

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบบแรงดันสูงความถี่สูงโดยใช้เทคนิคความหนาแน่นพัลส์

HIGH VOLTAGE AND HIGH FREQUENCY OZONE GENERATOR USING A PULSE DENSITY MODULATION TECHNIQUE



จพ.  
๑๓๕๕๑  
๑๕๕๑

สราวุธ คำนับไทย  
SARAWUT KHAMNAPTHAI

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 87876  
วัน,เดือน,ปี..... 19 ส.ค. 2552

b. 12072913  
i. ....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2551

KMITL-2008-EN-M-020-186



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**HIGH VOLTAGE AND HIGH FREQUENCY OZONE GENERATOR USING A  
PULSE DENSITY MODULATION TECHNIQUE**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2008  
KMITL-2008-EN-M-020-186**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2008**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์ เครื่องผลิตก๊าซไอโซนแบบแรงดันสูงความถี่สูงโดยใช้เทคนิคความหนาแน่นพัลส์

นักศึกษา นายสรารุช กำนันไทย

รหัสนักศึกษา 46060719

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ 2551

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องผลิตก๊าซไอโซนแบบแรงดันสูงความถี่สูง โดยใช้เทคนิคความหนาแน่นพัลส์สำหรับฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ข้อดีของเทคนิคนี้คือสามารถปรับลดเพิ่มปริมาณไอโซน โดยการปรับจำนวนลูกคลื่นความหนาแน่นพัลส์โดยที่พิกัดแรงดันที่เอาต์พุตจากหม้อแปลงอยู่ระหว่าง 4 kV ถึง 6 kV ความถี่ 25 kHz สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตของหม้อแปลงได้ โดยการปรับจำนวนความหนาแน่นพัลส์ที่ภาคควบคุมของวงจร และมีการจำลองวงจรที่ได้ออกแบบโดยใช้โปรแกรม แมทแลป/ซิมูลิงค์ ประสิทธิภาพรวมของระบบประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์

**Thesis Title** High Voltage and High Frequency Ozone Generator Using a Pulse Density Modulation Technique  
**Student** Mr.Sarawut Khamnaphai  
**Student ID** 46060719  
**Degree** Master of Engineering  
**Program** Electrical of Engineering  
**Year** 2008  
**Thesis Advisor** Assoc.Prof.Dr.Vijit Kinnares

### ABSTRACT

This Thesis presents the design and implementation of an ozone generator based on a PDM (Pulse Density Modulation) technique using a full-bridge converter providing high voltage and high frequency. The advantage is the adjustment of the quantity of ozone by controlling the number of the wave of pulse density. The rated voltage at the output of a transformer is between 4 kV and 6 kV at 25 kHz. The output voltage of the transformer can be controlled by varying the number of pulse density at the control part of a circuit. and The simulation of the designed circuit using MATLAB/SIMULINK is also included The overall System is alert 90 percent.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วิจิตร กิมเรศ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการเคมีมหาวิทาลัยเทคโนโลยีมหานครที่ให้ความช่วยเหลือในการวัดปริมาณ โอโซนตลอดจนสารเคมีต่างๆที่ใช้ในการวัด

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัย PMC และภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่สนับสนุนอุปกรณ์เครื่องมือสถานที่ ที่จำเป็นต้องใช้ในงานวิจัยนี้และขอบคุณพี่น้องห้องปฏิบัติการทุกคน

สุดท้ายนี้ต้องขอขอบคุณคุณแม่ที่ๆเพื่อนๆน้องๆทุกคนที่คอยให้กำลังใจและเป็นแรงผลักดันให้ข้าพเจ้าทำงานวิจัยชิ้นนี้ให้สำเร็จ

สำหรับคุณงามความดีอันได้ที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดาซึ่งเป็นที่รักและเคารพอย่างยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

สรารุช กำนันไทย

# 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.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องผลิตก๊าซ โอ โซน.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 กระบวนการสร้างก๊าซ โอ โซน โดยใช้อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกัน.....	6
2.2.1 วิธีการสร้างก๊าซ โอ โซน.....	7
2.2.2 ผลของความถี่สนามไฟฟ้าต่อแรงที่กระทำกับอิเล็กตรอนของ โมเลกุลก๊าซ.....	8
2.2.3 อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกัน.....	9
2.3 หม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน.....	12
2.4 พัลส์เคาน์ตีฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์.....	17
2.4.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับพีคบัปปลิวเอ็มฟูลบริดจ์ คอนเวอร์เตอร์.....	18
2.4.2 พัลส์เคาน์ตีฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์.....	20

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การออกแบบเครื่องผลิตก๊าซไอโซน.....	23
3.1 บทนำ.....	23
3.2 อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมฉนวน 2 ชั้น.....	23
3.3 หม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน.....	27
3.4 การออกแบบพัลส์เคาน์เตอร์.....	29
3.4.1การสร้างสัญญาณ PDM จาก TL494.....	31
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลองของเครื่องผลิตก๊าซไอโซน.....	34
4.1 บทนำ.....	34
4.2 การวัดผลการทดลองทางไฟฟ้า.....	34
4.3 การเก็บผลก๊าซไอโซนโดยการทดลองทางเคมี.....	91
บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	94
5.1 บทนำ.....	94
5.2 วิเคราะห์ผลการทดลองทางไฟฟ้า.....	94
5.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองทางเคมี.....	101
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	102
เอกสารอ้างอิง.....	104
ภาคผนวก.....	106
ภาคผนวก ก. ....	107
ภาคผนวก ข. ....	114
ประวัติผู้เขียน.....	118

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ระดับปริมาณก๊าซ โอ โชนและผลที่เกิดขึ้น (ข้อมูลจาก IOA).....	6
4.1 แสดงปริมาณการเกิด โอ โชนเทียบกับจำนวนความหนาแน่นพัลส์ที่แรงดันอินพุต 110 V.....	92
4.2 แสดงปริมาณการเกิด โอ โชนเทียบกับจำนวนความหนาแน่นพัลส์ที่แรงดันอินพุต 220 V.....	93



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของเครื่องผลิตก๊าซ โอ โซน.....	5
2.2 กระบวนการเกิดก๊าซ โอ โซน.....	7
2.3 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในช่องว่างอากาศ.....	9
2.4 รูปทรงของอิเล็กโทรดแบบ (ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (ข) สนามไฟฟ้าไม่ สม่ำเสมอเล็กน้อย (ค) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง.....	10
2.5 อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม.....	11
2.6 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุเสมือนในชุดอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม.....	12
2.7 วงจรสมมูลของหม้อแปลงความถี่สูง.....	13
2.8 แสดงตัวเก็บประจุเสมือนที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นของขดลวด.....	13
2.9 รูปความสัมพันธ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	15
2.10 โครงสร้างโดยทั่วไปของแหล่งจ่ายกำลังงานแบบสวิทช์โหมดคอนเวอร์เตอร์.....	17
2.11 วงจรพีคดับลิแวนต์ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์.....	18
2.12 แสดงสัญญาณการทำงานของฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์.....	20
2.13 รูปแบบการสวิทช์ของPDMแบบรวมกลุ่ม.....	21
2.14 รูปแบบการสวิทช์และรูปแบบการมอดูเลตของPDMแบบรวมกลุ่ม.....	22
3.1 โครงสร้างเครื่องผลิตก๊าซ โอ โซน.....	23
3.2 ลักษณะของรูปทรงของอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมจำนวน 2 ชั้น.....	24
3.3 โครงสร้างแกนเฟอร์ไรท์เบอร์ EE-80.....	28
3.4 มอสเฟตเบอร์ IRFP460 ต่อพร้อมด้วยตัวเก็บประจุค่า 4.7 nF.....	31
3.5 วงจรสร้างสัญญาณ PDM.....	32
3.6 วงจรแยกกราวด์โดยใช้ TLP250.....	33
4.1 วงจรกำลังของเครื่องกำเนิดก๊าซ โอ โซน.....	34
4.2 สัญญาณ Control ที่ความหนาแน่นพัลส์ 1 ลูกคลื่น.....	35

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 1 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V .....	35
4.4 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 1 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V.....	36
4.5 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 1 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V .....	36
4.6 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 1 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V .....	37
4.7 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 1 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V.....	37
4.8 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 1 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V.....	38
4.9 กระแสเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 1 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V.....	38
4.10 กระแสเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 1 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V.....	39
4.11 สัญญาณ Control ที่ความหนาแน่นพัลส์ 2 ลูกคลื่น.....	39
4.12 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 2 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V.....	40
4.13 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 2 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V.....	40
4.14 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 2 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V.....	41
4.15 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 2 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V.....	41
4.16 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 2 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V.....	42
4.17 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 2 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V.....	42
4.18 กระแสเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 2 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V.....	43
4.19 กระแสเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 2 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V.....	43
4.20 สัญญาณ Control ที่ความหนาแน่นพัลส์ 3 ลูกคลื่น.....	44
4.21 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 3 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V.....	44
4.22 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 3 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V.....	45
4.23 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 3 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V.....	45
4.24 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 3 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V.....	46
4.25 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 3 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V.....	46

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 3 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V.....	47
4.27 กระแสเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 3 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V.....	47
4.28 กระแสเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 3 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V.....	48
4.29 สัญญาณ Control ที่ความหนาแน่นพัลส์ 4 ลูกคลื่น.....	48
4.30 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 4 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V.....	49
4.31 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 4 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V.....	49
4.32 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 4 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V.....	50
4.33 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 4 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V.....	50
4.34 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 4 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V.....	51
4.35 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 4 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V.....	51
4.36 กระแสเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 4 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V.....	52
4.37 กระแสเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 4 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V.....	52
4.38 สัญญาณ Control ที่ความหนาแน่นพัลส์ 5 ลูกคลื่น.....	53
4.39 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 5 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V.....	53
4.40 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 5 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V.....	54
4.41 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 5 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V.....	54
4.42 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 5 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V.....	55
4.43 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 5 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V.....	55
4.44 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 5 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V.....	56
4.45 กระแสเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 5 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V.....	56
4.46 กระแสเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 5 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V.....	57
4.47 สัญญาณ Control ที่ความหนาแน่นพัลส์ 6 ลูกคลื่น.....	57
4.48 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 6 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V.....	58

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.49 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 6 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 220 V.....	58
4.50 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 6 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 110 V.....	59
4.51 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 6 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 220 V.....	59
4.52 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 6 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 110 V.....	60
4.53 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 6 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 220 V.....	60
4.54 กระแสเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 6 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 110 V.....	61
4.55 กระแสเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 6 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 220 V.....	61
4.56 สัญญาณ Control ที่ความหนาแน่นพัลส์ 7 ลูกคลื่น.....	62
4.57 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 7 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 110 V.....	62
4.58 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 7 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 220 V.....	63
4.59 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 7 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 110 V.....	63
4.60 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 7 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 220 V.....	64
4.61 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 7 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 110 V.....	64
4.62 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 7 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 220 V.....	65
4.63 กระแสเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 7 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 110 V.....	65
4.64 กระแสเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 7 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 220 V.....	66
4.65 สัญญาณ Control ที่ความหนาแน่นพัลส์ 8 ลูกคลื่น.....	66
4.66 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 8 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 110 V.....	67
4.67 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 8 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 220 V.....	67
4.68 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 8 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 110 V.....	68
4.69 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 8 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 220 V.....	68
4.70 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 8 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 110 V.....	69
4.71 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 8 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 220 V.....	69

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.72 กระแสเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 8 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 110 V.....	70
4.73 กระแสเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 8 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 220 V.....	70
4.74 สัญญาณ Control ที่ความหนาแน่นพัลส์ 9 ลูกคลื่น.....	71
4.75 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 9 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 110 V.....	71
4.76 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 9 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 220 V.....	72
4.77 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 9 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 110 V.....	72
4.78 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 9 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 220 V.....	73
4.79 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 9 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 110 V.....	73
4.80 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 9 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 220 V.....	74
4.81 กระแสเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 9 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 110 V.....	74
4.82 กระแสเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 9 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 220 V.....	75
4.83 สัญญาณ Control ที่ความหนาแน่นพัลส์ 10 ลูกคลื่น.....	75
4.84 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 10 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 110 V.....	76
4.85 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 10 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 220 V.....	76
4.86 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 10 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 110 V.....	77
4.87 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 10 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 220 V.....	77
4.88 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 10 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 110 V.....	78
4.89 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 10 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 220 V.....	78
4.90 กระแสเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 10 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 110 V.....	79
4.91 กระแสเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 10 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 220 V.....	79
4.92 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 1 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 110 V ขณะไม่มีโหลด.....	80
4.92 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 1 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 220 V ขณะไม่มีโหลด.....	80

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.93 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 2 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V ขณะไม่มีโหลด.....	81
4.94 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 2 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V ขณะไม่มีโหลด.....	81
4.95 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 3 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V ขณะไม่มีโหลด.....	82
4.96 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 3 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V ขณะไม่มีโหลด.....	82
4.97 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 4 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V ขณะไม่มีโหลด.....	83
4.98 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 4 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V ขณะไม่มีโหลด.....	83
4.99 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 5 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V ขณะไม่มีโหลด.....	84
4.100 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 5 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V ขณะไม่มีโหลด.....	84
4.101 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 6 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V ขณะไม่มีโหลด.....	85
4.102 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 6 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V ขณะไม่มีโหลด.....	85
4.103 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 7 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V ขณะไม่มีโหลด.....	86
4.104 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 7 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V ขณะไม่มีโหลด.....	86

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.105 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 8 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V ขณะไม่มีโหลด.....	87
4.106 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 8 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V ขณะไม่มีโหลด.....	87
4.107 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 9 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V ขณะไม่มีโหลด.....	88
4.108 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 9 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V ขณะไม่มีโหลด.....	88
4.109 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 10 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V ขณะไม่มีโหลด.....	89
4.110 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 10 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V ขณะไม่มีโหลด.....	89
4.111 วงจรจำลองการทำงานของคอนเวอร์เตอร์แบบควบคุมความหนาแน่นพัลส์โดยใช้โปรแกรม MatLAB Simulink.....	90
4.112 แรงดันและกระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 5 ลูกคลื่นจากการจำลอง.....	90
4.113 แรงดันและกระแสเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 5 ลูกคลื่นจากการจำลอง.....	91
4.114 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซไอโซนกับความหนาแน่นพัลส์.....	91
5.1 แสดงการวัดกำลัง ไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์โดยใช้เครื่องวัด YOKOGAWA รุ่น WT200.....	94
5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงกับความหนาแน่นพัลส์.....	95
5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าอินพุตคอนเวอร์เตอร์กับความหนาแน่นพัลส์.....	95
5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์กับความหนาแน่นพัลส์.....	96
5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตหม้อแปลงกับความหนาแน่นพัลส์.....	96
5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพคอนเวอร์เตอร์กับความหนาแน่นพัลส์.....	97

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพมือแปลงกับความหนาแน่นพัลส์.....	97
5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพรวมของระบบกับความหนาแน่นพัลส์.....	98
5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพรวมของระบบประสิทธิภาพคอนเวอร์เตอร์ ประสิทธิภาพมือแปลงกับความหนาแน่นพัลส์ที่ แรงดันอินพุต110 V.....	98
5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพรวมของระบบประสิทธิภาพคอนเวอร์เตอร์ ประสิทธิภาพมือแปลงกับความหนาแน่นพัลส์ที่ แรงดันอินพุต220 V.....	99



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน ได้มีการนำก๊าซโอโซน (Ozone Gas) มาใช้ประโยชน์เพื่อฆ่าเชื้อโรค และลดปริมาณการใช้คลอรีน (Chlorine) ในน้ำอย่างแพร่หลายเช่น ในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีการบำบัดน้ำเสีย โรงงานผลิตน้ำแข็ง ฆ่าเชื้อโรคเครื่องมือแพทย์ การฟอกอากาศให้บริสุทธิ์ในอาคารธุรกิจระหว่างน้ำและสปาร์ แต่ใจขณะเดียวกันก๊าซโอโซนมีข้อเสียด้านการใช้ในปริมาณที่เข้มข้นมากเกินไปจะทำให้เกิดการระคายเคืองกับเยื่อเมือก การนำก๊าซโอโซนจะอาศัยพลังงานจากสนามไฟฟ้า (Electric Field) กระทำต่อก๊าซออกซิเจนเพื่อให้ก๊าซโอโซนเกิดขึ้น งานวิจัยทางด้านไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซโอโซนจะใช้หลักการสร้างสนามไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้อิเล็กโทรดมาผลิตก๊าซ โดยความแตกต่างจะขึ้นอยู่กับลักษณะของชุดอิเล็กโทรดหรือชนิดของแหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้า

การประยุกต์ใช้แหล่งพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ฟลายแบคคัลคอนเวอร์เตอร์แปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่และแรงดันสูงป้อนให้อิเล็กโทรดเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าผลิตก๊าซโอโซนเป็นการนำพลังงานจากธรรมชาติมาใช้ให้เกิดประโยชน์และเป็น การลดต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้าได้ [1] ลักษณะการนำเครื่องผลิตก๊าซไปใช้งานในที่ที่มีสิ่งมีชีวิตอาศัยอยู่จำเป็นต้องผลิตก๊าซไม่มากเกินไปจนเป็นอันตรายได้ ดังนั้นเครื่องผลิตก๊าซโอโซนที่ผลิตได้ ปริมาณน้อยจึงต้องให้พลังงานต่ำและมีราคาไม่แพงเช่นกัน [2] โดยส่วนใหญ่แหล่งจ่ายกำลังงาน ไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตก๊าซโอโซนเป็นแหล่งจ่ายที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าสูงและมีความถี่สูง การวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นโหลดทางไฟฟ้าของอิเล็กโทรดทำได้ยากด้วยรูปแบบเป็นวงจรแบบไม่ เป็นเชิงเส้น ดังนั้นการแปลงวงจรไฟฟ้าให้กลายเป็นแบบเชิงเส้นจึงทำให้สามารถเข้าใจคุณสมบัติ ทางไฟฟ้าของอิเล็กโทรดได้ดียิ่งขึ้น [3] ในการวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นโหลดทางไฟฟ้า สามารถใช้สมการทางคณิตศาสตร์มาคำนวณได้ วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขช่วยลดเวลาในการจำลอง การทำงานลงได้ [4] เครื่องผลิตก๊าซโอโซนที่มีการใช้งานในลักษณะต่าง ๆ ที่หลากหลาย ต้อง สามารถที่จะปรับเปลี่ยนปริมาณก๊าซได้เพื่อให้เหมาะสมกับงาน การนำวิธีการสร้างแรงดันไฟฟ้า แบบกำหนดจำนวนลูกคลื่นที่ป้อนให้อิเล็กโทรดเพื่อปรับเปลี่ยนพลังงานที่ใช้ผลิตก๊าซถูก นำมาใช้และมีการควบคุมปริมาณก๊าซได้ [5] การใช้วิธีการจับสัญญาณแบบเลื่อนเฟส (Phase Shift PWM Control Technique) ของคู่อุปกรณ์สวิตช์สามารถแก้ปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นได้เนื่องจาก แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบพีคดับลิวิตีเอ็มพลูตบริดจ์คอนเวอร์เตอร์นั้น ไม่มีวงจรการคืนพลังงานที่สะสม อยู่ในโหลด แรงจากการผลัดกันประจุไฟฟ้าจะบังคับให้อิเล็กตรอนยังคงไหลต่อเนื่องผ่านรอยต่อ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ การค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Junction) ของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำอุปกรณ์สวิตช์เป็นผลให้อุปกรณ์สวิตช์ไม่สามารถหยุดนำกระแสจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแทนในขณะที่วิธีการขับสัญญาณแบบเลื่อนเฟสมีวงรอบการคืนพลังงานแต่ละครั้งคาบเวลาอยู่จึงสามารถตัดการส่งผ่านพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงได้ในขณะเดียวกันสามารถที่จะนำข้อดีของวิธีการควบคุมสัญญาณของรีโซแนนท์คอนเวอร์เตอร์มาประยุกต์ใช้ควบคู่กับคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอเพราะสามารถลดกำลังสูญเสียขณะเกิดการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์ได้โดยการกำหนดความถี่สวิตช์ซึ่งให้อุปกรณ์สวิตช์ทำงานที่แรงดันและกระแสเป็นศูนย์ ผลคูณของกำลังงานสูญเสียจึงเท่ากับศูนย์ [13]

เครื่องผลิตก๊าซโอโซน (Ozone Generator) ขนาดใหญ่ส่วนมากใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบพีดับบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (PWM Full Bridge Converter) สร้างสนามไฟฟ้าเอซี ป้อนให้กับขั้วอิเล็กโทรด (Electrode) ที่มีตัวนำ 2 ตัว โดยมีช่องว่างอากาศคั่นอยู่ระหว่างกลางซึ่งสามารถมองเป็นโหลดตัวเก็บประจุทางไฟฟ้าได้ คอนเวอร์เตอร์แบบนี้มีข้อดีคือ สามารถจ่ายกำลังงานได้สูงสามารถควบคุมความถี่ทางด้านเอาต์พุตได้ ดังนั้นจึงสามารถควบคุมระดับปริมาณการเกิดก๊าซโอโซนได้เช่นกัน แต่ในกรณีที่โหลดเป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานการควบคุมแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ทำได้ยากและมีกำลังสูญเสียที่อุปกรณ์สวิตช์เพิ่มขึ้น

ดังนั้นจึงนำเทคนิคการควบคุมลูกคลื่นที่ป้อนให้กับขั้วอิเล็กโทรดเพื่อปรับเปลี่ยนพลังงานที่ผลิตก๊าซโอโซน โดยการปรับเพิ่มลดจำนวนความหนาแน่นของรูปคลื่นที่วางจอร์ในส่วนของการควบคุม (Pulse Density Modulation) จะทำให้แรงดันเอาต์พุตของหม้อแปลงสามารถควบคุมให้อยู่ในพิสัยได้

## 1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อศึกษาหลักการทํางานวิเคราะห์และออกแบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า แบบควบคุมความหนาแน่นพัลส์ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ซึ่งนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายกำลังงานให้กับเครื่องผลิตก๊าซโอโซน โดยสามารถใช้กับฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ที่มีอยู่แล้วได้เพียงปรับเปลี่ยนรูปแบบวิธีการควบคุมการขับสัญญาณเกิดของอุปกรณ์สวิตช์เพื่อแก้ไขปัญหาการควบคุมขนาดแรงดันทางด้านเอาต์พุตและมีกำลังสูญเสียในอุปกรณ์สวิตช์ต่ำ เนื่องจากมอสเฟตทำการสวิตช์ที่แรงดันเป็นศูนย์เกิดสถานะชอฟท์สวิตช์ขณะ turn on และ turn off โดยคอนเวอร์เตอร์แบบนี้ที่นำเสนอนี้มีการทํางานที่คล้ายฮาล์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ คือ ที่แรงดันกระแสตรงอินพุตเท่ากันจะให้กำลังได้สูงกว่าและในการออกแบบอัตราส่วนจำนวนรอบขดลวดของหม้อแปลงความถี่สูงสามารถออกแบบได้ที่อัตราส่วนไม่สูงมากจนทำให้โวลเทจเรีกูลเลชันมีค่าต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์แล้วข้อที่ติกว่าก็คือ สามารถปรับความหนาแน่นของพัลส์ของแรงดันที่ป้อนให้ขดลวดปฐมภูมิได้โดยสามารถรักษาระดับแรงดันทางด้านทุติยภูมิให้คงที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 การดำเนินงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาข้อมูลจากตำรา บทความและวารสารที่สามารถค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับวิธีการสร้าง ก๊าซโอโซนและวิธีการควบคุมความหนาแน่นพัลส์(พัลส์เคาน์ตีฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์)

1.3.2 ออกแบบและสร้างวงจรในแต่ละส่วน

1.3.3 ทดสอบวงจรในส่วนต่างและนำมาทดลองเพื่อให้ได้ผลเป็นไปตามเป้าหมาย

1.3.4 เก็บผลการทดลองรูปสัญญาณทางไฟฟ้า

1.3.5 เก็บผลการทดลองทางเคมีที่สอดคล้องกับการเก็บผลทางไฟฟ้า

1.3.6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

1.3.7 เขียนวิทยานิพนธ์

### 1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.4.1 สร้างวงจรกำลังของพัลส์เคาน์ตีฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์เป็นแหล่งจ่ายให้กับเครื่องผลิตก๊าซโอโซน

1.4.2 ออกแบบสร้างชุดสัญญาณควบคุมความหนาแน่นพัลส์

1.4.3 สามารถปรับเปลี่ยนความหนาแน่นพัลส์ได้ตั้งแต่ 1 ถึง 10 ลูกคลื่น โดยสามารถรักษา ระดับแรงดันเอาต์พุตให้อยู่ในพิสัยได้

1.4.4 สามารถปรับปริมาณ โอโซน ได้โดยการปรับความหนาแน่นของพัลส์ได้

### 1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบ เพื่อสร้างวงจรพัลส์เคาน์ตีฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับเครื่องผลิตก๊าซโอโซนรายละเอียดที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์แบ่งเป็น 5 ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษางานวิจัย วิธีการวิจัย ขอบเขตวิทยานิพนธ์ ตลอดจนประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องผลิตก๊าซโอโซนคุณสมบัติและการเกิดก๊าซ กระบวนการที่จะใช้พลังงานจากแหล่งจ่ายมาผลิตและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการสร้างก๊าซการใช้หม้อแปลงความถี่สูงเพิ่มแรงดันเพื่อป้อนให้อิเล็กทรอนิกส์สร้างสนามไฟฟ้า โครงสร้างของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า รวมพารามิเตอร์แบบพัลส์เคาน์ตีฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

บทที่ 3 การออกแบบเครื่องผลิตก๊าซโอโซนเลือกและคำนวณขนาดของอิเล็กทรอนิกส์ ออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดันสร้างวงจรพัลส์เคาน์ตีฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

บทที่ 4 การทดสอบการทำงานของระบบและผลการทดลอง เก็บผลทางไฟฟ้าและทางเคมี ควบคู่กัน โดยการปรับความหนาแน่นพัลส์ เพิ่มขึ้นจาก 1 ถึง 10 ลูกคลื่น

บทที่5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

บทที่6 บทสรุปและข้อเสนอแนะต่างๆ

## 1.6 ประโยชน์ที่ได้จากวิทยานิพนธ์

1.6.1 สามารถนำวงจรพัลส์เดนซิตีฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์มาใช้แทนวงจรพีคบัลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์เพื่อเป็นแหล่งจ่ายให้กับเครื่องผลิตก๊าซโอโซน

1.6.2 สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุทไม่ให้เกิดพิคค์ได้

1.6.3 ลดกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์สวิตซ์ได้

1.6.4 สามารถปรับปริมาณก๊าซโอโซนได้

1.6.5 ไม่จำเป็นต้องเพิ่มอุปกรณ์ภายนอกเข้าไปในวงจรจึงไม่เป็นการเพิ่มต้นทุน



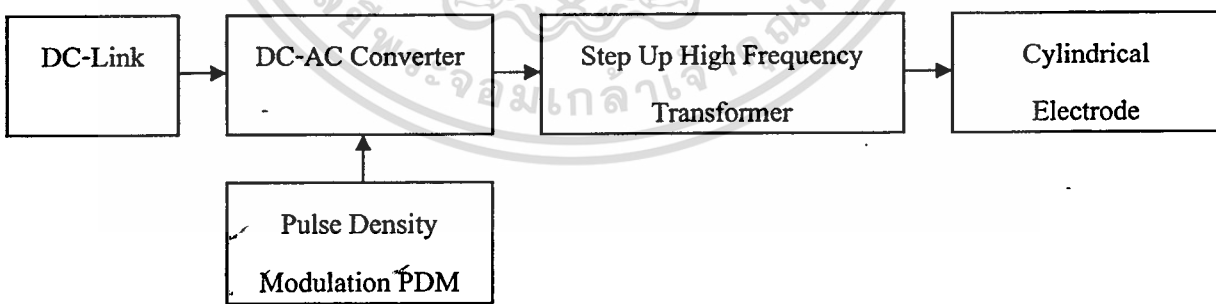
## บทที่ 2

# ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องผลิตก๊าซโอโซน

### 2.1 บทนำ

โดยทั่วไปเครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบ่งการใช้งานออกเป็น 2 แบบ คือ การใช้งานในบริเวณที่มีผู้คนอาศัยอยู่ การใช้งานแบบนี้จำเป็นต้องควบคุมปริมาณการเกิดก๊าซไม่ให้มากเกินไปจนเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต และแบบที่สองคือการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดสิ่งแวดล้อมหรืองานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ลักษณะงานแบบนี้ต้องการปริมาณก๊าซโอโซนเป็นจำนวนมาก ดังนั้นในบริเวณพื้นที่ทำงานต้องไม่มีสิ่งมีชีวิตอยู่หรือสร้างให้เป็นพื้นที่ปิดล้อม

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการผลิตก๊าซโอโซนในปริมาณที่มากเพื่อสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย ซึ่งเครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบบนี้มีขนาดใหญ่และใช้กำลังไฟฟ้าสูง โดยโครงสร้างประกอบด้วยชุดอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกัน (Cylindrical Electrode) หม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน (Step Up High Frequency Transformer) และเครื่องแปรผันกำลังไฟฟ้าดีซี-เอซี (DC-AC Converter) แบบพีดีเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์โดยใช้วิธีการควบคุมสัญญาณแบบความหนาแน่นพัลส์ (Pulse Density Modulation Full Bridge Converter) แสดงในรูปที่ 2.1 เพื่อให้เข้าใจกระบวนการเกิดก๊าซโอโซนมีที่มาเช่นไรและชุดอิเล็กโทรดสร้างก๊าซได้อย่างไร จะขอกล่าวถึงกระบวนการสร้างก๊าซโดยใช้อิเล็กโทรดเป็นอันดับแรก ต่อมาจะอธิบายถึงหม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดันและสุดท้ายคือเครื่องแปรผันกำลังไฟฟ้าดีซี-เอซี



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเครื่องผลิตก๊าซโอโซน

## 2.2 กระบวนการสร้างก๊าซโอโซนโดยใช้โอเลกโตรดทรงกระบอกซ้อนกัน

ก๊าซโอโซนคืออะตอมของออกซิเจน 3 อะตอมรวมกันเป็น 1 โมเลกุลของโอโซน ( $O_3$ ) ตามปกติออกซิเจนจะประกอบกันในลักษณะ 2 อะตอม เป็น 1 โมเลกุลออกซิเจน ( $O_2$ ) ซึ่งมีคุณสมบัติต่างกันมากคือ  $O_2$  จะสามารถคงสภาพอยู่ได้หลายสภาวะหรือ กล่าวได้ว่ามีเสถียรนั่นเอง แต่ก๊าซโอโซนจะไม่คงตัวหรือไม่เสถียร เนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ ความร้อน ความดันและการสัมผัสกับสารที่มีพลังงานต่ำกว่าจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) อย่างรวดเร็ว ซึ่ง  $O_3$  มีปฏิกิริยาสูงถึง 2.07 V (Oxidation Potential) ถ้าปราศจากความรู้ความเข้าใจ 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 ค่านี้แปรผันตามตำแหน่งและสภาพบรรยากาศแวดล้อม
0.05	ระดับสูงสุดที่ผลิตจาก Electronic air cleaner และอุปกรณ์ในบ้าน
0.1	ระดับสูงสุดที่ยอมให้มีในบรรยากาศ บริเวณอุตสาหกรรมและที่สาธารณะ
0.25	เริ่มปรากฏต่อสิ่งมีชีวิตที่สัมผัสโดยตรง ในพืชเกิดจุดดำ สีซีด มีใบตายในสัตว์เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินหายใจ
0.5	เริ่มมีอาการปวดศีรษะ ปวดถูกทำลาย ติดเชื้อทางเดินหายใจ
1.00 – 2.00	ในการทดสอบ การสูดดมเป็นเวลา 2 ชั่วโมงเกิดอาการป่วยคือ ปวดศีรษะ ปวดหน้าอกรุนแรงและทางเดินหายใจแห้งผาก
1.4 – 5.6	การทดสอบกับต้นถั่วพบว่าใน 70 วินาที ใบถั่วเกิดอาการป่วยรุนแรง
25 up	เป็นอันตรายเฉียบพลันต่อสิ่งมีชีวิต ในการทดสอบกับสัตว์พบอาการป่วยซึ่งน่าจะเป็นขั้นสุดท้าย

โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียรที่อุณหภูมิห้องและความดันในชั้นบรรยากาศ มีกลิ่นฉุนเฉพาะตัว มีสีฟ้า มวลโมเลกุลเท่ากับ 47.998 g/mol จุดหลอมเหลวที่ -192.5 องศาเซลเซียส จุดเดือดที่ 111.9 องศาเซลเซียส โดยอยู่ในรูปของของเหลวสีน้ำเงินเข้ม มีความไวในการทำปฏิกิริยาเคมีทั้ง

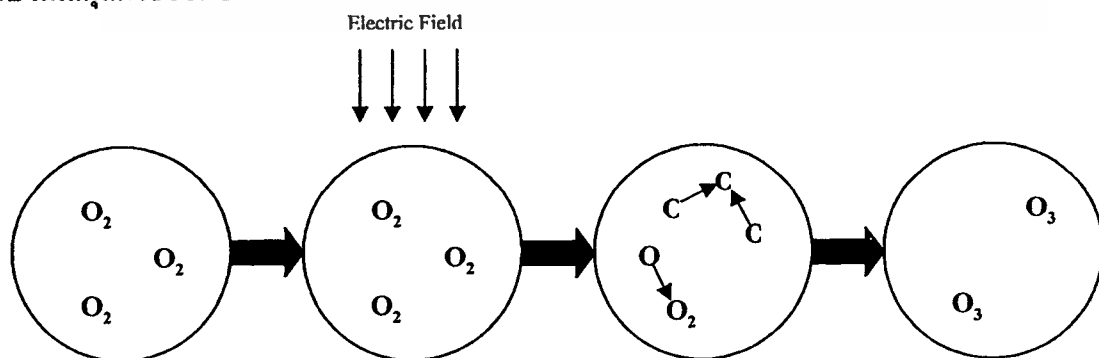
ในน้ำสารละลาย และอากาศ แต่ก๊าซโอโซนจะสลายตัวได้อย่างรวดเร็ว โดยเปลี่ยนเป็นก๊าซออกซิเจนเมื่อสัมผัสกับตัวรีดิวซ์ (Reduce) หรือได้รับความร้อน

ลักษณะการเกิดก๊าซโอโซนแบ่งได้ 2 แบบ คือ เกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติทั้งจากการรับพลังงานของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) ที่ความยาวคลื่นประมาณ 200 นาโนเมตร หรือพลังงานจากฟ้าผ่าและมนุษย์สร้างขึ้นโดยอาศัยพลังงานซึ่งเลียนแบบธรรมชาติ ส่วนใหญ่จะใช้พลังงานจากสนามไฟฟ้ามากระทำต่อก๊าซออกซิเจนเพราะในปัจจุบันสามารถจัดหาและสร้างแหล่งจ่ายได้ง่าย โดยใช้อิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวกำหนดทิศทางสนามไฟฟ้าจากนั้นจึงปล่อยให้อากาศไหลผ่านอิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้โมเลกุลของก๊าซได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า

### 2.2.1 วิธีการสร้างก๊าซโอโซน

ก๊าซโอโซนคือก๊าซที่เกิดจากการจับตัวกันของออกซิเจน 3 อะตอม การที่จะทำให้ออกซิเจนแตกพันธะได้นั้น จะต้องป้อนพลังงานจากภายนอกเข้าไปกระตุ้นให้ก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) แตกพันธะออกเป็นอะตอมอิสระของออกซิเจน (O) แล้วจึงรวมตัวกับ  $O_2$  และ  $O_3$  ดังรูปที่ 2.2 โดยอาศัยพลังงานจากสนามไฟฟ้าเพื่อให้เกิดกระบวนการ ไอออไนเซชัน (Ionization) หรือกระบวนการที่โมเลกุลของก๊าซได้รับพลังงานเพียงพอ จะทำอิเล็กตรอนหลุดออกไป 1 อิเล็กตรอน โมเลกุลของก๊าซนั้นมีความประจุเป็นบวกและอิเล็กตรอนวิ่งชน โมเลกุลของก๊าซ โดยได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าในขณะที่วิ่งเข้าหาศักย์ไฟฟ้าด้านบวก พลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับเป็นพลังงานจลน์ และต้องมีค่ามากกว่าพลังงาน ไอออไนเซชัน

ในก๊าซประกอบด้วยอนุภาคต่าง ๆ หลายชนิดทั้งที่มีประจุ (+,-) และอนุภาคที่เป็นกลาง การเคลื่อนที่ของอนุภาคเหล่านี้เป็นแบบสุ่ม สนามไฟฟ้าจากภายนอกทำให้อนุภาคประจุลบที่มีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับประจุบวกทั่ว ๆ ไปเคลื่อนที่อย่างมีทิศทาง จึงทำให้ตัวมันมีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่เกิดขึ้นในการแตกตัวของก๊าซ เช่นเดียวกันในการผลิต โอโซน พลังงานหลักที่ทำให้ ออกซิเจนเกิดการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างขึ้นส่งถ่ายมาจากการชนอิเล็กตรอนกับโมเลกุลก๊าซออกซิเจน



รูปที่ 2.2 กระบวนการเกิดก๊าซโอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการไอออไนเซชันโดยการชน (Collision Ionization) คือกระบวนการชนถ่ายทอดพลังงานจลน์ ของอนุภาคที่มีมวลซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วค่า ๆ หนึ่ง ไปชนกับอนุภาคที่มีมวลอีกตัวหนึ่ง ถ้าพลังงานที่ถ่ายทอดไม่มากพอถึงพลังงานให้เกิดการตื่นกระตุ้น (Excitation) หรือไอออไนเซชัน เรียกว่า การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision) แต่การชนของอนุภาคถ้าทำให้โมเลกุลของก๊าซที่ถูกชนได้รับพลังงานจากอนุภาคที่มาชนมากพอถึงพลังงานที่ทำให้เกิดการกระตุ้น เรียกว่า การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic collision) แสดงว่า พลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีมวลได้ถูกเปลี่ยนให้เป็นพลังงานศักย์สู่มอเลกุลของก๊าซที่อุณหภูมิต่ำนั่นเอง กระบวนการเริ่มขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนซึ่งได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าวิ่งชน โมเลกุลของก๊าซในระหว่างที่ถูกเร่งให้วิ่งเข้าหาอาโนด อิเล็กตรอนที่วิ่งนี้ได้รับพลังงานจลน์จากสนามไฟฟ้า ถ้าพลังงานนี้มากกว่าพลังงานไอออไนเซชันของก๊าซ ก็จะเกิดกระบวนการไอออไนเซชันขึ้น

ขั้นตอนการสร้าง โอโซนประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

1. การแตกตัวโครงสร้าง โมเลกุลก๊าซออกซิเจนเป็นอะตอมอิสระ (Dissociation Reaction) ขั้นตอนนี้คือปฏิกิริยาดูดพลังงาน แหล่งพลังงานที่พิจารณาคือการชนถ่ายทอดพลังงานของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้า

2. การจับตัวของอะตอมอิสระในข้อ 1 กับโมเลกุลก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) เป็น โอโซน (Ozone Generation)

ในการผลิตโอโซนนั้นย่านพลังงานที่ต้องใช้คือ  $5.58 \text{ kW.h/m}^3 - 7.073 \text{ kW.h/m}^3$  [6] แต่เนื่องจากในอากาศมีออกซิเจนอยู่โดยประมาณ 21 % ดังนั้นคิดเทียบแล้วพลังงานที่จำเป็นต้องใช้คือ  $1.172 \text{ kW.h/m}^3 - 7.073 \text{ kW.h/m}^3$  จึงเพียงพอต่อการเกิดก๊าซโอโซน

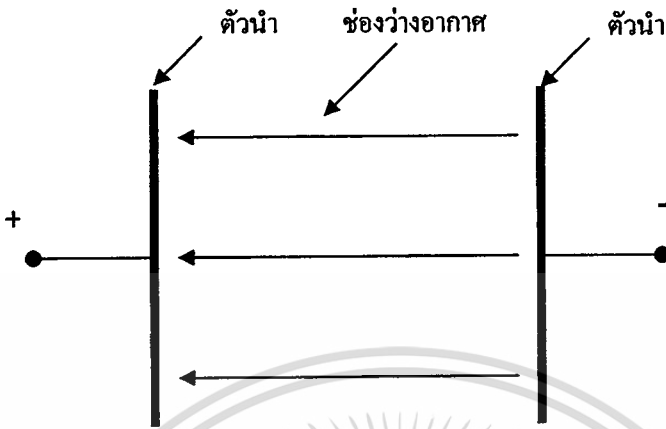
### 2.2.2 ผลของความถี่สนามไฟฟ้าต่อแรงที่กระทำกับอิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซ

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกให้กับช่องว่างที่มีโมเลกุลของก๊าซบรรจุอยู่ เกิดสนามไฟฟ้าภายในช่องว่าง อิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้ามากเพียงพอที่จะหลุดออกมาจากโมเลกุลก๊าซและเคลื่อนที่เข้าหาศักย์ไฟฟ้าขั้วบวกของสนามไฟฟ้าเป็นระยะทางระหว่างอิเล็กตรอนกับขั้วบวกของช่องว่างอากาศด้วยความเร็วค่า ๆ หนึ่ง ระหว่างทางที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปนั้นอาจเกิดการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับ โมเลกุลก๊าซอื่นได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ถ้าระยะ ทางนั้นมีความยาวมากขึ้น โดยที่อิเล็กตรอนยังมีพลังงานในการชนมากพอให้กับอิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซที่ถูกชนหลุดออกมานั้นจึงหมายความว่า แรงภายนอกที่กระทำต่ออิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อทำการกลับขั้วศักย์สนามไฟฟ้าอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวกเดิมก่อนหน้าจะถูกวางตัวใหม่ในทิศทางตรงข้าม และเคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวกใหม่ ณ อีกด้านหนึ่ง เมื่อเพิ่มความเร็วในการกลับขั้วในช่วงเวลาหนึ่งจึงเสมือนเป็นการเพิ่มระยะทางที่อิเล็กตรอนต้องเคลื่อน ที่ออกไป โดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นก็จะ ได้แรงภายนอกที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระทำต่ออิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังนั้นการเพิ่มความถี่จึงเป็นการเพิ่มแรงดันภายนอกที่มากระทำ



รูปที่ 2.3 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในช่องว่างอากาศ

### 2.2.3 อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันร่วม

ในกระบวนการสร้างก๊าซไอโซน สิ่งที่สำคัญที่สุดคือ พลังงานที่กระทำต่อ โมเลกุลของก๊าซออกซิเจน เพื่อให้เสถียรภาพในการจับตัวกันระหว่าง โมเลกุลลดลง พลังงานจากสนามไฟฟ้าเป็นตัวแปรสำคัญในการส่งผ่านพลังงานจากภายนอกสู่โมเลกุลของก๊าซ วิธีที่จะทำให้โมเลกุลไม่เสถียรจำเป็นต้องใช้กระบวนการแยกอิเล็กตรอนของก๊าซออกมา ขั้นตอนดังกล่าวอาศัยขูดอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันร่วม เป็นตัวสร้างสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงและสามารถที่จะให้อากาศไหลผ่านอิเล็กโทรดได้อย่างเหมาะสม

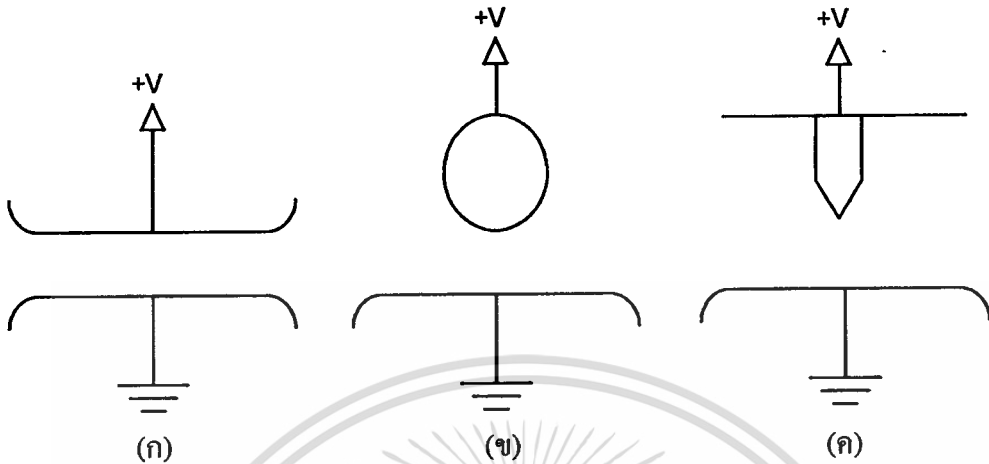
#### 1. สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง

สนามไฟฟ้านั้นแบ่งได้ 3 แบบคือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยและไม่สม่ำเสมอสูงดังรูปที่ 2.4 ในที่นี้จะกล่าวถึง สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงเพียงอย่างเดียว เพราะการนำมาใช้งานมีประโยชน์อย่างมากและถูกใช้ในงานวิจัยนี้เช่นกัน

สนามไฟฟ้าแบบนี้ค่าความเครียดแต่ละจุดจะไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับตำแหน่งและรูปทรงเรขาคณิต ของตัวนำไฟฟ้า โดยทั่วไปตัวนำไฟฟ้าที่แบ่งปลายแหลมจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงที่สุด ดังรูปที่ 2.4 (ค) กรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงก่อนเกิดการเบรกควานจะมีกระแสไหลผ่านช่องว่างอากาศเรียกว่า กระแสโคโรนา (Corona Current) ที่บริเวณผิวปลายแหลมของตัวนำจะมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่สุด แต่จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อวัดที่ระยะห่างออกมา ดังนั้นจึงยังไม่เกิดการเบรกควานขึ้นถึงแม้ว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าวิกฤตก็ตาม ในขณะเดียวกันจะเกิดการคายประจุที่ไม่สมบูรณ์ขึ้นในช่องว่างอากาศ เรียกว่า การคายประจุบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(partial Discharge) การคืบซาร์จนี้จะไม่เกิดขึ้นตลอดทั้งแนวของสนามไฟฟ้าและอาจเกิดขึ้นเป็นช่วงหรือต่อเนื่อง ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดกระแสไหลได้



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

## 2. อิเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนกันรวมจำนวน 2 ชั้น

รูปทรงของอิเล็กโตรดจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนกันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เท่ากัน โดยนำทรงกระบอกจำนวนที่มีขนาดเล็กกว่าซ้อนเข้าไปข้างใน โดยใช้แกนกลางร่วมกันดังรูปที่ 2.5 สนามฟ้าของอิเล็กโตรดชนิดนี้อยู่ในแนวรัศมีของพื้นผิวทรงกระบอก ดังนั้นจึงมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันตลอดทั้งพื้นผิว ในกรณีที่นำวัสดุฉนวนต่างชนิดและค่าเปอร์มิตติวิตี ( $\epsilon$ ) ไม่เท่ากันซ้อนกัน จึงกลายเป็นการนำสารไดอิเล็กตริก 2 ชนิดวางเรียงกันในสนามไฟฟ้า ดังนั้นเสมือนมีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกันอยู่คือ  $C_1$  และ  $C_2$  โดยแสดงในรูปที่ 2.6 สามารถหาได้จากสมการ (2.1) และ (2.2) [7]

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon_1\epsilon_0 x l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.1)$$

$$C_2 = \frac{2\pi\epsilon_2\epsilon_0 x l}{\ln \frac{r_3}{r_2}} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $C_1$  = ค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนชั้นที่ 1 หน่วยเป็น (F)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$C_2$  = ค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนชั้นที่ 2 หน่วยเป็น (F)

$\epsilon_{r1}$  = ค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนชั้นที่ 1 หน่วยเป็น (F/m)

$\epsilon_{r2}$  = ค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนชั้นที่ 2 หน่วยเป็น (F/m)

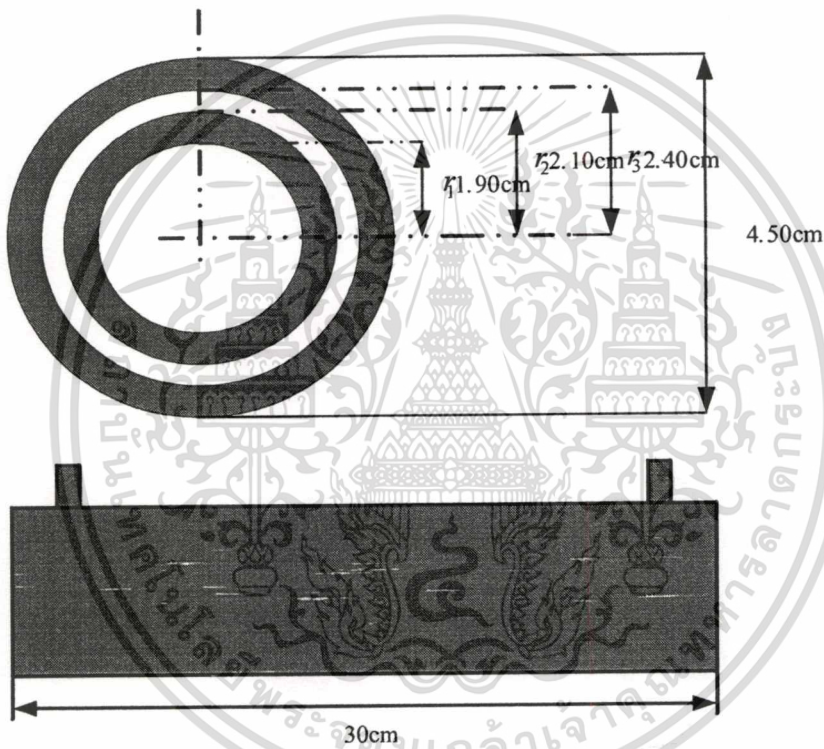
$\epsilon_0$  = ค่าเปอร์มิตติวิตีของฟรีสเปซ

$l_f$  = ความยาวของชุดอิเล็กโทรดหน่วยเป็น (m)

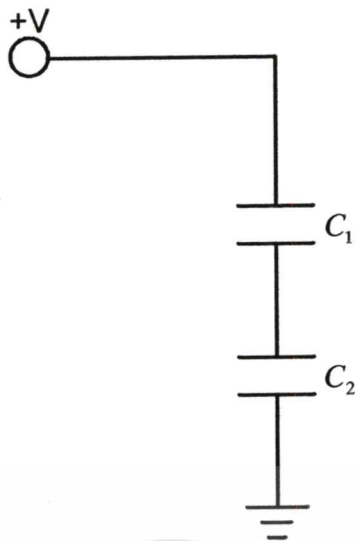
$r_1$  = รัศมีด้านในของฉนวนชั้น 1 หน่วยเป็น (m)

$r_2$  = รัศมีด้านนอกของฉนวนชั้นที่ 1 หน่วยเป็น (m)

$r_3$  = รัศมีด้านนอกของฉนวนชั้นที่ 2 หน่วยเป็น (m)



รูปที่ 2.5 อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกัน



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุเสมือนในชุดอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์แบบบ็อกซ์อินเทเกรต

ความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดใด ๆ ในฉนวนแต่ละชั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.3) [8]

$$E_x = \frac{\epsilon_1 \times \epsilon_2 \times V}{\epsilon_x \times r_x \times \left( \epsilon_1 \times \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \times \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (2.3)$$

เมื่อ

$E_x$  = ความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดใด ๆ (kV/cm)

$V$  = แรงดันภายนอกที่ป้อนให้ชุดอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ (kV)

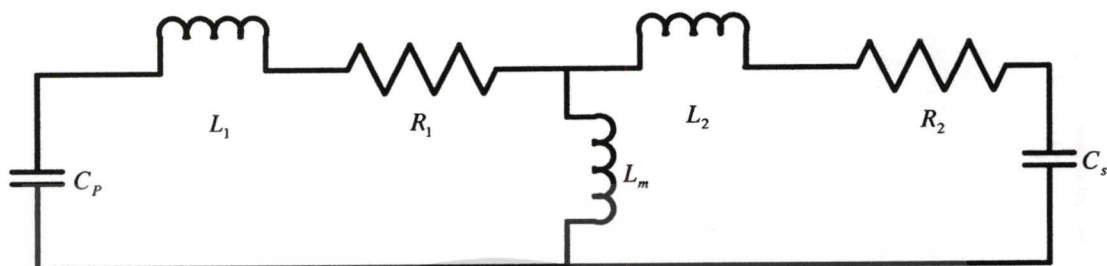
$r_x$  = รัศมีที่จุดใด ๆ (cm)

$\epsilon_x$  = ค่าเปอร์มิตติวิตีที่ฉนวนชั้นใด ๆ (F/m)

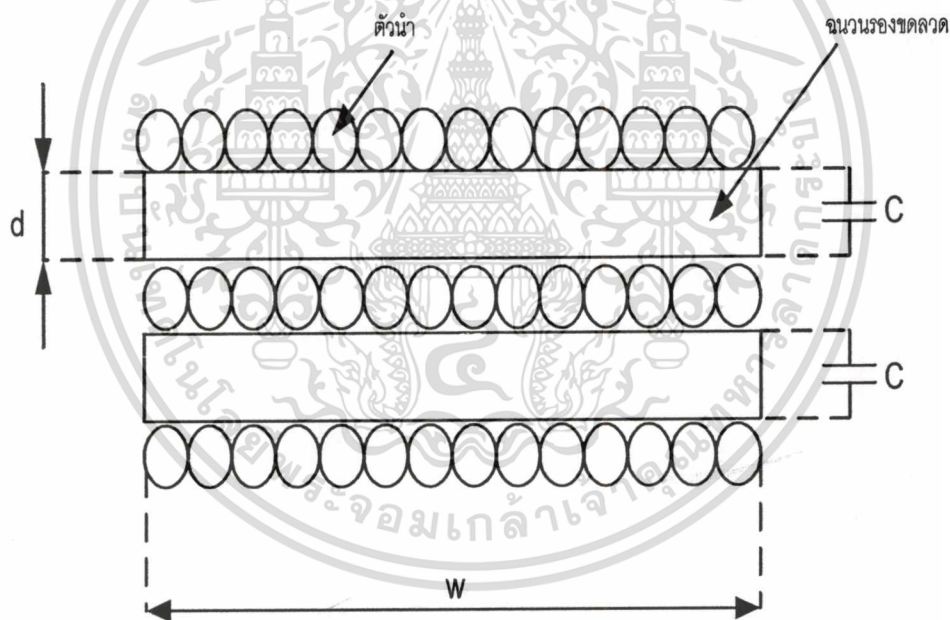
### 2.3 หม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน

การส่งผ่านกำลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปสู่อิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าอาศัยหม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน จากข้อ 2.2 แรงดันเอาต์พุตที่ป้อนให้กับอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์มีขนาดสูงมาก ในขณะที่แรงดันเอาต์พุตที่ได้จากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามักมีขนาดเท่ากับ 310V และมีความถี่สวิตช์ใช้งานสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้หม้อแปลงความถี่สูงเพิ่มแรงดันขึ้นไป แกนของหม้อแปลงที่ใช้ในงานความถี่สูงโดยส่วนมากมักใช้วัสดุที่ทำจากสารจำพวกเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic Material) ซึ่งมีคุณสมบัติทางด้านค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง แต่มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กต่ำ กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy Current) น้อยมาก ดังนั้นจึงไม่เอกลักษณะนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำเป็นต้องทำเป็นแผ่นบางเรียงซ้อนกันเหมือนหม้อแปลงแกนเหล็กทั่วไป ลดความยุ่งยากในการประกอบและติดตั้ง



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลของหม้อแปลงความถี่สูง



รูปที่ 2.8 แสดงตัวเก็บประจุเสมือนที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นของขดลวด

โดยพื้นฐานของหม้อแปลงความถี่สูงจะคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไปแต่แตกต่างกันตรงวัสดุที่ใช้ทำแกนและวงจรมูลที่มีตัวเก็บประจุแฝง (Parasitic Capacitance) ปรากฏขึ้นที่ขั้วของหม้อแปลงทั้งด้านดำนปฐมภูมิและทุติยภูมิแสดงดังรูปที่ 2.7 ตัวเก็บประจุทั้งสอง ( $C_p$  และ  $C_s$ ) เกิดจากการนำวัสดุฉนวนมารองระหว่างชั้นของขดลวดเพื่อป้องกันการลัดวงจร สักย์ไฟฟ้าที่ไม่เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างชั้นทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น เมื่อนำวัสดุฉนวนมาวางกันจึงเสมือนมีตัวเก็บประจุต่อคร่อมอยู่ระหว่างชั้น แสดงในรูปที่ 2.8 ในกรณีที่จำนวนชั้นมีมากกว่า 1 ชั้น เมื่อทำการคลี่ชั้นของขดลวดออกจึงกลายเป็นการนำตัวเก็บประจุมาต่ออนุกรมกัน สมการที่ใช้คำนวณต่อความจุแฝงได้จาก (2.4)

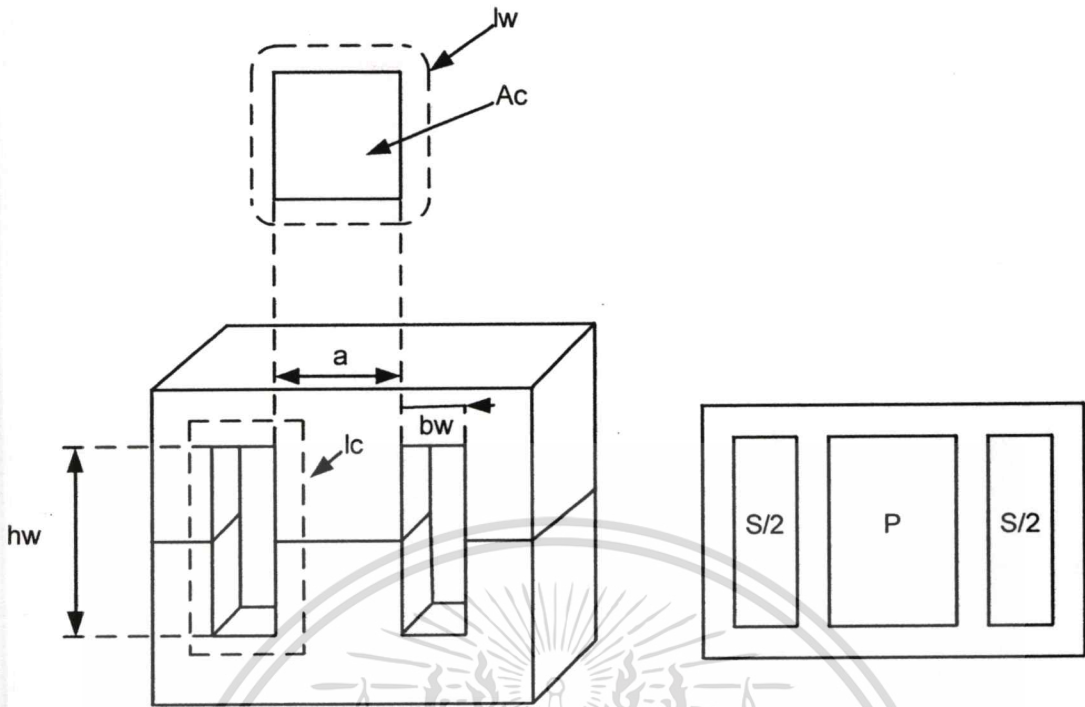
$$C = \epsilon_o \times \epsilon_r \times \frac{w}{d} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $C$  = ตัวเก็บประจุแฝงของหม้อแปลงความถี่สูง (F/m)  
 $\epsilon_o$  = ค่าเปอร์มิตติวิตี (Permittivity) ของสุญญากาศ  
 $\epsilon_r$  = ค่าเปอร์มิตติวิตีของวัสดุที่ใช้ทำฉนวน  
 $w$  = ความกว้างของชั้นขดลวด (m)  
 $d$  = ความหนาของวัสดุฉนวน (m)

แกนเฟอร์ไรท์ (Ferrite Core) นั้นมีค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กได้ต่ำ ดังนั้นจึงเกิดเส้นแรงแม่เหล็กบางส่วนที่ไม่ได้ไหลผ่านแกนแต่จะไหลผ่านช่องว่างอากาศ เรียกว่า เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (Leakage Inductance) ซึ่งเป็นผลให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำขึ้นในวงจรนั้นก็คือค่า  $L_1$  และ  $L_2$  สามารถใช้สมการ (2.5) คำนวณได้ [10] โดยแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 2.9

$$L_{leakage} = \frac{\mu_o \times N^2 \times l_w \times b_w}{3 \times s^2 \times h_w} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $L_{leakage}$  = ค่าความเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (H)  
 $\mu_o$  = ค่าเปอร์แมบิลิตี (Permeability) ของสุญญากาศ  
 $N^2$  = จำนวนรอบทั้งหมดของขดลวด  
 $l_w$  = ความยาวเฉลี่ยรอบแกน (m)  
 $b_w$  = ความกว้างขดลวด (m)  
 $h_w$  = ความสูงของขดลวด (m)  
 $s$  = จำนวนช่องการพันสลับระหว่างขดปฐมภูมิและทุติยภูมิ



รูปที่ 2.9 รูปความสัมพันธ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า

เส้นแรงแม่เหล็กส่วนใหญ่ที่ไหลผ่านแกน เกิดจากกระแสสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetizing Current) ที่จ่ายให้ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลง ดังนั้น จึงเกิดค่าความเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กในแกน (Magnetizing Inductance) ขึ้นในวงจร คำนวณได้จากสมการ (2.6)

$$L_m = N_{pr}^2 \times \frac{\mu_0 \times \mu_r \times A_c}{l_c} \quad (2.6)$$

เมื่อ	$L_m$	=	ค่าความเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กในแกน	(H)
	$N_{pr}$	=	จำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิ	
	$A_c$	=	พื้นที่หน้าตัดแกนเฟอร์ไรท์ที่เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่าน ( $m^2$ )	
	$l_c$	=	ทางเดินเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเฟอร์ไรท์	(m)

ค่าความต้านทาน  $R_1$  และ  $R_2$  ในตัวนำทองแดงที่ใช้ทำขดลวดทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ คำนวณได้จากสมการ (2.7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R = \rho_{cu} \frac{l_{cu}}{A_{cu}} \quad (2.7)$$

- เมื่อ  $R$  = ค่าความต้านทานของลวด (H)  
 $\rho_{cu}$  = ค่าสัมประสิทธิ์ของความต้านทานกระแสของวัสดุที่ใช้ทำขดลวด ( $\Omega\cdot m$ )  
 $l_{cu}$  = ความยาวของขดลวด (m)  
 $A_{cu}$  = พื้นที่หน้าตัดของขดลวด ( $m^2$ )

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

$$N = \frac{V}{4xfxB_m \times A_c} \quad (2.8)$$

- เมื่อ  $N$  = จำนวนรอบของขดลวด  
 $V$  = แรงดันไฟฟ้าที่ป้อน (V)  
 $f$  = ความถี่ไฟฟ้าใช้งาน (Hz)  
 $B_m$  = ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเฟอร์ไรท์ (T)  
 $A_c$  = พื้นที่หน้าตัดของแกนเฟอร์ไรท์ ( $m^2$ )

ในกรณีที่กำหนดพิกัดแรงดัน ทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิไว้แล้ว สามารถใช้สมการ (2.9) เพื่อคำนวณจำนวนรอบทางคานทุติยภูมิได้

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

- เมื่อ  $N_s$  = จำนวนรอบขดลวดทางด้านทุติยภูมิ  
 $N_p$  = จำนวนรอบขดลวดทางด้านปฐมภูมิ  
 $V_s$  = แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ (V)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_p = \text{แรงดันไฟฟ้าทางดำนปฐมภูมิ} \quad (V)$$

เมื่อได้จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิเรียบร้อยแล้ว ก็มาถึงในส่วนของการคำนวณ เบอร์ลวดที่ใช้พัน โดยมีขั้นตอนดังนี้

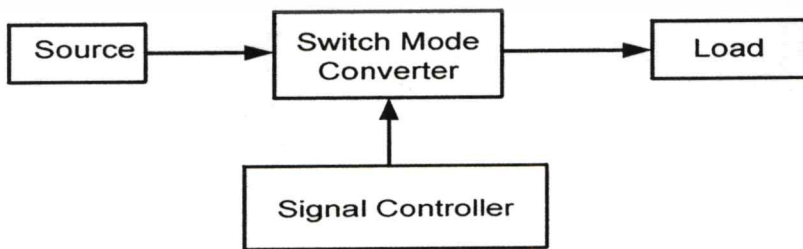
**ขั้นตอนที่ 1** กำหนดพิคัดกระแสที่ยอมให้ไหลผ่านขดลวด ( $A/mm^2$ ) โดยส่วนใหญ่กำหนดอยู่ที่ระหว่าง  $3-5 A/mm^2$  ในกรณีที่มีความถี่ใช้งานสูงการเลือกค่า  $A/mm^2$  ต่ำจึงเป็นทางเลือกที่ดี เพราะผลจากปรากฏการณ์ผิว (Skin Effect) จะทำให้พื้นที่การไหลของกระแสลดลงเนื่องจากกระแสจะมาไหลที่ผิวของตัวนำแทนหรือใช้วิธีแบ่งลวดออกเป็นเส้นเล็ก ๆ หลายเส้น โดยให้ผลรวมจำนวนพื้นที่หน้าตัดของขดลวดเส้นเล็กเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของลวดที่คำนวณได้

**ขั้นตอนที่ 2** นำพิคัดกระแสที่กำหนดคูณกับค่า  $A/mm^2$  ในขั้นตอนที่ 1 เพื่อหาขนาดพื้นที่หน้าตัดของขดลวด

**ขั้นตอนที่ 3** เมื่อได้พื้นที่หน้าตัดของขดลวดมาแล้ว จึงนำไปเทียบกับตารางขนาดสายเพื่อแปลงเป็นเบอร์ของขดลวด ซึ่งในประเทศไทยนิยมใช้มาตรฐานเบอร์ลวดอยู่ 2 แบบ คือ AWG และ SWG เป็นหลัก

## 2.4 พัลส์เดนมชิตีฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

ปัจจุบันแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ได้ถูกนำมาใช้ทดแทนแหล่งจ่ายกำลังแบบลิเนียร์มากขึ้น เพราะคุณสมบัติทางด้านประสิทธิภาพที่สูงกว่า ขนาดเล็กและน้ำหนักเบาว่าที่พิคัดกำลังงานเท่ากัน รองรับระบบได้มากกว่า สามารถทำงานเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับที่มีความถี่ต่ำและความถี่สูงได้ แหล่งจ่าย (Source) ของวงจรเป็นได้ทั้งแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงหรือกระแสสลับจากนั้นส่งผ่านสู่อุปกรณ์สวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์โดยมีวงจรควบคุมสัญญาณ (Signal Controller) เป็นตัวกำหนดการทำงานที่ส่งผ่านกำลังงานไปสู่โหลด โครงสร้างการใช้งานแสดงดังรูปที่ 2.10

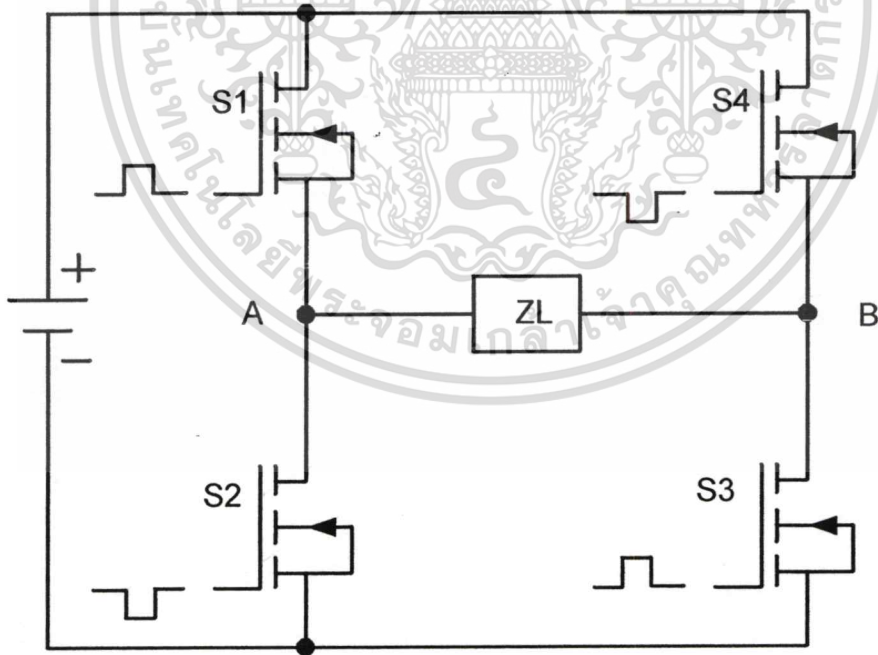


รูปที่ 2.10 โครงสร้างโดยทั่วไปของแหล่งจ่ายกำลังงานแบบสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์

การใช้งานแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์นั้นเปิดกว้างและค่อนข้างหลากหลายด้วย เพราะแหล่งจ่ายกำลังงานนั้นมีหลายแบบรองรับงาน โดยทั่วไปได้อย่างเพียงพอ พิกัดกำลังงานที่ใช้ส่วนใหญ่อยู่ที่ 100 W ไปจนถึง หลายร้อยกิโลวัตต์ แต่แหล่งจ่ายแบบนี้ก็มีข้อเสียคือราคาค่อนข้างแพง การสร้างและควบคุมยุ่งยากซับซ้อน สัญญาณรบกวนสูง แต่ปัญหาเหล่านี้กำลังลดน้อยลงเพราะนักวิจัยส่วนใหญ่ได้ทำการศึกษาค้นคว้าเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวนี้ อยู่ตลอดเวลา และด้วยเทคโนโลยีที่สูงขึ้น การผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สร้างแหล่งจ่ายกำลังงานแบบนี้ ราคากวกลงส่งผลให้ต้นทุนของแหล่งจ่ายกำลังแบบนี้มีราคากวกลงเช่นกัน

#### 2.4.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับพีดับบลิวเอ็มฟูลบริดจ์ คอนเวอร์เตอร์

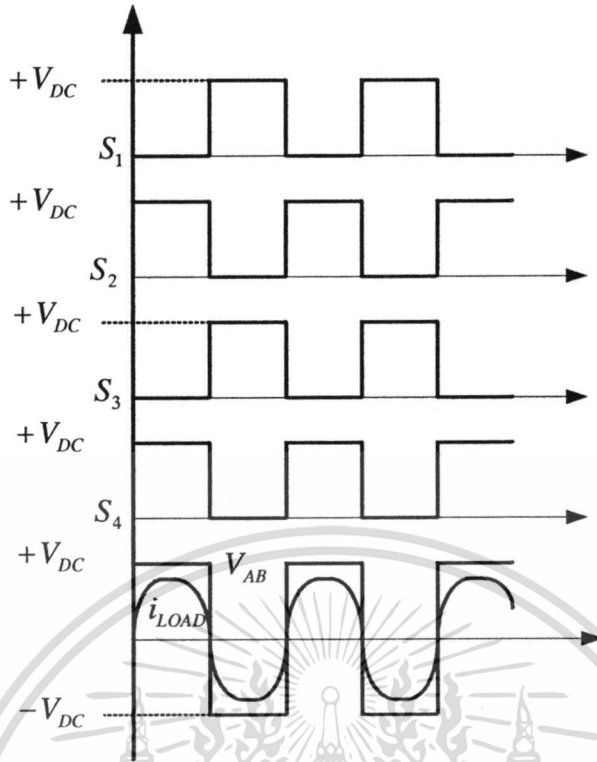
พีดับบลิวเอ็มฟูลบริดจ์ คอนเวอร์เตอร์ (Full Bridge Converter) เป็นรูปแบบหนึ่งของแหล่งจ่ายกำลังงานแบบสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์มีหลักการทำงาน โดยอาศัยการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์ส่งผ่านกำลังงาน ไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไปสู่โหลด ซึ่งใช้อุปกรณ์สวิตช์ทั้งหมด 4 ตัว ด้วยกันคือ  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  และ  $S_4$  วงจรของพีดับบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์แสดงดังรูปที่ 2.11 การทำงานของอุปกรณ์สวิตช์จะทำงานพร้อมกันเป็นคู่  $S_1 - S_3$  และ  $S_2 - S_4$  ทำงานสลับกันคู่ละครั้งคาบเวลาการสวิตช์



รูปที่ 2.11 วงจรพีดับบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

เมื่อคู่อุปกรณ์สวิตช์  $S_1 - S_3$  ทำงาน อุปกรณ์สวิตช์ทั้งสองตัวปิดวงจรแรงดันจากแหล่งจ่าย  $V_{DC}$  ตกคร่อมโหลด  $Z_L$  วัตต์แรงดันไฟฟ้าที่จุด AB ได้  $+V_{DC}$  จากนั้นที่ครึ่งคาบหลังคู่อุปกรณ์  $S_1 - S_3$  หยุดทำงานและ  $S_2 - S_4$  ทำงาน อุปกรณ์สวิตช์ทั้งสองตัวปิดวงจรแรงดันจากแหล่งจ่าย  $V_{DC}$  ตกคร่อมโหลด  $Z_L$  วัตต์แรงดันไฟฟ้าที่จุด AB ได้  $-V_{DC}$  การทำงานจะสลับกันไปตามคาบสัญญาณการสวิตช์แสดงในรูปที่ 2.12

ในกรณีที่โหลดเป็นอุปกรณ์แบบสะสมพลังงาน การสวิตช์แบบฮาร์ดสวิตช์ (Hard Switch) ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียที่อุปกรณ์สวิตช์สูง สาเหตุเพราะการถ่ายเทพลังงานออกจากอุปกรณ์สะสมพลังงานในช่วงเวลาขณะที่อุปกรณ์สวิตช์กำลังหยุด (turn off) หรือนำกระแส (turn on) แรงดันที่ตกคร่อมกับกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์ในช่วงเวลานี้ คือ กำลังงานสูญเสีย กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นเรียกว่า การสูญเสียขณะสวิตช์ (Switching Loss) การลดการสูญเสียขณะสวิตช์เรียกว่า ซอฟต์สวิตช์ (Soft Switch) วิธีการทำได้โดยการกำหนดความถี่สวิตช์ (Switching Frequency) ให้สูงกว่าความถี่เรโซแนนท์ (Resonant Frequency) เล็กน้อย จากรูปที่ 2.12 ขณะที่  $S_1 - S_3$  turn on แรงดันตกคร่อมค่อย ๆ ลดลง กระแสที่ไหลผ่านเป็นลบ จากนั้นเมื่อแรงดันลดลงเป็นศูนย์กระแสจึงค่อยเพิ่มขึ้น ผลคูณของกระแสและแรงดันจึงเท่ากับศูนย์ การสวิตช์แบบนี้ อุปกรณ์สวิตช์ถูกบังคับให้ทำงานที่แรงดันตกคร่อมเป็นศูนย์ก่อนที่กระแสจะไหลผ่านจึงเรียกว่า Zero Voltage Switch (ZVS) ในขณะที่  $S_1 - S_3$  turn off กระแสเปลี่ยนมาไหลผ่านตัวเก็บประจุที่ต่อขนานอยู่กับอุปกรณ์สวิตช์แทน แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเท่ากับแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์แรงดันที่ตกคร่อมค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจากการที่ตัวเก็บประจุถูกชาร์จ กระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์เป็นศูนย์ ผลคูณระหว่างแรงดันและกระแสจึงเป็นศูนย์ การสวิตช์แบบนี้ อุปกรณ์สวิตช์ทำงานขณะกระแสที่ไหลผ่านเป็นศูนย์ก่อนที่แรงดันจะเพิ่มขึ้นเรียกว่า Zero Current Switch (ZCS)



รูปที่ 2.12 แสดงสัญญาณการทำงานของฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

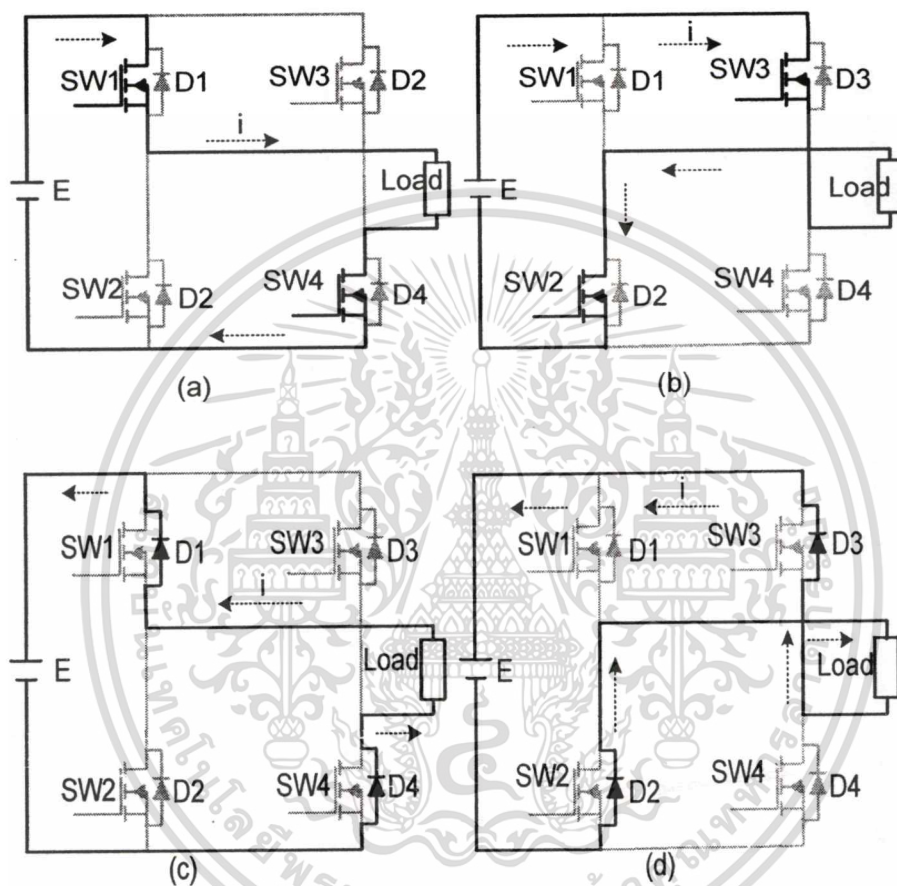
#### 2.4.2 พัลส์เดนมอดูเลชันฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

ในการปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าในวงจรเรโซแนนท์คอนเวอร์เตอร์ความถี่สูงทำได้ 2 ลักษณะ คือการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยวิธีการปรับความถี่ (Frequency Control) และการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยวิธีการปรับจำนวนความหนาแน่นพัลส์ (Pulse Density Modulation) ซึ่งยังสามารถแบ่งแยกออกได้อีกสองหลักการ คือ หลักการควบคุมโดยวิธีการปรับจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจาย และหลักการควบคุมโดยวิธีการปรับจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบรวมตัวเป็นกลุ่ม การควบคุมกำลังไฟฟ้าทั้งสองแบบการปรับพัลส์ PDM และแบบการปรับความถี่ นี้จะมีวิธีการควบคุมที่แตกต่างกันโดยสิ้นเชิง รวมทั้งข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงหลักการควบคุมโดยวิธีการปรับจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบรวมตัวเป็นกลุ่มจากหลักการควบคุมกำลังไฟฟ้าในวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนท์ความถี่สูง สำหรับกรณีการปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการปรับลดจำนวนพัลส์ในรูปแบบของการกระจายนั้นเพื่อเป็นการเปรียบเทียบกับหลักการควบคุมกำลังไฟฟ้า โดยการปรับลดจำนวนพัลส์ ในอีกรูปแบบหนึ่งซึ่งเป็นรูปแบบที่คลื่นพัลส์มีลักษณะการรวมตัวกันเป็นกลุ่ม ทั้งนี้เพื่อศึกษาคุณสมบัติต่างๆทางไฟฟ้าของทั้งสองกรณีนี้ เช่น ลักษณะของคลื่นและค่าของแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในวงจร ลักษณะโหมดการทำงานของวงจรในหนึ่งช่วงคาบเวลาซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ PDM แบบรวมตัวเป็นกลุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าในวงจรพัลส์ PDM แบบการรวมตัวเป็นกลุ่มและแบบกระจายตัวนี้ โดยแต่ละรูปแบบจะประกอบด้วยรูปคลื่นพัลส์จำนวน 10 ไซเคิลต่อคาบเวลาที่มีช่วงการ ON – OFF พัลส์ในจำนวนที่แตกต่างกันสำหรับ PDM แบบรวมตัวเป็นกลุ่มนี้จะเป็นการจัดรูปคลื่นพัลส์ให้มีการรวมตัวเป็นกลุ่มอยู่ในแถบบริเวณเดียวกัน โดยไม่ให้มีการกระจายออกในช่วง 1 คาบเวลาที่ใช้ในการพิจารณา

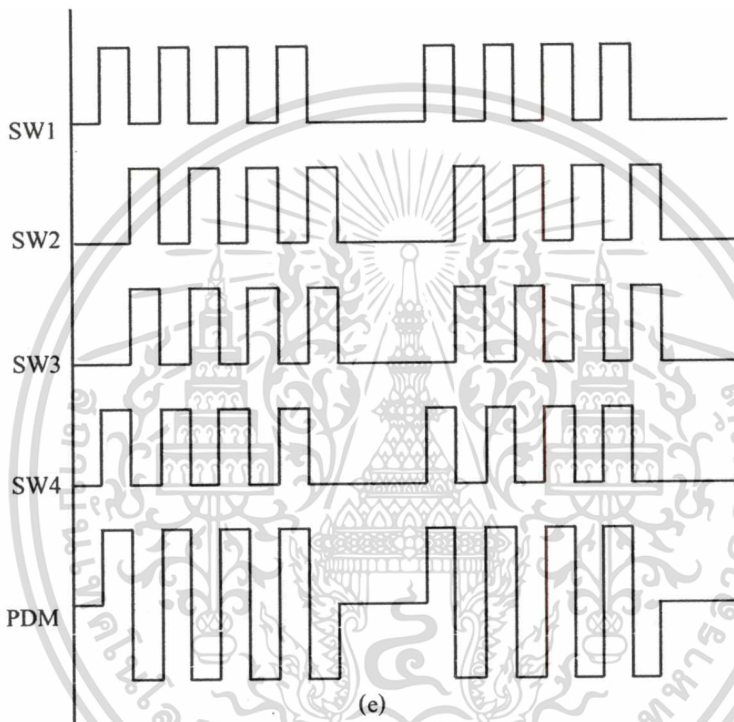


รูปที่ 2.13 รูปแบบการสวิทชิงของPDMแบบรวมกลุ่ม

รูปที่ 2.13 (a) ทำงานในโหมดจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงดันเอาต์พุตเป็นบวกกระแสเอาต์พุตมีทิศทางเป็นบวก เมื่อ sw1 และ sw4 ทำงาน กระแสจากแหล่งจ่ายกระแสตรงไหลผ่าน sw1 ไปสู่ Load จากนั้นไหลผ่าน sw4 กลับสู่แหล่งจ่ายครบวงจร แรงดันตกคร่อม โหลดเท่ากับแรงดันที่แหล่งจ่าย +E ที่กึ่งหน้าแรงดันตกคร่อม sw2 D2 เท่ากับแหล่งจ่าย E แรงดันตกคร่อม sw1 D1 เท่ากับศูนย์ รูปที่ 3 (b) ทำงานในโหมดคืนกำลังไฟฟ้าแรงดันเอาต์พุตเป็นลบกระแสเอาต์พุตมีทิศทางเป็นบวก เมื่อ sw3 และ sw2 ทำงาน กระแสจากแหล่งจ่ายกระแสตรงไหลผ่าน sw3 ไปสู่ Load จากนั้นไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ่าน sw2 กลับสู่แหล่งจ่ายแรงดันตกคร่อมโหลดเท่ากับแหล่งจ่ายแต่มีค่าติดลบเพราะกลับขั้วเท่ากับ -E ที่กึ่งหน้าแรงดันตกคร่อม sw1 D1 เท่ากับแหล่งจ่าย E แรงดันตกคร่อม sw2 D2 เท่ากับศูนย์ ที่กึ่งหลังแรงดันตกคร่อม sw3 D3 เท่ากับศูนย์แรงดันตกคร่อม sw4 D4 เท่ากับแหล่งจ่าย E รูปที่ 3 (c) จากรูปวงจรกำลังเป็นการทำงานในโหมดการคืนกำลังงานไฟฟ้าในขณะที่ sw 1 และ sw4 ยังทำงานอยู่แต่กระแสไหลผ่าน ไดโอด D1 และ D4 รูปที่ 3 (d) จากรูปวงจรกำลังเป็นการทำงานในโหมดการคืนกำลังงานไฟฟ้าในขณะที่ sw2 และ sw3 ยังทำงานอยู่แต่กระแสไหลผ่าน ไดโอด D2 และ D3 รูปที่ 3 (e) เป็นรูปสัญญาณของ sw1, sw2, sw3, sw4 และสัญญาณ PDM



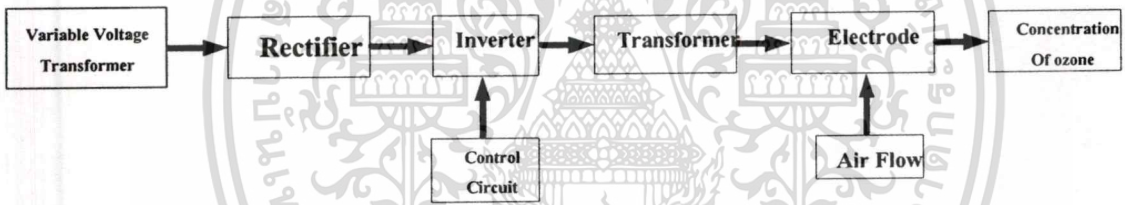
รูปที่ 2.14 รูปแบบการสวิทชิงและรูปแบบการมอดูเลตของPDMแบบรวมกลุ่ม

### บทที่ 3

## การออกแบบเครื่องผลิตก๊าซโอโซน

### 3.1 บทนำ

เครื่องผลิตก๊าซโอโซนมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนมากนัก โดยหลัก ๆ แล้วประกอบด้วยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ ชุดสร้างสัญญาณควบคุมเพื่อนำไปใช้เป็นสัญญาณขับเคลื่อนของอุปกรณ์สวิตช์ในแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ หม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดันและชุดอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันแนบกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ในการวิเคราะห์และออกแบบต้องทราบถึงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโหลดเสียก่อนจึงจะสามารถออกแบบในส่วนอื่น ๆ ที่เหลือของระบบได้ ดังนั้นจะขอกล่าวถึงการวิเคราะห์และออกแบบชุดอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันแนบกันรวม 2 ชั้นเป็นอันดับแรก หลังจากนั้นถึงออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงและแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 3.1 โครงสร้างเครื่องผลิตก๊าซโอโซน

### 3.2 อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันรวม 2 ชั้น

ในบทความนี้เลือกใช้แก้วเป็นวัสดุฉนวนชั้นที่ 1 ด้วยเหตุผล 5 ข้อดังนี้คือ

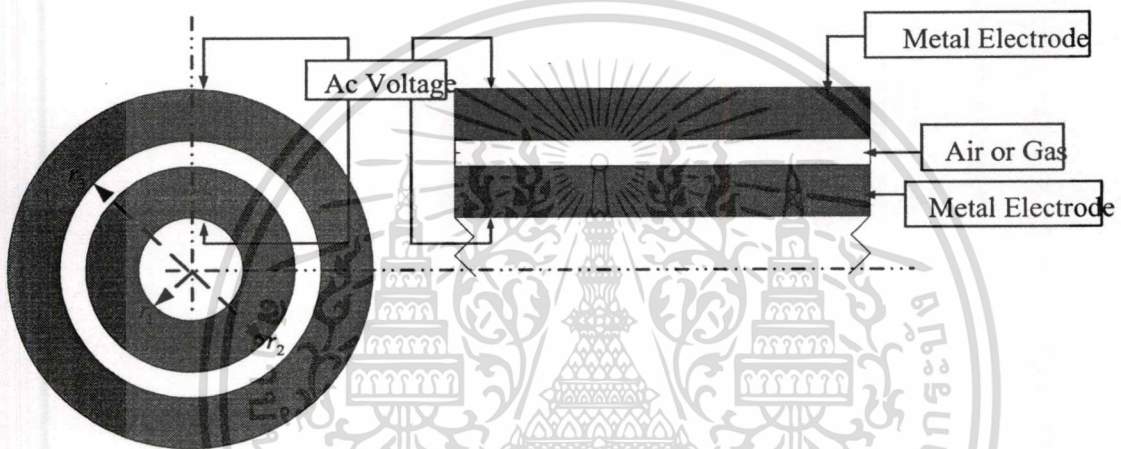
- 1) แก้วมีคุณสมบัติในการทนความเครียดสนามไฟฟ้าได้สูง
- 2) แก้วที่คุณภาพการผลิตดีจะมีผิวเรียบและไม่มีฟองอากาศหรือสิ่งแปลกปลอมเจือปนอยู่ซึ่งสิ่งเหล่านี้อาจส่งผลให้เกิดการเบรคความในแก้วได้
- 3) สามารถทนการชุบซิดและไม่เกิดริ้วรอยได้ง่าย
- 4) ในกระบวนการผลิตแก้วต้องให้ความร้อนสูงกว่า 1,200 องศาเซลเซียสเพื่อหลอมทรงซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ทำแก้ว ดังนั้นแก้วจึงทนความร้อนได้สูงมากก่อนที่จะหลอมละลายเสียหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) แก้วเป็นวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารใด ๆ ดังนั้นจึงไม่ทำปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนเช่นกัน

ในส่วนของฉนวนชั้นที่ 2 เป็นช่องว่างอากาศเพื่อที่จะสามารถทำให้อากาศไหลผ่านชุดอิเล็กโทรดได้ ตัวนำด้านในและด้านนอกใช้ฟอยสแตนเลสและท่อสแตนเลสตามลำดับ รูปทรงของอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันรวมฉนวน 2 ชั้น แสดงในรูปที่ 3.2

การกำหนดขนาดรัศมีของชุดอิเล็กโทรดจะเลือกจากขนาดของหลอดแก้วก่อนเป็นหลักเพราะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของหลอดแก้วมีให้เลือกไม่มากนัก จากนั้นจึงเลือกขนาดของท่อสแตนเลส ซึ่งผู้ผลิตได้จัดทำตารางขนาดท่อไว้แล้วจึงจะสะดวกต่อการนำเข้ามาใช้งาน



รูปที่ 3.2 ลักษณะของรูปทรงของอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันรวมฉนวน 2 ชั้น

ในงานวิจัยนี้เลือกหลอดแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 4.3 ซม., หนา = 0.1 ซม. และยาว = 30 ซม. เหตุผลในการเลือกนั้นเพราะจากการคำนวณร่วมกับท่อสแตนเลสหลาย ๆ ขนาดแล้วหลอดแก้วขนาดนี้ใช้แรงดันภายนอกที่ป้อนให้ไม่สูงมากนักและความยาวก็มากกว่าหลอดแก้วขนาดอื่น ๆ ในส่วนของท่อสแตนเลสเลือกใช้ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 4.5 ซม., หนา 0.1 ซม. และยาว = 30 ซม. เมื่อนำหลอดแก้วซ้อนเข้าไปในท่อสแตนเลส ดังนั้นจะได้ค่า  $r_1 = 1.90$  ซม.,  $r_2 = 2.10$  ซม. และ  $r_3 = 2.40$  ซม. ค่าเปอร์มิตติวิตีของแก้ว ( $\epsilon_{r1}$ ) อยู่ระหว่าง 5-10 และของอากาศ ( $\epsilon_{r2}$ ) ประมาณเท่ากับ 1 กำหนดให้ตัวนำด้านในของอิเล็กโทรดยาว ( $l$ ) 22 ซม. เนื่องจากในการคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุเสมือนใช้ค่าความยาวตัวนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเป็นตัวแปรในสมการซึ่งแปรผกผัน ดังนั้น ถ้าเลือกค่าความยาวมากก็จะทำให้ค่าตัวเก็บประจุมีค่ามากส่งผลให้กระแสไหลคมมีค่าสูงขึ้นพิคคของอุปกรณ์ก็จะสูงขึ้น แต่ถ้าความยาวสั้นเกินไปก็จะทำให้อากาศที่ไหลผ่านสนามไฟฟ้ามีระยะทางสั้น และ โอกาสที่โมเลกุลของ

อากาศจะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าก็น้อยลงเช่นกัน นำตัวแปรมาคำนวณหาปริมาตรของช่องว่างอากาศ ( $Vol$ ) มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร ( $m^3$ ) เพื่อนำไปแทนค่าในสมการที่ (3.3) ได้จากสมการ (3.1)

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

$$Vol = \pi \times (0.0240 - 0.0210)^2 \times 0.22$$

$$Vol = 6.22 \times 10^{-6} \quad m^3$$

จากหัวข้อ 2.2 ย่านพลังงานที่ใช้ในการผลิตก๊าซไอโซนอยู่ในช่วง  $1.172 \text{ kW.h/m}^3 - 1.62 \text{ kW.h/m}^3$  เพราะฉะนั้นสามารถคำนวณหาพลังงาน ( $W$ ) ที่ใช้ในอิเล็กทรอนิกส์ได้ดังนี้

$$W_{min} = 1.172 \times 10^3 \times 6.22 \times 10^{-6} = 7.2 \text{ mW.h}$$

$$W_{max} = 1.620 \times 10^3 \times 6.22 \times 10^{-6} = 10 \text{ mW.h}$$

คำนวณหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้า ( $E$ ) ได้จากสมการพลังงานในสนามไฟฟ้าของช่องว่างอากาศ (3.2) ในกรณีที่สนามไฟฟ้าตามเวลานั้น สามารถวิเคราะห์ในสภาพสนามไฟฟ้าสถิตย์ได้ เนื่องจากในขณะที่ขนาดของแรงดันภายนอกที่ป้อนให้กับอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่า ๆ หนึ่ง ก่อนถึงค่าสูงสุด สนามไฟฟ้าจะไม่มีพลังงานมากพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากโมเลกุลก๊าซได้ และไม่สามารถเร่งความเร็วของอิเล็กตรอนอิสระให้เคลื่อนที่และชนกับโมเลกุลก๊าซในช่องว่างอากาศให้แตกตัวได้ ดังนั้นพลังงานที่จะทำให้เกิดกระบวนการไอออไนเซชัน ( $W$ ) ได้จึงเกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดนั่นเอง เพราะฉะนั้นสามารถอินทิเกรตสมการ (3.2) ได้ดังนี้

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

$$W_i = \frac{1}{2} \times \epsilon_o \times \epsilon_r \times E^2 \times Vol$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ที่ย่านพลังงานต่ำสุด  $E_{\min} = \sqrt{\frac{2 \times 7.2 \times 10^{-3}}{8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 6.22}}$

$$E_{\min} = 16,170 \text{ V/cm}$$

ที่ย่านพลังงานสูงสุด  $E_{\max} = \sqrt{\frac{2 \times 10 \times 10^{-3}}{8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 6.22}}$

$$E_{\max} = 19,056 \text{ V/cm}$$

เมื่อได้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ย่านพลังงานต่ำสุดและสูงสุดที่ทำให้เกิดก๊าซไอโซนแล้วจึงคำนวณหาค่าแรงดันภายนอกที่ป้อนให้ชุดอิเล็กทรอนิกส์ได้จากสมการ (2.3) โดยแทนค่าได้ดังนี้

$$V_{\min} = \frac{16,170 \times 1 \times 2.10 \times \left( 8 \times \ln \frac{2.40}{2.10} + 1 \times \ln \frac{2.10}{1.90} \right)}{8 \times 1}$$

$$4.96 \text{ kV}$$

เพราะฉะนั้น  $V_{\min} = 14.95 \text{ kV}$

$$V_{\max} = \frac{19,056 \times 1 \times 2.10 \times \left( 8 \times \ln \frac{2.40}{2.10} + 1 \times \ln \frac{2.10}{1.90} \right)}{8 \times 1}$$

เพราะฉะนั้น  $V_{\max} = 14.95 \text{ kV}$   
5.84 kV

ในงานวิจัยนี้เลือกแรงดันที่ 5.5 kV เนื่องจากเป็นจุดกึ่งกลางระหว่างค่าต่ำสุดและสูงสุด ซึ่งสามารถใช้งานได้โดยมีความยืดหยุ่นสูงในกรณีที่แรงดันมีการแกว่งและไม่คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการหาค่าตัวเก็บประจุเสมือนที่ต่ออนุกรมกันในแท่งอิเล็กโทรดจากสมการ (2.1) และ (2.2) โดยแทนค่าได้ดังนี้

$$C_1 = \frac{2 \times \pi \times 8 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 22}{\ln \frac{2.10}{1.90}}$$

เพราะฉะนั้น

$$C_1 = 9.7 \times 10^{-8} \text{ F}$$

$$C_2 = \frac{2 \times \pi \times 1 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 22}{\ln \frac{2.40}{2.10}}$$

เพราะฉะนั้น

$$C_2 = 9.7 \times 10^{-9} \text{ F}$$

### 3.3 หม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน

ในงานวิจัยนี้ออกแบบกำลังงานของหม้อแปลงไว้ที่ 1.5 kW เลือกใช้แกนเฟอร์ไรท์เบอร์ EE-80 ซึ่งเป็นแกนแบบ EE ที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในท้องตลาดและจ่ายกำลังได้สูงสุด 2 kW โดยโครงสร้างคือการนำแกนเฟอร์ไรท์รูปร่างเหมือนตัว E สองตัวมาประกบกัน ลักษณะของแกนแสดงในรูปที่ 3.3 มีค่าพารามิเตอร์ดังนี้ พื้นที่หน้าตัดแกน  $A_c = 4.0 \times 10^{-4}$ ,  $B_{\max} = 0.3 \text{ T}$ , ความยาวทางเดินแม่เหล็กของแกน (1) 0.192 m ปริมาตรแกน  $V_g = 69.8 \times 10^3 \text{ mm}^3$  และความยาวรอบด้านทั้ง ( $l_w$ ) 4 ของแกน 0.08 m พื้นที่ช่องว่างของบ๊อบบิน  $800 \text{ mm}^2$  แต่เนื่องจากโหลดของหม้อแปลงเป็นอุปกรณ์แบบสะสมพลังงานดังนั้นสิ่งที่พิจารณาคือกระแสโหลดและพื้นที่หน้าตัดการนำกระแสของขดลวดตัวนำ

กำหนดพิกัดของหม้อแปลงดังนี้ แรงดันทางด้านปฐมภูมิ  $V_p = 310 \text{ V}$  แรงดันทางด้านทุติยภูมิ  $V_s = 5.5 \text{ kV}$ , ความถี่ใช้งาน 25 kHz และกระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง 5 A

คำนวณหาจำนวนรอบปฐมภูมิจากสมการ (2.8) โดยแทนค่าได้ดังนี้

$$N_p = \frac{310}{4 \times 25000 \times 0.3 \times 4.0 \times 10^{-4}}$$

เพราะฉะนั้น

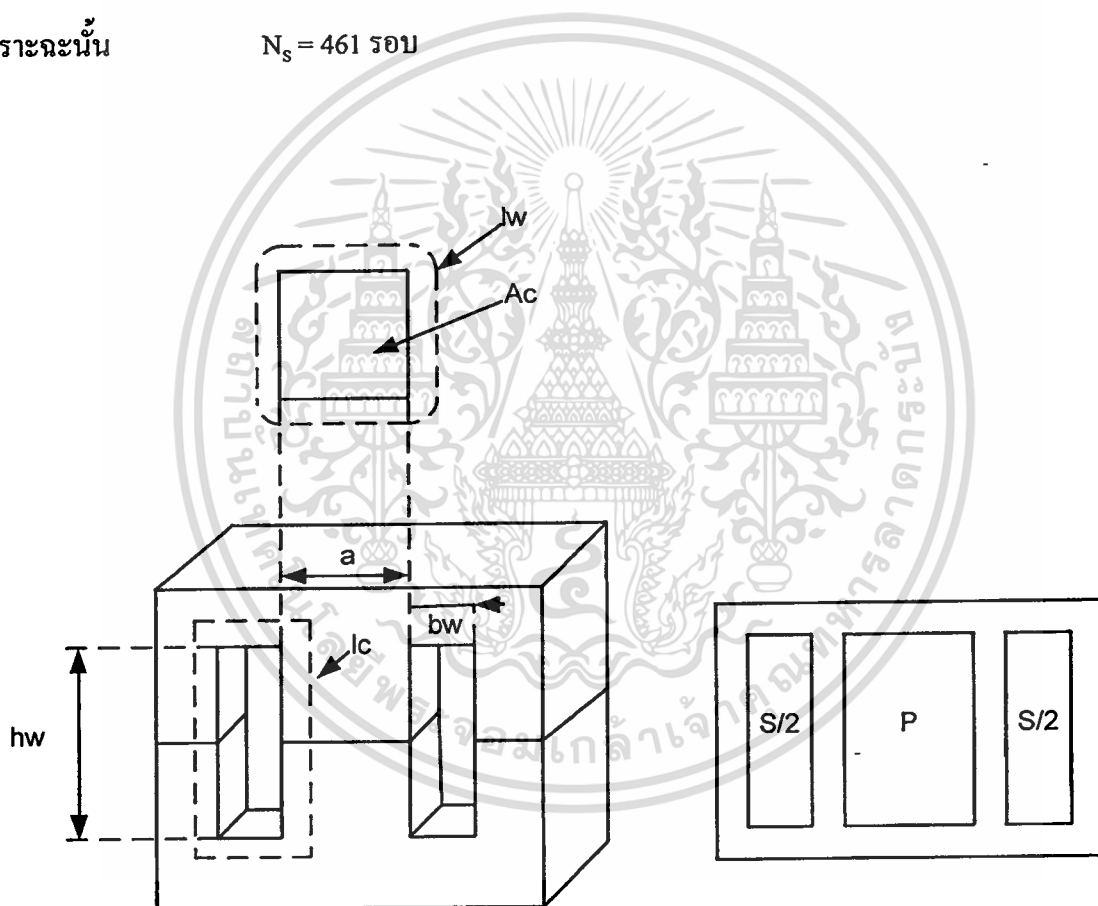
$$N_p = 26 \text{ รอบ}$$

จำนวนรอบทฤษฎีมีค่ามาจากสมการ (2.9) แทนค่าได้ดังนี้

$$N_s = 26 \times \frac{5500}{310}$$

เพราะฉะนั้น

$$N_s = 461 \text{ รอบ}$$



รูปที่ 3.3 โครงสร้างแกนเฟอริไรท์เบอร์ EE-80

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เปิดตารางเทียบเบอร์ลวดได้ # AWG 16 (1.307mm<sup>2</sup>)

คำนวณเบอร์ลวดทางค่านทุติยภูมิได้ดังนี้

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

$$I_s = 5 \times \frac{310}{5500}$$

เพราะฉะนั้น

$$I_s = 0.281$$

ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดของขดลวดคือ  $\frac{0.281A}{4A} = 0.07025 \text{ mm}^2$

เปิดตารางเทียบเบอร์ลวดได้ # AWG 28 (0.0846mm<sup>2</sup>)

### 3.4 การออกแบบพัลส์เคาน์ตีฟลูบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

อุปกรณ์สวิตซ์ 4 ตัวในวงจรกำลังฟลูบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ คือ มอสเฟตเบอร์ IREP460 มีพิกัดทนแรงดันได้สูงสุดคือ 500V และทนกระแสได้ 20A เนื่องจากแรงดันดีซีลิงคิจากแหล่งจ่ายมีขนาด 310V จึงต้องใช้อุปกรณ์สวิตซ์ทนแรงดันได้สูง มอสเฟตเบอร์นี้มีแอนตี้พาราเลลไดโอดเพื่อคืนพลังงานในช่วงเวลาฟรีวีวป้องกันการเสียหายให้กับมอสเฟต จึงไม่จำเป็นต้องต่อฟรีวิลลิงไดโอดภายนอกเพิ่มเติม ที่ขาดครบและขาของมอสเฟตต่อตัวเก็บประจุคร่อมไว้เพื่อให้เกิดการชอร์ฟสวิตซ์ขณะ tum off ดังแสดงในรูปที่ 3.4

หลักการเกิดชอร์ฟสวิตซ์ขณะ tum off ของมอสเฟตคือการทำให้แรงดันที่ตกคร่อมมอสเฟตยังคงเป็นศูนย์ในขณะที่กระแสไหลลัดที่ไหลผ่านมอสเฟตลดลงเป็นศูนย์ โดยใช้วิธีการเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแสจากมอสเฟตไหลผ่าน C ในขณะที่มอสเฟตกำลัง tum off ค่าความต้านทานภายในมอสเฟตเพิ่มสูงขึ้น ลักษณะนี้เสมือนเปิดวงจรแรงดันที่ตกคร่อม C จะไม่เพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่จะค่อย ๆ เพิ่มสูงขึ้นจากการที่ถูกชาร์จประจุโดยกระแสไหลดที่เคเบิลไหลผ่านมอสเฟตและกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตเริ่มลดลงเพราะมีทิศทางกระแสไหลเปลี่ยนไปที่ C แรงดันที่ตกคร่อม C เท่ากับแรงดันที่ตกคร่อมมอสเฟต ดังนั้นผลคูณกระแสกับแรงดันที่มอสเฟตซึ่งเป็นกำลังสูญเสีย ( $P_{loss}$ ) จึงลดลงแสดงในรูปที่ 3.5 สมการในคำนวณหาค่า C ใช้สมการ (3.4)

$$C_s = \frac{I_{load} \times t_{if}}{2 \times V_{dc}} \quad (3.4)$$

เมื่อ  $C_s$  = ค่าตัวเก็บประจุที่ทำให้เกิดซอร์ฟสวิทช์ (F)

$I_{load}$  = กระแสไหลดที่ไหลผ่านมอสเฟต (A)

$t_{if}$  = ช่วงเวลาที่กระแสเริ่มลดลงจนเป็นศูนย์ (sec)

$V_{dc}$  = แรงดันดีซี-ลิง

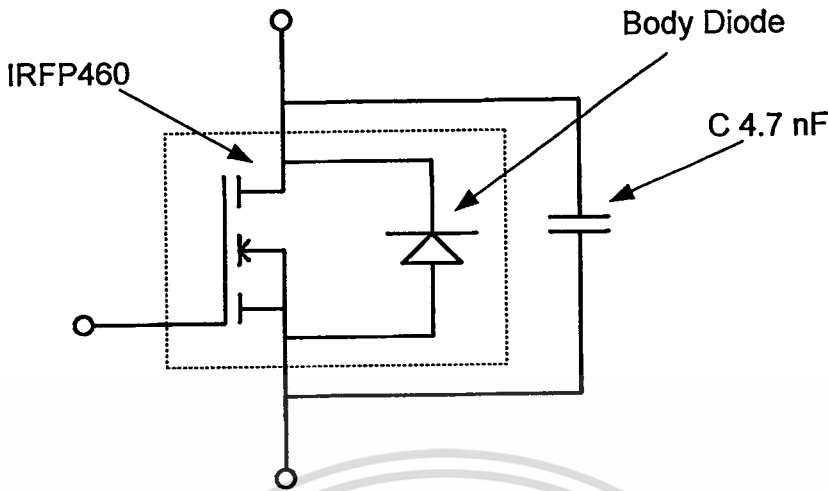
กำหนดช่วงเวลา ( $t_{if}$ ) เพื่อใช้ในการคำนวณค่า  $C_s$  โดยดูจากช่วงเวลาเดธไทม์ ( $t_{DP}$ ) ของมอสเฟตที่ความถี่ใช้งานสูงสุดคือ 25 kHz คาบเวลาใน 1 ลูกคลื่นเท่ากับ 10 s กำหนดเดธไทม์เท่ากับ 5% ของลูกคลื่น เพราะฉะนั้น  $t_{if}$  เท่ากับ คาบเวลา 1 ลูกคลื่นคูณกับช่วงเวลาเดธไทม์ ได้ 0.5 us กระแสไหลด ( $I_{load}$ ) จากหัวข้อที่ผ่านมาเท่ากับ 5A แรงดันดีซี-ลิงเท่ากับ 310V แทนค่าในสมการได้

$$C_s = \frac{5 \times 0.5 \times 10^{-6}}{2 \times 310}$$

เพราะฉะนั้น

$$C_s = 4 \text{ nF}$$

ดังนั้นเลือกใช้  $C_s$  เท่ากับ 4.7 nF

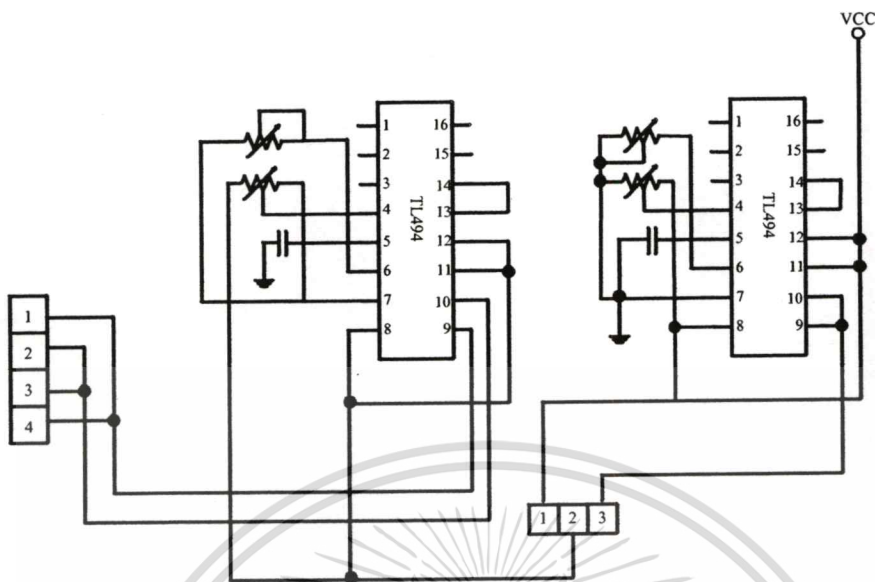


รูปที่ 3.4 มอสเฟตเบอร์ IRFP460 ต่อพร้อมด้วยตัวเก็บประจุค่า 4.7 nF

ในการเลือกใช้ตัวเก็บประจุตัวเดียวต่อพร้อมมอสเฟตดีกว่าการต่อแบบ RCD Snubber คือ ไม่มีกำลังสูญเสียที่ตัวต้านทานและไดโอดสับเบอร์ ประหยัดอุปกรณ์โดยที่หลักการทำงานยังเหมือนกับ RCD Snubber

### 3.4.1 การสร้างสัญญาณ PDM จาก TL494

ในงานวิจัยนี้จะใช้ IC เบอร์ TL494 จำนวนสองตัวในการสร้างสัญญาณควบคุมความหนาแน่นพัลส์โดยที่ตัวที่หนึ่งสร้างพัลส์ความถี่ 2.5 kHz ป้อนเข้าที่ขา feedback PWM comparator in put ของ TL494 ตัวที่หนึ่ง เพื่อนำสัญญาณไปตัดกับรูปคลื่นสามเหลี่ยมภายในของ TL494 ตัวที่สองโดยจะใช้ TL494 ตัวที่สองสร้างพัลส์ความถี่สูง 25 kHz ออกมาสัญญาณที่ได้จะเป็นสัญญาณที่มีการขาดหายเป็นช่วงๆ ตามค่า duty ration ของสัญญาณของ TL494 ตัวที่หนึ่งสัญญาณที่ออกมาจะอยู่ในรูปแบบ Pulse Density Modulation โดยที่จำนวนของพัลส์ในหนึ่งช่วงเวลาสามารถควบคุมได้โดยการปรับค่า duty ratio ของ TL494 ตัวที่หนึ่ง วงจรในการต่อดังรูปที่ 3.5 และทำการแยกกราวด์ของวงจรควบคุมกับวงจรกำลังออกจากกันโดยใช้ TLP250 วงจรการต่อดังรูปที่ 3.6 โดยที่งานวิจัยนี้สามารถปรับจำนวนลูกคลื่นพัลส์ได้ตั้งแต่หนึ่งถึงสิบลูกคลื่น



รูปที่ 3.5 วงจรสร้างสัญญาณ PDM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 วงจรแยกกราวด์โดยใช้ TLP250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

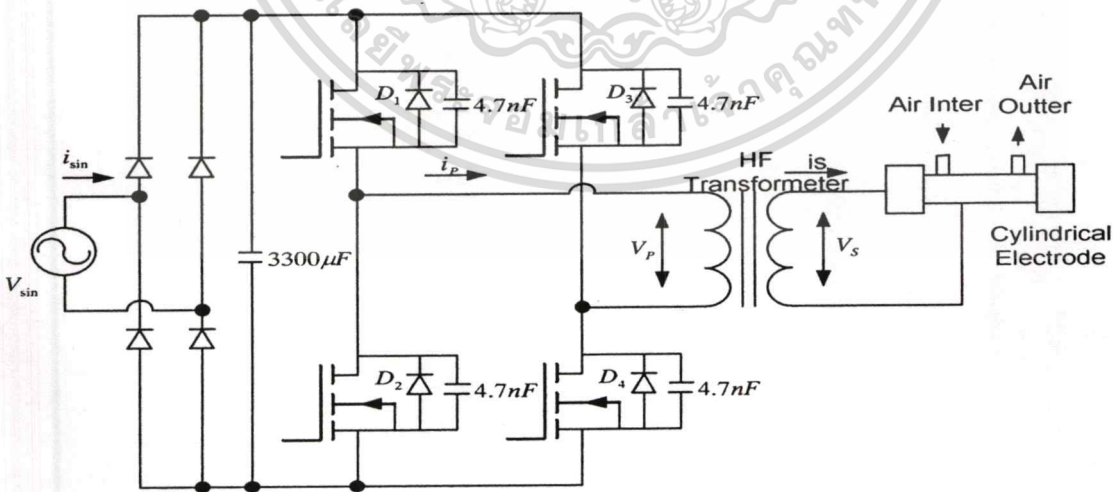
# การทดลองและผลการทดลองของเครื่องผลิตก๊าซไอโซน

### 4.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงการทดลองการทำงานของเครื่องต้นแบบเครื่องผลิตก๊าซไอโซนที่สร้างขึ้นโดยการวัดผลทางไฟฟ้าที่จุดต่างและทำการเก็บผลทางเคมีโดยการเปลี่ยนความหนาแน่นพัลส์ของคอนเวอร์เตอร์เพื่อดูผลการเกิดปริมาณ ไอโซน พร้อมทั้งวัดแรงดันและกระแสและกำลังไฟฟ้าทางด้านอินและเอาต์พุทของคอนเวอร์เตอร์เพื่อดูประสิทธิภาพของเครื่อง

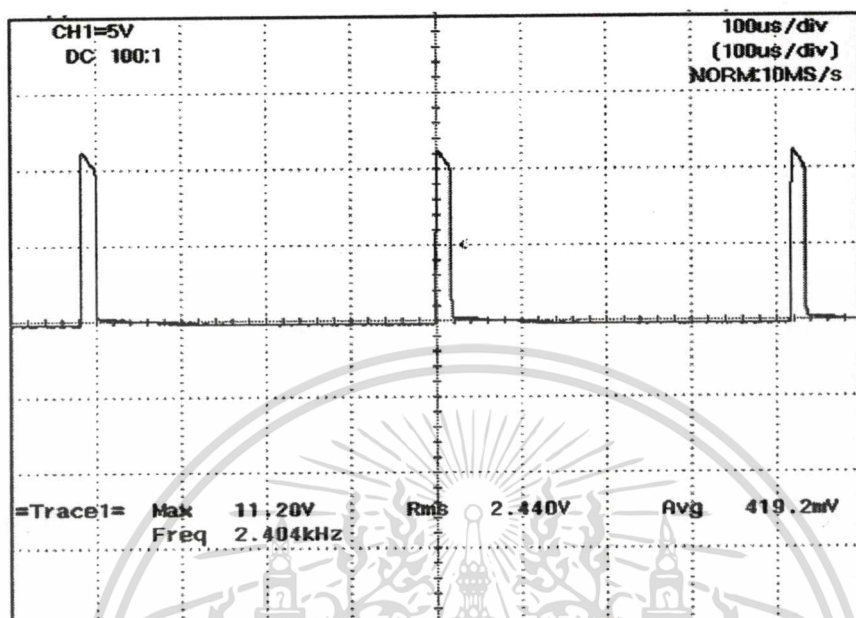
### 4.2 การวัดผลการทดลองทางไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้จะเก็บผลการทดลองทางไฟฟ้าของเครื่องผลิตก๊าซไอโซนต้นแบบซึ่งวงจรแสดงในรูปที่ 4.1 โดยจะจ่ายแรงดันอินพุทเท่ากับ 110 V และ 220 V ความถี่ 25 kHz คงที่และจะทำการปรับความหนาแน่นพัลส์เพิ่มขึ้นทีละหนึ่งลูกจากหนึ่งลูกคลื่นถึงสิบลูกคลื่นตามลำดับ โดยจะทำการเก็บผลของกำลังงานไฟฟ้ากระแสและแรงดันทางด้านอินพุทและเอาต์พุทของคอนเวอร์เตอร์และเก็บผลของแรงดันและกระแสที่โหลดเพื่อดูปริมาณการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันที่โหลดเมื่อทำการปรับความหนาแน่นพัลส์และทำการจำลองการทำงานหนึ่งตัวอย่างดังรูปที่ 4.1.1

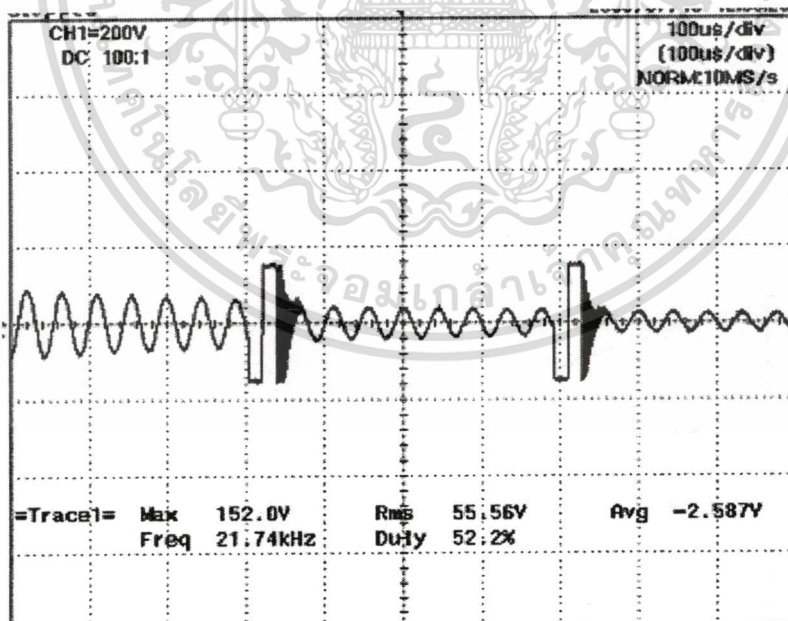


รูปที่ 4.1 วงจรกำลังของเครื่องกำเนิดก๊าซไอโซน

- ที่ความหนาแน่นพัลส์ 1 ลูกคลื่น

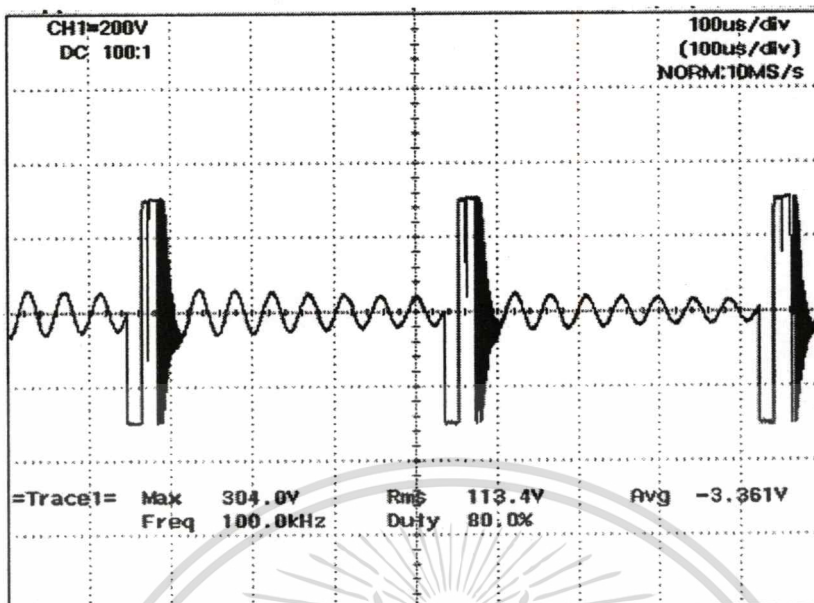


รูปที่ 4.2 สัญญาณ Control ที่ความหนาแน่นพัลส์ 1 ลูกคลื่น

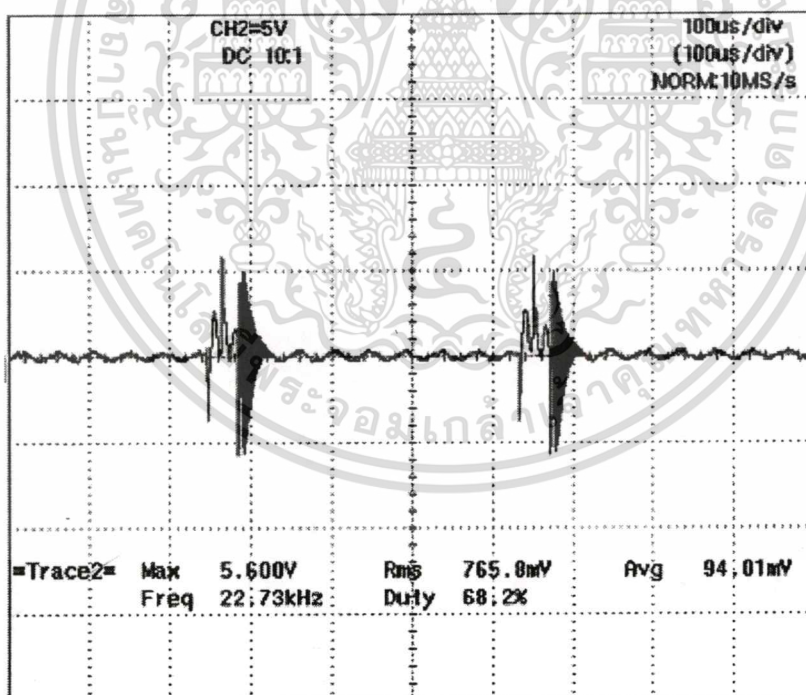


รูปที่ 4.3 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 1 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

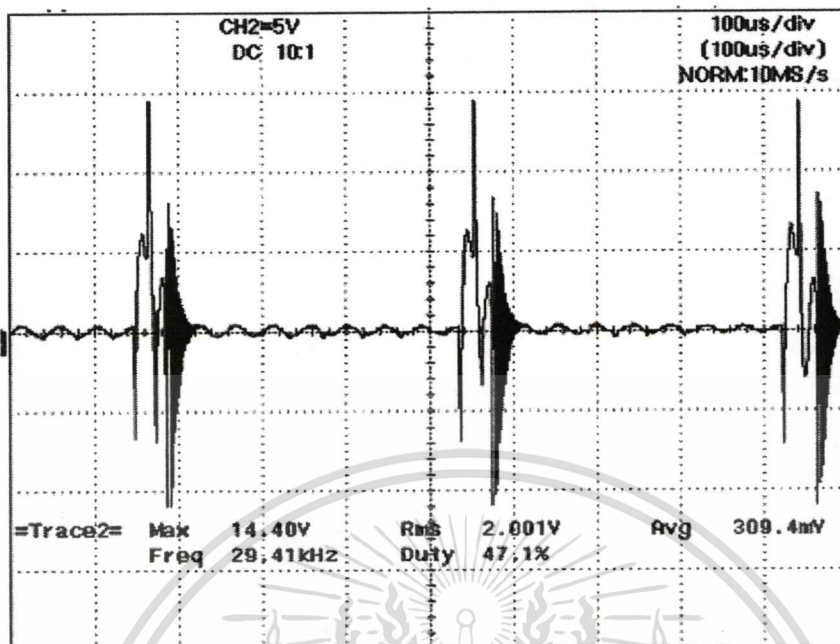


รูปที่ 4.4 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 1 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V

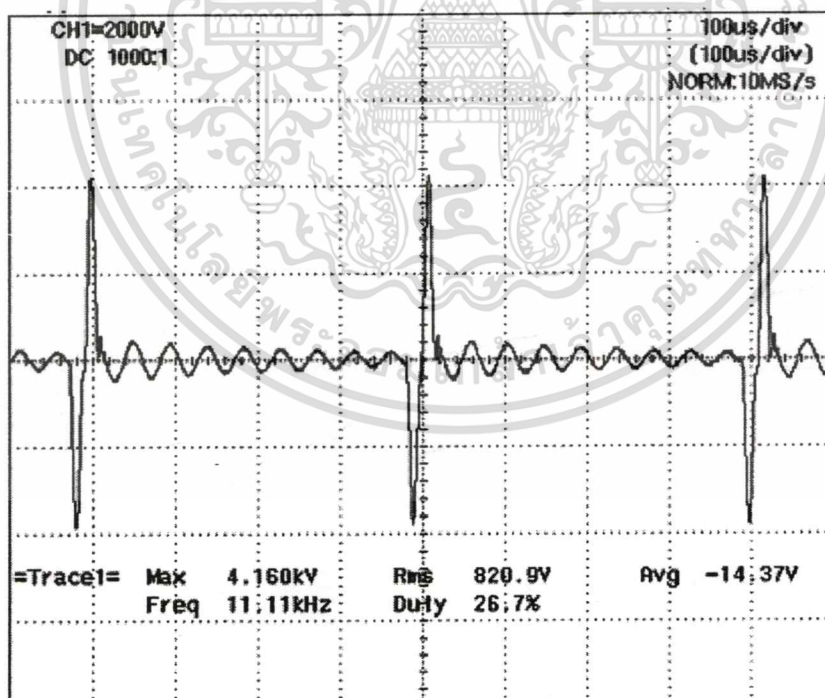


รูปที่ 4.5 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 1 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

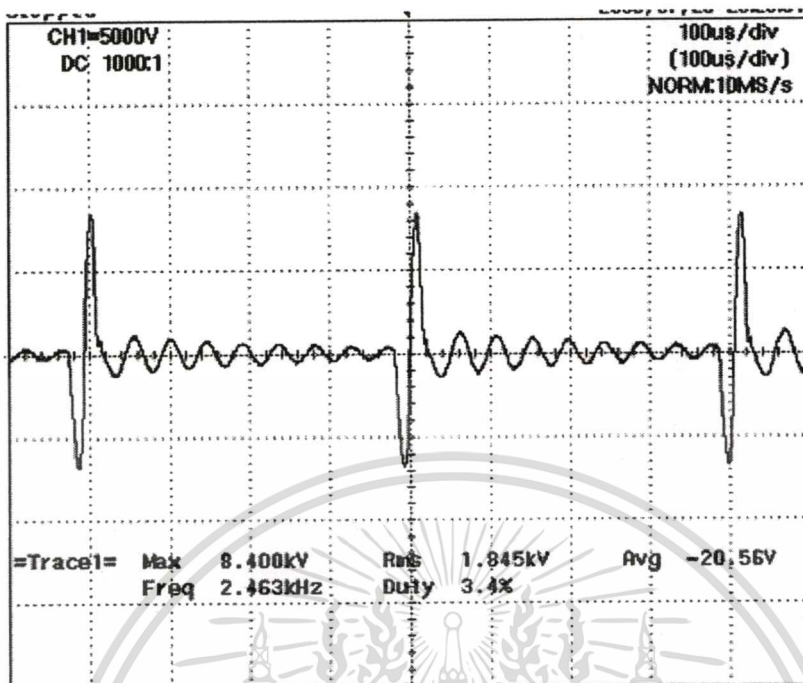


รูปที่ 4.6 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 1 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V

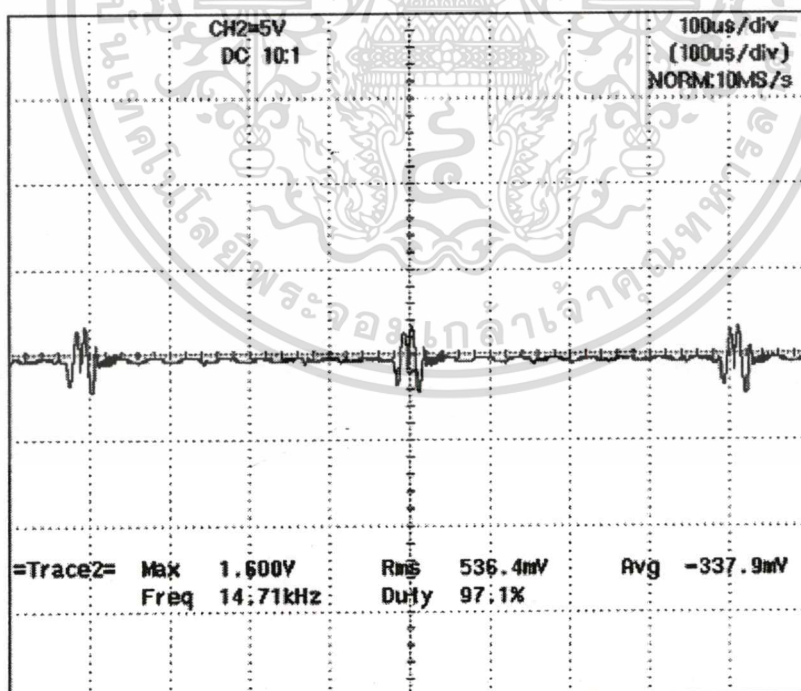


รูปที่ 4.7 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 1 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

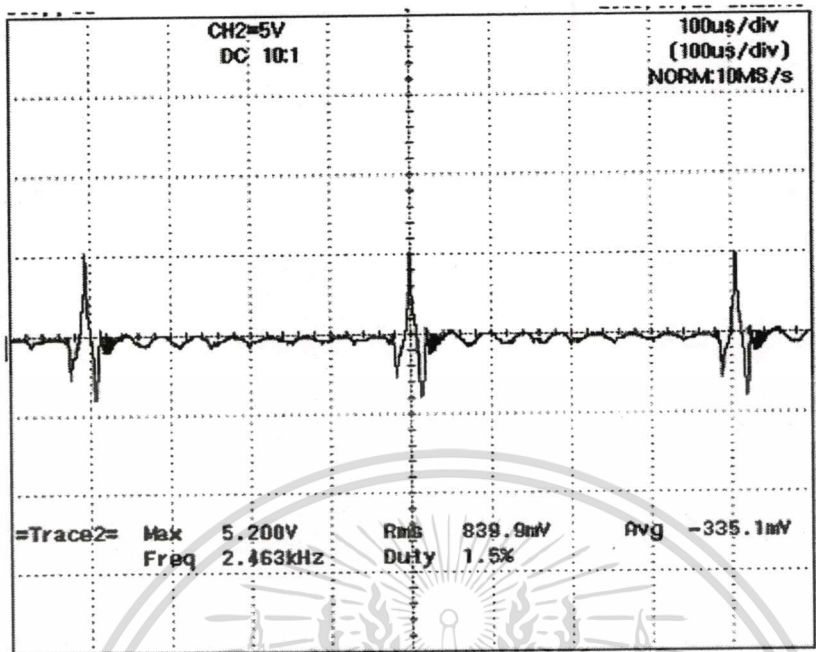


รูปที่ 4.8 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 1 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V



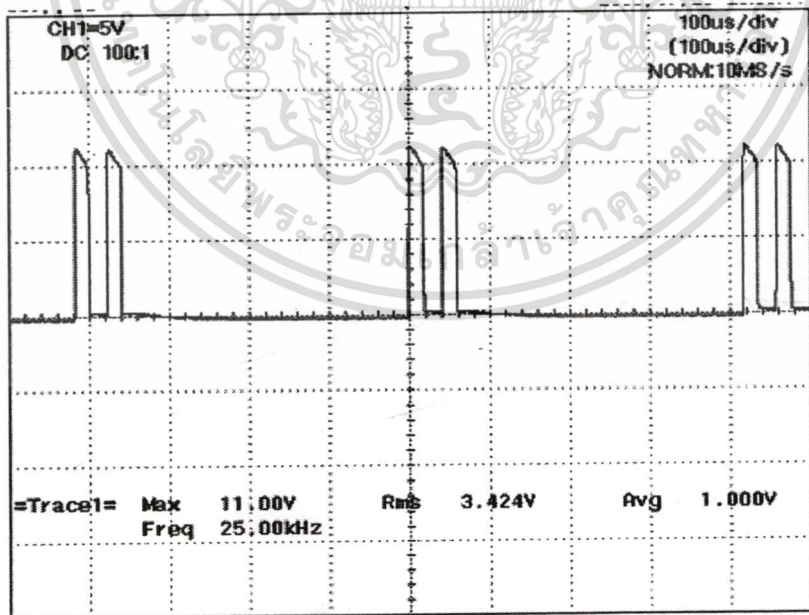
รูปที่ 4.9 กระแสเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 1 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



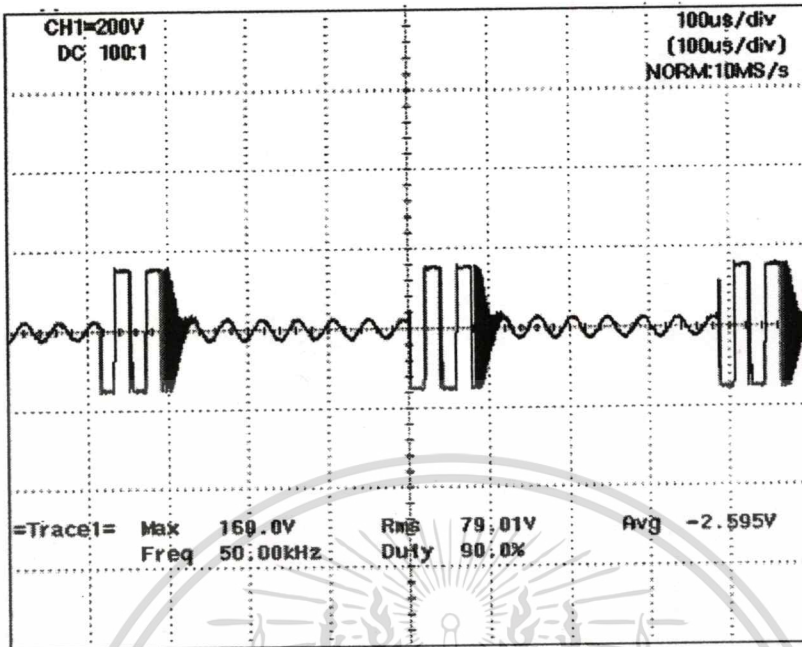
รูปที่ 4.10 กระแสเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 1 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V

- ที่ความหนาแน่นพัลส์ 2 ลูกคลื่น

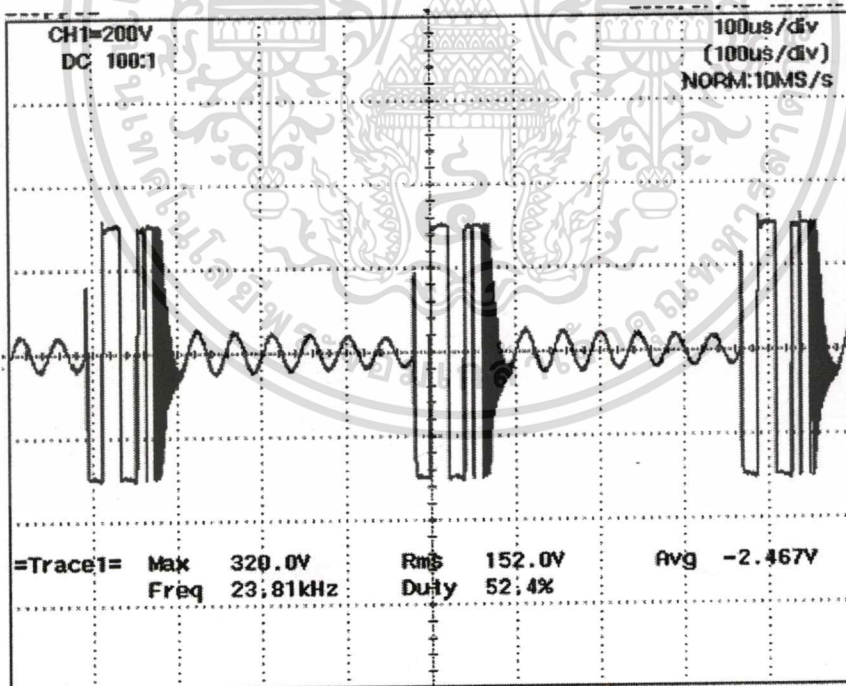


รูปที่ 4.11 สัญญาณ Control ที่ความหนาแน่นพัลส์ 2 ลูกคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

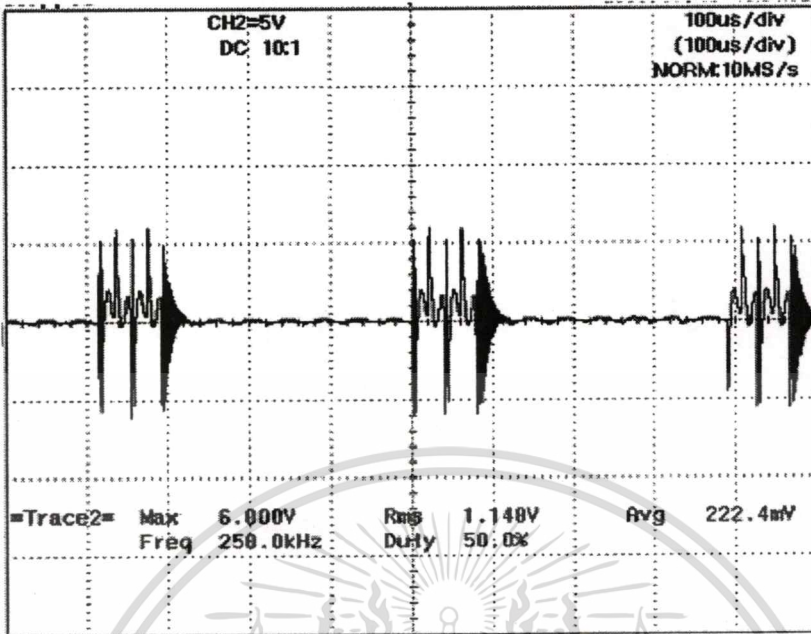


รูปที่ 4.12 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 2 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V

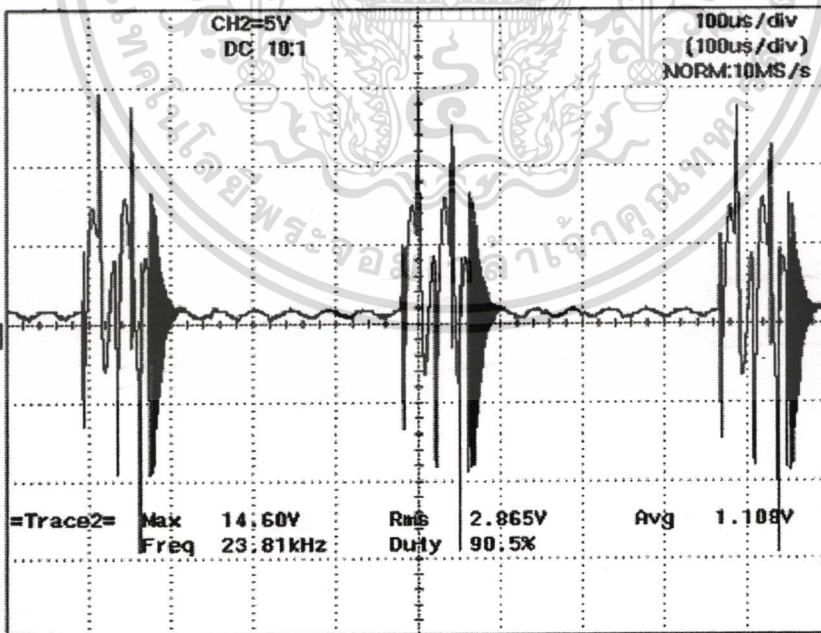


รูปที่ 4.13 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 2 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

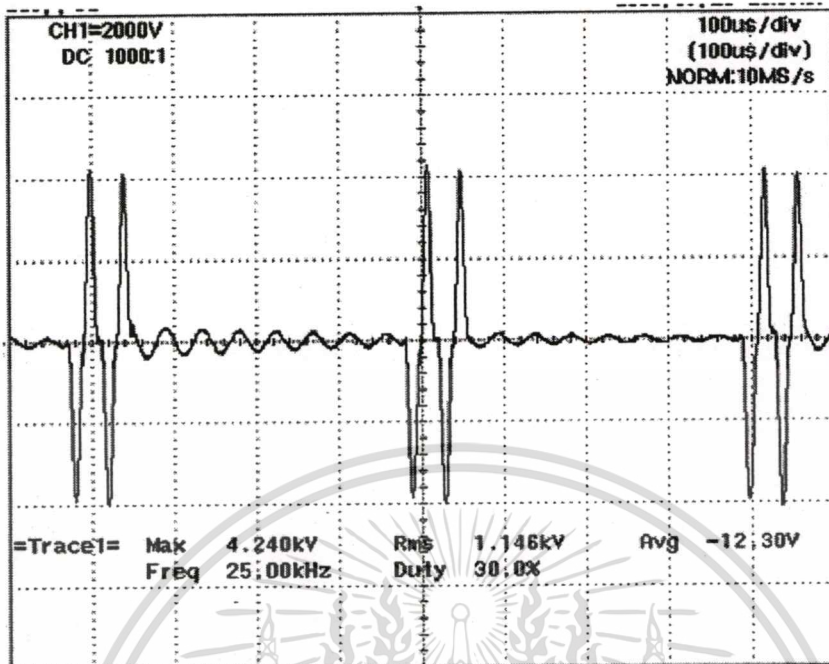


รูปที่ 4.14 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 2 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V

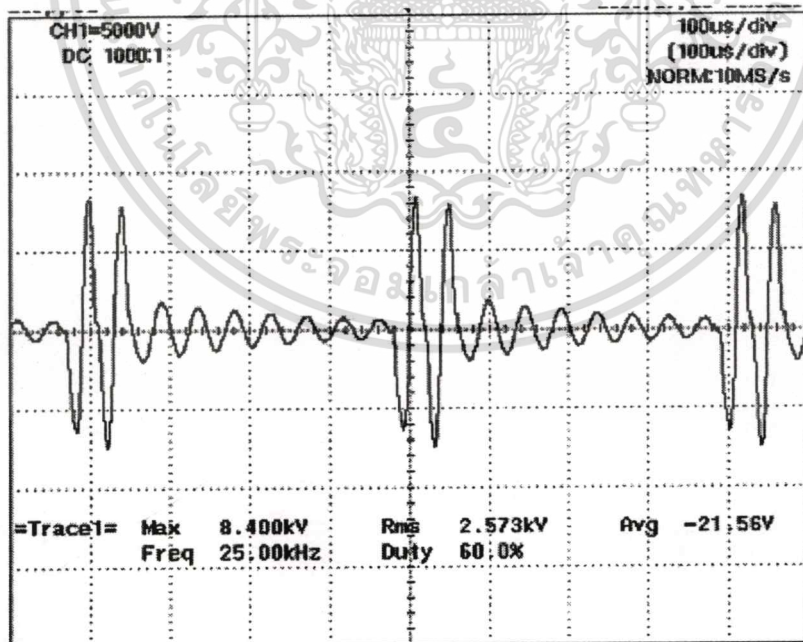


รูปที่ 4.15 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 2 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

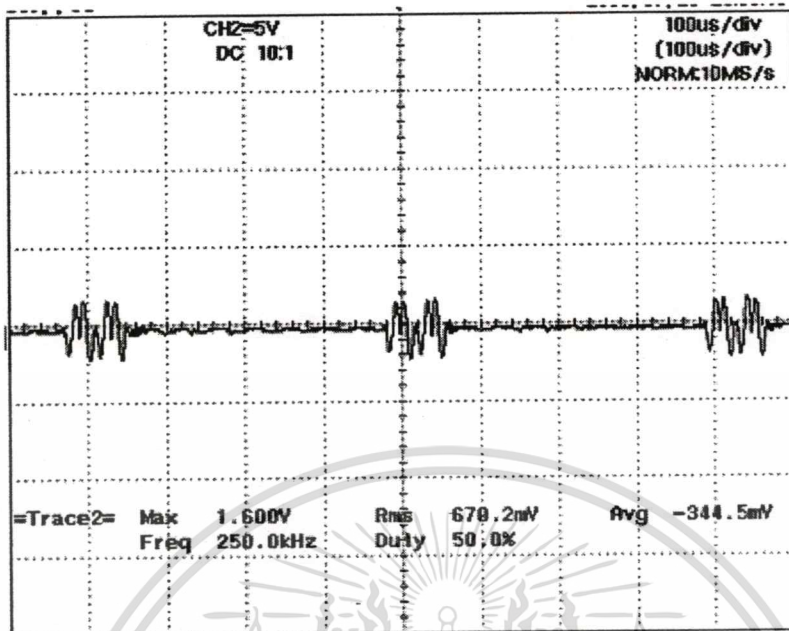


รูปที่ 4.16 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 2 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V

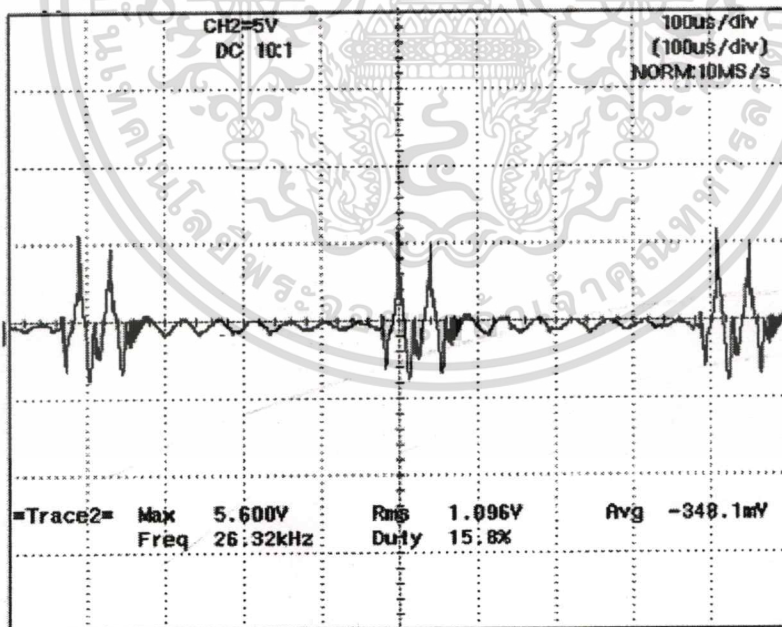


รูปที่ 4.17 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 2 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



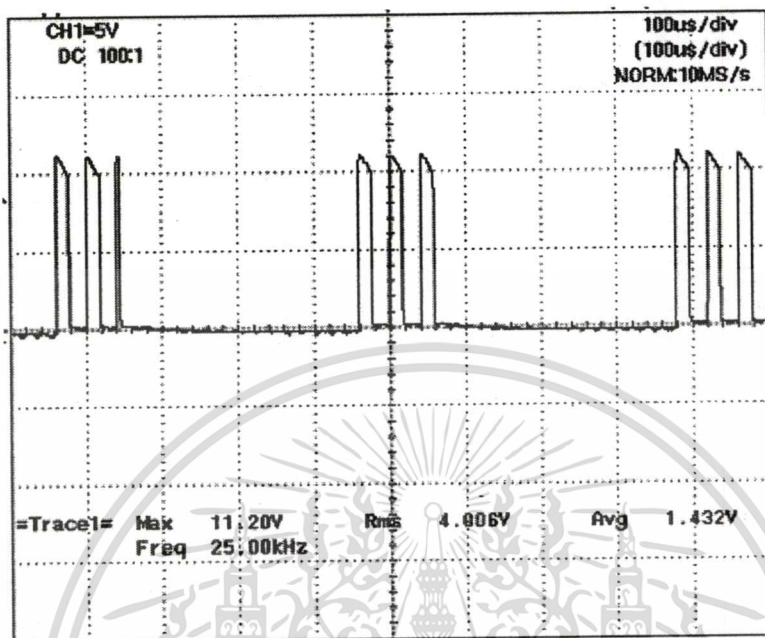
รูปที่ 4.18 กระแสเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพลัง 2 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V



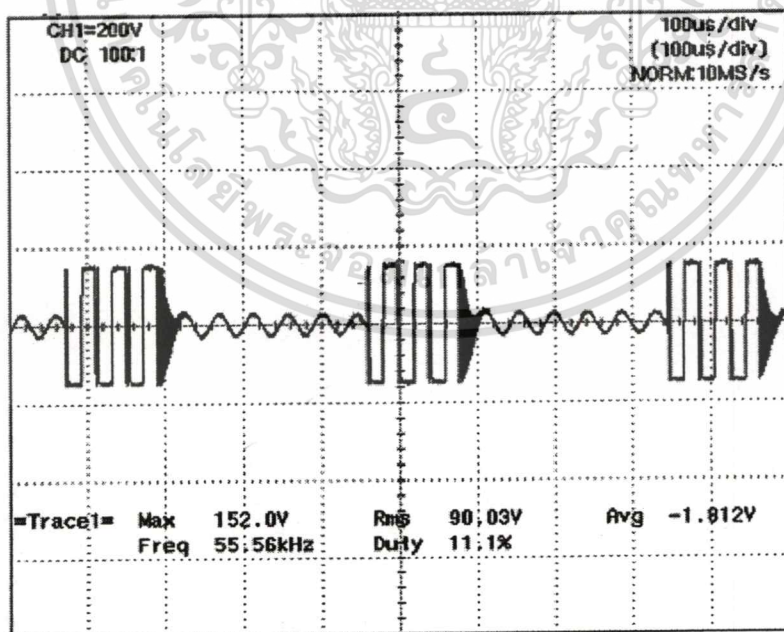
รูปที่ 4.19 กระแสเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพลัง 2 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่ความหนาแน่นพัลส์ 3 ลูกคลื่น

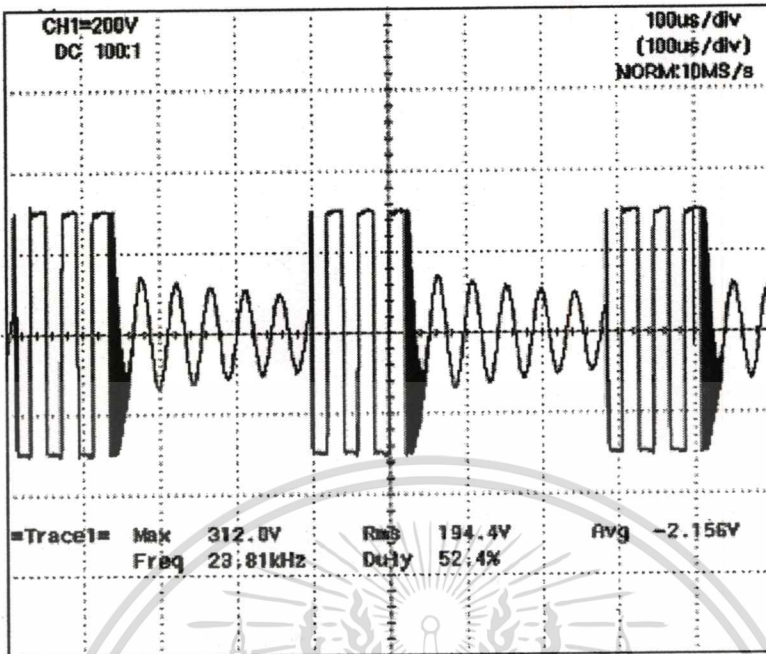


รูปที่ 4.20 สัญญาณ Control ที่ความหนาแน่นพัลส์ 3 ลูกคลื่น

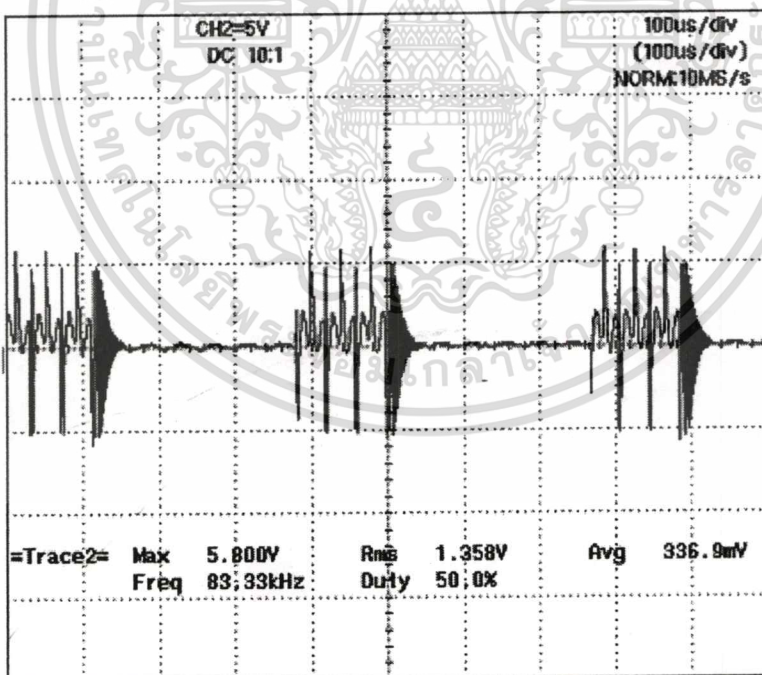


รูปที่ 4.21 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 3 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

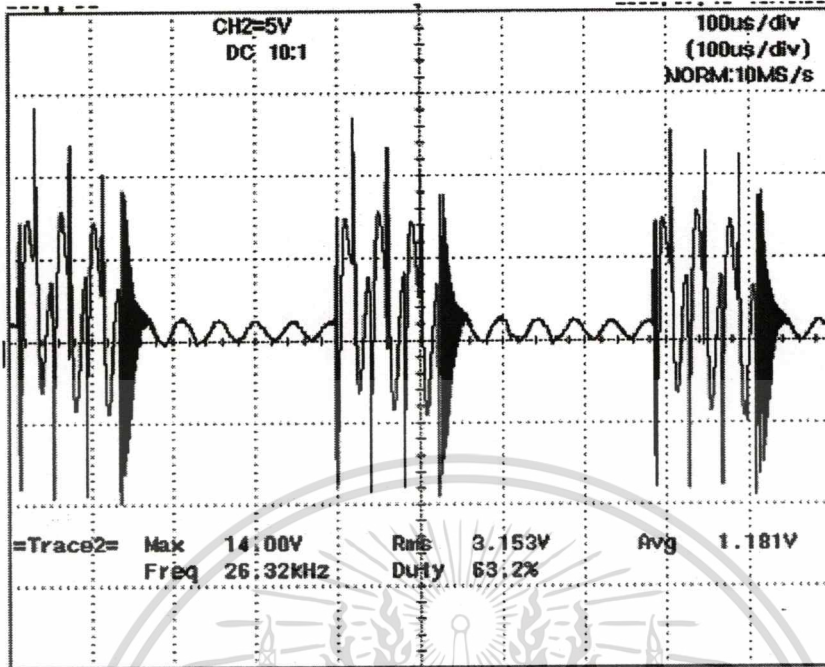


รูปที่ 4.22 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 3 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 220 V

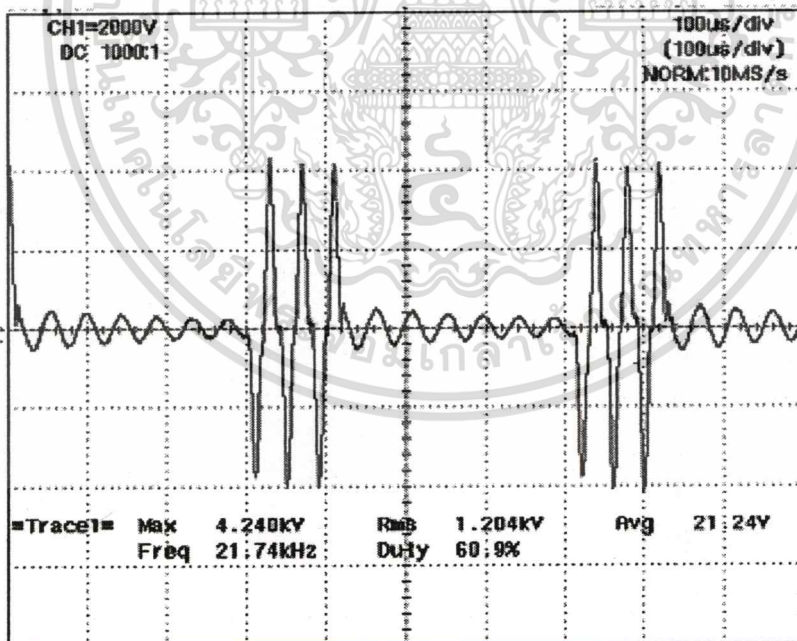


รูปที่ 4.23 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 3 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 110 V

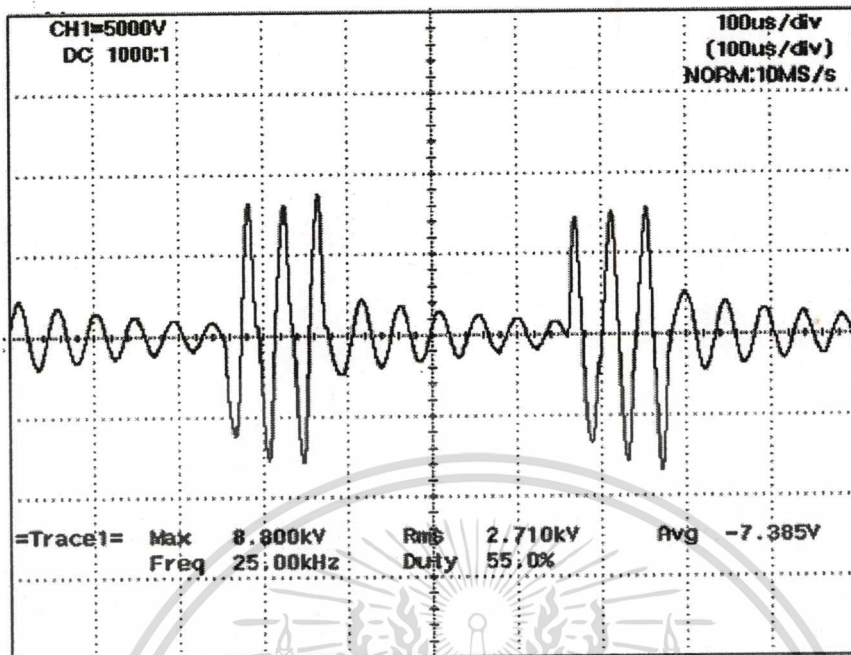
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



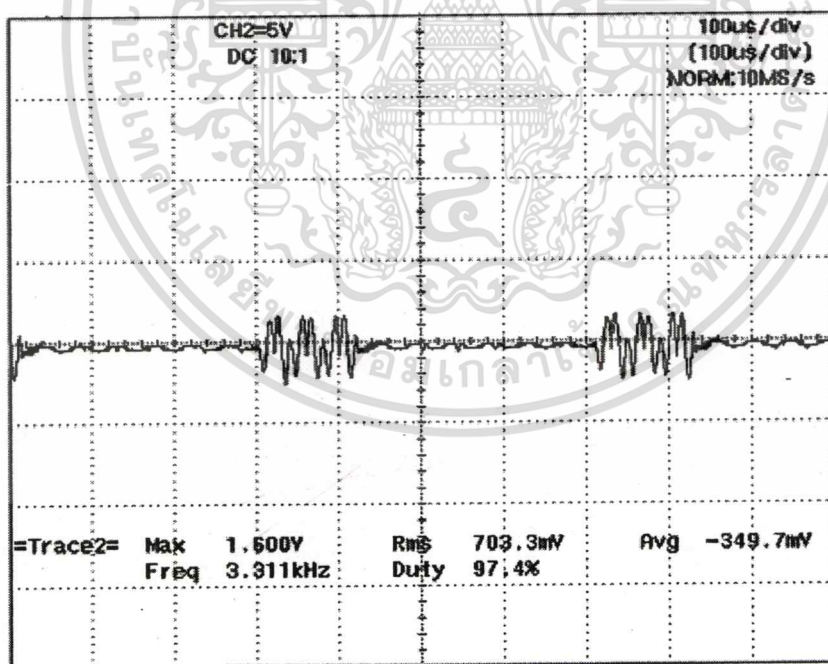
รูปที่ 4.24 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 3 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V



รูปที่ 4.25 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 3 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V

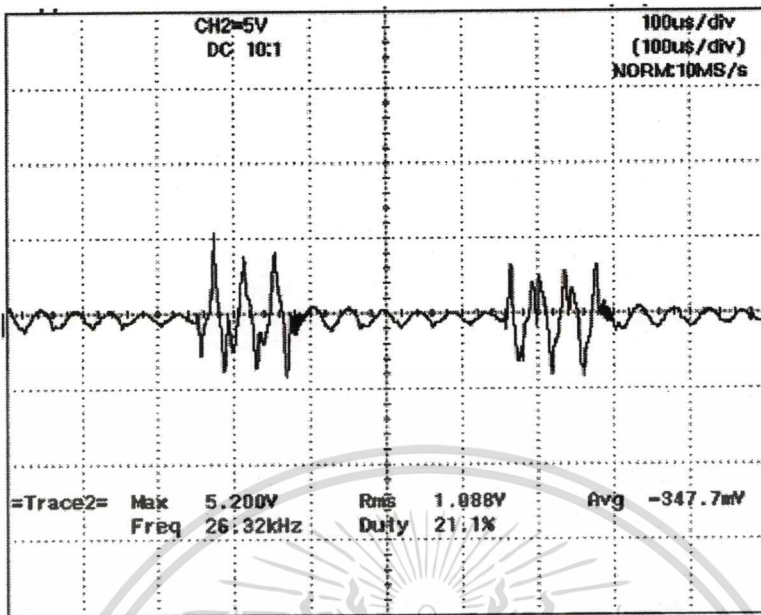


รูปที่ 4.26 แรงดันเอาต์พุตที่ความหนาแน่นพัลส์ 3 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V



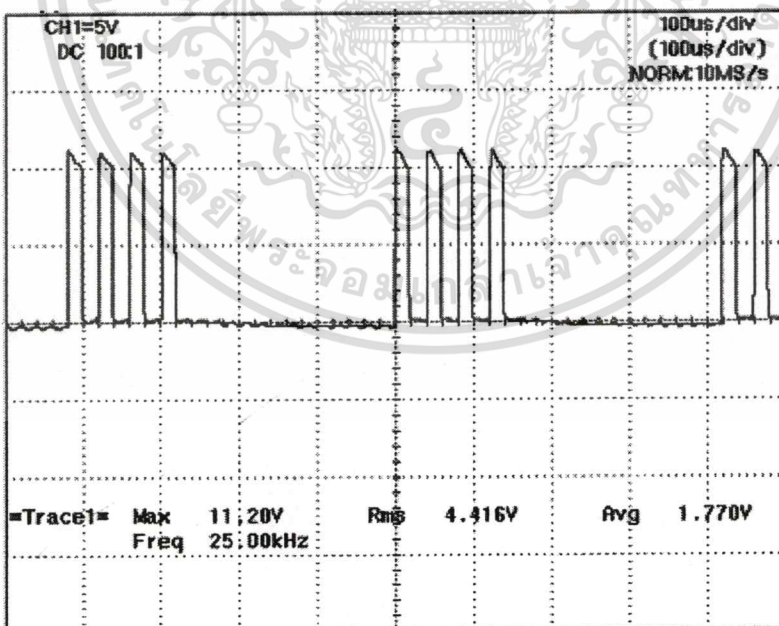
รูปที่ 4.27 กระแสเอาต์พุตที่ความหนาแน่นพัลส์ 3 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



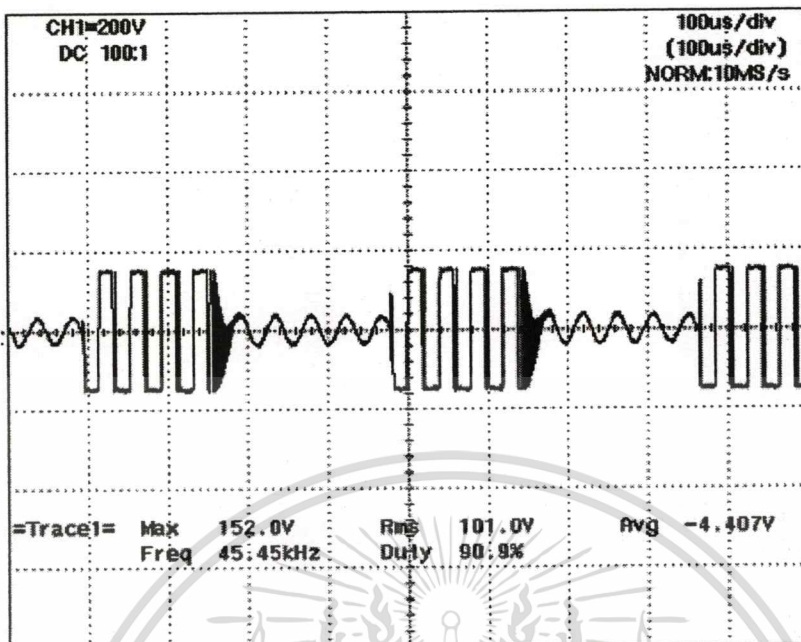
รูปที่ 4.28 กระแสเอาต์พุตที่ความหนาแน่นพัลส์ 3 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V

- ที่ความหนาแน่นพัลส์ 4 ลูกคลื่น

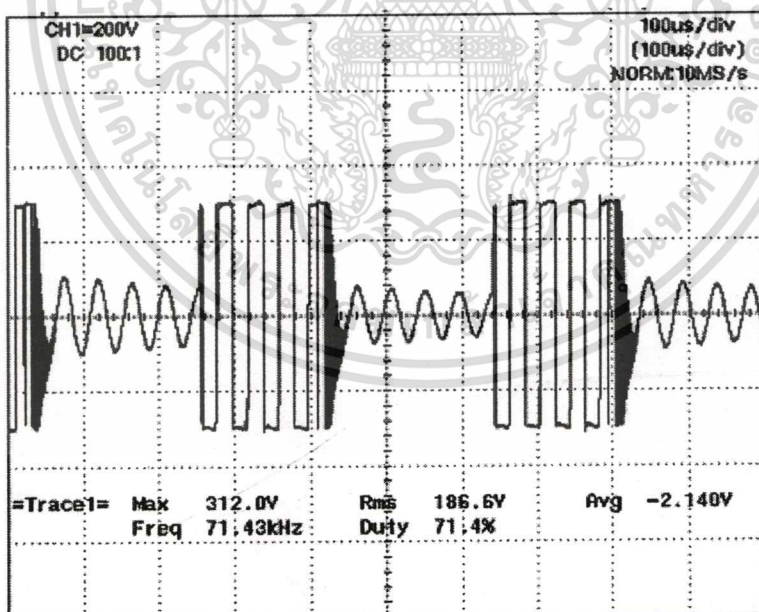


รูปที่ 4.29 สัญญาณ Control ที่ความหนาแน่นพัลส์ 4 ลูกคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

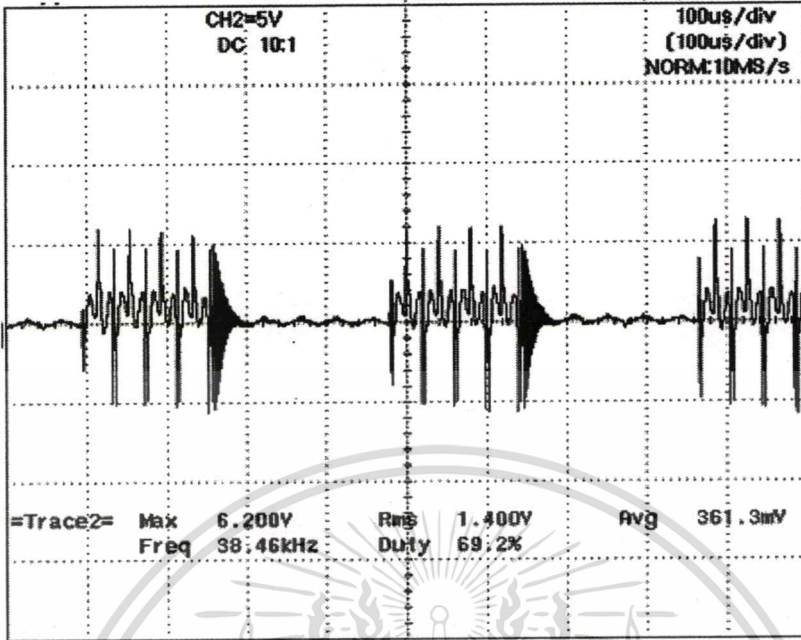


รูปที่ 4.30 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 4 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V

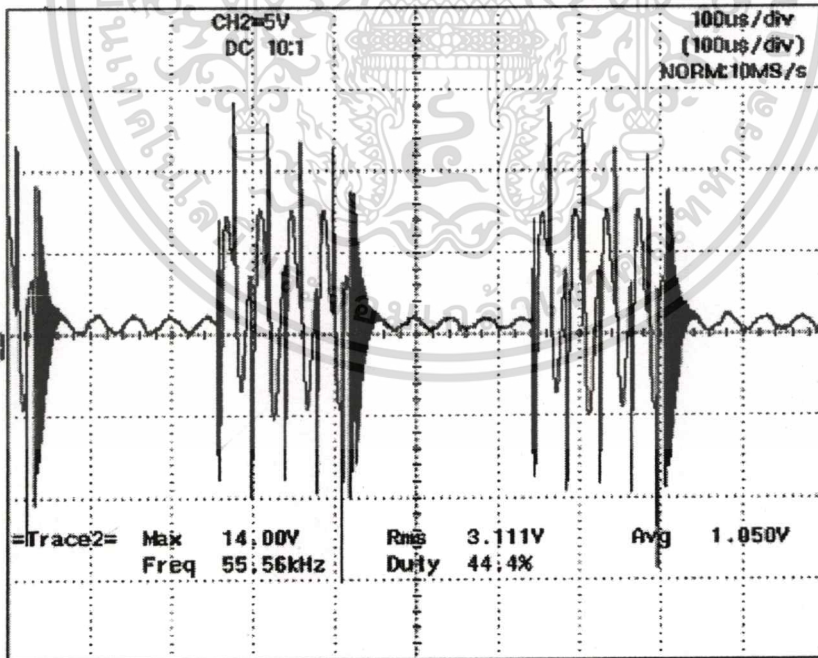


รูปที่ 4.31 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 4 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

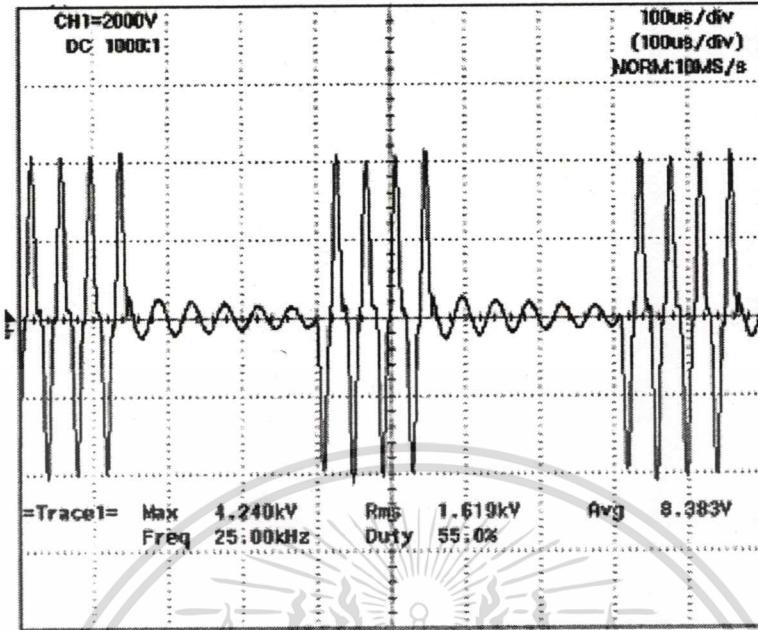


รูปที่ 4.32 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 4 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V

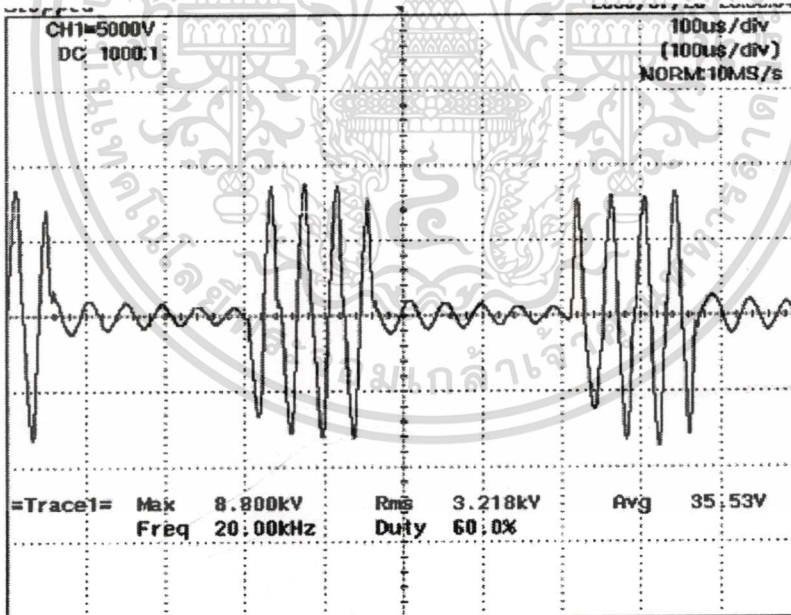


รูปที่ 4.33 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 4 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V

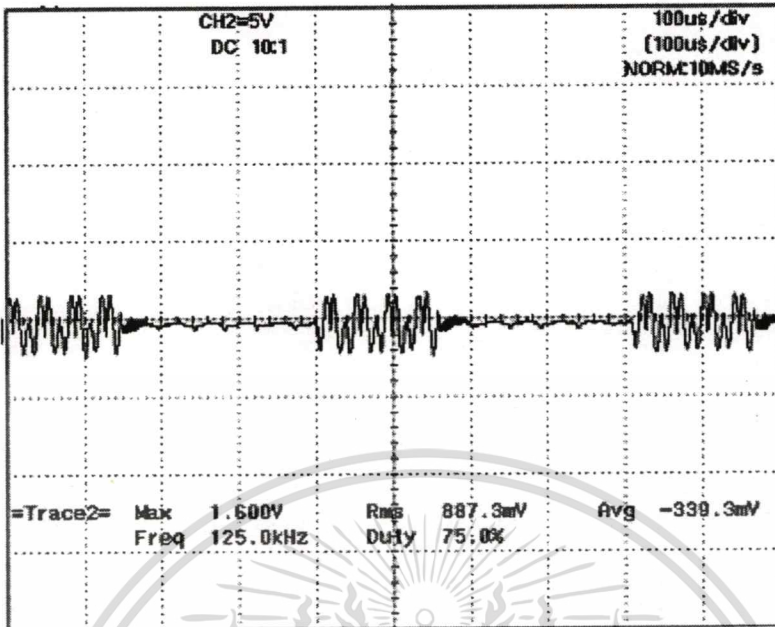
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



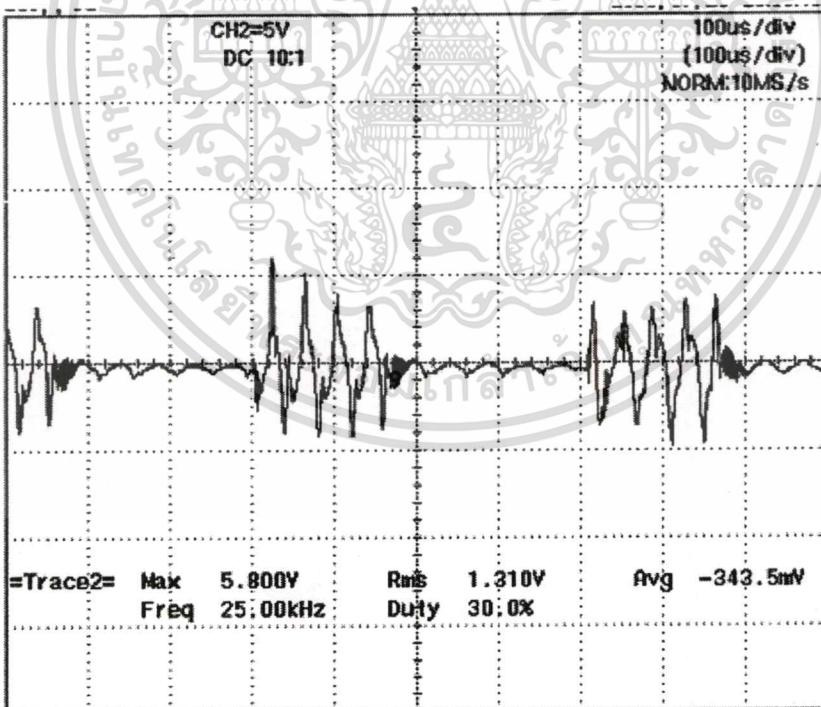
รูปที่ 4.34 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 4 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V



รูปที่ 4.35 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 4 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V



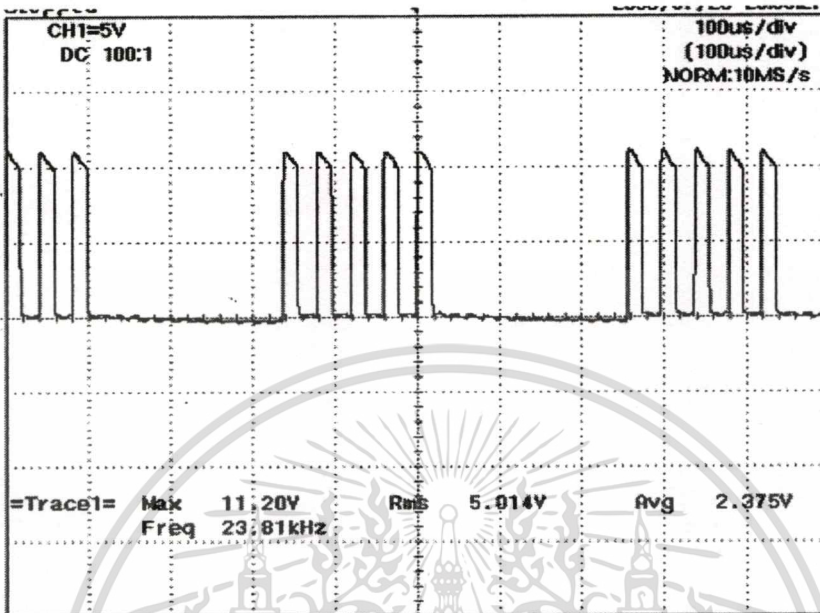
รูปที่ 4.36 กระแสอาทิตย์พืทหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 4 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 110 V



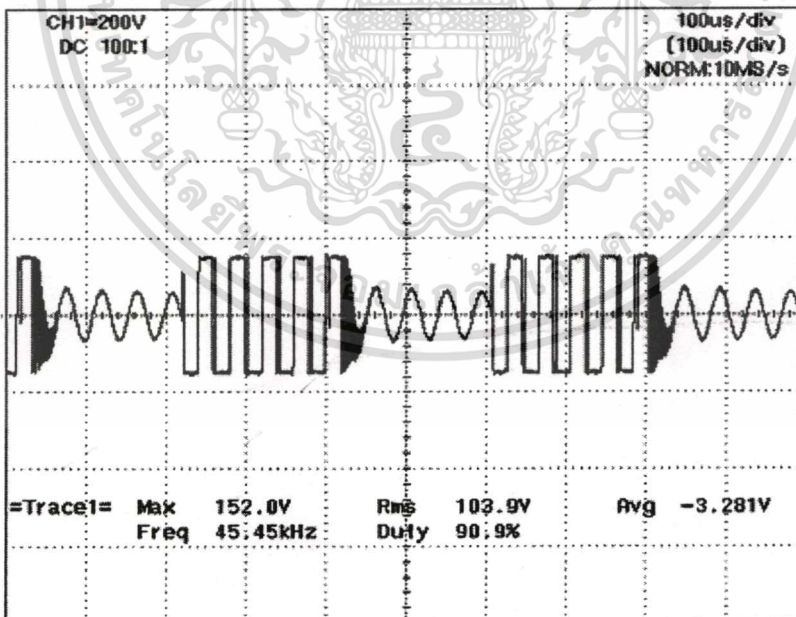
รูปที่ 4.37 กระแสอาทิตย์พืทหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 4 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 220 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่ความหนาแน่นพัลส์ 5 ลูกคลื่น

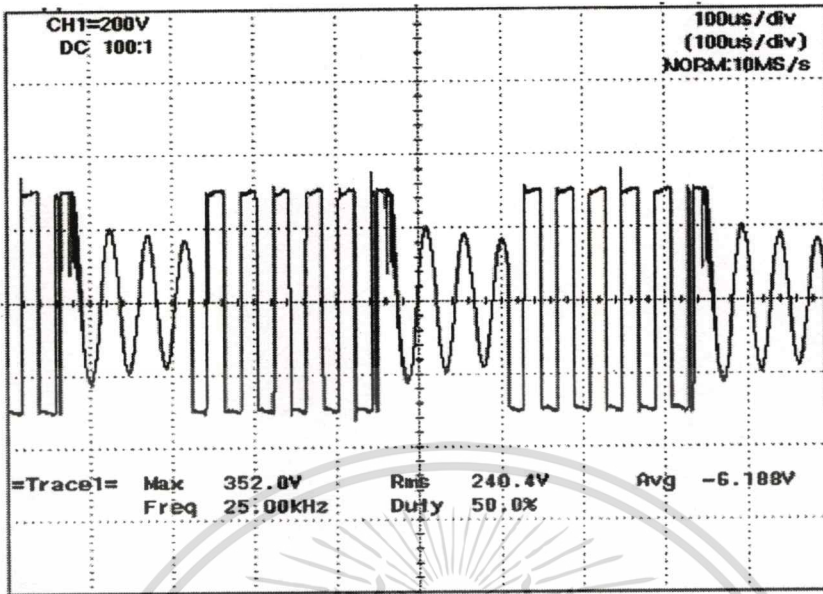


รูปที่ 4.38 สัญญาณ Control ที่ความหนาแน่นพัลส์ 5 ลูกคลื่น

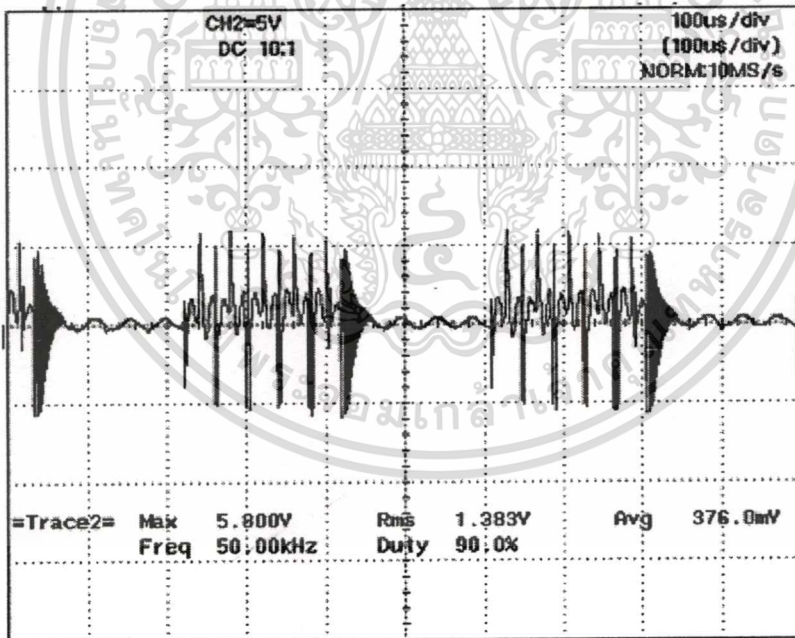


รูปที่ 4.39 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 5 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

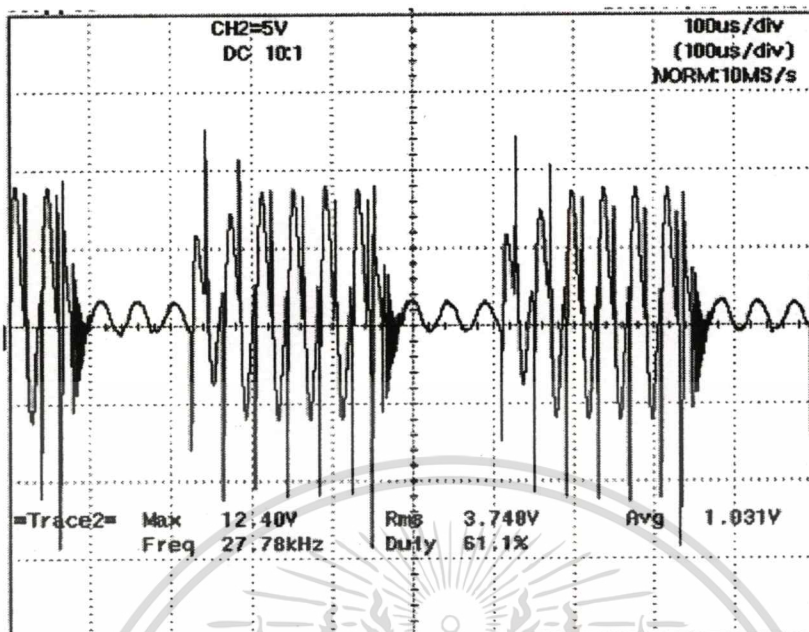


รูปที่ 4.40 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 5 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V

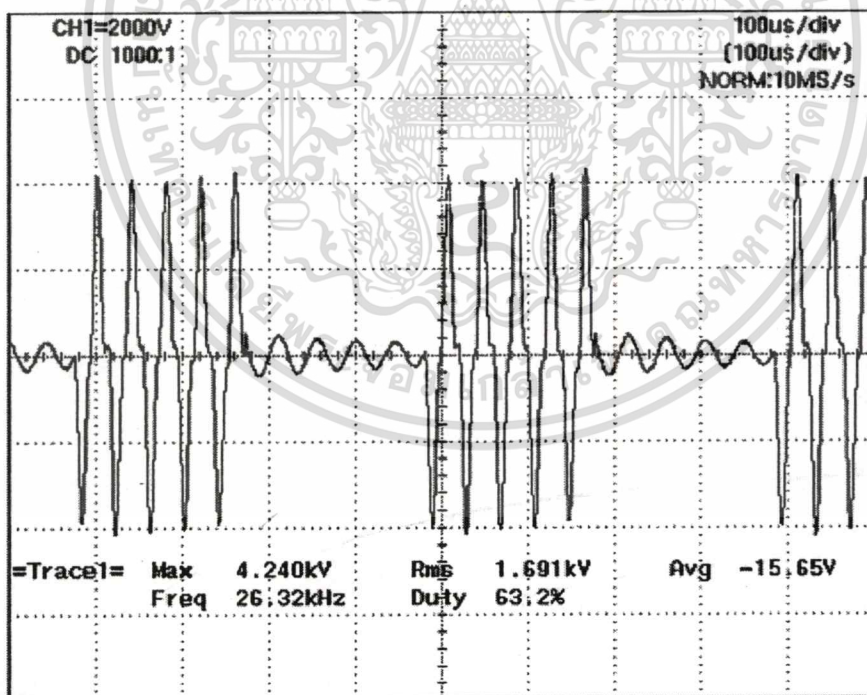


รูปที่ 4.41 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 5 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

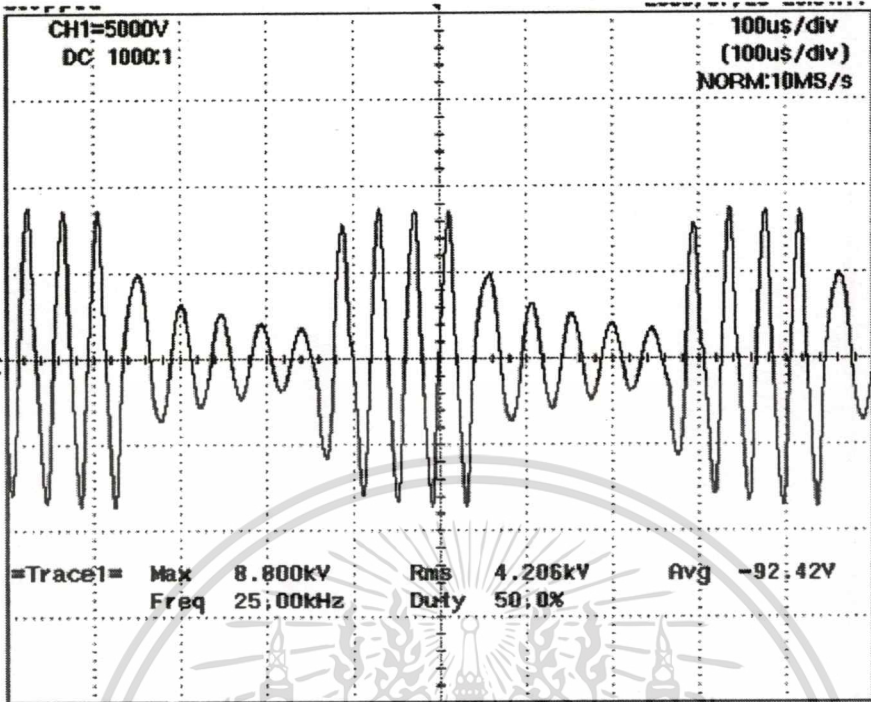


รูปที่ 4.42 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 5 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V

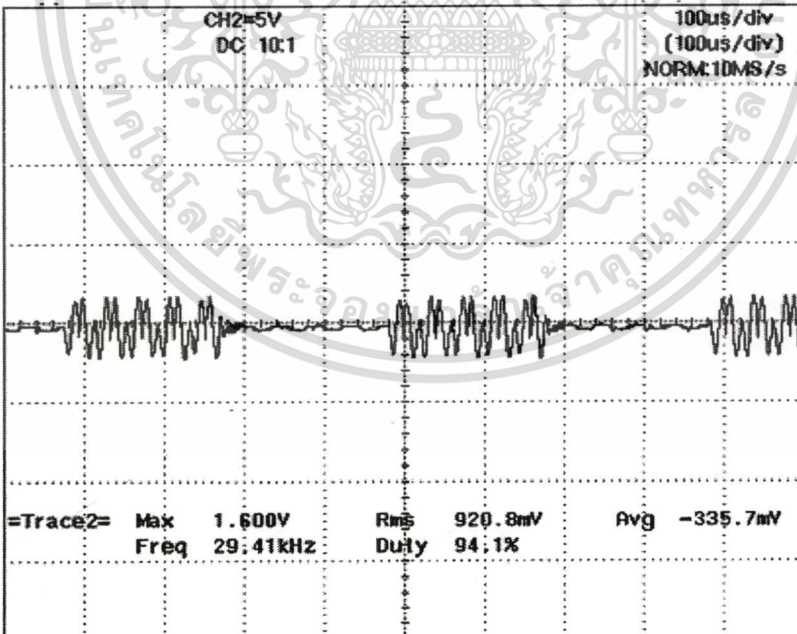


รูปที่ 4.43 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 5 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

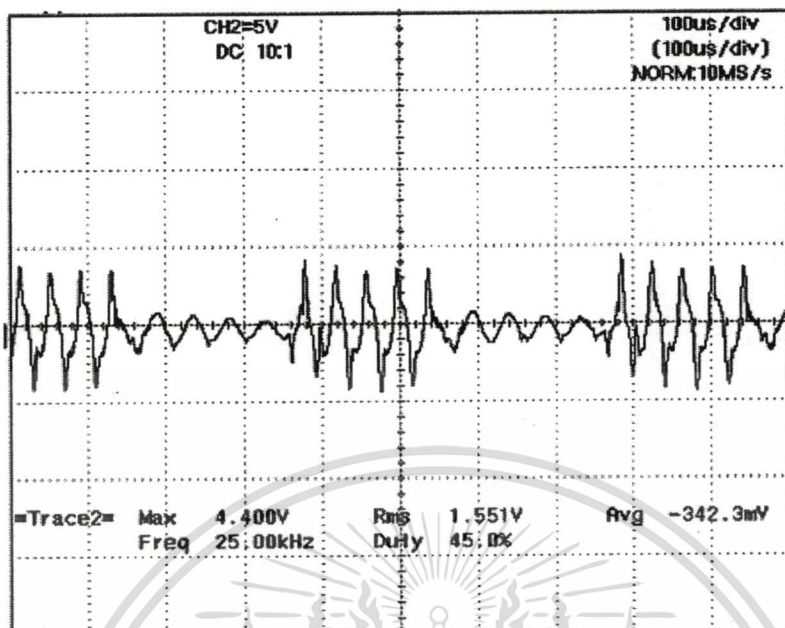


รูปที่ 4.44 แรงดันเอาต์พุตที่เปลี่ยนแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 5 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V



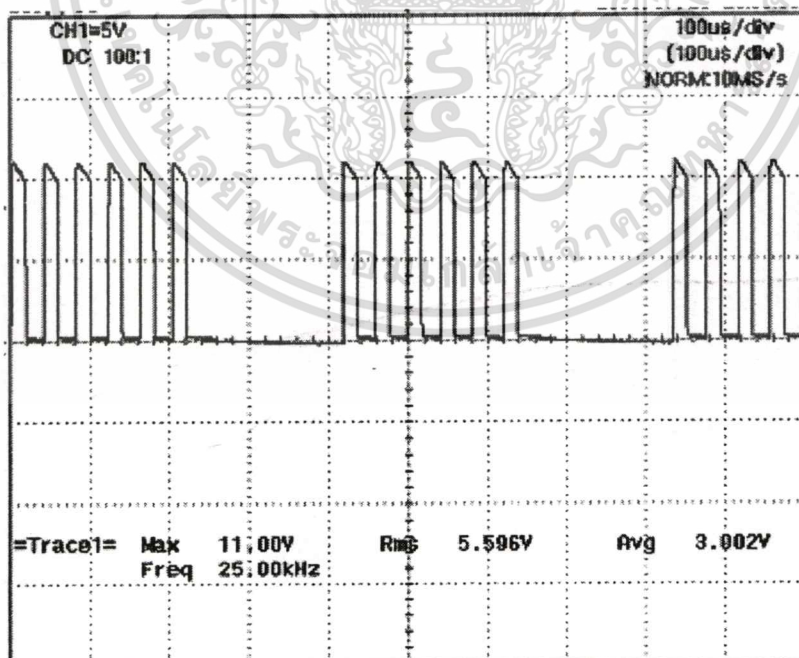
รูปที่ 4.45 กระแสเอาต์พุตที่เปลี่ยนแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 5 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



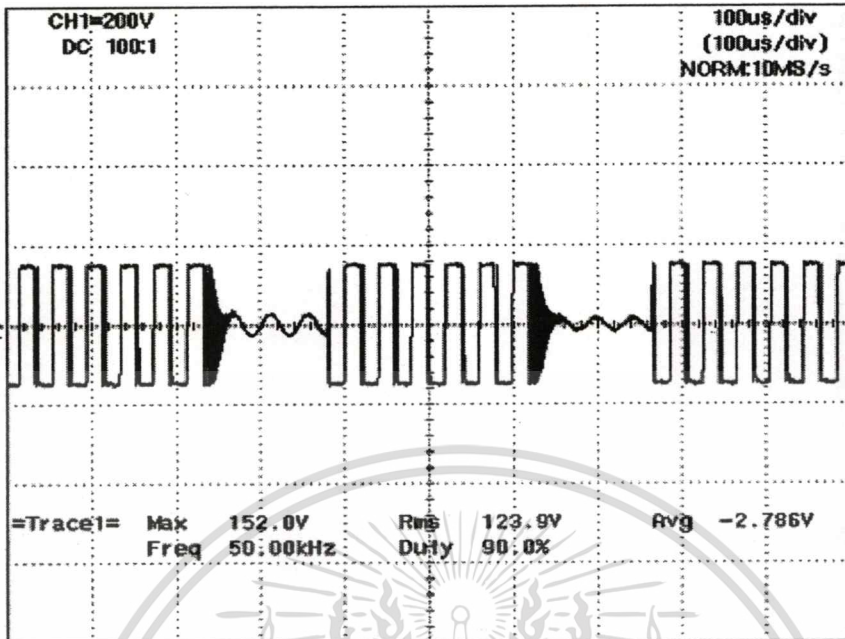
รูปที่ 4.46 กระแสเอาต์พุตที่ความหนาแน่นพัลส์ 5 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V

- ที่ความหนาแน่นพัลส์ 6 ลูกคลื่น

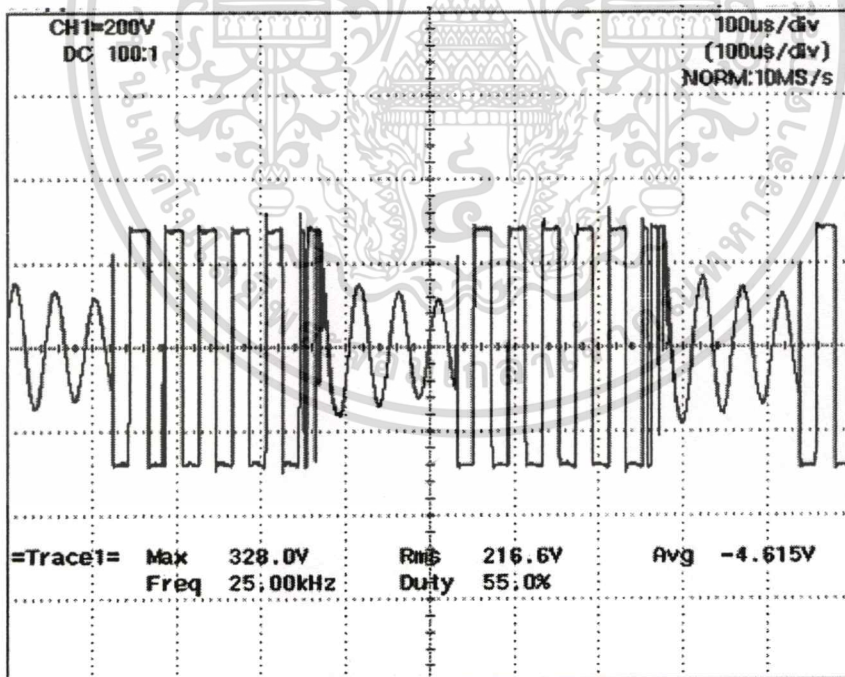


รูปที่ 4.47 สัญญาณ Control ที่ความหนาแน่นพัลส์ 6 ลูกคลื่น

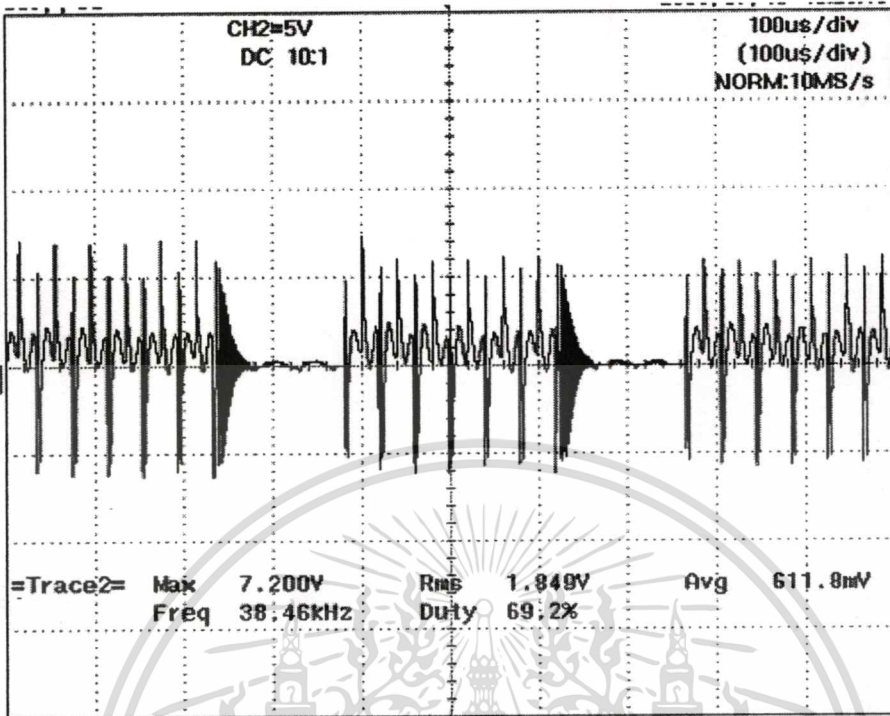
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



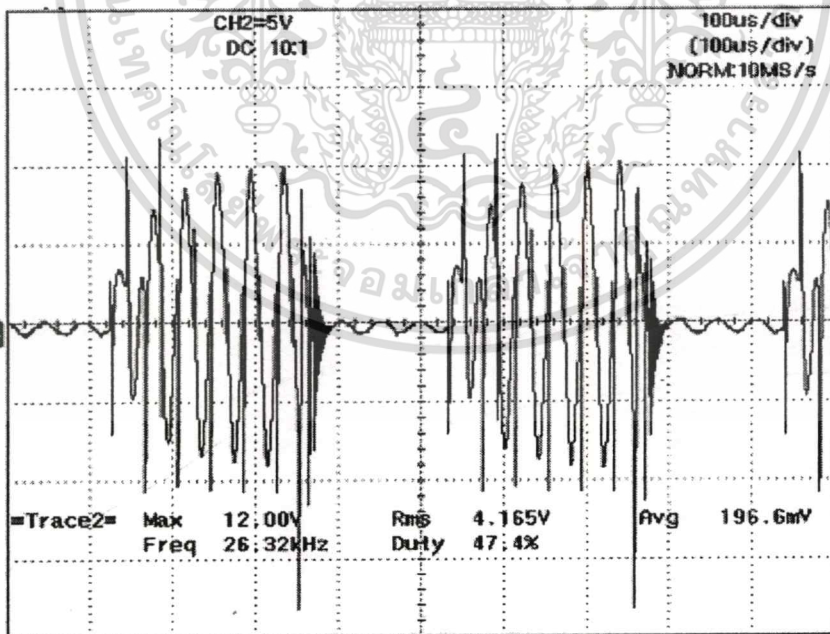
รูปที่ 4.48 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 6 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V



รูปที่ 4.49 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 6 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V

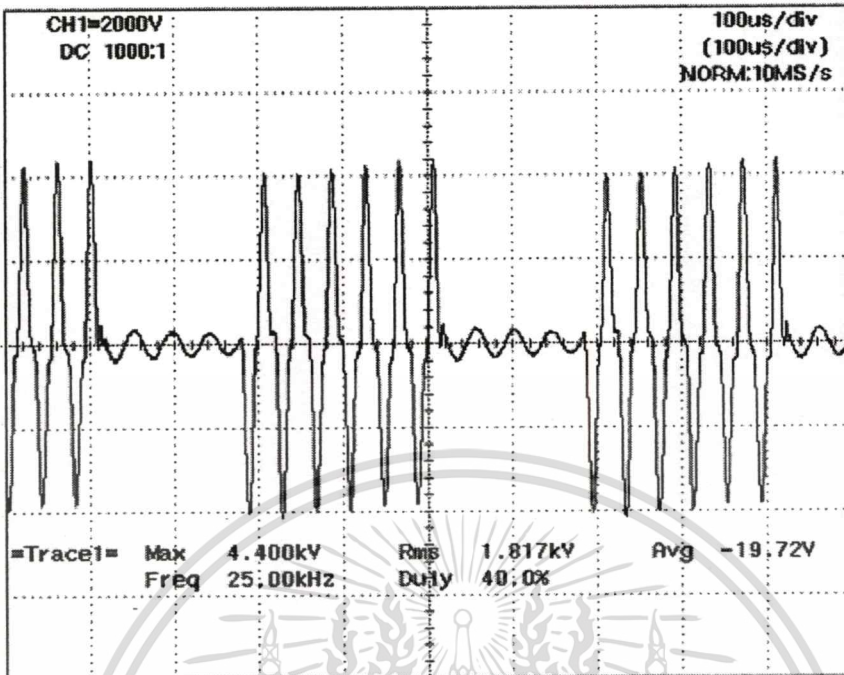


รูปที่ 4.50 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 6 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V

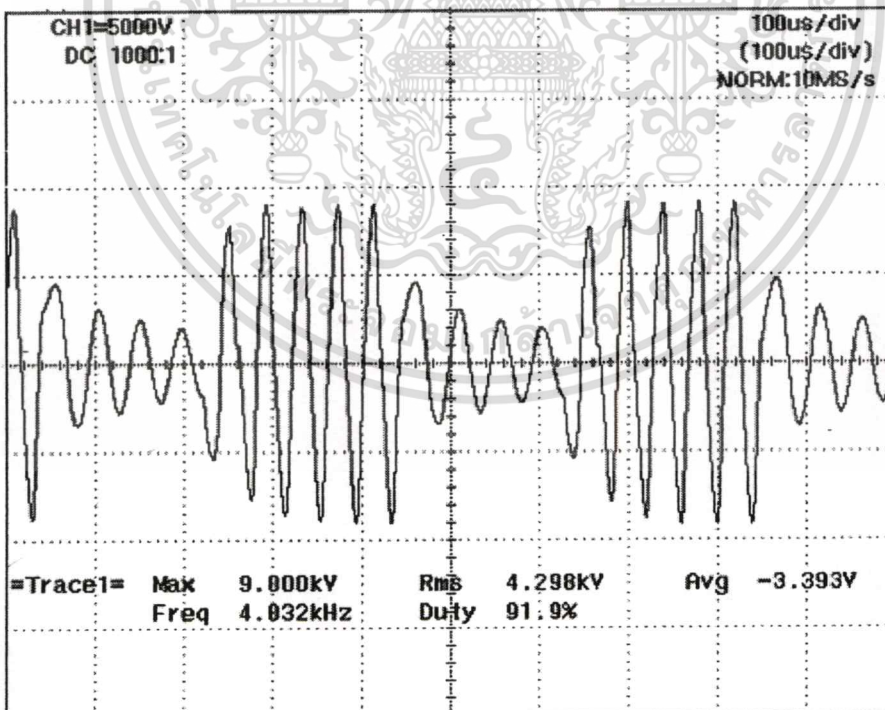


รูปที่ 4.51 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 6 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

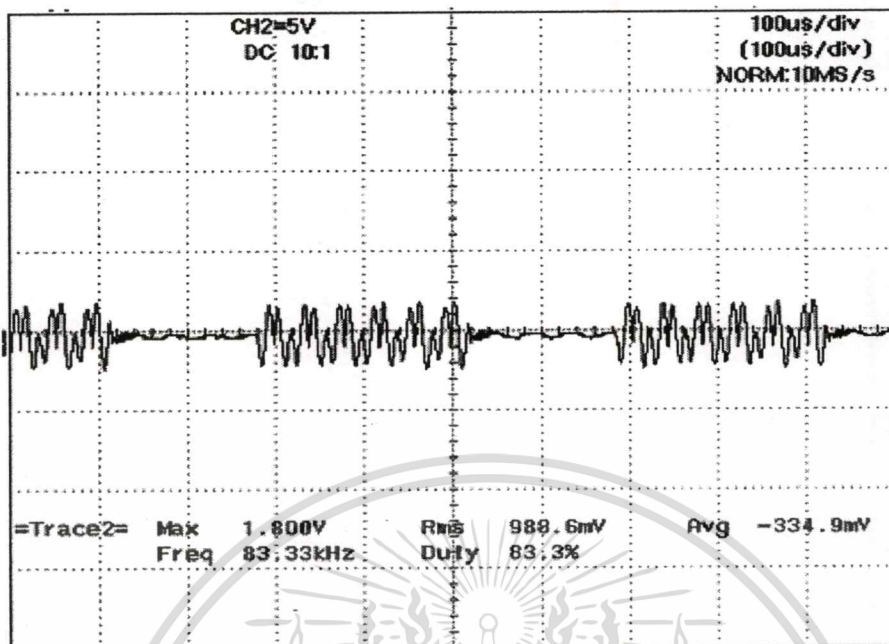


รูปที่ 4.52 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 6 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V

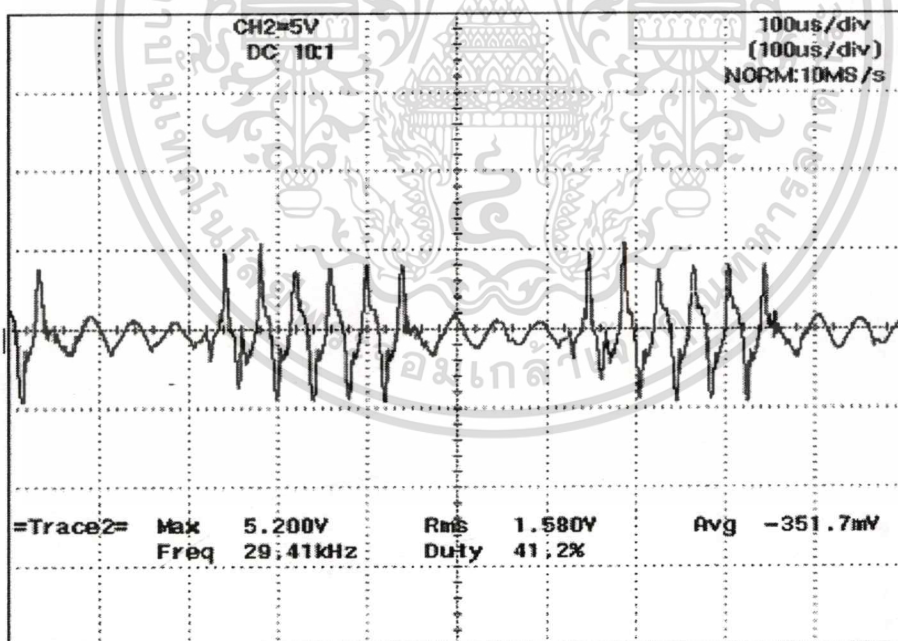


รูปที่ 4.53 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 6 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



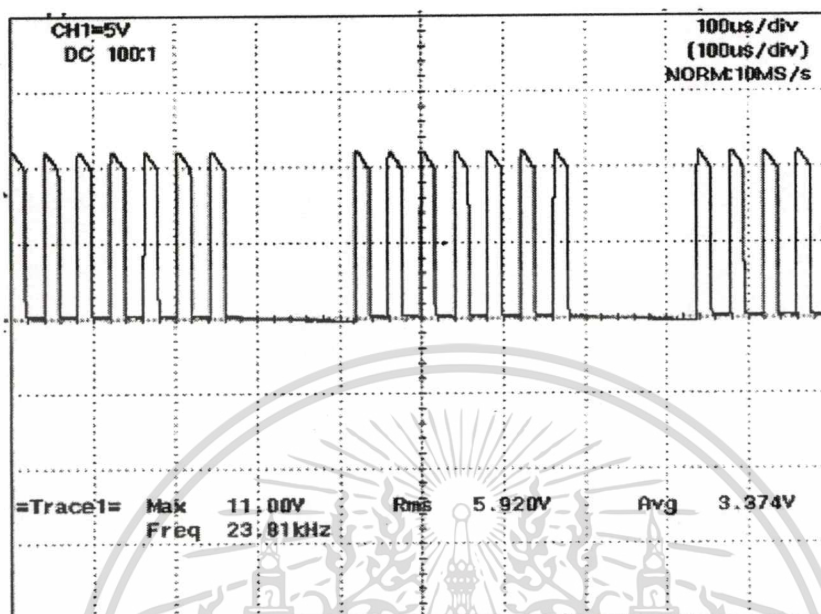
รูปที่ 4.54 กระแสเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 6 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V



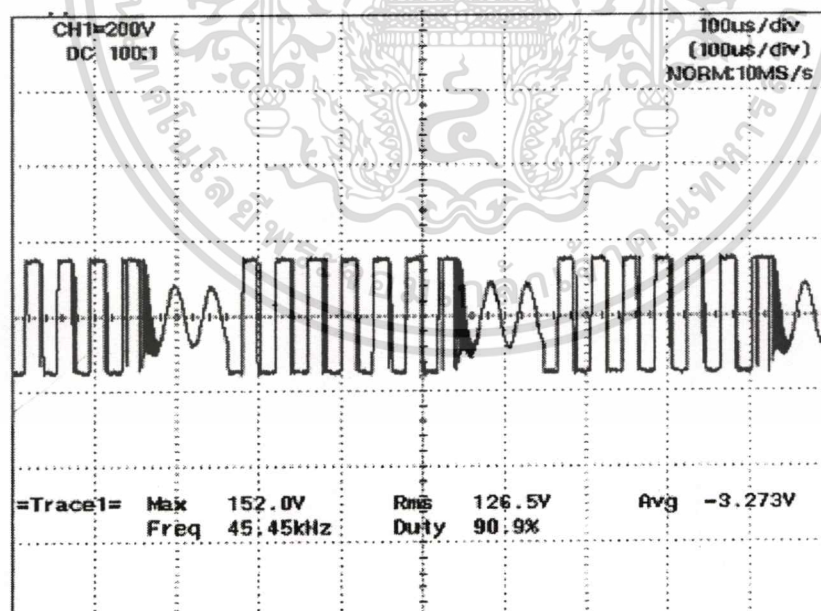
รูปที่ 4.55 กระแสเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 6 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่ความหนาแน่นพัลส์ 7 ลูกคลื่น

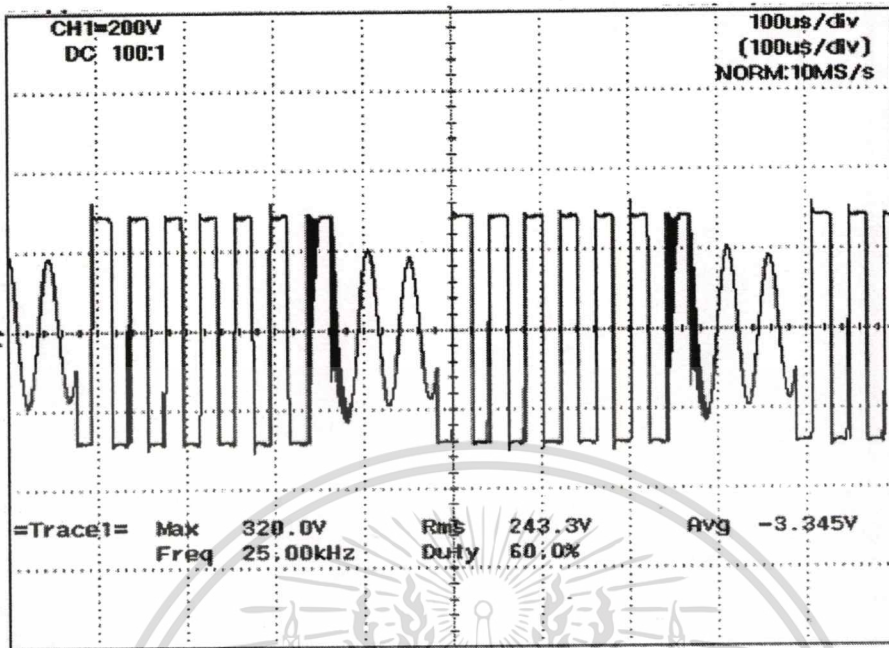


รูปที่ 4.56 สัญญาณ Control ที่ความหนาแน่นพัลส์ 7 ลูกคลื่น

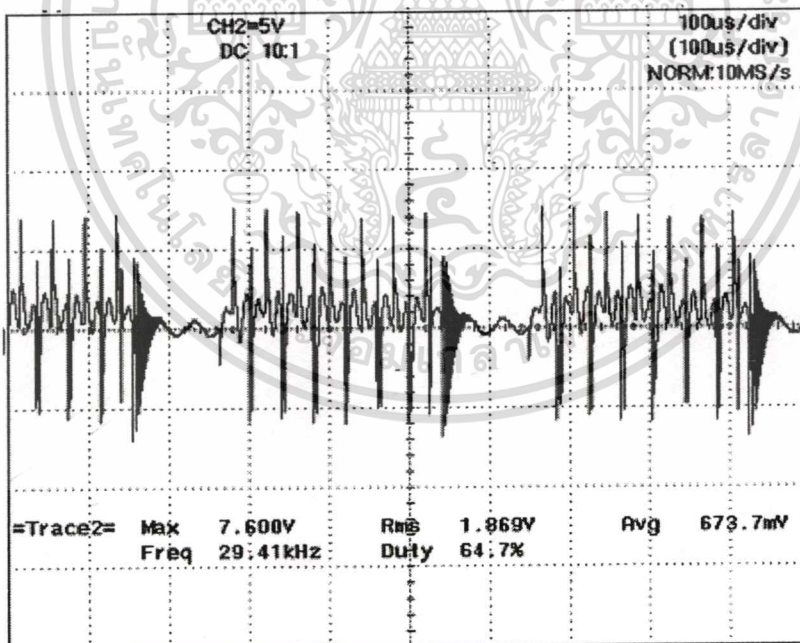


รูปที่ 4.57 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 7 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 110 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

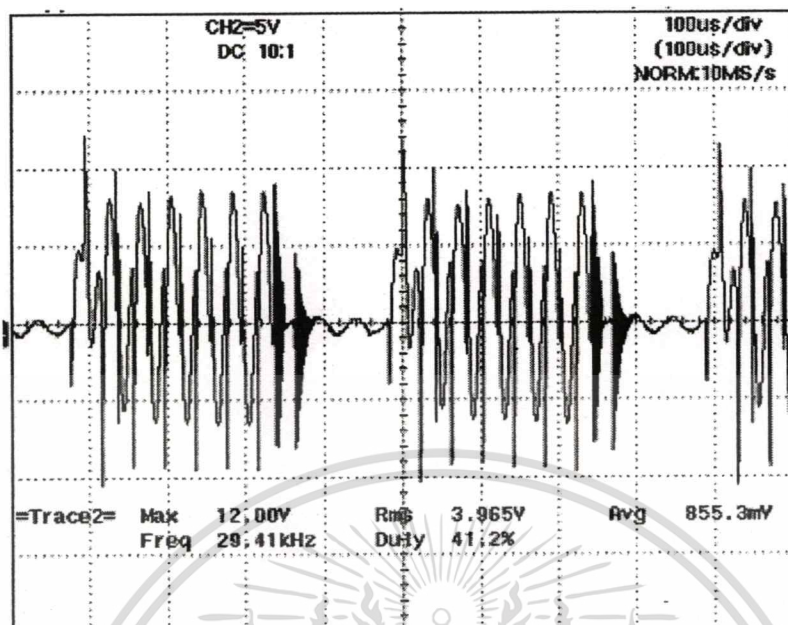


รูปที่ 4.58 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 7 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V

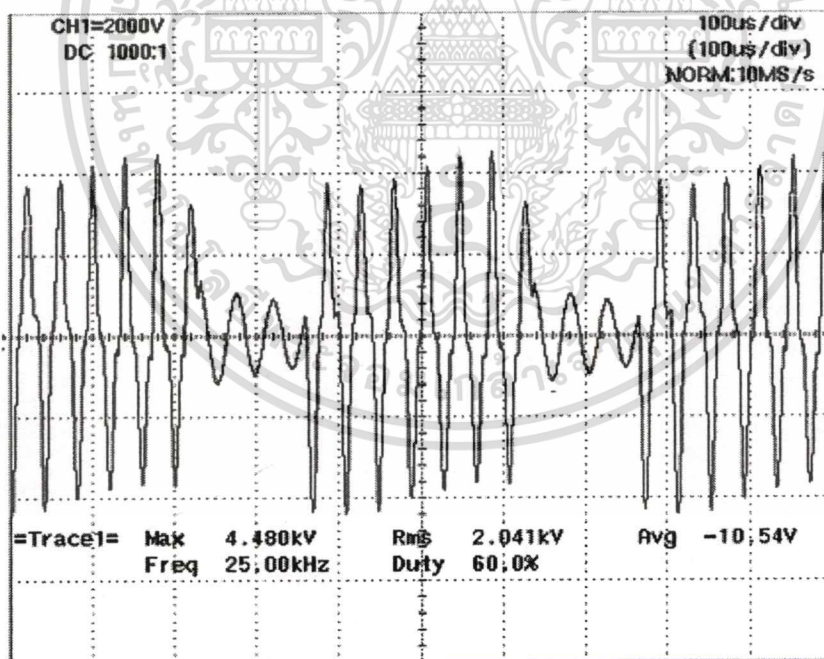


รูปที่ 4.59 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 7 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

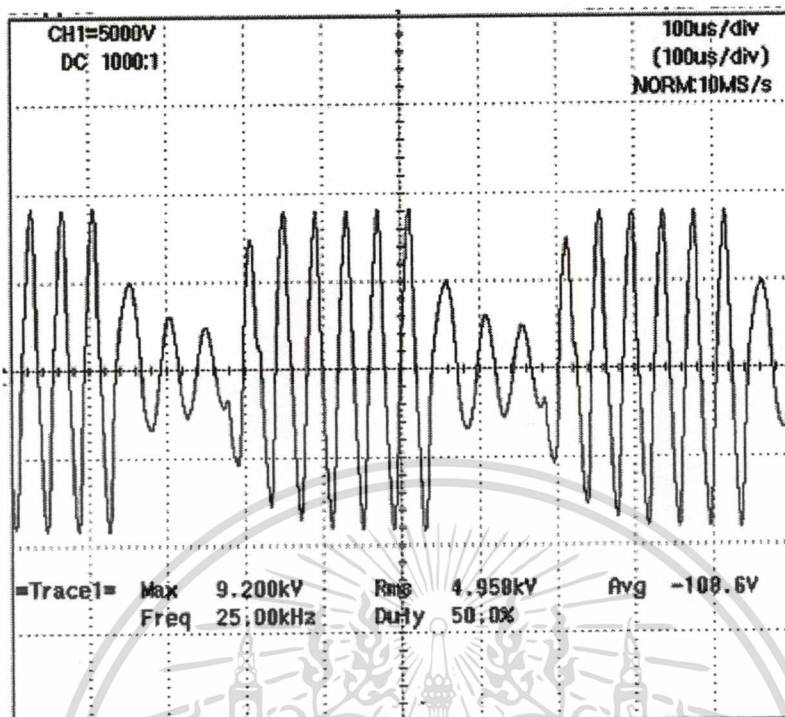


รูปที่ 4.60 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 7 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V

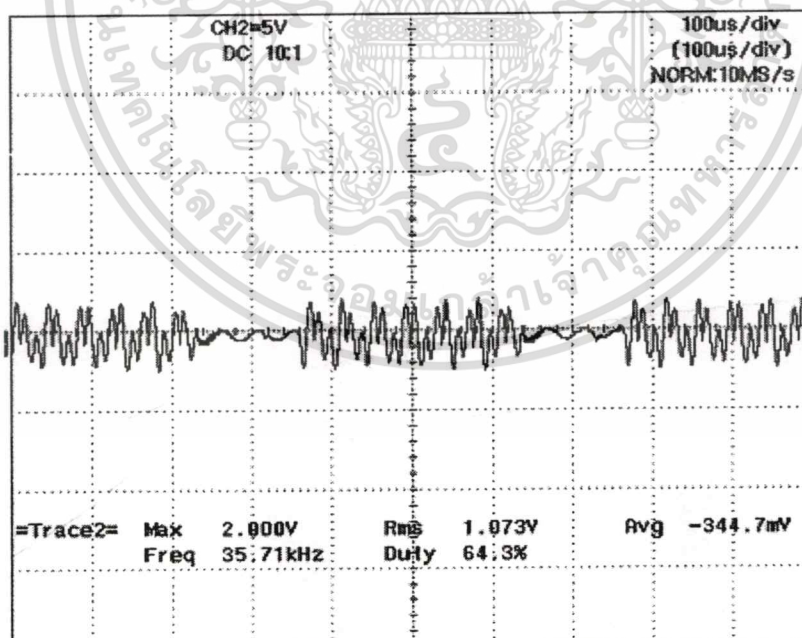


รูปที่ 4.61 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 7 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

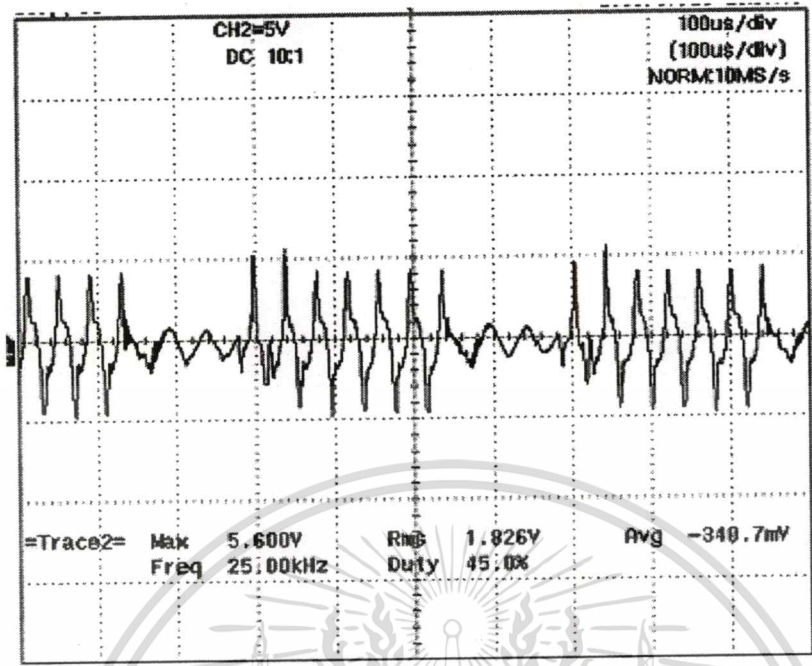


รูปที่ 4.62 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 7 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V



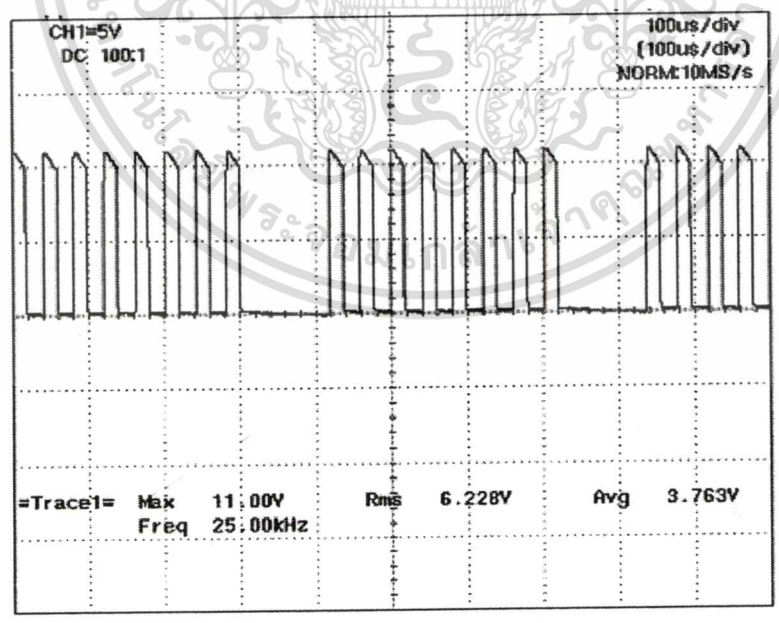
รูปที่ 4.63 กระแสเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 7 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



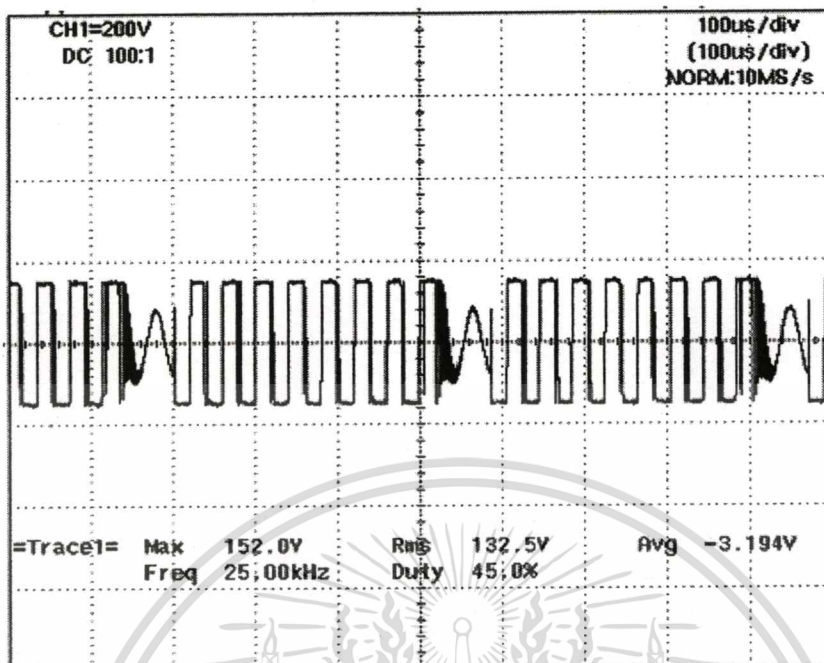
รูปที่ 4.64 กระแสเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 7 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V

- ที่ความหนาแน่นพัลส์ 8 ลูกคลื่น

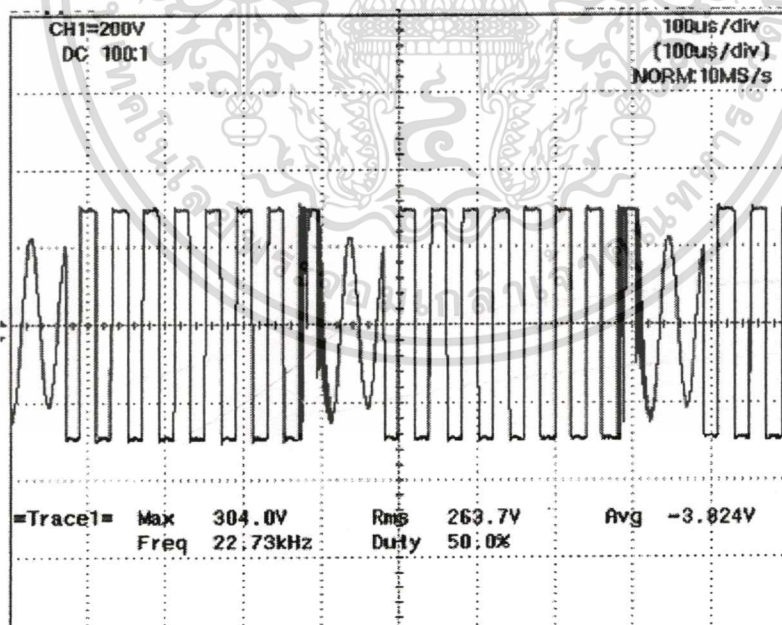


รูปที่ 4.65 สัญญาณ Control ที่ความหนาแน่นพัลส์ 8 ลูกคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

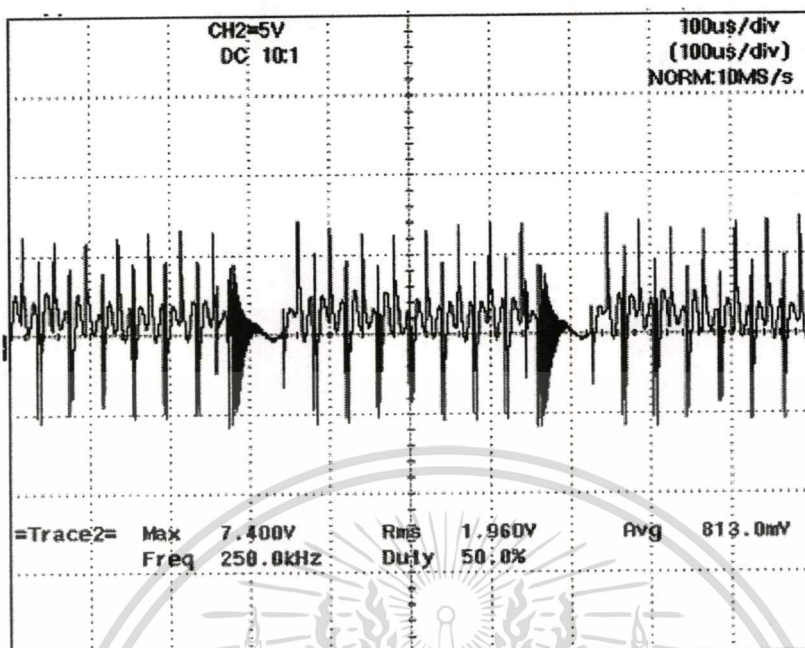


รูปที่ 4.66 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 8 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V

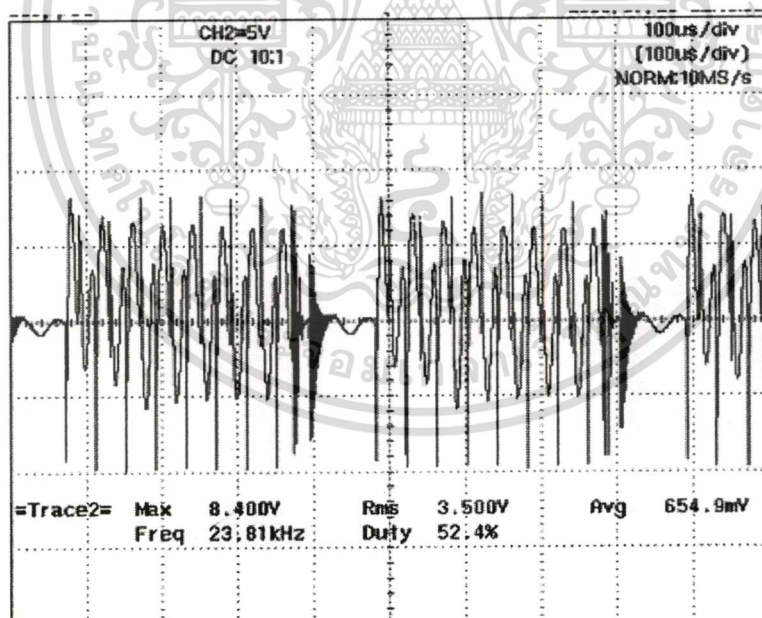


รูปที่ 4.67 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 8 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

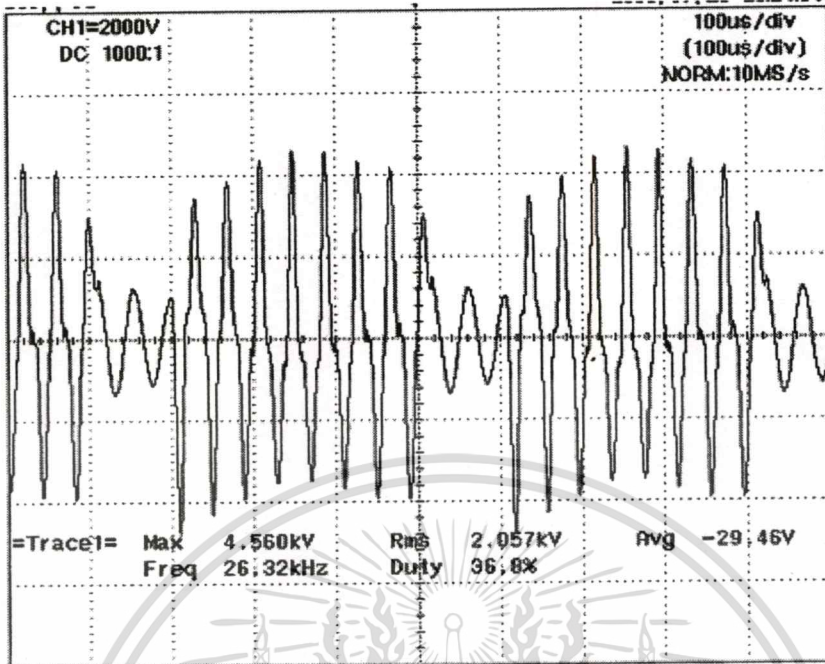


รูปที่ 4.68 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 8 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V

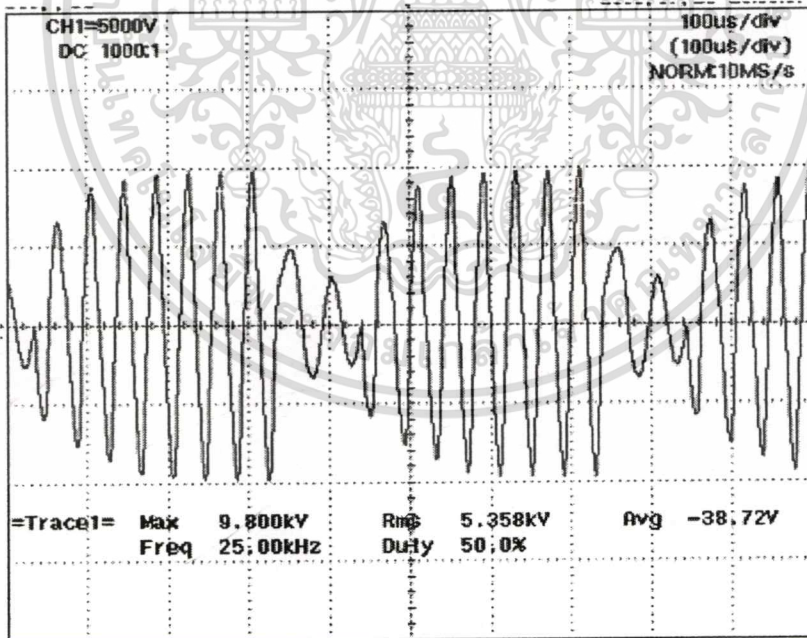


รูปที่ 4.69 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 8 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

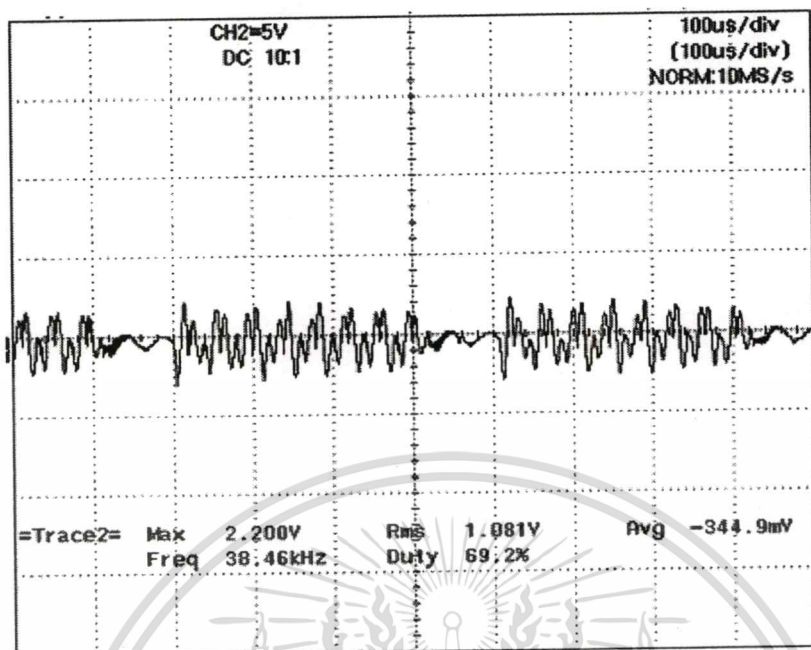


รูปที่ 4.70 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 8 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V

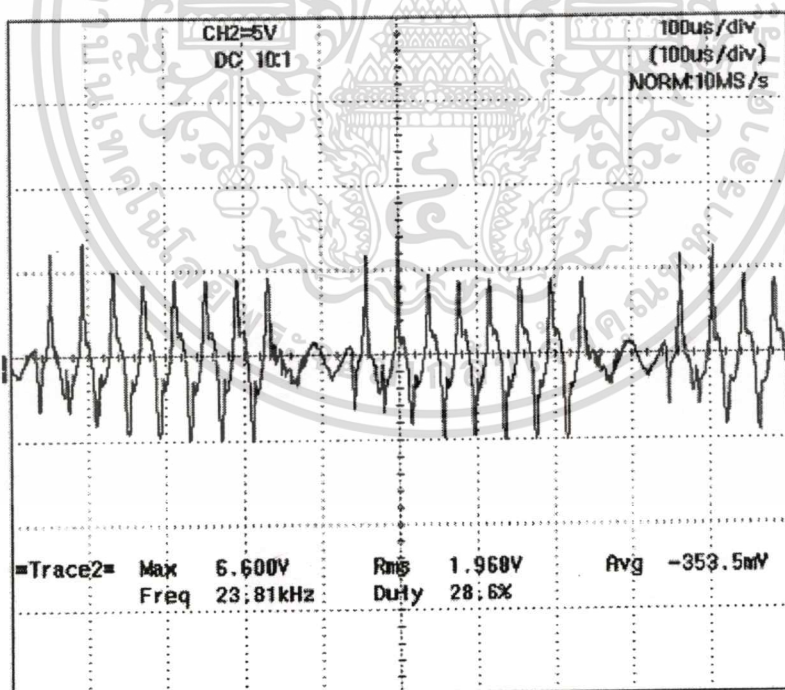


รูปที่ 4.71 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 8 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



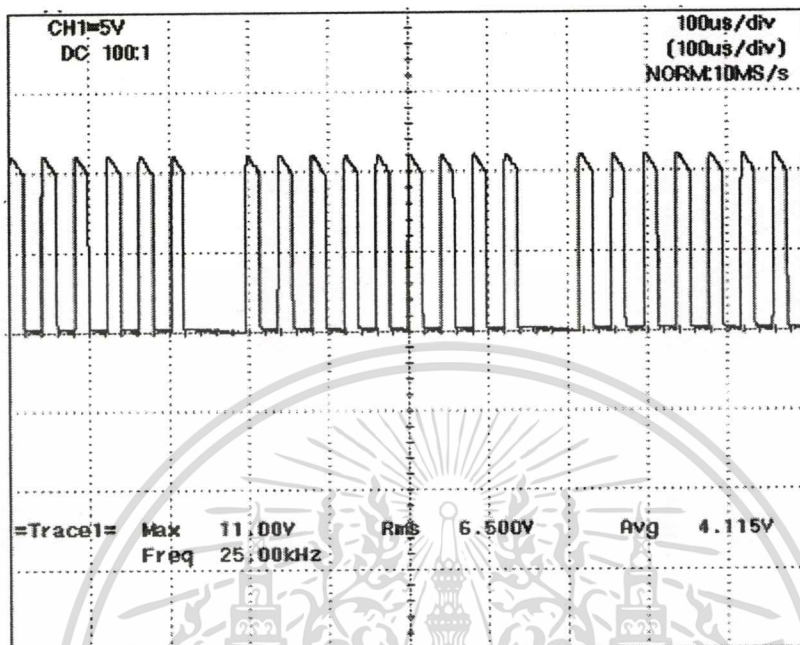
รูปที่ 4.72 กระแสเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 8 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V



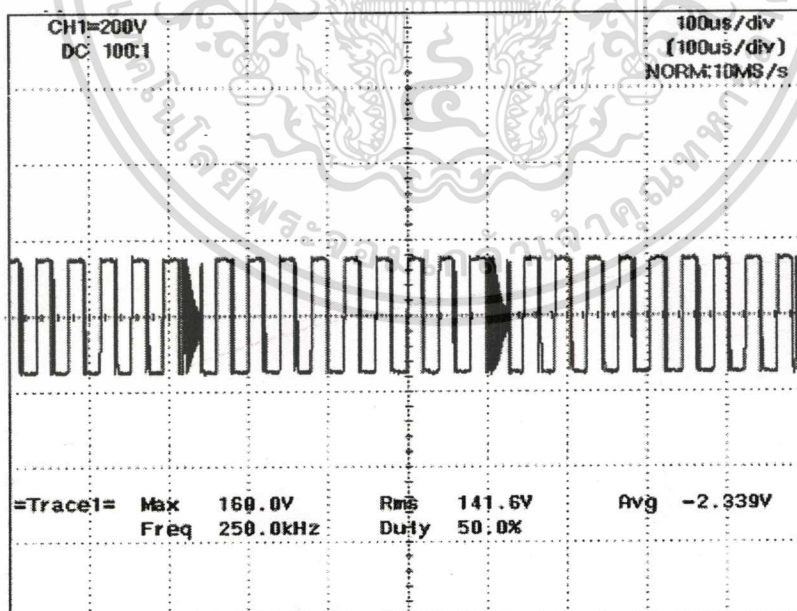
รูปที่ 4.73 กระแสเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 8 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทิศความหนาแน่นพัลส์ 9 ลูกคลื่น

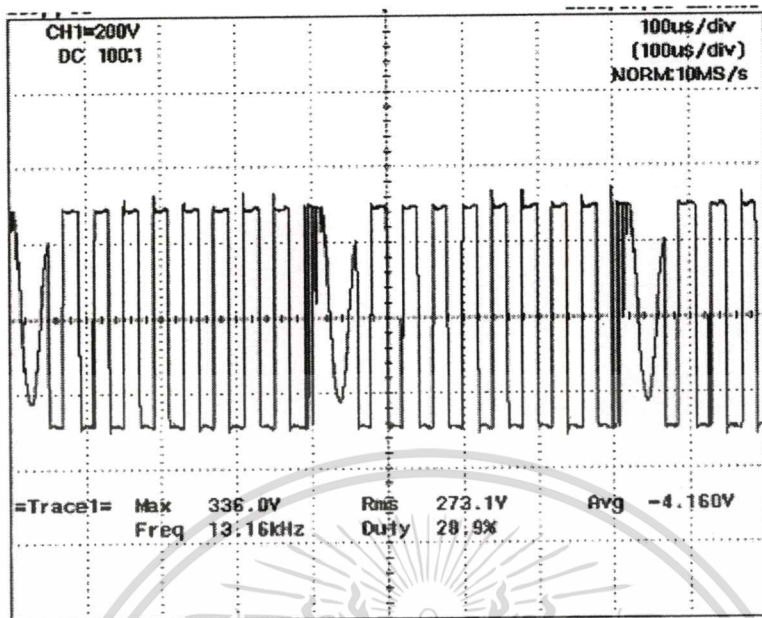


รูปที่ 4.74 สัญญาณ Control ที่ความหนาแน่นพัลส์ 9 ลูกคลื่น

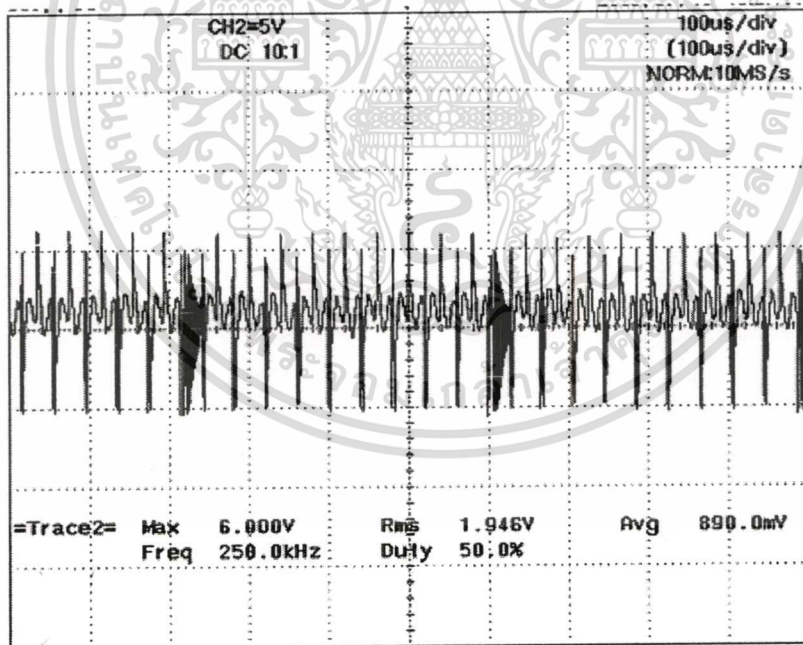


รูปที่ 4.75 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 9 ลูกคลื่นแรงดันอินพุท 110 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

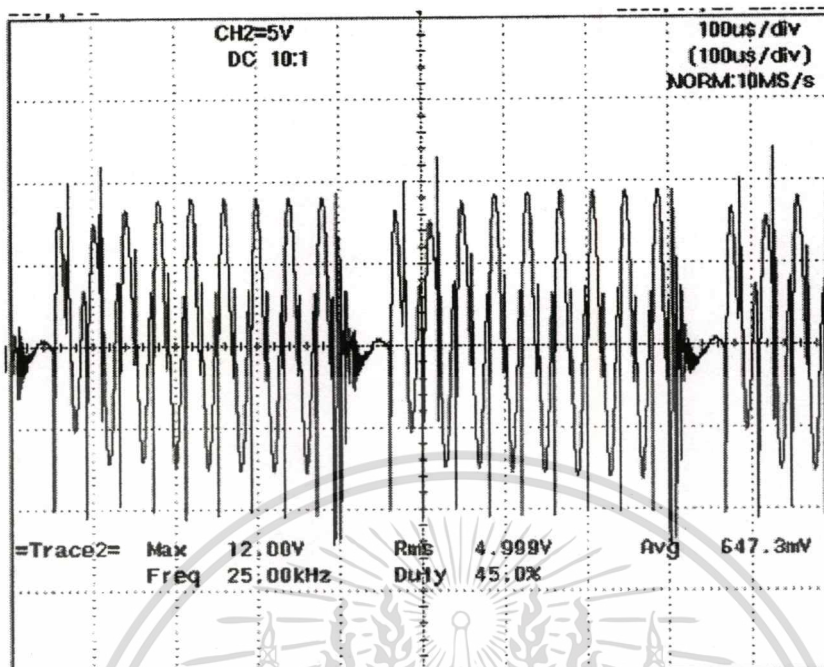


รูปที่ 4.76 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 9 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V

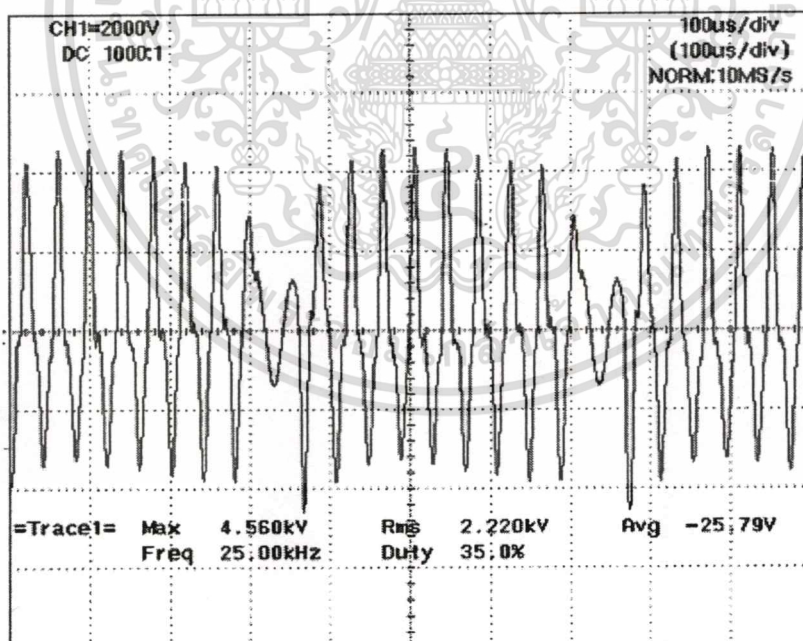


รูปที่ 4.77 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 9 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

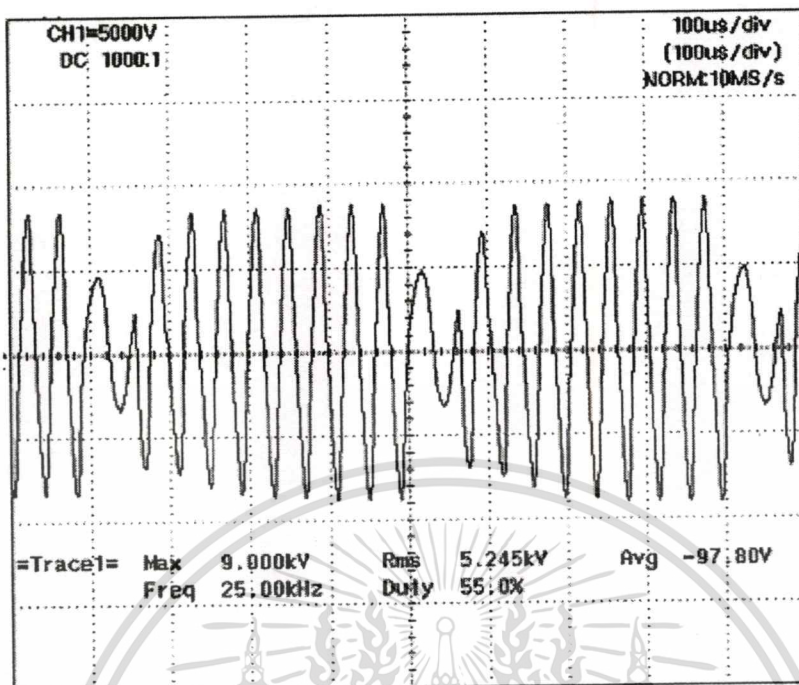


รูปที่ 4.78 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 9 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V

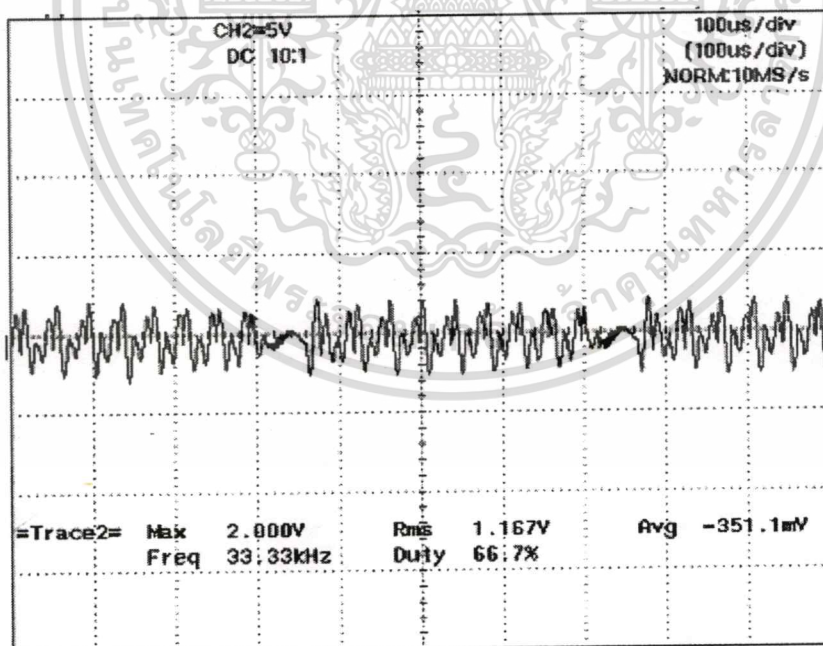


รูปที่ 4.79 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 9 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

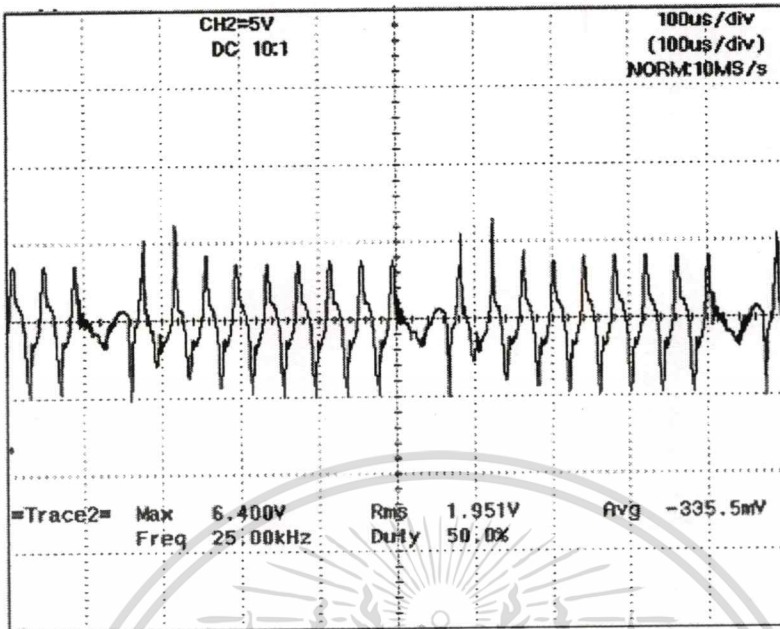


รูปที่ 4.80 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 9 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V



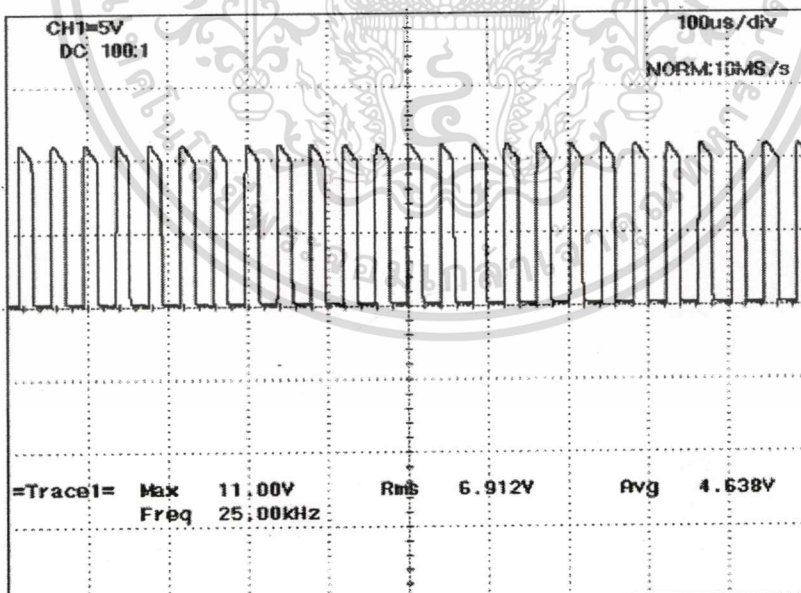
รูปที่ 4.81 กระแสเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 9 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



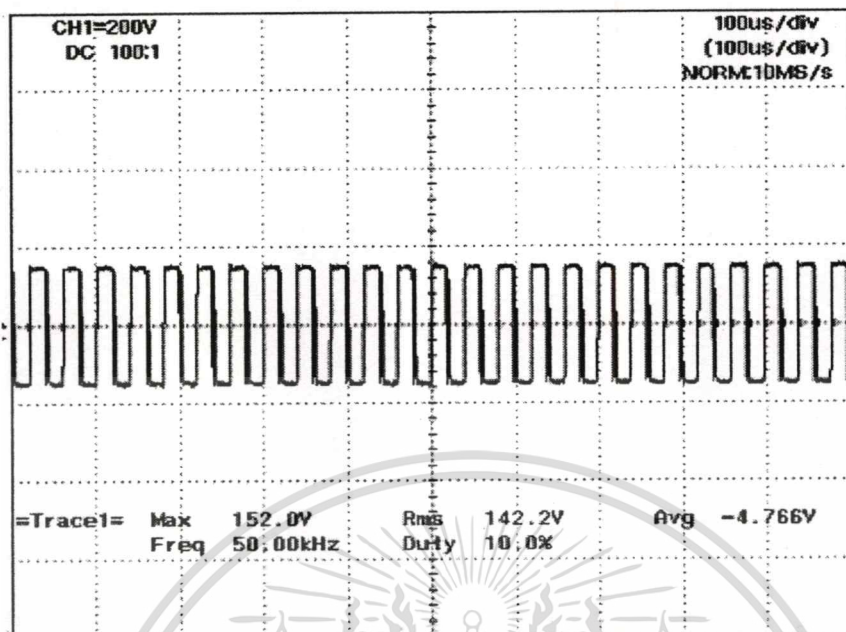
รูปที่ 4.82 กระแสเอาต์พุตที่ความหนาแน่นพัลส์ 9 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V

- ที่ความหนาแน่นพัลส์ 10 ลูกคลื่น

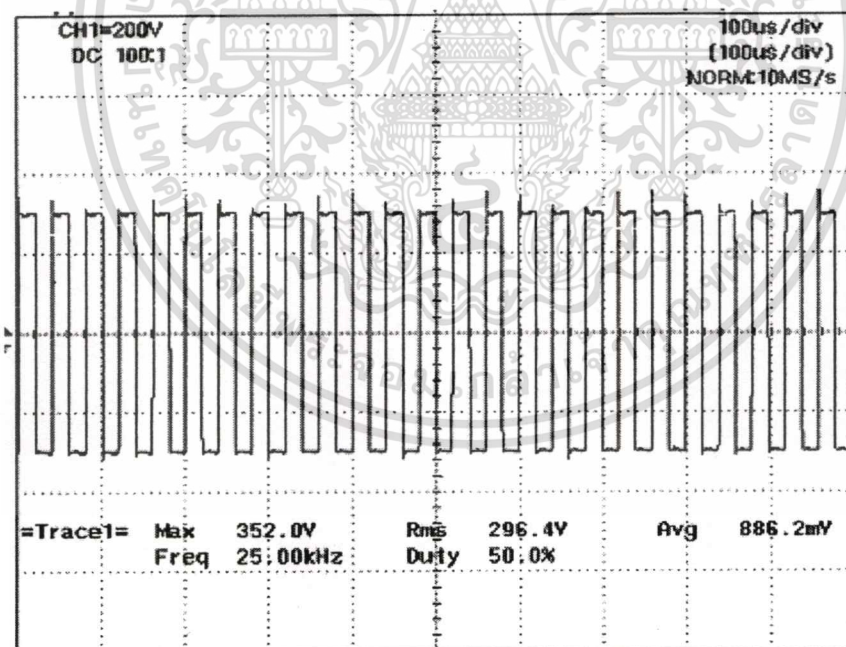


รูปที่ 4.83 สัญญาณ Control ที่ความหนาแน่นพัลส์ 10 ลูกคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

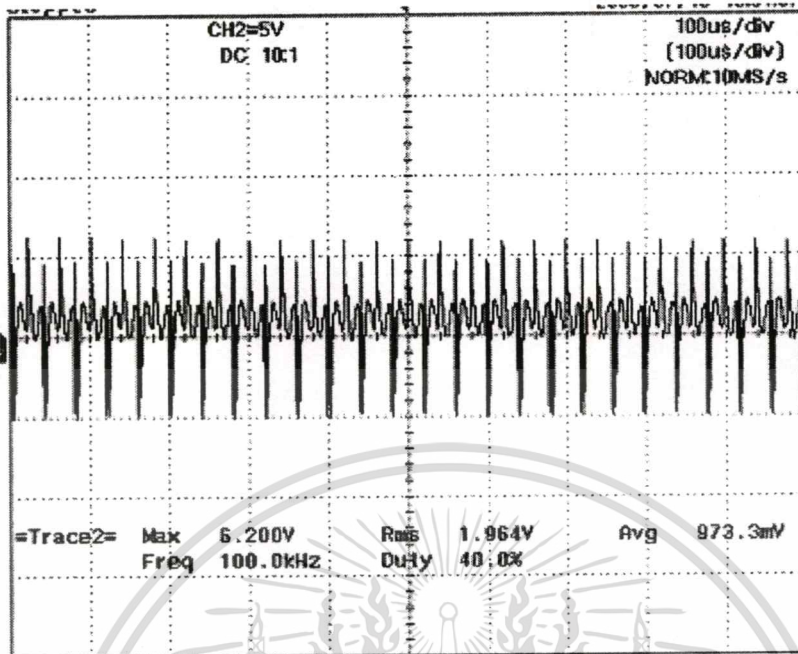


รูปที่ 4.84 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 10 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V

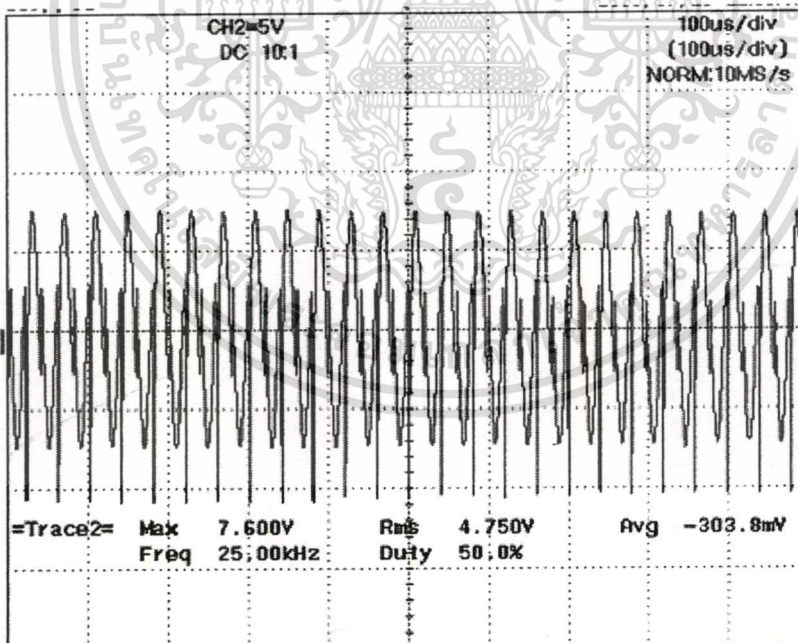


รูปที่ 4.85 แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 10 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

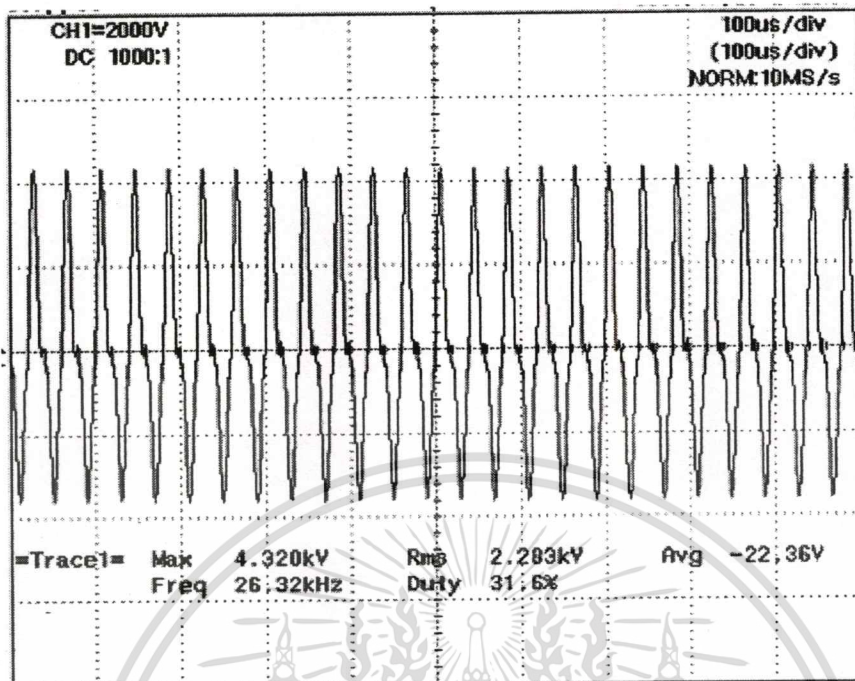


รูปที่ 4.86 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 10 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V

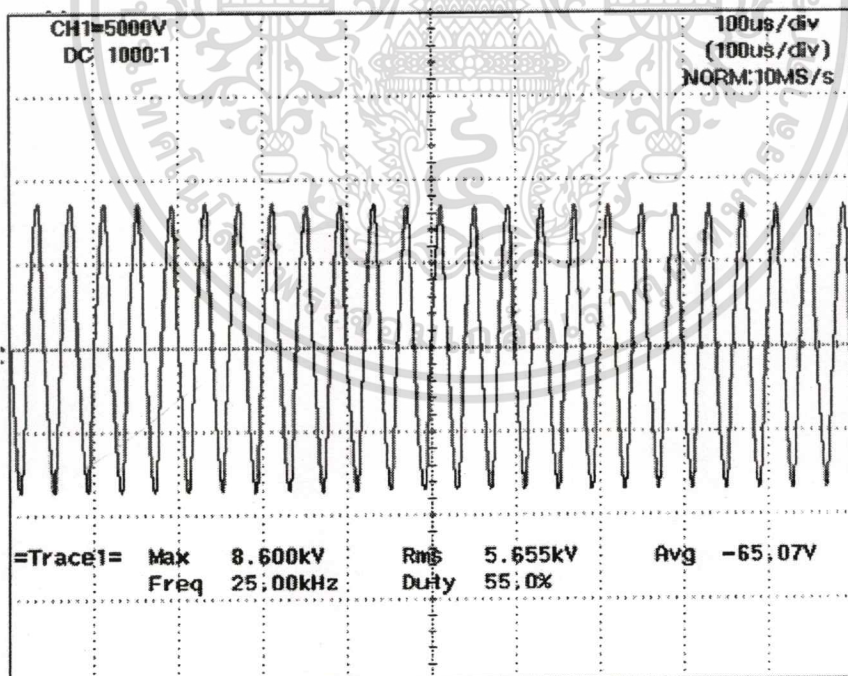


รูปที่ 4.87 กระแสเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 10 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

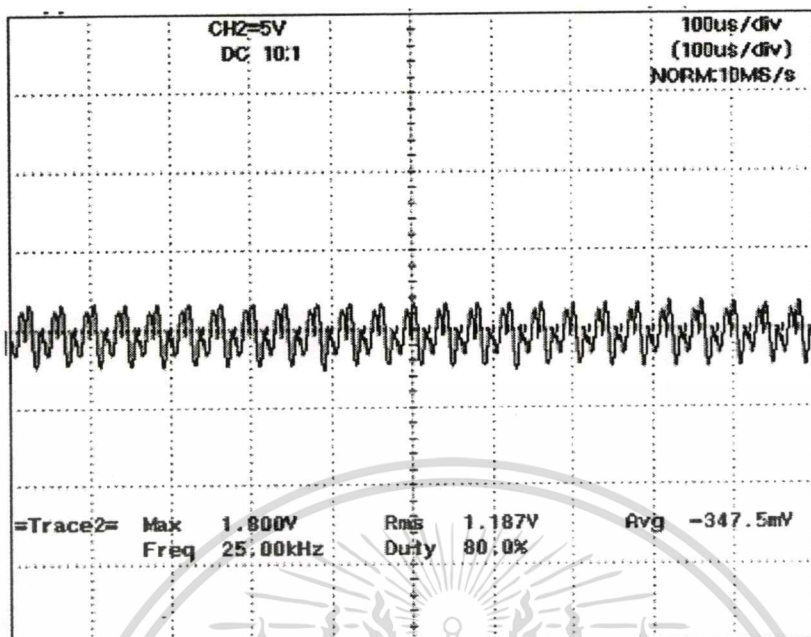


รูปที่ 4.88 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 10 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V

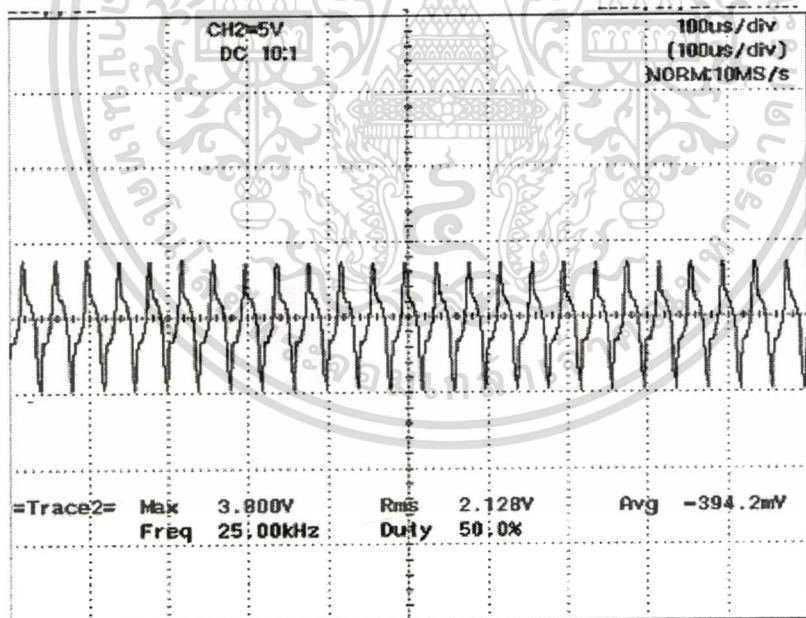


รูปที่ 4.89 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 10 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

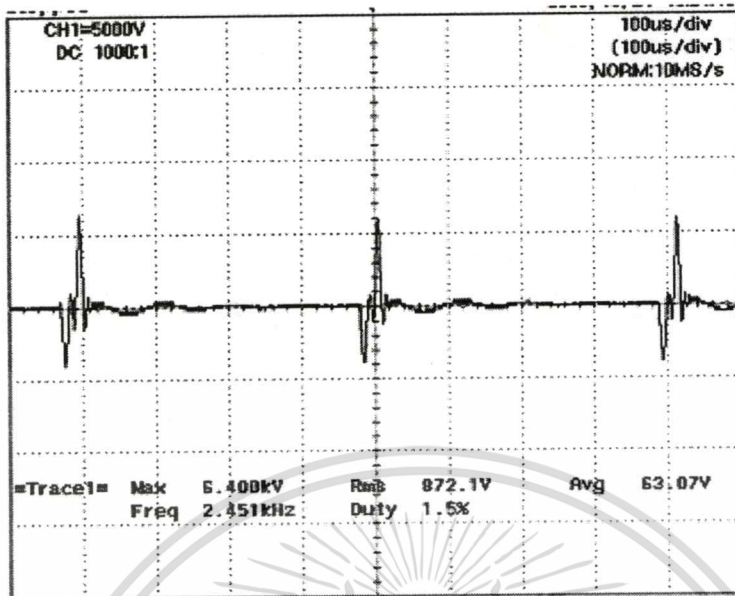


รูปที่ 4.90 กระแสเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 10 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V

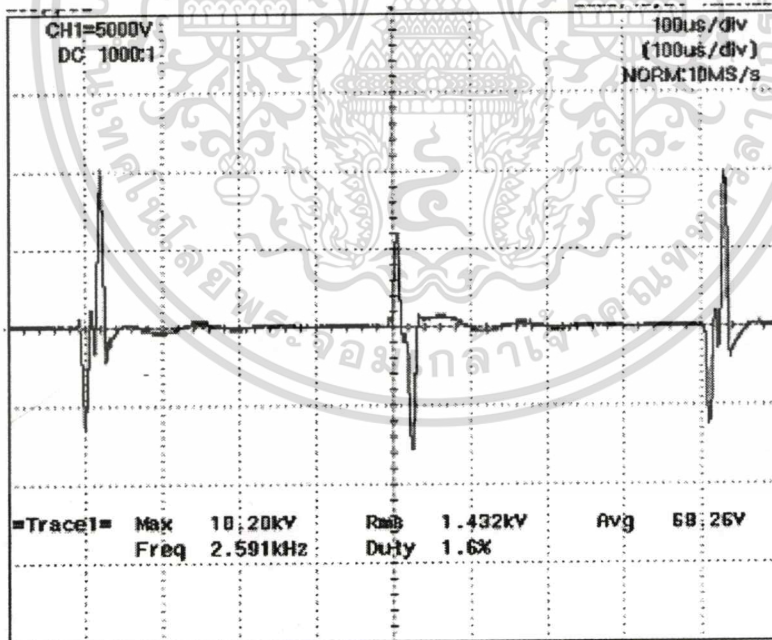


รูปที่ 4.91 กระแสเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 10 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

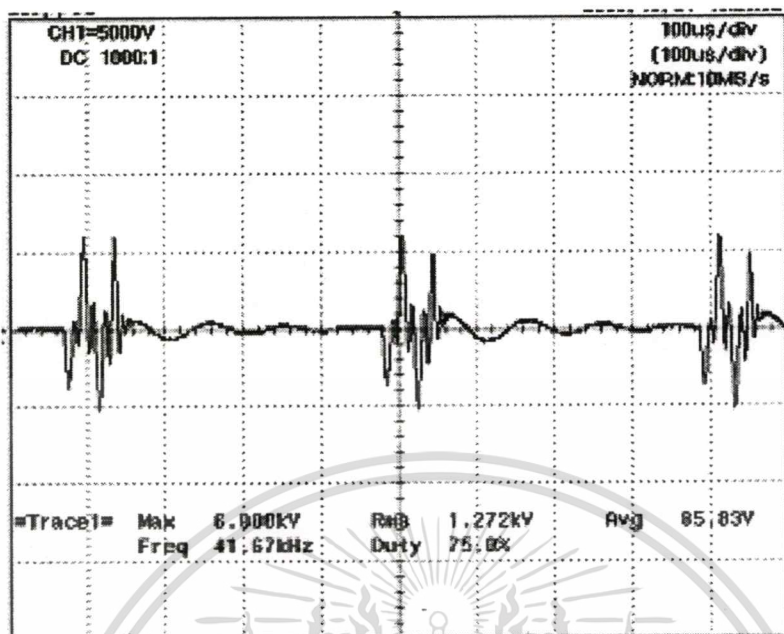


รูปที่ 4.92 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 1 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V ขณะไม่มีโหลด

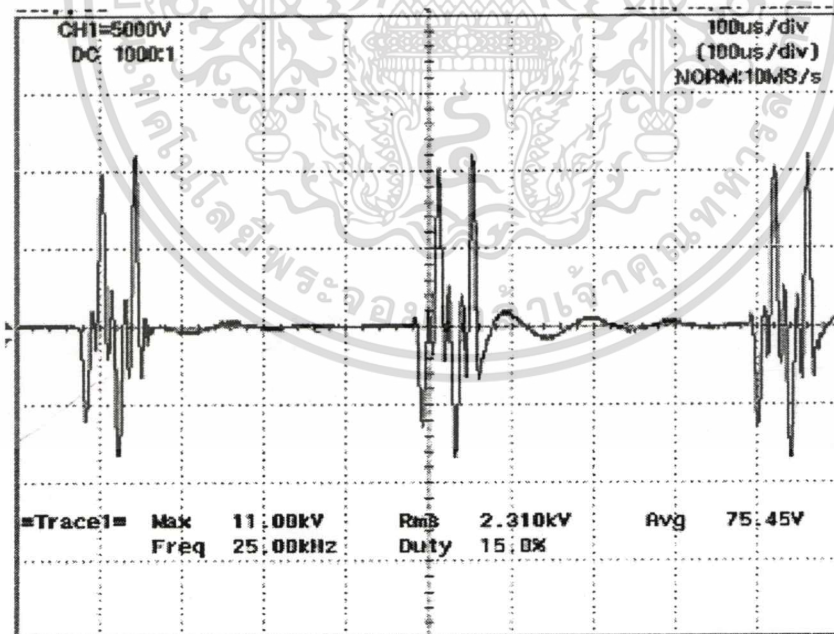


รูปที่ 4.93 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 1 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V ขณะไม่มีโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

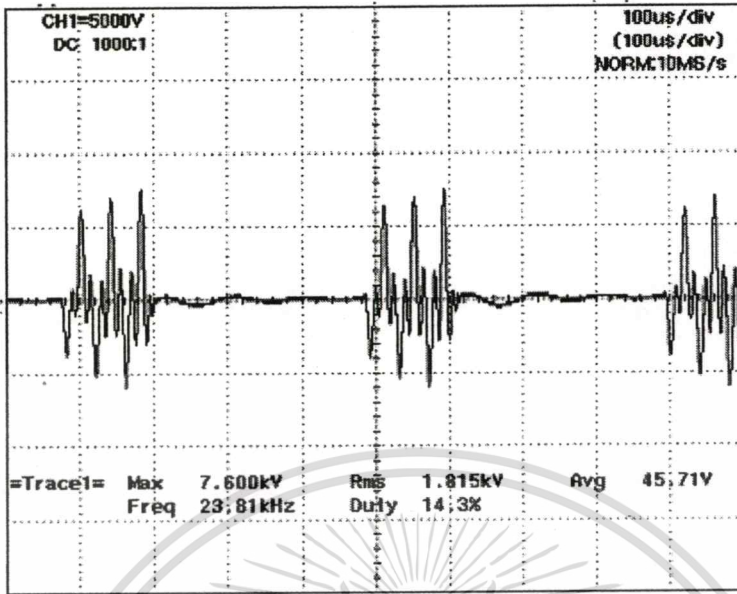


รูปที่ 4.94 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 2 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V ขณะไม่มีโหลด

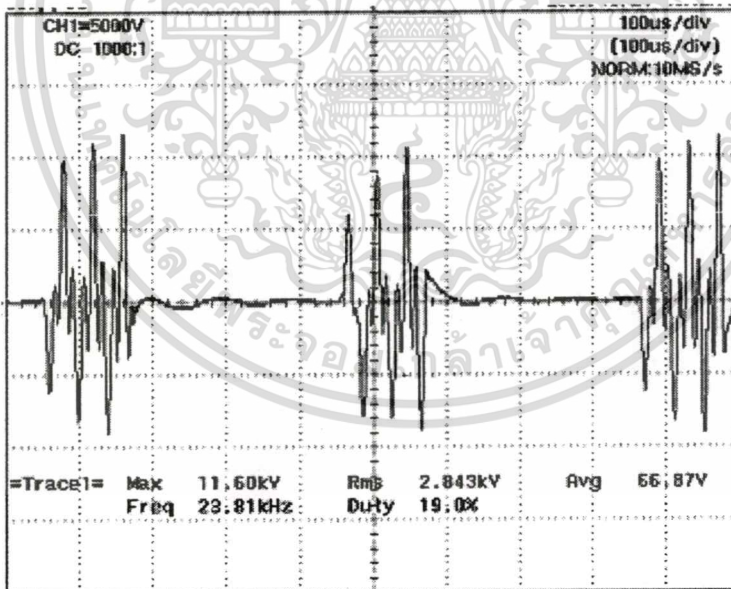


รูปที่ 4.94 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 2 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V ขณะไม่มีโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

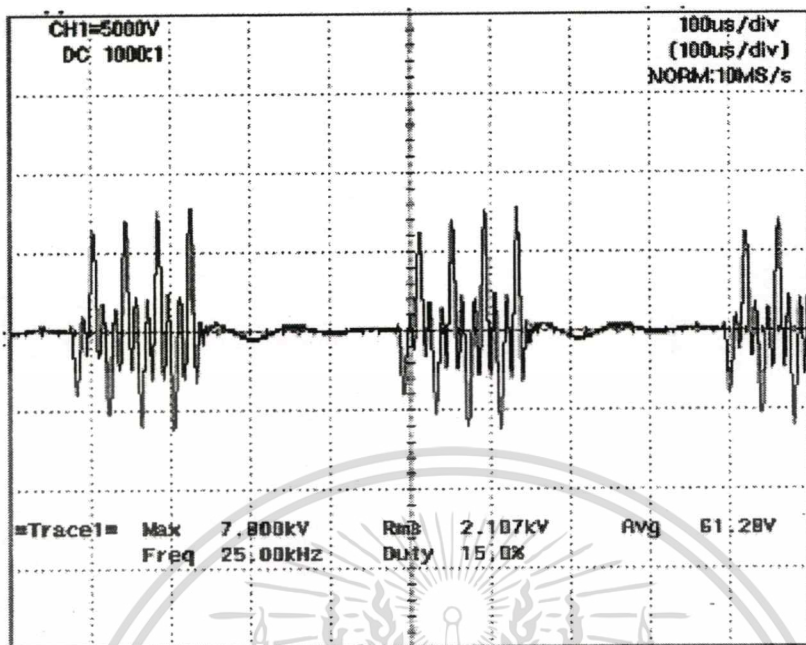


รูปที่ 4.95 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 3 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V ขณะไม่มีโหลด

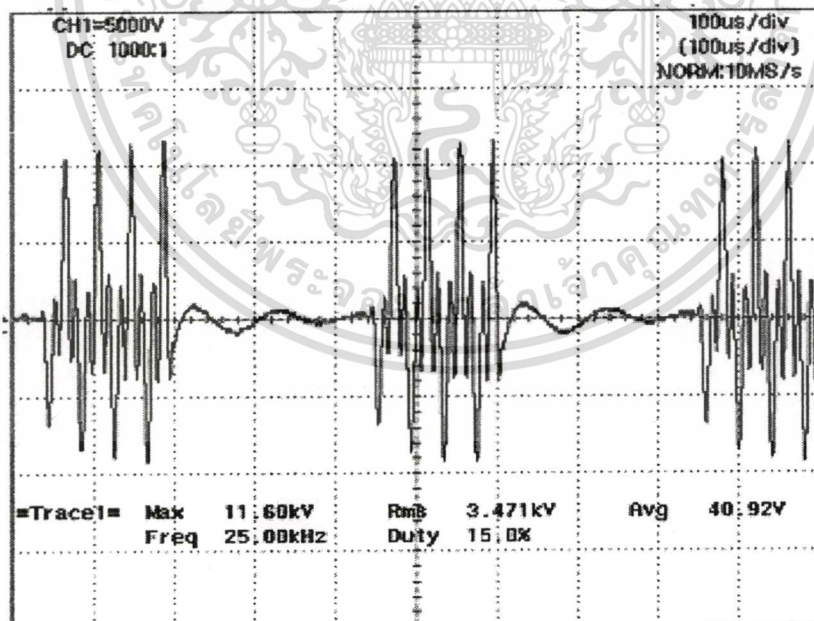


รูปที่ 4.96 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 3 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V ขณะไม่มีโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

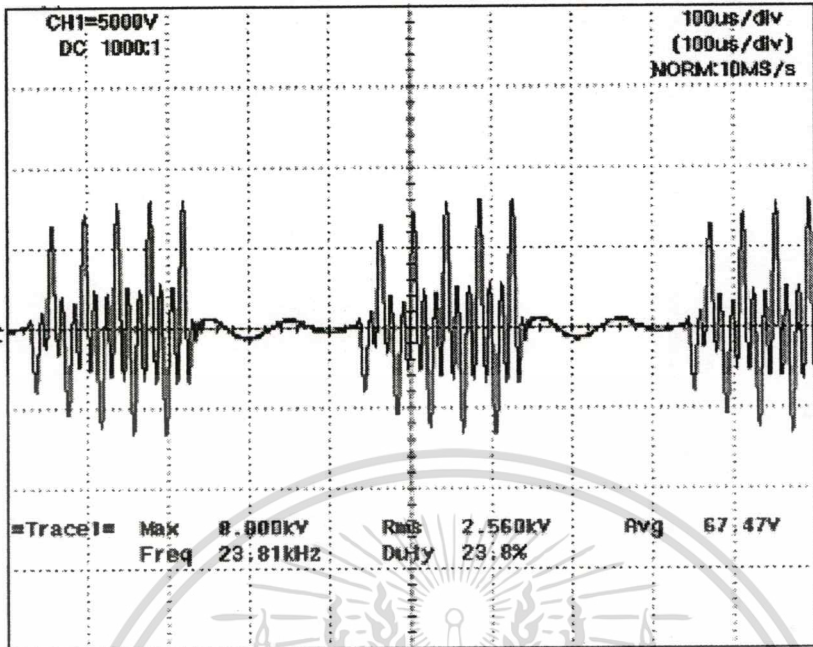


รูปที่ 4.97 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 4 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V ขณะไม่มีโหลด

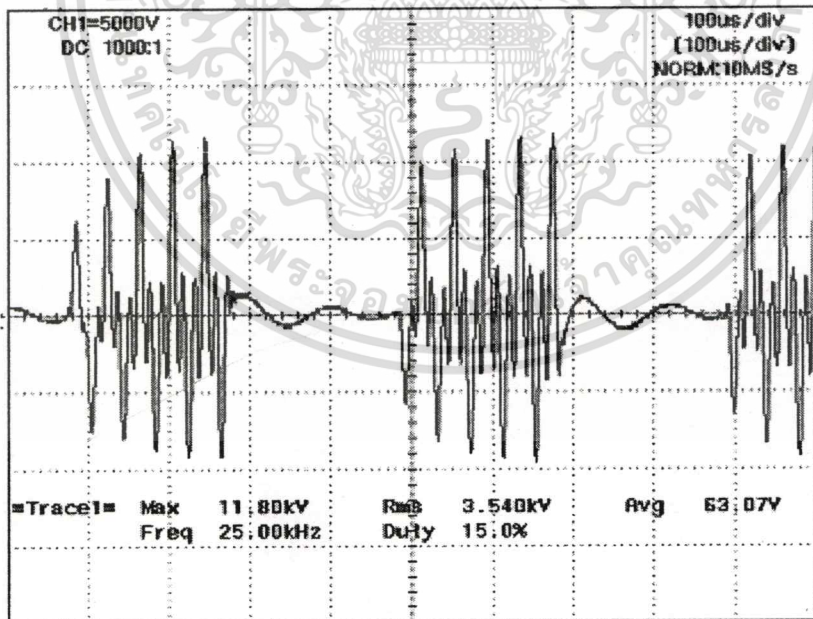


รูปที่ 4.98 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 4 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V ขณะไม่มีโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

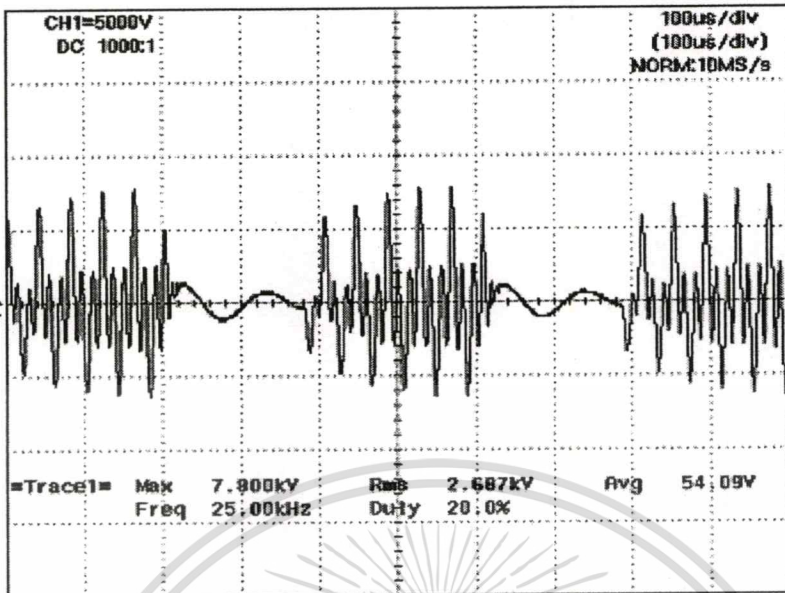


รูปที่ 4.99 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 5 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V ขณะไม่มีโหลด

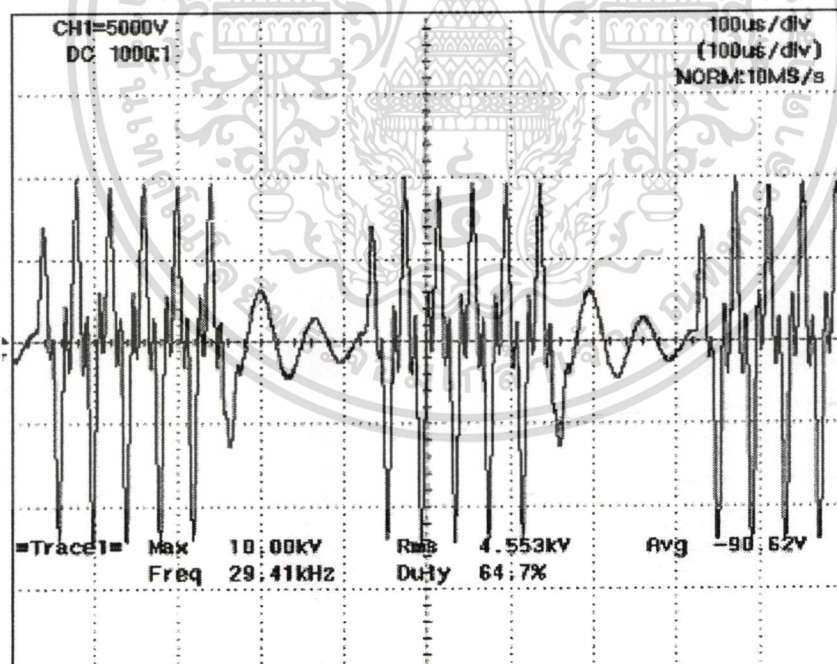


รูปที่ 4.100 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 5 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V ขณะไม่มีโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

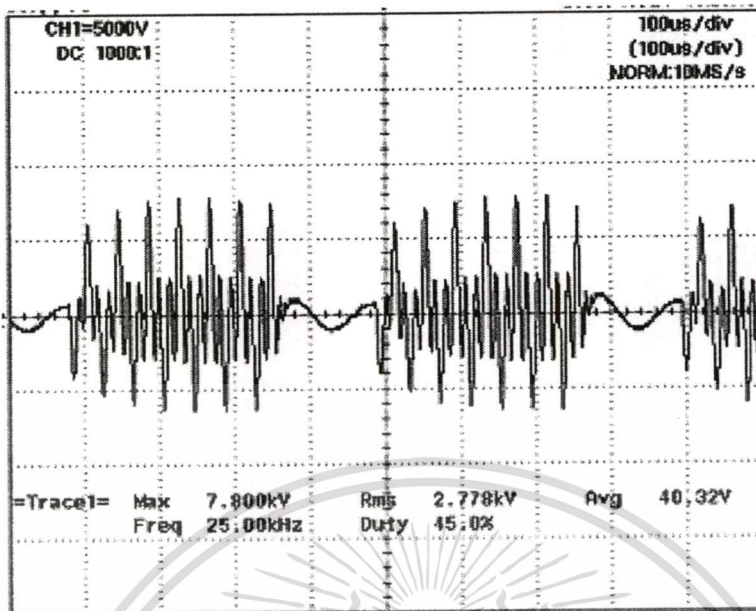


รูปที่ 4.101 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 6 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V ขณะไม่มีโหลด

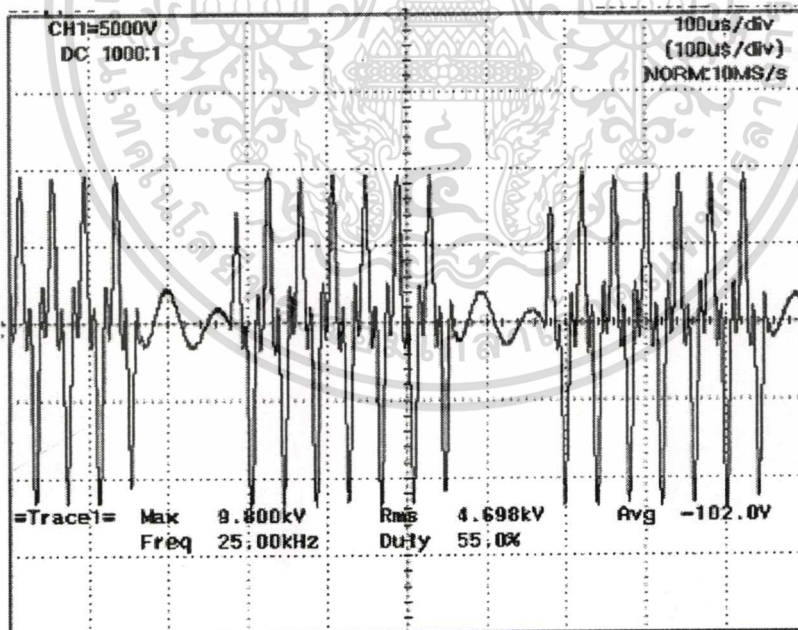


รูปที่ 4.102 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 6 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V ขณะไม่มีโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

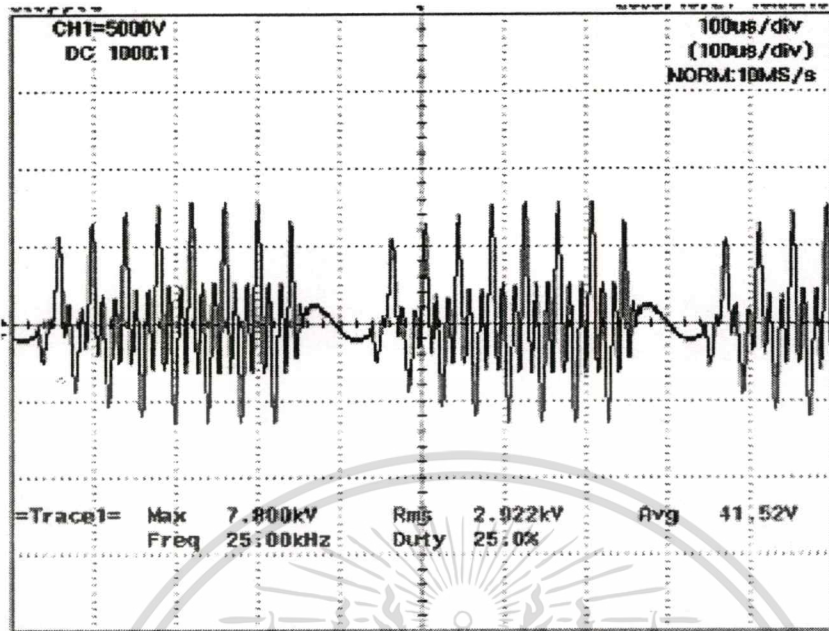


รูปที่ 4.103 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 7 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V ขณะไม่มีโหลด

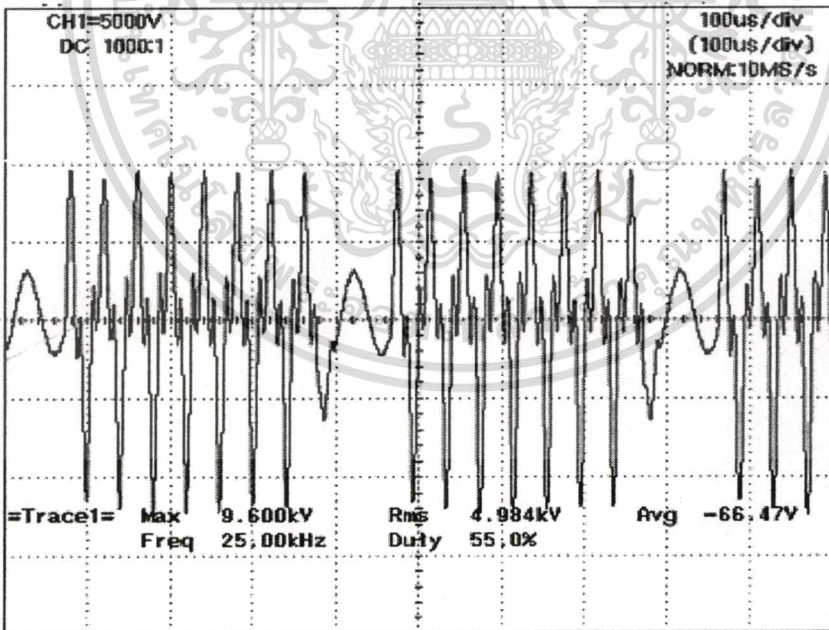


รูปที่ 4.104 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 7 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V ขณะไม่มีโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

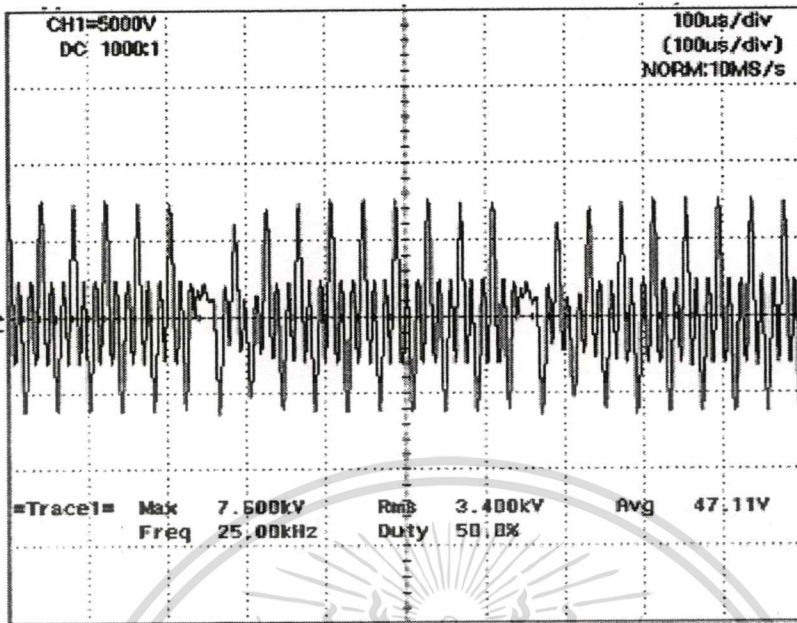


รูปที่ 4.105 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 8 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V ขณะไม่มีโหลด

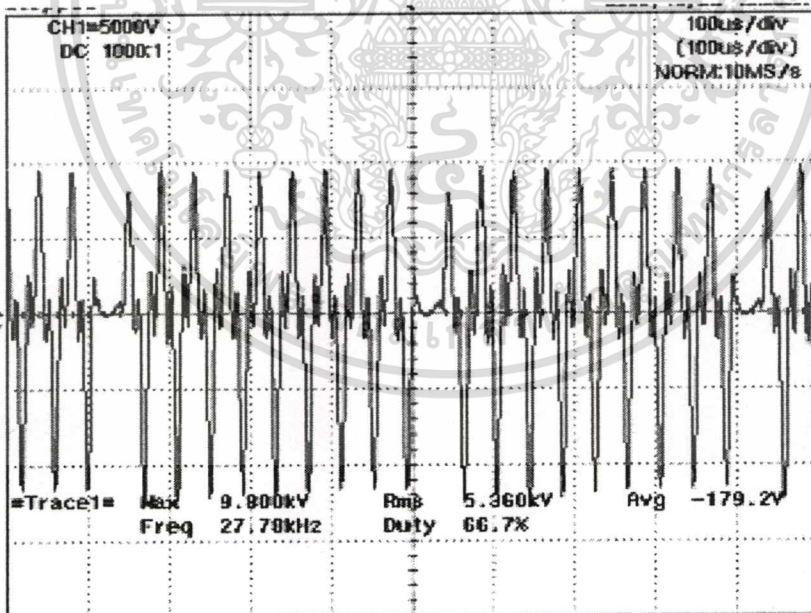


รูปที่ 4.106 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 8 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V ขณะไม่มีโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

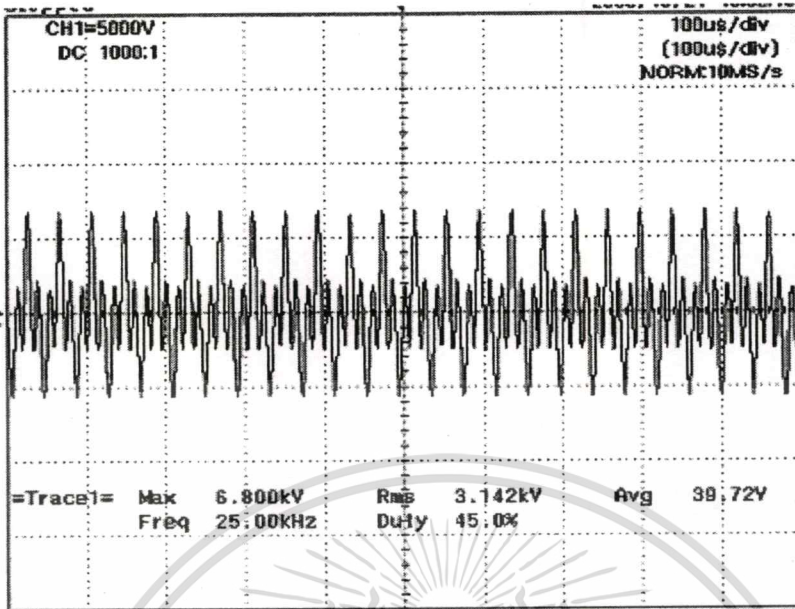


รูปที่ 4.107 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 9 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V ขณะไม่มีโหลด

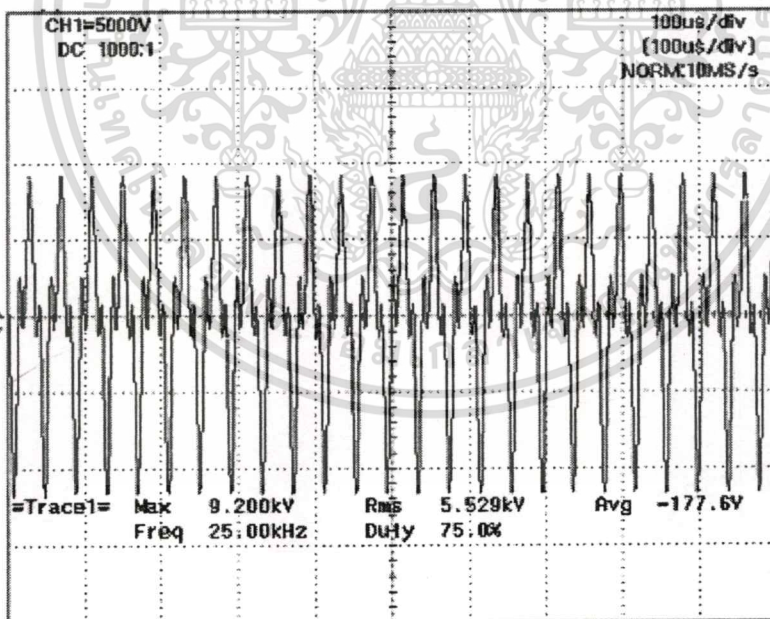


รูปที่ 4.108 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 9 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V ขณะไม่มีโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



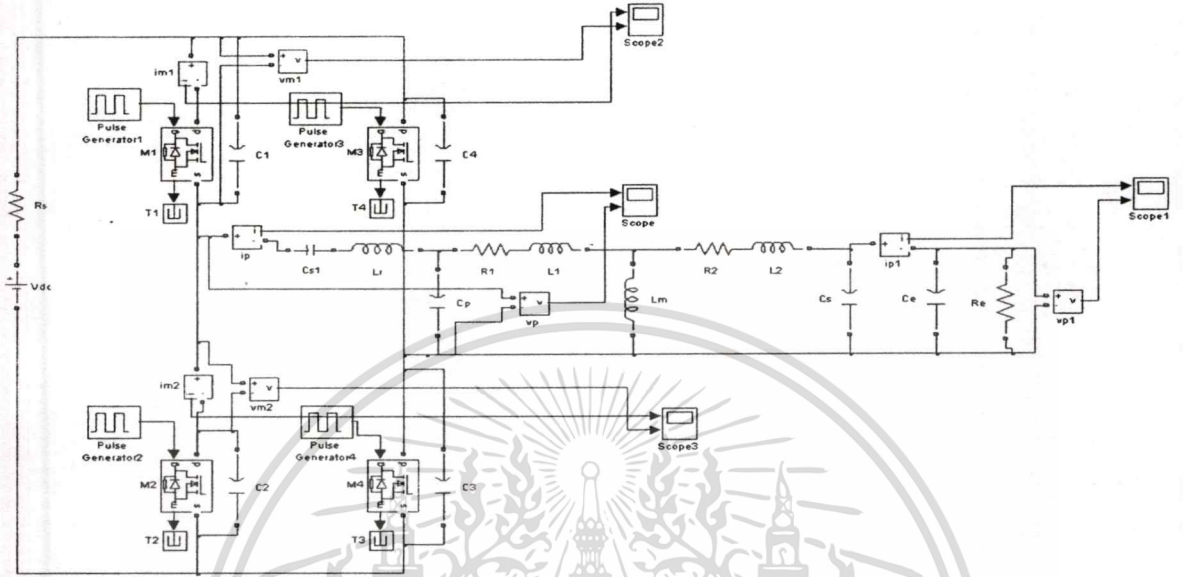
รูปที่ 4.109 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นฟลักซ์ 10 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 110 V ขณะไม่มีโหลด



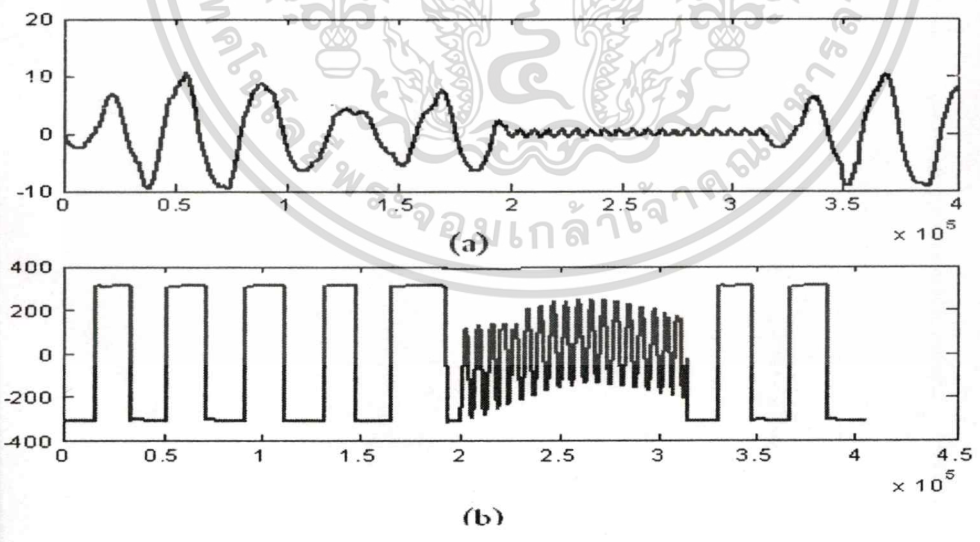
รูปที่ 4.110 แรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงที่ความหนาแน่นฟลักซ์ 10 ลูกคลื่นแรงดันอินพุต 220 V ขณะไม่มีโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การจำลองการทำงานของเครื่องผลิตก๊าซไอโซน

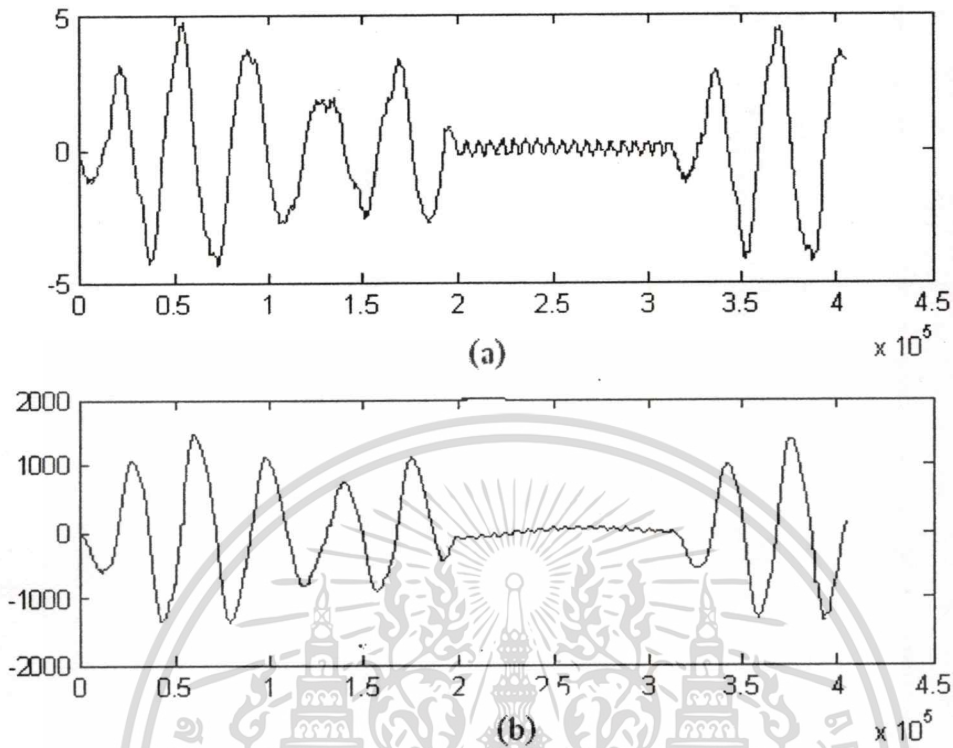


รูปที่ 4.111 วงจรจำลองการทำงานของคอนเวอร์เตอร์แบบควบคุมความหนาแน่นพัลส์โดยใช้โปรแกรม MatLAB Simulink



รูปที่ 4.112 (a) กระแส (b) แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 5 ลูกคลื่นจากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.113 (a) กระแส (b) แรงดันเอาต์พุตของหม้อแปลงที่ความหนาแน่นพัลส์ 5 ลูกคลื่นจากการจำลอง

จากรูปที่ 4.112 และ 4.113 เป็นการจำลอง โดยใช้โปรแกรม Math LAB จำลองการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ที่ความหนาแน่นพัลส์ 5 ลูกคลื่น โดยที่รูปที่ 4.112 (a) เป็นสัญญาณกระแสเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์รูปคลื่นของสัญญาณก็จะมีค่าใกล้เคียงกับการทดลอง (b) เป็นสัญญาณแรงดันแรงดันเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ในช่วงที่หุ้มนำกระแสยังคงไม่เป็นศูนย์เนื่องจากโหลดเป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานใกล้เคียงกับการทดลองรูปที่ 4.113 (a) เป็นสัญญาณกระแสของหม้อแปลงแรงดันความถี่สูงรูปคลื่นสัญญาณใกล้เคียงกับการทดลอง (b) เป็นสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงรูปคลื่นสัญญาณใกล้เคียงกับการทดลอง

#### 4.4 การเก็บผลก๊าซไอโซนโดยการทดลองทางเคมี

จากการทดสอบทางไฟฟ้าที่ผ่านมาแรงดันเอาต์พุตของหม้อแปลงที่ป้อนให้กับแท่งอิเล็กโทรดเพื่อผลิตก๊าซไอโซนจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนการปรับเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นพัลส์โดยที่แรงดันอินพุตและความถี่ที่ ดังนั้นการเก็บผลปริมาณการเกิดก๊าซไอโซนจะใช้วิธีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น

พัลส์ที่ภาคควบคุมของคอนเวอร์เตอร์จากนั้นจึงวัดผลการเกิดก๊าซโอโซนโดยวิธีการทางเคมีที่เรียกว่า การไทเตรต (Titrate) การวัดผลโอโซนจะใช้วิธีการบันทึกผลจำนวนหยดของสารเคมี  $Na_2S_2O_3$  ที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายโปแตสเซียมไอโอไดด์ KI ที่ผ่านกระบวนการแพร่กระจายของก๊าซโอโซน จากนั้นนำมาคำนวณโดยใช้สมการที่ (4.1) เพื่อหาค่าปริมาณ โอโซนที่เกิดขึ้น

$$0.1N \times Na_2S_2O_3 1mL = 2.4mgO_3 \quad (4.1)$$

เมื่อ  $Na_2S_2O_3$  คือ สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต  
 $mgO_3$  คือ ปริมาณการเกิดก๊าซโอโซน

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าระดับปริมาณก๊าซโอโซนเมื่อนำจำนวนหยดสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตในแต่ละความหนาแน่นพัลส์โดยใช้สมการที่ 4.1 จากนั้นนำมาคูณด้วยเวลาเพื่อเทียบเป็นปริมาณต่อเวลา โดยในการทดสอบเครื่องทำงานเป็นเวลา 1 นาทีที่ดังนั้นจึงคูณด้วย 60 จะได้เป็นปริมาณก๊าซต่อ 1 ชั่วโมง ทำการทดสอบสองครั้งต่อความหนาแน่นพัลส์หนึ่งค่าโดยทำการปรับความหนาแน่นพัลส์ตั้งแต่ 1 ถึง 10 ลูกคลื่นแล้วหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณการเกิด โอโซนเทียบกับจำนวนความหนาแน่นพัลส์ที่แรงดันอินพุต 110 V

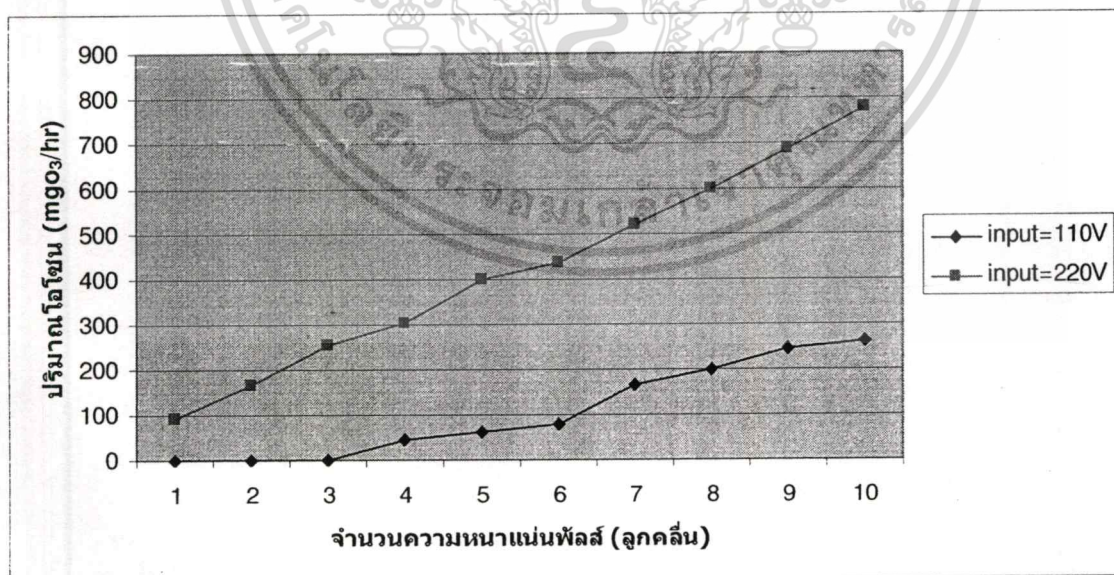
จำนวนความหนาแน่นพัลส์ (ลูกคลื่น)	ปริมาณก๊าซโอโซน( $mgO_3/hr$ )		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ค่าเฉลี่ย
1	-	-	-
2	-	-	-
3	-	-	-
4	43	51	47
5	60	69	64.5
6	86	77	81.5
7	164	172	168
8	198	207	202.5
9	241	250	245.5
10	259	267	263

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณการเกิดโอโซนเทียบกับจำนวนความหนาแน่นพัลส์ที่แรงดันอินพุต 220 V

จำนวนความหนาแน่นพัลส์ (ลูกคลื่น)	ปริมาณก๊าซโอโซน(mgO <sub>3</sub> /hr)		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ค่าเฉลี่ย
1	86	95	90.5
2	164	172	168
3	259	250	254.5
4	345	336	304.5
5	406	397	401.5
6	432	440	436
7	518	527	522.5
8	604	596	600
9	691	682	686.5
10	777	786	781.5

จากตารางที่ 4.1 และ 4.2 นำค่าปริมาณก๊าซโอโซนและจำนวนความหนาแน่นพัลส์เขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.114



รูปที่ 4.114 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซโอโซนกับความหนาแน่นพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

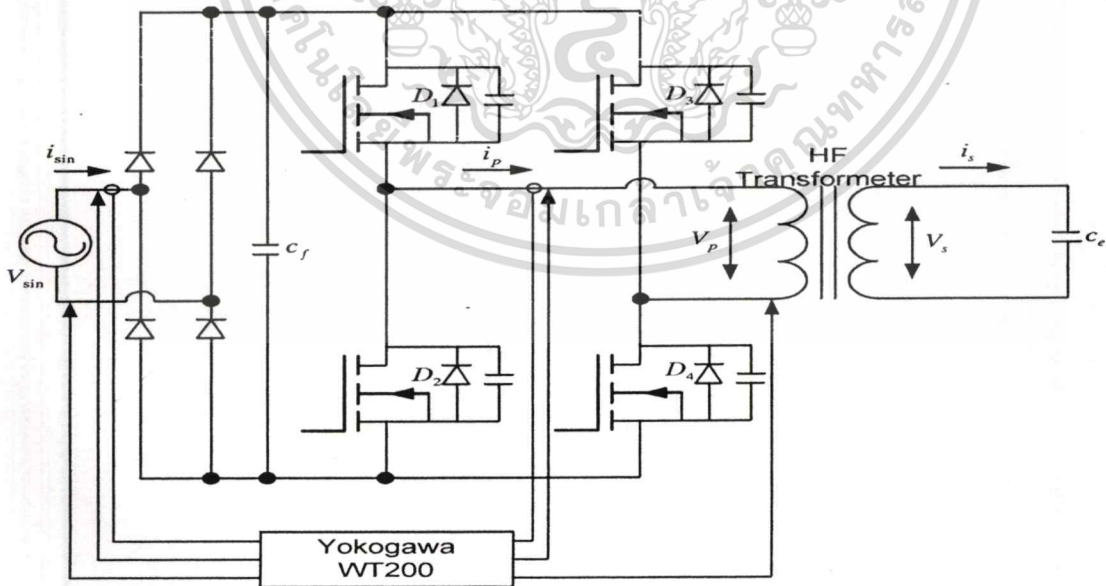
# การวิเคราะห์ผลการทดลอง

### 5.1 บทนำ

จากบทที่ 4 สามารถนำค่าต่างๆมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตเมื่อทำการปรับความหนาแน่นพัลส์ จากนั้นวิเคราะห์ผลปริมาณก๊าซไอโซน การเปลี่ยนความหนาแน่นพัลส์มีผลต่อการเกิดปริมาณไอโซนอย่างไร

### 5.2 วิเคราะห์ผลการทดลองทางไฟฟ้า

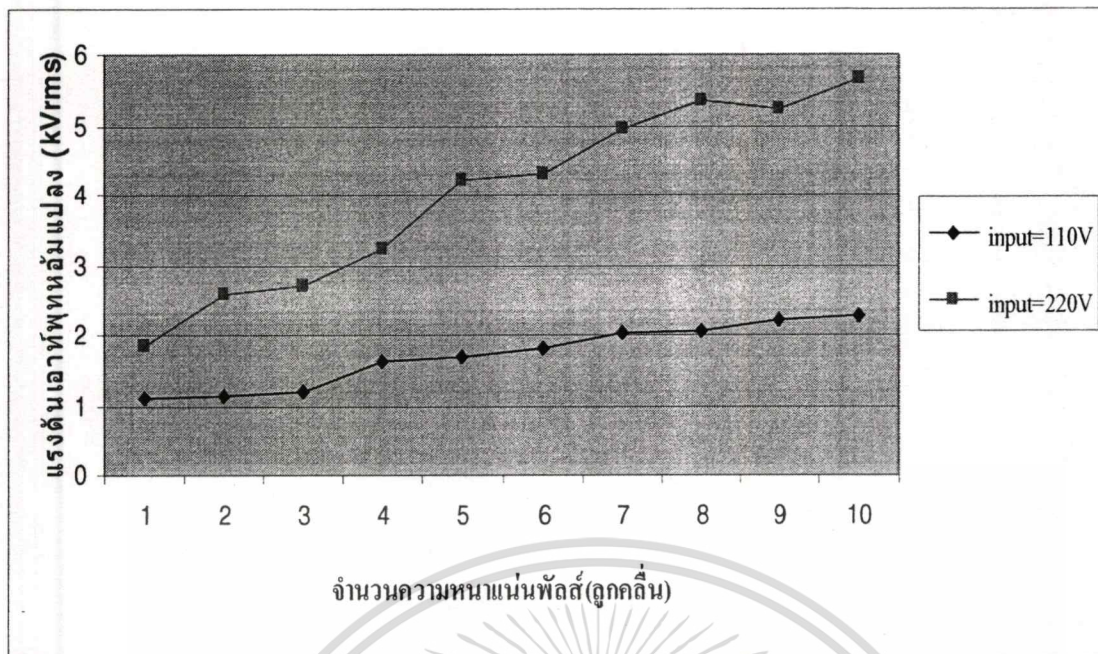
นำผลการทดลองจากบทที่ 4 มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตหรือแปลงความถี่สูงกับจำนวนความหนาแน่นพัลส์ กำลังไฟฟ้าอินพุตคอนเวอร์เตอร์กับความหนาแน่นพัลส์ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์กับความหนาแน่นพัลส์ กำลังไฟฟ้าที่โหลดกับความหนาแน่นพัลส์ ประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์กับความหนาแน่นพัลส์ ประสิทธิภาพของหม้อแปลงกับความหนาแน่นพัลส์ โดยจะเปรียบเทียบระหว่างแรงดันอินพุต 110 V และ 220 V ตามลำดับโดยทดลองในงานวิจัยนี้ใช้ Power Meter Yokogawa รุ่น WT200 ในการวัดค่ากำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 5.1



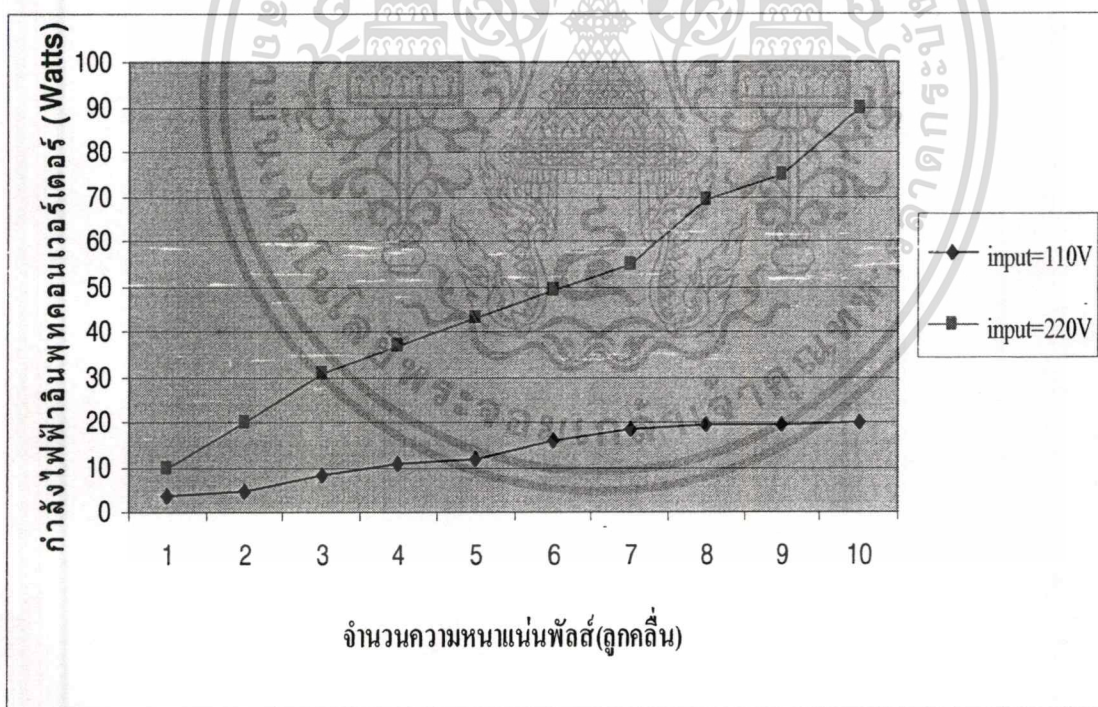
รูปที่ 5.1 แสดงการวัดกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์โดยใช้เครื่องวัด

YOKOGAWA รุ่น WT200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

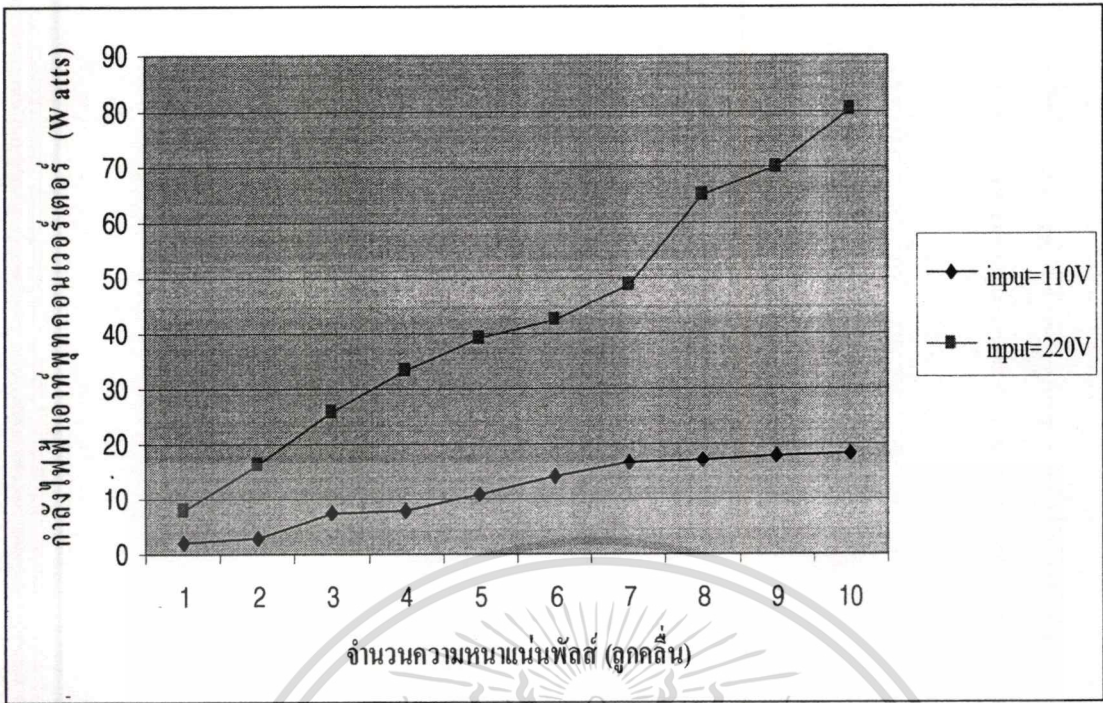


รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงกับความหนาแน่นพัลส์



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าย้อนคอมเวอร์เตอร์กับความหนาแน่นพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

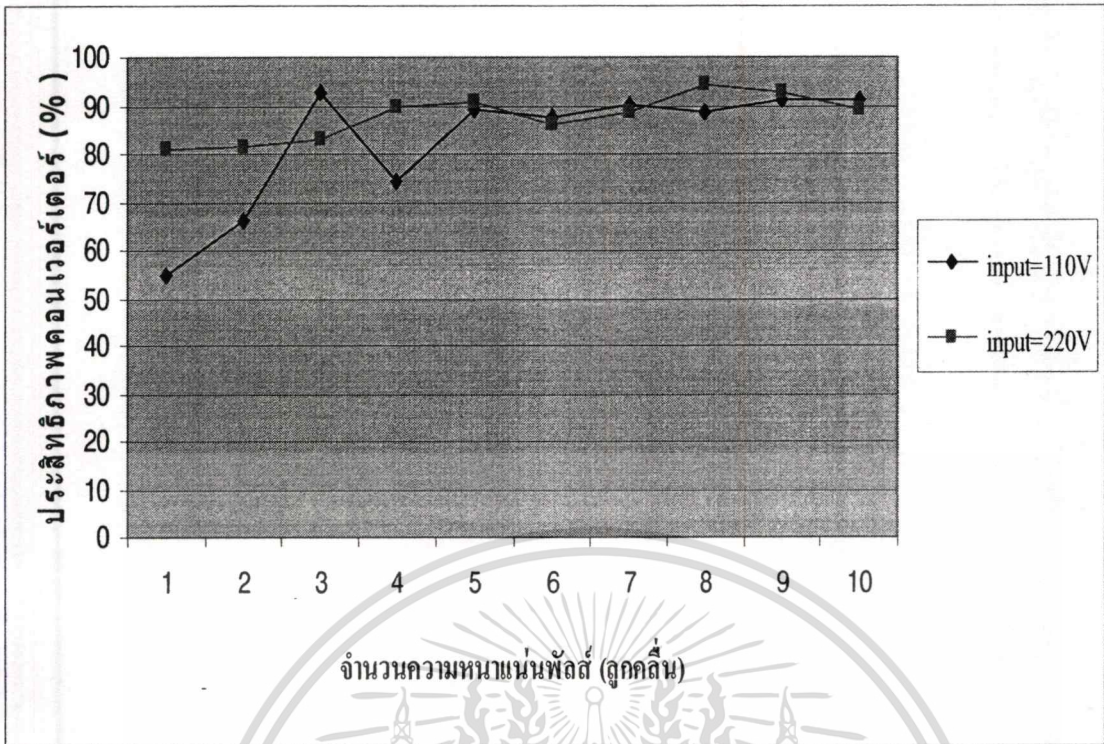


รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์กับความหนาแน่นพัลส์

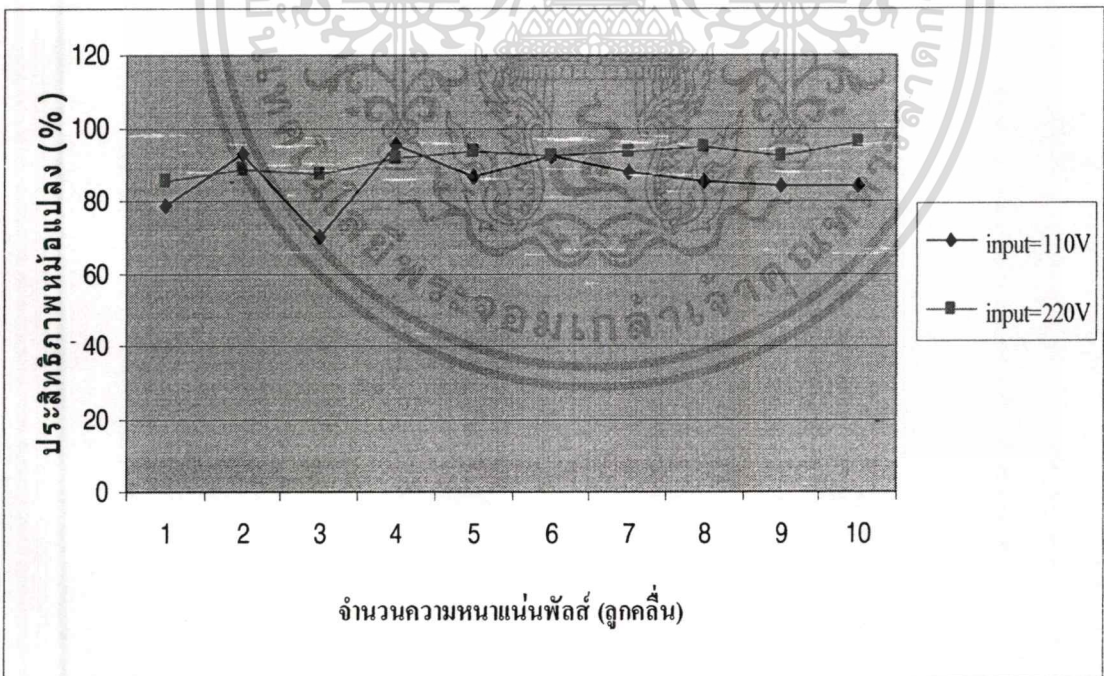


รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟเอาต์พุตหม้อแปลงกับความหนาแน่นพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

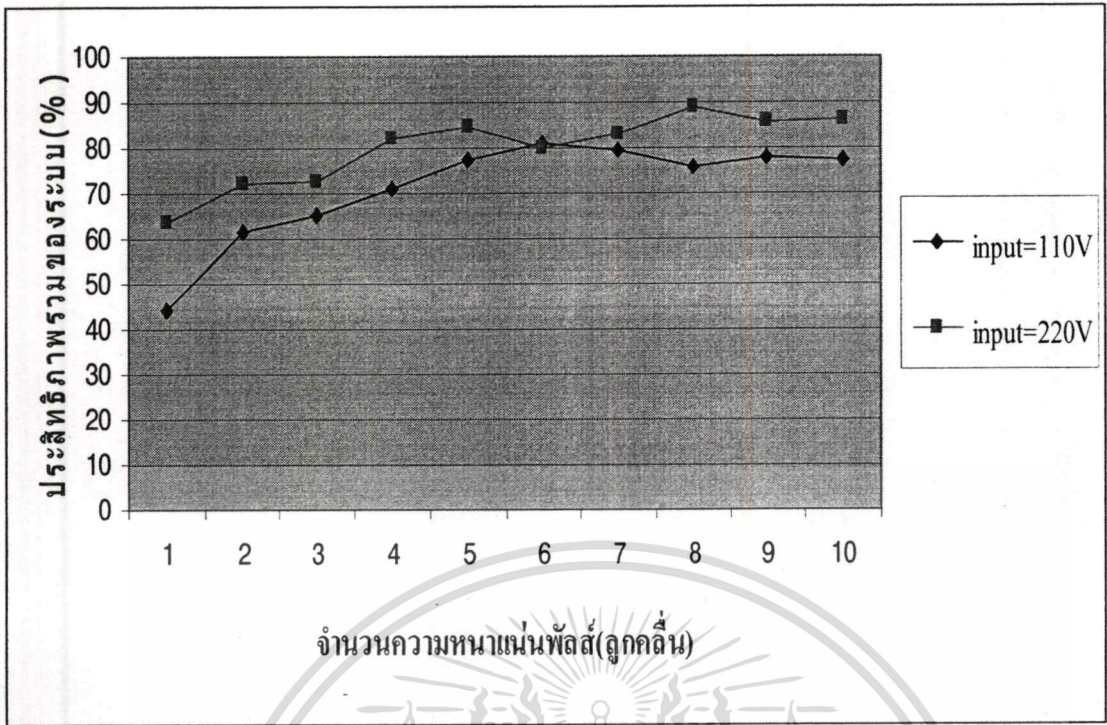


รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพคอนเวอร์เตอร์กับความหนาแน่นพัลส์

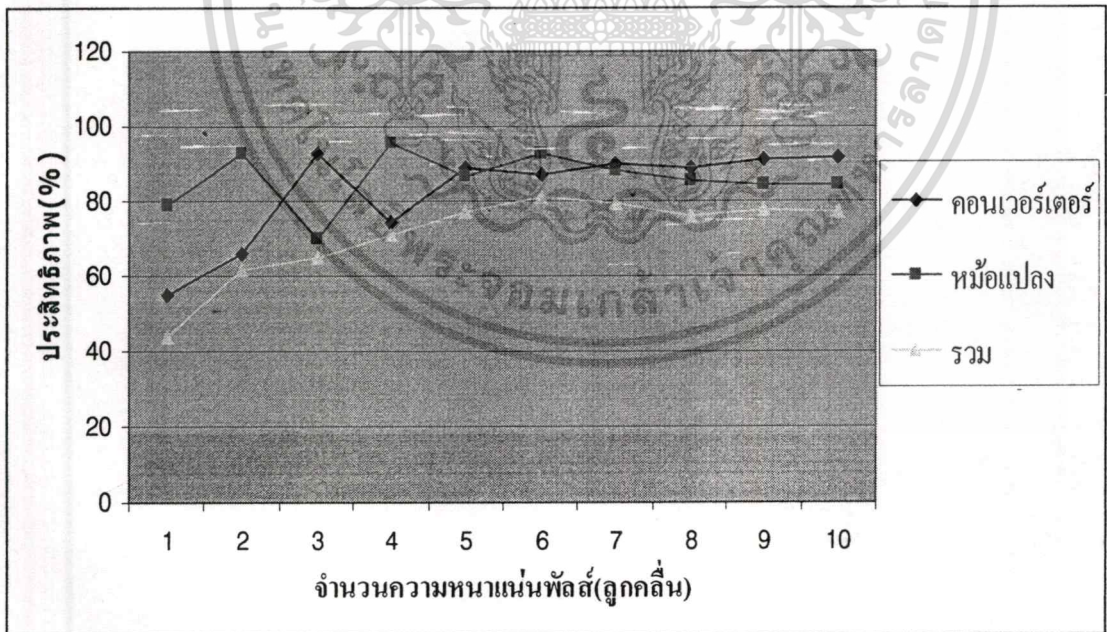


รูปที่ 5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพหม้อแปลงกับความหนาแน่นพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



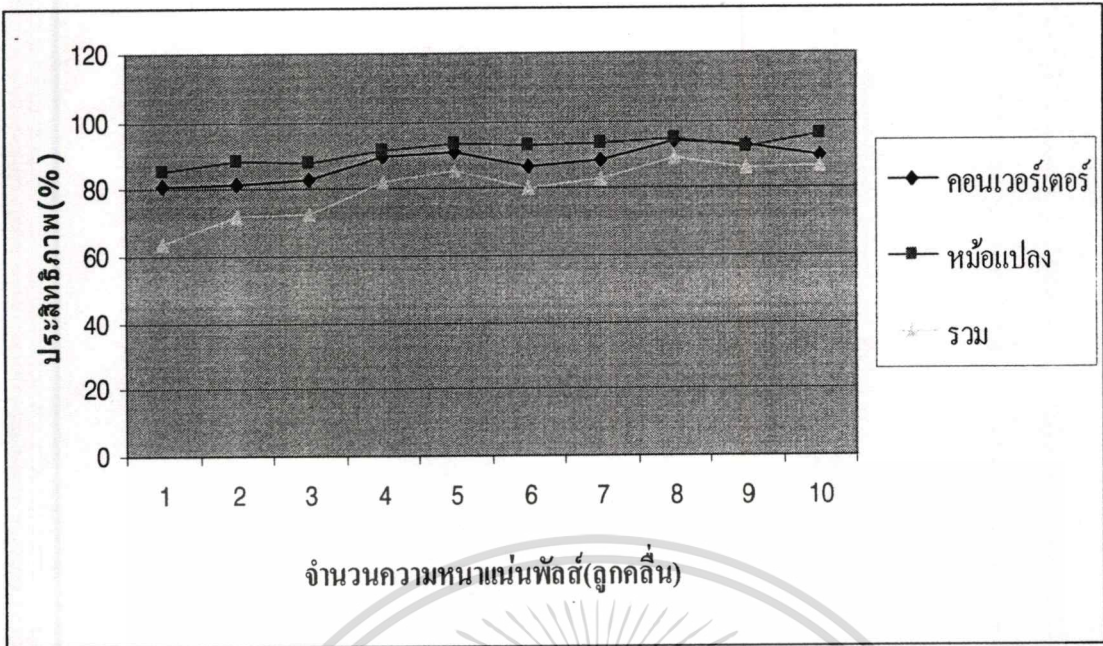
รูปที่ 5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพรวมของระบบกับความหนาแน่นพัลส์



รูปที่ 5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพรวมของระบบประสิทธิภาพคอนเวอร์

เตอร์ประสิทธิภาพหม้อแปลงกับความหนาแน่นพัลส์ที่ แรงดันอินพุต 110 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพรวมของระบบประสิทธิภาพคอนเวอร์เตอร์ประสิทธิภาพหม้อแปลงกับความหนาแน่นพัลส์ที่ แรงดันอินพุต 220 V

จากการทดลองในบทที่ 4 จะเห็นว่ารูปสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ในช่วงของการหยุดนำกระแสสัญญาณที่วัดได้จะไม่ใช่เป็นศูนย์ขณะที่เกิดจากการที่โหลดเป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานจึงเกิดการอินดีคัลกลับเข้าไปของ โหลด และจากการนำค่าต่างๆมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์จะเห็นว่าที่ความหนาแน่นพัลส์ 6 ลูกคลื่นจะสังเกตเห็นว่าค่าต่างๆเริ่มที่จะคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยเนื่องจากความถี่เอาต์พุตที่ความหนาแน่นพัลส์ 6 ลูกคลื่นนี้เริ่มใกล้เคียงกับความถี่ไซแนสตนเอง

จากรูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงกับจำนวนความหนาแน่นพัลส์ จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตของหม้อแปลงจะเปลี่ยนแปลงตามจำนวนความหนาแน่นพัลส์และแรงดันอินพุตที่ป้อนให้กับคอนเวอร์เตอร์โดยที่แรงดันอินพุตที่ 110 V แรงดันเอาต์พุตของหม้อแปลงต่ำสุดเท่ากับ 1.1 kV ที่ความหนาแน่นพัลส์ 1 ลูกคลื่น และแรงดันเอาต์พุตสูงสุดเท่ากับ 2.283 kV ที่ความหนาแน่นพัลส์ 10 ลูกคลื่น แรงดันอินพุตที่ 220 V แรงดันเอาต์พุตของหม้อแปลงต่ำสุดเท่ากับ 1.845 kV ที่ความหนาแน่นพัลส์ 1 ลูกคลื่น และแรงดันเอาต์พุตสูงสุดเท่ากับ 5.655 kV ที่ความหนาแน่นพัลส์ 10 ลูกคลื่น

จากรูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าอินพุตคอนเวอร์เตอร์กับความหนาแน่นพัลส์จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าอินพุตคอนเวอร์เตอร์จะเปลี่ยนแปลงตามจำนวนความหนาแน่นพัลส์และแรงดันอินพุตที่ป้อนให้กับคอนเวอร์เตอร์โดยที่แรงดันอินพุต 110 V กำลังไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินพุทคอนเวอร์เตอร์ต่ำสุดเท่ากับ 3.59 Watts ที่ความหนาแน่นพัลส์เท่ากับ 1 ลูกคลื่น กำลังไฟฟ้าอินพุทคอนเวอร์เตอร์สูงสุดเท่ากับ 20 Watts ที่ความหนาแน่นพัลส์เท่ากับ 10 ลูกคลื่นและที่แรงดันอินพุท 220 V กำลังไฟฟ้าอินพุทคอนเวอร์เตอร์ต่ำสุดเท่ากับ 10 Watts ที่ความหนาแน่นพัลส์เท่ากับ 1 ลูกคลื่น กำลังไฟฟ้าอินพุทคอนเวอร์เตอร์สูงสุดเท่ากับ 90 Watts ที่ความหนาแน่นพัลส์เท่ากับ 10 ลูกคลื่น

จากรูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุทคอนเวอร์เตอร์กับความหนาแน่นพัลส์จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุทคอนเวอร์เตอร์จะเปลี่ยนแปลงตามจำนวนความหนาแน่นพัลส์และแรงดันอินพุทที่ป้อนให้กับคอนเวอร์เตอร์โดยที่แรงดันอินพุท 110 V กำลังไฟฟ้าเอาต์พุทคอนเวอร์เตอร์ต่ำสุดเท่ากับ 2 Watts ที่ความหนาแน่นพัลส์เท่ากับ 1 ลูกคลื่น กำลังไฟฟ้าเอาต์พุทคอนเวอร์เตอร์สูงสุดเท่ากับ 18.3 Watts ที่ความหนาแน่นพัลส์เท่ากับ 10 ลูกคลื่นและที่แรงดันอินพุท 220 V กำลังไฟฟ้าเอาต์พุทคอนเวอร์เตอร์ต่ำสุดเท่ากับ 8.1 Watts ที่ความหนาแน่นพัลส์เท่ากับ 1 ลูกคลื่น กำลังไฟฟ้าเอาต์พุทคอนเวอร์เตอร์สูงสุดเท่ากับ 80.5 Watts ที่ความหนาแน่นพัลส์เท่ากับ 10 ลูกคลื่น

จากรูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุทหือแปลงแรงดันสูงความถี่สูงกับความหนาแน่นพัลส์จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุทหือแปลงแรงดันสูงความถี่สูงจะเปลี่ยนแปลงตามจำนวนความหนาแน่นพัลส์และแรงดันอินพุทที่ป้อนให้กับคอนเวอร์เตอร์โดยที่แรงดันอินพุท 110 V กำลังไฟฟ้าเอาต์พุทหือแปลงแรงดันสูงความถี่สูงต่ำสุดเท่ากับ 1.58 Watts ที่ความหนาแน่นพัลส์เท่ากับ 1 ลูกคลื่น กำลังไฟฟ้าเอาต์พุทหือแปลงแรงดันสูงความถี่สูงสูงที่สุดเท่ากับ 15.47 Watts ที่ความหนาแน่นพัลส์เท่ากับ 10 ลูกคลื่นและที่แรงดันอินพุท 220 V กำลังไฟฟ้าเอาต์พุทหือแปลงแรงดันสูงความถี่สูงต่ำสุดเท่ากับ 6.39 Watts ที่ความหนาแน่นพัลส์เท่ากับ 1 ลูกคลื่น กำลังไฟฟ้าเอาต์พุทหือแปลงแรงดันสูงความถี่สูงสูงที่สุดเท่ากับ 77.65 Watts ที่ความหนาแน่นพัลส์เท่ากับ 10 ลูกคลื่น

จากรูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์กับความหนาแน่นพัลส์จะเห็นว่าประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์จะเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 55 - 91.28 % ที่แรงดันอินพุท 110 V และประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์จะเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 81 - 94.34 % ที่แรงดันอินพุท 220 V และจากรูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของหือแปลงแรงดันสูงความถี่สูงกับความหนาแน่นพัลส์จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของหือแปลงแรงดันสูงความถี่สูงจะเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 69.86 - 65.37 % ที่แรงดันอินพุท 110 V และประสิทธิภาพของหือแปลงแรงดันสูงความถี่สูงจะเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 83.38 - 96.15 % ที่แรงดันอินพุท 220 V และจากรูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพรวมของระบบกับความหนาแน่นพัลส์จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพรวมของระบบจะเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 44 - 81 % ที่แรงดันอินพุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

110 V และประสิทธิภาพรวมของระบบจะเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 63.94 – 89.15 % ที่แรงดันอินพุท 220 V

### 5.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองทางเคมี

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนจำนวนความหนาแน่นพัลส์ที่ป้อนให้กับแท่งอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันรวมฉนวนสองชั้นโดยทำการปรับความหนาแน่นพัลส์ตั้งแต่ 1 ลูกคลื่นจนถึง 10 ลูกคลื่นและจ่ายแรงดันอินพุทให้กับคอนเวอร์เตอร์ 110 V และ 220 V ตามลำดับจะเห็นได้ว่าปริมาณก๊าซโอโซนเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ จากรูปที่ 4.92 ที่แรงดันอินพุท 110 V ก๊าซโอโซนจะเริ่มเกิดตั้งแต่ความหนาแน่นพัลส์ที่ 4 ลูกคลื่นและปริมาณโอโซนที่ต่ำสุดอยู่ที่ 47 mgO<sub>3</sub>/hr ที่ความหนาแน่นพัลส์เท่ากับ 4 ลูกคลื่น และปริมาณโอโซนมากที่สุดอยู่ที่ 263 mgO<sub>3</sub>/hr ที่ความหนาแน่นพัลส์เท่ากับ 10 ลูกคลื่น ที่แรงดันอินพุท 220 V ก๊าซโอโซนเริ่มเกิดตั้งแต่ความหนาแน่นพัลส์ 1 ลูกคลื่นและเพิ่มขึ้นตามลำดับโดยที่ปริมาณโอโซนต่ำสุดอยู่ที่ 90 mgO<sub>3</sub>/hr ที่ความหนาแน่นพัลส์เท่ากับ 1 ลูกคลื่น และปริมาณโอโซนสูงสุดอยู่ที่ 781 mgO<sub>3</sub>/hr ที่ความหนาแน่นพัลส์เท่ากับ 10 ลูกคลื่น

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีการปล่อยน้ำเสียหรืออุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการผลิตน้ำดื่ม มักใช้สารเคมีมีพิษในการกำจัดเชื้อโรคในน้ำ แต่จากปัญหาสภาพแวดล้อมที่มีความเป็นพิษต่าง ๆ ส่วนมากเกิดจากการปล่อยมลพิษในอุตสาหกรรมการผลิต เนื่องจากในหลายประเทศกำลังพัฒนายังไม่มีเทคโนโลยีขั้นสูงในการใช้งาน ดังนั้น จึงมีการตื่นตัวในการลดการใช้สารเคมีมีพิษและหาวิธีการอื่นหรือสารเคมีทดแทนมาใช้งาน

ก๊าซโอโซน (Ozone Gas) เป็นสารเคมีชนิดหนึ่งที่มีความเป็นพิษสูงสามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสียหรือใช้ฆ่าเชื้อโรคในผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวกับการบริโภคโดยใช้แทนสารเคมีมีพิษ เช่น สารคลอรีนได้ แต่ข้อดีของก๊าซโอโซนคือ สะลายตัวได้ง่ายและรวดเร็วโดยไม่เหลือความเป็นพิษตกค้าง สามารถผลิตได้ง่ายเพียงแต่เข้าใจคุณสมบัติการเกิดของก๊าซอย่างเพียงพอ ซึ่งโดยส่วนใหญ่ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นตัวการสร้างก๊าซขึ้น วิธีการนั้นใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าป้อนให้ชุดอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อสร้างสนามไฟฟ้า จากนั้นจึงปล่อยให้อากาศไหลผ่านสนามไฟฟ้า ก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) จะแตกตัวออกเป็น โมเลกุลอิสระ ( $O_2$ ) และรวมตัวกันใหม่กลายเป็นก๊าซโอโซนเกิดขึ้น

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในงานผลิตก๊าซโอโซนขนาดใหญ่ จะใช้แหล่งจ่ายแบบฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ เพราะสามารถจ่ายกำลังได้สูงและการใช้งานความถี่สวิตซ์ที่สูง สามารถลดขนาดของเครื่องให้เล็กลงได้ เหตุผลอีกข้อคือ การเพิ่มความถี่ของสนามไฟฟ้าให้สูงขึ้นทำให้ปริมาณก๊าซโอโซนที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น แต่แหล่งจ่ายกำลังแบบนี้ค่อนข้างควบคุมกำลังไฟฟ้าได้ยากเพราะเมื่อมองภาระทางไฟฟ้าของโหลดเป็นอุปกรณ์แบบสะสมพลังงาน ทำให้อุปกรณ์สวิตซ์ของคอนเวอร์เตอร์ถูกบังคับให้ยังคงทำงานต่อไปแม้จะถูกสั่งให้หยุดทำงาน จากการผลัดกันกระแสให้ไหลต่อเนื่องของอุปกรณ์สะสมพลังงาน ผลที่ตามมาคือความกว้างพัลส์ของแรงดันจะมีค่ามากที่สุด ซึ่งอาจทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าวิกฤตและเกิดการเบรกดาวน์ได้ ส่งผลให้เกิดความร้อนและก๊าซโอโซนก็จะสลายตัวเร็วขึ้น ค่าประสิทธิภาพของเครื่องก็จะมีค่าลดต่ำลง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการกำหนดสัญญาณขับเกดของมอสเฟตในฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์วิธี โดยการปรับจำนวนพัลส์ (Pulse Density Modulation) ซึ่งยังสามารถแบ่งแยกออกได้อีกสองหลักการ คือ หลักการควบคุมโดยวิธีการปรับจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจาย และหลักการควบคุมโดยวิธีการปรับจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบรวมตัวเป็นกลุ่ม การควบคุมกำลังไฟฟ้าทั้งสองแบบการปรับพัลส์ PDM และแบบการปรับความถี่ นี้จะมีวิธีการควบคุมที่แตกต่างกัน โดยสิ้นเชิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวมทั้งข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงหลักการควบคุมโดยวิธีการปรับจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบรวมตัวเป็นกลุ่มจากหลักการควบคุมกำลังไฟฟ้าในวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนท์ความถี่สูง สำหรับกรณีการปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการปรับลดจำนวนพัลส์ในรูปแบบของการกระจายนั้นเพื่อเป็นการเปรียบเทียบกับหลักการควบคุมกำลังไฟฟ้า โดยการปรับลดจำนวนพัลส์ ในอีกรูปแบบหนึ่งซึ่งเป็นรูปแบบที่คลื่นพัลส์มีลักษณะการรวมตัวกันเป็นกลุ่ม ทั้งนี้เพื่อศึกษาคุณสมบัติต่างๆทางไฟฟ้าของทั้งสองกรณีนี้ เช่น ลักษณะของคลื่นและค่าของแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในวงจรลักษณะโหมคการทำงานของวงจรในหนึ่งช่วงคาบเวลาซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ PDM แบบรวมตัวเป็นกลุ่ม

ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าในวงจรพัลส์ PDM แบบการรวมตัวเป็นกลุ่มและแบบกระจายตัวนี้ โดยแต่ละรูปแบบจะประกอบด้วยรูปคลื่นพัลส์จำนวน 10 ไซเคิลต่อคาบเวลาที่มีช่วงการ ON - OFF พัลส์ในจำนวนที่แตกต่างกันสำหรับ PDM แบบรวมตัวเป็นกลุ่มนี้จะเป็นการจัดรูปคลื่นพัลส์ ให้มีการรวมตัวเป็นกลุ่มอยู่ในแถบบริเวณเดียวกันโดยไม่ให้มีการกระจายออกในช่วง 1 คาบเวลา ที่ใช้ในการพิจารณา

วิธีการนำเสนอในวิทยานิพนธ์เป็นหนึ่งในหลาย ๆ วิธีที่ใช้ในการปรับระดับปริมาณการเกิดก๊าซโอโซนและยังมีวิธีการอื่นที่น่าสนใจซึ่งสามารถใช้ปรับระดับปริมาณก๊าซได้ เช่น โดยใช้การเลื่อนเฟสขั้วสัญญาณเกิดคู่การทำงานของมอสเฟต ส่งผลให้คอนเวอร์เตอร์มีวงรอบการคืนพลังงานจากโหลดที่เป็นอุปกรณ์สะสมพลังงาน ในช่วงเวลาที่เกิดวงรอบการคืนพลังงานแรงดันทางด้านเอาต์พุทของคอนเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับศูนย์ แรงดันที่ตกคร่อมขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงจึงเป็นศูนย์ด้วยและอีกส่วนก็คือในงานที่แรงดันและความถี่สูง จำเป็นต้องใช้วัสดุฉนวนที่ทนแรงดันได้สูง และมีการป้องกันสนามแม่เหล็กربกวนได้

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] J.Marcos Alonso, Jesus Cardesin, Emilio Lopez Corominas, Manuel Rico-Secedes and Jorge Garcia, “Low-Power High-Voltage High-Frequency Power Supply for Ozone Generation,” IEEE Transection on Industry Application, March/April 2004, Vol.40, No,2,pp.414-421
- [3] Mario Ponce, Jorge Aguilar, Jaime Fernandez, Erwin Beutelspacher, Jose M. Calderon, Claudia Cortes, “Linear and non linear model for ozone generators considering electrodes losses,” IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2004,pp.810-814
- [4] Kudryavtsev Oleg, Moisseev Sergey, Mutsuo Nakaoka, “Frequency characteristics analysis and switching power supply designing for dielectric barrier discharge type load,” IEEE Power Electronics Congress, 2002,pp.222-227
- [5] Oleg Koudriavtsev, Shengjpei Wang, Yoshihiro Konishi, and Mutsuo Nakaoka, “A Novel Pulse-Density-Modulated High-Frequency Inverter for Silent-Discharge-Type Ozonizer,” IEEE Transection on Industry Application, March/April 2002, Vol.38, No.2, pp.369-378
- [6] พรพิมล รัตนวิเชียร. “เครื่องผลิตก๊าซโอโซนด้วย พลังงานแสงอาทิตย์,” วิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543
- [7] ตำรวจ สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528
- [8] ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล, เอกสารประกอบการเรียนวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 2544
- [9] Mika Sippola, Developments for The High Frequency Power Transformer Design and Implementation, Applied Electronics Laboratory, Helsinki University of Technology, 2003
- [10] N.Mohan, T.M. Undeland, and W.P.Robbins, Power Electronics. Converters, Applications, and Design, 2 edition, New York: John Wiley & Sons, INC.,1995
- [11] H.Kifune, Y.Hatanaka and M.nakaoka, “Quasi-series-resonant-type soft-switching phase shift modulated inverter,” IEEE Proc.-Electr. Power Appl., November 2003, Vol. 150, No.6, pp. 725-732

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] นรเศรษฐ พัฒนเดช, วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า เล่ม 1, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550
- [13] อนูรกิจ มั่นสุข “เครื่องผลิตก๊าซไอโซนแบบแรงดันสูงความถี่สูงโดยใช้แหล่งจ่ายเฟสชัฟท์-พีดับบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์,”วิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การวิเคราะห์ปริมาณไอโชน

### 1. ขั้นตอนการเตรียมสารเคมีที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณไอโชน

#### 1.1 สารละลายโปแตสเซียมไอโอไดด์ (2% KI)

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

เก็บไว้ในขวดสีชา 1 คืนก่อนนำมาใช้

#### 1.2 สารละลายกรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ )

- ละลายสารกรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) ให้มีความเข้มข้น 1N  $H_2SO_4$

#### 1.3 สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ( $Na_2S_2O_3$ )

- ละลาย ( $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ ) จำนวน 25 กรัม (g) ในน้ำ 1 ลิตร (L) ให้มีความเข้มข้น 0.1

N  $Na_2S_2O_3$

#### 1.4 น้ำแป้ง (1% Starch)

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

### 2. ขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณไอโชนโดยวิธีทางเคมี

2.1 ดูดซึ่มก๊าซไอโชน (Absorption) จากเครื่องผลิตไอโชนลงในขวดรูปชมพู่ที่มีสารละลายโปแตสเซียมไอโอไดด์ละลาย (KI) กับน้ำกลั่นปริมาณ 100 มิลลิตร (mL) เป็นเวลา 1 นาที สารละลายที่ได้จะเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีเหลืองหรือสีส้ม

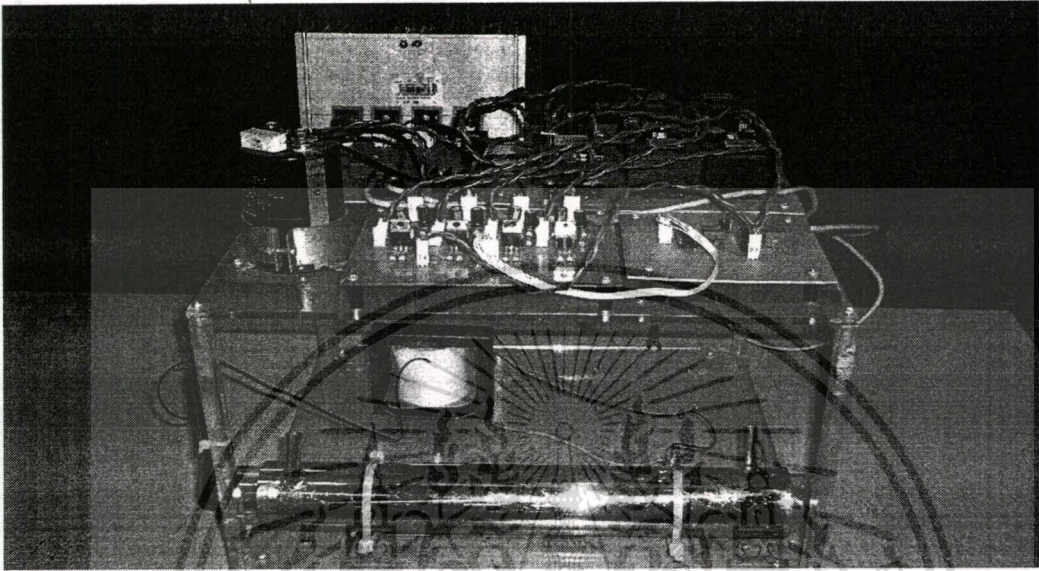
2.2 นำสารละลายที่ได้จากข้อ 2.1 มาปรับค่า pH โดยการนำสารละลายกรดซัลฟูริกที่มีค่าความเข้มข้น 1 N  $H_2SO_4$  ปริมาณ 3 มิลลิตร (mL) และเติมน้ำแป้ง 1 มิลลิตร (mL) (เป็นอินดิเคเตอร์) เติกลงไปในสารละลายที่ได้จากข้อ 2.1 สารละลายจะเปลี่ยนสีจากสีเหลืองหรือสีส้ม จะกลายเป็นสีน้ำเงิน

2.3 นำสารละลายที่ได้จากข้อ 2.2 มาทำการไตเตรดโดยใช้สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่มีความเข้มข้น 0.1 N  $Na_2S_2O_3$  เป็นตัวไตเตรด ทำการไตเตรดจนสีน้ำเงินจากหายไปจากนั้นทำการบันทึกค่าของ 0.1 N  $Na_2S_2O_3$  เพื่อใช้ในการคำนวณต่อ

### 3. การคำนวณหาปริมาณไอโชน

จากความสัมพันธ์ 0.1 N  $Na_2S_2O_3$  1mL = 2.4 mg  $O_3$

ตัวอย่าง การคำนวณเช่นกรณีที่ใช้  $0.1 \text{ N Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ในการไตเตรด  $1.7 \text{ mL}$  และดูดซึมไอโชนลงน้ำ  $1$  นาที คือปริมาณก๊าซไอโชนที่ผลิตได้ประมาณ  $1.7 \times 2.4 \times 60 = 122.4 \text{ mgO / hr}$

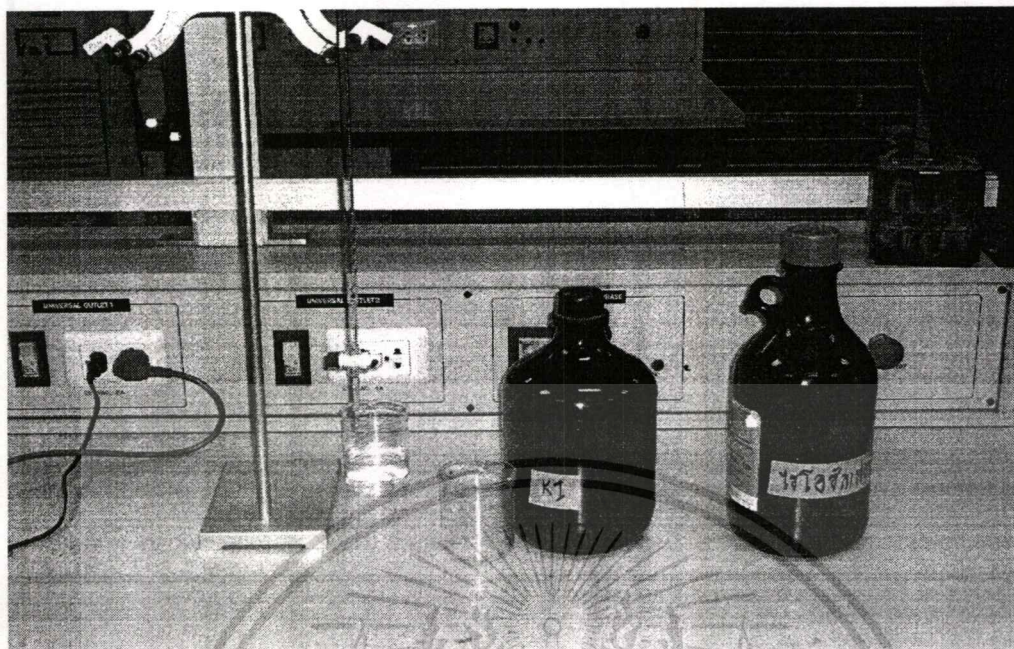


รูปที่ ก.1 เครื่องผลิตก๊าซ ไอโชนต้นแบบ



รูปที่ ก.2 การทดลองและเก็บผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

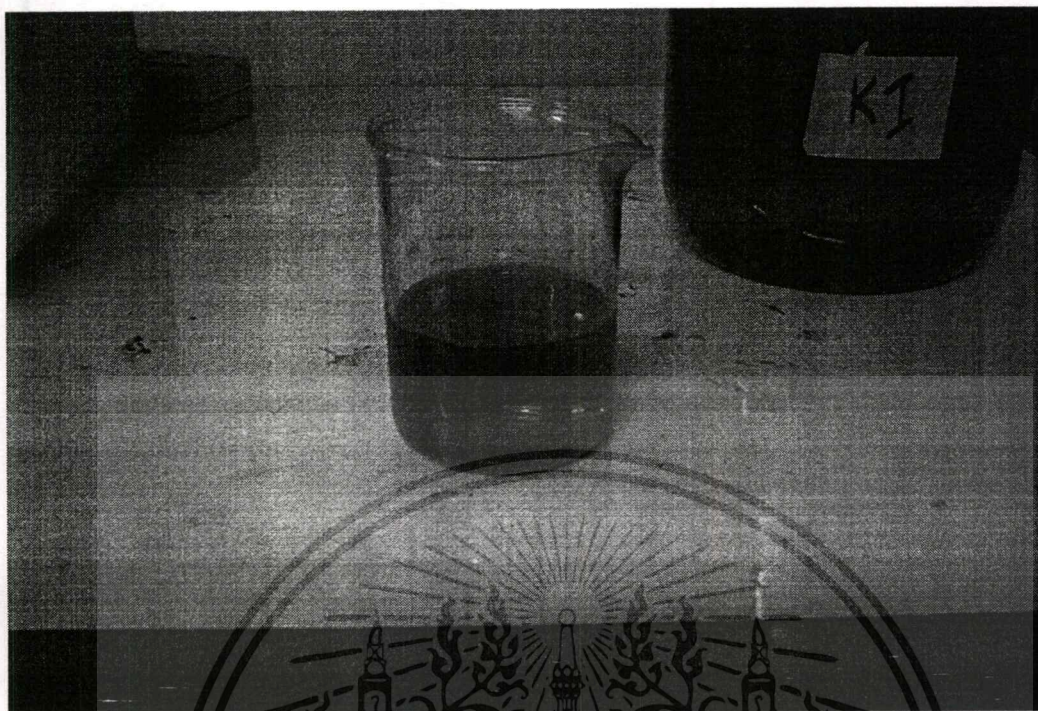


รูปที่ ก.3 การเตรียมสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

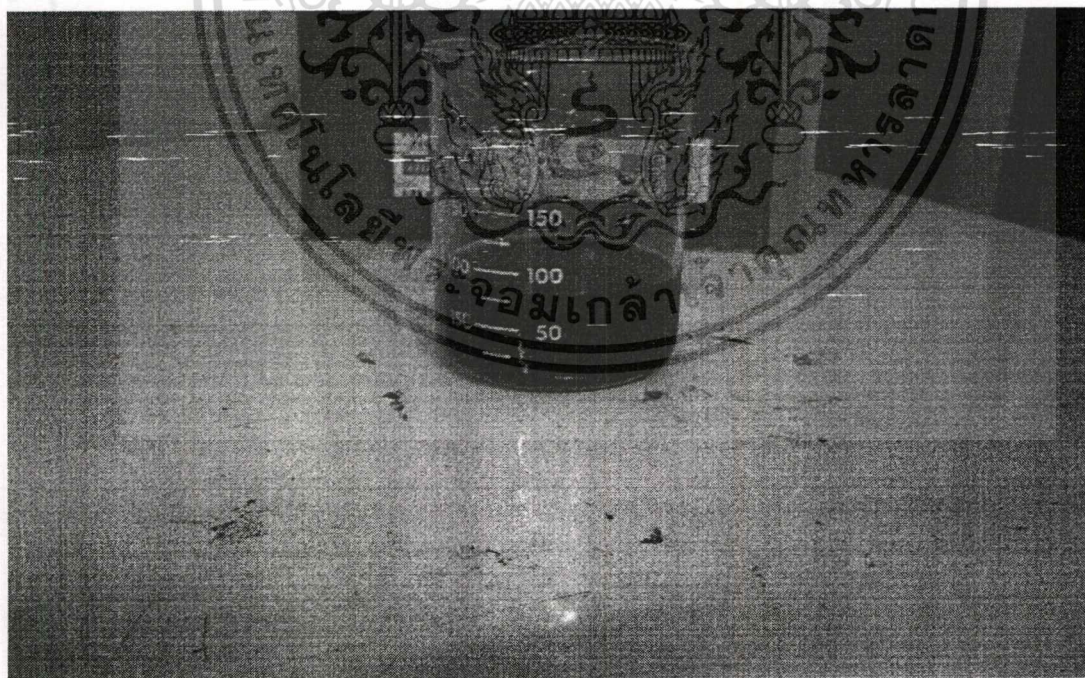


รูปที่ ก.4 สารละลาย KI ก่อนทำปฏิกิริยากับ ไอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

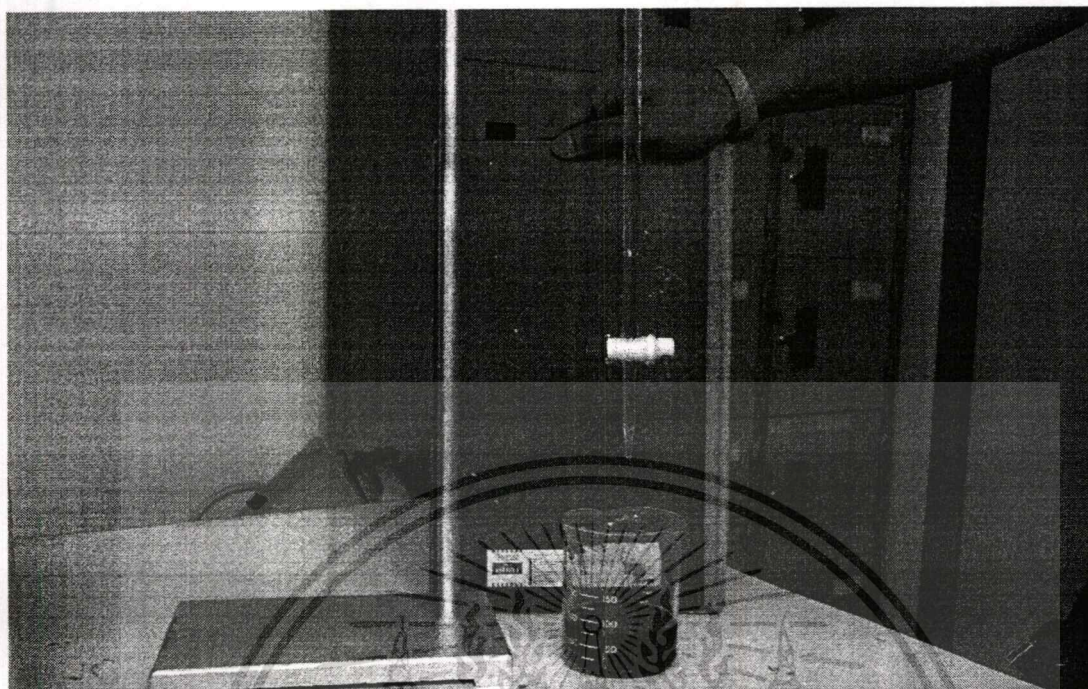


รูปที่ ก.5 สารละลาย KI หลังทำปฏิกิริยากับไอโชน

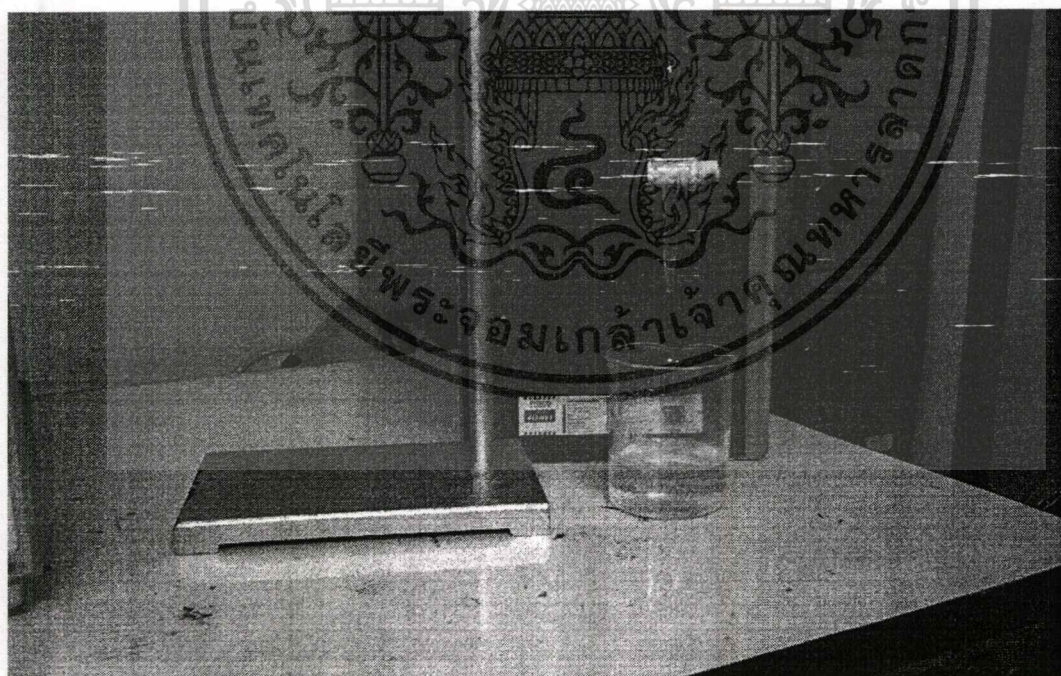


รูปที่ ก.6 สารละลาย KI หลังทำปฏิกิริยากับ ไอโชนและผสมกับน้ำแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.7 ขั้นตอนการหยดสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ )



รูปที่ ก.8 หลังทำการไตเตรดกับ โซเดียมไทโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) แล้ว

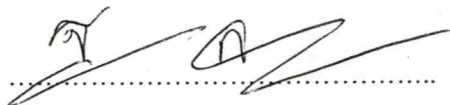
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการทดสอบปริมาณก๊าซโอโซน

ทำการทดสอบปริมาณโอโซนโดยกำหนดความหนาแน่นพัลส์ตั้งแต่ 1 – 10 ลูกคลื่น จ่ายแรงดันอินพุตเท่ากับ 110 V และ 220 V ตามลำดับโดยทำการเก็บผลการทดลอง 2 ครั้งต่อความหนาแน่นพัลส์หนึ่งลูกคลื่นแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องโดยผลได้แสดงในตารางด้านล่าง

จำนวนความ หนาแน่นพัลส์ (ลูกคลื่น)	ปริมาณก๊าซโอโซน(mgO <sub>3</sub> /hr)					
	แรงดันอินพุต 110 V			แรงดันอินพุต 220 V		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
1	-	-	-	86	95	90.5
2	-	-	-	164	172	168
3	-	-	-	259	250	254.5
4	43	51	47	345	336	304.5
5	60	69	64.5	406	397	401.5
6	86	77	81.5	432	440	436
7	164	172	168	518	527	522.5
8	198	207	202.5	604	596	600
9	241	250	245.5	691	682	686.5
10	259	267	263	777	786	781.5

ทำการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการเคมี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร



( รุณสร สังประพน )

เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี

24 กันยายน 2551



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# เครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบบแรงดันสูงความถี่สูงโดยใช้เทคนิคความหนาแน่นพัลส์

## High Voltage and High Frequency Ozone Generator Using a Pulse Density Modulation Technique

สรารุช คำนันทไทย และ วิจิตร กิณเรศ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กทม. 10520

โทร. (02) 326-4550, E-Mail: kkwijit@kmitl.ac.th , sarawut09@hotmail.com

### บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบบแรงดันสูงความถี่สูง โดยใช้เทคนิคความหนาแน่นพัลส์สำหรับฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ข้อดีของเทคนิคนี้คือสามารถปรับลดเพิ่มปริมาณโอโซน โดยการปรับจำนวนลูกคลื่นความหนาแน่นพัลส์โดยที่พิกัดแรงดันที่เอาต์พุตจากหม้อแปลงอยู่ระหว่าง 4 kV ถึง 7 kV ความถี่ 25 kHz สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตของหม้อแปลงได้ โดยการปรับจำนวนความหนาแน่นพัลส์ที่ภาคควบคุมของวงจร

คำสำคัญ: เทคนิคการควบคุมความหนาแน่นพัลส์

### ABSTRACT

This paper presents the design and implementation of an ozone generator a based on a PDM (Pulse Density Modulation) technique using a full-bridge converter providing high voltage and high frequency. The advantage is the adjustment of the quantity of ozone by controlling the number of the wave of pulse density. The rated voltage at the output of a transformer is between 4 kV and 7 kV at 25 kHz. The output voltage of the transformer can be controlled by varying the number of pulse density at the control part of a circuit.

Keywords: Pulse Density Modulation

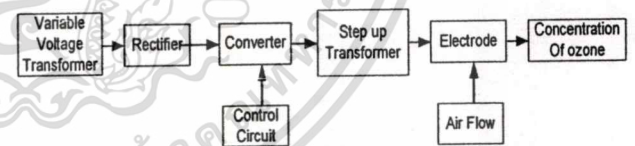
### 1. บทนำ

ในปัจจุบันได้มีการนำก๊าซโอโซน นำมาใช้ประโยชน์เพื่อฆ่าเชื้อโรค และลดปริมาณการใช้คลอรีน (Chlorine) ในน้ำอย่างแพร่หลาย เช่น ในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีการบำบัดน้ำเสีย โรงงานผลิตน้ำแข็ง นำเชื้อโรคเครื่องมือแพทย์ การฟอกอากาศให้บริสุทธิ์ในอาคาร ธุรกิจสระว่ายน้ำและสปา แต่ในขณะที่เดียวกันก๊าซโอโซนมีข้อเสีย ถ้าใช้ในปริมาณที่เข้มข้นมากเกินไปจะทำให้เกิดการระคายเคืองกับเยื่อเมือก การนำก๊าซโอโซนมาใช้ให้เหมาะสมกับงานนั้นต้องสามารถปรับเปลี่ยนปริมาณก๊าซได้ การสร้างก๊าซโอโซนจะอาศัยพลังงานจากสนามไฟฟ้าที่

ป้อนให้อิเล็กโทรดมาผลิตก๊าซ โดยความแตกต่างจะขึ้นอยู่กับชุดอิเล็กโทรดหรือชนิดของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า[1]

เครื่องผลิตก๊าซโอโซนขนาดใหญ่ส่วนมากใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบพีดีบีเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (PWM Full Bridge Converter) สร้างสนามไฟฟ้ากระแสสลับป้อนให้กับชุดอิเล็กโทรด (Electrode) ที่มีตัวนำ 2 ตัว โดยมีช่องว่างอากาศกั้นอยู่ระหว่างกลางซึ่งสามารถมองเป็นโหนดตัวเก็บประจุทางไฟฟ้าได้ คอนเวอร์เตอร์แบบนี้มีข้อดีคือ สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงสามารถควบคุมความถี่เอาต์พุตได้ ดังนั้นจึงสามารถควบคุมปริมาณการผลิตก๊าซโอโซนได้เช่นกัน แต่ในกรณีที่โหนดเป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานการควบคุมแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ทำได้ยากและมีกำลังสูญเสียที่อุปกรณ์สวิทช์เพิ่มขึ้น

ดังนั้น จึงนำเทคนิคการควบคุมลูกคลื่นที่ป้อนให้กับชุดอิเล็กโทรดเพื่อปรับเปลี่ยนพลังงานที่ใช้ผลิตก๊าซโอโซน โดยการปรับเพิ่มลดจำนวนความหนาแน่นของรูปคลื่นที่แท้จริงในส่วนของภาคควบคุม PDM จะทำให้แรงดันเอาต์พุตของหม้อแปลงสามารถควบคุมให้อยู่ในพิกัดได้



รูปที่ 1 โครงสร้างเครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบบแรงดันสูงความถี่สูงโดยใช้เทคนิคความหนาแน่นพัลส์

### 2. ทฤษฎีโอโซน

#### 2.1 วิธีการสร้างโอโซน

ก๊าซโอโซน คือ ก๊าซที่เกิดจากการจับตัวกันของออกซิเจน 3 อะตอม การที่จะทำให้ออกซิเจนแตกพันธะได้นั้นจะต้องป้อนพลังงานจากภายนอกเข้าไปกระตุ้นให้ออกซิเจน (O<sub>2</sub>) แตกพันธะออกเป็นอะตอมอิสระของออกซิเจน (O) แล้วจึงรวมตัวกับ (O<sub>2</sub>) และ (O) ดังรูปที่ 2 โดยอาศัยพลังงานจากสนามไฟฟ้าเพื่อให้เกิดกระบวนการไอออไนเซชันหรือกระบวนการที่โมเลกุลของก๊าซได้รับพลังงานเพียงพอ ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไป 1 อิเล็กตรอนโมเลกุลของก๊าซนั้นมีค่าประจุเป็นบวกและ

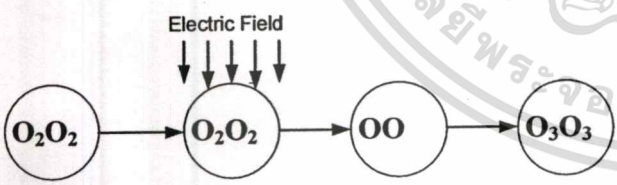
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนวงวนโมเลกุลของก๊าซได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าในขณะที่วิ่งเข้าหาศักย์ไฟฟ้าด้านบวก พลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับเป็นพลังงานจลน์และต้องมีค่ามากกว่าพลังงานไอออไนเซชัน

ในก๊าซประกอบด้วยอนุภาคต่างๆหลายชนิดทั้งที่มีประจุ (+,-) และอนุภาคที่เป็นกลาง การเคลื่อนที่ของอนุภาคเหล่านี้เป็นแบบสุ่ม สนามไฟฟ้าจากภายนอกทำให้อนุภาคประจุลบที่มีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับประจุบวกต่างๆไปเคลื่อนที่อย่างมีทิศทาง จึงทำให้ตัวมันมีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่เกิดขึ้น ในการแตกตัวของก๊าซเช่นเดียวกันในการผลิตโอโซนพลังงานหลักที่ทำให้ออกซิเจนเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างขึ้น ส่งถ่ายมาจากชนิดการชนอิเล็กตรอนกับโมเลกุลก๊าซออกซิเจน กระบวนการเริ่มขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนซึ่งได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าวิ่งชนโมเลกุลของก๊าซในระหว่างที่ถูกเร่งให้วิ่งเข้าหาเอาโนดอิเล็กตรอนที่วิ่งนี้ได้รับพลังงานจลน์จากสนามไฟฟ้า ถ้าพลังงานนี้มากกว่าพลังงานไอออไนเซชันของก๊าซ ก็จะเกิดกระบวนการไอออไนเซชันขึ้น

ขั้นตอนการสร้างโอโซนประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ  
 ขั้นตอนที่หนึ่ง - การแตกตัวโครงสร้างโมเลกุลก๊าซออกซิเจนเป็นอะตอมอิสระ ขั้นตอนนี้คือปฏิกิริยาของพลังงาน แหล่งพลังงานที่พิจารณาคือการชนถ่ายทอดพลังงานของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้า  
 ขั้นตอนที่สอง การจับตัวของอะตอมอิสระในข้อที่หนึ่งกับโมเลกุลก๊าซออกซิเจน (O<sub>2</sub>) เป็นโอโซน

ในการผลิตโอโซนนั้นย่านพลังงานที่ต้องใช้คือ 5.58 kW.h/m<sup>3</sup> ถึง 7.073 kW.h/m<sup>3</sup> [2] แต่เนื่องจากในอากาศมีออกซิเจนอยู่โดยประมาณ 21 % ดังนั้นย่านพลังงานที่ต้องใช้ในการสลายพลังงานที่ระเหยออกซิเจนคือช่วง 1.172 kW.h/m<sup>3</sup> ถึง 1.62 kW.h/m<sup>3</sup> จึงเพียงพอต่อการเกิดก๊าซโอโซน [2]



รูปที่ 2 กระบวนการเกิดก๊าซโอโซน

3.เทคนิคการมอดูเลชันความหนาแน่นของรูปคลื่นพัลส์ [3]

(Pulse Density Modulation)

ในการปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าในวงจรเรโซแนนซ์คอนเวอร์เตอร์ความถี่สูงทำได้ 2 ลักษณะ คือการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยวิธีการปรับความถี่ (Frequency Control) และการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยวิธีการปรับจำนวนพัลส์ (Pulse Density Modulation) ซึ่งยังสามารถแบ่งแยกออกได้อีกสองหลักการ คือ หลักการควบคุมโดยวิธีการปรับ

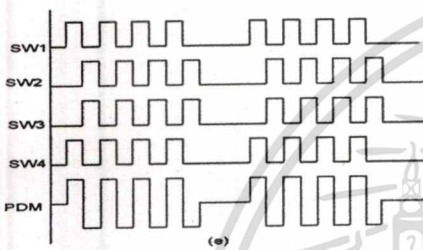
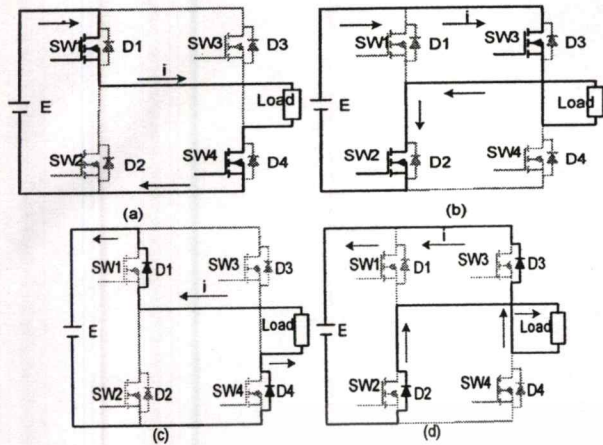
จำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบการกระจาย และหลักการควบคุมโดยวิธีการปรับจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบรวมตัวเป็นกลุ่ม การควบคุมกำลังไฟฟ้าทั้งสองแบบการปรับพัลส์ PDM และแบบการปรับความถี่ นี้จะมีวิธีการควบคุมที่แตกต่างกันโดยสิ้นเชิง รวมทั้งข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงหลักการควบคุมโดยวิธีการปรับจำนวนพัลส์ PDM ในรูปแบบรวมตัวเป็นกลุ่ม

จากหลักการควบคุมกำลังไฟฟ้าในวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ความถี่สูง สำหรับกรณีการปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการปรับลดจำนวนพัลส์ในรูปแบบของการกระจายนั้นเพื่อเป็นการเปรียบเทียบกับหลักการควบคุมกำลังไฟฟ้า โดยการปรับลดจำนวนพัลส์ในอีกรูปแบบหนึ่งซึ่งเป็นรูปแบบที่คลื่นพัลส์มีลักษณะการรวมตัวกันเป็นกลุ่ม ทั้งนี้เพื่อศึกษาคุณสมบัติต่างๆทางไฟฟ้าของทั้งสองกรณีนี้ เช่น ลักษณะของคลื่นและค่าของแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในวงจรลักษณะโหมคการทำงานของวงจรในหนึ่งช่วงคาบเวลาซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ PDM แบบรวมตัวเป็นกลุ่ม

ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าในวงจรพัลส์ PDM แบบการรวมตัวเป็นกลุ่มและแบบกระจายตัวนี้ โดยแต่ละรูปแบบจะประกอบด้วยรูปคลื่นพัลส์จำนวน 10 ไซเคิลต่อคาบเวลาที่มีช่วงการ ON - OFF พัลส์ในจำนวนที่แตกต่างกันสำหรับ PDM แบบรวมตัวเป็นกลุ่มนี้จะเป็นการจัดรูปคลื่นพัลส์ ให้มีการรวมตัวเป็นกลุ่มอยู่ในแถบบริเวณเดียวกันโดยไม่ให้มีการกระจายออกในช่วง 1 คาบเวลา ที่ใช้ในการพิจารณา

รูปที่ 3 (a) ทำงานในโหมคจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงดันเอาต์พุตเป็นบวกกระแสเอาต์พุตมีทิศทางเป็นบวก เมื่อ sw1 และ sw4 ทำงาน กระแสจากแหล่งจ่ายกระแสตรงไหลผ่าน sw1 ไปสู่ Load จากนั้นไหลผ่าน sw4 กลับสู่แหล่งจ่ายครบวงจร แรงดันตกคร่อมโหมคเท่ากับแรงดันที่แหล่งจ่าย +E ที่กึ่งหน้าแรงดันตกคร่อม sw2 D2 เท่ากับแหล่งจ่าย E แรงดันตกคร่อม sw1 D1 เท่ากับศูนย์ ที่กึ่งหลังแรงดันตกคร่อม sw3 D3 เท่ากับแหล่งจ่าย E แรงดันตกคร่อม sw4 D4 เท่ากับศูนย์ รูปที่ 3 (b) ทำงานใน โหมคคืนกำลังไฟฟ้าแรงดันเอาต์พุตเป็นลบกระแสเอาต์พุตมีทิศทางเป็นบวก เมื่อ sw3 และ sw2 ทำงาน กระแสจากแหล่งจ่ายกระแสตรงไหลผ่าน sw3 ไปสู่ Load จากนั้นไหลผ่าน sw2 กลับสู่แหล่งจ่ายครบวงจรแรงดันตกคร่อมโหมคเท่ากับแหล่งจ่ายแต่มีค่าติดลบเพราะกลับข้ามเท่ากับ -E ที่กึ่งหน้าแรงดันตกคร่อม sw1 D1 เท่ากับแหล่งจ่าย E แรงดันตกคร่อม sw2 D2 เท่ากับศูนย์ ที่กึ่งหลังแรงดันตกคร่อม sw3 D3 เท่ากับศูนย์แรงดันตกคร่อม sw4 D4 เท่ากับแหล่งจ่าย E รูปที่ 3 (c) จากรูปวงจรกำลังเป็นการทำงานในโหมคการคืนกำลังงานไฟฟ้าในขณะที่ sw 1 และ sw4 ยังทำงานอยู่แต่กระแสจะไหลผ่าน ไดโอด D1 และ D4 รูปที่ 3 (d) จากรูปวงจรกำลังเป็นการทำงานในโหมคการคืนกำลังงานไฟฟ้าในขณะที่ sw2 และ sw3 ยังทำงานอยู่แต่กระแสจะไหลผ่าน ไดโอด D2 และ D3 รูปที่ 3 (e) เป็นรูปสัญญาณของ sw1 sw2 sw3 sw4 และสัญญาณ PDM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

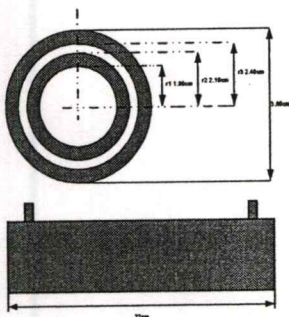


รูปที่ 3 รูปแบบการสวิตช์และรูปแบบการมอดูเลตของPDMแบบรวมกลุ่ม

4. การออกแบบแท่งอิเล็กโทรดและการคำนวณแรงดันที่ใช้ใน

การแตกตัวของออกซิเจน

ในการออกแบบส่วนกำเนิดไอโซนจะใช้หลักการของสนามไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ในการสร้างแท่งอิเล็กโทรด โดยการออกแบบแท่งอิเล็กโทรดในบทความนี้จะออกแบบให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนกันแล้วรวมจำนวนสองชั้น ซึ่งเป็นการออกแบบเพื่อให้แท่งอิเล็กโทรดสามารถสร้างสนามไฟฟ้าที่มีความไม่สม่ำเสมอสูงภายในช่องว่างอากาศได้ เพราะปริมาณไอโซนจะเกิดได้ดีในสนามไฟฟ้าแบบนี้ [2] โดยจะมีขนาดของแท่งและการออกแบบดังรูปที่ 4 และสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ตามสมการที่ (1),(2),[2]



รูปที่ 4 ลักษณะรูปทรงของอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันแล้วรวม

โดยกำหนดให้จำนวนชั้นที่ 1 เลือกใช้แก้วเป็นฉนวนโดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ ( $\epsilon_1$ ) = 8 จำนวนชั้นที่สอง ( $\epsilon_2$ ) = 1 และ ( $\epsilon_0$ ) =  $8.854 \times 10^{-12}$   $r_1 = 1.90$  cm  $r_2 = 2.10$  cm  $r_3 = 2.40$  cm  $l = 22$  cm และค่าปริมาตรอากาศในช่องว่างอากาศ (Vol) =  $6.22 \times 10^{-6}$   $m^3$  นำมาคำนวณหาค่าข่านพลังงานไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (1)

$$E = \sqrt{\frac{2 \times W}{\epsilon \times Vol}} \tag{1}$$

เมื่อ  $W = 7.28$  mW.h และ  $W = 10$  mW.h

จะได้พลังงานที่ใช้ต่ำสุดคือ

$$E_{min} = \sqrt{\frac{2 \times 7.28 \times 10^{-3}}{8.854 \times 10^{-12} \times 6.22 \times 10^{-6}}} = 16263 \text{ V/cm}$$

จะได้พลังงานที่ใช้สูงสุดคือ

$$E_{max} = \sqrt{\frac{2 \times 10 \times 10^{-3}}{8.854 \times 10^{-12} \times 6.22 \times 10^{-6}}} = 19056 \text{ V/cm}$$

คำนวณหาแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดไอโซนได้จากสมการที่ (2)

$$V = \frac{Er_2 \left( \epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)}{\epsilon_1} \tag{2}$$

$$V_{min} = \frac{16263 \times 2.1 \times \left( 8 \ln \frac{2.4}{2.1} + 1 \ln \frac{2.1}{1.9} \right)}{8} = 4.987 \text{ kV}$$

$$V_{max} = \frac{19056 \times 2.1 \times \left( 8 \ln \frac{2.4}{2.1} + 1 \ln \frac{2.1}{1.9} \right)}{8} = 5.84 \text{ kV}$$

นำแท่งอิเล็กโทรดที่ออกแบบมาคำนวณหาค่า C ได้ดังนี้

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon_1 l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{2\pi \times (8 \times 8.854 \times 10^{-12}) \times 22 \times 10^{-2}}{\ln \frac{2.10}{1.90}} = 4.0750 \times 10^{-11} \text{ F/m}$$

$$C_2 = \frac{2\pi\epsilon_2 l}{\ln \frac{r_3}{r_2}} = \frac{2\pi \times (1 \times 8.854 \times 10^{-12}) \times 22 \times 10^{-2}}{\ln \frac{2.40}{2.10}} = 9.1655 \times 10^{-11} \text{ F/m}$$

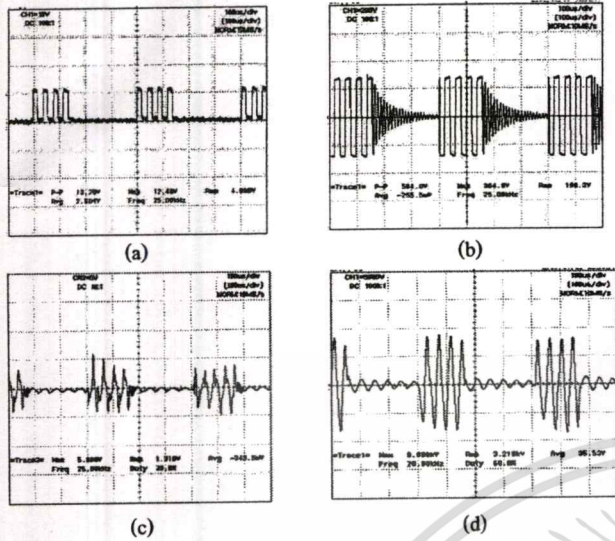
$$C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}} = 2.8220 \times 10^{-11} \text{ F/m}$$

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่ต้องป้อนให้กับแท่งอิเล็กโทรดเพื่อทำให้เกิดไอโซนจะอยู่ในช่วงระหว่าง 4.98 – 5.84 kV ในการออกแบบวงจรสำหรับสร้างแรงดันสูงในบทความนี้ได้ออกแบบให้สร้างแรงดันได้ 0 – 7 kVp โดยประมาณและสามารถปรับความถี่ได้ตั้งแต่ 10 – 25 kHz

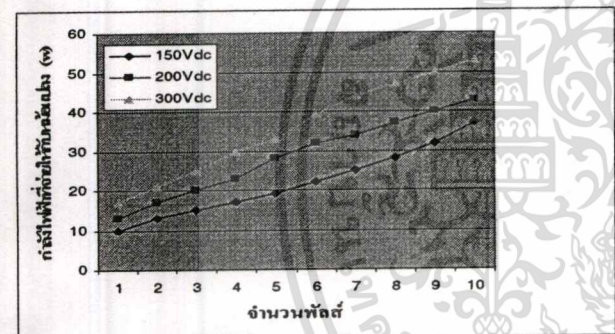
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ผลการทดลอง

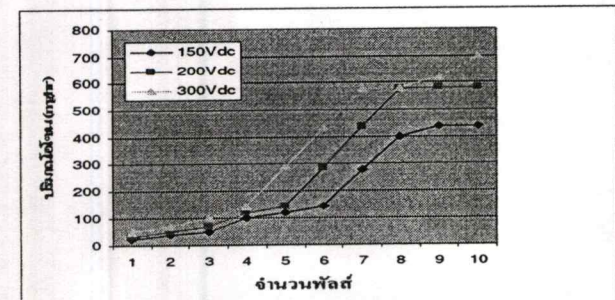


รูปที่ 5 (a) สัญญาณ PDM จำนวนสี่ลูกคลื่น (b) เอ้าท์พุทคอนเวอร์เตอร์ (c) สัญญาณกระแสที่โหลด (d) สัญญาณแรงดันที่โหลด



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพัลส์กับกำลังงานทางค่านเอ้าท์พุท

จากการทดลองปรับจำนวนลูกคลื่นพัลส์เคนซิดี้เพิ่มขึ้นทีละ 1 ลูกคลื่น โดยทำการปรับทั้งหมดจำนวน 10 ลูกคลื่นโดยปรับความถี่ที่ 25 kHz และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงคงที่ที่ 150 V 200 V 300 V ตามลำดับและทำการเปรียบเทียบก้าลังงานเอ้าท์พุทของคอนเวอร์เตอร์จะเห็นได้ว้่า กำลังเอ้าท์พุทของคอนเวอร์เตอร์จะเพิ่มขึ้น ตามจำนวนพัลส์และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนให้



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพัลส์ต่อปริมาณโอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 7 ทำการทดลองโดยการปรับจำนวนลูกคลื่นความหนาแน่นพัลส์เพิ่มขึ้นทีละ 1 ลูกคลื่นโดยทำการปรับทั้งหมดจำนวน 10 ลูกคลื่นโดยที่ความถี่คงที่ที่ 25 kHz และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงคงที่ที่ 150 V 200 V 300 V ตามลำดับและทำการเปรียบเทียบปริมาณโอโซนจะเห็นว่าปริมาณโอโซนจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนพัลส์และแรงดันกระแสตรงที่ป้อนให้ โดยที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ 150 V ปริมาณโอโซนต่ำสุดที่พัลส์ 1 ลูกคลื่นเท่ากับ 25 mg/hr และปริมาณโอโซนสูงสุดที่พัลส์ 10 ลูก เท่ากับ 435 mg/hr แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ 200 V ปริมาณโอโซนต่ำสุดที่พัลส์ 1 ลูกคลื่นเท่ากับ 30 mg/hr และปริมาณโอโซนสูงสุดที่พัลส์ 10 ลูก เท่ากับ 580 mg/hr แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ 300 V ปริมาณโอโซน ต่ำสุดที่พัลส์ 1 ลูกคลื่นเท่ากับ 50 mg/hr และปริมาณโอโซนสูงสุดที่พัลส์ 10 ลูก เท่ากับ 700 mg/hr

6.สรุป

จากการทดลองเครื่องกำเนิดโอโซนที่ออกแบบสามารถทำงานได้จริงในงานวิจัยนี้ จะเห็นว่าปริมาณโอโซนแรงดันเอ้าท์พุทและกำลังไฟฟ้าเอ้าท์พุทจะแปรผันตามจำนวนลูกคลื่นความหนาแน่นพัลส์ที่ทำการ ปรับโดยที่ความถี่คงที่โดยที่สามารถควบคุมแรงดันเอ้าท์พุทให้อยู่ในพิสัยตามที่ออกแบบไว้ได้โดยแรงดันที่ทำให้เกิดปริมาณโอโซนสูงสุดอยู่ที่ 5.65 kV

เอกสารอ้างอิง

[1]S.Potivejkul, V. Kinnares, P. Rattanavichien, "Design of Ozone Generator using SolarEnergy," IEEE APCAS,24-27 Nov 1998,pp217-220  
 [2] พรพิมล รัตนวิเชียร, "เครื่องผลิตก๊าซ โอโซนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์" วิทยานพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543  
 [3] Shenpei Wang, Mutsuo Nakaoka, Yoshiro Konishi "PDM and PWM Hybrid Power Control of a Voltage – Source Type High – Frequency Inverter for Ozonizer Applications",Power Electronics and Variabal Speed Drives,21-23 September 1998,Conference Publication NO. 456 IEEE1998



สรารุช คำนับไทย จบการศึกษาระดับปริญญา(วศ.บ) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครปัจจุบันศึกษาระดับปริญญาโทสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งานวิจัยที่สนใจ Power Electronics Electric a l Machines and drives



วิจิตร กิณรศ จบการศึกษา วศ.บ และ วศ.ม จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง Ph.D จาก Nottingham U.K. สนใจงานวิจัยทางด้าน Power Electronics Electric a l Machines and drives

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายสรารุช คำนั้บไทย  
 วัต เดือน ปีเกิด 19 มีนาคม 2520 ที่จังหวัดนครราชสีมา  
 ที่อยู่ 61 หมู่ 6 ต.ปากช่อง อ. ปากช่อง จ. นครราชสีมา 30130

ประวัติการศึกษา 2544 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
 สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ความชำนาญเฉพาะด้าน

- 1.) ออกแบบและสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง
- 2.) การออกแบบและประยุกต์ใช้งานวงจรทางด้านอิเล็กทรอนิกส์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้