

การศึกษาเปรียบเทียบวงจรควบคุมแบบ PWM, PDM และ PS-PWM ใน
วงจรคอนเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์ แรงดันสูงความถี่สูงแบบ LCC เรโซแนนซ์
สำหรับเครื่องกำเนิดโอโซน

COMPARATIVE STUDIES OF PWM, PDM AND PS-PWM CONTROL IN HIGH-
FREQUENCY HIGH-VOLTAGE LCC RESONANT FULL-BRIDGE CONVERTERS
FOR AN OZONE GENERATOR



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

KMITL-2013-EN-M-020-092

การศึกษาเปรียบเทียบวงจรควบคุมแบบ PWM, PDM และ PS-PWM ใน
วงจรคอนเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์ แรงดันสูงความถี่สูงแบบ LCC เรโซแนนซ์
สำหรับเครื่องกำเนิดโอโซน

COMPARATIVE STUDIES OF PWM, PDM AND PS-PWM CONTROL IN HIGH-
FREQUENCY HIGH-VOLTAGE LCC RESONANT FULL-BRIDGE CONVERTERS
FOR AN OZONE GENERATOR



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในห้องสมุดเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2013-EN-M-020-092

COMPARATIVE STUDIES OF PWM, PDM AND PS-PWM CONTROL IN HIGH-
FREQUENCY HIGH-VOLTAGE LCC RESONANT FULL-BRIDGE CONVERTERS
FOR AN OZONE GENERATOR



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2013

KMITL-2013-EN-M-020-092

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2013

FACULTY OF ENGINEERING

เอกสาร King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang นี้ นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเปรียบเทียบวงจรควบคุม PWM, PDM และ PS-PWM ในวงจรคอนเวอร์เตอร์ ฟูลบริดจ์แรงดันสูงความถี่สูงแบบ LCC เรโซแนนซ์สำหรับเครื่องกำเนิดโอโซน
Thesis Title	Comparative Studies of PWM, PDM and PS-PWM Control in High Frequency High-Voltage LCC Resonant Full-Bridge Converters for an Ozone Generator
นักศึกษา	นายธีระเดช เกียรติวรรณ
รหัสประจำตัว	53610518
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ
หมายเลขวิทยานิพนธ์	KMITL-2013-EN-M-020-092

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิจิตร	กิณเรศ	
ดร.ภาพ	จันทร์เจริญสุข	
ผศ.ดร.สลิลทิพย์	สินธุสนธิชาติ	
รศ.ดร.อนุวัฒน์	จางวนิชเลิศ	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 23 พฤษภาคม พ.ศ. 2556 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

A handwritten signature in blue ink, appearing as "J. J." or similar, written over a faint circular stamp.

(ศาสตราจารย์ ดร.สุชัยวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

คุณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 23 พฤษภาคม พ.ศ. 2556

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาเปรียบเทียบวงจรควบคุมแบบ PWM, PDM และ PS-PWM ในวงจรคอนเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์แรงดันสูงความถี่สูงแบบ LCC เรโซแนนซ์สำหรับเครื่องกำเนิดโอโซน

นักศึกษา

นายธีระเดช เจียรวรรณ

รหัสนักศึกษา

53610518

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2556

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบเครื่องกำเนิดโอโซนและเปรียบเทียบแหล่งจ่ายกำลังแบบแรงดันสูงความถี่สูง โดยใช้วงจร PWM, PDM และ PS-PWM ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์แบบ LCC เรโซแนนซ์เพื่อเพิ่มความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าบริเวณขั้วอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ของเครื่องกำเนิดโอโซนและเปรียบเทียบปริมาณโอโซน ด้วยเหตุนี้บทความนี้ได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ dsPIC30F2010 เป็นวงจรสร้างสัญญาณควบคุม แบบ PWM, PDM และ PS-PWM แล้วทำการเปรียบเทียบปริมาณโอโซนที่ได้จากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า แบบ PWM, PDM และ PS-PWM ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ โดยพิกัดแรงดันที่ป้อนให้กับชุดอิเล็กทรอนิกส์เท่ากับ 2.1 kV ซึ่งใช้หม้อแปลงความถี่สูงเป็นตัวเพิ่มแรงดัน และปรับความถี่สวิตชิ่งของคอนเวอร์เตอร์ให้ใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์และสูงกว่า คือ 20kHz, 21kHz, 22kHz, 23kHz และ 24kHz จากนั้นวัดปริมาณก๊าซโอโซนที่ผลิตได้ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงไปตามรูปแบบสัญญาณและความถี่ของแรงดันที่ป้อนให้กับชุดอิเล็กทรอนิกส์โดยปริมาณก๊าซโอโซนมีปริมาณมากที่สุดที่สัญญาณแบบ PWM, PDM และ PS-PWM ตามลำดับ อีกทั้งปริมาณโอโซนจะเพิ่มขึ้นตามความถี่ด้วย โดยสัญญาณ PWM, PDM และ PS-PWM ให้ปริมาณโอโซนอยู่ในช่วง 280 - 410 mg/hr, 230 - 300 mg/hr และ 100 - 170 mg/hr ตามลำดับ เพื่อเป็นทางเลือกที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงสำหรับเครื่องกำเนิดโอโซน การนำเสนอได้วิเคราะห์ออกแบบเครื่องกำเนิดโอโซนและวงจรแปลงผันกำลัง และวิเคราะห์ผลทดลองสำหรับเครื่องกำเนิดโอโซนและแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ได้สร้างขึ้น

Thesis	Comparative Studies of PWM,PDM and PS-PWM Control in High-Frequency High-Voltage LCC Resonant Full-Bridge Converters for an Ozone Generator
Student	Mr.Teeradate Jianwan
Student ID	53610518
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical of Engineering
Year	2013
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Anuwat Jangwanitlert

Abstract

This research presents the design and comparative studies of zone generator using the high-frequency and high-voltage LCC Resonant full-bridge converters. The control signals employ the Pulse-Width Modulation (PWM), Phase-Shifted PWM and Pulse Density Modulation (PDM) patterns in order to increase power density in electrodes of ozone generator. Three control signals are used to compare the results of ozone quantity. To simplify control signals, the microcontroller dsPIC30F2010 is used to generate. The switching frequency of the converter is close to the resonance frequency and higher at 20kHz, 21kHz, 22kHz, 23kHz and 24kHz. Then, the amount of ozone is produced and measured following by patterns of signals and frequency of the voltage supplied to the electrodes. The most ozone gas volume is from the signal PWM, PS-PWM and PDM, respectively and the ozone is increases followed by frequency. The signal of PWM, PS-PWM and PDM gives the amount of ozone in the range 280 - 410 mg / hr, 230 -300 mg / hr and 100 -170 mg / hr, respectively. In addition, the design of ozone generator, together with power conversion, is analyzed. The experimental results of ozone generator are analyzed as well.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้เครื่องมือที่ใช้ในการวัดปริมาณโอโซน

สุดท้ายนี้ต้องขอขอบคุณพ่อ คุณแม่ คุณพี่ และทุกคน ที่คอยเป็นกำลังใจและเป็นแรงผลักดันให้ข้าพเจ้าทำงานวิจัยชิ้นนี้ให้สำเร็จ

สำหรับคุณงามความดีอันที่ได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดาซึ่งเป็นที่ยรักและเคารพอย่างยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ธีระเดช เจียรวรรณ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 การดำเนินงานวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	3
1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้จากวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดโอโซน	5
2.1 บทนำ	5
2.2 กระบวนการสร้างก๊าซโอโซนโดยใช้โอเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนกันร่วม.....	6
2.2.1 วิธีการสร้างก๊าซโอโซน.....	7
2.2.2 ผลของความถี่สนามไฟฟ้าต่อแรงที่กระทำกับโอเล็กโตรนของโมเลกุลก๊าซ.....	8
2.2.3 โอเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนกันร่วม	9
2.3 หม้อแปลงความถี่สูงเพิ่มแรงดัน.....	13
2.4 อินเวอร์เตอร์เรโซแนนต์แบบ LCC	16
2.5 ทฤษฎีพื้นฐานทางด้านกำลังไฟฟ้า.....	20
2.6 พีดีบีแอลเอ็ม ฟลูบริดจ์คอนเวอร์เตอร์.....	21
2.7 พีดีเอ็ม ฟลูบริดจ์คอนเวอร์เตอร์.....	24
2.8 พีเอส-พีดีบีแอลเอ็ม ฟลูบริดจ์คอนเวอร์เตอร์.....	27
2.9 สรุป	30
บทที่ 3 การออกแบบเครื่องผลิตก๊าซโอโซน	32
3.1 บทนำ.....	32
3.2 โอเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนกันร่วมขนาด 2 ชั้น.....	32
3.3 หม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยประการ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.4 อินเวอร์เตอร์เรโซแนนต์แบบ LCC	41
3.5 วงจรควบคุมและสร้างสัญญาณ.....	42
3.6 วงจรขับนำเกิดด้วยไอซี TLP250.....	43
3.7 การสร้างสัญญาณ PWM.....	46
3.8 การสร้างสัญญาณ PDM.....	48
3.9 การสร้างสัญญาณ PS-PWM	51
3.10 สรุป	54
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลองของเครื่องผลิตก๊าซไอโซน	55
4.1 บทนำ.....	55
4.2 การวัดผลการทดลองทางไฟฟ้า	55
4.3 วิเคราะห์ผลการทดลองทางไฟฟ้า	75
4.4 การเก็บผลก๊าซไอโซนโดยการทดลองทางเคมี.....	77
4.5 วิเคราะห์ผลการทดลองทางเคมี	79
4.6 สรุป	79
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	80
เอกสารอ้างอิง.....	82
ภาคผนวก ก.	84
ภาคผนวก ข.	88
ภาคผนวก ค.	93
ประวัติผู้เขียน	108

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ระดับปริมาณก๊าซไอโซนและผลที่เกิดขึ้น (ข้อมูลจาก IOA).....	6
3.1 พารามิเตอร์ของระบบ.....	42
4.1 แสดงปริมาณการเกิดก๊าซไอโซนของรูปแบบสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 20 kHz-24 kHz.....	78
4.2 แสดงปริมาณการเกิดก๊าซไอโซนของรูปแบบสัญญาณ PDM ที่ความถี่ 20 kHz-24k Hz.....	78
4.3 แสดงปริมาณการเกิดก๊าซไอโซนของรูปแบบสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 20 kHz-24 kHz.....	78



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของเครื่องผลิตก๊าซไอโซน.....	5
2.2 กระบวนการเกิดก๊าซไอโซน.....	8
2.3 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในช่องว่างอากาศ.....	9
2.4 รูปทรงของอิเล็กโทรดแบบ (ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (ข) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ เล็กน้อย (ค) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง.....	10
2.5 อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม.....	11
2.6 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุเสมือนในชุดอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม.....	11
2.7 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของชุดอิเล็กโทรดเมื่อมองเป็นฉนวนในสนามไฟฟ้า.....	12
2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสที่ป้อนให้นวน.....	12
2.9 รูปหม้อแปลงไฟฟ้าแกน EE.....	13
2.10 วงจรสมมูลหม้อแปลงไฟฟ้า.....	15
2.11 วงจรกำลังของเครื่องกำเนิดก๊าซไอโซน.....	16
2.12 วงจรสมมูลของระบบ.....	16
2.13 วงจรสมมูลของระบบทางด้านปฏิกิริยา.....	16
2.14 วงจรสมมูลเรโซแนนต์.....	17
2.15 รูปแบบการจำลองค่าบรรทัดฐานของผลตอบสนองเชิงความถี่ระหว่าง V_{ab}/V_o กับ f_s/f_o	19
2.16 การไหลของกำลังไฟฟ้าจากอินพุตไปเอาต์พุต.....	20
2.17 กำลังไฟฟ้า.....	21
2.18 พัดเบิยูเอ็ม ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์.....	22
2.19 สัญญาณการทำงานของพัดเบิยูเอ็ม ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์.....	22
2.20 การทำงานของ PWM ที่สภาวะ 1 ถึง 6.....	23
2.21 การทำงานของสัญญาณ PDM.....	25
2.22 การทำงานของ PDM ที่สภาวะ 1 ถึง 8.....	26
2.23 การทำงานของสัญญาณ PS-PWM.....	27
2.24 การทำงานของ PS-PWM ที่สภาวะ 1 ถึง 8.....	29
3.1 โครงสร้างของเครื่องผลิตก๊าซไอโซน.....	32
3.2 ลักษณะของรูปทรงของอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมฉนวน 2 ชั้น.....	33
3.3 สัญญาณกระแสและแรงดันที่ชุดอิเล็กโทรดจากการทดสอบ.....	36
3.4 โครงสร้างแกนเฟอร์ไรท์ เบอร์ EE-80.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

3.5 วงจรสมมูลหม้อแปลงไฟฟ้าขณะยังไม่ได้ถ่ายโอนค่า.....	39
3.6 วงจรสมมูลของระบบขณะยังไม่ได้ถ่ายโอนค่า.....	40
3.7 วงจรสมมูลของระบบเมื่อมีการถ่ายโอนค่า	41
3.8 วงจรเรโซแนนต์.....	41
3.9 รูปวงจรไมโครโปรเซสเซอร์ dsPIC 30F2010.....	43
3.10 วงจรขับนำเกตโดยใช้ไอซีเบอร์ TLP250	44
3.11 วงจรภาคกำลัง.....	44
3.12 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของสัญญาณควบคุมทั้ง 3 แบบคือ PWM, PDM และ PS-PWM.....	45
3.13 คาบเวลาที่ใช้เขียนโปรแกรมรูปสัญญาณแบบ PWM.....	46
3.14 Flowchart การสร้างรูปสัญญาณแบบ PWM	48
3.15 คาบเวลาที่ใช้เขียนโปรแกรมรูปสัญญาณแบบ PDM.....	48
3.16 Flowchart การสร้างรูปสัญญาณแบบ PDM	50
3.17 ช่วงสัญญาณที่แบ่งเป็น 8 ช่วงเพื่อใช้ในการเขียนโปรแกรม.....	51
3.18 Flowchart การสร้างรูปสัญญาณแบบ PS-PWM.....	53
4.1 วงจรกำลังของเครื่องกำเนิดก๊าซไอโซน.....	55
4.2 การจำลองการทำงานของวงจรกำลังของเครื่องกำเนิดก๊าซไอโซน.....	56
4.3 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 20 kHz	56
4.4 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 20 kHz	56
4.5 สัญญาณกระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 20 kHz	57
4.6 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลองของสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 21 kHz	57
4.7 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 21 kHz.....	57
4.8 สัญญาณกระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 21 kHz	58

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.9 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลองของสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 22 kHz	58
4.10 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลอง ของสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 22 kHz.....	58
4.11 สัญญาณกระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์ (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลอง ของสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 22 kHz.....	59
4.12 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลอง ของสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 23 kHz.....	59
4.13 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลอง ของสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 23 kHz.....	59
4.14 สัญญาณกระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์ (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลอง ของสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 23 kHz.....	60
4.15 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลองของสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 24 kHz.....	60
4.16 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลอง ของสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 24 kHz.....	60
4.17 สัญญาณกระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์ (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลอง ของสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 24 kHz.....	61
4.18 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลองของสัญญาณ PDM ที่ความถี่ 20 kHz.....	62
4.19 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลอง ของสัญญาณ PDM ที่ความถี่ 20 kHz	62
4.20 สัญญาณกระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์ (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลอง ของสัญญาณ PDM ที่ความถี่ 20 kHz	62
4.21 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลองของสัญญาณ PDM ที่ความถี่ 21 kHz.....	63
4.22 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลอง ของสัญญาณ PDM ที่ความถี่ 21 kHz	63

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.23 สัญญาณกระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์ (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลอง ของสัญญาณ PDM ที่ความถี่ 21 kHz	63
4.24 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลองของสัญญาณ PDM ที่ความถี่ 22 kHz.....	64
4.25 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลอง ของสัญญาณ PDM ที่ความถี่ 22 kHz	64
4.26 สัญญาณกระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์ (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลอง ของสัญญาณ PDM ที่ความถี่ 22 kHz	64
4.27 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลองของสัญญาณ PDM ที่ความถี่ 23 kHz.....	65
4.28 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลอง ของสัญญาณ PDM ที่ความถี่ 23 kHz	65
4.29 สัญญาณกระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์ (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลอง ของสัญญาณ PDM ที่ความถี่ 23 kHz	65
4.30 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลองของสัญญาณ PDM ที่ความถี่ 24 kHz.....	66
4.31 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลอง ของสัญญาณ PDM ที่ความถี่ 24 kHz	66
4.32 สัญญาณกระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์ (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลอง ของสัญญาณ PDM ที่ความถี่ 24 kHz	66
4.33 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลองของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 20 kHz.....	67
4.34 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 20 kHz.....	68
4.35 สัญญาณกระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์ S_1 กับ S_2 (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 20 kHz.....	68
4.36 สัญญาณกระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์ S_3 กับ S_4 (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 20 kHz.....	68

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.37 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลองของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 21 kHz.....	69
4.38 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 21 kHz.....	69
4.39 สัญญาณกระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์ S_1 กับ S_2 (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 21 kHz.....	69
4.40 สัญญาณกระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์ S_3 กับ S_4 (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 21 kHz.....	70
4.41 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลองของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 22 kHz.....	70
4.42 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 22 kHz.....	70
4.43 สัญญาณกระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์ S_1 กับ S_2 (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 22 kHz.....	71
4.44 สัญญาณกระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์ S_3 กับ S_4 (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 22 kHz.....	71
4.45 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลองของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 23 kHz.....	71
4.46 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 23 kHz.....	72
4.47 สัญญาณกระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์ S_1 กับ S_2 (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 23 kHz.....	72
4.48 สัญญาณกระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์ S_3 กับ S_4 (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 23 kHz.....	72
4.49 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลองของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 24 kHz.....	73
4.50 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน	
(ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 24 kHz.....	73

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.51 สัญญาณกระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์ S_1 กับ S_2 (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 24 kHz.....	73
4.52 สัญญาณกระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์ S_3 กับ S_4 (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 24 kHz.....	74
4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง (V_{rms}) กับ ความถี่ (ก) จากการจำลอง (ข) จากการทดลอง.....	75
4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ (W) กับ ความถี่ (ก) จากการจำลอง (ข) จากการทดลอง.....	75
4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ (%) กับความถี่ (ก) จากการจำลอง (ข) จากการทดลอง.....	76
4.56 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซไอโซนกับความถี่ในแต่ละรูปแบบสัญญาณ	79

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันได้มีการนำก๊าซโอโซน (Ozone Gas) มาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย เช่นใน โรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีการบำบัดน้ำเสีย โรงงานผลิตน้ำแข็ง ฆ่าเชื้อโรค เครื่องมือแพทย์ การฟอกอากาศให้บริสุทธิ์ เป็นต้น โอโซนมีข้อดีกว่าสารอื่นๆที่ใช้งาน คือไม่ก่อให้เกิดมลพิษตกค้างแต่ ในขณะเดียวกันก๊าซโอโซนก็เป็นอันตรายได้เช่นกันถ้าได้รับในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการ ระคายเคืองกับเยื่อผิวหนัง

การประยุกต์ใช้งานแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (Flyback converter) แปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่และแรงดันเอาต์พุตสูง ป้อนให้ อิเล็กทรอนิกส์เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าเพื่อใช้ผลิตก๊าซโอโซน แต่เนื่องจากวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ให้ กำลังงานไม่สูงมากนักและแรงดันตกคร่อมสวิตช์สูงทำให้สวิตช์เกิดความเสียหายได้ง่าย จึงจำเป็นต้อง ใช้สวิตช์ที่มีพิกัดแรงดันสูงๆ พวก IGBT ซึ่งมีราคาแพง[1] ต่อมาได้มีการพัฒนาแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เป็นแบบ ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (Full Bridge Converter) เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าที่สูง แต่ยังมี ปัญหาเรื่องการสูญเสียที่สวิตช์และเพื่อให้ประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์สูง ได้มีการวิเคราะห์เรโซแนนซ์เข้ามาช่วย โดยการต่อตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ หรือตัวเก็บประจุไฟฟ้าเรโซแนนซ์ อนุกรมกับ โหลดทางด้านเอาต์พุต ซึ่งการวิเคราะห์เรโซแนนซ์ด้วยวิธีนี้ในทางปฏิบัติทำได้ยากเนื่องจากเอาต์พุตมี แรงดันและความถี่สูง[2] เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์เรโซแนนซ์ โดยการย้ายพารามิเตอร์ของหม้อ แปลงและโหลดไปไว้ทางด้านอินพุตของหม้อแปลง สามารถวิเคราะห์เรโซแนนซ์ได้ง่ายขึ้น โดยใช้ ความเหนี่ยวนำของหม้อแปลงเป็นค่าความเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์และความจุไฟฟ้าของโหลดโอโซนเป็น ค่าความจุไฟฟ้าเรโซแนนซ์ข้อดีก็คือไม่ต้องเพิ่มตัวเหนี่ยวนำหรือตัวเก็บประจุเพิ่มเข้าไป แต่มีข้อเสียคือ ไม่สามารถกำหนดความถี่เรโซแนนซ์ได้ ความถี่เรโซแนนซ์ขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุ ไฟฟ้าของพารามิเตอร์วงจร[3] เครื่องผลิตก๊าซโอโซนมีการใช้งานในลักษณะที่หลากหลาย ดังนั้น จะต้องสามารถปรับปริมาณโอโซนได้เพื่อให้เหมาะสมกับงาน ซึ่งปัจจุบันได้มีการสร้างแหล่งจ่าย กำลังไฟฟ้าให้กับเครื่องกำเนิดโอโซนหลายรูปแบบเช่น พัลส์เบรียเอ็ม ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (PWM Full Bridge Converter) สามารถปรับปริมาณโอโซนได้โดยการปรับความถี่ พัลส์เบรียเอ็ม ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (PDM Full Bridge Converter) สามารถปรับปริมาณโอโซนได้โดยการปรับจำนวนลูก คลื่น[4] และ พีเอส- พัลส์เบรียเอ็ม ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (PS-PWM Full Bridge Converter)) สามารถปรับปริมาณโอโซนได้โดยการปรับเฟสชิฟ [5]

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทดลองใช้รูปสัญญาณ ฟีดแบ็คเบิยูเอ็ม พูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (PWM Full Bridge Converter) ฟีดแบ็คเบิยูเอ็ม พูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (PDM Full Bridge Converter) และ ฟีดแบ็คเบิยูเอ็ม พูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (PS-PWM Full Bridge Converter) ในการสร้างสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดก๊าซโอโซนเพื่อเปรียบเทียบทางเคมีคือปริมาณโอโซนและทางไฟฟ้าของแต่ละรูปสัญญาณ ในขณะที่เดียวกันสามารถนำข้อดีของวงจรเรโซแนนซ์คอนเวอร์เตอร์มาประยุกต์ใช้เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความถี่เรโซแนนซ์

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อศึกษาหลักการทำงาน วิเคราะห์และออกแบบ เครื่องผลิตก๊าซโอโซนและแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบ Pulse-width Modulation (PWM), Pulse-Density Modulation (PDM) และ Phase-Shifted PWM (PS-PWM) พูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์เพื่อนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับเครื่องผลิตก๊าซโอโซน โดยแต่ละสัญญาณสามารถใช้กับ พูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ชุดเดียวกัน เพียงปรับเปลี่ยนรูปแบบวิธีการควบคุมการขับสัญญาณเกตของอุปกรณ์สวิตซ์เพื่อเปลี่ยนรูปแบบสัญญาณ ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอนี้มีการทำงานดีกว่าฮาร์ดพวลิตจ์คอนเวอร์เตอร์คือที่แรงดันอินพุตกระแสตรงเท่ากัน จะให้กำลังสูงกว่า โดยที่ผ่านมามีการศึกษาทดลองรูปแบบสัญญาณแบบ PWM โดยการปรับความถี่หรือปรับดิวตี้ไซเคิล เพื่อดูปริมาณโอโซน มีการศึกษาทดลองรูปแบบสัญญาณแบบ PS-PWM โดยการปรับความถี่หรือปรับเฟสชิฟ เพื่อดูปริมาณโอโซน และมีการศึกษาทดลองรูปแบบสัญญาณแบบ PDM โดยการปรับความถี่หรือปรับจำนวนลูกคลื่น เพื่อดูปริมาณโอโซน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเปรียบเทียบทางไฟฟ้าและทางด้านปริมาณโอโซนว่าสัญญาณแบบไหนที่เหมาะสมกับโหลดโอโซนมากที่สุดในทางไฟฟ้าและทางด้านปริมาณโอโซนโดยใช้โหลดโอโซนหลอดเดียวกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำในเชิงศึกษาเปรียบเทียบทางด้านไฟฟ้าและทางด้านปริมาณโอโซนของสัญญาณ แบบ PWM, PS-PWM และ PDM พูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ด้วยการปรับความถี่ และใช้ความถี่สวิตซ์ในช่วงที่ใกล้กับความถี่เรโซแนนต์ เพื่อลดการสูญเสียของสวิตซ์และให้ได้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์สูงกว่าคอนเวอร์เตอร์ทั่วไป

1.3 การดำเนินงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาข้อมูลจากตำรา บทความและวารสารที่สามารถค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับวิธีการสร้างก๊าซโอโซนและวิธีการสร้างสัญญาณควบคุมแบบ PWM, PDM และ PS-PWM

1.3.2 ออกแบบและสร้างเครื่องผลิตก๊าซโอโซน

1.3.3 ออกแบบและสร้างวงจรไฟฟ้า

1.3.4 ทดสอบเครื่องผลิตก๊าซโอโซน และวงจรในแต่ละภาคส่วน

1.3.5 เก็บผลการทดลองรูปสัญญาณทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.6 เก็บผลการทดลองปริมาณก๊าซไอโซนทางเคมี

1.3.7 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

1.3.8 เขียนวิทยานิพนธ์

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.4.1 ออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดไอโซน

1.4.2 สร้างวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์เป็นแหล่งจ่ายให้กับเครื่องกำเนิดไอโซน

1.4.3 ออกแบบสร้างชุดสัญญาณควบคุมแบบ PWM, PDM และ PS-PWM

1.4.4 สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้

1.4.5 สัญญาณ PDM ทำงานที่ 5 คาบเวลา และหยุดทำงานเป็นเวลา 5 คาบเวลา ทุกความถี่

1.4.6 สัญญาณ PS-PWM เฟสชิฟเป็นมุมคงที่ 36° ทุกความถี่

1.4.7 สัญญาณทุกรูปแบบมีแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 2.1 kV

1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบ เพื่อสร้างเครื่องกำเนิดไอโซนและวงจรแบบ PWM, PDM และ PS-PWM ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ เป็นแหล่งจ่ายกำลังให้กับเครื่องผลิตก๊าซไอโซนรายละเอียดจะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์แบ่งเป็น 5 บท ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษางานวิจัย วิธีการวิจัย ขอบเขตวิทยานิพนธ์ ตลอดจนประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดไอโซนคุณสมบัติและการเกิดก๊าซไอโซน กระบวนการที่จะใช้พลังงานจากแหล่งจ่ายมาผลิตก๊าซไอโซนและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการสร้างก๊าซไอโซน การใช้หม้อแปลงความถี่สูงเพิ่มแรงดันเพื่อป้อนให้กับอิเล็กทรอนิกส์สร้างสนามไฟฟ้า โครงสร้างของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า รวมทั้งรูปแบบการสวิตชิงของ PWM, PDM และ PS-PWM ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์แรงดันสูงความถี่สูงแบบ LCC เรโซแนนซ์

บทที่ 3 การออกแบบเครื่องผลิตก๊าซไอโซนเลือกและคำนวณขนาดของอิเล็กทรอนิกส์ ออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน สร้างวงจร PWM, PDM และ PS-PWM ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์แรงดันสูงความถี่สูงแบบ LCC เรโซแนนซ์

บทที่ 4 การทดสอบการทำงานของระบบและผลการทดลอง เก็บผลทางไฟฟ้าและทางเคมี ควบคุมกันไ้โดยการเปลี่ยนรูปแบบสัญญาณและปรับความถี่ และวิเคราะห์ผลการทดลอง

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะต่างๆ

1.6 ประโยชน์ที่ได้จากวิทยานิพนธ์

1.6.1 สามารถศึกษาเปรียบเทียบรูปแบบสัญญาณวงจร PWM, PDM และ PS-PWM ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ทั้งทางเคมีและทางไฟฟ้าของเครื่องผลิตก๊าซโอโซนได้

1.6.2 สามารถใช้ dsPIC30F2010 สร้างสัญญาณควบคุมแบบ PWM, PDM และ PS-PWM ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ภายในตัวเดียวกันซึ่งทำให้ประหยัดเงินและเวลา

1.6.3 ลดกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์สวิตซ์ได้

1.6.4 ไม่จำเป็นต้องเพิ่มอุปกรณ์ภายนอกเข้าไปในกรณีเปลี่ยนรูปสัญญาณขับเคลื่อนจึงไม่เป็นการเพิ่มทุน



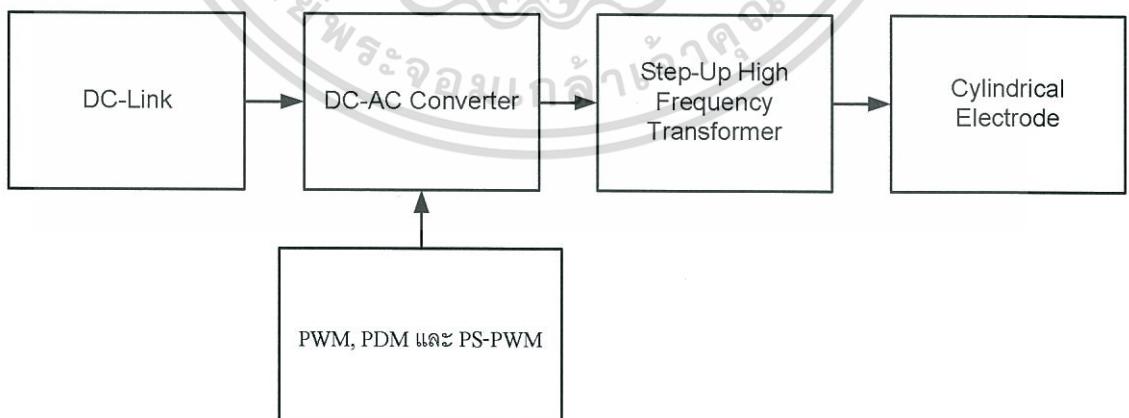
บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดโอโซน

2.1 บทนำ

โดยทั่วไปเครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบ่งการใช้งานออกเป็น 2 แบบ คือการใช้งานในแหล่งที่มีคนอาศัยอยู่ การใช้งานแบบนี้จำเป็นที่จะต้องควบคุมปริมาณการเกิดก๊าซไม่ให้มากเกินไปจนเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต และแบบที่สองคือการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำสิ่งแวดล้อมหรืองานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ลักษณะงานแบบนี้ต้องการปริมาณโอโซนเป็นจำนวนมาก ดังนั้นในบริเวณพื้นที่ทำงานต้องไม่มีสิ่งมีชีวิตอยู่หรือสร้างให้เป็นพื้นที่ปิดล้อม

ในงานวิจัยนี้เน้นผลิตโอโซนในปริมาณที่มากเพื่อสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายซึ่งเครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบบนี้มีขนาดใหญ่และใช้กำลังไฟฟ้าสูง โดยโครงสร้างประกอบด้วยชุดอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันรวม (Cylindrical Electrode) หม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน (Step-Up High Frequency Transformer) และวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าดีซี-เอซี (DC-AC Converter) พูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ โดยใช้วิธีการควบคุมสัญญาณแบบ PWM, PDM และ PS-PWM พูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ในรูปที่ 2.1 เพื่อให้เข้าใจกระบวนการเกิดโอโซนมีที่มาเช่นไรและชุดอิเล็กโทรดทรงกระบอกสร้างก๊าซโอโซนได้อย่างไร จะขอกล่าวถึงกระบวนการสร้างก๊าซโอโซนโดยใช้อิเล็กโทรดเป็นอันดับแรก ต่อมาจะมาอธิบายถึงหม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบดีซี-เอซี และอธิบายวงจรเรโซแนนซ์คอนเวอร์เตอร์แบบ LCC และสุดท้ายอธิบายวงจรแบบ PWM, PDM และ PS-PWM พูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเครื่องผลิตก๊าซโอโซน

2.2 กระบวนการสร้างก๊าซโอโซนโดยใช้อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันร่วม

ก๊าซโอโซนคืออะตอมของออกซิเจน 3 อะตอมรวมกันเป็น 1 โมเลกุลของโอโซน (O_3) ตามปกติออกซิเจนจะประกอบกันในลักษณะ 2 อะตอม เป็น 1 โมเลกุลออกซิเจน (O_2) ซึ่งมีคุณสมบัติต่างกันมากคือ O_2 จะคงสถานะอยู่ได้หลายสภาวะหรือ กล่าวได้ว่ามีเสถียรนั่นเอง แต่ O_3 จะไม่คงตัวหรือไม่เสถียร เนื่องจากปัจจัยต่างๆเช่น อุณหภูมิ ความร้อน ความดัน และการสัมผัสกับสารที่มีพลังงานต่ำกว่าจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) อย่างรวดเร็ว ซึ่ง O_3 มีปฏิกิริยาสูงถึง 2.07 V (Oxidation Potential) ถ้าปราศจากความเข้าใจ การนำไปใช้งานจะเป็นอันตรายมาก ดังนั้น IOA (International Ozone Association) จึงระบุระดับความเป็นพิษของโอโซนและผลที่เกิดขึ้นไว้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ระดับปริมาณก๊าซโอโซนและผลที่เกิดขึ้น (ข้อมูลจาก IOA)

ระดับปริมาณโอโซน (ppm : part per million)	ผลกระทบ
0.001-0.125	ระดับที่พบในชั้นบรรยากาศ คำนีแปรผันตามตำแหน่งและสภาพบรรยากาศแวดล้อม
0.05	ระดับสูงสุดที่ผลิตจาก Electronic air cleaner และอุปกรณ์ภายในบ้าน
0.1	ระดับสูงสุดที่ยอมให้มีในบรรยากาศ บริเวณอุตสาหกรรมและที่สาธารณะ
0.25	เริ่มปรากฏต่อสิ่งมีชีวิตที่สัมผัสโดยตรง ในพืชเกิดจุดดำ สีซีด มีใบตาย ในสัตว์เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินหายใจ
0.5	เริ่มมีอากาศปวดศีรษะ ปวดถูกทำลาย ติดเชื้อทางเดินหายใจ
1.00-2.00	ในการทดสอบ การสูดดมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เกิดอาการป่วยคือ ปวดศีรษะ ปวดหน้าอก รุนแรงและทางเดินหายใจแสบผา
1.4-5.6	การทดสอบกับต้นถั่วพบว่าใน 70 วินาที ใบถั่วเกิดอาการป่วยรุนแรง
25 up	เป็นอันตรายเฉียบพลันต่อสิ่งมีชีวิต ในการทดลองกับสัตว์พบอาการป่วยซึ่งน่าจะเป็นขั้นสุดท้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียรที่อุณหภูมิห้องและความดันในชั้นบรรยากาศ มีกลิ่นเฉพาะตัว มีสีฟ้า มวลโมเลกุลเท่ากับ 47.998 g/mol จุดหลอมเหลวที่ -192.5 องศาเซลเซียส จุดเดือดที่ 111.9 องศาเซลเซียส โดยอยู่ในรูปของของเหลวสีน้ำเงินเข้ม มีความเร็วในการทำปฏิกิริยาเคมีทั้งในสารละลายและอากาศ ก๊าซโอโซนจะสลายตัวได้อย่างรวดเร็ว โดยเปลี่ยนเป็นก๊าซ ออกซิเจนเมื่อสัมผัสกับริตดิช (Reduce) หรือได้รับความร้อน

ลักษณะการเกิดโอโซนแบ่งเป็น 2 แบบคือ เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติที่จากการรับพลังงานของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) ที่ความยาวคลื่นประมาณ 200 นาโนเมตร หรือพลังงานจากฟ้าผ่าและมนุษย์สร้างขึ้นโดยอาศัยพลังงานซึ่งเลียนแบบธรรมชาติ ส่วนใหญ่จะใช้พลังงานจากสนามไฟฟ้ามากระทำต่อก๊าซออกซิเจนเพราะในปัจจุบันสามารถจัดหาและสร้างแหล่งจ่ายได้ง่ายโดยใช้อิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้โมเลกุลของก๊าซได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า

2.2.1 วิธีการสร้างก๊าซโอโซน

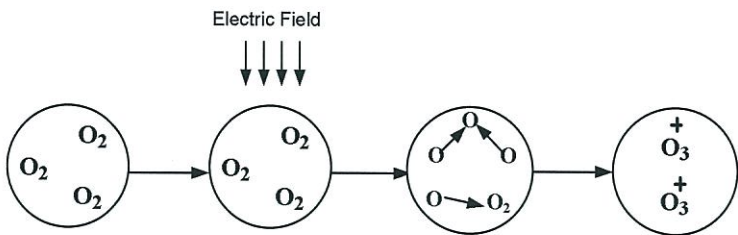
ก๊าซโอโซนคือก๊าซที่จับตัวกันของออกซิเจน 3 อะตอม การที่จะทำให้ออกซิเจนแตกพันธะได้นั้น จะต้องป้อนพลังงานจากภายนอกเข้าไปกระตุ้นให้ออกซิเจน (O_2) แตกพันธะออกเป็นอะตอมอิสระของออกซิเจน (O) แล้วจึงรวมตัวกับ O_2 และได้ O_3 ดังรูปที่ 2.2 โยอาศัยพลังงานจากสนามไฟฟ้าเพื่อให้เกิดกระบวนการ ไอออไนเซชัน (Ionization) หรือกระบวนการที่โมเลกุลของก๊าซได้รับพลังงานเพียงพอ จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไป 1 อิเล็กตรอนโมเลกุลของก๊าซนั้นมีความประจุเป็นบวกและอิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุลของก๊าซโดยได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าในขณะที่วิ่งเข้าหาศักย์ไฟฟ้าด้านบวก พลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับเป็นพลังงานจลน์และต้องมีความมากกว่าพลังงานไอออไนเซชัน

ในก๊าซประกอบด้วยอนุภาคต่างๆ หลายชนิดทั้งที่มีประจุ (+,-) และอนุภาคที่เป็นกลาง การเคลื่อนที่ของอนุภาคเหล่านี้เป็นแบบสุ่ม สนามไฟฟ้าจากภายนอกทำให้อนุภาคประจุลบที่มีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับประจุบวกเคลื่อนที่อย่างมีทิศทาง จึงทำให้มันมีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่เกิดขึ้นในการแตกตัวของก๊าซ เช่นเดียวกันในการผลิตโอโซนพลังงานหลักที่ทำให้ ออกซิเจนเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างส่งถ่ายมาจากการชนอิเล็กตรอนกับโมเลกุลของออกซิเจน

กระบวนการไอออไนเซชันโดยการชน (Collision Ionization) คือกระบวนการชนถ่ายทอดพลังงานจลน์ ของอนุภาคที่มีมวลซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วค่าๆ หนึ่งไปชนกับอนุภาคที่มีมวลอีกตัวหนึ่ง ถ้าพลังงานที่ถ่ายทอดไม่มากพอถึงพลังงานที่ทำให้เกิดการตื่นกระตุ้น (Excitation) หรือ ไอออไนเซชัน เรียกว่า การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision) แต่การชนของอนุภาคถ้าทำให้โมเลกุลของก๊าซที่ถูกชน ได้รับพลังงานจากอนุภาคที่มาชนมากพอถึงพลังงานที่ทำให้เกิดการกระตุ้น เรียกว่า การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic collision) แสดงว่า กระบวนการเริ่มขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนซึ่งได้รับ

พลังงานจากสนามไฟฟ้าวิ่งชนโมเลกุลของก๊าซในระหว่างที่ถูกเร่งให้วิ่งเข้าหาแอโนดอิเล็กตรอนที่วิ่งนี้ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้รับพลังงานจลน์จากสนามไฟฟ้า ถ้าพลังงานนี้มากกว่าพลังงานไอออไนเซชันของก๊าซ ก็จะเกิดกระบวนการไอออไนเซชันขึ้น



รูปที่ 2.2 กระบวนการเกิดก๊าซโอโซน

ขั้นตอนการสร้างก๊าซโอโซนประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

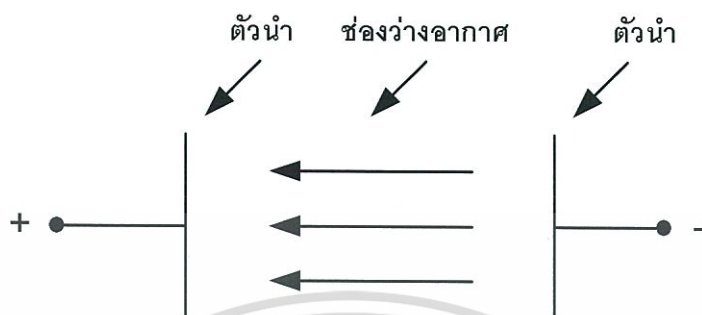
1. การแตกตัวโครงสร้างโมเลกุลก๊าซออกซิเจนเป็นอะตอมอิสระ(Dissociation Reaction)
ขั้นตอนนี้คือปฏิกิริยาดูดพลังงาน แหล่งพลังงานที่พิจารณาคือการชนถ่ายพลังงานของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้า
2. การจับตัวของอะตอมอิสระ (O) ในข้อที่ 1 กับโมเลกุลก๊าซออกซิเจน (O_2) เป็นโอโซน (Ozone Generation)

ในการผลิตโอโซนนั้นย่านพลังงานที่ต้องใช้คือ 5.58 kW.h/m^3 [8] แต่เนื่องจากในอากาศมีออกซิเจนอยู่ประมาณ 21% ดังนั้นคิดเทียบแล้วพลังงานที่จำเป็นต้องใช้คือ 1.169 kW.h/m^3 จึงเพียงพอต่อการเกิดโอโซน

2.2.2 ผลของความถี่สนามไฟฟ้าต่อแรงที่กระทำกับอิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซ

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกให้กับช่องว่าง อิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซบรรจุอยู่ เกิดสนามไฟฟ้าภายในช่องว่าง อิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้ามากเพียงพอที่จะหลุดออกมาจากโมเลกุลก๊าซและเคลื่อนที่เข้าหาศักย์ไฟฟ้าขั้วบวกของสนามไฟฟ้าเป็นระยะทางระหว่างอิเล็กตรอนกับขั้วบวกของช่องว่างอากาศด้วยความเร็วค่าๆ หนึ่ง ในระหว่างทางที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปนั้นอาจเกิดการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโมเลกุลอื่นได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ถ้าระยะ มีความยาวมากขึ้น โดยอิเล็กตรอนยังมีพลังงานในการชนมากพอให้กับอิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซที่ถูกชนหลุดออกมานั้นจึงหมายความว่า แรงภายนอกที่กระทำต่ออิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อทำการกลับขั้วศักย์ไฟฟ้าอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวกเดิมก่อนหน้านี้จะถูกวางตัวใหม่ในทิศทางตรงข้าม และเคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวกใหม่ อีกด้านหนึ่ง เมื่อเพิ่มความเร็วในการกลับขั้วในช่วงเวลาหนึ่งจึงเหมือนเป็นการเพิ่มระยะทางที่อิเล็กตรอนต้องเคลื่อนที่ออกไป

โดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นก็จะได้แรงภายนอกที่กระทำต่ออิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังนั้นการเพิ่มความถี่จึงเป็นการเพิ่มแรงภายนอกที่กระทำต่ออิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซด้วยเช่นกัน



รูปที่ 2.3 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในช่องว่างอากาศ

2.2.3 อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันแนบร่วม

ในกระบวนการสร้างไอโซน สิ่งที่สำคัญที่สุดคือ พลังงานที่กระทำต่อโมเลกุลของก๊าซออกซิเจน เพื่อให้เสถียรภาพในการจับตัวกันระหว่างโมเลกุลลดลง พลังงานจากสนามไฟฟ้าเป็นตัวแปรสำคัญในการส่งผ่านพลังงานจากภายนอกสู่โมเลกุลของก๊าซ วิธีนี้จะทำให้โมเลกุลไม่เสถียร จำเป็นต้องใช้กระบวนการแยกอิเล็กตรอนของก๊าซออกมา ขั้นตอนดังกล่าวอาศัยชุดอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันแนบร่วม เป็นตัวสร้างสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงและสามารถที่จะให้อากาศไหลผ่านอิเล็กโทรดได้อย่างเหมาะสม

1. สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง

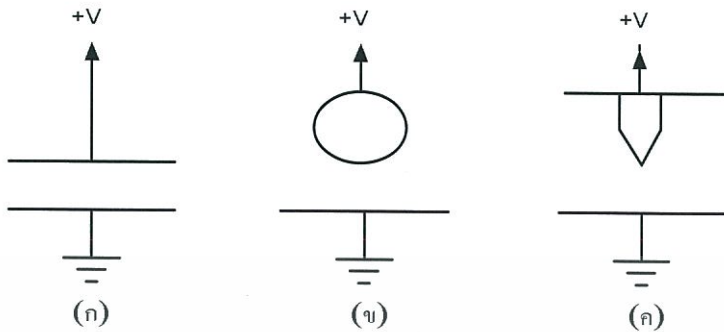
สนามไฟฟ้านั้นแบ่งได้เป็น 3 แบบคือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยและไม่สม่ำเสมอสูงดังรูปที่ 2.4 ในที่นี้จะกล่าวถึง สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเพียงอย่างเดียว เพราะการนำมาใช้งานมีประโยชน์อย่างมาก

สนามไฟฟ้าแบบนี้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับตำแหน่งและรูปทรงเลขาคณิต ของตัวนำไฟฟ้า โดยทั่วไปตัวนำไฟฟ้าแท่งปลายแหลมจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงที่สุด ดังรูปที่ 2.4 (ค) กรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงก่อนเกิดการแบรกดาวนจ์จะมีกระแสไหลผ่านช่องว่างอากาศเรียกว่า กระแสโคโรนา (Corona Current) ที่บริเวณผิวปลายแหลมของตัวนำจะมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่สุด แต่จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อวัดที่ระยะห่าง

ออกมา ดังนั้นจึงไม่เกิดการแบรกดาวนจ์ขึ้นถึงแม้ว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าวิกฤตก็ตามในขณะเดียวกันจะเกิดการดิสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ขึ้นในช่องว่างอากาศ เรียกว่า การดิสชาร์จบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Partial Discharge) การดิสชาร์จนี้จะไม่เกิดขึ้นตลอดทั้งแนวของสนามไฟฟ้าและอาจเกิดขึ้นเป็นช่วงหรือต่อเนื่อง ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดกระแสไหลได้



รูปที่ 2.4 รูปทรงของอิเล็กโทรดแบบ (ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (ข) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (ค) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง

2. อิเล็กโทรดทรงกระบอกแกนร่วมฉนวน 2 ชั้น

รูปทรงของอิเล็กโทรดจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เท่ากัน โดยนำกระบอกฉนวนที่มีขนาดเล็กกว่าซ้อนเข้าไปข้างใน โดยใช้แกนกลางร่วมกันดังรูปที่ 2.5 สนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดชนิดนี้อยู่ในแนวรัศมีของพื้นผิวทรงกระบอก ดังนั้นจึงมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันตลอดทั้งพื้นผิว ในกรณีที่นำวัสดุฉนวนต่างชนิดและค่าเปอร์มิตติวิตี (ϵ) ไม่เท่ากันซ้อนกันจึงกลายเป็นการนำสารไดอิเล็กตริก 2 ชนิดวางเรียงกันในสนามไฟฟ้า ดังนั้นเสมือนมีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกันอยู่คือ C_1 และ C_2 โดยแสดงในรูปที่ 2.6 สามารถหาได้จากสมการ (2.1) และ (2.2) [7]

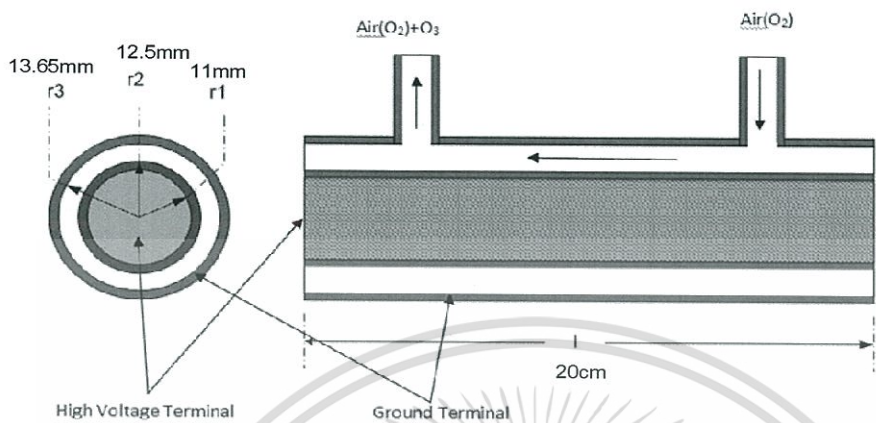
$$C_1 = \frac{2 \times \pi \times \epsilon_{r_1} \times \epsilon_0 \times l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.1)$$

$$C_2 = \frac{2 \times \pi \times \epsilon_{r_2} \times \epsilon_0 \times l}{\ln \frac{r_3}{r_2}} \quad (2.2)$$

- เมื่อ
- C_1 = ค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนชั้นที่ 1 หน่วยเป็น (F)
 - C_2 = ค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนชั้นที่ 2 หน่วยเป็น (F)
 - ϵ_{r_1} = ค่าค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวนชั้นที่ 1 หน่วยเป็น (F/m)
 - ϵ_{r_2} = ค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวนชั้นที่ 2 หน่วยเป็น (F/m)
 - ϵ_0 = ค่าเปอร์มิตติวิตีของฟรีสเปซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

l = ความยาวของชุดอิเล็กโทรดหน่วยเป็น (m)
 r_1 = รัศมีด้านในของฉนวนชั้น 1



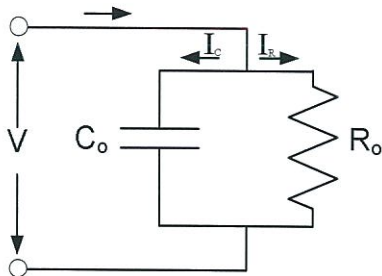
รูปที่ 2.5 อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม



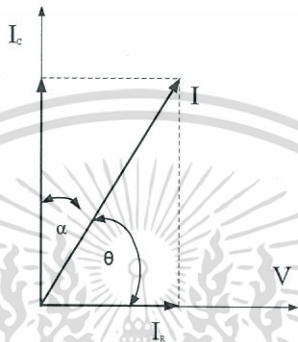
รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุเสมือนในชุดอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

เนื่องจากอากาศมีสภาพความเป็นฉนวน เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าจะเกิดการนำไฟฟ้าขึ้นเกิดมีกระแสไหลผ่าน สนามไฟฟ้าแบบมีขั้วนั้นอิเล็กตรอนจะถูกแรงจากสนามไฟฟ้ากระทำให้เกิดทิศทางและวางตัวอยู่ในแนวของสนามไฟฟ้า เมื่อขั้วของสนามไฟฟ้าสลับไปมาเป็นผลให้การวางตัวของอิเล็กตรอนก็สลับไปมาเช่นกันทำให้เกิดกำลังสูญเสียขึ้น ดังนั้นพารามิเตอร์ของอิเล็กโทรดจึงมองว่ามีค่าความต้านทานซึ่งเป็นตัววัดกำลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนถูกต้องชานอยู่กับค่าตัวเก็บประจุดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยในทางปฏิบัติเมื่อต้องการหาค่ากำลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกสามารถใช้เครื่องมือวัดที่เรียกว่า เซอริงบริดจ์ (Schering Bridge) โดยการวัดค่ามุมต่างเฟสระหว่างกระแสและแรงดันแล้วนำไปลบกับ 90° ให้อยู่ในรูปของ $\tan(\alpha)$ เรียกว่า แฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก โดยมุม α เรียกว่า มุมกำลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก [7] แสดงในรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของชุดอิเล็กทรอนิกส์เมื่อมองเป็นฉนวนในสนามไฟฟ้า



รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสที่ป้อนให้ฉนวน

จากวงจรสมมูลรูปที่ 2.7 เป็นวงจร RC ขนาน เมื่อป้อนแรงดันรูปไซน์ (Sin Wave) ให้กับวงจร กระแสที่ไหลในวงจรเป็นรูปคลื่นไซน์ที่มีมุมต่างเฟสกับแรงดันเป็นมุม θ โดย [9]

แรงดันอินพุตที่ป้อน

$$v(t) = v_m \sin(\omega t)$$

จะได้สัญญาณกระแส

$$i(t) = i_m \sin(\omega t + \theta)$$

จากรูปที่ 2.8 หาค่า R_o และ C_o ได้จากสมการ (2.3) และ (2.4)

โดย
$$R_o = \frac{V_m}{I_m \cos(\theta)} \tag{2.3}$$

และ
$$C_o = \frac{1}{2 \times \pi \times f \times X_c} \tag{2.4}$$

เมื่อ
$$X_{C_o} = \frac{V_m}{I_m \sin(\theta)} \tag{2.5}$$

หาค่ามุม α ได้โดย $\alpha = 90^\circ - \theta$

ดังนั้น
$$\tan(\alpha) = \frac{R_o}{X_{C_o}} \tag{2.6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

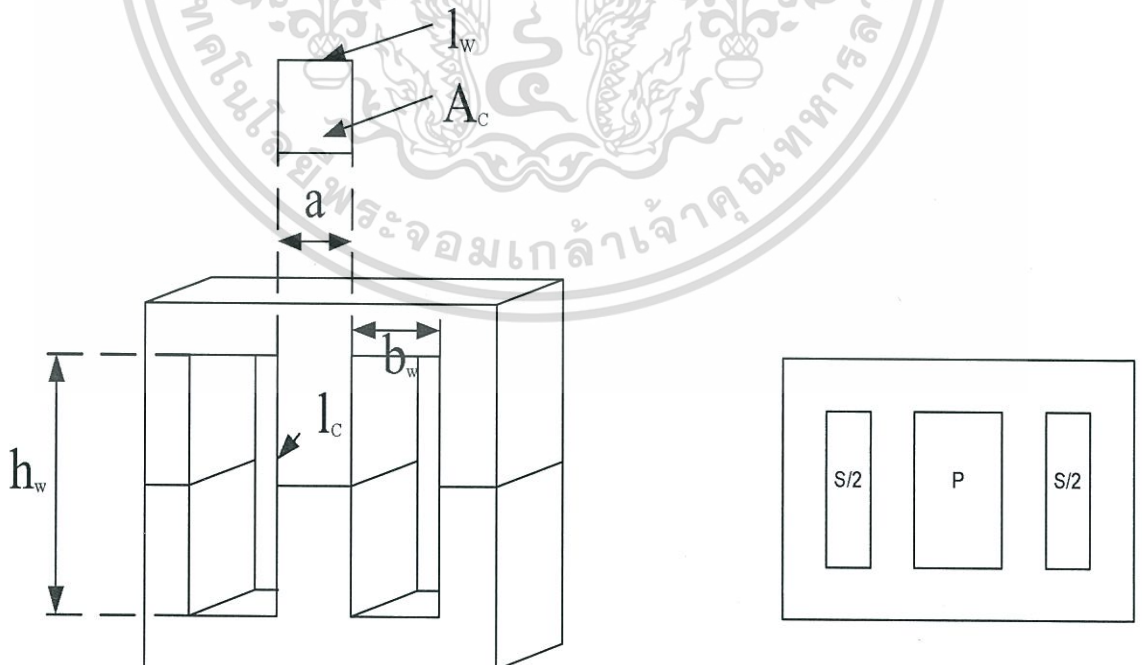
ความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดใดๆ ในฉนวนแต่ละชั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.7) [9]

$$E_{r_x} = \frac{\varepsilon_{r_1} \times \varepsilon_{r_2} \times V}{\varepsilon_x \times r_x \times \left(\varepsilon_{r_1} \times \ln \frac{r_3}{r_2} + \varepsilon_{r_2} \times \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (2.7)$$

เมื่อ E_{r_x} = ความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดใดๆ (kV/m)
 V = แรงดันภายนอกที่ป้อนให้กับชุดอิเล็กทรอนิกส์ (kV)
 r_x = รัศมีที่จุดใด ๆ (m)
 ε_x = ค่าเปอร์มิตติวิตีที่ฉนวนชั้นใดๆ (F/m)

2.3 หม้อแปลงความถี่สูงเพิ่มแรงดัน

การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปสู่อิเล็กทรอนิกส์เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าอาศัยหม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน จากข้อ 2.2 แรงดันเอาต์พุตที่ป้อนให้กับอิเล็กทรอนิกส์มีขนาดสูงมาก ในขณะที่แรงดันอินพุตที่ได้จากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีขนาดเท่ากับ 310 V และมีความถี่สวิตซ์ใช้งานสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องให้หม้อแปลงความถี่สูงเพิ่มแรงดันขึ้นไป แกนของหม้อแปลงที่ใช้งานความถี่สูงโดยส่วนมากมักใช้วัสดุที่ทำจากสารจำพวกเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic Material) ซึ่งมีคุณสมบัติทางด้านค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง แต่มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กต่ำ



รูปที่ 2.9 รูปหม้อแปลงไฟฟ้าแกน EE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy Current) น้อยมาก ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องทำเป็นแผ่นบางเรียงซ้อนกันเหมือนหม้อแปลงแกนเหล็กทั่วไป ลดความยุ่งยากในการประกอบและติดตั้ง

หม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญดังนี้ ขดลวดปฐมภูมิ, ขดลวดทุติยภูมิ, และแกนเฟอร์ไรท์ ในการออกแบบหม้อแปลงอันดับแรก ต้องกำหนดพิกัดกระแสและแรงดันทั้งทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเสียก่อน จากนั้นจึงเลือกขนาดแกนเฟอร์ไรท์ที่เหมาะสม เพื่อที่จะสามารถคำนวณเบอร์ขดลวดและจำนวนรอบของขดลวดได้ ในการออกแบบจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิจะใช้สมการ (2.8) ในการคำนวณ [9]

$$N_p = \frac{V}{4 \times f \times B_m \times A_c} \quad (2.8)$$

เมื่อ N_p = จำนวนรอบขดลวด

V = แรงดันไฟฟ้าที่ป้อน (V)

f = ความถี่ไฟฟ้าใช้งาน (Hz)

B_m = ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเฟอร์ไรท์ (T)

A_c = พื้นที่หน้าตัดของแกนเฟอร์ไรท์ (m²)

ในกรณีที่กำหนดพิกัดแรงดัน ทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิไว้แล้ว สามารถใช้สมการ (2.9)

เพื่อคำนวณจำนวนรอบทางด้านทุติยภูมิได้

$$N_s = N_p \times \frac{V_s}{V_p} \quad (2.9)$$

เมื่อ N_s = จำนวนรอบขดลวดทางด้านทุติยภูมิ

N_p = จำนวนรอบขดลวดทางด้านปฐมภูมิ

V_s = แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ (V)

V_p = แรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ (V)

เมื่อได้จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิเรียบร้อยแล้ว ก็มาถึงในส่วนของการคำนวณ เบอร์ลวดที่ใช้พัน โดยมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดพิกัดกระแสที่ยอมให้ไหลผ่านขดลวด (A/mm²) โดยส่วนใหญ่กำหนดอยู่ที่ระหว่าง 3-5 A/mm² ในกรณีที่ความถี่ใช้งานสูงการเลือกค่า A/mm² ต่ำจึงเป็นการเลือกที่ดี เพราะ

ผลจากปรากฏการณ์ผิว (skin Effect) จะทำให้พื้นที่การไหลของกระแสลดลงเนื่องจากกระแสจะมารวมกันที่ผิวหน้าของลวด ทำให้พื้นที่หน้าตัดที่มีประสิทธิภาพลดลง ดังนั้นการเลือกค่า A/mm² ที่ต่ำจึงเป็นการเลือกที่ดี เพราะ

ไหลที่ผิวของตัวนำแทนหรือใช้การแบ่งลวดเป็นเส้นเล็กๆหลายเส้น โดยให้ผลรวมจำนวนพื้นที่หน้าตัดของขดลวดเส้นเล็กๆเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของขดลวดที่คำนวณได้

ขั้นตอนที่ 2 นำพิกัดกระแสที่กำหนดคูณกับค่า A/mm^2 ในขั้นตอนที่ 1 เพื่อหาพื้นที่หน้าตัดของขดลวด

ขั้นตอนที่ 3 เมื่อได้พื้นที่หน้าตัดของขดลวดมาแล้ว จึงนำไปเทียบกับตารางขนาดเส้นลวดเพื่อแปลงเป็นเบอร์ของลวด ซึ่งประเทศไทยนิยมใช้มาตรฐานเบอร์ลวดอยู่ 2 แบบ คือ AWG และ SWG เป็นหลัก

2.3.1 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า[11]



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลหม้อแปลงไฟฟ้า

ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์

$$L_{11} = L_{ikP} + L_m \quad (2.10)$$

$$L_{22} = L_{iks} + \frac{L_m}{n_{r1}^2} \quad (2.11)$$

$$L_{11,s} = L_{ikP} + \frac{L_m n_{r1}^2 L_{iks}}{L_m + n_{r1}^2 L_{iks}} \quad (2.12)$$

$$L_{22,s} = L_{iks} + \left(\frac{L_m L_{ikP}}{L_m + L_{ikP}} \right) \frac{1}{n_{r1}^2} \quad (2.13)$$

$$n_{r1} = \sqrt{\frac{L_{11}}{L_{22}}} \quad (2.14)$$

เมื่อ L_{11} = ค่าความเหนี่ยวนำหม้อแปลง วัดด้านปฐมภูมิเมื่อเปิดด้านทุติยภูมิ (H)

$L_{11,s}$ = ค่าความเหนี่ยวนำหม้อแปลง วัดด้านปฐมภูมิเมื่อปิดด้านทุติยภูมิ (H)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ค่าความเหนี่ยวนำหม้อแปลง วัดด้านทุติยภูมิเมื่อเปิดด้านปฐมภูมิ (H) ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

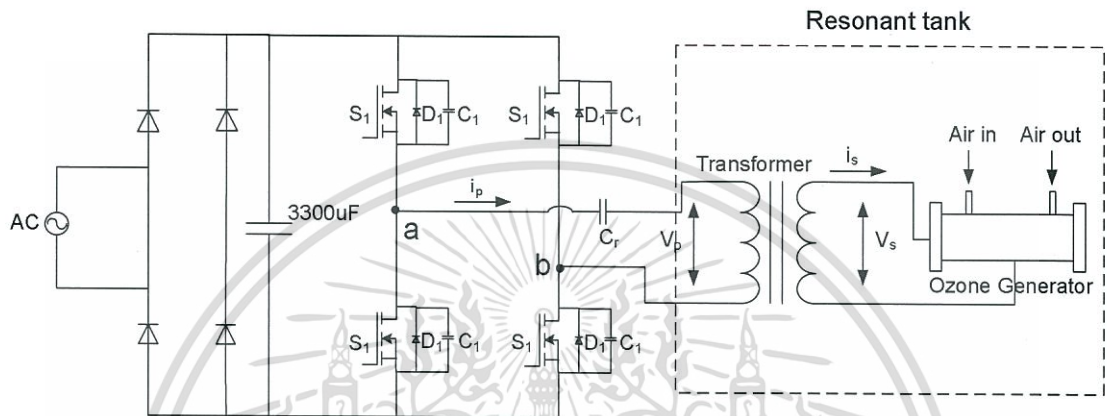
$L_{22,s}$ = ค่าความเหนี่ยวนำหม้อแปลงวัตต์ด้านทุติยภูมิเมื่อปิดด้านปฐมภูมิ (H)

L_{lkp} = ค่าความเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลทางด้านปฐมภูมิ (H)

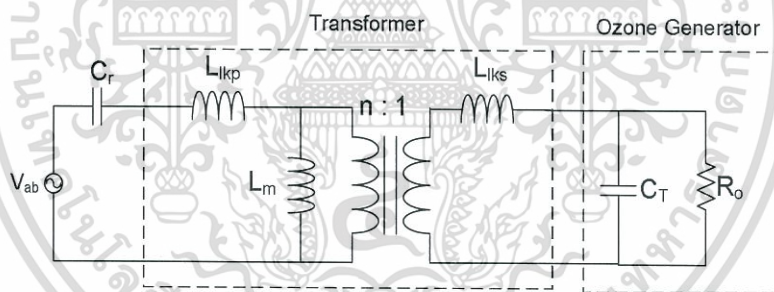
L_m = ค่าความเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กในแกน (H)

L_{lks} = ค่าความเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลทางด้านทุติยภูมิ (H)

2.4 อินเวอร์เตอร์เรโซแนนต์แบบ LCC

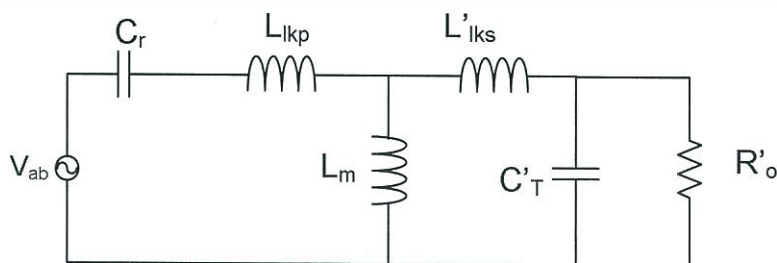


รูปที่ 2.11 วงจรกำลังของเครื่องกำเนิดก๊าซโอโซน



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลของระบบ

วงจรสมมูลโดยประมาณเมื่อย้ายค่าต่างๆทางด้านทุติยภูมิไปไว้ทางด้านปฐมภูมิ



รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลของระบบทางด้านปฐมภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการถ่ายโอนค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงทางด้านทุติยภูมิไปสู่ปฐมภูมิขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของจำนวนขดลวดทางด้านปฐมภูมิ (N_p) ต่อจำนวนขดลวดทางด้านทุติยภูมิ (N_s) ยกกำลังสอง แสดงในสมการ (2.15) (2.16) และ (2.17)

$$L'_{lks} = \left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2 \times L_{lks} \tag{2.15}$$

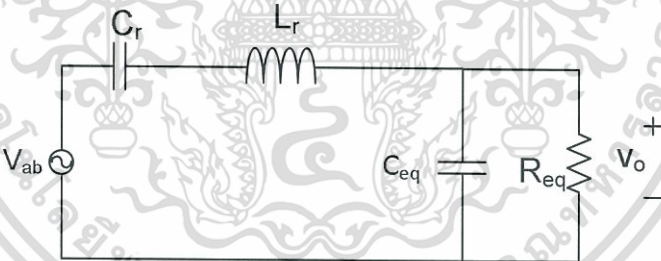
$$R'_o = \left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2 \times R_o \tag{2.16}$$

$$C'_T = \left(\frac{N_s}{N_p}\right)^2 \times C_T \tag{2.17}$$

- เมื่อ
- L'_2 = ค่าเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กทั่วไลทางด้านทุติยภูมิเมื่อถ่ายโอนค่าแล้ว (H)

R'_o = ค่าความต้านทานของเครื่องผลิตก๊าซไอโซนเมื่อถ่ายโอนค่าแล้ว (Ω)

C'_T = ค่าเก็บประจุไฟฟ้าของเครื่องผลิตก๊าซไอโซนเมื่อถ่ายโอนค่าแล้ว (F)



รูปที่ 2.14 วงจรสมมูลเรโซแนนต์

$$L_r = L_{lkp} + L'_{lks} \tag{2.18}$$

$$C_{eq} = C'_T \tag{2.19}$$

$$R_{eq} = R'_o \tag{2.20}$$

เมื่อ

L_r = ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าเรโซแนนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C_{eq} = ค่าความจุไฟฟ้าสมมูล

R_{eq} = ค่าความต้านทานไฟฟ้าสมมูล

C_r = ค่าความจุไฟฟ้าเรโซแนนซ์

จากรูปที่ 2.14 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรเรโซแนนซ์ [12]

$$\frac{V_{ab}}{V_o} = \frac{1}{\sqrt{(1 + \frac{X_{C_r}}{X_{C_{eq}}} - \frac{X_{L_r}}{X_{C_{eq}}})^2 + j(\frac{X_{L_r}}{R_{eq}} - \frac{X_{C_r}}{R_{eq}})^2}} \quad (2.21)$$

เมื่อ X_{C_r} = ค่ารีแอกแตนซ์ของ C_r

$X_{C_{eq}}$ = ค่ารีแอกแตนซ์ของ C_{eq}

X_{L_r} = ค่ารีแอกแตนซ์ของ L_r

R_{eq} = ค่าความต้านทานไฟฟ้าสมมูล

จัดรูปสมการที่ (2.21) ให้อยู่ในรูป ω_s จะได้

$$\frac{V_{ab}}{V_o} = \frac{1}{\sqrt{(1 + \frac{C_{eq}}{C_r} - \omega_s^2 L_r C_{eq})^2 + (\frac{\omega_s L_r}{R_{eq}} - \frac{1}{\omega_s R_{eq} C_r})^2}} \quad (2.22)$$

เมื่อ ω_s = ความถี่เชิงมุมสวิตชิง

จากรูปที่ 2.14 ความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} \quad (2.23)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} \quad (2.24)$$

เมื่อ ω_0 = ความถี่เชิงมุมเรโซแนนซ์

f_0 = ความถี่เรโซแนนซ์

L_r = ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าเรโซแนนซ์

C_r = ค่าความจุไฟฟ้าเรโซแนนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

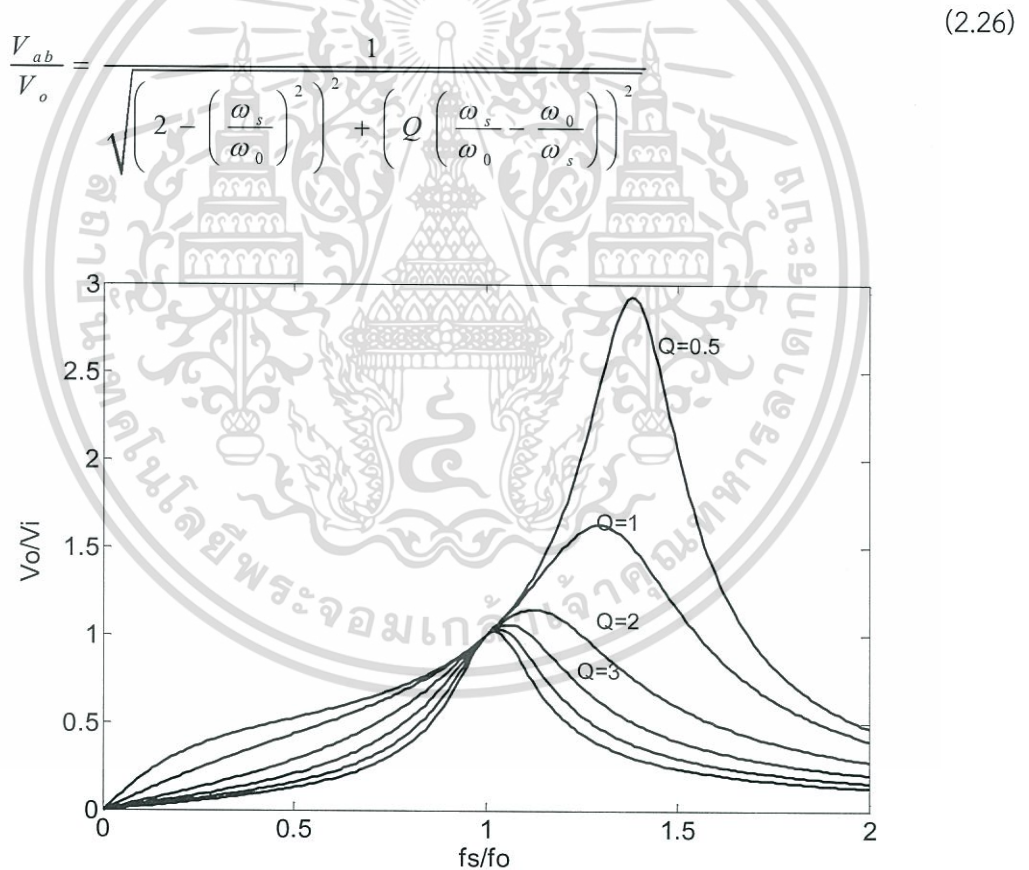
ตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor: Q) ค่าตัวประกอบคุณภาพเป็นค่าที่นิยามเพื่อแสดงคุณสมบัติของวงจรเรโซแนนซ์ในการเลือกความถี่และการสูญเสียภายในวงจร

จากรูปที่ 2.14 สามารถหาตัวประกอบคุณภาพได้จาก สมการที่ (2.22)

$$Q = \frac{\omega_0 L_r}{R} \quad (2.25)$$

เมื่อ Q = ค่าตัวประกอบคุณภาพ

กำหนดให้ $C_r = C_q$ จะได้ อัตราขยายกับค่าบรรทัดฐาน(f_s/f_0) ที่ค่า Q ต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.15 โดยที่ f_s = ความถี่สวิตชิง และ f_0 = ความถี่เรโซแนนซ์



รูปที่ 2.15 รูปแบบการจำลองค่าบรรทัดฐานของผลตอบสนองเชิงความถี่ระหว่าง V_{ab}/V_o กับ f_s/f_0

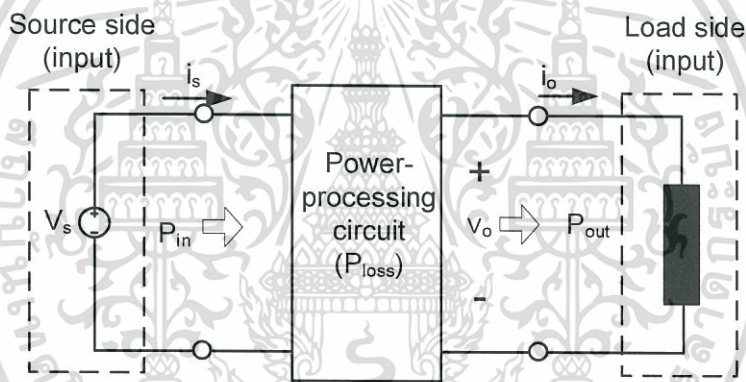
2.5 ทฤษฎีพื้นฐานทางด้านกำลังไฟฟ้า

พิจารณาจากรูป ที่ 2.16 แสดงถึงการไหลของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไปยังโหลด ประสิทธิภาพของวงจรในรูปที่ 2.17 คำนวณได้จากสมการที่ (2.27) หรือ (2.28)

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.27)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \times 100\% \quad (2.28)$$

ถ้าวงจรกำลังประกอบด้วยอุปกรณ์สวิตชิงอุดมคติไม่ว่าจะทำงานในสภาวะ “on” หรือ “off” ก็จะไม่มีความสูญเสียเกิดขึ้นในส่วนของตัวอุปกรณ์ต่างๆ ในวงจร เช่น ตัวคาปาซิเตอร์ ตัวเหนี่ยวนำ และตัวหม้อแปลง ดังนั้นประสิทธิภาพทั้งหมดของวงจรที่ทำงานส่งผ่านกำลังก็จะมีค่าเต็ม 100%



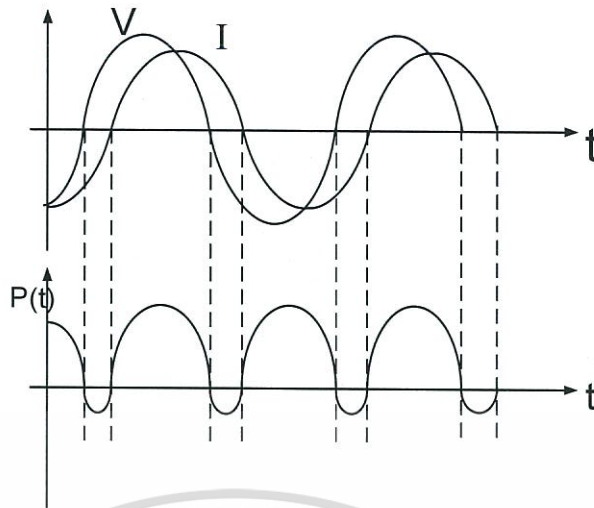
รูปที่ 2.16 การไหลของกำลังไฟฟ้าจากอินพุตไปเอาต์พุต

2.5.1 กำลังไฟฟ้าชั่วขณะ

กำลังไฟฟ้าชั่วขณะ $p(t)$ ที่ส่งไปให้โหลดนั้นคำนวณได้จากผลคูณของแรงดันชั่วขณะกับกระแสชั่วขณะที่ไหลผ่านโหลด ดังสมการที่ (2.26)

$$p(t) = v(t) \times i(t) \quad (2.29)$$

รูปคลื่นแรงดันและกระแสในรูปที่ 2.17 ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าขึ้นมาเป็นค่าบวก ค่าศูนย์ และค่าลบ ที่เวลาที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 2.17 กำลังไฟฟ้า

2.5.2 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย

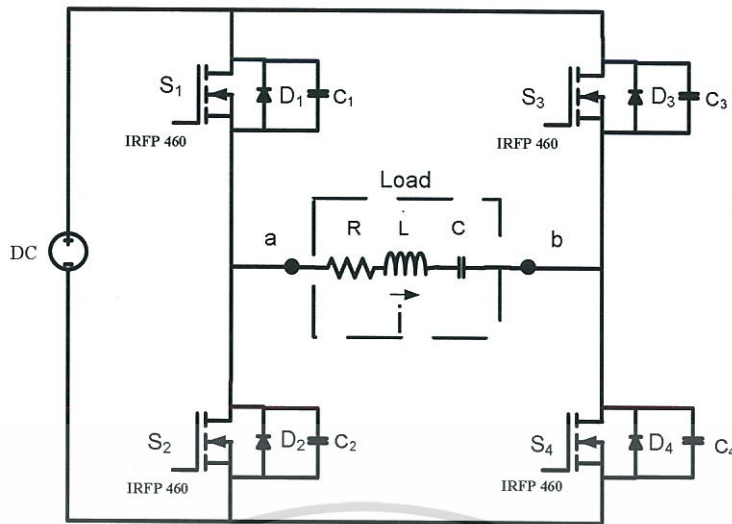
ถ้ารูปคลื่นแรงดันและกระแสมีคาบเวลาซ้ำๆ กัน ดังนั้นกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในตัวอุปกรณ์ในวงจรไฟฟ้า จะหาได้จากสมการที่ (2.30) หรือ (2.31)

$$P_{avg} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (2.30)$$

$$P_{avg} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t)dt \quad (2.31)$$

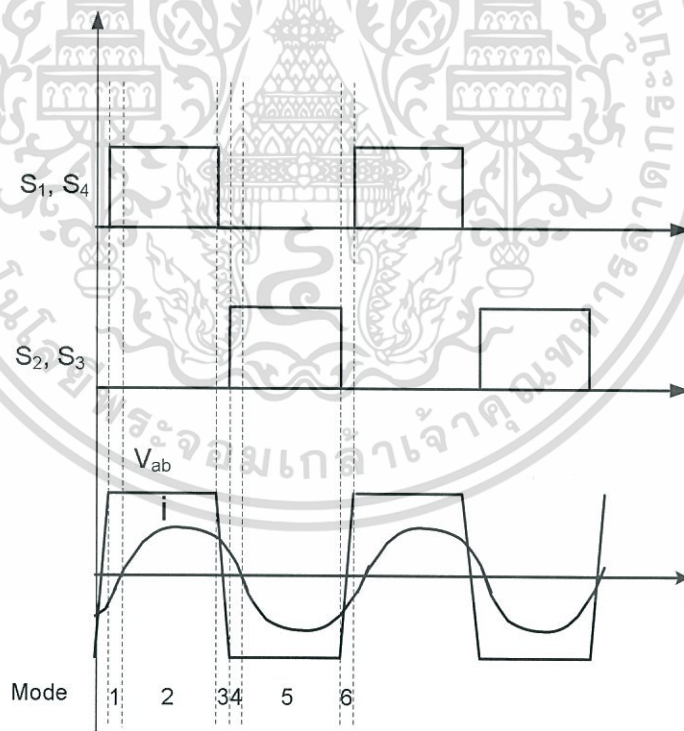
2.6 พีดับเบิลยูเอ็ม ฟลูบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (PWM Full – Bridge Converter)

พีดับเบิลยูเอ็ม ฟลูบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (PWM Full – Bridge Converter) เป็นรูปแบบหนึ่งของแหล่งจ่ายกำลังงานแบบสวิตช์โหมดคอนเวอร์เตอร์ มีหลักการทำงานโดยอาศัยการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์ ส่งผ่านกำลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกระแสตรงไปยังโหลด ซึ่งใช้อุปกรณ์สวิตช์ทั้งหมด 4 ตัวด้วยกัน ดังแสดงที่รูป 2.18 การทำงานของอุปกรณ์สวิตช์จะทำงานพร้อมกันเป็นคู่ๆ คือ S1 คู่กับ S4 และ S2 คู่กับ S3 ทำงานสลับกันคู่ละครึ่งคาบเวลาการสวิตช์ [10]



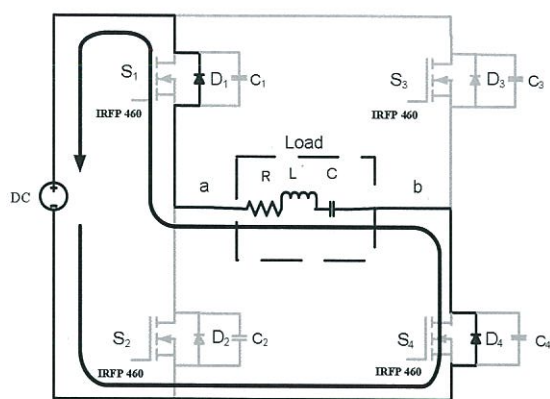
รูปที่ 2.18 ฟีดแบ็คเบิลยูเอ็มฟลูบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

อุปกรณ์สวิตช์ที่ใช้คือ มอสเฟตทั้ง 4 ตัวจะทำงานแยกอิสระกัน โดยรับสัญญาณ PWM เพื่อทำงานเป็นคู่ๆให้ S_1 และ S_4 หยุदनํ้ากระแส แล้วก็คํอยให้ S_2 และ S_3 นํ้ากระแส ทำอย่างนี้ไปเรื่อยๆ ดังรูปที่ 2.19

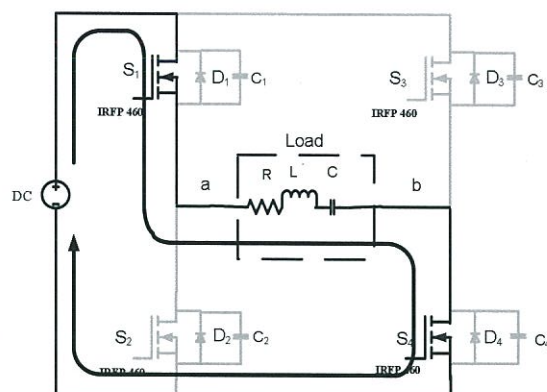


รูปที่ 2.19 สัญญาณการทำงานของฟีดแบ็คเบิลยูเอ็ม ฟลูบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

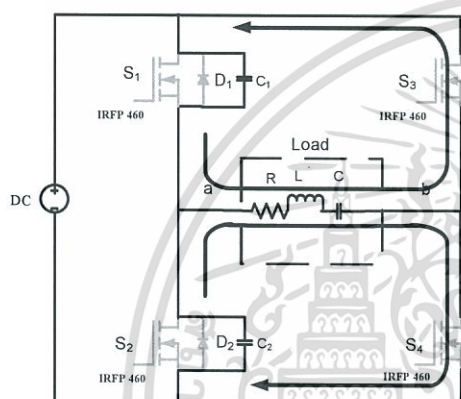
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



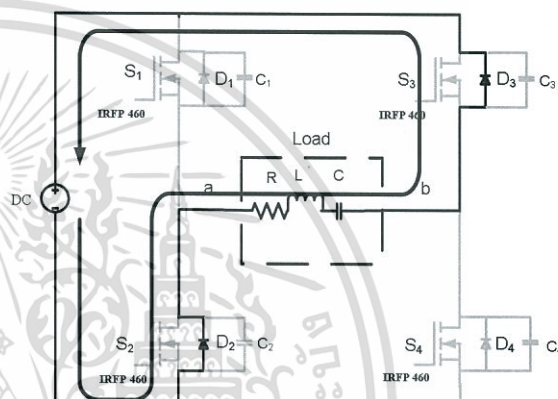
(ก)สภาวะที่ 1



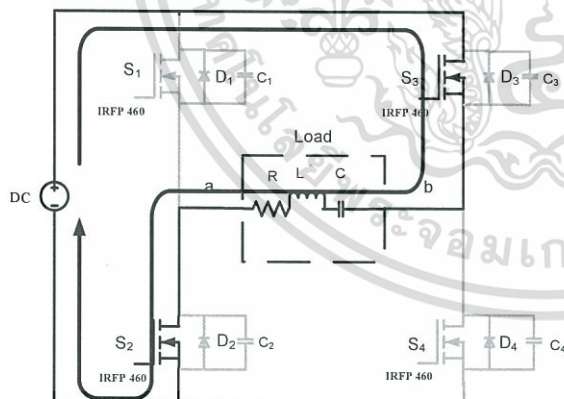
(ข) สภาวะที่ 2



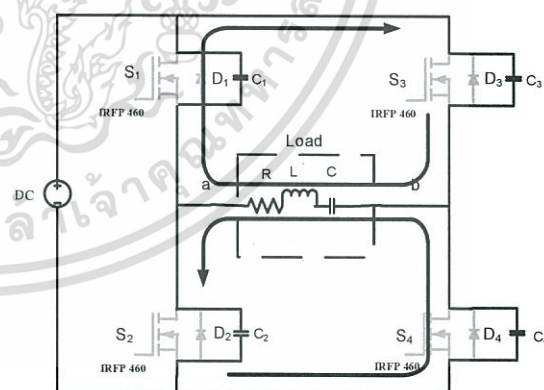
(ค) สภาวະที่ 3



(ง) สภาวะที่ 4



(จ) สภาวะที่ 5



(ฉ) สภาวະທີ 6

รูปที่ 2.20 การทำงานของ PWM ที่สภาวะ 1 ถึง 6

การทำงานของ PWM แบ่งได้เป็น 6 สภาวะโดยสามารถวิเคราะห์ทางจรแสดงการทำงานในโหมดต่างๆ ในหนึ่งรอบไซเคิลของคลื่นแรงดันเอาต์พุตได้โดยขณะวงจรทำงานภายใต้สภาวะ ZVS สามารถแสดงการทำงานในแต่ละโหมดได้ดังรูปที่ 2.20 ซึ่งมีโหมดการทำงานดังนี้

สถานะที่ 1 คือโหมดรีเจนเนอเรทีฟ (regenerative) ในครึ่งไซเคิลบวกของคลื่นแรงดันเอาต์พุต กระแสไหลผ่าน D_4 ผ่านโหลด และผ่าน D_1 เข้าสู่แหล่งจ่ายครบวงจร

สถานะที่ 2 คือโหมดเพาเวอร์ริง (Powering) ในครึ่งไซเคิลบวกของคลื่นแรงดันเอาต์พุต กระแสจากแหล่งจ่ายไหลผ่าน S_1 ผ่านโหลด และ S_4 ครบวงจร

สถานะที่ 3 คือโหมดขนถ่ายประจุ (charge transfer) โดยโหมดนี้จะขนถ่ายประจุจาก C_3 ไปยัง C_1 และ C_2 ไปยัง C_4

สถานะที่ 4 คือโหมดรีเจนเนอเรทีฟ (regenerative) ในครึ่งไซเคิลลบของคลื่นแรงดันเอาต์พุต กระแสไหลผ่าน D_2 ผ่านโหลด และผ่าน D_3 เข้าสู่แหล่งจ่ายครบวงจร

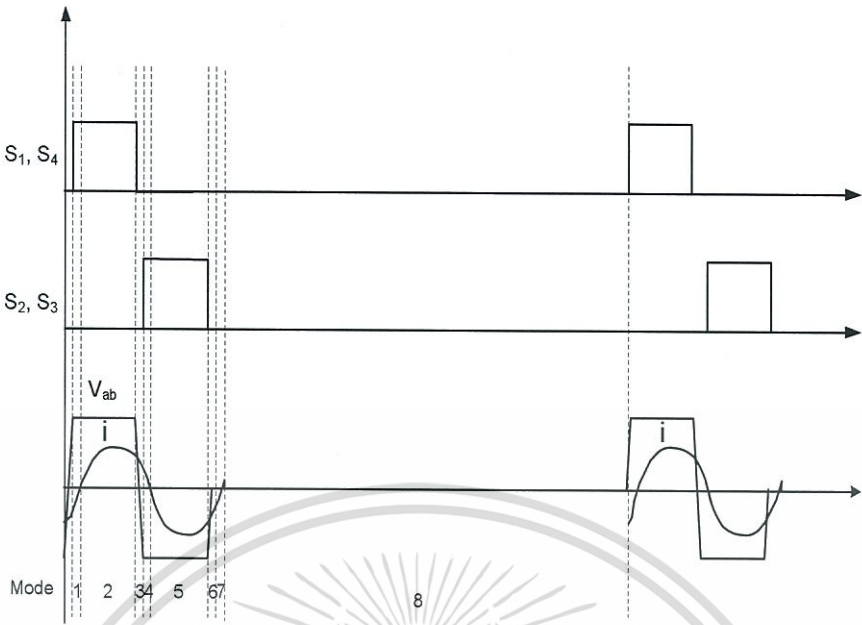
สถานะที่ 5 คือโหมดเพาเวอร์ริง (Powering) ในครึ่งไซเคิลลบของคลื่นแรงดันเอาต์พุต กระแสจากแหล่งจ่ายไหลผ่าน S_3 ผ่านโหลด และ S_2 ครบวงจร

สถานะที่ 6 คือโหมดขนถ่ายประจุ (charge transfer) โดยโหมดนี้จะขนถ่ายประจุจาก C_1 ไปยัง C_3 และ C_4 ไปยัง C_2

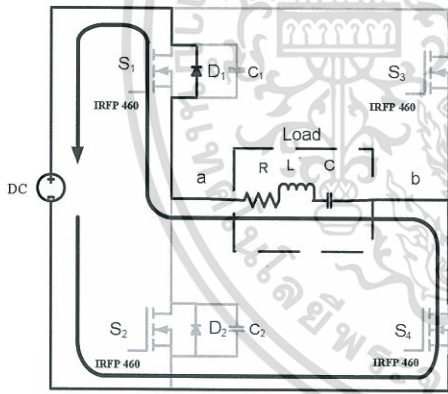
2.7 ฟีดแบ็ก ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (PDM Full Bridge Converter)

ฟีดแบ็ก ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (Pulse Density Modulation Full Bridge Converter) มีโครงสร้างเหมือนกับ ฟีดแบ็กฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ 2.18 แต่มีลักษณะที่ซับซ้อนที่แตกต่างกัน

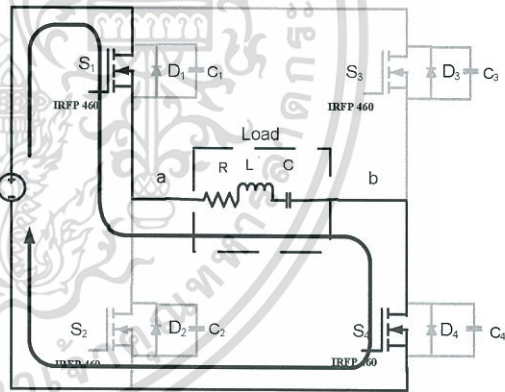
จากรูปที่ 2.22 แสดงถึงการทำงานของสัญญาณ PDM และ รูปที่ 2.21 แสดงถึงแรงดันและกระแสที่ออกมาจากวงจรภาคกำลังที่จ่ายให้โหลด โดยที่มอสเฟตจะทำงานเป็นคู่ๆ S_1 กับ S_4 นำกระแส สลับกับ S_2 กับ S_3 ทำอย่างนี้ไปเรื่อยๆ 5 คาบเวลา และหยุดจ่ายแรงดัน 5 คาบเวลา เช่นกันโดยช่วงหยุด S_1, S_2, S_3 และ S_4 หยุดนำกระแส เพื่อที่จะทำให้แรงดันมีค่าเป็นศูนย์ โดยจะจ่ายแรงดันและหยุดเป็นอย่างนี้ไปเรื่อยๆ การพิจารณาโหมดการทำงานจะคล้ายกับสัญญาณ PWM เพิ่มโหมดช่วงหยุดการทำงานของสวิตช์ ในตัวอย่างนี้พิจารณาที่ 1 ลูกคลื่น แล้วเว้น 5 ลูกคลื่น



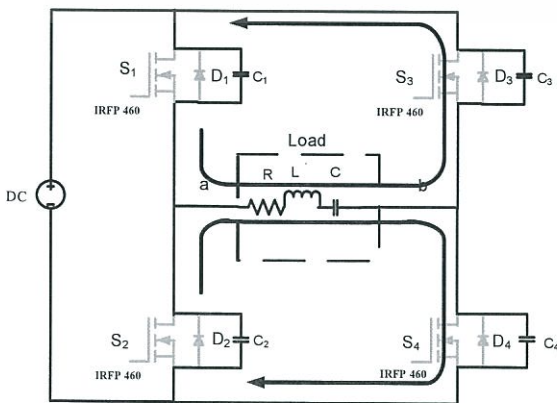
รูปที่ 2.21 การทำงานของสัญญาณ PDM



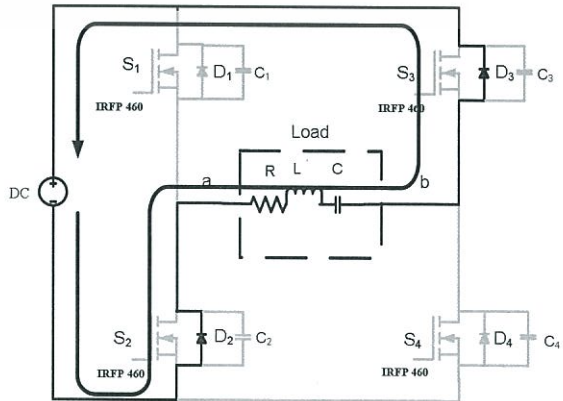
(ก) สภาวะที่ 1



(ข) สภาวะที่ 2

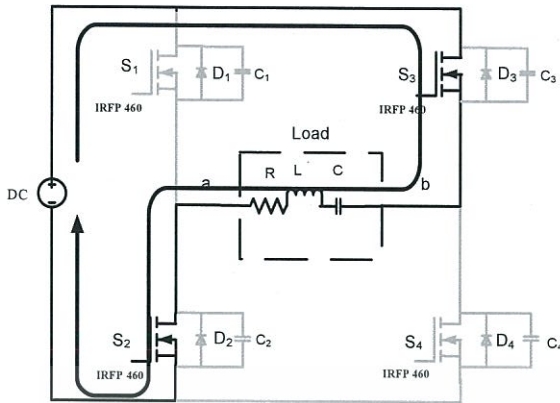


(ค) สภาวะที่ 3

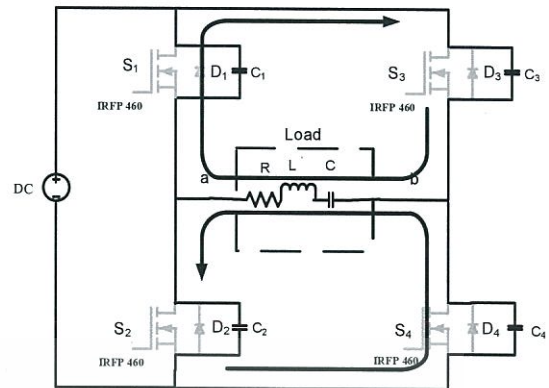


(ง) สภาวะที่ 4

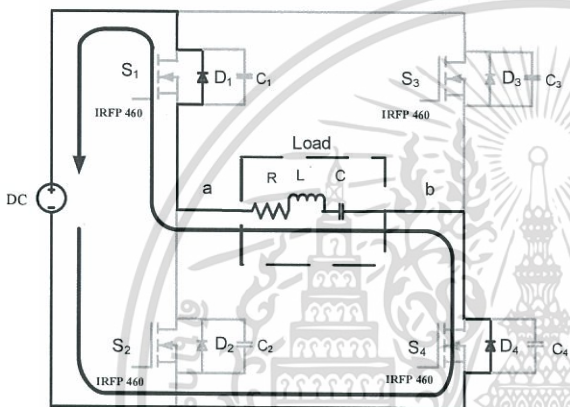
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



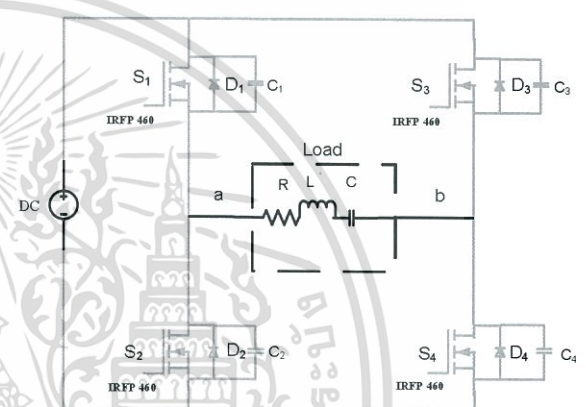
(จ) สภาวะที่ 5



(ฉ) สภาวะที่ 6



(ช) สภาวะที่ 7



(ซ) สภาวะที่ 8

รูปที่ 2.22 การทำงานของ PDM ที่สภาวะ 1 ถึง 8

สภาวะที่ 1 คือโหมดรีเจนเนอเรทีฟ (regenerative) ในครึ่งไซเคิลบวกของคลื่นแรงดันเอาต์พุต กระแสไหลผ่าน D_4 ผ่านโหลด และผ่าน D_1 เข้าสู่แหล่งจ่ายครบบวงจร

สภาวะที่ 2 คือโหมดเพาเวอร์ริง (Powering) ในครึ่งไซเคิลบวกของคลื่นแรงดันเอาต์พุต กระแสจากแหล่งจ่ายไหลผ่าน S_1 ผ่านโหลด และ S_4 ครบบวงจร

สภาวะที่ 3 คือโหมดขนถ่ายประจุ (charge transfer) โดยโหมดนี้จะขนถ่ายประจุจาก C_3 ไปยัง C_1 และ C_2 ไปยัง C_4

สภาวะที่ 4 คือโหมดรีเจนเนอเรทีฟ (regenerative) ในครึ่งไซเคิลลบของคลื่นแรงดันเอาต์พุต กระแสไหลผ่าน D_2 ผ่านโหลด และผ่าน D_3 เข้าสู่แหล่งจ่ายครบบวงจร

สภาวะที่ 5 คือโหมดเพาเวอร์ริง (Powering) ในครึ่งไซเคิลลบของคลื่นแรงดันเอาต์พุต กระแสจากแหล่งจ่ายไหลผ่าน S_3 ผ่านโหลด และ S_2 ครบบวงจร

สภาวะที่ 6 คือโหมดขนถ่ายประจุ (charge transfer) โดยโหมดนี้จะขนถ่ายประจุจาก C_1 ไปยัง C_3 และ C_4 ไปยัง C_2

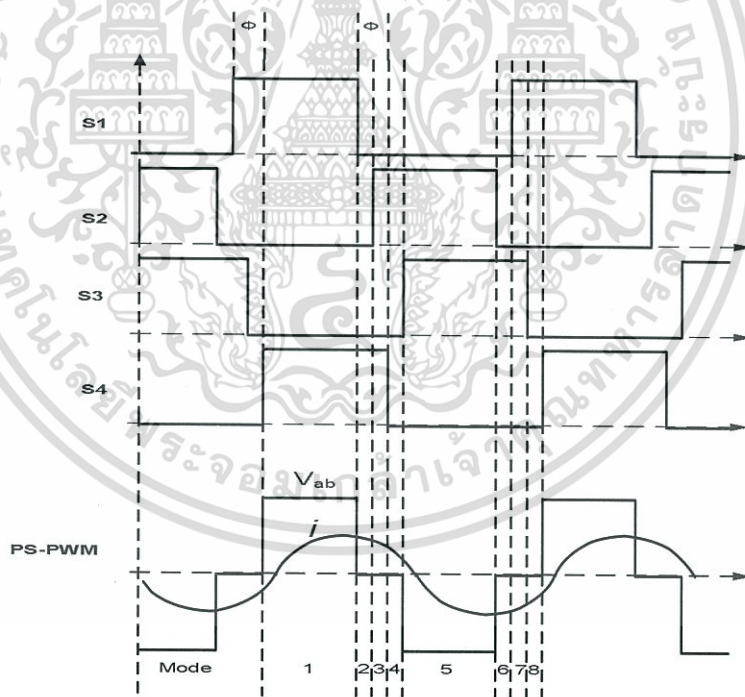
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานะที่ 7 คือโหมดรีเจนเนอเรทีฟ (regenerative) ในครึ่งไซเคิลบวกของคลื่นแรงดันเอาต์พุต กระแสไหลผ่าน D_4 ผ่านโหลด และผ่าน D_1 เข้าสู่แหล่งจ่ายครบวงจร

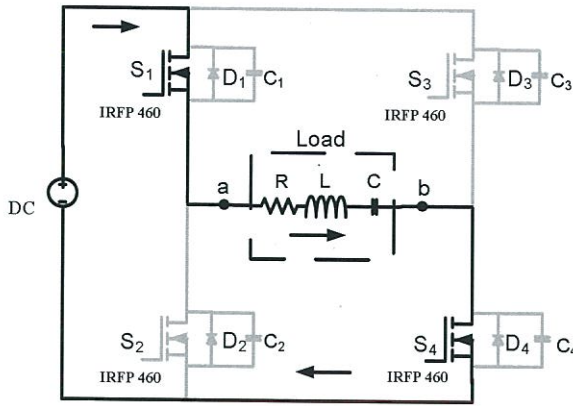
สถานะที่ 8 โหมดนี้ สวิตช์ทุกตัวจะหยุดนำกระแส

2.8 พีเอส-พีดับเบิลยูเอ็มฟลูบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (PS-PWM Full – Bridge Converter)

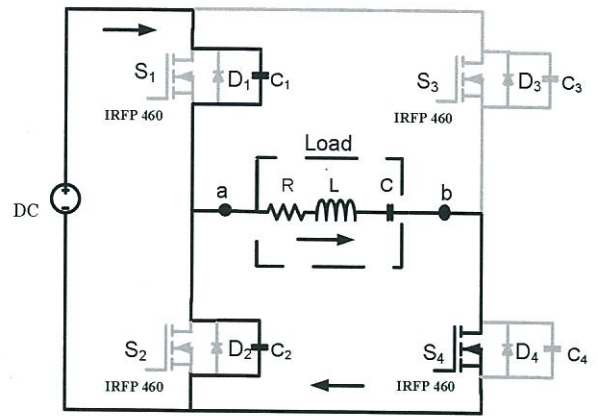
พีดับเบิลยูเอ็มแบบเลื่อนเฟสฟลูบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (Phase – Shift PWM Full – Bridge Converter) ดังรูปที่ 2.23 มีโครงสร้างเหมือนกับ พีดับเบิลยูเอ็ม ฟลูบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ 2.18 แต่มีลักษณะการขับเคลื่อนของอุปกรณ์สวิตช์แตกต่างกัน โดยปกติสัญญาณ PWM จะทำงานเป็น คู่ๆ ให้ S_1 และ S_4 นำกระแสโดยที่ S_2 และ S_3 ยังคงหยุดนำกระแสอยู่ สลับกับการให้ S_1 และ S_4 หยุดนำกระแส แล้วค่อยให้ S_2 และ S_3 นำกระแส ทำอย่างนี้ไปเรื่อยๆ แต่ PWM แบบเลื่อนเฟสช่วงเวลา S_1 และ S_4 นำกระแส S_1 จะนำกระแส ก่อน S_4 เป็นเวลา Φ และช่วงหยุดนำกระแส S_4 ก็จะช้ากว่า S_1 เพราะช่วงนำกระแสช้ากว่า ส่วน S_2 และ S_3 ก็เหมือนกัน ช่วงนำกระแส S_3 จะช้ากว่า S_2 เป็นเวลา Φ และช่วงหยุดนำกระแส S_3 ก็จะช้ากว่า S_2



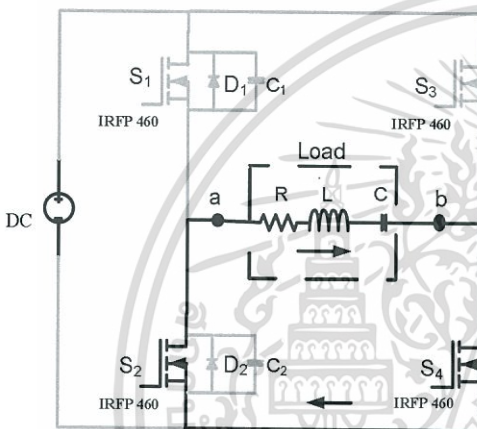
รูปที่ 2.23 การทำงานของสัญญาณ PS-PWM



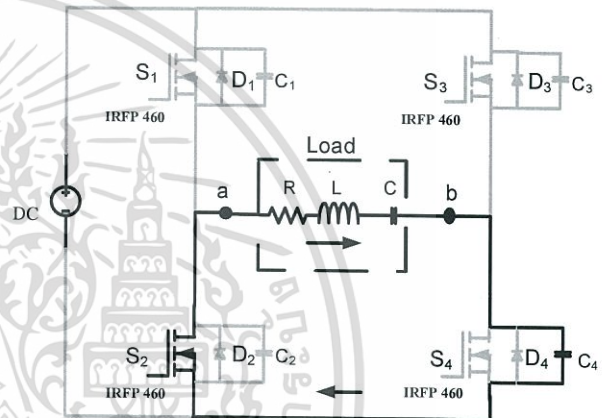
(ก) สถานะที่ 1



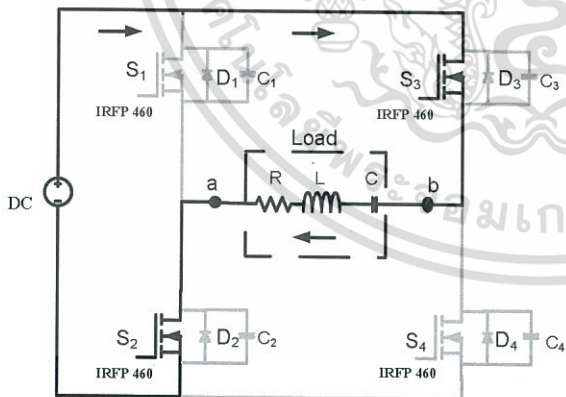
(ข) สถานะที่ 2



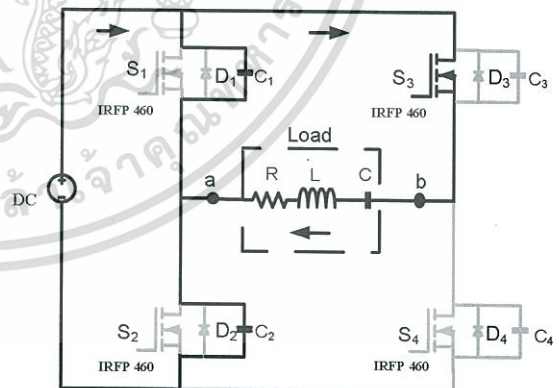
(ค) สถานะที่ 3



(ง) สถานะที่ 4

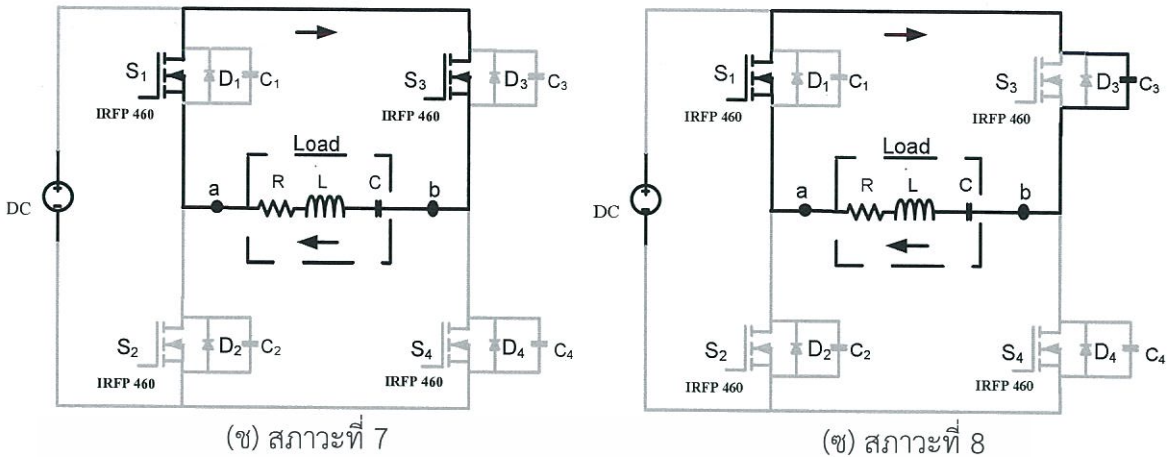


(จ) สถานะที่ 5



(ฉ) สถานะที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 การทำงานของ PS-PWM ที่สภาวะ 1 ถึง 8

การทำงานของ PWM แบบเลื่อนเฟสแบ่งได้เป็น 8 สภาวะโดยการกำหนดการทำงานจากสัญญาณขั้วเกิดของอุปกรณ์สวิตช์ ดังนั้นในรูปที่ 2.23 รูปสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ที่จุด ab มีลักษณะคล้ายสัญญาณสี่เหลี่ยม โดยที่จุดที่แรงดันเป็นศูนย์ เกิดจากการเลื่อนเฟสขั้วเกิดของคู่สัญญาณอุปกรณ์สวิตช์ วงจรของแหล่งจ่ายกำลังไม่ครบรอบ ทำให้แรงดันไม่สามารถปรากฏที่เอาต์พุต สัญญาณแรงดันที่ได้จึงเป็นศูนย์ วงจรแบบเลื่อนเฟสที่สภาวะการทำงานทั้ง 8 ดังรูปที่ 2.24

สภาวะที่ 1 สวิตช์ S_1 และ S_4 นำกระแส กระแสจากแหล่งจ่ายกระแสตรงไหลผ่าน S_1 ไปสู่โหลด และไหลผ่าน S_4 กลับสู่แหล่งจ่ายครบวงจร แรงดันตกคร่อมโหลดเท่ากับ V_{ab} เท่ากับแรงดันที่แหล่งจ่ายกระแสตรง V_{DC} โดยที่แรงดันตกคร่อม S_1 , C_1 และ D_1 เท่ากับศูนย์ แรงดันตกคร่อม S_2 , C_2 และ D_2 เท่ากับ V_{DC} แรงดันตกคร่อม S_3 , C_3 และ D_3 เท่ากับ V_{DC} และ แรงดันตกคร่อม S_4 , C_4 และ D_4 เท่ากับศูนย์

สภาวะที่ 2 สวิตช์ S_1 หยุดนำกระแส ในขณะที่ S_4 ยังคงนำกระแสอยู่ ตามรูปแบบของสัญญาณขั้วเกิดที่จ่ายให้ S_4 กระแสที่ไหลต่อเนื่องผ่าน S_1 จะเปลี่ยนมาไหลผ่าน C_1 แทน กระแสไหลผ่าน C_1 ไปสู่โหลด และ S_4 กลับสู่แหล่งจ่ายครบวงจร ในขณะเดียวกัน แรงดันที่ตกคร่อม C_2 ลดลง เพราะ C_2 ต่อขนานอยู่กับโหลด เมื่อ S_1 หยุดนำกระแส แรงดันที่ตกคร่อมโหลดลดลง C_2 สามารถคายประจุผ่านโหลด ผ่าน S_4 ครบวงจร

สภาวะที่ 3 ในสภาวะนี้แหล่งจ่ายไม่สามารถจ่ายกระแสให้ โหลดได้เพราะ S_1 เปิดวงจรและ C_1 เก็บประจุเต็ม ช่วงเวลานี้พลังงานที่สะสมในโหลด ไหลผ่าน S_4 ไปสู่ S_2 กลับมาที่โหลดครบวงจร

สภาวะที่ 4 กระแสที่ไหลผ่าน S_4 เปลี่ยนมาไหลผ่าน C_4 ไหลผ่าน S_2 กลับสู่โหลด เนื่องจาก S_4 เปิดวงจรแรงดันที่ตกคร่อม C_4 ค่อยๆเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่าหนึ่งไหลต่อขนานอยู่กับ C_4 จึงทำให้แรงดันที่วัดได้มีค่าเท่ากัน ในสภาวะนี้พลังงานที่สะสมที่โหลดลดลงเกือบหมด ดังนั้นกระแสที่ถูกจ่ายจากโหลดกำลังลดลงเป็นศูนย์ S_2 นำกระแส และ S_4 หยุดนำกระแส

สภาวะที่ 5 S_2 และ S_3 นำกระแส กระแสจากแหล่งจ่ายกระแสไหลผ่าน S_3 ไปสู่โหลดเมื่อกระแสไหลผ่านโหลด จะเกิดการสะสมพลังงาน จากนั้นไหลผ่าน S_2 กลับสู่แหล่งจ่ายครบวงจร แรงดันตกคร่อมโหลด V_{ab} เท่ากับแรงดันที่แหล่งจ่ายแต่มีค่าติดลบเพราะกลับขั้วกับสภาวะที่ 1 โดยที่แรงดันตกคร่อม S_1 , C_1 และ D_1 เท่ากับ V_{DC} แรงดันตกคร่อม S_2 , C_2 และ D_2 เท่ากับศูนย์ แรงดันตกคร่อม S_3 , C_3 และ D_3 เท่ากับศูนย์ และ แรงดันตกคร่อม S_4 , C_4 และ D_4 เท่ากับ V_{DC}

สภาวะที่ 6 S_2 หยุดนำกระแส ในขณะที่ S_3 ยังได้รับสัญญาณแรงดันขั้วเกิดและนำกระแสอยู่ในกรณีที่เป็โหลดสะสมพลังงานกระแสจะไม่หยุดไหลอย่างทันทีทันใด แต่จะค่อยๆลดลง ดังนั้นกระแสไหลต่อเนื่องที่ผ่าน S_2 จะเปลี่ยนมาไหลผ่าน C_2 แทน S_2 ที่เปิดวงจร แรงดันที่ตกคร่อม C_2 ค่อยๆเพิ่มขึ้นจากการที่ตัวมันถูกชาร์จประจุจากกระแสไหลที่ไหลผ่าน ตัวเหตุที่มันต่ออนุกรมกับ C_1 ซึ่งเป็นตัวแบ่งแรงดันอีกครั้งที่เหลือ กระแสไหลผ่าน S_3 ไปสู่โหลด ครบวงจร บางส่วนจะไหลผ่าน C_2 ไปยังแหล่งจ่ายครบวงจร

สภาวะที่ 7 เนื่องจาก S_2 เปิดวงจร ตัดทางเดินกระแสจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงออก กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน S_1 ไปสู่ S_3 ครบวงจร

สภาวะที่ 8 S_1 นำกระแส และ S_3 หยุดนำกระแส กระแสไหลผ่าน S_3 เปลี่ยนมาไหลผ่าน C_3 กลับสู่โหลด และแรงดันที่ตกคร่อม C_3 ค่อยๆเพิ่มจากศูนย์จนถึงค่าๆ หนึ่ง โหลดต่อขนานกับ C_3 ดังนั้น แรงดันตกคร่อมจึงมีค่าเท่ากัน ในสภาวะนี้พลังงานที่สะสมในโหลดเกือบหมด และ หลังจากสภาวะนี้แล้ว คอนเวอร์เตอร์จะกลับไปเริ่มการทำงานที่สภาวะที่ 1 อีกครั้ง เป็นวงรอบการทำงานต่อไป

2.9 สรุป

บทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวกับการสร้างเครื่องกำเนิดโอโซนเริ่มจากการคำนวณอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกแกนร่วม 2 ชั้น กระบวนการที่ทำให้เกิดก๊าซโอโซน ผลของความถี่สนามไฟฟ้าต่อแรงที่กระทำกับอิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซ สมการที่ใช้ในการคำนวณ ค่าความจุไฟฟ้าและความเครียดของสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกแกนร่วม 2 ชั้น ทฤษฎีพื้นฐานของหม้อแปลงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน อธิบายเกี่ยวกับคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนต์แบบ LCC และการวัดกำลังไฟฟ้า
อธิบายการทำงานของวงแบบ PWM, PDM และ PS-PWM พูลบริดจ์คอนเวอร์



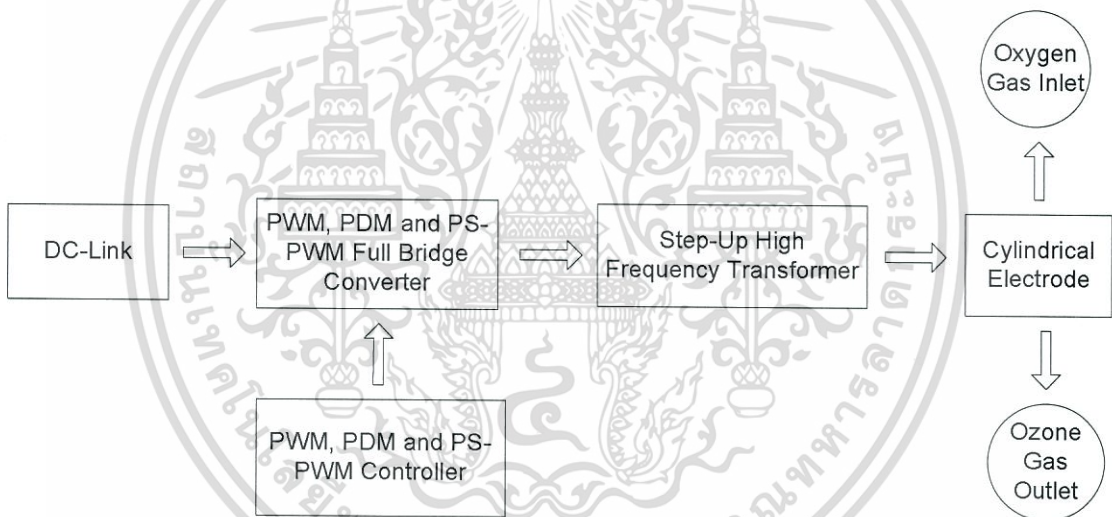
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบเครื่องผลิตก๊าซโอโซน

3.1 บทนำ

เครื่องผลิตก๊าซโอโซนมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนมากนัก โดยหลักๆ แล้วประกอบด้วยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์โหมดคอนเวอร์เตอร์ ชุดสร้างสัญญาณควบคุมเพื่อนำไปใช้เป็นสัญญาณขับเคลื่อนของอุปกรณ์สวิตช์ในแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์โหมดคอนเวอร์เตอร์ หม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดันและชุดอิเล็กทรอนิกส์โทรดทรงกระบอกซ้อนกันแน่น ในการวิเคราะห์และออกแบบต้องทราบถึงพารามิเตอร์ต่างๆ ของโหลดเสียก่อนจึงจะสามารถออกแบบในส่วนอื่นๆ ที่เหลือของระบบได้ ดังนั้นจะขอกล่าวถึงการวิเคราะห์และออกแบบชุดอิเล็กทรอนิกส์โทรดทรงกระบอกซ้อนกันแน่น 2 ชั้นเป็นอันดับแรก หลังจากนั้นถึงออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงและแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของเครื่องผลิตก๊าซโอโซน

3.2 อิเล็กทรอนิกส์โทรดทรงกระบอกซ้อนกันแน่น 2 ชั้น

ในบทความนี้ได้เลือกใช้แก้วเป็นวัสดุฉนวนชั้นที่ 1 ด้วยเหตุผล 5 ข้อดังนี้คือ

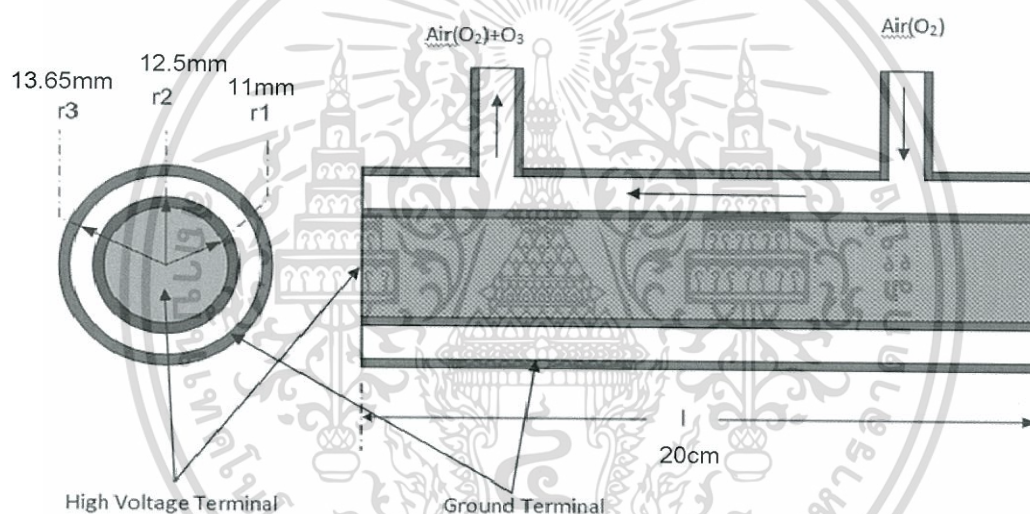
- 1) แก้วมีคุณสมบัติในการทนความเครียดสนามไฟฟ้าได้สูง
- 2) แก้วที่คุณภาพการผลิตจะมีผิวเรียบและไม่มีฟองอากาศหรือสิ่งแปลกปลอมเจือปนอยู่ ซึ่งสิ่งเหล่านี้อาจส่งผลให้เกิดการเบรกดาวนในแก้วได้
- 3) สามารถทนการชุบขีตและไม่เกิดริ้วรอยได้ง่าย
- 4) ในกระบวนการผลิตแก้วต้องให้ความร้อนสูงกว่า 1,200 องศาเซลเซียส เพื่อหลอมซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ทำแก้ว ดังนั้นแก้วจึงทนความร้อนได้สูงมากก่อนที่จะหลอมละลายเสียหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) แก้วเป็นวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารใดๆ ดังนั้นจึงไม่ทำปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนเช่นกัน

ในส่วนของฉนวนชั้นที่ 2 เป็นช่องว่างอากาศเพื่อที่จะสามารถทำให้อากาศไหลผ่านชุดอิเล็กโทรดได้ ตัวนำด้านในใช้ฟอยสแตนเลสและตัวนำด้านนอกแผ่นสแตนเลสที่นำมาติดกับหลอดแก้วด้านนอก รูปทรงของอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันรวมฉนวน 2 ชั้น แสดงในรูปที่ 3.2

สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการเลือกขนาดรัศมีของชุดอิเล็กโทรดนั้นก็คือระยะห่างและปริมาตรช่องว่างอากาศระหว่างขั้วอิเล็กโทรดด้านในเลือกจากและด้านนอกเพราะจะส่งผลต่อการออกแบบชุดกำลังไฟฟ้า การกำหนดขนาดรัศมีของชุดอิเล็กโทรดจะขนาดของหลอดแก้วด้านในและด้านนอกเป็นหลักเพราะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของหลอดแก้วมีค่าให้เลือกไม่มากนัก



รูปที่ 3.2 ลักษณะของรูปทรงของอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันรวมฉนวน 2 ชั้น

ในงานวิจัยนี้เลือกหลอดแก้วด้านในขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 2.2 ซม., หนา = 0.14 ซม., และยาว = 20 ซม. ในส่วนของหลอดแก้วด้านนอก เลือกใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 2.73 ซม., หนา 0.1 = ซม. และยาว = 20 ซม. เมื่อนำหลอดแก้วซ้อนกัน ดังนั้นจะได้ค่า $r_1 = 1.1$ ซม., $r_2 = 1.25$ ซม., และ $r_3 = 1.365$ ซม. ค่าเปอร์มิตติวิตีของแก้ว (ϵ_{r1}) อยู่ระหว่าง 5-10 และของอากาศ (ϵ_{r2}) ประมาณเท่ากับ 1

นำตัวแปรมาคำนวณหาปริมาตรของช่องว่างอากาศ (Vol) มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร (m^3) จากสมการ (3.1)

$$Vol = \pi \times (r_3 - r_2)^2 \times l \quad (3.1)$$

$$Vol = \pi \times (0.01365 - 0.0125)^2 \times 0.20$$

$$Vol = 0.8309 \times 10^{-6} m^3$$

จากหัวข้อ 2.2 ย่านพลังงานที่ใช้ในการผลิตก๊าซโอโซนอยู่ในช่วง 1.169 kWh/m^3 เพราะฉะนั้นสามารถคำนวณหาพลังงาน (W) ที่ใช้ในอิเล็กโทรดได้ดังนี้

$$W = 1.169 \times 10^3 \times 0.8309 \times 10^{-6} Wh$$

$$\therefore W = 0.97132 mWh$$

คำนวณหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (E) ได้จากสมการที่ (3.2) พลังงานในสนามไฟฟ้าของช่องว่างอากาศ ในกรณีที่สนามไฟฟ้าแปรตามเวลานั้น สามารถวิเคราะห์ในสภาพสนามไฟฟ้าสถิตย์ได้ เนื่องจากในขณะที่ขนาดของแรงดันภายนอกที่ป้อนให้กับอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่าๆหนึ่ง ก่อนถึงค่าสูงสุด สนามไฟฟ้าจะไม่มีพลังงานมากพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากโมเลกุลก๊าซได้ และไม่สามารถเร่งความเร็วของอิเล็กตรอนอิสระให้เคลื่อนที่และชนกับโมเลกุลก๊าซในช่องว่างอากาศให้แตกตัวได้ ดังนั้นพลังงานที่จะทำให้เกิดกระบวนการไอออไนเซชัน (W) ได้จึงเกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดนั่นเอง เพราะฉะนั้นสามารถอินทิเกรตสมการ(3.2) ได้ดังนี้ [9]

$$W_i = \frac{1}{2} \times \int \epsilon_0 \times \epsilon_r \times E^2 \times dVol \quad (3.2)$$

$$W_i = \frac{1}{2} \times \epsilon_0 \times \epsilon_r \times E^2 \times \int dVol$$

$$\frac{2 \times W_i}{\epsilon_0 \times \epsilon_r} = E^2 \times Vol$$

ดังนั้นค่าความเครียดสนามไฟฟ้า

$$E = \sqrt{\frac{2 \times W_i}{\epsilon_0 \times \epsilon_r \times Vol}} \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E = \sqrt{\frac{2 \times 0.9713 \times 10^{-3}}{8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 0.8309}} = 16.25 \text{ kV} / \text{cm}$$

เมื่อได้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดโอโซนแล้วจึงคำนวณหาแรงดันภายนอกที่ป้อนให้ชุดอิเล็กโทรดได้จากสมการ (2.7) โดยการแทนค่าดังนี้

$$V = \frac{16.25 \times 10^3 \times 1.25 \times (8 \times \ln \frac{1.365}{1.25} + 1 \times \ln \frac{1.25}{1.1})}{8}$$

เพราะฉะนั้น

$$V = 2.1 \text{ kV}$$

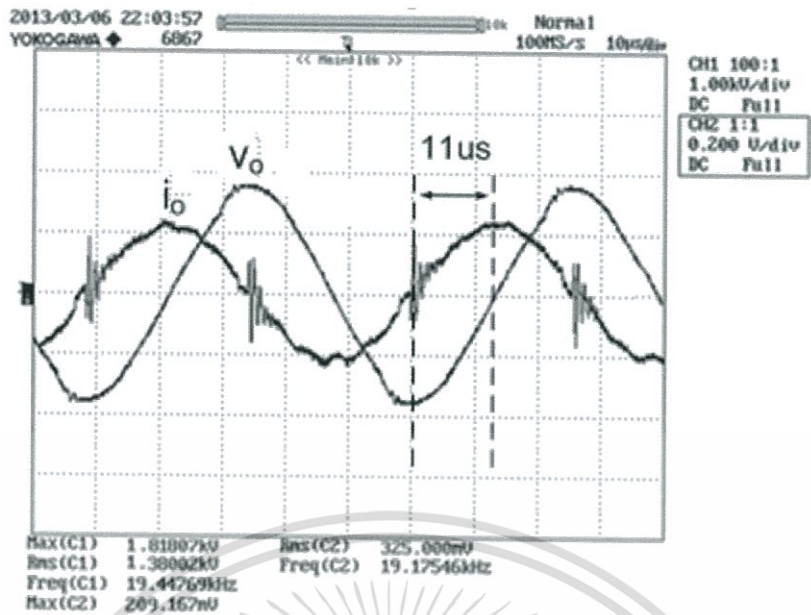
ทำการหาค่าตัวเก็บประจุเสมือนที่ต่ออนุกรมกันในแท่งอิเล็กโทรดจากสมการ (2.1) และ (2.2) โดยแทนค่าดังนี้

$$C_1 = \frac{2 \times \pi \times \epsilon_{r_1} \times \epsilon_0 \times l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{2 \times \pi \times 8 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 0.20}{\ln \frac{1.25}{1.1}} = 6.9630 \times 10^{-10} \text{ F}$$

$$C_2 = \frac{2 \times \pi \times \epsilon_{r_2} \times \epsilon_0 \times l}{\ln \frac{r_3}{r_2}} = \frac{2 \times \pi \times 1 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 0.20}{\ln \frac{1.365}{1.25}} = 1.2642 \times 10^{-10} \text{ F}$$

$$C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}} = 1.0699 \times 10^{-10} \text{ F}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 สัญญาณกระแสและแรงดันที่ชุดอิเล็กทรอนิกส์จากการทดสอบ

กำหนดความถี่ของสัญญาณแรงดันที่ 20 kHz วัดสัญญาณแรงดัน v_m เท่ากับ 1.8 kV และกระแส i_m เท่ากับ 209 mA มุมต่างเฟสระหว่างกระแสและแรงดันหาได้จากสมการ (3.4)

$$\theta = \frac{t_{delay} \times 360^\circ}{T} \tag{3.4}$$

- เมื่อ θ = มุมต่างเฟสระหว่างกระแสและแรงดัน
- t_{delay} = ช่วงเวลาห่างระหว่างกระแสและแรงดัน
- T = คาบเวลา 1 ลูกคลื่น

แทนค่าในสมการ (3.4) จากรูปที่ 3.3 ได้ดังนี้

$$\theta = \frac{10.8 \times 10^{-6} \times 360^\circ}{50 \times 10^{-6}}$$

ดังนั้น $\theta = 77.7600^\circ$

หาค่า R จากสมการที่ 2.3 โดยแทนค่าได้ดังนี้ $V_m = 1800$ V, $I_m = 209$ mV และ $\theta = 77.7600^\circ$

$$R_o = \frac{1800}{209 \times 10^{-3} \cos(77.7600)}$$

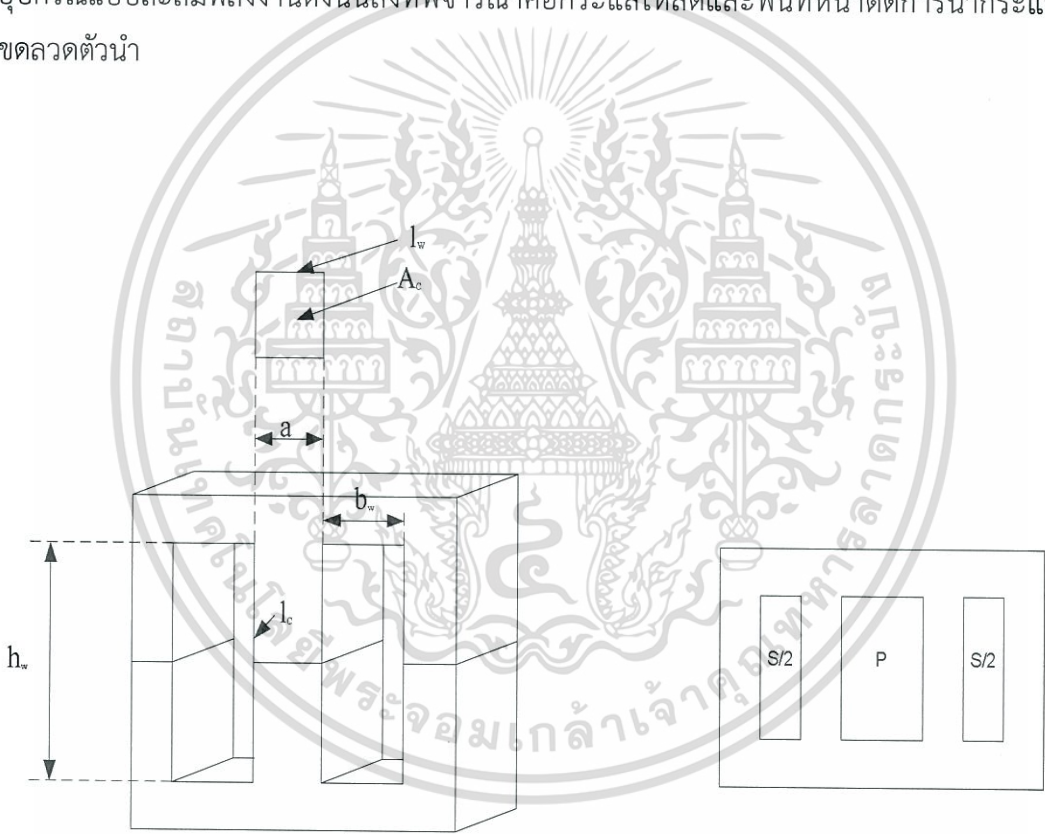
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$R_o = 38.285 k\Omega$$

3.3 หม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน

ในงานวิจัยนี้ออกแบบกำลังงานของหม้อแปลงไว้ที่ 1.5 kW เลือกใช้แกนเฟอร์ไรท์ เบอร์ EE-80 ซึ่งเป็นแกนแบบ EE ที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในท้องตลาดเมืองไทยโดยทั่วไปและจ่ายกำลังได้สูงสุด 2 kW โดยโครงสร้างคือ การนำแกนเฟอร์ไรท์รูปร่างเหมือนตัว E สองอันมาประกบกัน ลักษณะของแกนแสดงในรูปที่ 3.4 มีค่าพารามิเตอร์ดังนี้ พื้นที่หน้าตัดแกน $A_c=4.0 \times 10^{-4}$, $B_{max}= 0.3$ T, ความยาวทางเดินแม่เหล็กของแกน (l_c) 0.192 m ปริมาตรแกน $V_e = 69.8 \times 10^3$ mm³ และความยาวด้านทั้ง (l_w) 4 ของแกน 0.08 m พื้นที่ช่องว่างของบ๊อบบิน 800 mm² แต่เนื่องจากโหลดของหม้อแปลงเป็นอุปกรณ์แบบสะสมพลังงานดังนั้นสิ่งที่พิจารณาคือกระแสโหลดและพื้นที่หน้าตัดการนำกระแสของขดลวดตัวนำ



รูปที่3.4 โครงสร้างแกนเฟอร์ไรท์ เบอร์ EE-80

กำหนดพิกัดของหม้อแปลงดังนี้ แรงดันทางด้านปฐมภูมิ $V_p = 310$ V แรงดันด้านทุติยภูมิ $V_s = 2.1$ kV, ความถี่ใช้งาน 20 kHz และกระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง 5 A

คำนวณหารอบปฐมภูมิจากสมการ (2.8) โดยแทนค่าได้ดังนี้

$$N_p = \frac{310}{4 \times 20000 \times 0.3 \times 4 \times 10^{-4}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้น

$$N_p = 33 \text{ รอบ}$$

จำนวนรอบหุติยภูมิคำนวณได้จากสมการ(2.9) แทนค่าได้ดังนี้

$$N_s = 33 \times \frac{2100}{310}$$

เพราะฉะนั้น

$$N_s = 224 \text{ รอบ}$$

จากหัวข้อ 2.3 ในบทที่ 2 เนื่องจากความถี่ใช้งานมีค่าสูง ดังนั้นจึงเลือกค่ากระแสต่อพื้นที่หน้าตัดลวดไว้ที่ 4 A/mm^2 กระแสทางด้านปฐมภูมิเท่ากับ 5 A

$$\text{ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดของขดลวดคือ } \frac{5 \text{ A}}{4 \text{ A/mm}^2} = 1.25 \text{ mm}^2$$

เปิดตารางเทียบเบอร์ลวดได้ #AWG 17 (1.617 mm^2)

คำนวณเบอร์ลวดทางด้านหุติยภูมิได้ดังนี้

จาก

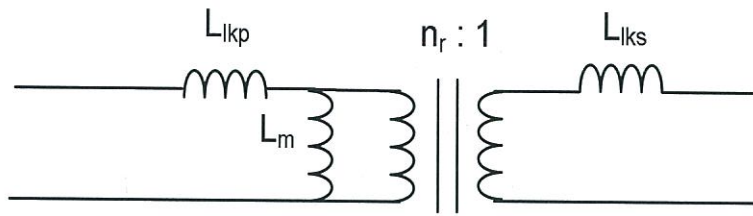
$$I_s = I_p \times \frac{V_p}{V_s}$$

$$I_s = 5 \times \frac{310}{2100}$$

$$I_s = 0.7381$$

$$\text{ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดของขดลวดคือ } \frac{0.7381}{4 \text{ A/mm}^2} = 0.17562 \text{ (mm}^2\text{)}$$

เปิดตารางเทียบเบอร์ลวดได้ #AWG 25 (0.21 mm^2)



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลหม้อแปลงไฟฟ้าขณะยังไม่ได้ถ่ายโอนค่า

จากนั้นเมื่อได้หม้อแปลงที่พันเรียบร้อยแล้วก็เอามาทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลง โดยการใช้เครื่อง RLC meter KC607 วัดพารามิเตอร์ได้ผลดังนี้

ค่าความเหนี่ยวนำหม้อแปลง วัดด้านปฐมภูมิเมื่อเปิดด้านทุติยภูมิ

$$L_{11} = 12.86 \text{ mH}$$

ค่าความเหนี่ยวนำหม้อแปลง วัดด้านปฐมภูมิเมื่อปิดด้านทุติยภูมิ

$$L_{11,s} = 0.459 \text{ mH}$$

ค่าความเหนี่ยวนำหม้อแปลง วัดด้านทุติยภูมิเมื่อเปิดด้านปฐมภูมิ

$$L_{22} = 514 \text{ mH}$$

ค่าความเหนี่ยวนำหม้อแปลงวัดด้านทุติยภูมิเมื่อปิดด้านปฐมภูมิ

$$L_{22,s} = 22 \text{ mH}$$

แทนค่าในสมการที่ (2.10) - (2.14) จะได้พารามิเตอร์หม้อแปลงดังนี้

ค่าความเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลทางด้านปฐมภูมิ

$$L_{lkp} = 0.360 \text{ mH}$$

ค่าความเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กในแกน

$$L_m = 12.5 \text{ mH}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลทางด้านทุติยภูมิ

$$L_{lks} = 5 \text{ mH}$$

อัตราส่วนรอบ

$$n_r = 1/7$$

จะได้วงจรสมมูลของระบบขณะยังไม่ได้ถ่ายโอนค่าจากทุติยภูมิไปทางด้านปฐมภูมิตามรูปที่ (3.6) ทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่ถ่ายโอนค่าจากทางด้านทุติยภูมิมายังทางด้านปฐมภูมิ โดยการแทนค่าลงในสมการที่ (2.15) (2.16) และ (2.17)

ดังนั้น

$$L'_{lks} = \left(\frac{33}{224} \right)^2 \times 5 \times 10^{-3}$$

$$L'_{lks} = 0.18 \text{ mH}$$

ดังนั้น

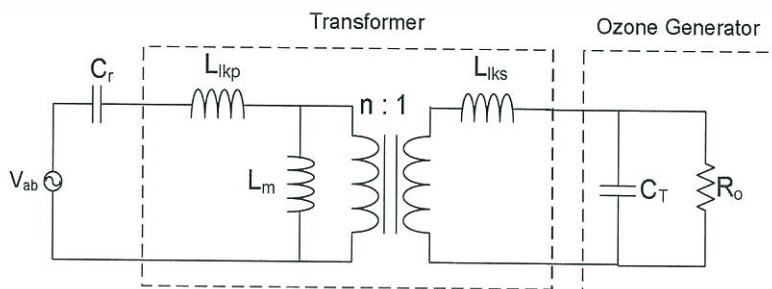
$$R'_o = \left(\frac{33}{224} \right)^2 \times 38.285 \times 10^3$$

$$R'_o = 831 \Omega$$

ดังนั้น

$$C'_r = \left(\frac{224}{33} \right)^2 \times 1.07 \times 10^{-10}$$

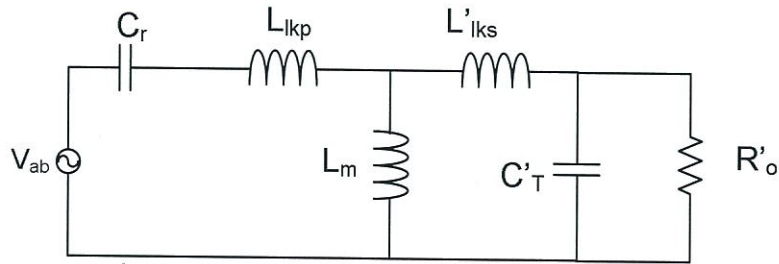
$$C'_r = 4.93 \text{ nF}$$



รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลของระบบขณะยังไม่ได้ถ่ายโอนค่า

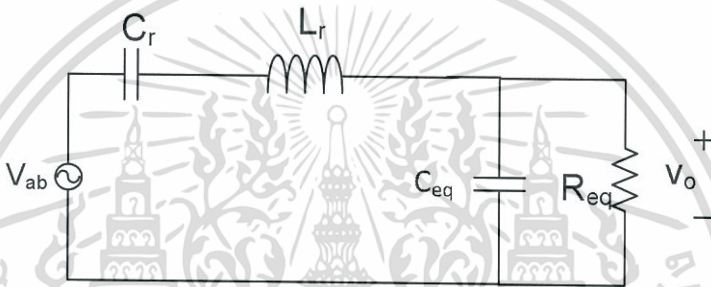
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้วงจรสมมูลของระบบตามรูปที่ (3.7)



รูปที่ 3.7 วงจรสมมูลของระบบเมื่อมีการถ่ายโอนค่า

3.4 อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบ LCC



รูปที่ 3.8 วงจรเรโซแนนซ์

จากรูปที่ 3.8 สามารถหาค่า L_r โดยนำที่ได้จากการทดสอบห้อมัแปลงไปแทนค่าในสมการที่ (2.18)

$$L_r = 0.360 \times 10^{-3} + 0.18 \times 10^{-3}$$

เพราะฉะนั้น $L_r = 0.54 \text{mH}$

สามารถคำนวณหาค่า C_r ได้จากสมการที่ 2.23 โดยกำหนดให้ความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ $f_0 = 20 \text{kHz}$ และ $L_r = 0.54 \text{mH}$

$$C_r = \frac{1}{(2 \times \pi \times (20000))^2 \times (0.54 \times 10^{-3})}$$

เพราะฉะนั้น $C_r = 137.2 \text{nF}$

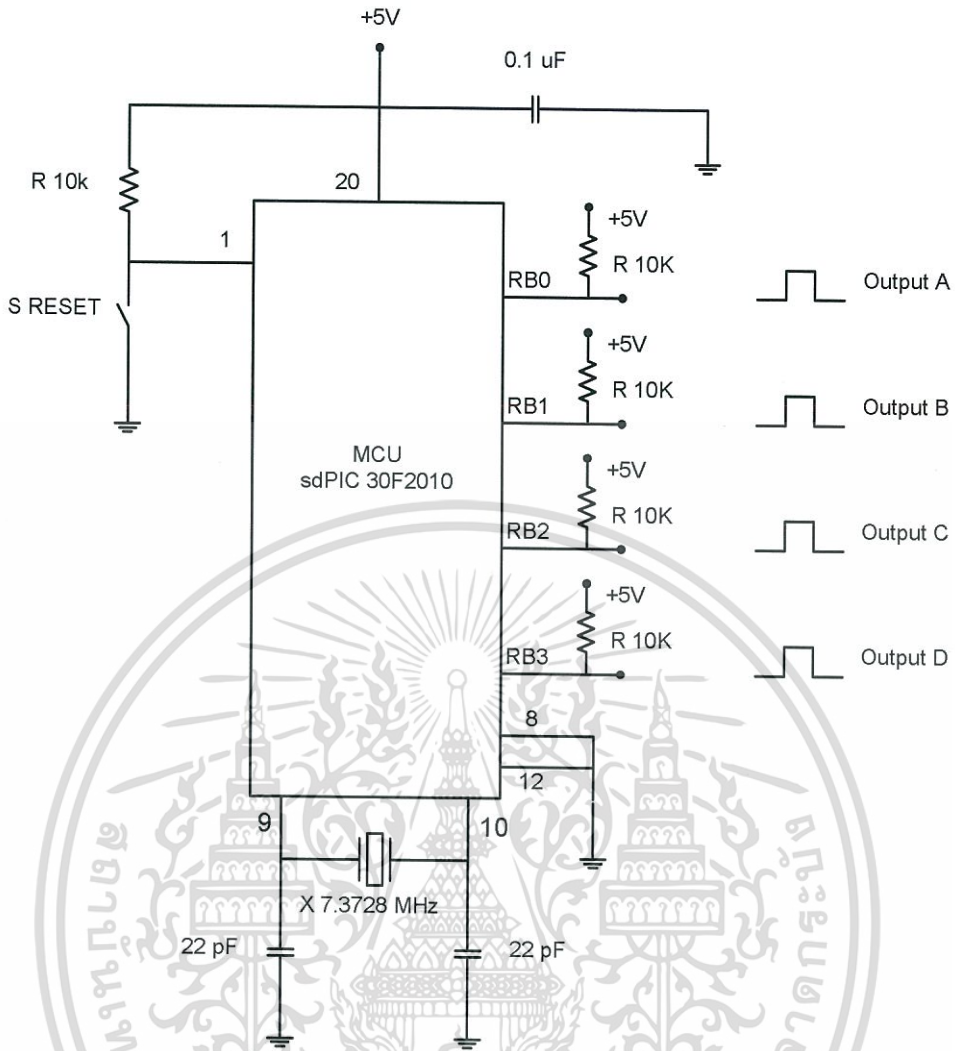
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่3.1 พารามิเตอร์ของระบบ

ค่าความเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลทางด้านปฐมภูมิ (L_{kp})	0.360 mH
ค่าความเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กในแกน (L_m)	12.5 mH
ค่าความเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลทางด้านทุติยภูมิ (L_{ks})	5 mH
ค่าความเหนี่ยวนำเรโซแนนต์ (L_r)	0.54 mH
อัตราส่วนรอบหม้อแปลง (n)	1/7
ความต้านทานสมมูล(R_{eq})	831 Ω
ค่าความจุไฟฟ้าสมมูล (C_{eq})	4.93 nF
ค่าความจุไฟฟ้าเรโซแนนต์ (C_r)	137.2 nF
ความถี่สวิตชิง(f_s)	20 kHz

3.5 วงจรควบคุมและสร้างสัญญาณ

วงจรควบคุมที่ใช้สร้างสัญญาณ PWM, PS-PWM และ PDM นั้นได้มาจากไมโครโปรเซสเซอร์ dsPIC 30F2010 ดังรูปที่ 3.9 โดยการเขียนโปรแกรมควบคุมด้วยภาษา C ผ่านโปรแกรม MPLAB C30 ซึ่งได้เขียนให้มีเอาต์พุต ทั้งหมด 4 เอาต์พุต A , B , C , และ D ออกมาจากขาที่ RB0 , RB1 , RB2 และ RB3 ตามลำดับโดยสร้างสัญญาณที่ความถี่ 20 kHz – 24 kHz เพื่อส่งต่อไปให้วงจรขับเคลื่อนของเพาเวอร์มอสเฟต ทั้ง 4 ชุด โดยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ dsPIC ในการสร้างสัญญาณเพราะว่าสะดวกแก่การเปลี่ยนรูปสัญญาณให้กับชุดขับ



รูปที่ 3.9 รูปวงจรไมโครโปรเซสเซอร์ dsPIC 30F2010

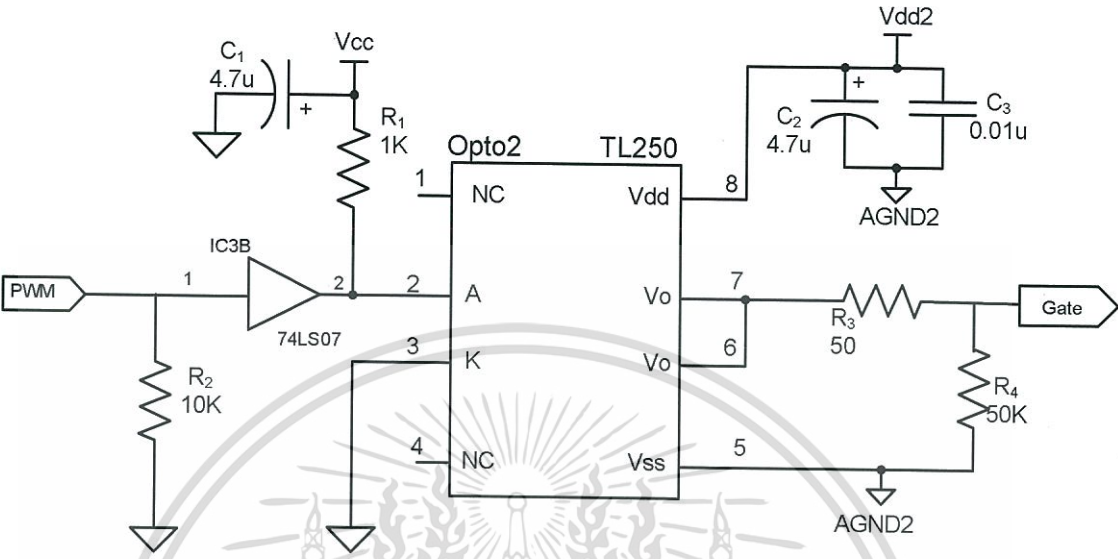
3.6 วงจรขับนำเกตด้วยไอซี TLP250

สัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตตามความกว้างของพัลส์มีลักษณะเป็นสัญญาณพัลส์ สี่เหลี่ยมสัญญาณนี้ถูกส่งไปยังวงจรสร้างสัญญาณขับนำเกต ด้วยไอซีสร้างสัญญาณขับนำเกต เบอร์ TLP250 เพื่อควบคุมการทำงานของมอสเฟต วงจรสร้างสัญญาณขับนำเกตแสดงดังรูปที่ 3.10 จาก วงจรสัญญาณด้านเข้าเป็นสัญญาณที่ถูกส่งมาจากวงจรมอดูเลตตามความกว้างของพัลส์มีขนาดแรงดัน 0 V ถึง 5 V สัญญาณนี้ถูกส่งเข้าไปไบอัสให้ LED ใน TLP250 นำกระแส โดยมี ความต้านทาน R_1 ทำหน้าที่จำกัดกระแสในการไบอัสและใช้ไอซีบัฟเฟอร์ 74LS07 เป็นตัวป้องกันไฟ 5 V ที่จะเกิดการไหลย้อนกลับของแรงดันเข้าไปในวงจรมอดูเลตตามความกว้างของสัญญาณพัลส์ (PWM) เมื่อ LED นำกระแส ทำให้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ทางด้านเอาต์พุตของ TLP250 นำกระแส แรงดันที่ขา 7 ของ TLP250 เทียบกับกราวด์เท่ากับ 15 V และแรงดันที่ V_{GS} ของมอสเฟตเท่ากับ 15 V กับ 0 V เมื่อแรงดัน V_{GS} มีค่าเป็นบวกสามารถทำให้มอสเฟตนำกระแสได้ ส่วนในกรณีที่แรงดันอินพุตน้อยกว่า 0.7 V LED ภายใน TLP250 หยุดนำกระแสส่งผลให้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ทางด้านเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

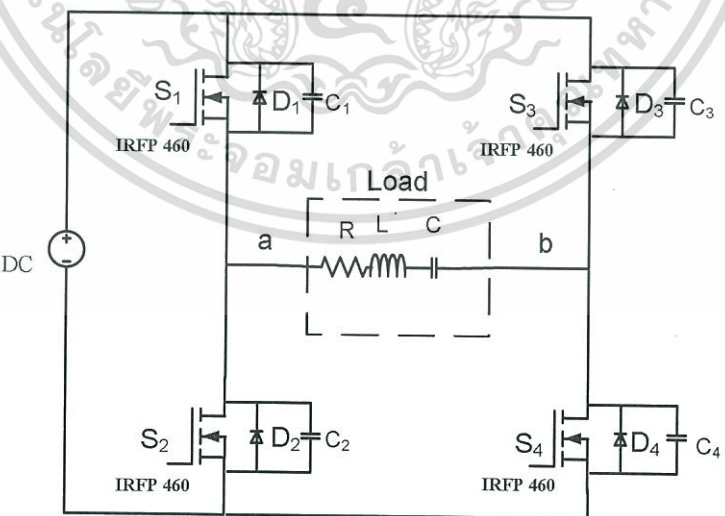
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ TLP250 หยุดนำกระแสเช่นเดียวกัน แต่ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP จะนำกระแสแทนส่งผลให้ที่สถานะนี้แรงดันที่ขา 7 ของ TLP250 เทียบกับกราวด์มีค่าประมาณ 0 V เมื่อแรงดันที่ V_{GS} มีค่าเป็น 0 V ก็จะทำให้มอสเฟตหยุดนำกระแสได้



รูปที่ 3.10 วงจรขับนำเกตโดยใช้ไอซีเบอร์ TLP250

วงจรภาคกำลังนี้เป็นวงจรที่ใช้อินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ ซึ่งใช้มอสเฟตทั้งหมด 4 ตัว ดังรูปที่ 3.11 โดยจะนำกระแส และหยุดนำกระแส ตามจังหวะสัญญาณที่ถูกส่งมาจาก วงจรขับเกต ในรูปที่ 3.10 โดยวงจรขับนำเกตต้องสร้าง 4 ชุด สำหรับมอสเฟตทั้งหมด 4 ตัว



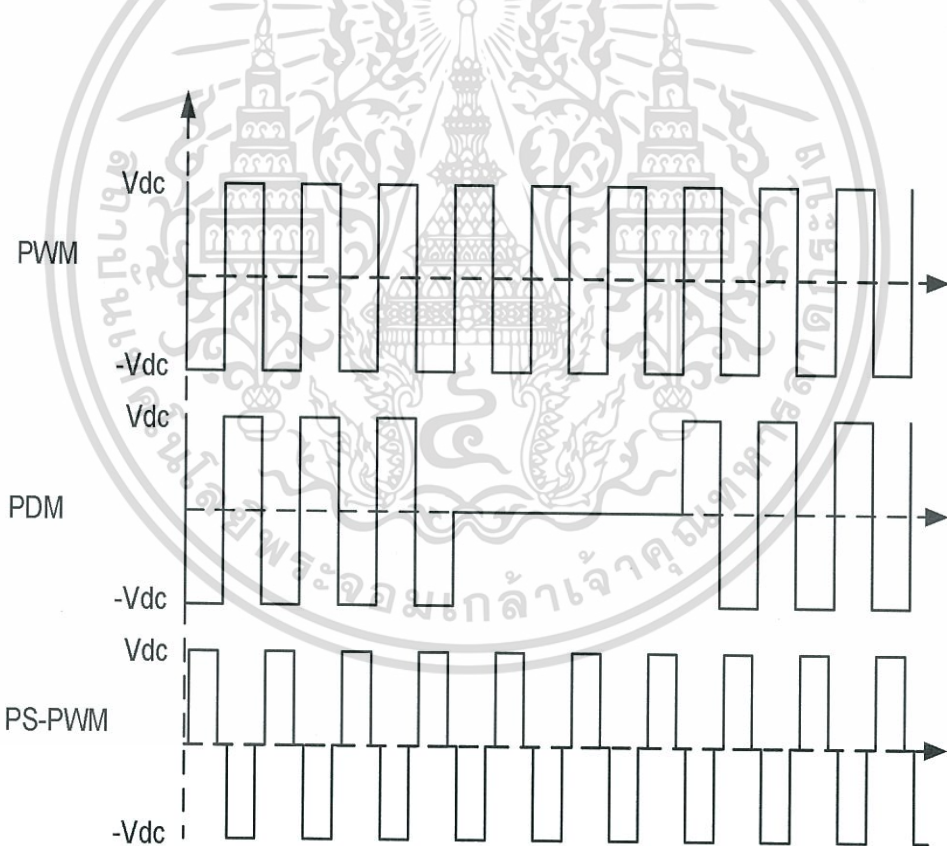
รูปที่ 3.11 วงจรภาคกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอสเฟตทั้ง 4 ตัว จะทำงานแยกอิสระจากกัน โดยรับสัญญาณ PWM จากวงจรขับเคลื่อนด้วยความถี่ 20 kHz – 24 kHz การทำงานของสัญญาณที่ออกมาจากวงจรขับเคลื่อน โดยปกติสัญญาณ PWM จะทำงานเป็นคู่ๆ ให้ S_1 และ S_4 นำกระแสโดยที่ S_2 และ S_3 ยังคงหยุดนำกระแสอยู่ สลับกับการให้ S_1 และ S_4 หยุดนำกระแส แล้วก็ค่อยให้ S_2 และ S_3 นำกระแส ทำอย่างนี้ไปเรื่อยๆ

การทำงานของสัญญาณ PS-PWM ช่วงเวลา S_1 และ S_4 นำกระแส S_1 จะนำกระแส ก่อน S_4 เป็นเวลา Φ และช่วงเวลาหยุดนำกระแสก็ช้ากว่า S_1 เพราะช่วงนำกระแส ช้ากว่านั่นเอง ส่วน S_2 และ S_3 ก็เหมือนกัน ช่วงนำกระแส S_3 จะช้ากว่า S_2 เป็นเวลา Φ และช่วงหยุดนำกระแส ก็จะช้ากว่า S_2 ด้วยทำอย่างนี้ไปเรื่อยๆ

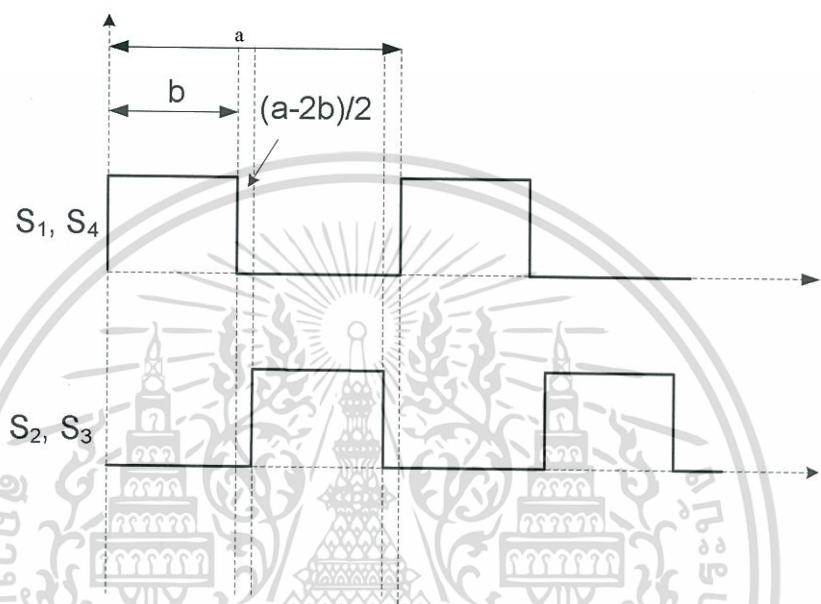
การทำงานของสัญญาณ PDM โดยที่มอสเฟตจะทำงานเป็นคู่ๆ S_1 กับ S_4 นำกระแส สลับกับ S_2 กับ S_3 ทำอย่างนี้ไปเรื่อยๆโดยการทดลองนี้ได้ใช้สัญญาณคาบเวลา 5 คาบเวลาและหยุดจ่ายแรงดัน 5 คาบเวลาโดยช่วงที่หยุด S_2 และ S_4 นำกระแส เพื่อให้โหลดทั้ง 2 ด้านลงกราวด์เพื่อที่จะทำให้แรงดันมีค่าเป็นศูนย์ โดยจะจ่ายแรงดันเป็นสัญญาณและหยุด เป็นอย่างนี้ไปเรื่อยๆ



รูปที่ 3.12 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของสัญญาณควบคุมทั้ง 3 แบบคือ PWM, PDM และ PS-PWM

3.7 การสร้างสัญญาณ PWM

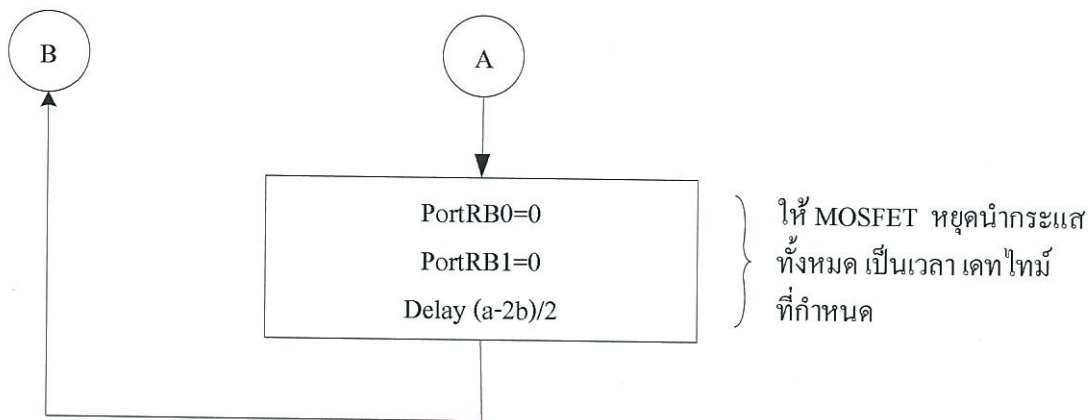
หัวข้อนี้จะกล่าวถึงการสร้างสัญญาณ PWM โดยได้กล่าวถึงรูปแบบสัญญาณ และสภาวะการทำงานไว้ในบทที่ 2 โดยการสร้างสัญญาณนั้นได้มาจาก การเขียนโปรแกรม dsPIC 30F2010 โดยหัวข้อนี้จะกล่าวถึง Flowchart และตัวโปรแกรม ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.13 คาบเวลาที่ใช้เขียนโปรแกรมรูปสัญญาณแบบ PWM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



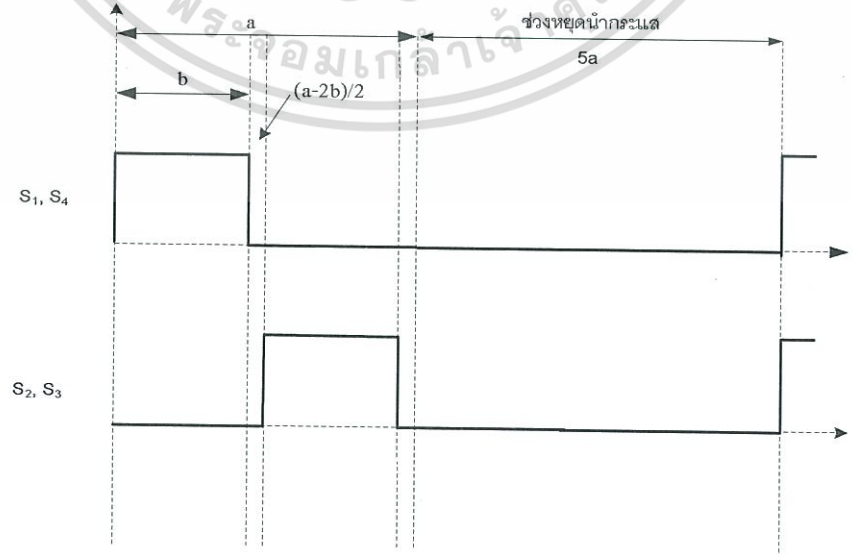
รูปที่ 3.14 Flowchart การสร้างรูปสัญญาณแบบ PWM

รูปที่ 3.14 โปรแกรมในการสร้างรูปสัญญาณ PWM เริ่มต้นจากการกำหนดค่าความถี่ที่ต้องการในที่นี้ทดลองคำนวณที่ 20 kHz และกำหนดค่าดีวตี้ไซเคิลไว้ที่ 48% แล้วจึงคำนวณค่าออกมาเป็นค่าคาบเวลาที่จะต้องทำงานและหยุดของรูปสัญญาณของมอสเฟตแต่ละตัวดังรูปที่ 3.13

คำนวณได้ค่า $a = 50\mu s$, $b = 24\mu s$, $(a-2b)/2$ (เดทไทม์) = $1\mu s$ แล้วกำหนดค่าเริ่มต้นต่างๆ ให้เป็นศูนย์ และมอสเฟตทั้งหมดค่าเริ่มต้นให้ หยุดนำกระแส จากนั้นให้ S_1 และ S_4 นำกระแสเป็นเวลา $24\mu s$ ช่วงเดทไทม์ หยุดนำกระแสมอสเฟตทั้งหมดเป็นเวลา $1\mu s$ แล้ว S_2 และ S_3 ก็ นำกระแสเป็นเวลา $24\mu s$ ช่วงเดทไทม์ หยุดนำกระแสมอสเฟตทั้งหมดเป็นเวลา $1\mu s$ ทำอย่างนี้เรื่อยๆ

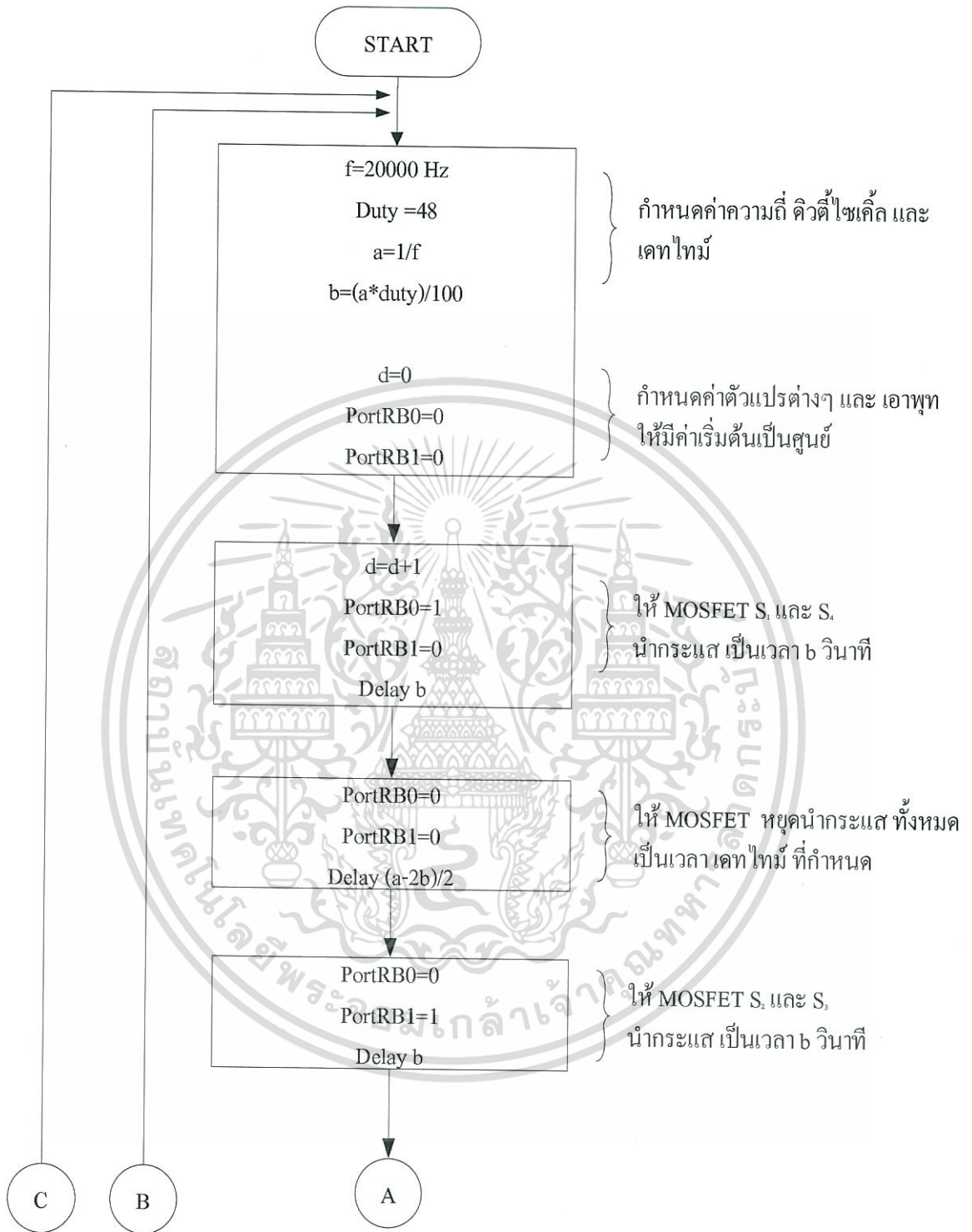
3.8 การสร้างสัญญาณ PDM

ในการสร้างสัญญาณ PDM ซึ่งได้กล่าวถึงรูปแบบสัญญาณ และสภาวะการทำงานทั้งหมดไว้แล้วในบทที่2 โดยหัวข้อนี้จะกล่าวถึง Flowchart และตัวโปรแกรม ดังรูปที่ 3.16

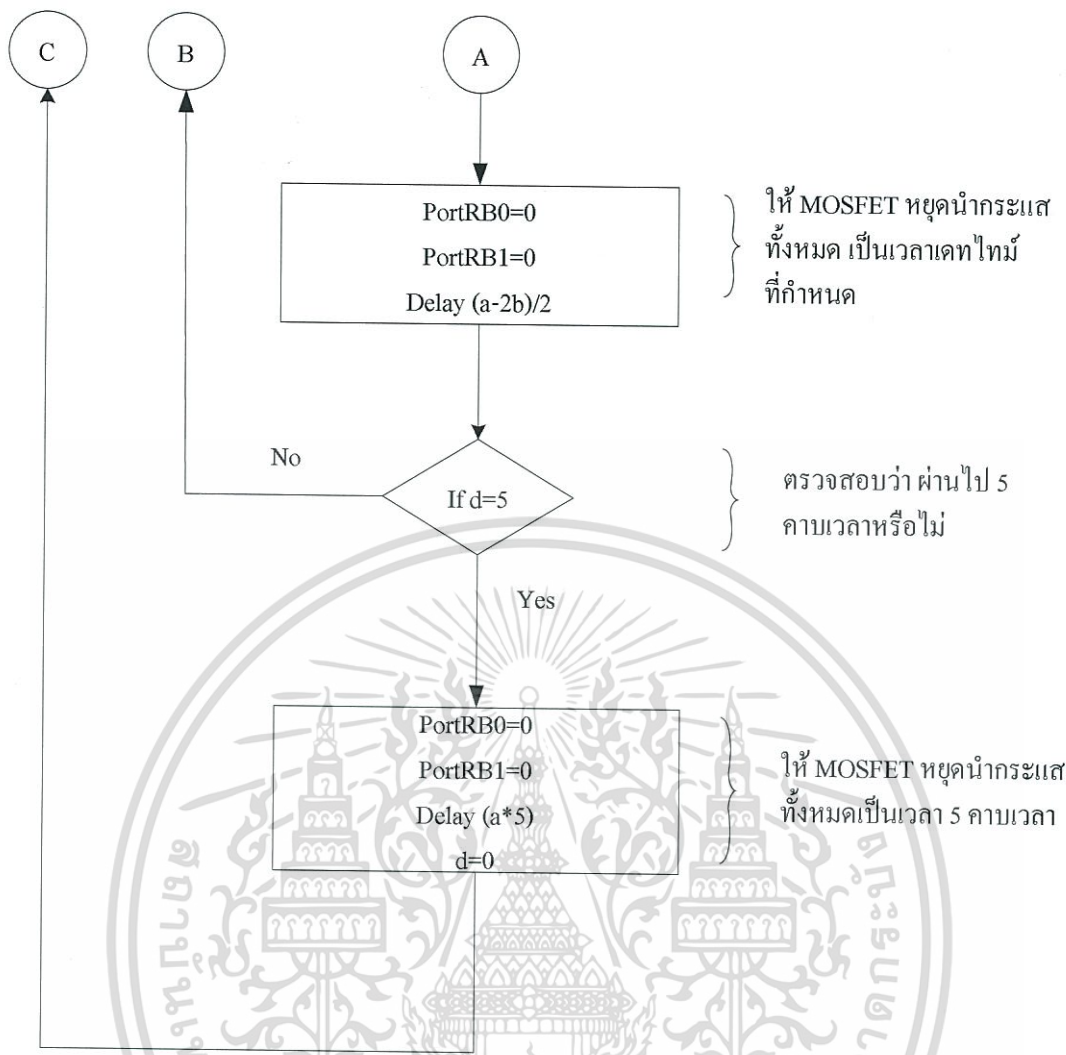


รูปที่3.15 คาบเวลาที่ใช้เขียนโปรแกรมรูปสัญญาณแบบ PDM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



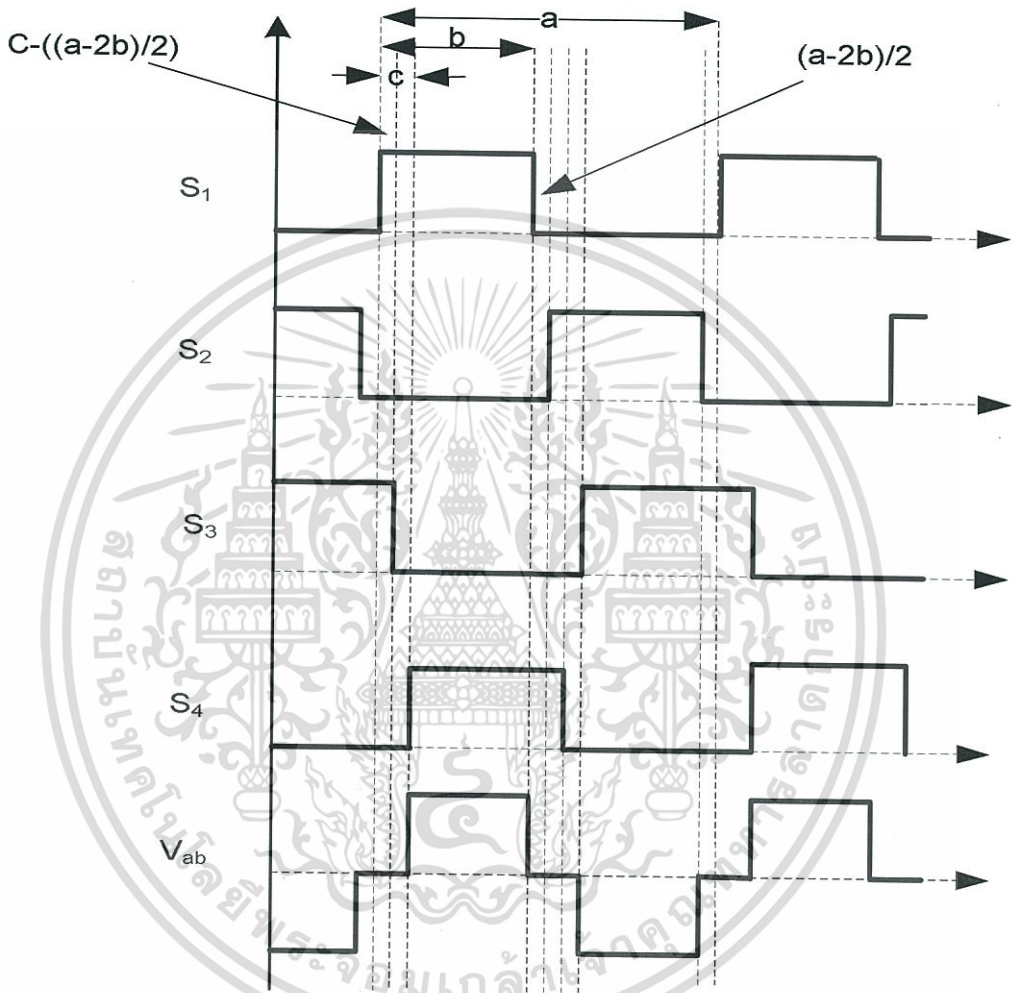
รูปที่ 3.16 Flowchart การสร้างรูปสัญญาณแบบ PDM

รูปที่ 3.16 โปรแกรมในการสร้างรูปสัญญาณ PDM เริ่มต้นจากการกำหนดค่าความถี่ที่ต้องการคือ 20 kHz และกำหนดดิวตี้ไซเคิลไว้ที่ 48% แล้วจึงคำนวณค่าออกมาเป็นค่าคาบเวลาที่จะต้องทำงาน และหยุดของรูปสัญญาณแต่ละมอสเฟต

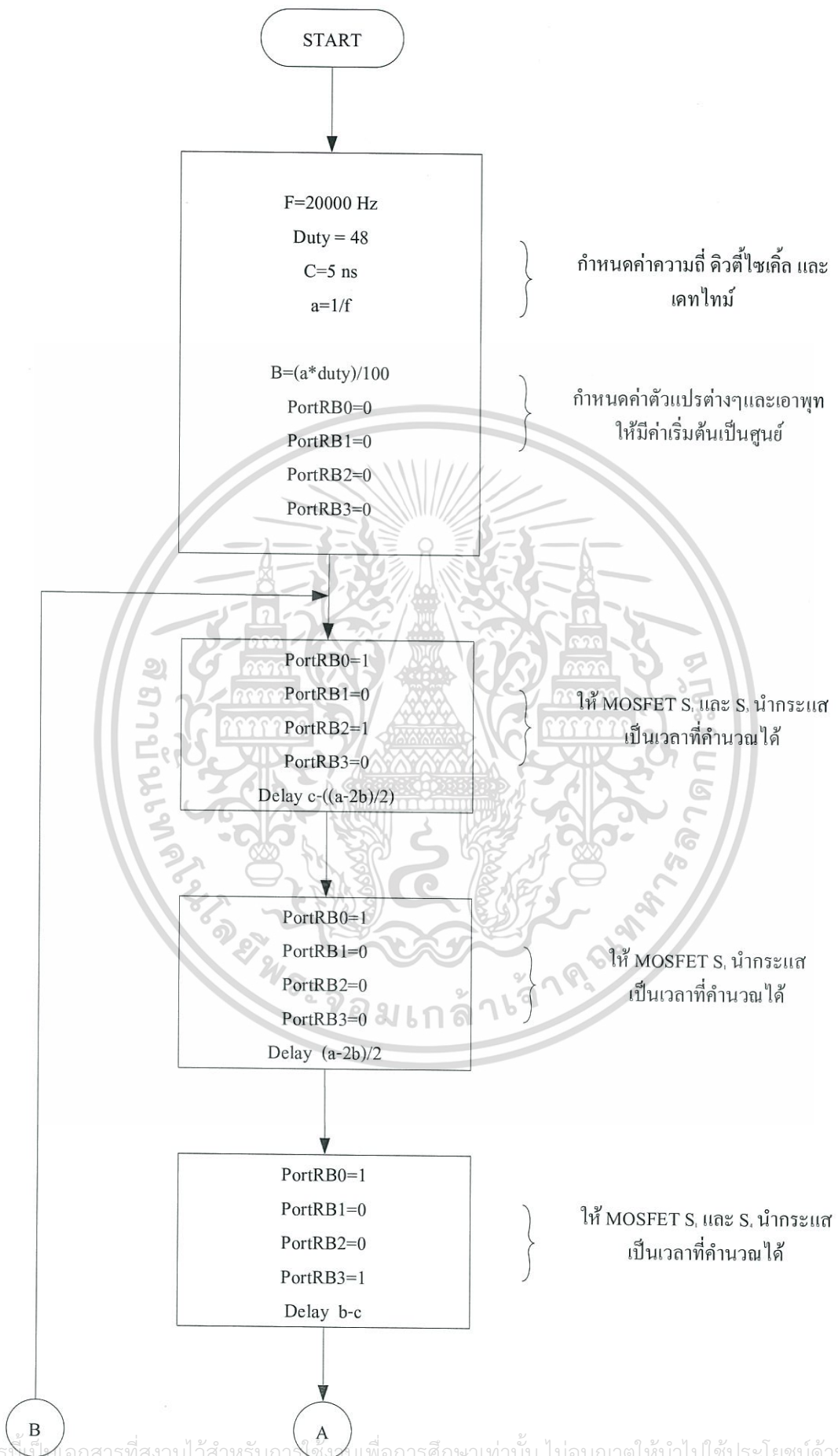
คำนวณได้ค่า $a = 50\mu s$, $b = 24\mu s$, $(a-2b)/2$ (คือช่วงเวลาเดทไทม์) $= 1\mu s$, แล้วกำหนดค่าเริ่มต้นต่างๆ และมอสเฟตทั้งหมดค่าเริ่มต้นให้ หยุดนำกระแส จากนั้น ให้ S_1 และ S_4 นำกระแส เป็นเวลา $24\mu s$ ช่วงเวลาเดทไทม์ หยุดนำกระแส มอสเฟตทั้งหมดเป็นเวลา $1\mu s$ แล้ว S_2 และ S_3 ก็ นำกระแส เป็นเวลา $24\mu s$ ช่วงเวลาเดทไทม์ หยุดนำกระแส มอสเฟตทั้งหมดเป็นเวลา $1\mu s$ ทำอย่างนี้ไปเรื่อยๆ และตรวจสอบว่าเป็นรอบที่ 5 หรือเปล่า ถ้าใช่ก็ให้มอสเฟตทั้งหมด หยุดนำกระแสเป็นเวลา 5 คาบเวลาหลัง เมื่อครบแล้วก็ให้มอสเฟตเริ่มทำใหม่แบบนี้ไปเรื่อยๆ

3.9 การสร้างสัญญาณ PS-PWM

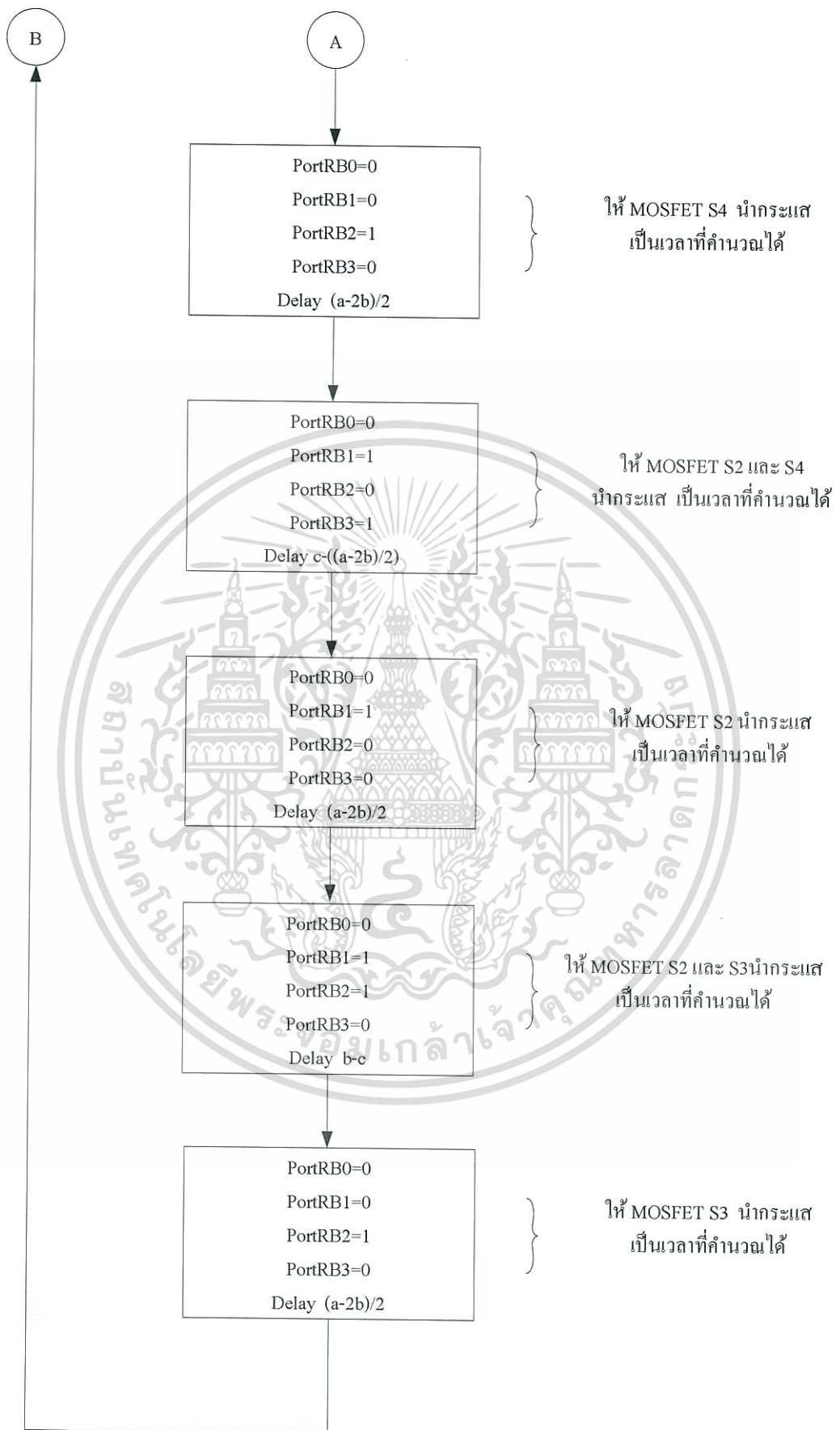
ในการสร้างสัญญาณ PS-PWM ซึ่งได้กล่าวถึงรูปแบบสัญญาณ และสภาวะการทำงานทั้งหมดไว้แล้วในบทที่ 2 ซึ่งได้แบ่งช่วงสัญญาณเป็น 8 ช่วง ดังในรูปที่ 3.17 เพื่อเขียนเป็นโปรแกรมในการสร้างสัญญาณดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.17 ช่วงสัญญาณที่แบ่งเป็น 8 ช่วงเพื่อใช้ในการเขียนโปรแกรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 Flowchart การสร้างรูปสัญญาณแบบ PS-PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.18 โปรแกรมในการสร้างรูปสัญญาณ PS-PWM เริ่มต้นจากการกำหนดค่าความถี่ที่ต้องการในที่นี้กำหนดที่ 20 kHz และกำหนดค่าดิวตี้ไซเคิลไว้ที่ 48% แล้วจึงกำหนดค่าออกมาเป็นคาบเวลาที่จะต้องทำงาน และหยุดของรูปสัญญาณแต่ละมอสเฟตดังรูปที่ 3.17

คำนวณได้ค่า $a=50\text{ us}$, $b=24\text{ us}$, c (ค่าช่วงเวลาที่เลื่อนเฟส) $=5\text{ us}$ หรือ เฟสชิฟไปเป็นมุม 36° , $(a-2b)/2$ (ช่วงเวลาเดทไทม์) $=1\text{ us}$, $c-((a-2b)/2) = 4\text{ us}$ แล้วกำหนดค่าเริ่มต้นต่างๆให้เป็นศูนย์ และมอสเฟตทั้งหมดเริ่มต้นให้ หยุดนำกระแส จากนั้นให้ S_1 และ S_3 นำกระแส เป็นเวลา 4 us ช่วงเวลาเดทไทม์ S_1 นำกระแส เป็นเวลา 1 us แล้ว S_1 และ S_4 นำกระแส เป็นเวลา 19 us ช่วงเวลาเดทไทม์ S_4 นำกระแส เป็นเวลา 1 us แล้ว S_2 และ S_4 นำกระแส เป็นเวลา 4 us ช่วงเวลาเดทไทม์ S_2 นำกระแส เป็นเวลา 1 us แล้ว S_2 และ S_3 นำกระแส เป็นเวลา 19 us ช่วงเวลาเดทไทม์ S_3 นำกระแส เป็นเวลา 1 us ทำอย่างนี้ไปเรื่อยๆ

จากโปรแกรมที่เขียน ทั้ง 3 รูปแบบที่ความถี่อื่นๆก็ทำเช่นเดียวกันกับที่นำเสนอข้างต้น เมื่อนำไปโปรแกรมลง ไมโครโปรเซสเซอร์เพื่อนำไปขับสัญญาณที่ขาเกต ของมอสเฟตเพื่อให้ได้รูปสัญญาณที่โหลดตามต้องการ

3.10 สรุป

บทนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบและสร้างเครื่องผลิตก๊าซโอโซน โดยใช้อิเล็กทรอนิกส์ทรานส์ซิสเตอร์ 2 ชั้น นั้นเลือกใช้แก้วเป็นฉนวนชั้นที่ 1 คำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าและความต้านทานไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์ซิสเตอร์ 2 ชั้นที่สร้างขึ้น คำนวณ แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดโอโซนเท่ากับ 2.1 kV จากนั้นก็เลือกชนิดและขนาดแกนหม้อแปลงแบบ EE 80 แล้วคำนวณจำนวนรอบหม้อแปลงทางด้านปฐมภูมิ เท่ากับ 33 รอบ และ ทางด้านทุติยภูมิ เท่ากับ 224 รอบ จากนั้นคำนวณหาขนาดของลวดตัวนำและเลือกเบอร์ลวดทางด้านปฐมภูมิและทางด้านทุติยะ เท่ากับ AWG17 (1.617 mm^2) และ AWG25 (0.21 mm^2) ตามลำดับ และแสดงการคำนวณความวงจรเรโซแนนซ์แบบ LCC

สร้างวงจรสัญญาณควบคุม ในที่นี้เลือกใช้ dsPIC 30F2010 ในการเขียนโปรแกรมควบคุมแบบ PWM, PDM และ PS-PWM และ เลือกใช้ไอซี TLP250 เป็นวงจรขับนำเกตทั้งหมด 4 ชุดกับมอสเฟต 4 ตัว มีการแสดงโหมดการทำงานของแต่ละรูปแบบสัญญาณ พร้อมทั้งแสดง Flowchart การเขียนโปรแกรมของแต่ละสัญญาณ

บทที่ 4

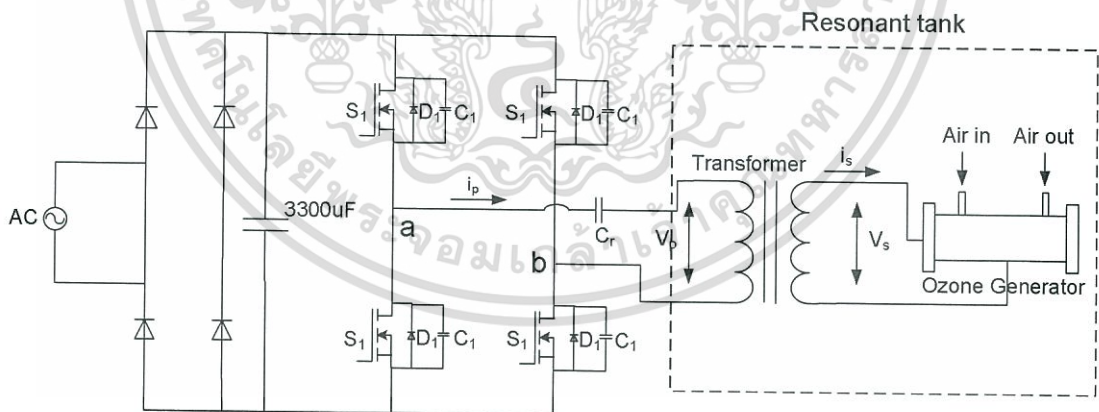
ผลการทดลองของเครื่องผลิตก๊าซโอโซน

4.1 บทนำ

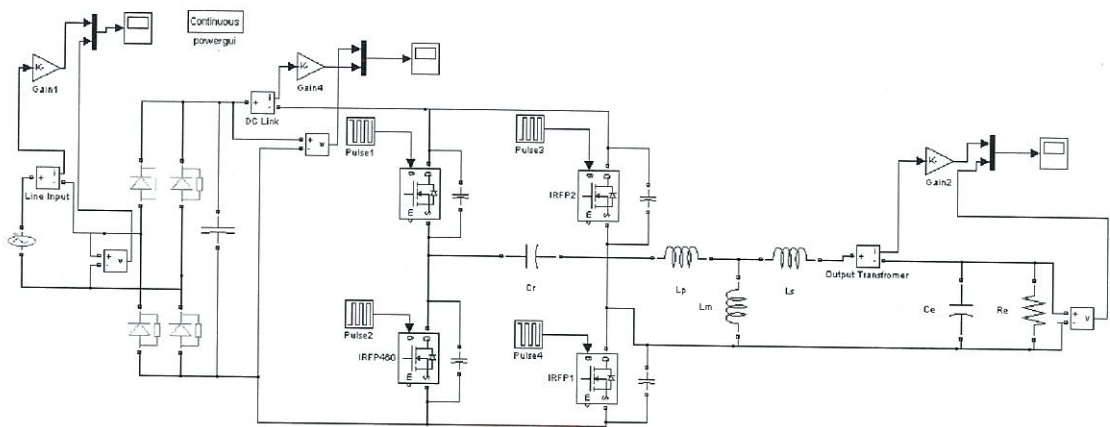
ในบทนี้กล่าวถึงการทดลองการทำงานของเครื่องต้นแบบเครื่องผลิตก๊าซโอโซนที่สร้างขึ้นโดยการวัดผลทางไฟฟ้าที่จุดต่างๆและทำการเก็บผลทางเคมี โดยการเปลี่ยนรูปแบบสัญญาณ และปรับความถี่ เพื่อดูผลการเกิดปริมาณโอโซนพร้อมทั้งวัดแรงดันและกระแสและกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์เพื่อดูประสิทธิภาพของเครื่อง

4.2 การวัดผลการทดลองทางไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้จะเก็บผลการทดลองทางไฟฟ้าของเครื่องผลิตก๊าซโอโซนเครื่องต้นแบบซึ่งวงจรแสดงในรูปที่ 4.1 โดยจะจ่ายแรงดันอินพุตเท่ากับ 311V และทำการปรับความถี่ 20 kHz-24 kHz ในแต่ละรูปแบบสัญญาณ โดยทำการเก็บผลของกำลังไฟฟ้า กระแส และ แรงดันทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์และเก็บผลของแรงดันและกระแสที่โหลดเพื่อดูของกระแสและแรงดันที่โหลดเมื่อทำการเปลี่ยนรูปแบบสัญญาณและปรับความถี่ของสัญญาณ การทำงานของวงจรในรูปที่ 4.2 โดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink ในการจำลองการทำงาน

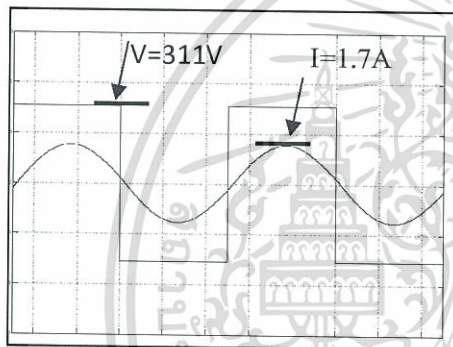


รูปที่ 4.1 วงจรกำลังของเครื่องกำเนิดก๊าซโอโซน

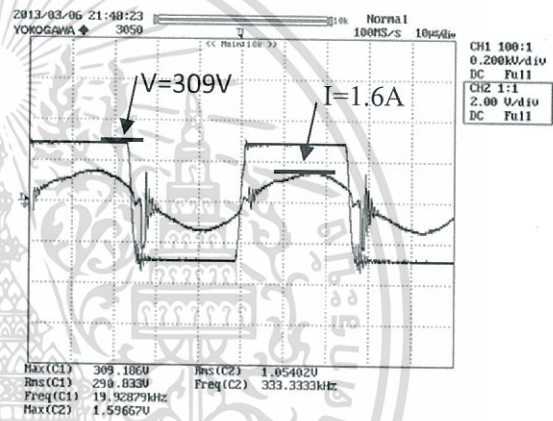


รูปที่ 4.2 การจำลองการทำงานของวงจรกำลังของเครื่องกำเนิดก๊าซไอโซน

- สัญญาณ PWM ที่ความถี่ 20 kHz

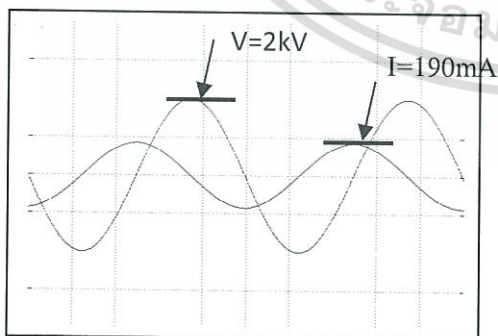


(ก)

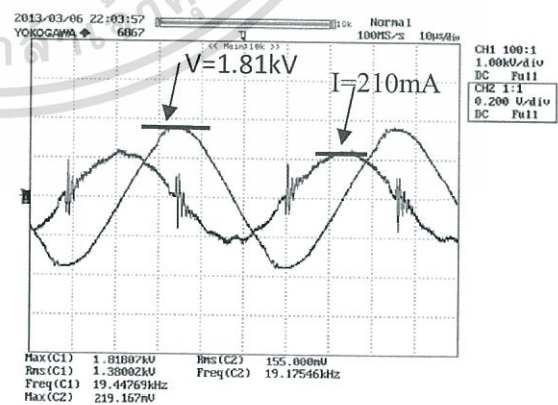


(ข)

รูปที่ 4.3 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 20 kHz



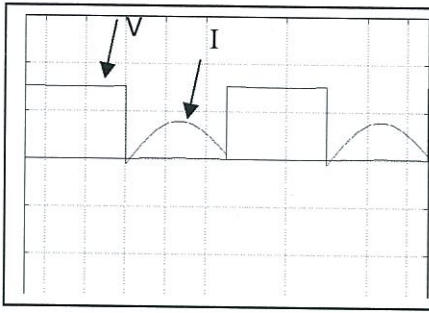
(ก)



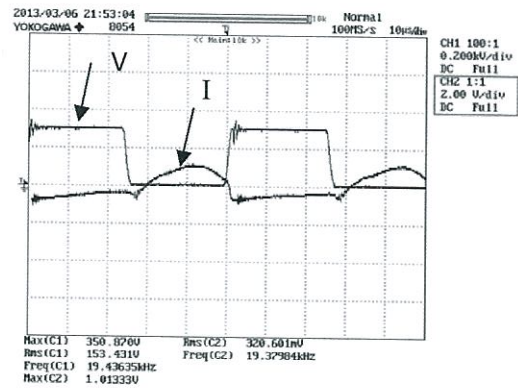
(ข)

รูปที่ 4.4 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 20 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



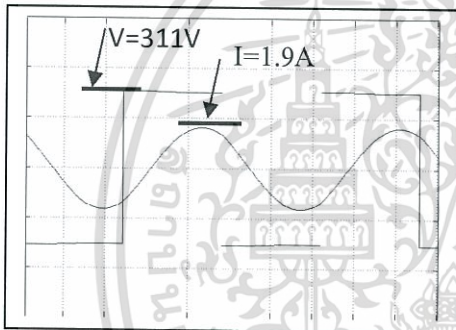
(ก)



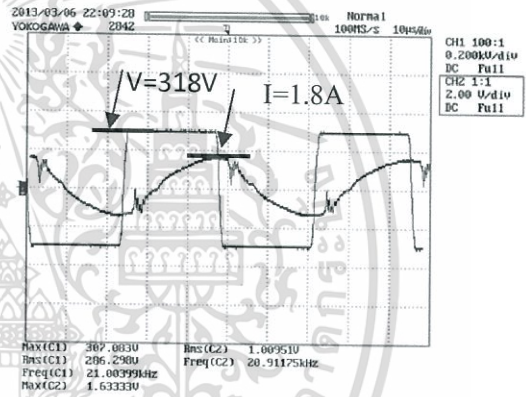
(ข)

รูปที่ 4.5 สัญญาณกระแสและแรงดันตกรวมสวิตช์ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 20 kHz

• สัญญาณ PWM ที่ความถี่ 21 kHz

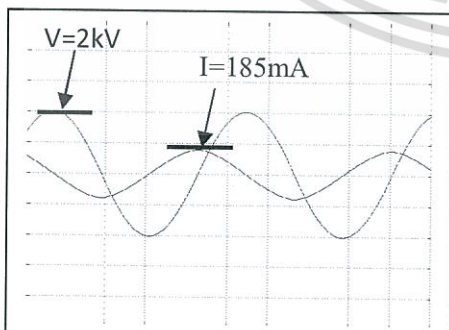


(ก)

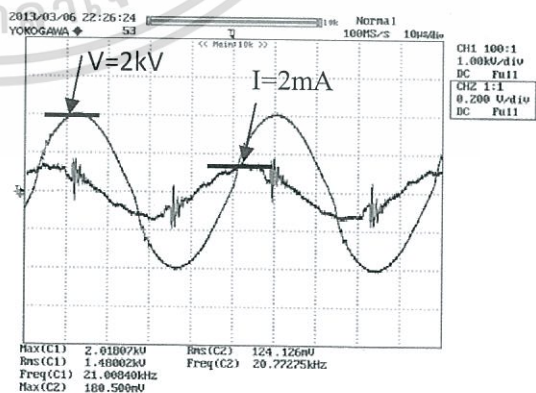


(ข)

รูปที่ 4.6 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 21 kHz



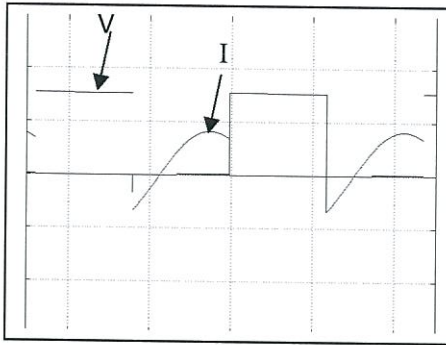
(ก)



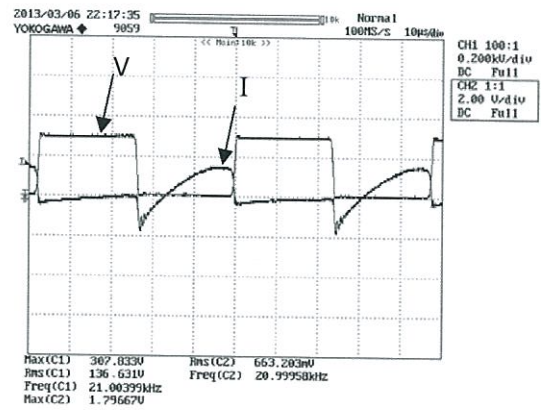
(ข)

รูปที่ 4.7 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 21 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



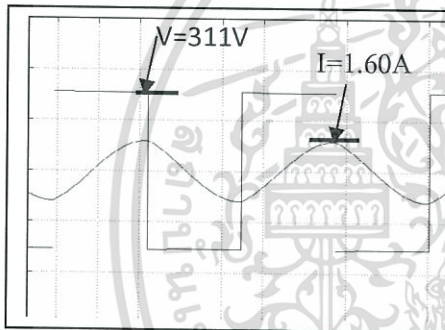
(ก)



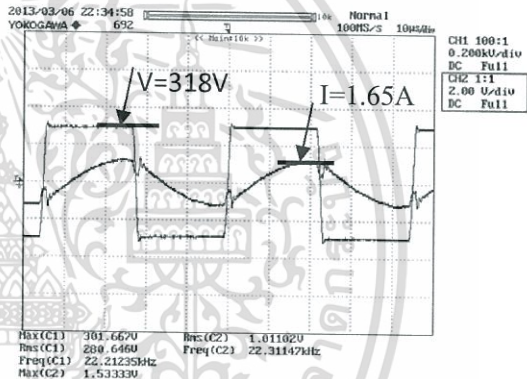
(ข)

รูปที่ 4.8 สัญญาณกระแสและแรงดันตกรวมสวิทช์ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 21 kHz

• สัญญาณ PWM ที่ความถี่ 22 kHz

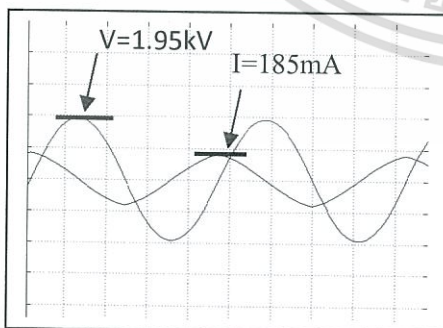


(ก)

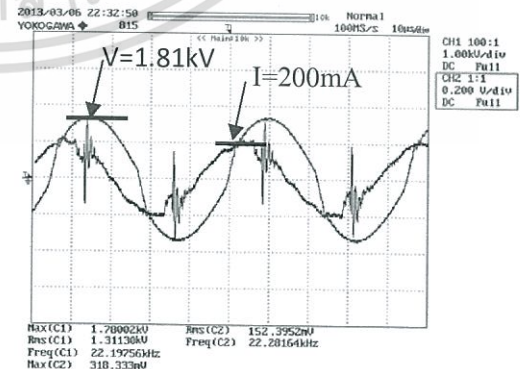


(ข)

รูปที่ 4.9 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 22 kHz



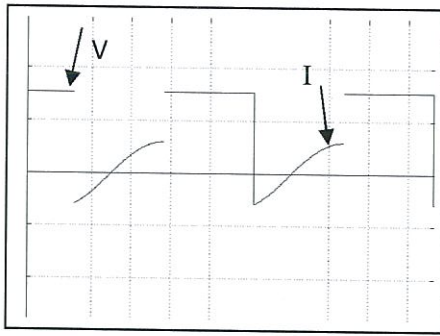
(ก)



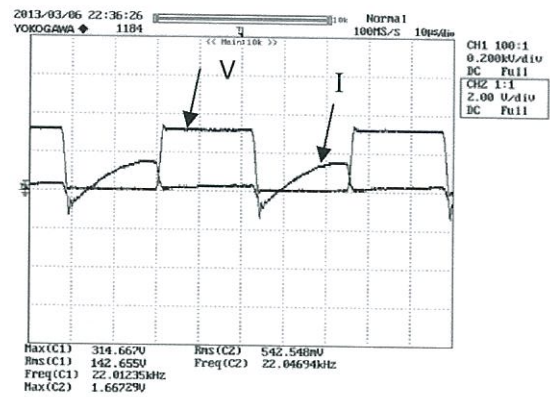
(ข)

รูปที่ 4.10 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 22 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



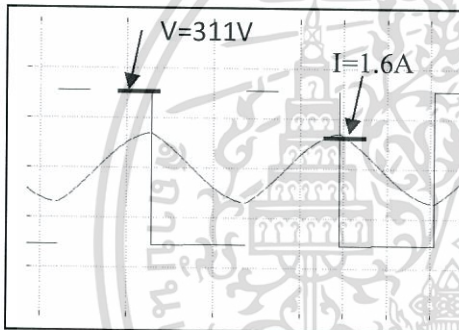
(ก)



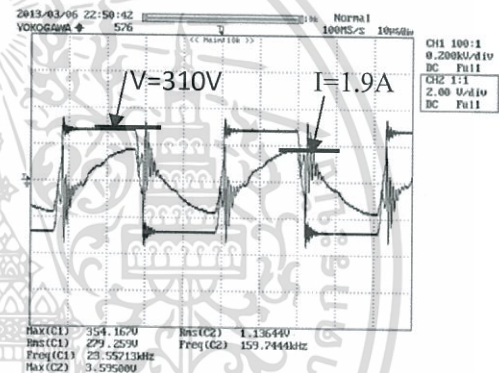
(ข)

รูปที่ 4.11 สัญญาณกระแสและแรงดันตันทกรูมสวิตช์ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 22 kHz

● สัญญาณ PWM ที่ความถี่ 23 kHz

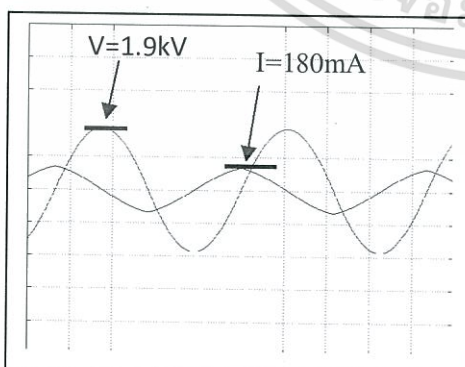


(ก)

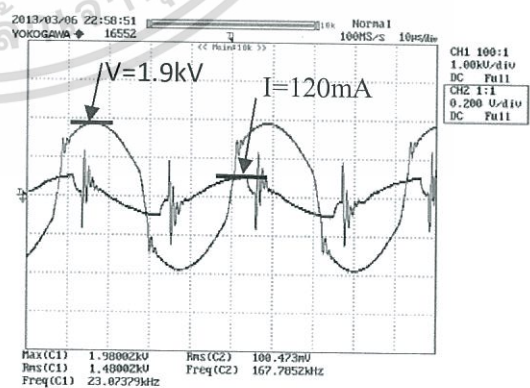


(ข)

รูปที่ 4.12 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 23 kHz



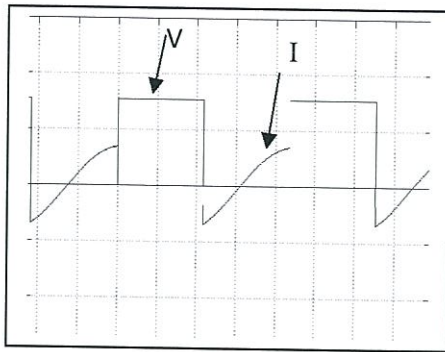
(ก)



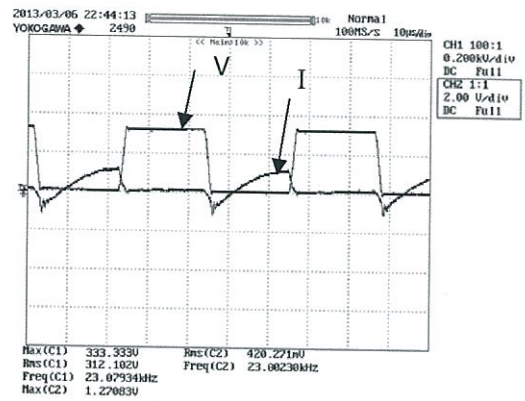
(ข)

รูปที่ 4.13 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 23 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



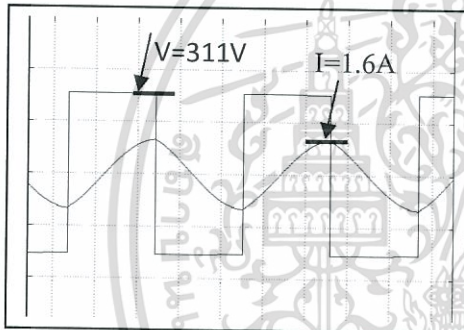
(ก)



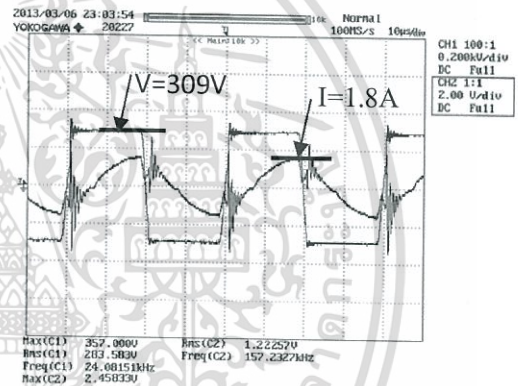
(ข)

รูปที่ 4.14 สัญญาณกระแสและแรงดันตักคร่อมสวิตช์ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 23 kHz

● PWM ที่ความถี่ 24 kHz

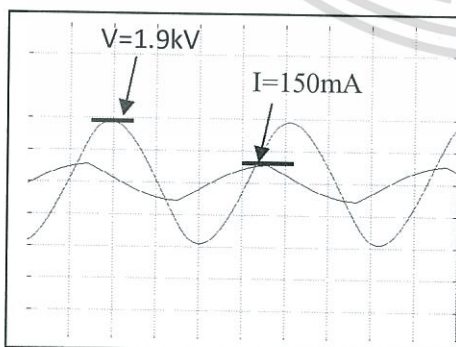


(ก)

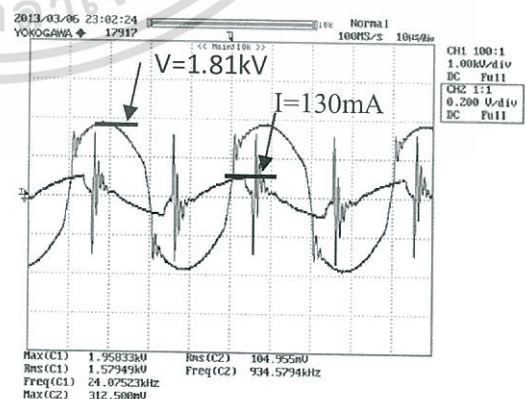


(ข)

รูปที่ 4.15 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 24 kHz



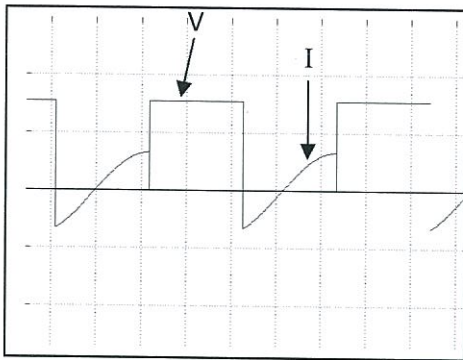
(ก)



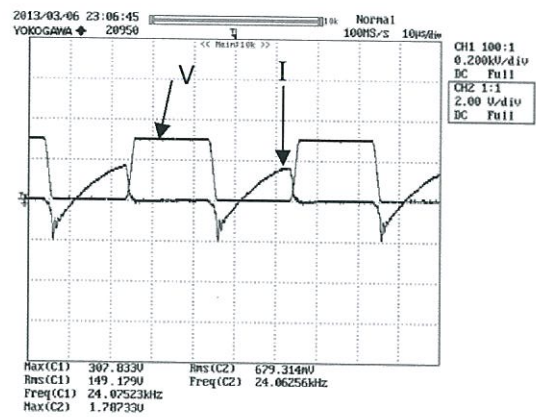
(ข)

รูปที่ 4.16 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 24 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

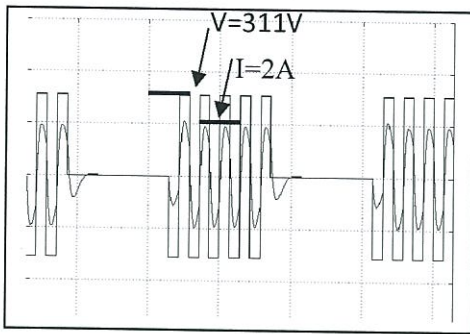
รูปที่ 4.17 สัญญาณกระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 24 kHz

จากผลการจำลองและผลการทดลองของสัญญาณแบบ PWM โดยการปรับความถี่ตั้งแต่ 20 kHz ถึง 24 kHz พบว่าสัญญาณเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์จากการจำลอง V_p เท่ากับ 311 V และ กระแส I_p เท่ากับ 1.6 A - 1.9 A สัญญาณเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์จากการทดลอง V_p เท่ากับ 309 V - 318 V และ กระแส I_p เท่ากับ 1.8 A - 1.9 A และยังพบว่าเมื่อเพิ่มความถี่ขึ้นเฟสของกระแสจะตามหลังแรงดันเพิ่มตามไปด้วย ลักษณะสัญญาณจากการจำลองและจากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกันแล้วมีความใกล้เคียงกัน

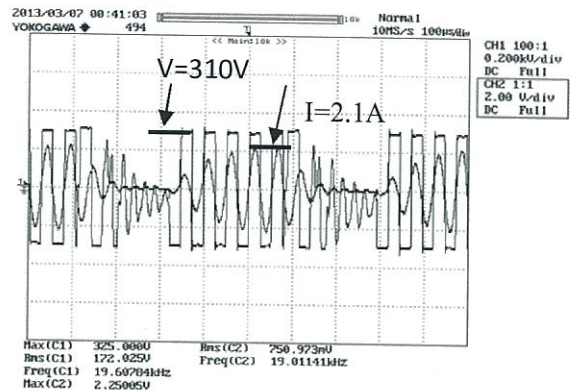
สัญญาณเอาต์พุตหม้อแปลงจากการจำลอง V_p เท่ากับ 1.9 kV- 2kV และ กระแส I_p เท่ากับ 150 mA - 190 mA สัญญาณเอาต์พุตหม้อแปลงจากการทดลอง V_p เท่ากับ 1.8 kV- 2kV และ กระแส I_p เท่ากับ 120 mA - 210 mA เฟสของกระแสจะนำแรงดัน ลักษณะสัญญาณจากการจำลองและจากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกันแล้วมีความใกล้เคียงกัน

แรงดันและกระแสตกคร่อมสวิตช์ S_1 , S_2 , S_3 และ S_4 มีลักษณะเหมือนกัน โดยที่แรงดันตกคร่อมสวิตช์จะเป็นศูนย์ก่อนที่กระแสจะเริ่มไหลผ่านสวิตช์ทำให้ไม่มีการสูญเสียที่สวิตช์

- สัญญาณ PDM ที่ความถี่ 20 kHz

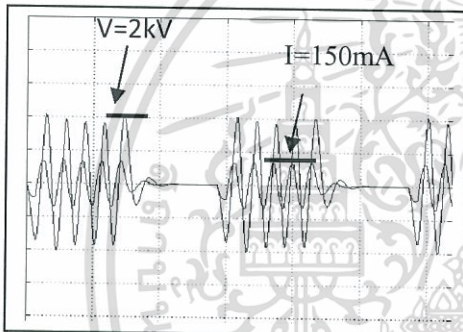


(ก)

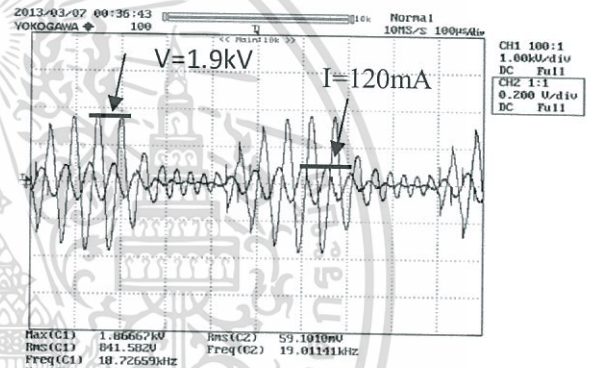


(ข)

รูปที่ 4.18 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PDM ที่ความถี่ 20 kHz

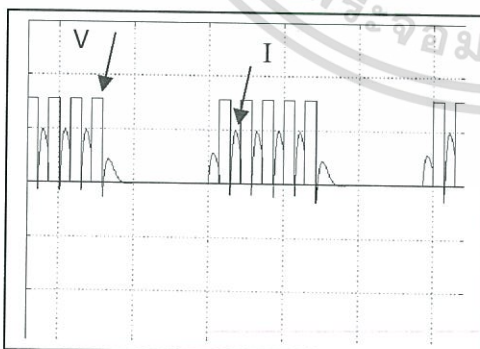


(ก)

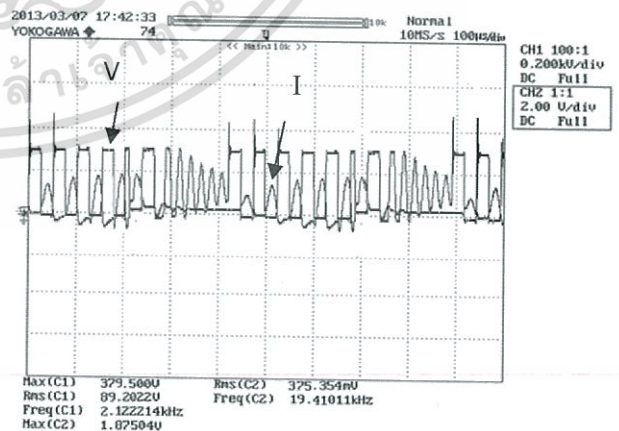


(ข)

รูปที่ 4.19 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PDM ที่ความถี่ 20 kHz



(ก)

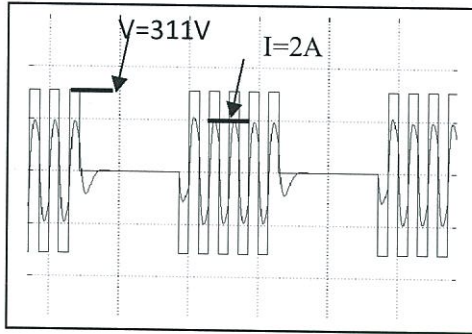


(ข)

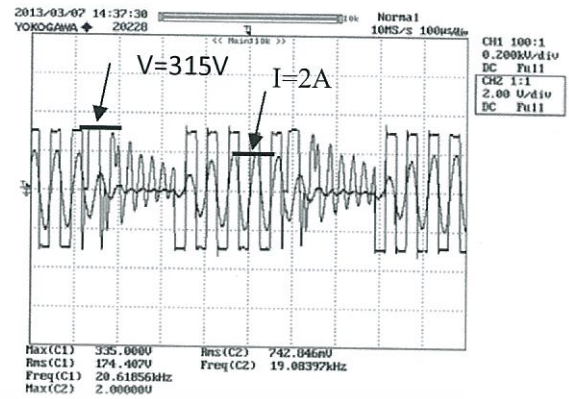
รูปที่ 4.20 สัญญาณกระแสและแรงดันแรงดันตกคร่อมสวิตช์ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PDM ที่ความถี่ 20 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

● สัญญาณ PDM ที่ความถี่ 21 kHz

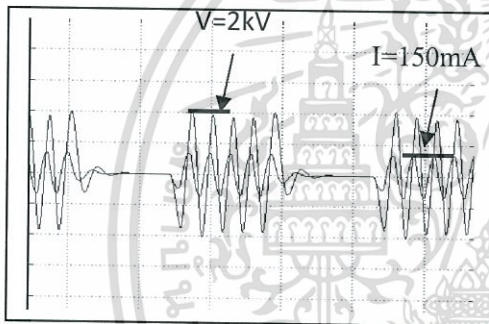


(ก)

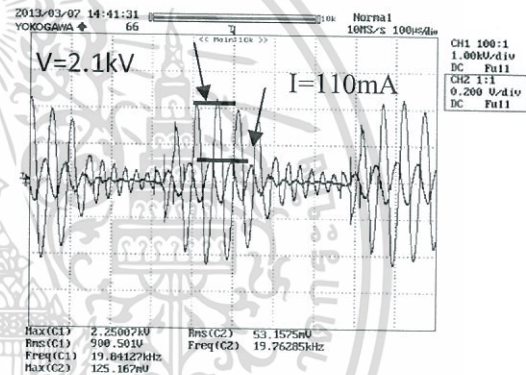


(ข)

รูปที่ 4.21 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PDM ที่ความถี่ 21 kHz

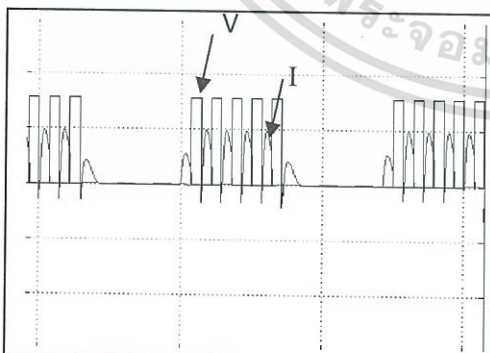


(ก)

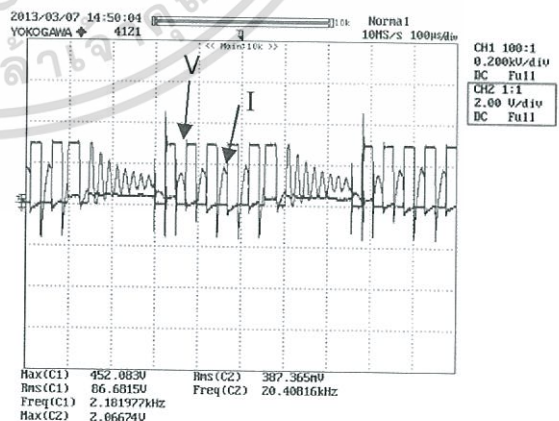


(ข)

รูปที่ 4.22 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PDM ที่ความถี่ 21 kHz



(ก)

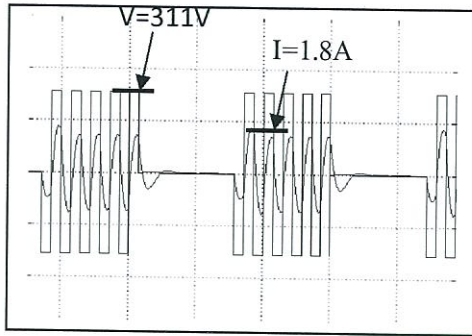


(ข)

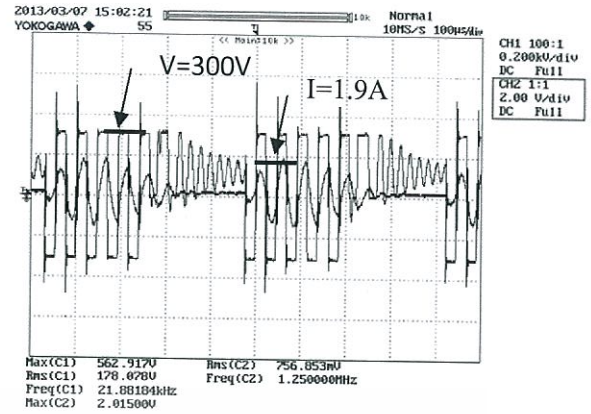
รูปที่ 4.23 สัญญาณกระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PDM ที่ความถี่ 21 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สัญญาณ PDM ที่ความถี่ 22 kHz

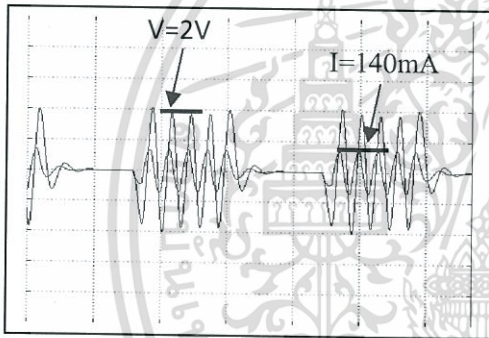


(ก)

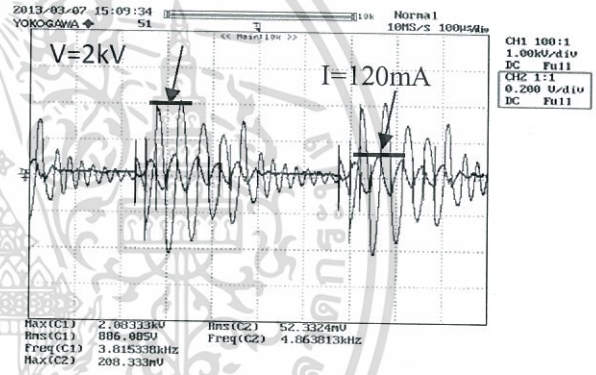


(ข)

รูปที่ 4.24 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PDM ที่ความถี่ 22 kHz

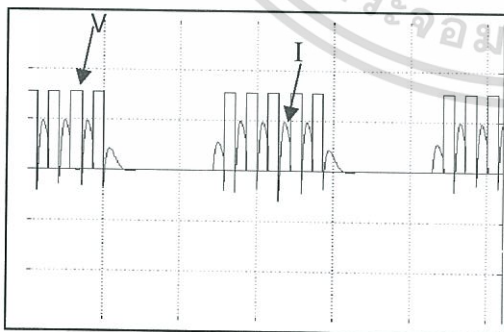


(ก)

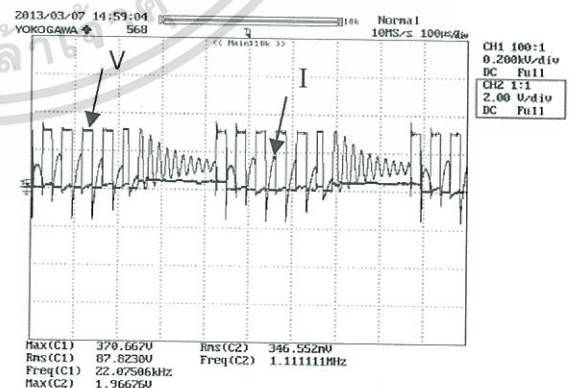


(ข)

รูปที่ 4.25 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PDM ที่ความถี่ 22 kHz



(ก)

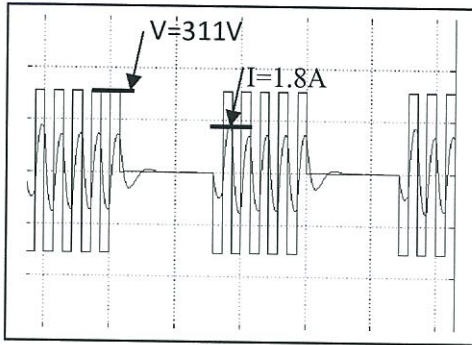


(ข)

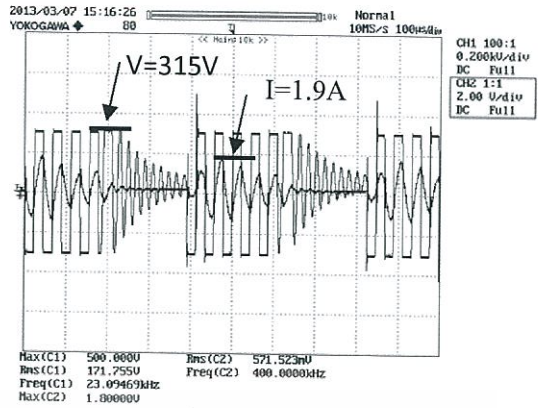
รูปที่ 4.26 สัญญาณกระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PDM ที่ความถี่ 22 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สัญญาณ PDM ที่ความถี่ 23 kHz

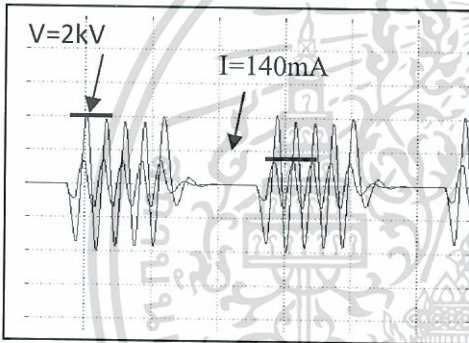


(ก)

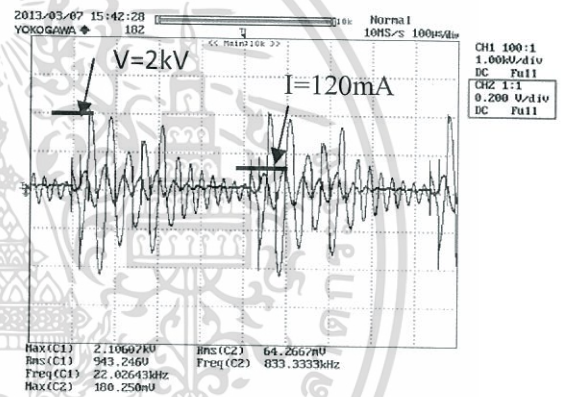


(ข)

รูปที่ 4.27 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PDM ที่ความถี่ 23 kHz

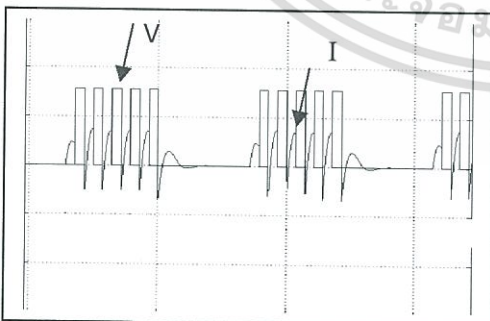


(ก)

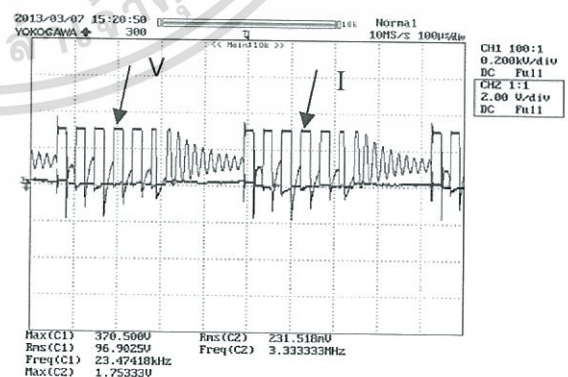


(ข)

รูปที่ 4.28 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PDM ที่ความถี่ 23 kHz



(ก)

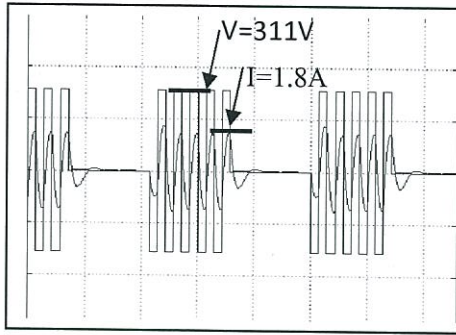


(ข)

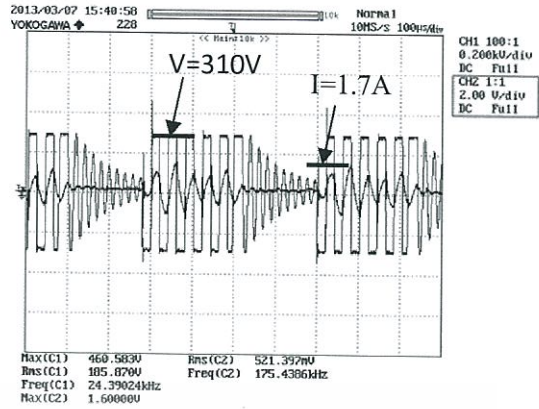
รูปที่ 4.29 สัญญาณกระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PDM ที่ความถี่ 23 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

● สัญญาณ PDM ที่ความถี่ 24 kHz

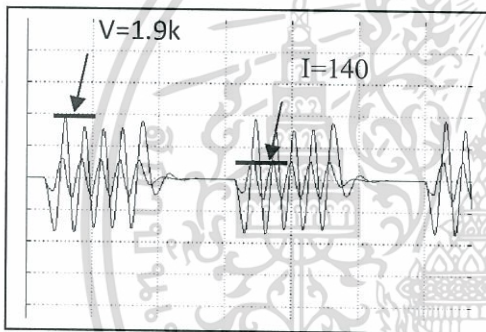


(ก)

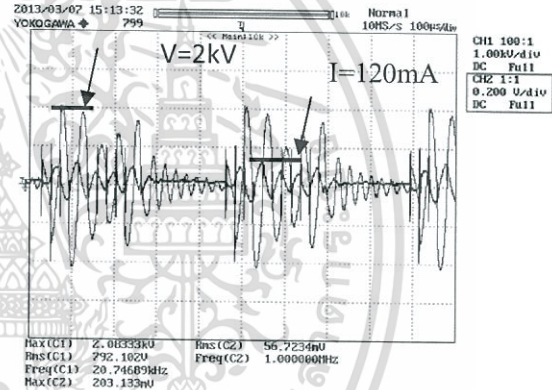


(ข)

รูปที่ 4.30 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PDM ที่ความถี่ 24 kHz

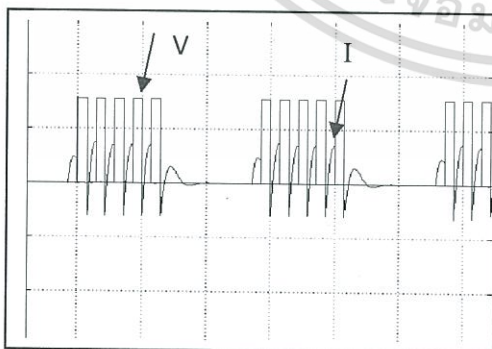


(ก)

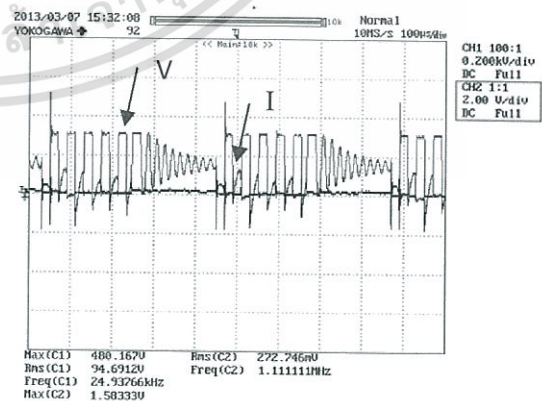


(ข)

รูปที่ 4.31 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PDM ที่ความถี่ 24 kHz



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.32 สัญญาณกระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PDM ที่ความถี่ 24 kHz

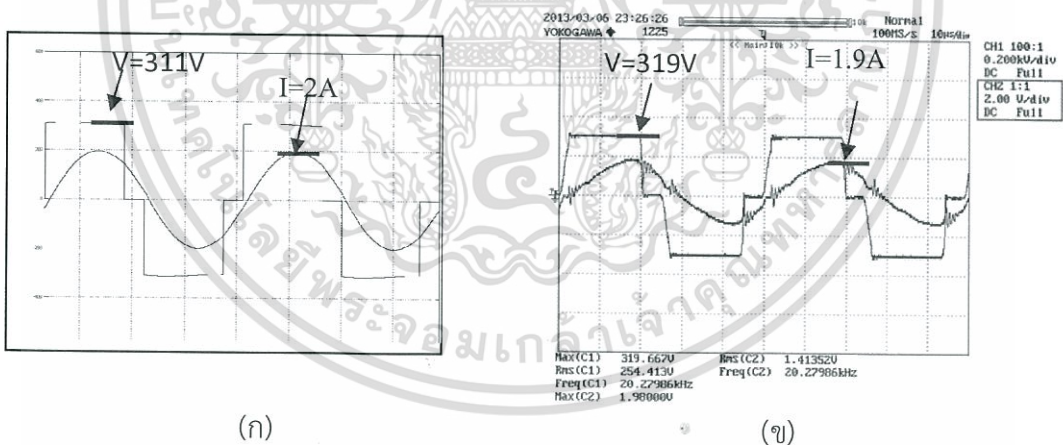
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการจำลองและผลการทดลองของสัญญาณแบบ PDM โดยการปรับความถี่ตั้งแต่ 20 kHz ถึง 24 kHz พบว่าสัญญาณเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์จากการจำลอง V_p เท่ากับ 311 V และ กระแส I_p เท่ากับ 1.8 A - 2 A สัญญาณเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์จากการทดลอง V_p เท่ากับ 300 V - 315 V และ กระแส I_p เท่ากับ 1.8 A - 1.9 A และยังพบว่าช่วงหยุดนำกระแสสัญญาณของ กระแสและแรงดันจะไม่เป็นศูนย์แต่จะแกว่งขึ้นลงอันเนื่องมาจากโหลดเป็นตัวเก็บสะสมพลังงาน ลักษณะสัญญาณจากการจำลองและจากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกันแล้วมีความใกล้เคียงกัน

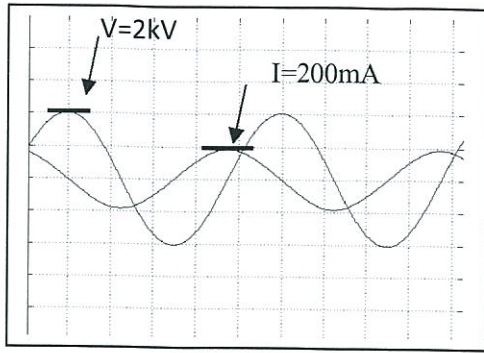
สัญญาณเอาต์พุตหม้อแปลงจากการจำลอง V_p เท่ากับ 1.9 kV- 2kV และ กระแส I_p เท่ากับ 140 mA - 150 mA สัญญาณเอาต์พุตหม้อแปลงจากการทดลอง V_p เท่ากับ 1.9 kV- 2.1 kV และ กระแส I_p เท่ากับ 110 mA - 130 mA เฟสของกระแสจะนำแรงดัน และยังพบว่าช่วงหยุดนำกระแสสัญญาณของกระแสและแรงดันจะไม่เป็นศูนย์แต่จะแกว่งขึ้นลงอันเนื่องมาจากโหลดเป็นตัวเก็บสะสมพลังงาน ลักษณะสัญญาณจากการจำลองและจากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกันแล้วมีความใกล้เคียงกัน

แรงดันและกระแสตกคร่อมสวิตช์ S_1, S_2, S_3 และ S_4 มีลักษณะเหมือนกัน โดยที่แรงดันตกคร่อมสวิตช์จะเป็นศูนย์ก่อนที่กระแสจะเริ่มไหลผ่านสวิตช์ทำให้ไม่มีการสูญเสียที่สวิตช์

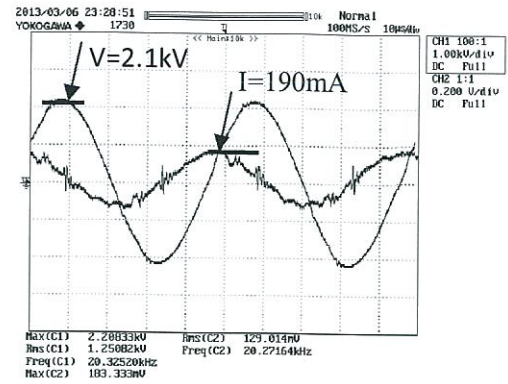
- สัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 20 kHz



รูปที่ 4.33 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 20 kHz

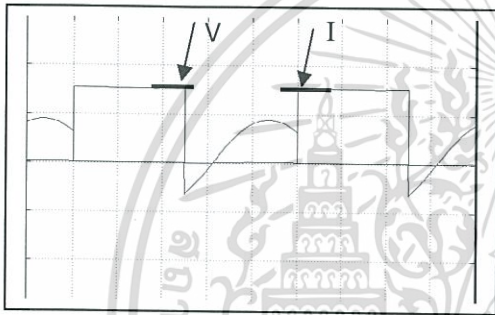


(ก)

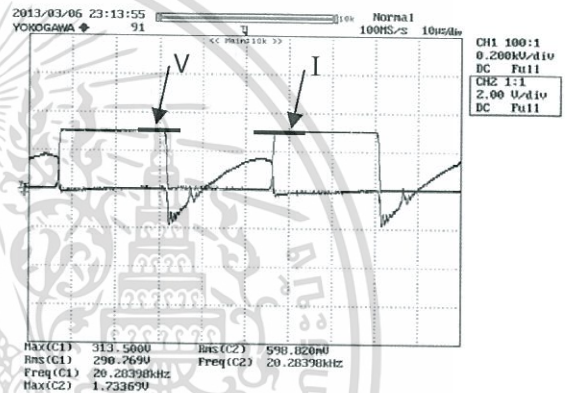


(ข)

รูปที่ 4.34 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 20 kHz

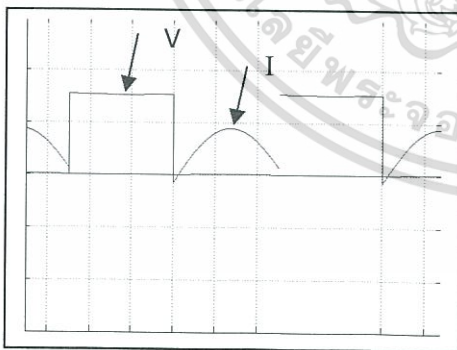


(ก)

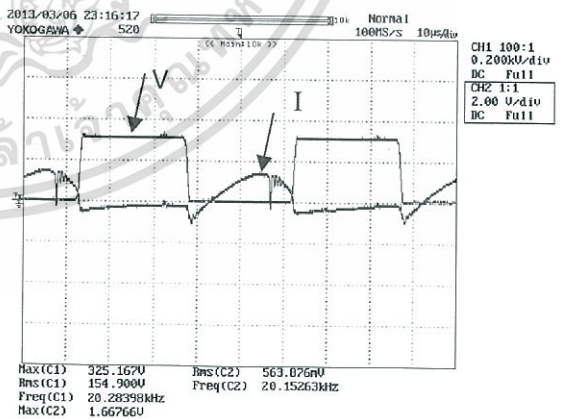


(ข)

รูปที่ 4.35 สัญญาณกระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์ S_1 กับ S_2 (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 20 kHz



(ก)

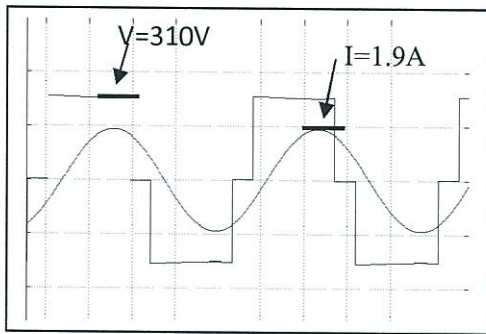


(ข)

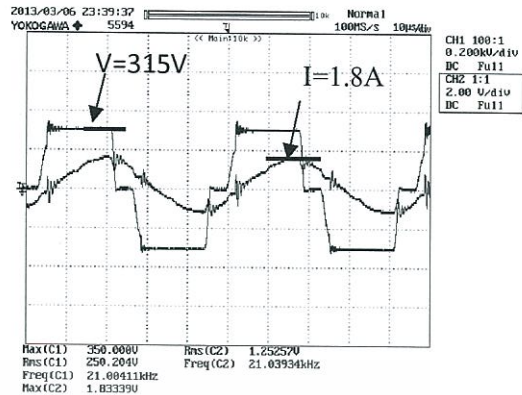
รูปที่ 4.36 สัญญาณกระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์ S_3 กับ S_4 (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 20 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 21 kHz

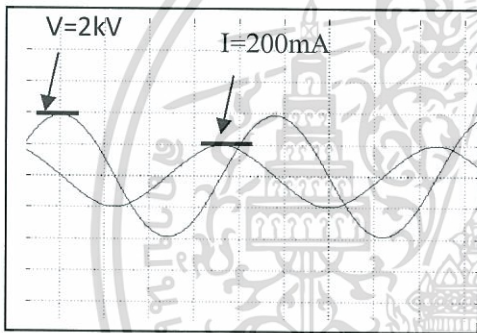


(ก)

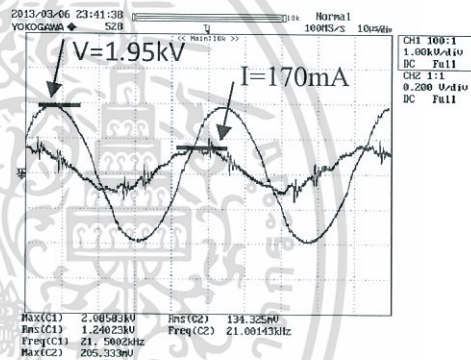


(ข)

รูปที่ 4.37 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 21 kHz

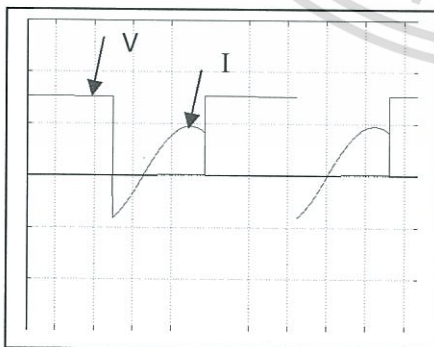


(ก)

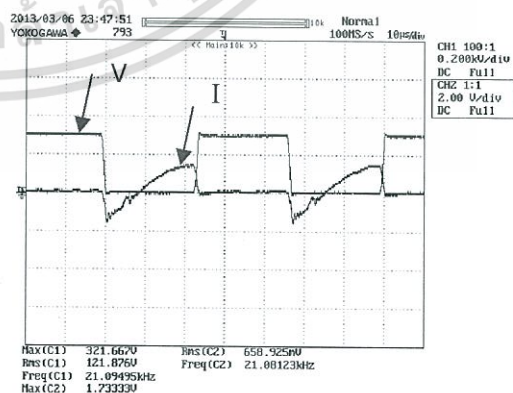


(ข)

รูปที่ 4.38 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 21 kHz



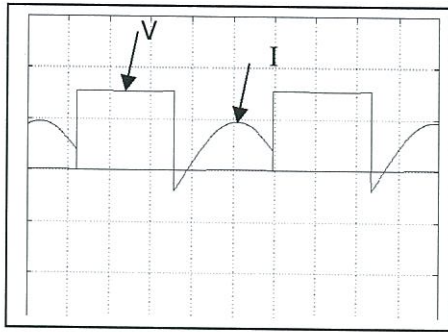
(ก)



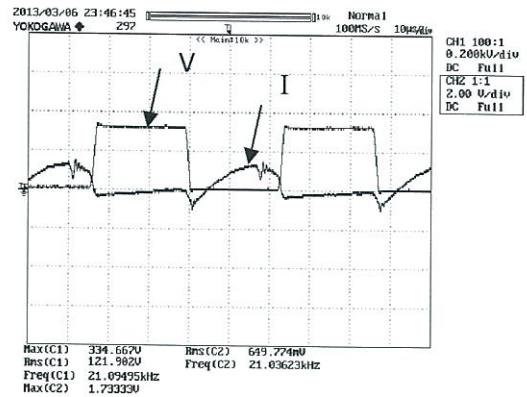
(ข)

รูปที่ 4.39 สัญญาณกระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์ S_1 กับ S_2 (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 21 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



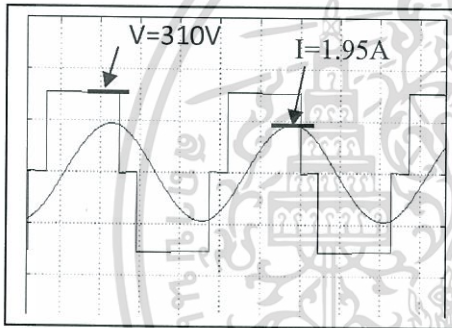
(ก)



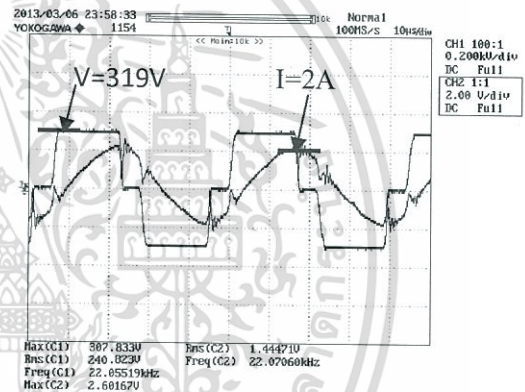
(ข)

รูปที่ 4.40 สัญญาณกระแสและแรงดันตกรวมสวิตช์ S_3 กับ S_4 (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 21 kHz

• PS-PWM ที่ความถี่ 22 kHz

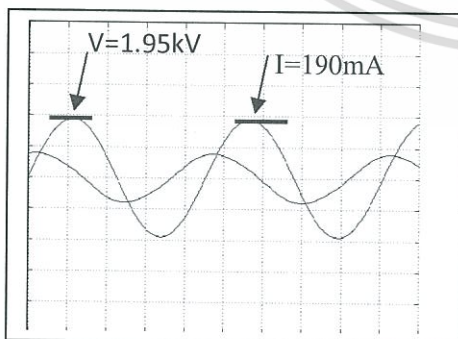


(ก)

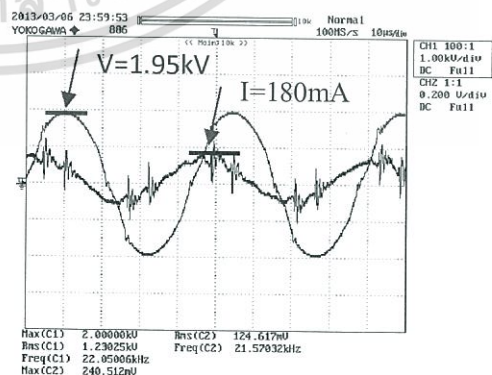


(ข)

รูปที่ 4.41 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 22 kHz



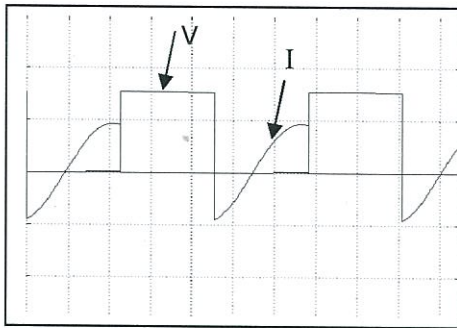
(ก)



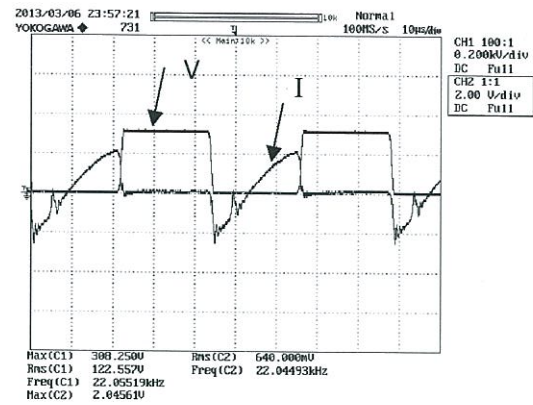
(ข)

รูปที่ 4.42 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 22 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

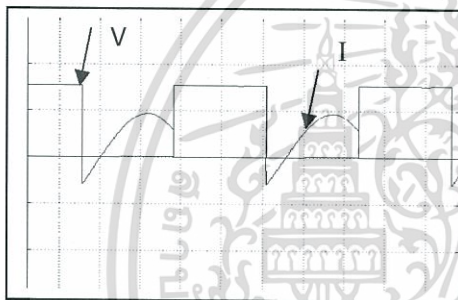


(ก)

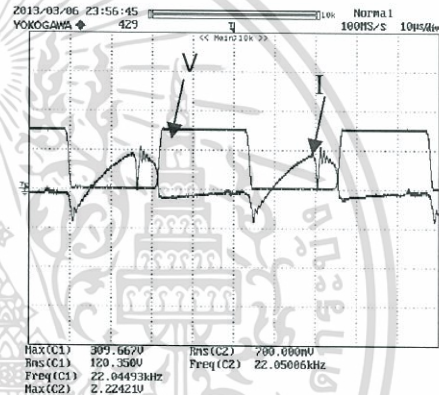


(ข)

รูปที่ 4.43 สัญญาณกระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์ S_1 กับ S_2 (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 22 kHz



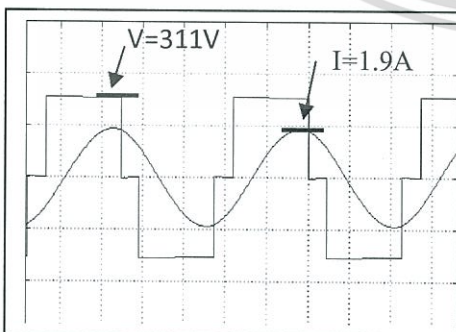
(ก)



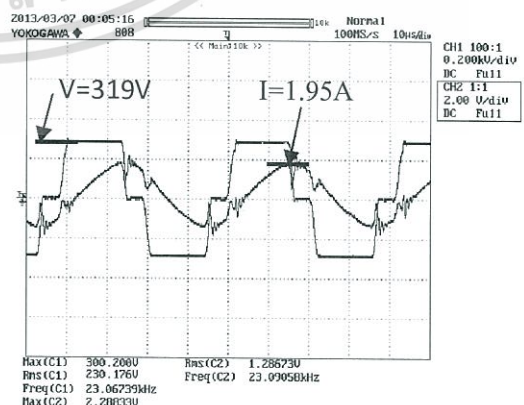
(ข)

รูปที่ 4.44 สัญญาณกระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์ S_3 กับ S_4 (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 22 kHz

● PS-PWM ที่ความถี่ 23 kHz



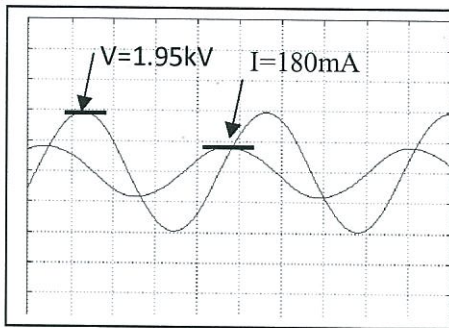
(ก)



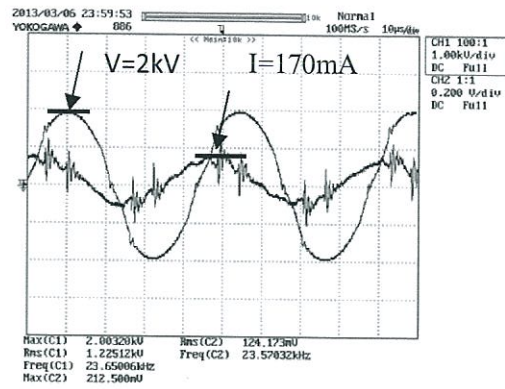
(ข)

รูปที่ 4.45 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 23 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

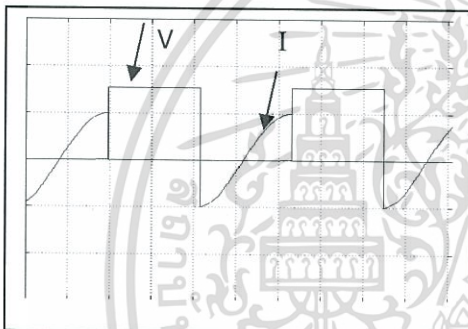


(ก)

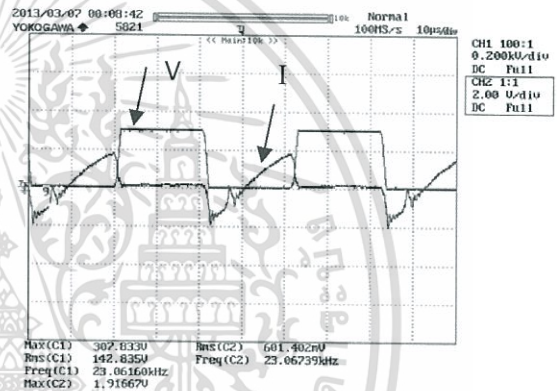


(ข)

รูปที่ 4.46 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 23 kHz

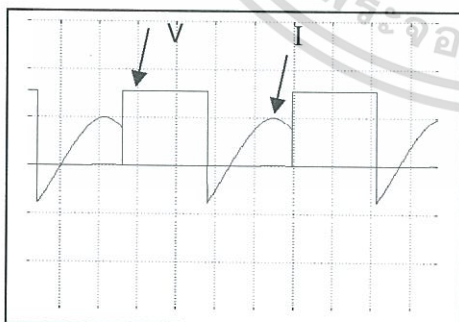


(ก)

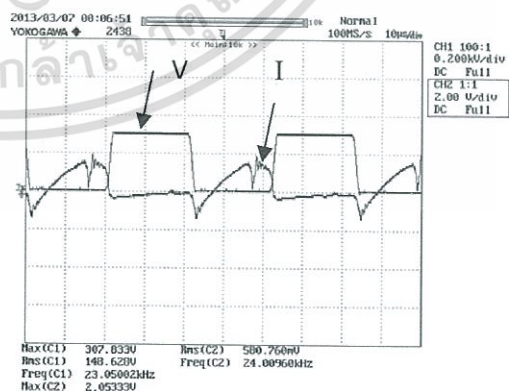


(ข)

รูปที่ 4.47 สัญญาณกระแสและแรงดันตกรวมสวิตช์ S_1 กับ S_2 (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 23 kHz



(ก)

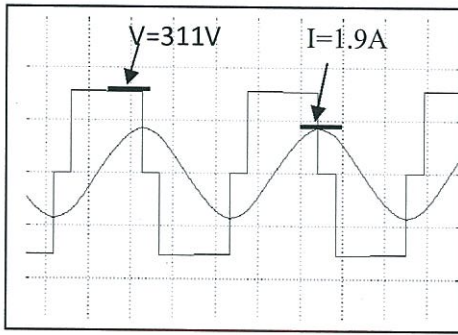


(ข)

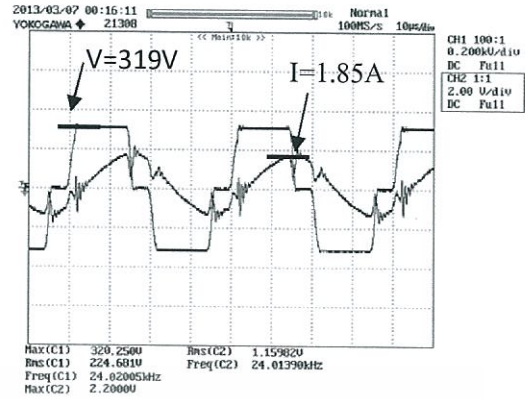
รูปที่ 4.48 สัญญาณกระแสและแรงดันตกรวมสวิตช์ S_3 กับ S_4 (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 23 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

● PS-PWM ที่ความถี่ 24 kHz

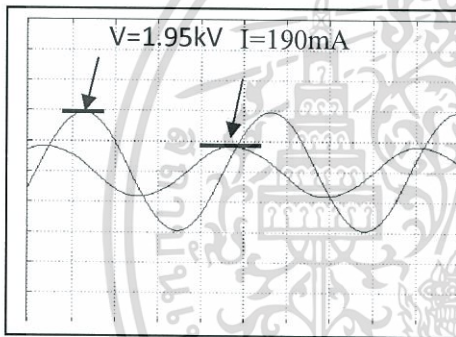


(ก)

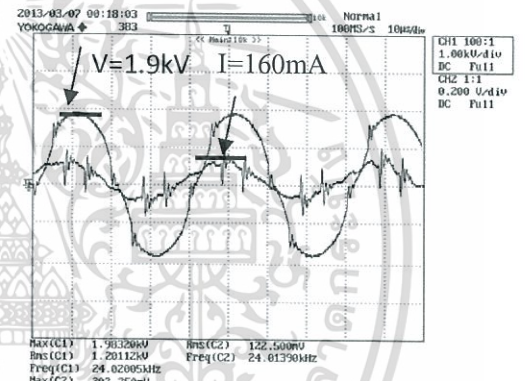


(ข)

รูปที่ 4.49 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 24 kHz

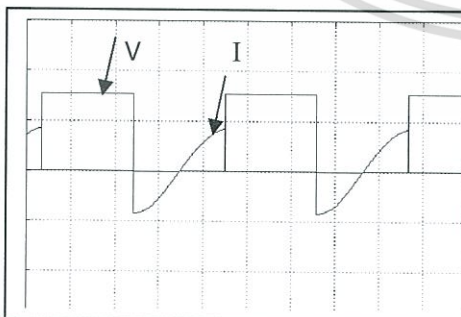


(ก)

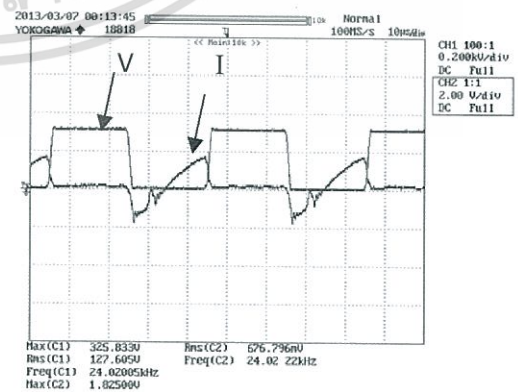


(ข)

รูปที่ 4.50 สัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 24 kHz



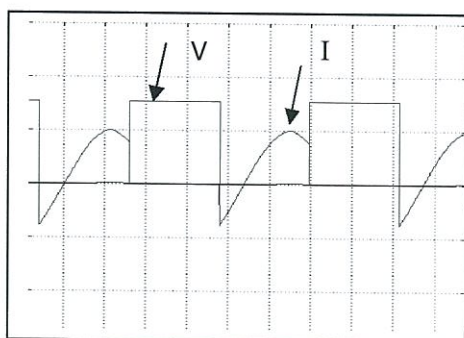
(ก)



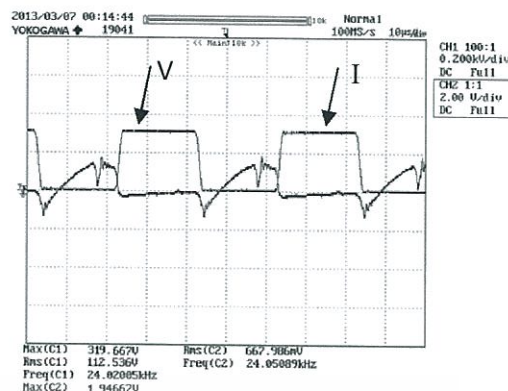
(ข)

รูปที่ 4.51 สัญญาณกระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์ S_1 กับ S_2 (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 24 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.52 สัญญาณกระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์ S_3 กับ S_4 (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 24 kHz

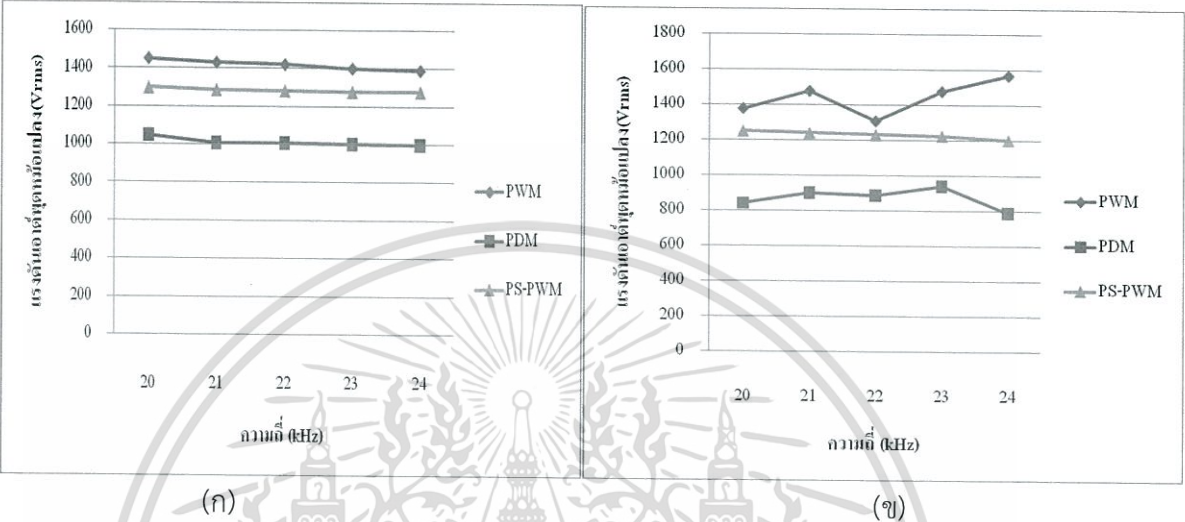
จากผลการจำลองและผลการทดลองของสัญญาณแบบ PS-PWM โดยการปรับความถี่ตั้งแต่ 20 kHz ถึง 24 kHz พบว่าสัญญาณเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์จากการจำลอง V_p เท่ากับ 311 V และ กระแส I_p เท่ากับ 1.9 A - 2 A สัญญาณเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์จากการทดลอง V_p เท่ากับ 300 V - 319 V และ กระแส I_p เท่ากับ 1.8 A - 2 A พบว่าสัญญาณกระแสตามหลังแรงดันเมื่อเพิ่มความถี่ กระแสจะตามหลังแรงดันเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามความถี่ ลักษณะสัญญาณจากการจำลองและจากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับกันแล้วมีความใกล้เคียงกัน แตกต่างกันบ้างเล็กน้อย เนื่องจากผลการทดลองค่าพารามิเตอร์แฝง (Parasitic) จึงมีผล Spike ของแรงดันและกระแสเมื่อเทียบกับผลการจำลอง

สัญญาณเอาต์พุตหม้อแปลงจากการจำลอง V_p เท่ากับ 1.95 kV- 2 kV และ กระแส I_p เท่ากับ 189 mA - 200 mA สัญญาณเอาต์พุตหม้อแปลงจากการทดลอง V_p เท่ากับ 1.9 kV- 2.1 kV และ กระแส I_p เท่ากับ 160 mA - 180 mA สัญญาณกระแสจะนำแรงดัน ลักษณะสัญญาณจากการจำลองและจากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับกันแล้วมีความใกล้เคียงกัน แตกต่างกันบ้างเล็กน้อย เนื่องจากผลการทดลองค่าพารามิเตอร์แฝง (Parasitic) จึงมีผล Spike ของแรงดันและกระแสเมื่อเทียบกับผลการจำลอง

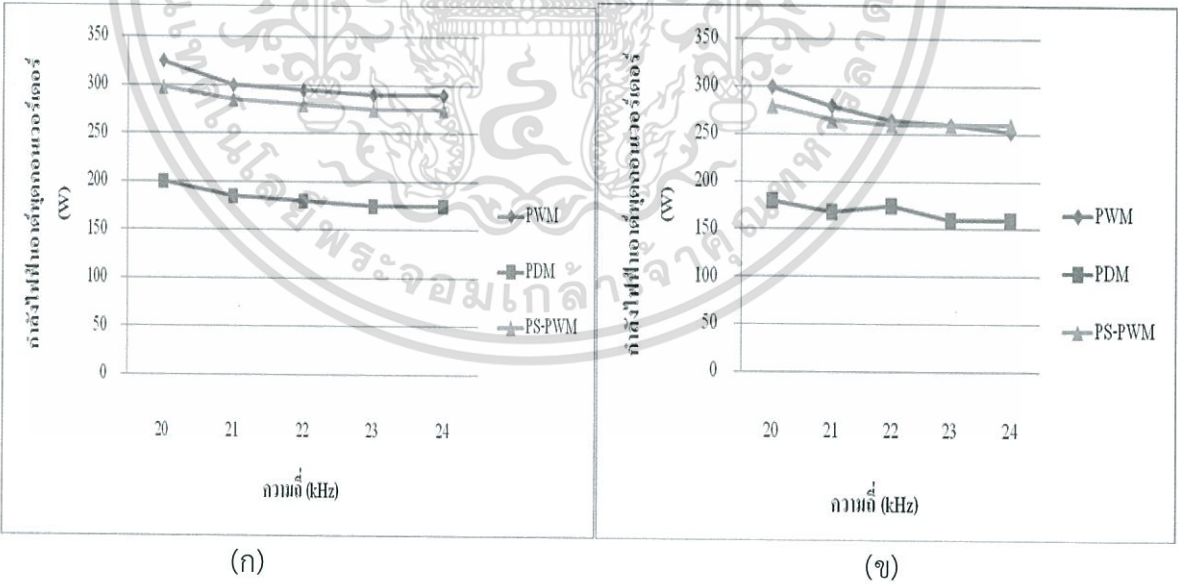
แรงดันและกระแสตกคร่อมสวิตช์ S_1 และ S_4 พบว่า สวิตช์ S_1 จะเริ่มนำกระแสช้ากว่า S_4 เนื่องมาจากการเลื่อนเฟสของสัญญาณ ส่วน S_2 และ S_3 ลักษณะเหมือนกัน กับ S_1 และ S_4 ตามลำดับ โดยที่แรงดันตกคร่อมสวิตช์จะเป็นศูนย์ก่อนที่กระแสจะเริ่มไหลผ่านสวิตช์ทำให้ไม่มีการสูญเสียที่สวิตช์

4.3 วิเคราะห์ผลการทดลองทางไฟฟ้า

นำผลการทดลอง มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต (V_{rms}) หม้อแปลงกับความถี่และรูปแบบสัญญาณ กำลังไฟฟ้าที่เอาต์พุตอินเวอร์เตอร์กับความถี่และรูปแบบสัญญาณ ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์กับความถี่และรูปแบบสัญญาณ ตามลำดับ

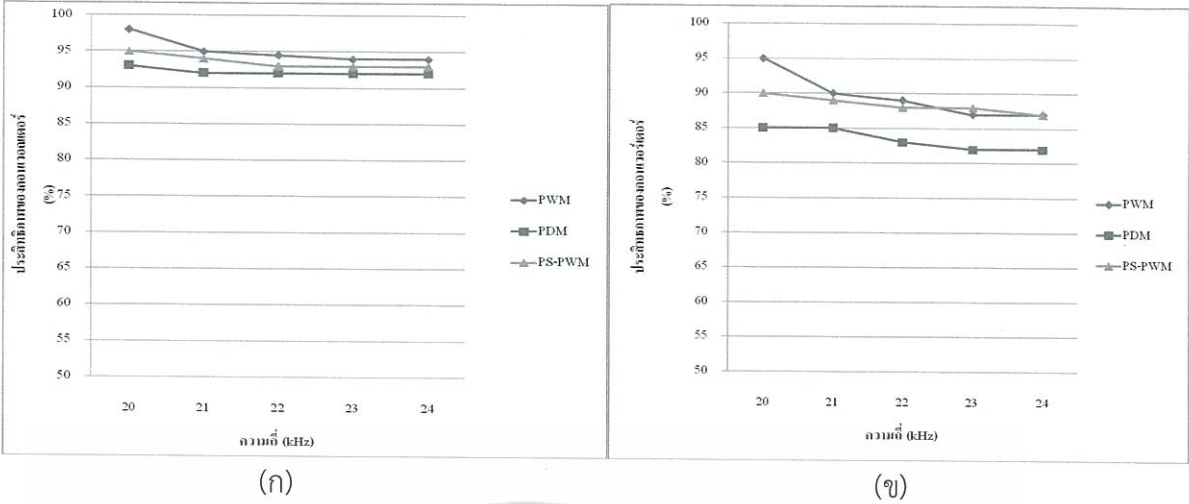


รูปที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง (V_{rms}) กับ ความถี่ (ก) จากการจำลอง (ข) จากการทดลอง



รูปที่ 4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ (W) กับความถี่ (ก) จากการจำลอง (ข) จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์กับความถี่
(ก) จากการจำลอง (ข) จากการทดลอง

จากรูปที่ 4.53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง (V_{rms}) กับ ความถี่เปรียบเทียบกันระหว่างผลการจำลองในรูป (ก) กับ ผลการทดลองในรูป (ข) จะเห็นว่า สัญญาณ PWM จากการจำลองพบว่า แรงดันไฟฟ้า (V_{rms}) ค่อยๆลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มความถี่และมีค่าสูงสุดที่ความถี่เริ่มต้นคือ 20 kHz ประมาณ 1450 V, ต่ำสุดที่ความถี่สุดท้าย คือ 24 kHz มีค่าประมาณ 1400 V และ สัญญาณ PWM จากการทดลองพบว่า แรงดันไฟฟ้า (V_{rms}) จะแกว่งอยู่ระหว่าง 1400 ถึง 1570 เมื่อเพิ่มความถี่, สัญญาณ PDM จากการจำลองพบว่า แรงดันไฟฟ้า (V_{rms}) ค่อยๆลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มความถี่และมีค่าสูงสุดที่ความถี่เริ่มต้นคือ 20 kHz ประมาณ 1100 V, ต่ำสุดที่ความถี่สุดท้าย คือ 24 kHz มีค่าประมาณ 1000 V และ สัญญาณ PWM จากการทดลองพบว่า แรงดันไฟฟ้า (V_{rms}) จะแกว่งอยู่ระหว่าง 800 V ถึง 900 V เมื่อเพิ่มความถี่ และสัญญาณ PS-PWM จากการจำลองพบว่า แรงดันไฟฟ้า (V_{rms}) ค่อยๆลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มความถี่ และมีค่าสูงสุดที่ความถี่เริ่มต้นคือ 20 kHz ประมาณ 1300 V, ต่ำสุดที่ความถี่สุดท้าย คือ 24 kHz มีค่าประมาณ 1250 V และ สัญญาณ PS-PWM จากการทดลองพบว่า แรงดันไฟฟ้า (V_{rms}) จะค่อยๆลดลงเล็กน้อยเช่นกันเมื่อเพิ่มความถี่ มีค่าสูงสุดที่ความถี่เริ่มต้นคือ 20 kHz ประมาณ 1220 V, ต่ำสุดที่ความถี่สุดท้าย คือ 24 kHz มีค่าประมาณ 1200 V สรุปว่าทั้งจากการจำลองและการทดลองพบว่าสัญญาณ PWM ให้ค่า V_{rms} สูงกว่า PS-PWM และ PDM ตามลำดับ

รูปที่ 4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์กับความถี่จะเห็นได้ว่า กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ของสัญญาณ PWM, PDM และ PS-PWM จะลดลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น ทั้งจากการจำลอง และการทดลอง โดยที่ กำลังไฟฟ้าสูงสุดของสัญญาณอยู่ที่ 20 kHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ใกล้ความถี่เรโซแนนต์ โดยสัญญาณ PWM จากการจำลองมีกำลังสูงสุดที่ความถี่ 20 kHz เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ 325 W กำลังต่ำสุดที่ความถี่ 24 kHz เท่ากับ 290 W และจากการทดลองมีกำลังสูงสุดเท่ากับ 300 W กำลังต่ำสุดที่ความถี่ 24 kHz เท่ากับ 250 W, PDM จากการจำลองมีกำลังสูงสุดที่ความถี่ 20 kHz เท่ากับ 200 W กำลังต่ำสุดที่ความถี่ 24 kHz เท่ากับ 175 W และจากการทดลองมีกำลังสูงสุดเท่ากับ 175 W กำลังต่ำสุดที่ความถี่ 24 kHz เท่ากับ 150 W และ PS-PWM จากการจำลองมีกำลังสูงสุดที่ความถี่ 20 kHz เท่ากับ 300 W กำลังต่ำสุดที่ความถี่ 24 kHz เท่ากับ 280 W และจากการทดลองมีกำลังสูงสุดเท่ากับ 275 W กำลังต่ำสุดที่ความถี่ 24 kHz เท่ากับ 250 W สรุปได้ว่าทั้งจากการจำลองและจากการทดลอง สัญญาณแบบ PWM ให้กำลังไฟฟ้าสูงกว่า PS-PWM และ PDM ตามลำดับ

รูปที่ 4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์กับความถี่จะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ของสัญญาณ PWM, PDM และ PS-PWM จะลดลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น ทั้งจากการจำลอง และจากการทดลอง โดยที่ประสิทธิภาพสูงสุดของสัญญาณอยู่ที่ 20 kHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ใกล้ความถี่เรโซแนนต์ โดยสัญญาณ PWM จากการจำลองมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ความถี่ 20 kHz เท่ากับ 98% กำลังต่ำสุดที่ความถี่ 24 kHz เท่ากับ 94% และจากการทดลองมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ความถี่ 20 kHz เท่ากับ 95% กำลังต่ำสุดที่ความถี่ 24 kHz เท่ากับ 87%, PDM จากการจำลองมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ความถี่ 20 kHz เท่ากับ 93% ประสิทธิภาพต่ำสุดที่ความถี่ 24 kHz เท่ากับ 92 % และจากการทดลองมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ความถี่ 20 kHz เท่ากับ 85% กำลังต่ำสุดที่ความถี่ 24 kHz เท่ากับ 82% และ PS-PWM จากการจำลองมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ความถี่ 20 kHz เท่ากับ 95% ประสิทธิภาพต่ำสุดที่ความถี่ 24 kHz เท่ากับ 93% และจากการทดลองมีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 90% ประสิทธิภาพต่ำสุดที่ความถี่ 24 kHz เท่ากับ 87% สรุปได้ว่าทั้งจากการจำลอง และจากการทดลอง สัญญาณแบบ PWM ให้ประสิทธิภาพไฟฟ้าสูงกว่า PS-PWM และ PDM ตามลำดับ

4.4 การเก็บผลก๊าซโอโซนโดยการทดลองทางเคมี

จากการทดสอบทางไฟฟ้าที่ผ่านมาแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของหม้อแปลงที่ป้อนให้กับแท่งอิเล็กโทรดเพื่อผลิตก๊าซโอโซนจะเปลี่ยนแปลงตามรูปแบบสัญญาณและความถี่ ที่ภาคควบคุมคอนเวอร์เตอร์จากนั้นถึงวัดปริมาณก๊าซโอโซนโดยวิธีทางเคมี ที่เรียกว่า การไทเทรต(Titrate) การวัดผลโอโซนจะใช้วิธีการบันทึกผลปริมาตรของสารเคมี $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายโพแตสเซียมไอโอไดด์ KI ที่ผ่านการแพร่กระจายของก๊าซโอโซนจากนั้นนำมาคำนวณโดยใช้สมการที่ 4.1 เพื่อหาปริมาณโอโซนที่เกิดขึ้น

$$0.1N \times \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 1\text{mL} = 2.4\text{mgO}_3 \quad (4.1)$$

เมื่อ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ คือสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ mgO_3 คือ ปริมาณการเกิดก๊าซโอโซนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าระดับปริมาณก๊าซโอโซนเมื่อนำปริมาตรสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ในแต่ละรูปแบบสัญญาณและแต่ละความถี่ โดยใช้สมการที่ 4.1 จากนั้นนำมาคูณด้วยเวลาเพื่อเทียบ เป็นปริมาณต่อเวลา โดยในการทดสอบเครื่องทำงานเป็นเวลา 1 นาที ดังนั้นจึงคูณด้วย 60 จะได้เป็น ปริมาณก๊าซต่อ 1 ชั่วโมง ทำการทดสอบสองครั้งต่อหนึ่งเงื่อนไขสัญญาณแล้วหาค่าเฉลี่ย โดยที่ อุณหภูมิห้องในการในวัดอยู่ 26 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของลม 20 L/minute

ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณการเกิดก๊าซโอโซนของรูปแบบสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 20 kHz-24kHz

ความถี่ (kHz)	ปริมาณก๊าซโอโซน(mgO ₃ /hr)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
20	289	279	284
21	356	360	358
22	370	375	372.5
23	397	406	392.5
24	412	410	411

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณการเกิดก๊าซโอโซนของรูปแบบสัญญาณ PDM ที่ความถี่ 20 kHz-24kHz

ความถี่ (kHz)	ปริมาณก๊าซโอโซน(mgO ₃ /hr)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
20	109	102	105.5
21	128	130	129
22	156	154	155
23	177	173	175
24	183	186	184.5

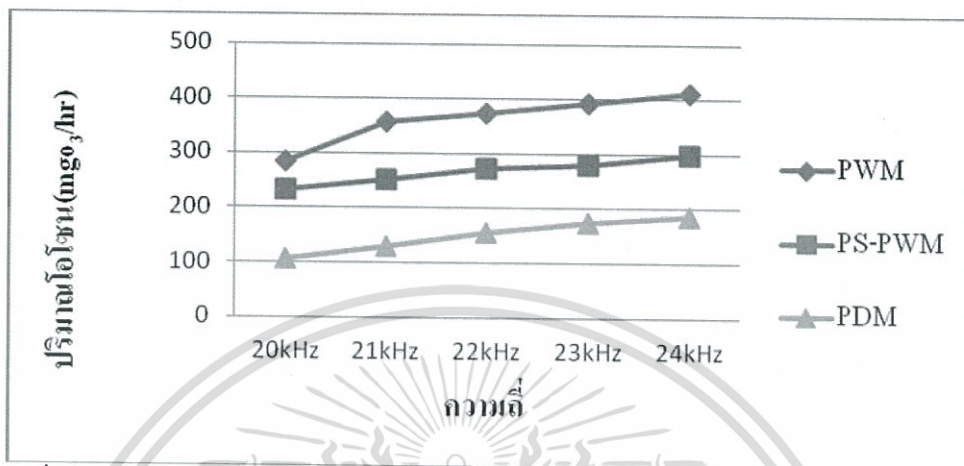
ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณการเกิดก๊าซโอโซนของรูปแบบสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่20kHz-24kHz

ความถี่ (kHz)	ปริมาณก๊าซโอโซน(mgO ₃ /hr)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
20	236	230	233
21	251	254	252.5
22	274	270	272
23	282	279	280.5
24	298	300	299

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 วิเคราะห์ผลการทดลองทางเคมี

จากตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 นำค่าปริมาณโอโซนของแต่ละสัญญาณและความถี่มาพล็อตกราฟได้ดังรูป 4.23



รูปที่ 4.56 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซโอโซนกับความถี่ในแต่ละรูปแบบสัญญาณ

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความถี่และรูปแบบสัญญาณควบคุม ที่ป้อนให้กับแท่งอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันร่วมฉนวนสองชั้น โดยทำการปรับเปลี่ยนสัญญาณแบบ PWM, PS-PWM และ PDM และปรับความถี่ที่ 20kHz-24kHz ปริมาณโอโซนเพิ่มตามความถี่ ปริมาณโอโซนต่ำสุดอยู่ที่ความถี่ 20 kHz โดยที่สัญญาณ PWM ผลิตได้ 275 mg/hr, PS-PWM ผลิตได้ 222 mg/hr และ PDM ผลิตได้ 98 mg/hr และปริมาณโอโซนสูงสุดอยู่ที่ความถี่ 24 kHz โดยที่สัญญาณ PWM ผลิตได้ 400 mg/hr, PS-PWM ผลิตได้ 300 mg/hr และ PDM ผลิตได้ 173 mg/hr จากการสังเกตพบว่าปริมาณโอโซนขึ้นอยู่กับความถี่และเนื้อแรงดันที่แท่งอิเล็กโทรดได้รับ พบว่าสัญญาณแบบ PWM ผลิตโอโซนได้มากที่สุด รองลงมาสัญญาณแบบ PS-PWM และสัญญาณแบบ PDM ผลิตโอโซนได้น้อยสุดที่สุดทุกความถี่ที่ทดลอง

4.6 สรุป

บทนี้ได้เสนอผลการจำลองทางไฟฟ้า ผลการทดลองทางไฟฟ้าและผลทางเคมีของเครื่องกำเนิดโอโซน โดยทางไฟฟ้าทำการวัดกระแสและแรงดันเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ กระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์และกระแสและแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง และทางเคมีโดยการวัดปริมาณโอโซนที่ทุกรูปแบบสัญญาณที่ความถี่ 20-24 kHz และนำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟ และวิเคราะห์ผลการทดลองทั้งทางไฟฟ้าและทางเคมี

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุป

ปัจจุบันโอโซนกลายเป็นทางเลือกสำหรับปรับปรุงอากาศและน้ำมากมาย โอโซนถูกใช้อย่างกว้างขวางในโรงงานและบ้านเรือน ดังเช่น การฟอกและการฆ่าเชื้อ รวมไปถึงการใช้ในกระบวนการอาหาร การเก็บรักษาอาหาร การกำจัดกลิ่น การฟื้นฟูน้ำใต้ดิน และการทำน้ำดื่ม การใช้ประโยชน์ของโอโซนได้เติบโตอย่างรวดเร็ว ซึ่งการปรับปรุงระบบสร้างโอโซนจึงเป็นส่วนสำคัญ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมได้ใช้วิธีการสร้างโอโซนโดยหลักการดิสชาร์จทางไฟฟ้า ในปัจจุบันการสร้างโอโซนมักจะใช้รูปแบบทรงกระบอกแกนร่วมโดยการให้แก๊ส อากาศแห้ง หรือ ออกซิเจน ไหลผ่านช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้า ความกว้าง 1-2 mm ด้านหนึ่งของช่องว่าง เป็นขั้วโลหะทำหน้าที่เป็นกราวด์ และอีกด้านหนึ่งแก้วหรือเซรามิคซึ่งติดอยู่กับขั้วไฟฟ้าแรงดันสูง แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับระหว่างสองขั้วทำให้เกิดสนามไฟฟ้ากระแสสลับสูงพอที่จะทำให้ ออกซิเจนแตกตัว ใช้แหล่งจ่ายกำลังที่ความถี่สูง เพื่อเพิ่มความหนาแน่นสนามไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดโอโซน และเพิ่มปริมาณโอโซนสำหรับพื้นที่ผิวที่จำกัด ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังสวิตชิง บนพื้นฐานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น หม้อแปลงความถี่สูง MOSFET หรือ IGBT มันสามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบสัญญาณเอาต์พุตและเพิ่มความถี่หลายกิโลเฮิร์ตซ์ได้ นอกจากนั้นช่วยลดขนาดอุปกรณ์และสามารถควบคุมปริมาณโอโซนได้ง่าย ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการศึกษาและเปรียบเทียบปริมาณโอโซนเมื่อป้อนสัญญาณ PWM, PDM และ PS-PWM พูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์เพื่อเป็นทางเลือกที่ใช้แหล่งจ่ายกำลังแรงดันสูงความถี่สูงสำหรับเครื่องกำเนิดโอโซน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรจะใช้หลักการของเรโซแนนซ์คอนเวอร์เตอร์โดยกำหนดความถี่เรโซแนนซ์ที่ 20kHz แล้วใช้ความถี่สวิตชิงที่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์เล็กน้อย ผลที่ได้คือคอนเวอร์เตอร์มีกำลังสูญเสียที่มอสเฟตค่อนข้างต่ำ จากการทดลองเครื่องกำเนิดโอโซนที่ออกแบบสามารถใช้งานได้จริงในงานวิจัยนี้ จะเห็นปริมาณโอโซนสูงสุดอยู่ที่ความถี่ 24 kHz โดยที่สัญญาณ PWM ผลิตได้ 400 mg/hr, PS-PWM ผลิตได้ 300 mg/hr และ PDM ผลิตได้ 173 mg/hr ตามลำดับ และยังพบว่าปริมาณโอโซนแปรผันตามความถี่ ทั้ง 3 รูปแบบสัญญาณ เนื่องจากความถี่เพิ่มขึ้นก็เป็นการเพิ่มความหนาแน่นสนามไฟฟ้าที่โหนดนั่นเอง พบว่าสาเหตุที่สัญญาณ PWM ให้ปริมาณโอโซนมากที่สุดอันเนื่องมาจากเนื้อแรงดันที่โหนดได้รับเยอะที่สุด ส่วนสัญญาณ PDM และ PS-PWM มีข้อดีกว่า PWM คือ การนำไปใช้งานช่วงที่จะปรับปริมาณโอโซนกว้างกว่า PWM และพบว่าสัญญาณที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้กับโหนดโอโซนที่ออกแบบขึ้นคือ สัญญาณ PWM เพราะว่าให้ปริมาณโอโซนและประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์สูงกว่าสัญญาณแบบอื่น โดยที่ควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้อยู่ในพิสัยตามที่ออกแบบไว้โดยแรงดันที่ทำให้เกิดโอโซนสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 2 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองพบว่าควรใช้สัญญาณควบคุมที่ความถี่สูงๆ เพราะจะทำให้ปริมาณโอโซนที่สูง และสามารถลดระดับแรงดันโหลดที่พิกัดสูงสุดลงได้ ควรมีระบบระบายความร้อนที่อิเล็กทรอนิกส์เนื่องจากข้ออิเล็กทรอนิกส์เกิดความร้อนสูง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] S.Potivejkul,V. Kinnares,P.Rattanavichien, “Design of Ozone Generator using Solar Energy” IEEE APCCAS,24-27 Nov 1998, pp.217-220.
- [2] Y.Konishi, S.P.Wang, M.Ishibashi, Y.L.Feng, and M.Nakaoka, “Efficient Ozonizer using PDM and PWM Controlled Resonant Inverter and its Performance Evaluations” Power Conversion Conference-Nagaoka (PCC-Nagaoka’97), 3-6 Aug 1997, vol.2., pp.971-976.
- [3] J. M. Alonso, J. Garcia, A. J. Calleja, J. Ribas, J. Cardesin “Efficient Ozonizer using PDM and PWM Controlled Resonant Inverter and its Performance Evaluations” IEEE Transection on Industry Application, March/April 2004, Vol. 4, pp. 2687-2693.
- [4] J. M. Alonso, J.S Cardesin, E. L. Corominas, Manuel, R. Secedes, and J. Garcia, “Low Power high- voltage high-frequency power supply for ozone generation” IEEE Trans. Industry Applications, March/April 2004, Vol. 40, No.2, pp. 414-421.
- [5] Prasopchok Hothongkham¹, Somkiat Kongkachat²,and Narongchai Thodsaporn¹, “Analysis and Comparison Study of PWM and Phase-Shifted PWM Full-Bridge Inverter Fed High-Voltage High-Frequency Ozone Generator” IEEE PEDS, 5 - 8 December 2011, Vol. 4, pp. 776-781.
- [6] N.Mohan, T.M. Undeland, and W.P.Robbins, Power Electronics. Converters, Applications, and Design, 2 edition, New York: John Wiley& Sons, INC.,1995
- [7] นรเศรษฐ พัฒนเดช,วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า เล่ม1,ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,2550.
- [8] พรพิมล รัตนวิเชียร, “เครื่องผลิตก๊าซโอโซนด้วย พลังงานแสงอาทิตย์” วิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543.
- [9] อนรรักษ์ มั่นสุข, “เครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบบแรงดันและความถี่สูงโดยใช้แหล่งจ่ายเฟสชิฟต์-ดับบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์” วิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.
- [10] ยงยุทธ นาราชฎร, “การวิเคราะห์การทำงานของวงจรภายใต้สภาวะ ZVS และ NON ZVS ในเรโซแนนต์อินเวอร์เตอร์ควบคุมด้วยดิทช์ไซเคิลที่คำนึงถึงผลของตัวเก็บประจุเดรนชอร์ตส ของมอสเฟต สำหรับงานให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำ”, วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.

- [11] Anuwat Jangwanitlert, "Evaluation of an Improved zero-voltage and zero-current Switching PWM full-Bridge cd-dc Converter" Dissertation of Electrical Engineering, University of Arkansas, Dec 2004.
- [12] R.L. Steigerwald, "A comparison of Half-bridge Resonant Converter Topologies" IEEE Trans on Industrial Electronics, May 1984, vol.IE-31, No.2, pp. 181-191.



ภาคผนวก ก.

การวิเคราะห์ปริมาณไอโชน

การวิเคราะห์ปริมาณไอโชน

1. ขั้นตอนการเตรียมสารเคมีที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณไอโชน

1.1 สารละลายโปแตสเซียมไอโอไดด์ (2% KI)

- ละลายสารโปแตสเซียมไอโอไดด์ (KI) 2.5 กรัม (g) ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร (mL)

เก็บไว้ในขวดสีชา 1 คืนก่อนนำมาใช้

1.2 สารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)

- สารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ให้มีความเข้มข้น 1N H_2SO_4

1.3 สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3$)

- ละลาย ($Na_2S_2O_3$) จำนวน 25 g ในน้ำ 1 ลิตร (L) ให้มีความเข้มข้น 0.1 N $Na_2S_2O_3$

1.4 น้ำแป้ง (1% Starch)

- ละลายน้ำแป้ง 1 กรัม (g) ทำให้มีปริมาตร 100 มิลลิลิตร (mL)

2. ขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณไอโชนโดยวิธีการทางเคมี

2.1 ดูดซึมก๊าซไอโชน (Absorption) จากเครื่องผลิตก๊าซไอโชนลงในขวดรูปชมพู่ที่มีสารละลายโปแตสเซียมไอโอไดด์ละลาย (KI) กับน้ำกลั่นปริมาณ 100 มิลลิลิตร (mL) เป็นเวลา 1 นาที สารละลายที่ได้จะเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีเหลืองหรือส้ม

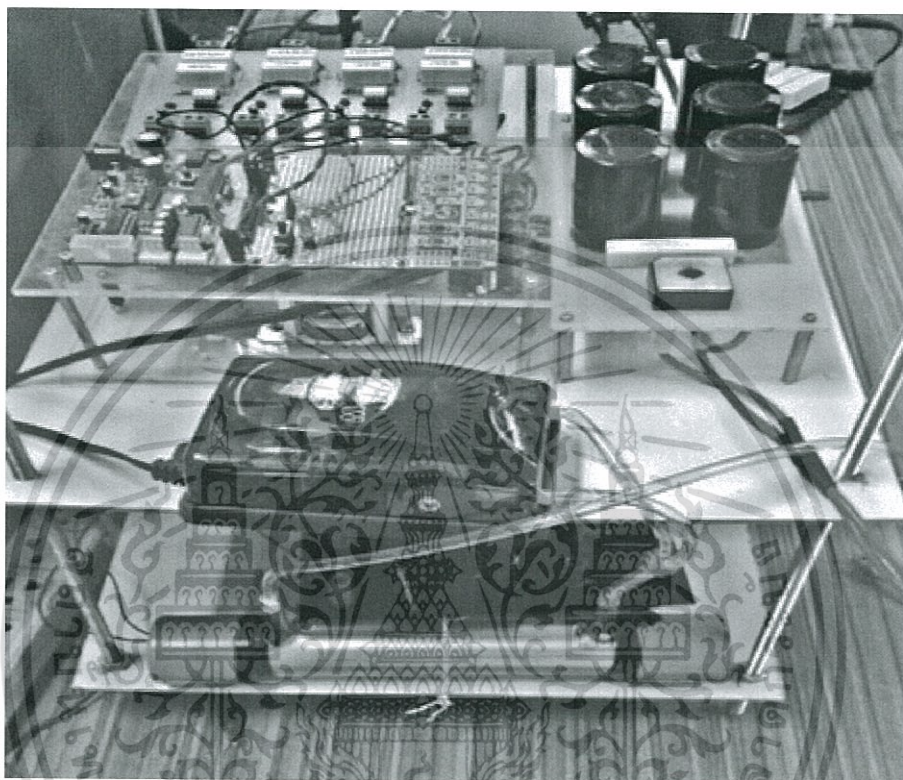
2.2 นำสารละลายที่ได้จากข้อ 2.1 มาปรับค่า pH โดยการนำสารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้น 1 N H_2SO_4 ปริมาณ 3 มิลลิลิตร (mL) และเติมน้ำแป้ง 1 มิลลิลิตร (mL) (เป็นอินดิเคเตอร์) เติมน้ำลงในสารละลายที่ได้จากข้อ 2.1 สารละลายจะเปลี่ยนสีจากสีเหลืองหรือสีส้ม จะกลายเป็นสีน้ำเงิน

2.3 นำสารละลายที่ได้จากข้อ 2.2 มาทำการไทรเตรตโดยใช้สารละลาย โซเดียมไทโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3$) ที่มีความเข้มข้น 0.1 N $Na_2S_2O_3$ เป็นตัวไทรเตรตทำการไทรเตรตจนสีน้ำเงินจางหายไปจากนั้นทำการบันทึกค่าของ 0.1 N $Na_2S_2O_3$ เพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป

3.การคำนวณหาปริมาณโอโซน

จากความสัมพันธ์ $0.1\text{ N Na}_2\text{S}_2\text{O}_3\ 1\text{ mL} = 2.4\text{ mgO}_3$

ตัวอย่าง การคำนวณเช่น กรณีที่ใช้ $0.1\text{ N Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ในการไตเตรต 1.7 mL และดูดซึมโอโซนลงน้ำ 1 นาที คือปริมาณก๊าซโอโซนที่ผลิตได้ประมาณ $1.7 \times 2.4 \times 60 = 122.4\text{ mgO/hr}$

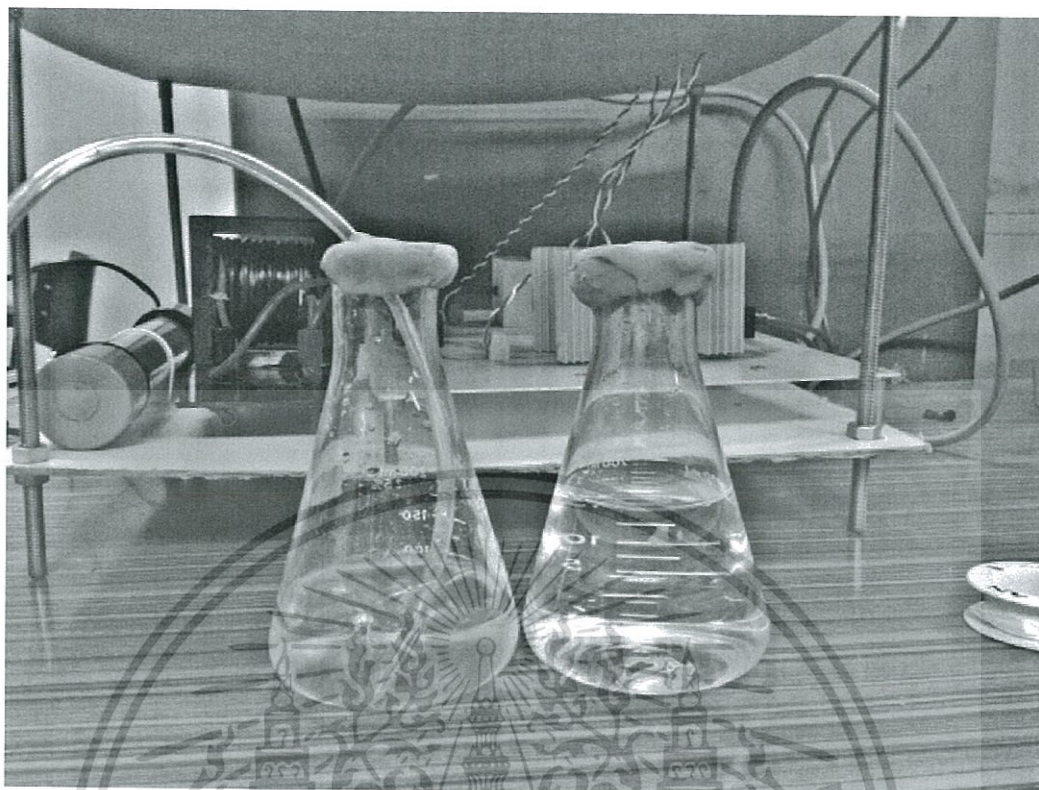


รูปก.1 เครื่องผลิตก๊าซโอโซนต้นแบบ

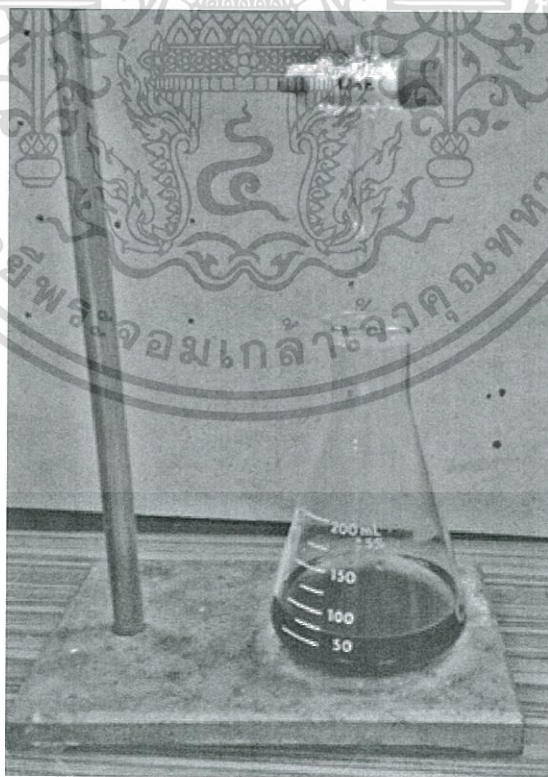


รูปก.2 อุปกรณ์ทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

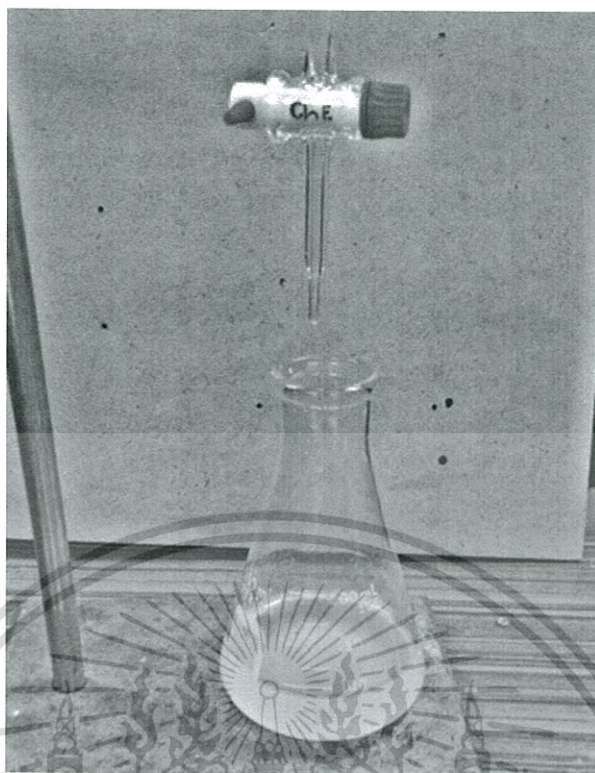


รูปก.3 สารละลาย KI ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับไอโชน



รูปก.4 สารละลายที่เติมกรดซัลฟูริกและน้ำแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

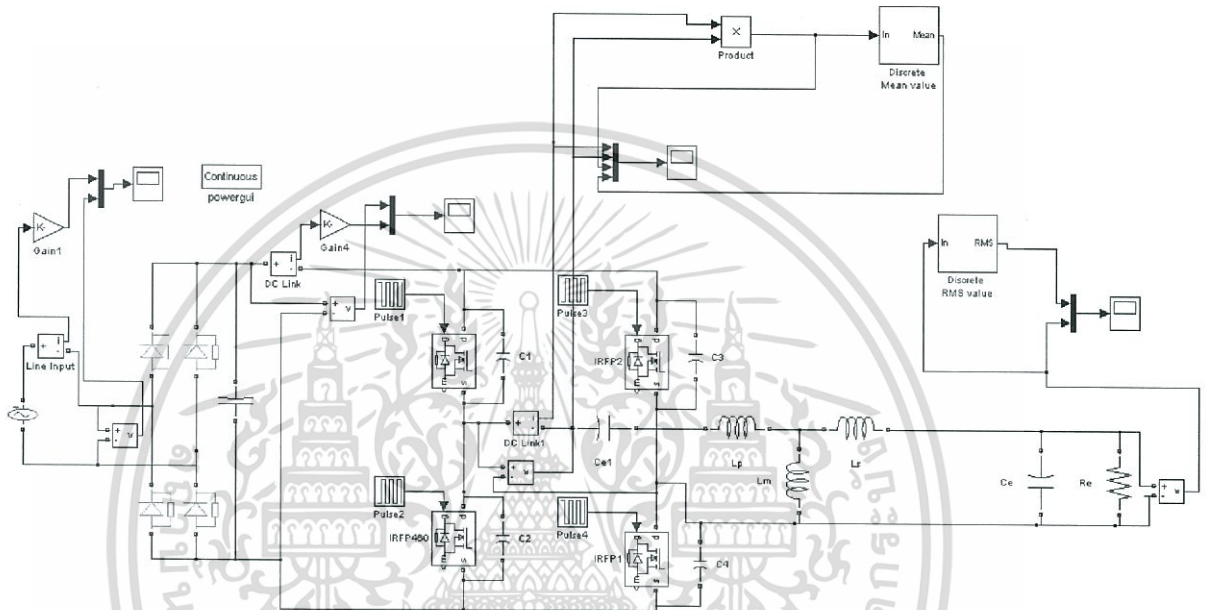


รูปก.5 สารละลายหลังทำการไตรเตรตกับโซเดียมไทโอซัลเฟตแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

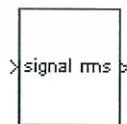
การหาค่า V_{rms} และ กำลังไฟฟ้า



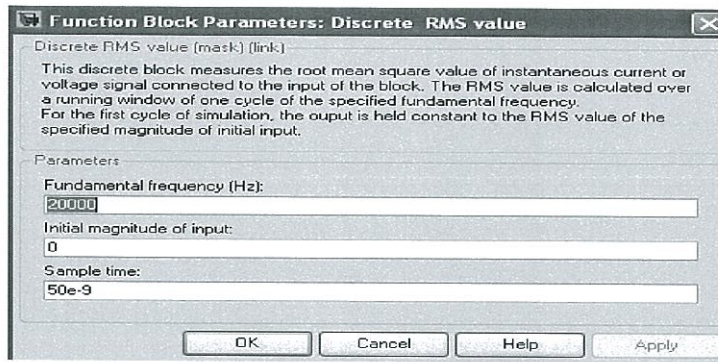
รูปที่ ก.1 วงจรจำลองของเครื่องกำเนิดโอโซน

การหาค่า V_{rms}

MATLAB Simulink มีเครื่องมือที่ช่วยในการหาค่า rms สัญญาณที่ชื่อว่า signal rms โดยเข้าไปที่ Library/ Extras/Measurements



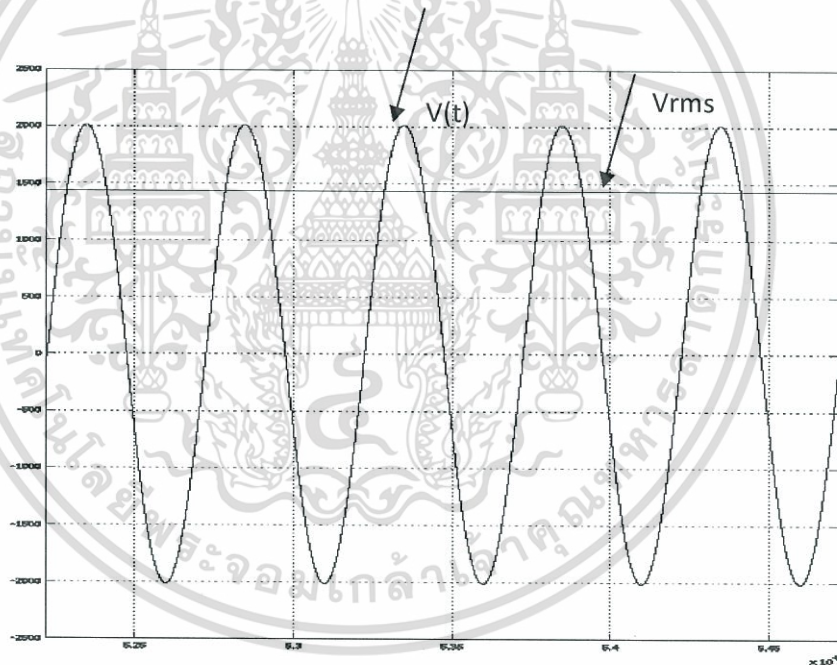
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.1 เครื่องมือที่ใช้วัดค่า rms

จากนั้นกำหนดค่าพารามิเตอร์ Fundamental frequency (Hz) เท่ากับ ความถี่ที่ใช้ในระบบ, ค่า Initial magnitude of input เท่ากับ 0 และ กำหนดค่า Sample time ยิ่งค่าน้อยยิ่งละเอียด

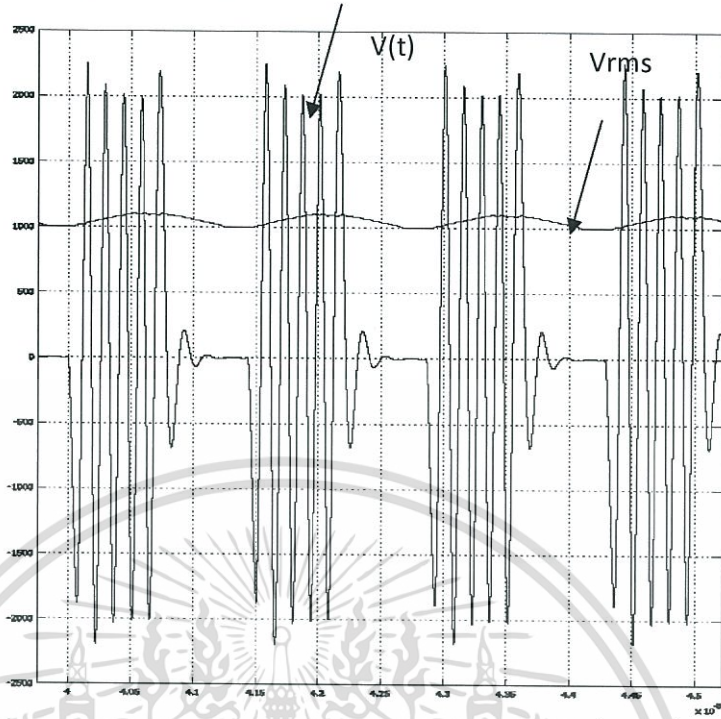
- สัญญาณ PWM ที่ความถี่ 20 kHz



รูปที่ ข.2 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง ของสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 20 kHz

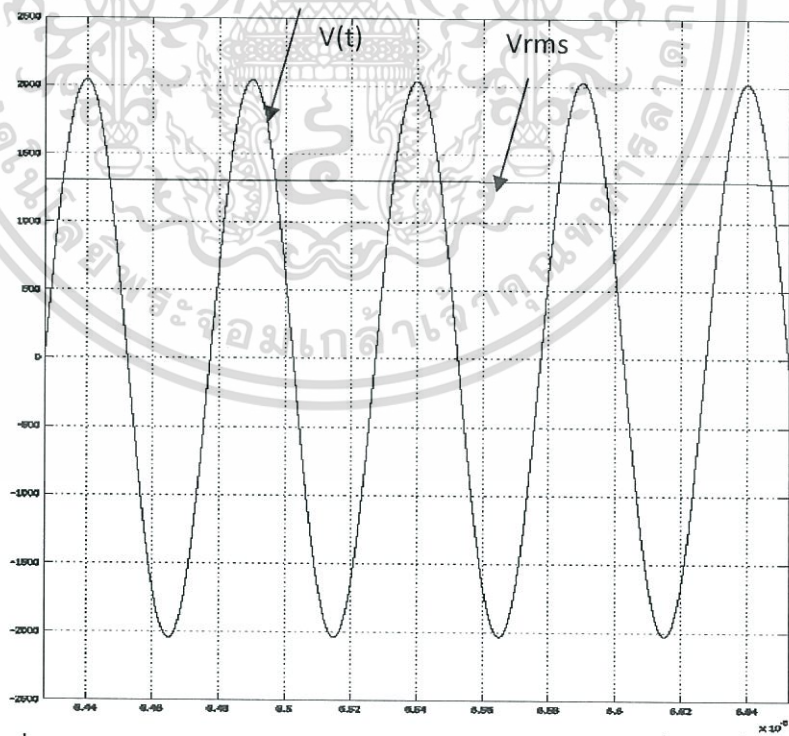
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สัญญาณ PDM ที่ความถี่ 20 kHz



รูปที่ ข.3 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง ของสัญญาณ PDM ที่ความถี่ 20 kHz

- สัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 20 kHz



รูปที่ ข.3 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 20 kHz

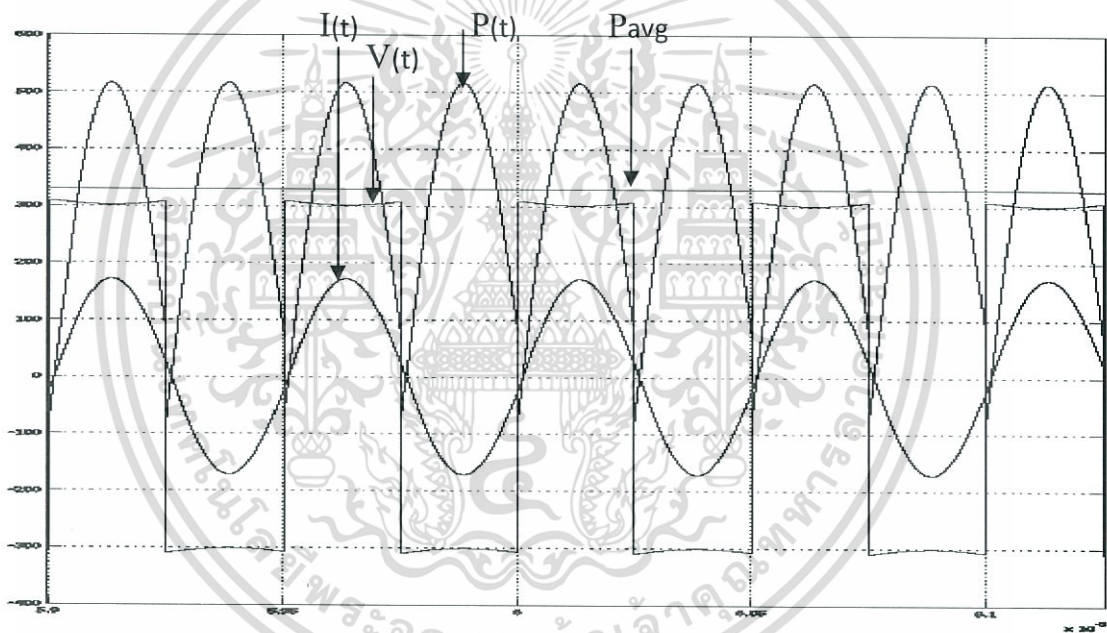
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหากำลังไฟฟ้า

MATLAB simulik มีตัวคูณสัญญาณ กระแสกับแรงดันด้วย Product ก่อน แล้วค่อยหาค่าเฉลี่ยโดยใช้ Discrete Mean value

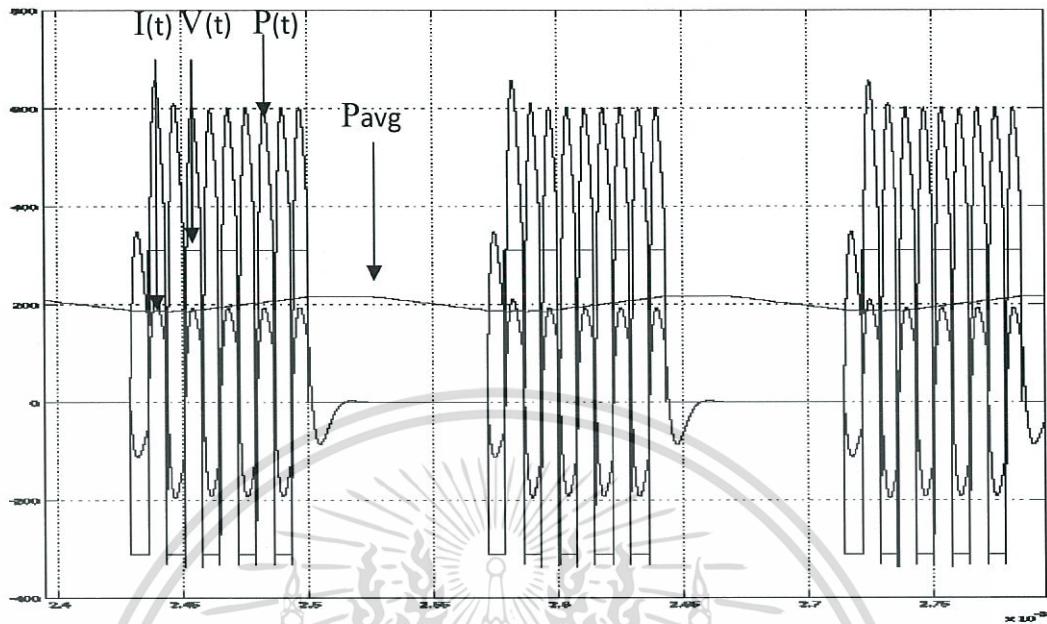


- สัญญาณ PWM ที่ความถี่ 20 kHz



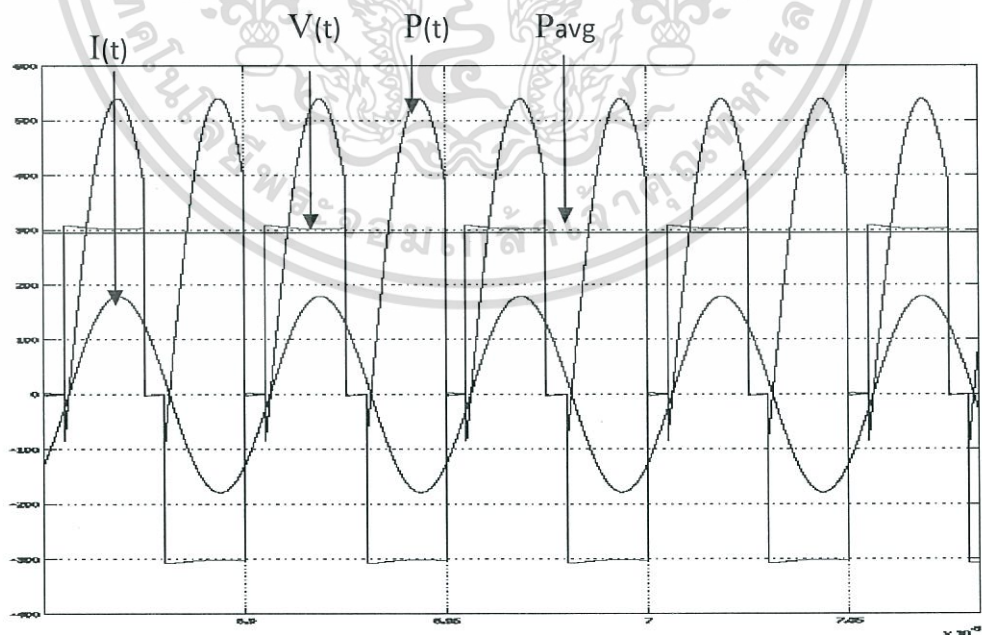
รูปที่ ข.4 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ ของสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 20 kHz

- สัญญาณ PDM ที่ความถี่ 20 kHz



รูปที่ ข.5 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ ของสัญญาณ PDM ที่ความถี่ 20 kHz

- สัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 20 kHz

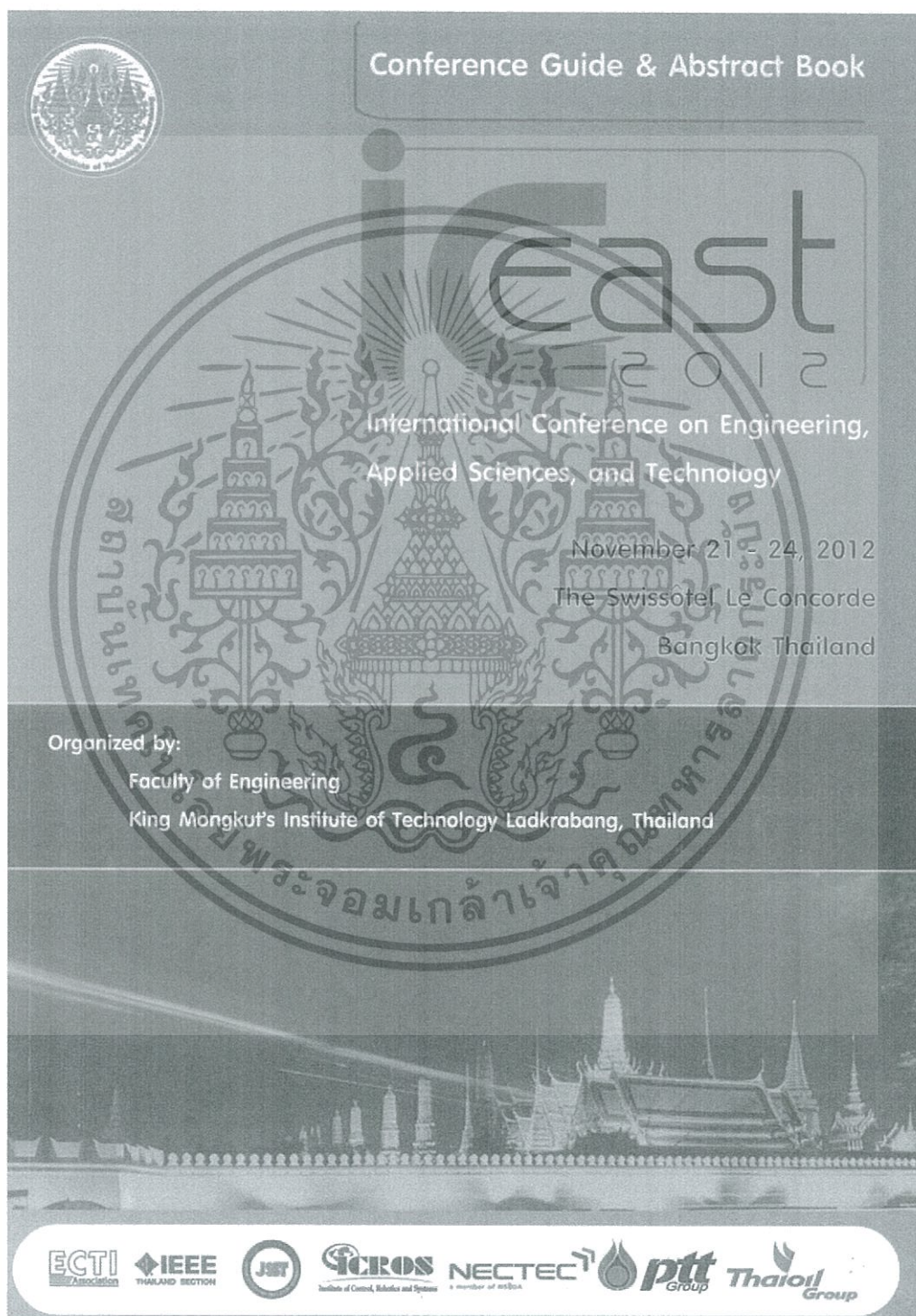


รูปที่ ข.6 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ ของสัญญาณ PS-PWM ที่ความถี่ 20 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Conference Program

November 21, 2012	
Time:	Event
13:00-18:00	Pre-Registration

November 22, 2012				
Time:	Room:			
08:30-09:00	Registration			
09:00-09:20	Opening Ceremony			
09:20-10:00	Keynote Speaker I: Prof. Dr. Shoichi Noguchi			
10:00-10:30	Break			
10:30-11:10	Keynote Speaker II: Mr. Sura Gaintanasitp			
11:10-11:50	Keynote Speaker III: Prof. Dr. Pairash Thachayapong			
11:50-13:10	Lunch			
Parallel Session:				
Room	A	B	C	D
	TA1	TA2	TA3	TA4
Session	Electrical and Electronic Engineering I	ICT I	Control and Automation Engineering I	Material Technology
Chair	Sorawat Chivaprecha (Thailand)	Chusit Pradabot (Thailand)	Chunxuan Xu (Japan)	Hye Jin Yang (South Korea)
	Kittipol Chitsakul (Thailand)	Kitsuchart Paetupa (Thailand)	Hwa-Seok Oh (South Korea)	Young-Seak Lee (South Korea)
13:10-13:30	PID52	PID13	PID102	PID8
13:30-13:50	PID54	PID15	PID12	PID136
13:50-14:10	PID58	PID19	PID114	PID63
14:10-14:30	PID60	PID31	PID14	PID9
14:30-14:50	PID69	PID70	PID115	PID137
14:50-15:10	PID99	PID78	PID20	PID51
15:10-15:30	Break			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Design and Construction of Ozone Generator: Comparative Studies of PWM, PDM, PS-PWM Control in High-Frequency High-Voltage Full-Bridge Inverter for Ozone Generator

Teeradee Jianwan

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
 Bangkok, Thailand, 10520
 Email: Robert_boy01@hotmail.com

Anuwat Jangwanitlert

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
 Bangkok, Thailand, 10520 Tel. 662-329-8330
 Email: kjanuwat@kmitl.ac.th

Abstract—This paper presents the construction and design of zone generator using the high-frequency and high-voltage full-bridge inverter. The control signals employ the Pulse-Width Modulation (PWM), Phase-Shifted PWM and Pulse Density Modulation (PDM) patterns in order to increase power density in electrodes of ozone generator. Three control signals are used to compare the results of ozone quantity. To simplify control signals, the microcontroller dsPIC30F2010 is used to generate. The experimental results of ozone generator are analyzed.

Keywords—Ozone generator, high-frequency high-voltage, full-bridge, PWM, PS-PWM, PDM

I. INTRODUCTION

Nowadays, ozone is alternative method for air purifier and water treatment. Ozone is widely used in factory and home such as air purifying, sterilization including preserving food, deodorization, restoring of water underground, and making drinkable water. To utilize ozone is increased rapidly. In addition, to improve the ozone generator is necessary.

Today, ozone generator in the Industry employs the discharge principle. The axial cylinder is constructed for gas, dry air or oxygen flowing through a gap between electrodes. The gap length is between 1 and 2 mm. One side of gap is metal electrode as a ground and the other side is glass or ceramic as a high voltage electrode. A high-frequency high-voltage between two electrodes makes a high electric field enough to generate oxygen. Moreover, the more electric-field density between electrodes increases, the more ozone generates in the limited surface. The switching converter performs dc voltage to a high-frequency high-voltage in order to increase the efficiency of ozone generator. Also, the switching converter provides components reduce and controls the ozone quantity easily [1].

In this paper, the comparison of PWM, PS-PWM, and PDM signals in the full-bridge inverter is analyzed. The high-frequency high-voltage for ozone generator is derived from full-bridge inverter. In sec II, structure of ozone generator is presented. In sec III, the design and operation of ozone generator which consists of a full bridge inverter and three signals.

The experimental results are shown in sec IV, and conclusion in sec V.

II. DESIGN OF ELECTRODES

In this research, the cylindrical glass is used as making ozone. Two-Insulator cylinder is used with electrodes. The first insulator is glass, relative permittivity $\epsilon_1 = 8$, and the other one is air, $\epsilon_2 = 1$, where $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ is permittivity of vacuum [1]. The size is followed by Fig. 1.

A. Ozone Process

1. Split free atom of oxygen



2. Combine between oxygen molecules and free atom to get ozone



From the ozone process, disintegration of O covalent bond uses energy of 5.584 kWh/m³, but there is a volume of oxygen in the air only 20.95%. Therefore, total energy used to generate ozone in air gap is 1.169 kWh/m³.

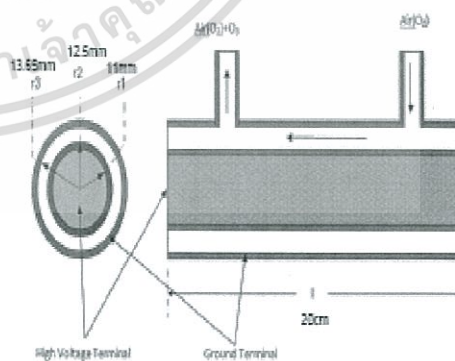


Fig. 1 Jointed Cylindrical axis

$$\text{From } W = \frac{1}{2} \int \epsilon E^2 dV \quad (3)$$

$$\text{So, } E = \sqrt{\frac{2W}{\epsilon Vol}} \quad (4)$$

The volume of air (V) in air gap is

$$Vol = \pi \times (r_2 - r_1)^2 \times l = \pi \times (0.01365 - 0.0125)^2 \times 0.20 = 0.8309 \times 10^{-4} m^3$$

so, ozone tube consumes the total energy (W) :

$$W = 1.169 \times 10^3 \times 0.8309 \times 10^{-4} Wh$$

$$\therefore W = 0.97132 mWh$$

$$E = \sqrt{\frac{2 \times 0.9713 \times 10^{-3}}{8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 0.8309}} = 16.25 kV/cm$$

where E is the electric field which generates ozone.

B. Calculation for generating ozone voltage (V)

$$V = \frac{E \times r_2 \left(\epsilon_1 \ln \frac{r_2}{r_1} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)}{\epsilon_1} \quad (5)$$

Substitute parameters in (5)

$$V = \frac{16.25 \times 10^3 \times 1.25 \times \left(8 \times \ln \frac{1.365}{1.25} + 1 \times \ln \frac{1.25}{1.1} \right)}{8} = 2.1 \text{ kV}$$

In case of different insulators, the relative permittivity (ϵ) is not same value. Two dielectrics of insulators are in electric field, so these are like two capacitors, C_1 and C_2 connected in series. The capacitor values are given by:

$$C_1 = \frac{2 \times \pi \times \epsilon_1 \times \epsilon_0 \times l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{2 \times \pi \times 8 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 20}{\ln \frac{1.25}{1.1}} = 6.9630 \times 10^{-10} F/m$$

$$C_2 = \frac{2 \times \pi \times \epsilon_2 \times \epsilon_0 \times l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{2 \times \pi \times 1 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 0.20}{\ln \frac{1.365}{1.25}} = 1.2642 \times 10^{-10} F/m$$

$$C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}} = 1.0699 \times 10^{-10} F/m$$

Where C_T is total capacitor value. So, the voltage fed to electrode for generating ozone is around 2.1 kV and capacitor value C_T of electrode is $1.0699 \times 10^{-10} F/m$. [1]

III. DESIGN AND OPERATION OF OZONE GENERATOR

There is a full bridge inverter as shown in Fig. 2 using PWM, PS-PWM, PDM signals to generate ozone quantity [1]-[4].

A. PWM Full-Bridge Inverter

The PWM Full-Bridge Inverter is a switching converter which provides power source. The full-bridge inverter employs two switches operating in the diagonal and vice versa. That means S1 and S4 are operated at the same time in the first half cycle and the later half cycle S2 and S3 are operated at the same time. Four Switches in this research are MOSFETs whose PWM signals as shown in Fig. 3 are controlled by dsPIC30F2010.

B. PS-PWM Full-Bridge Inverter

The PS-PWM Full-Bridge Inverter is the same main circuit, like original full-bridge inverter. The switches in the PS-PWM full-bridge inverter are operated like the PWM full-bridge inverter, but PS-PWM full-bridge inverter has switch S1 and diode of switch S4 conducts first and then S1 and S4 conducts together. That means time for witch S1 coming before switch S4 (ϕ) and the other diagonal switch (S2 and S3) are operated like the switch S1 and S4 as shown in Fig. 4 [6].

C. PDM Full-Bridge Inverter

PDM Full-Bridge Inverter has a structure main circuit is the same as PWM Full-Bridge Inverter, but the control signal is different. The Switch S1 and S4 conducts at the same time and S2 and S3 conducts at the same time, alternately. The PDM signal as shown in Fig. 5 has a stop time period that is different from PWM signal [5].

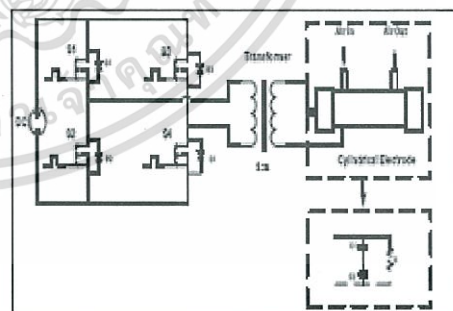


Fig. 2 Main Circuit for ozone generator.

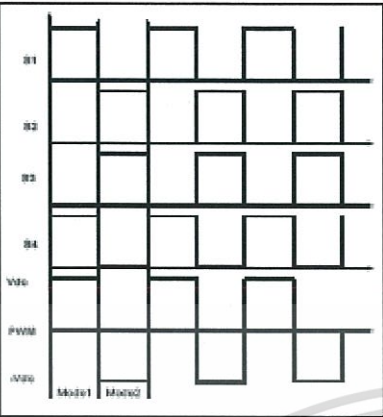


Fig. 3 PWM signals.

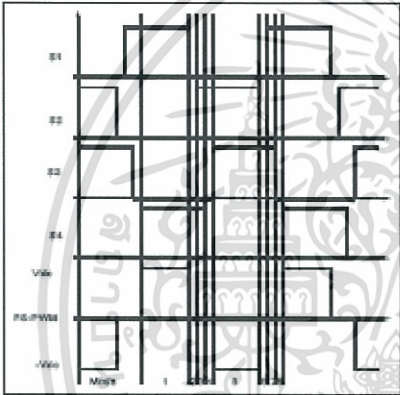


Fig. 4 PS-PWM signals.

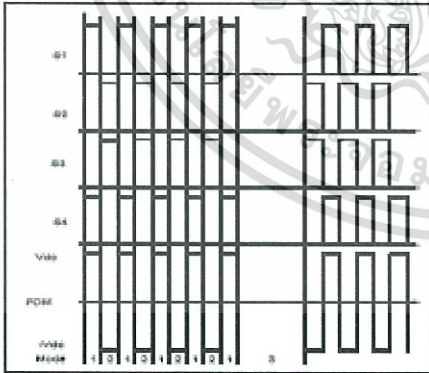


Fig. 5 PDM Signals.

IV. EXPERIMENTAL RESULTS

To verify the principle of operation, the proposed Full-Bridge Inverter using PWM, PS-PWM, PDM signal is operated at 20-50 kHz with the component values as shown in Table. 1. Figs. 6,7 and 8 show the output Secondary voltage and Secondary current that use the PWM signals for driving 4 switches in Full-Bridge Inverter. The characteristics waveforms are followed by the concept idea.

TABLE 1 PARAMETERS

Equipment	Name	Value/Number
Source	DC	310V
Switch	MOSFET	IRF460
Transformer	1:n	1:7
Cylindrical tube	C ₁	6.9630x10 ⁻¹⁰ F/m
	C ₂	1.2642x10 ⁻¹⁰ F/m
	C _T	1.0699x10 ⁻¹⁰ F/m
	R	71kΩ

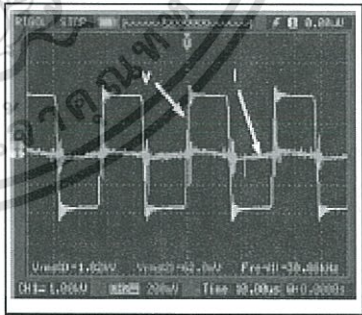


Fig.6 Secondary voltage (yellow) and current (blue) using PWM signal.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

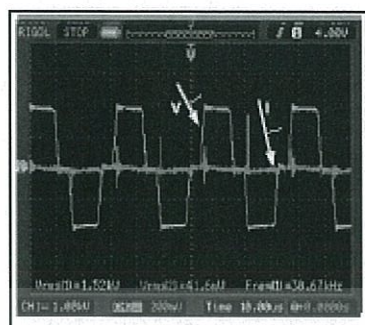


Fig. 7 Secondary voltage (yellow) and current (blue) using PS-PWM signal.

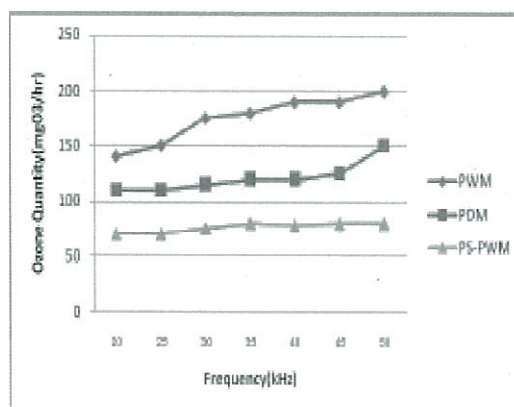


Fig. 9 Ozone quantity vs. frequency.

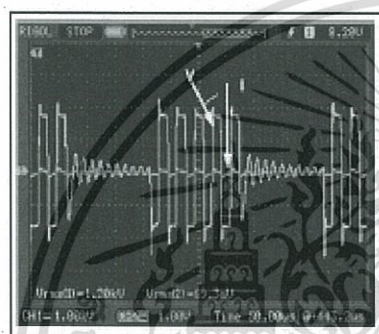


Fig. 8 Secondary voltage (yellow) and current (blue) using PDM signal.

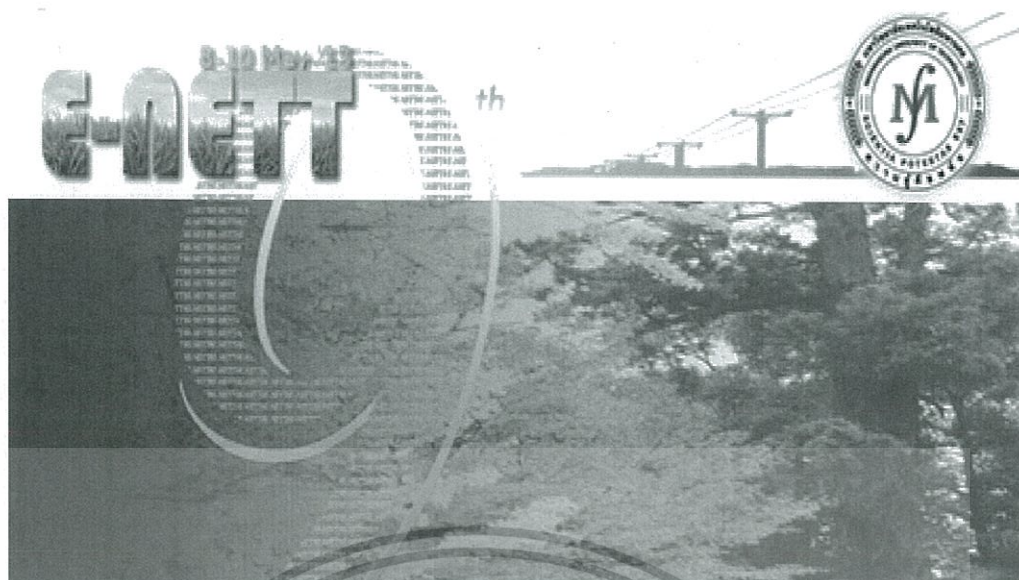
Fig.9 shows the ozone quantity vs. varied frequencies. The frequencies are varied from 20 kHz-50 kHz. The ozone quantity by using three signal patterns are compared one another. At the same frequency, full-bridge inverter using PWM signal can get the most ozone quantity. The second ozone quantity employs the full-bridge inverter by using PS-PWM signal and the lowest ozone quantity uses the full-bridge inverter by using the PDM signal. Moreover, the more frequency, the more ozone quantity. The reason is the electric field density depends on the frequency and secondary voltage. Therefore, secondary voltage of full-bridge inverter using PWM signal is higher than that of PS-PWM signal and PDM signal, respectively. For example, at the 20 kHz, the PWM signal can get ozone quantity of 140 mgO₃/hr, PS-PWM of 120 mgO₃/hr, and PDM signal of 65 mgO₃/hr. and at the 50 kHz, the PWM signal can get ozone quantity of 200 mgO₃/hr, PS-PWM signal of 150 mgO₃/hr, and PDM signal of 80 mgO₃/hr.

V. CONCLUSION

The Full-bridge inverter using PWM signal, PS-PWM signal and PDM signal is presented. The operating frequency is varied from 20 kHz to 50 kHz. The highest secondary voltage is 2 kV. From the experimental results, the ozone generator, which was designed, can be operated and used in practice. Also, the concept idea is verified by characteristic waveforms.

REFERENCES

- [1] J. M. s. Alonso, J. Garcia, A. J. Calleja, J. Ribas, and J. Cardesa, "Analysis, design, and experimentation of a high-voltage power supply for ozone generation based on current-fed parallel-resonant push-pull inverter," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 41, No. 5, September/October 2005.
- [2] S. Khammaphan and V. Kinnarot, "High voltage and high frequency ozone generator using a pulse density modulation technique," *The 31th Electrical Engineering Conference*, pp. 541-544, October 2551.
- [3] P. Hothongkham, S. Kongsachai, and N. Thodsaporn, "Analysis and comparison study of PWM and Phase-Shifted PWM full-bridge inverter fed high-voltage high-frequency ozone generator" *IEEE PEDS 2011*, pp. 776-781, December 2011.
- [4] P. Hothongkham and V. Kinnarot, "High-Voltage High-Frequency power supply using phase shift PWM full bridge inverter fed ozone generator" *IEEE International Symposium on Industrial Electronics* Seoul Olympic Parktel, Seoul, Korea July 5-8, 2009.
- [5] Y. Konishi, S. P. Wang, M. Ishibashi, Y. L. Feng and M. Nakakita, "Efficient ozonizer using PDM and PWM controlled resonant inverter and its performance evaluations", *Power Conversion Conference*, vol. 2, pp. 971-976, Aug 1997.
- [6] P. Hothongkham and V. Kinnarot, "Measurement of an ozone generator using a phase-shifted PWM full bridge inverter", *The 2010 International Power Electronics Conference*, pp. 1552 – 1559, 2010.



Conference on Energy Network of Thailand การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9

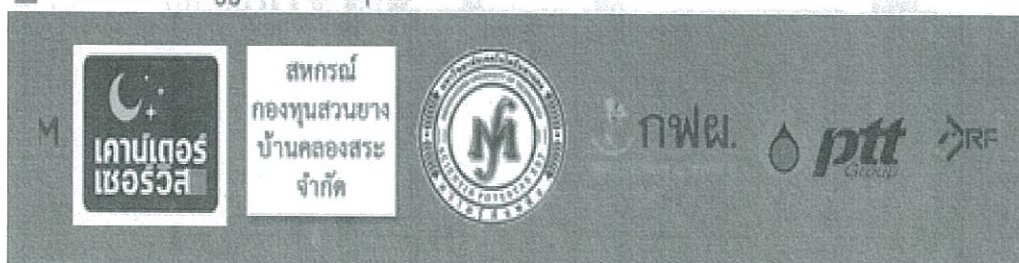
ณ. โรงแรม รีสอร์ท ออานา จ.นครนายก
8 - 10 พฤษภาคม 2556

กำหนดการสำคัญ

31 ม.ค. 2556
ส่งความสงบในวันสุดท้าย
20 ก.พ. 2556
ขยายวันเป็นทศวรรษ
15 มี.ค. 2556
แจ้งผลการดำเนินงาน
31 มี.ค. 2556
ส่งความสงบในวันสุดท้าย
31 มี.ค. 2556
ลงทะเบียนล่วงหน้า
8-10 พ.ค. 2556
วันประชุมวิชาการ

สาขาบทความวิจัย

Energy Policy (EP)
Applied Energy (AE)
Energy Material (EM)
Renewable Energy (RE)
Energy Conservation (EC)
Environmental Management (EVM)
Others (Energy-related topics)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รหัสบทความ:

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9

ENETT-212

8-10 พฤษภาคม 2556 จังหวัดนครนายก

การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดโอโซน : ศึกษาเปรียบเทียบวงจรควบคุมแบบ PWM, PS-PWM และ PDM ในวงจรคอนเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์ แรงดันสูงความถี่สูงแบบ LCC เรโซแนนซ์ สำหรับเครื่องกำเนิดโอโซน

Design and Construction of Ozone Generator: Comparative Studies of PWM, PDM and PS-PWM Control in High-Frequency High-Voltage LCC Resonant Full-Bridge Converter for Ozone Generator

ธีรเดช เจียรวรรณ¹*อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ¹¹ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กทม. 10520

*E-mail: Robert_boy01@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดโอโซนโดยใช้วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ แรงดันสูงความถี่สูง แบบ LCC เรโซแนนซ์ โดยใช้สัญญาณควบคุมด้วย PWM, PS-PWM และ PDM เพื่อเพิ่มความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าบริเวณ ขั้วไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดโอโซนและนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับปริมาณโอโซน ด้วยเทคนิคบทความนี้ได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ dsPIC30F2010 เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณควบคุมทั้งสามแบบ แล้วทำการเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดโอโซนที่ใช้สัญญาณควบคุมทั้งสามแบบ เพื่อจะได้เป็นทางเลือกใช้เครื่องกำเนิดโอโซนที่เหมาะสม การนำเสนอได้วิเคราะห์ออกแบบเครื่องกำเนิดโอโซนและวงจรแปลงกำลัง และวิเคราะห์ผลทดลองสำหรับเครื่องกำเนิดโอโซนและ แหล่งจ่ายกำลังที่ได้สร้างขึ้น

คำหลัก: เครื่องกำเนิดโอโซน, LCC เรโซแนนซ์, แหล่งจ่ายกำลังแบบแรงดันสูงความถี่สูง, ฟูลบริดจ์ อินเวอร์เตอร์, PWM, PS-PWM, PDM

Abstract

This paper presents the design and comparative studies of zone generator using a high-frequency and high-voltage LCC Resonant full-bridge converter. The control signals employ the Pulse-Width Modulation (PWM), Phase-Shifted PWM and Pulse Density Modulation (PDM) patterns in order to increase power density in electrodes of ozone generator. Three control signals are used to compare the results of ozone quantity. To simplify control signals, the microcontroller dsPIC30F2010 is used to generate. The efficiencies of ozone generator using three control signals are compared in order to choose which one is suitable. In addition, the design of ozone generator, together with power conversion, is analyzed. The experimental results of ozone generator are analyzed as well.

Keywords- Ozone generator, LCC Resonance, high-frequency high-voltage, full-bridge, PWM, PS-PWM, PDM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รหัสบทความ: ENETT-212

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9

8-10 พฤษภาคม 2556 จังหวัดนครนายก

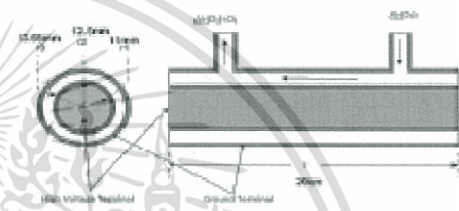
1. บทนำ

ปัจจุบันไอโซนกลายเป็นทางเลือกสำหรับปรับปรุงอากาศและน้ำมากมาย ไอโซนถูกใช้อย่างกว้างขวางในโรงงานและบ้านเรือน ดังเช่น การฟอกและการฆ่าเชื้อ รวมไปถึงการใช้ในกระบวนการอาหาร การเก็บรักษาอาหาร การกำจัดกลิ่น การฟื้นฟูน้ำใต้ดิน และการทำน้ำดื่ม การใช้ประโยชน์ของไอโซนได้เติบโตอย่างรวดเร็ว ซึ่งการปรับปรุงระบบสร้างไอโซนจึงเป็นส่วนสำคัญ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมได้ใช้วิธีการสร้างไอโซนโดยหลักการดีสชาร์จทางไฟฟ้า ในปัจจุบันการสร้างไอโซนมักจะใช้รูปแบบทรงกระบอกแกนร่วมโดยการให้แก๊สอากาศแห้ง หรือ ออกซิเจน ไหล ผ่านช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้า ความกว้าง 1-2 มม. ด้านหนึ่งของช่องว่าง เป็นขั้วโลหะ ทำหน้าที่เป็นกรวด และอีกด้านหนึ่งแก้วหรือเซรามิกซึ่งติดอยู่กับขั้วไฟฟ้าแรงดันสูง แรงดันไฟฟ้า กระแสสลับระหว่างสองขั้วทำให้เกิดสนามไฟฟ้า กระแสสลับสูงพอที่จะทำให้ออกซิเจนแตกตัว ใช้แหล่งจ่ายกำลังที่ความถี่สูง เพื่อเพิ่มความหนาแน่นสนามไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไอโซน และเพิ่มปริมาณ ไอโซนสำหรับพื้นที่ผิวที่จำกัด ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังสวิตชิ่ง บนพื้นฐานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น หม้อแปลงความถี่สูง MOSFET หรือ IGBT มันสามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบสัญญาณเอาต์พุตและเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ได้ ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่อง ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการเปรียบเทียบวงจรอินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์ ที่ใช้สัญญาณ PWM, PDM และ PS-PWM เพื่อเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับเป็นเครื่องกำเนิดไอโซน งานวิจัยนี้ section II แสดงโครงสร้าง เครื่องกำเนิดไอโซน เทคนิคและพื้นฐานในการวิเคราะห์วงจรแปลงผันกำลัง section III แสดงการออกแบบและการทำงานวงจรแปลงผันกำลังทั้ง 3 สัญญาณ section IV ผลการทดลอง สุดท้าย section V สรุปผล

2. การออกแบบแหล่งอิเล็กทรอนิกส์เครื่องกำเนิดไอโซนและคำนวณค่าแรงดันที่ใช้ในการแตกตัวของออกซิเจน

งานวิจัยนี้ใช้หลอดแก้วในการทำหลอดไอโซน ขั้วอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมฉนวนสองชั้น โดยกำหนดให้ฉนวนชั้น 1 ในที่นี้เป็นแก้ว ค่าสัมประสิทธิ์ (ϵ_1) -8 ฉนวนชั้นที่ 2 เป็นอากาศ ค่าสัมประสิทธิ์ (ϵ_2) -1 และ $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ และขนาดตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะรูปทรงของทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

กระบวนการเกิดไอโซน

1. กระบวนการแตกตัวเป็นอะตอมอิสระของออกซิเจน

$$O_2 \rightarrow O + O \quad (1)$$

2. ขั้นตอนการรวมตัวระหว่างโมเลกุลของออกซิเจนกับ อะตอมอิสระเกิด เป็นก๊าซไอโซน

$$O + O_2 \rightarrow O_3 \quad (2)$$

จากขั้นตอนดังกล่าวในการสลายพันธะออกเป็น O ซึ่งต้องใช้พลังงานทั้งสิ้น 5.584 kWh/m^3 แต่เนื่องจากในอากาศมีปริมาตรของออกซิเจนเพียง 20.95% เพราะฉะนั้นต้องใช้พลังงานทั้งสิ้น 1.169 kWh/m^3 จึงจะเริ่มการเกิดไอโซนขึ้นภายในช่องว่างอากาศ

$$\text{จาก} \quad W = \frac{1}{2} \int \epsilon E^2 dV \quad (3)$$

$$\text{จะได้} \quad E = \sqrt{\frac{2W}{\epsilon V_0 l}} \quad (4)$$

ปริมาตรอากาศช่องว่าง

$$V_0 = \pi x (r_2 - r_1) l = \pi x (0.01365 - 0.0125)^2 \times 0.20 = 0.8309 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

เพราะฉะนั้นหลอดไอโซนที่สร้างขึ้นนี้ต้องใช้พลังงานในการเกิดไอโซนเท่ากับ

รหัสบทความ:

ENETT-212

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9

8-10 พฤษภาคม 2556 จังหวัดนครนายก

$$W = 1.169 \times 10^3 \times Vol \times 10^{-6} Wh$$

Vol = ปริมาตรอากาศหน่วย cm^3

$$\therefore W = 0.97132 mWh$$

$$E = \sqrt{\frac{2 \times 0.9713 \times 10^{-3} \times 10^{-6}}{8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 0.8309 \times 10^{-4}}} = 16.25 kV/cm$$

เป็นสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดไอออนพอสิต

คำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดไอออนจาก

$$V = \frac{E \times r_1 \left(\epsilon_1 \ln \frac{r_2}{r_1} + \epsilon_2 \ln \frac{r_3}{r_1} \right)}{\epsilon_1} \quad (3)$$

$$V = \frac{16.25 \times 10^3 \times 1.25 \times \left(8 \times \ln \frac{1.365}{1.25} + 1 \times \ln \frac{1.25}{1.1} \right)}{8} = 2.1 kV$$

ในกรณีที่นำวัสดุขนาดต่างชนิดกัน วางซ้อนกันและค่าเปอร์มิตติวิตี (ϵ) ไม่เท่ากัน จึงกลายเป็นการนำสารไดอิเล็กทริกสองชนิดวางเรียงกันในสนามไฟฟ้า ดังนั้นเสมือนมีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกันอยู่คือ C_1 และ C_2

$$C_1 = \frac{2 \times \pi \times \epsilon_1 \times \epsilon_2 \times l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{2 \times \pi \times 8 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 20}{\ln \frac{1.25}{1.1}} = 6.9630 \times 10^{-10} F/m$$

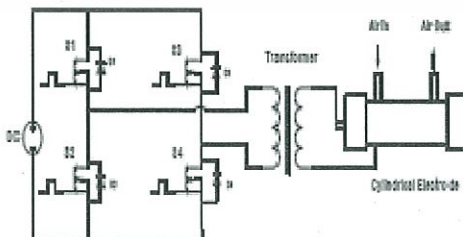
$$C_2 = \frac{2 \times \pi \times \epsilon_1 \times \epsilon_2 \times l}{\ln \frac{r_3}{r_1}} = \frac{2 \times \pi \times 1 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 0.20}{\ln \frac{1.365}{1.25}} = 1.2542 \times 10^{-10} F/m$$

$$C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}} = 1.0699 \times 10^{-10} F/m$$

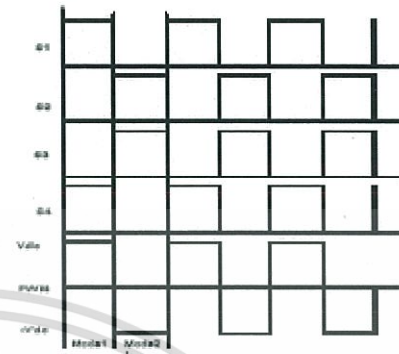
ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแก๊สอิเล็กโทรดเพื่อทำให้เกิดไอออน ประมาณ $V = 2.1 kV$ และความจุไฟฟ้าของแก๊สอิเล็กโทรด $C_T = 1.0699 \times 10^{-10} F/m$

3. การออกแบบและการทำงานวงจรแปลงผันกำลัง

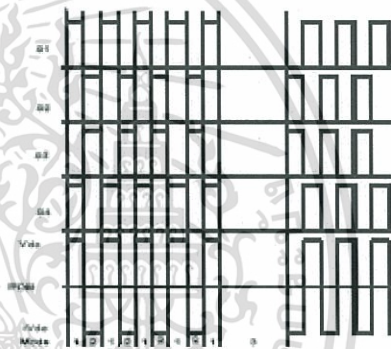
แบบ PWM, PDM, PS-PWM ฟลูบริดจ์ คอนเวอร์เตอร์



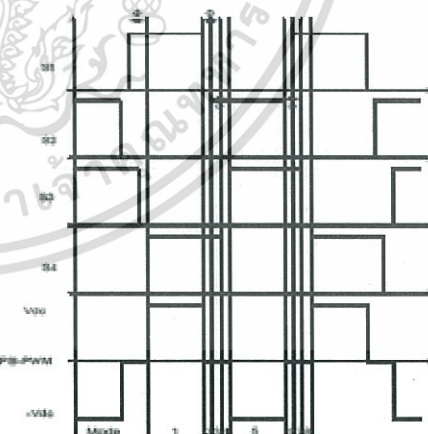
รูปที่ 2 วงจรกำลังของเครื่องกำเนิดไอออน



รูปที่ 3 การทำงานของสัญญาณ PWM



รูปที่ 4 การทำงานของสัญญาณ PDM



รูปที่ 5 การทำงานของสัญญาณ PS-PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รหัสบทความ:

ENETT-212

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9

8-10 พฤษภาคม 2556 จังหวัดนครนายก

3.1 คอนเวอร์เตอร์ ฟูลบริดจ์ชนิด PWM

อินเวอร์เตอร์ ฟูลบริดจ์ชนิด PWM เป็นรูปแบบหนึ่งของแหล่งจ่ายกำลังงาน แบบสวิตช์โหมดคอนเวอร์เตอร์ มีหลักการทำงานโดยอาศัยการสวิตช์ของ อุปกรณ์สวิตช์ ส่งผ่านกำลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า กระแสตรงไปสู่โหลด ซึ่งใช้อุปกรณ์สวิตช์ทั้งหมด 4 ตัว ด้วยกัน ดังรูปที่ 2 การทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ ที่ทำงานพร้อมกันเป็นคู่ๆ คือ S1 คู่กับ S4 และ S2 คู่กับ S3 ทำงานสลับกันคู่ละครึ่งคาบเวลา อุปกรณ์สวิตช์ที่ใช้คือ MOSFET ทั้ง 4 ตัว จะทำงานแยกอิสระจาก กัน โดยรับสัญญาณ PWM จาก dsPIC30F2010 ให้ S1 และ S4 นำกระแสโดยที่ S2 และ S3 หยุดนำกระแส สลับกันให้ ให้ S1 และ S4 หยุดนำกระแสแล้วให้ S2 และ S3 นำกระแส ทำอย่างนี้ไปเรื่อยๆ ดังแสดงในรูปที่ 3

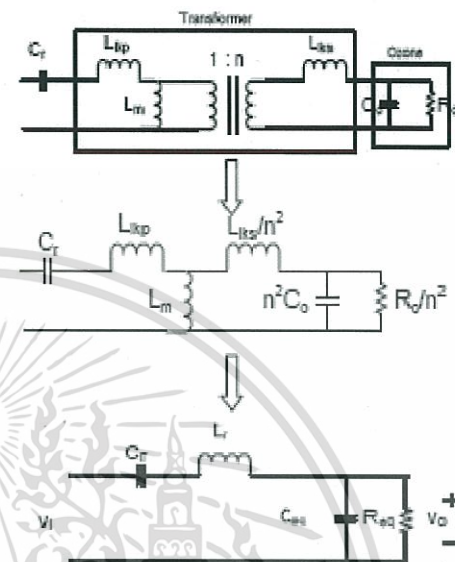
3.2 คอนเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์ ชนิด PDM

อินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์ ชนิด PDM มีโครงสร้างเหมือนกับ อินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์ ชนิด PWM โดยสวิตช์ จะทำงานเป็นคู่ๆ S1 และ S4 นำกระแสสลับกับ S2 และ S3 ทำอย่างนี้ไปเรื่อยๆ 5 คาบเวลา และหยุดจ่ายแรงดัน 5 คาบเวลาเช่นกัน โดยช่วงหยุด S1, S2, S3 และ S4 หยุดนำกระแสโดยจะจ่ายสัญญาณ 5 คาบ และหยุดจ่ายสัญญาณ 5 คาบ เป็นอย่างนี้ไปเรื่อยๆ ดังรูปที่ 4

3.3 PS-PWM ฟูลบริดจ์ คอนเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์ ชนิด PS-PWM สวิตช์จะทำงานเป็นคู่ๆ คล้ายกับ อินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์ ชนิด PWM แต่ต่างกันที่ PS-PWM ช่วงที่เวลาที่ S1 และ S4 นำกระแส S1 จะนำกระแสก่อน S4 เป็นเวลา Φ แล้ว ช่วงหยุดนำกระแส S1 จะเร็วกว่า S4 อยู่ Φ เช่นกัน ส่วนที่ S2 และ S3 ก็เหมือนกัน S2 จะนำกระแสก่อน S3 เป็นเวลา Φ แล้วช่วงหยุด นำกระแส S2 จะเร็วกว่า S3 อยู่ Φ เช่นกัน ทำอย่างนี้สลับกันไปเรื่อยๆ ดังรูปที่ 5

3.4 การวิเคราะห์วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเรโซแนนซ์



รูปที่ 6 วงจรสมมูลของหม้อแปลง + เครื่องกำเนิดไอโซน

L_{kp} - ค่าความเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลทางด้านปฐมภูมิ

L_m - ค่าความเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กในแกน

L_{ks} - ค่าความเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลทางด้านทุติยภูมิ

L_r - ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าเรโซแนนซ์

n - อัตราส่วนรอบของหม้อแปลง

C_r - ค่าความจุไฟฟ้าสมมูล

R_{eq} - ค่าความต้านทานไฟฟ้าสมมูล

C_o - ค่าความจุไฟฟ้าเรโซแนนซ์

ผลตอบสนองเชิงความถี่

$$\frac{V_i}{V_o} = \frac{1}{\sqrt{(1 + \frac{X_{C_r}}{X_{C_o}} - \frac{X_{L_r}}{X_{C_o}})^2 + j(\frac{X_{L_r}}{R_{eq}} - \frac{X_{C_r}}{R_{eq}})^2}} \quad (6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รหัสบทความ:

ENETT-212

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9

8-10 พฤษภาคม 2556 จังหวัดนครนายก

$$\frac{V_i}{V_o} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{C_{eq}}{C_r} - \omega^2 L_r C_{eq}\right)^2 + \left(\frac{\omega L_r}{R_{eq}} - \frac{1}{\omega R_{eq} C_r}\right)^2}} \quad (7)$$

ความถี่เรโซแนนซ์

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} \quad (8)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} \quad (9)$$

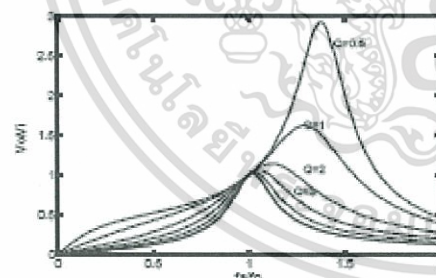
$$Q = \frac{\omega_0 L_r}{R_{eq}} \quad (10)$$

ตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor: Q)

ค่าตัวประกอบคุณภาพเป็นค่าที่นิยามเพื่อแสดงคุณสมบัติของวงจรเรโซแนนซ์ในการเลือกความถี่และการสูญเสียภายในวงจร

กำหนดให้ $C_r = C_{eq}$ จะได้ อัตราขยายกับค่าบรรทัดฐาน (V_i/V_o) ที่ค่า Q ต่าง ๆ ดังรูปที่

$$\frac{V_i}{V_o} = \frac{1}{\sqrt{2 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + \left(Q \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)\right)^2}} \quad (11)$$



รูปที่ 7 รูปแบบการจำลองค่าบรรทัดฐานของผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจร LCC เรโซแนนซ์

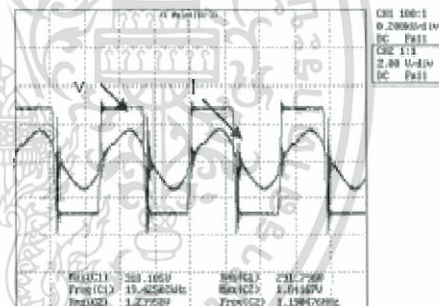
4.ผลการทดลอง

เพื่อตรวจสอบหลักการทำงาน ฟลูบรีดจ์ คอนเวอร์เตอร์แบบ PWM, PS-PWM และ PDM ทำงานที่ความถี่ 20-24 kHz ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆแสดงในตารางที่ 1 และรูปที่ 8-13 แสดงรูปสัญญาณกระแสและแรงดัน ของ

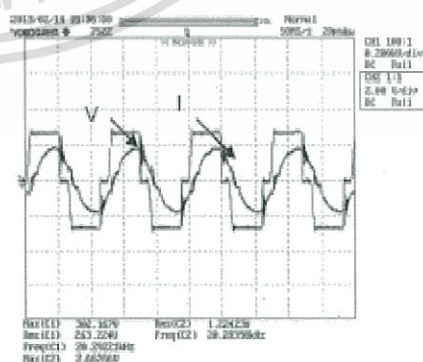
เอาต์พุตอินเวอร์เตอร์และหม้อแปลง และคุณลักษณะรูปสัญญาณเป็นไปตามหลักการ

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของวงจร

L_{lp}	0.360 mH
L_m	12.5 mH
L_{hp}	5 mH
L_r	0.54 mH
n	7
C_{eq}	5.3 nF
R_{eq}	831 Ω
C_r	137.2 nF
f_s	20 kHz



รูปที่ 8 กระแสและแรงดันของเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์แบบ PWM



รูปที่ 9 กระแสและแรงดันของเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์แบบ PS-PWM

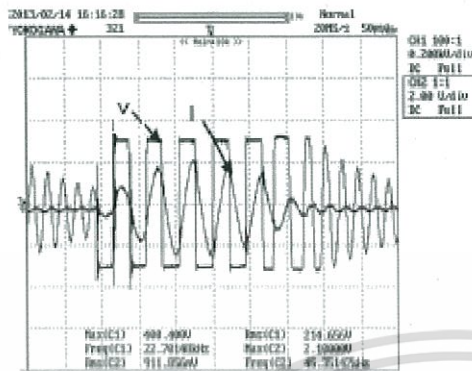
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รหัสบทความ:

ENETT-212

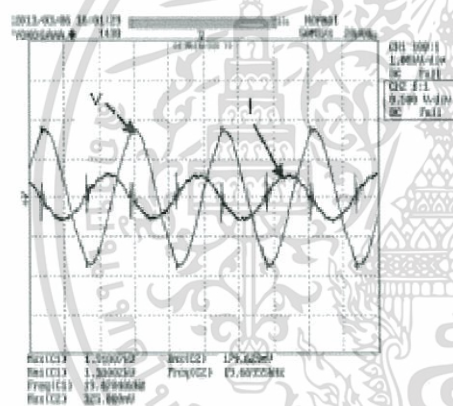
การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9

8-10 พฤษภาคม 2556 จังหวัดนครนายก



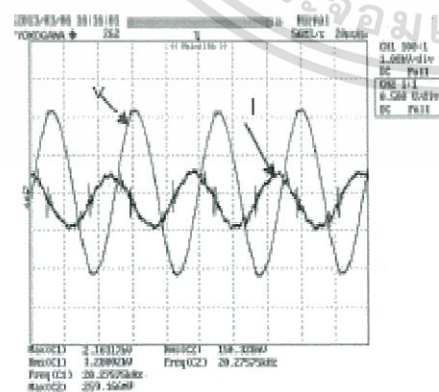
รูปที่ 10 กระแสและแรงดันของเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์

แบบ PDM



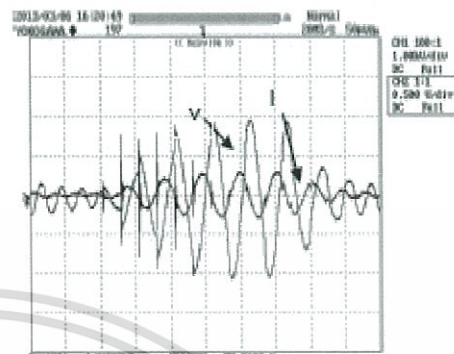
รูปที่ 11 กระแสและแรงดันของเอาต์พุตหม้อแปลงแบบ

PWM



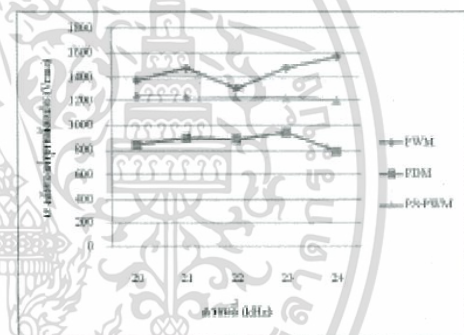
รูปที่ 12 กระแสและแรงดันของเอาต์พุตหม้อแปลงแบบ

PS- PWM

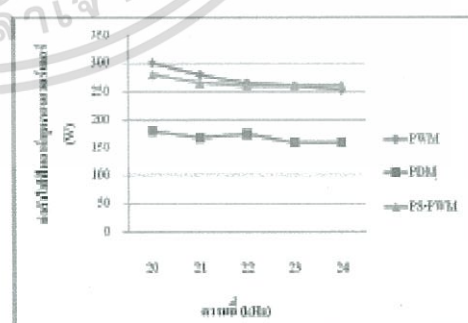


รูปที่ 13 กระแสและแรงดันของเอาต์พุตหม้อแปลงแบบ

PDM



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลง

 (V_{out}) กับ ความถี่

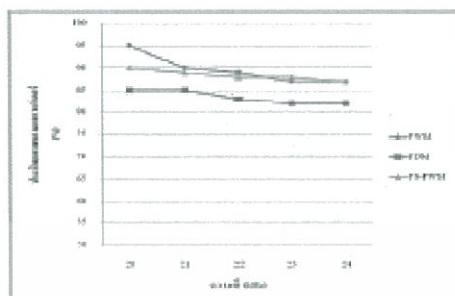
รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต

อินเวอร์เตอร์ กับความถี่

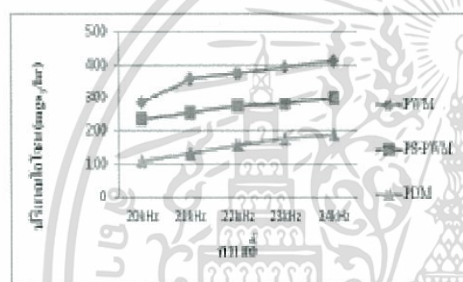
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รหัสบทความ: ENETT-212

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9
8-10 พฤษภาคม 2556 จังหวัดนครนายก



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเอทพุต
อินเวอร์เตอร์กับความถี่



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโอโซนกับความถี่

จากรูปที่ 14 แรงดันเอาต์พุต rms ของหม้อแปลงทั้ง 3 สัญญาณพบว่า PWM มีค่าค่อนข้างคงที่ทุกความถี่ อยู่ที่ประมาณ 1300 V -1600 V, PS-PWM มีค่าค่อนข้างคงที่ทุกความถี่ โดยมีค่าสูงสุดที่ความถี่ 20 kHz มีค่า 1200 V และ PDM มีค่าค่อนข้างคงที่ทุกความถี่ อยู่ที่ประมาณ 800 V -950 V

จากรูปที่ 15 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ ทั้ง 3 สัญญาณพบว่า PWM มีกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความถี่ 20 kHz มีค่าเท่ากับ 300 W และต่ำสุดที่ความถี่ 24 kHz มีค่าเท่ากับ 250 W, PS-PWM มีกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความถี่ 20 kHz มีค่าเท่ากับ 280 W และต่ำสุดที่ความถี่ 24 kHz มีค่าเท่ากับ 255 W และ PDM มีกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความถี่ 20 kHz มีค่าเท่ากับ 175 W และต่ำสุดที่ความถี่ 24 kHz มีค่าเท่ากับ 150 W

จากรูปที่ 16 ประสิทธิภาพเอทพุตอินเวอร์เตอร์ ทั้ง 3 สัญญาณพบว่า PWM มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ความถี่

20 kHz มีค่าเท่ากับ 95% และมีประสิทธิภาพต่ำสุดที่ความถี่ 24 kHz มีค่าเท่ากับ 87% และ, PS-PWM มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ความถี่ 20 kHz มีค่าเท่ากับ 90% และมีประสิทธิภาพต่ำสุดที่ความถี่ 24 kHz มีค่าเท่ากับ 87% และ PDM มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ความถี่ 20 kHz มีค่าเท่ากับ 85% และมีประสิทธิภาพต่ำสุดที่ความถี่ 24 kHz มีค่าเท่ากับ 83%

จากรูปที่ 17 ทำการทดลองโดยการปรับความถี่สัญญาณ ตั้งแต่ 20 kHz – 24 kHz ทั้ง 3 รูปแบบสัญญาณจะเห็นว่าปริมาณโอโซนต่ำสุดอยู่ที่ความถี่ 20 kHz โดยที่สัญญาณ PWM ผลิตได้ 288 mg/hr, PS-PWM ผลิตได้ 233 mg/hr และ PDM ผลิตได้ 98 mg/hr และปริมาณโอโซนสูงที่สุดอยู่ที่ความถี่ 24 kHz โดยที่สัญญาณ PWM ผลิตได้ 330 mg/hr, PS-PWM ผลิตได้ 300 mg/hr และ PDM ผลิตได้ 173 mg/hr

5. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเครื่องกำเนิดโอโซนที่ออกแบบสามารถใช้งานได้จริงในงานวิจัยนี้จะเห็นว่า ฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ แบบ PWM ให้ปริมาณโอโซนมากที่สุด เพราะเป็นรูปแบบสัญญาณที่มีเนื้อแรงดันสูงสุด รองลงมาเป็นฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์แบบ PS-PWM และฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ แบบ PDM ตามลำดับ และประสิทธิภาพและกำลังสูงสุดอยู่ที่ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนต์คือประมาณ 20 kHz ยังพบว่าปริมาณโอโซนแปรผันตามความถี่ ทั้ง 3 รูปแบบสัญญาณ เนื่องจากความถี่เพิ่มขึ้นก็เป็นการเพิ่มความหนาแน่นสนามไฟฟ้าที่ไหลผ่านเอง โดยที่ควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้อยู่ในขีดตามที่ การออกแบบ โดยกำหนดให้ แรงดันเกิดโอโซนสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 2 kV

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. M. Alonso, J. García, A. J. Calleja, J. Ribas, and J. Cardesin, "Analysis, design, and experimentation of a high-voltage power

รหัสบทความ:

ENETT-212

การประชุมวิชาการระดับชาติของงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9
8-10 พฤษภาคม 2556 จังหวัดนครนายก

- supply for ozone generation based on current-fed parallel-resonant push-pull inverter," IEEE Trans. Industry Applications, Vol.41, No. 5, September/October 2005.
- [2] S. Khamnaphai and V. Kinnarees, "High voltage and high frequency ozone generator using a pulse density modulation technique," The 31th Electrical Engineering Conference, , pp. 541-544, October 2551.
- [3] Y.Konishi, S.P.Wang, M.Ishibashi, Y.L.Feng, And M.Nakaoka, "Efficient ozonizer using PDM and PWM controlled resonant inverter and its performance evaluations," Power Conversion Conference-Nagaoka (PCC-Nagaoka'97), vol.2, Aug. 1997, pp. 971- 976.
- [4] J. M. Alonso, J.s Cardesin, E. L. Corominas, Manuel, R. Secades, and J. Garcia, "Low-Power high- voltage high-frequency power supply for ozone generation," IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 40, No.2, pp. 414-421, March/April 2004.
- [5] S.Potivajkul, V. Kinnarees, P. Rattanavichien, "Design of ozone generator using solar energy," Proc. of the IEEE Asia-Pacific Conference on Circuit and Systems (APCCAS), 24-27 Nov.1998, pp.217-220.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายธีระเดช เจียรวรรณ

วัน เดือน ปีเกิด 18 มีนาคม 2530 จ.นครศรีธรรมราช

ที่อยู่ 13/32 ซ.เก็กงาม2 ถ.คุณหญิงเหลียม แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

ประวัติการศึกษา 2552 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความชำนาญเฉพาะด้าน 1.) อิเล็กทรอนิกส์กำลัง
2.) หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง

