

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

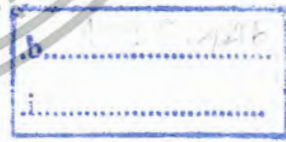
เครื่องกำเนิดโอโซนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์  
Ozone Generator using Solar cell



T104195



เลขหมู่.....  
เลขท. บิชน. 104195  
วัน,เดือน,ปี... 3.0. ๒๕๕2



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องกำเนิดโอโซนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์  
Ozone Generator using Solar cell



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ  
อ.ชัยทัต มณีอินทร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2551

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องกำเนิดไอโซนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

ผู้จัดทำ



1. นายถวัลย์ สิมปิโรจน์
2. นายตรีเทพ โคนาม
3. นายสฤษฏ์ เขียวชาญกิจการ
4. นายสาริษฐ์ ไสภ

.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิจิตร กิถเรศ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ชัยทัต มณีอินทร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เครื่องกำเนิดไอโซนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

นายณัฐวุฒิ ลิ้มปวีโรจน์  
นายดริณภพ โตนาม  
นายสฤษฏ์ เขียวชาญกิจการ  
นายสาริษฐ์ โสภา  
รศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ อาจารย์ที่ปรึกษา  
อ. ชัยทัต มณีอินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2551

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้เสนอ การออกแบบเครื่องกำเนิดไอโซนโดยใช้โซล่าเซลล์ โดยเครื่องกำเนิดไอโซนโดยโซล่าเซลล์นี้ จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ ชุดวงจรทบทระดับแรงดันไฟฟ้า ชุดวงจรสวิตซ์ซึ่งและหม้อแปลงความถี่สูง และชุดอิเล็กทรอนิกส์ มีหลักการทำงาน คือ รับพลังงานในรูปแบบไฟฟ้ากระแสตรงจากโซล่าเซลล์เข้าวงจรทบทระดับแรงดันไฟฟ้า เพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เหมาะสมกับวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งวงจรอินเวอร์เตอร์เป็นการประยุกต์ใช้สวิตซ์ซึ่งเพียงหนึ่งตัวร่วมกับชุดหม้อแปลงความถี่สูง เพื่อทำการแปลงเป็นแรงดันสูง ความถี่สูง เข้าสู่ชุดอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งออกแบบเป็นลักษณะทรงกลมแกนซ้อนร่วม ใช้ในสร้างสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง เพื่อใช้ในการผลิตไอโซน

## Ozone Generator using Solar cell

Natthavuth Limviroy

Daranpop Tonam

Sarit Chiewchankitjakarn

Sarit Sopa

Asst. Prof. Dr. Vijit Kinnaret Advisor

Chaitat Maneeinnn Advisor

2008

### ABSTRACT

This thesis proposes an ozone generator using Solar cells. This generator includes the three sets namely, the Solar cell and Boost Converter set, the Switching and High Frequency Transformer set and the Electrode set. This technique is based on Boost Voltage from the Solar cell with Boost Converter to be an input to Single Switching IGBT and high frequency transformer feeding high-voltage high frequency to the electrode, which is a common axis cylinder use for generating highly non-uniform electric field for ozone generation.

II

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการเครื่องกำเนิดไอโซนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ สำเร็จได้ดีต้องขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานและขอขอบคุณ อาจารย์รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ และ อ.ชัยทัต มณีอินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำปรึกษาแนะแนวทางการในการดำเนินโครงการ รวมทั้ง คณะอาจารย์ในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ทุกๆท่าน และ รุ่นพี่นักศึกษาปริญญาโท ทุกๆคน ที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำและช่วยเหลือเสมอมาซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

และต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูและให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และถ้าโครงการนี้เป็นประโยชน์แก่ผู้อ่าน ขอให้ประโยชน์และความดี จงส่งผลให้ แต่พ่อแม่ ครอบครัวและผู้มีพระคุณ จงมีแต่ความสุขความเจริญยิ่งๆขึ้นไป

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VI
สารบัญตาราง.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	2
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ไอโซน.....	3
2.1.1 การกำเนิดไอโซน.....	3
2.1.2 คุณสมบัติไอโซน.....	9
2.1.3 การประยุกต์ใช้งานไอโซน.....	14
2.1.4 ทฤษฎีการแตกตัวของก๊าซและการเกิดไอโซน.....	16
2.2 อิเล็กโตรด.....	19
2.2.1 สนามไฟฟ้า.....	20
2.2.2 ลักษณะสนามไฟฟ้าอย่างง่าย.....	21
2.2.3 ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อแรงดันเบรกดาวน์.....	23
2.2.4 ผลของแผ่นฉนวนบางคั่นที่มีผลต่อการเกิดไอโซน.....	27
2.3 หม้อแปลงแรงดันสูง ความถี่สูง.....	27
2.4 อุปกรณ์สวิตช์และวงจรขับ.....	31
2.5 วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า (Boost Converter).....	31
2.5.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์.....	31
2.5.2 หลักการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์.....	32
2.5.3 ผลของ Parasitic Elements.....	37
2.5.4 ค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าออก.....	38
2.6 ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์.....	39
2.6.1 แหล่งกำเนิดพลังงานแสงอาทิตย์.....	40
2.6.2 โครงสร้างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ IV และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.3 ตัวแปรที่บอกคุณสมบัติแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	44
2.7 แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตช์.....	45
2.7.1 วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าและกรองแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุต.....	45
2.7.2 วงจรดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์.....	47
2.7.3 วงจรการควบคุมสำหรับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์.....	49
บทที่ 3 การเลือกและการออกแบบ.....	50
3.1 การออกแบบชุดสร้างโคโรนา.....	50
3.1.1 การคำนวณค่าพลังงานและแรงดันไฟฟ้า.....	53
3.2 การออกแบบหม้อแปลงแรงดันสูง ความถี่สูง.....	55
3.3 การออกแบบวงจรสวิตซ์ซิ่ง.....	57
3.3.1 ผลการจำลองด้วยโปรแกรม.....	57
3.4 การออกแบบวงจรทระดับแรงดันไฟฟ้า.....	58
3.4.1 ขอบเขตการทำงานของวงจรทระดับแรงดัน.....	58
3.4.2 การออกแบบวงจร.....	59
3.4.3 กำหนดค่าของอุปกรณ์ต่างๆที่จะใช้งานจริงในวงจร.....	60
3.4.4 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	61
3.4.5 ผลการจำลองโดยใช้พารามิเตอร์ที่กำหนดขึ้นโดยอ้างอิงจากการ คำนวณ.....	62
3.4.6 วงจรที่ใช้งานจริง.....	64
บทที่ 4 ผลการทดลองเบื้องต้น.....	67
4.1 วงจรทบแรงดันไฟฟ้า.....	67
4.2 ผลทดสอบแหล่งจ่ายแรงดันสูงความถี่สูง.....	69
4.3 ทำการวัดปริมาณโอโซน.....	75
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	82
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	82
5.2 ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ.....	82
5.3 แนวทางในการพัฒนา.....	83
อ้างอิง	
ภาคผนวก ก	
ภาคผนวก ข	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของเครื่องกำเนิดไอโซน.....	1
2.1 โครงสร้างของเครื่องสังเคราะห์ก๊าซไอโซนแบบออกโตเพลต.....	6
2.2 โครงสร้างของเครื่องสังเคราะห์ก๊าซไอโซนแบบท่อ.....	6
2.3 โครงสร้างของเครื่องสังเคราะห์ก๊าซไอโซนแบบโลว์เซอร์เพลต.....	7
2.4 เส้นโค้งแสดงระดับพลังงานของออกซิเจน.....	17
2.5 ลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ.....	20
2.6 คุณสมบัติของสนามไฟฟ้า 3 ชนิดตามรูปร่างอิเล็กโตรด.....	21
2.7 ลักษณะการเปลี่ยนแปลง $V_0$ และ $E_{\text{th}}$ ในทอม $r_1$ เมื่อกำหนดให้ $r_2$ คงที่.....	23
2.8 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซตัวอย่างในฟังก์ชันความดัน.....	24
2.9 แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนของอิเล็กโตรดแบบแท่งกับระนาบในอากาศในทอมของระยะ d.....	25
2.10 ผลประจุค้างของปลายแหลมขั้วบวกและลบ.....	26
2.11 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์.....	32
2.12 แสดงโหมดการทำงานแบบกระแสต่อเนื่อง (a) switch on, (b) switch off.....	32
2.13 ขอบเขตระหว่างโหมดการทำงานแบบกระแสต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ของวงจรกระแส แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	34
2.14 เปรียบเทียบกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ ในโหมดกระแสต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง.....	36
2.15 แสดงขอบเขตของโหมดกระแสต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง.....	37
2.16 ค่า $V_o/V_d$ ของระบบจริงเทียบกับวงจรในอุดมคติ.....	37
2.17 แสดงรูปคลื่นที่มีการกระเพื่อม.....	38
2.18 ค่าความส่องสว่าง (Irradiant) โดยเฉลี่ยในช่วง 10 ปี บริเวณผิวโลก.....	39
2.19 การพิจารณาค่าแสงแดดใน 1 วันตามชั่วโมงที่แดดสูงสุด.....	40
2.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ต่อพื้นที่ต่างๆ.....	41
2.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เทียบกับความเข้มแสงต่างๆ.....	41
2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเทียบกับอุณหภูมิ.....	42
2.23 การอธิบายพาสไดโอดคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์.....	43
2.24 การต่อบล็อกกิงไดโอด (Blocking diode).....	43
2.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่กำลังสูงสุดที่ได้.....	44
2.26 บล็อกไดอะแกรมของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตซ์.....	45
2.27 วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าและกรองแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุต.....	46
2.28 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1	บล็อกไดอะแกรมการทำงานของเครื่องกำเนิดไอโซน.....50
3.2	ลักษณะของชุดสร้างโคโรนาทรงกระบอกซ้อนกันร่วมฉนวน 1 ชั้น.....51
3.3	ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ที่รัศมี $r_1$ ใดๆ เมื่อ $r_2 = 2.40$ cm.....52
3.4	ลักษณะของชุดสร้างโคโรนาทรงกระบอกซ้อนกันร่วมฉนวน 2 ชั้น.....52
3.5	แสดงภาคตัดขวางของชุดสร้างโคโรนา.....53
3.6	วงจรจำลองการทำงานของหม้อแปลงความถี่สูง.....57
3.7	ผลการจำลองแรงดันเอาต์พุตของหม้อแปลงความถี่สูง ที่ Duty cycle = 0.2, 6 kv .....57
3.8	ผลการจำลองแรงดันเอาต์พุตของหม้อแปลงความถี่สูง ที่ Duty cycle = 0.2, 9 kv .....58
3.9	แสดงบล็อกการทำงานของวงจรบูตส์คอนเวอร์เตอร์ (Boots Converter).....58
3.10	วงจรทบแรงดันไฟฟ้า.....59
3.11	วงจรทบแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณจริง.....61
3.12	แสดงผลการรูปคลื่นสัญญาณควบคุมเปรียบเทียบกับกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ และสัญญาณแรงดันขาออก.....62
3.13	วงจรทบแรงดันที่กำหนดค่าอุปกรณ์เอง.....62
3.14	แสดงผลการรูปคลื่นสัญญาณควบคุมเปรียบเทียบกับกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ และสัญญาณแรงดันขาออกที่ Duty ratio 0.6.....63
3.15	แสดงผลการรูปคลื่นสัญญาณควบคุมเปรียบเทียบกับกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ และสัญญาณแรงดันขาออกที่ Duty ratio 0.68.....64
3.16	แสดงผลการรูปคลื่นสัญญาณควบคุมเปรียบเทียบกับกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ และสัญญาณแรงดันขาออกที่ Duty ratio 0.75.....64
3.17	วงจรทบแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งานจริง.....65
3.18	วงจรการทำงานของเครื่องกำเนิดไอโซนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์.....66
4.1	สัญญาณขับเกตเปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ ( $D = 0.75$ ).....68
4.2	สัญญาณขับเกตเปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ ( $D = 0.68$ ).....68
4.3	สัญญาณขับเกตเปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ ( $D = 0.55$ ).....68
4.4	แสดงรูปคลื่นแรงดันด้านเข้าหม้อแปลงแรงดันสูงเทียบกับสัญญาณขับเกต ( $V_{OUTPUT} = 4$ kV).....69
4.5	แสดงรูปคลื่นแรงดันด้านออกจากหม้อแปลงแรงดันสูงเทียบกับสัญญาณขับเกต ( $V_{OUTPUT} = 4$ kV).....69
4.6	แสดงรูปคลื่นแรงดันด้านเข้าหม้อแปลงแรงดันสูงเทียบกับสัญญาณขับเกต ( $V_{OUTPUT} = 5$ kV).....70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ VII และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 แสดงรูปคลื่นแรงดันด้านนอกจากหม้อแปลงแรงดันสูงเทียบกับสัญญาณขับเกท ( $V_{\text{OUTPUT}} = 5 \text{ kV}$ ).....	70
4.8 แสดงรูปคลื่นแรงดันด้านเข้าหม้อแปลงแรงดันสูงเทียบกับสัญญาณขับเกท ( $V_{\text{OUTPUT}} = 6 \text{ kV}$ ).....	71
4.9 แสดงรูปคลื่นแรงดันด้านนอกจากหม้อแปลงแรงดันสูงเทียบกับสัญญาณขับเกท ( $V_{\text{OUTPUT}} = 6 \text{ kV}$ ).....	71
4.10 แสดงรูปคลื่นแรงดันด้านเข้าหม้อแปลงแรงดันสูงเทียบกับสัญญาณขับเกท ( $V_{\text{OUTPUT}} = 7 \text{ kV}$ ).....	72
4.11 แสดงรูปคลื่นแรงดันด้านนอกจากหม้อแปลงแรงดันสูงเทียบกับสัญญาณขับเกท ( $V_{\text{OUTPUT}} = 7 \text{ kV}$ ).....	72
4.12 แสดงรูปคลื่นแรงดันด้านเข้าหม้อแปลงแรงดันสูงเทียบกับสัญญาณขับเกท ( $V_{\text{OUTPUT}} = 8 \text{ kV}$ ).....	73
4.13 แสดงรูปคลื่นแรงดันด้านนอกจากหม้อแปลงแรงดันสูงเทียบกับสัญญาณขับเกท ( $V_{\text{OUTPUT}} = 8 \text{ kV}$ ).....	73
4.14 แสดงรูปคลื่นแรงดันด้านเข้าหม้อแปลงแรงดันสูงเทียบกับสัญญาณขับเกท ( $V_{\text{OUTPUT}} = 9 \text{ kV}$ ).....	74
4.15 แสดงรูปคลื่นแรงดันด้านนอกจากหม้อแปลงแรงดันสูงเทียบกับสัญญาณขับเกท ( $V_{\text{OUTPUT}} = 9 \text{ kV}$ ).....	74
4.16 แสดงอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดปริมาณไอโซนด้วยวิธีไอโอโดเมทริก.....	77
4.17 แสดงสารเคมีสำหรับตรวจวัดปริมาณไอโซนด้วยวิธีไอโอโดเมทริก.....	77
4.18 แสดงสีของสารละลายโพแตสเซียมไอโอไดด์ ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับไอโซน.....	78
4.19 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันเอาท์พุท (kV) กับปริมาณไอโซน (mg/hr).....	80
4.20 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันเอาท์พุท (kV) กับปริมาณไอโซน (mg/w-h).....	80
4.21 แสดงส่วนประกอบทั้งหมดของเครื่องผลิตไอโซน.....	81

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางแสดงคุณสมบัติของก๊าซไอโซนบรีสุทธิ.....	10
2.2 ตารางแสดงคุณสมบัติของก๊าซไอโซนบรีสุทธิ (ต่อ).....	11
2.3 ตารางแสดงระดับไอโซนและผลที่เกิดขึ้น.....	11
2.4 ตารางแสดงข้อมูลปริมาณการใช้ไอโซนในลักษณะต่างๆ.....	12
2.5 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของไอโซนกับคลอรีน.....	13
2.6 ตารางเปรียบเทียบปริมาณการใช้ และเวลาการทำปฏิกิริยาของไอโซนกับคลอรีน.....	16
4.1 ตารางผลการทดลองวงจรถบแรงดัน.....	67
4.2 แสดงปริมาณไอโซนที่เกิดขึ้นที่ค่าแรงดันเอาท์พุทต่างๆ.....	79
4.3 แสดงผลการทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้าในการสร้างไอโซน.....	79



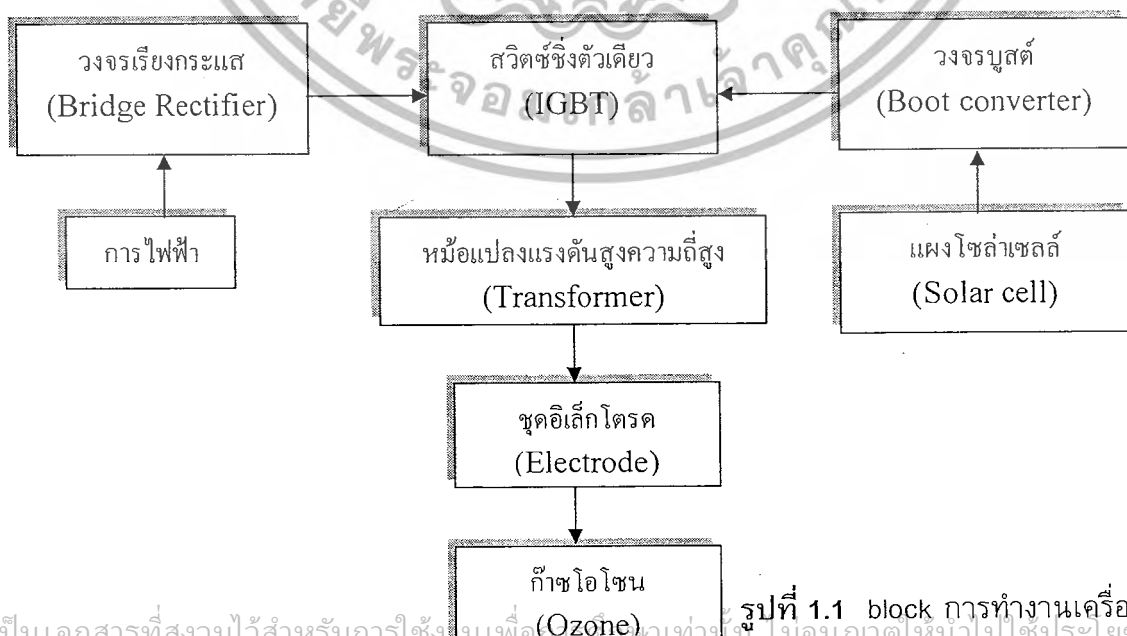
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อIX และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

ก๊าซโอโซนมีอยู่ในธรรมชาติที่สามารถผลิตขึ้นได้ด้วยกรรมวิธีทางวิทยาศาสตร์ โดยการแยกสลายก๊าซออกซิเจน โดยที่ก๊าซโอโซนจะให้พลังงานที่สูงกว่า มีความไวในการทำปฏิกิริยากับสารต่างๆ ได้อย่างรวดเร็วและไม่ทำให้เกิดสารตกค้างที่เป็นพิษเหมือนสารเคมีอย่างอื่น เมื่อสลายตัวก็จะให้ก๊าซออกซิเจนซึ่งยังคงเป็นประโยชน์ต่อการหายใจ จึงมีการผลิตเครื่องให้กำเนิดโอโซนเพื่อประยุกต์ใช้กับวงการต่างๆทั้งทางด้านวิทยาศาสตร์ ธุรกิจอุตสาหกรรม เกษตรกรรม การแพทย์ และอื่นๆ ทั้งนี้เพราะก๊าซโอโซนมีคุณสมบัติที่เด่นชัดในการฆ่าเชื้อโรค กำจัดสารพิษ ดับกลิ่น ฟอกสีและการเพิ่มออกซิเจนในน้ำ

ในโครงงานนี้จะใช้แรงดันไฟฟ้าสูง ความถี่สูง เพื่อใช้ในการผลิตโอโซน ซึ่งจะใช้แรงดันไฟฟ้า 220V 50Hz โดยสามารถใช้ได้จาก 2 แหล่งจ่าย คือ ไฟฟ้าตามบ้านเรือนทั่วไป จากไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V 50 Hz เป็นไฟฟ้ากระแสตรง 310V โดยประมาณด้วยวงจรเรกติไฟร์(Rectifier) และไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดแบบโซลาร์เซลล์ (Solar cell) ร่วมกับวงจรบูสต์ (Boost converter) เป็นไฟฟ้ากระแสตรง 310V ใช้ไอจีบีทีเป็นอุปกรณ์สวิตช์ ซึ่งจะมีไอซี TL494 สร้างสัญญาณพัลส์เพื่อควบคุมการสวิตช์ของไอจีบีที จากนั้นจะผ่านหม้อแปลงแรงดันสูง ความถี่สูง เพื่อทำการจ่ายให้กับชุดอิเล็กโทรด และทำให้เกิดการเร่งประจุไฟฟ้าที่เรียกว่าโคโรนา ดิสชาร์จ (Corona Discharge) ขึ้นภายในอิเล็กโทรด ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกตัวของออกซิเจนจาก  $O_2$  กลายเป็น  $O$  จากนั้นจะทำการผ่านออกซิเจนจากภายนอกเข้าไปซึ่งก็คือ( $O_2$ )รวมกับ  $O$  ในอิเล็กโทรด จะทำให้เกิดก๊าซโอโซน ( $Ozone, O_3$ ) ออกมา



รูปที่ 1.1 block การทำงานเครื่องกำเนิดโอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.1 ความสำคัญของปัญหา

ก๊าซโอโซนที่เกิดจากทำธรรมชาติ มีปริมาณน้อยเกินไปที่จะนำมาใช้ประโยชน์ ในปัจจุบัน เราจึงต้องทำเครื่องผลิตโอโซนขึ้นมาเพื่อสนองความต้องการของมนุษย์ในการนำไปใช้งาน และยังถ้าเราผลิตก๊าซโอโซนได้ในปริมาณมากก็เป็นผลดีต่อโลกของเรา และถ้านำไปเป็นธุรกิจในงานอุตสาหกรรม ก็ยังมีราคาแพง ฉะนั้นการผลิตก๊าซโอโซนจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในทุกวันนี้ เพื่อสุขภาพของมนุษย์เอง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาวิธีการผลิตก๊าซโอโซนโดยใช้แรงดันไฟฟ้าสูง ความถี่สูง
2. เพื่อศึกษาและพัฒนาวิธีการใช้โซลาร์เซลล์ในการผลิตก๊าซโอโซน
3. เพื่อศึกษาและเรียนรู้ หลักการทำงานส่วนประกอบของวงจรต่างๆภายในโครงงาน
4. เพื่อให้นักศึกษาเข้าใจวิชาการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมาประยุกต์ใช้งาน
5. เพื่อนำหลักการของโครงงานไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดอากาศและน้ำเสีย

## 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย

1. ขอบเขต:
  - ใช้แรงดันไฟฟ้า 220 V 50Hz แปลงเป็นแรงดันสูง ความถี่สูงเพื่อผลิตก๊าซโอโซน
  - ใช้แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดแสงโซลาร์เซลล์ ทำงานร่วมกับวงจรบูตส์จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 310 V แปลงเป็นแรงดันสูง ความถี่สูงเพื่อผลิตก๊าซโอโซน
2. ข้อกำหนด: ระยะเวลาในการดำเนินงานโครงงาน ใช้เวลา 1 ปี

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1. นักศึกษาได้รับความรู้และทักษะในการทำงาน
2. นักศึกษาได้นำความรู้ทางทฤษฎีและความสามารถทางการปฏิบัติมารวมกันเพื่อทำงาน และวิเคราะห์แก้ปัญหาในการปฏิบัติงาน
3. นักศึกษาได้เรียนรู้ถึงลักษณะการทำงานของโครงงาน และวางแผนปฏิบัติงานงบประมาณ และการทำงานเป็นหมู่คณะ
4. นักศึกษาได้เรียนรู้ถึงการติดต่อประสานงานหน่วยงานและองค์กรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องขณะทำโครงงานนี้
5. นำผลงานที่ทำการวิจัยมาใช้ประโยชน์และประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 โอโซน (Ozone)

โอโซน (Ozone:  $O_3$ ) ถูกค้นพบโดย Van Marom ในปี ค.ศ. 1785 และเป็นที่ยอมรับในปัจุบัน เนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะตัวของโอโซนที่สามารถแก้ปัญหาสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านมลภาวะแวดล้อมได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ประโยชน์ของโอโซนที่รู้จักกันแล้ว โอโซนยังมีโทษรุนแรง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความรู้ความเข้าใจและการนำไปใช้งาน

การออกแบบเครื่องผลิตโอโซนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์จำเป็นต้องรู้ทฤษฎีพื้นฐานของการแตกตัวก๊าซในสนามไฟฟ้าแรงสูง เพื่อสามารถออกแบบอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการสร้างปรากฏการณ์โคโรนา เพื่อทำให้เกิดการแตกตัวของอากาศภายในแก๊บอากาศที่ออกแบบได้ และเนื่องจากแหล่งจ่ายพลังงานที่นำมาใช้เป็นทั้งระบบไฟฟ้าจากการไฟฟ้า และระบบไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ดังนั้นจึงต้องมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับองค์ประกอบพื้นฐานของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ดังนั้นจึงต้องมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับองค์ประกอบพื้นฐานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์รวมทั้งการทำงาน และการออกแบบซึ่งจะนำเสนอในบทนี้เช่นกัน

โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียรมีสีน้ำเงิน และมีกลิ่นฉุนเฉพาะตัว ซึ่งก๊าซนี้ มีแนวโน้มที่จะสลายตัวเป็นก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) ได้ง่ายเมื่อโดนความร้อน ทำให้ไม่สามารถผลิตก๊าซโอโซนให้มีความหนาแน่นสูง ๆ ได้ และเก็บไว้นาน ๆ ไม่ได้ โอโซน เป็นก๊าซธรรมชาติ ที่มีปฏิกิริยาออกซิเดชันสูง การนำไปใช้งานต้องใช้งานทันที เนื่องจากคุณสมบัติสลายตัวได้ง่ายโดยข้อบ่งชี้ในการสลายตัวขึ้นอยู่กับ

- ระดับความเข้มข้นของก๊าซโอโซน
- อุณหภูมิ
- ความบริสุทธิ์ของอากาศจากฝุ่น
- ความชื้น
- การกระจายตัวของแสงแดด

เนื่องจากคุณสมบัติดังกล่าว ทำให้โอโซนเป็นก๊าซที่เริ่มเป็นที่รู้จักและมีผู้สนใจมากขึ้นในปัจจุบัน คุณสมบัติของโอโซนที่ไม่ก่อให้เกิดสารพิษตกค้าง เมื่อเทียบกับสารเคมีชนิดอื่น ๆ และประโยชน์ของโอโซนยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ให้เข้ากับชีวิตประจำวันและในแวดวงอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้ เช่น ใช้ฆ่าเชื้อโรคแทนคลอรีนในสระว่ายน้ำ รวมถึงการใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น

#### 2.1.1 การกำเนิดโอโซน

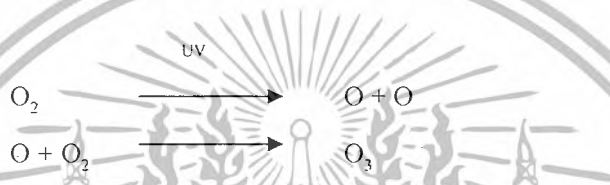
การกำเนิดโอโซนจากการศึกษาพบว่า การกำเนิดโอโซนสามารถเกิดได้ 2 วิธีหลัก ๆ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดย บริษัท ออสมเกิ้ล จำกัด การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. การกำเนิดโอโซนจากการกระทำของมนุษย์

### 1). การกำเนิดโอโซนตามธรรมชาติ

รังสีอุตราไวโอเลต (Ultraviolet) ซึ่งเกิดจากธรรมชาติโดยเฉพาะในบรรยากาศชั้นสตราโทสเฟียร์ (Stratosphere) ซึ่งอยู่สูงจากพื้นโลกประมาณ 20 กิโลเมตร มีจำนวนมากถึง 90% เกิดจากการรวมตัวกันของโมเลกุลของก๊าซออกซิเจน โดยมีรังสีอุตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 242 นาโนเมตร เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดพลังงานที่จะดึงเอาโมเลกุลของก๊าซออกซิเจนให้แตกตัวเป็นอะตอมของออกซิเจน 2 อะตอม และเมื่ออะตอมของออกซิเจน 1 อะตอมพบกับโมเลกุลของก๊าซออกซิเจนจะเกิดการรวมตัวตั้งสมการ



โอโซนที่เกิดขึ้นนี้สามารถดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเลตแล้วแตกตัวกลายเป็นก๊าซออกซิเจนและรวมตัวกับอะตอมของออกซิเจน กลายเป็นโอโซนได้อีก โดยมีรังสีอัลตราไวโอเลตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะเกิดเช่นนี้ไปได้เรื่อยๆ โดยไม่มีที่สิ้นสุดแบบปฏิกิริยาลูกโซ่ โอโซนยังสามารถเกิดได้เองในอากาศจากพายุฝนฟ้าคะนองหรือจากฟ้าแลบได้อีกด้วย กระบวนการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวนี้เรียกว่าขบวนการโฟโตเคมีคอล(Photochemical process) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดก๊าซโอโซนและสลายตัวพร้อมกัน และในที่สุดปฏิกิริยาของก๊าซโอโซนก็จะอยู่ในภาวะสมดุลโดยที่อัตราการเกิดและสลายตัวเท่ากัน

โอโซนเป็นส่วนประกอบของบรรยากาศส่วนหนึ่งที่ปกคลุมผิวโลก ซึ่งมีลักษณะเป็นชั้นบางๆ บริเวณที่อยู่แปรผันอยู่ระหว่างระดับน้ำทะเลขึ้นไปถึงระยะ 60 กิโลเมตร โอโซนส่วนใหญ่อยู่ที่ชั้นบรรยากาศสตราโทสเฟียร์ซึ่งพบประมาณร้อยละ 89 - 90 ส่วนที่เหลือจะกระจายอยู่ชั้นโทรโพสเฟียร์และเมโซสเฟียร์ ชั้นโอโซนจะทำหน้าที่กรองแสงอัลตราไวโอเลตจากดวงอาทิตย์โดยสามารถดูดแสง UV-B ความยาวคลื่นระหว่าง 280 - 320 นาโนเมตร ไว้ได้ประมาณ ร้อยละ 70 - 90 รังสี UV-B นี้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต โอโซนยังมีบทบาทสำคัญในการกำหนดหรือควบคุมอุณหภูมิของโลกและบรรยากาศ โดยสามารถดูดรังสีอินฟราเรดซึ่งสะท้อนจากผิวโลกและจากชั้นสตราโทสเฟียร์ได้ ทำให้อุณหภูมิบรรยากาศโลกชั้นนี้สูงขึ้น มีผลต่อสภาพภูมิอากาศของผิวโลก

โอโซนส่วนใหญ่อยู่ในบรรยากาศชั้นสตราโทสเฟียร์ โดยมีความเข้มข้นประมาณ 10 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งเป็นปริมาณน้อยมากแต่ก็มีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตต่างๆ ปัจจุบันพบว่าการปล่อยสารเคมีต่างๆขึ้นสู่บรรยากาศมากขึ้น ทำให้ก๊าซโอโซนน้อยลงจากการใช้เครื่องมือต่างๆพบว่าโอโซนลดลงร้อยละ 2-3 ที่ระดับความสูง 30 - 40 กิโลเมตรและจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานวิจัยของศูนย์วิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมภาคที่ 11 อ่างทอง โดยศูนย์วิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมภาคที่ 11 อ่างทอง ขอสงวนสิทธิ์ในการดำเนินการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer) ตรวจวัดปริมาณโอโซนในบริเวณขั้วโลกใต้ของเดือนตุลาคมในทุกปี ซึ่งเริ่มตั้งแต่ปี 1957 เป็นต้นไปก็ได้พบว่าปริมาณของโอโซนที่อยู่เหนือบริเวณขั้วโลกใต้ลดลงเกือบ 40 เปอร์เซ็นต์ และลดลงมากที่สุดในปี 1970 ผลการตรวจวัดระดับโอโซนในบรรยากาศได้รับการยืนยันในปี 1975 จากการใช้ดาวเทียมสำรวจ ได้แสดงให้เห็นว่าเกิดความเสียหายขึ้นต่อชั้นโอโซนเหนือบริเวณขั้วโลกใต้ และได้พบความเสียหายได้ขยายตัวมายังบริเวณเส้นศูนย์สูตรประมาณ 45 องศาใต้ ซึ่งองค์การนาซ่าของสหรัฐอเมริกา ก็ได้ทำการตรวจสอบสภาพบรรยากาศของโลกได้รายงาน ว่า เกิดมีลักษณะความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ผ่านบรรยากาศไม่สม่ำเสมอจึงได้หาสาเหตุและพบว่าโอโซนที่อยู่รอบโลกในชั้นบรรยากาศโดยเฉพาะบริเวณขั้วโลกใต้ และขั้วโลกเหนือได้ลดลงเป็นหย่อม ๆ และเกิดมากขึ้นเป็นลำดับบางหย่อมคิดเป็นพื้นที่ได้ประมาณ 9 ล้านตารางกิโลเมตร ( เกษม, 2533 ) การที่โอโซนในชั้นสตราโตเฟียร์ถูกทำลายไปเนื่องจากสารเคมีที่ปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศและสารที่สำคัญคือ CFCs ซึ่งจะมีผลทำให้ UV ส่องมาถึงโลกมากขึ้นมีผลเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้

สารเคมี 2 ชนิดที่อยู่ในรูปของก๊าซ ในชั้นบรรยากาศที่ทำลายโอโซนได้คือ คลอรีนออกไซด์ (Chlorine Oxides; ClOx) และ ไนโตรเจนออกไซด์ (Nitrogen Oxides; NO<sub>2</sub>) (ดูเรื่องสาร CFC ประกอบ)

ไนโตรเจนออกไซด์มาจากไนตรัสออกไซด์ (Nitrous Oxides; N<sub>2</sub>O) ซึ่งมีจุดกำเนิดตามธรรมชาติที่ผิวโลก เช่น กระบวนการ denitrification ของจุลินทรีย์และในบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ เกิดจากฟ้าแลบฟ้าร้อง พวกเครื่องบินที่บินเร็วเหนือเสียง (SST) ที่ปล่อยไนตริกออกไซด์จากไอเสียและยังมีสารพวกฮาโลเจน (Halogen) โดยเฉพาะพวกก๊าซโบมีน (Br) ที่สามารถสลายโอโซนได้ในทางทฤษฎี

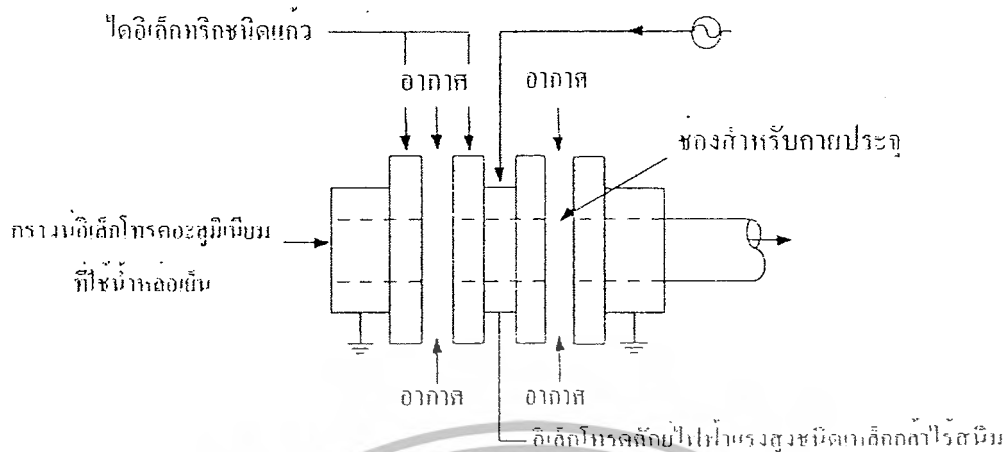
ขบวนการสำคัญที่สุดที่ทำลายโอโซนคือขบวนการที่มีอะตอมของคลอรีน ไนตริกออกไซด์ ไฮโดรเจนออกไซด์ โบมีน และ ไฮโดรเจนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ผลของปฏิกิริยาที่ทำกับโอโซนหรือออกซิเจนนั้น จะทำให้อะตอมของสารพวกนั้นออกมาและเริ่มต้นใหม่

## 2). การกำเนิดโอโซนจากการกระทำของมนุษย์

ในปัจจุบันเครื่องสังเคราะห์ก๊าซโอโซนที่ใช้หลักการนี้มีอยู่ด้วยกัน 3 แบบ คือ แบบออกโตเพลต (Otto plate) แบบท่อ (Tube) และแบบโลว์เธอร์เพลต (Lowther plate)

เครื่องสังเคราะห์แบบออกโตเพลต ถูกออกแบบขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1905 ถึงแม้ว่าจะมีประสิทธิภาพไม่มากนัก แต่ก็ยังมีใช้ในบางส่วนของยุโรปตะวันตก เพราะใช้ขนาดแรงดันต่ำ

เครื่องสังเคราะห์แบบดังกล่าวแสดงในรูป  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเครื่องสังเคราะห์ก๊าซไอโซนแบบออกโตเพลด

เครื่องสังเคราะห์แบบท่อ จะประกอบไปด้วยจำนวนท่อหลายๆ ท่อรวมกัน ดังแสดงในรูป อิเล็กโทรดข้างนอกจะทำด้วยท่อเหล็กกล้าไร้สนิม และการระบายความร้อนด้วยน้ำอยู่รอบๆ ท่อ ส่วนของท่อแก้วที่อยู่ตรงกลาง จะถูกเคลือบผิวด้วยตัวนำไฟฟ้า ไฟฟ้าแรงดันสูงจะถูกป้อนเข้าระหว่างตัวนำที่เคลือบอยู่ด้านนอกตลอดทั่วทั้งท่อเหล็กด้านนอก อากาศหรือก๊าซออกซิเจนจะถูกส่งผ่านระหว่างช่องนั้น การสังเคราะห์ก๊าซไอโซนโดยวิธีนี้สามารถออกแบบได้หลายรูปแบบ จึงเป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

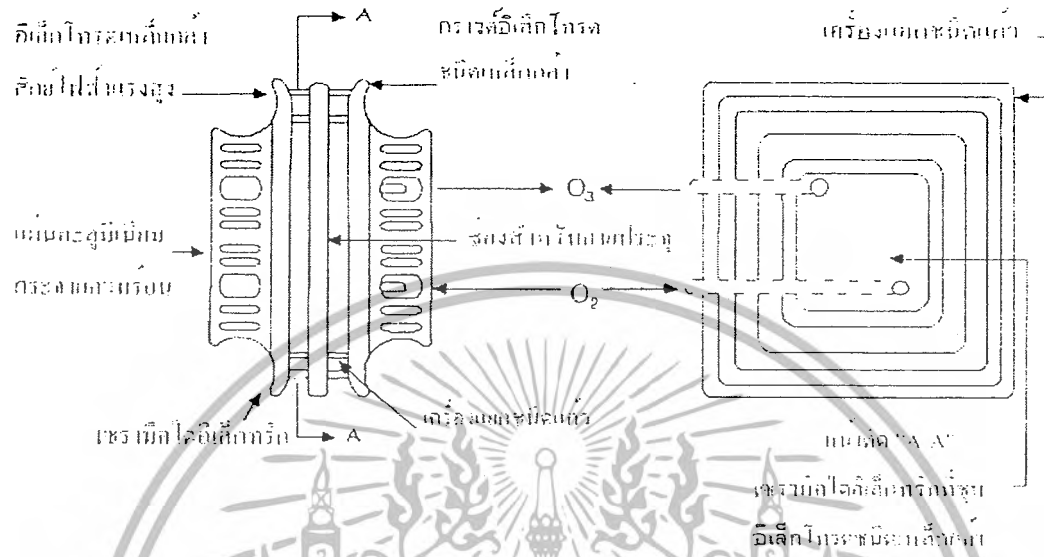


รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเครื่องสังเคราะห์ก๊าซไอโซนแบบท่อ

เครื่องสังเคราะห์แบบโลว์เซอร์เพลด เป็นแบบใหม่ที่ถูกปรับปรุงขึ้น เครื่องสังเคราะห์แบบนี้จะใช้การระบายความร้อนด้วยอากาศ ซึ่งต่างจากสองแบบแรกที่ใช้การระบายความร้อนด้วยน้ำ อิเล็กโทรดถูกเคลือบด้วยเซรามิคหรือยางซิลิโคน โดยเคลือบทั้งด้านนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และด้านในท่อ ซึ่งจะทำให้เครื่องมีประสิทธิภาพสูง เครื่องสังเคราะห์ก๊าซโอโซนแบบนี้แสดงในรูปถัดไป



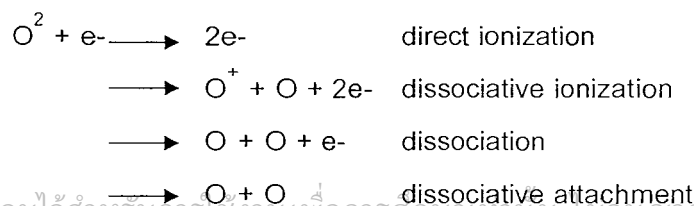
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเครื่องสังเคราะห์ก๊าซโอโซนแบบโลว์เทอร์เพลด

โดยโอโซนถูกผลิตขึ้นมาเพื่อใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น การกำจัดน้ำเสีย และใช้ฆ่าเชื้อโรค การเตรียมก๊าซโอโซนที่สะดวกที่สุดคือ การใช้ไฟฟ้า (silent electrical discharge) หรือวิธีการ Corona Discharge เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากวิธีนี้สามารถผลิตความเข้มข้นของโอโซนได้สูงที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นๆ ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากัน การใช้ไฟฟ้ากระทำกับอากาศหรือกับก๊าซออกซิเจน ซึ่งก๊าซออกซิเจนบางส่วนเท่านั้นที่กลายเป็นโอโซน ถ้าใช้อากาศ เรียกก๊าซผสมนี้ว่า โอเอไอซ์แอร์ (ozonised air) ถ้าใช้ก๊าซออกซิเจน ก๊าซโอโซนที่เกิดขึ้นจะปนอยู่กับก๊าซออกซิเจนที่เหลือ เรียกว่า ozonised oxygen เครื่องมือที่ใช้เตรียมก๊าซโอโซนด้วยวิธีนี้เรียกว่า โอโนไนเซอร์ (ozonizer)

การกำเนิดโอโซนจากความเครียดสนามไฟฟ้า

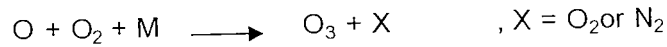
โอโซน ( $O_3$ ) เกิดขึ้นได้จากการแตกตัวของออกซิเจน ( $O_2$ ) และรวมตัวกันเป็นโอโซนดังสมการ

1. Oxygen-free radicals are generate by ionic process:



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 . Ozone is generated by free radical reactive:



การทำให้ออกซิเจนในอากาศแตกตัวได้มีผลมาจากความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจนอิเล็กโตรดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา ดังนั้น แรงดันไฟฟ้ามีความสำคัญในการกำเนิดโอโซน ที่มีความสัมพันธ์กับระยะห่างระหว่างขั้วของอิเล็กโตรด และความดัน

$$V = K_1 pg \quad (2.1)$$

เมื่อ  $V$  : แรงดันที่จำเป็น  
 $P$  : ความดันที่ช่องว่างอากาศ  
 $g$  : ระยะแกป

ในทำนองเดียวกัน ความสามารถในการกำเนิดโอโซนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่ค่าคงที่ และแรงดันกำลังสอง และผลกับความหนาของไดอิเล็กตริก

$$\text{Yield} = \frac{k_2 (\text{feV})^2}{d} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $f$  : ความถี่  
 $V$  : แรงดัน  
 $e$  : ค่าคงที่ได้ไอเลคตริก  
 $d$  : ความหนาของไดอิเล็กตริก

จากสมการนี้เราพบว่า จะมีปัญหาในการออกแบบเครื่องกำเนิดโอโซน คือเราต้องพยายามทำให้ไดอิเล็กตริกบางที่สุดเท่าที่จะบางได้และต้องทนแรงดันได้สูงด้วยขณะเดียวกัน เพื่อให้ได้โอโซนมาก ๆ เราก็ต้องเพิ่มแรงดันให้สูง ๆ ด้วย ในอีกทางหนึ่งขณะที่แรงดันสูง ๆ ถูกนำมาใช้ สารไดอิเล็กตริกก็จะเสียหายได้ง่ายขึ้น ในปัจจุบันมีวิธีที่นิยมในการเพิ่มปริมาณโอโซนที่ต้องการโดยการเพิ่มความถี่ของกระแสที่ใช้ นอกจากนี้ยังมีการเพิ่มคุณภาพของไดอิเล็กตริกให้ดียิ่งขึ้น และการระบายความร้อนออกจากเซลล์ที่กำเนิดโอโซนก็สามารถทำได้ดีขึ้นด้วย มีผลทำให้อัตราการผลิตโอโซนมีค่ามากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อควรระวังในการผลิต

วัสดุที่ใช้ในระบบการสร้างโอโซนนั้นจะต้องระมัดระวังอย่างมาก เนื่องจากโอโซนมีความสามารถในการปฏิกิริยา (Oxidation) วัสดุจำพวกยางหรือพลาสติกบางชนิด นีโอพรีน EPDM และอลูมิเนียม ไม่เหมาะที่จะนำใช้ สิ่งที่ควรนำมาใช้คือ สแตนเลส แก้ว ไฮพาลอน เทปลอน และคอนกรีต

### 2.1.2 คุณสมบัติของโอโซน

ก๊าซโอโซน เป็นก๊าซที่เริ่มเป็นที่รู้จักและสนใจมากในปัจจุบัน เนื่องจากคุณสมบัติที่โดดเด่นกว่าสารเคมีอื่นๆ ที่ทำหน้าที่เดียวกัน คือ เป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดี ไม่มีสารตกค้าง นอกจากนี้ยังสามารถทำหน้าที่อื่นๆ ได้อย่างดี โดยบทนี้จะแนะนำให้นะนำให้รู้จักถึงคุณสมบัติของโอโซน ข้อดี ข้อเสีย และการใช้งาน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### คุณสมบัติของโอโซน

- เป็นก๊าซที่เกิดจากออกซิเจนที่ถูกกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage) หรือรังสีอุตราไวโอเลต
- เป็นก๊าซที่มีกลิ่นฉุน
- พบได้ทั้งชั้นบรรยากาศตราโตสเฟียร์
- โอโซนเข้มข้นมีสีฟ้าที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (Standard Temperature and Pressure; STP) เมื่ออุณหภูมิลดลงถึง  $-112^{\circ}\text{C}$  โอโซนจะเป็นของเหลวสีน้ำเงิน และเมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่า  $-193^{\circ}\text{C}$  ก็จะกลายเป็นของแข็งสีดำ
- มีค่าศักย์ออกซิเดชั่น (Oxidation Potential) สูงถึง 2.07 โวลต์ แต่คลอรีนมีค่าศักย์ออกซิเดชั่นเพียง 1.36 โวลต์
- การละลายน้ำของโอโซนเกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ
- สามารถคงตัวได้นานที่ค่า pH ต่ำ
- สามารถฆ่าไวรัส แบคทีเรียได้
- สามารถออกซิไดซ์กับสารอื่นได้เป็นอย่างดี
- มีน้ำหนักโมเลกุล 48.00
- ความสามารถในการละลายน้ำที่ความดัน 1 บรรยากาศ 25 องศาเซลเซียส คือ 6 มิลลิกรัม/ลิตร
- จุดเดือด 122 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 192 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของก๊าซไอโซนปริสท์

จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)		-192.5±0.4
จุดเดือด (องศาเซลเซียส)		-111.9±0.3
อุณหภูมิวิกฤติ (องศาเซลเซียส)		-12.1
ความดันวิกฤต (บรรยากาศ)		54.6
ปริมาตรวิกฤต (ลบ./โมล)		111
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความหนาแน่นของเหลว (กรัม/ลบ.ซม)	ความดันไอของของเหลว (ทอร์)
-183	1574	0.11
-180	1566	0.21
-170	1535	1.41
-160	1504	6.73
-150	1473	24.8
-140	1442	74.2
-130	1410	190
-120	1378	427
-110	1347	865
-100	1316	1605
ความหนาแน่นของไอโซนของแข็งที่ 77.4 เคลวิน (กรัมลบ.ซม)		1.728
ความหนืดของของเหลว (เซนติพอยต์) ที่ 77.6 และ 90.2 เคลวิน		4.17 ,1.56
แรงตึงผิว (ดาเยน – เซนติเมตร) ที่ 77.6 และ 90.2 เคลวิน		43.8 ,38.4
พาราเซอร์ ที่ 90.2 เคลวิน		75.7
ค่าคงที่ได้อิเล็กทริกของของเหลวที่ 90.2 เคลวิน		4.79
แรงระหว่างขั้ว (เดบาย)		0.555
ความไวต่อสารแม่เหล็ก (ซีอีเอส) ของก๊าซและของเหลว		0.002*106 ,0.15
ความจุความร้อนของของเหลวจาก 90 ถึง 150 เคลวิน		0.425+0.0014(T-90)
ความร้อนของการกลายเป็นไอ (กิโลแคลเลอร์/โมล)		3410 ,3650

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติของก๊าซโอโซนบริสุทธิ์ (ต่อ)

	ความร้อนของการเกิด (กิโลแคลลอรี่/โมล)	พลังงานอิสระของการเกิด (กิโลแคลลอรี่/โมล)
ก๊าซที่ 298.15 เคลวิน	34.15	38.89
ของเหลวที่ 90.15 เคลวิน	30	-
Hypothetical Gas ที่ 0 เคลวิน	34.74	-

ตารางที่ 2.3 แสดงระดับโอโซนและผลที่เกิดขึ้น (ข้อมูลจาก IOA : international Ozone Association)

ระดับโอโซน (ppm)	ผลกระทบที่เกิดขึ้น
0.001 – 0.00125	ระดับที่พบในชั้นบรรยากาศ คำนึงแปรผันตามตำแหน่งและสภาพบรรยากาศ
0.05	ความเข้มข้นโอโซนสูงสุดที่ผลิตได้จาก Electronic air cleaner และอุปกรณ์ในบ้าน
0.1	ความเข้มข้นโอโซนสูงสุดที่ยอมให้มีในบรรยากาศ บริเวณที่ทำงานทางอุตสาหกรรม
0.3	ระดับโอโซนเริ่มปรากฏผลต่อสิ่งมีชีวิตที่สัมผัสโดยตรง ในพืชเกิดจุดดำ สีซีด มีใบตาย ในสัตว์เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินหายใจ
1.00 – 2.00	ในการทดสอบ การสูดดมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เกิดอาการป่วย คือ ปวดศีรษะ ปวดหน้าอก และทางเดินหายใจแห้งผาก
1.40 – 5.60	การทดสอบกับต้นถั่ว พบว่าในเวลา 70 นาที ใบถั่วเกิดอาการป่วยอย่างรุนแรง
25 up	ความเข้มข้นของโอโซนเป็นอันตรายเฉียบพลันต่อสิ่งมีชีวิตในการทดสอบกับสัตว์ พบอาการป่วยซึ่งน่าจะเป็นขั้นสุดท้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 แสดงข้อมูลปริมาณการใช้ไอโซนในลักษณะต่างๆ

ลักษณะและพื้นที่ของการใช้งาน	ปริมาณที่ใช้ (มิลลิกรัม/ชั่วโมง)
1. ในรถยนต์	10 - 15
2. ในห้อง 10 ตารางเมตร	20
— ในห้อง 20 ตารางเมตร	40
— ในห้อง 33 ตารางเมตร	70
— ในห้อง 55 ตารางเมตร	100
3. ทำน้ำดื่ม 10 – 30 ลิตร	100 – 125
4. สลายสารพิษในผัก ผลไม้ เนื้อสัตว์	100
— ทำความสะอาดภาชนะ	
— ซักล้างสารที่ตกค้างบนเนื้อผ้า	
— เสริมความงาม	
5. ในอ่างอาบน้ำ 150 ลิตร	200
6. สลายสารเคมี ทำลายและยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อโรคและกลิ่นอันไม่พึงประสงค์ต่างๆ	250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบคุณสมบัติของโอโซนกับคลอรีน

Chlorine	Ozone
1. ความเป็นพิษสูง และเป็นก๊าซพิษ	1. ระดับความเป็นพิษ อยู่ที่ 1 mg/l มีกลิ่นฉุน เริ่มสังเกตได้ที่ระดับ 0.01 mg/l ที่ระดับสูงกว่านี้ มีการระคายเคืองสูงมาก
2. คลอรีนจะถูกเก็บในภาชนะบรรจุความดันสูงและสามารถเป็นอันตรายได้เมื่อมีการรั่วไหล	2. โอโซนต้องการผลิต ณ ตำแหน่งที่ใช้งานไม่สามารถเก็บได้
3. คลอรีนเมื่อผสมกับยูรีนและเหงื่อจะทำให้สารประกอบโครเจน ซึ่งทำให้เกิดระคายเคืองตาและเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ	3. โอโซนมีวงชีวิตสั้น หลังทำปฏิกิริยาจะสลายตัวเป็นออกซิเจน
4. ราคาแพง	4. ราคาโอโซนต่ำ เนื่องจากการพัฒนาเทคโนโลยี และการใช้พลังงานน้อยลงในการผลิต ณ ปัจจุบัน
5. คลอรีนมีค่าความรุนแรงในการทำปฏิกิริยา (Oxidation potential) 1.36 V	5. โอโซนเป็นตัวออกซิไดส์ที่ทำปฏิกิริยาสูงสุด เนื่องจากค่า (Oxidation potential) 2.07 V
6. คลอรีนฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้แต่ไม่สามารถฆ่าเชื้อไวรัสได้	6. โอโซนที่ค่าความเข้มข้นเดียวกับคลอรีนสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียและไวรัสได้ดีกว่าคลอรีน 600 – 3000 เท่า
7. คลอรีนมีกลิ่นรุนแรงตกค้างหลังการบำบัด	7. โอโซนไม่มีกลิ่นตกค้าง แต่สามารถกำจัดกลิ่นของยูรีน คาวิน อาหาร และสีได้
8. คลอรีนทำงานกับตะไคร่น้ำ ได้ผลดีมาก กำจัดตะไคร่น้ำได้ดี	8. โอโซนพบปัญหาการเติบโตของตะไคร่น้ำต้องใช้คลอรีนช่วยโดยการทำ Shock Treatment
9. คลอรีนทำงานได้ดี ต้องควบคุม pH ให้อยู่ย่าน 7.0 - 7.4	9. โอโซนไม่ต้องมีการควบคุม pH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารทำลายโอโซน

สารทำลายโอโซน หรือ โอโซนดีฟลิตติ้งซับสแตนซ์ (Ozone Depleting Substance, ODS) เป็นสารเคมีที่สังเคราะห์ขึ้นโดยมนุษย์เพื่อใช้ในภาคอุตสาหกรรม กว่า 2 ทศวรรษที่ผ่านมา ซึ่งพบว่าเป็นต้นเหตุของการทำลายชั้นโอโซนในบรรยากาศทำให้ชั้นโอโซนบางลง การบางลงทำให้รังสีอัลตราไวโอเล็ตที่เป็นอันตรายส่องมาถึงโลกมากขึ้นและเป็นอันตรายต่อมนุษย์ เช่น มะเร็งผิวหนัง ต้อเนื้อ ต้อลม ฟิชแควะแกรน วัสดุต่างๆ เปราะและหักพังเร็วขึ้น

สารทำลายโอโซน ได้แก่สารพวก ฮาโลคาร์บอน (Halocarbon) คือสารที่มีส่วนประกอบของธาตุ คลอรีน (Cl) ฟลูออรีน (F) โบรมีน (Br) คาร์บอน (C) และไฮโดรเจน (H) ซึ่งเป็นคำรวมที่เรียกลสารทำลายโอโซนส่วนมาก เช่น

คลอโรฟลูออโรคาร์บอนหรือซีเอฟซี (Chlorofluorocarbon, CFCs) คือ สารที่มีส่วนประกอบของธาตุ คลอรีน ฟลูออรีนและคาร์บอน ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น เครื่องทำความเย็นในตู้เย็น เครื่องปรับอากาศ โฟม กระป๋องสเปรย์ สารดับเพลิง สารชะล้าง

ฮาลอน (Halon) ประกอบด้วย คาร์บอน, โบรมีน, ฟลูออรีน และ คลอรีน มักใช้เป็นสารดับเพลิง

คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (CCl<sub>4</sub>) ประกอบด้วย คาร์บอน และคลอรีน มักใช้เป็นตัวทำละลายในห้องปฏิบัติการ การผลิตยาเม็ด และใช้ทดสอบการดูดซึมของถ่านกัมมันตรังสี

เมทิลคลอโรฟอร์ม (Methyl Chloroform or 1,1,1-Trichloroethane) ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และ คลอรีน มักใช้ใน อุตสาหกรรมการผลิตเสื้อผ้า ผ้าเย็บ และใช้ทำความสะอาดมอเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น

ปัจจุบันประเทศต่างๆได้ตัดสินใจหยุดผลิตและบริโภค ยกเว้นเพื่อการใช้กรณีจำเป็น และในอุตสาหกรรมได้พยายามพัฒนาสารทดแทนที่เป็นมิตรกับโอโซน (Ozone-Friendly) ตามพิธีสารมอนทรีออลซึ่งเป็นสนธิสัญญาระหว่างประเทศ ว่าด้วยการลดและเลิกใช้สารทำลายชั้นบรรยากาศโอโซน

### 2.1.3 การประยุกต์ใช้งานโอโซน

การใช้โอโซนฆ่าเชื้อโรค เป็นเป้าหมายหลักในการประยุกต์ใช้โอโซนที่เป็นที่ยอมรับและได้รับความนิยมมากขึ้นทุกที เพราะก๊าซโอโซนไม่เลือกว่าเป็นเชื้อโรคประเภทใด ไม่มีปัญหาการดื้อยา และยังสามารถสลายสารพิษ (Toxins) ที่สร้างจากตัวเชื้อโรคได้อีกด้วย โดยมีการใช้ประโยชน์ของโอโซน เช่น

คุณสมบัติของโอโซนในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากก๊าซโอโซนมีความสามารถในการออกซิเดชันและมีค่าศักย์ไฟฟ้าของการรีดักชัน เท่ากับ 2.07 โวลต์ จึงสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกซิไดซ์หรือเติมออกซิเจนให้กับสารเคมีได้หลายชนิด การนำก๊าซโอโซนไปใช้ในการบำบัดน้ำ แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

- 1). การบำบัดน้ำเสียที่ถูกปล่อยมาจากโรงงานอุตสาหกรรม ปกติน้ำเสียดังกล่าวจะมีสารปนเปื้อนอยู่ ซึ่งสารเหล่านี้ล้วนเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม จึงจำเป็นต้องบำบัดก่อนจึงปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้
- 2). การปรับปรุงคุณภาพน้ำดื่ม เช่น น้ำดื่ม ต้องการน้ำที่สะอาด และปราศจากสารตกค้าง

ข้อดีของการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำ

- 1) โอโซนสามารถออกซิไดส์สารประกอบต่างๆ ในน้ำ ทั้งสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ เช่น โลหะหนักที่เจือปนในน้ำได้อย่างรวดเร็ว
- 2) โอโซนเป็นสารออกซิแดนท์ที่แรงและใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาสั้น สามารถฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ได้ภายในเวลาเพียง 2 -3 วินาที
- 3) ใช้พลังงานในการทำปฏิกิริยาดำ โดยทั่วไปโอโซนจะละลายน้ำได้ดีที่อุณหภูมิต่ำกว่า 35 องศาเซลเซียส ดังนั้นปฏิกิริยาการเกิดโอโซน จึงเกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ไม่ต้องใช้พลังงานกระตุ้นในการทำให้เกิดปฏิกิริยา
- 4) โอโซนสามารถสลายได้ง่าย จึงไม่ก่อให้เกิดสารตกค้างในระบบ
- 5) สามารถแยกสารแขวนลอยออกจากรน้ำได้ ด้วยการทำให้คือน้ำมีคุณสมบัติเป็นกลาง ทำให้โมเลกุลของสารแขวนลอยรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้น จึงสามารถแยกออกจากน้ำได้ง่าย
- 6) ควบคุมการเจริญเติบโตของพืชน้ำ โดยการออกซิไดซ์อาหารของพืชน้ำ ทำให้เกิดสภาวะขาดแคลนอาหารและหยุดการเจริญเติบโต หลังจากการเกิดปฏิกิริยาจะได้ก๊าซออกซิเจนเกิดขึ้น
- 7) กำจัดสี รส และกลิ่นของน้ำได้

คุณสมบัติของโอโซนในการฆ่าเชื้อโรค คือ การทำลายความสามารถของจุลชีพที่เป็นสาเหตุของการเกิดโรคต่างๆ การฆ่าเชือนั้นเป็นขั้นตอนที่จำเป็นขั้นสุดท้ายที่ป้องกันมนุษย์จากจุลชีพต่างๆ ที่ทำให้เกิดโรค โดยโอโซนสามารถฆ่าเชื้อโรคที่มีขนาดเล็กมากได้อย่างรวดเร็ว แม้กรณีที่เคยกลอรินลงไปปริมาณสูงสุดแล้ว ก็ยังไม่สามารถฆ่าเชื้อโรคได้ ดังนั้นจึงสามารถทำน้ำให้ปราศจากเชื้อโรคได้ภายในไม่กี่วินาที ไม่ว่าจะค่า pH ของน้ำจะเป็นอย่างไร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบปริมาณการใช้ และเวลาการทำปฏิกิริยาของโอโซนกับคลอรีน

Gem load	Disinfectant	Vol.Applied mg/l	Lethal effect
60000 coliform/ml	Chlorine	0.1	15000 sec
	Ozone	0.1	5 sec
350 spores B.Suvtitis/ml	Chlorine	1.4	9000 sec
	Ozone	0.05	30sec
PM virus	Chlorine	0.25 – 1.5	Inactive within 180 min
MV Parent Solution and Le Virus suspension of 1:1000	Ozone	0.05 – 0.5	

นอกจากนี้ ยังมีการนำก๊าซโอโซนไปประยุกต์ใช้ในด้านอื่นๆอีก ได้แก่

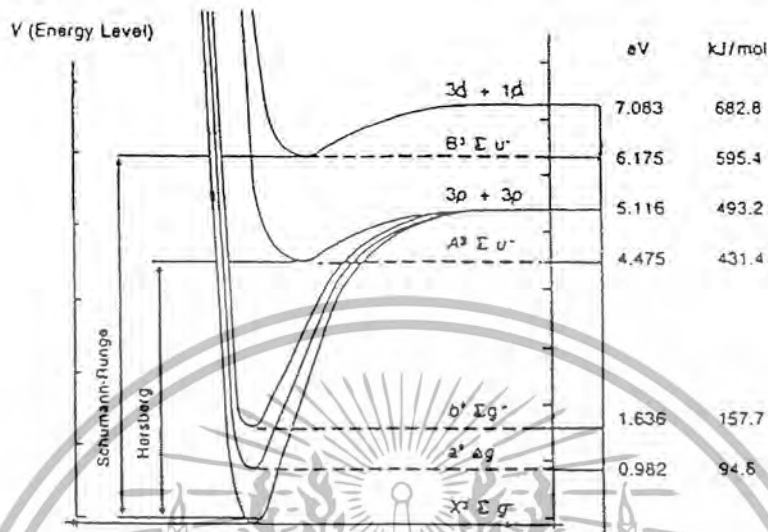
- การบำบัดอากาศ
- การดับกลิ่น
- การเกษตรกรรม
- กระบวนการผลิตและถนอมอาหาร
- การผลิตน้ำบริสุทธิ์
- บำบัดสวะร้ายน้ำและบ่อน้ำแร่
- การเลี้ยงสัตว์น้ำและการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ
- ปศุสัตว์และสวนสัตว์
- การฟอกสีกระดาษ
- การฟอกย้อมสิ่งทอ
- ระบบน้ำหล่อเย็น
- การผลิตทางทันตสาธารณสุขต่างๆ

#### 2.1.4 ทฤษฎีการแตกตัวของก๊าซและการเกิดโอโซน

โอโซนเป็นก๊าซที่ประกอบด้วยออกซิเจน 3 อะตอม จับตัวกันอยู่ในสถานะที่ไม่เสถียร สลายตัวได้ง่าย ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขแวดล้อมและความหนาแน่นของปริมาณโอโซนที่ผลิตขึ้นตอนการผลิตประกอบด้วย กระบวนการสร้างอะตอมอิสระของออกซิเจนจากโมเลกุลก๊าซออกซิเจนในอากาศ หลังจากนั้นอะตอมอิสระเหล่านี้จะรวมตัวเข้ากับโมเลกุลก๊าซออกซิเจนเกิดเป็นโอโซน  $O_3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานในการสลายพันธะออกซิเจน



รูปที่ 2.4 เส้นโค้งแสดงระดับพลังงานของออกซิเจน

เมื่อพิจารณาจากเส้นโค้งระดับพลังงานของออกซิเจน จะเห็นว่าออกซิเจนมีระดับพลังงานที่ต่างกันหลายระดับซึ่งออกซิเจนที่สามารถรวมตัวเป็นก๊าซโอโซนได้มี 2 ระดับคือ O (<sup>3</sup>P) และ O (<sup>1</sup>D) ขั้นตอนการสร้างโอโซนประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ

1) ขั้นตอนการแตกตัวเป็นอะตอมอิสระของออกซิเจน



2) ขั้นตอนการรวมตัวระหว่างโมเลกุลของออกซิเจนกับอะตอมอิสระเกิดเป็น

ก๊าซโอโซน



จากรูปเส้นโค้งแสดงระดับพลังงานของออกซิเจนแสดงให้เห็นว่าในการผลิตโอโซนจำเป็นต้องใช้พลังงาน 493.2 KJ/mol ถึง 682.8 KJ/mol ขึ้นไปจึงจะทำให้เริ่มเกิดก๊าซโอโซน เพื่อที่จะแปลงหน่วยโมลเป็นปริมาตรต้องอ้างอิงถึงพฤติกรรมของก๊าซในทางเคมี โดยจะเขียนความสัมพันธ์ของก๊าซในอุดมคติ (Ideal Gas) ได้เป็น

กฎของก๊าซ (Gas Law)

$$PV = nRT \quad (2.3)$$

และก๊าซจริง (Real Gas) พบว่าโมเลกุลของก๊าซมีขนาดและแรงกระทำระหว่างโมเลกุลเป็นแรง Vander Walls ซึ่งขนาดโมเลกุลและแรงกระทำนี้เป็นคุณสมบัติเฉพาะของก๊าซแต่ละชนิดและสามารถเขียนสมการโดยประมาณของก๊าซจริง คือ สมการแวนเดอร์วาลส์ (Vander Walls)

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT \quad (2.4)$$

สมการที่ 2.3 และ 2.4

V คือ ปริมาณก๊าซ  $m^3$

P คือ ความดันบรรยากาศ  $P = 101.5 \times 10^3$  pascal (mm.Hg)

R คือ เลขอาโวกาโดร์ =  $8,314.3 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3 / (\text{kmol}\cdot\text{K})$

T คือ อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{K}$ )

N คือ จำนวนโมล

ส่วนค่า a และ b ในสมการข้างต้น คือค่าคงที่ซึ่งหาได้จากสมการ ที่สภาวะวิกฤติเมื่อค่าอุณหภูมิวิกฤติ ( $T_c$ ) =  $154.6^{\circ}\text{K}$  และค่าความดันวิกฤติ ( $P_c$ ) =  $5,043 \text{ kPa}$  จะได้

$$a = \frac{27R^2T_c}{64P_c} = \frac{27 \times (8314.3)^2 \times (154.6)^2}{64 \times 5.043 \times 10^6} = 138,218$$

$$b = \frac{RT_c}{8P_c} = \frac{8314.3 \times 154.6}{8 \times 5.043 \times 10^6} = 0.0318$$

แทนค่า a และ b ลงในสมการ

$$\left(101.5 \times 10^3 + \frac{138218}{V^2}\right)(V - 0.0318) = 2,494,290$$

ซึ่งสัมพันธ์กับสมการที่ 3.1 โดยที่  $n = 1 \text{ V} = \frac{8,314.3 \times 300}{101.5 \times 10^3} = 24.57 \text{ m}^3/\text{kmol}$

ใช้วิธีลองผิดลองถูก (Trial and error) เพิ่มแปลงหน่วย mol เป็นปริมาตร  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการแข่งขันเพื่อการแข่งขันเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองแทนค่า  $V = 24.57$   $2,494,290 < (101,728.96)(24.5382) = 2,496,246$

ทดลองแทนค่า  $V = 24.50$  ใน (2.6) ;

$$2,494,290 > (101,730)(24.4682) = 2,489,149$$

ทดลองแทนค่า  $V = 24.60$  ใน (2.6) ;

$$2,494,290 < (101,728)(24.5682) = 2,499,273$$

ทดลองแทนค่า  $V = 24.55$  ใน (2.6) ;

$$2,494,290 \cong (101,729)(24.5182) = 2,494,212$$

ที่  $P = 101.5 \text{ kPa}$  ,  $T = 300 \text{ }^\circ\text{K}$

จะได้  $V = 24.55 \text{ m}^3/\text{kmol}$

นั่นคือ  $1 \text{ mol} = 0.02455 \text{ m}^3$  โดยประมาณ

ดังนั้น  $493.2 \text{ kJ/mol} = 20089.61 \text{ kJ/ m}^3$

และ  $682.8 \text{ kJ/mol} = 27812.63 \text{ kJ/ m}^3$

จาก  $3.6 \times 10^6 \text{ J} = 1 \text{ Wh}$

$$1 \text{ J} = 2.78 \times 10^{-4} \text{ Wh}$$

ดังนั้นพลังงานที่จำเป็นต้องใช้คือ  $5.58 \text{ kWh/ m}^3$  ถึง  $7.73 \text{ kWh/ m}^3$  ขึ้นไปแต่ในอากาศนั้นมีออกซิเจนอยู่ 21% โดยประมาณ ดังนั้นพลังงานที่จำเป็นต้องใช้ในการสลายพันธะออกซิเจน คือ  $1.172 \text{ kWh/ m}^3$  ถึง  $1.62 \text{ kWh/ m}^3$  ขึ้นไปจึงเพียงพอต่อการเกิดโอโซนในช่องว่างอากาศ

ในการออกแบบส่วนสร้างก๊าซโอโซนจะใช้หลักการของสนามไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ในการสร้างหัวอิเล็กโทรดโดยจะออกแบบให้หัวอิเล็กโทรดมีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมมีฉนวน 2 ชั้น ซึ่งจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงภายในช่องอากาศโดยฉนวนบางที่คั่นจะต้องมีค่าคงทนสนามไฟฟ้าสูงกว่าอากาศ จึงทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าตกคร่อมอากาศมากขึ้นและผลของแผ่นฉนวนบางกันในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงทำให้อากาศทนแรงดันเบรกดาวนัสสูงขึ้นโดยฉนวนบางที่ใช้เป็นแก้วซึ่งแก้วเป็นสารอนินทรีย์เทอร์โมพลาสติกที่มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำทนความร้อนได้สูงประกอบด้วยออกไซด์  $\text{SiO}_2$  ที่ซับซ้อนค่าคงที่ฉนวนสัมพันธ์ อยู่ในช่วง 3.5-9 มีค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก 0.005-0.01 จะมีค่ามากที่สุดที่ความถี่ต่ำ

## 2.2 หลอดอิเล็กโทรด

หลอดอิเล็กโทรดมีหน้าที่ในการก่อให้เกิดก๊าซโอโซน โดยมีหน้าที่ในการเกิดความเครียดสนามไฟฟ้า เพื่อให้ออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) ได้รับพลังงานและแตกตัว รวมกันเป็นโอโซน

ซึ่งต้องอาศัยปัจจัยหลัก ทั้งโครงสร้าง สนามไฟฟ้า และสภาพสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะกล่าวต่อไปนี้

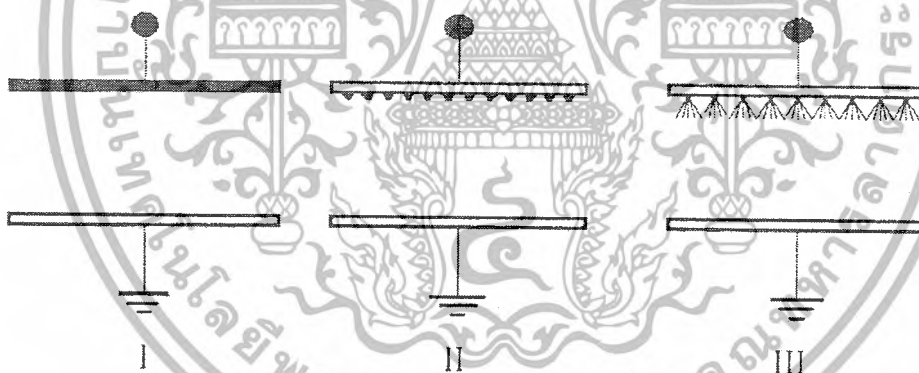
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น มิฉะนั้นอย่าได้เห็นไป ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.1 สนามไฟฟ้า

สนามไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอและสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ โดยสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ แบ่งเป็น 2 ชนิด คือสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยและสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ซึ่งสนามไฟฟ้าจะเป็นลักษณะใดขึ้นอยู่กับรูปร่างลักษณะของอิเล็กโทรด โดยขึ้นอยู่กับค่าแฟคเตอร์สนามไฟฟ้า ( $\eta^*$ ) คำนวณได้จากแสดงระดับพลังงาน

$$\eta^* = \frac{E_{\max}}{E_{\text{av}}} \leq 1 \quad (2.5)$$

โดยที่  $E_{\max}$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในช่องว่างอากาศระหว่างอิเล็กโทรด  
 $E_{\text{av}}$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในช่องว่างอากาศระหว่างอิเล็กโทรด



รูปที่ 2.5 ลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ

I สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ, II สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย, III สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง

### 1). สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform field)

สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ คือ สนามไฟฟ้าเท่ากันทุกจุด มีค่าแฟคเตอร์สนามไฟฟ้าเท่ากับ 1 ( $\eta^* = 1$ ) นั่นคือเมื่อป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ จะเกิดเบรกดาวนทันทีเมื่อค่า  $E_{\max}$  มีค่าเท่ากับค่าความคงทนของฉนวน ( $E_b$ ) เนื่องจากสนามไฟฟ้าเฉลี่ย ( $E_{\text{av}}$ ) ทุกจุดเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2). สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (Uniform field)

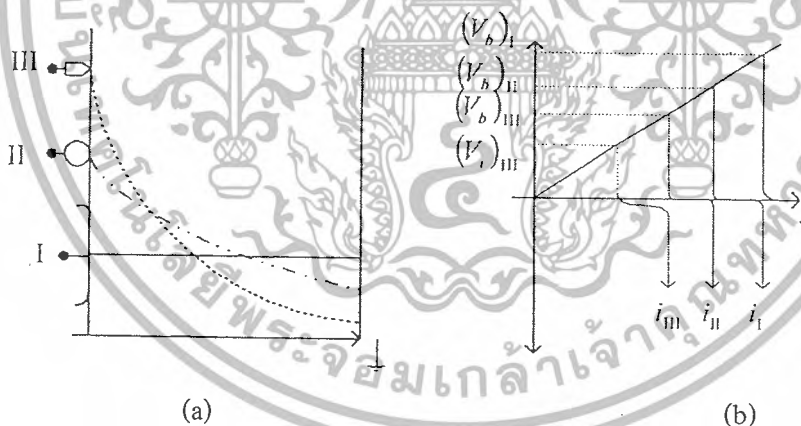
สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้น ความแตกต่างกันของความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของอิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย

## 3). สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly non-uniform field)

คือ สนามไฟฟ้าที่มีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 0.4 - 1 ซึ่งจะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมาก

## 4). สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly non-uniform field)

คือสนามไฟฟ้าที่มีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าน้อยกว่า 0.2 ( $\eta \leq 20\%$ ) คุณสมบัติของสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงคือมีผลของประจุค้างเกิดขึ้นทำให้สนามไฟฟ้าผิดเพี้ยนไปจากปกติ จะทำให้เกิดกระแสไหลก่อนเกิดการเบรกดาวนั้นนานมากเรียกว่า "กระแสโคโรนา"



รูปที่ 2.6 คุณสมบัติของสนามไฟฟ้า 3 ชนิดตามรูปร่างอิเล็กโทรด

I สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ, II สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย, III สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง

### 2.2.2 ลักษณะสนามไฟฟ้าอย่างง่าย

ในการผลิตก๊าซไอโซนจะใช้อิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าเป็นแบบไม่สม่ำเสมอสูงเช่น ทรงกลมขนาดเล็กมาก(ปลายแหลม) และรูปทรงกระบอกแกนร่วมซึ่งสามารถ

เขียนด้วยสมการทรงทางเรขาคณิตได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1). ทรงกลมเดี่ยวในอากาศ

ทรงกลมเดี่ยวในอากาศจะมีจุดรวมประจุอยู่ที่จุดศูนย์กลางทรงกลม สนามไฟฟ้า  $E$  จะตั้งฉากกับผิวทรงกลม โดยที่พิจารณาทรงกลมลูกเดี่ยว รัศมีของอิเล็กโตรดที่เป็นกรวดที่อยู่ไกลมาก ( $r_2 = \infty$ ) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมี  $r$  ใดๆหาได้จาก

$$E_r = \frac{Q}{4\pi\epsilon r^2} \quad (2.6)$$

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดที่ผิวทรงกลม

$$E_{\max} = \frac{Q}{4\pi\epsilon r_1^2} = \frac{V}{r_1} \quad (2.7)$$

ในทางปฏิบัติการออกแบบเพื่อป้องกันการเกิดโคโรนาจะสร้างทรงกลมเป็นโล่ (Shield) ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าลดต่ำกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติ  $E_c$  โดยในสนามไฟฟ้าลมฟ้าเสมอใช้  $E_c = 30 \text{ kV}_{\text{peak}} / \text{cm}$  แต่ในทางปฏิบัติใช้  $E_c = 25 \text{ kV}_{\text{peak}} / \text{cm}$

## 2). ทรงกระบอกซ้อนกัน

ทรงกระบอกซ้อนกันจะมีเส้นฟลักซ์สนามไฟฟ้าอยู่ในแนวรัศมีและพื้นผิวของทรงกระบอกคือพื้นผิวตั้งฉากไฟฟ้าเท่า และจากสมการของแมกเวลล์  $Q = \int_S \vec{D} \cdot d\vec{A}$  สำหรับทรงกระบอกแกนร่วมยาว 1 รัศมี  $r$  ( $r_1 \leq r \leq r_2$ ) หาค่าสนามไฟฟ้าได้จาก

$$E_r = \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \cdot \frac{1}{r} \quad (2.6)$$

แรงดัน  $V$  ที่ป้อนระหว่างทรงกระบอกทั้ง 2

$$V = \int_{r_1}^{r_2} E_r dr = \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2.7)$$

$$V = \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2.8)$$

$$\text{ได้} \quad E_r = \frac{V}{r \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (r_1 < r < r_2) \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

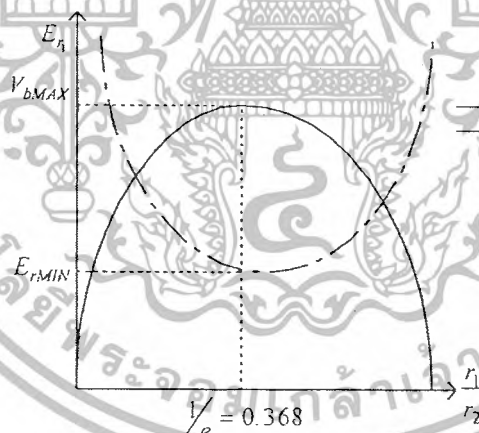
ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดที่ผิวทรงกระบอกวงใน

$$E_{\max} = E_r = \frac{V}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.10)$$

### 3). มิติที่เหมาะสม (Optimum dimension)

ในทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง มิติที่พอเหมาะสมควรคือลักษณะการออกแบบที่ให้มิติที่เล็กที่สุดทนต่อแรงดันได้สูงที่สุด ตัวอย่างเช่นในกรณีกำหนดรัศมีอิเล็กโตรดนอก  $r_2$  ให้ตัวอิเล็กโตรดในรัศมี  $r_1$  ใกล้เคียง  $r_1$  ใกล้เคียง  $r_2$  มากๆ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดวงนอกกับวงในคือ  $d = r_2 - r_1$  มีค่าน้อยเกิดเบรกดาวได้ง่าย แต่การลดรัศมี  $r_1$  ลงเพื่อเพิ่มค่า  $d$  จะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวตัวนำสูงขึ้นมาจนถึงควักฤติและเกิดโคโรนาได้ง่าย การหาจุดที่มีค่า  $r_1$  เหมาะสมที่มีค่าอยู่ระหว่าง  $0 - r_2$  ที่ทำให้ระบบทนแรงดันได้สูงสุดโดยไม่เกิดโคโรนาก่อน

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



รูปที่ 2.7 ลักษณะการเปลี่ยนแปลง  $V_b$  และ  $E_r$  ในเทอม  $r_1$  เมื่อกำหนดให้  $r_2$  คงที่

## 2.2.3 ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อแรงดันเบรกดาว

### 1). รูปร่างอิเล็กโตรด (Electrode configuration)

รูปร่างอิเล็กโตรดจะมีผลต่อแรงดันเบรกดาวมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับลักษณะสนามไฟฟ้าโดย ถ้าเป็นกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดกับความเครียดเฉลี่ยจะต่างกันไม่มาก ค่าแรงดันเริ่มต้นกับค่าแรงดันเบรกดาวนี้เป็นค่าเดียวกัน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

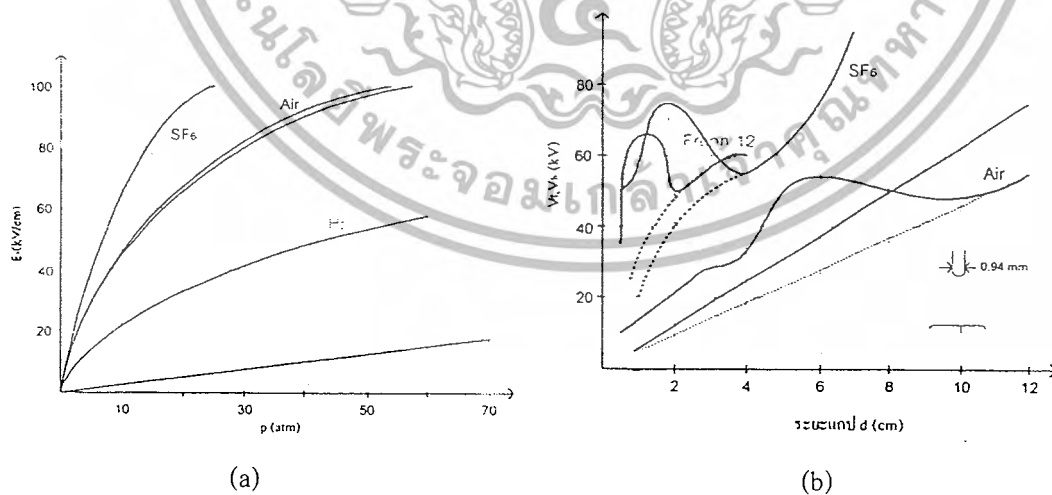
โดยเมื่ออะวาลานซ์วิกฤตได้ตามเงื่อนไขจะเบรกดาว์ทันที แต่กรณีที่สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงระยะแกปกว้างมากเมื่อเทียบกับรัศมีอิเล็กโตรด ค่าแรงดันเริ่มต้นจะต่ำกว่าแรงดันเบรกดาว์อย่างชัดเจน ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_m$ ) เท่ากับความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนาซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$V_i = E_i \cdot \eta^* \tag{2.11}$$

เมื่อ  $d$  คือระยะช่องว่างอากาศและ  $\eta^*$  คือแฟคเตอร์สนามไฟฟ้า

**2). ผลของความหนาแน่นก๊าซ**

ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอแรงเคลื่อนไฟฟ้าเบรกดาว์จะแปรตามความหนาแน่นก๊าซดังแสดงในกราฟ1 แต่กรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงคือแฟคเตอร์สนามไฟฟ้า  $\eta^* < 20-30 \%$  ลักษณะของค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์จะมีลักษณะค่าสูงสุด เมื่อพิจารณาในเทอมของความดันก๊าซ กล่าวคือที่ความดันต่ำๆจะมีโคโรนาเกิดขึ้นก่อนการเบรกดาว์ และเมื่อเพิ่มความดันให้สูงขึ้นค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์จะลดต่ำลงด้วย จนกระทั่งค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาว์กับแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดมีค่าเท่ากัน เป็นความดันที่ค่าแรงดันมีค่าต่ำ หลังจากจุดนี้ถ้าเพิ่มความดันก๊าซต่อไปอีกค่าแรงดันเบรกดาว์จะเพิ่มเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความดันก๊าซอีก ในช่วงหลังจุดต่ำสุดนี้ ( $p > p_c$ )



**รูปที่ 2.8** ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซตัวอย่างในฟังก์ชันความดัน

(a) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (b) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

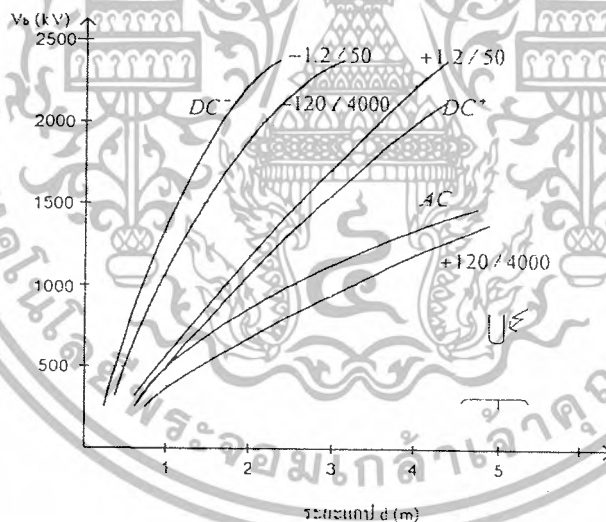
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3) ผลของความชื้นในอากาศ

โมเลกุลของ  $H_2O$  ในอากาศเป็นก๊าซไฟฟ้าลบอ่อนๆ ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงผลของความชื้นมีผลอย่างมากต่อค่าแรงดันเบรกดาวนและมีผลมากที่สุดต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

### 4) ผลของรูปแบบแรงดัน

แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนขึ้นอยู่กับรูปคลื่นของแรงดันดังตัวอย่างในรูป ซึ่งแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนในอากาศในฟังก์ชันของระยะแกปในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ แรงดันอิมพัลส์สัจิตซึ่งชั่ววอกมีค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนต่ำสุด แรงดันชั่วลบกระแสตรงมีค่าแรงดันเบรกดาวนสูงสุด อาจจะทำให้กล่าวถึงความคงทนของอากาศต่อแรงดันชั่วลบทุกชนิดใกล้เคียงกัน ส่วนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่พลังงาน 50 - 60Hz จะมีค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนเท่ากับแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนกระแสตรงในช่วงว่างอากาศที่ระยะห่างไม่เกิน 150 cm แต่จะต่ำกว่าเมื่อระยะช่องว่างอากาศเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.9 แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนของอิเล็กโตรดแบบแท่งกับระนาบในอากาศในเทอมของระยะ  $d$  เมื่อแรงดันที่ป้อนมีรูปแบบต่างๆที่สภาวะมาตรฐาน IEC (760 torr  $20^{\circ}C$   $11 gH_2O/m^3$ )

### 5) ผลของประจุค้างต่อแรงดันไฟฟ้าต่างชั่ว (บวก-ลบ)

ประจุค้างเกิดขึ้นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ผลคือค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน ( $V_b$ ) สูงกว่าค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด ( $V_i$ ) มากและทำให้แรงดันเบรกดาวนของชั่ววอกและชั่วลบต่างกัน ปรากฏการณ์เช่นนี้เกิดกับแรงดันทุกรูปแบบไม่ว่าจะเป็น DC, AC, Impulse เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

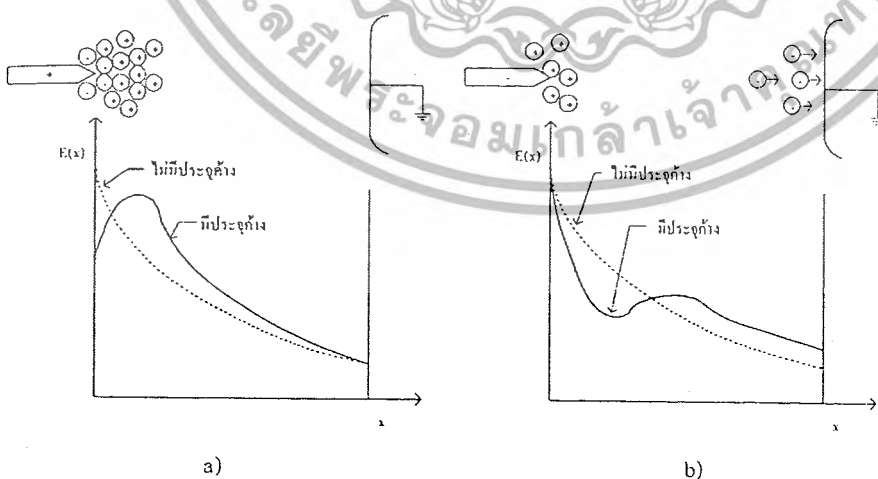
และในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงแบบไม่สมมาตร เช่นปลายแหลมกับระนาบ การอ้างถึงแรงดันขั้วบวกหรือขั้วลบหมายถึงขั้วแรงดันบนอิเล็กโทรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

### ปลายแหลมขั้วบวก

ผลของประจุค้างทำให้ค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด ( $V_i$ ) ของขั้วบวกสูง และค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน ( $V_b$ ) ต่ำ เมื่อพิจารณาความเครียดสนามในรูปที่ 2.10 a) การไอออนในเซชันเริ่มที่บริเวณรอบๆ ปลายแหลม อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เร็ววิ่งเข้าหาแอโนดคือปลายแหลมรวมเป็นกลาง ปล่องไอออนบวกที่เคลื่อนที่ช้าออกกันอยู่หน้าปลายแหลมทำให้ความเครียดที่ปลายแหลมลดลง แต่ความเครียดทิศทางเข้าหาแคโทดเพิ่มสูงขึ้น ประจุไอออนบวกหน้าปลายแหลมเสมือนทำให้ปลายแหลมยาวขึ้น ช่องว่างอากาศสั้นลงและในเวลาเดียวกัน ความเครียดสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็นผลให้เกิดการเบรกดาวนง่ายขึ้น

### ปลายแหลมขั้วลบ

ผลของประจุค้างทำให้ค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด ( $V_i$ ) ของขั้วลบต่ำ และค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน ( $V_b$ ) สูง รูปที่ 2.10 b) ปลายแหลมขั้วลบทำให้อิเล็กตรอนที่เกิดเนื่องจากกระบวนการไอออนในเซชันเคลื่อนที่สู่แอโนดซึ่งความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำ อิเล็กตรอนอาจเกาะบนโมเลกุลรวมตัวเป็นกลางที่แอโนด ส่วนไอออนบวกเคลื่อนที่ช้าเข้าหาแคโทดปลายแหลม ออกด้านหน้าปลายแหลมทำให้ความเครียดหน้าปลายแหลมเพิ่มสูงขึ้น แต่สนามระหว่างหมอกประจุค้างกับแอโนดกลับสม่ำเสมอขึ้นเนื่องจากประจุค้าง ทำให้เบรกดาวนยากขึ้น



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงผลประจุค้างของปลายแหลมขั้วบวกและลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.4 ผลของแผ่นฉนวนบางคั่นที่มีผลต่อการเกิดโอโซน

แผ่นฉนวนบางคั่นช่วยให้ช่องว่างอากาศทนแรงดันเบรกดาวนส์ได้สูงขึ้น แผ่นฉนวนจะกั้นการเคลื่อนที่ของไอออนบวกที่เกิดขึ้นจากการไอออไนเซชัน (Ionization) ที่แคโทด (Cathode) ไม่ให้คืบหน้าไป ประจุบวกจะรวมตัวกระจายอยู่บนระนาบของแผ่นฉนวนบาง ทำให้สนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นฉนวนบางกับระนาบอิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ขณะเดียวกันความเครียดระหว่างคาโทดกับแผ่นฉนวนบางลดลง แรงดันเบรกดาวนส์ขึ้นอยู่กับความคงทนของช่องอากาศในสนามสม่ำเสมอ ผลของแผ่นฉนวนบางคั่นทำให้อากาศทนแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนส์สูงขึ้นในสนามไม่สม่ำเสมอ

## 2.3 หม้อแปลงแรงดันสูง ความถี่สูง

ส่วนประกอบของหม้อแปลงสวิตชิง

หม้อแปลงสวิตชิงมีหน้าที่หลักในการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่อินพุต ซึ่งอาจมีค่าสูงได้ถึง 310 V ให้มีค่าสูงขึ้นเป็นไฟฟ้าแรงดันสูงที่เอาต์พุต และทำให้เกิดการแยกจากกันทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตที่ได้ เพื่อป้องกันอันตรายจากการถูกไฟฟ้าดูด ส่วนประกอบที่สำคัญของหม้อแปลงสวิตชิงมีรายละเอียดดังนี้

### 1). แกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite Core)

เฟอร์ไรต์เป็นวัสดุประเภทเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic Material) การเหนี่ยวนำแม่เหล็กบนแกนเฟอร์ไรต์จะมีผลทำให้เกิดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงกว่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนแกนอากาศมาก เฟอร์ไรต์มีค่าจูดัอมิตีฟลักซ์แม่เหล็กค่อนข้างสูง ประมาณในช่วง 3,000 ถึง 4,000 เกาส์ และเกิดการสูญเสียในตัวมันต่ำที่ความถี่สูงๆ ดังนั้นหม้อแปลงสวิตชิงจึงนิยมใช้แกนเฟอร์ไรต์มากที่สุด

### 2). บอบบิ้น (Bobbin)

บอบบิ้นหรือแบบรองพัน ปกติจะทำจากพลาสติกชนิดทนความร้อนได้สูงและไม่ติดไฟบอบบิ้นจะช่วยให้การพันขดลวดบนแกนเฟอร์ไรต์สะดวกขึ้น และปกป้องปัญหาการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับแกนเฟอร์ไรต์ได้ บอบบิ้นจะมีขนาดตามมาตรฐานของแกนเฟอร์ไรต์ บอบบิ้นส่วนใหญ่จะถูกออกแบบให้มีขาพักลวดทองแดง เพื่อความสะดวกในการพันขดลวดและบัดกรีติดกับแผ่น PCB

### 3). ลวดทองแดงฉนวนใยน้ำยา ( Enameled Copper Wire)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพันขดลวดทั้งไพรมารีและเซคันดารีของหม้อแปลงสวิตชิงที่กำลังไม่สูงนัก ปกติจะใช้ลวดทองแดงอาบน้ำยาพันบนแกนบอบบิ้นเพื่อให้ได้จำนวนรอบตามต้องการ ซึ่งขนาดของขดลวดทองแดงที่จะใช้พันนั้น ขึ้นอยู่กับค่ากระแสสูงสุดที่ผ่านขดลวด ความถี่และผลข้างเคียงอื่น

#### 4). เทปฉนวน (Insulation Tape)

เทปฉนวนใช้พันสำหรับเป็นตัวรองระหว่างชั้นของขดลวดในหม้อแปลงสวิตชิง และมีหน้าที่สำคัญในการแยกส่วนทางไฟฟ้าระหว่างขดไพรมารีและขดเซคันดารีด้วยวัสดุที่ใช้ทำ เทปฉนวนอาจเป็นพวกไมลาร์ (Mylar) หรือโพลีเอสเตอร์ (Polyester) ที่มีความหนาอยู่ในช่วง 0.05 ถึง 0.1 มิลลิเมตร การเลือกใช้จุดขึ้นอยู่กับค่าการออกแบบและค่าความปลอดภัยที่ต้องการจาก หม้อแปลงสวิตชิงเป็นหลัก

#### 5). แกนเฟอร์ไรต์และการเลือกใช้

ลักษณะและขนาดมาตรฐานของแกนเฟอร์ไรต์

แกนเฟอร์ไรต์สำหรับหม้อแปลงสวิตชิงโดยทั่วไป จะถูกผลิตออกมาที่ขนาดและรูปทรงต่างๆ ตามมาตรฐานเดียวกัน เช่น EI,EE,ETD หรือแกนแบบ POT เป็นต้น ปกติผู้ผลิตจัดทำแกนเฟอร์ไรต์ออกมาในลักษณะของคู่ประกบ เพื่อความสะดวกในการประกอบเข้ากับบอบบิ้น การประกบแกนเฟอร์ไรต์บนบอบบิ้นจะทำให้ทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกน เฟอร์ไรต์มีลักษณะเป็นวงบรรจบได้

แกนแบบ POT นั้นจะใช้กับหม้อแปลงสวิตชิงที่ไม่ต้องการกำลังสูง (ไม่เกิน 125 วัตต์) และในงานที่ต้องการสัญญาณรบกวน EMI/RFI ต่ำเนื่องจากลักษณะรูปทรงของมัน สามารถป้องกันการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนได้ดี แต่แกนบอบบิ้น POT มีช่องสำหรับให้ ขดลวดออกมาภายนอกได้ค่อนข้างเล็ก จึงเป็นอุปสรรคในการพันลวดทองแดงขนาดใหญ่เมื่อ หม้อแปลงต้องการกำลังสูงจะเป็นแกนแบบ EI,EE และ ETD เนื่องจากสามารถพันขดลวดรอบ แกนบอบบิ้นได้สะดวกแกนในกลุ่มนี้จะมีขนาดต่างๆ ให้เลือกใช้จำนวนมาก โดย สามารถให้กำลังงานได้ตั้งแต่ 5 วัตต์ ไปจนถึง 10 กิโลวัตต์ อย่างไรก็ตามสัญญาณรบกวน EMI/RFI ที่เกิดมีค่ามากกว่าแกนแบบ POT

ยังมีแกนเฟอร์ไรต์ในแบบอื่นๆที่สามารถนำมาใช้งานได้อีก เช่น แกนแบบ RM,PQ และ LP แต่มักไม่ค่อยพบเห็นในท้องตลาดทั่วไป และไม่ค่อยเป็นที่นิยมจึงไม่ขอ กล่าวถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ลักษณะสมบัติของสารที่ใช้ทำแกนเฟอร์ไรต์

ชนิดของเนื้อสารแกนเฟอร์ไรต์ที่แตกต่างกัน จะให้คุณสมบัติทางแม่เหล็กของแกนเฟอร์ไรต์แตกต่างกันด้วยถึงแม้จะมีขนาดเท่ากันทุกประการก็ตาม ในแผ่นข้อมูลเนื้อสารที่ให้มากับแกนเฟอร์ไรต์ จะต้องมียุทธศาสตร์คุณสมบัติเนื้อสารแสดงไว้เสมอ ข้อมูลสำคัญที่ควร จะให้ความสนใจและศึกษาไว้ก็คือเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis curve) และค่าการสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์(Core Loss)

$A_e$  = ขนาดของพื้นที่ตัดแกนเฟอร์ไรต์

$A_w$  = ขนาดพื้นที่ช่องพันขดลวดของบอบบิ้น

$V_o$  = ปริมาตรของแกนเฟอร์ไรต์

$A_g$  = ระยะทางเดินฟลักซ์แม่เหล็กในแกนเฟอร์ไรต์

## เส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis Curve)

เส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิสจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (B) ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของขดลวดที่พันบนแกน ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B มีค่าเพิ่มขึ้นน้อยมาก แม้ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของความเข้มสนามแม่เหล็ก H ก็ตามจากจุดดังกล่าว เราจะเรียกว่า แกนเริ่มมีการอิ่มตัวของฟลักซ์แม่เหล็ก (Saturation)

โดยปกติผู้ผลิตจะแสดงกราฟเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิสเพียงครั้งเดียว เนื่องจากอีก ครั้งหนึ่งของเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิสจะมีลักษณะกลับที่สแกนเท่านั้น

การใช้งานแกนเฟอร์ไรต์ในหม้อแปลงสวิตชิงจะต้องระวังไม่ทำให้แกนเฟอร์ไรต์เกิดการอิ่มตัวขึ้นได้ ดังนั้นโดยทั่วไปในการออกแบบหม้อแปลงสวิตชิง จึงควรกำหนดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B ที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ในแกนขณะทำงาน มีค่าไม่เกินครึ่งหนึ่งของค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดก่อนอิ่มตัวของแกนเฟอร์ไรต์ เพื่อความปลอดภัย

การกำหนดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดในแกนหม้อแปลง

ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดในแกนหม้อแปลง จะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดไพรมารี จากกฎของฟาราเดย์จะได้ว่า

$$\text{สูตร } \Delta B = \frac{V \times 10^8}{N_p A_c} \quad (2.12)$$

เมื่อ  $\Delta B$  คือ ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนเป็นเกาส์

$V$  คือ ค่าแรงดันที่ตกคร่อมขดไพรมารี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่ง  $N_p$  ไว้ส่ คือ ค่าจำนวนรอบของขดไพรมารีเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- A<sub>c</sub> คือ ขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกนเป็นตารางเซ็นติเมตร  
 t คือ ช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กเกิดขึ้นเป็นวินาที

จะเห็นได้ว่ายิ่งจำนวนรอบของขดลวดไพรมารีมีค่าน้อยลง ค่าความหนาแน่นฟลักซ์ที่เกิดขึ้นจะยิ่งมีค่ามาก ซึ่งการลดจำนวนรอบของขดไพรมารีลงจะทำให้สามารถใช้ลวดทองแดงขนาดใหญ่ขึ้นได้และสามารถทนกระแสได้สูงขึ้น

อย่างไรก็ตาม หากความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัวจะทำให้แรงดันตกคร่อมขดไพรมารีมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว แรงดันอินพุตจะไปตกคร่อมที่เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ที่กำลังนำกระแสสูง ๆ แทนทำให้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์พังเสียหายได้ และความหนาแน่นฟลักซ์เหล็กที่มีค่าสูงจะทำให้เกิดการสูญเสียภายในแกนสูงอีกด้วย ดังนั้นการกำหนดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์ของหม้อแปลงขณะทำงาน จึงมีข้อที่ควรคำนึงถึง 2 ประการ คือ

1. แกนเฟอร์ไรต์ต้องไม่เกิดอิ่มตัวขณะทำงาน
2. มีค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่เกิดขึ้นในแกนขณะทำงานจะต้องเกิดการสูญเสีย ในแกนเฟอร์ไรต์ต่ำที่สุด

หมายเหตุการกำหนดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ให้กำหนดเป็น 2 เท่าของค่าที่อ่านได้จากกราฟ และค่า ไม่ควรกำหนดเกินเส้นประในกราฟซึ่งแสดงขีดจำกัดของสำหรับคอนเวอเตอร์

การเลือกขนาดแกนเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสม

การใช้แกนเฟอร์ไรต์ที่มีขนาดใหญ่เกินไปสำหรับหม้อแปลงสวิสซิ่ง จะเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายโดยไม่จำเป็น ส่วนการใช้แกนเฟอร์ไรต์ที่มีขนาดเล็กเกินไป ขดลวดและแกนเฟอร์ไรต์จะร้อน กำลังงานสูงสุดที่เหมาะสมสำหรับแกนเฟอร์ไรต์ขนาดต่าง ๆ พิจารณาจากขนาดหน้าตัดของแกนและขนาดช่องสำหรับพันขดของบอบบิ้น

ช่องอากาศคั่นทางเดินแม่เหล็กในแกนเฟอร์ไรต์(Air Gap)

การกำหนดช่องอากาศคั่นทางเดินแม่เหล็ก (Air Gap) ในแกนเฟอร์ไรต์ เป็นวิธีการอย่างหนึ่งที่ใช้ป้องกันการอิ่มตัวของแกนเฟอร์ไรต์ และช่วยให้การสะสมพลังงานของขดลวดในหม้อแปลงสวิสซิ่งมีค่ามากขึ้นได้ด้วย อย่างไรก็ตาม ช่องอากาศคั่นในแกนเฟอร์ไรต์จะทำให้เกิดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวน EMI ออกมา และรบกวนอุปกรณ์ภายนอกได้เช่นกัน

สำหรับแกนเฟอร์ไรต์แบบ EE,EI ,ETD หรือ แบบ POT สามารถกำหนดลักษณะของช่องอากาศคั่นในแกนได้ 2 ลักษณะ ดังรูปที่ 3.6(ก) และ(ข) คือ การกำหนดช่องอากาศคั่นที่แกนกลางอย่างเดียวและการคั่นแกนด้วยช่องอากาศระหว่างคู่ประกบ

การค้นแกนด้วยช่องอากาศระหว่างคู่ประกบสามารถทำได้ง่ายกว่าการค้นช่องอากาศที่แกนกลาง ซึ่งทำได้โดยการใช้แผ่นฉนวนที่มีความหนาเป็นครึ่งหนึ่งของระยะช่องอากาศที่ตรงกลาง ซึ่งทำได้โดยการใช้แผ่นฉนวนที่มีความหนาเป็นครึ่งหนึ่งของระยะช่องอากาศที่ตรงกลาง ต้องสั่งโดยตรงจากผู้ผลิตแกนเฟอร์ไรต์หรือซัดแกนกลางออกเองเพื่อให้ได้ระยะช่องอากาศตามต้องการมีข้อสังเกตคือ การค้นช่องอากาศระหว่างคู่ประกบ ความหนาของแผ่นฉนวนที่ใช้นั้นจะมีค่าเพียงครึ่งหนึ่งของระยะช่องอากาศที่ตรงกลางที่ตรงกลาง เนื่องจากช่องอากาศที่ตรงกลางได้จึงเป็นผลรวมของระยะช่อง

## 2.4 อุปกรณ์สวิตช์และวงจรถับ

IGBT นั้นเป็นลูกผสมระหว่างมอสเฟตและ SCR สามารถใช้วงจรถับแบบเดียวกับมอสเฟตได้ ตัว IGBT นั้นมีความเร็วในการสวิตช์ประมาณ 500 nS ถึงแม้จะไม่เร็วเท่ามอสเฟต แต่สามารถรองรับกับกำลังได้มากกว่า อาจจะมีมากกว่า 500 W ต่อสวิตช์หนึ่งตัว ดังนั้นถ้าเราไม่สนใจในเรื่องค่าความสูญเสียของวงจรถับมากนัก IGBT จึงเป็นทางเลือกที่ดีทีเดียว

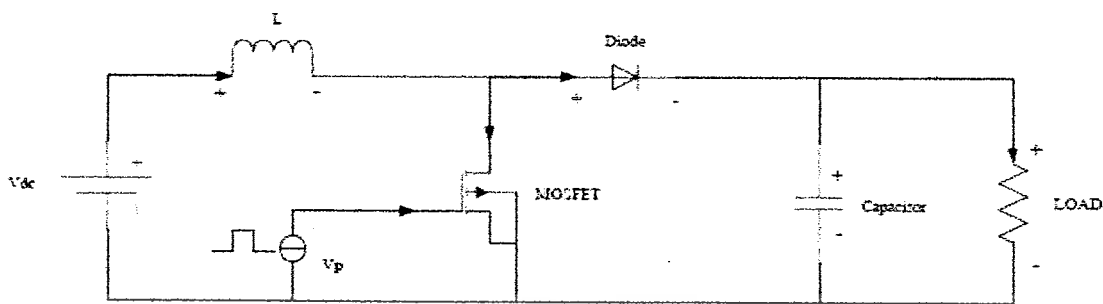
## 2.5 วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า (Boost Converter)

วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้าหรือวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ คือ วงจรที่ใช้ในการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออก ให้สูงกว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้า ซึ่งเป็นที่มาของชื่อวงจร "Boost Converter" นั้นเอง

### 2.5.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์

ในการวิเคราะห์การทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ในช่วงสภาวะอยู่ตัว จะมีการกำหนดเงื่อนไขในการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ เพื่อช่วยต่อการวิเคราะห์ ดังนี้

- 1). กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ณ ตำแหน่งเดียวกันในแต่ละคาบ จะมีค่าเท่ากันและมีค่าเป็นบวกเสมอ
- 2). แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบจะเท่ากับศูนย์ หมายถึง ผลรวมของผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับเวลา ในแต่ละคาบจะเท่ากับศูนย์
- 3). ตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่ทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกมีค่าคงที่
- 4). กำลังไฟฟ้าด้านเข้าเท่ากับกำลังไฟฟ้าด้านออก กรณีนี้ไม่คำนึงถึงการสูญเสียเนื่องจากการทำงานของวงจร โดยกำหนดให้อุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพของวงจรเป็นหนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์



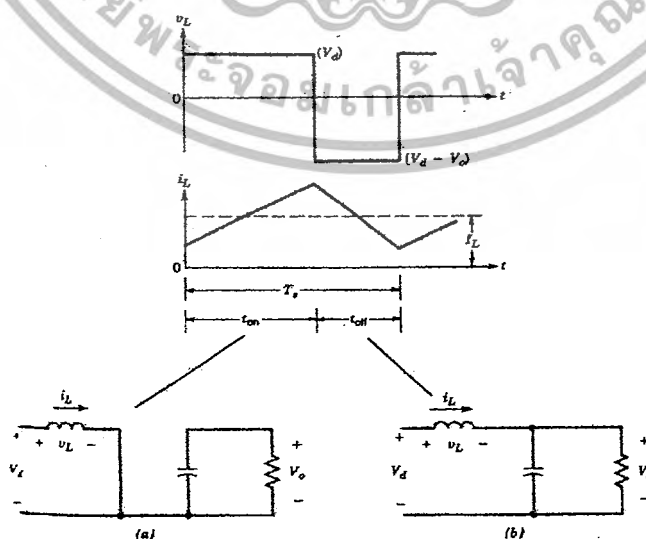
รูปที่ 2.11 วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์

## 2.5.2 หลักการทำงานของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์

หลักการทำงานของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์ คือ การทำให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกมีค่าตามต้องการ โดยจะเริ่มต้นจากข้อกำหนดที่ว่า แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะเท่ากับศูนย์ และสามารถหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้โดย วิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละโหมด ทั้งนี้การทำงานต้องอยู่ในช่วงสภาวะอยู่ตัว ดังนี้

### 1). โหมดกระแสต่อเนื่อง (Continuous-Conduction Mode)

จากรูปที่ 2.12 แสดงถึงรูปคลื่นในสภาวะอยู่ตัว (Steady-state) ในโหมดการทำงานแบบกระแสต่อเนื่อง ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่า กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีลักษณะต่อเนื่อง ( $i_L(t) > 0$ )



รูปที่ 2.12 แสดงโหมดการทำงานแบบกระแสต่อเนื่อง (a) switch on, (b) switch off

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายกเว้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสภาวะการทำงานแบบกระแสต่อเนื่อง ผลรวมพื้นที่ใต้กราฟแรงดันของตัวเหนี่ยวนำ จะต้องมามีค่าเท่ากับศูนย์ ดังสมการ

$$V_d t_{on} + (V_d - V_o) t_{off} = 0 \quad (2.13)$$

หารทั้งสองข้างด้วย  $T_s$  และจัดรูปสมการใหม่จะได้ว่า

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{T_s}{t_{off}} = \frac{1}{1-D} \quad (2.14)$$

หากพิจารณาให้วงจรมีค่าความสูญเสียต่ำมาก,  $P_d = P_o$

$$\therefore V_d I_d = V_o I_o \quad (2.15)$$

และ

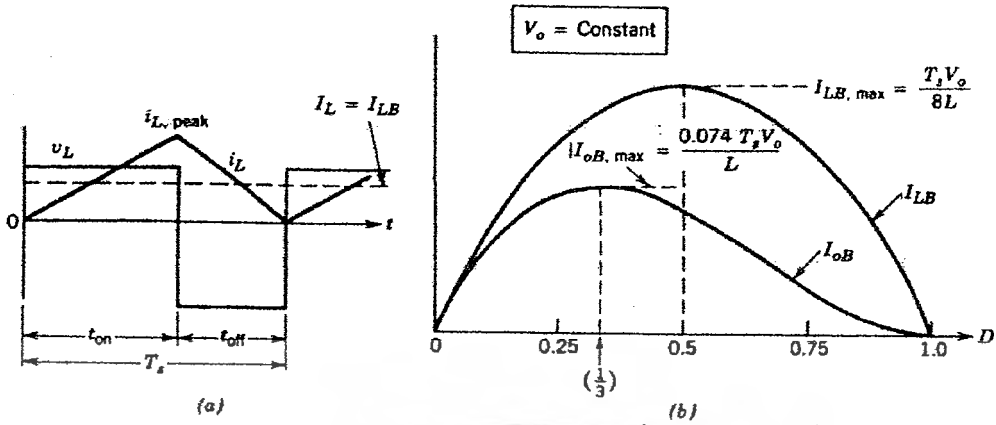
$$\frac{I_o}{I_d} = (1-D) \quad (2.16)$$

## 2). ขอบเขตระหว่างโหมดการทำงานแบบกระแสต่อเนื่องและกระแสไม่ต่อเนื่อง

จากรูปที่ 2.13 แสดงถึงลักษณะลูกคลื่นที่เกิดขึ้นในโหมดกระแสต่อเนื่อง โดยกำหนดว่าในโหมดนี้ กระแส  $i_L$  จะมีค่าเป็นศูนย์ ในจุดสุดท้ายของช่วงสวิตช์ไม่นำกระแส ( $t_{off}$ ) ค่าเฉลี่ยของกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำน้อยสุดภายในวงจร ที่ทำให้วงจรยังทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง คือ

$$\begin{aligned} I_{LB} &= \frac{1}{2} I_{L,peak} \quad \text{จากรูปที่ 2.13} \\ &= \frac{1}{2} \frac{V_d}{L} t_{on} \\ &= \frac{T_s V_o}{2L} D(1-D) \quad \text{จากสมการที่ (2.14)} \quad (2.17) \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 ขอบเขตระหว่างโหมดการทำงานแบบกระแสต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ของวงจร  
ยกระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

จากการที่เราทราบว่า ในวงจรที่ใช้ยกระดับแรงดัน กระแสที่ตัวเหนี่ยวนำภายใน  
วงจรและกระแสอินพุต เป็นกระแสตัวเดียวกัน ( $i_d = i_L$ ) และจากสมการที่ (2.16) และ (2.17)  
เราจะสามารถหาค่าเฉลี่ยของกระแสเอาต์พุตที่เกิดขึ้นในโหมดการทำงานแบบกระแสต่อเนื่องได้  
ดังสมการ

$$I_{oB} = \frac{T_s V_o}{2L} D(1-D)^2 \tag{2.18}$$

ในการประยุกต์ใช้งานวงจรยกระดับแรงดันส่วนมากจะต้องการให้แรงดัน  
เอาต์พุตคงที่ เราจึงกำหนดให้  $V_o$  คงที่ จะสามารถเขียนกราฟระหว่าง  $I_{LB}$  และ  $I_{oB}$  กับค่า Duty  
ratio (D) ได้ดังรูปที่ 2.13 โดยที่ให้ค่า  $V_o$  คงที่และปรับค่า Duty ratio ไปเรื่อยๆ โดย  
เปรียบเสมือนปรับค่าแรงดันอินพุต

จากรูปที่ 2.13 แสดงให้เห็นว่ากระแส  $I_{LB}$  จะมีค่ามากที่สุดเมื่อค่า  $D = 0.5$

$$I_{LB,max} = \frac{T_s V_o}{8L} \tag{2.19}$$

เช่นเดียวกัน  $I_{oB}$  จะมีค่าสูงสุดที่  $D = 0.333$

$$I_{oB,max} = \frac{2 T_s V_o}{27 \cdot 8L} = 0.074 \frac{T_s V_o}{L} \tag{2.20}$$

เราสามารถเขียนสมการ  $I_{LB}$  และ  $I_{oB}$  ในเทอมของค่าสูงสุดได้ ดังนี้  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{LB} = 4D(1-D)I_{LB,max} \quad (2.21)$$

และ

$$I_{oB} = \frac{27}{4}D(1-D)^2 I_{oB,max} \quad (2.22)$$

จากรูปที่ 2.13 แสดงถึงค่า  $D$  ได้ เมื่อให้ค่า  $V_o$  คงที่แล้ว ค่าเฉลี่ยกระแสที่ไหลต่ำกว่า  $I_{oB}$  และ กระแสที่ตัวเหนี่ยวนำต่ำกว่า  $I_{LB}$  วงจรจะทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง

### 3). โหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous-Conduction Mode)

การทำงานของวงจรในโหมดไม่ต่อเนื่อง เราอาจกำหนดเงื่อนไขได้ว่า วงจรจะให้ค่าเอาต์พุตพาวเวอร์ลดลง เมื่อ  $V_d$  และ  $D$  มีค่าคงที่ จากรูปที่ 2.14 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างจุดการทำงานต่ำสุดที่ให้อำนาจการทำงานให้โหมดกระแสต่อเนื่องและโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง เมื่อกำหนดให้  $V_d$  และ  $D$  มีค่าคงที่

จากรูป 2.14 โหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง จะทำให้อำนาจเอาต์พุตพาวเวอร์ได้ต่ำลง เนื่องจากกระแส  $I_L (= I_d)$  มีค่าต่ำลง เมื่อพิจารณา  $V_d$  มีค่าคงที่ ในช่วงแรกจนถึง  $i_{L,peak}$  จะมีลักษณะกระแสจะเหมือนกับการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง ฉะนั้นจึงเป็นไปกรณีเดียวที่จะทำให้เอาต์พุตต่ำลง คือ  $I_L$  ต่ำลงเนื่องจากความไม่ต่อเนื่องเพราะ  $V_o$  ขาดช่วงไปเท่านั้น

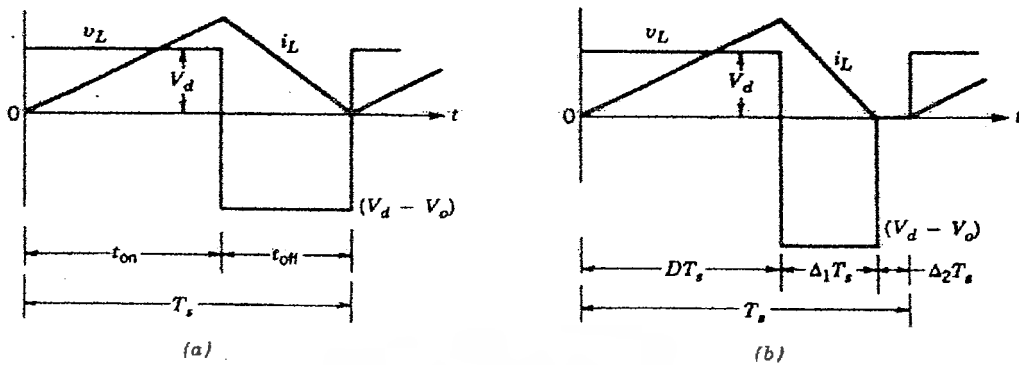
หากเราทำการหาผลรวมของพื้นที่ใต้กราฟของแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในหนึ่งคาบแล้ว ให้มีค่าเท่ากับศูนย์

$$V_d DT_s + (V_d - V_o) \Delta_1 T_s = 0$$

$$\therefore \frac{V_o}{V_d} = \frac{\Delta_1 + D}{\Delta_1} \quad (2.23)$$

และ

$$\frac{I_o}{I_d} = \frac{\Delta_1}{\Delta_1 + D} \quad \text{เมื่อ } P_d = P_o \quad (2.24)$$



รูปที่ 2.14 เปรียบเทียบกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ ในโหมดกระแสต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง

จากรูปที่ 2.14 ค่าเฉลี่ยของกระแสอินพุตเท่ากับกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ ดังสมการ

$$I_d = \frac{V_d}{2L} DT_s \cdot (D + \Delta_1) \quad (2.25)$$

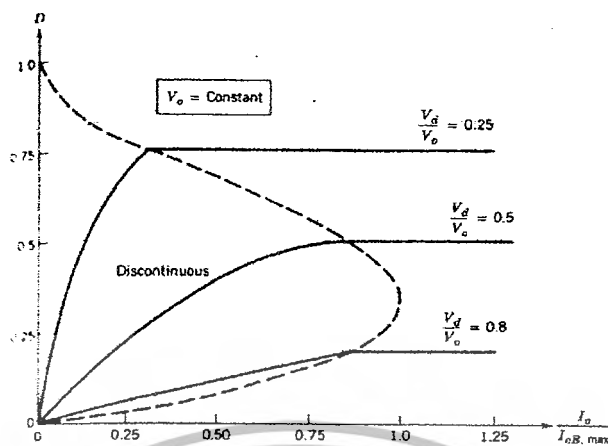
แทนค่าสมการที่ (2.18) ด้วย (2.19) จะได้ว่า

$$I_o = \left( \frac{T_s V_d}{2L} \right) D \Delta_1 \quad (2.26)$$

ในทางปฏิบัตินั้นเราจะให้ค่า  $V_o$  คงที่ และปรับค่า  $D$  ไปตามค่า  $V_d$  ที่ต้องการ ซึ่งการวิธีการที่มักนิยมใช้ โดยค่า Duty ratio ( $D$ ) เป็นฟังก์ชันของกระแสที่ไหลโดยจะแปรผันตามอัตราส่วน  $V_o/V_d$  สามารถอธิบายได้จากสมการที่ (2.17) และสมการที่ (2.20) ดังนี้

$$D = \left[ \frac{4}{27} \left( \frac{V_o}{V_d} \right) \left( \frac{V_o}{V_d} - 1 \right) \frac{I_o}{I_{oB,max}} \right]^{1/2} \quad (2.27)$$

จากรูปที่ 2.15 ค่า  $D$  ถูกพล็อตในฟังก์ชันของ  $I_o/I_{oB,max}$  โดยเปลี่ยนค่า  $V_d/V_o$  ไปเรื่อยๆ โดยขอบเขตระหว่างโหมดการทำงานแบบกระแสต่อเนื่องและโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องนั้น อาจแสดงได้โดยเส้นประ ดังภาพ



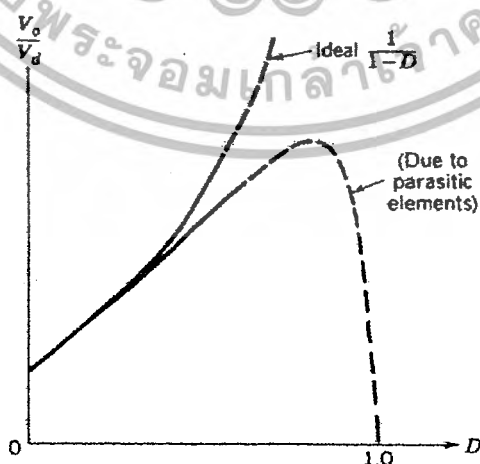
รูปที่ 2.15 แสดงขอบเขตของโหมดกระแสต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง

ในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง ถ้า  $V_o$  จะไม่สามารถควบคุมได้หากเวลาในการสวิตช์ซึ่งน้อยกว่า สมการนี้

$$\frac{L}{2} I_{L, peak}^2 = \frac{(V_d D T_s)^2}{2L} \text{ W-s} \tag{2.28}$$

พลังงานที่ถูกถ่ายเทจากอินพุตไปเอาต์พุตนั้นจะผ่านตัวเก็บประจุและจึงไปยังโหลด หากโหลดไม่สามารถดูดซับพลังงานไว้ได้หมดแล้ว จะทำให้ แรงดันเอาต์พุต  $V_o$  เพิ่มขึ้น และหากโหลดน้อยมากก็จะทำให้  $V_o$  สูงมากจนกระทั่งตัวเก็บประจุเกิดการเบรกดาวนี้ได้

### 2.5.3 ผลของ Parasitic Elements



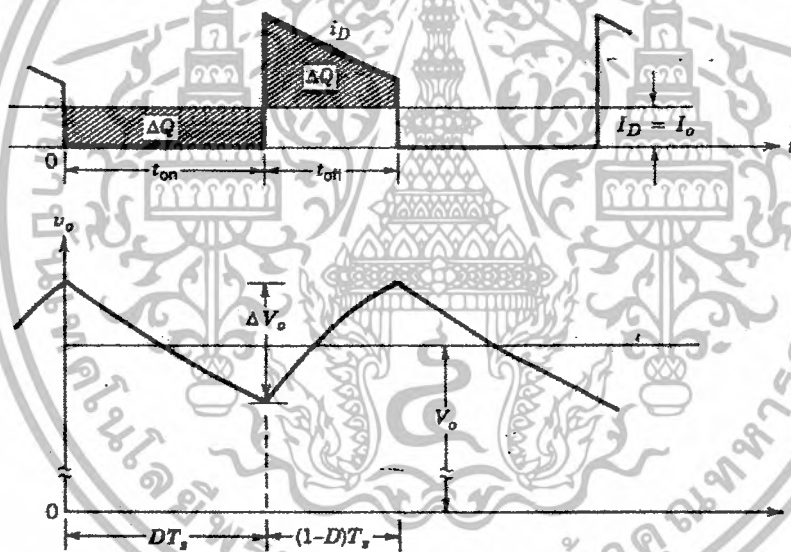
รูปที่ 2.16 ค่า  $V_o/V_d$  ของระบบจริงเทียบกับวงจรในอุดมคติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Parasitic Elements** ในวงจรยกระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เกิดจากการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการ **associate** ในตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ สวิตช์ และไดโอด จากรูปที่ 2.16 แสดงถึงคุณลักษณะ  $V_o/V_d$  ของระบบยกระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากผลของ Parasitic Elements เปรียบเทียบกับคุณลักษณะของวงจรในอุดมคติ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อค่า Duty ratio (D) เพิ่มมากขึ้นถึงจุดๆหนึ่ง กราฟของวงจรที่เป็นไปในทางปฏิบัติจะไม่เป็นเส้นตรง และมีแนวโน้มโค้งลง ต่างจากกราฟอุดมคติที่จะมีค่ามากเป็นอนันต์ที่ค่า  $D = 1$

#### 2.5.4 ค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าออก

ค่าระลอกคลื่นนั้นเราสามารถจะคำนวณได้จาก รูปคลื่นที่ 2.16 สำหรับโหมดการทำงานต่อเนื่อง สมมติให้กระแสระลอกเริ่มที่ไดโอด ไหลผ่านไปยังตัวเก็บประจุ และไหลเข้าสู่โหลดที่เป็นความต้านทาน ซึ่งมีรูปคลื่นดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงรูปคลื่นที่มีการกระเพื่อม

เมื่อให้มีการชาร์ตประจุ  $\Delta Q$  แล้วค่าแรงดัน **peak - peak** ของระลอกคลื่นหาได้จาก

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{I_o DT_s}{C} \quad (2.29)$$

$$\text{โดยให้แรงดันออกมีค่าคงที่} = \frac{V_o}{R} = \frac{I_o}{C} DT_s$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

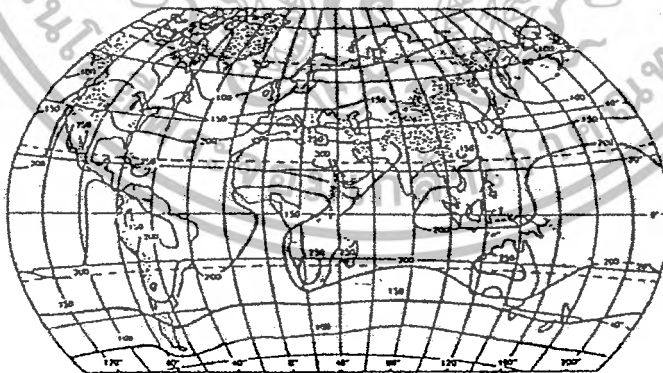
$$\begin{aligned} \therefore \frac{\Delta V_o}{V_o} &= \frac{DT_s}{RC} \\ &= D \frac{T_s}{\tau} \end{aligned} \quad (2.30)$$

เมื่อ  $\tau = RC$  time constant

## 2.6 ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ (Photovoltaic system)

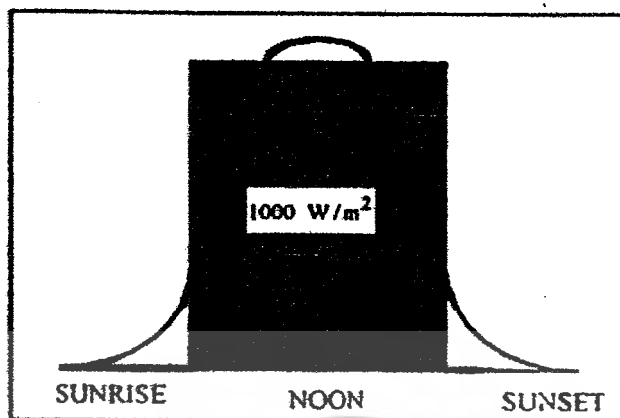
การออกแบบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์มีปัจจัยหลักที่ต้องพิจารณาก่อนติดตั้ง เลือกใช้ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์คือ สถานที่ติดตั้ง เนื่องจากแหล่งพลังงานหลักมาจากดวงอาทิตย์ดังนั้นบริเวณที่เหมาะสมแก่การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้คือบริเวณที่มีค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้ต่อตารางเมตร สูงสุด ค่าความสว่าง (Irradiant) คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ตกกระทบพื้นที่หนึ่ง จากการสำรวจค่าความสว่างโดยเฉลี่ยทั่วโลกพบว่าเป็นดังรูปที่ 2.18

ค่าการรับแสงแดด (Insolation) ซึ่งคือปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้รับบนพื้นที่ที่พิจารณา ค่านี้มีหน่วยเป็น  $\text{kW-h/m}^2$  ค่านี้เท่ากับชั่วโมงที่แดดสูงสุด (peak sun hour) ซึ่งคือจำนวนชั่วโมงต่อวันซึ่งค่าความสว่างของดวงอาทิตย์ เท่ากับ  $1000 \text{ W/m}^2$  ซึ่งจะให้พลังงานปริมาณเท่ากัน ข้อมูลของการส่องสว่างของแสงอาทิตย์มักเป็นข้อมูลต่อวัน ดังนั้นเมื่อฤดูกาลเปลี่ยนไปค่านี้จึงเปลี่ยนไป ค่าการถูกแสงแดดต่อวัน (Daily insolation) ที่พิจารณาแสดงในรูปที่ 2.19



รูป 2.18 ค่าความส่องสว่าง (Irradiant) โดยเฉลี่ยในช่วง 10 ปี บริเวณผิวโลก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



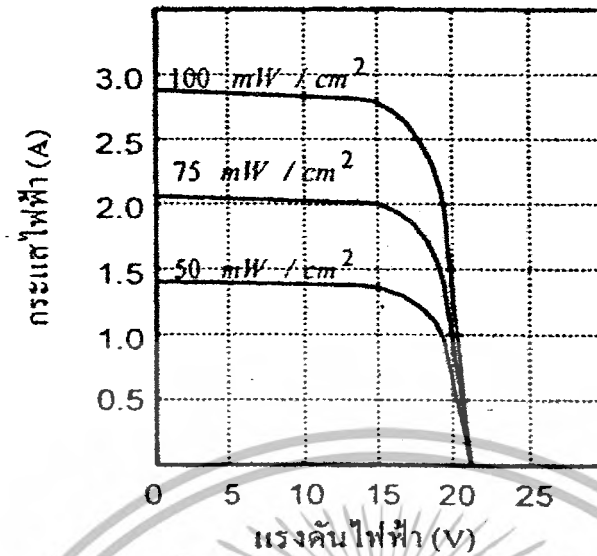
รูป 2.19 การพิจารณาค่าแสงแดดใน 1 วันตามชั่วโมงที่แดดสูงสุด

การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต้องคำนึงถึงพลังงานเอิร์ทพุทที่แผงเซลล์ให้ด้วย เนื่องจากพลังงานสูงสุดจากแผงเซลล์จะได้เมื่อแผงเซลล์ตั้งฉากกับดวงอาทิตย์ เมื่อกล่าวถึงระบบการแปลงรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้าเพื่อใช้งานจะหมายถึงระบบที่ประกอบด้วยส่วนประกอบต่างๆ หลายส่วน ดังแสดงต่อไปนี้

### 2.6.1 แหล่งกำเนิดพลังงานแสงอาทิตย์ (PV Generator)

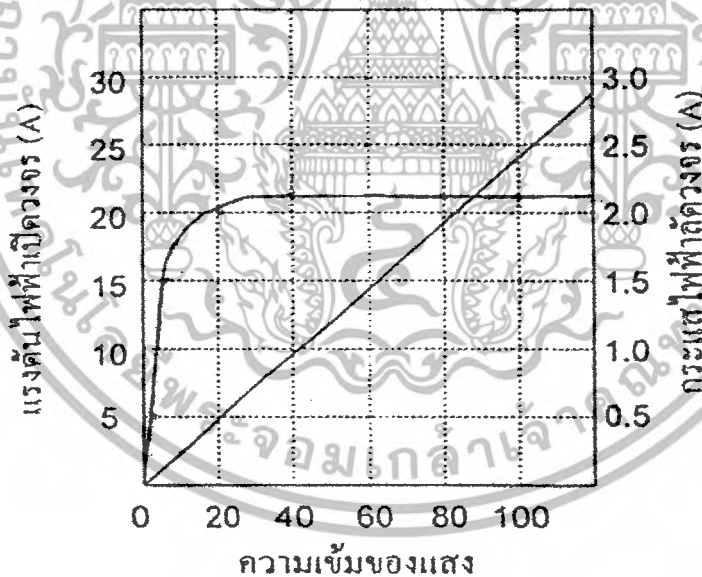
หน่วยพื้นฐานของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ คือ เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) ซึ่งเป็นชิ้นของสารกึ่งตัวนำมีแรงดันคงที่ประมาณ 0.5 V แต่กระแสเปลี่ยนแปลงไปตามพื้นที่หน้าตัดของเซลล์ โดยเฉลี่ยประมาณ  $3A/100\text{ cm}^2$  ชิ้นเซลล์นี้จะถูกนำมาเรียงต่อกันในแผงเซลล์ 1 แผง เพื่อให้ได้แรงดันตามต้องการ เซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะที่สำคัญคือ

- 1). แผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้กระแสคงที่ โดยทั้งแรงดันและกระแสมีความสัมพันธ์กันดังรูปที่ 2.7 โดยแผงเซลล์จะให้กระแสคงที่ถึงจุดให้พลังงานสูงสุด



รูป 2.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ต่อพื้นที่ต่างๆ

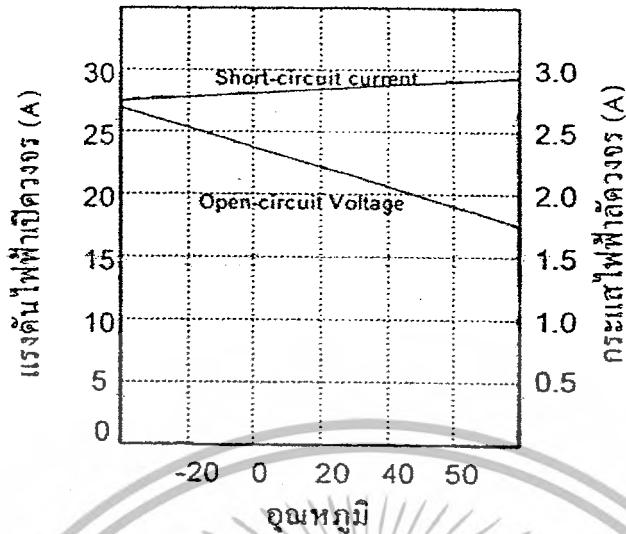
2). กระแสแปรตามความเข้มแสง ในขณะที่แรงดันค่อนข้างคงที่



รูป 2.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เทียบกับความเข้มแสงต่างๆ

3). แรงดันลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่กระแสแทบไม่เปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

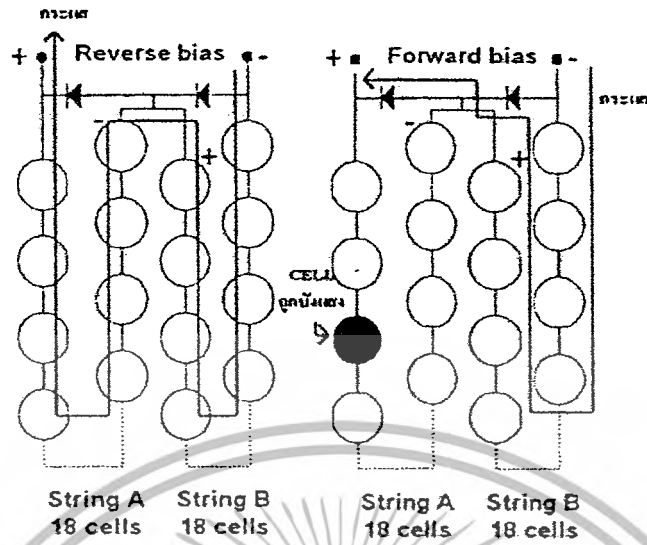


รูป 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเทียบกับอุณหภูมิ

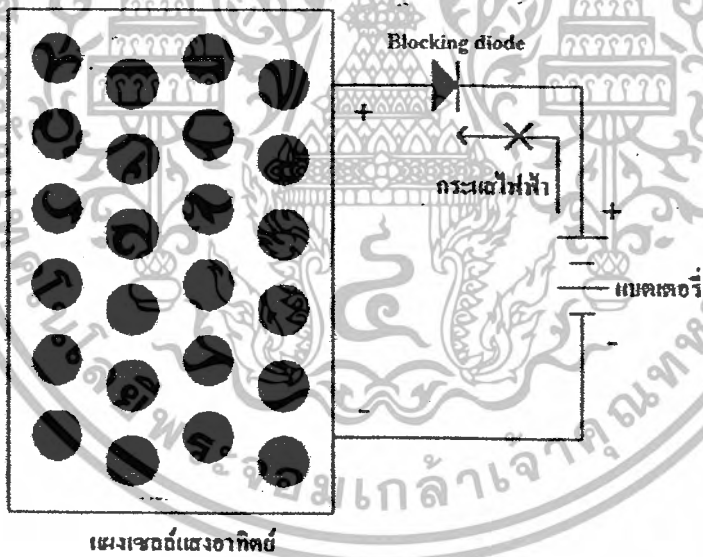
### 2.6.2 โครงสร้างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

- 1). เซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาต่อกันแบบขนานหรืออนุกรมแล้วแต่ค่าแรงดันที่ต้องใช้ปกติจะถูกออกแบบให้ใช้กับระบบไฟฟ้า 120 โวลท์ จึงอนุกรมเซลล์เข้าด้วยกันจำนวน 2 – 3 แผง ให้ได้แรงดันโดยประมาณ 80 – 120 โวลท์
- 2). กระจกนิรภัย แสงผ่านได้ 92% เป็นกระจก Tempered low iron, High transmission glass.
- 3). EVA : Ethylene – Vinyl Acetate เคลือบเซลล์กันความชื้นและฝุ่นละอองของถูกเซลล์แสงอาทิตย์
- 4). บายพาสไดโอด (By pass diode) ต่อคร่อมระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ 2 แถว ป้องกันกระแสขาดวงจร กรณีเกิดเงาบังบนเซลล์ใดเซลล์หนึ่งเซลล์นั้นจะเปลี่ยนสภาพจากแหล่งจ่ายกลายเป็นโหลดทันที กระแสไม่สามารถไหลผ่านเซลล์นั้นได้ บายพาสไดโอดช่วยให้ทิศทางกระแสเปลี่ยนมาผ่านทางไดโอดแทนโดยไม่ผ่านเซลล์นั้น ลักษณะการต่อและการทำงานแสดงในรูป 2.23
- 5). บล็อกกิ้งไดโอด (Blocking diode) ต่อระหว่างชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับแบตเตอรี่ ป้องกันการไหลย้อนกลับของกระแสจากแบตเตอรี่ไปยังชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูป 2.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.23 การต่อบายพาสไดโอดคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์



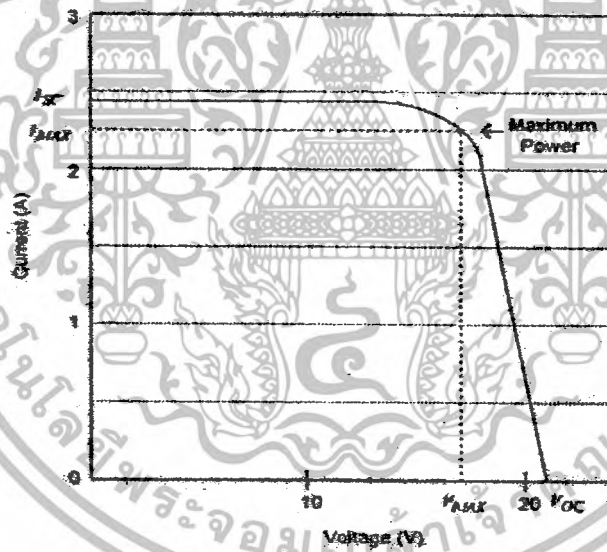
รูป 2.24 การต่อบล็อกกิ้งไดโอด (Blocking diode)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.3 ตัวแปรที่บอกคุณสมบัติแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ในการเลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ สิ่งที่ต้องพิจารณาควบคู่กับการออกแบบระบบ คือค่าตัวแปรต่างๆ ในกราฟคุณสมบัติกระแส - แรงดันของแผงนั้นๆ ดังแสดงในรูป 2.25

- 1). ค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ( $V_{oc}$ ) เป็นแรงดันที่วัดได้เมื่อไม่ได้ต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า
- 2). ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ( $V_{max}$ ) เป็นแรงดันที่วัดได้เมื่อโหลดที่เหมาะสมที่สุด เป็นจุดที่แผงเซลล์ให้พลังงานสูงสุด
- 3). ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) เป็นค่ากระแสที่วัดได้เมื่อลัดวงจรแผงเซลล์แสงอาทิตย์
- 4). ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด ( $I_{max}$ ) เป็นค่ากระแสที่วัดได้เมื่อต่อโหลดเหมาะสม เป็นจุดที่แผงเซลล์ให้พลังงานสูงสุด
- 5). กำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $P_{max}$ ) เป็นกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

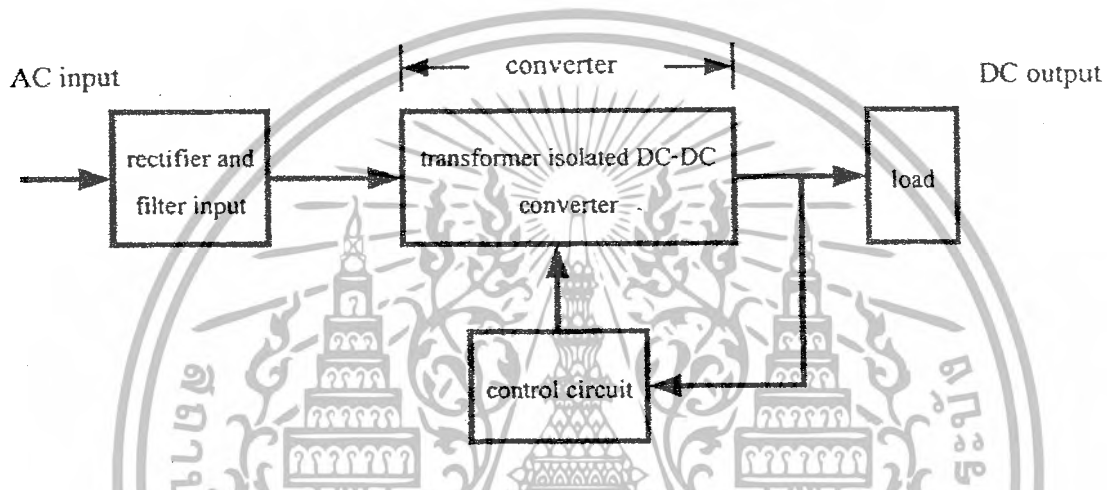


รูป 2.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่ กำลังสูงสุดที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตช์

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V ให้เป็นแรงดันไฟฟ้าตรงค่าต่ำเพื่อใช้งานในวงจรและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ที่นิยมใช้ในปัจจุบันโดยทั่วไปจะมีส่วนประกอบหลักดังแสดงในรูปที่ 1.1 คือ (1) วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าและกรองแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุต (2) วงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่ประกอบไปด้วย หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าและกรองแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตและ (3) วงจรควบคุมรักษาระดับแรงดันเอาต์พุต



รูปที่ 2.26 บล็อกไดอะแกรมของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์

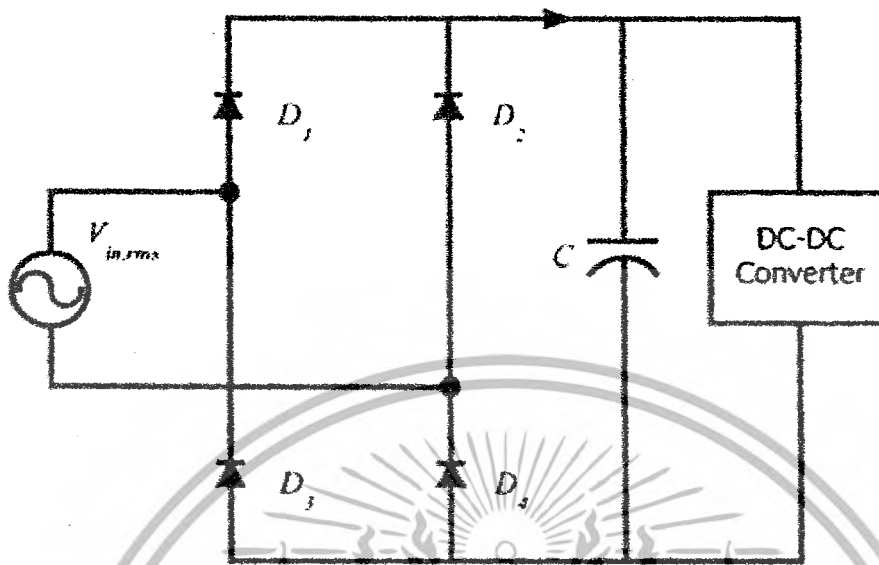
แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์โดยทั่วไป ถูกออกแบบให้ใช้กับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยที่ไฟฟ้ากระแสสลับจะต่อเข้ากับภาควงจรเรียงกระแสไฟฟ้าและจะถูกเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าตรงที่แรงดันไฟฟ้าสูง ต่อจากนั้นถูกส่งให้กับวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีมอสเฟตกำลังเป็นอุปกรณ์สวิตช์ โดยจะตัดต่อแรงดันไฟฟ้าออกเป็นช่วงๆ ที่ความถี่สูง จากนั้นผ่านเข้าไปยังหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง เพื่อลดทอนแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าต่ำลง ที่เอาต์พุตของหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าและกรองแรงดันไฟฟ้าให้เรียบเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลด การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าอินพุตและการเปลี่ยนแปลงโหลดกระทำได้โดยการป้อนกลับค่าแรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุตมายังวงจรควบคุม เพื่อควบคุมการทำงานของมอสเฟตกำลังให้มีช่วงเวลาในการนำกระแสไฟฟ้ามากขึ้นหรือน้อยลงเพื่อรักษาแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้คงที่ได้

### 2.7.1 วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าและกรองแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุต

วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าและกรองแรงดันไฟฟ้ามีหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า

อินพุตกระแสไฟฟ้าสลับไปเป็นแรงดันไฟฟ้าตรงเพื่อนำไปเป็นแรงดันไฟฟ้าอินพุตให้กับภาคดี

เอกสารนี้ใช้ดีซีคอนเวอร์เตอร์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.27 วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าและกรองแรงดันไฟฟ้าต้านเอาท์พุท

วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าในรูปที่ 1.2 ประกอบไปด้วยไดโอดเรียงกระแสไฟฟ้า ( $D_1$ - $D_4$ ) และตัวเก็บประจุกรองแรงดันไฟฟ้า (C) ไดโอดที่นำมาใช้งานจะต้องมีอัตราทนกระแสไฟฟ้าควรมีค่ามากกว่า 1.5 – 2 เท่าของค่ากระแสไฟฟ้าปกติและมีอัตราทนแรงดันไฟฟ้ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าอินพุทของวงจร

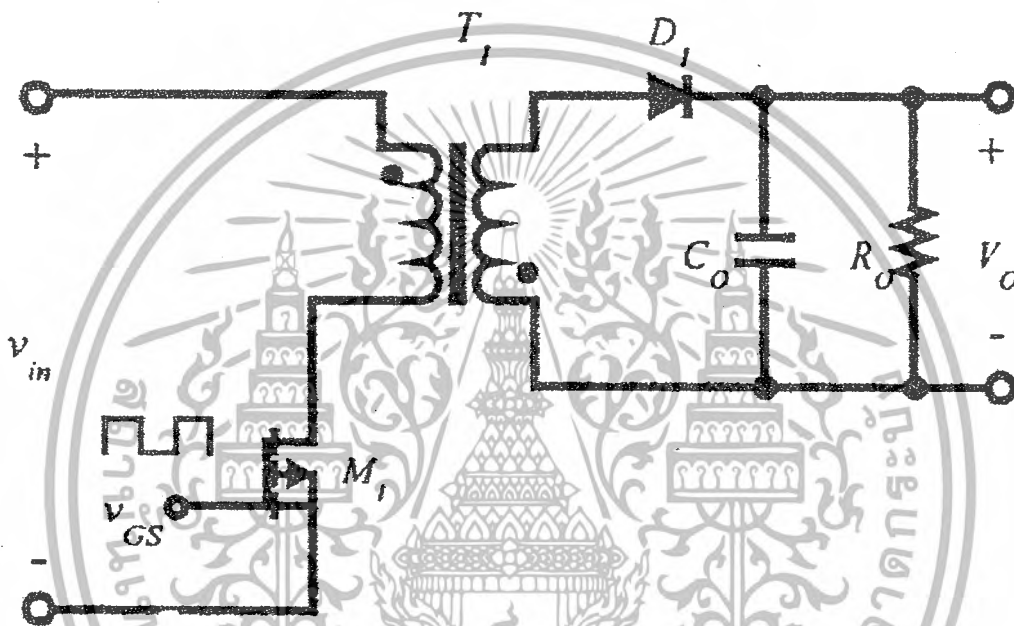
ตัวเก็บประจุกรองแรงดันไฟฟ้าทำหน้าที่กรองแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการเรียงกระแสไฟฟ้าของไดโอดทั้ง 4 ตัว ให้เป็นแรงดันไฟฟ้าตรงเรียบมากขึ้น การทำงานของตัวเก็บประจุ ในวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าจะเป็นไปในลักษณะของการชาร์จประจุและคายประจุ ค่ากระแสไฟฟ้าขณะชาร์จประจุและคายประจุจะมากหรือน้อย ขึ้นกับค่าความจุของตัวเก็บประจุและภาวะของโหลดที่เอาท์พุทของวงจร ค่าตัวเก็บประจุที่ต้องการจะถูกกำหนดโดยแรงดันไฟฟ้ากระแสเพื่อม โดยทั่วไปการออกแบบวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าจะกำหนดให้มีแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทกระแสเพื่อมไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ อัตราทนแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุกรองแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ควรทนได้ไม่ต่ำกว่า 1.5 เท่าของแรงดันไฟฟ้าตรงที่เอาท์พุท ตัวเก็บประจุกรองแรงดันไฟฟ้าที่ใช้กันโดยทั่วไปนั้นจะเป็นชนิดอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งจะมีคุณสมบัติคือมีค่าความจุมากและทนแรงดันไฟฟ้าได้สูงแต่ราคาของตัวเก็บประจุก็จะสูงตามขนาดค่าความจุและการทนแรงดันไฟฟ้า ช่วงเวลาโฮลด์อัฟ (hold-up time) เป็นช่วงเวลาแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะยังคงรักษาแรงดันไฟฟ้าที่เอาท์พุทได้ตามปกติที่โหลดสูงที่สุด เมื่อแรงดันไฟฟ้าอินพุทลดลงต่ำกว่าย่านที่กำหนด ช่วงเวลาโฮลด์อัฟนี้จะขึ้นอยู่กับค่าความจุของตัวเก็บประจุและภาวะที่ต่อคร่อมตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7.2 วงจรดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์

วงจรคอนเวอร์เตอร์นับเป็นส่วนสำคัญในการทำงานของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ที่ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าตรงค่าหนึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าตรงอีกค่าหนึ่ง วงจรคอนเวอร์เตอร์มีหลายประเภท โดยคอนเวอร์เตอร์แต่ละประเภทจะมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงหลักการการทำงานของวงจรดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์พื้นฐานประเภทฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

### 1.) ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.28 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 1.3 เมื่อมอสเฟต  $M_1$  นำกระแสไฟฟ้าไดโอด  $D_1$  ถูกไบแอสกลับและไม่นำกระแสไฟฟ้า เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้า  $T_1$  จะกำหนดให้ขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิกลับเฟส จึงมีการสะสมพลังงานในแกนของหม้อแปลงไฟฟ้า  $T_1$  เมื่อ  $M_1$  หยุดนำกระแสไฟฟ้า สนามแม่เหล็กในหม้อแปลงไฟฟ้า  $T_1$  ยุบตัวให้เกิดการกลับขั้วแรงดันไฟฟ้าที่ขดปฐมภูมิและทุติยภูมิ  $D_1$  จะอยู่ในลักษณะถูกไบแอสตรงพลังงานที่สะสมจะถูกถ่ายเททำให้เกิดมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไดโอด  $D_1$  ไปยังตัวเก็บประจุเอาต์พุต  $C_0$  และโหลด

### 2.) หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง

หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงทำหน้าที่ลดทอนแรงดันไฟฟ้าตรงที่อินพุตของคอนเวอร์เตอร์ที่มีค่าสูงให้มีค่าลดลงเป็นแรงดันไฟฟ้าค่าต่ำที่เอาต์พุตและทำให้เกิดการแยกจากกันทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.) มอสเฟตกำลัง

ในปัจจุบันมอสเฟตกำลังได้มีบทบาทมากในวงจรแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์เพราะสามารถทำงานได้ดีที่ความถี่สูงและใช้เวลาในการเปลี่ยนสถานะค่อนข้างสั้น มอสเฟตกำลังจะใช้แรงดันไฟฟ้าเป็นตัวควบคุมการทำงาน สำหรับมอสเฟตกำลังการเกิดเซคันดารีเบรกดาวน์(secondary breakdown) เช่นในไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์จะไม่เกิดขึ้น เพราะค่าความต้านทานระหว่างเดรนและซอร์สขณะนำกระแสไฟฟ้า  $R_{DS(ON)}$  ของมันจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมีค่าน้อยลงต่างจากกรณีไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ขณะเกิดเซคันดารีเบรกดาวน์ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นกระแสไฟฟ้าจะไหลมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะเกิดการพังเสียหายได้อย่างรวดเร็ว มอสเฟตกำลังจะมีพิคัดความปลอดภัยในกราฟ SOA (safe operating area) กว้างกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ และเนื่องจากมอสเฟตกำลังไม่เกิดเซคันดารีเบรกดาวน์ อัตราหมกกำลังสูญเสียสูงสุดของมันจะถูกจำกัดด้วยค่าความร้อนที่เกิดขึ้นที่รอยต่อภายในตัวมันเท่านั้น พิกัดกำลังของมอสเฟตกำลังนั้นแบ่งออกได้เป็น 4 ลักษณะคือ

- แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเดรนและซอร์ส  $V_{DS}$  สูงสุดที่สามารถทนได้ (maximum drain source voltage)
- ค่ากระแสไฟฟ้าเดรน  $I_D$  สูงสุดที่สามารถไหลผ่านได้และไม่ทำให้โครงสร้างภายในเสียหาย
- ค่าความต้านทานขณะนำกระแสไฟฟ้า ( $R_{DS(ON)}$ )
- การระบายความร้อนของตัวถัง (package limit)

โครงสร้างภายในตัวมอสเฟตกำลังเสมือนมีตัวเก็บประจุอยู่ระหว่างขาเกตกับซอร์สเมื่อมอสเฟตกำลังนำกระแสจะเกิดการเก็บประจุเข้าไปที่ตัวเก็บประจุทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขาเกต ( $V_{GS}$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มทำงาน ส่วนในการที่จะทำให้มอสเฟตกำลังหยุดนำกระแสไฟฟ้าก็จะทำการคายประจุออกจนแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่ขาเกตลดลงต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มทำงาน อัตราการชาร์จประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุที่อยู่ในตัวมอสเฟตกำลังนี้ จะเป็นตัวกำหนดความเร็วในการเปลี่ยนสถานะของตัวมอสเฟตกำลัง

### 4.) ไดโอดกำลัง

ไดโอดที่อยู่ใ้ในภาคเอาต์พุตของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์สิ่งที่จะต้องคำนึงถึงอย่างหนึ่งคือกำลังสูญเสียในไดโอดเนื่องจากต้องทำงานที่ความถี่สูง กำลังการสูญเสียจะเกิดได้เ็น 2 ลักษณะคือกำลังสูญเสียขณะนำกระแสไฟฟ้าและกำลังการสูญเสียขณะเปลี่ยนสถานะ การใช้งานของไดโอดที่ความถี่สูงๆกำลังการสูญเสียขณะเปลี่ยนสถานะจะมีผลต่อกำลังการสูญเสียทั้งหมดฉะนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกชนิดของไดโอดให้ถูกต้อง ไดโอดจะเกิดกำลังสูญเสียได้มากที่สุดในช่วงการคืนตัวหลังจากหยุดนำกระแส (reversed recovery) ซึ่งมีผลมาจากการสะสมประจุในตัวไดโอดขณะนำกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากคอนเวอร์เตอร์จะใช้งานที่ค่าความถี่ตั้งแต่ประมาณ 20 kHz ขึ้นไป ไดโอดที่ใช้ในวงจรคอนเวอร์เตอร์จึงจำเป็นต้องมีคุณสมบัติทั่วไปดังนี้ (1) มีแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสไฟฟ้าต่ำ (2) มีช่วงเวลากินตัวสั้นและ (3) สามารถทนกำลังไฟฟ้าได้สูง ไดโอดที่ใช้ในวงจรคอนเวอร์เตอร์ควรเลือกใช้จากไดโอด 3 ชนิดดังต่อไปนี้

### 2.7.3 วงจรการควบคุมสำหรับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์

การรักษาแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสำหรับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ทำได้ เอาต์พุตโดยการควบคุมช่วงเวลาการนำกระแสไฟฟ้าของมอสเฟตกำลัง การควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่นิยมมีสองแบบคือ การควบคุมในแรงดัน (voltage mode control) และการควบคุมในโหมดกระแส (current mode control)

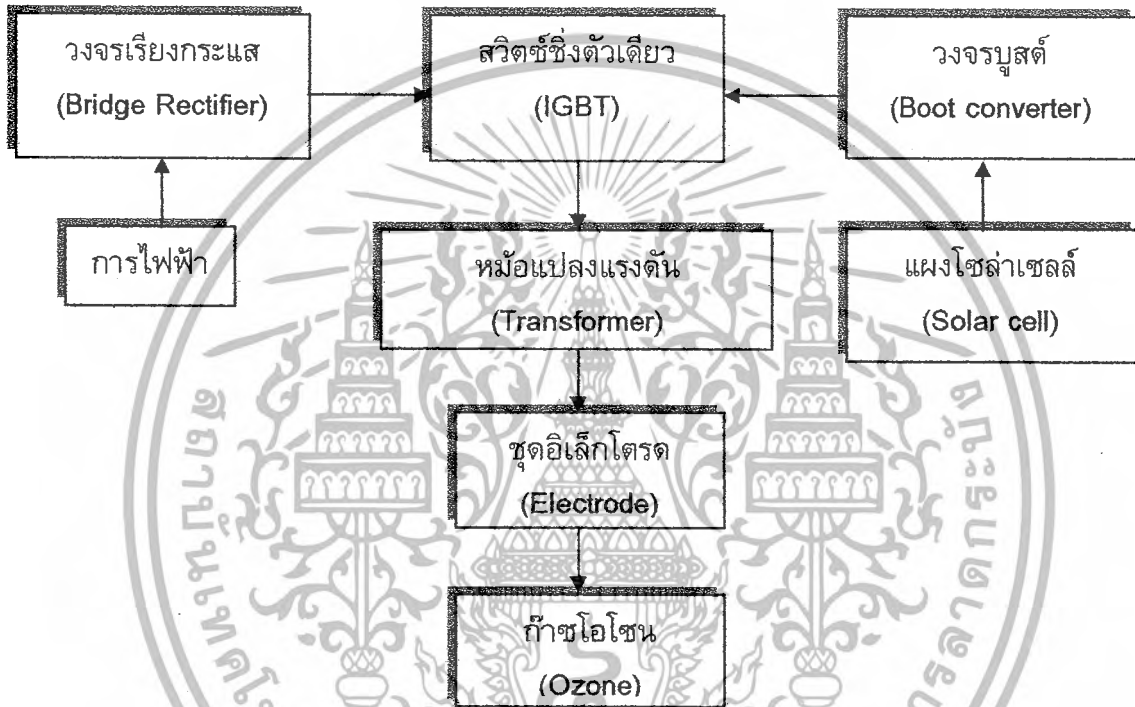


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### การเลือกและการออกแบบ

สำหรับการออกแบบเครื่องกำเนิดก๊าซโอโซนความถี่สูงนั้น ในโครงการนี้ได้แยกส่วนของการออกแบบ เป็นส่วนๆ นั่นคือ วงจรทบทระดับแรงดัน วงจรสวิตซ์ซิงไอจีบีที หม้อแปลงแรงดัน และชุดอิเล็กโทรด ดังแสดงในบล็อกการทำงานของเครื่องกำเนิดโอโซน



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของเครื่องกำเนิดโอโซน

#### 3.1 การออกแบบชุดสร้างโคโรนา

โครงสร้างหลักอย่างหนึ่งของเครื่องผลิตก๊าซโอโซน คือ ชุดสร้างโคโรนาโดยเป็นองค์ประกอบที่จะกำหนดขนาดแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ต้องใช้ในการออกแบบโครงสร้างของระบบอื่นๆ นอกจากนี้การออกแบบชุดสร้างโคโรนาให้มีประสิทธิภาพสูงในการผลิตก๊าซโอโซน ต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆ ที่เป็นตัวแปรทางไฟฟ้า เช่น ลักษณะสนามไฟฟ้า , แรงดันไฟฟ้า, ความถี่ไฟฟ้า และประเภทการแตกตัวของก๊าซแล้ว ยังต้องคำนึงถึงปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ ได้แก่ อุณหภูมิ, ความชื้น, และอัตราการไหลของอากาศผ่านชุดสร้างโคโรนาด้วย ดังนั้นในการออกแบบชุดสร้างโคโรนาจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การออกแบบเพื่อทดสอบทฤษฎีพื้นฐานการผลิตไอโซน
2. การออกแบบเพื่อปรับปรุงการผลิตไอโซน

ในการออกแบบชุดสร้างโคโรนาทรงกระบอกซ้อนกันรวม จะพิจารณาจากการออกแบบมิติที่เหมาะสม (Optimum dimension) ของรัศมีวงนอก ( $r_2$ ) และรัศมีวงใน ( $r_1$ ) แต่ในการออกแบบชุดสร้างโคโรนาสำหรับเครื่องผลิตก๊าซไอโซนมีหลักการคือต้องการแรงดันต่ำ ( $V_0$ ) เพื่อสร้างความเครียดสูง ( $E_c$ ) จนก๊าซออกซิเจนแตกตัวได้ ดังนั้นการออกแบบจึงต้องหลีกเลี่ยงการออกแบบมิติที่เหมาะสม



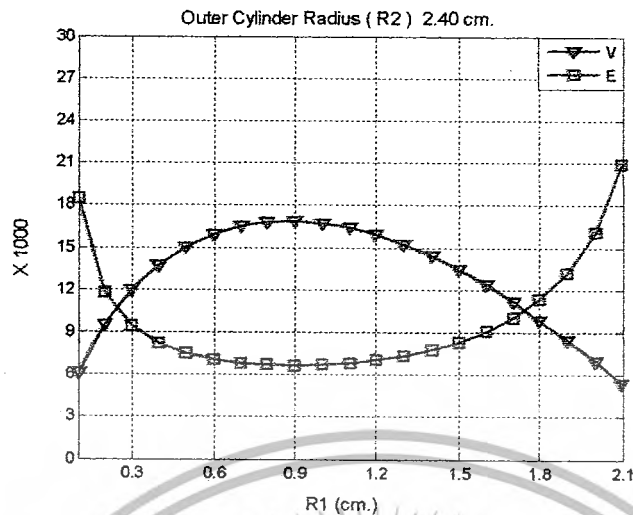
รูปที่ 3.2 ลักษณะของชุดสร้างโคโรนาทรงกระบอกซ้อนกันรวมจำนวน 1 ชั้น

สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้ากับแรงดัน คือ

$$E = \frac{V}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (3.1)$$

ขั้นต้นจะมีการประยุกต์ใช้ Optimum dimension design เพื่อการออกแบบเงื่อนไขของตัวในการออกแบบคือรัศมีทรงกระบอกวงนอก( $r_2$ ) ซึ่งมีขนาดรัศมี 2.40 เซนติเมตร

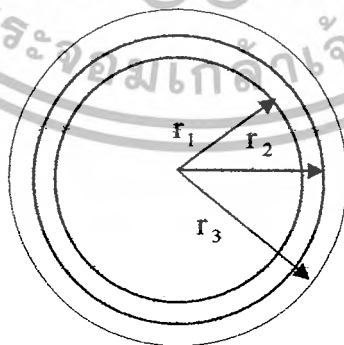
ผลการจากคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB แสดงกราฟความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าได้ดังนี้



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ที่รัศมี  $r_1$  ใดๆ เมื่อ  $r_2 = 2.40$  cm

จากกราฟความสัมพันธ์ช่วงรัศมีวงใน ( $r_1$ ) ที่อยู่ในช่วงมิติที่เหมาะสม (Optimum dimension) คือต้องใช้แรงดันไฟฟ้า (V) สูงแต่ได้ค่าสนามไฟฟ้าต่ำ (E) ซึ่งช่วงดังกล่าว มีรัศมีอยู่ในช่วง 0.2 - 1.75 cm โดยรัศมีวงในที่เลือกในการสร้างชุดสร้างโคโรนาคือ 1.9 cm ซึ่งระยะดังกล่าวไม่อยู่ในช่วงมิติที่เหมาะสม

จากในส่วนของทฤษฎี เมื่อทำการเพิ่มฉนวนไฟฟ้าเข้าไปแทนที่ช่องว่างอากาศจะทำให้ช่องว่างอากาศมีขนาดแคบลง จะส่งผลทำให้มีความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณช่องว่างอากาศสูงขึ้นและช่วยให้บริเวณช่องว่างอากาศ เกิดการเบรกดาวน์ได้ง่ายขึ้น ดังนั้นจึงมีการออกแบบชุดสร้างโคโรนาเป็นแบบทรงกระบอกซ้อนกัน 2 ชั้น มีลักษณะดังรูป



รูปที่ 3.4 ลักษณะของชุดสร้างโคโรนาทรงกระบอกซ้อนกัน 2 ชั้น

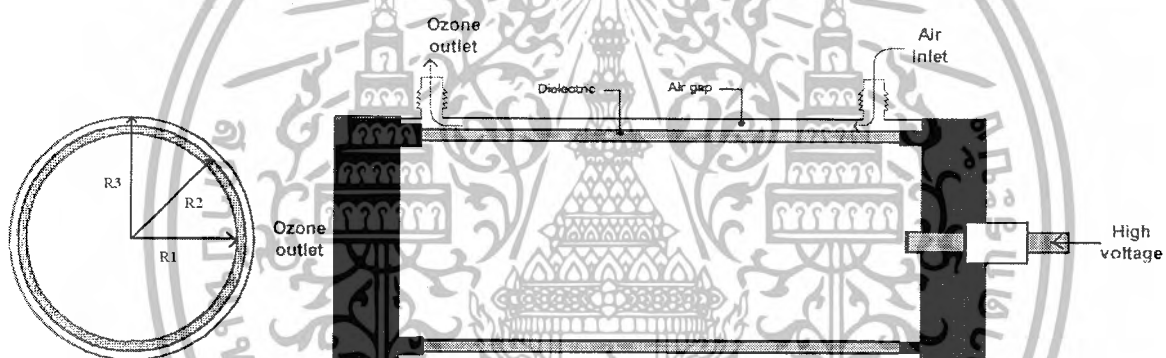
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าคือ

$$E_{r_2} = \frac{\epsilon_1 V}{r_2 (\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1})} \quad (3.2)$$

ชุดสร้างโคโรนา I เพื่อทดสอบทฤษฎีพื้นฐานการผลิตโอโซน

- รูปร่างทรงกระบอกซ้อนกันแกนร่วม ยาว 20 cm.
- รัศมีวงนอก ( $r_3$ ) เท่ากับ 2.40 cm.
- รัศมีวงใน ( $r_1$ ) เท่ากับ 2.00 cm.
- ฉนวนของแข็งที่ใช้คือ แก้ว (Pyrex) มีค่า  $\epsilon_1 = 8$ หนา 0.20 cm.
- ฉนวนอากาศมีค่า  $\epsilon_2 = 1$ หนา 0.20 cm



รูปที่ 3.5 แสดงภาคตัดขวางของชุดสร้างโคโรนา

### 3.1.1 การคำนวณค่าพลังงานและแรงดันไฟฟ้า

ชุดสร้างโคโรนา I ( $r_1 = 2.0$  cm.,  $r_2 = 2.2$  cm.,  $r_3 = 2.4$  cm.,  $L = 20$  cm.)

พลังงานที่ต้องใช้ในการสลายพันธะออกซิเจนคือ  $1.172$  kWh/  $m^3$  ถึง  $1.62$  kWh/  $m^3$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรอากาศในช่วงว่างอากาศคือ } \pi(r_3^2 - r_2^2) \times L &= \pi(0.0240^2 - 0.022^2) \times 0.2 \\ &= 5.781 \times 10^{-5} m^3 = 57.81 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

$$\text{ย่านพลังงาน } 1.172 \times 10^3 \times 5.781 \times 10^{-5} = 0.0678 \text{ w-hx}$$

$$1.620 \times 10^3 \times 5.781 \times 10^{-5} = 0.09365 \text{ w-h}$$

พลังงานในการผลิตเกิดเนื่องจากสนามไฟฟ้า(E) สามารถคำนวณได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W = \frac{1}{2} \int \epsilon E^2 dV$$

∴ ยานสนามไฟฟ้า  $E = \sqrt{\frac{2W}{\epsilon V}}$

$$E_{\min} = \sqrt{\frac{2(0.0678)}{(8.854 \times 10^{-12})(57.81)}} = 16.27 \text{ kV/cm}$$

$$E_{\max} = \sqrt{\frac{2(0.09365)}{(8.854 \times 10^{-12})(57.81)}} = 19.13 \text{ kV/cm}$$

สมการความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า

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

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

$$V_{\min} = \frac{16.27 \times 2.2 \times \left( 8 \ln \left( \frac{2.4}{2.2} \right) + 1 \ln \left( \frac{2.2}{2.0} \right) \right)}{8} = 3.52 \text{ kV}$$

$$V_{\max} = \frac{19.13 \times 2.2 \times \left( 8 \ln \left( \frac{2.4}{2.2} \right) + 1 \ln \left( \frac{2.2}{2.0} \right) \right)}{8} = 4.16 \text{ kV}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การออกแบบหม้อแปลงแรงดันสูง ความถี่สูง

การออกแบบหม้อแปลงแรงดันสูง ความถี่สูง เพื่อเข้าสู่อิเล็กทรอนิกส์นั้น ต้องมีความสัมพันธ์ กับการออกแบบของอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากอิเล็กทรอนิกส์เปรียบเสมือนตัวกำหนดพลังงานของระบบ จึงต้องมีการหาค่าของตัวเก็บประจุของชุดอิเล็กทรอนิกส์มาใช้ในการออกแบบหม้อแปลง ดังสมการต่อไปนี้

หาค่า C ของอิเล็กทรอนิกส์ C1, C2

$$C_1 = \frac{2\pi \xi l}{\ln(r_2/r_1)} = \frac{2\pi \times 1 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 20 \times 10^{-2}}{\ln(2.1/1.9)}$$

$$= 8.894 \times 10^{-11} \text{ F}$$

$$C_2 = \frac{2\pi \xi l}{\ln(r_3/r_2)} = \frac{2\pi \times 1 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 20 \times 10^{-2}}{\ln(2.4/2.1)}$$

$$= 2.669 \times 10^{-11} \text{ F}$$

ได้ค่า C รวม =  $2.591 \times 10^{-11} \text{ F}$

หาจำนวนรอบจากสูตร

$$V = 4fABm ; N_1 = \frac{V}{(4fAB_m)}$$

$$= \frac{310}{(4 \times 30 \times 10^3 \times 4 \times 10^{-4} \times 0.3)}$$

$$= 21.52 \text{ รอบ}$$

เลือกใช้  $N_1 = 22 \text{ รอบ}$

จาก  $\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_2}{V_1}$

$$N_2 = \frac{V_2 \times N_1}{V_1}$$

$$= \frac{9,000 \times 22}{310}$$

$$= 638.70 \text{ รอบ}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภาาใช้เชิงวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{เลือกใช้ } N_2 &= 640 \text{ รอบ} \\ \text{Ratio (a)} &= 640/22 \\ &= 29.09 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{หา } I(\text{secondary}) &= \frac{V(\text{sec})}{X_c} \\ &= \frac{9000}{(1/2\pi f C)} \\ &= \frac{9,000}{(1/2\pi \times 50 \times 10^3 \times 2.59 \times 10^{-11})} \\ &= 0.073 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{หา } I(\text{primary}) &= a I(\text{sec}) \\ &= 29.09 \times 0.073 \\ &= 2.13 \text{ A} \end{aligned}$$

เราจึงสามารถคำนวณหาขนาด (เบอร์) และจำนวนของขดลวดทั้งทางด้าน Primary และ Secondary ได้ โดยเลือกขนาด 450 circulamil / 1 A จะได้

$$\text{ทาง primary จะได้ } 450 \times 2.13 = 958.5 \text{ circulamil}$$

$$\text{ทำเป็นมิลลิเมตร จะได้ } 958.5 \times 5.068 \times 10^{-4} = 0.48 \text{ mm}^2$$

- เลือกใช้ลวดทองแดงตีเกลียว 4 เส้น จะได้ (ลวดทองแดงเบอร์ 24 x 4 เส้น)

$$\text{ทาง secondary จะได้ } 450 \times 0.0406 = 32.85 \text{ circulamil}$$

$$\text{ทำเป็นมิลลิเมตร จะได้ } 32.85 \times 5.068 \times 10^{-4} = 0.0016 \text{ mm}^2$$

- เลือกใช้ลวดทองแดงตีเกลียว 2 เส้น จะได้ (ลวดทองแดงเบอร์ 34 x 2 เส้น)

- เลือกใช้แกนเฟอร์ไรต์ EE80 / 80

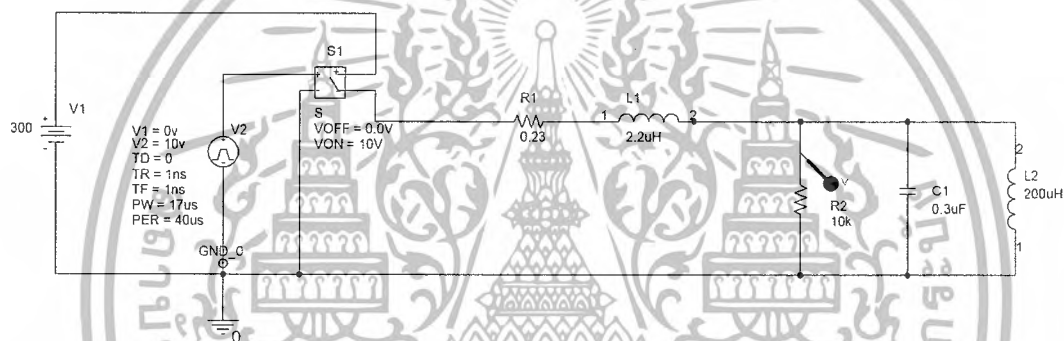
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การออกแบบวงจรสวิตซ์ซิ่ง

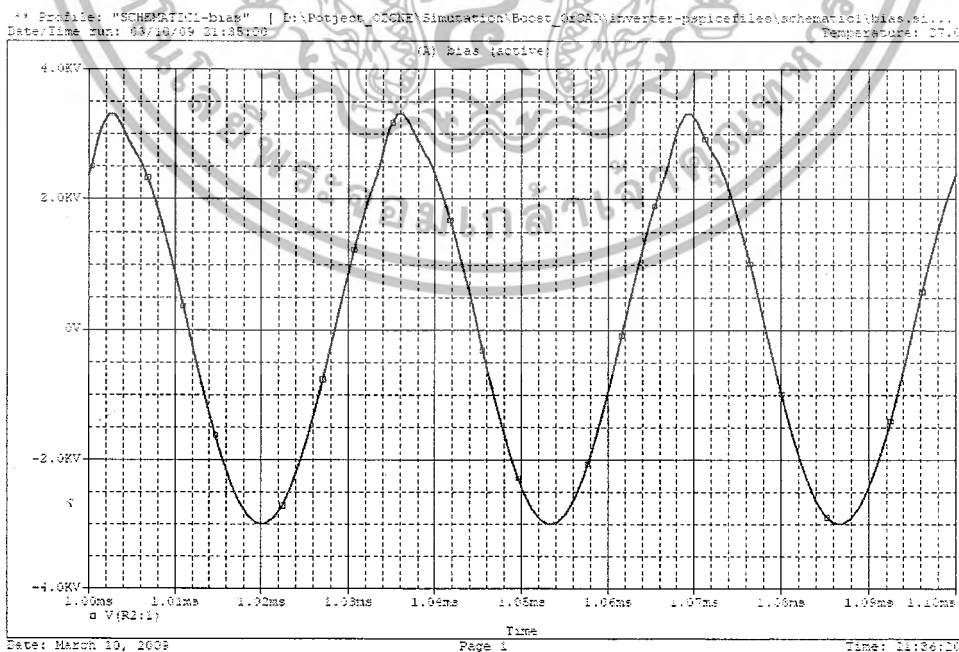
วงจรสวิตซ์ซิ่ง เป็นส่วนที่รับแรงดันอินพุตจากทั้งสองระบบ คือ แหล่งกำเนิดจากแผงโซลาร์เซลล์ และแหล่งกำเนิดจากการไฟฟ้า หรือไฟฟ้าตามบ้านเรือน มีหน้าที่ในการปรับความถี่จากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของอินพุต ให้มีความถี่สูงตามต้องการ และมีจุดเด่นที่วงจรมีกำลังไฟฟ้าต่ำ กว่าวงจรอินเวอร์เตอร์ทั้งแบบฟลูบริดจ์ และฮาฟบริดจ์

#### 3.3.1 ผลการจำลองด้วยโปรแกรม

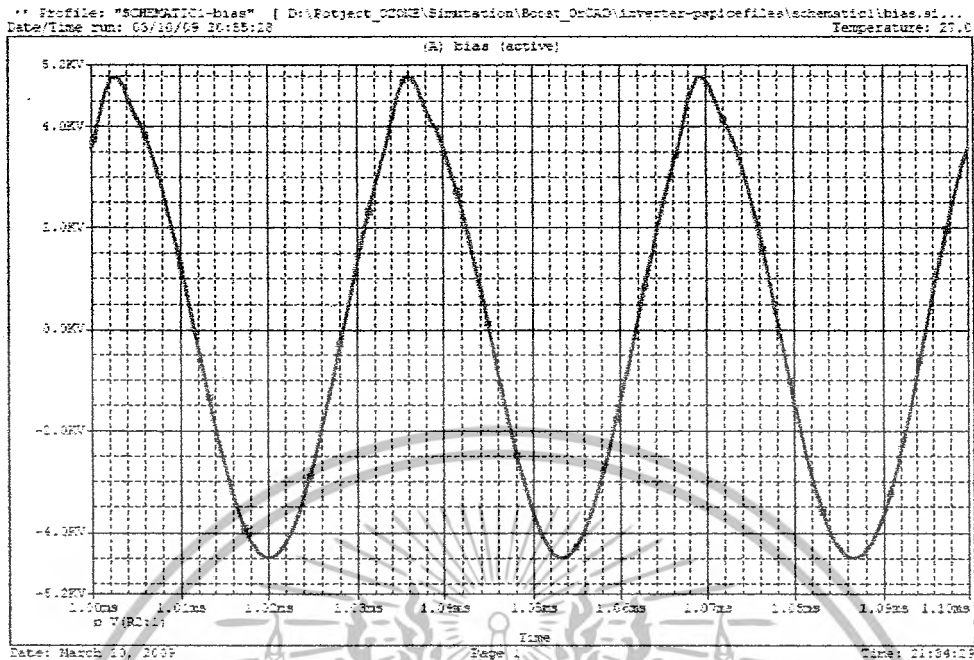
การจำลองการทำงานของระบบโดยใช้โปรแกรม PSpice ในการจำลองโดยต่อวงจร ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งเป็นวงจรสมมูลของหม้อแปลงและโหลด



รูปที่ 3.6 วงจรจำลองการทำงานของหม้อแปลงความถี่สูง



รูปที่ 3.7 ผลการจำลองแรงดันเอาต์พุตของหม้อแปลงความถี่สูง ที่ Duty cycle = 0.2, 6 kv  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



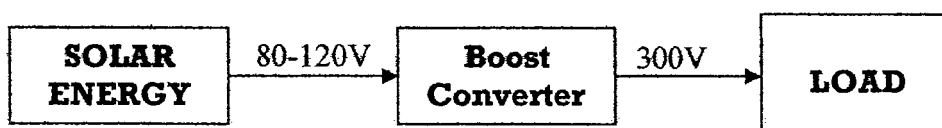
รูปที่ 3.8 ผลการจำลองแรงดันเอาต์พุตของหม้อแปลงความถี่สูง ที่ Duty cycle = 0.2 , 9 kv

### 3.4 การออกแบบวงจรยกระดับแรงดันไฟฟ้า (Design of Boost Converter)

รับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากแผงโซลาร์เซลล์ 80 – 120 โวลต์ จากนี้วงจรจะ  
ยกระดับแรงดันเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 310 โวลต์ โดยมีรายการอุปกรณ์ที่ใช้มีดังต่อไปนี้

#### 3.4.1 ขอบเขตการทำงานของวงจรยกระดับแรงดัน

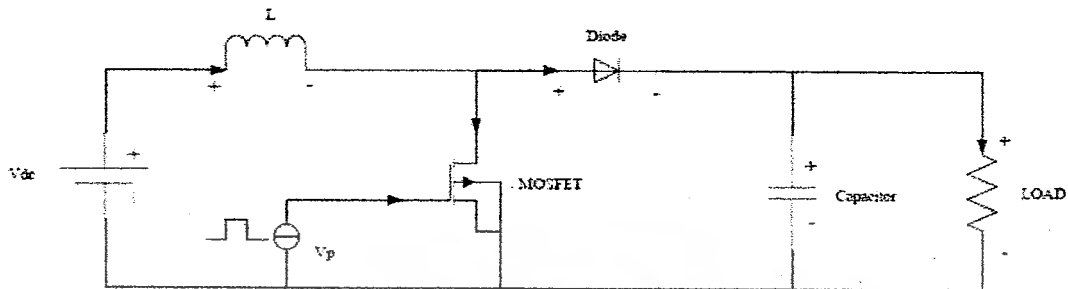
- วงจรทำงานที่ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 50 kHz คิดเป็นคาบเวลาเท่ากับ 20  $\mu$ S
- สามารถส่งผ่านพลังงานได้ไม่เกิน 70 W
- รับแรงดันไฟฟ้าในช่วง 80 - 120 Vdc และให้แรงดันไฟฟ้าออกคงที่ 310 Vdc ค่าผิดพลาดไม่เกิน 5%
- แรงดันไฟฟ้าออกให้เกิดการกระเพื่อม(Ripple)ได้ไม่เกิน 5%
- วงจรมีพิกัดกระแสไม่เกิน 1.5 A



รูปที่ 3.9 แสดงบล็อกการทำงานของวงจรบูตส์คอนเวอร์เตอร์ (Boots Converter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2 การออกแบบวงจร



รูปที่ 3.10 วงจรทบทแรงดันไฟฟ้า

พิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไอโซน คือ 70 W แรงดันออกคงที่ที่ 310 V

$$\text{จากสมการ } P = \frac{V_o^2}{R}$$

$$R_L = \frac{V_o^2}{P} = \frac{(310)^2}{70} = 1.37k\Omega$$

ที่ด้านแรงดันออกคงที่ 310 V จ่ายกำลัง 70 W กระแสที่ไหลสู่โหลดหาได้จาก

$$I_{o,max} = \frac{P}{V_o} = \frac{70}{310} = 0.226A$$

จากขอบเขตการทำงานของวงจรสามารถรับแรงดันเข้าในช่วง 80-120 V<sub>dc</sub> จึงทำให้ค่า Duty ratio อยู่ในช่วง 0.75 - 0.6 สามารถหาค่าตัวเหนี่ยวนำน้อยที่สุดจะต้องใช้ได้จากสมการ

$$I_{oB} = \frac{T_s V_o}{2L} D(1-D)^2$$

$$L_{min} = \frac{T_s V_o}{2I_{oB}} D(1-D)^2 = \frac{(20 \times 10^{-6}) 310}{2(0.226)} \times 0.6 \times (1-0.6)^2$$

$$L_{min} = 1.273mH$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากขอบเขตของวงจรให้เกิด Ripple 5% สามารถคำนวณค่าตัวเก็บประจุน้อยสุดที่จะต้องใช้ได้จากสมการ

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{DT_s}{RC}$$

$$C_{\min} = \frac{DT_s}{R \cdot \frac{\Delta V_o}{V_o}} = \frac{0.6 \times 20 \times 10^{-6}}{1.37 \times 10^3 \times 0.05}$$

$$C_{\min} = 0.178 \mu F$$

### 3.4.3 กำหนดค่าของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จะใช้งานจริงในวงจร

ข้อมูลเบื้องต้นของวงจร

- 1.) วงจรรับแรงดันไฟฟ้าเข้าในช่วง 80-120 V<sub>dc</sub> และจ่ายแรงดันไฟฟ้าออกคงที่ 300 V<sub>dc</sub>
- 2.) วงจรสามารถส่งผ่านพลังงานได้ไม่เกิน 70 W
- 3.) วงจรให้แรงดันไฟฟ้าออกมีค่า Ripple ไม่เกิน 5%

จึงสามารถกำหนดค่าอุปกรณ์ที่ใช้งานจริง โดยอ้างอิงจากการคำนวณข้างต้นที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยพิจารณาค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเป็นหลัก โดยตัวเหนี่ยวนำจะมีผลต่อกระแสที่ไหลในวงจร และตัวเก็บประจุมีผลต่อการกระเพื่อมของสัญญาณแรงดันออก

ตัวเหนี่ยวนำภายในวงจรทบทแรงดันนั้น มีหน้าที่สำคัญในการเก็บพลังงานในช่วงที่สวิตช์นำกระแส และคายพลังงานให้วงจรเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส ฉะนั้นหากตัวเหนี่ยวนำมีค่ามากนั้นก็จะมีพลังงานได้มาก และถ้ามากกว่าค่าที่คำนวณได้ข้างต้นก็จะสามารถแน่ใจได้ว่าวงจรจะทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง แต่ในทางปฏิบัติแล้วการพันตัวเหนี่ยวนำให้มีค่ามากและสามารถเก็บพลังงานได้มากด้วยนั้น เป็นสิ่งที่ทำได้ยาก จึงพยายามให้ค่าใกล้เคียงค่าที่คำนวณได้ที่สุด แต่อาจมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อยอาจยอมรับได้ เพราะการที่ค่าตัวเหนี่ยวนำที่ใช้จริงต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้นั้น จะทำให้วงจรทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง ซึ่งจะมีผลให้กระแสที่ไหลเข้าวงจรผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าสูงสุด (Peak) ที่สูงมีผลต่อพิกัดกระแสของมอเตอร์ที่ใช้ แต่ในโครงการนี้ วงจรทบทแรงดันทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังไม่มากนักกระแสที่ไหลจึงต่ำ ทำให้ค่ากระแสสูงสุด (Peak) ที่จะเกิดขึ้นมีค่าไม่มากนัก ดังจะเห็นได้จากผลการจำลองการทำงานต่อไป

ตัวเก็บประจุ มีผลต่อการกระเพื่อม ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าออก ซึ่งขอบเขต

ของโครงการนี้กำหนดไว้ไม่เกิน 5% หรืออาจน้อยกว่า ซึ่งถ้าค่าของตัวเก็บประจุยิ่งมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณแรงดันที่ออกมาาก็จะยิ่งมีการกระเพื่อมน้อย จึงควรเลือกค่าตัวเก็บประจุสูงๆ โดยกำหนดให้

$$f_s = 50 \text{ kHz}$$

$$T_s = 20 \mu\text{s}$$

$$L = 0.95 \text{ mH}$$

$$C = 220 \mu\text{F}$$

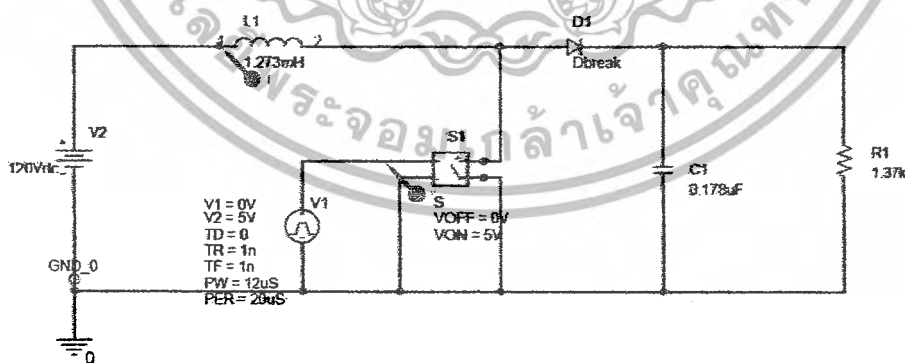
### 3.4.4 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ทำการทดสอบการทำงานของวงจรบัพระดับแรงดันไฟฟ้า ที่ออกแบบและกำหนดค่าอุปกรณ์ โดยการอ้างอิงจากการคำนวณ แล้วทำการจำลองและวิเคราะห์การทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSpice

#### 1). ผลการจำลองโดยใช้พารามิเตอร์จากการคำนวณจริง

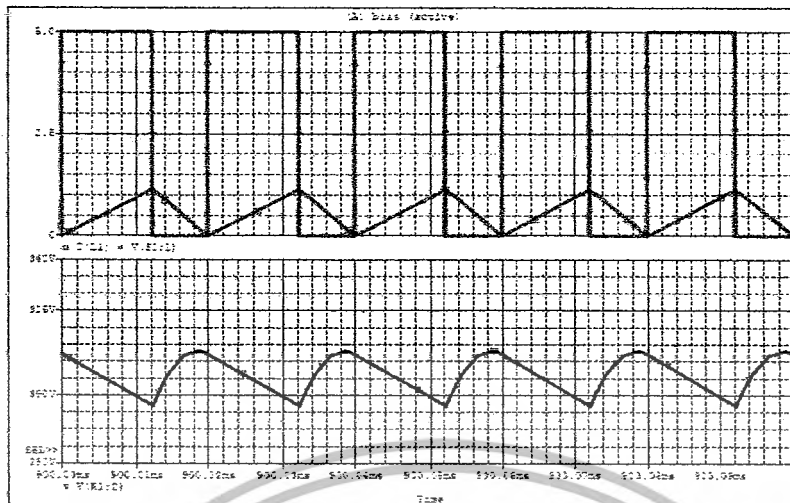
จากการคำนวณเราสามารถนำค่าของอุปกรณ์ต่างๆ มาทำการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อเป็นการยืนยันผลการคำนวณ ได้ดังต่อไปนี้

ให้วงจรทำงานที่ความถี่ 50 kHz จากการคำนวณที่ Duty ratio ที่ 0.60 แรงดันไฟฟ้าเข้า 120 V ซึ่งการทำงานของวงจรจะเป็นแบบโหมดกระแสต่อเนื่อง และเป็นจุดต่ำสุดในโหมดกระแสต่อเนื่องด้วย อันจะเห็นได้จากรูปที่ 3.13 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะไม่มีค่าเป็นศูนย์ในช่วงสิ้นสุดของคาบ และจากรูปที่ 3.13 ด้านล่างจะเห็นได้ว่า สัญญาณไฟฟ้าขาออกมีการกระเพื่อมไม่มากนักอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้



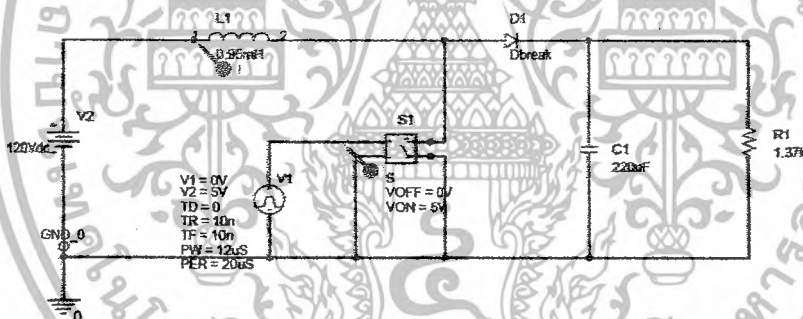
รูปที่ 3.11 วงจรบัพแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 แสดงผลการรูปคลื่นสัญญาณควบคุมเปรียบเทียบกับกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำและสัญญาณแรงดันขาออก

### 3.4.5 ผลการจำลองโดยใช้พารามิเตอร์ที่กำหนดขึ้นโดยอ้างอิงจากการคำนวณ



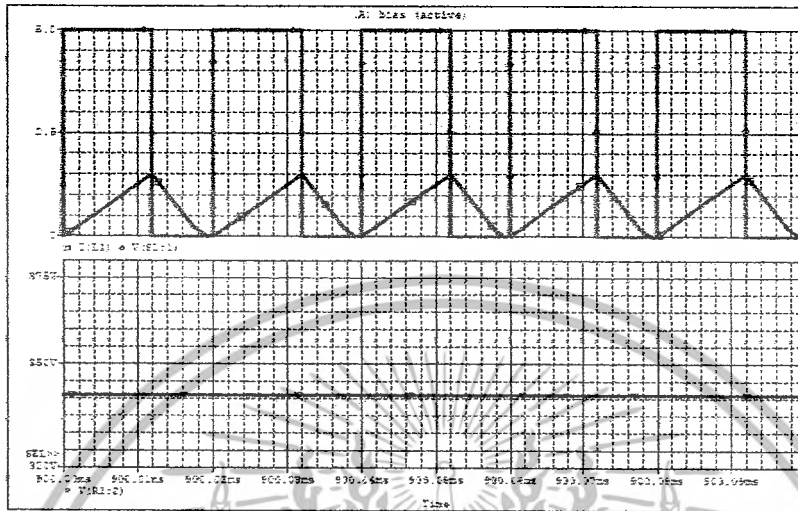
รูปที่ 3.13 วงจรทบทแรงดันที่กำหนดค่าอุปกรณ์เอง

จากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ต่างๆ โดยการอ้างอิงจากการคำนวณ เราสามารถจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อเป็นการวิเคราะห์ผลการทำงาน ที่ได้จากการกำหนดค่าขึ้นเอง โดยอ้างอิงจากการคำนวณ ได้ดังต่อไปนี้

ในวงจรใหม่นี้มีค่าความเหนี่ยวนำ  $0.95 \text{ mH}$  และค่าตัวเก็บประจุ  $220 \text{ uF}$  ทำงานที่ความถี่  $50 \text{ kHz}$  ซึ่งการที่ค่าตัวเหนี่ยวนำต่ำกว่าที่คำนวณได้ ย่อมจะทำให้วงจรทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องในบางช่วงของแรงดัน ซึ่งจะเห็นได้จากรูปที่ 3.15 เมื่อวงจรทำงานที่ Duty ratio  $0.6$  จุดเดียวกับที่ใช้ในการคำนวณ จะทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีบางช่วงเป็นศูนย์ และเกิดกระแสสูงสุดที่  $2.0 \text{ A}$  แต่อยู่ในช่วงที่ไม่มากนัก และในรูปที่ 3.15 ด้านล่างจะเห็นว่าสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันออกมีความเรียบมาก ไม่มีการกระเพื่อม ทั้งนี้เนื่องจากการที่เราใช้ตัวเก็บประจุมากกว่าที่คำนวณได้ถึง 100 เท่า



รูปที่ 3.14 แสดงผลการรูปคลื่นสัญญาณควบคุมเปรียบเทียบกับกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ และสัญญาณแรงดันขาออกที่ Duty ratio 0.6

จากการที่เรากำหนดให้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ  $0.95 \text{ mH}$  นั้นจะทำให้วงจรมีขอบเขตการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องอยู่ที่ Duty ratio เท่ากับ  $0.681$  โดยคงที่แรงดันไฟฟ้าออก  $310 \text{ V}$  มีแรงดันไฟฟ้าเข้าเท่ากับ  $98.89 \text{ V}$  ดังรูปที่ 3.16 และแสดงได้จากการคำนวณ ดังต่อไปนี้

จากสมการ

$$I_{oB} = \frac{T_s V_o}{2L} D(1-D)^2$$

$$0.226 = \frac{(20 \times 10^{-6}) \cdot 310}{2(0.95 \times 10^{-3})} \times D \times (1-D)^2$$

$$D = 0.681$$

จากสมการ

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{1}{1-D}$$

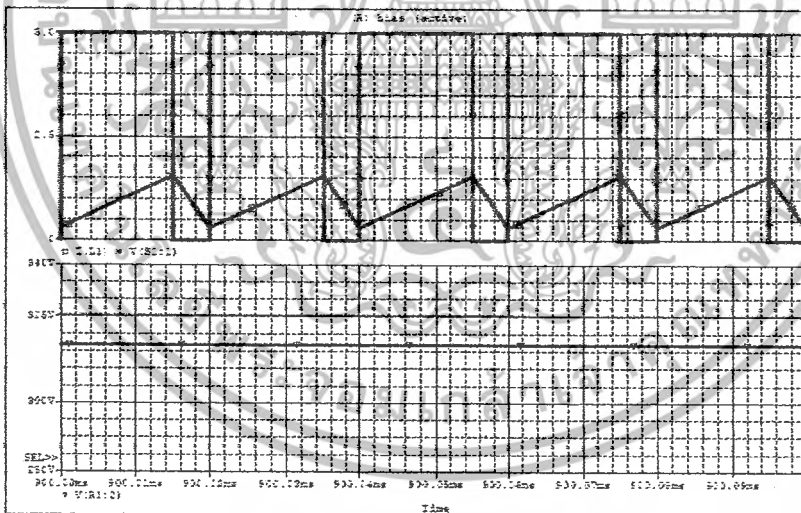
$$V_o = 310V \rightarrow V_d = 98.89V$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 แสดงผลการรูปคลื่นสัญญาณควบคุมเปรียบเทียบกับกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ และสัญญาณแรงดันขาออกที่ Duty ratio 0.68

ในรูปที่ 3.17 เราจะเห็นได้ว่า จากการที่ Duty ratio เพิ่มขึ้นนั้น จะทำให้ระบบกลับมาทำงานในโหมดต่อเนื่องได้อีกครั้ง ทั้งนี้เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำมีเวลาเก็บสะสมพลังงานมาก และช่วงที่คายพลังงานสั้น



รูปที่ 3.16 แสดงผลการรูปคลื่นสัญญาณควบคุมเปรียบเทียบกับกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ และสัญญาณแรงดันขาออกที่ Duty ratio 0.75

### 3.4.6. วงจรที่ใช้งานจริง

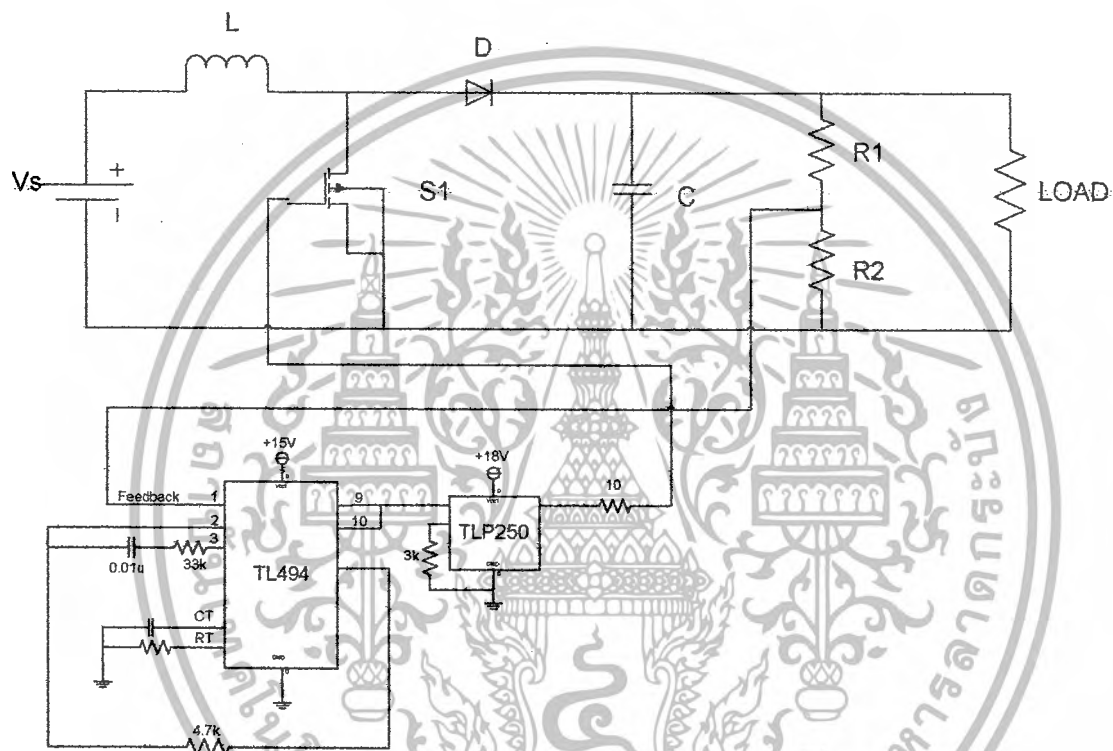
เมื่อเราทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ และออกแบบวงจรที่ใช้งาน

จริงได้แล้ว จึงทำการเลือกอุปกรณ์ที่จะใช้ในวงจร ซึ่งอ้างอิงผลการทำงานจากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้ในการเลือกพิกัดของอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งมีรายการดังต่อไปนี้  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

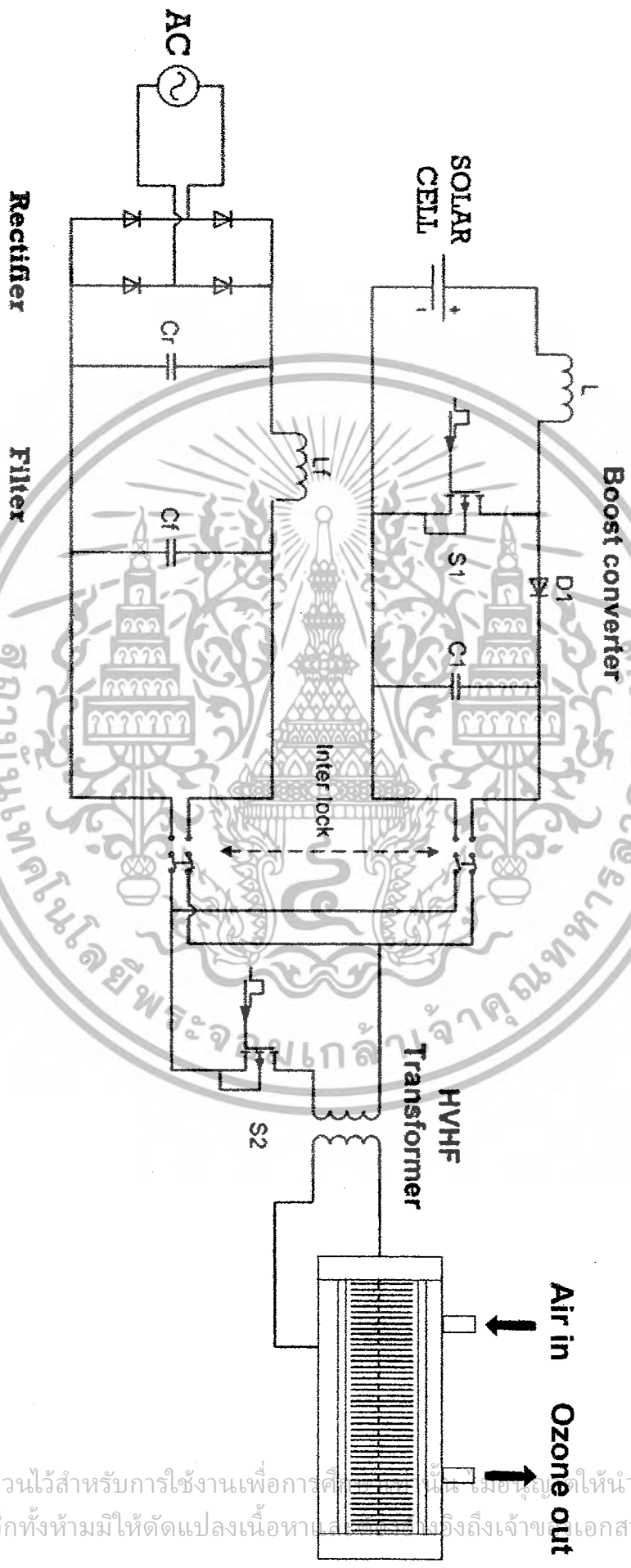
## รายการอุปกรณ์

- MOSFET                      IRF730
- Switch mode                TL494
- Photo Isolate                TLP250
- Fast Recovery Diode        MUR160
- Capacitor                    220 uF,400v
- Inductor                      0.95 mH



รูปที่ 3.17 วงจรทบทแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 วงจรการทำงานของเครื่องกำเนิดโอโซนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

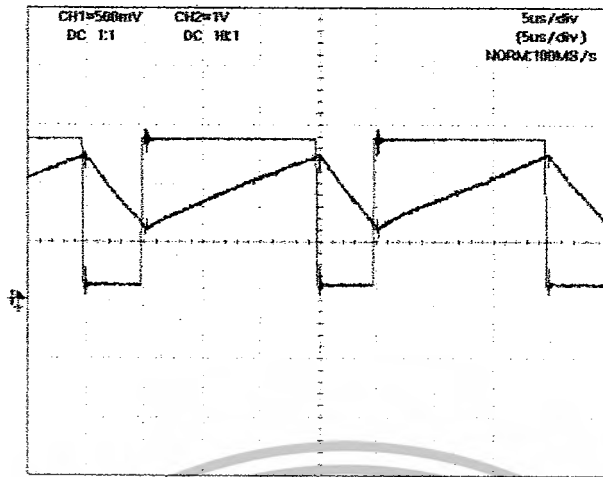
#### 4.1 วงจรทบทแรงดันไฟฟ้า

วงจรทบทแรงดันไฟฟ้า นอกจากจะมีหน้าที่ในการยกระดับแรงไฟฟ้ากระแสตรงแล้ว ยังต้องคำนึงถึงการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าด้วย ซึ่งนอกจากระดับแรงดันเข้า - ออกแล้ว การส่งผ่านพลังงานไฟฟ้ายังมีต่อพิกัดของอุปกรณ์ต่างๆ เป็นอย่างมากด้วย ในการทดลอง โดยให้วงจรทำงานที่พิกัดจริง จ่ายโหลดความต้านทาน 1,300 โอห์ม ที่พิกัดแรงดันออก 310 V<sub>dc</sub> คงที่ โดยเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าเข้าในช่วง 80 – 130 V<sub>dc</sub> แล้วทำการบันทึกสัญญาณกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ ภายในวงจรทบทแรงดัน

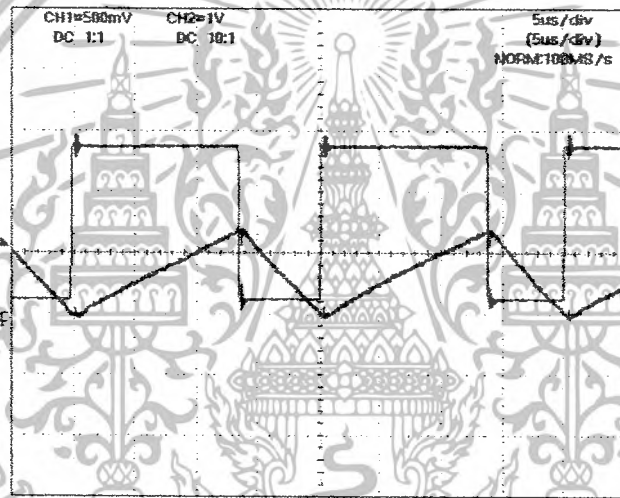
ซึ่งวงจรจะทำงานทั้งในโหมดกระแสต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง โดยขอบเขตของการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง ค่า Duty ratio จะต้องไม่น้อยกว่า 0.68 ตามที่ได้กล่าวแล้ว ในบทการออกแบบวงจร ซึ่งผลการทดลองเป็น ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองวงจรทบทแรงดัน

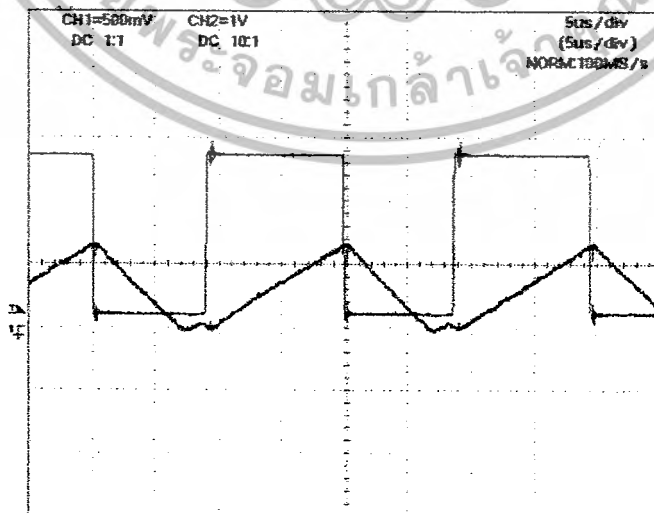
แรงดันไฟฟ้า ออก(V)	Duty Ratio (D)	แรงดันไฟฟ้าเข้า จาก การคำนวณ (V)	แรงดันไฟฟ้าเข้า จริง(V)	Mode
310	0.75	77.5	80.0	Continuous
	0.70	93.0	95.2	Continuous
	0.65	104.9	108.5	Discontinuous
	0.60	111.7	114.3	Discontinuous
	0.55	119.5	124.6	Discontinuous
	0.50	128.3	131.1	Discontinuous



รูปที่ 4.1 สัญญาณจับเกตเปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ ( $D = 0.75$ )



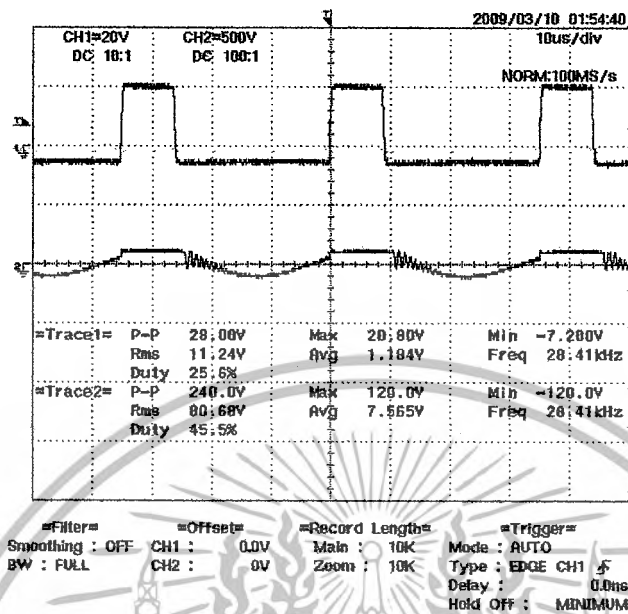
รูปที่ 4.2 สัญญาณจับเกตเปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ ( $D = 0.68$ )



รูปที่ 4.3 สัญญาณจับเกตเปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ ( $D = 0.55$ )

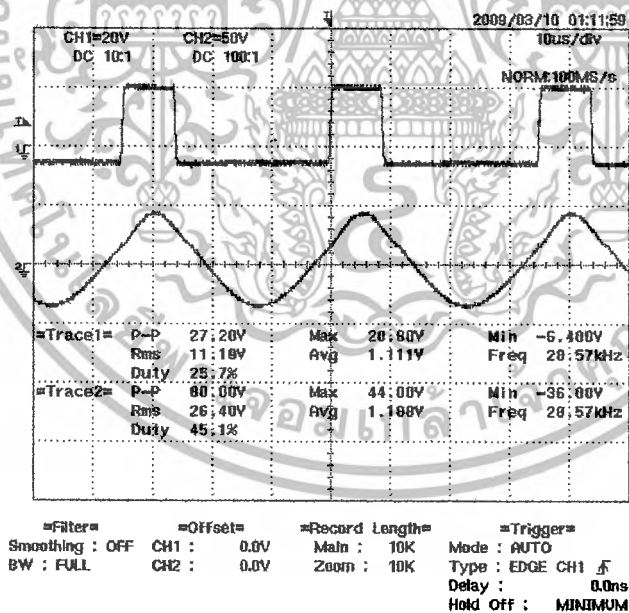
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลทดสอบแหล่งจ่ายแรงดันสูงความถี่สูง



รูปที่ 4.4 แสดงรูปคลื่นแรงดันด้านเข้าหม้อแปลงแรงดันสูงเทียบกับสัญญาณซิงเกท

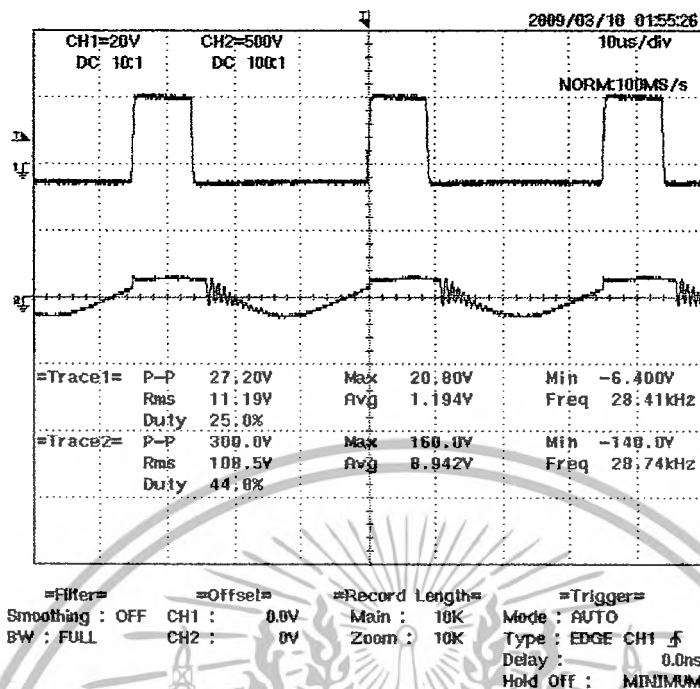
$$(V_{\text{OUTPUT}} = 4 \text{ kV})$$



รูปที่ 4.5 แสดงรูปคลื่นแรงดันด้านออกจากหม้อแปลงแรงดันสูงเทียบกับสัญญาณซิงเกท

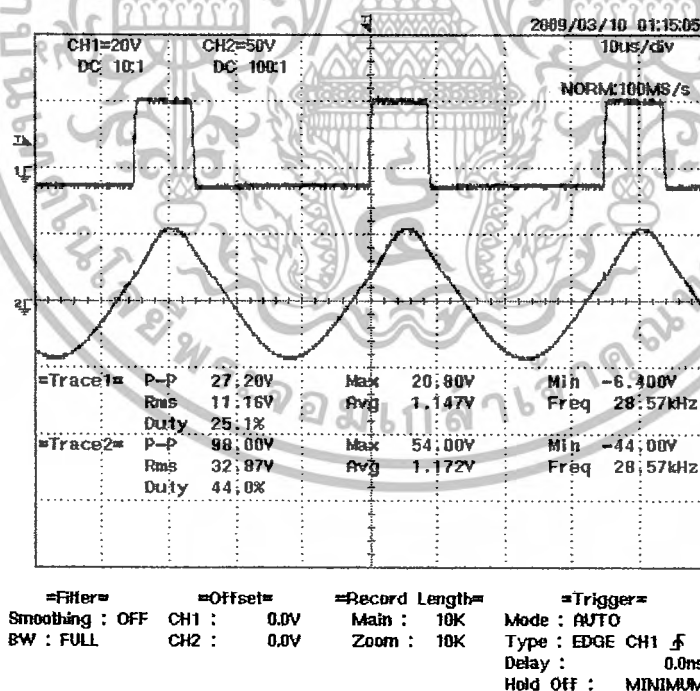
$$(V_{\text{OUTPUT}} = 4 \text{ kV})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงรูปคลื่นแรงดันต้านเข้าห้อมัลแปลงแรงดันสูงเทียบกับสัญญาณซิงเกท

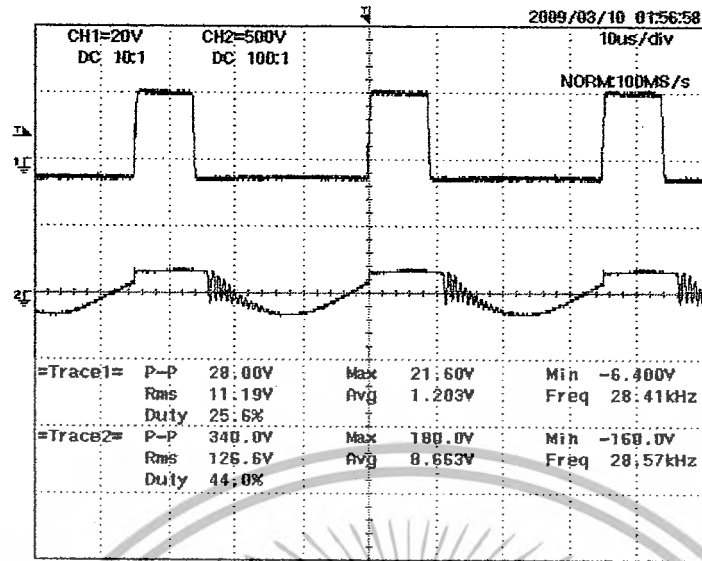
( $V_{\text{OUTPUT}} = 5 \text{ kV}$ )



รูปที่ 4.7 แสดงรูปคลื่นแรงดันต้านออกจากห้อมัลแปลงแรงดันสูงเทียบกับสัญญาณซิงเกท

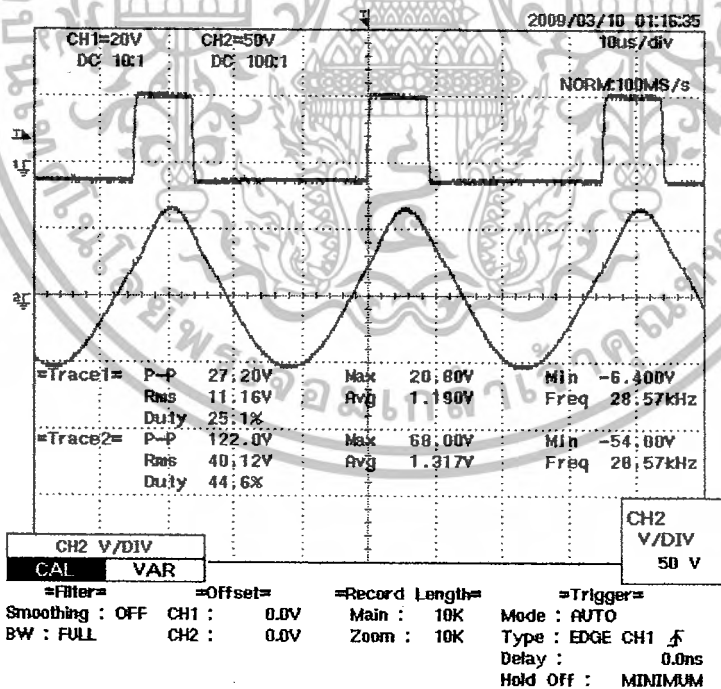
( $V_{\text{OUTPUT}} = 5 \text{ kV}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



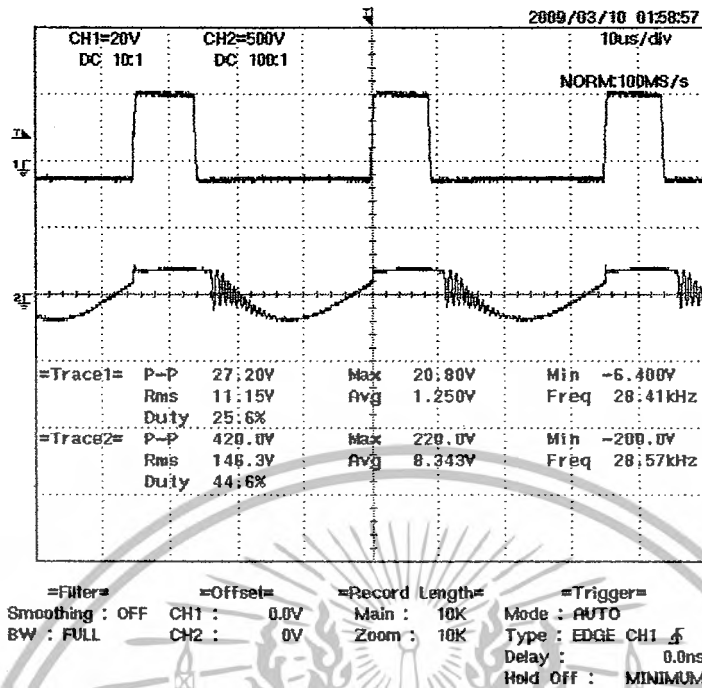
=Filter= Smoothing : OFF BW : FULL  
 =Offset= CH1 : 0.0V CH2 : 0V  
 =Record Length= Main : 10K Zoom : 10K  
 =Trigger= Mode : AUTO Type : EDGE CH1  Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

รูปที่ 4.8 แสดงรูปคลื่นแรงดันด้านเข้าหม้อแปลงแรงดันสูงเทียบกับสัญญาณขับเกท ( $V_{\text{OUTPUT}} = 6 \text{ kV}$ )

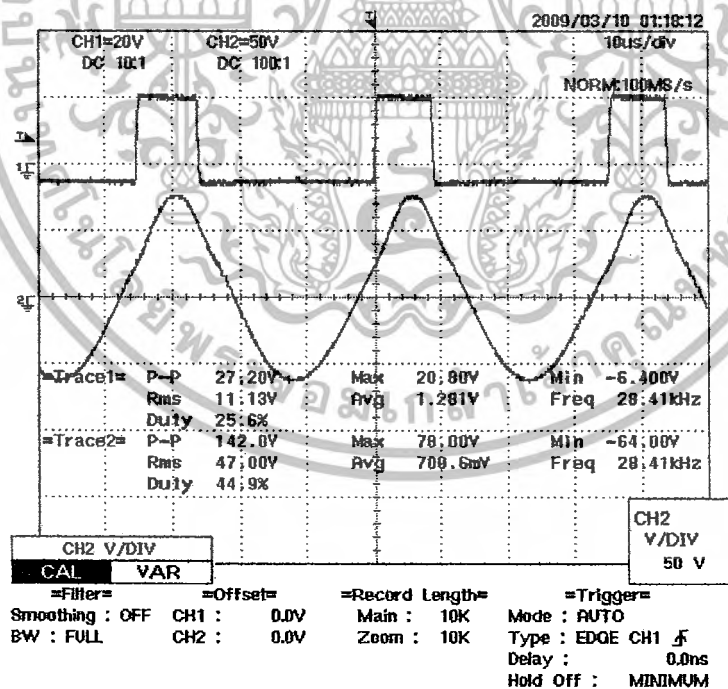


รูปที่ 4.9 แสดงรูปคลื่นแรงดันด้านออกจากหม้อแปลงแรงดันสูงเทียบกับสัญญาณขับเกท ( $V_{\text{OUTPUT}} = 6 \text{ kV}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

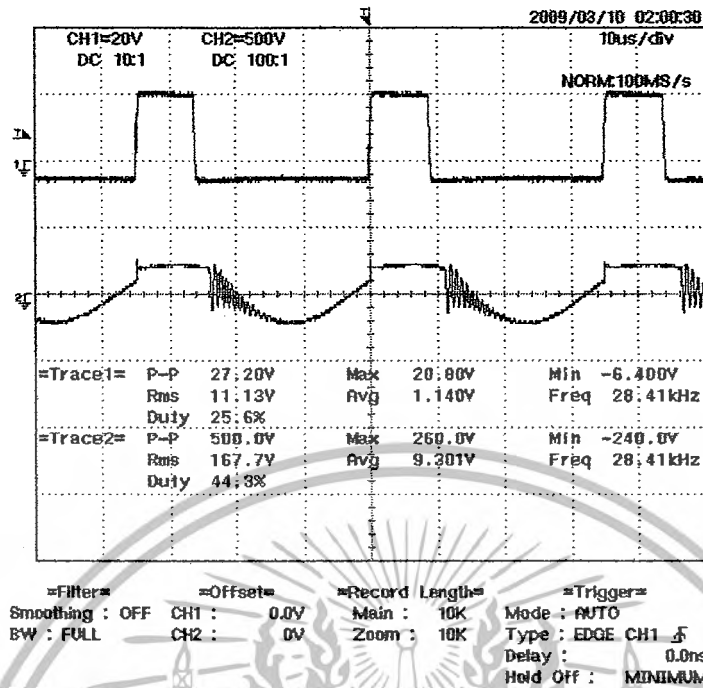


รูปที่ 4.10 แสดงรูปคลื่นแรงดันด้านเข้าหม้อแปลงแรงดันสูงเทียบกับสัญญาณชั้บเกท ( $V_{\text{OUTPUT}} = 7 \text{ kV}$ )



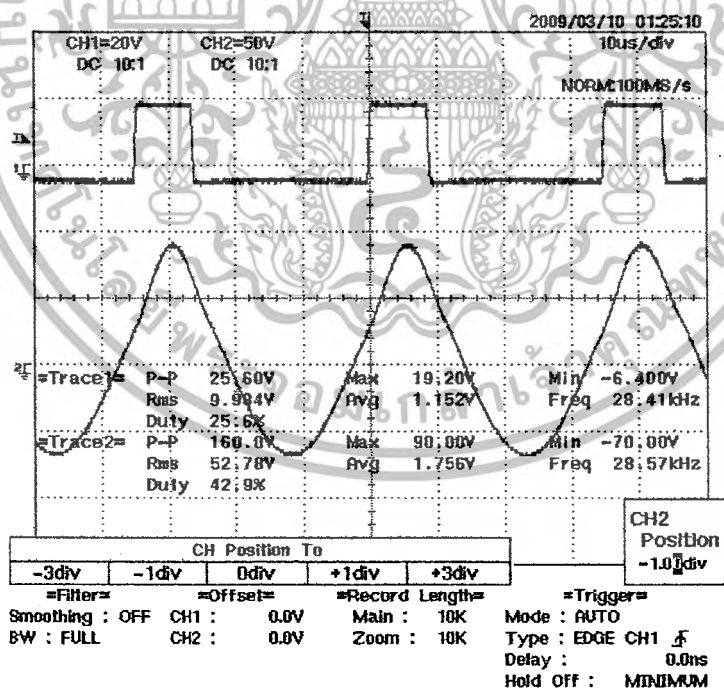
รูปที่ 4.11 แสดงรูปคลื่นแรงดันด้านออกจากหม้อแปลงแรงดันสูงเทียบกับสัญญาณชั้บเกท ( $V_{\text{OUTPUT}} = 7 \text{ kV}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดงรูปคลื่นแรงดันด้านเข้าหม้อแปลงแรงดันสูงเทียบกับสัญญาณขับเกท

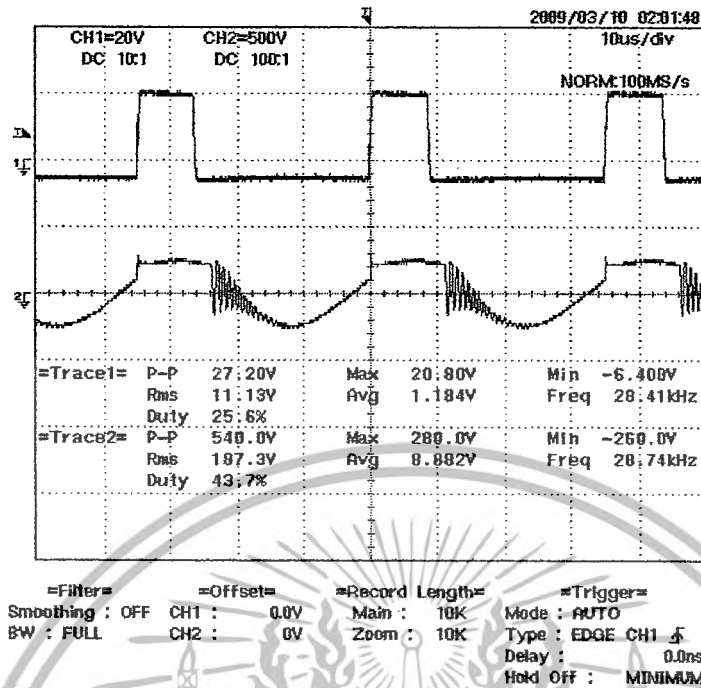
( $V_{\text{OUTPUT}} = 8 \text{ kV}$ )



รูปที่ 4.13 แสดงรูปคลื่นแรงดันด้านออกจากหม้อแปลงแรงดันสูงเทียบกับสัญญาณขับเกท

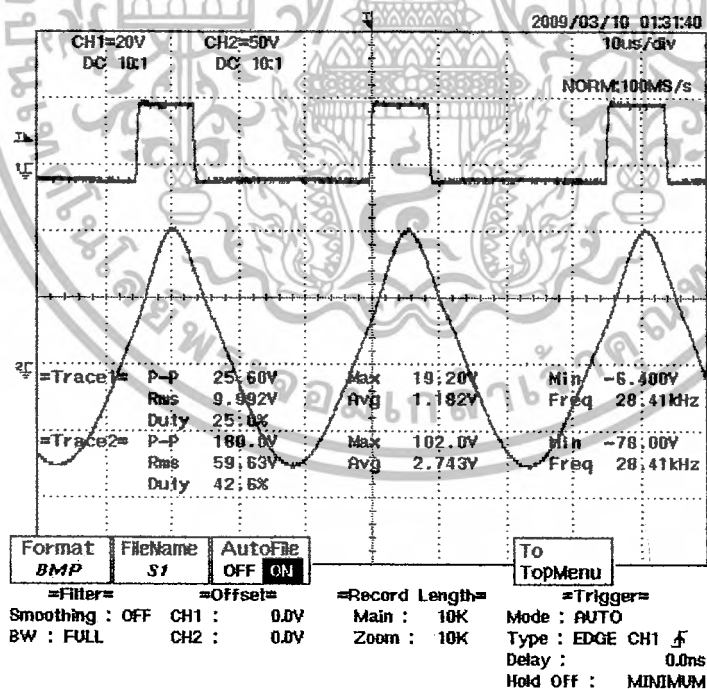
( $V_{\text{OUTPUT}} = 8 \text{ kV}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แสดงรูปคลื่นแรงดันด้านขาหม้อแปลงแรงดันสูงเทียบกับสัญญาณขั้วเกท

( $V_{\text{OUTPUT}} = 9 \text{ kV}$ )



รูปที่ 4.15 แสดงรูปคลื่นแรงดันด้านออกจากหม้อแปลงแรงดันสูงเทียบกับสัญญาณขั้วเกท

( $V_{\text{OUTPUT}} = 9 \text{ kV}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ทำการวัดปริมาณไอโซน

การตรวจวัดปริมาณไอโซนสามารถทำได้หลายวิธี เช่นวิธีอัลตราไวโอแลตสเปกโตรเมทรีหรือการใช้เทคนิคทางอิเล็กโตรเคมี โดยในโครงการนี้จะใช้วิธีการทางเคมีซึ่งเรียกว่าวิธีไดโอดิเมทริก (Iodometric methods) โดยมีหลักการคือ ใช้สารละลายที่มีความจำเพาะต่อการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซไอโซนสูง เช่น สารละลายโพแตสเซียมไอโอไดด์ (KI) ทำให้ได้สารใหม่เกิดขึ้น จากนั้นสามารถหาปริมาณไอโซนได้โดยกานาไตเตรตกับสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ เช่น โซเดียมไทโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) หรือฟีนิลาซินออกไซด์ เป็นต้น

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปริมาณไอโซน

#### 1. สารเคมี

- 1.1 สารละลายโพแตสเซียมไอโอไดด์เข้มข้น 2 % โดยน้ำหนัก โดยละลายโพแตสเซียมไอโอไดด์ จำนวน 20 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วเติมจนได้ปริมาตร 1 ลิตร เขย่าให้เข้ากันแล้วเก็บในขวดสีชา 1 คืนก่อนนำมาใช้
- 1.2 สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 1 นอร์มอล
- 1.3 สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตเข้มข้น 0.10 นอร์มอล โดยละลาย  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  จำนวน 25 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วเติมน้ำจนได้ปริมาตร 1 ลิตร เขย่าให้เข้ากัน
- 1.4 น้ำเบ็งเข้มข้น 1 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก โดยละลายเบ็ง 1 กรัมในน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน

#### 2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 2.1 ขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร 6 ใบ
- 2.2 กระจกตวง ขนาด 100 มิลลิลิตร 1 ใบ
- 2.3 บีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร 1 ใบ
- 2.4 ปิเปตขนาด 10 มิลลิลิตร 1 อัน
- 2.5 บิวเรตขนาด 50 มิลลิลิตร 1 อัน
- 2.6 ขวดวัดปริมาตร ขนาด 1 ลิตร 2 อัน
- 2.7 ขวดวัดปริมาตร ขนาด 250 มิลลิลิตร 1 อัน
- 2.8 นาฬิกาจับเวลา 1 อัน

#### ขั้นตอนการวิเคราะห์หาปริมาณไอโซน

1. ดูดซึมก๊าซไอโซน (Absorption) โดยผ่านก๊าซจากชุดทดลองลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตรที่มีสารละลายโพแตสเซียมไดโอดิเดต บรรจุอยู่ 100 มิลลิลิตร

2. ทำการไตเตรต (Titration) โดยนำสารละลายโพแตสเซียมไดโอดิเดต ที่ได้จากข้อ 1 (สารละลายที่ได้จะมีสีเหลืองหรือสีส้ม) เติมสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 1 นอร์มอล ปริมาตร 3 มิลลิลิตร เพื่อปรับค่า pH จากนั้นนำไปไตเตรตกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล จนสีเหลืองค่อย ๆ จางหายไป(แสดงว่าใกล้ถึงจุดยุติแล้ว) เติมน้ำแบ่ง 1 มิลลิลิตร(เป็นอินดิเคเตอร์) สารละลายจะกลายเป็นสีน้ำเงินแต่จะสังเกตเห็นข้างยากมาก ทำการไตเตรตต่อจนสีน้ำเงินค่อยจางหายไป บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณไอโชนต่อไป

หมายเหตุ กรณีที่ใช้อากาศผ่านกระบวนการแทนออกซิเจน ควรมีการทำ Blank test เพื่อหาปริมาณไอโชนที่แท้จริงโดยการพ่นอากาศผ่านลงในสารละลายโพแตสเซียมไอโอไดด์ 100 มิลลิลิตร นำไปเติมกรด เติมน้ำแบ่ง และทำการไตเตรตหาปริมาณไอโชนที่มีอยู่ในอากาศ

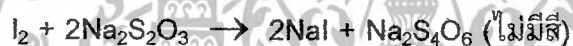
การคำนวณหาปริมาณไอโชนที่เกิดขึ้น

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น

1. การดูดซึมไอโชนโดยใช้สารละลายโพแตสเซียมไอโอไดด์



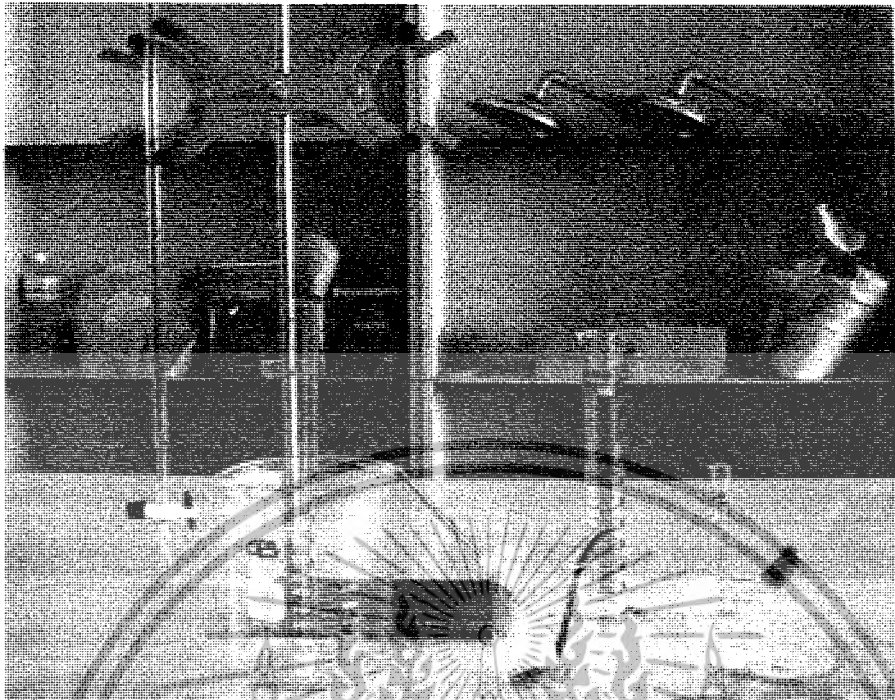
2. การไตเตรตโดยใช้สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล



จากสมการข้างต้นสามารถคำนวณหาปริมาณไอโชนได้จากความสัมพันธ์

ปริมาณไอโชน(มิลลิกรัม) = 24 \* ปริมาตรของโซเดียมไทโอซัลเฟต (มิลลิลิตร)

ตัวอย่างการคำนวณ เช่นกรณีที่ใช้โซเดียมไทโอซัลเฟตในการไตเตรตปริมาตร 0.05 มิลลิลิตร เวลาที่ใช้ในการพ่นไอโชนลงในสารละลายโพแตสเซียมไอโอไดด์เป็น 5 นาที คือ ปริมาณก๊าซไอโชนที่ได้ =  $24 \times 0.05 \times 60 / 5 = 14.4 \text{ mg/hr}$  เป็นต้น



รูปที่ 4.16 แสดงอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดปริมาณไฮโดรเจนด้วยวิธีไอโอโดเมตริก



รูปที่ 4.17 แสดงสารเคมีสำหรับตรวจวัดปริมาณไฮโดรเจนด้วยวิธีไอโอโดเมตริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณ เช่นกรณีที่ใช้โซเดียมไทโอซัลเฟตในการไตเตรตปริมาตร 0.05 มิลลิลิตร เวลาที่ใช้ในการฟั่นไอโชนลงในสารละลายโพแตสเซียมไอโอไดด์เป็น 5 นาที คือปริมาณก๊าซไอโชนที่ได้ =  $24 \times 0.05 \times 60 / 5 = 14.4 \text{ mg/hr}$  เป็นต้น



**รูปที่ 4.18** แสดงสีของสารละลายโพแตสเซียมไอโอไดด์ ก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับไอโชน  
 NO.1 สารละลาย KI ก่อนทำปฏิกิริยากับ ไอโชน  
 NO.2 สารละลาย KI หลังทำปฏิกิริยากับ ไอโชน

ทำการวิเคราะห์หาปริมาณไอโชนที่ค่าพิกัดแรงดันเอาท์พุทต่างๆ โดยกำหนดให้ความถี่มีค่าคงที่ที่ 30 kHz ดิวตี้ไซเคิล 20% ซึ่งได้ปริมาณไอโชนดังแสดงในตาราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.2** แสดงปริมาณโอโซนที่เกิดขึ้นที่ค่าแรงดันเออาร์ท์พุตต่างๆ อัตราการไหลของอากาศที่ออกจากชุดอิเล็กโตรดเท่ากับ 1 ลิตรต่อนาที

แรงดันเออาร์ท์พุต (kV)	เวลาที่พ่นโอโซน (นาที)	ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟต (mL)	ปริมาณโอโซน (mg/hr)	ปริมาณโอโซน (mg/w-h)
4.0	5	0.00	0.0	0.00
5.0	5	0.00	0.0	0.00
6.0	5	0.05	14.4	4.83
7.0	5	0.15	43.2	9.89
8.0	5	0.25	72.0	12.19
9.0	5	0.35	100.8	13.15

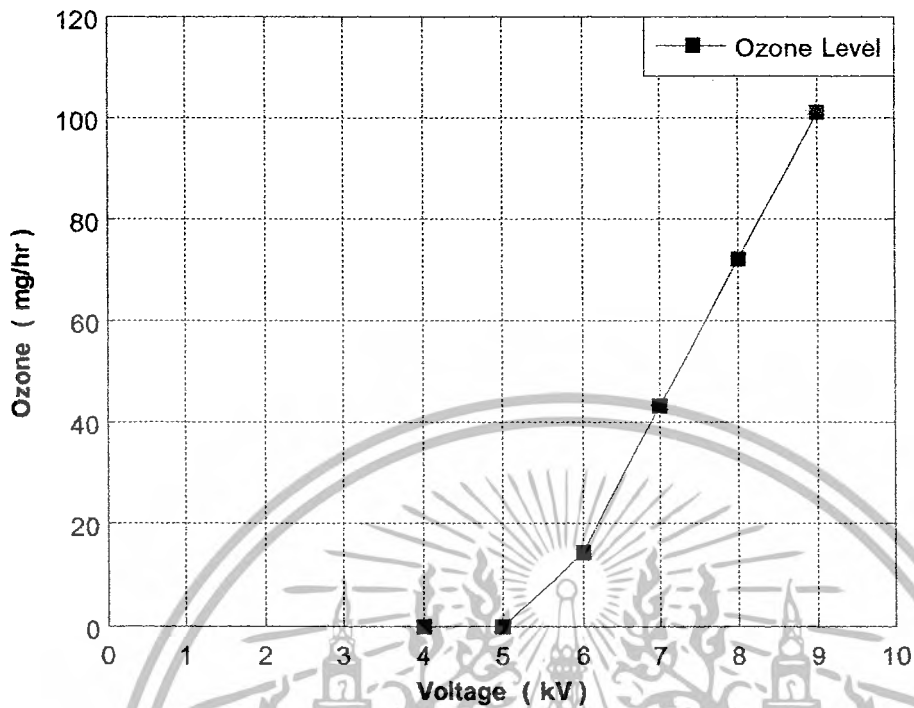
หมายเหตุ ในช่วงแรงดันเออาร์ท์พุต 4 kV และ 5 kV ปริมาณโอโซนน้อยเกินไป จึงไม่สามารถวัดด้วยการติเตรทได้

**ตารางที่ 4.3** แสดงผลการทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้าในการสร้างโอโซน

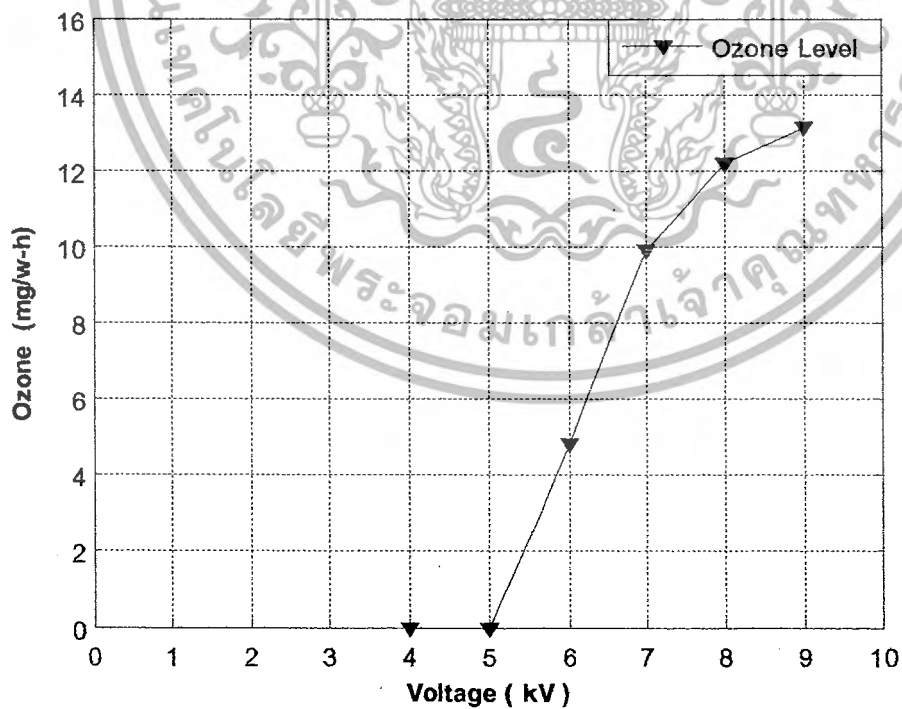
แรงดันอินพุท (V)	กระแสอินพุท (A)	กำลังไฟฟ้าอินพุท (W)	แรงดันเออาร์ท์พุต (kV)	ปริมาณโอโซน (mg/hr)	ปริมาณโอโซน (mg/w-h)
101.4	0.19	0.96	4.0	0.0	0.00
132.3	0.30	1.98	5.0	0.0	0.00
156.8	0.38	2.98	6.0	14.4	4.83
181.9	0.48	4.36	7.0	43.2	9.91
207.3	0.57	5.91	8.0	72.0	12.18
232.3	0.66	7.67	9.0	100.8	13.14

หมายเหตุ ในช่วงแรงดันเออาร์ท์พุต 4 kV และ 5 kV ปริมาณโอโซนน้อยเกินไป จึงไม่สามารถวัดด้วยการติเตรทได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

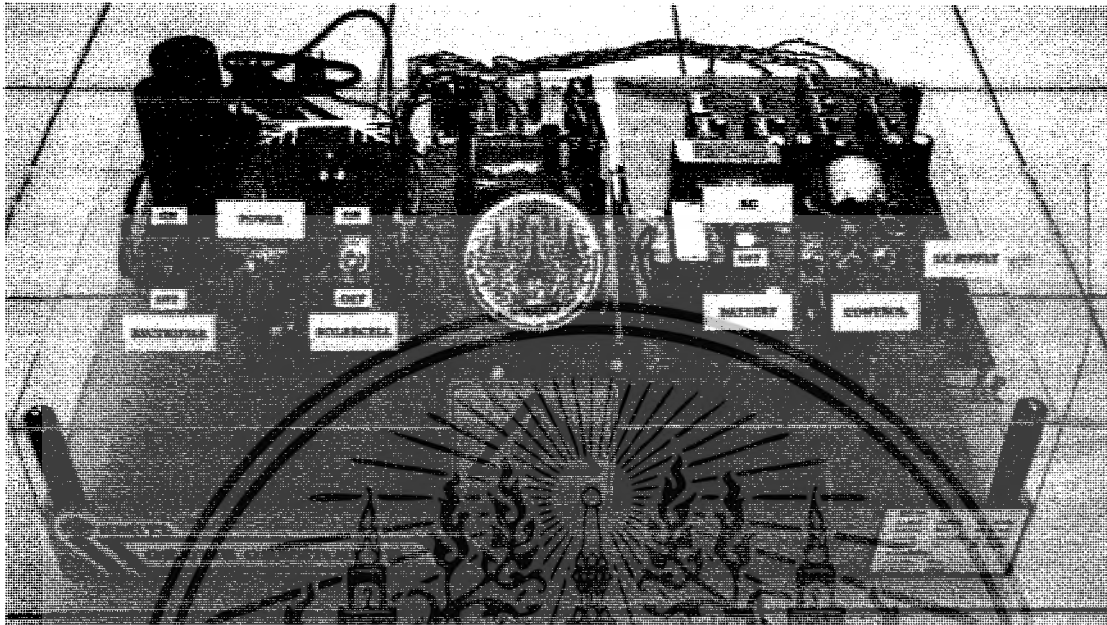


รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุต (kV) กับปริมาณโอโซน (mg/hr)



รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุต (kV) กับปริมาณโอโซน (mg/w-h)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 แสดงส่วนประกอบทั้งหมดของเครื่องผลิตไอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

1. จากการศึกษาที่ได้เอาทฤษฎีไฟฟ้าแรงสูง มาใช้ในการออกแบบชุดอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดิวเซอร์ สามารถทำให้ผลิตก๊าซไอโซนขึ้นมาได้ ซึ่งออกแบบลักษณะของชุดอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดิวเซอร์เป็นแบบทรงกระบอกซ้อนกันรวมมีฉนวน 2 ชั้น ซึ่งจะให้ความเครียดสนามไฟฟ้าได้สูง ทำให้ก๊าซไอโซนออกมา
2. ชุดสร้างความถี่สูงคือ สวิตช์กำลังหนึ่งตัวที่ทำการสวิตช์ด้วยความถี่ 30 kHz
3. ในส่วนของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงนี้ จะออกแบบให้ทำงานที่พิกัด 6-9 กิโลโวลต์ และสามารถทำงานที่ความถี่พิกัด 30 kHz
4. วงจรทบทแรงดันสามารถทบทแรงดันได้ 2 เท่า ซึ่งสามารถทบทแรงดันที่รับจากโซลาร์เซลล์ได้เป็น 300 โวลต์

#### 5.2 ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ

1. ชุดอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องด้วยจากการออกแบบได้คำนวณระยะแคบอากาศไว้มากเกินไป ซึ่งเมื่อทดลองจ่ายแรงดันในช่วง 4-5 KV แล้วทำให้เกิดโคโรนามีน้อยเกินไป ทำให้ได้ปริมาณไอโซนที่ได้มีน้อยซึ่งทำให้ไม่สามารถวัดปริมาณด้วยการดีเทรทได้ จึงจำเป็นต้องมีการเพิ่มแรงดันให้อยู่ในช่วง 6-9 KV จึงจะทำให้ปริมาณไอโซนที่ออกมาสามารถวัดปริมาณด้วยการดีเทรทได้
2. อัตราการไหลของอากาศที่มีน้อย จึงจำเป็นต้องมีการเพิ่มปั๊มเพื่อที่จะทำให้อัตราการไหลของอากาศมีมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ได้ปริมาณไอโซนมากขึ้นด้วย
3. หม้อแปลงความถี่สูง แรงดันสูง จะมีปัญหาในเรื่องของความคงทนของฉนวน เพราะระดับแรงดันที่สูงนั้นจะทำให้สามารถเกิดการรั่วไหลมาที่แกนหม้อแปลงได้ และยังมีควมอันตรายถ้าไปสัมผัสกับสายไฟที่ต่อจากหม้อแปลงมายังอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดิวเซอร์เพราะมีระดับแรงดันที่สูงแล้ว ความคงทนต่อฉนวนของหม้อแปลงมีค่าต่ำ
4. สัญญาณขับเคลื่อนของสวิตช์มีปัญหาจากการมีสัญญาณรบกวน ทำให้เมื่อรับระดับแรงดันที่มีค่าสูง จะทำให้ตัวสวิตช์มีความเสียหาย ดังนั้นจึงทำการลดสัญญาณรบกวนโดยการใส่ตัวเก็บประจุชนิด Metalized Polyester Film และนอกจากนี้ยังลดความยาวสายไฟที่ต่อไฟเลี้ยงให้กับวงจรขับเคลื่อนของสวิตช์รวมทั้งทำการป้องกันคลื่นสนามแม่เหล็กที่เกิดจากตัวเหนี่ยวนำด้วย
5. ปัญหาที่เกิดจากการรั่วไหลของหม้อแปลงความถี่สูง ทำให้มีสปาร์กเกิดขึ้นที่แรงดันคร่อมเตอรัน ซอร์สของตัวสวิตช์ ในการแก้ปัญหาจะต้องมีการปรับดีไซเคิลและความถี่ในการสวิตช์ให้เหมาะสม ซึ่งจะช่วยลดขนาดของสปาร์กให้ลดน้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 แนวทางในการพัฒนา

ในการพัฒนาเครื่องกำเนิดไอโซนโดยใช้โซลาร์เซลล์ จะมุ่งเน้นให้สามารถใช้งานได้ในพื้นที่ที่ไม่มีไฟจากการไฟฟ้า ซึ่งตัวเครื่องสามารถรับไฟจากแผงโซลาร์เซลล์ เพื่อใช้ในการผลิตไอโซน แต่ตัวเครื่องจำเป็นต้องมีไฟเลี้ยงให้กับวงจรควบคุมในส่วนต่างๆ ซึ่งในสภาวะที่รับไฟจากแผงโซลาร์เซลล์ จำเป็นต้องมีแบตเตอรี่จ่ายไฟให้กับวงจรควบคุม ซึ่งในการดำเนินการในการออกแบบสร้างตัวเครื่อง เราได้สร้างวงจรสวิตซ์ซึ่งเพาเวอร์ซัพพลายที่สามารถรับไฟได้ทั้งจากไฟการไฟฟ้าและจากแบตเตอรี่ ซึ่งในส่วนที่รับไฟจากแบตเตอรี่นั้นยังมีปัญหา คือแรงดันขาออกมีค่าไม่ตรงตามที่ต้องการ และ ไม่มีความเสถียร เพราะฉะนั้นในการวางแผนทางในการพัฒนาต่อไป จะต้องออกแบบสร้างวงจรสวิตซ์ซึ่งเพาเวอร์ซัพพลายที่สามารถเลือกรับไฟได้ทั้งไฟจากการไฟฟ้าและแบตเตอรี่ เพื่อที่จะทำให้เครื่องสามารถมีไฟเลี้ยงวงจรควบคุมได้ทั้ง 2 สภาวะ ซึ่งจะทำให้เครื่องมีความสมบูรณ์ พร้อมใช้งานได้ทุกสถานที่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] นายกฤษพล สรวายสุวรรณ และคณะ, “เครื่องกำเนิดไอโซนโดยใช้แรงดันสูงความถี่สูง,” **ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.
- [2] นายโกวิท พันธุ์บัว และคณะ, “เครื่องกำเนิดไอโซน,” **ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมวัดคุม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545.
- [3] นายชัยวัฒน์ เถระกุล, “การออกแบบเพื่อลดสัญญาณรบกวนทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพรายแบบฟลายแบค,” **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมวัดคุม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548.
- [4] นายหิรัญ ดวงอุไร และคณะ, “ชุดสร้างโครานาสำหรับเครื่องกำเนิดไอโซน,” **ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543.
- [5] นางสาวพรพิมล รัตนวิเชียร, “เครื่องผลิตก๊าซไอโซนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์,” **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543.
- [6] นายศุภชัย หอวิมานพร, “การศึกษาเปรียบเทียบวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ในโหมดการนำกระแสแบบต่อเนื่องและแบบไม่ต่อเนื่อง,” **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ใบรับรองผลการทดลอง

วันที่ทำการทดลอง 20 กุมภาพันธ์ 2552

- ผู้ทำการทดลอง
- 1) นายณัฐวุฒิ ลิ้มปวีโรจน์
  - 2) นายครุณภพ โคนาม
  - 3) นายสฤณภูมิ เชื้อวชาญกิจการ
  - 4) นายสาริษฐ์ โสภา

แรงดันไฟฟ้า (KV)	เวลาที่ปล่อยก๊าซไอโซน (นาทีก)	ปริมาณโปรตัสเซียมไอโอไดด์ (KI) (มิลลิกรัม)	ปริมาณโซเดียมไทโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) (มิลลิกรัม)
4	5	100	0.00
5	5	100	0.00
6	5	100	0.05
7	5	100	0.15
8	5	100	0.25
9	5	100	0.35

.....  
.....

(นายพินโย แสงสุวรรณ)

เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทางเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข  
ข้อมูลอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบ  
เครื่องผลิตก๊าซโอโซนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# TL494, NCV494

## SWITCHMODE™ Pulse Width Modulation Control Circuit

The TL494 is a fixed frequency, pulse width modulation control circuit designed primarily for SWITCHMODE power supply control.

### Features

- Complete Pulse Width Modulation Control Circuitry
- On-Chip Oscillator with Master or Slave Operation
- On-Chip Error Amplifiers
- On-Chip 5.0 V Reference
- Adjustable Deadtime Control
- Uncommitted Output Transistors Rated to 500 mA Source or Sink
- Output Control for Push-Pull or Single-Ended Operation
- Undervoltage Lockout
- NCV Prefix for Automotive and Other Applications Requiring Site and Control Changes
- Pb-Free Packages are Available\*

**MAXIMUM RATINGS** (Full operating ambient temperature range applies, unless otherwise noted.)

Rating	Symbol	Value	Unit
Power Supply Voltage	V <sub>CC</sub>	42	V
Collector Output Voltage	V <sub>C1</sub> , V <sub>C2</sub>	42	V
Collector Output Current (Each transistor) (Note 1)	I <sub>C1</sub> , I <sub>C2</sub>	500	mA
Amplifier Input Voltage Range	V <sub>IR</sub>	-0.3 to +42	V
Power Dissipation @ T <sub>A</sub> ≤ 45°C	P <sub>D</sub>	1000	mW
Thermal Resistance, Junction-to-Ambient	R <sub>θJA</sub>	80	°C/W
Operating Junction Temperature	T <sub>J</sub>	125	°C
Storage Temperature Range	T <sub>stg</sub>	-55 to +125	°C
Operating Ambient Temperature Range	T <sub>A</sub>	-40 to +125	°C
TL494B		0 to +70	
TL494C		-40 to +85	
TL494I		-40 to +125	
NCV494B		-40 to +125	
Derating Ambient Temperature	T <sub>A</sub>	45	°C

Maximum ratings are those values beyond which device damage can occur. Maximum ratings applied to the device are individual stress limit values (not normal operating conditions) and are not valid simultaneously. If these limits are exceeded, device functional operation is not implied, damage may occur and reliability may be affected.

1. Maximum thermal limits must be observed.



ON Semiconductor®

<http://onsemi.com>

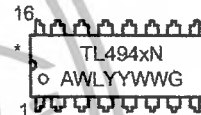
### MARKING DIAGRAMS



SOIC-16  
D SUFFIX  
CASE 751B



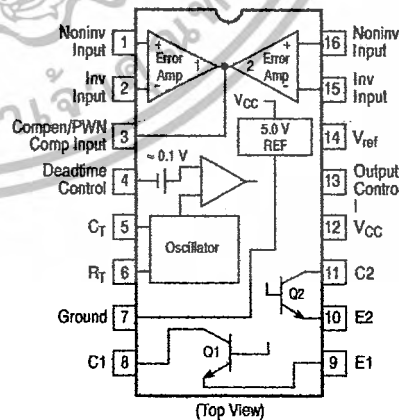
PDIP-16  
N SUFFIX  
CASE 648



x = B, C or I  
A = Assembly Location  
WL = Wafer Lot  
YY, Y = Year  
WW, W = Work Week  
G = Pb-Free Package

\*This marking diagram also applies to NCV494.

### PIN CONNECTIONS



### ORDERING INFORMATION

See detailed ordering and shipping information in the package dimensions section on page 4 of this data sheet.

\*For additional information on our Pb-Free strategy and soldering details, please download the ON Semiconductor Soldering and Mounting Techniques Reference Manual, SOLDERRM/D.

# TL494, NCV494

## RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Power Supply Voltage	$V_{CC}$	7.0	15	40	V
Collector Output Voltage	$V_{C1}, V_{C2}$	-	30	40	V
Collector Output Current (Each transistor)	$I_{C1}, I_{C2}$	-	-	200	mA
Amplified Input Voltage	$V_{in}$	-0.3	-	$V_{CC} - 2.0$	V
Current Into Feedback Terminal	$I_{fb}$	-	-	0.3	mA
Reference Output Current	$I_{ref}$	-	-	10	mA
Timing Resistor	$R_T$	1.8	30	500	k $\Omega$
Timing Capacitor	$C_T$	0.0047	0.001	10	$\mu$ F
Oscillator Frequency	$f_{osc}$	1.0	40	200	kHz

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $V_{CC} = 15$ V, $C_T = 0.01$ $\mu$ F, $R_T = 12$ k $\Omega$ , unless otherwise noted.)

For typical values  $T_A = 25^\circ\text{C}$ , for min/max values  $T_A$  is the operating ambient temperature range that applies, unless otherwise noted.

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
<b>REFERENCE SECTION</b>					
Reference Voltage ( $I_O = 1.0$ mA)	$V_{ref}$	4.75	5.0	5.25	V
Line Regulation ( $V_{CC} = 7.0$ V to 40 V)	$Reg_{line}$	-	2.0	25	mV
Load Regulation ( $I_O = 1.0$ mA to 10 mA)	$Reg_{load}$	-	3.0	15	mV
Short Circuit Output Current ( $V_{ref} = 0$ V)	$I_{SC}$	15	35	75	mA
<b>OUTPUT SECTION</b>					
Collector Off-State Current ( $V_{CC} = 40$ V, $V_{CE} = 40$ V)	$I_{C(off)}$	-	2.0	100	$\mu$ A
Emitter Off-State Current ( $V_{CC} = 40$ V, $V_C = 40$ V, $V_E = 0$ V)	$I_{E(off)}$	-	-	-100	$\mu$ A
Collector-Emitter Saturation Voltage (Note 2) Common-Emitter ( $V_E = 0$ V, $I_C = 200$ mA) Emitter-Follower ( $V_C = 15$ V, $I_E = -200$ mA)	$V_{sat(C)}$ $V_{sat(E)}$	- -	1.1 1.5	1.3 2.5	V
Output Control Pin Current Low State ( $V_{OC} \leq 0.4$ V) High State ( $V_{OC} = V_{ref}$ )	$I_{OCL}$ $I_{OCH}$	- -	10 0.2	- 3.5	$\mu$ A mA
Output Voltage Rise Time Common-Emitter (See Figure 12) Emitter-Follower (See Figure 13)	$t_r$	- -	100 100	200 200	ns
Output Voltage Fall Time Common-Emitter (See Figure 12) Emitter-Follower (See Figure 13)	$t_f$	- -	25 40	100 100	ns

2. Low duty cycle pulse techniques are used during test to maintain junction temperature as close to ambient temperature as possible.

# TL494, NCV494

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $V_{CC} = 15\text{ V}$ , $C_T = 0.01\ \mu\text{F}$ , $R_T = 12\ \text{k}\Omega$ , unless otherwise noted.)

For typical values  $T_A = 25^\circ\text{C}$ , for min/max values  $T_A$  is the operating ambient temperature range that applies, unless otherwise noted.

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
<b>ERROR AMPLIFIER SECTION</b>					
Input Offset Voltage ( $V_O$ (Pin 3) = 2.5 V)	$V_{IO}$	-	2.0	10	mV
Input Offset Current ( $V_O$ (Pin 3) = 2.5 V)	$I_{IO}$	-	5.0	250	nA
Input Bias Current ( $V_O$ (Pin 3) = 2.5 V)	$I_{IB}$	-	-0.1	-1.0	$\mu\text{A}$
Input Common Mode Voltage Range ( $V_{CC} = 40\ \text{V}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$ )	$V_{ICR}$	-0.3 to $V_{CC}-2.0$			V
Open Loop Voltage Gain ( $\Delta V_O = 3.0\ \text{V}$ , $V_O = 0.5\ \text{V}$ to $3.5\ \text{V}$ , $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$ )	$A_{VOL}$	70	95	-	dB
Unity-Gain Crossover Frequency ( $V_O = 0.5\ \text{V}$ to $3.5\ \text{V}$ , $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$ )	$f_{C-}$	-	350	-	kHz
Phase Margin at Unity-Gain ( $V_O = 0.5\ \text{V}$ to $3.5\ \text{V}$ , $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$ )	$\phi_m$	-	65	-	deg.
Common Mode Rejection Ratio ( $V_{CC} = 40\ \text{V}$ )	CMRR	65	90	-	dB
Power Supply Rejection Ratio ( $\Delta V_{CC} = 33\ \text{V}$ , $V_O = 2.5\ \text{V}$ , $R_L = 2.0\ \text{k}\Omega$ )	PSRR	-	100	-	dB
Output Sink Current ( $V_O$ (Pin 3) = 0.7 V)	$I_{O-}$	0.3	0.7	-	mA
Output Source Current ( $V_O$ (Pin 3) = 3.5 V)	$I_{O+}$	2.0	-4.0	-	mA
<b>PWM COMPARATOR SECTION (Test Circuit Figure 11)</b>					
Input Threshold Voltage (Zero Duty Cycle)	$V_{TH}$	-	2.5	4.5	V
Input Sink Current ( $V_{(Pin\ 3)} = 0.7\ \text{V}$ )	$I_{I-}$	0.3	0.7	-	mA
<b>DEADTIME CONTROL SECTION (Test Circuit Figure 11)</b>					
Input Bias Current (Pin 4) ( $V_{(Pin\ 4)} = 0\ \text{V}$ to $5.25\ \text{V}$ )	$I_{IB}$ (DT)	-	-2.0	-10	$\mu\text{A}$
Maximum Duty Cycle, Each Output, Push-Pull Mode ( $V_{(Pin\ 4)} = 0\ \text{V}$ , $C_T = 0.01\ \mu\text{F}$ , $R_T = 12\ \text{k}\Omega$ ) ( $V_{(Pin\ 4)} = 0\ \text{V}$ , $C_T = 0.001\ \mu\text{F}$ , $R_T = 30\ \text{k}\Omega$ )	$DC_{max}$	45	48	50	%
		-	45	50	
Input Threshold Voltage (Pin 4) (Zero Duty Cycle) (Maximum Duty Cycle)	$V_{th}$	- 0	2.8 -	3.3 -	V
<b>OSCILLATOR SECTION</b>					
Frequency ( $C_T = 0.001\ \mu\text{F}$ , $R_T = 30\ \text{k}\Omega$ )	$f_{osc}$	-	40	-	kHz
Standard Deviation of Frequency* ( $C_T = 0.001\ \mu\text{F}$ , $R_T = 30\ \text{k}\Omega$ )	$\sigma f_{osc}$	-	3.0	-	%
Frequency Change with Voltage ( $V_{CC} = 7.0\ \text{V}$ to $40\ \text{V}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$ )	$\Delta f_{osc} (\Delta V)$	-	0.1	-	%
Frequency Change with Temperature ( $\Delta T_A = T_{low}$ to $T_{high}$ ) ( $C_T = 0.01\ \mu\text{F}$ , $R_T = 12\ \text{k}\Omega$ )	$\Delta f_{osc} (\Delta T)$	-	-	12	%
<b>UNDERVOLTAGE LOCKOUT SECTION</b>					
Turn-On Threshold ( $V_{CC}$ increasing, $I_{ref} = 1.0\ \text{mA}$ )	$V_{th}$	5.5	6.43	7.0	V
<b>TOTAL DEVICE</b>					
Standby Supply Current (Pin 6 at $V_{ref}$ , All other inputs and outputs open) ( $V_{CC} = 15\ \text{V}$ ) ( $V_{CC} = 40\ \text{V}$ )	$I_{CC}$	-	5.5	10	mA
		-	7.0	15	
Average Supply Current ( $C_T = 0.01\ \mu\text{F}$ , $R_T = 12\ \text{k}\Omega$ , $V_{(Pin\ 4)} = 2.0\ \text{V}$ ) ( $V_{CC} = 15\ \text{V}$ ) (See Figure 12)		-	7.0	-	mA

\* Standard deviation is a measure of the statistical distribution about the mean as derived from the formula,  $\sigma$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (X_n - \bar{X})^2}{N-1}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## TL494, NCV494

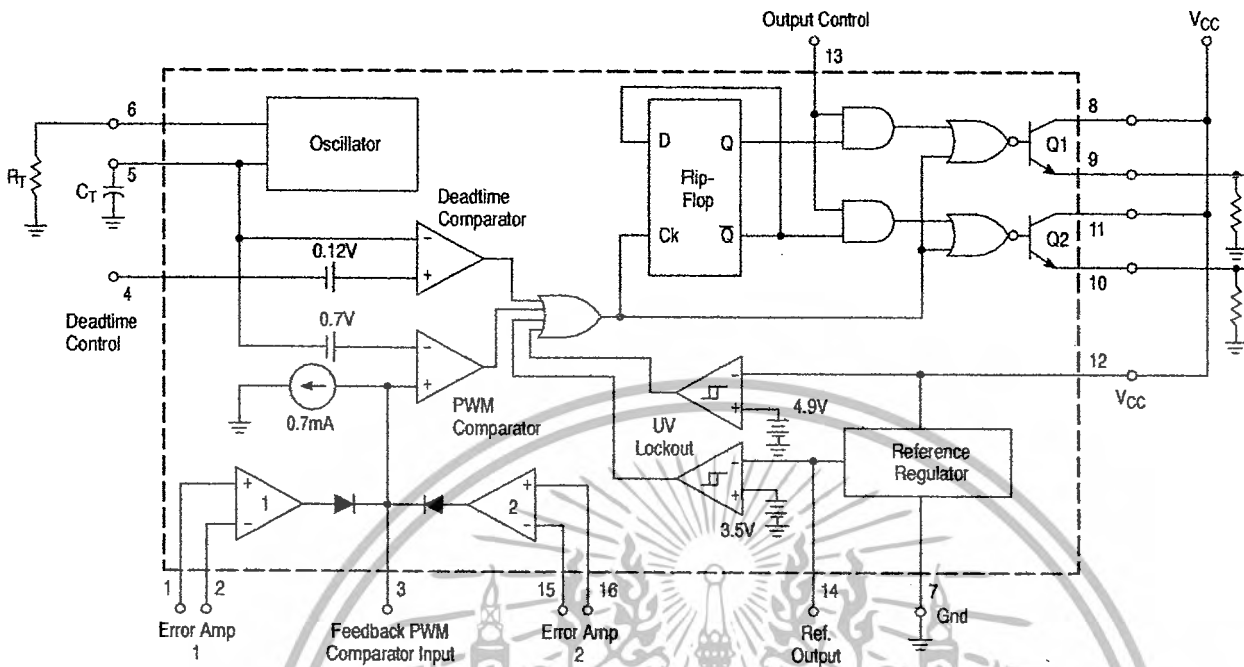
### ORDERING INFORMATION

Device	Package	Shipping†
TL494BD	SOIC-16	48 Units / Rail
TL494BDG	SOIC-16 (Pb-Free)	48 Units / Rail
TL494BDR2	SOIC-16	2500 Tape & Reel
TL494BDR2G	SOIC-16 (Pb-Free)	2500 Tape & Reel
TL494CD	SOIC-16	48 Units / Rail
TL494CDG	SOIC-16 (Pb-Free)	48 Units / Rail
TL494CDR2	SOIC-16	2500 Tape & Reel
TL494CDR2G	SOIC-16 (Pb-Free)	2500 Tape & Reel
TL494CN	PDIP-16	25 Units / Rail
TL494CNG	PDIP-16 (Pb-Free)	25 Units / Rail
TL494IN	PDIP-16	25 Units / Rail
TL494ING	PDIP-16 (Pb-Free)	25 Units / Rail
NCV494BDR2*	SOIC-16	2500 Tape & Reel
NCV494BDR2G*	SOIC-16 (Pb-Free)	2500 Tape & Reel

†For information on tape and reel specifications, including part orientation and tape sizes, please refer to our Tape and Reel Packaging Specifications Brochure, BRD8011/D.

\*NCV494:  $T_{low} = -40^{\circ}C$ ,  $T_{high} = +125^{\circ}C$ . Guaranteed by design. NCV prefix is for automotive and other applications requiring site and change control.

# TL494, NCV494



This device contains 46 active transistors.

Figure 1. Representative Block Diagram

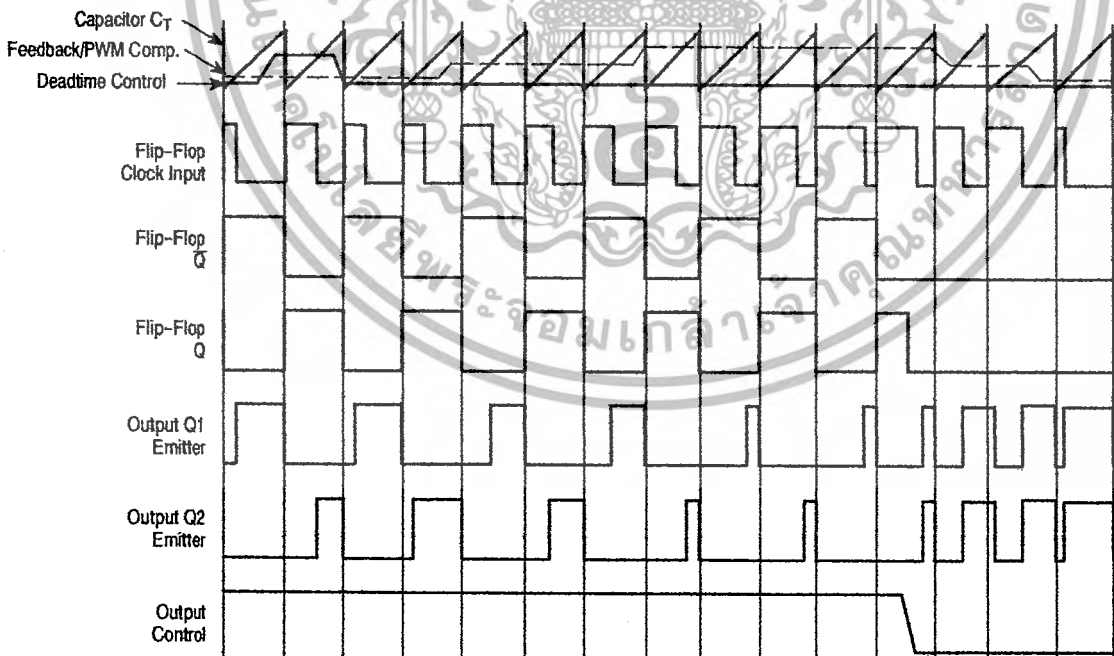


Figure 2. Timing Diagram

# TL494, NCV494

## APPLICATIONS INFORMATION

### Description

The TL494 is a fixed-frequency pulse width modulation control circuit, incorporating the primary building blocks required for the control of a switching power supply. (See Figure 1.) An internal-linear sawtooth oscillator is frequency-programmable by two external components,  $R_T$  and  $C_T$ . The approximate oscillator frequency is determined by:

$$f_{osc} \approx \frac{1.1}{R_T \cdot C_T}$$

For more information refer to Figure 3.

Output pulse width modulation is accomplished by comparison of the positive sawtooth waveform across capacitor  $C_T$  to either of two control signals. The NOR gates, which drive output transistors Q1 and Q2, are enabled only when the flip-flop clock-input line is in its low state. This happens only during that portion of time when the sawtooth voltage is greater than the control signals. Therefore, an increase in control-signal amplitude causes a corresponding linear decrease of output pulse width. (Refer to the Timing Diagram shown in Figure 2.)

The control signals are external inputs that can be fed into the deadtime control, the error amplifier inputs, or the feedback input. The deadtime control comparator has an effective 120 mV input offset which limits the minimum output deadtime to approximately the first 4% of the sawtooth-cycle time. This would result in a maximum duty cycle on a given output of 96% with the output control grounded, and 48% with it connected to the reference line. Additional deadtime may be imposed on the output by setting the deadtime-control input to a fixed voltage, ranging between 0 V to 3.3 V.

Functional Table

Input/Output Controls	Output Function	$\frac{f_{out}}{f_{osc}} =$
Grounded	Single-ended PWM @ Q1 and Q2	1.0
@ $V_{ref}$	Push-pull Operation	0.5

The pulse width modulator comparator provides a means for the error amplifiers to adjust the output pulse width from the maximum percent on-time, established by the deadtime control input, down to zero, as the voltage at the feedback pin varies from 0.5 V to 3.5 V. Both error amplifiers have a

common mode input range from -0.3 V to  $(V_{CC} - 2V)$ , and may be used to sense power-supply output voltage and current. The error-amplifier outputs are active high and are ORed together at the noninverting input of the pulse-width modulator comparator. With this configuration, the amplifier that demands minimum output on time, dominates control of the loop.

When capacitor  $C_T$  is discharged, a positive pulse is generated on the output of the deadtime comparator, which clocks the pulse-steering flip-flop and inhibits the output transistors, Q1 and Q2. With the output-control connected to the reference line, the pulse-steering flip-flop directs the modulated pulses to each of the two output transistors alternately for push-pull operation. The output frequency is equal to half that of the oscillator. Output drive can also be taken from Q1 or Q2, when single-ended operation with a maximum on-time of less than 50% is required. This is desirable when the output transformer has a ringback winding with a catch diode used for snubbing. When higher output-drive currents are required for single-ended operation, Q1 and Q2 may be connected in parallel, and the output-mode pin must be tied to ground to disable the flip-flop. The output frequency will now be equal to that of the oscillator.

The TL494 has an internal 5.0 V reference capable of sourcing up to 10 mA of load current for external bias circuits. The reference has an internal accuracy of  $\pm 5.0\%$  with a typical thermal drift of less than 50 mV over an operating temperature range of 0° to 70°C.

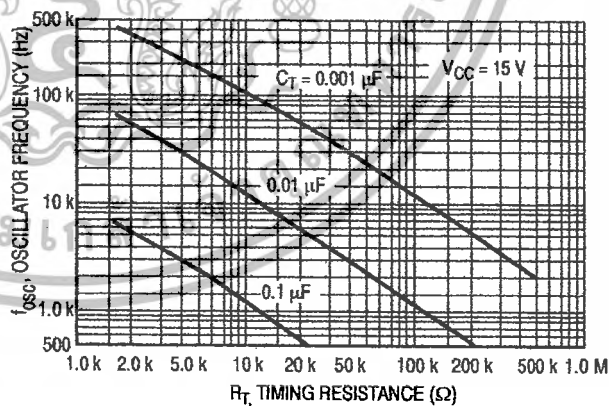


Figure 3. Oscillator Frequency versus Timing Resistance

# TL494, NCV494

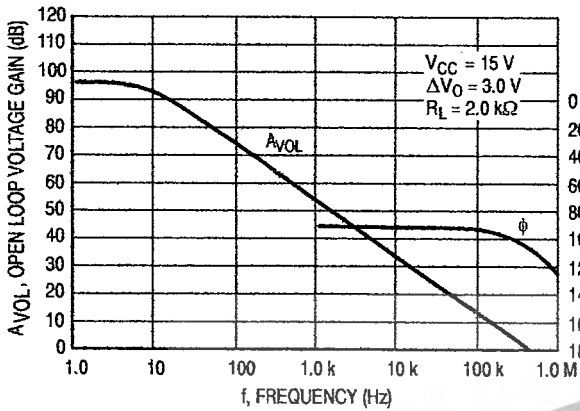


Figure 4. Open Loop Voltage Gain and Phase versus Frequency

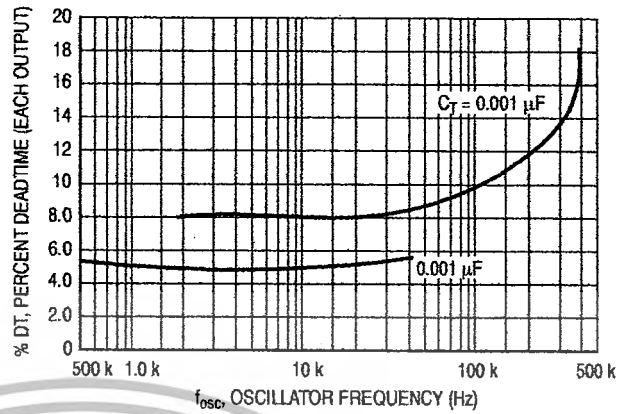


Figure 5. Percent Deadtime versus Oscillator Frequency

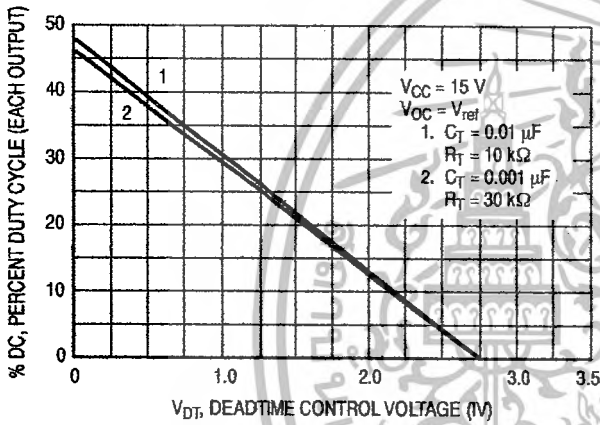


Figure 6. Percent Duty Cycle versus Deadtime Control Voltage

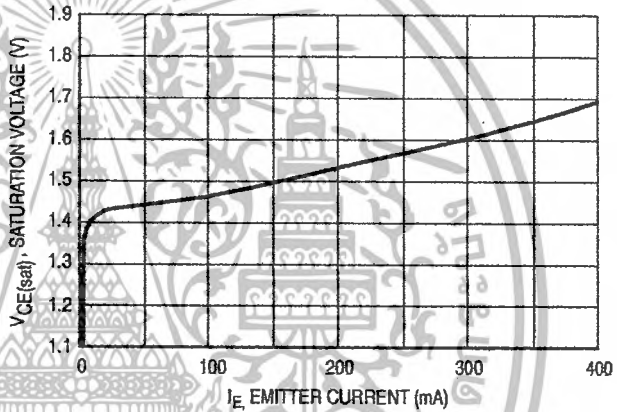


Figure 7. Emitter-Follower Configuration Output Saturation Voltage versus Emitter Current

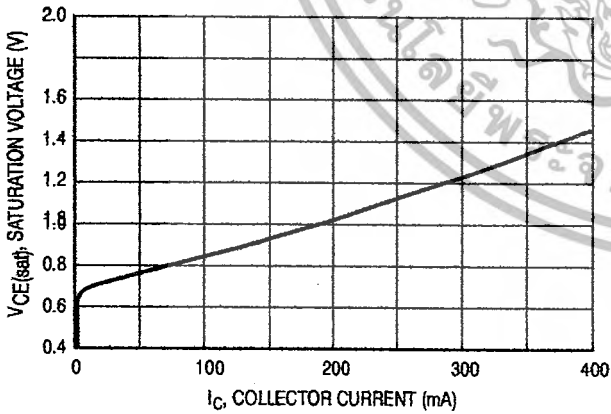


Figure 8. Common-Emitter Configuration Output Saturation Voltage versus Collector Current

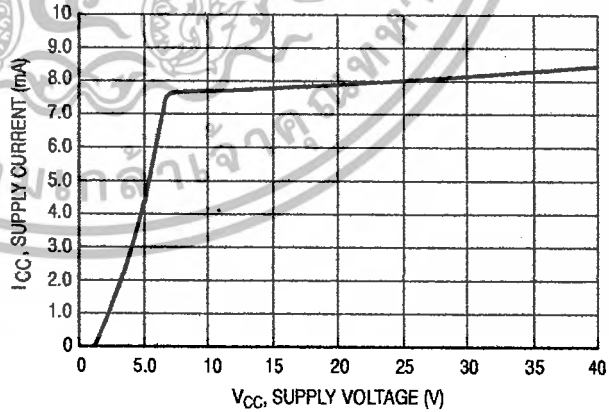


Figure 9. Standby Supply Current versus Supply Voltage

# TL494, NCV494

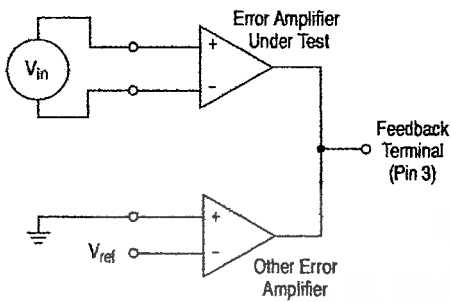


Figure 10. Error-Amplifier Characteristics

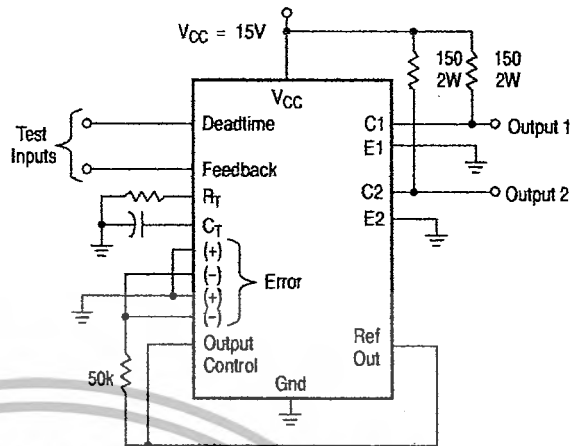


Figure 11. Deadtime and Feedback Control Circuit

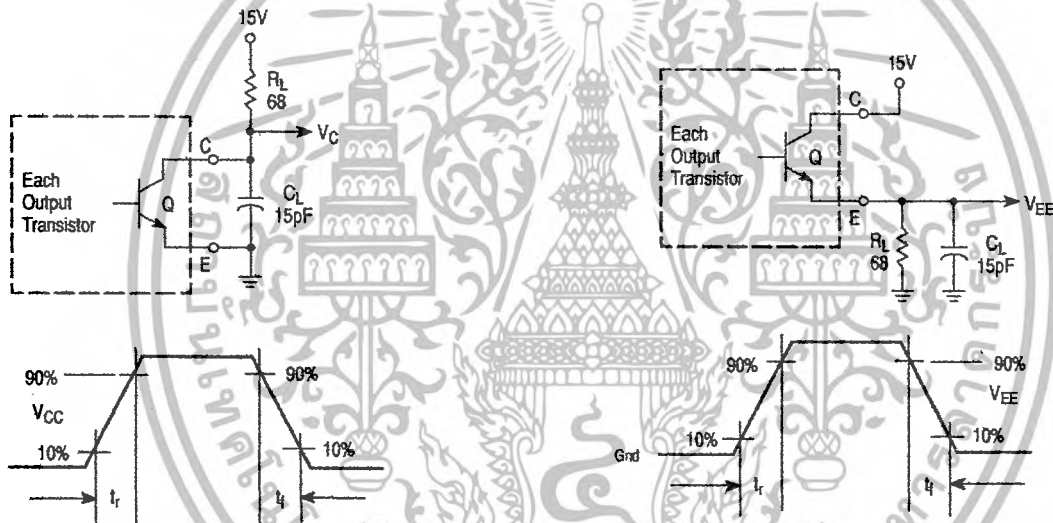


Figure 12. Common-Emitter Configuration Test Circuit and Waveform

Figure 13. Emitter-Follower Configuration Test Circuit and Waveform

# TL494, NCV494

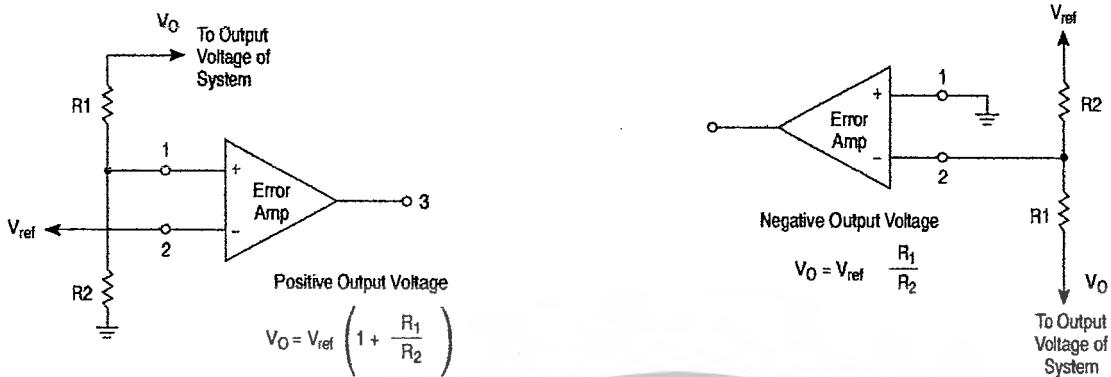


Figure 14. Error-Amplifier Sensing Techniques

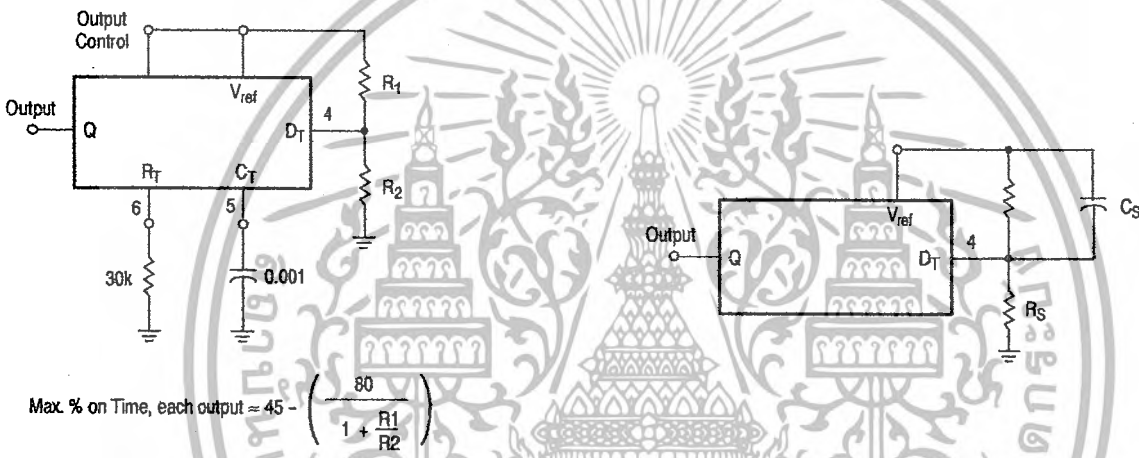


Figure 15. Deadtime Control Circuit

Figure 16. Soft-Start Circuit

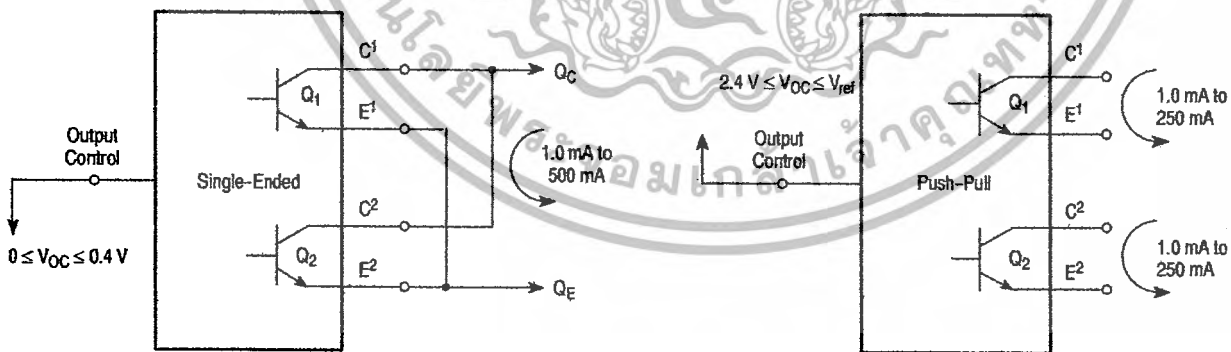


Figure 17. Output Connections for Single-Ended and Push-Pull Configurations

# TL494, NCV494

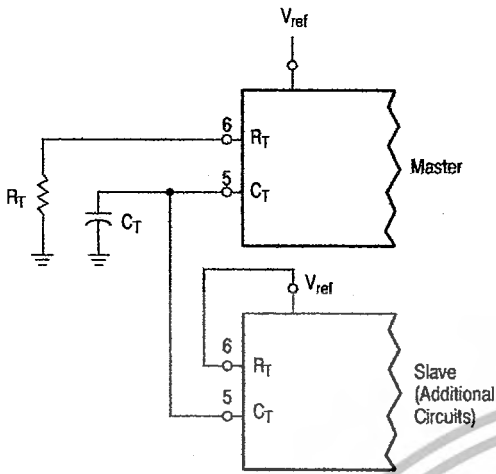


Figure 18. Slaving Two or More Control Circuits

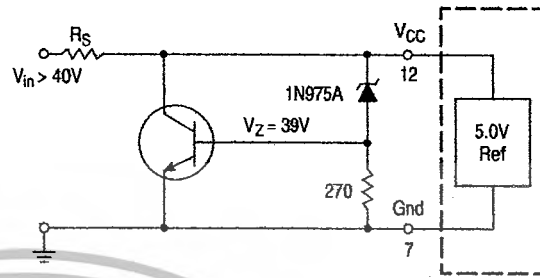


Figure 19. Operation with  $V_{in} > 40V$  Using External Zener

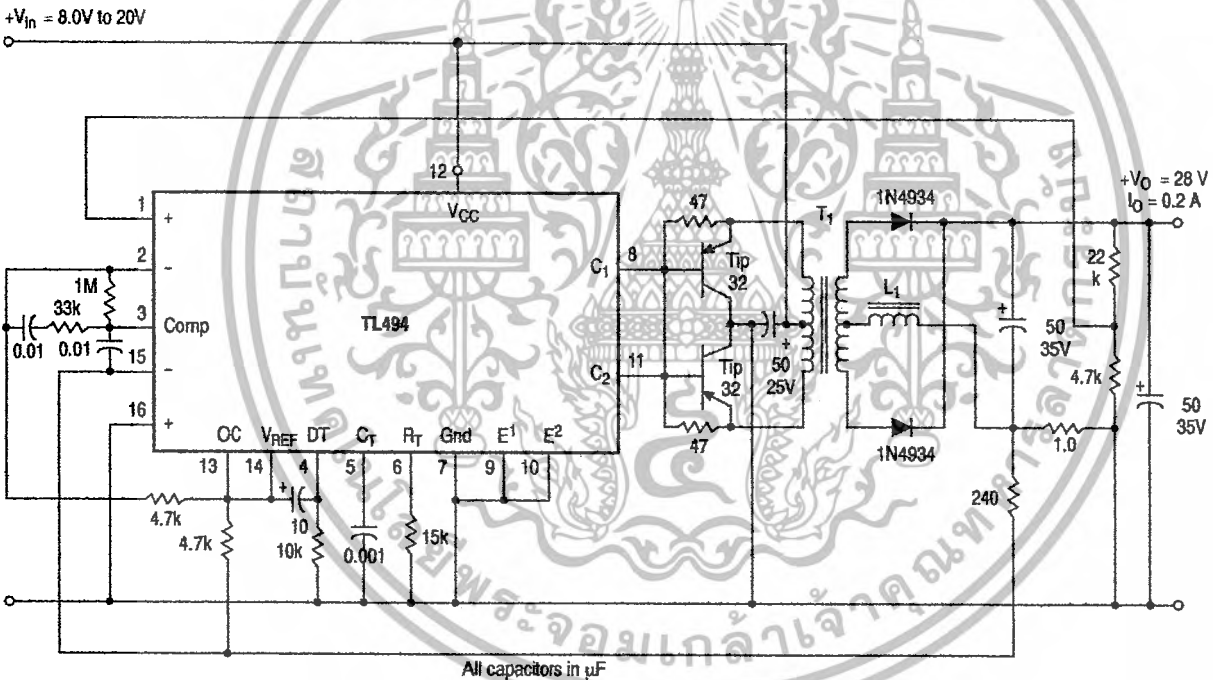
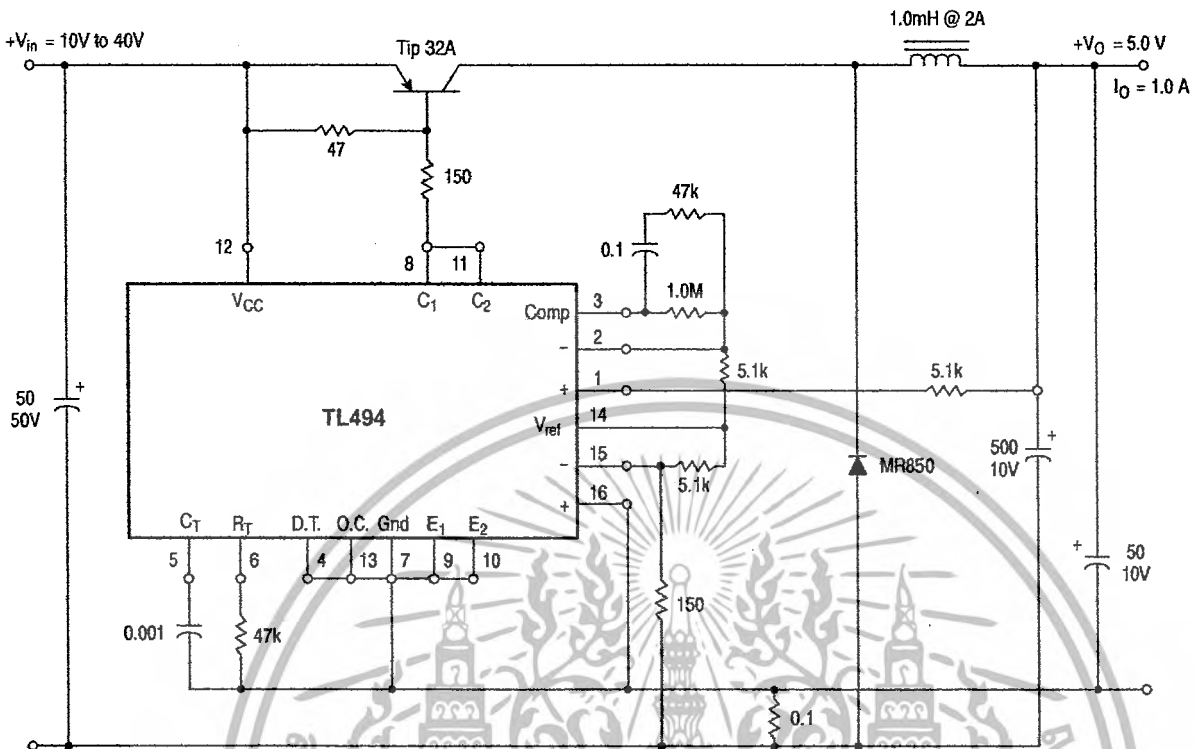


Figure 20. Pulse Width Modulated Push-Pull Converter

Test	Conditions	Results
Line Regulation	$V_{in} = 10V$ to $40V$	14 mV 0.28%
Load Regulation	$V_{in} = 28V$ , $I_o = 1.0mA$ to $1.0A$	3.0 mV 0.06%
Output Ripple	$V_{in} = 28V$ , $I_o = 1.0A$	65 mV pp P.A.R.D.
Short Circuit Current	$V_{in} = 28V$ , $R_L = 0.1\Omega$	1.6 A
Efficiency	$V_{in} = 28V$ , $I_o = 1.0A$	71%

L1 - 3.5 mH @ 0.3 A  
 T1 - Primary: 20T C.T. #28 AWG  
 Secondary: 120T C.T. #36 AWG  
 Core: Ferroxcube 1408P-L00-3CB

## TL494, NCV494



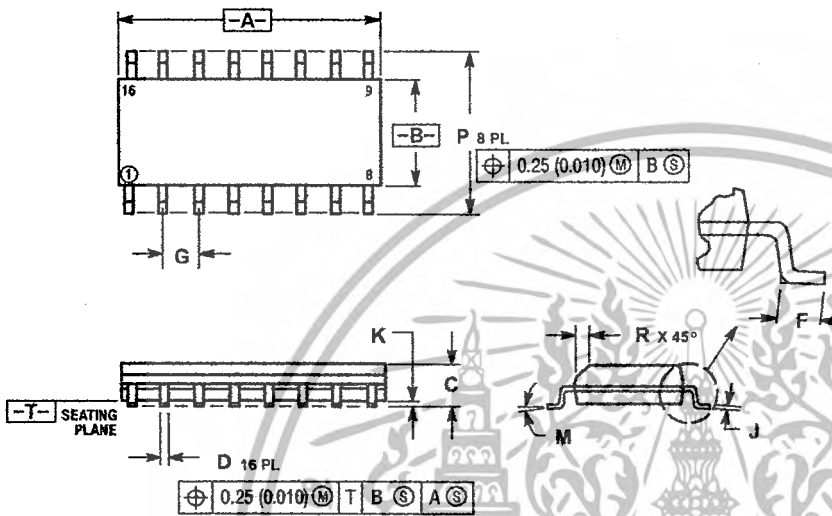
**Figure 21. Pulse Width Modulated Step-Down Converter**

Test	Conditions	Results
Line Regulation	$V_{in} = 8.0 \text{ V to } 40 \text{ V}$	3.0 mV 0.01%
Load Regulation	$V_{in} = 12.6 \text{ V}, I_O = 0.2 \text{ mA to } 200 \text{ mA}$	5.0 mV 0.02%
Output Ripple	$V_{in} = 12.6 \text{ V}, I_O = 200 \text{ mA}$	40 mV pp P.A.R.D.
Short Circuit Current	$V_{in} = 12.6 \text{ V}, R_L = 0.1 \Omega$	250 mA
Efficiency	$V_{in} = 12.6 \text{ V}, I_O = 200 \text{ mA}$	72%

# TL494, NCV494

## PACKAGE DIMENSIONS

SOIC-16  
D SUFFIX  
CASE 751B-05  
ISSUE J



### NOTES:

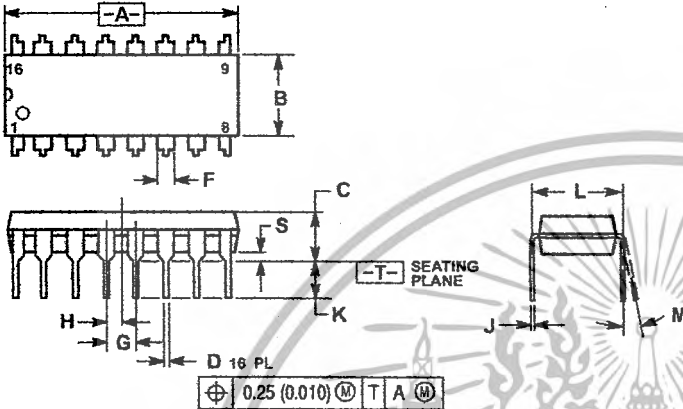
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: MILLIMETER.
3. DIMENSIONS A AND B DO NOT INCLUDE MOLD PROTRUSION.
4. MAXIMUM MOLD PROTRUSION 0.15 (0.006) PER SIDE.
5. DIMENSION D DOES NOT INCLUDE DAMBAR PROTRUSION. ALLOWABLE DAMBAR PROTRUSION SHALL BE 0.127 (0.005) TOTAL IN EXCESS OF THE D DIMENSION AT MAXIMUM MATERIAL CONDITION.

DIM	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	9.80	10.00	0.386	0.393
B	3.80	4.00	0.150	0.157
C	1.35	1.75	0.054	0.068
D	0.35	0.49	0.014	0.019
F	0.40	1.25	0.016	0.049
G	1.27 BSC		0.050 BSC	
J	0.19	0.25	0.006	0.009
K	0.10	0.25	0.004	0.009
M	0°	7°	0°	7°
P	5.80	6.20	0.229	0.244
R	0.25	0.50	0.010	0.019

# TL494, NCV494

## PACKAGE DIMENSIONS

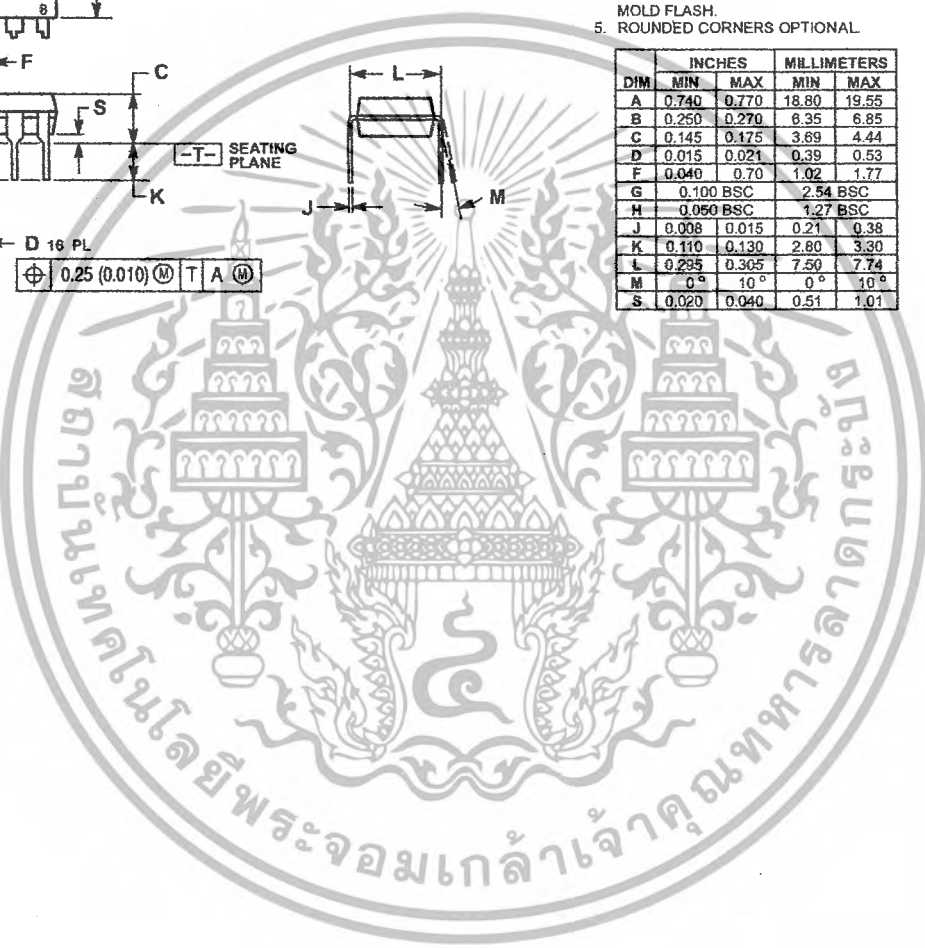
PDIP-16  
N SUFFIX  
CASE 648-08  
ISSUE T



- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
  2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
  3. DIMENSION L TO CENTER OF LEADS WHEN FORMED PARALLEL.
  4. DIMENSION B DOES NOT INCLUDE MOLD FLASH.
  5. ROUNDED CORNERS OPTIONAL.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.740	0.770	18.80	19.55
B	0.250	0.270	6.35	6.85
C	0.145	0.175	3.69	4.44
D	0.015	0.021	0.39	0.53
F	0.040	0.70	1.02	1.77
G	0.100 BSC		2.54 BSC	
H	0.050 BSC		1.27 BSC	
J	0.008	0.015	0.21	0.38
K	0.110	0.130	2.80	3.30
L	0.235	0.305	7.50	7.74
M	0°	10°	0°	10°
S	0.020	0.040	0.51	1.01


⊕ 0.25 (0.010) Ⓜ T A Ⓜ



# TL494, NCV494



SWITCHMODE is a trademark of Semiconductor Components Industries, LLC.

**ON Semiconductor** and  are registered trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC (SCILLC). SCILLC reserves the right to make changes without further notice to any products herein. SCILLC makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does SCILLC assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. "Typical" parameters which may be provided in SCILLC data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. SCILLC does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. SCILLC products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the SCILLC product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use SCILLC products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold SCILLC and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that SCILLC was negligent regarding the design or manufacture of the part. SCILLC is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer. This literature is subject to all applicable copyright laws and is not for resale in any manner.

## PUBLICATION ORDERING INFORMATION

### LITERATURE FULFILLMENT:

Literature Distribution Center for ON Semiconductor  
P.O. Box 61312, Phoenix, Arizona 85082-1312 USA  
Phone: 480-829-7710 or 800-344-3860 Toll Free USA/Canada  
Fax: 480-829-7709 or 800-344-3867 Toll Free USA/Canada  
Email: [orderlit@onsemi.com](mailto:orderlit@onsemi.com)

**N. American Technical Support:** 800-282-9855 Toll Free  
USA/Canada

**Japan:** ON Semiconductor, Japan Customer Focus Center  
2-9-1 Kamimeguro, Meguro-ku, Tokyo, Japan 153-0051  
Phone: 81-3-5773-3850

**ON Semiconductor Website:** <http://onsemi.com>

**Order Literature:** <http://www.onsemi.com/litorder>

For additional information, please contact your local Sales Representative.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494/D

# TLP250

- Transistor Inverter
- Inverter For Air Conditionor
- IGBT Gate Drive
- Power MOS FET Gate Drive

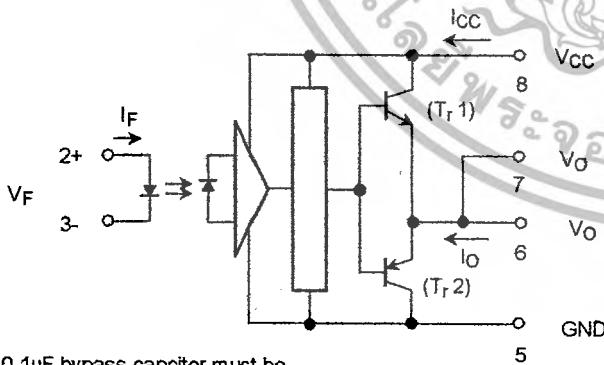
The TOSHIBA TLP250 consists of a GaAlAs light emitting diode and a integrated photodetector.  
 This unit is 8-lead DIP package.  
 TLP250 is suitable for gate driving circuit of IGBT or power MOS FET.

- Input threshold current:  $I_F=5\text{mA}(\text{max.})$
- Supply current ( $I_{CC}$ ):  $11\text{mA}(\text{max.})$
- Supply voltage ( $V_{CC}$ ):  $10\text{--}35\text{V}$
- Output current ( $I_O$ ):  $\pm 1.5\text{A}(\text{max.})$
- Switching time ( $t_{pLH}/t_{pHL}$ ):  $1.5\mu\text{s}(\text{max.})$
- Isolation voltage:  $2500\text{V}_{\text{rms}}(\text{min.})$
- UL recognized: UL1577, file No.E67349
- Option (D4) type  
 VDE approved: DIN VDE0884/06.92,certificate No.76823  
 Maximum operating insulation voltage:  $630\text{V}_{\text{PK}}$   
 Highest permissible over voltage:  $4000\text{V}_{\text{PK}}$

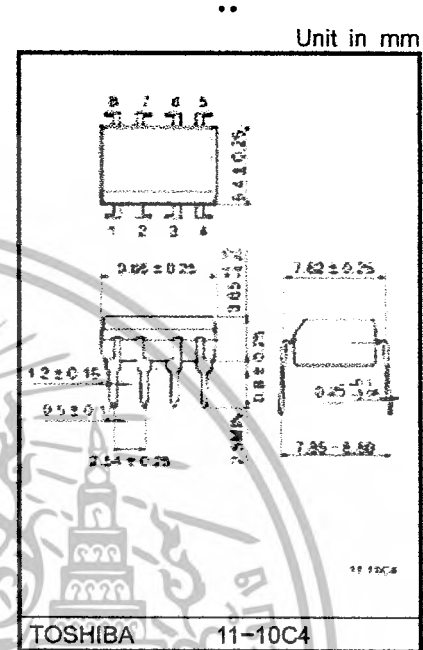
**(Note)** When a VDE0884 approved type is needed, please designate the "option (D4)"

- Creepage distance:  $6.4\text{mm}(\text{min.})$   
 Clearance:  $6.4\text{mm}(\text{min.})$

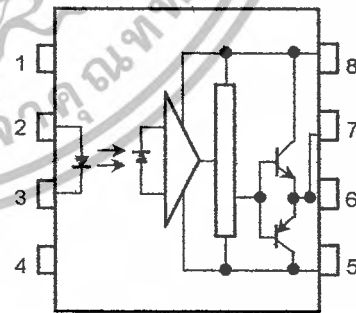
### Schematic



A 0.1 $\mu\text{F}$  bypass capacitor must be connected between pin 8 and 5 (See Note 5).



### Pin Configuration (top view)



- 1: N.C.
- 2: Anode
- 3: Cathode
- 4: N.C.
- 5: GND
- 6:  $V_O$  (Output)
- 7:  $V_O$
- 8:  $V_{CC}$

### Truth Table

		Tr1	Tr2
Input LED	On	On	Off
	Off	Off	On

เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัทใช้เพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 不得复制或传播。如有更改，恕不另行通知。如有更改，恕不另行通知。如有更改，恕不另行通知。

**Absolute Maximum Ratings (Ta = 25°C)**

Characteristic		Symbol	Rating	Unit	
LED	Forward current	$I_F$	20	mA	
	Forward current derating (Ta ≥ 70°C)	$\Delta I_F / \Delta T_a$	-0.36	mA / °C	
	Peak transient forward current (Note 1)	$I_{FPT}$	1	A	
	Reverse voltage	$V_R$	5	V	
	Junction temperature	$T_j$	125	°C	
Detector	"H" peak output current ( $P_W \leq 2.5\mu s, f \leq 15kHz$ ) (Note 2)	$I_{OPH}$	-1.5	A	
	"L" peak output current ( $P_W \leq 2.5\mu s, f \leq 15kHz$ ) (Note 2)	$I_{OPL}$	+1.5	A	
	Output voltage	(Ta ≤ 70°C)	$V_O$	35	V
		(Ta = 85°C)		24	
	Supply voltage	(Ta ≤ 70°C)	$V_{CC}$	35	V
		(Ta = 85°C)		24	
	Output voltage derating (Ta ≥ 70°C)	$\Delta V_O / \Delta T_a$	-0.73	V / °C	
	Supply voltage derating (Ta ≥ 70°C)	$\Delta V_{CC} / \Delta T_a$	-0.73	V / °C	
	Junction temperature	$T_j$	125	°C	
Operating frequency (Note 3)	$f$	25	kHz		
Operating temperature range	$T_{opr}$	-20~85	°C		
Storage temperature range	$T_{stg}$	-55~125	°C		
Lead soldering temperature (10 s) (Note 4)	$T_{sol}$	260	°C		
Isolation voltage (AC, 1 min., R.H. ≤ 60%) (Note 5)	$BV_S$	2500	Vrms		

Note 1: Pulse width  $P_W \leq 1\mu s, 300pps$

Note 2: Exponential waveform

Note 3: Exponential waveform,  $I_{OPH} \leq -1.0A (\leq 2.5\mu s), I_{OPL} \leq +1.0A (\leq 2.5\mu s)$

Note 4: It is 2 mm or more from a lead root.

Note 5: Device considered a two terminal device: Pins 1, 2, 3 and 4 shorted together, and pins 5, 6, 7 and 8 shorted together.

Note 6: A ceramic capacitor(0.1μF) should be connected from pin 8 to pin 5 to stabilize the operation of the high gain linear amplifier. Failure to provide the bypassing may impair the switching property. The total lead length between capacitor and coupler should not exceed 1cm.

**Recommended Operating Conditions**

Characteristic	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Input current, on (Note 7)	$I_{F(ON)}$	7	8	10	mA
Input voltage, off	$V_{F(OFF)}$	0	—	0.8	V
Supply voltage	$V_{CC}$	15	—	30   20	V
Peak output current	$I_{OPH}/I_{OPL}$	—	—	±0.5	A
Operating temperature	$T_{opr}$	-20	25	70   85	°C

Note 7: Input signal rise time (fall time) < 0.5 μs.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Electrical Characteristics (Ta = -20~70°C, unless otherwise specified)

Characteristic		Symbol	Test Circuit	Test Condition	Min.	Typ.*	Max.	Unit
Input forward voltage		V <sub>F</sub>	—	I <sub>F</sub> = 10 mA, Ta = 25°C		1.6	1.8	V
Temperature coefficient of forward voltage		ΔV <sub>F</sub> / ΔTa	—	I <sub>F</sub> = 10 mA	—	-2.0	—	mV / °C
Input reverse current		I <sub>R</sub>	—	V <sub>R</sub> = 5V, Ta = 25°C		—	10	μA
Input capacitance		C <sub>T</sub>	—	V = 0, f = 1MHz, Ta = 25°C	—	45	250	pF
Output current	"H" level	I <sub>OPH</sub>	3	V <sub>CC</sub> = 30V (*1) I <sub>F</sub> = 10 mA V <sub>8-6</sub> = 4V	-0.5	-1.5	—	A
	"L" level	I <sub>OPL</sub>	2		I <sub>F</sub> = 0 V <sub>6-5</sub> = 2.5V	0.5	2	
Output voltage	"H" level	V <sub>OH</sub>	4	V <sub>CC1</sub> = +15V, V <sub>EE1</sub> = -15V R <sub>L</sub> = 200Ω, I <sub>F</sub> = 5mA	11	12.8	—	V
	"L" level	V <sub>OL</sub>	5	V <sub>CC1</sub> = +15V, V <sub>EE1</sub> = -15V R <sub>L</sub> = 200Ω, V <sub>F</sub> = 0.8V	—	-14.2	-12.5	
Supply current	"H" level	I <sub>CCH</sub>	—	V <sub>CC</sub> = 30V, I <sub>F</sub> = 10mA Ta = 25°C	—	7	—	mA
				V <sub>CC</sub> = 30V, I <sub>F</sub> = 10mA	—	—	11	
	"L" level	I <sub>CCL</sub>	—	V <sub>CC</sub> = 30V, I <sub>F</sub> = 0mA Ta = 25°C	—	7.5	—	
				V <sub>CC</sub> = 30V, I <sub>F</sub> = 0mA	—	—	11	
Threshold input current	"Output L→H"	I <sub>FLH</sub>	—	V <sub>CC1</sub> = +15V, V <sub>EE1</sub> = -15V R <sub>L</sub> = 200Ω, V <sub>O</sub> > 0V	—	1.2	5	mA
Threshold input voltage	"Output H→L"	I <sub>FHL</sub>	—	V <sub>CC1</sub> = +15V, V <sub>EE1</sub> = -15V R <sub>L</sub> = 200Ω, V <sub>O</sub> < 0V	0.8	—	—	V
Supply voltage		V <sub>CC</sub>	—		10	—	35	V
Capacitance (input-output)		C <sub>S</sub>	—	V <sub>S</sub> = 0, f = 1MHz Ta = 25°C	—	1.0	2.0	pF
Resistance(input-output)		R <sub>S</sub>	—	V <sub>S</sub> = 500V, Ta = 25°C R.H. ≤ 60%	1×10 <sup>12</sup>	10 <sup>14</sup>	—	Ω

\* All typical values are at Ta = 25°C (\*1): Duration of I<sub>O</sub> time ≤ 50μs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ใกว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Switching Characteristics (Ta = -20~70°C , unless otherwise specified)**

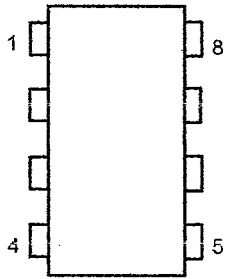
Characteristic		Symbol	Test Circuit	Test Condition	Min.	Typ.*	Max.	Unit
Propagation delay time	L→H	t <sub>pLH</sub>	6	I <sub>F</sub> = 8mA (Note 7) V <sub>CC1</sub> = +15V, V <sub>EE1</sub> = -15V R <sub>L</sub> = 200Ω	—	0.15	0.5	μs
	H→L	t <sub>pHL</sub>			—	0.15	0.5	
Output rise time		t <sub>r</sub>			—	—	—	
Output fall time		t <sub>f</sub>			—	—	—	
Common mode transient immunity at high level output		C <sub>MH</sub>	7	V <sub>CM</sub> = 600V, I <sub>F</sub> = 8mA V <sub>CC</sub> = 30V, Ta = 25°C	-5000	—	—	V / μs
Common mode transient immunity at low level output		C <sub>ML</sub>	7	V <sub>CM</sub> = 600V, I <sub>F</sub> = 0mA V <sub>CC</sub> = 30V, Ta = 25°C	5000	—	—	V / μs

\* All typical values are at Ta = 25°C

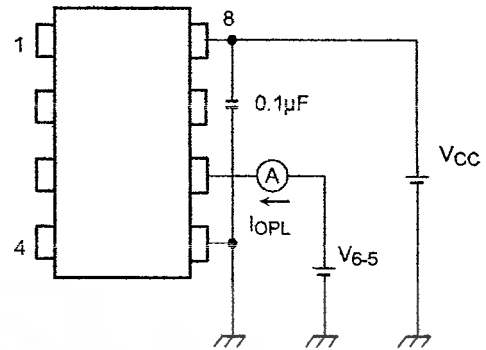
Note 7: Input signal rise time (fall time) < 0.5 μs.



Test Circuit 1 :

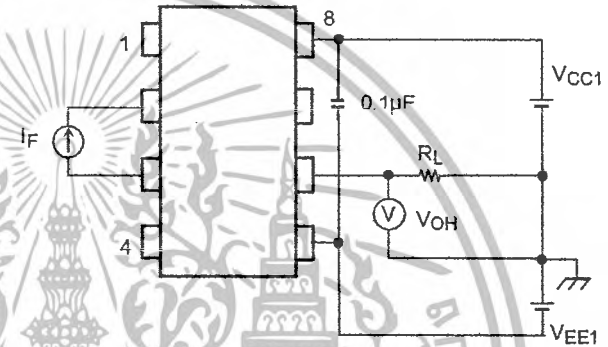
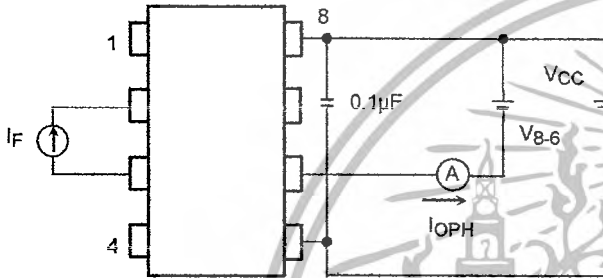


Test Circuit 2 : IOPL

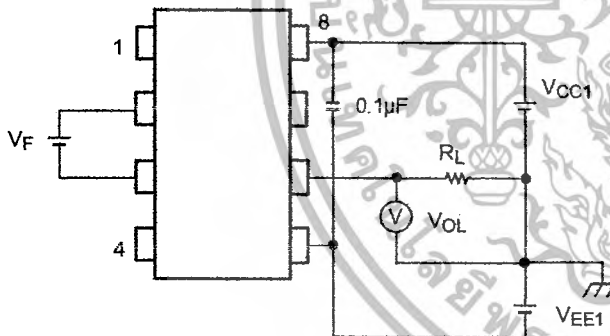


Test Circuit 3 : IOPH

Test Circuit 4 : VOH

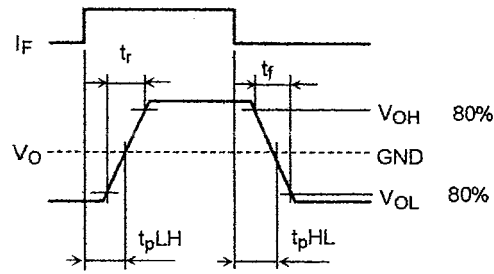
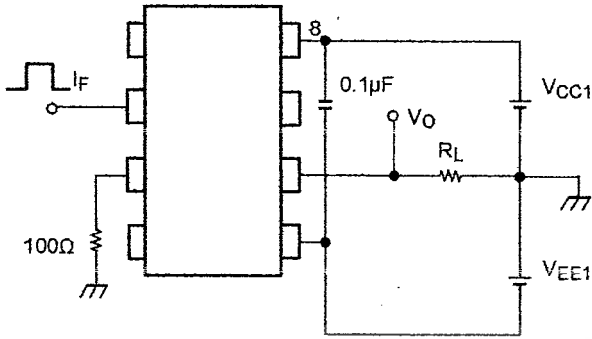


Test Circuit 5 : VOL

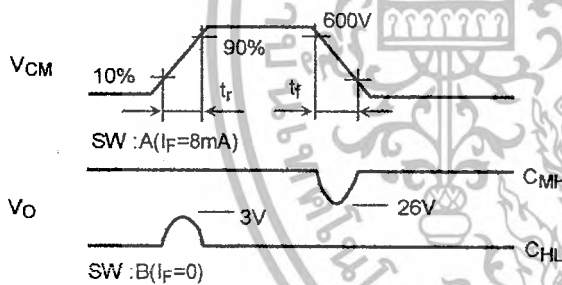
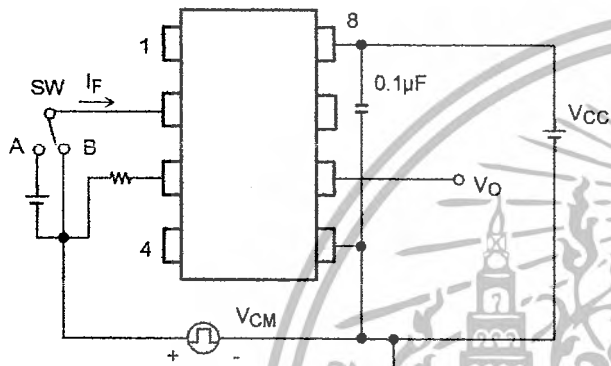


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ใกว่ากรณีใดต ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Test Circuit 6:  $t_{pLH}$ ,  $t_{pHL}$ ,  $t_r$ ,  $t_f$



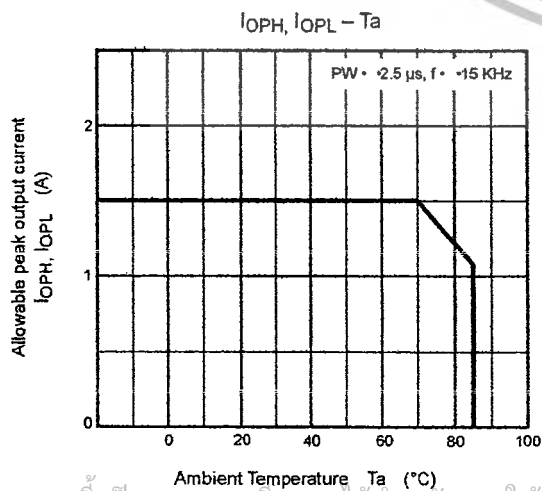
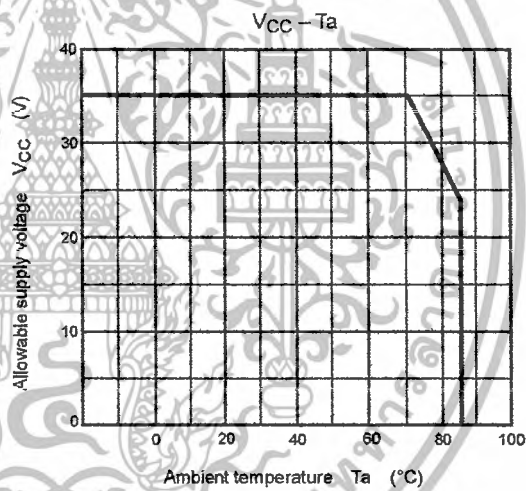
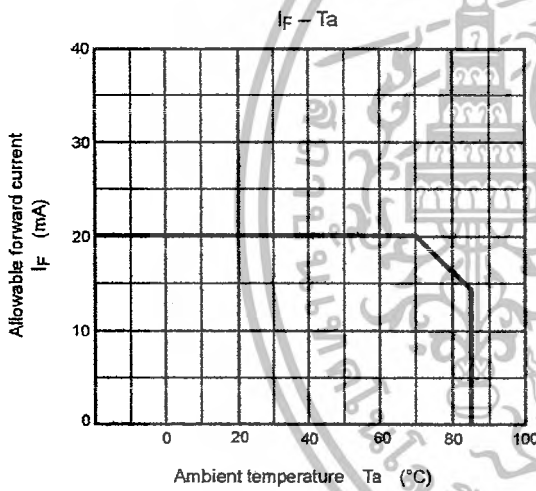
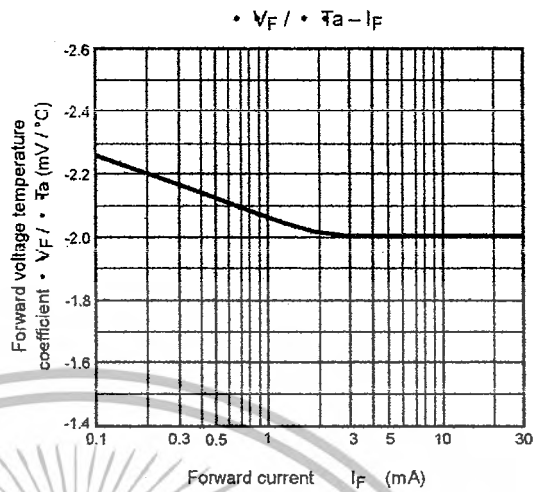
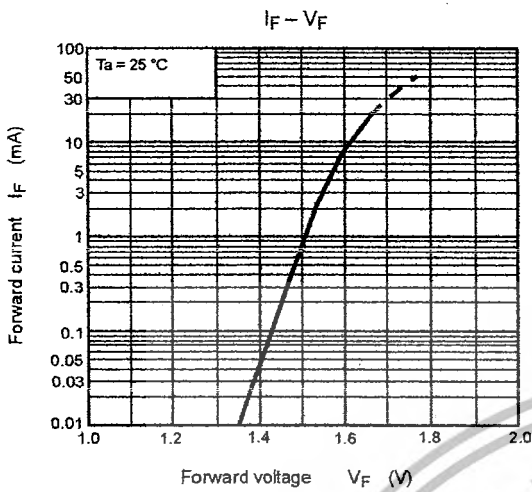
Test Circuit 7:  $C_{MH}$ ,  $C_{ML}$



$$C_{ML} = \frac{480 (V)}{t_f (\mu s)}$$

$$C_{MH} = \frac{480 (V)}{t_r (\mu s)}$$

$C_{ML}(C_{MH})$  is the maximum rate of rise (fall) of the common mode voltage that can be sustained with the output voltage in the low (high) state.



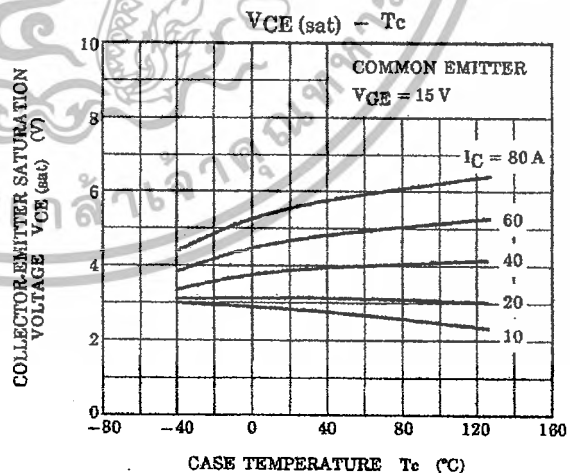
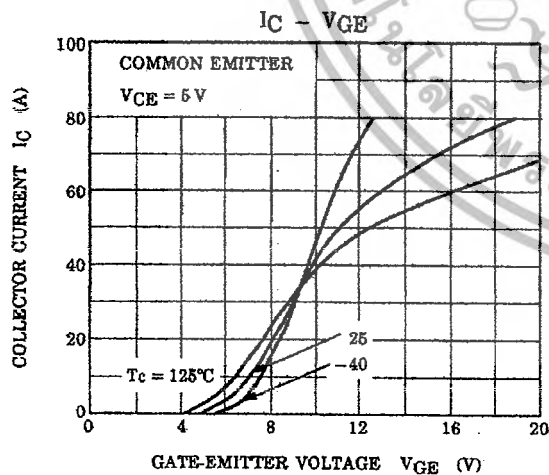
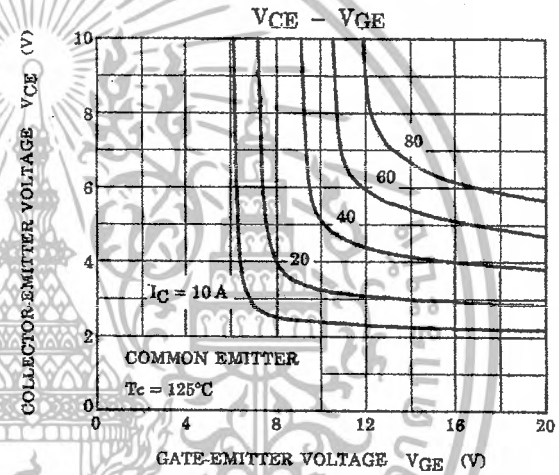
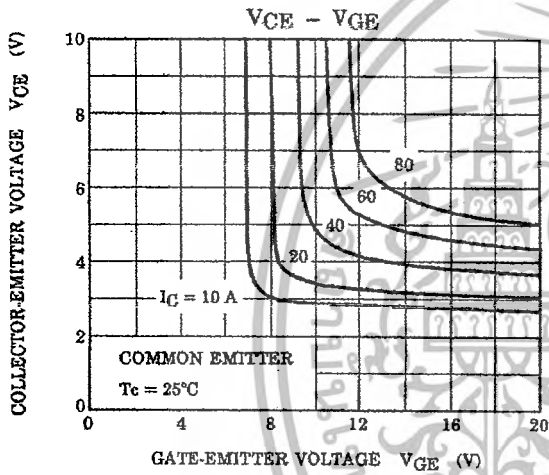
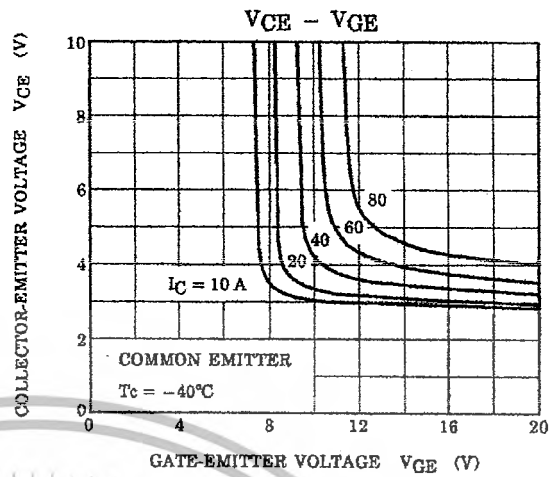
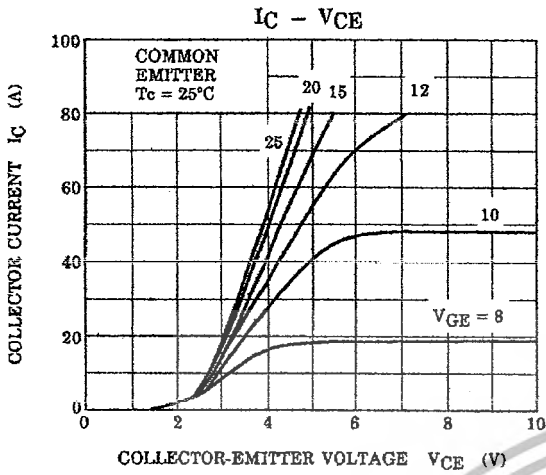
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## RESTRICTIONS ON PRODUCT USE

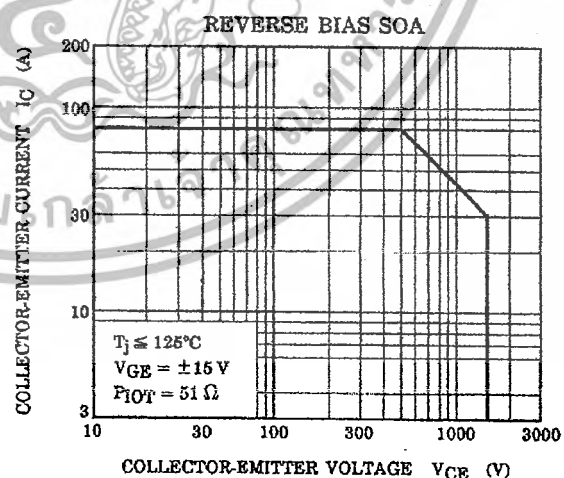
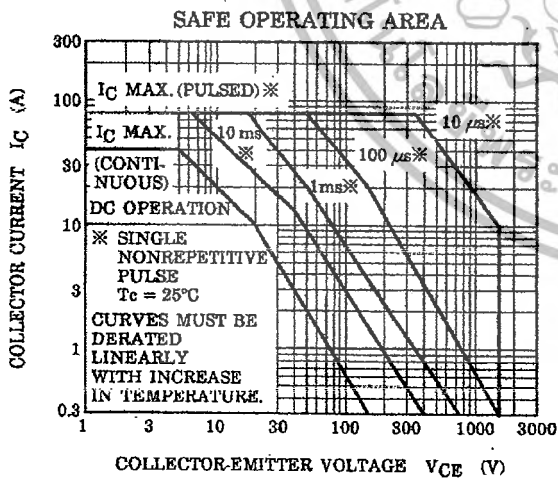
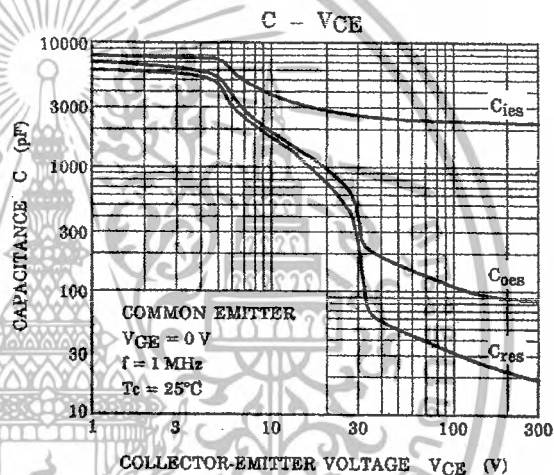
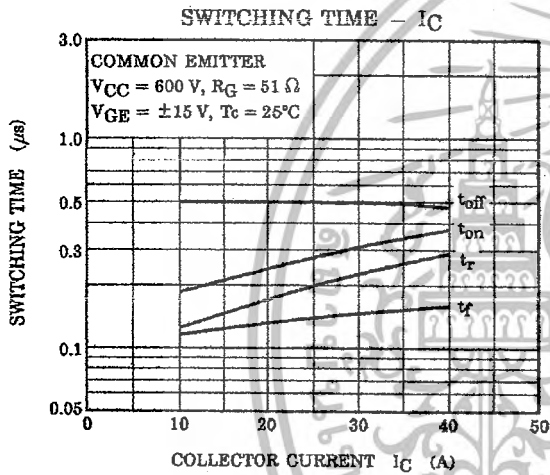
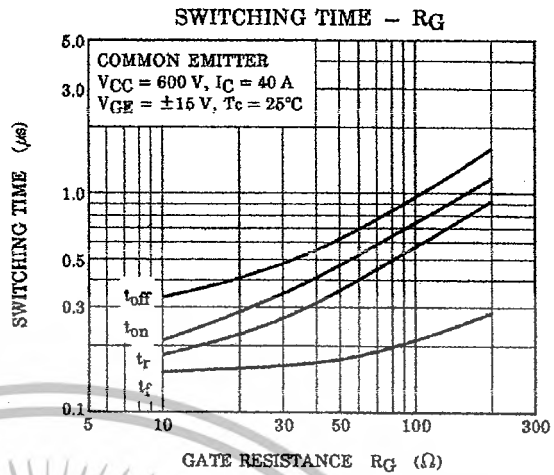
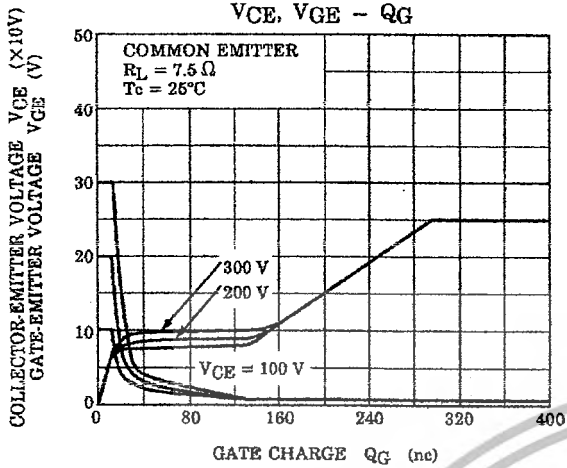
- The information contained herein is subject to change without notice.
- The information contained herein is presented only as a guide for the applications of our products. No responsibility is assumed by TOSHIBA for any infringements of patents or other rights of the third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of TOSHIBA or others.
- TOSHIBA is continually working to improve the quality and reliability of its products. Nevertheless, semiconductor devices in general can malfunction or fail due to their inherent electrical sensitivity and vulnerability to physical stress. It is the responsibility of the buyer, when utilizing TOSHIBA products, to comply with the standards of safety in making a safe design for the entire system, and to avoid situations in which a malfunction or failure of such TOSHIBA products could cause loss of human life, bodily injury or damage to property.  
In developing your designs, please ensure that TOSHIBA products are used within specified operating ranges as set forth in the most recent TOSHIBA products specifications. Also, please keep in mind the precautions and conditions set forth in the "Handling Guide for Semiconductor Devices," or "TOSHIBA Semiconductor Reliability Handbook" etc..
- The TOSHIBA products listed in this document are intended for usage in general electronics applications (computer, personal equipment, office equipment, measuring equipment, industrial robotics, domestic appliances, etc.). These TOSHIBA products are neither intended nor warranted for usage in equipment that requires extraordinarily high quality and/or reliability or a malfunction or failure of which may cause loss of human life or bodily injury ("Unintended Usage"). Unintended Usage include atomic energy control instruments, airplane or spaceship instruments, transportation instruments, traffic signal instruments, combustion control instruments, medical instruments, all types of safety devices, etc.. Unintended Usage of TOSHIBA products listed in this document shall be made at the customer's own risk.
- The products described in this document are subject to the foreign exchange and foreign trade laws.
- TOSHIBA products should not be embedded to the downstream products which are prohibited to be produced and sold, under any law and regulations.
- GaAs(Gallium Arsenide) is used in this product. The dust or vapor is harmful to the human body. Do not break, cut, crush or dissolve chemically.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

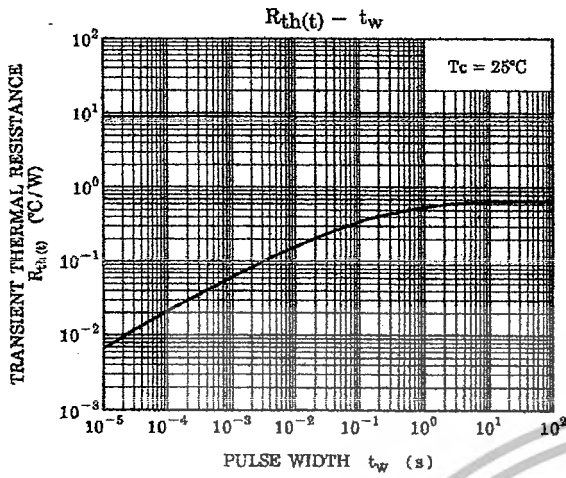




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## RESTRICTIONS ON PRODUCT USE

000707EAA

- TOSHIBA is continually working to improve the quality and reliability of its products. Nevertheless, semiconductor devices in general can malfunction or fail due to their inherent electrical sensitivity and vulnerability to physical stress. It is the responsibility of the buyer, when utilizing TOSHIBA products, to comply with the standards of safety in making a safe design for the entire system, and to avoid situations in which a malfunction or failure of such TOSHIBA products could cause loss of human life, bodily injury or damage to property.  
In developing your designs, please ensure that TOSHIBA products are used within specified operating ranges as set forth in the most recent TOSHIBA products specifications. Also, please keep in mind the precautions and conditions set forth in the "Handling Guide for Semiconductor Devices," or "TOSHIBA Semiconductor Reliability Handbook" etc..
- The TOSHIBA products listed in this document are intended for usage in general electronics applications (computer, personal equipment, office equipment, measuring equipment, industrial robotics, domestic appliances, etc.). These TOSHIBA products are neither intended nor warranted for usage in equipment that requires extraordinarily high quality and/or reliability or a malfunction or failure of which may cause loss of human life or bodily injury ("Unintended Usage"). Unintended Usage include atomic energy control instruments, airplane or spaceship instruments, transportation instruments, traffic signal instruments, combustion control instruments, medical instruments, all types of safety devices, etc.. Unintended Usage of TOSHIBA products listed in this document shall be made at the customer's own risk.
- The information contained herein is presented only as a guide for the applications of our products. No responsibility is assumed by TOSHIBA CORPORATION for any infringements of intellectual property or other rights of the third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any intellectual property or other rights of TOSHIBA CORPORATION or others.
- The information contained herein is subject to change without notice.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This datasheet has been download from:

[www.datasheetcatalog.com](http://www.datasheetcatalog.com)

Datasheets for electronics components.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

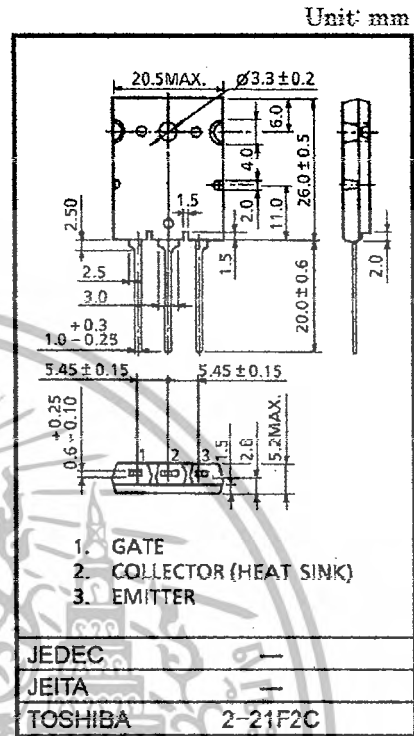
# GT60M303

## HIGH POWER SWITCHING APPLICATIONS

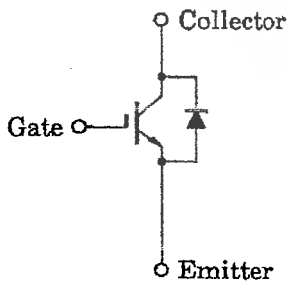
- The 4th Generation
- FRD Included Between Emitter and Collector
- Enhancement-Mode
- High Speed IGBT :  $t_f = 0.25\mu s$  (TYP.)  
FRD :  $t_{rr} = 0.7\mu s$  (TYP.)
- Low Saturation Voltage :  $V_{CE(sat)} = 2.1V$  (TYP.)

## MAXIMUM RATINGS (Ta = 25°C)

CHARACTERISTIC	SYMBOL	RATING	UNIT
Collector-Emitter Voltage	$V_{CES}$	900	V
Gate-Emitter Voltage	$V_{GES}$	$\pm 25$	V
Collector Current	DC	$I_C$	60
	1ms	$I_{CP}$	120
Emitter-Collector Forward Current	DC	$I_{ECF}$	15
	1ms	$I_{ECFP}$	120
Collector Power Dissipation (Tc = 25°C)	$P_C$	170	W
Junction Temperature	$T_j$	150	°C
Storage Temperature Range	$T_{stg}$	-55~150	°C
Screw Torque	—	0.8	N·m



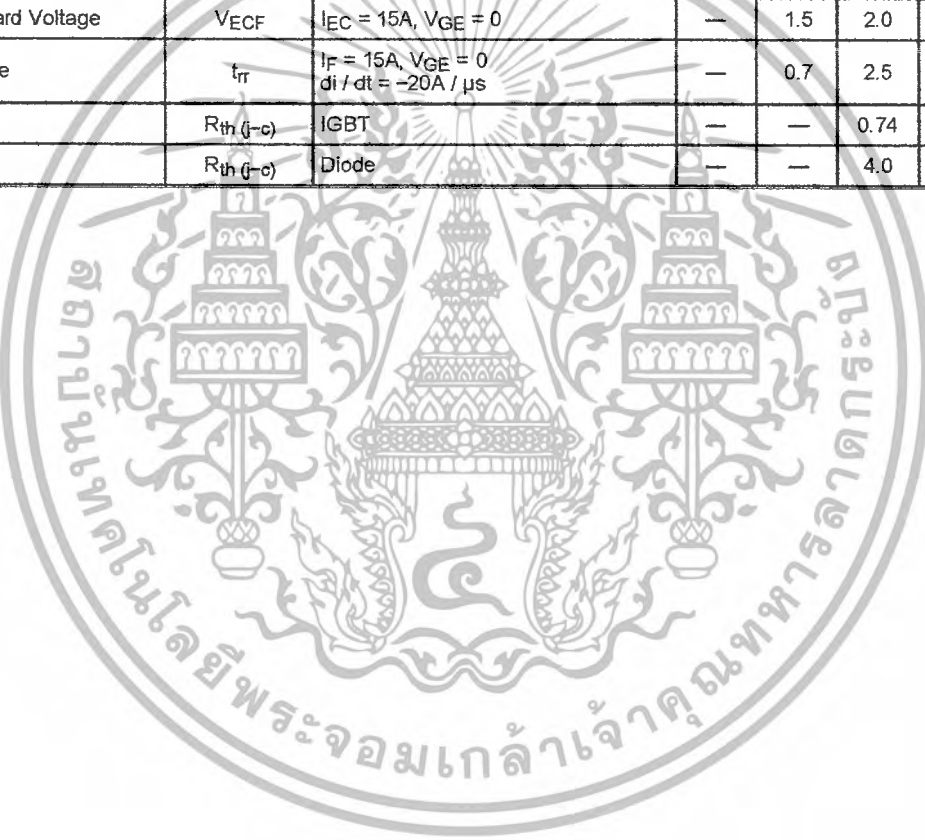
## EQUIVALENT CIRCUIT



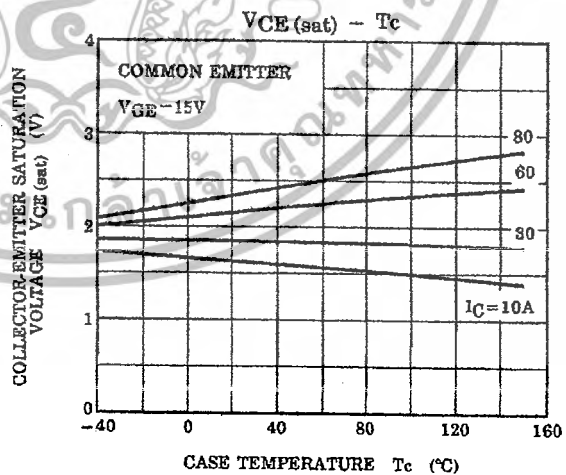
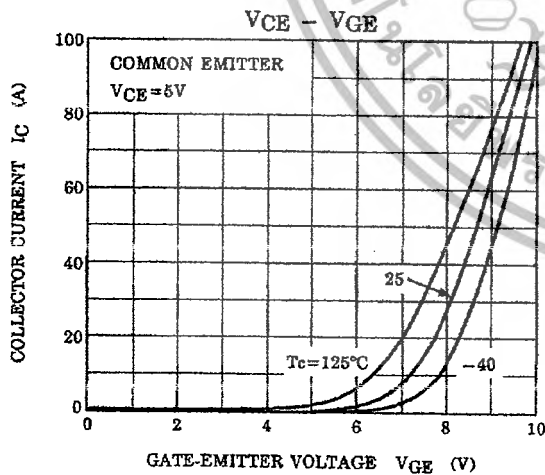
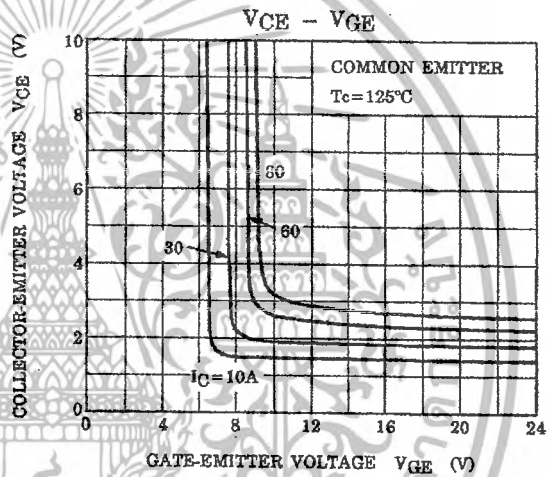
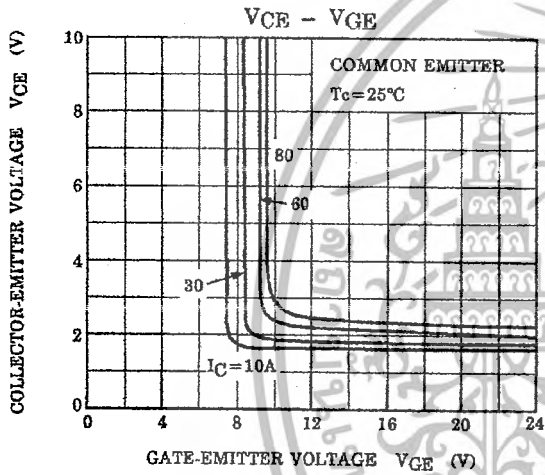
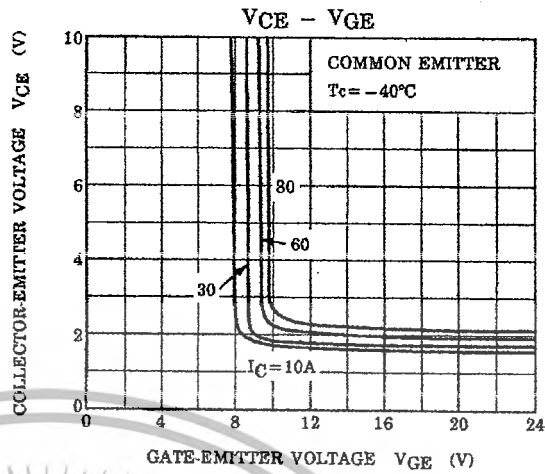
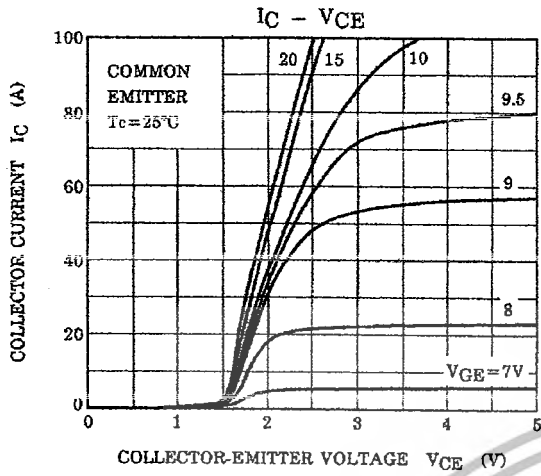
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Ta = 25°C)**

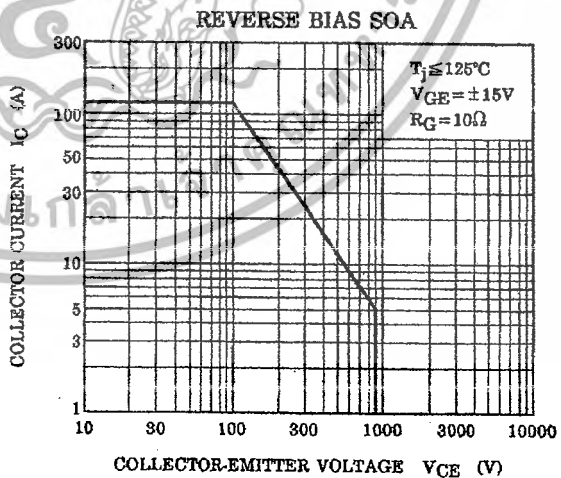
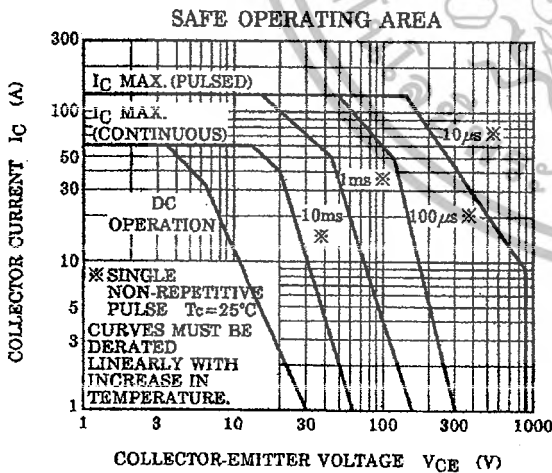
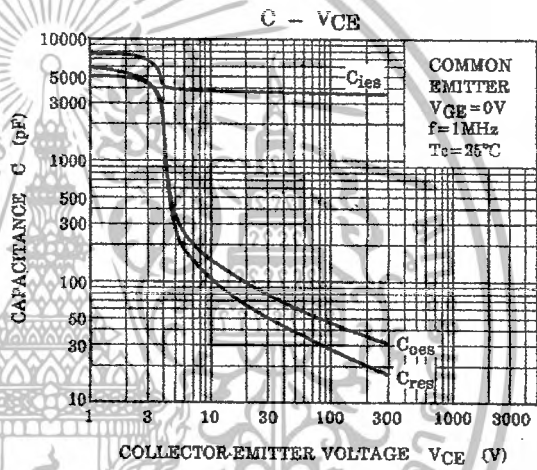
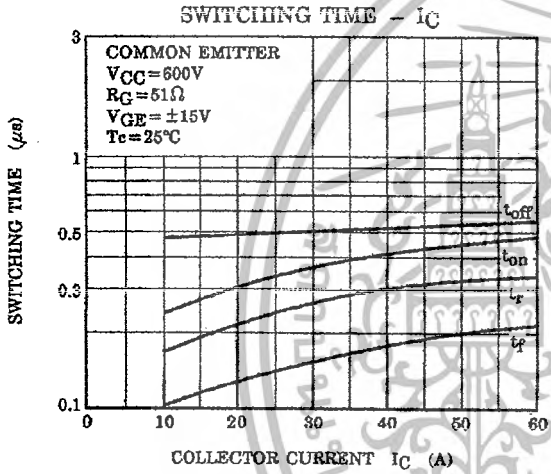
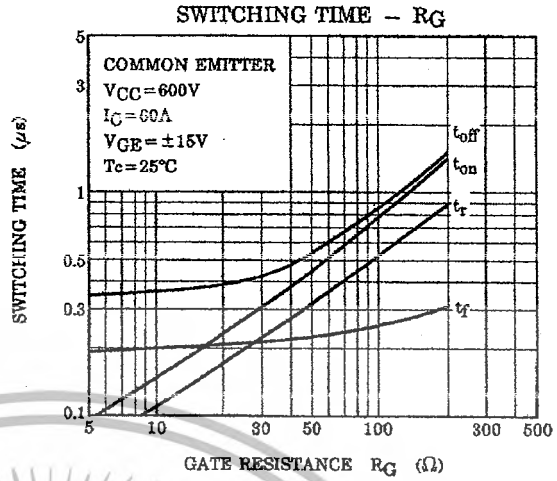
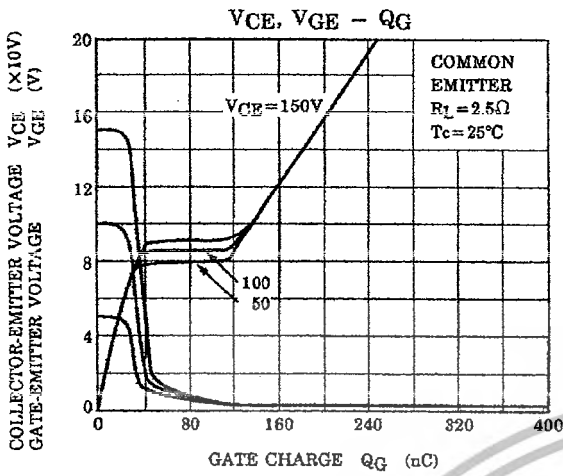
CHARACTERISTIC	SYMBOL	TEST CONDITION	MIN	TYP.	MAX	UNIT
Gate Leakage Current	I <sub>GES</sub>	V <sub>GE</sub> = ±25V, V <sub>CE</sub> = 0	—	—	±500	nA
Collector Cut-off Current	I <sub>CES</sub>	V <sub>CE</sub> = 900V, V <sub>GE</sub> = 0	—	—	1.0	mA
Gate-Emitter Cut-off Voltage	V <sub>GE (OFF)</sub>	I <sub>C</sub> = 60mA, V <sub>CE</sub> = 5V	3.0	—	6.0	V
Collector-Emitter Saturation Voltage	V <sub>CE (sat) (1)</sub>	I <sub>C</sub> = 10A, V <sub>GE</sub> = 15V	—	1.6	2.2	V
Collector-Emitter Saturation Voltage	V <sub>CE (sat) (2)</sub>	I <sub>C</sub> = 60A, V <sub>GE</sub> = 15V	—	2.1	2.7	V
Input Capacitance	C <sub>ies</sub>	V <sub>CE</sub> = 10V, V <sub>GE</sub> = 0, f = 1MHz	—	3800	—	pF
Switching Time	Rise Time	t <sub>r</sub>		0.35	0.60	μs
	Turn-On Time	t <sub>on</sub>		0.46	0.75	
	Fall Time	t <sub>f</sub>		0.25	0.40	
	Turn-Off Time	t <sub>off</sub>		0.60	0.70	
Emitter-Collector Forward Voltage	V <sub>ECF</sub>	I <sub>EC</sub> = 15A, V <sub>GE</sub> = 0	—	1.5	2.0	V
Reverse Recovery Time	t <sub>rr</sub>	I <sub>F</sub> = 15A, V <sub>GE</sub> = 0 di / dt = -20A / μs	—	0.7	2.5	μs
Thermal Resistance	R <sub>th (j-c)</sub>	IGBT	—	—	0.74	°C / W
Thermal Resistance	R <sub>th (j-c)</sub>	Diode	—	—	4.0	°C / W



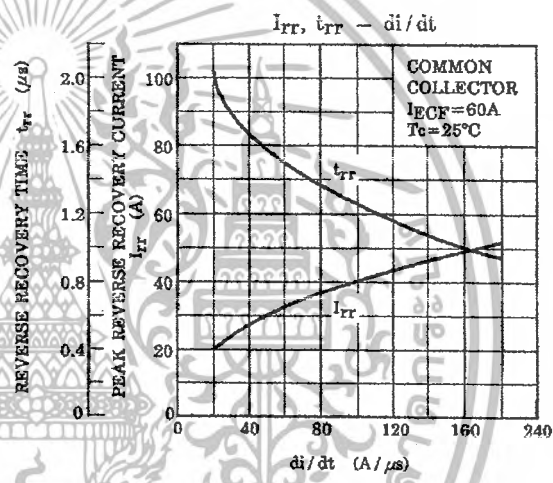
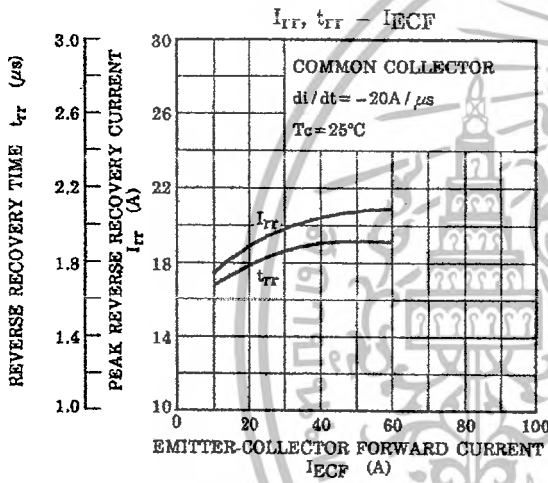
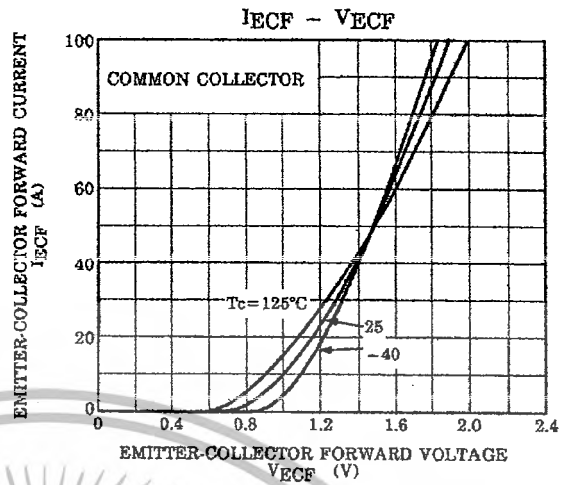
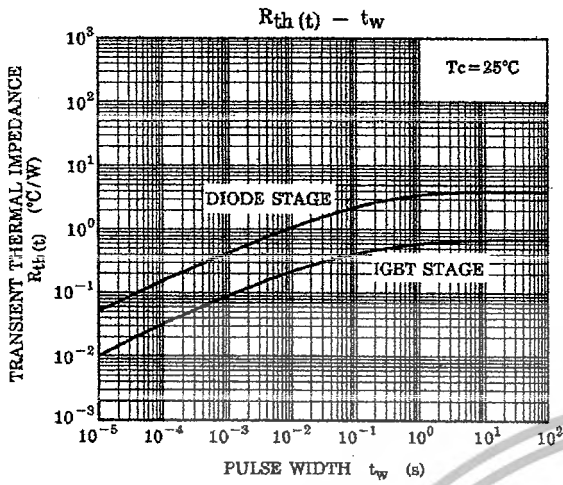
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## RESTRICTIONS ON PRODUCT USE

000707EAA

- TOSHIBA is continually working to improve the quality and reliability of its products. Nevertheless, semiconductor devices in general can malfunction or fail due to their inherent electrical sensitivity and vulnerability to physical stress. It is the responsibility of the buyer, when utilizing TOSHIBA products, to comply with the standards of safety in making a safe design for the entire system, and to avoid situations in which a malfunction or failure of such TOSHIBA products could cause loss of human life, bodily injury or damage to property.  
In developing your designs, please ensure that TOSHIBA products are used within specified operating ranges as set forth in the most recent TOSHIBA products specifications. Also, please keep in mind the precautions and conditions set forth in the "Handling Guide for Semiconductor Devices," or "TOSHIBA Semiconductor Reliability Handbook" etc..
- The TOSHIBA products listed in this document are intended for usage in general electronics applications (computer, personal equipment, office equipment, measuring equipment, industrial robotics, domestic appliances, etc.). These TOSHIBA products are neither intended nor warranted for usage in equipment that requires extraordinarily high quality and/or reliability or a malfunction or failure of which may cause loss of human life or bodily injury ("Unintended Usage"). Unintended Usage include atomic energy control instruments, airplane or spaceship instruments, transportation instruments, traffic signal instruments, combustion control instruments, medical instruments, all types of safety devices, etc.. Unintended Usage of TOSHIBA products listed in this document shall be made at the customer's own risk.
- The information contained herein is presented only as a guide for the applications of our products. No responsibility is assumed by TOSHIBA CORPORATION for any infringements of intellectual property or other rights of the third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any intellectual property or other rights of TOSHIBA CORPORATION or others.
- The information contained herein is subject to change without notice.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This datasheet has been download from:

[www.datasheetcatalog.com](http://www.datasheetcatalog.com)

Datasheets for electronics components.

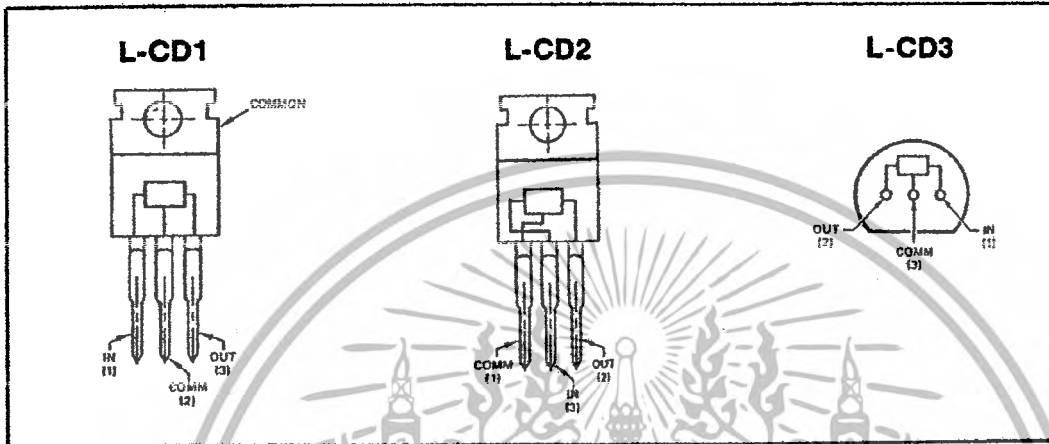


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# CODI Semiconductor, Inc.

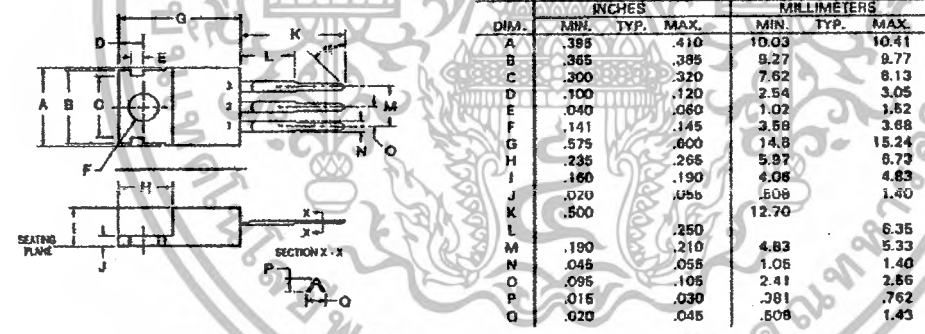
## LINEAR

### LOGIC SYMBOLS AND CONNECTION DIAGRAMS



### PACKAGE OUTLINES

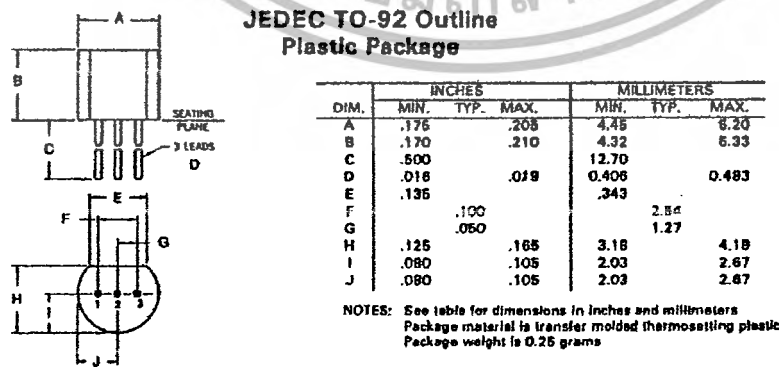
#### JEDEC TO-220 Outline Plastic Power Package



NOTES: See table for dimensions in inches and millimeters.  
Center lead is electrical contact with the mounting tab.

Package weight is 2.1 grams

#### JEDEC TO-92 Outline Plastic Package



NOTES: See table for dimensions in inches and millimeters.  
Package material is transfer molded thermosetting plastic.  
Package weight is 0.25 grams

144 Market St., Kenilworth, NJ, USA 07033 • (201) 298-0400

TOLL-FREE: 1-800-232-CODI

TELEX: 844-796

FAX NUMBER: 201-298-0477

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# CODI Semiconductor, Inc.

## LINEAR INTEGRATED CIRCUITS 3 - TERMINAL VOLTAGE REGULATORS

	1 AMP Pos. 7805-7824	1 AMP Neg. 7905-7924	.5A Pos. 78H05-78H24	.1A Pos. 78L05-78L24
Thermal resistance Rj-c Rj-a	5°C/w 70°C/w		7°C/w 100°C/w	
Power Dissipation	20W		10W	500mW
Temperature range Operating Ambient Operating Junction Storage	-20 to + 80°C -20 to + 125°C -55 to + 125°C		-20 to + 75°C -20 to + 125°C -40 to + 125°C	
Line Regulation (mV) Vo/Vi (%)	2.0		1.0	2.0
Load Regulation (mV) Vo/Io (%)	2.0		1.0	
Logic/Connection diagram	L-CD 1	L-CD 2	L-CD 1	L-CD 3
Package	TO-220			TO-92

TYPE No.	Nominal OUTPUT Voltage Range (V)	OUTPUT Voltage Range (V)	INPUT Voltage Range (V)	Quiescent Current (mA)	Ripple Rejection (dB) MIN	OUTPUT Noise Voltage (µV)	OUTPUT Voltage Drift (TEMP) mV/°C
----------	---	--------------------------------	-------------------------------	------------------------------	---------------------------------	---------------------------------	---

### 1 AMP POSITIVE

7805	5.0	4.8-5.2	7.0-35.0	5.1	52	50	-0.4
7806	6.0	5.75-6.25	8.0-35.0	4.7	59	45	-0.6
7808	8.0	7.7-8.3	10.5-35.0	4.7	56	50	-0.6
7812	12.0	11.5-12.5	14.5-35.0	4.7	55	70	-0.8
7815	15.0	14.4-15.6	17.5-35.0	4.7	56	85	-1.0
7818	18.0	17.3-18.7	21.0-35.0	5.0	53	95	-1.2
7824	24.0	23.0-25.0	27.0-60.0	5.0	50	120	-1.6

### 1 AMP NEGATIVE

7905	-5.0	-4.8-5.2	-7.0-35.0	1.0	54	100	-0.4
7906	-6.0	-5.75-6.25	-8.0-35.0	1.0	54	150	-0.5
7908	-8.0	-7.7-8.3	-10.5-35.0	1.0	54	200	-0.6
7912	-12.0	-11.5-12.5	-14.5-35.0	1.5	54	300	-0.8
7915	-15.0	-14.4-15.6	-17.5-35.0	1.5	54	375	-1.0
7918	-18.0	-17.3-18.7	-21.0-35.0	1.5	54	450	-1.0
7924	-24.0	-23.0-25.0	-27.0-60.0	1.5	51	600	-1.0

### .5A (500ma) POSITIVE

78H05	5.0	4.8-5.2	7.0-35.0	4.5	62	40	-1.0
78H06	6.0	5.75-6.25	8.0-35.0	4.6	59	45	-1.0
78H08	8.0	7.7-8.3	10.5-35.0	4.6	56	52	-1.0
78H12	12.0	11.5-12.5	14.5-35.0	4.8	55	75	-1.0
78H15	15.0	14.4-15.6	17.5-35.0	4.8	56	90	-1.0
78H18	18.0	17.3-18.7	21.0-35.0	4.8	53	100	-1.0
78H24	24.0	23.0-25.0	27.0-60.0	5.0	50	120	-1.0

### .1A (100ma) POSITIVE

78L05	5.0	4.75-5.25	7.0-30.0	4.0*	40	40	-1.0
78L06	6.0	5.92-6.45	8.0-30.0	4.0*	39	50	-1.0
78L08	8.0	7.6-8.4	10.5-30.0	5.0*	39	60	-1.0
78L12	12.0	11.4-12.6	14.5-35.0	6.5*	37	80	-1.5
78L15	15.0	14.3-15.7	17.5-35.0	6.5*	34	90	-1.5
78L18	18.0	17.1-18.9	21.0-40.0	6.5*	32	120	-2.0
78L24	24.0	22.8-25.2	27.0-40.0	7.0*	32	200	-2.0

\*max

144 Market St., Kenilworth, NJ, USA 07033 • (201) 298-0400

TOLL-FREE: 1-800-232-CODI

TELEX: 844-796

FAX NUMBER: 201-298-0477

เอ็กสาร์ทเป็นเอ็กสาร์ทที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอ็กสาร์ททุกครั้งที่มีการนำไปใช้