

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ระบบผลิตน้ำไอโซน

OZONE WATER SYSTEM



T104244

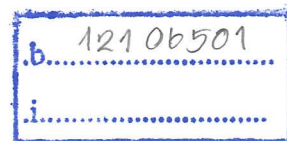
โดย

นายคิตวัตร ไชยสุทธิ  
นายจิตรกร ตะนุรักษ์  
นางสาวอรุษา เลากลาง

๔/๗

๑ 472 ๕

เลขหมู่.....2551  
เลขทะเบียน.....104244  
วัน,เดือน,ปี...30 ต.ค. 2552



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2551

ระบบผลิตน้ำโอโซน  
OZONE WATER SYSTEM

โดย

นายคิตวัตร ไชยสุทธิ รหัส 49015140  
นายจิตรกร ตะนุรักษ์ รหัส 49015143  
นางสาวอรอุษา เลากลาง รหัส 49015178

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2551

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2551

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
เรื่อง ระบบผลิตน้ำไอโซน

|          |                         |               |
|----------|-------------------------|---------------|
| ผู้จัดทำ | 1. นาย คีตวัตร ไชยสุทธิ | รหัส 49015140 |
|          | 2. นาย จิตกร ตะนุรักษ์  | รหัส 49015143 |
|          | 3. นางสาว อรุษา เลากลาง | รหัส 49015178 |

  
.....อาจารย์ ที่ปรึกษา  
( รศ. สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล )

## ระบบผลิตน้ำไอโซน

นาย กิตวัต ไชยสุทธิ รหัส 49015140

นาย จิตกร ตะนุรักษ์ รหัส 49015143

น.ศ. อรุษา เลากลาง รหัส 49015178

ร.ศ. สมศักดิ์ เขียวศิริกุล อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2551

### บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของปริญญานิพนธ์นี้เพื่ออธิบายถึงการออกแบบและการสร้างแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับแรงดันสูง ความถี่สูง แบบสวิตชิง ซึ่งมีขนาดแรงดันเอาต์พุต 3KV เพื่อนำไปจ่ายให้กับหลอดไอโซนโดยใช้ ไอซีเบอร์ TL494 เป็นตัวควบคุมการทำงานของวงจร และเป็นตัวผลิตสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่สูงและคาบเวลาคงที่เอาไปควบคุมเพาเวอร์มอสเฟต โดยใช้เทคนิคพัลส์วิดมอดูเลชั่นในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตชิง สำหรับการสวิตชิงของเพาเวอร์มอสเฟตได้ใช้หลักการของฮาล์ฟ-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ในการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับภายในวงจรสวิตชิง จากนั้นจะทำการผลิตสัญญาณพัลส์ออกมาและเอาสัญญาณพัลส์ที่ได้นี้ไปผ่านวงจรเรโซแนนซ์เพื่อเปลี่ยนแรงดันกระแสไฟฟ้ากระแสสลับที่มีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ และแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ นี้จะถูกแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงด้วยหม้อแปลงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดัน เพื่อนำแหล่งจ่ายไฟที่สร้างขึ้นมานี้ไปเป็นแหล่งจ่ายให้ระบบผลิตน้ำไอโซนเพื่อพัฒนาให้ระบบผลิตน้ำไอโซนมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยที่นำเอาอากาศให้ไหลผ่านหลอดไอโซน โดยให้อากาศไหลผ่านสนามไฟฟ้าแรงดันสูงเพื่อให้ออกซิเจนในอากาศแตกตัวและรวมตัวกันใหม่เกิดเป็นก๊าซไอโซน และนำก๊าซไอโซนที่ได้มาผสมกับน้ำ ระบบจะประกอบไปด้วยเครื่องสูบน้ำที่ใช้ในการจ่ายน้ำผ่านขั้นตอนผสมกับก๊าซไอโซน จากนั้นนำน้ำที่ผ่านการผสมกับก๊าซไอโซนมาทำการวัดปริมาณก๊าซไอโซนโดยใช้สารละลาย KI (โพแตสเซียม ไอโอไดด์)

# OZONE WATER SYSTEM

Mr. Keetawat Chaiyasut ID.49015140

Mr. Jittakorn Tanurak ID.49015143

Miss. Oraison Louklang ID.49015178

Assoc Prof. Somsak Chearsirikun Adviser

Educational Year 2008

## abstract

The purpose of this project to describes a design and construction of the high voltage switching power supply with high frequency at output voltage of 3KV. For ozone generate tube. IC TL494 is controlled switching and produce a signal that have high frequency and time are stable to control power MOSFET with Pulse Width Modulation (PWM) technique to control of the switching. The working process of switching work on the principle of half-bridge inverter to converts DC voltage into pulse voltage. After to produce signal pulse comes out. The signal pulse voltage to be converted into sine wave by resonance circuit and passed to high frequency step up transformer for high output voltage.

After that we use the switching power supply for the ozone water system is to develop the ozone water system.

Process of ozone water system following. First air blown in to ozone tube. Then air flow through high pressure electric field in order to ionize Oxygen and to regeneration into ozone. When we get ozone gas we would feed it and waste water in to ozone mixer. The designed ozone mixer uses water pump to discharge water through mixer which mix water and ozone gas. We then test the efficiency of ozone water mixing uses KI solution.

## กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำปฏิญยานิพนธ์ในครั้งนี้คงจะไม่ประสบความสำเร็จ ถ้าไม่มีท่านอาจารย์ที่ปรึกษา (รศ.สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล) ที่ได้คอยให้คำปรึกษาพร้อมทั้งแนวทางความคิดและขั้นตอนตลอดจนถึง เรื่องการแก้ไขปัญหาดังกล่าว เป็นผลทำให้ปฏิญยานิพนธ์ในครั้งนี้สำเร็จมาด้วยดี พร้อมทั้งขอขอบคุณ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้ความเอื้อเฟื้อในด้านสถานที่และเครื่องมืออุปกรณ์ อีกทั้งขอขอบคุณ พระคุณบิดา มารดา ที่ได้สนับสนุนด้านทุนทรัพย์และให้กำลังใจทางการศึกษาตลอดมาจนถึง ปัจจุบันอีกทั้งขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ที่คอยช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ หลายๆ เรื่องเช่น ให้ยืมเครื่องมือ และคอยให้กำลังใจที่ดีตลอดมาในการทำปฏิญยานิพนธ์ในครั้งนี้

นาย คีตวัตร ไชยสุทธิ์

นาย จิตกร ตะนุรักษ์

นางสาวอรอุษา เลากลาง

ผู้จัดทำ

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ

Abstract

บทที่ 1 บทนำ

1

1.1 สวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายแรงดันสูง

1

1.2 ระบบโอโซน

2

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ

3

บทที่ 2 หลักการทำงานและการออกแบบแหล่งจ่ายไฟ

4

2.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบต่างๆ

4

2.1.1 ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

5

2.1.2 ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์

7

2.1.3 พุช-พูล คอนเวอร์เตอร์

10

2.1.4 ฮาล์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

11

2.1.5 ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

13

2.2 วงจรควบคุมสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย

14

2.2.1 วงจรควบคุมในโหมดควบคุมจากแรงดัน ( Voltage Mode Control)

14

2.2.2 วงจรควบคุมในโหมดของกระแส ( Current Mode Control)

16

2.3 การออกแบบสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายด้วยไอซีเบอร์ TL494

20

2.3.1 การกำหนดคาบเวลาการทำงาน

21

2.3.2 การทำงานของไอซีในการคงค่าแรงดันของคอนเวอร์เตอร์

21

2.3.3 การกำหนดค่าเวลาเพื่อ  $T_D$

22

2.3.4 การเลือกใช้ Q1 และ Q2 ที่เอาต์พุตของไอซี

23

2.4 หลักการทำงานของแหล่งจ่ายไฟสวิตชิงแรงดันสูง

23

บทที่ 3 หลักการทำงานและการออกแบบระบบผลิตน้ำโอโซน

27

3.1 การทำงานของระบบผลิตน้ำโอโซน

27

3.2 หลักการออกแบบและการทำงานของระบบผสมระหว่างก๊าซโอโซนกับน้ำ

28

บทที่ 4 สารกึ่งตัวนำ

31

4.1 เพาเวอร์มอสเฟต

31

4.1.1 กำลังงานสูญเสียในรูปความร้อนของมอสเฟต

31

|         |                                                         |    |
|---------|---------------------------------------------------------|----|
| 4.1.2   | เงื่อนไขของวงจรขับเพาเวอร์มอสเฟต                        | 33 |
| 4.1.3   | ความจุความต้านทานอินพุต( Input Capacitance)             | 33 |
| 4.1.4   | การกำหนดเวลาในการเปลี่ยนสถานะ                           | 35 |
| 4.1.5   | วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วย TTL                           | 37 |
| 4.1.6   | วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วย CMOS                          | 38 |
| 4.1.7   | วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วยหม้อแปลง                       | 39 |
| 4.2     | วงจรสับเบอร์                                            | 39 |
| 4.2.1   | วงจรสับเบอร์ช่วงหยุดนำกระแส                             | 40 |
| 4.2.2   | วงจรสับเบอร์ป้องกันแรงดันเกิน                           | 41 |
| 4.3     | ไดโอดในสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย                           | 43 |
| 4.3.1   | กำลังงานสูญเสียในรูปความร้อนของไดโอด                    | 43 |
| 4.3.2   | ชนิดและการเลือกใช้                                      | 45 |
| 4.3.2.1 | ฟาสต์-รีกัฟเวอร์รีไดโอดและอัลตราฟาสต์-รีกัฟเวอร์รีไดโอด | 46 |
| 4.3.2.2 | ซอดดักไดโอด                                             | 47 |
| บทที่ 5 | การทดลอง                                                | 48 |
| 5.1     | การทดลองในส่วนของสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย                 | 48 |
| บทที่ 6 | สรุปผลการทดลอง                                          | 59 |



## สารบัญรูปภาพ

| ชื่อ                                                                                                                    | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 2.1 แสดงวงจรพื้นฐานของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์                                                                       | 5    |
| รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันที่เกิดขึ้นในวงจรขณะทำงานของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์                                     | 7    |
| รูปที่ 2.3 แสดงวงจรพื้นฐานของฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์                                                                    | 8    |
| รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะของกระแสและแรงดันที่เกิดขึ้นในวงจรขณะทำงานของฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์                               | 9    |
| รูปที่ 2.5 แสดงวงจรพื้นฐานของพุ่ม-พูลคอนเวอร์เตอร์                                                                      | 10   |
| รูปที่ 2.6 แสดงวงจรพื้นฐานของฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์                                                                  | 12   |
| รูปที่ 2.7 แสดง(บน) ขณะ Q1 นำกระแส (ล่าง) ขณะ Q2 นำกระแส                                                                | 12   |
| รูปที่ 2.8 แสดงวงจรพื้นฐานของฟูล-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์                                                                    | 13   |
| รูปที่ 2.9 แสดงวงจรพื้นฐานสำหรับการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ในโหมดควบคุมจากแรงดัน                                             | 15   |
| รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะของความกว้างของพัลส์จาก PWM ซึ่งเป็นผลมาจากการมอดูเลตสัญญาณป้อนกลับและสัญญาณพื้นฐานตามรูปที่ 2.9  | 16   |
| รูปที่ 2.11 แสดงวงจรพื้นฐานสำหรับการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ในโหมดควบคุมจากกระแส                                             | 17   |
| รูปที่ 2.12 วงจรควบคุมเมื่อตัดวงจรขยายความแตกต่างออกและกำหนดแรงดันอ้างอิง $V_{ref}$ ที่ขาอินเวอร์ตของวงจรเปรียบเทียบแทน | 18   |
| รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะการทำงานที่จุดต่างๆ ของวงจรควบคุมในโหมดควบคุมกระแส                                                | 19   |
| รูปที่ 2.14 แสดงการจัดโครงสร้างภายในและการจัดขาของไอซี TL 494                                                           | 20   |
| รูปที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ของค่า $R_T$ $C_T$ ในการกำหนดความถี่                                                        | 21   |
| รูปที่ 2.16 แสดงรูปคลื่นลักษณะการทำงานของ TL 494                                                                        | 22   |
| รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะของการควบคุมค่าเวลาเพื่อ                                                                          | 23   |
| รูปที่ 2.18 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย                                                          | 24   |
| รูปที่ 2.19 วงจรเรโซแนนซ์ภาคเอาต์พุต                                                                                    | 25   |
| รูปที่ 3.1 แสดงการทำงานของระบบผลิตน้ำไอโซน                                                                              | 27   |
| รูปที่ 3.2 แสดงตัวผสมก๊าซไอโซนกับน้ำด้วย ( Venturi Tube )                                                               | 28   |

|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 3.3  | ภาพจำลองระบบผลิตน้ำไอโซนด้วยหัวทราย (ฟองฟู)                                                                                                                                                                                                                                    | 29 |
| รูปที่ 3.4  | ภาพจำลองระบบผลิตน้ำไอโซนด้วย Venturi tube                                                                                                                                                                                                                                      | 30 |
| รูปที่ 4.1  | แสดงลักษณะของกระแสและแรงดันตกคร่อมเพาเวอร์มอสเฟตเมื่อเริ่มนำกระแส และเริ่มหยุดนำกระแส ในส่วนที่แรงจะเป็นส่วนที่จะเกิดกำลังงานสูญเสีย ในรูปความร้อนได้สูง                                                                                                                       | 32 |
| รูปที่ 4.2  | แสดงตัวเก็บประจุแผ่นที่ต่ออยู่ที่ขาต่างๆ ภายในตัวเพาเวอร์มอสเฟต                                                                                                                                                                                                                | 34 |
| รูปที่ 4.3  | แสดงลักษณะแรงดันและกระแสที่ขาเกตขณะเพาเวอร์มอสเฟตถูกไบแอสให้นำกระแส                                                                                                                                                                                                            | 34 |
| รูปที่ 4.4  | แสดงตัวอย่างของ Gate Charge Chart                                                                                                                                                                                                                                              | 35 |
| รูปที่ 4.5  | (ก) แสดงลักษณะการชาร์จประจุที่ขาเกตตามเวลาที่มีผลต่อการเริ่มนำกระแส<br>(ข) แสดงผลเมื่อเริ่มหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต                                                                                                                                                        | 36 |
| รูปที่ 4.6  | (ก) แสดงการขับเพาเวอร์มอสเฟตให้นำกระแสด้วยไอซี TTL และพุลอัพรีซิสเตอร์<br>(ข) แสดงการต่อทรานซิสเตอร์เพิ่มเข้ามาในวงจรรูป 5.11 (ก) เพื่อเพิ่มความเร็วขณะนำกระแส<br>(ค) แสดงการต่อทรานซิสเตอร์เพิ่มเข้ามาอีก 1 ตัวในวงจรรูป 5.11(ข) เพื่อเพิ่มความเร็วใน ขณะเริ่มหยุดนำกระแสด้วย | 38 |
| รูปที่ 4.7  | แสดงการขับเพาเวอร์มอสเฟตให้นำกระแสด้วยไอซี CMOS โดยตรง                                                                                                                                                                                                                         | 39 |
| รูปที่ 4.8  | แสดงตัวอย่างการจัดวงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตให้นำกระแสด้วยหม้อแปลง                                                                                                                                                                                                                  | 39 |
| รูปที่ 4.9  | แสดงลักษณะการลดลงของกระแส และการเพิ่มขึ้นของแรงดันตกคร่อม เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ขณะเริ่มหยุดนำกระแส                                                                                                                                                                              | 40 |
| รูปที่ 4.10 | แสดงการต่อวงจรสับเบอร์ช่วยหยุดนำกระแสเพื่อหน่วงแรงดันตกคร่อม เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ให้เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ                                                                                                                                                                         | 40 |
| รูปที่ 4.11 | แสดงการต่อสับเบอร์ป้องกันแรงดันเกินเพื่อจำกัดค่ากระแสสูงสุดที่จะตกคร่อม เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ขณะเริ่มหยุดนำกระแส                                                                                                                                                                | 41 |
| รูปที่ 4.12 | แสดงตัวอย่างค่าแรงดันตกคร่อมไดโอดขณะนำกระแส กำลัง สูญเสียในไดโอดในช่วงนี้จะมีค่า $P_D = V_F \times I_F$                                                                                                                                                                        | 44 |
| รูปที่ 4.13 | แสดงลักษณะของกระแสและแรงดันตกคร่อมไดโอดขณะเริ่มหยุดนำกระแส                                                                                                                                                                                                                     | 45 |

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 4.14 (ก) แสดงตัวอย่างค่าแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสของฟาสต์รีคัพเวอร์รีไดโอด                |    |
| (ข) แสดงตัวอย่างค่าแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสของอูลตราฟาสต์รีคัพเวอร์รีไดโอด                      | 46 |
| รูปที่ 4.15 แสดงตัวอย่างแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสของชอตต์กีไดโอด (ก)                             |    |
| และ ค่ากระแสรั่วไหลของชอตต์กีไดโอด (ข)                                                         | 47 |
| ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดลองที่ความถี่ต่างๆ                                                     | 48 |
| ตารางที่ 5.2 แสดงผลการทดลองที่ความถี่ต่างๆ                                                     | 49 |
| กราฟที่ 5.1 กราฟแสดงประสิทธิภาพกับความถี่ต่างๆ                                                 | 50 |
| กราฟที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเอาต์พุตกับความถี่ต่างๆ                            | 50 |
| กราฟที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์กันระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับความถี่ต่างๆ                        | 51 |
| รูปที่ 5.1 สัญญาณพินเปลือยวัดจากขา 5 ของ TL494                                                 | 52 |
| รูปที่ 5.2 สัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากมอสเฟตชุดไครว์เวอร์                                          | 52 |
| รูปที่ 5.3 สัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากเพาเวอร์มอสเฟตภาคอินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นอินพุตให้วงจรเรโซแนนซ์ | 53 |
| รูปที่ 5.4 เมื่อไม่ใส่ชุดวงจรสับเบอร์ให้เพาเวอร์มอสเฟต สัญญาณที่ได้จะมีสไปค์เกิดขึ้น           | 53 |
| รูปที่ 5.5 แสดง แหล่งจ่ายไฟแรงดันสูง                                                           | 55 |
| รูปที่ 5.6 แสดง หลอดกำเนิดไอโซน                                                                | 55 |
| รูปที่ 5.7 แสดง Venturi tube                                                                   | 56 |
| รูปที่ 5.8 แสดง ถังบำบัดน้ำ                                                                    | 56 |
| รูปที่ 5.9 แสดง ป้อนน้ำ                                                                        | 57 |
| รูปที่ 5.10 แสดง ป้อนลม                                                                        | 57 |
| รูปที่ 5.11 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ของระบบผลิตน้ำไอโซน                                           | 58 |

## บทที่ 1

### บทนำ

ปริญญานิพนธ์นี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนของ สวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย(Switching Power Supply) และในส่วนของการผลิตน้ำไอโซนที่ต้องใช้ในส่วนของการเพาเวอร์สวิตชิงซัพพลายเป็นส่วนประกอบในส่วนของการสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายเป็นแหล่งจ่ายไฟค่าคงที่แบบหนึ่งสามารถเปลี่ยนแรงดันไฟจากระบบแรงดันไฟสลับที่ 110 โวลต์หรือ 220 โวลต์ให้เป็นแรงดันไฟตรงค่าต่ำเพื่อใช้ในการอิเล็กทรอนิกส์ได้เช่นเดียวกับแหล่งจ่ายไฟแบบเชิงเส้น หรือที่เรียกว่าลิเนียร์เพาเวอร์ซัพพลาย(Linear Power Supply) ข้อได้เปรียบของสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งจ่ายไฟแบบเชิงเส้นคือประสิทธิภาพที่สูงกว่าขนาดเล็กและน้ำหนักเบาว่าแหล่งจ่ายไฟแบบเชิงเส้น เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟแบบเชิงเส้นใช้หม้อแปลงความถี่ต่ำจึงมีขนาดของหม้อแปลงที่ใหญ่และน้ำหนักมากขณะใช้งานจะมีแรงดันและกระแสผ่านตัวหม้อแปลงตลอดเวลา กำลังงานสูญเสียที่เกิดจากหม้อแปลงจึงมีค่าสูงสำหรับการคงค่าแรงดันของแหล่งจ่ายไฟเชิงเส้นส่วนมากจะใช้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ต่ออนุกรมที่เอาต์พุตเพื่อจ่ายกระแสและคงค่าแรงดันกำลังงานสูญเสียในรูปความร้อนจะมีค่าสูงและต้องใช้แผ่นระบายความร้อนขนาดใหญ่ซึ่งกินเนื้อที่มากเมื่อเพาเวอร์ซัพพลายต้องจ่ายกำลังงานสูงๆจะทำให้อุปกรณ์ที่ใช้มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากปกติแหล่งจ่ายไฟเชิงเส้นจะมีประสิทธิภาพประมาณ 30% หรืออาจทำได้สูงถึง 50% ในบางกรณีซึ่งนับได้ว่าค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายซึ่งมีประสิทธิภาพในช่วง 65%-80%

ในปัจจุบันสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายซึ่งมีขนาดของหม้อแปลงเล็กและมีประสิทธิภาพสูง น้ำหนักเบา มีบทบาทเป็นอย่างมากในเครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กซึ่งต้องการแหล่งจ่ายไฟที่ให้กำลังงานได้สูงและมีขนาดเล็กด้วย เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ เครื่องรับโทรทัศน์ เป็นต้น แนวโน้มการนำสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายมาใช้ในเครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์ทุกประเภทจึงเป็นไปได้สูง การศึกษาหลักการการทำงานและการออกแบบสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้สำหรับผู้ที่เกี่ยวข้องกับงานอิเล็กทรอนิกส์ทุกประเภทจะเห็นว่าสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายจึงมีความสำคัญมากในเครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันที่ต้องการความเล็ก น้ำหนักเบา แต่มีประสิทธิภาพสูง

#### 1.1 สวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายแรงดันสูง

สำหรับสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายในโครงการนี้ได้เอาหลักการพื้นฐานของสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายแรงดันต่ำมาทำเป็นสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายแรงดันสูงแบบกระแสสลับ โดยเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3,000 โวลต์ซึ่งมีหลักการทำงาน

คือเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ให้เป็นแรงดันไฟตรง 310 โวลต์ด้วยวงจรเรกติไฟร์และ วงจรฟิลเตอร์แล้วผ่านวงจรสวิตชิงเพื่อแปลงกลับมาเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงซึ่ง วงจรสวิตชิงเป็นหัวใจสำคัญที่สุดของสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายแรงดันสูงในโครงการนี้ใช้วิธีการ ของฮัลฟ-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ในการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ภายในวงจรสวิตชิง และในการควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ใช้เทคนิคพัลส์วิดมอดูเลชั่นใน การควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตชิง โดยหัวใจหลักของวงจรควบคุมคือ ไอซีเบอร์ TL494 ซึ่ง จะผลิตสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่และคาบเวลาตามที่เรากำหนดไว้ไปควบคุมเพาเวอร์มอสเฟตที่ ใช้ในการสวิตชิงสามารถกำหนดระดับแรงดันเอาต์พุตได้จากการปรับความถี่และคาบเวลาของ พัลส์ในภาคคอนโทรลแรงดันเอาต์พุตที่ออกจากวงจรสวิตชิงจะมีลักษณะเป็นพัลส์สี่เหลี่ยม และมี แรงดันเท่ากับแรงดันไฟตรงที่ป้อนให้กับวงจรที่นี้คือ 310 โวลต์ยออดถึงยออดจากนั้นก็เอาพัลส์ สี่เหลี่ยมที่ได้นี้ไปผ่านวงจรเรโซแนนซ์ซึ่งกำหนดความถี่เรโซแนนซ์ไว้ที่ 35 kHz สัญญาณที่ผ่าน วงจรเรโซแนนซ์จะเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่สูงจากนั้นเอาแรงดัน กระแสสลับที่ได้นี้ไปผ่านหม้อแปลงสวิตชิงความถี่สูงแบบเพิ่มแรงดันเพื่อเพิ่มแรงดันให้มีแรงดัน สูงถึง 3,000 โวลต์ซึ่งแรงดันเอาต์พุตนี้สามารถปรับค่าแรงดันได้จากความถี่ของสัญญาณสวิตชิง ถ้า ความถี่มีค่าใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าสูงขึ้นแต่ถ้าความถี่ของสัญญาณ สวิตชิงมีค่าห่างไกลจากความถี่เรโซแนนซ์แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าลดลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ แรงดันสูงจากเอาต์พุตของสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายแรงดันสูงในโครงการนี้ก็สามารถเอาไป ประยุกต์ใช้งานต่างๆ ได้ตามที่ต้องการ

## 1.2 ระบบโอโซน

ก๊าซโอโซนสามารถสร้างขึ้นได้ด้วยการนำอากาศจากปั๊มอากาศโดยไหลผ่านไปยังหลอด โอโซนซึ่งหลอดโอโซนนี้สร้างขึ้นโดยมีขั้วโลหะในที่นี้ใช้ขั้วโลหะทองแดง มีแก้วเป็นสารไดอิเล็ก ตริกและมีตาข่าย (มุ้งลวด) เป็นขั้วกราวด์ซึ่งจะป้อนไฟฟ้าแรงดันสูงให้กับขั้วไฟฟ้าทำให้เกิด สนามไฟฟ้าค่าสูงเพื่อทำให้ก๊าซออกซิเจนในอากาศระหว่างขั้วอิเล็กโตรด เกิดการไอออนไนเซชัน แยกตัวเป็นออกซิเจนอะตอมเดี่ยวและรวมตัวใหม่เป็นโอโซน ( $O_3$ )

ในปฏิญานิพนธ์นี้เป็น โครงการที่สร้างขึ้นมาเพื่อศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหา แนวทางในการผลิตน้ำโอโซนให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งประกอบไปด้วยหลอดกำเนิดโอโซน แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง ปั๊มอากาศ และตัวผสมโอโซนกับน้ำ ซึ่งปั๊มอากาศจะทำหน้าที่ให้อากาศ ไหลผ่านหลอดกำเนิดโอโซน โดยจะต้องป้อนแรงดันไฟฟ้าค่าสูงให้กับหลอดโอโซน ซึ่งก๊าซ โอโซนที่เกิดขึ้นนี้จะนำไปใช้ในระบบบำบัดน้ำระบบผลิตน้ำโอโซนจะให้มีประสิทธิภาพมี พารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อระบบ ดังเช่น การควบคุมปริมาณอากาศจากปั๊มอากาศ ควบคุมอัตรา

การไหลของน้ำ นอกจากนี้สามารถควบคุมปริมาณก๊าซโอโซนได้จากการป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงให้กับหลอดกำเนิดโอโซนจากนั้นน้ำที่ผ่านการผสมกับก๊าซโอโซนมาทำการตรวจสอบปริมาณก๊าซโอโซน

วัตถุประสงค์ของโครงการนี้คือ

1. เพื่อศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงเพื่อนำมาใช้ในการกำเนิดโอโซน
2. เพื่อศึกษากระบวนการผสมน้ำกับก๊าซโอโซน

## บทที่ 2

### หลักการงานและการออกแบบของแหล่งจ่ายไฟ

#### 2.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบต่างๆ

วงจรคอนเวอร์เตอร์นับว่าเป็นส่วนสำคัญที่สุดในสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายมีหน้าที่ลดทอนแรงดันไฟตรงค่าสูงลงมาเป็นแรงดันไฟตรงค่าต่ำและสามารถคงค่าแรงดันได้คอนเวอร์เตอร์มีหลายแบบขึ้นอยู่กับลักษณะการจับวงจรภายในโดยคอนเวอร์เตอร์แต่ละแบบจะมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันออกไปการจะเลือกใช้คอนเวอร์เตอร์แบบใดสำหรับสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายนั้นมีข้อควรพิจารณาจากลักษณะพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์แต่ละแบบดังนี้ คือ

- ลักษณะการแยกกันทางไฟฟ้าระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์
- ค่าแรงดันอินพุตที่จะนำมาใช้กับคอนเวอร์เตอร์
- ค่ากระแสสูงสุดที่ไหลผ่านเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในคอนเวอร์เตอร์ขณะทำงาน
- ค่าแรงดันสูงสุดที่ตกคร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในคอนเวอร์เตอร์ขณะทำงาน
- การรักษาระดับแรงดันในกรณีที่คอนเวอร์เตอร์มีเอาต์พุตหลายค่าแรงดัน
- การกำเนิดสัญญาณรบกวน RFI/EMI ของคอนเวอร์เตอร์

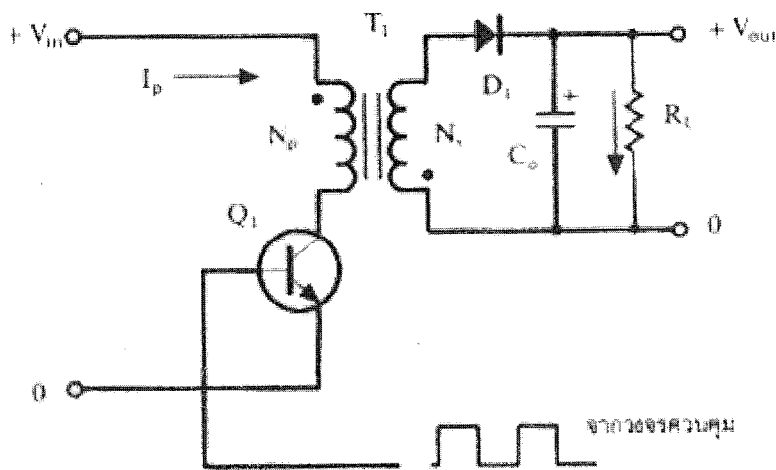
จากข้อพิจารณาดังกล่าว จะทำให้ผู้ออกแบบทราบขีดจำกัดของคอนเวอร์เตอร์และตัดสินใจเลือกใช้คอนเวอร์เตอร์แบบใดได้ ปัจจุบันได้มีการพัฒนาคอนเวอร์เตอร์ในรูปแบบต่างๆ ขึ้นมามากมาย ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะคอนเวอร์เตอร์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมของสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายซึ่งมี 5 แบบที่นิยมใช้ คือ

- ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (Flyback converter)
- ฟอว์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ (Forward converter)
- พูช-พูลคอนเวอร์เตอร์ (Push-Pull converter)
- ฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (Half-Bridge converter)
- ฟูล-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (Full-Bridge converter)

คอนเวอร์เตอร์ทั้ง 5 แบบนี้ มีลักษณะการทำงานที่ไม่แตกต่างกันจนเกินไปนัก และค่อนข้างง่ายต่อการทำความเข้าใจและศึกษาคอนเวอร์เตอร์เหล่านี้ยังสามารถแบ่งย่อยได้อีกหลายประเภทโดยการเพิ่มเทคนิคบางประการให้กับคอนเวอร์เตอร์

### 2.1.1 ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ มีค่าใช้จ่ายในการสร้างต่ำ จึงเหมาะสำหรับสวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายที่มีกำลังขาออกในช่วง 50 วัตต์ ถึง 150 วัตต์ สวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายมีข้อเสียคือ แรงดันเอาต์พุตที่ได้จะมีค่าแรงดันกระเพื่อม(ripple)ค่อนข้างสูงและเมื่อใช้กับระบบแรงดันไฟสลับ 220 โวลต์ เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในวงจรต้องทนแรงดันได้สูงประมาณ 800 โวลต์ ถึง 1,000 โวลต์ ซึ่งมีราคาแพง



รูปที่ 2.1 แสดงวงจรพื้นฐานของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

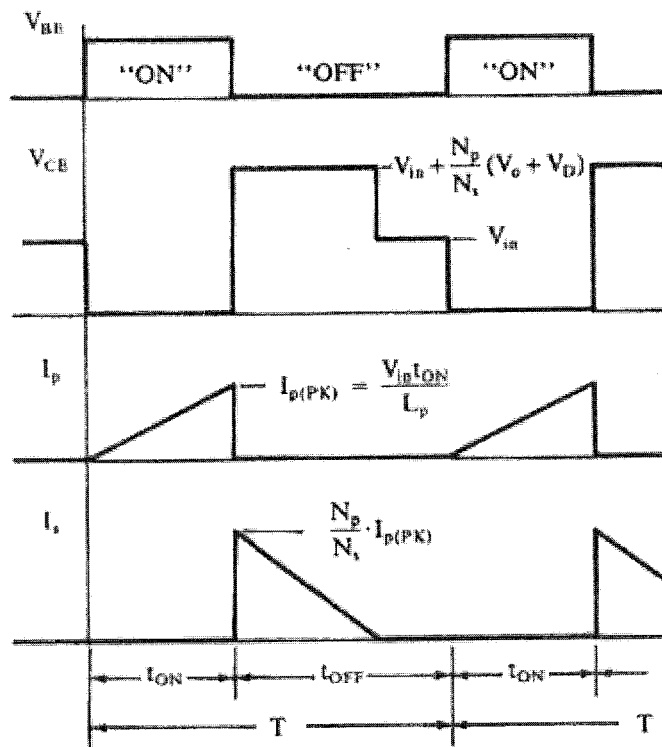
วงจรพื้นฐานของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แสดงไว้ในรูปที่ 2.1 การทำงานของวงจรจะเป็นดังนี้ เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q1 ในฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์จะทำงานในลักษณะเป็นสวิตช์ และจะนำกระแสตามคำสั่งของพัลส์ที่เปลี่ยนที่ป้อนให้ทางขาเบส เนื่องจากหม้อแปลง T1 จะกำหนดขดไฟโพรมารี่และขดเซคันดารีให้มีลักษณะกลับเฟสกันอยู่ ดังนั้นเมื่อ Q1 นำกระแส (ON) ไดโอด D1 จึงอยู่ในลักษณะถูกไบแอสกลับและไม่นำกระแส จึงมีการสะสมพลังงานที่ขดไฟโพรมารี่ของหม้อแปลง T1 แทน เมื่อ Q1 หยุดนำกระแส (OFF) สนามแม่เหล็ก T1 ยุบตัวทำให้เกิดการกลับขั้วแรงดันที่ขดไฟโพรมารี่และเซคันดารี D1 ก็จะอยู่ในลักษณะถูกไบแอสตรง พลังงานที่สะสมในขดไฟโพรมารี่ของหม้อแปลงก็จะถูกถ่ายเทออกไปยังขดเซคันดารี และมีกระแสไหลผ่านไดโอด D1 ไปยังตัวเก็บประจุเอาต์พุต Co และโหลดได้ค่าของแรงดันที่เอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์จะขึ้นอยู่กับค่าความถี่การทำงานของ Q1 ช่วงเวลานำกระแสของ Q1 อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลง และค่าของแรงดันที่อินพุต



เมื่อวงจรทำงานอยู่ในสภาวะคงที่ ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะเป็นไปตามสมการ

$$V_{out} = \frac{t_{ON} \times (N_s / N_p)(V_{in} - V_{CE(sat)})}{(T - t_{ON})} - V_D \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

- T      คือ คาบเวลาการทำงานของ Q1 เป็นวินาที
- $t_{ON}$       คือ ช่วงเวลาที่ Q1 นำกระแส เป็นวินาที
- $N_p$       คือ จำนวนรอบของขดไพรมารี เป็นรอบ
- $N_s$       คือ จำนวนรอบของขดเซคันดารี เป็นรอบ
- $V_{out}$       คือ แรงดันที่เอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ เป็น โวลต์
- $V_{in}$       คือ แรงดันที่อินพุตของคอนเวอร์เตอร์ เป็น โวลต์
- $V_{CE(sat)}$       คือ แรงดันตกคร่อม Q1 ขณะนำกระแสที่จุดอิ่มตัว เป็น โวลต์
- $V_D$       คือ แรงดันตกคร่อม ไดโอด D1 ขณะนำกระแส เป็น โวลต์



**รูปที่ 2.2** แสดงลักษณะของกระแสและแรงดันที่เกิดขึ้นในวงจรขณะทำงานของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์เป็นคอนเวอร์เตอร์ที่ให้กำลังงานได้ไม่สูงนัก โดยอยู่ในช่วงไม่เกิน 150 วัตต์ และให้ค่าสัญญาณรบกวน RFI/EMI ค่อนข้างสูง แต่ใช้อุปกรณ์น้อยและมีราคาถูก

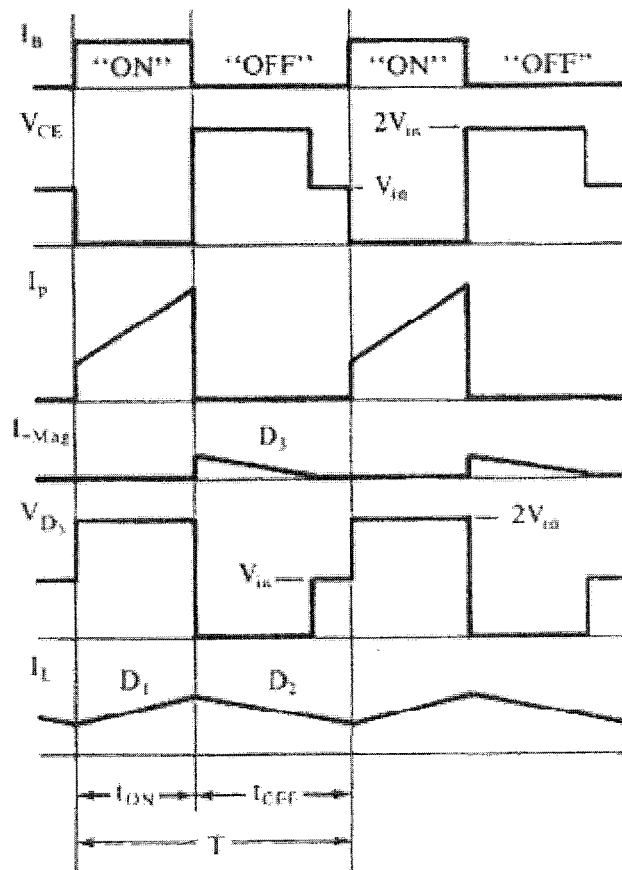
## 2.1.2 ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์

ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ เหมาะสำหรับสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายที่ให้กำลังงานอยู่ในช่วง 100 วัตต์ถึง 200 วัตต์ และถึงแม้จะมีค่าใช้จ่ายในการสร้างมากกว่าฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ แต่เนื่องจากฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์มีข้อได้เปรียบหลายประการที่เหนือกว่าฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ ดังนั้นที่กำลังสูงไม่เกิน 200 วัตต์ ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์จึงเป็นคอนเวอร์เตอร์อีกแบบหนึ่งที่นิยมใช้ในสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย



ผ่านไดโอด D2 ไปยังตัวเก็บประจุ Co และโหลดได้ กระแสที่ไหลผ่านโหลดจึงมีลักษณะต่อเนื่อง ทั้งในช่วงที่ Q1 นำกระแสและหยุดนำกระแส ทำให้มีการกระเพื่อมของแรงดันที่เอาต์พุตต่ำกว่า ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

ในขณะที่ Q1 หยุดนำกระแส สนามแม่เหล็กที่ตกค้างภายในหม้อแปลงจะมีการยุบตัวและ กลับชั่วแรงดันที่ขด Np, Ns และ Nr ไดโอด D3 จะอยู่ในลักษณะถูกไบแอสตรง ทำให้มีการถ่ายเท พลังงานที่เหลือค้างนี้ออกไปได้ ขดลวดดีแมกเนไตซ์ Nr และไดโอด D3 นี้มีความสำคัญมาก เพราะถ้าไม่มีการถ่ายเทพลังงานที่ตกค้างออกไปจากขดไพรมารีในขณะที่ Q1 หยุดนำกระแส เมื่อ Q1 เริ่มนำกระแสอีกครั้ง สนามแม่เหล็กที่หลงเหลืออยู่จะทำให้ Q1 เสียหายได้



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะของกระแสและแรงดันที่เกิดขึ้นในวงจรขณะทำงานของฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์

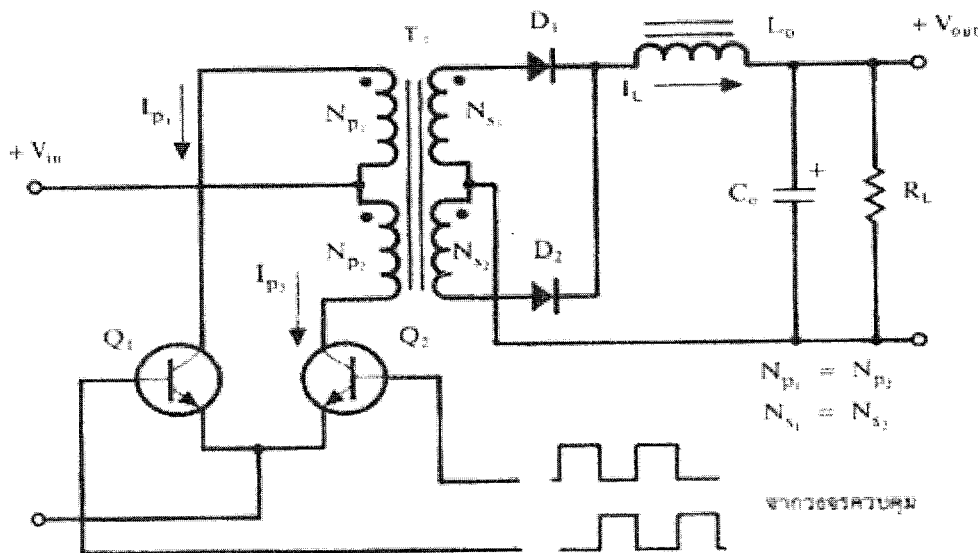
สำหรับฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ เมื่อวงจรทำงานอยู่ในสภาวะคงที่ ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากคอนเวอร์เตอร์จะเป็นไปตามสมการ

$$V_{out} = \frac{t_{ON} \times (N_s / N_p)(V_{in} - V_{CE(sat)})}{(T - t_{ON})} - V_D \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ให้กำลังงานได้ในช่วงเดียวกับฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์(ในช่วง 100 - 200 วัตต์) แต่กระแสที่ได้จะมีการกระเพื่อมต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม ตัวอุปกรณ์ที่เพิ่มเข้ามาจะทำให้มีราคาสูงกว่า

### 2.1.3 พุช-พูลคอนเวอร์เตอร์

การทำงานของพุช-พูลคอนเวอร์เตอร์ เปรียบเหมือนกับการนำฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์สองชุดมาต่อทำงานร่วมกัน โดยผลัดกันทำงานในแต่ละครึ่งคาบเวลาในลักษณะกลับเฟส ทำให้จ่ายกำลังได้ค่อนข้างสูงในช่วง 200 วัตต์ ถึง 1,000 วัตต์ อย่างไรก็ตาม เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในวงจรยังคงมีแรงดันตกคร่อมขณะหยุดนำกระแสค่อนข้างสูงเช่นเดียวกับฟอร์เวิร์ดและฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์รวมทั้งปัญหาในการเกิดฟลักซ์ไม่สมมาตรในแกนเฟอร์ไรต์ของวงจรทำให้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์พังและเสียหายง่าย



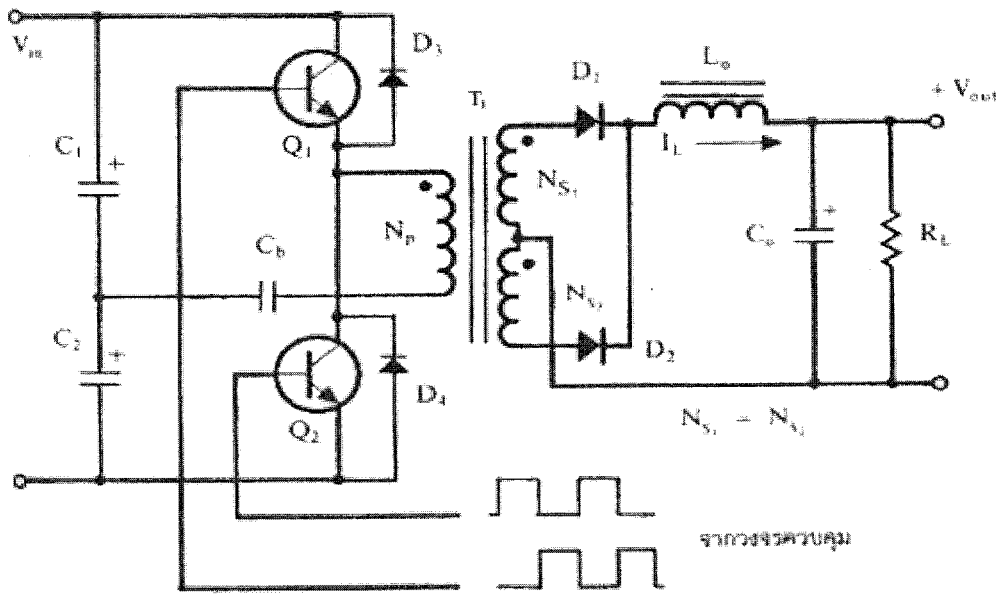
รูปที่ 2.5 แสดงวงจรพื้นฐานของพุช-พูลคอนเวอร์เตอร์

วงจรพื้นฐานของพืชน-พุลคอนเวอร์เตอร์แสดงไว้ในรูปที่ 2.5 จากรูป Q1 และ Q2 จะสลับกันทำงานโดยผลัดกันนำกระแสในแต่ละครึ่งคาบเวลา T ในขณะที่ Q1 นำกระแสจะมีกระแส  $I_p$  ไหลผ่านขดไฟพรมารี Np1 และไดโอด D1 จะถูกไบแอสกลับ ส่วนไดโอด D2 จะถูกไบแอสตรง ทำให้มีกระแสไหลที่ขดไฟพรมารี Ns2 ผ่านไดโอด D2 และ Lo ไปยังตัวเก็บประจุ Co และโหลด ในจังหวะนี้แรงดันตกคร่อม Q2 จะมีค่าเป็น  $2V_{in}$  (จำนวนรอบ Np1 = Np2 และ Ns1 = Ns2) ในทำนองเดียวกันขณะที่ Q2 นำกระแส Q1 และ D2 จะไม่นำกระแสเนื่องจากถูกไบแอสกลับ D1 ซึ่งถูกไบแอสตรงจะนำกระแสจากขดเซคันดารี Ns1 ผ่าน Lo ไปยังตัวเก็บประจุ Co และโหลด จะเห็นได้ว่าในหนึ่งคาบเวลาการทำงาน ขดเซคันดารีจะให้กระแสไหลผ่าน Lo ได้ถึงสองครั้ง พืชน-พุลคอนเวอร์เตอร์จึงสามารถจ่ายกำลังงานได้มากเป็นสองเท่าของฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ที่ค่ากระแสสูงสุดด้านพรมารีมีค่าเท่ากัน และโหลดมีกระแสไหลต่อเนื่องตลอดเวลา กระแสที่ได้ทางเอาต์พุตจึงค่อนข้างเรียบ

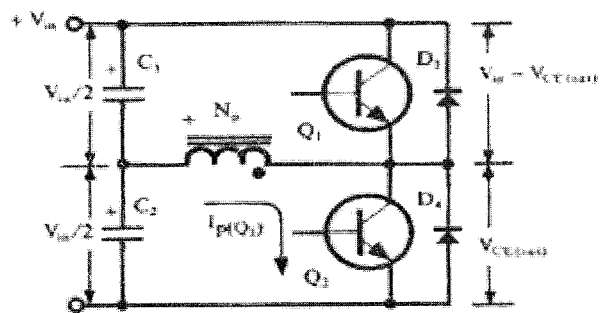
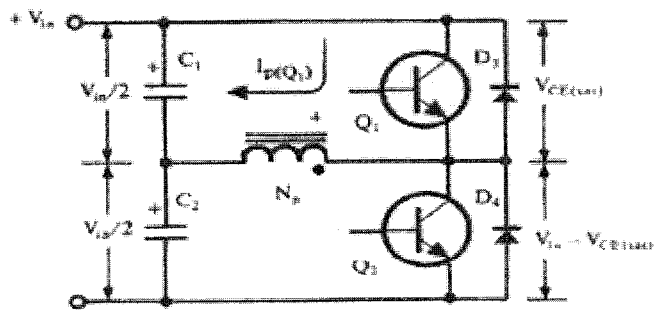
#### 2.1.4 ฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์

อาจกล่าวได้ว่าฮาล์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์จัดอยู่ในตระกูลเดียวกับพืชน-พุลคอนเวอร์เตอร์แต่ลักษณะการจัดวงจรของฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์จะทำให้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในวงจรมีแรงดันตกคร่อมขณะหยุดนำกระแสเพียงค่าแรงดันอินพุตเท่านั้น ทำให้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ที่ใช้มีราคาถูก และหาได้ง่ายกว่า ซึ่งจะลดข้อจำกัดต่างๆ เมื่อใช้กับระบบแรงดันไฟสูงได้มาก เช่นที่แรงดันไฟสลับ 220 โวลต์ รวมทั้งฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ยังไม่มีปัญหาของการไม่สมมาตรของฟลักซ์ในแกนเฟอร์ไรต์ของหม้อแปลงได้ด้วย ฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์สามารถให้กำลังงานสูงสุดได้ไม่เกิน 500 วัตต์

วงจรพื้นฐานของฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์แสดงไว้ในรูปที่ 2.6 การทำงานเป็นดังต่อไปนี้ ตัวเก็บประจุ C1 และ C2 ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากัน ต่ออนุกรมกันอยู่ทางด้านอินพุตเพื่อแบ่งครึ่งแรงดันแรงดันตกคร่อม C1 และ C2 จึงมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของแรงดันที่อินพุต เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q1 และ Q2 จะสลับกันทำงานคนละครึ่งคาบเวลาเช่นเดียวกับพืชน-พุลคอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาวงจร จะพิจารณาในกรณีที่ไม่มีตัวเก็บประจุ Cb ต่ออยู่ในวงจร โดยให้ปลายของขดไฟพรมารี Np ที่ต่ออยู่กับ Cb นั้นต่อโดยตรงเข้ากับจุดต่อระหว่างตัวเก็บประจุ C1 และ C2 ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 แสดงวงจรพื้นฐานของฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์



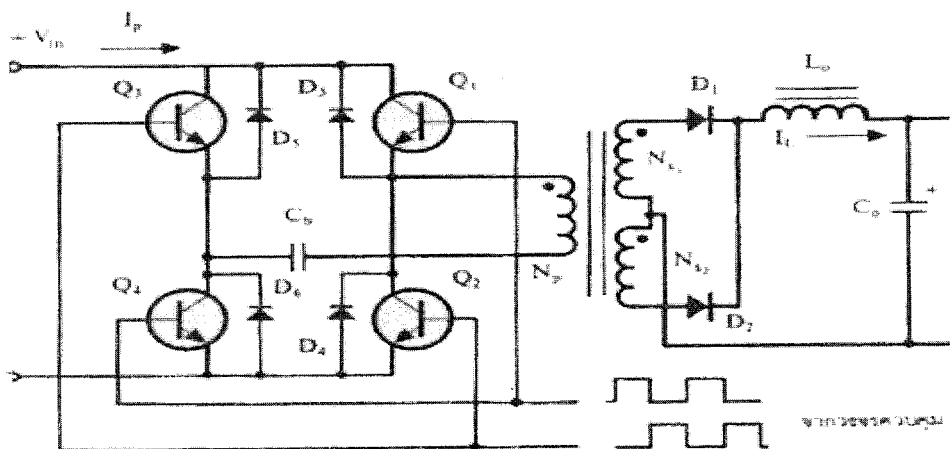
รูปที่ 2.7 (บน) ขณะ Q1 นำกระแส (ล่าง) ขณะ Q2 นำกระแส

พิจารณาการทำงานของฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ในรูปที่ 2.7 เมื่อ Q1 เริ่มนำกระแสและ Q2 ไม่นำกระแส แรงดันตกคร่อม Q2 จะมีค่าเท่ากับ  $V_{in} - V_{ce(sat)}$  ส่วนแรงดันตกคร่อมของไพรมารี Np จะมีค่าเท่ากับ  $V_{c1} - V_{ce(sat)}$  หรือมีค่าเท่ากับ  $V_{in}/2 - V_{ce(sat)}$  นั่นเอง ในทำนองเดียวกัน เมื่อ Q2 นำกระแส และ Q1 ไม่นำกระแส แรงดันตกคร่อม Q1 จะมีค่าเท่ากับ  $V_{in} - V_{ce(sat)}$  เช่นเดียวกัน แรงดันตกคร่อมที่ขดไพรมารี Np ก็ยังคงมีค่าเท่ากับ  $V_{in}/2 - V_{ce(sat)}$  เนื่องจาก  $V_{ce(sat)}$  มีค่าประมาณ 0.5-1 โวลต์ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าแรงดันตกคร่อม Q1 และ Q2 ขณะหยุดนำกระแสจะมีค่าเพียงแรงดันอินพุตเท่านั้น ผลของการทำงานของ Q1 และ Q2 ที่ด้านเซคันดารีจะมีลักษณะเดียวกันกับฟูล-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์จะให้กำลังงานสูงสุดได้ไม่เกิน 500 วัตต์

จากข้อดีของฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ทำให้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในวงจรมีแรงดันตกคร่อมขณะหยุดนำกระแสเพียงค่าแรงดันอินพุตเท่านั้นทำให้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ที่ใช้มีราคาถูกลงและหาได้ง่าย ซึ่งจะลดข้อจำกัดต่างๆ เมื่อใช้กับระบบแรงดันไฟสูงได้มาก ทำให้ในโครงการนี้เราจะใช้วิธีการของฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ในการทำงานของภาคสวิตชิง

### 2.1.5 ฟูล-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์

ฟูล-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ขณะทำงานจะมีแรงดันตกคร่อมขดไพรมารีเท่ากับแรงดันอินพุต แต่แรงดันตกคร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์มีค่าเพียงครึ่งหนึ่งของแรงดันอินพุตเท่านั้นและค่ากระแสสูงสุดที่เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์แต่ละตัวนั้น มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของกระแสสูงสุดในฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ที่กำลังขาออกเท่ากัน เนื่องจากข้อจำกัดด้านเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ลดน้อยลงไป กำลังงานสูงสุดที่จะได้จากฟูล-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์จึงมีค่าสูงได้ตั้งแต่ 500 วัตต์ จนถึง 1,000 วัตต์



รูปที่ 2.8 แสดงวงจรพื้นฐานของฟูล-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์



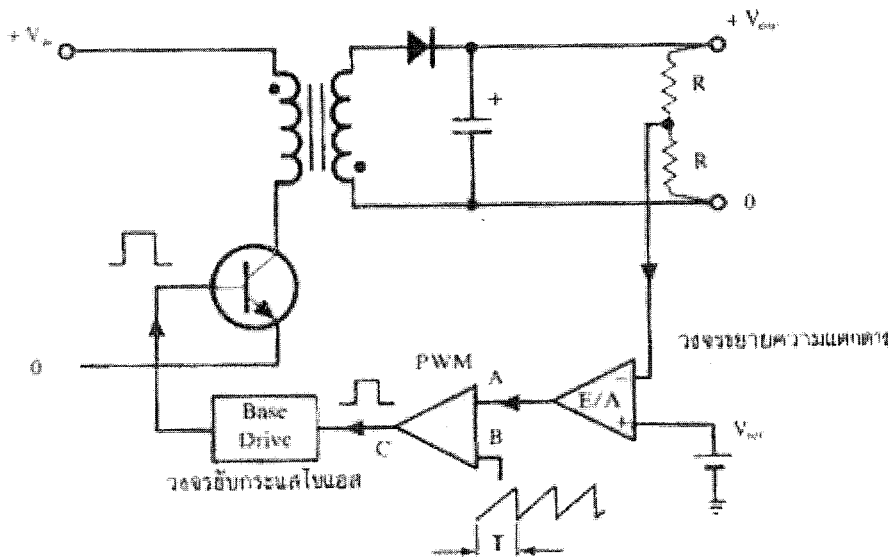
วงจรพื้นฐานของฟูล-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์แสดงในรูปที่ 2.8 เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ทั้ง 4 ตัวจะทำงานโดยนำกระแสและหยุดนำกระแสสลับกันเป็นคู่ๆ ในแต่ละครึ่งคาบเวลา Q1 และ Q4 จะนำกระแสพร้อมกันในครึ่งคาบเวลา และเมื่อหยุดนำกระแส Q2 และ Q3 จะนำกระแสพร้อมกันในครึ่งคาบเวลาที่เหลือ สลับกันเช่นนี้เรื่อยไป ลักษณะการทำงานของวงจรที่ได้จึงเป็นเช่นเดียวกันกับฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ยกเว้นแรงดันตกคร่อมขดไฟรมาจะมีค่าเท่ากับ  $V_{in} - 2V_{ce(sat)}$  ดังนั้นผลของการทำงานของวงจรจึงเหมือนกับผลที่ได้จากพุ่ม-ฟูลคอนเวอร์เตอร์นั่นเอง ส่วนตัวเก็บประจุบล็อกกิ้ง  $C_b$  จะมีผลเช่นเดียวกับวงจรฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ จะเห็นได้ว่าแรงดันที่ตกคร่อม Q1 และ Q4 ขณะหยุดนำกระแสจะมีค่าเท่ากับ  $V_{in} - V_{ceq2(sat)}$  และ  $V_{in} - V_{ceq3(sat)}$  ตามลำดับ ส่วนแรงดันที่ตกคร่อม Q2 และ Q3 ขณะหยุดนำกระแสก็มีค่า  $V_{in} - V_{ceq1(sat)}$  และ  $V_{in} - V_{ceq4(sat)}$  ตามลำดับเช่นเดียวกัน ส่วนไดโอด D3-D6 ทำหน้าที่เป็นคอมมิวเตตติ้งไดโอดให้กับวงจรเพื่อป้องกัน Q1-Q4 เช่นเดียวกับฮาล์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

## 2.2 วงจรควบคุมสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย

วงจรคอนเวอร์เตอร์เกือบทุกแบบ จะสามารถคงค่าแรงดันเอาต์พุตได้ ด้วยการควบคุมช่วงเวลานำกระแส ( $t_{ON}$ ) ของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ดังนั้นวงจรควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์โดยทั่วไป จึงมักนิยมใช้เทคนิคพัลส์วิดมอดูเลชัน (Pulse Width Modulation) หรือ PWM เป็นหลักการใช้เทคนิคพัลส์วิดมอดูเลชันเพื่อควบคุมช่วงเวลาในการนำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในคอนเวอร์เตอร์สามารถทำได้ 2 ลักษณะการทำงานของวงจรควบคุมคือ โหมดควบคุมจากแรงดันและโหมดควบคุมจากกระแส ในโครงการชิ้นนี้จะใช้วงจรควบคุมโหมดควบคุมจากแรงดัน โดยใช้ไอซีเบอร์ TL494 เป็นหัวใจหลักในการควบคุม

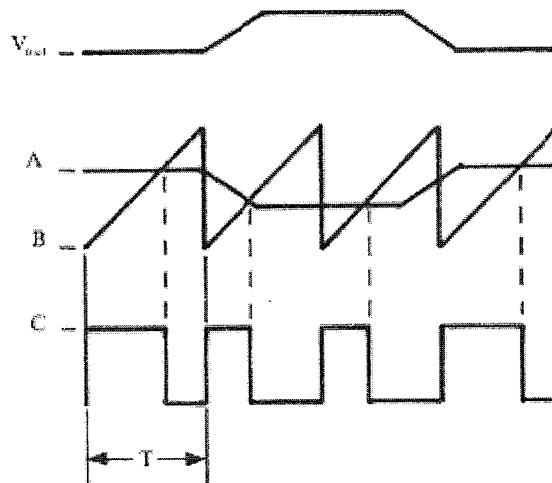
### 2.2.1 วงจรควบคุมในโหมดควบคุมจากแรงดัน (Voltage Mode Control)

การทำงานของวงจรควบคุมในโหมดนี้จะอาศัยการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันที่เอาต์พุตมาควบคุมช่วงเวลาในการนำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์เพื่อการคงค่าแรงดันเอาต์พุตเป็นหลัก วงจรพื้นฐานของวงจรควบคุมในโหมดควบคุมจากแรงดันแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงวงจรพื้นฐานสำหรับการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ในโหมดควบคุมจากแรงดัน

จากรูปที่ 2.9 วงจรควบคุมจะอาศัยการป้อนกลับค่าแรงดันที่เอาต์พุต และนำมาเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง  $V_{ref}$  ของวงจร เพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่เอาต์พุต ค่าความแตกต่างที่ได้จะถูกขยายโดยวงจรขยายความแตกต่าง E/A ก่อนที่จะส่งต่อไปยังวงจร PWM โดยค่าแรงดันที่ได้จากวงจรขยายความแตกต่าง E/A ที่ตำแหน่ง A จะถูกเปรียบเทียบกับแรงดันรูปฟันเลื่อยที่ตำแหน่ง B ของ PWM อีกครั้งหนึ่ง เอาต์พุตที่ได้จากวงจร PWM จะมีลักษณะเป็นพัลส์สี่เหลี่ยมซึ่งมีคาบเวลาคงที่เท่ากับคาบเวลาของแรงดันรูปฟันเลื่อย และมีความกว้างของพัลส์ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามผลมอดดูเลชั่นของค่าแรงดันที่ตำแหน่ง A และ B ค่าความกว้างของพัลส์นี้เองที่จะเป็นตัวกำหนดช่วงเวลานำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในคอนเวอร์เตอร์



**รูปที่ 2.10** แสดงลักษณะของความกว้างของพัลส์จาก PWM ซึ่งเป็นผลมาจากการมอดูเลตสัญญาณป้อนกลับและสัญญาณพื้นฐานตามรูปที่ 2.9

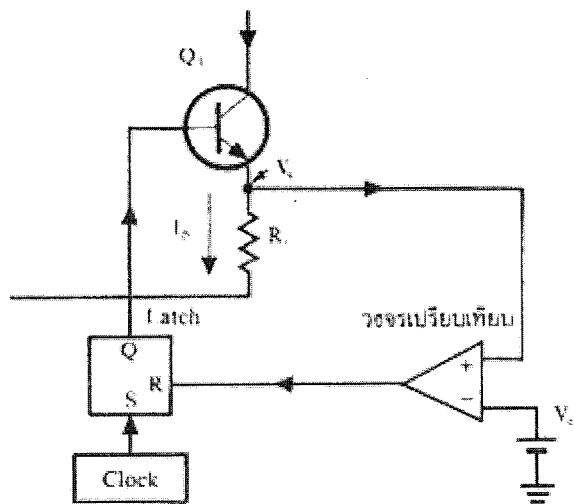
เนื่องจากค่าแรงดันป้อนกลับจะถูกส่งมายังวงจรขยายความแตกต่าง  $E/A$  ที่ขาอินเวอร์ตซึ่งผลต่างของแรงดันเอาต์พุต และแรงดันอ้างอิงที่จุด A จึงมีลักษณะกลับเฟสอยู่ 180 องศา กล่าวคือเมื่อแรงดันเอาต์พุตมีค่ามากขึ้น แรงดันที่จุด A จะมีค่าลดลง ความกว้างของพัลส์ที่เอาต์พุตของวงจร PWM จึงมีค่าลดลงด้วย และช่วงเวลานำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์  $t_{ON}$  ก็จะมีค่าลดลง ถ้าแรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลง แรงดันที่จุด A จะมีค่าเพิ่มขึ้น ความกว้างพัลส์ที่เอาต์พุตของวงจร PWM จึงมีค่าเพิ่มขึ้น  $t_{ON}$  ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้คอนเวอร์เตอร์สามารถคงค่าแรงดันเอาต์พุตไว้ได้ ลักษณะรูปคลื่นแรงดันขณะวงจรทำงานจะเป็นดังรูปที่ 2.10 ตัวอย่าง IC ที่ใช้ควบคุมคอนเวอร์เตอร์ในโหมดควบคุมจากแรงดันได้แก่เบอร์ MC34060, MC34166 และ TL494 เป็นต้น

## 2. 2.2 วงจรควบคุมในโหมดควบคุมจากกระแส (Current Mode Control)

การคงค่าแรงดันเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ด้วยวงจรควบคุมในโหมดควบคุมจากกระแส (Current Mode Control) มีข้อดีหลายประการที่เหนือกว่าโหมดควบคุมจากแรงดัน จึงเป็นวงจรควบคุมอีกแบบหนึ่งที่นิยมใช้กันมาก อย่างไรก็ตาม วงจรควบคุมในโหมดควบคุมจากกระแสนี้ยังคงใช้เทคนิคพัลส์วิดมอดูเลชันเช่นกัน วงจรพื้นฐานแสดงในรูปที่ 2.11



เมื่อวงจรทำงานวงจรกำเนิดสัญญาณพิกาสจะให้กำเนิดสัญญาณพิกาสที่มีคาบเวลาคงที่ไปกระตุ้นที่ขา S ของ Latch ขา Q จึงมีสถานะเป็น “High” เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q1 จะเริ่มนำกระแส เมื่อ Q1 นำกระแสจะมีกระแสไหลผ่านขดลวดปรมารีและตัวต้านทาน Rs ที่ต่ออนุกรมไว้กับ Q1 ทำให้เกิดแรงดัน  $V_s$  ตกคร่อมที่ตัวต้านทาน Rs ด้วย



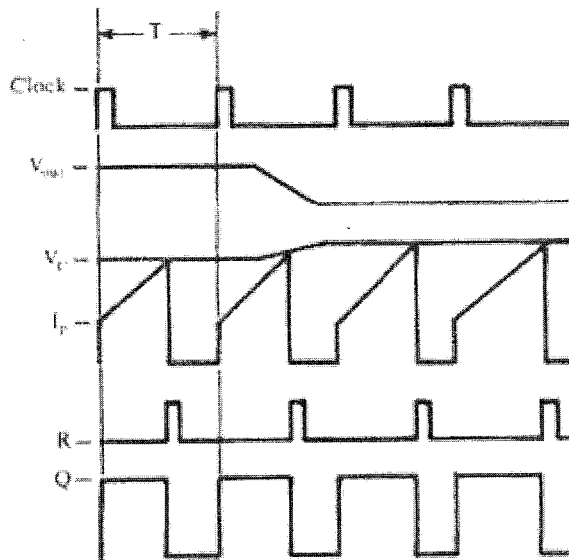
รูปที่ 2.12 วงจรควบคุมเมื่อตัดวงจรขยายความแตกต่างออกและกำหนดแรงดันอ้างอิง  $V_{ref}$  ที่ขาอินเวอร์ตของวงจรเปรียบเทียบแทน

แรงดันตกคร่อม  $R_s$  ที่เกิดขึ้นจะถูกเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง  $V_{ref}$  โดยวงจรเปรียบเทียบ ดังนั้นเมื่อค่าของ  $V_s$  เพิ่มขึ้นจนมีค่ามากกว่าค่าของแรงดันอ้างอิง  $V_{ref}$  เอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบจะมีสถานะเป็น “High” และไปกระตุ้นที่ขา R ของวงจร Latch ทำให้ขา Q มีสถานะเป็น “Low” และเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์  $Q_1$  จะหยุดนำกระแส จนกว่าที่ขา S ของวงจร Latch จะได้รับการกระตุ้นจากสัญญาณนาฬิกาอีกครั้ง

จะเห็นได้ว่าความกว้างของเอาต์พุตพัลส์ที่ขา Q ของวงจร Latch จะถูกควบคุมโดยค่าของแรงดัน  $V_s$  ที่ตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_s$  นั้นเอง ถ้าค่าแรงดันอินพุตของคอนเวอร์เตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นแรงดัน  $V_s$  จะเพิ่มขึ้นจนมีค่ามากกว่าแรงดันอ้างอิง  $V_{ref}$  ได้เร็วขึ้นด้วย ทำให้ความกว้างของเอาต์พุตพัลส์ลดลง เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์จะมีช่วงเวลานำกระแสน้อยลง ในทางกลับกัน ถ้าแรงดันอินพุตของคอนเวอร์เตอร์มีค่าลดลง แรงดัน  $V_s$  จะเพิ่มขึ้นได้ช้า ความกว้างของเอาต์พุตพัลส์จึงเพิ่มขึ้น เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์จะมีช่วงเวลานำกระแสมากขึ้นด้วย จะเห็นได้ว่าเมื่อโหลดคงที่ คอนเวอร์เตอร์จะสามารถคงค่าแรงดันเอาต์พุตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุตได้ โดยไม่ต้องอาศัยการป้อนกลับแรงดันที่เอาต์พุตเลย ทำให้คอนเวอร์เตอร์ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุตได้อย่างรวดเร็ว

พิจารณาวงจรควบคุมอีกครั้งตามวงจรในรูปที่ 2.11 เมื่อต่อวงจรขยายความแตกต่าง E/A เพิ่มเข้ามา วงจรในลักษณะนี้เมื่อแรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลง เอาต์พุตของวงจรขยายความแตกต่าง

$E/A$  จะมีค่ามากขึ้น เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์จะใช้เวลานานกระแสมากขึ้นด้วย เพื่อให้ค่าแรงดัน  $V_s$  มากกว่าแรงดันที่เอาต์พุตของวงจรขยายความแตกต่าง  $E/A$  ในทางกลับกัน เมื่อแรงดันเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น เอาต์พุตของวงจรขยายความแตกต่าง  $E/A$  จะมีค่าลดลง เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์จึงใช้เวลานานกระแสลดลงด้วย ดังนั้นคอนเวอร์เตอร์จะสามารถคงค่าแรงดันที่เอาต์พุตเอาไว้ได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงที่โหลด ลักษณะของรูปคลื่นและแรงดันขณะที่ยังทำงานเป็นดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะการทำงานที่จุดต่างๆ ของวงจรควบคุมในโหมดควบคุมกระแส

จากลักษณะการทำงานดังกล่าว ทำให้วงจรควบคุมในโหมดควบคุมกระแสมีข้อดีมากกว่าวงจรควบคุมในโหมดควบคุมจากแรงดันดังนี้

- ตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุตได้รวดเร็วกว่า ทำให้ลดปัญหาการคงค่าแรงดันที่เอาต์พุตเมื่อเกิดทรานเซียนส์และการกระเพื่อมของแรงดันสูงที่แรงดันอินพุต เพราะไม่ต้องรอสัญญาณป้อนกลับจากเอาต์พุต
- สามารถป้องกันกระแสไหลเกินได้ ด้วยการจำกัดค่ากระแสสูงสุดที่ขดไฟโรมารี่ในลักษณะพัลส์ต่อพัลส์อย่างรวดเร็ว
- ให้ค่าไลน์เรกูเลชันที่ดีมาก

- โดยการจำกัดกระแสสูงสุดที่ขดไฟโพรมารี ดังนั้นปัญหาการไม่สมมาตรฟลักซ์แม่เหล็กของพุช-พูลคอนเวอร์เตอร์จะไม่เกิดขึ้น
- สามารถต่อขนานคอนเวอร์เตอร์หลายชุดเข้าด้วยกันได้ เพื่อให้จ่ายกระแสได้มากขึ้น และกระแสเฉลี่ยที่คอนเวอร์เตอร์แต่ละชุดจะมีค่าเท่ากัน

ตัวอย่างของ IC ที่ใช้ควบคุมคอนเวอร์เตอร์ในโหมดควบคุมจากกระแสได้แก่ เบอร์ UC3842/3/4/5, MC34023/5 และ MC34129 เป็นต้น

### 2.3 การออกแบบสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายด้วยไอซีเบอร์ TL 494

ไอซีเบอร์ TL 494 เป็นไอซีที่ออกแบบมาเพื่อใช้ควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ โดยทำงานด้วยโหมดควบคุมจากแรงดัน โครงสร้างภายในและการจัดขาของ TL 494 แสดงในรูปที่ 2.14

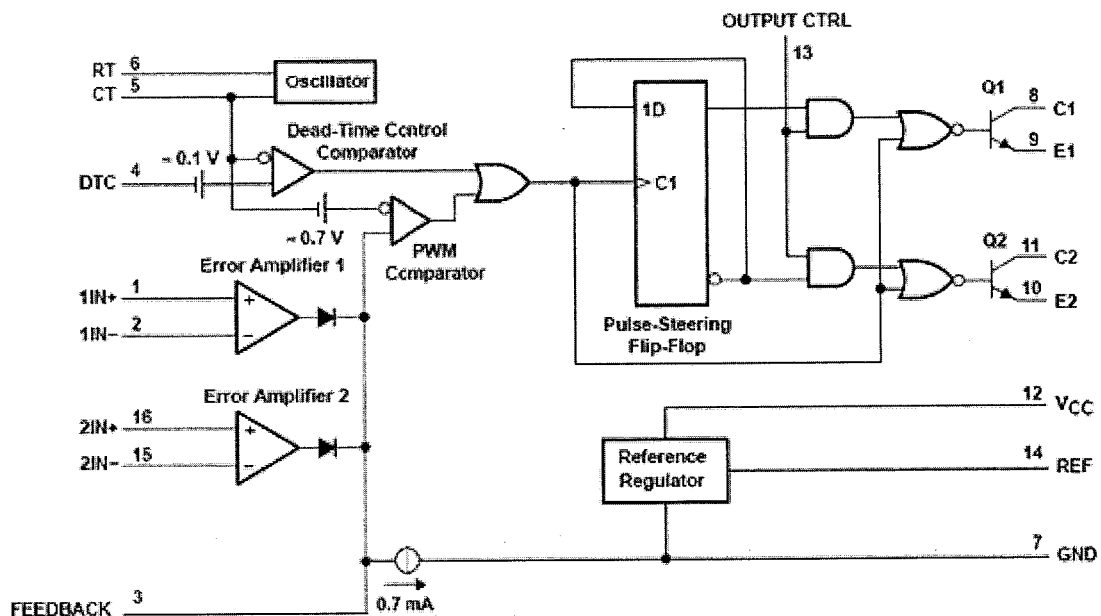


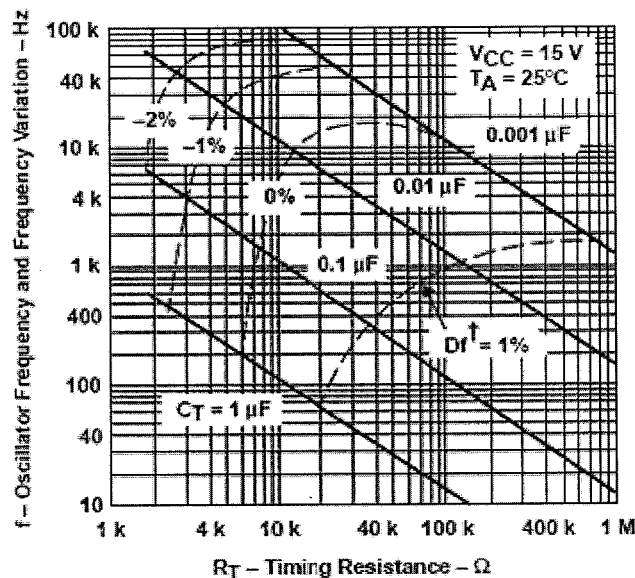
Figure 1. TL494 Block Diagram

รูปที่ 2.14 แสดงการจัดโครงสร้างภายในและการจัดขาของไอซี TL 494

### 2.3.1 การกำหนดคาบเวลาการทำงาน

วงจรของ TL 494 เป็นวงจร PWM ที่มีความถี่คงที่ คาบเวลาการทำงานของเอาต์พุตพัลส์ กำหนดโดยค่าของ  $R_T$  และ  $C_T$  จากภายนอกที่ขา 6 และขา 5 ของไอซี ค่าคาบเวลาการทำงานจะกำหนดได้จาก

$$T = (R_T C_T) / 1.1$$



รูปที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ของค่า  $R_T C_T$  ในการกำหนดความถี่

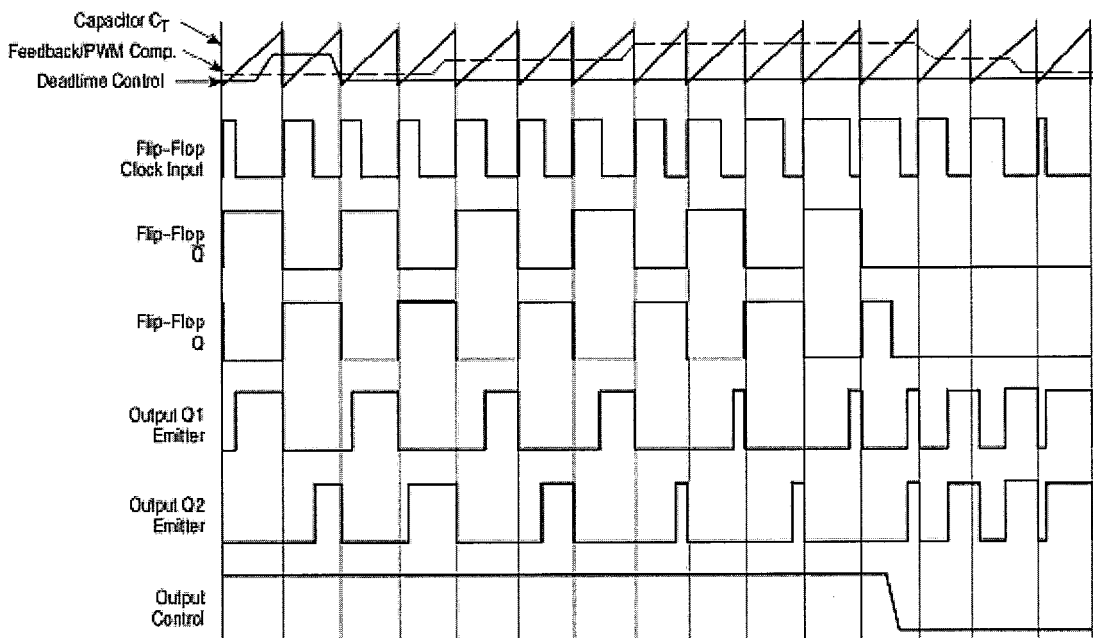
### 2.3.2 การทำงานของไอซีในการคงค่าแรงดันของคอนเวอร์เตอร์

ความกว้างเอาต์พุตพัลส์ของไอซี จะได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณฟันเลื่อยที่ขา 5 กับแรงดันที่ได้จากวงจรขยายความแตกต่าง (Error Amp) ทั้ง 2 ตัวที่ PWM Comparator ส่วน Nor Gate ที่ควบคุมทรานซิสเตอร์เอาต์พุต Q1 และ Q2 จะทำงานก็ต่อเมื่อขา C1 ของ Flip-Flop อยู่ในสถานะ “Low” เท่านั้น ซึ่ง C1 จะเป็น “Low” ได้ก็ต่อเมื่อแรงดันของสัญญาณฟันเลื่อยมีค่ามากกว่าแรงดันที่มาจาก Error Amp ทั้ง 2 ตัว นั่นคือแรงดันป้อนกลับจากเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์หากมีค่าสูงขึ้น ความกว้างเอาต์พุตพัลส์ของไอซีจะลดลง ในทางกลับกัน แรงดันป้อนกลับหากมีค่าลดลง ความกว้างเอาต์พุตพัลส์ของไอซีจะเพิ่มขึ้น

ความกว้างเอาต์พุตพัลส์ของไอซีนี้อาจกำหนดให้มีค่ามากที่สุดหรือมีค่าเท่ากับศูนย์ได้ ด้วยการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ขา 3 จาก 0.5 โวลต์ จนถึง 3.5 โวลต์ ส่วน Error Amp ทั้งสองตัวจะมี



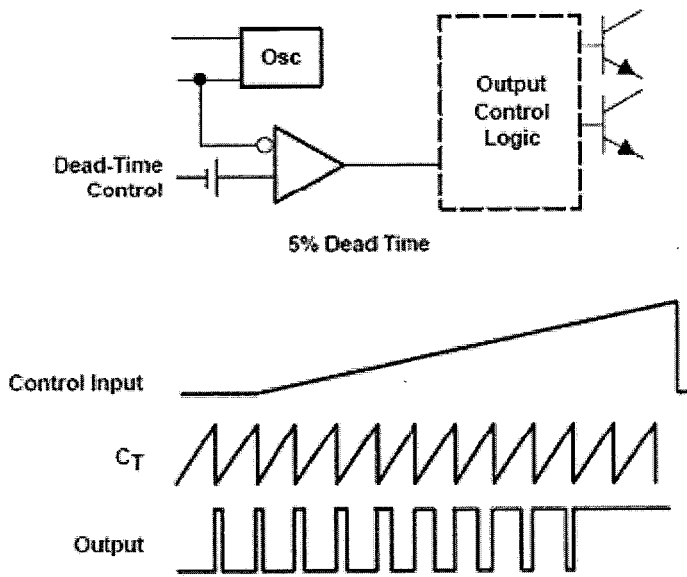
ช่วงของอินพุตคอมมอนโมด ตั้งแต่  $-0.3$  ถึง  $(V_{cc}-2)$  โวลต์ และสามารถใช้ตรวจจับแรงดันหรือ กระแสที่เอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ได้ Error Amp ทั้ง 2 ตัวจะให้เอาต์พุตในลักษณะให้สถานะ “High” โดยต่อกันอยู่ในลักษณะ OR ที่ขา non-inverting ของ PWM Comparator การต่อกันใน ลักษณะนี้ Error Amp ตัวที่ทำให้เกิดความกว้างของเอาต์พุตต่ำที่สุด จะเป็นตัวควบคุมความกว้าง ของเอาต์พุตพัลส์ของไอซี



รูปที่ 2.16 แสดงรูปคลื่นลักษณะการทำงานของ TL 494

### 2.3.3 การกำหนดค่าเวลาเพื่อ $T_D$

TL 494 สามารถให้ผู้ใช้งานกำหนดค่าเวลาเพื่อ (Dead Time)  $T_D$  ของวงจรได้เอง ด้วยการต่อ แรงดันระหว่าง 0 ถึง 3.3 โวลต์ที่ขา 4 ของไอซี อย่างไรก็ตาม หากแรงดันที่ขา 4 มีค่าเท่ากับ 0 โวลต์ ค่าเวลาเพื่อต่ำสุดของไอซีจะไม่ต่ำกว่า 4 เปอร์เซ็นต์ของค่าคาบเวลาการทำงาน เนื่องจากมีแรงดัน ออฟเซต 120 มิลลิโวลต์ต่ออยู่ภายใน ดังนั้นช่วงเวลา  $t_{ON}$  สูงสุดของคอนเวอร์เตอร์ที่ได้จากไอซีจะ เท่ากับ 48 เปอร์เซ็นต์ ของค่าคาบเวลาเมื่อต่อขา 13 (Output control) เข้ากับขา 14 (+5 Vref) และมี ค่าเท่ากับ 96 เปอร์เซ็นต์ของค่าคาบเวลาเมื่อต่อขา 13 ลงกราวด์



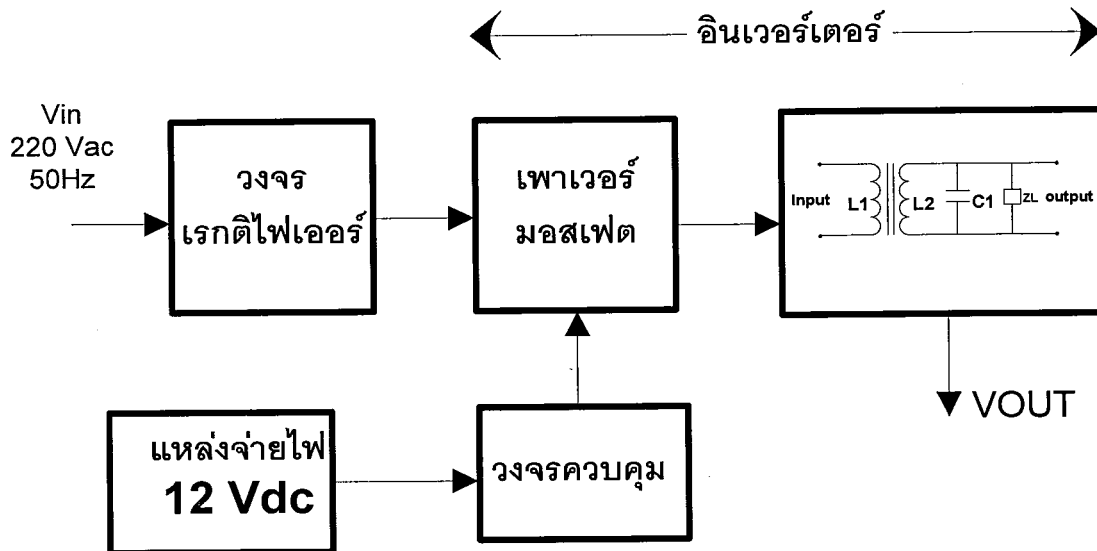
รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะของการควบคุมค่าเวลาเพื่อ

#### 2.3.4 การเลือกใช้ Q1 และ Q2 ที่เอาต์พุตของไอซี

เอาต์พุต Q1 และ Q2 ของไอซีสามารถทำงานได้ 2 โหมด คือ ทำงานพร้อมกัน หรือสลับกันทำงาน ซึ่งสามารถเลือกการทำงานได้ที่ขา 13 โดยขณะที่ C ดิสชาร์จ เอาต์พุตของ Dead-Time Comparator จะให้พัลส์ออกมา C1 จะมีสถานะเป็น “High” และหยุดการทำงานของ Q1 และ Q2 ถ้ากำหนดให้ขา 13 มีสถานะเป็น “High” โดยการต่อเข้ากับขา 4 Q1 และ Q2 จะสลับกันทำงานตามจังหวะของ Flip-Flop เพื่อใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์แบบพวง-พูล ในกรณีนี้ คาบเวลาการทำงานจะเป็น 2 เท่าของค่าคาบเวลาสัญญาณฟันเลื่อยของไอซี แต่ถ้ากำหนดให้ขา 13 มีสถานะเป็น “Low” โดยการต่อลงกราวด์ (ยกเลิก Flip-Flop) Q1 และ Q2 จะทำงานพร้อมกันและสามารถขนาน Q1 และ Q2 เข้าด้วยกันได้ ถ้าต้องการให้น้ำกระแสได้มากขึ้น ในกรณีนี้คาบเวลาการทำงานจะมีค่าเท่ากับค่าคาบเวลาของสัญญาณฟันเลื่อยของไอซี (ช่วงเวลาน้ำกระแสสูงสุดเท่ากับ 96% ของค่าคาบเวลา)

#### 2.4 หลักการทำงานของแหล่งจ่ายไฟสวิตชิงแรงดันสูง

สวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายโดยทั่วไปมีองค์ประกอบพื้นฐานที่คล้ายคลึงกัน และไม่ซับซ้อนมากนัก สำหรับสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายในโครงงานนี้ มีการทำงานดังแสดงในรูปที่ 2.18 หัวใจสำคัญของสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายจะอยู่ที่ภาคอินเวอร์เตอร์ สำหรับในโครงงานนี้จะใช้เป็น วงจรฮาล์ฟ-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ ในการแปลงสัญญาณไฟตรงให้เป็นไฟสลับและคงค่าแรงดันเอาต์พุตได้ ซึ่งหลักการทำงานก็เหมือนกับวงจรฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ที่อธิบายไว้ในบทที่ 2 องค์ประกอบต่างๆ ของสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายทำงานตามลำดับดังนี้



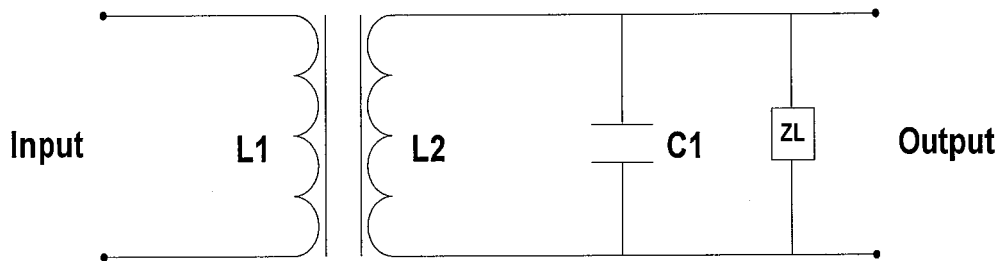
รูปที่ 2.18 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของสวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลาย

### หลักการทำงานของวงจร

แรงดันไฟสลับ 220 โวลต์ ป้อนเข้ามาในวงจร แล้วถูกแปลงสัญญาณไฟสลับเป็นไฟตรงขนาด 310 โวลต์ ด้วยวงจรเรกติไฟเออร์เพื่อเป็นไฟเลี้ยงให้เพาเวอร์มอสเฟต ซึ่งเพาเวอร์มอสเฟตจะทำงานเป็นตัวสวิตซ์ โดยการตัดต่อแรงดันไฟตรง 310 โวลต์ เป็นช่วงๆ โดยใช้ความถี่สวิตซ์ประมาณ 20 - 80 KHz ซึ่งควบคุมโดยภาควงจรควบคุม จะได้สัญญาณออกมาเป็นพัลส์สี่เหลี่ยมมีแรงดัน 310 V<sub>p-p</sub> จากนั้นสัญญาณพัลส์ที่ได้จะส่งผ่านไปยังวงจรเรโซแนนซ์ซึ่งมี L, C ต่อแบบผสมวงจรเรโซแนนซ์กำหนดความถี่เรโซแนนซ์ไว้ที่ 31 kHz สามารถปรับค่าความถี่ได้จากค่า L, C ที่ต่อในวงจร ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \dots\dots\dots(2.3)$$

สำหรับสมการคำนวณนี้ คำนวณมาจากวงจรเรโซแนนซ์ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 วงจรเรโซแนนซ์ภาคเอาต์พุต

วงจรเรโซแนนซ์ที่ใช้ในโครงงานนี้เป็นการต่อ LC แบบผสม ดังรูปที่ 2.19 ซึ่งสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตได้จากความถี่ที่ป้อนให้กับวงจรเรโซแนนซ์ ที่ความถี่เรโซแนนซ์จะทำให้ได้แรงดันเอาต์พุตสูงที่สุด  
ในวงจรนี้ใช้ค่า

$$L2 = 75.34 \text{ mH}$$

$$C1 = 323.06 \text{ pF}$$

เพราะฉะนั้นได้

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{(75.34\text{mH})(323.06\text{pF})}} = 32.26\text{KHz}$$

สัญญาณที่ผ่านวงจรเรโซแนนซ์จะเป็นสัญญาณไซน์บริสุทธิ์ออกมาที่เอาต์พุตโดยมีหม้อแปลงความถี่สูง T1 เป็น Step up transformer เพื่อเพิ่มค่าแรงดันเอาต์พุตให้มีขนาดสูงขึ้น

วงจรควบคุม ใช้ไอซีเบอร์ TL494 เป็นหัวใจหลักในการผลิตสัญญาณพัลส์ ไปควบคุมการสวิตซ์ของเพาเวอร์มอสเฟตในภาควงจรอินเวอร์เตอร์ โดยที่ TL494 เป็นวงจร PWM ที่ผลิตความถี่เอาต์พุตออกมายังขา 8 และขา 11 ซึ่งทั้ง 2 ขา จะมีความต่างเฟสกันอยู่ 180 องศา โดยเราสามารถ

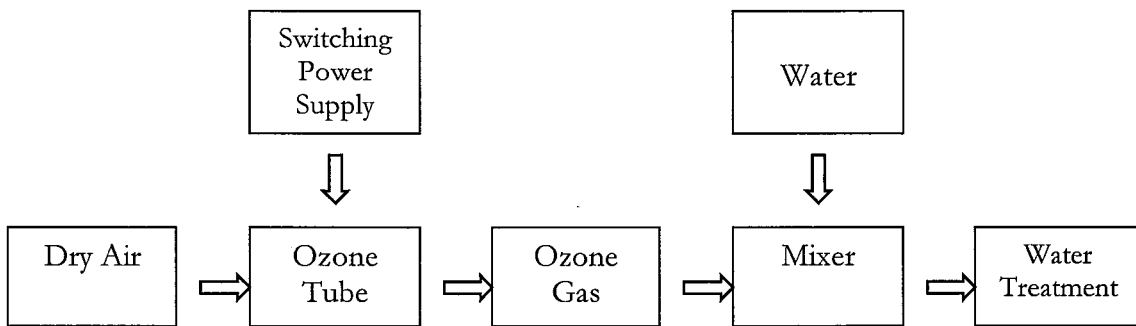
ปรับความถี่ที่ผลิตได้จาก R ที่ขา 6 และ C ที่ขา 5 ในโครงงานนี้จะใช้ R แบบ active ในการกำหนดค่าความถี่ ซึ่งเกิดจากการทำงานของ OP-AMP เบอร์ LM324 สัญญาณที่ผลิตออกมาจะมีการเผื่อค่า DEAD TIME เอาไว้ด้วย เพื่อไม่ให้เพาเวอร์มอสเฟตทั้ง 2 ตัวเกิดการนำกระแสพร้อมกัน เป็นการป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้กับเพาเวอร์มอสเฟต การกำหนดค่า DEAD TIME ทำได้ด้วยการต่อแรงดันระหว่าง 0 – 3.3 โวลต์ ที่ขา 4 ของ TL494

เอาต์พุตของ TL494 อยู่ที่ขา 8 และ 11 จะเป็น output open collector เราจึงต้องต่อ R 1K ไว้ที่ขา 8 และ 11 แล้วต่อเข้ากับไฟเลี้ยงด้วย สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากไอซี TL494 จะถูกต่อเข้ากับ CMOS BUFFER เพื่อทำให้สัญญาณพัลส์จากเอาต์พุตมีลักษณะเป็นพัลส์สี่เหลี่ยมที่สมบูรณ์ จากนั้นนำสัญญาณพัลส์นี้ไปขับเกตของมอสเฟตที่ต่อแบบคอมพลีเมนต์ารกันอยู่ สัญญาณที่ออกจากขั้วไดรฟ์ของมอสเฟตชุดนี้ จะส่งผ่านเข้าไปยังหม้อแปลงสวิตชิงเพื่อถ่ายทอดสัญญาณพัลส์จากภาคควบคุมไปขับเพาเวอร์มอสเฟตในภาคอินเวอร์เตอร์ต่อไป

### บทที่ 3

#### หลักการทำงานและการออกแบบระบบผลิตน้ำโอโซน

##### 3.1 การทำงานของระบบผลิตน้ำโอโซน



รูปที่ 3.1 แสดงการทำงานของระบบผลิตน้ำโอโซน

จากรูปที่ 3.1 จะเป็นขั้นตอนการกำเนิดโอโซน โดยแบ่งเป็นขั้นตอนต่างๆดังนี้

1. ในขั้นตอนที่ 1 ตามรูปนั้น เป็นการสร้างอากาศโดยใช้ปั๊มอากาศ Pump Dry air เพื่อที่จะนำไปใช้โดยจะป้อนอากาศที่ได้มานั้นให้ไหลผ่านไปยังหลอดกำเนิดโอโซนที่สร้างไว้แล้ว

2. ในขั้นตอนที่ 2 ตามรูปนั้นเป็นการสร้างหลอดกำเนิดโอโซน ซึ่งในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญมากที่สุดขั้นตอนหนึ่ง การที่เราจะสามารถสร้างหลอดกำเนิดโอโซนขึ้นมาได้นั้นเราจะต้องทำการเลือกวัสดุอุปกรณ์ที่จะนำมาใช้ในการสร้างให้เหมาะสม โดยวัสดุที่เราเลือกนำมาใช้นั้น เราได้ทำการเลือกโดยใช้ขั้วโลหะ ( ในที่นี้ใช้ขั้วทองแดง ) มาทำเป็นขั้วอิเล็กโทรดโดยมีหลอดแก้วเป็นไดอิเล็กตริก และมีตะแกรง ( มุ้งลวด ) เป็นกรวด ซึ่งเมื่อเราทำการอัดอากาศเข้าไปในหลอดที่ได้ทำการสร้างเอาไว้ซึ่งได้จากขั้นตอนที่ 1 นั้น อากาศ ( $O_2$ ) จะวิ่งผ่านสนามไฟฟ้าค่าสูงที่เกิดจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงที่จะกล่าวถึงในข้อถัดไป โดยอากาศจะแตกตัวเป็น  $O_2$  อะตอมและจะไปรวมกับออกซิเจน ( $O_2$ ) กลายเป็นก๊าซโอโซน ( $O_3$ )

3. ในขั้นตอนที่ 3 ตามรูปนั้นเป็นการสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบสวิตซ์ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายให้กับหลอดกำเนิดโอโซน ซึ่งข้อดีของการเลือกใช้แหล่งจ่ายแบบสวิตซ์ซึ่งนั้นได้กล่าวไว้แล้ว ซึ่งการใช้สวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลายนั้นข้อดีอย่างหนึ่งคือสามารถใช้กับความถี่สูงได้เป็นอย่างดีและนอกจากนี้ยังให้ประสิทธิภาพในการทำงานสูง น้ำหนักเบาและสามารถปรับความถี่ในการทำงานเพื่อกำหนดปริมาณโอโซนได้อีกด้วย

4. ในขั้นตอนที่ 4 ตามรูปนั้นเป็นการนำก๊าซโอโซนไปผสมกับน้ำโดยในขั้นตอนนี้สามารถ

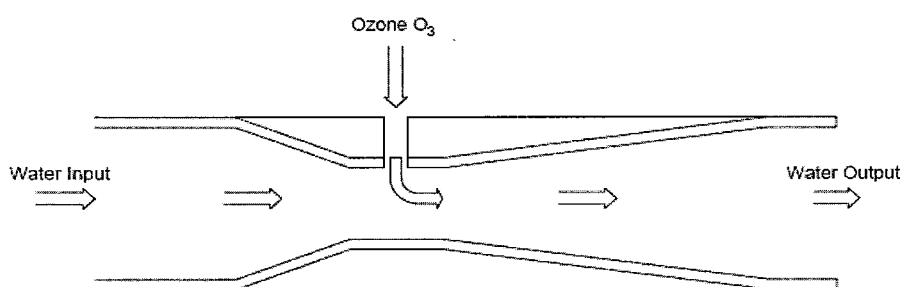
เลือกใช้การใส่ก๊าซโอโซนลงในน้ำได้หลายวิธี ซึ่งในปฏิญานพนธ์เล่มนี้เป็นการนำเสนอวิธีการ 2 วิธี คือ

1. การนำก๊าซโอโซนผสมกันน้ำด้วยหัวทราย (ฟองฟู)
2. การนำก๊าซโอโซนผสมกันน้ำด้วย Venturi tube เพื่อทดสอบว่าวิธีการใดได้ประสิทธิภาพมากกว่ากัน

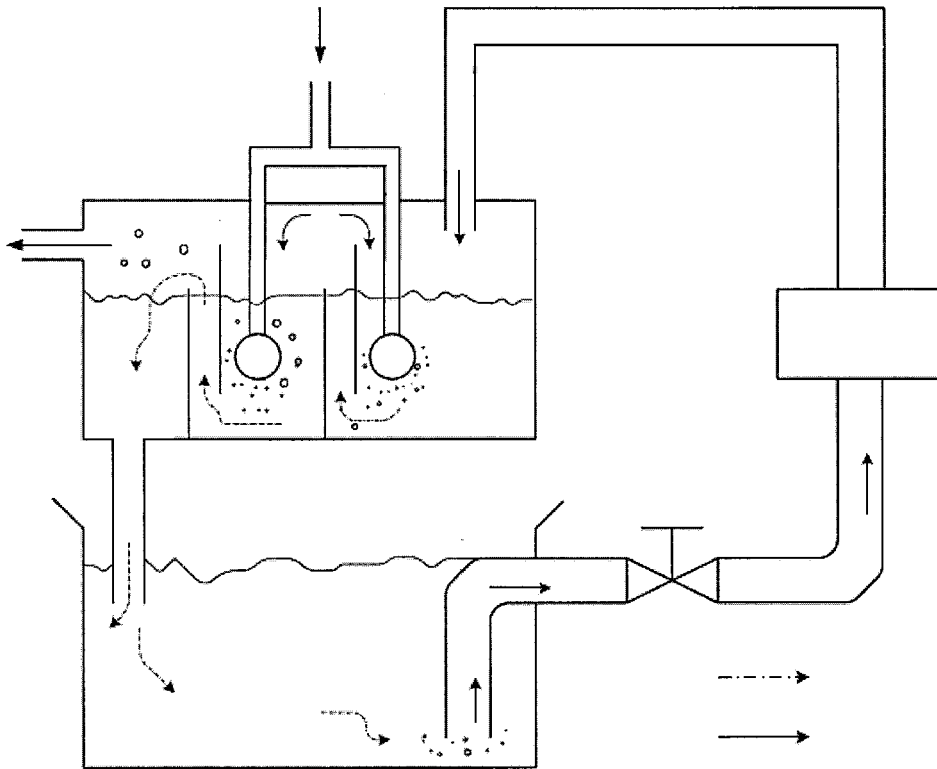
### 3.2 หลักการออกแบบและการทำงานของระบบผสมระหว่างก๊าซโอโซนกับน้ำ

จากรูปที่ 3.3 ภาพจำลองระบบผลิตน้ำโอโซนด้วยหัวทราย (ฟองฟู) ได้ทำการออกแบบถังใบที่ 2 เป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วนที่ 1, ส่วนที่ 2, ส่วนที่ 3 โดยเริ่มจากส่วนที่ 1 ที่บรรจุน้ำไว้จากการสูบของปั้มน้ำเข้ามายังระบบ (Mixer) ซึ่งเป็นตัวการสำคัญในการผสมก๊าซโอโซนกับน้ำเข้าด้วยกัน คือ หัวทราย (ฟองฟู) หลังจากทำการผสมระหว่างก๊าซโอโซนกับน้ำเรียบร้อยแล้ว น้ำจะไหลเข้ามายังถังใบที่ 1 ซึ่งก๊าซโอโซนที่เหลือจากการผสมก็จะปล่อยทิ้ง (Ozone output)

จากรูปที่ 3.4 ภาพจำลองระบบผลิตน้ำโอโซนด้วย Venturi tube โดยน้ำจากการสูบของปั้มน้ำจะเข้ามาทาง Venturi tube น้ำก็จะไหลผ่านตัวผสม (Venturi Tube) เพื่อมารวมกับก๊าซโอโซนทางด้านบน (Ozone input) โดยอาศัยหลักการของแรงดันที่เท่ากันทั้ง 2 ด้าน คือ เมื่อน้ำที่มีแรงดันสูงจากการสูบของปั้มน้ำไหลผ่านเข้ามานั้นจะทำให้เกิดแรงดันที่มีค่าต่ำภายในช่องทางไหลของน้ำ ซึ่งระบบตัวผสม (Venturi Tube) จะทำการลดแรงดันโดยจะดูดก๊าซโอโซนจากทางด้านบนของ (Venturi Tube) เข้ามา จึงทำให้เกิดการผสมระหว่างก๊าซโอโซนกับน้ำ (Mixer) โดยการออกแบบ (Venturi Tube) นั้น เราได้ทำการกำหนดมุมทางด้านเข้าของน้ำ 21 องศา ทางด้านออก 15 องศา (ตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว) และมุมทางเข้าของโอโซน 90 องศา ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม. ส่วนทางน้ำไหลเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม.

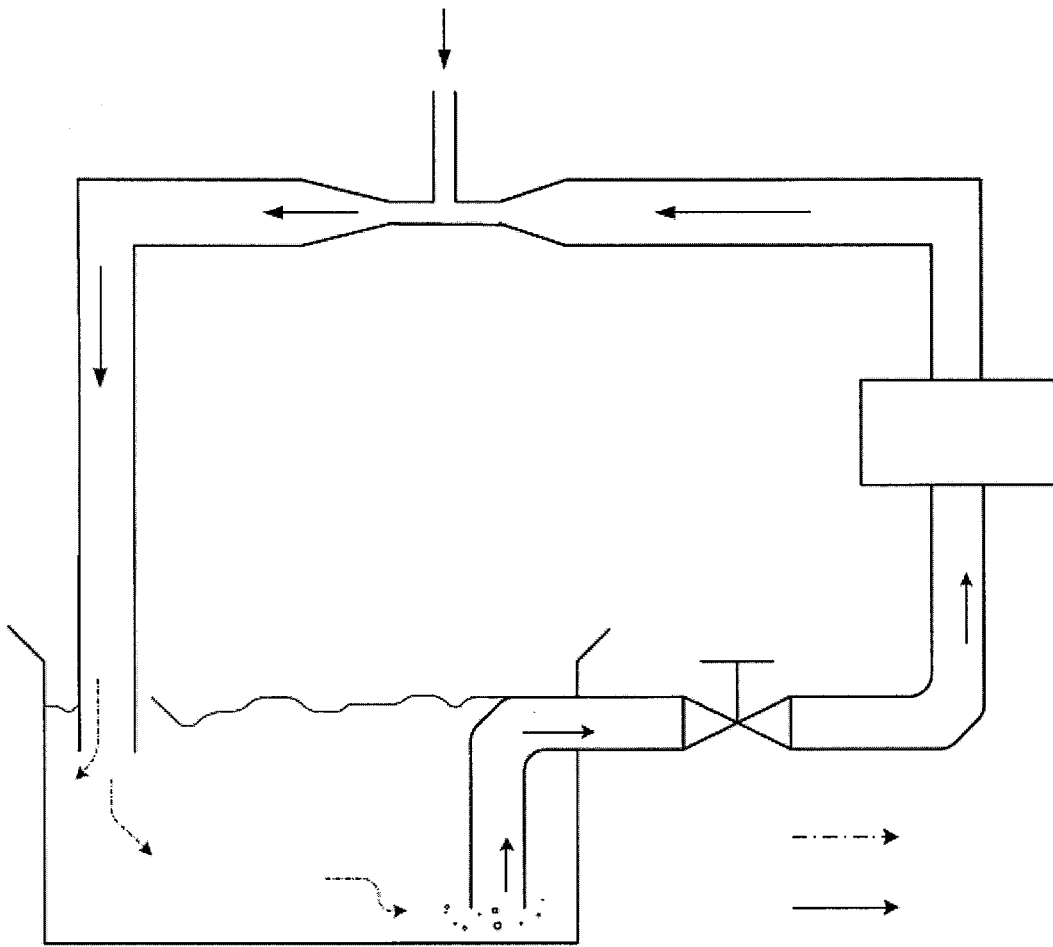


รูปที่ 3.2 แสดงตัวผสมก๊าซโอโซนกับน้ำด้วย ( Venturi Tube )



รูปที่ 3.3 ภาพจำลองระบบผลิตน้ำโอโซนด้วยหัวทราย (ฟองฟู)





รูปที่ 3.4 ภาพจำลองระบบผลิตน้ำไอโซนด้วย Venturi tube

## บทที่ 4

### วงจรกำลัง

#### 4.1 เพาเวอร์มอสเฟต

เพาเวอร์มอสเฟต (MOSFET Power Transistor) สามารถทำงานได้ดีที่ความถี่สูงตั้งแต่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ไปจนถึงประมาณ 200 หรือ 400 กิโลเฮิร์ตซ์ เนื่องจากมันใช้เวลาในการเปลี่ยนสถานะค่อนข้างสั้น และการพัฒนาในปัจจุบันมีแนวโน้มจะทำให้เพาเวอร์มอสเฟตทำงานได้ที่ความถี่สูงขึ้นไปอีกด้วย ซึ่งจะเป็นผลดีในการลดขนาดของคอนเวอร์เตอร์ ในส่วนวงจรขับของเพาเวอร์มอสเฟตนั้นสามารถทำได้ง่าย โดยอาจขับเพาเวอร์มอสเฟตให้ทำงานได้จากไอซีควบคุม เช่น UC 3842 โดยตรง เพาเวอร์มอสเฟตจึงเข้ามาแทนที่ไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์อย่างรวดเร็วในการผลิตสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายในตลาดอุตสาหกรรมปัจจุบัน

โครงสร้างของเพาเวอร์มอสเฟตจะเป็นไปได้ทั้งในลักษณะ N-channel และ P-channel อย่างไรก็ตาม ในบทนี้จะกล่าวถึงเฉพาะเพาเวอร์มอสเฟตชนิด N-channel เท่านั้น

##### 4.1.1 กำลังงานสูญเสียในรูปความร้อนของเพาเวอร์มอสเฟต

กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในเพาเวอร์มอสเฟตขณะทำงานจะเป็นไปได้ 2 ลักษณะ เช่นเดียวกับไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์คือกำลังงานสูญเสียขณะเปลี่ยนสถานะและกำลังงานสูญเสียขณะนำกระแส แต่สำหรับเพาเวอร์มอสเฟตจะมีช่วงเวลาเริ่มนำกระแสและช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแสสั้นกว่าไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์มากเพราะตามโครงสร้างเพาเวอร์มอสเฟตจะไม่มีประจุสะสมเกิดขึ้นจึงไม่มีปัญหาในลักษณะเดียวกับไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ อย่างไรก็ตามเพาเวอร์มอสเฟตจะมีค่าความต้านทานขณะมันนำกระแสค่อนข้างสูงการสูญเสียเพาเวอร์มอสเฟตขณะนำกระแสจึงสูงกว่าไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะการตอบสนองของเพาเวอร์มอสเฟตเมื่อทำงานเป็นสวิตช์

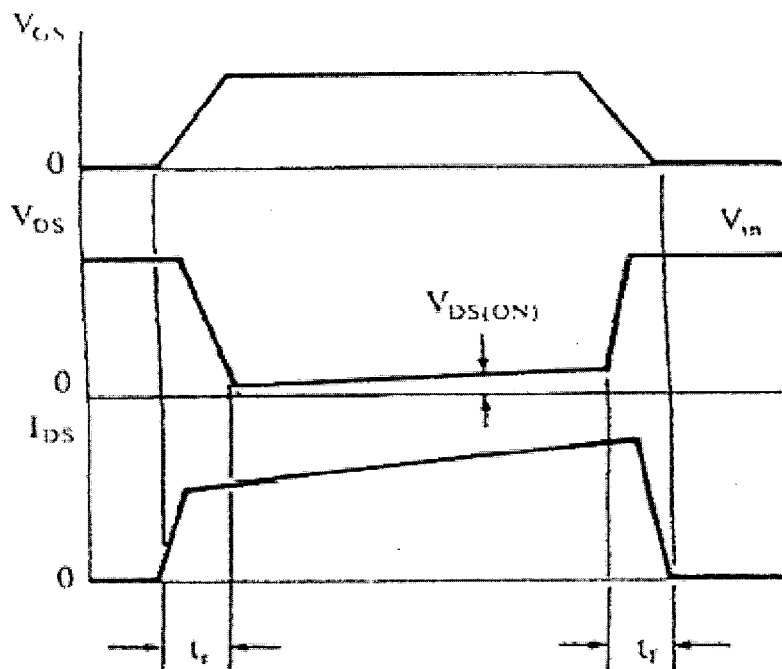
ถึงแม้ว่าช่วงเวลาเริ่มนำกระแสและเริ่มหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟตจะค่อนข้างสั้น แต่โดยทั่วไปเพาเวอร์มอสเฟตมักถูกใช้งานที่ความถี่สูง การใช้งานที่ความถี่สูงกว่า 50 กิโลเฮิร์ตซ์ การคิดค่ากำลังงานสูญเสียขณะทำงานจำเป็นต้องนำค่ากำลังงานสูญเสียขณะเปลี่ยนสถานะมาคิดด้วยและเนื่องจากช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแส (Turn off time) กับช่วงเวลาเริ่มนำกระแส (Turn on time) ของเพาเวอร์มอสเฟตมีค่าใกล้เคียงกันจึงต้องนำมาคิดทั้งสองช่วงเวลาดังนั้นกำลังงานสูญเสียของเพาเวอร์มอสเฟตขณะทำงาน  $P_D$  จะมีค่าเท่ากับ

$$P_D = P_{SW(on)} + P_{SW(off)} + P_C \quad \dots\dots\dots(4.1)$$

$$P_{SW(ON)} = \frac{0.5 \times I_{PK(on)} \times V_{in} \times t}{T} \dots\dots\dots(4.2)$$

$$P_{SW(Off)} = \frac{0.5 \times I_{PK(off)} \times V_{in} \times t}{T} \dots\dots\dots(4.3)$$

$$P_C = I^2 D_{rms} \times R_{DS(on)}(Tj) \dots\dots\dots(4.4)$$



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะของกระแสและแรงดันตกคร่อมเพาเวอร์มอสเฟตเมื่อเริ่มนำกระแส และเริ่มหยุดนำกระแส ในส่วนที่แรงจะเป็นส่วนที่จะเกิดกำลังงานสูญเสียในรูปความร้อนได้สูง

- เมื่อ  $P_{SW(ON)}$  คือ กำลังงานสูญเสียขณะเริ่มนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต
- $P_{SW(Off)}$  คือ กำลังงานสูญเสียขณะเริ่มหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต
- $P_C$  คือ กำลังงานสูญเสียขณะนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต
- $I_{PK(on)}$  คือ ค่ากระแสสูงสุดขณะเริ่มนำกระแส
- $I_{PK(off)}$  คือ ค่ากระแสสูงสุดขณะเริ่มหยุดนำกระแส
- $I_{Drms}$  คือ ค่ากระแส rms ที่ไหลผ่านเพาเวอร์มอสเฟตขณะทำงาน

$R_{DS(on)}(T_j)$  คือ ค่าความต้านทานระหว่างเดรนและซอร์สที่อุณหภูมิรอยต่อสูงสุด  
ขณะทำงานของเพาเวอร์มอสเฟต

$t_i$  คือ ช่วงเวลาเริ่มนำกระแส ของเพาเวอร์มอสเฟต

$t_f$  คือ ช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต

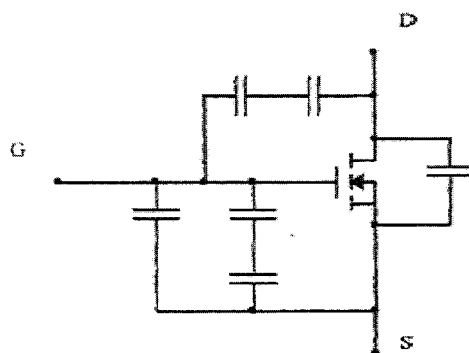
**หมายเหตุ** สำหรับเพาเวอร์มอสเฟตโดยทั่วไป ช่วงเวลาเริ่มนำกระแสและหยุดนำกระแส ในคาட்சิตของผู้ผลิตส่วนใหญ่ มักระบุมาเป็นค่า  $t_r$  (current rise time) และ  $t_f$  (current fall time) ตามลำดับ ในที่นี้จึงใช้สัญลักษณ์เป็น  $t_r$  และ  $t_f$  แทน  $t_{ON}$  และ  $t_c$  เมื่อเปรียบเทียบกับ ไบโพลาร์ เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์

#### 4.1.2 เงื่อนไขของวงจรขับเพาเวอร์มอสเฟต

การขับเพาเวอร์มอสเฟตให้นำกระแส นั้น แตกต่างจากการขับกระแสไบแอสในไบโพลาร์ เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ เนื่องจากมีเงื่อนไขการไบแอสที่แตกต่างกันสำหรับไบโพลาร์เพาเวอร์ ทรานซิสเตอร์กระแสจะไหลผ่านขาคอลเล็กเตอร์และอีมิเตอร์ได้ก็ต่อเมื่อ มีกระแสไบแอสไหล ผ่านที่เบสและอีมิเตอร์แต่เพาเวอร์มอสเฟตจะมีกระแสไหลผ่านเดรนและซอร์สได้ก็ต่อเมื่อแรงดัน ตกคร่อมที่ขาเกตและซอร์สมีค่าอย่างต่ำเท่ากับแรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage) ของมันแต่ใช้ กระแสต่ำ การขับเพาเวอร์มอสเฟตจึงทำได้ง่าย และยุ่งยากน้อยกว่าไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ มาก อย่างไรก็ตามเพื่อให้เพาเวอร์มอสเฟตทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดจึงจำเป็นต้องศึกษา เงื่อนไขต่างๆ สำหรับการบังคับให้เพาเวอร์มอสเฟตนำกระแส เป็นอันดับแรกเสียก่อน

#### 4.1.3 ค่าความจุไฟฟ้าด้านอินพุต (Input Capacitance)

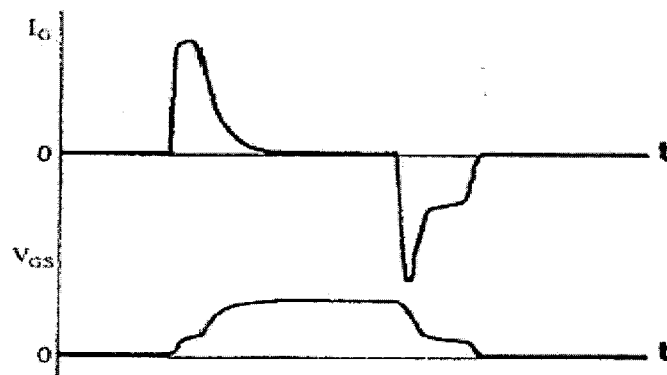
เนื่องจากลักษณะโครงสร้างภายในตัวเพาเวอร์มอสเฟตจึงเหมือนกับมีตัวเก็บประจุต่ออยู่ รอบๆขาต่างๆ ของมันดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงตัวเก็บประจุแฝงที่ต่ออยู่ที่ขาต่างๆ ภายในตัวเพาเวอร์มอสเฟต

ตัวเก็บประจุเหล่านี้บังคับให้เพาเวอร์มอสเฟตต้องชาร์จประจุเข้าไปที่ตัวเก็บประจุเสียก่อน เพื่อให้แรงดันตกคร่อมที่ขาเกต  $V_{GS}$  มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าแรงดันขีดเริ่มเพาเวอร์มอสเฟตจึงเริ่มนำกระแสในทางกลับกันการหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟตจะต้องทำให้ตัวเก็บประจุคายประจุออกไปจนแรงดันตกคร่อมที่ขาเกต  $V_{GS}$  มีค่าลดลงต่ำกว่าค่าแรงดันขีดเริ่มเพาเวอร์มอสเฟตจึงหยุดนำกระแสลักษณะของกระแสและแรงดันที่ขาเกตจึงมีลักษณะดังรูปที่ 4.3

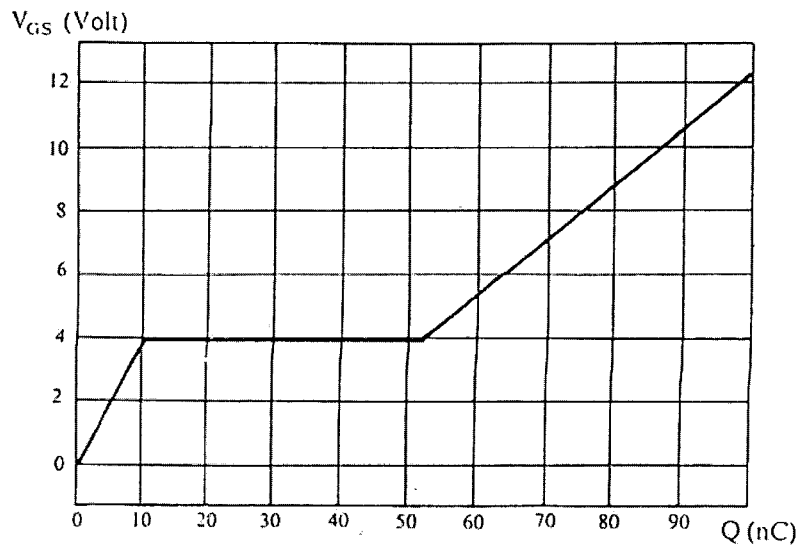
โดยทั่วไปแล้วค่าความจุของตัวเก็บประจุในตัวเพาเวอร์มอสเฟตนี้เองจะเป็นตัวกำหนดความเร็วการเปลี่ยนสถานะของมัน



รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะแรงดันและกระแสที่ขาเกตขณะเพาเวอร์มอสเฟตถูกไบแอสให้นำกระแส

#### 4.1.4 การกำหนดเวลาในการเปลี่ยนสถานะ

ปกติแล้วผู้ผลิตมักจะให้กราฟของแรงดัน  $V_{GS}$  ที่เพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าประจุสะสมที่ขาเกตเพิ่มขึ้นหรือเรียกว่า Gate Charge Chart มาในคำอธิบายด้วยกราฟนี้มีประโยชน์มากในการคำนวณค่ากระแสไบแอสเกตและเวลาในการเปลี่ยนสถานะของเพาเวอร์มอสเฟต

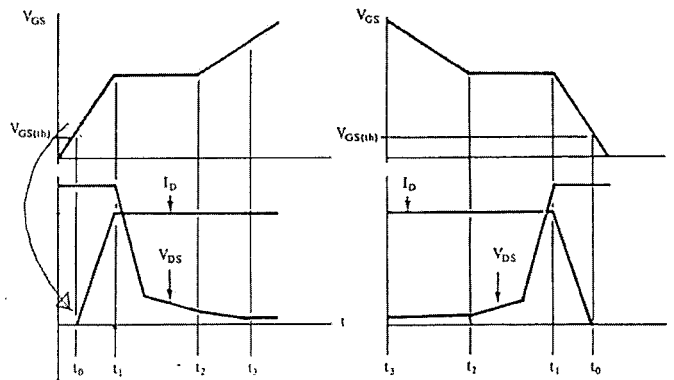


รูปที่ 4.4 แสดงตัวอย่างของ Gate Charge Chart

ลักษณะของกราฟจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ตามผลของประจุที่เพิ่มขึ้นคือ

1. ช่วงเวลาหน่วงก่อนเริ่มนำกระแส (turn on delay)  $t_0$
2. ช่วงเวลาเริ่มนำกระแส (rise time)  $t_0 \rightarrow t_2$
3. ช่วงเวลาสะสมประจุส่วนเกิน (excess charge time)  $t_2 \rightarrow t_3$

เมื่อเพาเวอร์มอสเฟตเริ่มซาร์จประจุที่ขาเกตจนกระทั่งพ้นช่วงเวลาหน่วงก่อนเริ่มนำกระแส เมื่อแรงดันขาเกตมากกว่าแรงดันขีดเริ่ม ( $V_{GS(th)}$ ) จึงจะเริ่มมีกระแสไหลผ่านเดรนและซอร์สที่เวลา  $t_0$  ค่าของแรงดันจะยังไม่ลดลงจนกว่าจะผ่านเวลาเท่ากับ  $t_1$  แรงดันตกคร่อมเดรนและซอร์ส  $V_{DS}$  จึงมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วจากค่าแรงดันประมาณ 90 % จนเหลือเพียง 10 % ของค่าแรงดันตกคร่อม  $V_{DS}$  สูงสุด เพาเวอร์มอสเฟตจะนำกระแสได้อย่างเต็มที่ ในช่วงเวลาเริ่มนำกระแส  $t_1$  ถึง  $t_2$  นี้เอง และแรงดันตกคร่อมที่ขาเกต  $V_{GS}$  จะคงที่จนกว่าเพาเวอร์มอสเฟตจะสามารถนำกระแสได้อย่างเต็มที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ในช่วงเวลาสะสมประจุส่วนเกินค่าความต้านทานระหว่างแรงดันเดรนและซอร์สจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ หากปล่อยให้มีการสะสมประจุต่อไปในช่วง  $t_2$  ถึง  $t_3$  แต่ประจุสะสมที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการหน่วงขณะเริ่มหยุดนำกระแส เนื่องจากเพาเวอร์มอสเฟตจะต้องใช้เวลานานในการคายประจุส่วนเกินนี้ทิ้งไป ดังนั้นการขับเพาเวอร์มอสเฟตที่ขาเกตด้วยแรงดันสูงเกินความจำเป็นจะทำให้ช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแสเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลเสีย



รูปที่ 4.5 (ก)แสดงลักษณะการชาร์จประจุที่ขาเกตตามเวลาที่มีผลต่อการเริ่มนำกระแส

(ข)แสดงผลเมื่อเริ่มหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต

เนื่องจากเพาเวอร์มอสเฟตไม่เกิดประจุสะสมขึ้นขณะนำกระแส การหยุดการนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟตจึงทำได้ง่าย ๆ ด้วยการคายประจุที่ขาเกตทิ้งไปเช่นเดียวกับขณะเริ่มนำกระแส และถ้าขนาดกระแสเพื่อชาร์จประจุและคายประจุที่มีค่าเท่ากันช่วงเวลาเริ่มนำกระแสและช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแสจะมีค่าเท่ากันด้วย ยกเว้นหากมีประจุสะสมมากในช่วง  $t_2$  ถึง  $t_3$  การหยุดนำกระแสจะมีช่วงเวลาน่องเพิ่มขึ้น เนื่องจากต้องใช้เวลาส่วนหนึ่งในการคายประจุส่วนเกินทิ้งไป

จากกราฟในรูปที่ 4.5 ของเพาเวอร์มอสเฟตแต่ละเบอร์ จะนำมาหาค่าช่วงเวลาเริ่มนำกระแสและช่วงเวลาเริ่มหยุดกระแส ได้จาก

$$t = \frac{Q_G}{I_G} \dots\dots\dots (4.5)$$

เมื่อ  $Q_G$  คือ ค่าประจุที่ได้จากกราฟเป็นคูลอมป์

$I_G$  คือ ค่ากระแสที่ใช้ชาร์จประจุที่ค่ากระแสคงที่ เป็นแอมป์

จะเห็นได้ว่าการขับเพาเวอร์มอสเฟตให้น้ำกระแสได้นั้น  $V_{GS}$  จะต้องมีการชาร์จประจุและคายประจุที่ขาเกต วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตจะต้องมีลักษณะของการจ่ายและการรับกระแส (source and sink) ได้ที่ประมาณ 200 ถึง 400 มิลลิแอมป์ด้วยและต้องให้แรงดันตกคร่อมที่ขาเกต ค่ามากพอเพื่อที่เพาเวอร์มอสเฟตจะทำงานได้อย่างเต็มที่ด้วย (ประมาณ 10 โวลต์)

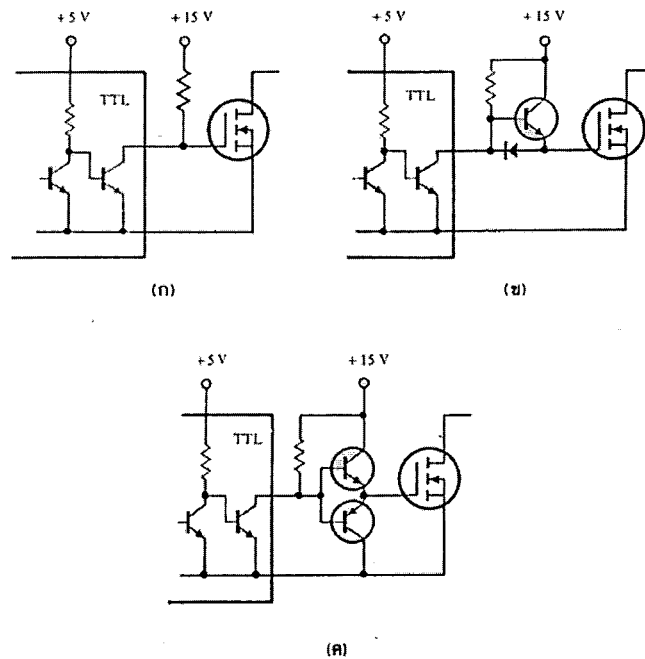
#### 4.1.5 วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วย TTL

การขับเพาเวอร์มอสเฟตจากไอซี TTL โดยตรงนั้นเป็นไปได้แต่ไอซี TTL มีขีดจำกัดในการจ่ายและรับกระแสของมันที่เอาต์พุตซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อความเร็วในการเปลี่ยนสถานะของเพาเวอร์มอสเฟตและทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียได้ การต่อวงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วยไอซี TTL จึงจำเป็นต้องเพิ่มตัวอุปกรณ์อื่นๆ เพื่อช่วยให้เกิดการเปลี่ยนสถานะของเพาเวอร์มอสเฟตเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว

รูปที่ 4.6(ก) แสดงการต่อวงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วยไอซี TTL ที่มีเอาต์พุตเป็นแบบคอลเล็กเตอร์เปิดการต่อพลูอ์ฟริชิสเตอร์เข้าช่วยจะทำให้มีแรงดันสูงพอที่จะขับเพาเวอร์มอสเฟตให้ทำงาน และการหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟตเป็นไปได้อย่างรวดเร็วขึ้น อย่างไรก็ตามความเร็วขณะเริ่มนำกระแสยังมีค่าจำกัดอยู่ เนื่องจากกระแสน้ำยังถูกจำกัดด้วยพลูอ์ฟริชิสเตอร์ การต่อทรานซิสเตอร์เพิ่มเข้ามาดังในรูปที่ 4.6(ข) ทรานซิสเตอร์จะช่วยจ่ายกระแสได้มากขึ้นทำให้ความเร็วขณะเริ่มนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟตดีขึ้น และลดกำลังงานสูญเสียในตัวไอซี TTL ด้วย เพื่อให้การคายประจุที่ขาเกตเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว การเพิ่มทรานซิสเตอร์เข้ามาในวงจรอีก 1 ตัว ดังรูป 4.6(ค) ก็จะทำให้ความเร็วในขณะเริ่มหยุดนำกระแสเป็นไปได้อย่างรวดเร็วมากขึ้น

ทรานซิสเตอร์ที่ใช้สามารถใช้ทรานซิสเตอร์กำลังต่ำเช่น เบอร์ 2N 222A และ 2N 2907 ก็สามารถทำให้วงจรขับจ่ายกระแสได้ถึง 800 มิลลิแอมป์ ซึ่งก็นับว่าเพียงพอแล้ว





รูปที่ 4.6 (ก) แสดงการขับเพาเวอร์มอสเฟตให้นำกระแสด้วยไอซี TTL และพูล์อัฟฟริชิสเตอร์

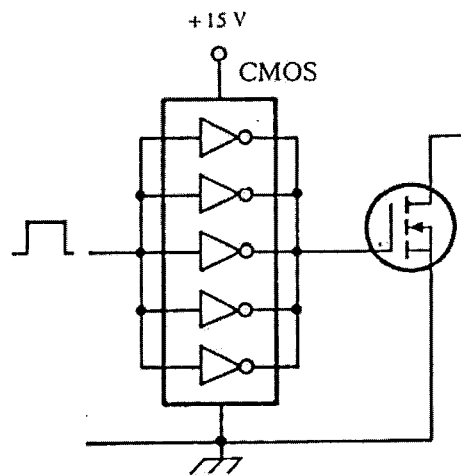
(ข) แสดงการต่อทรานซิสเตอร์เพิ่มเข้ามาในวงจรรูป 5.11 (ก) เพื่อเพิ่มความเร็วขณะนำกระแส

(ค) แสดงการต่อทรานซิสเตอร์เพิ่มเข้ามาอีก 1 ตัวในวงจรรูป 5.11(ข) เพื่อเพิ่มความเร็วในขณะเริ่มหยุดนำกระแสด้วย

#### 4.1.6 วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วย CMOS

เพาเวอร์มอสเฟตสามารถต่อโดยตรงเข้ากับไอซีชนิด CMOS ได้ ไอซี CMOS มาตรฐานเช่นตระกูล 14000 จะมีเอาต์พุตเป็นเฟตในลักษณะคอมพลิเมนต์ารี N และ P channel อยู่แล้ว ไอซีตระกูล 14000 สามารถทำงานได้ที่แรงดันไฟเลี้ยงตั้งแต่ 3 โวลต์ถึง 18 โวลต์ โดยทั่วไปแรงดันไฟเลี้ยงที่ 12 โวลต์ถึง 15 โวลต์ จะเหมาะสมสำหรับการใช้ขับเพาเวอร์มอสเฟต

สำหรับการขับเพาเวอร์มอสเฟตที่ต้องนำกระแสสูงๆการต่อ CMOS ในลักษณะขนานกันดังรูปที่ 4.7 จะสามารถเพิ่มกระแสที่ขาเกต และทำให้ความเร็วในการเปลี่ยนสถานะของเพาเวอร์มอสเฟตเป็นไปได้อย่างเร็วขึ้นด้วย

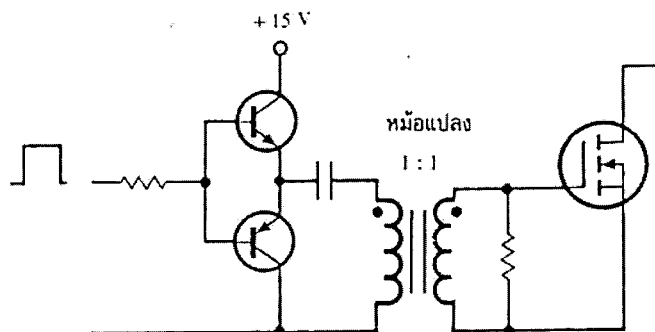


รูปที่ 4.7 แสดงการขับเพาเวอร์มอสเฟตให้นำกระแสด้วยไอซี CMOS โดยตรง

#### 4.1.7 วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วยหม้อแปลง

ในกรณีวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์และฟูลบริดจ์ วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตตัวบนและตัวล่างจะต้องมีการแยกกราวด์ออกจากกัน และอาจจำเป็นต้องใช้หม้อแปลงหรือในกรณีที่ต้องการขับเพาเวอร์มอสเฟตมากกว่าหนึ่งตัวพร้อมกัน ก็อาจต้องใช้หม้อแปลงช่วย

การต่อหม้อแปลงพัลส์เข้ากับขาเกตและวงจรควบคุมโดยตรงอาจเกิดปัญหาการเลื่อนระดับของแรงดันที่เอาต์พุตหม้อแปลงและอาจมีปัญหาในการทำงานของเพาเวอร์มอสเฟตได้ การต่อวงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วยหม้อแปลงจึงควรทำในลักษณะดังในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงตัวอย่างการจัดวงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตให้นำกระแสด้วยหม้อแปลง

#### 4.2 วงจรสแนบเบอร์

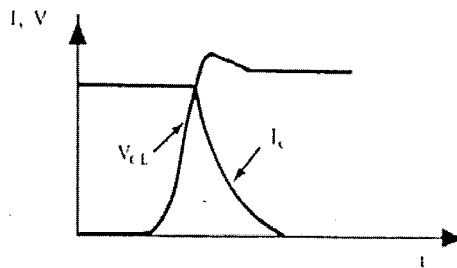
วงจรสแนบเบอร์ (Snubber Network) เป็นส่วนที่เพิ่มเข้ามาในคอนเวอร์เตอร์เพื่อลดการเกิดกำลังงานสูญเสียและป้องกันการเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในวงจรขณะทำงาน ปกติวงจรสแนบเบอร์ในที่นี่อาจแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือวงจรสแนบเบอร์ช่วงหยุดนำกระแส

(turn off snubber) และวงจรสแนบเบอร์ป้องกันแรงดันเกิน (clamp snubber) วงจรสแนบเบอร์โดยทั่วไปจะประกอบด้วยตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุและไดโอดในบางครั้งจึงเรียกกันว่าวงจร RCD สแนบเบอร์

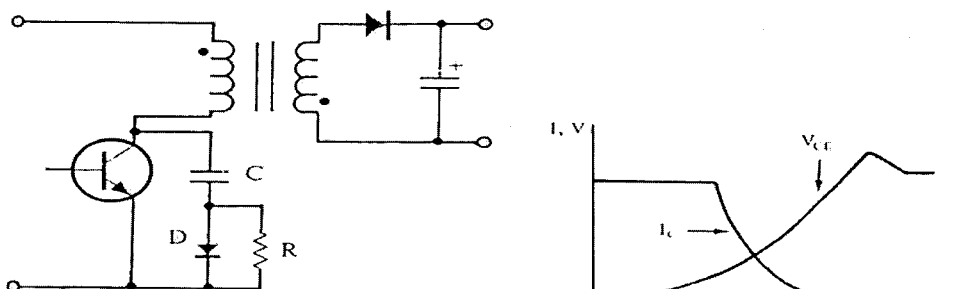
#### 4.2.1 วงจรสแนบเบอร์ช่วงหยุดนำกระแส

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า กำลังงานสูญเสียที่เกิดในเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ จะเป็นไปได้สูงขณะเปลี่ยนสถานะการทำงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งขณะเริ่มหยุดนำกระแสก่อนที่เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์จะหยุดนำกระแสนั้น กระแสจะลดลงอย่างช้าๆ ในขณะที่แรงดันเพิ่มขึ้นสูงค่าแรงดันอินพุตอย่างรวดเร็ว (ดูรูป 4.9 ประกอบ) กำลังงานสูญเสียในรูปความร้อนในช่วงนี้จึงเกิดขึ้นสูง

เพื่อลดการเกิดกำลังงานสูญเสียในช่วงนี้อาจทำได้โดยการต่อวงจรสแนบเบอร์เข้ากับเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ เพื่อควบคุมแรงดันตกคร่อมที่คอลเล็กเตอร์และอีมีตเตอร์ให้เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนกระทั่งกระแสที่ไหลผ่านตัวเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ลดลงได้ทันกัน ซึ่งจะทำให้กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำ ลักษณะของการต่อวงจรสแนบเบอร์อาจทำได้ดังในรูปที่ 4.10



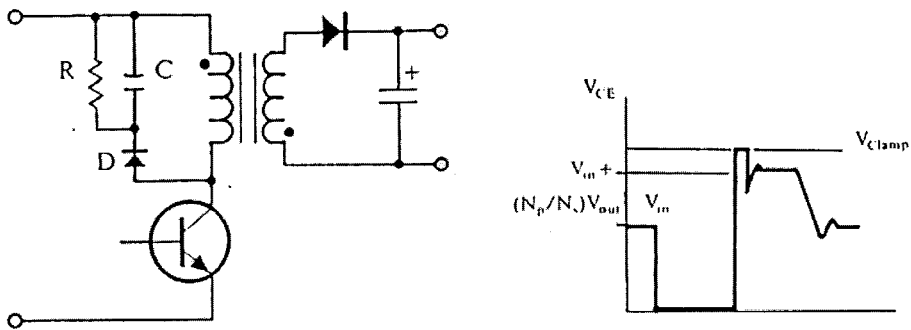
รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะการลดลงของกระแส และการเพิ่มขึ้นของแรงดันตกคร่อม เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ขณะเริ่มหยุดนำกระแส



รูปที่ 4.10 แสดงการต่อวงจรสแนบเบอร์ช่วยหยุดนำกระแสเพื่อหน่วงแรงดันตกคร่อม เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ให้เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ  
เมื่อ  $T$  คือ ค่าคาบเวลาการทำงานของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์

#### 4.2.2 วงจรสับเบอร์ป้องกันแรงดันเกิน

ปกติการพังเสียหายของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ขณะทำงาน มักมีสาเหตุหลักมาจากการทำงานเกินพิกัดปลอดภัย RBSOA แรงดันสไปค์ขณะหยุดนำกระแสโดยเฉพาะอย่างยิ่งในฟลายแบค และฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ มักทำให้ค่าของแรงดันตกคร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ขณะเริ่มหยุดนำกระแสมีค่าสูงเกินค่าแรงดันสูงสุดที่มันจะทนได้ และเกิดการพังเสียหายขึ้น วงจรสับเบอร์ป้องกันแรงดันเกิน จึงมีหน้าที่ป้องกันค่าแรงดันสไปค์ที่เกิดขึ้นไม่ให้เกินค่าปลอดภัยของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ การต่อวงจร RCD สับเบอร์เพื่อป้องกันแรงดันเกินอาจทำได้ดังรูปที่ 4.11



**รูปที่ 4.11** แสดงการต่อสับเบอร์ป้องกันแรงดันเกินเพื่อจำกัดค่ากระแสสูงสุดที่จะตกคร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ขณะเริ่มหยุดนำกระแส

การทำงานของวงจร RCD สับเบอร์ช่วงเริ่มหยุดนำกระแสจะเป็นดังนี้คือ เมื่อเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์  $Q_1$  เริ่มหยุดนำกระแส แรงดันที่ขาคอลเล็กเตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้มีกระแสบางส่วนไหลผ่านตัวเก็บประจุ  $C_1$  และไดโอด  $D_1$  ของวงจรสับเบอร์ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม  $C_1$  แรงดันที่ตกคร่อม  $C_1$  จะทำให้แรงดันที่คอลเล็กเตอร์ของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ดังนั้นถ้าให้  $C_1$  มีค่ามากพอ การเพิ่มขึ้นของแรงดันที่ขาคอลเล็กเตอร์จะถูกหน่วงออกไป เพื่อให้กระแสที่ไหลผ่านเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ลดลงจนมีค่าน้อยๆ ได้ทันกัน และจะลดการเกิดกำลังงานสูญเสียในตัวเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ได้ ขณะที่เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์เริ่มนำกระแสอีกครั้ง  $C_1$  จะคายประจุผ่านตัวต้านทาน  $R_1$  ทิ้งไป แรงดันตกคร่อม  $C_1$  จึงลดต่ำลงได้อีกครั้งและสามารถทำงานได้ในช่วงต่อไปค่าของ  $C_1$  และ  $R_1$  ที่เหมาะสมอาจหาได้จาก

$$C_1 = \frac{I_{p(PK)} \times t_{OFF}}{2V_{in}} \dots\dots\dots(4.6)$$

$$R_1 = \frac{t_{ON(min)}}{2.3C_1} \dots\dots\dots(4.7)$$

$I_{p(PK)}$  คือ ค่ากระแสสูงสุดขณะเริ่มหยุดนำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์

$V_{in}$  คือ ค่าแรงดันอินพุตของคอนเวอร์เตอร์

$t_{ON}$  คือ ช่วงเวลานำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์

$t_{OFF}$  คือ ช่วงเวลาหยุดนำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์

$C_1 R_1 R_1 R_1$  คือ การคายประจุของ  $C_1$  จะทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียในตัว  $R_1$  สูง ตัวต้านทาน  $R_1$  จะต้องทนกำลังได้สูงโดยค่ากำลังสูญเสียใน  $R_1$  อาจหาได้จาก

$$P_L = \frac{C_1(2V_{in})^2}{2T} \dots\dots\dots(4.8)$$

เริ่มหยุดนำกระแส ตัวเก็บประจุ  $C$  จะถูกชาร์จประจุผ่านไดโอด  $D$  จากค่าแรงดันสไปค์ค่าของ  $R_1$  จะทำให้แรงดันตกคร่อม  $C$  มีค่าต่ำกว่าแรงดันสไปค์ และมีค่าคงที่ตลอดช่วงของการแรงดันสไปค์ ค่าแรงดันสูงสุดที่คอลเล็กเตอร์ จะเกิดสไปค์จึงถูกกันไว้ด้วยแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C$  และเนื่องจากแรงดันสไปค์จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ ดังนั้นขณะที่แรงดันสไปค์มีค่าลดลง  $C$  จะคายประจุออกมาผ่านตัวต้านทาน  $R$  แรงดันตกคร่อมที่คอลเล็กเตอร์จะกลับสู่ค่าแรงดันตามการทำงานปกติ อาจกล่าวได้ว่า วงจรสับเบรคป้องกันแรงดันเกินนั้นทำงานโดยการถ่ายเทพลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำเฟืองอันเป็นตัวทำให้เกิดแรงดันสไปค์ไปไว้ที่ตัวเก็บประจุ  $C$  แทน นั่นคือ

$$\frac{1}{2} \times C \times V_C^2 = \frac{1}{2} Li \times I^2 p_{(PK)} \dots\dots\dots(4.9)$$

เนื่องจาก จะมีค่าได้ไม่เกิน  $V_C V_{CEO} - V_{Clamp}$  ดังนั้น

$$C = \frac{Li \times I^2 P_{(PK)}}{(V_{CEO} - V_{Clamp})^2} \dots\dots\dots(4.10)$$

เมื่อ

Li คือ ค่าความเหนี่ยวนำแฝงที่เกิดจากฟลักซ์รั่วของขดไฟรมารี (leakage inductance)

$I P_{(PK)}$  คือ ค่ากระแสสูงสุดขณะเริ่มหยุดนำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์

$V_{CEO}$  คือ อัตราทนแรงดันตกคร่อมสูงสุดของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์

$V_{CLAMP}$  คือ ค่าแรงดันสูงสุดที่ยอมให้เกิดได้เมื่อเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์เริ่มหยุดนำกระแส

ค่าของ R อาจหาได้จาก

$$R = \frac{t_{OFF(min)}}{2.3 \times C1} \dots\dots\dots(4.11)$$

กำลังงานสูญเสียใน R จะมีค่าเท่ากับ

$$P_D = \frac{1}{2} \times \frac{Li \times I^2 P_{(PK)}}{T} \quad (\text{วัตต์}) \dots\dots\dots(4.11)$$

เมื่อ T คือ คาบเวลาการทำงานของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์

$t_{OFF}$  คือ ช่วงเวลาหยุดนำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์

### 4.3 ไดโอดในสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย

#### 4.3.1 กำลังงานสูญเสียในรูปความร้อนของไดโอด

ไดโอดเป็นอุปกรณ์อีกตัวหนึ่งของสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย ที่ไม่อาจมองข้ามการเกิดกำลังงานสูญเสียในรูปความร้อนขณะมันทำงานได้ เนื่องจากต้องทำงานที่ความถี่สูงกำลังงานสูญเสียในไดโอดจะเกิดได้ 2 ลักษณะเช่นเดียวกับเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์คือ กำลังงานสูญเสียขณะนำกระแสและกำลังงานสูญเสียขณะเปลี่ยนสถานะการใช้งานไดโอดที่ความถี่ต่ำๆกำลังงานสูญเสียส่วนใหญ่จะเกิดจากกำลังงานสูญเสียขณะนำกระแส แต่ที่ความถี่สูงกำลังงานสูญเสียขณะเปลี่ยนสถานะของไดโอดจะมีค่าสูงขึ้นด้วย และมีผลต่อค่ากำลังงานสูญเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นในไดโอด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกชนิดของไดโอดให้ถูกต้องเพื่อลดการเกิดกำลังงานสูญเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะนั้นด้วย ขณะที่ไดโอดนำกระแสจะมีแรงดันตกคร่อมที่รอยต่อขึ้น ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมไดโอด

ขณะนำกระแสซึ่งจะมีค่าขึ้นกับค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวมัน รูปที่ 4.12 จะแสดงตัวอย่างกราฟค่าของแรงดันตกคร่อมตัวไดโอดต่อค่ากระแสที่ไหลผ่านโดยไดโอดในช่วงนี้จะมีกำลังงานสูญเสียเท่ากับ

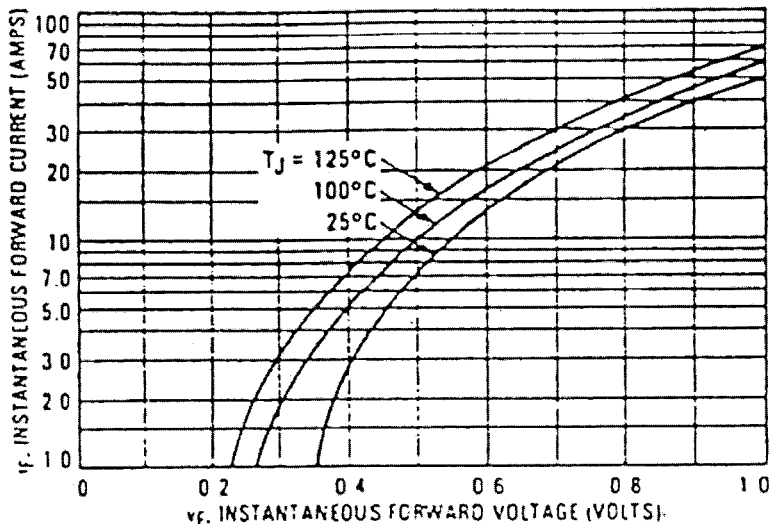
$$P_D = V_F \times I_F \quad \dots\dots\dots(4.12)$$

เมื่อ  $P_D$  คือ ค่ากำลังงานสูญเสียในรูปความร้อนของไดโอดขณะนำกระแส

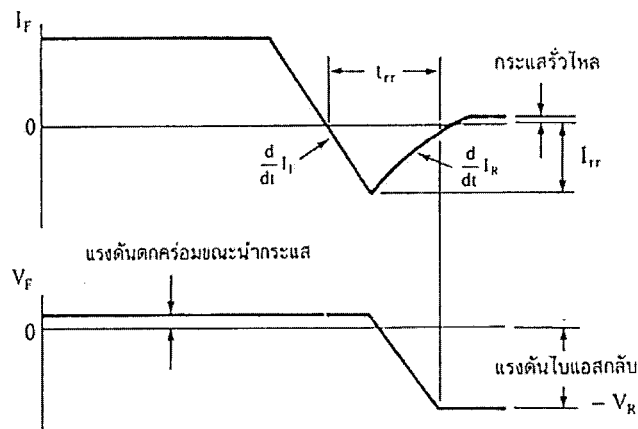
$V_F$  คือ ค่าแรงดันตกคร่อมตัวไดโอดขณะนำกระแส

$I_F$  คือ ค่ากระแสที่ไหลผ่านไดโอด

ไดโอดจะเกิดกำลังงานสูญเสียได้มากที่สุดขณะเปลี่ยนสถานะเมื่อเริ่มหยุดนำกระแส ซึ่งมีผลมาจากการเกิดประจุสะสมขึ้นในตัวไดโอดขณะนำกระแสโดยก่อนที่ไดโอดจะตอบสนองต่อแรงดันไบแอสกลับและกันไม่ให้เกิดกระแสไหลย้อนทางได้ไดโอดจะต้องลดประจุสะสมเหล่านี้ออกไปเสียก่อนประจุสะสมจะมีผลทำให้เกิดกระแสไหลย้อนกลับผ่านตัวไดโอดในขณะที่มีแรงดันไบแอสกลับตกคร่อมตัวมันอยู่และไดโอดต้องใช้เวลาส่วนหนึ่งลดประจุสะสมออกไปจึงจะทำให้สามารถหยุดกระแสไบแอสกลับได้ เวลาที่ใช้ในการลดประจุนี้เรียกว่า ช่วงเวลาดิ้นตัว (reverse recovery time) หรือ  $t_{rr}$  ลักษณะตอบสนองต่อแรงดันและกระแสของไดโอดจะเป็นดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.12 แสดงตัวอย่างค่าแรงดันตกคร่อมไดโอดขณะนำกระแส กำลังงานสูญเสียในไดโอดในช่วงนี้จะมีค่า  $P_D = V_F \times I_F$



**รูปที่ 4.13** แสดงลักษณะของกระแสและแรงดันตกคร่อมไดโอดขณะเริ่มหยุดนำกระแส

ช่วงเวลานี้ขึ้นตัว  $t_{rr}$  จะขึ้นกับค่าประจุสะสม ซึ่งเป็นผลโดยตรงจากการที่มีกระแสไหลผ่าน ไดโอดขณะถูกไบแอสตรง รวมทั้งการใช้งานไดโอดลักษณะต่างๆ กันจะให้ค่าที่  $t_{rr}$  แตกต่างกัน ออกไปด้วย จะเห็นได้ว่าในช่วงเวลานี้  $t_{rr}$  ไดโอดจะมีกระแสไหลขณะที่มีแรงดันตกคร่อมสูง และ จะเกิดกำลังงานสูญเสียขึ้นสูงเมื่อใช้งานไดโอดที่ความถี่สูงขึ้น

ลักษณะที่สำคัญอีกประการหนึ่งของไดโอดก็คือความนุ่มนวลในการคืนตัว (softness recovery) ที่ความถี่สูงๆ ลักษณะการคืนตัวของไดโอดจะมีผลต่อการเกิดสัญญาณรบกวน RFI ของสวิตช์ซึ่ง เพาเวอร์ซัพพลาย ความนุ่มนวลในการคืนตัวของไดโอดจะกำหนดด้วยค่าความชันที่ขอบขาขึ้นของ กระแสในช่วงเวลานี้ตัว  $\frac{dI_R}{dt}$  ไดโอดที่มีความชัน  $\frac{dI_R}{dt}$  น้อยๆ จะมีลักษณะการคืนตัวอย่าง นุ่มนวลและให้ค่าสัญญาณรบกวน RFI เกิดขึ้นต่ำๆ แต่จะมีช่วงเวลานี้ตัว  $t_{rr}$  มาก และเกิดกำลัง งานสูญเสียได้มากด้วย

#### 4.3.2 ชนิดและการเลือกใช้ไดโอด

เนื่องจากคอนเวอร์เตอร์จะมีค่าความถี่การทำงานของวงจรตั้งแต่ 20 กิโลเฮิรตซ์ขึ้นไป ไดโอดที่ช้ในคอนเวอร์เตอร์จึงจำเป็นต้องมีคุณสมบัติทั่วไปดังนี้ คือ (1) มีแรงดันตกคร่อมขณะ นำกระแสต่ำ (2) มีช่วงเวลานี้ตัว  $t_{rr}$  สั้น และ (3) สามารถทนกำลังได้สูง

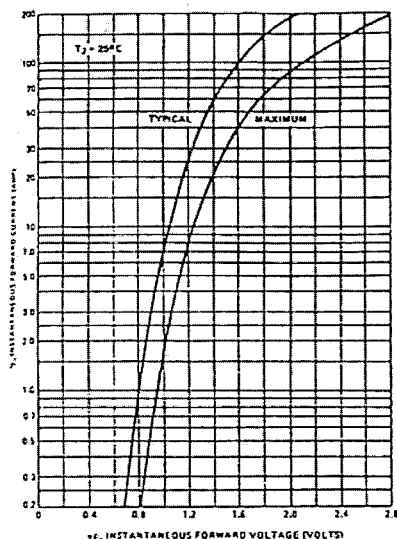
ซิลิคอนไดโอดที่ใชในวงจรเรกติไฟเออร์ต่างๆ ไปจะไม่สามารถนำมาใช้กับคอนเวอร์เตอร์ ได้ เนื่องจากมีค่าช่วงเวลานี้ตัวมาก กำลังงานสูญเสียในรูปความร้อนจะเกิดขึ้นสูงและมี ประสิทธิภาพต่ำ ปกติไดโอดที่ใชในวงจรคอนเวอร์เตอร์ควรเลือกใช้จากไดโอด 3 ชนิด ดังต่อไปนี้คือ



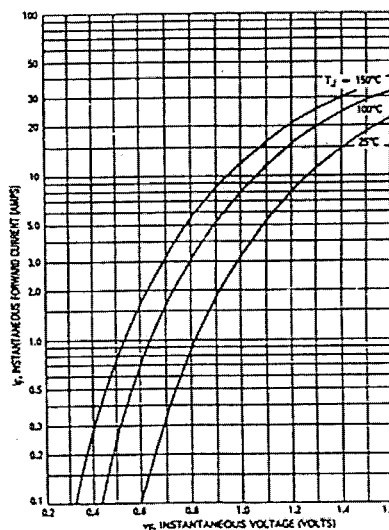
1. ฟาสต์-รีคัพเวอร์ไดโอด ( Fast Recovery Diode)
2. อุลตราฟาสต์- รีคัพเวอร์ไดโอด ( Ultra Fast Recovery Diode)
3. ชอตต์กีไดโอด ( Schottky Diode)

#### 4.3.2.1 ฟาสต์-รีคัพเวอร์ไดโอดและอุลตราฟาสต์- รีคัพเวอร์ไดโอด

ฟาสต์-รีคัพเวอร์ไดโอดมีช่วงเวลาคืนตัว ประมาณ 200 - 750 นาโนวินาที ซึ่งสั้นกว่าซิลิคอนไดโอดมาก  $t_{rr}$  และฟาสต์-รีคัพเวอร์ไดโอดมีอัตราทนแรงดันไบแอสกลับได้สูงถึง 1,000 โวลต์ ส่วน อุลตราฟาสต์- รีคัพเวอร์ไดโอด มีช่วงเวลาคืนตัว  $t_{rr}$  ประมาณ 25 - 100 นาโนวินาที และมีอัตราทนแรงดันไบแอสกลับได้สูงถึง 1,000 โวลต์ เช่นเดียวกัน แรงดันตกคร่อมขณะนำกระแส  $V_F$  ของไดโอดทั้ง 2 ชนิดมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกันคือประมาณ 0.6 - 1.5 โวลต์ ตัวอย่างค่าแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสของ ฟาสต์-รีคัพเวอร์และอุลตราฟาสต์- รีคัพเวอร์ แสดงไว้ในรูปที่ 4.14 เนื่องจากแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสของ ฟาสต์-รีคัพเวอร์และอุลตราฟาสต์- รีคัพเวอร์ไดโอด มีค่าค่อนข้างสูง ไดโอดทั้งสองชนิดนี้จึงเหมาะกับคอนเวอร์เตอร์ที่มีค่าแรงดันเอาต์พุตที่มีค่าแรงดันตั้งแต่ 12 โวลต์ขึ้นไป



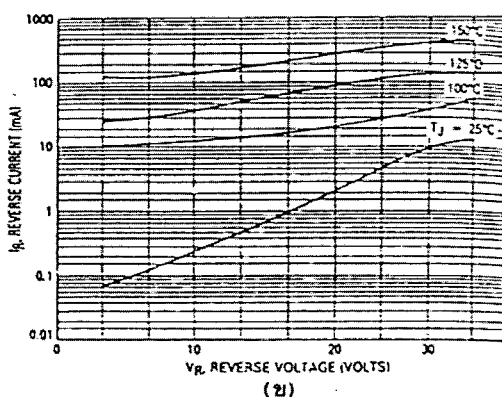
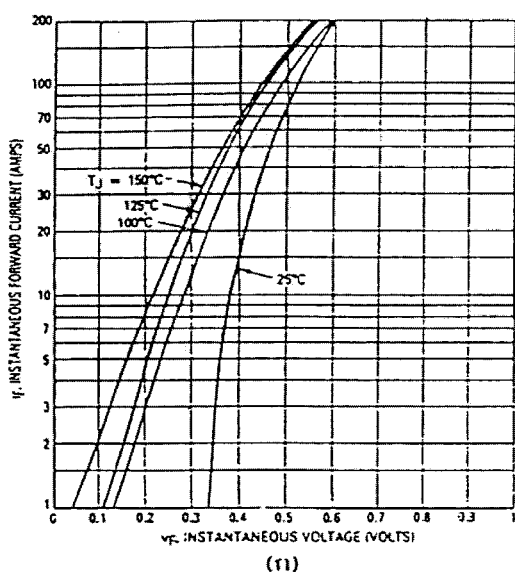
รูปที่ 4.14 (ก) แสดงตัวอย่างค่าแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสของฟาสต์รีคัพเวอร์ไดโอด



รูปที่ 4.14 (ข) แสดงตัวอย่างค่าแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสของอุลตราฟาสต์รีคัพเวอร์ไดโอด

#### 4.3.2.2 ขอตต์กีไดโอด

ขอตต์กีไดโอดมีค่าแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสค่อนข้างต่ำที่ประมาณ 0.5 โวลต์ (ดูรูปที่ 4.15 ประกอบ) จึงเหมาะสมกับคอนเวอร์เตอร์ที่มีค่าแรงดันเอาต์พุตต่ำๆ และกระแสสูงๆ เช่นที่แรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 5 โวลต์ เนื่องจากลักษณะโครงสร้างภายในที่แตกต่างจากฟอสต์-รีคัพเวอร์และอูลตราฟอสต์-รีคัพเวอร์ไดโอดขอตต์กีไดโอดจะไม่เกิดประจุสะสมขึ้นภายในตัวมันขณะนำกระแส ช่วงเวลาคืนตัว  $t_{rr}$  ของขอตต์กีไดโอดจะมีค่าสั้นมากโดยมีค่าน้อยกว่า 10 นาโนวินาที และอาจถือว่าขอตต์กีไดโอดไม่มีกำลังงานสูญเสียในช่วงนี้ได้ อย่างไรก็ตาม ขอตต์กีไดโอดมีข้อเสียอยู่ 2 ประการคือขอตต์กีไดโอดที่ผลิตได้ในปัจจุบันมีอัตราทนแรงดันขณะไบแอสกลับได้สูงสุดที่ 100 โวลต์เท่านั้น และ ขอตต์กีไดโอดมีกระแสรั่วไหลสูง (ดูรูปที่ 5.25 ประกอบ) ทำให้มีกำลังงานสูญเสียขณะถูกไบแอสกลับค่อนข้างสูง และยังมีปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อนำขอตต์กีไดโอดมาใช้ในคอนเวอร์เตอร์อีกประการหนึ่งคือ ขอตต์กีไดโอดจะให้ทรานเซียนต์ขณะเริ่มหยุดนำกระแสสูง



รูปที่ 4.15 (ก)แสดงตัวอย่างแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสของขอตต์กีไดโอด  
(ข)แสดงค่ากระแสรั่วไหลของขอตต์กีไดโอด

**บทที่ 5**  
**การทดลอง**

**5.1 ผลการทดลองแหล่งจ่ายไฟสวิตชิงแรงดันสูง**

ผลการทดลองแหล่งจ่ายไฟสวิตชิงแรงดันสูงที่ต่อกับโหลดไอโซน

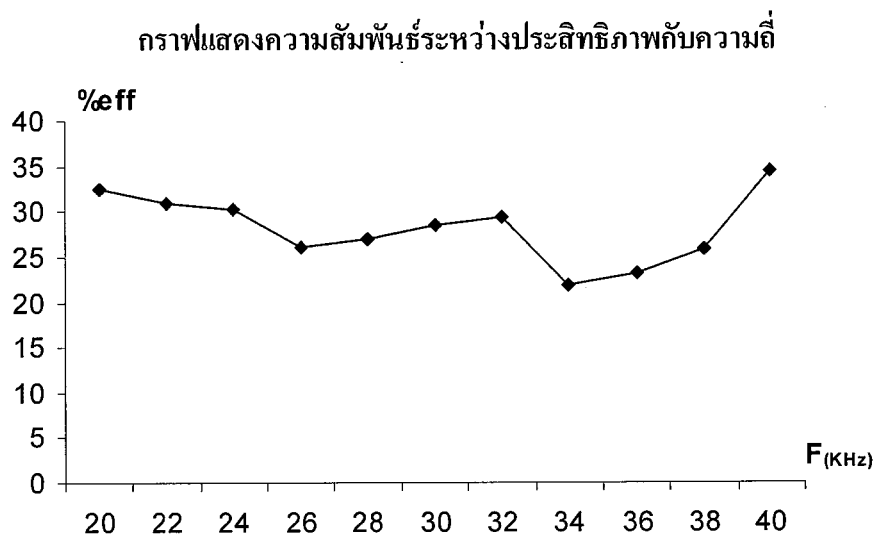
| <b>F(KHz)</b> | <b>Vout<br/>(Vp)</b> | <b>Vout<br/>(rms)</b> | <b>Iout<br/>(A)</b> | <b>Pout<br/>(W)</b> |
|---------------|----------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|
| 20            | 574.17               | 406                   | 0.3                 | 121                 |
| 22            | 599.62               | 424                   | 0.34                | 144                 |
| 24            | 649.12               | 459                   | 0.35                | 160                 |
| 26            | 724.07               | 512                   | 0.38                | 194                 |
| 28            | 749.53               | 530                   | 0.38                | 201                 |
| 30            | 799.03               | 565                   | 0.39                | 220                 |
| 32            | 774.98               | 548                   | 0.36                | 197                 |
| 34            | 649.12               | 459                   | 0.34                | 156                 |
| 36            | 574.17               | 406                   | 0.30                | 122                 |
| 38            | 524.67               | 371                   | 0.28                | 104                 |
| 40            | 349.31               | 247                   | 0.26                | 64                  |

**ตารางที่ 5.1** แสดงผลการทดลองที่ความถี่ต่างๆ

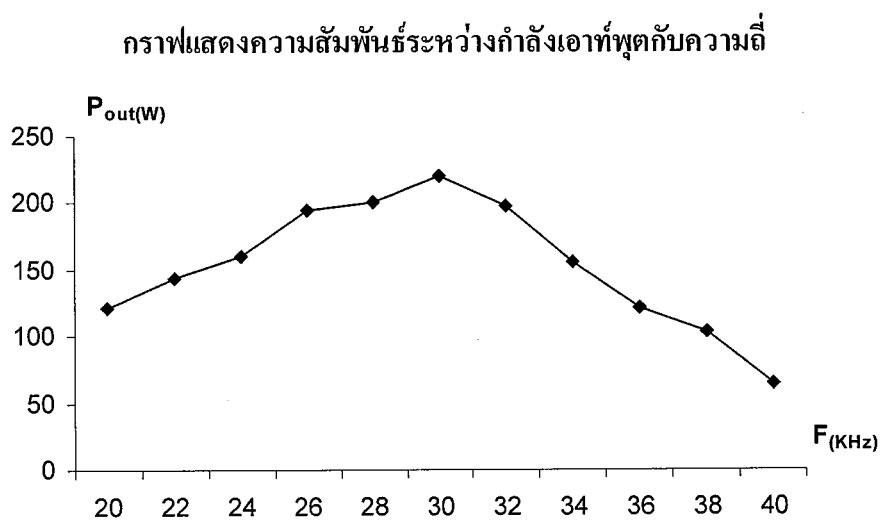
| <b>F(KHz)</b> | <b>I<sub>IN</sub>(A)</b> | <b>P<sub>IN</sub>(W)</b> | <b>I<sub>OUT</sub>(A)</b> | <b>V<sub>OUT</sub></b><br>(Vac) | <b>P<sub>OUT</sub>(W)</b> | <b>% eff</b> |
|---------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------|--------------|
| 20            | 1.2                      | 372                      | 0.3                       | 406                             | 121                       | 32.5         |
| 22            | 1.5                      | 465                      | 0.34                      | 424                             | 144                       | 30.9         |
| 24            | 1.7                      | 527                      | 0.35                      | 459                             | 160                       | 30.3         |
| 26            | 2.4                      | 744                      | 0.38                      | 512                             | 194                       | 26.0         |
| 28            | 2.4                      | 744                      | 0.38                      | 530                             | 201                       | 27.0         |
| 30            | 2.5                      | 775                      | 0.39                      | 565                             | 220                       | 28.4         |
| 32            | 2.5                      | 775                      | 0.36                      | 548                             | 197                       | 29.4         |
| 34            | 2.3                      | 713                      | 0.34                      | 459                             | 156                       | 21.8         |
| 36            | 1.7                      | 527                      | 0.30                      | 406                             | 122                       | 23.15        |
| 38            | 1.3                      | 403                      | 0.28                      | 371                             | 104                       | 25.8         |
| 40            | 0.6                      | 186                      | 0.26                      | 247                             | 64                        | 34.4         |

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการทดลองที่ความถี่ต่างๆ

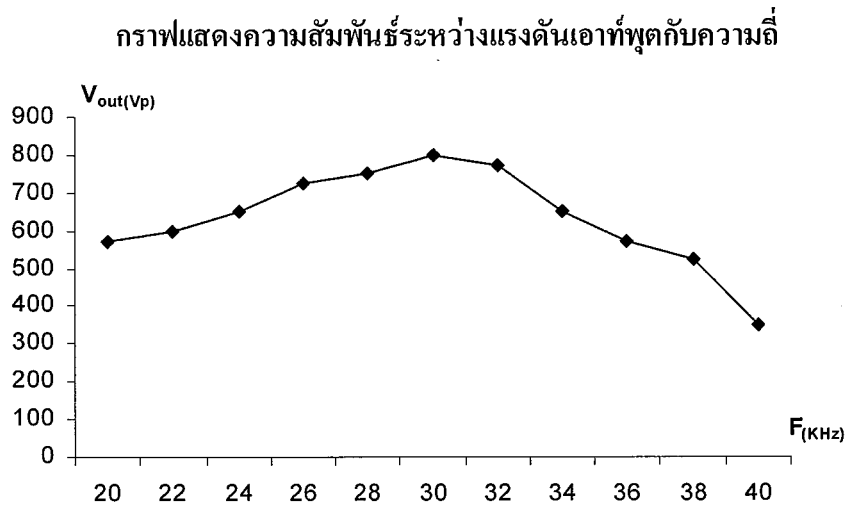
๕๐



กราฟที่ 5.1 กราฟแสดงประสิทธิภาพกับความถี่ต่างๆ

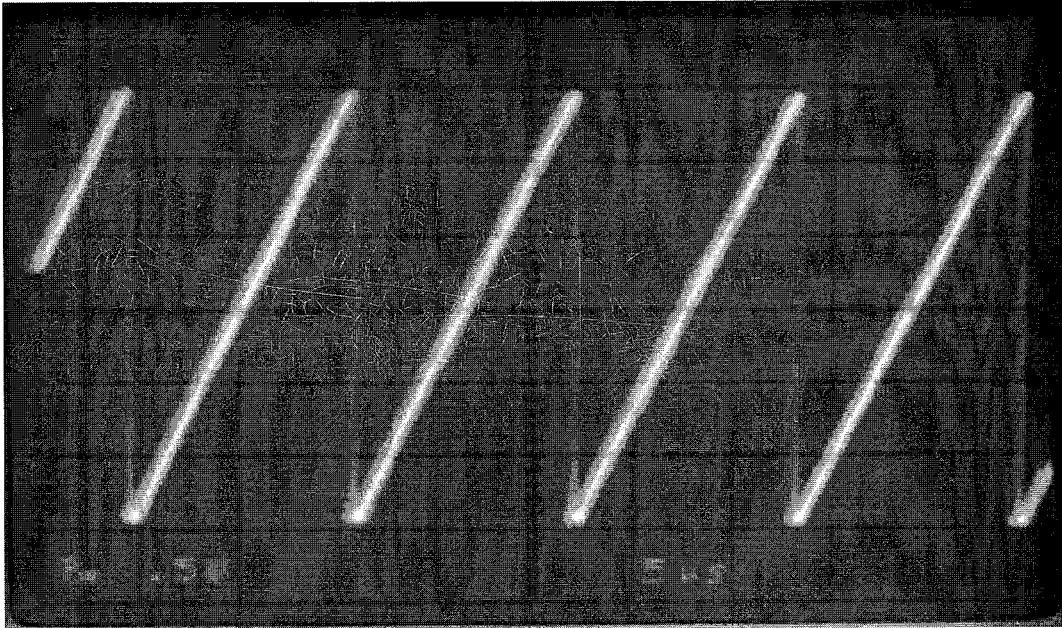


กราฟที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเอาต์พุตกับความถี่ต่างๆ

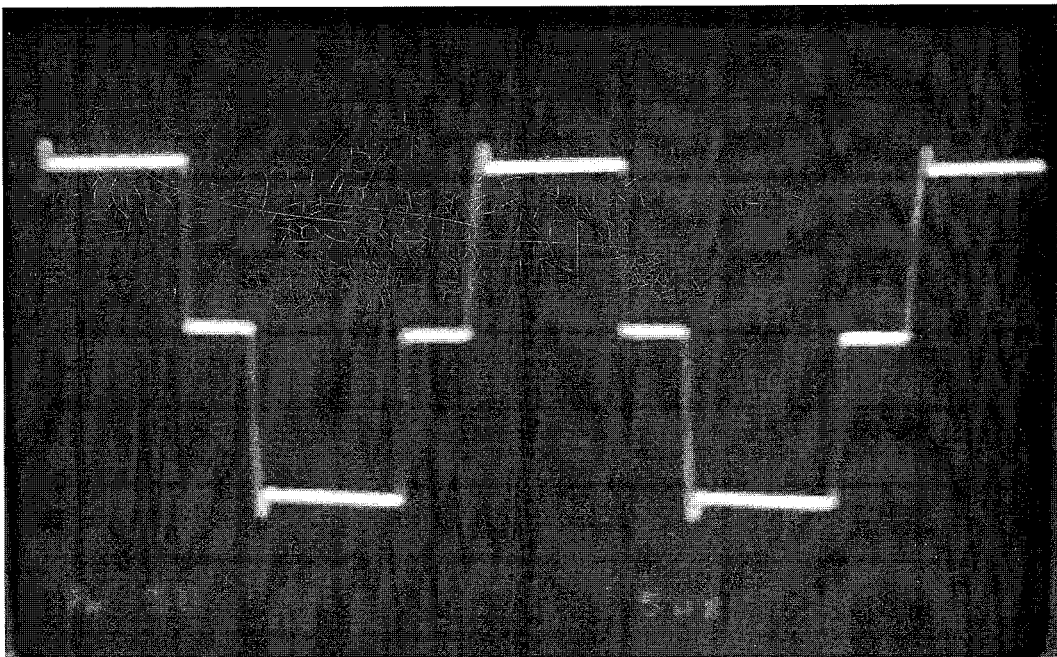


กราฟที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์กันระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับความถี่ต่างๆ

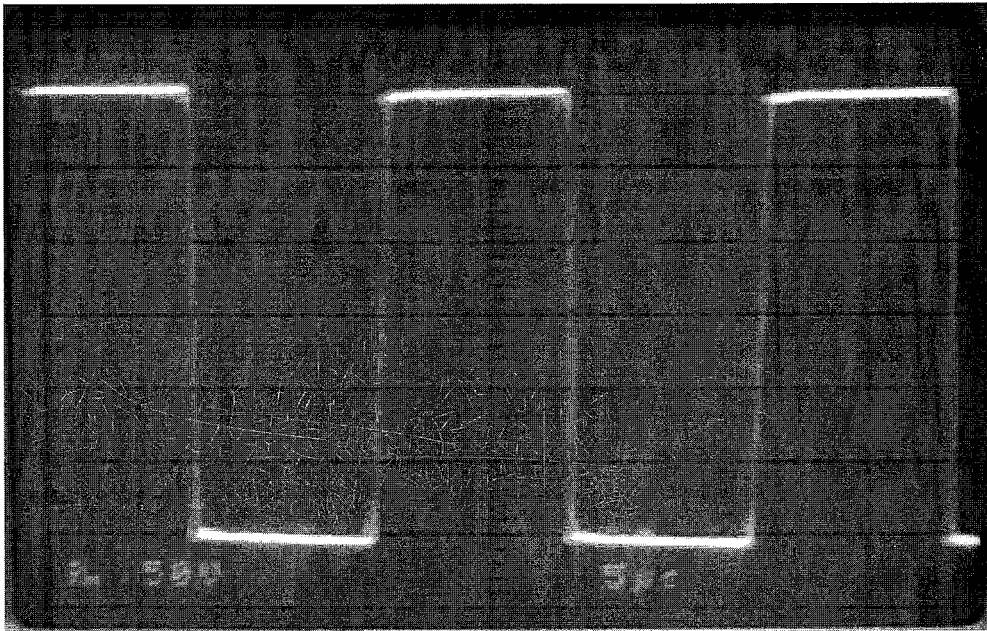
รูปของสัญญาณต่างๆที่ได้จากการทดลอง



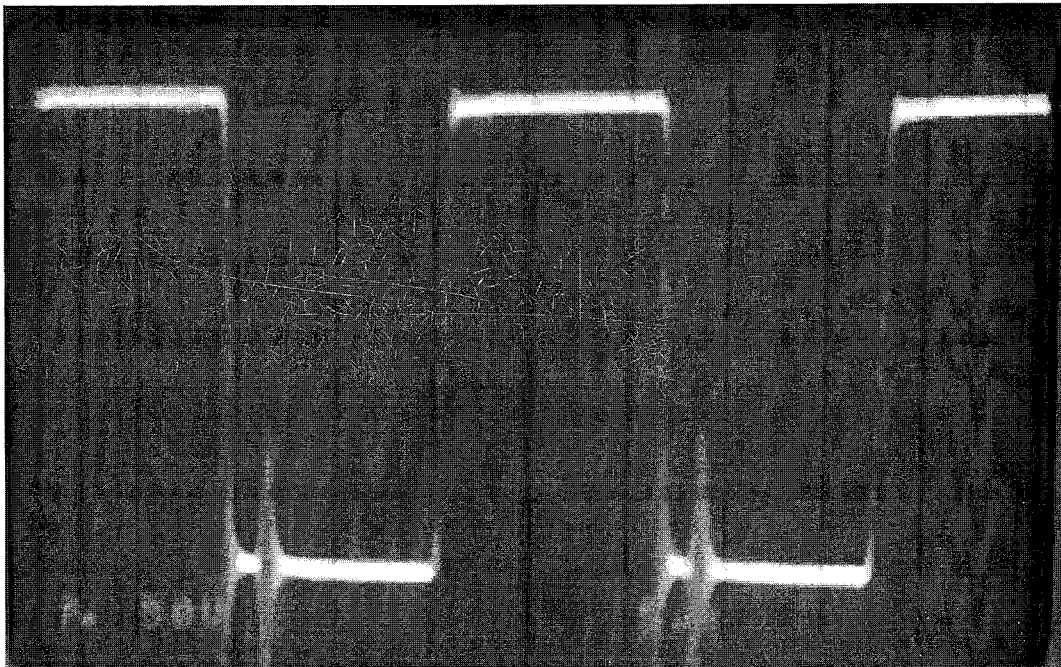
รูปที่ 5.1 สัญญาณฟันเลื่อยวัดจากขา 5 ของ TL494



รูปที่ 5.2 สัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากมอสเฟตชุดไดรฟ์เวอร์



รูปที่ 5.3 สัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากเพาเวอร์มอสเฟตภาคอินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นอินพุตให้วงจรเรโซแนนซ์



รูปที่ 5.4 เมื่อไม่ใส่ชุดวงจรสับเบอร์ให้เพาเวอร์มอสเฟตสัญญาณที่ได้จะมีสไปค์เกิดขึ้น



จากรูปที่ 5.1 เป็นสัญญาณพื้นเลื้อยที่วัดจากขา 5 ของ TL494 ซึ่งต่ออยู่กับ  $C_T$  เพื่อกำหนดความถี่ของวงจร สัญญาณที่ได้มีขนาด  $3\text{ V}_{P-P}$

รูปที่ 5.2 เป็นสัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาจากชุดมอสเฟตที่ต่อแบบคอมพลิเมนตาของวงจรควบคุม สัญญาณมีขนาด  $12\text{ V}_P$  เท่ากับแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง จะเห็นว่าจะมีช่วงที่สัญญาณเป็น 0 โวลต์ นั่นคือช่วงของ DEAD TIME นั่นเอง ซึ่งเราจะเอาสัญญาณที่ได้นี้ไปเข้าหม้อแปลงคัปปลิงความถี่สูงเพื่อแยกสัญญาณออกเป็น 2 ชุด มีเฟสต่างกัน  $180^\circ$  องศา เอาไปเข้าขาเกตของเพาเวอร์มอสเฟตในภาคคอนเวอร์เตอร์

รูปที่ 5.3 เป็นสัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาจากคู่เพาเวอร์มอสเฟตของภาคอินเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นอินพุตให้วงจรเรโซแนนซ์ สัญญาณจะมีลักษณะเป็นพัลส์สี่เหลี่ยมมีแรงดัน  $150\text{ V}_P$  คงที่ตลอดทุกความถี่

รูปที่ 5.4 เป็นสัญญาณที่ได้เมื่อไม่ได้ต่อชุดวงจรสับเบอรี่ให้กับเพาเวอร์มอสเฟตจะเห็นว่า จะเกิดสัญญาณสไปค์ขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุของการสูญเสียที่เกิดขึ้นในตัวเพาเวอร์มอสเฟต ทำให้เพาเวอร์มอสเฟตร้อนขึ้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องต่อชุดสับเบอรี่ไว้เสมอ เพื่อความปลอดภัยของเพาเวอร์มอสเฟต

## 5.2 การทดลองระบบผลิตน้ำไอโซน

### ส่วนประกอบในการทดลอง

1. แหล่งจ่ายไฟแรงดันสูง



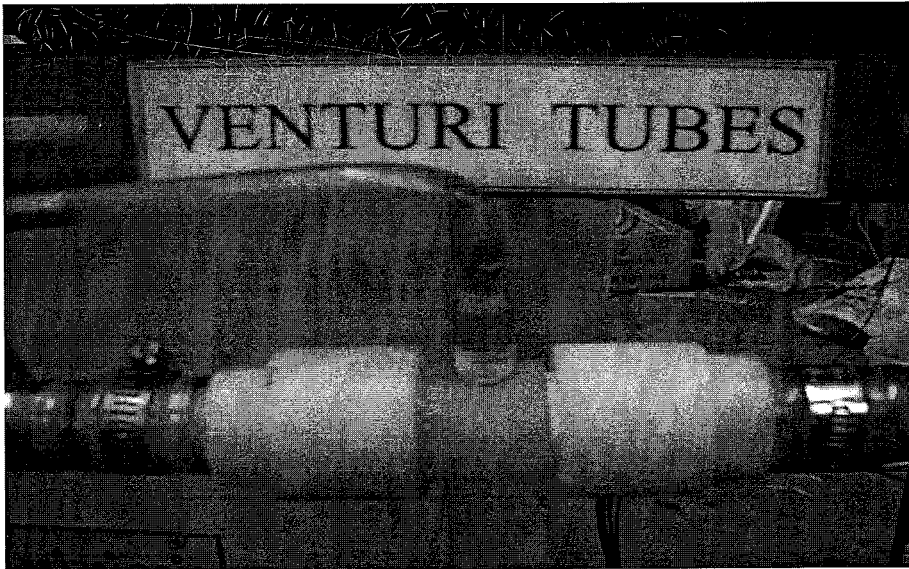
รูปที่ 5.5 แสดง แหล่งจ่ายไฟแรงดันสูง

2. หลอดกำเนิดไอโซน



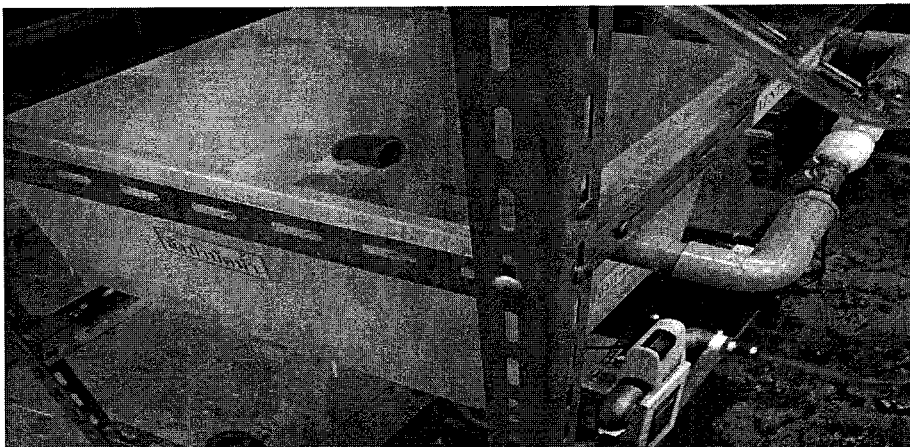
รูปที่ 5.6 แสดง หลอดกำเนิดไอโซน

3. Venturi tube



รูปที่ 5.7 แสดง Venturi tube

4. ถังบำบัดน้ำ



รูปที่ 5.8 แสดง ถังบำบัดน้ำ

5. ป้อนน้ำ



รูปที่ 5.9 แสดง ป้อนน้ำ

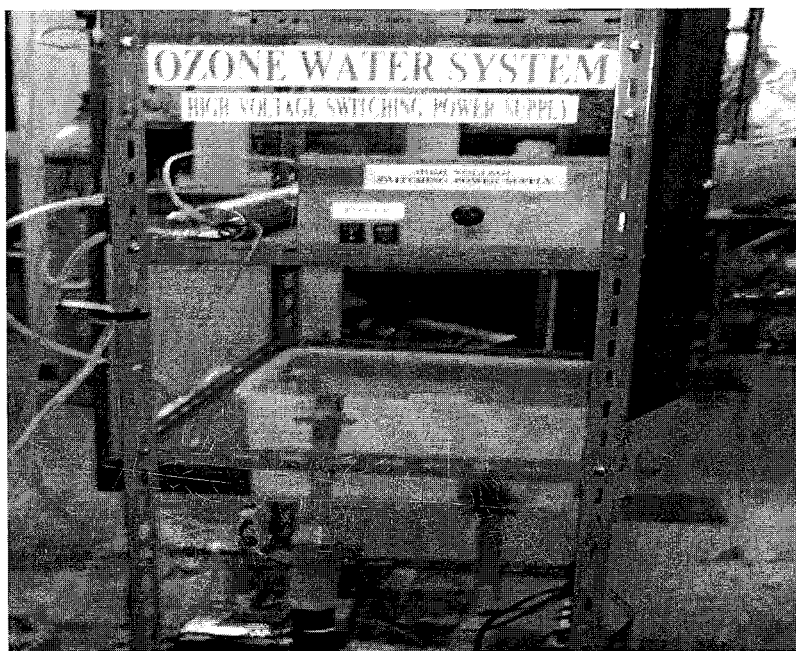
6. ป้อนลม



รูปที่ 5.10 แสดงอัตราการไหลของอากาศ

## วิธีทดลอง

1. ติดตั้งอุปกรณ์ให้เรียบร้อยดังรูป



รูปที่ 5.11 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ของระบบผลิตน้ำโอโซน

2. เติมน้ำในถัง 10 ลิตร
3. ทำการปั้มน้ำเข้าระบบผลิตน้ำโอโซนด้วย Venturi tube
4. ทำการป้อน Ozone gas เข้ามาทางด้านบนของ Venturi tube
5. เริ่มทำการจับเวลาการผสมระหว่างน้ำกับก๊าซโอโซนที่ต่างๆ คือ 1, 2 นาที
6. เมื่อครบ 1 นาที ทำการตวงน้ำจากการผสมระหว่างน้ำกับก๊าซโอโซนมา 100 มิลลิลิตร มาผสมกับสารละลาย KI (โพแทสเซียมไอโอไดด์) ที่ได้ทำการผสมกับน้ำกลั่นไว้แล้ว
7. สังเกตสีของน้ำ 100 มิลลิลิตร ที่นำมาผสมกับสารละลาย KI (โพแทสเซียมไอโอไดด์)

## บทที่ 6

### สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองได้ผลการทดลองของวงจรในแต่ละภาคที่ถูกต้องซึ่งเราสามารถอธิบายได้ดังนี้ที่ภาคCONTROL จะมีไอซีเบอร์ TL494 เป็นหัวใจหลักในการผลิตสัญญาณ PWM ซึ่งสามารถกำหนดความถี่ได้จากค่า  $R_T$  ที่ขา 6 และ  $C_T$  ที่ขา 5 แต่ในโครงงานนี้เราใช้ Active Resister มาทำหน้าที่ปรับความถี่แทน  $R_T$  ซึ่งสร้างจากไอซีออปแอมป์เบอร์ LM324 ซึ่งเราปรับค่าความถี่จากค่า Resistor ที่ต่ออยู่กับขา Non-inverting ของออปแอมป์เพื่อปรับค่าแรงดันอ้างอิงให้ออปแอมป์ทำให้เกิดการเปลี่ยนค่าแรงดันเอาต์พุตของออปแอมป์ ส่งผลให้ค่าของกระแสที่ขา 6 เปลี่ยนแปลงตาม จึงเกิดการเปลี่ยนค่าความถี่ขึ้นสัญญาณ PWM ที่ได้จาก TL494 จะส่งต่อไปกับวงจร DRIVE ซึ่งประกอบด้วย มอสเฟตเป็นชุดทำงานหลักมอสเฟตที่ใช้เป็นเบอร์ IRF9540 และ IRF540 แล้วทำการคัปปลิงผ่านหม้อแปลงสวิตชิงความถี่สูง เพื่อนำไปขับให้เพาเวอร์มอสเฟตให้นำกระแสในภาคอินเวอร์เตอร์ แล้วนำสัญญาณพัลส์ที่ออกจากเพาเวอร์มอสเฟตเข้าสู่วงจรเรโซแนนซ์เพื่อให้ได้สัญญาณไซน์บริสุทธิ์ออกมาทางเอาต์พุต ซึ่งในวงจรเรโซแนนซ์ เราจะใช้หม้อแปลงแบบเพิ่มแรงดันเพื่อทำการเพิ่มแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าสูง ในวงจรเรโซแนนซ์เรากำนวณได้ค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ 32.26 kHz แต่ในการทดลองค่าความถี่เรโซแนนซ์จะคลาดเคลื่อนเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากความคลาดเคลื่อนของค่า L,C จากการทดลองจะเห็นได้ว่า เมื่อความถี่ของวงจรมีค่าเข้าใกล้ความถี่เรโซแนนซ์ แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย พอถึงจุดเรโซแนนซ์ แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าสูงที่สุด แต่พอเราเปลี่ยนค่าความถี่ของวงจรให้ห่างจากค่าความถี่เรโซแนนซ์ แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าลดลงตามไปด้วย ในการปรับค่าความถี่ของวงจร เราจะเริ่มที่ 20 kHz ขึ้นไป เพราะที่ความถี่ต่ำกว่านี้ จะเป็นความถี่ที่มนุษย์ได้ยิน ซึ่งทำให้เกิดเสียงดังรบกวนได้

เมื่อจ่ายไฟแรงดันสูงให้กับหลอดไอโซน หลอดไอโซนจะเริ่มทำงาน ซึ่งสังเกตได้จากมีแสงสีม่วงเกิดขึ้นภายในหลอดไอโซน เมื่อทำการปรับความถี่เพื่อเพิ่มแรงดันของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิงแรงดันสูง ให้มีแรงดันสูงขึ้นไปอีกพบว่าแสงสีม่วงที่เกิดขึ้นที่หลอดกำเนิดไอโซนจะมีความเข้มมากขึ้น ซึ่งเวลาทำการทดลองเราต้องเปิดปั๊มเพื่อดูดอากาศเพื่อให้ก๊าซไอโซนเกิดการไหลเวียนออกมาภายนอกซึ่งเราจะพบว่ามิกคลีนควาปลาออกมาภายนอกซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการทำงานของหลอดกำเนิดไอโซนนั่นเอง

### ผลการทดลองเมื่อทดลองเป็นระบบผลิตน้ำไอโซน

จากการทดลองเฉพาะหลอดกำเนิดไอโซนเข้ากับหลอดจ่ายไฟแรงดันสูงพบว่าค่าเรโซแนนซ์เปลี่ยนไปโดยได้ค่ากระแสสูงสุดเกิดที่ความถี่ 31.17 KHz โดยสังเกตได้ว่าหลอดไอโซนมีสีม่วงและมีกลิ่นฉุนคล้ายกลิ่นควาปลาโดยจะฉุนมากที่ความถี่ 31.17 KHz และค่อยๆจางลงเมื่อห่างความถี่ออกมา

จากการทดลองเมื่อต่อเป็นระบบผลิตน้ำไอโซนพบว่าสีของน้ำที่ไปผสมกับสารละลาย KI (โพแทสเซียมไอโอไดด์) จะกลายเป็นสีเหลืองอ่อนๆโดยเมื่อใช้เวลาในการทดลองนานสีของน้ำที่ได้ก็จะมีสีเหลืองเข้มขึ้น

### ปัญหาที่เกิดขึ้น

1. เนื่องจากวงจรเป็นวงจรไฟฟ้าแรงดันสูงในการทดลองจึงต้องใช้ความระมัดระวังอย่างมาก
2. เนื่องจากก๊าซไอโซนมีกลิ่นฉุนและมีอันตรายดังนั้นการทดลองจึงต้องใช้สถานที่อากาศถ่ายเท

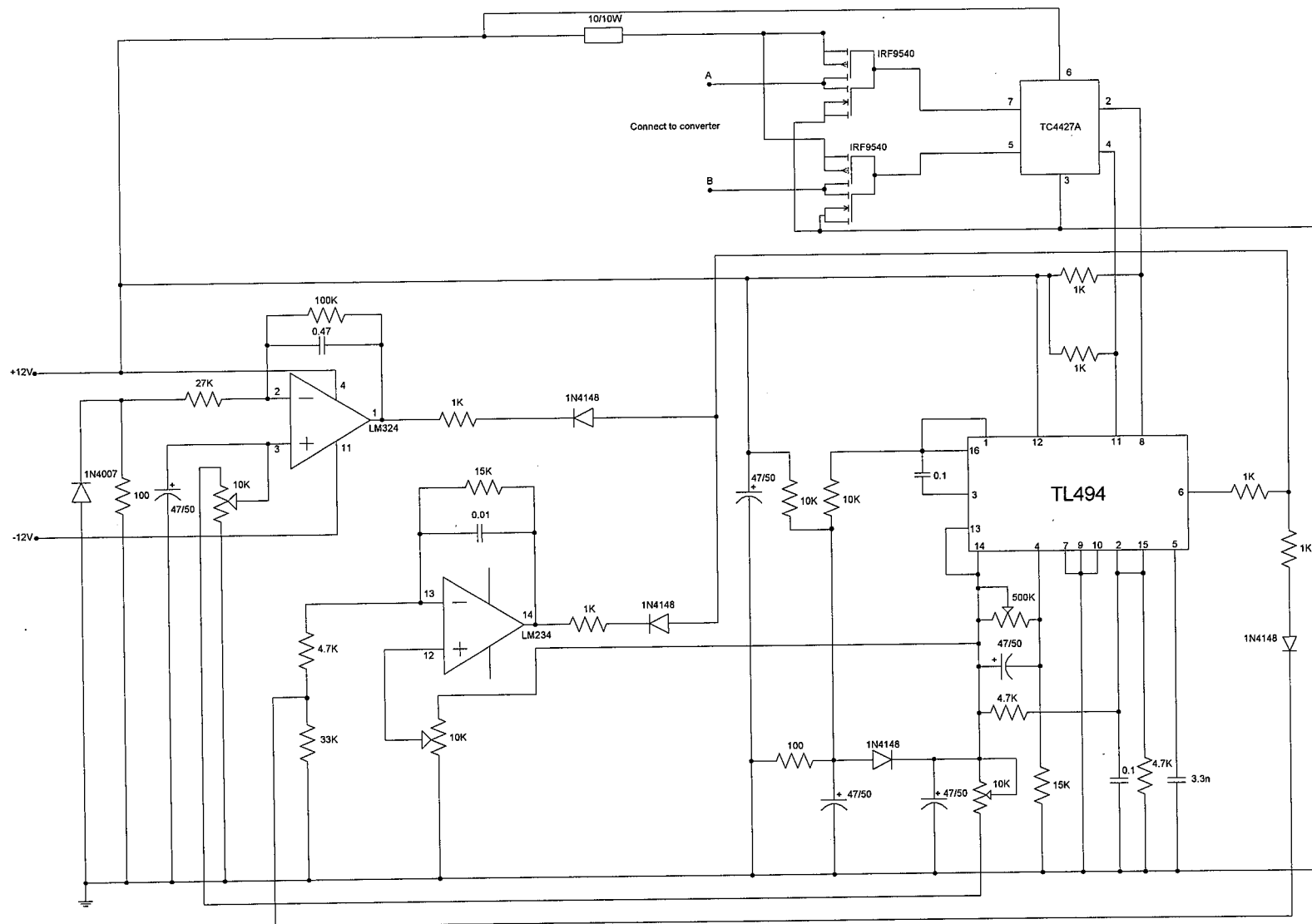
สะดวก

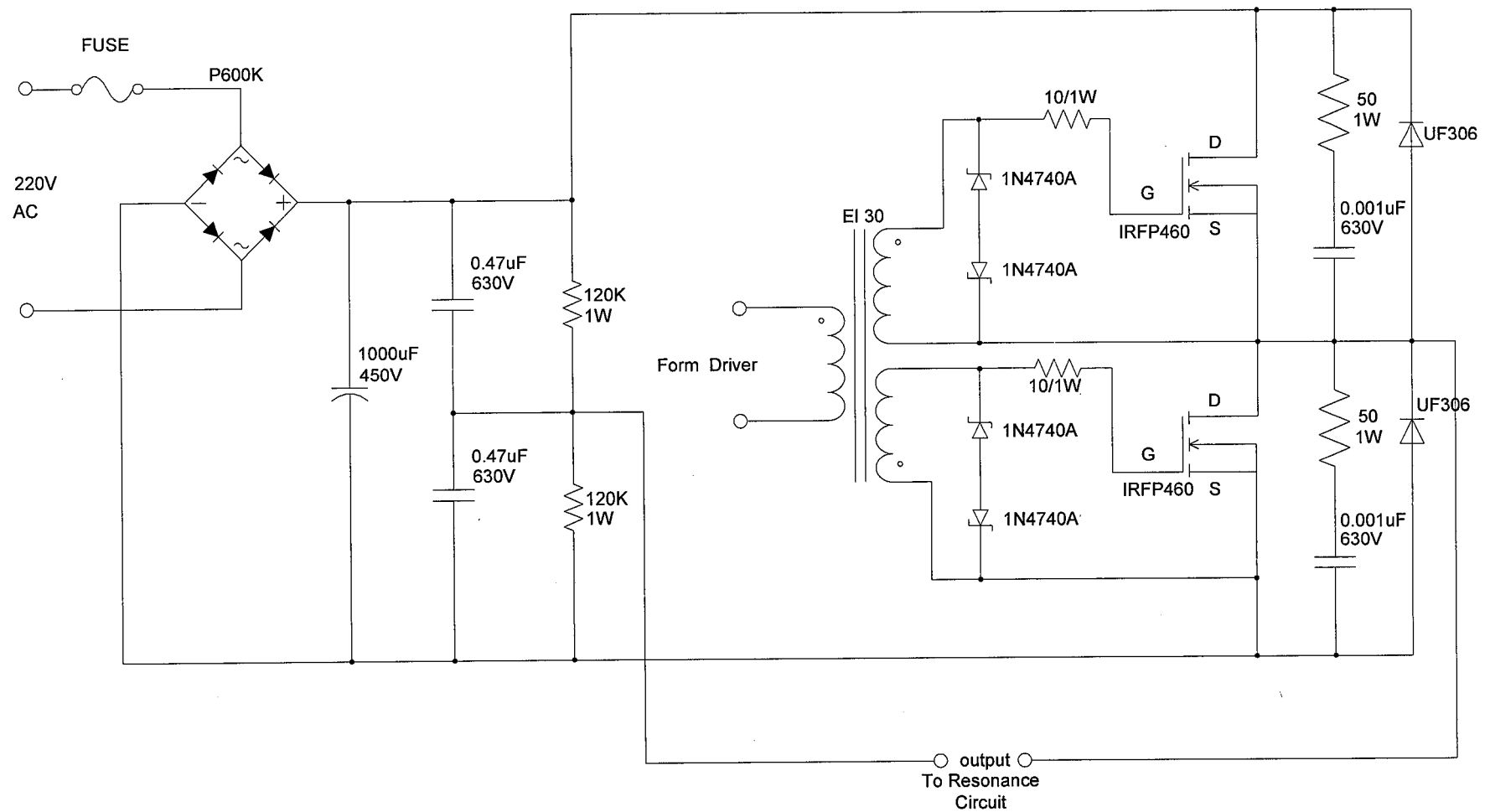
## หนังสืออ้างอิง

1. สุวัฒน์ คั่น, “เทคนิคและการออกแบบ สวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย”, หน้า 7-85
2. สมบูรณ์ มาลานนท์, สมคิด วิริยะประสิทธิ์ชัย, “แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิง”, ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, กรุงเทพฯ, 2538
3. Pressman, A., “Switching Power Supply Design”, McGraw-Hill, Singapore, 1992
4. Chrysis, G., “High Frequency Switching Power Supplies-Theory And Design”, 2nd Editions., McGraw-Hill, New York, 1989
5. Mohammad H. Rashid, “Power electronics : circuits, device, and applications”, Pearson 2004



ภาคผนวก





# LM124, LM124A, LM224, LM224A, LM324, LM324A, LM2902, LM2902V, LM224K, LM224KA, LM324K, LM324KA, LM2902K, LM2902KV, LM2902KAV QUADRUPLER OPERATIONAL AMPLIFIERS

SLOS066R – SEPTEMBER 1975 – REVISED JANUARY 2005

- 2-kV ESD Protection for:
  - LM224K, LM224KA
  - LM324K, LM324KA
  - LM2902K, LM2902KV, LM2902KAV
- Wide Supply Ranges
  - Single Supply . . . 3 V to 32 V  
(26 V for LM2902)
  - Dual Supplies . . .  $\pm 1.5$  V to  $\pm 16$  V  
( $\pm 13$  V for LM2902)
- Low Supply-Current Drain Independent of Supply Voltage . . . 0.8 mA Typ
- Common-Mode Input Voltage Range Includes Ground, Allowing Direct Sensing Near Ground
- Low Input Bias and Offset Parameters
  - Input Offset Voltage . . . 3 mV Typ  
A Versions . . . 2 mV Typ
  - Input Offset Current . . . 2 nA Typ
  - Input Bias Current . . . 20 nA Typ  
A Versions . . . 15 nA Typ
- Differential Input Voltage Range Equal to Maximum-Rated Supply Voltage . . . 32 V  
(26 V for LM2902)
- Open-Loop Differential Voltage Amplification . . . 100 V/mV Typ
- Internal Frequency Compensation

## description/ordering information

These devices consist of four independent high-gain frequency-compensated operational amplifiers that are designed specifically to operate from a single supply over a wide range of voltages. Operation from split supplies also is possible if the difference between the two supplies is 3 V to 32 V (3 V to 26 V for the LM2902), and  $V_{CC}$  is at least 1.5 V more positive than the input common-mode voltage. The low supply-current drain is independent of the magnitude of the supply voltage.

Applications include transducer amplifiers, dc amplification blocks, and all the conventional operational-amplifier circuits that now can be more easily implemented in single-supply-voltage systems. For example, the LM124 can be operated directly from the standard 5-V supply that is used in digital systems and provides the required interface electronics, without requiring additional  $\pm 15$ -V supplies.

LM124 . . . D, J, OR W PACKAGE

LM124A . . . J PACKAGE

LM224, LM224A, LM224K, LM224KA . . . D OR N PACKAGE

LM324, LM324K . . . D, N, NS, OR PW PACKAGE

LM324A . . . D, DB, N, NS, OR PW PACKAGE

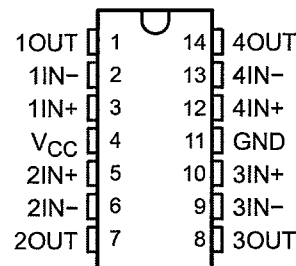
LM324KA . . . D, N, NS, OR PW PACKAGE

LM2902 . . . D, N, NS, OR PW PACKAGE

LM2902K . . . D, DB, N, NS, OR PW PACKAGE

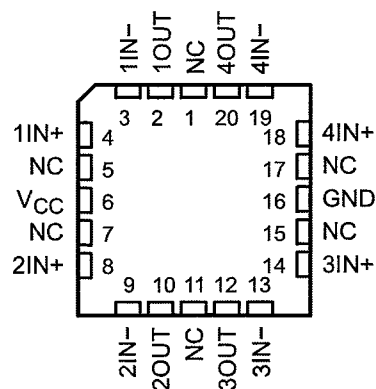
LM2902KV, LM2902KAV . . . D OR PW PACKAGE

(TOP VIEW)



LM124, LM124A . . . FK PACKAGE

(TOP VIEW)



NC – No internal connection

LM124, LM124A, LM224, LM224A, LM324, LM324A, LM2902, LM2902V,  
LM224K, LM224KA, LM324K, LM324KA, LM2902K, LM2902KV, LM2902KAV  
QUADRUPLE OPERATIONAL AMPLIFIERS  
LOS066R – SEPTEMBER 1975 – REVISED JANUARY 2005

Description/ordering information (continued)

ORDERING INFORMATION

| T <sub>A</sub> | V <sub>IO</sub> max<br>AT 25°C | MAX<br>TESTED<br>V <sub>CC</sub> | PACKAGE†   |              | ORDERABLE<br>PART NUMBER | TOP-SIDE<br>MARKING |
|----------------|--------------------------------|----------------------------------|------------|--------------|--------------------------|---------------------|
| 0°C to 70°C    | 7 mV                           | 30 V                             | PDIP (N)   | Tube of 25   | LM324N                   | LM324N              |
|                |                                |                                  |            |              | LM324KN                  | LM324KN             |
|                |                                |                                  | SOIC (D)   | Tube of 50   | LM324D                   | LM324               |
|                |                                |                                  |            | Reel of 2500 | LM324DR                  |                     |
|                |                                |                                  |            | Tube of 50   | LM324KD                  | LM324K              |
|                |                                |                                  |            | Reel of 2500 | LM324KDR                 |                     |
|                |                                |                                  | SOP (NS)   | Reel of 2000 | LM324NSR                 | LM324               |
|                |                                |                                  |            | Tube of 50   | LM324KNS                 | LM324K              |
|                |                                |                                  |            | Reel of 2000 | LM324KNSR                |                     |
|                |                                |                                  | TSSOP (PW) | Tube of 90   | LM324PW                  | L324                |
|                |                                |                                  |            | Reel of 2000 | LM324PWR                 |                     |
|                |                                |                                  |            | Tube of 90   | LM324KPW                 | L324K               |
|                |                                |                                  |            | Reel of 2000 | LM324KPWR                |                     |
|                | 3 mV                           | 30 V                             | PDIP (N)   | Tube of 25   | LM324AN                  | LM324AN             |
|                |                                |                                  |            | Tube of 25   | LM324KAN                 | LM324KAN            |
|                |                                |                                  | SOIC (D)   | Tube of 50   | LM324AD                  | LM324A              |
|                |                                |                                  |            | Reel of 2500 | LM324ADR                 |                     |
|                |                                |                                  |            | Tube of 50   | LM324KAD                 | LM324KA             |
|                |                                |                                  |            | Reel of 2500 | LM324KADR                |                     |
|                |                                |                                  | SOP (NS)   | Reel of 2000 | LM324ANSR                | LM324A              |
|                |                                |                                  |            | Tube of 50   | LM324KANS                | LM324KA             |
|                |                                |                                  |            | Reel of 2000 | LM324KANSR               |                     |
|                |                                |                                  | SSOP (DB)  | Reel of 2000 | LM324ADBR                | LM324A              |
|                |                                |                                  | TSSOP (PW) | Tube of 90   | LM324APW                 | L324A               |
|                |                                |                                  |            | Reel of 2000 | LM324APWR                |                     |
|                |                                |                                  |            | Tube of 90   | LM324KAPW                | L324KA              |
|                |                                |                                  |            | Reel of 2000 | LM324KAPWR               |                     |
| –25°C to 85°C  | 5 mV                           | 30 V                             | PDIP (N)   | Tube of 25   | LM224N                   | LM224N              |
|                |                                |                                  |            |              | LM224KN                  | LM224KN             |
|                |                                |                                  | SOIC (D)   | Tube of 50   | LM224D                   | LM224               |
|                |                                |                                  |            | Reel of 2500 | LM224DR                  |                     |
|                |                                |                                  |            | Tube of 50   | LM224KD                  | LM224K              |
|                |                                |                                  |            | Reel of 2500 | LM224KDR                 |                     |
|                | 3 mV                           | 30 V                             | PDIP (N)   | Tube of 25   | LM224AN                  | LM224AN             |
|                |                                |                                  |            | Tube of 25   | LM224KAN                 | LM224KAN            |
|                |                                |                                  | SOIC (D)   | Tube of 50   | LM224AD                  | LM224A              |
|                |                                |                                  |            | Reel of 2500 | LM224ADR                 |                     |
|                |                                |                                  |            | Tube of 50   | LM224KAD                 | LM224KA             |
|                |                                |                                  |            | Reel of 2500 | LM224KADR                |                     |

† Package drawings, standard packing quantities, thermal data, symbolization, and PCB design guidelines are available at [www.ti.com/sc/package](http://www.ti.com/sc/package).

**LM124, LM124A, LM224, LM224A, LM324, LM324A, LM2902, LM2902V,  
LM224K, LM224KA, LM324K, LM324KA, LM2902K, LM2902KV, LM2902KAV  
QUADRUPLE OPERATIONAL AMPLIFIERS**

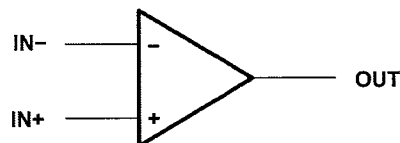
SLOS066R – SEPTEMBER 1975 – REVISED JANUARY 2005

**ORDERING INFORMATION (CONTINUED)**

| $T_A$          | $V_{IOmax}$<br>AT 25°C | MAX<br>TESTED<br>$V_{CC}$ | PACKAGE†   |              | ORDERABLE<br>PART NUMBER | TOP-SIDE<br>MARKING |
|----------------|------------------------|---------------------------|------------|--------------|--------------------------|---------------------|
| –40°C to 125°C | 7 mV                   | 26 V                      | PDIP (N)   | Tube of 25   | LM2902N                  | LM2902N             |
|                |                        |                           |            | Tube of 25   | LM2902KN                 | LM2902KN            |
|                |                        |                           | SOIC (D)   | Tube of 50   | LM2902D                  | LM2902              |
|                |                        |                           |            | Reel of 2500 | LM2902DR                 |                     |
|                |                        |                           |            | Tube of 50   | LM2902KD                 | LM2902K             |
|                |                        |                           |            | Reel of 2500 | LM2902KDR                |                     |
|                |                        |                           | SOP (NS)   | Reel of 2000 | LM2902NSR                | LM2902              |
|                |                        |                           |            | Tube of 50   | LM2902KNS                | LM2902K             |
|                |                        |                           |            | Reel of 2000 | LM2902KNSR               |                     |
|                |                        |                           | SSOP (DB)  | Tube of 80   | LM2902KDB                | L2902K              |
|                |                        |                           |            | Reel of 2000 | LM2902KDBR               |                     |
|                |                        |                           | TSSOP (PW) | Tube of 90   | LM2902PW                 | L2902               |
|                |                        |                           |            | Reel of 2000 | LM2902PWR                |                     |
|                |                        |                           |            | Tube of 90   | LM2902KPW                | L2902K              |
|                |                        |                           |            | Reel of 2000 | LM2902KPWR               |                     |
| –55°C to 125°C | 5 mV                   | 30 V                      | CDIP (J)   | Tube of 25   | LM124J                   | LM124J              |
|                |                        |                           | CFP (W)    | Tube of 25   | LM124W                   | LM124W              |
|                |                        |                           | LCCC (FK)  | Tube of 55   | LM124FK                  | LM124FK             |
|                |                        |                           | SOIC (D)   | Tube of 50   | LM124D                   | LM124               |
|                |                        |                           |            | Reel of 2500 | LM124DR                  |                     |
|                |                        |                           | CDIP (J)   | Tube of 25   | LM124AJ                  | LM124AJ             |
|                | 2 mV                   | 30 V                      | LCCC (FK)  | Tube of 55   | LM124AFK                 | LM124AFK            |

† Package drawings, standard packing quantities, thermal data, symbolization, and PCB design guidelines are available at [www.ti.com/sc/package](http://www.ti.com/sc/package).

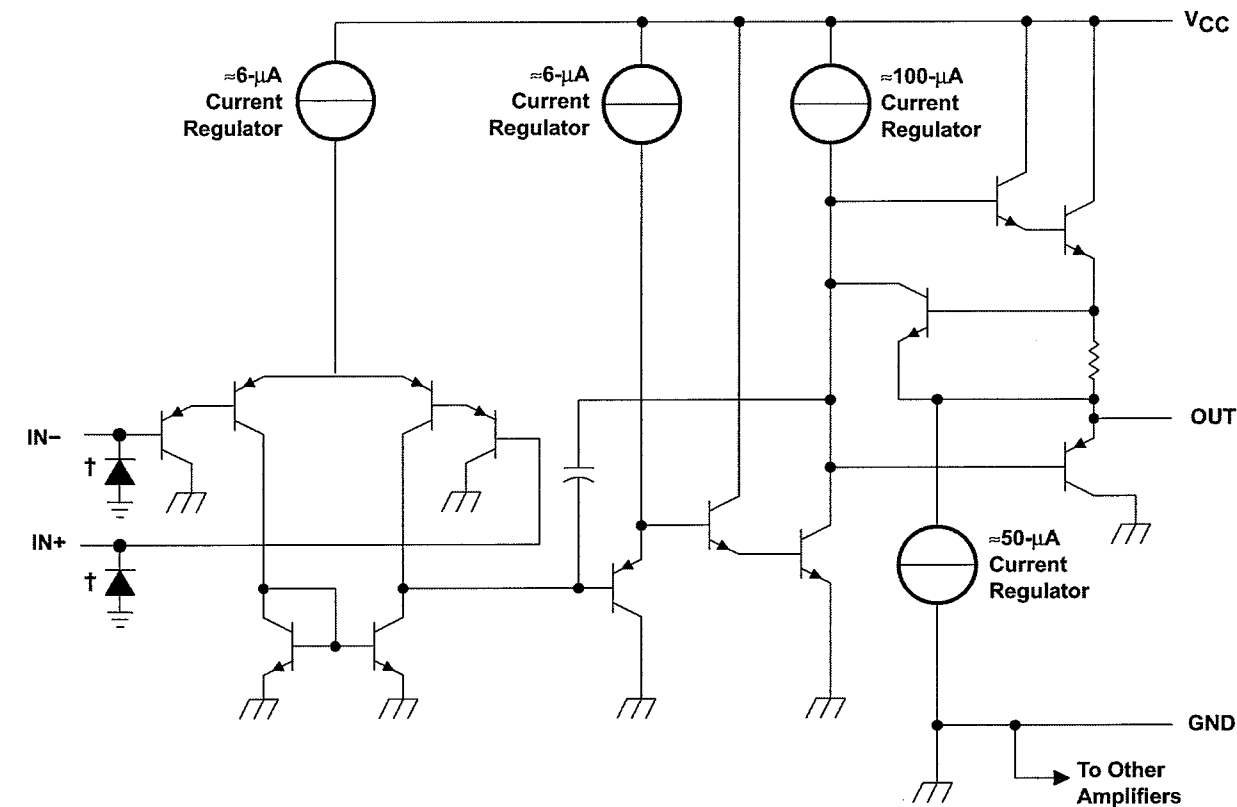
**symbol (each amplifier)**



M124, LM124A, LM224, LM224A, LM324, LM324A, LM2902, LM2902V,  
M224K, LM224KA, LM324K, LM324KA, LM2902K, LM2902KV, LM2902KAV  
QUADRUPLER OPERATIONAL AMPLIFIERS

\_OS066R - SEPTEMBER 1975 - REVISED JANUARY 2005

schematic (each amplifier)



| COMPONENT COUNT<br>(total device) |    |
|-----------------------------------|----|
| Epi-FET                           | 1  |
| Transistors                       | 95 |
| Diodes                            | 4  |
| Resistors                         | 11 |
| Capacitors                        | 4  |

\* ESD protection cells - available on LM324K and LM324KA only

**LM124, LM124A, LM224, LM224A, LM324, LM324A, LM2902, LM2902V,  
LM224K, LM224KA, LM324K, LM324KA, LM2902K, LM2902KV, LM2902KAV**  
**QUADRUPLE OPERATIONAL AMPLIFIERS**

SLOS066R – SEPTEMBER 1975 – REVISED JANUARY 2005

**absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)<sup>†</sup>**

|                                                                                                                                            |                | LM2902         | ALL OTHER DEVICES | UNIT               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|-------------------|--------------------|
| Supply voltage, $V_{CC}$ (see Note 1)                                                                                                      |                | $\pm 13$ or 26 | $\pm 16$ or 32    | V                  |
| Differential input voltage, $V_{ID}$ (see Note 2)                                                                                          |                | $\pm 26$       | $\pm 32$          | V                  |
| Input voltage, $V_I$ (either input)                                                                                                        |                | -0.3 to 26     | -0.3 to 32        | V                  |
| Duration of output short circuit (one amplifier) to ground at (or below) $T_A = 25^\circ\text{C}$ , $V_{CC} \leq 15\text{ V}$ (see Note 3) |                | Unlimited      | Unlimited         |                    |
| Package thermal impedance, $\theta_{JA}$ (see Notes 4 and 5)                                                                               | D package      | 86             | 86                | $^\circ\text{C/W}$ |
|                                                                                                                                            | DB package     | 96             | 96                |                    |
|                                                                                                                                            | N package      | 80             | 80                |                    |
|                                                                                                                                            | NS package     | 76             | 76                |                    |
|                                                                                                                                            | PW package     | 113            | 113               |                    |
| Package thermal impedance, $\theta_{JC}$ (see Notes 6 and 7)                                                                               | FK package     |                | 5.61              | $^\circ\text{C/W}$ |
|                                                                                                                                            | J package      |                | 15.05             |                    |
|                                                                                                                                            | W package      |                | 14.65             |                    |
| Operating virtual junction temperature, $T_J$                                                                                              |                | 150            | 150               | $^\circ\text{C}$   |
| Case temperature for 60 seconds                                                                                                            | FK package     |                | 260               | $^\circ\text{C}$   |
| Lead temperature 1.6 mm (1/16 inch) from case for 60 seconds                                                                               | J or W package | 300            | 300               | $^\circ\text{C}$   |
| Storage temperature range, $T_{stg}$                                                                                                       |                | -65 to 150     | -65 to 150        | $^\circ\text{C}$   |

<sup>†</sup> Stresses beyond those listed under "absolute maximum ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under "recommended operating conditions" is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

- NOTES:
1. All voltage values (except differential voltages and  $V_{CC}$  specified for the measurement of  $I_{OS}$ ) are with respect to the network GND.
  2. Differential voltages are at  $IN+$ , with respect to  $IN-$ .
  3. Short circuits from outputs to  $V_{CC}$  can cause excessive heating and eventual destruction.
  4. Maximum power dissipation is a function of  $T_J(\text{max})$ ,  $\theta_{JA}$ , and  $T_A$ . The maximum allowable power dissipation at any allowable ambient temperature is  $P_D = (T_J(\text{max}) - T_A)/\theta_{JA}$ . Operating at the absolute maximum  $T_J$  of  $150^\circ\text{C}$  can affect reliability.
  5. The package thermal impedance is calculated in accordance with JESD 51-7.
  6. Maximum power dissipation is a function of  $T_J(\text{max})$ ,  $\theta_{JC}$ , and  $T_C$ . The maximum allowable power dissipation at any allowable case temperature is  $P_D = (T_J(\text{max}) - T_C)/\theta_{JC}$ . Operating at the absolute maximum  $T_J$  of  $150^\circ\text{C}$  can affect reliability.
  7. The package thermal impedance is calculated in accordance with MIL-STD-883.

## ESD protection

| TEST CONDITIONS  |                                                                | TYP     | UNIT |
|------------------|----------------------------------------------------------------|---------|------|
| Human-Body Model | LM224K, LM224KA, LM324K, LM324KA, LM2902K, LM2902KV, LM2902KAV | $\pm 2$ | kV   |





**LM124, LM124A, LM224, LM224A, LM324, LM324A, LM2902, LM2902V,  
LM224K, LM224KA, LM324K, LM324KA, LM2902K, LM2902KV, LM2902KAV**  
**QUADRUPLE OPERATIONAL AMPLIFIERS**

LOS066R – SEPTEMBER 1975 – REVISED JANUARY 2005

**Electrical characteristics at specified free-air temperature,  $V_{CC} = 5\text{ V}$  (unless otherwise noted)**

| PARAMETER                        |                                                                            |                                                                                                 | TEST CONDITIONS†       | T <sub>A</sub> ‡ | LM124<br>LM224                |      |                               | LM324<br>LM324K |      |      | UNIT |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------|-------------------------------|------|-------------------------------|-----------------|------|------|------|
|                                  |                                                                            |                                                                                                 |                        |                  | MIN                           | TYP§ | MAX                           | MIN             | TYP§ | MAX  |      |
| V <sub>IO</sub>                  | Input offset voltage                                                       | V <sub>CC</sub> = 5 V to MAX,<br>V <sub>IC</sub> = V <sub>ICRmin</sub> , V <sub>O</sub> = 1.4 V |                        | 25°C             | 3                             |      | 5                             | 3               |      | 7    | mV   |
|                                  |                                                                            |                                                                                                 |                        | Full range       |                               |      | 7                             | 9               |      |      |      |
| I <sub>O</sub>                   | Input offset current                                                       | V <sub>O</sub> = 1.4 V                                                                          |                        | 25°C             | 2                             |      | 30                            | 2               |      | 50   | nA   |
|                                  |                                                                            |                                                                                                 |                        | Full range       |                               |      | 100                           | 150             |      |      |      |
| I <sub>B</sub>                   | Input bias current                                                         | V <sub>O</sub> = 1.4 V                                                                          |                        | 25°C             | -20                           |      | -150                          | -20             |      | -250 | nA   |
|                                  |                                                                            |                                                                                                 |                        | Full range       |                               |      | -300                          | -500            |      |      |      |
| V <sub>ICR</sub>                 | Common-mode<br>input voltage range                                         | V <sub>CC</sub> = 5 V to MAX                                                                    |                        | 25°C             | 0 to<br>V <sub>CC</sub> - 1.5 |      | 0 to<br>V <sub>CC</sub> - 1.5 |                 |      | V    |      |
|                                  |                                                                            |                                                                                                 |                        | Full range       | 0 to<br>V <sub>CC</sub> - 2   |      | 0 to<br>V <sub>CC</sub> - 2   |                 |      |      |      |
| V <sub>OH</sub>                  | High-level<br>output voltage                                               | R <sub>L</sub> = 2 kΩ                                                                           |                        | 25°C             | V <sub>CC</sub> - 1.5         |      | V <sub>CC</sub> - 1.5         |                 |      | V    |      |
|                                  |                                                                            | R <sub>L</sub> = 10 kΩ                                                                          |                        | 25°C             |                               |      |                               |                 |      |      |      |
|                                  |                                                                            | V <sub>CC</sub> = MAX                                                                           | R <sub>L</sub> = 2 kΩ  | Full range       | 26                            |      | 26                            |                 |      |      |      |
|                                  |                                                                            |                                                                                                 | R <sub>L</sub> ≥ 10 kΩ | Full range       | 27                            | 28   | 27                            |                 | 28   |      |      |
| V <sub>OL</sub>                  | Low-level<br>output voltage                                                | R <sub>L</sub> ≤ 10 kΩ                                                                          |                        | Full range       | 5                             |      | 20                            | 5               |      | 20   | mV   |
| A <sub>VD</sub>                  | Large-signal<br>differential voltage<br>amplification                      | V <sub>CC</sub> = 15 V, V <sub>O</sub> = 1 V to 11 V,<br>R <sub>L</sub> ≥ 2 kΩ                  |                        | 25°C             | 50                            | 100  | 25                            |                 | 100  | V/mV |      |
|                                  |                                                                            |                                                                                                 |                        | Full range       | 25                            |      | 15                            |                 |      |      |      |
| CMRR                             | Common-mode<br>rejection ratio                                             | V <sub>IC</sub> = V <sub>ICRmin</sub>                                                           |                        | 25°C             | 70                            | 80   | 65                            |                 | 80   | dB   |      |
| k <sub>SVR</sub>                 | Supply-voltage<br>rejection ratio<br>(ΔV <sub>CC</sub> /ΔV <sub>IO</sub> ) |                                                                                                 |                        | 25°C             | 65                            | 100  | 65                            |                 | 100  | dB   |      |
| V <sub>O1</sub> /V <sub>O2</sub> | Crosstalk<br>attenuation                                                   | f = 1 kHz to 20 kHz                                                                             |                        | 25°C             | 120                           |      | 120                           |                 |      | dB   |      |
| I <sub>O</sub>                   | Output current                                                             | V <sub>CC</sub> = 15 V,<br>V <sub>ID</sub> = 1 V,<br>V <sub>O</sub> = 0                         | Source                 | 25°C             | -20                           | -30  | -60                           | -20             | -30  | -60  | mA   |
|                                  |                                                                            |                                                                                                 |                        | Full range       | -10                           |      | -10                           |                 |      |      |      |
|                                  |                                                                            | V <sub>CC</sub> = 15 V,<br>V <sub>ID</sub> = -1 V,<br>V <sub>O</sub> = 15 V                     | Sink                   | 25°C             | 10                            | 20   | 10                            |                 | 20   |      |      |
|                                  |                                                                            |                                                                                                 |                        | Full range       | 5                             |      | 5                             |                 |      |      |      |
|                                  |                                                                            | V <sub>ID</sub> = -1 V, V <sub>O</sub> = 200 mV                                                 |                        | 25°C             | 12                            | 30   | 12                            |                 | 30   | μA   |      |
| I <sub>OS</sub>                  | Short-circuit<br>output current                                            | V <sub>CC</sub> at 5 V,<br>GND at -5 V                                                          | V <sub>O</sub> = 0,    | 25°C             | ±40                           |      | ±60                           | ±40             |      | ±60  | mA   |
| I <sub>CC</sub>                  | Supply current<br>(four amplifiers)                                        | V <sub>O</sub> = 2.5 V,                                                                         | No load                | Full range       | 0.7                           |      | 1.2                           | 0.7             |      | 1.2  | mA   |
|                                  |                                                                            | V <sub>CC</sub> = MAX,<br>V <sub>O</sub> = 0.5 V <sub>CC</sub> ,                                | No load                | Full range       | 1.4                           |      | 3                             | 1.4             |      | 3    |      |

All characteristics are measured under open-loop conditions, with zero common-mode input voltage, unless otherwise specified. MAX  $V_{CC}$  for testing purposes is 26 V for LM2902 and 30 V for the others.

Full range is -55°C to 125°C for LM124, -25°C to 85°C for LM224, and 0°C to 70°C for LM324.

All typical values are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .



POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

**LM124, LM124A, LM224, LM224A, LM324, LM324A, LM2902, LM2902V,  
LM224K, LM224KA, LM324K, LM324KA, LM2902K, LM2902KV, LM2902KAV**  
**QUADRUPLE OPERATIONAL AMPLIFIERS**

SLOS066R – SEPTEMBER 1975 – REVISED JANUARY 2005

**electrical characteristics at specified free-air temperature,  $V_{CC} = 5\text{ V}$  (unless otherwise noted)**

| PARAMETER                        |                                                                      | TEST CONDITIONS†                                                                                   |                        | T <sub>A</sub> ‡ | LM2902 |                            |      | LM2902V                    |      |       | UNIT |    |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------|--------|----------------------------|------|----------------------------|------|-------|------|----|
|                                  |                                                                      |                                                                                                    |                        |                  | MIN    | TYP§                       | MAX  | MIN                        | TYP§ | MAX   |      |    |
| V <sub>IO</sub>                  | Input offset voltage                                                 | V <sub>CC</sub> = 5 V to MAX,<br>V <sub>IC</sub> = V <sub>ICRmin</sub> ,<br>V <sub>O</sub> = 1.4 V | Non-A-suffix devices   | 25°C             |        | 3                          | 7    |                            | 3    | 7     | mV   |    |
|                                  |                                                                      |                                                                                                    |                        | Full range       |        |                            | 10   |                            | 10   |       |      |    |
|                                  |                                                                      | A-suffix devices                                                                                   | 25°C                   |                  |        |                            |      | 1                          | 2    |       |      |    |
|                                  |                                                                      |                                                                                                    | Full range             |                  |        |                            |      |                            | 4    |       |      |    |
| ΔV <sub>IO</sub> /ΔT             | Input offset voltage temperature drift                               | R <sub>S</sub> = 0 Ω                                                                               |                        | Full range       |        |                            |      |                            | 7    | μV/°C |      |    |
| I <sub>IO</sub>                  | Input offset current                                                 | V <sub>O</sub> = 1.4 V                                                                             |                        | 25°C             |        | 2                          | 50   |                            | 2    | 50    | nA   |    |
|                                  |                                                                      |                                                                                                    |                        | Full range       |        |                            | 300  |                            | 150  |       |      |    |
| ΔI <sub>IO</sub> /ΔT             | Input offset current temperature drift                               |                                                                                                    |                        | Full range       |        |                            |      |                            | 10   | pA/°C |      |    |
| I <sub>IB</sub>                  | Input bias current                                                   | V <sub>O</sub> = 1.4 V                                                                             |                        | 25°C             |        | -20                        | -250 |                            | -20  | -250  | nA   |    |
|                                  |                                                                      |                                                                                                    |                        | Full range       |        |                            | -500 |                            | -500 |       |      |    |
| V <sub>ICR</sub>                 | Common-mode input voltage range                                      | V <sub>CC</sub> = 5 V to MAX                                                                       |                        | 25°C             |        | 0 to V <sub>CC</sub> - 1.5 |      | 0 to V <sub>CC</sub> - 1.5 |      | V     |      |    |
|                                  |                                                                      |                                                                                                    |                        | Full range       |        | 0 to V <sub>CC</sub> - 2   |      | 0 to V <sub>CC</sub> - 2   |      |       |      |    |
| V <sub>OH</sub>                  | High-level output voltage                                            | R <sub>L</sub> = 2 kΩ                                                                              |                        | 25°C             |        |                            |      |                            |      | V     |      |    |
|                                  |                                                                      | R <sub>L</sub> = 10 kΩ                                                                             |                        | 25°C             |        | V <sub>CC</sub> - 1.5      |      | V <sub>CC</sub> - 1.5      |      |       |      |    |
|                                  |                                                                      | V <sub>CC</sub> = MAX                                                                              | R <sub>L</sub> = 2 kΩ  | Full range       |        | 22                         |      | 26                         |      |       |      |    |
|                                  |                                                                      |                                                                                                    | R <sub>L</sub> ≥ 10 kΩ | Full range       |        | 23                         | 24   |                            | 27   |       |      |    |
| V <sub>OL</sub>                  | Low-level output voltage                                             | R <sub>L</sub> ≤ 10 kΩ                                                                             |                        | Full range       |        | 5                          | 20   |                            | 5    | 20    | mV   |    |
| A <sub>VD</sub>                  | Large-signal differential voltage amplification                      | V <sub>CC</sub> = 15 V, V <sub>O</sub> = 1 V to 11 V, R <sub>L</sub> ≥ 2 kΩ                        |                        | 25°C             |        | 25                         | 100  |                            | 25   | 100   | V/mV |    |
|                                  |                                                                      |                                                                                                    |                        | Full range       |        | 15                         |      |                            | 15   |       |      |    |
| CMRR                             | Common-mode rejection ratio                                          | V <sub>IC</sub> = V <sub>ICRmin</sub>                                                              |                        | 25°C             |        | 50                         | 80   |                            | 60   | 80    | dB   |    |
| k <sub>SVR</sub>                 | Supply-voltage rejection ratio (ΔV <sub>CC</sub> /ΔV <sub>IO</sub> ) |                                                                                                    |                        | 25°C             |        | 50                         | 100  |                            | 60   | 100   | dB   |    |
| V <sub>O1</sub> /V <sub>O2</sub> | Crosstalk attenuation                                                | f = 1 kHz to 20 kHz                                                                                |                        | 25°C             |        | 120                        |      |                            | 120  |       | dB   |    |
| I <sub>O</sub>                   | Output current                                                       | V <sub>CC</sub> = 15 V, V <sub>ID</sub> = 1 V, V <sub>O</sub> = 0                                  | Source                 | 25°C             |        | -20                        | -30  | -60                        | -20  | -30   | -60  | mA |
|                                  |                                                                      |                                                                                                    |                        | Full range       |        | -10                        |      |                            | -10  |       |      |    |
|                                  |                                                                      | V <sub>CC</sub> = 15 V, V <sub>ID</sub> = -1 V, V <sub>O</sub> = 15 V                              | Sink                   | 25°C             |        | 10                         | 20   |                            | 10   | 20    |      |    |
|                                  |                                                                      |                                                                                                    |                        | Full range       |        | 5                          |      |                            | 5    |       |      |    |
|                                  |                                                                      | V <sub>ID</sub> = -1 V, V <sub>O</sub> = 200 mV                                                    |                        | 25°C             |        | 30                         |      |                            | 12   | 40    | μA   |    |
| I <sub>OS</sub>                  | Short-circuit output current                                         | V <sub>CC</sub> at 5 V, GND at -5 V                                                                | V <sub>O</sub> = 0,    | 25°C             |        | ±40                        | ±60  |                            | ±40  | ±60   | mA   |    |
| I <sub>CC</sub>                  | Supply current (four amplifiers)                                     | V <sub>O</sub> = 2.5 V,                                                                            | No load                | Full range       |        | 0.7                        | 1.2  |                            | 0.7  | 1.2   | mA   |    |
|                                  |                                                                      | V <sub>CC</sub> = MAX, V <sub>O</sub> = 0.5 V <sub>CC</sub> ,                                      | No load                | Full range       |        | 1.4                        | 3    |                            | 1.4  | 3     |      |    |

† All characteristics are measured under open-loop conditions, with zero common-mode input voltage, unless otherwise specified. MAX  $V_{CC}$  for testing purposes is 26 V for LM2902 and 32 V for LM2902V.

‡ Full range is -40°C to 125°C for LM2902.

§ All typical values are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

M124, LM124A, LM224, LM224A, LM324, LM324A, LM2902, LM2902V,  
LM224K, LM224KA, LM324K, LM324KA, LM2902K, LM2902KV, LM2902KAV  
QUADRUPLE OPERATIONAL AMPLIFIERS  
LOS066R - SEPTEMBER 1975 - REVISED JANUARY 2005

Electrical Characteristics at specified temperature,  $V_{CC} = 5\text{ V}$  (unless otherwise noted)

| PARAMETER                        | TEST CONDITIONS†                                                                                 | TA‡                | LM124A                        |      |             | LM224A                        |             |             | LM324A,<br>LM324KA            |             |              | UNIT |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------------------|------|-------------|-------------------------------|-------------|-------------|-------------------------------|-------------|--------------|------|
|                                  |                                                                                                  |                    | MIN                           | TYP§ | MAX         | MIN                           | TYP§        | MAX         | MIN                           | TYP§        | MAX          |      |
| V <sub>IO</sub>                  | V <sub>CC</sub> = 5 V to 30 V,<br>V <sub>IC</sub> = V <sub>ICRmin</sub> , V <sub>O</sub> = 1.4 V | 25°C<br>Full range |                               |      | 2<br>4      |                               | 2<br>4      | 3<br>4      |                               | 2<br>2      | 3<br>5       | mV   |
| I <sub>IO</sub>                  | V <sub>O</sub> = 1.4 V                                                                           | 25°C<br>Full range |                               |      | 10<br>30    |                               | 2<br>30     | 15<br>30    |                               | 2<br>75     | 30<br>75     | nA   |
| I <sub>IB</sub>                  | V <sub>O</sub> = 1.4 V                                                                           | 25°C<br>Full range |                               |      | -50<br>-100 |                               | -15<br>-100 | -80<br>-100 |                               | -15<br>-200 | -100<br>-200 | nA   |
| V <sub>ICR</sub>                 | V <sub>CC</sub> = 30 V                                                                           | 25°C<br>Full range | 0 to<br>V <sub>CC</sub> - 1.5 |      |             | 0 to<br>V <sub>CC</sub> - 1.5 |             |             | 0 to<br>V <sub>CC</sub> - 1.5 |             |              | V    |
| V <sub>OH</sub>                  | R <sub>L</sub> = 2 kΩ<br>V <sub>CC</sub> = 30 V                                                  | 25°C<br>Full range | 26<br>27                      |      |             | 26<br>27                      |             |             | 26<br>27                      |             |              | V    |
| V <sub>OL</sub>                  | R <sub>L</sub> ≤ 10 kΩ                                                                           | Full range         |                               |      | 20          |                               | 5<br>100    | 20          |                               | 5<br>100    | 20           | mV   |
| A <sub>VD</sub>                  | V <sub>CC</sub> = 15 V, V <sub>O</sub> = 1 V to 11 V,<br>R <sub>L</sub> ≥ 2 kΩ                   | 25°C<br>Full range | 50<br>25                      |      |             | 50<br>25                      |             |             | 25<br>15                      |             |              | V/mV |
| CMRR                             | V <sub>IC</sub> = V <sub>ICRmin</sub>                                                            | 25°C               | 70                            |      |             | 70                            |             |             | 65                            |             |              | dB   |
| k <sub>SVR</sub>                 | Supply-voltage rejection ratio<br>(ΔV <sub>CC</sub> /ΔV <sub>IO</sub> )                          | 25°C               | 65                            |      |             | 65                            |             |             | 65                            |             |              | dB   |
| V <sub>O1</sub> /V <sub>O2</sub> | Crosstalk attenuation                                                                            | 25°C               |                               |      | 120         |                               |             | 120         |                               |             | 120          | dB   |
| I <sub>O</sub>                   | V <sub>CC</sub> = 15 V,<br>V <sub>ID</sub> = 1 V,<br>V <sub>O</sub> = 0                          | 25°C               | -20                           |      |             | -20                           |             |             | -20                           |             |              | mA   |
|                                  |                                                                                                  | Full range         | -10                           |      |             | -10                           |             |             | -10                           |             |              |      |
|                                  |                                                                                                  | 25°C               | 10                            |      |             | 10                            |             |             | 10                            |             |              |      |
| I <sub>OS</sub>                  | V <sub>CC</sub> at 5 V,<br>V <sub>O</sub> = 0                                                    | 25°C               | 5                             |      |             | 5                             |             |             | 5                             |             |              | μA   |
|                                  |                                                                                                  | Full range         | 12                            |      |             | 12                            |             |             | 12                            |             |              |      |
|                                  |                                                                                                  | 25°C               |                               |      |             |                               |             |             |                               |             |              |      |
| I <sub>CC</sub>                  | V <sub>O</sub> = 2.5 V,<br>V <sub>CC</sub> = 30 V,<br>No load                                    | 25°C               |                               |      |             |                               |             |             |                               |             |              | mA   |
|                                  |                                                                                                  | Full range         | ±40                           |      | ±60         | ±40                           |             | ±60         | ±40                           |             | ±60          |      |
|                                  |                                                                                                  | Full range         | 0.7                           |      | 1.2         | 0.7                           |             | 1.2         | 0.7                           |             | 1.2          |      |
| I <sub>CC</sub>                  | V <sub>O</sub> = 15 V,<br>No load                                                                | 25°C               | 1.4                           |      | 3           | 1.4                           |             | 3           | 1.4                           |             | 3            | mA   |
|                                  |                                                                                                  | Full range         |                               |      |             |                               |             |             |                               |             |              |      |
|                                  |                                                                                                  | Full range         |                               |      |             |                               |             |             |                               |             |              |      |

† All characteristics are measured under open-loop conditions, with zero common-mode input voltage, unless otherwise specified.

‡ Full range is -55°C to 125°C for LM124A, -25°C to 85°C for LM224A, and 0°C to 70°C for LM324A.

§ All typical values are at TA = 25°C.



**LM124, LM124A, LM224, LM224A, LM324, LM324A, LM2902, LM2902V,  
LM224K, LM224KA, LM324K, LM324KA, LM2902K, LM2902KV, LM2902KAV**  
**QUADRUPLER OPERATIONAL AMPLIFIERS**

SLOS066R – SEPTEMBER 1975 – REVISED JANUARY 2005

operating conditions,  $V_{CC} = \pm 15\text{ V}$ ,  $T_A = 25^\circ\text{C}$

| PARAMETER |                                | TEST CONDITIONS                                                                          | TYP | UNIT                         |
|-----------|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|------------------------------|
| SR        | Slew rate at unity gain        | $R_L = 1\text{ M}\Omega$ , $C_L = 30\text{ pF}$ , $V_I = \pm 10\text{ V}$ (see Figure 1) | 0.5 | $\text{V}/\mu\text{s}$       |
| $B_1$     | Unity-gain bandwidth           | $R_L = 1\text{ M}\Omega$ , $C_L = 20\text{ pF}$ (see Figure 1)                           | 1.2 | MHz                          |
| $V_n$     | Equivalent input noise voltage | $R_S = 100\text{ }\Omega$ , $V_I = 0\text{ V}$ , $f = 1\text{ kHz}$ (see Figure 2)       | 35  | $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ |

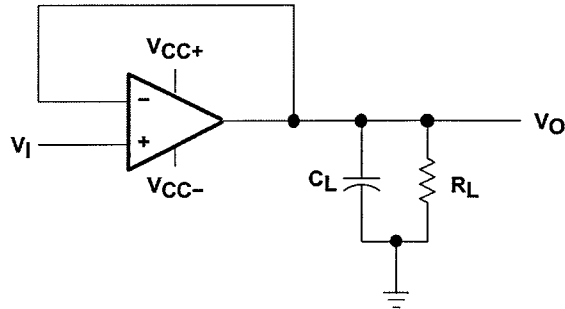


Figure 1. Unity-Gain Amplifier

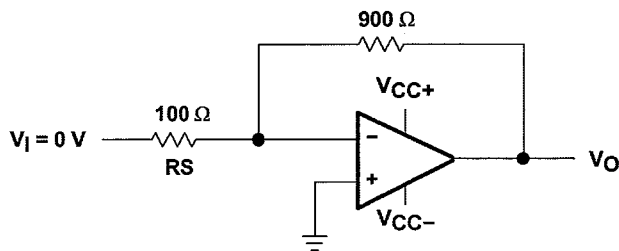
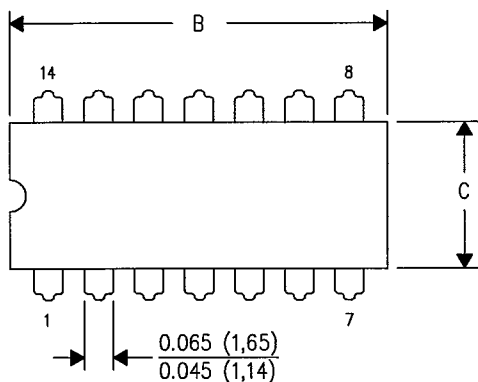


Figure 2. Noise-Test Circuit

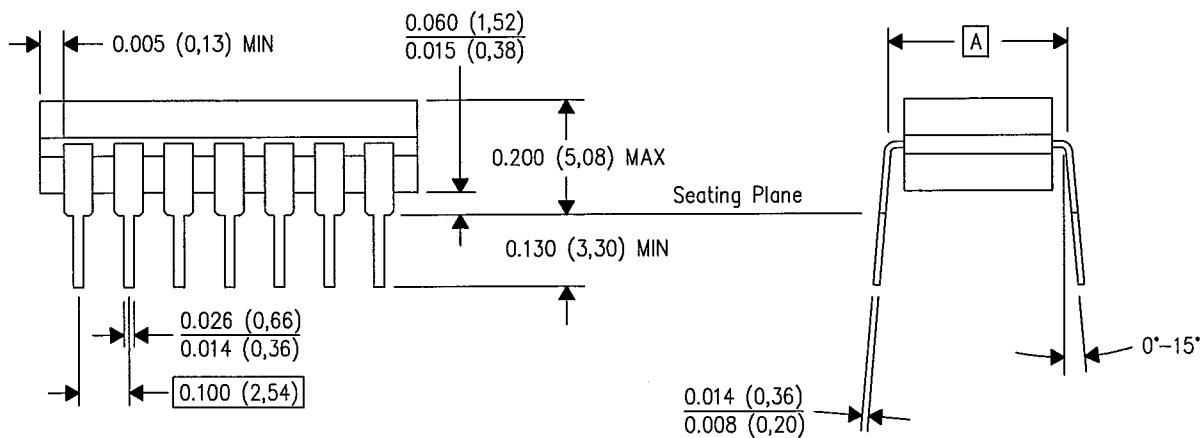
J (R-GDIP-T\*\*)

# CERAMIC DUAL IN-LINE PACKAGE

14 LEADS SHOWN



| DIM \ PINS ** | 14                     | 16                     | 18                     | 20                     |
|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| A             | 0.300<br>(7,62)<br>BSC | 0.300<br>(7,62)<br>BSC | 0.300<br>(7,62)<br>BSC | 0.300<br>(7,62)<br>BSC |
| B MAX         | 0.785<br>(19,94)       | .840<br>(21,34)        | 0.960<br>(24,38)       | 1.060<br>(26,92)       |
| B MIN         | —                      | —                      | —                      | —                      |
| C MAX         | 0.300<br>(7,62)        | 0.300<br>(7,62)        | 0.310<br>(7,87)        | 0.300<br>(7,62)        |
| C MIN         | 0.245<br>(6,22)        | 0.245<br>(6,22)        | 0.220<br>(5,59)        | 0.245<br>(6,22)        |

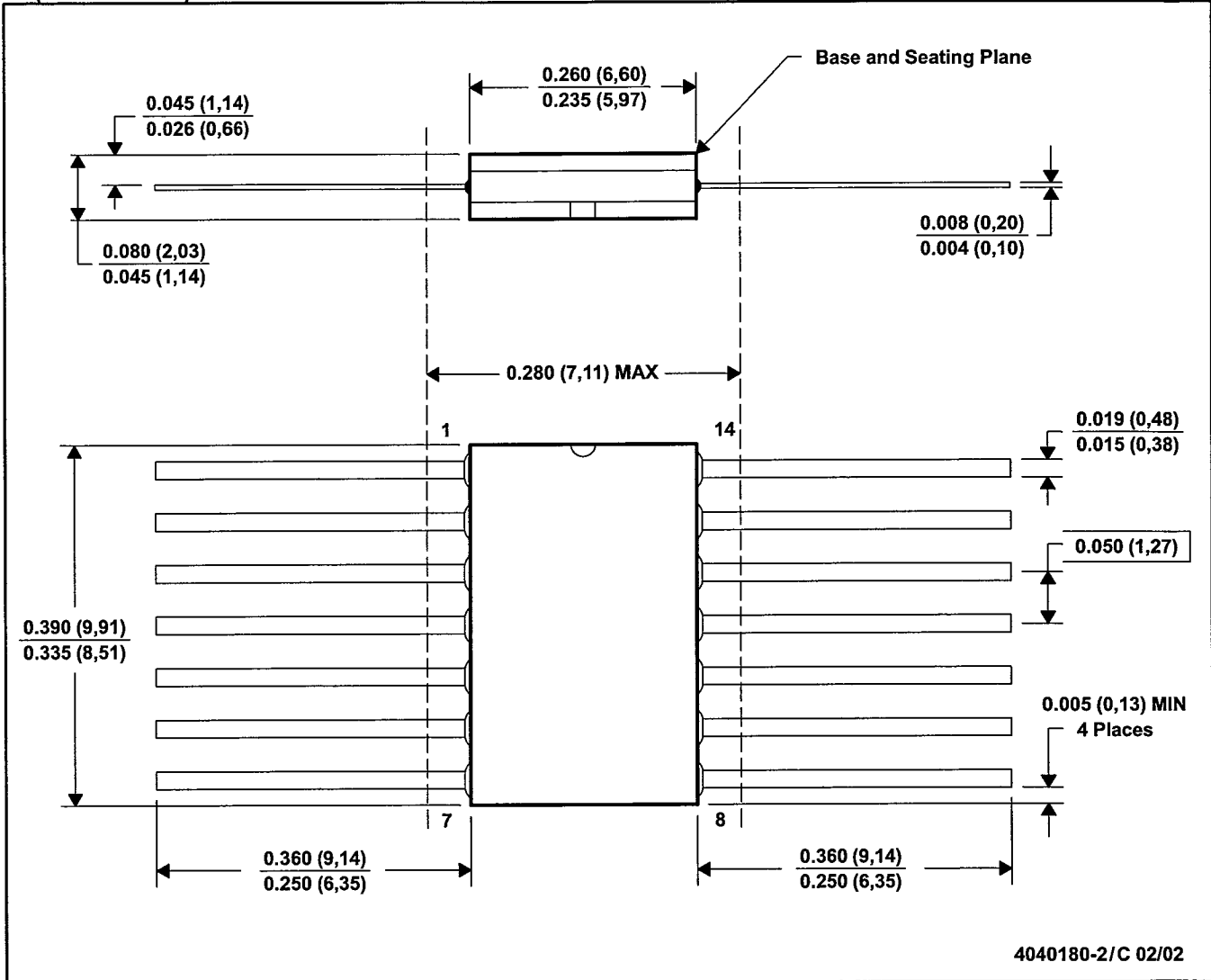


4040083/F 03/03

- NOTES:
- A. All linear dimensions are in inches (millimeters).
  - B. This drawing is subject to change without notice.
  - C. This package is hermetically sealed with a ceramic lid using glass frit.
  - D. Index point is provided on cap for terminal identification only on press ceramic glass frit seal only.
  - E. Falls within MIL STD 1835 GDIP1-T14, GDIP1-T16, GDIP1-T18 and GDIP1-T20.

W (R-GDFP-F14)

CERAMIC DUAL FLATPACK

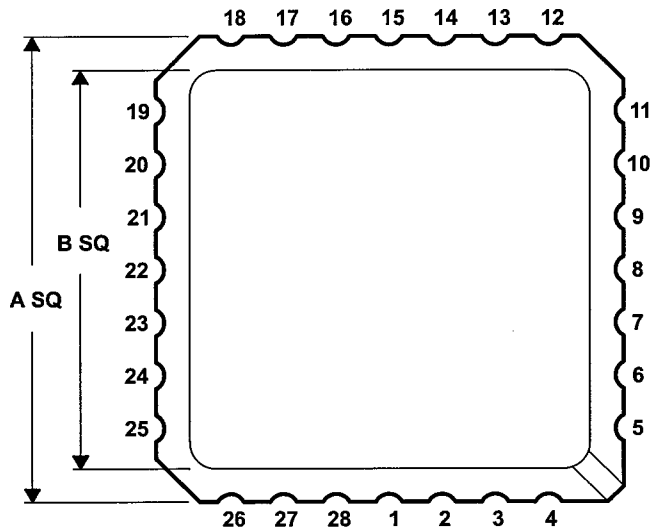


- NOTES:
- A. All linear dimensions are in inches (millimeters).
  - B. This drawing is subject to change without notice.
  - C. This package can be hermetically sealed with a ceramic lid using glass frit.
  - D. Index point is provided on cap for terminal identification only.
  - E. Falls within MIL STD 1835 GDFP1-F14 and JEDEC MO-092AB

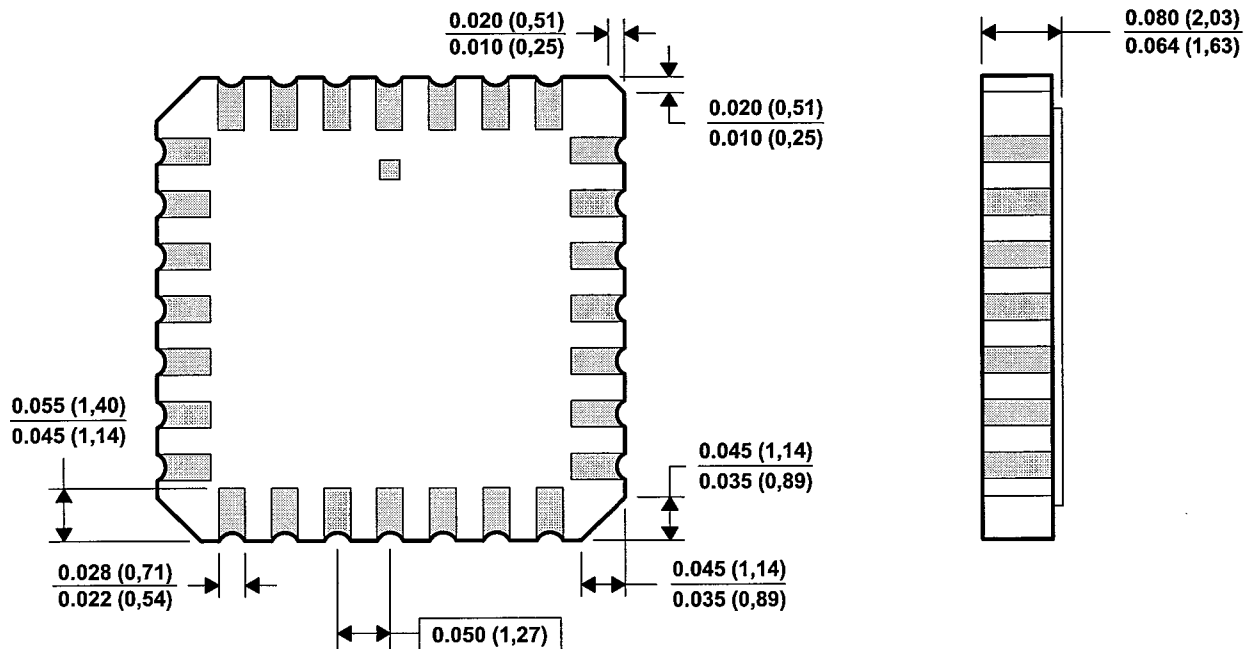
FK (S-CQCC-N\*\*)

## LEADLESS CERAMIC CHIP CARRIER

28 TERMINAL SHOWN



| NO. OF<br>TERMINALS<br>** | A                |                  | B                |                  |
|---------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|                           | MIN              | MAX              | MIN              | MAX              |
| 20                        | 0.342<br>(8,69)  | 0.358<br>(9,09)  | 0.307<br>(7,80)  | 0.358<br>(9,09)  |
| 28                        | 0.442<br>(11,23) | 0.458<br>(11,63) | 0.406<br>(10,31) | 0.458<br>(11,63) |
| 44                        | 0.640<br>(16,26) | 0.660<br>(16,76) | 0.495<br>(12,58) | 0.560<br>(14,22) |
| 52                        | 0.739<br>(18,78) | 0.761<br>(19,32) | 0.495<br>(12,58) | 0.560<br>(14,22) |
| 68                        | 0.938<br>(23,83) | 0.962<br>(24,43) | 0.850<br>(21,6)  | 0.858<br>(21,8)  |
| 84                        | 1.141<br>(28,99) | 1.165<br>(29,59) | 1.047<br>(26,6)  | 1.063<br>(27,0)  |



4040140/D 10/96

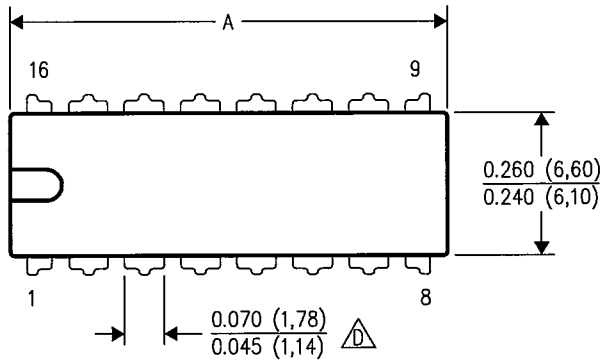
- NOTES: A. All linear dimensions are in inches (millimeters).  
 B. This drawing is subject to change without notice.  
 C. This package can be hermetically sealed with a metal lid.  
 D. The terminals are gold plated.  
 E. Falls within JEDEC MS-004

# MECHANICAL DATA

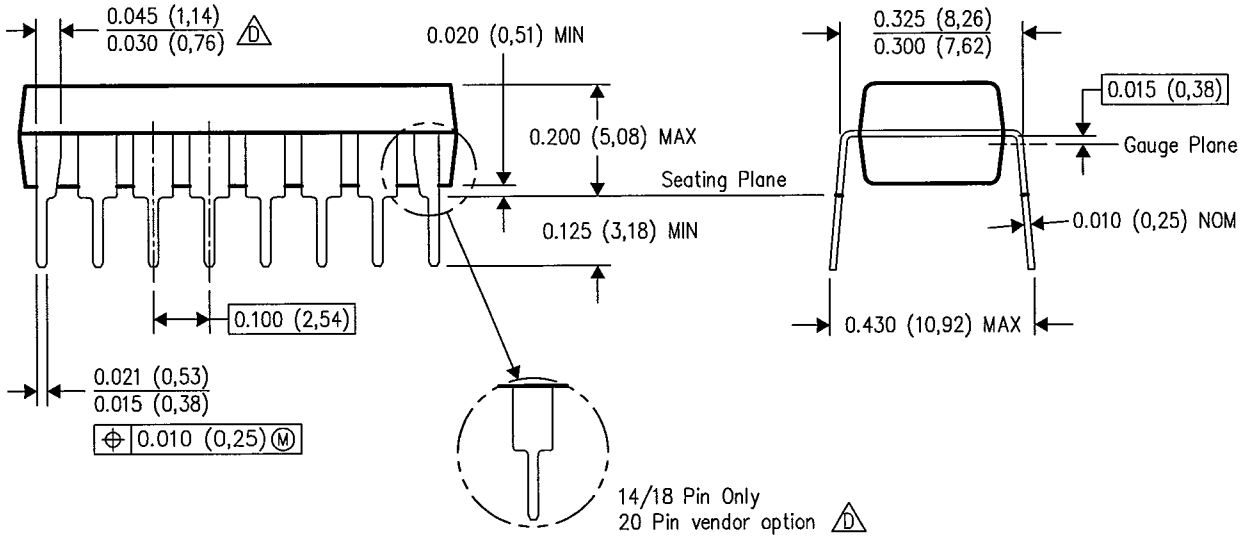
## N (R-PDIP-T\*\*)

16 PINS SHOWN

## PLASTIC DUAL-IN-LINE PACKAGE



| DIM \ PINS **       | 14               | 16               | 18               | 20               |
|---------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| A MAX               | 0.775<br>(19,69) | 0.775<br>(19,69) | 0.920<br>(23,37) | 1.060<br>(26,92) |
| A MIN               | 0.745<br>(18,92) | 0.745<br>(18,92) | 0.850<br>(21,59) | 0.940<br>(23,88) |
| MS-001<br>VARIATION | AA               | BB               | AC               | AD               |



14/18 Pin Only  
20 Pin vendor option

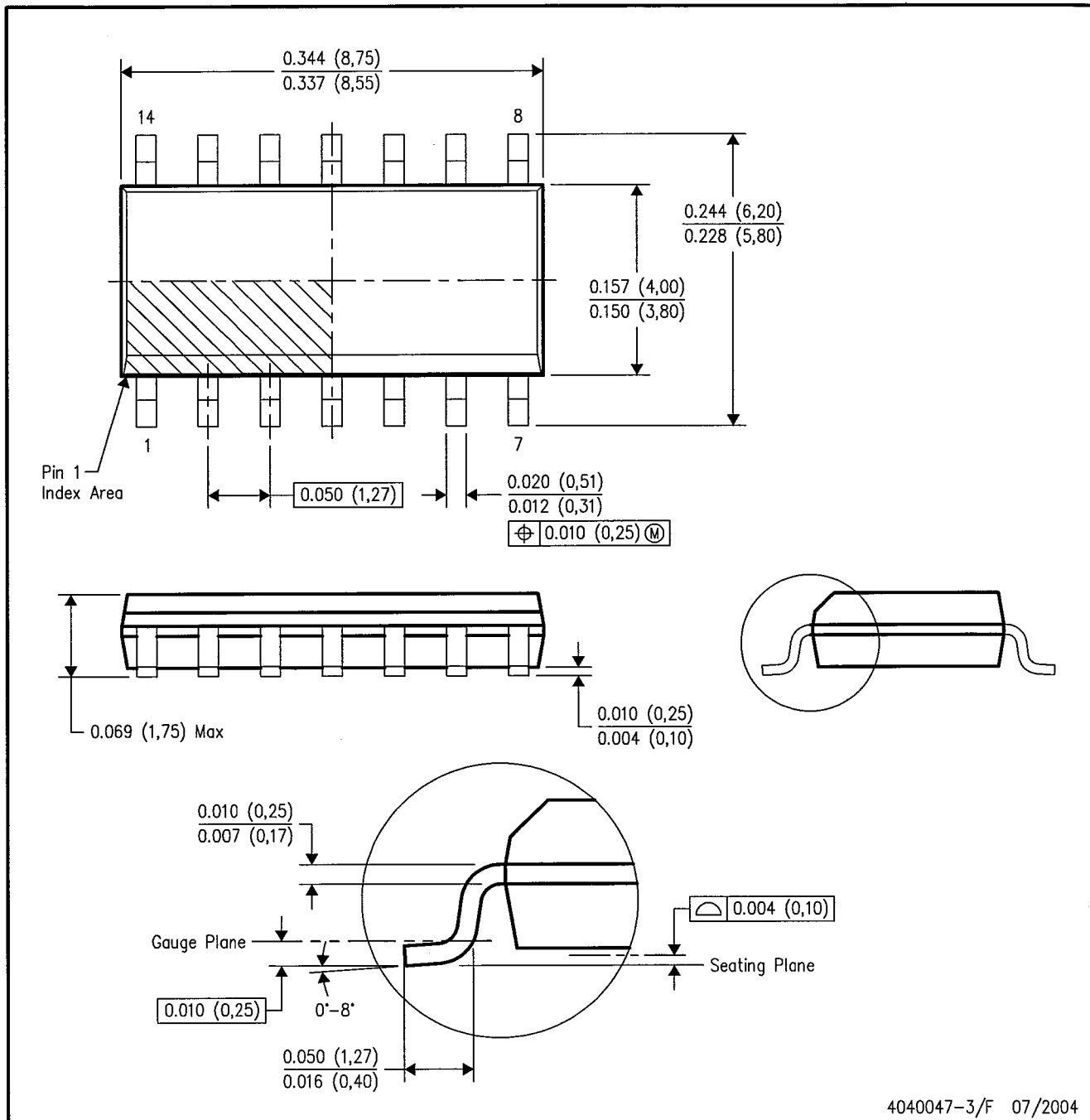
4040049/E 12/2002

- NOTES:
- A. All linear dimensions are in inches (millimeters).
  - B. This drawing is subject to change without notice.
  - Falls within JEDEC MS-001, except 18 and 20 pin minimum body length (Dim A).
  - The 20 pin end lead shoulder width is a vendor option, either half or full width.



D (R-PDSO-G14)

PLASTIC SMALL-OUTLINE PACKAGE



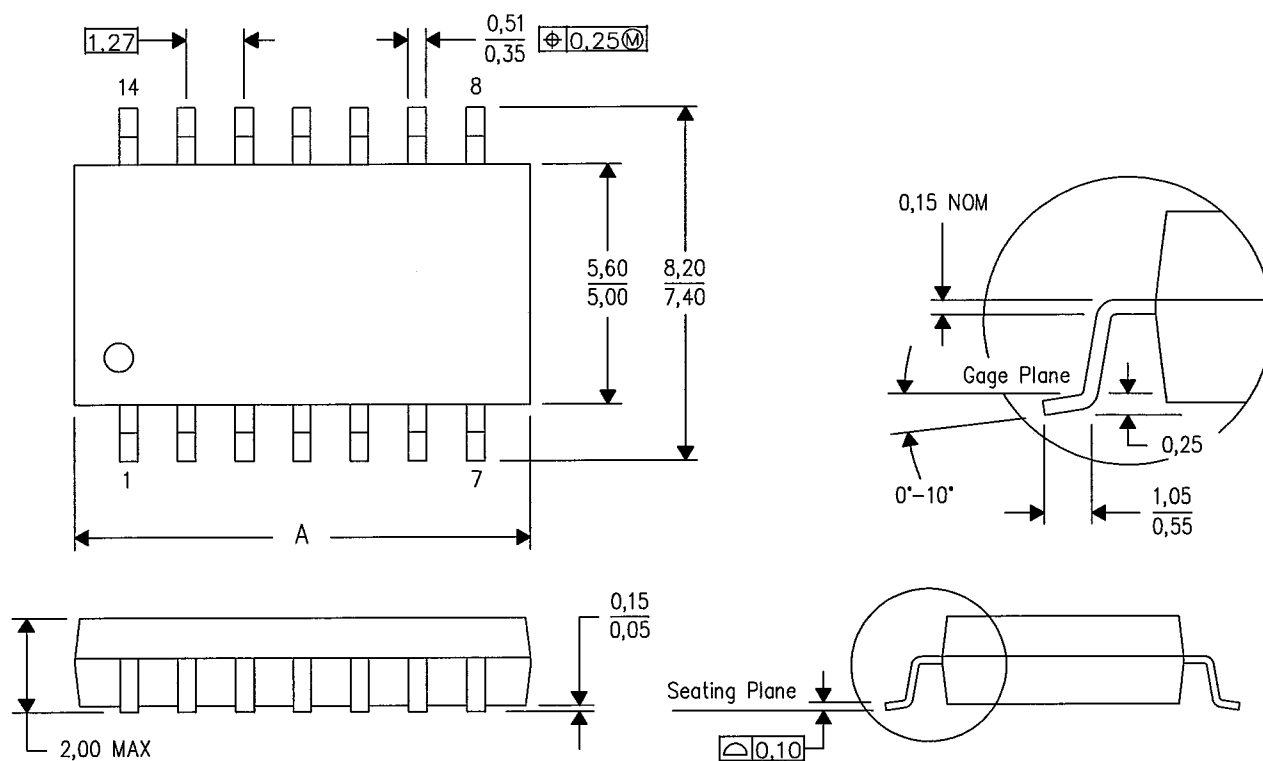
- NOTES:
- All linear dimensions are in inches (millimeters).
  - This drawing is subject to change without notice.
  - Body dimensions do not include mold flash or protrusion not to exceed 0.006 (0,15).
  - Falls within JEDEC MS-012 variation AB.

# MECHANICAL DATA

NS (R-PDSO-G\*\*)

PLASTIC SMALL-OUTLINE PACKAGE

14-PINS SHOWN



| DIM \ PINS ** | 14    | 16    | 20    | 24    |
|---------------|-------|-------|-------|-------|
| A MAX         | 10,50 | 10,50 | 12,90 | 15,30 |
| A MIN         | 9,90  | 9,90  | 12,30 | 14,70 |

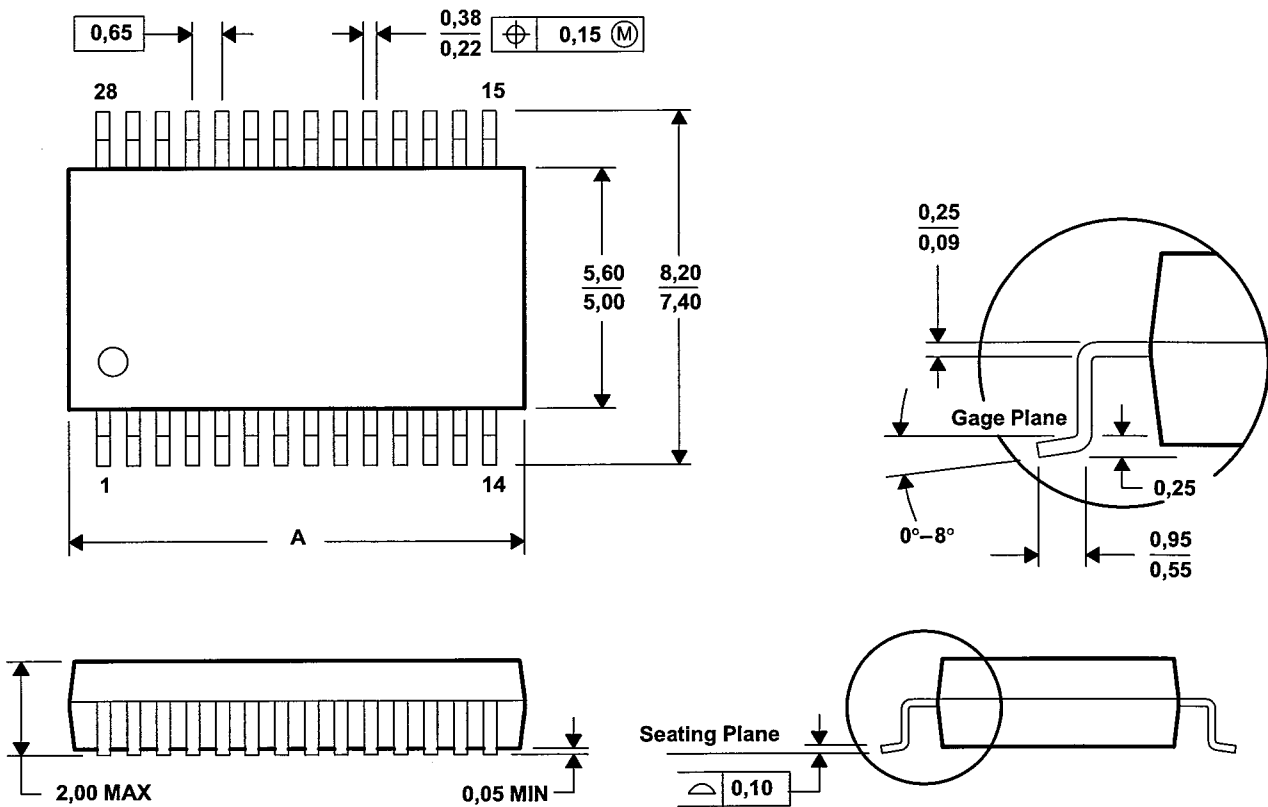
4040062/C 03/03

- NOTES:
- A. All linear dimensions are in millimeters.
  - B. This drawing is subject to change without notice.
  - C. Body dimensions do not include mold flash or protrusion, not to exceed 0,15.

DB (R-PDSO-G\*\*)

PLASTIC SMALL-OUTLINE

28 PINS SHOWN



| DIM \ PINS ** | 14   | 16   | 20   | 24   | 28    | 30    | 38    |
|---------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| A MAX         | 6,50 | 6,50 | 7,50 | 8,50 | 10,50 | 10,50 | 12,90 |
| A MIN         | 5,90 | 5,90 | 6,90 | 7,90 | 9,90  | 9,90  | 12,30 |

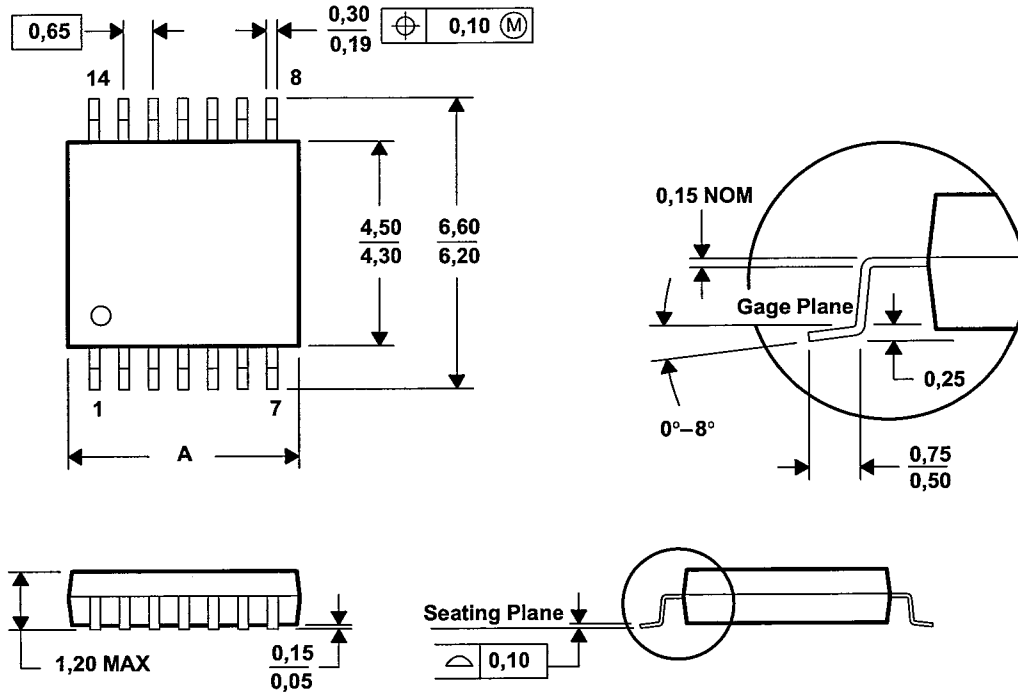
4040065 /E 12/01

- NOTES: A. All linear dimensions are in millimeters.  
 B. This drawing is subject to change without notice.  
 C. Body dimensions do not include mold flash or protrusion not to exceed 0,15.  
 D. Falls within JEDEC MO-150

PW (R-PDSO-G\*\*)

PLASTIC SMALL-OUTLINE PACKAGE

14 PINS SHOWN



| PINS **<br>DIM | 8    | 14   | 16   | 20   | 24   | 28   |
|----------------|------|------|------|------|------|------|
| A MAX          | 3,10 | 5,10 | 5,10 | 6,60 | 7,90 | 9,80 |
| A MIN          | 2,90 | 4,90 | 4,90 | 6,40 | 7,70 | 9,60 |

4040064/F 01/97

- NOTES: A. All linear dimensions are in millimeters.  
 B. This drawing is subject to change without notice.  
 C. Body dimensions do not include mold flash or protrusion not to exceed 0,15.  
 D. Falls within JEDEC MO-153

## IMPORTANT NOTICE

Texas Instruments Incorporated and its subsidiaries (TI) reserve the right to make corrections, modifications, enhancements, improvements, and other changes to its products and services at any time and to discontinue any product or service without notice. Customers should obtain the latest relevant information before placing orders and should verify that such information is current and complete. All products are sold subject to TI's terms and conditions of sale supplied at the time of order acknowledgment.

TI warrants performance of its hardware products to the specifications applicable at the time of sale in accordance with TI's standard warranty. Testing and other quality control techniques are used to the extent TI deems necessary to support this warranty. Except where mandated by government requirements, testing of all parameters of each product is not necessarily performed.

TI assumes no liability for applications assistance or customer product design. Customers are responsible for their products and applications using TI components. To minimize the risks associated with customer products and applications, customers should provide adequate design and operating safeguards.

TI does not warrant or represent that any license, either express or implied, is granted under any TI patent right, copyright, mask work right, or other TI intellectual property right relating to any combination, machine, or process in which TI products or services are used. Information published by TI regarding third-party products or services does not constitute a license from TI to use such products or services or a warranty or endorsement thereof. Use of such information may require a license from a third party under the patents or other intellectual property of the third party, or a license from TI under the patents or other intellectual property of TI.

Reproduction of information in TI data books or data sheets is permissible only if reproduction is without alteration and is accompanied by all associated warranties, conditions, limitations, and notices. Reproduction of this information with alteration is an unfair and deceptive business practice. TI is not responsible or liable for such altered documentation.

Resale of TI products or services with statements different from or beyond the parameters stated by TI for that product or service voids all express and any implied warranties for the associated TI product or service and is an unfair and deceptive business practice. TI is not responsible or liable for any such statements.

Following are URLs where you can obtain information on other Texas Instruments products and application solutions:

| Products         |                                                                    | Applications       |                                                                          |
|------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Amplifiers       | <a href="http://amplifier.ti.com">amplifier.ti.com</a>             | Audio              | <a href="http://www.ti.com/audio">www.ti.com/audio</a>                   |
| Data Converters  | <a href="http://dataconverter.ti.com">dataconverter.ti.com</a>     | Automotive         | <a href="http://www.ti.com/automotive">www.ti.com/automotive</a>         |
| DSP              | <a href="http://dsp.ti.com">dsp.ti.com</a>                         | Broadband          | <a href="http://www.ti.com/broadband">www.ti.com/broadband</a>           |
| Interface        | <a href="http://interface.ti.com">interface.ti.com</a>             | Digital Control    | <a href="http://www.ti.com/digitalcontrol">www.ti.com/digitalcontrol</a> |
| Logic            | <a href="http://logic.ti.com">logic.ti.com</a>                     | Military           | <a href="http://www.ti.com/military">www.ti.com/military</a>             |
| Power Mgmt       | <a href="http://power.ti.com">power.ti.com</a>                     | Optical Networking | <a href="http://www.ti.com/opticalnetwork">www.ti.com/opticalnetwork</a> |
| Microcontrollers | <a href="http://microcontroller.ti.com">microcontroller.ti.com</a> | Security           | <a href="http://www.ti.com/security">www.ti.com/security</a>             |
|                  |                                                                    | Telephony          | <a href="http://www.ti.com/telephony">www.ti.com/telephony</a>           |
|                  |                                                                    | Video & Imaging    | <a href="http://www.ti.com/video">www.ti.com/video</a>                   |
|                  |                                                                    | Wireless           | <a href="http://www.ti.com/wireless">www.ti.com/wireless</a>             |

Mailing Address: Texas Instruments  
Post Office Box 655303 Dallas, Texas 75265

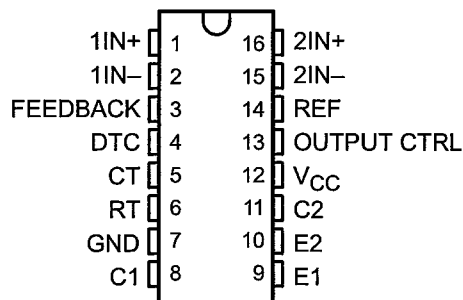
Copyright © 2005, Texas Instruments Incorporated

# TL494 PULSE-WIDTH-MODULATION CONTROL CIRCUITS

SLVS074B – JANUARY 1983 – REVISED JULY 1999

- Complete PWM Power Control Circuitry
- Uncommitted Outputs for 200-mA Sink or Source Current
- Output Control Selects Single-Ended or Push-Pull Operation
- Internal Circuitry Prohibits Double Pulse at Either Output
- Variable Dead Time Provides Control Over Total Range
- Internal Regulator Provides a Stable 5-V Reference Supply With 5% Tolerance
- Circuit Architecture Allows Easy Synchronization

D, N, NS, OR PW PACKAGE  
(TOP VIEW)



## description

The TL494 incorporates all the functions required in the construction of a pulse-width-modulation (PWM) control circuit on a single chip. Designed primarily for power-supply control, this device offers the flexibility to tailor the power-supply control circuitry to a specific application.

The TL494 contains two error amplifiers, an on-chip adjustable oscillator, a dead-time control (DTC) comparator, a pulse-steering control flip-flop, a 5-V, 5%-precision regulator, and output-control circuits.

The error amplifiers exhibit a common-mode voltage range from  $-0.3\text{ V}$  to  $V_{CC} - 2\text{ V}$ . The dead-time control comparator has a fixed offset that provides approximately 5% dead time. The on-chip oscillator can be bypassed by terminating RT to the reference output and providing a sawtooth input to CT, or it can drive the common circuits in synchronous multiple-rail power supplies.

The uncommitted output transistors provide either common-emitter or emitter-follower output capability. The TL494 provides for push-pull or single-ended output operation, which can be selected through the output-control function. The architecture of this device prohibits the possibility of either output being pulsed twice during push-pull operation.

The TL494C is characterized for operation from  $0^{\circ}\text{C}$  to  $70^{\circ}\text{C}$ . The TL494I is characterized for operation from  $-40^{\circ}\text{C}$  to  $85^{\circ}\text{C}$ .

FUNCTION TABLE

| INPUT TO<br>OUTPUT CTRL | OUTPUT FUNCTION                 |
|-------------------------|---------------------------------|
| $V_I = \text{GND}$      | Single-ended or parallel output |
| $V_I = V_{\text{ref}}$  | Normal push-pull operation      |



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

**TEXAS  
INSTRUMENTS**

POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

Copyright © 1999, Texas Instruments Incorporated

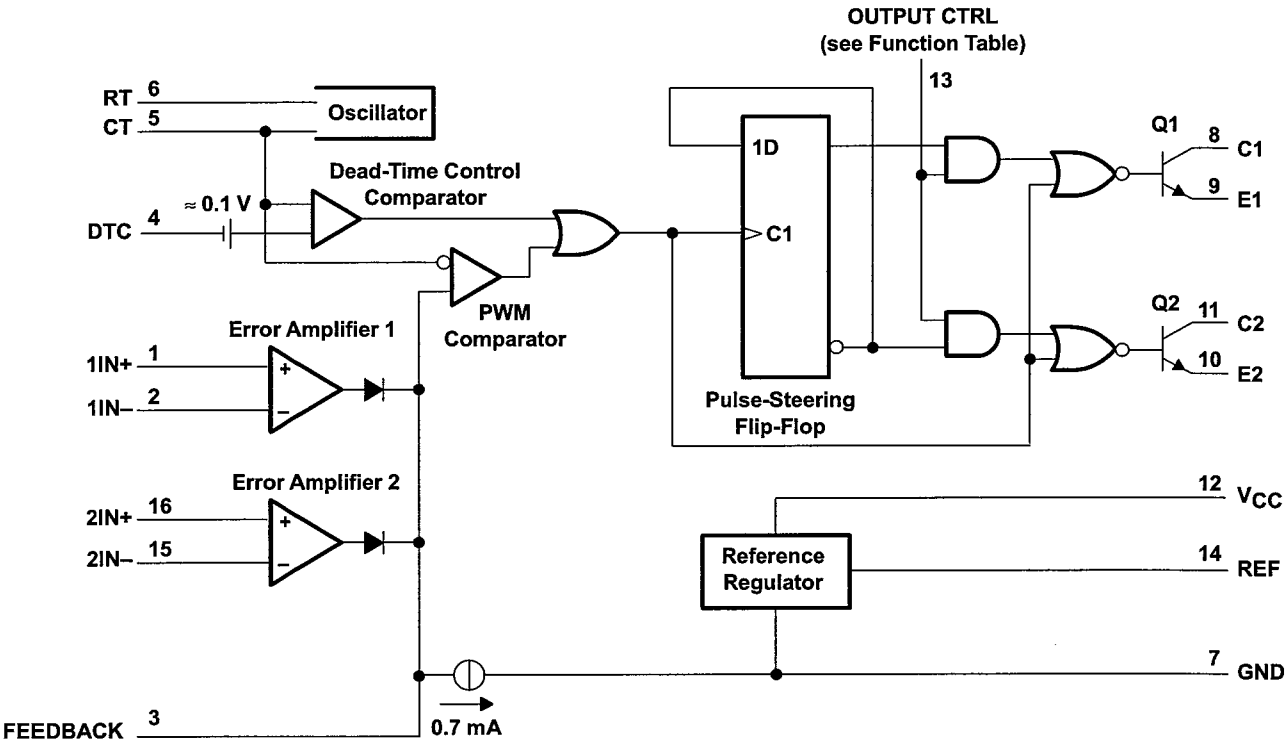
TL494  
PULSE-WIDTH-MODULATION CONTROL CIRCUITS

LVS074B – JANUARY 1983 – REVISED JULY 1999

| AVAILABLE OPTIONS |                   |                 |                    |                           |               |
|-------------------|-------------------|-----------------|--------------------|---------------------------|---------------|
| T <sub>A</sub>    | PACKAGED DEVICES  |                 |                    |                           | CHIP FORM (Y) |
|                   | SMALL OUTLINE (D) | PLASTIC DIP (N) | SMALL OUTLINE (NS) | SHRINK SMALL OUTLINE (PW) |               |
|                   |                   |                 |                    |                           |               |
| 0°C to 70°C       | TL494CD           | TL494CN         | TL494CNS           | TL494CPW                  | TL494Y        |
| –40°C to 85°C     | TL494ID           | TL494IN         | —                  | —                         | —             |

The D, NS, and PW packages are available taped and reeled. Add the suffix R to device type (e.g., TL494CDR). Chip forms are tested at 25°C.

functional block diagram



# TL494

## PULSE-WIDTH-MODULATION CONTROL CIRCUITS

SLVS074B – JANUARY 1983 – REVISED JULY 1999

**absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)<sup>†</sup>**

|                                                              |                     |     | TL494        | UNIT |
|--------------------------------------------------------------|---------------------|-----|--------------|------|
| Supply voltage, $V_{CC}$ (see Note 1)                        |                     |     | 41           | V    |
| Amplifier input voltage, $V_I$                               |                     |     | $V_{CC}+0.3$ | V    |
| Collector output voltage, $V_O$                              |                     |     | 41           | V    |
| Collector output current, $I_O$                              |                     |     | 250          | mA   |
| Package thermal impedance, $\theta_{JA}$ (see Notes 2 and 3) | D package           | 73  | °C           |      |
|                                                              | N package           | 88  |              |      |
|                                                              | NS package          | 64  |              |      |
|                                                              | PW package          | 108 |              |      |
| Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds | D, N, or PW package | 260 | °C           |      |
| Storage temperature range, $T_{sta}$                         |                     |     | −65 to 150   | °C   |

<sup>†</sup> Stresses beyond those listed under "absolute maximum ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under "recommended operating conditions" is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

- NOTES:
1. All voltage values, except differential voltages, are with respect to the network ground terminal.
  2. Maximum power dissipation is a function of  $T_J(\text{max})$ ,  $\theta_{JA}$ , and  $T_A$ . The maximum allowable power dissipation at any allowable ambient temperature is  $P_D = (T_J(\text{max}) - T_A)/\theta_{JA}$ . Operating at the absolute maximum  $T_J$  of 150°C can impact reliability.
  3. The package thermal impedance is calculated in accordance with JESD 51, except for through-hole packages, which use a trace length of zero.

### recommended operating conditions

|                                            |        | TL494 |            | UNIT       |
|--------------------------------------------|--------|-------|------------|------------|
|                                            |        | MIN   | MAX        |            |
| Supply voltage, $V_{CC}$                   |        | 7     | 40         | V          |
| Amplifier input voltage, $V_I$             |        | -0.3  | $V_{CC}-2$ | V          |
| Collector output voltage, $V_O$            |        |       | 40         | V          |
| Collector output current (each transistor) |        |       | 200        | mA         |
| Current into feedback terminal             |        |       | 0.3        | mA         |
| Oscillator frequency, $f_{osc}$            |        | 1     | 300        | kHz        |
| Timing capacitor, $C_T$                    |        | 0.47  | 10000      | nF         |
| Timing resistor, $R_T$                     |        | 1.8   | 500        | k $\Omega$ |
| Operating free-air temperature, $T_A$      | TL494C | 0     | 70         | °C         |
|                                            | TL494I | -40   | 85         |            |



TL494
PULSE-WIDTH-MODULATION CONTROL CIRCUITS

LVS074B – JANUARY 1983 – REVISED JULY 1999

Electrical characteristics over recommended operating free-air temperature range, VCC = 15 V, fosc = 10 kHz (unless otherwise noted)

Reference section

Table with 5 columns: PARAMETER, TEST CONDITIONS†, TL494C, TL494I (MIN, TYP‡, MAX), and UNIT. Rows include Output voltage (REF), Input regulation, Output regulation, Output voltage change with temperature, and Short-circuit output current§.

For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions. All typical values, except for parameter changes with temperature, are at TA = 25°C. Duration of the short circuit should not exceed one second.

Oscillator section, CT = 0.01 µF, RT = 12 kΩ (see Figure 1)

Table with 5 columns: PARAMETER, TEST CONDITIONS†, TL494, TL494I (MIN, TYP‡, MAX), and UNIT. Rows include Frequency, Standard deviation of frequency||, Frequency change with voltage, and Frequency change with temperature#.

For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions. All typical values, except for parameter changes with temperature, are at TA = 25°C. Standard deviation is a measure of the statistical distribution about the mean as derived from the formula:

σ = √(Σ(xn - X̄)² / (N - 1))

Temperature coefficient of timing capacitor and timing resistor are not taken into account.

Error-amplifier section (see Figure 2)

Table with 5 columns: PARAMETER, TEST CONDITIONS, TL494, TL494I (MIN, TYP‡, MAX), and UNIT. Rows include Input offset voltage, Input offset current, Input bias current, Common-mode input voltage range, Open-loop voltage amplification, Unity-gain bandwidth, Common-mode rejection ratio, Output sink current (FEEDBACK), and Output source current (FEEDBACK).

All typical values, except for parameter changes with temperature, are at TA = 25°C.

# TL494

## PULSE-WIDTH-MODULATION CONTROL CIRCUITS

SLVS074B – JANUARY 1983 – REVISED JULY 1999

electrical characteristics over recommended operating free-air temperature range,  $V_{CC} = 15\text{ V}$ ,  $f = 10\text{ kHz}$ ,  $T_A = 25^\circ\text{C}$  (unless otherwise noted)

### reference section

| PARAMETER                     | TEST CONDITIONS†                     | TL494Y |      |     | UNIT |
|-------------------------------|--------------------------------------|--------|------|-----|------|
|                               |                                      | MIN    | TYP† | MAX |      |
| Output voltage (REF)          | $I_O = 1\text{ mA}$                  |        | 5    |     | V    |
| Input regulation              | $V_{CC} = 7\text{ V to }40\text{ V}$ |        | 2    |     | mV   |
| Output regulation             | $I_O = 1\text{ mA to }10\text{ mA}$  |        | 1    |     | mV   |
| Short-circuit output current‡ | REF = 0 V                            |        | 25   |     | mA   |

† All typical values, except for parameter changes with temperature, are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

‡ Duration of the short circuit should not exceed one second.

### oscillator section, $C_T = 0.01\text{ }\mu\text{F}$ , $R_T = 12\text{ k}\Omega$ (see Figure 1)

| PARAMETER                        | TEST CONDITIONS†                                            | TL494Y |      |     | UNIT   |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------|------|-----|--------|
|                                  |                                                             | MIN    | TYP† | MAX |        |
| Frequency                        |                                                             |        | 10   |     | kHz    |
| Standard deviation of frequency§ | All values of $V_{CC}$ , $C_T$ , $R_T$ , and $T_A$ constant |        | 100  |     | Hz/kHz |
| Frequency change with voltage    | $V_{CC} = 7\text{ V to }40\text{ V}$                        |        | 1    |     | Hz/kHz |

† All typical values, except for parameter changes with temperature, are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

§ Standard deviation is a measure of the statistical distribution about the mean as derived from the formula:

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

### error-amplifier section (see Figure 2)

| PARAMETER                       | TEST CONDITIONS                                                                             | TL494Y |      |     | UNIT          |
|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------|------|-----|---------------|
|                                 |                                                                                             | MIN    | TYP† | MAX |               |
| Input offset voltage            | $V_O$ (FEEDBACK) = 2.5 V                                                                    |        | 2    |     | mV            |
| Input offset current            | $V_O$ (FEEDBACK) = 2.5 V                                                                    |        | 25   |     | nA            |
| Input bias current              | $V_O$ (FEEDBACK) = 2.5 V                                                                    |        | 0.2  |     | $\mu\text{A}$ |
| Open-loop voltage amplification | $\Delta V_O = 3\text{ V}$ , $R_L = 2\text{ k}\Omega$ , $V_O = 0.5\text{ V to }3.5\text{ V}$ |        | 95   |     | dB            |
| Unity-gain bandwidth            | $V_O = 0.5\text{ V to }3.5\text{ V}$ , $R_L = 2\text{ k}\Omega$                             |        | 800  |     | kHz           |
| Common-mode rejection ratio     | $\Delta V_O = 40\text{ V}$                                                                  |        | 80   |     | dB            |
| Output sink current (FEEDBACK)  | $V_{ID} = -15\text{ mV to }-5\text{ V}$ , $V$ (FEEDBACK) = 0.7 V                            |        | 0.7  |     | mA            |

† All typical values, except for parameter changes with temperature, are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

TL494
PULSE-WIDTH-MODULATION CONTROL CIRCUITS

LVS074B – JANUARY 1983 – REVISED JULY 1999

Electrical characteristics over recommended operating free-air temperature range, VCC = 15 V, f = 10 kHz (unless otherwise noted)

Output section

Table with 5 columns: PARAMETER, TEST CONDITIONS, TL494, TL494Y (MIN, TYP†, MAX), and UNIT. Rows include Collector off-state current, Emitter off-state current, Collector-emitter saturation voltage (Common emitter and Emitter follower), and Output control input current.

All typical values except for temperature coefficient are at TA = 25°C.

Dead-time control section (see Figure 1)

Table with 5 columns: PARAMETER, TEST CONDITIONS, TL494, TL494Y (MIN, TYP†, MAX), and UNIT. Rows include Input bias current (DEAD-TIME CTRL), Maximum duty cycle, and Input threshold voltage (DEAD-TIME CTRL).

All typical values except for temperature coefficient are at TA = 25°C.

Feedback comparator section (see Figure 1)

Table with 5 columns: PARAMETER, TEST CONDITIONS, TL494, TL494Y (MIN, TYP†, MAX), and UNIT. Rows include Input threshold voltage (FEEDBACK) and Input sink current (FEEDBACK).

All typical values except for temperature coefficient are at TA = 25°C.

Power device

Table with 5 columns: PARAMETER, TEST CONDITIONS, TL494, TL494Y (MIN, TYP†, MAX), and UNIT. Rows include Standby supply current and Average supply current.

All typical values except for temperature coefficient are at TA = 25°C.

Switching characteristics, TA = 25°C

Table with 5 columns: PARAMETER, TEST CONDITIONS, TL494, TL494Y (MIN, TYP†, MAX), and UNIT. Rows include Rise time and Fall time for both Common-emitter and Emitter-follower configurations.

All typical values except for temperature coefficient are at TA = 25°C.

### PARAMETER MEASUREMENT INFORMATION

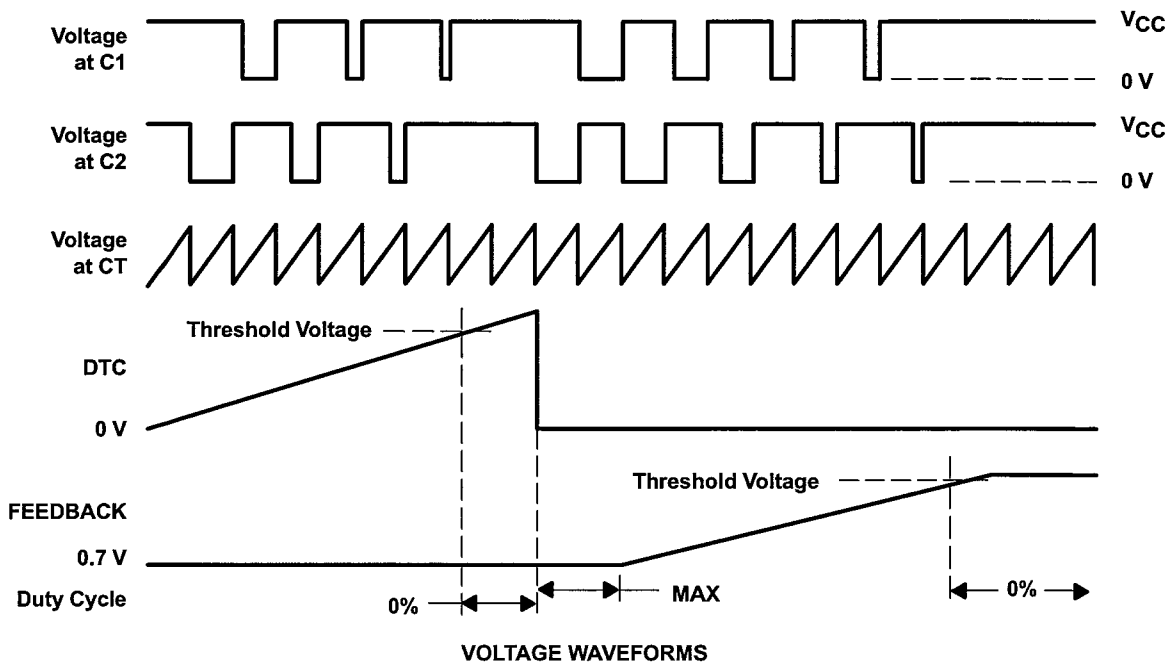
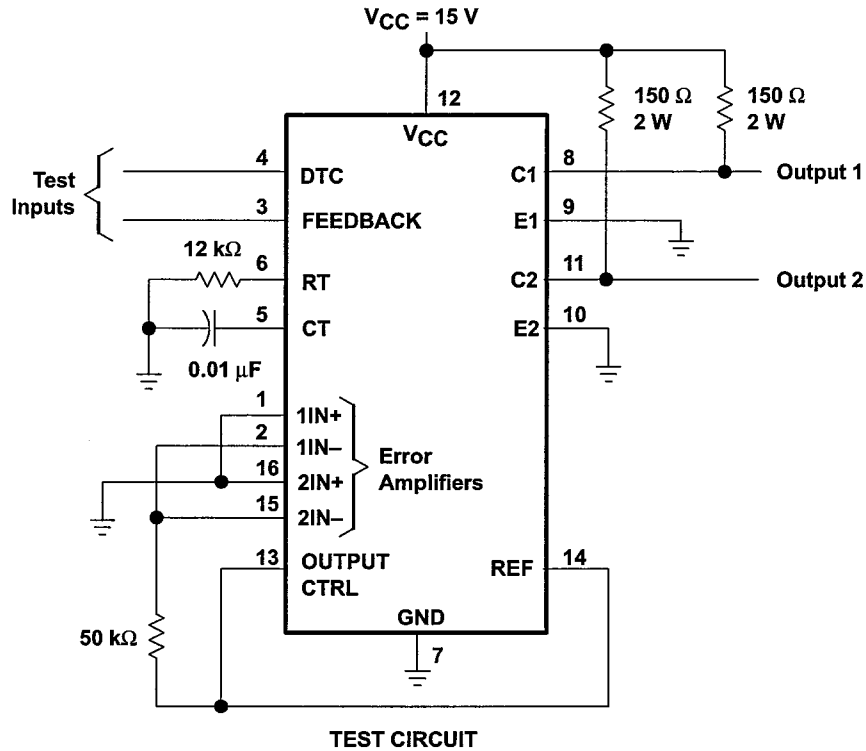


Figure 1. Operational Test Circuit and Waveforms

PARAMETER MEASUREMENT INFORMATION

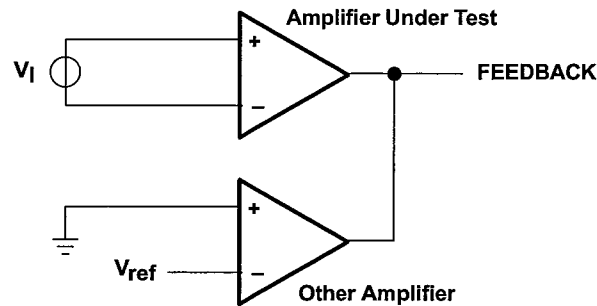
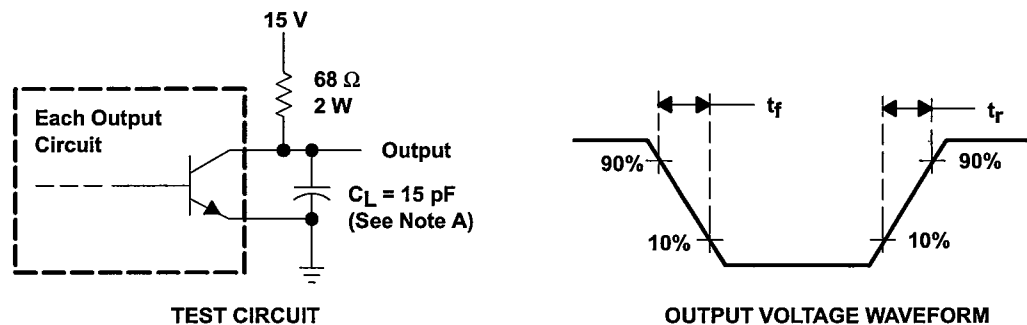
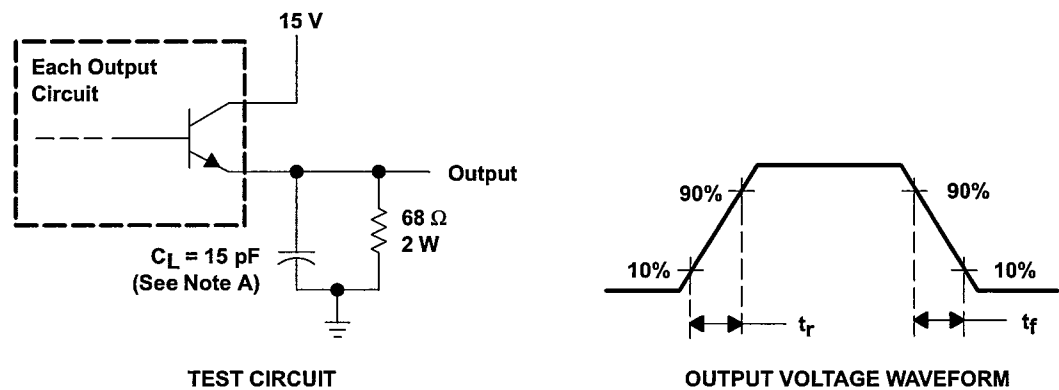


Figure 2. Amplifier Characteristics



NOTE A:  $C_L$  includes probe and jig capacitance.

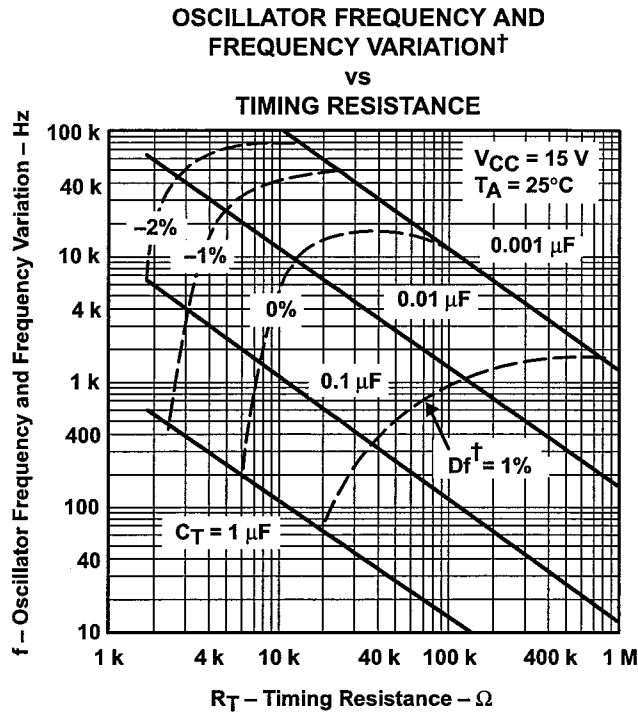
Figure 3. Common-Emitter Configuration



NOTE A:  $C_L$  includes probe and jig capacitance.

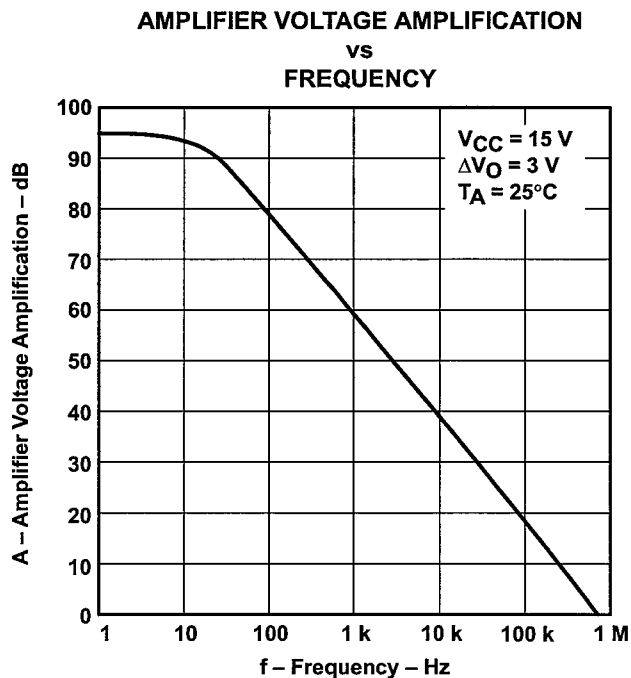
Figure 4. Emitter-Follower Configuration

### TYPICAL CHARACTERISTICS



† Frequency variation ( $\Delta f$ ) is the change in oscillator frequency that occurs over the full temperature range.

**Figure 5**



**Figure 6**