

เครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบบแรงดันและความถี่สูงโดยใช้  
แหล่งจ่ายเฟสชิฟท์-พีดับบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

HIGH VOLTAGE AND HIGH FREQUENCY OZONE GENERATOR USING  
PHASE SHIFT-PWM FULL BRIDGE CONVERTER

อนรรักษ์ มั่นสุข  
ANURAG MANDSUK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

KMITL-2007-EN-M-020-124

เครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบบแรงดันและความถี่สูงโดยใช้  
แหล่งจ่ายเฟสชิฟท์-พีดีบีทิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

HIGH VOLTAGE AND HIGH FREQUENCY OZONE GENERATOR USING  
PHASE SHIFT – PWM FULL BRIDGE CONVERTER

อนุรักษ์ มั่นสุข  
ANURAG MANDSUK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2550

KMITL-2007-EN-M-020-124

**HIGH VOLTAGE AND HIGH FREQUENCY OZONE GENERATOR USING  
PHASE SHIFT – PWM FULL BRIDGE CONVERTER**

**ANURAG MANDSUK**

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

**2007**

**KMITL-2007-EN-M-020-124**

**COPYRIGHT 2007**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

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

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบบแรงดันและความถี่สูงโดยใช้แหล่งจ่ายเฟสชิฟท์-พีคดับลิแวมฟูลบรีดจ์คอนเวอร์เตอร์
นักศึกษา	นายอนรรักษ์ มั่นสุข
รหัสประจำตัว	45060106
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. วิจิตร กิณเรศ

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันระบบบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่หรืออุตสาหกรรมผลิตน้ำเพื่อบริโภคได้เริ่มหันมาให้ความสนใจและนำก๊าซโอโซนมาใช้งานกันมากขึ้น เนื่องจากสามารถนำมาทดแทนสารเคมีที่ใช้อยู่เดิมได้ โดยข้อได้เปรียบของก๊าซโอโซนคือสลายตัวได้อย่างรวดเร็วไม่ทิ้งสารพิษตกค้างและผลิตได้ง่ายโดยใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับป้อนแรงดันให้กับชุดอิเล็กทรอนิกส์เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าแรงสูงส่งผ่านพลังงานเป็นแรงกระทำต่อก๊าซออกซิเจนจนได้เป็นก๊าซโอโซนขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้นำเสนอเครื่องต้นแบบผลิตก๊าซโอโซนแบบใช้แหล่งจ่ายเฟสชิฟท์-พีคดับลิแวมฟูลบรีดจ์คอนเวอร์เตอร์ ข้อดีของระบบนี้คือสามารถปรับระดับปริมาณก๊าซโอโซนโดยการปรับความถี่ของคอนเวอร์เตอร์และสามารถปรับระดับแรงดันที่ใช้สร้างสนามไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่กำหนดได้ด้วยวิธีการเลื่อนเฟสขั้วสัญญาณเกิดของกลุ่มอสเฟทกำลัง เป็นผลให้ความกว้างพัลส์แรงดันเปลี่ยนแปลง โดยการทำงานทั้งหมดของระบบใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการสร้างสัญญาณควบคุมเพื่อนำไปขับสัญญาณของวงจรกำลัง โดยพิกัดแรงดันที่ป้อนให้กับชุดอิเล็กทรอนิกส์เท่ากับ 3.5 kV ซึ่งใช้หม้อแปลงความถี่สูงเป็นตัวเพิ่มแรงดัน และสามารถปรับความถี่สวิทซ์ของคอนเวอร์เตอร์ได้ตามสภาวะโหลดที่ความถี่รีโซแนนท์และสูงกว่าคือ 45kHz, 47.5kHz, 50kHz, 52kHz, 55kHz และ 57.5kHz จากนั้นวัดผลปริมาณก๊าซโอโซนที่ผลิตได้ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของแรงดันโดยปริมาณก๊าซมีค่ามากขึ้นเมื่อแรงดันมีความถี่สูงขึ้นจาก 314 mg/h – 939mg/h ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการปรับระดับปริมาณก๊าซโอโซนโดยการเปลี่ยนความถี่ได้ และพิกัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องคือ 73W

<b>Thesis Title</b>	High Voltage and High Frequency Ozone Generator using Phase Shift – PWM Full Bridge Converter
<b>Student</b>	Mr. Anurag Mandsuk
<b>Student ID.</b>	45060106
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2007
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Vijit Kinnares

## ABSTRACT

Presently, water waste treatment for industrial and water drinking applications has been increasingly interested and has used ozone. This method can replace existing chemical substance. The advantage of ozone is fast decomposition without exotic residue and simplicity in generation. Ozone is simply generated by using electric AC power supply feeding electrode for generating electric high voltage field. The energy is converted into force existing an ozone. As a consequence, Ozone occurs. Therefore, in this research a prototype of ozone generator is designed and constructed using a phase shift – PWM full bridge converter. The advantages of this system is capability of varying ozone level with converter frequency adjustment and varying voltage level for generating electric field within a defined range with phase shift of Mosfets gate signals. The overall control system uses a microcontroller for generating control signals for gate drive circuits. The voltage level is 3.5 kV in conjunction with a high frequency step up transformer. The switching frequency can be adjusted according to a load condition at resonant frequency and above are 45kHz, 47.5kHz, 50kHz, 52kHz, 55kHz and 57.5kHz. Ozone level is measured under variations in frequency and there are from 314mg/h to 939mg/h. Increased ozone level is achieved when increasing both voltage and frequency which agrees with theory for ozone level adjustment with frequency variation. Powers of converter is 73W.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประการที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุวัฒน์ กิตติรัตน์สังจา และ ผศ.ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ กรรมการสอบหัวข้อและเค้าโครงวิทยานิพนธ์และ อ.ชัยทัต มณีอินทร์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนรวมถึงข้อชี้แนะต่างๆที่จำเป็น จนในที่สุดแล้วก็ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์พื้นฐาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม ที่สนับสนุนเครื่องมือ สารเคมีและห้องปฏิบัติการในการวัดผลทางเคมี

ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการวิจัย PMC และภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่สนับสนุนอุปกรณ์เครื่องมือและสถานที่ ที่จำเป็นจะต้องใช้ในการงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณพี่น้อง ๆ ในห้องปฏิบัติการทุกคน

สุดท้ายต้องขอขอบคุณ พี่ เพื่อนและน้องๆทุกคนที่เป็นกำลังใจและแรงผลักดันให้ข้าพเจ้าทำงานวิจัยชิ้นนี้จนสำเร็จ

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพอย่างยิ่งอย่างหาที่สุดมิได้ ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

อนุรัักษ์ มั่นสุข

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 การดำเนินงานวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้จากวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องผลิตก๊าซไอโซน.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 กระบวนการสร้างก๊าซไอโซนโดยใช้อิเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนกันแกนร่วม.....	6
2.2.1 วิธีการสร้างก๊าซไอโซน.....	7
2.2.2 ผลของความถี่สนามไฟฟ้าต่อแรงที่กระทำกับอิเล็กตรอนของ โมเลกุลก๊าซ.....	8
2.2.3 อิเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนกันแกนร่วม.....	9
2.3 หม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน.....	12
2.4 เฟสชิฟท์พีคัปบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์.....	17
2.4.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับพีคัปบลิวเอ็มฟูลบริดจ์ คอนเวอร์เตอร์.....	18
2.4.2 เฟสชิฟท์พีคัปบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์.....	19
บทที่ 3 การออกแบบเครื่องผลิตก๊าซไอโซน.....	25
3.1 บทนำ.....	25
3.2 อิเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนกันแกนร่วมฉนวน 2 ชั้น.....	25
3.3 หม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน.....	29
3.4 การออกแบบเฟสชิฟท์พีคัปบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์.....	31

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 การวิเคราะห์และจำลองการทำงานของระบบเฟสชิฟท์-พีคบัลลิ่ง ฟูลบริดจ์ คอนเวอร์เตอร์.....	38
4.1 บทนำ.....	38
4.2 การวิเคราะห์ซุกติเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมฉนวน 2 ชั้น.....	38
4.3 การวิเคราะห์หม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน.....	42
4.4 การวิเคราะห์สภาวะโหลดของเฟสชิฟท์ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์.....	48
บทที่ 5 การทดสอบการทำงานของระบบและผลการทดลอง ของเครื่องผลิตก๊าซไอโซน.....	64
5.1 บทนำ.....	64
5.2 การวัดผลการทดสอบทางไฟฟ้า.....	64
5.3 การเก็บผลก๊าซไอโซนโดยการทดสอบทางเคมี.....	87
บทที่ 6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	89
6.1 บทนำ.....	89
6.2 วิเคราะห์ผลการทดลองทางไฟฟ้า.....	89
6.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองทางเคมี.....	97
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	98
เอกสารอ้างอิง.....	100
ภาคผนวก.....	102
ภาคผนวก ก. การวิเคราะห์ปริมาณก๊าซไอโซน.....	103
ภาคผนวก ข. โปรแกรมควบคุมการทำงานไมโครคอนโทรลเลอร์.....	107
ภาคผนวก ค. ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	124
ภาคผนวก ง. รูปภาพแสดงผลงานวิจัยทั้งหมด.....	121
ภาคผนวก จ. สมการคำนวณอนุพันธ์อันดับสองโดยใช้โปรแกรม MatLAB.....	132
ประวัติผู้เขียน.....	136

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ระดับปริมาณก๊าซโอโซนและผลที่เกิดขึ้น (ข้อมูลจาก IOA).....	6
5.1 แสดงผลปริมาณการเกิดการก๊าซโอโซนเทียบกับความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต.....	87

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของเครื่องผลิตก๊าซไอโซน.....	5
2.2 กระบวนการเกิดก๊าซไอโซน.....	7
2.3 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในช่องว่างอากาศ.....	9
2.4 รูปทรงของอิเล็กโทรดแบบ (ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (ข) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (ค) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง.....	10
2.5 อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันแนบกัน.....	11
2.6 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุเสมือนในชุดอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันแนบกัน.....	11
2.7 วงจรสมมูลของหม้อแปลงความถี่สูง.....	12
2.8 แสดงตัวเก็บประจุเสมือนที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นของขดลวด.....	13
2.9 รูปความสัมพันธ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	14
2.10 โครงสร้างโดยทั่วไปของแหล่งจ่ายกำลังงานแบบสวิทช์โหมดคอนเวอร์เตอร์.....	17
2.11 วงจรพีคดับลิฟท์เอมพลูบริคค์คอนเวอร์เตอร์.....	18
2.12 แสดงสัญญาณการทำงานของฟูลบริคค์คอนเวอร์เตอร์.....	19
2.13 วงจรเฟสชิฟท์พีคดับลิฟท์เอมคอนเวอร์เตอร์.....	20
2.14 แสดงสัญญาณการทำงานของเฟสชิฟท์คอนเวอร์เตอร์.....	22
2.15 แสดงการทำงานของเฟสชิฟท์คอนเวอร์เตอร์ที่สภาวะ 1 ถึง 8.....	24
3.1 โครงสร้างของเครื่องผลิตก๊าซไอโซน.....	25
3.2 ลักษณะรูปทรงของอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันแนบกันฉนวน 2 ชั้น.....	26
3.3 โครงสร้างแกนเฟอร์ไรท์เบอร์ EE-80.....	30
3.4 มอสเฟตเบอร์ IRFP460 ต่อคร่อมด้วยตัวเก็บประจุค่า 4.7 nF.....	32
3.5 (ก) แสดงวงจรสมมูลการเกิดซอร์ฟสวิทช์ขณะ turn off (ข) รูปสัญญาณกระแสและแรงดันที่มอสเฟต.....	33
3.6 วงจรขับสัญญาณเกตมอสเฟต.....	34
3.7 ขาพอร์ที่เอาต์พุท โมดูลเอาต์พุทคอมแพร์ของไมโครฯเบอร์dsPIC30F4011.....	35
3.8 รูปแบบสัญญาณของโมดูลเอาต์พุทคอมแพร์.....	35
3.9 วงจรสร้างสัญญาณควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011.....	36
3.10 วงจรกำลังฟูลบริคค์คอนเวอร์เตอร์.....	37
4.1 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของชุดอิเล็กโทรดเมื่อมองเป็นฉนวนในสนามไฟฟ้า.....	39

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสที่ป้อนให้ฉนวน.....	39
4.3 สัญญาณกระแสและแรงดันที่ชุดอิเล็กทรอนิกส์โทรจากรทดสอบ.....	41
4.4 (ก) วงจรสมมูลของหม้อแปลงขณะยังไม่ได้ทำการถ่ายโอนค่า (ข) วงจรสมมูลของหม้อแปลงเมื่อมีการถ่ายโอนค่า.....	43
4.5 วงจรสมมูลหม้อแปลงความถี่สูงแบบยุบรวมค่าพารามิเตอร์เพื่อง่ายต่อการคำนวณ.....	47
4.6 แสดงการต่อโหลดของวงจรเฟสชิฟท์ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์.....	48
4.7 สัญญาณแรงดันตกคร่อมโหลดทั้ง 4 สถานะ.....	49
4.8 วงจรสมมูลในการวิเคราะห์ช่วงจรอนุพันธ์อันดับสอง (ก) สถานะที่ 1 (ข) สถานะที่ 2 .....	49
4.9 สัญญาณแรงดันอินพุต( $V_i$ ) กระแสอินพุต( $i_i$ ) และแรงดันเอาต์พุต( $V_o$ ) ของหม้อแปลง ความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดันโดยใช้โปรแกรม MathLAB ในการคำนวณ.....	63
5.1 วงจรกำลังของเครื่องผลิตก๊าซไอโซน.....	64
5.2 วงจรการจำลองการทำงานของเฟสชิฟท์ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ โดยใช้โปรแกรม MathLAB Simulink.....	65
5.3 สัญญาณขั้วเกิดของมอสเฟต (ก) การจำลองการทำงาน $M_1$ $M_2$ และ $M_3$ ตามลำดับ (ข) การทดลองบน คู่ $M_1$ และ $M_2$ ต่างคู่ $M_1$ และ $M_3$ ที่ความถี่สวิทซ์ 45 kHz.....	65
5.4 สัญญาณกระแส ( $i_{M1}$ ) และแรงดัน ( $v_{ds1}$ ) ที่ตกคร่อมมอสเฟต $M_1$ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลองที่ความถี่สวิทซ์ 45 kHz .....	66
5.5 สัญญาณกระแส ( $i_{M3}$ ) และแรงดัน ( $v_{ds3}$ ) ที่ตกคร่อมมอสเฟต $M_3$ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลองที่ความถี่สวิทซ์ 45 kHz .....	66
5.6 สัญญาณกระแส ( $i_p$ ) และแรงดัน ( $v_p$ ) ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลองที่ความถี่สวิทซ์ 45 kHz.....	66
5.7 สัญญาณกระแส ( $i_s$ ) และแรงดัน ( $v_s$ ) ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลองที่ความถี่สวิทซ์ 45 kHz .....	67
5.8 สัญญาณอินพุตของระบบ (ก) กำลังไฟฟ้า (ข) ฮาร์มอนิกส์ของกระแส (ค) แรงดันและกระแสที่ความถี่สวิทซ์ 45 kHz.....	67
5.9 สัญญาณขั้วเกิดของมอสเฟต (ก) การจำลองการทำงาน $M_1$ $M_2$ และ $M_3$ ตามลำดับ (ข) การทดลองบน คู่ $M_1$ และ $M_2$ ต่างคู่ $M_1$ และ $M_3$ ที่ความถี่สวิทซ์ 47.5 kHz.....	68

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.10 สัญญาณกระแส ( $i_{M1}$ ) และแรงดัน ( $v_{ds1}$ ) ที่ตกคร่อมมอสเฟต $M_1$ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลองที่ความถี่สวิทซ์ 47.5 kHz .....	69
5.11 สัญญาณกระแส ( $i_{M3}$ ) และแรงดัน ( $v_{ds3}$ ) ที่ตกคร่อมมอสเฟต $M_3$ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลองที่ความถี่สวิทซ์ 47.5 kHz .....	69
5.12 สัญญาณกระแส ( $i_p$ ) และแรงดัน ( $v_p$ ) ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลองที่ความถี่สวิทซ์ 47.5 kHz.....	69
5.13 สัญญาณกระแส ( $i_s$ ) และแรงดัน ( $v_s$ ) ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลองที่ความถี่สวิทซ์ 47.5 kHz .....	70
5.14 สัญญาณอินพุทของระบบ (ก) กำลังไฟฟ้า (ข) ฮาร์มอนิกส์ของกระแส (ค) แรงดันและกระแสที่ความถี่สวิทซ์ 47.5 kHz.....	70
5.15 สัญญาณขับเคลื่อนของมอสเฟต (ก) การจำลองการทำงาน $M_1$ $M_2$ และ $M_3$ ตามลำดับ (ข) การทดลองบน คู่ $M_1$ และ $M_2$ ล่างคู่ $M_1$ และ $M_3$ ที่ความถี่สวิทซ์ 50 kHz.....	71
5.16 สัญญาณกระแส ( $i_{M1}$ ) และแรงดัน ( $v_{ds1}$ ) ที่ตกคร่อมมอสเฟต $M_1$ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลองที่ความถี่สวิทซ์ 50 kHz .....	72
5.17 สัญญาณกระแส ( $i_{M3}$ ) และแรงดัน ( $v_{ds3}$ ) ที่ตกคร่อมมอสเฟต $M_3$ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลองที่ความถี่สวิทซ์ 50 kHz .....	72
5.18 สัญญาณกระแส ( $i_p$ ) และแรงดัน ( $v_p$ ) ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลองที่ความถี่สวิทซ์ 50 kHz.....	72
5.19 สัญญาณกระแส ( $i_s$ ) และแรงดัน ( $v_s$ ) ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลองที่ความถี่สวิทซ์ 50 kHz .....	73
5.20 สัญญาณอินพุทของระบบ (ก) กำลังไฟฟ้า (ข) ฮาร์มอนิกส์ของกระแส (ค) แรงดันและกระแสที่ความถี่สวิทซ์ 50 kHz.....	73
5.21 สัญญาณขับเคลื่อนของมอสเฟต (ก) การจำลองการทำงาน $M_1$ $M_2$ และ $M_3$ ตามลำดับ (ข) การทดลองบน คู่ $M_1$ และ $M_2$ ล่างคู่ $M_1$ และ $M_3$ ที่ความถี่สวิทซ์ 52.5 kHz .....	74
5.22 สัญญาณกระแส ( $i_{M1}$ ) และแรงดัน ( $v_{ds1}$ ) ที่ตกคร่อมมอสเฟต $M_1$ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลองที่ความถี่สวิทซ์ 52.5 kHz .....	75

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.23 สัญญาณกระแส ( $i_{M3}$ ) และแรงดัน ( $v_{ds3}$ ) ที่ตกร่วมมอสเฟต $M_3$ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลองที่ความถี่สวิทซ์ 52.5 kHz .....	75
5.24 สัญญาณกระแส ( $i_p$ ) และแรงดัน ( $v_p$ ) ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลองที่ความถี่สวิทซ์ 52.5 kHz.....	75
5.25 สัญญาณกระแส ( $i_s$ ) และแรงดัน ( $v_s$ ) ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลองที่ความถี่สวิทซ์ 52.5 kHz .....	76
5.26 สัญญาณอินพุทของระบบ (ก) กำลังไฟฟ้า (ข) ฮาร์มอนิกส์ของกระแส (ค) แรงดันและกระแสที่ความถี่สวิทซ์ 52.5 kHz.....	76
5.27 สัญญาณขับเคลื่อนของมอสเฟต (ก) การจำลองการทำงาน $M_1$ $M_2$ และ $M_3$ ตามลำดับ (ข) การทดลองบน คู่ $M_1$ และ $M_2$ ล่างคู่ $M_1$ และ $M_3$ ที่ความถี่สวิทซ์ 55 kHz.....	77
5.28 สัญญาณกระแส ( $i_{M1}$ ) และแรงดัน ( $v_{ds1}$ ) ที่ตกร่วมมอสเฟต $M_1$ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลองที่ความถี่สวิทซ์ 55 kHz .....	78
5.29 สัญญาณกระแส ( $i_{M3}$ ) และแรงดัน ( $v_{ds3}$ ) ที่ตกร่วมมอสเฟต $M_3$ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลองที่ความถี่สวิทซ์ 55 kHz .....	78
5.30 สัญญาณกระแส ( $i_p$ ) และแรงดัน ( $v_p$ ) ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลองที่ความถี่สวิทซ์ 55 kHz.....	78
5.31 สัญญาณกระแส ( $i_s$ ) และแรงดัน ( $v_s$ ) ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลองที่ความถี่สวิทซ์ 55 kHz .....	79
5.32 สัญญาณอินพุทของระบบ (ก) กำลังไฟฟ้า (ข) ฮาร์มอนิกส์ของกระแส (ค) แรงดันและกระแสที่ความถี่สวิทซ์ 55 kHz.....	79
5.33 สัญญาณขับเคลื่อนของมอสเฟต (ก) การจำลองการทำงาน $M_1$ $M_2$ และ $M_3$ ตามลำดับ (ข) การทดลองบน คู่ $M_1$ และ $M_2$ ล่างคู่ $M_1$ และ $M_3$ ที่ความถี่สวิทซ์ 57.5 kHz.....	80
5.34 สัญญาณกระแส ( $i_{M1}$ ) และแรงดัน ( $v_{ds1}$ ) ที่ตกร่วมมอสเฟต $M_1$ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลองที่ความถี่สวิทซ์ 57.5 kHz .....	81
5.35 สัญญาณกระแส ( $i_{M3}$ ) และแรงดัน ( $v_{ds3}$ ) ที่ตกร่วมมอสเฟต $M_3$ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลองที่ความถี่สวิทซ์ 57.5 kHz .....	81

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.36 สัญญาณกระแส ( $i_p$ ) และแรงดัน ( $v_p$ ) ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลองที่ความถี่สวิตชิ่ง 57.5 kHz.....	81
5.37 สัญญาณกระแส ( $i_s$ ) และแรงดัน ( $v_s$ ) ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลองที่ความถี่สวิตชิ่ง 57.5 kHz .....	82
5.38 สัญญาณอินพุตของระบบ (ก) กำลังไฟฟ้า (ข) ฮาร์มอนิกส์ของกระแส (ค) แรงดันและกระแสที่ความถี่สวิตชิ่ง 57.5 kHz.....	82
5.39 สัญญาณขับเคลื่อนของมอสเฟต (ก) การจำลองการทำงาน $M_1$ $M_2$ และ $M_3$ ตามลำดับ (ข) การทดลองบน คู่ $M_1$ และ $M_2$ ต่างคู่ $M_1$ และ $M_3$ ที่ความถี่สวิตชิ่ง 60 kHz.....	83
5.40 สัญญาณกระแส ( $i_{M1}$ ) และแรงดัน ( $v_{ds1}$ ) ที่ตกร่วมมอสเฟต $M_1$ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลองที่ความถี่สวิตชิ่ง 60 kHz .....	84
5.41 สัญญาณกระแส ( $i_{M3}$ ) และแรงดัน ( $v_{ds3}$ ) ที่ตกร่วมมอสเฟต $M_3$ (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลองที่ความถี่สวิตชิ่ง 60 kHz .....	84
5.42 สัญญาณกระแส ( $i_p$ ) และแรงดัน ( $v_p$ ) ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลองที่ความถี่สวิตชิ่ง 60 kHz.....	84
5.43 สัญญาณกระแส ( $i_s$ ) และแรงดัน ( $v_s$ ) ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง (ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลองที่ความถี่สวิตชิ่ง 60 kHz .....	85
5.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแรงดันไฟฟ้า ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง.....	85
5.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุต (Pc1) และเอาต์พุต ของคอนเวอร์เตอร์ (Pc2) เมื่อเปลี่ยนความถี่สวิตชิ่ง.....	86
5.46 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซไอโซนและความถี่ไฟฟ้า.....	88
6.1 วงจรกำลังเฟสชิฟท์-ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์.....	89
6.2 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณแรงเอาต์พุต $V_{AB}$ เมื่อเปลี่ยนความถี่สวิตซ์.....	90
6.3 แสดงสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นเมื่อทำการวัดสัญญาณแรงดันตกร่วม ตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมในวงจรเพื่อวัดค่ากระแส.....	91
6.4 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณกระแสและแรงดันของหม้อแปลงความถี่สูง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความถี่.....	92

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.5 แสดงการวัดกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุทและเอาต์พุทของคอนเวอร์เตอร์ โดยใช้เครื่องวัด YOKOGAWA รุ่น PZ4000.....	93
6.6 แสดงวงสมมูลทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ความถี่สวิตซ์ 45 kHz.....	94
6.7 แสดงวงสมมูลทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ความถี่สวิตซ์ 50 kHz.....	95
6.8 แสดงวงสมมูลทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ความถี่สวิตซ์ 57.5 kHz.....	96

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันได้มีการนำก๊าซโอโซน (Ozone Gas) มาใช้ประโยชน์เพื่อฆ่าเชื้อโรค และลดปริมาณการใช้คลอรีน (Chlorine) ในน้ำอย่างแพร่หลายเช่น ในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีการบำบัดน้ำเสีย โรงงานผลิตน้ำแข็ง ฆ่าเชื้อโรคเครื่องมือแพทย์ การฟอกอากาศให้บริสุทธิ์ในอาคารธุรกิจสระว่ายน้ำและสปา แต่ในขณะที่เดียวกันก๊าซโอโซนมีข้อเสียถ้าใช้ในปริมาณที่เข้มข้นมากเกินไปจะทำให้เกิดการระคายเคืองกับเยื่อผิวหนัง การนำก๊าซโอโซนมาใช้ให้เหมาะสมกับงานนั้นต้องสามารถปรับเปลี่ยนปริมาณก๊าซได้ การสร้างก๊าซโอโซนจะอาศัยพลังงานจากสนามไฟฟ้า (Electric Field) กระทำต่อก๊าซออกซิเจนเพื่อให้ก๊าซโอโซนเกิดขึ้น งานวิจัยทางด้านไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซโอโซนจะใช้หลักการสร้างสนามไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้อิเล็กโทรดมาผลิตก๊าซ โดยความแตกต่างจะขึ้นอยู่กับลักษณะของชุดอิเล็กโทรดหรือชนิดของแหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้า

การประยุกต์ใช้แหล่งพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ฟลายแบคคัลคอนเวอร์เตอร์แปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่และแรงดันสูงป้อนให้อิเล็กโทรดเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าผลิตก๊าซโอโซนเป็นการนำพลังงานจากรธรรมชาติมาใช้ให้เกิดประโยชน์และเป็นการลดต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้าได้ [1] ลักษณะการนำเครื่องผลิตก๊าซไปใช้งานในที่ที่มีสิ่งมีชีวิตอาศัยอยู่จำเป็นต้องผลิตก๊าซไม่มากเกินไปจนเป็นอันตรายได้ ดังนั้นเครื่องผลิตก๊าซโอโซนที่ผลิตได้ปริมาณน้อยจึงต้องใช้พลังงานต่ำและมีราคาไม่แพงเช่นกัน [2] โดยส่วนใหญ่แหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตก๊าซโอโซนเป็นแหล่งจ่ายที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าสูงและมีความถี่สูง การวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นโพลดทางไฟฟ้าของอิเล็กโทรดทำได้ยากด้วยรูปแบบเป็นวงจรมอบไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นการแปลงวงจรมอบไฟฟ้าให้กลายเป็นแบบเชิงเส้นจึงทำให้สามารถเข้าใจคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอิเล็กโทรดได้ดียิ่งขึ้น [3] ในการวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นโพลดทางไฟฟ้าสามารถใช้สมการทางคณิตศาสตร์มาคำนวณได้ วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขช่วยลดเวลาในการจำลองการทำงานลงได้ [4] เครื่องผลิตก๊าซโอโซนที่มีการใช้งานในลักษณะต่างๆที่หลากหลาย ต้องสามารถที่จะปรับเปลี่ยนปริมาณการผลิตก๊าซได้เพื่อให้เหมาะสมกับงาน การนำวิธีการสร้างแรงดันไฟฟ้าแบบกำหนดจำนวนลูกคลื่นที่ป้อนให้อิเล็กโทรดเพื่อปรับเปลี่ยนพลังงานที่ใช้ผลิตก๊าซถูกนำมาใช้และมีการควบคุมปริมาณก๊าซได้ [5]

เครื่องผลิตก๊าซโอโซน (Ozone Generator) ขนาดใหญ่ส่วนมากใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบที่ดับเบิลเอ็มพลูบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (PWM Full Bridge Converter) สร้างสนามไฟฟ้าเอซี ป้อน

ให้กับขุคิเล็กโตรด (Electrode) ที่มีตัวนำ 2 ตัว โดยมีช่องว่างอากาศคั่นอยู่ระหว่างกลางซึ่งสามารถมองเป็นโหลดตัวเก็บประจุทางไฟฟ้าได้ คอนเวอร์เตอร์แบบนี้มีข้อดีคือ สามารถจ่ายกำลังงานได้สูง สามารถควบคุมความถี่ทางด้านเอาต์พุตได้ ดังนั้นจึงสามารถควบคุมระดับปริมาณการเกิดก๊าซโอโซนได้เช่นกัน แต่ในกรณีที่โหลดเป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานการควบคุมแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ทำได้ยากและมีกำลังสูญเสียที่อุปกรณ์สวิทช์เพิ่มขึ้น

การใช้วิธีการขับสัญญาณแบบเลื่อนเฟส (Phase Shift PWM Control Technique) ของคู่อุปกรณ์สวิทช์สามารถแก้ปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นได้เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบพีดับบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์นั้นไม่มีวงรอบการคืนพลังงานที่สะสมอยู่ในโหลด แรงจากการผลัดกันประจุไฟฟ้าจะบังคับให้อิเล็กตรอนยังคงไหลต่อเนื่องผ่านรอยต่อ (Junction) ของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำอุปกรณ์สวิทช์เป็นผลให้อุปกรณ์สวิทช์ไม่สามารถหยุดนำกระแสจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงได้ การควบคุมแรงดันทางด้านเอาต์พุตจึงต้องอาศัยการควบคุมแรงดันที่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแทน ในขณะที่วิธีการขับสัญญาณแบบเลื่อนเฟสมีวงรอบการคืนพลังงานแต่ละครั้งคาบเวลาอยู่จึงสามารถตัดการส่งผ่านพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงได้ ในขณะเดียวกันสามารถที่จะนำข้อดีของวิธีการควบคุมสัญญาณของรีโซแนนท์คอนเวอร์เตอร์มาประยุกต์ใช้ควบคู่กับคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอเพราะสามารถลดกำลังสูญเสียขณะเกิดการสวิทช์ของอุปกรณ์สวิทช์ได้โดยการกำหนดความถี่สวิทช์เพื่อให้อุปกรณ์สวิทช์ทำงานที่แรงดันและกระแสเป็นศูนย์ ผลคูณของกำลังงานสูญเสียจึงเท่ากับศูนย์

## 1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อศึกษาหลักการทํางาน วิเคราะห์และออกแบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเฟสชิฟท์-พีดับบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายกำลังงานให้กับเครื่องผลิตก๊าซโอโซน โดยสามารถใช้กับฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ที่มีอยู่แล้วได้เพียงปรับเปลี่ยนรูปแบบวิธีการควบคุมการขับสัญญาณเกิดของอุปกรณ์สวิทช์ เพื่อแก้ไขปัญหาการควบคุมขนาดแรงดันทางด้านเอาต์พุตและมีกำลังสูญเสียในอุปกรณ์สวิทช์ต่ำ เนื่องจากมอสเฟตทำการสวิทช์ที่แรงดันเป็นศูนย์เกิดสถานะชอฟท์สวิทช์ขณะ turn on และ turn off โดยคอนเวอร์เตอร์แบบนี้นำเสนอนี้มีการทํางานที่ดีกว่าฮาล์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์คือ ที่แรงดันกระแสตรงอินพุตเท่ากันจะให้ออกแรงดันได้สูงกว่าและในการออกแบบอัตราส่วนจำนวนรอบขดลวดของหม้อแปลงความถี่สูงสามารถออกแบบได้ที่อัตราส่วนไม่สูงมากจนทำให้โวลเทจเรีกูลเลชันมีค่าต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์แล้วข้อที่ดีกว่าก็คือสามารถปรับความกว้างพัลส์ของแรงดันที่ป้อนให้ขดลวดปฐมภูมิได้โดยสามารถรักษาระดับแรงดันทางด้านทุติยภูมิให้คงที่ได้

### 1.3 การดำเนินงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาข้อมูลจากตำรา บทความและวารสารที่สามารถค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับวิธีการสร้าง ก๊าซโอโซนและวิธีการควบคุมเฟสซิฟท์พีดับบลิวเอ็มฟูลบริจค์คอนเวอร์เตอร์

1.3.2 จำลองการออกแบบและวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรเฟสซิฟท์พีดับบลิวเอ็มฟูล บริจค์คอนเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.3.3 สร้างวงจรในแต่ละส่วนจากนั้นจึงนำวงจรเฟสซิฟท์พีดับบลิวเอ็มฟูลบริจค์คอนเวอร์เตอร์ มาทดสอบโดยการใส่ตัวต้านทานเป็นโหลด

1.3.4 ออกแบบแก้ไขและปรับปรุงวงจรและนำมาทดลองเพื่อให้ผลเป็นไปตามเป้าหมาย

1.3.5 เก็บผลการทดลองรูปสัญญาณทางไฟฟ้าและการจำลองการทำงานเพื่อเปรียบเทียบกัน

1.3.6 เก็บผลการทดลองทางเคมีที่สอดคล้องกับการเก็บผลทางไฟฟ้า

1.3.7 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

1.3.8 เขียนวิทยานิพนธ์

### 1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.4.1 สร้างวงจรกำลังของเฟสซิฟท์-พีดับบลิวเอ็มฟูลบริจค์คอนเวอร์เตอร์เป็นแหล่งจ่ายให้กับ เครื่องผลิตก๊าซโอโซน

1.4.2 ออกแบบชุดสร้างสัญญาณควบคุมและวงจรขับสัญญาณของเฟสซิฟท์-พีดับบลิวเอ็มฟูล บริจค์คอนเวอร์เตอร์

1.4.3 สามารถปรับเปลี่ยนความถี่สวิทซ์ของวงจรกำลังโดยสามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุต ให้คงที่ได้

1.4.5 ปรับปรุงและแก้ไขกำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์สวิทซ์ให้มีค่าน้อย

1.4.6 สามารถปรับปริมาณก๊าซโอโซนโดยการปรับเปลี่ยนความถี่ได้

### 1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบ เพื่อสร้างวงจรเฟสซิฟท์-พีดับบลิวเอ็มฟูลบริจค์คอนเวอร์เตอร์ เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับเครื่องผลิตก๊าซโอโซน รายละเอียดที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์แบ่งเป็น 6 บท ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา งานวิจัย วิธีการวิจัย ขอบเขตวิทยานิพนธ์ ตลอดจนประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องผลิตก๊าซโอโซน คุณสมบัติและการเกิดก๊าซ กระบวนการที่จะใช้พลังงานจากแหล่งจ่ายมาผลิตและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการสร้างก๊าซ การใช้หม้อแปลง

ความถี่สูงเพิ่มแรงดันเพื่อป้อนให้อิเล็กโทรดสร้างสนามไฟฟ้า โครงสร้างของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเฟสซิปท์-พีดับบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

บทที่ 3 การออกแบบเครื่องผลิตก๊าซโอโซน เลือกและคำนวณขนาดของอิเล็กโทรด ออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน สร้างวงจรเฟสซิปท์-พีดับบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

บทที่ 4 การวิเคราะห์และจำลองการทำงานของระบบ กล่าวถึงคุณสมบัติความเป็นโหลดทางไฟฟ้าของชุดอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันร่วมฉนวน 2 ชั้น การอธิบายรูปแบบความต้านทานทางไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูง โดยการยุบรวมพารามิเตอร์เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ การกำหนดการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่รีโซแนนท์เพื่อดูผลกำลังงานสูญเสียในมอสเฟต และทำการจำลองการทำงานของระบบโดยใช้คอมพิวเตอร์เมื่อนำวงจรสมมูลของหม้อแปลงความถี่สูงและชุดอิเล็กโทรดมาต่อเป็นโหลดของคอนเวอร์เตอร์

บทที่ 5 การทดสอบการทำงานของระบบและผลการทดลอง เก็บผลทางไฟฟ้าและทางเคมีควบคู่กัน โดยการเปลี่ยนความถี่ เปรียบเทียบผลจากการทดลองกับผลจากการจำลองการทำงาน

บทที่ 6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะต่าง ๆ

## 1.6 ประโยชน์ที่ได้จากวิทยานิพนธ์

1.6.1 สามารถนำวงจรเฟสซิปท์-พีดับบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์มาใช้แทนวงจรพีดับบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์เพื่อเป็นแหล่งจ่ายให้กับเครื่องผลิตก๊าซโอโซน

1.6.2 สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตให้คงที่ได้เมื่อเปลี่ยนความถี่สวิตซ์

1.6.3 ลดกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์สวิตซ์ได้

1.6.4 สามารถปรับปริมาณก๊าซโอโซนได้

1.6.5 ไม่จำเป็นต้องเพิ่มอุปกรณ์ภายนอกเข้าไปในวงจรจึงไม่เป็นการเพิ่มต้นทุน

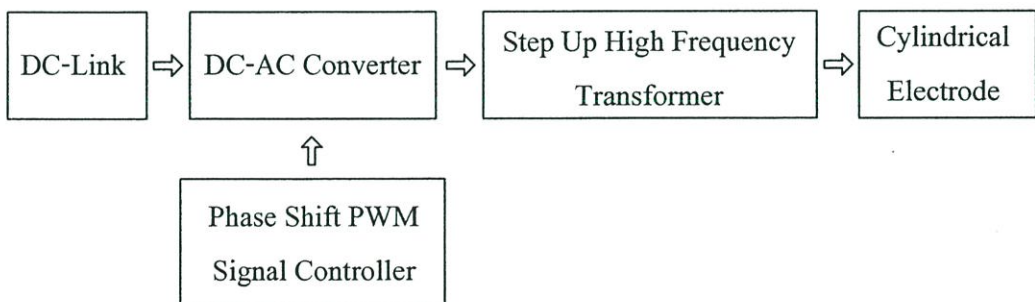
## บทที่ 2

# ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องผลิตก๊าซไอโซน

### 2.1 บทนำ

โดยทั่วไปเครื่องผลิตก๊าซไอโซนแบ่งการใช้งานออกเป็น 2 แบบคือ การใช้งานในบริเวณที่มีผู้คนอาศัยอยู่ การใช้งานแบบนี้จำเป็นต้องควบคุมปริมาณการเกิดก๊าซไม่ให้มากเกินไปจนเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต และแบบที่สองคือการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดสิ่งแวดล้อมหรืองานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ลักษณะงานแบบนี้ต้องการปริมาณก๊าซไอโซนเป็นจำนวนมาก ดังนั้นในบริเวณพื้นที่ทำงานต้องไม่มีสิ่งมีชีวิตอยู่หรือสร้างให้เป็นพื้นที่ปิดล้อม

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการผลิตก๊าซไอโซนในปริมาณที่มากเพื่อสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย ซึ่งเครื่องผลิตก๊าซไอโซนแบบนี้มีขนาดใหญ่และใช้กำลังไฟฟ้าสูง โดยโครงสร้างประกอบด้วยชุดอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกัน (Cylindrical Electrode) หม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน (Step Up High Frequency Transformer) และเครื่องแปรผันกำลังไฟฟ้าดีซี-เอซี (DC-AC Converter) แบบพีดีบีบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์โดยใช้วิธีการควบคุมสัญญาณแบบเลื่อนเฟส (Phase Shift-PWM Full Bridge Converter) แสดงในรูปที่ 2.1 เพื่อให้เข้าใจกระบวนการเกิดก๊าซไอโซนมีที่มาเช่นไรและชุดอิเล็กโทรดสร้างก๊าซได้อย่างไร จะขอกล่าวถึงกระบวนการสร้างก๊าซโดยใช้อิเล็กโทรดเป็นอันดับแรก ต่อมาจะอธิบายถึงหม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดันและสุดท้ายคือเครื่องแปรผันกำลังไฟฟ้าดีซี-เอซี



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเครื่องผลิตก๊าซไอโซน

## 2.2 กระบวนการสร้างก๊าซโอโซนโดยใช้โอเล็คโตรดทรงกระบอกซ้อนกันร่วม

ก๊าซโอโซนคืออะตอมของออกซิเจน 3 อะตอมรวมกันเป็น 1 โมเลกุลของโอโซน ( $O_3$ ) ตามปกติ ออกซิเจนจะประกอบกันในลักษณะ 2 อะตอม เป็น 1 โมเลกุลออกซิเจน ( $O_2$ ) ซึ่งมีคุณสมบัติต่างกันมากคือ  $O_2$  จะสามารถคงสภาพอยู่ได้หลายสภาวะ หรือ กล่าวได้ว่ามีความเสถียรนั่นเอง แต่ก๊าซโอโซนจะไม่คงตัวหรือไม่เสถียร เนื่องจากปัจจัยต่างๆ 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 คำนึงแปรผันตามตำแหน่งและสภาพบรรยากาศแวดล้อม
0.05	ระดับสูงสุดที่ผลิตจาก Electronic air cleaner และอุปกรณ์ในบ้าน
0.1	ระดับสูงสุดที่ยอมให้มีในบรรยากาศ บริเวณอุตสาหกรรม และที่สาธารณะ
0.25	เริ่มปรากฏต่อสิ่งมีชีวิตที่สัมผัสโดยตรง ในพืชเกิดจุดดำ สีซีด มีใบตาย ในสัตว์เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินหายใจ
0.5	เริ่มมีอาการปวดศีรษะ ปวดถูกทำลาย ติดเชื้อทางเดินหายใจ
1.00 - 2.00	ในการทดสอบ การสูดดมเป็นเวลา 2 ชั่วโมงเกิดอาการป่วย คือ ปวดศีรษะ ปวดหน้าอกรุนแรง และทางเดินหายใจแสบผก
1.4 - 5.6	การทดสอบกับต้นถั่วพบว่าใน 70 วินาที ใบถั่วเกิดอาการป่วยรุนแรง
25 up	เป็นอันตรายเฉียบพลันต่อสิ่งมีชีวิต ในการทดสอบกับสัตว์พบอาการป่วยซึ่งน่าจะเป็นขั้นสุดท้าย

โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียรที่อุณหภูมิห้องและความดันในชั้นบรรยากาศ มีกลิ่นเฉพาะตัว มีสีฟ้า มวลโมเลกุลเท่ากับ 47.998 g/mol จุดหลอมเหลวที่ -192.5 องศาเซลเซียส จุดเดือดที่ 111.9 องศาเซลเซียส โดยอยู่ในรูปของของเหลวสีน้ำเงินเข้ม มีความไวในการทำปฏิกิริยาเคมีทั้งในน้ำ

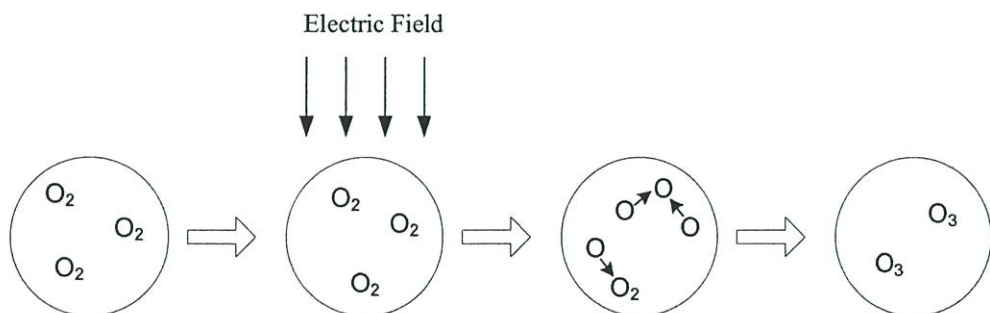
สารละลาย และอากาศ แต่ก๊าซโอโซนจะสลายตัวได้อย่างรวดเร็ว โดยเปลี่ยนเป็นก๊าซออกซิเจนเมื่อสัมผัสกับตัวรีดิวซ์ (Reduce) หรือได้รับความร้อน

ลักษณะการเกิดก๊าซโอโซนแบ่งได้ 2 แบบคือ เกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติทั้งจากการรับพลังงานของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) ที่ความยาวคลื่นประมาณ 200 นาโนเมตรหรือพลังงานจากฟ้าผ่า และมนุษย์สร้างขึ้น โดยอาศัยพลังงานซึ่งเลียนแบบธรรมชาติ ส่วนใหญ่จะใช้พลังงานจากสนามไฟฟ้ามากระทำต่อก๊าซออกซิเจนเพราะในปัจจุบันสามารถจัดหาและสร้างแหล่งจ่ายได้ง่าย โดยใช้อิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวกำหนดทิศทางสนามไฟฟ้าจากนั้นจึงปล่อยให้อากาศไหลผ่านอิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้โมเลกุลของก๊าซได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า

### 2.2.1 วิธีการสร้างก๊าซโอโซน

ก๊าซโอโซนคือก๊าซที่เกิดจากการจับตัวกันของออกซิเจน 3 อะตอม การที่จะทำให้ออกซิเจนแตกพันธะได้นั้น จะต้องป้อนพลังงานจากภายนอกเข้าไปกระตุ้นให้ก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) แตกพันธะออกเป็นอะตอมอิสระของออกซิเจน (O) แล้วจึงรวมตัวกับ  $O_2$  กลายเป็น  $O_3$  ดังรูปที่ 2.2 โดยอาศัยพลังงานจากสนามไฟฟ้าเพื่อให้เกิดกระบวนการไอออไนเซชัน (Ionization) หรือกระบวนการที่โมเลกุลของก๊าซได้รับพลังงานเพียงพอ จนทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไป 1 อิเล็กตรอน โมเลกุลของก๊าซนั้นมีค่าประจุเป็นบวกและอิเล็กตรอนวิ่งชน โมเลกุลของก๊าซ โดยได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า ในขณะที่วิ่งเข้าหาศักย์ไฟฟ้าด้านบวก พลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับเป็นพลังงานจลน์และต้องมีค่ามากกว่าพลังงานไอออไนเซชัน

ในก๊าซประกอบด้วยอนุภาคต่างๆ หลายชนิดทั้งที่มีประจุ (+,-) และอนุภาคที่เป็นกลาง การเคลื่อนที่ของอนุภาคเหล่านี้เป็นแบบสุ่ม สนามไฟฟ้าจากภายนอกทำให้อนุภาคประจุลบที่มีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับประจุบวกต่างๆ ไปเคลื่อนที่อย่างมีทิศทาง จึงทำให้ตัวมันมีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่เกิดขึ้นในการแตกตัวของก๊าซ เช่นเดียวกันในการผลิตโอโซน พลังงานหลักที่ทำให้ออกซิเจนเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างขึ้นส่งถ่ายมาจากการชนอิเล็กตรอนกับโมเลกุลก๊าซออกซิเจน



รูปที่ 2.2 กระบวนการเกิดก๊าซโอโซน

กระบวนการไอออไนเซชันโดยการชน (Collision Ionization) คือกระบวนการชนถ่ายทอดพลังงานจลน์ ของอนุภาคที่มีมวลซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วค่าๆ หนึ่งไปชนกับอนุภาคที่มีมวลอีกตัวหนึ่ง ถ้าพลังงานที่ถ่ายทอดไม่มากพอถึงพลังงานให้เกิดการตื่นกระตุ้น (Excitation) หรือไอออไนเซชัน เรียกว่า การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision) แต่การชนของอนุภาคถ้าทำให้โมเลกุลของก๊าซที่ถูกชนได้รับพลังงานจากอนุภาคที่มาชนมากพอถึงพลังงานที่ทำให้เกิดการกระตุ้น เรียกว่า การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic collision) แสดงว่า พลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีมวลได้ถูกเปลี่ยนให้เป็นพลังงานศักย์สู่มอเลกุลของก๊าซที่ถูกชนนั่นเอง กระบวนการเริ่มขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนซึ่งได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าวิ่งชนโมเลกุลของก๊าซในระหว่างที่ถูกเร่งให้วิ่งเข้าหาไอออน อิเล็กตรอนที่วิ่งนี้ได้รับพลังงานจลน์จากสนามไฟฟ้า ถ้าพลังงานนี้มากกว่าพลังงานไอออไนเซชันของก๊าซ ก็จะเกิดกระบวนการไอออไนเซชันขึ้น

ขั้นตอนการสร้างโอโซนประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ

1. การแตกตัวโครงสร้างโมเลกุลก๊าซออกซิเจนเป็นอะตอมอิสระ (Dissociation Reaction) ขั้นตอนนี้คือปฏิกิริยาดูดพลังงาน แหล่งพลังงานที่พิจารณาคือการชนถ่ายทอดพลังงานของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้า

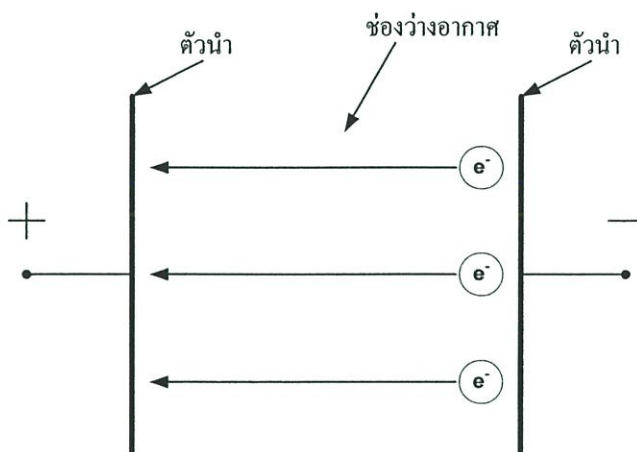
2. การจับตัวของอะตอมอิสระในข้อ 1 กับโมเลกุลก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) เป็นโอโซน (Ozone Generation)

ในการผลิตโอโซนนั้นย่านพลังงานที่ต้องใช้คือ  $5.58 \text{ kW.h/m}^3 - 7.073 \text{ kW.h/m}^3$  [6] แต่เนื่องจากในอากาศมีออกซิเจนอยู่ โดยประมาณ 21% ดังนั้นคิดเทียบแล้วพลังงานที่จำเป็นต้องใช้คือ  $1.172 \text{ kW.h/m}^3 - 1.62 \text{ kW.h/m}^3$  จึงเพียงพอต่อการเกิดก๊าซโอโซน

### 2.2.2 ผลของความถี่สนามไฟฟ้าต่อแรงที่กระทำกับอิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซ

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกให้กับช่องว่างที่มีโมเลกุลของก๊าซบรรจุอยู่ เกิดสนามไฟฟ้าภายในช่องว่าง อิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้ามากเพียงพอที่จะหลุดออกมาจากโมเลกุลก๊าซและเคลื่อนที่เข้าหาศักย์ไฟฟ้าขั้วบวกของสนามไฟฟ้าเป็นระยะทางระหว่างอิเล็กตรอนกับขั้วบวกของช่องว่างอากาศด้วยความเร็วค่าๆ หนึ่ง ระหว่างทางที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปนั้นอาจเกิดการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโมเลกุลก๊าซอื่นได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ถ้าระยะทางนั้นมีความยาวมากขึ้น โดยที่อิเล็กตรอนยังมีพลังงานในการชนมากพอให้อิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซที่ถูกชนหลุดออกมานั้นจึงหมายความว่า แรงภายนอกที่กระทำต่ออิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อทำการกลับขั้วศักย์สนามไฟฟ้าอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวกเดิมก่อนหน้านี้อาจจะถูกวางตัวใหม่ในทิศทางตรงข้าม และเคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวกใหม่ ณ อีกด้านหนึ่ง เมื่อเพิ่มความเร็วในการกลับขั้วในช่วงเวลาหนึ่งจึงเสมือนเป็นการเพิ่มระยะทางที่อิเล็กตรอนต้องเคลื่อนที่ออกไป

โดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นก็จะได้แรงภายนอกที่กระทำต่ออิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 2.3 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในช่องว่างอากาศ

### 2.2.3 อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันร่วม

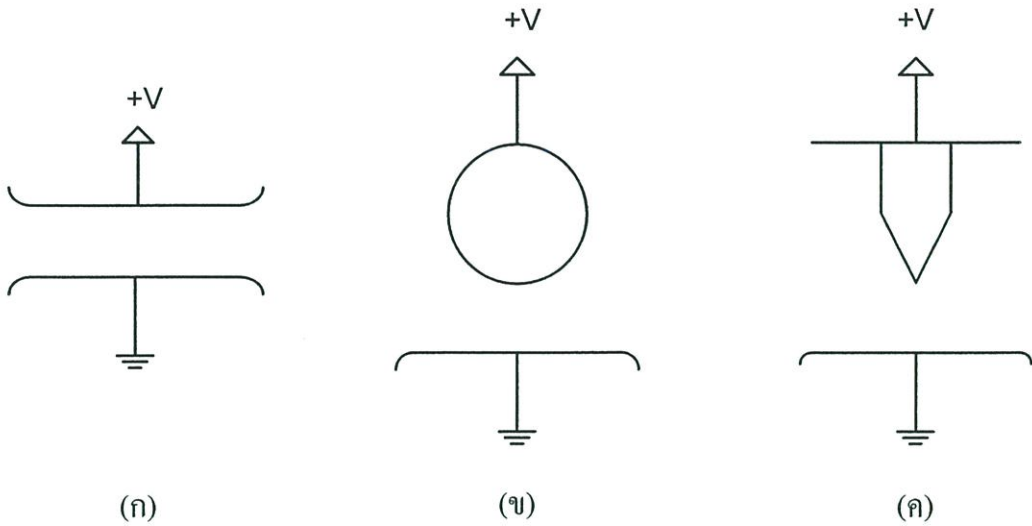
ในกระบวนการสร้างก๊าซไอโซน สิ่งที่สำคัญที่สุดคือ พลังงานที่กระทำต่อโมเลกุลของก๊าซออกซิเจน เพื่อให้เสถียรภาพในการจับตัวกันระหว่างโมเลกุลลดลง พลังงานจากสนามไฟฟ้าเป็นตัวแปรสำคัญในการส่งผ่านพลังงานจากภายนอกสู่โมเลกุลของก๊าซ วิธีที่จะทำให้โมเลกุลไม่เสถียรจำเป็นต้องใช้กระบวนการแยกอิเล็กตรอนของก๊าซออกมา ขั้นตอนดังกล่าวอาศัยชุดอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันร่วม เป็นตัวสร้างสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงและสามารถที่จะให้อากาศไหลผ่านอิเล็กโทรดได้อย่างเหมาะสม

#### 1. สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง

สนามไฟฟ้านั้นแบ่งได้ 3 แบบคือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ, ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และไม่สม่ำเสมอสูงดังรูปที่ 2.4 ในที่นี้จะกล่าวถึง สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงเพียงอย่างเดียว เพราะการนำมาใช้งานมีประโยชน์อย่างมากและถูกใช้ในงานวิจัยนี้เช่นกัน

สนามไฟฟ้าแบบนี้ค่าความเครียดแต่ละจุดจะไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งและรูปทรงเรขาคณิตของตัวนำไฟฟ้า โดยทั่วไปตัวนำไฟฟ้าแห่งปลายแหลมจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงที่สุด ดังรูปที่ 2.4 (ค) กรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงก่อนเกิดการเบรกดาวนจ์จะมีกระแสไหลผ่านช่องว่างอากาศ เรียกว่า กระแสโคโรนา (Corona Current) ที่บริเวณผิวปลายแหลมของตัวนำจะมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่สุด แต่จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อวัดที่ระยะห่างออกมา ดังนั้นจึงยังไม่เกิดการเบรกดาวนจ์ขึ้นถึงแม้ว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าวิกฤตก็ตาม ในขณะที่เดียวกันจะเกิดการดิสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ขึ้นในช่องว่างอากาศ เรียกว่า การดิสชาร์จบางส่วน

(Partial Discharge) การดิสชาร์จนี้จะไม่เกิดขึ้นตลอดทั้งแนวของสนามไฟฟ้าและอาจเกิดขึ้นเป็นช่วงหรือต่อเนื่อง ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดกระแสไหลได้



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

## 2. อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันรวมฉนวน 2 ชั้น

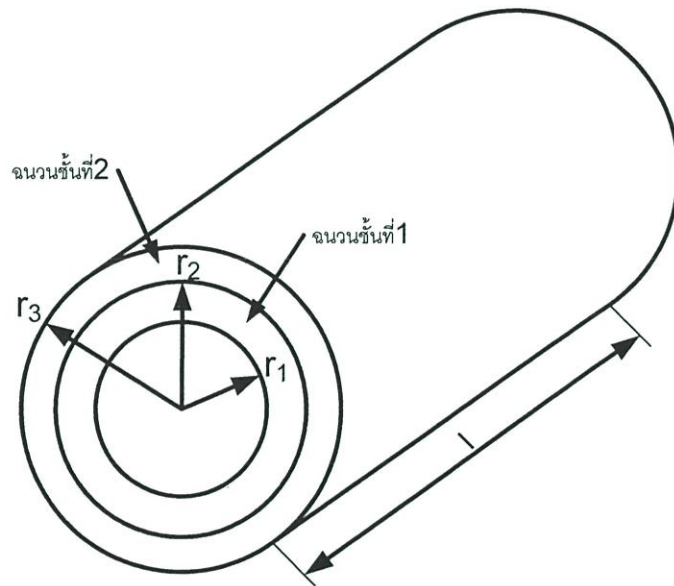
รูปทรงของอิเล็กโทรดจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนกันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เท่ากัน โดยนำกระบอกฉนวนที่มีขนาดเล็กกว่าซ้อนเข้าไปข้างใน โดยใช้แกนกลางร่วมกันดังรูปที่ 2.5 สนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดชนิดนี้อยู่ในแนวรัศมีของพื้นผิวทรงกระบอก ดังนั้นจึงมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันตลอดทั้งพื้นผิว ในกรณีที่น่าวัสดุฉนวนต่างชนิดและค่าเปอร์มิตติวิตี ( $\epsilon$ ) ไม่เท่ากันซ้อนกัน จึงกลายเป็นการนำสารไดอิเล็กตริก 2 ชนิดวางเรียงกันในสนามไฟฟ้า ดังนั้นเสมือนมีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกันอยู่คือ  $C_1$  และ  $C_2$  โดยแสดงในรูปที่ 2.6 สามารถหาได้จากสมการ (2.1) และ (2.2) [7]

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

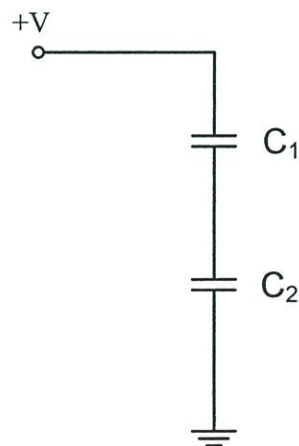
$$C_2 = \frac{2 \times \pi \times \epsilon_{r_2} \times \epsilon_0 \times \ell}{\ln \frac{r_3}{r_2}} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $C_1$  = ค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนชั้นที่ 1 หน่วยเป็น (F)  
 $C_2$  = ค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนชั้นที่ 2 หน่วยเป็น (F)

- $\epsilon_{r_1}$  = ค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวนชั้นที่ 1 หน่วยเป็น (F/m)  
 $\epsilon_{r_2}$  = ค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวนชั้นที่ 2 หน่วยเป็น (F/m)  
 $\epsilon_o$  = ค่าเปอร์มิตติวิตีของฟรีสเปซ  
 $l$  = 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 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุเสมือนในชุดอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกัน

ความเคียดสนามไฟฟ้าที่จุดใดๆ ในฉนวนแต่ละชั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.3) [8]

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

เมื่อ  $E_{rx}$  = ความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดใดๆ (kV/cm)

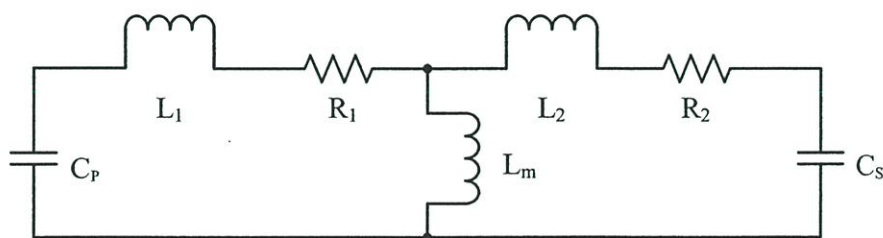
$V$  = แรงดันภายนอกที่ป้อนให้ชุดอิเล็กโทรด (kV)

$r_x$  = รัศมีที่จุดใดๆ (cm)

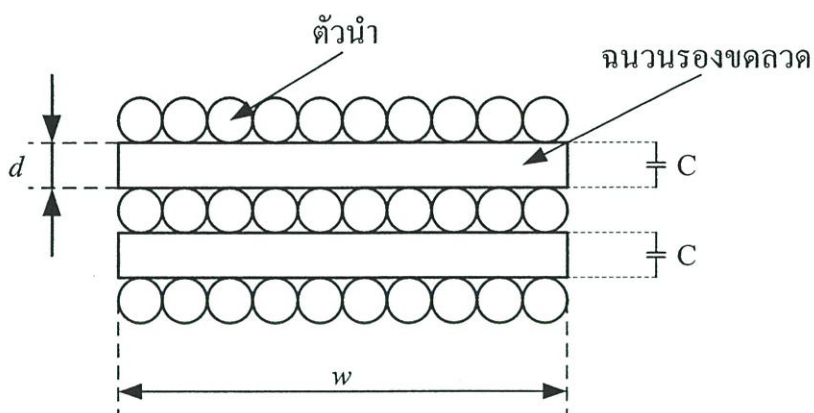
$\epsilon_x$  = ค่าเปอร์มิตติวิตีที่ฉนวนชั้นใดๆ (F/m)

## 2.3 หม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน

การส่งผ่านกำลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปสู่อิเล็กโทรดเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าอาศัยหม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน จากข้อ 2.2 แรงดันเอาต์พุตที่ป้อนให้กับอิเล็กโทรดมีขนาดสูงมาก ในขณะที่แรงดันเอาต์พุตที่ได้จากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีขนาดเท่ากับ 310V และมีความถี่สวิตช์ใช้งานสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้หม้อแปลงความถี่สูงเพิ่มแรงดันขึ้นไป แกนของหม้อแปลงที่ใช้ในงานความถี่สูงโดยส่วนมากมักใช้วัสดุที่ทำจากสารจำพวกเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic Material) ซึ่งมีคุณสมบัติทางด้านค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง แต่มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กต่ำ กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy Current) น้อยมาก ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องทำเป็นแผ่นบางเรียงซ้อนกันเหมือนหม้อแปลงแกนเหล็กทั่วไป ลดความยุ่งยากในการประกอบและติดตั้ง



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลของหม้อแปลงความถี่สูง



รูปที่ 2.8 แสดงตัวเก็บประจุเสมือนที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นของขดลวด

โดยพื้นฐานของหม้อแปลงความถี่สูงจะคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไปแต่แตกต่างกันตรงวัสดุที่ใช้ทำแกนและวงจรสมมูลที่มีตัวเก็บประจุแฝง (Parasitic Capacitance) ปรากฏขึ้นที่ขั้วของหม้อแปลงทั้งทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิแสดงดังรูปที่ 2.7 ตัวเก็บประจุทั้งสอง ( $C_p$  และ  $C_s$ ) เกิดจากการนำวัสดุฉนวนมารองระหว่างชั้นของขดลวดเพื่อป้องกันการลัดวงจร สักย์ไฟฟ้าที่ไม่เท่ากันระหว่างชั้นทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น เมื่อนำวัสดุฉนวนมาวางกันจึงเสมือนมีตัวเก็บประจุต่อคร่อมอยู่ระหว่างชั้น แสดงในรูปที่ 2.8 ในกรณีที่มีจำนวนชั้นมีมากกว่า 1 ชั้น เมื่อทำการคลี่ชั้นของขดลวดออกจึงกลายเป็นการนำตัวเก็บประจุมาต่ออนุกรมกัน สมการที่ใช้คำนวณต่อความจุแฝงได้จาก (2.4) [9]

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

เมื่อ  $C$  = ตัวเก็บประจุแฝงของหม้อแปลงความถี่สูง (F/m)

$\epsilon_o$  = ค่าเปอร์มิตติวิตี (Permittivity) ของสุญญากาศ

$\epsilon_r$  = ค่าเปอร์มิตติวิตีของวัสดุที่ใช้ทำฉนวน

$w$  = ความกว้างของชั้นขดลวด (m)

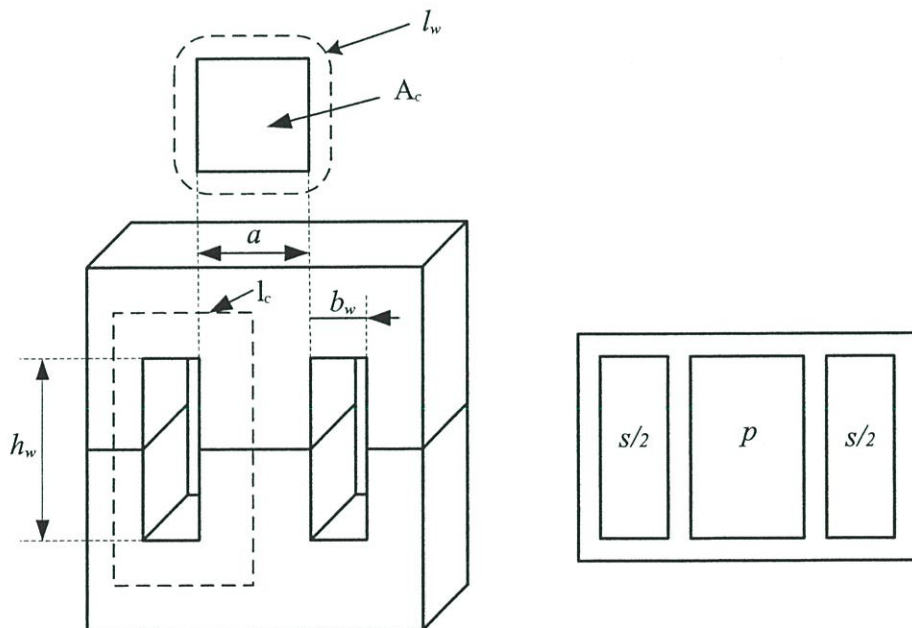
$d$  = ความหนาของวัสดุฉนวน (m)

แกนเฟอร์ไรท์ (Ferrite Core) นั้นมีค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กได้ต่ำ ดังนั้นจึงเกิดเส้นแรงแม่เหล็กบางส่วนที่ไม่ได้ไหลผ่านแกน แต่จะไหลผ่านช่องว่างอากาศ เรียกว่า เส้นแรงแม่เหล็ก

รั่วไหล (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)
- $\mu_o$  = ค่าเปอร์เมียบิลิตี (Permeability) ของสุญญากาศ
- $N$  = จำนวนรอบทั้งหมดของขดลวด
- $l_w$  = ความยาวเฉลี่ยรอบแกน (m)
- $b_w$  = ความกว้างขอบบิ้น (m)
- $h_w$  = ความสูงของขอบบิ้น (m)
- $s$  = จำนวนช่องการพันสลับระหว่างขดปฐมภูมิและทุติยภูมิ



รูปที่ 2.9 รูปความสัมพันธ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า

เส้นแรงแม่เหล็กส่วนใหญ่ที่ไหลผ่านแกน เกิดจากกระแสสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetizing Current) ที่จ่ายให้ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลง ดังนั้นจึงเกิดค่าความเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กในแกน (Magnetizing Inductance) ขึ้นในวงจร คำนวณได้จากสมการ (2.6)

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

เมื่อ  $L_m$  = ค่าความเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กในแกน (H)

$N_{pr}$  = จำนวนรอบของขดลวดค้ำปฐมภูมิ

$A_c$  = พื้นที่หน้าตัดแกนเฟอร์ไรท์ที่เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่าน (m<sup>2</sup>)

$l_c$  = ทางเดินเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเฟอร์ไรท์ (m)

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

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

เมื่อ  $R$  = ค่าความต้านทานของลวด (Ω)

$\rho_{cu}$  = ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานกระแสของวัสดุที่ใช้ทำขดลวด (Ω-m)

$l_{cu}$  = ความยาวของขดลวด (m)

$A_{cu}$  = พื้นที่หน้าตัดของขดลวด (m<sup>2</sup>)

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

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

เมื่อ  $N$  = จำนวนรอบของขดลวด

$V$  = แรงดันไฟฟ้าที่ป้อน (V)

$f$  = ความถี่ไฟฟ้าใช้งาน (Hz)

$B_m$  = ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเฟอร์ไรท์ (T)

$A_c$  = พื้นที่หน้าตัดของแกนเฟอร์ไรท์ (m<sup>2</sup>)

ในกรณีที่กำหนดพิกัดแรงดัน ทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิไว้แล้ว สามารถใช้สมการ (2.9) เพื่อคำนวณจำนวนรอบทางด้านทุติยภูมิได้

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

เมื่อ  $N_s$  = จำนวนรอบขดลวดทางด้านทุติยภูมิ

$N_p$  = จำนวนรอบขดลวดทางด้านปฐมภูมิ

$V_s$  = แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ (V)

$V_p$  = แรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ (V)

เมื่อได้จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิเรียบร้อยแล้ว ก็มาถึงในส่วนของการคำนวณเบอร์ลวดที่ใช้พัน โดยมีขั้นตอนดังนี้

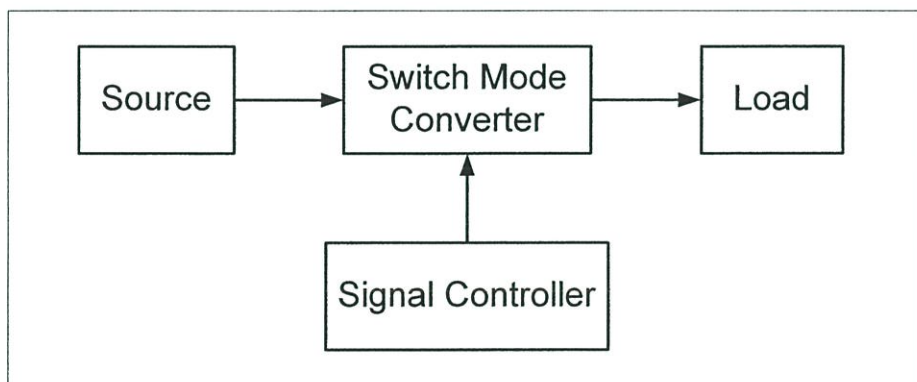
**ขั้นตอนที่ 1** กำหนดพิกัดกระแสที่ยอมให้ไหลผ่านขดลวด (A/mm<sup>2</sup>) โดยส่วนใหญ่กำหนดอยู่ที่ระหว่าง 3-5 A/mm<sup>2</sup> ในกรณีที่ความถี่ใช้งานสูงการเลือกค่า A/mm<sup>2</sup> ดังข้างเป็นทางเลือกที่ดี เพราะผลจากปรากฏการณ์ผิว (Skin Effect) จะทำให้พื้นที่การไหลของกระแสลดลงเนื่องจากกระแสจะมาไหลที่ผิวของตัวนำแทนหรือใช้วิธีแบ่งลวดออกเป็นเส้นเล็กๆหลายเส้น โดยให้ผลรวมจำนวนพื้นที่หน้าตัดของลวดเส้นเล็กเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของลวดที่คำนวณได้

**ขั้นตอนที่ 2** นำพิกัดกระแสที่กำหนดคูณกับค่า A/mm<sup>2</sup> ในขั้นตอนที่ 1 เพื่อหาขนาดพื้นที่หน้าตัดของขดลวด

ขั้นตอนที่ 3 เมื่อได้พื้นที่หน้าตัดของขอลวดมาแล้ว จึงนำไปเทียบกับตารางขนาดสายเพื่อแปลงเป็นเบอร์ของขอลวด ซึ่งในประเทศไทยนิยมใช้มาตรฐานเบอร์ลวดอยู่ 2 แบบ คือ AWG และ SWG เป็นหลัก

## 2.4 เฟลซิปท์-พีดับบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

ปัจจุบันแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ได้ถูกนำมาใช้ทดแทนแหล่งจ่ายกำลังงานแบบลิเนียร์มากขึ้น เพราะคุณสมบัติทางด้านประสิทธิภาพที่สูงกว่า ขนาดเล็กและน้ำหนักเบากว่าที่พิกัดกำลังงานเท่ากัน รองรับระบบได้มากกว่า สามารถทำงานเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับที่ความถี่ต่ำและความถี่สูงได้ แหล่งจ่าย (Source) ของวงจรเป็นได้ทั้งแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงหรือกระแสสลับจากนั้นส่งผ่านผู้สวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์โดยมีวงจรควบคุมสัญญาณ (Signal Controller) เป็นตัวกำหนดการทำงานที่จะส่งผ่านกำลังงานไปสู่โหลด โครงสร้างการใช้งานแสดงดังรูปที่ 2.10

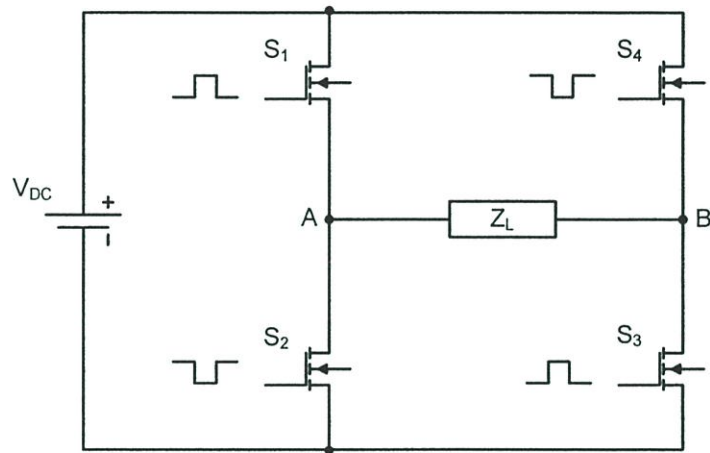


รูปที่ 2.10 โครงสร้างโดยทั่วไปของแหล่งจ่ายกำลังงานแบบสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์

การใช้งานแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์นั้นเปิดกว้างและค่อนข้างหลากหลายด้วย เพราะแหล่งจ่ายกำลังงานนั้นมีหลายแบบรองรับงานโดยทั่วไปได้อย่างเพียงพอ พิกัดกำลังงานที่ใช้ส่วนใหญ่อยู่ที่ 100 W ไปจนถึง หลายร้อยกิโลวัตต์ แต่แหล่งจ่ายแบบนี้ก็มีข้อเสียคือ ราคาค่อนข้างแพง การสร้างและควบคุมยุ่งยากซับซ้อน สัญญาณรบกวนสูง แต่ปัญหาเหล่านี้กำลังลดน้อยลงเพราะนักวิจัยส่วนใหญ่ได้ทำการศึกษาค้นคว้าเพื่อแก้ไขปัญหาเหล่านี้อยู่ตลอดเวลา และด้วยเทคโนโลยีที่สูงขึ้น การผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สร้างแหล่งจ่ายกำลังงานแบบนี้มีราคาถูกลงส่งผลให้ต้นทุนของแหล่งจ่ายกำลังแบบนี้มีราคาถูกลงเช่นกัน

### 2.4.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับพีดับบลิวเอ็มฟูลบริดจ์ คอนเวอร์เตอร์

พีดับบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์(Full Bridge Converter) เป็นรูปแบบหนึ่งของแหล่งจ่ายกำลังงานแบบสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์มีหลักการการทำงานโดยอาศัยการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์ส่งผ่านกำลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไปสู่โหลด ซึ่งใช้อุปกรณ์สวิตช์ทั้งหมด 4 ตัวด้วยกันคือ  $S_1, S_2, S_3$  และ  $S_4$  วงจรของพีดับบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์แสดงดังรูปที่ 2.11 การทำงานของอุปกรณ์สวิตช์จะทำงานพร้อมกันเป็นคู่  $S_1 - S_3$  และ  $S_2 - S_4$  ทำงานสลับกันคู่ละครั้งคาบเวลาการสวิตช์

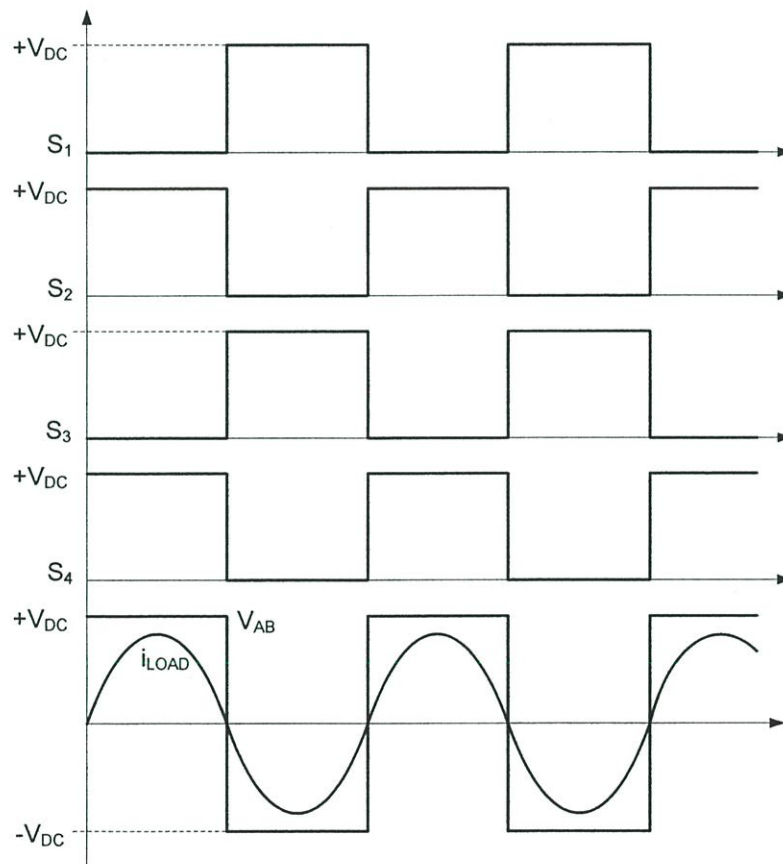


รูปที่ 2.11 วงจรพีดับบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

เมื่อคู่อุปกรณ์สวิตช์  $S_1 - S_3$  ทำงาน อุปกรณ์สวิตช์ทั้งสองตัวปิดวงจรแรงดันจากแหล่งจ่าย  $V_{DC}$  ตกคร่อมโหลด  $Z_L$  วัดแรงดันไฟฟ้าที่จุด AB ได้  $+V_{DC}$  จากนั้นที่ครึ่งคาบหลังคู่อุปกรณ์สวิตช์  $S_1 - S_3$  หยุดทำงานและ  $S_2 - S_4$  ทำงาน อุปกรณ์สวิตช์ทั้งสองตัวปิดวงจรแรงดันจากแหล่งจ่าย  $V_{DC}$  ตกคร่อมโหลด  $Z_L$  วัดแรงดันไฟฟ้าที่จุด AB ได้  $-V_{DC}$  การทำงานจะสลับกันไปตามคาบสัญญาณการสวิตช์แสดงในรูปที่ 2.11

ในกรณีที่โหมคเป็นอุปกรณ์แบบสะสมพลังงาน การสวิตช์แบบฮาร์ดสวิตช์(Hard Switch) ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียที่อุปกรณ์สวิตช์สูง สาเหตุเพราะการถ่ายเทพลังงานออกจากอุปกรณ์สะสมพลังงานในช่วงเวลาขณะที่อุปกรณ์สวิตช์กำลังหยุด (turn off) หรือนำกระแส (turn on) แรงดันที่ตกคร่อมกับกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์ในช่วงเวลานี้คือ 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 แรงดันตกคร่อมค่อยๆลดลง กระแสที่ไหลผ่านเป็นลบ จากนั้นเมื่อแรงดันลดลงเป็นศูนย์ กระแสจึงค่อยเพิ่มขึ้น ผลคูณของกระแสและแรงดันจึงเท่ากับศูนย์ การสวิตช์แบบนี้อุปกรณ์สวิตช์ ถูกบังคับให้ทำงานที่แรงดันตกคร่อมเป็นศูนย์ก่อนที่กระแสซึ่งบวกจะไหลผ่านจึงเรียกว่า Zero Voltage Switch (ZVS) ในขณะที่  $S_1 - S_3$  turn off กระแสเปลี่ยนมาไหลผ่านตัวเก็บประจุที่ต่อขนาน อยู่กับอุปกรณ์สวิตช์แทน แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเท่ากับแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์ แรงดันที่ตกคร่อมค่อยๆเพิ่มขึ้นจากการที่ตัวเก็บประจุถูกชาร์จ กระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์เป็น ศูนย์ ผลคูณระหว่างแรงดันและกระแสจึงเป็นศูนย์ การสวิตช์แบบนี้อุปกรณ์สวิตช์ทำงานขณะ กระแสที่ไหลผ่านเป็นศูนย์ก่อนที่แรงดันจะเพิ่มขึ้นจึงเรียกว่า Zero Current Switch (ZCS)

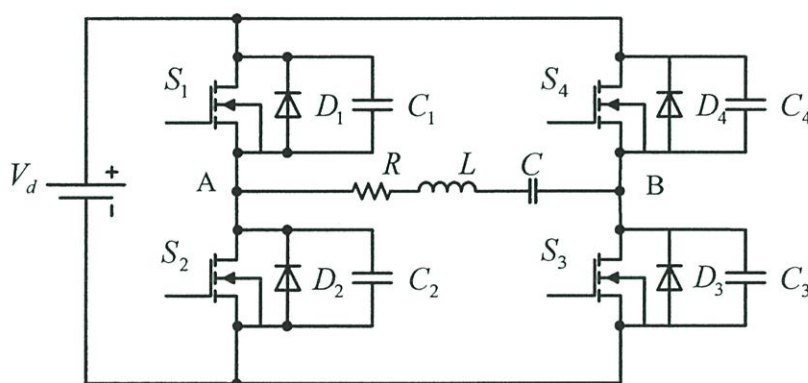


รูปที่ 2.12 แสดงสัญญาณการทำงานของฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

#### 2.4.2 เฟสชิฟท์-พีดีบีบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

เฟสชิฟท์-พีดีบีบลิวเอ็มคอนเวอร์เตอร์ (Phase Shift-PWM Full Bridge Converter) มีโครงสร้าง เหมือนกับพีดีบีบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์แต่มีลักษณะสัญญาณขับขาเกิดของอุปกรณ์สวิตช์

แตกต่างกัน สัญญาณขับเคลื่อนของพีคดับลิเอ็มฟูลบริจค์คอนเวอร์เตอร์นั้นจะทำงานเป็นคู่พร้อมกัน แต่เฟสซิปท์-พีคดับลิเอ็มคอนเวอร์เตอร์มีการขับเคลื่อนที่แตกต่างกันเล็กน้อยโดยมีการทำงานของคู่อุปกรณ์สวิตช์แยกเป็นกึ่งหน้าและกึ่งหลัง จากรูปที่ 2.13 ที่กึ่งหน้าอุปกรณ์สวิตช์  $S_1$  เริ่มทำงานก่อนจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป  $S_3$  ซึ่งอยู่กึ่งหลังจึงเริ่มทำงานที่มุม  $\alpha$  และ  $S_1$  ทำงานจนครบคาบเวลาที่กำหนดจากนั้นจึงหยุดทำงานก่อน โดย  $S_3$  จะหยุดทำงานต่อมาเช่นกันเมื่อครบคาบเวลาที่กำหนด และที่อุปกรณ์สวิตช์  $S_2$  ในครึ่งคาบหลังจะเริ่มทำงานก่อนจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป  $S_4$  ซึ่งอยู่กึ่งหลังจึงเริ่มทำงานที่มุม  $\alpha$  และ  $S_2$  ทำงานจนครบคาบเวลาที่กำหนดจากนั้นจึงหยุดทำงานก่อน โดย  $S_4$  จะหยุดทำงานต่อมาเช่นกันเมื่อครบคาบเวลาที่กำหนดโดยทำงานสลับกันไปตามรอบจังหวะเวลาการทำงาน สวิตช์ตัวบนและตัวล่างในกึ่งเดียวกันจะต้องมีช่วงเวลาหยุดนำกระแสทั้งคู่ ช่วงหนึ่งเพื่อป้องกันการลัดวงจรแหล่งจ่ายกำลัง ช่วงเวลานั้นคือ ขณะ turn on และ turn off ของทั้งสองตัวเรียกว่า ช่วงเวลา Death Time ( $t_{DT}$ ) [11]



รูปที่ 2.13 วงจรเฟสซิปท์พีคดับลิเอ็มคอนเวอร์เตอร์

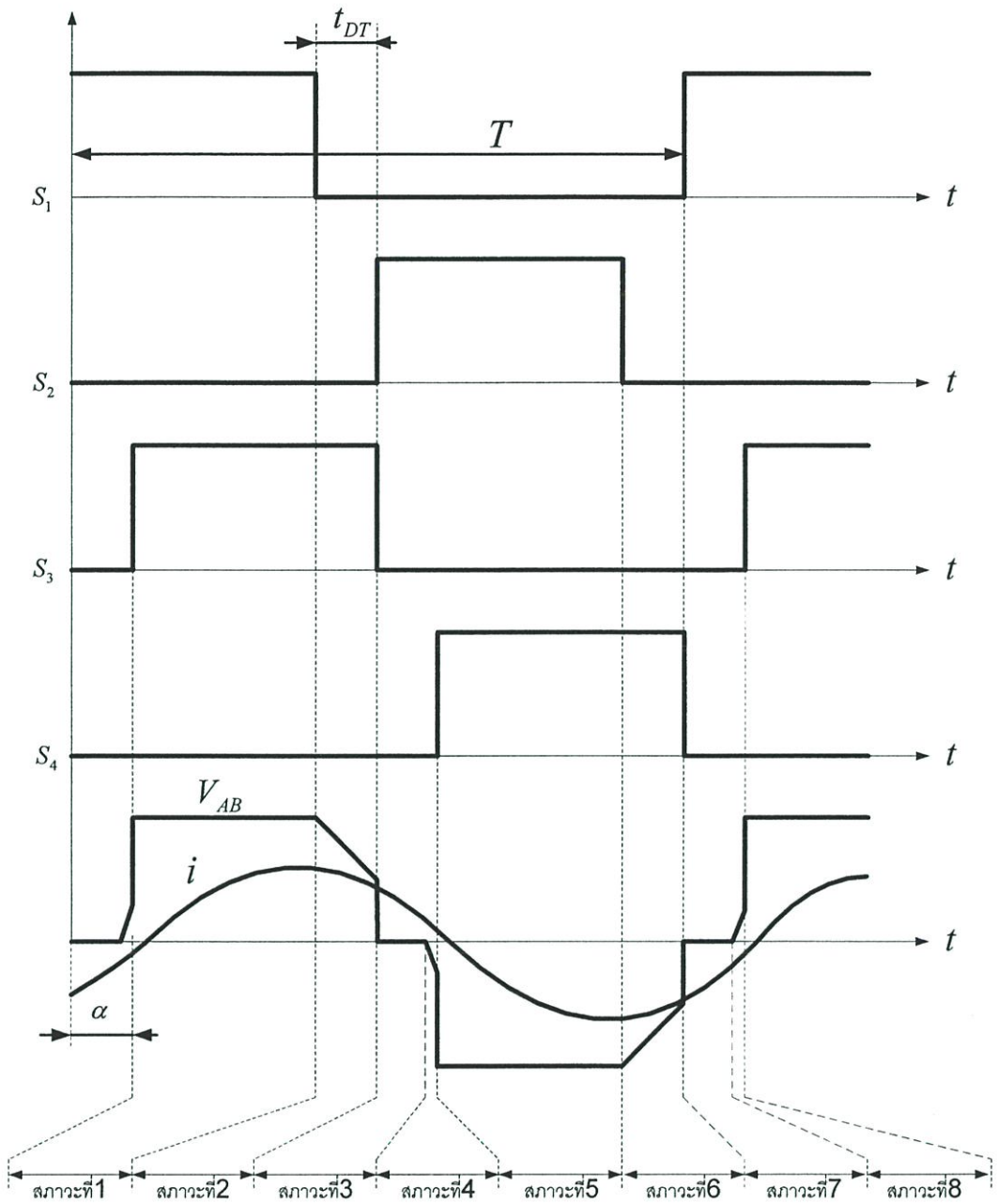
การทำงานของเฟสซิปท์คอนเวอร์เตอร์แบ่งได้เป็น 8 สภาวะ โดยการกำหนดการทำงานจากสัญญาณขับเคลื่อนของอุปกรณ์สวิตช์ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 รูปสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ที่จุด AB มีลักษณะคล้ายสัญญาณสี่เหลี่ยม (quasi-square wave) โดยจุดที่แรงดันเป็นศูนย์ เกิดจากการเคลื่อนเฟสขับเคลื่อนของคู่อุปกรณ์สวิตช์ออกไป วงจรของแหล่งจ่ายกำลังไม่ครบรอบทำให้แรงดันไม่สามารถปรากฏที่เอาต์พุต สัญญาณแรงดันที่ได้จึงเป็นศูนย์ วงจรเฟสซิปท์คอนเวอร์เตอร์ที่สภาวะการทำงานทั้ง 8 แสดงดังรูปที่ 2.15

สถานะที่ 1 สวิตช์  $S_1$  และ  $S_3$  turn on กระแสจากแหล่งจ่ายกระแสตรงไหลผ่าน  $S_1$  ไปสู่ Load (RLC) เมื่อกระแสไหลผ่าน L เกิดการสะสมพลังงานในรูปของสนามแม่เหล็ก จากนั้นไหลผ่าน C เพื่อเก็บประจุโดยมี R เป็นตัวจำกัดกระแส สุดท้ายจึงไหลผ่าน  $S_3$  กลับสู่แหล่งจ่ายครบวงจร แรงดันตกคร่อมโหลด  $V_{AB}$  เท่ากับแรงดันที่แหล่งจ่ายกระแสตรง  $+V_d$  ที่กึ่งหน้าแรงดันตกคร่อม  $S_2, C_2$  และ  $D_2$  เท่ากับ  $V_d$  แรงดันที่ตกคร่อม  $S_1, C_1$  และ  $D_1$  เท่ากับศูนย์ ที่กึ่งหลังแรงดันตกคร่อม  $S_4, C_4$  และ  $D_4$  เท่ากับ  $V_d$  แรงดันที่ตกคร่อม  $S_3, C_3$  และ  $D_3$  เท่ากับศูนย์

สถานะที่ 2 สวิตช์  $S_1$  turn off ในขณะที่  $S_3$  ยังคง turn on ตามรูปแบบของสัญญาณขับเคลื่อนที่จ่ายใช้  $S_3$  กระแสไหลต่อเนื่องที่ผ่าน  $S_1$  จะเปลี่ยนมาไหลผ่าน  $C_1$  แทน เพราะเมื่อ  $S_1$  turn off เสมือนเปิดวงจร  $C_1$  ซึ่งถูกต่อคร่อมที่  $S_1$  จึงกลายเป็นทางเดินใหม่ให้กับกระแส  $C_1$  ถูกชาร์จประจุทำให้แรงดันที่ตกคร่อม  $C_1$  มีค่าสูงขึ้นจากศูนย์ จนถึง  $V_d/2$  กระแสไหลผ่าน  $C_1$  ไปสู่ Load (RLC) ไปสู่  $S_3$  กลับสู่แหล่งจ่ายครบวงจร ในขณะเดียวกันแรงดันที่ตกคร่อม  $C_2$  ลดลงเพราะ  $C_2$  ถูกต่อขนานอยู่กับ Load (RLC) เมื่อ  $S_1$  turn off แรงดันที่ตกคร่อม Load (RLC) ลดลงจากกลาย  $V_d/2$   $C_2$  สามารถคายประจุผ่าน Load (RLC) ผ่าน  $S_3$  ครบวงจรได้

สถานะที่ 3 ช่วงเวลาฟรีวีล (Free Wheeling) ในสถานะนี้แหล่งจ่ายไม่สามารถจ่ายกระแสให้ Load (RLC) ได้เพราะ  $S_1$  เปิดวงจรและ  $C_1$  เก็บประจุเต็ม ช่วงเวลานี้พลังงานที่สะสมใน L อยู่ในรูปของสนามแม่เหล็กยุบตัวลงติดกับขดลวดเกิดกระแสจ่ายออกจาก L ไหลผ่าน C ไปสู่  $S_3$  ไปสู่  $D_2$  และผ่าน R กลับสู่ L ครบวงจร ช่วงเวลาฟรีวีล นี้ ไดโอด  $D_2$  ได้รับฟอร์เวิร์ดไบอัส ทำให้ครบรอบวงจรคืนพลังงาน เพื่อลดการเสียหายของอุปกรณ์สวิตซ์จากการได้รับรีเวิร์สไบอัสที่สูงเกินขีดจำกัดได้และแรงดันตกคร่อม Load (RLC) มีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากสวิตซ์  $S_2$  ปิดวงจร  $D_2$  ได้รับฟอร์เวิร์ดไบอัส

สถานะที่ 4 กระแสที่ไหลผ่าน  $S_3$  เปลี่ยนมาไหลผ่าน  $C_3$  ไหลผ่าน  $D_2$  กลับสู่โหลด จากการที่  $S_3$  เปิดวงจรแรงดันที่ตกคร่อม  $C_3$  ค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่าๆ หนึ่ง Load (RLC) ต่อขนานอยู่กับ  $C_3$  จึงทำให้แรงดันที่วัดได้มีค่าเท่ากัน ในสถานะนี้พลังงานที่สะสมใน L ลดลงเกือบหมด ดังนั้นกระแสที่ถูกจ่ายออกจาก L กำลังลดลงเป็นศูนย์และ  $S_2$  turn on และ  $S_3$  turn off



รูปที่ 2.14 แสดงสัญญาณการทำงานของเฟสชิฟต์คอนเวอร์เตอร์

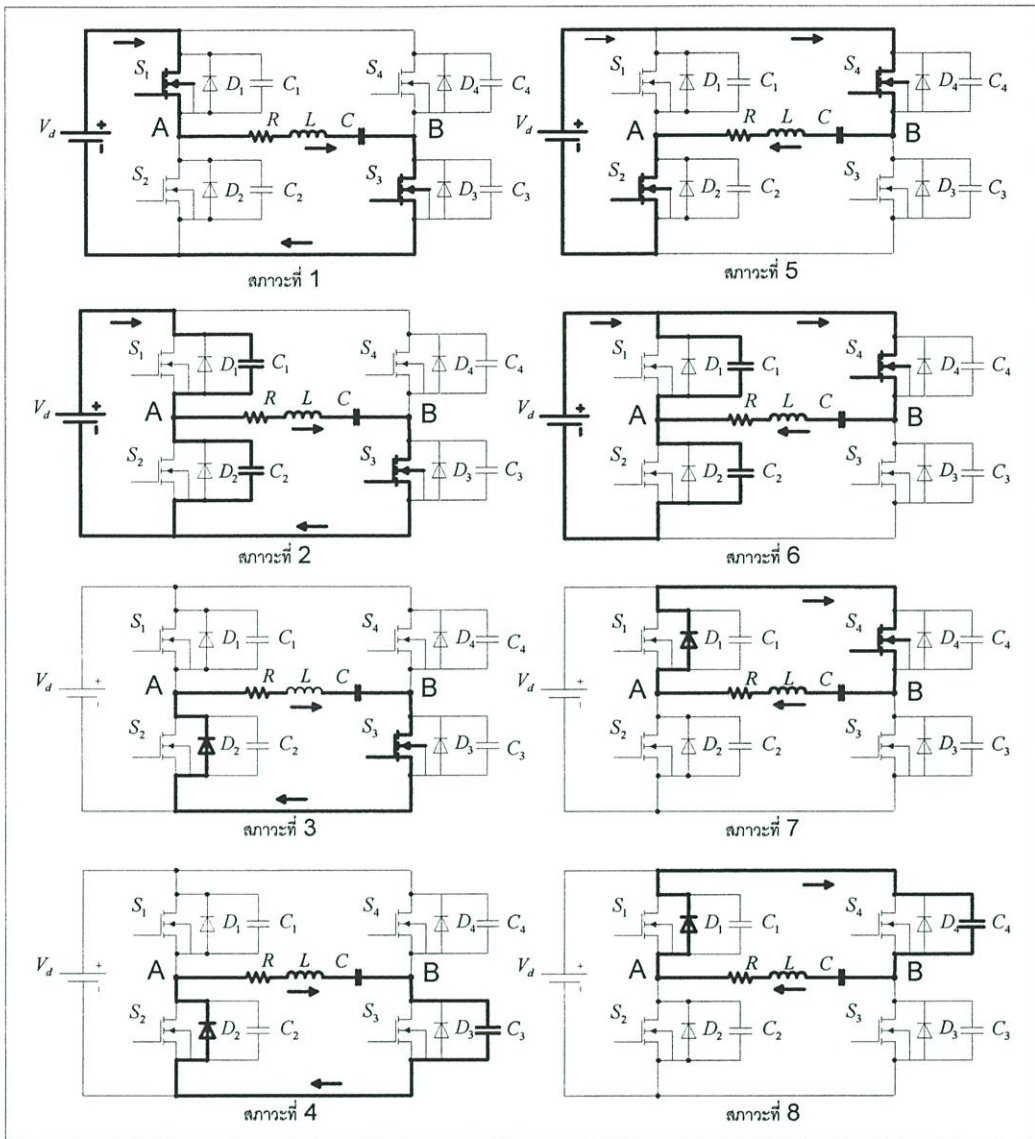
สภาวะที่ 5  $S_2 - S_4$  turn on กระแสจากแหล่งจ่ายกระแสตรงไหลผ่าน  $S_4$  ไปสู่ Load (RLC) เมื่อกระแสไหลผ่าน L เกิดการสะสมพลังงานในรูปสนามแม่เหล็กและจากนั้นจึงไหลผ่าน C เพื่อชาร์จประจุให้กับ C โดยมี R เป็นตัวจำกัดกระแส จากนั้นจึงไหลผ่าน  $S_2$  กลับสู่แหล่งจ่ายวงจร แรงดันตกคร่อมโหลด  $V_{AB}$  เท่ากับแรงดันที่แหล่งจ่ายแต่มีค่าติดลบเพราะกลับขั้วเท่ากับ -

Vd ที่กึ่งหน้าแรงดันตกคร่อม  $C_1$ ,  $D_1$  และ  $C_1$  เท่ากับ Vd แรงดันที่ตกคร่อม  $D_2$  และ  $C_2$  เท่ากับ ศูนย์ ที่กึ่งหลังแรงดันตกคร่อม  $S_3$ ,  $D_3$  และ  $C_3$  เท่ากับ Vd แรงดันตกคร่อม  $D_4$  และ  $C_4$  เท่ากับ ศูนย์

สถานะที่ 6  $S_2$  turn off ในขณะที่  $S_4$  ยังได้รับสัญญาณแรงดันขับเกตและ turn on อยู่ในกรณีที่ เป็นโหลดสะสมพลังงานกระแสจะไม่หยุดไหลอย่างทันทีทันใด แต่จะค่อยๆ ลดลง ดังนั้น กระแสไหลต่อเนื่องที่ผ่าน  $S_2$  จะเปลี่ยนมาไหลผ่าน  $C_2$  ที่ถูกต่อขนานอยู่กับ  $S_2$  ซึ่งเปิดวงจรแรงดันที่ตกคร่อม  $C_2$  ค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากการที่ตัวมันถูกชาร์จประจุจากกระแสไหลที่ไหลผ่านแรงดันที่ตกคร่อม  $C_2$  เปลี่ยนแปลงจากศูนย์ไปจนถึง  $Vd/2$  ด้วยเหตุที่มันต่ออนุกรมกับ  $C_1$  ซึ่งเป็นตัวแบ่งแรงดันอีกครั้งที่เหลือ เมื่อแรงดันที่ตกคร่อม  $C_1$  ลดลงจาก Vd เหลือ  $Vd/2$   $C_1$  จะคายประจุออก กระแสไหลผ่าน  $S_4$  ไปสู่ Load (RLC) กลับมาที่  $C_1$  ครอบรอบ ในขณะเดียวกัน กระแส Load (RLC) บางส่วนจะไหลผ่าน  $C_2$  ไปสู่แหล่งจ่าย ไปสู่  $S_4$  กลับสู่ Load (RLC) ครบวงจร

สถานะที่ 7 ช่วงเวลาฟรีวีล เนื่องจาก  $S_2$  เปิดวงจร ตัดทางเดินกระแสจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า กระแสตรงออก กระแสที่ไหลผ่านโหลดเกิดจากการยุบตัวของสนามแม่เหล็กติดกับขดลวดของ L ทำให้พลังงานที่สะสมอยู่ถูกจ่ายออกมาเป็นกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน R ไปสู่  $D_1$  ไปสู่  $S_4$  ผ่าน C กลับสู่ L ครบวงจร ช่วงเวลาฟรีวีลนี้  $D_1$  นำกระแส เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่ขาซอร์สเริ่มสูงกว่าขาเดรน ในกรณีนี้แรงดันตกคร่อมสวิตช์จะถูกจำกัดให้เท่ากับแรงดันเริ่มต้นที่ตกคร่อมไดโอด ลักษณะที่เกิดขึ้นแบบนี้ ช่วยลดการเสียหายของอุปกรณ์สวิตช์จากการได้รับรีเวิร์สไบอัสที่สูงเกินขีดจำกัด และเนื่องจาก  $S_4$  ปิดวงจร และ  $D_1$  ได้รับฟอร์เวิร์ดไบอัส ทำให้แรงดันตกคร่อม Load (RLC) มีค่าเท่ากับศูนย์

สถานะที่ 8  $S_1$  turn on และ  $S_4$  turn off กระแสไหลผ่าน  $S_4$  เปลี่ยนมาไหลผ่าน  $C_4$  ไหลผ่าน  $D_3$  กลับสู่โหลด และแรงดันที่ตกคร่อม  $C_4$  ค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่าๆ หนึ่ง Load (RLC) ถูกต่อขนานกับ  $C_4$  ดังนั้น แรงดันตกคร่อมที่วัดได้จึงมีค่าเท่ากัน ในสถานะนี้พลังงานที่สะสมใน L ลดลงเกือบหมด ดังนั้นกระแสที่ถูกจ่ายออกจาก L กำลังลดลงเป็นศูนย์และ หลังจากสถานะที่ 8 นี้แล้ว คอนเวอร์เตอร์จะกลับไปเริ่มการทำงานที่สถานะที่ 1 อีกครั้งเป็นวงรอบการทำงานต่อไป



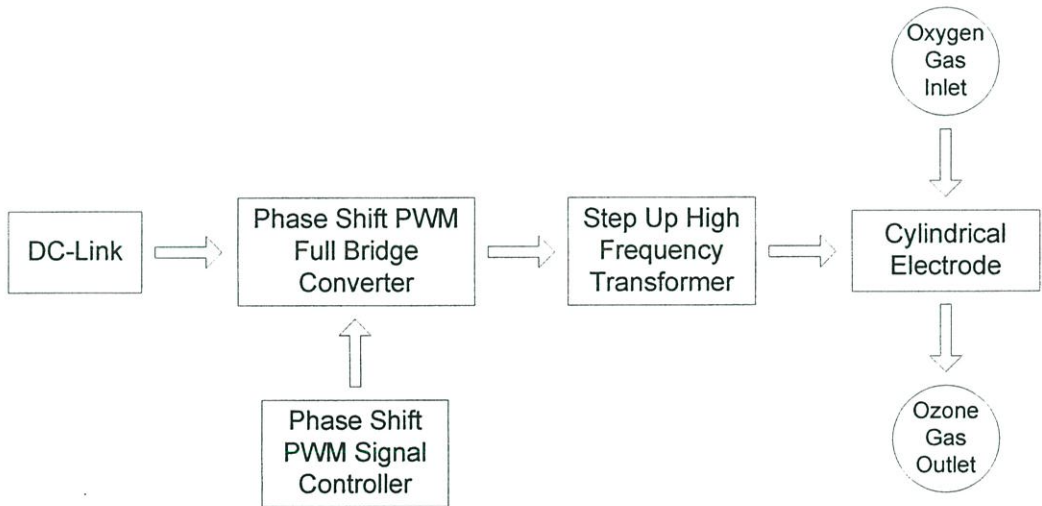
รูปที่ 2.15 แสดงการทำงานของเฟสชิฟท์คอนเวอร์เตอร์ที่สถานะ 1 ถึง 8

# บทที่ 3

## การออกแบบเครื่องผลิตก๊าซโอโซน

### 3.1 บทนำ

เครื่องผลิตก๊าซโอโซนมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนมากนัก โดยหลักๆแล้วประกอบด้วยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตซ์โหมคคอนเวอร์เตอร์ ชุดสร้างสัญญาณควบคุมเพื่อนำไปใช้เป็นสัญญาณขับเคลื่อนของอุปกรณ์สวิตซ์ในแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตซ์โหมคคอนเวอร์เตอร์ หม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดันและชุดอิเล็กทรอนิกส์ทรานซอร์มเมอร์แบบแยกกันร่วม ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ในการวิเคราะห์และออกแบบต้องทราบถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของโหลดเสียก่อนจึงจะสามารถออกแบบในส่วนอื่นๆที่เหลือของระบบได้ ดังนั้นจะขอกล่าวถึงการวิเคราะห์และออกแบบชุดอิเล็กทรอนิกส์ทรานซอร์มเมอร์แบบแยกกันร่วม 2 ชั้นเป็นอันดับแรก หลังจากนั้นจึงออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงและแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ขั้นตอนสุดท้ายเมื่อได้ตัวแปรในส่วนต่างๆของระบบครบแล้วจึงนำมาจำลองการทำงานของระบบด้วยโปรแกรม MatLAB/Simulink เพื่อศึกษาผลทางสัญญาณไฟฟ้าที่ได้



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของเครื่องผลิตก๊าซโอโซน

### 3.2 อิเล็กทรอนิกส์ทรานซอร์มเมอร์แบบแยกกันร่วม 2 ชั้น

ในบทความนี้เลือกใช้แก้วเป็นวัสดุฉนวนชั้นที่ 1 ด้วยเหตุผล 5 ข้อดังนี้คือ

- 1.) แก้วมีคุณสมบัติในการทนความเครียดสนามไฟฟ้าได้สูง
- 2.) แก้วที่คุณภาพการผลิตดีจะมีผิวเรียบและไม่มีฟองอากาศหรือสิ่งแปลกปลอมเจือปนอยู่ ซึ่งสิ่งเหล่านี้อาจส่งผลให้เกิดการเบรกดาวนในแก้วได้

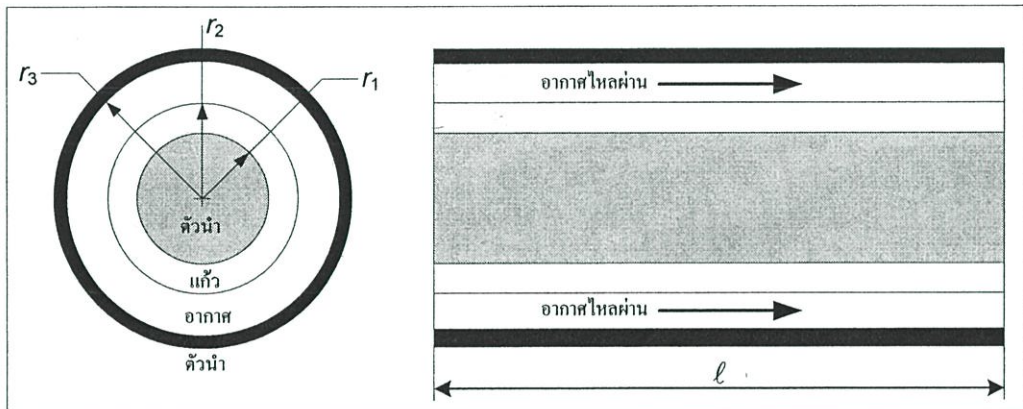
3.) สามารถทนการขูดขีดและไม่เกิดริ้วรอยได้ง่าย

4.) ในกระบวนการผลิตแก้วต้องให้ความร้อนสูงกว่า 1,200 องศาเซลเซียสเพื่อหลอมทราย ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ทำแก้ว ดังนั้นแก้วจึงทนความร้อนได้สูงมากก่อนที่จะหลอมละลายเสียหาย

5.) แก้วเป็นวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารใดๆ ดังนั้นจึงไม่ทำปฏิกิริยากับก๊าซไอโซนเช่นกัน

ในส่วนของฉนวนชั้นที่ 2 เป็นช่องว่างอากาศเพื่อที่จะสามารถทำให้อากาศไหลผ่านชุดอิเล็กโทรดได้ ตัวนำด้านในและด้านนอกใช้ฟอยสแตนเลสและท่อสแตนเลสตามลำดับ รูปทรงของอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันรวมฉนวน 2 ชั้น แสดงในรูปที่ 3.2

การกำหนดขนาดรัศมีของชุดอิเล็กโทรดจะเลือกจากขนาดของหลอดแก้วก่อนเป็นหลักเพราะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของหลอดแก้วมีให้เลือกไม่มากนัก จากนั้นจึงเลือกขนาดของท่อสแตนเลส ซึ่งผู้ผลิตได้จัดทำตารางขนาดท่อไว้แล้วจึงสะดวกต่อการนำค่ามาใช้งาน



รูปที่ 3.2 ลักษณะรูปทรงของอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันรวมฉนวน 2 ชั้น

งานวิจัยนี้เลือกหลอดแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 4.5 ซม., หนา = 0.1 ซม. และ ยาว = 25 ซม. เหตุผลในการเลือกนั้นเพราะจากการคำนวณร่วมกับท่อสแตนเลสหลายๆขนาดแล้วหลอดแก้วขนาดนี้ใช้แรงดันภายนอกที่ป้อนให้ไม่สูงมากนักและความยาวก็มากกว่าหลอดแก้วขนาดอื่นๆ ในส่วนของท่อสแตนเลสเลือกใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 5.1 ซม., หนา 0.1 ซม. และ ยาว = 25 ซม. เมื่อนำหลอดแก้วซ้อนเข้าไปในท่อสแตนเลส ดังนั้นจะได้ค่า  $r_1 = 2.15$  ซม.,  $r_2 = 2.25$  ซม. และ  $r_3 = 2.45$  ซม. ค่าเปอร์มิตติวิตีของแก้ว ( $\epsilon_{r_1}$ ) อยู่ระหว่าง 5-10 และของอากาศ ( $\epsilon_{r_2}$ ) ประมาณเท่ากับ 1 กำหนดให้ตัวนำด้านในของอิเล็กโทรดยาว ( $l$ ) 22 ซม. เนื่องจากในการคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุเสมือนใช้ค่าความยาวตัวนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเป็นตัวแปรในสมการซึ่งแปรผันกัน ดังนั้นถ้าเลือกค่าความยาวมากก็จะทำให้ค่าตัวเก็บประจุมีค่ามากส่งผลให้กระแสไหลมีค่าสูงขึ้น พิกัดของอุปกรณ์ก็จะสูงขึ้น แต่ถ้าความยาวสั้นเกินไปก็จะทำให้อากาศที่ไหลผ่านสนามไฟฟ้ามีระยะทางสั้น และ โอกาสที่โมเลกุลของอากาศจะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าก็น้อยลงเช่นกัน นำ

ตัวแปรมาคำนวณหาปริมาตรของช่องว่างอากาศ ( $Vol$ ) มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร ( $m^3$ ) ได้จากสมการ (3.1)

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

$$Vol = \pi \times (0.0245 - 0.0225)^2 \times 0.22$$

$$Vol = 2.55 \times 10^{-6} \quad m^3$$

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

$$W_{\min} = 1.172 \times 10^3 \times 2.55 \times 10^{-6} = 3.0 \text{ mW.h}$$

$$W_{\max} = 1.620 \times 10^3 \times 2.55 \times 10^{-6} = 4.1 \text{ mW.h}$$

คำนวณหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้า ( $E$ ) ได้จากสมการพลังงานในสนามไฟฟ้าของช่องว่างอากาศ (3.2) ในกรณีที่สนามไฟฟ้าแปรตามเวลานั้น สามารถวิเคราะห์ในสภาพสนามไฟฟ้าสถิตย์ได้ เนื่องจากในขณะที่ขนาดของแรงดันภายนอกที่ป้อนให้กับอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่าๆ หนึ่งก่อนถึงค่าสูงสุด สนามไฟฟ้าจะไม่มีพลังงานมากพอที่จะทำให้อิเล็กทรอนิกส์หลุดออกมาจากโมเลกุลก๊าซได้ และไม่สามารถเร่งความเร็วของอิเล็กตรอนอิสระให้เคลื่อนที่และชนกับโมเลกุลก๊าซในช่องว่างอากาศให้แตกตัวได้ ดังนั้นพลังงานที่จะทำให้เกิดกระบวนการไอออไนเซชัน ( $W_i$ ) ได้จึงเกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดนั่นเอง เพราะฉะนั้นสามารถอินทิเกรตสมการ (3.2) ได้ดังนี้

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

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

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

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

ที่ย่านพลังงานต่ำสุด  $E_{\min} = \sqrt{\frac{2 \times 3.0 \times 10^{-3}}{8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 2.55}}$

$$E_{\min} = 16,300 \text{ V/cm}$$

ที่ย่านพลังงานสูงสุด  $E_{\max} = \sqrt{\frac{2 \times 4.1 \times 10^{-3}}{8.854 \times 10^{-12} \times 1 \times 2.55}}$

$$E_{\max} = 19,000 \text{ V/cm}$$

เมื่อได้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ย่านพลังงานต่ำสุดและสูงสุดที่ทำให้เกิดก๊าซไอโซนแล้วจึงคำนวณหาค่าแรงดันภายนอกที่ป้อนให้ชุดอิเล็กทรอนิกส์ได้จากสมการ (2.3) โดยแทนค่าได้ดังนี้

$$V_{\min} = \frac{16,300 \times 1 \times 2.25 \times \left( 8 \times \ln \frac{2.45}{2.25} + 1 \times \ln \frac{2.25}{2.15} \right)}{8 \times 1}$$

เพราะฉะนั้น  $V_{\min} = 3.33 \text{ kV}$

$$V_{\max} = \frac{19,000 \times 1 \times 2.25 \times \left( 8 \times \ln \frac{2.45}{2.25} + 1 \times \ln \frac{2.25}{2.15} \right)}{8 \times 1}$$

เพราะฉะนั้น  $V_{\max} = 3.88 \text{ kV}$

ในงานวิจัยนี้เลือกแรงดันที่ 3.5 kV เนื่องจากเป็นจุดกึ่งกลางระหว่างค่าต่ำสุดและสูงสุด ซึ่งสามารถใช้งานได้โดยมีความยืดหยุ่นสูงในกรณีที่แรงดันมีการแกว่งและไม่คงที่

ทำการหาค่าตัวเก็บประจุเสมือนที่ต่ออนุกรมกันในแท่งอิเล็กทรอนิกส์จากสมการ (2.1) และ (2.2) โดยแทนค่าได้ดังนี้

$$C_1 = \frac{2 \times \pi \times 8 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 22}{\ln \frac{2.25}{2.15}}$$

เพราะฉะนั้น  $C_1 = 2.1537 \text{ nF}$

$$C_2 = \frac{2 \times \pi \times 1 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 22}{\ln \frac{2.45}{2.25}}$$

เพราะฉะนั้น  $C_2 = 0.1437 \text{ nF}$

### 3.3 หม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน

ในงานวิจัยนี้ออกแบบกำลังงานของหม้อแปลงไว้ที่ 1.5 kW เลือกใช้แกนเฟอร์ไรท์เบอร์ EE-80 ซึ่งเป็นแกนแบบ EE ที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในท้องตลาดและจ่ายกำลังได้สูงสุด 2 kW โดยโครงสร้างคือการนำแกนเฟอร์ไรท์รูปร่างเหมือนตัว E สองตัวมาประกบกัน ลักษณะของแกนแสดงในรูปที่ 3.3 มีค่าพารามิเตอร์ดังนี้ พื้นที่หน้าตัดแกน  $A_c = 3.92 \times 10^{-4}$ ,  $B_{\max} = 0.3 \text{ T}$ , ความยาวทางเดินแม่เหล็กของแกน ( $l_c$ ) 0.192 m ปริมาตรแกน  $V_c = 69.8 \times 10^3 \text{ mm}^3$  และความยาวรอบด้านทั้ง ( $l_w$ ) 4 ของแกน 0.08 m พื้นที่ช่องว่างของบ็อบบิน  $800 \text{ mm}^2$  แต่เนื่องจากโหลดของหม้อแปลงเป็นอุปกรณ์แบบสะสมพลังงานดังนั้นสิ่งที่พิจารณาคือกระแสโหลดและพื้นที่หน้าตัดการนำกระแสของขดลวดตัวนำ

กำหนดพิกัดของหม้อแปลงดังนี้ แรงดันทางด้านปฐมภูมิ  $V_p = 310 \text{ V}$  แรงดันทางด้านทุติยภูมิ  $V_s = 3.5 \text{ kV}$ , ความถี่ใช้งาน 20-100 kHz และกระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง 5 A

คำนวณหาจำนวนรอบปฐมภูมิจากสมการ (2.8) โดยแทนค่าได้ดังนี้

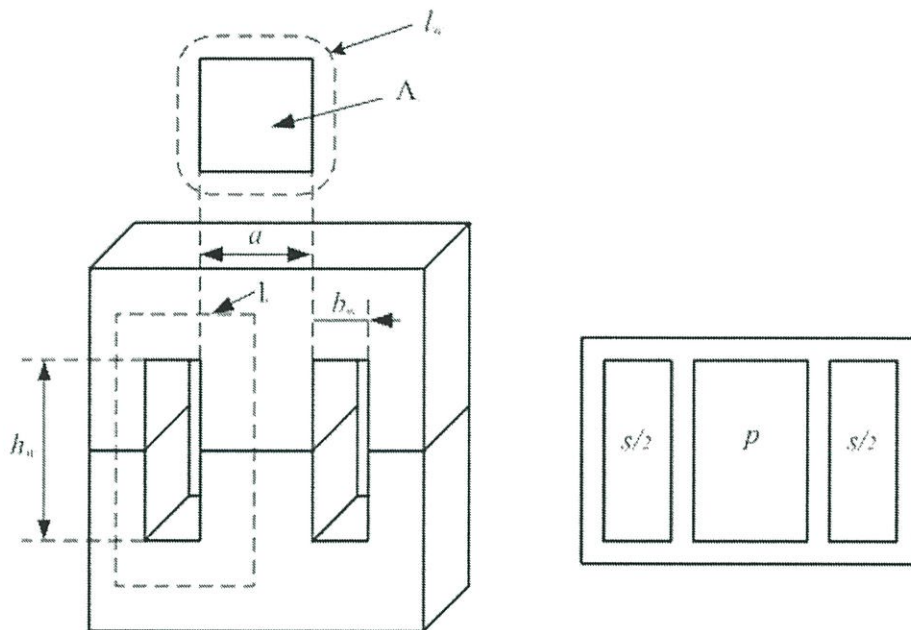
$$N_p = \frac{310}{4 \times 20,000 \times 0.1 \times 3.92 \times 10^{-4}}$$

เพราะฉะนั้น  $N_p = 99 \text{ รอบ}$

จำนวนรอบทุติยภูมิคำนวณจากสมการ (2.9) แทนค่าได้ดังนี้

$$N_s = 99 \times \frac{3500}{310}$$

เพราะฉะนั้น  $N_s = 1130$  รอบ



รูปที่ 3.3 โครงสร้างแกนเฟอร์ไรท์เบอร์ EE-80

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

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

เปิดตารางเทียบเบอร์ลวดได้ #AWG 16 ( $1.3 mm^2$ )

คำนวณเบอร์ลวดทางด้านทุติยภูมิได้ดังนี้

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

$$I_s = 5 \times \frac{99}{1130}$$

เพราะฉะนั้น  $I_s = 0.443$

ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดของขดลวดคือ  $\frac{0.443A}{4A} = 0.11 \text{ mm}^2$

เปิดตารางเทียบเบอร์ลวดได้ #AWG 26 ( $0.128 \text{ mm}^2$ )

### 3.4 การออกแบบเฟสฟิที่พีดับบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

อุปกรณ์สวิตช์ 4 ตัวในวงจรกำลังฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือ มอสเฟตเบอร์ IRFP460 มีพิกัดทนแรงดันได้สูงสุดคือ 500V และทนกระแสได้ 20A เนื่องจากแรงดันดีซี-ลิงค์จากแหล่งจ่ายมีขนาด 310V จึงต้องใช้อุปกรณ์สวิตช์ทนแรงดันได้สูง มอสเฟตเบอร์นี้มีแอนตี้พาราเลลไดโอดเพื่อคืนพลังงานในช่วงเวลาฟรีวีวป้องกันการเสียหายให้กับมอสเฟต จึงไม่จำเป็นต้องต่อฟรียูลิ่งไดโอดภายนอกเพิ่มเติม ที่ขาเดรนและขาซอสของมอสเฟตต่อตัวเก็บประจุคร่อมไว้เพื่อให้เกิดการชอร์ฟสวิทช์ขณะ turn off ดังแสดงในรูปที่ 3.4

หลักการเกิดชอร์ฟสวิทช์ขณะ turn off ของมอสเฟตคือการทำให้แรงดันที่ตกคร่อมมอสเฟตยังคงเป็นศูนย์ในขณะที่กระแสไหลดที่ไหลผ่านมอสเฟตลดลงเป็นศูนย์ โดยใช้วิธีการเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแสจากมอสเฟตมาไหลผ่าน C ในขณะที่มอสเฟตกำลัง turn off ค่าความต้านทานภายในมอสเฟตเพิ่มสูงขึ้น ลักษณะนี้เสมือนเปิดวงจร แรงดันที่ตกคร่อม C จะไม่เพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดแต่จะค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นจากการที่ถูกรชาร์จประจุโดยกระแสไหลดที่เคยไหลผ่านมอสเฟตและกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตเริ่มลดลงเพราะมีทิศทางการไหลเปลี่ยนไปที่ C แรงดันที่ตกคร่อม C เท่ากับแรงดันที่ตกคร่อมมอสเฟต ดังนั้นผลคูณกระแสกับแรงดันที่มอสเฟตซึ่งเป็นกำลังสูญเสีย ( $P_{loss}$ ) จึงลดลงแสดงในรูปที่ 3.5 สมการในการคำนวณค่า C ใช้สมการ (3.4)

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

เมื่อ  $C_s$  = ค่าตัวเก็บประจุที่ทำให้เกิดชอร์ฟสวิทช์ (F)

$I_{load}$  = กระแสไหลดที่ไหลผ่านมอสเฟต (A)

$t_{if}$  = ช่วงเวลาที่กระแสเริ่มลดลงจนเป็นศูนย์ (sec)

$V_{dc}$  = แรงดันดีซี-ลิงค์ (V)

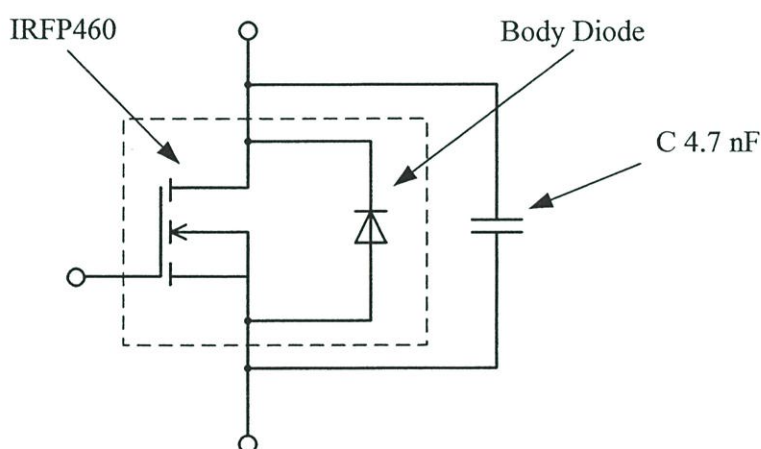
กำหนดช่วงเวลา ( $t_{yf}$ ) เพื่อใช้ในการคำนวณค่า  $C_s$  โดยดูจากช่วงเวลาเดธไทม์ ( $t_{DT}$ ) ของมอสเฟตที่ความถี่ใช้งานสูงสุดคือ 100 kHz คาบเวลาใน 1 ลูกคลื่นเท่ากับ  $10 \mu\text{s}$  กำหนดเดธไทม์เท่ากับ 5% ของลูกคลื่น เพราะฉะนั้น  $t_{yf}$  เท่ากับ คาบเวลา 1 ลูกคลื่นคูณกับช่วงเวลาเดธไทม์ ได้  $0.5 \mu\text{s}$  กระแสโหลด ( $I_{load}$ ) จากหัวข้อที่ผ่านมาเท่ากับ 5A แรงดันดีซี-ลิงก์เท่ากับ 310V แทนค่าในสมการได้

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

เพราะฉะนั้น

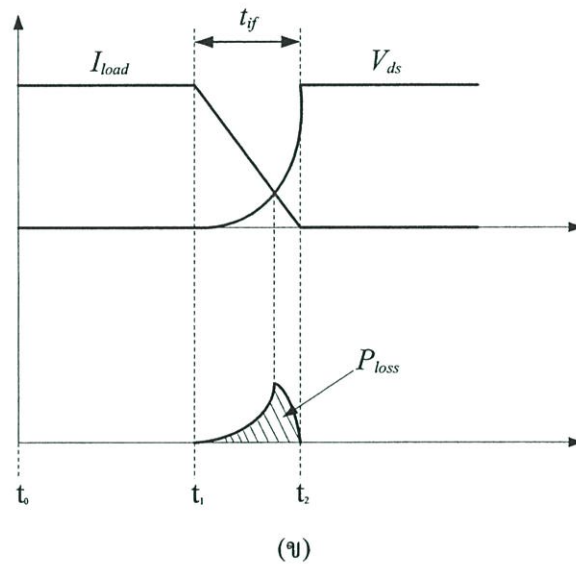
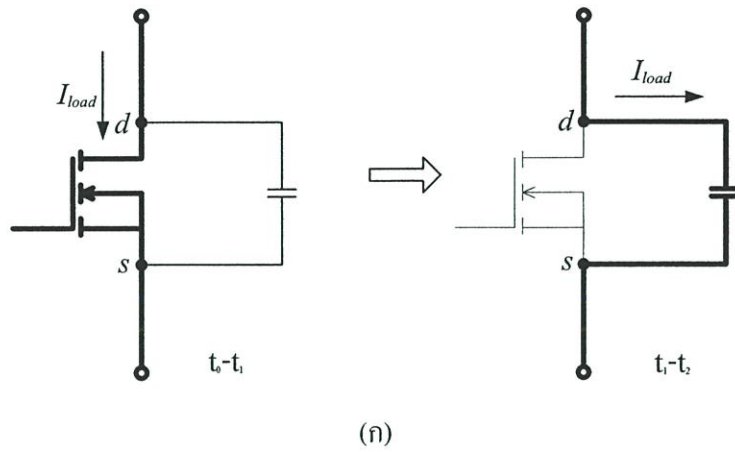
$$C_s = 4 \text{ nF}$$

ดังนั้นเลือกใช้ค่า C เท่ากับ 4.7 nF



รูปที่ 3.4 มอสเฟตเบอร์ IRFP460 ต่อพร้อมด้วยตัวเก็บประจุค่า 4.7 nF

ในการเลือกใช้ตัวเก็บประจุตัวเดียวต่อพร้อมมอสเฟตดีกว่าการต่อแบบ RCD Snubber คือ ไม่มีกำลังสูญเสียที่ตัวต้านทานและไดโอดสับเบอร์ ประหยัดอุปกรณ์โดยที่หลักการทำงานยังเหมือนกับ RCD Snubber



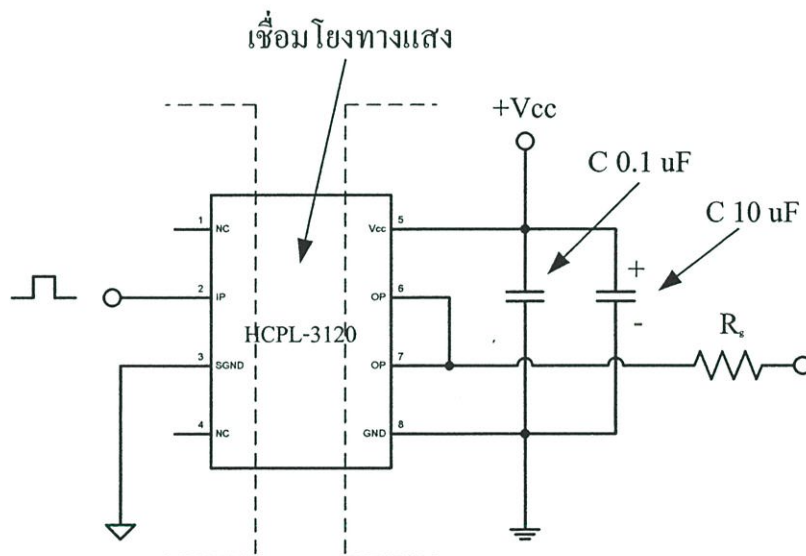
รูปที่ 3.5 (ก) แสดงวงจรสมมูลการเกิดซอร์ฟสวิทช์ขณะ turn off

(ข) รูปสัญญาณกระแสและแรงดันที่มอสเฟต

ในส่วนวงจรขับสัญญาณเกตของมอสเฟต ใช้ไอซีออปโตคัปเปิลเบอร์ HCPL-3120 ซึ่งคุณสมบัติของตัวมันเป็นอุปกรณ์ขับสัญญาณเกตกระแสสูงอยู่แล้วจึงไม่จำเป็นต้องต่ออุปกรณ์เพิ่มเติม คุณสมบัติอีกข้อคือ ไอซีเบอร์นี้มีการเชื่อมโยงสัญญาณทางแสงดังนั้นจึงเป็นการแยกกราวด์อย่างเด็ดขาด ซึ่งฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ที่มีมอสเฟตในกิ่งเดียวกันต้องแยกกราวด์ไฟเลี้ยงวงจรเพื่อป้องกันการลัดวงจรแหล่งจ่ายดีซี-ลิงค์ การเชื่อมโยงสัญญาณด้วยแสงยังมีข้อดีอีกประการหนึ่งคือ เพื่อแยกวงจรทางด้านแรงดันสูงของวงจรกำลังออกจากแรงดันต่ำของวงจรสร้างสัญญาณควบคุมในกรณีที่วงจรกำลังทำงานผิดพลาดและเกิดการเสียหายก็จะไม่มีผลต่อวงจรควบคุมแต่อย่างใด สัญญาณเอาท์พุทของไอซีถูกต่อผ่าน  $R_g$  ก่อนที่จะต่อกับขาเกตของมอสเฟตเพื่อจำกัดกระแสและกำหนดช่วงเวลาขาขึ้นและขาลงของสัญญาณขับเกต ที่ขั้วไฟเลี้ยงของไอซีต่อ

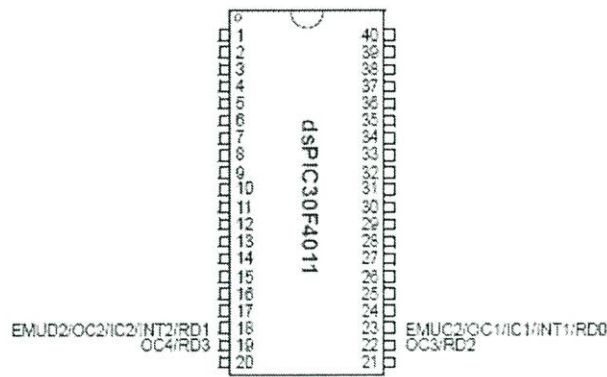
C เซรามิกค่า  $0.1 \mu\text{F}$  เพื่อกรองสัญญาณรบกวนความถี่สูงออกจากไฟเลี้ยงไอซีส่งผลให้เสถียรภาพการทำงานดีขึ้น และ C อิเล็กโตรไลต์ค่า  $10 \mu\text{F}$  เพื่อช่วยรักษาแรงดันไฟเลี้ยงให้คงที่และจ่ายกระแสชดเชยให้ไอซี วงจรขับสัญญาณเกตมอสเฟตแสดงในรูปที่ 3.6

การสร้างสัญญาณควบคุมจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวสร้างสัญญาณโดยการเขียนโปรแกรมกำหนดการทำงานและภาษาของโปรแกรมที่ใช้คือภาษาแอสเซมบลี (Assembly) [ภาคผนวก ข] บทความนี้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC30F4011 ซึ่งเป็นไอซีที่ทางบริษัทไมโครชิปเป็นผู้ผลิตขึ้น การใช้งานนั้นมีโมดูลให้เลือกใช้หลายแบบ หนึ่งในนั้นคือโมดูลเอาต์พุตคอมแพร์ (Output Compare Module) โมดูลนี้มีขาสัญญาณเอาต์พุต 4 ขา สามารถนำสัญญาณไปใช้ขับมอสเฟตทั้ง 4 ตัวได้พอดี ขาพอร์ทเอาต์พุตทั้ง 4 ขาคือ ขา OC1 ถึง OC4 แสดงในรูปที่ 3.7 วิธีการใช้งานโมดูลเอาต์พุตคอมแพร์ค่อนข้างทำได้ง่ายและสะดวก โดยก่อนอื่นต้องทำความเข้าใจกับการกำหนดการทำงานและรูปแบบการสั่งงานก่อน ในส่วนของการเขียนโปรแกรมควบคุมทั้งหมดถูกแสดงในภาคผนวก ข



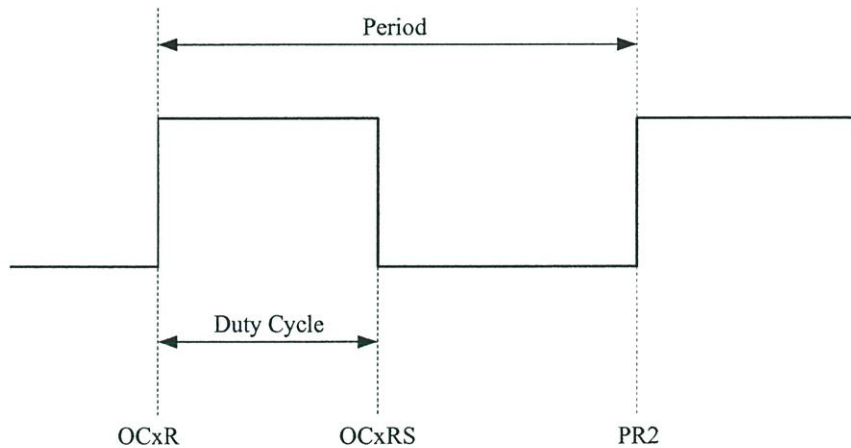
รูปที่ 3.6 วงจรขับสัญญาณเกตมอสเฟต

โดยทั่วไปการเขียนโปรแกรมให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานต้องมีการกำหนดค่าให้กับรีจิสเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องเสียก่อนการทำงานจึงจะสมบูรณ์และถูกต้อง ทางบริษัทไมโครชิปผู้ผลิตได้ทำการกำหนดรูปแบบเริ่มต้นหัวโปรแกรมไว้แล้ว สามารถนำไปใช้งานได้ทันทีโดยที่ผู้เขียนโปรแกรมไม่จำเป็นต้องลงลึกในรายละเอียด



รูปที่ 3.7 ขาพอร์ทเอาต์พุทของ โมดูลเอาต์พุทคอมแพร์

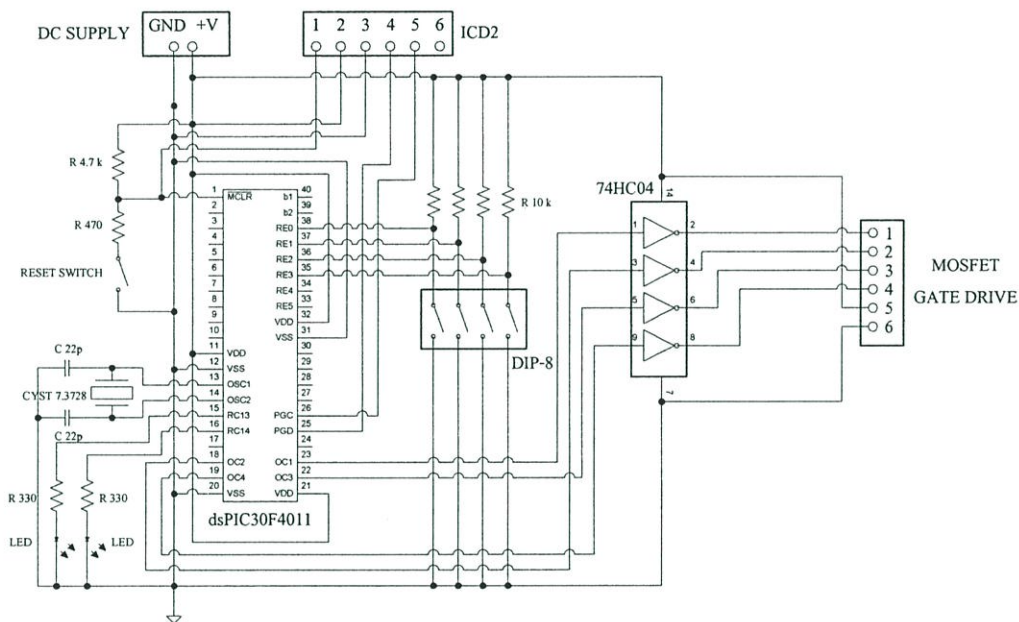
โมดูลเอาต์พุทคอมแพร์จะเริ่มทำงานก็ต่อเมื่อได้มีการกำหนดค่าให้กับรีจิสเตอร์ OCxCON (เมื่อ x แทนพอร์ท 1, 2, 3 หรือ 4) เสียก่อน การทำงานของโมดูลเอาต์พุทคอมแพร์จะใช้ Timer 2 หรือ 3 เป็นตัวกำหนดคาบเวลาของโมดูล โดยอาศัยรีจิสเตอร์ 2 ตัวเป็นตัวกำหนดขอบขาขึ้นและขอบขาลงของสัญญาณคือ OCxR และ OCxRS ตามลำดับ การกำหนดค่าจะกำหนดเป็นตัวเลข ซึ่งต้องสัมพันธ์กับค่าตัวเลขที่จะใส่ให้กับ PR2 ซึ่งเป็นตัวกำหนดคาบเวลาการนับของ Timer 2 เช่นกันดังในรูปที่ 3.8



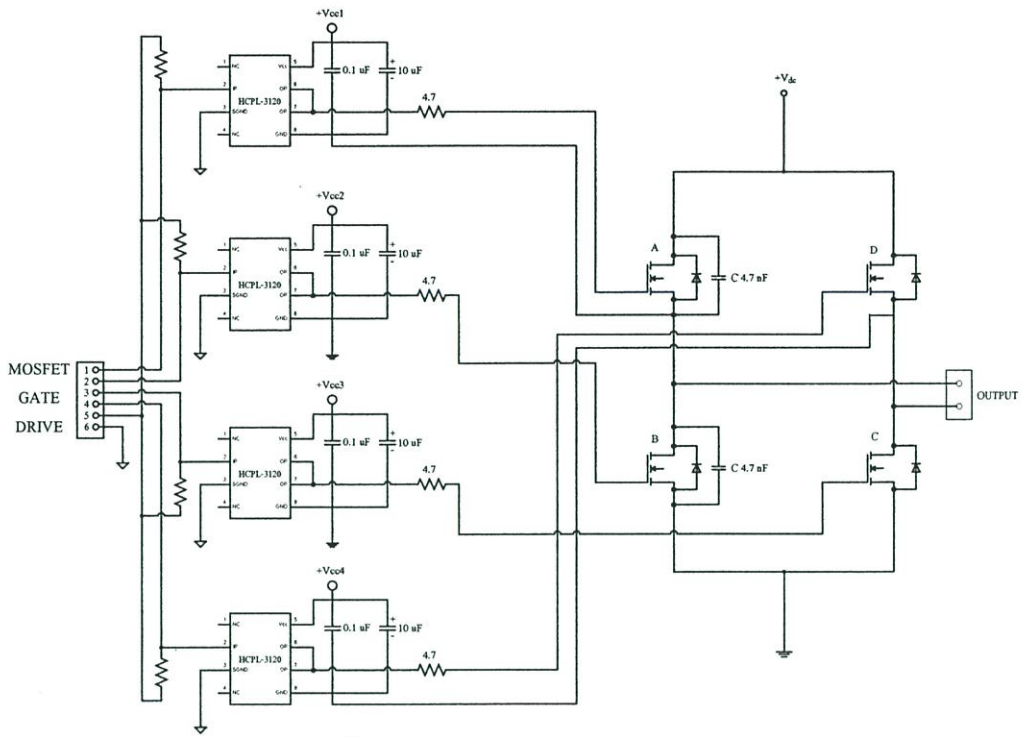
รูปที่ 3.8 รูปแบบสัญญาณของ โมดูลเอาต์พุทคอมแพร์

เนื่องจากสถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รับบรรจุอุปกรณ์ต่อพ่วงภายนอกที่จำเป็นรวมไว้ภายในแล้วเช่น หน่วยความจำแบบแฟลชซึ่งเป็นที่เก็บโปรแกรมรหัสคำสั่งและรหัสข้อมูลที่ใช้ในการควบคุมไมโครฯโดยสามารถทำการลบและเขียนใหม่ได้นับแสนครั้งและเก็บรักษาข้อมูลได้นาน 10 ปี ขาพอร์ตของไมโครฯสามารถจ่ายและรับกระแสได้สูงจึงไม่จำเป็นต้องต่อไอซี

บัฟเฟอร์เพื่อจ่ายกระแสแทนทำให้วงจรที่ต่อใช้งานมีขนาดค่อนข้างเล็ก มีอุปกรณ์ภายนอกต่อไม่มากนักดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยอุปกรณ์ภายนอกที่จำเป็นต้องต่อเพิ่มเข้ามาคือ ชุดสร้างสัญญาณนาฬิกาอ้างอิงโดยใช้คริสตอลและตัวเก็บประจุแบบเซรามิก สวิตช์รีเซ็ตและคอนเนคเตอร์สำหรับดาวน์โหลดโปรแกรม (ICD2) ไอซีซีโมสแบบนอทเกตสำหรับกลับสัญญาณที่ได้จากไมโครฯไปสู่ชุดขับสัญญาณเกตของมอสเฟต หลอดแอลอีดี (LED) สำหรับแสดงผลการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 3.9 วงจรสร้างสัญญาณควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011



รูปที่ 3.10 วงจรกำลังฟูแลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

## บทที่ 4

# การวิเคราะห์และจำลองการทำงานของระบบ เฟสชิฟท์-พีดับบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

### 4.1 บทนำ

จากการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของระบบและทำการออกแบบส่วนประกอบต่างๆในบทที่ผ่านมาสามารถนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้วิเคราะห์รูปแบบทางไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์คอนเวอร์ชันแกนร่วมฉนวน 2 ชั้น หม้อแปลงความถี่สูงและเฟสชิฟท์พีดับบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ จากนั้นจึงนำคุณสมบัติทางไฟฟ้างดังกล่าวมาจำลองการทำงานของระบบ โดยใช้คอมพิวเตอร์ซึ่งในปัจจุบันมีโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์หรือจำลองการทำงานของวงจรไฟฟ้าได้อย่างถูกต้อง

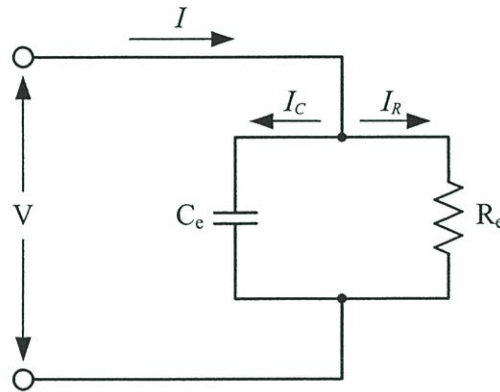
ในบทนี้ได้กล่าวถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชุดอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์คอนเวอร์ชันแกนร่วมฉนวน 2 ชั้นเมื่อใช้งานที่แรงดันไฟฟ้าและความถี่สูง การมองวงจรสมมูลของหม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดันให้ง่ายขึ้น โดยการยุบรวมพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อลดความยุ่งยากในการคำนวณและกำหนดการทำงานของเฟสชิฟท์พีดับบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ในกรณีที่ต้องการลดกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในมอสเฟต

### 4.2 การวิเคราะห์ชุดอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์คอนเวอร์ชันแกนร่วมฉนวน 2 ชั้น

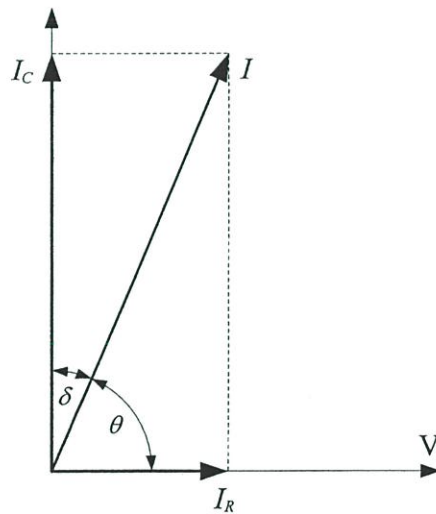
การใช้งานอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์คอนเวอร์ชันแกนร่วมฉนวน 2 ชั้นในงานวิจัยนี้ถูกออกแบบให้เกิดการคายประจุบางส่วน (Partial Discharge) ผ่านช่องว่างอากาศภายในสนามไฟฟ้าแรงดันสูงและความถี่สูง เพื่อให้ไอเล็กตรอนวิ่งข้ามช่องว่างอากาศกลับไปกลับมา การที่ไอเล็กตรอนข้ามผ่านช่องว่างอากาศนั้นต้องใช้เวลาเดินทางเพราะถึงเมื่อไอเล็กตรอนจะมีขนาดเล็กแต่ก็มีน้ำหนัก การเพิ่มความถี่ของแรงดันไฟฟ้าทำให้ขั้วของสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้น ทำให้ไอเล็กตรอนที่เดินทางจากขั้วลบจึงยังไม่ถึงขั้วบวกส่งผลให้เกิดไอเล็กตรอนจำนวนมากค้างอยู่ในช่องว่างอากาศ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า สเปซชาร์จ (Space Charge) วิธีการนี้ทำให้โอกาสที่ไอเล็กตรอนจำนวนมากที่ค้างอยู่ในช่องว่างอากาศชนกับโมเลกุลของก๊าซออกซิเจนเป็นไปได้สูงขึ้น

เนื่องจากอากาศมีสภาพความเป็นฉนวน เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าจะเกิดการนำไฟฟ้าขึ้นเกิดมีกระแสไหลผ่าน สนามไฟฟ้าแบบมีขั้วนั้นไอเล็กตรอนจะถูกแรงจากสนามไฟฟ้ากระทำให้เกิดทิศทางและวางตัวอยู่ในแนวของสนามไฟฟ้า เมื่อขั้วของสนามไฟฟ้าสลับไปมาเป็นผลให้การวางตัวของไอเล็กตรอนก็สลับไปมาเช่นกันทำให้เกิดกำลังสูญเสียขึ้น ดังนั้นพารามิเตอร์ของอิเล็กทรอนิกส์จึงถูกมองว่าเสมือนมีค่าความต้านทานซึ่งเป็นตัววัดกำลังงานสูญเสียโดยอิเล็กทรอนิกส์ของฉนวนถูกต้อง

ขนานอยู่กับค่าตัวเก็บประจุคงแสดงในรูปที่ 4.1 โดยในทางปฏิบัติเมื่อต้องการหาค่ากำลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกสามารถใช้เครื่องมือวัดที่เรียกว่า เซอริงบริดจ์ (Schering Bridge) โดยการวัดค่ามุมต่างเฟสระหว่างกระแสและแรงดันแล้วนำไปลบกับมุม  $90^\circ$  ให้อยู่ในรูปของ  $\tan(\delta)$  เรียกว่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก โดยมุม  $\delta$  เรียกว่า มุมกำลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก [12] แสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของชุดอิเล็กโตรดเมื่อมองเป็นฉนวนในสนามไฟฟ้า



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสที่ป้อนให้ฉนวน

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 4.1 เป็นวงจร RC ขนาน เมื่อป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ (Sin Wave) ให้กับฉนวน กระแสที่ไหลในวงจรเป็นรูปคลื่นไซน์ที่มีมุมต่างเฟสกับแรงดันเป็นมุม  $\theta$  โดย

$$\begin{array}{ll} \text{แรงดันอินพุทที่ป้อน} & v(t) = v_m \cdot \sin(\omega t) \\ \text{จะได้สัญญาณกระแส} & i(t) = i_m \cdot \sin(\omega t + \theta) \end{array}$$

จากรูปที่ 4.2 หาค่า  $R_e$  และ  $C_e$  ได้จากสมการ (4.1) และ (4.2)

$$\text{โดย} \quad R_e = \frac{V_m}{I_m \cdot \cos(\theta)} \quad (4.1)$$

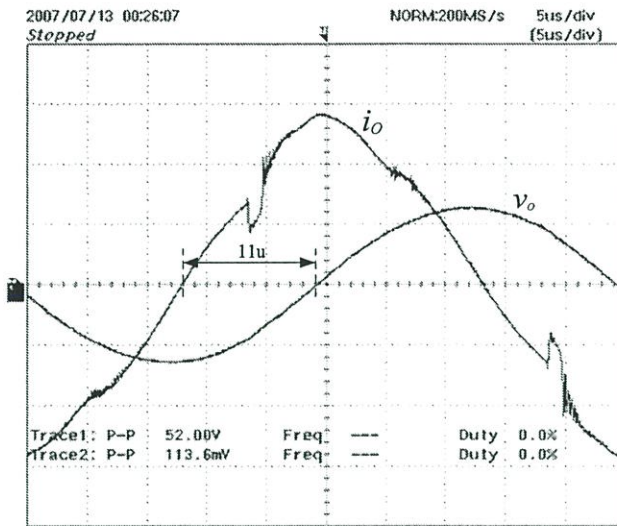
$$\text{และ} \quad C_e = \frac{1}{2 \times \pi \times f \times X_C} \quad (4.2)$$

$$\text{เมื่อ} \quad X_C = \frac{V_m}{I_m \cdot \sin(\theta)} \quad (4.3)$$

$$\text{หาค่ามุม } \delta \text{ ได้โดย} \quad \delta = 90^\circ - \theta$$

$$\text{ดังนั้นมุม} \quad \tan(\delta) = \frac{R_e}{X_C} \quad (4.4)$$

ในบทความนี้ใช้วิธีการวัดค่าความต้านทานที่ทำให้เกิดกำลังสูญเสียไดโอดเล็กทรอนิกส์ของชุดอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์แบบคอนกรีตจำนวน 2 ชั้น โดยการป้อนสัญญาณแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ และทำการวัดรูปคลื่นกระแสโดยเปรียบเทียบมุมต่างเฟสระหว่างกัน โดยรูปสัญญาณที่วัดได้แสดงในรูปที่ 4.3 เมื่อใช้วิธีวัดแบบต่อค่าตัวเก็บประจุเพื่อลดแรงดันลงเป็น 117:1



รูปที่ 4.3 สัญญาณกระแสและแรงดันที่ซูดิเล็กโทรดจากการทดสอบ

กำหนดความถี่ของสัญญาณแรงดันที่ 20 kHz โดยใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณแรงดัน ( $v_o$ ) ที่ Chanel 1 ได้ขนาดเท่ากับ  $52 V_{p-p}/2$  แล้วนำไปคูณกับค่าอัตราทดแรงดันที่ 117:1 ได้เท่ากับ 3,040 V สัญญาณกระแส ( $i_o$ ) ใช้ Chanel 2 วัดได้เท่ากับ  $113.6 mA_{p-p}/2$  ได้เท่ากับ 56.8 mA มุมต่างเฟสระหว่างกระแสและแรงดันหาได้จากสมการ (4.5)

$$\theta = \frac{t_{delay} \times 360^\circ}{T} \quad (4.5)$$

เมื่อ  $\theta$  = มุมต่างเฟสระหว่างกระแสและแรงดัน

$t_{delay}$  = ช่วงเวลาห่างระหว่างกระแสและแรงดันตัดแกนนอน s

$T$  = คาบเวลา 1 ลูกคลื่น s

แทนค่าในสมการ (4.5) จากรูปที่ 4.3 ได้ดังนี้

$$\theta = \frac{11 \times 10^{-6} \times 360^\circ}{50 \times 10^{-6}}$$

ดังนั้น  $\theta = 79.2^\circ$

หาค่า  $R_c$  จากสมการที่ 4.1 โดยแทนค่าได้ดังนี้

$$R_e = \frac{3,040}{56.8 \times 10^{-3} \cos(79.2)}$$

ดังนั้น  $R_e = 285.6 \quad \text{k}\Omega$

หาค่า  $X_C$  จากสมการที่ 4.3 โดยแทนค่าได้ดังนี้

$$X_C = \frac{3,040}{56.8 \times 10^{-3} \times \sin(79.2)}$$

ดังนั้น  $X_C = 54.5 \quad \text{k}\Omega$

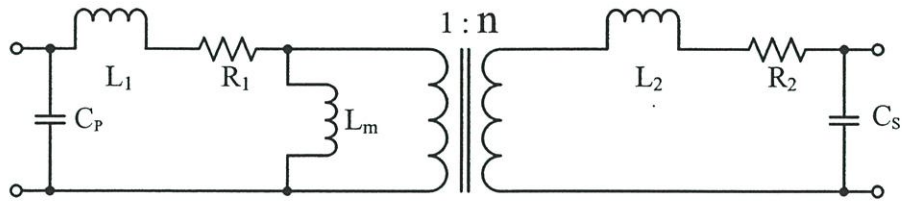
หาค่า  $C_e$  จากสมการ (4.2) โดยแทนค่าได้ดังนี้

$$C_e = \frac{1}{2 \times \pi \times 20 \times 10^3 \times 54.5 \times 10^3}$$

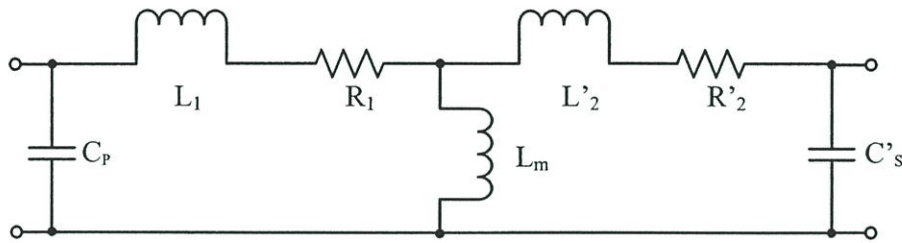
เพราะฉะนั้น  $C_e = 0.146 \quad \text{nF}$

#### 4.3 การวิเคราะห์หม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ส่งผ่านกำลังงานจากแหล่งจ่ายไปสู่โหลด โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ขั้วปฐมภูมิของหม้อแปลง จากนั้นจะได้แรงดันไฟฟ้าขาออกที่ขั้วทุติยภูมิเพื่อไปจ่ายให้โหลด ในกรณีนี้หม้อแปลงถูกมองเป็นโหลดเช่นกัน เมื่อพิจารณาคุณสมบัติที่มีพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบทั้งทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ ดังรูปที่ 4.4 (ก) เนื่องจากพิกัดแรงดันทั้งสองด้านของหม้อแปลงไม่เท่ากันจึงจำเป็นต้องทำการถ่ายโอนค่าพารามิเตอร์ทางด้านทุติยภูมิมาสู่ทางด้านปฐมภูมิ เพื่อให้การคำนวณหม้อแปลงไฟฟ้าทำได้ง่ายขึ้น แสดงในรูปที่ 4.4 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.4 (ก) วงจรสมมูลของหม้อแปลงขณะยังไม่ได้ทำการถ่ายโอนค่า

(ข) วงจรสมมูลของหม้อแปลงเมื่อมีการถ่ายโอนค่า

จากหัวข้อ 2.3 หาค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงความถี่สูงเพื่อนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ความเป็นโพลดของหม้อแปลง โดยวงจรสมมูลของหม้อแปลงความถี่สูง ประกอบไปด้วยตัวเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล  $L_1$  และ  $L_2$  ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าในขดลวดทองแดง  $R_1$  และ  $R_2$  ค่าความเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กที่ไหลในแกนเฟอร์ไรท์  $L_m$  และตัวเก็บประจุแฝงเนื่องจากค่าไดอิเล็กตริกของฉนวนรองขดลวด  $C_p$  และ  $C_s$  ซึ่งสามารถใช้สมการคำนวณได้โดยค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณเพื่อนำไปทำการจำลองการทำงานของระบบ

การคำนวณตัวเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล  $L_1$  และ  $L_2$  ใช้สมการ (2.5) คำนวณได้โดยกำหนดตัวแปรต่างๆดังนี้ ค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กในสุญญากาศ  $(\mu_0) = 4\pi \times 10^{-7}$ , ค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กในอากาศ  $(\mu_r) = 1$ , จำนวนรอบขดลวดปฐมภูมิ  $(N_p) = 99$  รอบ, จำนวนรอบขดลวดทุติยภูมิ  $(N_s) = 1130$  รอบ, จำนวนรอบของขดลวดต่อชั้นทางด้านปฐมภูมิ = 33 รอบ, จำนวนรอบของขดลวดต่อชั้นทางด้านทุติยภูมิ = 66 รอบ, จำนวนชั้นของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ = 3, จำนวนชั้นของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ = 17, ความยาวเฉลี่ยรอบแกน  $(l_w) = 0.18$  m, ความกว้างบอบบิ้น  $(b_w) = 0.02$  m, ความสูงของบอบบิ้น  $(h_w) = 0.055$  m, จำนวนช่องการพันสลับระหว่างขดปฐมภูมิและทุติยภูมิ  $(s) = 2$ , ความหนาของฉนวนรองขดลวดแต่ละชั้น  $(d) = 0.35$  mm (ฉนวน Normex) และความกว้างของชั้นของขดลวด  $(w) = 40$  mm โดยแทนค่าได้ดังนี้

$$L_1 = \frac{4 \times \pi \times 10^{-7} \times 99^2 \times 0.18 \times 0.02}{3 \times 2^2 \times 0.055}$$

ดังนั้น  $L_1 = 0.067 \text{ mH}$

$$L_2 = \frac{4 \times \pi \times 10^{-7} \times 1130^2 \times 0.18 \times 0.02}{3 \times 2^2 \times 0.055}$$

ดังนั้น  $L_2 = 8.75 \text{ mH}$

หาค่า  $L_m$  จากสมการที่ (2.6) โดยกำหนดให้ค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเฟอร์ไรท์ ( $\mu_r$ ) เท่ากับ 2400 พื้นที่หน้าตัดแกนขนาด  $3.92 \times 10^{-4} \text{ m}^2$  และความยาวทางเดินเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเท่ากับ 0.192 m แทนค่าได้ดังนี้

$$L_m = 99^2 \times \frac{4 \times \pi \times 10^{-7} \times 2400 \times 3.92 \times 10^{-4}}{0.192}$$

เพราะฉะนั้น  $L_m = 26.55 \text{ mH}$

ค่าความต้านทานในขดลวด  $R_1$  และ  $R_2$  คำนวณได้โดยกำหนดค่า  $\rho_{cu} = 1.724 \times 10^{-8}$  ซึ่งเป็นค่าเฉพาะในดัดนำทองแดง ความยาวดัดนำทองแดงทางด้านปฐมภูมิ = 7.9 m, ความยาวดัดนำทองแดงทางด้านทุติยภูมิ = 90 m, พื้นที่หน้าตัดลวดทางด้านปฐมภูมิ =  $1.3 \text{ mm}^2$  และพื้นที่หน้าตัดลวดทางด้านทุติยภูมิ =  $0.128 \text{ mm}^2$  แทนค่าในสมการ (2.7) ได้

$$R_1 = 1.724 \times 10^{-8} \frac{7.9}{1.3 \times 10^{-6}}$$

ดังนั้น  $R_1 = 0.1 \text{ } \Omega$

$$R_2 = 1.724 \times 10^{-8} \frac{90}{0.128 \times 10^{-6}}$$

ดังนั้น

$$R_2 = 12.12 \ \Omega$$

ตัวเก็บประจุแฝงทางด้านปฐมภูมิ ( $C_p$ ) และทางด้านทุติยภูมิ ( $C_s$ ) หาได้จากสมการ (2.4) โดยกำหนดค่าเปอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ =  $8.854 \times 10^{-12}$ , ค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวน Normex แบบ Polyester = 3, ความกว้างของชั้นของขดลวด ( $w$ ) = 40 mm และความหนาของฉนวนรองขดลวดแต่ละชั้น ( $d$ ) = 0.35 mm แทนค่าในสมการได้

$$C_{layer} = 8.854 \times 10^{-12} \times 3 \times \frac{40}{0.35}$$

ดังนั้น

$$C_{layer} = 3.035 \ \text{nF}$$

ทางด้านปฐมภูมิมีฉนวนรองขดลวด 2 ชั้น

$$\frac{1}{C_p} = \frac{1}{3.035 \times 10^{-9}} + \frac{1}{3.035 \times 10^{-9}}$$

ดังนั้น

$$C_p = 1.52 \ \text{nF}$$

ทางด้านทุติยภูมิมีฉนวนรองขดลวด 16 ชั้น ค่า C ต่ออนุกรมกันจึงคำนวณแบบการต่อขนาน

$$\frac{1}{C_s} = \frac{16}{3.035 \times 10^{-9}}$$

$$C_s = 0.189 \ \text{nF}$$

ในการถ่ายโอนค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงทางด้านทุติยภูมิไปสู่ปฐมภูมิใช้การคูณด้วยอัตราส่วนของจำนวนขดลวดทางด้านปฐมภูมิ ( $N_p$ ) ต่อจำนวนขดลวดทางด้านทุติยภูมิ ( $N_s$ ) ยกกำลังสอง แสดงในสมการ (4.6) (4.7) และ (4.8)

$$L'_2 = \left( \frac{N_p}{N_s} \right)^2 \times L_2 \quad (4.6)$$

$$R'_2 = \left( \frac{N_p}{N_s} \right)^2 \times R_2 \quad (4.7)$$

$$C'_s = \left( \frac{N_s}{N_p} \right)^2 \times C_s \quad (4.8)$$

เมื่อ  $L'_2$  = ค่าเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วไหลทางด้านทุติยภูมิเมื่อถ่ายโอนค่าแล้ว (H)

$R'_2$  = ค่าความต้านทานในขดลวดตัวทางด้านทุติยภูมิเมื่อถ่ายโอนค่าแล้ว ( $\Omega$ )

$C'_s$  = ค่าตัวเก็บประจุแฝงทางด้านทุติยภูมิเมื่อถ่ายโอนค่าแล้ว (F)

ทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่ถ่ายโอนค่าจากทางด้านทุติยภูมิมายังด้านปฐมภูมิ โดยการแทนค่าลงในสมการที่ (4.6) (4.7) และ (4.8) ได้ดังนี้

$$L'_2 = \left( \frac{310}{3500} \right)^2 \times 8.75 \times 10^{-3}$$

ดังนั้น

$$L'_2 = 0.0685 \text{ mH}$$

$$R'_2 = \left( \frac{310}{3500} \right)^2 \times 12.12$$

ดังนั้น

$$R'_2 = 0.095$$

$$C'_s = \left( \frac{3500}{310} \right)^2 \times 0.189 \times 10^{-9}$$

ดังนั้น

$$C'_s = 24.1 \text{ nF}$$

$$C'_e = \left( \frac{3500}{310} \right)^2 \times 0.146 \times 10^{-9}$$

ดังนั้น

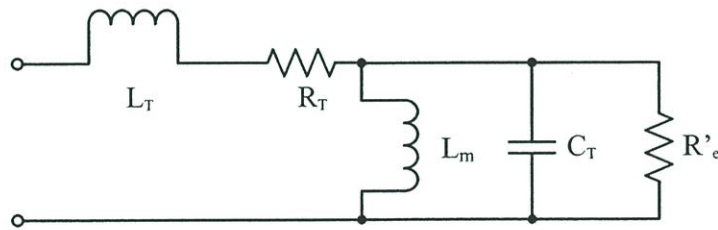
$$C'_e = 18.6 \text{ nF}$$

$$R'_e = \left( \frac{310}{3500} \right)^2 \times 285 \times 10^3$$

ดังนั้น

$$R'_e = 2.23 \text{ k}\Omega$$

ในรูปที่ 4.4 (ข) เมื่อนำค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรสมมูลมาวิเคราะห์สามารถทำให้ง่ายขึ้นโดยการยุบรวมค่า  $L_1$  และ  $L'_2$  กลายเป็น  $L_T$  จากนั้นยุบ  $R_1$  และ  $R'_2$  กลายเป็น  $R_T$  และรวม  $C_p$ ,  $C'_s$  และ  $C'_e$  ของอิเล็คโทรด์เข้าด้วยกันกลายเป็น  $C_T$  โดยเลื่อน  $L_m$  มาขนานกับ  $C_T$  และ  $R'_e$  ของอิเล็คโทรด์ วงจรสมมูลแสดงในรูปที่ 4.5 การคำนวณคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรสมมูลนี้สามารถคำนวณได้ง่ายขึ้นและเป็นค่าโดยประมาณ



รูปที่ 4.5 วงจรสมมูลห้อยแปลงความถี่สูงแบบยุบรวมค่าพารามิเตอร์เพื่อง่ายต่อการคำนวณ

ทำการยุบรวมพารามิเตอร์ของห้อยแปลงได้ดังนี้

$$L_T = L_1 + L'_2$$

$$L_T = 0.067 + 0.0685 \text{ mH}$$

เพราะฉะนั้น

$$L_T = 0.1355 \text{ mH}$$

$$R_T = R_1 + R'_2$$

$$R_T = 0.1 + 0.095 \text{ }\Omega$$

เพราะฉะนั้น

$$R_T = 0.195 \text{ }\Omega$$

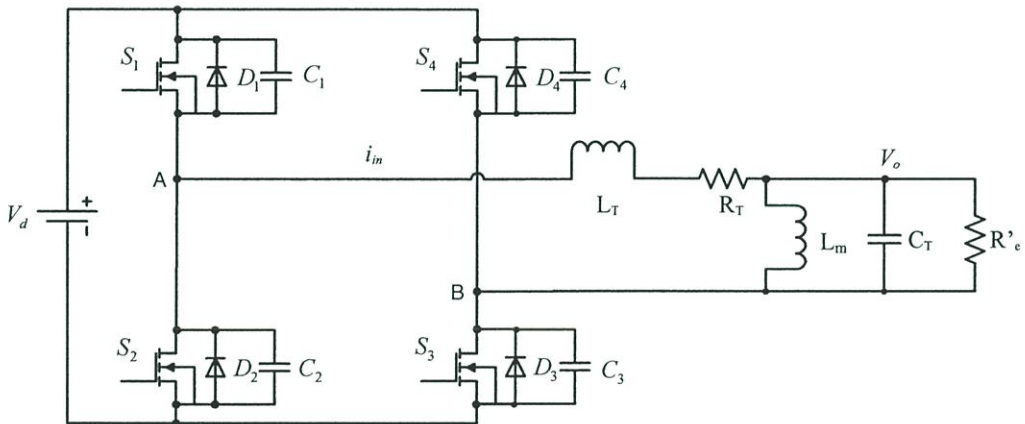
$$C_T = C_p + C'_s + C'_e$$

$$C_T = 1.52 + 24.1 + 18.6 \quad \text{nF}$$

เพราะฉะนั้น  $C_T = 44.22 \quad \text{nF}$

#### 4.4 การวิเคราะห์สภาวะโหนดของเฟสชิฟท์ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

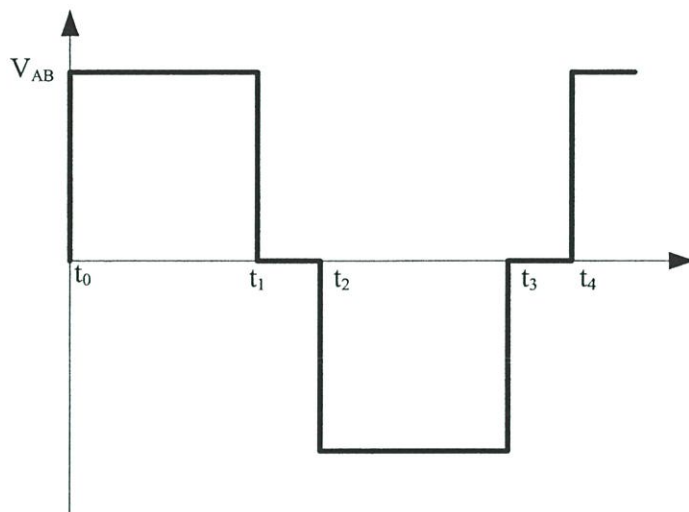
จากหัวข้อ 4.3 สามารถนำค่าพารามิเตอร์ของโหนดมาต่อทางด้านเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ได้ ดังรูปที่ 4.6 ทำการวิเคราะห์วงจรสมมูลของคอนเวอร์เตอร์โดยสามารถแยกออกเป็นสถานะต่างๆ ได้ 4 สถานะอย่างง่าย ซึ่งแต่ละสถานะจะกำหนดวงจรสมมูลของโหนดเพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์และมีความสอดคล้องกันโดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์แบบสมการอนุพันธ์อันดับสอง (Second-order Differential Equation) ในการวิเคราะห์เพื่อให้ทราบถึงผลตอบสนองของแรงดันเอาต์พุต ( $V_o$ ) และกระแสอินพุต ( $i_m$ ) ของหม้อแปลงความถี่สูงว่ามีลักษณะเช่นไร



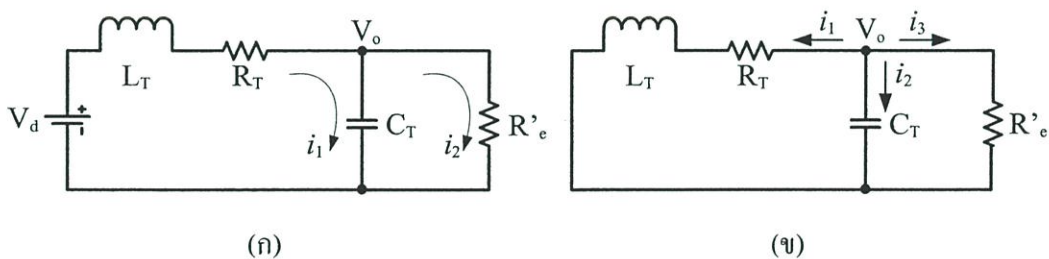
รูปที่ 4.6 แสดงการต่อโหนดของวงจรเฟสชิฟท์ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

สถานะทั้ง 4 นั้นถูกแบ่งด้วยช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบสัญญาณแรงดันคั่นคร่อมโหนด แสดงในรูปที่ 4.7 โดยพิจารณาจากการกำหนดสัญญาณสวิตช์ของคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งสถานะที่ 1 ทำงานในช่วง  $t_0 - t_1$  ช่วงเวลานี้โหนดได้รับไบอัสจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง  $V_d$  และเนื่องจากค่าของ  $L_m$  มีค่ามากจึงส่งผลต่อวงจรน้อยประกอบกับการคิดค่าของ  $L_m$  ในวงจรทำให้กลายเป็นการวิเคราะห์แบบ Third-order ซึ่งมีความยุ่งยากมาก ดังนั้นจึงไม่คิดค่าของ  $L_m$  ในวงจรสมมูลของสถานะที่ 1 แสดงในรูปที่ 4.8 (ก) สถานะที่ 2 เริ่มต้นที่  $t_1 - t_2$  ในสถานะนี้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง  $V_d$  ถูกตัดออกจากวงจรโดยสวิตช์  $S_1$  ไดโอดฟรีวีว  $D_2$  นำกระแส แรงดันที่จุด AB เป็นศูนย์ วงจรสมมูลแสดงในรูปที่ 4.8 (ข) โดยที่สถานะที่ 3 เหมือนกับสถานะที่ 1 และสถานะที่ 4

เหมือนกับสถานะที่ 2 ต่างเพียงสถานะที่ 3 โหลดได้รับไบอัสกลับจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง  $V_d$  โดยแก้สมการหาความสัมพันธ์ของกระแสอินพุทของหม้อแปลง ( $i_1$ ) และแรงดันเอาต์พุทของหม้อแปลง ( $V_o$ )



รูปที่ 4.7 สัญญาณแรงดันตกคร่อมโหลดทั้ง 4 สถานะ



รูปที่ 4.8 วงจรสมมูลในการวิเคราะห์ห้วงจรอนุพันธ์อันดับสอง (ก) สถานะที่ 1 (ข) สถานะที่ 2

- เมื่อ  $V_d$  = แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง  
 $V_o$  = แรงดันเอาต์พุทของหม้อแปลง  
 $i_1$  = กระแสอินพุทของหม้อแปลง  
 $L_T$  = ค่าเหนี่ยวนำแฝงของหม้อแปลง  
 $R_T$  = ค่าความต้านทานขดลวดของหม้อแปลง  
 $C_T$  = ค่าตัวเก็บประจุของโหลดรวมกับค่าตัวเก็บประจุของหม้อแปลง

$R'_e$  = ค่าความต้านทานของโหลด

ข้อกำหนดของการแปลงตัวแปรในสมการเพื่อให้ง่ายต่อการเขียนมีดังนี้

$$\tau_{RC} = R'_e \cdot C_T$$

$$\tau_{RL} = \frac{L_T}{R_T}$$

$$\omega_T = \frac{1}{\sqrt{L_T \cdot C_T}}$$

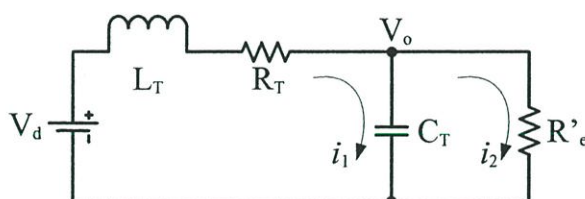
$$\tau_i = \frac{R_T}{R'_e}$$

$$\alpha_T = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{\tau_{RC}} + \frac{1}{\tau_{RL}} \right)$$

$$\omega_M = \sqrt{\omega_T^2 + \frac{1}{\tau_{RL} \cdot \tau_{RC}}}$$

$$\omega_N = \sqrt{\omega_M^2 - \alpha_T^2}$$

- สถานะที่ 1  $t_0 - t_1$



จัดรูปสมการ  $V_o$  ของวงจรเข้าสู่สมการอนุพันธ์อันดับสอง โดยใช้ Mesh Analysis ที่ loop ของ  $i_1$

$$L_T \cdot \frac{di_1}{dt} + R_T \cdot i_1 + V_o = V_d \quad (1)$$

จาก

$$i_1 - i_2 = C_T \cdot \frac{dV_o}{dt}$$

$$i_1 = C_T \cdot \frac{dV_o}{dt} + \frac{V_o}{R'_e} \quad (2)$$

แทนค่า (2) ใน (1)

$$L_T \cdot \frac{d}{dt} \left( C_T \cdot \frac{dV_o}{dt} + \frac{V_o}{R'_e} \right) + R_T \cdot \left( C_T \cdot \frac{dV_o}{dt} + \frac{V_o}{R'_e} \right) + V_o = V_d$$

จัดรูปสมการใหม่ได้

$$\frac{d^2V_o}{dt^2} + \left( \frac{1}{\tau_{RC}} + \frac{1}{\tau_{RL}} \right) \cdot \frac{dV_o}{dt} + \left( \frac{1}{\tau_{RL} \cdot \tau_{RC}} + \omega_T^2 \right) V_o = \omega_T^2 V_d \quad (3)$$

ผลเฉลยผลตอบสนองบังคับ (Force Response Solution)

$$\frac{d^2V_o}{dt^2} + \left( \frac{1}{\tau_{RC}} + \frac{1}{\tau_{RL}} \right) \cdot \frac{dV_o}{dt} + \left( \frac{1}{\tau_{RL} \cdot \tau_{RC}} + \omega_T^2 \right) V_o = \omega_T^2 V_d$$

กำหนดให้  $V_o = V_{of}$  และให้  $V_{of}$  เป็นค่าคงที่เท่ากับ A

$$\frac{d^2A}{dt^2} + \left( \frac{1}{\tau_{RC}} + \frac{1}{\tau_{RL}} \right) \cdot \frac{dA}{dt} + \left( \frac{1}{\tau_{RL} \cdot \tau_{RC}} + \omega_T^2 \right) A = \omega_T^2 V_d$$

ดังนั้นได้ผลเฉลยผลตอบสนองบังคับ

$$A = V_{of} = \frac{\omega_T^2 V_d}{\left( \frac{1}{\tau_{RL} \cdot \tau_{RC}} + \omega_T^2 \right)} = \frac{V_d}{\left( \frac{R_T}{R'_e} + 1 \right)} \quad (4)$$

ผลเฉลยผลตอบสนองธรรมชาติ (Natural Response Solution)

กำหนดให้  $V_o = V_{on}$

$$\frac{d^2V_{on}}{dt^2} + \left( \frac{1}{\tau_{RC}} + \frac{1}{\tau_{RL}} \right) \cdot \frac{dV_{on}}{dt} + \left( \frac{1}{\tau_{RL} \cdot \tau_{RC}} + \omega_T^2 \right) V_{on} = 0$$

จากสมการด้านบนได้ผลเฉลยทั่วไปคือ

$$V_{on} = k_1 \cdot e^{x_1 t} + k_2 \cdot e^{x_2 t} \quad (5)$$

หาค่าของ  $x_{1,2}$  ได้ดังนี้

$$x_{1,2} = \frac{-\left(\frac{1}{\tau_{RC}} + \frac{1}{\tau_{RL}}\right) \pm \sqrt{\left(\frac{1}{\tau_{RC}} + \frac{1}{\tau_{RL}}\right)^2 - 4 \cdot \left(\frac{1}{\tau_{RL} \cdot \tau_{RC}} + \omega_T^2\right)}}{2}$$

แทนค่า  $x_1$  และ  $x_2$  ใน (5) ได้ผลเฉลยผลตอบสนองธรรมชาติ

$$V_{on} = k_1 \cdot e^{(-\alpha_T t)} \cdot e^{(j\omega_N t)} + k_2 \cdot e^{(-\alpha_T t)} \cdot e^{(-j\omega_N t)} \quad (6)$$

จากสมการ Euler' Equation

$$V_{on} = k_1 \cdot e^{(-\alpha_T t)} \cdot (\cos(\omega_N t) + j \sin(\omega_N t)) + k_2 \cdot e^{(-\alpha_T t)} \cdot (\cos(\omega_N t) - j \sin(\omega_N t))$$

$$V_{on} = k_1 \cdot e^{(-\alpha_T t)} \cdot \cos(\omega_N t) + k_2 \cdot e^{(-\alpha_T t)} \cdot \cos(\omega_N t) \\ + k_1 \cdot e^{(-\alpha_T t)} \cdot j \sin(\omega_N t) - k_2 \cdot e^{(-\alpha_T t)} \cdot j \sin(\omega_N t)$$

$$V_{on} = (k_1 + k_2) e^{(-\alpha_T t)} \cdot \cos(\omega_N t) + (k_1 - k_2) e^{(-\alpha_T t)} \cdot \sin(\omega_N t) \quad (7)$$

**ผลเฉลยผลตอบสนองรวม (Total Response Solution)**

ผลเฉลยผลตอบสนองรวมของระบบคือ

$$V_o = V_{on} + V_{of}$$

$$V_o = k_1 \cdot e^{(-\alpha_T t)} \cdot (\cos(\omega_N t) + j \sin(\omega_N t)) + k_2 \cdot e^{(-\alpha_T t)} \cdot (\cos(\omega_N t) - j \sin(\omega_N t)) \\ + \frac{V_d}{(\tau_i + 1)}$$

ที่เวลา  $t=0$   $V_o(0)=V_{oi}$ ,  $i_i(0)=i_{ii}$

$$V_{oi} = k_1 + k_2 + \frac{V_d}{(\tau_i + 1)}$$

$$k_1 + k_2 = V_{oi} - \frac{V_d}{(\tau_i + 1)} \quad (8)$$

หาอนุพันธ์ของ  $V_o$  ที่เวลา  $t=0$

$$\begin{aligned} \left. \frac{dV_o}{dt} \right|_0 &= k_1 \cdot (-\omega_N \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \sin(\omega_N \cdot t) - \alpha_T \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \cos(\omega_N \cdot t)) \\ &\quad + \omega_N \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \cos(\omega_N \cdot t) - \alpha_T \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \sin(\omega_N \cdot t) \\ &\quad + k_2 \cdot (-\omega_N \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \sin(\omega_N \cdot t) - \alpha_T \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \cos(\omega_N \cdot t)) \\ &\quad - \omega_N \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \cos(\omega_N \cdot t) - \alpha_T \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \sin(\omega_N \cdot t) \end{aligned}$$

$$\left. \frac{dV_o}{dt} \right|_0 = k_1 \cdot (\omega_N - \alpha_T) - k_2 \cdot (\omega_N + \alpha_T) \quad (9)$$

จาก

$$C_T \cdot \left. \frac{dV_o}{dt} \right|_0 = i_1 - i_2$$

$$\left. \frac{dV_o}{dt} \right|_0 = \frac{i_{1i}}{C_T} - \frac{V_{oi}}{C_T \cdot R'_e} \quad (10)$$

แทนสมการ (10) ใน (9)

$$\frac{i_{1i}}{C_T} - \frac{V_{oi}}{\tau_{RC}} = k_1 \cdot (\omega_N - \alpha_T) - k_2 \cdot (\omega_N + \alpha_T)$$

$$k_1 - k_2 = \frac{1}{\omega_N} \left( \alpha_T \cdot \left( V_{oi} - \frac{V_d}{\tau_i + 1} \right) + \frac{i_{1i}}{C_T} - \frac{V_{oi}}{\tau_{RC}} \right) \quad (11)$$

แทนค่าสมการ (8)  $k_1+k_2$  และสมการ (10)  $k_1-k_2$  ในสมการ (7) ได้ผลตอบสนองรวม

เพราะฉะนั้นคำตอบสุดท้ายของผลตอบสนองรวมได้เท่ากับ

$$V_o = \frac{V_d}{\tau_i + 1} + \left( V_{oi} - \frac{V_d}{\tau_i + 1} \right) e^{(-\alpha_T t)} \cdot \cos(\omega_N t) + \frac{1}{\omega_N} \left( \alpha_T \cdot \left( V_{oi} - \frac{V_d}{\tau_i + 1} \right) + \frac{i_{i1}}{C_T} - \frac{V_{oi}}{\tau_{RC}} \right) e^{(-\alpha_T t)} \cdot \sin(\omega_N t) \quad (12)$$

จัดรูปสมการหาค่ากระแสอินพุทของหม้อแปลง  $i_1$  โดยใช้ Mesh Analysis ใน loop ทางซ้ายมือของวงจรได้ดังนี้

$$L_T \cdot \frac{di_1}{dt} + R_T \cdot i_1 + V_o = V_d$$

$$V_o = V_d - L_T \cdot \frac{di_1}{dt} - R_T \cdot i_1 \quad (13)$$

จากสมการ

$$i_1 - \frac{V_o}{R'_e} - C_T \cdot \frac{dV_o}{dt} = 0 \quad (14)$$

แทน (13) ใน (14) ได้

$$i_1 - \frac{1}{R'_e} \left( V_d - L_T \cdot \frac{di_1}{dt} - R_T \cdot i_1 \right) - C_T \cdot \frac{d}{dt} \left( V_d - L_T \cdot \frac{di_1}{dt} - R_T \cdot i_1 \right) = 0$$

จัดรูปสมการใหม่ได้

$$\frac{d^2 i_1}{dt^2} + \left( \frac{1}{\tau_{RC}} + \frac{1}{\tau_{RL}} \right) \cdot \frac{di_1}{dt} + \left( \frac{1}{\tau_{RL} \cdot \tau_{RC}} + \omega_T^2 \right) i_1 = \omega_T^2 \cdot \frac{V_d}{R'_e} \quad (15)$$

ผลเฉลยผลตอบสนองบังคับ (Force Response Solution)

$$\frac{d^2 i_1}{dt^2} + \left( \frac{1}{\tau_{RC}} + \frac{1}{\tau_{RL}} \right) \cdot \frac{di_1}{dt} + \left( \frac{1}{\tau_{RL} \cdot \tau_{RC}} + \omega_T^2 \right) i_1 = \omega_T^2 \cdot \frac{V_d}{R'_e}$$

กำหนดให้  $i_1 = i_{1f}$  และให้  $i_{1f}$  เป็นค่าคงที่เท่ากับ A

$$\frac{d^2 A}{dt^2} + \left( \frac{1}{\tau_{RC}} + \frac{1}{\tau_{RL}} \right) \frac{dA}{dt} + \left( \frac{1}{\tau_{RL} \cdot \tau_{RC}} + \omega_T^2 \right) A = \omega_T^2 \cdot \frac{V_d}{R'_e}$$

$$0 + 0 + \left( \frac{1}{\tau_{RL} \cdot \tau_{RC}} + \omega_T^2 \right) A = \omega_T^2 \cdot \frac{V_d}{R'_e}$$

ดังนั้นได้ผลเฉลยผลตอบสนองบังคับ

$$A = i_{1f} = \frac{\omega_T^2 \cdot V_d}{\left( \frac{1}{\tau_{RL} \cdot \tau_{RC}} + \omega_T^2 \right)} = \frac{V_d}{(R_T + R'_e)} \quad (16)$$

ผลเฉลยผลตอบสนองธรรมชาติ (Natural Response Solution)

กำหนดให้  $i_1 = i_{1n}$

$$\frac{d^2 i_1}{dt^2} + \left( \frac{1}{\tau_{RC}} + \frac{1}{\tau_{RL}} \right) \frac{di_1}{dt} + \left( \frac{1}{\tau_{RL} \cdot \tau_{RC}} + \omega_T^2 \right) i_1 = 0$$

จาก

$$i_{1n} = k_1 \cdot e^{x_1 t} + k_2 \cdot e^{x_2 t} \quad (17)$$

$$x_{1,2} = \frac{-\left( \frac{1}{\tau_{RC}} + \frac{1}{\tau_{RL}} \right) \pm \sqrt{\left( \frac{1}{\tau_{RC}} + \frac{1}{\tau_{RL}} \right)^2 - 4 \cdot \left( \frac{1}{\tau_{RL} \cdot \tau_{RC}} + \omega_T^2 \right)}}{2}$$

แทนค่า  $x_1$  และ  $x_2$  ใน (17) ได้ผลเฉลยผลตอบสนองธรรมชาติ

$$i_{1n} = k_1 \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot e^{(j\omega_N \cdot t)} + k_2 \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot e^{(-j\omega_N \cdot t)} \quad (18)$$

จากสมการ Euler' Equation

$$i_{1n} = k_1 \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot (\cos(\omega_N \cdot t) + j \sin(\omega_N \cdot t)) + k_2 \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot (\cos(\omega_N \cdot t) - j \sin(\omega_N \cdot t))$$

$$i_{1n} = k_1 \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \cos(\omega_N \cdot t) + k_2 \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \cos(\omega_N \cdot t)$$

$$\begin{aligned}
& + k_1 \cdot e^{(-\alpha_T t)} \cdot j \sin(\omega_N t) - k_2 \cdot e^{(-\alpha_T t)} \cdot j \sin(\omega_N t) \\
i_{1n} & = (k_1 + k_2) \cdot e^{(-\alpha_T t)} \cdot \cos(\omega_N t) + (k_1 - k_2) \cdot e^{(-\alpha_T t)} \cdot \sin(\omega_N t)
\end{aligned} \tag{19}$$

ผลเฉลยผลตอบสนองรวม (Total Response Solution)

ผลเฉลยผลตอบสนองรวมของระบบคือ

$$i_1 = i_{1n} + i_{1f} \tag{20}$$

$$\begin{aligned}
i_1 & = k_1 \cdot e^{(-\alpha_T t)} \cdot (\cos(\omega_N t) + j \sin(\omega_N t)) + k_2 \cdot e^{(-\alpha_T t)} \cdot (\cos(\omega_N t) - j \sin(\omega_N t)) \\
& + \frac{V_d}{(R_T + R'_e)}
\end{aligned}$$

At  $t=0$   $i_1(0)=i_{1i}$ ,  $V_o(0)=V_{oi}$

$$i_1(0) = k_1 + k_2 + \frac{V_d}{(R_T + R'_e)}$$

$$k_1 + k_2 = i_{1i} - \frac{V_d}{(R_T + R'_e)} \tag{21}$$

หาอนุพันธ์ของ  $i_1$  ที่เวลา  $t=0$

$$\begin{aligned}
\left. \frac{di_1}{dt} \right|_0 & = k_1 \cdot (-\omega_N \cdot e^{(-\alpha_T t)} \cdot \sin(\omega_N t) - \alpha_T \cdot e^{(-\alpha_T t)} \cdot \cos(\omega_N t)) \\
& + \omega_N \cdot e^{(-\alpha_T t)} \cdot \cos(\omega_N t) - \alpha_T \cdot e^{(-\alpha_T t)} \cdot \sin(\omega_N t) \\
& + k_2 \cdot (-\omega_N \cdot e^{(-\alpha_T t)} \cdot \sin(\omega_N t) - \alpha_T \cdot e^{(-\alpha_T t)} \cdot \cos(\omega_N t)) \\
& - \omega_N \cdot e^{(-\alpha_T t)} \cdot \cos(\omega_N t) - \alpha_T \cdot e^{(-\alpha_T t)} \cdot \sin(\omega_N t)
\end{aligned}$$

$$\left. \frac{di_1}{dt} \right|_0 = \omega_N \cdot (k_1 - k_2) - \alpha_T \cdot (k_1 + k_2) \tag{22}$$

จาก

$$L_T \cdot \left. \frac{di_1}{dt} \right|_0 + R_T \cdot i_1(0) + V_{oi} = V_d$$

$$\left. \frac{di_1}{dt} \right|_0 = \frac{V_d - V_{oi} - R_T \cdot i_{1i}}{L_T} \quad (23)$$

แทนสมการ (23) ใน (22) ได้

$$\frac{V_d - V_{oi} - R_T \cdot i_{1i}}{L_T} = \omega_N \cdot (k_1 - k_2) - \alpha_T \cdot (k_1 + k_2)$$

$$k_1 - k_2 = \frac{1}{\omega_N} \left( \alpha_T \cdot \left( i_{1i} - \frac{V_d}{R_T + R'_e} \right) + \frac{V_d - V_{oi} - R_T \cdot i_{1i}}{L_T} \right) \quad (24)$$

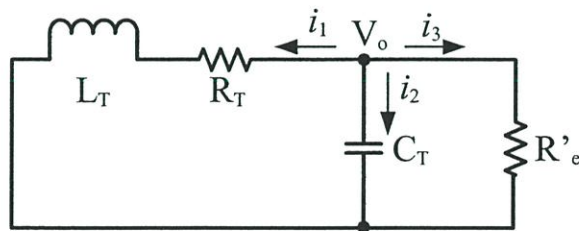
แทนค่า  $k_1 + k_2$  และ  $k_1 - k_2$  ในสมการ (19)

เพราะฉะนั้นคำตอบสุดท้ายของผลตอบสนองรวมได้เท่ากับ

$$i_1 = \frac{V_d}{(R_T + R'_e)} + \left( i_{1i} - \frac{V_d}{(R_T + R'_e)} \right) e^{(-\alpha_T t)} \cdot \cos(\omega_N t)$$

$$+ \frac{1}{\omega_N} \left( \alpha_T \cdot \left( i_{1i} - \frac{V_d}{(R_T + R'_e)} \right) + \frac{V_d - V_{oi} - R_T \cdot i_{1i}}{L_T} \right) e^{(-\alpha_T t)} \cdot \sin(\omega_N t) \quad (25)$$

- สถานะที่ 2  $t_1 - t_2$



จัดรูปสมการของวงจรเข้าสู่สมการอนุพันธ์อันดับสอง โดยใช้ Nodal Analysis ที่ node  $V_o$

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

$$i_1 = -C_T \frac{dV_o}{dt} - \frac{V_o}{R'_e} \quad (26)$$

ใช้ KVL ที่ loop ทางซ้ายมือ

$$L_T \cdot \frac{di_1}{dt} + R_T \cdot i_1 = V_o \quad (27)$$

แทน (26) ใน (27) ได้

$$L_T \cdot \frac{d}{dt} \left( -C_T \frac{dV_o}{dt} - \frac{V_o}{R'_e} \right) + R_T \cdot \left( -C_T \frac{dV_o}{dt} - \frac{V_o}{R'_e} \right) = V_o$$

จัดรูปสมการใหม่ดังนี้

$$\frac{d^2 V_o}{dt^2} + \left( \frac{1}{\tau_{RC}} + \frac{1}{\tau_{RL}} \right) \cdot \frac{dV_o}{dt} + \left( \frac{1}{\tau_{RL} \cdot \tau_{RC}} + \omega_T^2 \right) \cdot V_o = 0 \quad (28)$$

ผลเฉลยผลตอบสนองรวม (Total Response Solution)

เนื่องจากที่สถานะที่ 2 ไม่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้าดังนั้นจึงมีแต่ผลเฉลยผลตอบสนองธรรมชาติเท่านั้น  
ผลเฉลยผลตอบสนองรวมของระบบคือ

$$V_o = V_{on}$$

$$\frac{d^2 V_o}{dt^2} + \left( \frac{1}{\tau_{RC}} + \frac{1}{\tau_{RL}} \right) \cdot \frac{dV_o}{dt} + \left( \frac{1}{\tau_{RL} \cdot \tau_{RC}} + \omega_T^2 \right) \cdot V_o = 0$$

จากสมการ ด้านบนได้ผลเฉลยทั่วไปคือ

$$V_{on} = k_1 \cdot e^{x_1 t} + k_2 \cdot e^{x_2 t} \quad (29)$$

หาค่าของ  $x_{1,2}$  ได้ดังนี้

$$x_{1,2} = \frac{-\left(\frac{1}{\tau_{RC}} + \frac{1}{\tau_{RL}}\right) \pm \sqrt{\left(\frac{1}{\tau_{RC}} + \frac{1}{\tau_{RL}}\right)^2 - 4\left(\frac{1}{\tau_{RL}\tau_{RC}} + \omega_T^2\right)}}{2}$$

แทนค่า  $x_1$  และ  $x_2$  ใน (29) ได้ผลเฉลยผลตอบสนองของธรรมชาติ

$$V_{on} = k_1 \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot e^{(j\omega_N \cdot t)} + k_2 \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot e^{(-j\omega_N \cdot t)} \quad (30)$$

จากสมการ Euler' Equation

$$V_{on} = k_1 \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot (\cos(\omega_N \cdot t) + j \sin(\omega_N \cdot t)) + k_2 \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot (\cos(\omega_N \cdot t) - j \sin(\omega_N \cdot t))$$

$$V_{on} = k_1 \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \cos(\omega_N \cdot t) + k_2 \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \cos(\omega_N \cdot t) \\ + k_1 \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot j \sin(\omega_N \cdot t) - k_2 \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot j \sin(\omega_N \cdot t)$$

$$V_{on} = (k_1 + k_2) \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \cos(\omega_N \cdot t) + (k_1 - k_2) \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \sin(\omega_N \cdot t) \quad (31)$$

ที่  $t=t_1=0$   $V_o(0)=V_{oi}$ ,  $i_1(0)=i_{1i}$

$$V_{oi} = k_1 + k_2 \quad (32)$$

หาอนุพันธ์ของ  $V_{on}$  ที่เวลา  $t=0$

$$\left. \frac{dV_o}{dt} \right|_0 = k_1 \cdot \left( -\omega_N \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \sin(\omega_N \cdot t) - \alpha_T \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \cos(\omega_N \cdot t) \right. \\ \left. + \omega_N \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \cos(\omega_N \cdot t) - \alpha_T \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \sin(\omega_N \cdot t) \right) \\ + k_2 \cdot \left( -\omega_N \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \sin(\omega_N \cdot t) - \alpha_T \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \cos(\omega_N \cdot t) \right. \\ \left. - \omega_N \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \cos(\omega_N \cdot t) - \alpha_T \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \sin(\omega_N \cdot t) \right)$$

$$\left. \frac{dV_o}{dt} \right|_0 = k_1 \cdot (\omega_N - \alpha_T) - k_2 \cdot (\omega_N + \alpha_T) \quad (33)$$

จาก

$$i_{1i} - i_2 = C_T \cdot \left. \frac{dV_o}{dt} \right|_0$$

$$\left. \frac{dV_o}{dt} \right|_0 = \frac{i_{1i}}{C_T} - \frac{V_{oi}}{C_T \cdot R'_e} \quad (34)$$

แทนสมการ (34) ใน (33)

$$\frac{i_{1i}}{C_T} - \frac{V_{oi}}{C_T \cdot R'_e} = k_1 \cdot (\omega_N - \alpha_T) - k_2 \cdot (\omega_N + \alpha_T)$$

$$k_1 - k_2 = \frac{1}{\omega_N} \left( \alpha_T \cdot V_{oi} + \frac{i_{1i}}{C_T} - \frac{V_{oi}}{C_T \cdot R'_e} \right) \quad (35)$$

แทนค่า  $k_1+k_2$  และ  $k_1-k_2$  ในสมการ (31)

เพราะฉะนั้นคำตอบสุดท้ายของผลตอบสนองรวมได้เท่ากับ

$$V_o = V_{oi} \cdot e^{(-\alpha_T t)} \cdot \cos(\omega_N t) + \frac{1}{\omega_N} \left( \alpha_T \cdot V_{oi} + \frac{i_{1i}}{C_T} - \frac{V_{oi}}{C_T \cdot R'_e} \right) e^{(-\alpha_T t)} \cdot \sin(\omega_N t) \quad (36)$$

จัดรูปสมการหาค่ากระแสอินพุทของหม้อแปลง  $i_1$  โดยแทนสมการ (27) ใน (26) ได้ดังนี้

$$i_1 + C_T \frac{d}{dt} \left( L_T \cdot \frac{di_1}{dt} + R_T \cdot i_1 \right) + \frac{1}{R'_e} \left( L_T \cdot \frac{di_1}{dt} + R_T \cdot i_1 \right) = 0$$

$$\frac{d^2 i_1}{dt^2} + \left( \frac{1}{\tau_{RC}} + \frac{1}{\tau_{RL}} \right) \cdot \frac{di_1}{dt} + \left( \frac{1}{\tau_{RL} \cdot \tau_{RC}} + \omega_T^2 \right) i_1 = 0 \quad (37)$$

ผลเฉลยผลตอบสนองรวม (Total Response Solution)

ผลเฉลยผลตอบสนองรวมของระบบคือ

$$i_1 = i_{1n}$$

$$\frac{d^2 i_1}{dt^2} + \left( \frac{1}{\tau_{RC}} + \frac{1}{\tau_{RL}} \right) \frac{di_1}{dt} + \left( \frac{1}{\tau_{RL} \tau_{RC}} + \omega_T^2 \right) i_1 = 0$$

จาก

$$i_{1n} = k_1 \cdot e^{x_1 t} + k_2 \cdot e^{x_2 t} \quad (38)$$

$$x_{1,2} = \frac{-\left( \frac{1}{\tau_{RC}} + \frac{1}{\tau_{RL}} \right) \pm \sqrt{\left( \frac{1}{\tau_{RC}} + \frac{1}{\tau_{RL}} \right)^2 - 4 \left( \frac{1}{\tau_{RL} \tau_{RC}} + \omega_T^2 \right)}}{2}$$

แทนค่า  $x_1$  และ  $x_2$  ใน (38) ได้ผลเฉลยผลตอบสนองธรรมชาติ

$$i_{1n} = k_1 \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot e^{(j\omega_N \cdot t)} + k_2 \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot e^{(-j\omega_N \cdot t)}$$

จากสมการ Euler' Equation

$$i_{1n} = k_1 \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot (\cos(\omega_N \cdot t) + j \sin(\omega_N \cdot t)) + k_2 \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot (\cos(\omega_N \cdot t) - j \sin(\omega_N \cdot t))$$

$$\begin{aligned} i_{1n} &= k_1 \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \cos(\omega_N \cdot t) + k_2 \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \cos(\omega_N \cdot t) \\ &\quad + k_1 \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot j \sin(\omega_N \cdot t) - k_2 \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot j \sin(\omega_N \cdot t) \end{aligned}$$

$$i_{1n} = (k_1 + k_2) \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \cos(\omega_N \cdot t) + (k_1 - k_2) \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \sin(\omega_N \cdot t) \quad (39)$$

ที่  $t=t_1=0$   $V_o(0)=V_{oi}$ ,  $i_i(0)=i_{Ii}$

$$i_{Ii} = k_1 + k_2 \quad (40)$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{di_1}{dt} \right|_0 &= k_1 \cdot (-\omega_N \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \sin(\omega_N \cdot t) - \alpha_T \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \cos(\omega_N \cdot t)) \\ &\quad + \omega_N \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \cos(\omega_N \cdot t) - \alpha_T \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \sin(\omega_N \cdot t) \\ &\quad + k_2 \cdot (-\omega_N \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \sin(\omega_N \cdot t) - \alpha_T \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \cos(\omega_N \cdot t)) \\ &\quad - \omega_N \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \cos(\omega_N \cdot t) - \alpha_T \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \sin(\omega_N \cdot t) \end{aligned}$$

$$\left. \frac{di_1}{dt} \right|_0 = k_1 \cdot (\omega_N - \alpha_T) - k_2 \cdot (\omega_N + \alpha_T) \quad (41)$$

จาก

$$L_T \cdot \left. \frac{di_1}{dt} \right|_0 + R_T \cdot i_{1i} + V_{oi} = 0$$

$$\left. \frac{di_1}{dt} \right|_0 = \frac{-R_T \cdot i_{1i} - V_{oi}}{L_T} \quad (42)$$

แทนสมการ (41) ใน (40)

$$\frac{-R_T \cdot i_{1i} - V_{oi}}{L_T} = k_1 \cdot (\omega_N - \alpha_T) - k_2 \cdot (\omega_N + \alpha_T)$$

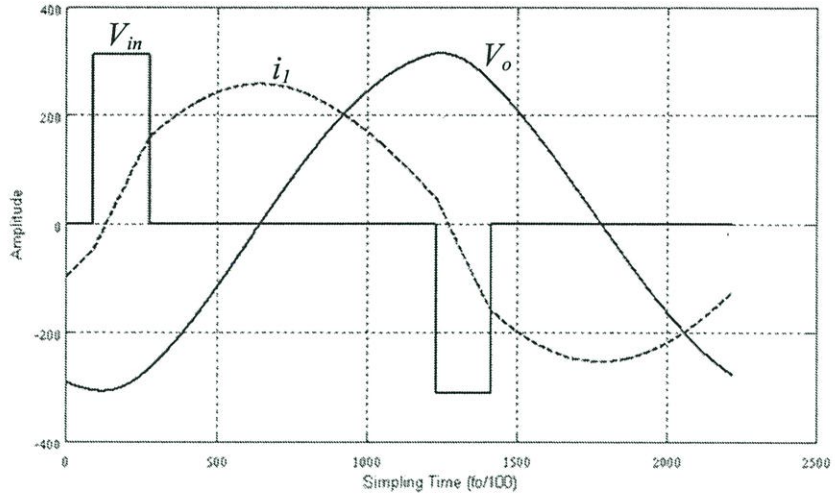
$$k_1 - k_2 = \frac{1}{\omega_N} \left( \alpha_T \cdot i_{1i} - \frac{R_T \cdot i_{1i} + V_{oi}}{L_T} \right) \quad (43)$$

แทนค่า  $k_1+k_2$  และ  $k_1-k_2$  ในสมการ (39)

เพราะฉะนั้นคำตอบสุดท้ายของผลตอบสนองรวมได้เท่ากับ

$$i_1 = i_{1i} \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \cos(\omega_N \cdot t) + \frac{1}{\omega_N} \left( \alpha_T \cdot i_{1i} - \frac{R_T \cdot i_{1i} + V_{oi}}{L_T} \right) \cdot e^{(-\alpha_T \cdot t)} \cdot \sin(\omega_N \cdot t) \quad (44)$$

จากการแก้สมการอนุพันธ์อันดับสองของวงจรไฟฟ้าที่สถานะที่ 1 และสถานะที่ 2 สามารถนำสมการแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาพุท  $V_o$  และกระแสอินพุท  $i_i$  ของหม้อแปลงมาแทนค่าพารามิเตอร์เพื่อดูผลตอบสนองของวงจรไฟฟ้าได้ โดยใช้โปรแกรม MatLAB คำนวณสมการ [ภาคผนวก จ] และแสดงค่าที่ได้ในรูปที่ 4.9 โดยกำหนดเงื่อนไขค่าเริ่มต้น (Initial Value) ของกระแสอินพุทของหม้อแปลงเท่ากับ  $i_{1i}$  และแรงดันเอาท์พุทของหม้อแปลงเท่ากับ  $V_{oi}$  เมื่อกำหนดให้ความถี่สวิตช์สูงกว่าความถี่รีโซแนนท์เล็กน้อย คาบเวลาเท่ากับ 22.22  $\mu$ s หรือ 45 kHz



รูปที่ 4.9 สัญญาณแรงดันอินพุต ( $V_{in}$ ) กระแสอินพุต ( $i_1$ ) และแรงดันเอาต์พุต ( $V_o$ ) ของหม้อแปลง ความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน โดยใช้โปรแกรม MatLAB ในการคำนวณ

## บทที่ 5

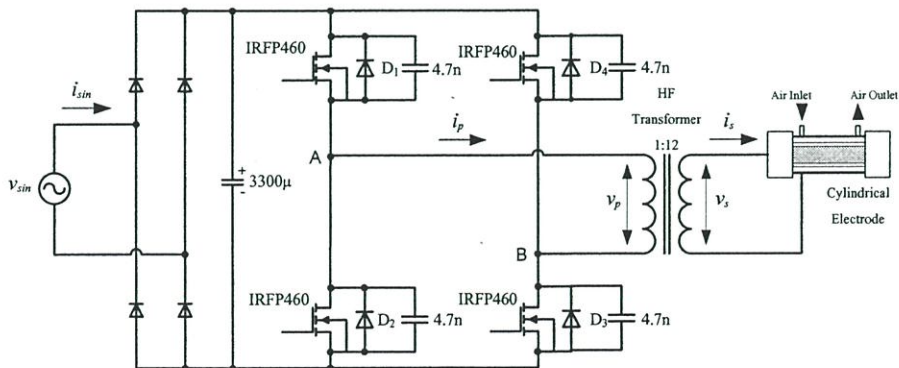
# การทดสอบการทำงานของระบบและผลการทดลองของ เครื่องผลิตก๊าซโอโซน

### 5.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบเครื่องผลิตก๊าซโอโซนที่สร้างขึ้นโดยการวัดผลทางไฟฟ้าที่จุดต่างๆเพื่อเปรียบเทียบผลจากการจำลองการทำงานและทำการเก็บผลการทดลองทางเคมีโดยการเปลี่ยนความถี่สวิทซ์ของคอนเวอร์เตอร์เพื่อดูผลการเกิดปริมาณก๊าซโอโซน พร้อมทั้งวัดกำลังงานทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์เพื่อดูประสิทธิภาพของเครื่อง

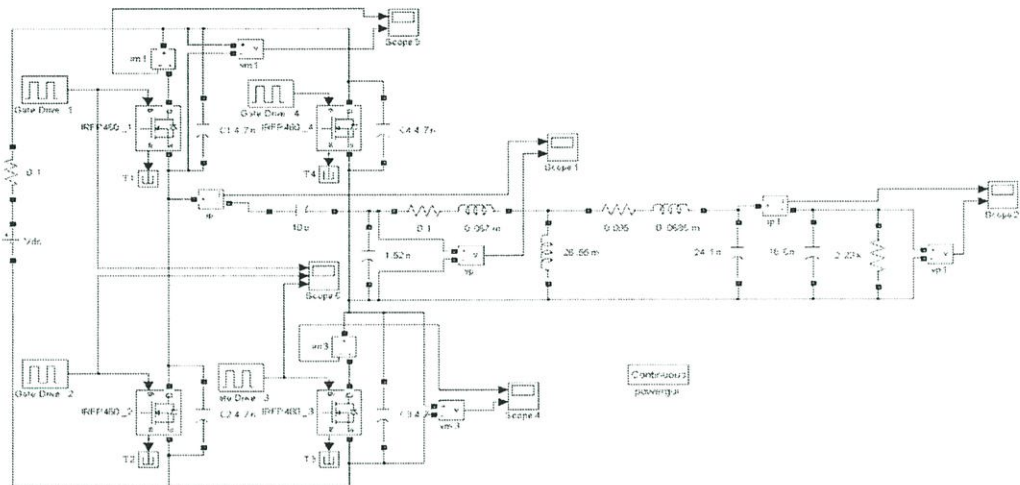
### 5.2 การวัดผลการทดสอบทางไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้จะเก็บผลการทดลองทางไฟฟ้าของเครื่องผลิตก๊าซโอโซนต้นแบบซึ่งวงจรแสดงในรูปที่ 5.1 จากหัวข้อที่ 4.4 ความถี่รีโซแนนท์ของระบบคือ 45 kHz กำหนดความถี่สวิทซ์ของคอนเวอร์เตอร์เริ่มต้นจากความถี่รีโซแนนท์และเพิ่มขึ้น วิธีการคือเปลี่ยนความถี่ 45 kHz, 47.5 kHz, 50 kHz, 52.5 kHz, 55 kHz, 57.5 kHz และ 60 kHz ในการเลือกความถี่สวิทซ์ของระบบ 45 kHz – 60 kHz เนื่องจากคอนเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้โดยไม่เกินพิกัดกระแสของหม้อแปลงและต้องการดูผลการเกิดปริมาณก๊าซโอโซนเมื่อความถี่สูงกว่า 40 kHz ปริมาณก๊าซจะลดลงหรือไม่ โดยจะเก็บผลสัญญาณแรงดันขั้วเบสของมอสเฟตทั้ง 4 ตัวเพื่อดูการเลื่อนเฟสของกลุ่มมอสเฟต ทำการวัดกระแส ( $i_{M1}$ ) และแรงดัน ( $v_{ds1}$ ) ที่ตกรวมมอสเฟต  $M_1$  และกระแส ( $i_{M3}$ ) และแรงดัน ( $v_{ds3}$ ) ที่ตกรวมมอสเฟต  $M_3$  เพื่อดูสภาวะการทำงานและกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นและเปรียบเทียบผลที่ได้กับการจำลองการทำงานของวงจรในรูปที่ 5.2 โดยใช้โปรแกรม MatLAB Simulink ในการจำลองการทำงานและค่าพารามิเตอร์ของวงจรได้จากบทที่ 4



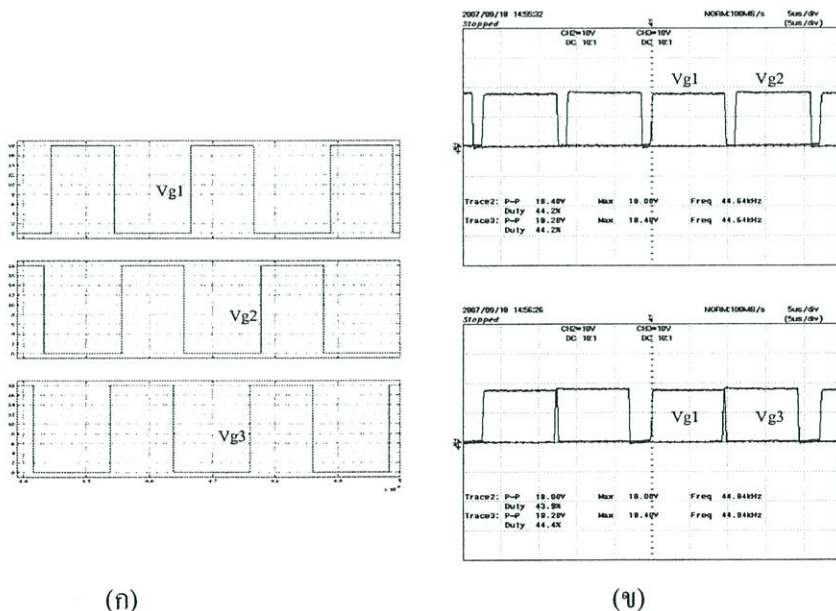
รูปที่ 5.1 วงจรกำลังของเครื่องผลิตก๊าซโอโซน

จากนั้นเก็บผลสัญญาณกระแส ( $i_p$ ) และแรงดัน ( $v_p$ ) ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเพื่อวัดกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ ต่อมาทำการวัดสัญญาณกระแส ( $i_s$ ) และแรงดัน ( $v_s$ ) ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงที่จ่ายให้ชุดอิเล็กทรอนิกส์เพื่อดูขนาดกระแสและแรงดันให้คงที่ 3.44 kV สุดท้ายวัดกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตโดยการวัดกระแส ( $i_{sin}$ ) และแรงดัน ( $v_{sin}$ ) ของเครื่องผลิตก๊าซไอโซนเปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์เพื่อดูประสิทธิภาพ

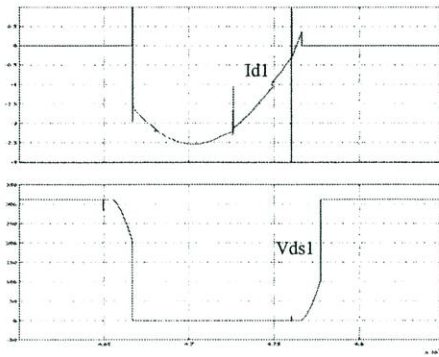


รูปที่ 5.2 วงจรการจำลองการทำงานของเฟสชิพที่ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ โดยใช้โปรแกรม MatLAB Simulink

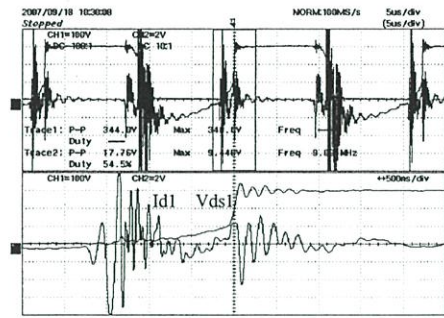
- ความถี่สวิตช์ 45 kHz



รูปที่ 5.3 สัญญาณขับเคลื่อนของมอสเฟต (ก) การจำลองการทำงาน  $M_1$ ,  $M_2$  และ  $M_3$  ตามลำดับ (ข) การทดลองบน คู่  $M_1$  และ  $M_2$ , ล่างคู่  $M_1$  และ  $M_3$  ที่ความถี่สวิตช์ 45 kHz



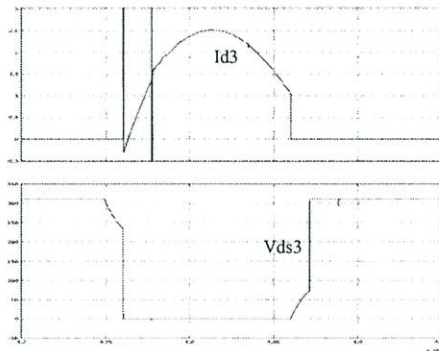
(ก)



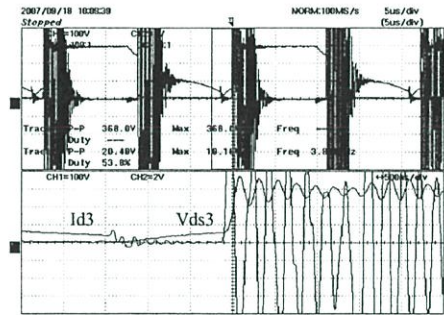
(ข)

รูปที่ 5.4 สัญญาณกระแส ( $i_{M1}$ ) และแรงดัน ( $v_{ds1}$ ) ที่ตกร่วมมอสเฟต  $M_1$

(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ที่ความถี่สวิตชิง 45 kHz



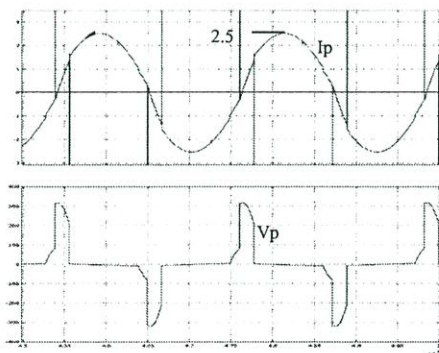
(ก)



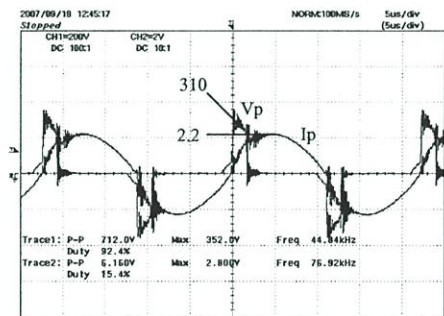
(ข)

รูปที่ 5.5 สัญญาณกระแส ( $i_{M3}$ ) และแรงดัน ( $v_{ds3}$ ) ที่ตกร่วมมอสเฟต  $M_3$

(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ที่ความถี่สวิตชิง 45 kHz



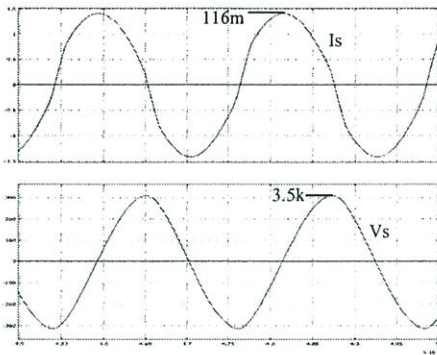
(ก)



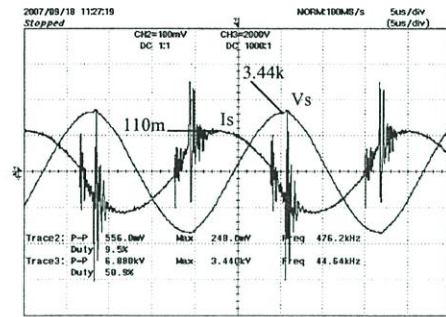
(ข)

รูปที่ 5.6 สัญญาณกระแส ( $i_p$ ) และแรงดัน ( $v_p$ ) ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง

(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ที่ความถี่สวิตชิง 45 kHz



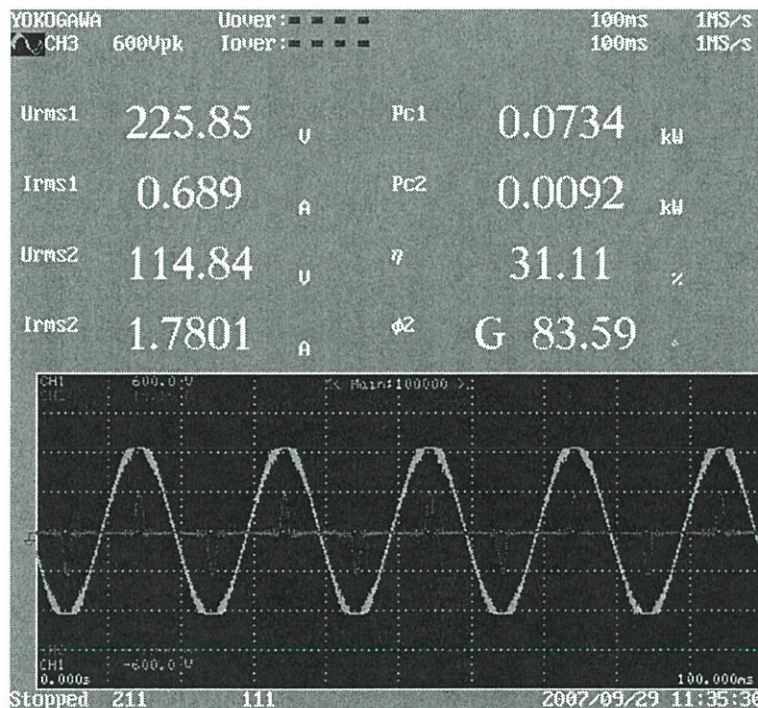
(ก)



(ข)

รูปที่ 5.7 สัญญาณกระแส ( $i_s$ ) และแรงดัน ( $v_s$ ) ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง

(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ที่ความถี่สวิตชิง 45 kHz

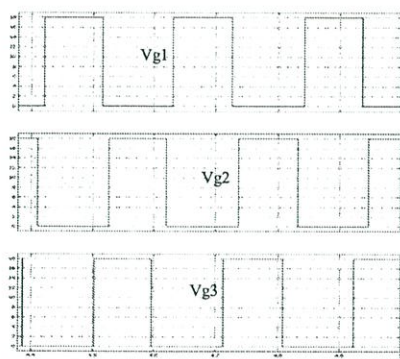


รูปที่ 5.8 สัญญาณอินพุตกระแสและแรงดันของระบบ โดยวัดกำลังทางด้านอินพุต(Pc1) และกำลังทางด้านเอาต์พุต(Pc2) ที่ความถี่สวิตชิง 45 kHz

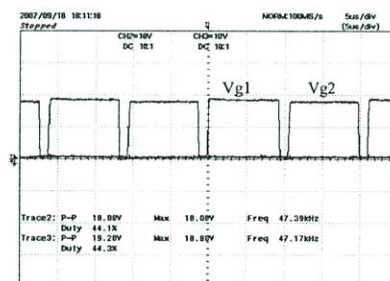
ที่ความถี่สวิตชิง 45 kHz กำหนดสัญญาณขั้วเกิดของมอสเฟตในกิ่งเดียวกันคือ  $M_1$  และ  $M_2$  ให้มีเฟสตรงข้ามกันและมีช่วงเวลาครีโม่ 5 % ของคาบเวลาเท่ากับ 1.111  $\mu$ s เพื่อป้องกันการลัดวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง จากช่วงเวลา turn on และ turn off ของมอสเฟตในกิ่งเดียวกันการปรับมุมต่างเฟสสัญญาณขั้วเกิดของกลุ่มมอสเฟต  $M_1$  และ  $M_3$  สามารถทำให้ความกว้างของสัญญาณแรงดันทางด้านเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์มีขนาดตามที่ต้องการได้ โดยกำหนดมุมเลื่อนเฟสเท่ากับ

154° หรือ 9.5  $\mu$ s ดังแสดงในรูปที่ 5.3 ในรูปที่ 5.4 แสดงรูปสัญญาณแรงดันที่ตักคร่อมมอสเฟต  $M_1$  และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต  $M_1$  ผลจากการต่อตัวเก็บประจุคร่อมที่ขา d-s ของมอสเฟตทำให้แรงดันที่ตักคร่อมมอสเฟตขณะ turn off ไม่เพิ่มอย่างทันทีทันใดแต่จะค่อยๆเพิ่มขึ้นและกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตเปลี่ยนมาไหลผ่านตัวเก็บประจุส่งผลให้กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นที่มอสเฟตมีค่าต่ำ กระแสทางด้านลบเกิดจากการไหลของกระแสผ่านไดโอดภายในของมอสเฟตในช่วงเวลาฟรีวีล รูปที่ 5.5 แสดงรูปสัญญาณแรงดันที่ตักคร่อมมอสเฟต  $M_3$  และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต  $M_3$  จากการที่มอสเฟต  $M_3$  turn on ซ้ำกว่า  $M_1$  ทำให้กระแสที่ไหลผ่าน  $M_3$  เป็นกระแสขณะ turn on และขณะช่วงเวลาฟรีวีล จากรูปที่ 5.6 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสที่ไหลทางด้านปฐมภูมิ โดยผลจากทดลองได้ค่ากระแสใกล้เคียงกับผลจากการจำลองการทำงานและแรงดันอินพุทของหม้อแปลงเป็นรูป quasi-square wave ในรูปที่ 5.7 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสที่ไหลทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง แรงดันทางด้านทุติยภูมิถูกรักษาระดับให้เท่ากับพิกัดด้วยการปรับความกว้างพัลส์ของแรงดันทางด้านปฐมภูมิ รูปที่ 5.8 แสดงค่าทางด้านอินพุทของเครื่องผลิตก๊าซ โอโซน โดยรูป (ก) แสดงกำลังงานของเครื่อง ในรูป (ข) วัดสัญญาณฮาร์มอนิกส์รวมของกระแส และรูป (ค) แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสของ

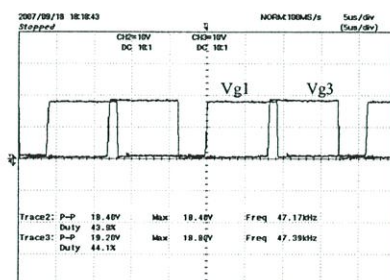
- ความถี่สวิตซ์ 47.5 kHz



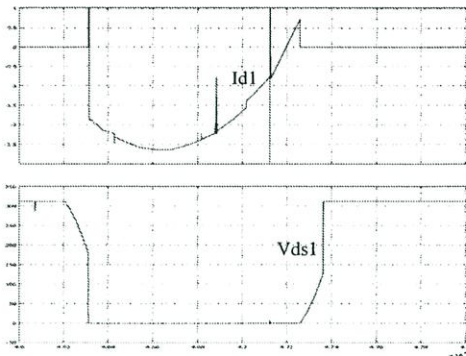
(ก)



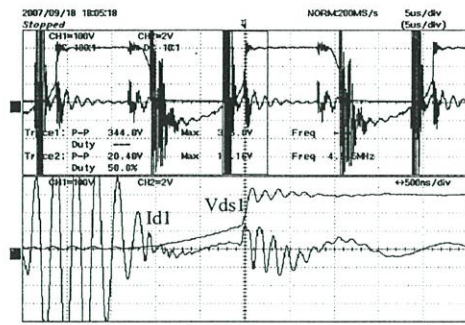
(ข)



รูปที่ 5.9 สัญญาณขับเคลื่อนของมอสเฟต (ก) การจำลองการทำงาน  $M_1$ ,  $M_2$  และ  $M_3$  ตามลำดับ  
(ข) การทดลองบน คู่  $M_1$  และ  $M_2$ , ค่าคู่  $M_1$  และ  $M_3$  ที่ความถี่สวิตซ์ 47.5 kHz



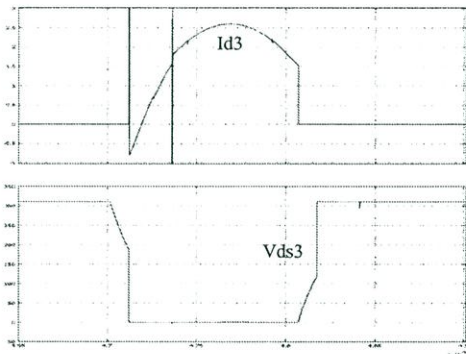
(ก)



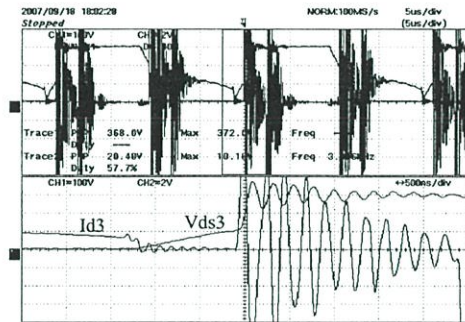
(ข)

รูปที่ 5.10 สัญญาณกระแส ( $i_{M1}$ ) และแรงดัน ( $v_{ds1}$ ) ที่ตกร่วมมอสเฟต  $M_1$

(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ที่ความถี่สวิทซ์ 47.5 kHz



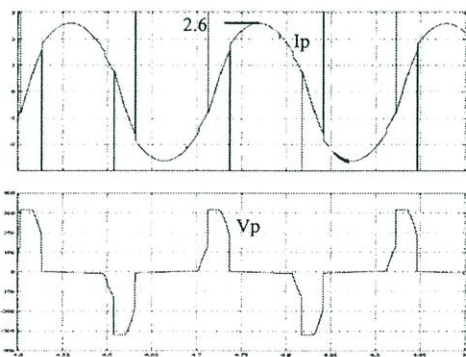
(ก)



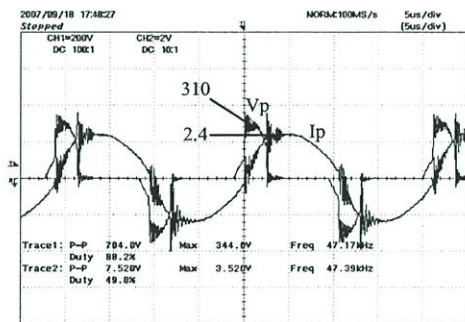
(ข)

รูปที่ 5.11 สัญญาณกระแส ( $i_{M3}$ ) และแรงดัน ( $v_{ds3}$ ) ที่ตกร่วมมอสเฟต  $M_3$

(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ที่ความถี่สวิทซ์ 47.5 kHz



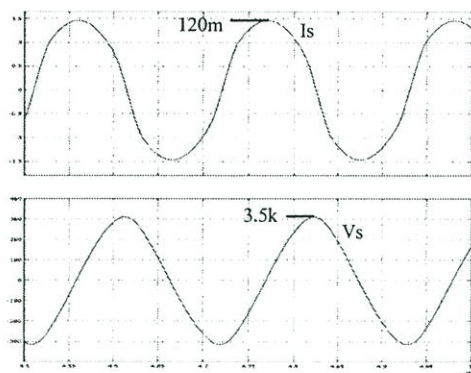
(ก)



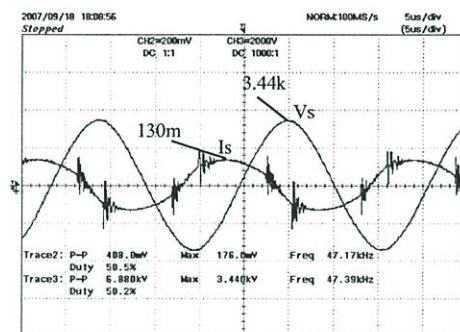
(ข)

รูปที่ 5.12 สัญญาณกระแส ( $i_p$ ) และแรงดัน ( $v_p$ ) ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง

(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ที่ความถี่สวิทซ์ 47.5 kHz



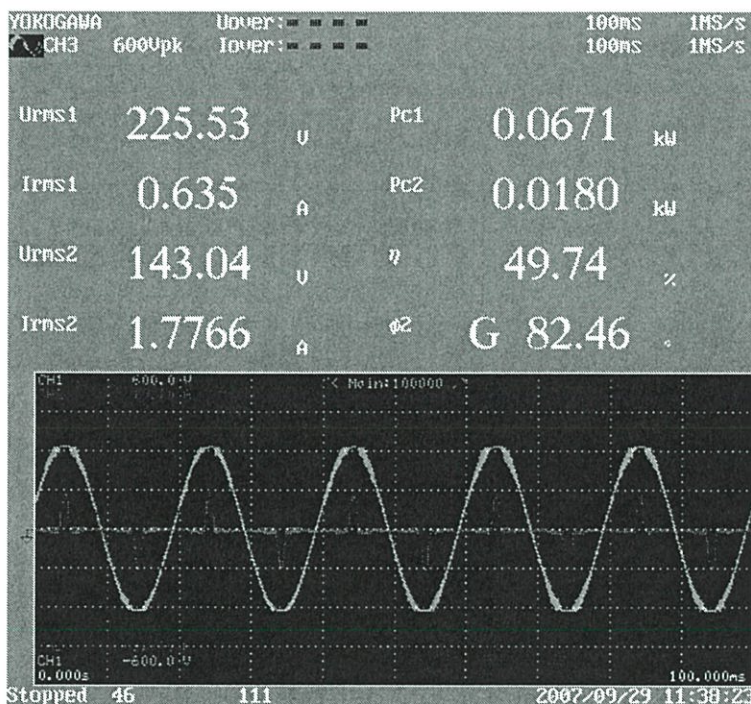
(ก)



(ข)

รูปที่ 5.13 สัญญาณกระแส ( $i_s$ ) และแรงดัน ( $v_s$ ) ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง

(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ที่ความถี่สวิตชิ่ง 47.5 kHz

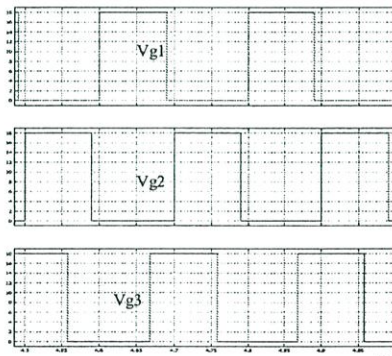


รูปที่ 5.14 สัญญาณอินพุตกระแสและแรงดันของระบบ โดยวัดกำลังทางด้านอินพุต(Pc1) และกำลังทางด้านเอาต์พุต(Pc2) ที่ความถี่สวิตชิ่ง 47.5 kHz

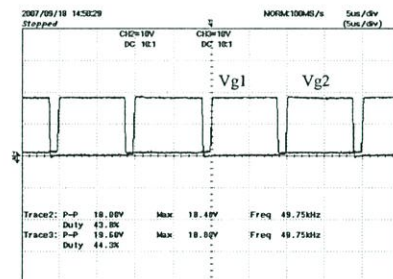
ที่ความถี่สวิตชิ่ง 47.5 kHz กำหนดสัญญาณขั้วเกิดของมอสเฟตในกึ่งเดียวกันคือ  $M_1$  และ  $M_2$  ให้มีเฟสตรงข้ามกันและมีช่วงเวลาเดธไทม์ 5 % ของคาบเวลาเท่ากับ  $1.0525 \mu\text{s}$  เพื่อป้องกันการลัดวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง จากช่วงเวลา turn on และ turn off ของมอสเฟตในกึ่งเดียวกัน การปรับมุมต่างเฟสสัญญาณขั้วเกิดของกลุ่มมอสเฟต  $M_1$  และ  $M_3$  สามารถทำให้ความกว้างของสัญญาณแรงดันทางด้านเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์มีขนาดตามที่ต้องการได้ โดยกำหนดมุมเลื่อน

เฟสเท่ากับ  $139^\circ$  หรือ  $8.12 \mu\text{s}$  ดังแสดงในรูปที่ 5.9 ในรูปที่ 5.10 แสดงรูปสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมมอสเฟต  $M_1$  และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต  $M_1$  ผลจากการต่อตัวเก็บประจุคร่อมที่ขา d-s ของมอสเฟตทำให้แรงดันที่ตกคร่อมมอสเฟตขณะ turn off ไม่เพิ่มอย่างทันทีทันใดแต่จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตเปลี่ยนมาไหลผ่านตัวเก็บประจุส่งผลให้กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นที่มอสเฟตมีค่าต่ำ กระแสทางด้านลบเกิดจากการไหลของกระแสผ่านไดโอดภายในของมอสเฟตในช่วงเวลาฟรีวิล รูปที่ 5.11 แสดงรูปสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมมอสเฟต  $M_3$  และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต  $M_3$  จากการที่มอสเฟต  $M_3$  turn on ซ้ำกว่า  $M_1$  ทำให้กระแสที่ไหลผ่าน  $M_3$  เป็นกระแสขณะ turn on และขณะช่วงเวลาฟรีวิล จากรูปที่ 5.12 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสที่ไหลทางด้านปฐมภูมิ โดยผลจากทดลองได้ค่ากระแสใกล้เคียงกับผลจากการจำลองการทำงานและแรงดันอินพุทของหม้อแปลงเป็นรูป quasi-square wave ความกว้างพัลส์แรงดันมีขนาดกว้างขึ้นและขนาดกระแสมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับความถี่ที่ 45 kHz ในรูปที่ 5.13 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสที่ไหลทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง แรงดันทางด้านทุติยภูมิถูกรักษาระดับให้เท่ากับพัลส์ด้วยการปรับความกว้างพัลส์ของแรงดันทางด้านปฐมภูมิ รูปที่ 5.14 แสดงค่าทางด้านอินพุทของเครื่องผลิตก๊าซไอโซนโดยรูป (ก) แสดงกำลังงานของเครื่อง ในรูป (ข) วัดสัญญาณฮาร์มอนิกส์รวมของกระแส และรูป (ค) แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสของเครื่อง

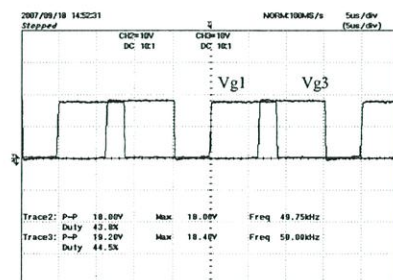
#### - ความถี่สวิตซ์ 50 kHz



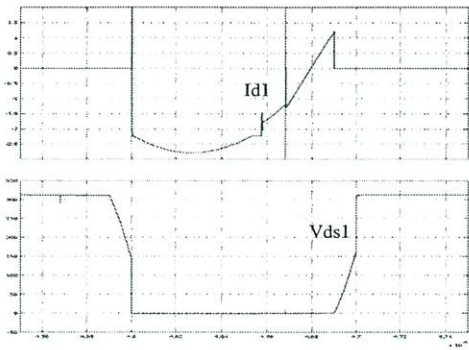
(ก)



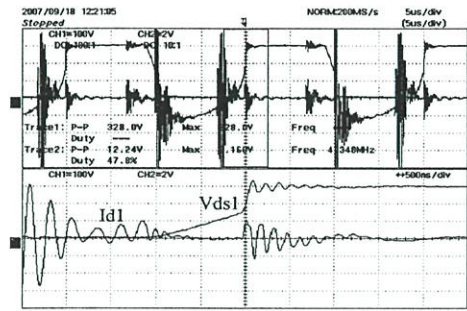
(ข)



รูปที่ 5.15 สัญญาณขับเคลื่อนของมอสเฟต (ก) การจำลองการทำงาน  $M_1$   $M_2$  และ  $M_3$  ตามลำดับ  
(ข) การทดลองบน ทุ่  $M_1$  และ  $M_2$ , ล่าง ทุ่  $M_1$  และ  $M_3$  ที่ความถี่สวิตซ์ 50 kHz



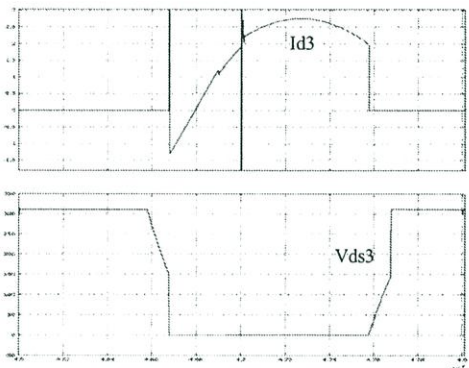
(ก)



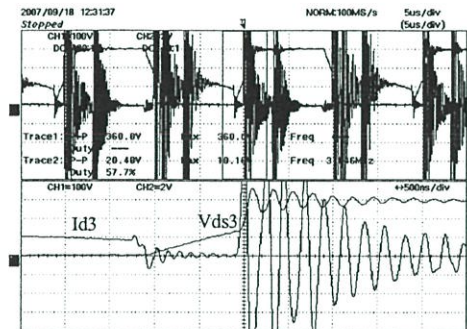
(ข)

รูปที่ 5.16 สัญญาณกระแส ( $i_{M1}$ ) และแรงดัน ( $v_{ds1}$ ) ที่ตกรวมมอสเฟต  $M_1$

(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ที่ความถี่สวิทซ์ 50 kHz



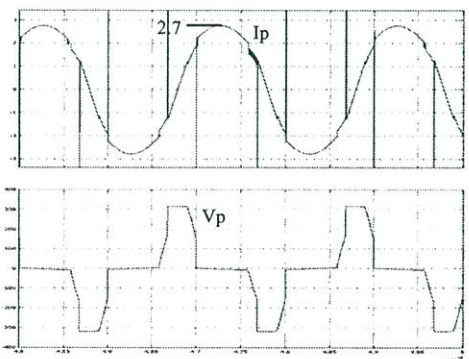
(ก)



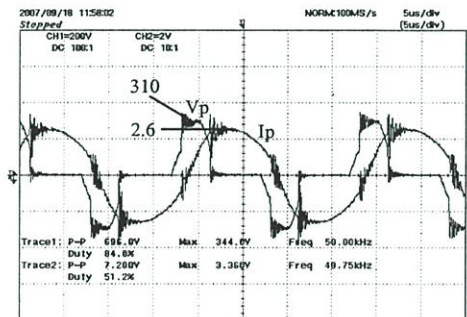
(ข)

รูปที่ 5.17 สัญญาณกระแส ( $i_{M3}$ ) และแรงดัน ( $v_{ds3}$ ) ที่ตกรวมมอสเฟต  $M_3$

(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ที่ความถี่สวิทซ์ 50 kHz



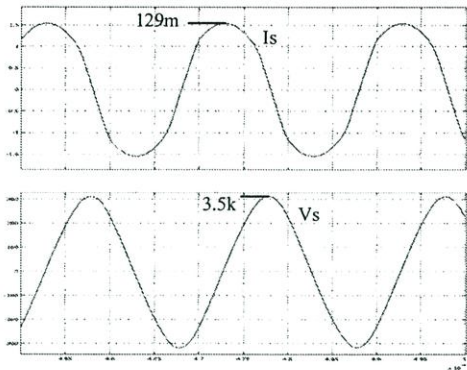
(ก)



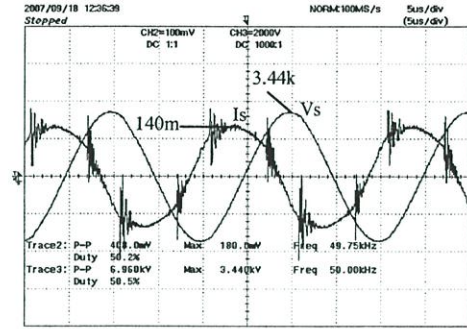
(ข)

รูปที่ 5.18 สัญญาณกระแส ( $i_p$ ) และแรงดัน ( $v_p$ ) ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง

(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ที่ความถี่สวิทซ์ 50 kHz



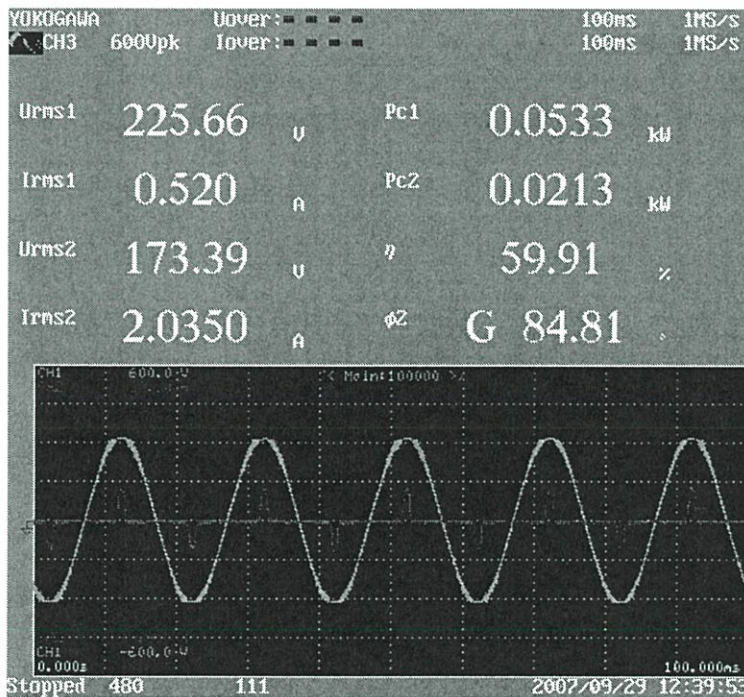
(ก)



(ข)

รูปที่ 5.19 สัญญาณกระแส ( $i_s$ ) และแรงดัน ( $v_s$ ) ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง

(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ที่ความถี่สวิตซ์ 50 kHz

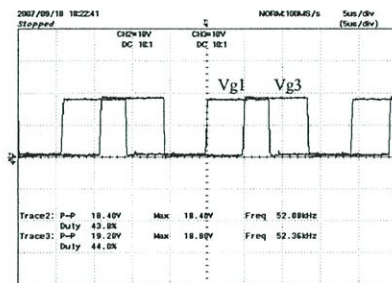
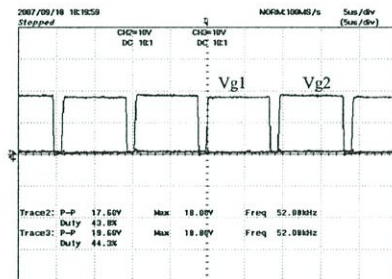
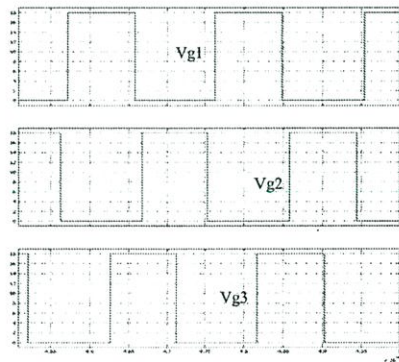


รูปที่ 5.20 สัญญาณอินพุตกระแสและแรงดันของระบบ โดยวัดกำลังทางด้านอินพุต(Pc1) และกำลังทางด้านเอาต์พุต(Pc2) ที่ความถี่สวิตซ์ 50 kHz

ที่ความถี่สวิตซ์ 50 kHz กำหนดสัญญาณขั้วเกิดของมอสเฟตในกิ่งเดียวกันคือ  $M_1$  และ  $M_2$  ให้มีเฟสตรงข้ามกันและมีช่วงเวลาเดธไทม์ 5 % ของคาบเวลาเท่ากับ  $1.0 \mu s$  เพื่อป้องกันการลัดวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง จากช่วงเวลา turn on และ turn off ของมอสเฟตในกิ่งเดียวกันการปรับมุมต่างเฟสสัญญาณขั้วเกิดของกลุ่มมอสเฟต  $M_1$  และ  $M_2$  สามารถทำให้ความกว้างของสัญญาณแรงดันทางด้านเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์มีขนาดตามที่ต้องการได้ โดยกำหนดมุมเลื่อนเฟสเท่ากับ

122° หรือ 6.8  $\mu$ s ดังแสดงในรูปที่ 5.15 ในรูปที่ 5.16 แสดงรูปสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมมอสเฟต  $M_1$  และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต  $M_1$  ผลจากการต่อตัวเก็บประจุคร่อมที่ขา d-s ของมอสเฟตทำให้แรงดันที่ตกคร่อมมอสเฟตขณะ turn off ไม่เพิ่มอย่างทันทีทันใดแต่จะค่อยๆเพิ่มขึ้นและกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตเปลี่ยนมาไหลผ่านตัวเก็บประจุส่งผลให้กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นที่มอสเฟตมีค่าต่ำ กระแสทางด้านลบเกิดจากการไหลของกระแสผ่านไดโอดภายในของมอสเฟตในช่วงเวลาฟรีวีลรูปที่ 5.17 แสดงรูปสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมมอสเฟต  $M_3$  และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต  $M_3$  จากการที่มอสเฟต  $M_3$  turn on ซ้ำกว่า  $M_1$  ทำให้กระแสที่ไหลผ่าน  $M_3$  เป็นกระแสขณะ turn on และขณะช่วงเวลาฟรีวีล จากรูปที่ 5.18 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสที่ไหลทางด้านปฐมภูมิ โดยผลจากทดลองได้ค่ากระแสใกล้เคียงกับผลจากการจำลองการทำงานและแรงดันอินพุทของหม้อแปลงเป็นรูป quasi-square wave ความกว้างพัลส์แรงดันมีขนาดกว้างขึ้นและขนาดกระแสมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับความถี่ที่ 47.5 kHz ในรูปที่ 5.19 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสที่ไหลทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง แรงดันทางด้านทุติยภูมิถูกรักษาระดับให้เท่ากับพัลส์ด้วยการปรับความกว้างพัลส์ของแรงดันทางด้านปฐมภูมิ รูปที่ 5.20 แสดงค่าทางด้านอินพุทของเครื่องผลิตก๊าซไอโซน โดยรูป (ก) แสดงกำลังงานของเครื่อง ในรูป (ข) วัสดุสัญญาณฮาร์มอนิกส์รวมของกระแส และรูป (ค) แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสของเครื่อง

- ความถี่สวิตช์ 52.5 kHz

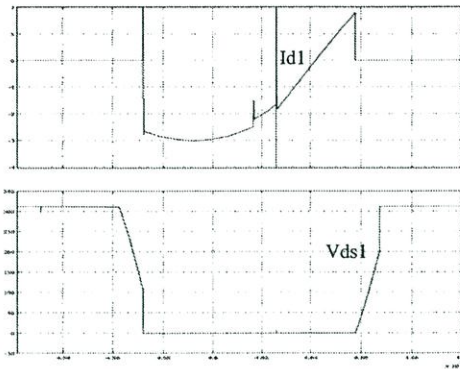


(ก)

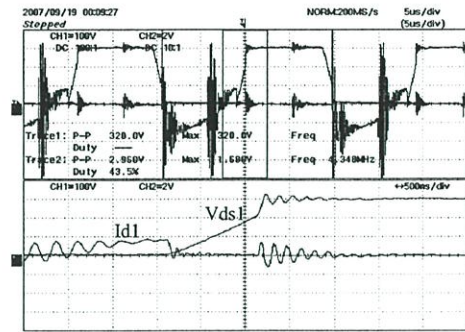
(ข)

รูปที่ 5.21 สัญญาณขับเคลื่อนของมอสเฟต (ก) การจำลองการทำงาน  $M_1$   $M_2$  และ  $M_3$  ตามลำดับ

(ข) การทดลองบน ทุ่  $M_1$  และ  $M_2$ , ต่างทุ่  $M_1$  และ  $M_3$  ที่ความถี่สวิตช์ 52.5 kHz



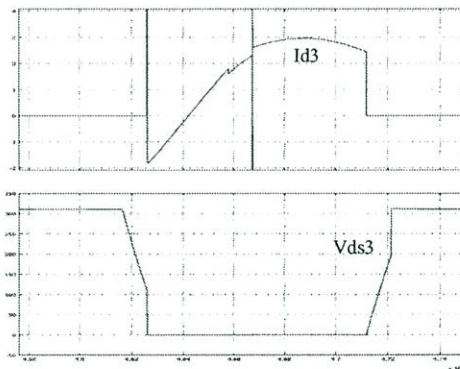
(ก)



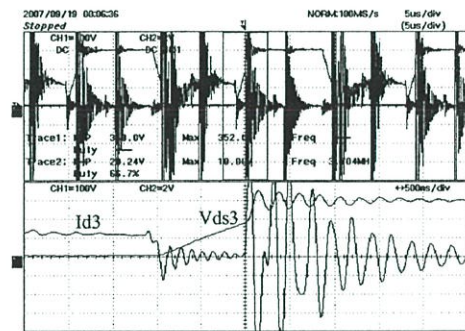
(ข)

รูปที่ 5.22 สัญญาณกระแส ( $i_{M1}$ ) และแรงดัน ( $v_{ds1}$ ) ที่ตักคร่อมมอสเฟต  $M_1$

(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ที่ความถี่สวิตซ์ 52.5 kHz



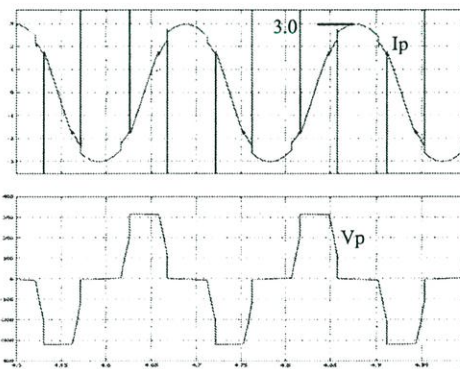
(ก)



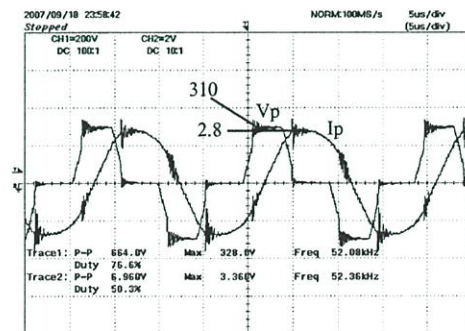
(ข)

รูปที่ 5.23 สัญญาณกระแส ( $i_{M3}$ ) และแรงดัน ( $v_{ds3}$ ) ที่ตักคร่อมมอสเฟต  $M_3$

(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ที่ความถี่สวิตซ์ 52.5 kHz



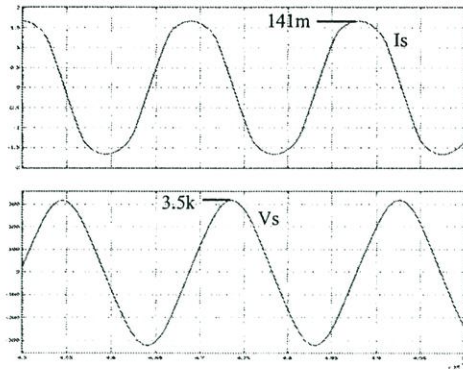
(ก)



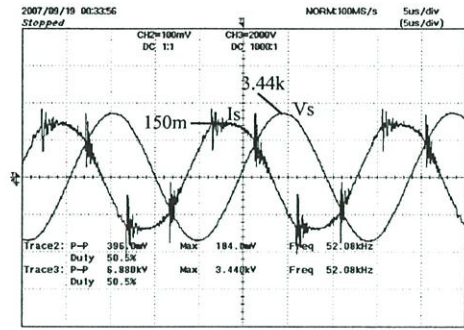
(ข)

รูปที่ 5.24 สัญญาณกระแส ( $i_p$ ) และแรงดัน ( $v_p$ ) ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง

(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ที่ความถี่สวิตซ์ 52.5 kHz

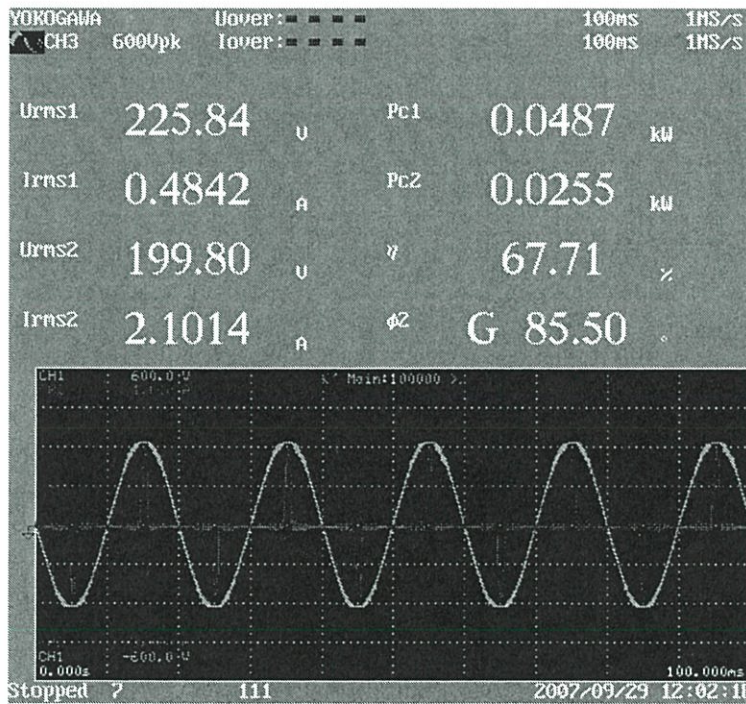


(ก)



(ข)

รูปที่ 5.25 สัญญาณกระแส ( $i_s$ ) และแรงดัน ( $v_s$ ) ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง  
(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ที่ความถี่สวิตชิง 52.5 kHz

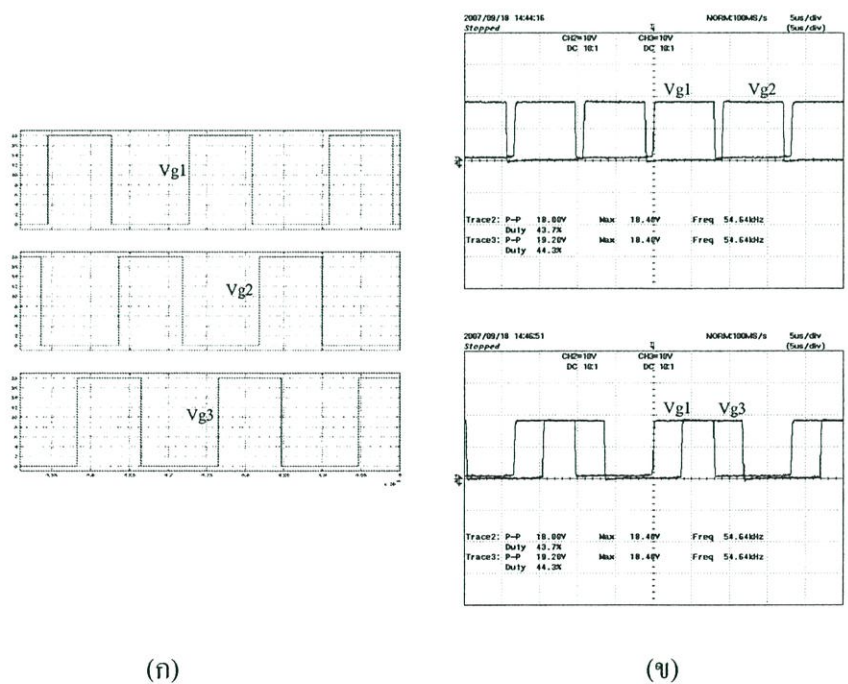


รูปที่ 5. สัญญาณอินพุตกระแสและแรงดันของระบบ โดยวัดกำลังทางด้านอินพุต(Pc1) และกำลังทางด้านเอาต์พุต(Pc2) ที่ความถี่สวิตชิง 52.5 kHz

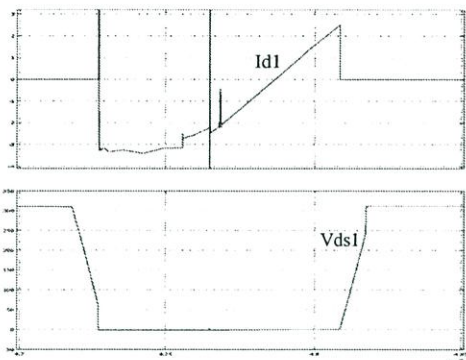
ที่ความถี่สวิตชิง 52.5 kHz กำหนดสัญญาณขั้วเกิดของมอสเฟตในกิ่งเดียวกันคือ  $M_1$  และ  $M_2$  ให้มีเฟสตรงข้ามกันและมีช่วงเวลาเดธไทม์ 5 % ของคาบเวลาเท่ากับ  $0.9525 \mu s$  เพื่อป้องกันการลัดวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง จากช่วงเวลา turn on และ turn off ของมอสเฟตในกิ่งเดียวกัน การปรับมุมต่างเฟสสัญญาณขั้วเกิดของกลุ่มมอสเฟต  $M_1$  และ  $M_3$  สามารถทำให้ความกว้างของสัญญาณแรงดันทางด้านเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์มีขนาดตามที่ต้องการได้ โดยกำหนดมุมเลื่อน

เฟสเท่ากับ  $101.3^\circ$  หรือ  $5.36 \mu s$  ดังแสดงในรูปที่ 5.21 ในรูปที่ 5.22 แสดงรูปสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมมอสเฟต  $M_1$  และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต  $M_1$  ผลจากการต่อตัวเก็บประจุรอมที่ขา d-s ของมอสเฟตทำให้แรงดันที่ตกคร่อมมอสเฟตขณะ turn off ไม่เพิ่มอย่างทันทีทันใดแต่จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตเปลี่ยนมาไหลผ่านตัวเก็บประจุส่งผลให้กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นที่มอสเฟตมีค่าต่ำ กระแสทางด้านลบเกิดจากการไหลของกระแสผ่านไดโอดภายในของมอสเฟตในช่วงเวลาฟรีวิล รูปที่ 5.23 แสดงรูปสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมมอสเฟต  $M_3$  และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต  $M_3$  จากการที่มอสเฟต  $M_3$  turn on ซ้ำกว่า  $M_1$  ทำให้กระแสที่ไหลผ่าน  $M_3$  เป็นกระแสดัง turn on และขณะช่วงเวลาฟรีวิล จากรูปที่ 5.24 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสที่ไหลทางด้านปฐมภูมิ โดยผลจากทดลองได้ค่ากระแสใกล้เคียงกับผลจากการจำลองการทำงานและแรงดันอินพุทของหม้อแปลงเป็นรูป quasi-square wave ความกว้างพัลส์แรงดันมีขนาดกว้างขึ้นและขนาดกระแสมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับความถี่ที่ 50 kHz ในรูปที่ 5.25 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสที่ไหลทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง แรงดันทางด้านทุติยภูมิถูกรักษาระดับให้เท่ากับพิกัดด้วยการปรับความกว้างพัลส์ของแรงดันทางด้านปฐมภูมิ รูปที่ 5.26 แสดงค่าทางด้านอินพุทของเครื่องผลิตก๊าซ โอโซน โดยรูป (ก) แสดงกำลังงานของเครื่อง ในรูป (ข) วัดสัญญาณฮาร์มอนิกสักรวมของกระแส และรูป (ค) แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสของเครื่อง

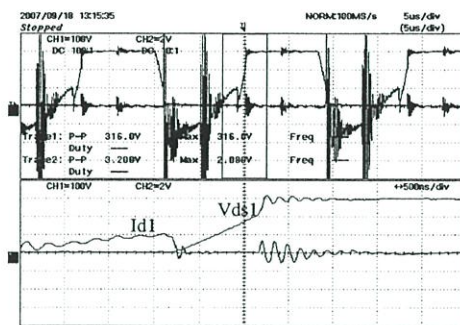
- ความถี่สวิตช์ 55 kHz



รูปที่ 5.27 สัญญาณขับเคลื่อนของมอสเฟต (ก) การจำลองการทำงาน  $M_1$   $M_2$  และ  $M_3$  ตามลำดับ (ข) การทดลองบน คู่  $M_1$  และ  $M_2$ , ต่างคู่  $M_1$  และ  $M_3$  ที่ความถี่สวิตช์ 55 kHz



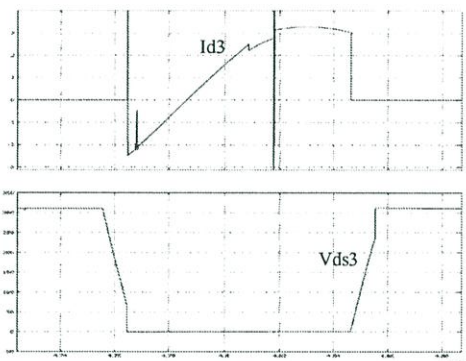
(ก)



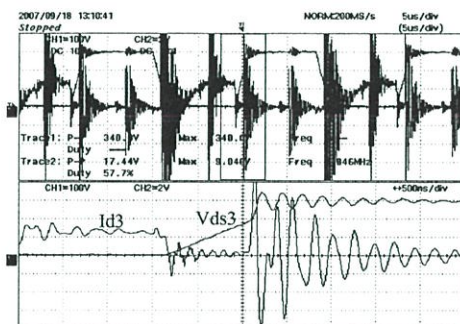
(ข)

รูปที่ 5.28 สัญญาณกระแส ( $i_{M1}$ ) และแรงดัน ( $v_{ds1}$ ) ที่ตักคร่อมมอสเฟต  $M_1$

(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ที่ความถี่สวิตซิ่ง 55 kHz



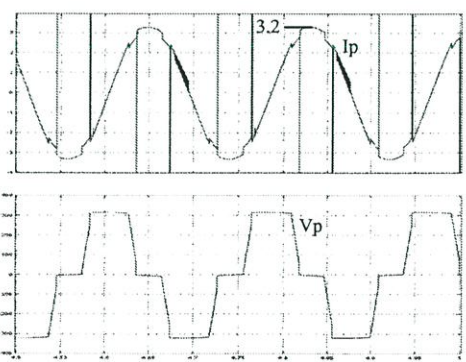
(ก)



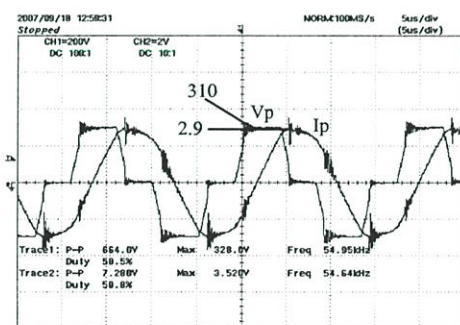
(ข)

รูปที่ 5.29 สัญญาณกระแส ( $i_{M3}$ ) และแรงดัน ( $v_{ds3}$ ) ที่ตักคร่อมมอสเฟต  $M_3$

(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ที่ความถี่สวิตซิ่ง 55 kHz



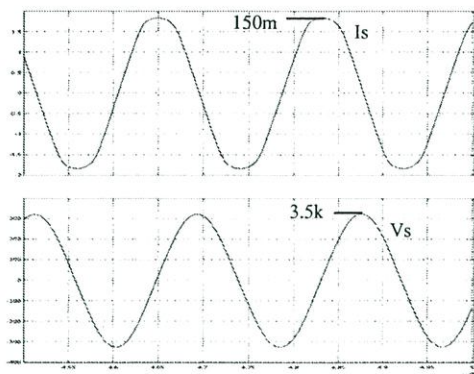
(ก)



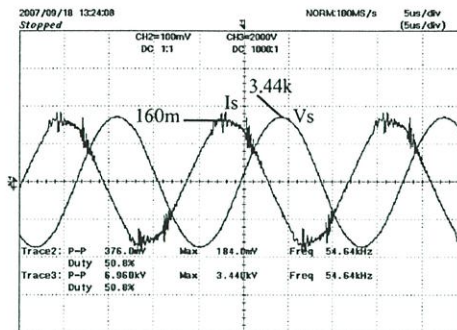
(ข)

รูปที่ 5.30 สัญญาณกระแส ( $i_p$ ) และแรงดัน ( $v_p$ ) ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง

(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ที่ความถี่สวิตซิ่ง 55 kHz



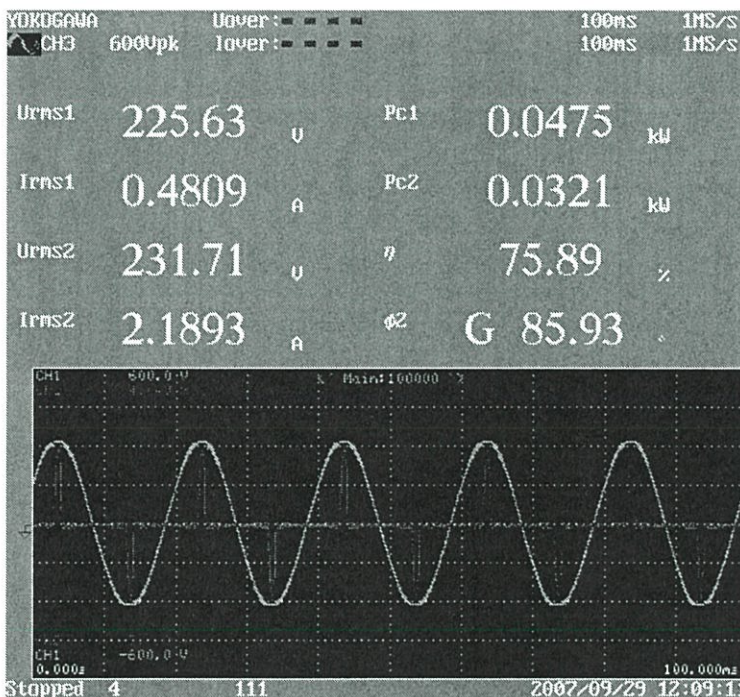
(ก)



(ข)

รูปที่ 5.31 สัญญาณกระแส ( $i_s$ ) และแรงดัน ( $v_s$ ) ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง

(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ที่ความถี่สวิตซ์ 55 kHz

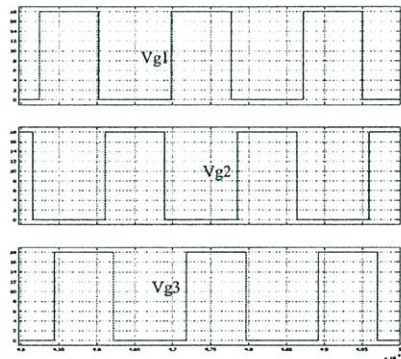


รูปที่ 5.32 สัญญาณอินพุทกระแสและแรงดันของระบบ โดยวัดกำลังทางด้านอินพุท(Pc1) และกำลังทางด้านเอาต์พุท(Pc2) ที่ความถี่สวิตซ์ 55 kHz

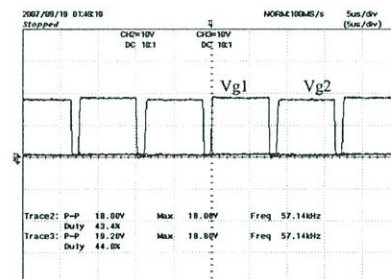
ที่ความถี่สวิตซ์ 55 kHz กำหนดสัญญาณขั้วเกิดของมอสเฟตในกิ่งเดียวกันคือ  $M_1$  และ  $M_2$  ให้มีเฟสตรงข้ามกันและมีช่วงเวลาเดธไทม์ 5 % ของคาบเวลาเท่ากับ  $0.909 \mu s$  เพื่อป้องกันการลัดวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง จากช่วงเวลา turn on และ turn off ของมอสเฟตในกิ่งเดียวกันการปรับมุมต่างเฟสสัญญาณขั้วเกิดของกลุ่มมอสเฟต  $M_1$  และ  $M_2$  สามารถทำให้ความกว้างของสัญญาณแรงดันทางด้านเอาต์พุทของคอนเวอร์เตอร์มีขนาดตามที่ต้องการได้ โดยกำหนดมุมเลื่อนเฟสเท่ากับ

75° หรือ 3.787  $\mu\text{s}$  ดังแสดงในรูปที่ 5.27 ในรูปที่ 5.28 แสดงรูปสัญญาณแรงดันที่ตกรวมมอสเฟต  $M_1$  และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต  $M_1$  ผลจากการต่อตัวเก็บประจุคร่อมที่ขา d-s ของมอสเฟตทำให้แรงดันที่ตกรวมมอสเฟตขณะ turn off ไม่เพิ่มอย่างทันทีทันใดแต่จะค่อยๆเพิ่มขึ้นและกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตเปลี่ยนมาไหลผ่านตัวเก็บประจุส่งผลให้กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นที่มอสเฟตมีค่าต่ำ กระแสทางด้านลบเกิดจากการไหลของกระแสผ่านไดโอดภายในของมอสเฟตในช่วงเวลาฟรีวิล รูปที่ 5.29 แสดงรูปสัญญาณแรงดันที่ตกรวมมอสเฟต  $M_3$  และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต  $M_3$  จากการที่มอสเฟต  $M_3$  turn on ซ้ำกว่า  $M_1$  ทำให้กระแสที่ไหลผ่าน  $M_3$  เป็นกระแสขณะ turn on และขณะช่วงเวลาฟรีวิล จากรูปที่ 5.30 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสที่ไหลทางด้านปฐมภูมิ โดยผลจากทดลองได้ค่ากระแสใกล้เคียงกับผลจากการจำลองการทำงานและแรงดันอินพุทของหม้อแปลงเป็นรูป quasi-square wave ความกว้างพัลส์แรงดันมีขนาดกว้างขึ้นและขนาดกระแสมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับความถี่ที่ 52.5 kHz ในรูปที่ 5.31 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสที่ไหลทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง แรงดันทางด้านทุติยภูมิถูกรักษาระดับให้เท่ากับพิกัดด้วยการปรับความกว้างพัลส์ของแรงดันทางด้านปฐมภูมิ รูปที่ 5.32 แสดงค่าทางด้านอินพุทของเครื่องผลิตก๊าซไอโซนโดยรูป (ก) แสดงกำลังงานของเครื่อง ในรูป (ข) วัดสัญญาณฮาร์มอนิกส์รวมของกระแส และรูป (ค) แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสของเครื่อง

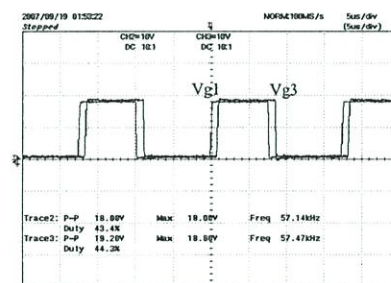
#### - ความถี่สวิตซ์ 57.5 kHz



(ก)

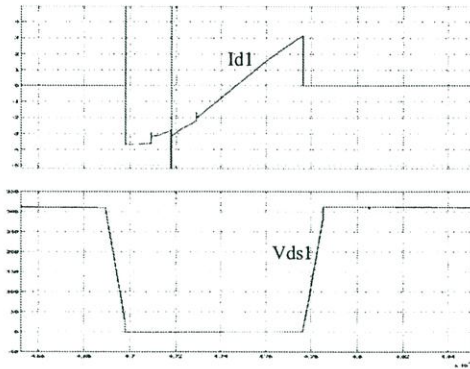


(ข)

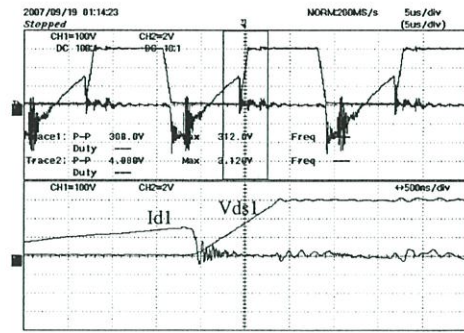


รูปที่ 5.33 สัญญาณขับเคลื่อนของมอสเฟต (ก) การจำลองการทำงาน  $M_1$   $M_2$  และ  $M_3$  ตามลำดับ

(ข) การทดลองบน ทุ่  $M_1$  และ  $M_2$ , ล่าง ทุ่  $M_1$  และ  $M_3$  ที่ความถี่สวิตซ์ 57.5 kHz



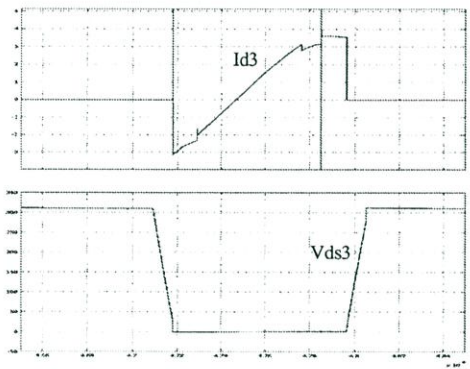
(ก)



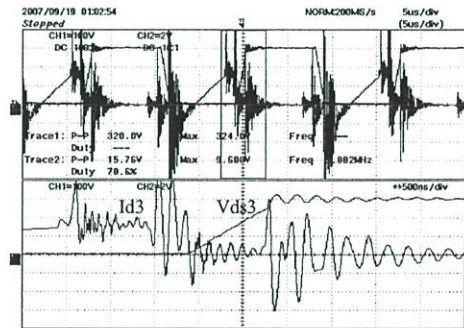
(ข)

รูปที่ 5.34 สัญญาณกระแส ( $i_{M1}$ ) และแรงดัน ( $v_{ds1}$ ) ที่ตัวทรานซิสเตอร์  $M_1$

(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ที่ความถี่สวิทซ์ 57.5 kHz



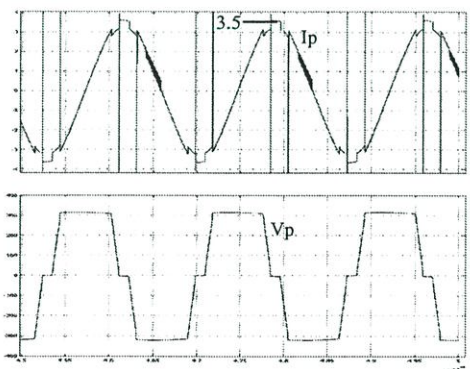
(ก)



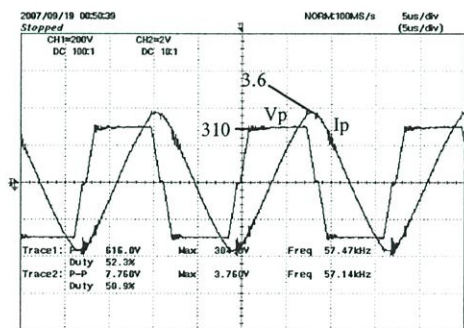
(ข)

รูปที่ 5.35 สัญญาณกระแส ( $i_{M3}$ ) และแรงดัน ( $v_{ds3}$ ) ที่ตัวทรานซิสเตอร์  $M_3$

(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ที่ความถี่สวิทซ์ 57.5 kHz



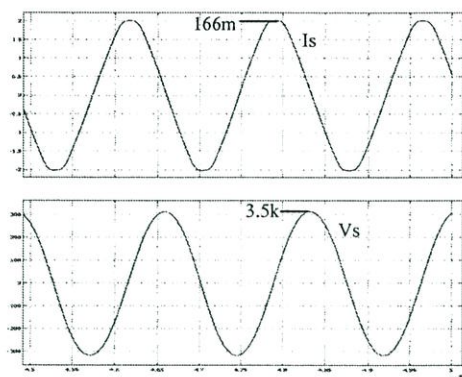
(ก)



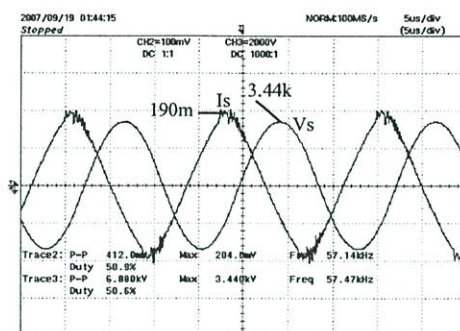
(ข)

รูปที่ 5.36 สัญญาณกระแส ( $i_p$ ) และแรงดัน ( $v_p$ ) ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง

(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ที่ความถี่สวิทซ์ 57.5 kHz

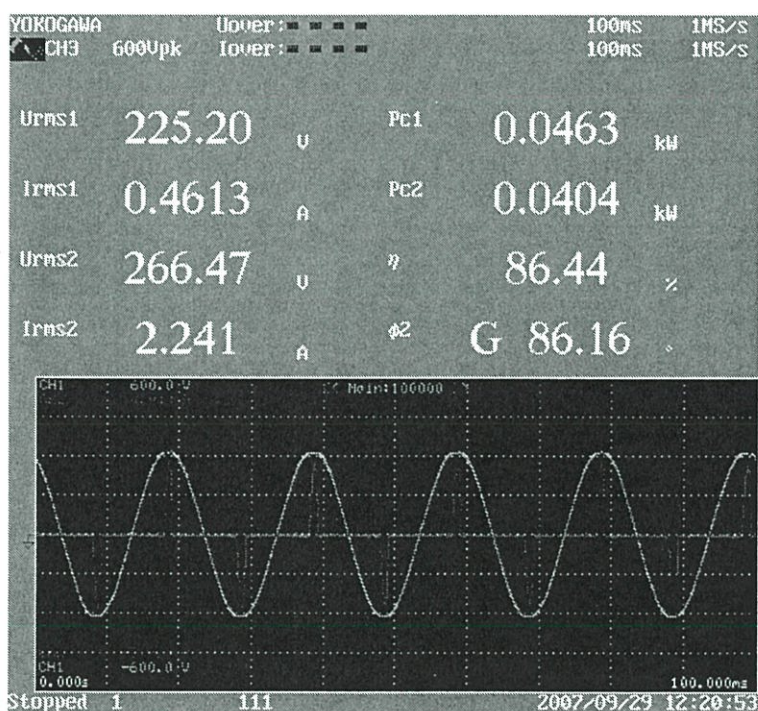


(ก)



(ข)

รูปที่ 5.37 สัญญาณกระแส ( $i_s$ ) และแรงดัน ( $v_s$ ) ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง  
(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ที่ความถี่สวิตชิง 57.5 kHz

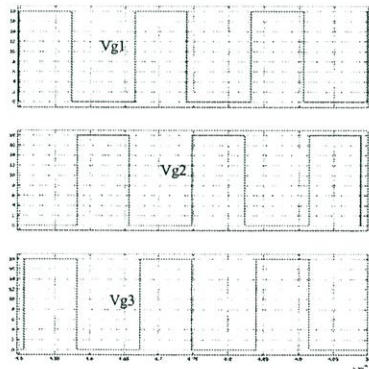


รูปที่ 5.38 สัญญาณอินพุทกระแสและแรงดันของระบบ โดยวัดกำลังทางด้านอินพุท(Pc1) และกำลังทางด้านเอาต์พุท(Pc2) ที่ความถี่สวิตชิง 57.5 kHz

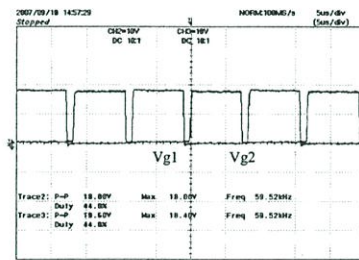
ที่ความถี่สวิตชิง 57.5 kHz กำหนดสัญญาณขั้วเกิดของมอสเฟตในกึ่งเดียวกันคือ  $M_1$  และ  $M_2$  ให้มีเฟสตรงข้ามกันและมีช่วงเวลาเดธไทม์ 5 % ของคาบเวลาเท่ากับ  $0.87 \mu\text{s}$  เพื่อป้องกันการลัดวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง จากช่วงเวลา turn on และ turn off ของมอสเฟตในกึ่งเดียวกัน การปรับมุมต่างเฟสสัญญาณขั้วเกิดของกลุ่มมอสเฟต  $M_1$  และ  $M_2$  สามารถทำให้ความกว้างของ

สัญญาณแรงดันทางด้านเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์มีขนาดตามที่ต้องการได้ โดยกำหนดมุมเลื่อนเฟสเท่ากับ  $36^\circ$  หรือ  $1.746 \mu s$  ดังแสดงในรูปที่ 5.33 ในรูปที่ 5.34 แสดงรูปสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมมอสเฟต  $M_1$  และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต  $M_1$  ผลจากการต่อตัวเก็บประจุรุ่มที่ขา d-s ของมอสเฟตทำให้แรงดันที่ตกคร่อมมอสเฟตขณะ turn off ไม่เพิ่มอย่างทันทีทันใดแต่จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตเปลี่ยนมาไหลผ่านตัวเก็บประจุส่งผลให้กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นที่มอสเฟตมีค่าต่ำ กระแสทางด้านลบเกิดจากการไหลของกระแสผ่านไดโอดภายในของมอสเฟตในช่วงเวลาฟรีวิล รูปที่ 5.35 แสดงรูปสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมมอสเฟต  $M_3$  และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต  $M_3$  จากการที่มอสเฟต  $M_3$  turn on ช้ากว่า  $M_1$  ทำให้กระแสที่ไหลผ่าน  $M_3$  เป็นกระแสขณะ turn on และขณะช่วงเวลาฟรีวิล จากรูปที่ 5.36 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสที่ไหลทางด้านปฐมภูมิ โดยผลจากทดลองได้ค่ากระแสใกล้เคียงกับผลจากการจำลองการทำงานและแรงดันอินพุตของหม้อแปลงเป็นรูป quasi-square wave ความกว้างพัลส์แรงดันมีขนาดกว้างขึ้นและขนาดกระแสมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับความถี่ที่ 55 kHz ในรูปที่ 5.37 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสที่ไหลทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง แรงดันทางด้านทุติยภูมิถูกรักษาระดับให้เท่ากับพิกัดด้วยการปรับความกว้างพัลส์ของแรงดันทางด้านปฐมภูมิ รูปที่ 5.38 แสดงค่าทางด้านอินพุตของเครื่องผลิตก๊าซไอโซนโดยรูป (ก) แสดงกำลังงานของเครื่อง ในรูป (ข) วัดสัญญาณฮาร์มอนิกสัรวมของกระแส และรูป (ค) แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสของเครื่อง

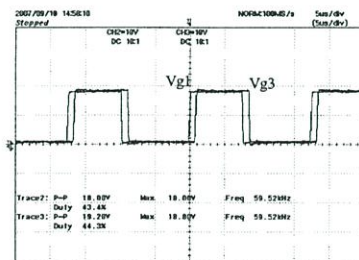
- ความถี่สวิตซ์ 60 kHz



(ก)

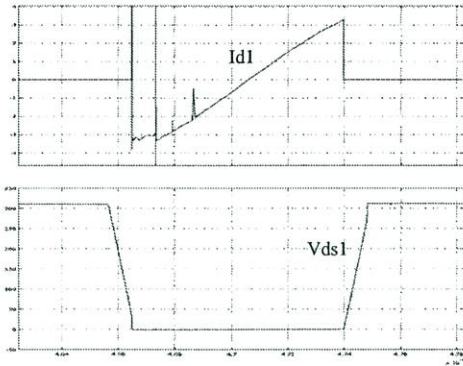


(ข)

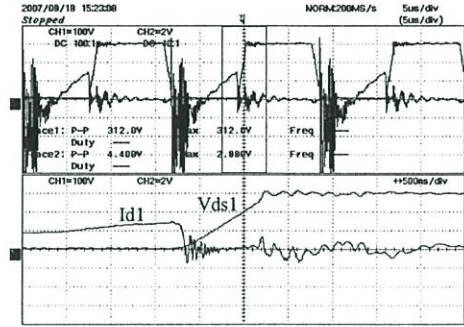


รูปที่ 5.39 สัญญาณขับเคลื่อนของมอสเฟต (ก) การจำลองการทำงาน  $M_1$   $M_2$  และ  $M_3$  ตามลำดับ

(ข) การทดลองบน คู่  $M_1$  และ  $M_2$ , ค่าคู่  $M_1$  และ  $M_3$  ที่ความถี่สวิตซ์ 60 kHz



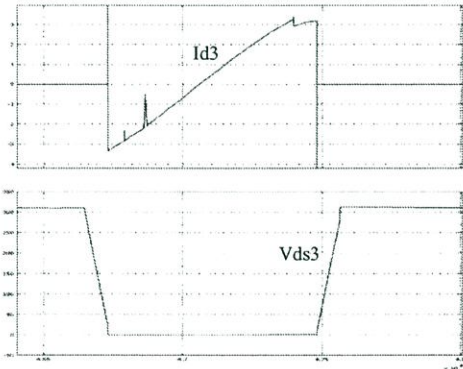
(ก)



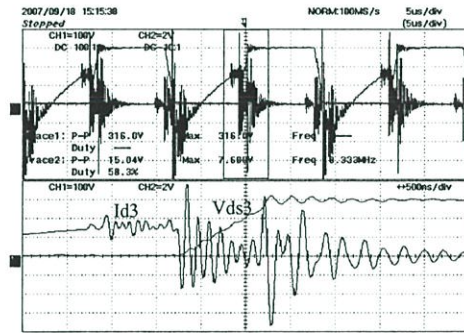
(ข)

รูปที่ 5.40 สัญญาณกระแส ( $i_{M1}$ ) และแรงดัน ( $v_{ds1}$ ) ที่ตกรวมมอสเฟต  $M_1$

(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ที่ความถี่สวิตซิ่ง 60 kHz



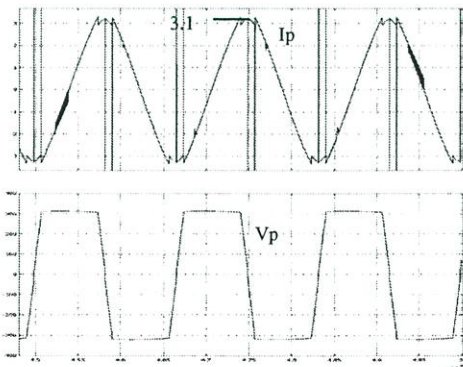
(ก)



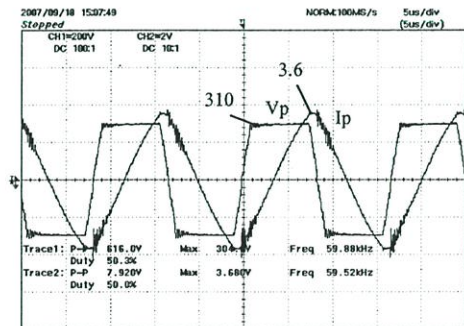
(ข)

รูปที่ 5.41 สัญญาณกระแส ( $i_{M3}$ ) และแรงดัน ( $v_{ds3}$ ) ที่ตกรวมมอสเฟต  $M_3$

(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ที่ความถี่สวิตซิ่ง 60 kHz



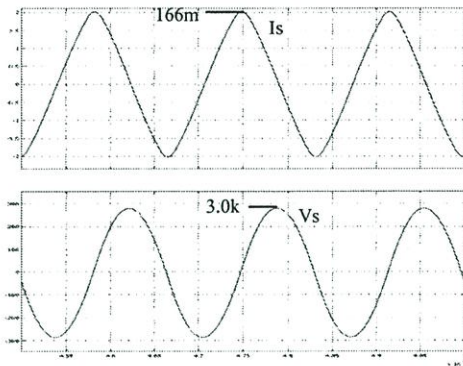
(ก)



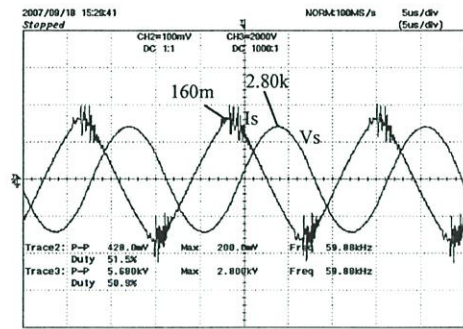
(ข)

รูปที่ 5.42 สัญญาณกระแส ( $i_p$ ) และแรงดัน ( $v_p$ ) ทางด้านปฏุมภูมิของหม้อแปลง

(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ที่ความถี่สวิตซิ่ง 60 kHz



(ก)

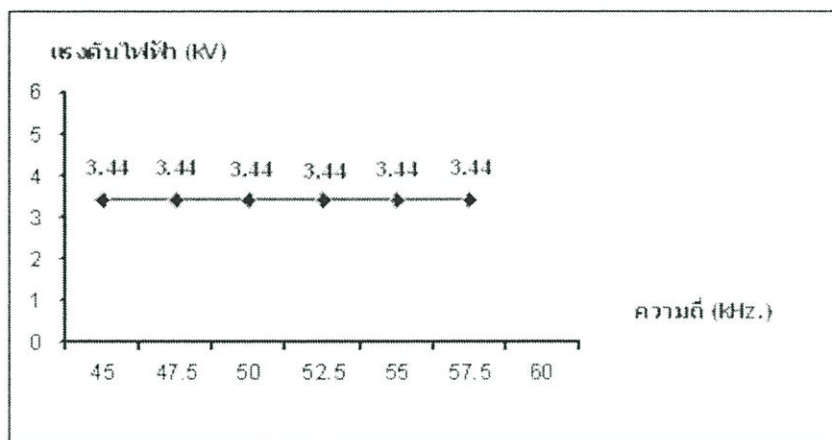


(ข)

รูปที่ 5.43 สัญญาณกระแส ( $i_s$ ) และแรงดัน ( $v_s$ ) ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง  
(ก) การจำลองการทำงาน (ข) การทดลอง ที่ความถี่สวิทซ์ 60 kHz

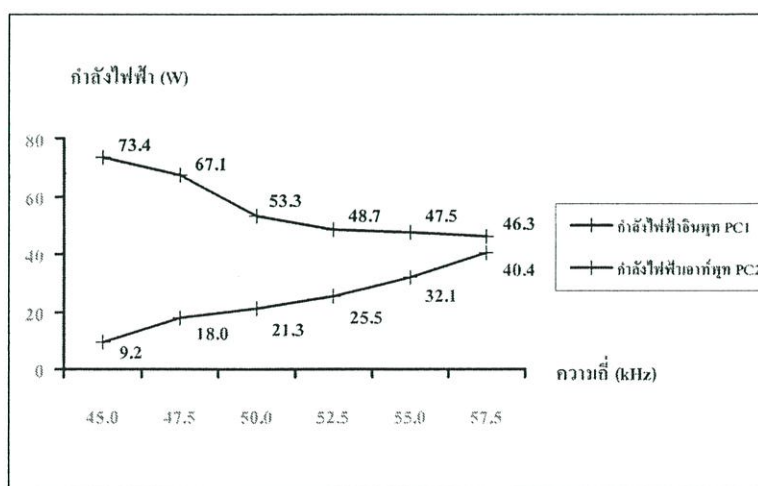
ที่ความถี่สวิทซ์ 60 kHz กำหนดสัญญาณขั้วเกิดของมอสเฟตในกิ่งเดียวกันคือ  $M_1$  และ  $M_2$  ให้มีเฟสตรงข้ามกันและมีช่วงเวลาเดธ ไทม์ 5 % ของคาบเวลาเท่ากับ  $0.833 \mu\text{s}$  เพื่อป้องกันการลัดวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง จากช่วงเวลา turn on และ turn off ของมอสเฟตในกิ่งเดียวกันการปรับมุมต่างเฟสสัญญาณขั้วเกิดของกลุ่มมอสเฟต  $M_1$  และ  $M_3$  สามารถทำให้ความกว้างของสัญญาณแรงดันทางด้านเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์มีขนาดตามที่ต้องการได้ โดยกำหนดมุมเลื่อนเฟสเท่ากับ  $18^\circ$  หรือ  $0.833 \mu\text{s}$  ดังแสดงในรูปที่ 5.39 ในรูปที่ 5.40 แสดงรูปสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมมอสเฟต  $M_1$  และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต  $M_1$  ผลจากการต่อตัวเก็บประจุรอมที่ขา d-s ของมอสเฟตทำให้แรงดันที่ตกคร่อมมอสเฟตขณะ turn off ไม่เพิ่มอย่างทันทีทันใดแต่จะค่อยๆเพิ่มขึ้นและกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตเปลี่ยนมาไหลผ่านตัวเก็บประจุส่งผลให้กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นที่มอสเฟตมีค่าต่ำ กระแสทางด้านลบเกิดจากการไหลของกระแสผ่านไดโอดภายในของมอสเฟตในช่วงเวลาฟรีวิล รูปที่ 5.41 แสดงรูปสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมมอสเฟต  $M_3$  และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต  $M_3$  จากการที่มอสเฟต  $M_3$  turn on ช้ากว่า  $M_1$  ทำให้กระแสที่ไหลผ่าน  $M_3$  เป็นกระแสขณะ turn on และขณะช่วงเวลาฟรีวิล จากรูปที่ 5.42 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสที่ไหลทางด้านปฐมภูมิ โดยผลจากการทดลองได้ค่ากระแสใกล้เคียงกับผลจากการจำลองการทำงานและแรงดันอินพุตของหม้อแปลงเป็นรูป square wave ความกว้างพัลส์แรงดันมีขนาดกว้างสูงสุดแต่ขนาดกระแสอินพุตมีค่าเท่ากับกระแสอินพุตที่ความถี่ 57.5 kHz ในรูปที่ 5.43 แสดงสัญญาณแรงดันและกระแสที่ไหลทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง แรงดันทางด้านทุติยภูมิไม่สามารถรักษาระดับให้เท่ากับพิกัดได้เนื่องจากการปรับความกว้างพัลส์ของแรงดันทางด้านปฐมภูมิถูกปรับให้มีความกว้างสูงสุดแล้ว ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตที่ได้จึงมีขนาดลดลงขนาดกระแสจึงลดลง

จากการทดลองที่ผ่านมามีค่าที่วัดได้มาเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 5.44 เมื่อทำการเปลี่ยนความถี่ให้สูงขึ้นแรงดันเอาต์พุตของหม้อแปลงลดลง ดังนั้นจึงต้องปรับความกว้างพัลส์แรงดันที่ป้อนให้หม้อแปลงทางด้านอินพุตให้กว้างขึ้นเพื่อชดเชยแรงดันเอาต์พุตให้คงที่



รูปที่ 5.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง

รูปที่ 5.45 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์ที่เปลี่ยนไปเมื่อทำการปรับเปลี่ยนความถี่สวิตช์ โดยแสดงเปรียบเทียบระหว่างกำลังงานทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของเครื่องผลิตก๊าซไอโซนที่ความถี่ 45 kHz, 47.5 kHz, 50 kHz, 52.5 kHz, 55 kHz และ 57.5 kHz เนื่องจากที่ความถี่ 60 kHz ไม่สามารถรักษาระดับแรงดันให้คงที่และวัดปริมาณก๊าซไอโซนไม่ได้จึงไม่นำมาแสดงในกราฟ



รูปที่ 5.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุต (Pc1) และเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ (Pc2) เมื่อเปลี่ยนความถี่สวิตช์

### 5.3 การเก็บผลก๊าซโอโซนโดยการทดสอบทางเคมี

จากบทวิเคราะห์ที่ผ่านมาการผลิตก๊าซโอโซน โดยสามารถปรับระดับปริมาณการเกิดก๊าซได้จะอาศัยกระบวนการการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขั้วตัวนำของชุดอิเล็กโทรด โดยสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ 3.5 kV เพื่อให้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงจุดที่ทำให้เกิดพลังงานไอออนไนเซชัน ซึ่งเครื่องผลิตก๊าซโอโซนต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถเปลี่ยนแปลงความถี่โดยสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชุดอิเล็กโทรดให้คงที่ได้ ดังนั้นการเก็บผลปริมาณการเกิดก๊าซโอโซนจะใช้วิธีการเปลี่ยนความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้อิเล็กโทรดและรักษาระดับแรงดันให้คงที่จากนั้นจึงวัดผลการเกิดก๊าซโอโซนโดยใช้วิธีการทางเคมีที่เรียกว่า การไตเตรท (Titrate) [ภาคผนวก ก] การวัดผลโอโซนจะใช้วิธีการบันทึกผลจำนวนหยดของสารเคมี  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายโปแตสเซียมไอโอไดด์ KI ที่ผ่านกระบวนการแพร่กระจายของก๊าซโอโซน จากนั้นนำมาคำนวณโดยใช้สมการ (5.1) เพื่อหาค่าปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น

$$0.1\text{N} \times \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \text{ 1mL} = 2.4 \text{ mgO}_3 \quad (5.1)$$

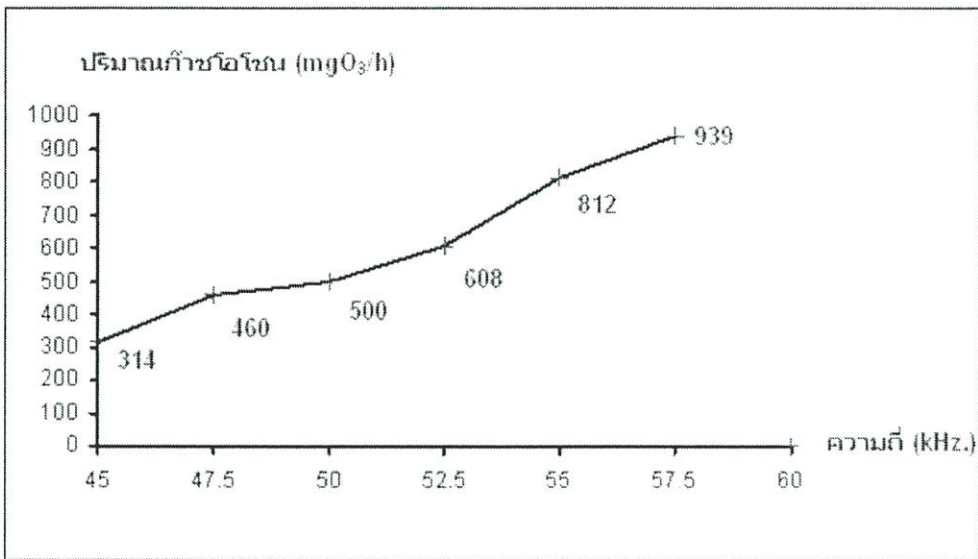
เมื่อ  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  คือ สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต  
 $\text{mgO}_3$  คือ ปริมาณการเกิดก๊าซโอโซน

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าระดับปริมาณก๊าซโอโซนเมื่อนำจำนวนหยดสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตในแต่ละความถี่มาคำนวณโดยใช้สมการที่ 5.1 จากนั้นนำมาคูณด้วยเวลาเพื่อเทียบเป็นปริมาณต่อเวลา โดยในการทดสอบเครื่องทำงานเป็นเวลา 2 นาทีดังนั้นจึงคูณด้วย 30 จะได้เป็นจำนวนปริมาณก๊าซต่อ 1 ชั่วโมง ทำการทดสอบสองครั้งต่อความถี่แล้วหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 5.1 แสดงผลปริมาณการเกิดก๊าซโอโซนเทียบกับความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

ความถี่ (kHz)	ปริมาณก๊าซโอโซน ( $\text{mgO}_3/\text{hr}$ )		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ค่าเฉลี่ย
45	311	317	314
47.5	455	465	460
50	501	498	500
52.5	602	615	608
55	816	809	812
57.5	933	946	939

จากตารางที่ 5.1 นำค่าปริมาณก๊าซโอโซนและความถี่ไฟฟ้ามาเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 5.46



รูปที่ 5.46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซโอโซนและความถี่ไฟฟ้า

## บทที่ 6

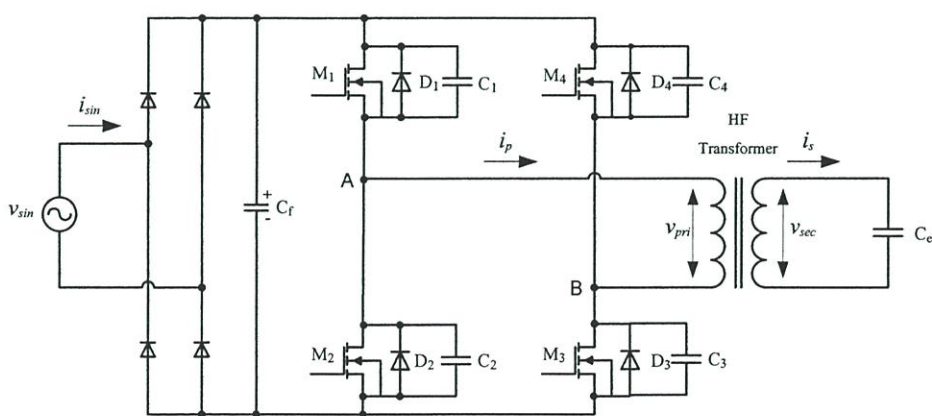
### การวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 6.1 บทนำ

จากบทที่ 5 สามารถวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อให้สามารถเข้าใจการทำงานของเครื่องผลิตก๊าซไอโซนได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยการวิเคราะห์ผลการทดลองทางไฟฟ้าถึงรูปสัญญาณกระแสและแรงดันที่จุดต่างๆ อธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานทางด้านอินพุตและเอาต์พุตเมื่อทำการปรับเปลี่ยนความถี่ จากนั้นวิเคราะห์ผลปริมาณการเกิดก๊าซไอโซน การเปลี่ยนแปลงความถี่ไฟฟ้ามีต่อปริมาณการเกิดก๊าซไอโซนอย่างไร

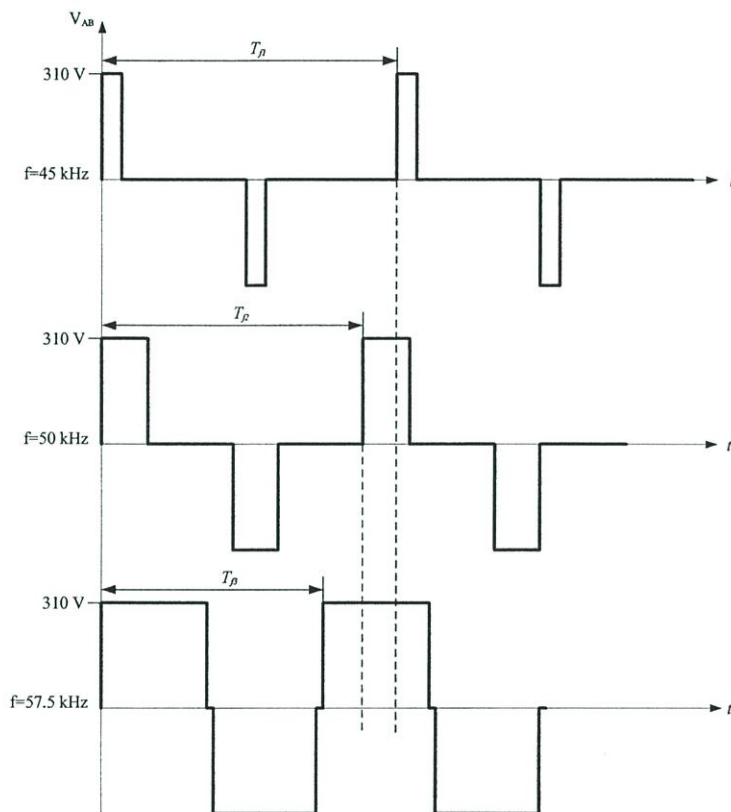
#### 6.2 วิเคราะห์ผลการทดลองทางไฟฟ้า

จากรูปที่ 6.1 แสดงวงจรกำลังของคอนเวอร์เตอร์ต่ออยู่ทางด้านเอาต์พุต โหลดของหม้อแปลงความถี่สูงคือตัวเก็บประจุเสมือน ( $C_c$ ) ซึ่งถูกแสดงแทนอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์ฟอร์มเมอร์แบบสองขั้วจำนวน 2 ขั้ว ในกรณีที่เพิ่มความถี่แรงดันไฟฟ้า ( $V_{sec}$ ) ที่ตกคร่อม  $C_c$  ทำให้กระแสที่ไหลผ่าน  $C_c$  มีขนาดสูงขึ้นโดยมีข้อแม้ว่าระดับแรงดัน  $V_{sec}$  ต้องมีขนาดคงที่ การเพิ่มความถี่ของแรงดัน  $V_{sec}$  ทำให้โดยการเพิ่มความถี่สวิทช์ชิ่งของคอนเวอร์เตอร์ ทำให้แรงดันปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูง ( $V_{pri}$ ) มีค่าความถี่สูงขึ้น ส่งผลให้  $V_{sec}$  มีความถี่สูงขึ้นเช่นกัน แต่เมื่อพิจารณาวงจรสมมูลของหม้อแปลงความถี่สูงจะเห็นว่า เมื่อความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้ขดลวดปฐมภูมิมี่ค่าสูงขึ้น ทำให้แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิมีค่าลดลงเนื่องจากผลของค่าความเหนี่ยวนำที่จะมีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น ดังนั้นเมื่อเพิ่มความถี่ของแรงดันไฟฟ้าแล้วจำเป็นต้องเพิ่มขนาดของแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิด้วยเช่นกัน



รูปที่ 6.1 วงจรกำลังเฟสชิ่งฟูล-บริดจ์แบบลิแวม์ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

การเพิ่มขนาดของแรงดันทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงใช้วิธีปรับความกว้างพัลส์แรงดันไฟฟ้ารูปสี่เหลี่ยมให้กว้างขึ้น หรือค่าเปอร์เซ็นต์ดีวตี้ไซเคิลสูงขึ้นนั่นเอง การปรับความกว้างพัลส์ของแรงดันใช้วิธีการเลื่อนเฟสขั้วสัญญาณของคู่การทำงานของมอสเฟตกำลังให้เหลื่อมกันทำให้แรงดันจากแหล่งจ่ายไม่สามารถปรากฏขึ้นที่ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงได้



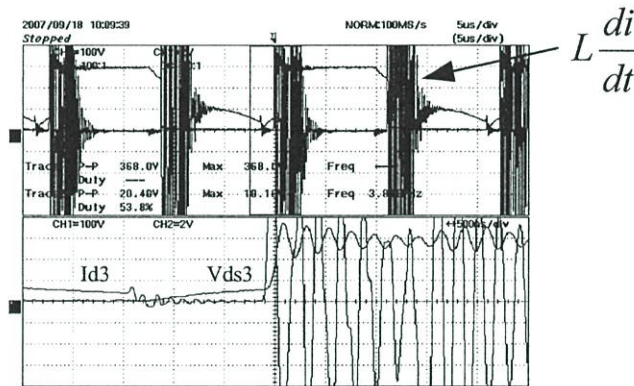
รูปที่ 6.2 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณแรงเอาต์พุต  $V_{AB}$  เมื่อเปลี่ยนความถี่สวิตช์

จากผลการทดลองที่ความถี่ 45 kHz. ซึ่งเป็นความถี่เริ่มต้นที่ใช้ในการทดสอบและเป็นความถี่ที่สูงกว่าความถี่รีโซแนนท์ เนื่องจากต้องการให้มอสเฟตมีสถานะการสวิตช์ที่มีการสูญเสียต่ำเพราะการสวิตช์ที่ความถี่สูงกว่าความถี่รีโซแนนท์จะทำให้กระแสล่าหลังแรงดัน ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อมมอสเฟตลดลงเป็นศูนย์ก่อนที่กระแสขั้วจะไหลผ่านมอสเฟต ผลคูณกระแสและแรงดันที่มอสเฟตจึงเป็นศูนย์

ในรูปที่ 6.2 แสดงการเปรียบเทียบรูปสัญญาณกระแสและแรงดันทางด้านเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์เมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ โดยที่ความถี่ที่ 45 kHz. ปรับความกว้างพัลส์แรงดันที่ป้อนให้หม้อแปลงความถี่สูงเท่ากับ 8% Duty Cycle ขนาด 310 V<sub>peak</sub> ได้แรงดันเอาต์พุตทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเท่ากับ 3.5 kV แต่ที่วัดได้ในออสซิลอสโคปอ่านค่าได้ 3.44 k เป็นผลมาจากเออร์

เรอร์ของย่านการวัดสูงๆ ของเครื่องมือวัด ที่เป็นเช่นนี้ด้วยเพราะเมื่อป้อนแรงดันรูปสี่เหลี่ยมที่ความถี่เข้าใกล้ความถี่รีโซแนนท์ ผลรวมแรงดันเอาต์พุตเท่ากับแรงดันที่ความถี่มูลฐานบวกกับแรงดันที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆ เพราะความถี่ที่ฮาร์โมนิกส์ลำดับต้นๆ ถูกลดทอนด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของระบบลงไปถึงเล็กน้อยนั่นเอง แต่เมื่อเพิ่มความถี่สวิตช์สูงขึ้นไป ดังเช่นที่ความถี่ 50 kHz แรงดันที่ความถี่มูลฐานและความถี่ฮาร์โมนิกส์ถูกลดทอนด้วยอิมพีแดนซ์ของระบบมากขึ้น ดังนั้นจึงต้องปรับความกว้างพัลส์แรงดันให้กว้างขึ้นเพื่อชดเชยขนาดของแรงดันทางด้านเอาต์พุตให้คงที่ที่ 3.5 kV

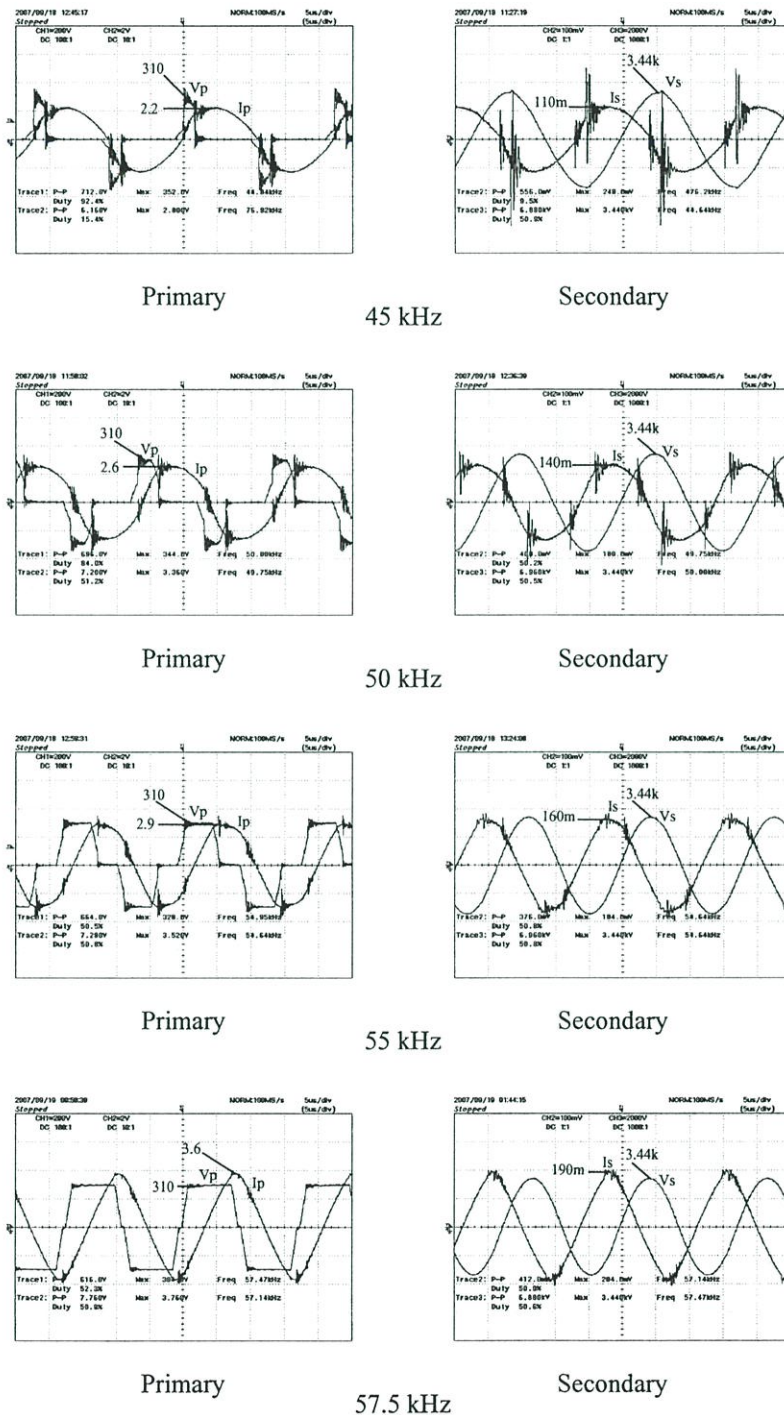
ที่ความถี่ 57.5 kHz ทำการปรับความกว้างพัลส์แรงดันอินพุตของหม้อแปลงความถี่สูงไว้ที่ค่าสูงสุดนั่นคือ 45% Duty Cycle จึงจะสามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตของหม้อแปลงให้คงที่ที่ 3.5 kV ได้ ดังนั้นเมื่อเพิ่มความถี่สวิตช์ขึ้นเป็น 60 kHz ไม่สามารถปรับความกว้างพัลส์ของแรงดันได้อีก แรงดันเอาต์พุตจึงตกลงไม่ถึง 3.5 kV เมื่อเปรียบเทียบผลกับการจำลองการทำงานได้ผลใกล้เคียงกัน



รูปที่ 6.3 แสดงสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นเมื่อทำการวัดสัญญาณแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมในวงจรเพื่อวัดหาค่ากระแส

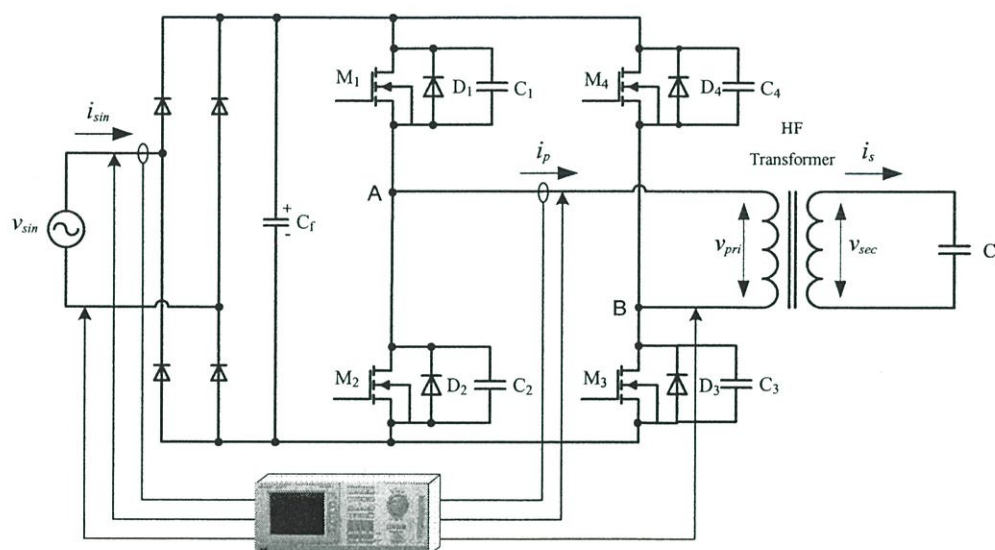
ในการวัดสัญญาณกระแส ณ จุดต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้วิธีการต่อตัวต้านทานค่า 0.1Ω อนุกรมเข้าไปในเส้นทางที่กระแสไหลผ่าน จากนั้นจึงวัดแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานแล้วหารด้วย 0.1 จึงได้เป็นกระแสออกมา ในทางปฏิบัติตัวต้านทานจะมีค่าความเหนี่ยวนำแฝงประกอบอยู่ด้วยเนื่องจากโครงสร้างทางกายภาพที่ทำจากขดลวดตัวนำ เมื่อนำมาใช้ในงานที่มีความถี่สูงตัวต้านทานจึงถูกเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กที่แพร่ออกมาได้ง่าย จากความสัมพันธ์  $V_L = L \frac{di}{dt}$  ถ้าค่าความเหนี่ยวนำแฝง(L) มีค่ามาก  $V_L$  ก็จะมีค่ามากตามไปด้วย หรือถ้าใช้งานที่ความถี่สูงมากๆ (เวลา t น้อย)  $V_L$  ก็จะมีค่ามากเช่นกัน ดังนั้นเมื่อทำการวัดแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานก็จะได้รูปแรงดัน

ระหว่างกระแสความต้านทาน บวกกับแรงดันเหนี่ยวนำ ( $V_L$ ) ของค่าความเหนี่ยวนำแฝง ดังแสดงในรูปที่ 6.3



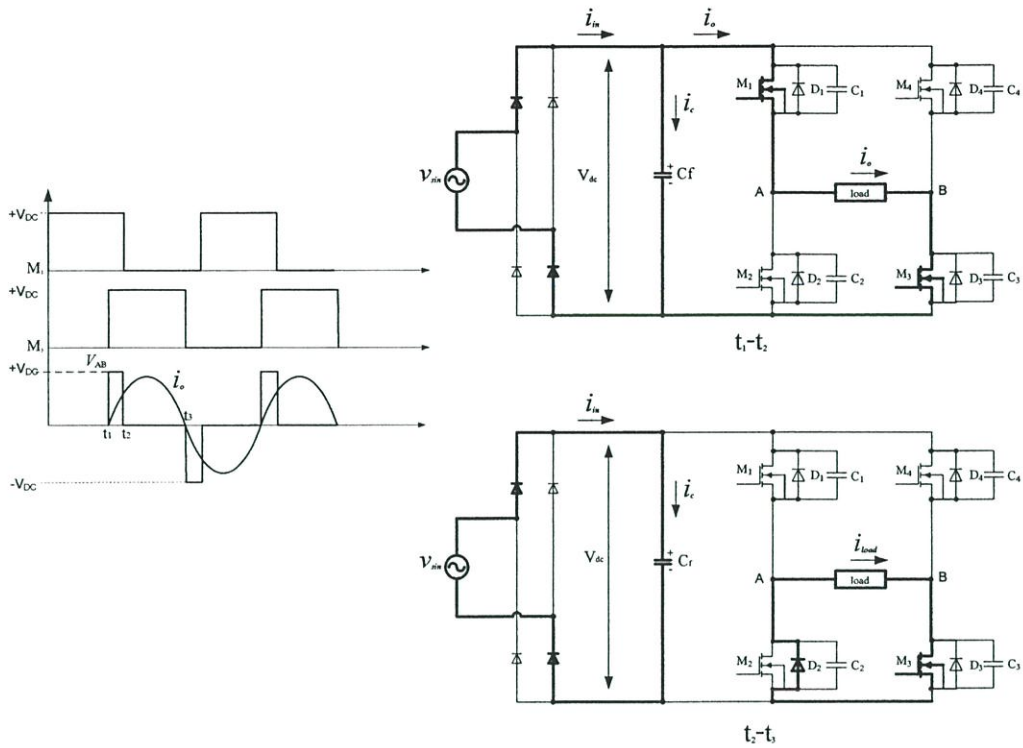
รูปที่ 6.4 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณกระแสและแรงดันของหม้อแปลงความถี่สูง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความถี่

ภาระทางไฟฟ้าของเครื่องผลิตก๊าซไอโซนก็คือชุดอิเล็กทรอนิกส์ทรานซอร์มเมอร์แบบสองขั้วกันรวมจำนวน 2 ชั้น ซึ่งถูกมองเสมือนเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อเปลี่ยนความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้ชุดอิเล็กทรอนิกส์ให้สูงขึ้นทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอิเล็กทรอนิกส์ทรานซอร์มเมอร์มีค่าสูงขึ้น โดยที่แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงที่ความถี่ต่างๆ มีค่าคงที่ 3.5 kV ที่ความถี่ 45 kHz กระแสทางด้านปฐมภูมิเท่ากับ 2.2 A ทางด้านทุติยภูมิ 0.11 A ที่ความถี่ 50 kHz กระแสทางด้านปฐมภูมิเท่ากับ 2.6 A ทางด้านทุติยภูมิ 0.14 A ที่ความถี่ 55 kHz กระแสทางด้านปฐมภูมิเท่ากับ 2.9 A ทางด้านทุติยภูมิ 0.16 A ที่ความถี่ 57.5 kHz กระแสทางด้านปฐมภูมิเท่ากับ 3.6 A ทางด้านทุติยภูมิ 0.19 A ดังแสดงในรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.5 แสดงการวัดกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ โดยใช้เครื่องวัด YOKOGAWA รุ่น PZ4000

วิธีการวัดกำลังไฟฟ้าจะใช้เครื่องวัด PZ4000 วัดกระแสและแรงดันทางด้านอินพุตที่ Line 50 Hz จากระบบของการไฟฟ้า และทางด้านเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ โดยเครื่องวัดนี้สามารถคำนวณพิกัดกำลังไฟฟ้าได้ทันทีโดยไม่ต้องนำค่ามาคำนวณภายนอก ดังแสดงในรูปที่ 6.5

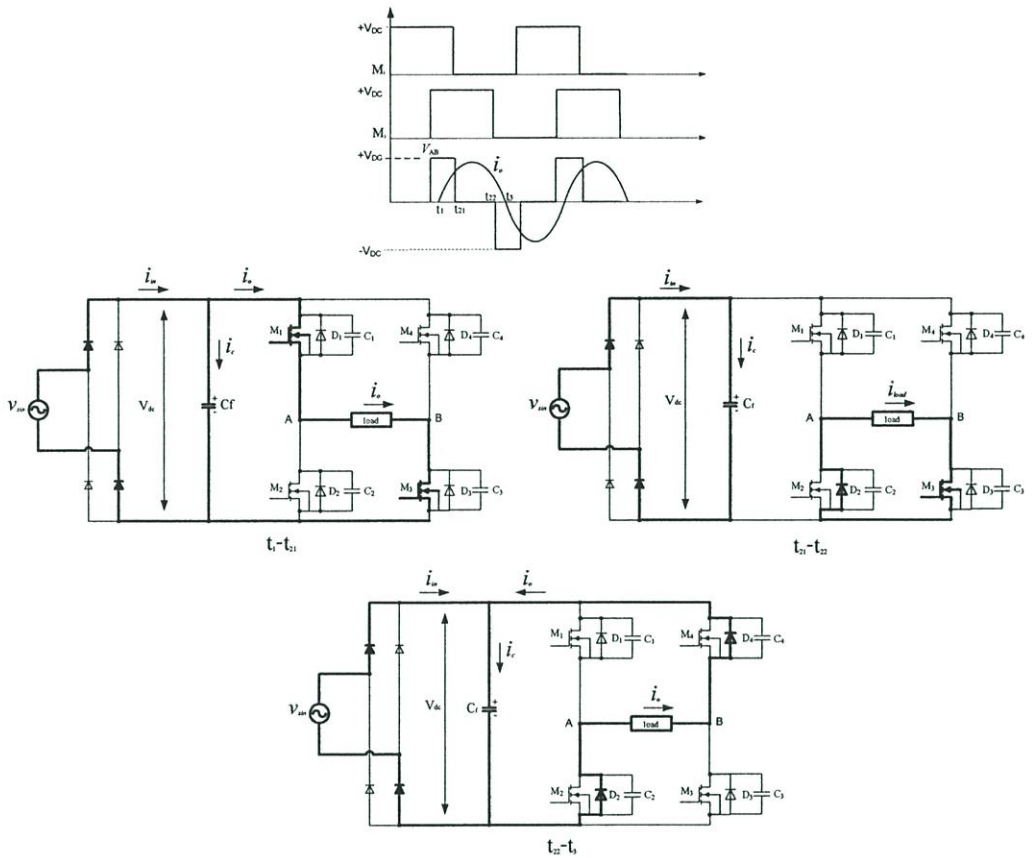


รูปที่ 6.6 แสดงวงสมมูลทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ความถี่สวิตช์ 45 kHz

ที่ความถี่ 45 kHz วัดกำลังงานด้านอินพุตได้ 73.4 W และด้านเอาต์พุตได้ 9.2 W ที่ความถี่นี้ ความกว้างพัลส์แรงดันเอาต์พุต  $V_{AB}$  ของคอนเวอร์เตอร์มีค่าน้อยที่สุดเนื่องจากความถี่สวิตช์เข้าใกล้ความถี่รีโซแนนท์ ดังนั้นกำลังงานทางด้านเอาต์พุตจึงมีค่าน้อยเช่นกัน จากความสัมพันธ์ในรูปที่ 6.6 อธิบายได้ดังนี้

ที่เวลา  $t_1-t_2$  มอสเฟต  $M_1$  และ  $M_3$  turn on กระแส  $i_o$  ไหลผ่าน  $M_1$  ไปสู่ load ไปสู่  $M_3$  กลับสู่แหล่งจ่าย โดยที่กระแสจากแหล่งจ่าย ( $i_{in}$ ) เท่ากับ กระแสชาร์จ  $C_f(i_c)$  บวกกับกระแสโหลด  $i_o$

ที่เวลา  $t_2-t_3$  มอสเฟต  $M_1$  turn off กระแส  $i_o$  ไหลอยู่ภายในวงรอบปิดของคอนเวอร์เตอร์ กำลังงานสูญเสียเกิดขึ้นที่  $D_2$  และ  $M_3$  กระแส  $i_{in}$  เท่ากับ  $i_c$



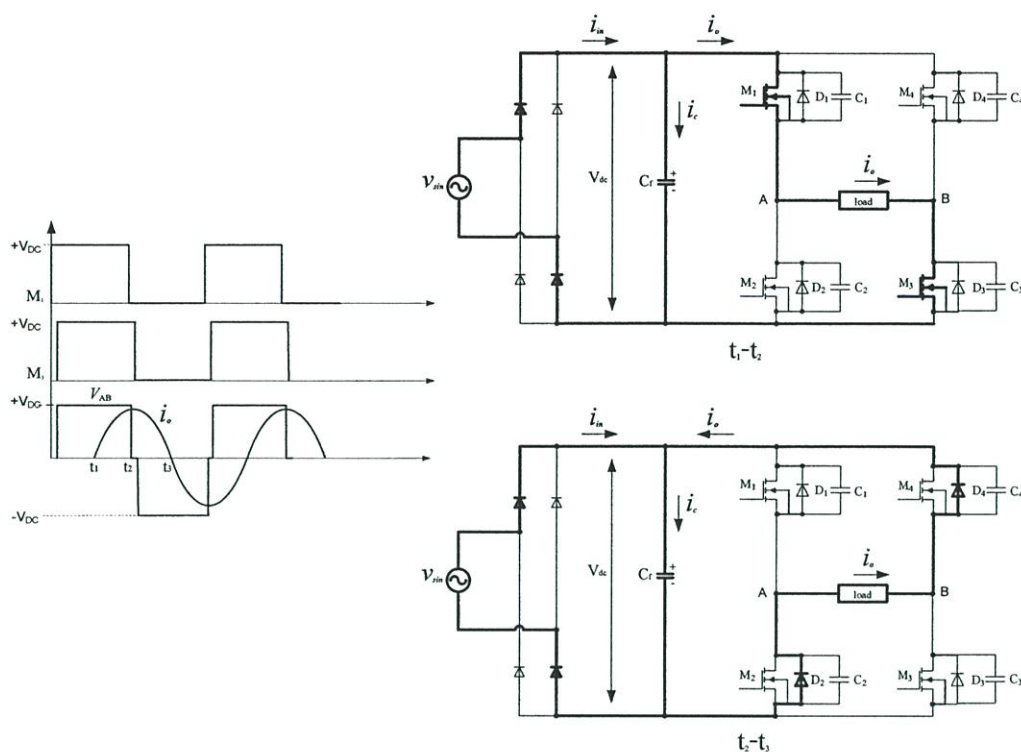
รูปที่ 6.7 แสดงวงสุมมูลทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ความถี่สวิตช์ 50 kHz

ในกรณีเพิ่มความถี่สวิตช์สูงขึ้นเป็น 50 kHz มุมต่างเฟสระหว่างกระแสจะล้าหลังแรงดันมากขึ้น แต่ในขณะที่เดียวกันขนาดของกระแสก็มีค่าสูงขึ้นเนื่องจาก โหลดของหม้อแปลงความถี่สูงคือตัวเก็บประจุ เมื่อปรับความกว้างพัลส์แรงดันปฐมภูมิของหม้อแปลงกว้างขึ้นทำให้กำลังไฟฟ้าสูงขึ้นด้วยเช่นกัน วัดกำลังงานด้านอินพุตได้ 53.3 W และด้านเอาต์พุตได้ 21.3 W พิจารณารูปที่ 6.7 เมื่อปรับความถี่สวิตช์เท่ากับ 50 kHz อธิบายความสัมพันธ์ได้ดังนี้

ที่เวลา  $t_1-t_1$  มอสเฟต  $M_1$  และ  $M_3$  turn on กระแส  $i_o$  ไหลผ่าน  $M_1$  ไปสู่ load ไปสู่  $M_3$  กลับสู่แหล่งจ่าย โดยที่กระแสจากแหล่งจ่าย ( $i_{in}$ ) เท่ากับ กระแสชาร์จ  $C_f(i_c)$  บวกกับกระแสไหล  $i_o$

ที่เวลา  $t_{21}-t_{22}$  มอสเฟต  $M_1$  turn off กระแส  $i_o$  ไหลอยู่ภายในวงรอบปิดของคอนเวอร์เตอร์ กำลังงานสูญเสียเกิดขึ้นที่  $D_2$  และ  $M_3$  กระแส  $i_{in}$  เท่ากับ  $i_c$

ที่เวลา  $t_{22}-t_3$  มอสเฟต  $M_3$  turn off กระแส  $i_o$  ไหลผ่าน  $D_4$  กลับมาชาร์จ  $C_f$  ไหลผ่าน  $D_2$  กรบวงรอบคืนพลังงาน ดังนั้น  $i_{in}$  เท่ากับ  $i_c$  ลบ  $i_o$  ทำให้กำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตจาก Line 50 Hz มีค่าลดลง



รูปที่ 6.8 แสดงวงสมมูลทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ความถี่สวิตช์ 57.5 kHz

ที่ความถี่สวิตช์สูงสุดจากการทดลองคือ 57.5 kHz มุมล่าหลังของกระแสต่อแรงดันทางด้านเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์มีค่ามากที่สุด และความกว้างพัลส์ของแรงดันก็มีขนาดกว้างที่สุดเช่นกัน จากการทดลองที่ความถี่นี้กระแสไหลดมีค่าสูงที่สุด ดังนั้นพิกัดกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์จึงมีค่าสูงสุดวัดกำลังงานด้านอินพุตได้ 46.3 W และด้านเอาต์พุตได้ 40.4 W รูปที่ 6.8 อธิบายการทำงานได้ดังนี้

ที่เวลา  $t_1-t_2$  มอสเฟต  $M_1$  และ  $M_3$  turn on กระแส  $i_o$  ไหลผ่าน  $M_1$  ไปสู่ load ไปสู่  $M_3$  กลับสู่แหล่งจ่าย โดยที่กระแสจากแหล่งจ่าย ( $i_m$ ) เท่ากับ กระแสชาร์จ  $C_f(i_c)$  บวกกับกระแสไหล  $i_o$

ที่เวลา  $t_2-t_3$  มอสเฟต  $M_1$  และ  $M_3$  turn off กระแส  $i_o$  ไหลผ่าน  $D_4$  กลับมาชาร์จ  $C_f$  ไหลผ่าน  $D_2$  ครอบวงจรอินพุตพลังงาน ดังนั้น  $i_m$  เท่ากับ  $i_c$  ลบ  $i_o$  ทำให้กำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตจาก Line 50 Hz มีค่าลดลงมากที่สุดเมื่อความถี่สวิตช์มีค่าเท่ากับ 57.5 kHz เนื่องจากกระแสไหล  $i_o$  มีค่ามากขึ้น โดยที่ กำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตกลับเพิ่มขึ้นจากเหตุผลที่ได้อธิบายไว้ แต่ทั้งนี้ในทุกความถี่ที่ได้ทำการทดสอบ กำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตของคอนเวอร์เตอร์มีค่ามากกว่าทางด้านเอาต์พุตเสมอ ซึ่งถูกต้องและเป็นไปตามหลักการ

### 6.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองทางเคมี

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อน แกนร่วมฉนวน 2 ชั้น โดยเริ่มต้นที่ความถี่ 45 kHz., 47.5 kHz., 50 kHz., 52.5 kHz., 55 kHz. และ 57.5 kHz. และสามารถรักษาระดับแรงดันให้คงที่ได้ 3.5 kV. สามารถที่จะทำให้ปริมาณก๊าซโอโซนที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มสูงขึ้น จากตารางที่ 5.1 เมื่อปรับความถี่ที่ 45 kHz. สามารถผลิตก๊าซโอโซนได้ 314 mg O<sub>3</sub>/hr. แต่เมื่อเพิ่มความถี่ให้สูงขึ้นเป็น 47.5 kHz. ปริมาณก๊าซโอโซนก็เพิ่มขึ้นเป็น 460 mg O<sub>3</sub>/hr. และเมื่อเพิ่มความถี่สูงขึ้นไปจนถึง 57.5 kHz. ปริมาณก๊าซโอโซนก็เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึง 939 mg O<sub>3</sub>/hr. จากนั้นเมื่อเพิ่มความถี่เป็น 60 kHz. ไม่สามารถวัดปริมาณก๊าซโอโซนได้เนื่องจากที่ความถี่ 60 kHz. แรงดันไฟฟ้าตกลงเหลือ 2.8 kV ทำให้อิเล็กตรอนของโมเลกุลก๊าซได้รับพลังงานไม่ถึงพลังงานไอออไนเซชัน จึงไม่เกิดการแตกตัวของโมเลกุลก๊าซและไม่เกิดก๊าซโอโซนขึ้น

## บทที่ 7

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีการปล่อยน้ำเสียหรืออุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการผลิตน้ำดื่มมักใช้สารเคมีมีพิษในการกำจัดเชื้อโรคในน้ำ แต่จากปัญหาสภาพแวดล้อมที่มีความเป็นพิษต่างๆ ส่วนมากเกิดจากการปล่อยมลพิษในอุตสาหกรรมการผลิต เนื่องจากในหลายประเทศกำลังพัฒนายังไม่มีเทคโนโลยีขั้นสูงในการใช้งาน ดังนั้นจึงมีการตื่นตัวในการลดการใช้สารเคมีมีพิษและหาวิธีการอื่นหรือสารเคมีทดแทนมาใช้งาน

ก๊าซโอโซน (Ozone Gas) เป็นสารเคมีชนิดหนึ่งที่มีความเป็นพิษสูงสามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสียหรือใช้ฆ่าเชื้อโรคในผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริโภคโดยใช้แทนสารเคมีมีพิษ เช่น สารคลอรีนได้ แต่ข้อดีของก๊าซโอโซนคือ สะลายตัวได้ง่ายและรวดเร็วโดยไม่เหลือความเป็นพิษตกค้าง สามารถผลิตได้ง่ายเพียงแต่เข้าใจคุณสมบัติการเกิดของก๊าซอย่างเพียงพอ ซึ่งโดยส่วนใหญ่ใช้สนามแม่ไฟฟ้าเป็นตัวการสร้างก๊าซขึ้น วิธีการนั้นใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าป้อนให้ชุดอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อสร้างสนามไฟฟ้า จากนั้นจึงปล่อยให้อากาศไหลผ่านสนามไฟฟ้า ก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) จะแตกตัวออกเป็น โมเลกุลอิสระ ( $O$ ) และรวมตัวกันใหม่กลายเป็นก๊าซโอโซนเกิดขึ้น

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในงานผลิตก๊าซโอโซนขนาดใหญ่ จะใช้แหล่งจ่ายแบบฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ เพราะสามารถจ่ายกำลังได้สูงและการใช้งานความถี่สวิตซ์ซึ่งที่สูง สามารถลดขนาดของเครื่องให้เล็กลงได้ เหตุผลอีกข้อคือ การเพิ่มความถี่ของสนามไฟฟ้าให้สูงขึ้นทำให้ปริมาณก๊าซโอโซนที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น แต่แหล่งจ่ายกำลังแบบนี้ค่อนข้างควบคุมกำลังไฟฟ้าได้ยากเพราะเมื่อมองภาระทางไฟฟ้าของโหลดเป็นอุปกรณ์แบบสะสมพลังงาน ทำให้อุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งของคอนเวอร์เตอร์ถูกบังคับให้ยังคงทำงานต่อไปแม้จะถูกสั่งให้หยุดทำงาน จากการผลัดกันกระแสให้ไหลต่อเนื่องของอุปกรณ์สะสมพลังงาน ผลที่ตามมาคือความกว้างพัลส์ของแรงดันจะมีค่ามากที่สุด ซึ่งอาจทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าวิกฤตและเกิดการเบรกดาวนได้ ส่งผลให้เกิดความร้อนและก๊าซโอโซนก็จะสลายตัวเร็วขึ้น ค่าประสิทธิภาพของเครื่องก็จะมีค่าลดต่ำลง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการกำหนดสัญญาณขั้วเกิดของมอสเฟตในฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ โดยใช้การเลื่อนเฟสขั้วสัญญาณเกิดคู่การทำงานของมอสเฟต ส่งผลให้คอนเวอร์เตอร์มีวงรอบการคืนพลังงานจากโหลดที่เป็นอุปกรณ์สะสมพลังงาน ในช่วงเวลาที่เกิดวงรอบการคืนพลังงานแรงดันทางด้านเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับศูนย์ แรงดันที่ตกคร่อมขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงจึงเป็นศูนย์ด้วย ดังนั้นจึงสามารถช่วยให้คอนเวอร์เตอร์สามารถรักษาระดับแรงดันที่ใช้สร้างสนามไฟฟ้า

ให้คงที่ที่ 3.5 kV เมื่อเปลี่ยนความถี่เป็น 45 kHz, 47.5 kHz, 50 kHz, 52.5 kHz, 55 kHz และ 57.5 kHz โดยการปรับความกว้างพัลส์แรงดันทางด้านเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ที่จ่ายให้ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงเพื่อเพิ่มแรงดันทางด้านทุติยภูมิให้สูงขึ้นและป้อนให้ชุดอิเล็กทรอนิกส์โดยสามารถปรับปริมาณก๊าซไอโซนได้ดังตารางที่ 5.1 ซึ่งแปรตามความถี่ของแรงดันไฟฟ้า ในขณะที่ความถี่ 60 kHz ไม่สามารถรักษาระดับแรงดันให้คงที่ที่พิกัดได้สาเหตุเพราะการปรับความกว้างพัลส์แรงดันถูกปรับจนสูงสุดแล้วจึงไม่สามารถชดเชยแรงดันต่อได้อีก การกำหนดความถี่สวิทซ์ซึ่งจะใช้หลักการของรีโซแนนท์คอนเวอร์เตอร์โดยการหาความถี่รีโซแนนท์ของวงจรได้ 45 kHz และกำหนดความถี่ สวิทซ์ให้สูงกว่าความถี่รีโซแนนท์เล็กน้อย ผลที่ได้คือคอนเวอร์เตอร์มีกำลังสูญเสียที่มอสเฟตมีค่าต่ำเนื่องจากคอนเวอร์เตอร์ทำงานที่สถานะสวิทซ์แรงดันเป็นศูนย์ ผลคูณกำลังงานสูญเสียในมอสเฟตจึงเป็นศูนย์

วิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์เป็นหนึ่งในหลายๆ วิธีที่ใช้ในการปรับระดับปริมาณการเกิดก๊าซไอโซนและยังมีวิธีการอื่นที่น่าสนใจซึ่งสามารถใช้ปรับระดับปริมาณก๊าซได้ เช่น วิธีการปรับจำนวนลูกคลื่นแรงดันที่ป้อนให้อิเล็กโทรด ซึ่งเมื่อนำมาใช้ร่วมกันก็จะสามารถปรับระดับปริมาณก๊าซได้กว้างขึ้น เพราะวิธีการเลื่อนเฟสนั้นมีขีดจำกัดในการรักษาระดับแรงดัน และอีกส่วนก็คือในงานที่แรงดันและความถี่สูง จำเป็นต้องใช้วัสดุฉนวนที่ทนแรงดันได้สูง และมีการป้องกันสนามแม่เหล็กครบถ้วนได้

## 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, Shengpei 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 คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543
- [7] สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528
- [8] ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล, เอกสารประกอบการเรียนวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี มหานคร, 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<sup>nd</sup> 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," IEE Proc.-Electr. Power Appl., November 2003, Vol. 150, No. 6, pp. 725-732
- [12] นรเศรษฐ พัฒนเดช, วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า เล่ม1, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550

## ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

การวิเคราะห์ปริมาณไอโซน

## การวิเคราะห์ปริมาณไอโชน

### 1. ขั้นตอนการเตรียมสารเคมีที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณไอโชน

1.1 สารละลายโปแตสเซียมไอโอไดด์ (2% KI)

- ละลายสาร โปแตสเซียมไอโอไดด์ (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 ดูดซึมก๊าซไอโชน (Absorption) จากเครื่องผลิตไอโชนลงในขวดรูปชมพู่ที่มีสารละลายโปแตสเซียมไอโอไดด์ละลาย (KI) กับน้ำกลั่นปริมาณ 100 มิลลิตร (mL) เป็นเวลา 1 นาที สารละลายที่ได้จะเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีเหลืองหรือสีส้ม

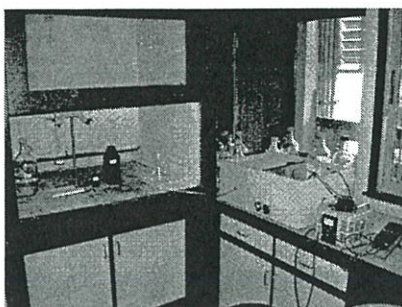
2.2 นำสารละลายที่ได้จากข้อ 2.1 มาปรับค่า pH โดยการนำสารละลายกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้น 1 N  $H_2SO_4$  ปริมาณ 3 มิลลิตร (mL) และเติมน้ำแป้ง 1 มิลลิตร (mL) (เป็นอินดิเคเตอร์) เติมลงไปนในสารละลายที่ได้จากข้อ 2.1 สารละลายจะเปลี่ยนสีจากสีเหลืองหรือสีส้ม จะกลายเป็นสีน้ำเงิน

2.3 นำสารละลายที่ได้จากข้อ 2.2 มาทำการไตเตรดโดยใช้สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่มีความเข้มข้น 0.1 N  $Na_2S_2O_3$  เป็นตัวไตเตรด ทำการไตเตรดจนสีน้ำเงินจางหายไป จากนั้นทำการบันทึกค่าของ 0.1 N  $Na_2S_2O_3$  เพื่อใช้ในการคำนวณต่อ

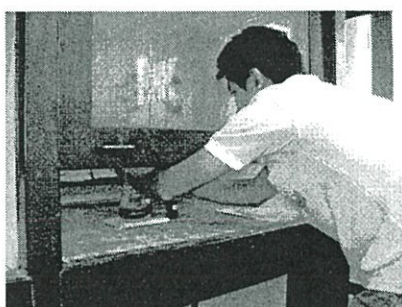
### 3. การคำนวณหาปริมาณไอโชน

จากความสัมพันธ์  $0.1 \text{ N } Na_2S_2O_3 \text{ 1mL} = 2.4 \text{ mgO}_3$

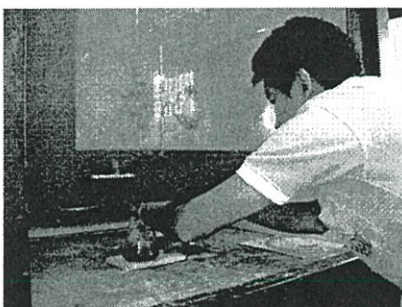
**ตัวอย่าง** การคำนวณเช่นกรณีที่ใช้ 0.1 N  $Na_2S_2O_3$  ในการไตเตรด 1.7 mL และดูดซึมไอโชนลงน้ำ 1 นาที คือปริมาณก๊าซไอโชนที่ผลิตได้ประมาณ  $1.7 \times 2.4 \times 60 = 122.4 \text{ mgO}_3 / \text{hr}$



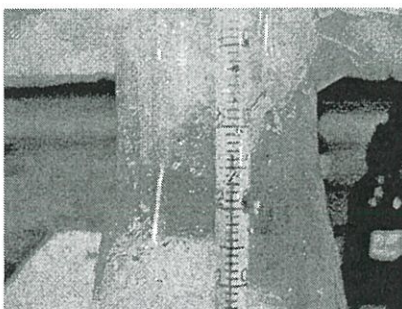
รูปที่ ก.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบทางเคมี



รูปที่ ก.2 ขั้นตอนการเติมสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ )



รูปที่ ก.3 ขั้นตอนการเติมน้ำแป้งเป็นอินดิเคเตอร์



รูปที่ ก.4 วัดอุณหภูมิขณะทำการทดสอบ

### ผลการทดสอบปริมาณก๊าซไอโซน

ทำการทดสอบหาปริมาณก๊าซไอโซนโดยกำหนดพิกัดแรงดันไฟฟ้าภายนอกที่ป้อนให้ชุดอิเล็กทรอนิกส์ที่ 3.5 kV และทำการเปลี่ยนความถี่ไฟฟ้าที่ 45 k, 47.5 k, 50 k, 52.5 k, 55 k, 57.5 k และ 60 kHz โดยทำการทดสอบเก็บผล 3 ครั้งต่อความถี่แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง โดยผลที่ได้แสดงในตารางด้านล่าง

อุณหภูมิขณะทำการทดสอบ 24 องศาเซลเซียส อัตราไหลของลม 20 L/minute

26.5


ความถี่ (kHz)	ปริมาณก๊าซไอโซน (mgO <sub>3</sub> /h)			ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
45	311	317		314
47.5	455	465		460
50	501	498		500
52.5	602	615		608
55	816	809		812
57.5	933	946		939
60	—	—		

ทำการทดสอบที่ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นฐาน  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม

( )

เจ้าหน้าที่ผู้ทำการทดสอบ

24 / 09 / 2550

  
(รับรองผลตรวจค่าการทดสอบ)  
จ. อภิเมษฐ์ อธิคุณพันธ์  
อาจารย์ประจำ  
ภาควิชาวิศวกรรม

ภาคผนวก ข.

โปรแกรมควบคุมการทำงานไมโครคอนโทรลเลอร์





```

CALL  Init_PORTS           ;Initialize the I/O ports
CALL  Init_TMR2            ;Initialize TMR2 Module
CALL  Init_OC              ;Initialize Output Compare Module
CALL  Main_Program
BRA   Start_Program

```

```

;-----
;Subroutine: Initialization of W registers to 0x0000
;-----

```

\_wreg\_init:

```

CLR   W0
MOV   W0, W14
REPEAT   #12
MOV   W0, [++W14]
CLR   W14

```

RETURN

```

;-----
;Subroutine:Init_PORTS
;-----

```

Init\_PORTS:

```

CLR   LATB                ; clear LATB
MOV   #0xFF00,W0          ; set is outputs
MOV   W0,TRISB

CLR   LATC                ; clear LATC
MOV   #0x0000,W0          ; set is outputs
MOV   W0,TRISC

```

```

CLR   LATD                               ; clear LATD
MOV   #0xFF00,W0                          ; set is outputs
MOV   W0,TRISD

```

```

CLR   LATE                               ; clear LATE
MOV   #0xFFFF,W0                         ; set is inputs
MOV   W0,TRISE

```

```

CLR   LATF                               ; clear LATF
MOV   #0xFF00,W0                          ; set is outputs
MOV   W0,TRISF

```

```

RETURN

```

```

;-----
;Subroutine to Init TMR1
;-----

```

```

Init_TMR2:

```

```

CLR   T2CON                               ; Stops the Timer2 and reset control reg.
CLR   TMR2                                ; Clear contents of the timer register
MOV   #1479,W0                             ; Load the Period register
MOV   W0,PR2                               ; with the value #1183*0.0338 us (20kHz)

```

```

BSET  IPC1,#T2IP0
BCLR  IPC1,#T2IP1                          ; Setup Timer2 interrupt for
BSET  IPC1,#T2IP2                          ; desired priority level 5
BCLR  IFS0,#T2IF                           ; Clear the Timer2 interrupt status flag
BSET  IEC0,#T2IE                           ; Enable Timer2 interrupts

```

```

RETURN                                     ; the internal instruction cycle

```

```

;-----

```

;Subroutine to Init OC

;

Init\_OC:

```
    CLR    OC1CON
    CLR    OC2CON
    CLR    OC3CON
    CLR    OC4CON

    MOV    #0X0005,W0
    MOV    W0,OC1CON
    MOV    W0,OC2CON
    MOV    W0,OC3CON
    MOV    W0,OC4CON

    MOV    #665,W0          ;A tr
    MOV    W0,OC1R
    MOV    #1479,W0        ;A tf
    MOV    W0,OC1RS

    MOV    #1405,W0        ;B tr
    MOV    W0,OC2R
    MOV    #740,W0         ;B tf
    MOV    W0,OC2RS

    MOV    #1330,W0        ;C tr
    MOV    W0,OC3R
    MOV    #665,W0         ;C tf
    MOV    W0,OC3RS

    MOV    #591,W0         ;D tr
    MOV    W0,OC4R
```

```

MOV #1405,W0          ;D tf
MOV W0,OC4RS

```

```

RETURN

```

```

;-----
;   Begin Main Program
;-----

```

```

Main_Program:

```

```

MOV #0XB,W0
MOV W0,CHK_RETURN
BSET LATF,#1
BSET LATF,#5
MOV #tblpage(FREQTABLE),W10      ;INITIAL LOOK-UP TABLE
MOV W10,TBLPAG
MOV #tbloffset(FREQTABLE),W10

CLR CNT_FRQ
MOV #16,W0
MOV W0,CHK_FRQ

MOV #665,W0
MOV W0,DUTY_ON
MOV W0,CP_PHASE
MOV #1479,W0
MOV W0,FULL_PERI
MOV #1405,W0
MOV W0,PERI2_2
CLR CNT_PHASE
MOV #49,W0
MOV W0,CHK_PHASE

```

```

MOV    #12,W0
MOV    W0,ADJ_DEGR

      BSET  T2CON,#TON
LP_WITH:
      NOP
      BSET  PORTC,#13
      BRA   LP_WITH

RETURN

;-----
;-----
;   INTERRUPT TIMER 2 SEVICE
;-----

__T2Interrupt:

      BTSC  PORTE,#0X0
      BRA   CHK_PRT2
      BRA   DELAY_CHK
CHK_PRT2:
      BTSC  PORTE,#0X1
      BRA   CHK_PRT3
      BRA   DELAY_CHK
CHK_PRT3:
      BTSC  PORTE,#0X2
      BRA   CHK_PRT4
      BRA   DELAY_CHK
CHK_PRT4:
      BTSC  PORTE,#0X3
      BRA   EXIT

DELAY_CHK:

```

```

DO    #5,LP_DL1
DO    #14746,LP_DL2
NOP
LP_DL2:NOP                ;DELAY LOOP 1 msec.
LP_DL1:NOP                ;DELAY LOOP 5 msec.
MOV   PORTE,W11

```

```
NP_SW:NOP
```

```

BTSS  PORTE,#0X0
BRA   NP_SW
BTSS  PORTE,#0X1
BRA   NP_SW
BTSS  PORTE,#0X2
BRA   NP_SW
BTSS  PORTE,#0X3
BRA   NP_SW

```

```

DO    #5,LP_DL3
DO    #14746,LP_DL4
NOP
LP_DL4:NOP                ;DELAY LOOP 1 msec.
LP_DL3:NOP                ;DELAY LOOP 5 msec.

```

```

CP.B  W11,#0XE    ; #0XE at 4bit input switch
BRA   Z,DEC_PHASE
CP.B  W11,#0XD    ; #0XD at 4bit input switch
BRA   Z,INC_PHASE
CP.B  W11,#0XB
BRA   Z,DEC_FRQ
CP.B  W11,#0X7
BRA   Z,INC_FRQ
BRA   EXIT

```

DEC\_PHASE:

```
    CP0    CNT_PHASE
    BRA    Z,LED_DEC
    BCLR   LATF,#4
    CLR    OC3CON
    CLR    OC4CON
    MOV    CP_PHASE,W5
    MOV    FULL_PERI,W6

    MOV    DUTY_ON,W0
    MOV    ADJ_DEGR,W1
    ADD    W0,W1,W1
    MOV    W1,DUTY_ON
;   MOV    W0,W1

    ADD    W5,W1,W2

    MOV    PERI2_2,W0
    MOV    ADJ_DEGR,W3
    ADD    W0,W3,W3
    MOV    W3,PERI2_2
;   MOV    W0,W3

    ADD    W5,W3,W0
    CPLT   W0,W6
    SUB    W0,W6,W0
    MOV    W0,W4

    CALL   LD_PHASE
    MOV    #0X0005,W0
    MOV    W0,OC3CON
```

```
MOV W0,OC4CON
DEC CNT_PHASE
CP0 CNT_PHASE
BRA Z,LED_DEC
BRA EXIT
```

```
LED_DEC:
BSET LATF,#5
BRA EXIT
```

INC\_PHASE:

```
MOV CNT_PHASE,W0
CP CHK_PHASE
BRA Z,LED_INC
BCLR LATF,#5
CLR OC3CON
CLR OC4CON
MOV CP_PHASE,W5
MOV FULL_PERI,W6
```

```
MOV DUTY_ON,W0
MOV ADJ_DEGR,W1
SUB W0,W1,W1
MOV W1,DUTY_ON
; MOV W0,W1
```

```
ADD W5,W1,W2
MOV PERI2_2,W0
MOV ADJ_DEGR,W3
SUB W0,W3,W3
MOV W3,PERI2_2
```

```
;    MOV    W0,W3

      ADD    W5,W3,W0
      CPSLT W0,W6
      SUB    W0,W6,W0
      MOV    W0,W4

      CALL  LD_PHASE
      MOV    #0X0005,W0
      MOV    W0,OC3CON
      MOV    W0,OC4CON
      INC    CNT_PHASE
      MOV    CNT_PHASE,W0
      CP     CHK_PHASE
      BRA    Z,LED_INC
      BRA    EXIT

LED_INC:
      BSET  LATF,#4
      BRA  EXIT

DEC_FRQ:
      CP0   CNT_FRQ
      BRA   Z,CHK_LEDDEF
      MOV   CHK_RETURN,W0
      CP.B  W0,#0XB
      BRA   Z,ADJ_DFRQ
      MOV   W10,GEN_BNK
      DEC2  GEN_BNK
      DEC2  GEN_BNK
      DEC2  GEN_BNK
      DEC2  GEN_BNK
```

```
DEC2 GEN_BNK
MOV GEN_BNK,W10
```

ADJ\_DFRQ:

```
MOV W11,CHK_RETURN
BCLR LATF,#0
TBLRDL [--W10],W11
MOV W11,CHK_PHASE
BLRDL [--W10],W11
MOV W11,ADJ_DEGR
TBLRDL [--W10],W11
MOV W11,DUTY_ON
TBLRDL [--W10],W11
MOV W11,HALF_PERI
TBLRDL [--W10],W11
MOV W11,FULL_PERI
```

```
CALL INIT_PHASE
DEC CNT_FRQ
CP0 CNT_FRQ
BRA Z,CHK_LEDDEF
BRA EXIT
```

CHK\_LEDDEF:

```
BSET LATF,#1
BRA EXIT
```

INC\_FRQ:

```
MOV CNT_FRQ,W0
CP CHK_FRQ
BRA Z,CHK_LEDINF
MOV CHK_RETURN,W0
```

```
CP.B  W0,#0X7
BRA   Z,ADJ_IFRQ
MOV   W10,GEN_BNK
INC2  GEN_BNK
INC2  GEN_BNK
INC2  GEN_BNK
INC2  GEN_BNK
INC2  GEN_BNK
INC2  GEN_BNK
MOV   GEN_BNK,W10
```

ADJ\_IFRQ:

```
MOV   W11,CHK_RETURN
BCLR  LATF,#1
TBLRDL [W10++],W11
MOV   W11,FULL_PERI
TBLRDL [W10++],W11
MOV   W11,HALF_PERI
TBLRDL [W10++],W11
MOV   W11,DUTY_ON
TBLRDL [W10++],W11
MOV   W11,ADJ_DEGR
TBLRDL [W10++],W11
MOV   W11,CHK_PHASE

CALL  INIT_PHASE
INC   CNT_FRQ
MOV   CNT_FRQ,W0
CP    CHK_FRQ
BRA   Z,CHK_LEDINF
BRA   EXIT
```

CHK\_LEDINF:

```
BSET LATF,#0
```

```
EXIT: NOP
```

```
BCLR IFS0,#T2IF
```

```
RETFIE
```

```
;-----
```

```
INIT_PHASE:
```

```
BCLR LATF,#4
```

```
BSET LATF,#5
```

```
CLR OC1CON
```

```
CLR OC2CON
```

```
CLR OC3CON
```

```
CLR OC4CON
```

```
CLR CNT_PHASE
```

```
MOV DUTY_ON,W0
```

```
MOV W0,CP_PHASE
```

```
MOV HALF_PERI,W1
```

```
ADD W0,W1,W1
```

```
MOV W1,PERI2_2
```

```
MOV FULL_PERI,W2
```

```
SUB W2,W1,W2
```

```
SUB W0,W2,W1
```

```
MOV W1,PERI4_2
```

```
MOV DUTY_ON,W1
```

```
ADD W0,W1,W1
```

```
MOV W1,PERI3_2

MOV DUTY_ON,W0 ;A tr
MOV W0,OC1R
MOV FULL_PERI,W0 ;A tf
MOV W0,OC1RS

MOV PERI2_2,W0 ;B tr
MOV W0,OC2R
MOV HALF_PERI,W0 ;B tf
MOV W0,OC2RS

MOV PERI3_2,W0 ;C tr
MOV W0,OC3R
MOV DUTY_ON,W0 ;C tf
MOV W0,OC3RS

MOV PERI4_2,W0 ;D tr
MOV W0,OC4R
MOV PERI2_2,W0 ;D tf
MOV W0,OC4RS

MOV #0X0005,W0
MOV W0,OC1CON
MOV W0,OC2CON
MOV W0,OC3CON
MOV W0,OC4CON

MOV FULL_PERI,W0
MOV W0,PR2
```

```
RETURN
```

```
;-----
```

LD\_PHASE:

MOV W2,OC3R

MOV W1,OC3RS

MOV W4,OC4R

MOV W3,OC4RS

RETURN

-----  
;

FREQTABLE:

.word 1479,740,665,12,49

.word 1183,592,532,10,47

.word 987,494,444,8,49

.word 845,423,380,7,48

.word 739,370,332,6,49

.word 657,329,295,5,52

.word 591,296,266,5,47

.word 537,269,242,5,43

.word 493,247,222,4,49

.word 455,228,205,4,45

.word 423,212,190,4,42

.word 395,198,178,3,52

.word 369,185,166,3,49

.word 349,175,157,3,46

.word 329,165,148,3,44

.word 311,156,140,3,41

.word 295,148,133,2,59

-----  
;

.END

ภาคผนวก ก.

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



# เครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบบใช้แหล่งจ่ายเฟสชิฟท์พีดีบีดับลิวเอ็ม ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

## Ozone Generator using Phase Shift PWM

### Full Bridge Converter

อนุรักษ์ มั่นสุข

วิจิตร กิจเรศ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบบใช้แหล่งจ่ายเฟสชิฟท์พีดีบีดับลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ข้อดีของระบบนี้คือสามารถปรับระดับปริมาณก๊าซโอโซน โดยการปรับความถี่ของคอนเวอร์เตอร์และสามารถรักษาระดับแรงดันให้คงที่ด้วยวิธีการเลื่อนเฟสขั้วสัญญาณเกิดของกลุ่มอสเฟทกำลัง เป็นผลให้ความกว้างพัลส์แรงดันเปลี่ยนแปลง ในบทความนี้ได้ทำการออกแบบจำลองการทำงานของระบบโดยใช้โปรแกรม PSpice เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจริง โดยการทำงานทั้งหมดของระบบใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการสร้างสัญญาณควบคุม ในตอนท้ายของบทความวิจัยได้นำเสนอเครื่องต้นแบบของเครื่องผลิตก๊าซโอโซนและผลการจำลองการทำงานของระบบที่ได้นั้นจะเป็นไปตามทฤษฎีของหลักการ

#### Abstract

This paper proposes an ozone generator using a phase shift PWM full bridge converter. The advantage of the system is capable of varying ozone gas level by varying frequency of the converter, and constant output voltage with phase shift technique resulting in variable pulse width of output voltage. In this paper, the simulation of all system is investigated using PSpice program. The simulations are also implemented using a microcontroller generating the control signal. Finally, the prototype of ozone generator was investigated and discussed in comparison with the theory and the simulation.

#### 1. บทนำ

การสร้างเครื่องผลิตก๊าซโอโซนที่สามารถใช้งานได้ อย่างมีประสิทธิภาพ ได้มีการปรับปรุงโดยนักวิจัยต่างๆ ทั่วโลก การปรับปรุงในหลายๆวิธีการ มีการใช้เทคนิค การขับสัญญาณแบบการปรับจำนวนพัลส์เอาท์พุทของ คอนเวอร์เตอร์(Pulse Density)[1] หรือการใช้ฟลายแบ็ค คอนเวอร์เตอร์เพื่อลดค่าใช้จ่ายและพลังงานในการผลิต

ก๊าซ[2] การใช้วิธีการที่จะปรับพลังงาน โดยใช้เทคนิค การขับสัญญาณแบบเลื่อนเฟสขั้วสัญญาณของคู่อุปกรณ์ สวิตช์ถูกนำมาใช้ โดยบทความในงานวิจัยนี้นำเสนอการ ประยุกต์ใช้งานวิธีการสร้างสัญญาณขับอุปกรณ์สวิตช์ แบบเลื่อนเฟสเพื่อสามารถรักษาระดับแรงดันที่ใช้ผลิต ก๊าซโอโซนเมื่อปรับเปลี่ยนความถี่ ในงานวิจัยจะ

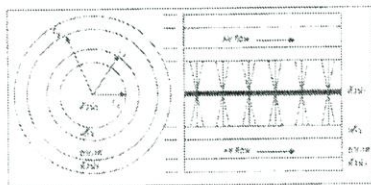
นำเสนอหลักการการทำงานของเครื่องผลิตก๊าซไอโซนโดยจำลองการทำงานจากระบบด้วยโปรแกรม PSpice ก่อนที่นำมาประยุกต์ใช้งานจริงด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

2. หลักการพื้นฐาน

วิธีการนำเสนอบทความนี้ใช้แหล่งจ่ายกำลังแบบฟูลบริดจ์ชนิดที่ดับลิแวนต์เป็นแหล่งจ่ายกำลังงาน โดยใช้หม้อแปลงความถี่สูง ยกแรงดันสัญญาณแรงดันจ่ายให้โวลต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ดำเนินการทำงานความถี่สูง ดังนั้นหลักการพื้นฐานที่กล่าวถึงคือ อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันแน่น หม้อแปลงความถี่สูงและฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ชนิดที่ดับลิแวนต์

2.1 อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันแน่น

การสร้างก๊าซไอโซน จำเป็นต้องป้อนพลังงานจากสนามไฟฟ้าให้ก๊าซโดยอาศัยอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันแน่นดังรูปที่ 1 โดยใช้อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันแน่นจำนวน 2 ชั้น สมการที่ใช้ในการคำนวณแรงดันภายนอกที่ป้อนให้กับอิเล็กโทรดได้จาก (1) [3]



รูปที่ 1 อิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนกันแน่น

$$V = E r_1 \epsilon_1 \left( \frac{\epsilon_1 \ln \frac{r_2}{r_1} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1}}{\epsilon_1 \epsilon_2} \right) \quad (1)$$

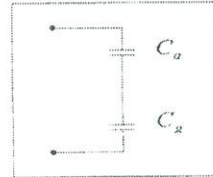
เมื่อ

- $V$  = แรงดันภายนอกที่ป้อน (kV)
- $E$  = ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (kV/cm)
- $r_1$  = รัศมีที่ใช้คำนวณการเกิดก๊าซไอโซน (cm)
- $\epsilon_1$  = ค่า relative permittivity ของ ฉนวนที่ใช้คำนวณ
- $\epsilon_2$  = ค่า relative permittivity ของ ฉนวนชั้นที่ 2
- $r_2$  = รัศมีของฉนวนชั้นที่ 1 ด้านใน (cm)

$r_2$  = รัศมีของฉนวนชั้นที่ 1 ด้านนอก (cm)

$r_3$  = รัศมีของฉนวนชั้นที่ 2 ด้านใน (cm)

ลักษณะการเกิดสนามไฟฟ้าในชุดอิเล็กโทรดสามารถมองเป็นวงจรสมมูลโดยแทนค่าให้อยู่ในรูปของตัวเก็บประจุต่อกันครบกันดังรูปที่ 2 โดยค่าความจุได้จากสมการ (2) และ (3)



รูปที่ 2 วงจรสมมูลค่าความจุของชุดอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันแน่นจำนวน 2 ชั้น

$$C_g = \frac{2\pi \epsilon_1 l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2)$$

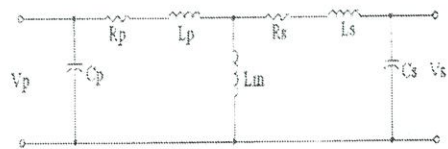
$$C_a = \frac{2\pi \epsilon_2 l}{\ln \frac{r_1}{r_2}} \quad (3)$$

เมื่อ

- $C_g$  = ค่าความเก็บประจุชั้นที่ 1 (แก้ว) (F)
- $C_a$  = ค่าความเก็บประจุชั้นที่ 2 (อากาศ) (F)
- $l$  = ความยาวของอิเล็กโทรด (m)

2.2 หม้อแปลงความถี่สูง

ในหม้อแปลงความถี่สูงมีค่าความจุแฝงคือ ค่าความจุทางด้านปฐมภูมิ( $C_p$ ) และทุติยภูมิ( $C_s$ ) ดังรูปที่ 3 ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดันตกคร่อมระหว่างชั้นของขดลวดที่มีฉนวนรองอยู่ โดยของฉนวนเป็นสารไดอิเล็กตริก ค่าความจุแฝงของหม้อแปลงหาได้จากสมการ (4) [4] ซึ่ง  $C_{layer}$  ใช้คำนวณหาค่า  $C_p$  และ  $C_s$



รูปที่ 3 วงจรสมมูลของหม้อแปลงความถี่สูง

$$C_{layer} = \epsilon_0 * \epsilon_r * \frac{W}{x} \quad (4)$$

เมื่อ

$C_{layer}$  = ค่าความจุแผ่น (F) (F)

$\epsilon_0$  = ค่า permittivity of free space (F/m)

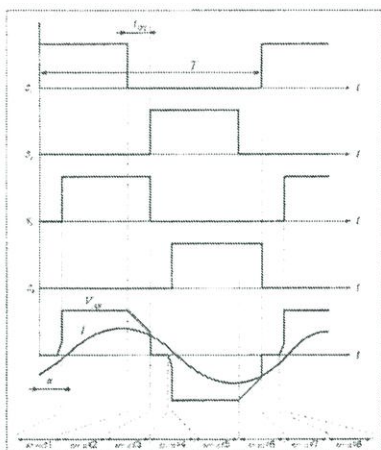
$\epsilon_r$  = ค่า relative permittivity

$w$  = ความกว้างของขดลวด (m)

$x$  = ความหนาของกระดาษฉนวนระหว่างขด (m)

2.3 เฟสชิฟท์ที่คัปปลิงตัวเก็บประจุคอนเวอร์เตอร์

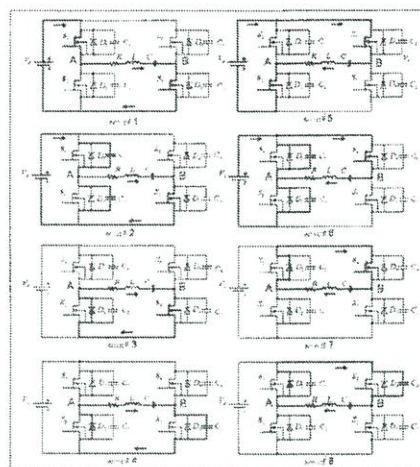
หลักการการทำงานของฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ชนิดที่คัปปลิงตัวเก็บประจุ [5] คือ การเลื่อนช่วงเวลาของการขับสัญญาณเกิดของกลุ่มอสเฟด โดยกำหนดให้สัญญาณของมอสเฟดที่กึ่งหลัก ( $S_1$  และ  $S_2$ ) ถูกขับช้ากว่ากึ่งหน้า ( $S_3$  และ  $S_4$ ) เป็นมุม  $\alpha$  ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงรูปสัญญาณการขับสัญญาณแบบเลื่อนเฟสที่สภาวะทั้ง 8

การกำหนดความถี่ของอุปกรณ์สวิทช์ สามารถกำหนดได้ด้วยความถี่มากกว่าไรโซแนนท์เพื่อให้เกิด ZVS ที่อุปกรณ์สวิทช์ สภาวะการทำงานของคอนเวอร์เตอร์กำหนดได้ 8 สภาวะดังรูปที่ 5

สภาวะที่ 1  $S_1$  และ  $S_3$  turn on แรงดันคคกร่อมโวลต  $V_{AB}$  เท่ากับ  $V_d$  กระแสไหลผ่าน  $S_1$  ไปสู่ Load(RLC) ไปสู่  $S_3$



รูปที่ 5 แสดงการทำงานของเฟสชิฟท์ที่คัปปลิงตัวเก็บประจุคอนเวอร์เตอร์ที่สภาวะ 1 ถึง 8

สภาวะที่ 2  $S_1$  turn off,  $C_1$  เริ่มต้นการเก็บประจุและ  $C_2$  คายประจุ แรงดัน  $V_{S2}$  ค่อยๆ ลดลงจาก  $V_d$  เป็น  $V_d/2$  ขณะเดียวกันแรงดันที่  $V_{S1}$  ค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึง  $V_d/2$  สวิทช์  $S_1$  เกิด soft switch ขณะ turn off แรงดันคคกร่อมโวลต  $V_{AB}$  เท่ากับ  $V_{S2}$

สภาวะที่ 3 ช่วงเวลาฟรีวีลต์  $D_2$  เริ่มนำกระแสเนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่ขาซอร์สเริ่มสูงกว่าขาเดรน กระแสไหลต่อเนื่อง ผลมาจากการถ่ายพลังงานที่สะสมอยู่ใน L แรงดันคคกร่อมโวลต  $V_{AB}$  เท่ากับ 0

สภาวะที่ 4  $S_2$  turn on,  $S_4$  turn off  $C_1$  เริ่มต้นเก็บประจุ แรงดัน  $V_{S3}$  ค่อยๆ เพิ่มขึ้น แรงดันคคกร่อมโวลต  $V_{AB}$  เท่ากับ  $V_{S3}$

สภาวะที่ 5  $S_4$  turn on แรงดันคคกร่อมโวลต  $V_{AB}$  เท่ากับ  $-V_d$  กระแสไหลกลับทิศทางผ่าน  $S_4$  ไปสู่ Load(RLC) ไปสู่  $S_2$

สภาวะที่ 6  $S_2$  turn off,  $C_2$  เริ่มต้นการเก็บประจุ  $C_1$  คายประจุ แรงดัน  $V_{S2}$  ค่อยๆ เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง  $V_d/2$  ขณะเดียวกันแรงดันที่  $V_{S1}$  ค่อยๆ ลดลงจาก  $V_d$  จนถึง  $V_d/2$  สวิทช์  $S_2$  เกิด soft switch ขณะ turn off แรงดันคคกร่อมโวลต  $V_{AB}$  เท่ากับ  $V_{S1}$

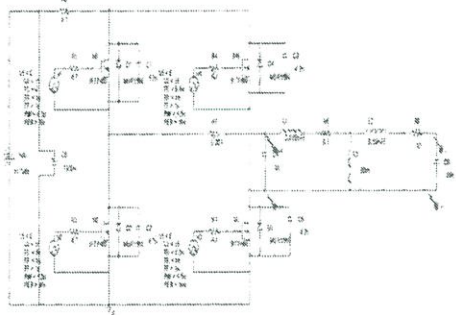
สภาวะที่ 7 ช่วงเวลาฟรีวีลต์  $D_1$  เริ่มนำกระแสเนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่ขาซอร์สเริ่มสูงกว่าขาเดรน กระแสไหล

ต่อเนื่อง ผลมาจากการถ่ายพลังงานที่สะสมอยู่ใน L แรงดันตกคร่อมโหนด  $V_{AB}$  เท่ากับ 0

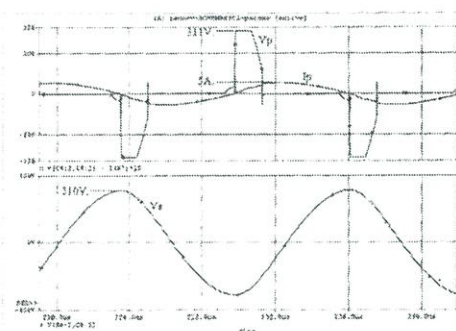
สภาวะที่ 8  $S_1$  turn on,  $S_2$  turn off  $C_2$  เริ่มต้นเก็บประจุ แรงดัน  $V_{S_1}$  ท่อยุ่เพิ่มขึ้น แรงดันตกคร่อมโหนด  $V_{AB}$  เท่ากับ  $V_{S_1}$  จบรอบการทำงาน

3. การจำลองการทำงาน

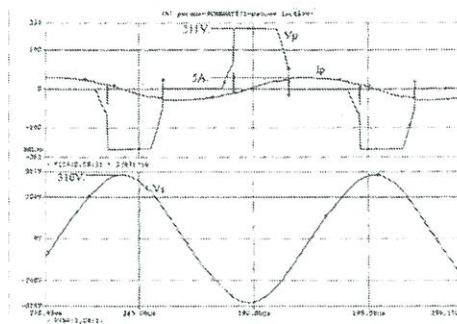
การจำลองการทำงานใช้โปรแกรม PSpice โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากการคำนวณได้  $L_1=0.033mH$ ,  $L_2=0.12mH$ ,  $R_1=0.1\Omega$ ,  $R_2=10\Omega$ ,  $L_m=60mH$ ,  $C_p=2nF$ ,  $C_{sc}=35nF$  และใช้วงจรดังรูปที่ 6 ในการจำลอง ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 7, 8 และ 9



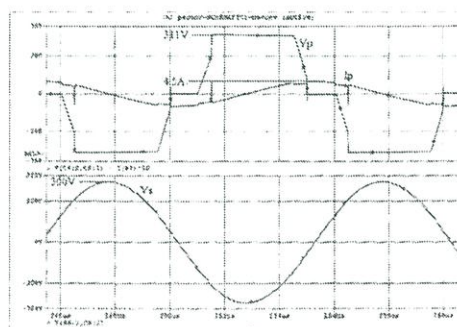
รูปที่ 6 วงจรสมมูลเฟสชิฟท์ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 7 (บน) แสดงสัญญาณแรงดัน(Vp) quasi-square wave และกระแส(Ip) อินพุตsin wave ของหม้อแปลง (ล่าง) สัญญาณแรงดันเอาต์พุต(Vs) ของหม้อแปลงที่ความถี่ 80 kHz



รูปที่ 8 (บน) แสดงสัญญาณแรงดัน(Vp) quasi-square wave และกระแส(Ip) อินพุตsin wave ของหม้อแปลง (ล่าง) สัญญาณแรงดันเอาต์พุต(Vs) ของหม้อแปลงที่ความถี่ 90 kHz



รูปที่ 9 (บน) แสดงสัญญาณแรงดัน(Vp) quasi-square wave และกระแส(Ip) อินพุตsin wave ของหม้อแปลง (ล่าง) สัญญาณแรงดันเอาต์พุต(Vs) ของหม้อแปลงที่ความถี่ 100 kHz

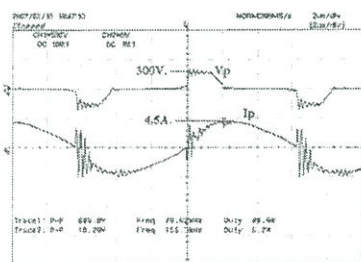
4. ผลการทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การทดสอบเก็บผลทางไฟฟ้าและทางเคมี โดยการเก็บผลทาง ไฟฟ้าจะทำการวัดแรงดันอินพุตและเอาต์พุตของหม้อแปลง และวัดกระแสอินพุตของหม้อแปลง ส่วนที่ส่องวัดผลทางเคมี โดยการวัดปริมาณก๊าซไอโซนที่ความถี่ 80kHz, 90kHz และ 100kHz

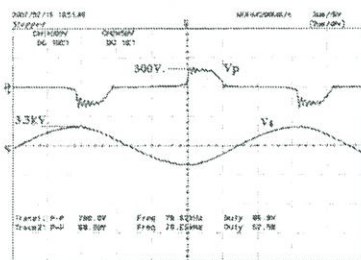
4.1 ผลการทดลองทางไฟฟ้า

วัดแรงดันที่จุดต่างๆดังนี้ แรงดันปฐมภูมิหม้อแปลง ( $V_p$ ), กระแสปฐมภูมิหม้อแปลง ( $I_p$ ) และแรงดันทุติยภูมิหม้อแปลง ( $V_s$ )

ทำการทดลองโดยการเปลี่ยนความถี่สวิตซ์ที่ 80 kHz, 90kHz และ 100kHz ซึ่งเป็นความถี่ที่สูงกว่าความถี่รีโซแนนท์เพื่อให้เกิดภาวะซอเฟสวิตซ์ และผลจากการเพิ่มความถี่ทำให้แรงดันทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงลดลง ทำการปรับความกว้างพัลส์เพิ่มขึ้นเพื่อรักษาระดับแรงดันเอาท์พุทให้คงที่ เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นการสูญเสียขณะสวิตซ์เพิ่มขึ้นเช่นกัน ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 10, 11 และ 12



(ก)

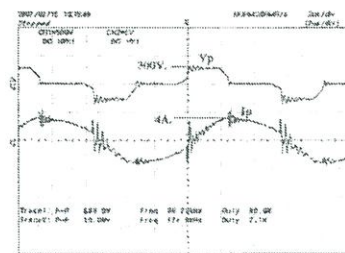


(ข)

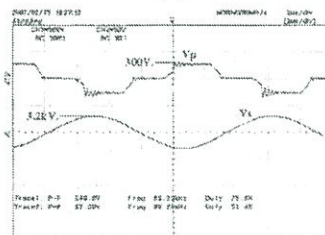
รูปที่10 แสดงสัญญาณที่ความถี่ 80 kHz

(ก) แรงดัน( $V_p$ )และกระแส( $I_p$ ) ปฐมภูมิของหม้อแปลง

(ข) แรงดันปฐมภูมิ( $V_p$ ) และแรงดันทุติยภูมิ( $V_s$ ) ของหม้อแปลง



(ก)

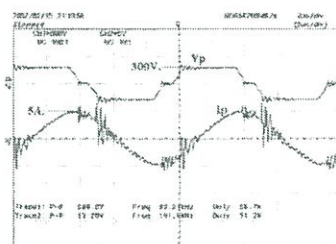


(ข)

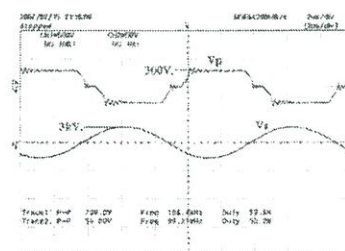
รูปที่11 แสดงสัญญาณที่ความถี่ 90 kHz

(ก) แรงดัน( $V_p$ )และกระแส( $I_p$ ) ปฐมภูมิของหม้อแปลง

(ข) แรงดันปฐมภูมิ( $V_p$ ) และแรงดันทุติยภูมิ( $V_s$ ) ของหม้อแปลง



(ก)



(ข)

รูปที่12 แสดงสัญญาณที่ความถี่ 100 kHz

(ก) แรงดัน(Vp)และกระแส(Ip) ปฐมภูมิของหม้อแปลง

(ข) แรงดันปฐมภูมิ(Vp) และแรงดันทุติยภูมิ(Vs)ของหม้อแปลง

4.2 ผลการทดลองทางเคมี

จากข้อ 4.1 เมื่อเปลี่ยนความถี่โดยรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตคงที่ ผลการวัดปริมาณการเกิดก๊าซโอโซนมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ทางเคมีที่เรียกว่า ไตเตรชัน (Titration) หลักการคือ การเกิดปฏิกิริยาระหว่างก๊าซโอโซนกับสารละลายโปแตสเซียมไอโอไดด์ (KI) 100 mL ได้สารใหม่เกิดขึ้น จากนั้นนำไปไตเตรทกับสารละลายที่เป็นตัวรีดิวซ์คือ โซเดียมไทโอซัลเฟต (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) แล้วเติมน้ำแข็งเป็นอินดิเคเตอร์ สารละลายจะกลายเป็นสีน้ำเงิน ทำการไตเตรทจนสีน้ำเงินจางหายไป ทำการบันทึกค่าปริมาณโซเดียมไทโอซัลเฟต เพื่อนำมาหาค่าปริมาณโอโซนต่อไปจากสมการ (5) [6]

$$0.1N * Na_2S_2O_3 * \frac{24000}{100 mL(KI)} = mgO_3/L \quad (5)$$

Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = ปริมาณสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต  
100 mL(KI) = ปริมาณสารละลายโปแตสเซียมไอโอไดด์

ตารางที่ 1 แสดงผลปริมาณการเกิดก๊าซโอโซนเทียบกับความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

ความถี่ (kHz)	แรงดันทุติยภูมิ (kV)	ปริมาณก๊าซโอโซน (mg/h)
80	3.3	432
90	3.3	576
100	3.3	720

5. สรุป

เครื่องผลิตก๊าซโอโซน แบบใช้แหล่งจ่ายไฟสวิตช์ที่ลิ้นับถวีสัมบูรณ์รีดิวซ์คอนเวอร์เตอร์ มีย่านการทำงานที่ความถี่สูงกว่าโอโซน 80kHz, 90kHz และ 100kHz และสามารถปรับปริมาณก๊าซโอโซนได้ดังตารางที่ 1 โดย

การปรับเปลี่ยนความถี่ ซึ่งสามารถที่จะรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตคงที่ที่ 3.3kV โดยการปรับความกว้างพัลส์ของแรงดันอินพุตซึ่งใช้วิธีเลื่อนเฟสสัญญาณขับเคลื่อนของคู่อุปกรณ์สวิตช์ อย่างไรก็ตาม การรักษาแรงดันให้คงที่ทำได้จำกัดไม่เกินค่าหนึ่ง ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องและเป็นไปตามทฤษฎี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Oleg Koudriavtsev, Shengpei Wang, Yoshihiro Konishi, and Mutsuo Nakaoka, "A Novel Pulse-Density-Modulated High-Frequency Inverter for Silent-Discharge-Type Ozonizer," IEEE Transaction on Industry Application, March/April 2002, Vol. 38, No. 2, pp. 369-378
- [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 Transaction on Industry Application, March/April 2004, Vol. 40, No.2, pp. 414-421
- [3] ศิริวัฒน์ โพธิ์วชกุล, "เอกสารประกอบการเรียนวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง," ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2544
- [4] Mika Sippola, "Developments for The High Frequency Power Transformer Design and Implementation," Helsinki University of Technology Applied Electronics Laboratory, 2003
- [5] H. Kifune, Y. Hatanaka and M. Nakaoka, "Cost effective phase shifted pulse modulation soft switching high frequency inverter for induction heating applications," IEE Proc.-Electr. Power Appl., 2004, Vol. 151, pp. 19-25
- [6] พรพิมล รัตนวิเชียร, "เครื่องผลิตก๊าซโอโซนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์," วิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543

**ภาคผนวก จ.**

**สมการคำนวณอนุพันธ์อันดับสอง  
โดยใช้โปรแกรม MatLAB**

กำหนดค่าตัวแปรดังนี้

```

clear;

to1=1.85*10^-6;
to2=9.51*10^-6;

Vd1=311;Vd2=0;
T=23.3*10^-6;Lt=0.535*10^-3;Lm=26*10^-3;
Rt=0.2;Re=2e3;Ct=32*10^-9;
trl=Lt/Rt;ti=Rt/Re; trc=Re*Ct;
wt=1/(sqrt(Lt*Ct));
alt=(1/2)*((1/trl)+(1/trc));
wm=sqrt(wt^2+(1/(trl*trc)));
wn=sqrt(wm^2-alt^2);

iin=0;
vo=0;
n1=to1/10^-8;
n2=to2/10^-8;
n3=30;
t1=0:to1/n1:to1;
t2=0:to2/n2:to2;
x=1;
x1=1;

for n=1:1:n3

    % Stated
    c=(Vd1/(1+ti));
    d1=(vo(x1)-(Vd1/(1+ti)));d2=exp(-alt.*t1).*cos(wn.*t1);
    d=d1.*d2;
    e1=(1/wn).*(alt.*(vo(x1)-Vd1/(1+ti))+iin(x1)/Ct-
    vo(x1)./trc);e2=exp(-alt.*t1).*sin(wn.*t1);
    e=e1.*e2;
    Vol=c+d+e;

    h=Vd1/(Rt+Re);
    k1=iin(x1)-Vd1/(Rt+Re);
    k2=exp(-alt.*t1).*cos(wn.*t1);
    k=k1.*k2;
    m1=(1/wn).*(alt.*(iin(x1)-Vd1/(Rt+Re))+(Vd1-vo(x1)-
    iin(x1).*Rt)/Lt);
    m2=exp(-alt.*t1).*sin(wn.*t1);
    m=m1.*m2;
    iil=h+k+m;

for n=1:1:n1
    x1=x;
    vo(x1)=Vol(n);

```

```

        iin(x1)=ii1(n);
        Vin(x1)=311;
        x=x+1;
end

        %State2
a1=vo(x1);a2=exp(-alt.*t2).*cos(wn.*t2);
a=a1.*a2;
b1=(1/wn).*((alt.*vo(x1))+(iin(x1)./Ct)-
(vo(x1)./(Ct*Re)));b2=exp(-alt.*t2).*sin(wn.*t2);
b=b1.*b2;
Vo2=a+b;

l1=iin(x1);l2= exp(-alt.*t2).*cos(wn.*t2);
l=l1.*l2;
m1=(1/wn).*((alt.*iin(x1)-
((Rt.*iin(x1)+vo(x1))./Lt)));m2= exp(-
alt.*t2).*sin(wn.*t2);
m=m1.*m2;
ii2=l+m;

for n=1:1:n2
    x1=x;
    vo(x1)=Vo2(n);
    iin(x1)=ii2(n);
    Vin(x1)=0;
    x=x+1;
end
        %State3
c=(-Vd1/(1+ti));
d1=(vo(x1)+(Vd1/(1+ti)));d2=exp(-alt.*t1).*cos(wn.*t1);
d=d1.*d2;
e1=(1/wn).*(alt.*(vo(x1)+Vd1/(1+ti))+iin(x1)+vo(x1)./trc)
;e2=exp(-alt.*t1).*sin(wn.*t1);
e=e1.*e2;
Vo3=c+d+e;

h1=-Vd1/(Rt+Re);h2=1-exp(-alt.*t1).*cos(wn.*t1);
h=h1.*h2;
k1=(1/wn).*((alt*(Vd1))/(Rt+Re)-
(Vd1+vo(x1)+Rt.*iin(x1))/Lt);k2=exp(-
alt.*t1).*sin(wn.*t1);
k=k1.*k2;
ii3=h+k+iin(x1);

for n=1:1:n1
    x1=x;
    vo(x1)=Vo3(n);
    iin(x1)=ii3(n);
    Vin(x1)=-311;
    x=x+1;

```

```

end

    %State4
a1=vo(x1);a2=exp(-alt.*t2).*cos(wn.*t2);
a=a1.*a2;
b1=(1/wn).*((alt.*vo(x1))+(iin(x1)./Ct)-
(vo(x1)./(Ct*Re)));b2=exp(-alt.*t2).*sin(wn.*t2);
b=b1.*b2;
Vo4=a+b;

l1=iin(x1);l2= exp(-alt.*t2).*cos(wn.*t2);
l=l1.*l2;
m1=(1/wn).*((alt.*iin(x1)-
((Rt.*iin(x1)+vo(x1))./Lt)));m2= exp(-
alt.*t2).*sin(wn.*t2);
m=m1.*m2;
ii4=l+m;

for n=1:1:n2
    x1=x;
    vo(x1)=Vo4(n);
    iin(x1)=ii4(n);
    Vin(x1)=0;
    x=x+1;
end
end

```

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายอนุรักษ์ มั่นสุข
วัน เดือน ปีเกิด	15 สิงหาคม 2521 ที่จังหวัดอุดรธานี
ที่อยู่	33/155 หมู่ 3 หมู่บ้านภัสสร 1 ถ. รังสิต-องครักษ์ ต.คลองสาม อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120
ประวัติการศึกษา	2545 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) การออกแบบและประยุกต์ใช้งานวงจรทางด้านดิจิทัลและแอนะล็อก 2.) การออกแบบและประยุกต์ใช้งานวงจรทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ 3.) การพัฒนาโปรแกรมและการประยุกต์ใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ 4.) การออกแบบสร้างระบบไฟฟ้าแรงดันสูงและความถี่สูง