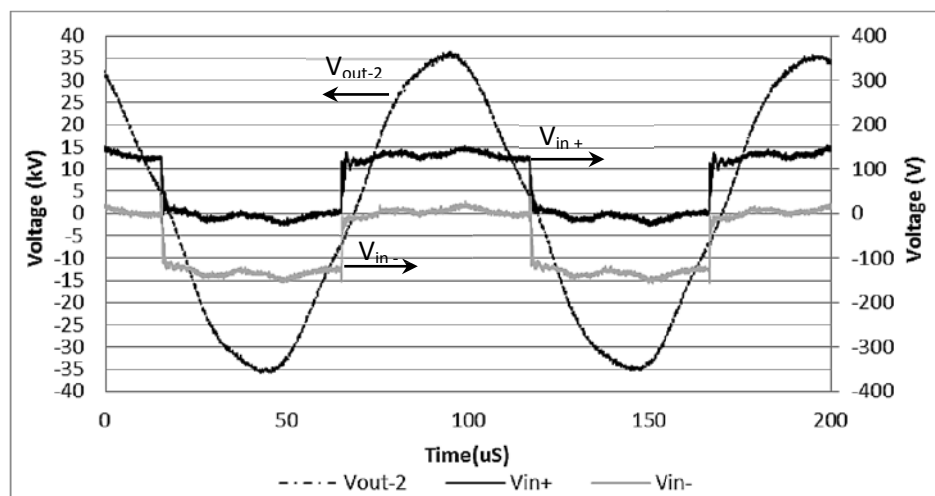
ขดลวดกระตุ้นจากหม้อแปลงตัวแรกที่จ่ายเข้าสู่ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงตัวที่ 2 มีค่าสูงกว่าแรงดันขาเข้าของหม้อแปลงตัวแรก ทำให้แรงดันขาเข้าของหม้อแปลงตัวที่ 2 สูงกว่าตัวแรก ซึ่งระดับแรงดันที่ใช้คำนวณสัดส่วนการขยายแรงดันจะใช้แรงดันขาเข้าของหม้อแปลงตัวแรกเป็นหลัก ทำให้สัดส่วนการขยายแรงดันของหม้อแปลงตัวที่ 2 สูงกว่าตัวแรก

กรณีของการทดสอบแบบต่อโหลดผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.3 โดยกำลังไฟฟ้าที่สามารถทดสอบได้คือ 206 วัตต์ ซึ่งคำนวณจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานคูณด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทาน เมื่อพิจารณาสัดส่วนการขยายแรงดันไฟฟ้าจะมีสัดส่วนการขยายแรงดันไฟฟ้าที่ 112 เท่า ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าสัดส่วนของหม้อแปลงที่ได้ออกแบบไว้ คือ 97 เท่า ผลที่ได้แตกต่างกันเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าขาเข้าของหม้อแปลงตัวที่สองมีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าของหม้อแปลงตัวที่หนึ่ง ทำให้สัดส่วนการขยายแรงดันไฟฟ้ามีค่ามากกว่าที่ออกแบบไว้ สัดส่วนการขยายแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงตัวแรกคือ 40 เท่า และสัดส่วนการขยายแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงตัวที่สองคือ $112-40=72$ เท่า



ภาพประกอบที่ 4.12 กำลังไฟฟ้าที่ได้จากหม้อแปลงขึ้นบันไดเมื่อทดสอบแบบต่อโหลด

พิจารณากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบต่อโหลด โดยใช้โหลดเป็นตัวต้านทานไฟฟ้าขนาด 300 กิโลโอห์ม แสดงดังภาพประกอบที่ 4.12 กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ทดสอบได้คือ 206 วัตต์ ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า RMS 6,557 โวลต์ เนื่องจากตัวต้านทานที่ใช้ในการทดสอบมีกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 200 วัตต์ทำให้ไม่สามารถทดสอบที่ระดับแรงดันไฟฟ้าสูงกว่านี้ได้



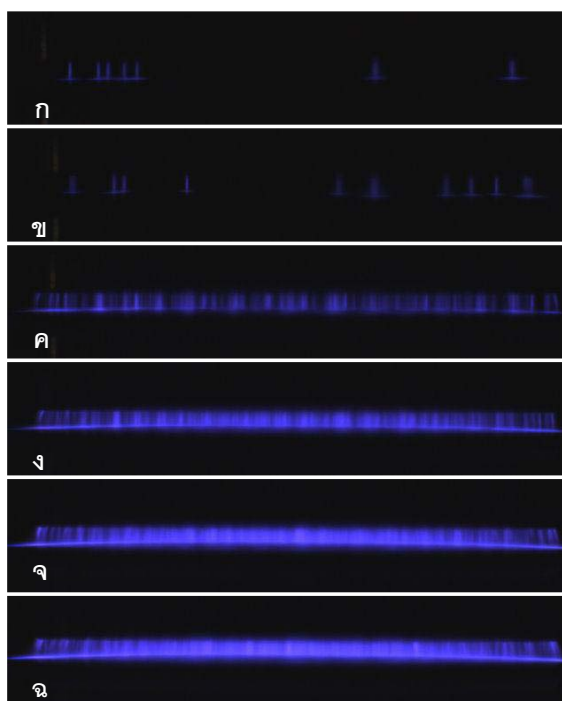
ภาพประกอบที่ 4.13 แรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบจັນบันได

ภาพประกอบที่ 4.13 แสดงแรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบจันบันไดเมื่อทดสอบแบบไม่ต่อโหลดโดยจ่ายสัญญาณขาเข้า 135 กิโลโวลต์ (RMS) ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ มีค่า Duty Cycle 50 % ได้สัญญาณขาออก 24.7 กิโลโวลต์ (RMS) และมีค่าแอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 35 กิโลโวลต์

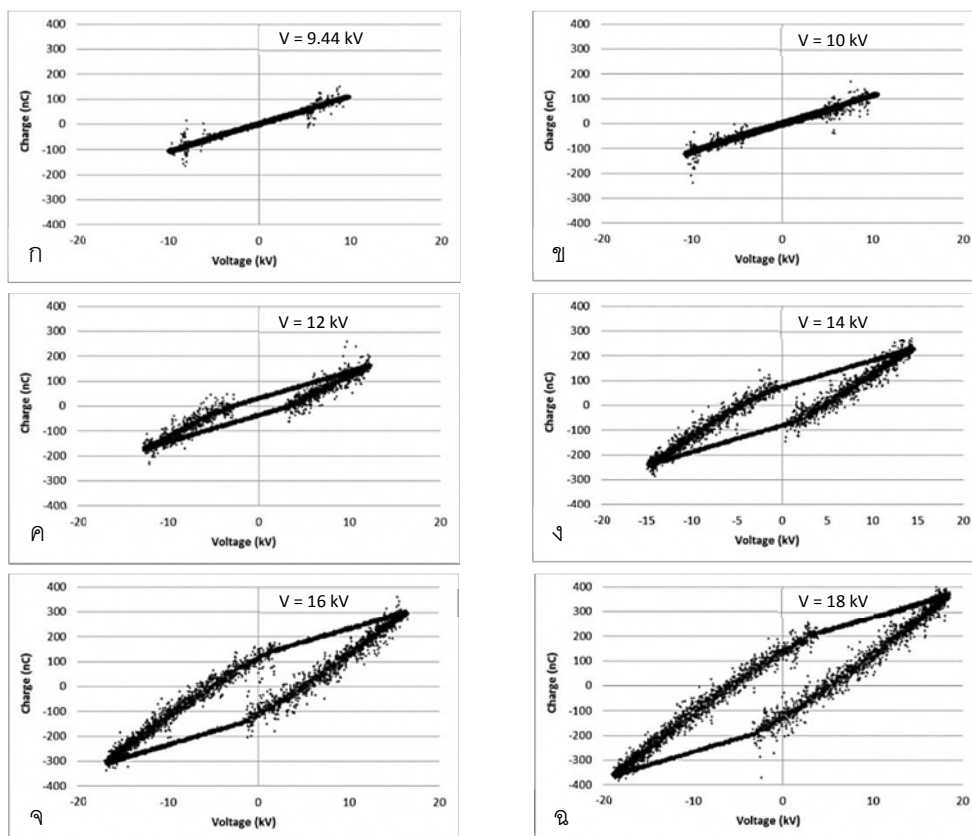
4.2 การศึกษาคุณสมบัติของพลาสมา

4.2.1 ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของพลาสมาเมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า

การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของพลาสมา โดยการวัดแรงดันไฟฟ้า กระแส ดิสชาร์จ และประจุไฟฟ้า โดยเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างพลาสมา โดยเริ่มจากแรงดันไฟฟ้าที่สามารถเกิดพลาสมาได้คือ 9.44 กิโลโวลต์ แต่พลาสมาที่เกิดขึ้นนั้นไม่ได้เกิดทั่วทั้งขั้วไฟฟ้าแต่เกิดบางส่วนเท่านั้น แสดงดังภาพประกอบที่ 4.14(ก) เนื่องจากที่แรงดันไฟฟ้า 9.44 กิโลโวลต์ กำลังไฟฟ้าที่จ่ายไม่เพียงพอต่อการเกิดพลาสมาทั่วทั้งขั้วไฟฟ้า แต่เมื่อเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า พลาสมาที่เกิดขึ้นจะมีความสม่ำเสมอเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.14 (ข) ถึง 4.14(ฉ) เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจาก 10, 12, 14, 16 และ 18 กิโลโวลต์ ตามลำดับ การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าส่งผลให้พื้นที่ภายในของแผนภาพลิสซาจัวส์มีค่ามากขึ้นดังภาพประกอบที่ 4.15 นั่นคือกำลังของพลาสมามากขึ้น กำลังของพลาสมาแสดงดังตารางที่ 4.4 กำลังของพลาสมาต่ำสุดคือ 0.36 วัตต์ ที่แรงดันไฟฟ้า 9.44 กิโลโวลต์ และสูงสุดคือ 57.16 วัตต์ ที่แรงดันไฟฟ้า 18 กิโลโวลต์ และเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของกำลังของพลาสมาเมื่อเทียบกับกำลังของพลาสมาสูงสุดที่ 57 วัตต์ (% of maximum power) แสดงดังตารางที่ 4.4



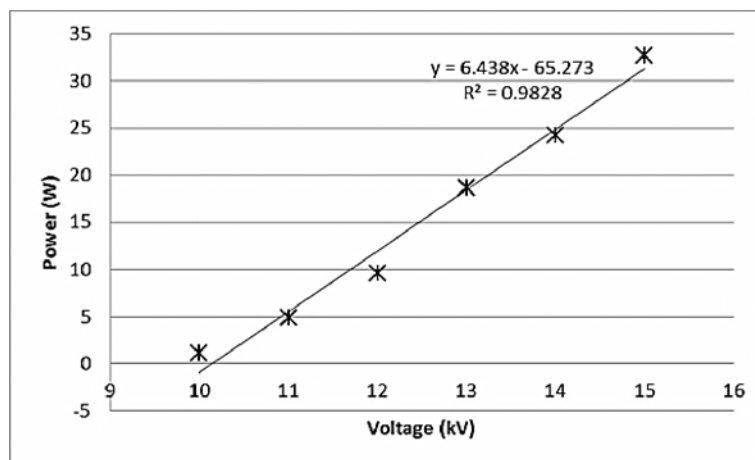
ภาพประกอบที่ 4.14 ภาพถ่ายจากกล้องซีซีดีของพลาสมาเมื่อเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้าจาก 9.44 10 12 14 16 และ 18 กิโลโวลต์ ซึ่งแสดงในภาพ ก ถึง ฉ ตามลำดับ



ภาพประกอบที่ 4.15 แผนภาพลิสสาจั่วส์ของการเกิดดิสชาร์จ เมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า ตั้งแต่ 9.44 10 12 14 16 และ 18 กิโลโวลต์ ซึ่งแสดงในภาพ ก ถึง ฉ ตามลำดับ

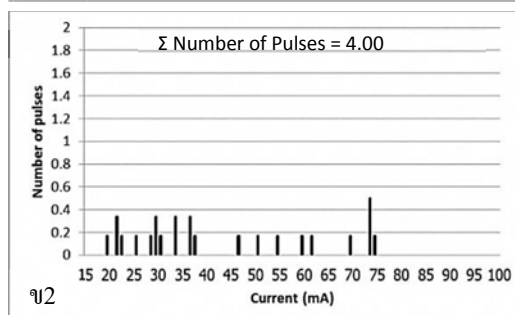
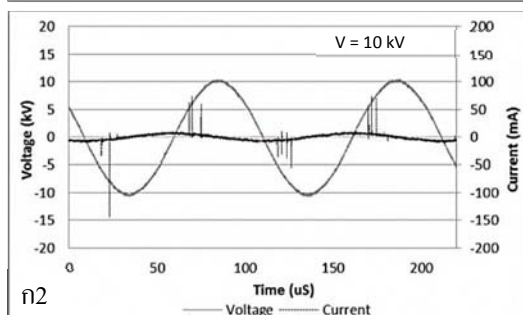
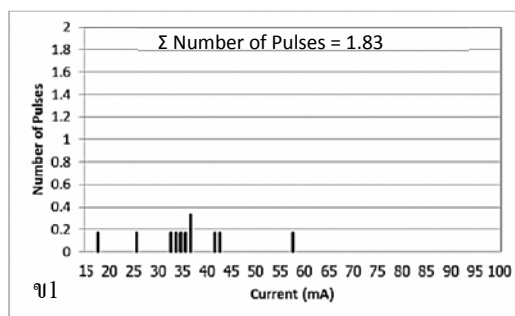
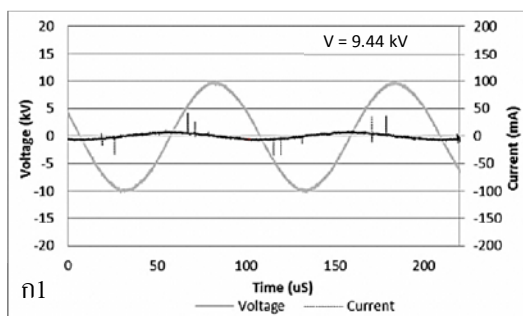
ตารางที่ 4.4 กำลังของพลาสมาเมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า

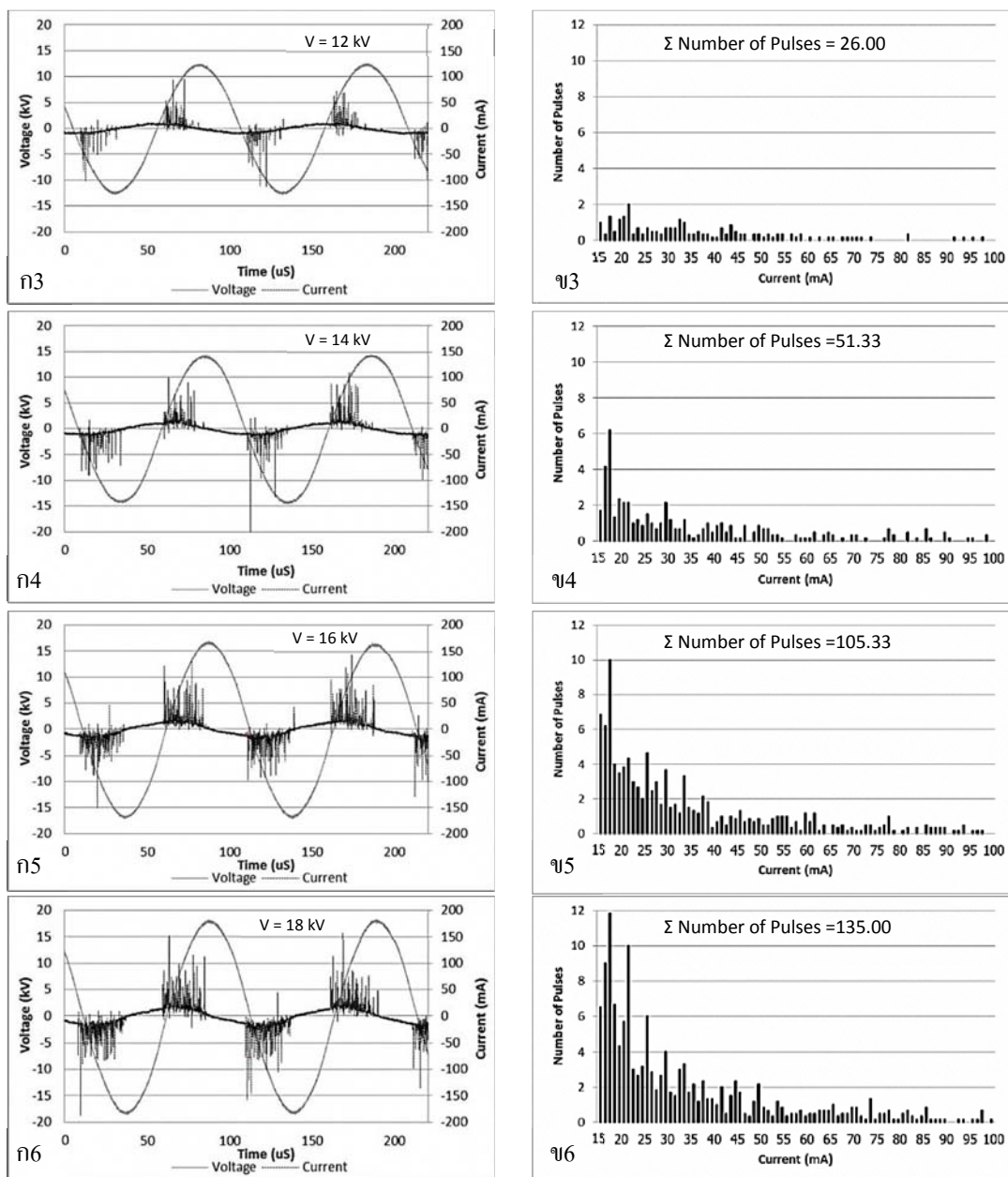
แรงดันไฟฟ้า (กิโลโวลต์)	กำลังของพลาสมา (วัตต์)	เปอร์เซ็นต์กำลังของ พลาสมา
9.44	0.36	0.63
10.00	1.10	1.92
11.00	4.90	8.57
12.00	9.56	16.72
13.00	18.66	32.65
14.00	24.26	42.44
15.00	32.73	57.26
16.00	42.77	74.83
17.00	50.64	88.59
18.00	57.16	100.00



ภาพประกอบที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของพลาสมาและแรงดันไฟฟ้า

พิจารณาความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของพลาสมาและแรงดันไฟฟ้าในภาพประกอบที่ 4.16 ในช่วงที่แรงดันไฟฟ้าต่ำ ความชันของกราฟมีค่าน้อย และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นจนถึง 12 กิโลโวลต์ เนื่องจากที่แรงดันไฟฟ้า 12 กิโลโวลต์ดังกล่าว พลาสมาเกิดทั่วทั้งขั้วไฟฟ้าแล้ว และเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นความชันของกราฟก็จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง





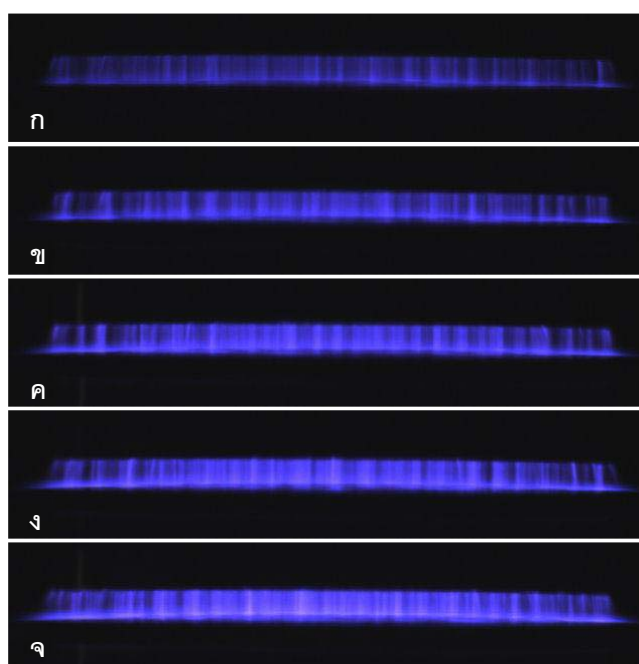
ภาพประกอบที่ 4.17 ภาพ ก1 ถึง ก6 แสดงกระแสดีสชาร์จเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายแก่ขั้วไฟฟ้า และภาพ ข1 ถึง ข6 แสดงจำนวนยอดกระแสต่อครั้งคลื่นแรงดันไฟฟ้า เมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า 9.44 10 12 14 16 และ 18 กิโลโวลต์ ตามลำดับ

ภาพประกอบที่ 4.17 (ก1 – ก6) แสดงกระแสดีสชาร์จเทียบกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายแก่ขั้วไฟฟ้า ซึ่งลักษณะของกระแสดีสชาร์จที่ได้แสดงถึงการเกิดพลาสมาแบบเส้น (Filamentary Discharge) และจำนวนกระแสดีสชาร์จแสดงถึงจำนวนครั้งของการดีสชาร์จที่เกิดขึ้น โดยภาพประกอบที่ 4.17 (ก1) จำนวนพัลส์ของกระแสต่อครั้งความยาวคลื่น (Number of Pulses) มีค่า

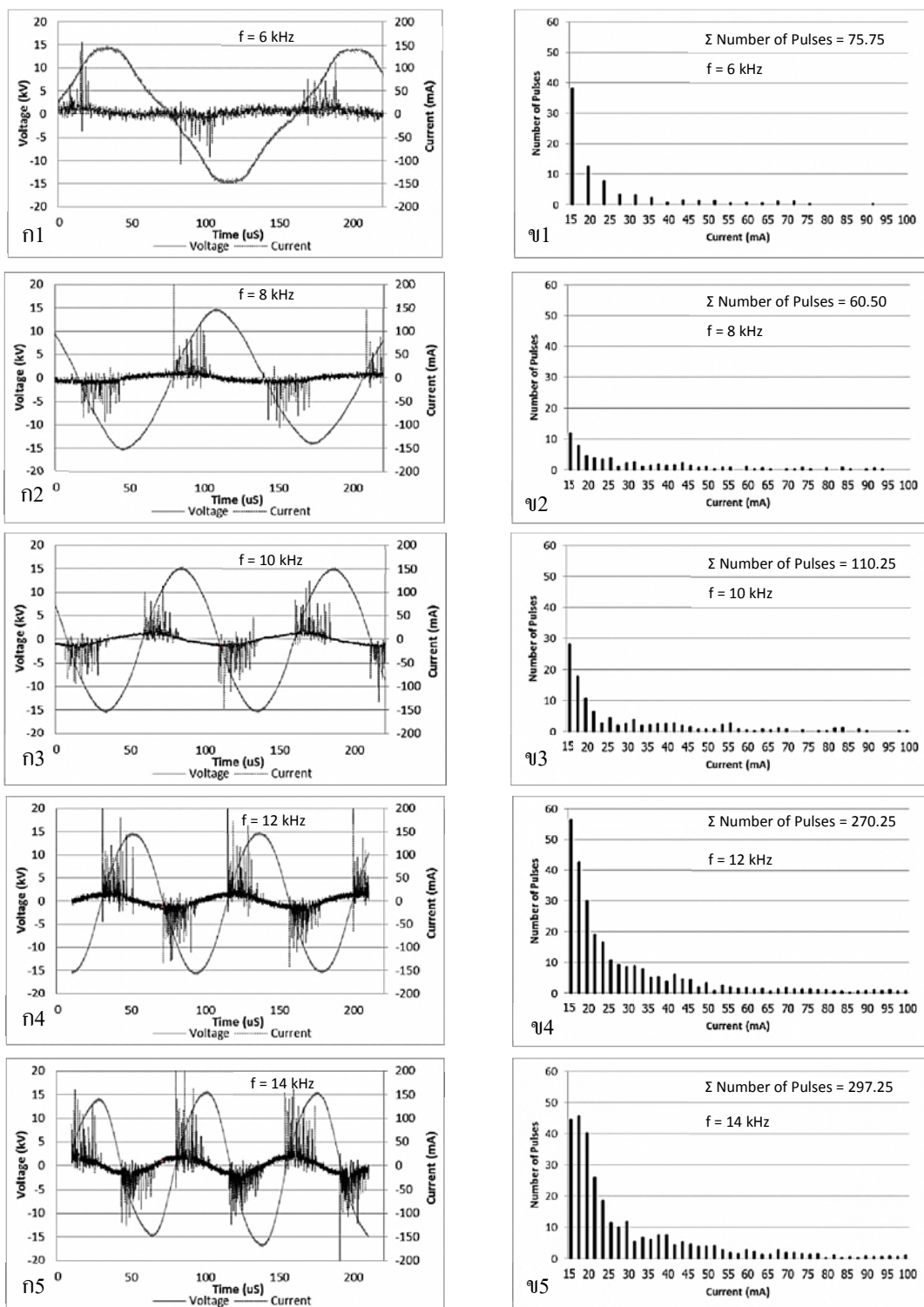
น้อย และมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น ซึ่งแสดงดังภาพที่ ก2 ถึง ก6 แต่เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นจำนวนพัลส์ของกระแสมีค่ามากจนไม่สามารถมองเห็นความแตกต่าง จึงใช้วิธีการเขียนโปรแกรมเพื่อนับจำนวนพัลส์ของกระแสในแต่ละแอมพลิฟายเออร์ของกระแสดิซาร์จ (โปรแกรมอยู่ในภาคผนวก ข) และนำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟระหว่างจำนวนพัลส์ของกระแสที่นับได้ (Number of Pulses) และแอมพลิฟายเออร์ของพัลส์ของกระแส (Current) ซึ่งแสดงในภาพประกอบที่ 4.17 (ข1 – ข6) เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายแก่ขั้วไฟฟ้า ทำให้ได้จำนวนพัลส์กระแสดิซาร์จเพิ่มขึ้นสังเกตได้จากจำนวนพัลส์ของกระแสดิซาร์จรวม (Σ Number of Pulses) ซึ่งเป็นจำนวนพัลส์ของกระแสดิซาร์จที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้งคลื่นแรงดันไฟฟ้า ภาพประกอบที่ 4.17 (ข1) จำนวนพัลส์ของกระแสดิซาร์จรวมมีค่า 1.83 นั่นคือมีจำนวนพัลส์ของกระแสดิซาร์จ 1.83 ในครั้งคลื่นแรงดันไฟฟ้า โดยตัวเลขดังกล่าวเฉลี่ยจากการเก็บข้อมูลของกระแสดิซาร์จในช่วง 3 ความยาวคลื่นของแรงดันไฟฟ้า หรือ 6 ครั้งคลื่นของแรงดันไฟฟ้า จำนวนพัลส์ของกระแสดิซาร์จรวมจะมีค่าเพิ่มขึ้นแสดงในภาพประกอบที่ 4.17 (ข2 – ข6) โดยจำนวนพัลส์ของกระแสดิซาร์จรวมที่เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับกำลังของพลาสมาที่เพิ่มขึ้นด้วยซึ่งได้แสดงไปแล้วในภาพประกอบที่ 4.16

4.2.2 ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของพลาสมาเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ของแหล่งจ่าย

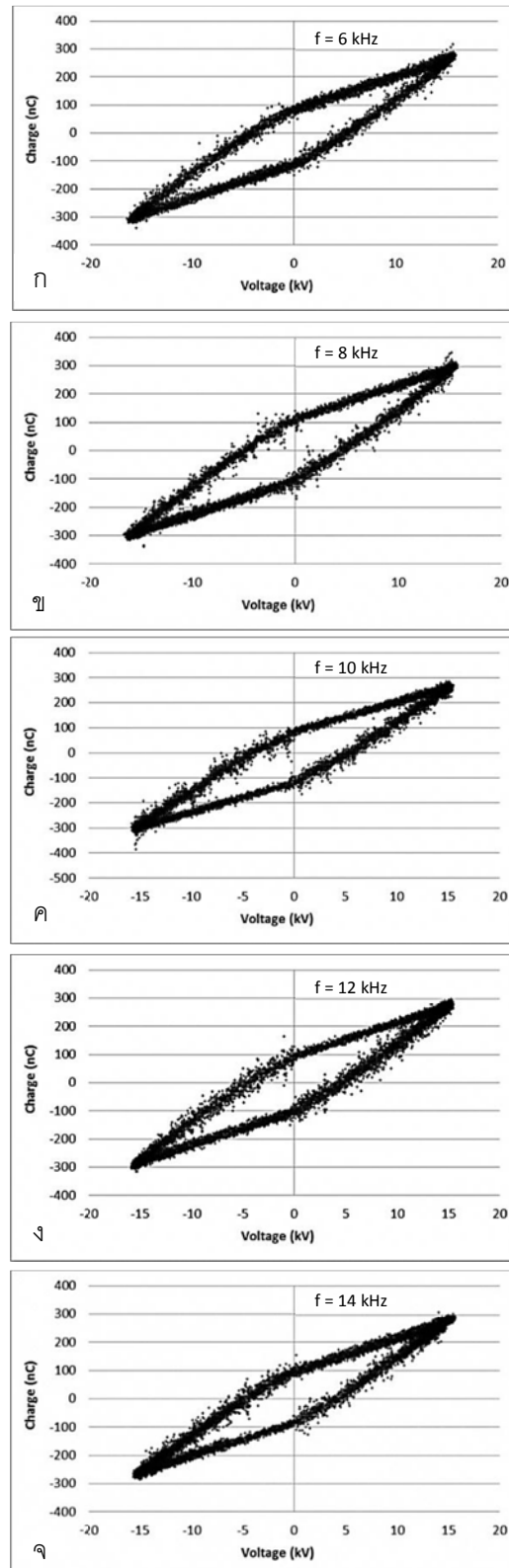
การศึกษาคูสมบัติของพลาสมาโดยการวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสดิซชาร์จ์ และ ประจุไฟฟ้า โดยการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายแก่ขั้วไฟฟ้าแคโทดของ แรงดันไฟฟ้ามีค่าคงที่ การทดลองจะเปลี่ยนแปลงความถี่จาก 6, 8, 10, 12 และ 14 กิโลเฮิร์ตซ์ โดย ลักษณะของพลาสมาที่เกิดขึ้นแสดงดังภาพประกอบที่ 4.18 (ก – จ) เมื่อพิจารณาแต่ละภาพพบว่า ที่ ความถี่น้อยความเข้มของพลาสมามีค่าน้อย และเมื่อเพิ่มความถี่ พลาสมาที่เกิดขึ้นจะมีความเข้ม มากขึ้น



ภาพประกอบที่ 4.18 ภาพถ่ายจากกล้องซีซีดีของพลาสมาเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ตั้งแต่ 6 8 10 12 และ 14 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งแสดงดังภาพ ก ถึง จ ตามลำดับ



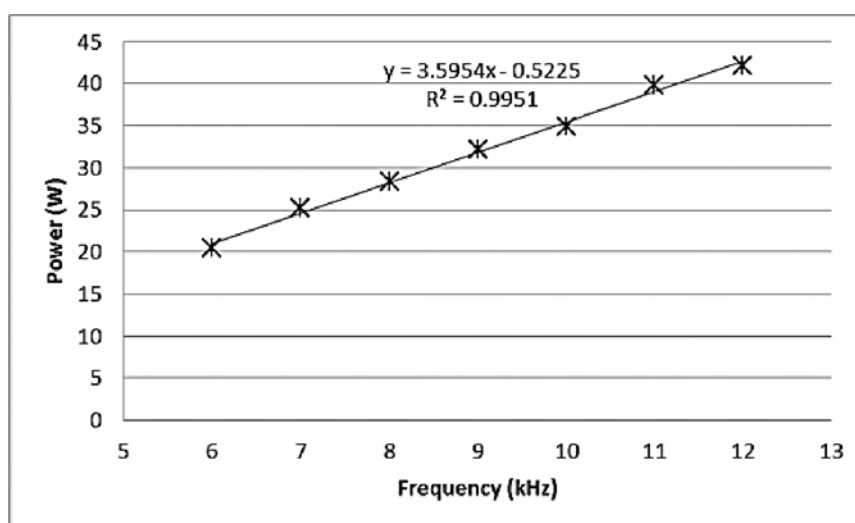
ภาพประกอบที่ 4.19 ภาพ ก1 ถึง ก5 แสดงกระแสที่ซาร์จเทียบกับแรงดันไฟฟ้า และ ข1 ถึง ข5 แสดงจำนวนกระแสที่นับในแต่ละช่วงกระแส เมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ตั้งแต่ 6 8 10 12 และ 14 กิโลเฮิร์ตซ์ ตามลำดับ



ภาพประกอบที่ 4.20 แผนภาพลิซซาจิวส์ของการเกิดดิสชาร์จ เมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ตั้งแต่ 6 8 10 12 และ 14 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งแสดงดังภาพ ก ถึง จ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 กำลังของพลาสมาเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่

ความถี่ (กิโลเฮิรตซ์)	กำลังของพลาสมา (วัตต์)	เปอร์เซ็นต์กำลังของ ของพลาสมา
6	20.44	48.53
7	25.16	59.73
8	28.40	67.43
9	32.11	76.23
10	34.89	82.83
11	39.73	94.32
12	42.12	100.00
13	41.73	99.07
14	41.44	98.38



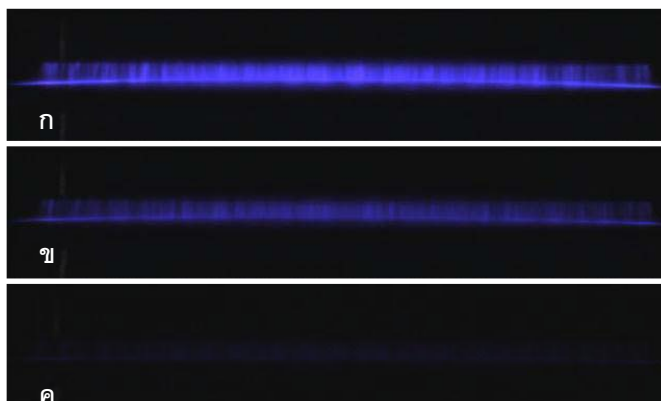
ภาพประกอบที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของพลาสมาและความถี่

แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายแก่ขั้วไฟฟ้าเทียบกับกระแสไอออไนซ์ที่เวลาต่างๆ แสดงดังภาพประกอบที่ 4.19 (ก1 – ก5) ลักษณะของกระแสไอออไนซ์ที่ได้แสดงถึงการเกิดไอออไนซ์แบบเส้น (Filamentary Discharge) เมื่อพิจารณาภาพประกอบที่ 4.19 (ข1 – ข5) การเพิ่มความถี่ของแรงดันไฟฟ้าส่งผลให้จำนวนพัลส์ของกระแสไอออไนซ์รวม (Σ Number of Pulses) เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับกำลังของพลาสมาที่เพิ่มขึ้นด้วย

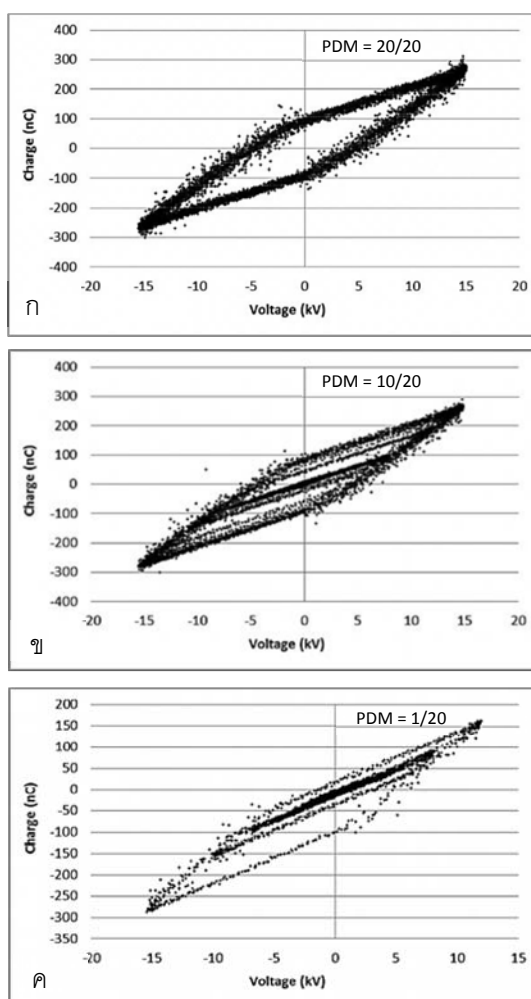
พิจารณากำลังของพลาสมาที่คำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟของแผนภาพลิสซาจวส์ ในภาพประกอบที่ 4.20 (ก - จ) แสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าเมื่อความถี่สูงขึ้นกำลังของพลาสมาที่สูงขึ้นด้วย เพราะเมื่อเพิ่มความถี่ แรงดันไฟฟ้าแตกตัวของก๊าซจะลดลงส่งผลให้ก๊าซสามารถแตกตัวได้มากขึ้น โดยกำลังของพลาสมาจะเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดคือ 42.12 วัตต์ ที่ความถี่ 12 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งค่าดังกล่าวถือเป็นกำลังของพลาสมามากที่สุดที่ 100 % และเมื่อเพิ่มความถี่สูงขึ้น กำลังของพลาสมามีแนวโน้มคงที่ แสดงดังภาพประกอบที่ 4.21 ซึ่งเกิดจากลักษณะของสัญญาณไฟฟ้าที่จ่ายแก่ขั้วไฟฟ้า มีความผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณไซน์ ทำให้กำลังของพลาสมาลดลงเพราะพลาสมาไม่ได้เกิดตลอดช่วงของแรงดันไฟฟ้า แต่จะเกิดเฉพาะ บริเวณที่แรงดันไฟฟ้ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าแตกตัว การที่แรงดันไฟฟ้าผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณรูปไซน์ในลักษณะที่ยอดของแรงดันไฟฟ้าแฉกบลง ทำให้ช่วงเวลาที่มีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าแตกตัวมีน้อยลง ส่งผลให้ช่วงเวลาที่เกิดพลาสมาลดน้อยลงด้วย นั่นคือกำลังของพลาสมาก็จะลดน้อยลงด้วยเช่นกัน

4.2.3 ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของพลาสมาเมื่อใช้การควบคุมกำลังโดยการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพัลส์

การศึกษาคูณสมบัติทางไฟฟ้าของพลาสมาโดยการวัดแรงดันไฟฟ้า กระแส ดิสชาร์จ และประจุไฟฟ้า โดยใช้เทคนิคการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพัลส์เพื่อควบคุมกำลังของพลาสมา ภาพประกอบที่ 4.22 (ก - ค) แสดงภาพพลาสมาที่เกิดจากการใช้ความหนาแน่นของพัลส์ 20/20, 10/20 และ 1/20 ความหนาแน่นของพัลส์ 20/20 คือมีแรงดันไฟฟ้าจ่าย 20 ช่วงจากช่วงเวลาทั้งหมด 20 ช่วง ความหนาแน่นของพัลส์ 10/20 คือมีแรงดันไฟฟ้าจ่าย 10 ช่วงจากช่วงเวลาทั้งหมด 20 ช่วง และ ความหนาแน่นของพัลส์ 1/20 คือมีแรงดันไฟฟ้าจ่าย 1 ช่วงจากช่วงเวลาทั้งหมด 20 ช่วง การเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของพัลส์ทำให้พลาสมาที่เกิดขึ้นมีความเข้มต่างๆ กัน และเกิดสม่าเสมอทั่วทั้งขั้วไฟฟ้า โดยภาพประกอบที่ 4.22 (ก) แสดงภาพพลาสมาเมื่อความหนาแน่นของพัลส์ 20/20 ซึ่งถือเป็นกำลังของพลาสมามากที่สุดคือ 32.68 วัตต์ และภาพประกอบที่ 4.22 (ข) เมื่อ ความหนาแน่นของพัลส์ 10/20 มีกำลัง 11.05 วัตต์ ซึ่งคิดเป็น 33.81 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับกำลังของพลาสมามากที่สุด และภาพประกอบที่ 4.22 (ค) ความหนาแน่นของพัลส์ 1/20 มีกำลังน้อยที่สุดคือ 1.23 วัตต์ ซึ่งคิดเป็น 3.76 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับกำลังของพลาสมามากที่สุด กำลังของพลาสมาที่ได้คำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟของแผนภาพลิสซาจัวส์ซึ่งแสดงดังภาพประกอบที่ 4.23 นั่นคือกรณีที่กำลังของพลาสมามากสุด (ความหนาแน่นของพัลส์ 20/20) แผนภาพลิสซาจัวส์จะมีขนาดเท่ากันดังภาพประกอบที่ 4.23 (ก) เนื่องจากประจุที่ถูกสะสมในตัวเก็บประจุในแต่ละลูกคลื่นมีค่าเท่ากันเพราะแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายมีความสม่ำเสมอดังภาพประกอบที่ 4.24 (ก) โดยที่หนึ่งความยาวคลื่นจะได้แผนภาพลิสซาจัวส์ 1 วง แต่กรณีที่กำลังของพลาสมาน้อยลงแผนภาพลิสซาจัวส์จะประกอบด้วยภาพขนาดเล็กลงดังภาพประกอบที่ 4.23 (ข, ค) เนื่องจากประจุที่สะสมในตัวเก็บประจุในแต่ละลูกคลื่นมีค่าไม่เท่ากัน เพราะแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายไม่มีความสม่ำเสมอ ดังภาพประกอบที่ 4.24 (ข, ค)



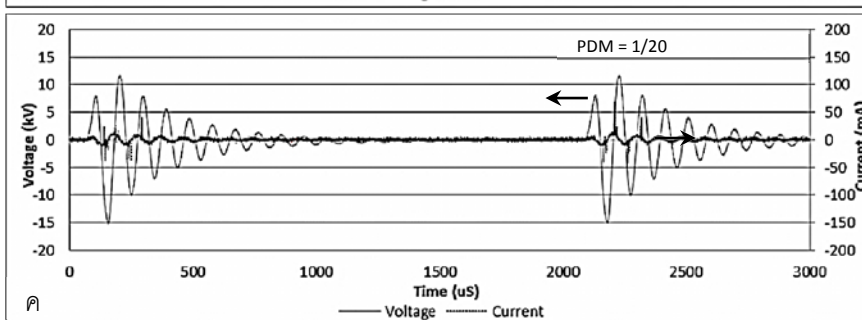
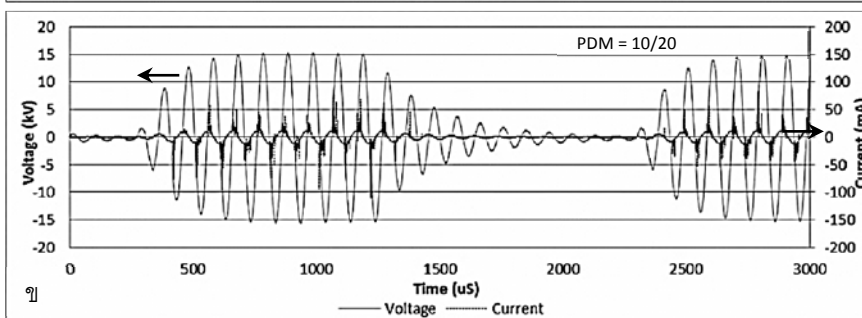
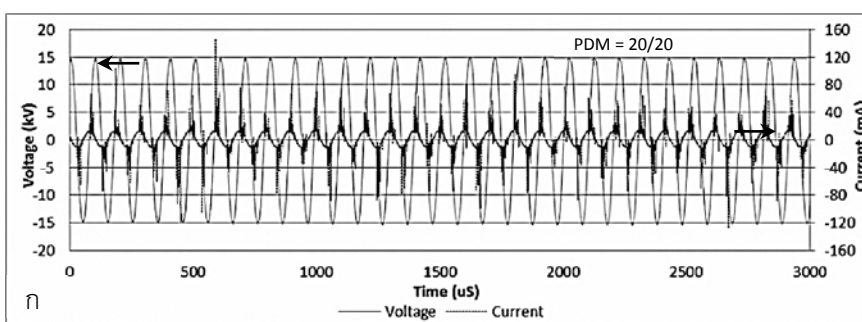
ภาพประกอบที่ 4.22 ภาพจากกล้องซีซีดีของพลาสมาที่ใช้การควบคุมกำลังโดยการเปลี่ยนความหนาแน่นของพัลส์ เมื่อ ก ข และ ค มีความหนาแน่นของพัลส์ 20/20 10/20 และ 1/20 ตามลำดับ



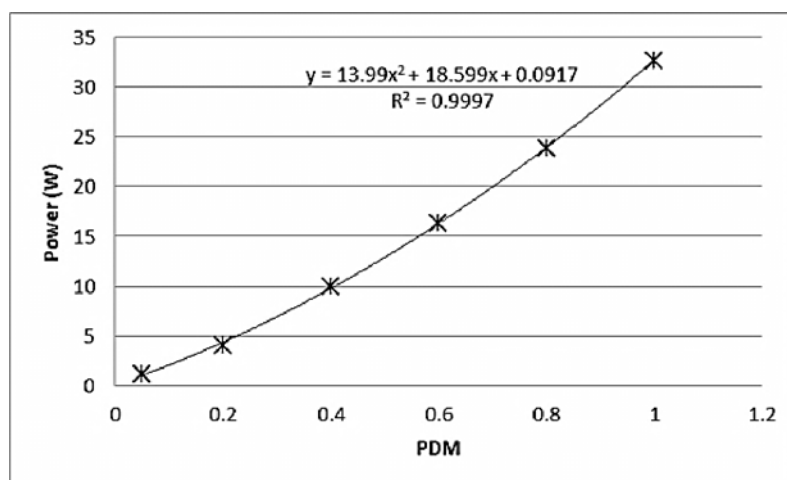
ภาพประกอบที่ 4.23 แผนภาพลิสซาจัวส์ที่ใช้การควบคุมกำลังของพลาสมาโดยการเปลี่ยนความหนาแน่นของพัลส์ เมื่อ ก ข และ ค มีความหนาแน่นของพัลส์ 20/20 10/20 และ 1/20 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 กำลังของพลาสมาเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพัลส์

ความหนาแน่น ของพัลส์	กำลังของพลาสมา (วัตต์)	เปอร์เซ็นต์กำลังของ พลาสมา
20/20	32.68	100.00
16/20	23.87	73.04
12/20	16.34	50.00
10/20	11.05	33.81
8/20	9.96	30.48
4/20	4.01	12.27
1/20	1.23	3.76



ภาพประกอบที่ 4.24 แรงดันไฟฟ้าและกระแสดีสชาร์จของพลาสมาที่ควบคุมกำลังโดยการเปลี่ยนความหนาแน่นของพัลส์ ก ข และ ค มีความหนาแน่นของพัลส์ 20/20 10/20 และ 1/20 ตามลำดับ



ภาพประกอบที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของพลาสมาและความหนาแน่นของพัลส์

ภาพประกอบที่ 4.25 แสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังของพลาสมาเทียบกับการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพัลส์ เมื่อเพิ่มความหนาแน่นของพัลส์ส่งผลให้กำลังของพลาสมาเพิ่มขึ้นด้วย สัญญาณไฟฟ้าที่จ่ายแก่ขั้วไฟฟ้าแสดงดังภาพประกอบที่ 4.24 (ก - ค) ซึ่งกรณีที่ ความหนาแน่นของพัลส์ 20/20 จะมีสัญญาณต่อเนื่องตลอดเวลา แต่เมื่อลดความหนาแน่นของพัลส์จะมีการหยุดจ่ายสัญญาณเป็นช่วงๆ ตามค่าความหนาแน่นของพัลส์ที่กำหนด ขณะที่ไม่มีสัญญาณไฟฟ้า จะไม่มีพลาสมาเกิดขึ้น ซึ่งสังเกตได้จาก ไม่มีกระแสดิซชาร์จเกิดขึ้นบริเวณดังกล่าว พิจารณา ลักษณะของกระแสดิซชาร์จที่มีความไม่ต่อเนื่อง และมีลักษณะเป็นพัลส์ในช่วงเวลาสั้นๆ ซึ่งมีความ สอดคล้องกับการดิซชาร์จแบบเส้น (Filamentary Discharge)

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลการทดลอง

- 5.1.1 จากการทดสอบวงจรขับ Power MOSFET พบว่าการใช้วงจรถับด้วยไอซีสามารถสร้างสัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีความถูกต้องของค่า Positive Duty Cycle และมีการเปลี่ยนระดับของแรงดันไฟฟ้าที่เร็วกว่าวงจรถับด้วย MOSFET
- 5.1.2 จากการทดสอบกำลังไฟฟ้าของวงจรถับอินเวอร์เตอร์ โดยไม่ต่อหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง สามารถวัดกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดคือ 1,512 วัตต์ ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 275 โวลต์ โดยทดสอบแบบต่อโหลดกับตัวต้านทาน 50 โอห์ม
- 5.1.3 จากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง โดยเปรียบเทียบการใช้หม้อแปลงตัวเดียวกับการต่อหม้อแปลงแบบขั้นบันไดพบว่า การต่อหม้อแปลงแบบขั้นบันไดสามารถสร้างสัญญาณที่มีความถูกต้องของความถี่ดีกว่าหม้อแปลงตัวเดียวและมีสัดส่วนการขยายแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 112 เท่าของแรงดันไฟฟ้าขาเข้าของหม้อแปลงตัวแรก
- 5.1.4 จากการทดสอบวัดแอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากหม้อแปลงแบบขั้นบันไดที่ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์พบว่า สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้ 35 กิโลโวลต์ และมีค่า RSM คือ 24.7 กิโลโวลต์
- 5.1.5 จากการทดสอบวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของพลาสมาโดยเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายกับขั้วไฟฟ้า พบว่าสามารถเปลี่ยนแปลงกำลังของพลาสมาได้ในช่วงกว้างตั้งแต่ 0.36 – 57.16 วัตต์ (9.44 – 18 กิโลโวลต์) แต่ในช่วงกำลังไฟฟ้าน้อยๆ การเกิดพลาสมาจะไม่มีควมสม่ำเสมอตลอดขั้วไฟฟ้า
- 5.1.6 จากการทดสอบวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของพลาสมาเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วไฟฟ้าพบว่า กำลังของพลาสมาสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตั้งแต่ 20.44 – 41.44 วัตต์ (6 - 14 กิโลเฮิร์ตซ์) ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์

- 5.1.7 จากการทดสอบวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของพลาสติกเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของฟิล์มพบว่า สามารถเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของพลาสติกได้ในช่วง 1.23 – 32.68 วัตต์ ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ที่ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งพลาสติกที่ได้มีความสม่ำเสมอตลอดช่วงการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของฟิล์ม
- 5.1.8 จากการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของพลาสติกโดยเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงความถี่ของแรงดันไฟฟ้า และการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของฟิล์มพบว่า การควบคุมกำลังโดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าสามารถนำไปใช้ควบคุมกำลังของพลาสติกได้กรณีที่ไม่ต้องการใช้พลาสติกที่มีกำลังต่ำ นั่นคือใช้ได้ดีที่กำลังของพลาสติกมีค่าสูง การควบคุมกำลังโดยการเปลี่ยนแปลงความถี่สามารถควบคุมกำลังของพลาสติกได้ในช่วงแคบๆ สาเหตุหนึ่งมาจากแหล่งจ่ายไม่สามารถเปลี่ยนแปลงความถี่ได้ในช่วงที่กว้าง การควบคุมกำลังโดยใช้การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของฟิล์ม สามารถนำไปใช้ในการควบคุมกำลังของพลาสติกในช่วงกว้างและให้พลาสติกที่เกิดสม่ำเสมอทั่วทั้งขั้วไฟฟ้า

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ลดช่วงเวลาการนำกระแสของ Power MOSFET ด้านแรงดันไฟฟ้าสูง(Positive Duty Cycle) ของสัญญาณที่ได้จากวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยใช้ค่า $\alpha = 30$ องศา เพื่อลดการเกิดฮาร์โมนิกที่ 3 ของสัญญาณที่ออกจากหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง กรณีที่ใช้หม้อแปลงตัวเดียว
- 5.2.2 เพิ่มขีดความสามารถของเครื่องจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงให้ทำงานที่ความถี่สูงขึ้นได้ โดยการออกแบบให้หม้อแปลงไฟฟ้าสามารถทำงานที่ความถี่สูงขึ้นได้ นั่นคือการลดจำนวนรอบของลวดลวดปฐมภูมิ ให้สอดคล้องกับความถี่ที่ต้องการใช้งาน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4 ในบทที่ 2
- 5.2.3 ทดสอบคุณสมบัติของพลาสมาโดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค OES เพื่อศึกษาความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (Electron density) และอุณหภูมิของอิเล็กตรอน (Electron temperature) ของพลาสมาที่เกิดขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] I. S. Choi, S. W. Hwang, and J. C. Park, Application of medium frequency atmospheric plasma on continuous aluminum wire cleaning for magnet wire manufacturing, *Surface and Coatings Technology* 142-144 (2001) 300.
- [2] F. Massines, A. Rabehi, P. Decomps, R. B. Gadri, P. Segur, and C. Mayoux, Experimental and theoretical study of a glow discharge at atmospheric pressure controlled by dielectric barrier, *Journal of Applied Physics* 83 (1998) 2950.
- [3] S. Wanho, C. Jaeho, and K. Taewoong, *Power Electronics Specialists Conference (PESC '06)*, 2006, p. 1.
- [4] H. Fujita and H. Akagi, Control and performance of a pulse-density-modulated series-resonant inverter for corona discharge processes, *Industry Applications, IEEE Transactions on* 35 (1999) 621.
- [5] S. Sugimoto, M. Kiuchi, S. Takechi, K. Tanaka, and S. Goto, Inverter plasma discharge system, *Surface and Coatings Technology* 136 (2001) 65.
- [6] U N Pal, M Kumar, MS Tyagi, BL Meena, H Khatun, and A K Sharma, Discharge analysis and electrical modeling for the development of efficient dielectric barrier discharge, *Journal of Physics: Conference Series* 208 (2010)
- [7] WU Jun, ZENG Fengcai, and CHEN Bingqiang, The Solubility of Natural Cellulose After DBD Plasma Treatment, *Plasma Science and Technology* 10 (2008) 743.
- [8] N. Jidenko and et al., Temperature profiles in filamentary dielectric barrier discharges at atmospheric pressure, *Journal of Physics D: Applied Physics* 43 (2010) 295203.
- [9] D. W. Hart, *Power Electronics*, McGraw-Hill, Singapore, 2011.
- [10] C. W. T. McLyman, *Transformer and Inductor Design Handbook*, California, U.S.A.

- [11] Mean Free Path. [2010 30/05/10], Available from: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/kinetic/menfre.html>
- [12] Philip L. Bartlett and Andris T. Stelbovics, *PHYSICAL REVIEW*, Vol. A.66, 2002, p. 012707.
- [13] A. Bogaerts, E. Neyts, R. Gijbels, and J. van der Mullen, Gas discharge plasmas and their applications, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 57 (2002) 609.
- [14] H Conrads and M Schmidt, Plasma generation and plasma sources, *Plasma Sources Sci. Technol.* 9 (2000) 441.
- [15] C. Tendero, C. Tixier, P. Tristant, J. Desmaison, and P. Leprince, Atmospheric pressure plasmas: A review, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 61 (2006) 2.
- [16] U. Kogelschatz, B. Eliasson, and W. Egli, Dielectric-Barrier Discharges. Principle and Applications, *Le Journal de Physique IV* 07 (1997) 20.
- [17] H. E. Wagner, R. Brandenburg, K. V. Kozlov, A. Sonnenfeld, P. Michel, and J. F. Behnke, The barrier discharge: basic properties and applications to surface treatment, *Vacuum* 71 (2002) 417.
- [18] U. Kogelschatz, Dielectric-Barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications, *Plasma Chemistry and Plasma Processing* 23 (2003) 1.
- [19] A. Chirokov, A. Gutsol, and A. Fridman, Atmospheric pressure plasma of dielectric barrier discharges, *Pure and Applied Chemistry* 77 (2005) 487.
- [20] ชัยวิทย์ ศิลาวรรณาไณย, ฟิสิกส์ของดิสชาร์จไฟฟ้า, 1986.
- [21] วิเชียร เบลญจวัฒนาผล, สสท., 2539.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

โปรแกรมควบคุมแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง

```

#include <ADUc7024.H> // ADUc7024 MPU Register
#include <stdio.h>
void IRQ_Handler (void) __irq; // IRQ Service Routine
int putchar(int ch);
int getchar (void);
float period,Tup,Tdown,PDM,N_Active;
int IR0_STA,IR1_STA,count,SIG_STA,d;
int main(void)
{
    float f,T,N_PDM,PDM,IR_0,IR_1,dead_time;
    int i;
    static int temp[7]={0,0,0,0,0,0,0};

//Initial
GP1CON &= 0xFFFFFCC; // Reset P1.1 & P1.0 Pin Function
GP1CON |= 0x00000011; // Setup P1.1 = TXD & P1.0 = RXD

// Initial UART = 9600BPS
COMCON0 = 0x80; // Setting DLAB
COMDIV0 = 0x88; // Setting DIV0 and DIV1 to DL
calculated
COMDIV1 = 0x00;
COMCON0 = 0x07; // Clearing DLAB

// Config Port P4 = GPIO
GP4CON = 0x00000000; // P4 = GPIO

// Config GPIO Data Output
GP4DAT = 0x1E000000; // P4[1]-P4[4] = Output
GP4SET = 0x00140000; // SET P4[2],P4[4]
GP4CLR = 0x000A0000; // CLR P4[1],P4[3]

//Enter data
Do
{
    printf("\nEnter Frequency in form xxxxxx (6 digit)\n");
    for(i=0;i<6;i++)
    {
        temp[i]=getchar();
    }
}

```

```

f=(temp[5]+temp[4]*10)+(temp[3]*100)+(temp[2]*1000)+(temp[1]*10000)+(temp[0]*10
0000);
printf("\nEnter Pulse density in form x.xx (0.00 - 1.00) \n");
for(i=0;i<4;i++)
{
    temp[i]=getchar();
}
PDM=(temp[i-1]*0.01)+(temp[i-2]*0.1)+(temp[i-4]);
printf("\n\nFrequency = %.0f Hz\n",f);
printf("Pulse density(PDM) = %.3f\n",PDM);
printf("\nAll Parameter are CORRECT\n(enter : 1=Yes,0=No)");
temp[0]=getchar();
}
while(temp[0]==0);
N_PDM=40;
IRO_STA=0; //Interrupt for number of positive
IR1_STA=1; //Interrupt for PDM Control -for zero state
SIG_STA=1;
count=0;
d=0; // Set loop of delay function for dead time
dead_time=0.000000; //Enter in sec unit
T=1/f;
IR_0=(T/2)-(dead_time*2) ;
IR_1=(N_PDM/2)*T;
printf("\nT= %f \nTime : IR_0 = %f IR_1 = %f\n",T,IR_0,IR_1);
N_Active=(PDM)*N_PDM;
IR_0=IR_0/0.0000000239348; //Convert to number of loop interrupt
if(PDM!=1.00)
IR_1=IR_1/0.0000000239348; //Convert to number of loop interrupt
printf("Loop of : IR_0 = %f IR_1 = %F\nNumber of positive
SIG = %f",IR_0,IR_1,N_Active);

// Config Port P4 = GPIO
GP4CON = 0x00000000; // P4 = GPIO
IRQEN |= 0x0000000C; // Enable Timer1 AND Timer0 Trigger IRQ

// HCLK = 41.78 MHz
// Time 1 Cycle = 1 / 41.78 MHz
// = 23.9348 nS
TOCON &= 0xFFFFFFF0; // Prescale = HCLK / 1
TOCON &= 0xFFFFFFF3; // Format = Binary Counter
TOCON |= 0x00000040; // Timer1 Mode = Periodic
TOCON &= 0xFFFFFEFF; // Timer0 = Count Down
TOCON &= 0xFFFFF1FF; // Timer0 Clock Source = HCLK
TOCON |= 0x00000080; // Timer0 Enable
TOLD=IR_0;
T1CON &= 0xFFFFFFF0; // Prescale = HCLK / 1
T1CON &= 0xFFFFFFF3; // Format = Binary Counter

```

```

T1CON |= 0x00000040;           // Timer1 Mode = Periodic
T1CON &= 0xFFFFFEFF;         // Timer1 = Count Down
T1CON &= 0xFFFFF1FF;         // Timer1 Clock Source = HCLK
T1CON |= 0x00000080;         // Timer1 Enable
T1LD=IR_1;
while(1);                     // Loop Continue

// Wait Timer1 Interrupt //
}

/*****
/* Interrupt Service Routine */
*****/
void IRQ_Handler (void) __irq           // IRQ Service Routine
{
    if (((IRQSTA & 0x00000004) != 0)&&(IRO_STA == 1)) // if Timer0 IRQ Flag Status
    {
        if(PDM!=1.00)
        {
            count=count+1;
        }
        if (count >= N_Active)
        {
            GP4CLR = 0x000A0000;
            GP4SET = 0x00140000;
            IR1_STA=1;
            IRO_STA=0;
            count=0;
            T1CLRI &= 0xFFFFFFFF;           //Clear Interrupt 1
            SIG_STA=1;
        }
        else
        {
            if (SIG_STA == 1)
            {
                GP4CLR = 0x00120000;           // CLR P4[1] p4[4]
                GP4SET = 0x000C0000;         // SET P4[2] P4[3]
                SIG_STA=2;
                TOCLRI &= 0xFFFFFFFF;
            }
            else
            {
                GP4CLR = 0x000C0000;           // CLR P4[2] P4[3]
                GP4SET = 0x00120000;         // SET P4[1] P4[4]
                SIG_STA=1;
                TOCLRI &= 0xFFFFFFFF;
            }
            // Clear Timer0 Trigger IRQ Flag
        }
    }
}

```

```

        if( ((IRQSTA & 0x00000008) != 0) &&(IR1_STA == 1)) // if Timer1 IRQ Flag Status
        {
            GP4CLR = 0x00040000;           // CLR P4[2]
            GP4SET = 0x00020000;         // SET P4[1]
            IR1_STA=0;
            IR0_STA=1;
            TOCLR1 &= 0xFFFF1FF;        // Clear Timer0 Trigger IRQ Flag
        }
        return ;
    }

    /*****
    /* Write Character To UART */
    /*****/
    int putchar(int ch)                // Write character to Serial Port
    {
        if (ch == '\n')
        {
            while(!(0x40==(COMSTA0 & 0x40))) // Wait TX Complete
            {
            }
            COMTX = 0x0D;                // Write CR
        }
        while(!(0x40==(COMSTA0 & 0x40))) // Wait TX Complete
        {
        }
        return (COMTX = ch);
    }

    /*****
    /* Read Character From UART */
    /*****/
    int getchar (void)                // Read character from Serial Port
    {
        int out,in;
        while(!(0x01==(COMSTA0 & 0x01))) // Wait Receive Data Ready
        {
        }
        in=COMRX;
        switch(in)
        {
            case 46 : out=99; break;
            case 48 : out=0; break;
            case 49 : out=1; break;
            case 50 : out=2; break;
            case 51 : out=3; break;
            case 52 : out=4; break;
            case 53 : out=5; break;
        }
    }

```

```
case 54 : out=6; break;
case 55 : out=7; break;
case 56 : out=8; break;
case 57 : out=9; break;
default :printf("RESET MCU and Enter only 0-9 OR '.'\n");
}
return (out);
}
```

ภาคผนวก ข

โปรแกรมนับสัญญาณกระแสไฟฟ้า

```

#include <stdio.h>
#include <math.h>
main()
{
    FILE *fp,*f_out;
    float time[3],voltage[3],current[3]={0};
    float out[451][2]={0},max_current,temp;
    int i=0,j=0,group=1000,pulse=1;
    clrscr();
    printf("\n\nCopy file 'data.txt' in same directory with this programe.\n");
    printf("File 'data.txt' consist of 3 column and current signal is in third
column.\n\n");
    if((fp=fopen("data.txt","rt"))==NULL)
    {
        printf("Cannot open file!!\n");
        goto loop1;
    }
    if((f_out=fopen("output.txt","w"))==NULL)
    {
        printf("Cannot open output file!!");
        goto loop1;
    }

    fprintf(f_out,"Current Count\n");
    printf("Enter a maximun current\n");
    scanf("%f",&max_current);
    printf("Enter a groups of current (max=450)\n");
    scanf("%d",&group);
    printf("Enter a Pulse of signal.\n");
    scanf("%d",&pulse);
    temp=max_current/group;
    group=group+1;
    for(i=0;i<group;i++)
    {
        out[i][0]=temp*i;
    }
    i=0;
    while(fscanf(fp,"%f%f%f",&time[0],&voltage[0],&current[0])!=EOF)
    {
        current[0]=sqrt(current[0]*current[0]);
        i=i+1;
        if(i>1)

```

```

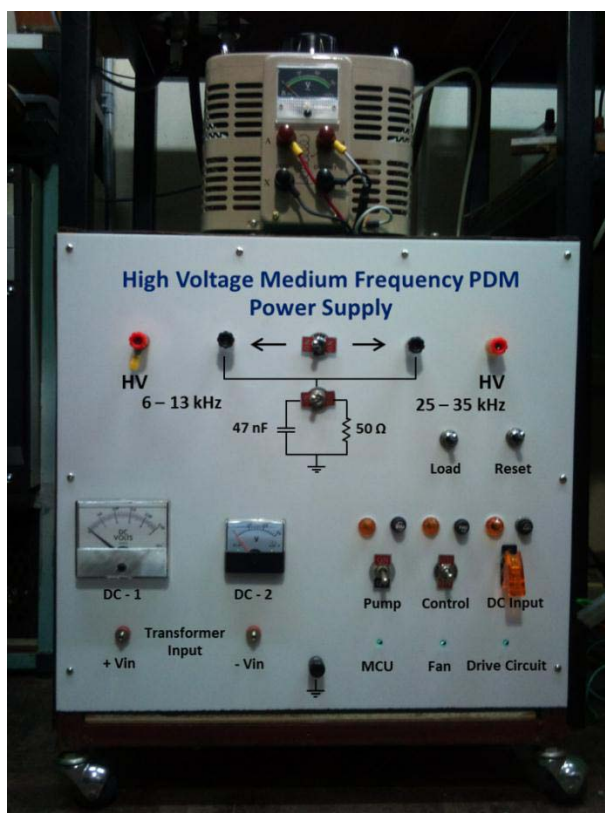
    {
        if(current[1]>current[0]&&current[1]>current[2])
            {
                j=0;
                for(j=0;j<group;j++)
                    {
                        if(current[1]<=out[j+1][0])
                            {
                                out[j][1]++;
                                break;
                            }
                    }
            }
    }

    time[2]=time[1];
    time[1]=time[0];
    voltage[2]=voltage[1];
    voltage[1]=voltage[0];
    current[2]=current[1];
    current[1]=current[0];
    i++;
}
for(j=0;j<group;j++)
{
    fprintf(f_out,"%f %f\n",out[j][0],out[j][1]/pulse);
}
fclose(fp);
fclose(f_out);
loop1: printf("***** FINISHED *****\n\n");
printf("*****\n");
printf("*****");
printf("\nThis programe created by\n\n\n Arlee & Wanita\n\n");
printf("\n*****\n");
printf("*****\n");
scanf("%f",&temp);
return(0);
}

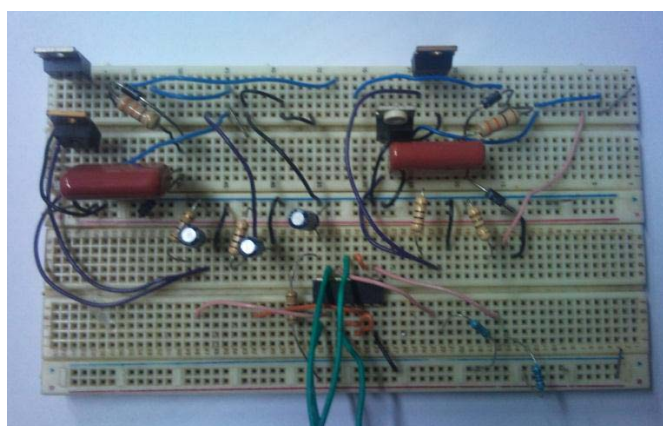
```

ภาคผนวก ค

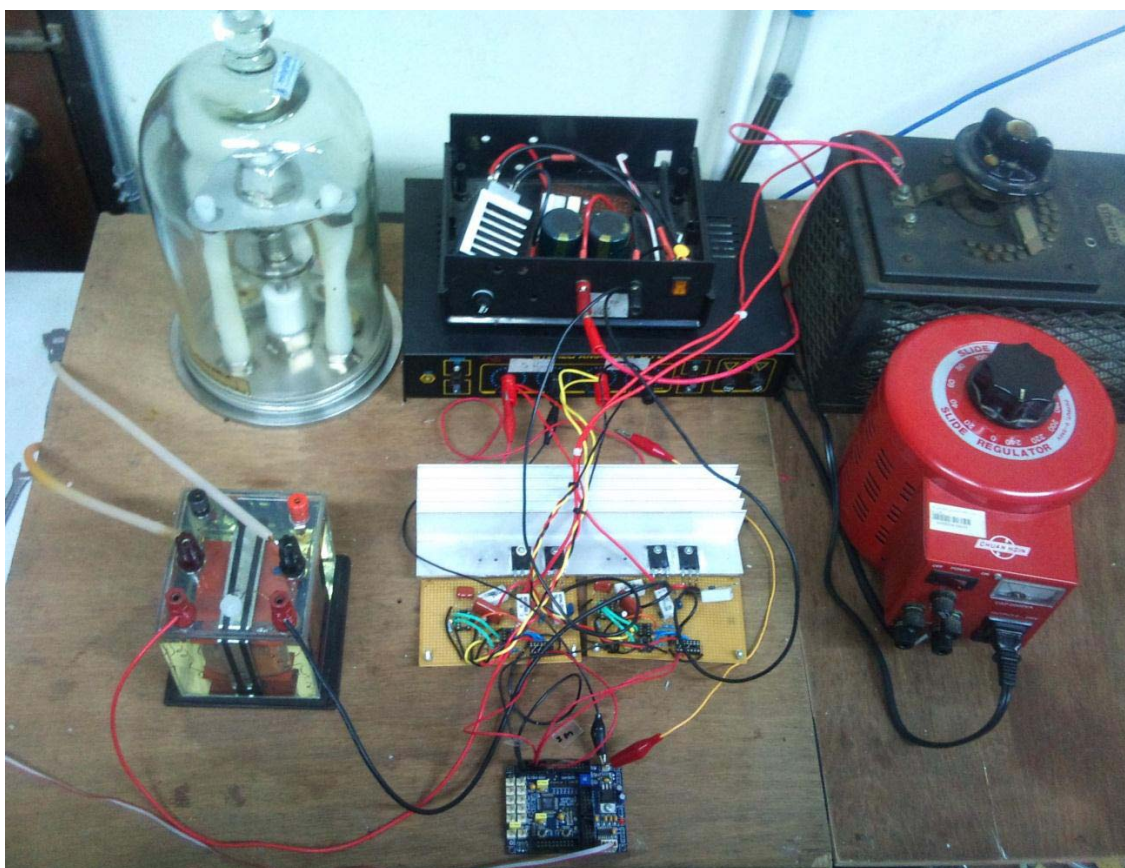
ภาพประกอบจากการวิจัย



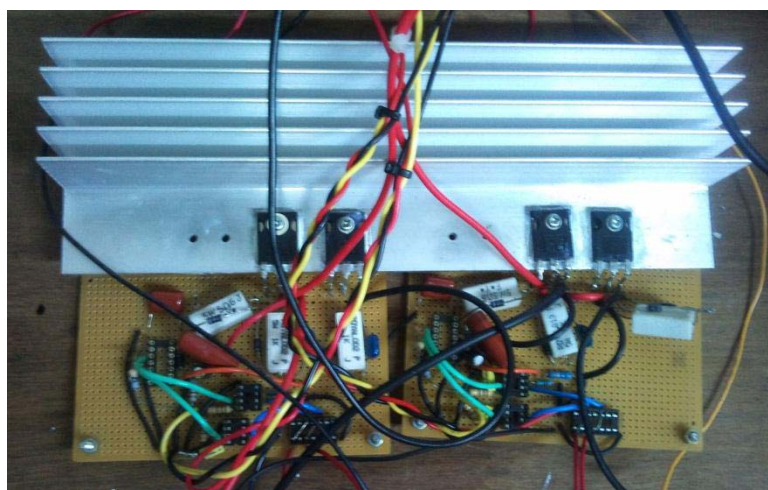
ภาพประกอบที่ 1 แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงที่สร้างขึ้น



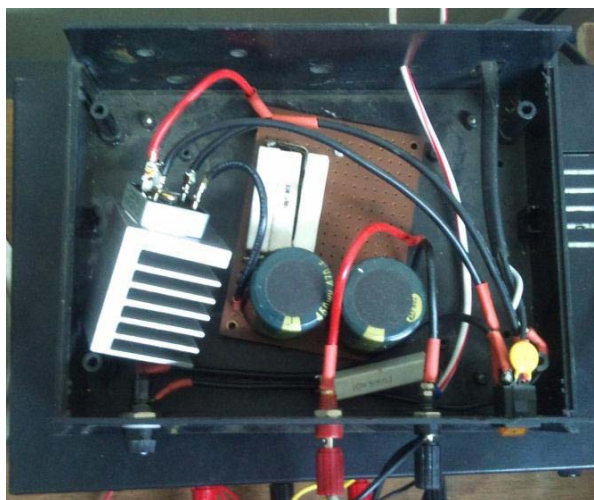
ภาพประกอบที่ 2 วงจรขับ Power MOSFET แบบใช้ MOSFET (สำหรับทดสอบการทำงาน)



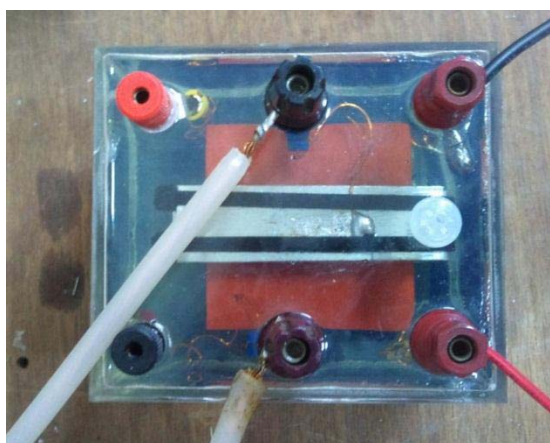
ภาพประกอบที่ 3 อุปกรณ์สำหรับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (สำหรับทดสอบการทำงาน)



ภาพประกอบที่ 4 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบ Full-Bridge และวงจรขับแบบใช้ไอซี (สำหรับทดสอบการทำงาน)



ภาพประกอบที่ 5 วงจรเรียงกระแสและวงจรกรองแรงดัน (สำหรับทดสอบการทำงาน)



ภาพประกอบที่ 6 หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงเมื่อต่อใช้งานหนึ่งตัว (สำหรับทดสอบการทำงาน)



ภาพประกอบที่ 7 ขั้วไฟฟ้าสำหรับสร้างพลาสมาซึ่งสามารถปรับช่องว่างของอากาศได้



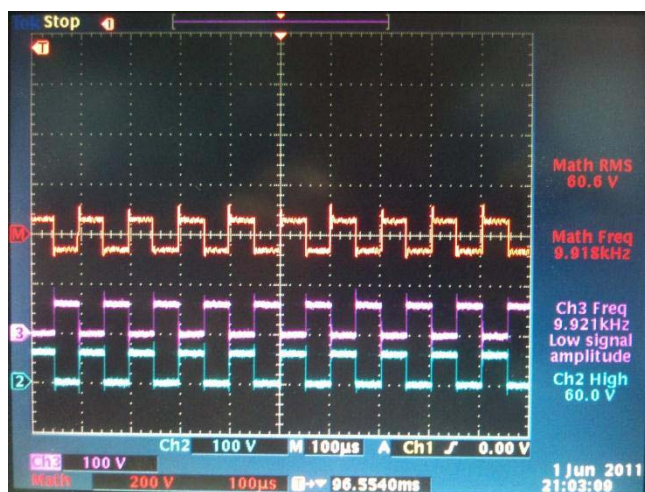
ภาพประกอบที่ 8 การต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง และแก๊สเข้าสู่ระบบ



ภาพประกอบที่ 9 เครื่องปั่นมือแปลงไฟฟ้า



ภาพประกอบที่ 10 มาตรวัดจำนวนรอบขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า



ภาพประกอบที่ 11 แรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรมอเตอร์เมื่อไม่ต่อโหลด ($V=60\text{ V}_{\text{rms}}$)

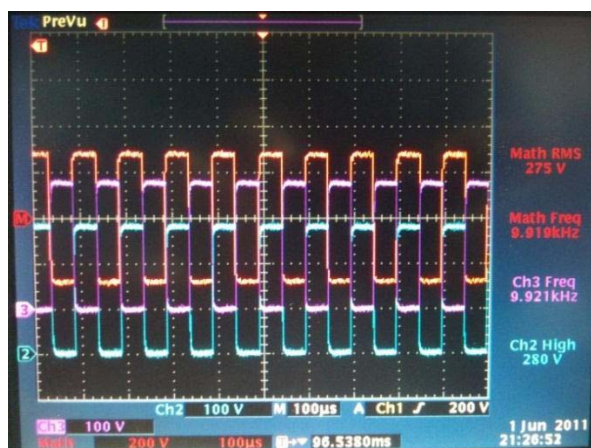


ภาพประกอบที่ 12 แรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรมอเตอร์เมื่อต่อโหลด 50 โอห์ม

$$(V_{\text{open load}} = 60\text{ V}_{\text{rms}})$$

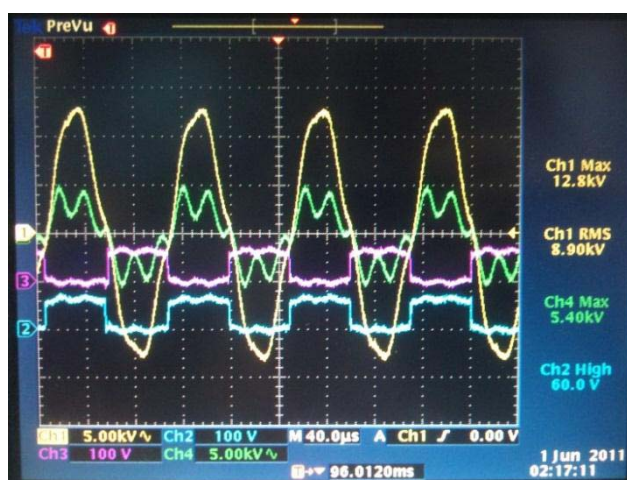


ภาพประกอบที่ 13 แรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรมอเตอร์เมื่อไม่ต่อโหลด ($V=300\text{ V}_{\text{rms}}$)



ภาพประกอบที่ 14 แรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรถินเวอร์เตอร์เมื่อต่อโหลด 50 โอห์ม

$$(V_{\text{open load}} = 300 \text{ V}_{\text{rms}})$$



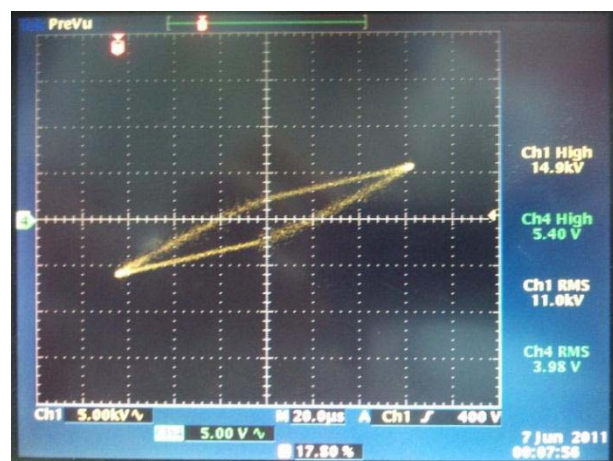
ภาพประกอบที่ 15 แรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงชั้นบันไดตัวที่ 1 (CH1) และตัวที่ 2 (CH4)



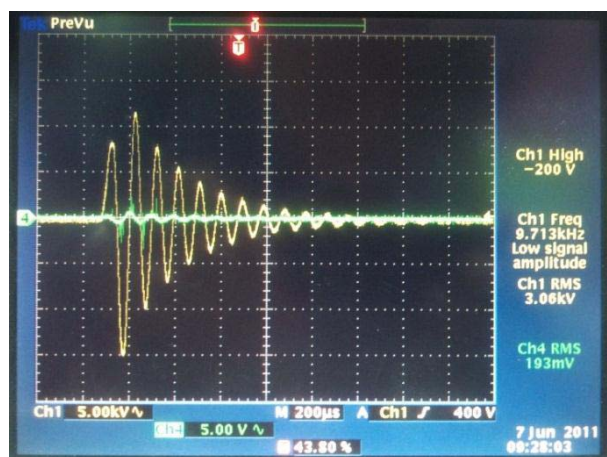
ภาพประกอบที่ 16 แรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงชั้นบันได(CH1) และแรงดันไฟฟ้าขาเข้า (Math) ที่แอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดคือ 35 กิโลโวลต์



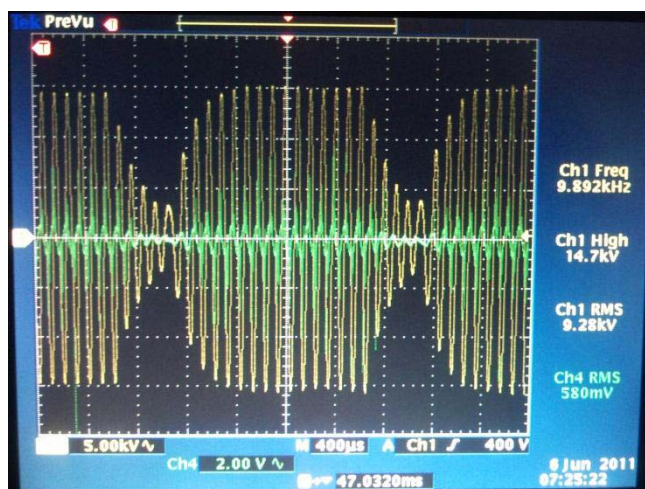
ภาพประกอบที่ 17 กระแสดีสชาร์จ (CH4) เทียบกับแรงดันไฟฟ้า (CH1) ที่จ่ายแต่ห้องพลาสมา



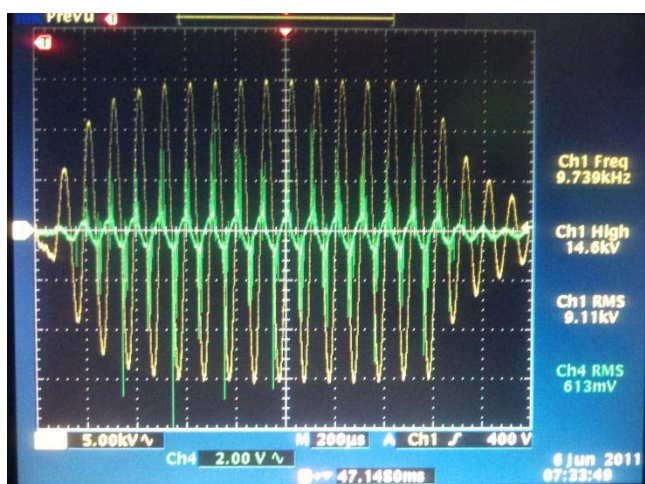
ภาพประกอบที่ 18 แผนภาพลิสซาจัวส์เมื่อใช้การแสดงผลแบบ X-Y บนออสซิลโลสโคป



ภาพประกอบที่ 19 แรงดันไฟฟ้า (CH1) และกระแสดีสชาร์จ (CH4) เมื่อความหนาแน่นของพัลส์ 1/20 ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ แรงดันไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์



ภาพประกอบที่ 20 แรงดันไฟฟ้า (CH1) และกระแสสขาร์จ (CH4) เมื่อความหนาแน่นของพัลส์ 16/20 ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ แรงดันไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์



ภาพประกอบที่ 21 แรงดันไฟฟ้า (CH1) และกระแสสขาร์จ (CH4) เมื่อความหนาแน่นของพัลส์ 16/20 ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ แรงดันไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์

ภาคผนวก ง

ผลงานเผยแพร่จากวิทยานิพนธ์

Arlee Tamman, Prajak Saeung and Yutthana Tirawanichakul. “*Control and Performance of a Pulse-Density-Modulated Inverter for Plasma Discharge Processes*” Siam Physics Congress 2011 (SPC2011) March 23 to March 26, 2011, at Ambassador City Jomtien Hotel, Chon Buri, Thailand.

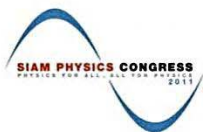
Arlee Tamman, Prajak Saeung and Yutthana Tirawanichakul. “*Inverter System for Plasma Discharge*” The Proceedings of the 6th Conference on Science and Technology for Youths: 2011, March 18 to March 19, 2011, at Bangkok International Trade & Exhibition Centre, Bangkok, Thailand

Arlee Tamman, Prajak Saeung and Yutthana Tirawanichakul. “*Effect of the Varied-Voltage, Frequency and PDM in Atmospheric Pressure Dielectric Barrier Discharges*” Advanced Plasma Technology for Green Energy and Biomedical Applications (ATP 2011), August 11 to August 12, 2011, at Centara Duangtawan Hotel, Chiang Mai, Thailand.

นำเสนอผลงานวิชาการในรูปแบบโปสเตอร์

**เรื่อง Control and Performance of a Pulse-Density-Modulated Inverter for
Plasma Discharge Process**

ในงาน Siam Physics Congress 2011 (SPC2011)



Siam Physics Congress SPC2011
Physics for all, all for physics 23-26 March 2011

ที่ สฟท. ว.001/2554

14 กุมภาพันธ์ 2554

เรื่อง ขอเชิญเสนอผลงานวิชาการ Siam Physics Congress 2011 (SPC2011)

เรียน Mr. Arlee Tamman

ตามที่สมาคมฟิสิกส์ไทย ร่วมกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) และ สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ดำเนินการประชุมเชิงวิชาการระดับชาติ Siam Physics Congress 2011 (SPC2011) ภายใต้แนวคิด Physics for all, all for physics ในช่วงระหว่างวันที่ 23-26 มีนาคม 2554 ณ โรงแรม Ambassador City Jomtien Hotel จังหวัดชลบุรี โดยท่านได้ลงทะเบียนเพื่อเข้าร่วมเสนอผลงานในการประชุมนั้น ในการนี้ทางคณะกรรมการจัดการประชุมขอตอบรับการนำเสนอผลงานของท่านในหัวข้อ Control and Performance of a Pulse-Density-Modulated Inverter for Plasma Discharge Process ในรูปแบบ Poster โดยท่านสามารถดูรายละเอียดของการประชุมได้ที่ <http://www.kmutt.ac.th/spc2011/spc/> ทั้งนี้ ในการชำระค่าลงทะเบียน สามารถดำเนินการได้ตั้งแต่บัดนี้เป็นต้นไป โดยท่านสามารถตรวจสอบสถานะการชำระเงินค่าลงทะเบียนได้ที่เว็บไซต์การประชุม

จึงเรียนมาเพื่อทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(ดร.วรवरงศ์ รักเรืองเดช)

เลขานุการการประชุม SPC2011



สำนักงานเลขานุการ

สมาคมฟิสิกส์ไทย

ที่ตั้ง:

อาคารสุรพัฒน์ 3

ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี

อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

ที่อยู่ไปรษณีย์:

ตู้ ป.ณ. 93

ปณจ. นครราชสีมา 30000

โทรศัพท์ 0-4421-7040

โทรสาร 0-4421-7047

Secretariat Office

Thai Physics Society

Visiting Address:

Suraphat 3 Building,

University Ave.,

Suranaree Subdistrict,

Muang, Nakhonratchasima

Postal Address:

P.O. Box 93

Nakhonratchasima 30000

Thailand



Control and Performance of a Pulse-Density-Modulated Inverter for Plasma Discharge Processes

A. Tamman^{1,2*}, P. Saeng^{3,4,5}, and Y. Tirawanichakul^{2,3,4,5}

¹Human Resource Development in Science Project (Science Achievement Scholarship of Thailand, SAST), Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, 90112, Thailand

²Department of Physics, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, 90112, Thailand

³Plasma and Energy Technology Research Laboratory,

Department of Physics, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, 90112, Thailand

⁴Membrane Science and Technology Research center, Department of Physics, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai,

Songkhla, 90112, Thailand

⁵TheP Center, CHE, 328 Si Ayuthaya Rd., Bangkok 10400, Thailand

*Corresponding author. E-mail: arlee.tam@gmail.com

Abstract

Adjusting the pulse ac discharges for ultimate plasma control is manually done by the pulse-density-modulation (PDM). This is a control sequence that adjusts its average output voltage synchronized with current of the series load. The plasma system consists of voltage-source PDM inverter, a step-up transformer and corona discharge treater. The voltage source is ac power supply of 1-50 kHz, 500 W and 15 kV. This is to maintain a stable corona discharge in air at atmospheric pressure. Plasma generator usually receives necessary energy through various ways. The most commonly used method is to apply an electric field to neutral gas for its energy increase. Electric field can be generated by various voltage sources such as ac-voltage, dc-voltage, pulse ac-voltage or pulse dc-voltage. Pulse ac discharges are used to generate plasma, which can be controlled by varied frequency or amplitude, or duty cycle. Nonetheless, the PDM is more widely practiced regarding plasma control. The PDM inverter creates the square-wave ac-voltage state and zero state to control average output voltage.

Keywords: Corona discharge, Plasma, Pulse-density-modulation, Pulse power generation



The Influence of the Characteristics of Light Source Profiles in Ghost Shadow Imaging

T. Sriarunothai, A. Sinsarp, W. Chunwachirasiri, and W. Singhsomroj*

¹Collaborative Research Unit on Quantum Information, Department of Physics, Faculty of Science, Mahidol University, Bangkok, 10400, Thailand
*Corresponding author. E-mail: scwss@mahidol.ac.th

Abstract

Ghost shadow imaging is an imaging technique which is inspired by the combination of ghost imaging, demonstrated by Pittman *et al.* in 1995 [Phys. Rev. A 52, 3429(R) (1995)], and projection of shadow. Ghost imaging and ghost shadow imaging construct an image indirectly. An image is constructed by two separated light. In order to construct an image, the correlations are calculated between the intensities of light after an object detected by a fixed bucket detector, a non spatial-resolution detector, and spatial intensity profiles of the light source detected by a linear array detector. In this study, the influence of the characteristics of the light source profiles is considered. The characteristics of the light source profiles are prepared by Gaussian convolution model in one-dimension. These profiles are used to construct an image. By varying the characteristics of the profiles, the qualities of the constructed images are considered. We found that there are optimal indicators to get the best constructed image. The simulation result will be presented.

Keywords: Correlation imaging, Gaussian convolution model, Ghost imaging, Ghost shadow imaging



Control and Performance of a Pulse-Density-Modulated Inverter for Plasma Discharge Processes

Arlee Tamman^{1,2}, Prajak Saeung^{2,3} and Yutthana Tirawanichakul^{2,3}

¹Human Resource Development in Science Project (Science Achievement Scholarship of Thailand, SAST), Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112, Thailand

²Department of Physics, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112, Thailand

³ThEP Center, CHE, 328 Si Ayutthaya Rd., Bangkok 10400, Thailand



Abstract: Adjusting the pulse ac discharges for ultimate plasma control are manually done by the pulse-density-modulation (PDM), which is a control sequence that adjusts its average output voltage synchronized with current of the series load. The plasma system consists of voltage-source PDM inverter, a step-up transformer and corona discharge treater. The voltage source uses ac power supply of 1-50 kHz, 500 W and 15 kV to maintain a stable corona discharge in air at atmospheric pressure. Plasma generator usually receives necessary energy through various ways. The most commonly used method is by applying an electric field to neutral gas for its energy increase. Electric field can be generated by various voltage source such as ac-voltage, dc-voltage, pulse ac-voltage or pulse dc-voltage. Since pulse ac discharges are used to generate plasma, which can be controlled by varied frequency or amplitude, or duty cycle. Nonetheless, the PDM is more widely practiced regarding plasma control. The PDM inverter creates the square-wave ac-voltage state and zero state to control average output voltage.

Introduction: Plasma can be generated by supplying energy to a neutral gas for its energy increase. When electrons or ion in the gas phase receives sufficient energy and collide with the neutral atom and molecules in gas, ionization or photoionization occur. The most commonly used method of generating a low-temperature plasma is by applying an electric field to the neutral gas. Electric field can be generated by various voltage source such as ac-voltage, dc-voltage, pulse ac-voltage or pulse dc-voltage. Since pulse ac discharges are used to generate plasma with dielectric barrier discharge system (DBD), a power of plasma can be controlled by varied frequency or amplitude, or duty cycle. Yet another way to control a power of plasma can be done through varied number of pulse, which is applied to the electrodes in unit time, though a frequency and amplitude of the pulse ac-voltage will be unchanged. This technique is called a Pulse-Density-Modulated (PDM).

System configuration: Figure 1 shows a power circuit configuration of pulse power supply system with DBD reactor. The 1 – 40 kHz 500 W inverter consists of a single-phase voltage-source and full-bridge inverter using four power MOSFET. Power MOSFET is rated at 500 V and 20 A. A step-up transformer with ferrite core, is installed on the ac terminals of the inverter to obtain a high voltage of 10-15 kV for DBD plasma discharge. A circuit of gate drive using TLP250 which consists of a GaAlAs light emitting diode and integrated photodetector separates low-voltage part and high-voltage part as to protect a control circuit. The control circuit using ET-BASE ARM7024 which is board microcontroller ARM7 64PIN family uses microcontroller No.ADUC7024 from Analog Device. The MCU can collect data maximum 41.78 MHz by using XTAL 32.768 KHz. DBD reactor consists of two plates of stainless steel which varies from 2 mm to 15 mm in gas gap.

Results and Discussion: Figure 4 shows experimental waveforms of PDM inverter system when using 200 V_{DC} at 10 kHz of frequency. a) corresponds to the case of maximum power operation at unity pulse density by producing no zero-voltage state. b) indicates a half power operation at a pulse density of 10/20 by having the PDM inverter create a ten of square-wave ac-voltage state and ten of zero-voltage states.

Conclusions: The power supply using PDM inverter system generates an ac signal to drive the primary winding of a step-up high voltage and high frequency transformer. It can generate 400 V_{pp} of output voltage with frequency in rang of 1-40 kHz, that can adjust its average output voltage to control power output from 1/20 to maximum power. Nonetheless, positive duty cycle decreases when the frequency increases. This problem occurs from a bootstrap circuit signal which drives high-side power MOSFET.

References Hart,D.W.(2011). *Power Electronics*. Singapore : McGraw-Hill
Fujita, H. and H. Akagi, *Control and performance of a pulse-density-modulated series-resonant inverter for corona discharge processes*. Industry Applications, IEEE Transactions on, 1999. 35(3): p. 621-627.

Principle of PDM: Figure 2 shows a switching modes of the voltage-source PDM inverter. The combination of the step-up transformer and the DBD reactor is represented by an RLC series-resonant circuit. The PDM can be operated in three modes; mode I and mode II in figure 2(a) and (b) together produce a square-wave ac-voltage state, whereas mode III produces a zero-voltage state at its output terminals. Figure 3 shows signals from the control circuit which is applied to power MOSFET. Signal v_A is applied to Q1 and Q4 to generate positive state and signal v_B is applied to Q2 and Q4 to generate negative state in signal v_O. Thus, v_A and v_B together produce a square-wave ac-voltage state in signal v_O. The PDM frequency repeatedly runs and stops in accordance with a control sequence to adjust its average output voltage for control power output.

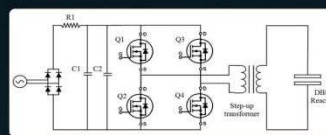


Figure 1 Pulse power supply system with DBD reactor.

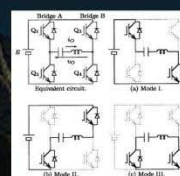


Figure 2 Switching modes in PDM inverter.

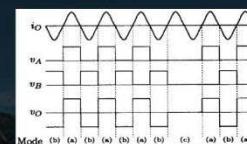


Figure 3 Principle of PDM control.

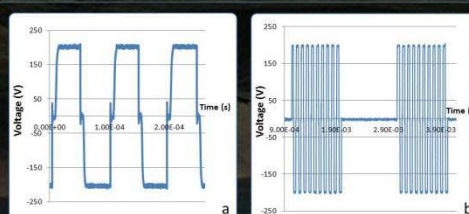


Figure 4 Experimental waveform for a) full power b) pulse density 10/20 (f=10 kHz)

**นำเสนอผลงานวิชาการในรูปแบบโปสเตอร์
เรื่อง Inverter System for Plasma Discharge ในงาน**

**The Proceedings of the 6th Conference on Science and Technology
for Youths: 2011**



สวทช.
NSTDA

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ร่วมกับ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา
สำนักงานคณะกรรมการการศึกษาระดับขั้นพื้นฐาน และสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

ขอขอบเกียรติบัตรฉบับนี้ไว้เพื่อแสดงว่า

นายอาทิตย์ ต่ำหมั่น

ได้เข้าร่วมนำเสนอผลงานวิจัยในงานประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อเยาวชน ครั้งที่ ๒

ระหว่างวันที่ ๑๘ - ๑๙ มีนาคม พุทธศักราช ๒๕๕๔

ณ ศูนย์นันทนาการและการประชุมไบเทค บางนา กรุงเทพมหานคร

ให้ไว้ ณ วันที่ ๑๙ มีนาคม พุทธศักราช ๒๕๕๔

(ดร.พรพรณ ไวยายงูร)
ผู้อำนวยการ

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

(ดร.สุพถ ภัทรากร)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

84 พรรษา **เปิดพระเกียรติยศศิษย์นักวิทยาศาสตร์**

บทคัดย่อ

Abstracts



การประชุมวิชาการ

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อเยาวชน ครั้งที่ 6

The 6th Conference on Science and Technology for Youths

18-19 มีนาคม 2554 ณ ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทค บางนา



สวทช.
NSTDA



ระบบอินเวอร์เตอร์สำหรับการดิสชาร์จไฟฟ้าของพลาสมา

อาทลี ต่ำหมั่น

อาจารย์ที่ปรึกษา ประจักษ์ แซ่อึ้ง และ ยุทธนา ฐิระวนิชย์กุล

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่ สงขลา 90112

Email address: arlee.tam@gmail.com โทรศัพท์ 08-6748-0038

บทคัดย่อ: ระบบอินเวอร์เตอร์ใช้สร้างแหล่งจ่ายไฟสำหรับระบบการดิสชาร์จไฟฟ้าของพลาสมา โดยการเปลี่ยนจากไฟฟ้าระบบ DC เป็น AC ระบบอินเวอร์เตอร์ประกอบด้วยอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลัง หม้อแปลงไฟฟ้าสวิตช์สูงและความถี่สูง และภาคควบคุม ภาคควบคุมสร้างสัญญาณสี่เหลี่ยมที่ช่วงความถี่ 1 – 40 kHz เพื่อจ่ายให้กับวงจรขับมอสเฟตกำลัง สัญญาณที่ได้จากวงจรขับมอสเฟตกำลังจะจ่ายให้กับมอสเฟตกำลังเพื่อสร้างสัญญาณสี่เหลี่ยมสวิตช์สูงและกระแสสูง สัญญาณดังกล่าวจะถูกจ่ายให้กับขดลวดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าสวิตช์สูงและความถี่สูง สัญญาณที่ได้จากหม้อแปลงจะมีความต่างศักย์เท่ากับหรือสูงกว่าความต่างศักย์แตกตัวของก๊าซ ส่งผลให้สามารถสร้างพลาสมาได้

คำสำคัญ: inverter system, plasma discharge, AC plasma discharge

Inverter System for plasma discharge

Arlee Tamman

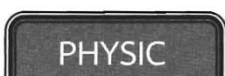
Thesis advisor: Prajak Saeung and Yutthana Tirawanichakul

Department of Physics, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkla, 90112

Email address: arlee.tam@gmail.com Tel. 08-6748-0038

Abstract: Inverter system is used to produce power supply for plasma discharge system by switching DC to AC. It consists of power semiconductor switch devices, high voltage and high frequency transformer, and control board. The control board generates a square wave frequency in a rank of 1 – 40 kHz, which is transferred to power MOSFET drive circuit. The signals from power MOSFET drive circuit will be applied to power MOSFET in order to produce square wave high voltage and high current signals. These signals ultimately drive the primary winding of a step-up high voltage and high frequency transformer. The transformer's output is equally high to or slightly higher than breakdown of neutron gas, which can generate plasma.

Key words: inverter system, plasma discharge, AC plasma discharge





Inverter System for Plasma Discharges

Arlee Tamman^{1,2}, Prajak Saeung^{2,3} and Yutthana Tirawanichakul^{2,3}

¹Human Resource Development in Science Project (Science Achievement Scholarship of Thailand, SAST), Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112, Thailand

²Department of Physics, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112, Thailand

³ThEP Center, CHE, 328 Si Ayutthaya Rd., Bangkok 10400, Thailand



Abstract: Inverter system is used to produce power supply for plasma discharge system by switching DC to AC. It consists of power semiconductor switching-devices, high voltage and high frequency transformer, and control board. The control board generates a square wave frequency in a rank of 1 – 40 kHz, which is transferred to power MOSFET drive circuit. The signals from power MOSFET drive circuit will be applied to power MOSFET in order to produce square wave high voltage and high current signals. These signals ultimately drive the primary winding of a step-up high voltage and high frequency transformer. The transformer's output is equally high to or slightly higher than breakdown of neutron gas, which can generate plasma.

Introduction: Inverters are circuits that convert dc to ac and transfer power from a dc source to an ac load. Inverters are used in applications such as motor speed control, uninterruptible power supply (UPS) and running ac application from dc source. A full-bridge converter is the basic circuit used to convert dc to ac which is synthesized from the dc source by closing and opening the switches to produce a square wave. The output voltage can be positive, negative, or zero voltage, depending on which switches are opened. The power MOSFET is a voltage-controlled device that can be turned on and off by applying voltage to the gate. The on state is achieved when a gate-to-source voltage is higher than threshold voltage while the off state is achieved by a voltage lower than threshold voltage. The gate-to-source voltage (V_{gs}) can be produced by gate drive circuit; it has two side of power MOSFET driver: low-side and high-side driver. Low-side driver use TLP250 which is photocoupler. Output from TLP250 is connected to the gate of low side power MOSFET. A bootstrap circuit is used for driving a high-side power MOSFET that uses two of MOSFETs, capacitor, diode and resistor.

Developed system: Figure 1 is equivalent circuit of inverter and plasma discharge system that consists of 4 switching-device (power MOSFET), load and dc power supply. When S_1 and S_2 are closed, $+V_{dc}$ is applied to the load whereas $-V_{dc}$ is applied to the load when S_3 and S_4 are closed. The low-side driver circuit shown in figure 2 uses TLP250, which consists of a GaAlAs light emitting diode and integrated photodetector. Signals from a control board is applied to the light emitting diode, and output signal of TLP250 is connected to the gate of power MOSFET. The high-side driver shown in figure 3 consists of two driver MOSFETs, high voltage capacitor, diode and resistor. When the control signal is high, two of MOSFETs are turned on, causing the capacitor charge to V_s through the diode. When it is low, two of MOSFETs are turned off, allowing the charge of capacitor to be transferred through the resistor and supplied to gate of power MOSFET. Output signals from full-bridge converter drive a primary winding of a step-up high voltage and high frequency transformer.

Results and Discussion: Figure 5 shows experimental waveforms of driver circuits, output of power MOSFETs and dc-voltage under a condition of a constant frequency and dc-input voltage. The frequency is 10 kHz, input voltage is 70 V, output from bootstrap circuit is up to 85 V for drive high side power MOSFET ($V_{gs} = 15$ V), and output from low-side driver that uses TLP250 to drive low side power MOSFET is 15 V. Figure 4 shows output from full-bridge converter that uses $200 V_{dc}$ and its frequency is 10kHz.

References: Hart,D.W.(2011). *Power Electronics*. Singapore : McGraw-Hill

Wanho, S., C. Jaeho, and K. Taewoong. *Bidirectional Pulse Plasma Power Supply for Treatment of Air Pollution*. in *Power Electronics Specialists Conference*, 2006. PESC '06. 37th IEEE. 2006.

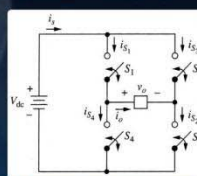


Figure 1 Equivalent circuit of full-bridge converter.

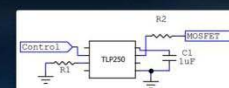


Figure 2 Low-side driver circuit.

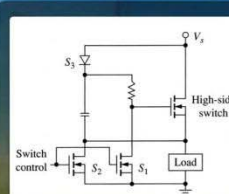


Figure 3 High-side driver circuit.

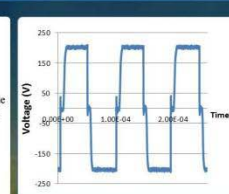


Figure 4 Output signal from full-bridge converter

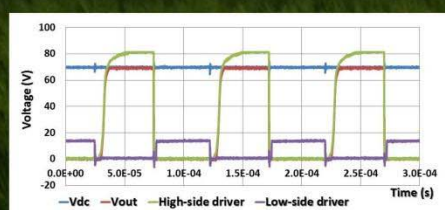


Figure 5 Output signals from driver circuits and power MOSFET.

Conclusions: The power supply uses inverter system to generate an ac signal to drive the primary winding of a step-up high voltage and high frequency transformer that can generate $400 V_{pp}$ of output voltage with frequency in rang of 1-40 kHz. However, positive duty cycle is decreased when the frequency is increased. This problem occurs from a bootstrap circuit signal that drives high-side power MOSFET.

นำเสนอผลงานวิชาการในรูปแบบบรรยาย

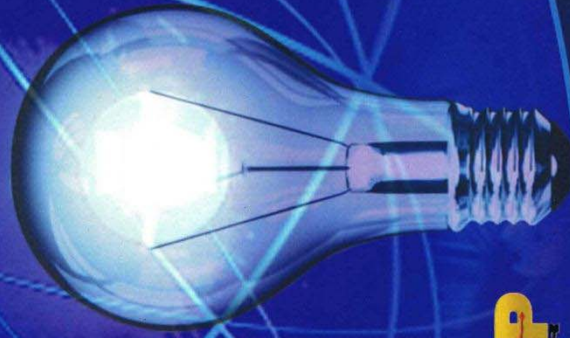
**เรื่อง Effect of the Varied-Voltage, Frequency and PDM in Atmospheric
Pressure Dielectric Barrier Discharges**

**ในงาน Advanced Plasma Technology for Green Energy and Biomedical
Applications (ATP 2011)**

Book of Abstract **Advanced Plasma Technology** for Green Energy and Biomedical Applications

August 10-12, 2011

Centara Duangtawan Hotel, Chiangmai, Thailand



ThEP



Organized by Thailand Center of Excellence in Physics (ThEP)
Co-organized by Asian Joint Committee for Applied Plasma Science
and Engineering (AJC-APSE)

Supporting Organizations :

Ministry of Education Thailand,

Center for Advanced Plasma Surface Technology (CAPST), Korea

Plasma Nanotechnology Center (PLANT), Japan

Plasma Bioscience Research Center (PBRC), Korea

Center of Plasma Nano-Interface Engineering (CNPE), Japan



ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ : 70 ถนนวิภาวดีรังสิต กรุงเทพฯ 10400 โทร (053) 942650-3

FTIR study on degree of modification in tapioca starch induced by atmospheric argon plasma under various humidity conditions

Panakamol Deeyai¹, Manop Supphantharika², Rungtiwa Wongsagonsup³ and Somsak Dangtip^{4,5,6,*}

¹Materials Science and Engineering Program, ²Department of Biotechnology, and ⁴Department of Physics, Faculty of Science, Mahidol University, Bangkok, THAILAND
³Food Technology Program, Mahidol University, Kanchanaburi Campus, Kanchanaburi, THAILAND
⁵TheP-Center, Commission for Higher Education, Ministry of Education, Bangkok, THAILAND
⁶NANOTEC CoE at Mahidol University, Faculty of Science, Mahidol University, Bangkok, THAILAND

Abstract

Tapioca starch is one of the major starch sources in Thai agricultural sector. The fact that it contains the least amount of lipid among all starch sources has recently supported its importance in the dietary-concern society. Tapioca starch undergoes certain modifications of its physico-chemical and rheological properties before being applied to food applications. Degree of modification varies considerably with tapioca starch history. In this study, we focus on studying effect of humidity in tapioca starch on degree of cross-linking following atmospheric argon plasma treatment. Starch tablets were stored under three different relative humidity environment; 11%, ambient (68%), and 78% before treating with atmospheric argon plasma for 30 minutes. The plasma promotes the cross-linking process accompanying with water abstraction. Water molecules are then engulfed in two ways; tightly bound into starch structure or weakly absorbed. The former case is associated with wave number 1630 cm^{-1} in the FTIR spectrum, while the latter with 3272 cm^{-1} . These two peaks and the C-O-H peak at 993 cm^{-1} , with respect to the symmetric and the anti-symmetric ether (C-O-C) peaks, are used to identify degree of cross-linking. The high humidity condition helps sinking the abstracted water through the gelatinization and melting process. The low humidity condition, which slows the gelatinization and melting process, absorbs little amount of the abstracted waters and lets most of them free to the plasma.

*Corresponding author. E-mail: panaple@gmail.com

O - 8

Effect of the Varied-Voltage, Frequency and PDM in Atmospheric Pressure Dielectric Barrier Discharges

Arlee Tamman^{1,2}, Prajak Saeung^{2,3,*} and Yutthana Tirawanichakul^{2,3}

¹Human Resource Development in Science Project (Science Achievement Scholarship of Thailand, SAST)

²Department of Physics, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112, Thailand

³TheP Center, CHE, 328 Si Ayutthaya Rd., Bangkok 10400, Thailand

Abstract

Dielectric barrier discharges (DBD) plasma was generated by applying an electric field to the reactor. The power of plasma was controlled with various formation of signal input. The discharged power can be controlled by varying potential and frequency. Yet another way to control a power of plasma can be done through varied number of pulse signal that applied to the parallel electrodes in unit time, which is called pulse-density-modulated (PDM). In this research, the discharged power of 0.36 to 32 watts due to varied voltage become unstable at low power. While the power range of 20 to 40 watts by adjusting frequency can be achieved steady state of discharge, but it has a short range of power control. The PDM used to control for a wide range of discharge power. It can be varied from 1 to 32 watt with steady plasma. The steady plasma can use for membranes modification, as well as to adjust a power of plasma for strong and weak modification processes.

*Corresponding author. E-mail: prajak.s@psu.ac.th

O - 9

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายอาหลี คำหมั่น	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5210220114	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วท.บ. (ฟิสิกส์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2551

ทุนการศึกษา

ปีการศึกษา 2548 – 2551 ได้รับทุนจาก โครงการพัฒนากำลังคนวิทยาศาสตร์ (ทุนเรียนดีวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย)

ปีการศึกษา 2551 ได้รับทุนสนับสนุนโครงการวิจัยจาก โครงการสร้างปัญญาวิทย์ ผลิตนักเทคโนโลยี (Young Scientist and Technologist Programme, YSTP)

ปีการศึกษา 2552 – 2553 ได้รับทุนจาก โครงการพัฒนากำลังคนวิทยาศาสตร์ (ทุนเรียนดีวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย)

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Arlee Tamman, Prajak Saeung and Yutthana Tirawanichakul. “Control and Performance of a Pulse-Density-Modulated Inverter for Plasma Discharge Processes” Siam Physics Congress 2011 (SPC2011) March 23 to March 26, 2011, at Ambassador City Jomtien Hotel, Chon Buri, Thailand.

Arlee Tamman, Prajak Saeung and Yutthana Tirawanichakul. “Inverter System for Plasma Discharge” The Proceedings of the 6th Conference on Science and Technology for Youths: 2011, March 18 to March 19, 2011, at Bangkok International Trade & Exhibition Centre, Bangkok, Thailand.

Arlee Tamman, Prajak Saeung and Yutthana Tirawanichakul. “Effect of the Varied-Voltage, Frequency and PDM in Atmospheric Pressure Dielectric Barrier Discharges” Advanced Plasma Technology for Green Energy and Biomedical Applications (ATP 2011), August 11 to August 12, 2011, at Centara Duangtawan Hotel, Chiang Mai, Thailand.