

คอนเวอร์เตอร์ผลิตโอโซนด้วยวงจรเรโซแนนซ์  
A CONVERTER FOR AN OZONE GENERATOR



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2561

คอนเวอร์เตอร์ผลิตโอโซนด้วยวงจรเรโซแนนซ์  
A CONVERTER FOR AN OZONE GENERATOR



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# A CONVERTER FOR AN OZONE GENERATOR



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT  
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2561

คอนเวอร์เตอร์ผลิตโอโซนด้วยวงจรเรโซแนนซ์  
A CONVERTER FOR AN OZONE GENERATOR



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2561

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

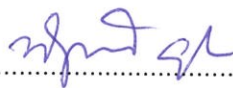
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง คอนเวอเตอร์ผลิตโอโซนด้วยวงจรเรโซแนนซ์

ผู้จัดทำ



1. นาย กณพ ไตรภูมิ
2. นาย กิตติเชษฐ์ จุ่มทอง
3. นาย กิตติธัช เหล่าขจรบุญ
4. นาย ชานน เกื้อนุ้ย



..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.พีรฤทธิ ยุทธโกวิท)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คอนเวอเตอร์ผลิตโอโซนด้วยวงจรเรโซแนนซ์

นาย กณพ ไตรภูมิ  
นาย กิตติเชษฐ์ จุ่มทอง  
นาย กิตติธัช เหล่าขจรบุญ  
นาย ชานน เกื้อนุ้ย  
ผศ.ดร. พีรวุฒิ ยุทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2561

### บทคัดย่อ

การฆ่าเชื้อโรคในสมัยปัจจุบันมีหลากหลายวิธี แต่โดยส่วนใหญ่ต้องพึ่งพาสารเคมีเป็นส่วนใหญ่ เพื่อลดการใช้สารเคมีจึงมีการนำโอโซนมาประยุกต์ใช้เพราะโอโซนมีความสามารถในการกำจัดเชื้อโรคและขจัดกลิ่นโดยมีประสิทธิภาพสูงพอๆกับการใช้สารเคมีในปริมาณที่เหมาะสม โดยในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและนำเสนอการออกแบบการผลิตโอโซนด้วยคอนเวอเตอร์วงจรเรโซแนนซ์โดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ โดยนำเอาวงจรคอนเวอเตอร์และวงจรเรโซแนนซ์มาประยุกต์ใช้ในการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันให้มีกำลังขยายที่สูงขึ้น ด้วยวิธีการออกแบบที่แบ่งวงจรออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของวงจรกำลังและส่วนของวงจรควบคุม โดยในส่วนของวงจรควบคุมจะมีหน้าที่ในการส่งสัญญาณความถี่ที่สามารถปรับค่าได้ไปยังวงจรกำลังจากนั้นวงจรกำลังจะเกิดการสวิตซ์ซึ่งความถี่สูงไปยังวงจรเรโซแนนซ์เพื่อขยายแรงดันให้เกิดโอโซนอย่างมีประสิทธิภาพ

## A Converter for an Ozone Generator

Mr.Kanop Traipoom

Mr.Kitteched Joomthong

Mr.Kittituch Laokajornboon

Mr.Chanon Kurnui

Asst.Prof.Dr.Peerawut Yutthagowith Advisor

Year 2018

### ABSTRACT

At the present time there is a lot of bacteria. Most of them can be disposed by chemical method. To decrease using of chemical method we use ozone instead because ozone has ability to dispose bacteria and deodorize pungent smell with quality that equal to chemical method. Purpose of this thesis is for design and present the Ozone Generator with resonance converter by using AC source for an input. We can divided our main circuit into 2 parts. First part is Control circuit and the second part is Power circuit. Control circuit is a part for making an adjustable frequency signal through the Power circuit after that the Power circuit will convert the signal with a high switching speed frequency for converting low voltage to high voltage in making ozone.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับการช่วยเหลือและสนับสนุนอย่างดีจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรฤทธิ ยุทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำโครงการชิ้นนี้อย่างต่อเนื่องเสมอมา และได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขในส่วนต่างๆ จนทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ลงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณนายภัทริน กิจเจริญ ที่ช่วยให้คำแนะนำต่างๆ มาโดยตลอดจนกระทั่งโครงการชิ้นนี้เสร็จสมบูรณ์ออกมาได้

สุดท้ายนี้ต้องขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและกำลังใจอีกทั้ง เพื่อนๆ พี่น้อง ที่คอยให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ จนโครงการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงต้องขอขอบคุณ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ



# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	1
1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย	2
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 บทนำ	3
2.2 กระบวนการสร้างไอโซนโดยใช้อิเล็กทรอนิกส์ทรานส์กรรบอกชั่นแกนร่วม	4
2.2.1 หลักการสร้างก๊าซไอโซน	4
2.2.2 สนามไฟฟ้า	5
2.2.3 อิเล็กทรอนิกส์ทรานส์กรรบอกชั่นแกนร่วม	12
2.2.4 มิติที่เหมาะสม (Optimum Dimension)	14
2.3 อินเวอร์เตอร์	14
2.3.1 ประเภทของอุปกรณ์ Power Electronics	14
2.3.1.1 ไดโอด (Diode)	14
2.3.1.2 ไทริสเตอร์ (Thyristor)	16
2.3.1.3 BJT (Bipolar Junction Transistor)	17
2.3.1.4 มอสเฟต (MOSFET)	19
2.3.1.5 GTO (Gate-Turn-off-Thyristor)	20
2.3.1.6 ไอจีบีที IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors)	20
2.3.1.7 การเปรียบเทียบอุปกรณ์ Power Electronics	21

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.2 ตัวแปลงกำลัง (Power Converter)	22
2.3.2.1 อินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์แบบอนุกรม	22
2.3.2.2 วงจรเรียงกระแส	25
<b>บทที่ 3 การออกแบบประกอบสร้างเครื่องผลิตก๊าซไอโซน</b>	<b>31</b>
3.1 เงื่อนไขการออกแบบ	31
3.2 ส่วนประกอบของวงจรแปลงผันกำลัง	31
3.3 การออกแบบประกอบสร้างวงจรเรียงกระแส	33
3.4 การออกแบบประกอบสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์	33
3.5 การออกแบบประกอบสร้างวงจรควบคุม	35
3.6 วงจรขับเคลื่อน	41
3.7 การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ในการผลิตไอโซน	43
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์</b>	<b>46</b>
4.1 บทนำ	46
4.2 เปรียบเทียบแรงดัน	46
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ</b>	<b>55</b>
5.1 สรุปผลการทดลอง	55
5.2 ข้อเสนอแนะ	55
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>56</b>
<b>ภาคผนวก</b>	<b>57</b>
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ	58
ภาคผนวก ข โปรแกรมสำหรับปรับความถี่ของวงจรควบคุม	63
<b>ประวัติผู้เขียน</b>	

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของอิเล็กโทรดทรงกลม	6
2.2 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้ากับอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ	7
2.3 การหักเหของสนามไฟฟ้าตรงรอยต่อของฉนวน	9
2.4 ชั้นฉนวนซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ	10
2.5 เปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นกับค่าเฉลี่ย	12
2.6 ทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม	12
2.7 ไดโอด (ก) สัญลักษณ์ (ข) พฤติกรรมระหว่างกระแสกับแรงดันที่สภาวะปกติ (ค) พฤติกรรมระหว่างกระแสกับแรงดันในอุดมคติ	15
2.8 การเกิดของ trr	16
2.9 สัญลักษณ์ของไคริสเตอร์ แบบเอสซีอาร์ (Silicon Controlled Rectifier)	16
2.10 สัญลักษณ์ของ Thyristor แบบ Triac (Triode AC Switch)	17
2.11 BJT (ก) Symbol (ข) i-v characteristic (ค) idealized	18
2.12 การเพิ่มค่า $h_{FE}$ ของ Power BJT	18
2.13 วงจรพื้นฐาน BJT	18
2.14 มอสเฟต (a) Symbol (b) i-v characteristic (c) idealized characteristic	19
2.15 การมองเป็นความต้านทานที่ขา D-S ของมอสเฟต	19
2.16 การขนานมอสเฟตเพื่อเพิ่มกระแส	20
2.17 GTO (a) Symbol (b) i-v characteristic (c) idealized characteristic	20
2.18 IGBT (a) Symbol (b) i-v characteristic (c) idealized characteristic	21
2.19 ระดับพิคสูงสุดของแรงดัน กระแส ความถี่ ของอุปกรณ์สวิตซ์กำลัง	21
2.20 (ก) วงจรอินเวอร์เตอร์โชนันท์แบบอนุกรม (ข) วงจรสมมูล R-L-C (ค) การจำลองค่าบรรทัดฐานของแรงดันไฟฟ้าด้านออกต่อความถี่การสวิตซ์	24
2.21 วงจรกระแสเฟสเดียวแบบครึ่งคลื่น	25
2.22 วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวเต็มคลื่นแบบบริดจ์ไดโอด	26
2.23 แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่าย	27
2.24 แรงดันของวงจรเรียงกระแสเฟสเดียวแบบเต็มคลื่นแบบบริดจ์ไดโอด	27
2.25 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่น	28
2.26 แรงดันของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบเต็มคลื่น	29
2.27 แรงดันของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่น	29
3.1 วงจรแปรผันกำลัง (1)	32

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.2 วงจรแปรผันกำลัง (2)	32
3.3 แผนผังวงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรกำลัง	33
3.4 วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์	34
3.5 ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรเรโซแนนซ์	34
3.6 วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์	35
3.7 ชุด STM32F49I DISCOVERY	35
3.8 หลักการทำงานของ PWM ของ STM32F49I DISCOVERY	36
3.9 ตัวอย่างการสร้างสัญญาณ PWM	37
3.10 แผนผังการสร้างสัญญาณ PWM	38
3.11 สัญญาณ PWM ที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ความถี่ 10 kHz	41
3.12 สัญญาณ PWM ที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ความถี่ 10 kHz เมื่อมีการหน่วงเวลา 400 $\mu$ S	41
3.13 IC เบอร์ TLP250 (ก) วงจรภายใน IC เบอร์ TLP250 (ข) การต่อวงจร IC เบอร์ TLP 250	42
3.14 อิเล็กทรอนิกส์ในการผลิตโอโซนที่สร้างใน Solid Work	43
3.15 อิเล็กทรอนิกส์ในการผลิตโอโซนที่ใช้จริง	43
3.16 ปริมาณความเครียดสนามไฟฟ้าด้านหลังจาก Simulation	44
3.17 ปริมาณความเครียดสนามไฟฟ้าด้านข้างหลังจาก Simulation	44
3.18 ปริมาณความเครียดสนามไฟฟ้าโดยรวมหลังจาก Simulation	44
3.19 ปริมาณความเครียดสนามไฟฟ้าด้านจาก Simulation	45
4.1 ตำแหน่งของการเปรียบเทียบแรงดันตามตารางที่ 4.1	46
4.2 รูปคลื่นแรงดัน 1.3 kV ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ	47
4.3 รูปคลื่นแรงดัน 1.5 kV ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ	47
4.4 รูปคลื่นแรงดัน 1.7 kV ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ	48
4.5 รูปคลื่นแรงดัน 1.9 kV ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ	48
4.6 รูปคลื่นแรงดัน 2.1 kV ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ	48
4.7 รูปคลื่นแรงดัน 2.3 kV ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ	49
4.8 รูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุตอนเกิดเบรกดาวน	49
4.9 รูปคลื่นแรงดัน 1.3 kV ที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ	49

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 รูปคลื่นแรงดัน 1.5 kV ที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ	50
4.11 รูปคลื่นแรงดัน 1.7 kV ที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ	50
4.12 รูปคลื่นแรงดัน 1.9 kV ที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ	50
4.13 รูปคลื่นแรงดัน 2.1 kV ที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ	51
4.14 รูปคลื่นแรงดัน 2.3 kV ที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ	51
4.15 รูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำตอนเกิดเบรกดาวน	51
4.16 รูปคลื่นแรงดันกระแสตรงที่แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเท่ากับ 1.3 kV	52
4.17 รูปคลื่นแรงดันกระแสตรงที่แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเท่ากับ 1.5 kV	52
4.18 รูปคลื่นแรงดันกระแสตรงที่แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเท่ากับ 1.7 kV	52
4.19 รูปคลื่นแรงดันกระแสตรงที่แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเท่ากับ 1.9 kV	53
4.20 รูปคลื่นแรงดันกระแสตรงที่แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเท่ากับ 2.1 kV	53
4.21 รูปคลื่นแรงดันกระแสตรงที่แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเท่ากับ 2.3 kV	53
4.22 รูปคลื่นแรงดันกระแสตรงที่แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุตอนเบรกดาวน	54

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 การดำเนินงานวิจัย	2
2.1 ประโยชน์และอันตรายจากโอโซน	3
2.2 ระดับพิกัดสูงสุดของแรงดัน กระแส ความถี่ ของอุปกรณ์สวิตซ์กำลัง	22
4.1 ตารางเปรียบเทียบแรงดัน	48



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันก๊าซโอโซน (Ozone) มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น การฆ่าเชื้อโรคในโรงงานน้ำแข็งหรือ อุปกรณ์ทางการแพทย์ ใช้สำหรับฟอกอากาศใช้สลายสารพิษในผัก อีกทั้งยังมีการนำไปใช้โรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่สำหรับการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งโอโซนมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคหรือจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ได้เป็นอย่างดี โอโซนมีข้อดีมากกว่าสารออกฤทธิ์อื่นๆ ที่ใช้งาน คือมีช่วงครึ่งชีวิตที่สั้น (12 ชั่วโมงในบรรยากาศ) จึงไม่ก่อให้เกิดมลพิษตกค้างด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่มาของแนวคิดในการออกแบบและประกอบสร้างชุดเครื่องกำเนิดโอโซนที่มีประสิทธิภาพสูงโดยการสร้างชุดเครื่องกำเนิดโอโซนที่มีประสิทธิภาพสูง จึงต้องใช้หลักการทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงในการออกแบบวงจรปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างโอโซน ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า ความถี่ อุณหภูมิ เป็นต้น สำหรับปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จะออกแบบและประกอบสร้างโดยใช้หลักการวงจรรีโซแนนซ์ (Resonance) ซึ่งวงจรรีโซแนนซ์จะให้กำลังไฟฟ้าที่สูงโดยใช้ขนาดของกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่ายต่ำและกำเนิดก๊าซโอโซน โดยอาศัยการแตกตัวของโมเลกุลในอากาศเมื่อเกิดการโคโรนาดิสชาร์จ (Corona Discharge)

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการผลิตก๊าซโอโซนโดยใช้แรงดันไฟฟ้าและความถี่สูง
- 1.2.2 เพื่อออกแบบและประกอบสร้างวิธีการผลิตก๊าซโอโซน โดยใช้หลักการของวงจรรีโซแนนซ์ (Resonance)
- 1.2.3 เพื่อศึกษาและเรียนรู้โดยนำวิชาการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมาประยุกต์ใช้งาน
- 1.2.4 เพื่อส่งเสริมให้เกิดการวิจัยเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีสมัยใหม่โดยใช้วัสดุอุปกรณ์ที่มีภายในประเทศ

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1.3.1 ทำการออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดโอโซน
- 1.3.2 ใช้แรงดันไฟฟ้า 220 V ความถี่ 50 Hz แปลงเป็นแรงดันสูงและความถี่สูงเพื่อผลิตก๊าซโอโซน
- 1.3.3 ใช้แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดทำงานร่วมกับวงจรรีโซแนนซ์ (Resonance) เพื่อได้กำลังขาออก (Output) สูงสุดโดยก่อให้เกิดกำลังสูญเสียน้อย

### 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

ในโครงการนี้จะใช้แรงดันไฟฟ้าสูงและความถี่สูงเพื่อใช้ในการผลิตโอโซน ซึ่งจะใช้แรงดันไฟฟ้า 220 V ความถี่ 50 Hz เปลี่ยนเป็นกระแสตรง 220 V ด้วยวงจรเรียงกระแส (Rectifier) ร่วมกับวงจรรีโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์ (Resonance) ซึ่งมีการใช้ไอจีบีทีเป็นอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งร่วมกับไอซี STM32F429I DISCOVERY ในการสร้างสัญญาณพัลส์ (Pulse Width Modulation : PWM) เพื่อเป็นสัญญาณขับเคลื่อนของไอจีบีที จากนั้นจะผ่านหม้อแปลงแรงดันสูงและความถี่สูง เพื่อทำการจ่ายให้กับชุดอิเล็กทรอนิกส์ และทำให้เกิดการเร่งประจุไฟฟ้าที่เรียกว่าโคโรนาดิสชาร์จ (Corona Discharge)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นภายในอิเล็กโทรด ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกตัวโมเลกุลของออกซิเจน 2 โมเลกุล ( $O_2$ ) กลายเป็นออกซิเจน 1 โมเลกุล (O) จากนั้นจะทำการผ่านออกซิเจนภายนอก ( $O_2$ ) เข้าไป เพื่อให้จับตัวรวมกับออกซิเจนภายใน (O) กลายเป็นก๊าซโอโซน (Ozone:  $O_3$ ) สูบบรรยากาศ

### 1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 ศึกษาข้อมูลจากตำรา บทความและวารสารที่สามารถค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับวิธีการสร้างก๊าซโอโซน, การออกแบบแหล่งจ่ายและวิธีการสร้างสัญญาณควบคุมสัญญาณพัลส์

1.5.2 ออกแบบชุดกำเนิดก๊าซโอโซน

1.5.3 ออกแบบและสร้างวงจรไฟฟ้า

1.5.4 ทดสอบเครื่องผลิตก๊าซโอโซนและวงจรในแต่ละภาคส่วน

1.5.5 ทดสอบประยุกต์ใช้งานของจริงของเครื่องกำเนิดโอโซน

1.5.6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

1.5.7 จัดทำปฏิญานិพนธ์ฉบับสมบูรณ์

ตารางที่ 1.1 การดำเนินงานวิจัย

หัวข้อ	ภาคเรียนที่ 1					ภาคเรียนที่ 2			
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1. ศึกษาข้อมูลจากตำรา บทความและวารสาร	←-----→								
2. ออกแบบและสร้างเครื่องผลิตก๊าซโอโซน		←-----→							
3. ออกแบบและสร้างวงจรไฟฟ้า			←-----→						
4. ทดสอบเครื่องผลิตก๊าซโอโซน และวงจรในแต่ละภาคส่วน						←-----→			
5. เก็บผลการทดลองปริมาณก๊าซ						←-----→			
6. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง						←-----→			
7. เขียนปฏิญานิพนธ์						←-----→			

←-----→ วางแผน                      ←-----→ ปฏิบัติจริง

### 1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 นักศึกษาได้นำความรู้ทางทฤษฎีและความสามารถทางการปฏิบัติมารวมกันเพื่อทำงานและวิเคราะห์แก้ปัญหาในการปฏิบัติงาน

1.6.2 สามารถใช้ STM32F429I DISCOVERY สร้างสัญญาณพัลส์เพื่อควบคุมการสวิตซ์ไอจีบีทีได้

1.6.3 ลดกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นได้จากการใช้วงจรเรโซแนนซ์

1.6.4 ได้ศึกษาการนำก๊าซโอโซนไปใช้ในประโยชน์ต่างๆ

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ [3]

โอโซนเป็นโมเลกุลที่ประกอบด้วยออกซิเจน 3 อะตอม ( $O_3$ ) ที่มีโครงสร้างที่ไม่เสถียร ดังนั้นสามารถแปลงกลับเป็นออกซิเจน สำหรับโอโซนในชั้นสตราโตสเฟียร์ เกิดจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตซึ่งมีพลังงานสูงชนเข้ากับโมเลกุลออกซิเจนในชั้นสตราโตสเฟียร์ ทำให้โมเลกุลของออกซิเจนแตกตัวออกจากกัน โมเลกุลที่แตกสลายแล้วจับกับโมเลกุลอื่นของออกซิเจนกลายเป็นโอโซน



ตารางที่ 2.1 ประโยชน์และอันตรายจากโอโซน

ประโยชน์จากโอโซน	อันตรายจากโอโซน
1. โอโซนช่วยกำจัดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ต่างๆ	1. หากได้รับในปริมาณที่ $>0.1$ ppm อาจทำให้มีปัญหาต่อร่างกาย เช่น คลื่นไส้ อาเจียน
2. โอโซนช่วยในการทำลายและกำจัดเชื้อโรค	2. หากได้รับในปริมาณที่ $>6$ ppm จะเกิดภาวะปอดบวมน้ำ
3. โอโซนช่วยในการสลายก๊าซพิษ	

คุณสมบัติของโอโซน มีดังนี้

1. โอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงและสลายตัวเร็ว
2. เป็นก๊าซที่มีกลิ่น และสัมผัสได้ด้วยความเข้มข้นต่ำในอากาศ 0.01 ppm
3. ความหนาแน่น (Density) 150% ของออกซิเจน
4. สถานะก๊าซที่อุณหภูมิบรรยากาศเป็นของเหลวที่  $-170$  °F หรือ  $-111.9$  °C (สีน้ำเงินเข้ม) และมีสถานะเป็นของแข็ง หรือแข็งตัวที่  $-420$  °F หรือ  $-251$  °C จุดหลอมเหลวที่  $-192.7$  °C ความสามารถในการละลายในน้ำที่อุณหภูมิ  $20$  °C มีค่าเท่ากับ 0.003 g/l (3ppm.) และความหนาแน่นของโอเท่ากับ 1 (เท่ากับอากาศ)
5. สถานะละลายน้ำได้ดีกว่าออกซิเจน ( $O_2$ )
6. มีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อโรคได้เร็วกว่าคลอรีน 3,125 เท่า

7. ฆ่าเชื้อโรค อาทิ ไวรัส (Virus), แบคทีเรีย (Bacteria), รา (Fungus), Mold, Yeast
8. ทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่ละลายน้ำ
9. ทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ
10. กำจัดกลิ่นในอากาศ
11. ลด COD, BOD ในน้ำเสีย
12. ช่วยลดเวลาสำหรับกระบวนการตกตะกอน

## 2.2 กระบวนการสร้างโอโซนโดยใช้อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันแนวนอน [1], [3]

### 2.2.1 หลักการสร้างโอโซน

การสร้างโอโซนโดยส่วนใหญ่จะอาศัยสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงเพื่อทำให้เกิดโคโรนาดีสชาร์จ เพื่อให้  $O_2$  เกิดการแตกตัวที่กระแสค่าน้อย ในการใช้สนามไฟฟ้าที่มีความถี่ต่ำ (50 หรือ 60 Hz) ความถี่ปานกลาง (60-1000 Hz) หรือ ความถี่สูง (>1000 Hz)

ตัวอย่างการสร้างโอโซนด้วยความถี่สูงช่วง 10 kHz ขึ้นไปโดยนำหลักการของวงจรถ่ายแบบคอนเวอร์เตอร์แบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า โดยใช้ไอซี TL494 ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตชิง โดยการออกแบบวงจรถ่ายแบบคอนเวอร์เตอร์ให้ทำงานที่ความถี่ 10 - 30 kHz ผ่านหม้อแปลงความถี่สูง วงจรเรียงกระแสและฟิลเตอร์ทางด้านเอาต์พุต เพื่อให้ได้ไฟฟ้ากระแสตรงที่แรงดันเอาต์พุต 10 kV<sub>dc</sub> เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับอิเล็กโทรดแบบไม่สม่ำเสมอสูง ในการสร้างชุดอิเล็กโทรดในการผลิตโอโซน โดยออกแบบให้ทำงาน 1 ชั่วโมงและสามารถผลิตโอโซนได้สูงสุด 125.3 mgO<sub>3</sub>/hr

ตัวอย่างการสร้างโอโซนด้วยความถี่สูงและคงที่ด้วยความถี่ 3.7 kHz ขึ้นไปจากเครื่องผลิตโอโซน ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 3 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นหลอดผลิตโอโซน ส่วนที่เป็นชุดจ่ายไฟแรงดันสูงความถี่สูงและปั๊มลม หลอดผลิตโอโซนประกอบด้วยท่อสเตนเลส 2 ท่อ โดยมีท่อแก้วไฟร์เร็กซ์วางระหว่งกลางซึ่งทำหน้าที่เป็นสารไดอิเล็กตริก โดยที่ช่องว่างอากาศที่จะเกิดการดีสชาร์จจะมีค่าเท่ากับ 1.2 mm. และมีความยาว 200 mm. ทำการวัดอัตราการผลิตโอโซนเมื่อจ่ายไฟที่ความถี่คงที่เท่ากับ 3.7 kHz และอัตราการไหลของอากาศต่างๆ กันตั้งแต่ 5 ถึง 50 l/min จากผลการทดลองพบว่าเครื่องผลิตโอโซนให้ค่าของโอโซนสูงสุดเท่ากับ 4.3 g/h ที่อัตราการไหลของอากาศ 40 ถึง 45 l/min

โดยในโครงการนี้ได้ออกแบบเครื่องผลิตโอโซนจากวงจรเรโซแนนซ์ความถี่สูง โดยอาศัยหลักการเกิดเรโซแนนซ์ในการยกระดับแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมกับปริมาณโอโซนที่ต้องการ

### 2.2.2 สนามไฟฟ้า

สนามไฟฟ้าคือความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากพลังงานของประจุในรูปแบบต่างๆ รวมกันในสนามไฟฟ้าที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์ผลกระทบของสนามไฟฟ้าต่อพฤติกรรมกระจายสนามไฟฟ้าในเนื้อฉนวนนั้นมีประโยชน์อย่างมากในการออกแบบอุปกรณ์ เครื่องมือสำหรับการใช้อย่างปลอดภัย สนามไฟฟ้าสามารถแบ่งได้ 3 ประเภทคือ

- สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform Field)
- สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly Nonuniform Field)
- สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly Nonuniform Field)

สนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ (Uniform Field) เมื่อป้อนแรงดันให้อิเล็กโทรไลต์ สนามไฟฟ้าจะมีความสม่ำเสมอหรือสปาร์คทันทีที่สนามไฟฟ้าเกิดความเครียดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรด (ซึ่งเท่ากันทุกจุด) ขึ้นอยู่กับค่าประมาณหนึ่งและเพิ่มขึ้นอย่างมากทันทีในด้านของสนามไม่สม่ำเสมอ (Nonuniform Field) อิเล็กโทรดนี้แต่ละสนามไฟฟ้าที่มีค่าที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับความแตกต่าง ณ จุดต่างๆ แต่ถ้าเขียนเส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่าจะได้ดังรูปที่ 2.1 เห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโทรดทรงกลมซึ่งอาจคำนวณได้จากสมการ

$$E_{\max} = \frac{U}{d\eta^*} \quad (2.3)$$

เมื่อ

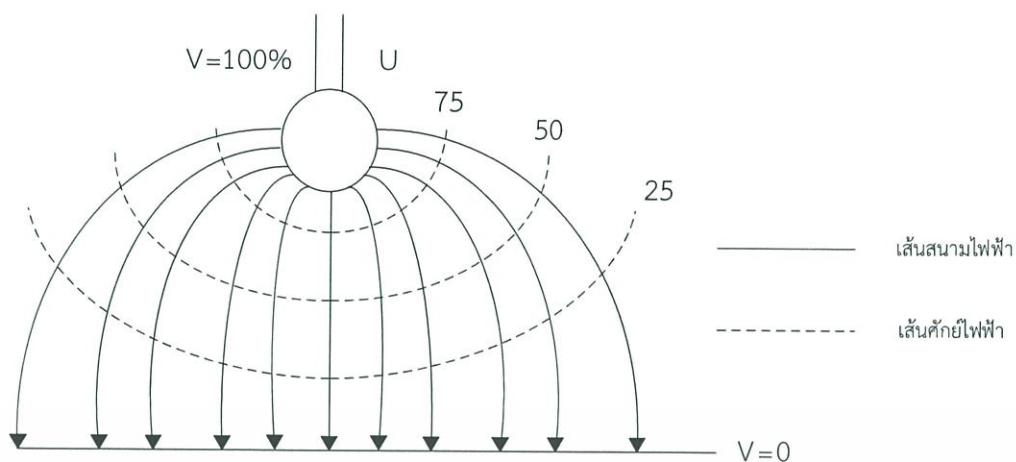
$E_{\max}$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิด  
 $U$  คือ แรงดันป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด (Corona Inception Voltage)  
 $\eta^*$  คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (Field Utilization Factor)

$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}} \leq 1 \quad (2.4)$$

โดย สนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ (Uniform Field) จะมีค่า  $\eta^* = 1$

สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly Nonuniform Field) จะมีค่า  $100\% < \eta^* < 40\%$

สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly Nonuniform Field) จะมีค่า  $\eta^* < 20\%$



รูปที่ 2.1 เส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของอิเล็กโทรดทรงกลม

จากอิเล็กโทรดในรูปที่ 2.1 แม้จะมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดถึงค่าวิกฤตแล้วก็ตาม จะไม่เกิดการเบรกดาวน์แต่จะเกิดโคโรน่าในบริเวณพื้นผิวอิเล็กโทรดคือบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ส่วนบริเวณอื่นๆ ยังมีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำจะไม่ทำให้เกิดโคโรน่า ดังนั้นในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดจะเกิดดิสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ (คือไม่ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโทรด) เรียกว่า ดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) ปรากฏการณ์นี้อาจเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือเป็นระยะๆ ดังนั้นจึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้อิเล็กโทรด กระแสนี้จะเกิดขึ้นและวัดได้ก่อนการเกิดเบรกดาวน์ เรียกว่า “กระแสโคโรน่า (Corona Current) หรือ กระแสดิสชาร์จ” การเกิดโคโรน่าจึงทำให้สนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตเปลี่ยนไป เพราะมีประจุค้าง (Space Charge) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดยังคำนวณได้จากสมการที่ 2.3 แต่  $\eta^*$  จะเปลี่ยนไป ดังนั้นค่าความเครียดเบรกดาวน์ของฉนวนจะคำนวณจากสมการที่ 2.3 ไม่ได้ อย่างไรก็ตาม สมการที่ 2.3 นี้อาจใช้คำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรน่าเริ่มเกิดได้ เพราะสนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตยังไม่เปลี่ยนแปลง จึงใช้ได้เฉพาะกรณีที่ไม่มีประจุค้างระหว่างอิเล็กโทรด (Free Of Space Charge) ค่าแรงดันเริ่มต้นจึงอาจเขียนในรูปสมการทั่วไปได้ว่า

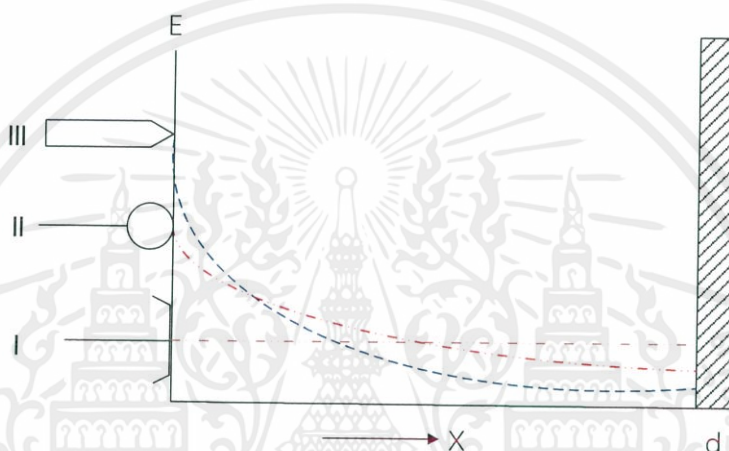
$$U_i = E_i \cdot d \eta^* \quad (2.5)$$

เมื่อ

$U_i$  คือ แรงดันเริ่มต้น

$E_i$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันเริ่มต้น  $U_i$

ในกรณีที้อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ค่า  $U_i$  คือ  $U_b$  และ  $E_i$  คือ  $E_b$  ถ้าเป็นอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง  $U_b > U_i$  ค่าแรงดันเบรกดาวน์นี้อาจจะคำนวณได้ง่ายๆ ทั้งนี้เพราะไม่ทราบถึงการกระจายของประจุค้ำว่าเป็นอย่างไร ดังนั้นการคำนวณความคงทนต่อแรงดันทางไฟฟ้าของการเป็นฉนวนที้อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงโดยทั่วไปจะกำหนดด้วยค่าแรงดันเริ่มต้น หรือความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มต้นเป็นตัวบอกถึงค่าความคงทนการเป็นฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า อย่างไรก็ตามความคงทนต่อการเป็นฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้านี้ นอกจากนี่ยังขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโทรด เช่น ระยะห่างของอิเล็กโทรด รัศมีความโค้งของอิเล็กโทรด ลักษณะพื้นผิวของอิเล็กโทรด แล้วยังขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์อื่นๆ อีกหลายประการ



รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้ากับอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ

ความเครียดสนามไฟฟ้า E (Electrical Field Stress)

จากกฎของคูลอมบ์

$$F = \frac{Q_1}{4\pi r^2} \cdot \frac{1}{\epsilon} Q_2 f \quad (2.6)$$

ถ้าใช้นิยามของความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า จะเขียนได้ว่า

$$F = \frac{D}{\epsilon} Q_2 \quad (2.7)$$

จากสมการที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าแรงกระทำบนประจุ  $Q_2$  เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ  $\frac{D}{\epsilon}$  ซึ่งมีหน่วยเป็นนิวตันต่อคูลอมบ์  $\frac{N}{C}$  กล่าวคือ เป็นแรงต่อหนึ่งหน่วยประจุ เป็นแรงในสนามไฟฟ้าหรือเรียกว่าความเครียดสนามไฟฟ้า  $E$  (Electrical Field Stress) ซึ่งนิยามด้วยความสัมพันธ์ว่า

$$\text{โดย} \quad F = \frac{D}{\epsilon} \quad (2.8)$$

กฎของคูลอมบ์ จึงเขียนสมการทั่วไปได้ว่า

$$F = QE \quad (2.9)$$

จะเห็นได้ว่าแรงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดของสนามไฟฟ้าบางครั้งเรียกว่า ความเข้มของสนามไฟฟ้าเป็นหน่วย  $\frac{kV}{cm}$  ในทำนองเดียวกันความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในตัวนำเชิงเส้นแบบไอโซโทรปิกเป็นสัดส่วนกับสนามไฟฟ้างั้น จึงเขียนได้ว่า

$$J = \sigma E \quad (2.10)$$

เมื่อ

$J$  คือ ความหนาแน่นของกระแส เป็นเวกเตอร์ มีหน่วยเป็น  $A/m^2$

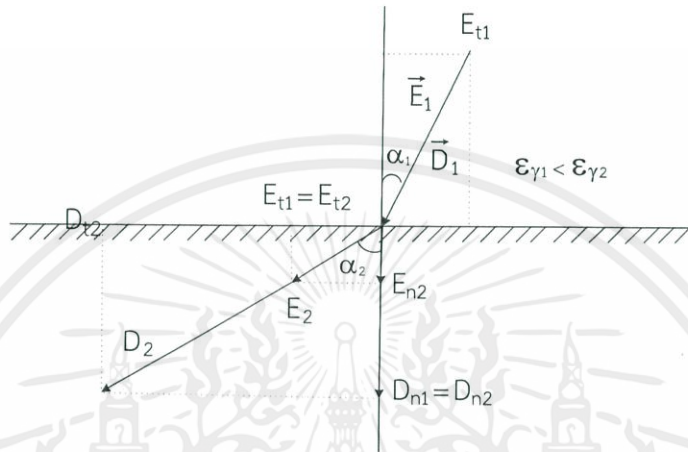
$\sigma$  คือ สภาพนำไฟฟ้าของตัวนำ มีหน่วยเป็น  $S/m = \text{Simens/meter} = \frac{1}{\rho}$

$\rho$  คือ สภาพต้านทานไฟฟ้าเป็น  $\Omega \cdot m$

ความเครียดจากสนามไฟฟ้าถือเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับฉนวนไฟฟ้าหรือระบบไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งฉนวนที่ใช้งานได้จริงส่วนใหญ่นอกจากจะทำหน้าที่เป็นฉนวนแล้วยังต้องทำหน้าที่เป็นตัวรองรับน้ำหนักได้อีกด้วย ซึ่งหมายความว่าโครงสร้างของฉนวนจะต้องทนต่อแรงทางกล ดังนั้นการหุ้มฉนวนด้วยของเหลวหรือก๊าซจึงจำเป็นต้องใช้กับฉนวนกันความร้อนที่เป็นของแข็ง ฉนวนกันความร้อนที่ใช้แตกต่างกันจะมีค่าพิเศษ (Permittivity) และค่าความต้านทานเฉพาะที่แตกต่างกัน ก่อให้เกิดชั้นของฉนวนซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือการหักเหของเส้นทางสนามไฟฟ้าและ

ความเค้นของสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนต่างๆ ในกรณีของสนามไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้า DC การกระจายของสนามไฟฟ้าถูกกำหนดโดยความต้านทานของฉนวนและการก่อประจุ

การหักเหแนวเส้นสนามไฟฟ้าที่รอยต่อของฉนวนต่างชนิดโดยอาศัยหลักความจริงที่ว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวสัมผัส  $E_t$  ของรอยต่อฉนวนต่างชนิดกันมีค่าคงตัวและความหนาแน่นของเส้นฟลักซ์ไฟฟ้า  $D_n$  ในแนวตั้งฉากกับรอยต่อมีค่าคงตัว กล่าวคือ  $E_{t1} = E_{t2}$  และ  $D_{n1} = D_{n2}$  ดังแสดงในรูปที่ 2.3

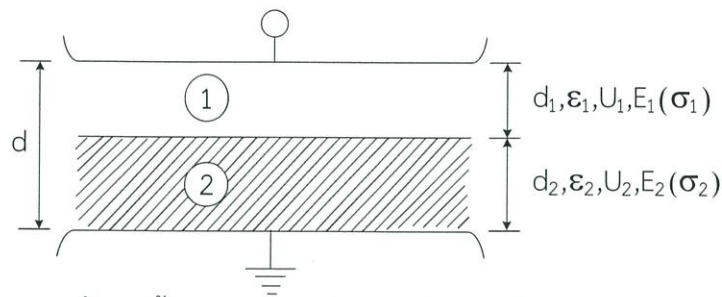


รูปที่ 2.3 การหักเหของสนามไฟฟ้าตรงรอยต่อของฉนวน

จากความสัมพันธ์  $D = \epsilon E$  ดังนั้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ว่า

$$\frac{\operatorname{tg}(\alpha_1)}{\operatorname{tg}(\alpha_2)} = \frac{E_{n2}}{E_{n1}} = \frac{D_{n1}}{D_{n2}} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \quad (2.11)$$

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเส้นฟลักซ์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าในสารที่มีค่ามากกว่านั้นจะหักเหออกจากแนวตั้งฉากหรือหักเหไปทางตะเข็บตัวเอง แต่เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่ากับส่วนที่มีค่าสูงจะหักเหไปทางแนวตั้ง ชั้นฉนวนที่แตกต่างกันจะถูกจัดเรียงในแหล่งจ่ายไฟสม่ำเสมอ ในทางทฤษฎีการวางชั้นฉนวนระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ดีที่สุดคือเพื่อป้องกันการหักเหของสนามไฟฟ้าหรือเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่านั้น นั่นคือข้อต่อของฉนวนอยู่บนพื้นผิวของศักย์ไฟฟ้าเท่าและหลีกเลี่ยงกระแสไฟฟ้า ความเค้นของสนามในเส้นสัมผัสค่าความเค้นของสนามไฟฟ้าในแต่ละชั้นของฉนวนเป็นค่าคงที่หรือเท่ากัน เมื่อวางในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ชั้นฉนวนซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

สนามไฟฟ้าและแรงดันกระจายในฉนวนทั้งสองอาจจะคำนวณได้จากสมการสนามไฟฟ้าพื้นฐาน คือ  $E=Ud$  เพราะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอใช้ความสัมพันธ์  $D= \epsilon E$  เมื่อสนามไฟฟ้าเป็นแบบไฟฟ้ากระแสสลับ ฉะนั้นจะมีค่าคงตัว  $D$  และลักษณะการวางของฉนวนอยู่ในสนามไฟฟ้าเสมือนว่ามีตัวเก็บประจุต่ออันดับกัน ฉะนั้นประจุในตัวเก็บประจุแต่ละชั้นจะมีค่าเท่ากันคือ

เมื่อ  $C_1$  และ  $C_2$  เป็นค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนชั้นที่มี  $\epsilon_1$  และ  $\epsilon_2$  ตามลำดับแต่เนื่องจาก

$$Q = C_1 U_1 = C_2 U_2 \quad (2.12)$$

$$C_1 = \frac{\epsilon_1}{d_1} \quad \text{และ} \quad C_2 = \frac{\epsilon_2}{d_2} \quad (2.13)$$

ฉะนั้นอัตราส่วนของแรงดัน

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\epsilon_2 \cdot d_1}{\epsilon_1 \cdot d_2} \quad (2.14)$$

$$U_2 = \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \cdot U_1 \quad (2.15)$$

จาก

$$U = U_1 + U_2 \quad (2.16)$$

$$= U_1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \cdot U_1 \quad (2.17)$$

$$= U_1 \left( 1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \right) \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉะนั้น

$$U_1 = \frac{U}{\left(1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1}\right)} \quad (2.19)$$

แทนค่า  $U_1$  จะได้

$$U_2 = \frac{\frac{\epsilon_1 \cdot d_2 \cdot U}{\epsilon_2 \cdot d_1}}{\left(1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1}\right)} \quad (2.20)$$

ฉะนั้นความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนทั้งสองคือ

$$E_1 = \frac{U_1}{d_1} = \frac{U}{d_1} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1}\right)} \quad (2.21)$$

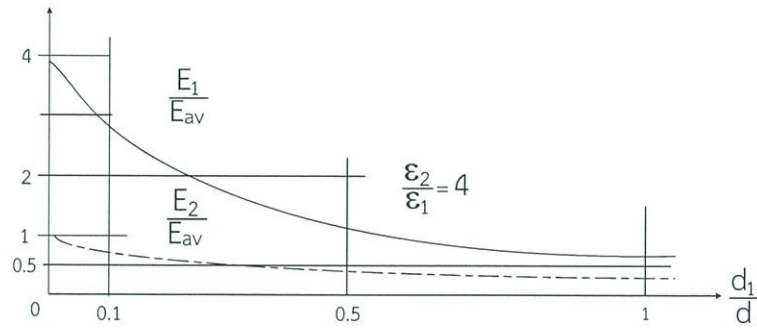
$$E_2 = \frac{U_2}{d_2} = \frac{\frac{\epsilon_1 \cdot d_2 \cdot U}{\epsilon_2 \cdot d_1}}{d_2 \left(1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1}\right)} \quad (2.22)$$

$$E_2 = \frac{\left(\frac{\epsilon_1 \cdot U_2}{\epsilon_2}\right)}{d_2 \left(1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1}\right)} \quad (2.23)$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad (2.24)$$

จะเห็นได้ว่า ความเครียดสนามไฟฟ้า  $E_1$  จะมากกว่า  $E_2$  ตามอัตราส่วน  $\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$  เมื่อ

$\epsilon_2 > \epsilon_1$  ถ้าเปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนฉนวนที่มี TM (Transverse Magnetic Waves) ต่ำ สนามไฟฟ้าจะยิ่งสูงขึ้น ดังรูปภาพที่ 2.5



รูปที่ 2.5 เปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นกับค่าเฉลี่ย

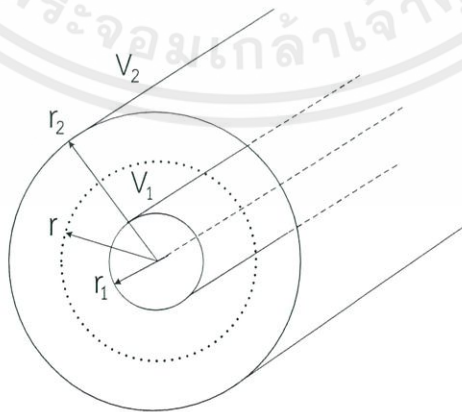
ฉนวนไฟฟ้าแรงสูงจะถูกจำกัดหรือพิจารณาจากความเครียดสนามไฟฟ้า ดังนั้นการออกแบบฉนวนควรรูปร่างและขนาดของสนามไฟฟ้าเพื่อเลือกชนิดและรูปร่างของรูปทรงเรขาคณิตของสนามไฟฟ้า

### 2.2.3 อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกัน

ทรงกระบอกซ้อนกัน เมื่ออิเล็กโทรดมีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนกัน เส้นฟลักซ์ไฟฟ้าจะอยู่ในแนวรัศมีและพื้นผิวของทรงกระบอกคือพื้นผิวศักย์ไฟฟ้าเท่า ดังนั้นอาศัยอินทิกรัล สมการที่ 4 ของแมกซ์เวลล์ฉนวนไฟฟ้าแรงสูงจะถูกจำกัด หรือพิจารณาจากความเครียดสนามไฟฟ้าจึงมีความสำคัญดังนั้นการออกแบบฉนวนต้องรูปร่างและขนาดของสนามไฟฟ้าเพื่อเลือกชนิดและรูปร่างของรูปทรงเรขาคณิตของสนามไฟฟ้า

สำหรับทรงกระบอกซ้อนกันมีความยาว  $l$  รัศมี  $r$  ( $r_1 \leq r \leq r_2$ ) ดังภาพที่ 2.6 และ  $E = \frac{D}{\epsilon}$  จะหาค่าสนามไฟฟ้าที่มีรัศมี  $r$  ได้คือ

$$E_r = \frac{Q}{2\pi r} \cdot \ln \frac{r_1}{r_2} \quad (2.25)$$



รูปที่ 2.6 ทรงกระบอกซ้อนกัน

$$U = \int_{r_1}^{r_2} E_r dr = \frac{Q}{2\pi r} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} \quad (2.26)$$

และเส้นแรงดันที่ป้อนระหว่างทรงกระบอกทั้งสองคือ

$$U = \frac{Q}{2\pi r l} \cdot \ln \frac{r_1}{r_2} \quad (2.27)$$

จึงได้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่  $r_1 < r < r_2$

$$E_r = \frac{U}{r \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.28)$$

ฉะนั้นความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{\max}$  จะเกิดที่ผิวทรงกระบอกด้านใน นั่นคือ

$$E_{\max} = E_{r1} = \frac{U}{r \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.29)$$

จากนิยามแฟคเตอร์สนาม  $\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}}$  โดยที่

$$E_{av} = \frac{U}{r_2 - r_1} \quad (2.30)$$

$$\text{ฉะนั้น} \quad \eta^* = \frac{r \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}}{r_2 - r_1} \quad (2.31)$$

ความจุไฟฟ้าของทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

$$C = \frac{l}{2k_e \ln(b/a)} \quad (2.32)$$

- โดยที่
- l คือ ความยาวของอิเล็กโทรด
  - $k_e$  คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับตัวกลางของระบบ  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$   
เมื่อตัวกลางคืออากาศจะได้ค่า  $k_e$  เท่ากับ  $9 \times 10^9$
  - b คือ รัศมีวงนอกของทรงกระบอก
  - a คือ รัศมีวงในของทรงกระบอก

#### 2.2.4 มิติที่เหมาะสม (Optimum Dimension)

ในงานวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงมิติที่ถูกต้องคือการออกแบบที่ให้มิติที่เล็กที่สุดเพื่อรับแรงดันสูงสุด ตัวอย่างเช่นในกรณีของการกำหนดรัศมีด้านนอกของ  $r_2$  หากขั้วไฟฟ้าในรัศมี  $r_1$  นั้นใกล้เคียงกับ  $r_2$  มากระยะทางระหว่างขั้วไฟฟ้าด้านนอกและวงกลมด้านในคือ  $d = r_2 - r_1$  มีค่าน้อยจะเกิดเบรกดาวน์ง่าย แต่การลดรัศมี  $r_1$  เพื่อเพิ่มค่า  $d$  จะเพิ่มความเค้นของสนามไฟฟ้าบนพื้นผิวตัวนำจนเกิดวิกฤตและเกิดโคโรนาได้ง่าย จะหาจุดที่เหมาะสมของ  $r_1$  ที่อยู่ระหว่าง  $0 - r_2$  ที่ทำให้ระบบสามารถทนต่อแรงดันสูงสุดโดยไม่ต้องโคโรนาแรกในกรณีของอิเล็กโทรดทรงกระบอกแทนคือ

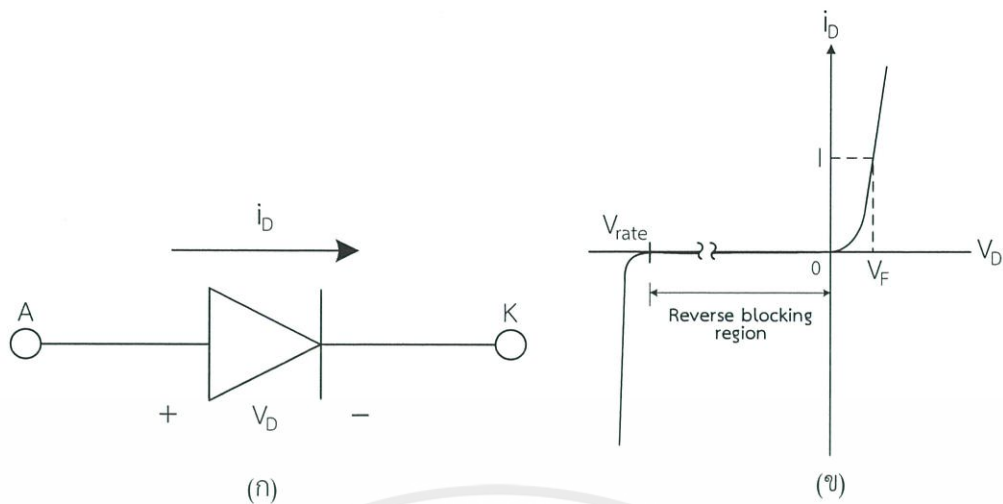
$$\left(\frac{r_2}{r_1}\right)_{\text{opt}} = e \quad (2.33)$$

### 2.3 อินเวอร์เตอร์ [2], [4]

#### 2.3.1 ประเภทของอุปกรณ์ Power Electronics

##### 2.3.1.1 ไดโอด (Diode)

รูปที่ 2.7 แสดงสัญลักษณ์ของ Diode เมื่อ Diode นำกระแส (Forward Bias) Voltage ที่ตกคร่อมจะมีค่าต่ำ (ประมาณ 1 V) ในทางตรงกันข้ามเมื่อเกิด Reverse Bias กระแสจะไหลผ่านได้น้อยมาก (ประมาณ  $1 \mu\text{A}$ ) จากรูปที่ 2.7 (ข) เมื่อ Reverse Voltage มีค่าสูงเกิน Reverse Blocking region จะทำให้ Diode พังและจะนำกระแสอย่างมาก รูปที่ 2.7 (ค) แสดง Modeling ของ Diode ที่ใช้ในการ Simulate โดยให้ Forward Bias Voltage = 0 และไม่มี Reverse Blocking Region

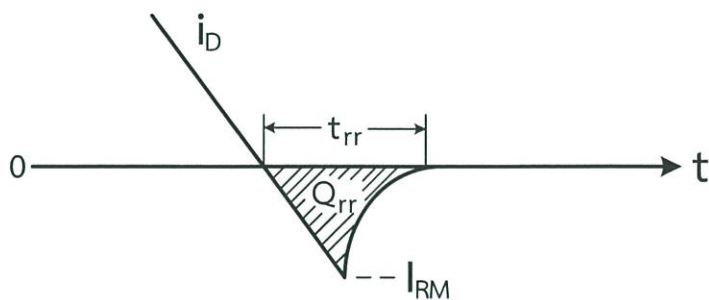


รูปที่ 2.7 ไดโอด (ก) สัญลักษณ์ (ข) พฤติกรรมระหว่างกระแสกับแรงดันที่สภาวะปกติ  
(ค) พฤติกรรมระหว่างกระแสกับแรงดันในอุดมคติ

ประเภทของ Diode ที่สำคัญ

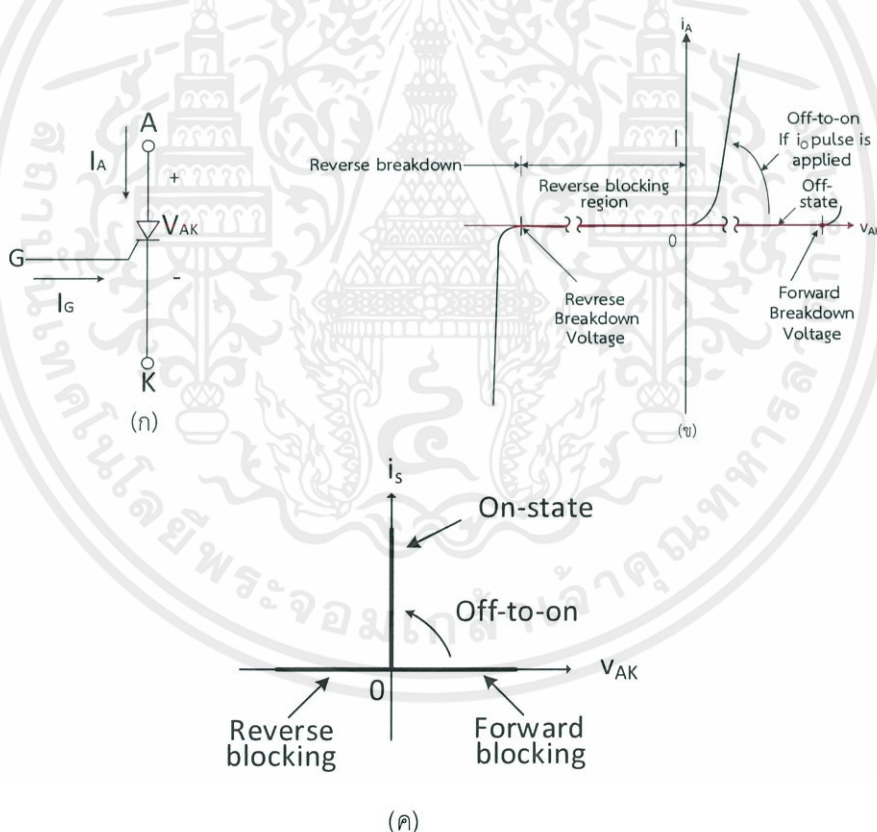
1. Schottky Diode มีค่า Forward Bias ต่ำ (0.3 V) ใช้กับแรงดันไฟฟ้าขนาดต่ำ (50–100 V)
2. Fast-recovery Diode ออกแบบมาใช้กับวงจร Switching เพราะใช้งานกับความถี่สูง และมีค่า Reverse-recovery time ( $t_{rr}$ ) ต่ำ (หน่วย ns)
3. Line-frequency Diode มีค่า  $t_{rr}$  สูงจึงใช้ในความถี่ต่ำ (50 Hz) แต่พิกัดของกระแสและแรงดันมีค่าสูงมาก

จากรูปที่ 2.8 จะเห็นว่าเมื่อไดโอดกำลังจะปิดกระแสจะไหลจากบวกเป็น 0 แต่ไดโอดต้องการกระแสลบเพื่อที่จะปิดในช่วงเวลานี้กระแสจะไหลเป็นลบ หรือมี Reverse Current และช่วงเวลาที่ Reverse Current คือค่า  $t_{rr}$  ของไดโอดนั่นเอง ในงานของสวิตซิ่งนั้นค่า  $t_{rr}$  จะต้องมีค่าน้อย เมื่อเทียบกับคาบเวลาของความถี่สวิตซิ่ง เพื่อลดกำลังสูญเสียของอุปกรณ์ให้น้อยที่สุด

รูปที่ 2.8 การเกิดของ  $t_{rr}$ 

### 2.3.1.2 ไทริสเตอร์ (Thyristor)

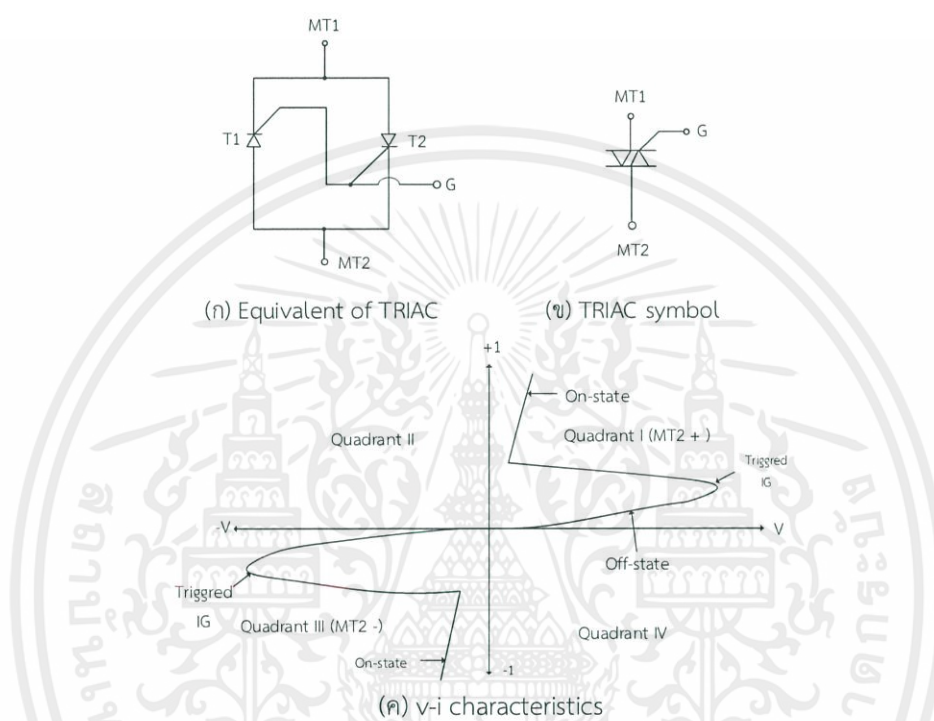
รูปที่ 2.9 แสดงสัญลักษณ์ของ Silicon Controlled Rectifier, ไทริสเตอร์เป็นเหมือนไดโอด แต่มีขา Gate (G) เพื่อกระตุ้น (Trig) ให้ไดโอดทำงานภายในเวลาที่ต้องการ สำหรับการไม่ทำงานมันจะต้องให้ Reverse Bias เหมือนไดโอดปกติเนื่องจาก SCR เป็นเหมือนไดโอดกระแสไหลในทิศทางเดียวเท่านั้น



รูปที่ 2.9 ไทริสเตอร์แบบเอสซีอาร์ (ก) สัญลักษณ์  
(ข) พฤติกรรมระหว่างกระแสกับแรงดันที่สภาวะปกติ  
(ค) พฤติกรรมระหว่างกระแสกับแรงดันในอุดมคติ

รูปที่ 2.10 แสดงสัญลักษณ์ของ Triac (Triode AC Switch) วงจรภายในของ Triac ประกอบด้วย 2 SCRs ขนานกัน แต่จะสลับขั้วเพื่อให้กระแสไหลผ่าน 2 ทาง มาควบคุมระบบไฟฟ้า กระแสสลับเช่นวงจรรีไฟเป็นต้น

การ Trig นั้นคือการควบคุมให้ทำงานได้อย่างเดียว ส่วนการปิดการทำงานนั้นจะไม่สามารถควบคุมโดยการ Trig สัญญาณได้ Triac จะไม่ทำงานก็ต่อเมื่อให้ Reverse Bias เหมือนไดโอดธรรมดาเท่านั้น



รูปที่ 2.10 ไตรสเตอร์แบบ Triac (ก) สัญลักษณ์  
(ข) พฤติกรรมระหว่างกระแสกับแรงดันที่สภาวะปกติ  
(ค) พฤติกรรมระหว่างกระแสกับแรงดันในอุดมคติ

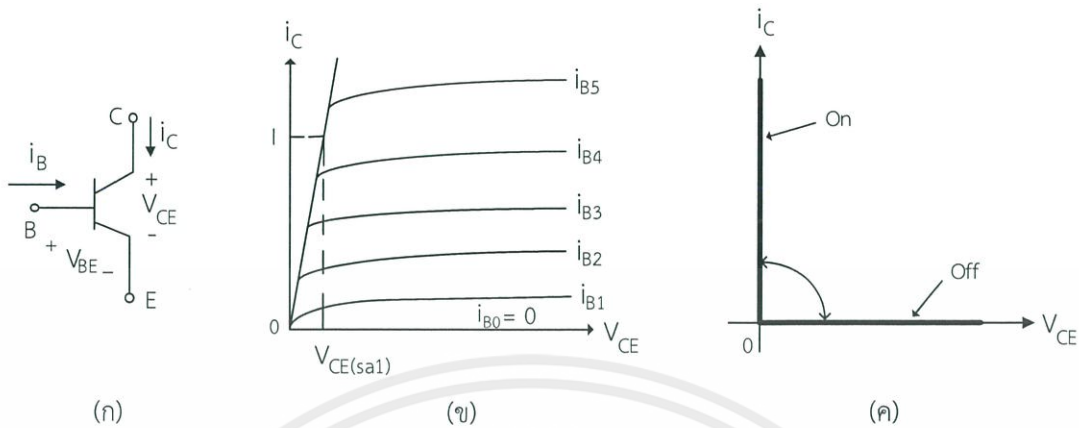
### 2.3.1.3 BJT (Bipolar Junction Transistor)

รูปที่ 2.11 แสดงสัญลักษณ์ของ BJT แบบ NPN, BJT จะใช้กระแส  $I_B$  เพื่อนำไปควบคุมกระแสของ  $I_C$  โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

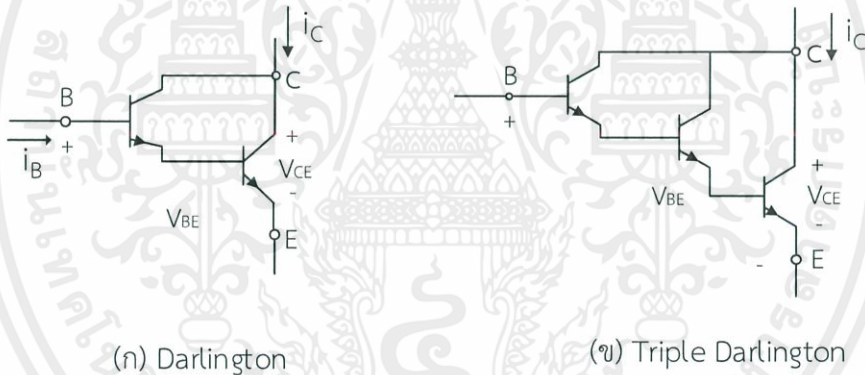
$$I_C = I_B \cdot h_{FE} \quad (2.34)$$

ค่า  $h_{FE}$  ของ Power BJT อยู่ระหว่าง 5-10 ซึ่งมีค่าต่ำและเมื่อคุณต้องการทำให้ค่า  $h_{FE}$  สูงขึ้นควรเลือก Darlington หรือ Triple Darlington ซึ่งค่า  $h_{FE}$  สูงขึ้นตามการคูณของแต่ละ

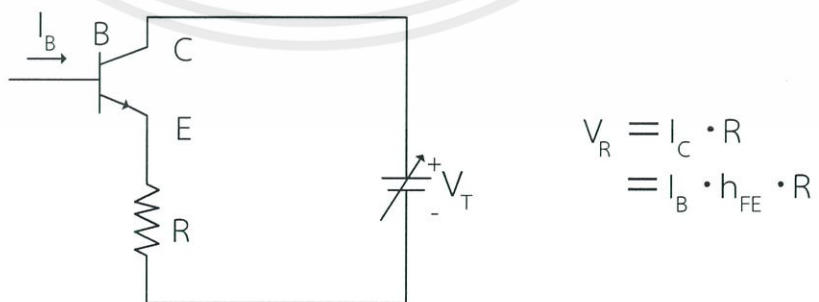
$h_{FE}$  ของ BJT ซึ่งการใช้ BJT เป็นสวิตช์ต้องป้อนกระแส  $i_B$  จำนวนมากจนกว่าอิมิตัว เพื่อให้สามารถขับโหลดและต้องป้อน  $i_B$  ตลอดเวลา On, BJT มีค่า On-voltage ประมาณ 0.1 - 0.2 V



รูปที่ 2.11 BJT (ก) สัญลักษณ์ (ข) พฤติกรรมระหว่างกระแสกับแรงดันที่สภาวะปกติ (ค) พฤติกรรมระหว่างกระแสกับแรงดันในอุดมคติ



รูปที่ 2.12 การเพิ่มค่า  $h_{FE}$  ของ Power BJT

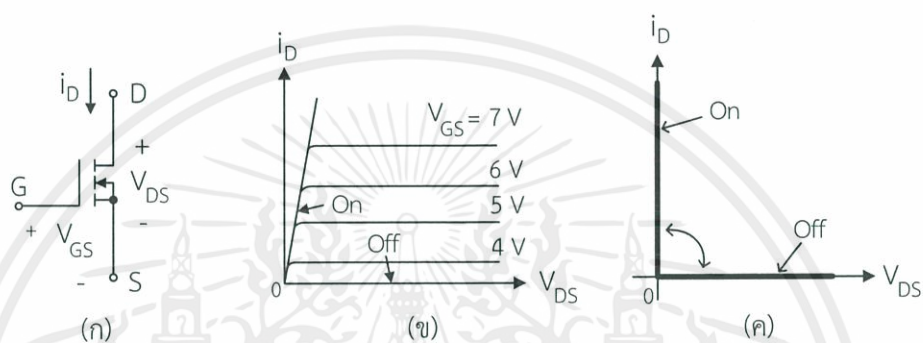


รูปที่ 2.13 วงจรพื้นฐาน BJT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

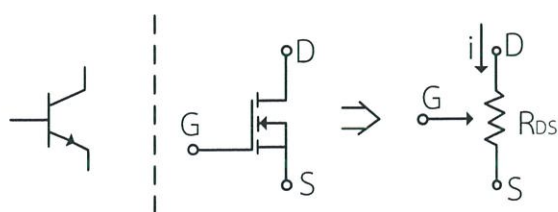
### 2.3.1.4 มอสเฟต (Metal-Oxide-Semiconductor-Field Effect Transistor : MOSFET)

รูปที่ 2.14 แสดงสัญลักษณ์ของมอสเฟต การทำงานของมอสเฟตจะใช้แรงดันระหว่าง Gate (G) กับ Source (S) เพื่อไปควบคุมความต้านทานระหว่าง D-S ให้มีค่าลดลง ( $r_{DS(ON)}=1-100\text{ m}\Omega$ ) และทำให้กระแสไหลมอสเฟต มีช่วงเวลาในการสวิตช์ ( $t_{tr}$ ) อยู่ประมาณ 10-100 nS ซึ่งถือว่าเป็นความเร็วที่สูงที่สุดสำหรับอุปกรณ์สวิตช์ที่มีในปัจจุบัน ค่าความต้านทานระหว่างขา G-S จะมีค่าสูงมาก ทำให้สามารถออกแบบวงจรขับได้ง่าย แต่ค่าความจุไฟฟ้าที่อยู่ระหว่าง G-S ก็เป็นปัญหาสำหรับการขับในความถี่สูงซึ่งจะต้องใช้กำลังสูงขึ้น



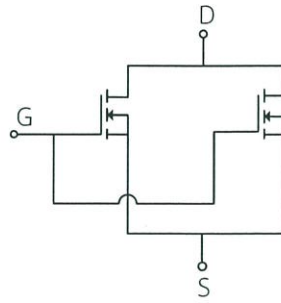
รูปที่ 2.14 มอสเฟต (ก) สัญลักษณ์ (ข) พฤติกรรมระหว่างกระแสกับแรงดันที่สภาวะปกติ (ค) พฤติกรรมระหว่างกระแสกับแรงดันในอุดมคติ

เนื่องจาก MOSFET มีเวลาเปลี่ยนสั้นมากทำให้สูญเสียพลังงานน้อยลง แต่เนื่องจากโครงสร้างภายในและคุณสมบัติของวัสดุเซมิคอนดักเตอร์ของ MOSFET จึงสามารถใช้งานในช่วง 1,000 V, 100 A เท่านั้น มอสเฟตแตกต่างกับ BJT ตรงที่ขา D-S สามารถมองเป็นความต้านทานที่เปลี่ยนค่าได้ตามแรงดันของ G-S ดังแสดงในรูปที่ 2.15 เราสามารถขนานขาของมอสเฟต ตามรูปที่ 2.16 เพื่อเพิ่มกระแสได้ เพราะ D-S สามารถมองเป็นความต้านทานได้นั่นเอง แต่ทว่าการต่อขา G-S ขนานกันหลายตัวจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้ารวมของขา G-S สูงขึ้นมีผลให้วงจรขับ (Drive circuit) ต้องจ่ายกระแสมากขึ้น ข้อแตกต่างระหว่าง MOSFET และ BJT ก็คือ MOSFET จะมีอัตราการขยายที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามกับ BJT ทำให้ MOSFET มีเสถียรภาพมากกว่า BJT



รูปที่ 2.15 การมองเป็นความต้านทานที่ขา D-S ของมอสเฟต

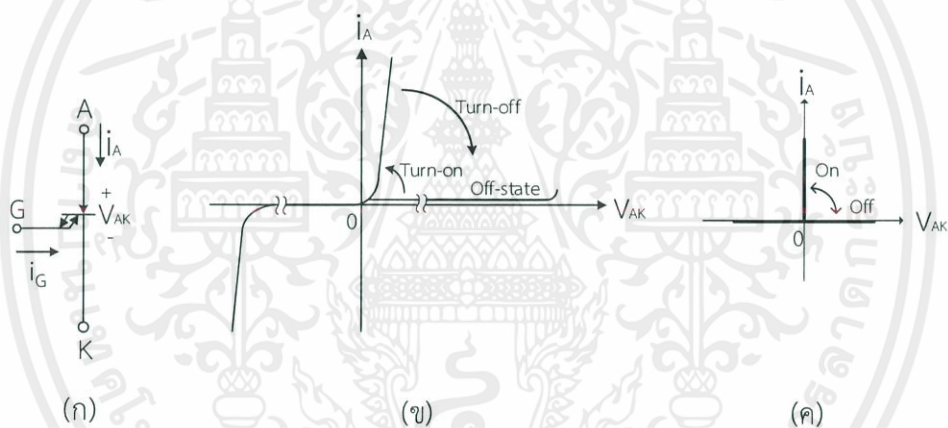
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 การขนานของมอสเฟต เพื่อเพิ่มกระแส

### 2.3.1.5 GTO (Gate-Turn-off-Thyristor)

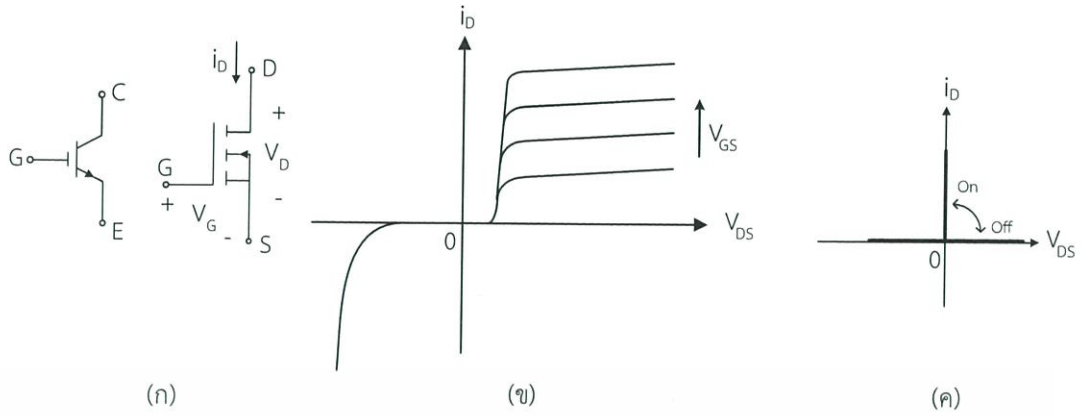
รูปที่ 2.17 แสดงสัญลักษณ์ของ GTO ซึ่ง GTO มีการทำงานคล้ายเอสซีอาร์ คือเมื่อให้  $G, K = +, -$  จะทำให้กระแสไหลผ่าน A-K ได้ (Turn On) แต่ที่แตกต่างจาก SCR ก็คือเมื่อให้ค่าของ  $G, K = -, +$  จะสามารถสั่งให้กระแสไหลผ่าน A-K ไม่ได้ (Turn Off)



รูปที่ 2.17 GTO (ก) สัญลักษณ์ (ข) พฤติกรรมระหว่างกระแสกับแรงดันที่สภาวะปกติ (ค) พฤติกรรมระหว่างกระแสกับแรงดันในอุดมคติ

### 2.3.1.6 ไอจีบีที IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors)

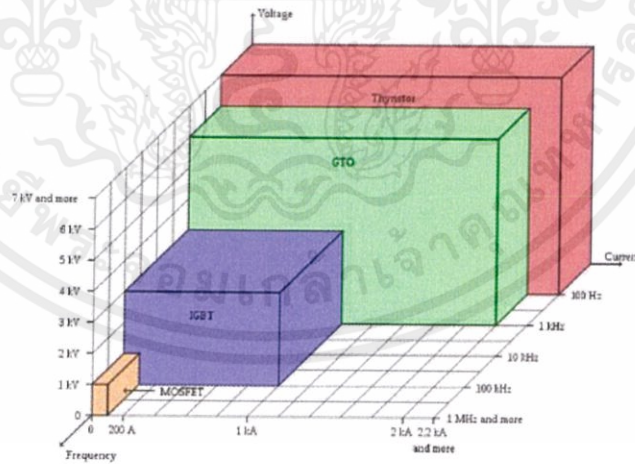
รูปที่ 2.18 แสดงสัญลักษณ์ของ IGBT ซึ่ง IGBT มีสัญลักษณ์คล้ายกับมอสเฟตกับ BJT รวมกันโดยที่ขา Gate (G) มีสัญลักษณ์คล้ายมอสเฟตเพราะมีค่าความต้านทานเกตสูง ( $10 \text{ M}\Omega$ ) เหมือนมอสเฟต และมีสัญลักษณ์คล้าย BJT ที่ขา D-S เพราะมีโครงสร้างคล้าย BJT และมีค่า  $V_{CE}(\text{On})$  ต่ำ ( $0.2 \text{ V}$ ) เหมือน BJT, IGBT มักใช้กันมากในงานสวิตซ์ซึ่งเพราะมีคุณสมบัติที่ดีของมอสเฟต และ BJT รวมกันอยู่



รูปที่ 2.18 IGBT (ก) สัญลักษณ์ (ข) พฤติกรรมระหว่างกระแสกับแรงดันที่สภาวะปกติ (ค) พฤติกรรมระหว่างกระแสกับแรงดันในอุดมคติ

2.3.1.7 การเปรียบเทียบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

รูปที่ 2.19 และตารางที่ 2.2 แสดงระดับแรงดัน กระแส ความถี่ของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งกำลัง แบบต่างๆ การเลือกใช้จะต้องเลือกตามการใช้งาน เช่น ไทริสเตอร์จะทนแรงดันและกระแสได้มาก แต่ไม่สามารถทำงานที่ความถี่สูงได้ ไทริสเตอร์และ GTO นั้น ส่วนใหญ่ใช้งานที่ความถี่ 50 Hz ซึ่งใช้ในการควบคุมเฟส ส่วน BJT IGBT และ MOSFET จะถูกใช้ในการควบคุมมอเตอร์ที่ต้องการการตอบสนองที่รวดเร็ว (Response Time) และต้องการความถี่สวิตซ์ที่สูงเพื่อลดเสียงรบกวนของมอเตอร์



รูปที่ 2.19 ระดับพิกัดสูงสุดของแรงดัน กระแส ความถี่ ของอุปกรณ์สวิตซ์กำลัง

ตารางที่ 2.2 ระดับพิกัดสูงสุดของแรงดัน กระแส ความถี่ ของอุปกรณ์สวิตซ์กำลัง

Device	Voltage rated	Current rated	Frequency rated
Thyristor	5 kV	3000 A	500 Hz
GTO	3 kV	2000 A	1 kHz
BJT	1.5 kV	700 A	10 kHz
IGBT	2 kV	500 A	80 kHz
MOSFET	1 kV	150 A	1 MHz

### 2.3.2 ตัวแปลงกำลัง (Power Converter)

ในตัวประมวลกำลังมีหลายขั้นตอนในการแปลงกำลังไฟฟ้า แต่ละขั้นตอนจะมีตัวแปลงกำลังประกอบด้วยอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เก็บและปล่อยพลังงานในเวลาชั่วขณะ (Energy Storage Element) เช่น ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำเป็นต้น ดังนั้นตัวแปลงกำลังหนึ่งตัวจะเท่ากับการแปลงกำลังไฟฟ้าเพียงหนึ่งขั้นตอนในตัวประมวลกำลังเท่านั้น ซึ่งสามารถแบ่งได้ตามความถี่, ทางเข้าและออกสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภทดังนี้

1. ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง หรือมีชื่อเฉพาะว่า วงจรเรียงกระแส (Rectifier)
2. ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ
3. ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ
4. ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ หรือมีชื่อเฉพาะว่า วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter)

ทั้งสี่ประเภทนั้นเรียกได้ว่าเป็นตัวแปลงกำลังหรือคอนเวอร์เตอร์ได้ แต่มีสองประเภทที่มีชื่อเฉพาะที่เรียกกันคือการแปลงกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง มีชื่อเรียกว่าวงจรเรียงกระแส และอีกวงจรมีการแปลงกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ มีชื่อเรียกเฉพาะว่าวงจรอินเวอร์เตอร์ สาเหตุที่พิจารณาเรียกประเภทของตัวแปลงกำลังจากกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยก็เพราะว่าการไหลของกำลังไฟฟ้าอาจเป็นไปได้ทั้งแบบเรียงกระแสหรืออินเวอร์เตอร์

#### 2.3.2.1 อินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์แบบอนุกรม

อินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์แบบอนุกรมเป็นตัวแปลงที่ก่อกำลังจาก DC เป็นกระแสสลับ ซึ่งเรียกว่าวงจรต่อเนื่องแบบอนุกรมเนื่องจากมีตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ (C) จะทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ซึ่งเท่ากับความถี่สวิตซ์ขั้นตอนการวิเคราะห์มีดังนี้

พิจารณาผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจร R-L-C จะได้อัตราการขยายแรงดันของวงจรซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \quad (2.35)$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega L}{R} - \frac{1}{\omega RC}\right)^2}} \quad (2.36)$$

ความถี่เรโซแนนซ์จะมีค่าเท่ากับ

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.37)$$

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.38)$$

ที่ความถี่เรโซแนนซ์ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะหักล้างกัน จึงมองเห็นเป็นโหลดมีค่าเฉพาะความต้านทานเท่านั้น

เมื่อแรงดันเอาต์พุตเป็นคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่  $f_o$  ผลของ L-C จะทำตัวเหมือนตัวกรองความถี่คือการทำให้แกนความถี่ผ่านและจะลดขนาดสัญญาณของลำดับฮาร์โมนิกต่างๆ ทำให้รูปคลื่นที่คร่อมความต้านทานเป็นรูปคลื่นไซน์ด้วยความถี่เดียวกับความถี่ของคลื่นสี่เหลี่ยม ขนาดของแรงดันความถี่หลักมูลของสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม  $\pm V_{dc}$  จะมีขนาดเท่ากับ

$$V_1 = \frac{4V_{dc}}{\pi} \quad (2.39)$$

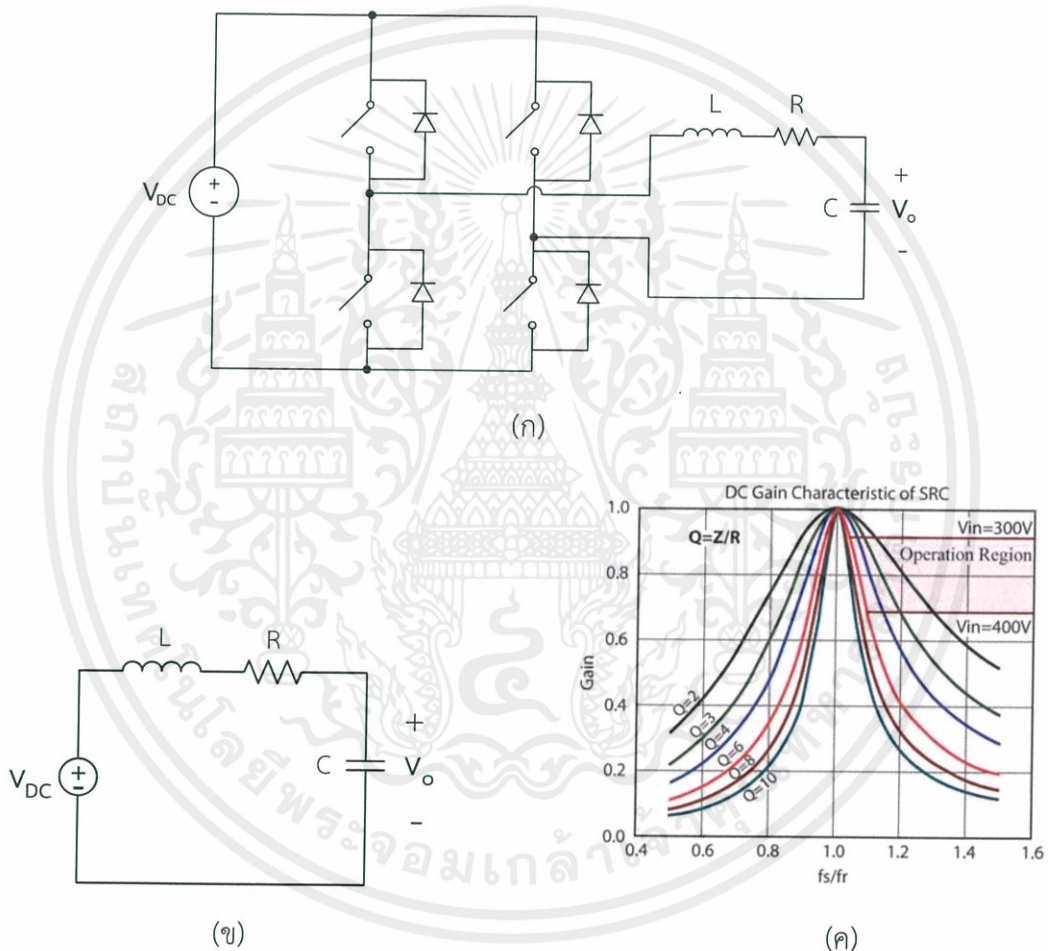
ผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่จะแสดงในพจน์ของแบนด์วิดท์ โดยแสดงในรูปตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor : Q) ดังนี้

$$Q = \frac{\omega_o L}{R} = \frac{1}{\omega_o RC} \quad (2.40)$$

อัตราขยายแรงดันสามารถแสดงในพจน์ของ  $\omega_o$  และ Q ดังนี้

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left( \frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega} \right)^2}} \quad (2.41)$$

ผลตอบสนองเชิงความถี่แสดงในรูปที่ 2.20 อัตราขยายแรงดันของผลตอบสนองเชิงความถี่บรรทัดฐาน (Normalized Frequency :  $f_s / f_o$ ) ที่ค่า Q ต่างๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานจะลดลงเมื่อค่า Q มีค่าสูงขึ้น ขณะที่การเพิ่มค่า L และลดค่า C จะมีผลทำให้ Q มีค่าสูงขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 2.20 (ก) วงจรมอดูเลเตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม

(ข) วงจรสมมูล R-L-C

(ค) รูปการจำลองค่าบรรทัดฐานของแรงดันไฟฟ้าด้านออกต่อความถี่การสวิตช์ด้วยโปรแกรม Mathcad

### 2.3.2.2 วงจรเรียงกระแส

วงจรเรียงกระแสคือวงจรสำหรับแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยวงจรเรียงกระแสที่มีทั้งแบบครึ่งคลื่นและแบบเต็มคลื่น รวมทั้งเฟสเดียวและสามเฟส ขึ้นอยู่กับว่าหลักการควบคุมไดโอด ซึ่งการใช้งานของแต่ละประเภทของวงจรมีขึ้นอยู่กับความเหมาะสมตามโหลดการใช้งาน

#### 1. วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวแบบครึ่งคลื่น

วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นใช้ไดโอด 1 ตัว เพื่อเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (คลื่นไซน์) เป็นแรงดันกระแสตรง ที่ด้านเอาต์พุตเฉพาะคลื่นไซเคิล และอินพุตเท่านั้น เพราะไดโอดจะทำงาน (นำกระแส: ON) เมื่อรับคลื่นไซน์ในครึ่งรอบบวกเท่านั้น (เพราะในช่วงเวลานั้นไดโอดจะได้รับไบแอสตรง) แต่เมื่ออินพุตคลื่นไซน์เป็นครึ่งรอบไดโอดเชิงลบจะไม่นำกระแส : OFF ดังนั้นจึงไม่มีกระแสไหลผ่านโหลด รูปคลื่นของเอาต์พุตจะปรากฏเพียงครึ่งหนึ่งของวงจรวัดดังนั้นจึงเรียกว่าวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่น ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 วงจรกระแสเฟสเดียวแบบครึ่งคลื่น

โดยสมการแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยด้านเอาต์พุตจะเป็นไปตามสมการที่ 2.43 และค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าเป็นไปตามสมการที่ 2.45

$$V_{o,avg} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} [V_m \sin(\omega t)] d(\omega t) \quad (2.42)$$

$$V_{o,avg} = \frac{V_m}{\pi} \quad (2.43)$$

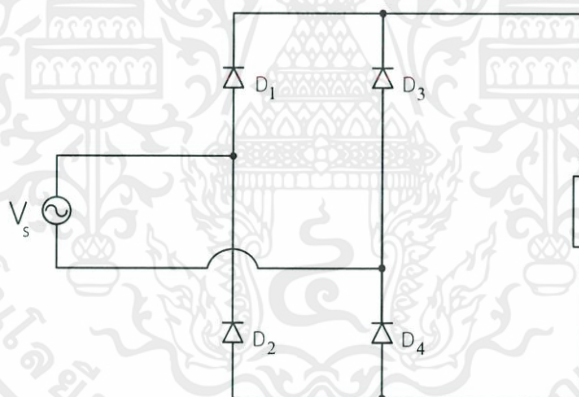
และ

$$V_{o,rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} [V_m \sin(\omega t)]^2 d(\omega t)} \quad (2.44)$$

$$V_{o,rms} = \frac{V_m}{\pi} \quad (2.45)$$

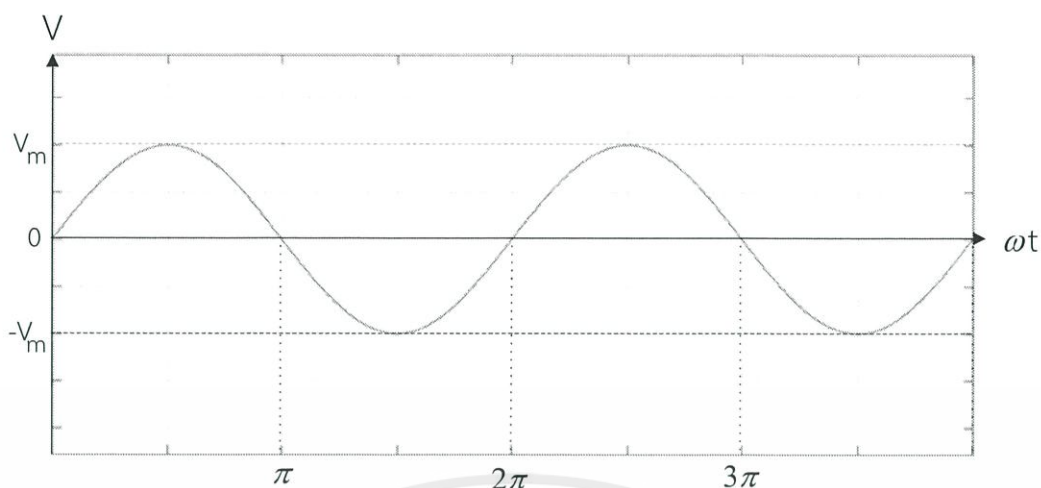
## 2. วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวแบบเต็มคลื่นแบบบริดจ์ไดโอด

วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นเฟสเดียวคล้ายกับวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นแบบเฟสเดียว แต่วงจรเหล่านี้มีข้อดีกว่าวงจรครึ่งคลื่น คือวงจรประเภทนี้มีกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยด้านเข้าหรือแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นศูนย์ซึ่งจะดีสำหรับหม้อแปลงและข้อดีอีกข้อคือจะมีค่าตัวประกอบระลอกคลื่น(Ripple Factor) นั้นต่ำกว่าวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นทำให้จ่ายกำลังไฟฟ้าด้านออกจะสูงกว่าวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นเฟสเดียว มีวงจรกระแสเฟสเดียวแบบเต็มคลื่นหลายประเภท แต่มีเพียงชนิดเดียวที่พูดถึงคือบริดจ์ไดโอด ซึ่งจะมีฟังก์ชันคล้ายกับตัวเรียงกระแสเฟสเดียวครึ่งคลื่น แต่พฤติกรรมของไดโอดจะทำงานเป็นคู่ กล่าวคือเมื่อพัลส์บวกของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อนไปยังไดโอด  $D_1$  และวงจร  $D_2$  จะนำกระแสไฟฟ้าและทำให้กระแสไหลผ่านโหลดในทิศทางที่แสดงในรูป ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาถึงพัลส์เชิงลบของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อนเข้าให้กับวงจรแล้วจะพบว่าไดโอด  $D_3$  และ  $D_4$  จะนำกระแสไฟฟ้าและทำให้กระแสไหลผ่านโหลดในลักษณะเดียวกับไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  โดยมีลักษณะดังรูปที่ 2.22

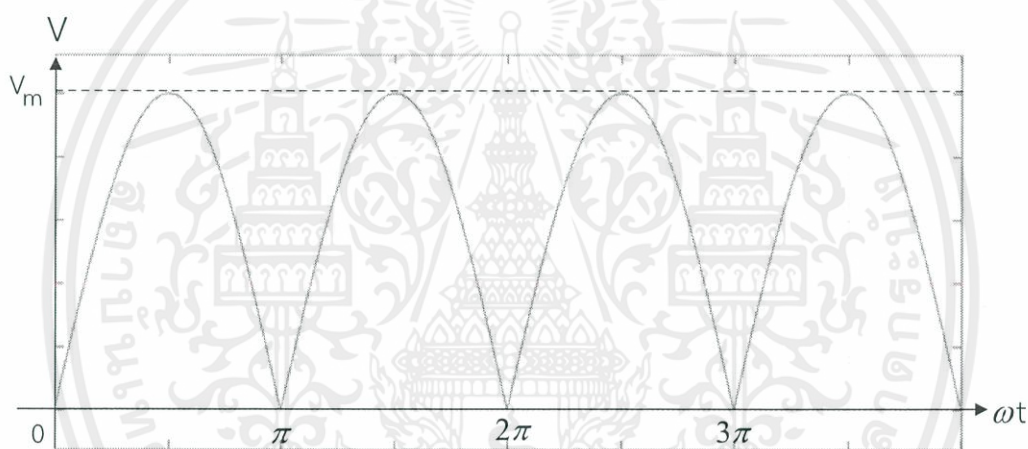


รูปที่ 2.22 วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวเต็มคลื่นแบบบริดจ์ไดโอด

$$V_s = V_m \sin(\omega t) \quad (2.46)$$



รูปที่ 2.23 แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่าย



รูปที่ 2.24 แรงดันของวงจรเรียงกระแสเฟสเดียวแบบเต็มคลื่นแบบบริดจ์ไดโอด

โดยสมการแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยด้านออกจะเป็นไปตามสมการที่ 2.48 และค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าเป็นไปตามสมการที่ 2.50

$$V_{o,avg} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} [V_m \sin(\omega t)] d(\omega t) \quad (2.47)$$

$$V_{o,avg} = \frac{2V_m}{\pi} \quad (2.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

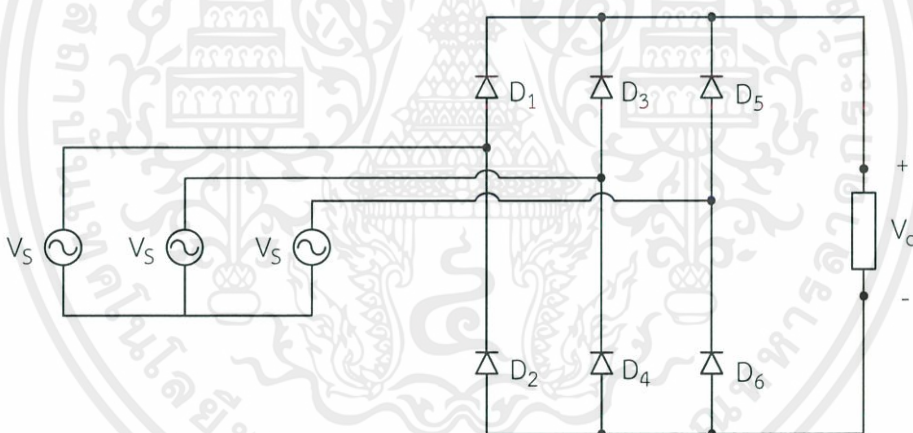
และ

$$V_{o,rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} [V_m \sin(\omega t)]^2 d(\omega t)} \quad (2.49)$$

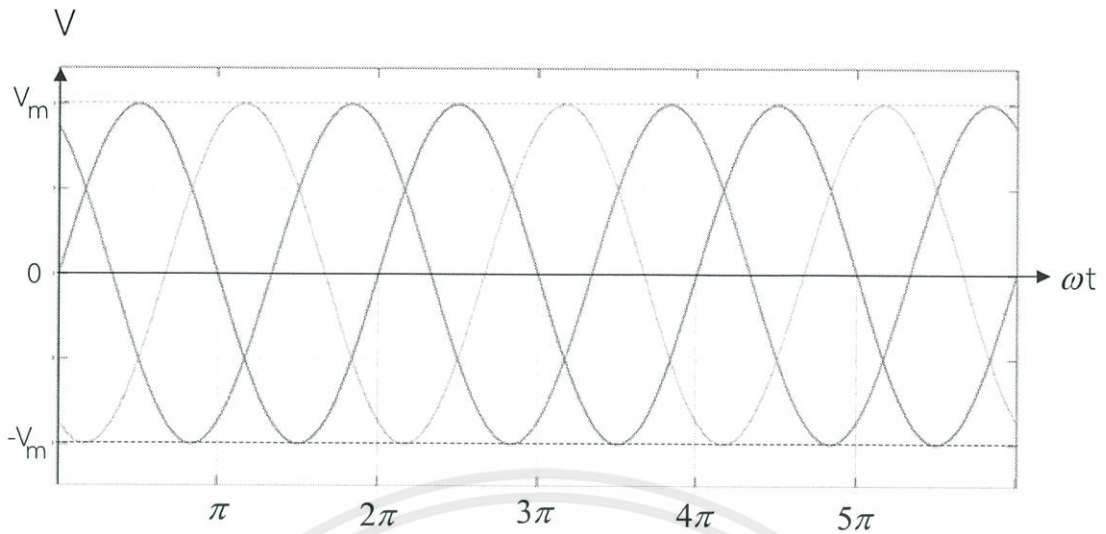
$$V_{o,rms} = \frac{V_m}{2} \quad (2.50)$$

### 3. วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่น

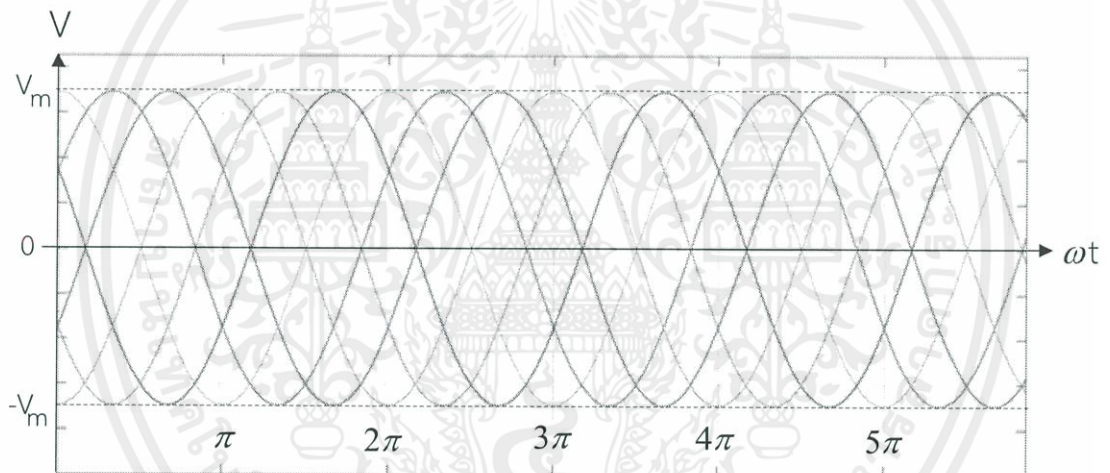
ในที่นี้หมายถึงวงจรเรียงกระแสไดโอดสามเฟส หลักการทำงานของวงจรเรียงกระแสนี้จะขึ้นอยู่กับไดโอด 6 ตัว หากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่ายไฟสมดุลสามเฟสพฤติกรรมของวงจรกระแสนี้จะเกิดจากการใช้ไดโอดสองตัวทำงานพร้อมกัน ซึ่งจะสลับกันตามแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส (line-to-line) ค่าสูงสุดของการจ่ายไฟซึ่งก็คือแรงดันที่ตกคร่อมโหลด ซึ่งลักษณะของแรงดันจะประกอบด้วยแรงดันระหว่างเฟสทั้ง 6 รูปแบบภายในหนึ่งคาบเวลา อีกชื่อหนึ่งของวงจรนี้คือ วงจรเรียงกระแสแบบหกพัลส์โดยมีลักษณะดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่น



รูปที่ 2.26 แรงดันของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบเต็มคลื่น



รูปที่ 2.27 แรงดันของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่น

โดยสมการแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยด้านออกจะเป็นไปตามสมการที่ 2.52 และค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าเป็นไปตามสมการที่ 2.54

$$V_{o,avg} = \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} [V_{m,L-L} \sin(\omega t)] d(\omega t) \quad (2.51)$$

$$V_{o,avg} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \quad (2.52)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$V_{o,rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} [V_{m,L-L} \sin(\omega t)]^2 d(\omega t)} \quad (2.53)$$

$$V_{o,rms} = 1.6554V_m \quad (2.54)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การออกแบบการทดลองและการประกอบสร้างเครื่องผลิตก๊าซโอโซน

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบวงจรแปลงผันกำลัง (Power convertor) โดยสามารถปรับความถี่ได้ เพื่อใช้สำหรับเป็นแหล่งจ่ายแรงดันสูงในการดิสชาร์จภายในหลอดทรงกระบอกซ้อนกันแนวนอน เพื่อผลิตก๊าซโอโซนโดยอาศัยหลักการแตกตัวของโมเลกุลของออกซิเจน ( $O_2$ ) เมื่อได้รับสนามไฟฟ้าที่มีความเครียดสูง ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังประกอบสร้างประกอบไปด้วย ชุดวงจรเรียงกระแส ชุดวงจรเรโซแนนซ์ ชุดวงจรควบคุม และวงจรขับเคลื่อน รวมถึงหลักการออกแบบหลอดทรงกระบอกซ้อนกันแนวนอนในการผลิตก๊าซโอโซน

#### 3.1 เงื่อนไขการการออกแบบ

การออกแบบวงจรแปลงผันกำลังมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้สำหรับเป็นแหล่งจ่ายแรงดันสูงในการดิสชาร์จภายในหลอดทรงกระบอกซ้อนกันแนวนอน โดยวงจรแปลงผันกำลังที่ออกแบบจะต้องสามารถปรับความถี่ได้เพื่อให้เกิดการเรโซแนนซ์ของวงจรและได้แรงดันขาออกตามที่กำหนดไว้ เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในการผลิตก๊าซโอโซน ดังนั้นการออกแบบและประกอบสร้างวงจรแปลงผันกำลังมีเงื่อนไขดังนี้

- 1) วงจรแปลงผันกำลังที่ประกอบสร้างขึ้นจะต้องสามารถป้อนแรงดันให้กับหลอดทรงกระบอกซ้อนกันแนวนอนได้ในช่วงแรงดัน 10 – 20 kV
- 2) วงจรแปลงผันกำลังที่ประกอบสร้างขึ้นจะต้องป้อนแรงดันที่สามารถปรับความถี่ได้ในช่วงความถี่ 10 – 50 kHz เพื่อทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ได้

#### 3.2 ส่วนประกอบของวงจรแปลงผันกำลัง

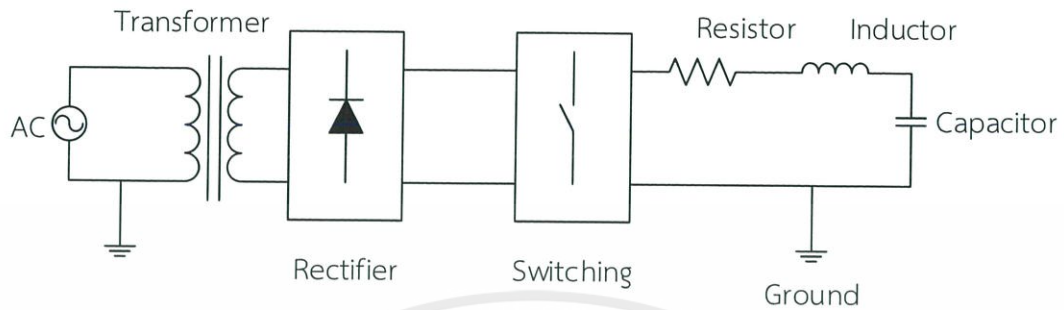
ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการออกแบบและประกอบสร้างวงจรแปลงผันกำลังที่ใช้สำหรับเพิ่มแรงดันขาออกโดยมีส่วนประกอบดังนี้

1. ชุดวงจรเรียงกระแส
2. ชุดวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์
3. ชุดวงจรควบคุม

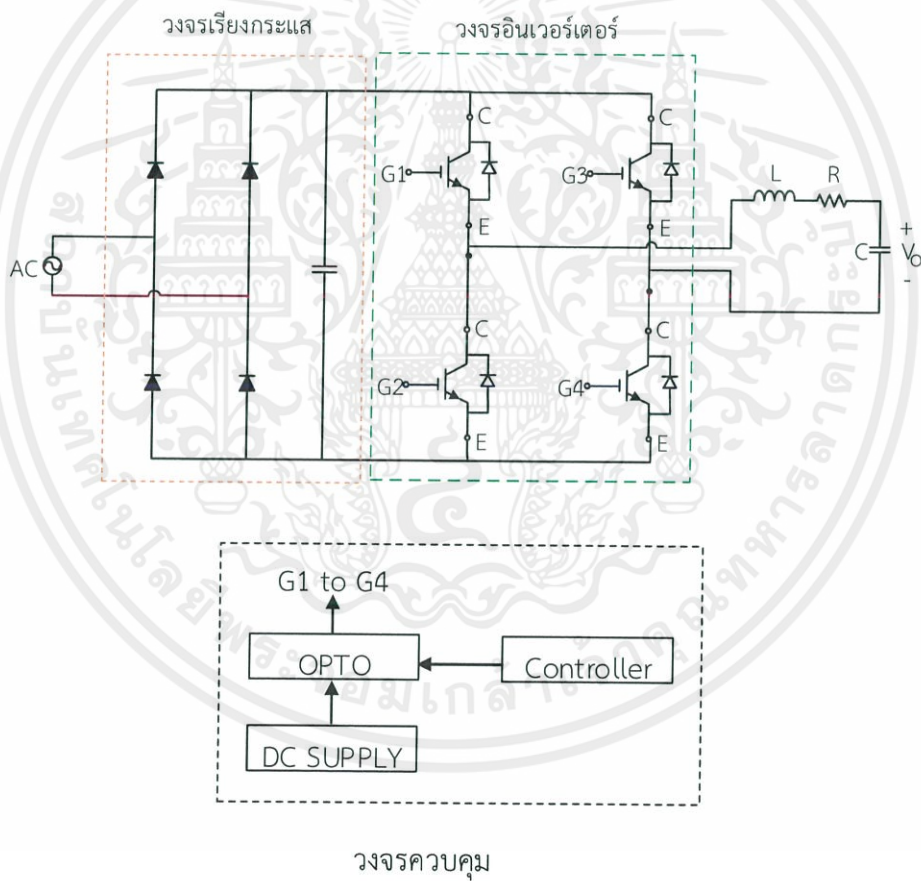
ชุดวงจรแปลงผันกำลังนี้จะได้รับแรงดันไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส ซึ่งมีระดับแรงดันที่ 220 V ที่ความถี่ 50 Hz โดยมีการต่อผ่านหม้อแปลงปรับแรงดันเพื่อควบคุมแรงดันที่จ่ายให้กับชุดวงจรแปลงผันกำลัง จากนั้นจะผ่านวงจรเรียงกระแสเพื่อแปลงเป็นระบบไฟฟ้ากระแสตรงที่มีตัวเก็บประจุต่อขนานอยู่เพื่อลดระดับระลอกคลื่นแรงดันก่อนที่จะเข้าสู่วงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งมีอุปกรณ์การสวิตชิงเป็นไอจีบีทีที่สามารถส่งจ่ายกำลังได้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ต่างๆ จากนั้นจึงไปเข้าวงจรเรโซแนนซ์เพื่อขยาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันขาออกให้มีค่ามากที่สุด โดยใช้วงจรควบคุมในการควบคุมความถี่ของการสวิตซิ่งของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเรโซแนนซ์



รูปที่ 3.1 วงจรแปรผันกำลัง (1)



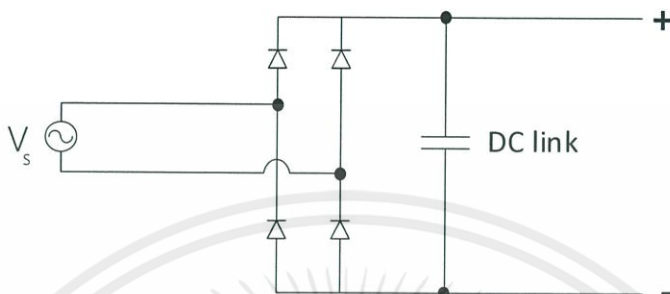
วงจรควบคุม

รูปที่ 3.2 วงจรแปรผันกำลัง (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การออกแบบและประกอบสร้างวงจรเรียงกระแส

วงจรเรียงกระแสนี้จะทำหน้าที่ในการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีระดับแรงดันที่ด้านแรงดันขาออกของหม้อแปลงปรับแรงดัน 1 เฟส ตั้งแต่ 0 – 220 V<sub>AC</sub> ให้เป็นแรงดันกระแสตรงที่มีระดับแรงดันตั้งแต่ 0 – 311 V<sub>DC</sub> โดยวงจรเรียงกระแสที่ใช้จะเป็นวงจรเรียงกระแส 1 เฟส เต็มคลื่นแบบไดโอด



รูปที่ 3.3 แผนผังวงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรกำลัง

### 3.4 การออกแบบและการประกอบสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์

วงจรอินเวอร์เตอร์นี้จะนำแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสมาแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยสามารถปรับความถี่ได้จากวงจรควบคุม สำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้นั้นจะเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม ซึ่งใช้วงจรสวิตชิงแบบไอจีบีที โดยวงจรเรโซแนนซ์จะประกอบด้วยตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำมาต่ออนุกรมกัน เพื่อให้แรงดันขาออกมีค่าสูงสุด โดยค่าของตัวเก็บประจุหาได้จากสมการทรงกระบอกซ้อนกันรวมตามสมการที่ 3.1

$$C = \frac{l}{2k_e \ln(b/a)} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $l$  มีค่าเท่ากับ 19 cm

$k_e$  มีค่าเท่ากับ  $9 \times 10^9$

$b$  มีค่าเท่ากับ 0.9 cm

$a$  มีค่าเท่ากับ 0.3 mm

จากการแทนค่า ลงในสมการที่ 3.1 ค่า  $C$  มีค่าเท่ากับ 3.103 pF

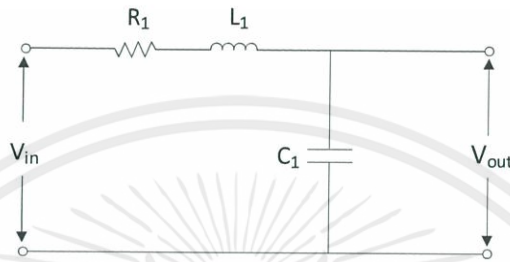
ในส่วนของความถี่เมื่อได้ค่า  $C$  ของอิเล็กทรอนิกส์แล้ว พร้อมทั้งค่า  $L$  ที่ต้องการใช้ แต่เนื่องจากค่า  $C$  นั้นมีค่าน้อยเกินไปจนทำให้ค่า  $L$  มีค่ามากเกินไป ส่งผลให้ความถี่เรโซแนนซ์เกินย่านที่สามารถปรับได้จึงทำการเพิ่มค่า  $C$  เป็น 0.01  $\mu$ F และลดค่า  $L$  เป็น 3.14 mH ดังนั้นจึงสามารถหาค่าความถี่ได้จากสมการที่ 3.2

$$f_{\text{resonance}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.2)$$

เมื่อ L มีค่าเท่ากับ 3.14 mH

C มีค่าเท่ากับ 0.01  $\mu\text{F}$

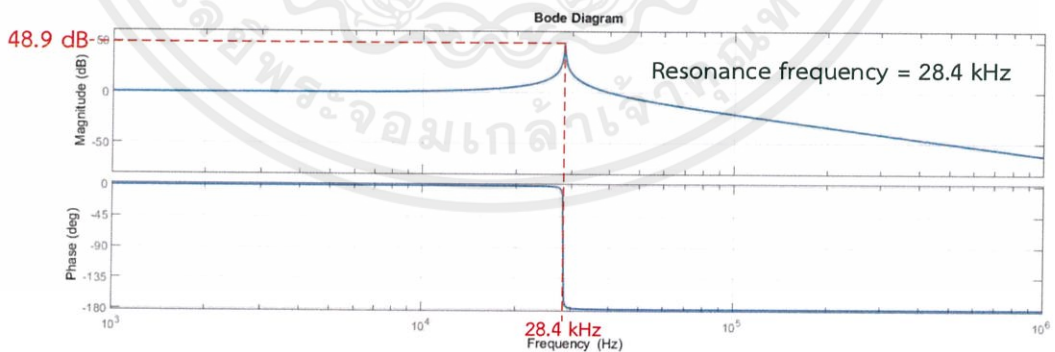
จากการแทนค่าลงในสมการที่ 3.2 ค่า  $f_{\text{resonance}}$  มีค่าเท่ากับ 28.40 kHz



รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลของวงจรเรโซแนนซ์

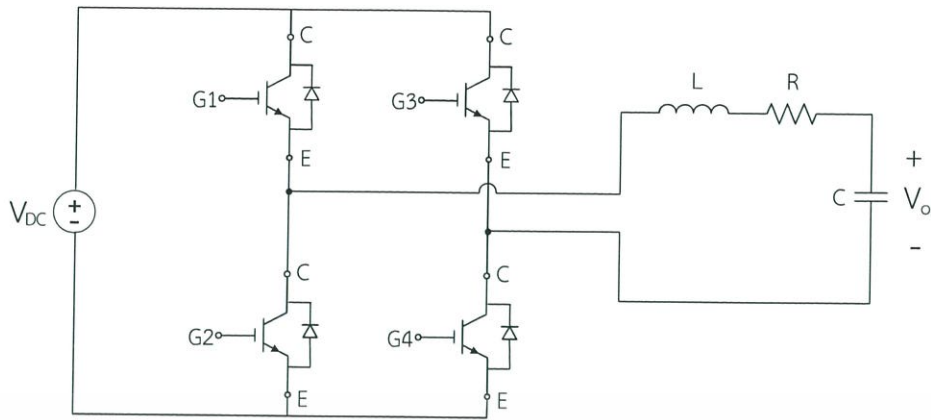
จากรูปที่ 3.4 สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอน ดังสมการที่ 3.3 โดยกำหนดให้ว่า ความต้านทาน (R) ค่าความเหนี่ยวนำ (L) และ ค่าความเก็บประจุ (C) มีค่าเป็น 1  $\Omega$  3.14 mH และ 0.01  $\mu\text{F}$  ตามลำดับ จะได้ผลตอบสนองความถี่ ดังรูปที่ 3.5 โดยจะให้ค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ 28.4 kHz

$$\frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} = \frac{1}{LCS^2 + RCS + 1} \quad (3.3)$$



รูปที่ 3.5 ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรเรโซแนนซ์

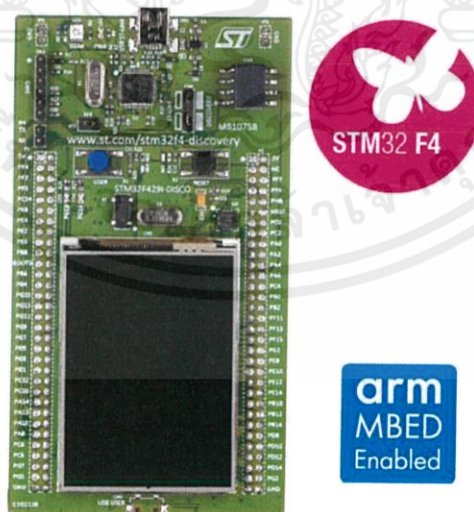
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์

### 3.5 การออกแบบและประกอบสร้างวงจรควบคุม

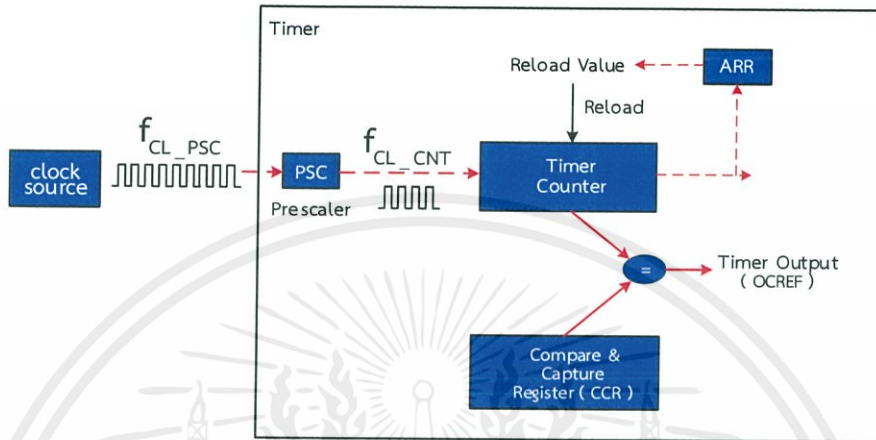
วงจรควบคุมชนิดสัญญาณ PWM จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด STM32F429I DISCOVERY เป็นตัวสร้างสัญญาณควบคุมการสวิตซ์ของไอจีบีที (IGBT) โดยการสร้างวงจรควบคุมจะใช้โปรแกรม STM32CubeMX ในการสร้างตัว generate code สำหรับสร้าง source code ขึ้นมาและนำไปใช้ร่วมกับ SW4STM32 หรือ System Workbench for STM32 ซึ่งเป็น Free IDE และ Compiler สำหรับ STM32 โดยตัว IDE จะสร้างมาจาก Eclipse ซึ่งจะคล้ายๆกับ MPLAB X ของ Microchip เวลาใช้งานก็ค่อนข้างสะดวกเพราะมี Auto complete ให้เวลาเราเรียก Structure ต่างๆ ส่วน Compiler ก็เป็น GCC สำหรับ STM32 ซึ่งจะสามารถสร้างสัญญาณควบคุมที่มีค่าแรงดัน 3 V ออกมาตามขาเอาต์พุตที่กำหนดไว้



รูปที่ 3.7 ชุด STM32F49I DISCOVERY

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับปริยญาณิพนธ์ฉบับนี้ได้ออกแบบการควบคุมวงจรแปลงผันกำลัง โดยสามารถปรับความถี่ของ PWM ได้ในช่วงความถี่ 7 – 68 kHz โดยให้มีค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ (เมื่อไม่คำนึงถึงค่า Dead time) ซึ่งหลักการออกแบบด้วย STM32F49I DISCOVERY มีดังนี้



รูปที่ 3.8 หลักการทำงานของ PWM ของ STM32F49I DISCOVERY

จากรูปที่ 3.8 จะเป็นการทำงานของตัวโปรแกรม PWM ภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด STM32F429I DISCOVERY ที่ความถี่ค่าหนึ่งเพียงค่าเดียวโดยจะปรับความถี่ไม่ได้ จึงจำเป็นต้องมีอินพุตอีกค่าหนึ่งเพื่อรับคำสั่งในการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของ PWM โดยจะใช้ค่าอินพุตค่าแบบอนาล็อก (Analog input voltage จากตัวต้านทานแบบปรับค่าได้) แล้วแปลงค่าเป็นค่าดิจิทัล 12 บิต (ค่าอยู่ในช่วง 0 - 4095) เพื่อนำค่าอินพุตนั้นมาเป็นค่าควบคุมความถี่และค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) ตามเงื่อนไขที่ตั้งค่าไว้ โดยให้สามารถปรับความถี่ได้ตามที่ต้องการ (ความถี่ 7 – 68 kHz)

สำหรับการตั้งค่าการทำงานของ PWM ในไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด STM32F429I DISCOVERY ด้วยโปรแกรม STM32CubeMX และ System Workbench for STM32 นั้นจะขึ้นกับตัวแปรดังนี้คือ Prescale, Counter Period และ Pulse ซึ่งตัวแปรทั้งสามค่านี้ตั้งค่าขึ้นอยู่กับชนิดและรุ่นของอุปกรณ์ที่ใช้งาน โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 1) Prescale

ค่า Prescale จะเป็นค่าคูณลดความถี่สัญญาณนาฬิกาภายในของอุปกรณ์ของรุ่นที่ใช้งานอยู่ ( $F_{src}$ ) โดยไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด STM32F429I DISCOVERY นี้จะมีความถี่สัญญาณนาฬิกาภายในสูงสุดที่ค่า 72 MHz ซึ่งสำหรับการตั้งค่า Prescale จะตั้งค่าด้วยเลขดิจิทัล 16 บิต (ค่าอยู่ในช่วง 0 - 65535) และเมื่อตั้งค่าความถี่เอาต์พุตของสัญญาณนาฬิกาผ่านกระบวนการ Prescale ( $F_{clock}$ ) จะได้ค่าตามสมการ

$$F_{\text{clock}} = \frac{F_{\text{scr}}}{\text{Prescale} + 1} \quad (3.4)$$

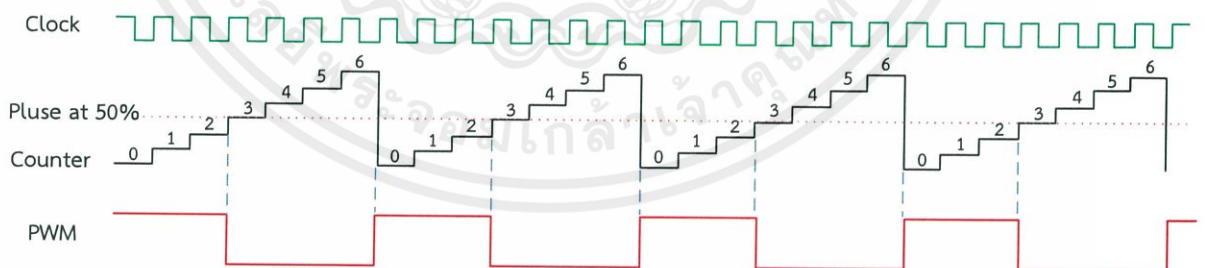
## 2) Counter Period

ค่า Counter Period คือการนับสัญญาณที่มีรูปแบบ (Pattern) หนึ่งภายในช่วงเวลา หรือ คาบ (Period) ที่จำกัด (สามารถวัดได้) โดยรูปแบบดังกล่าวปรากฏซ้ำด้วยคาบที่เท่ากันตลอดช่วงที่พิจารณาและเรียกรวมครบรูปแบบหนึ่งครั้งของสัญญาณดังกล่าวว่ารอบ (Cycle) ซึ่งสำหรับการตั้งค่า Counter Period จะตั้งค่าด้วยเลขดิจิตอล 16 บิต (ค่าอยู่ในช่วง 0 - 65535) โดยค่าเอาต์พุตจะเป็นค่าความถี่ของสัญญาณ PWM ( $F_{\text{out}}$ ) ตามสมการดังนี้

$$F_{\text{out}} = \frac{F_{\text{clock}}}{\text{Counter\_Period} + 1} \quad (3.5)$$

## 3) Pulse

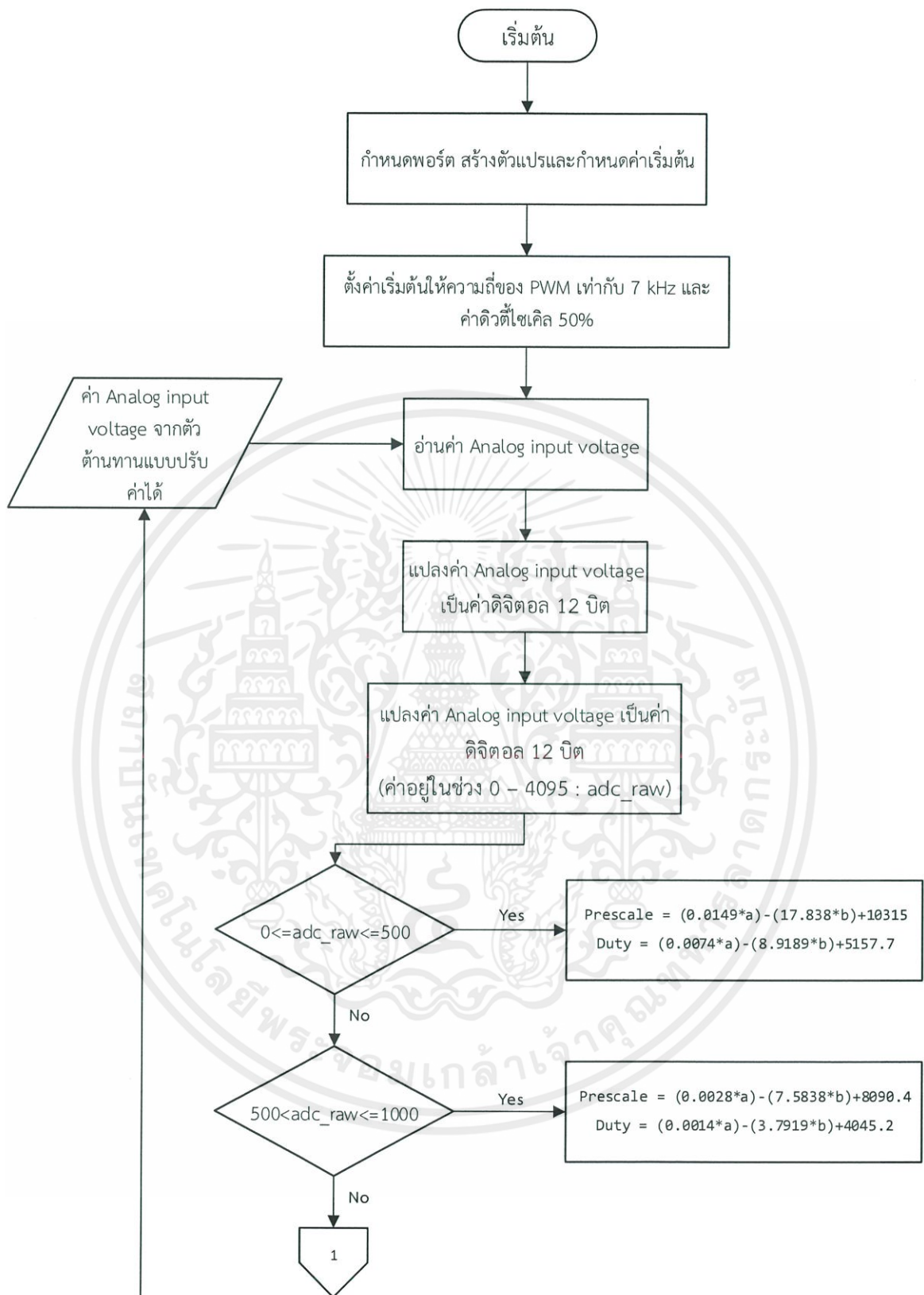
ค่า Pulse จะเป็นค่าไว้สำหรับตั้งค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) ของสัญญาณ PWM ที่ต้องการ โดยการตั้งค่านั้นจะคิดค่าเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ โดยสมมติตั้งค่าดิวตี้ไซเคิล 50 เปอร์เซ็นต์ จะได้นำค่า Counter Period+1 แล้วนำไปคูณด้วยค่า 50 เปอร์เซ็นต์และลบด้วยหนึ่ง ก็จะได้ค่าสำหรับการตั้งค่าของค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) สัญญาณ PWM เป็นต้น

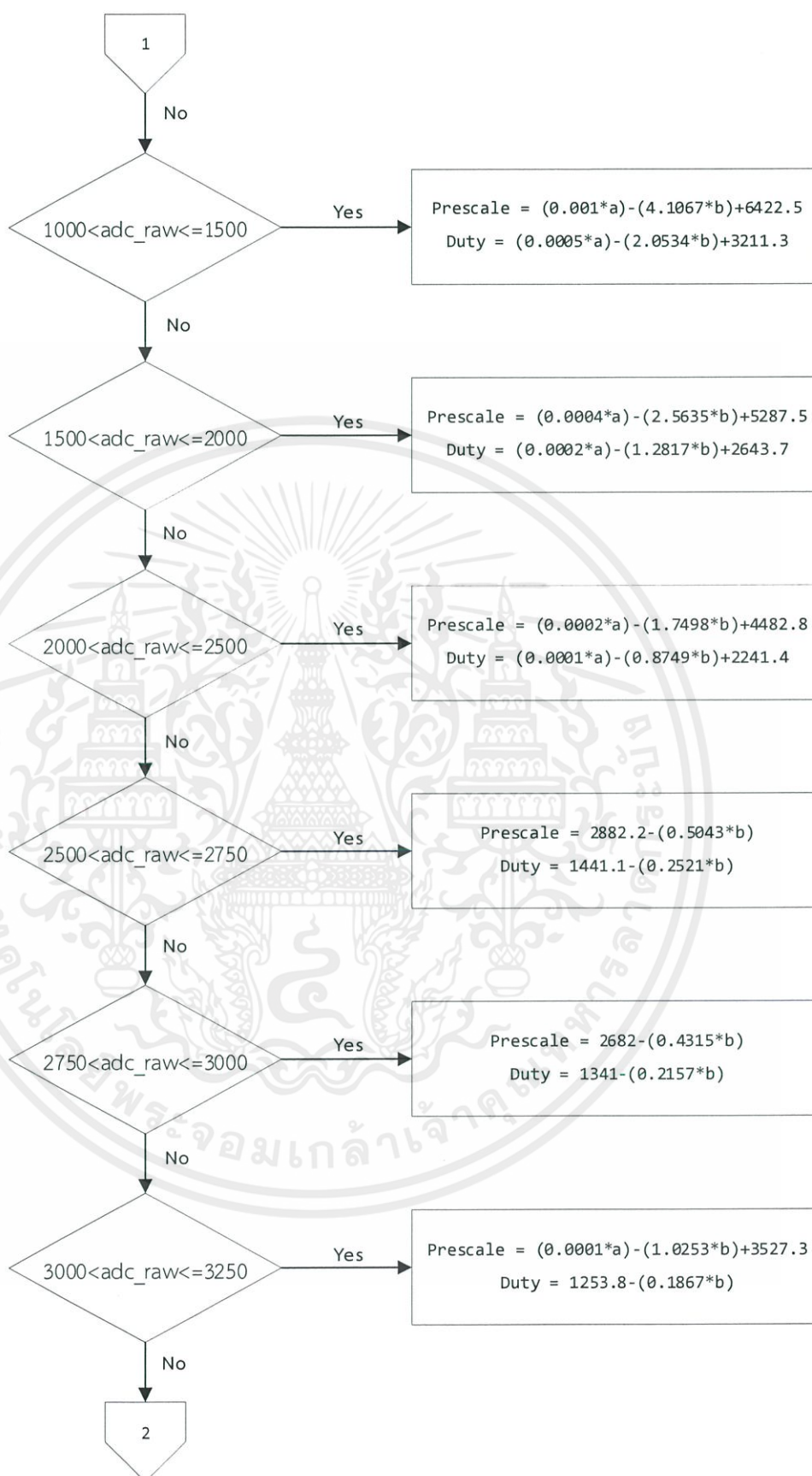


รูปที่ 3.9 ตัวอย่างการสร้างสัญญาณ PWM

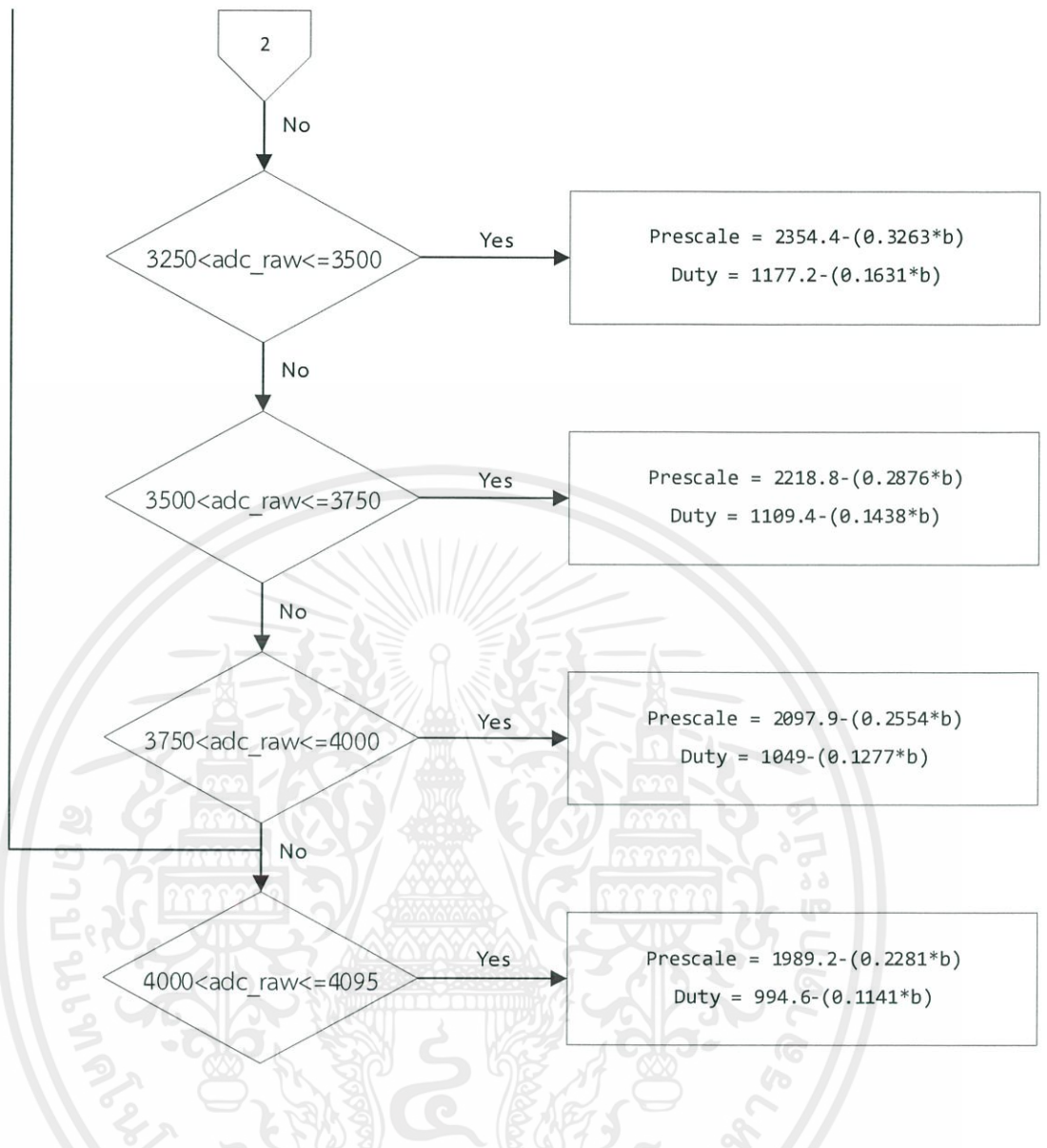
การเขียนโปรแกรมการทำงานในโปรแกรม System Workbench for STM32 เพื่อควบคุมความถี่สัญญาณของ PWM ที่ค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) 50 เปอร์เซ็นต์ สามารถสรุปเป็นแผนผังได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



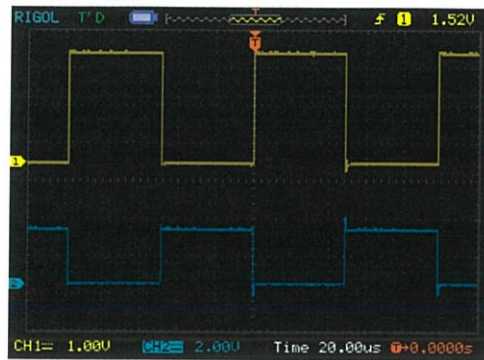


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

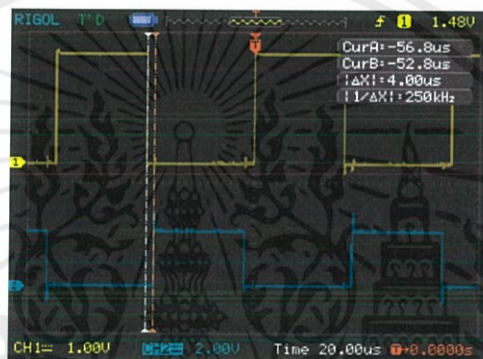


รูปที่ 3.10 แผนผังการสร้างสัญญาณ PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



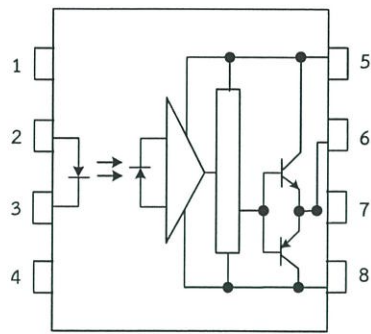
รูปที่ 3.11 สัญญาณ PWM ที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด STM32F429I DISCOVERY ที่ความถี่ของสัญญาณ 10 kHz



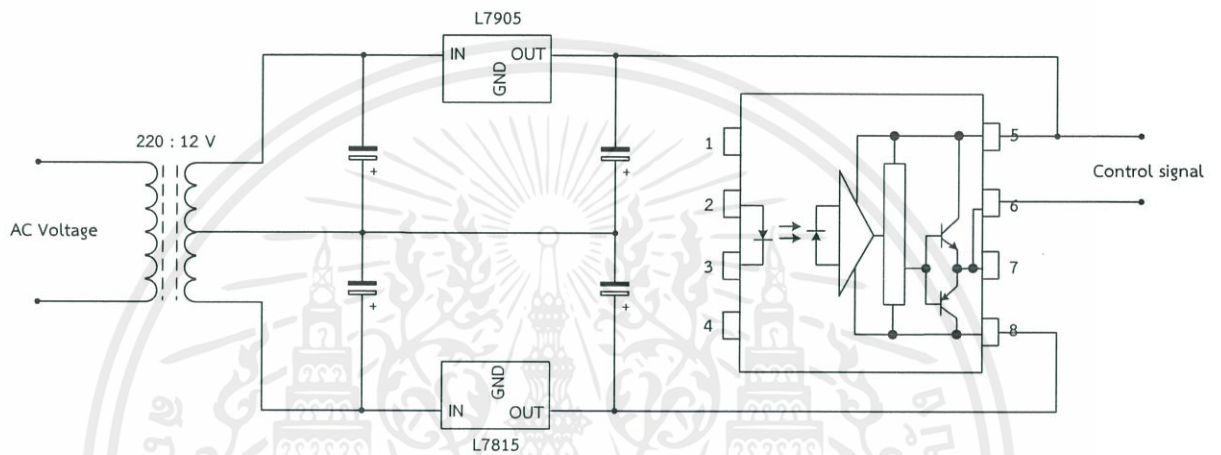
รูปที่ 3.12 สัญญาณ PWM ที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด STM32F429I DISCOVERY ที่ความถี่ของสัญญาณ 10 kHz เมื่อมีการหน่วงเวลา (Dead time) 400 ns

### 3.6 วงจรขับเกต

วงจรขับเกต (Gate Drive) เป็นวงจรส่วนที่สำคัญสำหรับทำหน้าที่เชื่อมโยงสัญญาณพัลส์แบบมอดูเลตความกว้างพัลส์จากวงจรรวม ซึ่งกำเนิดจากสัญญาณต่างๆ กับสวิตซ์อิเล็คทรอนิกส์กำลัง ต่อไปจะเป็นการใช้งานของ IC เบอร์ TLP250 ซึ่งหลักการทำงานเบื้องต้นของอุปกรณ์ชนิดดังกล่าว คือ เป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสงด้วยการส่งแสงที่มาจาก การเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าไปยังตัวรับสัญญาณแสง หลังจากนั้นตัวรับสัญญาณแสงจะเปลี่ยนสัญญาณแสงกลับมาเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งเป็น Isolation กันทางไฟฟ้าระหว่างวงจรไฟฟ้าทั้งสองโดยสิ้นเชิง ดังใน Block Diagram



(ก)

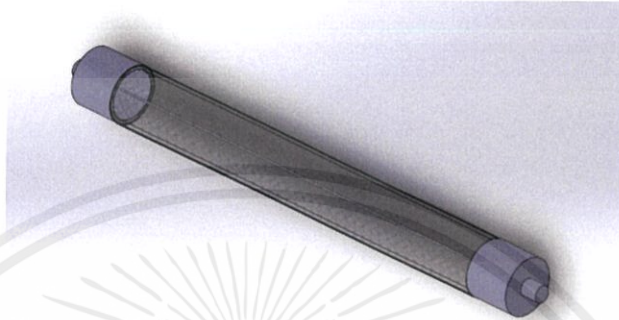


(ข)

รูปที่ 3.13 (ก) วงจรภายใน IC เบอร์ TLP250  
 (ข) การต่อวงจร IC เบอร์ TLP250

### 3.7 การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ในการผลิตไอโซน

อิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาผลิตไอโซนจะใช้เป็นทรงกระบอกซ้อนกันเพราะมีลักษณะเป็นหลอดง่ายต่อการกักเก็บอากาศและไม่แพร่กระจายออกได้ง่าย โดยออกแบบลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์ตามรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 อิเล็กทรอนิกส์ในการผลิตไอโซนที่ออกแบบสร้างใน Solid Work

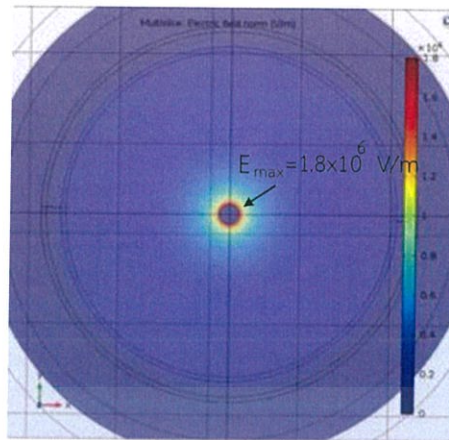


รูปที่ 3.15 อิเล็กทรอนิกส์ในการผลิตไอโซนที่ใช้จริง

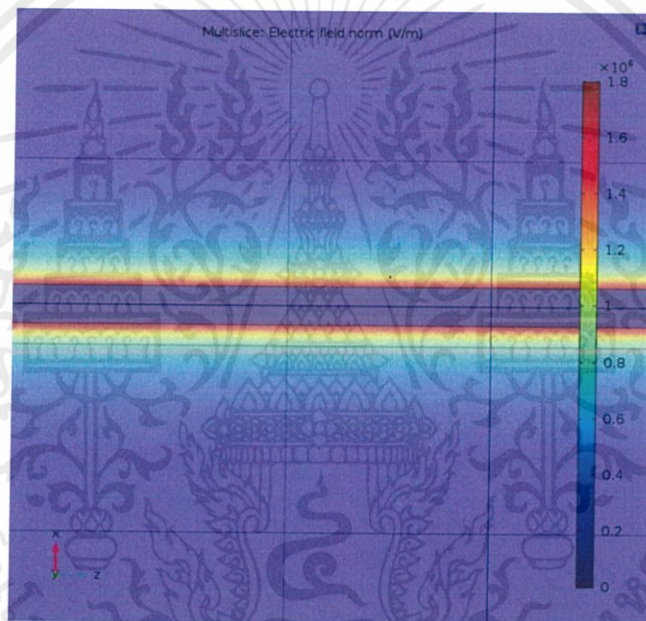
เมื่อสร้างอิเล็กทรอนิกส์ใน Solid Work สำเร็จ จึง Export ไปยังโปรแกรม Comsol เพื่อ Simulation หาความเครียดของสนามไฟฟ้า โดยกำหนดค่าในการ Simulation ดังนี้

- |                                       |     |    |
|---------------------------------------|-----|----|
| 1. ค่าแรงดันที่ใช้คือ                 | 10  | kV |
| 2. ค่าเปอร์มิติวิตี้ของกระจกเท่ากับ   | 3.8 |    |
| 3. ค่าเปอร์มิติวิตี้ของอากาศเท่ากับ   | 1   |    |
| 4. ค่าเปอร์มิติวิตี้ของพลาสติกเท่ากับ | 3   |    |

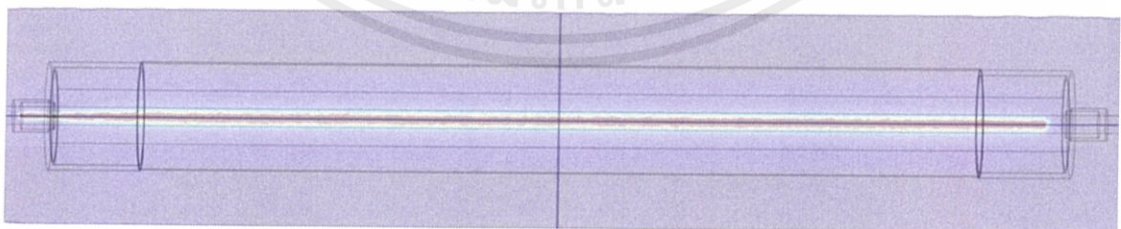
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 ปริมาณความเครียดสนามไฟฟ้าด้านหลังจาก Simulation

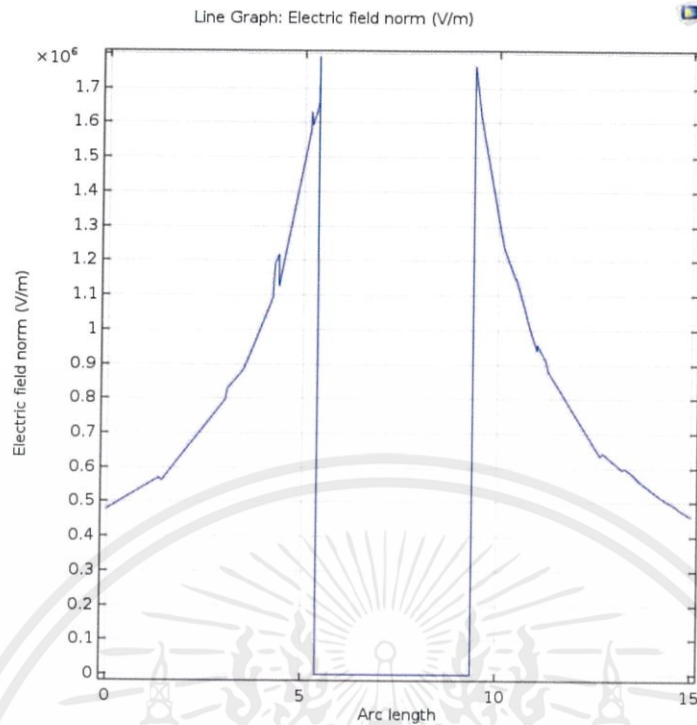


รูปที่ 3.17 ปริมาณความเครียดสนามไฟฟ้าด้านข้างหลังจาก Simulation



รูปที่ 3.18 ปริมาณความเครียดสนามไฟฟ้าโดยรวมหลังจาก Simulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 ปริมาณความเครียดสนามไฟฟ้าหลังจาก Simulation

จากการ Simulation ทำให้ทราบว่าในส่วนของแท่นแกนเหล็กตรงกลางนั้นมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่สุดจากนั้นส่วนที่ถัดออกมาจึงจะเริ่มเบาบางลง ในด้านของแถบสี่ด้านขวามือของแต่ละรูปแสดงถึงความเครียดสนามไฟฟ้าโดยไล่ลำดับตามสีเริ่มที่สีแดงจะมีความเครียดสูงสุดและไล่ระดับลงมาถึงสีน้ำเงินเข้มที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าน้อยที่สุด

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์

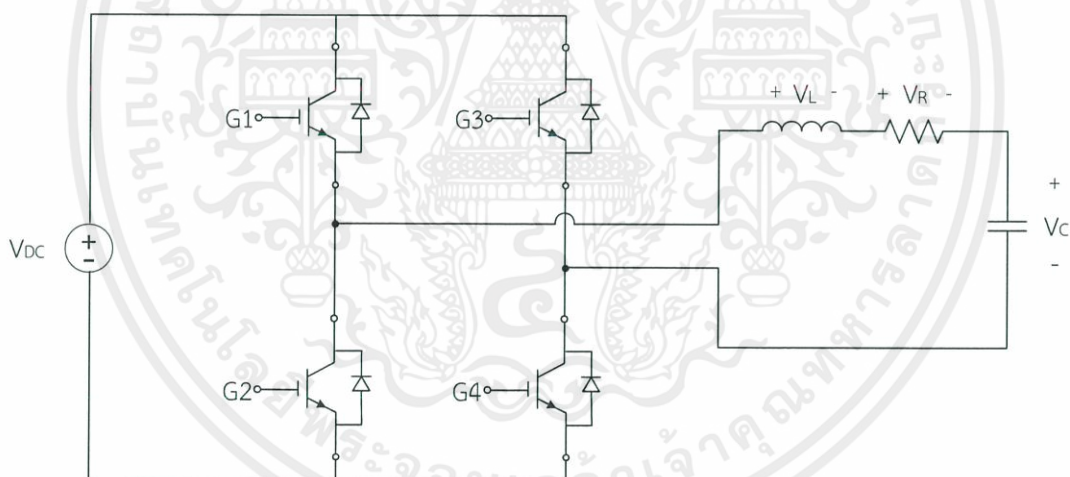
#### 4.1 บทนำ

การทดสอบการผลิตไอโซนด้วยแรงดันกระแสสลับโดยใช้คอนเวอร์เตอร์วงจรเรโซแนนซ์ โดยกำหนดค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ  $0.01 \mu\text{F}$ , ตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ  $3.14 \text{ mH}$  และมีค่าความถี่  $27 - 28 \text{ kHz}$  ซึ่งมีการกำหนดวัตต์แรงดันค่าต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบแรงดันขาเข้าของวงจรแปลงผันกำลังกับแรงดันขาออกของวงจรเรโซแนนซ์ในการผลิตไอโซน

สำหรับการทดสอบนี้ได้ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

#### 4.2 เปรียบเทียบแรงดัน

จากการทดสอบแรงดันที่ใช้ในการผลิตไอโซนโดยใช้แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุเป็นเกณฑ์ตามรูปที่ 4.1 พบว่าแรงดันต่างๆ มีค่าดังนี้

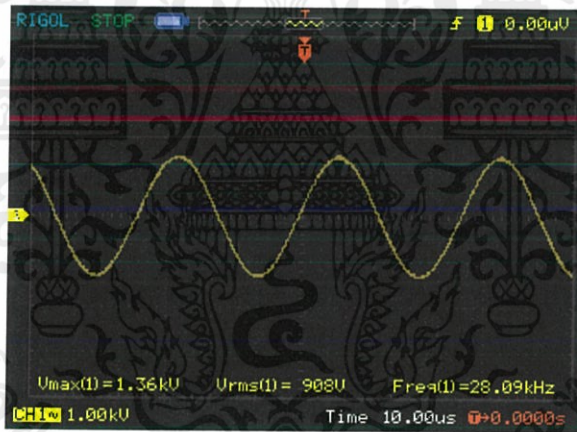


รูปที่ 4.1 ตำแหน่งของการเปรียบเทียบแรงดันตามตารางที่ 4.1

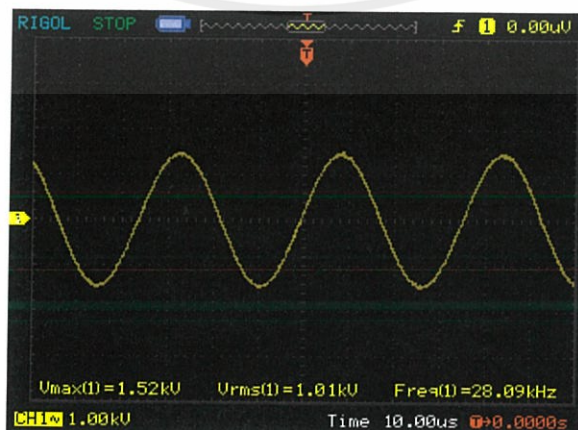
ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบแรงดัน

แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ (kV)	แรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ (kV)	แรงดันกระแสตรง (V)	แรงดันกระแสสลับ (V)
1.36	1.36	17.60	10.28
1.52	1.52	19.60	11.16
1.72	1.72	22.80	12.95
1.92	1.92	26.80	14.05
2.16	2.16	27.60	14.93
2.32	2.36	12.80	16.73
2.16 (เบรกดาวณ์)	2.08	10.40	17.76

รูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ

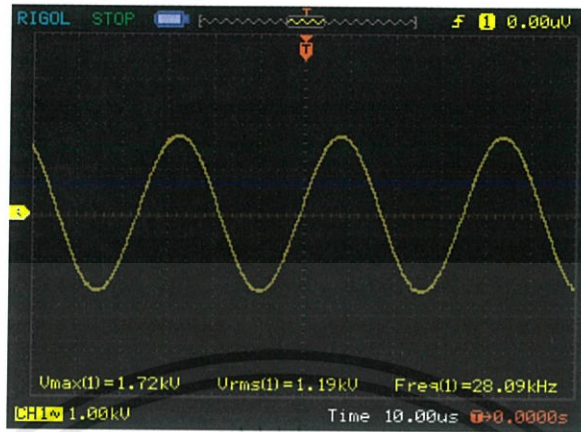


รูปที่ 4.2 รูปคลื่นแรงดัน 1.3 kV ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ

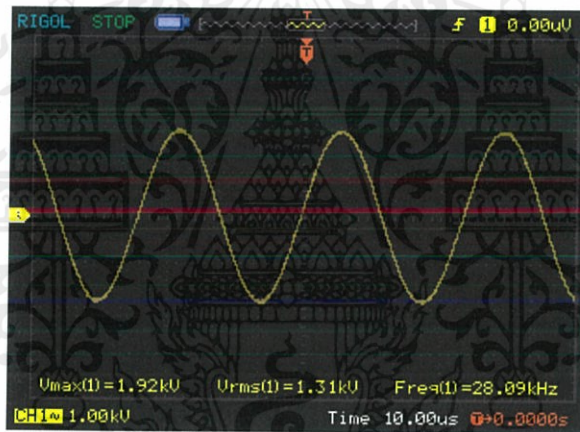


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

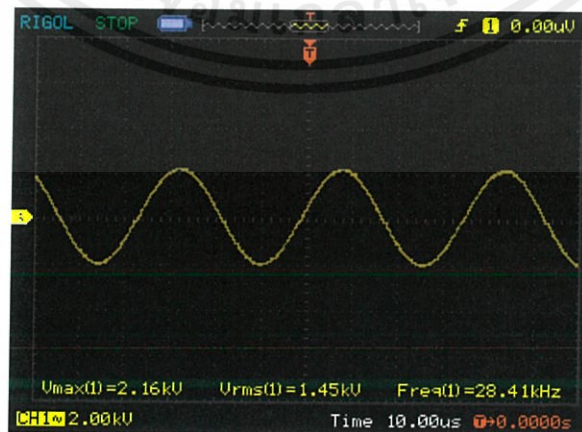
รูปที่ 4.3 รูปคลื่นแรงดัน 1.5 kV ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ



รูปที่ 4.4 รูปคลื่นแรงดัน 1.7 kV ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ

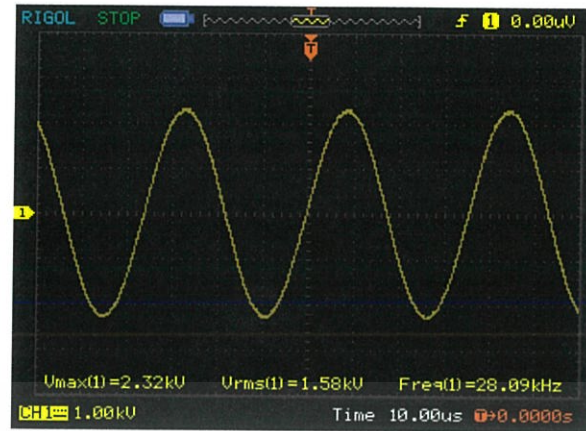


รูปที่ 4.5 รูปคลื่นแรงดัน 1.9 kV ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ

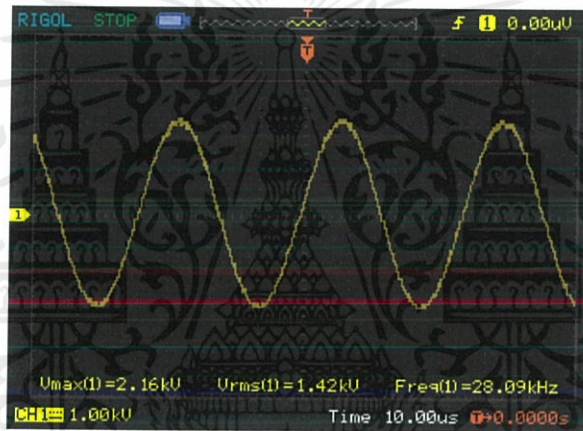


รูปที่ 4.6 รูปคลื่นแรงดัน 2.1 kV ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

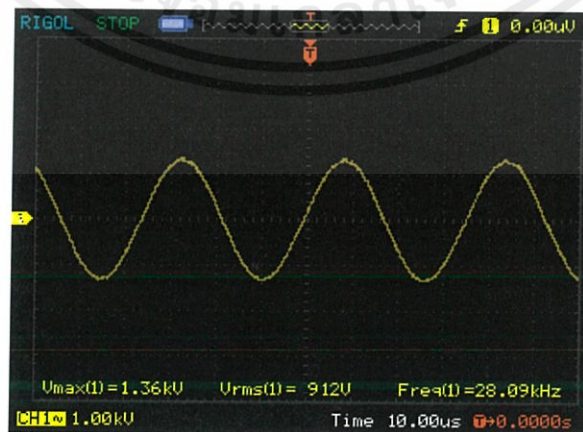


รูปที่ 4.7 รูปคลื่นแรงดัน 2.3 kV ที่ตกรวมตัวเก็บประจุ



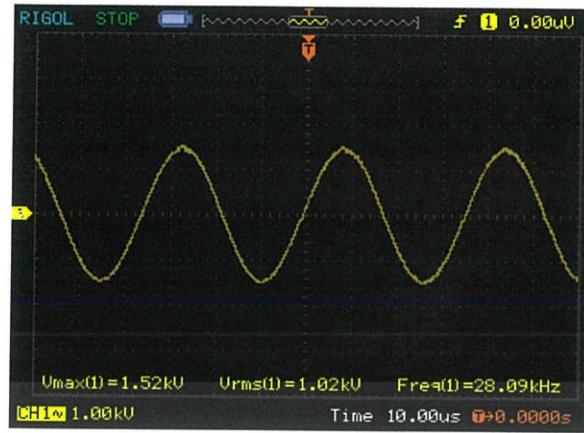
รูปที่ 4.8 รูปคลื่นแรงดันที่ตกรวมตัวเก็บประจุตอนเกิดการเบรกดาวน

รูปคลื่นแรงดันที่ตกรวมตัวเหนี่ยวนำ

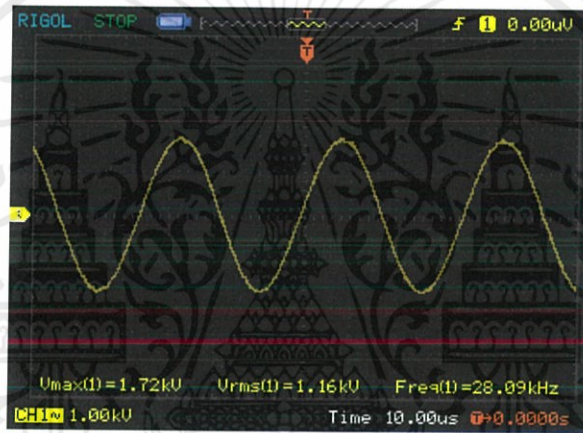


รูปที่ 4.9 รูปคลื่นแรงดัน 1.3 kV ที่ตกรวมตัวเหนี่ยวนำ

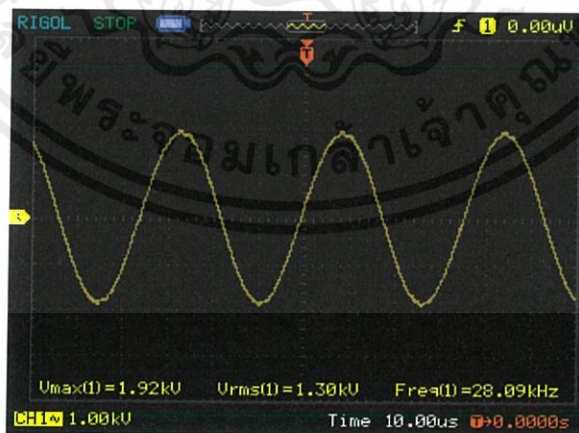
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 รูปคลื่นแรงดัน 1.5 kV ที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ

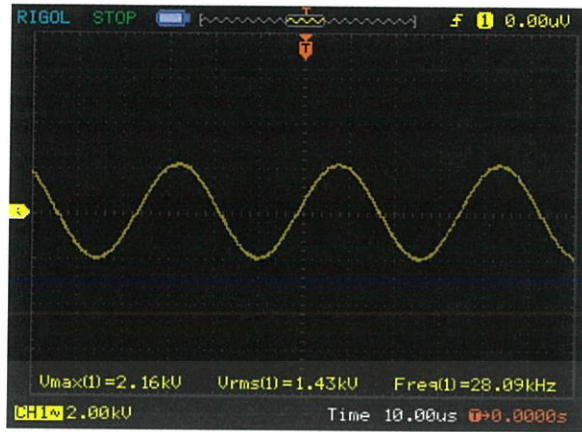


รูปที่ 4.11 รูปคลื่นแรงดัน 1.7 kV ที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ

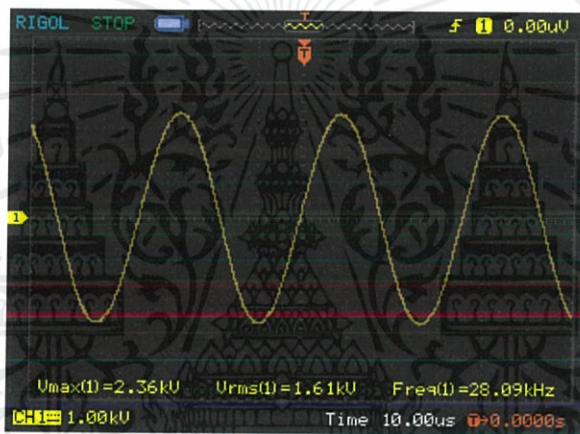


รูปที่ 4.12 รูปคลื่นแรงดัน 1.9 kV ที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ

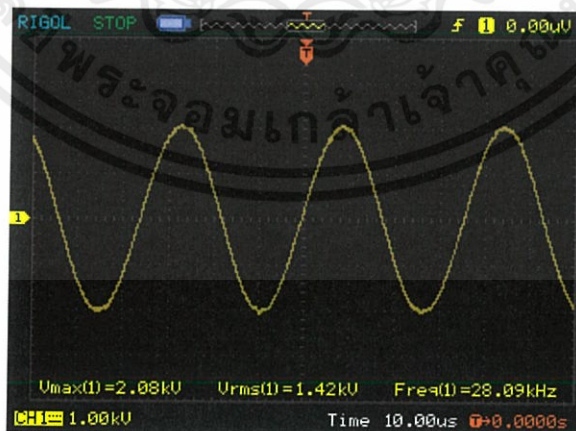
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 รูปคลื่นแรงดัน 2.1 kV ที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 4.14 รูปคลื่นแรงดัน 2.3 kV ที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 4.15 รูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำตอนเกิดการเบรกดาวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

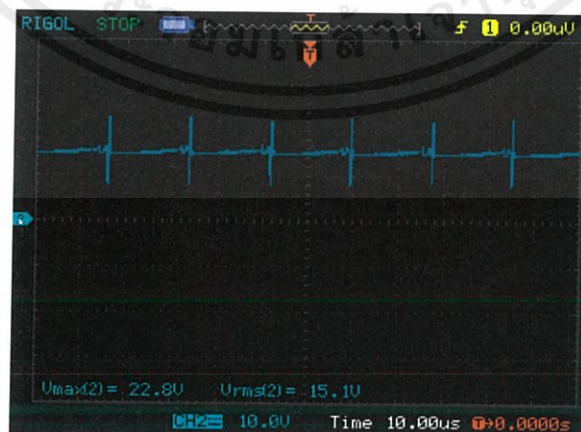
## รูปแรงดันกระแสตรง



รูปที่ 4.16 รูปคลื่นแรงดันกระแสตรงที่แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเท่ากับ 1.3 kV

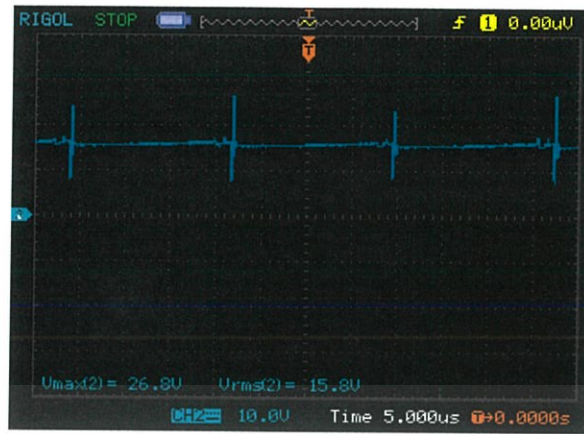


รูปที่ 4.17 รูปคลื่นแรงดันกระแสตรงที่แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเท่ากับ 1.5 kV

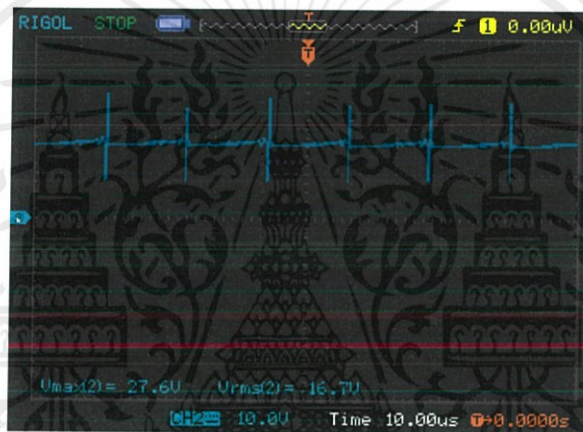


รูปที่ 4.18 รูปคลื่นแรงดันกระแสตรงที่แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเท่ากับ 1.7 kV

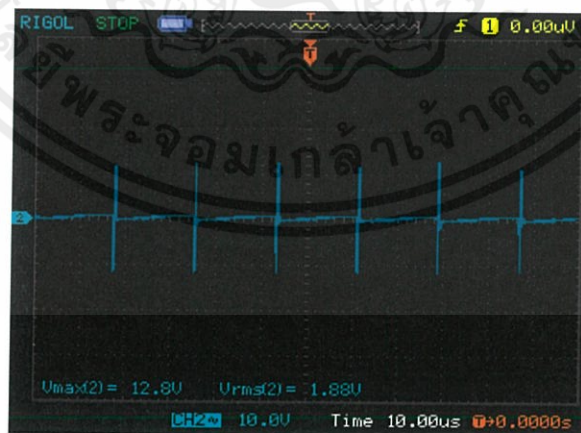
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 รูปคลื่นแรงดันกระแสตรงที่แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเท่ากับ 1.9 kV

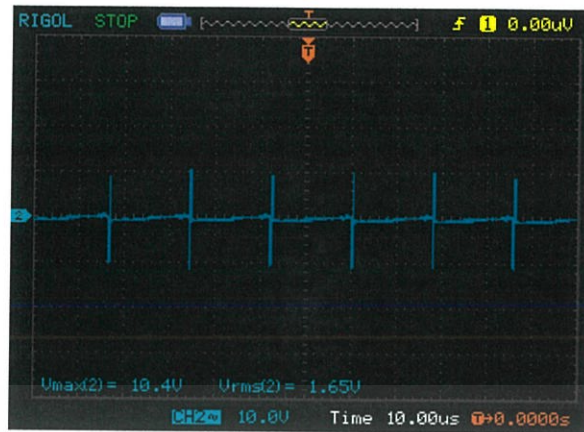


รูปที่ 4.20 รูปคลื่นแรงดันกระแสตรงที่แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเท่ากับ 2.1 kV



รูปที่ 4.21 รูปคลื่นแรงดันกระแสตรงที่แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเท่ากับ 2.3 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 รูปคลื่นแรงดันกระแสตรงที่แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุตอนเบรกดาวน

จากตารางสรุปผลและกราฟแรงดันต่างๆ พบว่าความถี่ที่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์อยู่ในย่านความถี่ 27 - 28 kHz โดยการเกิดเรโซแนนซ์นั้นสามารถสังเกตได้จากกราฟแรงดันขาออกต้องมีลักษณะเป็นกราฟไซน์ และผลจากการเกิดเรโซแนนซ์ทำให้แรงดันขาออกหรือแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุนั้นมีการขยายเพิ่มมากขึ้นหลายเท่าตัวดังตารางที่ 4.1 และการผลิตโอโซนจะเริ่มตอนเบรกดาวน (เมื่อแรงดันขาออกนั้นเกิน 2.5 kV)

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาการผลิตโอโซนด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V เป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรแปลงผันกำลังและวงจรควบคุมในการแปลงแรงดันต่ำเป็นแรงดันสูงเพื่อทำให้หลอดอิเล็กโทรดผลิตโอโซน โดยเน้นการออกแบบวงจรแปลงผันกำลังแบบเรโซแนนซ์ให้ขยายแรงดันให้ได้มากที่สุดและวงจรควบคุมให้ปรับความถี่ในย่านต่างๆ ได้เพื่อหาความถี่เรโซแนนซ์

โดยเบื้องต้นออกแบบวงจรควบคุมให้สามารถปรับความถี่ระหว่าง 7 - 68 kHz โดยใช้ STM32F491 DISCOVERY เป็นตัวควบคุมและจ่ายสัญญาณไปยังวงจรแปรผันกำลังเป็นสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม จากนั้นไอจีบีทีในวงจรแปรผันกำลังจะทำการสวิตชิงและจ่ายแรงดันออกไปยังตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ

เมื่อแรงดันไปตกคร่อมตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ จึงทำการปรับค่าความถี่ที่ทำให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำมีค่ามากที่สุด

ซึ่งผลจากการทดสอบโดยใช้วงจรควบคุมปรับหาความถี่เรโซแนนซ์เพื่อทำให้วงจรกำลังขยายแรงดันได้มากที่สุด พบว่าความถี่ที่ทำให้เกิดแรงดันขาออกหรือแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมากที่สุดอยู่ในช่วง 27 - 28 kHz และแรงดันขาออกที่ทำให้เกิดโอโซนคือแรงดันที่เกิดเบรกดาวนซึ่งมีขนาด 2.5 kV

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1) เนื่องจากการสวิตชิงความถี่สูงทำให้เกิดสัญญาณรบกวนมาก จึงเป็นเหตุให้ค่าแรงดันต่างๆ ที่วัดได้ดังตารางที่ 4.1 มีความคลาดเคลื่อน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ดร.สำรวย สังข์สะอาด. 2549. “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง.” พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [2] รศ.ดร.วีระเชษฐ์ ชื่นเงิน และวุฒิพล ธาราธิ์เศรษฐ์. 2549. “อิเล็กทรอนิกส์กำลัง Power Electronics.” พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: วี.เจ.พรินติ้ง.
- [3] เจษฎา มัทกิจ. “การออกแบบระบบโอโซนเพื่อใช้ในระบบคูลลิ่งทาวเวอร์.” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.
- [4] ภัทริน. “วงจรแปลงผันกำลังสำหรับการทดสอบดีสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันสูง.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2561.





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คอนเวอร์เตอร์ผลิตโอโซนด้วยวงจรเรโซแนนซ์

### A Converter for an Ozone Generator

กมล ไตรภูมิ กิตติเชษฐ์ จุมทอง กิตติรัช เหล่าขจรบุญ และ ชานน เกื้อนุ้ย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ดลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-Mail: kittituch29545@yahoo.com.au

#### บทคัดย่อ

การฆ่าเชื้อโรคในสมัยปัจจุบันมีหลากหลายวิธี แต่โดยส่วนใหญ่ต้องพึ่งพาสารเคมีเป็นส่วนมาก เพื่อลดการใช้สารเคมีจึงมีการนำโอโซนมาประยุกต์ใช้เพราะโอโซนมีความสามารถในการกำจัดเชื้อโรคและขจัดกลิ่น โดยมีประสิทธิภาพสูงพอๆกับการใช้สารเคมีในปริมาณที่เหมาะสม โดยในปริญญาโทฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและนำเสนอการออกแบบการผลิตโอโซนด้วยคอนเวอร์เตอร์วงจรเรโซแนนซ์โดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ โดยนำเอาวงจรคอนเวอร์เตอร์และวงจรเรโซแนนซ์มาประยุกต์ใช้ในการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันให้มีกำลังขาที่สูงขึ้น ด้วยวิธีการออกแบบที่แบ่งวงจรออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของวงจรกำลังและส่วนของวงจรควบคุม โดยในส่วนของวงจรควบคุมจะมีหน้าที่ในการส่งสัญญาณความถี่ที่สามารถปรับค่าได้ไปยังวงจรถูกส่งจากนั้นวงจรถูกส่งจะเกิดการสวิตซ์ซึ่งความถี่สูงไปยังวงจรเรโซแนนซ์เพื่อขยายแรงดันให้เกิดโอโซนอย่างมีประสิทธิภาพ

**คำสำคัญ :** คอนเวอร์เตอร์, เรโซแนนซ์, โอโซน

#### Abstract

At the present time there is a lot of bacteria. Most of them can be disposed by chemical method. To decrease using of chemical method we use ozone instead because ozone has ability to dispose bacteria and deodorize pungent smell with quality that equal to chemical method. Purpose of this thesis is for design and present the Ozone Generator with resonance converter by using AC source for an input. We can divided our main circuit into 2 parts. First part is Control circuit and the second part is Power circuit. Control circuit is a part for making an adjustable frequency signal through the Power circuit after that the Power circuit will convert the signal with a high switching speed frequency for converting low voltage to high voltage in making ozone.

**Keyword :** converter, resonance, ozone

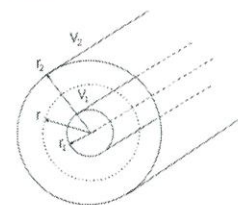
#### 1. บทนำ

ปัจจุบันก๊าซโอโซน (Ozone) มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น การฆ่าเชื้อโรคในโรงงานน้ำแข็งหรือ อุปกรณ์ทางการแพทย์ ใช้สำหรับฟอกอากาศใช้สลายสารพิษในผัก อีกทั้งยังมีการนำไปใช้โรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่สำหรับการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งโอโซนมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคหรือจุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี โอโซนมีข้อดีมากกว่าสารออกฤทธิ์อื่นๆ ที่ใช้งาน คือมีช่วงครึ่งชีวิตที่สั้น (12 ชั่วโมงในบรรยากาศ) จึงไม่ก่อให้เกิดมลพิษตกค้างด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่มาของแนวคิดในการออกแบบและประกอบสร้างชุดเครื่องกำเนิดโอโซนที่มีประสิทธิภาพสูง โดยการสร้างชุดเครื่องกำเนิดโอโซนที่มีประสิทธิภาพสูง จึงต้องใช้หลักการทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงในการออกแบบวงจรป้อนที่มีผลต่อการสร้างโอโซน ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า ความถี่ อุณหภูมิ เป็นต้น สำหรับปริญญาโทฉบับนี้จะออกแบบและประกอบสร้างโดยใช้หลักการวงจรเรโซแนนซ์ (Resonance) ซึ่งวงจรเรโซแนนซ์จะให้กำลังไฟฟ้าที่สูงโดยใช้ขนาดของกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่ายต่ำและกำเนิดก๊าซโอโซน โดยอาศัยการแตกตัวของโมเลกุลในอากาศเมื่อเกิดการโคโรนาดีสชาร์จ (Corona Discharge)

#### 2. ทฤษฎี

##### 2.1 อิเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนกัน

ทรงกระบอกซ้อนกัน เมื่ออิเล็กโตรดมีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนกัน เส้นฟลักซ์ไฟฟ้าจะอยู่ในแนวรัศมี และพื้นผิวของทรงกระบอกคือพื้นผิวศักย์ไฟฟ้าเท่าๆกัน โดยอาศัยอินทิกรัลสมการที่ 4 ของแมกซ์เวลล์คำนวณไฟฟ้าแรงสูงจะถูกจำกัด หรือพิจารณาจากความเครียดสนามไฟฟ้าจึงมีความสำคัญดังนั้นการออกแบบคำนวณต้องรูปร่างและขนาดของสนามไฟฟ้าเพื่อเลือกชนิดและรูปร่างของรูปทรงเรขาคณิตของสนามไฟฟ้า



รูปที่ 1 ทรงกระบอกซ้อนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C = \frac{1}{2k_c \ln(r_2/r_1)} \quad (1)$$

- โดยที่  $I$  คือ ความยาวของอิเล็กโทรด  
 $k_c$  คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับตัวกลางของระบบ  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$   
 เมื่อตัวกลางคืออากาศจะได้ค่า  $k_c$  เท่ากับ  $9 \times 10^9$   
 $r_2$  คือ รัศมีวงนอกของทรงกระบอก  
 $r_1$  คือ รัศมีวงในของทรงกระบอก

### 2.3. Power Converter (วงจรแปลงผันกำลัง)

ในตัวประมวลกำลังมีหลายขั้นตอนในการแปลงกำลังไฟฟ้า แต่ละขั้นตอนจะมีตัวแปลงกำลังประกอบด้วยอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เก็บและปล่อยพลังงานในเวลาชั่วขณะ (Energy storage element) เช่น ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำเป็นต้น ดังนั้นตัวแปลงกำลังหนึ่งตัวจะทำการแปลงกำลังไฟฟ้าเพียงหนึ่งขั้นตอนในตัวประมวลกำลังเท่านั้น ซึ่งสามารถแบ่งได้ตามความถี่, ทางเข้าและออกสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภทดังนี้

ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง หรือมีชื่อเฉพาะว่า วงจรเรียงกระแส (Rectifier)

ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ

ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ

ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ หรือมีชื่อเฉพาะว่า วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter)

ทั้งสี่ประเภทนี้เรียกรวมกันว่าเป็นตัวแปลงกำลังหรือคอนเวอร์เตอร์ได้ แต่มีสองประเภทที่มีชื่อเฉพาะที่เรียกกันคือการแปลงกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง มีชื่อว่าวงจรเรียงกระแส และอีกวงจรมีการแปลงกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ มีชื่อเรียกเฉพาะว่าวงจรอินเวอร์เตอร์ สาเหตุที่พิจารณาเรียกประเภทของตัวแปลงกำลังจากกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยก็เพราะว่าการไหลของกำลังไฟฟ้าอาจเป็นไปได้ทั้งแบบเรียงกระแสหรืออินเวอร์เตอร์

### 2.4 อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม

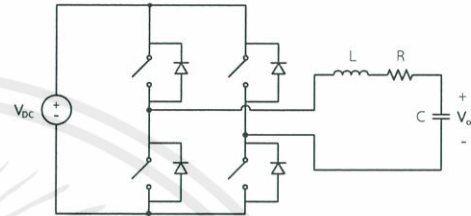
หลักการทำงานเบื้องต้น

อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรมเป็นตัวแปลงที่นำกำลังจาก DC เป็นกระแสสลับ ซึ่งเรียกว่วงจรต่อเนื่องแบบอนุกรมเนื่องจากมีตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ (C) จะทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ซึ่งต่ำกว่าความถี่สวิทช์ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์มีดังนี้

พิจารณาผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจร R-L-C จะได้อัตราขยายแรงดันของวงจรซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

จากสมการที่ 2 ความถี่เรโซแนนซ์ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะหักล้างกัน จึงมองเห็นเป็นโหลดมีค่าเฉพาะความต้านทานเท่านั้น

เมื่อแรงดันเอาต์พุตเป็นคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่  $f_0$  ผลของ L-C จะทำตัวเหมือนตัวกรองความถี่คือการทำให้แกนความถี่ผ่านและจะลดขนาดสัญญาณของลำดับฮาร์โมนิกต่าง ๆ ทำให้รูปคลื่นที่คร่อมความต้านทานเป็นรูปคลื่นไซน์ด้วยความถี่เดียวกับความถี่ของคลื่นสี่เหลี่ยม ขนาดของแรงดันความถี่หลักมูลของสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม  $\pm V_{dc}$



รูปที่ 2 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

## 3. การออกแบบและประกอบสร้าง

### 3.1 เงื่อนไขการออกแบบ

การออกแบบวงจรแปลงผันกำลังมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้สำหรับเป็นแหล่งจ่ายแรงดันสูงในการศึกษาภายในหลอดทรงกระบอกช้อนแกนร่วม โดยวงจรแปลงผันกำลังที่ออกแบบจะต้องสามารถปรับความถี่ได้เพื่อให้เกิดการเรโซแนนซ์ของวงจรและได้แรงดันขาออกตามที่กำหนดไว้ เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในการผลิตก๊าซไอโซน ดังนั้นการออกแบบและประกอบสร้างวงจรแปลงผันกำลังมีเงื่อนไขดังนี้

1. วงจรแปลงผันกำลังที่ประกอบสร้างขึ้นจะต้องสามารถป้อนแรงดันให้กับหลอดทรงกระบอกช้อนแกนร่วมได้ในช่วงแรงดันไฟฟ้า 10 – 20 kV
2. วงจรแปลงผันกำลังที่ประกอบสร้างขึ้นจะต้องป้อนแรงดันที่สามารถปรับความถี่ได้ในช่วงความถี่ 10 – 50 kHz เพื่อให้เกิดการเรโซแนนซ์ได้

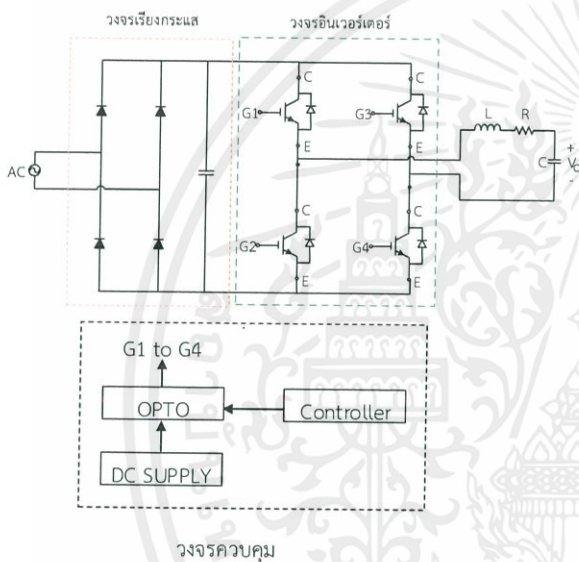
### 3.2 ส่วนประกอบของวงจรแปลงผันกำลัง

ในปัญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการออกแบบและประกอบสร้างวงจรแปลงผันกำลังที่ใช้สำหรับเพิ่มแรงดันขาออกโดยมีส่วนประกอบดังนี้

1. ชุดวงจรเรียงกระแส
2. ชุดวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์
3. ชุดวงจรควบคุม

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

ชุดวงจรแปลงผันกำลังนี้จะได้รับแรงดันไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสซึ่งมีระดับแรงดันที่ 220 V ที่ความถี่ 50 Hz โดยมีการต่อผ่านหม้อแปลงปรับแรงดันเพื่อควบคุมแรงดันที่จ่ายให้กับชุดวงจรแปลงผันกำลัง จากนั้นจะผ่านวงจรเรียงกระแสเพื่อแปลงเป็นระบบไฟฟ้ากระแสตรงที่มีตัวเก็บประจุต่อขนานอยู่เพื่อลดระดับระลอกคลื่นแรงดันก่อนที่จะเข้าสู่ตัวอินเวอร์เตอร์ซึ่งมีอุปกรณ์การสวิตช์ซึ่งเป็น ไอจีบีทีที่สามารถส่งจ่ายกำลังได้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ต่างๆ จากนั้นจึงไปเข้าวงจรเรโซแนนซ์เพื่อขยายแรงดันขาออกให้มีค่ามากที่สุด โดยใช้วงจรควบคุมในการควบคุมความถี่ของการสวิตช์ของวงจรถืออินเวอร์เตอร์แบบเรโซแนนซ์



รูปที่ 3 วงจรแปลงผันกำลัง (2)

### 3.3. การออกแบบและประกอบสร้างวงจรเรียงกระแส

วงจรเรียงกระแสจะทำหน้าที่ในการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีระดับแรงดันที่ด้านแรงดันขาออกของหม้อแปลงปรับแรงดัน 1 เฟสตั้งแต่ 0 – 220 V<sub>AC</sub> ให้เป็นแรงดันกระแสตรงที่มีระดับแรงดันตั้งแต่ 0 – 311 V<sub>DC</sub> โดยวงจรเรียงกระแสที่ใช้นั้นจะเป็นวงจรเรียงกระแส 1 เฟสเต็มคลื่นแบบไดโอด

จากผลการทดลองพบว่าระยะทางที่วัดได้จากการขยายตัวสูงสุดของตัวเพียร์โซ (0.13 um) มีค่าใกล้เคียงกับที่คำนวณได้จากคุณสมบัติเฉพาะของตัวเพียร์โซ (0.09 um) และจากรูปที่ 4 เราพบว่าความละเอียดที่ระบบนี้สามารถวัดได้อยู่ที่ 0.02 um หรือ 20 nm

### 3.4 การออกแบบและประกอบสร้างวงจรถืออินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์

วงจรถืออินเวอร์เตอร์นี้จะนำแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสมาแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดย

สามารถปรับความถี่ได้จากวงจรถือควบคุม สำหรับวงจรถืออินเวอร์เตอร์ที่ใช้นั้นจะเป็นวงจรถืออินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม ซึ่งใช้วงจรถือสวิตช์แบบ ไอจีบีที โดยวงจรถือเรโซแนนซ์จะประกอบด้วยตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำมาต่ออนุกรมกัน เพื่อให้แรงดันขาออกมีค่าสูงสุด โดยค่าของตัวเก็บประจุหาได้จากสมการทรงกระบอกซ้อนกันร่วม ตามสมการที่ 1 เมื่อ  $L$  มีค่าเท่ากับ  $19 \text{ cm}$ ,  $k_c$  มีค่าเท่ากับ  $9 \times 10^9$   $b$  มีค่าเท่ากับ  $0.9 \text{ cm}$  และ  $a$  มีค่าเท่ากับ  $0.3 \text{ mm}$  จากการแทนค่าลงในสมการที่ 1 ค่า  $C$  มีค่าเท่ากับ  $3.103 \text{ pF}$

ในส่วนของความถี่เมื่อได้ค่า  $C$  ของอิเล็กทรอนิกส์มาแล้ว พร้อมทั้งค่า  $L$  ที่ต้องการใช้ แต่เนื่องจากค่า  $C$  นั้นมีค่าน้อยเกินไปจนทำให้ค่า  $L$  มีค่ามากเกินไป ส่งผลให้ความถี่เรโซแนนซ์เกินย่านที่สามารถปรับได้จึงทำการเพิ่มค่า  $C$  เป็น  $0.01 \mu\text{F}$  และลดค่า  $L$  เป็น  $3.14 \text{ mH}$  ดังนั้นจึงสามารถหาค่าความถี่ได้จากสมการที่ 2 เมื่อ  $L$  มีค่าเท่ากับ  $3.14 \text{ mH}$  และ  $C$  มีค่าเท่ากับ  $0.01 \mu\text{F}$  จากการแทนค่าลงในสมการที่ 2 ค่า  $f$  มีค่าเท่ากับ  $28.40 \text{ kHz}$

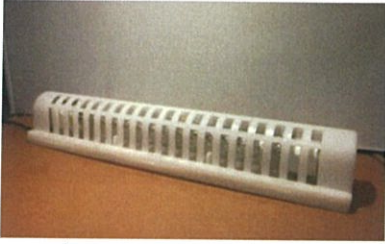
### 3.5 การออกแบบและประกอบสร้างวงจรถือควบคุม

วงจรถือควบคุมชนิดสัญญาณ PWM จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด STM32F429I DISCOVERY เป็นตัวสร้างสัญญาณควบคุมการสวิตช์ของ ไอจีบีที (IGBT) โดยการสร้างวงจรถือควบคุมจะใช้โปรแกรม STM32CubeMX ในการสร้างตัว generate code สำหรับสร้าง source code ขึ้นมาและนำไปใช้ร่วมกับ SW4STM32 หรือ System Workbench for STM32 ซึ่งเป็น Free IDE และ Compiler สำหรับ STM32 โดยตัว IDE จะสร้างมาจาก Eclipse ซึ่งจะคล้ายกับ MPLAB X ของ Microchip เวลาใช้งานก็ค่อนข้างสะดวกเพราะมี Auto complete ให้เวลาเรเรียก Structure ต่างๆ ส่วน Compiler ก็เป็น GCC สำหรับ STM32 ซึ่งจะสามารถสร้างสัญญาณควบคุมที่มีค่าแรงดัน 3 V ออกมาตามขาเอาต์พุตที่กำหนดไว้

สำหรับปริยญาณิพจนธ์ฉบับนี้ได้ออกแบบการควบคุมวงจรถือแปลงผันกำลัง โดยสามารถปรับความถี่ของ PWM ได้ในช่วงความถี่ 7 – 68 kHz โดยให้มีค่าดีวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ (เมื่อไม่คำนึงถึงค่า Dead time)

### 3.7 การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ในการผลิตไอโซน

อิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาผลิตไอโซนจะใช้เป็นทรงกระบอกซ้อนกันร่วม เพราะมีลักษณะเป็นหลอดง่ายต่อการกักเก็บอากาศและไม่แพร่กระจายออกได้ง่าย โดยออกแบบลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 4 อีเล็กโทรดในการผลิตไอโซน

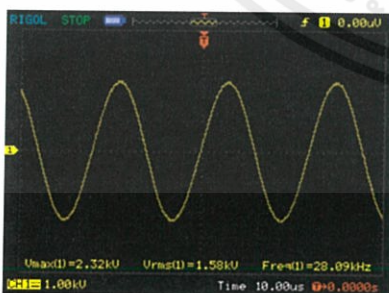
ผลจากการใช้ Program Comsol simulation พบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของอีเล็กโทรดอยู่ที่แกน มีขนาด  $1.8 \times 10^6$  V/m

#### 4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

การทดสอบการผลิตไอโซนด้วยแรงดันกระแสสลับโดยใช้คอนเวอร์เตอร์วงจรเรโซแนนซ์ โดยกำหนดค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ  $0.01 \mu\text{F}$ , ตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ  $3.14 \text{ mH}$  และความถี่  $27\text{-}28 \text{ kHz}$  ซึ่งมีการกำหนดตัววัดแรงดันค่าต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบแรงดันขาเข้าของวงจรแปลงผันกำลังกับแรงดันขาออกของวงจรเรโซแนนซ์ในการผลิตไอโซน

ตารางที่ 1 ตารางเปรียบเทียบแรงดัน

แรงดันตก คร่อมตัวเก็บ ประจุ (kV)	แรงดันตก คร่อมตัว เหนี่ยวนำ (kV)	แรงดัน กระแสตรง (V)	แรงดัน กระแสสลับ (V)
1.36	1.36	17.60	10.28
1.52	1.52	19.60	11.16
1.72	1.72	22.80	12.95
1.92	1.92	26.80	14.05
2.16	2.16	27.60	14.93
2.32	2.36	12.80	16.73
2.16 (Breakdown)	2.08	10.40	17.76



รูปที่ 5 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ 2.3 kV

จากตารางสรุปผลและกราฟแรงดันต่างๆพบว่าความถี่ที่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์อยู่ในย่าน  $27\text{-}28 \text{ kHz}$  โดยการเกิดเรโซแนนซ์นั้นสามารถสังเกตได้จากกราฟแรงดันขาออกต้องมีลักษณะเป็นกราฟไซน์ และผลจากการเกิดเรโซแนนซ์ทำให้แรงดันขาออกหรือแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บ

ประจุ นั้นมีการขยายเพิ่มมากขึ้นหลายเท่าตัวดังตารางที่ 1 และการผลิตไอโซนจะเริ่มตอนเบรกคาวาน์เมื่อแรงดันขาออกนั้นเกิน  $2.5 \text{ kV}$

#### 5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองการออกแบบวงจรควบคุมให้สามารถปรับความถี่ในย่านระหว่าง  $7\text{-}68 \text{ kHz}$  โดยใช้ STM32F49I DISCOVERY เป็นตัวควบคุมและจ่ายสัญญาณ ไปยังวงจรแปรผันกำลังเป็นสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม จากนั้น ไอจีบีทีในวงจรแปรผันกำลังจะทำการสวิตช์และจ่ายแรงดันออกไปยังตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำเมื่อแรงดันไปตกคร่อมตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ จึงทำการปรับค่าความถี่ที่ทำให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำมีค่ามากที่สุด

ซึ่งผลจากการทดสอบโดยใช้วงจรควบคุมปรับหาความถี่เรโซแนนซ์เพื่อทำให้วงจรกำลังขยายแรงดันได้มากที่สุด พบว่าความถี่ที่ทำให้เกิดแรงดันขาออกหรือแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมากที่สุดอยู่ในช่วง  $27\text{-}28 \text{ kHz}$  และแรงดันขาออกที่ทำให้เกิดไอโซนคือแรงดันที่เกิดเบรกคาวาน์ซึ่งมีขนาด  $2.5 \text{ kV}$

#### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ดร.สำรวย สังข์สะอาด. 2549. "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง." พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [2] รศ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน และ วุฒิพล ชาราธิรเศรษฐ์. 2549. "อิเล็กทรอนิกส์กำลัง Power Electronics." พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: วี.เจ.พรินต์.
- [3] เจษฎา มัทกิจ. "การออกแบบระบบไอโซนเพื่อใช้ในระบบกูดลิงทาวเวอร์." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.
- [4] ถัทธิณ. "วงจรแปลงผันกำลังสำหรับการทดสอบดิซซาร์จบางส่วนของหม้อแปลงเครื่องมือวัดแรงดันสูง." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2561.



ภาคผนวก ข

โปรแกรมสำหรับปรับความถี่ของวงจรควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

//Code control frequency of STM32F429I Discovery
uint16_t adc_raw = 0;
    //ADC_raw_PA_5
double a;
double b;
double f;
double p;
double n;
double m;
int frequency;
int duty;

while (1)
{
/* USER CODE END WHILE */
    MX_USB_HOST_Process();
/* USER CODE BEGIN 3 */
    HAL_ADC_Start(&hadc1); //start_ADC
    HAL_ADC_PollForConversion(&hadc1, HAL_MAX_DELAY);
    adc_raw = HAL_ADC_GetValue(&hadc1) * 0.01 + adc_raw * 0.99;
    char msg[40];
    HAL_UART_Transmit(&huart1, (uint8_t*) msg, strlen(msg), HAL_MAX_DELAY);
    HAL_Delay(1);
    a = adc_raw*adc_raw;
    b = adc_raw;

    if( adc_raw>=0 && adc_raw<=500 ){
        f = (0.0149*a)-(17.838*b)+10315;
        p = (0.0074*a)-(8.9189*b)+5157.7;
        __HAL_TIM_SET_AUTORELOAD(&htim1, f);
        __HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim1, TIM_CHANNEL_1, p);
        sprintf(msg, "adc_raw_1: %d\r\n", adc_raw);
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if( adc_raw>500 && adc_raw<=1000 ){
    f = (0.0028*a)-(7.5838*b)+8090.4;
    p = (0.0014*a)-(3.7919*b)+4045.2;
    __HAL_TIM_SET_AUTORELOAD(&htim1, f);
    __HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim1, TIM_CHANNEL_1, p);
    sprintf(msg, "adc_raw_2: %d\r\n", adc_raw);
}
if( adc_raw>1000 && adc_raw<=1500 ){
    f = (0.001*a)-(4.1067*b)+6422.5;
    p = (0.0005*a)-(2.0534*b)+3211.3;
    __HAL_TIM_SET_AUTORELOAD(&htim1, f);
    __HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim1, TIM_CHANNEL_1, p);
    sprintf(msg, "adc_raw_3: %d\r\n", adc_raw);
}
if( adc_raw>1500 && adc_raw<=2000 ){
    f = (0.0004*a)-(2.5635*b)+5287.5;
    p = (0.0002*a)-(1.2817*b)+2643.7;
    __HAL_TIM_SET_AUTORELOAD(&htim1, f);
    __HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim1, TIM_CHANNEL_1, p);
    sprintf(msg, "adc_raw_4: %d\r\n", adc_raw);
}
if( adc_raw>2000 && adc_raw<=2500 ){
    f = (0.0002*a)-(1.7498*b)+4482.8;
    p = (0.0001*a)-(0.8749*b)+2241.4;
    __HAL_TIM_SET_AUTORELOAD(&htim1, f);
    __HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim1, TIM_CHANNEL_1, p);
    sprintf(msg, "adc_raw_5: %d\r\n", adc_raw);
}
if( adc_raw>2500 && adc_raw<=2750 ){
    f = 2882.2-(0.5043*b);
    p = 1441.1-(0.2521*b);
    __HAL_TIM_SET_AUTORELOAD(&htim1, f);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    __HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim1, TIM_CHANNEL_1, p);
    sprintf(msg, "adc_raw_6.1: %d\r\n", adc_raw);
}
if( adc_raw>2750 && adc_raw<=3000 ){
    f = 2682-(0.4315*b);
    p = 1341-(0.2157*b);
    __HAL_TIM_SET_AUTORELOAD(&htim1, f);
    __HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim1, TIM_CHANNEL_1, p);
    sprintf(msg, "adc_raw_6.2: %d\r\n", adc_raw);
}
if( adc_raw>3000 && adc_raw<=3250 ){
    f = (0.0001*a)-(1.0253*b)+3527.3;
    p = 1253.8-(0.1867*b);
    __HAL_TIM_SET_AUTORELOAD(&htim1, f);
    __HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim1, TIM_CHANNEL_1, p);
    sprintf(msg, "adc_raw_7: %d\r\n", adc_raw);
}
if( adc_raw>3250 && adc_raw<=3500){
    f = 2354.4-(0.3263*b);
    p = 1177.2-(0.1631*b);
    __HAL_TIM_SET_AUTORELOAD(&htim1, f);
    __HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim1, TIM_CHANNEL_1, p);
    sprintf(msg, "adc_raw_8: %d\r\n", adc_raw);
}
if( adc_raw>3500 && adc_raw<=3750){
    f = 2218.8-(0.2876*b);
    p = 1109.4-(0.1438*b);
    __HAL_TIM_SET_AUTORELOAD(&htim1, f);
    __HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim1, TIM_CHANNEL_1, p);
    sprintf(msg, "adc_raw_9: %d\r\n", adc_raw);
}
if( adc_raw>3750 && adc_raw<=4000){
    f = 2097.9-(0.2554*b);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

p = 1049-(0.1277*b);
__HAL_TIM_SET_AUTORELOAD(&htim1, f);
__HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim1, TIM_CHANNEL_1, p);
sprintf(msg, "adc_raw_10: %d\r\n", adc_raw);
}
if( adc_raw>4000 && adc_raw<=4095){
f = 1989.2-(0.2281*b);
p = 994.6-(0.1141*b);
__HAL_TIM_SET_AUTORELOAD(&htim1, f);
__HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim1, TIM_CHANNEL_1, p);
sprintf(msg, "adc_raw_11: %d\r\n", adc_raw);
}
//End

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



กณพ ไตรภูมิ 58010004

เกิดเมื่อวันที่ 27 มิถุนายน 2539

ที่อยู่: 29/72 หมู่ 3 ต.นาหลวงเสน อ.ทุ่งสง จ.นครศรีธรรมราช 80110

สำเร็จการศึกษาจากโรงเรียนสตรีทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช และ สำเร็จ การศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า คุณทหารลาดกระบัง

E-mail: kanop\_por01@hotmail.com



กิตติเชษฐ์ จุ่มทอง 58010093

เกิดเมื่อวันที่ 7 กันยายน 2539

ที่อยู่: 223/102 แขวงบ้านช่างหล่อ เขตบางกอกน้อย กทม 10700

สำเร็จการศึกษาจากโรงเรียนมัธยมวัดนายโรง และสำเร็จการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

E-mail: kitteched@gmail.com



กิตติช เหล่าชจรบุญ 58010099

เกิดเมื่อวันที่ 6 กุมภาพันธ์ 2541

ที่อยู่: 990/9 ถนนนครไชยศรี แขวงถนนนครไชยศรี เขตดุสิต จังหวัด กรุงเทพมหานคร 10300

สำเร็จการศึกษาจากโรงเรียนเซนต์คาเบรียล จังหวัดกรุงเทพมหานครฯ และ สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

E-mail: kittituch29545@yahoo.com.au



ชานน เกื้อนุ้ย 58010285

เกิดเมื่อวันที่ 18 มิถุนายน 2539

ที่อยู่: 17 ถนนสระเกษ ต.บ่อทราย อำเภอเมืองสงขลา จังหวัดสงขลา 90000

สำเร็จการศึกษาจากโรงเรียนวรนารีเฉลิม จังหวัดสงขลา และ สำเร็จ การศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า คุณทหารลาดกระบัง

E-mail: nonzanotza@hotmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้