สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้สำหรับปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า

AC Chopper with reversible voltage control for Line Voltage Conditioning

T055586

นาย สมศักดิ์ แสนเมือง

นาย เบี่ยมสุข ตาปสนันท์

นาย วรสิทธิ์ บำรุงรักษ์สกุล

นาย ศรศักดิ์ อึ้งสุวรรณสกุล

นาย อำนาจ เลากสิกิจ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมไฟฟ้าบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เลขหมู่ b
เลขทะเบียน 55586 i
วัน,เดือน,ปี 20 พ.ค. 2548

ไฟล์นี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้สำหรับปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า

AC Chopper with reversible voltage control for Line Voltage Conditioning

นาย สมศักดิ์ แสนเมือง

นาย เปี่ยมสุข ตาปสนันท์

นาย วรสิทธิ์ บำรุงรักษ์สกุล

นาย ศรศักดิ์ อึ้งสุวรรณสกุล

นาย อำนาจ เลาหสิกิจ

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. วิริยะ พิเชฐจำเริญ

ดร. สมภพ ผลไม้

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมไฟฟ้าบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2546

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้สำหรับปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า

AC Chopper with reversible voltage control for Line Voltage Conditioning

ผู้จัดทำ

นาย	สมศักดิ์	แสนเมือง	รหัสประจำตัว 44015130
นาย	เปี่ยมสุข	ตาปสนันท์	รหัสประจำตัว 44015156
นาย	วรสิทธิ์	บำรุงรักษ์สกุล	รหัสประจำตัว 44015164
นาย	ศรศักดิ์	คึ้งสุวรรณสกุล	รหัสประจำตัว 44015170
นาย	อำนาจ	เลากสิกิจ	รหัสประจำตัว 44015181

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.วิริยะ พิเชษฐ์จำเริญ)

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.สมภพ ผลไม้)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้สำหรับปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า

นาย สมศักดิ์	แสนเมือง	44015130
นาย เปี่ยมสุข	ตาปสนันท์	44015156
นาย วรสิทธิ์	บำรุงรักษ์สกุล	44015164
นาย ศรศักดิ์	อึ้งสุวรรณสกุล	44015170
นาย อำนาจ	เลากสิกิจ	44015181

รศ.ดร. วิริยะ	พิเชฐจำเริญ	อาจารย์ที่ปรึกษา
ดร. สมภพ	ผลไม้	อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2546

บทคัดย่อ

ปัจจุบันนี้มีโหลดบางประเภทที่ต้องการระดับแรงดันใช้งานคงที่ เช่นคอมพิวเตอร์ หรือระบบสื่อสารเป็นต้น ดังนั้นเครื่องรักษาระดับแรงดันจึงถูกนำมาใช้งานเพื่อตอบสนองความต้องการนี้ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอแนวความคิดใหม่ที่แตกต่างจากวิธีการดั้งเดิมที่เคยมี ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอแนวคิดในการใช้หม้อแปลงชดเชยแรงดัน ร่วมกับวงจรเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้โดยมีมอสเฟทกำลังเป็นอุปกรณ์สวิทช์ชิ่งเพื่อจ่ายแรงดันให้กับขดลวดทางปฐมภูมิของหม้อแปลงชดเชยแรงดัน โดยที่ขดลวดทางด้านทุติยภูมิต่ออนุกรมกับแหล่งจ่ายอยู่เพื่อจ่ายแรงดันเสริมหรือหักล้างกับแหล่งจ่ายเพื่อให้โหลดมีแรงดันคงที่ตลอดเวลา โดยแรงดันที่จะนำไปชดเชยจะถูกควบคุมโดยช่วงเวลาการทำงานของมอสเฟท ที่สามารถปรับดิวตี้ไซเคิลได้จากวงจรส่วนควบคุม จึงทำให้สามารถควบคุมแรงดันที่โหลดให้คงที่ได้ตลอดย่านการทำงานของเครื่องรักษาระดับแรงดัน ซึ่งวิธีนี้จะมีข้อดีหลายประการ เช่น การบำรุงรักษาต่ำ มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็ว ขนาดเล็ก มีประสิทธิภาพสูง การสูญเสียที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะเน้นไปที่การเสนอแนวคิดในการออกแบบ อธิบายหลักการทำงานในส่วนต่างๆ มีผลการทดลองจริง และการจำลองการทำงานโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และเก็บผลการทดลองในส่วนต่างๆไว้เพื่อใช้ในการพัฒนาและปรับปรุงให้ดีขึ้นในโอกาสต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AC Chopper with Reversible Voltage Control for Line Voltage Conditioning

Somsak	Sanmuang	44015130
Piamsuk	Tapasanant	44015156
Vorasit	Bumrungraksakul	44015164
Sornsak	Oungsuwansakul	44015170
Amnad	Loukasikit	44015181

Asso.Prof.Dr.Viriya	Pichetchumroen	Advisor
Dr.Sompob	Polmai	Advisor

Year 2546

Abstract

Recently, some kind of load equipment needs constant voltage for operation such as computer or communication system. So AC chopper with reversible voltage control for line voltage conditioning is proposed for this desire. This thesis present a novel AC chopper with reversible voltage control. Power MOSFETs are used in this switching equipment for supplying voltage to the primary winding of the compensation transformer having secondary winding connected series with the AC voltage supply for voltage addition or subtraction. As a result the load equipment will have constant voltage all the time. The compensating voltage is controlled by duty cycle control of the PWM circuit. The advantages of this method are low maintenance, small size, high efficiency and low losses.

This thesis purposes describes the of the innovation ,the design idea , the principle of operation of circuit, The result of experiment are compared with results of computer simulation to confirm the validation of the proposed circuit.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และร่วมมือจากหลาย ๆ ฝ่าย ด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จลงได้ก็คือ รศ.ดร.วิริยะ พิเชษฐ์จำเริญ และ ดร.สมภพ ผลไม้ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือเสมอมา ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

และท้ายที่สุดนี้ต้องขอขอบพระคุณพี่ๆ นักศึกษาปริญญาโทที่แสนดี พี่เทพ ให้คำปรึกษา และ อยู่คอยช่วยเหลือตลอดเวลาและเพื่อนๆ ร่วมห้องโปรเจคที่แสนดีทุกคนคุณกมล น้องเอก น้องตุ๊ แอนที่แสนจะน่ารัก และขอบคุณวิโรจน์ อ่อนคงที่แวะเวียนมาทักทายและสร้างความรบกวนอยู่ตลอดเวลา ขอบพระคุณมากครับ

นาย สมศักดิ์ แสนเมือง
นาย เปี่ยมสุข ตาปสนันท์
นาย วรสิทธิ์ บำรุงรักษ์สกุล
นาย ศรศักดิ์ อึ้งสุวรรณสกุล
นาย อำนาจ เลากสิกิจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้าที่

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญตาราง VII

สารบัญภาพ VIII

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาของโครงงาน 1

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน 1

1.3 ขอบเขตโครงงาน 1

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ 2

1.5 หลักการทำงานเบื้องต้น 2

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 ทฤษฎีของมอสเฟทพื้นฐาน 4

2.1.1 มอสเฟทกำลัง 4

2.1.2 ลักษณะสมบัติที่ Steady state ของมอสเฟทกำลัง 6

2.1.3 ลักษณะสมบัติการสวิตชิ่ง 8

2.1.4 พารามิเตอร์ในการทำงานของมอสเฟท 10

2.1.4.1 ลักษณะสมบัติเชิงเส้น Linear characteristic 10

2.1.4.2 ความต้านทานขณะทำงาน On – state resistannce, R_{DS} ค่า R_{DS} 12

2.1.5 การออกแบบวงจรขับเกท 14

2.1.5.1 การขับมอสเฟทด้วย TLL 15

2.1.5.2 การขับมอสเฟทด้วย CMOS 17

2.1.5.3 การขับมอสเฟทด้วยออปแอมป์ 17

2.1.5.4 วงจรขับที่ไม่ได้อ้างอิงกับกราวนด์ 17

2.2 วงจรสนับเบอร์ 19

2.2.1 วงจรสนับเบอร์ช่วยหยุดนำกระแส 19

2.2.2 วงจรสนับเบอร์ป้องกันแรงดันเกิน 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 การคำนวณค่า RC snubber 20

2.3 ทฤษฎีออปแอมป์เบื้องต้น 21

2.3.1 วงจรขยายกลับเฟส 21

2.3.2 วงจรขยายการบวก 22

2.3.3 วงขยายผลต่าง 23

2.3.4 วงจรเปรียบเทียบ 25

2.4 เกตลอจิกและพีชคณิตบูลีน 26

2.4.1 ค่าคงที่บูลีนและตัวแปรบูลีน 26

2.4.2 การปฏิบัติการ OR 27

2.4.3 การปฏิบัติการ AND 28

2.4.4 การปฏิบัติการ NOT 29

2.4.5 เกต NOR และเกต NAND 30

2.4.5.1 เกต NOR 30

2.4.5.2 เกต NAND 31

2.5 การเชื่อมต่อด้วยแสง 32

2.6 ไอซีเบอร์ TL 494 33

2.6.1 การกำหนดคาบเวลาทำงาน 33

2.6.2 การทำงานของไอซีในการคงค่าแรงดันของคอนเวอเตอร์ 34

2.6.3 การกำหนดค่าเวลาเผื่อ 34

2.6.4 การเลือกใช้ Q_1 และ Q_2 ที่เอาท์พุทของไอซี 35

2.7 พัลส์วิดท์มอดูเลเตอร์ PWM 36

2.7.1 พัลส์วิดท์มอดูเลชั่น 36

2.7.2 พัลส์วิดท์มอดูเลเตอร์ 36

2.8 ทฤษฎีหม้อแปลง 37

2.9 วงจรบริดส์เรคติไฟเออร์ 39

2.10 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ 40

2.11 ฟลิปฟลอบแบบ D 42

บทที่ 3 หลักการทำงานและการออกแบบ 44

3.1 บทนำ 44

3.2 หลักการทำงานของวงจรเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้ 46

3.3 การออกแบบฟิลเตอร์กรองผ่านความถี่ต่ำ 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 หลักการทำงานของเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้สำหรับปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า 75
3.4.1 หลักการทำงานของเครื่องรักษาระดับแรงดันในกรณีที่แรงดันที่โหลด มีค่าต่ำกว่า 220 โวลต์ 77
3.4.2 หลักการทำงานของเครื่องรักษาระดับแรงดันในกรณีที่แรงดันที่โหลด มีค่ามากกว่า 220 โวลต์ 78
3.4.3 หลักการทำงานของเครื่องรักษาระดับแรงดันในกรณีที่แรงดันที่ แหล่งจ่ายเท่ากับ 220 โวลต์ 79
3.5 หลักการออกแบบวงจรควบคุมการทำงาน 80
3.5.1 วงจรสร้างสัญญาณ PWM 80
3.5.2 วงจรสร้างสัญญาณ Zero Crossing 81
3.5.3 วงจรตรวจจับแรงดันเกิน / แรงดันตก 82
3.5.4 วงจรป้อนกลับในส่วนของการปรับค่าดิวตี้ไซเกิล 82
3.5.5 วงจรรวมสัญญาณในส่วนของสัญญาณการควบคุม การทำงานของคอนเวอเตอร์ 2 83
3.5.6 วงจรรวมสัญญาณในส่วนของสัญญาณการควบคุม การทำงานของคอนเวอเตอร์ 1 83
3.5.7 วงจรตรวจจับขอบของสัญญาณแรงดัน 84
บทที่ 4 ผลการทดลอง 86
4.1 บทนำ 86
4.2 วงจรการทดลองและค่าพารามิเตอร์ต่างๆในวงจรทดลองของเอซีชอปเปอร์ ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า 86
4.3 การทดลองโดยวิธีการจำลองการทำงานของวงจรควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ 87
4.3.1 การทดลองวงจรสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่ 20 KH_z 87
4.3.2 การทดลองวงจร Zero Crossing 93
4.3.3 การทดลองวงจร Dead Time 95
4.3.4 การทดลองวงจร Drive & Isolate 99
4.3.5 การทดลองวงจรรวมสัญญาณ 102
4.3.6 การทดลองวงจรรวมสัญญาณ 106
4.4 ผลการทดลอง 108
4.4.1 การทดลองในการแก้ผลของการแรงดันเกิดสไปร์ทโดยใช้ ตัวเก็บประจุสนับเบอร์ 108

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 การทดลองในส่วนของการฟิลเตอร์ก่อนและหลังการผ่านฟิลเตอร์ 109
4.4.3 การทดลองในส่วนของการกลับขั้วแรงดัน 111
4.4.4 การทดลองในส่วนของการรักษาระดับแรงดันและการปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า 114
4.4.5 การทดลองในส่วนของการหาค่าประสิทธิภาพ 123

บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์โครงงาน 127
5.1 สรุปโครงงาน 127
5.2 บทวิจารณ์โครงงาน 127
5.3 ปัญหา อุปสรรค และแนวทางแก้ไข 128
5.4 แนวทางการพัฒนา 128
เอกสารอ้างอิง 130
ภาคผนวก 131

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2-1 แสดงค่าคงที่บูลีนและตัวแปรบูลีน 26

ตารางที่ 2-2 แสดงค่าการปฏิบัติการ OR 27

ตารางที่ 2-3 แสดงค่าการปฏิบัติการ AND 28

ตารางที่ 2-4 แสดงค่าการปฏิบัติการ NOT 29

ตารางที่ 2-5 แสดงค่าของเกต NOR 30

ตารางที่ 2-6 แสดงค่าของเกต NAND 31

ตารางที่ 3-1 การเรียงลำดับโหมดการทำงานในกรณีของโหลด Rและ v_S มีเฟสตรงกันกับ v_C 52

ตารางที่ 3-2 การเรียงลำดับโหมดการทำงานในกรณีของ หลด R-L และ v_S มีเฟสตรงกันกับ v_C 57

ตารางที่ 3-3 การเรียงลำดับโหมดการทำงานในกรณีของ โหลด Rและ v_S ต่างเฟสกับ v_C อยู่ 180 องศา 64

ตารางที่ 3-4 การเรียงลำดับโหมดการทำงานในกรณีของ โหลด R-L และ v_S ต่างเฟสกับ v_C อยู่ 180 องศา 69

ตารางที่ 4-1 ตารางแสดงค่าแรงดันอินพุต V_{in} , แรงดันเอาท์พุต V_{out} , เปอร์เซ็นเรกูเรชั่น และเปอร์เซ็นค่าผิดพลาดของเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า 122

ตารางที่ 4-2 ตารางแสดงค่าแรงดันอินพุต V_{in} , กระแสอินพุต , มุม $\cos \varnothing_i$,กำลังอินพุตของเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า 124

ตารางที่ 4-3 ตารางแสดงค่าแรงดันเอาท์พุต V_{out} , กระแสเอาท์พุต , มุม $\cos \varnothing_i$, กำลังเอาท์พุตของเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า 125

ตารางที่ 4-4 ตารางแสดงค่าแรงดันอินพุต, แรงดันเอาท์พุต, กำลังอินพุต, กำลังเอาท์พุตและประสิทธิภาพของเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า 126

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

		หน้า
รูปที่ 2-1	แสดงประเภทของมอสเฟตกำลังในลักษณะต่างๆ	4
รูปที่ 2-2	a) N-channel depletion - type MOSFET	
	b) P-channel depletion - type MOSFET	5
รูปที่ 2-3	a) N-channel enhancement - type MOSFET	
	b) P - channel enhancement - type MOSFET	6
รูปที่ 2-4	ลักษณะสมบัติโอนย้ายของมอสเฟทแบบ N – channel และ P – channel	7
รูปที่ 2-5	ลักษณะสมบัติทางเอาท์พุทของ Enhancement - type MOSFET	8
รูปที่ 2-6	โมเดลการสวิตชิ่งที่ Steady state ของมอสเฟท	8
รูปที่ 2-7	โมเดลแฝงของ Enhancement - type MOSFET	9
รูปที่ 2-8	โมเดลสวิตชิ่งของมอสเฟท	9
รูปที่ 2-9	รูปสัญญาณในการสวิตชิ่งของมอสเฟท	10
รูปที่ 2-10	ลักษณะสมบัติทางเอาท์พุท	10
รูปที่ 2-11	ลักษณะสมบัติโอนย้าย	11
รูปที่ 2-12	ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์เทียบกับกระแสเดรน	11
รูปที่ 2-13	ลักษณะสมบัติอิ่มตัว	11
รูปที่ 2-14	ค่าความต้านทานขณะทำงานเทียบกับอุณหภูมิที่รอยต่อ	12
รูปที่ 2-15	ค่าความต้านทานขณะทำงานเทียบกับกระแสเดรน	12
รูปที่ 2-16	ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเทียบกับอุณหภูมิที่ตัวถัง	13
รูปที่ 2-17	พื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยสูงสุด	13
รูปที่ 2-18	ค่าความจุไฟฟ้าเทียบกับแรงดัน V_{DS}	14
รูปที่ 2-19	ค่าประจุไฟฟ้าเกท เทียบกับแรงดัน	14
รูปที่ 2-20	การใช้งานมอสเฟทเป็นสวิตช์ แบบคอมมอนซอร์ส	15
รูปที่ 2-21	การขับมอสเฟทด้วย TTL	16
รูปที่ 2-22	การใช้ IC จ่ายกระแสได้สูงต่อระหว่าง TTL กับมอสเฟท	17
รูปที่ 2-23	a) การขับมอสเฟทด้วย CMOS	
	b) การใช้ CMOS ขนานกันเพื่อจ่ายกระแสเกทได้สูงขึ้น	18
รูปที่ 2-24	การขับมอสเฟทด้วยออปแอมป์	18
รูปที่ 2-25	วงจรขับเกทโดยใช้ Opto coupler	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2-26 แสดงลักษณะของกระแสและแรงดันเมื่อเริ่มหยุดนำกระแสของอุปกรณ์สวิตช์ชิ่ง 19
รูปที่ 2-27 แสดงลักษณะที่เป็นไปได้ในการต่อวงจรสนับเบอร์ RC ช่วงหยุดนำกระแส 20
รูปที่ 2-28 วงจรสนับเบอร์อย่างง่ายสำหรับอุปกรณ์สวิตชิ่ง 20
รูปที่ 2-29 แสดงวงจรขยายกลับเฟส 22
รูปที่ 2-30 แสดงวงจรขยายการบวก 22
รูปที่ 2-31 แสดงวงขยายผลต่าง 24
รูปที่ 2-32 แสดงวงจรเปรียบเทียบ 25
รูปที่ 2-33 แสดงวงจรเปรียบเทียบชนิดกลับเฟส 26
รูปที่ 2-34 แสดงวงจรเปลี่ยนสัญญาณรูปคลื่นไซน์เป็นสัญญาณรูปคลื่นจัตุรัส 26
รูปที่ 2-35 สัญลักษณ์เกท OR 27
รูปที่ 2-36 รูปคลื่นเอาท์พุทของเกท OR 28
รูปที่ 2-37 สัญลักษณ์เกท AND 28
รูปที่ 2-38 รูปคลื่นเอาท์พุทของขาเกท AND 29
รูปที่ 2-39 สัญลักษณ์และรูปคลื่นอินพุทของเกท NOT 30
รูปที่ 2-40 ปฏิบัติการของเกต NOR 31
รูปที่ 2-41 รูปคลื่นเอาท์พุทของขาเกต NOR 31
รูปที่ 2-42 แสดงถึงการกลับค่าปฏิบัติการของเกต NAND 32
รูปที่ 2-43 รูปคลื่นเอาท์พุตของเกต NAND 32
รูปที่ 2-44 อุปกรณ์การเชื่อมต่อด้วยแสง และสัญลักษณ์ 33
รูปที่ 2-45 แสดงการจัดโครงสร้างภายในและการจัดขาของไอซี TL 494 33
รูปที่ 2-46 แสดงความสัมพันธ์ของค่า R_TC_T ในการกำหนดความถี่ 34
รูปที่ 2-47 แสดงรูปคลื่นลักษณะการทำงานของ TL 494 35
รูปที่ 2-48 แสดงลักษณะการเลือกใช้เอาท์พุทของ TL 494 35
รูปที่ 2-49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาท์พุทกับการเปลี่ยนแปลงความกว้างของพัลส์ควบคุมช่วงเวลานำกระแส t_{ON} ในลักษณะพัลส์วิดท์มอดูเลชั่น 36
รูปที่ 2-50 แสดงลักษณะของแรงดันที่จุดต่างๆของวงจร เมื่อวงจรทำงาน 37
รูปที่ 2-51 หม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ 37
รูปที่ 2-52 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 40
รูปที่ 2-53 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ 40
รูปที่ 2-54 D ฟลิบฟลอป a) สัญลักษณ์ b) ตารางความจริง 43
รูปที่ 2-55 การเขียน D ฟลิบฟลอป 43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2-56 สัญลักษณ์ของ D ฟลิบฟลอปของไอซี 7474 43

รูปที่ 3-1 แสดงบล็อกการทำงานของวงจรควบคุม 44

รูปที่ 3-2 โฟลวชาร์ตแสดงการทำงานของวงจรเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้ เพื่อปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า 45

รูปที่ 3-3 รูปวงจรเอซีช็อปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้ที่ใช้สร้างแรงดันชดเชย 46

รูปที่ 3-4 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและ กระแสไฟฟ้าโดยที่ i_L มีเฟสตรงกันกับ v_S , v_S มีเฟสตรงกันกับ v_C และ i_L มีเฟสตรงกันกับ v_C 48

รูปที่ 3–5 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและ กระแสไฟฟ้าโดยที่ i_L ล้าหลัง v_S, v_s มีเฟ่สตรงกันกับ v_C และ i_L ล้าหลัง v_C 49

รูปที่ 3-6 แสดงรูปคลื่นของแรงดัน กระแสไฟฟ้า และสัญญาณที่ใช้ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ชิ่ง ในกรณีที่ v_S มีเฟสตรงกันกับ i_L, v_S มีเฟสตรงกันกับ v_C และ v_C มีเฟสตรงกันกับ i_L 50

รูปที่ 3-7 แสดงรูปคลื่นของแรงดัน กระแสไฟฟ้า และสัญญาณที่ใช้ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ชิ่ง ในกรณีที่ i_L ล้าหลัง v_S, v_S มีเฟสตรงกันกับ v_C และ i_L ล้าหลัง v_C 51

รูปที่ 3-8 แสดงรูปคลื่นแสดงโหมดการการทำงานของวงจร เอซีชอปเปอร์ ในกรณีที่แรงดันไฟฟ้า v_S มีเฟสตรงกันกับกระแสไฟฟ้า i_L และ v_S มีเฟสตรงกันกับ v_C 52

รูปที่ 3-9 แสดงการทำงานของสวิตช์เมื่อ v_S เป็นบวกและ i_L เป็นบวก 53

รูปที่ 3-10 แสดงการทำงานของสวิตช์เมื่อ v_S เป็นลบและ i_L เป็นลบ 54

รูปที่ 3- 11 แสดงการทำงานของสวิตช์เมื่อ $v_S = 0$ และ $i_L > 0$ 54

รูปที่ 3-12 แสดงการทำงานของสวิตช์เมื่อ $v_S = 0$ และ $i_L < 0$ 55

รูปที่ 3- 13 แสดงการทำงานของสวิตช์เมื่อ $v_S > 0$ และ $i_L > 0$ 56

รูปที่ 3-14 แสดงการทำงานของสวิตช์เมื่อ $v_S < 0$ และ $i_L < 0$ 56

รูปที่ 3-15 แสดงรูปคลื่นแสดงโหมดการการทำงานของวงจรเอซีชอปเปอร์ ในกรณีที่กระแสไฟฟ้า i_L ล้าหลัง แรงดันไฟฟ้า v_S และ v_S มีเฟสตรงกันกับ v_C 57

รูปที่ 3-16 แสดงการทำงานของสวิตช์เมื่อ $v_S > 0$ และ $i_L < 0$ 58

รูปที่ 3-17 แสดงการทำงานของสวิตช์เมื่อ $v_S < 0$ และ $i_L > 0$ 58

รูปที่ 3-18 แสดงรูปคลื่นของแรงดัน และกระแสไฟฟ้า โดยที่ v_S มีเฟสตรงกันกับ i_L , v_S ต่างเฟสกัน 180° กับ v_C และ i_L มีเฟสตรงกันกับ v_C 59

รูปที่ 3-19 แสดงรูปคลื่น ของแรงดัน และกระแสไฟฟ้า โดยที่ i_L มีเฟสตรงกันกับ v_S , v_S ต่างเฟสกัน 180° กับ v_C และ i_L มีเฟสตรงกันกับ v_C 60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3- 20 แสดงรูปคลื่นของแรงดัน กระแสไฟฟ้า และสัญญาณที่ใช้ควบคุมการทำงาน ของอุปกรณ์สวิตช์ชิ่ง ในกรณีที่ v_S มีเฟสตรงกันกับ i_L , v_S ต่างเฟสกัน 180° กับ v_C และ i_L มีเฟสตรงกันกับ v_C 61

รูปที่ 3-21 แสดงรูปคลื่นของแรงดัน กระแสไฟฟ้า และสัญญาณที่ใช้ควบคุมการทำงาน ของอุปกรณ์ สวิตช์ชิ่ง ในกรณีที่ i_L ล้าหลัง v_S , v_S ต่างเฟสกัน 180° กับ v_C และ i_L ล้าหลัง v_C 62

รูปที่ 3-22 รูปคลื่นแสดงโหมดการการทำงานของวงจรเอซีชอปเปอร์ ในกรณีที่ แรงดันไฟฟ้า v_S มีเฟสตรงกันกับกระแสไฟฟ้า i_L, v_S ต่างเฟสกับ v_C อยู่ 180 องศา 63

รูปที่ 3-23 แสดงการทำงานของสวิตช์เมื่อ v_S เป็นบวกและ i_L เป็นบวก 64

รูปที่ 3-24 แสดงการทำงานของสวิตช์เมื่อ v_S เป็นลบและ i_L เป็นลบ 65

รูปที่ 3-25 แสดงการทำงานของสวิตช์เมื่อ $v_S = 0$ และ $i_L < 0$ 66

รูปที่ 3-26 แสดงการทำงานของสวิตช์เมื่อ $v_S = 0$ และ $i_L > 0$ 66

รูปที่ 3-27 แสดงการทำงานของสวิตช์เมื่อ $v_S > 0$ และ $i_L < 0$ 67

รูปที่ 3-28 แสดงการทำงานของสวิตช์เมื่อ $v_S < 0$ และ $i_L < 0$) 67

รูปที่ 3-29 รูปคลื่นแสดงโหมดการการทำงานของวงจรเอซีชอปเปอร์ในกรณีที่ กระแสไฟฟ้า i_L ล้าหลังแรงดันไฟฟ้า v_S, v_S ต่างเฟสกับ v_C อยู่ 180 องศา 68

รูปที่ 3-30 แสดงการทำงานของสวิตช์เมื่อ $v_S > 0$ และ $i_L < 0$ 69

รูปที่ 3-31 แสดงการทำงานของสวิตช์เมื่อ $v_S < 0$ และ $i_L > 0$ 70

รูปที่ 3-32 รูปวงจรสมมูลของวงจรเอซีชอปเปอร์ 72

รูปที่ 3-33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิวตี้เร โชกับค่า TH_1 และ TH_2 74

รูปที่ 3-34 การต่อวงจรวงจรเครื่องรักษาระดับแรงดันแบบเอซี ชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้ สำหรับสภาพแรงดันไฟฟ้า 76

รูปที่ 3-35 รูปแสดงการกำหนดเฟสของหม้อแปลงเมื่อกระแสไหลเข้าด็อท 76

รูปที่ 3-36 รูปแสดงการกำหนดเฟสของหม้อแปลงเมื่อกะแสไหลออกจากด็อท 76

รูปที่ 3-37 แสดงทำงานของเครื่องรักษาระดับแรงดันในกรณีที่แรงดันที่โหลดมีค่า ต่ำกว่า 220 โวลต์ 77

รูปที่ 3-38 แสดงทำงานของเครื่องรักษาระดับแรงดันในกรณีที่แรงดันที่โหลดมีค่า มากกว่า 220 โวลต์ 78

รูปที่ 3-39 แสดงทำงานของเครื่องรักษาระดับแรงดันในกรณีแรงดันที่แหล่งจ่ายเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

220โวลต์ 79
รูปที่ 3-40 บล็อกแสดงการทำงานในส่วนของการควบคุมการทำงาน 80
รูปที่ 3-41 รูปวงจรการต่อใช้งานไอซี TL 494 81
รูปที่ 3-42 รูป่วงจรสร้างสัญญาณ Zero Crossing 81
รูปที่ 3-43 รูปวงจรตรวจจับแรงดันเกิน / แรงดันตก 82
รูปที่ 3-44 รูปวงจรป้อนกลับในส่วนของการปรับค่าดิวตี้ไซเกิล 82
รูปที่ 3-45 รูปวงจรรวมสัญญาณการควบคุมการทำงานของคอนเวอเตอร์ 2 83
รูปที่ 3-46 รูปวงจรรวมสัญญาณการควบคุมการทำงานของคอนเวอเตอร์ 1 83
รูปที่ 3-47 รูปวงจรตรวจจับขอบของสัญญาณแรงดัน 84
รูปที่ 4-1 วงจรทดลองของเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า 86
รูปที่ 4-2 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่ 20 kHz 88
รูปที่ 4-3 สัญญาณที่ทดลองจริงที่ใช้ในการเปรียบเทียบ เมื่อ V_{REF} = 0 V 88
รูปที่ 4-4 สัญญาณที่ได้จากการทดลองจริง เมื่อ V_{REF} = 0 V 89
รูปที่ 4-5 สัญญาณที่ได้จากโปรแกรม Orcad 9.1 เมื่อ V_{REF} = 0 V 89
รูปที่ 4-6 สัญญาณที่ได้จากการทดลองจริง เมื่อ V_{REF} = 1.5 V 90
รูปที่ 4-7 สัญญาณที่ได้จากการทดลองจริง เมื่อ V_{REF} = 1.5 V 90
รูปที่ 4-8 สัญญาณที่ได้จากโปรแกรม Orcad 9.1 เมื่อ V_{REF} = 1.5 V 91
รูปที่ 4-9 สัญญาณที่ได้จากการทดลองจริง เมื่อ V_{REF} = 25 V 91
รูปที่ 4-10 สัญญาณที่ได้จากการทดลองจริง เมื่อ V_{REF} = 25 V 92
รูปที่ 4-11 สัญญาณที่ได้จากโปรแกรม Orcad 9.1 เมื่อ V_{REF} = 2.5 V 92
รูปที่ 4-12 วงจร Zero Crossing ในโปรแกรม Orcad 9.1 93
รูปที่ 4-13 สัญญาณที่ได้จากการทดลองจริง 94
รูปที่ 4-14 สัญญาณที่ได้จากการทดลองจริง 94
รูปที่ 4-15 แรงดัน Zero Crossing ที่ได้จากโปรแกรม Orcad 9.1 95
รูปที่ 4-16 วงจร Dead Time ในโปรแกรม Orcad 9.1 96
รูปที่ 4-17 สัญญาณ Dead Time ที่ได้จากการทดลองจริง เมื่อ V_{REF} = 0 V 96
รูปที่ 4-18 สัญญาณที่ได้จากวงจร Dead Time ในโปรแกรม Orcad 9.1 เมื่อ V_{REF} = 0 V 97
รูปที่ 4-19 สัญญาณ Dead Time ที่ได้จากการทดลองจริง เมื่อ V_{REF} = 1.5 V 97
รูปที่ 4-20 สัญญาณที่ได้จากวงจร Dead Time ในโปรแกรม Orcad 9.1 เมื่อ V_{REF} = 1.5 V 98
รูปที่ 4-21 สัญญาณ Dead Time ที่ได้จากการทดลองจริง เมื่อ V_{REF} = 2.5 V 98
รูปที่ 4-22 สัญญาณที่ได้จากวงจร Dead Time ในโปรแกรม Orcad 9.1 เมื่อ V_{REF} = 2.5 V 99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4-23 วงจร Drive & Isolate โปรแกรม Orcad 9.1 100
รูปที่ 4-24 สัญญาณ Drive & Isolate ที่ได้จากการทดลองจริง เมื่อ V_{REF} = 0 V. 100
รูปที่ 4-25 สัญญาณ Drive & Isolate ที่ได้จากโปรแกรม Orcad 9.1 เมื่อ V_{REF} = 0 V. 101
รูปที่ 4-26 สัญญาณ Drive & Isolate ที่ได้จากการทดลองจริง เมื่อ V_{REF} = 2 V. 101
รูปที่ 4-27 สัญญาณ Drive & Isolate ที่ได้จากโปรแกรม Orcad 9.1 เมื่อ V_{REF} = 2 V. 102
รูปที่ 4-28 วงจรรวมสัญญาณที่ได้จากโปรแกรม Orcad 9.1 103
รูปที่ 4-29 สัญญาณเอาท์พุต ที่ได้จากการทดลองจริง เมื่อ V_{REF} = 0 V. 104
รูปที่ 4-30 สัญญาณเอาท์พุต ที่ได้จากโปรแกรม Orcad 9.1 เมื่อ V_{REF} = 0 V. 104
รูปที่ 4-31 สัญญาณ เอาท์พุต ที่ได้จากการทดลองจริง เมื่อ V_{REF} = 2 V. 105
รูปที่ 4-32 สัญญาณ เอาท์พุต ที่ได้จากโปรแกรม Orcad 9.1 เมื่อ V_{REF} = 2 V. 105
รูปที่ 4-33 วงจรคอนโทรลของชุดกลับขั้ว ที่ได้จากโปรแกรม Orcad 9.1 106
รูปที่ 4-34 สัญญาณอินพุตขณะกลับสวิทช์การทำงานจาก S1,S2 off เป็น on 107
รูปที่ 4-35 สัญญาณอินพุตขณะกลับสวิทช์การทำงานจาก S1,S2 on เป็น off 107
รูปที่ 4-36 รูปคลื่นแรงดัน v_b ที่วัดได้ในขณะที่ยังไม่ต่อคาปาซิเตอร์สนับเบอร์ C_b 109
รูปที่ 4-37 แรงดัน v_b ที่วัดได้ภายหลังการต่อคาปาซิเตอร์สนับเบอร์ C_b 109
รูปที่ 4-38 รูปคลื่นแรงดัน v_r ที่ยังไม่ผ่านฟิลเตอร์ และ v_c ที่ผ่านฟิลเตอร์แล้ว 110
รูปที่ 4-39 พัลส์ของแรงดันPWM v_r ที่ยังไม่ผ่านฟิลเตอร์และ v_c ที่ผ่านฟิลเตอร์ 111
รูปที่ 4-40 รูปคลื่นแรงดัน v_r ที่ยังไม่ผ่านฟิลเตอร์ 111
รูปที่ 4-41 รูปคลื่นแสดงการกลับขั้วแรงดันให้ขั้วของแรงดันชดเชย v_c ต่างเฟสกัน
กับแรงดันด้านอินพุต vs 112
รูปที่ 4-42 รูปคลื่นแสดงการกลับขั้วแรงดันให้ขั้วของแรงดันชดเชย v_c ให้มีเฟสตรงกัน
กับแรงดันด้านอินพุต v_s 113
รูปที่ 4-43 แสดงรูปคลื่นของแรงดันด้านอินพุต v_c (Trace1) และแรงดันชดเชย v_c
(Trace2)ในกรณีที่มีเฟสตรงกัน 113
รูปที่ 4-44 รูปคลื่นของแรงดันด้านอินพุต v_c (Trace1) และแรงดันชดเชย v_c
(Trace2) ในกรณีที่มีเฟสต่างกัน 114
รูปที่ 4-45 แสดงรูปคลื่นของแรงดันอินพุต(Trace2) และ แรงดันเอาท์พุต (Trace1)
โดยที่แรงดันอินพุตมีค่าต่ำสุดที่ -10% =198 โวลต์ 115
รูปที่ 4-46 แสดงรูปคลื่นของแรงดันอินพุต v_s (Trace2) และ แรงดันชดเชย v_c (Trace1)
ที่จ่ายออกมาจากหม้อ แปลงชดเชย ในการจ่ายแรงดันเสริม 115
รูปที่ 4-47 แสดงรูปคลื่นของแรงดันอินพุต (Trace2) และแรงดันเอาท์พุต (Trace1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่แรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ 200 โวลต์ 116
รูปที่ 4-48 แสดงรูปคลื่นของแรงดันอินพุต (Trace2) และแรงดันเอาท์พุต (Trace1)
โดยที่แรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ 205 โวลต์ 116
รูปที่ 4-49 แสดงรูปคลื่นของแรงดันอินพุต (Trace2) และแรงดันเอาท์พุต (Trace1)
โดยที่แรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ 210 โวลต์ 117
รูปที่ 4-50 แสดงรูปคลื่นของแรงดันอินพุต (Trace2) และแรงดันเอาท์พุต (Trace1)
โดยที่แรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ 215 โวลต์ 117
รูปที่ 4-51 แสดงรูปคลื่นของแรงดันอินพุต (Trace2) และแรงดันเอาท์พุต (Trace1)
โดยที่แรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ 220 โวลต์ 118
รูปที่ 4-52 แสดงรูปคลื่นของแรงดันอินพุต v_s (Trace2) และแรงดันชดเชย v_c (Trace1)
ที่จ่ายออกมาจากหม้อแปลงชดเชย โดยที่แรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ 220 โวลต์ 118
รูปที่ 4-53 แสดงรูปคลื่นของแรงดันอินพุต (Trace2) และแรงดันเอาท์พุต (Trace1)
โดยที่แรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ 225 โวลต์ 119
รูปที่ 4-54 แสดงรูปคลื่นของแรงดันอินพุต v_s (Trace2) และแรงดันชดเชย v_c (Trace1)
ที่จ่ายออกมาจากหม้อแปลงชดเชย ในการจ่ายแรงดันหักล้าง 119
รูปที่ 4-55 แสดงรูปคลื่นของแรงดันอินพุต (Trace2) และแรงดันเอาท์พุต (Trace1)
โดยที่แรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ 230 โวลต์ 120
รูปที่ 4-56 แสดงรูปคลื่นของแรงดันอินพุต (Trace2) และแรงดันเอาท์พุต (Trace1)
โดยที่แรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ 235 โวลต์ 120
รูปที่ 4-57 แสดงรูปคลื่นของแรงดันอินพุต (Trace2) และแรงดันเอาท์พุต (Trace2)
โดยที่แรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ 240 โวลต์ 121
รูปที่ 4-58 แสดงรูปคลื่นของแรงดันอินพุต (Trace2) และแรงดันเอาท์พุต (Trace1)
โดยที่แรงดันอินพุตมีค่าสูงสุดที่ +10% = 242 โวลต์ 121
รูปที่ 4-59 แสดงรูปคลื่นของแรงดันอินพุต (Trace2) และกระแสอินพุต (Trace1) 123
รูปที่ 4-60 แสดงรูปคลื่นของแรงดันเอาท์พุต (Trace2) และกระแสเอาท์พุต (Trace1) 124

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงงาน

ในปัจจุบันนี้มีโหลดทางไฟฟ้าหลายชนิดที่ต้องการระดับแรงดันใช้งานคงที่ เพื่อความแม่นยำในการทำงาน เช่น คอมพิวเตอร์, ระบบสื่อสาร หรือระบบควบคุม เป็นต้น ซึ่งการผิดปกติในระบบไฟฟ้าที่เกิดขึ้น เช่น การเกิดไฟตก/ไฟเกิน จะส่งผลโดยตรงต่อโหลดประเภทนี้ ทำให้เครื่องรักษาระดับแรงดันถูกนำมาใช้เพื่อรักษาระดับแรงดันและปรับสภาพแรงดันให้มีค่าคงที่ ซึ่งเครื่องรักษาระดับแรงดันรุ่นก่อนๆ หน้านี้เช่น การใช้วิธีการเปลี่ยนแท็ปหม้อแปลง (Tap Change), การใช้วิธีควบคุมมุมทริกสัญญาณเกทของไทริสเตอร์ (Phase Control) และ เอซีชอปเปอร์แบบสวิทซ์สองทาง (Bidirectional Switch AC Chopper) ซึ่งในแต่ละวิธีต่างก็มีข้อเสียอยู่บางส่วนดังนี้คือ

1.1.1 มี Filter ขนาดใหญ่

1.1.2 มีการบำรุงรักษามาก

1.1.3 มีการตอบสนองต่อโหลดช้า

1.1.4 มีการสูญเสียมาก

1.1.5 แรงดันเอาท์พุตเป็นไปตามแรงดันที่แหล่งจ่าย

แต่โครงงานนี้ได้เสนอแนวทางใหม่ในการรักษาระดับแรงดันให้คงที่โดยใช้หลักการของวงจรเอซีชอปเปอร์แบบสวิทซ์ทางเดียว (Unidirectional Switch AC Chopper) และหลักการของหม้อแปลงชดเชยแรงดันรวมเข้าด้วยกัน ทำให้สามารถควบคุมแรงดันที่โหลดให้คงที่ได้ตลอดย่านการทำงานของเครื่องรักษาระดับแรงดัน ซึ่งวิธีนี้จะมีข้อดีหลายประการ เช่น มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็ว ขนาดเล็ก มีประสิทธิภาพสูง การสูญเสียที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย การบำรุงรักษาต่ำ ซึ่งมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น สามารถควบคุมระดับแรงดันได้ค่อนข้างละเอียดจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจที่จะศึกษาต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 เพื่อเป็นการสร้างเครื่องรักษาระดับแรงดันต้นแบบ ในการรักษาระดับแรงดันที่ใช้การสวิทช์เป็นแบบสวิทช์ทางเดียว

1.2.2 เพื่อสร้างเครื่องรักษาระดับแรงดันโดยมีการนำอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาใช้ในการปรับระดับแรงดันให้แรงดันทางด้านเอาท์พุตมีค่าคงที่ตลอดเวลา

1.2.3 เพื่อทำให้สามารถทดแทน อุปกรณ์รักษาระดับแรงดันแบบดั้งเดิมที่ใช้กันอยู่

1.2.4 เพื่อเป็นการศึกษานำไปเป็นแนวทางในการที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพานิชต่อไป

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

เนื่องจากโครงงานเป็นการนำมาศึกษาครั้งแรก ดังนั้นขอบเขตของโครงงานจึงเน้นไปที่การทดสอบหลักการเบื้องต้นว่าการรักษาระดับแรงดัน โดยการใช้หม้อแปลงชดเชยนั้นสามารถรักษาระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันที่โหลดได้ดีเพียงใด และทดลองว่าเมื่อนำมาต่อใช้งานจริงจะมีระดับเปอร์เซ็นต์เรกูเรชั่น (% Regulation) เท่าใด รวมไปถึงการเก็บผลการทดลองในส่วนต่างๆเพื่อรวบรวมข้อมูลของโครงงานไว้สำหรับการพัฒนา และ ปรับปรุงให้ดีขึ้นให้โอกาสต่อไป โดยมีขนาดพิกัดของเครื่องรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเป็นดังนี้คือ

1.3.1 แรงดันขาเข้า 220V±10%

1.3.2 แรงดันขาออก 220V±2%

1.3.3 ความถี่ในการสวิทช์ชิ่ง 20 กิโลเฮิร์ท

1.3.4 จ่ายโหลด 500 วัตต์

1.3.5 ค่าตัวประกอบกำลังทางไฟฟ้า 0.8 ล้าหลัง

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

เนื่องจากโครงงานนี้เป็นการสร้างเครื่องต้นแบบของเครื่องรักษาระดับแรงดัน โดยใช้การสวิทช์แบบ สวิตช์ทางเดียวจึงเป็นการเสนอแนวคิดและที่มาของโครงงาน ทฤษฎีต่างๆที่ใช้อธิบายเพื่อให้ผู้ที่ต้องการศึกษาสามารถเข้าใจได้ง่ายขึ้น และเพื่อให้สามารถทำความเข้าใจได้ง่ายยิ่งขึ้นจึงจะอธิบายหลักการทำงานวงวงจรส่วนต่างๆ พร้อมกับการบันทึกค่าจากการทดลองมาอธิบายร่วมกับการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (OrCad 9.1) จำลองการทำงานอีกด้วย

1.5 หลักการทำงานเบื้องต้น

ในโครงงานนี้ได้ใช้หลักการของเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้ (AC chopper with reversible voltage control) ร่วมกับการชดเชยแรงดันด้วยหม้อแปลงโดยที่มีวงจรควบคุมทำหน้าที่สร้างสัญญาณขับเกทในรูปของ EPWM (Equal Pulse Width Modulation) ซึ่งก็คือสัญญาณ PWM ที่มีลักษณะรูปคลื่นสัญญาณพัลส์แบบสมมาตร ซึ่งสัญญาณขับเกทนี้จะไปสั่งงานให้วงจรสวิตช์กำลังที่ใช้มอสเฟทกำลัง (Power Mosfet) เป็นอุปกรณ์สวิทช์ชิ่งและมีการต่อวงจรสวิตช์แบบสวิตช์ทางเดียวซึ่งจะต่อสวิตช์เป็นวงจรแบบฟูลบริดจ์คอนเวอเตอร์ (Full Bridge Converter) สามารถทำให้กระแสไหลผ่านได้ทั้งช่วงบวกและลบ ซึ่งในวงจรเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้ จะใช้คอนเวอเตอร์ 2 ชุด คือ คอนเวอเตอร์1 ทำหน้าที่ในการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และคืนพลังงานจากโหลดคืนสู่แหล่งจ่าย ในช่วงการเกิดรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative) โดยมีตัวเก็บประจุทำหน้าที่เป็นสนับเบอร์ (Snubber) ป้องกันแรงดันเกินที่เกิดจากการเทิร์นออฟ (turn off) ของอุปกรณ์สวิทช์ชิ่ง เชื่อมกับคอนเวอเตอร์ 2 ซึ่งทำหน้าที่ในการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยใช้วิธีการช็อปเปอร์ซึ่งก็คือ การสับแรงดันที่ความถี่สูงแบบ PWM และจะสามารถกลับขั้วของแรงดันได้พร้อมกันไปในช่วงของการทำงานในแต่ละช่วงเวลา (20 mS) เพื่อให้สามารถสร้างแรงดันเสริมหรือหักล้าง และคืนพลังงานจากโหลดคืนสู่แหล่งจ่ายในช่วงการเกิดรีเจนเนอร์เรทีฟ และผ่านวงจรกรองความถี่สูงออกไป (Lowpass-filter) และให้ผ่านแต่ความถี่ต่ำที่ความถี่ใช้งานที่ 50 เฮิร์ท ซึ่งแรงดันนี้จะนำไปจ่ายให้กับขดปฐมภูมิของหม้อแปลงชดเชยแรงดัน ซึ่งเป็นหม้อแปลงลดระดับแรงดัน (Step down) โดยที่ด้านทุติยภูมิต่ออนุกรมอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับแหล่งจ่าย และโหลดทางไฟฟ้าเพื่อให้แรงดันทางด้านเอาท์พุตมีค่าคงที่ตลอดเวลาโดยใช้วิธีการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) ตรวจจับแรงดันทางด้านเอาท์พุตเพื่อนำไปควบคุมการทำงานในส่วนของวงจรสร้างแรงดันชดเชย

ดังนั้นการควบคุมแรงดันที่โหลดจึงสามารถทำได้โดยการให้หม้อแปลงชดเชยแรงดัน จ่ายแรงดันเสริมกับแหล่งจ่าย หรือ หักล้างกับแหล่งจ่าย เพื่อรักษาระดับแรงดันที่จ่ายให้กับโหลดคงที่ โดยการควบคุมแรงดันที่นำไปชดเชยจะขึ้นอยู่กับสัญญาณควบคุมป้อนกลับที่ได้จากชุดตรวจจับระดับแรงดันที่วัดจากแรงดันแหล่งจ่ายและทำให้ทราบว่าแรงดันตกหรือแรงดันเกิน และจะสั่งงานให้คอนเวอเตอร์ 2 สร้างแรงดันที่จะนำไปจ่ายให้กับหม้อแปลงชดเชยแรงดันจนแรงดันที่โหลดมีค่าคงที่

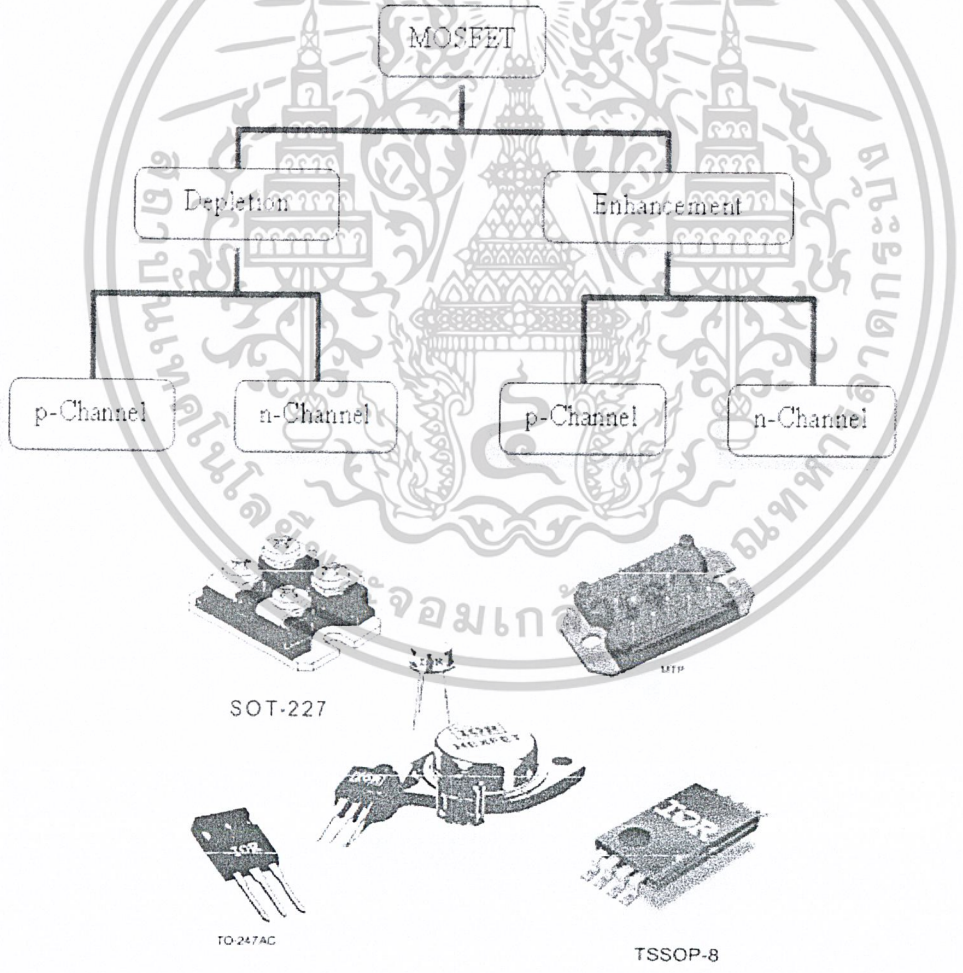
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีมอสเฟทพื้นฐาน

2.1.1 มอสเฟทกำลัง

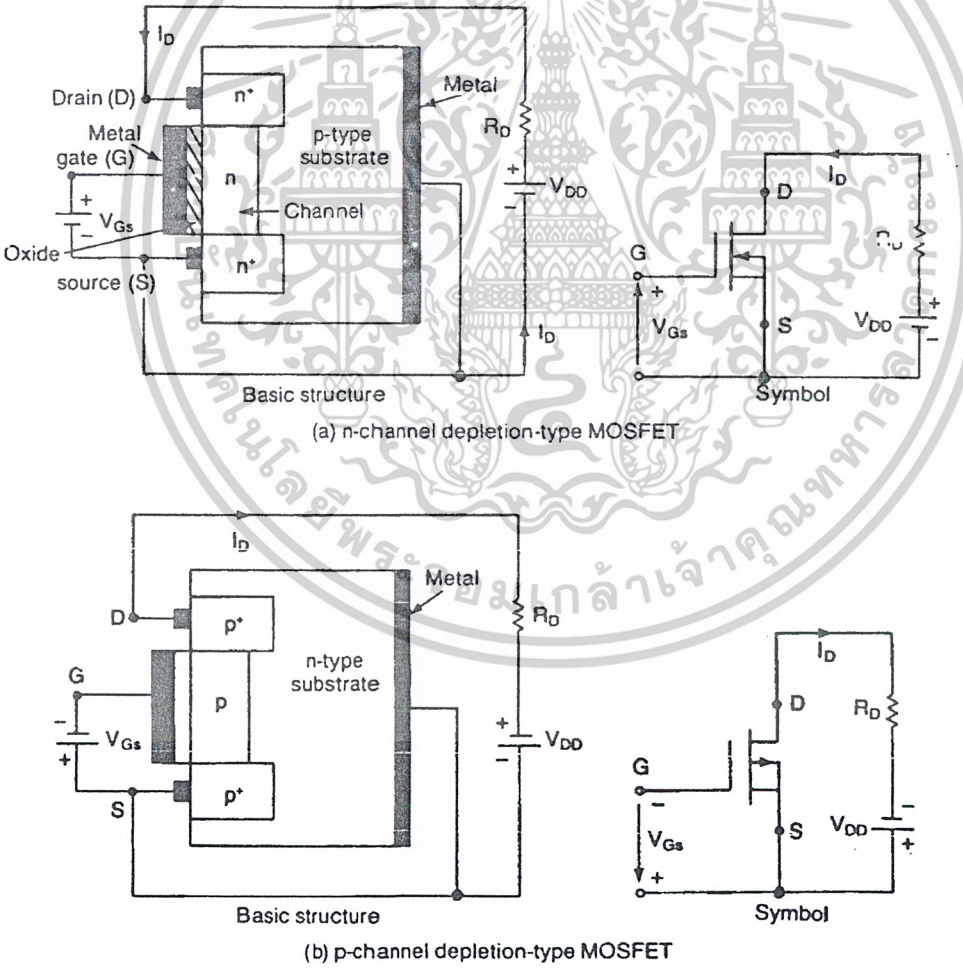
มอสเฟท (MOSFET) ย่อมาจาก Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor เป็นอุปกรณ์ที่ควบคุมด้วยระดับแรงดันต้องการกระแสอินพุตต่ำๆ ความเร็วในการสวิทช์ชิ่งสูงเวลาในการสวิทช์ชิ่งต่ำมากเป็น นาโนวินาที มอสเฟทกำลังได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านคอนเวอเตอร์ (Converter) ที่มีกำลังต่ำ, ความถี่สูง มอสเฟทกำลังไม่มีปัญหาเกี่ยวกับปรากฏการณ์ Secondary Breakdown เหมือนกับทรานซิสเตอร์ แต่อย่างไรก็ตามมอสเฟทก็มีปัญหาเกี่ยวกับไฟฟ้าสถิตและต้องการการเก็บรักษาเป็นพิเศษ



รูปที่ 2-1แสดงประเภทของมอสเฟตกำลังในลักษณะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอสเฟทมีด้วยกันอยู่ 2 ชนิดคือ (1) Depletion MOSFETs และ (2) Enhancement MOSFETs Depletion MOSFET แบบn-channel จะมีโครงสร้างที่เป็นสารซิลิกอนชนิด p-typeดังรูป 2-2a และถูกโด๊ปด้วยสารซิลิกอนแบบ n^+ ซึ่งมีความต้านทานต่ำแกทจะถูกแยกทางไฟฟ้าออกจาก channelด้วยชั้นของออกไซด์บางๆขาทั้ง 3 ของมอสเฟทมีชื่อเรียกว่า เกท (gate) เดรน (drain) และ ซอร์ส (source) แรงดันที่เกทกับซอร์ส (V_{GS}) นั้นจะบวกหรือลบก็ได้ ถ้า V_{GS} เป็นลบอิเล็กตรอนบางส่วนในพื้นที่ n-Channel จะถูกผลักดันออกไปและบริเวณปลอดพาหะจะถูกสร้างขึ้นที่ด้านล่างของชั้นออกไซด์เป็นผลให้ channelแคบลงความต้านทานระหว่างเดรนและซอร์สจะสูงขึ้น(R_{DS}) ถ้า V_{GS}มีค่าเป็นลบมากพอที่ทำให้channel ปลอดพาหะอย่างสมบูรณ์ซึ่งทำให้ R_{DS} มีค่าสูงขึ้นจนไม่มีกระแสไหลจากเดรนไปยังซอร์ส I_{DS} แล้วแรงดัน V_{GS} ดังกล่าวเรียกว่า Pinch-off Voltage เมื่อ V_{GS} เป็นบวก channelจะเริ่มกว้างมากขึ้น I_{DS} เพิ่มขึ้นเนื่องจาก R_{DS} ลดลงสำหรับในDepletion MOSFETแบบ p-channel จะมีขั้วของ V_{GS} , I_{DS} , R_{DS} จะตรงข้ามกันกับ n-channel



รูปที่ 2-2 a) N-channel depletion - type MOSFET

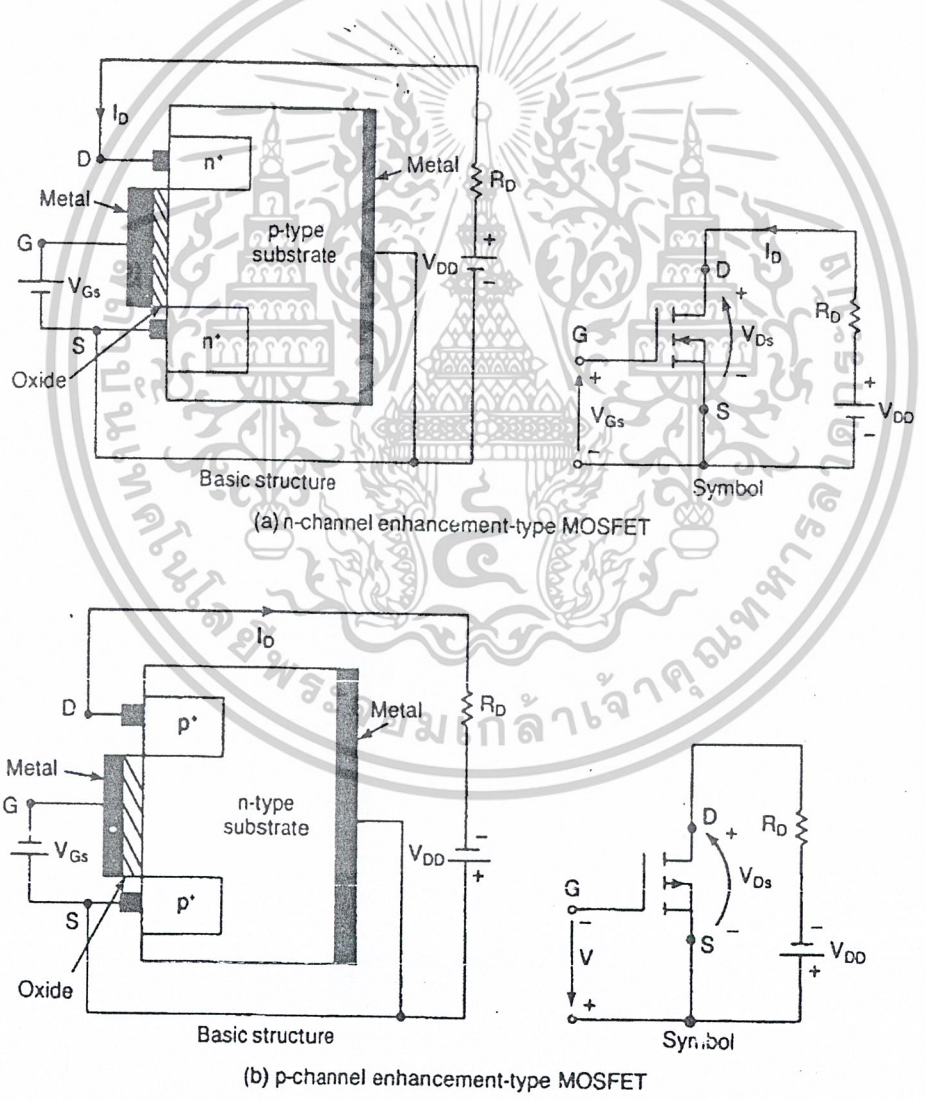
b) P-channel depletion - type MOSFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ลักษณะสมบัติที่ Steady State ของมอสเฟทกำลัง

มอสเฟทเป็นอุปกรณ์ที่ควบคุมได้ด้วยแรงดันไฟฟ้า ซึ่งมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์สูงมากทำให้กระแสเกทไหลต่ำมากเป็น นาโนแอมแปร์ อัตราการขยายกระแส ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างกระแสเดรน I_D กับกระแสเกท I_G โดยทั่วไปแล้วจะมีค่าสูงถึง 10^9 อย่างไรก็ตามอัตราขยายกระแสดงไม่ได้เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญค่าทรานส์คอนดักแตนซ์เป็นอัตราส่วนระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกทจะเป็นพารามิ เตอร์ที่สำคัญกว่า

ลักษณะโอนย้ายของมอสเฟทแบบ N-channel และ p-channel แสดงดังรูปที่ 2-4 และ รูปที่ 2-5 จะเป็นลักษณะทางเอาท์พุตของ Enhancement MOSFETแบบ n-channelซึ่งจะมีการทำงานใน 3 บริเวณ คือ (1) บริเวณ cut - off เมื่อ $V_{GS} < VT$ (2) บริเวณ Pinch - off เมื่อ $V_{DS} > (V_{GS} - V_T)$ และ (3) บริเวณเชิงเส้น เมื่อ $V_{DS} > (V_{GS} - V_T)$



รูปที่ 2-3 a) n- channel enhancement -type MOSFET

b) p- channel enhancement -type MOSFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

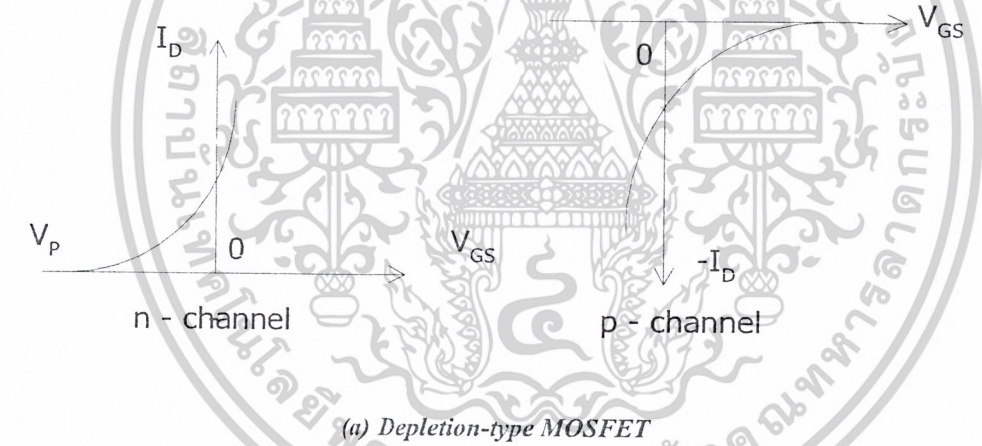
การPinch – off จะเกิดขึ้นเมื่อ $V_{DS} = V_{GS} - V_T$ ในบริเวณเชิงเส้นกระแส I_Dจะเปลี่ยนไปโดยเป็นสัดส่วนกับแรงดัน V_{DS} เนื่องจากกระแสเดรนที่สูงและแรงดันเดรนที่ต่ำ ทำให้มอสเฟตกำลังทำงานได้ในบริเวณเชิงเส้นสำหรับการสวิทช์ชิ่ง ในบริเวณกระแสเดรนจะมีค่าคงที่เมื่อแรงดัน V_{DS} เพิ่มขึ้น ในบริเวณนั้นมอสเฟทจึงถูกนำไปใช้ในการขายแรงดันมอสเฟททั้ง Depletion – type และ Enhanment–type จะมีโมเดล Steady – State ดังรูปที่ 2-6 ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ (g_m)หาได้ดังนี้

$$g_m = \frac{\Delta V_{DS} * V_{DS}}{\Delta V_{GS}} \approx Cons\tan t \qquad (2.1)$$

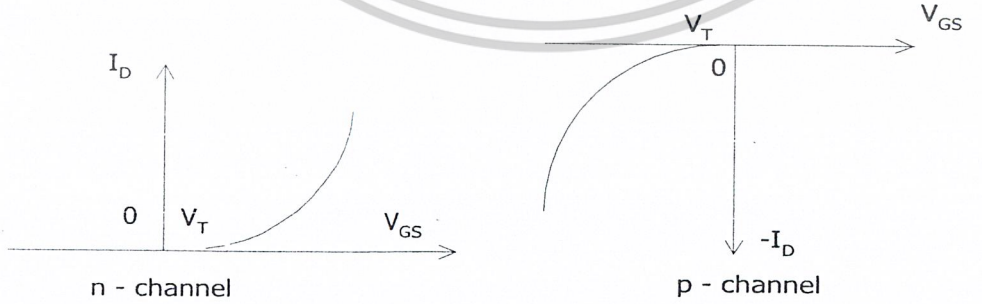
ความต้านทานด้านเอาท์พุต ,$r_o = R_{DS}$ หาได้จาก

$$R_{DS} = \frac{\Delta V_{DS}}{\Delta I_D} \qquad (2.2)$$

R_{DS} ในบริเวณ Pinch – off จะมีค่าสูงเป็นเมกกะโอห์มและในบริเวณเชิงเส้นจะมีค่าต่ำเป็นมิลลิโอห์ม



(a) Depletion-type MOSFET

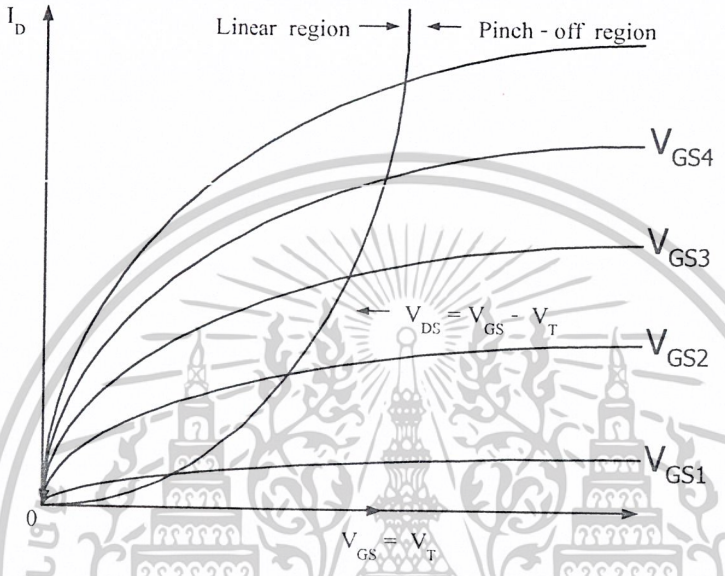


(b) Enhancement-type MOSFET

รูปที่ 2-4 ลักษณะสมบัติโอนย้ายของมอสเฟทแบบ N – channel และ P – channel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

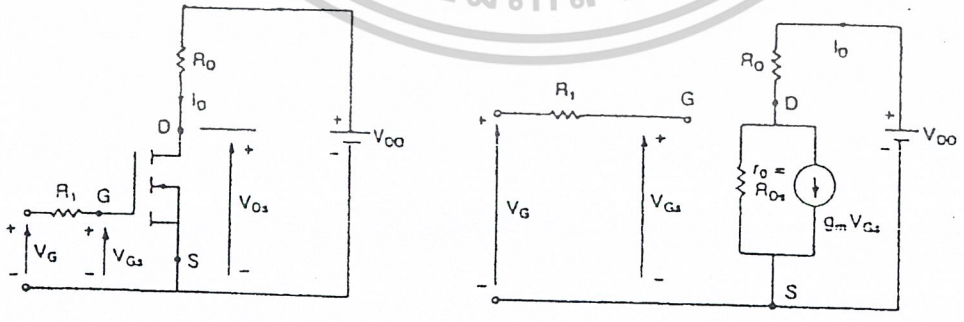
สำหรับDepletion MOSFETจะทำงานที่แรงดันเกทเป็นบวกหรือเป็นลบก็ได้ แต่Enhancement MOSFETจะตอบสนองที่แรงดันเกทเป็นบวกเท่านั้น มอสเฟทที่ใช้งานโดยทั่วๆไปแล้วนั้นจะเป็นชนิด Enhancement MOSFET อย่างไรก็ตาม Depletion MOSFET ก็ยังมีการประยุกต์ใช้ในการออกแบบทางลอจิกที่ต้องการเข้ากันได้กับสวิทช์ DC หรือ AC ซึ่งยังคงทำงานอยู่ได้ เมื่อแหล่งจ่ายลอจิกตกลงจน V_{GS} เป็นศูนย์



รูปที่ 2-5 ลักษณะสมบัติทางเอาท์พุทของ Enhancement - type MOSFET

2.1.3 ลักษณะสมบัติการสวิทช์ชิ่ง

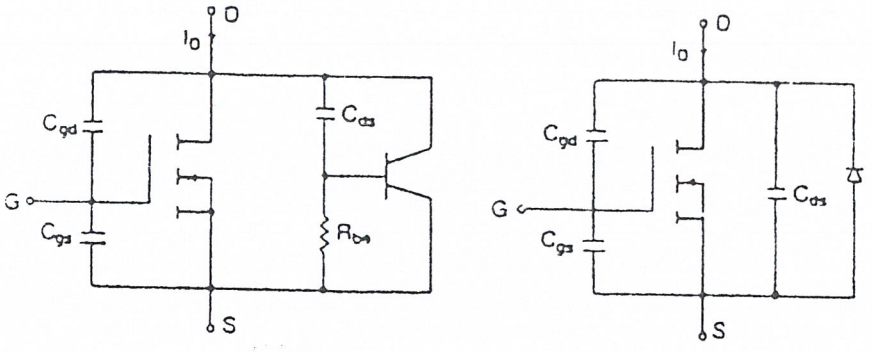
ถ้าปราศจากสัญญาณที่เกท Enhancement MOSFETจะถูกพิจารณาเป็นไดโอด 2ตัวต่อกันเป็นทรานซิสเตอร์ชนิด NPNโครงสร้างของเกทจะมีค่าความจุไฟฟ้าแฝงกับระหว่างเดรนและซอร์ส C_{GD} จะมี รอยทรานซิสเตอร์ต่อไบแอสกลับจากเดรนไปยังซอร์สและมีค่าความจุไฟฟ้า C_{DS}



(a) Circuit diagram (b) Equivalent circuit

รูปที่ 2-6 โมเดลการสวิตชิ่งที่ Steady state ของมอสเฟท

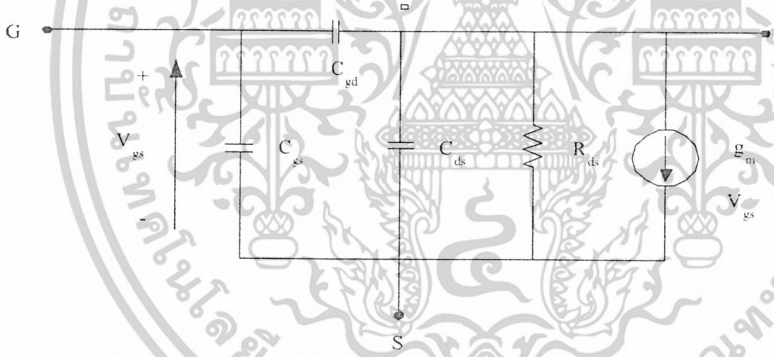
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) Parasitic bipolar (b) Internal diode

รูปที่ 2-7 โมเดลแฝงของ Enhancement - type MOSFET

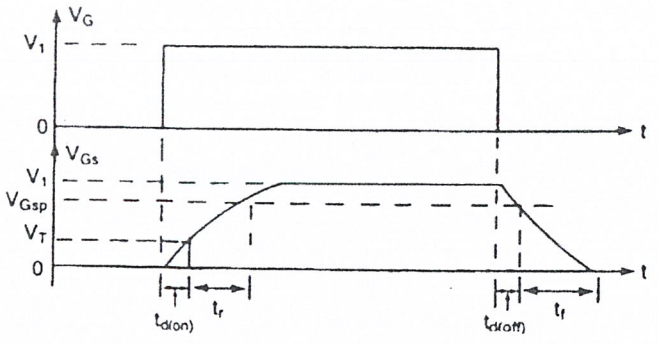
รูปที่2-7 แสดงวงจรเทียบเคียงของทรานซิสเตอร์แฝงที่ขนานกับมอสเฟท R_{BE} ที่บริเวณเบสกับอิมิเตอร์นั้นมีค่าต่ำ ด้วยเหตุนี้มอสเฟทจึงถูกพิจารณาให้มีไดโอดต่ออยู่ภายในโมเดลสวิทช์ชิ่งของมอสเฟทแสดงดังรูปที่ 2-8



รูปที่ 2-8 โมเดลสวิตชิ่งของมอสเฟท

จากรูปที่ 2-9 Turn – on delay time ,$t_{d\ (min)}$ เป็นเวลาที่ใช้ในการประจุ C_{gs} จนแรงดันถึงระดับ Threshold voltage rise time, t_r เป็นเวลาที่ใช้ในการประจุเกท จากแรงดันที่ Threshold voltage จนถึงแรงดันเกทสูงสุด V_{GS} ซึ่งใช้ในการขับมอสเฟทให้อยู่ในบริเวณเชิงเส้น Turn – off delay time ,$t_{d\ (off)}$ เป็นเวลาที่ใช้ในการคายประจุเกทจากระดับแรงดันเกท V_1 จนมอสเฟททำงานที่บริเวณ Pinch – off fall time, t_f เป็นเวลาที่ใช้ในการคายประจุเกทจากบริเวณ Pinch – off จนแรงดันถึงระดับ Threshold voltage ถ้า $V_{GS} < V_T$ มอสเฟทจะหยุดทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



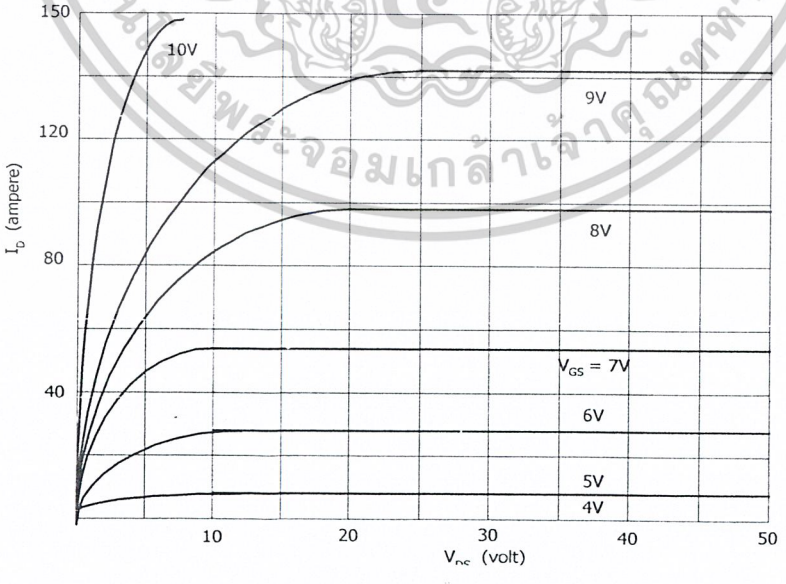
รูปที่ 2-9 รูปสัญญาณในการสวิตชิ่งของมอสเฟท

2.1.4 พารามิเตอร์ในการทำงานของมอสเฟท

Output characteristic เป็นกราฟของ I_D เทียบกับ V_{GS} ดังรูปที่ 2-10 จากกราฟแรงดัน Threoshold Voltage, V_T ที่มีค่าเท่ากับ 4 V และในการทำให้แรงดัน V_{GS} คงที่ไว้ทำให้กระแส I_D มีค่าเกือบจะคงที่แรงดัน Pinch – off เนื่องจากความต้านทานในขณะทำงาน On – State Resistanceมีค่า ($R_{DS} = \frac{\Delta V_{DS}}{\Delta I_D}$) โดยประมาณคงที่

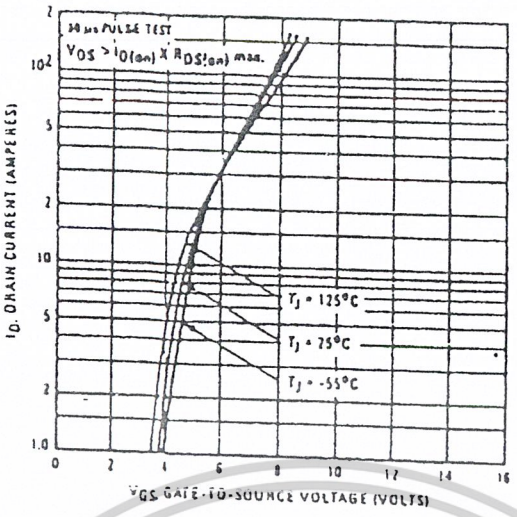
2.1.4.1 ลักษณะสมบัติเชิงเส้น Linear Characteristic

เป็นลักษณะสมบัติทางเอาท์พุตที่ค่า V_{DS} ต่ำๆ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการนำไปใช้ในงานสวิทช์ชิ่ง จากการที่ V_{DS} มีค่าต่ำในบริเวณเชิงเส้นจึงมักจะกำหนดเป็นลักษณะสมบัติอิ่มตัว Saturation Characteristic ดังรูป 2-13



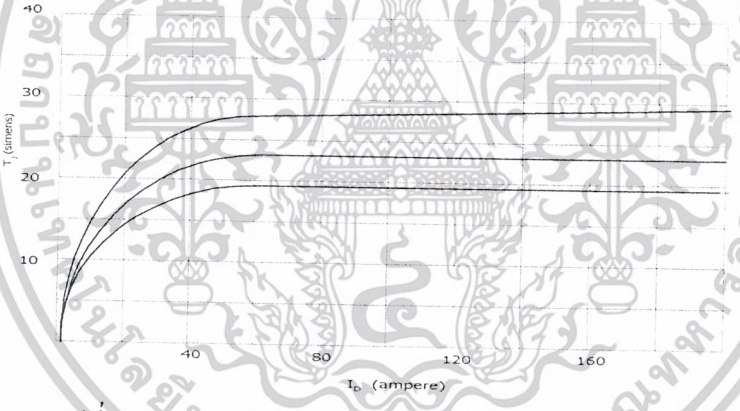
รูปที่ 2-10 ลักษณะสมบัติทางเอาท์พุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

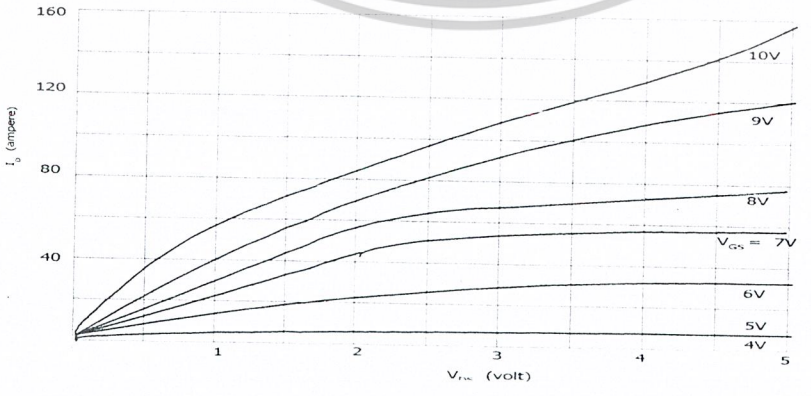


รูปที่ 2-11 ลักษณะสมบัติโอนย้าย

Transconductance, g_m เป็นค่าที่ได้จาก Transfer characteristic ดังรูปที่ 2-12

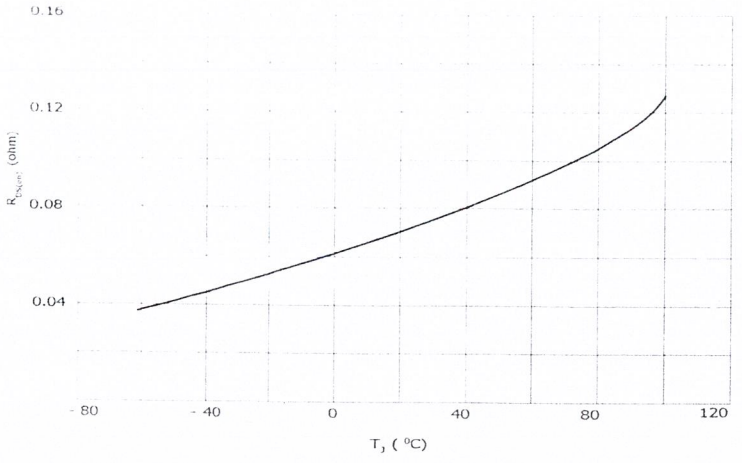


รูปที่ 2-12 ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์เทียบกับกระแสเดรน



รูปที่ 2-13 ลักษณะสมบัติอิ่มตัว

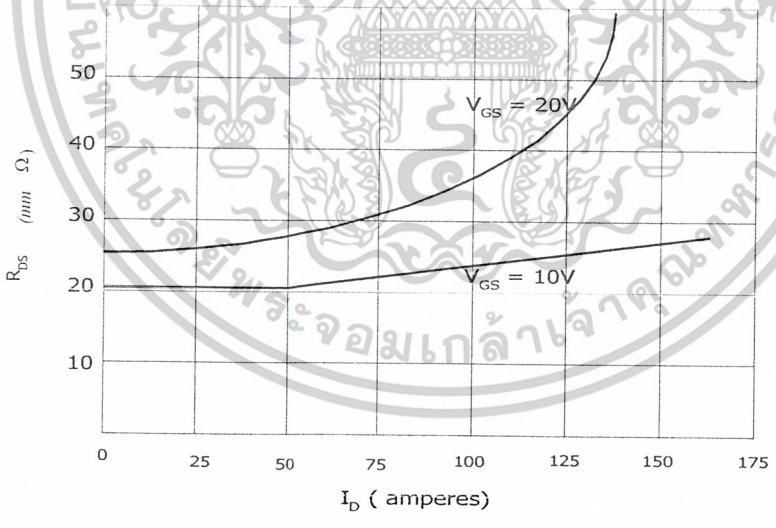
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-14 ค่าความต้านทานขณะทำงานเทียบกับอุณหภูมิที่รอยต่อ

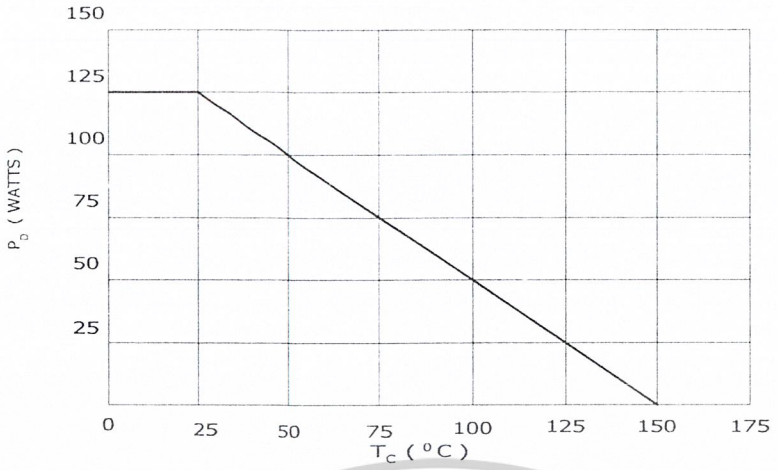
2.1.4.2 ความต้านทานขณะทำงาน On - State Resistance, R_{DS}

เป็นการแสดงถึงการสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าขณะที่มอสเฟทนำกระแส R_{DS} จะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นเมื่ออุณหภูมิที่รอยต่อเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2-14 การเพิ่มขึ้นของ R_{DS} ที่ค่า I_D และ V_{DS} ต่างๆกัน ดังรูป 2-15 จะไม่เป็นเชิงเส้น กำลังไฟฟ้าสิ้นเปลือง $P_D = R_{DS} I_D^2 = V_{DS} I_D$ ซึ่งจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ตัวถังเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2-16



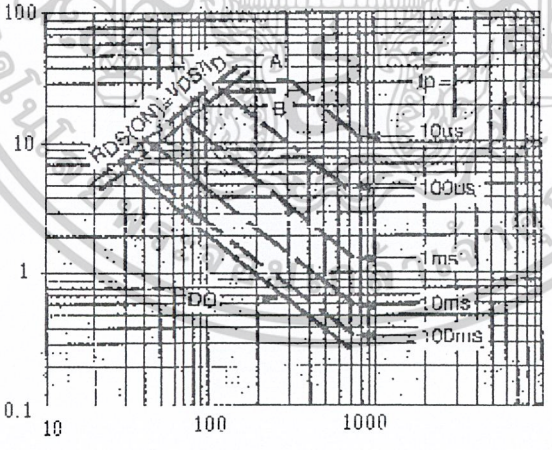
รูปที่ 2-15 ค่าความต้านทานขณะทำงานเทียบกับกระแสเดรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเทียบกับอุณหภูมิที่ตัวถัง

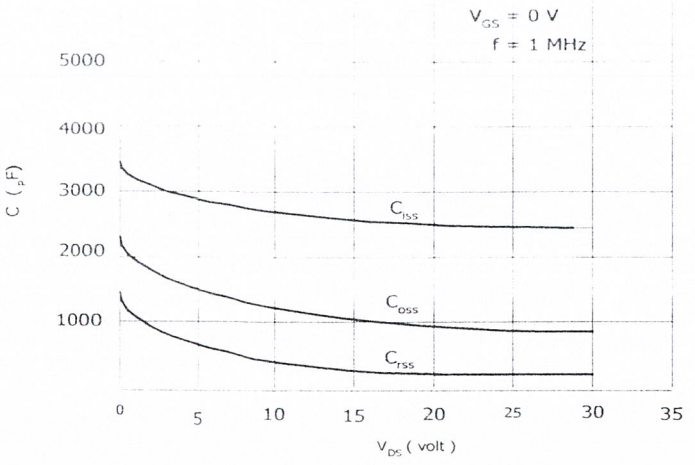
พื้นที่การทำงานที่ปลอดภัย Safe operating area,SOAแสดงดังรูปที่ 2-17 ซึ่งจะแสดงค่าของ I_D สูงสุดกับค่าของ V_{DS} สูงสุด ในขณะที่มอสเฟทสวิทช์ปิดวงจรและสวิทช์เปิดวงจรโดยจะเป็นขีดจำกัดทางอุณหภูมิ สำหรับมอสเฟทจะไม่มีปรากฏการณ์ Second breakdown แต่จะมีข้อจำกัดของกระแส I_D ที่ค่า V_{DS} ต่ำๆ เนื่องจากความต้านทานในขณะทำงานมากขึ้น สำหรับการทำงานในช่วงสั้นๆขอบเขตของ SOA จะกว้างขึ้นคือ I_D และ V_{DS} มีค่ามากขึ้นนั่นเอง โดยปกติ SOA จะกำหนดไว้ที่ T = 150°C



รูปที่ 2-17 พื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยสูงสุด

ค่าความจุทางด้านอินพุตและเอาท์พุต บริษัทผู้ผลิตจะกำหนดค่าของ (1) ความจุไฟฟ้าใช้งานทางด้านอินพุต $C_{iss} = C_{gd} // C_{gs}$ (2) ความจุไฟฟ้าใช้งานทางด้านเอาท์พุต $C_{oss} = C_{ds} // C_{gd}$ และ (3) ความจุไฟฟ้าโอนย้าย $C_{rss} = C_{gd}$ ความจุไฟฟ้าเหล่านี้ขึ้นอยู่กับ V_{DS} ดังรูป 2-18

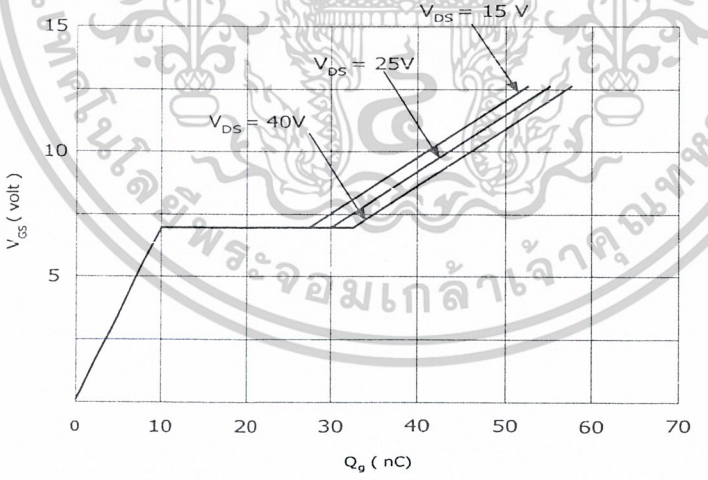
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-18 ค่าความจุไฟฟ้าเทียบกับแรงดัน V_{DS}

ประจุไฟฟ้าเกท Q_g ในช่วงสวิทช์ปิดวงจรความจุไฟฟ้าด้านอินพุตจะถูกประจุและคายประจุ การสะสมประจุไฟฟ้าที่ความจุไฟฟ้าทางด้านอินพุต ขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้า V_{GS} ดังรูปที่ 2-19 การสูญเสียทางด้านสวิทช์ซึ่ง เนื่องจากแรงดันเกทมีค่าดังนี้

$$P_D = V_{GS} Q_g f_S \tag{2.3}$$



รูปที่ 2-19 ค่าประจุไฟฟ้าเกท เทียบกับแรงดัน

2.1.5 การออกแบบวงจรขับ (Driving Circuit)

จากลักษณะสมบัติการทำงานที่ดีของมอสเฟทกำลังทำให้สามารถทำงานที่ความถี่สูงมากๆได้ ในการออกแบบต้องมีข้อระวังเกี่ยวกับปัญหาการออสซิเลตเมื่อใช้งานที่ความถี่สูง มีอยู่ 2 ประการคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ความยาวของตัวนำที่ต่อไปยังขั้วของมอสเฟทจะต้องสั้นที่สุดโดยเฉพาะที่ขาเกทถ้าไม่สามารถที่จะใช้ตัวนำที่สั้นได้จะต้องใช้เฟอร์ไรต์บีด (Ferrite bead) หรือตัวต้านทานค่าต่ำๆ R_1 ต่ออนุกรมกับขาเกทของมอสเฟทดังรูปที่ 2-20

2. เนื่องจากมอสเฟทมีอินพุตอิมพีแดนซ์ที่มีค่าสูงมากดังนั้นแหล่งจ่ายของวงจรขับต้องมีมพีแดนซ์ ต่ำมากๆ เพื่อป้องกันการป้อนกลับแบบบวก ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดออสซิเลตได้ ณ จุดนี้ในขณะที่ ดีซีอินพุตอิมพีแดนซ์ของมอสเฟทมีค่าสูงมากค่าเอซีอินพุตอิมพีแดนซ์จะเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ ดังนั้นเวลาขาขึ้น (Rise Time) และเวลาขาลง (Fall Time) ของมอสเฟทจึงขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายวงจรขับด้วย

โดยค่าประมาณของเวลาขาขึ้นและเวลาขาลงจะได้จากสมการต่อไปนี้

$$t_r \text{ หรือ } t_f = 2.2\ R_g\ C_{iss} \qquad (2.4)$$

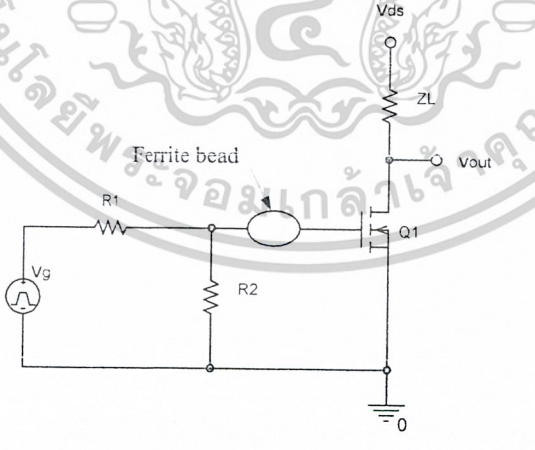
เมื่อ t_r คือ เวลาขาขึ้นของมอสเฟท, nS

t_f คือ เวลาขาลงของมอสเฟท,nS

R_g คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายวงจรขับ,Ω

C_{iss} คือ ค่าความจุไฟฟ้าทางด้านอินพุตของมอสเฟท,pF

จากสมการค่าที่ได้จะถูกต้องเมื่อ $R_2 >> R_g$ จากรายละเอียดที่ผ่านมาประกอบกับมอสเฟทไม่มีค่าเวลาสะสม (Storage Time) ทำให้ผู้ออกแบบสามารถที่จะปรับค่าเวลาขาขึ้นและเวลาขาลงได้ ค่าความต้านทาน R_1 ในรูปที่ 2-20ใช้ในการ Turn – off มอสเฟท



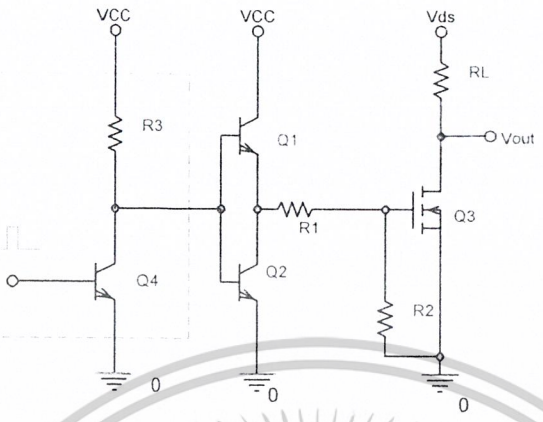
รูปที่ 2-20 การใช้งานมอสเฟทเป็นสวิตช์ แบบคอมมอนซอร์ส

2.1.5.1 การขับมอสเฟทด้วย TTL

แม้ว่าจะเป็นไปได้ที่จะขับมอสเฟทโดยตรงจากภาคเอาท์พุต TTL แต่ไม่แนะนำให้ใช้เนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรานซิสเตอร์ใน TTLทำงานในบริเวณเชิงเส้นเป็นเวลานานกว่าจะถึงจุดอิ่มตัว ทำให้มอสเฟทไม่สามารถทำงานที่จุดที่ดีที่สุดได้



รูปที่ 2-21 การขับมอสเฟทด้วย TTL

ในการปรับปรุงการทำงานในการสวิทช์ชิ่ง จะต้องเพิ่งวงจรบัฟเฟอร์เข้าไปเพื่อให้กระแสชิงค์และกระแสซอร์สไหลได้เร็วขึ้น วงจรอย่างง่ายที่ใช้คือ Emitter – follower ชนิด Complementary ดังรูปที่2-21 ทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 จะต้องมีค่าเกทสูง เพื่อที่จะจ่ายกระแสเนื่องจากผลของ Miller Effect ใน ขณะที่สวิทช์ปิดวงจรและสวิทช์เปิดวงจร ได้สมการต่อไปนี้จะใช้ในการคำนวณค่ากระแสที่ไหลในทรานซิสเตอร์แต่ละตัวในขณะที่สวิทช์ปิดวงจร (Q_1) และ ขณะสวิทช์เปิดวงจร(Q_2)กระแสประจุ I_{charge} จะได้มาจาก

$$I_{charge} = \frac{C_{gs} V_{gs}}{t_r} \tag{2.5}$$

$$C_{gs} = C_{iss} - C_{rss} \tag{2.6}$$

เมื่อ C_{iss} คือ ค่าความจุไฟฟ้าอินพุต, pF

C_{rss} คือ ค่าความจุไฟฟ้าโอนย้ายกลับ, pF

C_{gs} คือ ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างเกทกับซอร์ส, pF

V_{GS} คือ แรงดันระหว่างเกทกับซอร์ส, V

t_r คือ เวลาขาขึ้นของพัลล์อินพุต, nS

ถ้าสมมุติให้ความจุไฟฟ้าระหว่างเกทกับเดรนถูกคายประจุที่เวลาเดียวกันดังนั้น $t_r = t_f$ กระแสคายประจุสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

$$I_{dis} = \frac{C_{rss} V_{DS}}{t_s} \tag{2.7}$$

เมื่อ V_{DS} เป็นแรงดันระหว่างเดรนกับซอร์ส ในการคำนวณหากำลังไฟฟ้าสิ้นเปลืองที่ทรานซิสเตอร์ใช้สูตรต่อไปนี้

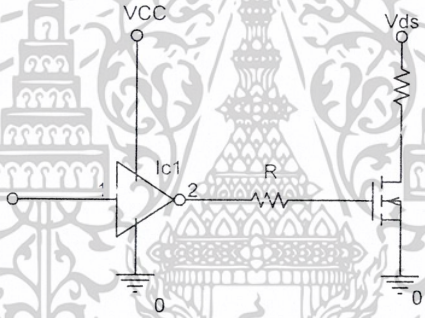
$$P = V_{CE} I_C t_r f \tag{2.8}$$

เมื่อ V_{CE} คือ แรงดันระหว่างคอลเลคเตอร์กับอิมิเตอร์ขณะอิ่มตัว

I_C คือ กระแสคอลเลคเตอร์

f คือ ความถี่การสวิทช์ชิ่ง

ในการขับมอสเฟทอีกวิธีหนึ่งที่ใช้แทนทรานซิสเตอร์คือใช้ไอซีพิเศษที่สามารถจ่ายกระแสได้สูงๆ ดังรูปที่ 2-22



รูปที่ 2-22 การใช้ IC จ่ายกระแสได้สูงต่อระหว่าง TTL กับมอสเฟท

2.1.5.2 การขับมอสเฟทด้วย CMOS

ด้วยเหตุผลที่มอสเฟทมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์สูง ทำให้สามารถนำ CMOS มาใช้ขับได้โดยตรง ดังรูปที่ 2-23a ซึ่งจะได้เวลาขาขึ้นและขาลงประมาณ 60 nS ในการลงเวลาสวิทช์ชิ่งจะต้องใช้กับบัฟเฟอร์ ชนิด Emitter – follower หรือใช้ CMOS ที่ขนานกันมากกว่า 1ชุดดังรูป 2-23b

2.1.5.3 การขับมอสเฟทด้วยออปแอมป์

มอสเฟทสามารถที่จะขับได้โดยตรงที่ภาคขยายของออปแอมป์ ซึ่งเป็นออปแอมป์ กำลังที่สามารถจ่ายกระแสได้สูง แต่อย่างไรก็ดียังมีขีดจำกัดคือออปแอมป์กำลังมีค่าสลูว์เรทต่ำ ทำให้แบนด์วิดท์ในการทำงานน้อยกว่า 25MHz

ในการทำให้ค่าแบนด์วิดท์และสลูว์เรทดีขึ้นเพื่อให้ขับมอสเฟทได้ดีนั้นจะต้องใช้บัฟเฟอร์ชนิด Emitter – follower วงจรขับที่ใช้ออปแอมป์โดยทั่วๆไปแสดงดังรูป 2-24

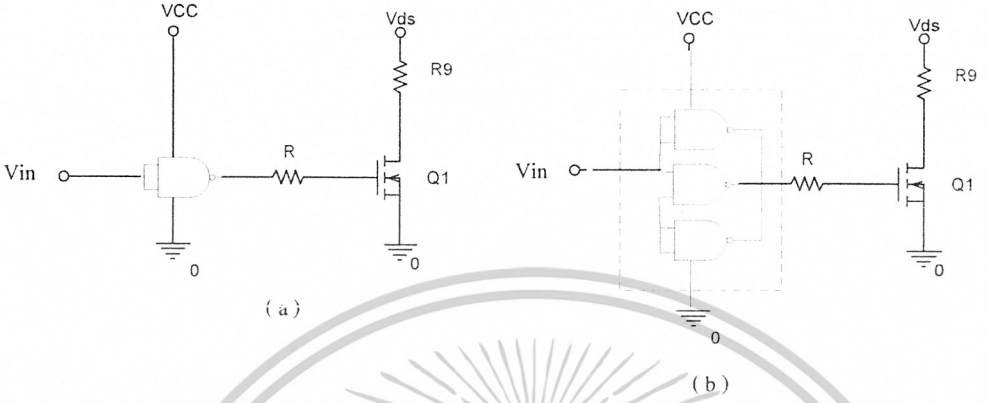
2.1.5.4 วงจรขับที่ไม่ได้อ้างอิงกับกราวนด์

ในการขับให้มอสเฟททำงานจนอิ่มตัวนั้น จะต้องมีแรงดันตกคร่อมระหว่างซอร์ส กับกราวนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

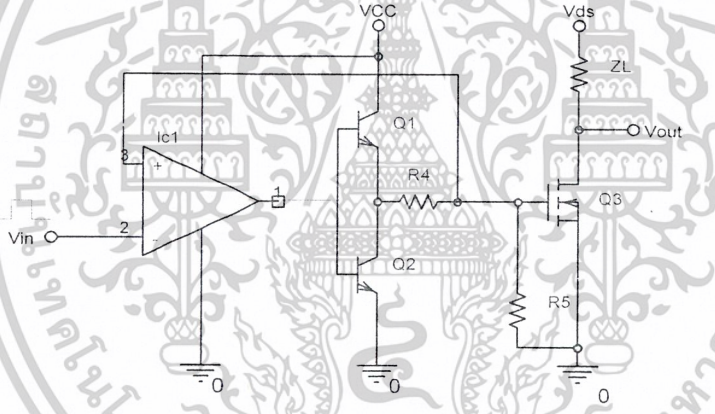
55586

และวงจรถูกต่อระหว่างเกทกับกราวนด์ทำให้แรงดันระหว่างเกทกับซอร์สลดลงในขณะที่ทำการTurn – on จากเหตุผลดังกล่าวทำให้ต้องใช้วงจรขับเกทที่ต้องอ้างอิงกับซอร์ส ซึ่งมีอยู่ 3 วิธีพื้นฐานที่ทำให้วงจรขับเกทลอยจากกราวนด์ได้ดังรูป



รูปที่ 2-23 a) การขับมอสเฟทด้วย CMOS

b) การใช้ CMOS ขนานกันเพื่อจ่ายกระแสเกทได้สูงขึ้น

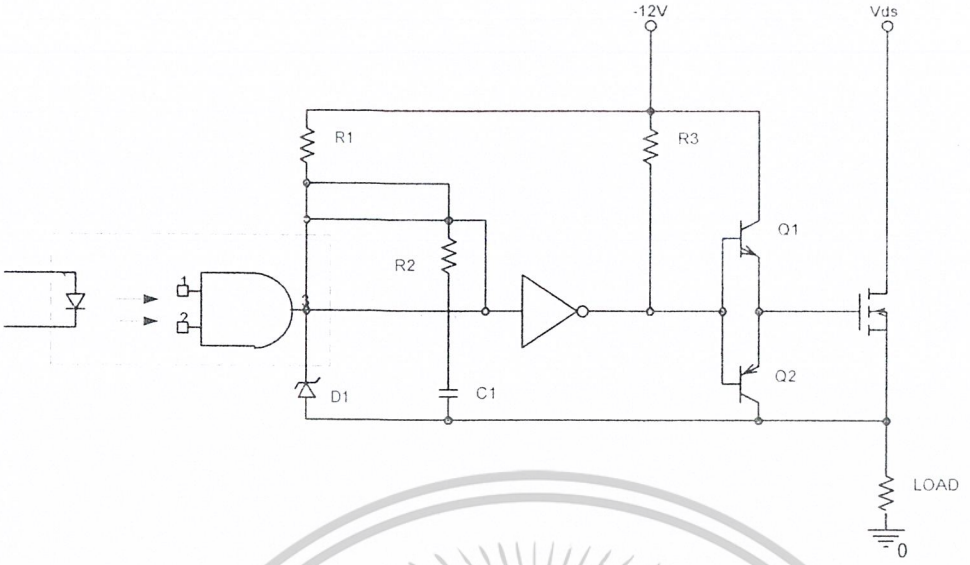


รูปที่ 2-24 การขับมอสเฟทด้วยออปแอมป์

1. โดยใช้ Opto coupler
2. โดยใช้หม้อแปลงความถี่
3. โดยใช้ ดีซีทูดีซีซอปเปอร์ที่มีหม้อแปลงแยกกันทางไฟฟ้า

Opto coupler ใช้ในการแยกกราวนด์ระหว่างซอร์สกับทางด้านอินพุตของ Opto couplerออกจาก กันOpto coupler gate (ที่เข้ากันได้กับ TTL) จะมีเวลาหน่วง 50 nS เวลาขาขึ้นและเวลาขาลง 25nS ทำให้ใช้งานที่ความถี่เป็นเมกกะเฮิรตซ์ได้ แต่จะมีวงจรขยายที่ภาคเอาท์พุต ดังรูปที่ 2-25

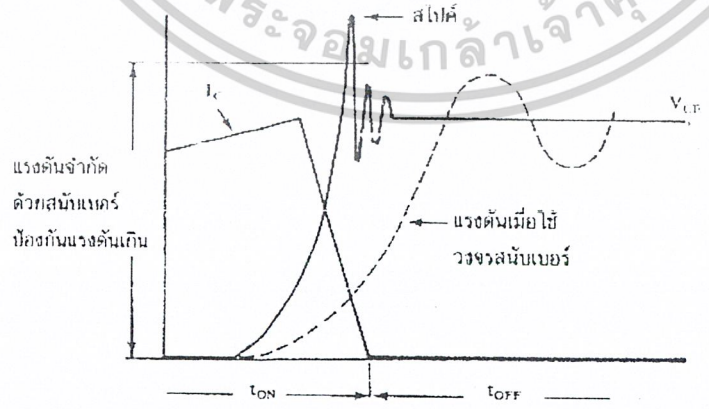
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-25 วงจรขับเกทโดยใช้ Opto coupler

2.2 วงจรสนับเบอร์ (Snubber Circuit)

วงจรสนับเบอร์เป็นส่วนจำเป็นและใช้ควบคู่ไปกับการใช้งานอุปกรณ์สวิทชิ่งเพื่อลงการเกิดกำลังงานสูญเสียแล้ป้องกันการเกิดความเสียหายที่จะเกิดกับอุปกรณ์สวิทชิ่ง ในวงจรขณะทำงานปกติ วงจรสนับเบอร์อาจแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ (1) วงจรสนับเบอร์ช่วงหยุดนำกระแส (turn – off Snubber) และ (2) วงจรสนับเบอร์ป้องกันแรงดันเกิน (clamp snubber) การใช้อุปกรณ์สวิทช์ชิ่งเป็นสวิทช์ในวงจรจะพบปัญหาที่สำคัญอยู่ 2 ประการคือ การเกิดการสูญเสียช่วงหยุดนำกระแสเนื่องจากแรงดันตกคร่อมที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและยังคงมีกระแสไหลอยู่ แรงดันสไปรห์เกิดขึ้นเนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำแฝงที่เกิดขึ้นในสายไฟของวงจรและค่าความเหนี่ยวนำแฝงในหม้อแปลง สวิทช์ชิ่งหรือโช๊ค

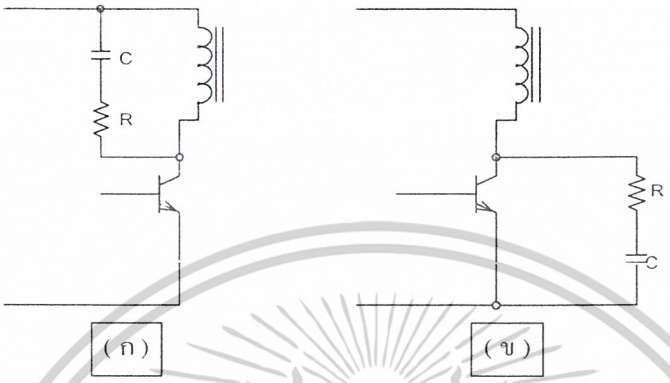


รูปที่ 2-26 แสดงลักษณะของกระแสและแรงดันเมื่อเริ่มหยุดนำกระแสของอุปกรณ์สวิตช์ชิ่ง

2.2.1 วงจรสนับเบอร์ช่วยหยุดนำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

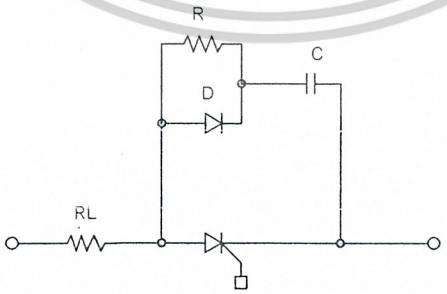
วงจรสนับเบอร์ช่วยหยุดนำกระแสจะช่วยหน่วงการเพิ่มขึ้นของแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิทซ์ชิ่ง เมื่อเริ่มหยุดนำกระแสให้เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในขณะที่กระแสไหลผ่านอุปกรณ์สวิทซ์ชิ่ง ยังมีค่ามาก (เส้นประในรูปที่ 2-26) ทำให้เกิดการสูญเสียของอุปกรณ์สวิทซ์ชิ่งในช่วงนี้ลงน้อยลงได้ การต่อวงจรสนับเบอร์ช่วยหยุดนำกระแสที่นิยมใช้อาจทำได้ดังรูปที่ 2-27



รูปที่ 2-27 แสดงลักษณะที่เป็นไปได้ในการต่อวงจรสนับเบอร์ RC ช่วงหยุดนำกระแส

2.2.2 วงจรสนับเบอร์ป้องกันแรงดันเกิน

การเกิดสไปรท์ขณะที่อุปกรณ์สวิทซ์ชิ่งเริ่มหยุดนำกระแส อาจทำให้เกิดการเสียหายขึ้นที่อุปกรณ์สวิทซ์ชิ่งได้ เนื่องจากสไปรท์ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมตัวมันมีค่าสูงขณะที่มีกระแสไหล มีผลทำให้อุปกรณ์สวิทซ์ชิ่งทำงานเกินกำลังจากพิกัดปลอดภัยของมัน วงจรสนับเบอร์ป้องกันแรงดันเกินจะทำหน้าที่หยุดแรงดันสไปรท์ที่เกิดขึ้นไม่ให้มีค่าเกินพิกัดปลอดภัยของอุปกรณ์สวิทซ์ชิ่ง การต่อสนับเบอร์ป้องกันแรงดันเกินที่นิยมใช้ทั่วไปมีดังรูปที่ 2-28



รูปที่ 2-28 วงจรสนับเบอร์อย่างง่ายสำหรับอุปกรณ์สวิทซ์ชิ่ง

2.2.3 การคำนวณค่า RC snubber

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรค่าเวลาคงที่เนื่องจากค่า R_L และC ซึ่งจะเป็นตัวพิจารณาอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดัน ขณะหยุดจ่ายแรงดันให้กับอุปกรณ์สวิทช์ชิ่ง โดยที่ R_L คือค่าความต้านทานโหลดต่ำสุดไม่ว่าจะเป็นหลอดไฟหรือขดลวดความร้อนขดลวดความต้านทานของมอเตอร์หรือขดลวดไพรมารี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยมีค่าความต้านทาน R เป็นตัวจำกัดกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิทช์ชิ่งขณะนำกระแสโดยการดิสชาร์จ ผ่าน C

สำหรับไดโอดนั้น จะเป็นตัวลัดวงจรค่าความต้านทาน R ในจังหวะแรงดันที่จ่ายให้กับอุปกรณ์สวิทช์ชิ่งมีค่าเพิ่มขึ้น อาจจะเป็นจังหวะที่หยุดจ่ายแรงดันพอดีหรือแรงดันที่อัตราเพิ่มขึ้นในปริมาณที่สูงในระยะเวลาที่สั้นจากผลกระทบต่อโหลดภายนอก แต่ไดโอดนี้ไม่สามารถจะละออกไปได้หากค่าความต้านทาน R มีค่าน้อยกว่าหรือมีค่าเท่ากับความต้านทานโหลด R_L และสำหรับวงจรที่ใช้ไตรแอกเป็นอุปกรณ์สวิทช์ชิ่งไดโอดจำเป็นต้องเปลี่ยนเป็น บริดจ์ไดโอดเสียก่อน

ค่าตัวเก็บประจุสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$C = \frac{I_{p(pk)} T_{off}}{2V_{in(max)}} \tag{2.9}$$

สำหรับค่าความต้านทาน R สามารถคำนวณได้จาก

$$R = T_{ON} / (2*3C) \tag{2.10}$$

$$P_O = C*(2V_{in})^2/2T \tag{2.11}$$

เมื่อ $I_{p(pk)}$ คือ กระแสโหลดสูงสุดที่ไหลผ่านมอสเฟท

T_{ON}, T_{Off} คือ ค่าพารามิเตอร์ของมอสเฟท(เปิดจาก Data Sheet)

T คือ คาบเวลาที่มอสเฟททำงานมีค่าเท่ากับ ($1/f_S$)

สำหรับเลขแฟคเตอร์ 0.5 ที่ใส่เข้าไปในสมการนั้นเผื่อไว้ก่อนเพื่อความปลอดภัยและอย่าลืมคำนวณค่าอัตราการทนกำลังของค่าความต้านทาน R ด้วย ส่วนการเลือกใช้ไดโอดให้เลือกใช้พิกัดเดียวกับอุปกรณ์สวิทช์ชิ่ง แต่ควรเผื่อให้อัตราทนได้ของกระแสสูงสุดสูงกว่า I_L ประมาณ 2-3 เท่า เพราะ ว่าไดโอดจะนำกระแสในช่วงเวลาสั้นๆ ขณะที่อุปกรณ์สวิทช์ชิ่งหยุดนำกระแสอาจเกิดความเสียหายได้ หากเกิดความเครียดที่รอยต่อมากเกินไป

2.3 ทฤษฎีออปแอมป์

2.3.1 วงจรขยายกลับเฟส (Inverting Amplifier)

ดังรูปที่ 2-29 ได้ถูกต่อเป็นวงจรขยายกลับเฟส เนื่องจากสัญญาณอินพุตที่ป้อนได้ป้อนเข้าขาอินพุตของออปแอมป์ โดยผ่านตัวต้านทาน R_1 ซึ่งเรียกว่าความต้านทานอินพุต สำหรับ R_2 คือความต้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

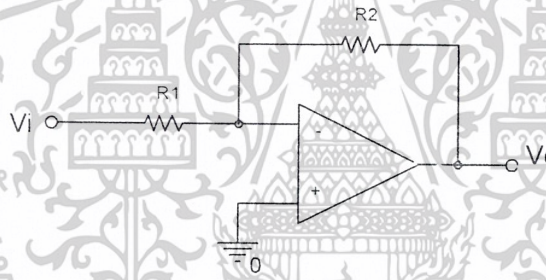
ทานป้อนกลับ (Feedback Element) ส่วนค่าแรงดันเอาท์พุตของวงจรจะได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$V_O = -(R_2/R_1)V_{in} \quad (2.12)$$

เครื่องหมายลบ (-)ในสมการหมายถึงเมื่อสัญญาณอินพุตเปลี่ยนแปลงไปทางด้านบวกสัญญาณเอาท์พุตจะเปลี่ยนแปลงไปทางด้านลบ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาท์พุตที่ได้จะต่างเฟสกันอยู่ 180 องศา สำหรับอัตราขยายแรงดันขณะป้อนกลับ A_{CL} จะได้

$$A_{CL} = V_O / V_{in}$$
$$= -R_2/R_1 \quad (2.13)$$

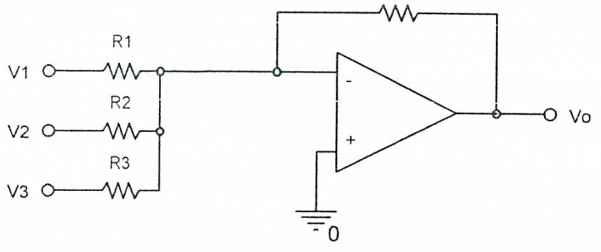
จากสมการ $V_O = -(R_2/R_1)V_{in}$ จะเห็นว่าอัตราขยายแรงดันของวงจรขยายกลับเฟสสามารถทำให้มีค่าน้อยกว่าหรือมากกว่า 1 ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทาน R_2 และ R_1 สำหรับกรณีที่ R_2 และR_1 มีค่าเท่ากันอัตราขยายแรงดันจะมีค่าเท่ากัน 1 และมักนิยมนำมาใช้กลับสัญญาณ



รูปที่ 2-29 แสดงวงจรขยายกลับเฟส (Inverting Amplifier)

2.3.2 วงจรขยายการบวก (Summing Amplifier)

ถ้าหากมีตัวต้านทานอินพุตหลายๆตัวนำมาต่อพร้อมๆกันเข้าที่ขาอินพุต ดังรูปที่ 2-30เรียกวงจรนี้ว่า วงจรขยายการบวก



รูปที่ 2-30 แสดงวงจรขยายการบวก (Summing Amplifier)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยวงจรนี้ถ้าหากมีแรงดันป้อนเข้ามาที่ขาอินพุตแต่ละขาพร้อมๆกันดังนั้นแรงดันเอาท์พุตจะได้ตามสมการดังต่อไปนี้

$$V_O = -\left[\left(\frac{R_F}{R_1}\right)V_1 + \left(\frac{R_F}{R_2}\right)V_2 + \left(\frac{R_F}{R_3}\right)V_3\right]$$

$$= -R_F\left[\left(\frac{V_1}{R_1}\right) + \left(\frac{V_2}{R_2}\right) + \left(\frac{V_3}{R_3}\right)\right] \qquad (2.14)$$

ซึ่งสมการจะคล้ายกับสมการ $V_O = -(R_2/R_1)V_{in}$ แต่จะต่างกันตรงที่มีอินพุตหลายจุดต่อเข้าด้วยกันถ้าหากตัวต้านทานป้อนกลับ R_F และตัวต้านทานอินพุต R_1 , R_2 ,R_3มีค่าเท่ากันดังนั้น แรงดันเอาท์พุต V_O จะมีค่าดังนี้

$$V_O = -(V_1+V_2+V_3) \qquad (2.15)$$

การเพิ่มอัตราขยายแรงดันสามารถทำได้โดยเพิ่มค่าความต้านทานป้อนกลับให้สูงขึ้นมากกว่าความต้านทานอินพุตที่มีค่าเท่ากัน 3 ตัวสำหรับค่าอิมพีแดนซ์ด้านอินพุตที่ได้ของวงจรที่ได้แต่ละอินพุตจะมีค่าเดียวกันกับความต้านทานด้านอินพุตของออปแอมป์

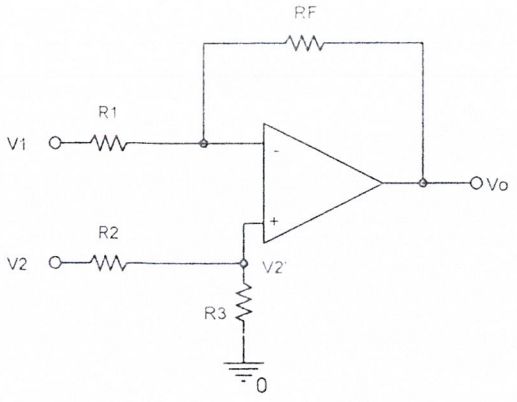
2.3.3 วงจรขยายผลต่าง (Difference Amplifier)

ดังรูปที่ 2-31 เป็นการแสดงวงจรขยายผลต่างที่มีแรงดันอินพุตป้อนเข้าที่ขาอินพุต – และขาอินพุต + ของออปแอมป์พร้อมๆกันและดูเหมือนว่าวงจรจะดูยุ่งยากแต่การทำงานยังอาศัยพื้นฐานของวงจรกลับเฟสและวงจรไม่กลับเฟส โดยอันดับแรกสมมุติว่าแรงดันอินพุต V_2 มีค่าเป็นศูนย์ และที่จุด V_2" ถูกลัดวงจรให้ลงกราวนด์ ดังนั้นวงจรที่ได้จะกลายเป็นวงจรขยายกลับเฟสเหมือนกับที่ได้แสดงดังรูป 2-29 และได้แรงดันเอาท์พุตตามสมการดังนี้

$$V_O = -(R_2/R_1)V_{in} \qquad (2.16)$$

ต่อมาปลดจุด V_2" ที่ได้ลงกราวนด์ออกและลัดวงจร V_1 ให้ลงกราวนด์บ้างดังนั้นวงจรและการทำงานจะกลายเป็นวงจรขยายไม่กลับเฟสที่มีแรงดันอินพุตป้อนเข้าที่ขาอินพุต + จริงๆเท่ากับ V_2" และมีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อม R_1 ซึ่งแปรผันตรงกับแรงดันอินพุต V_2 ด้วยค่าตามสมการของตัวแบ่งแรงดันดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-31 แสดงวงขยายผลต่าง

$$V_2'' = \left[\frac{R_3}{R_2 + R_3}\right] V_2 \tag{2.17}$$

และจากสมการแรงดันเอาท์พุตของวงจรขยายกลับเฟส คือ

$$V_O = \left[1 + \frac{R_F}{R_1}\right] V_2''$$

$$= \left[1 + \frac{R_F}{R_1}\right]\left[\frac{R_3}{R_2 + R_3}\right] V_2 \tag{2.18}$$

เมื่อรวมสมการเข้าด้วยกันดังนั้นจะได้แรงดันเอาท์พุตของวงจรขยายผลต่างที่มีแรงดันอินพุต 2 ค่าพร้อมๆกัน คือ V_1และ V_2 ดังนี้

$$V_O = -\left(\frac{R_F}{R_1}\right) V_1 + \left[1 + \left(\frac{R_F}{R_1}\right)\right]\left[\frac{R_3}{R_2 + R_3}\right] V_2 \tag{2.19}$$

โดยที่จำนวนแรกซ้ายมือของแรงดันเอาท์พุตที่ได้ จะเป็นเอาท์พุตขณะที่วงจรทำหน้าที่ขยายแบบกลับเฟส และจำนวนที่ 2 ขวามือของแรงดันเอาท์พุตที่ได้จะเป็นเอาท์พุตขณะที่วงจรทำหน้าที่ขยายแบบไม่กลับเฟส

ดังนั้นเมื่อนำวงจรตามรูปที่ 2-31 มาใช้งานจะได้อัตราขยายแรงดันเท่ากับ Gและความสัมพันธ์ระหว่างค่า G กับค่าความต้านทานทั้ง 4 จะเป็นดังนี้

$$R_F = GR_1 \tag{2.20}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_3 = GR_1 \quad (2.21)$$

$$R_2 = R_1 \quad (2.22)$$

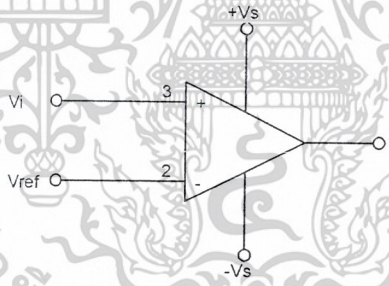
ถ้าความต้านทานทั้ง 4 ตัวมีค่าเท่ากันดังนั้นแรงดันเอาท์พุตจะเหลือเพียง

$$V_O = V_2 - V_1 \quad (2.23)$$

เพราะฉะนั้นแรงดันเอาท์พุตคือค่าผลต่างระหว่างแรงดันอินพุต V_2 กับ V_1 นั่นเอง

2.3.4 วงจรเปรียบเทียบ (Comparator Circuit)

เป็นวงจรที่ใช้สำหรับเปรียบเทียบค่าแรงดันอินพุตที่ป้อนเข้ามา กับแรงดันอ้างอิง (Reference Voltage) หรือ V_{REF} ที่ทราบค่าและมีค่าคงที่ โดยเอาท์พุตที่ได้จะเป็นเครื่องชี้แสดงให้เห็นว่า อินพุตที่ป้อนเข้ามามีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าแรงดันอ้างอิง ดังวงจรที่ได้แสดงดังรูป 2-32 ซึ่งแรงดันเอาท์พุตจะได้เป็นบวก ใกล้เคียงกับแรงดันแหล่งจ่ายกำลังค่าบวกเมื่อแรงดันอินพุตมีค่ามากกว่าแรงดันอ้างอิง และได้แรงดันเอาท์พุตเป็นลบใกล้เคียงกับแรงดันแหล่งจ่ายกำลังค่าลบ เมื่อแรงดันมีค่าน้อยกว่าแรงดันอ้างอิง

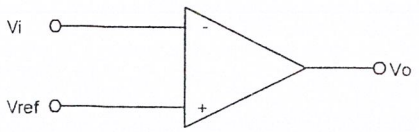


รูปที่ 2-32 แสดงวงจรเปรียบเทียบ

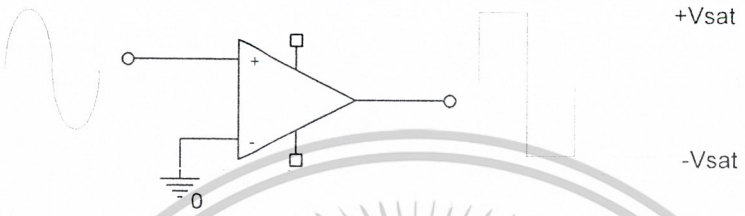
การนำออปแอมป์มาประกอบเป็นวงจรเปรียบเทียบจะเห็นว่าอัตราสลูว์เรทของออปแอมป์หรืออัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาท์พุต ขณะเปลี่ยนสถานะเมื่อเทียบกับแรงดันจะมีค่าสูงมากๆ มิฉะนั้นจะต้องนำวงจรภายนอกมาประกอบเป็นวงจรเพื่อเพิ่มอัตราสลูว์เรท แต่ถึงอย่างไรก็ตามยังมีออปแอมป์บางตัวที่ไม่ต้องนำวงจรภายนอกมาประกอบเป็นวงจรเพื่อเพิ่มค่านี้ซึ่งได้แก่ ออปแอมป์เบอร์ LM 318 และจะมีอัตราการสลูว์ประมาณ 70 V/μSec

การนำไปใช้งานที่ดีอย่างหนึ่งของวงจรเปรียบเทียบคือ ใช้เป็นวงจรเปลี่ยนสัญญาณรูปซายน์ให้เป็นสัญญาณรูปคลื่นจัตุรัส(Square Wave) ดังรูปที่ 2-33และ 2-34 โดยกำหนดให้ขาอินพุต + ต่อลงกราวนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-33 แสดงวงจรเปรียบเทียบชนิดกลับเฟส



รูปที่ 2.34 แสดงวงจรเปลี่ยนสัญญาณรูปคลื่นไซน์เป็นสัญญาณรูปคลื่นจัตุรัส

2.4 เกตลอจิกและพีชคณิตบูลีน

2.4.1 ค่าคงที่บูลีนและตัวแปรบูลีน (Boolean Constant and Variables)

พีชคณิตบูลีนแตกต่างจากพีชคณิตธรรมดาตรงที่ ค่าคงที่มีเพียง 2 ค่า คือ 0 และ 1 ส่วนตัวแปรบูลีน เป็น ระดับของแรงดันไฟฟ้า 0 และ 1ที่เวลาต่างกันหรือเรียกว่า ระดับลอจิกของค่าบูลีน

LOGIC 0	LOGIC 1
False	True
Off	On
Low	High
No	Yes
Open switch	***Close switch***

ตารางที่ 2 -1 แสดงค่าคงที่บูลีนและตัวแปรบูลีน

ปฏิบัติการพื้นฐานของพีชคณิตบูลีนมี 3 แบบคือ

1. การรวมทางลอจิก (Logical Addition) เรียกว่าการรวมแบบ OR หรือปฏิบัติการORมีสัญลักษณ์คือ เครื่องหมาย (+)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การคูณทางลอจิก (Logical Multiplication) เรียกว่าการคูณแบบ AND มีสัญลักษณ์คือ เครื่องหมายคูณแบบจุด (.)

3. การคอมพลีเมนต์ทางลอจิกหรือการกลับค่า (Logical Complementation Inversion) เรียกว่ารียกว่าปฏิบัติการ NOT มีสัญลักษณ์คือ ขีดบน (—)

2.4.2 ปฏิบัติการ OR (OR Operation)

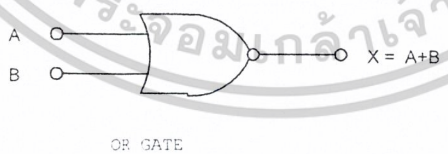
กำหนดให้ A และ B แทนตัวแปรอินพุตปฏิบัติการ OR ทำให้เขียนสมการบูลีนสำหรับเอาท์พุต X (สมการเอาท์พุต)ได้ดังนี้

$$X = A + B$$

สมการ X = A + B อ่านว่า "x เท่ากับ A OR B" เครื่องหมาย +หมายถึง OR ไม่ใช่การบวกเลขธรรมดา โดยมีข้อกำหนดตามตารางค่าความจริงในตาราง 2-2

A	B	x = A+B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

ตารางที่ 2-2 แสดงค่าการปฏิบัติการ OR



OR GATE

รูปที่ 2-35 สัญลักษณ์เกท OR

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับปฏิบัติการ OR ในระบบดิจิตอลซึ่งให้ค่าตารางความจริงในตารางที่ 2-2 เรียกว่า เกท OR มีสัญลักษณ์ดังรูปที่2-35

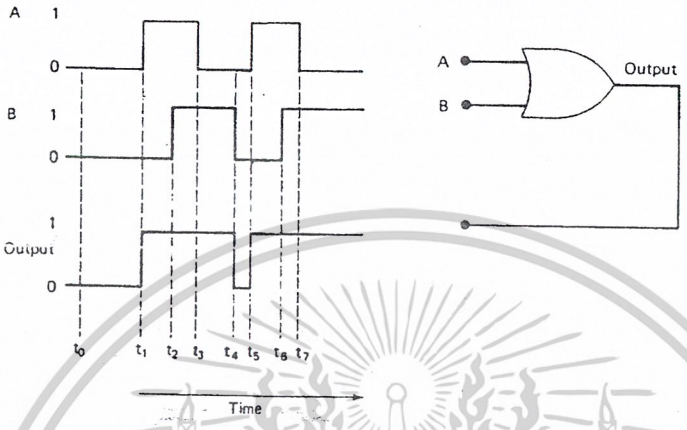
จากการพิจารณาตารางที่ 2-2 ทำให้ได้ข้อสรุปดังนี้

1. ปฏิบัติการ OR ให้ผลลัพธ์เอาท์พุตเป็น 1 เมื่อมีตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งที่อินพุตเป็น 1
2. ปฏิบัติการ OR ให้ผลลัพธ์เอาท์พุตเป็น 0 เมื่อตัวแปรที่อินพุตทั้งหมดเป็น 0 เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ผลลัพธ์ปฏิบัติการ OR แตกต่างจากการรวมเลขธรรมดาคือ1+1=1(ไม่ใช่ 2)

จากรูปที่ 2-36 ถ้าป้อนรูปคลื่น Aหรือ Bให้กับอินพุตเกท OR รูปคลื่นนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงตามแผนภูมิเวลา เช่น ที่เวลา t_0 รูปคลื่น Aเริ่มต้นด้วยสภาวะ Low และเปลี่ยนเป็นสภาวะ High ที่เวลา t_1 จากนั้นกลับมาเป็นสภาวะ Low ที่เวลา t_3 จากเขียนเอาท์พุตรูปคลื่นของเกท OR



รูปที่ 2-36 รูปคลื่นเอาท์พุทของเกท OR

2.4.3 การปฏิบัติการ AND (AND Operation)

กำหนดให้ A และ B แทนตัวแปรอินพุตปฏิบัติการ AND ทำให้เขียนสมการบูลีนสำหรับเอาท์พุต X (สมการเอาท์พุต) ได้ดังนี้

$$X = A \cdot B$$

สมการ X = A . B อ่านว่า "x เท่ากับ A AND B" มีข้อกำหนดตามตาราง 2-3

A	B	x = AB
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

ตารางที่ 2-3 แสดงค่าการปฏิบัติการ AND

รูปที่ 2-37 สัญลักษณ์เกท AND

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

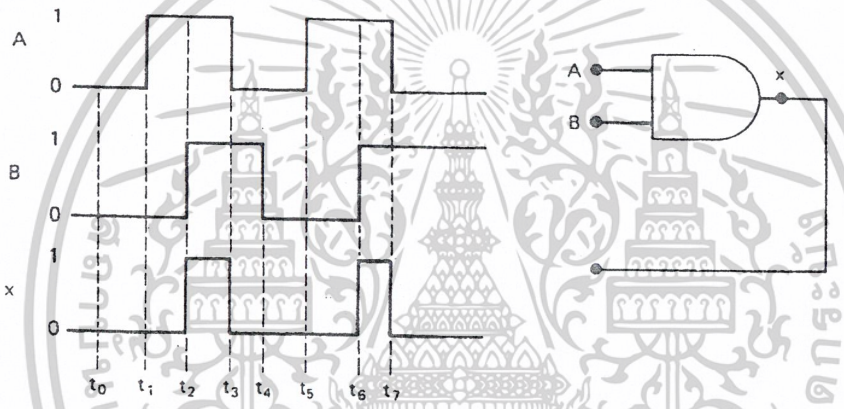
เมื่อพิจารณาตารางค่าความจริงจะเห็นว่าปฏิบัติการANDเหมือนกับการคูณทางพีชคณิตธรรมดา ดังนั้นจึงเขียนสมการบูลีนได้ใหม่เป็น X = AB

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับปฏิบัติการ AND ในระบบดิจิตอลซึ่งให้ค่าตารางความจริงในตารางที่ 2-3 เรียกว่า เกท AND มีสัญลักษณ์ดังรูปที่2-37

จากการพิจารณาตารางที่ 2-3 ทำให้ได้ข้อสรุปดังนี้

1. ปฏิบัติการ AND ให้ผลลัพธ์เอาท์พุตเป็น 1 เมื่ออินพุตทั้งหมดเป็น 1เท่านั้น
2. ปฏิบัติการ AND มีหลักการเหมือนกับการคูณเลขธรรมดาเพียงแต่ใช้เฉพาะเลข 0 และ 1
3. เมื่อตัวแปรอินพุตตัวใดตัวหนึ่งเป็น 0 ที่เอาท์พุตจะเป็น 0

จากรูปที่ 2-38 ถ้าป้อนรูปคลื่น Aหรือ Bให้กับอินพุตเกท AND เขียนรูปคลื่นเอาท์พุตของขาเกท ANDได้ดังนี้



รูปที่ 2-38 รูปคลื่นเอาท์พุทของขาเกท AND

2.4.4 การปฏิบัติการ NOT (NOT Operation)

ปฏิบัติการ NOT ไม่เหมือนกับปฏิบัติการ OR และ AND ตรงที่NOT ใช้ตัวแปรอินพุตเดี่ยวถ้ากำหนดให้ A แทนตัวแปรที่อินพุตทำให้เขียนสมการตัวแปรที่เอาท์พุต x ได้ดังนี้

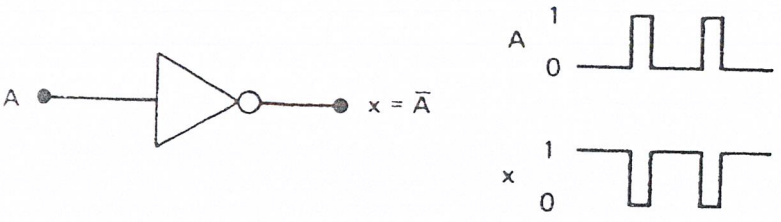
$$x = \overline{A}$$

สมการ $x = \overline{A}$ อ่านว่า x เท่ากับ A NOT B" มีข้อกำหนดตามตาราง 2-4

A	$X = \overline{A}$
0	1
1	0

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าการปฏิบัติการ NOT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) (b)

รูปที่ 2-39 สัญลักษณ์และรูปคลื่นอินพุทของเกท NOT

จากตารางที่ 2-4 แสดงว่า ค่าลอจิกหรือสภาวะของ x = $\bar{A}$ ตรงข้ามกับค่าของ A เช่นถ้า $\bar{A}$ = 1จะได้ A = 0

2.4.5 เกต NOR และ เกต NAND (NOR Gate and NAND Gate)

เกตอีก 2 ประเภทที่ใช้กับอย่างแพร่หลายในวงจรดิจิตอล คือเกต NOR และ เกต NAND ปฏิบัติการของเกตเหล่านี้จะรวมถึงปฏิบัติการพื้นฐานของเกต AND ,OR, NOT ไว้ด้วยกัน ซึ่งทำให้การอธิบายเกี่ยวกับพีชคณิตบูลีนง่ายขึ้น

2.4.5.1 เกต NOR

สัญลักษณ์ของเกต NOR ที่มี 2 อินพุตเป็นดังรูปที่ 2-40a ซึ่งเหมือนกับสัญลักษณ์ของเกต OR ยกเว้นวงกลมเล็กที่ปลายเอาท์พุต วงกลมเล็กนี้แสดงปฏิบัติการ NOT ปฏิบัติการของเกตNOR จึงเหมือนกับปฏิบัติการของเกต NOT ร่วมกับปฏิบัติการของเกต OR ดังแสดงในรูปที่2-40a และรูปที่2-40b

	OR	NOR
A B	A + B	$\overline{A + B}$
0 0	0	1
0 1	1	0
1 0	1	0
1 1	1	0

ตารางที่ 2-5 แสดงค่าของเกต NOR

จากคุณสมบัติข้างต้นจึงเขียนสมการเอาท์พุตบูลีนของเกต NOR ๆได้ดังนี้

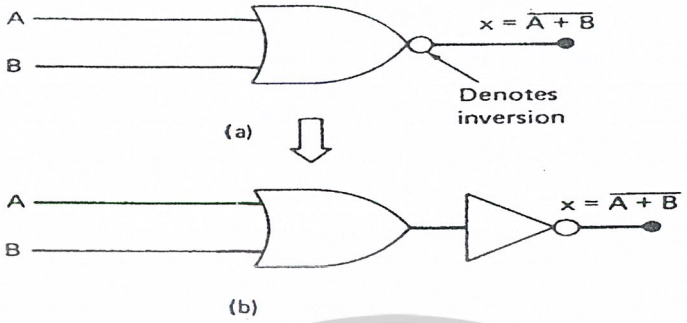
$$x = \overline{A + B}$$

จากสมการบูลีนนี้นำมาเขียนตาราความจริงของเกต NOR ได้ดังตารางที่ 2-5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเอาท์พุตของเกต NOR มีค่ากลับกันกับเอาท์พุตของเกต OR กล่าวคือเอาท์พุตของเกต OR จะมีค่า High

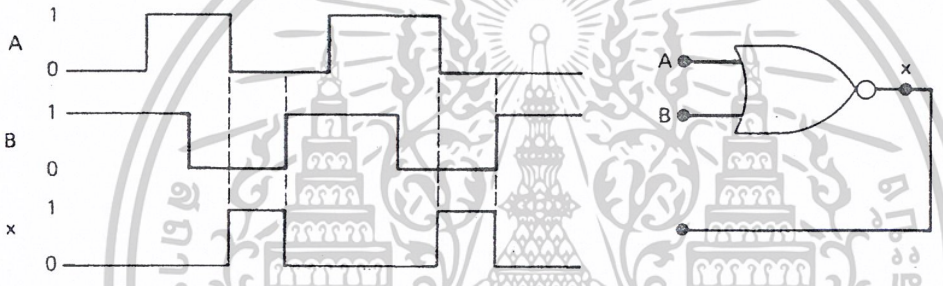
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่ออินพุตใดๆมีค่า High แต่เกต NOR มีเอาท์พุตเป็น Low เมื่ออินพุตใดๆเป็น High

จากรูปที่ 2-41 เป็นการเขียนเอาท์พุตรูปคลื่นของขาเกต NOR



รูปที่ 2-40 ปฏิบัติการของเกต NOR



รูปที่ 2-41 รูปคลื่นเอาท์พุทของขาเกต NOR

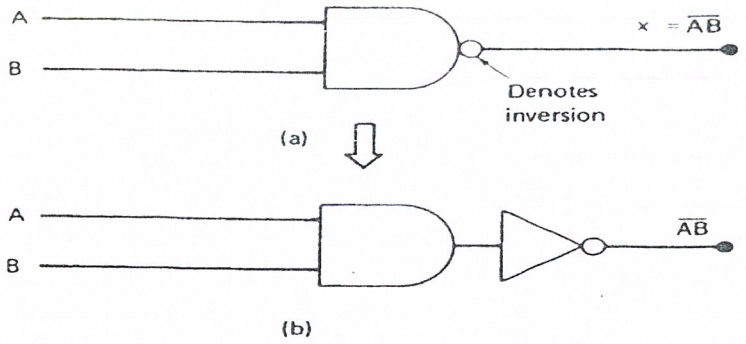
2.4.5.2 เกต NAND

สัญลักษณ์ของเกต NAND ที่มี 2 อินพุตเป็นดังรูปที่ 2-42 ซึ่งเหมือนกับสัญลักษณ์ของเกต AND ยกเว้นวงกลมเล็กที่ปลายเอาท์พุต วงกลมเล็กนี้แสดงปฏิบัติการNOTปฏิบัติการของเกตNANDจึงเหมือนกับปฏิบัติการของเกต NOT ร่วมกับปฏิบัติการของเกต AND ดังแสดงในรูปที่2-42

	AND	NAND
A B	AB	$\overline{AB}$
0 0	0	1
2 1	1	0
3 0	1	0
1 1	1	0

ตารางที่ 2-6 แสดงค่าของเกต NAND

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

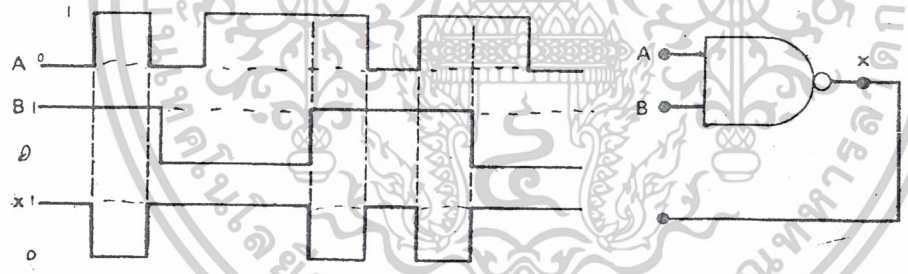


รูปที่ 2-42 แสดงถึงการกลับค่าปฏิบัติการของเกต NAND

จากคุณสมบัติข้างต้นจึงเขียนสมการเอาท์พุตบูลีนของเกต NAND ได้ดังนี้

$$x = \overline{AB}$$

จากสมการบูลีนนี้นำมาเขียนตารางความจริงของเกต NAND ได้ดังตารางที่ 2-6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเอาท์พุตของเกต NAND มีค่ากลับกันกับเอาท์พุตของเกต AND กล่าวคือเอาท์พุตของเกต AND จะมีค่า High เมื่ออินพุตทั้งหมดมีค่า High แต่เกต NAND มีเอาท์พุตเป็น Low เมื่ออินพุตทั้งหมดเป็น High จากรูปที่ 2-43 เป็นการเขียนเอาท์พุตรูปคลื่นของขาเกต NAND

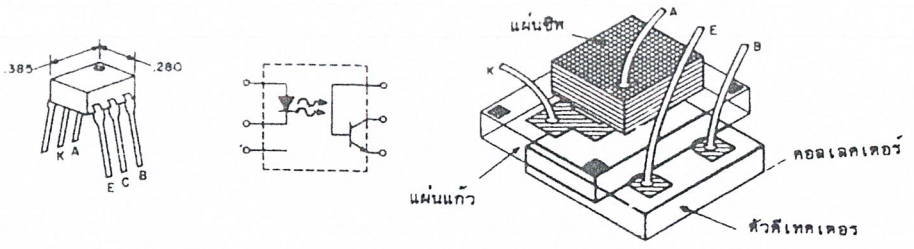


รูปที่ 2-43 รูปคลื่นเอาท์พุตของเกต NAND

2.5 การเชื่อมต่อด้วยแสง (Opto Coupler)

ออพโต้คัปเปลอร์อร์เป็นอุปกรณ์ทางด้านอิเลกทรอนิกส์ล้วนๆ ทิศทางการเคลื่อนที่ของ แสง จะคงที่อยู่ในตัวอุปกรณ์ ใช้เปลี่ยนสัญญาณทางไฟฟ้าเป็นแสงและเปลี่ยนจากแสงเป็นไฟฟ้า โดยไม่ต้องมีสายเชื่อมโยงต่อระหว่างวงจรแรงดันระหว่างอุปกรณ์ทั้ง 2 ข้างคือ ตัวปล่อยแสงและตัวรับแสง จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระยะทางของตัวปล่อยแสงและตัวรับแสง ระยะห่างมากแรงดันพังก็ยิ่งจะมีค่าสูงขึ้น แต่มีข้อเสีย คือ อัตราการส่งผ่านสัญญาณจะน้อยจึงต้องจัดระยะห่างให้ดีที่สุด ในกรณีแบบขาสองแถวคู่ฉนวนควรจะเป็นแก้วทนแรงดันผิวระหว่างตัวอุปกรณ์ควรทนได้ 5000โวลต์

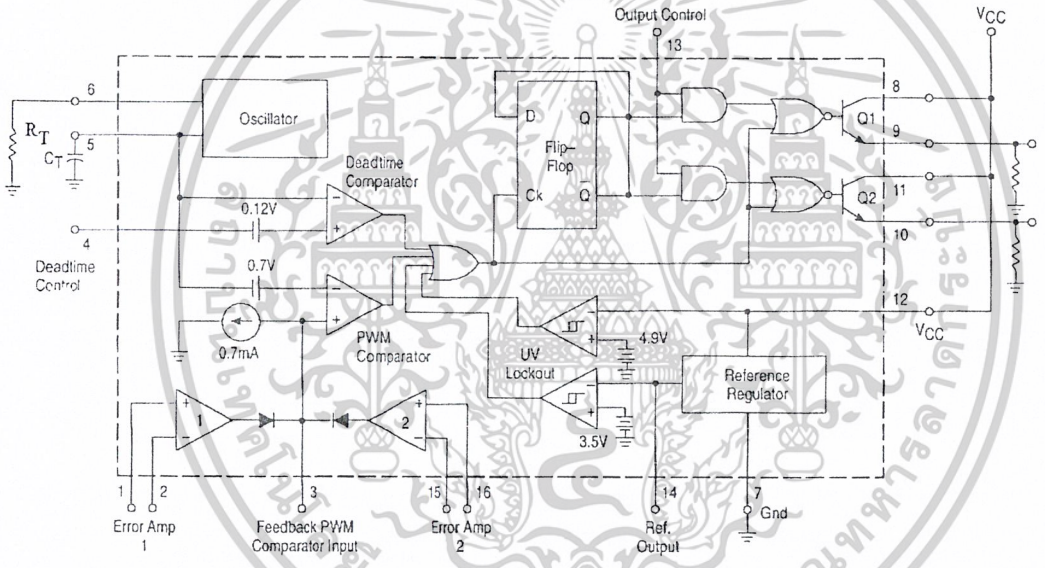
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-44 อุปกรณ์การเชื่อมต่อด้วยแสง และสัญลักษณ์

2.6 ไอซีเบอร์ TL 494

ไอซีเบอร์ TL 494 เป็นไอซีที่ออกแบบมาเพื่อใช้การควบคุมการทำงานของคอนเวอเตอร์ โดยการทำงานด้วยโหมดควบคุมแรงดัน โครงสร้างภายในและการจัดขาของ TL 494 แสดงดังรูป ที่ 2-45



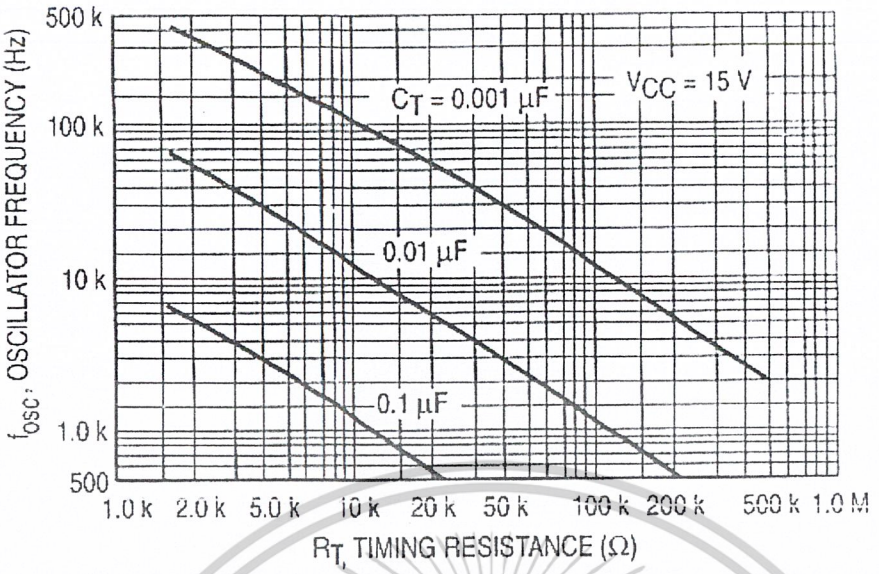
รูปที่ 2-45 แสดงการจัดโครงสร้างภายในและการจัดขาของไอซี TL 494

2.6.1 การกำหนดคาบเวลาทำงาน

วงจรของ TL 494 เป็นวงจร PWM ที่มีความถี่คงที่คาบเวลาของการทำงานของเอาท์พุตพัลส์กำหนดโดย R_T และ C_T จากภายในที่ขา 5 และ 6 ของไอซี คาบเวลาการทำงานจะกำหนดได้จาก

$$T = \frac{R_T C_T}{1.1} \tag{2.24}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-46 แสดงความสัมพันธ์ของค่า R_TC_T ในการกำหนดความถี่

2.6.2 การทำงานของไอซีในการคงค่าแรงดันของคอนเวอร์เตอร์

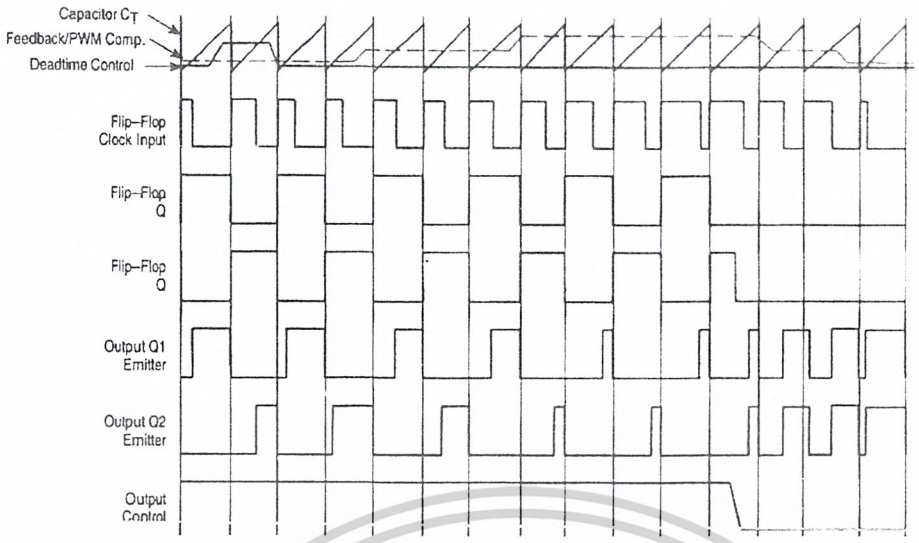
ความกว้างเอาท์พุตพัลส์ของไอซี จะได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณฟันเลื่อยที่ขา 5 กับแรงดันที่ได้จากวงจรขยายความต่าง (Error Amp) ทั้ง 2 ตัวที่ PWM Comparator ส่วน NOR Gate ที่ควบคุมทรานซิสเตอร์เอาท์พุต Q_1และ Q_2 จะทำงานก็ต่อเมื่อแรงดันของสัญญาณฟันเลื่อยมีค่ามากกว่าแรงดันที่มาจาก Error Amp ทั้ง 2 ตัว นั่นคือแรงดันที่ป้อนกลับจากเอาท์พุตคอนเวอร์เตอร์หากมีค่าสูงขึ้น ความกว้างของพัลส์ไอซีก็จะลดลง ในทางกลับกันถ้าหากแรงดันที่ป้อนกลับจากเอาท์พุตคอนเวอร์เตอร์หากมีค่าลดลง ความกว้างของพัลส์ไอซีก็จะเพิ่มขึ้น

ความกว้างเอาท์พุตพัลส์ของไอซีนี้สามารถให้มีค่ามากที่สุดหรือมีค่าเท่ากับศูนย์ได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ขา 3 จาก 0.5 ถึง 3.5 โวลต์ ส่วน Error Amp ทั้ง 2ตัว จะมีช่วงอินพุตคอมมอนโหมด ตั้งแต่ -0.3 ถึง (V_{CC} -2)โวลต์ และสามารถใช้ตรวจจับระดับแรงดันหรือกระแสที่เอาท์พุตคอนเวอเตอร์ได้ Error Amp ทั้ง 2ตัว จะให้เอาท์พุตในลักษณะสถานะ High (Active High) โดยต่อกันอยู่ในลักษณะ OR ที่ขา Non – Inverting ของ PWM Comparator การต่อในลักษณะนี้ Error Amp ตัวที่ทำให้เกิดความกว้างเอาท์พุตพัลส์ต่ำสุด จะเป็นตัวควบคุมความกว้างของพัลส์ไอซี

2.6.3 การกำหนดค่าเวลาเผื่อ (Dead Time)

TL 494 สามารถให้ผู้ใช้กำหนดค่าเวลาเผื่อ T_D ของวงจรได้เอง ด้วยการต่อระดับแรงดับ 0 ถึง 3.3 โวลต์ ได้ที่ขา 4ของไอซี หากแรงดันที่ขา 4 มีค่าเท่ากับ 0 โวลต์ ค่าเวลาต่ำสุดของเวลาเผื่อจะไม่ต่ำกว่า 4 เปอร์เซ็นต์ของคาบเวลาทำงานเนื่องจากมีแรงดันออฟเซต 120มิลลิโวลต์ต่ออยู่ภายใน ดังนั้นเวลาt_{ON} สูงสุดที่ได้จากไอซีจะมีค่าเท่ากับ48 %ของคาบเวลาเมื่อต่อขา13(output control)เข้ากับขา 14(+15V)และมีค่าเท่ากับ 96 % ของคาบเวลาเมื่อต่อขา 13 ลงกราวนด์

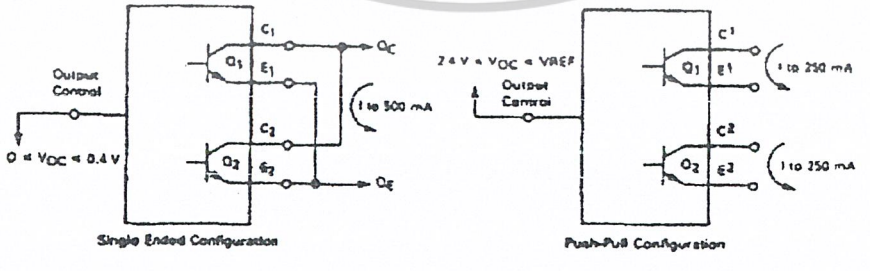
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-47 แสดงรูปคลื่นลักษณะการทำงานของ TL 494

2.6.4 การเลือกใช้ Q_1 และ Q_2 ที่เอาท์พุตของไอซี

เอาท์พุต Q_1 และQ_2 ของไอซีทำงานได้ 2 โหมด คือ ทำงานพร้อมกันหรือทำงานสลับกัน ซึ่งสามารถเลือกการทำงานได้ที่ขา 13 (output control) โดยขณะที่ C_T ดิสชาร์จเอาท์พุตของ Dead Time Comparator จะให้พัลส์ออกมา C_x จะมีสถานะเป็น High และหยุดการทำงานของ Q_1 และ Q_2 ถ้ากำหนดให้ขา 13 มีสถานะเป็น High โดยการต่อเข้ากับขา 4 ($+15\ V_{REF}$) Q_1 และ Q_2 จะสลับกันทำงานตามจังหวะของ Flip – Flop เพื่อใช้ขับการทำงานของคอนเวอเตอร์แบบ พุช – พูล ในกรณีนี้คาบการทำงานจะเป็น 2 เท่าของคาบเวลา สัญญาณฟันเลื่อยของไอซี ถ้ากำหนดให้ขา 13 มีสถานะเป็น Low โดยการต่อลงกราวนด์ (ยกเลิก Flip – Flop) Q_1 และ Q_2 จะทำงานพร้อมกันและสามารถขนาน Q_1 และ Q_2 เข้าด้วยกันได้ ถ้าต้องการให้นำกระแสได้มากขึ้น ในกรณีนี้คาบเวลาในการทำงานจะมีค่าเท่ากับคาบเวลาของสัญญาณฟันเลื่อยของไอซี (ช่วงเวลานำกระแสสูงสุดมีค่าเท่ากับ 96 % ของค่าคาบเวลา)



รูปที่ 2-48 แสดงลักษณะการเลือกใช้เอาท์พุทของ TL 494

TL 494 ต้องการไฟเลี้ยงตั้งแต่ 7 – 40 โวลต์ มีแรงดันอ้างอิงภายใน V_{REF} = 5 โวลต์ และสามารถ

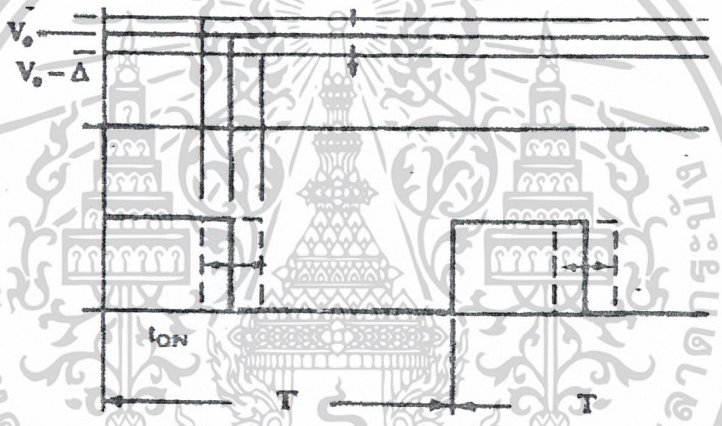
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ่ายกระแสได้ถึง 10 มิลลิแอมป์เพื่อใช้กับวงจรภายนอกได้ โดยมีค่าความถูกต้อง ±1.5 % ค่าความคลาดเคลื่อนทางอุณหภูมิมีค่าน้อยกว่า 50 มิลลิโวลต์เมื่อทำงานในช่วง 0 ถึง 70°C

2.7 พัลส์วิดท์มอดูเลเตอร์

2.7.1 พัลส์วิดท์มอดูเลชั่น(Pulse Width Modulation : PWM)

เมื่อคอนเวอเตอร์ใช้วงจรออสซิเลเตอร์เป็นตัวกำหนดพัลส์ไบแอสให้กับเพาเวอร์มอสเฟท ด้วยคาบเวลาคงที่การกำหนอช่วงของพัลส์ซึ่งก็ คือ ช่วงเวลานำกระแส t_{ON} ต้องมีความสัมพันธ์กับแรงดันเอาท์พุตด้วย กล่าวคือเมื่อแรงดันของเอาท์พุตลดลงความกว้างของพัลส์ก็ต้องมากขึ้นด้วยและเมื่อแรงดันเอาท์พุตเพิ่มขึ้นความกว้างของพัลส์ก็ต้องลดลงด้วยในขณะที่ค่าเวลาคงที่ ดังแสดงดังรูปที่ 2-49 ความสัมพันธ์ในลักษณะนี้เรียกว่า"พัลส์วิดท์มอดูเลชั่น " (Pulse Width Modulation : PWM)โดยวงจรที่ทำให้เกิดลักษณะดังกล่าวเรียกว่า " พัลส์วิดท์มอดูเลเตอร์ " จะกล่าวต่อไปนี้



รูปที่ 2-49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาท์พุทกับการเปลี่ยนแปลงความกว้างพัลส์ควบคุมช่วงเวลานำกระแส t_{ON} ในลักษณะพัลส์วิดท์มอดูเลชั่น

2.7.2 พัลส์วิดท์มอดูเลเตอร์ (Pulse Width Modulation : PWM)

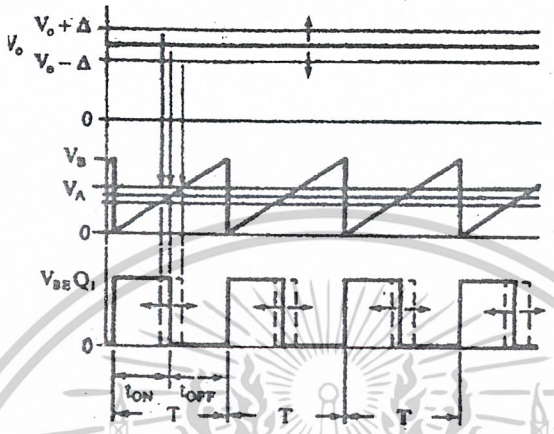
วงจรพัลส์วิดท์มอดูเลเตอร์สามารถออกแบบได้หลายลักษณะ แต่ส่วนใหญ่จะอาศัยลักษณะสัญญาณแรงดันฟันเลื่อยในการเปรียบเทียบแรงดันในที่นี้จะขอกล่าวถึงวิธีที่ใช้สัญญาณฟันเลื่อยเปรียบเทียบแรงดันที่สำคัญ

แรงดันที่จุด A จะถูกส่งไปยังวงจร PWM และจะถูกเปรียบเทียบกับสัญญาณฟันเลื่อยที่จุด B ซึ่งมีคาบเวลาและความชันที่คงที่ เอาท์พุตที่ได้จากการเปรียบเทียบของPWM จะมีลักษณะเป็นพัลส์สี่เหลี่ยมซึ่งมีค่าคาบเวลาคงที่เท่ากับคาบเวลาของแรงดับรูปฟันเลื่อย และมีความกว้างของพัลส์เปลี่ยนแปลงไปตามผลมอดูเลเตอร์ของแรงดันที่ตำแหน่ง A และ B ค่าความกว้างของพัลส์นี้จะเป็นตัวกำหนดช่วงเวลาการนำกระแส t_{ON} ของเพาเวอร์มอสเฟทในวงจร

เมื่อแรงดันเอาท์พุตของคอนเวอเตอร์มีค่ามากขึ้น แรงดันที่จุด A จะมีค่าลดลงและความกว้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

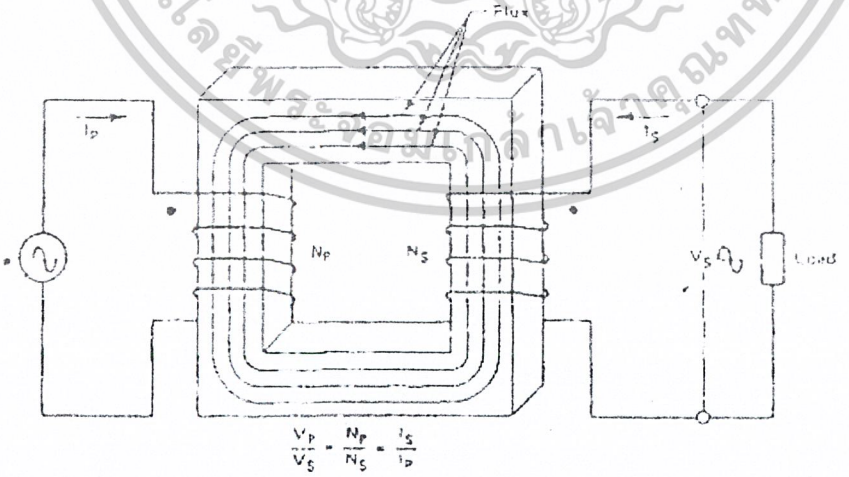
ของพัลส์เอาท์พุตของวงจร PWM จะมีค่าลดลงด้วย ช่วงเวลานำกระแส t_{ON} ของเพาเวอร์มอสเฟทจะมีค่าลดลง ถ้าแรงดันเอาท์พุตมีค่าลดลง แรงดันที่จุด A จะมีค่าเพิ่มขึ้นความกว้างของพัลส์เอาท์พุตของวงจร PWM จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ช่วงเวลานำกระแส t_{ON}จะมีค่ามากขึ้นทำให้รักษาระดับแรงดันเอาท์พุตของคอนเวอเตอร์เอาไว้ได้ดังรูปที่ 2-50



รูปที่ 2-50 แสดงลักษณะของแรงดันที่จุดต่างๆของวงจร เมื่อวงจรทำงาน

2.8 ทฤษฎีหม้อแปลง (Transformer Theory)

เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวดที่พันอยู่บนแกนปิดจะเกิดฟลั๊กซ์เหนี่ยวนำบนแกนถ้ากระแสที่จ่ายมีการเปลี่ยนแปลงไปมาฟลั๊กซ์จะเปลี่ยนแปลงไปมาด้วย ถ้าเรานำขดลวดอีกขดมาพันรอบแกน แกนนี้จะเกิดแรงดันและกระแสเหนี่ยวนำที่เรียกว่า หม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 2-51 หม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ

โดยทั่วไปแล้วหม้อแปลงจะมีแรงดันเอาท์พุตสูงหรือต่ำเกิดจากสัดส่วนการพัน โดยกำหนดให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s} \tag{2.25}$$

ดังนั้นหม้อแปลงก็สามารถทำงานเป็นหม้อแปลงเพิ่มแรงดัน (Step – up)หรือหม้อแปลงลดแรงดัน (Step – down) ได้โดยสามารถทำให้แรงดันที่ขดลวดทุติยภูมิสูงกว่าหรือต่ำกว่าขดลวดปฐมภูมิ ถ้าเพิ่มขดลวดทุติยภูมิอีกหลาย ๆขด เราก็จะได้แรงดันเอาท์พุตอีกหลายระดับ ตามสัดส่วนการพันเช่นกัน ประโยชน์ที่สำคัญอีกข้อหนึ่งโดยใช้ลักษณะสมบัติของหม้อแปลง ดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั่นคือ การแยกกันทางไฟฟ้า (Electrical Isolation) ที่เกิดขึ้นระหว่างขดลวดทุติยภูมิและขดลวดปฐมภูมิ จากความสัมพันธ์พื้นฐานของหม้อแปลง

$$e = NA_e\left(\frac{dB}{dt}\right)10^{-8} \tag{2.26}$$

เราสามารถคำนวณความหนาแน่นฟลั๊กซ์ B ที่แน่นนอนได้โยกำหนดการทำงานของหม้อแปลงให้อยู่ในส่วนที่เป็นเชิงเส้นของกราฟ ดังสมการ

$$B_{\max} = \frac{V_p * 10^{-8}}{KfN_pA_e} \tag{2.27}$$

เมื่อ B_{max} คือ ความหนาแน่นฟลั๊กซ์สูงสุด

V_p คือ แรงดันที่ ขดลวดปฐมภูมิ (V)

N_p คือ จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ

f คือ ความถี่ (Hz)

A_e คือ พื้นที่ของแกนเหล็ก (cm^2)

K คือ 4.44สำหรับคลื่นซายน์ และ 4.0 สำหรับรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

$B_{max} = B_{sat} / 2$ จะได้จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิดังนี้

$$N_p = \frac{V_p * 10^{-8}}{4fB_{\max}A_e} \tag{2.28}$$

ในการเลือกแกนเหล็กนั้นก็ยังมีพารามิเตอร์ที่สำคัญอีก 2 ตัวซึ่ง ตัวแรก คือ พื้นที่การพันของแกน (หรือบอบบิ้น)ซึ่งจะต้องเลือกให้กว้างพอกับขนาดของขดลวด เพื่อให้เกิด Winding Loss น้อยที่สุด และ ข้อที่สอง คือ Core's Power Handling Capability

สมการของตัวพารามิเตอร์มีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{out} = \left(1.16 B_{\max} f A_e A_c d\right) * 10^{-9} \qquad (2.29)$$

เมื่อ B_{max} คือ ความหนาแน่นฟลั๊กซ์สูงสุด

P_{out} คือ Power handling of core (W)

A_c คือ พื้นที่การพันของบอบบิ้น (cm^2)

f คือ ความถี่ (Hz)

A_e คือ พื้นที่ของแกนเหล็ก (cm^2)

d คือ ความหนาแน่นกระแสของเส้นลวด(A/m^2)

2.9 วงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์ (Bridge Rectifier)

รูปที่ 2-52 (ก) แสดงให้เห็นว่าวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ประกอบไปด้วยไดโอด 4 ตัว ข้อดีของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์คือไม่ต้องใช้หม้อแปลงที่มีแท็ปกลางและพิกัดแรงดันผกผันสูงสุดของไดโอดเท่ากับ V_m ส่วนข้อเสีย คือไม่มีการแยกกันทางไฟฟ้าและต้องใช้ไดโอดมากกว่าวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นซึ่งใช้หม้อแปลงที่มีแท็ปกลาง การทำงานของวงจรแบ่งได้เป็น 2 ช่วง

ช่วงที่ 1 คือ $0 \le \omega t \le \pi$ ซึ่งก็คือซีกบวกของแรงดันอินพุต ดังนั้นไดโอด D_3 และ D_4 ได้รับไบแอสย้อนกลับดังรูปที่ 2-52 (ข) แรงดันผกผันของไดโอด D_3 และ D_4 เท่ากับ V_m ส่วนD_1 และ D_2 นำกระแส ทำให้แรงดันเอาท์พุต $V_S = V_m \sin \omega t$ ตกคร่อมความต้านทานโหลด จะได้แรงดันด้านเอาท์พุต คือ

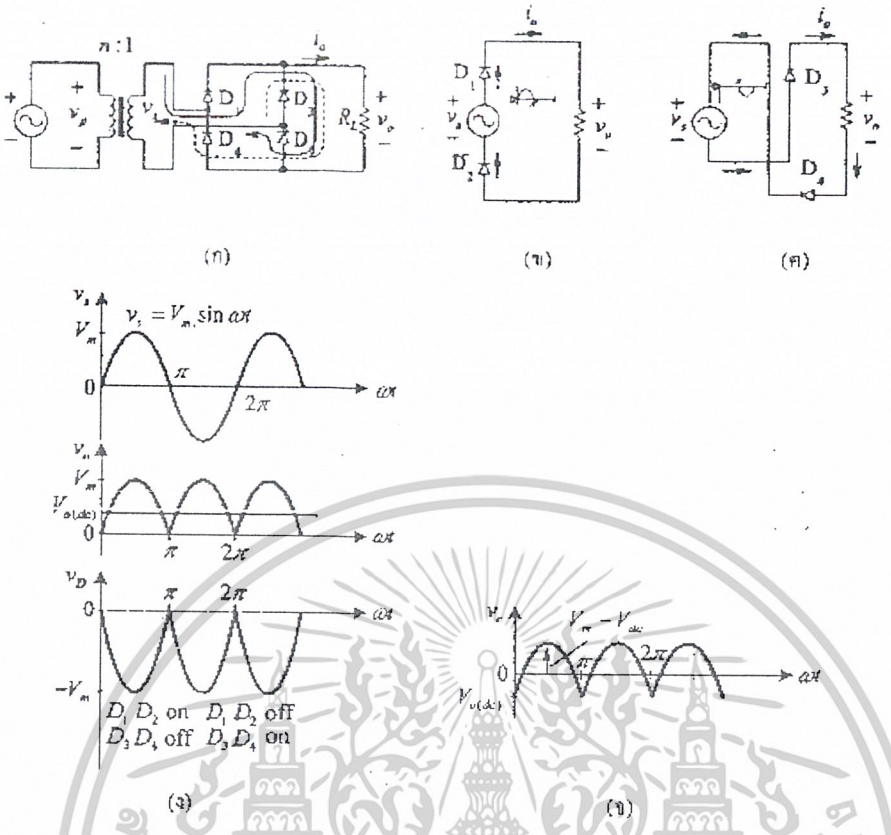
$$V_O = V_m \sin \omega t \text{ เมื่อ } 0 \le \omega t \le \pi \qquad (2.30.1)$$

ช่วงที่2 คือ $\pi \le \omega t \le 2\pi$ ซึ่งก็คือซีกบวกของแรงดันอินพุต ดังนั้นไดโอด D_1 และ D_2 ได้รับ ไบแอสย้อนกลับดังรูปที่ 2-52 (ค) แรงดันผกผันของไดโอด D_1 และ D_2 เท่ากับ V_m ส่วนD_3 และ D_4 นำ กระแสทำให้แรงดันเอาท์พุต $V_S = V_m \sin \omega t$ ตกคร่อมความต้านทานโหลด จะได้แรงดันด้านเอาท์พุต คือ

$$V_O = V_m \sin \omega t \text{ เมื่อ } \pi \le \omega t \le 2\pi \qquad (2.30.2)$$

รูปที่ 2-52(ง)แสดงให้เห็นแรงดันอินพุตและเอาท์พุต ส่วนแรงดันริบเปิ้ลแสดงดังรูปที่ 2-52(จ)

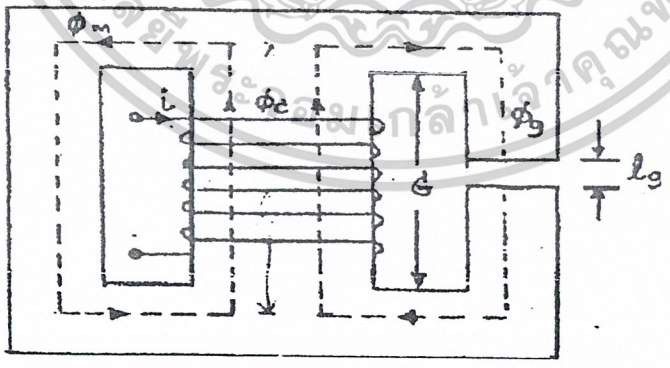
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) วงจร (ข) วงจรสมมูล $V_s > 0$ (ค) วงจรสมมูล $V_s < 0$ (ง) แรงดันริบเบิ้ลเอาท์พุท

รูปที่ 2-52 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์

2.10 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2-53 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ

$$R_C = \frac{l_C}{\mu_C S_C} = \frac{1}{\rho_C} \tag{2.31}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_M = \frac{l_M}{\mu_M S_M} = \frac{1}{\rho_M} \tag{2.32}$$

$$R_g = \frac{l_g}{\mu_g S_g} = \frac{1}{\rho_g} \tag{2.33}$$

ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ (Inductor Design) สิ่งที่ต้องคำนึงในการออกแบบ คือการเลือกอุปกรณ์

1. ชนิด ลักษณะโครงสร้างและขนาดของแกนเหล็ก
2. ชนิด รูปร่างขนาดและจำนวนรอบที่ใช้ในการที่ใช้ในการพันของขดลวดตัวนำ
3. ชนิดและลักษณะของฉนวน
4. ลักษณะโครงสร้างของ Case ตลอดจนการระบายความร้อน
5. คุณสมบัติทางไฟฟ้าและเชิงกลอื่นๆ

ข้อกำหนด

1. ค่าความเหนี่ยวนำ
2. ขนาดและรูปร่างรวมทั้งความถี่ของกระแสและแรงดัน
3. กำลังสูญเสียประสิทธิหรืออุณหภูมิเพิ่ม (T_{rise})
4. คุณสมบัติทางไฟฟ้าและเชิงกลอื่นๆ

การออกแบบโดยวิธีคำนวณ Core Geometry Kg Approch

วิธีเป็นการออกแบบที่ใช้กำลังการสูญเสียของลวดทองแดง (Pcu)

$$N = LI_{peak} / SB_{max} \tag{2.34}$$

$$A_W = k.w / N \tag{2.35}$$

$$I = N.t \tag{2.36}$$

$$R_W = \rho l / A_W = \rho.N^2.t / k.w \tag{2.37}$$

$$P_{cu} = I_{rms}^2 R_W \tag{2.38}$$

แทนค่าตัวแปรต่างๆให้อยู่ในรูป P_{cu}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{CU} = I_{rms}^2 \cdot \frac{\rho . L^2 . I_{peak}^2 . t}{B_{\max}^2 . S^2 . k . w} \tag{2.39}$$

จัดกลุ่มตัวแปรใหม่

$$K_g = \frac{w.S^2}{t} = \frac{4\rho\left[(1/2)\left(L.I_{rms}^2\right)\right]\left[(1/2)\left(LI_{peak}^2\right)\right]}{k.B_{\max}^2 . P_{CU}} \tag{2.40}$$

ถ้า $I_{peak} = I_{rm}$

$$K_g = \frac{w.S^2}{t} = \frac{4\rho . E_{peak}^2}{k.B_{\max}^2 . P_{CU}} \tag{2.41}$$

เมื่อ $E_{peak} = (1/2)\left(LI_{peak}^2\right)$

ขั้นตอนในการออกแบบโดยวิธี Kg Approch

1. จากข้อกำหนดและขีดจำกัดคำนวณค่า Kg
2. เลือกขนาดของแกนให้มีค่าใหญ่กว่า Kg ที่คำนวณได้จากข้อ 1
3. คำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ (N)
4. คำนวณหาขนาดของขดลวดเหนี่ยวนำ (Aw)
5. เลือกเบอร์ของขดลวดทองแดงให้มี Aw มากกว่า Aw ที่ได้จากค่าคำนวณในข้อ 4

โดยเลือกรัศมีของขดลวดทองแดงที่เล็กกว่าความลึกผิวของทองแดงที่ความถี่สูงสุดที่ใช้งานโดย ที่ $\delta(m) = \sqrt{2\rho / \mu w}$

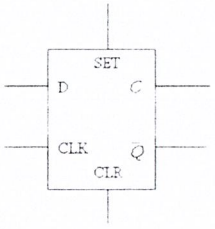
6. คำนวณหาขนาดของช่องว่างอากาศ (air gap) $l_g = N^2 \mu_O$ หรือค่า μ ของแกนเหล็ก
7. คำนวณหาค่าของ Fringing Flux Correction Factor (F) $= 1 + \left(l_g / \sqrt{s}\right)\left(\ln\left(2G/l_g\right)\right)$ อันเนื่อง
   มาจากผลของฟลั๊กซ์ที่ขอบทำให้พื้นที่หน้าตัดของช่องว่างอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น
8. ปรับลด l_g จนได้ค่า L ที่ต้องการ

2.11 ฟลิปฟลอบแบบ D

สัญลักษณ์ทางลอจิกของ D ฟลิปฟลอปแสดงได้ดังรูปที่ 2-54 โดยทางอินพุตจะมีขา ดาต้าอินพุต (ขา D) และ ขาอินพุตคล็อค(ขา CLK) สำหรับเอาต์พุตจะมีสองค่าคือ Q และ $\overline{Q}$ ตัว D ฟลิบฟลอป บางครั้งเรียกว่า delay Flip – Flop คือว่า delay จะเกี่ยวข้องกับข้อมูล ถ้ามีอินพุต D เข้ามาเป็น (0 หรือ 1) ข้อมูลจะถูกหน่วยเวลาไปอีกหนึ่งลูกของสัญญาณนาฬิกา จึงออกมาทางเอาท์พุต Q ตารางความจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

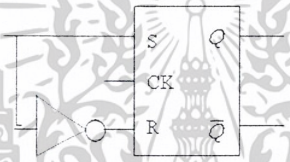
ของ D ฟลิบฟลอปแสดงดังรูปที่2.54 จะสังเกตว่าเอาท์พุต Q จะมีค่าตามอินพุตหลังจากมี clock pulse เข้ามาหนึ่งลูก



Input	Output
D	Q^{n+1}
0	0
1	1

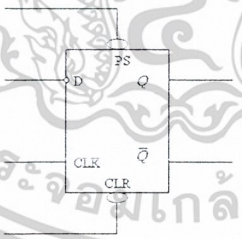
รูปที่ 2-54 D ฟลิบฟลอป a) สัญลักษณ์ b) ตารางความจริง

ตัวD ฟลิบฟลอปสามารถสร้างจาก R-S ฟลิบฟลอปได้ โดยการเพิ่มอินเวอเตอร์เข้าไปทางด้านอินพุตดังรูปที่2.55



รูปที่ 2-55 การเขียนD ฟลิบฟลอป

สำหรับD ฟลิบฟลอปที่สร้างไว้ในไอซีส่วนมากจะเป็นดังรูปที่2.56



รูปที่ 2-56 สัญลักษณ์ของ D ฟลิบฟลอปของไอซี 7474

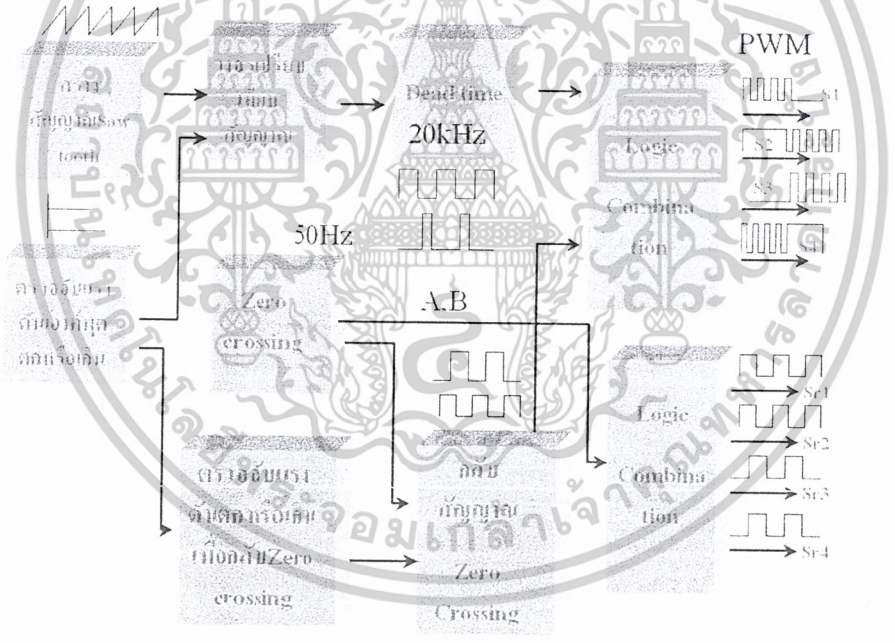
โดยเพิ่มอินพุตเข้าไปอีก 2 ตัวให้กับD ฟลิบฟลอป PR (Preset) และ CLR (Clear) ขา PS อินพุตจะเป็นตัวเซ็ตเอาท์พุต Q ให้เป็น 1 ถ้าอินาเบิ้ลด้วยลอจิก 0 สำหรับขา CLR อินพุต จะใช้เคลียร์เอาท์พุต Q ให้เป็น 0ถ้าอินาเบิ้ลด้วยลอจิก 0 ขาอินพุต PS และ CLR เราจะไม่ใช้ก็ได้ถ้าหากต้องการใช้ D ฟลิบฟลอปแบบรูปที่ 2.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
หลักการทำงานและการออกแบบวงจร

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการอธิบายการทำงานในส่วนต่างๆ ของวงจรเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า โดยจะเป็นการอธิบายหลักการทำงานของวงจรเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้ซึ่งจะประกอบไปด้วยโหมดการทำงาน 3โหมดที่แตกต่างกันคือโหมดแอกทีฟ โหมดบายพาส โหมดฟรีวีลลิ่ง ทิศทางการไหลของกระแสที่ไหลในวงจรเพื่อนำไปใช้ในการประยุกต์ใช้ในการปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า การออกแบบตัวฟิลเตอร์กรองผ่านความถี่ต่ำเพื่อทำหน้าที่กรองส่วนประกอบฮาร์โมนิกส์ไว้และส่งผ่านเฉพาะส่วนประกอบความถี่ใช้งานไปยังโหลด การทำงานของวงจรเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงดันไฟฟ้าในการทำงานที่เกิดขึ้น 3 กรณีคือ กรณีที่แรงดันที่โหลดมีค่าต่ำกว่า 220 โวลต์, กรณีที่แรงดันที่โหลดมีค่ามากกว่า 220 โวลต์ และกรณีที่แรงดันที่แหล่งจ่ายเท่ากับ 220 โวลต์ การออกแบบการควบคุมแบบป้อนกลับดังมีบล็อกแสดงดังรูปที่ 3-1และในโฟลวชาร์ตดังในรูปที่ 3-2

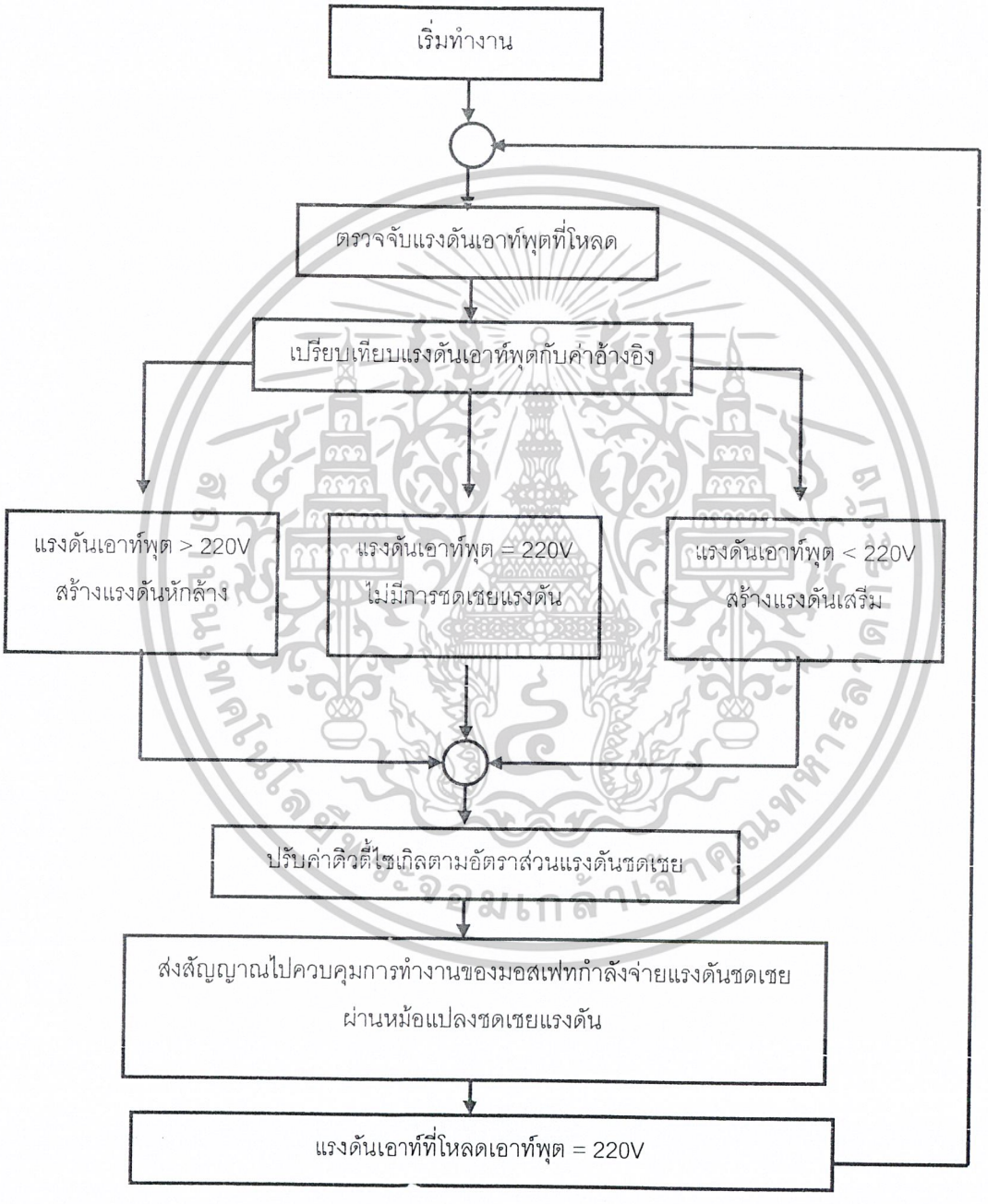


รูปที่ 3-1 แสดงบล็อกของวงจรควบคุม

การออกแบบวงจรเพื่อให้ได้มาซึ่งการควบคุมตามที่ต้องการ โดยจะเริ่มจากการสร้างวงจรตรวจจับระดับแรงดันเพื่อใช้ในการตรวจจับระดับแรงดันเอาท์พุท วงจรควบคุมการกลับเฟสสัญญาณที่ใช้ในการกลับขั้วแรงดัน วงจรสร้างสัญญาณ PWM ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ทที่สามารถปรับดิวตี้ไซเกิลได้แล้วนำสัญญาณนี้ไปทำให้เป็นสัญญาณ 2 สัญญาณที่มีเฟสตรงกันข้ามกันและมีช่วงเวลาตายของสัญญาณ (Dead

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

time) ซึ่งกันและกันก่อนที่จะนำสัญญาณที่ได้นี้ไปรวมกับสัญญาณสี่เหลี่ยมความถี่ 50 เฮิร์ทที่มีเฟสตรงกันกับแหล่งจ่ายไฟของการไฟฟ้าเพื่อให้ได้เอาท์พุตออกมาและนำเอาท์พุทนี้ไปเข้าวงจรขับเกทและแยกกราวด์เพื่อนำไปสั่งให้มอสเฟทกำลังทำงานจ่ายแรงดันให้กับหม้อแปลงชดเชยต่อไปและหม้อแปลงชดเชยจะทำหน้าที่ในการควบคุมให้แรงดันที่โหลดมีค่าคงที่ตามที่ต้องการ

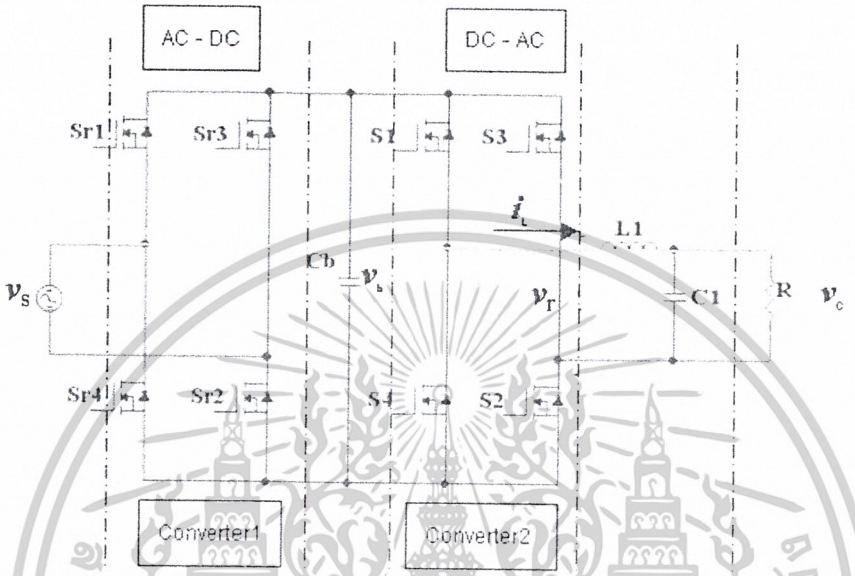


รูปที่ 3-2 โฟลวชาร์ตแสดงการทำงานของวงจรเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 หลักการทำงานของวงจรเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้

ส่วนวงจรสวิทช์กำลังได้มีการต่อใช้งานในแบบของวงจรสวิทช์ทางเดียว โดยใช้มอสเฟทกำลังเป็นอุปกรณ์สวิทช์ หลักการทำงานต้นเบื้องของวงจรเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้ ที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องรักษาระดับแรงดันซึ่งลักษณะของวงจรที่นำมาใช้งานคือ



รูปที่ 3-5 รูปวงจรเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้ที่ใช้สร้างแรงดันชดเชย

- ชุดคอนเวอเตอร์ 1 ที่ใช้ มอสเฟทกำลังชนิดที่มี ฟรีวีลลิ่งไดโอด (Freewheeling Diode) ต่ออยู่ด้วยภายในตัวต่อวงจรกันแบบ บริดจ์โดยวงจรในส่วนของ คอนเวอเตอร์1 นี้จะทำหน้าที่อยู่ 2 อย่างคือ ทำหน้าที่ในการเรียงกระแส แรงดันกระแสสลับเป็นกระแสตรง โดยผ่านทางไดโอด และทำหน้าที่ในการรีเจนเนอเรทีฟ คืนพลังงานจากโหลดคืนกลับไปยังด้านอินพุตโดยผ่านทางมอสเฟทกำลังในกรณีของโหลด R – L

- ชุดตัวเก็บประจุสนับเบอร์เป็นตัวป้องกันแรงดันเกินที่เกิดจากผลของ $V_L = L_S \frac{di_L}{dt}$ ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันสไปร์ทแรงสูงเกิดขึ้นจากการเทิร์นออฟ (การเปิดวงจรของสวิทช์) จากคอนเวอเตอร์ 2 โดยที่ตัวเก็บประจุสนับเบอร์จะทำหน้าที่ในการขลิบแรงดันสไปร์ทไว้ไม่ให้เกินพิกัดที่มอสเฟทกำลังทนได้

- ชุดคอนเวอเตอร์ 2 ที่ใช้มอสเฟทกำลังแบบเดียวกันต่อวงจรกันแบบฟูลบริดจ์คอนเวอเตอร์ โดยวงจรในส่วนของ ชุดคอนเวอเตอร์ 2 นี้จะทำหน้าที่อยู่ 2 อย่างคือ ทำหน้าที่ในการกลับขั้วแรงดันและเปลี่ยนแรงดันจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับ โดยที่จะทำโดยใช้การสับแบบ PWM แรงดันทางด้านเอาท์พุตสามารถกลับขั้วแรงดันกับด้านอินพุตได้ และทำหน้าที่ในการรีเจนเนอร์เรทีฟพลังงานจากโหลดคืนกลับไปยังอินพุตในกรณีของโหลด R – L โดยผ่านทางไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชุด L– C Filterทำหน้าที่ในการกรองแรงดันเอาเฉพาะในส่วนของแรงดันที่ความถี่ใช้งานที่ 50 เฮิร์ท (Fundamental) ให้ส่งผ่านไปยังด้านโหลดแต่เพียงอย่างเดียว โดยที่ส่วนประกอบฮาร์โมนิกส์จะกำจัดออกไป

จากรูปที่ 3-3 รูปวงจรเอซีช็อปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้ที่ใช้สร้างแรงดันชดเชยแรงดันในส่วนต่างๆ ภายในวงจรจะมี

- แรงดัน v_S เป็นแรงดันทางด้านอินพุต

- แรงดัน v_b เป็นแรงดันที่ได้จากการการเรียงกระแสแรงดันด้านอินพุต (v_S) โดยไดโอด ชุด คอนเวอเตอร์ 1

- แรงดัน v_r เป็นแรงดัน PWM ที่ได้จากการการสับที่ความถี่ที่สูง 20 กิโลเฮิร์ทโดย ชุด คอนเวอเตอร์ 2

- แรงดัน v_C เป็นแรงดันที่ได้จากการผ่าน L–C Filterภายหลังจากการ สับที่ความถี่ที่สูง20 กิโลเฮิร์ทโดย ชุด คอนเวอเตอร์ 2

โดยที่การทำงานในส่วนของ คอนเวอเตอร์ 2 นี้ซึ่งมันจะสามารถกลับขั้วของแรงดันทางด้านเอาท์พุตกับด้านอินพุตได้จากหลักการดังกล่าวข้างต้นนี้เอง เราจึงนำเอาวงจรนี้มาใช้ในการสร้างแรงดันเสริมใน กรณีที่แรงดันทางด้านอินพุตมีค่าต่ำกว่า 220 โวลต์ และ สร้างแรงดันหักล้างใน กรณีที่แรงดันทางด้านอินพุตมีค่าสูงกว่า220 โวลต์ ซึ่งในที่นี้จะยังไม่อธิบายในเนื้อหาในส่วนนี้ ซึ่งในการทำงานของ ชุด คอนเวอเตอร์ 2 นี้จะสามารถพิจารณาวิเคราะห์การทำงาน ที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของโหลดที่ต่ออยู่ภายในวงจร เพราะโหลดที่ต่ออยู่ภายในวงจรจะส่งผลต่อการทำงานของวงจร ซึ่งรูปแบบการงานของวงจรจะพิจารณาผลของโหลดที่ใช้ 2 แบบ คือโหลด R และ โหลด R – L ซึ่งจากผลของโหลดที่แตกต่างกัน นี้จะส่งผลต่อการทำงานของวงจรซึ่งสามารถสรุปการทำงานที่เกิดจากโหลดได้ดังนี้คือ

- กรณีของโหลด R คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลอยู่ในวงจรจะมีเฟสตรงกัน (in phase) กับแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุตซึ่งในที่นี้คือ i_L เฟสตรงกับ v_S

- กรณีของโหลด R - L คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลอยู่ในวงจรจะล้าหลัง (lagging) กับแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุต ซึ่งในที่นี้คือ i_L ล้าหลัง v_S

และผลของการทำงานในส่วนของขั้วแรงดันที่สามารถควบคุมการทำงานได้ ซึ่งเราสามารถแบ่งการทำงานออกได้เป็น 2 รูปแบบคือ

- กรณีที่แรงดันทางด้านอินพุต (v_S) มีเฟสตรงกัน กับแรงดันทางด้านเอาท์พุต (v_C)

- กรณีที่แรงดันทางด้านอินพุต (v_S) ต่างเฟสกัน 180 องศา (Out of phase) กับแรงดันทางด้านเอาท์พุต(v_a)

เมื่อเรานำผลของโหลดและขั้วของแรงดันทางด้านอินพุตกับด้านเอาท์พุตมาพิจารณาร่วมกันครบองค์ประกอบที่เกิดขึ้นจะสามารถแยกรูปแบบการทำงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นได้เป็น 4 รูปแบบคือ

1) กรณีของโหลด R กระแสไฟฟ้าที่ไหลอยู่ในวงจรจะมีเฟสเดียว กับแรงดันซึ่งในที่นี้คือ i_L มีเฟสตรงกันกับ v_S โดยที่แรงดันทางด้านอินพุต (v_S) มีเฟสตรงกันกับแรงดันทางด้านเอาท์พุต (v_C)

i_L มีเฟสตรงกันกับ v_S , v_S มีเฟสตรงกันกับ v_C และ i_L มีเฟสตรงกันกับ v_C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) กรณีของโหลด R - L กระแสไฟฟ้าที่ไหลอยู่ในวงจรจะล้าหลังกับแรงดันซึ่งในที่นี้คือ i_L ล้าหลัง v_S โดยที่แรงดันทางด้านอินพุต (v_S) มีเฟสตรงกันกับแรงดันทางด้านเอาท์พุต (v_C)

i_L ล้าหลัง v_S, v_S มีเฟสตรงกันกับ v_C และ i_L ล้าหลัง v_C

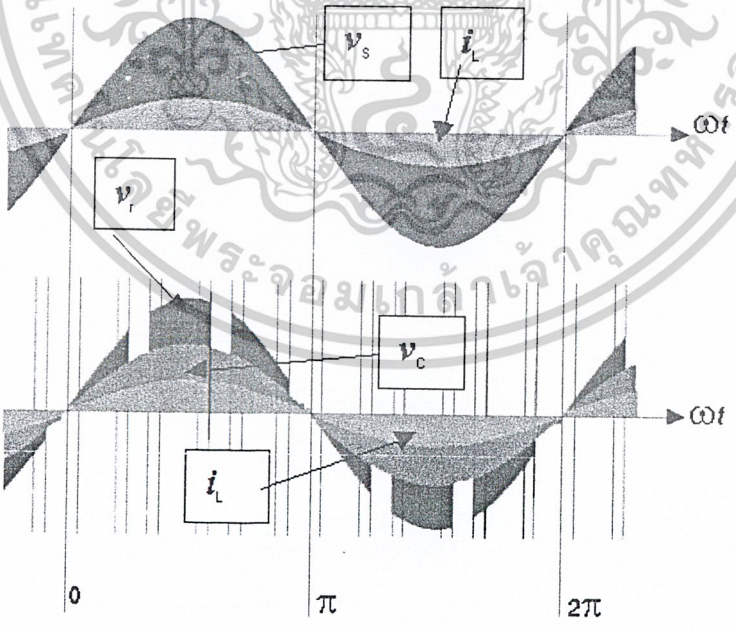
3) กรณีของโหลด R กระแสไฟฟ้าที่ไหลอยู่ในวงจรจะมีเฟสเดียวกับแรงดันซึ่งในที่นี้คือ i_L inphase v_S โดยที่แรงดันทางด้านอินพุต (v_S) ต่างเฟสกัน 180 องศา ชุด คอนเวอเตอร์ กับแรงดันทางด้านเอาท์พุต (v_C)

i_L มีเฟสตรงกันกับ v_S , v_S ต่างเฟสกัน 180 $^{\circ}$กับv_C และ i_L มีเฟสตรงกันกับ v_C

4) กรณีของโหลด R - L กระแสไฟฟ้าที่ไหลอยู่ในวงจรจะล้าหลัง กับแรงดันซึ่งในที่นี้คือ i_L มีเฟสตรงกันกับ v_S โดยที่แรงดันทางด้านอินพุต (v_S) ต่างเฟสกัน 180 $^{\circ}$ กับแรงดันทางด้านเอาท์พุต (v_C)

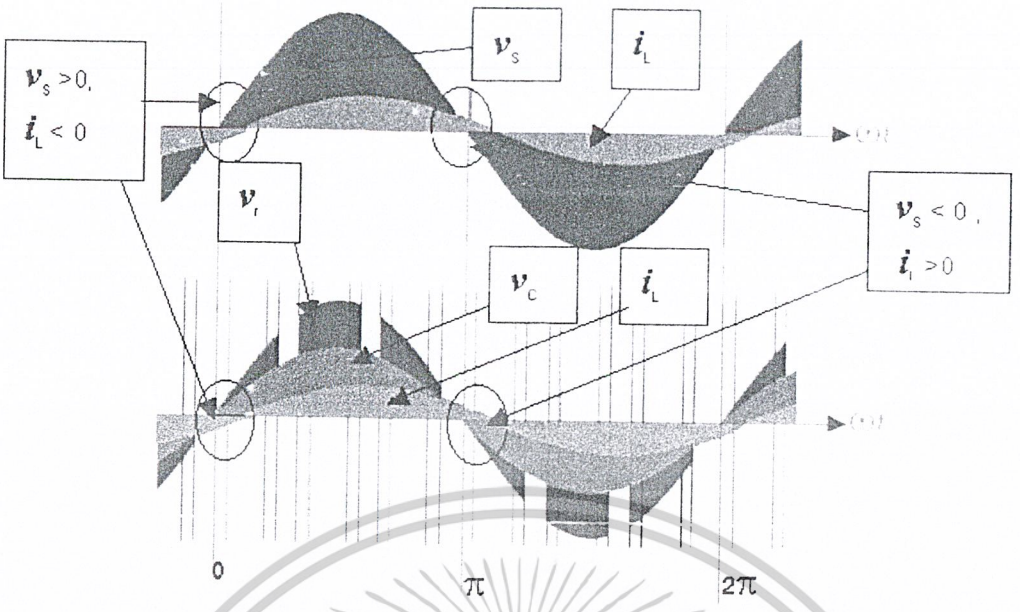
i_L ล้าหลัง v_S, v_S ต่างเฟสกัน 180 $^{\circ}$กับ v_C และ i_L ล้าหลัง v_C

จากรูปแบบการทำงานทั้ง4รูปแบบการทำงานที่เกิดขึ้นนี้เราจะนำเงื่อนไขของการทำงานที่เกิดขึ้นไปพิจารณาการทำงานของวงจรซึ่งในส่วนนี้เราจะพิจารณาโหมดการทำงานของวงจรที่จะมีความสัมพันธ์กัน ในส่วนของวงจร คอนเวอเตอร์ 1 และ คอนเวอเตอร์ 2 ซึ่งการพิจารณาการทำงานเราจะต้องพิจารณาจากรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าในส่วนต่างๆประกอบ รวมถึงทิศทางการไหลของกระแสโดยจะพิจารณาในส่วนของรูปแบบที่ 1 และ 2 การทำงานของวงจร ในส่วนของรูปแบบที่ 1 กับ 2 จะแตกต่างกันอยู่ในช่วงการทำงานในช่วงการทำงานในโหมดบายพาส ซึ่งก็คือช่วงเวลาตายของสัญญาณในรูปที่ 3-4 และ รูปที่ 3-5 และ ซึ่งเป็นรูปที่แสดง รูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าในส่วนต่าง ๆ ของวงจรกระแส i_L



รูปที่ 3-4 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและ กระแสไฟฟ้าโดยที่ i_L มีเฟสตรงกันกับ v_S , v_S มีเฟสตรงกันกับ v_C และ i_L มีเฟสตรงกันกับ v_C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3–5 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและ กระแสไฟฟ้าโดยที่ i_L ล้าหลัง v_s, v_s มีเฟสตรงกันกับ v_C และ i_L ล้าหลัง v_C

จากรูปที่ 3-6 และรูปที่3-7 แสดงรูปคลื่นของแรงดัน กระแสไฟฟ้า และสัญญาณที่ใช้ควบคุมการทำงานของ อุปกรณ์สวิตช์ซึ่งโดยที่โดยดูจากวงจรในรูปที่ 3-3 ประกอบ

v_s : แรงดันอินพุทที่รับมาจากแหล่งจ่าย

v_{gsr1}, v_{gsr2} : สัญญาณควบคุมการขับเกทของสวิตช์ S_{r1} และ S_{r2} ตามลำดับ ในการรีเจนเนอเรทีฟคืนพลังงาน

v_{gs3}, v_{gsr4} : สัญญาณควบคุมการขับเกทของสวิตช์ S_{r3} และ S_{r4} ตามลำดับ ในการรีเจนเนอเรทีฟคืนพลังงาน

v_b : แรงดันที่ได้จากการการเรียงกระแสแรงดันด้านอินพุต

v_{gs1} : สัญญาณควบคุมการขับเกทของสวิตช์ S_1

v_{gs2} : สัญญาณควบคุมการขับเกทของสวิตช์ S_2

v_{gs3} : สัญญาณควบคุมการขับเกทของสวิตช์ S_3

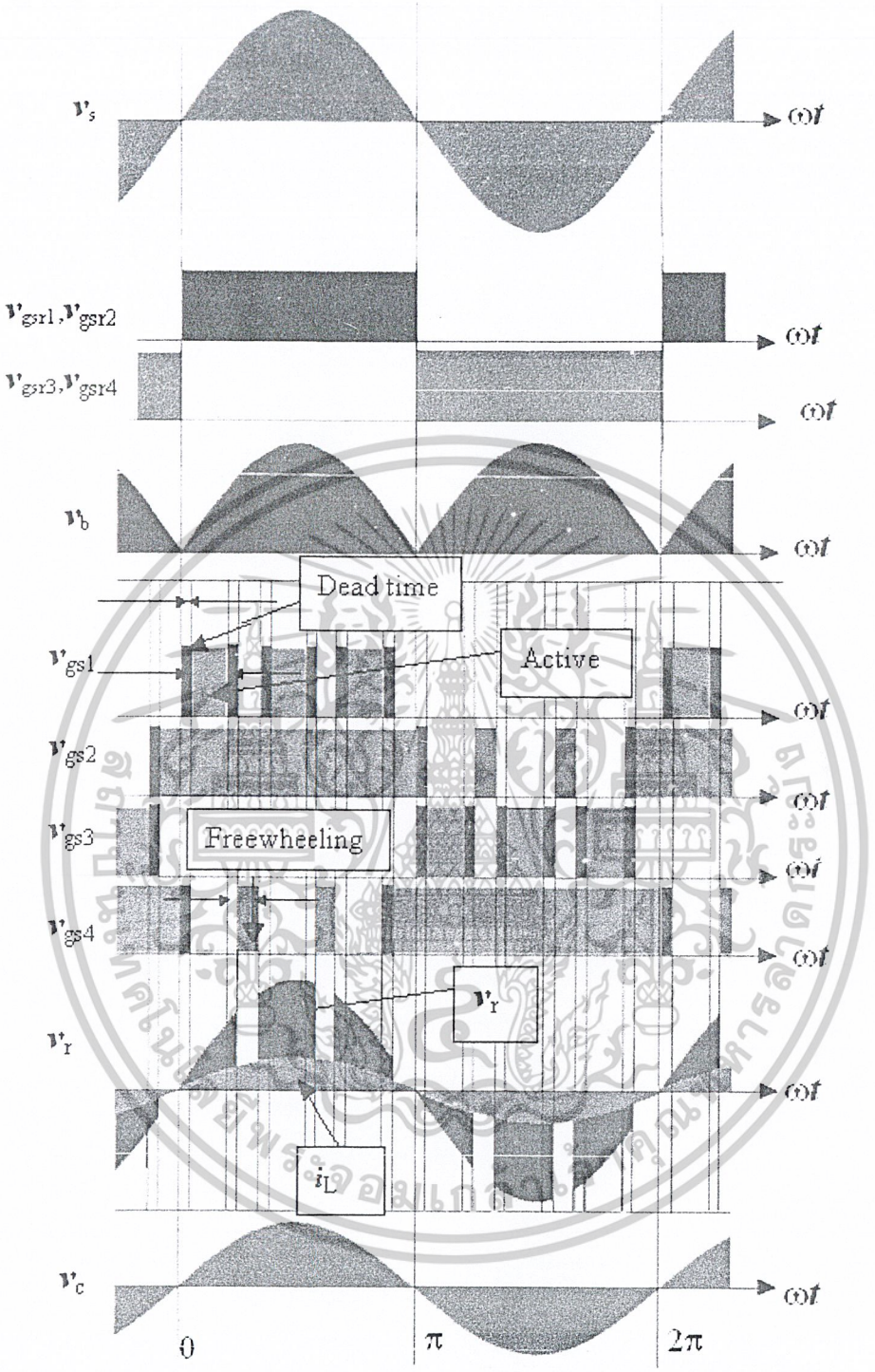
v_{gs4} : สัญญาณควบคุมการขับเกทของสวิตช์ S_4

v_r : แรงดัน PWM ที่ได้จากการการสับ

i_L : กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร

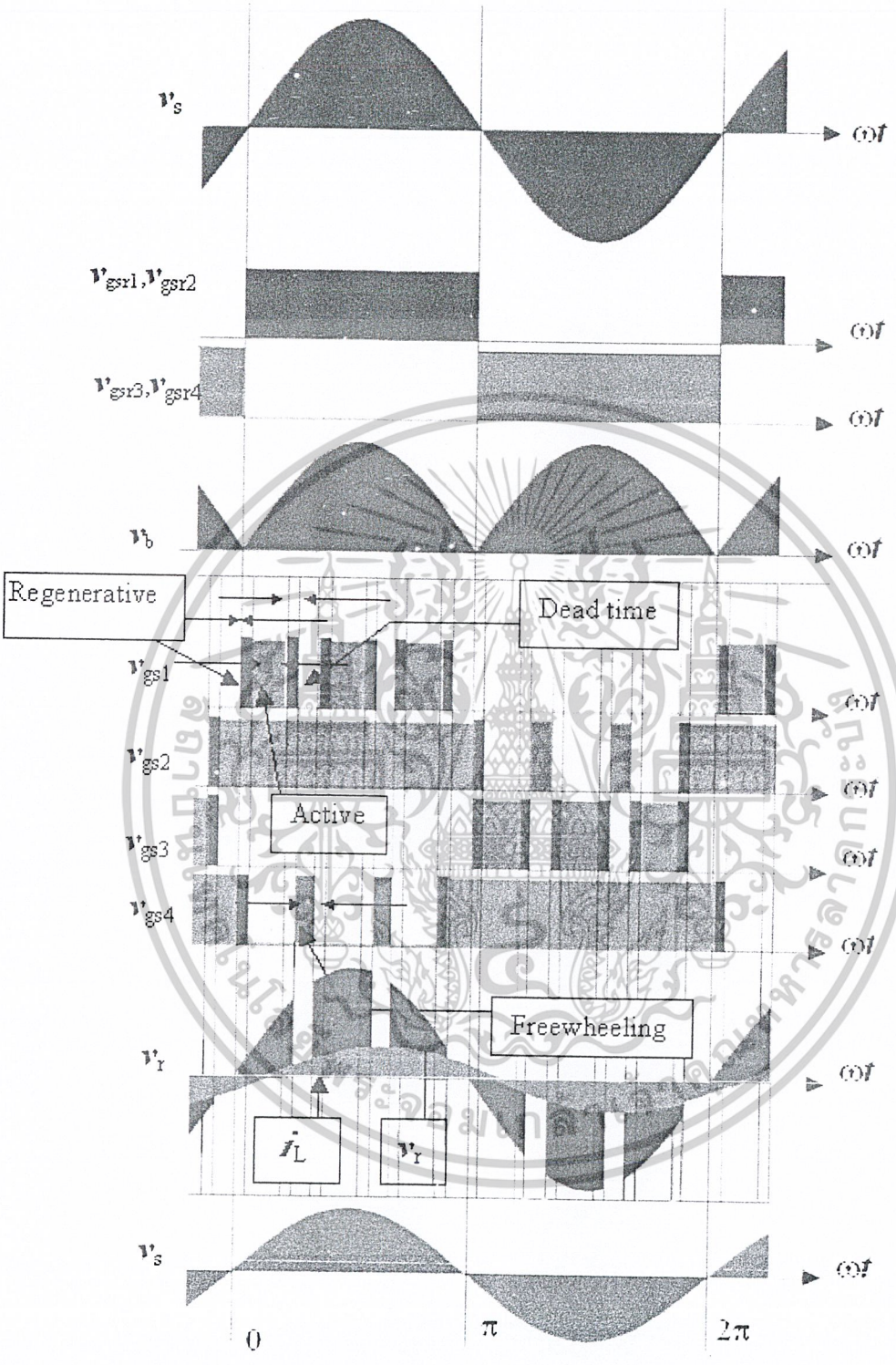
v_c : แรงดันที่ได้จากการผ่านฟิลเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



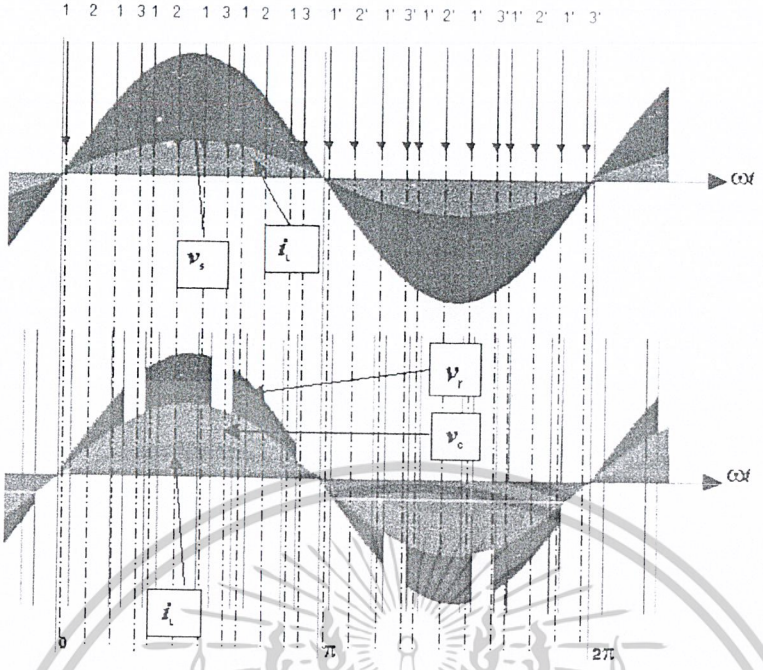
รูปที่ 3-6 แสดงรูปคลื่นของแรงดัน กระแสไฟฟ้า และสัญญาณที่ใช้ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ชิ่ง ในกรณีที่ v_s มีเฟสตรงกันกับ i_L, v_s มีเฟสตรงกันกับ v_c และ v_c มีเฟสตรงกันกับ i_L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-7 แสดงรูปคลื่นของแรงดัน กระแสไฟฟ้า และสัญญาณที่ใช้ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ซิ่ง ในกรณีที่ i_L ล้าหลัง v_S, v_S มีเฟสตรงกันกับ v_C และ i_L ล้าหลัง v_C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-8 แสดงรูปคลื่นแสดงโหมดการการทำงานของวงจร เอซีชอปเปอร์ ในกรณีที่แรงดันไฟฟ้า v_S มีเฟสตรงกันกับกระแสไฟฟ้า i_L และ v_S มีเฟสตรงกันกับ v_C

จากรูปที่ 3-8 แสดงการเรียงลำดับโหมดการทำงานของวงจรเอซีชอปเปอร์ในกรณีที่แรงดันไฟฟ้า v_S มีเฟสตรงกันกับกระแสไฟฟ้า i_L ในกรณีของ โหลด R โดยที่ตัวเลขที่กำหนดขึ้นแสดง โหมดการทำงานที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้คือ

ลำดับที่	โหมดการทำงาน	แรงดัน ไฟฟ้า v_S	แรงดัน ไฟฟ้า v_C	กระแสไฟฟ้า i_L
1	Bypass	$+(v_S > 0)$	$+(v_C > 0)$	$+(i_L > 0)$
2	Active	$+(v_S > 0)$	$+(v_C > 0)$	$+(i_L > 0)$
3	Freewheeling	0	$+(v_C > 0)$	$+(i_L > 0)$
1'	Bypass	$-(v_S < 0$	$-(v_C < 0)$	$-(i_L < 0)$
2'	Active	$-(v_S < 0)$	$-(v_C < 0)$	$-(i_L < 0)$
3'	Freewheeling	0	$-(v_C < 0)$	$-(i_L < 0)$

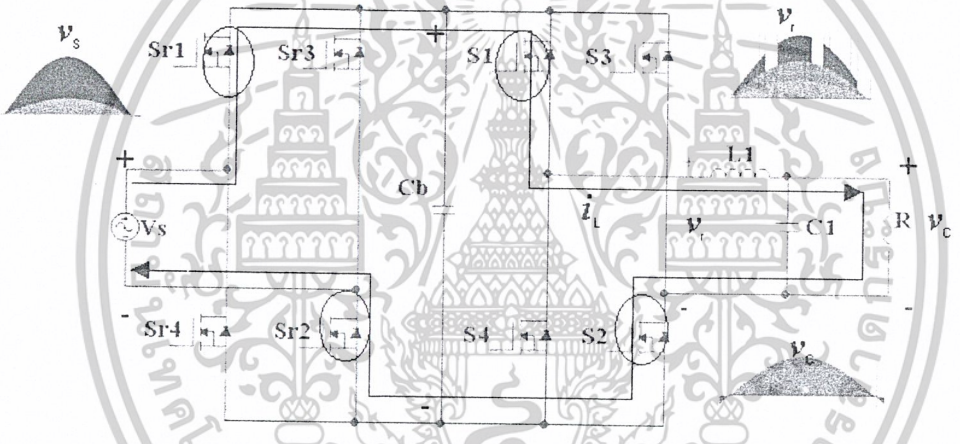
ตารางที่ 3-1 การเรียงลำดับโหมดการทำงานในกรณีของ โหลด Rและ v_S มีเฟสตรงกันกับ v_C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3-8 เมื่อนำค่าลำดับโหมดการทำงานมาเขียนเป็นตารางในตารางที่ 3-1จะเห็นได้ว่าในกรณีนี้จะมีลักษณะการทำงานเป็นรอบ ๆ ซึ่งในแต่ละรอบจะมีโหมดการทำงานที่สัมพันธ์กัน 3 โหมดการทำงานที่แตกต่างกันซึ่งในแต่ละโหมดการทำงานสามารถอธิบายได้ดังนี้

1) โหมดแอกทีฟ (Active Mode ในตารางที่ 3-1คือหมายเลข 2 และ 2') การทำงานในส่วนของโหมดนี้จะเป็นการทำงานเพื่อจ่ายพลังงานให้กับโหลดโดยจะจ่ายพลังงานทั้งในช่วงแรงดันบวกและแรงดันลบดังนั้นในการทำงานในโหมดนี้จะแบ่งช่วงการทำงานในส่วนของวงจรออกได้เป็น 2 ส่วนด้วยกันคือส่วนแรกเป็นส่วนของวงจรที่ทำหน้าที่เป็นวงจร เรียงกระแส และทำหน้าที่เป็นตัว รีเจนเนอร์ทีฟพลังงานคืนสู่แหล่งจ่าย ในกรณีที่มีผลของโหลด R – L ซึ่งในส่วนนี้จะยังไม่กล่าวถึง และในส่วนที่สองจะทำหน้าที่ในการสับ แรงดัน และทำน้าที่ในการกลับขั้วแรงดันไฟฟ้าด้วยซึ่งในการทำงานในส่วนโหมดแอกทีฟ จะมีรูปแบบการทำงานซึ่งจะสามารถอธิบายได้ในรูปวงจรดังต่อไปนี้

-การทำงานเมื่อ v_S เป็นบวก และ i_L เป็นบวก (ในตารางที่ 3-1คือหมายเลข 2)



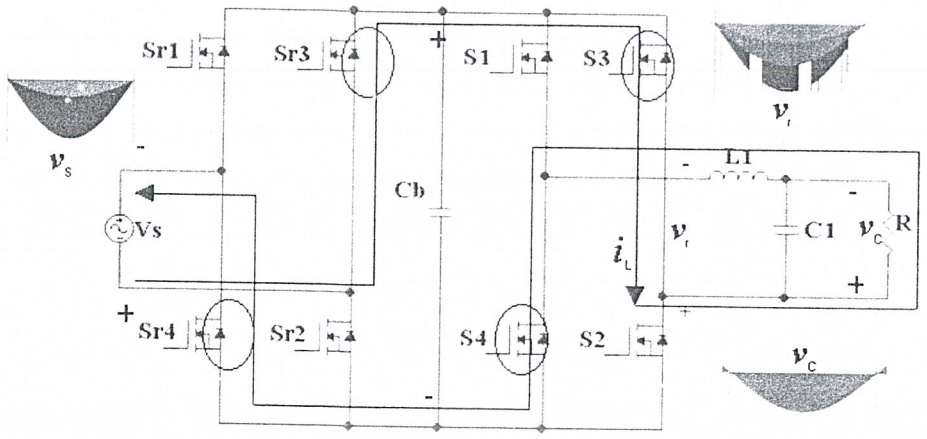
รูปที่ 3-9 แสดงการทำงานของสวิตซ์เมื่อ v_S เป็นบวกและ i_L เป็นบวก

จากรูปที่ 3-9 วงจรการทำงาน ไดโอดที่สวิตซ์ S_{r1} และ S_{r2} ทำหน้าที่เป็นตัวเรียงกระแส ส่วนสวิทซ์มอสเฟท S_1 และ S_2 จะทำงาน (On) พร้อมกันโดยมีทิศทางกระแสดังรูป

- การทำงานเมื่อ v_S เป็นลบ และ i_L เป็นลบ (ในตารางที่ 3-1คือหมายเลข 2')

จากรูปที่ 3-10 วงจรการทำงาน ไดโอดที่สวิตซ์ S_{r3} และ S_{r4} ทำหน้าที่เป็นตัวเรียงกระแส ส่วนสวิทซ์ มอสเฟท S_3 และ S_4 จะทำงาน พร้อมกันโดยมีทิศทางกระแสดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

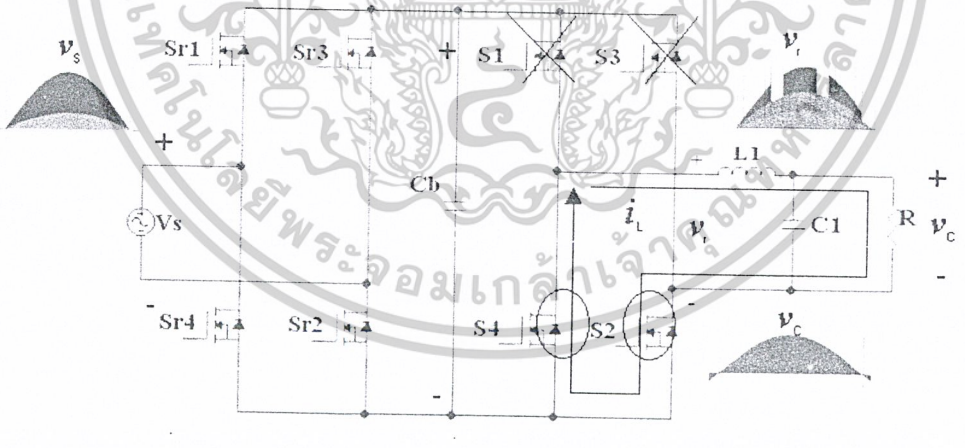


รูปที่ 3-10 แสดงการทำงานของสวิตซ์เมื่อ v_S เป็นลบและ i_L เป็นลบ

2) โหมดฟรีวีลลิ่ง (Freewheeling Mode ในตารางที่ 3-1คือหมายเลข 3 และ 3') การทำงานในส่วนของโหมดนี้จะเป็นการทำงานในช่วงเวลาที่ตรงกันข้ามกับ โหมดแอกทีฟโดยในโหมดนี้จะทำให้พลังงานที่สะสมในขดลวดเกิดการคายพลังงานไปทางด้านโหลดต่อเนื่องจากช่วง แอกทีฟ โหมด ดังนั้นในโหมดนี้จะมีการทำงานเป็นดังนี้

- เมื่อ $i_L > 0$ และ $v_S = 0$ (i_L มีค่าเป็นบวก ในตารางที่ 3-1คือหมายเลข 3)

ในการทำงานในช่วงโหมดฟรีวีลลิ่ง เมื่อ $i_L > 0$ จะมีรูปแบบการทำงานของวงจรเป็นดังนี้



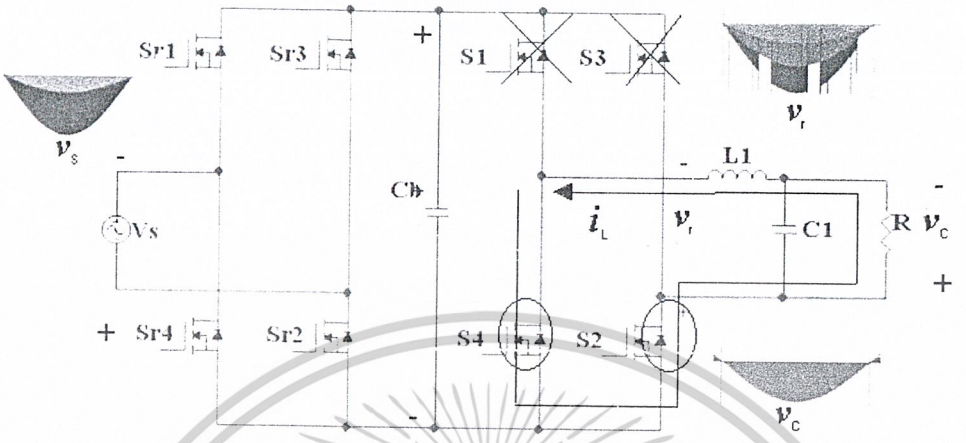
รูปที่ 3-11 แสดงการทำงานของสวิตซ์เมื่อ $v_S = 0$ และ $i_L > 0$

จากวงจรในรูปที่ 3-11แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในช่วงที่ $v_S = 0$, $i_L > 0$ โดยที่สวิตซ์ S2 จะทำงานทำให้กระแสไหลผ่านไดโอดของสวิตซ์ S4 ซึ่งจะทำให้เกิดการครบลูปกระแสและกระแสจะยังคงไหลไปในทิศทางเดิมอย่างต่อเนื่องผ่านทางด้านเอาท์พุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-เมื่อ $i_L < 0$ และ $v_S = 0$ (i_L มีค่าเป็นลบในตารางที่ 3-1คือหมายเลข 3')

ในการทำงานในช่วงฟรีวีลลิ่ง โหมด เมื่อ $i_L < 0$ จะมีรูปแบบการทำงานของวงจรเป็นดังนี้



รูปที่ 3-12 แสดงการทำงานของสวิตซ์เมื่อ $v_s = 0$ และ $i_L < 0$

จากวงจรในรูปที่ 3-12 แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในช่วงที่ $v_S = 0$, $i_L < 0$ โดยที่สวิตซ์ S4จะทำงานทำให้กระแสไหลผ่านไดโอดของสวิตซ์ S2 ซึ่งจะทำให้เกิดการครบลูปกระแสและกระแสจะยังคงไหลไปในทิศทางเดิมอย่างต่อเนื่องผ่านทางด้านเอาท์พุท

3) โหมดบายพาส (Bypass Mode ตารางที่ 3-1คือหมายเลข 1 และ1') โดยช่วงเวลาของการทำงานในโหมดบายพาสจะใช้ช่วงเวลาของ ตายของสัญญาณ ของสวิตซ์เพื่อสร้างไหลของกระแสไฟฟ้าไว้ล่วงหน้าเพื่อป้องกันการเกิด สไปร์ท (Spike) อันเนื่องมาจากการทำงานของสวิตซ์ ในกรณีนี้จะมีการทำงานในโหมดนี้ ซึ่ง v_S มีเฟสตรงกันกับ i_L จึงมีรูปแบบการทำงานการทำงานเป็น 2 รูปแบบ

- เมื่อ $i_L > 0$ และ $v_S > 0$ (ในตารางที่ 3-1คือหมายเลข 1)

ในการทำงานในช่วงโหมดบายพาส เมื่อ $i_L > 0$ จะมีรูปแบบการทำงานของวงจรเป็นดังนี้

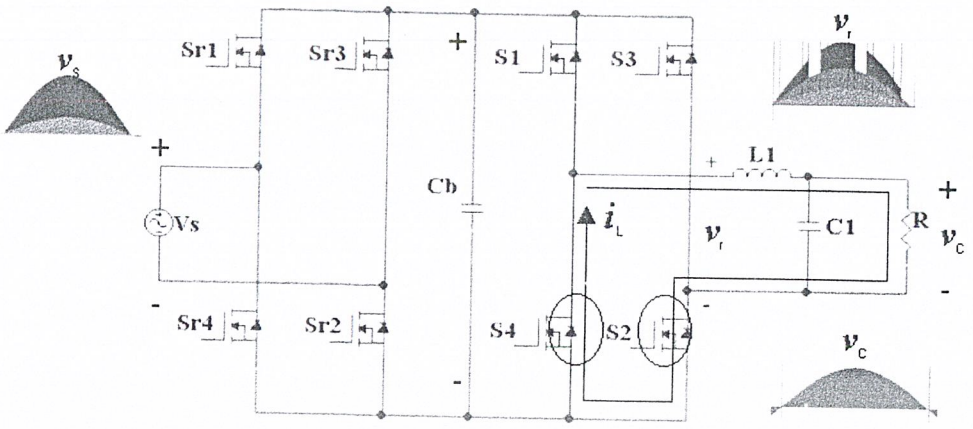
จากวงจรในรูปที่ 3-13 แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในช่วงที่ $v_S > 0$, $i_L > 0$ โดยที่สวิตซ์ S2 จะทำงานทำให้กระแสไหลผ่านไดโอดของสวิตซ์ S4 ซึ่งจะทำให้เกิดการครบลูปกระแสและกระแสจะยังคงไหลไปในทิศทางเดิมอย่างต่อเนื่องผ่านทางด้านเอาท์พุท

เมื่อ $i_L < 0$ และ $v_S < 0$ (ในตารางที่ 3-1คือหมายเลข 1')

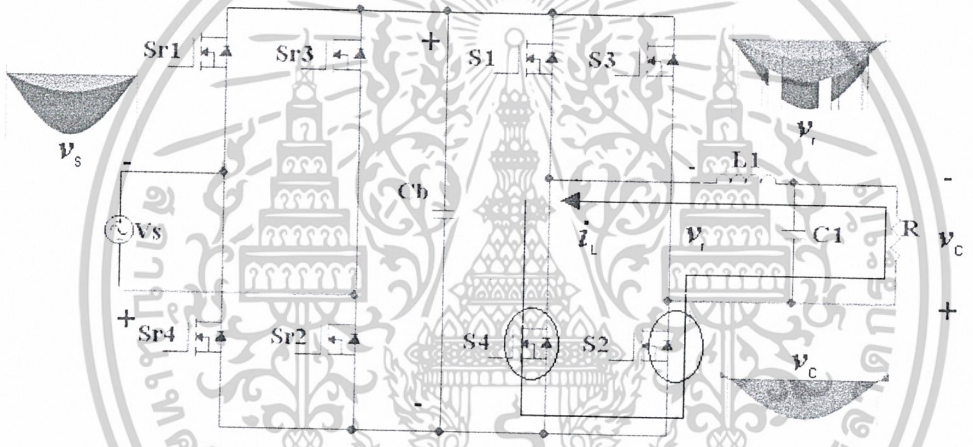
ในการทำงานในช่วง โหมดบายพาส เมื่อ $i_L < 0$ จะมีรูปแบบการทำงานของวงจรเป็นดังนี้

จากวงจรในรูปที่ 3-14 แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในช่วงที่ $v_S < 0$, $i_L < 0$ โดยที่สวิตซ์S4จะทำงานทำให้กระแสไหลผ่านไดโอดของสวิตซ์S2ซึ่งจะทำให้เกิดการครบลูปกระแสและกระแสจะยังคงไหลไปในทิศทางเดิมอย่างต่อเนื่องผ่านทางด้านเอาท์พุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-13 แสดงการทำงานของสวิตซ์เมื่อ $v_S > 0$ และ $i_L > 0$

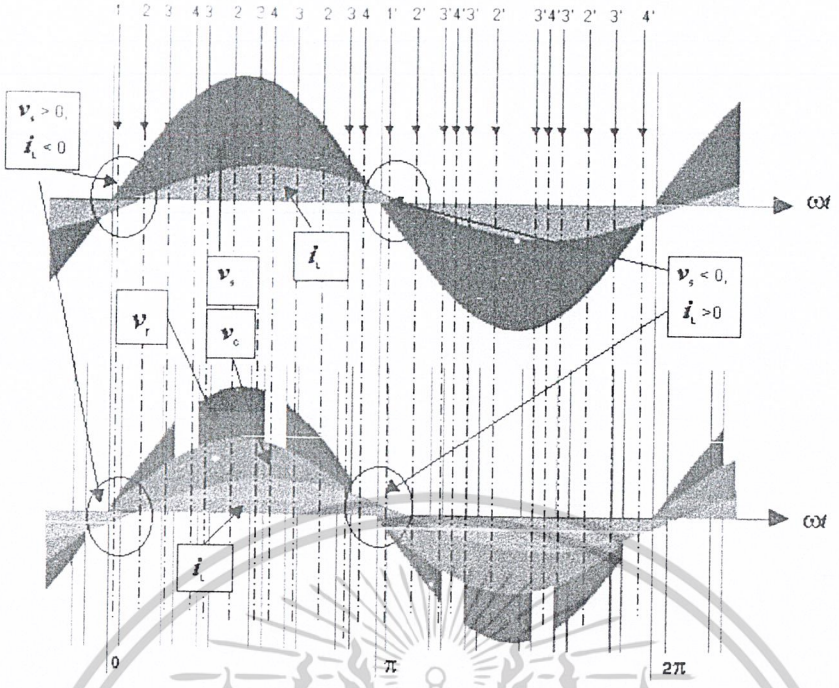


รูปที่ 3-14 แสดงการทำงานของสวิตซ์เมื่อ $v_S < 0$ และ $i_L < 0$

ส่วนการทำงานในกรณีของโหลด R – L ที่กระแสไฟฟ้า (i_L) ล้าหลังแรงดัน (v_S) ซึ่งจะมีโหมดการทำงานของการทำงานที่เพิ่มเข้ามาดังแสดงดังในรูปที่ 3-15

จากรูปที่ 3-15 แสดงการเรียงลำดับโหมดการทำงานของวงจร เอซีชอปเปอร์ ในกรณีที่กระแสไฟฟ้า i_L ล้าหลังแรงดันไฟฟ้า v_S ในกรณีของโหลด R - L โดยที่ตัวเลขที่กำหนดขึ้นแสดง โหมดการทำงานที่เกิดขึ้นซึ่งสามารถเขียนเป็นตารางดังในตารางที่ 3-2 การเรียงลำดับโหมดการทำงานในกรณีของ โหลด R-L ลำดับการทำงานในโหมดต่างๆที่เกิดขึ้นในกรณีนี้การทำงานโหมดบายพาส ที่มีช่วงของการทำงานที่เพิ่มเข้าในการทำหน้าที่ รีเจนเนอร์เรทีฟพลังงานคืนจากโหลด ด้านเอาท์พุท คืนไปยังด้านอินพุทสำหรับในส่วนของการทำงานในโหมดอื่นๆในช่วงอื่นๆจะยังคงทำงานเหมือนกับกรณีที่แรงดันไฟฟ้า v_S มีเฟสตรงกันกับกระแสไฟฟ้า i_L ซึ่งสามารถเขียนเป็นตาราง.เป็นดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-15 แสดงรูปคลื่นแสดงโหมดการการทำงานของวงจรเอซีชอปเปอร์ ในกรณีที่กระแสไฟฟ้า i_L ล้าหลัง แรงดันไฟฟ้า v_S และ v_S มีเฟสตรงกันกับ v_C

ลำดับที่	โหมดการทำงาน	แรงดัน ไฟฟ้า v_S	แรงดัน ไฟฟ้า v_C	กระแสไฟฟ้า i_L
1	Bypass (Regenerative)	$+(v_S > 0)$	$+(v_C > 0)$	$-(i_L < 0)$
2	Active	$+(v_S > 0)$	$+(v_C > 0)$	$+(i_L > 0)$
3	Bypass	$+(v_S > 0)$	$+(v_C > 0)$	$+(i_L > 0)$
4	Freewheeling	0	$+(v_C > 0)$	$+(i_L > 0)$
1'	Bypass (Regenerative)	$-(v_S > 0)$	$-(v_C > 0)$	$+(i_L > 0)$
2'	Active	$-(v_S > 0)$	$-(v_C > 0)$	$-(i_L < 0)$
3'	Bypass	$-(v_S > 0)$	$-(v_C > 0)$	$-(i_L < 0)$
4'	Freewheeling	0	$-(v_C > 0)$	$-(i_L < 0)$

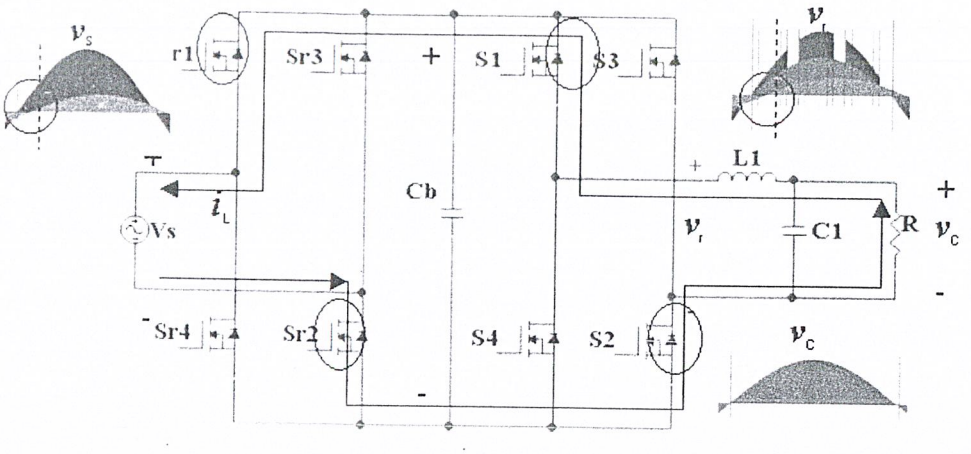
ตารางที่ 3-2 การเรียงลำดับโหมดการทำงานในกรณีของ โหลด R-L และ v_S มีเฟสตรงกันกับ v_C

ในส่วนของการทำงานในโหมดบายพาส ในช่วงที่มีการเกิด รีเจนเนอร์เรทีฟมีรูปแบบการทำงานอยู่ 2 ลักษณะคือ

- เมื่อ $v_S > 0$ และ $i_L < 0$ (ในตารางที่ 3-2คือหมายเลข 1)

ในการทำงานในช่วง รีเจนเนอร์เรทีฟเมื่อ $i_L < 0$ จะมีรูปแบบการทำงานของวงจรเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

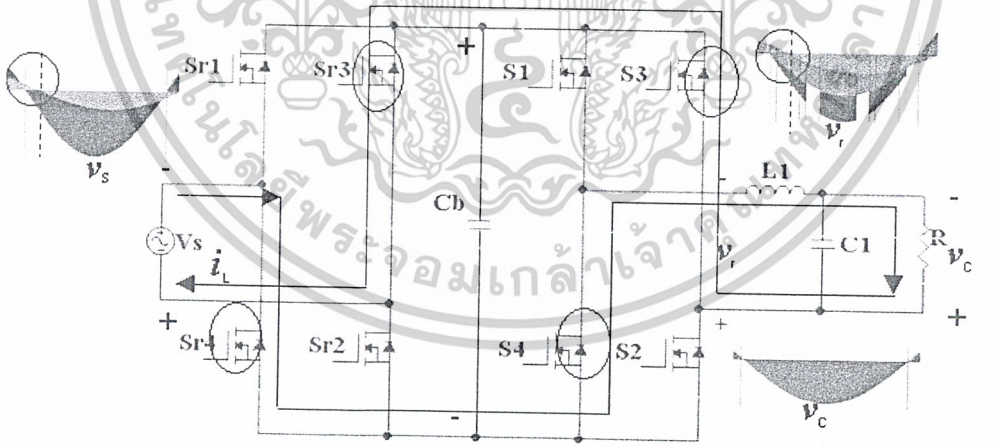


รูปที่ 3-16 แสดงการทำงานของสวิตซ์เมื่อ $v_S > 0$ และ $i_L < 0$

จากวงจรในรูปที่ 3-16แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในช่วงที่ $v_S > 0$, $i_L < 0$ โดยที่กระแส i_L จะไหลผ่านทางด้านของไดโอดของสวิตซ์ S2 และ S4 ของทางด้านเอาท์พุต และสวิตซ์ Sr1 และ Sr2 ทางด้านอินพุตจะทำงานทำให้เกิดการครบลูปกระแสและกระแสจะยังคงไหลไปในทิศทางผ่านทางด้านเอาท์พุทไปยังด้านอินพุต

- เมื่อ $v_S < 0$ และ $i_L > 0$ (ในตารางที่ 3-2คือหมายเลข 1')

ในการทำงานในช่วง รีเจนเนอร์เรทีฟเมื่อ $i_L > 0$ จะมีรูปแบบการทำงานของ วงจรเป็นดังนี้



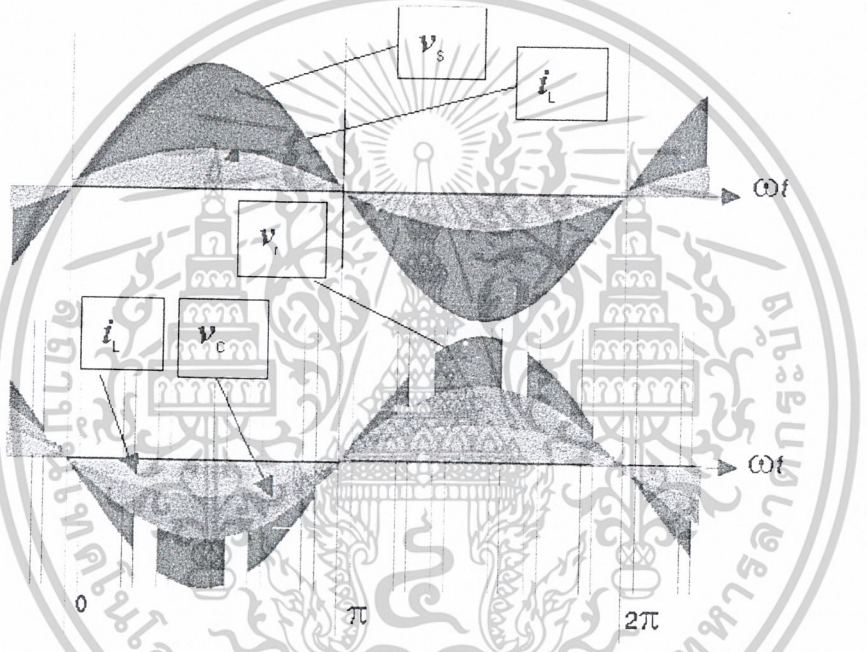
รูปที่ 3-17 แสดงการทำงานของสวิตซ์เมื่อ $v_S < 0$ และ $i_L > 0$

จากวงจรในรูปที่ 3-17 แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในช่วงที่ $v_S < 0$, $i_L > 0$ โดยที่กระแส i_L จะไหลผ่านทางด้านของไดโอดของสวิตซ์ S3 และ S4 ของทางด้านเอาท์พุต และสวิตซ์ Sr3 และ Sr4 ทางด้านอินพุตจะทำงานทำให้เกิดการครบลูปกระแส และกระแสจะยังคงไหลไปในทิศทางผ่านทางด้านเอาท์พุทไปยังด้านอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

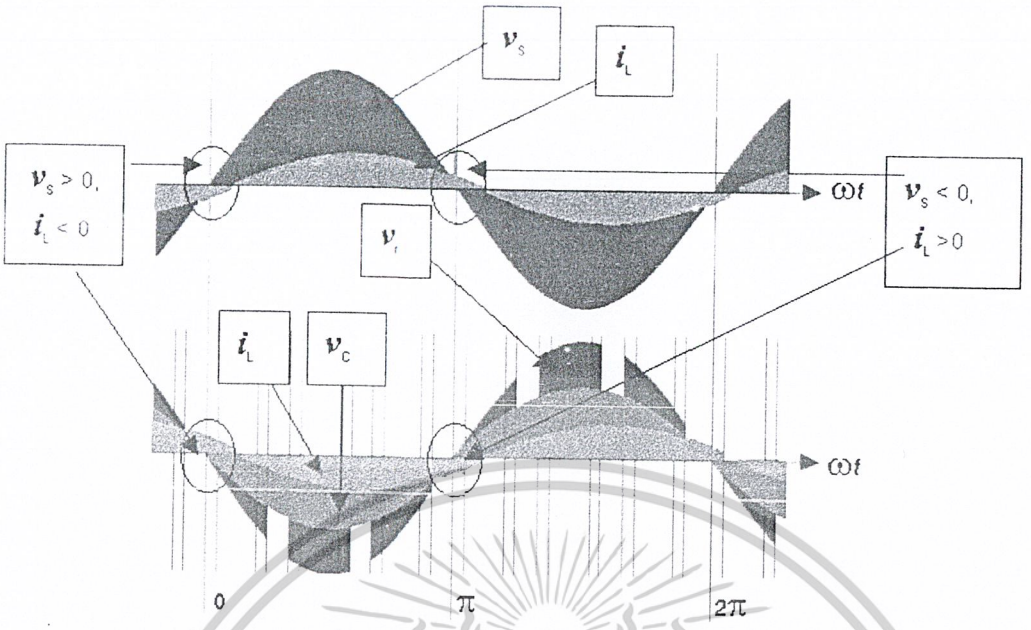
ซึ่งในส่วนของการทำงานในส่วนของ กรณีที่แรงดันทางด้านอินพุต (v_S) มีเฟสตรงกันกับแรงดันทางด้านเอาท์พุต (v_C) ก็มีรายละเอียดเพียงเท่านี้

การทำงานในกรณีที่ แรงดันทางด้านอินพุต (v_S) ต่างเฟสกัน 180 องศา กับแรงดันทางด้านเอาท์พุต(v_C) ในส่วนของการพิจารณาในส่วนของรูปคลื่นของแรงดันและกระแสไฟฟ้าในส่วนต่าง ๆของวงจร จาก รูปคลื่นใน รูปที่3-18 และรูปที่ 3-19 เราจะเห็นได้จากการเปรียบเทียบระหว่าง รูปคลื่นของแรงดัน และกระแส ไฟฟ้า i_L มีเฟสตรงกันกับ v_S , v_S ต่างเฟสกัน 180 องศา v_C , i_L มีเฟสตรงกันกับ v_C ในกรณีของโหลด R เทียบกับ รูปคลื่นของแรงดันและ กระแสไฟฟ้า i_L ล้าหลัง v_S, v_S ต่างเฟสกัน 180 องศา v_C , i_L ล้าหลัง v_Cในกรณีของโหลด R – L ในกรณีที่ แรงดัน และกระแสไฟฟ้า i_L มีเฟสตรงกันกับ v_S นั้น การทำงานของวงจรจะไม่มีการเกิด การรีเจนเนอร์ทีฟ



รูปที่ 3-18 แสดงรูปคลื่นของแรงดัน และกระแสไฟฟ้า โดยที่ v_S มีเฟสตรงกันกับ i_L , v_S ต่างเฟสกัน 180 ^{o} กับ v_C และ i_L มีเฟสตรงกันกับ v_C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-19 แสดงรูปคลื่น ของแรงดัน และกระแสไฟฟ้า โดยที่ i_L มีเฟสตรงกันกับ v_S , v_S ต่างเฟสกัน 180 ^{o} กับ v_C และ i_L มีเฟสตรงกันกับ v_C

จากรูปที่ 3-20 และรูปที่ 3-21 แสดงรูปคลื่นของแรงดัน กระแสไฟฟ้า และสัญญาณที่ใช้ควบคุมการทำงานของ อุปกรณ์สวิตช์ซึ่งโดยที่โดยดูจากวงจรในรูปที่ 3-3 ประกอบ

v_s : แรงดันอินพุทที่รับมาจากแหล่งจ่าย

v_{gsr1},v_{gsr2} : สัญญาณควบคุมการขับเกทของสวิตช์ S_{r1} และ S_{r2} ตามลำดับ ในการรีเจนเนอเรทีฟคืนพลังงาน

v_{gs3} ,v_{gsr4} : สัญญาณควบคุมการขับเกทของสวิตช์ S_{r3} และ S_{r4} ตามลำดับ ในการรีเจนเนอเรทีฟคืนพลังงาน

v_b : แรงดันที่ได้จากการการเรียงกระแสแรงดันด้านอินพุต

v_{gs1} : สัญญาณควบคุมการขับเกทของสวิตช์ S_1

v_{gs2} : สัญญาณควบคุมการขับเกทของสวิตช์ S_2

v_{gs3} : สัญญาณควบคุมการขับเกทของสวิตช์ S_3

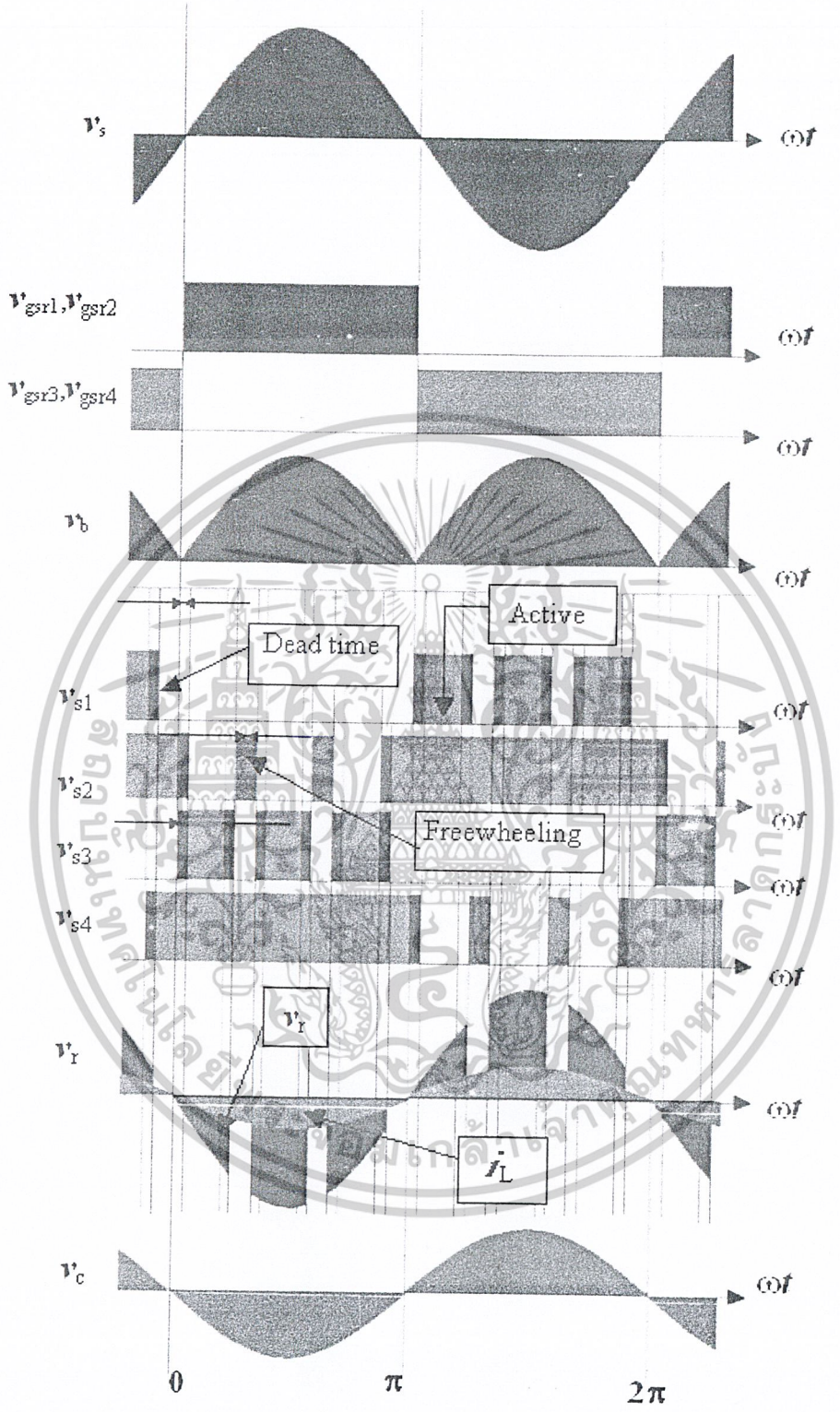
v_{gs4} : สัญญาณควบคุมการขับเกทของสวิตช์ S_4

v_r : แรงดัน PWM ที่ได้จากการการสับ

i_L : กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร

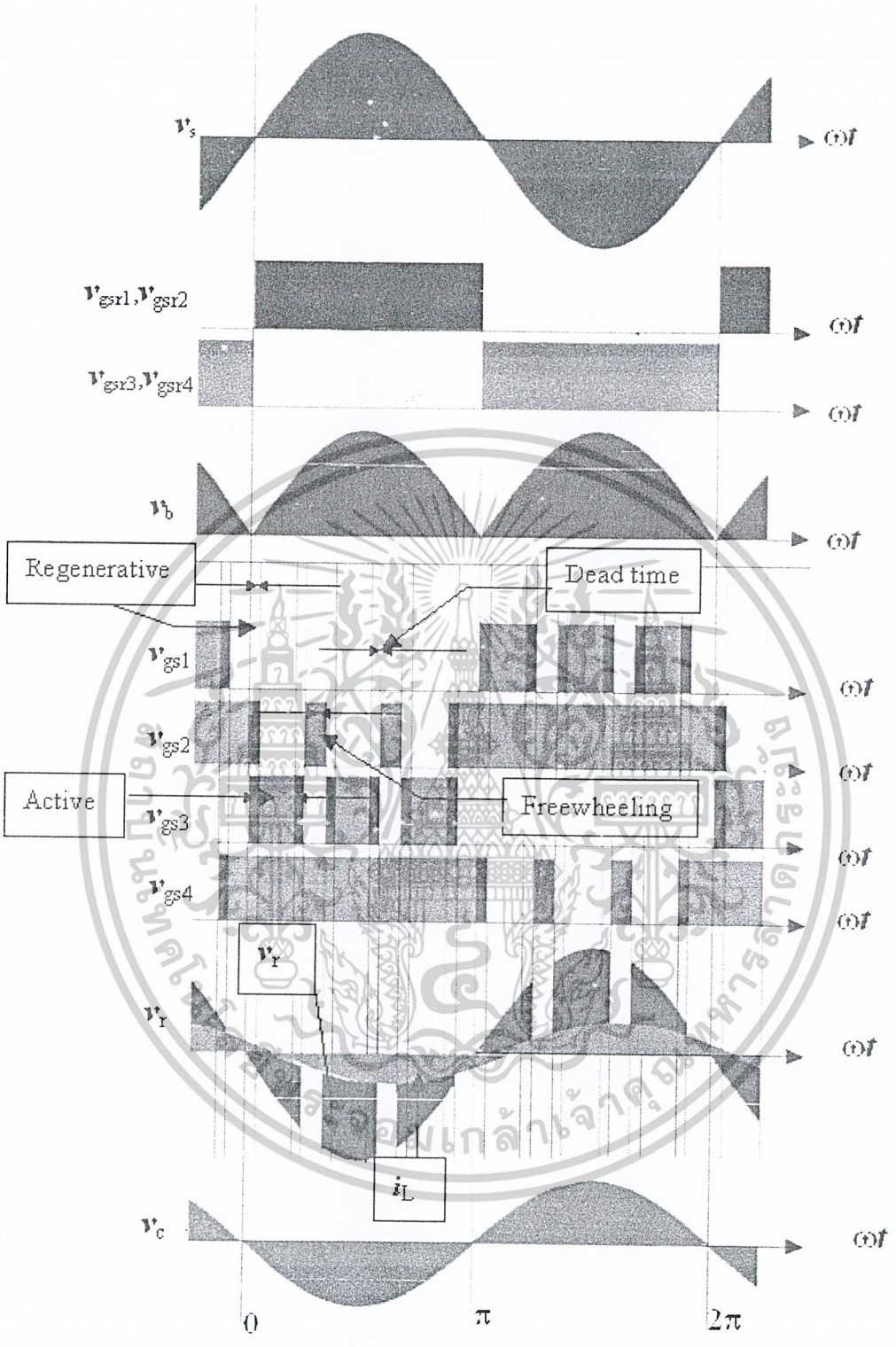
v_c : แรงดันที่ได้จากการผ่านฟิลเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-20 แสดงรูปคลื่นของแรงดัน กระแสไฟฟ้า และสัญญาณที่ใช้ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ชิ่ง ในกรณีที่ v_s มีเฟสตรงกันกับ i_L , v_s ต่างเฟสกัน 180 ^{o}กับ v_c และ i_L มีเฟสตรงกันกับ v_c

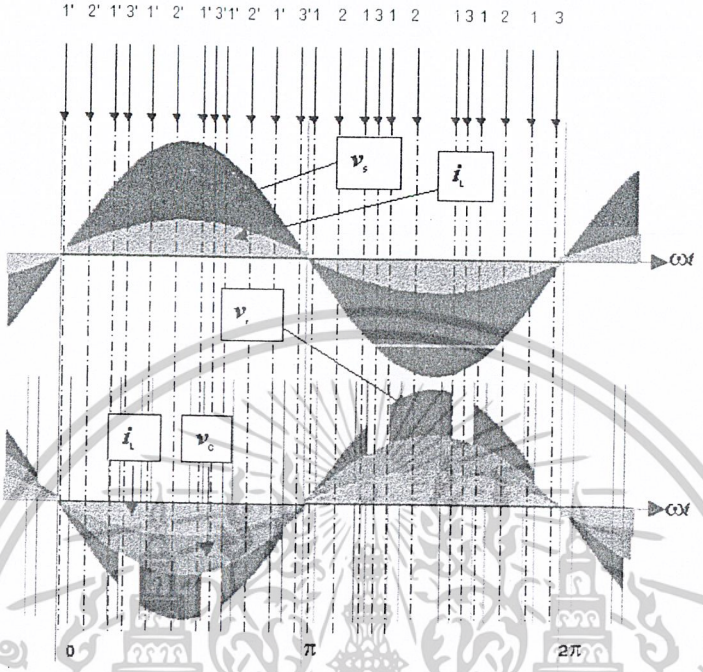
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-21 แสดงรูปคลื่นของแรงดัน กระแสไฟฟ้า และสัญญาณที่ใช้ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ชิ่ง ในกรณีที่ i_L ล้าหลัง v_S , v_S ต่างเฟสกัน 180 ^{o}กับ v_C และ i_L ล้าหลัง v_C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการไล่โหมดการทำงานในกรณีของการทำงานแบบกลับขั้วแรงดัน โดยที่แรงดันทางด้านอินพุต (v_S) ต่างเฟสกัน 180 องศา กับขั้วแรงดันด้านเอาท์พุตในกรณีของโหลด R



รูปที่ 3-22 รูปคลื่นแสดงโหมดการการทำงานของวงจรเอซีซอปเปอร์ ในกรณีที่แรงดันไฟฟ้า v_S มีเฟสตรงกันกับกระแสไฟฟ้า i_L, v_S ต่างเฟสกับ v_C อยู่ 180 องศา

จากรูปที่ 3-22 แสดงการเรียงลำดับโหมดการทำงานของวงจรเอซีซอปเปอร์ ในกรณีที่แรงดันไฟฟ้า v_S มีเฟสตรงกันกับกระแสไฟฟ้า i_L ในกรณีของโหลด R โดยที่ตัวเลขที่กำหนดขึ้นแสดง โหมดการทำงานที่เกิดขึ้น จากรูปคลื่นและเมื่อนำค่าลำดับโหมดการทำงานมาเขียนเป็นตารางดังในตารางที่ 3–3จะเห็นได้ว่าในกรณีนี้จะมีลักษณะการทำงานเป็นรอบ ๆ ซึ่งในแต่ละรอบจะมีโหมดการทำงานที่สัมพันธ์กัน 3โหมดการทำงานที่แตกต่างกันซึ่งในแต่ละโหมดการทำงานสามารถอธิบายได้ดังนี้ โดยที่โหมดการทำงานของวงจรในกรณีนี้จะมีการทำงานเป็นเหมือนกับกรณีของ, v_S มีเฟสตรงกันกับ v_C

จากรูปคลื่นและเมื่อนำค่าลำดับโหมดการทำงานมาเขียนเป็นตารางจะเห็นได้ว่าในกรณีนี้จะมีลักษณะการทำงานเป็นรอบ ๆ ซึ่งในแต่ละรอบจะมีโหมดการทำงานที่สัมพันธ์กัน 3 โหมดการทำงานที่แตกต่างกันซึ่งในแต่ละโหมดการทำงานสามารถอธิบายได้ดังนี้

ตารางแสดงโหมดการทำงานในกรณี ที่แรงดันไฟฟ้า v_S มีเฟสตรงกันกับกระแสไฟฟ้า i_L, v_S ต่างเฟส กับ v_C อยู่ 180 องศา

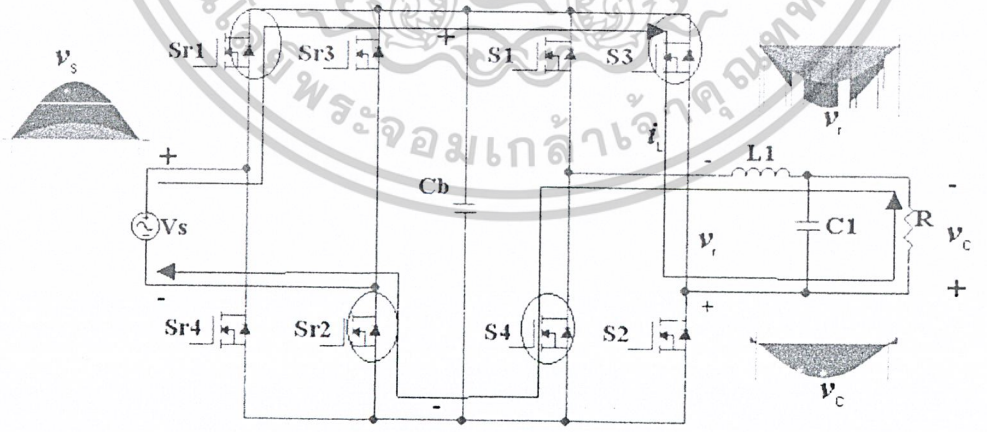
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่	โหมดการทำงาน	ที่แรงดันไฟฟ้า v_S	แรงดัน ไฟฟ้า v_C	กระแสไฟฟ้า i_L
1'	Bypass	$+(v_S > 0)$	$-(v_C < 0)$	$+(i_L > 0)$
2'	Active	$+(v_S > 0)$	$-(v_C < 0)$	$+(i_L > 0)$
3'	Freewheeling	0	$-(v_C < 0)$	$+(i_L > 0)$
1	Bypass	$-(v_S < 0$	$+(v_C > 0)$	$-(i_L < 0)$
2	Active	$-(v_S < 0)$	$+(v_C > 0)$	$-(i_L < 0)$
3	Freewheeling	0	$+(v_C > 0)$	$-(i_L < 0)$

ตารางที่ 3-3 การเรียงลำดับโหมดการทำงานในกรณีของ โหลด Rและ v_S ต่างเฟสกับ v_C อยู่ 180 องศา

1) โหมดแอกทีฟ (ในตารางที่ 3–3คือหมายเลข 2 และ 2') การทำงานในส่วนของโหมดนี้จะเป็นการทำงานเพื่อจ่ายพลังงานให้กับโหลดโดยจะจ่ายพลังงานทั้งในช่วงแรงดันบวกและแรงดันลบดังนั้นในการทำงานในโหมดนี้จะแบ่งช่วงการทำงานในส่วนของวงจรออกได้เป็น 2 ส่วนด้วยกันคือส่วนแรกเป็นส่วนของวงจรที่ทำหน้าที่เป็นวงจร เรียงกระแส และทำหน้าที่เป็นตัวรีเจนเนอร์เรทีฟพลังงานคืนสู่แหล่งจ่ายในกรณีที่มีผลของโหลด R – L ซึ่งในส่วนนี้จะยังไม่กล่าวถึง และในส่วนที่สองจะทำหน้าที่ในการสับแรงดัน และทำหน้าที่ในการกลับขั้วแรงดันไฟฟ้าด้วยซึ่งในการทำงานในส่วนโหมดแอกทีฟ จะมีรูปแบบการทำงานซึ่งจะสามารถอธิบายได้ในรูปวงจรดังต่อไปนี้

- การทำงานเมื่อ v_S เป็นบวก และ i_L เป็นบวก (ในตารางที่ 3–3คือหมายเลข 2')

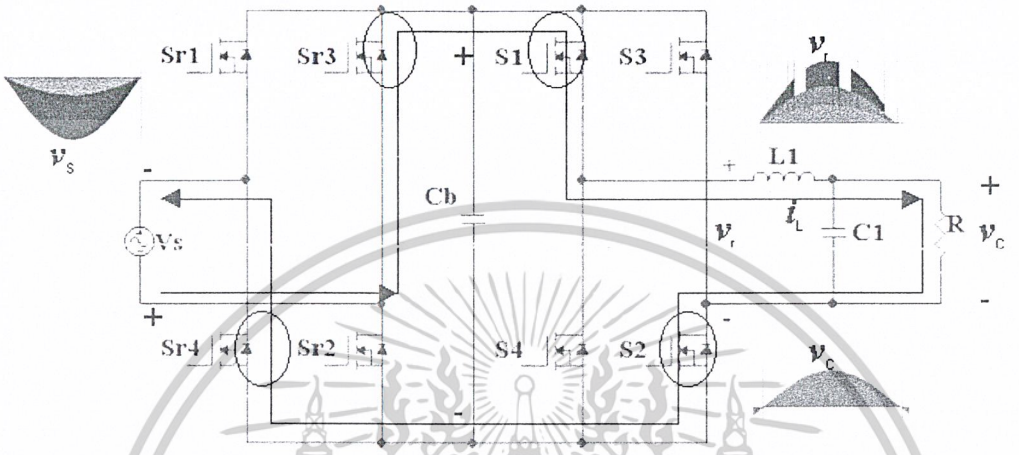


รูปที่ 3-23 แสดงการทำงานของสวิตซ์เมื่อ v_S เป็นบวกและ i_L เป็นบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3-23 วงจรการทำงาน ไดโอดที่สวิตซ์ S_{r1} และ S_{r2} ทำหน้าที่เป็นตัว เรียงกระแส ส่วนสวิตซ์ มอสเฟท S_3 และ S_4 จะทำงาน พร้อมกันโดยมีทิศทางกระแสดังรูป โดยที่ v_S ต่างเฟสกับ v_C ซึ่งจะมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไปยังโหลด

- การทำงานเมื่อ v_S เป็นลบ และ i_L เป็นลบ (ในตารางที่ 3–3คือหมายเลข 2)



รูปที่ 3-24 แสดงการทำงานของสวิตซ์เมื่อ v_s เป็นลบและ i_L เป็นลบ

จากรูป ที่ 3-24 วงจรการทำงาน ไดโอดที่สวิตซ์ S_{r3} และ S_{r4} ทำหน้าที่เป็นตัวเรียงกระแส ส่วนสวิตซ์ มอสเฟท S_1 และ S_2 จะทำงานพร้อมกันโดยมีทิศทางกระแสดังรูป

2) โหมดฟรีวีลลิ่ง (ในตารางที่ 3–3คือหมายเลข 3 และ 3') การทำงานในส่วนของโหมดนี้จะเป็นการทำงานในช่วงเวลาที่ตรงกันข้ามกับโหมดแอกทีฟ โดยในโหมดนี้จะทำให้พลังงานที่สะสมในขดลวดเกิดการคายพลังงานไปทางด้านโหลดต่อเนื่องจากช่วงโหมดแอกทีฟ ดังนั้นในโหมดนี้จะมีการทำงานเป็นดังนี้

- เมื่อ $i_L < 0$ และ $v_S = 0$ (i_L มีค่าเป็นบวก ในตารางคือหมายเลข 3')

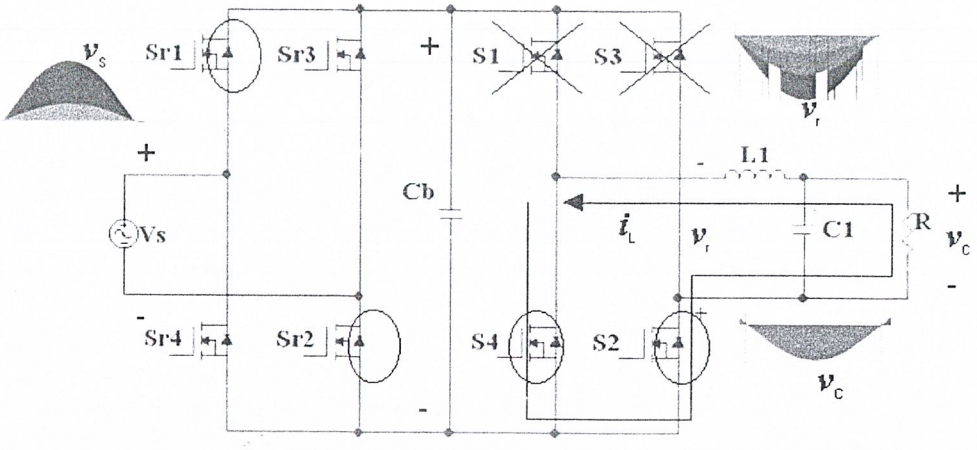
ในการทำงานในช่วงโหมดฟรีวีลลิ่ง เมื่อ $i_L < 0$ จะมีรูปแบบการทำงานของวงจรเป็นดังนี้

จากวงจรในรูปที่ 2-25 แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในช่วงที่ $v_S = 0$, $i_L < 0$ โดยที่สวิตซ์ S4 จะทำงานทำให้กระแสไหลผ่านไดโอดของสวิตซ์ S2 ซึ่งจะทำให้เกิดการครบลูปกระแส และกระแสจะยัง คงไหลไปในทิศทางเดิมอย่างต่อเนื่องผ่านทางด้านเอาท์พุท

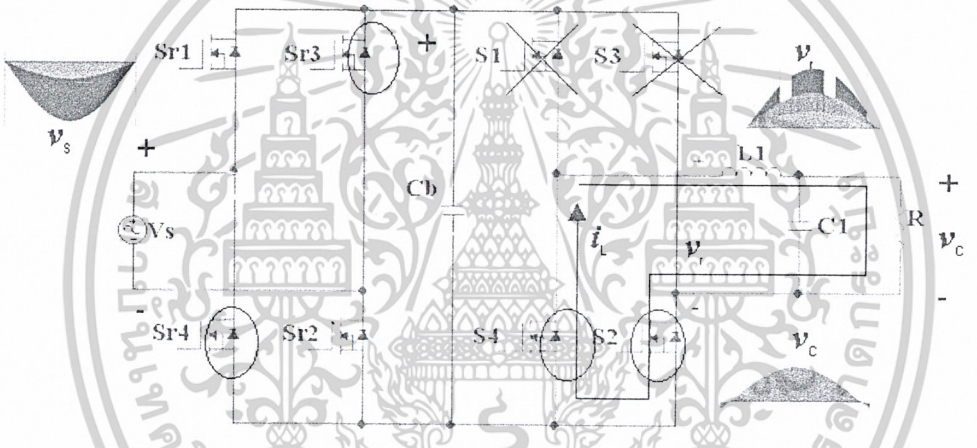
- เมื่อ $i_L > 0$ และ $v_S = 0$ (i_L มีค่าเป็นบวก ในตารางที่ 3–3คือหมายเลข 3)

จากวงจรในรูปที่ 3-26 แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในช่วงที่ $v_S = 0$, $i_L > 0$ โดยที่สวิตซ์ S2 จะทำงานทำให้กระแสไหลผ่านไดโอดของสวิตซ์ S4 ซึ่งจะทำให้เกิดการครบลูปกระแส และกระแสจะยัง คงไหลไปในทิศทางเดิมอย่างต่อเนื่องผ่านทางด้านเอาท์พุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-25 แสดงการทำงานของสวิตซ์เมื่อ $v_S = 0$ และ $i_L < 0$



รูปที่ 3-26 แสดงการทำงานของสวิตซ์เมื่อ $v_S = 0$ และ $i_L > 0$

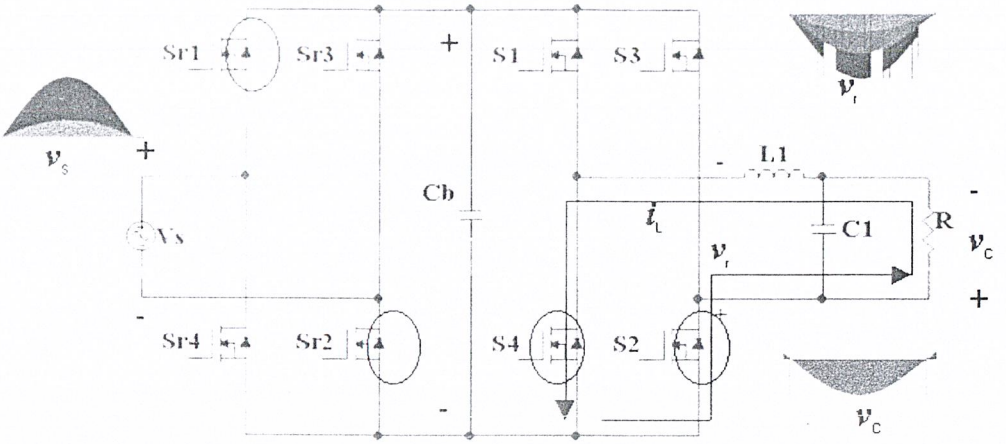
3) โหมดบายพาส (ตารางที่ 3–3คือหมายเลข 1 และ1') โดยช่วงเวลาของการทำงานในโหมดนี้ จะใช้ช่วงเวลาตายของสัญญาณขับของสวิตซ์เพื่อสร้างไหลของกระแสไฟฟ้าไว้ล่วงหน้าเพื่อป้องกันการเกิดสไปร์ท อันเนื่องมาจากการทำงานของสวิตซ์ ในกรณีนี้จะมีการทำงานในโหมดนี้ซึ่ง v_S มีเฟสตรงกันกับ i_L จึงมีรูปแบบการทำงานการทำงานเป็น 2 รูปแบบ

- เมื่อ $i_L < 0$ และ $v_S > 0$(ในตารางที่ 3–3คือหมายเลข 1')

ในการทำงานในช่วงโหมดบายพาส เมื่อ $i_L > 0$ จะมีรูปแบบการทำงานของวงจรเป็นดังนี้

จากวงจรในรูปที่ 3-27 แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในช่วงที่ $v_S > 0$, $i_L < 0$ โดยที่สวิตซ์ S2 จะทำงานทำให้กระแสไหลผ่านไดโอดของสวิตซ์ S4 ซึ่งจะทำให้เกิดการครบลูปกระแสและกระแสจะยังคงไหลไปในทิศทางเดิมอย่างต่อเนื่องผ่านทางด้านเอาท์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

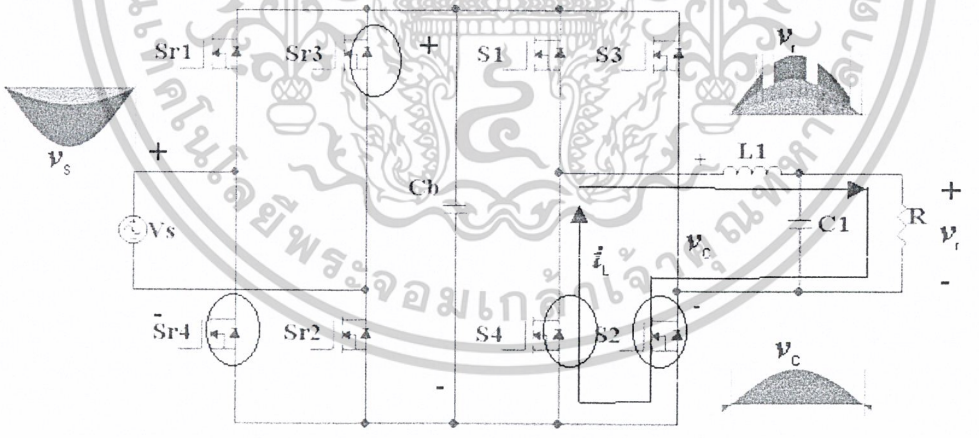


รูปที่ 3-27 แสดงการทำงานของสวิตซ์เมื่อ $v_s > 0$ และ $i_L < 0$

- เมื่อ iL < 0 และ $v_S < 0$ (ในตารางที่ 3–3คือหมายเลข 1)

ในการทำงานในช่วงโหมดบายพาส เมื่อ $i_L < 0$ จะมีรูปแบบการทำงานของวงจรเป็นดังนี้

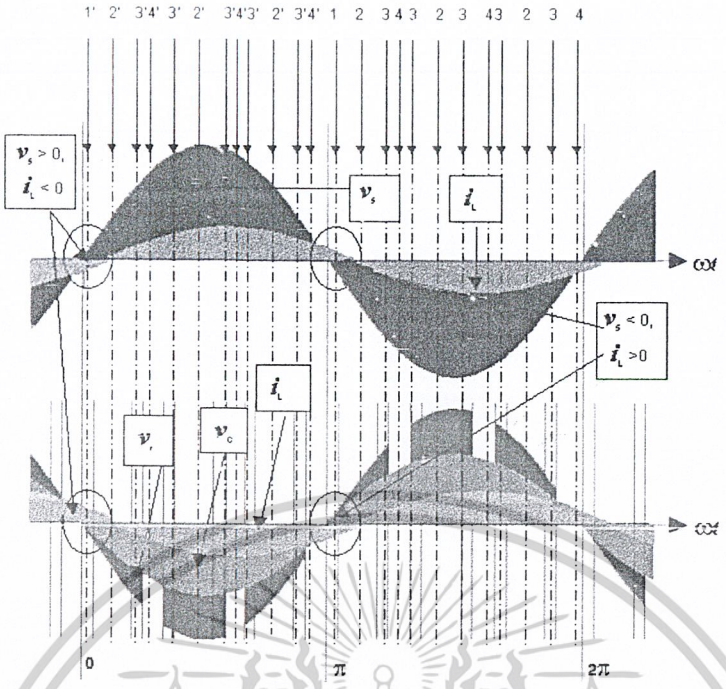
จากวงจรในรูปที่ 3-28 แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในช่วงที่ $v_S < 0$, $i_L > 0$ โดยที่สวิตซ์ S2 จะทำงานทำให้กระแสไหลผ่านไดโอดของสวิตซ์S4ซึ่งจะทำให้เกิดการครบลูปกระแส และกระแสจะยังคงไหลไปในทิศทางเดิมอย่างต่อเนื่องผ่านทางด้านเอาท์พุท



รูปที่ 3-28 แสดงการทำงานของสวิตซ์เมื่อ $v_s < 0$ และ $i_L < 0$)

ในส่วนของโหลด R - Lในกรณีของในกรณีที่กระแส i_L ล้าหลัง แรงดัน v_Sและ v_S ต่างเฟสกับ v_C อยู่ 180 องศาในการไล่โหมดการทำงานในกรณีของการทำงานแบบกลับขั้วแรงดัน โดยที่แรงดันทางด้านอินพุต (v_S) กลับเฟสกัน 180 องศา กับขั้วแรงดันด้านเอาท์พุตในกรณีของโหลด R – L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-29 รูปคลื่นแสดงโหมดการการทำงานของวงจรเอซีชอปเปอร์ในกรณีที่กระแสไฟฟ้า i_L ล้าหลังแรงดันไฟฟ้า v_S, v_S ต่างเฟสกับ v_C อยู่ 180 องศา

จากรูปที่ 3-29 แสดงการเรียงลำดับโหมดการทำงานของวงจรเอซีชอปเปอร์ ในกรณีที่กระแสไฟฟ้า i_L ล้า หลังแรงดันไฟฟ้า v_S และ v_S ต่างเฟสกับ v_C อยู่ 180 องศา ในกรณีของโหลด R - L โดยที่ตัวเลขที่กำหนดขึ้นแสดง โหมดการทำงานที่เกิดขึ้น จากรูปคลื่นและเมื่อนำค่าลำดับโหมดการทำงานมาเขียนเป็นตารางดังในตารางที่ 3-4 จะเห็นได้ว่าในกรณีนี้จะมีลักษณะการทำงานเป็นรอบ ๆ ซึ่งในแต่ละรอบจะมีโหมดการทำงานที่สัมพันธ์กัน 3 โหมดการทำงานที่แตกต่างกัน ซึ่งในแต่ละโหมดของการทำงานสามารถอธิบาย ได้โดยที่โหมดการทำงานของวงจรในกรณีนี้จะมีการทำงานเป็นเหมือนกับกรณีของ v_S มีเฟสตรงกันกับ i_L แต่จะแตกต่างกันในช่วงของ $v_S > 0$, $i_L < 0$ และ $v_S < 0$, $i_L > 0$ ซึ่งในกรณีจะทำให้มีการเกิดรีเจนเนอร์เรทีฟเกิดขึ้น เมื่อดูจากรูปคลื่นซึ่งจะทำให้ต้องมีการทำงานเพิ่มเข้ามาเพื่อคืนพลังงานจากด้านเอาท์พุตไปยังด้านอินพุต เพื่อป้องกันสไปร์ท เกิดขึ้นในวงจร และเมื่อนำค่าลำดับโหมดการทำงานมาเขียนเป็นตารางจะเห็นได้ว่าในกรณีนี้จะมีลักษณะการทำงานเป็นรอบ ๆ ซึ่งในแต่ละรอบจะมีโหมดการทำงานที่สัมพันธ์กัน 3 โหมดการทำงานที่แตกต่างกันซึ่งในแต่ละโหมดการทำงานสามารถอธิบายได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

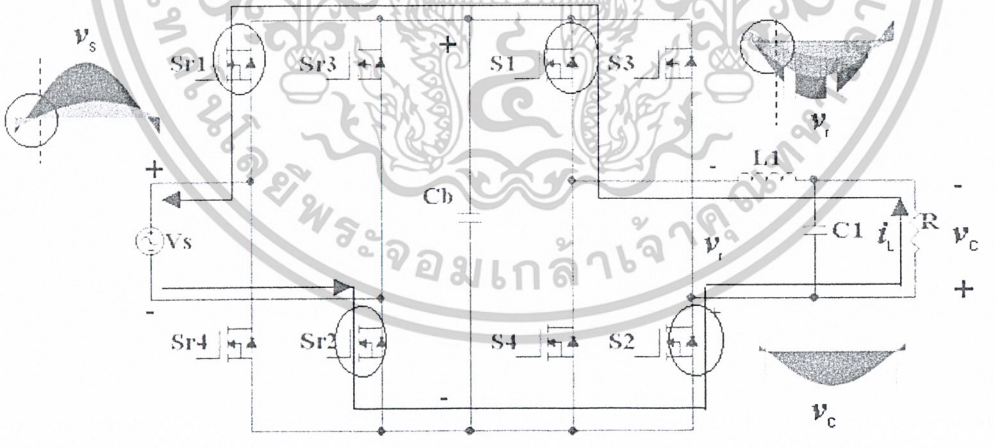
ลำดับที่	โหมดการทำงาน	แรงดัน ไฟฟ้า v_s	แรงดัน ไฟฟ้า v_c	กระแสไฟฟ้า i_L
1'	Bypass (Regenerative)	$+(v_S > 0)$	$-(v_C > 0)$	$-(i_L < 0)$
2'	Active	$+(v_S > 0)$	$-(v_C > 0)$	$+(i_L > 0)$
3'	Bypass	$+(v_S > 0)$	$-(v_C > 0)$	$+(i_L > 0)$
4'	Freewheeling	0	$-(v_C > 0)$	$+(i_L > 0)$
1	Bypass (Regenerative)	$-(v_S > 0)$	$+(v_C > 0)$	$+(i_L > 0)$
2	Active	$-(v_S > 0)$	$+(v_C > 0)$	$-(i_L < 0)$
3	Bypass	$-(v_S > 0)$	$+(v_C > 0)$	$-(i_L < 0)$
4	Freewheeling	0	$+(v_C > 0)$	$-(i_L < 0)$

ตารางที่ 3-4 การเรียงลำดับโหมดการทำงานในกรณีของ โหลด R-L และ v_S ต่างเฟสกับ v_C อยู่ 180 องศา

ในส่วนของการทำงานในโหมดบายพาสในช่วงที่มีการเกิด รีเจนเนอร์เรทีฟมีรูปแบบการทำงานอยู่ 2ลักษณะคือ

- เมื่อ $v_S > 0$ และ $i_L < 0$(ในตารางที่ 3-4คือหมายเลข 1')

ในการทำงานในช่วงรีเจนเนอร์เรทีฟ เมื่อ $i_L < 0$ จะมีรูปแบบการทำงานของวงจรเป็นดังนี้



รูปที่ 3-30 แสดงการทำงานของสวิตซ์เมื่อ $v_S > 0$ และ $i_L < 0$

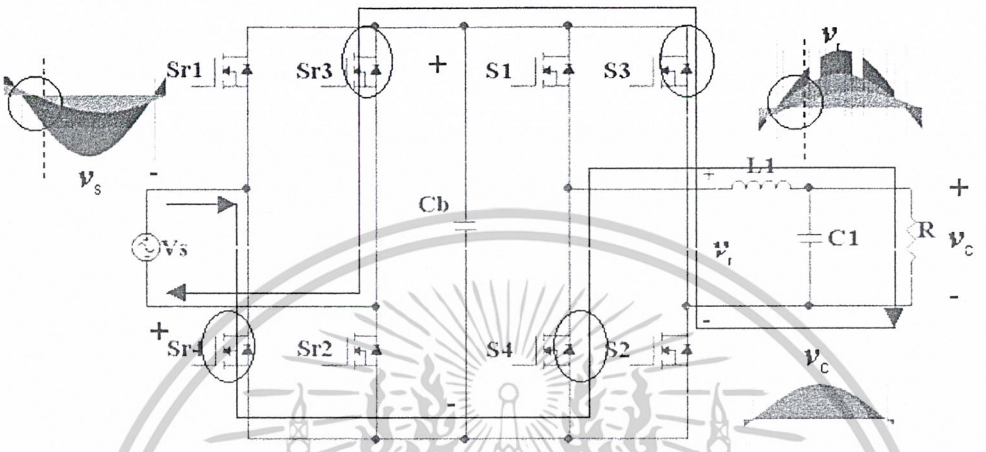
จากวงจรในรูปที่ 3-30 แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในช่วงที่ $v_S > 0$, $i_L < 0$ โดยที่กระแส i_L จะไหลผ่านทางด้านของไดโอดของสวิตซ์ S2 และ S4 ของทางด้านเอาท์พุต และสวิตซ์ Sr1 และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sr2 ทางด้านอินพุตจะทำงานทำให้เกิดการครบลูปกระแส และกระแสจะยังคงไหลไปในทิศทางผ่านทางด้านเอาท์พุทไปยังด้านอินพุต

- เมื่อ $v_S < 0$ และ $i_L > 0$(ในตารางที่ 3-4คือหมายเลข 1)

ในการทำงานในช่วงรีเจนเนอร์เรทีฟ เมื่อ $i_L > 0$ จะมีรูปแบบการทำงานของ วงจรเป็นดังนี้



รูปที่ 3-31 แสดงการทำงานของสวิตซ์เมื่อ $v_S < 0$ และ $i_L > 0$

จากวงจรในรูปที่ 3-31 แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในช่วงที่ $v_S < 0$, $i_L > 0$ โดยที่กระแส i_L จะไหลผ่านทางด้านของไดโอดของสวิตซ์ S3 และ S4ของทางด้านเอาท์พุต และสวิตซ์ Sr3 และ Sr4 ทางด้านอินพุตจะทำงานทำให้เกิดการครบลูปกระแส และกระแสจะยังคงไหลไปในทิศทางผ่านทางด้านเอาท์พุทไปยังด้านอินพุต

ซึ่งในส่วนของการทำงานในส่วนของ กรณีที่แรงดันทางด้านอินพุต (v_S) ต่างเฟส กับ แรงดันทางด้านเอาท์พุต (v_C) 180 องศา ก็มีรายละเอียดเพียงเท่านี้

3.3 การออกแบบฟิลเตอร์กรองผ่านความถี่ต่ำ

ในการออกแบบฟิลเตอร์กรองผ่านความถี่ต่ำ (Low pass Filter) เพื่อที่จะกรองผ่านแรงดันที่ความถี่ใช้งานที่ 50 เฮิร์ท (Fundamental Component) ส่งไปยังด้านเอาท์พุตเราจะกำหนดเงื่อนไขของสมการเพื่อที่จะใช้ในการออกแบบฟิลเตอร์โดยจะกำหนดให้

$$\omega L \ll R_L \ll \frac{1}{\omega C} \tag{3.1}$$

$$\frac{1}{\omega_S C} \ll R_L \ll \omega_S L \tag{3.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\omega = 2\pi f$ และ $\omega_S = 2\pi f_S$ ซึ่งเป็นค่าความถี่เชิงมุมของแรงดันด้านอินพุท และค่าความถี่เชิงมุมของการสวิทช์ชิ่ง (Switching frequency) ของวงจรเอซีชอปเปอร์ ตามลำดับ ในการกำหนดค่าเฉลี่ยของส่วนประกอบความถี่ใช้งานที่ 50 เฮิร์ท ซึ่งส่วนใหญ่จะถูกส่งผ่านไปยังโหลดด้านเอาท์พุต คือโหลด R_L และส่วนประกอบของฮาร์โมนิกส์ (Harmonics Component) ซึ่งจะไม่ถูกส่งผ่านไปยังโหลดด้านเอาท์พุต โดยที่แรงดันด้านอินพุตที่จ่ายให้วงจรเอซีชอปเปอร์ ถูกกำหนดให้เป็นไปดังสมการต่อไปนี้

$$v_S(t) = \sqrt{2}\ V_S \cos(\omega t) \tag{3.3}$$

เมื่อ V_S คือ ค่า RMS ของแรงดันด้านอินพุต โดยที่สวิทช์ชิ่งฟังก์ชั่น (Switching function) หาได้จากสมการดังต่อไปนี้ คือ

$$S(\omega_S t) = D + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2\sin(kD\pi)}{k\pi} \cos(k\omega_S t) \tag{3.4}$$

เมื่อ D คือ ค่า ดิวตี้เรโช ซึ่งค่าของ แรงดัน PWM $v_r(t)$ หาได้จากการใช้สมการ (3.3) และ (3.4)

$$v_r(t) = S(\omega_S t)\, v_S(t)$$

$$= \sqrt{2}\ D V_S \cos(\omega t) + V_{rk} \cos[(k\omega_S \pm \omega)t] \tag{3.5}$$

เมื่อ $S(\omega_S t)$ คือ สวิทช์ชิ่งฟังก์ชั่น, k คือ ค่าอันดับที่ของฮาร์โมนิกส์ (Order of harmonics Component) และ V_{rk} คือ ค่าแรงดัน RMS ของส่วนประกอบฮาร์โมนิกส์ ของแรงดัน PWM V_{rk} หาได้จากสมการดังต่อไปนี้ คือ

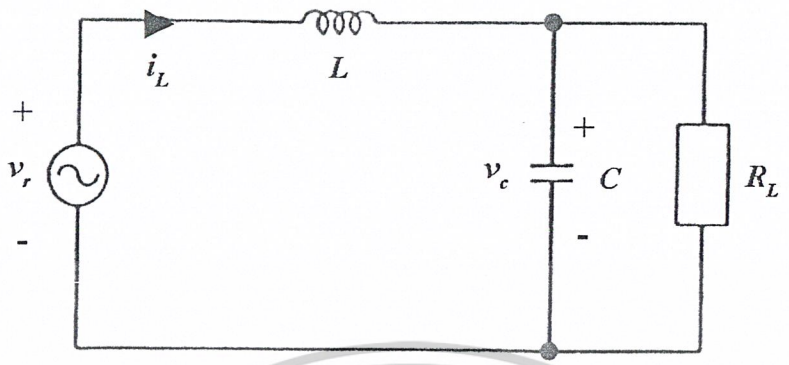
$$V_{rk} = \frac{V_s \sin(Dk\pi)}{k\pi} \tag{3.6}$$

การใส่ฟิลเตอร์ทางด้านเอาท์พุตจะช่วยลดฮาร์โมนิกส์ ซึ่งมาจากผลของกระแสที่เกิดตัวเหนี่ยวนำ และแรงดันเอาท์พุตที่ตัวเก็บประจุ โดยที่ผลรวมของตัวประกอบความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ (Total Harmonics distortion factor : THD) จะถูกนิยามได้ด้วยสมการเป็นดังต่อไปนี้

$$THD_v = \frac{100}{V_{cf}} \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} V_{ck}^2}\ [\%] \tag{3.7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$THD_i = \frac{100}{I_{1f}} \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} I_{Lk}^{\ 2}} \ [\%] \tag{3.8}$$



รูปที่ 3-32 รูปวงจรสมมูลของวงจรเอซีชอปเปอร์

เมื่อ f คือ ค่าองค์ประกอบที่ความถี่ใช้งาน , V_{cf} และ V_{ck} คือ ขนาดของค่าของส่วนประกอบความถี่ใช้งานที่ 50 เฮิร์ท และส่วนประกอบฮาร์โมนิกส์ของแรงดันเอาท์พุต v_c , I_{Lf} และ I_{Lk} คือ ขนาดของค่าของส่วนประกอบความถี่ใช้งานที่ 50 เฮิร์ท และส่วนประกอบฮาร์โมนิกส์ของกระแสจากตัวเหนี่ยวนำ i_L ตามลำดับ จากวงจรสมมูลของวงจรเอซีชอปเปอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3-32 ทำให้สามารถหาทรานส์เฟอร์ฟังก์ชั่นของแรงดันเอาท์พุต $V_c(s)$ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับแรงดัน PWM $V_r(s)$ ซึ่งจะหาได้จาก

$$\frac{V_c(s)}{V_r(s)} = \frac{R_L}{sL + (1 + s^2 LC)R_L} \tag{3.9}$$

การหาค่าของแรงดันที่ความถี่ใช้งานที่ 50 เฮิร์ท V_{cf} ของแรงดันเอาท์พุต v_c หาได้โดยวิธีการประมาณค่าสมมติให้สมการ (3.1) เป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

$$V_{cf} = \frac{R_L DV_S}{\sqrt{\omega^2 L^2 + (1 - \omega^2 LC)^2 R_L^{\ 2}}} \approx DVS \tag{3.10}$$

และจากสมการ (3.2) และให้ $k\omega \pm \omega \approx k\omega_S$, ส่วนประกอบฮาร์โมนิกส์ของแรงดัน V_{ck} ของแรงดันเอาท์พุตมีค่าโดยประมาณได้ดังนี้คือ

$$V_{ck} \approx \frac{\sqrt{2} R_L V_{rk}}{\sqrt{k^2 \omega_S^{\ 2} L^2 + (1 - k^2 \omega_S^{\ 2} LC)^2 R_L^{\ 2}}} \approx \frac{\sqrt{2} V_{rk}}{k^2 \omega_S^{\ 2} LC} \tag{3.11}$$

จากสมการ (3-10) และ (3-11) THD_v จะหาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$THD_v \approx \frac{100\sqrt{2}}{\pi\omega_s^2 LC} TH_1 \tag{3.12}$$

เมื่อ

$$TH_1 = \frac{1}{D}\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty}\frac{\sin^2(kD\pi)}{k^6}} \tag{3.13}$$

ดังนั้นผลรวมของตัวประกอบความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ THD_v ของแรงดันเอาท์พุต v_c จะขึ้นอยู่กับโหลดความต้านทาน R_L อย่างไรก็ตามตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ จะมีผลอย่างมากต่อ THD_v ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชั่นของกระแสของตัวเหี่ยวนำ $I_L(s)$ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับแรงดัน PWM V_r (s) หาได้จาก

$$\frac{I_L(s)}{V_r(s)} = \frac{1+sCR_L}{sL+(1+s^2LC)R_L} \tag{3.14}$$

การหาค่าของกระแสที่ความถี่ใช้งานที่ 50 เฮิร์ท I_{Lf} ได้โดยวิธีการประมาณค่าสมมติให้สมการ (3.1) เป็น ไปตามสมการดังต่อไปนี้ ส่วนประกอบฮาร์โมนิกส์ของกระแส I_{Lk} ของกระแสตัวเหนี่ยวนำหาโดยวิธีการประ มาณค่าได้ดังต่อไปนี้

$$I_{Lf} = \frac{\sqrt{1+\omega^2C^2R_L^2}}{\sqrt{\omega^2L^2+(1-\omega^2LC)^2R_L^2}} DV_S \approx \frac{DV_S}{R_L} \tag{3.15}$$

$$I_{Lk} \approx \frac{\sqrt{2}V_s}{k\omega_s L} \tag{3.16}$$

จากสมการ (3.15) และ (3.16) ผลรวมของตัวประกอบความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ THD_i หาได้จาก

$$THD_i \approx \frac{100\sqrt{2}R_L}{\pi\omega_s L} TH_2 \tag{3.17}$$

เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

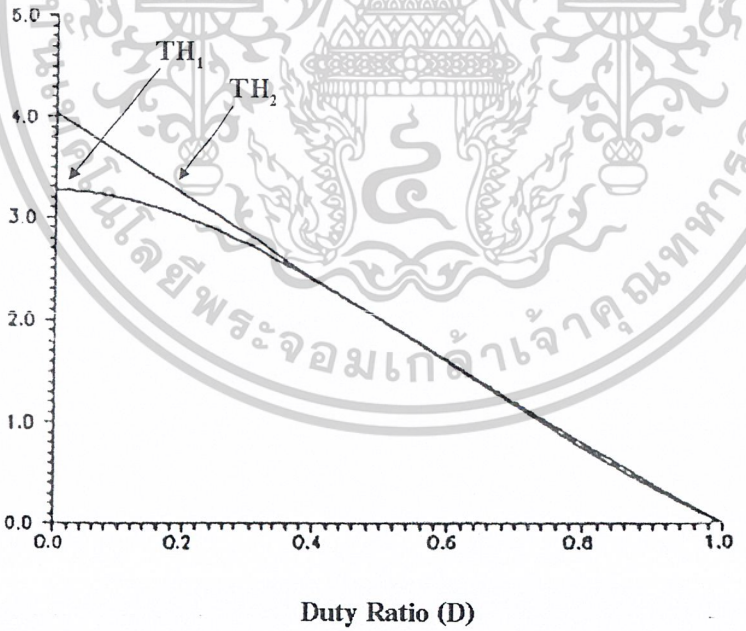
$$TH_2 \approx \frac{1}{D}\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty}\frac{\sin^2(kD\pi)}{k^4}} \tag{3.18}$$

ดังนั้นผลรวมของตัวประกอบความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ THD_i ของกระแสตัวเหนี่ยวนำจะไม่ได้ขึ้นอยู่กับตัวเก็บประจุ C ทางด้านเอาท์พุท โดยที่ค่าพารามิเตอร์ของตัวฟิลเตอร์สามารถที่จะออกแบบให้สอดคล้องกับค่า THD ที่ต้องการใช้ในระบบโดยใช้สมการที่ (3.13) และ (3.18) ขนาดของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะหาได้โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$L = \frac{100\sqrt{2}R_L}{\pi\omega_s}\frac{TH_2}{THD_i} \tag{3.19}$$

$$C = \frac{100\sqrt{2}}{\pi\omega_s^2 L}\frac{TH_1}{THD_v} \tag{3.20}$$

การแทนค่าเชิงตัวเลขเพื่อคำนวณค่าของ TH_1 และ TH_2 ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับค่าดิวตี้เรโช D ที่จะใช้ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุดังแสดงในรูปที่ 3-33



รูปที่ 3-33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิวตี้เรโชกับค่า TH_1 และ TH_2

การใช้วงจรเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้สำหรับปรับสภาพแรงดันไฟฟ้าดังในรูปที่ 3-34 แรงดันเอาท์พุทจะถูกควบคุมผ่านทางหม้อแปลงชดเชยแรงดันที่ต่ออนุกรมกับแรงดันทางด้านอินพุต v_s ซึ่งเราจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ค่าเฉลี่ยโมเดลเบื้องต้นของช่วงเวลาของการแซมปลิ้ง (Sampling period) ค่าแรงดัน ของส่วนประกอบฮาร์โมนิกส์ของแรงดัน PWM v_r จะถูกตัดทิ้งไปดังนั้นจะได้สมการดิฟเฟอเรนเชี่ยล (Differential Equations) ของระบบเป็นดังต่อไปนี้

$$L\frac{di_L(t)}{dt} = DV_o - v_c(t) \tag{3.21}$$

$$C\frac{dv_c(t)}{dt} = i_L(t) - n\frac{v_O(t)}{R_L} \tag{3.22}$$

$$v_O(t) = v_{com}(t) + v_i(t) \tag{3.23}$$

$$v_{com}(t) = nv_c(t) \tag{3.24}$$

เมื่อ v_{com}(t) คือค่า แรงดันชดเชย และ n คือค่าอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงชดเชย

3.4 หลักการทำงานของเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้สำหรับปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า

วงจรเครื่องรักษาระดับแรงดันแบบเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้สำหรับสภาพแรงดันไฟฟ้าดังในรูปที่ ซึ่งแสดงถึงส่วนประกอบในวงจรโดยที่การทำงานในส่วนของคอนเวอเตอร์ 1 และ คอนเวอเตอร์ 2 นั้นได้อธิบายหลักการทำงานไปแล้วนั้นจากรูปวงจรของเครื่องรักษาระดับแรงดันจะมีหม้อแปลงที่ใช้อยู่ 2 ลูกคือ

หม้อแปลงลดแรงดัน (T1)

เป็นหม้อแปลงที่ใช้เพื่อลดแรงดันลงจาก 220 โวลต์ให้เหลือ 110 โวลต์ เพื่อให้เหมาะสมในการนำไปใช้งานในการจ่ายแรงดันให้กับเครื่องรักษาระดับแรงดัน

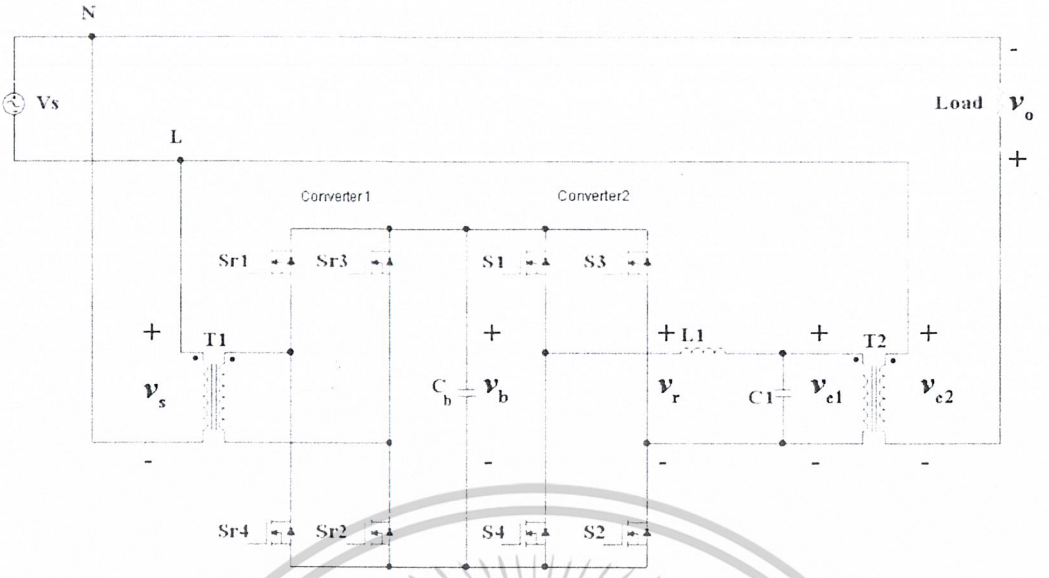
หม้อแปลงชดเชยแรงดัน (T2)

เป็นหม้อแปลงที่ใช้ในการสร้างแรงดันชดเชยโดยใช้หม้อแปลงขนาด 90/22 V ซึ่งการทำงานของเครื่องรักษาระดับแรงดันจะอาศัยหม้อแปลงชดเชยแรงดันเป็นตัวสร้างแรงดันเสริมหรือหักล้างกับแรงดันที่แหล่งจ่ายไฟของการไฟฟ้าโดยอาศัยหลักการของขั้วของหม้อแปลงพลังงานนั่นคือ " ด็อท " (Dot) ซึ่งความหมายของด็อทคือ จุดสำหรับใช้อ้างอิงเพื่อใช้ในการกำหนดเฟสแรงดันของหม้อแปลง ดังนี้

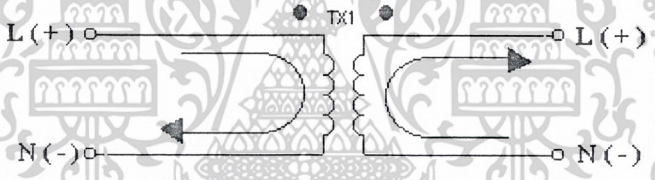
- ถ้ากำหนดให้กระแสไหลเข้าด็อททางด้านปฐมภูมิ กระแสจะไหลออกจากด็อททางด้านทุติยภูมิด้วย ดังรูปที่ 3-35

- ถ้ากำหนดให้กระแสไหลออกจากด็อททางด้านปฐมภูมิ กระแสจะไหลเข้าด็อททางด้านทุติยภูมิด้วย ดังรูปที่ 3-36

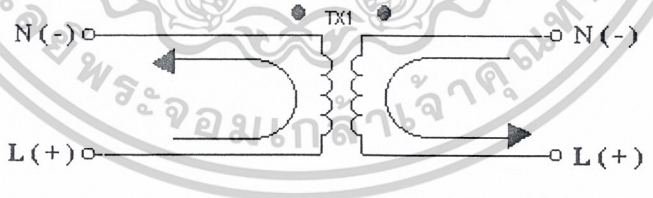
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-34 การต่อวงจรวงจรเครื่องรักษาระดับแรงดันแบบเอซี ชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้สำหรับสภาพแรงดันไฟฟ้า



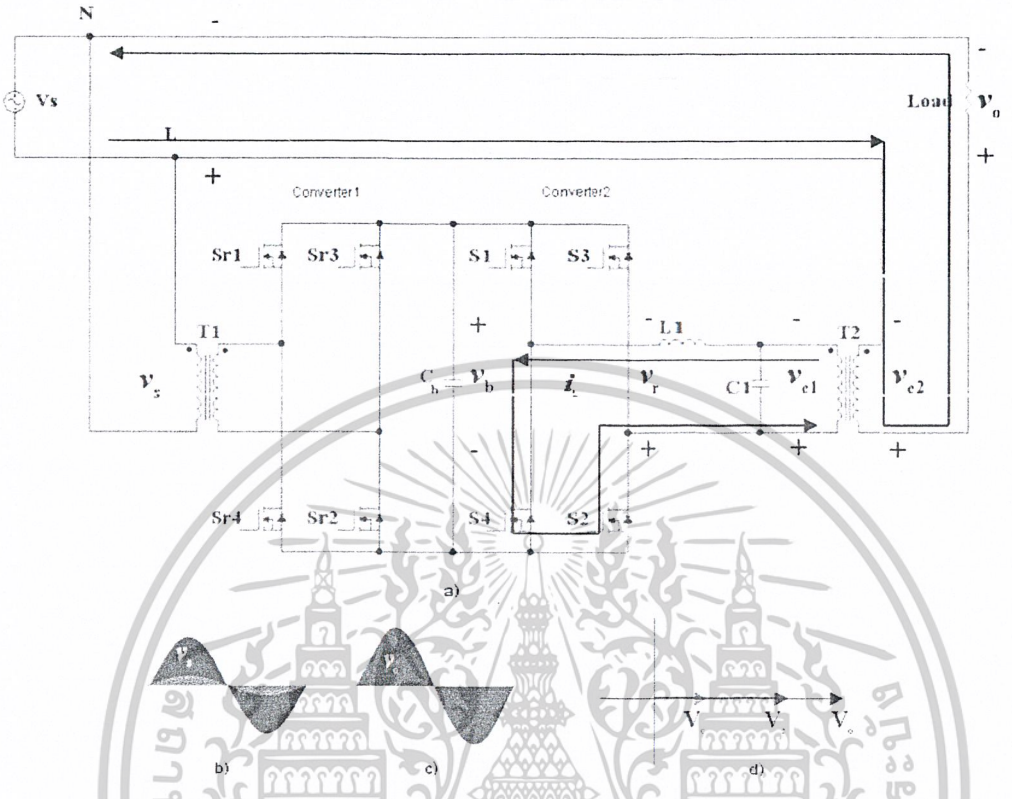
รูปที่ 3-35 รูปแสดงการกำหนดเฟสของหม้อแปลงเมื่อกระแสไหลเข้าด็อท



รูปที่ 3-36 รูปแสดงการกำหนดเฟสของหม้อแปลงเมื่อกะแสไหลออกจากด็อท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 หลักการทำงานของเครื่องรักษาระดับแรงดันในกรณีที่แรงดันที่โหลดมีค่าต่ำกว่า 220 โวลต์



a) แสดงทิศทางการไหลของกระแสในวงจร

b) แสดงรูปคลื่นของแรงดันที่แหล่งจ่ายกับแรงดันชดเชย

c) แสดงรูปคลื่นของแรงดันเอาท์พุตที่โหลด

d) แสดงเฟสเซอร์ของแรงดัน

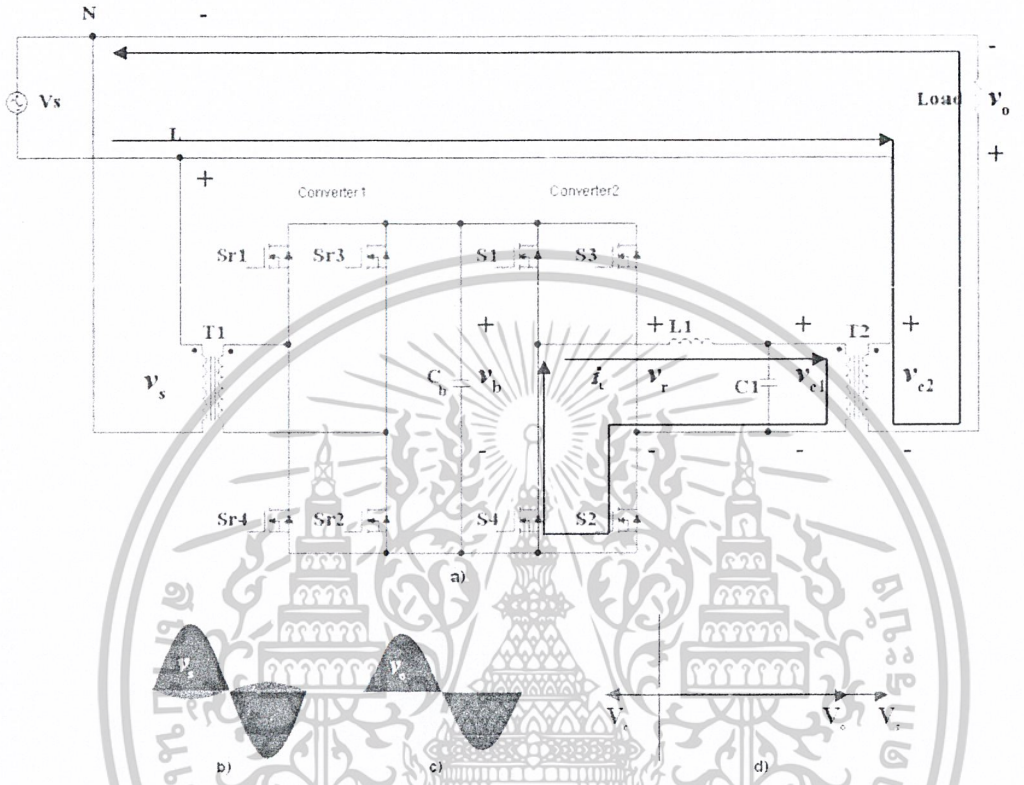
รูปที่ 3-37 แสดงทำงานของเครื่องรักษาระดับแรงดันในกรณีที่แรงดันที่โหลดมีค่าต่ำกว่า 220 โวลต์

การทำงานของเครื่องรักษาระดับแรงดัน เพื่อปรับสภาพแรงดันไฟฟ้าให้กับโหลดทางด้านเอาท์พุตมีค่าคงที่เท่ากับ 220โวลต์อยู่ตลอดเวลา จากรูปที่ 3-37 **a)**ในกรณีที่แรงดันที่โหลดมีค่าต่ำกว่า 220 โวลต์ จากวงจรในส่วนของเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้สำหรับปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า นั้นซึ่งจะต้องมีการจ่ายแรงดันเสริมผ่านทางหม้อแปลงชดเชยแรงดันโดยจะต้องพิจารณาจากส่วนประกอบที่ต่ออยู่ภายในวงจร คือ ขั้วของหม้อแปลงชดเชยแรงดัน , ขั้วของการต่อสายจากแหล่งจ่าย (ขั้วไลน์และนิวตรอล) และการทำงานของวงจรเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้ จากวงจรในการที่จะจ่ายแรงดันเสริมเข้าไปยังหม้อแปลงชดเชยแรงดัน นั้นเมื่อพิจารณาจากวงจรตามรูปที่ 3-37 **a)** แล้วเราจะต้องกลับขั้วแรงดันที่จะจ่ายให้กับหม้อแปลงชดเชยแรงดันเพื่อให้แรงดันชดเชย (V_c) มีทิศทางเสริมกับแรงดันที่แหล่งจ่ายไฟจากการไฟฟ้า(V_s) และจากรูปที่ 3-37 **a)** จะมีทิศทางการไหลของกระแสมีลักษณะเสริมกันตามรูป โดยที่พิจารณาจากรูปที่ 3-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

37 **b)** ,**c)** และ **d)** เป็นรูปแสดงรูปคลื่นของแรงดันที่แหล่งจ่ายกับแรงดันชดเชย ,รูปคลื่นของแรงดันเอาท์พุตที่โหลด ,แสดงเฟสเซอร์ของแรงดัน ตามลำดับ

3.4.2 หลักการทำงานของเครื่องรักษาระดับแรงดันในกรณีที่แรงดันที่โหลดมีค่ามากกว่า 220 โวลต์



a) แสดงทิศทางการไหลของกระแสในวงจร

b) แสดงรูปคลื่นของแรงดันที่แหล่งจ่ายกับแรงดันชดเชย

c) แสดงรูปคลื่นของแรงดันเอาท์พุตที่โหลด

d) แสดงเฟสเซอร์ของแรงดัน

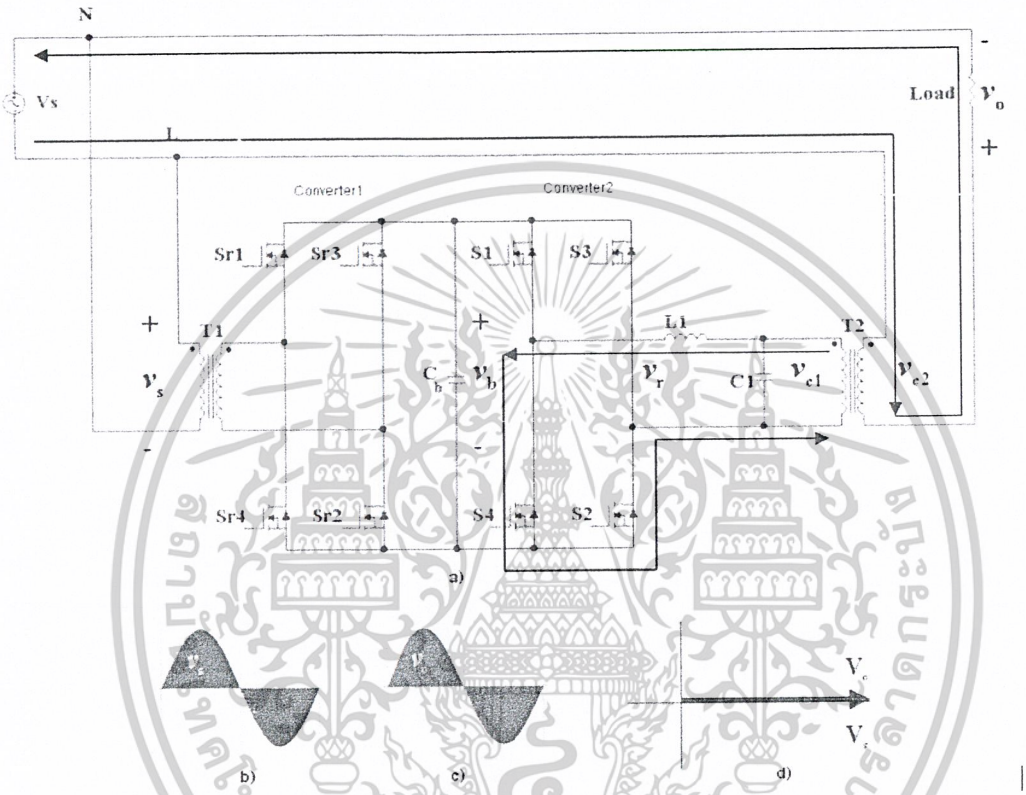
*รูปที่ 3-38 แสดงทำงานของเครื่องรักษาระดับแรงดันในกรณีที่*แรงดันที่โหลดมีค่ามากกว่า 220 โวลต์

การทำงานของเครื่องรักษาระดับแรงดันจากรูปที่ 3-38 **a)**ในกรณีที่แรงดันที่โหลดมีค่ามากกว่ากว่า 220 โวลต์ จากวงจรในส่วนของเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้สำหรับปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า นั้นซึ่งจะต้องมีการจ่ายแรงดันหักล้างผ่านทางหม้อแปลงชดเชยแรงดัน โดยจะต้องพิจารณาจากส่วนประกอบที่ต่ออยู่ภายในวงจร คือ ขั้วของหม้อแปลงชดเชยแรงดัน, ขั้วของการต่อสายจากแหล่งจ่าย (ขั้วไลน์และนิวตรอล) และการทำงานของวงจรเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้ จากวงจรในการที่จะจ่ายแรงดันหักล้างเข้าไปยังหม้อแปลงชดเชยแรงดัน นั้นเมื่อพิจารณาจากวงจรตามรูปที่ 3-38 **a)** แล้วเราจะจ่ายแรงดันให้กับหม้อแปลงชดเชยแรงดันโดยที่ขั้วของแรงดันมีขั้วตรงกันกับแรงดันของแหล่งจ่ายไฟของการไฟฟ้า(V_S)เพื่อให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันชดเชย (V_c) มีทิศทางหักล้างกับแรงดันที่แหล่งจ่ายไฟจากการไฟฟ้า (V_s) ดังรูปและจากรูปที่ 3-38 a) จะมีทิศทางการไหลของกระแสมีลักษณะหักล้างกันกันตามรูป โดยที่พิจารณาจากรูปที่ 3-38 b) ,c) และ d) เป็นรูปแสดงรูปคลื่นของแรงดันที่แหล่งจ่ายกับแรงดันชดเชย , รูปคลื่นของแรงดันเอาท์พุตที่โหลด , แสดงเฟสเซอร์ของแรงดัน ตามลำดับ

3.4.3 หลักการทำงานของเครื่องรักษาระดับแรงดันในกรณีที่แรงดันที่แหล่งจ่ายเท่ากับ 220 โวลต์



a) แสดงทิศทางการไหลของกระแสในวงจร

b) แสดงรูปคลื่นของแรงดันที่แหล่งจ่ายกับแรงดันชดเชย

c) แสดงรูปคลื่นของแรงดันเอาท์พุตที่โหลด

d) แสดงเฟสเซอร์ของแรงดัน

รูปที่ 3-39 แสดงทำงานของเครื่องรักษาระดับแรงดันในกรณีแรงดันที่แหล่งจ่ายเท่ากับ 220 โวลต์

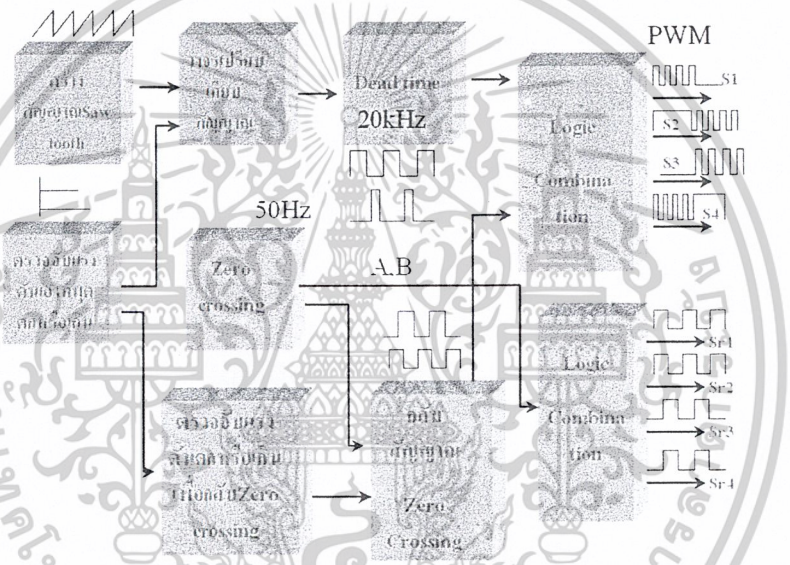
การทำงานของเครื่องรักษาระดับแรงดันจากรูปที่ 3-39 a)ในกรณีที่แรงดันที่โหลดมีค่าเท่ากับ 220 โวลต์พอดีจากวงจรในส่วนของเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้สำหรับปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า นั้นในส่วนของการชดเชยแรงดันจะไม่มีการทำงานเกิดขึ้น แต่จะมีการทำงานในลักษณะของการฟรีวีลลิ่งเกิดขึ้นเพื่อให้เสมือนว่าหม้อแปลงชดเชยแรงดันทำงานคล้ายกับหม้อแปลงกระแส (Current Transformer) เพื่อให้แรงดันตกคร่อมที่หม้อแปลงชดเชยแรงดันมีค่าเท่ากับศูนย์โวลต์ (V_c = 0 V) โดยมีลักษณะการทำงานเป็นไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังในรูปที่ 3-39 a)โดยที่พิจารณาจากรูปที่ 3-39 **b) ,c)** และ **d)** เป็นรูปแสดงรูปคลื่นของแรงดันที่แหล่งจ่ายกับแรงดันชดเชย , รูปคลื่นของแรงดันเอาท์พุตที่โหลด , แสดงเฟสเซอร์ของแรงดัน ตามลำดับ

3.5 หลักการออกแบบวงจรควบคุมการทำงาน

ในการออกแบบวงจรควบคุมการทำงานของเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้สำหรับปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า ซึ่งในส่วนของการควบคุมจะเป็นส่วนของสัญญาณที่จะนำไปใช้ในการควบคุมการทำงานของมอสเฟทกำลังในส่วนของวงจรกำลัง และในส่วนของการตรวจแรงดันเอาท์พุทเพื่อนำมาเป็นค่าเปรียบเทียบกับค่าที่ใช้เป็นตัวอ้างอิงเพื่อให้มาซึ่งการควบคุมที่ดี มีประสิทธิภาพ มีความแม่นยำในการทำงานสูง มีความผิดพลาดในการทำงานน้อย



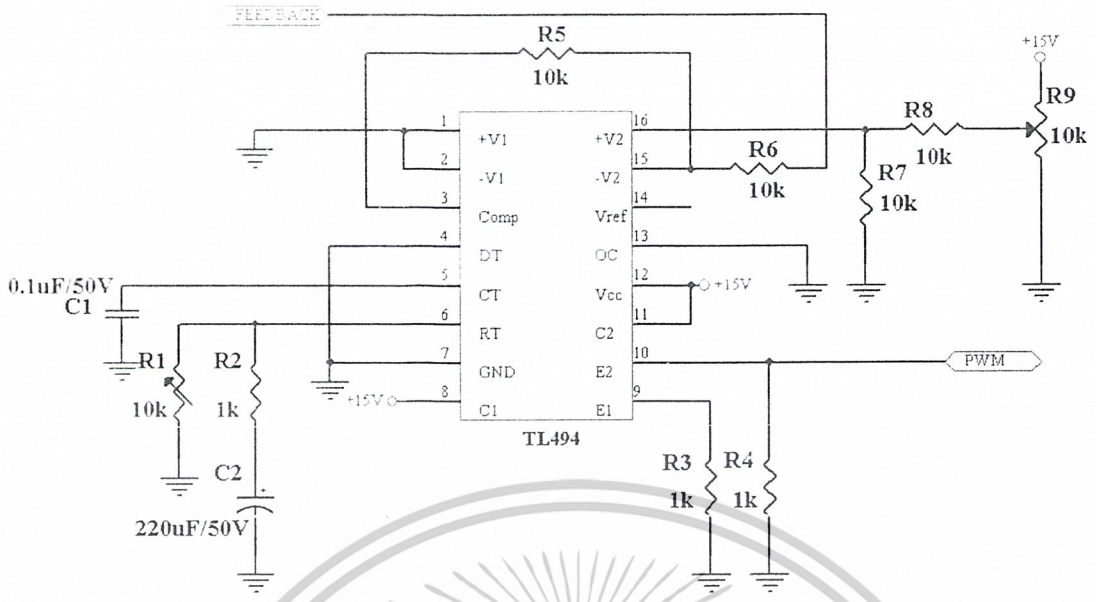
รูปที่ 3-40 บล็อกแสดงการทำงานในส่วนของการควบคุมการทำงาน

จากบล็อกแสดงการทำงานดังในรูปที่ 3-40 แสดงส่วนของการควบคุมการทำงานซึ่งจะประกอบไปด้วย ส่วนของการสร้างสัญญาณ Saw tooth, ส่วนของการตรวจจับแรงดันเอาท์พุต, ส่วนของการเปรียบเทียบสัญญาณ, ส่วนของการสร้างเวลาตายของสัญญาณ, ส่วนของการสร้างสัญญาณ Zero Crossing, ส่วนของการกลับเฟสสัญญาณ Zero Crossing, และส่วนของการรวมสัญญาณ ซึ่งในแต่ละส่วนนำมาออกแบบเป็นวงจรที่ใช้ในการควบคุมการทำงานเป็นดังนี้

3.5.1วงจรสร้างสัญญาณ PWM

วงจรสร้างสัญญาณ PWM โดยใช้ไอซี TL 494 โดยที่สัญญาณ PWM ที่สร้างมาจากไอซี TL 494 นี้จะสร้างสร้างสัญญาณ PWM ที่มีค่าดิวตี้ไซเกิล 96 % และสามารถปรับค่าดิวตี้ไซเกิลได้โดยใช้การป้อนกลับนำมาเปรียบเทียบกับวงจรขยายส่วนต่างภายในไอซี TL 494 ดังแสดงในรูปที่ 3-41

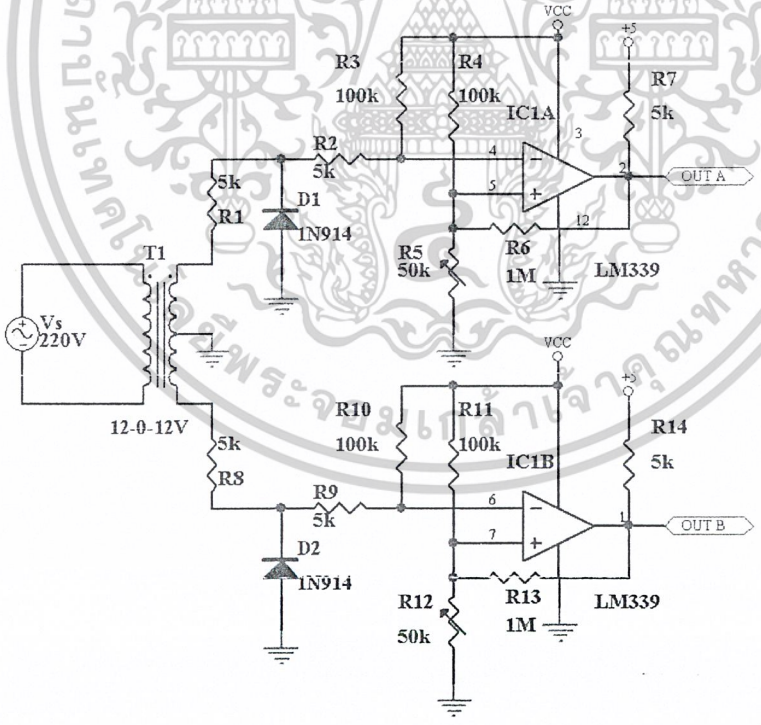
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-41รูปวงจรการต่อใช้งานไอซี TL 494

3.5.2วงจรสร้างสัญญาณ Zero Crossing

วงจรการสร้างสัญญาณ Zero Crossing ดังแสดงในรูปที่ 3-42

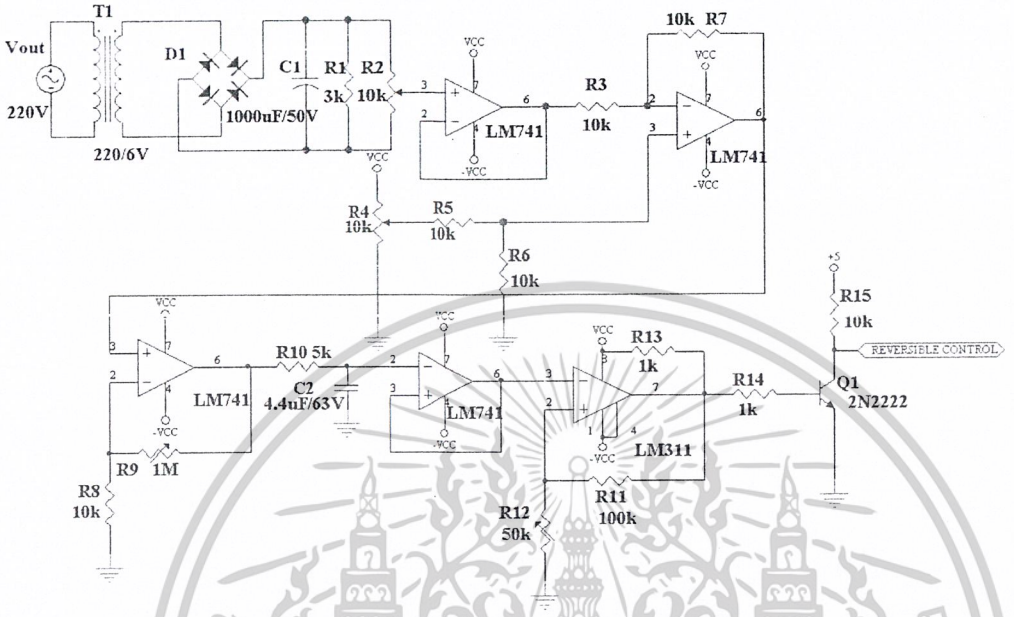


รูปที่ 3-42 รูปวงจรสร้างสัญญาณ Zero Crossing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

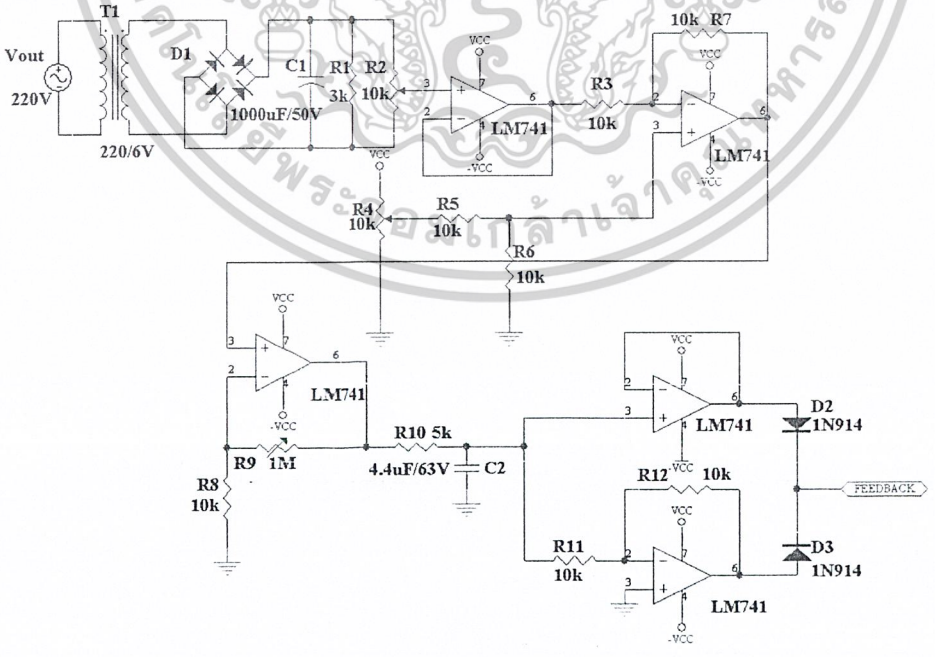
3.5.3 วงจรตรวจจับแรงดันเกิน / แรงดันตก

วงจรตรวจจับแรงดันเกิน / แรงดันตกเป็นวงจรที่ทำหน้าที่ตรวจจับระดับแรงดันทางด้านเอาท์พุท ที่ด้านโหลดว่าแรงดันมีค่าสูงเกินหรือต่ำเกินกับค่าแรงดันอ้างอิง



รูปที่ 3-43 รูปวงจรตรวจจับแรงดันเกิน / แรงดันตก

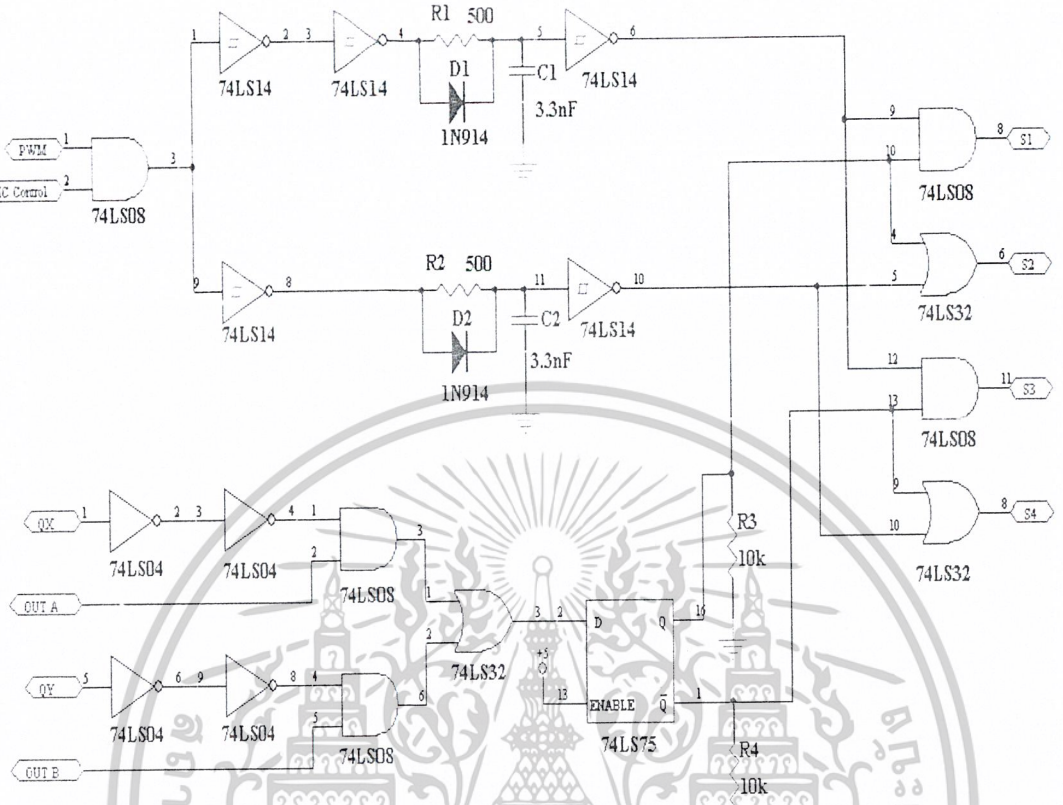
3.5.4 วงจรป้อนกลับในส่วนของการปรับค่าดิวตี้ไซเกิล



รูปที่ 3-44 รูปวงจรป้อนกลับในส่วนของการปรับค่าดิวตี้ไซเกิล

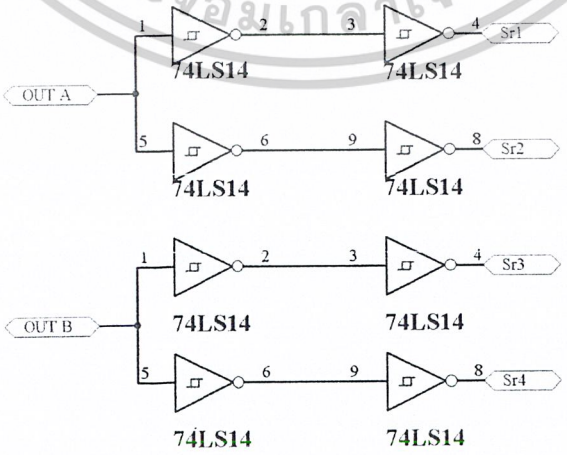
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.5 วงจรรวมสัญญาณในส่วนของสัญญาณการควบคุมการทำงานของคอนเวอเตอร์ 2



รูปที่ 3-45 รูปวงจรรวมสัญญาณการควบคุมการทำงานของคอนเวอเตอร์ 2

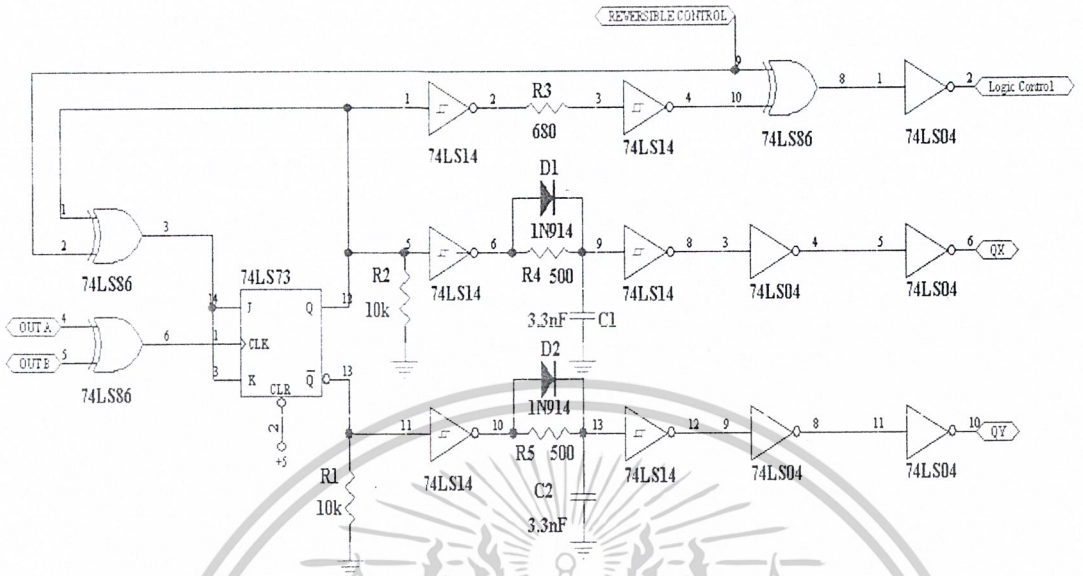
3.5.6 วงจรรวมสัญญาณในส่วนของสัญญาณการควบคุมการทำงานของคอนเวอเตอร์ 1



รูปที่ 3-46 รูปวงจรรวมสัญญาณการควบคุมการทำงานของคอนเวอเตอร์ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.7 วงจรตรวจจับขอบของสัญญาณแรงดัน



รูปที่ 3-47 รูปวงจรตรวจจับขอบของสัญญาณแรงดัน

จากรูปวงจรในแต่ละส่วนดังแสดงอยู่ในรูปที่3-41 ถึงรูปที่ 3-47 วงจรในแต่ละส่วนตามรูปจะมีสัญลักษณ์แสดงจุดต่อระหว่างในแต่ระวงจร

หลักการทำงานของส่วนควบคุมนี้จะอาศัยการตรวจจับระดับของแรงดันทางด้านเอาท์พุตที่มีค่าอยู่ระหว่าง 220โวลต์ ±10% โดยนำแรงดันที่ตรวจจับนำไปลดแรงดันให้มีระดับที่ต่ำที่ 6โวลต์ ±10%โดยการใช้หม้อแปลงลดแรงดันแล้วทำให้เป็นแรงดันไฟตรงเพื่อนำไปเป็นค่าเปรียบเทียบกับค่าแรงดันอ้างอิงที่ 5โวลต์ โดยกำหนดแรงดันไฟตรง 5โวลต์ให้มีค่าเท่ากับแรงดันทางด้านเอาท์พุต 220โวลต์พอดีโดยพิจารณาดูจากวงจรในรูปที่3-43 โดยส่วนต่างของแรงดันที่มากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าแรงดันที่ 5โวลต์อ้างอิงนี้จะนำไปใช้ในการควบคุมในส่วนการสร้างแรงดันเสริมหรือหักล้างในการส่งสัญญาณไปกลับเฟสของสัญญาณจากชุดวงจรสร้างสัญญาณ Zero Crossing พิจารณาดูจากวงจรในรูปที่3-43 และ อีกส่วนหนึ่งจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับอัตราขยายส่วนต่างของการสร้างสัญญาณแรงดันแรงดันไฟตรงเพื่อนำไปเป็นค่าเปรียบเทียบกับค่าแรงดันสัญญาณ Saw tooth ที่มีอยู่ภายในตัวของไอซี TL494 นำไปควบคุมช่วงของค่าดิวตี้ไซเกิลพิจารณาดูจากวงจรในรูปที่ 3-44 เพื่อสร้างสัญญาณ PWM ออกมาโดยมีค่าดิวตี้ไซเกิลตามอัตราส่วนต่างของแรงดันที่จะนำไปชดเชย พิจารณาดูจากวงจรในรูปที่ 3-41 โดยสัญญาณ PWM ที่ได้จากไอซี TL494 จะถูกนำไปสร้างสัญญาณ PWM 2 สัญญาณที่มีเฟสของสัญญาณตรงกันข้ามกันพร้อมกับสร้างเวลาตายของสัญญาณ PWM ทั้ง 2 เพื่อจ่ายไปยังวงจรรวมสัญญาณพิจารณาดูจากวงจรในรูปที่ 3-45 โดยที่วงจรรวมสัญญาณนี้จะเป็นส่วนที่มีการรวมสัญญาณในส่วนที่มาจากวงจรควบคุมการกลับเฟสของสัญญาณ Zero Crossing และมาจากวงจรสร้างสัญญาณ PWM 2 สัญญาณที่มีเฟสของสัญญาณตรงกันข้ามกันพร้อมกับสร้างเวลาตายของสัญญาณ PWM นำมารวมสัญญาณโดยการการใช้ลอจิกเกท พิจารณาดูจากวงจรในรูปที่ 3-45 เพื่อนำสัญญาณที่ได้จากวงจรรวมสัญญาณนี้นำไปควบคุมการทำงานของมอสเฟทกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยผ่านทางวงจร Drive & Isolated โดยสัญญาณในส่วนนี้จะนำไปควบคุมการทำงานในส่วนของคอนเวอเตอร์ 2 ในส่วนของสัญญาณควบคุมการทำงานในส่วนของคอนเวอเตอร์ 1 จะใช้สัญญาณจากชุดวงจรสร้างสัญญาณ Zero Crossing มาควบคุมการทำงานพิจารณาดูจากวงจรในรูปที่ 3-46 โดยที่การทำงานในส่วนของการควบคุมการทำงานของเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้สำหรับปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า การกลับขั้วของสัญญาณควบคุมการกลับเฟสของสัญญาณนี้จะใช้การตรวจจับขอบของสัญญาณ Zero Crossing เพื่อให้การกลับเฟสของสัญญาณกลับที่จุดแรงดันศูนย์พอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 บทนำ

การทดลองการนำเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า ไปใช้ในการปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า เพื่อเป็นการทดสอบขีดความสามารถในการทำงาน ของเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงดันไฟฟ้าที่มีข้อได้เปรียบที่เป็นข้อดีที่ได้กล่าวถึงไว้ในบทที่1 ในเรื่องของมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็ว ขนาดเล็ก มีประสิทธิภาพสูง การสูญเสียที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย การบำรุงรักษาต่ำ โดยทำการทดลองวัดค่า พารามิเตอร์ต่างๆที่มีอยู่ภายในวงจร รวมถึงการทดสอบหลักการทำงานในส่วนของการทำงานจริงเพื่อนำไปเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองจริงกับผลทางทฤษฎีเพื่อเป็นผลการยืนยันที่แน่ชัดในหลักการ

4.2 วงจรการทดลองและค่าพารามิเตอร์ต่างๆในวงจรทดลองของเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า

รูปที่ 4–1 วงจรทดลองของเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า

จากรูปที่ 4-1 วงจรการทดลองค่าพารามิเตอร์ต่างๆของอุปกรณ์ภายในวงจรการทดลอง และขอบเขตของการทดลองเป็นดังนี้

T_1 : หม้อแปลงลดแรงดันขนาดพิกัดแรงดัน 220 / 110 V

S_{r1}-S_{r4} และ S_1-S_4 : มอสเฟทกำลังขนาดพิกัด 20 A/ 500 V (IRFP460)

C_b : ตัวเก็บประจุสนับเบอร์ (WIMA MKP10) ขนาด 2.25 μF / 250 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L_1 : ตัวเหนี่ยวนำ ฟิลเตอร์ขนาด 0.44 mH

C_1 : ตัวคาปาซิเตอร์ ฟิลเตอร์ขนาด (WIMA MKP10) 10.68μF / 250 V

T_2 : หม้อแปลงชดเชยแรงดันขนาดพิกัดแรงดัน 90 / 22 V

โหลดหลอดไฟชนิดหลอดไส้ขนาด 500 W

v_{in} (v_S) : แรงดันอินพุต 220V±10%

v_{out} : แรงดันแรงดันเอาต์พุต 220V±2%

แรงตันไฟฟ้าแรงดันในส่วนต่างๆ ภายในวงจรที่มีผลต่อการทำงานของเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงตันไฟฟ้าที่

v_b เป็นแรงดันที่ได้จากการการเรียงกระแสแรงดันด้านอินพุต (v_S) โดยไดโอด ชุด คอนเวอเตอร์ i

v_r เป็นแรงดันที่ได้จากการการ สับที่ความถี่ที่สูง20 กิโลเฮิร์ทโดย ชุด คอนเวอเตอร์ 2โดยที่แรงดันเป็นแรงดัน PWM

v_C เป็นแรงดันที่ได้จากการผ่าน L – C ฟิลเตอร์ภายหลังจากการ สับที่ความถี่ที่สูง 20 กิโลเฮิร์ทโดย ชุด คอนเวอเตอร์ 2

4.3 การทดลองโดยวิธีการจำลองการทำงานของวงจรควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์

4.3.1 การทดลองวงจรสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่ 20 KH_Z

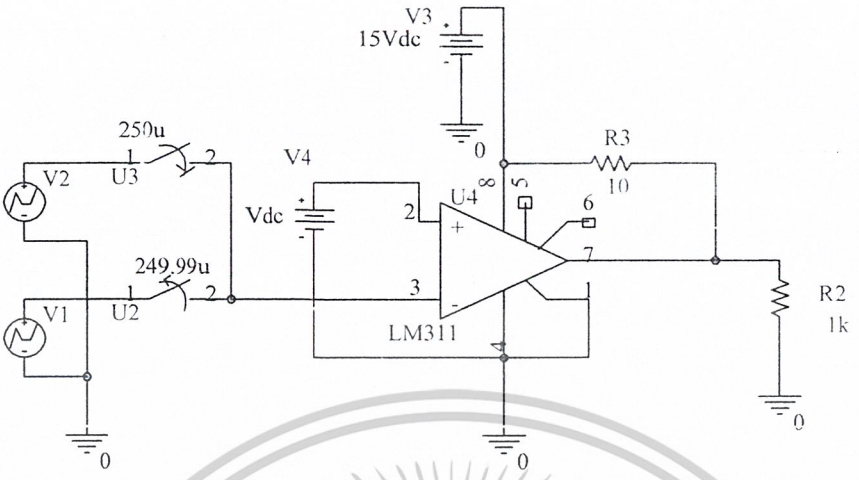
วงจรที่ใช้ในการ Simulation ประกอบด้วยรูปคลื่นสามเหลี่ยม 20 KHz ที่เกิดจาก TL 494 ในวงจรใช้ V1,V2 แทน โดยเป็น VPWL แรงดันที่เปลี่ยนแปลงที่โหลด (V_{REF}) ในวงจรใช้ V4 แทน โดยเป็น Vdc ที่ปรับค่าได้

วัตถุประสงค์ต้องการทราบว่ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมมีลักษณะเป็นอย่างไรเมื่อแรงดันอ้างอิง V_{REF} เปลี่ยนแปลงในช่วง 0 - 2.8 V

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการวัดสัญญาณที่ขา 5 ของ IC TL494 เปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง V_{REF} โดยปรับค่าแรงดันอ้างอิง V_{REF} มีค่าเท่ากับ 0,1.5 และ 2.5 V ตามลำดับ
2. วัดสัญญาณเอาท์พุทที่ได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณที่ขา 5 ของ IC TL494 กับแรงดันอ้างอิง V_{REF} ที่ค่าต่างๆ

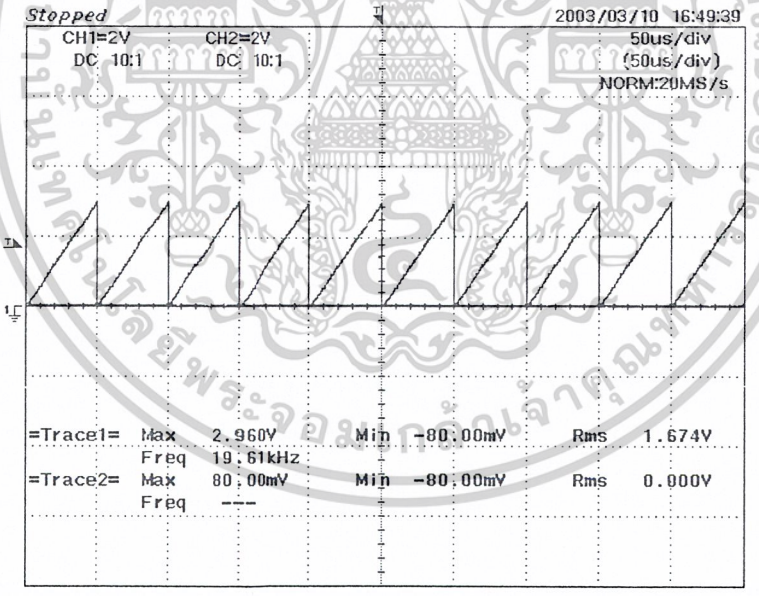
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-2 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่ 20 kHz

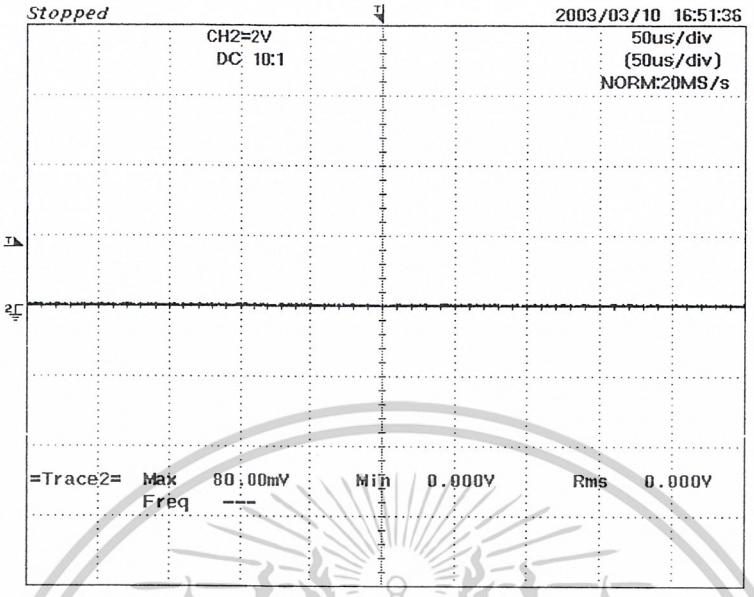
ผลการทดลอง

1. รูปคลื่นสัญญาณที่ค่า $V_{REF} = 0$ V

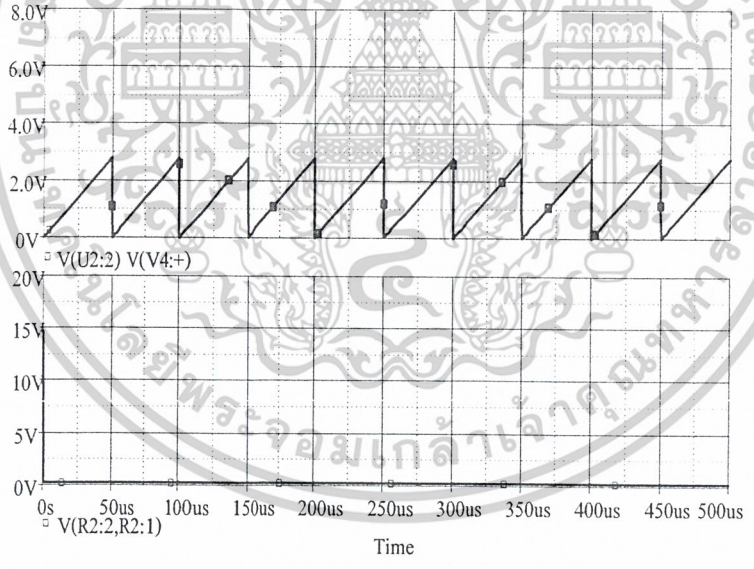


รูปที่ 4-3 สัญญาณที่ทดลองจริงที่ใช้ในการเปรียบเทียบ เมื่อ $V_{REF} = 0$ V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



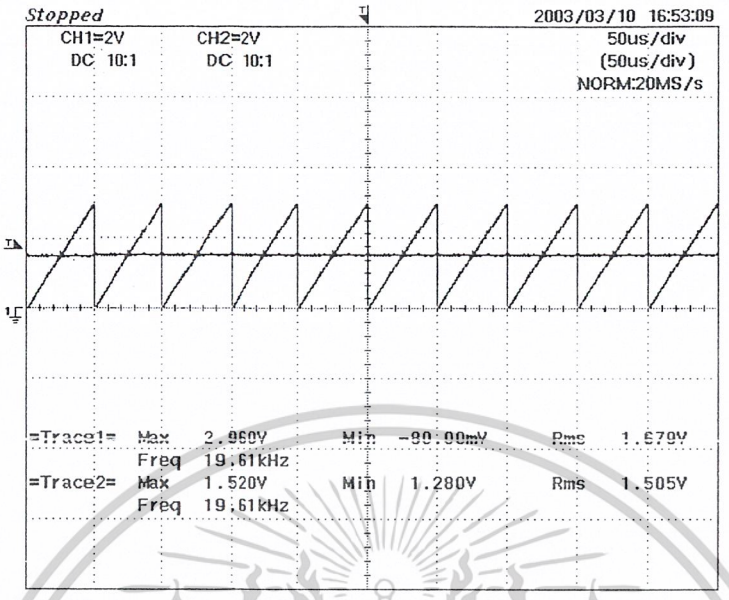
รูปที่ 4-4 สัญญาณที่ได้จากการทดลองจริง เมื่อ $V_{REF} = 0\ V$



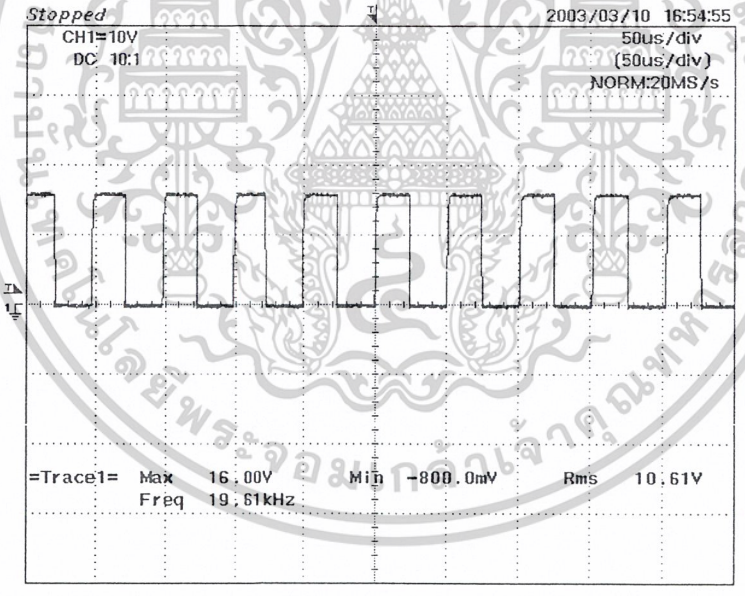
รูปที่ 4-5 สัญญาณที่ได้จากโปรแกรม Orcad 9.1 เมื่อ $V_{REF} = 0\ V$

2. รูปคลื่นสัญญาณที่ค่า V_{REF} = 1.5 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

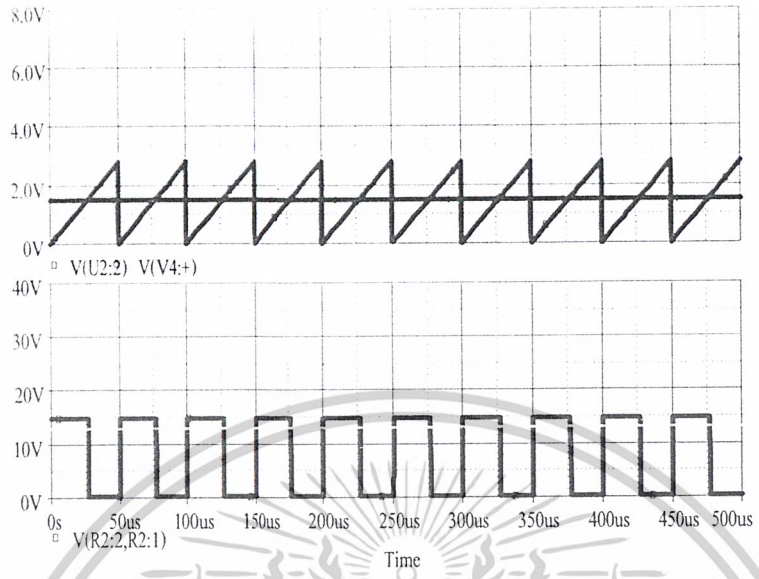


รูปที่ 4-6 สัญญาณที่ได้จากการทดลองจริง เมื่อ V_{REF} = 1.5 V



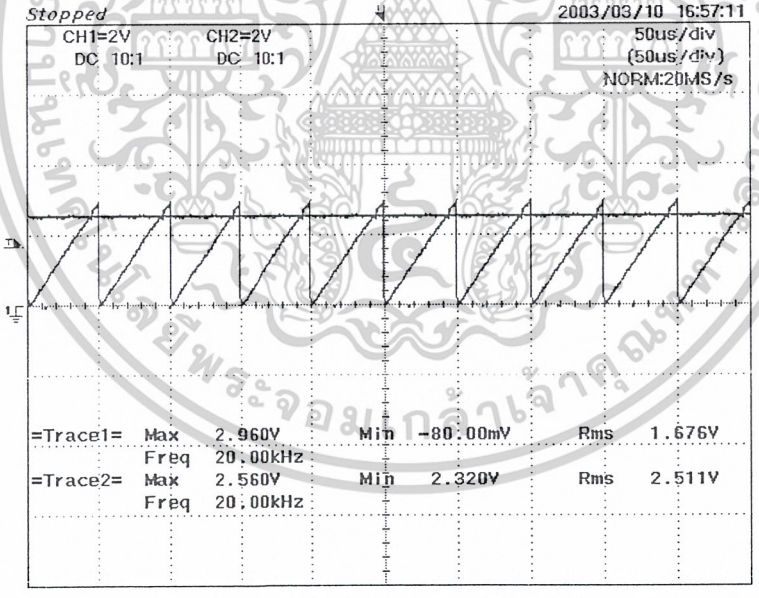
รูปที่ 4-7 สัญญาณที่ได้จากการทดลองจริง เมื่อ V_{REF} = 1.5 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



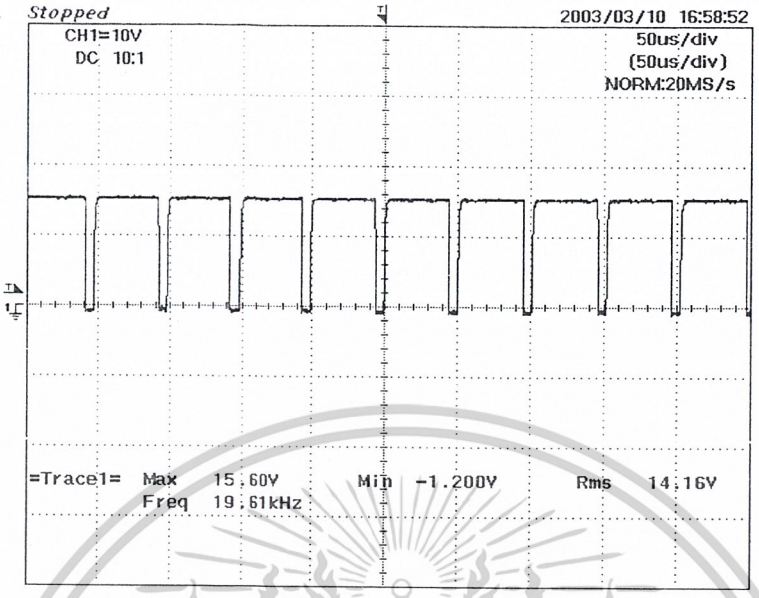
รูปที่ 4-8 สัญญาณที่ได้จากโปรแกรม Orcad 9.1 เมื่อ V_{REF} = 1.5 V

3. รูปคลื่นสัญญาณที่ค่า V_{REF} = 2.5 V

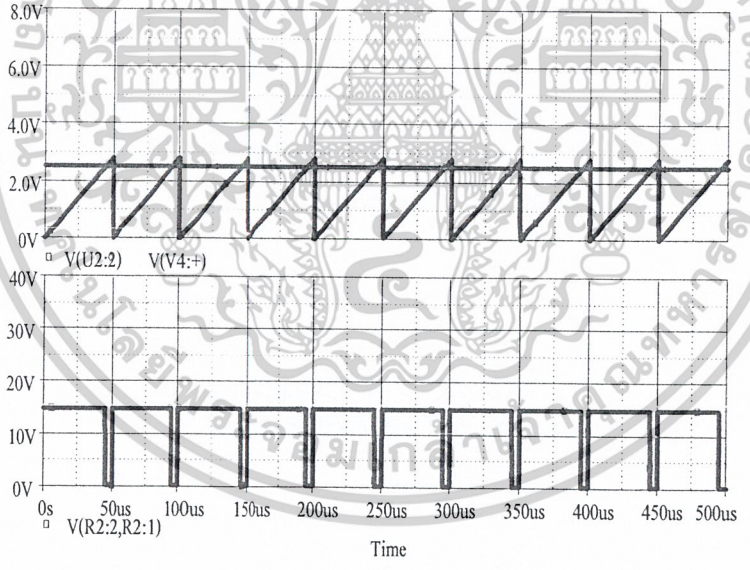


รูปที่ 4-9 สัญญาณที่ได้จากการทดลองจริง เมื่อ V_{REF} = 25 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-10 สัญญาณที่ได้จากการทดลองจริง เมื่อ V_{REF} = 25 V



รูปที่ 4-11 สัญญาณที่ได้จากโปรแกรม Orcad 9.1 เมื่อ V_{REF} = 2.5 V

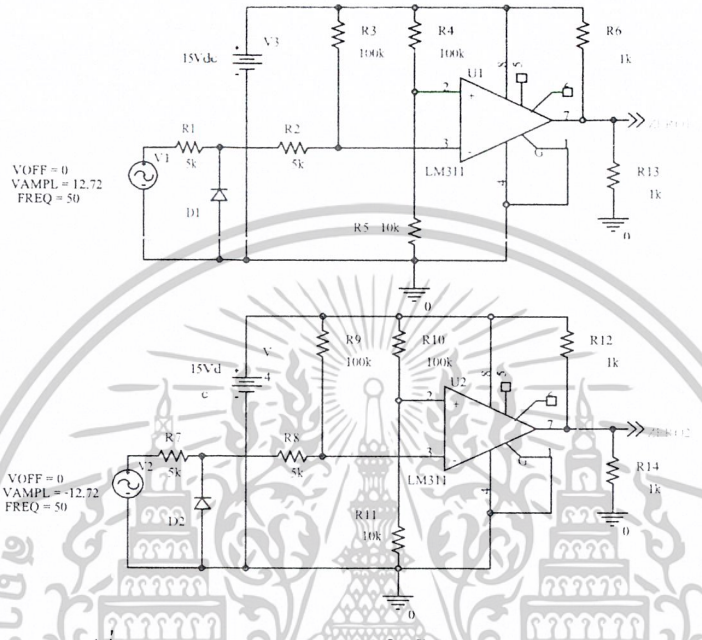
สรุปผลการทดลอง

จะเห็นได้ว่าจากการทดลอง เมื่อค่าแรงดันอ้างอิง V_{REF} มีการเปลี่ยนแปลงจะทำให้เอาท์พุตของวงจรสร้างสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงตาม แต่ความถี่ของสัญญาณเอาท์พุต ยังคงเท่าเดิม ซึ่งแรงดันอ้างอิง V_{REF} นี้จะนำมาจากวงจรป้อนกลับ ที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันได้ตั้งแต่ 0 - 2.8 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การทดลองวงจร Zero Crossing

วงจรที่ใช้ในการ Simulation ประกอบด้วยแรงดันที่ได้จากหม้อแปลงขนาด 12-0-12 โวลต์ ในวงจรใช้ V1, V2 แทน โดยเป็น Vsin



รูปที่ 4-12 วงจร Zero Crossing ในโปรแกรม Orcad 9.1

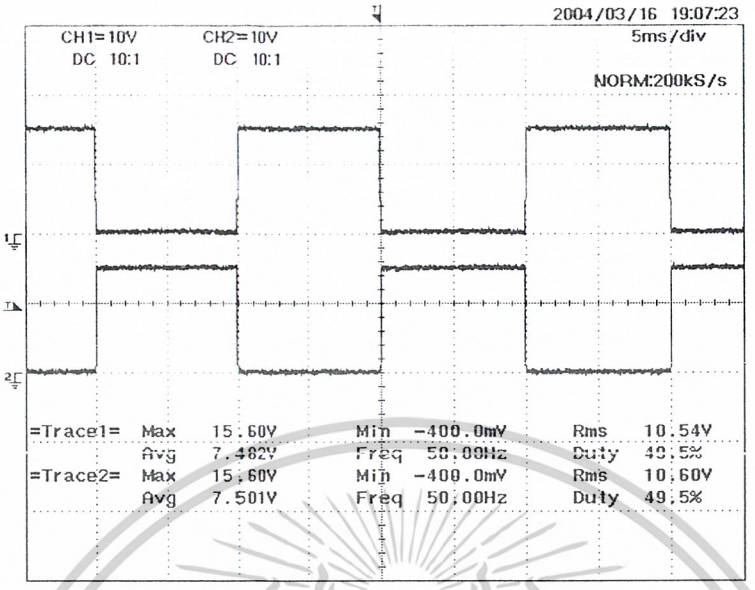
วัตถุประสงค์ ต้องการเปรียบเทียบสัญญาณสี่เหลี่ยม 50 H_Z กับสัญญาณไซน์ 50 H_Z

ขั้นตอนการทดลอง

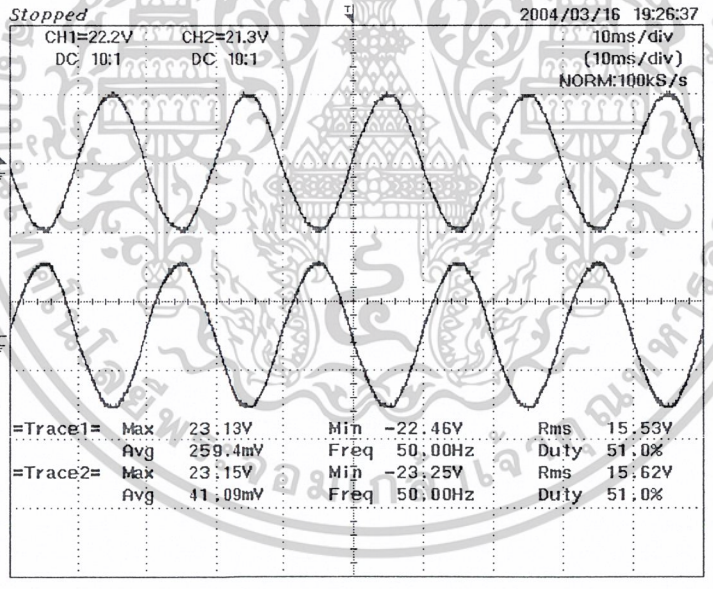
1. ทำการวัดสัญญาณไซน์ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงทั้ง 2 สัญญาณในวงจร Zero Crossing
2. ทำการวัดสัญญาณเอาท์พุท 1 และ เอาท์พุท 2 ที่เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม
3. ทำการเปรียบเทียบสัญญาณไซน์ และสี่เหลี่ยม

ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

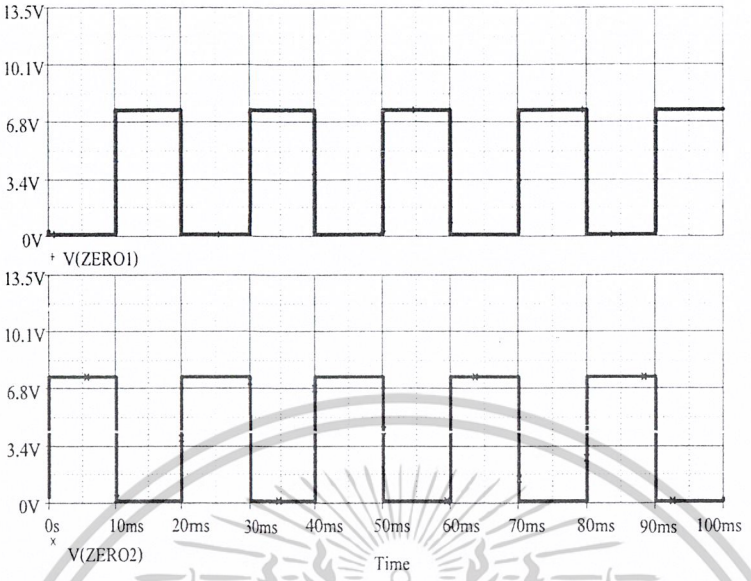


รูปที่ 4-13 สัญญาณที่ได้จากการทดลองจริง



รูปที่ 4-14 สัญญาณที่ได้จากการทดลองจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-15 แรงดัน Zero Crossing ที่ได้จากโปรแกรม Orcad 9.1

สรุปผลการทดลอง

จากคุณสมบัติการทำงานของวงจร เมื่อสัญญาณไซน์มีค่ามากกว่าศูนย์ เอาท์พุทที่ได้จะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม แต่ขณะที่สัญญาณไซน์มีค่าน้อยกว่าศูนย์ เอาท์พุทที่ได้จะเป็นศูนย์ โดยความถี่ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ได้นี้จะมีค่าเท่ากับความถี่ของสัญญาณไซน์คือ 50 H_Z และสัญญาณเอาท์พุททั้ง 2 สัญญาณนี้จะมีความต่างเฟสกัน 180°

4.3.3 การทดลองวงจร Dead Time

วงจรที่ใช้ในการ Simulation ประกอบด้วยสัญญาณที่ได้จากวงจรสร้างสัญญาณสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 20 kHz ในวงจรใช้ Vpulse แทน โดยเป็น VPULSE มีรายละเอียดดังนี้

V1 = 0 Volt , V2 = 15 Volt , TD = 0 sec , TR = 1 nsec , TF = 1 nsec ,

PW = 0.025 msec , PER = 0.05 msec

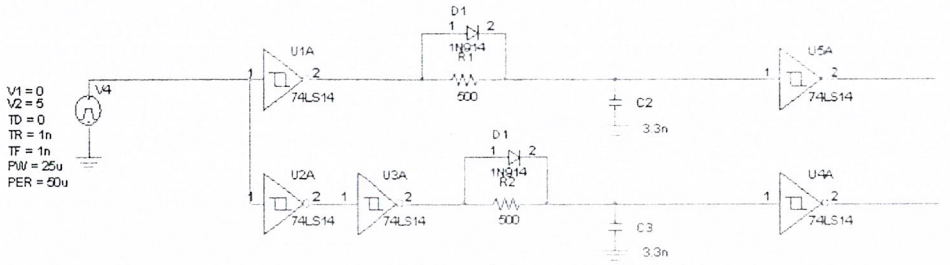
วัตถุประสงค์ ต้องการเปรียบเทียบสัญญาณสี่เหลี่ยม 20 KH_Z 2 สัญญาณที่มี Dead Time ซึ่งกันและกัน โดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง V_{REF} มีค่าเท่ากับ 0 และ 1.5 V

ขั้นตอนการทดลอง

1. ป้อนสัญญาณสี่เหลี่ยม 20 KH_Z จากวงจรสร้างสัญญาณและปรับแรงดันอ้างอิงที่ค่า 0, 1.5 และ 2.5 V ตามลำดับ
2. วัดสัญญาณเอาท์พุทของวงจร Dead Time โดยปรับค่าเวลา Dead Time (t_d) มีค่าเท่ากับ 4 μ s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

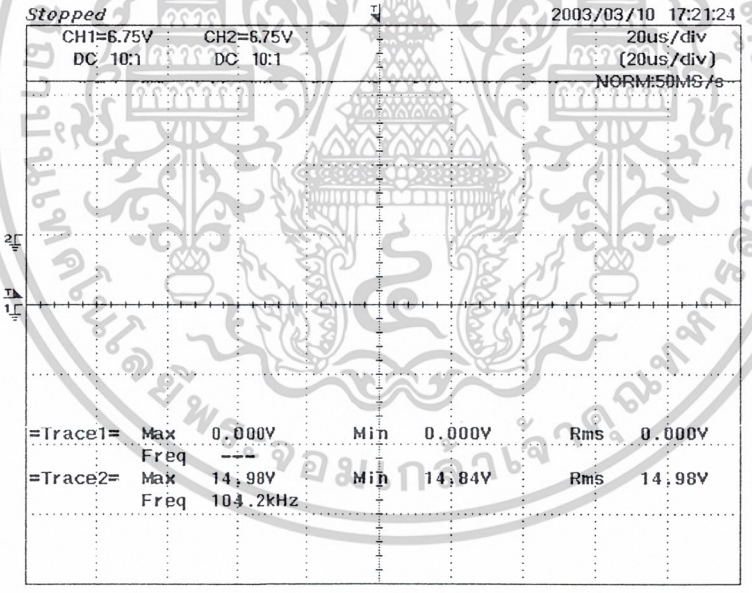
3. เปรียบเทียบสัญญาณที่อินพุท และเอาท์พุททั้ง 3 สัญญาณ



รูปที่ 4-16 วงจร Dead Time ในโปรแกรม Orcad 9.1

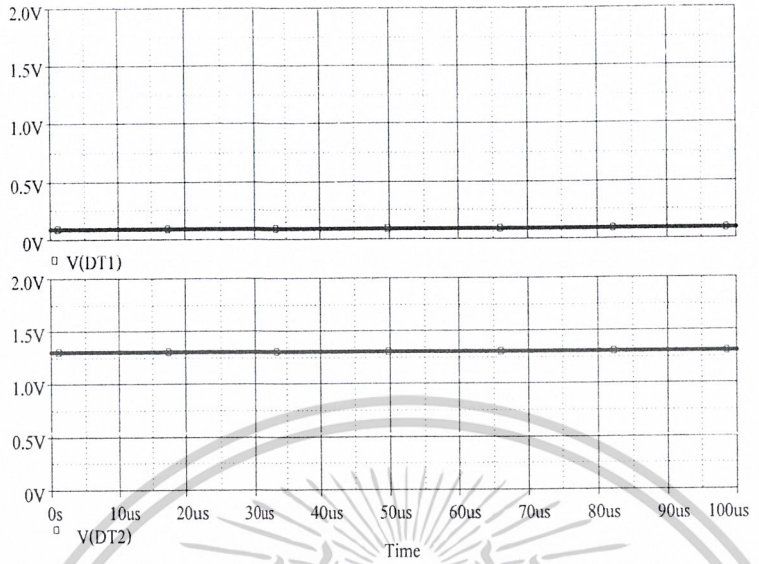
ผลการทดลอง

1. $V_{REF} = 0$ V, $t_d = 4\,\mu$ s



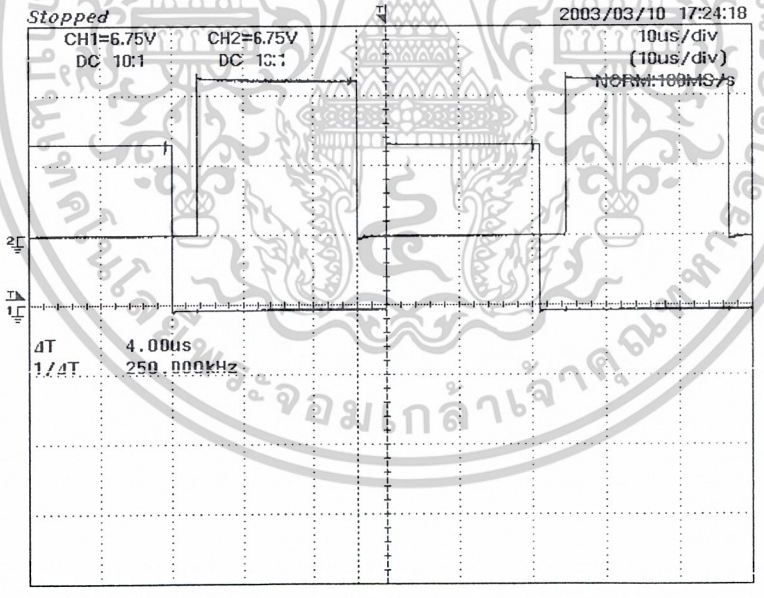
รูปที่ 4-17 สัญญาณ Dead Time ที่ได้จากการทดลองจริง เมื่อ $V_{REF} = 0$ V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



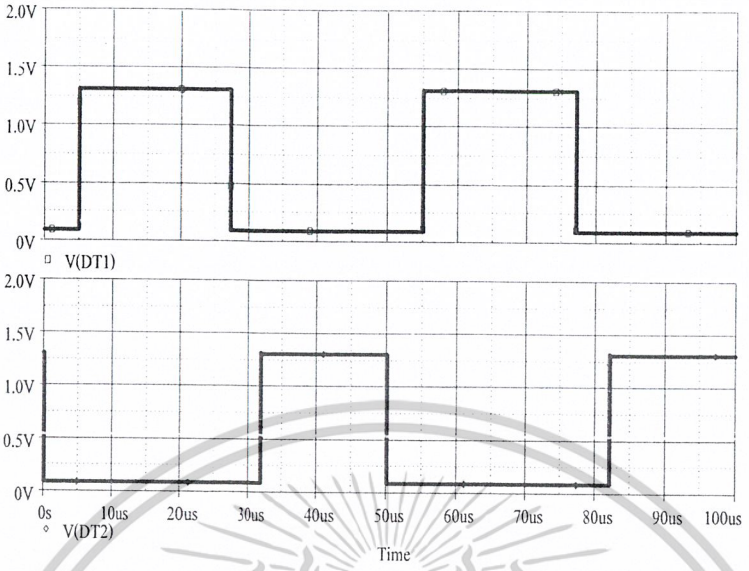
รูปที่ 4-18 สัญญาณที่ได้จากวงจร Dead Time ในโปรแกรม Orcad 9.1 เมื่อ $V_{REF} = 0$ *V*

2. $V_{REF} = 1.5$ V, $t_d = 4\ \mu$ s



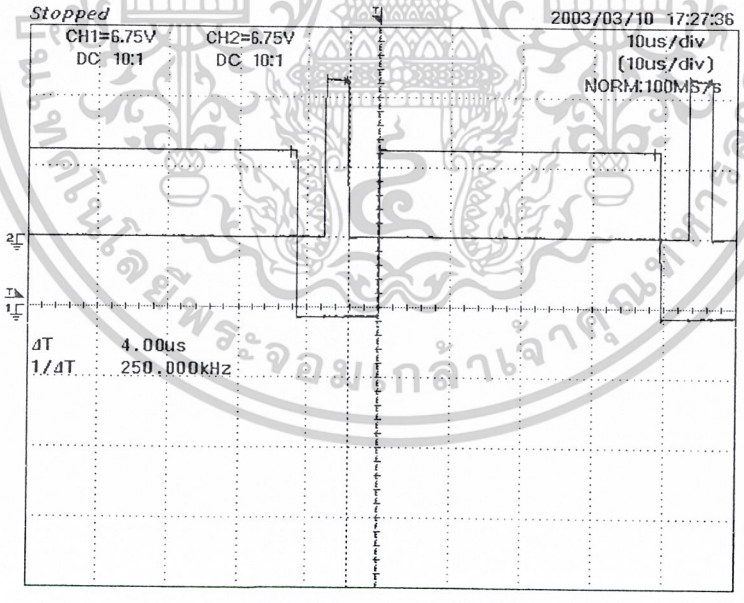
รูปที่ 4-19 สัญญาณ Dead Time ที่ได้จากการทดลองจริง เมื่อ $V_{REF} = 1.5$ *V*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



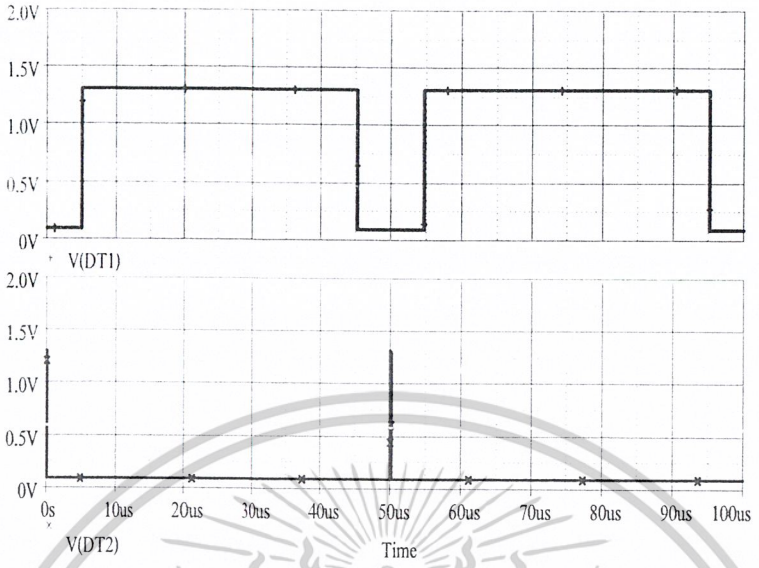
รูปที่ 4-20 สัญญาณที่ได้จากวงจร Dead Time ในโปรแกรม Orcad 9.1 เมื่อ $V_{REF} = 1.5\ V$

3. $V_{REF} = 2.5$ V, $t_d = 4\ \mu$ s



รูปที่ 4-21 สัญญาณ Dead Time ที่ได้จากการทดลองจริง เมื่อ $V_{REF} = 2.5\ V$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-22 สัญญาณที่ได้จากวงจร Dead Time ในโปรแกรม Orcad 9.1 เมื่อ V_{REF} = 2.5 V

สรุปผลการทดลอง

จะเห็นได้ว่าที่ค่าแรงดันอ้างอิง $V_{REF} = 0$ V. สัญญาณ $Q = 0$ แต่ Q' จะไม่เป็นศูนย์ ซึ่งจุดนี้เป็นจุดที่สำคัญมากเพราะว่าที่ค่า $V_{REF} = 0$ V. เราต้องการให้สัญญาณเอาท์พุทเท่ากับศูนย์ด้วยเนื่องจากเราไม่ต้องการให้มีสัญญาณไปขับมอสเฟท เพราะฉะนั้นต้องทำการปรับปรุงและแก้ไขให้สัญญาณ $Q' = 0$ ที่ค่า $V_{REF} = 0$ V. โดยวงจรที่ใช้ปรับปรุงแก้ไขจะอยู่ในส่วนของวงจรรวมสัญญาณ ส่วนสัญญาณเอาท์พุทที่ค่า V_{REF} = 1.5 V. และ 2.5 V. $t_d = 5\ \mu s$ จะมีลักษณะดังรูปข้างบน

4.3.4 การทดลองวงจร Drive & Isolate

เนื่องจากสัญญาณเอาท์พุททั้ง 4 ยังไม่สามารถที่จะไปขับมอสเฟทได้โดยตรงดังนั้นจึงต้องนำสัญญาณเอาท์พุทจากวงจรรวมสัญญาณมาผ่านวงจร Drive & Isolate เสียก่อน ซึ่งวิธีการทดสอบสามารถกระทำได้ดังนี้

วงจรที่ใช้ในการซิมูเลชั่น ประกอบด้วย

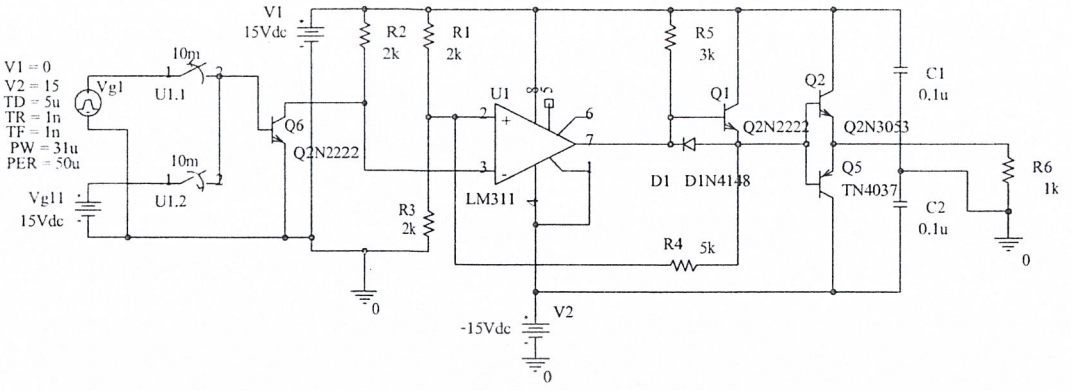
วัตถุประสงค์ทำการเปรียบเทียบสัญญาณเอาท์พุทของวงจร โดยปรับค่าแรงดันอ้างอิงเท่ากับ 0 และ 2 V.

ขั้นตอนการทดลอง

1.ป้อนสัญญาณ V_{g1} , V_{g2} , V_{g3} และ V_{g4} ให้กับชุด Drive & Isolate แต่ละชุด

2.เปรียบเทียบสัญญาณเอาท์พุท V_{G1} , V_{G2} , V_{G3} และ V_{G4}

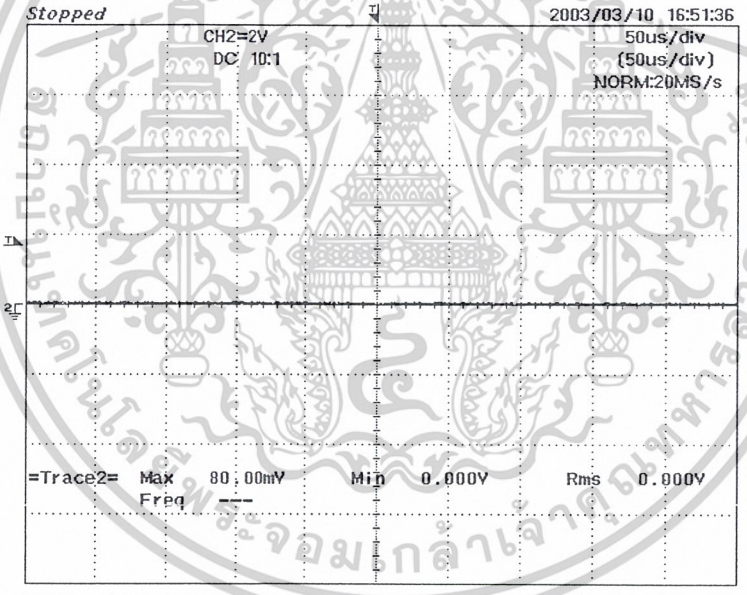
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-23 วงจร Drive & Isolate โปรแกรม Orcad 9.1

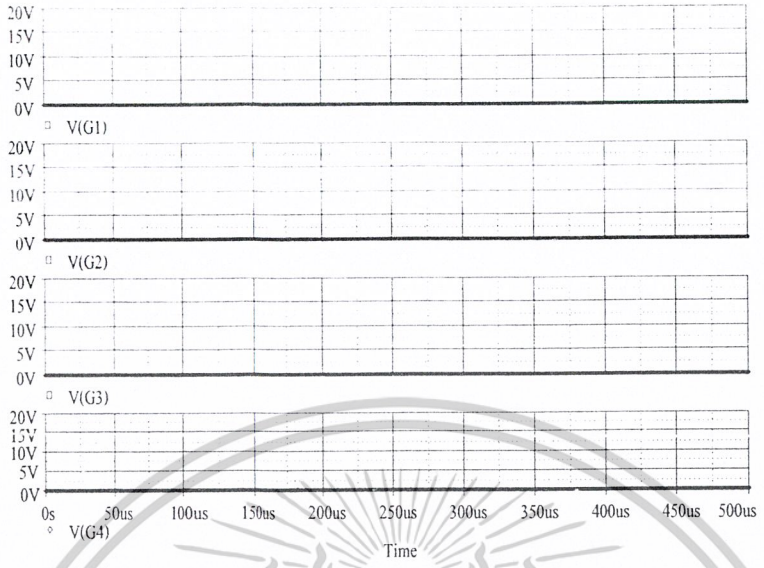
ผลการทดลอง

1. $V_{REF} = 0$ V.



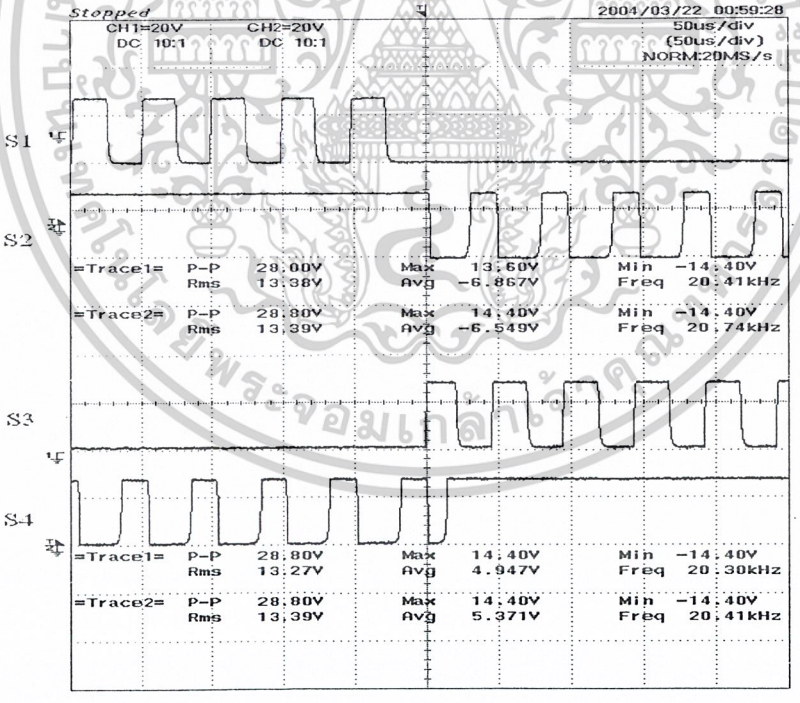
รูปที่ 4-24 สัญญาณ Drive & Isolate ที่ได้จากการทดลองจริง เมื่อ $V_{REF} = 0$ V.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



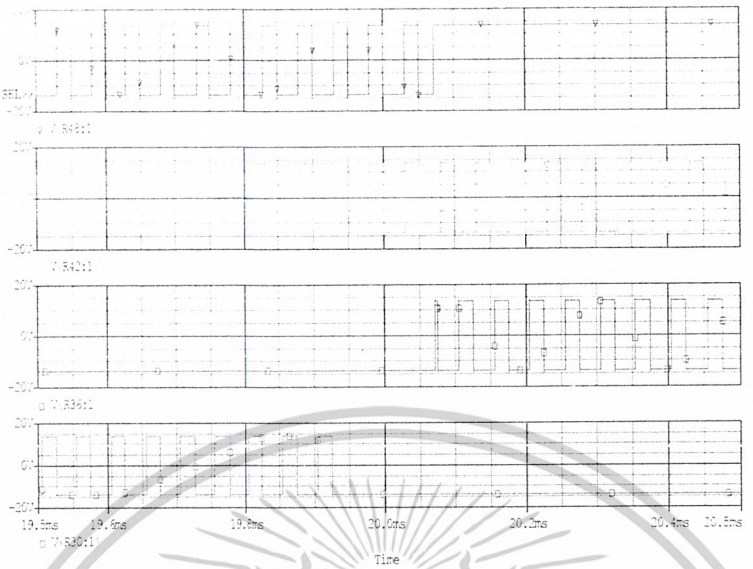
รูปที่ 4-25 สัญญาณ Drive & Isolate ที่ได้จากโปรแกรม Orcad 9.1 เมื่อ V_{REF} = 0 V.

2. V_{REF} = 2 V.



รูปที่ 4-26 สัญญาณ Drive & Isolate ที่ได้จากการทดลองจริง เมื่อ V_{REF} = 2 V.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-27 สัญญาณ Drive & Isolate ที่ได้จากโปรแกรม Orcad 9.1 เมื่อ V_{REF} = 2 V.

สรุปผลการทดลอง

จากรูปคลื่นจะเห็นได้ว่าเมื่อนำอินพุทป้อนเข้ามา เอาท์พุทได้จะมีลักษณะเหมือนกันแต่สัญญาณเอาท์พุทที่ค่าต่ำสุดจะติดลบประมาณ -15 V. เนื่องจากการที่จะนำสัญญาณไปขับมอสเฟทให้ทำงานถ้าต้องการให้มอสเฟทหยุดทำงาน ที่แรงดันติดลบนั้นจะทำให้มอสเฟทหยุดทำงานได้แน่นอนยิ่งขึ้น

4.3.5 การทดลองวงจรรวมสัญญาณ

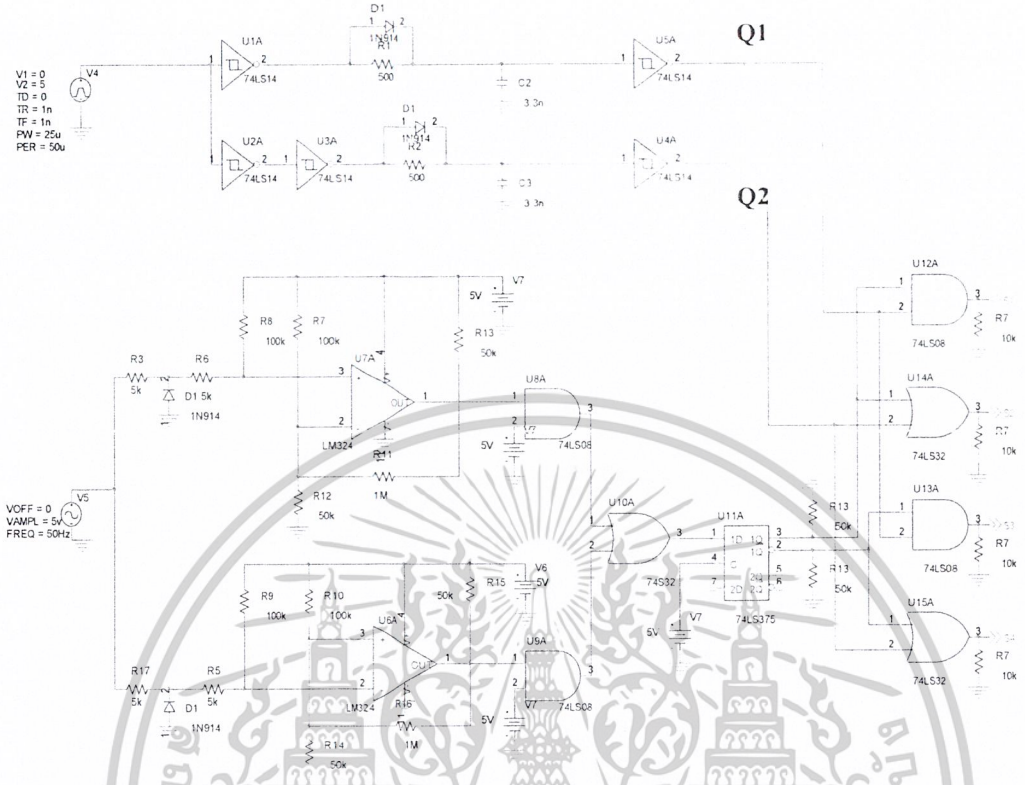
วงจรที่ใช้ในการ Simulation ประกอบด้วยวงจร Dead Time และวงจร Zero Crossing ที่รวมสัญญาณเข้ากันด้วยเกตต่างๆ

วัตถุประสงค์ ต้องการนำสัญญาณสี่เหลี่ยม 20 KHz Q!และ Q2 จากวงจร Dead Time นำมา รวมสัญญาณสี่เหลี่ยม 50 Hz B1 และ B2 จากวงจร Zero Crossing

ขั้นตอนการทดลอง

1. ป้อนอินพุตของวงจรนี้คือ สัญญาณสี่เหลี่ยม 20 KHz Q1และ Q2 กับสัญญาณสี่เหลี่ยม 50 Hz B1 และ B2
2. ปรับแรงดันอ้างอิง Vref จากวงจรรวมสัญญาณที่ค่า 0 , 2 V โดยตั้ง td จากวงจร Dead Time เท่ากับ 3.2 μs
3. เปรียบเทียบสัญญาณเอาท์พุท กับสัญญาณอินพุตที่ค่าแรงดันอ้างอิง V_{ref} = 0, 2 V ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

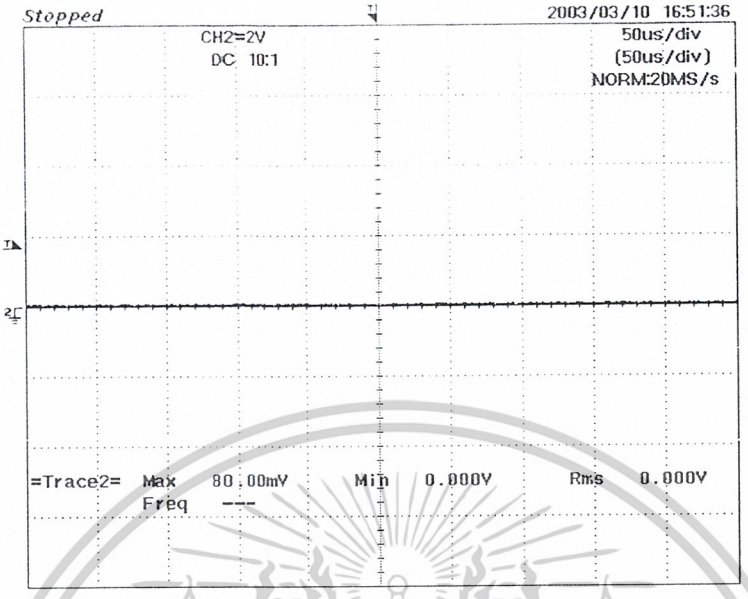


รูปที่ 4-28 วงจรรวมสัญญาณที่ได้จากโปรแกรม Orcad 9.1

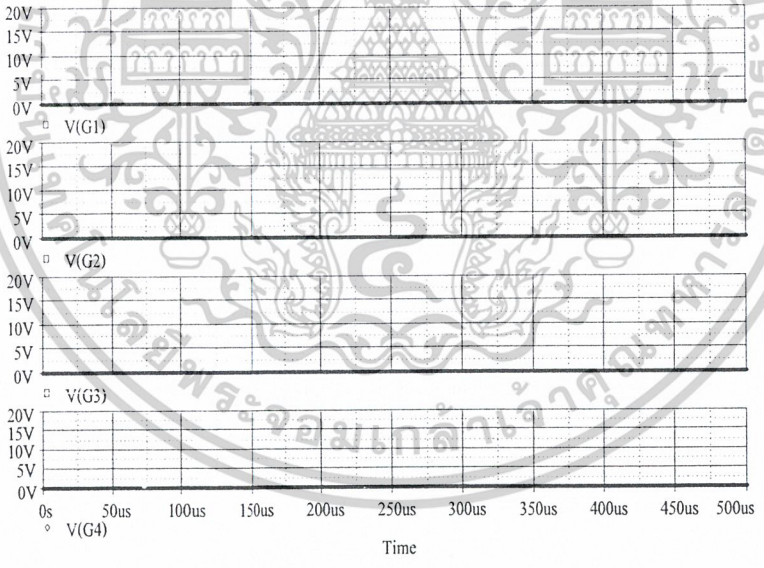
ผลการทดลอง

1. $V_{REF} = 0$ V.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



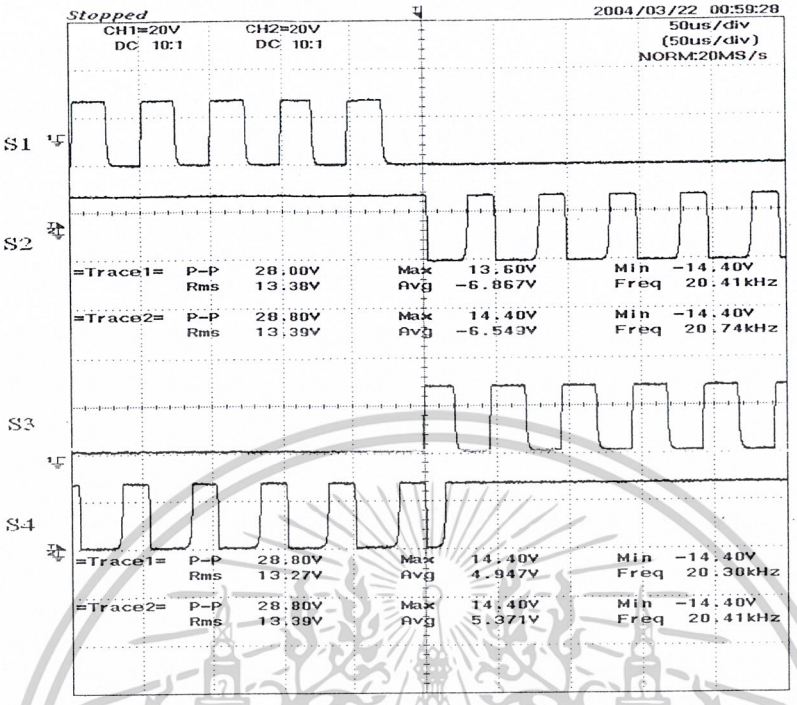
รูปที่ 4-29 สัญญาณเอาท์พุต ที่ได้จากการทดลองจริง เมื่อ V_{REF} = 0 V.



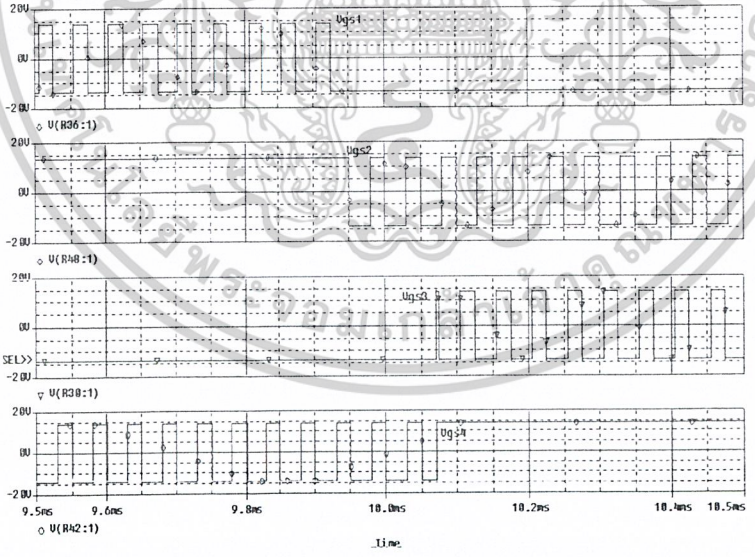
รูปที่ 4-30 สัญญาณเอาท์พุต ที่ได้จากโปรแกรม Orcad 9.1 เมื่อ V_{REF} = 0 V.

2. V_{REF}= 2 V.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-31 สัญญาณ เอาท์พุต ที่ได้จากการทดลองจริง เมื่อ V_{REF} = 2 V.



รูปที่ 4-32 สัญญาณ เอาท์พุต ที่ได้จากโปรแกรม Orcad 9.1 เมื่อ V_{REF} = 2 V.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.6 การทดลองวงจรรวมสัญญาณ

การทดลองของวงจรกลับขั้วสวิทช์ทุกตัวจะต้องทำการ off ก่อนทำการกลับขั้ว

วงจรที่ใช้ในการ Simulation ประกอบด้วย

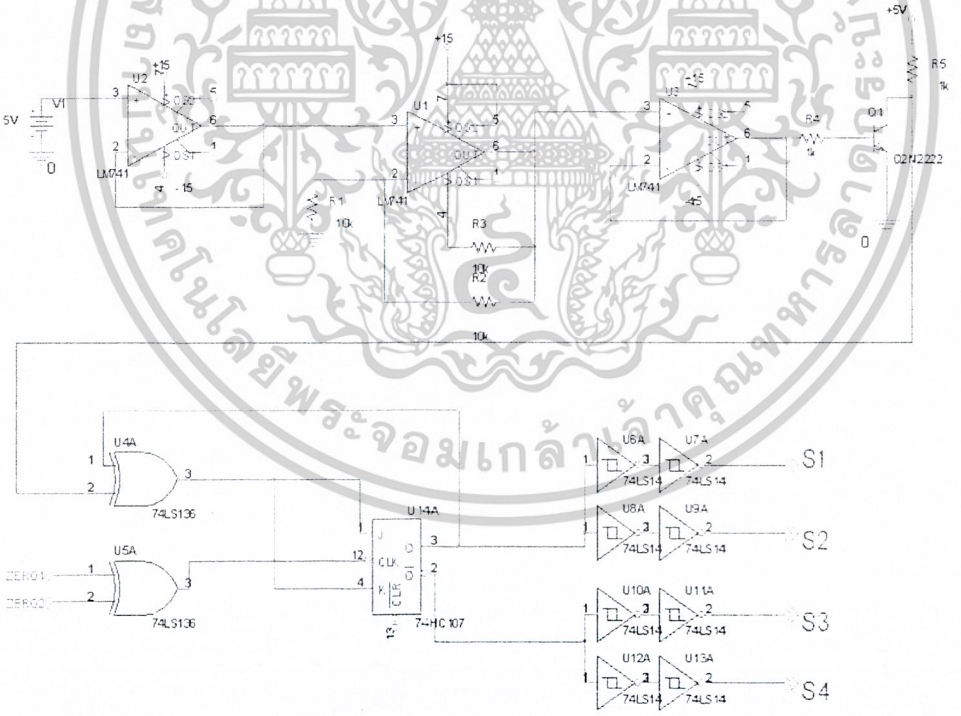
วัตถุประสงค์ ทำการตรวจสอบการทำงานของวงจร Drive ของชุดกลับขั้วในสภาวะการทำงานเสริมและหักล้างแรงดัน

ขั้นตอนการทดลอง

1. ป้อนสัญญาณ Zero Crossing เข้าที่ขา Zero 1 และ Zero 2 เข้าที่ตัว Exclusive – OR Gate พร้อมกับสัญญาณ Feedback
2. เปรียบเทียบสัญญาณเอาท์พุต S1 , S2 , S3 , S4

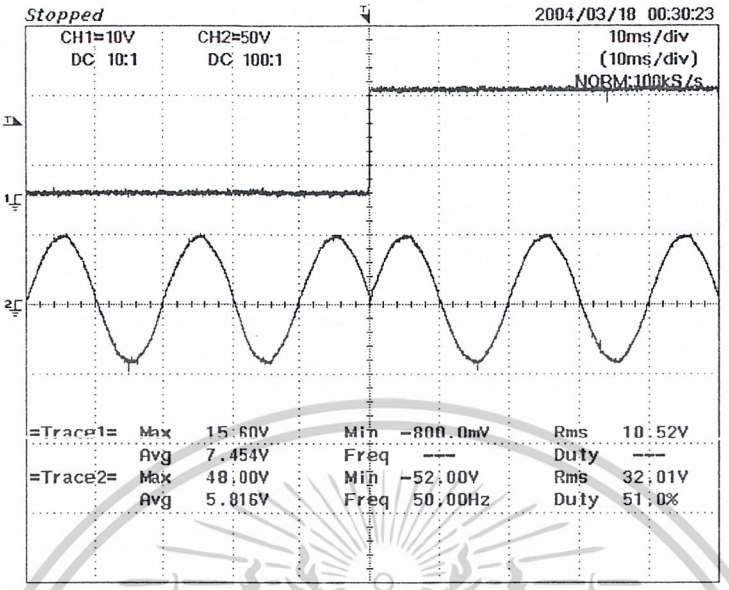
ผลการทดลอง

จากรูปคลื่นจะเห็นว่าวงจรสามารถได้ 2 สภาวะการทำงาน คือ สภาวะแรก คือ S1 , S2 เปลี่ยนจากสภาวะศูนย์เป็นบวก จะเห็นว่ารูปคลื่นเหมือนกับอินพุตที่เข้ามา สภาวะที่สอง S3 , S4 เปลี่ยนจากสภาวะบวกเป็นศูนย์ จะเห็นว่ารูปคลื่นจะตรงข้ามกับอินพุตที่เข้ามา

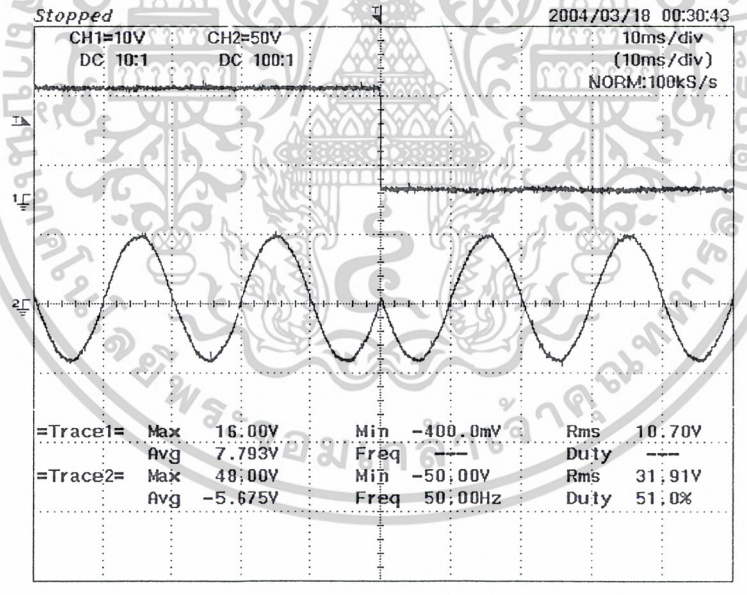


รูปที่ 4-33 วงจรคอนโทรลของชุดกลับขั้ว ที่ได้จากโปรแกรม Orcad 9.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-34 สัญญาณอินพุตขณะกลับสวิทช์การทำงานจาก S1,S2 off เป็น on



รูปที่ 4-35 สัญญาณอินพุตขณะกลับสวิทช์การทำงานจาก S1,S2 on เป็น off

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

การทดลองในการกลับขั้วแรงดันโดยใช้การตรวจจับระดับของแรงดัน นั้นในการตรวจจับแรงดันนั้นสามารถทำงานได้อย่างรวดเร็วและในการกลับขั้วแรงดันนี้จะทำงานเป็นไซเกิลที่ช่วงคาบเวลาการทำงานที่ 20 ms จึงทำให้การทำงานของการชดเชยแรงดันมีความถูกต้องและแม่นยำ

4.4 ผลการทดลอง

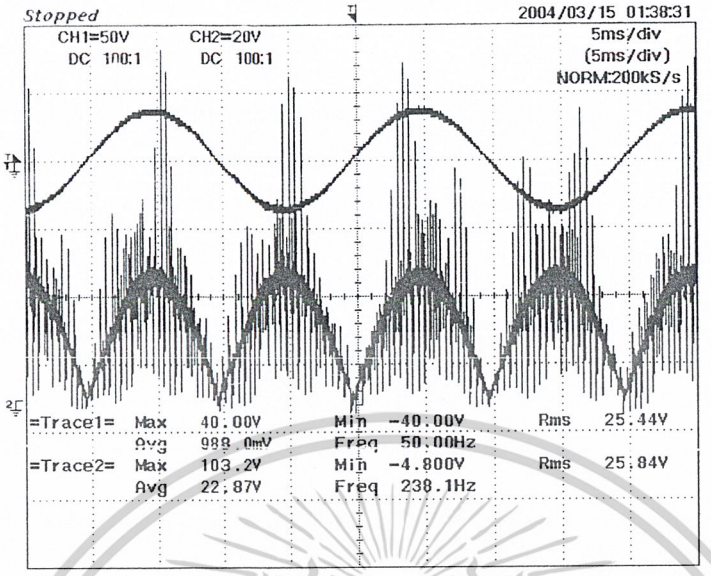
4.4.1 การทดลองในการแก้ผลของการเกิดแรงดันสไปร์ทโดยใช้ตัวเก็บประจุสนับเบอร์

ผลการทดลองที่ได้จากการทดลองวัดค่าจริงของวงจรเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้ โดยเริ่มจากในส่วนของ v_b เป็นแรงดันที่ได้จากการการเรียงกระแสแรงดันด้านอินพุต (v_S)โดยคอนเวอเตอร์ 1 โดยที่ เปรียบเทียบผลก่อนหน้าและหลังการใส่ตัวเก็บประจุสนับเบอร์ (C_b) เพื่อลดผลของการแรงดันเกิดสไปร์ทเนื่องจากการเทิร์นออฟ (turn-off) ของสวิทซ์จากชุด คอนเวอเตอร์ 2

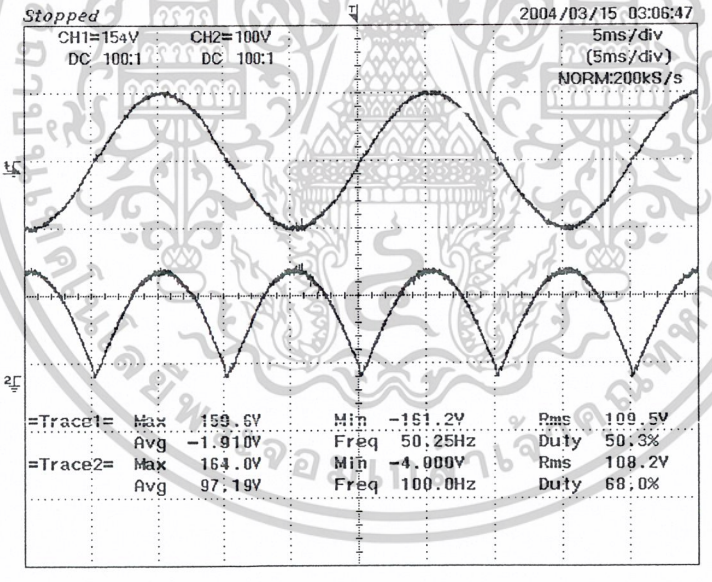
สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองที่ได้จากการ วัดค่าผลการทดลองในส่วนของ v_b เป็นแรงดันที่ได้จากการการเรียงกระแสแรงดันจากด้านอินพุต v_S ชุดจากคอนเวอเตอร์ 1โดยที่เมื่อทำการเปรียบเทียบเทียบจากรูปที่ 4-2 จะเห็นว่าในขณะที่ยังไม่มีการต่อตัวเก็บประจุสนับเบอร์นั้นแรงดันที่จ่ายให้กับคอนเวอเตอร์ 1 นั้นมีค่าเพียงเล็กน้อย (v_S) แต่เมื่อมีการทำงานของสวิทซ์จากชุดคอนเวอเตอร์ 2 ซึ่งทำให้เกิดแรงดันสไปร์ทอันเนื่องมาจากผลของ $V_L = L_S \frac{di_L}{dt}$ ซึ่งแรงดันสไปร์ทนั้นมีค่าแรงดันพีค (Peak Voltage) สูงมากหากมีค่ามากเกินกว่าพิกัดที่อุปกรณ์สวิทซ์ชิ่งทนได้มันจะทำให้อุปกรณ์สวิทซ์ชิ่งพังเสียหายทันที และ รูปที่ 4-3 จะเห็นได้อย่างชัดเจนหลังการใส่ตัวเก็บประจุสนับเบอร์ (C_b) เพื่อลดผลของการแรงดันสไปร์ทเนื่องจากการเทิร์นออฟ ของสวิทซ์จากชุดคอนเวอเตอร์ 2 ตัวเก็บประจุสนับเบอร์จะทำหน้าที่เป็นสนับเบอร์ป้องกันแรงดันเกิน โดยการขลิบแรงดันไม่ให้เกินพิกัดที่มอสเฟทกำลังทนได้ จากรูปที่ 4-3 จะเห็นได้ว่าแรงดันสไปร์ทถูกกำจัดออกไปโดย ตัวเก็บประจุสนับเบอร์ได้หมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-36 รูปคลื่นแรงดัน v_b ที่วัดได้ในขณะที่ยังไม่ต่อคาปาซิเตอร์สนับเบอร์ C_b



รูปที่ 4-37 แรงดัน v_b ที่วัดได้ภายหลังการต่อคาปาซิเตอร์สนับเบอร์ C_b

4.4.2 การทดลองในส่วนของการฟิลเตอร์ก่อนและหลังการผ่านฟิลเตอร์

การใส่ฟิลเตอร์ในการกรองเพื่อให้แรงดัน PWM v_r ที่ได้จากการสับที่ความถี่สูง 20 กิโลเฮิร์ทซึ่ง แรงดัน v_r เป็นแรงดันที่มีจำนวนครั้งของการสวิตช์ชิ่งซึ่งหาได้จาก

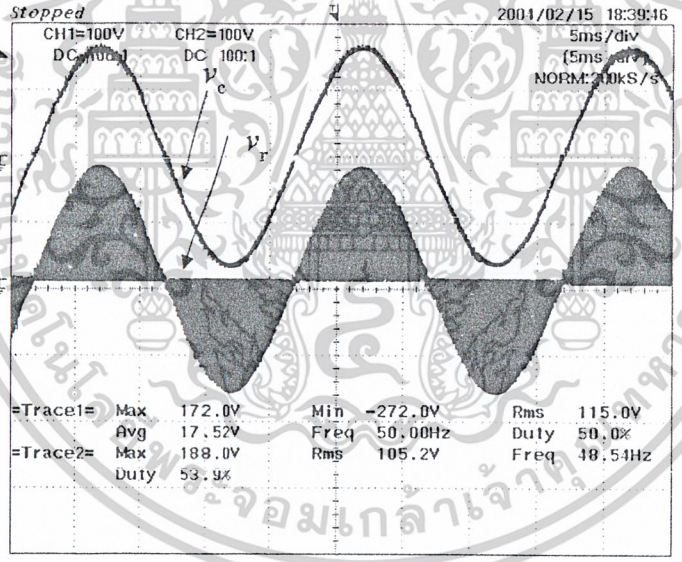
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{จำนวนครั้งของการสวิตช์ซิ่ง} = \frac{\text{ค่าความถี่ของการสวิตช์ซิ่ง}}{\text{ค่าความถี่ฐาน}} = \frac{20kH_z}{50H_z} = 400\text{ครั้ง/ไซเกิล} \quad (4.1)$$

ซึ่งแรงดัน v_r ซึ่งเป็นแรงดันที่มีทั้งส่วนของแรงดันที่ความถี่ใช้งานและส่วนประกอบของฮาร์โมนิกส์ การใส่ฟิลเตอร์จะช่วยกรองเอาส่วนประกอบของฮาร์โมนิกส์ไว้ และส่งผ่านเฉพาะส่วนของแรงดันที่ความถี่ใช้งานส่งออกไปยังโหลดเอาท์พุตโดยมีผลการทดลองดังรูปที่ 4-4 และ 4-5

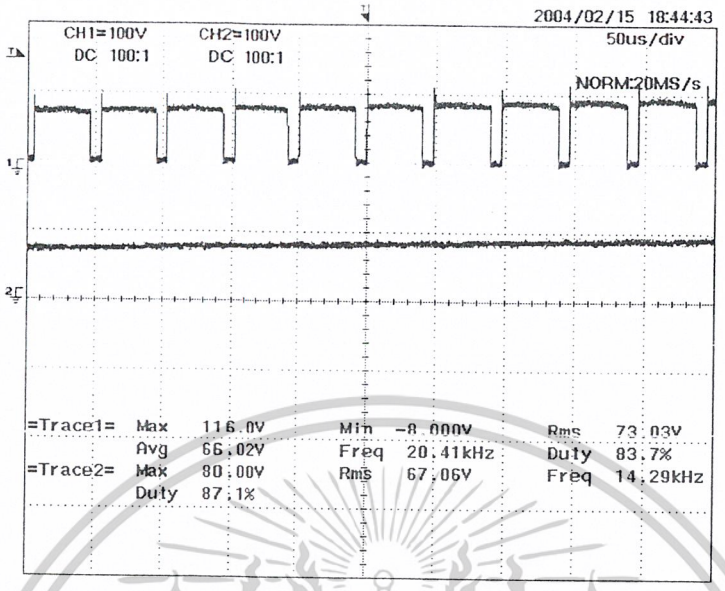
สรุปผลการทดลอง

จากรูปที่ 4-4 และรูปที่ 4-5 จากรูปคลื่นของแรงดันที่วัดได้โดยมีแรงดันPWM v_r เป็นแรงดันที่ได้จากการสับที่ความถี่ที่สูง 20 กิโลเฮิร์ทโดยมีจำนวนครั้งของการสับที่ 400 ครั้ง / ไซเกิลโดยประมาณ จาก ชุด คอนเวอเตอร์ 2โดยที่แรงดันเป็นแรงดัน PWM v_r จะถูกกรองให้เป็นแรงดันซายน์ (Sinusoidal) โดยผ่าน L-C ฟิลเตอร์ เพื่อจ่ายไปให้กับโหลดต่อไป จากผลของการทดลองค่าที่วัดได้ ทำให้เห็นว่าแรงดันที่ได้จากการกรองโดยผ่าน L-C ฟิลเตอร์เป็นแรงดันสัญญาณซายน์

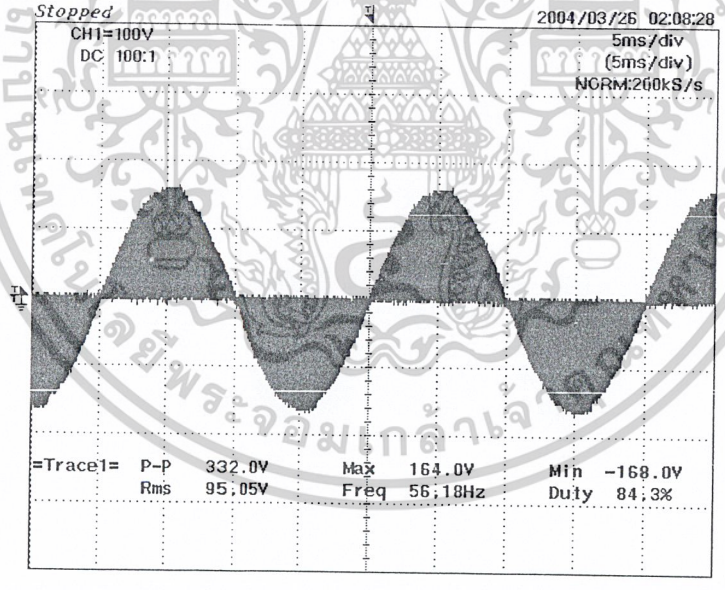


รูปที่ 4-38 รูปคลื่นแรงดัน v_r ที่ยังไม่ผ่านฟิลเตอร์ และ v_c ที่ผ่านฟิลเตอร์แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-39 พัลส์ของแรงดันPWM v_r ที่ยังไม่ผ่านฟิลเตอร์และ v_r ที่ผ่านฟิลเตอร์



รูปที่ 4-40 รูปคลื่นแรงดัน v_r ที่ยังไม่ผ่านฟิลเตอร์

4.4.3 การทดลองในส่วนของการกลับขั้วแรงดัน

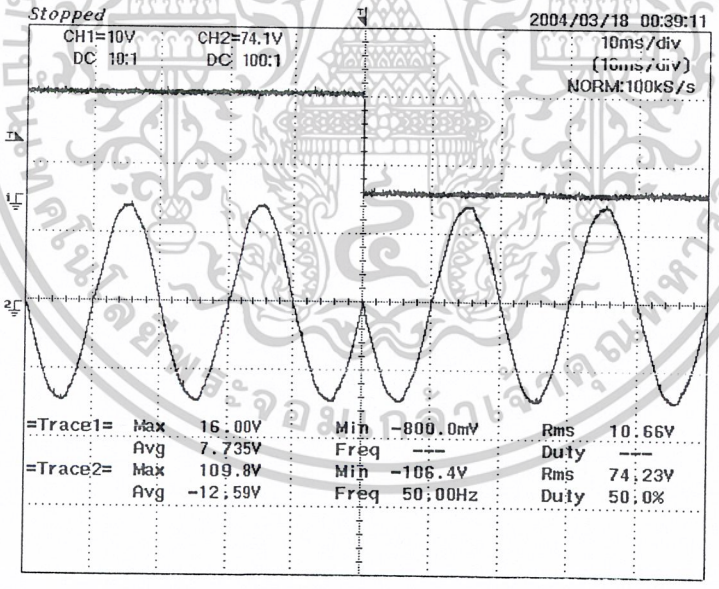
การกลับขั้วของแรงดันได้ของเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงตันไฟฟ้า นั้นสามารถกลับขั้วได้ภายในระยะเวลาที่รวดเร็วซึ่งการกลับขั้วได้ของแรงดันนี่เอง ที่นำไปสร้างแรงดันเสริมหรือหักล้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับแรงดันที่แหล่งจ่ายไฟจากการไฟฟ้า โดยผ่านทางหม้อแปลงชดเชยแรงดัน เพื่อนำไปสร้างแรงดันชดเชยให้กับโหลดทางด้านเอาท์พุต ให้มีค่าคงที่ตลอดเวลา โดยการการกลับขั้วของแรงดันนั้นจะใช้การควบคุมการทำงานคอนเวอเตอร์ 2 ทำให้แรงดันที่จ่ายออกจากคอนเวอเตอร์ 2 มีเฟสตรงกันหรือต่างเฟสกันกับแรงดันของแรงดันรับมาจากด้านอินพุต v_s รูปแสดงดังรูปที่ 4-6 และรูปที่ 4-7

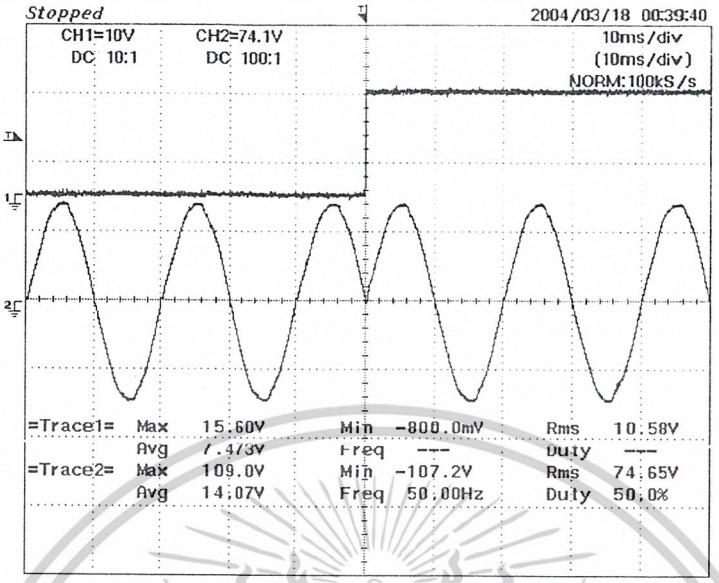
สรุปผลการทดลอง

จากรูปที่ 4-6 และรูปที่ 4-7 การใช้เอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงดันไฟฟ้าโดยการการกลับขั้วของแรงดัน โดยการควบคุมการทำงานคอนเวอเตอร์ 2 ทำให้แรงดันที่จ่ายออกจากคอนเวอเตอร์ 2 มีเฟสตรงกันหรือต่างเฟสกันกับแรงดันของแรงดันรับมาจากด้านอินพุต v_s รูปแสดงดังรูปที่ 4-6 และ รูปที่ 4-7 ซึ่งจะพิจารณาได้จากรูปคลื่นของแรงดันแรงดันชดเชย v_c ดังรูปที่ 4-6 และรูปที่ 4-7 และรูปที่ 4-8 จากรูปคลื่นของแรงดันด้านอินพุต v_c และแรงดันชดเชย v_c ที่วัด ได้ในกรณีที่มีเฟสตรงกันและรูปที่ 4-9 รูปคลื่นของแรงดันด้านอินพุต v_c และแรงดันชดเชย v_c ในกรณีที่มีเฟสต่างกัน ตามลำดับ การทำงานของวงจรเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้นี้จากการทดลองนั้นการกลับขั้วของแรงดัน ที่จะนำไปจ่ายให้กับหม้อแปลงชดเชยแรงดันนั้นการกลับขั้วของแรงดันจะเป็นการทำงานด้วยความรวดเร็วไซเกิลต่อไซเกิล ทำให้สามารถสร้างแรงดันชดเชยให้กับได้แน่นอนตลอดเวลาการทำงาน

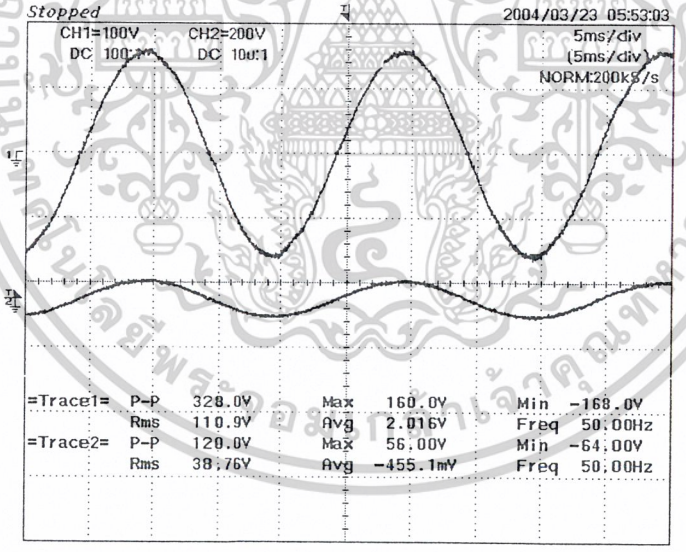


รูปที่ 4-41 รูปคลื่นแสดงการกลับขั้วแรงดันให้ขั้วของแรงดันชดเชย v_c ต่างเฟสกันกับแรงดันด้านอินพุต vs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

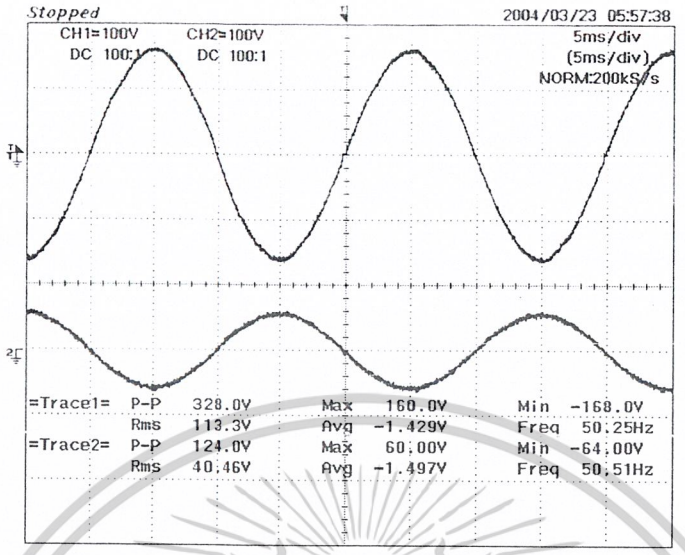


รูปที่ 4-42 รูปคลื่นแสดงการกลับขั้วแรงดันให้ขั้วของแรงดันชดเชย v_c ให้มีเฟสตรงกันกับแรงดันด้านอินพุต v_s



รูปที่ 4-43 แสดงรูปคลื่นของแรงดันด้านอินพุต v_s(Trace1) และแรงดันชดเชย v_c (Trace2)ในกรณีที่มีเฟสตรงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

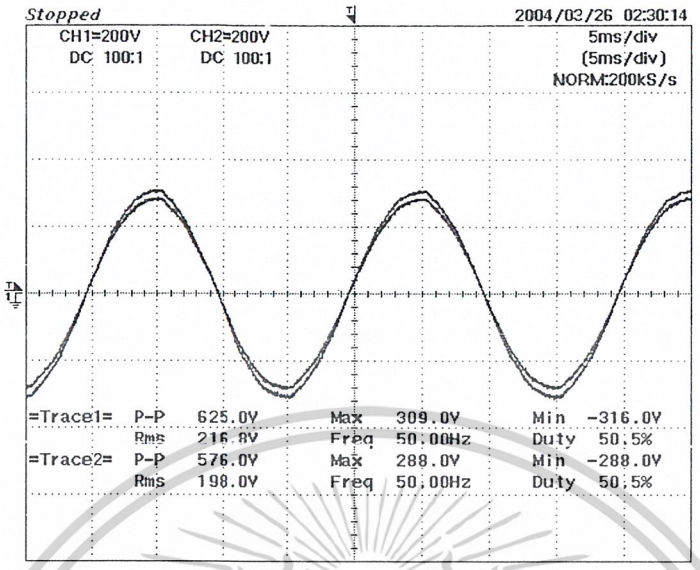


รูปที่ 4-44 รูปคลื่นของแรงดันด้านอินพุต v_g (Trace1) และแรงดันชดเชย v_c (Trace2) ในกรณีที่มีเฟสต่างกัน

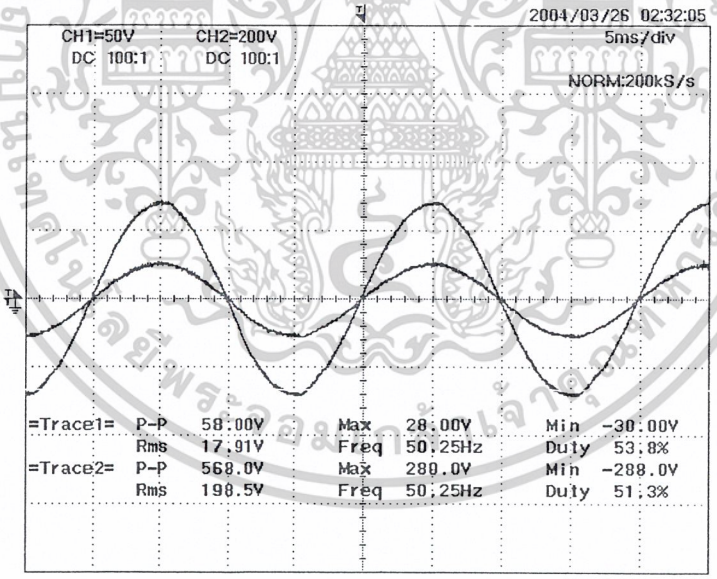
4.4.4 การทดลองในส่วนของการรักษาระดับแรงดันและการปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า

การทดลองในส่วนของการรักษาระดับแรงดันและการปรับสภาพแรงดันไฟฟ้าของเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงดันไฟฟ้าจากวงจรการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4-1 เพื่อแสดงผลของการทำงานของวงจรในการรักษาระดับแรงดันและการปรับสภาพแรงดันไฟฟ้าซึ่งเป็นส่วนสำคัญของโครงงาน โดยการทดลองทดสอบการทำงานในการรักษาระดับแรงดันและการปรับสภาพแรงดันไฟฟ้าในช่วงของขอบเขตของ แรงดันอินพุต 220V±10% และ แรงดันแรงดันเอาต์พุต 220V±2% และเปอร์เซ็นเรกูเรชั่นของเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า โดยที่แสดงผลการทดลองที่ได้จากการวัดค่าดังแสดงอยู่ดังในรูปที่ 4-11 ถึงรูปที่ 4-23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

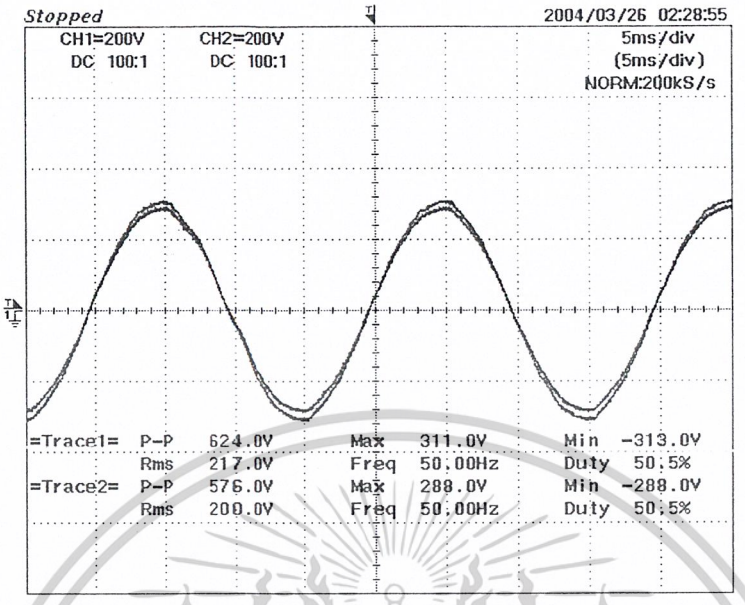


รูปที่ 4-45 แสดงรูปคลื่นของแรงดันอินพุต(Trace2) และ แรงดันเอาท์พุต (Trace1) โดยที่แรงดันอินพุตมีค่าต่ำสุดที่ -10% =198 โวลต์

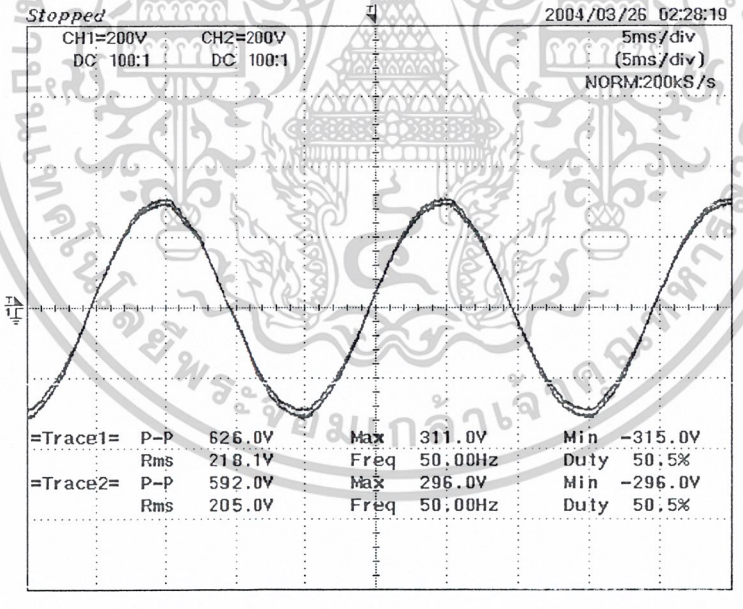


รูปที่ 4-46 แสดงรูปคลื่นของแรงดันอินพุต v_s (Trace2) และ แรงดันชดเชย v_c (Trace1) ที่จ่ายออกมาจากหม้อแปลงชดเชย ในการจ่ายแรงดันเสริม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

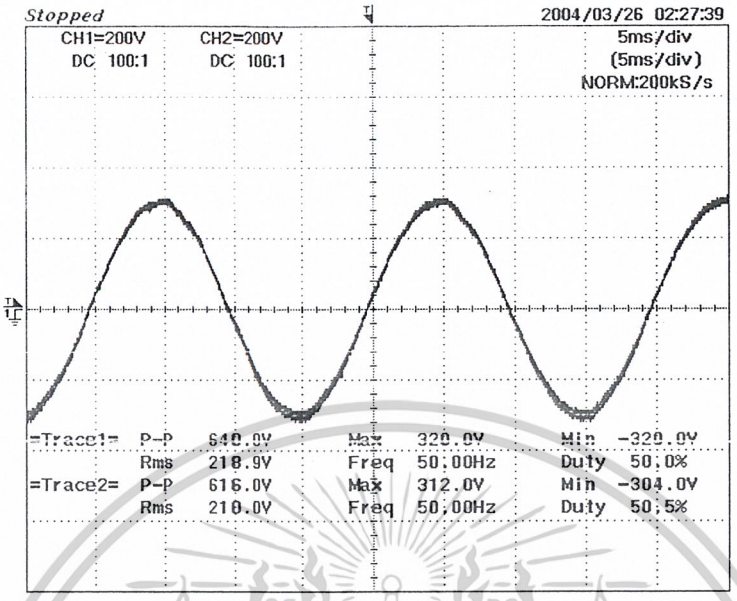


รูปที่ 4-47 แสดงรูปคลื่นของแรงดันอินพุต (Trace2) และแรงดันเอาท์พุต (Trace1) โดยที่แรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ 200 โวลต์

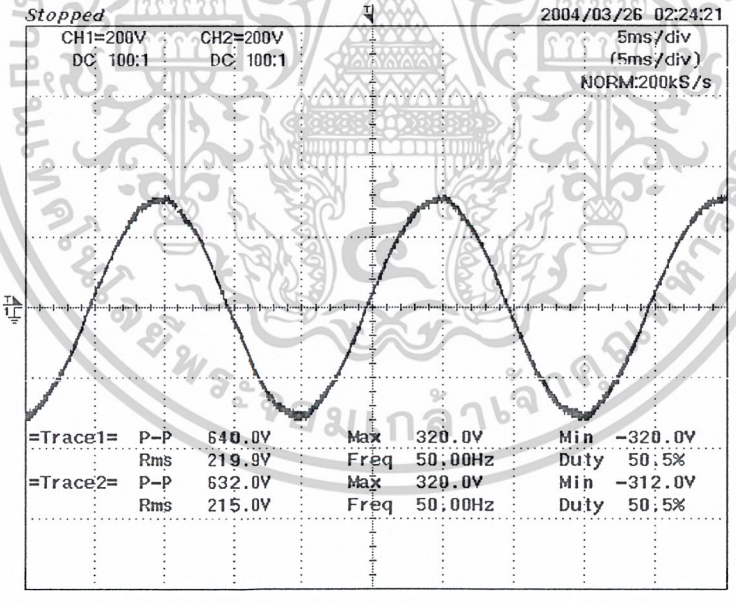


รูปที่ 4-48 แสดงรูปคลื่นของแรงดันอินพุต (Trace2) และแรงดันเอาท์พุต (Trace1) โดยที่แรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ 205 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

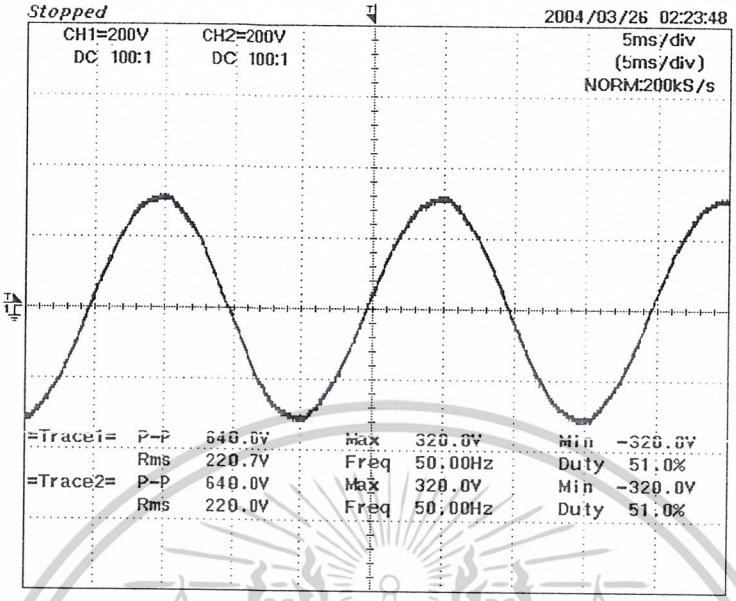


รูปที่ 4-49 แสดงรูปคลื่นของแรงดันอินพุต (Trace2) และแรงดันเอาท์พุต (Trace1) โดยที่แรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ 210 โวลต์

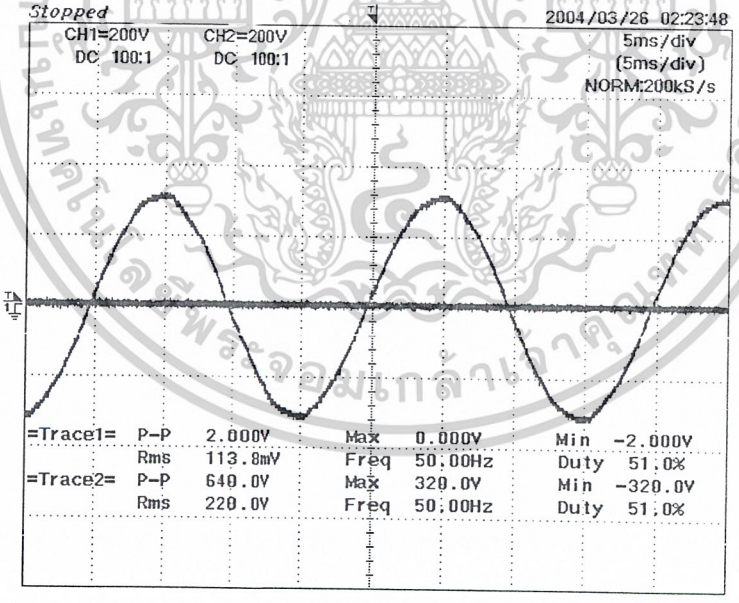


รูปที่ 4-50 แสดงรูปคลื่นของแรงดันอินพุต (Trace2) และแรงดันเอาท์พุต (Trace1) โดยที่แรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ 215 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

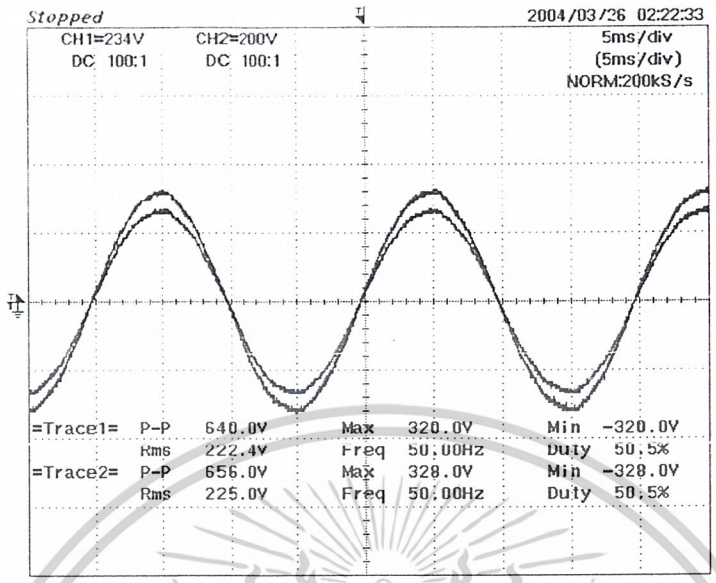


รูปที่ 4-51 แสดงรูปคลื่นของแรงดันอินพุต (Trace2) และแรงดันเอาท์พุต (Trace1) โดยที่แรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ 220 โวลต์

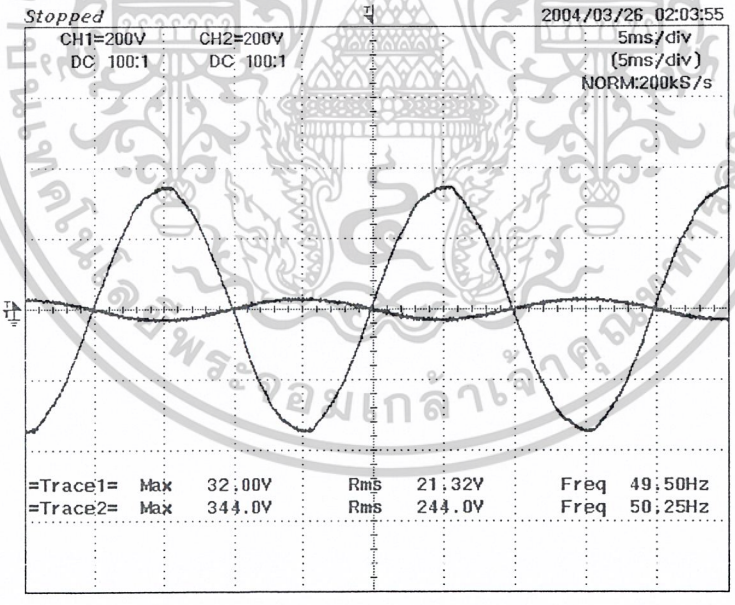


รูปที่ 4-52 แสดงรูปคลื่นของแรงดันอินพุต v_s (Trace2) และแรงดันชดเชย v_c (Trace1) ที่จ่ายออกมาจากหม้อแปลงชดเชย โดยที่แรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ 220 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

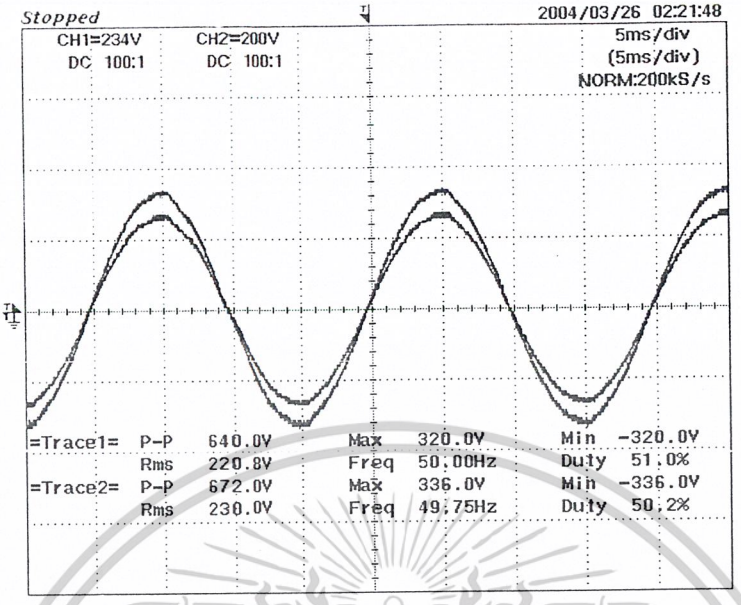


รูปที่ 4-53 แสดงรูปคลื่นของแรงดันอินพุต (Trace2) และแรงดันเอาท์พุต (Trace1) โดยที่แรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ 225 โวลต์

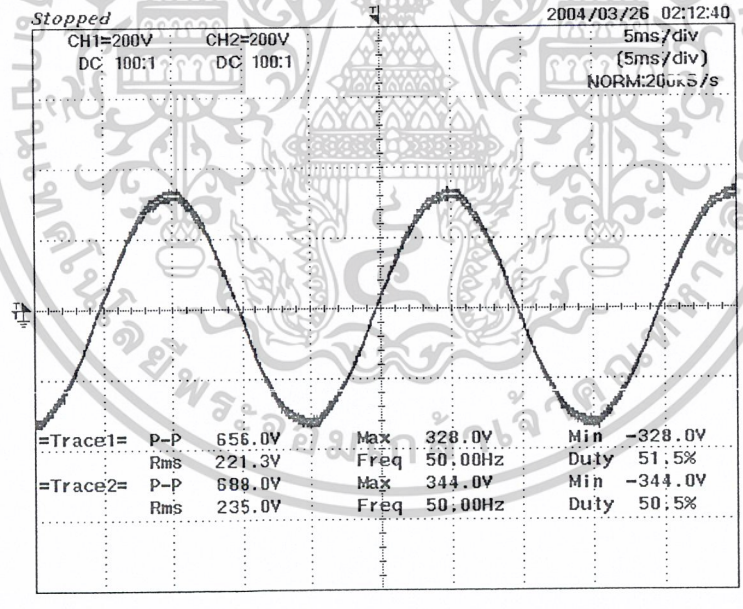


รูปที่ 4-54 แสดงรูปคลื่นของแรงดันอินพุต v_s (Trace2) และแรงดันชดเชย v_c (Trace1) ที่จ่ายออกมาจากหม้อแปลงชดเชย ในการจ่ายแรงดันหักล้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

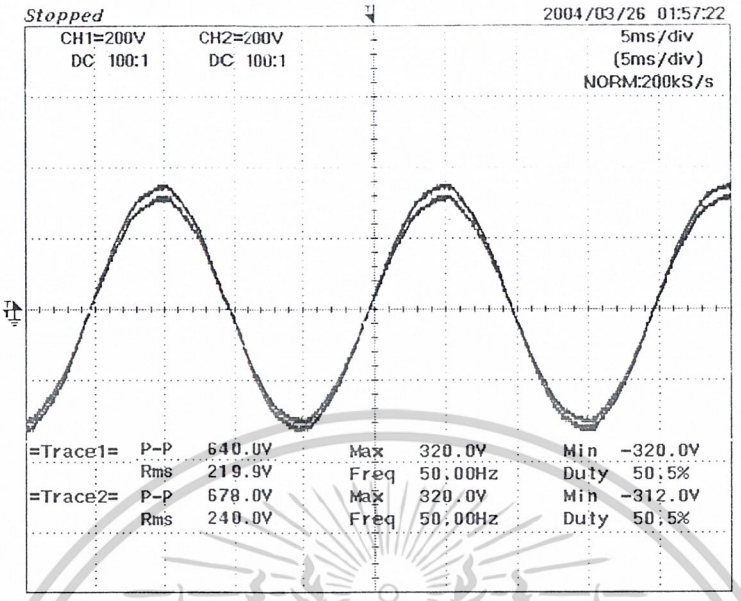


รูปที่ 4-55 แสดงรูปคลื่นของแรงดันอินพุต (Trace2) และแรงดันเอาท์พุต (Trace1) โดยที่แรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ 230 โวลต์

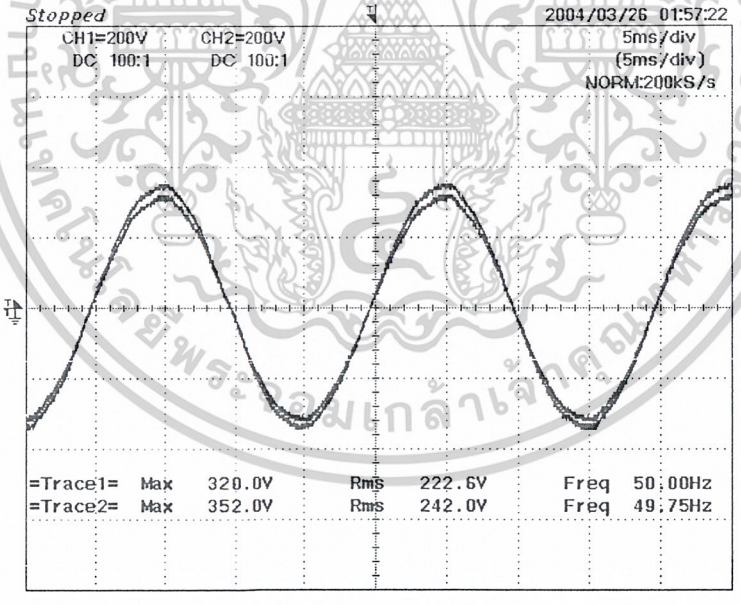


รูปที่ 4-56 แสดงรูปคลื่นของแรงดันอินพุต (Trace2) และแรงดันเอาท์พุต (Trace1) โดยที่แรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ 235 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-57 แสดงรูปคลื่นของแรงดันอินพุต (Trace2) และแรงดันเอาท์พุต (Trace2) โดยที่แรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ 240 โวลต์



รูปที่ 4-58 แสดงรูปคลื่นของแรงดันอินพุต (Trace2) และแรงดันเอาท์พุต (Trace1) โดยที่แรงดันอินพุตมีค่าสูงสุดที่ +10% = 242 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V_{in}(V)	V_{out}(V)	%เรกูเรชั่น(%)	%ค่าผิดพลาด (%)
198	216.8	1.47	-1.45
200	217.0	1.38	-1.36
205	218.1	0.87	-0.86
210	218.9	0.50	-0.50
215	219.4	0.27	-0.27
220	220.7	0.00	+0.32
225	222.4	1.80	+1.09
230	220.8	0.36	+0.36
235	221.3	0.77	+0.59
240	219.9	1.92	-0.04
242	222.6	1.17	+1.18

ตารางที่ 4-1 ตารางแสดงค่าแรงดันอินพุต V_{in} , แรงดันเอาท์พุต V_{out}, เปอร์เซ็นเรกูเรชั่น และ เปอร์เซ็นค่าผิดพลาดของเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า

ผลการทดลองโดยวัดค่าแรงดันอินพุตและแรงดันเอาท์พุตซึ่งสามารถหาค่าเปอร์เซ็นเรกูเรชั่น ของเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงดันไฟฟ้าได้โดย

$$\%เรกูเรชั่น = \frac{ค่าแรงดันที่พิกัด - ค่าของแรงดันที่ได้จากทดลอง}{ค่าของแรงดันที่ได้จากการทดลอง} \times 100 \qquad (4.2)$$

โดยที่ค่าเปอร์เซ็นเรกูเรชั่น เป็นการหาค่าในส่วนต่างระหว่างแรงดันที่พิกัด 220โวลต์ที่ใช้ในการอ้างอิงกับค่าที่ได้จากการทดลอง

$$\%ค่าผิดพลาด = \frac{ค่าแรงดันที่พิกัด - ค่าแรงดันที่ได้จากการทดลอง}{ค่าแรงดันที่พิกัด} \times 100 \qquad (4.3)$$

สรุปผลการทดลอง

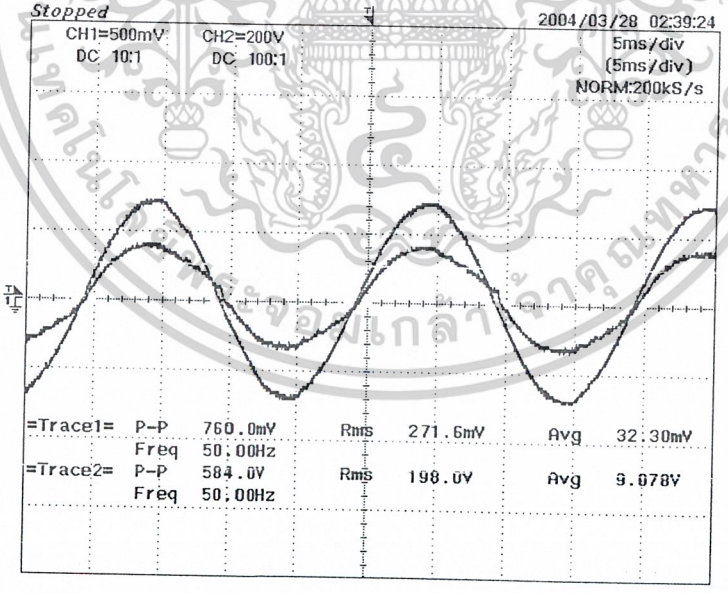
จากการทดลองการทำงานของเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า ที่ระดับแรงดันอินพุตที่มีค่าอยู่ระหว่าง 198–242 โวลต์ (±10%) ดังมีผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 4-11 ถึง รูปที่ 4-23 โดยที่การรักษาระดับแรงดันของเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า ผลจากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงออกมาให้เห็นว่าการปรับสภาพแรงดันไฟฟ้าของเอซีซอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงดันไฟฟ้านั้น สามารถที่จะรักษาระดับแรงดันให้อยู่ในระดับที่กำหนดได้ดีคือ มีค่าอยู่ระหว่างอยู่ 215.6 – 224.4 โวลต์ (±10%) ซึ่งจากการทดลองเมื่อนำค่ามาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นเรกูเรชั่นของเอซีซอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า ดังตารางที่ 4-1 ซึ่งค่าเปอร์เซ็นเรกูเรชั่นอยู่ในระดับที่ดี และค่าของเปอร์เซ็นความผิดพลาดของแรงดันที่จ่ายให้กับโหลดนั้นอยู่ระหว่าง 220 (±2%)โวลต์ จากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่าเราสามารถนำเอาเอซีซอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงดันไฟฟ้าไปใช้ในการรักษาระดับแรงดันได้ดี

4.4.5 การทดลองในส่วนของการหาค่าประสิทธิภาพ

การทดลองในการหาประสิทธิภาพของเอซีซอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงดันไฟฟ้าโดยการวัดค่าของกระแส, แรงดันทางด้านอินพุต และกระแส, แรงดันทางด้านเอาท์พุตโดยใช้การวัดค่าแบบ True RMS นำมาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของวงจรโดยที่การวัดค่ากระแสด้านอินพุต และกระแสด้านเอาท์ พุตวัดโดยการใช้โพรบวัดกระแสแบบ True RMS โดยมีอัตราส่วน 100 มิลลิโวลต์/แอมป์ การวัดด้วยวิธีการนี้ทำให้สามารถมองเห็นมุมเฟสของกระแส, แรงดันทางด้านอินพุตและกระแส, แรงดันทางด้านเอาท์พุต ทำให้สามารถนำมาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าทาง ด้านอินพุตและเอาท์พุต เพื่อนำมาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของเอซีซอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า ที่ค่าแรงดันอินพุตที่อยู่ระหว่าง 198-242 โวลต์ ดังมีผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 4-25 และรูปที่ 4-26

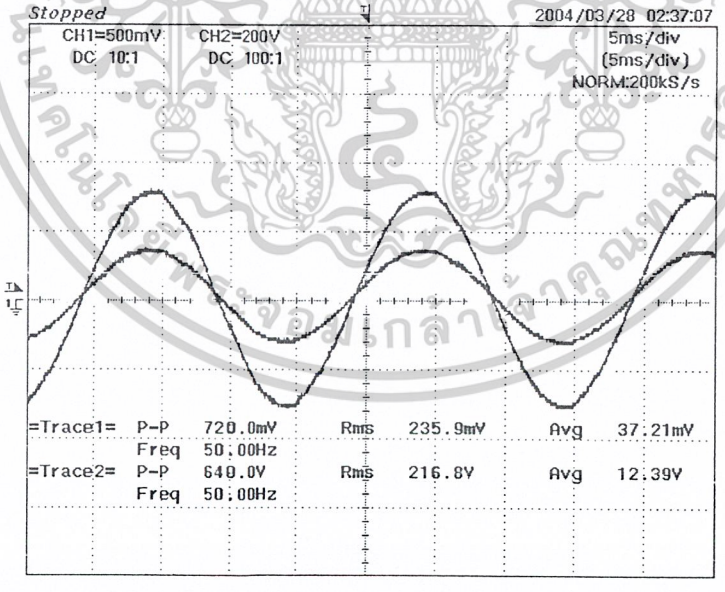


รูปที่ 4-59 แสดงรูปคลื่นของแรงดันอินพุต (Trace2) และกระแสอินพุต (Trace1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V_{in}(V)	I_{in}(A)	$\angle\varnothing_I(^\circ)$	P_{in}(W)
198	2.716	10	530
200	2.710	10	534
205	2.700	10	545
210	2.591	10	536
215	2.546	10	539
220	2.495	10	540
225	2.542	10	563
230	2.480	10	561
235	2.415	10	559
240	2.354	10	556
242	2.350	10	560

ตารางที่ 4-2 ตารางแสดงค่าแรงดันอินพุต V_{in} , กระแสอินพุต , มุม $\cos\varnothing_i$,กำลังอินพุตของเอซีชอปเปอร์ ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 4-60 แสดงรูปคลื่นของแรงดันเอาท์พุต (Trace2) และกระแสเอาท์พุต (Trace1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V_{in}(V)	V_{out}(V)	I_{out}(A)	$\angle\varnothing_1$(°)	P_{out}(W)
198	216.8	2.359	0	511
200	217.0	2.373	0	515
205	218.1	2.366	0	518
210	218.9	2.382	0	521
215	219.4	2.391	0	525
220	220.7	2.400	0	530
225	222.4	2.420	0	538
230	220.8	2.405	0	532
235	221.3	2.410	0	534
240	219.9	2.394	0	528
242	222.6	2.425	0	540

ตารางที่ 4-3 ตารางแสดงค่าแรงดันเอาท์พุต V_{in}, กระแสเอาท์พุต , มุม $\cos\varnothing_i$, กำลังเอาท์พุตของเอซีชอปเปอร์ ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองในส่วนของการหาค่าประสิทธิภาพของเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงตันไฟฟ้าโดยที่โหลดที่ใช้ในการทดลองคือ หลอดไส้ซึ่งเป็นโหลดประเภท ความต้านทาน โดยที่การทดลองนี้ได้ ทดสอบหาประสิทธิภาพของเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงตันไฟฟ้า ในช่วงของแรงดันอินพุต 220 โวลต์(±10%) โดยมีการแสดงค่าดังในตารางที่ 4-2, ตารางที่ 4-3 และตารางที่ 4-4 จากผลที่แสดงในตารางผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพที่ได้นั้นจะอยู่ที่ 95% ขึ้นไป ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงตันไฟฟ้ามีประสิทธิภาพการทำงานดี การสูญเสียที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V_{in}(V)	V_{out}(V)	P_{in}(W)	P_{out}(W)	η(%)
198	216.8	530	511	96
200	217.0	534	515	96
205	218.1	545	518	95
210	218.9	536	521	97
215	219.4	539	525	96
220	220.7	540	530	98
225	222.4	563	538	95
230	220.8	561	532	95
235	221.3	559	534	95
240	219.9	556	528	95
242	222.6	560	540	96

ตารางที่ 4-4 ตารางแสดงค่าแรงดันอินพุต, แรงดันเอาท์พุต, กำลังอินพุต, , กำลังเอาท์พุต และประสิทธิภาพ ของเอซีชอปเปอร์ ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปและวิจารณ์โครงงาน

5.1 สรุปโครงงาน

สำหรับผลการทดลองจากโครงงานเอซีชอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้สำหรับปรับสภาพแรงดันไฟฟ้านี้ สามารถยืนยันแนวคิดที่จะนำ หลักการของการใช้วงจรเอซีช็อปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้ มาใช้งานร่วมกับหม้อแปลงชดเชยแรงดันเพื่อสร้างแรงดันชดเชย มาใช้งานในการรักษาระดับแรงดันได้จริง โดยจะมีความสามารถมากกว่าและมีการทำงานที่ดีกว่าการใช้หลักการเปลี่ยนการใช้วิธีการเปลี่ยนแท็ปหม้อแปลง, การใช้วิธีควบคุมมุมทริกสัญญาณเกทของไทริสเตอร์ และ เอซีชอปเปอร์แบบสวิทช์ทางเดียว ในแง่ของความละเอียดของแรงดันที่จะทำการรักษาระดับเพื่อจ่ายให้กับโหลด มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็ว ขนาดเล็ก มีประสิทธิภาพสูง การสูญเสียที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย อีกทั้งยังมีการบำรุงรักษาที่น้อยกว่าด้วย แต่จากการวิเคราะห์โครงงานนี้ยังพบว่ามีปัญหาอยู่บ้างซึ่งสามารถที่จะนำไปพัฒนาต่อไปเพื่อให้มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีที่สุดได้ต่อไป

5.2 บทวิจารณ์โครงงาน

จากการทดลองที่ผ่านมาพบว่าปัญหาที่เกิดมากที่สุดในการทำงานมี 2 ส่วนคือ

5.2.1 เรื่องของเฟสของแรงดัน ณ. จุดต่างๆ

เพราะเราจำเป็นที่จะต้องให้สัญญาณขับเกทกับแรงดันที่จ่ายให้กับมอสเฟทมีเฟสการทำงานที่ตรงกัน เพราะหากจ่ายการทำงานที่มีเฟสไม่ตรงกันแล้ววงจรจะไม่สามารถทำงานได้ และอาจส่งผลให้มอสเฟทเสียหายได้

5.2.2 ส่วนวงจรป้อนกลับ

ในการทำงานครั้งนี้ปัญหาใหญ่ที่สุดที่ผู้ทำโครงงานได้ประสบความ คือ ส่วนวงจรป้อนกลับเพราะในส่วนนี้จะทำหน้าที่ตรวจจับระดับแรงดันที่โหลดเพื่อที่จะได้ทราบว่าแรงดันที่โหลดมีค่าลดลงหรือว่ามีค่าเพิ่มขึ้น จากนั้นวงจรป้อนกลับจะส่งสัญญาณป้อนกลับเป็นแรงดันไฟตรงมายังจุด Vref เพื่อที่จะได้ทำการปรับความกว้างของสัญญาณขับมอสเฟทให้มอสเฟทมีการทำงานสอดคล้องกับแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไป โดยในการทดลองครั้งนี้ผู้ทำโครงงานได้ใช้การสร้างแรงดันอ้างอิงโดยใช้การควบคุมแบบป้อนกลับอัตโนมัติโดยใช้การตรวจจับแรง ดันด้านเอาท์พุทนำมาเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงซึ่งการทำงานในบางสภาวะมีการทำงานคลาดเคลื่อนโดยจะต้องมีการปรับตั้งค่าเกนในส่วนของวงจรควบคุม อีกทั้งการทำงานของชุดป้อนกลับนี้จะต้องมีการสั่งให้มีการกลับเฟสของแรงดันด้วยเพื่อที่จะได้ทำการจ่ายแรงดันเสริมหรือหักล้างตามแต่สภาวะแรงดันที่โหลด โดยในการทดลองนี้ได้ใช้การกลับเฟส โดยการใช้การควบคุมการกลับขั้วสัญญาณ Zero Crossing ที่ใช้ในการรวมสัญญาณ กับสัญญาณ PWM และในการทำงานในส่วนของวงจรควบคุมหากมีสัญญาณสอดแทรกทางแม่เหล็กไฟฟ้า EMI (Electromagnetic Interference) ที่เกิดจากเครื่องเชื่อมอีเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่สูงซึ่งต้องหาทางป้องกันโดยการออกแบบวงจรฟิลเตอร์ที่สามารถลดผลกระทบของการสอดแทรกทางแม่เหล็กไฟฟ้า EMI เพื่อ ให้สามารถทำงานได้ทุกสภาพแวดล้อมเพื่อนำเอซีซอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงดันไฟฟ้าไปใช้ในการทำงานจริงได้

5.3 ปัญหา อุปสรรค และแนวทางแก้ไข

5.3.1 ปัญหาการเกิดสัญญาณรบกวนในวงจร ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมการทำงานในส่วนของวงจรกำลัง ส่งผลให้มีการทำงานที่ผิดพลาดเกิดขึ้นซึ่งอาจทำให้อุปกรณ์สวิทช์ชิ่งพังเสียหายได้

แนวทางการแก้ไข

5.3.1.1 แยกไฟเลี้ยงระหว่างอุปกรณ์อนาล็อก (Analog) กับอุปกรณ์ดิจิตอล (Digital)

5.3.1.2 ควรต่อตัวเก็บประจุชนิดเซรามิคขนาด 0.1 ไมโครฟารัด ไว้ที่ขาไฟเลี้ยง (Vcc) ของไอซีทุกตัว

5.3.1.3 การเชื่อมต่อสัญญาณกันโดยใช้สายไฟควรให้มีน้อยที่สุด

5.3.1.4 ควรใช้แผ่นปริ้นท์แบบสองหน้าเพื่อให้ลายวงจรมีขนาดเล็กลง

5.3.2 ปัญหาการนำมอสเฟทกำลังไปต่อในวงจรกำลังโดยไม่มีการป้อนสัญญาณขับเกทคือการเปิดวงจรระหว่างขาเกทกับขาซอร์สเมื่อเราป้อนแรงดันเข้าไปในวงจรจะทำให้มอสเฟทกำลังพังเสียหายทันทีเนื่องจากมอสเฟทจะทำงานผิดพลาด

แนวทางการแก้ไข ทำได้โดยการลัดวงจรระหว่างขาเกท กับขาซอร์ส หรือต่อตัวต้านทานค่าน้อยๆ ระหว่างขาเกท กับขาซอร์ส

5.3.3 ปัญหาจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำโครงงานหาซื้อยาก ราคาแพง เช่น มอสเฟทกำลัง ออปโตไอโซเลเตอร์ แกนเฟอร์ไรซ์แบบ EE ตัวคาปาซิเตอร์สนับเบอร์

แนวทางการแก้ไข หาร้านที่จำหน่ายอุปกรณ์ไว้หลายๆ ร้าน

5.4 แนวทางการพัฒนา

สำหรับการพัฒนาต่อไปควรจะให้ความสำคัญกับชุดควบคุมป้อนกลับให้มากที่สุดเพราะจะส่งผลถึงการทำงานโดยรวมของโครงงานและความสามารถในการรักษาระดับแรงดันที่โหลดชนิดต่างๆเช่น โหลดประเภทคอมพิวเตอร์โหลดประเภทมอเตอร์โดยนำไปใช้ในการจ่ายโหลดในสภาวะการทำงานจริงรวมถึงการศึกษาผลกระทบของฮาโมนิกส์ของเอซีซอปเปอร์ชนิดกลับขั้วได้เพื่อปรับสภาพแรงดันไฟฟ้าและการแก้ไขปรับปรุงให้ดีขึ้น

ในส่วนของวงจรควบคุมแบบป้อนกลับนั้นการนำเอาไมโครโปรเซสเซอร์หรือไมโครคอนโทรเลอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงโดยที่ภายในตัวมันมีวงจรทางด้านการแปลงสัญญาณอานาลอกเป็นดิจิตอลและแปลงสัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ญาณจากดิจิตอลเป็นอานาลอก ความเร็วในการประมวลผลสูงเพื่อนำมาทดแทนในส่วนของวงจรควบคุม เพื่อให้ได้ระสิทธิภาพในการทำงานสูง ขนาดวงจรที่เล็กลงความน่าเชื่อถือในการทำงาน

ในส่วนของวงจรขับเกทและแยกกราวด์การใช้การควบคุมโดยผ่านทางออปโต้ไอโซเลเตอร์นั้นมีข้อเสียคือจะต้องใช้แหล่งจ่ายแยกจ่ายแต่ละชุดซึ่งทำให้ขนาดวงจรใหญ่จึงควรหาแนวทางในการแก้ไขปรับปรุงโดยการใช้หม้อแปลงในการแยกกราวด์เป็นตัวขับสัญญาณเกทแทนการใช้ออปโต้ไอโซเลเตอร์เพื่อให้วงจรมีขนเดเล็กลง และลดความสิ้นเปลืองเนื่องจาก ออปโต้ไอโซเลเตอร์มีความเสียหายง่าย และขาดตลาดบ่อยและราคาแพง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] สุวัฒน์ แซ่ดั่น, เทคนิคและการออกแบบสวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลาย, หัวหน้าฝ่ายวิจัยและ พัฒนา บริษัท เอนเทลไทย จำกัด

[2] ผศ.ดร. เติมพงษ์ เพ็ชรกุล , อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ, ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์, ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ , สถาบันเทคโน โลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[3] สักรียา ชิตวงศ์, วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์, ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[4] รศ.ดร. โคทม อารียา ,อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 1,บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด

[5] รศ.ดร. โคทม อารียา ,อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 2, บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด

[6] M.H. Rashid, Power Electronics: Circuits, Devices and Application, Prentice-Hall Int. Inc., New Jersey, 1988

[7] N. Mohan, T.M. Underland, W.P. Robbins. Power Electronics: Converters, Application and Design, John Wiley & Sons, New York, 1989

[8] Novel Line Conditioner With Voltage Up/Down Capability , B.H. Kwon, G.Y. Jeong, S.H. Han, and D.H. Lee IEEE Transaction on Industrial Electronics,Vol.49, No.5, October 2002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494, NCV494

SWITCHMODE™ Pulse Width Modulation Control Circuit

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

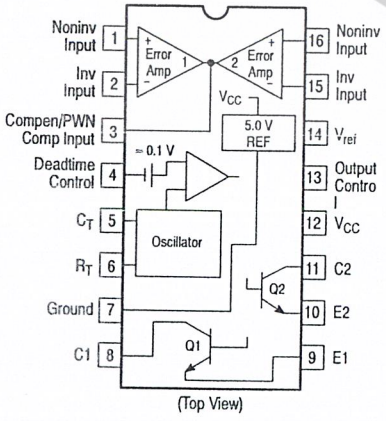
- Complete Pulse Width Modulation Control Circuitry
- On–Chip Oscillator with Master or Slave Operation
- On–Chip Error Amplifiers
- On–Chip 5.0 V Reference
- Adjustable Deadtime Control
- Uncommitted Output Transistors Rated to 500 mA Source or Sink
- Output Control for Push–Pull or Single–Ended Operation
- Undervoltage Lockout

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

Rating	Symbol	Value	Unit
Power Supply Voltage	V_{CC}	42	V
Collector Output Voltage	V_{C1}, V_{C2}	42	V
Collector Output Current (Each transistor) (Note 1)	I_{C1}, I_{C2}	500	mA
Amplifier Input Voltage Range	V_{IR}	−0.3 to +42	V
Power Dissipation @ $T_A \le 45°C$	P_D	1000	mW
Thermal Resistance, Junction–to–Ambient	$R_{\theta JA}$	80	°C/W
Operating Junction Temperature	T_J	125	°C
Storage Temperature Range	T_{stg}	−55 to +125	°C
Operating Ambient Temperature Range TL494B TL494C TL494I NCV494B	T_A	 −40 to +125 0 to +70 −40 to +85 −40 to +125	°C
Derating Ambient Temperature	T_A	45	°C

1. Maximum thermal limits must be observed.

PIN CONNECTIONS

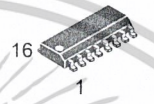


(Top View)

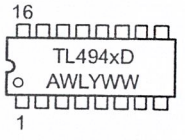
ON Semiconductor®

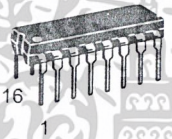
http://onsemi.com

MARKING DIAGRAMS

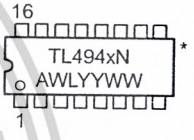


SO–16
D SUFFIX
CASE 751B





PDIP–16
N SUFFIX
CASE 648



*

x = B, C or I
A = Assembly Location
WL, L = Wafer Lot
YY, Y = Year
WW, W = Work Week

*This marking diagram also applies to NCV494.

ORDERING INFORMATION

Device	Package	Shipping
TL494BD	SO–16	48 Units/Rail
TL494BDR2	SO–16	2500 Tape & Reel
TL494CD	SO–16	48 Units/Rail
TL494CDR2	SO–16	2500 Tape & Reel
TL494CN	PDIP–16	25 Units/Rail
TL494IN	PDIP–16	25 Units/Rail
NCV494BDR2*	SO–16	2500 Tape & Reel

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

© Semiconductor Components Industries, LLC, 2002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

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

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V_{CC} = 15 V, C_T = 0.01 μF, R_T = 12 kΩ, unless otherwise noted.)

For typical values T_A = 25°C, for min/max values T_A is the operating ambient temperature range that applies, unless otherwise noted.

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V_{CC} = 15 V, C_T = 0.01 μF, R_T = 12 kΩ, unless otherwise noted.)
For typical values T_A = 25°C, for min/max values T_A is the operating ambient temperature range that applies, unless otherwise noted.

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

* Standard deviation is a measure of the statistical distribution about the mean as derived from the formula, $\sigma \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{N} (X_n - \bar{X})^2}{N-1}}$

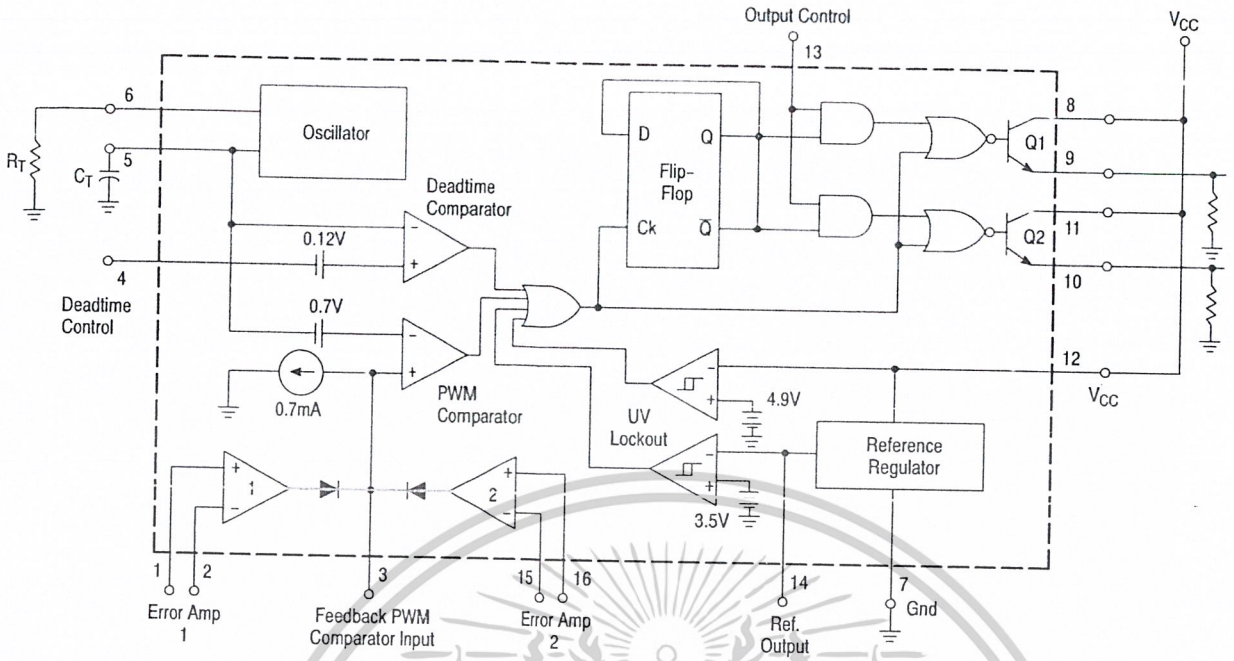
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V_{CC} = 15 V, C_T = 0.01 μF, R_T = 12 kΩ, unless otherwise noted.)
For typical values T_A = 25°C, for min/max values T_A is the operating ambient temperature range that applies, unless otherwise noted.

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

* Standard deviation is a measure of the statistical distribution about the mean as derived from the formula, $\sigma \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{N} (X_n - \bar{X})^2}{N-1}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



This device contains 46 active transistors.

Figure 1. Representative Block Diagram

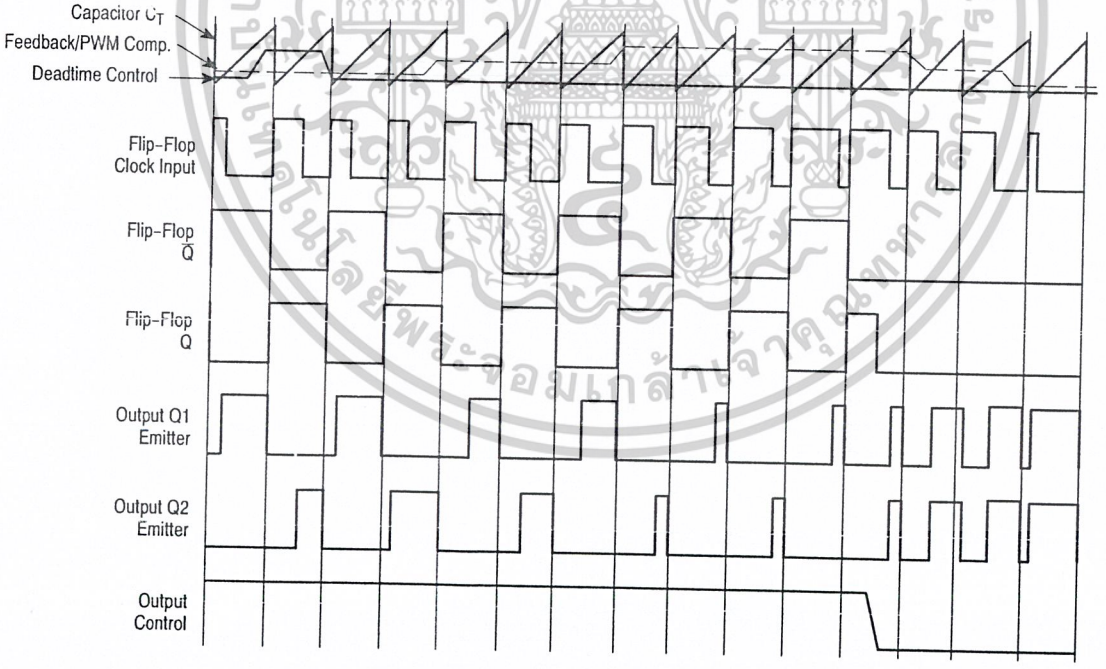


Figure 2. Timing Diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPLICATIONS INFORMATION

Description

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

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

For more information refer to Figure 3.

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

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

Functional Table

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

The pulse width modulator comparator provides a means for the error amplifiers to adjust the output pulse width from the maximum percent on–time, established by the deadtime control input, down to zero, as the voltage at the feedback pin varies from 0.5 V to 3.5 V. Both error amplifiers have a common mode input range from –0.3 V to (V_{CC} – 2V), and may be used to sense power–supply output voltage and current. The error–amplifier outputs are active high and are ORed together at the noninverting input of the pulse–width modulator comparator. With this configuration, the amplifier that demands minimum output on time, dominates control of the loop.

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

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

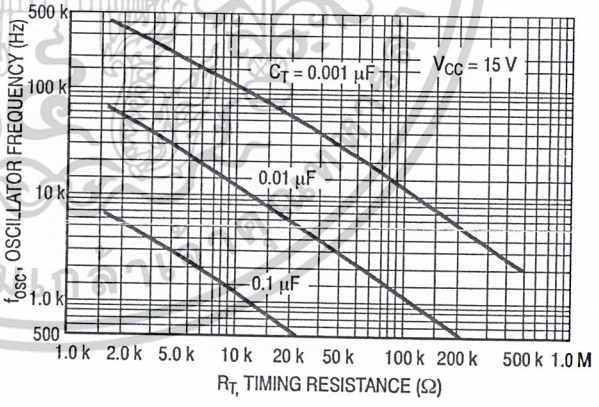


Figure 3. Oscillator Frequency versus Timing Resistance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

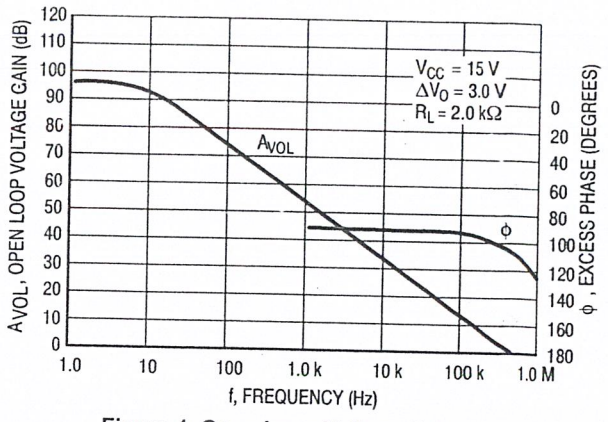


Figure 4. Open Loop Voltage Gain and Phase versus Frequency

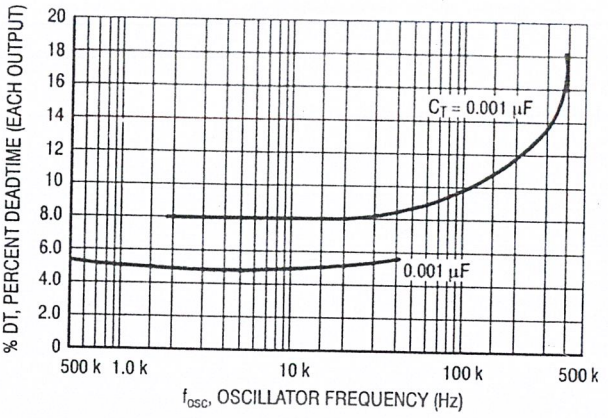


Figure 5. Percent Deadtime versus Oscillator Frequency

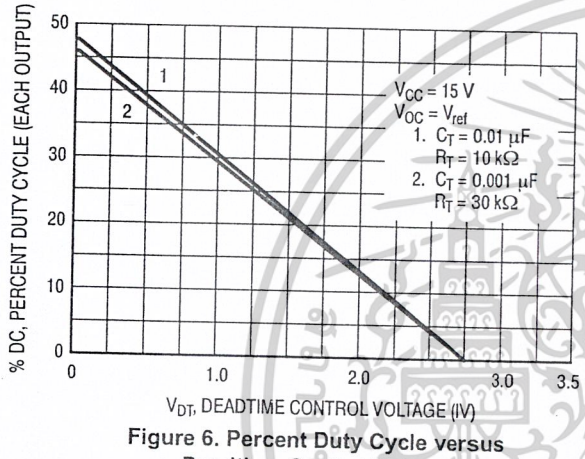


Figure 6. Percent Duty Cycle versus Deadtime Control Voltage

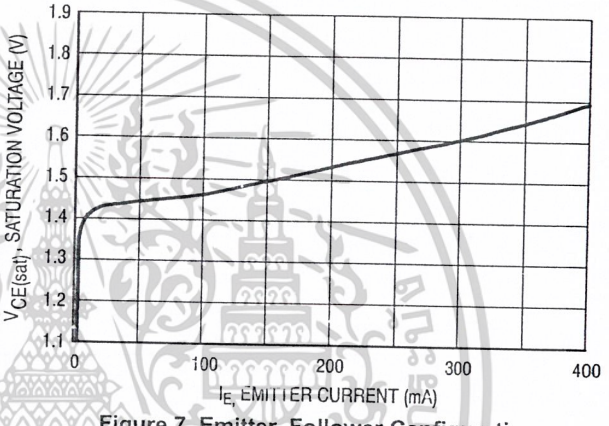


Figure 7. Emitter–Follower Configuration Output Saturation Voltage versus Emitter Current

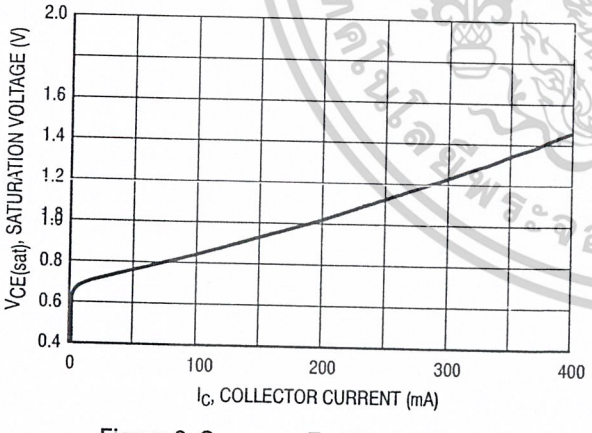


Figure 8. Common–Emitter Configuration Output Saturation Voltage versus Collector Current

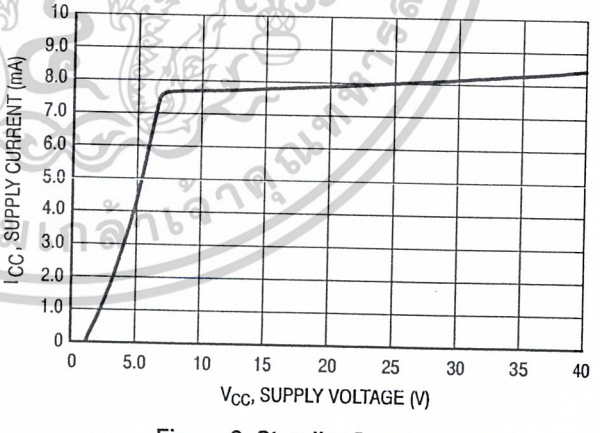


Figure 9. Standby Supply Current versus Supply Voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

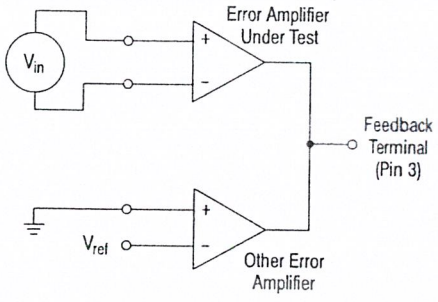


Figure 10. Error–Amplifier Characteristics

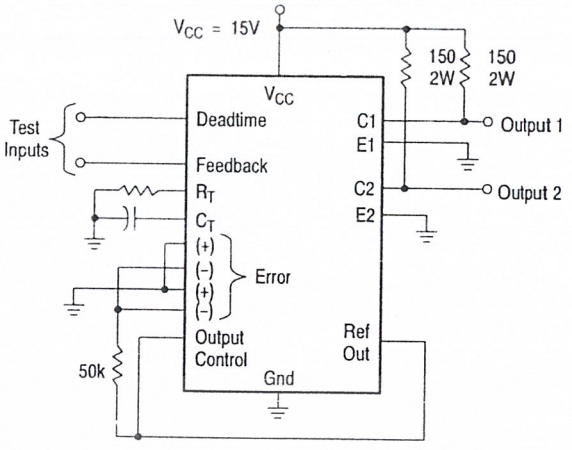


Figure 11. Deadtime and Feedback Control Circuit

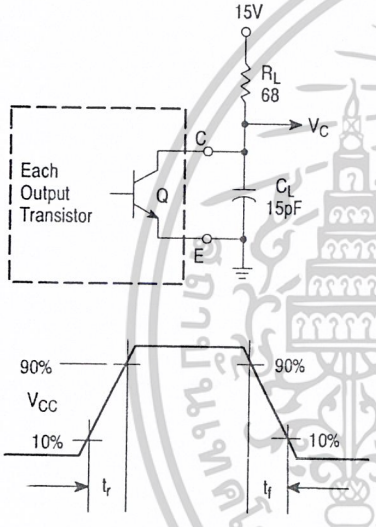


Figure 12. Common–Emitter Configuration Test Circuit and Waveform

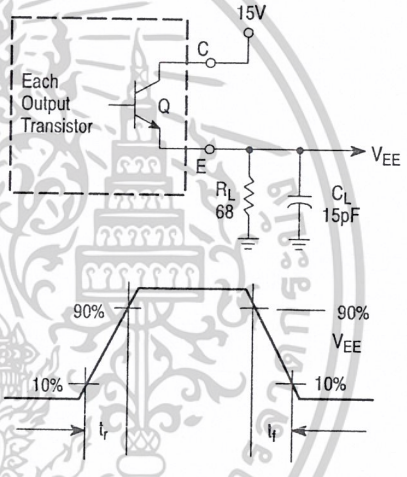


Figure 13. Emitter–Follower Configuration Test Circuit and Waveform

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

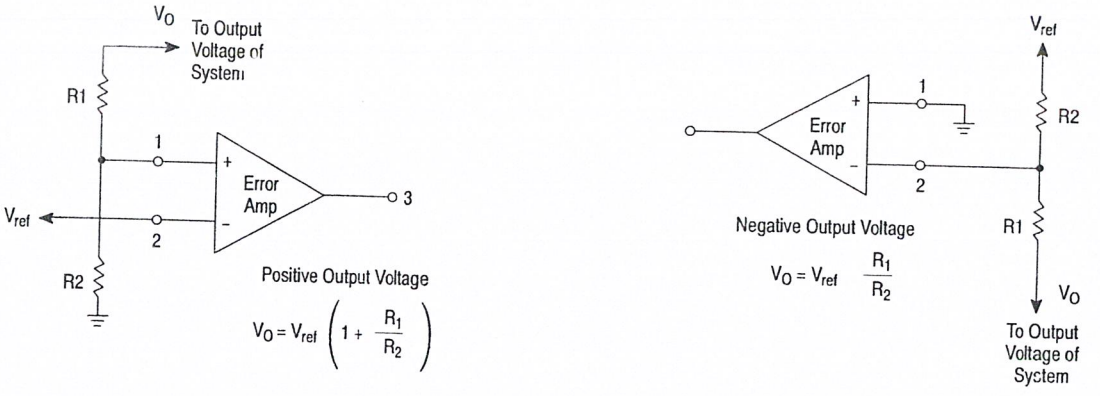


Figure 14. Error−Amplifier Sensing Techniques

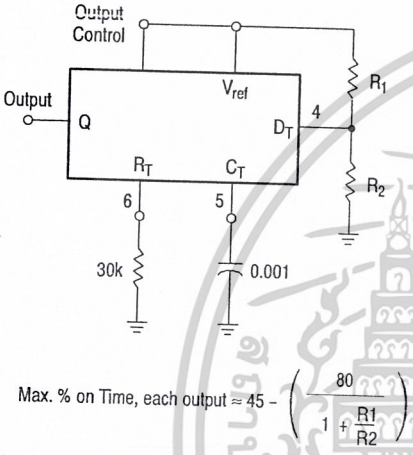


Figure 15. Deadtime Control Circuit

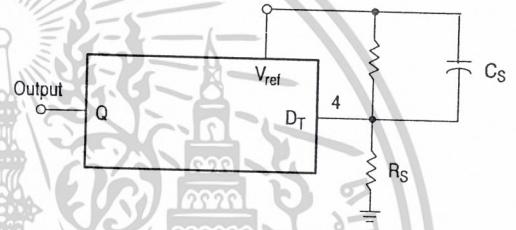


Figure 16. Soft−Start Circuit

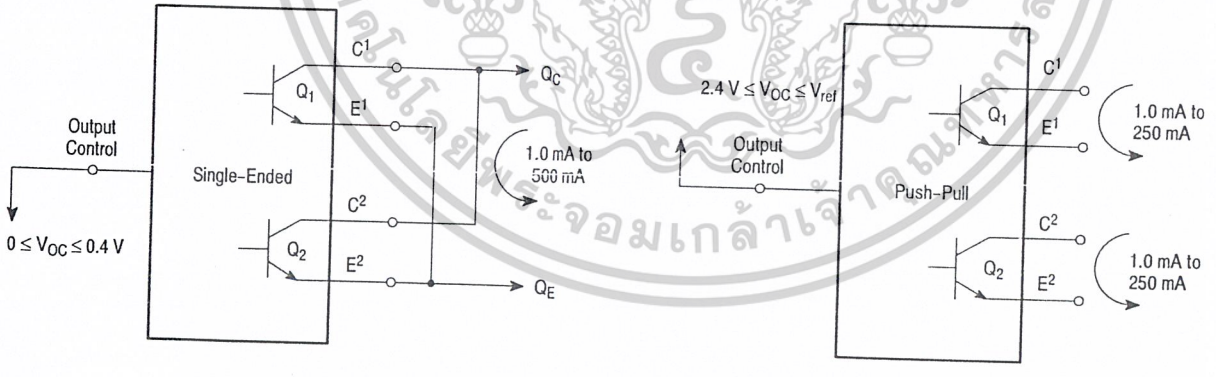


Figure 17. Output Connections for Single−Ended and Push−Pull Configurations

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

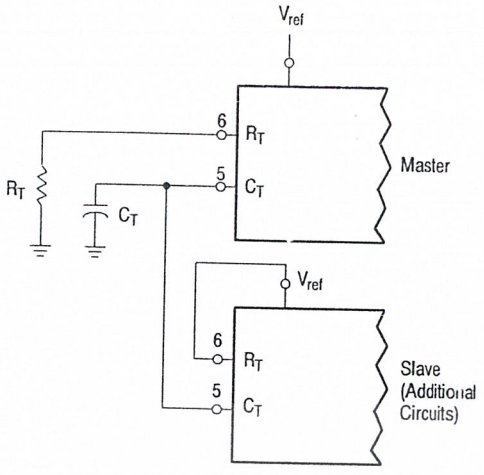


Figure 18. Slaving Two or More Control Circuits

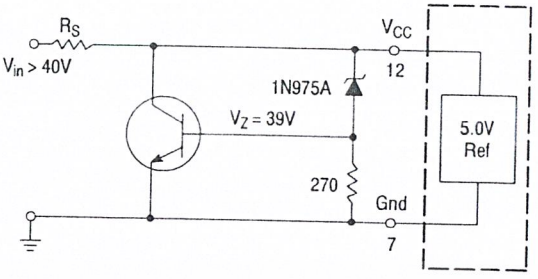


Figure 19. Operation with V_{in} > 40 V Using External Zener

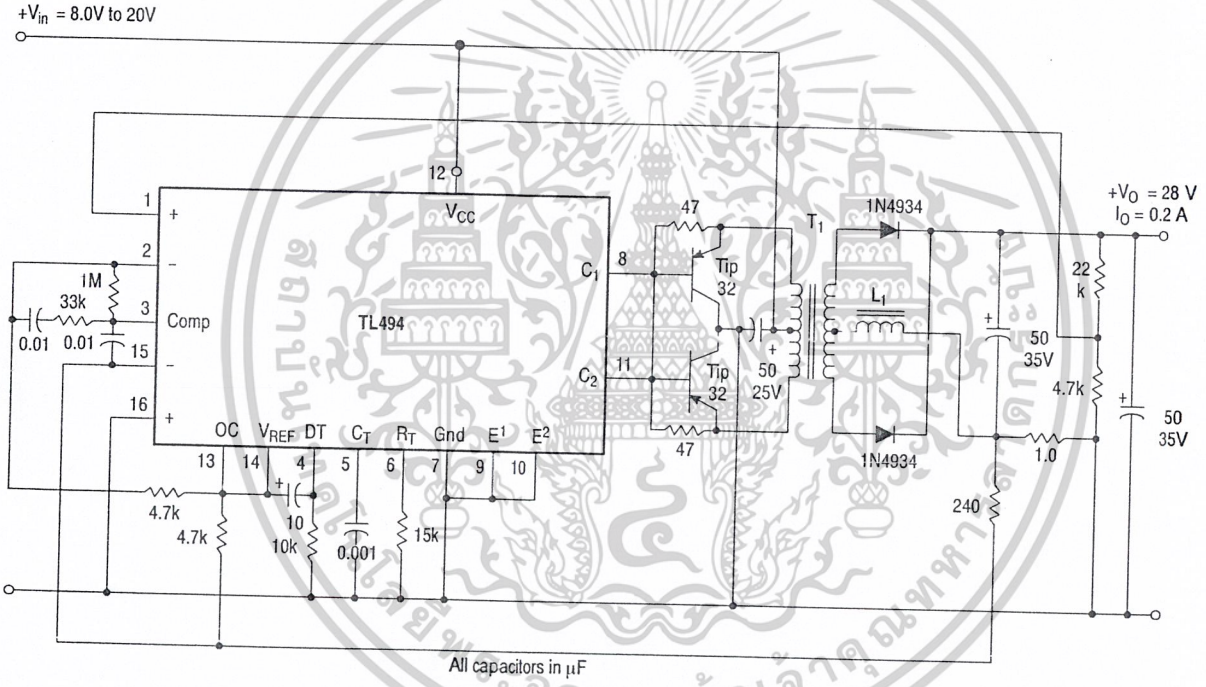


Figure 20. Pulse Width Modulated Push–Pull Converter

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

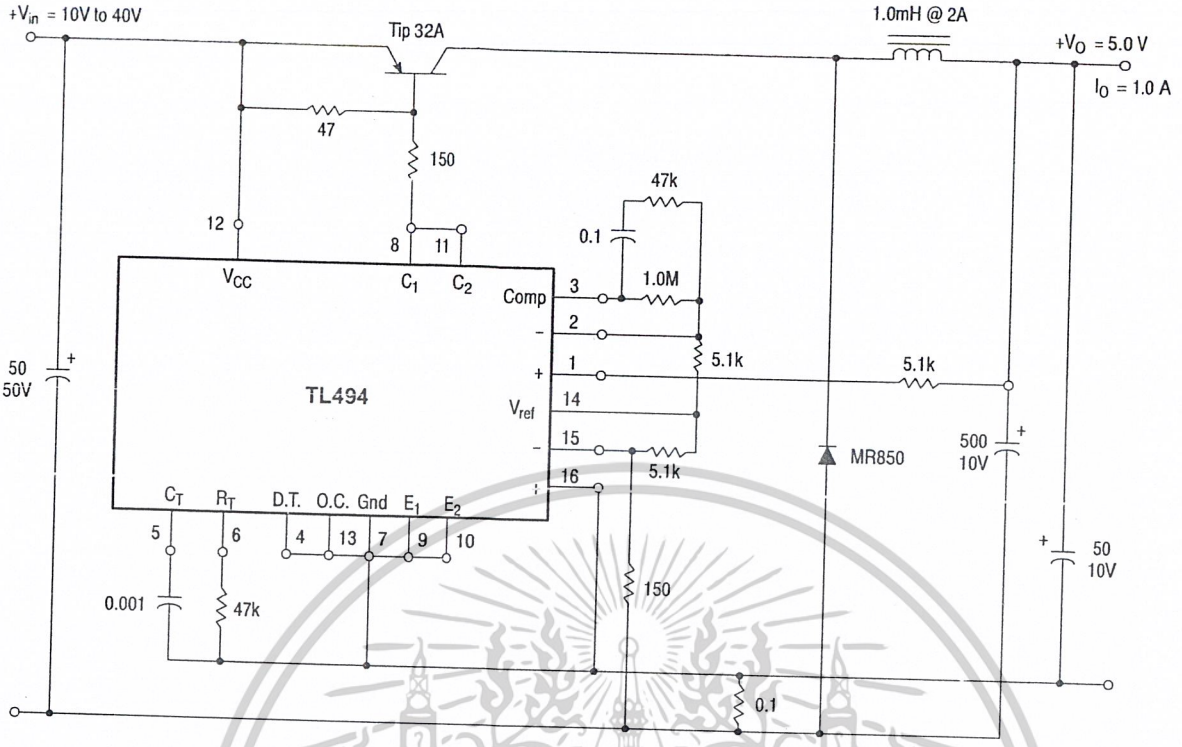


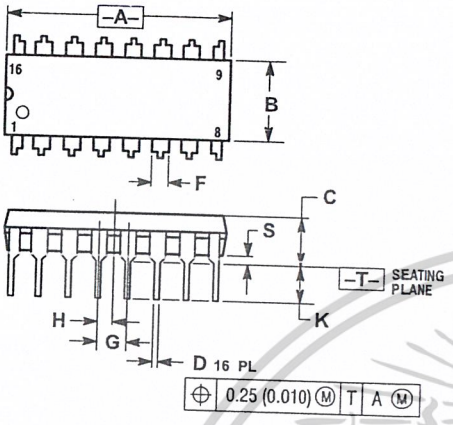
Figure 21. Pulse Width Modulated Step−Down Converter

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PACKAGE DIMENSIONS

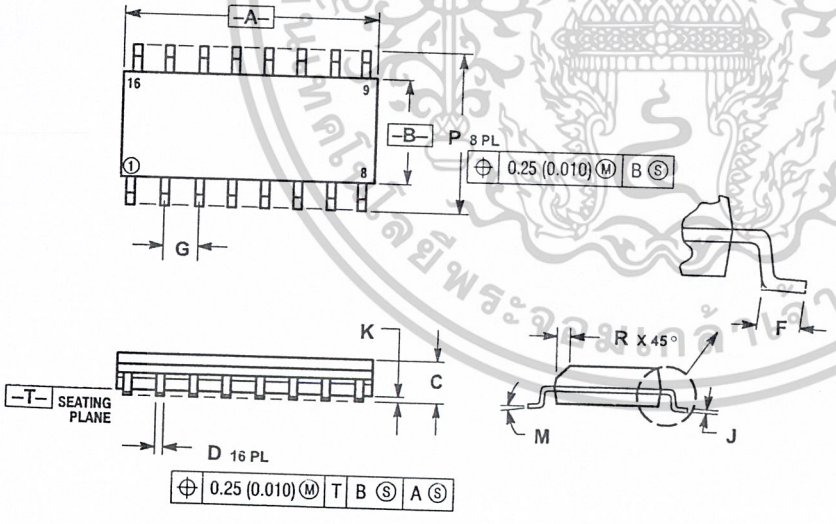
PDIP–16
N SUFFIX
CASE 648–08
ISSUE R



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

	INCHES		MILLIMETERS	
DIM	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.740	0.770	18.80	19.55
B	0.250	0.270	6.35	6.85
C	0.145	0.175	3.69	4.44
D	0.015	0.021	0.39	0.53
F	0.040	0.70	1.02	1.77
G	0.100 BSC		2.54 BSC	
H	0.050 BSC		1.27 BSC	
J	0.008	0.015	0.21	0.38
K	0.110	0.130	2.80	3.30
L	0.295	0.305	7.50	7.74
M	0°	10°	0°	10°
S	0.020	0.040	0.51	1.01

SO–16
D SUFFIX
CASE 751B–05
ISSUE J



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

	MILLIMETERS		INCHES	
DIM	MIN	MAX	MIN	MAX
A	9.80	10.00	0.386	0.393
B	3.80	4.00	0.150	0.157
C	1.35	1.75	0.054	0.068
D	0.35	0.49	0.014	0.019
F	0.40	1.25	0.016	0.049
G	1.27 BSC		0.050 BSC	
J	0.19	0.25	0.008	0.009
K	0.10	0.25	0.004	0.009
M	0°	7°	0°	7°
P	5.80	6.20	0.229	0.244
R	0.25	0.50	0.010	0.019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SWITCHMODE is a trademark of Semiconductor Components Industries, LLC.

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

PUBLICATION ORDERING INFORMATION

Literature Fulfillment:
Literature Distribution Center for ON Semiconductor
P.O. Box 5163, Denver, Colorado 80217 USA
Phone: 303–675–2175 or 800–344–3860 Toll Free USA/Canada
Fax: 303–675–2176 or 800–344–3867 Toll Free USA/Canada
Email: ONlit@hibbertco.com

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

JAPAN: ON Semiconductor, Japan Customer Focus Center
4–32–1 Nishi–Gotanda, Shinagawa–ku, Tokyo, Japan 141–0031
Phone: 81–3–5740–2700
Email: r14525@onsemi.com

ON Semiconductor Website: http://onsemi.com

For additional information, please contact your local Sales Representative.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

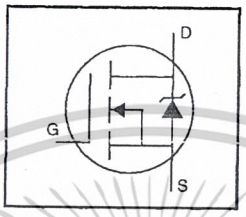
International
IOR Rectifier

PD-9.512B

IRFP460

HEXFET® Power MOSFET

- Dynamic dv/dt Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- Isolated Central Mounting Hole
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements



V_{DSS} = 500V

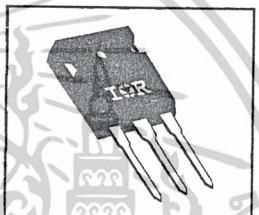
$R_{DS(on)}$ = 0.27Ω

I_D = 20A

Description

Third Generation HEXFETs from International Rectifier provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-247 package is preferred for commercial-industrial applications where higher power levels preclude the use of TO-220 devices. The TO-247 is similar but superior to the earlier TO-218 package because of its isolated mounting hole. It also provides greater creepage distance between pins to meet the requirements of most safety specifications.



TO-247AC

DATA SHEETS

Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
I_D @ T_C = 25°C	Continuous Drain Current, V_{GS} @ 10 V	20	A
I_D @ T_C = 100°C	Continuous Drain Current, V_{GS} @ 10 V	13	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	80	
P_D @ T_C = 25°C	Power Dissipation	280	W
	Linear Derating Factor	2.2	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	±20	V
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy ②	960	mJ
I_{AR}	Avalanche Current ①	20	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy ①	28	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③	3.5	V/ns
T_J T_{STG}	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to +150	°C
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting Torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf•in (1.1 N•m)	

Thermal Resistance

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	—	0.45	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	—	0.24	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	—	40	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electrical Characteristics @ T_J = 25°C (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	500	—	—	V	V_{GS}=0V, I_D= 250μA
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.63	—	V/°C	Reference to 25°C, I_D= 1mA
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.27	Ω	V_{GS}=10V, I_D=12A ④
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	V_{DS}=V_{GS}, I_D= 250μA
g_{fs}	Forward Transconductance	13	—	—	S	V_{DS}=50V, I_D=12A ④
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	V_{DS}=500V, V_{GS}=0V
		—	—	250		V_{DS}=400V, V_{GS}=0V, T_J=125°C
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	V_{GS}=20V
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		V_{GS}=-20V
Q_g	Total Gate Charge	—	—	210	nC	I_D=20A
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	29		V_{DS}=400V
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	110		V_{GS}=10V See Fig. 6 and 13 ④
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	18	—	ns	V_{DD}=250V
t_r	Rise Time	—	59	—		I_D=20A
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	110	—		R_G=4.3Ω
t_f	Fall Time	—	58	—		R_D=13Ω See Figure 10 ④
L_D	Internal Drain Inductance	—	5.0	—	nH	Between lead, 6 mm (0.25in.) from package and center of die contact
L_S	Internal Source Inductance	—	13	—		
C_{iss}	Input Capacitance	—	4200	—	pF	V_{GS}=0V
C_{oss}	Output Capacitance	—	870	—		V_{DS}= 25V
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	350	—		f=1.0MHz See Figure 5

Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	20	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
I_{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	80		
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.8	V	T_J=25°C, I_S=20A, V_{GS}=0V ④
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	570	860	ns	T_J=25°C, I_F=20A
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	5.7	8.6	μC	di/dt=100A/μs ④
t_{on}	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is neglegible (turn-on is dominated by L_S+L_D)				

Notes:

① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature (See Figure 11)

② V_{DD}=50V, starting T_J=25°C, L=4.3mH R_G=25Ω, I_{AS}=20A (See Figure 12)

③ I_{SD}≤20A, di/dt≤160A/μs, V_{DD}≤$V_{(BR)DSS}$, T_J≤150°C

④ Pulse width ≤ 300 μs; duty cycle ≤2%.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

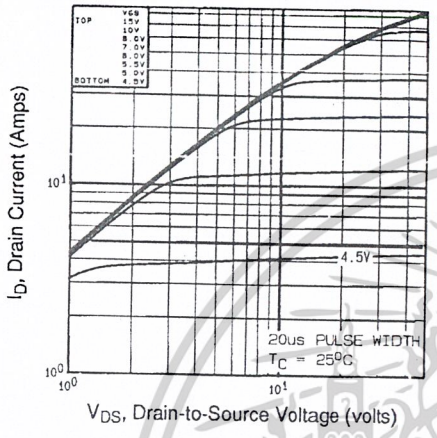


Fig 1. Typical Output Characteristics, T_C=25°C

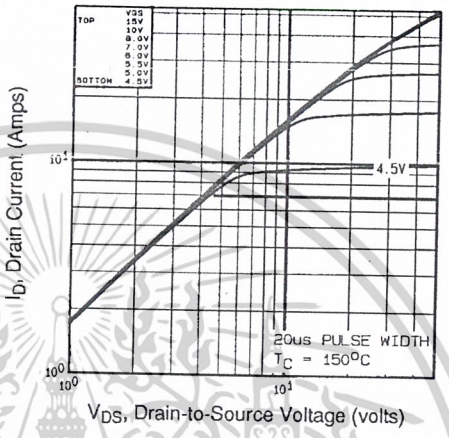


Fig 2. Typical Output Characteristics, T_C=150°C

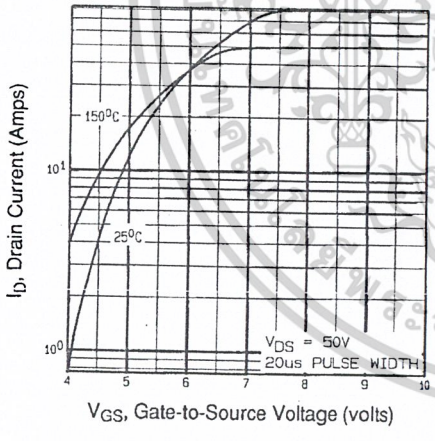


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

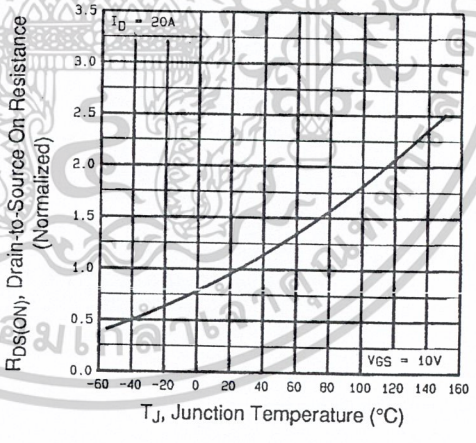


Fig 4. Normalized On-Resistance Vs. Temperature

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

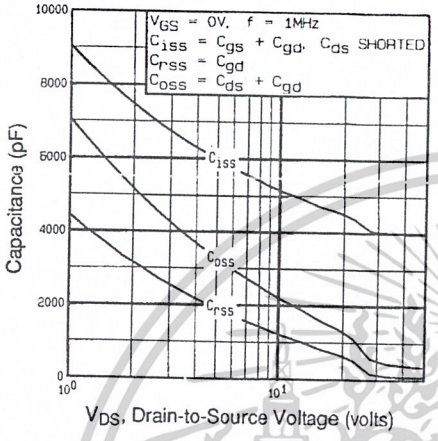


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

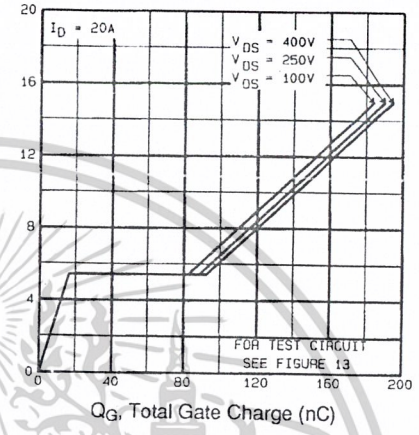


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

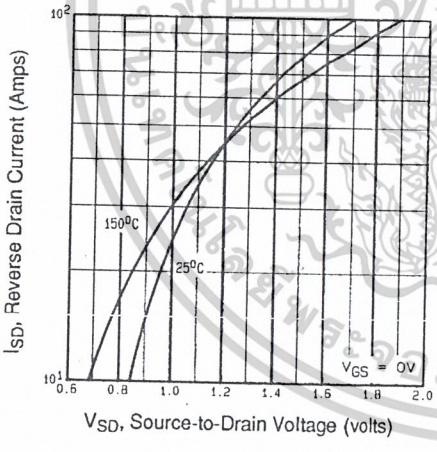


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

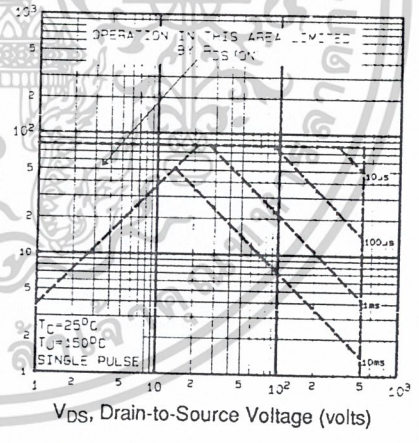


Fig 8. Maximum Safe Operating Area

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

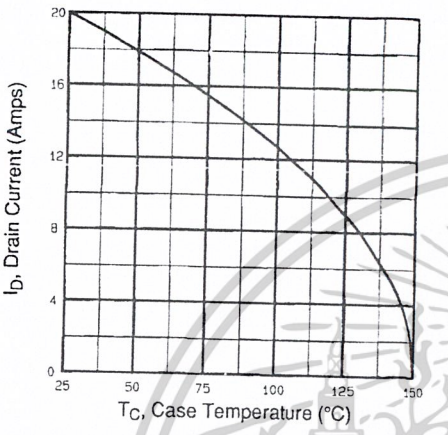


Fig 9. Maximum Drain Current Vs. Case Temperature

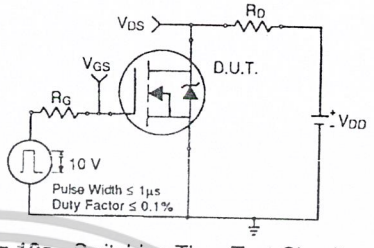


Fig 10a. Switching Time Test Circuit

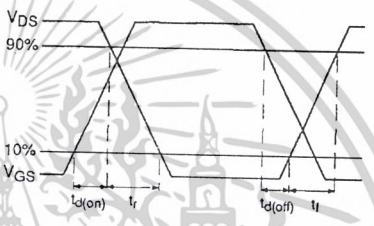


Fig 10b. Switching Time Waveforms

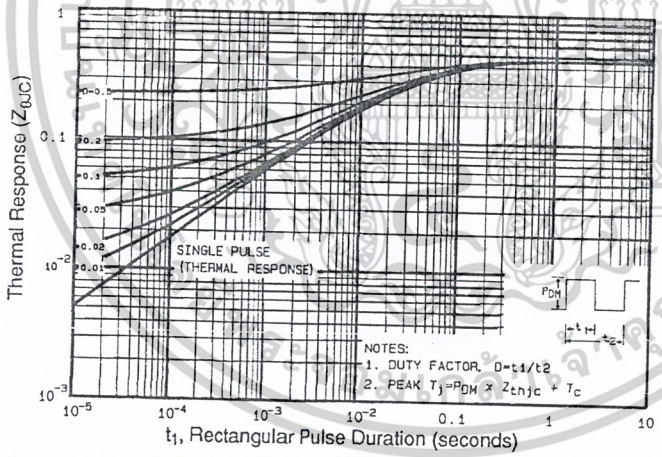


Fig 11. Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

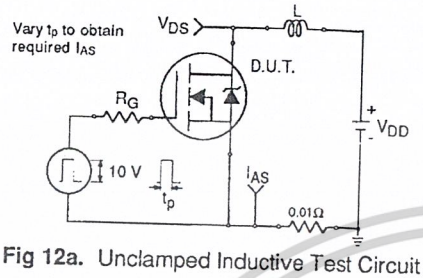


Fig 12a. Unclamped Inductive Test Circuit

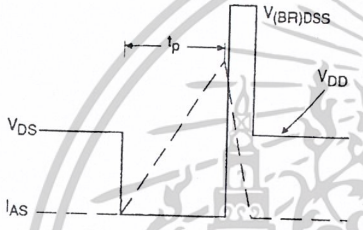


Fig 12b. Unclamped Inductive Waveforms

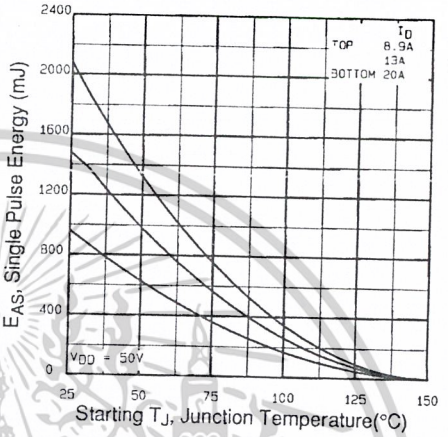


Fig 12c. Maximum Avalanche Energy Vs. Drain Current

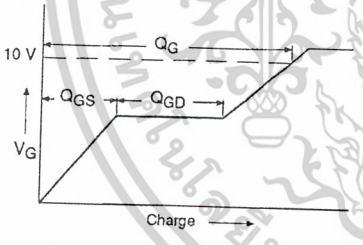


Fig 13a. Basic Gate Charge Waveform

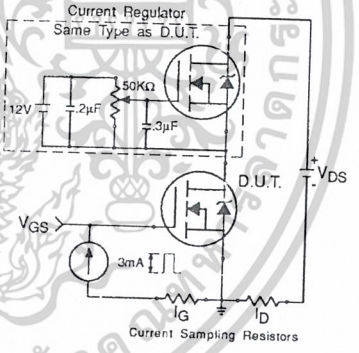


Fig 13b. Gate Charge Test Circuit

Appendix A: Figure 14, Peak Diode Recovery dv/dt Test Circuit – See page 1505

Appendix B: Package Outline Mechanical Drawing – See page 1511

Appendix C: Part Marking Information – See page 1517

International
IOR Rectifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้