

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท ชุดทดลองการควบคุมไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์

ELECTRIC CONTROL WITH ELECTRONIC LABORATORY SET

นักศึกษา

- นางสาวกาญจนา อุงศ์ รหัสประจำตัว 40031502
- นายเกรียงศักดิ์ เลขตะระโก รหัสประจำตัว 40031504
- นายวรพงษ์ เพชรสุวรรณ รหัสประจำตัว 40031519
- นายสยาม ฟังเกิด รหัสประจำตัว 40031526

หลักสูตร ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชา เทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท

- อาจารย์ไพบูลย์ พวงวงศ์ตระกูล
- อาจารย์วรวิทย์ สมหา
- อาจารย์สุรพงษ์ สิริพงศ์ดี



คณะกรรมการสอบปริญญาโท	ลายมือชื่อ
1. อาจารย์วรวิทย์ สมหา	
2. อาจารย์สุรพงษ์ สิริพงศ์ดี	
3. อาจารย์กิติพงศ์ มະโน	
4. อาจารย์พงษ์เกียรติ เศรษฐพิทักษ์สกุล	
5. อาจารย์สุรชัย พิมพ์สาตี	

วันเดือนปีที่สอบ วันที่ 28 เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2541 เวลา 23.00 น. ถึง 24.00 น.

สถานที่สอบ ห้อง ค.310 คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สจล.

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 32855

วัน, เดือน, ปี 14 ส.ย. 2542



ภาควิชารับรองแล้ว

ลงนาม

(ศ.ดร.ธีระพล เทพหัสดิน ณ อยุธยา)

หัวหน้าภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม

วันที่ 2 เดือน 11 พ.ศ. 42

สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ปริญญานิพนธ์

ชุดทดลองการควบคุมไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์

ELECTRIC CONTROL WITH ELECTRONIC LABORATORY SET



นางสาวกาญจนา อุงศ์  
นายเกรียงศักดิ์ เลขตะระโก  
นายวรพงษ์ เพชรสุวรรณ  
นายสยาม พึ่งเกิด

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม

ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ปีการศึกษา 2541 นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ปริญญานิพนธ์

เรื่อง ชุดทดลองการควบคุมไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์

ELECTRIC CONTROL WITH ELECTRONIC LABORATORY SET

## ผู้จัดทำ

- 1. นางสาวกาญจนา อูพงศ์
- 2. นายเกรียงศักดิ์ เลขตะระโก
- 3. นายวรพงษ์ เพชรสุวรรณ
- 4. นายสยาม พึ่งเกิด

## อาจารย์ที่ปรึกษา

ลงนาม.....  
(อาจารย์ไพบุลย์ พวงวงศ์ตระกูล)

ลงนาม.....  
(อาจารย์วรวิทย์ สมหา)

ลงนาม.....  
(อาจารย์สุรพงษ์ สิริพงศ์ดี)

## หัวหน้าภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม

ลงนาม.....

เอกสารนี้เป็น (ผศ.ดร.ธีระพล) สำหรับก เทพหัสดิน ณ อยุธยา) เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ปริญญานิพนธ์

เรื่อง ชุดทดลองการควบคุมไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์

ELECTRIC CONTROL WITH ELECTRONIC LABORATORY SET

### วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาหลักการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง
2. เพื่อออกแบบและสร้างชุดทดลองการควบคุมไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์
3. เพื่อออกแบบและสร้างใบงานการทดลองการควบคุมไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์
4. เพื่อนำชุดทดลองการควบคุมไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างไปใช้งานได้จริง
5. เพื่อให้นักศึกษาสามารถเข้าใจในบทเรียนวิชาอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเข้าใจหลักการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง
2. มีชุดทดลองและใบงานที่ใช้งานได้จริง
3. สามารถนำชุดทดลองไปใช้เป็นที่ประกอบการเรียนการสอน
4. สามารถทำให้นักศึกษาเข้าใจบทเรียนของวิชาอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้ง่ายขึ้น
5. สามารถเข้าใจการทำงานของชุดทดลองการควบคุมไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์ได้จากคู่มือ
6. เป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ชุดทดลองการควบคุมไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์

นางสาวกาญจนา	อุพงศ์
นายเกรียงศักดิ์	เลขตะระโก
นายวรพงษ์	เพชรสุวรรณ
นายสยาม	พึงเกิด

### อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ไพบูลย์	พวงวงศ์ตระกูล
อาจารย์วรวิทย์	สมหา
อาจารย์สุรพงษ์	สิริพงศ์ดี

ปีการศึกษา 2541

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอชุดทดลองการควบคุมไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์ ประกอบด้วยวงจรถริกเกอร์ วงจรสร้างสัญญาณพัลส์ วงจรเรกติไฟเออร์ เพื่อใช้เป็นส่วนการเรียนการสอนในรายวิชาอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยได้จัดทำใบงานการทดลองทั้งหมด 14 ใบงาน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการเรียนการสอนให้ดียิ่งขึ้น จากการทดลอง ผลการทดลองที่ได้อยู่ในระดับดีสามารถนำไปใช้งานได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## II

# ELECTRIC CONTROL WITH ELECTRONIC LABORATORY SET

MISSKANJANA	U-PONG
MR.KRIENGSAK	LEKTARAGO
MR.WORRAPONG	PETSUWAN
MR.SIAM	PUNGKIRD

### ADVISORS

MR.PAIBOON	PONGWONGTRAGULL
MR.WORRAWIT	SOMTHA
MR.SURAPONG	SIRIPONGDEE

1998

### ABSTRACT

This thesis presents the Electric Control with Electronics Laboratory Set which include of a trigger circuit, a generator pulse circuit, a rectifier circuit. This laboratory set can be used as an instructional media in the Power Electronics subject. It has 14 laboratories to increase the efficiency of learning. The results of these laboratories have a good range for application.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### III

## กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำปริญญานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดี จากความร่วมมือของสมาชิกภายในกลุ่มทุกท่าน นอกจากนี้ยังได้รับความอนุเคราะห์จากอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ และอาจารย์ประจำภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรมทุกท่าน ในการให้คำปรึกษา แนะนำและความช่วยเหลือต่าง ๆ ตลอดจนให้โอกาสในการทำปริญญานิพนธ์อย่างเต็มที่ ทั้งด้านเวลา สถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ และขอขอบคุณบุพการีผู้ให้กำเนิดที่ให้โอกาสในทางการศึกษา เพื่อน ๆ ตลอดจนผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่าง ๆ อีกทั้งยังเป็นกำลังใจในการทำปริญญานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## IV

### สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปริญญาโท	1
1.2 ขอบเขตของปริญญาโท	2
1.3 เนื้อหาโดยสังเขป	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 กล่าวนำ	4
2.2 ไทริสเตอร์และการเรียงกระแสที่มีการควบคุม	4
2.2.1 ไทริสเตอร์แบบสวิตช์แบบที่ 2	4
2.2.2 หลักการทำงานและลักษณะสมบัติของเอสซีอาร์	6
2.2.3 หลักการทำงานและลักษณะสมบัติของไทรแอก	12
2.3 การเปิดกระแสของไทรสเตอร์	16
2.3.1 การทำให้หยุดกระแสไหลตามธรรมชาติ	16
2.3.2 การทำให้หยุดกระแสไหลด้วยแรงดันกลับ	17
2.4 วงจรจุดชนวน	19
2.4.1 วงจรจุดชนวนด้วยไฟฟ้าดีซี	21
2.4.2 วงจรจุดชนวนด้วยเฟสของสัญญาณเอซี	23
2.4.3 วงจรจุดชนวนด้วยพัลส์	25
2.5 ชุดวงจรกำเนิดพัลส์ทริกเกอร์	30
2.5.1 วงจรไอโซเลตสัญญาณ	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.5.3 การใช้งานของไอซี TCA 785	32
2.6 การเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง	33
2.6.1 การเลือกวงจรการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับ	33
2.6.2 การนำวงจรควบคุมการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็น ไฟฟ้ากระแสตรงไปใช้งาน	34
2.6.3 การเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ชนิด 1 เฟส ครึ่งลูกคลื่น (Single-phase Half-wave Rectifier Circuit)	35
2.6.4 Single-phase Full-wave Controlled Rectifier	48
2.6.5 Full-wave Rectifier Center-tap Transformer	48
2.6.6 Fully Controlled Single-phase Bridge	53
2.6.7 Single-phase Half Controlled Bridge	59
2.7 การควบคุมมอเตอร์ดีซี	64
<b>บทที่ 3 การออกแบบและการสร้าง</b>	<b>70</b>
3.1 การออกแบบและการสร้างทางด้านฮาร์ดแวร์	70
3.1.1 การสร้างฮาร์ดแวร์	70
<b>บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง</b>	<b>78</b>
4.1 วงจรสร้างสัญญาณพัลส์ควบคุมการทริกเกต	78
4.2 วงจรไอโซเลตสัญญาณ	83
<b>บทที่ 5 สรุป ปัญหา แนวทางการแก้ไขและการพัฒนา</b>	<b>87</b>
5.1 สรุป	87
5.2 ปัญหาที่พบ	87
5.2.1 ในส่วนของฮาร์ดแวร์	87
5.2.2 ในส่วนของใบงาน	88
5.3 แนวทางในการพัฒนา	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VI

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
ภาคผนวก ก ใบงานการทดลอง	89
ภาคผนวก ข วงจรและลายวงจรพิมพ์	193
ภาคผนวก ค รายการข้อมูลและคุณสมบัติของอุปกรณ์	203
บรรณานุกรม	222
ประวัติผู้แต่ง	223



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## VII

### สารบัญภาพ

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ 2.1 (ก) การเรียงสารกึ่งตัวนำแบบพีและแบบเป็นชั้น ๆ PNPN (ข) รูปสมมูลของสิ่งประดิษฐ์เป็นไดโอดสามตัวต่อเรียงกัน	5
รูปที่ 2.2 (ก) โครงสร้างของเอสซีอาร์ (ข) สัญลักษณ์ของเอสซีอาร์	6
รูปที่ 2.3 (ก) การต่อเอสซีอาร์เข้ากับวงจรไฟฟ้าโดยแสดงกระแส และแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าบวก (ข) กราฟเส้นโค้งลักษณะสมบัติของเอสซีอาร์	7
รูปที่ 2.4 โมเดลของเอสซีอาร์แบบวงจรทรานซิสเตอร์ต่อกันแบบป้อนกลับค่าบวก	9
รูปที่ 2.5 (ก) การต่อสิ่งประดิษฐ์พีเอ็นพีเอ็นสองชิ้นอย่างขนานแต่กลับขั้วกัน (ข) โครงสร้างรวมของ (ก)	13
รูปที่ 2.6 (ก) โครงสร้างของไทรแอก (ข) สัญลักษณ์ของไทรแอก	13
รูปที่ 2.7 เส้นโค้งลักษณะสมบัติของไทรแอก	14
รูปที่ 2.8 (ก) การทำให้กระแสหยุดไหลด้วยการยกสวิตช์ที่ต่ออนุกรม (ข) การทำให้กระแสหยุดไหลด้วยการสับสวิตช์ที่ต่อขนาน	17
รูปที่ 2.9 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสของไทรสเตอร์ในช่วงเวลาปิดกระแส	18
รูปที่ 2.10 (ก) วงจรสมมูลของวงจรจุดชนวนของเกต (ข) การเขียนเส้นภาระ	20
รูปที่ 2.11 วงจรจุดชนวนด้วยไฟฟ้าดีซีอย่างง่าย	21
รูปที่ 2.12 วงจรจุดชนวนดีซีที่ตัดแปลงจากไฟฟ้าเอซีเลี้ยงวงจร (ก) ต่อสวิตซ์อนุกรมกับเกต (ข) ต่อสวิตซ์ขนานกับเกต (ค) รูปคลื่นของแรงดัน	22
รูปที่ 2.13 (ก) วงจรจุดชนวนด้วยเฟสของสัญญาณเอซีแบบง่าย (ข) รูปคลื่นแรงดันเมื่อค่าความต้านทาน R มีค่าน้อยและค่าใหญ่	23

## VIII

### สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ 2.14 (ก) วงจรควบคุมเฟสครึ่งคลื่นแบบง่ายด้วยความต้านทานแปรค่าได้	
(ข) วงจรควบคุมเฟสครึ่งคลื่นด้วยความต้านทานแปรค่าได้ ของตัวเก็บประจุและไดโอด	24
รูปที่ 2.15 วงจรจุดชนวนครึ่งคลื่นที่ใช้หม้อแปลงที่มีแกนสามารถอิมตัวได้เข้าต่อ	
(ก) แบบอนุกรม	
(ข) แบบขนาน	25
รูปที่ 2.16 แผนผังการใช้เครื่องกำเนิดพัลส์เข้าจุดชนวนเอสซีอาร์	
(ก) โดยจุดชนวนเอสซีอาร์หนึ่งตัวผ่านหม้อแปลงสองขด	
(ข) โดยจุดชนวนเอสซีอาร์สองตัวผ่านหม้อแปลงสามขด	
(ค) โดยจุดชนวนเอสซีอาร์สองตัวผ่านหม้อแปลงสี่ขด	27
รูปที่ 2.17 (ก) วงจรจุดชนวนที่ใช้เครื่องกำเนิดพัลส์สร้างจากยูเจที	
ซึ่งเป็นการควบคุมแบบครึ่งคลื่น	
(ข) วงจรจุดชนวนที่ใช้ยูเจทีเข้าควบคุมวงจรหรีไฟแบบเต็มคลื่น	29
รูปที่ 2.18 วงจรจุดชนวนที่ใช้เอสซีอาร์ขนาดเล็กเข้าจุดชนวนเอสซีอาร์ขนาดใหญ่	30
รูปที่ 2.19 วงจรแยกกราวด์ระหว่างชุดควบคุมกับชุดกำลัง	30
รูปที่ 2.20 โครงสร้างภายในของ IC TCA 785	32
รูปที่ 2.21 โหลดเป็นความต้านทานอย่างเดียว	35
รูปที่ 2.22 โหลดเป็นอินดักติฟโหลด	37
รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\alpha$ และ $\gamma$ ที่มุม $\phi$ ค่าต่าง ๆ	40
รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง $I_n$ และ $\alpha$ ที่มุม $\phi$ ค่าต่าง ๆ	41
รูปที่ 2.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง $I_{RN}$ และ $\alpha$ ที่มุม $\phi$ ค่าต่าง ๆ	42
รูปที่ 2.26 โหลดเป็นอินดักเตอร์อย่างเดียว	42
รูปที่ 2.27 โหลดเป็น RL และมี Free-wheeling Diode	45
รูปที่ 2.28 วงจรควบคุมเรกติไฟเออร์คลื่นเมื่อมีโหลดเป็น RC	47
รูปที่ 2.29 Full-wave Rectifier with Center-tap Transformer	49
รูปที่ 2.30 โหลดเป็นอินดักติฟโหลด	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใด ๆ การค้า  
โดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการใช้

## IX

### สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ 2.31 วงจรที่มี Flywheel-diode ต่อขนานกับอินดักตีฟโหลด	52
รูปที่ 2.32 Full-controlled Single Phase Bridge Whit Resistive Load	54
รูปที่ 2.33 Fully-controlled single phase bridge whit inductive load	55
รูปที่ 2.34 Fully-controlled Single Phase Bridge With Flywhell-diode	56
รูปที่ 2.35 Firing Circuit Output Connections	57
รูปที่ 2.36 ในสภาวะของอินเวอร์เตอร์	58
รูปที่ 2.37 (ก) แอโนดของเอสซีอาร์ต่อกัน (ข) แคโทดของเอสซีอาร์ต่อกัน (ค) แอโนดและแคโทดของเอสซีอาร์ต่อกัน	59
รูปที่ 2.38 กรณีที่โหลดเป็นอินดักตีฟโหลดแต่กระแสไหลต่อเนื่อง (ก) ของวงจรรูปที่ 2.37 (ก) และ (ข) (ข) ของรูปวงจรที่ 2.37 (ค)	61
รูปที่ 2.39 กระแสไหลอย่างต่อเนื่อง (ก) สัญญาณของวงจรรูปที่ 2.37 (ก) และ (ข) (ข) สัญญาณของวงจรรูปที่ 2.37 (ค)	62
รูปที่ 2.40 สัญญาณของวงจรรูปที่ 2.37 (ก) และ (ข) เมื่อมี Flywheel-diode	63
รูปที่ 2.41 การต่อวงจรอาร์มาเจอร์และวงจรฟิลต์ของเครื่องกลไฟฟ้าตีซี (ก) ต่อวงจรฟิลต์เป็นอนุกรมกับวงจรอาร์มาเจอร์ (ข) ต่อวงจรฟิลต์ขนานกับวงจรอาร์มาเจอร์ (ค) ต่อวงจรฟิลต์แยกออกจากวงจรอาร์มาเจอร์ (ง) ต่อวงจรฟิลต์แบบผสม	65
รูปที่ 2.42 การมอดูเลตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	68
รูปที่ 3.1 วงจร DC-Amplifier	70
รูปที่ 3.2 วงจร Pulse Generator	72
รูปที่ 3.3 วงจร Pulse Generator	73
รูปที่ 3.4 วงจร Control Amplifier	75

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ 3.5 วงจร Feed Back Variable Amplifier	76
รูปที่ 3.6 วงจร Opto-isolator	76
รูปที่ 4.1 วงจรที่ใช้ในการทดสอบการทำงาน	79
รูปที่ 4.2 สัญญาณเอาต์พุตที่ขาต่าง ๆ ของไอซี TCA 785	81
รูปที่ 4.3 สัญญาณพัลส์ที่นำไปใช้ในการควบคุมเกตให้ทำงานช่วงคลื่นลูกบวก (0 องศา-180 องศา) ที่ได้จากขา 15 ของไอซีเบอร์ TCA 785	82
รูปที่ 4.4 สัญญาณที่นำไปใช้ในการควบคุมเกตให้ทำงานช่วงคลื่นลูกลบ (180 องศา-360 องศา) ที่ได้จากขา 14 ของไอซีเบอร์ TCA 785	82
รูปที่ 4.5 วงจรที่ใช้ในการทดสอบการเชื่อมโยงทางแสงโดยใช้ไอซีเบอร์ MOC 3010	83
รูปที่ 4.6 สัญญาณที่ผ่านการเชื่อมโยงของแสง โดยใช้ไอซีเบอร์ MOC 3010	84
รูปที่ 4.7 วงจรรวมของการใช้ไอซีเบอร์ TCA 785 และการเชื่อมโยงทางแสง ที่ใช้ไอซีเบอร์ MOC 3010	84
รูปที่ 4.8 ชุดของเอสซีอาร์ซึ่งใช้เป็นชุดกำลัง	85
รูปที่ 4.9 วงจรรวมของชุดทดลองการควบคุมไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์	85
รูปที่ 4.10 แผงทดลองการควบคุมไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์

ในปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ จะใช้ระบบไฟฟ้าที่มีขนาดของระบบที่ใหญ่ จำเป็นต้องมีการควบคุมกำลังงานที่มีความแม่นยำและให้ผลที่ผิดพลาดน้อยที่สุด ซึ่งในระบบที่ใช้กันจะใช้เครื่องจักรกลควบคุมซึ่งจะทำให้ระบบมีขนาดใหญ่ มีความแม่นยำน้อย สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย อีกทั้งอายุการใช้งานของอุปกรณ์เครื่องจักรกลมีอายุการใช้งานที่ค่อนข้างต่ำ จึงมีการพัฒนามาใช้ อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์จำพวกอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมาควบคุมระบบไฟฟ้าแทนระบบเดิมที่ใช้เครื่องจักรกลซึ่งจะให้ความแม่นยำและอายุการใช้งานได้ยาวนานยิ่งขึ้น ทั้งยังทำให้ระบบมีขนาดเล็กลงและยังช่วยประหยัดค่าใช้จ่าย

อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมไฟฟ้าที่ผู้จัดทำเลือกใช้คือ เอสซีอาร์และไทรแอก ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ต้องมีวงจรควบคุมการทริก ในปริญญานิพนธ์ชิ้นนี้ประกอบด้วยวงจรและใบงานการทดลองที่เป็นพื้นฐานในการที่จะศึกษาการควบคุมไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ในส่วนของวงจรที่ใช้ควบคุมการทริกซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญ ทั้งนี้ทางคณะผู้จัดทำเลือกใช้ ไอซีเบอร์ TCA785 ซึ่งเป็นไอซีคอนโทรลเฟสที่สามารถควบคุมมุมการทริกให้กับเอสซีอาร์และไทรแอก

ใบงานแต่ละใบงานจะเป็นการศึกษาคุณสมบัติของอุปกรณ์แต่ละตัว รวมถึงการใช้งานในวงจรพื้นฐานที่จะสามารถเป็นพื้นฐานในการศึกษาวงจรและระบบใหญ่ ๆ ต่อไปได้

โครงการนี้นำเสนอวงจรพื้นฐานและชุดใบงานที่จะเป็นประโยชน์ในการเรียนการสอนวิชาอิเล็กทรอนิกส์กำลังในระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูงและระดับปริญญาตรี ซึ่งจะ เป็นพื้นฐานในการศึกษาระบบที่มีความยุ่งยากต่อไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 ซัดความสามารถของโครงการงาน

สร้างชุดทดลองควบคุมไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์ และออกแบบใบงานการทดลองได้ 14 ใบงานตามรายชื่อดังนี้

- DIODE AND THYRISTOR IN DC-CIRCUITS
- THYSISTOR IN AC-CIRCUITS
- TRIAC IN AC-CIRCUITS
- THYRISTOR IN ANTIPARALLEL CONNECTIONS
- SINGLE-PHASE HALF WAVE RECTIFIER CIRCUITS
- FULL WAVE RECTIFIER WITH CENTER TAP TRANSFORMER
- THYRISTOR IN HALF BRIDGE WITH CIRCUITS
- BRANCH-PAIR HALF WAVE (HALF-CONTROLLED TWO PULSE BRIDGE CONNECTION)
- ONE-POLE CONTROLLED TWO-PULSE BRIDGE CONNECTION
- TWO PULSE BRIDGE CONNECTION WITH RESISTIVE AND INDUCE LOAD
- TWO PULSE BRIDGE CONNECTION
- TWO PULSE BRIDGE CONNECTION WITH CONTROL UNIT AND RESISTIVE LOAD
- RECORDING STATIC CONVERTER CHARATERISTICS

## 1.3 เนื้อหาโดยสังเขป

เนื้อหาภายในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ แบ่งออกเป็นบทต่าง ๆ เพื่อความสะดวกต่อการศึกษา และทำความเข้าใจ ในแต่ละบทจะประกอบด้วยเนื้อหาที่สำคัญดังนี้

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ ประกอบด้วยเนื้อหาในทางทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับ ใบงานการทดลองทั้ง 14 ใบงาน ซึ่งทำให้ผู้อ่านได้มีความรู้ ความเข้าใจที่เป็นพื้นฐานเสียก่อน อันจะเป็นประโยชน์ต่อการทำความเข้าใจกับวงจรที่ใช้งานจริง

บทที่ 3 การออกแบบ การสร้าง และการทำงานของชุดทดลองการควบคุมไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์ โดยกล่าวถึงโครงสร้างของฮาร์ดแวร์ การออกแบบฮาร์ดแวร์และการออกแบบ

ใบงานการทดลอง รวมถึงหลักการทำงานในส่วนต่าง ๆ ของฮาร์ดแวร์ ซึ่งทำให้ผู้อ่านมีความเข้าใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การทำงานโดยรวมของโครงการงานนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง กล่าวถึงขั้นตอนการทดลอง และการทดสอบประสิทธิภาพในการทำงานของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของโครงการนี้ ซึ่งประกอบด้วย 14 ใบบงานการทดลอง เพื่อตรวจสอบว่าโครงการนี้สามารถทำงานได้ตรงตามวัตถุประสงค์หรือไม่

บทที่ 5 บทสรุป ปัญหา แนวทางแก้ไขและพัฒนา เป็นการสรุปผลการทำงานและได้เสนอแนวทางการแก้ไข และแนวทางในการพัฒนาชุดทดลองการควบคุมไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์รวมทั้งใบบงานการทดลอง ให้มีประสิทธิภาพและการใช้งานได้อย่างกว้างขวางมากขึ้น

ในภาคผนวกแสดงรายละเอียดของใบบงานการทดลองและรายการอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้จัดทำโครงการนี้

ภาคผนวก ก ใบบงานการทดลอง

ภาคผนวก ข วงจรและลายวงจรพิมพ์

ภาคผนวก ค รายการข้อมูลและคุณสมบัติของอุปกรณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 กล่าวนำ

เนื้อหาของปริญญานิพนธ์ในบทนี้จะเป็นทฤษฎีและหลักการ ที่นำมาประกอบการสร้างโครงการ โดยประกอบด้วยไทรสเตอร์และการเรียงกระแสที่มีการควบคุม, การเปิดกระแสของไทรสเตอร์, วงจรจุดชนวน, ชุดวงจรกำเนิดพัลส์ทริกเกอร์, การเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง, การควบคุมมอเตอร์ดีซี ซึ่งจะกล่าวถึงดังต่อไปนี้

#### 2.2 ไทรสเตอร์และการเรียงกระแสที่มีการควบคุม

##### 2.2.1 ไทรสเตอร์แบบสวิตช์แบบที่ 2

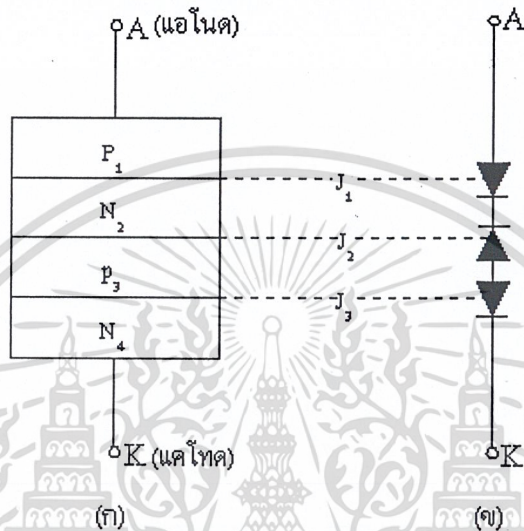
ไทรสเตอร์เป็นชื่อรวมหรือชื่อตระกูล (Family Name) ของสิ่งประดิษฐ์ทางสถานะของแข็ง (Solid-state) ที่ผลิตขึ้นจากสารกึ่งตัวนำแบบพีและแบบเอ็นเรียงสลับกันเป็นชั้น ๆ ตั้งแต่สี่ชั้นขึ้นไป ซึ่งจะทำให้เกิดมีรอยต่อพีเอ็นสามรอยต่อขึ้นไปเรียงกันเป็นอนุกรม (รูปที่ 2.1) สามารถทำหน้าที่เป็นสวิตช์เปิดวงจร สามารถควบคุมจังหวะการเปิดให้นำกระแสได้ สามารถนำไปควบคุมกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่ได้ และถูกแบ่งชั้นให้เป็นสวิตช์แบบที่ 2 ผลิตขึ้นเป็นครั้งแรกเมื่อ พ.ศ. 2500 โดยบริษัท เจเนอรัลอีเล็กทริก (General Electric Company)

ไทรสเตอร์มีสมาชิกหลายชนิดซึ่งอาจจะมีคุณสมบัติให้กระแสไหลได้ทางเดียว หรือให้กระแสไหลได้สองทางและอาจมีขั้ว สองขั้ว สามขั้วหรือสี่ขั้ว ดังเช่น

เอสซีอาร์ (Silicon Controlled Rectifier : SCR) เป็นไทรสเตอร์ชนิดที่มีสามขั้วคือแอนอด, แคโทด และเกตมีคุณสมบัติให้กระแสไหลได้ทิศทางเดียวจากแอนอดไปยังแคโทด และอาจเรียกชื่อว่าไดร ไอต์ ไทรสเตอร์ที่กั้นไม่ให้กระแสไหลกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไทรแอก (Triode Ac Switch : Triac) เป็นไทรสเตอร์ชนิดที่มีสามขั้ว คือ เกต และอีกสองขั้วเป็นได้ทั้งแอโนดและแคโทด เพราะว่าไทรแอกมีคุณสมบัติให้กระแสไหลได้สองทิศทาง และอาจเรียกชื่อว่า ไตรโอดไทรสเตอร์ที่ให้กระแสไหลได้สองทิศทาง (Bidirection Triode Thyristor)



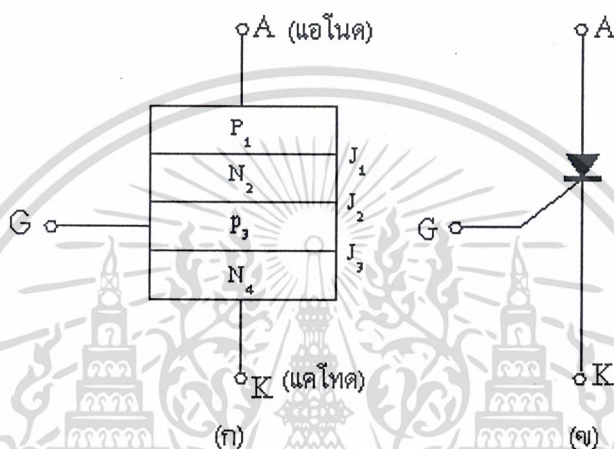
รูปที่ 2.1 (ก) การเรียงสารกึ่งตัวนำแบบพีและแบบเป็นชั้น ๆ PNPN  
(ข) รูปสมมูลของสิ่งประดิษฐ์เป็นไดโอดสามตัวต่อเรียงกัน

เอสยูเอสหรือช็อกเลย์ไดโอด (Silicon Unilateral Switch : SUS หรือ Shockley Diode) เป็นไทรสเตอร์ชนิดที่มีสองขั้ว คือ แอโนดกับแคโทดและมีคุณสมบัติให้กระแสไหลได้ทิศทางเดียวเป็นต้น

เนื่องจากเอสซีอาร์และไทรแอกสามารถนำกระแสขนาดใหญ่มาก และนิยมที่จะนำไปใช้ควบคุมกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่ ดังนั้นจะได้อธิบายละเอียดถึงเอสซีอาร์และไทรแอก ในที่นี้ถ้ากล่าวถึงไทรสเตอร์ขอให้หมายถึงเอสซีอาร์ ในบางครั้งอาจหมายถึงไทรแอก หรือหมายถึงเอสซีอาร์และไทรแอกทั้งคู่ และถ้าจะกล่าวถึงไทรสเตอร์ชนิดอื่นจะได้กล่าวให้ทราบอย่างชัดเจน

## 2.2.2 หลักการทำงานและลักษณะสมบัติของเอสซีอาร์

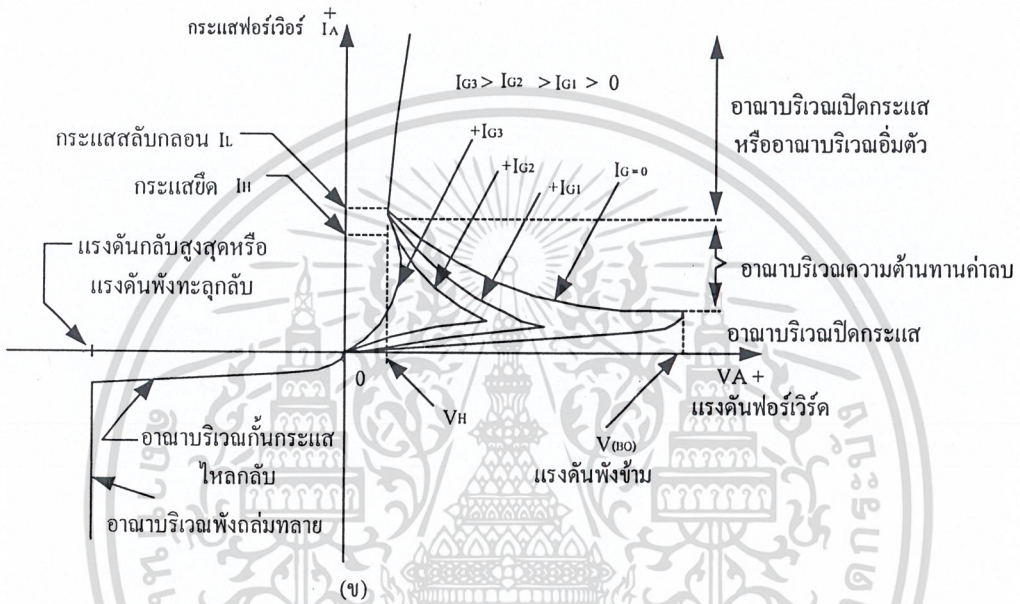
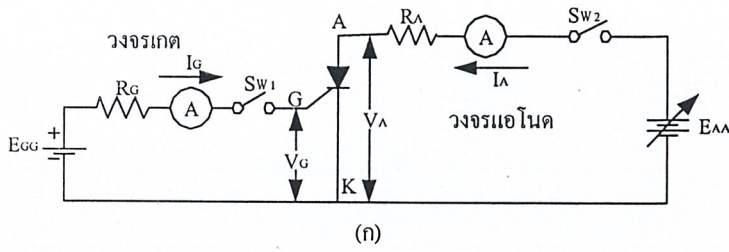
เอสซีอาร์เป็นทรานซิสเตอร์ชนิดหนึ่งที่มีสามขั้วเรียกว่า แอนโอด (A) และแคโทด (K) และเกต (G) ซึ่งมีโครงสร้างคล้ายรูปที่ 2.1 (ซึ่งเป็นรูปโครงสร้างของเอสยูเอส) ยกเว้นแต่ว่าที่ชั้นของสารพี (P), มีชั้นเกต (G) เข้าต่อติดดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ก) และเขียนสัญลักษณ์แทนดังรูปที่ 2.2 (ข)



รูปที่ 2.2 (ก) โครงสร้างของเอสซีอาร์

(ข) สัญลักษณ์ของเอสซีอาร์

เมื่อต่อเอสซีอาร์เข้ากับวงจรไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ก) ถ้าปิดสวิตช์  $Sw_1$  และ  $Sw_2$  ลง แล้วปรับค่าแรงดันเลี้ยงวงจรแอนโอด  $E_{AA}$  และวงจรเกต  $E_{GG}$  ให้เหมาะสม เราจะได้เส้นโค้งลักษณะสมบัติดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ข) โดยให้ยึดถือหลักที่ว่ากระแสแอนโอด  $I_A$  และกระแสเกต  $I_G$  มีค่าบวกถ้ากระแสไหลเข้าสู่ขั้วของเอสซีอาร์ และแรงดันแอนโอด  $V_A$  และแรงดันเกต  $V_G$  มีค่าบวกถ้าแอนโอดและเกตมีศักย์สูงกว่าแคโทด ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ก)



รูปที่ 2.3 (ก) การต่อเอสซีอาร์เข้ากับวงจรไฟฟ้าโดยแสดงกระแส และแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าบวก (ข) เส้นโค้งลักษณะสมบัติของเอสซีอาร์

ในการเริ่มต้นการทดลองให้เปิดสวิตช์  $Sw_1$  ไว้ปิดสวิตช์  $Sw_2$  ลงและให้แรงดันแอนโอด  $V_A$  มีค่าเริ่มต้นจากน้อยไปหามาก โดยให้  $I_G = 0$  แล้วเพิ่มค่าแรงดันแอนโอดจากศูนย์ให้สูงขึ้นทางบวก หรือในทิศฟอว์เวิร์ดเราจะเห็นกระแส  $I_A$  เพิ่มค่าจากศูนย์เพียงเล็กน้อย เรียกว่า “เอสซีอาร์อยู่ในสภาวะปิดกระแส” แต่เมื่อแรงดัน  $V_A$  เพิ่มค่าสูงถึงค่า  $V_{(BO)}$  ซึ่งเรียกว่า “แรงดันพังข้าม” (Breakover Voltage) แล้วเอสซีอาร์เปลี่ยนสถานะเข้าสู่สภาวะเปิดกระแสได้เองโดยต้องการเวลาชั่วครู่หนึ่งซึ่งจะเรียกว่า “เวลาเปิดกระแส” (Turn-on Time) เราเรียกช่วงนี้ว่า “อาณาบริเวณปิดกระแสหรืออาณาบริเวณกั้นกระแสทิสฟอว์เวิร์ด” (Cut-off Region หรือ Forward Blocking Region)

เอกสารนี้เป็นเอกสารควบคุมกระแส  $I_A$  ให้เพิ่มค่าสูงขึ้นทีละน้อยด้วยการเพิ่มค่าแรงดันแอนโอด  $E_{AA}$  เราจะการค่าใดเห็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าของ  $V_A$  ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ข) ซึ่งเมื่อภายหลังที่ค่าแรงดัน  $V_A$  นี้ไปใช้

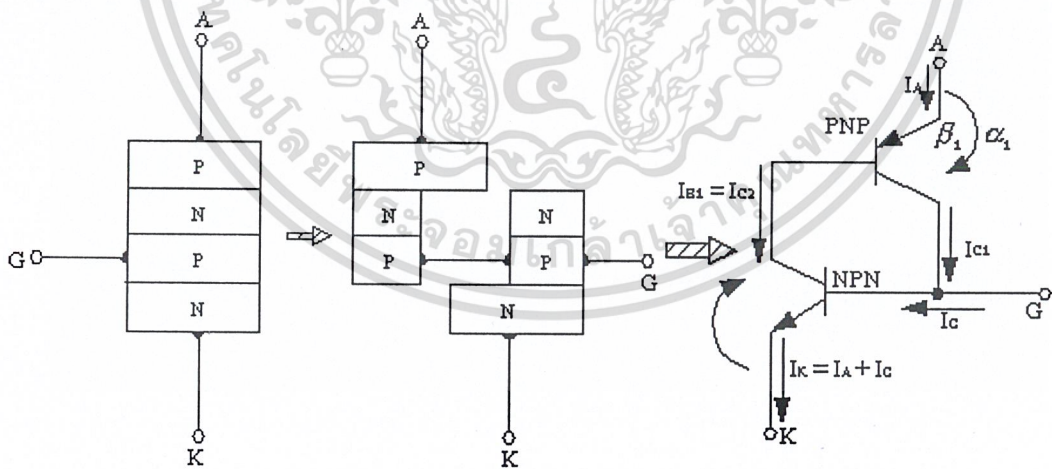
ได้ผ่านค่าแรงดันพิกซ์ข้าม  $V_{(BO)}$  แล้วเราสามารถแบ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงนี้ออกได้เป็นสองช่วง ช่วงแรกเป็นช่วงที่แรงดันแอนโอด  $V_A$  ลดค่าลงจากแรงดันพิกซ์ข้าม  $V_{(BO)}$  ไปสู่ค่า  $V_H$  และกระแส  $I_A$  เพิ่มค่าสูงขึ้นจากค่า  $I_{(BO)}$  (อยู่ตรงจุดเกินแรงดันพิกซ์ข้าม  $V_{(BO)}$ ) ไปสู่ค่า  $I_H$  (อยู่ตรงจุดเกิด  $V_H$ ) โดยกระแส  $I_H$  นี้เป็นค่ากระแสที่น้อยที่สุดที่สามารถรักษาให้เอสซีอาร์อยู่ในสถานะเปิดกระแสเรียก กระแสนี้ว่า “กระแสยึดหรือกระแสโฮลดิ้ง” (Holding Current) โดยช่วงนี้เป็นช่วงของการที่เอสซีอาร์กำลังเปลี่ยนสถานะจากสภาวะปิดกระแสเข้าสู่สภาวะเปิดกระแส ซึ่งเราจะเรียกช่วงนี้ว่า “อาณาบริเวณของความต้านทานค่าลบ” (Negative Resistance Region) ช่วงที่สองเป็นช่วงที่กระแส  $I_A$  มีค่าใหญ่กว่ากระแสยึด  $I_H$  เล็กน้อยไปจนถึงค่าที่ใหญ่มากมาย โดยแรงดันแอนโอดเพิ่มค่าสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยซึ่งจะเรียกช่วงที่สองนี้ว่า “อาณาบริเวณเปิดกระแสหรืออาณาบริเวณอิ่มตัว” (High Conduction Region หรือ Saturation Region) กระแส  $I_A$  ที่ไหลอยู่ในช่วงนี้มีค่าใหญ่มากจะสามารถทำอันตรายต่อเอสซีอาร์ให้ชำรุดเสียหายได้ เราจึงจำเป็นต้องใช้ความต้านทาน  $R_A$  ที่มีค่าใหญ่เข้าต่อเป็นอนุกรมในวงจรแอนโอดเพื่อจำกัดกระแส  $I_A$  ไม่ให้ใหญ่มากเกินไป ถ้าเราต้องการให้เอสซีอาร์ที่อยู่ในสถานะเปิดกระแสเปลี่ยนกลับไปสู่สถานะปิดกระแสให้เรลดกระแสแอนโอด  $I_A$  ให้มีค่าต่ำกว่ากระแสยึด  $I_H$  ในขณะที่  $I_G = 0$  ยังมีกระแสอีกชื่อหนึ่งคือ “กระแสสลักกลอน” (Latching Current)  $I_L$  ซึ่งนิยามว่าเป็น กระแสที่เล็กที่สุดที่สามารถรักษาให้เอสซีอาร์อยู่ในสภาวะเปิดกระแสโดยปลดเอาสัญญาณป้อนเข้าเกิดออก ซึ่งเมื่อเราได้ลดกระแส  $I_H$  ให้ต่ำกว่ากระแส  $I_L$  ได้แล้วเอสซีอาร์จะหยุดเปิดกระแส เราเรียกช่วงนี้ว่า “อาณาบริเวณเปิดกระแสหรืออาณาบริเวณกั้นกระแสทิสฟอว์เวิร์ด” การเปลี่ยนสภาวะนี้ต้องการเวลาชั่วครู่หนึ่ง ซึ่งเรียกว่า “เวลาปิดกระแส” (Turn-off Time)  $t_f$  การลดกระแสแอนโอดให้ต่ำกว่ากระแสสลักกลอน  $I_L$  แล้วเปลี่ยนกลับเพิ่มกระแสสูงขึ้นไปในใหม่ในระยะเวลาที่สั้นกว่าเวลาปิดกระแสของเอสซีอาร์ แล้วเอสซีอาร์จะกลับเข้าสู่สภาวะเปิดกระแสต่อไปตามเดิม กระแสเกต  $I_G$  มีอิทธิพลมากในการช่วยให้เอสซีอาร์จากสภาวะปิดกระแสเข้าสู่สภาวะเปิดกระแสได้ง่ายขึ้นโดยไม่ต้องใช้แรงดันแอนโอด  $V_A$  สูงมาก ซึ่งเมื่อเราจัดให้  $I_G$  มีค่าใหญ่มากขึ้นจะทำให้แรงดันพิกซ์ข้ามของเอสซีอาร์ต่ำลง

เมื่อจัดให้แรงดันแอนโอด  $V_A$  มีค่าลบหรือมีแรงดันกลับ (Reverse Voltage) กระแสแอนโอดจะไหลกลับทางและมีค่าน้อยมาก ซึ่งเรียกช่วงนี้ว่า “อาณาบริเวณกั้นกระแสไหลกลับ” (Reverse Blocking Region) ต่อเมื่อเราเพิ่มค่าแรงดันแอนโอดค่าลบไปจนถึงค่าที่เรียกว่า “แรงดันพิกซ์ทะลุกลับ” (Reverse Breakdown Voltage) กระแสแอนโอดจะไหลเพิ่มค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยทั่ว ๆ ไปผู้ผลิตเอสซีอาร์จะออกแบบให้เอสซีอาร์มีค่าแรงดันพิกซ์ทะลุกลับมีค่าเท่ากับหรือใหญ่กว่าค่าแรงดันพิกซ์ข้ามทิสฟอว์เวิร์ด ในขณะที่  $I_G = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถอธิบายกลไกการทำงานของเอสซีอาร์ได้ โดยอาศัยทฤษฎีของรอยต่อพีเอ็นหรือโดยอาศัยออสซิลโลแกรมแบบทรานซิสเตอร์ ซึ่งในที่นี้ขออธิบายด้วยวิธีหลังวิธีเดียวคือ เราคิดให้เอสซีอาร์มีโมเดลเป็นทรานซิสเตอร์ โดยการให้ชั้นพีเอ็นพีเอ็นของเอสซีอาร์ถูกแบ่งออกเป็น ตัวทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็นและพีเอ็นพี สองตัวเข้าต่อกันด้วยวิธีการป้อนกลับค่าบวกดังแสดงในรูปที่ 2.4

เมื่อป้อนแรงดันแอนโอดโนติสฟอว์เวิร์ดให้กับเอสซีอาร์ ซึ่งทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวก็จะมีแรงดันเข้าไปเลี้ยงอิมิตเตอร์ (Emitter) และคอลเล็กเตอร์ (Collector) ในทิสฟอว์เวิร์ดหากแต่ทรานซิสเตอร์ทั้งสองยังอยู่ในสถานะปิดกระแส ต่อมาเพิ่มแรงดันแอนโอดถึงค่าแรงดันพังข้าม  $V_{(BO)}$  คอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็นซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์ตัวล่าง จะมีเป็นศักย์ลบปรากฏอยู่จะเข้าไปกระตุ้นเบส (Base) ของทรานซิสเตอร์พีเอ็นพี ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์ตัวบนให้เปิดการนำกระแสคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ตัวบนจึงมีศักย์บวกปรากฏว่าสูงขึ้น และส่งเข้ากระตุ้นเบสของทรานซิสเตอร์ตัวบนให้ทำการเปิดการนำกระแสให้มากขึ้น ซึ่งผลอันนี้จะวนกลับมากกระตุ้นให้ทรานซิสเตอร์ของตัวล่างอีก กระบวนการนี้จะเป็นการป้อนกลับค่าบวก ซึ่งผลสุดท้ายจะทำให้ทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวนำกระแสอยู่ในสถานะอิ่มตัว ก็จะมีกระแสแอนโอดของเอสซีอาร์ไหลได้สูงมากและเอสซีอาร์เข้าอยู่ในสถานะเปิดกระแส



รูปที่ 2.4 โมเดลของเอสซีอาร์แบบวงจรทรานซิสเตอร์ต่อกันแบบป้อนกลับค่าบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าต้องการให้เอสซีอาร์เปลี่ยนจากสภาวะเปิดกระแสกลับเข้าสู่สภาวะปิดกระแส เราก็ลดขนาดของกระแสแอมโหนด I ลงให้ต่ำกว่ากระแสขีด I (ถ้า  $I > 0$ ) กระแสคอลเล็กเตอร์ตัวบนจะลดต่ำลงมากไม่พอที่จะกระตุ้นให้เบสของทรานซิสเตอร์ตัวล่างเปิดให้กระแสได้ต่อไป ฉะนั้นศักย์ที่คอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ตัวล่างก็จะลดน้อยลงมากและไม่พอที่จะไปกระตุ้นเบสของทรานซิสเตอร์ตัวบนให้เปิดนำกระแสต่อไปอีก ทรานซิสเตอร์ก็หยุดนำกระแสดังนั้นเอสซีอาร์จึงเปลี่ยนสภาวะกลับเข้าสู่สภาวะปิดกระแส

ถ้าเราเอาแรงดันแอมโหนดค่าลบเข้ากับเอสซีอาร์ ทรานซิสเตอร์ทั้งสองต่อจะอยู่ในสภาวะถูกไบแอสกลับทางจึงมีกระแสแอมโหนดไหลได้น้อยมาก เมื่อเราป้อนแรงดันค่าลบที่มีค่าสูงมากที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวเกิดพังทลายจึงจะมีกระแสแอมโหนดไหลได้สูงมากและเอสซีอาร์ก็ชำรุด

เพื่อความเข้าใจที่ดี เราอาจใช้คณิตศาสตร์เข้าช่วยอธิบาย โดยเราจะพิจารณาเห็นวงจรป้อนกลับที่อยู่ภายในของเอสซีอาร์มีค่ากระแสเกนท์ (Current Gain)

$$G = \beta_1 \times \beta_2 \quad (2.1)$$

เมื่อ G เป็นค่ากระแสเกนท์รวม

$\beta_1$  และ  $\beta_2$  เป็นค่ากระแสเกนท์ชนิดอิมิตเตอร์ร่วมของทรานซิสเตอร์พีเอ็นพีและเอ็นพีเอ็นตามลำดับ และมีนิยามว่าเป็นอัตราส่วนของกระแสคอลเล็กเตอร์ต่อกระแสเบส (ซึ่งมีหนังสือหลายเล่มนิยมเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $h_{FE}$  หรือ  $\alpha_E$ ) ถ้า  $I_{CB01}$  เป็นกระแสรั่วในคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์พีเอ็นพีเมื่อต่อวงจรแบบเบสร่วม เราจะเขียนได้ว่า

$$I_{C1} = \beta_1 (I_{C2} + I_{CB01}) + I_{CB01} \quad (2.2)$$

เมื่อ	$I_{C1}$	เป็นกระแสคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์พีเอ็นพีและ เป็นกระแสเบสของทรานซิสเตอร์
	$I_{C2}$	เป็นกระแสคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็น
ถ้า	$I_{CB02}$	เป็นกระแสรั่วในคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็น เมื่อต่อวงจรแบบเบสร่วมเราจะได้

$$I_{C2} = \beta_2 (I_{C1} + I_{CB02}) + I_{CB02} \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และกระแสแอมป์คือ

$$I_A = I_{C1} + I_{C2} \quad (2.4)$$

โดยการคำนวณเราสามารถหากระแสแอมป์  $I_A$  จากสมการที่ (2.2) ถึง (2.4) ได้เป็น

$$I_A = \frac{(1 + \beta_1)(1 + \beta_2)(I_{CB01} + I_{CB02})}{1 - G} \quad (2.5)$$

ในตอนเริ่มต้นถึงแม้มีแรงดันแอมป์ป้อนเข้าแบบฟอร์เวิร์ด แต่เอสซีอาร์ยังอยู่ในสภาวะปิดกระแส  $\beta_1$  และ  $\beta_2$  มีค่าต่ำทั้งคู่และ  $G$  มีค่าเข้าหาหนึ่ง (คือ  $\beta_1 \cdot \beta_2 \rightarrow 1$ ) ทำให้เราได้  $I_A$  ซึ่งในทางปฏิบัติจะทำได้หลายวิธีดังจะกล่าวในหัวข้อ 2.2.2 แต่ในที่นี้เราใช้วิธีการป้อนกระแสเข้าเกตและใช้แรงดันสูงป้อนเข้าที่แอมป์ป้อนก็ทำให้เอสซีอาร์เปลี่ยนสถานะเข้าสู่สภาวะเปิดกระแส

ถ้าเราลดกระแสแอมป์  $I_A$  ลงให้ต่ำกว่ากระแสขีด  $I_H$  จะทำให้เกน  $G$  มีค่าลดลง ทำให้เอสซีอาร์เปลี่ยนสถานะกลับสู่สภาวะปิดกระแส และถ้าเราป้อนแรงดันเข้าเอสซีอาร์กลับทางก็เป็น การลดค่าเกน  $G$  และค่าเกน  $G$  จะเพิ่มมากขึ้นอีกครั้งหนึ่งเมื่อแรงดันกลับทางนั้นมีค่าสูงเท่ากับค่าแรงดันถล่มหลายของทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัว

เราอาจวิเคราะห์วงจรทรานซิสเตอร์ที่เป็น โมเดลของเอสซีอาร์ได้ โดยอาศัยค่ากระแส เกน  $\alpha$  หรือ  $\alpha_B$  ของทรานซิสเตอร์เมื่อต่อแบบเบสร่วม ซึ่งมีนิยามว่าเป็นอัตราส่วนของกระแสคอลเล็กเตอร์ต่อกระแสเอมิเตอร์ โดยมีความสัมพันธ์กับกระแสเกนของทรานซิสเตอร์เมื่อต่อแบบอิมิตเตอร์ร่วมดังนี้

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (2.6)$$

ซึ่งเราอาจเขียนสมการเกนของทรานซิสเตอร์ได้ดังนี้

$$I_C = -\beta I_E + I_{CB0} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $I_C$  และ  $I_E$  เป็นกระแสคอลเล็กเตอร์และกระแสเอมิเตอร์ตามลำดับ  
 $I_{CB0}$  เป็นกระแสรั่วในคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์เมื่อต่อวงจร  
 แบบเบสร่วม

ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการของทรานซิสเตอร์แต่ละตัวได้ดังนี้

$$\text{พีเอ็นพี } I_A - I_{C2} = \alpha_1 I_A + I_{CB01} \quad (2.8)$$

$$\text{เอ็นพีเอ็น } I_{C2} = \alpha_2 (I_A + I_C) + I_{CB02} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $\alpha_1$  และ  $\alpha_2$  เป็นค่ากระแสค่ากระแสแอมป์ของทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็น  
 และพีเอ็นพีตามลำดับ

$I_G$  เป็นกระแสเกิดของเอสซีอาร์

โดยการนำสมการที่ (2.9) เข้าแทนค่าในสมการที่ (2.8) เพื่อขจัด  $I_{C2}$  แล้วคำนวณหากระแส  
 แอโนด  $I_A$  จะได้

$$I_A = \frac{I_{CB01} + I_{CB02} + I_G}{1 - (\beta_1 + \beta_2)} \quad (2.10)$$

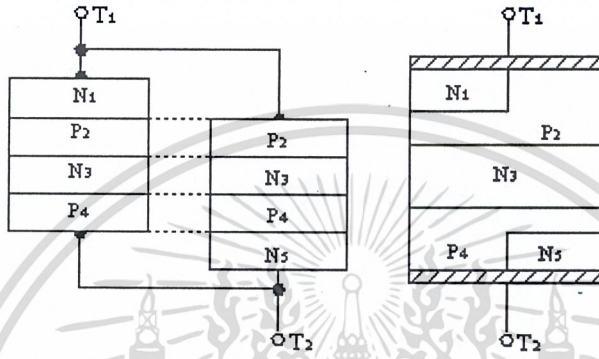
ค่า  $(\alpha_1 + \alpha_2)$  ในสมการที่ (2.10) นี้มีพฤติกรรมคล้ายค่า  $G$  ในสมการที่ (2.5) โดยที่  
 $(\alpha_1 + \alpha_2) \rightarrow 0, I_A \rightarrow I_{CL} = I_{CB01} + I_{CB02}$  เมื่อ  $I_{CL}$  เป็นกระแสรั่วรวมทั้งหมด ซึ่งในกรณีนี้จะสมนัย  
 กับเอสซีอาร์อยู่ในสภาวะปิดกระแสก็ต่อเมื่อ  $(\alpha_1 + \alpha_2) \rightarrow 1, I_A \rightarrow \infty$  เอสซีอาร์ก็จะอยู่ในสภาวะ  
 ป้อนกลับค่าบวกซึ่งทำให้เอสซีอาร์อยู่ในสถานะเปิดกระแส

### 2.2.3 หลักการทำงานและลักษณะสมบัติของไทรแอก

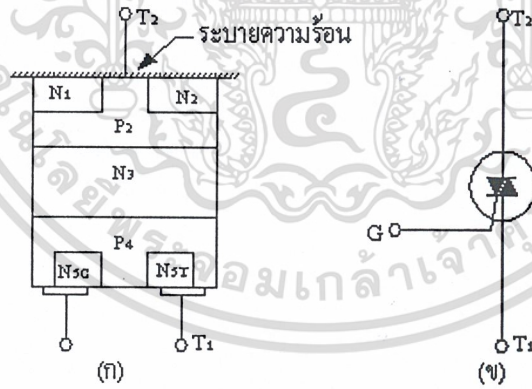
ไทรแอกเป็นไทรสเตอร์อีกชนิดหนึ่งที่มีสามขั้วคล้ายเอสซีอาร์ แต่สามารถให้กระแสไหล  
 ผ่านได้ทั้งสองทิศทาง ซึ่งแตกต่างกับเอสซีอาร์ที่สามารถให้กระแสไหลผ่านได้ทิศฟอว์เวิร์ดได้  
 ทิศทางเดียว ดังนั้นเราจึงไม่สามารถเรียกขั้วสองขั้วของไทรแอก (ที่มีรูปร่างใหญ่ที่ใช้เป็นขั้วสำหรับ  
 กระแสไหลเข้าออก) ว่าขั้วใดเป็นแอโนดหรือว่าขั้วใดเป็นแคโทดแต่เรียกเป็นขั้ว  $T_1$  และ  $T_2$  แทน  
 และขั้วที่สามมีรูปร่างเล็กนั้นเป็นขั้วเกต (G) และไทรแอกมีหลักการทำงานเหมือนกับเอสซีอาร์สอง  
 ตัวต่อขนานกันแต่กลับขั้วกัน ซึ่งคล้ายกับเอาสิ่งประดิษฐ์สถานะของแข็งพีเอ็นสองชิ้นมาต่อขนาน  
 กันแต่กลับขั้วกันดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ก) ซึ่งจะเห็นว่ามิชชันของสารกึ่งตัวนำแตกต่างกันห้าชั้น คือ

$N_1, P_2, N_3, P_4, N_5$  เมื่อนำเข้ารวมกันเป็นโครงสร้างเดียวกันก็จะเขียนได้เป็นรูปที่ 2.5 (ข) เมื่อต่อขั้ว  
 ไม่มีการเชื่อมต่อขั้วใดขั้วหนึ่ง หรือการเชื่อมต่อขั้วใดขั้วหนึ่งไม่ถูกต้องให้เอาไปใช้ประโยชน์ไม่ได้

เกต และตัดแปลงโครงสร้างภายในให้เป็นแบบลัดวงจรอิมิตเตอร์ (Shorted Emitter Structure) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ก) เราจะได้ไทรแอก ซึ่งมีสัญลักษณ์ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ข) โดยทั่ว ๆ ไปเราใช้ขั้ว  $T_1$  ที่แสดงในรูปที่ 2.6 นี้เป็นขั้วอ้างอิง เช่นเมื่อกล่าวถึงแรงดันที่ขั้ว  $T_2$  เป็นบวก จะมีความหมายว่าขั้ว  $T_2$  มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าขั้ว  $T_1$  เป็นต้น



รูปที่ 2.5 (ก) การต่อสิ่งประดิษฐ์พีเอ็นพีเอ็นสองชั้นอย่างขนานแต่กลับขั้วกัน  
(ข) โครงสร้างรวมของ (ก)



รูปที่ 2.6 (ก) โครงสร้างของไทรแอก  
(ข) สัญลักษณ์ของไทรแอก

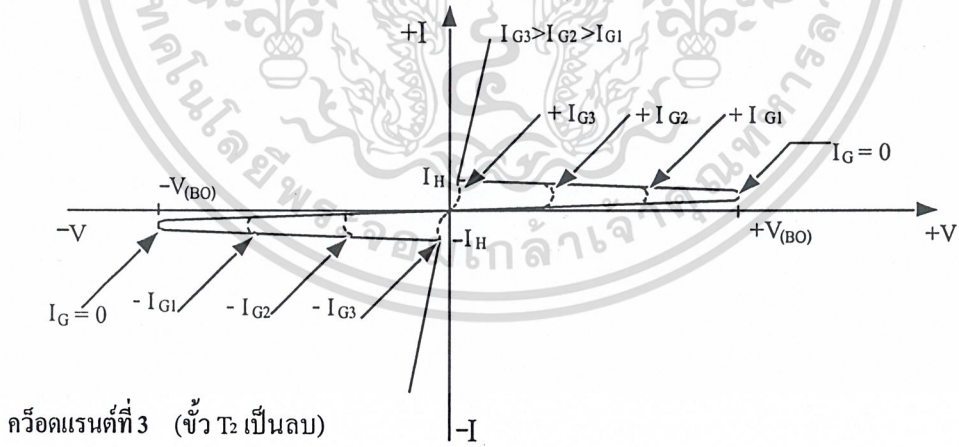
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การที่มีโครงสร้างแบบลวดจอร์มิติเตอร์ก็คล้ายกับใส่ความต้านทานขนานเข้าระหว่างเกตกับแคโทด เพื่อแบ่งกระแสรั่วที่เกิดขึ้นจากความร้อนและเนื่องจากประจุเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากการมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันคร่อมรอยต่อระหว่างเกตกับแคโทด วิธีการนี้อาจทำให้การป้อนกลับค่าบวกมีผลน้อยลงแต่กลับทำให้ไทรแอกทำงานได้ดีที่อุณหภูมิสูงและเมื่อมีแรงดันเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

ไทรแอกมีข้อดีที่มีราคาถูกกว่าเอสซีอาร์ ไทรแอกตัวเดียวสามารถใช้แทนเอสซีอาร์สองตัวที่ต่อขนานกันแต่ต่อขั้วกลับกันและแรงดันกลับทางที่สูงมากซึ่งทำให้เอสซีอาร์ชำรุดนั้นเมื่อนำมาป้อนเข้าไทรแอกแล้วแรงดันนี้เพียงแต่ทำให้ไทรแอกนำกระแสได้เท่านั้น ข้อเสียของไทรแอกคือไม่สามารถที่จะใช้กับวงจรที่มีความถี่สูงได้ ซึ่งจะได้อธิบายเหตุผลให้ทราบเมื่ออธิบายถึงการปิดให้ไทรแอกหยุดนำกระแส

การนำกระแสของไทรแอกจะเป็นดั่งเส้นโค้งลักษณะสมบัติ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งจะคล้ายกับเส้นโค้งลักษณะสมบัติของเอสซีอาร์สำหรับสถานะเปิดนำกระแสสองเส้นมาต่อกลับหัวกัน

เมื่อ  $I_G = 0$  ไทรแอกจะเปลี่ยนแปลงสถานะไปสู่สถานะเปิดกระแสได้เองถ้าแรงดันที่ขั้ว  $T_2$  มีค่าบวกและสูงถึงแรงดันพังข้าม  $V_{(BO)}$  (ดูควีอเรนต์ที่ 1 ของรูปที่ 2.7) หรือถ้าแรงดันที่ขั้ว  $T_2$  เป็นลบและสูงถึงแรงดันพังข้าม  $V_{(BO)}$  (ดูควีอเรนต์ที่ 3 ของรูปที่ 2.7)



รูปที่ 2.7 เส้นโค้งลักษณะสมบัติของไทรแอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไทรแอกที่กำลังอยู่ในสภาวะเปิดกระแสอาจเปลี่ยนกลับเข้าสู่สภาวะปิดกระแสได้ ถ้าลดกระแสไหลผ่านไทรแอก I ลงให้เหลือน้อยกว่าค่ากระแสขีด  $I_H$  เป็นเวลานานมากกว่าเวลาปิดกระแส

ไทรแอกซึ่งอยู่ในสภาวะปิดกระแสอาจเปลี่ยนสภาวะเข้าสู่สภาวะเปิดกระแส โดยใช้แรงดันที่ขั้ว  $T_2$  น้อยกว่าแรงดันพังข้าม  $V_{(BO)}$  พร้อมกับใช้กระแสเกตค่าต่าง ๆ ซึ่งสามารถทำได้ 4 วิธี คือ

1. แบบ I+ (ควีโอดแรนต์ที่ 1) เมื่อแรงดันที่ขั้ว  $T_2$  เป็นบวก และแรงดันที่ขั้วเกตเป็นบวก
2. แบบ I- เมื่อแรงดันขั้ว  $T_2$  เป็นบวก และแรงดันขั้วเกตเป็นลบ
3. แบบ III+ เมื่อแรงดันขั้ว  $T_2$  เป็นลบ และแรงดันขั้วเกตเป็นบวก
4. แบบ III- (ควีโอดแรนต์ที่ 3) เมื่อแรงดันที่ขั้ว  $T_2$  เป็นลบ และแรงดันขั้วเกตเป็นลบ

ไทรแอกในท้องตลาดปัจจุบันสามารถทำงานได้ว่องไวตามวิธีแบบ I+ และแบบ III- มากที่สุดแบบ I- จะให้ความว่องไวรองลงมา และแบบ III+ มีความว่องไวต่ำมากจึงไม่นิยมใช้แบบ I- และแบบ III+

เราสามารถอธิบายหลักการทำงานของไทรแอก ได้ดังนี้

เมื่อแรงดันที่ขั้ว  $T_2$  เป็นบวกรอยต่อ  $N_3P_4$  (คือรอยต่อระหว่างสาร  $N_3$  กับ  $P_4$ ) จะถูกไบแอสกลับ ถ้าสวิตซ์ให้แรงดันบวกเข้าป้อนขั้วเกตซึ่งทำให้กระแสบวกไหลเข้าเกตผ่านไปสูขั้ว  $T_1$  เป็นผลให้ไดโอด  $N_4N_{ST}$  ถูกฟอร์เวิร์ดไบแอสและมีอิเล็กตรอนพุ่งจากสาร  $N_{ST}$  เข้าสู่สาร  $P_4$  แล้วแพร่กระจายไปถึงรอยต่อ  $N_3P_4$  ได้ ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกสนามไฟฟ้าที่รอยต่อนี้ผลักดันให้เข้าสู่สาร  $N_3$  อีกต่อหนึ่ง วิธีการเช่นนี้เป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการป้อนกลับค่าบวก และมีผลขั้นสุดท้ายทำให้รอยต่อ  $P_2N_3$ ,  $N_3P_4$  และ  $N_4N_{ST}$  ถูกฟอร์เวิร์ดไบแอสทั้งหมด จึงทำให้ไทรแอกเปิดกระแสให้ไหลได้ ซึ่งกรณีนี้เป็นการเปลี่ยนสถานะไทรแอกให้เข้าสู่สภาวะเปิดและกระแส แบบ I+

เมื่อแรงดันขั้ว  $T_2$  เป็นค่าบวก การป้อนขั้วเกตด้วยศักย์ลบทำให้กระแสเกตค่าลบไหลเข้าไทรแอกเป็นผลให้ไดโอด  $P_4N_{SG}$  ถูกฟอร์เวิร์ดไบแอส และจะมีอิเล็กตรอนพุ่งจากสาร  $N_{SG}$  เข้าสู่สาร  $P_4$  และแพร่กระจายไปถึงรอยต่อ  $N_3P_4$  ได้ ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกสนามไฟฟ้าที่รอยต่อนี้ผลักดันให้เข้าสู่สาร  $N_3P_4$  อีกต่อหนึ่ง วิธีการเช่นนี้เป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการป้อนกลับค่าบวกซึ่งมีผลขั้นสุดท้ายทำให้รอยต่อ  $P_2N_3$ ,  $N_3P_4$  และ  $P_4N_{SG}$  ถูกฟอร์เวิร์ดไบแอสทั้งหมดศักย์ไฟฟ้าของสาร  $P_4$  ตรงบริเวณใกล้ ๆ สาร  $N_{SG}$  มีค่าสูงขึ้นเข้าหาค่าแรงดันที่ขั้ว  $T_2$  ซึ่งเป็นผลให้รอยต่อ  $N_4N_{ST}$  ที่อยู่ใกล้บริเวณ  $N_{SG}$  เริ่มถูกฟอร์เวิร์ดไบแอสขึ้นบ้าง ดังนั้นจึงเริ่มมีอิเล็กตรอนพุ่งออกจากสาร  $N_{ST}$  ไปเข้าสู่  $P_4$  แล้วเลยไปสู่  $N_3$  อีกต่อหนึ่งซึ่งเป็นในขั้นสุดท้ายทำให้รอยต่อ  $N_4N_{ST}$  5 ถูกฟอร์เวิร์ดไบแอสเต็มที่และไทรแอกก็เข้าสู่สภาวะเปิดกระแส ซึ่งในกรณีนี้เป็นการเปลี่ยนสถานะไทรแอกให้เข้าสู่สภาวะเปิดกระแสแบบ I-

เมื่อแรงดันขั้ว  $T_2$  เป็นค่าลบ การป้อนศักย์บวกเข้าขั้วเกตทำให้กระแสเกตค่าบวกไหลเข้า ไทรแอกเป็นผลให้รอยต่อ  $P_4N_{ST}$  ถูกฟอร์เวิร์ดไบแอส ซึ่งทำให้มีอิเล็กตรอนพุ่งจากสาร  $N_{ST}$  เข้าสู่สาร  $P_4$  แล้วแพร่กระจายเข้าไปถึงรอยต่อ  $N_3P_4$  และจะถูกผลักคืนให้พุ่งเข้าไปในสาร  $N_3$  อีกต่อหนึ่ง วิธีการนี้เริ่มต้นของกระบวนการการป้อนค่าบวกซึ่งมีผลขั้นสุดท้ายทำให้รอยต่อ  $N_1P_2$ ,  $P_4N_3$  และ  $N_3P_4$  ถูกฟอร์เวิร์ดไบแอสทั้งหมด ดังนั้น ไทรแอกจึงเข้าสู่สภาวะเปิดกระแส ซึ่งในกรณีนี้จะเป็นการเปลี่ยนสถานะ ไทรแอกเข้าสู่สภาวะเปิดกระแสแบบ III+ เมื่อแรงดันขั้ว  $T_2$  เป็นค่าลบรอยต่อ  $N_1P_2$  และรอยต่อ  $N_3P_4$  จะถูกฟอร์เวิร์ดไบแอสแต่รอยต่อ  $P_2N_3$  จะถูกไบแอสกลับการป้อนขั้วเกตด้วยศักย์ลบทำให้กระแสเกตค่าลบไหลเข้า ไทรแอก ซึ่งเป็นผลให้รอยต่อ  $P_4N_{5G}$  ถูกฟอร์เวิร์ดไบแอส ทำให้มีอิเล็กตรอนพุ่งออกจากสาร  $N_{5G}$  เข้าสู่สาร  $P_4$  แล้วแพร่กระจายเข้าไปถึงรอยต่อ  $N_3P_4$  ซึ่งต่อจากนี้จะถูกผลักให้พุ่งเข้าสู่สาร  $N_3$  อีกต่อหนึ่ง วิธีการนี้เป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการป้อนกลับค่าบวก ซึ่งมีผลขั้นสุดท้ายทำให้รอยต่อ  $N_1P_2$ ,  $P_2N_3$  และ  $N_3P_4$  ถูกฟอร์เวิร์ดไบแอสทั้งหมดแล้ว ไทรแอกก็เข้าสู่สภาวะเปิดกระแส ซึ่งกรณีนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงสถานะ ไทรแอกเข้าสู่สภาวะเปิดกระแสแบบ III-

## 2.3 การเปิดกระแสของไทรสเตอร์

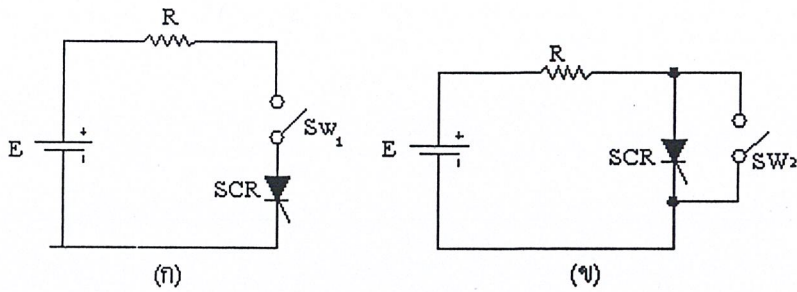
การเปิดกระแสของไทรสเตอร์มีความหมายถึง การหยุดนำกระแสในทิศฟอร์เวิร์ดทั้งหมดของไทรสเตอร์ ทำได้โดยที่ป้อนแรงดันกลับคืนเข้ากับแอนโอดใหม่และไม่ป้อนสัญญาณเกตอีก แล้วไม่มีการเปิดกระแสขึ้นอีก ในการเปิดกระแสของไทรสเตอร์เป็นกระบวนการที่ยุ้งยากซึ่งจะได้อธิบายข้างล่างนี้ โดยเราแบ่งเป็นวิธีการใหญ่ ๆ 2 วิธี

### 2.3.1 การทำให้หยุดกระแสไหลตามธรรมชาติ

ถ้าต้องการเปิดให้ไทรสเตอร์หยุดนำกระแส เราสามารถทำได้โดยการลดกระแสแอนโอดลงให้ต่ำกว่าค่ากระแสยึดของไทรสเตอร์ (อัตรากระแสแอนโอดปกติ (Ratcd Anode Current) มีค่ากว่ากระแสยึดประมาณ 1000 เท่า) ซึ่งเราอาจทำได้ 2 วิธี คือ

1. ยกสวิตช์  $SW_1$  ที่ต่ออนุกรมกับไทรสเตอร์ให้เปิดออก ดังแสดงในรูป 2.8 (ก) หรือ
2. สับสวิตช์  $SW_2$  ที่ต่อขนานกับไทรสเตอร์ให้ปิดลงเพื่อลัดวงจรให้กระแสไม่ไหลเข้าไปในไทรสเตอร์ และไทรสเตอร์จะทำการปิดกระแสดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 (ก) การทำให้กระแสหยุดไหลด้วยการยกสวิตช์ที่ต่ออนุกรม  
(ข) การทำให้กระแสหยุดไหลด้วยการสับสวิตช์ที่ต่อขนาน

### 2.3.2 การทำให้กระแสหยุดไหลด้วยแรงดันกลับ

โดยการป้อนแรงดันกลับเข้าระหว่างแอโนดและแคโทด (คือป้อนแรงดันให้แคโทดมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับแอโนด) ของไทรสเตอร์จะทำให้รอยต่อถูกไบแอสกลับกับของกรณีที่ไทรสเตอร์เปิดกระแสโดยรอยต่อ  $J_1$  กับ  $J_3$  (รูปที่ 2.2) จะถูกไบแอสกลับ แต่รอยต่อ  $J_2$  จะถูกฟอร์เวิร์ดไบแอสพาหะต่าง ๆ จะไหลสวนทางกับไทรสเตอร์เปิดกระแสทำให้กระแสไหลกลับจากแคโทดสู่แอโนด กระแสนี้จะไหลกระชอกและถูกจำกัดค่า  $di/dt$  ด้วยค่าความต้านทานของวงจรภายนอกซึ่งจะไหลอยู่ชั่วระยะเวลาหนึ่งจนกระทั่งส่วนใหญ่ของพาหะที่รอยต่อ  $J_1$  และ  $J_3$  ได้เคลื่อนที่ออกไปหมดเป็นผลให้รอยต่อ  $J_1$  และ  $J_3$  อยู่ในสภาวะกั้นกระแส ทำให้กระแสที่รอยต่อทั้งสองนี้ลดค่าลงเป็นศูนย์ ขณะเดียวกันรอยต่อ  $J_2$  ถูกฟอร์เวิร์ดไบแอสและมีประจุจำนวนมากตกค้างอยู่ที่รอยต่อนี้พาหะที่เป็นอิเล็กตรอนและโฮลจะกลับเข้ารวมกัน เป็นผลให้การป้อนกลับค่าบวกลดค่าลงต่ำเป็นศูนย์ในเวลาชั่วครู่หนึ่งแล้วไทรสเตอร์ก็เข้าสู่สภาวะปิดกระแส ถ้าอุณหภูมิรอยต่อมีค่าสูงหรือสาเหตุอื่นดังจะกล่าวต่อไป การกลับเข้ารวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลจะกินเวลานานออกไป ทำให้ไทรสเตอร์ใช้เวลาปิดกระแสเนิ่นนานออกไปด้วย

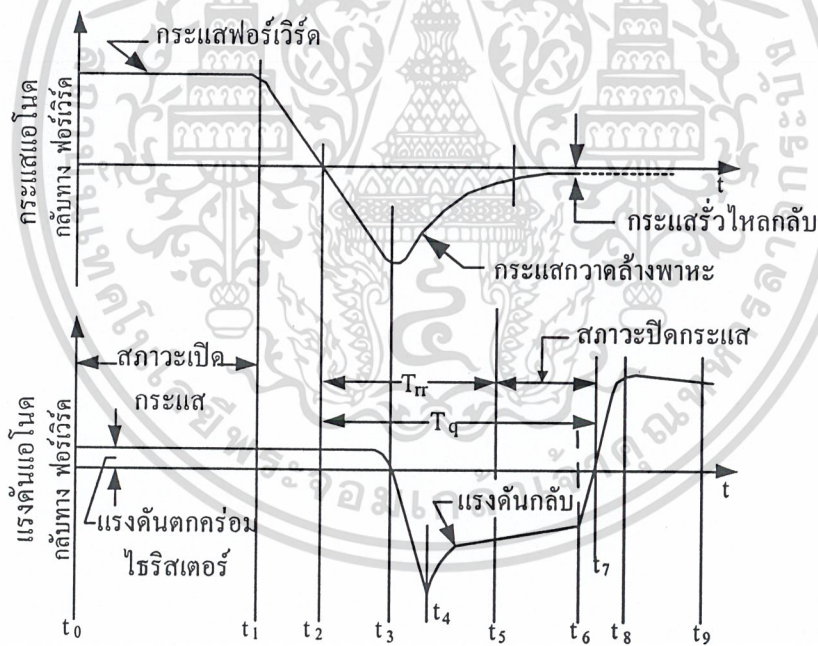
วิธีการนี้แบ่งย่อยออกเป็น 2 วิธี คือ

1. การที่จะทำให้กระแสหยุดไหลด้วยเฟสหรือแรงดันของสายไฟเอซี (Phase Commutation หรือ AC Line Commutation) โดยอาศัยแรงดันค่าลบทุก ๆ ครึ่งลบของวัฏจักรของแรงดันเอซีเลี้ยงวงจรทำหน้าที่ไบแอสกลับให้กับไทรสเตอร์ แล้วไทรสเตอร์ก็จะเข้าสู่สภาวะปิดกระแส วิธีนี้เป็นที่นิยมในทางปฏิบัติมากสำหรับกรณีที่ไฟเลี้ยงวงจรเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การทำให้กระแสหยุดไหลด้วยวิธีบังคับ (Forced Commutation) โดยอาศัยการเก็บประจุจำนวนมากไว้บนตัวเก็บประจุ เมื่อถึงเวลาที่เรต้องการจะปิดไทรสเตอร์ให้หยุดนำกระแส เราใช้วิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์เข้าบังคับให้ตัวเก็บประจุถ่ายเทประจุผ่านไทรสเตอร์ในทิศไบแอสกลับอย่างรวดเร็วเป็นกระแสอิมพัลส์ (Impulse) เมื่อกระแสอิมพัลส์นี้มีค่าใหญ่กว่ากระแสแอนโตนในทิศทางฟอร์เวิร์ดแล้วไทรสเตอร์จะปิดกระแสแสดง วิธีนี้ให้เวลาปิดกระแสสั้นมาก เป็นวิธีที่นิยมใช้กับกรณีไฟฟ้าเลี้ยงวงจรเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ดูหัวข้อที่ 2.7

ในเมื่อไทรสเตอร์อยู่ในสภาวะเปิดกระแสแล้วทำให้ปิดกระแสด้วยวิธีดังกล่าวข้างต้น (โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้วิธีปิดกระแสด้วยแรงดันกลับ) เราจะได้รูปคลื่นแรงดัน, รูปคลื่นกระแสแสดงในรูปที่ 2.9 เราจะเห็นว่ามีการไหลกลับค่าใหญ่ชั่วคราวแล้วค่อย ๆ ลดค่าเล็กลงเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยมีพฤติกรรมเหมือนกระแสกวาดล้างพาหะในไดโอด ซึ่งทำให้เราสามารถนิยามค่าที่เกี่ยวข้องกับเวลาปิดกระแส ดังนี้



รูปที่ 2.9 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสของไทรสเตอร์ในช่วงเวลาปิดกระแส

เวลาปิดกระแส  $t_q$  เป็นช่วงเวลาที่สั้นที่สุดอยู่ระหว่างเวลาที่กระแสทิศฟอว์เวิร์ดมีค่าเป็นศูนย์ ( $t_2$ ) ถึงเวลาที่ไทรสเตอร์สามารถกั้นแรงดันทิศฟอว์เวิร์ดที่ป้อนเข้าไปใหม่ไม่ให้ไทรสเตอร์กลับเข้าสู่สภาวะเปิดกระแสอีก ( $t_4$ ) ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ เวลาปิดกระแส  $t_c$  นี้มีค่าไม่แน่นอนอาจมีค่าประมาณ 10 ไมโครวินาที สำหรับทรานซิสเตอร์ที่มีอัตราแรงดันต่ำ และอัตรากระแสต่ำอาจจะมีค่าใหญ่กว่า 20, 35 หรือ 50 ไมโครวินาที สำหรับทรานซิสเตอร์ที่มีอัตราแรงดันสูงและมีเวลาปิดกระแสอยู่ระหว่าง 100 ถึง 200 ไมโครวินาที

## 2.4 วงจรจุดชนวน

เราต้องออกแบบวงจรจุดชนวนให้ได้ตามความต้องการต่อไปนี้

1. ต้องสามารถจุดชนวนได้ ถึงแม้ว่าจะเปลี่ยนทรานซิสเตอร์เป็นตัวอื่นแต่ยังคงเป็นเบอร์เดียวกันอยู่

2. ต้องมีแรงดันและกำลังไม่สูงเกินกว่าจะทนทานได้

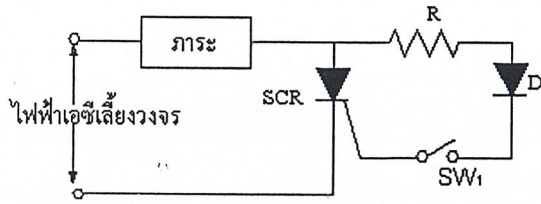
3. ต้องแน่ใจได้ว่า การจุดชนวนจะต้องไม่เกิดจากสัญญาณรบกวนอื่น ๆ

โดยความต้องการดังที่กล่าวข้างบนนี้ เราจึงออกแบบวงจรจุดชนวนที่มีวงจรสมมูลดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ก) ซึ่งมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีแรงดันเปิดวงจร  $E_{oc}$  มีความต้านทานภายใน  $R_G$  และมีเส้นโค้งโดยเราเขียนเส้นภาระ (Load Line) จากจุด  $E_{oc}$  ผ่านบริเวณที่นิยมใช้ขั้ววงจรมายังจุดของกระแสลัดวงจรของวงจรชนวน  $I_{sc}$  ได้นำมาเขียนแสดงใหม่ในรูปที่ 2.10 (ข) โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเปิดวงจร  $E_{oc}$  กับกระแสลัดวงจร  $I_{sc}$  ดังนี้

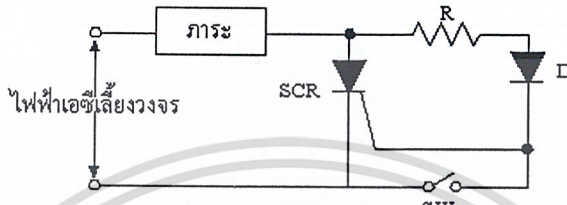
$$I_{sc} = \frac{E_{oc}}{R_G} \quad (2.11)$$

สำหรับทรานซิสเตอร์ขนาด 100 แอมแปร์ทั่ว ๆ ไปควรมีวงจรที่สามารถให้แรงดันเปิดวงจร 6 โวลต์และมีความต้านทานภายใน 12 โอห์ม

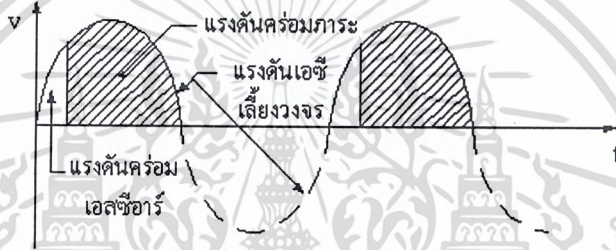
ถ้าแหล่งจ่ายไฟฟ้าของวงจรจุดชนวนมีแรงดันเป็นฟังก์ชันกับเวลา คือ  $E_{oc} = e_s(t)$  แล้วเส้นภาระที่เขียนได้เป็นเส้นที่เคลื่อนที่กวาดไปตามเส้นกราฟ โดยเริ่มต้นจากจุดกำเนิดไปสู่ตำแหน่งสูงสุด คือ เส้นภาระที่แรงดันเอาต์พุตสูงสุดของวงจรจุดชนวน



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.10 (ก) วงจรสมมูลของวงจรจุดชนวนของเกด

(ข) การเขียนเส้นฟิวส์

การเลือกใช้เส้น ใ้คงกำลังของเกดจะขึ้นอยู่กับขีดจำกัดค่าเฉลี่ยหรือขีดจำกัดค่าสูงสุดที่สามารถยอมให้ได้ของค่ากำลังสูญเสียกระจายของของเกด ดังตัวอย่างเช่น ถ้าเราใช้สัญญาณติชี่เข้าจุดชนวน เราต้องเลือกใช้เส้น ใ้คงที่ไม่เกินค่าเฉลี่ยสูงสุดที่สามารถยอมให้ได้ของกำลังสูญเสียกระจายของเกด (สำหรับเอสซีอาร์ เบอร์ C35 ค่านี้เท่ากับ 0.5 วัตต์) ถ้าเราใช้พัลส์เข้าจุดชนวนเราต้องเลือกใช้เส้น ใ้คงกำลังสูญเสียกระจายของเกด (สำหรับเอสซีอาร์เบอร์ C35 ค่านี้เท่ากับ 5 วัตต์) สำหรับสัญญาณเกดที่มีรูปคลื่นอยู่กลาง ๆ ระหว่างสัญญาณติชี่กับพัลส์ เราต้องใช้เส้น ใ้คงขีดจํานวนของกำลังสูญเสียกระจายที่สามารถยอมให้ได้ของเกดที่คำนวณได้จากวัฏจักรหน้าที่ (Duty Cycle) ของสัญญาณจุดชนวนตามสูตร

$$(\text{กำลังขั้วสูงสุดของเกด}) \times (\text{ความกว้างของพัลส์}) \times (\text{อัตราการเดินของพัลส์})$$

$$\times (\text{กำลังเฉลี่ยที่ยอมให้ได้ของเกด})$$

$$(2.12)$$

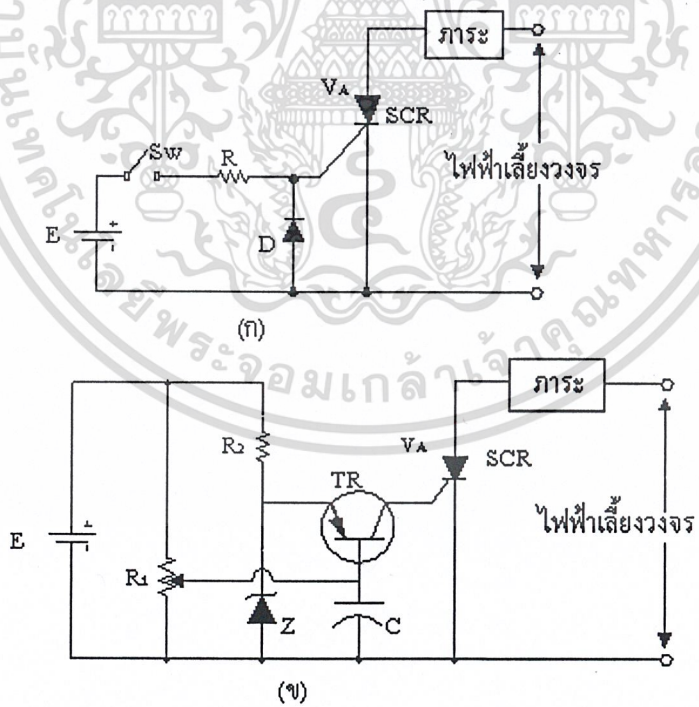
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์หรือการขงนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปกติจะมีวงจรขนานหลายแบบด้วยกัน แต่ในที่นี้จะได้อธิบายถึงวงจรที่ง่ายและเป็นหลักพื้นฐาน วงจรพื้นฐานที่จะอธิบายในที่นี้คือวงจรจุดชนวนด้วยไฟฟ้าดีซี วงจรจุดชนวนด้วยเฟสของไฟฟ้าเอซี (AC Phase Signal) และวงจรจุดชนวนด้วยพัลส์

2.4.1 วงจรจุดชนวนด้วยไฟฟ้าดีซี

โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าดีซีต่อเข้าเกตของแอสซีอาร์ ผ่านสวิตช์ Sw, และความต้านทาน R ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ก) ไดโอด D ทำหน้าที่ป้องกันแรงดันกลับไม่ให้ป้อนเข้าไประหว่างขั้วแคโทดกับเกตของไทรสเตอร์ในช่วงเวลาครึ่งวัฏจักรกลับมาถึงสวิตช์ Sw ที่เห็นเป็นสวิตช์ก้านเดียว (Single-pole) นั้นความจริงอาจเป็นหลอดนีออนไดแอค (Diac) ซีเนอร์ไดโอด (Zener Diode) ทรานซิสเตอร์หรือเอสซีอาร์ที่มีขนาดเล็ก ฯลฯ รูปที่ 2.11 (ข) แสดงการใช้ทรานซิสเตอร์ TR แทนสวิตช์ Sw นี้ เอสซีอาร์ในวงจรของรูปที่ 2.11 ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ปิดเปิดวงจรขนาดใหญ่

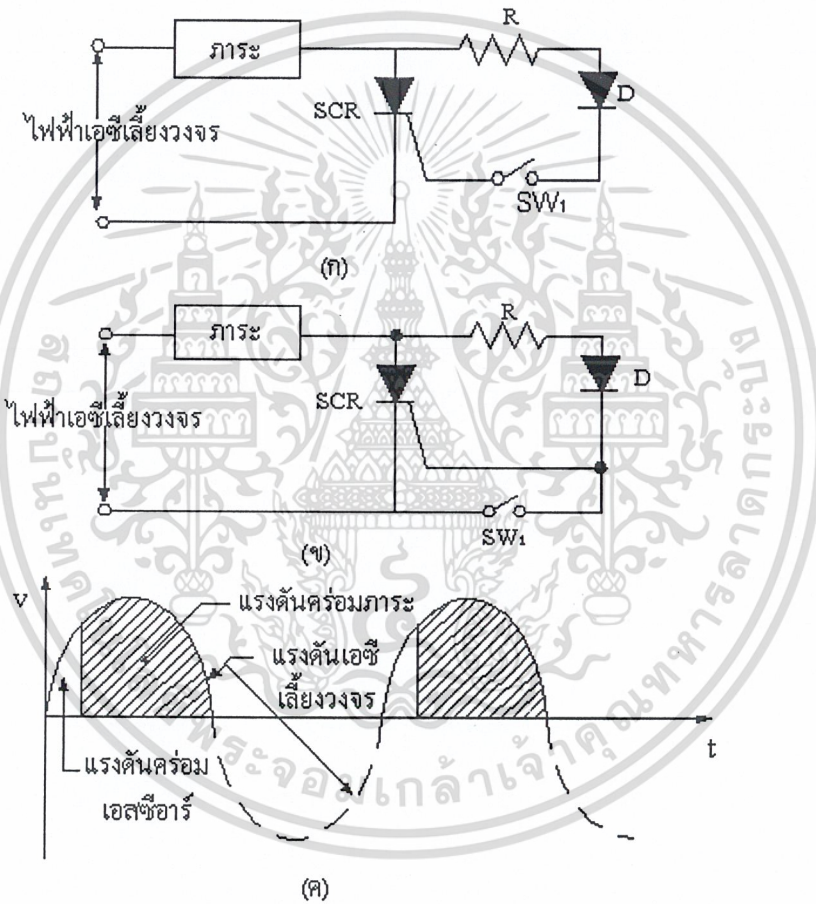
การที่มีกระแสไหลต่อเนื่องอยู่ตลอดเวลาดังในรูปที่ 2.11 ทำให้เกิดมีกำลังสูญเสียกระจายในเอสซีอาร์จึงไม่เป็นที่นิยมใช้ในปฏิบัติ ยกเว้นแต่ว่าในวงจรที่ใช้งานนั้น เอสซีอาร์ได้ปิดกระแสไปก่อนที่กำลังสูญเสียกระจายจะไปทำให้เอสซีอาร์น้อยเกินกว่าขีดที่ยอมให้ได้



รูปที่ 2.11 วงจรจุดชนวนด้วยไฟฟ้าดีซีอย่างง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.12 แสดงวงจรจุดชนวนที่ตัดแปลงเอาไฟฟ้าเอสซีจากไฟฟ้าเลี้ยงวงจรมาเรียงกระแสให้เป็นไฟฟ้าดีซีด้วยไดโอด D และใช้ความต้านทาน R จำกัดค่าช่วงสูงสุดของกระแสเกตไม่ให้มาก วิธีการทำให้เอสซีอาร์เปิดกระแสคือ ในรูปที่ 2.12 (ก) ให้ปิดสวิตช์  $SW_1$  ลง สำหรับรูปที่ 2.12 (ข) ให้เปิดสวิตช์  $SW_2$  ขึ้นแล้วเอสซีอาร์จะปิดกระแสเมื่อครั้งคลื่นลบมาถึง โดยไดโอด D ทำหน้าที่กั้นแรงดันกลับที่จะป้อนเข้าเกต เอสซีอาร์จะเปิดและปิดกระแสอีกในวัฏจักรต่อไปเมื่อมีการกระทำซ้ำเดิม



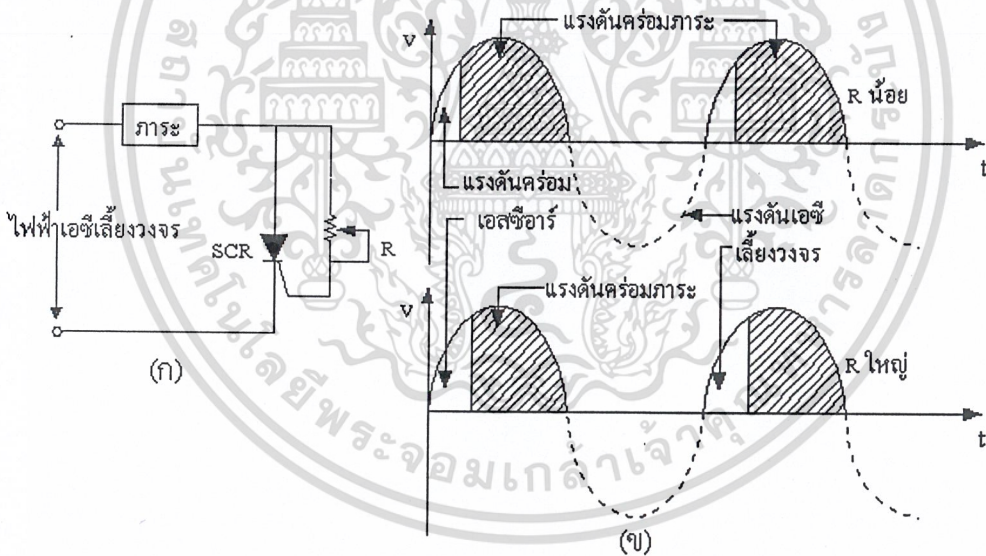
รูปที่ 2.12 วงจรจุดชนวนดีซีที่ตัดแปลงจากไฟฟ้าเอซีเลี้ยงวงจร

- (ก) ต่อสวิตช์อนุกรมกับเกต
- (ข) ต่อสวิตช์ขนานกับเกต
- (ค) รูปคลื่นของแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2. วงจรจุดชนวนด้วยเฟสของสัญญาณเอซี

โดยใช้แรงดันเอซีเลี้ยงวงจรเข้าจุดชนวนผ่านความต้านทานที่แปรค่าได้ R ดังแสดงในรูปที่ 2.13 (ก) ซึ่งจะทำให้เอสซีอาร์เปิดกระแสขึ้นเมื่อกระแสเกิดมีค่าใหญ่เพียงพอ ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับค่าความต้านทาน R และค่าของแรงดันที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในครึ่งวัฏจักรบวกระหว่างเฟส (หรือมุม) 0 ถึง 90 องศา และเอสซีอาร์จะปิดกระแสเมื่อครึ่งวัฏจักรลบมาถึงซึ่งมีรูปคลื่นแรงดันแสดงในรูปที่ 2.13 (ข) วงจรนี้เป็นวงจรที่มีราคาถูกแต่เกิดของเอสซีอาร์อาจชำรุดได้เมื่อครึ่งวัฏจักรลบมาถึง จึงได้มีการปรับปรุงแก้ไขด้วยการใช้ไดโอด D เข้ากั้นแรงดันกลับที่ป้อนเข้าเกิด ดังเขียนแสดงในรูปที่ 2.14 (ก) ซึ่งวงจรสามารถควบคุมให้เอสซีอาร์เปิดกระแสแปรค่ามุมจาก 0 องศา (คือเปิดให้นำกระแสครึ่งคลื่นเต็ม 100%) ถึงมุม 90 องศา (คือเปิดให้นำกระแสครึ่งคลื่น 50%) เราจึงขอแนะนำให้ใช้ในการควบคุมกระแสที่เรียกว่า “วิธีควบคุมเฟส” (Phase Control) ขอให้เราสังเกตว่ารูปที่ 2.14 (ก) นี้ไม่สามารถควบคุมใหญ่เกินกว่ามุม 90 องศา ได้และ  $\alpha$  เป็นมุมจุดชนวน

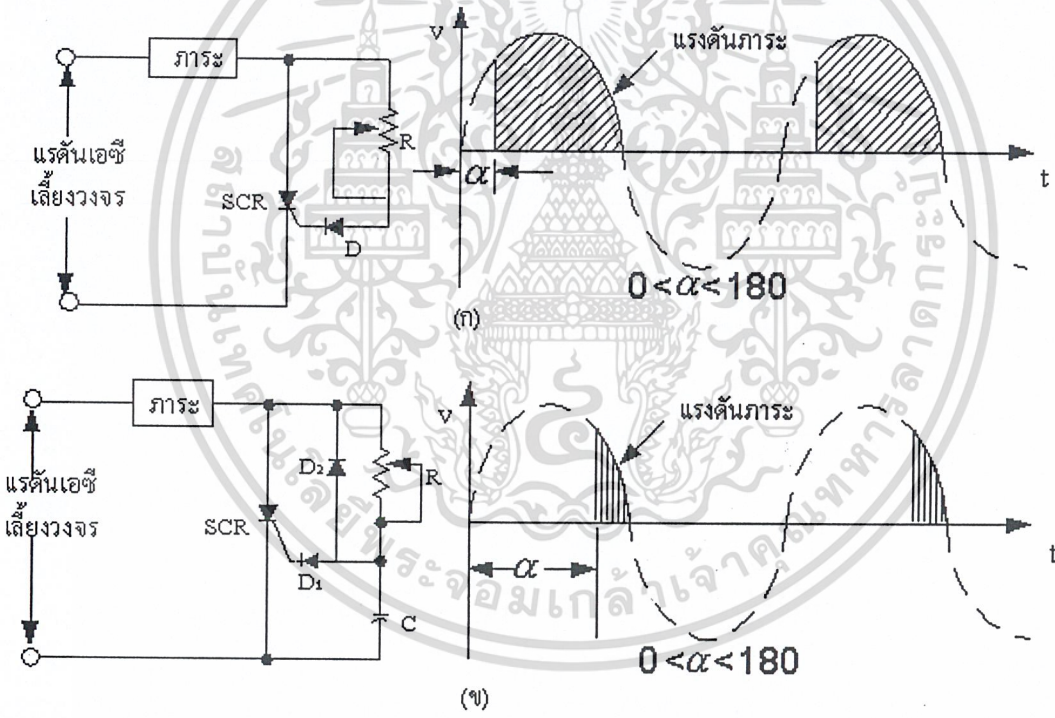


รูปที่ 2.13 (ก) วงจรจุดชนวนด้วยเฟสของสัญญาณเอซีแบบง่าย

(ข) รูปคลื่นแรงดันเมื่อค่าความต้านทาน R มีค่าน้อยและค่าใหญ่

เพื่อที่เราจะสามารถควบคุมเฟสได้จาก 0 ถึง 180 องศา (คือ สามารถควบคุมได้เต็มครึ่งวัฏจักร) เราใช้ความต้านทาน R ตัวเก็บประจุ C และไดโอดเข้าต่อร่วมกันดังแสดงในรูปที่ 2.14 (ข) โดยจะต้องเลือกใช้ตัวเก็บประจุ C ให้ใหญ่มากพอที่จะสามารถเก็บประจุเพื่อจ่ายออกเป็นกระแสเกิดที่ใหญ่พอเพียงที่จะจุดชนวนได้และเลือกค่า R เพื่อที่จะสามารถปรับค่าตัวเวลาทางที่ RC ให้มุม

จุดชนวนเกิดขึ้นจาก 0 ถึง 180 องศา ได้เนื่องจากวงจร RC จะทำให้แรงดันเอซีเล็ยงวงจรมีเฟส นำหน้าแรงดันที่ป้อนเข้าเกิด ซึ่งเมื่อแรงดันเอซีเล็ยงวงจรครึ่งวัฏจักรบวกผ่านเข้ามา ก็จะประจุให้ แผ่นบนของตัวเก็บประจุ C มีศักย์บวก ครั้นถึงเวลาที่ตั้งไว้ด้วยการปรับค่าความต้านทาน R จะทำให้ศักย์บวกบนตัวเก็บประจุ C มีค่าใหญ่พอที่จะให้กระแสเกตใหญ่เพียงพอที่จะชนวนได้ ซึ่งเป็นผลให้เอสซีอาร์เปิดกระแสตามต้องการ ซึ่งเมื่อครึ่งวัฏจักรลบมาถึง เอสซีอาร์จะปิดกระแส และแรงดันค่าลบนี้จะให้กระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุ C และไดโอด  $D_2$  แล้วประจุให้มีศักย์ลบที่ แผ่นบนของตัวเก็บประจุ C ซึ่งเป็นการตั้งต้นใหม่รอคอยครึ่งวัฏจักรบวกที่จะมาถึงต่อไป สำหรับ ไดโอด  $D_1$  ทำหน้าที่กันแรงดันกลับที่ป้อนเข้าเกิดในช่วงครึ่งวัฏจักรลบ วงจรนี้สามารถนำไปดัดแปลงใช้กับวงจรควบคุมเฟสเติมคลื่นได้



รูปที่ 2.14 (ก) วงจรควบคุมเฟสครึ่งคลื่นแบบง่ายด้วยความต้านทานแปรค่าได้

(ข) วงจรควบคุมเฟสครึ่งคลื่นด้วยความต้านทานแปรค่าได้  
ของตัวเก็บประจุและไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

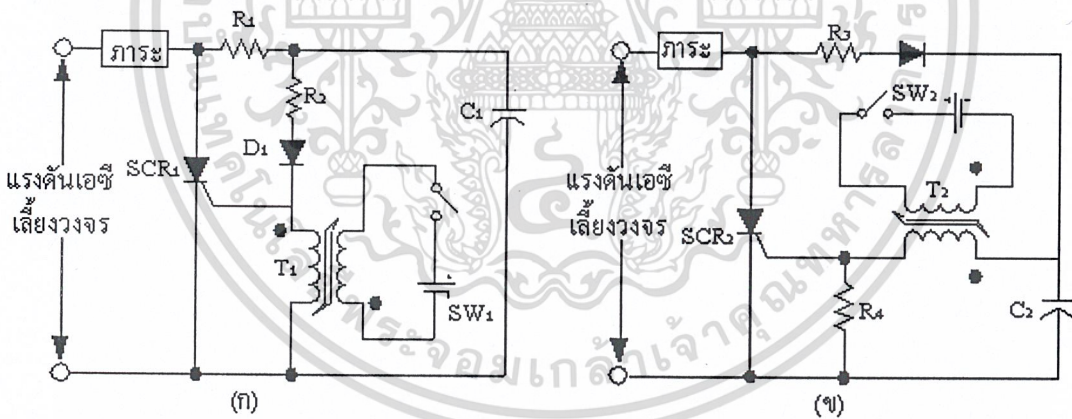
### 2.4.3. วงจรจุดชนวนด้วยพัลส์

สัญญาณที่ใช้จุดชนวนที่ดีควรเป็นพัลส์ที่มีช่วงสั้น ๆ มีความสูงมาก และส่วนหน้าจะต้องมีความชัน สัญญาณนี้จะทำให้กำลังสูญเสียกระจายของเกตมีค่าลดลงกว่าสองวิธีที่กล่าวแล้วข้างบน และยังมีข้อดีที่ยิ่งใหญ่กว่าวิธีจุดชนวนด้วยไฟฟ้าดีซี อยู่ที่เราสามารถใช่มือแปลงเข้าต่อในวงจรเกตทำให้เราสามารถแยกวงจรเกตออกจากวงจรของแหล่งสัญญาณที่ใช้ควบคุมเกต เป็นผลให้เราสามารถควบคุมเกตได้อย่างอิสระและง่าย

เราสามารถแบ่งวงจรออกเป็นสองพวกใหญ่ ๆ คือ

- วิธีจุดชนวนด้วยพัลส์เดี่ยว (หรือจุดชนวนด้วยการปิดเปิดพัลส์ง่าย ๆ)
- วิธีจุดชนวนด้วยชนวนพัลส์ (หรือจุดชนวนด้วยเครื่องกำเนิดพัลส์แบบต่าง ๆ)

(ก) วิธีจุดชนวนด้วยพัลส์เดี่ยว โดยการใช้หม้อแปลงที่มีแกนสามารถอิ่มตัวได้ (Saturable Core Transformer) เข้ามาช่วยดังแสดงในรูป 2.15 สวิตช์ Sw ที่เห็นอยู่ในรูปอาจจะเป็นวงจรมัลติไวยเบรเตอร์แบบเสถียรหนึ่งสถานะ (Monostable Multivibrator) ซึ่งสร้างขึ้นจากทรานซิสเตอร์ยูเจที (Uni-Junction Transistor : UJT) หรืออาจเป็นวงจรไทม์เมอร์ (Timer) 555 ก็ได้



รูปที่ 2.15 วงจรจุดชนวนครั้งคลื่นที่ใช้หม้อแปลงที่มีแกนสามารถอิ่มตัวได้เข้าต่อ

(ก) แบบอนุกรม

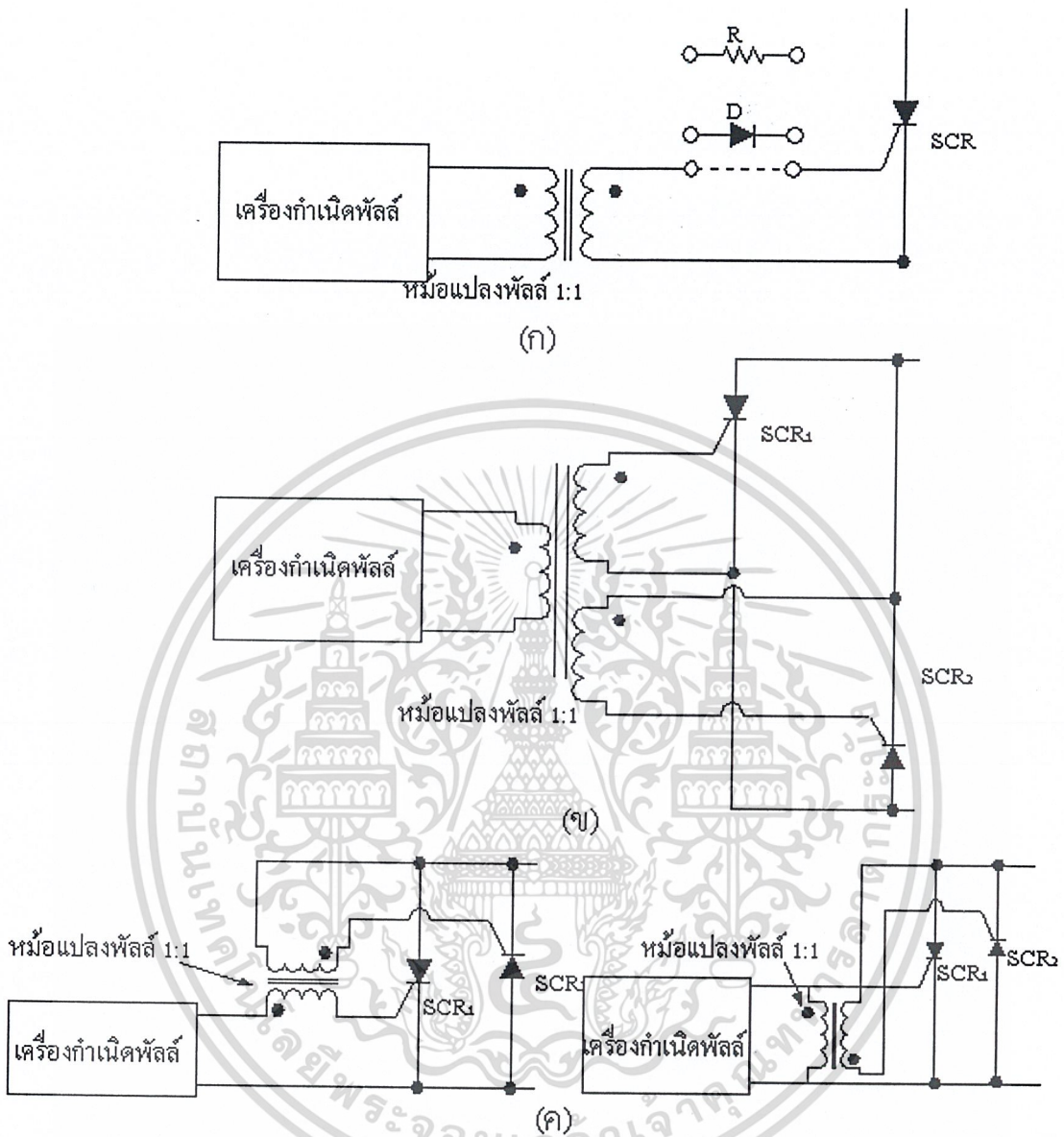
(ข) แบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 2.15 (ก) ใช้ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงที่สามารถอิมตัวได้  $T_1$  ที่ต่อขนานกับเกตของเอสซีอาร์เริ่มต้นหม้อแปลง  $T_1$  ไม่อิมตัว กระแสไหลผ่าน  $R_1, R_2$  และ  $D_1$  เข้าสู่เกตของเอสซีอาร์ในช่วงแรกของครึ่งวัฏจักรบวกเป็นผลทำให้เอสซีอาร์เปิดกระแส ถ้าหม้อแปลง  $T_1$  อิมตัวขดลวดของหม้อแปลง  $T_1$  นี้มีอิมพีแดนซ์ต่ำกระแสที่เคปไหลผ่านเกตจะเปลี่ยนทางเดินมาไหลผ่านขดลวดของหม้อแปลง  $T_1$  ซึ่งเท่ากับปลดเอาสัญญาณจูดชนวนออกจากเกตทำให้เราสามารถตั้งต้นเตรียมการเปิดกระแสเอสซีอาร์ได้ใหม่เมื่อครึ่งวัฏจักรลบมาถึงแล้ว เราสามารถจูดชนวนได้ด้วยการป้อนแรงดันบวกเข้าทางขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงหรือปิดสวิตช์  $Sw_1$  ลงตัวเก็บประจุ  $C$  ใช้เป็นเครื่องกรองคลื่นที่จะมารบกวนสัญญาณเกต ซึ่งเป็นสาเหตุเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงชั่วคราวที่รวดเร็วมาก (Fast Transient) ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าเอซี

รูปที่ 2.15 (ข) ใช้ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงที่สามารถอิมตัวได้  $T_2$  ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ  $C_2$  และเกตของเอสซีอาร์ ในตอนเริ่มแรกของครึ่งวัฏจักรบวก  $T_2$  ยังไม่อิมตัวกระแสจะไหลผ่าน  $R_3$  และ  $D_2$  แล้วประจุเข้า  $C_2$  เมื่อครึ่งวัฏจักรบวกผ่านไปสองสามองศา  $T_2$  จะเข้าอยู่ในสถานะอิมตัวเป็นผลให้  $C_2$  ถ่ายประจุเข้าเกตของเอสซีอาร์อย่างรวดเร็ว เป็นสาเหตุให้ทรานซิสเตอร์นำกระแสถ้าตอนเริ่มต้นของครึ่งวัฏจักรบวก  $T_2$  อิมตัว กระแสจะไม่ไหลเข้าประจุ  $C_2$  แต่จะไหลผ่านขดลวดทุติยภูมิของ  $T_2$  ผ่านเข้าเกตและความต้านทาน  $R_4$  โดย  $R_4$  นี้จะป้องกันไม่ให้แรงดันเกตมีค่าสูงเกินกว่าค่าสูงสุดของแรงดันคร่อมเกต ดังนั้นเอสซีอาร์จะไม่เปิดกระแส เมื่อ  $T_2$  อิมตัวแล้วก็เป็นการตั้งต้นใหม่เตรียมพร้อมสำหรับการจูดชนวนต่อไปด้วยการป้อนแรงดันบวกเข้าทางขั้วอินพุตหรือปิด  $Sw_2$  ลง

(ข) วิธีจูดชนวนด้วยขบวนการพัลส์ โดยการใช้เครื่องกำเนิดพัลส์ ซึ่งอาจเป็นวงจรกวัดแกว่งรีเล็กเซชัน (Relaxation Oscillator) วงจรฟลิป-ฟลอป (Flip-Flop) วงจรมัลติไวเบรเตอร์แบบเสถียร (Astable Multivibrator) เป็นต้น



รูปที่ 2.16 แผนผังการใช้เครื่องกำเนิดพัลส์เข้าจุดชนวนเอสซีอาร์

- (ก) โดยจุดชนวนเอสซีอาร์หนึ่งตัวผ่านหม้อแปลงสองขด
- (ข) โดยจุดชนวนเอสซีอาร์สองตัวผ่านหม้อแปลงสามขด
- (ค) โดยจุดชนวนเอสซีอาร์สองตัวผ่านหม้อแปลงสี่ขด

ดังวงจรในรูปที่ 2.16 (ก) ซึ่งเป็นวงจรที่ใช้หม้อแปลงพัลส์ที่มีขดลวดสองขดอัตราส่วน 1:1 ต่อเข้าระหว่างเกตกับแคโทดของไทรสเตอร์ หรืออาจมีความต้านทาน R ต่ออนุกรมเพื่อลดกระแสเกตให้อยู่ในค่าปลอดภัยหรือใช้แบบกระแสให้เท่ากันเมื่อใช้หม้อแปลงสามขดลวด 1:1:1 ต่อเข้ากับไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกดของไทรสเตอร์สองตัว หรืออาจใช้ไดโอด D เข้าต่ออนุกรมเพื่อป้องกันการไหลกลับของกระแส เกดในกรณีที่มีการเกิดกวัดแกว่งเล็ก ๆ หรือริงกิง (Ringing) เข้าแทรกหรือพัลส์กับทางเกิดขึ้นที่ เอาต์พุตของหม้อแปลง ในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนสูง เราอาจจำเป็นต้องต่อความต้านทานเป็น ภาระของขดลวดทุติยภูมิป้องกันการจุดชนวนผิดพลาด รูปที่ 2.16 (ข) และ (ค) เป็นวงจรที่ใช้ในการ จุดชนวนเอสซีอาร์สองตัวแบบต่าง ๆ

ขอให้สังเกตว่า วงจรข้างต้นนี้ต้องใช้วงจรพัลส์ที่มีคุณสมบัติข้างล่างดังนี้

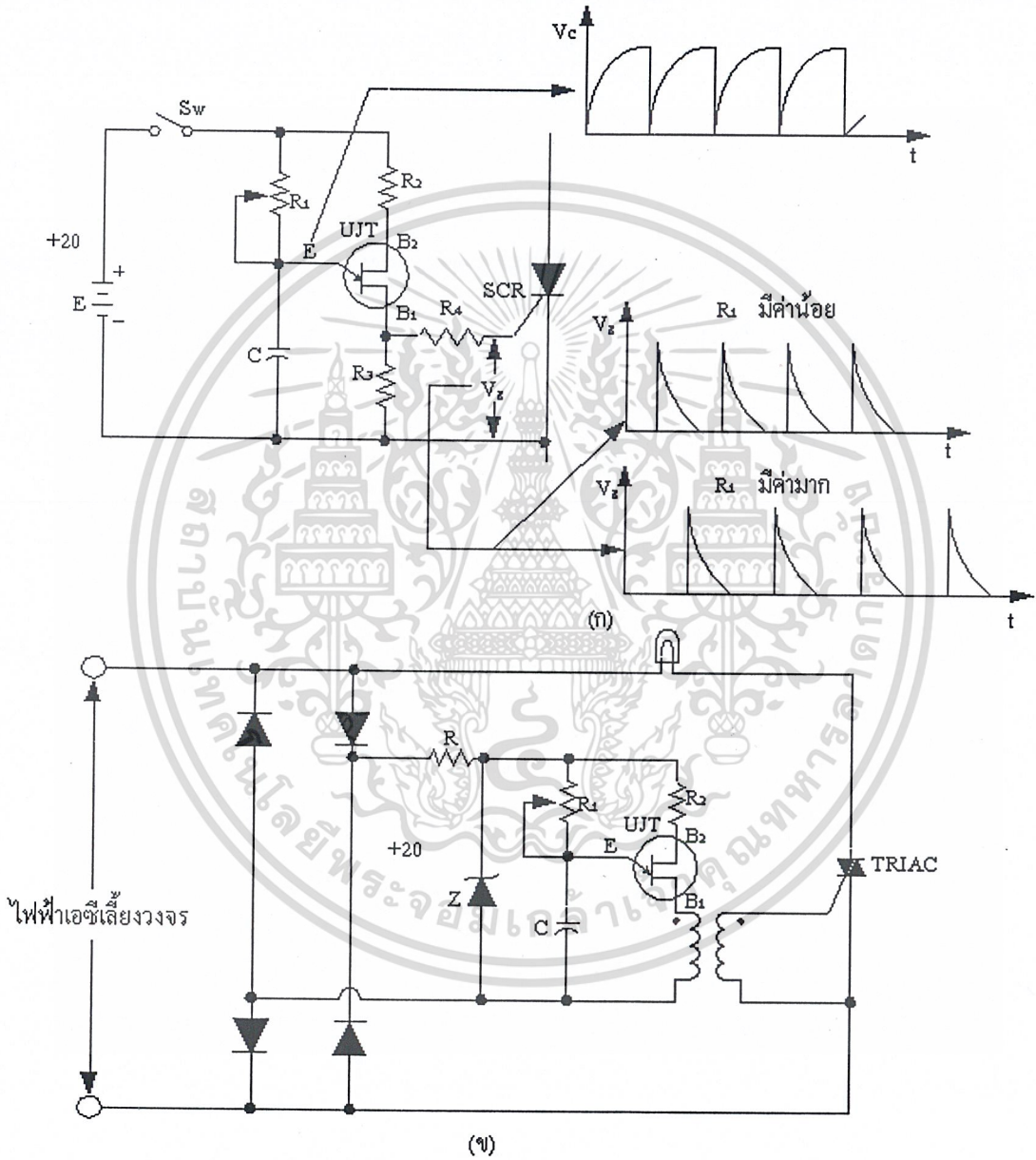
1. ต้องพันขดลวดให้มีจำนวนมากรอบเพื่อให้ค่าเหนี่ยวนำมีค่าสูง ซึ่งจะทำให้เป็นแม่เหล็ก (Magnetizing Current) มีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับกระแสพัลส์ ในระหว่างที่มีพัลส์เข้ามา
2. เนื่องจากพัลส์มีทิศทางเดียว อาจทำให้แกนของหม้อแปลงอิ่มตัว เราจำเป็นต้องทำให้ แกนของหม้อแปลงมีอากาศ (Air Gap) เพื่อป้องกันไม่ให้หม้อแปลงอิ่มตัว
3. สำหรับหม้อแปลงที่ใช้จุดชนวนไทรสเตอร์ตัวเดียว ควรจะมีคัปปลิงแน่น (Tight-Coupling) ระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ สำหรับหม้อแปลงที่ใช้จุดชนวนไทรสเตอร์ หลายตัวควรมีรีแอกแตนซ์รั่ว (Leakage Reactance) ตามมาตรฐานที่ระบุเพื่อที่จะแบ่งกระแสให้ เท่ากัน
4. ตามปกติค่าเก็บประจุระหว่างขดลวดต่าง ๆ ไม่มีความสำคัญ แต่อาจกลายเป็นทางเดิน ของสัญญาณความถี่สูงที่เราต้องการ

การทดสอบหม้อแปลงพัลส์ จะทำได้ด้วยการป้องกันสัญญาณพัลส์เข้าที่ตัวต้านทานที่มี ขนาด 20 โอห์ม แล้วนำตัวความต้านทานนี้เข้าต่อกับขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงพัลส์ ซึ่งเมื่อ ป้อนสัญญาณพัลส์อย่างเดียวกันผ่านทางขดลวดปฐมภูมิ ให้ตรวจสอบรูปคลื่นของพัลส์คร่อมที่ตัว ต้านทานทั้งสองกรณี ถ้าหากพบว่ามีรูปคลื่นอย่างเดียวกันแสดงว่าหม้อแปลงพัลส์มีคุณสมบัติดีมาก สามารถนำมาใช้ได้ การสูญหายของสัญญาณอาจมีบ้างให้ชดเชยด้วยการเพิ่มขนาดพัลส์จากเครื่อง กำเนิดพัลส์

รูปที่ 2.17 (ก) แสดงวงจรจุดชนวนที่ใช้ยูเจทที่เป็นรีเล็กเซชันออสซิลเลเตอร์ ซึ่งเป็นวงจร ราคาถูก และสามารถดัดแปลงใช้กับวงจรคุมคลื่นเต็มได้ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ข) ซึ่งเป็นวงจร หนีไฟ รูปที่ 2.17 (ก) มีหลักการทำงานว่าในตอนเริ่มต้น ตัวเก็บประจุ C จะถูกประจุให้มีศักย์สูงขึ้น ตามค่าคงที่เวลา (Time Constant)  $R_1C$  ซึ่งทำให้จุด E มีศักย์สูงขึ้นไปด้วยทุกครั้งเมื่อจุด E มีศักย์ สูงถึงแรงดันจุดยอดสูงสุด (Peak Point Voltage) ของอิมิตเตอร์ของยูเจท ยูเจทที่จะเปิดกระแสให้ตัว เก็บประจุ C ถ่ายเทประจุผ่านอิมิตเตอร์ไปยังเบสอย่างรวดเร็ว ทำให้มีพัลส์เกิดขึ้นคร่อมที่ตัว ความต้านทาน  $R_2$  และเมื่อตัวเก็บประจุ C ถ่ายเทประจุออกหมดแล้วจะมีประจุให้ตัวเก็บประจุ C มี ศักย์สูงขึ้นใหม่เป็นวัฏจักร ทำให้เกิดขบวนพัลส์เข้าจุดชนวนเอสซีอาร์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.17 (ข) เป็นวงจรจุดชนวนที่ใช้ยูเจทีเช่นเดียวกับรูปที่ 2.17 (ก) เพียงแต่ดัดแปลงให้หม้อแปลงพัลส์เข้าแทนความต้านทาน  $R_3$  และใช้ไทรแอกแทนเอสซีอาร์ซึ่งนำไปใช้วงจรหรี่ไฟหรือใช้เป็นวงจรอย่างอื่น ๆ

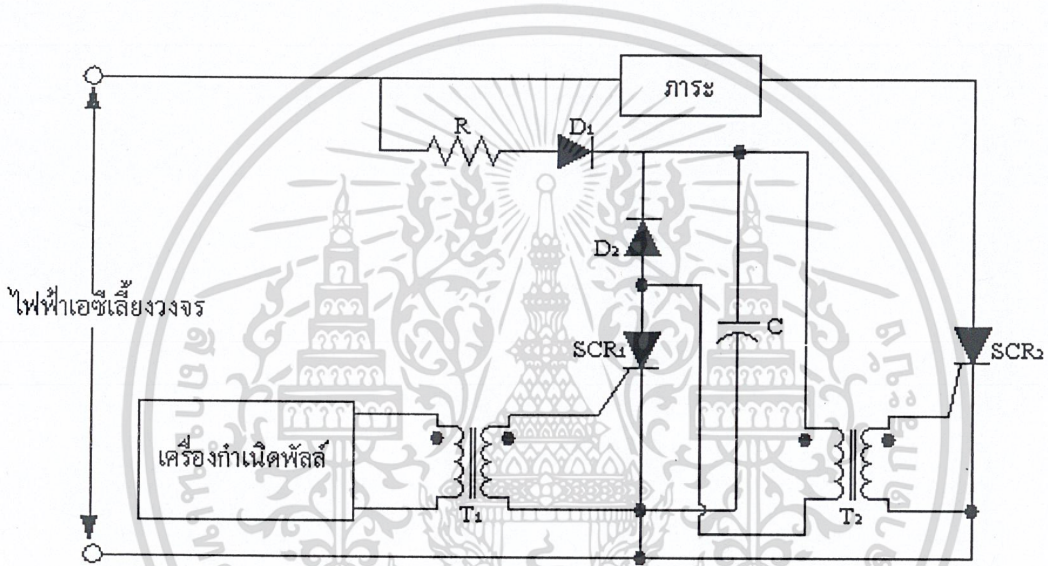


รูปที่ 2.17 (ก) วงจรจุดชนวนที่ใช้เครื่องกำเนิดพัลส์สร้างจากยูเจที  
ซึ่งเป็นการควบคุมแบบครึ่งคลื่น

(ข) วงจรจุดชนวนที่ใช้ยูเจทีเข้าควบคุมวงจรหรี่ไฟแบบเต็มคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.17 เป็นวงจรที่ใช้เอสซีอาร์ขนาดเล็กเข้าจุดชนวนเอสซีอาร์ขนาดใหญ่ ซึ่งในรูปนี้มีหลักการทำงานว่าในตอนเริ่มต้นตัวเก็บประจุ C จะถูกประจุผ่านไดโอด  $D_1$  ไว้ก่อน โดยมีแผ่นบนของตัวเก็บประจุ C มีศักย์บวกเมื่อมีพัลส์เข้าจุดชนวนเอสซีอาร์ขนาดเล็ก  $SCR_1$  ผ่านหม้อแปลงพัลส์  $P_1$  แล้ว  $SCR_1$  นี้จะเปิดกระแสผ่านทางไดโอด  $D_1$  ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงพัลส์  $T_2$  และในขณะเดียวกันนั้นประจุที่อยู่บนตัวเก็บประจุ C จะถ่ายออกอย่างรวดเร็วเป็นผลทำให้มีพัลส์ที่มีขนาดสูงคมและแคบเข้าจุดชนวนเอสซีอาร์ขนาดใหญ่  $SCR_2$  ให้เปิดกระแสสำหรับไดโอด  $D_2$  ทำหน้าที่เป็นฟรีวิลลิ่งไดโอดของหม้อแปลง  $T_2$

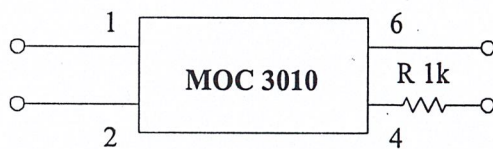


รูปที่ 2.18 วงจรจุดชนวนที่ใช้เอสซีอาร์ขนาดเล็กเข้าจุดชนวนเอสซีอาร์ขนาดใหญ่

หมายเหตุ มีวงจรจุดชนวนอีกจำนวนมากซึ่งอาจจะหาอ่านได้จากหนังสือคู่มือเอสซีอาร์ต่าง ๆ

## 2.5 ชุดวงจรกำเนิดพัลส์ทริกเกอร์

### 2.5.1 วงจรไอโซเลตลัตสัญญาณ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 2.19 วงจรแยกกราวด์ระหว่างชุดควบคุมกับชุดกำลัง  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุที่แบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำสัญญาณทรiggerที่ได้จากวงจรไปทรiggerเอสซีอาร์โดยตรงนั้น อาจจะทำให้เกิดอันตรายต่อวงจรทรiggerได้เพราะในส่วนของโหลดมีโวลต์เตจและกระแสสูง ดังนั้นจึงต้องมีการ Isolate ระหว่างเอสซีอาร์กับวงจรทรigger โดยการนำเอาสัญญาณทรiggerผ่าน IC Optocoupler เพื่อทำหน้าที่แยกแรงดันไฟฟ้าของชุดกำลังออกจากวงจรของชุดควบคุมก่อนที่จะป้อนเข้าสู่ขาเกตของเอสซีอาร์ มีผลก็คือทำให้กราวด์ (Ground) ของวงจรชุดควบคุมกับกราวด์ของชุดกำลังแยกเป็นอิสระจากกันและกัน ทำให้ป้องกันการเสียหายที่เกิดขึ้นกับวงจรชุดควบคุมได้ ในกรณีเมื่อวงจรชุดกำลังทำงานผิดพลาด

อุปกรณ์หลักในส่วนนี้คือตัวเชื่อมโยงทางแสง (Opto-isolator) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวที่จะแยกระบบไฟฟ้าของวงจรในส่วนการควบคุมที่ใช้ไฟฟ้าระดับต่ำออกจากชุดกำลังที่ใช้ไฟฟ้าระดับแรงดันสูง ทั้งนี้เนื่องจากวงจรชุดควบคุมไม่สามารถที่จะส่งเอาต์พุตออกเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าสูงเพื่อจ่ายแก่โหลดได้ ฉะนั้นจึงต้องแยกแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ โหลดอีกชุดหนึ่ง

สำหรับการส่งผ่านสัญญาณของตัวเชื่อมโยงทางแสงนี้ จะถูกส่งระหว่างชิ้นส่วนทั้งสองชิ้นที่แยกออกจากกันโดยจะอยู่ในรูปของสัญญาณแสง ชิ้นส่วนทั้งสองนี้ไม่สามารถสลับหน้าที่กันได้และไม่มีการเชื่อมโยงทางไฟฟ้า สัญญาณที่ถูกส่งผ่านจึงมีได้เพียงทิศทางเดียวเท่านั้น

## 2.5.2 การทำงานของวงจรทรigger

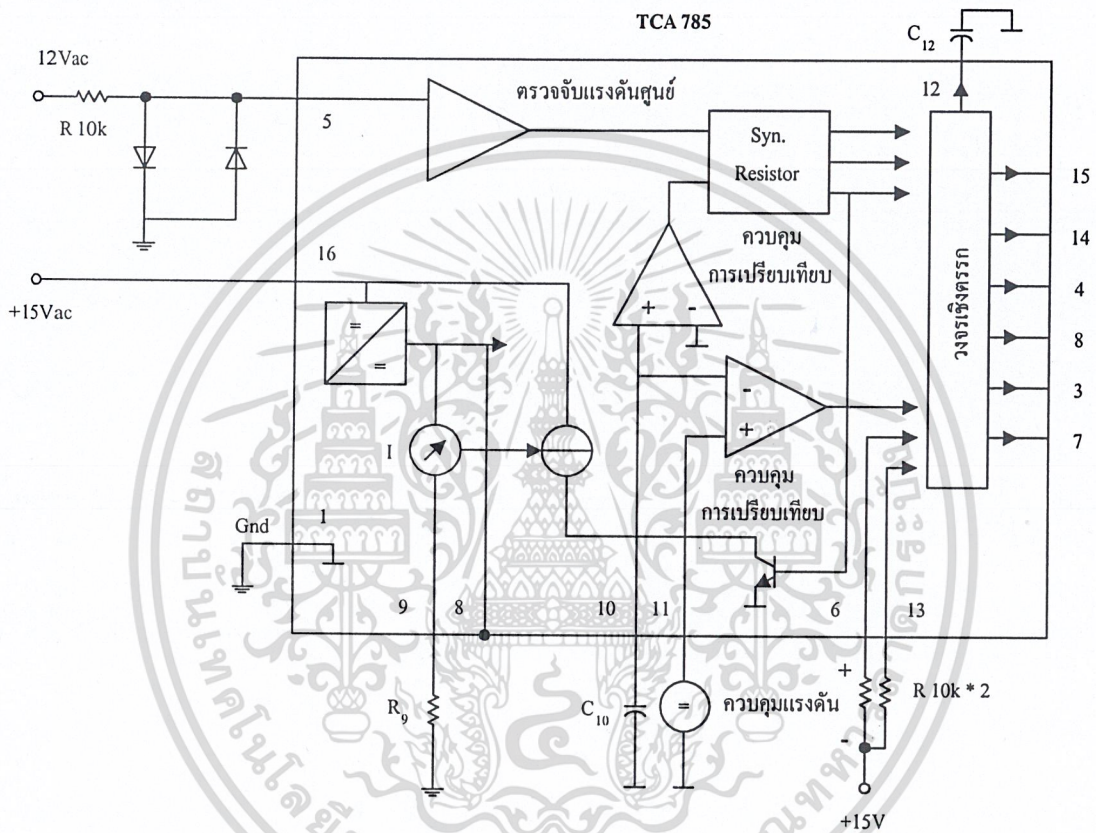
วงจรควบคุมการทรiggerหรือวงจรสร้างสัญญาณกระตุ้น จะเป็นส่วนทำหน้าที่ให้ตัวเอสซีอาร์เริ่มและหยุดการทำงาน เป็นหน้าที่ควบคุมกระแสที่จ่ายให้กับเอสซีอาร์ เพื่อให้เอสซีอาร์ควบคุมการทำงานของโหลดได้ วงจรควบคุมจะทำงานโดยนำสัญญาณ Sync. จากแหล่งจ่ายเดียวกันมาผ่านการจำกัดกระแสให้พอเหมาะ จากนั้นจะผ่านสัญญาณไปยังวงจรตรวจจับแรงดันศูนย์ (Zero Voltage Detector) แล้วส่งไปยังส่วนของวงจรซิงโครไนซ์รีจิสเตอร์ (Sync.Registor) ซึ่งควบคุมสัญญาณแรมป์ที่เกิดจากการเก็บประจุของ  $C_{10}$  จ่ายกระแสที่คงที่ซึ่งได้กำหนดความลาดชันของสัญญาณแรมป์ด้วย  $R_9$  ถ้าหากว่าสัญญาณแรมป์ที่ขา 10 มีระดับแรงดันต่างไปจากขา 11 ตัวควบคุมการเปรียบเทียบ (Control Comparator) จะผลิตสัญญาณเชิงตรรกะไปยังส่วนของวงจรลอจิกต่อไป ซึ่งสัญญาณลอจิกนี้เราสามารถควบคุมให้เลื่อนไปมาจาก 0 ถึง 180 องศาได้ โดยการปรับเปลี่ยนแรงดันทางอินพุตของวงจรส่วนควบคุมการเปรียบเทียบ

สำหรับขาที่ 6 จะเป็นตัวปิดเปิดพัลส์ทั้งหมด หากขาที่ 6 มีลอจิกเป็น “1” ก็จะมีพัลส์ออกตามปรกติ แต่ถ้าขาที่ 6 มีลอจิกเป็น “0” ก็จะไม่มีการพัลส์ใด ๆ ออกมา พัลส์ต่าง ๆ จะมีความกว้างประมาณ 30 ไมโครวินาที สามารถขยายความกว้างพัลส์ต่าง ๆ ออกไปได้ถึง 180 องศา โดยการเปลี่ยนค่า  $C_{12}$  หรือจะลัดวงจร  $C_{12}$  ที่ขา 12 ลงกราวด์ ก็จะได้ความกว้างพัลส์ตั้งแต่มุมทรiggerที่ 0 องศาไปจนถึง 180 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นใจจะขอยืมคืน การค้าไม่ทำกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับเอาต์พุตที่จะนำมาใช้สัญญาณกระตุ้นจากขาที่ 14 และขาที่ 15 ของไอซี โดยทำงานแต่ละครึ่งไซเคิล คือระหว่างช่วงคลื่นลูกบวก (0 ถึง 180 องศา) และระหว่างช่วงคลื่นลูกลบ (180 ถึง 360 องศา)

### 2.5.3 การใช้งานของ ไอซี TCA 785



รูปที่ 2.20 โครงสร้างภายในของ IC TCA 785

- ขาที่ 1 เป็นจุดต่อขั้วลบของไฟเลี้ยงวงจร (จุดกราวด์ของวงจร)
- ขาที่ 2 เป็นอินเวิร์ตเอาต์พุตของขาที่ 15
- ขาที่ 3 เป็นจุดต่อสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่สูงเพื่อใช้งานบางอย่าง
- ขาที่ 4 เป็นอินเวิร์ตเอาต์พุตของขาที่ 14
- ขาที่ 5 เป็นจุดต่อรับสัญญาณ Sync. จากไฟเลี้ยงวงจรเอซี
- ขาที่ 6 เป็นจุดเปิดปิดพัลส์ทางด้านเอาต์พุตของวงจร

หมายเหตุ: ขาที่ 7 เป็นจุดต่อสัญญาณพัลส์สำหรับไปควบคุมโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำสูงมาก ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขาที่ 8 เป็นจุดสร้างแรงดันอ้างอิงของวงจร

ขาที่ 9 เป็นจุดต่อความต้านทานที่ใช้ควบคุมความลาดชันของสัญญาณแรมป์

## 2.6 การเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

การเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้แก่โหลด แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จะไม่ราบเรียบเหมือนได้จากแบตเตอรี่ แต่จะประกอบด้วย Ripple ในที่นี้จะศึกษา วงจรการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงดังนี้

1. วงจรสามารถควบคุมหรือเปลี่ยนแรงดันได้และไม่ได้
2. แรงดันของแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ
3. แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่โหลด
4. แรงดันคร่อมเอสซีอาร์และไดโอด
5. กระแสที่เข้าโหลด
6. กระแสที่ไหลจากแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ

วงจรที่จะศึกษามีหลายวงจร แต่ที่จะไม่กล่าวถึงการเกิด Over Lamp คือช่วงที่กระแสเปลี่ยนจากเอสซีอาร์หรือไดโอดตัวหนึ่งไปเป็นอีกตัวหนึ่ง

### 2.6.1 การเลือกวงจรการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับ

วงจรการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงมีด้วยกันหลายวงจร ซึ่งมีความหมายแตกต่างกันไป การตัดสินใจเลือกวงจรต้องพิจารณาดังนี้

1. ต้องการควบคุมหรือเปลี่ยนแปลงแรงดันได้หรือไม่

เมื่อไม่ต้องการควบคุมแรงดันหรือกระแสเอาต์พุตจึงสามารถใช้ไดโอด การเปลี่ยนแปลงแรงดันสามารถทำได้เพียงแต่เปลี่ยนแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ โดยการเปลี่ยนแปลงรอบทางขดลวดขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้า แต่เมื่อต้องการควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง จะต้องใช้ไดโอดต่อร่วมกับเอสซีอาร์ที่เรียกกันว่า วงจรควบคุมเพียงครึ่งเดียว (Half Controlled Circuits) คือ การใช้ไดโอดและเอสซีอาร์ต่อร่วมกัน หรือวงจรควบคุมทั้งหมด (Fully Controlled Circuits) จะใช้เอสซีอาร์ในวงจรอย่างเดียว

2. ต้องการแรงดันเอาต์พุตเรียบหรือไม่

ในการที่จะได้แรงดันเอาต์พุตเรียบ จะต้องใช้แหล่งจ่ายไฟที่เป็น 3 เฟสหรือมากกว่า 3 เฟส เพื่อให้แรงดันเอาต์พุตเรียบหรือมี Ripple น้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. แรงดันไฟฟ้า

สำหรับแรงดันเอาต์พุตที่สูง ๆ ในระดับเป็นกิโลโวลต์ ถ้าหากมีไดโอดและเอสซีอาร์ที่มีขีดจำกัดของแรงดันต่ำกว่าแรงดันที่ต้องการ จะต้องนำมาต่ออนุกรมกัน

### 4. จำนวนแผ่นระบายความร้อน

ไดโอดชนิดที่ทนกระแสได้สูง ๆ มีด้วยกัน 2 ชนิด คือ แอนโอดจะเป็นน็อตสามารถติดกับแผ่นระบายความร้อน และชนิดแคโทดเป็นน็อตสามารถติดกับแผ่นระบายความร้อน แต่เอสซีอาร์ชนิด Stud Type แอนโอดจะเป็นน็อตสามารถที่จะติดกับแผ่นระบายความร้อน ถ้าหากเลือกวงจรที่เหมาะสมจะลดจำนวนของแผ่นระบายความร้อนลงได้ ในกรณีที่ใช้วงจรที่ต่อแคโทดของเอสซีอาร์ร่วมกัน เอสซีอาร์ชนิด Presspack จะใช้แผ่นระบายความร้อนน้อยกว่า

### 5. เอาต์พุตต้องการกระแสสูงแต่แรงดันต่ำ

ไดโอดและเอสซีอาร์ที่ทนกระแสสูง ๆ มีขายมากมาย แต่ในวงจรที่ต้องการเอาต์พุตกระแสสูง ๆ แต่แรงดันต่ำ ดังตัวอย่างเช่น เครื่องชุบ โลหะจะมีแรงดันตกคร่อมไดโอดและเอสซีอาร์ทำให้ประสิทธิภาพต่ำ จึงต้องเลือกวงจรที่ใช้หม้อแปลงที่มี Center Tap หรือวงจรที่มีไดโอดเพียงตัวเดียว นำกระแสในแต่ละครึ่งไซเคิลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้น

### 6. ผลกระทบต่อระบบจ่ายไฟฟ้า

วงจรที่ใช้เอสซีอาร์ควบคุมการเปลี่ยนแปลงแรงดันกระแสสลับเป็นกระแสตรง ในกรณีที่มีกำลังสูง ๆ จะเกิดฮาร์โมนิกส์ต่ำจะรบกวนระบบโทรศัพท์

### 7. เพาเวอร์เฟคเตอร์

การควบคุมแรงดันเอาต์พุตอย่างต่อเนื่องโดยใช้เอสซีอาร์จะทำให้เกิดเพาเวอร์เฟคเตอร์ต่ำ

### 8. ความสามารถในการจ่ายพลังงานคืน (Regeneration Capability)

ในวงจรการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงให้กับมอเตอร์ หรือโหลดที่มีตัวเหนี่ยวนำสูง ซึ่งบางครั้งต้องการให้พลังงานไฟฟ้ากลับสู่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งวงจรแบบ Fully-controlled สามารถทำการจ่ายพลังงานคืนได้

## 2.6.2 การนำวงจรควบคุมการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

### ไปใช้งาน

การควบคุมการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยการใช้เพาเวอร์เซมิคอนดักเตอร์เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเฉลี่ยที่จ่ายสู่โหลด โดยการใช้เอสซีอาร์เป็นตัวเปลี่ยนจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่มีแรงดันคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรควบคุมการเปลี่ยนแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง สามารถนำไปใช้งานได้ในหลายลักษณะ เช่น

1. ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังตัวอย่างเช่น ในอุตสาหกรรมทำกระดาษ ขากรถยนต์และผลิตสายไฟ เป็นต้น
2. เครื่องชุบโลหะ
3. เครื่องแปลงไฟฟ้าเพื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงชนิดกระแสตรง

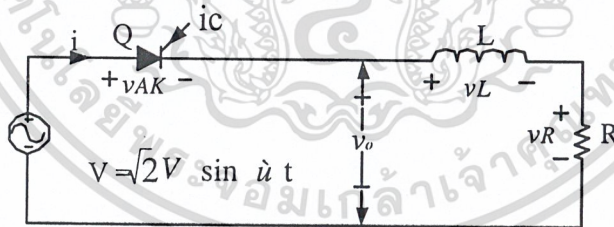
### 2.6.3 การเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส ครึ่งลูกคลื่น

#### (Single-phase Half-wave Rectifier Circuit)

แรงดันเฉลี่ยเอาต์พุตของวงจรแบบครึ่งคลื่น (Half-wave) สามารถควบคุมได้โดยเปลี่ยนแปลงมุมที่จ่ายสัญญาณทริกแก์เอสซีอาร์ ในขณะที่เอสซีอาร์ได้รับฟอร์เวิร์ดไบแอส คือ ที่แรงดันที่แอโนดเป็นบวกเมื่อเทียบกับแคโทดเอสซีอาร์จะนำกระแส เมื่อกระแสผ่านสู่อโหลดมากกว่ากระแสยึด (Holding Current) ในกรณีที่โหนดเป็นความต้านทานอย่างเดียว กระแสถึงกระแสยึดที่มุมที่ทริกเอสซีอาร์ ( $\alpha$ )

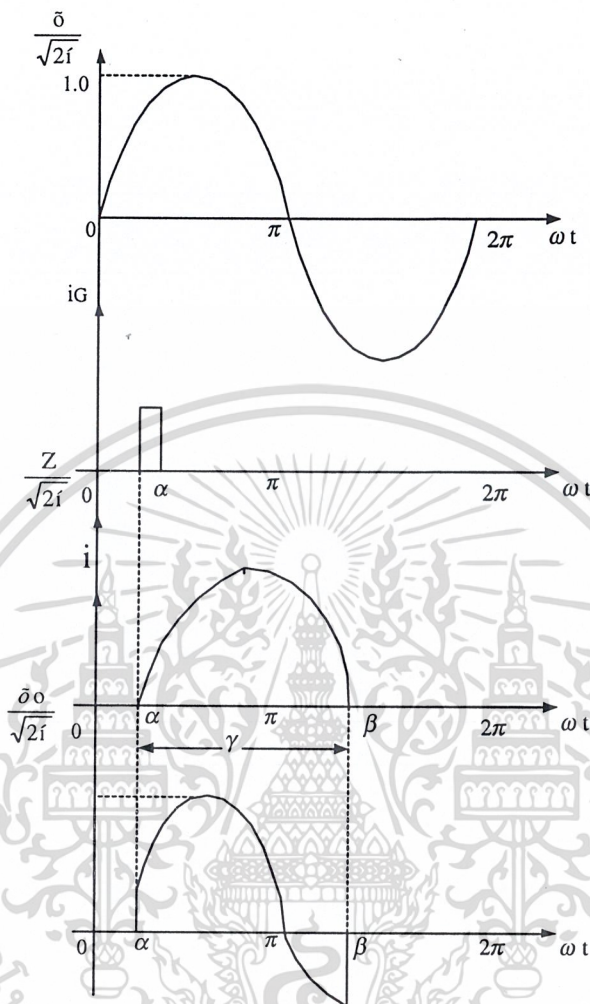
1. โหนดเป็นความต้านทานอย่างเดียว

ในรูปที่ 2.21 เป็นวงจรการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟสแบบควบคุมครึ่งคลื่น เมื่อโหนดเป็นตัวต้านทานอย่างเดียว



รูปที่ 2.21 โหนดเป็นความต้านทานอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 (ต่อ) โหลดเป็นความต้านทานอย่างเดียว

สมมติว่าไม่มีแรงดันคร่อมเอสซีอาร์เมื่อเอสซีอาร์นำกระแส

$V$  = แรงดันอาร์เอ็มเอสของแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ

$$V_{O(\text{ave})} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2}V \sin \omega t \, d(\omega t) \quad (2.13)$$

$$= \frac{\sqrt{2}V}{2\pi} \left[ -\cos \theta \right]_{\alpha}^{\pi}$$

$$= \frac{\sqrt{2}V}{2\pi} (1 + \cos \alpha) \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ 2π เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะต้องใช้เอสซีอาร์ที่ทนแรงดันรีเวิร์ดมากกว่า

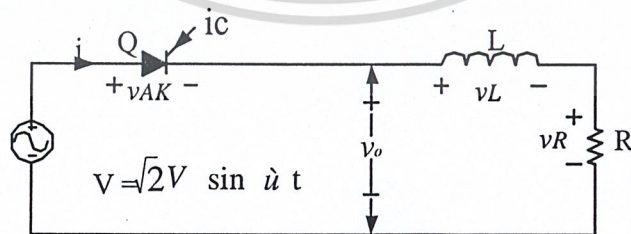
$$\begin{aligned}
 V_{O(ave)} \text{ สูงสุด } (\alpha=0) &= \frac{V_m}{\pi} = \frac{\sqrt{2V}}{\pi} \\
 I_{O(ave)} &= \frac{V_{O(ave)}}{R} \\
 &= \frac{\sqrt{2V}}{2\pi R} (1 + \cos\alpha)
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

จะใช้เอสซีอาร์ที่ทนกระแสเฉลี่ยได้มากกว่า  $I_{O(ave)}$  สูงสุดคือ

$$\begin{aligned}
 I_{O(RMS)} &= \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \left( \frac{\sqrt{2V}}{R} \sin\omega t \right)^2 d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} \\
 &= \frac{\sqrt{2V}}{R} \left[ \frac{1}{4\pi} \left( \omega t - \frac{1}{2} \sin 2\omega t \right) \right]_{\alpha}^{\pi} \\
 &= \frac{\sqrt{2V}}{R} \left[ \frac{1}{4\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right) \right]^{\frac{1}{2}}
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

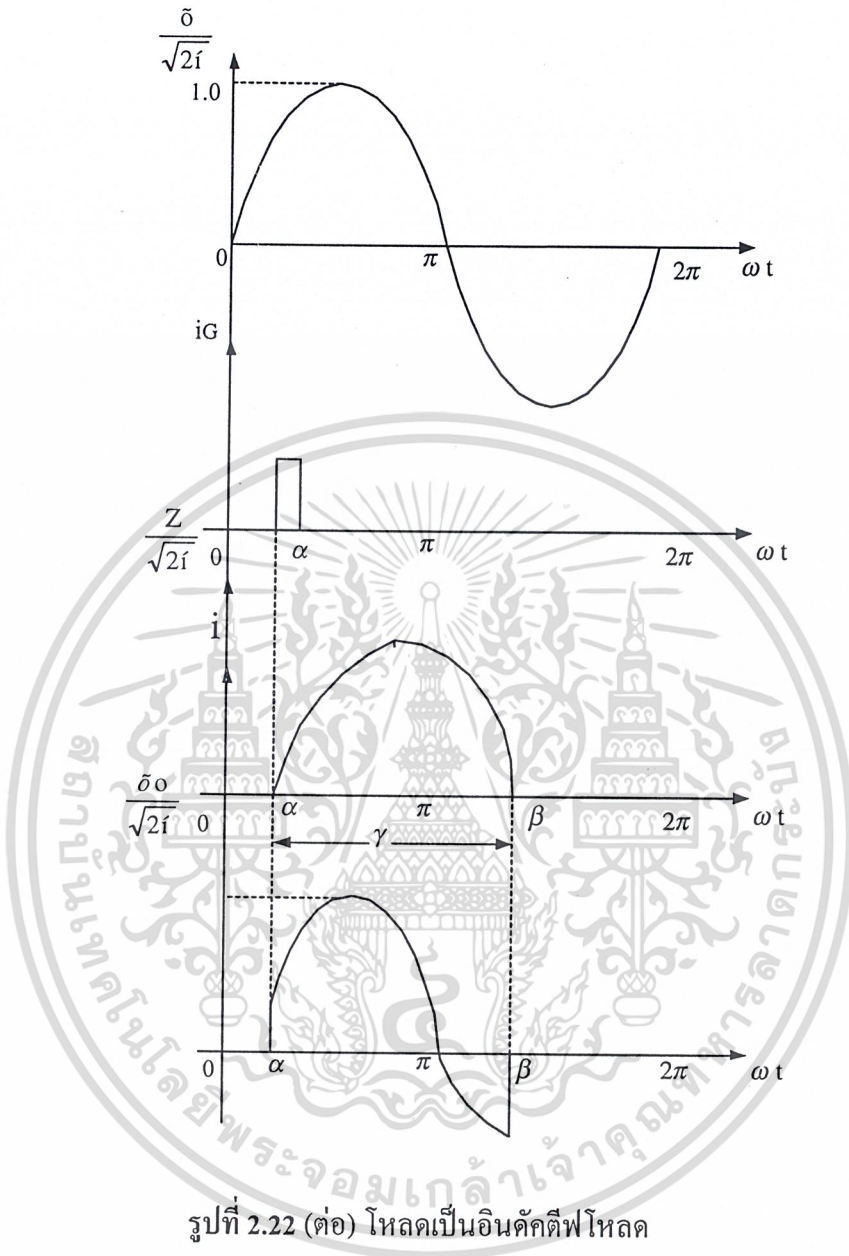
## 2. โหลดเป็นอินดักทีฟ

เมื่อ โหลดเป็นอินดักทีฟหรือความต้านทานต่ออนุกรมกับอินดักเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 โหลดเป็นอินดักทีฟโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 (ต่อ) โหลดเป็นอินคัคติฟโหลด

เมื่อเอสซีอาร์ได้รับสัญญาณทริกที่เกิดในครึ่งไซเคิลบวกของแหล่งจ่ายไฟ เอสซีอาร์จะนำกระแส จะได้

$$\begin{aligned}
 V &= V_L + V_R \\
 \sqrt{2} V \sin\omega t &= L \frac{di}{dt} + iR
 \end{aligned}
 \tag{2.17}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามใช้ส<sup>2</sup>+ω<sup>2</sup>ปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I(s) = \frac{\sqrt{2} V}{s^2 + \omega^2} \cdot \frac{1}{(R + LS)}$$

$$i(t) = \frac{\sqrt{2} V}{Z} \sin(\omega t - \phi) + Ae^{-\frac{R}{L}t} \quad (2.18)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$$

เมื่อทำการทริกเอสซีอาร์ที่มุม  $\omega t = \alpha$  กระแส  $I$  จะมีค่าเท่ากับ 0 แทนค่าลงในสมการที่ (2.18) จะได้

$$0 = \frac{\sqrt{2} V}{Z} \sin(\alpha - \phi) + Ae^{-\frac{R}{L} \frac{\alpha}{\omega}}$$

$$A = -\frac{\sqrt{2} V}{Z} \sin(\alpha - \phi) e^{\frac{R}{L} \frac{\alpha}{\omega}}$$

แทนค่า  $A$  ลงในสมการที่ (2.18)

$$i = \frac{\sqrt{2} V}{Z} \left[ \sin(\omega t - \phi) - \sin(\alpha - \phi) e^{\frac{R}{L} \left( \frac{\alpha}{\omega} - t \right)} \right] \quad (2.19)$$

ที่มุม  $\omega t = \beta$  กระแส  $I$  จะมีค่าเท่ากับ 0 เป็นจุดที่เอสซีอาร์หยุดนำกระแส จะหาค่ามุม  $\beta$  ได้ โดยแทนค่า  $\omega t = \beta, i = 0$  ลงในสมการที่ (2.19)

$$0 = \frac{\sqrt{2} V}{Z} \left[ \sin(\beta - \phi) - \sin(\alpha - \phi) e^{\frac{R}{L} \left( \frac{\alpha}{\omega} - \frac{\beta}{\omega} \right)} \right]$$

$$\sin(\beta - \phi) - \sin(\alpha - \phi) e^{\frac{R}{L} \left( \frac{\alpha}{\omega} - \frac{\beta}{\omega} \right)} = 0 \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

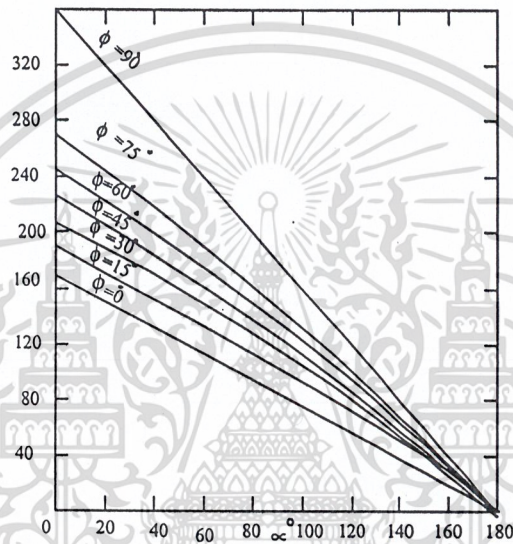
$\alpha$  = คือ มุมที่เริ่มทริกให้เอสซีอาร์นำกระแส

$\beta$  = คือ มุมที่เอสซีอาร์หยุดนำกระแส

$\gamma$  = คือ จำนวนมุมที่เอสซีอาร์นำกระแส

$\gamma$  = คือ  $\beta - \alpha$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ  $\alpha$  และ  $\gamma$  ที่  $\phi$  ค่าต่าง ๆ ได้จากผลลัพธ์ของสมการที่ (2.20) แสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\alpha$  และ  $\gamma$  ที่มุม  $\phi$  ค่าต่าง ๆ

กระแสเฉลี่ย (Average Current)

$$I_{\text{ave}} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} \frac{\sqrt{2} V}{Z} \left[ \sin(\omega t - \phi) - \sin(\alpha - \phi) e^{-\frac{R}{L} \left( \frac{\alpha}{\omega} - t \right)} \right] d(\omega t) \quad (2.21)$$

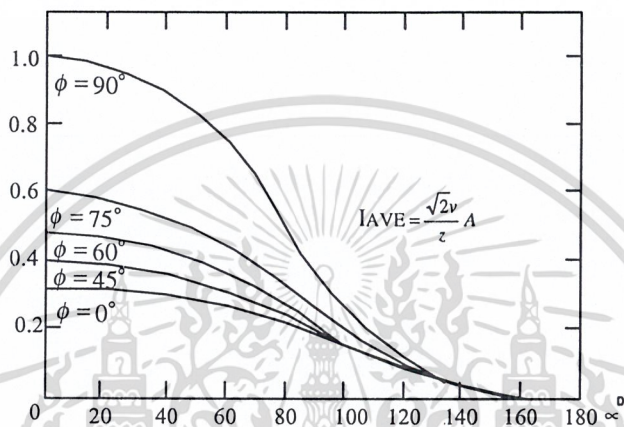
$$I_N = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} \left[ \sin(\omega t - \phi) - \sin(\alpha - \phi) e^{-\frac{R}{L} \left( \frac{\alpha}{\omega} - t \right)} \right] d(\omega t) \quad (2.22)$$

$$I_{\text{ave}} = \frac{\sqrt{2} V}{Z} I_N$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_N$  และ  $\alpha$  ที่มุม  $\phi$  ค่าต่าง ๆ ได้จากผลลัพธ์ของ สมการที่ (2.22) แสดงในรูปที่ 2.20

$$I_{O(ave)} = I_{ave}$$



รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_N$  และ  $\alpha$  ที่มุม  $\phi$  ค่าต่าง ๆ

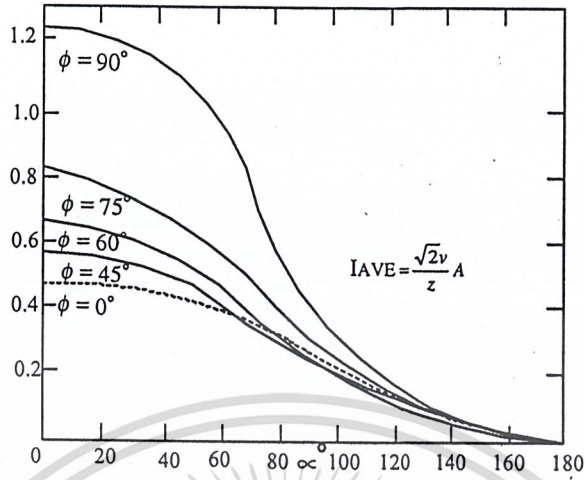
กระแสอาร์เอ็มเอส (R.M.S Output Current)

$$I_{RMS} = \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} \left\{ \frac{\sqrt{2}V}{Z} \left[ \sin(\omega t - \phi) - \sin(\alpha - \phi) e^{\frac{R}{L} \left( \frac{\alpha}{\omega} - t \right)} \right] \right\}^2 d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.23)$$

$$I_{RMS} = \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} \left\{ \sin(\omega t - \phi) - \sin(\alpha - \phi) e^{\frac{R}{L} \left( \frac{\alpha}{\omega} - t \right)} \right\}^2 d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.24)$$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_{RN}$  และ  $\alpha$  ที่มุม  $\phi$  ค่าต่าง ๆ ได้จากผลลัพธ์ของสมการที่ (2.20) แสดงในรูปที่ 2.21

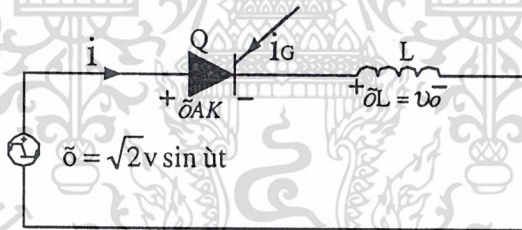
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_{RN}$  และ  $\alpha$  ที่มุม  $\phi$  ค่าต่าง ๆ

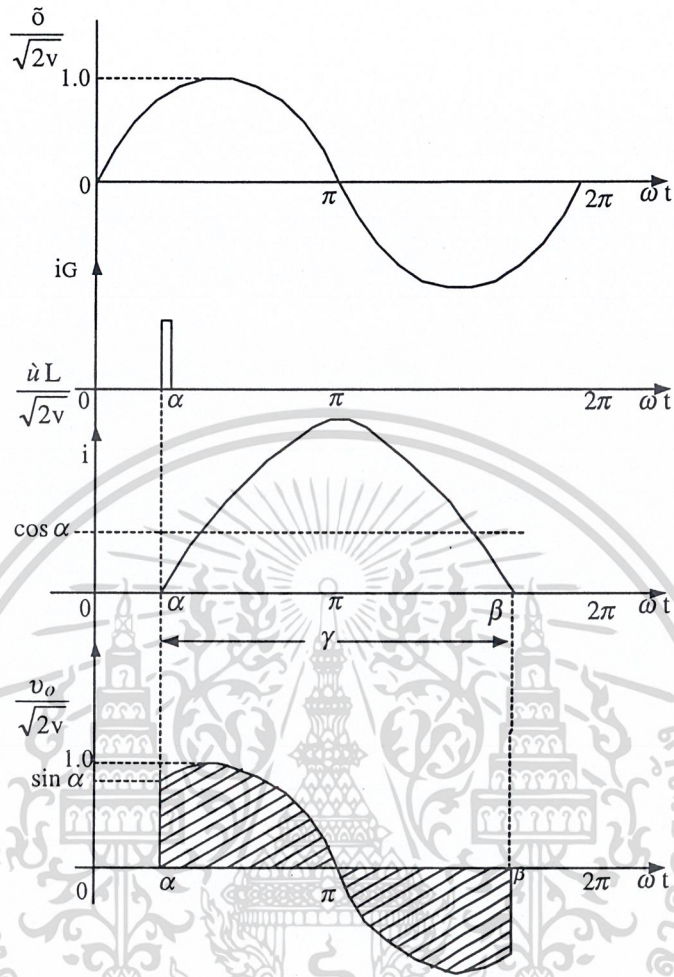
3. โหลดเป็นอินดักเตนซ์อย่างเดียว

สำหรับกรณีที่โหลดเป็นอินดักติฟอย่างเดียว คือ  $R = 0, Z = \omega L$  และ  $\phi = 90$  องศา



รูปที่ 2.26 โหลดเป็นอินดักเตนซ์อย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 (ต่อ) โหลดเป็นอินดักเตอร์อย่างเดียว

จากสมการที่ (2.19)

$$\begin{aligned}
 i &= \frac{\sqrt{2} V}{Z} \left[ \sin(\omega t - \phi) - \sin(\alpha - \phi) e^{-\frac{R}{L} \left( \frac{\alpha}{\omega} - t \right)} \right] \\
 &= \frac{\sqrt{2} V}{Z} \left[ \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) - \sin \left( \alpha - \frac{\pi}{2} \right) e^0 \right] \\
 &= \frac{\sqrt{2} V}{Z} (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad \text{แอมแปร์} \qquad (2.25)
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสจะตกเป็นศูนย์ ( $i = 0$ ) ที่  $\omega t$  เท่าใดจะหาได้โดยแทนค่า  $i = 0$  ในสมการที่ (2.25)

$$0 = \frac{\sqrt{2} V}{Z} (\cos\alpha - \cos\beta)$$

$$\cos\beta = \cos\alpha \quad \text{เรเดียน}$$

กระแสเฉลี่ยจะมีค่าเท่ากับ

$$I_{O(\text{ave})} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} \frac{\sqrt{2} V}{Z} (\cos\alpha - \cos\omega t) d(\omega t)$$

$$I_N = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} (\cos\alpha - \cos\omega t) d(\omega t)$$

$$= \frac{1}{\pi} [(\pi - \alpha)\cos\alpha + \sin\alpha] \quad (2.26)$$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_N$  และ  $\alpha$  ที่ค่า  $\phi = 90$  องศา แสดงในรูปที่ 2.24 กระแสอาร์เอ็มเอสมีค่าเท่ากับ

$$I_{O(\text{RMS})} = \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} [\cos\alpha - \cos\omega t]^2 d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}}$$

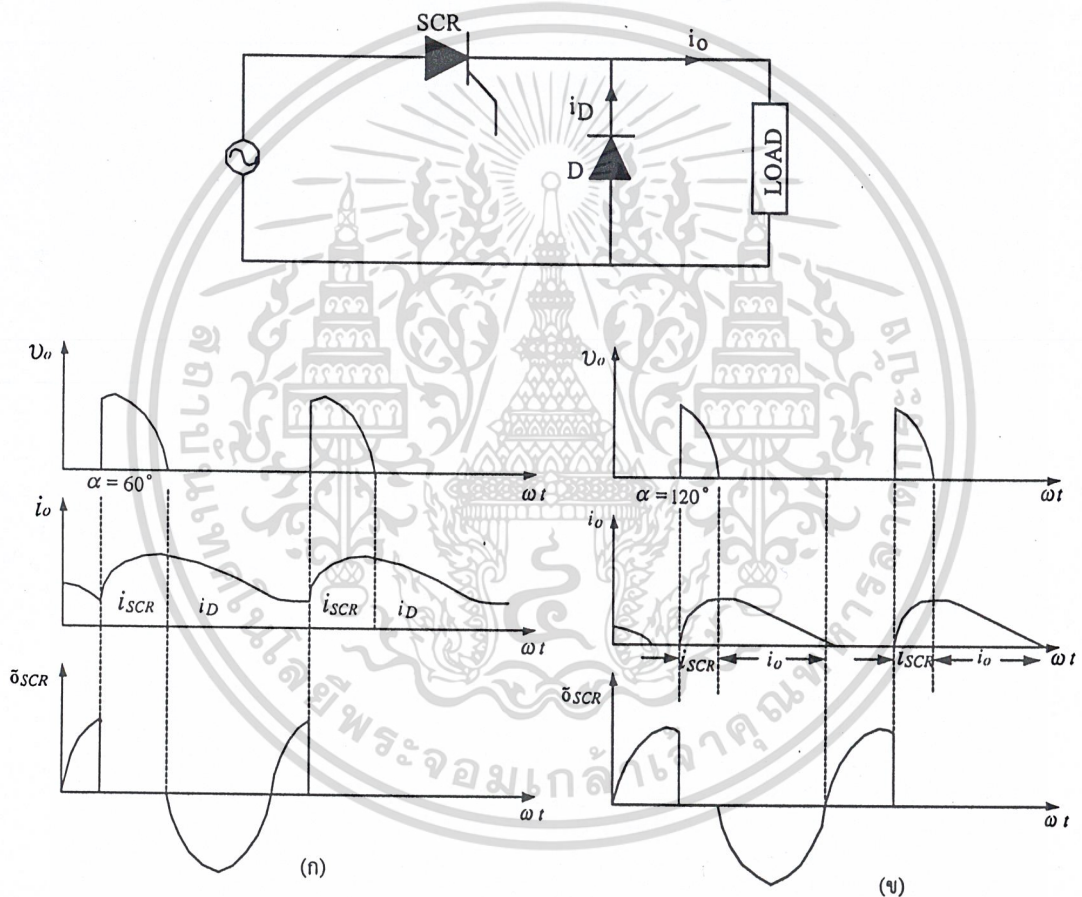
$$I_{RN} = \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} (\cos\alpha - \cos\omega t)^2 d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}}$$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_{RN}$  กับ  $\alpha$  ที่มุม  $\phi = 90$  องศา ดังแสดงในรูปที่ 2.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4. โหลดเป็น RL และมี Free-wheeling Diode

วงจรควบคุมการเปลี่ยนไฟกระแสสลับเป็นกระแสตรง โดยใช้เอสซีอาร์ในรูปที่ 2.27 (ก) โหลดเป็นโหลด RL และมี Free-wheeling Diode ต่อคร่อมโหลดอยู่ เอสซีอาร์จะหยุดนำกระแสที่  $\omega t = 180$  องศา กล่าวคือ ระหว่างครึ่งบวกของแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับเอสซีอาร์ถูกทริกให้นำกระแสแต่ไดโอด D ยังไม่นำกระแส เพราะได้รับกระแสรีเวิร์กไบแอสอยู่เมื่อถึงครึ่งลบของไซเคิล ไดโอด D สามารถนำกระแส แต่ทว่าเอสซีอาร์ได้รับรีเวิร์กไบแอสซึ่งจะหยุดนำกระแส กระแสที่ไหลในโหลดจะผ่านไดโอด D และลดลงอย่าง Exponential ดังแสดงในรูปที่ 2.27 (ข)



รูปที่ 2.27 โหลดเป็น RL และมี Free-wheeling Diode

$$V_{dc} = V_{ave} = \frac{1}{2\pi\alpha} \int \sqrt{2} V \sin \omega t d(\omega t) \frac{\sqrt{2} V}{2\pi} (1 + \cos \alpha) \quad \text{โวลต์}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5. โหลดเป็นวงจร RC

เมื่อมีสัญญาณทริกเกิดของเอสซีอาร์  $Q$  ที่แสดงในรูปที่ 2.28 (ก) เอสซีอาร์จะนำกระแส

$$V_s = V_c + V_R = V_o \quad \text{โวลต์}$$

$$\sqrt{2} V \sin \omega t = \frac{1}{C} \int i \, d\omega t + iR$$

จะได้

$$i = \frac{\sqrt{2} V}{Z} \sin(\omega t + \phi) + A e^{-\frac{t}{RC}} \quad \text{แอมแปร์} \quad (2.27)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{1}{\omega RC}$$

$$Z = \left[ R^2 + \left( \frac{1}{\omega C} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

เมื่อทำการทริกเอสซีอาร์ให้นำกระแสที่  $\omega t = \alpha$  โดยไม่มีแรงดันคาปาซิเตอร์อยู่ก่อน ( $V_c = 0$ ) กระแสเริ่มต้นจะเท่ากับ

$$i = \frac{\sqrt{2} V}{R} \sin \alpha$$

แทนค่าสถานะเริ่มต้นนี้ในสมการที่ (2.27) จะได้

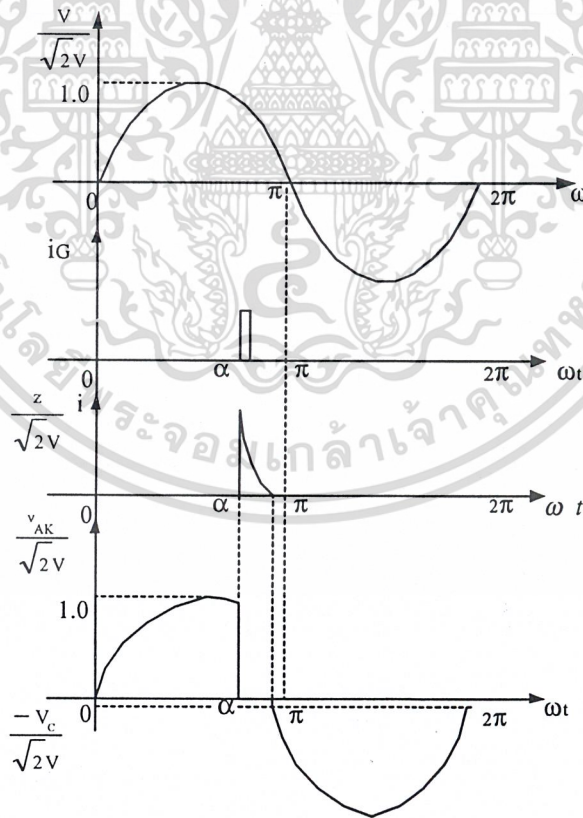
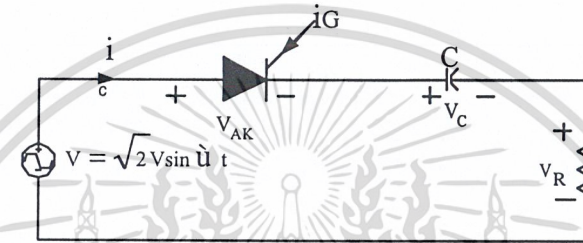
$$\frac{\sqrt{2} V}{R} \sin \alpha = \frac{\sqrt{2} V}{R} \sin(\alpha + \phi) + A e^{-\frac{\alpha}{\omega RC}}$$

$$A = \frac{\sqrt{2} V}{Z} \left[ \frac{Z}{R} \sin \alpha - \sin(\alpha + \phi) \right] e^{\frac{\alpha}{\omega RC}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า A ในสมการที่ (2.27)

$$\begin{aligned}
 i &= \frac{\sqrt{2} V}{Z} \sin(\omega t + \phi) + \frac{\sqrt{2} V}{Z} \left\{ \frac{Z}{R} \sin \alpha - \sin(\alpha + \phi) \right\} e^{\frac{\alpha}{\omega RC}} \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \\
 &= \frac{\sqrt{2} V}{Z} \left[ \sin(\omega t + \phi) + \left\{ \frac{Z}{R} \sin \alpha - \sin(\alpha + \phi) \right\} e^{\frac{1}{RC} \left( \frac{\alpha}{\omega} - t \right)} \right] \quad (2.28)
 \end{aligned}$$



รูปที่ 2.28 วงจรควบคุมเรกติไฟเออร์คลื่นเมื่อมีโหลดเป็น RC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณกระแสและแรงดันที่ตกคร่อมเอสซีอาร์ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.28 และถ้าในกรณีที่  $R = 0$  โอห์ม คือ มีแต่คาปาซิเตอร์อย่างเดียว เช่น วงจรเรกติไฟเออร์ที่มีค่าคาปาซิเตอร์ค่าสูง ๆ เป็นตัวฟิลเตอร์ให้แรงดันเอาต์พุตที่จ่ายให้แก่โหลดเรียบขึ้น เมื่อทำการทริกให้เอสซีอาร์นำกระแสที่  $\omega t = \alpha$  จะมีแรงดันคร่อมคาปาซิเตอร์  $V_C = \sqrt{2}V \sin\alpha$  เกิดกระแสเป็นพัลส์สูงมากเพราะไม่มี ความต้านทานต่ออยู่ในวงจรเลย ในการนี้จะทำให้เอสซีอาร์เสียหายได้ แม้แต่ในวงจรเรกติไฟเออร์ที่ใช้ไดโอดทำหน้าที่แทนเอสซีอาร์ เมื่อทำการปิดสวิตช์จ่ายไฟจากแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับเข้า วงจรเรกติไฟเออร์ที่ใช้ไดโอด ที่ไดโอดก็จะเสียหายเนื่องจากกระแสกระชากเป็นพัลส์สูงมากนี้

#### 2.6.4 Single-phase Full-wave Controlled Rectifier

ในวงจรการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส ครึ่งลูกคลื่นจะใช้ ไดโอดหรือเอสซีอาร์เพียงตัวเดียว แต่ในการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟสเต็มลูกคลื่น จะมีลักษณะการต่อหลายแบบ ซึ่งจะอธิบายหัวข้อต่อไป ซึ่งถ้าใช้ไดโอดจะไม่สามารถควบคุมแรงดันเฉลี่ยเอาต์พุตได้ แต่ถ้าใช้เอสซีอาร์ร่วมด้วยจะสามารถควบคุมแรงดันเฉลี่ยเอาต์พุตได้

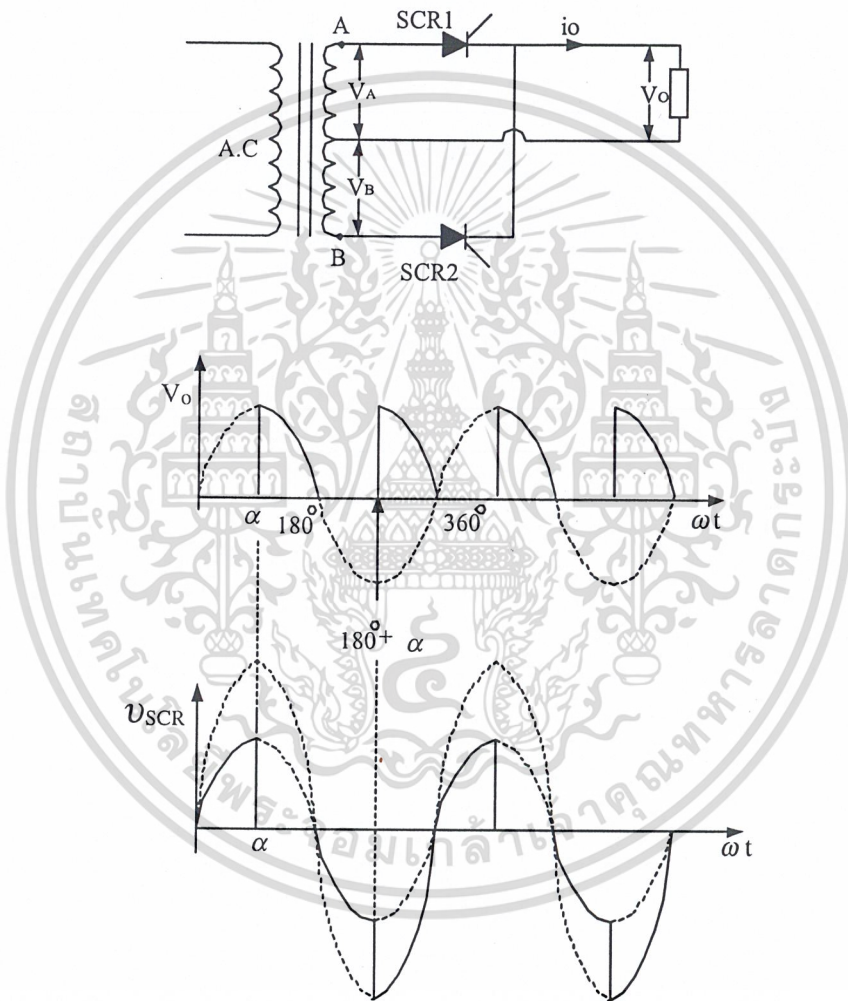
#### 2.6.5 Full-wave Rectifier with Center-tap Transformer

การแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟกระแสตรงแบบเต็มลูกคลื่น โดยใช้หม้อแปลงที่มีจุดกึ่งกลาง ดังแสดงในรูปที่ 2.29 (ก) จะใช้เอสซีอาร์เพียง 2 ตัว เปลี่ยนกันนำกระแสตัวละครึ่งลูกคลื่น เอสซีอาร์ 1 สามารถถูกทริกให้นำกระแสที่แรงดัน  $V_A$  เป็นบวกเมื่อเทียบกับจุดกึ่งกลางของหม้อแปลง โดยทำการทริกให้เอสซีอาร์นำกระแสที่มุม  $\alpha$  หรือกล่าวได้ว่ามุมทริกเกอร์เท่ากับ  $\alpha$  ในกรณีที่โหลดเป็นความต้านทานอย่างเดียว เมื่อทริกให้เอสซีอาร์ 1 นำกระแสที่มุม  $\alpha$  แล้วเอสซีอาร์ 1 จะหยุดนำกระแสเมื่อ  $V_A$  ตกลงสู่ศูนย์ คือ ที่มุม  $180$  องศา ดังแสดงในรูปที่ 2.29 (ข) และทริกให้เอสซีอาร์ 2 นำกระแสที่มุม  $180^\circ + \alpha$  และเอสซีอาร์ 2 จะหยุดนำกระแสที่มุม  $360$  องศา แรงดันกระแสตรงเฉลี่ยที่โหลดจะมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} V_{O(\text{ave})} &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} V_A \sin \omega t \, d(\omega t) \\ &= \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_A (1 + \cos\alpha) \end{aligned} \quad (2.29)$$

$V_A = V_B =$  แรงดันอาร์เอ็มเอสระหว่างขั้ว A และ B เทียบกับจุดกึ่งกลางของหม้อแปลงทาง  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สละไปส่วนแรกการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ด้านขจัดจ่ายไฟ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่โหลดเป็นอินดักทีฟโหลด เอสซีอาร์ 1 ยังคงนำกระแสต่อไป ถึงแม่แรงดัน  $V_A$  เป็นลบ ดังแสดงในรูปที่ 2.30 ขณะที่แรงดัน  $V_A$  เป็นลบ แรงดัน  $V_B$  จะเป็นบวก และเมื่อเอสซีอาร์ 2 มีสัญญาณเทรiggerให้นำกระแส เอสซีอาร์ 2 ก็จะนำกระแสทำให้เอสซีอาร์ 1 ได้รับรีเวิร์คไบแอสเป็นการทำให้เอสซีอาร์ 1 หยุดนำกระแส ซึ่งจะกล่าวได้ว่าเอสซีอาร์ 1 ถูกทำให้หยุดนำกระแส (Commutated) โดยเอสซีอาร์ 2

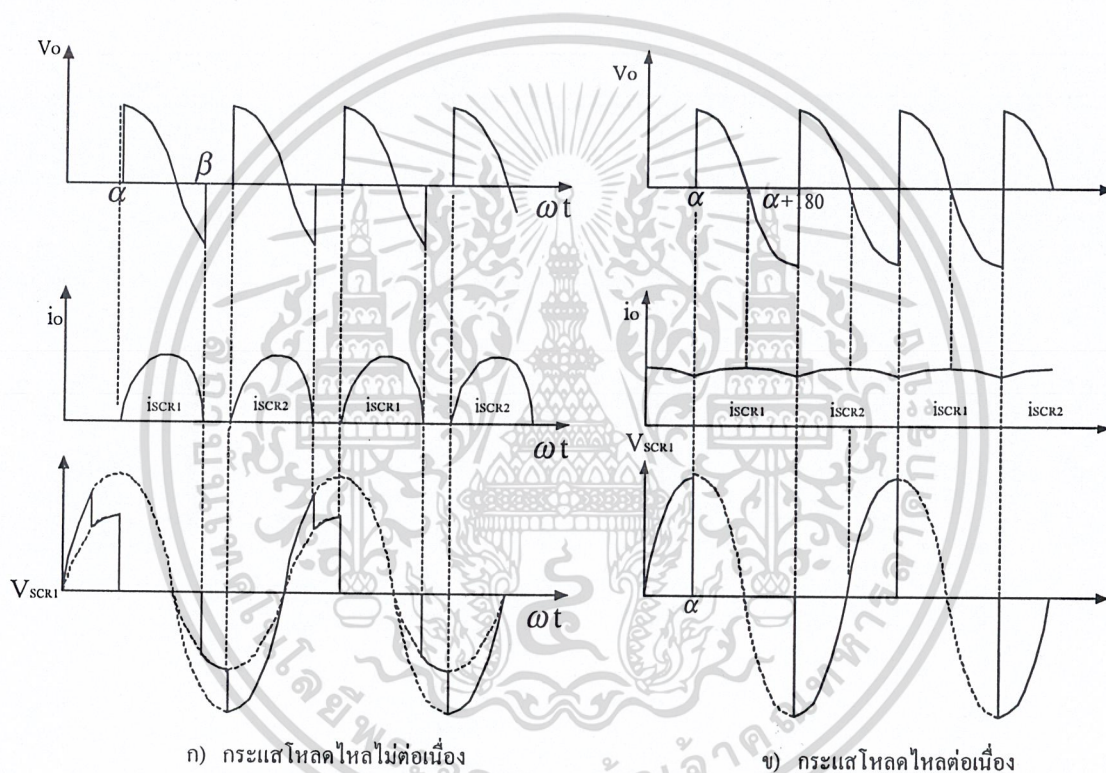


รูปที่ 2.29 Full-wave Rectifier with Center-tap Transformer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่มิกระแสไหลต่อเนื่องคือ มุมทริกเกอร์, เอสซีอาร์หยุดนำกระแสที่มุม  $\beta$  ดังแสดงในรูปที่ 2.30 (ก) จะมีแรงดันเฉลี่ยเอาต์พุตเท่ากับ

$$\begin{aligned} V_{O(\text{ave})} &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} \sqrt{2} V_A \sin \omega t \, d(\omega t) \\ &= \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot V_A [-\cos \beta + \cos \alpha] \end{aligned} \quad (2.30)$$



รูปที่ 2.30 โหลดเป็นอินดักทีฟโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่กระแสไหลต่อเนื่อง (Continuous Conduction) พิจารณาโดยแทนค่าลงในสมการที่ (2.20)

$$\begin{aligned} \sin(\beta - \phi) - \sin(\alpha - \alpha) e^{\frac{R}{L} \left( \frac{\alpha - \beta}{\omega} - \frac{\beta}{\omega} \right)} &= 0 \\ \sin(\beta - \phi) &= 0 \\ &= \sin 180^\circ \\ \beta &= 180^\circ + \phi \\ &= 180^\circ + \alpha \end{aligned} \quad (2.31)$$

ฉะนั้นกระแสที่ไหลผ่านเอสซีอาร์ 1 จะตกเป็นศูนย์ที่มุม  $\beta = 180^\circ + \phi$  และทำการทริกเอสซีอาร์ 2 ที่มุม  $\phi$  (เมื่อมุมทริกเกอร์  $\alpha = \phi$ ) เพราะฉะนั้นเมื่อมุมทริกเกอร์  $\alpha < \phi$  กระแสที่ไหลผ่านเอสซีอาร์ 1 ยังไม่ตกลงเป็นศูนย์ เอสซีอาร์ 2 ก็ถูกทริกเกอร์ให้นำกระแส กระแสที่ไหลผ่านโหลดจึงไม่ตกลงเป็นศูนย์ จึงเป็นสถานะที่กระแสไหลต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 2.30 (จ) จะมีแรงดันเฉลี่ยเอาต์พุตเท่ากับ

$$\begin{aligned} V_{O(ave)} &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2} V_A \sin \omega t \, d(\omega t) \\ &= \frac{\sqrt{2} V_A}{\pi} \cdot [-\cos(\pi + \alpha) + \cos \alpha] \\ &= \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_A \cos \alpha \end{aligned} \quad (2.32)$$

$V = V_A = V_B =$  แรงดันอาร์เอ็มเอสที่จุดกึ่งกลางของหม้อแปลง

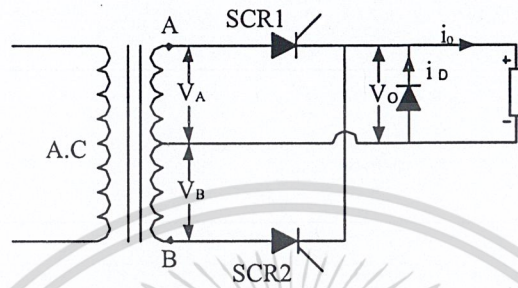
ในกรณีที่โหลดเป็นอินดักทีฟโหลดและมี Free-wheeling Diode ต่อขนานกับโหลด ดังแสดงในรูปที่ 2.31 (ก) สัญญาณของแรงดันที่โหลดจะไม่ลดลงต่ำกว่าศูนย์ ไดโอดจะนำกระแสรักษากระแสที่ไหลผ่านโหลดให้ไหลต่อเนื่องอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.31 (จ) แรงดันเฉลี่ยเอาต์พุตจะมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} V_{O(ave)} &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} V \sin \omega t \, d(\omega t) \\ &= \frac{\sqrt{2} V}{\pi} (1 + \cos \alpha) \end{aligned}$$

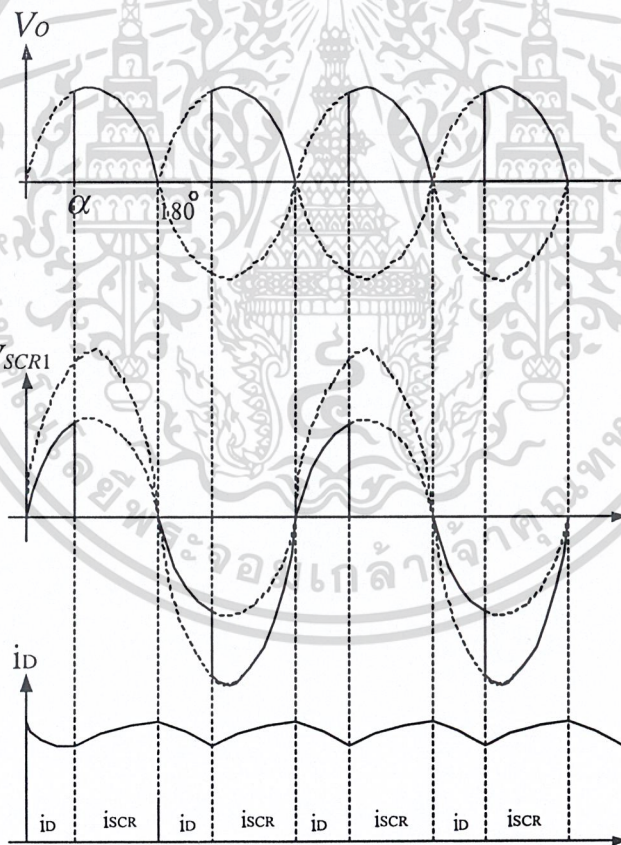
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาของเอกสารทุกครั้งที่มีการแก้ไข (2.33) ใช้

Free-wheeling Diode จะต้องสามารถทนกระแสสูงสุดของโหลด และต้องทนแรงดันซึ่งเท่ากับ  $\sqrt{2}V$  โวลต์

จงสังเกตว่าเอสซีอาร์ทั้งสองต้องทนแรงดันมากกว่า  $2(\sqrt{2}V)$



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.31 วงจรที่มี Flywheel-diode ต่อขนานกับอินดักทีฟโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแรงดันสูงสุด ครึ่งหนึ่งของขดจ่ายไฟ (Secondary Winding) =  $V_m$

แรงดันเอาต์พุต =  $V_{O(ave)} = V_{dc}$

กระแสเฉลี่ยเอาต์พุตต่อครึ่งหนึ่งของขดจ่ายไฟ =  $\frac{I_{dc}}{2} = \frac{I_{O(ave)}}{2}$

กระแสอาร์เอ็มเอสเอาต์พุตต่อครึ่งหนึ่งของขดจ่ายไฟ =  $\sqrt{\frac{(I_{dc})^2}{2}} = 0.707 I_{dc}$

แรงดันอาร์เอ็มเอสต่อครึ่งหนึ่งของขดจ่ายไฟ =  $\frac{V_m}{\sqrt{2}} = V_{r.m.s.}$

$$= \frac{\pi}{2\sqrt{2}} V_{O(ave)} = 1.11 V_{dc}$$

ขดจ่ายไฟมีค่า Volt-amperes (R.M.S) =  $2 \times 0.707 I_{dc} \times 1.11 V_{dc}$   
 $= 1.57 V_{dc} \cdot I_{dc}$

เมื่อ  $\frac{N_1}{N_2} = 1$

แรงดันอาร์เอ็มเอสที่ขดรับไฟ (Primary Winding) =  $1.11 V_{dc}$

กระแสอาร์เอ็มเอสที่ขดรับไฟ =  $I_{dc}$

ขดรับไฟมีค่า Volt-amperes (R.M.S) =  $1.11 V_{dc} \cdot I_{dc}$

เอสซีอาร์จะต้องทำกระแสได้มากกว่า  $\frac{I_{dc}}{2}$

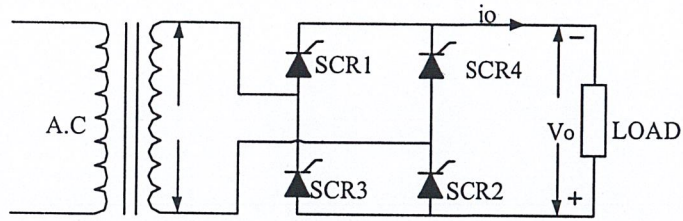
และต้องทนแรงดันรีเวิร์ดได้มากกว่า  $3.14 V_{dc}$

### 2.6.6 Fully Controlled Single-phase Bridge

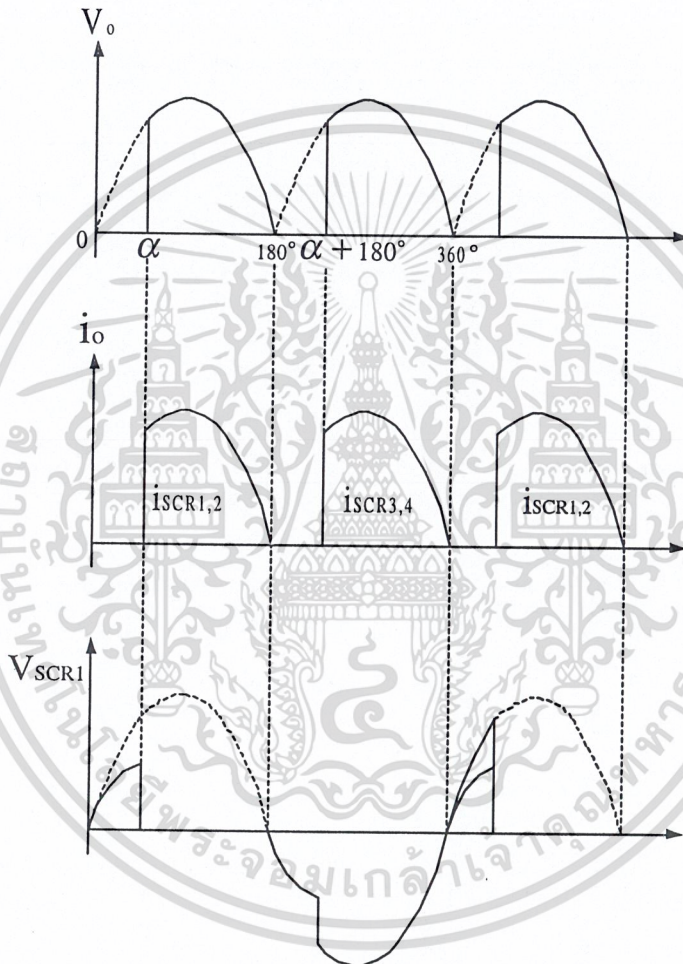
วงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบบริดจ์ โดยควบคุมเต็มคลื่นจะประกอบด้วยเอสซีอาร์ จำนวน 4 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.32 ในการควบคุมแบบนี้จะสามารถจ่ายพลังงานกลับสู่แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับได้ คือ ในกรณีที่โหลดเป็นมอเตอร์กระแสตรง

กระแสไหลผ่านโหลดเมื่อเอสซีอาร์ 1 และ 2 ถูกทริกให้นำกระแสพร้อมกัน และเอสซีอาร์ 3 และ 4 จะต้องถูกทริกให้นำกระแสในครั้งถัดไป จะสังเกตว่าเอสซีอาร์สองตัวที่ต้องทริกให้นำกระแสพร้อมกัน ขั้วแคโทดไม่ได้ต่อร่วมกันและมีระดับต่างกัน เมื่อต้องการจะใช้วงจรสร้างสัญญาณทริกวงจรถือเดียวกัน จึงจำเป็นจะต้องใช้ Pulse Transformer ดังแสดงในรูปที่ 2.35 หรือใช้ Opto-coupler มาแยกแคโทดของเอสซีอาร์ทั้งสองออกจากกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



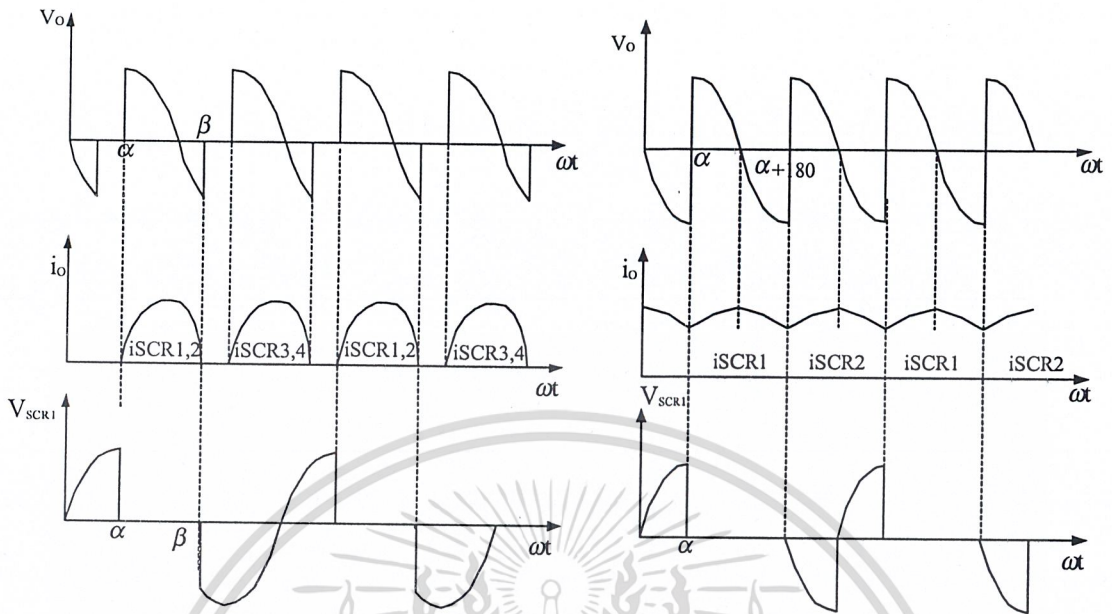
(ก)



(ข) โหลดเป็นความต้านทาน

รูปที่ 2.32 Full-controlled Single Phase Bridge with Resistive Load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) โหลดเป็นอินดักทีฟ กระแสโหลดไหลไม่ต่อเนื่อง

(ข) โหลดเป็นอินดักทีฟโหลด กระแสโหลดไหลต่อเนื่อง

รูปที่ 2.33 Fully-controlled Single Phase Bridge with Inductive Load

สัญญาณของแรงดันขณะที่มีโหลดเป็นความต้านทานอย่างเดียว ดังแสดงในรูปที่ 2.32 (ข) ทำการทริกเอสซีอาร์ให้นำกระแสที่มุม  $\alpha$  เอสซีอาร์จะนำกระแสจนกระทั่งแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟ กระแสสลับตกเป็นศูนย์แรงดันเฉลี่ยที่โหลดที่ค่าเท่ากับ

$$V_{O(ave)} = \frac{\sqrt{2}V}{\pi} (1 + \cos \alpha) \tag{2.34}$$

สัญญาณของแรงดันขณะที่มีโหลดเป็นอินดักทีฟโหลด แต่กระแสไหลไม่ต่อเนื่องทำการทริกเอสซีอาร์ให้นำกระแสที่มุม  $\alpha$  และเอสซีอาร์จะหยุดนำกระแสที่มุม  $\beta$

$$V_{O(ave)} = \frac{\sqrt{2}V}{\pi} (\cos \alpha - \cos \beta) \text{ ที่ } \alpha < \phi \tag{2.35}$$

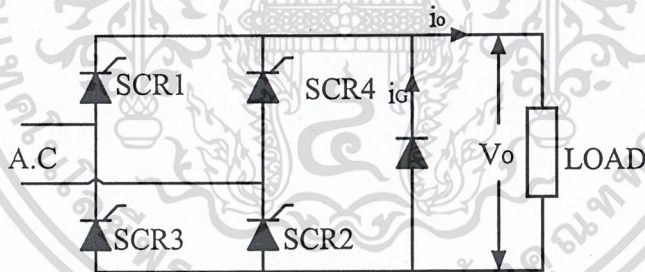
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณของแรงดันขณะที่มีโหลดเป็นอินดักทีฟโหลด แต่กระแสไหลดไหลอย่างต่อเนื่อง คือ เริ่มทริกเอสซีอาร์ 1 และ 2 ให้นำกระแสที่มุม  $\alpha$  เอสซีอาร์ทั้งสองหยุดนำกระแสที่มุม  $180^\circ + \alpha$  และเริ่มทริกเอสซีอาร์ 3 และ 4 ให้นำกระแสที่มุม  $180^\circ + \alpha$  ดังแสดงในรูปที่ 2.33 (ข) แรงดันเฉลี่ยที่ โหลดมีค่าเท่ากับ

$$V_{O(ave)} = \frac{2\sqrt{2}V}{\pi} \cos\alpha \quad \text{ที่ } \alpha \leq \phi \quad (2.36)$$

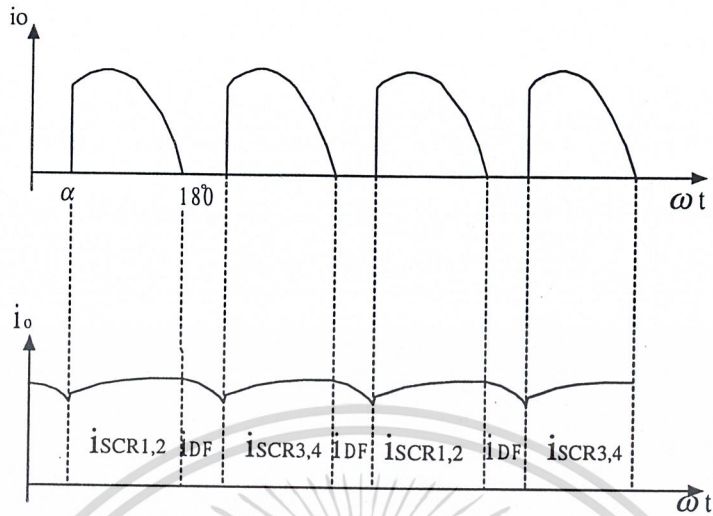
สัญญาณของแรงดันขณะที่มีโหลดเป็นอินดักทีฟโหลด ที่มี Free-wheeling Diode ต่อขนาน อยู่ เมื่อทริกเอสซีอาร์ให้นำกระแสที่มุม  $\alpha$  และเอสซีอาร์จะหยุดนำกระแส เมื่อแรงดันตกเป็นศูนย์ หรือที่มุม  $180$  องศา กระแสจากโหลดจะไหลผ่าน Free-wheeling Diode แทน จะได้สัญญาณของ แรงดัน ดังแสดงในรูปที่ 2.34 แรงดันเฉลี่ยที่มีโหลดมีค่าเท่ากับ

$$V_{O(ave)} = \frac{\sqrt{2}V}{\pi} (1 + \cos\alpha) \quad (2.37)$$

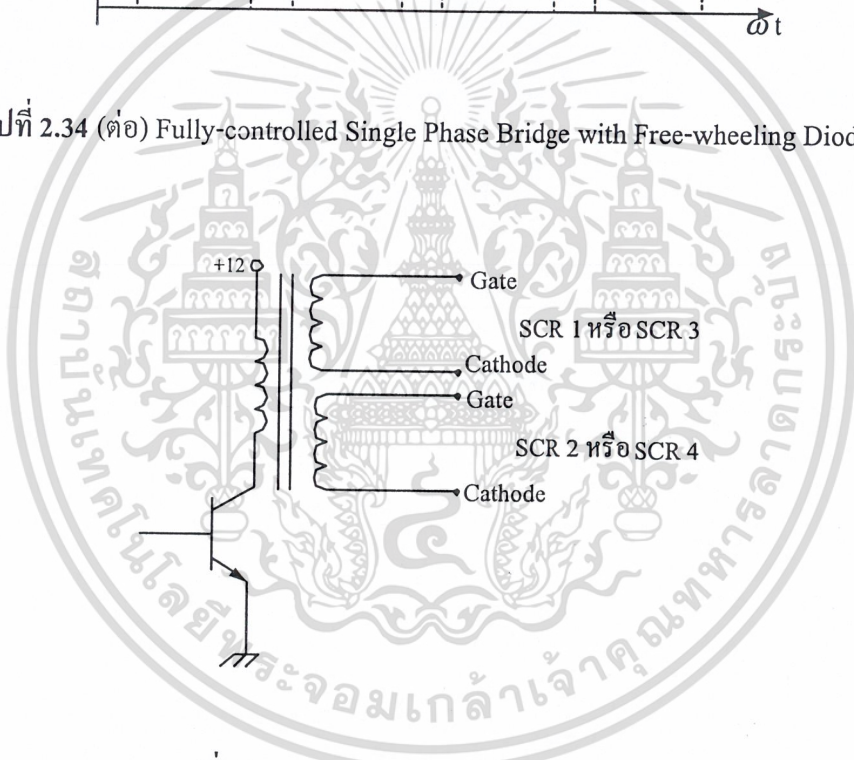


รูปที่ 2.34 Fully-controlled Single Phase Bridge with Free-wheeling Diode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



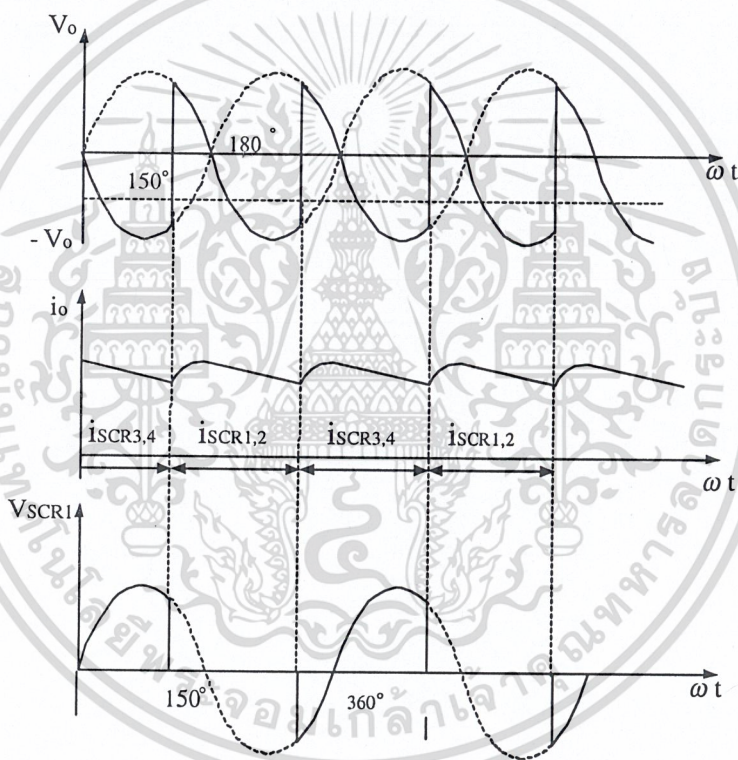
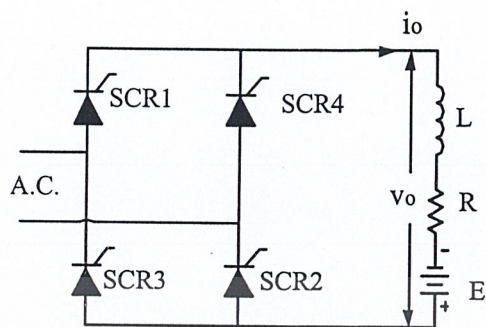
รูปที่ 2.34 (ต่อ) Fully-controlled Single Phase Bridge with Free-wheeling Diode



รูปที่ 2.35 Firing Circuit Output Connections

จากสมการที่ (2.36) จะเห็นว่า ถ้า  $\alpha > 90$  องศา แรงดันเฉลี่ยที่โหลด  $V_{O(ave)}$  จะมีค่าเป็นลบ ในสถานะนี้ ถ้าที่โหลดมีแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง เช่น แบตเตอรี่ หรือ E.M.F. ที่อาร์มาเจอร์ของมอเตอร์กระแสตรง พลังงานจากแหล่งจ่ายไฟกระแสจะจ่ายสู่แหล่งจ่ายไฟกระแสลับ เรียกว่า เป็นสถานะของ Regeneration หรือ อินเวอร์เตอร์ (Inverter) สำหรับในกรณี  $\alpha = 150$  องศา แรงดันเฉลี่ยที่โหลดและแรงดันคร่อมเอสซีอาร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.36 ในสถานะของอินเวอร์เตอร์

แรงดันอาร์เอ็มเอสของขดจ่ายไฟ (Secondary Winding)

$$= 1.11 V_{o(ave)} = 1.11 V_{dc}$$

กระแสอาร์เอ็มเอสของขดจ่ายไฟ =  $I_{dc}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเมื่อใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันอาร์เอ็มเอสของขดรับไฟ (Primary Winding) =  $1.11 V_{dc}$

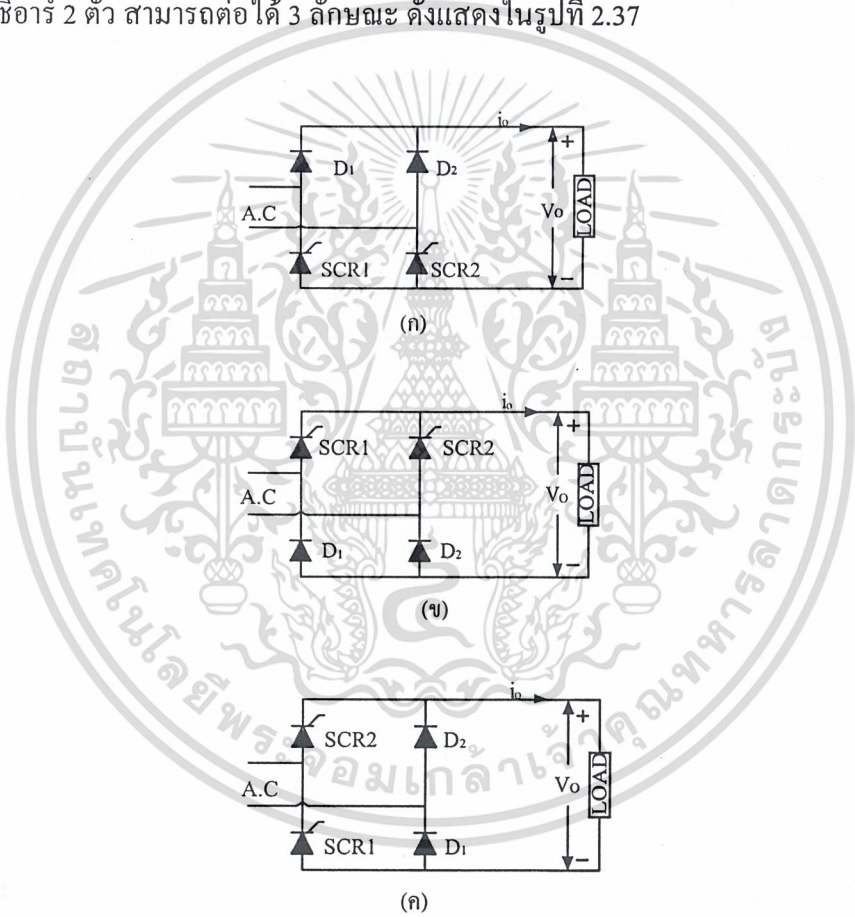
แรงดันอาร์เอ็มเอสของขดรับไฟ =  $I_{dc}$

จะต้องใช้เอสซีอาร์ทนกระแสได้มากกว่า  $\frac{I_{dc}}{2}$

และต้องใช้เอสซีอาร์ทนแรงดันรีเวิร์คได้มากกว่า  $1.57 V_{dc}$

### 2.6.7 Single-phase Half Controlled Bridge

การแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสไฟฟ้าตรงชนิด 1 เฟส แบบ Half Controlled Bridge โดยใช้เอสซีอาร์ 2 ตัว สามารถทำได้ 3 ลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 2.37



รูปที่ 2.37 (ก) แอนโอดของเอสซีอาร์ต่อกัน

(ข) แคโทดของเอสซีอาร์ต่อกัน

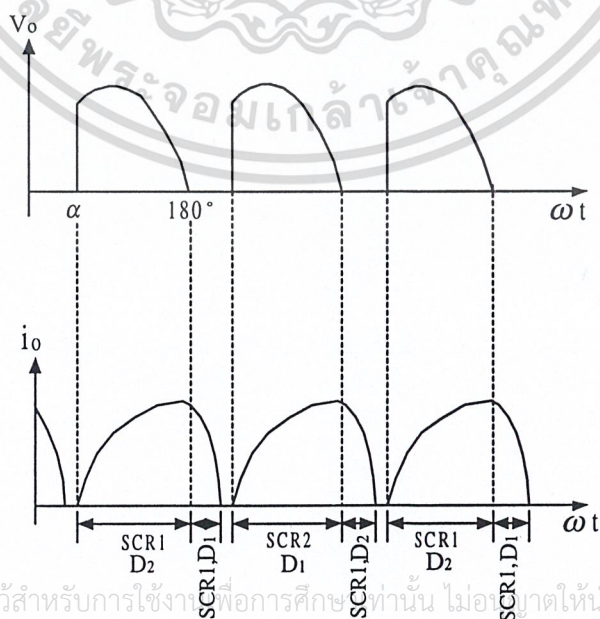
(ค) แอนโอดและแคโทดของเอสซีอาร์ต่อกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

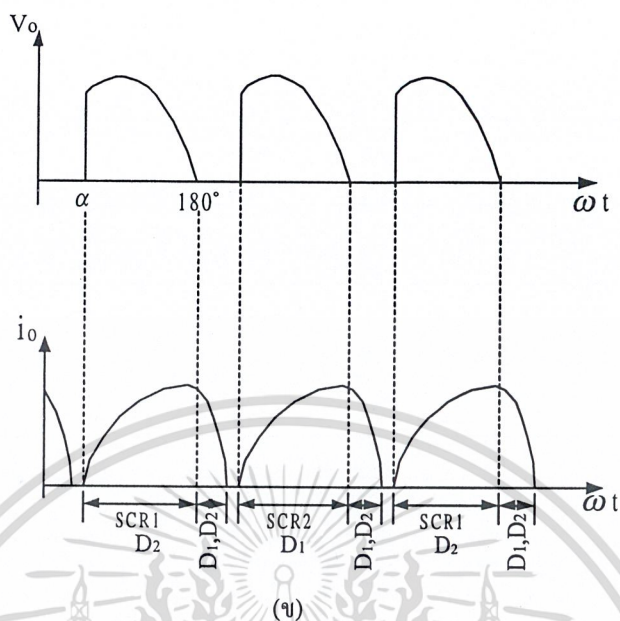
ในวงจรรูปที่ 2.37 เมื่อทำการทริกเอสซีอาร์ 1 ให้นำกระแส เมื่อเอสซีอาร์ 1 ได้รับการฟอร์เวิร์ดไบแอสจะมีกระแสไหลผ่านเอสซีอาร์ 1, ไดโอด  $D_2$  และโหลดทำการทริกเอสซีอาร์ 2 ให้นำกระแสเมื่อเอสซีอาร์ 2 ได้รับการฟอร์เวิร์ดไบแอสจะมีกระแสไหลผ่านเอสซีอาร์ 2, ไดโอด  $D_1$  และโหลด ดังแสดงในวงจรรูปที่ 2.37 (ก) และ (ค) วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างสัญญาณทริกเอสซีอาร์ทั้งสองแยกจากกันดังแสดงในวงจรรูปที่ 2.37 (ข) ไม่ต้องใช้ Pulse Transformer วงจรรูปที่ 2.37 (ค) ไดโอด  $D_1, D_2$  ทำหน้าที่เป็น Free-wheeling Diode ดังแสดงสัญญาณต่าง ๆ ในรูปที่ 2.39 (ข)

ในกรณีที่โหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว เมื่อทำการทริกเอสซีอาร์ให้นำกระแสที่มุม  $\alpha$  เอสซีอาร์ก็จะนำกระแสจนกระทั่งแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับตกเป็นศูนย์หรือมุมที่ 180 องศา แรงดันเฉลี่ยที่โหลดจะมีค่าเท่ากับ  $\frac{\sqrt{2}V}{\pi}(1 + \cos\alpha)$  สัญญาณแรงดันที่โหลดจะเหมือนกับที่แสดงในรูปที่ 2.32

ในกรณีที่โหลดเป็นอินดักทีฟโหลด แต่กระแสไหลไม่ไหลต่อเนื่อง เมื่อทำการทริกให้เอสซีอาร์ 1 ให้นำกระแสที่มุม  $\alpha$  กระแสจะไหลผ่านเอสซีอาร์ 1 และ  $D_1$  เมื่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับตกเป็นศูนย์หรือมุมที่ 180 องศา แต่ในวงจรรูปที่ 2.37 (ก) และ (ข) กระแสไหลจะไหลผ่านเอสซีอาร์ 1 และไดโอด  $D_1$  แทน แต่ในวงจรรูปที่ 2.37 (ค) กระแสไหลจะไหลผ่านไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  แทน จนกระทั่งกระแสไหลผ่านโหลดตกเป็นศูนย์จึงทำการทริกเอสซีอาร์ 2 ให้นำกระแสที่มุม  $180^\circ + \alpha$  ซึ่งมีลักษณะการนำกระแสเหมือนกับที่อธิบายผ่านมา สัญญาณต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.38 และแรงดันเฉลี่ยที่โหลดมีค่าเท่ากับ  $\frac{\sqrt{2}V}{\pi}(1 + \cos\alpha)$



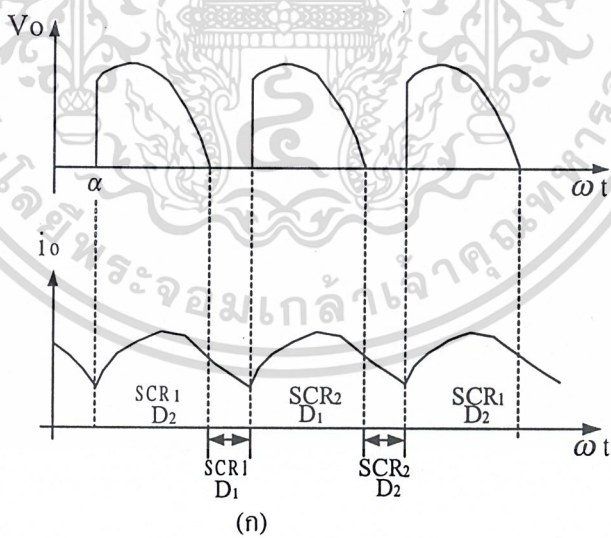
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา(ก) ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



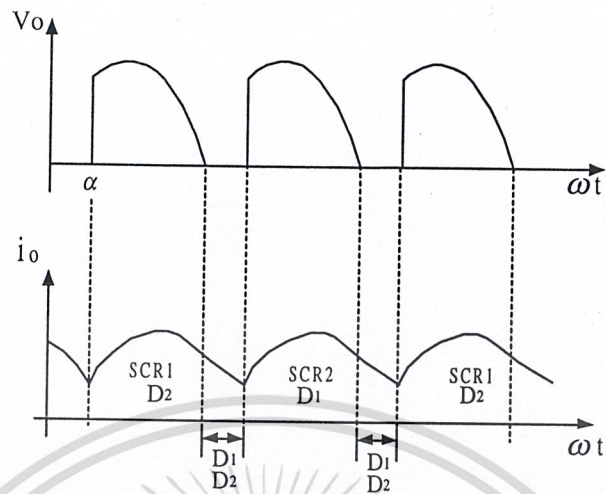
รูปที่ 2.38 กรณีที่โหลดเป็นอินดักทีฟโหลดแต่กระแสไหลไม่ต่อเนื่อง

(ก) ของวงจรรูปที่ 2.37 (ก) และ (ข)

(ข) ของรูปวงจรที่ 2.37 (ค)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



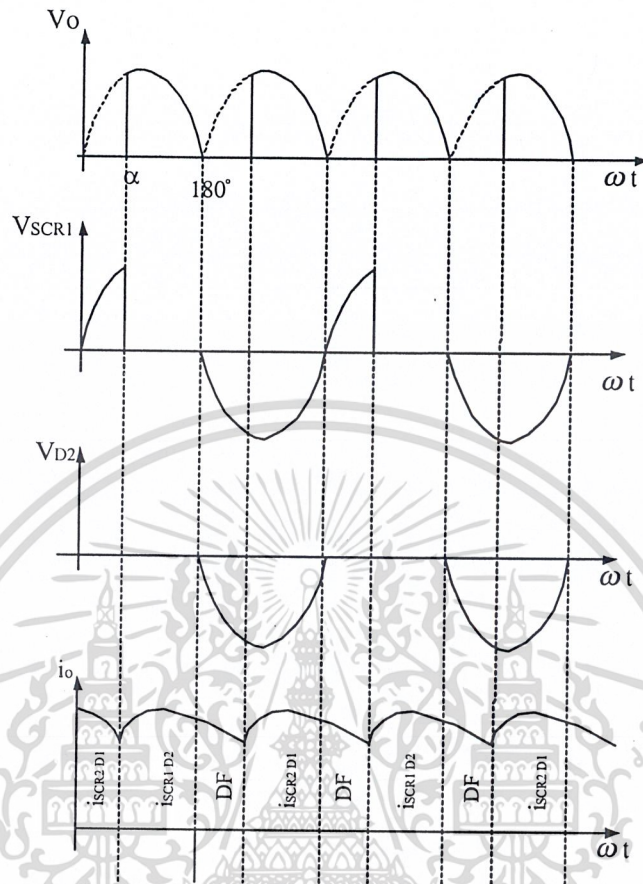
(ข)

รูปที่ 2.39 กระแสไหลอย่างต่อเนื่อง

(ก) สัญญาณของวงจรรูปที่ 2.37 (ก) และ (ข)

(ข) สัญญาณของวงจรรูปที่ 2.37 (ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.40 สัญญาณของวงจรรูปที่ 2.37 (ก) และ (ข) เมื่อมี Free-wheeling Diode

ในกรณีที่โหลดเป็นอินดักทีฟโหลดแต่ละกระแสไหลอย่างต่อเนื่อง และเมื่อทำการทริกให้เอสซีอาร์ 1 ให้นำกระแสที่มุม  $\alpha$  กระแสจะไหลผ่านเอสซีอาร์ 1 และ D1 เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับตกเป็นศูนย์หรือที่มุม  $180^\circ$  องศา วงจรรูปที่ 2.37 (ค) กระแสไหลจะไหลผ่านไดโอด D<sub>1</sub> และ D<sub>2</sub> จนกระทั่งทริกให้เอสซีอาร์ 2 นำกระแส สัญญาณต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.39 (ข) สำหรับวงจรรูปที่ 2.37 (ก) และ (ข) กระแสจะไหลผ่านเอสซีอาร์ 1 และไดโอด D<sub>1</sub> แทนดังแสดงในรูปที่ 2.39 กระแสที่ไหลผ่านโหลดจะไหลอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งทำการทริกเอสซีอาร์ 2 ให้นำกระแส ซึ่งในการทริกเอสซีอาร์ 2 จะทำให้เอสซีอาร์ 1 หยุดนำกระแส พิจารณาวงจรรูปที่ 2.37 (ก) และ (ข) และรูปที่ 2.39 (ก) เมื่อทริกให้เอสซีอาร์ 1 ให้นำกระแสที่มุม  $\alpha$  จนกระทั่งกระแสไหลผ่านเอสซีอาร์ 1 และไดโอด D<sub>1</sub> ถ้าสัญญาณทริกเกอร์ที่จ่ายให้กับเอสซีอาร์ 2 ไม่มี และกระแสไหลที่ไหลผ่านเอสซีอาร์ 1 และไดโอด D<sub>1</sub> ยังมีอยู่จนกระทั่งถึงมุม  $360^\circ$  องศา เอสซีอาร์ 1 จะนำกระแสต่อไป โดยมีกระแสไหลผ่านเอสซีอาร์ 1 และไดโอด D<sub>2</sub> ที่มุม  $360^\circ$  องศา ในกรณีนี้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงไม่สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตเป็นศูนย์ เพื่อไม่ให้เกิดข้อผิดพลาดนี้ขึ้นจึงจำเป็นต้องต่อ Free-wheeling Diode ขนานกับ โหลด ดังแสดงสัญญาณต่าง ๆ ในรูปที่ 2.40

## 2.7 การควบคุมมอเตอร์ดีซี

ปัจจุบันนิยมใช้มอเตอร์ดีซีกันมาก ก็เนื่องจากสามารถปรับอัตราความเร็วได้พิสัยกว้างมาก จึงทำให้มองข้ามข้อเสียในการที่มีคอมมิวเตเตอร์กับการที่มีขนาดใหญ่กว่ามอเตอร์เอซีที่มีกำลังม้าเท่ากัน แต่อย่างไรก็ตามถ้าเป็นระบบที่มีกำลังใหญ่มากกว่าก็จำเป็นต้องหันไปใช้มอเตอร์เอซี

เมื่อเลือกใช้มอเตอร์เอซีแล้วก็สามารถปรับค่าแรงดันดีซีเพียงวงจร (DC Voltage Supply) ที่ป้อนเข้าวงจรอาร์มาเจอร์หรือวงจรฟิลด์ ซึ่งจะสามารถปรับค่าวงจรได้หลากหลายแบบตามชนิดของมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.41

ทุก ๆ กรณีที่แสดงในรูปที่ 2.41 จะให้สมการสาเหตุและผลดังต่อไปนี้

$$E = E_b + I_a R_a \quad (2.38)$$

$$\omega = \frac{E_b}{K \omega \phi} \quad (2.39)$$

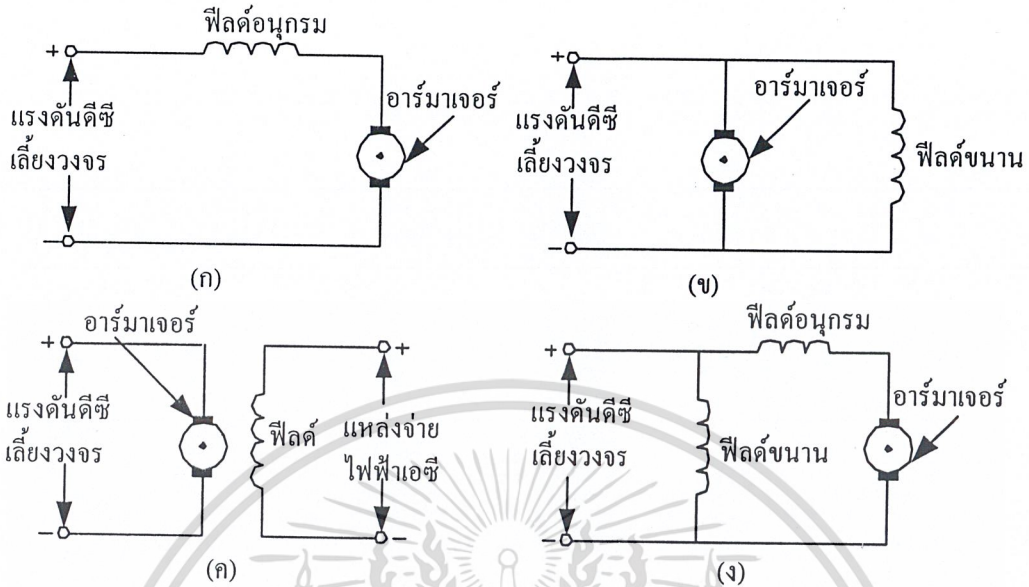
$$T = K_t \phi I_a \quad (2.40)$$

$$\phi = K_f I_f \quad (2.41)$$

เมื่อ	$E$	เป็นแรงดันดีซีเพียงวงจร
	$E_b$	เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้กลับของมอเตอร์ที่มีอัตราเร็ว $\omega$ และที่ฟิลด์ฟลักซ์ (Field Flux)
	$I_a$	เป็นค่าของกระแสในอาร์มาเจอร์ซึ่งทำให้มอเตอร์เกิดแรงหมุน $T$
	$I_f$	เป็นค่าของกระแสฟิลด์
และ	$K_\omega, K_t$ และ $K_f$	เรียกว่า เป็นตัวคงที่ของอัตราเร็วของแรงหมุนและฟลักซ์ตามลำดับ

$R_a$  เป็นความต้านทานต่าง ๆ ที่ต่ออนุกรมในวงจรที่ผ่านอาร์มาเจอร์ ซึ่งอาจจะเป็นความต้านทานของขดลวดอาร์มาเจอร์ร่วมกับความต้านทานของรอยสัมผัสที่แปรปรวนร่วมกับคอมมิวเตเตอร์ (ซึ่งอาจจะเรียกสั้น ๆ ว่าความต้านทานอาร์มาเจอร์  $R_a$ ) หรืออาจเป็นผลบวกของความต้านทานอาร์มาเจอร์  $R_a$  กับความต้านทานของฟิลด์  $R_f$  ขึ้นอยู่กับแบบที่เราใช้ต่อวงจรของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือสงวนชื่อผู้พิมพ์หรือชื่อผู้จำหน่าย ไม่สามารถนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.41 การต่อวงจรอาร์มาเจอร์และวงจรฟิวด์ของเครื่องกลไฟฟ้าค้ำชี

- (ก) ต่อวงจรฟิวด์เป็นอนุกรมกับวงจรอาร์มาเจอร์
- (ข) ต่อวงจรฟิวด์ขนานกับวงจรอาร์มาเจอร์
- (ค) ต่อวงจรฟิวด์แยกออกจากวงจรอาร์มาเจอร์
- (ง) ต่อวงจรฟิวด์แบบผสม

ถ้าพิจารณาสมการที่ (2.38) และ (2.39) เมื่อให้ฟลักซ์  $\phi$  มีค่าคงที่ เราจะเห็นได้ว่าอัตราเร็ว  $\omega$  เป็นสัดส่วนโดยตรงอย่างหยาบ ๆ กับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ (โดยถือว่าแรงดันตกคร่อมอาร์มาเจอร์มีค่ามากจึงไม่ต้องคำนึงถึง) ทั้งนี้ก็เนื่องจากเมื่อมีแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าสูงก็จะมีกระแสอาร์มาเจอร์สูงขึ้นทำให้แรงหมุนมากขึ้น (ดังสมการที่ (2.40)) เพราะฉะนั้นก็จะทำให้มอเตอร์หมุนเร็วขึ้น และถ้าเราลดแรงดันป้อนเข้าลงกระแสอาร์มาเจอร์จะลดลงและแรงหมุนก็น้อยลงทำให้มอเตอร์หมุนช้าลง

ถ้าเราให้แรงดันป้อนให้มอเตอร์มีค่าคงที่แต่เปลี่ยนค่าของกระแสฟิวด์ ก็จะไปทำให้ฟิวด์ฟลักซ์เปลี่ยนค่าตามไปด้วยโดยสมการที่ (2.39) เราจะเห็นได้ว่าอัตราเร็วของมอเตอร์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับฟิวด์ฟลักซ์หรือกระแสฟิวด์ คือเมื่อกระแสฟิวด์มีค่ามากมอเตอร์จะหมุนช้าลง แต่กระแสฟิวด์มีค่าน้อยมอเตอร์จะหมุนเร็วขึ้น ทั้งนี้เพราะว่าขณะที่มอเตอร์กำลังหมุนอยู่นั้นก็จะมี

แรงแม่เหล็กมาดึงดูดอาร์มาเจอร์ไว้ด้วยค่านิ่ง เมื่อเราเพิ่มกระแสฟิวด์แรงดึงดูดแม่เหล็กมีกำลังแรงขึ้นจึงทำให้มอเตอร์หมุนช้าลง แต่เมื่อเราลดกระแสฟิวด์ลงแรงดึงดูดแม่เหล็กจะลดลง ทำให้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เด็ดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีไปใช้

แรงหมุนแห่งความเฉื่อยของมอเตอร์ร่วมกับแรงหมุนที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากไฟฟ้าจะมากกว่าแรงดึงดูดแม่เหล็ก มอเตอร์จึงหมุนเร็ว แต่ถ้าเราลดกระแสฟลักซ์เป็นศูนย์ มอเตอร์ไม่สามารถหมุนเร็วเข้าหาอินฟินิตี้ได้ เพราะว่าแรงหมุนของมอเตอร์ในสมการ (2.40) มีค่าเป็นศูนย์ด้วย มอเตอร์ก็จะหมุนด้วยความเฉื่อยซึ่งจะค่อย ๆ หมุนช้าลงและหยุดลงในที่สุด ดังการควบคุมอัตราเร็วได้พิสัยกว้างมากนั้นจะเป็นมอเตอร์อนุกรม (คือต่อฟลักซ์อนุกรมกับอาร์มาเจอร์) และจะให้แรงหมุนตอนสตาร์ทสูงและจะได้พิสัยกว้างพอสมควร จะเป็นมอเตอร์แบบต่อฟลักซ์แยกออกจากวงจรอาร์มาเจอร์ แต่สำหรับมอเตอร์แบบขนาน (คือต่อฟลักซ์ขนานกับวงจรอาร์มาเจอร์) จะมีอัตราเร็วค่อนข้างคงที่ที่เราจะปรับอัตราเร็วได้ด้วยการปรับค่าความต้านทานภายในวงจรอาร์มาเจอร์และวงจรฟลักซ์ได้ แต่แรงหมุนตอนสตาร์ทมีไม่ค่อนมาค้อมอเตอร์แบบอนุกรมไม่ได้ ดังนั้นมอเตอร์อนุกรมเหมาะสมที่ใช้ในการขับเคลื่อนต่าง ๆ

ถ้าพิจารณาสมการที่ (2.39) ขณะที่มอเตอร์กำลังเริ่มเดินเครื่องหรือสตาร์ท เราจะได้ว่ามอเตอร์แรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับมีค่าต่ำมากเมื่อมอเตอร์หมุนช้า ๆ เพราะฉะนั้นจากสมการที่ (2.38) เราจะเห็นได้ว่ากระแสอาร์มาเจอร์ที่มีค่าสูงมาก และสมการที่ (2.40) ก็จะทำให้เราเห็นว่าแรงหมุนตอนสตาร์ทที่มีค่าสูงซึ่งเป็นข้อดีของมอเตอร์ดีซี โดยเฉพาะอย่างยิ่งมอเตอร์อนุกรม กระแสที่ไหลผ่านอาร์มาเจอร์ก็จะไหลผ่านฟลักซ์ด้วย จึงมีกระแสและฟลักซ์ตอนสตาร์ทที่มีค่าสูงด้วยกันทั้งคู่ ทำให้แรงหมุนตอนสตาร์ทสูงกว่ามอเตอร์ดีซีที่ต่อแบบอื่น ๆ

ดังนั้นในตอนสตาร์ทและการปรับอัตราเร็ว จะขึ้นอยู่กับ การปรับกระแสและแรงดันที่ป้อนให้มอเตอร์ ซึ่งอาจจะทำได้ด้วยการต่อความต้านทานเข้าไปในวงจรที่ต้องการ แล้วจึงปรับค่าความต้านทานตัวนั้น แต่มีข้อเสียอยู่ที่มีกำลังสูญเสียในความต้านทานและขณะทำการปรับเปลี่ยนความต้านทานจะมีการขัดสีและเกิดประกายไฟทำให้ความต้านทานเสียได้ จึงต้องการการซ่อมบำรุง ดังนั้นในปัจจุบันเราใช้ไทรสเตอร์เข้ามาต่อแทนตัวต้านทานที่กล่าวนั้น แล้วควบคุมการนำกระแสของไทรสเตอร์เราจะได้เราสามารถเปลี่ยนค่าแรงดันและกระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.41 ซึ่งเราจะได้แหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นดีซีหรือเอซีก็ได้ ไทรสเตอร์จะเรียงกระแสให้ไหลได้ทางเดียวเสมอ เมื่อบังคับให้ไทรสเตอร์ปิดและเปิดการนำกระแสให้มีลักษณะขาดความต่อเนื่องต่าง ๆ ด้วยความถี่ปิดเปิดเร็วมากก็จะให้ค่าเฉลี่ยระดับแรงดันต่าง ๆ ซึ่งอัตราเร็วของมอเตอร์จะขึ้นอยู่กับค่าของระดับเฉลี่ยนี้ที่ป้อนเข้ามอเตอร์ วิธีการที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้ารูปแบบต่าง ๆ ให้เป็นแรงดันไฟฟ้าดีซีเรียกว่า “การมอดูเลตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง” (Modulation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สองรูปแรกของรูปที่ 2.41 เป็นวิธีการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าดิซอินพุตคงที่ให้เป็นแรงดันไฟฟ้าดิซเอาต์พุตที่มีระดับเปลี่ยนแปลงค่าได้ ซึ่งจะทำให้ได้ด้วยการบังคับให้ไทรสเตอร์ปิด ๆ เปิด ๆ การนำกระแสอย่างรวดเร็ว วิธีการนี้จะทำให้แรงดันไฟฟ้าดิซอินพุตถูก “สับ” (Chop) ให้ขาดตอนเป็นห้วง ๆ หรือเป็นพัลส์จำนวนมากที่เอาต์พุตของไทรสเตอร์ที่ทำหน้าที่จะเป็น “ผู้สับหรือวงจรสับไฟฟ้า” (Chopper) โดยจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยน้อยกว่าอินพุต เราสามารถปรับค่าเฉลี่ยของแรงดันเอาต์พุตได้ด้วยการปรับอัตราส่วนของเวลาที่ไทรสเตอร์เปิดให้นำกระแสต่อเวลาปิดให้หยุดนำกระแสเราเรียกว่า “อัตราส่วนมาร์ค-สเปซ” (Mark-spaceratio) หรือ “ควบคุมอัตราส่วนเวลา” (Time Ratio Control : TRC) ซึ่งเราอาจทำได้ 3 วิธีดังนี้

1. ปรับค่าของ  $t_{on}$  แต่รักษาคาบ  $T$  (หรือความถี่) ให้คงที่
2. รักษาค่า  $t_{on}$  ให้คงที่ แต่ปรับค่าของคาบ  $T$
3. ปรับค่าของ  $t_{on}$  และของคาบ  $T$  ทั้งคู่

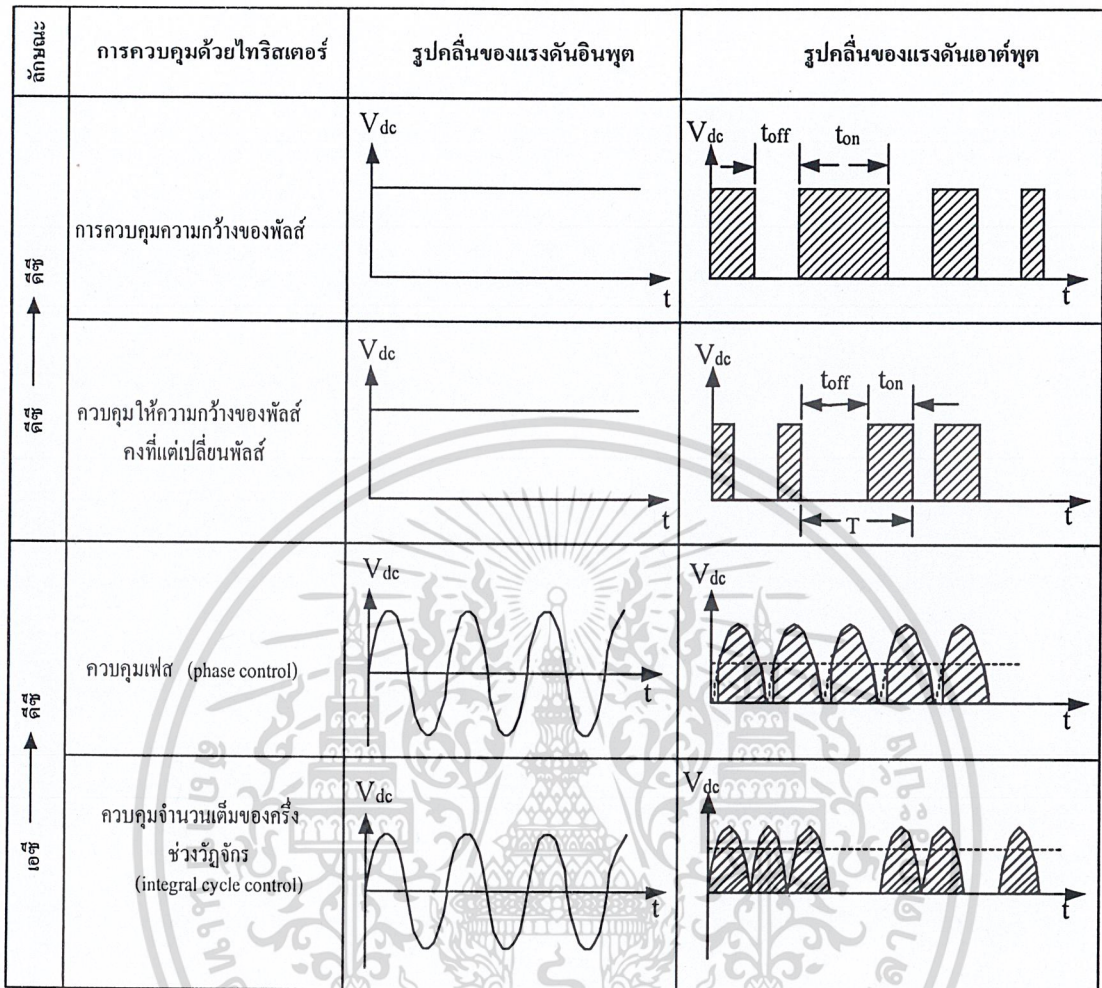
เมื่อ  $t_{on}$  เป็นช่วงเวลาที่ไทรสเตอร์เปิดให้กระแสไหล

$t_{off}$  เป็นช่วงเวลาที่ไทรสเตอร์เปิดให้กระแสหยุดไหล

$T = t_{on} + t_{off}$  เป็นคาบ และ

$f = \frac{1}{T}$  เป็นความถี่ของการที่ทำให้ไทรสเตอร์เปิดปิดการนำกระแส

สองรูปหลังของรูปที่ 2.41 เป็นวิธีการควบคุมแรงดันเฉลี่ยของแรงดันเอาต์พุตดิซจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าเอซีโดยใช้การเรียงกระแสด้วยไทรสเตอร์ วิธีแรกในการที่เราเรียงกระแสเอซีให้เป็นดิซนั้นให้เราบังคับให้ไทรสเตอร์เปิดนำกระแสที่เฟส (Phase) ต่าง ๆ ของครึ่งวัฏจักร (Cycle) ทำให้เราได้ค่าเฉลี่ยของแรงดันดิซ มีค่าต่าง ๆ ที่มีพิสัยกว้างมาก แต่มีตัวประกอบกำลังทางด้านอินพุตมีค่าค่อนข้างต่ำมาก วิธีนี้เป็นวิธีง่ายและนิยมใช้กันมาก เรียกว่าวิธี “ควบคุมเฟส” (Phase Control) วิธีที่สองใช้การควบคุมให้ไทรสเตอร์เปิดการนำกระแสเต็มช่วงหรือครึ่งช่วงวัฏจักรจำนวนหลายช่วง ซึ่งเมื่อนำไปป้อนเข้ามอเตอร์ มอเตอร์จะหมุนเร็วบ้างช้าบ้างรอบ ๆ อัตราเร็วเฉลี่ย และมอเตอร์จะหมุนด้วยอัตราเร็วที่ดีถ้าเราใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าเอซีที่มีความถี่สูง



รูปที่ 2.42 การมืออดจูเลตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

ในปัจจุบันเราจะมีแหล่งจ่ายไฟเอซีอยู่ทั่ว ๆ ไป และด้วยวิธีการข้างบนนี้เราไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการปิดให้ไทรสเตอร์หยุดนำกระแส เพราะฉะนั้นส่วนมากเราจึงนิยมใช้มอดูเลเตอร์ดีซีที่ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ ในบางกรณีที่โรงงานอุตสาหกรรมบางชนิดตั้งอยู่ในที่ห่างไกลที่การจ่ายไฟฟ้าเอซีมีไปไม่ถึงหรือในรถยนต์ไฟฟ้าหรือยานพาหนะอื่นใดที่ใช้แบตเตอรี่ (Battery) หรือเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) ใด ๆ เราก็จำเป็นต้องใช้วงจรสับไฟฟ้า ในบางกรณีไทรสเตอร์ต้องเปิดและปิดการนำกระแสด้วยความเร็วสูง ซึ่งหมายความว่าเราจะต้องปิดไทรสเตอร์ให้หยุดนำกระแสได้อย่างรวดเร็ว ในกรณีเช่นนี้เราต้องการไทรสเตอร์ชนิดพิเศษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกรณีแหล่งจ่ายไฟฟ้าดีซี เราก็อาจจะมีปัญหาเกี่ยวกับการปิดไทรสเตอร์ให้หยุดนำกระแส เราจำเป็นต้องใช้วงจรปิดให้หยุดนำกระแสเข้าช่วยทำให้การควบคุมมอเตอร์ด้วย “วงจรสับไฟฟ้า” ที่มีความยุ่งยากแต่เราก็สามารถทำได้สำเร็จและนำไปใช้งานเป็นประโยชน์ได้

สำหรับในรถไฟไฟฟ้าที่ใช้คอมมิวเตเตอร์มอเตอร์เอซีเฟสเดียว ซึ่งอาจจะมีปัญหาเกี่ยวกับการทำให้กระแสหยุดไหล เราจึงนิยมใช้มอเตอร์ดีซีที่ควบคุมด้วยไทรสเตอร์เข้าทำงานแทน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การออกแบบและการสร้าง

ในบทนี้จุดประสงค์จะกล่าวถึง การสร้างและการออกแบบชุดทดลองการควบคุมไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์ โดยแยกส่วนประกอบออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของฮาร์ดแวร์และส่วนของโปรแกรมทดลอง

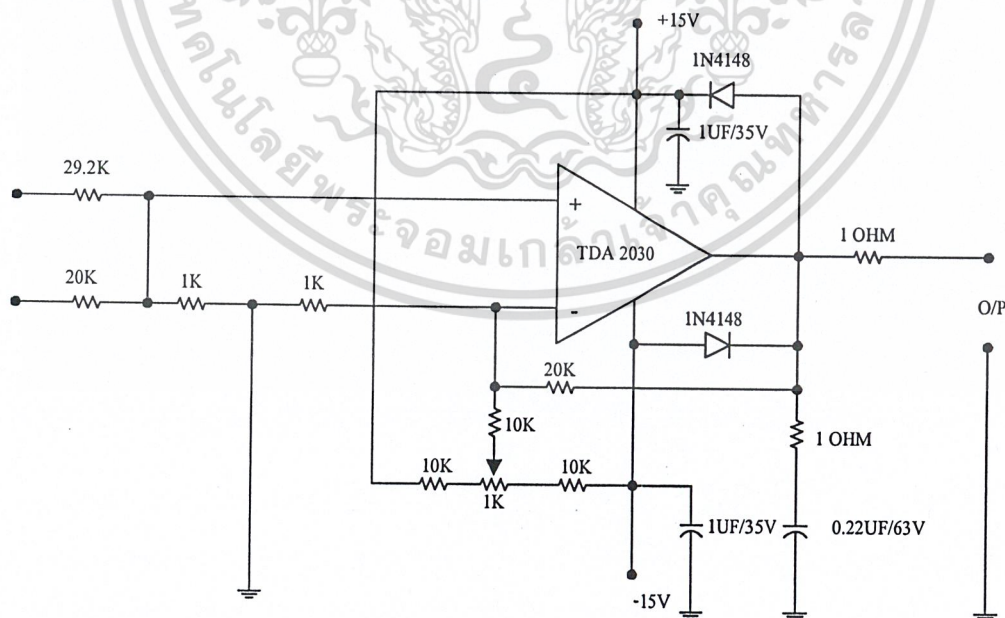
#### 3.1 การออกแบบและการสร้างทางด้านฮาร์ดแวร์

ชุดฝึกการควบคุมไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์ เป็นชุดฝึกที่ออกแบบเพื่อศึกษาการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง และการนำเอาอุปกรณ์ดังกล่าวไปใช้ในการควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น มอเตอร์กระแสตรง เป็นต้น

##### 3.1.1 การสร้างฮาร์ดแวร์

การสร้างฮาร์ดแวร์นั้นได้ประกอบวงจรส่วนต่างไว้บนบอร์ด ซึ่งประกอบด้วยวงจรส่วนต่างได้ดังนี้

###### 1. วงจร DC-Amplifier



รูปที่ 3.1 วงจร DC-Amplifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบวงจร DC-Amplifier จะใช้ IC เบอร์ TDA 2030 ประกอบ โดยจะให้ค่า  $V_u$  (DC-Voltage Gain of DC-Amplifier) ที่เป็นเชิงเส้น เพื่อใช้ในการจ่ายแรงดันให้ชุดควบคุมอิเล็กทรอนิกส์กำลัง สำหรับการคำนวณ Proportional Gain ( $V_u$ ) หาได้จาก

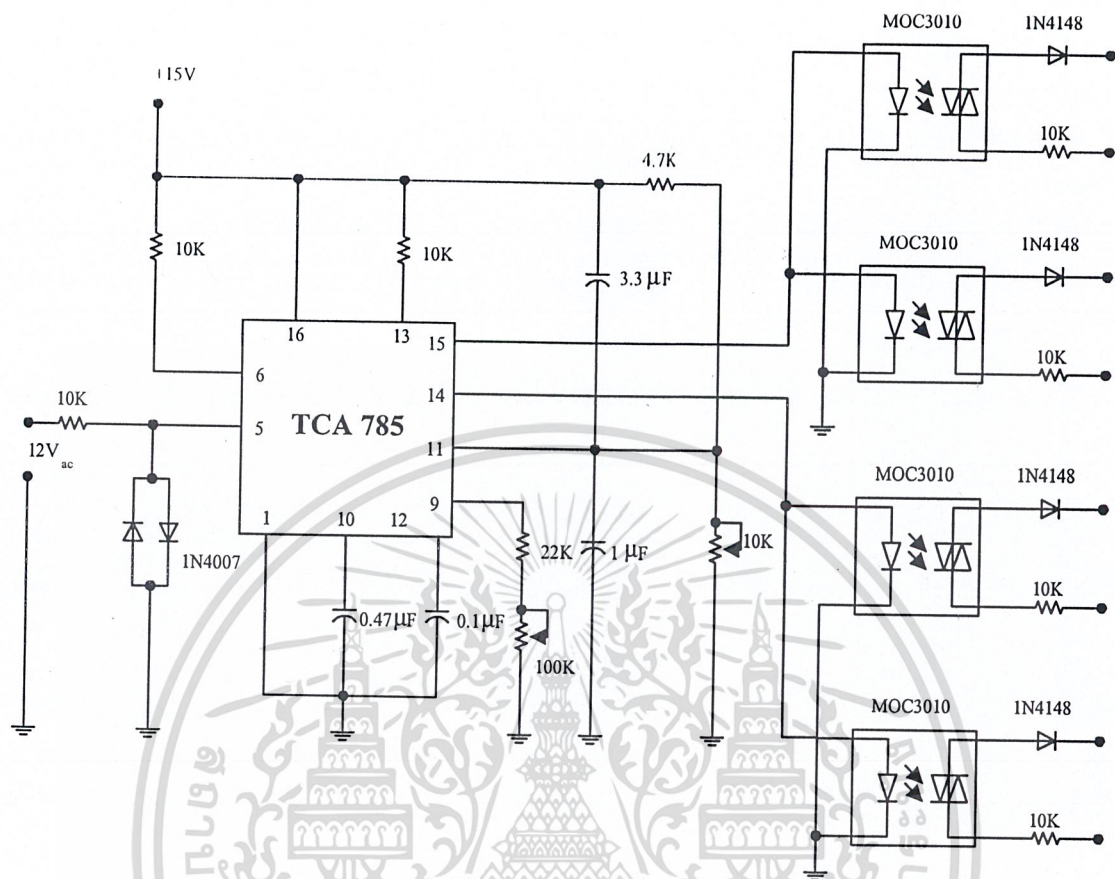
$$V_u = \frac{\Delta U_2}{\Delta U_1} = \frac{U_{2,1} - U_{2,2}}{U_{1,1} - U_{1,2}} \quad (3.1)$$

## 2. วงจร Trigger Pulse

วงจร Trigger Pulse จะสร้างสัญญาณการกระตุ้นทำให้เอสซีอาร์เริ่มและหยุดการทำงาน ควบคุมกระแสที่จ่ายให้กับเอสซีอาร์ทำให้เอสซีอาร์สามารถควบคุมการทำงานของ Load ได้

จากการทดลองได้ทำการจ่ายไฟเอซี 12 โวลต์ 50 เฮิร์ต ให้กับชุดวงจรควบคุม และวงจรควบคุมจะทำงานโดยนำสัญญาณ Sync. จากแหล่งจ่ายความถี่เดียวกันมาผ่านการจำกัดกระแสให้พอเหมาะ จากนั้นจึงส่งผ่านสัญญาณไปยังวงจรตรวจจับแรงดันศูนย์ (Zero Voltage Detector) แล้วทำการส่งสัญญาณไปยังส่วนของวงจรซิงค์โครไนซ์รีจิสเตอร์ (Sync.Registor) ซึ่งควบคุมสัญญาณแรมป์ที่เกิดจากการเก็บประจุของคาปาซิเตอร์ที่ขา 10 จ่ายกระแสที่คงที่ ซึ่งจะกำหนดความลาดชันของสัญญาณแรมป์ด้วยรีจิสเตอร์ที่ขา 9 ถ้าหากว่าสัญญาณแรมป์ที่ขา 10 มีระดับแรงดันต่างไปจากขา 11 ตัว ควบคุมจะเปรียบเทียบ (Control Comparator) จะผลิตสัญญาณเชิงตรรกะไปยังส่วนของ วงจรลอจิกต่อไป ซึ่งสัญญาณลอจิกนี้เราสามารถควบคุมให้เลื่อนไปมาจาก 0 องศา ถึง 180 องศาได้ โดยการปรับเปลี่ยนแรงดันทางด้านอินพุตของวงจร ส่วนควบคุมการเปลี่ยนแปลงแรงดันทางด้านอินพุตของวงจรส่วนควบคุมการเปรียบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 วงจร Pulse Generator

สำหรับขาที่ 6 จะเป็นตัวปิดเปิดพัลส์ทั้งหมด หากขา 6 มีลอจิกเป็น “1” ก็จะมีพัลส์ออกมาตามปกติ แต่ถ้าหากขา 6 มีลอจิกเป็น “0” ก็จะไม่มีการพัลส์ใดๆ ออกมาเลย

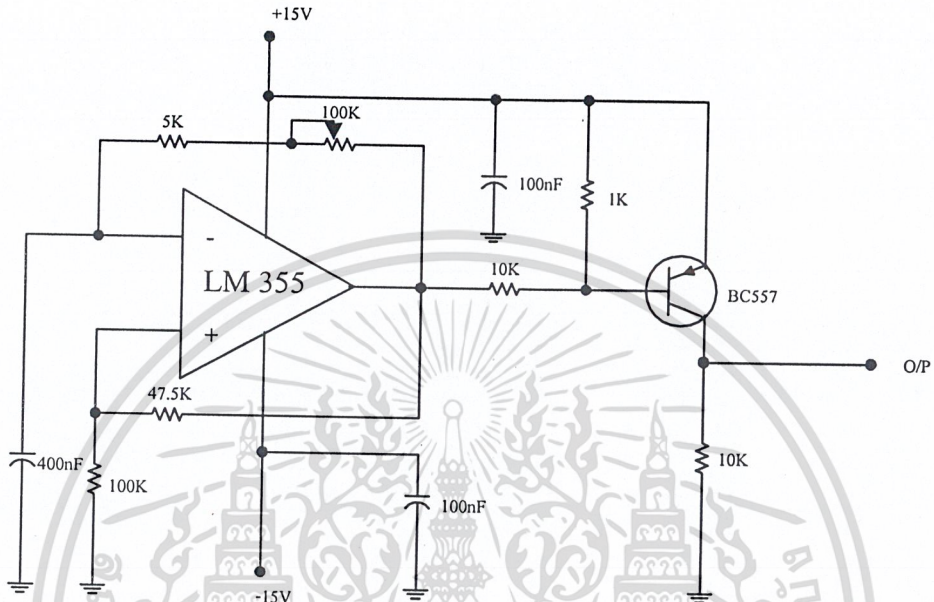
พัลส์ต่าง ๆ จะมีความกว้างโดยประมาณ 30 ไมโครวินาที สามารถขยายความกว้างของพัลส์ต่าง ๆ ออกไปได้มากถึง 180 องศา โดยการเปลี่ยนค่าคาปาซิเตอร์ที่ขา 12 หรือจะลดวงจรคาปาซิเตอร์ที่ขา 12 โดยให้คาปาซิเตอร์ขา 12 ลงกราวด์ ก็จะได้ความกว้างพัลส์ตั้งแต่มุมทริกที่ 0 ไปจนถึง 180 องศา

สำหรับเอาต์พุตที่นำมาใช้คือ สัญญาณกระตุ้นที่ขา 14 และขาที่ 15 ของ IC โดยทำงานอย่างละครั้ง ไซเคิล คือระหว่างช่วงคลื่นลูกบวก 0-180 องศา และสัญญาณช่วงคลื่นลูกลบ 180-360 องศา

สำหรับวงจรชุดนี้ การควบคุมสามารถที่จะปรับค่าของกระแสได้สูงสุดที่ 400 มิลลิแอมป์ และมีพิสัยการควบคุมของมุมกระตุ้นจาก 0-180 องศา โดยใช้เอสซีอาร์ทำหน้าที่เป็นสวิทช์ในการควบคุมการเปิดและปิดการนำกระแสที่จ่ายให้กับโหลดให้สามารถที่จะทำงานได้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด 3. วงจร Pulse Generator ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจร Pulse Generator จะใช้ Op-Amp เบอร์ LM 355 โดยมาต่อเป็นวงจรมัลติไวเบรเตอร์ชนิดอะสแตเบิล (Astable)



รูปที่ 3.3 วงจร Pulse Generator

การหาสัญญาณ Output หาได้จากรูปคลื่นสี่เหลี่ยมหาได้จาก

$$f_{out} = \frac{1}{2.R1.C} \tag{3.2}$$

การหา Voltage Saturation สามารถหาได้จาก

$$+V_T = \frac{R_3}{R_3 + R_2} (+V_{sat}) = 0.45 (+V_{sat}) \tag{3.3}$$

$$-V_T = \frac{R_3}{R_3 + R_2} (-V_{sat}) = 0.45 (-V_{sat}) \tag{3.4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

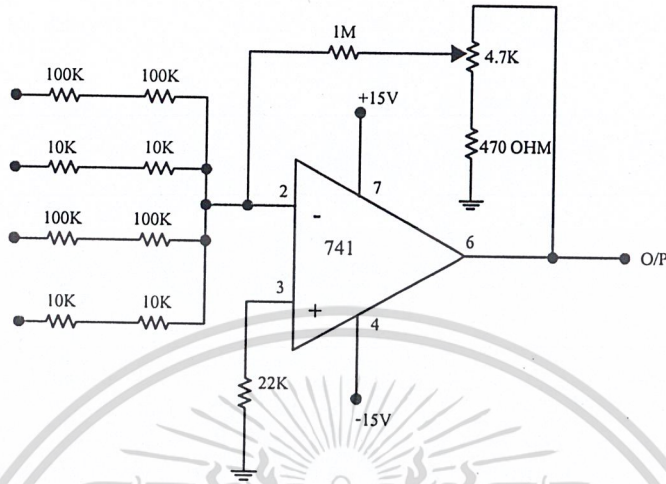
สัญญาณทาง Output ที่ถูกนำออกมาผ่าน  $(R_1 + R_2)$  เข้าที่ Input ต่างกับตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะเป็นภาคที่กำหนดความถี่ของคลื่นสี่เหลี่ยม ตัวต้านทาน  $R_3$  และ  $R_4$  เป็นภาคที่ใช้กำหนดแรงดันอ้างอิง ( $V_{ref}$ ) ให้กับขั้ว Input บวก โดยคำนวณจากสมการที่ (3.5) จะได้ค่าของความถี่สัญญาณ เอาต์พุตรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

เมื่อป้อนไฟเลี้ยงให้กับ Op-Amp จะมีแรงดันค่าน้อย ๆ ตกคร่อมที่ขั้วอินพุตทั้งสองของ ออปแอมป์ที่ขา 2 และขา 3 นั่นเอง แรงดันนี้จะมีผลทำให้  $C_1$  ชาร์จประจุตลอดเวลาและแรงดัน ตกคร่อม  $V_{C1}$  จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นสู่แรงดัน  $+V_{sat}$  ทำให้แรงดันที่ขาอินพุตลบมีค่าสูงขึ้นด้วย ในขณะเดียวกันอินพุตบวกจะมีศักดาเท่ากับการแบ่งแรงดัน  $+V_{sat}$  ระหว่าง  $R_3$  และ  $R_4$  ซึ่งแรงดันอ้างอิง  $V_{ref}$  จะมีค่าเท่ากับ  $+V_T$  (ในขณะที่  $V_{out} = +V_{sat}$ ,  $V_{ref} = +V_T$  เมื่อ  $V_{out} = -V_{sat}$ ,  $V_{ref} = -V_T$ ) และเมื่อ  $V_c$  ของ  $C_1$  มีค่าสูงกว่า  $+V_T$  ทำให้แรงดัน  $V_{out}$  เปลี่ยนสถานะทันทีเป็นผลทำให้ขั้วอินพุตเปลี่ยนสถานะจาก  $+V_{sat}$  เป็น  $-V_{sat}$  ในทันที การเปลี่ยนแปลงที่เอาต์พุตจะเป็นผลทำให้  $V_{ref}$  จาก  $+V_T$  เป็น  $-V_T$  และยังเปลี่ยนทิศทางการชาร์จของประจุ  $C_1$  นั่นคือ  $C_1$  จะค่อย ๆ ลดค่าลงจาก  $+V_T$  สู่  $-V_{sat}$  แต่ก่อนที่จะมีค่า  $-V_{sat}$  นั้นศักดาที่ขั้วอินพุตลบนั้นจะมีค่าต่ำกว่า  $-V_T$  แล้วจะมีผลทำให้ขั้วอินพุตมีศักดาเป็นบวกสูงกว่าขั้วอินพุตลบแรงดันเอาต์พุตจะเปลี่ยนสถานะจาก  $-V_{sat}$  เป็น  $+V_{sat}$  อีก และขั้นตอนการชาร์จ  $C_1$  จะเริ่มต้นใหม่ไปเรื่อย ๆ

เราสามารถที่จะปรับความกว้างของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจาก  $R_2$  ที่เป็น Volume โดยจะทำให้รูปคลื่นเอาต์พุตมีขนาดความกว้างได้ตามต้องการ

สัญญาณที่ได้จากออปแอมป์นำไปเข้าขา B ของทรานซิสเตอร์ Q1 เบอร์ B557 เป็นสัญญาณทริกให้ทรานซิสเตอร์ทำงาน โดยเราสามารถนำเอาต์พุตจากขา C ของทรานซิสเตอร์ไปใช้งาน เพื่อป้องกันความเสียหายจากการนำไปต่อใช้งานกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

## 4. วงจร Control Amplifier



รูปที่ 3.4 วงจร Control Amplifier

สัญญาณอินพุตจะเข้ามาที่จุด Current Summing Point โดยจะถูกทำให้มีความเสถียรจากการป้อนกลับจากเอาต์พุต ซึ่งอัตราขยาย AV สามารถปรับเปลี่ยนได้จาก Volume 4.7k เพื่อรักษาเสถียรภาพการควบคุมแรงดันหรือสัญญาณที่นำมาต่อใช้งานร่วมกับวงจร ซึ่งการปรับ Volume จะทำให้อัตราขยายเปลี่ยนแปลงไป

อัตราขยายหาได้จาก

$$AV = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (3.5)$$

อัตราขยาย AV เมื่ออยู่โหมดลูปปิดหาได้จาก

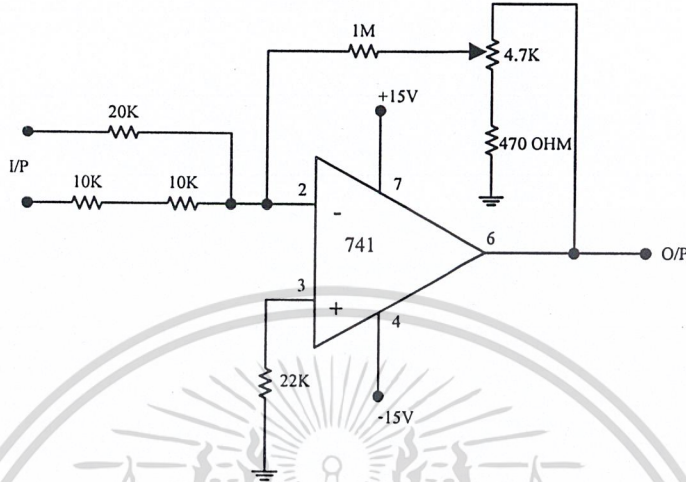
$$AV = -\frac{R_f}{R_{in}} \quad (3.6)$$

แรงดันเอาต์พุต ( $V_{out}$ ) หาได้จาก

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_1} V_1 + \frac{R_f}{R_2} V_2 + \dots + \frac{R_f}{R_n} V_n \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

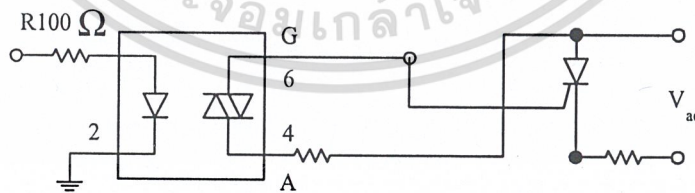
5. วงจร Feed Back Variable Amplifier



รูปที่ 3.5 วงจร Feed Back Variable Amplifier

การทำงานของวงจรจะรับสัญญาณอินพุตมาที่จุด Current Summing Point ที่ต่อกับขา อินเวอร์ตติ้งของออปแอมป์จะทำให้ได้รับสัญญาณป้อนกลับจากเอาต์พุต ทำให้เกิดเสถียรภาพขึ้นโดยสามารถปรับได้โดย Volume ในส่วนที่อนุกรมกับ  $R_f$  สัญญาณเอาต์พุตที่ได้นำไปประกอบกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อศึกษาการทำงานและคุณลักษณะต่าง ๆ ของวงจร

6. วงจร Opto-isolator



รูปที่ 3.6 วงจร Opto-isolator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ IC Opto-coupler จะทำหน้าที่แยกแรงดันสูงของชุดกำลังออกจากวงจรของชุดควบคุม ป้องกันการเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับวงจรชุดควบคุมได้

IC เบอร์ MOC 3010 จะทำหน้าที่แยกระบบไฟฟ้าของวงจรของส่วนควบคุมที่ใช้ระดับ แรงดันต่ำออกจากชุดกำลังที่ใช้ระดับแรงดันไฟฟ้าสูง เนื่องจากวงจรชุดควบคุมไม่สามารถที่จะส่งเอาต์พุตออกเป็นค่าไฟสูงพอที่จะส่งให้โหลดได้ จึงต้องแยกแรงดันที่จะจ่ายให้โหลดอีกชุดหนึ่ง

การทำงาน คือ เมื่อสัญญาณอินพุตมีค่าลอจิกเป็น “0” จะมีกระแสไหลผ่านไดโอดเปล่งแสง อินฟราเรดส่งแสงไปกระตุ้นให้โฟโตไทรแอกเกิดการนำกระแสจะทำให้เอาต์พุตทำหน้าที่เป็นสวิทช์ ปิดวงจรซึ่งนำไปต่อใช้งาน และเมื่อสัญญาณอินพุตมีค่าลอจิกเป็น “1” ไดโอดเปล่งแสงหยุดทำงาน ทำให้ไม่มีแสงไปกระตุ้นโฟโตไทรแอก โฟโตไทรแอกจึงมีสภาวะเป็นสวิทช์เปิดไม่สามารถนำกระแสจากวงจรใด ๆ ที่เอาต์พุตได้

#### 7. Power Supply

เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับชุดทดลองการควบคุมไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์ ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ DC-Supply และ AC-Supply

DC-Supply ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟ +15, 0, -15 โวลต์ 0.1 แอมป์ และชุดแหล่งจ่ายไฟ 24 โวลต์ ใช้จ่ายให้กับวงจรภายในของชุดทดลองและอุปกรณ์ภายนอก

AC-Supply ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟ 24 โวลต์ และ 19 โวลต์ ใช้จ่ายให้กับอุปกรณ์ ไทริสเตอร์และไฟฟ้ากระแสสลับ 12 โวลต์ ใช้เป็นสัญญาณ Sync. ของวงจรควบคุมการทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

ชุดทดลองการควบคุมการควบคุมไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบและสร้างขึ้น สามารถที่จะใช้เป็นชุดทดลองในการเรียนการสอนของวิชาอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งรายละเอียดของ ใบบางจะเป็นการแสดงคุณสมบัติ และการนำอุปกรณ์เอาทริสเตอร์และไทรแอกไปใช้ในการ ควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยให้ได้แรงดันที่เอาต์พุตตามที่ ต้องการได้ ซึ่งในบทนี้จะเป็นการทดสอบการทำงานของชุดทดลองการควบคุมไฟฟ้าด้วย อิเล็กทรอนิกส์ โดยจะทำการทดสอบชุดสร้างสัญญาณพัลส์ที่ไปทริกให้อุปกรณ์ไทรสเตอร์ทำงาน ในการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยมีการทดลองดังนี้

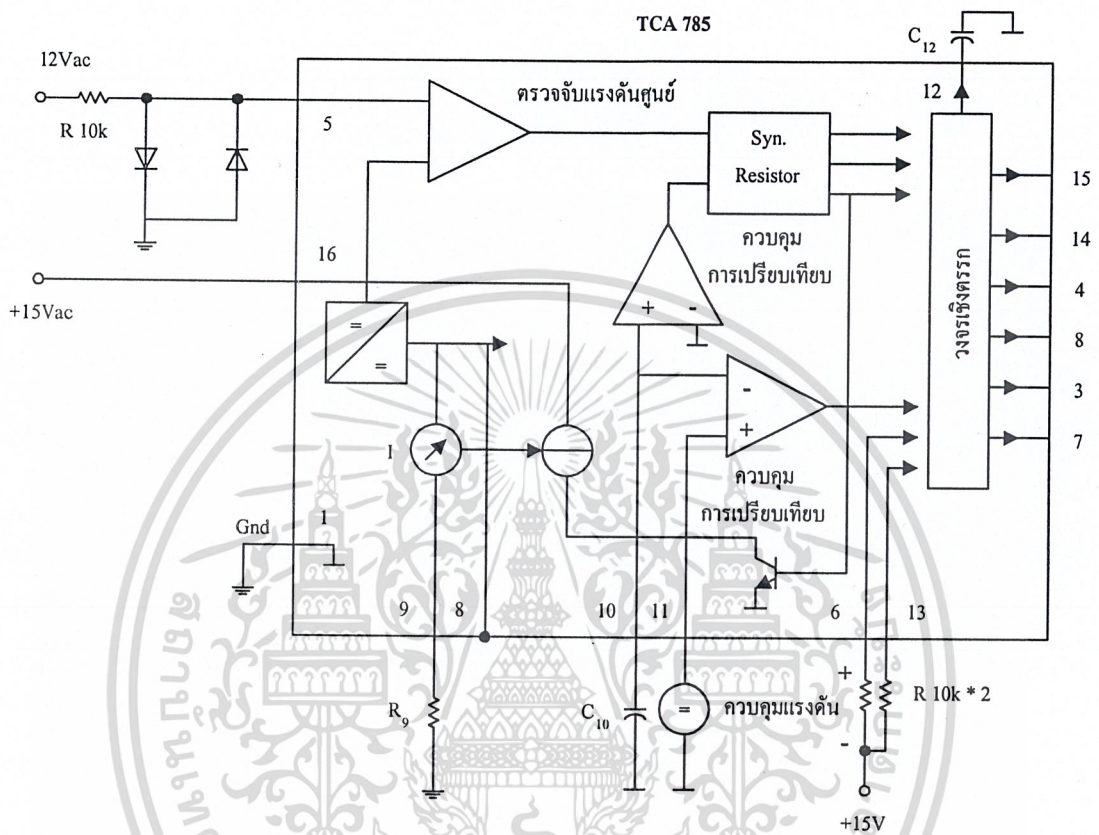
#### 4.1 วงจรสร้างสัญญาณพัลส์ควบคุมการทริกเกต

วงจรสร้างสัญญาณควบคุมการทริกเกตหรือวงจรสัญญาณกระตุ้น โดยการใช้ไอซีเบอร์ TCA 785 ซึ่งเป็นไอซีที่ใช้ในการสร้างพัลส์ และควบคุมการทริกเกตให้เอสซีอาร์หรือไทรแอกเริ่ม และหยุดทำงานเป็นส่วนที่ควบคุมกระแสที่ต่อให้กับเอสซีอาร์และไทรแอก เพื่อให้เอสซีอาร์และ ไทรแอกสามารถควบคุมการทำงานของโหลดได้

จากการทดลองได้ทำการทดลองจ่ายไฟฟ้า 15 โวลต์ให้กับวงจรควบคุม วงจรควบคุมจะ ทำงานโดยการนำสัญญาณ Sync. โดยใช้สัญญาณ Sync. ที่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 12 โวลต์ 50 เฮิร์ต จากแหล่งจ่ายเดียวกันมาผ่านการจำกัดกระแสให้พอเหมาะ จากนั้นจะผ่านสัญญาณไปวงจรตรวจจับ แรงดันศูนย์ (Zero Voltage Defector) แล้วส่งสัญญาณไปยังส่วนของวงจรซิงค์โครไนซ์รีซิสเตอร์ (Sync.Resistor) ซึ่งควบคุมการกำเนิดสัญญาณแรมป์ที่เกิดจากการเก็บประจุของ  $C_{10}$  การจ่ายกระแส ที่คงที่ ซึ่งกำหนดความลาดชันของสัญญาณแรมป์ด้วย  $R_9$  ถ้าหากว่าสัญญาณแรมป์ที่ขา 10 มีระดับ แรงดันต่างไปจากแรงดันที่ขา 11 ตัวควบคุมการเปรียบเทียบ (Control Comparator) จะผลิต สัญญาณเชิงตรรกะไปยังส่วนของวงจรลอจิกต่อไป ซึ่งสัญญาณลอจิกนี้เราสามารถควบคุมให้เลื่อน ไปมาจาก 0 ถึง 180 องศาได้ โดยการปรับเทียบแรงดันทางด้านอินพุตของขา 11 ซึ่งเป็นวงจรส่วน ควบคุมการเปรียบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวงจรที่ใช้ในการทดสอบการทำงานดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 วงจรที่ใช้ในการทดสอบการทำงาน

สำหรับสัญญาณเอาต์พุตที่นำมาใช้คือ สัญญาณกระตุ้นจากขา 14 และขาที่ 15 ของไอซีเบอร์ TCA 785 โดยการทำงานคนละครึ่งไซเคิล คือระหว่างช่วงลูกคลื่นบวก (0 องศา-180 องศา) และระหว่างวงลูกคลื่นลบ (180 องศา-360 องศา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งานของไอซี TCA 785

ขาที่ 1 เป็นจุดต่อขั้วลบของไฟเลี้ยงวงจร (จุดกราวด์ของวงจร)

ขาที่ 2 เป็นอินเวิร์ตเอาต์พุตของขาที่ 15

ขาที่ 3 เป็นจุดต่อสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่สูงเพื่อไปใช้งานบางอย่าง

ขาที่ 4 เป็นอินเวิร์ตเอาต์พุตของขาที่ 14

ขาที่ 5 เป็นจุดต่อรับสัญญาณ Sync. จากไฟเลี้ยงวงจรเอซี

ขาที่ 6 เป็นจุดเปิดปิดพัลส์ทางด้านเอาต์พุตของวงจร

ขาที่ 7 เป็นจุดต่อสัญญาณพัลส์สำหรับไปควบคุม โหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำสูงมาก

ขาที่ 8 เป็นจุดสร้างแรงดันอ้างอิงของวงจร

ขาที่ 9 เป็นจุดต่อความต้านทานที่ใช้ควบคุมความลาดชันของสัญญาณแรมปี

ขาที่ 10 เป็นจุดต่อเพื่อควบคุมแรงดันของสัญญาณแรมปี

ขาที่ 11 เป็นจุดแรงดันควบคุมการเปรียบเทียบของวงจร

ขาที่ 12 เป็นจุดควบคุมความกว้างของสัญญาณพัลส์ โดยการปรับเปลี่ยนค่า  $C_{12}$

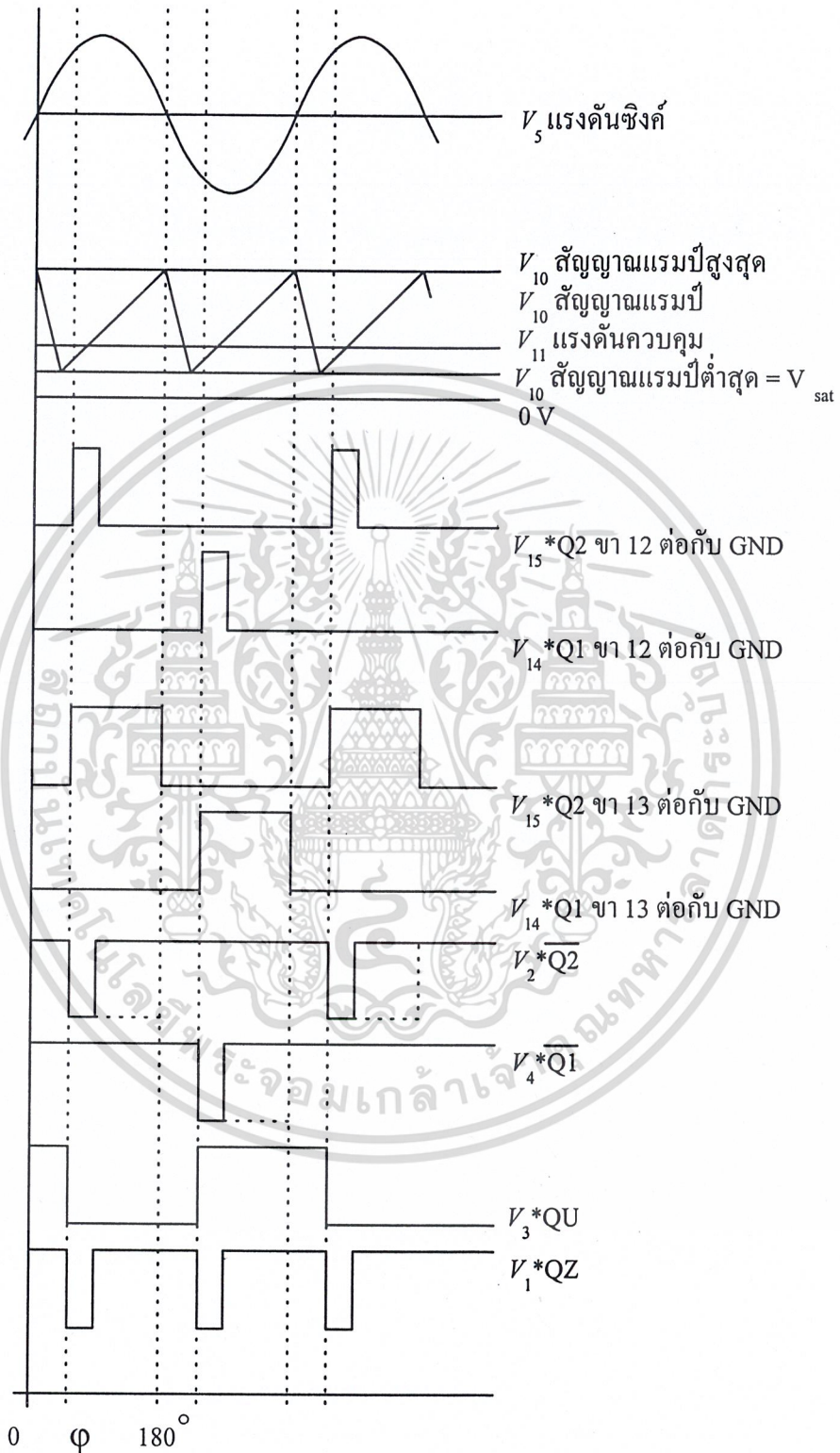
ขาที่ 13 เป็นจุดต่อสำหรับเลือกการใช้งานของเอาต์พุตพัลส์ที่ขา 2 กับ 4

ขาที่ 14 เป็นเอาต์พุตของวงจรครึ่งลบไซเคิลแรก

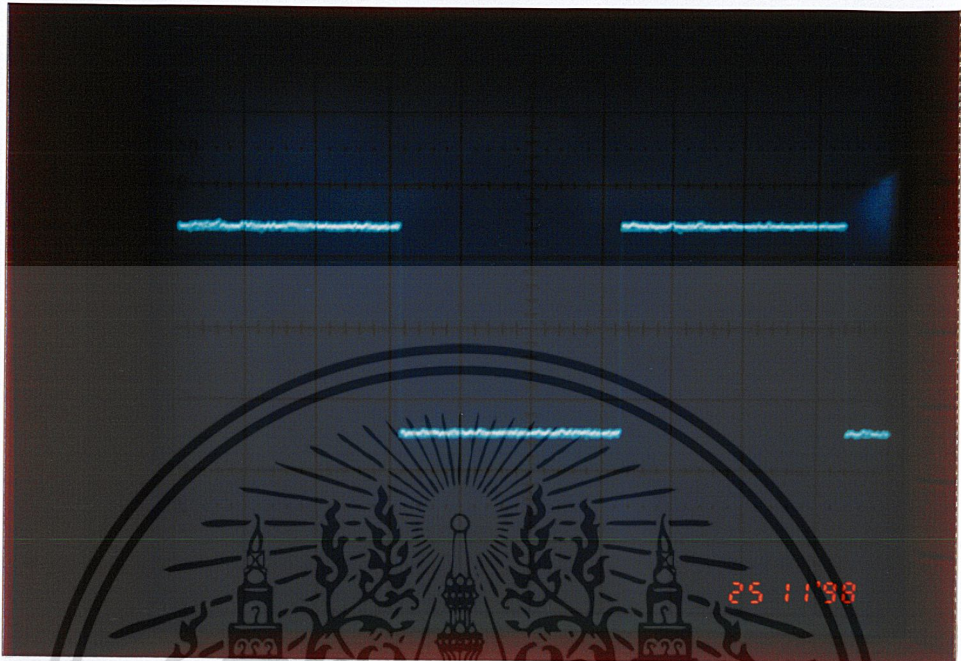
ขาที่ 15 เป็นเอาต์พุตของวงจรครึ่งบวกไซเคิลหลัง

ขาที่ 16 เป็นจุดต่อบวกของไฟเลี้ยงวงจร

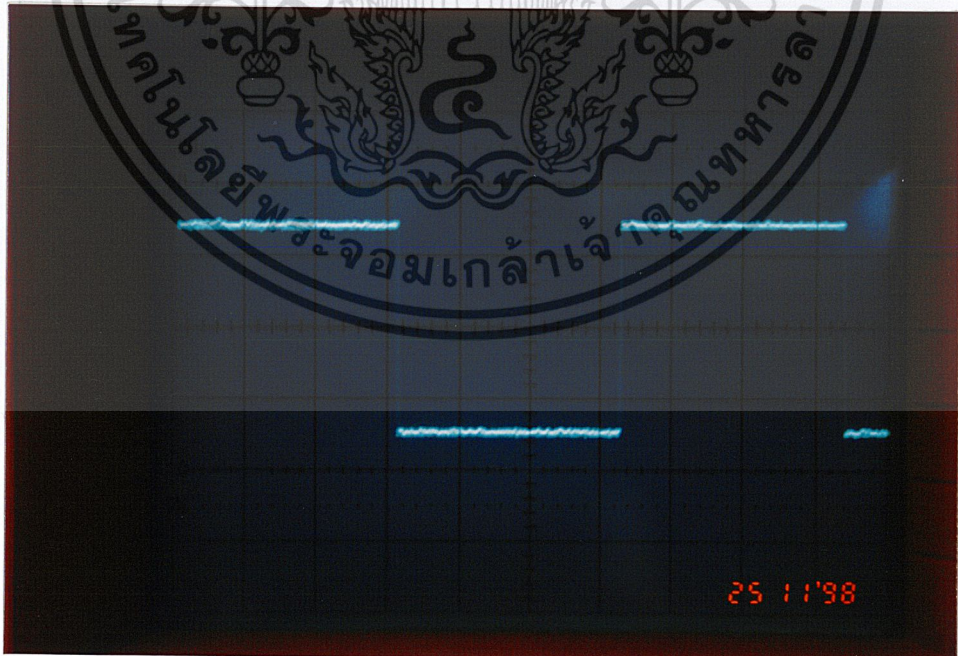
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ที่ 4.2 สัญญาณเอาต์พุตที่ขาต่างๆ ของไอซี TCA 785 ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 สัญญาพัสดุที่นำไปใช้ในการควบคุมเกณฑ์ทำงานช่วงคลื่นลูกบวก (0 องศา-180 องศา) ที่ได้จากขา 15 ของไอซีเบอร์ TCA 785



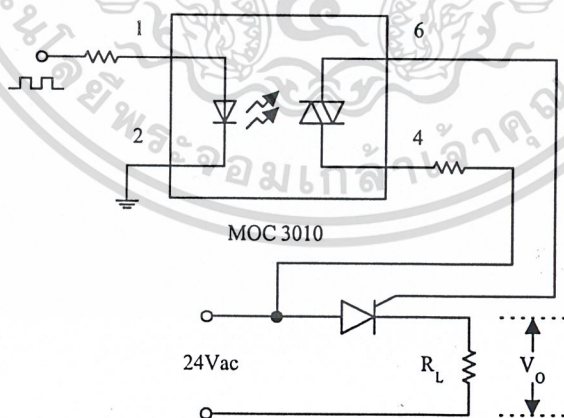
รูปที่ 4.4 สัญญาที่นำไปใช้ในการควบคุมเกณฑ์ทำงานช่วงคลื่นลูกลบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (180 องศา-360 องศา) ที่ได้จากขา 14 ของไอซีเบอร์ TCA 785 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 วงจรไอโซเลตสัญญาณ

การที่สัญญาณทรานซิสเตอร์ไปทรานซิสเตอร์โดยตรงนั้น อาจจะทำให้เกิดอันตรายต่อวงจรทรานซิสเตอร์ได้ เพราะในส่วนของโหลดมีแรงดันและกระแสสูง ดังนั้นจึงต้องมีการแยกส่วนของวงจรทรานซิสเตอร์ออกจากส่วนของวงจรกำลัง โดยการนำเอาสัญญาณทรานซิสเตอร์ผ่านไอซี Opto-coupler เพื่อทำหน้าที่แยกไฟฟ้าแรงดันสูงของชุดกำลังออกจากวงจรของชุดควบคุมก่อนที่จะป้อนเข้าสู่ขาเกตของเอสซีอาร์ มีผลดีคือทำให้กราวด์ (Ground) ของวงจรชุดควบคุมกับกราวด์ของชุดกำลังแยกเป็นอิสระจากกันและกัน ทำให้ป้องกันการเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับวงจรชุดควบคุมได้ ในกรณีเมื่อวงจรชุดกำลังทำงานผิดพลาด

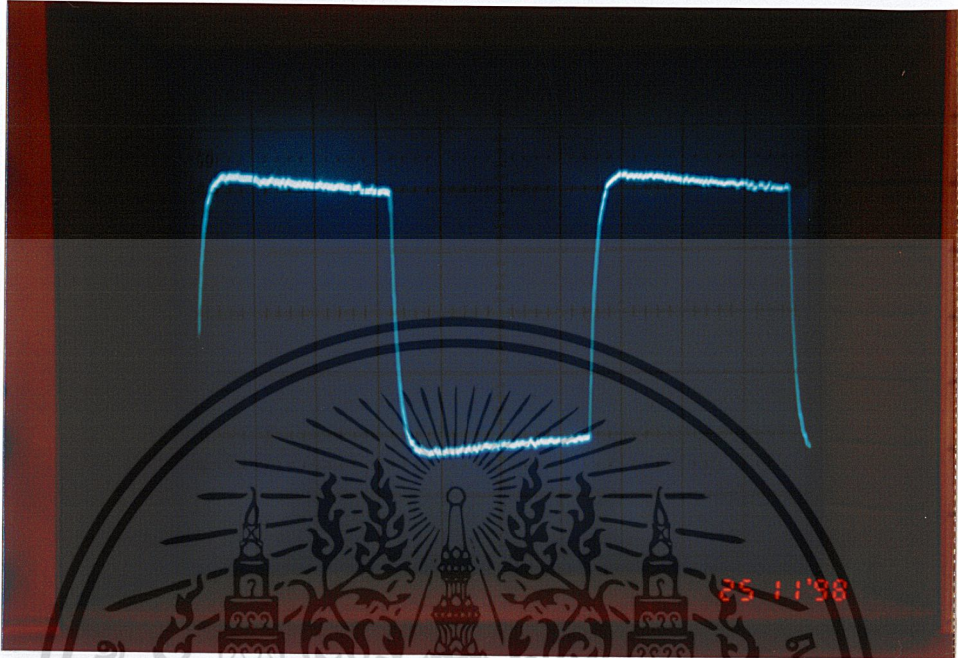
อุปกรณ์หลักในส่วนนี้คือ ตัวเชื่อมต่อทางแสง (Opto-isolation) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวแยกระบบไฟฟ้าของวงจรส่วนควบคุมที่ใช้ระดับแรงดันต่ำออกจากชุดกำลังที่ใช้แรงดันสูง ทั้งนี้เนื่องจากวงจรชุดควบคุมไม่สามารถที่จะส่งเอาต์พุตออกเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าสูงเพื่อจ่ายให้แก่โหลดได้

ในการทดลองจะใช้สัญญาณที่ได้จากเอาต์พุตที่ถูกสร้างขึ้นโดยการใช้ไอซีเบอร์ TCA 785 ป้องกันอินพุตของไอซี Opto-isolator ซึ่งในที่นี้ใช้ไอซีเบอร์ MOC 3010 ซึ่งเป็นโฟโตไดโอดแยกสำหรับการส่งสัญญาณของตัวเชื่อมต่อทางแสงนี้ จะถูกส่งผ่านระหว่างชิ้นส่วนสองชิ้นที่แยกจากกันทางไฟฟ้า โดยจะอยู่ในรูปของสัญญาณแสง ชิ้นส่วนสองชิ้นนี้ไม่สามารถสลับหน้าที่กันได้และไม่มีการเชื่อมต่อทางไฟฟ้า สัญญาณที่ถูกส่งผ่านจึงมีได้เพียงทิศทางเดียวเท่านั้น

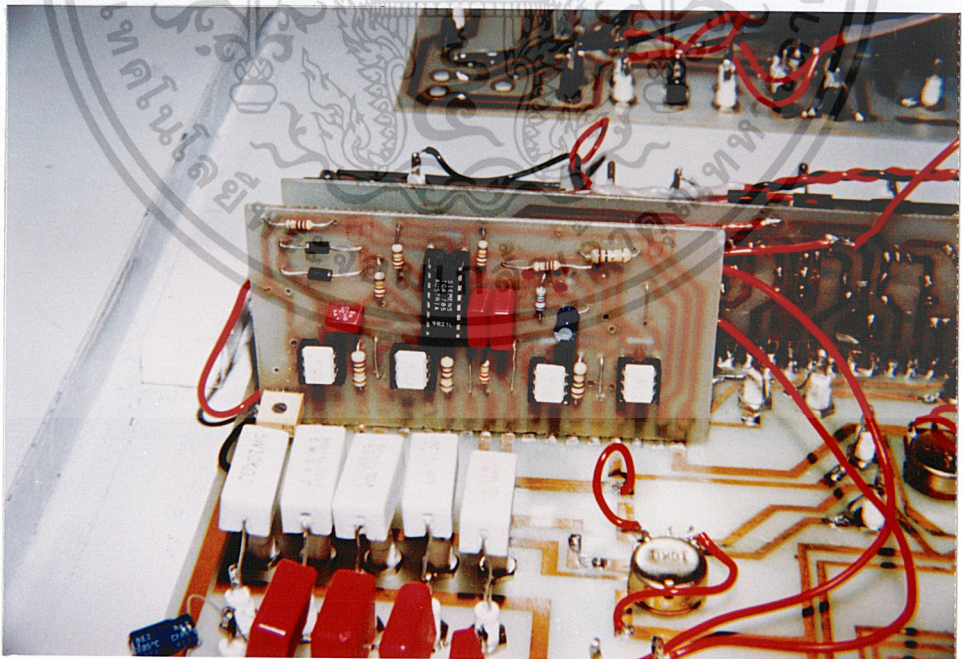


รูปที่ 4.5 วงจรที่ใช้ในการทดสอบการเชื่อมต่อทางแสง  
โดยใช้ไอซีเบอร์ MOC 3010

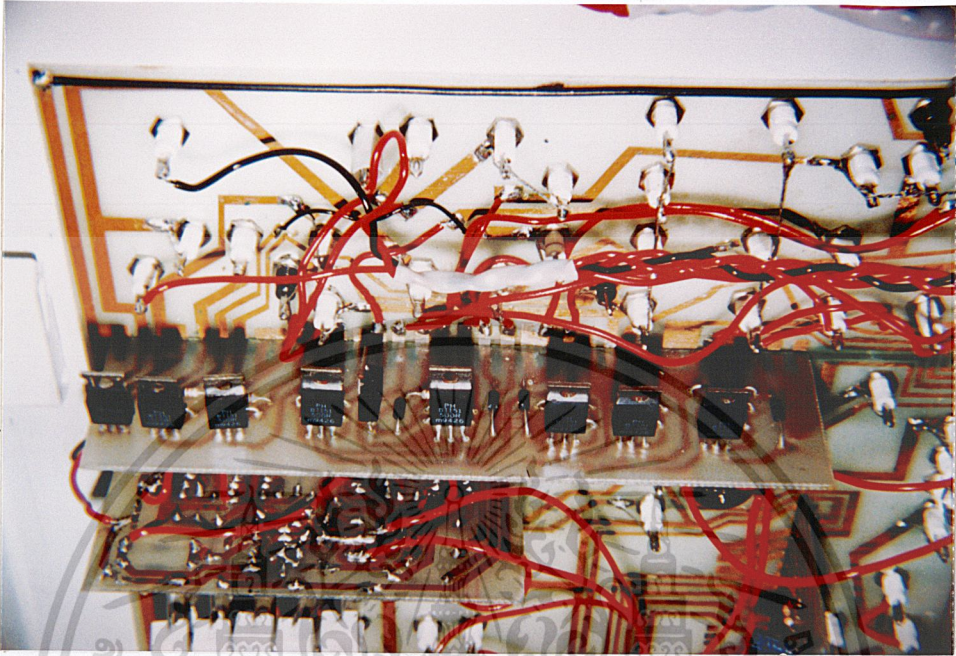
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



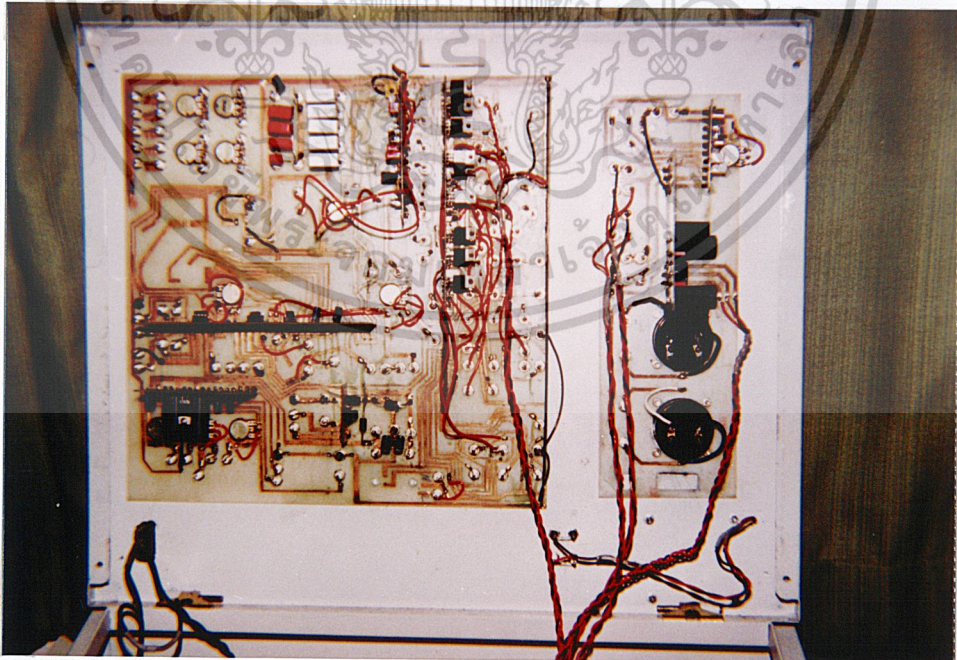
รูปที่ 4.6 สัญญาณที่ผ่านการเชื่อมโยงของแสง  
โดยใช้ไอซีเบอร์ MOC 3010



รูปที่ 4.7 วงจรรวมของการใช้ไอซีเบอร์ TCA 785 และการเชื่อมโยงทางแสง  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ที่ใช้ไอซีเบอร์ MOC 3010  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

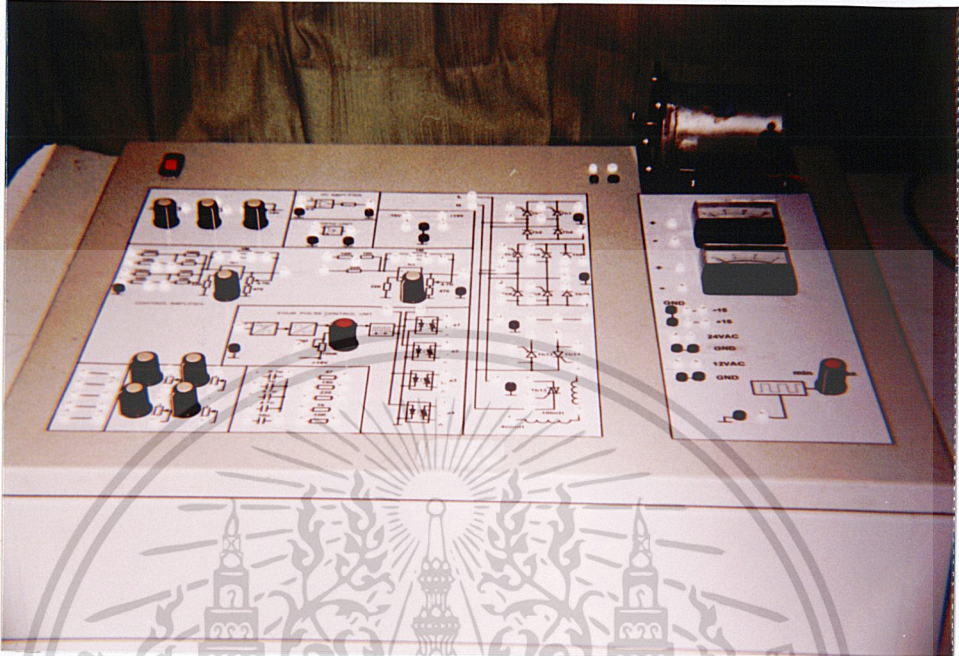


รูปที่ 4.8 ชุดของเอสซีอาร์ซึ่งใช้เป็นชุดกำลัง



รูปที่ 4.9 วงจรรวมของชุดทดลองการควบคุมไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นว่าเป็นประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แผงทดลองการควบคุมไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### บทสรุป ปัญหา แนวทางการแก้ไขและการพัฒนา

#### 5.1 สรุป

ชุดทดลองการควบคุมไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์ สร้างขึ้นเพื่อศึกษาคุณสมบัติและการใช้งานอุปกรณ์ไทรสเตอร์ในงานด้านการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง และใช้เป็นสื่อประกอบการเรียนการสอนในภาคปฏิบัติของวิชาอิเล็กทรอนิกส์กำลังของสาขาวิชาช่างอิเล็กทรอนิกส์และช่างไฟฟ้ากำลัง โดยขอบเขตที่วางไว้ข้างต้นคือ สามารถสร้างชุดทดลองและออกแบบใบงานรองรับชุดทดลองที่สร้างขึ้น

จากการศึกษาและทดลองสร้าง ปรากฏว่าผลที่ได้อยู่ในระดับที่น่าพอใจกล่าวคือ ชุดทดลองนี้สามารถใช้ในการเรียนการสอนในภาคปฏิบัติของวิชาอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยมีใบงานรองรับการทดลองที่มีเนื้อหาเกี่ยวข้องกับการเรียนการสอนวิชาอิเล็กทรอนิกส์กำลังในส่วนหนึ่ง

ข้อดีของชุดทดลองการควบคุมไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์นี้คือ ทำให้การเรียนการสอนมีประสิทธิภาพมากขึ้น เพราะการทดลองที่เห็นภาพจริงจะสามารถเข้าใจการทำงานของอุปกรณ์และการใช้งานอุปกรณ์ไทรสเตอร์ของนักศึกษาได้ดียิ่งขึ้น อีกทั้งชุดทดลองการควบคุมไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นมีราคาถูกกว่าชุดทดลองที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด

#### 5.2 ปัญหาที่พบ

##### 5.2.1 ในส่วนของฮาร์ดแวร์

ปัญหา	อุปกรณ์มีราคาแพงและตรงกับช่วงปิดงบประมาณ
แนวทางการแก้ไข	ทางภาควิชาควรให้ความช่วยเหลือเรื่องงบประมาณสนับสนุนในการทำปริญญาานิพนธ์มากกว่านี้
ปัญหา	การทดลองวงจรต่าง ๆ เป็นไปได้ช้า เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองมีน้อยและสภาพไม่ดี
แนวทางการแก้ไข	ทางภาควิชาควรจัดเครื่องมือที่จำเป็นต้องใช้ในการทำปริญญาานิพนธ์ให้พร้อมกว่านี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2.2 ในส่วนของใบงาน

ปัญหา	เนื่องจากความรู้เรื่องการควบคุมแรงดันไฟฟ้าไม่พอเพียงจึงทำให้เกิดความล่าช้าในการสร้างใบงานการทดลอง
แนวทางการแก้ไข	ปรึกษากับอาจารย์และค้นคว้าจากตำราอ้างอิงต่าง ๆ เพื่อใช้ประกอบการสร้างใบงาน
ปัญหา	ผลการทดลองในใบงานไม่ตรงกับทฤษฎีเท่าที่ควร เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ไม่มีความเที่ยงตรงเพียงพอ
แนวทางการแก้ไข	หาจุดที่ใกล้เคียงกับทฤษฎีมากที่สุดในการทำเฉลยของใบงาน

## 5.3 แนวทางในการพัฒนา

1. ทำการปรับปรุงใบงานให้มีความผิดพลาดน้อยลงและให้ตรงกับทฤษฎีมากที่สุด โดยการเปลี่ยนอุปกรณ์ให้มีความผิดพลาดน้อยลง
2. ควรมีการเพิ่มใบงานให้ครอบคลุมวิชาอิเล็กทรอนิกส์คำสั่งให้มากกว่านี้
3. ในส่วนของแผงวงจรการทดลอง ควรออกแบบให้มีความรัดกุมมากกว่านี้และเอื้อประโยชน์ในการทดลองมากกว่านี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ใบงานที่ 1

## DIODE AND THYRISTOR IN DC-CIRCUIT

### วัตถุประสงค์

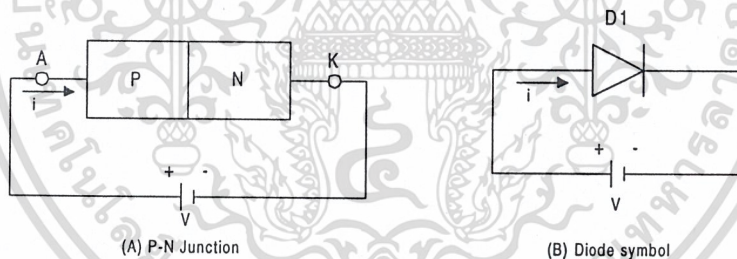
1. เพื่อศึกษาการทำงานของไดโอดในวงจรไฟฟ้ากระแสตรง
2. เพื่อศึกษาการทำงานของไทรสเตอร์ในวงจรไฟฟ้ากระแสตรง

### ทฤษฎี

ไดโอดกำลัง (Power Diode)

ไดโอดกำลังเป็นไดโอดที่ออกแบบให้บริเวณรอยต่อมีช่วงกว้างมากกว่าไดโอดทั่วไป เพื่อนำไปใช้กับงานที่มีกำลังและกระแสไฟฟ้าสูง ๆ และยังสามารถทนอุณหภูมิได้สูงกว่าไดโอดทั่วไป โครงสร้างและสัญลักษณ์

ไดโอดกำลังมี 2 ขั้ว คือ แอโนด (Anode; A) ซึ่งต่ออยู่กับสารกึ่งตัวนำชนิด P และแคโทด (Cathode; K) ต่อกับสารกึ่งตัวนำชนิด N ดังรูปที่ 1A และมีสัญลักษณ์ดังรูปที่ 1B

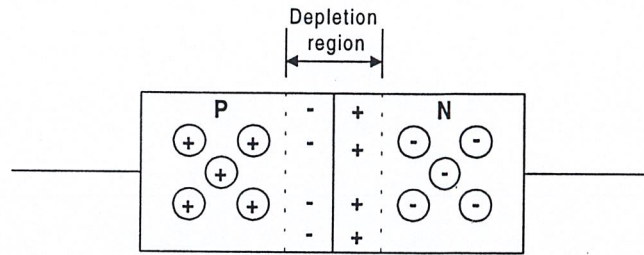


รูปที่ 1 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของไดโอดกำลัง

หลักการการทำงานของไดโอดกำลัง

#### 1. รอยต่อ P-N

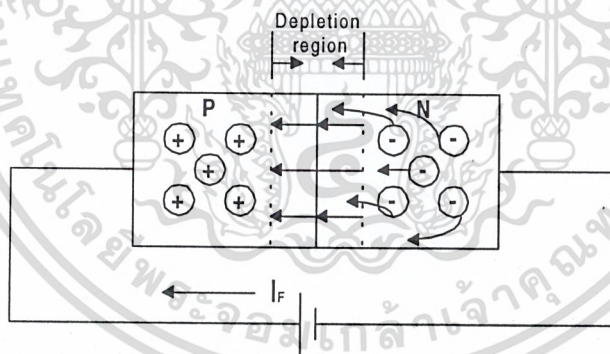
ที่บริเวณรอยต่อของเนื้อสาร P และ N จะเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลผ่านรอยต่อเข้าหากัน (โดยธรรมชาติอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เข้าหาโฮล) เกิดเป็นช่วงรอยต่อที่เรียกว่า เขตปลอดพาหะ (Depletion Region) หลังจากอิเล็กตรอนและโฮลรวมตัวกันจะมีประจุเป็นกลาง ทางด้านสาร N จะสูญเสียอิเล็กตรอนไป ทำให้มีประจุไฟฟ้าบวกเกิดขึ้น ส่วนด้านสาร P จะสูญเสียโฮลไป จึงทำให้เกิดประจุลบ ดังแสดงในรูปที่ 2 เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 Depletion Region ที่รอยต่อ P-N

2. การไหลของกระแสเมื่อให้ไบแอสแบบฟอร์เวิร์ด

เมื่อต่อขั้วบวกของแหล่งจ่ายเข้าทาง P และต่อขั้วลบเข้าทาง N ดังแสดงในรูปที่ 3 จะทำให้ Depletion Region มีขนาดเล็กลง เป็นเหตุให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ข้าม Depletion Region ได้ และอิเล็กตรอนเหล่านี้จะกลับไปที่ขั้วบวกของแหล่งจ่ายได้ แต่เนื่องจากกระแสไฟฟ้าจะไหลจากขั้วบวกไปยังขั้วลบ สรุปได้ว่ากระแสไฟฟ้าจะสามารถไหลจากขั้วบวกของแหล่งจ่ายผ่านรอยต่อ P-N กลับเข้ามาทางขั้วลบได้ เมื่อไดโอดได้รับไบแอสแบบฟอร์เวิร์ด

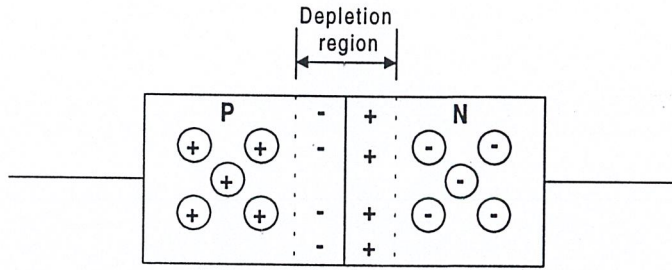


รูปที่ 3 การไหลของกระแสเมื่อได้รับไบแอสแบบฟอร์เวิร์ด

3. การไหลของกระแสเมื่อให้ไบแอสแบบรีเวิร์ด

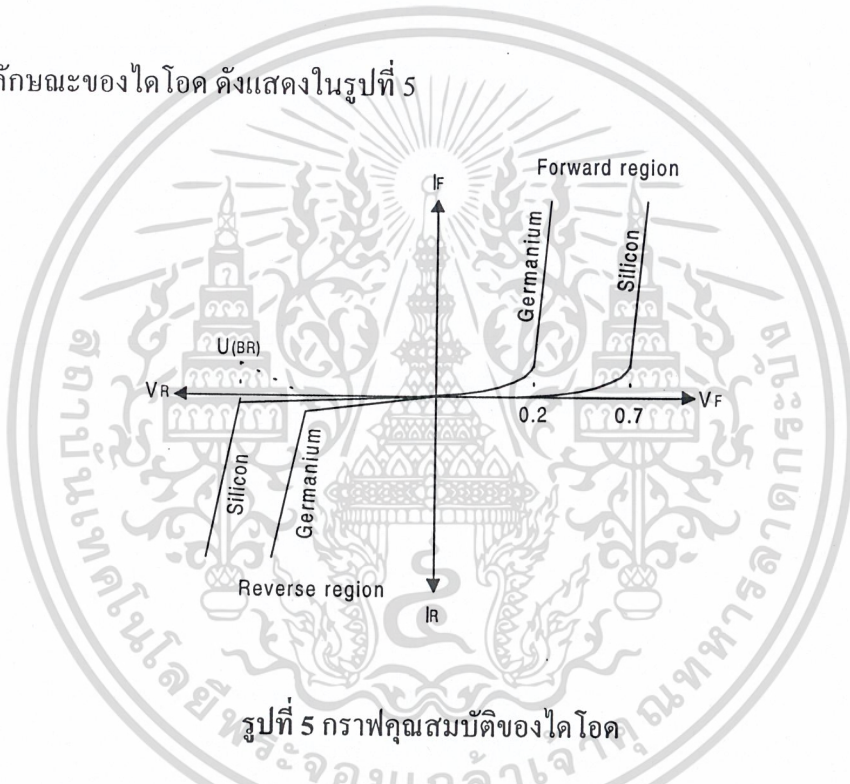
ถ้าหากต่อขั้วแหล่งจ่ายกลับขั้วโดยต่อขั้วบวกเข้าทาง N และต่อขั้วลบเข้าทาง P ดังแสดงในรูปที่ 4 จะทำให้ Depletion Region มีขนาดกว้างขึ้น เป็นเหตุให้อิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ข้าม Depletion Region ได้ ฉะนั้นจึงไม่มีกระแสไฟฟ้าไหล แต่ตามความเป็นจริงแล้วจะมีกระแสรั่วไหล (Leakage Current) ปริมาณน้อยมากไหลจากขั้วบวกผ่านรอยต่อ P-N ไปยังขั้วลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 การไหลของกระแสเมื่อให้ไบแอสแบบรีเวิร์ด

กราฟคุณลักษณะของไดโอด ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 กราฟคุณสมบัติของไดโอด

เมื่อไดโอดถูกไบแอสแบบฟอร์เวิร์ด ไดโอดจะเริ่มนำกระแสเมื่อแรงดันระหว่างขั้วแอโนดและแคโทดสูงกว่าค่าแรงดันเสมือน ซึ่งจะมีค่าประมาณ 0.2 โวลต์ (เยอรมันเนียม) และ 0.7 โวลต์ (ซิลิกอน) แต่เมื่อไดโอดถูกไบแอสแบบรีเวิร์ดจะมีกระแสรั่วไหล ( $I_R$ ) กระแสนี้จะมีค่าในย่าน ไมโครแอมแปร์ เมื่อแรงดันรีเวิร์ด ( $U_R$ ) ค่าสูงเกินกว่าที่รอยต่อ P-N จะรับได้จะเกิดการเบรกดาวน์ ซึ่งทำให้มีกระแสไหลจากแคโทดไปยังแอโนดเป็นจำนวนมาก การใช้ไดโอดจึงต้องระวังไม่ให้แรงดันย้อนกลับเกินกว่าค่าแรงดันเบรกดาวน์ ( $U_{(BR)} = \text{Breakdown Voltage}$ )

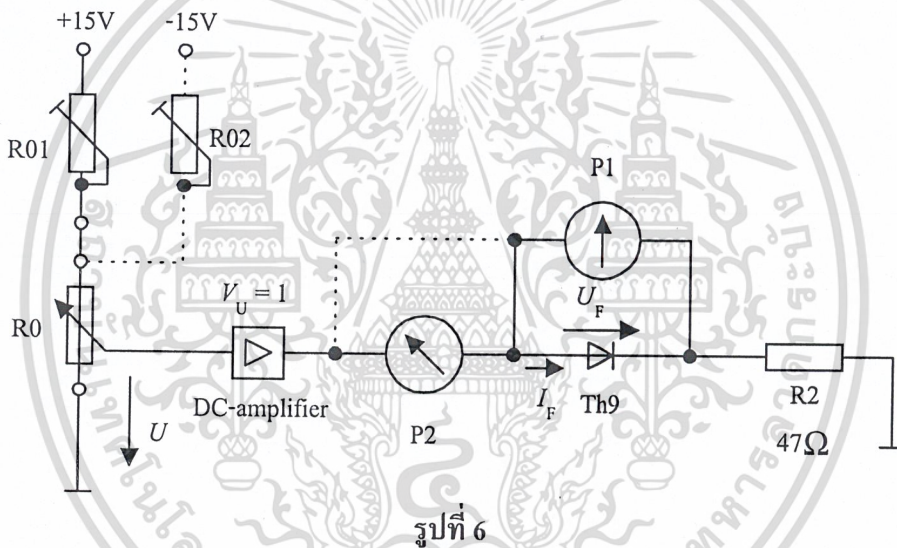
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์

1. ไดโอด (Th9)
2. ไทริสเตอร์ (Th5)
3. รีซิสเตอร์ (R2) 47 โอห์ม
4. รีซิสเตอร์ (R3) 10 กิโลโอห์ม
5. รีซิสเตอร์ (R4) 10 กิโลโอห์ม

ลำดับขั้นการทดลอง

1. ต่อยวงจรตามรูปที่ 6



2. จำกัดช่วงแรงดัน  $U$  ให้มีค่า +10 V โดยการปรับ R01 ทำการวัดไดโอดทางฟอร์เวิร์ดไบแอส บันทึกผลการทดลองในตารางที่ 1

U (V)	1	2	3	7	10
$U_F$ (V)					
$I_F$ (mA)					

$U$  : Preamplifier Input Voltage

$U_F$  : Forward Voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. จ่ายแรงดันด้านลบให้กับ R0 โดยผ่านทาง R02 จำกัดแรงดัน U ให้มีค่า -10V โดยการปรับ R02 ต่อ โวลต์มิเตอร์ขานานแอมป์มิเตอร์และไดโอด ทำการวัดและบันทึกผลในตารางที่ 2

U (V)	-1	-3	-5	-7	-10
$U_R$ (V)					
$I_R$ (mA)					

$U_F$  : Reverse Voltage

$I_F$  : Reverse Current

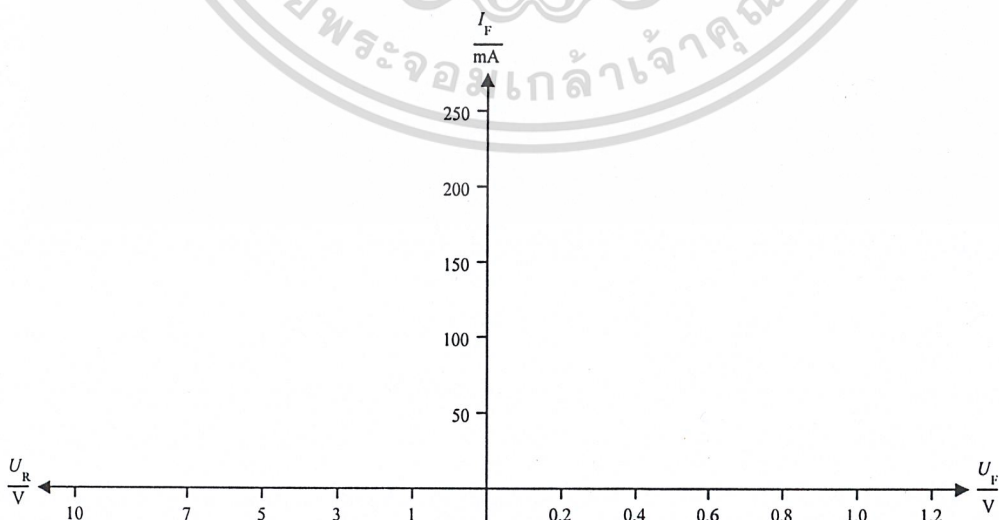
4. วาดกราฟของ  $I = f(U)$  โดยใช้ค่าที่ได้จากข้อ 2 และข้อ 3 หาค่า Threshold Voltage ( $U_{(TO)}$ ) และ ดิฟเฟอเรนเชียลฟอร์เวิร์ดรีซีสแตนซ์ ( $r_F$ ) คำนวณหาค่าแรงดันฟอร์เวิร์ด ( $U_F$ ) ที่  $I_F = 150$  mA

Threshold Voltage ( $U_{(TO)}$ ) = ..... V

Differential Forward Resistance ( $r_F$ ) =  $\frac{\Delta U_F}{\Delta I_F}$  = .....  $m\Omega$

Forward Voltage :  $U_F = U_{(TO)} + r_F \times I_F$

ถ้า  $I_F = 150$  mA :  $U_F =$  ..... V



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. อธิบายความแตกต่างของคุณสมบัติทางฟอร์เวิร์ดของไดโอดที่เป็นอุดมคติ และในทางปฏิบัติ

.....

.....

.....

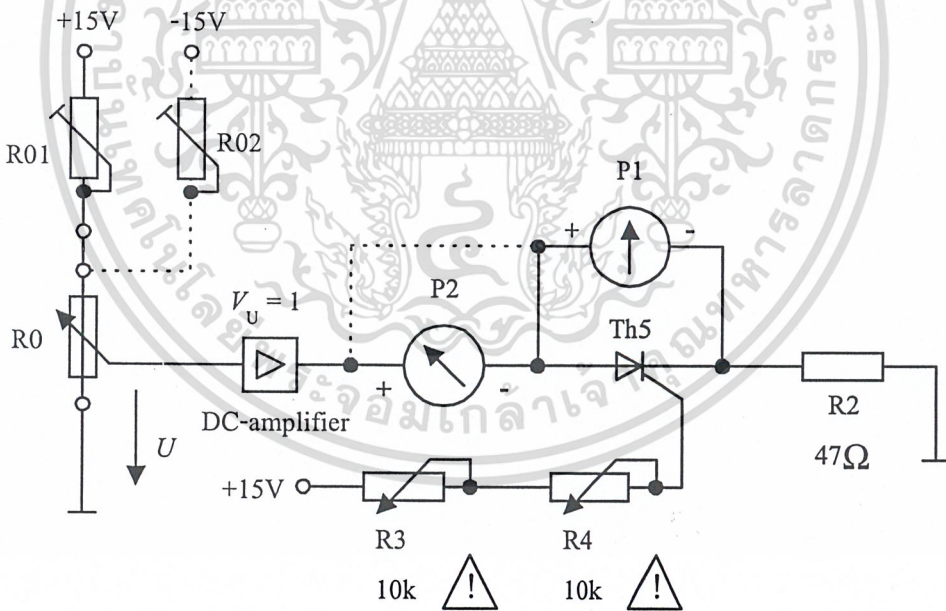
.....

6. เปลี่ยนไดโอด (Th9) เป็นไทรสเตอร์ (Th5) ทำการวัดกระแสที่ไหลผ่าน Thyristor โดยที่ยังไม่ต่อขา Gate เหมือนกับข้อ 3 และข้อ 4

$U = 0\text{ V ถึง } +10\text{ V}$  วัดกระแส = ..... mA

$U = 0\text{ V ถึง } +10\text{ V}$  วัดกระแส = ..... mA

7. ต่อดวงจรรูปที่ 7



รูปที่ 7

ปรับ R0 ให้  $U = +10\text{ V}$  และวัด Forward Current ( $I_F$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ ค่า Forward Current ( $I_F$ ) ของ Thyristor จะเรียกว่า On-state Current และ Forward Voltage จะเรียกว่า On-voltage

$U = +10\text{ V}$        $I_F$  ที่วัดได้ = ..... mA

8. ปรับค่าความต้านทาน R4 ลงอย่างช้า ๆ (อาจใช้ R3 เข้าช่วยก็ได้) จนกระทั่งไทรสเตอร์อยู่ในสภาวะนำกระแส และทำการวัดค่า On-state Current ( $I_F$ )

$U = +10\text{ V}$        $I_F$  ที่วัดได้ = ..... mA

9. ปรับ R3 และ R4 ให้มีค่า U เป็น 0 V และเพิ่มขึ้นเป็น +10 V วัด On-State Current ( $I_F$ )

$U = +10\text{ V}$        $I_F$  ที่วัดได้ = ..... mA

10. อธิบายลักษณะทางด้าน Forward (On-state) ของไทรสเตอร์ โดยพิจารณาผลการทดลองที่ได้ในข้อ 8 และ 9

.....  
.....  
.....  
.....

**สรุปผลการทดลอง**

.....  
.....  
.....  
.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**คำถามท้ายการทดลอง**

1. เพราะเหตุใด เมื่อจ่ายแรงดันลบเข้าที่ขาแอนโหนดของไดโอด ไดโอดจึงไม่สามารถนำกระแสได้

.....

.....

.....

.....

2. จงอธิบายการนำกระแสของเอสซีอาร์เมื่อไม่มีการทริกที่ขาเกต

.....

.....

.....

.....



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ใบงานที่ 2

### THYRISTOR IN AC-CIRCUIT

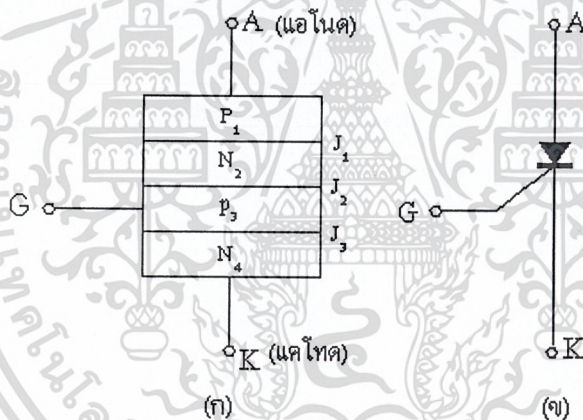
#### วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของไทรสเตอร์ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ
2. เพื่อศึกษาการทำงานของไทรสเตอร์ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

#### ทฤษฎี

หลักการทำงานและลักษณะสมบัติของเอสซีอาร์

เอสซีอาร์เป็นไทรสเตอร์ชนิดหนึ่งที่มีสามขั้วเรียกว่า แอนโอด (A) และแคโทด (K) และเกต (G) ดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) และเขียนสัญลักษณ์แทนด้วยรูปที่ 1 (ข)

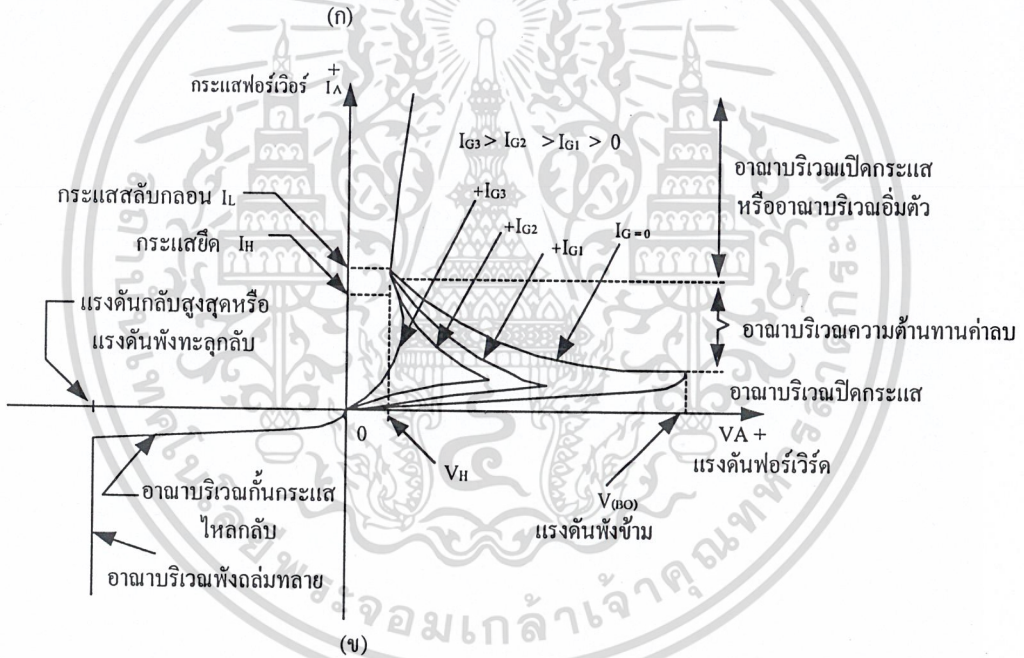
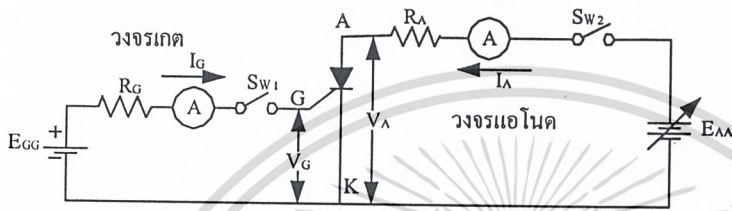


รูปที่ 1 (ก) โครงสร้างของเอสซีอาร์

(ข) สัญลักษณ์ของเอสซีอาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อต่อเอสซีอาร์เข้ากับวงจรไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) ถ้าปิดสวิตช์  $Sw_1$  และ  $Sw_2$  ลง แล้วปรับค่าแรงดันเลี้ยงวงจรแอนโอด  $E_{AA}$  และวงจรเกต  $E_{GG}$  ให้เหมาะสม เราจะได้เส้นโค้งลักษณะ สมบัติดังแสดงในรูปที่ 2 (ข) โดยให้ยึดถือหลักที่ว่ากระแสแอนโอด  $I_A$  และกระแสเกต  $I_G$  มีค่าบวก ถ้ากระแสไหลเข้าสู่ขั้วของเอสซีอาร์ และแรงดันแอนโอด  $V_A$  และแรงดันเกต  $V_G$  มีค่าบวกถ้าแอนโอด และเกตมีศักย์สูงกว่าแคโทด ดังที่ได้เขียนไว้ในรูปที่ 2 (ก)



รูปที่ 2 (ก) การต่อเอสซีอาร์เข้ากับวงจรไฟฟ้าโดยแสดงกระแส และแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าบวก  
(ข) เส้นโค้งลักษณะสมบัติของเอสซีอาร์

ในการเริ่มต้นการทดลองให้เปิดสวิตช์  $Sw_1$  ไว้ปิดสวิตช์  $Sw_2$  ลงและให้แรงดันแอนโอด  $V_A$  มีค่าเริ่มต้นจากน้อยไปหามาก โดยให้  $I_G = 0$  แล้วเพิ่มค่าแรงดันแอนโอดจากศูนย์ให้สูงขึ้นทางบวก หรือในทิศฟอร์เวิร์ดเราจะเห็นกระแส  $I_A$  เพิ่มขึ้นจากศูนย์เพียงเล็กน้อย เรียกว่า “เอสซีอาร์อยู่ในสภาวะปิดกระแส” แต่เมื่อแรงดัน  $V_A$  เพิ่มขึ้นสูงถึงค่า  $V_{(BO)}$  ซึ่งเรียกว่า “แรงดันพังข้าม” (Breakover

Voltage) แล้วเอสซีอาร์เปลี่ยนสถานะเข้าสู่สภาวะเปิดกระแสได้เอง โดยต้องการเวลาชั่วคราวหนึ่งซึ่งจะเรียกว่า “เวลาเปิดกระแส” (Turn-on Time) เราเรียกช่วงนี้ว่า “อาณาบริเวณปิดกระแสหรืออาณาบริเวณกั้นกระแสทิสฟอว์เวิร์ด” (Cut-off Region หรือ Forward Blocking Region)

ถ้าเราควบคุมกระแส  $I_A$  ให้เพิ่มค่าสูงขึ้นทีละน้อยด้วยการเพิ่มค่าแรงดันแอโนด  $E_{AA}$  เราจะเห็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าของ  $V_A$  ดังแสดงในรูปที่ 2 (ข) ซึ่งเมื่อภายหลังที่ค่าแรงดัน  $V_A$  นี้ได้ผ่านค่าแรงดันพังข้าม  $V_{(BO)}$  แล้วเราสามารถแบ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงนี้ออกได้เป็นสองช่วง ช่วงแรกเป็นช่วงที่แรงดันแอโนด  $V_A$  ลดค่าลงจากแรงดันพังข้าม  $V_{(BO)}$  ไปสู่ค่า  $V_H$  และกระแส  $I_A$  เพิ่มค่าสูงขึ้นจากค่า  $I_{(BO)}$  (อยู่ตรงจุดเกินแรงดันพังข้าม  $V_{(BO)}$ ) ไปสู่ค่า  $I_H$  (อยู่ตรงจุดเกิด  $V_H$ ) โดย กระแส  $I_H$  นี้จะเป็นค่ากระแสที่น้อยที่สุดที่สามารถรักษาให้เอสซีอาร์อยู่ในสภาวะเปิดกระแส เรียกกระแสนี้ว่า “กระแสยึดหรือกระแสโฮลดิ้ง” (Holding Current) โดยช่วงนี้เป็นช่วงของการที่เอสซีอาร์กำลังเปลี่ยนสถานะจากสภาวะปิดกระแสเข้าสู่สภาวะเปิดกระแส เราเรียกช่วงนี้ว่า “อาณาบริเวณของความต้านทานค่าลบ” (Negative Resistance Region) ช่วงที่สองเป็นช่วงที่กระแส  $I_A$  มีค่าใหญ่กว่ากระแสยึด  $I_H$  เล็กน้อย ไปจนถึงค่าที่ใหญ่มากมายโดยแรงดันแอโนดเพิ่มค่าสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย เรียกช่วงที่สองนี้ว่า “อาณาบริเวณเปิดกระแส หรือ อาณาบริเวณอิ่มตัว” (High Conduction Region หรือ Saturation Region) กระแส  $I_A$  ที่ไหลอยู่ในช่วงนี้มีค่าใหญ่มากจะสามารถทำอันตรายต่อเอสซีอาร์ให้ชำรุดเสียหายได้ เราจึงจำเป็นต้องใช้ความต้านทาน  $R_A$  ที่มีค่าใหญ่เข้าต่อเป็นอนุกรมในวงจรแอโนดเพื่อจำกัดกระแส  $I_A$  ไม่ให้ใหญ่มากเกินไป ถ้าเราต้องการให้เอสซีอาร์ที่อยู่ในสภาวะเปิดกระแสเปลี่ยนกลับไปสู่สภาวะปิดกระแสให้เราลดกระแสแอโนด  $I_A$  ให้มีค่าต่ำกว่ากระแสยึด  $I_H$  ในขณะที่  $I_G = 0$  ยังมีกระแสอีกชื่อหนึ่งคือ “กระแสสลักกลอน” (Latching Current)  $I_L$  ซึ่งนิยามว่าเป็นกระแสที่เล็กที่สุดที่สามารถรักษาให้เอสซีอาร์อยู่ในสภาวะเปิดกระแส โดยปลดเอาสัญญาณป้อนเข้าเกตออก ซึ่งเมื่อเราได้ลดกระแส  $I_H$  ให้ต่ำกว่ากระแส  $I_L$  ได้แล้วเอสซีอาร์จะหยุดเปิดกระแส เราเรียกช่วงนี้ว่า “อาณาบริเวณเปิดกระแส หรือ อาณาบริเวณกั้นกระแสทิสฟอว์เวิร์ด (Forward Blocking Region)” การเปลี่ยนสภาวะนี้ต้องการเวลาชั่วคราวหนึ่ง เรียกว่า “เวลาปิดกระแส” (Turn-off Time)  $t_q$  การลดกระแสแอโนดให้ต่ำกว่ากระแสสลักกลอน  $I_L$  แล้วเปลี่ยนกลับเพิ่มกระแสสูงขึ้นไปในระยะเวลาที่สั้นกว่าเวลาปิดกระแสของเอสซีอาร์ แล้วเอสซีอาร์จะกลับเข้าสู่สภาวะเปิดกระแสต่อไปตามเดิม กระแสเกต  $I_G$  มีอิทธิพลมากในการช่วยให้เอสซีอาร์จากสภาวะปิดกระแสเข้าสู่สภาวะเปิดกระแสได้ง่ายขึ้นโดยไม่ต้องใช้แรงดันแอโนด  $V_A$  สูงมาก ซึ่งเมื่อเราจัดให้  $I_G$  มีค่าใหญ่มากขึ้นจะยิ่งทำให้แรงดันพังข้ามของเอสซีอาร์ต่ำลง

เมื่อจัดให้แรงดันแอโนด  $V_A$  มีค่าลบหรือมีแรงดันกลับ (Reverse Voltage) กระแสแอโนดจะไหลกลับทางและมีค่าน้อยมาก เรียกช่วงนี้ว่า “อาณาบริเวณกั้นกระแสไหลกลับ” (Reverse

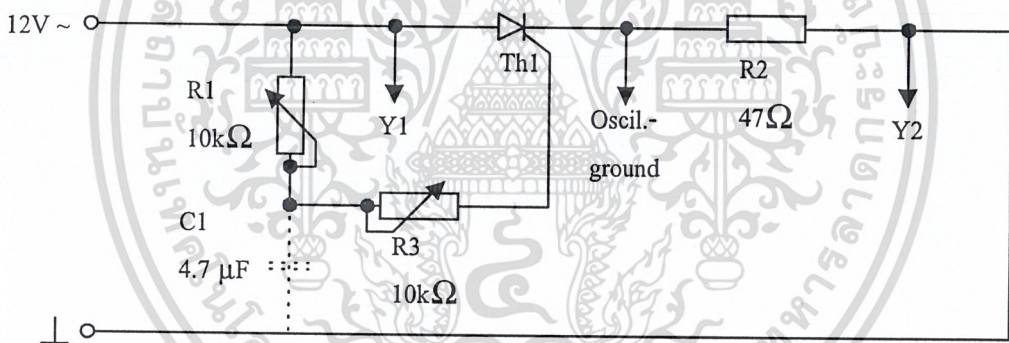
Blocking Region) ต่อเมื่อเราเพิ่มค่าแรงดันแอนโหนดค่าลบไปจนถึงค่าที่เรียกว่า “แรงดันพังทะลุกลับ” (Reverse Breakdown Voltage) กระแสแอนโหนดจะไหลเพิ่มค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยทั่ว ๆ ไปแล้ว ผู้ผลิตเอสซีอาร์จะออกแบบให้เอสซีอาร์มีค่าแรงดันพังทะลุกลับมีค่าเท่ากับหรือใหญ่กว่าค่าแรงดันพังข้ามทิสเฟอร์เวิร์ดในขณะที่  $I_G = 0$

**อุปกรณ์**

1. ไทริสเตอร์ (Th5)
2. รีซิสเตอร์ (R1) 10 กิโลโอห์ม
3. รีซิสเตอร์ (R2) 47 โอห์ม
4. รีซิสเตอร์ (R3) 10 กิโลโอห์ม

**ลำดับขั้นการทดลอง**

1. ต่อวงจรตามรูปที่ 3 (โดยที่ยังไม่ต่อคาปาซิเตอร์)



รูปที่ 3

2. ศึกษาช่วงการปรับตั้ง Triggering Angle (Control Angle) และแรงดันตกคร่อม R2 ที่ขึ้นอยู่กับ R3

.....

.....

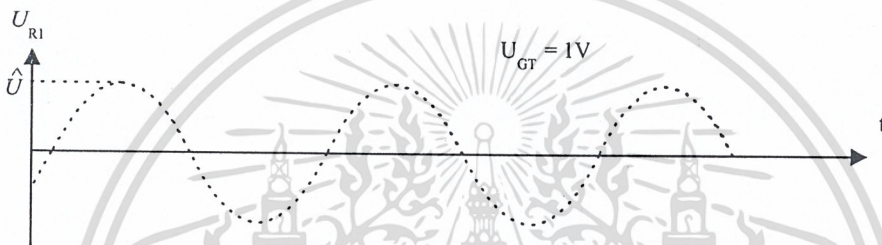
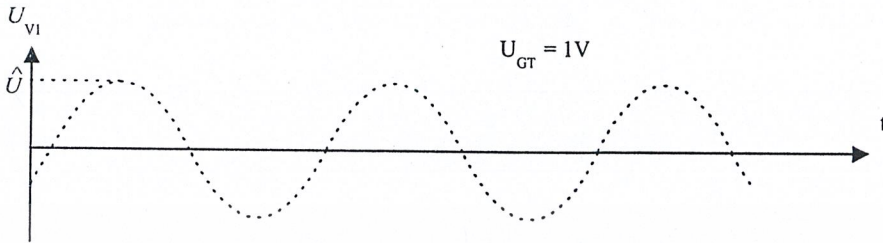
.....

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



6. วาดรูปคลื่นแรงดันที่ทรานซิสเตอร์ ( $U_{TH}$ ) และที่โหลด R2 ( $U_R$ ) ขณะที่แรงดัน  $U_{GT}$  เท่ากับ 1 V



สรุปผลการทดลอง

คำถามท้ายการทดลอง

1. จงอธิบายถึงการกระตุ้นขาเกตทำให้เอสซีอาร์นำกระแสได้อย่างไร

2. อธิบายการหยุดกระแสแบบธรรมชาติที่ทำให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ใบงานที่ 3

## THYRISTOR IN ANTIPARALLEL (INVERSE) CONNECTIONS

### วัตถุประสงค์

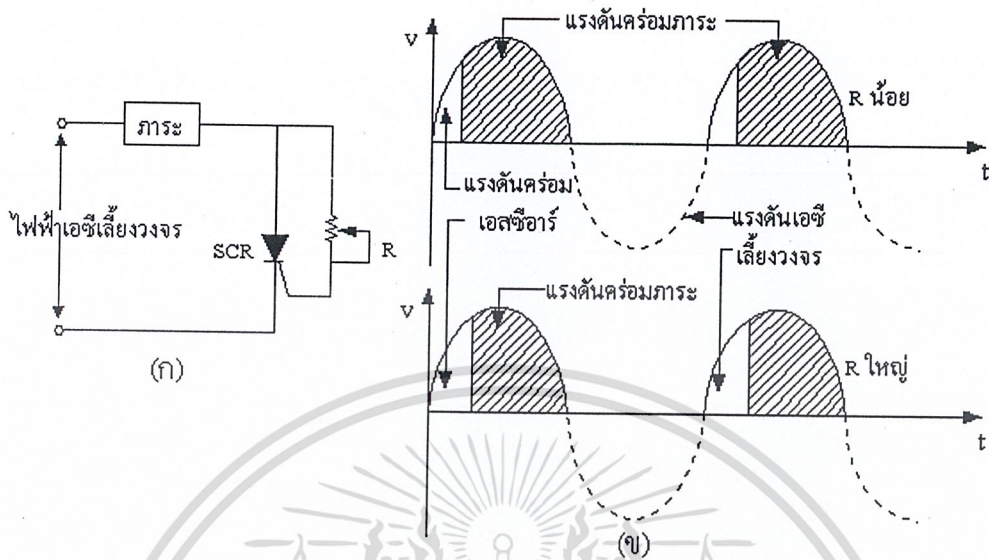
1. เพื่อศึกษาการทำงานของไทรสเตอร์ 2 ตัว ที่ต่อกันแบบ Antiparallel (Inverse) ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ
2. เพื่อศึกษาการต่อไทรสเตอร์ 2 ตัว แทนการทำงานของไทรแอกอุปกรณ์การทดลอง

### ทฤษฎี

วงจรจุดชนวนด้วยเฟสของสัญญาณเอซี

โดยใช้แรงดันเอซีเลี้ยงวงจรเข้าจุดชนวนผ่านความต้านทานที่แปรค่าได้  $R$  ดังแสดงใน รูปที่ 1 (ก) ซึ่งจะทำให้เอสซีอาร์เปิดกระแสขึ้นเมื่อกระแสเกตมีค่าใหญ่เพียงพอ ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับ ความต้านทาน  $R$  และค่าของแรงดันที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในครึ่งวัฏจักรบวกระหว่างเฟส (หรือมุม) 0 ถึง 90 องศา และเอสซีอาร์จะปิดกระแสเมื่อครึ่งวัฏจักรลบมาถึงซึ่งมีรูปคลื่นแรงดัน ดังแสดงในรูปที่ 1 (ข) วงจรนี้เป็นวงจรที่มีราคาถูกแต่เกตของเอสซีอาร์อาจชำรุดได้เมื่อครึ่งวัฏจักรลบมาถึง จึงได้มีการปรับปรุงแก้ไขด้วยการใช้ไดโอด  $D$  เข้ากั้นแรงดันกลับที่ป้อนเข้าเกตดังเขียนแสดงในรูป ที่ 2 (ก) ซึ่งวงจรสามารถควบคุมให้เอสซีอาร์เปิดกระแสแปรค่ามุมจาก 0 องศา (คือเปิดให้นำกระแสครั้งคลื่นเต็ม 100%) ถึงมุม 90 องศา (คือเปิดให้นำกระแสครั้งคลื่น 50%) เราจึงชอบนำไปใช้ในการควบคุมกระแสที่เรียกว่า “วิธีควบคุมเฟส” (Phase Control) ขอให้เราสังเกตว่ารูปที่ 2 (ก) นี้ไม่สามารถควบคุมใหญ่เกินกว่ามุม 90 องศา ได้และ  $\alpha$  เป็นมุมจุดชนวน

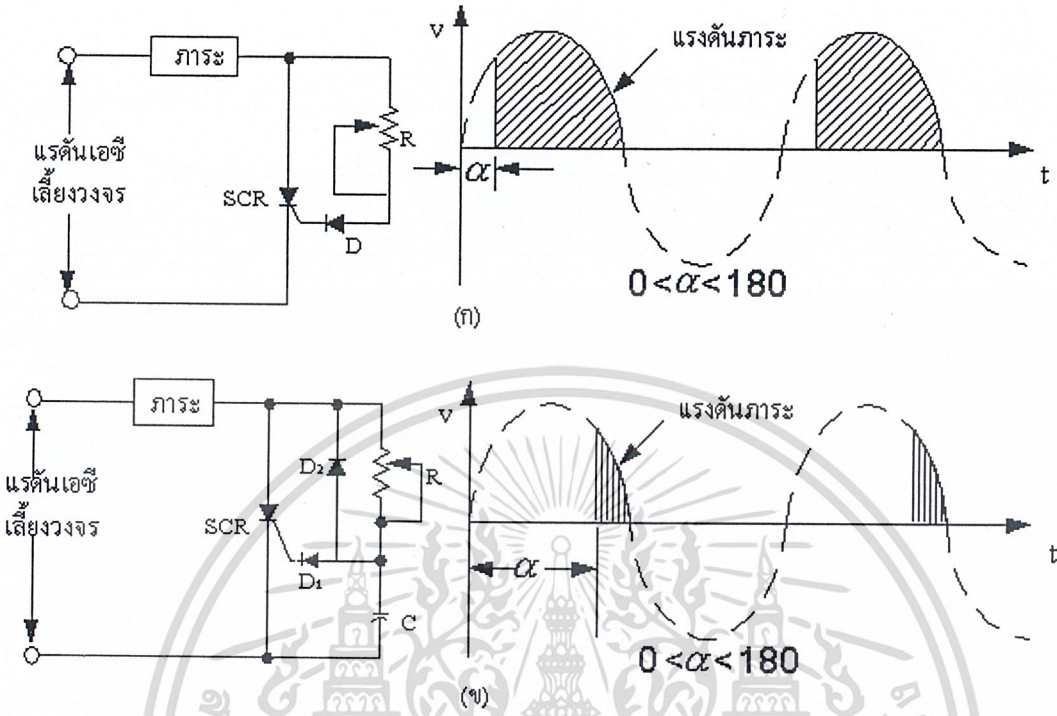
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 (ก) วงจรจุดชนวนด้วยเฟสของสวิตช์สัญญาณเอซีแบบง่าย  
 (ข) รูปคลื่นแรงดันเมื่อค่าความต้านทาน R มีค่าน้อยและค่าใหญ่

เพื่อที่เราจะสามารถควบคุมเฟสได้จาก 0 ถึง 180 องศา (คือสามารถควบคุมได้เต็มครึ่ง วัฏจักร) เราใช้ความต้านทาน R ตัวเก็บประจุ C และไดโอดเข้าต่อร่วมกันดังแสดงในรูปที่ 2 (ข) โดยจะต้องเลือกใช้ตัวเก็บประจุ C ให้ใหญ่พอที่จะสามารถเก็บประจุเพื่อจ่ายออกเป็นกระแสเกตที่ใหญ่พอเพียงที่จะจุดชนวนได้และเลือกค่า R เพื่อที่จะสามารถปรับค่าตัวเวลาคงที่ RC ให้มุมจุดชนวนเกิดขึ้นจาก 0 ถึง 180 องศา ได้เนื่องจากวงจร RC จะทำให้แรงดันเอซีเลี้ยววงจรมีเฟส นำหน้าแรงดันที่ป้อนเข้าเกต ซึ่งเมื่อแรงดันเอซีเลี้ยววงจรครึ่งวัฏจักรบวกผ่านเข้ามา ก็จะประจุให้แผ่นบนของตัวเก็บประจุ C มีศักย์บวก ครั้นถึงเวลาที่ตั้งไว้ด้วยการปรับค่าความต้านทาน R จะทำให้ศักย์บวกบนตัวเก็บประจุ C มีค่าใหญ่พอที่จะให้กระแสเกตใหญ่เพียงพอที่จะชนวนได้ ซึ่งเป็นผลให้เอสซีอาร์เปิดกระแสตามต้องการ ซึ่งเมื่อครึ่งวัฏจักรลบมาถึง เอสซีอาร์จะปิดกระแส และแรงดันค่าลบนี้จะให้กระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุ C และไดโอด  $D_2$  แล้วประจุให้มีศักย์ลบที่แผ่นบนของตัวเก็บประจุ C ซึ่งเป็นการตั้งต้นใหม่รอคอยครึ่งวัฏจักรบวกที่จะมาถึงต่อไป สำหรับ ไดโอด  $D_1$  จะทำหน้าที่กันแรงดันกลับที่ป้อนเข้าเกตในช่วงครึ่งวัฏจักรลบ วงจรนี้สามารถนำไป ดัดแปลงใช้กับวงจรควบคุมเฟสเต็มคลื่นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

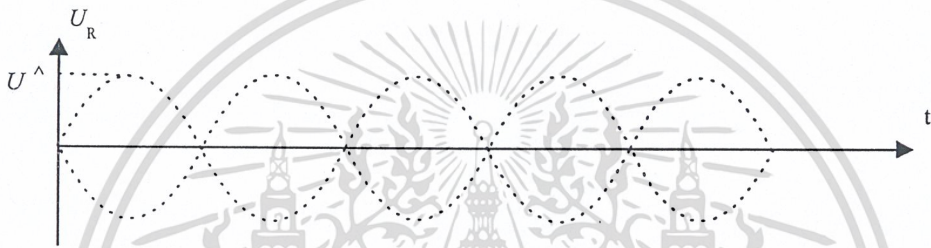
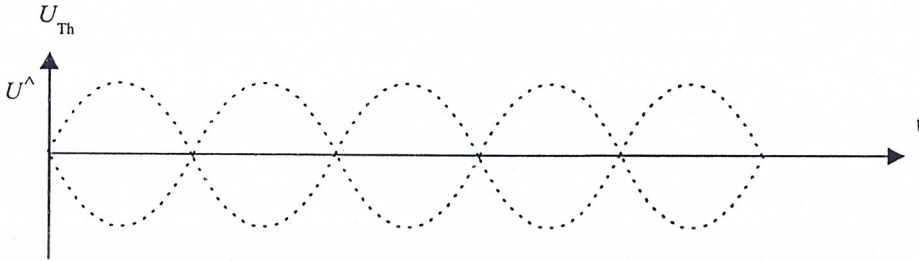


รูปที่ 2 (ก) วงจรควบคุมเฟสครึ่งคลื่นแบบง่ายด้วยความต้านทานแปรค่าได้  
 (ข) วงจรควบคุมเฟสครึ่งคลื่นด้วยความต้านทานแปรค่าได้  
 ตัวเก็บประจุและไดโอด

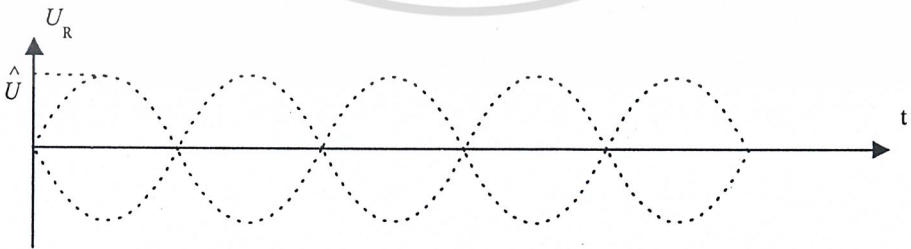
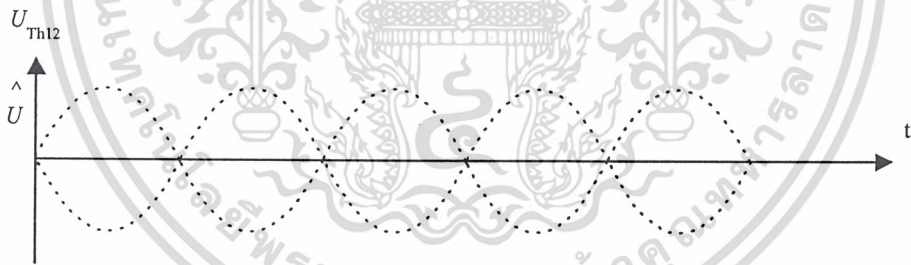
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



3. ลดค่าของแรงดัน  $U_{GT}$  เป็น 0.5 V และวาดรูปคลื่นจากออสซิลโลสโคป

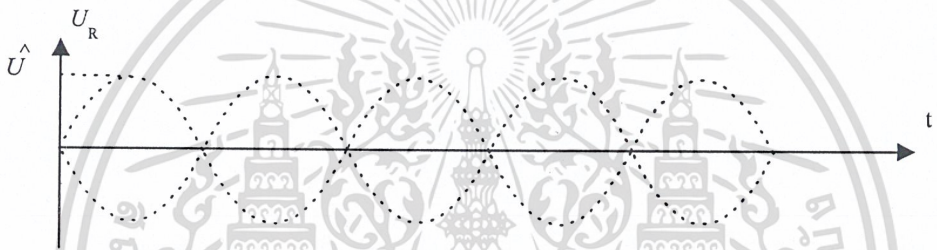
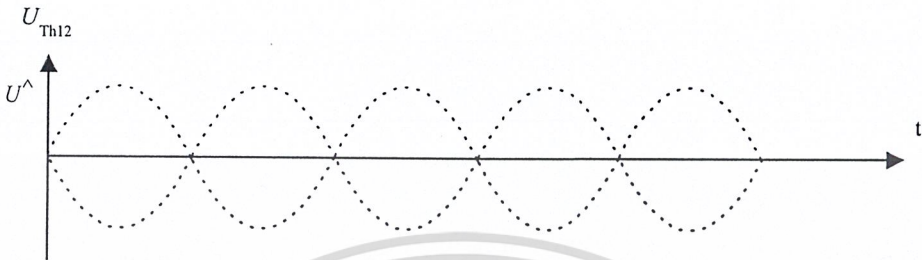


4. ปลดวงจรส่วนที่เป็นไทรสเตอร์ Th11 ออกจากวงจร และทำการบันทึกรูปคลื่น ( $U_{GT} = 0.5 V$ )



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ต่อดวงจรส่วนของไทรสเตอร์ Th11 กลับคืนและปลดวงจรส่วนที่เป็นไทรสเตอร์ Th12 ออกจากวงจร ทำการบันทึกรูปคลื่น ( $U_{GT} = 0.5 \text{ V}$ )



6. เปรียบเทียบรูปคลื่นที่ได้จากออสซิลโลสโคป และอธิบายผลของการไม่ต่อไทรสเตอร์ Th11 และ Th12 ที่มีผลต่อแรงดันตกคร่อมที่โหลด

.....

.....

.....

.....

**สรุปผลการทดลอง**

.....

.....

.....

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**คำถามท้ายการทดลอง**

1. จงอธิบายการนำกระแสของเอสซีอาร์ที่ต่อกันแบบ Antiparallel

.....

.....

.....

.....

2. การต่อเอสซีอาร์แบบ Antiparallel เหมือนหรือแตกต่างจากไทรแอกอย่างไร

.....

.....

.....

.....



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ใบงานที่ 4

### TRIAC IN AC-CIRCUIT

#### วัตถุประสงค์

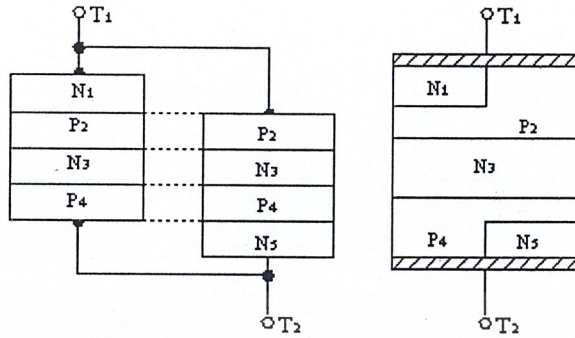
1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของไทรแอกในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ
2. เพื่อศึกษาการทำงานของไทรแอกในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ
3. เพื่อเปรียบเทียบการทำงานของไทรแอกและเอสซีอาร์ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

#### ทฤษฎี

หลักการทํางานและลักษณะสมบัติของไทรแอก

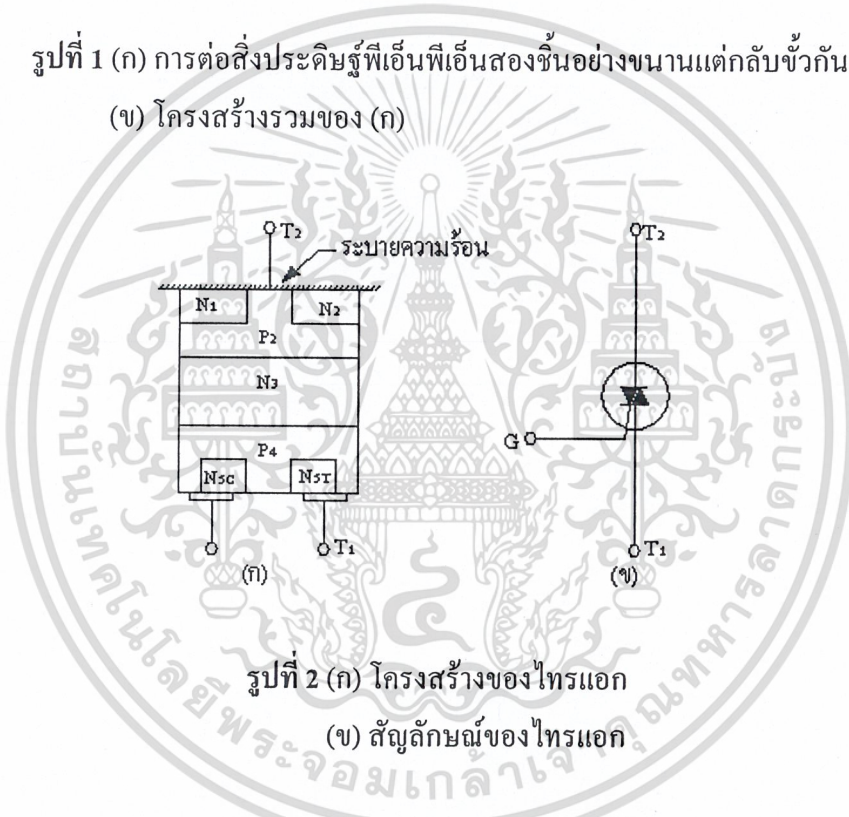
ไทรแอกเป็นไทรสเตอร์อีกชนิดหนึ่งที่มีสามขั้วคล้ายเอสซีอาร์ แต่สามารถให้กระแสไหลผ่านได้ทั้งสองทิศทาง ซึ่งจะแตกต่างกับเอสซีอาร์ที่สามารถให้กระแสไหลผ่านได้ทิศฟอว์เวิร์ดได้เพียงทิศทางเดียว ดังนั้นเราจึงไม่สามารถเรียกขั้วสองขั้วของไทรแอก (ที่มีรูปร่างใหญ่ที่ใช้เป็นขั้วสำหรับกระแสไหลเข้าออก) ว่าขั้วใดเป็นแอนโอดหรือว่าขั้วใดเป็นแคโทดแต่เรียกเป็นขั้ว  $T_1$  และ  $T_2$  แทน และขั้วที่สามมีรูปร่างเล็กนั้นเป็นขั้วเกต (G) และไทรแอกที่มีหลักการทํางานเหมือนกับเอสซีอาร์สองตัวต่อขนานกันแต่กลับขั้วกัน ซึ่งคล้ายกับเอาสิ่งประดิษฐ์สถานะของแฉิ่งพีเอ็นสองชิ้นมาต่อขนานกันแต่กลับขั้วกันดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) ซึ่งจะเห็นว่ามิชั้นของสารกึ่งตัวนำแตกต่างกันห้าชั้น คือ  $N_1, P_2, N_3, P_4, N_5$  เมื่อนำเข้ารวมกันเป็นโครงสร้างเดียวกันก็จะเขียนได้เป็นรูปที่ 1 (ข) เมื่อต่อขั้วเกต และดัดแปลงโครงสร้างภายในให้เป็นแบบลัดวงจรอิมิตเตอร์ (Shorted Emitter Structure) ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) เราจะได้ไทรแอก ซึ่งมีสัญลักษณ์ดังแสดงในรูปที่ 2 (ข) โดยทั่วไปเราใช้ขั้ว  $T_1$  ที่แสดงในรูปที่ 2 นี้เป็นขั้วอ้างอิง เช่นเมื่อกล่าวว่า แรงดันที่ขั้ว  $T_2$  เป็นบวก จะมีความหมายว่า ขั้ว  $T_2$  มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าขั้ว  $T_1$  เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 (ก) การต่อสิ่งประดิษฐ์พีเอ็นพีเอ็นสองชั้นอย่างขนานแต่กลับขั้วกัน

(ข) โครงสร้างรวมของ (ก)



รูปที่ 2 (ก) โครงสร้างของไทรแอก

(ข) สัญลักษณ์ของไทรแอก

การที่มีโครงสร้างแบบลัดวงจรอิมิตเตอร์ก็คล้ายกับใส่ความต้านทานขนานเข้าระหว่างเกตกับแคโทดเพื่อแบ่งกระแสรั่วที่เกิดขึ้นจากความร้อน และเนื่องจากประจุเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากการมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันคร่อมรอยต่อระหว่างเกตกับแคโทด วิธีการนี้อาจทำให้การป้อนกลับค่าบวกมีผลน้อยลงแต่กลับทำให้ไทรแอกทำงานได้ดีที่อุณหภูมิสูง และเมื่อมีแรงดันเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

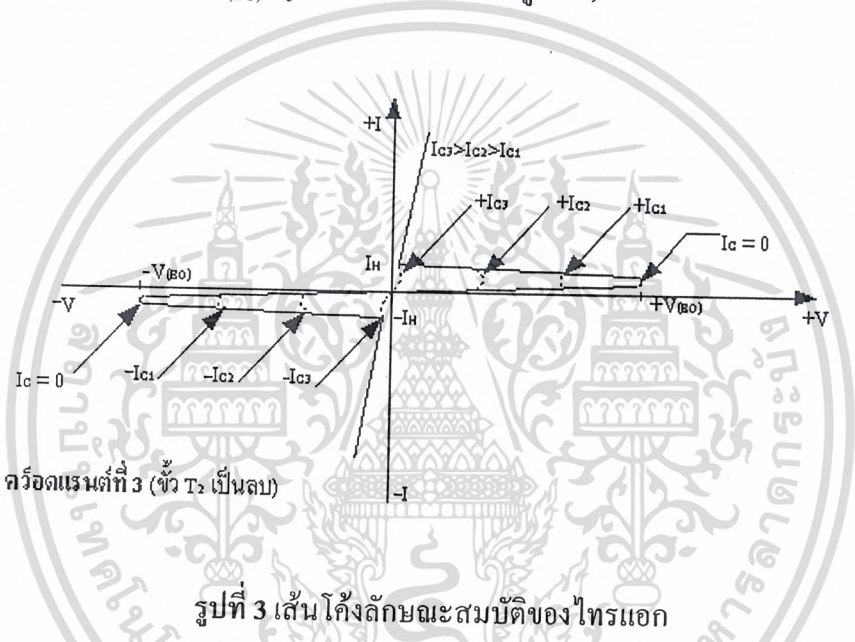
ไทรแอกมีข้อดีที่มีราคาถูกลงกว่าเอสซีอาร์ ไทรแอกตัวเดียวสามารถใช้แทนเอสซีอาร์สองตัวที่ต่อขนานกันแต่ต่อขั้วกลับกัน และแรงดันกลับทางที่สูงมากซึ่งทำให้เอสซีอาร์ชำรุดนั้นเมื่อนำมาป้อนเข้าไทรแอกแล้วแรงดันนี้เพียงแต่ทำให้ไทรแอกนำกระแสได้เท่านั้น ข้อเสียของไทรแอกคือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น มิใช่ผู้จัดทำเนื้อหาเว็บไซต์นี้เป็นการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถใช้กับวงจรที่มีความถี่สูงได้ ซึ่งจะได้อธิบายเหตุผลให้ทราบเมื่ออธิบายถึงการปิดให้ ไทรแอกหยุดนำกระแส

การนำกระแสของไทรแอกจะเป็นดั่งเส้นโค้งลักษณะสมบัติ ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งจะคล้ายกับเส้นโค้งลักษณะสมบัติของเอสซีอาร์สำหรับสภาวะเปิดนำกระแสสองเส้นมาต่อกลับหัวกัน

เมื่อ  $I_G = 0$  ไทรแอกจะเปลี่ยนแปลงสถานะไปสู่สภาวะเปิดกระแสได้เองถ้าแรงดันที่ขั้ว  $T_2$  มีค่าบวกและสูงถึงแรงดันพังข้าม  $V_{(BO)}$  (ดูควีออดเรนต์ที่ 1 ของรูปที่ 3) หรือถ้าแรงดันที่ขั้ว  $T_2$  เป็นลบและสูงถึงแรงดันพังข้าม  $V_{(BO)}$  (ดูควีออดเรนต์ที่ 3 ของรูปที่ 3)



ไทรแอกที่กำลังอยู่ในสภาวะเปิดกระแส อาจจะเปลี่ยนกลับเข้าสู่สภาวะปิดกระแสได้ถ้าลดกระแสไหลผ่านไทรแอก  $I$  ลงให้เหลือน้อยกว่าค่ากระแสยึด  $I_H$  เป็นเวลานานมากกว่าเวลาปิดกระแส

ไทรแอกซึ่งอยู่ในสภาวะปิดกระแส อาจจะเปลี่ยนสภาวะเข้าสู่สภาวะเปิดกระแสโดยใช้แรงดันที่ขั้ว  $T_2$  น้อยกว่าแรงดันพังข้าม  $V_{(BO)}$  พร้อมกับใช้กระแสเกตค่าต่าง ๆ ซึ่งสามารถจะทำ ได้ 4 วิธี คือ

- 1) แบบ I+ (ควีออดเรนต์ที่ 1) เมื่อแรงดันที่ขั้ว  $T_2$  เป็นบวก และแรงดันที่ขั้วเกตเป็นบวก
- 2) แบบ I- เมื่อแรงดันขั้ว  $T_2$  เป็นบวก และแรงดันขั้วเกตเป็นลบ
- 3) แบบ III+ เมื่อแรงดันขั้ว  $T_2$  เป็นลบ และแรงดันขั้วเกตเป็นบวก
- 4) แบบ III- (ควีออดเรนต์ที่ 3) เมื่อแรงดันที่ขั้ว  $T_2$  เป็นลบ และแรงดันขั้วเกตเป็นลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเขียนขึ้นเพื่อการวิจัยเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำขึ้นจะขอสงวนสิทธิ์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

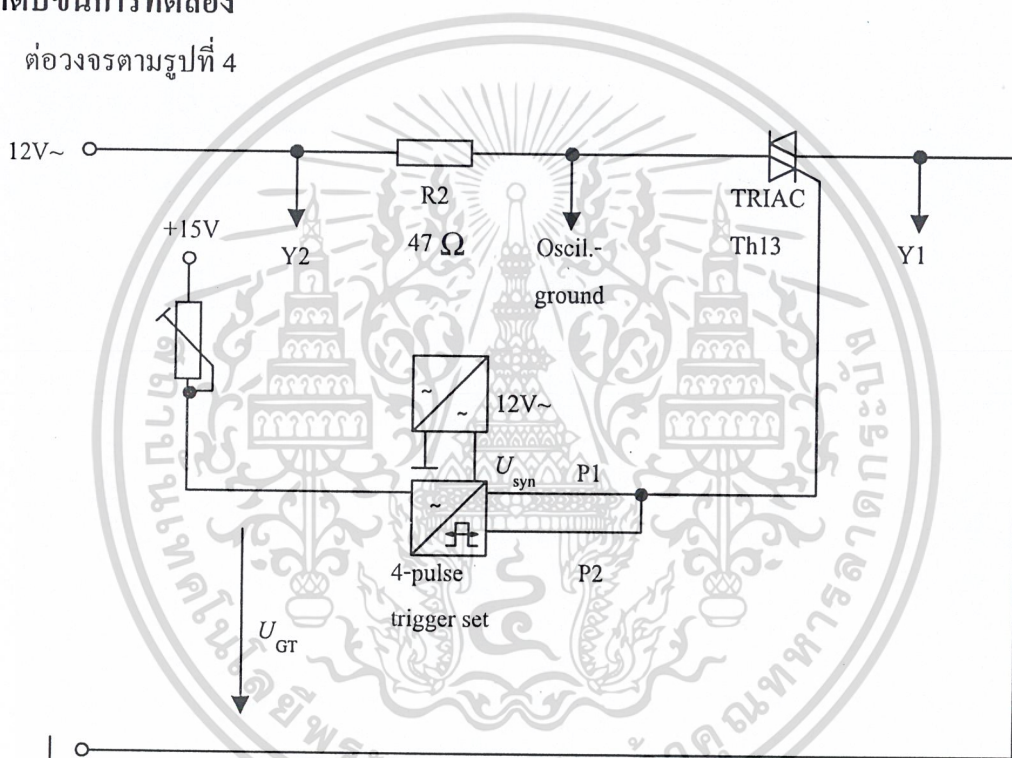
ไทรแอกในท้องตลาดปัจจุบันจะสามารถทำงานได้ว่องไวตามวิธีแบบ I+ และแบบ III- มากที่สุด แบบ I- จะให้ความว่องไวรองลงมา และแบบ III+ มีความว่องไวต่ำมาก จึงไม่นิยมใช้ แบบ I- และแบบ III+

### อุปกรณ์การทดลอง

1. ไทรสเตอร์ (Th13)
2. รีซิสเตอร์ (R2) 47 โอห์ม

### ลำดับขั้นการทดลอง

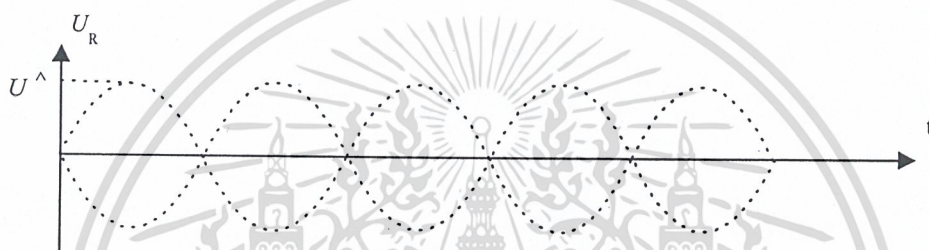
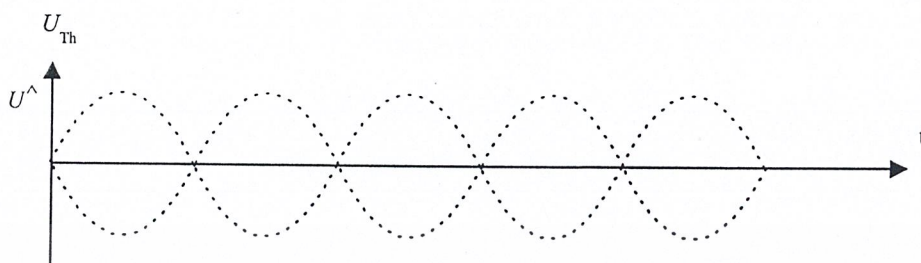
1. ต่อดังตามรูปที่ 4



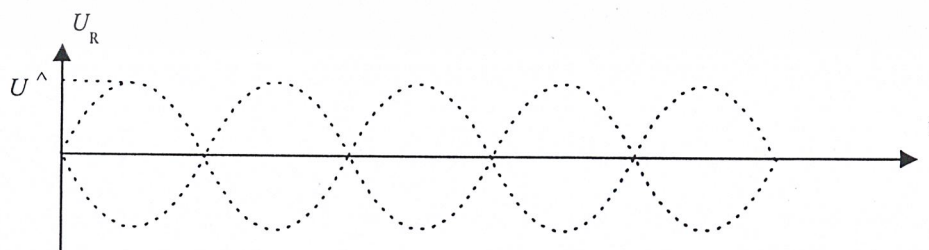
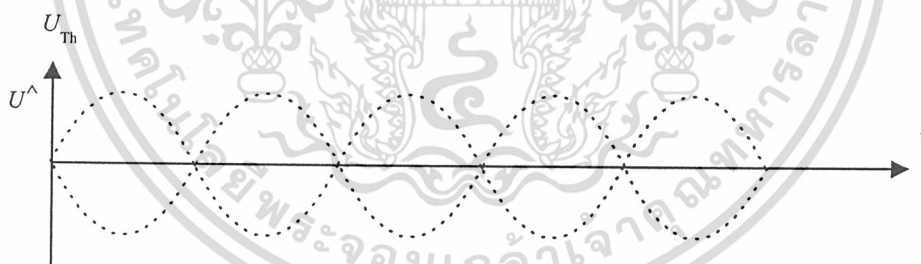
รูปที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เปลี่ยนแปลงค่าของแรงดัน  $U_{GT}$  สังเกตรูปคลื่นที่ได้ทำการบันทึกที่รูปคลื่นที่  $U_{GT} = 1V$

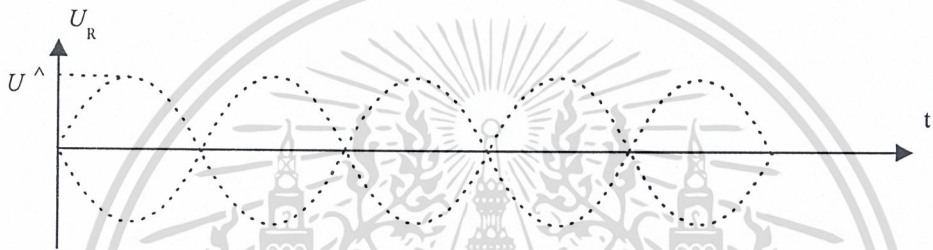
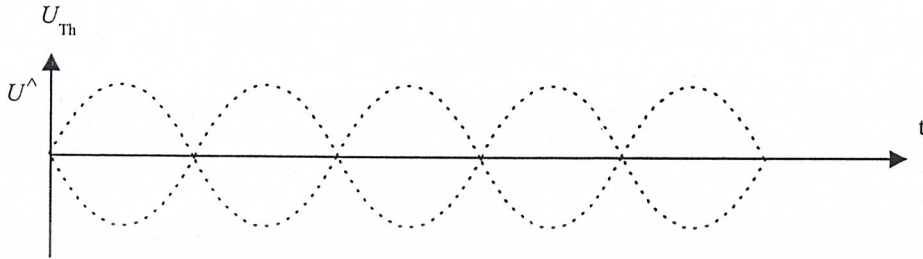


3. สลับขั้วของชุด 4 Pulse Trigger ปรับเปลี่ยน  $U_{GT}$  ช้า ๆ สังเกตผลที่ได้ บันทึกรูปคลื่นที่  $U_{GT} = 1V$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. สลับขั้วของไทรแอกในวงจร ปรับเปลี่ยนแรงดัน  $U_{GT}$  ซ้ำ ๆ สังเกตและบันทึกผลที่ได้



5. อธิบายผลของการสลับขั้วไทรแอกและการสลับขั้วของวงจร 4 Pulse Trigger

.....

.....

.....

.....

.....

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

คำถามท้ายการทดลอง

1. จงเปรียบเทียบการนำกระแสของเอสซีอาร์และไทรแอก

.....

.....

.....

.....

2. การใช้งานไทรแอกในโหมดใดที่นิยมใช้มากที่สุด เพราะเหตุใด

.....

.....

.....



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ใบงานที่ 5

### SINGLE-PHASE HALF-WAVE RECTIFIER CIRCUIT

#### วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการทำงานของวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส ครึ่งคลื่น
2. เพื่อศึกษาผลกระทบของโหลดที่มีผลต่อวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส ครึ่งคลื่น

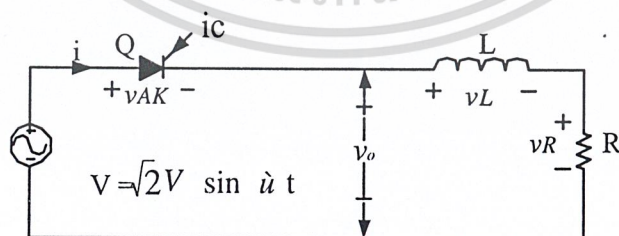
#### ทฤษฎี

การเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส ครึ่งคลื่น (Single-phase Half-wave Rectifier Circuit)

แรงดันเฉลี่ยเอาต์พุตของวงจรแบบครึ่งคลื่น (Half-wave) สามารถควบคุมได้โดยเปลี่ยนแปลงมุมที่จ่ายสัญญาณทริกแก์เอสซีอาร์ ในขณะที่เอสซีอาร์ได้รับฟอร์เวิร์ดไบแอส คือ ที่แรงดันที่แอนโอดเป็นบวกเมื่อเทียบกับแคโทดเอสซีอาร์จะนำกระแส และเมื่อกระแสผ่านสู่โหลดมากกว่ากระแสยึด (Holding Current) ในกรณีที่โหลดเป็นความต้านทานอย่างเดียว กระแสถึงกระแสยึดที่มุมที่ทริกเอสซีอาร์ ( $\alpha$ )

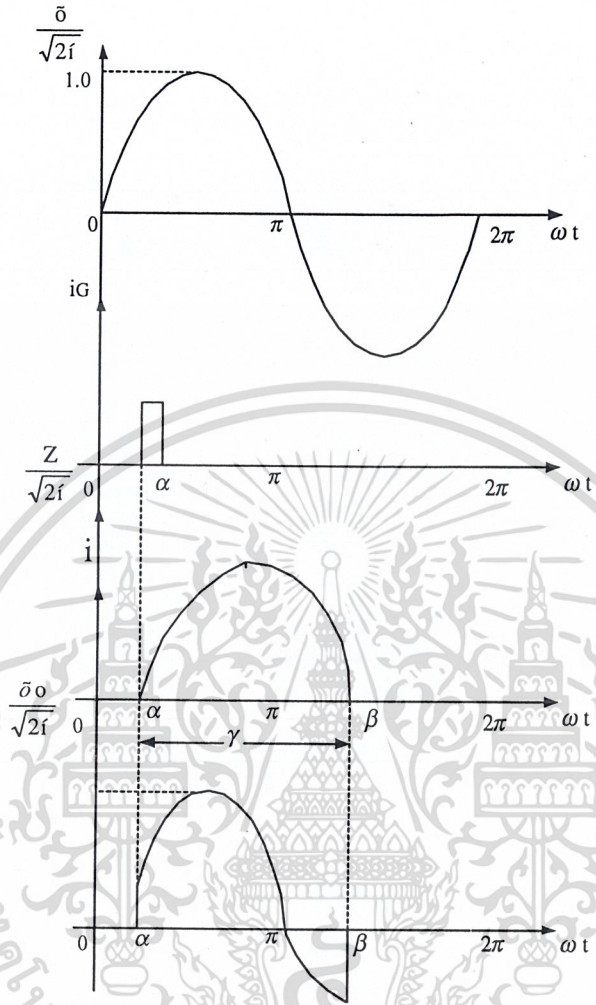
1. โหลดเป็นความต้านทานอย่างเดียว

ในรูปที่ 1 เป็นวงจรการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟสแบบควบคุมครึ่งคลื่น เมื่อโหลดเป็นตัวต้านทานอย่างเดียว



รูปที่ 1 โหลดเป็นความต้านทานอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 (ต่อ) โหลดเป็นความต้านทานอย่างเดียว

สมมติว่าไม่มีแรงดันคร่อมเอสซีอาร์เมื่อเอสซีอาร์นำกระแส

$V$  = แรงดันอาร์เอ็มเอสของแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ

$$V_{O(ave)} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2}V \sin \omega t \, d(\omega t) \tag{1}$$

$$= \frac{\sqrt{2}V}{2\pi} \left[ -\cos\theta \right]_{\alpha}^{\pi}$$

$$= \frac{\sqrt{2}V}{2\pi} (1 + \cos\alpha) \tag{2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ 2π เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะต้องใช้เอสซีอาร์ที่ทนแรงดันรีเวิร์ดมากกว่า

$$V_{O(ave)} \text{ สูงสุด } (\alpha = 0) = \frac{V_m}{\pi} = \frac{\sqrt{2V}}{\pi}$$

$$I_{O(ave)} = \frac{V_{O(ave)}}{R}$$

$$= \frac{\sqrt{2V}}{2\pi R} (1 + \cos\alpha) \quad (3)$$

จะใช้เอสซีอาร์ที่ทนกระแสเฉลี่ยได้มากกว่า  $I_{O(ave)}$  สูงสุดคือ

$$I_{O(RMS)} = \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \left( \frac{\sqrt{2V}}{R} \sin\omega t \right)^2 d(\omega t) \right]^{1/2}$$

$$= \frac{\sqrt{2V}}{R} \left[ \frac{1}{4\pi} \left( \omega t - \frac{1}{2} \sin 2\omega t \right) \right]_{\alpha}^{\pi}^{1/2}$$

$$= \frac{\sqrt{2V}}{R} \left[ \frac{1}{4\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right) \right]^{1/2} \quad (4)$$

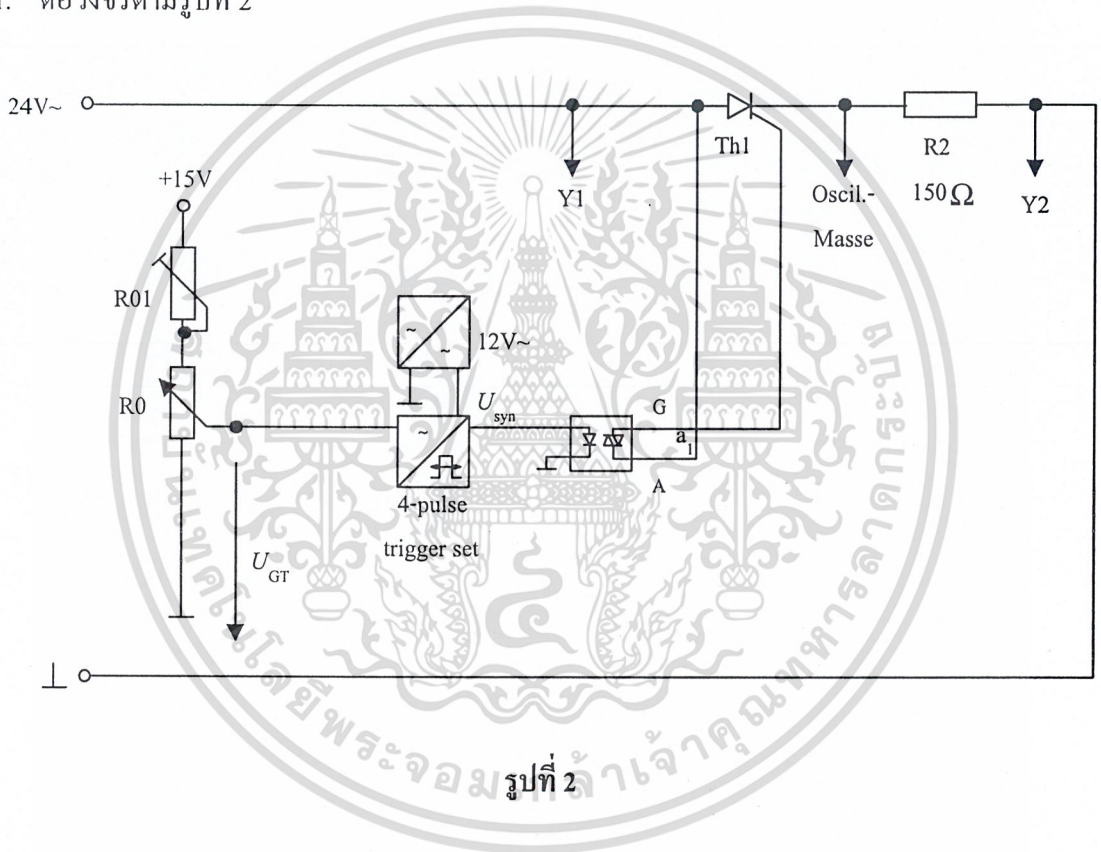
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์การทดลอง

1. ไทริสเตอร์ (Th1)
2. รีซิสเตอร์ (R2) 150 โอห์ม
3. อินดักเตอร์ 100 mH
4. คาปาซิเตอร์ 10  $\mu$ F

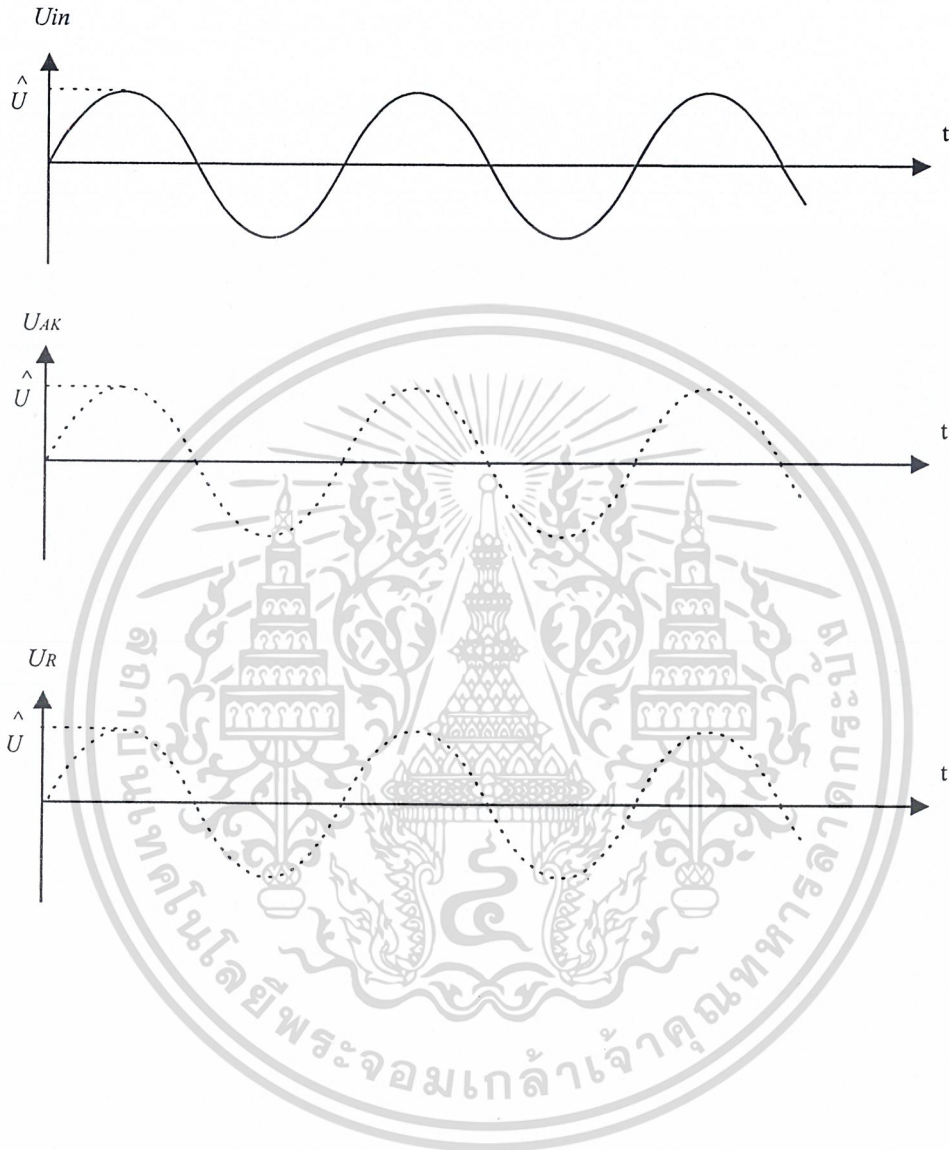
ลำดับขั้นการทดลอง

1. ต่อวงจรตามรูปที่ 2



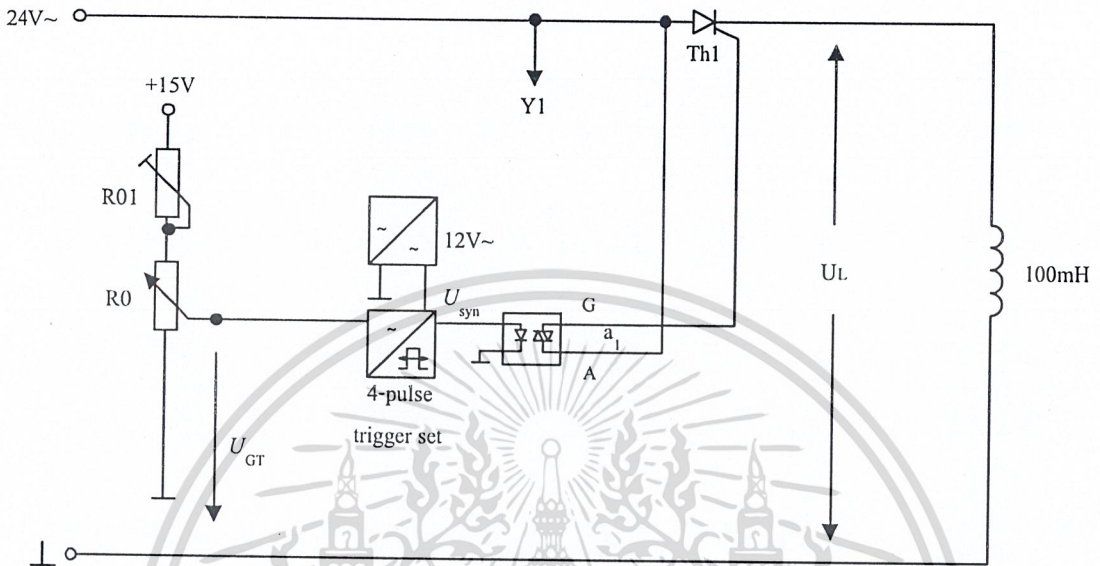
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ปรับแรงดัน  $U_{GT}$  จาก 0 ถึง 2 V สังเกตรูปคลื่นและบันทึกรูปคลื่นที่  $U_{GT} = 1 V$



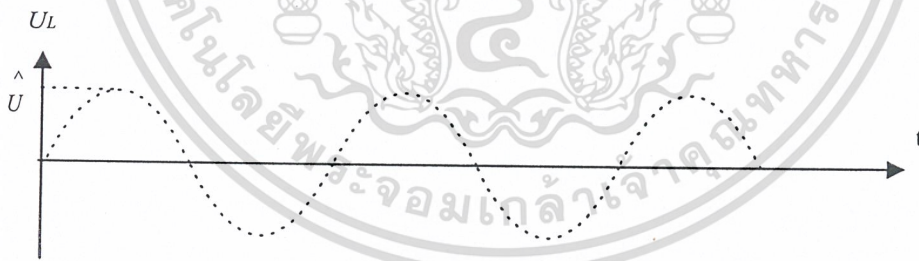
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เปลี่ยนวงจรดังรูปที่ 3

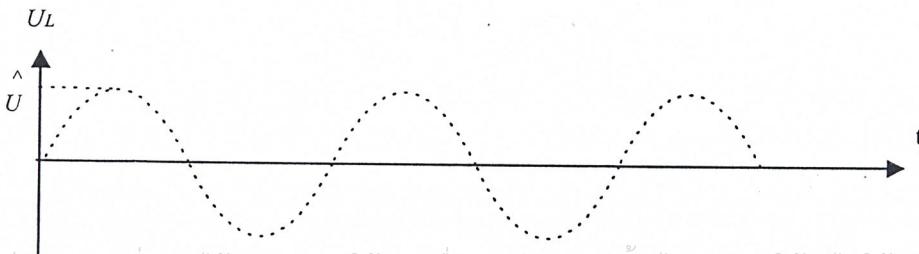


รูปที่ 3

4. ทำการทดลองซ้ำการทดลองข้อ 2 สังเกตและบันทึกรูปคลื่น

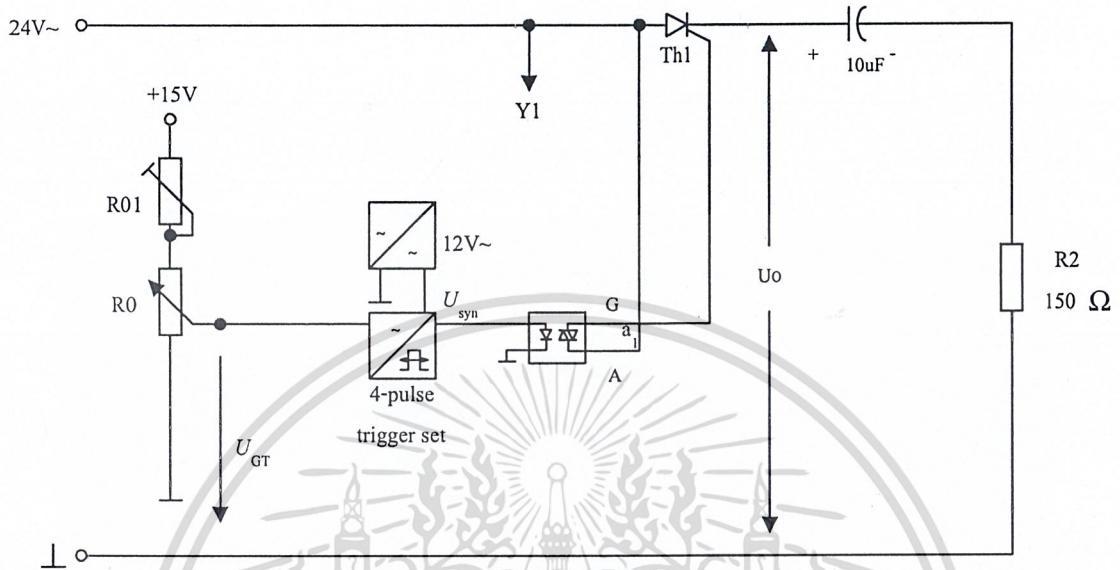


5. เพิ่ม โหลดเป็น R-L สังเกตรูปคลื่นและบันทึกรูปคลื่นที่  $U_{GT} = 1V$



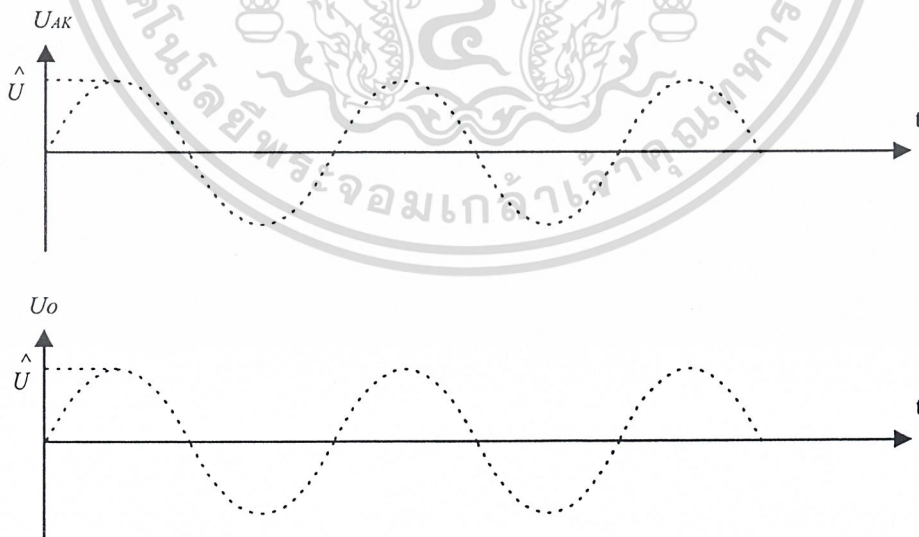
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ต่อดวงจรใหม่ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4

7. ปรับแรงดัน  $U_{GT}$  จาก 0 ถึง 2V สังเกตรูปคลื่นและบันทึกรูปคลื่นที่  $U_{GT} = 1V$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. อธิบายผลของอินดักเตอร์ที่มีต่อการนำกระแสของเอสซีอาร์

.....

.....

.....

.....

สรุปผลการทดลอง

.....

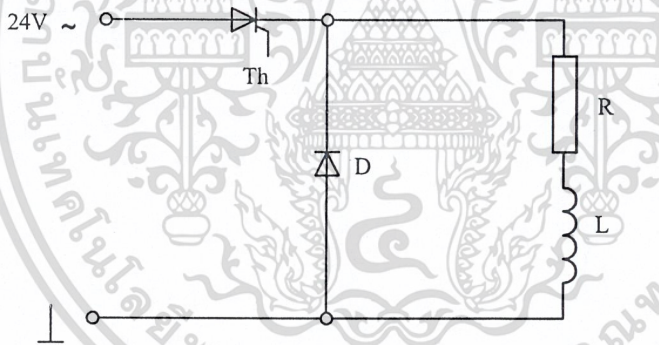
.....

.....

.....

คำถามท้ายการทดลอง

1. ถ้าต่อวงจรดังรูปจะมีผลอย่างไร



.....

.....

.....

.....

2. เมื่อต่อโหลดที่เป็นคาปาซิเตอร์เพียงอย่างเดียวจะมีผลเสียอย่างไรกับวงจร

.....

.....

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขประโยชน์ด้วยการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ใบงานที่ 6

### FULL-WAVE RECTIFIER WITH CENTER TAP TRANSFORMER

#### วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการทำงานของวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบเต็มลูกคลื่นที่ใช้หม้อแปลงแท็ปกลาง
2. เพื่อศึกษาผลกระทบของโหลดที่มีวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบเต็มลูกคลื่นที่ใช้หม้อแปลงแท็ปกลาง

#### ทฤษฎี

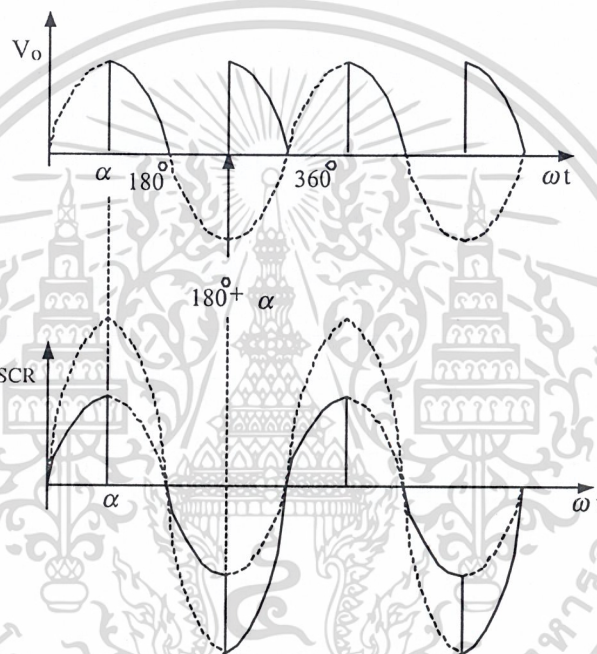
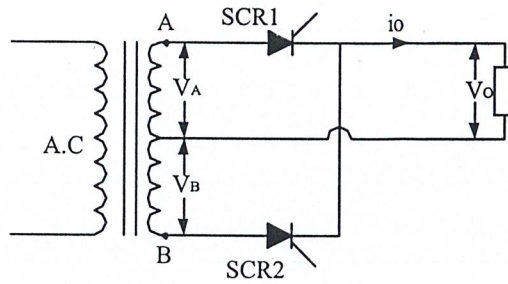
Full-wave Rectifier with Center Tap Transformer

การแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟกระแสตรงแบบเต็มลูกคลื่น โดยใช้หม้อแปลงที่มีจุดกึ่งกลาง ดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) จะใช้เอสซีอาร์เพียง 2 ตัว เปลี่ยนกันนำกระแสตัวละครึ่งลูกคลื่นเอสซีอาร์ 1 สามารถถูกทริกให้นำกระแสที่แรงดัน  $V_A$  เป็นบวก เมื่อเทียบกับจุดกึ่งกลางของ หม้อแปลง โดยทำการทริกให้เอสซีอาร์นำกระแสที่มุม  $\alpha$  หรือกล่าวได้ว่ามุมทริกเกอร์เท่ากับ  $\alpha$  ในกรณีที่โหลดเป็นความต้านทานอย่างเดียว เมื่อทริกให้เอสซีอาร์ 1 นำกระแสที่มุม  $\alpha$  แล้วเอสซีอาร์ 1 จะหยุดนำกระแสเมื่อ  $V_A$  ตกลงสู่ศูนย์ คือ ที่มุม  $180$  องศา ดังแสดงในรูปที่ 1 (ข) และทริกให้ เอสซีอาร์ 2 นำกระแสที่มุม  $180^\circ + \alpha$  และเอสซีอาร์ 2 จะหยุดนำกระแสที่มุม  $360$  องศา แรงดันกระแสตรงเฉลี่ยที่โหลดจะมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} V_{O(\text{ave})} &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} V_A \sin \omega t \, d(\omega t) \\ &= \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_A (1 + \cos \alpha) \end{aligned} \quad (1)$$

$V_A = V_B =$  แรงดันอาร์เอ็มเอส ระหว่างขั้ว A และ B เทียบกับจุดกึ่งกลางของหม้อแปลง  
ทางด้านขดจ่ายไฟ

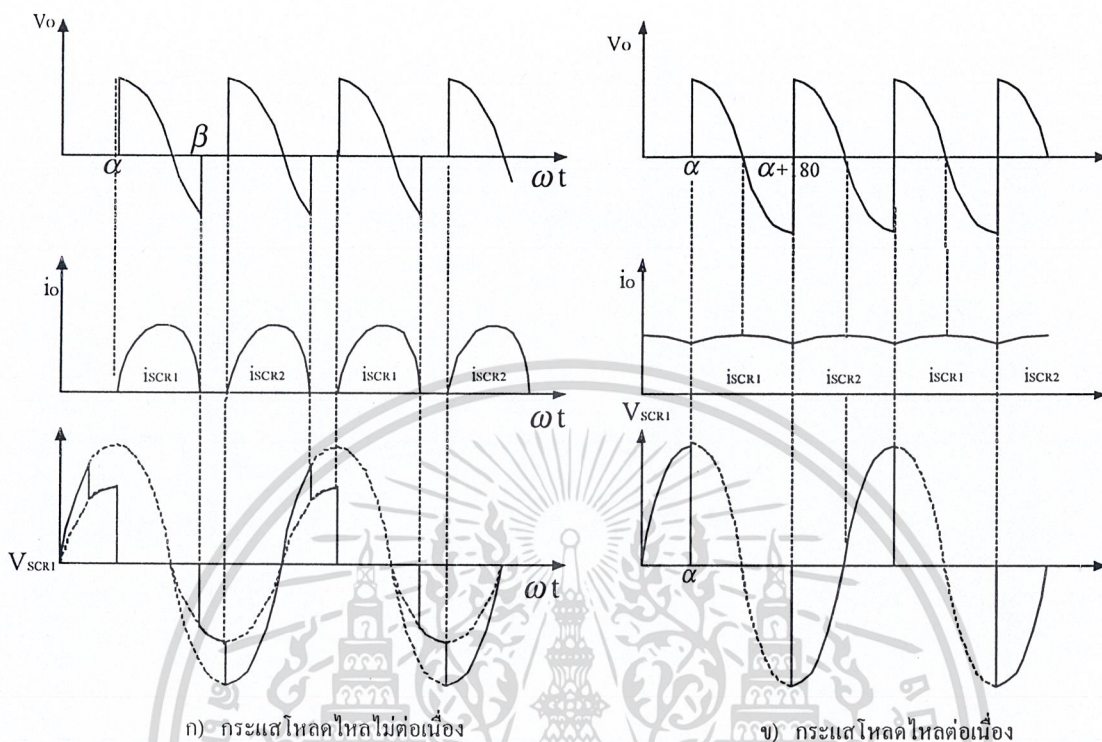
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 Full-wave Rectifier with Center-tap Transformer

ในกรณีที่โหลดเป็นอินดักทีฟโหลด เอสซีอาร์ 1 ยังคงนำกระแสต่อไป ถึงแม้แรงดัน  $V_A$  เป็นลบ ดังแสดงในรูปที่ 2 ขณะที่แรงดัน  $V_A$  เป็นลบ แรงดัน  $V_B$  จะเป็นบวก และเมื่อเอสซีอาร์ 2 มีสัญญาณทริกให้นำกระแส เอสซีอาร์ 2 ก็จะนำกระแสทำให้เอสซีอาร์ 1 ได้รับรีเวิร์คไบแอสเป็นการทำให้เอสซีอาร์ 1 หยุดนำกระแส ซึ่งกล่าวได้ว่าเอสซีอาร์ 1 ถูกทำให้หยุดนำกระแส (Commutated) โดยเอสซีอาร์ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 โหลดเป็นอินดักติฟโหลด

ในกรณีที่มิกระแสไหลคไหลไม่ต่อเนื่องคือ มุมทริกเกอร์, เอสซีอาร์หยุดนำกระแสที่มุม  $\beta$  ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) จะมีแรงดันเฉลี่ยเอาต์พุตเท่ากับ

$$\begin{aligned}
 V_{O(ave)} &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} \sqrt{2} V_A \sin \omega t \, d(\omega t) \\
 &= \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot V_A [-\cos\beta + \cos\alpha] \tag{2}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่มีกระแสไหลต่อเนื่อง (Continuous Conduction) พิจารณาโดยแทนค่าลงในสมการที่ (3)

$$\sin(\beta - \phi) - \sin(\alpha - \alpha) e^{\frac{R}{L} \left( \frac{\alpha - \beta}{\omega} - \frac{\beta}{\omega} \right)} = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \sin(\beta - \phi) &= 0 \\ &= \sin 180^\circ \\ \beta &= 180^\circ + \phi \\ &= 180^\circ + \alpha \end{aligned} \quad (4)$$

ฉะนั้นกระแสที่ไหลผ่านเอสซีอาร์ 1 จะตกเป็นศูนย์ที่มุม  $\beta = 180^\circ + \phi$  และทำการทริกเอสซีอาร์ 2 ที่มุม  $\phi$  (เมื่อมุมทริกเกอร์  $\alpha = \phi$ ) เพราะฉะนั้นเมื่อมุมทริกเกอร์  $\alpha < \phi$  กระแสที่ไหลผ่านเอสซีอาร์ 1 ยังไม่ตกลงเป็นศูนย์ เอสซีอาร์ 2 ก็ถูกทริกเกอร์ให้นำกระแส กระแสที่ไหลผ่านโหลดจึงไม่ตกลงเป็นศูนย์ จึงเป็นสถานะที่กระแสไหลอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 2 (จ) จะมีแรงดันเฉลี่ยเอาต์พุตเท่ากับ

$$\begin{aligned} V_{O(\text{ave})} &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2} V_A \sin \omega t \, d(\omega t) \\ &= \frac{\sqrt{2} V_A}{\pi} \cdot [-\cos(\pi + \alpha) + \cos \alpha] \\ &= \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_A \cos \alpha \end{aligned} \quad (5)$$

$V = V_A = V_B =$  แรงดันอาร์เอ็มเอสที่จุดกึ่งกลางของหม้อแปลง

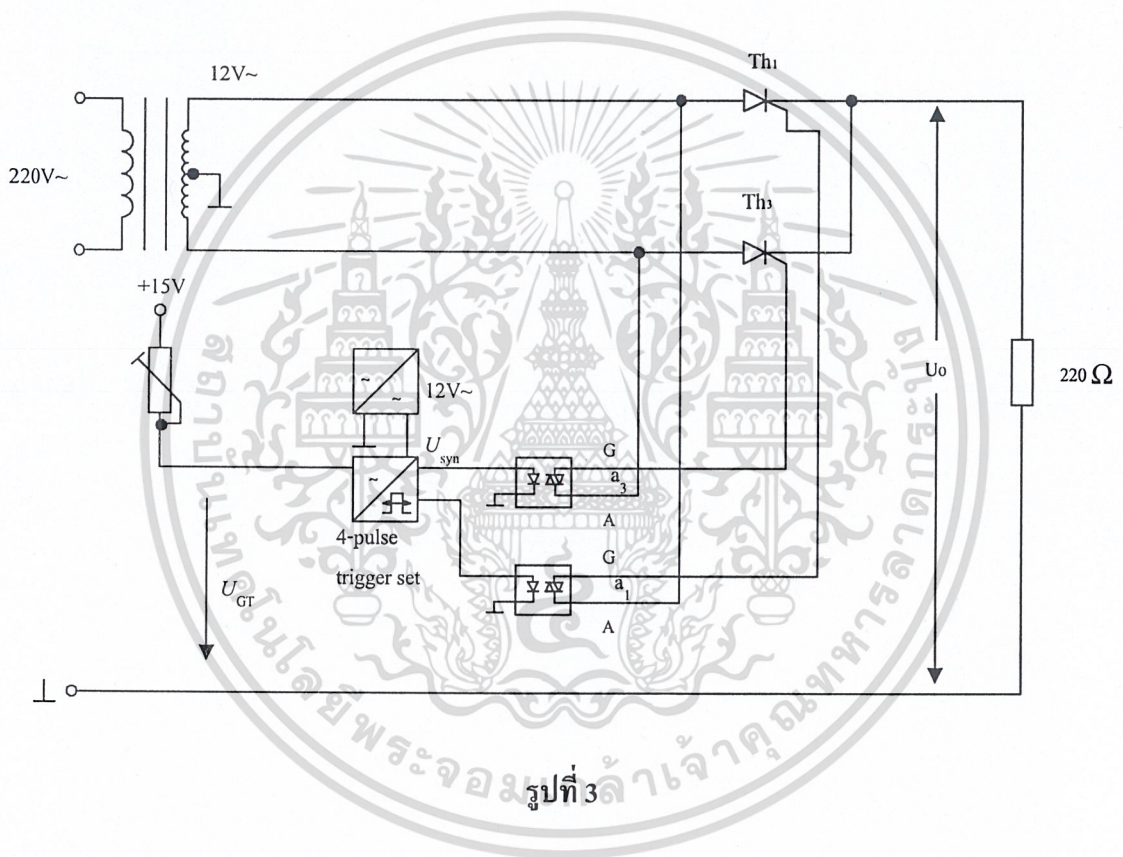
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์

1. ไทริสเตอร์ (Th1, Th3)
2. รีซิสเตอร์ (R2) 220 โอห์ม
3. มอเตอร์กระแสตรง 24V

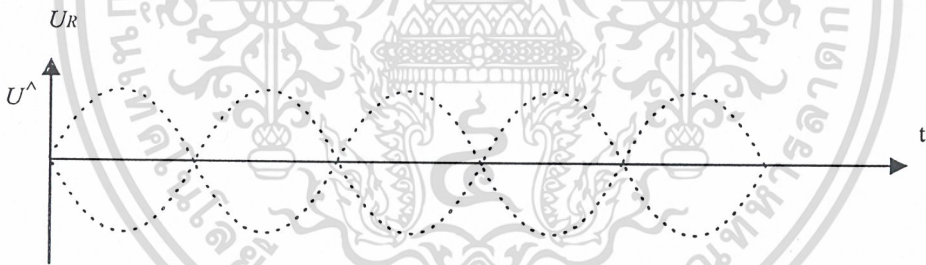
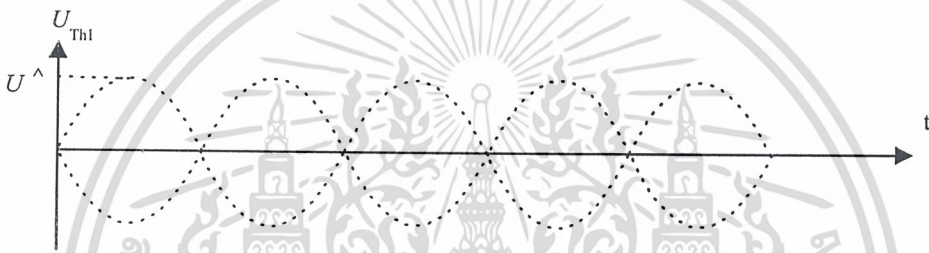
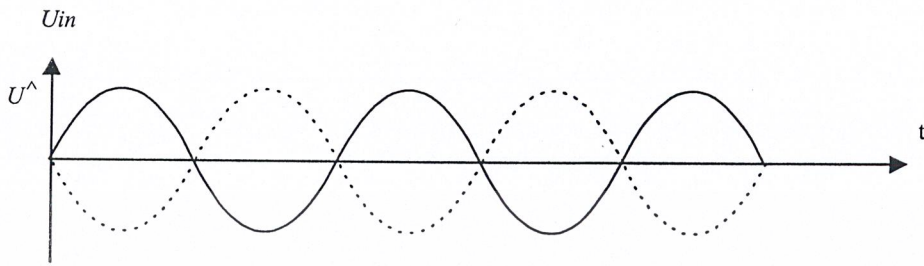
ลำดับขั้นการทดลอง

1. ต่อดังรูปที่ 3



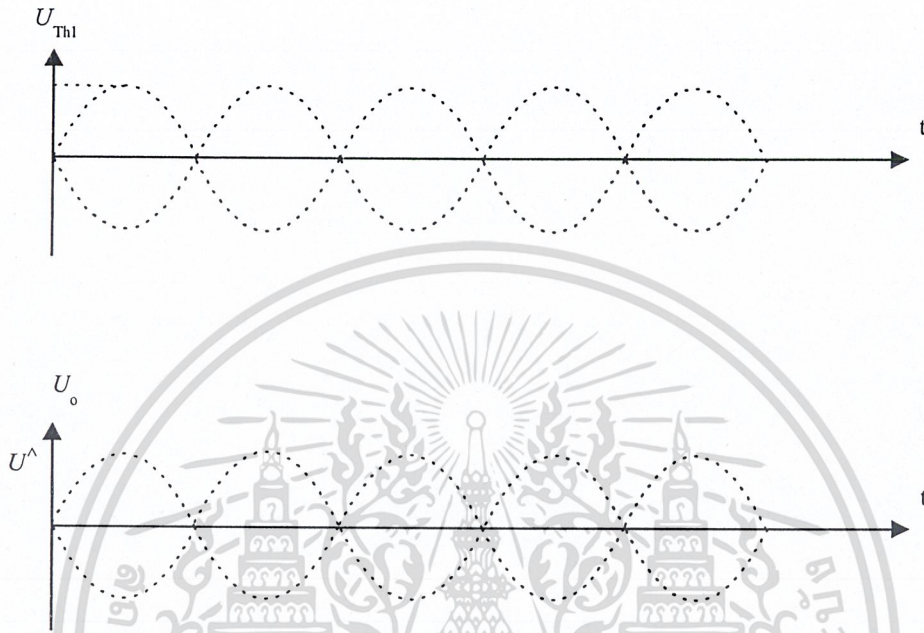
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ปรับแรงดัน  $U_{GT}$  จาก 0 ถึง 2V สังเกตรูปคลื่นและบันทึกรูปคลื่นที่  $U_{GT} = 1V$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เปลี่ยนโหนดเป็นมอเตอร์ สังเกตรูปคลื่นและบันทึกรูปคลื่นที่  $U_{GT} = 1V$



4. ทดลองปรับ  $U_{GT}$  จาก 0 ถึง 2V สังเกตการหมุนของมอเตอร์

$U_{GT}$  ที่ 0 V .....  
 $U_{GT}$  ที่ 2 V .....

5. อธิบายความสัมพันธ์ของ  $U_{GT}$  และการหมุนของมอเตอร์

.....

.....

.....

.....

## สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

## คำถามท้ายการทดลอง

1. โหลดที่เป็นมอเตอร์มีผลอย่างไรต่อวงจร

.....

.....

.....

.....

2. การลดผลกระทบของโหลดมอเตอร์ทำได้อย่างไร จงอธิบาย

.....

.....

.....

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ใบงานที่ 7

### TWO-PULSE-BRIDGE CONNECTION UNCONTROL

#### วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของวงจร Two-Pulse-Bridge Connection
2. เพื่อศึกษาการทำงานของชุด Two-Pulse-Bridge Connection

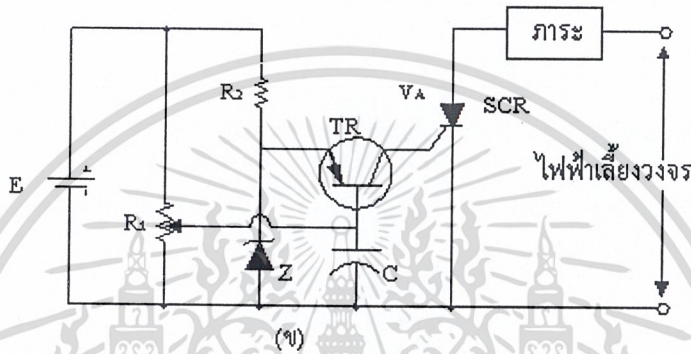
#### ทฤษฎี

1. วงจรจุดชนวนด้วยไฟฟ้าดีซี

โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าดีซีต่อเข้ากับเกตของเอสซีอาร์ผ่านสวิตช์  $Sw_1$  และความต้านทาน  $R$  ดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) ไดโอด  $D$  ทำหน้าที่ป้องกันแรงดันกลับไม่ให้ป้อนเข้าไประหว่างขั้วแคโทดกับเกตของไทรสเตอร์ ในช่วงเวลาครึ่งวัฏจักรลบมาถึงสวิตช์  $Sw$  ที่เห็นเป็นสวิตช์ก้านเดี่ยว (Single-pole) นั้นความจริงอาจเป็นหลอดนีออนไดแอก (Diac) ซีเนอร์ไดโอด (Zener Diode) ทรานซิสเตอร์ หรือเอสซีอาร์ที่มีขนาดเล็ก ฯลฯ รูปที่ 1 (ข) แสดงการใช้ทรานซิสเตอร์  $TR$  แทนสวิตช์  $Sw$  นี้ เอสซีอาร์ในวงจรของรูปที่ 1 ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ปิดเปิดวงจรขนาดใหญ่

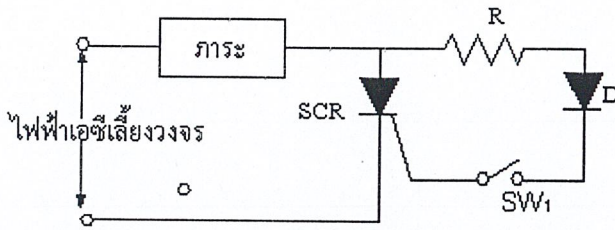
การที่มีกระแสเกตไหลต่อเนื่องอยู่ตลอดเวลาดังในรูปที่ 1 ทำให้เกิดมีกำลังสูญเสียกระจายในเอสซีอาร์จึงไม่เป็นที่นิยมใช้ในปฏิบัติ ยกเว้นแต่ว่าในวงจรที่ใช้งานนั้น เอสซีอาร์ได้ปิดกระแสไปก่อนที่ กำลังสูญเสียจะไปทำให้เอสซีอาร์น้อยเกินกว่าขีดที่ยอมให้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

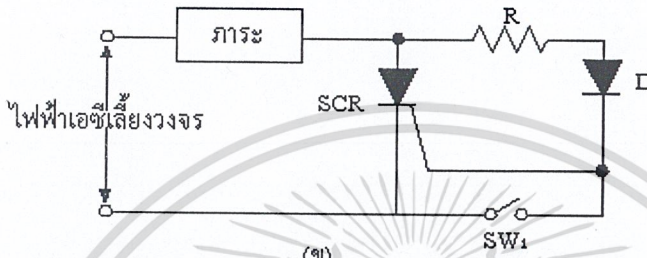


รูปที่ 1 วงจรจุดชนวนด้วยไฟฟ้าคืออย่างง่าย

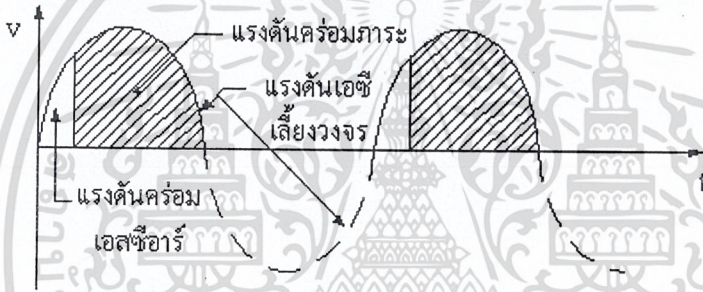
รูปที่ 2 แสดงวงจรจุดชนวนที่ดัดแปลงเอาไฟฟ้าเอสซีจากไฟฟ้าเลี้ยงวงจรมาเรียงกระแสให้เป็นไฟฟ้าคือด้วยไดโอด D และใช้ความต้านทาน R จำกัดค่าช่วงสูงสุดของกระแสเกตไม่ให้มาก วิธีการทำให้เอสซีอาร์เปิดกระแสคือ ในรูปที่ 2 (ก) ให้ปิดสวิตช์  $Sw_1$  ลง สำหรับรูปที่ 2 (ข) ให้เปิดสวิตช์  $Sw_2$  ขึ้นแล้วเอสซีอาร์จะปิดกระแสเมื่อครั้งคลื่นลบมาถึง โดยไดโอด D ทำหน้าที่กั้นแรงดันกลับที่จะป้อนเข้าเกต เอสซีอาร์จะเปิดและปิดกระแสอีกในวัฏจักรต่อไปเมื่อมีการกระทำซ้ำเดิม



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2 วงจรจุดชนวนดีซีที่ตัดแปลงจากไฟฟ้าเอซีเลี้ยงวงจร

- (ก) ต่อสวิตช์อนุกรมกับเกต
- (ข) ต่อสวิตช์ขนานกับเกต
- (ค) รูปคลื่นของแรงดัน

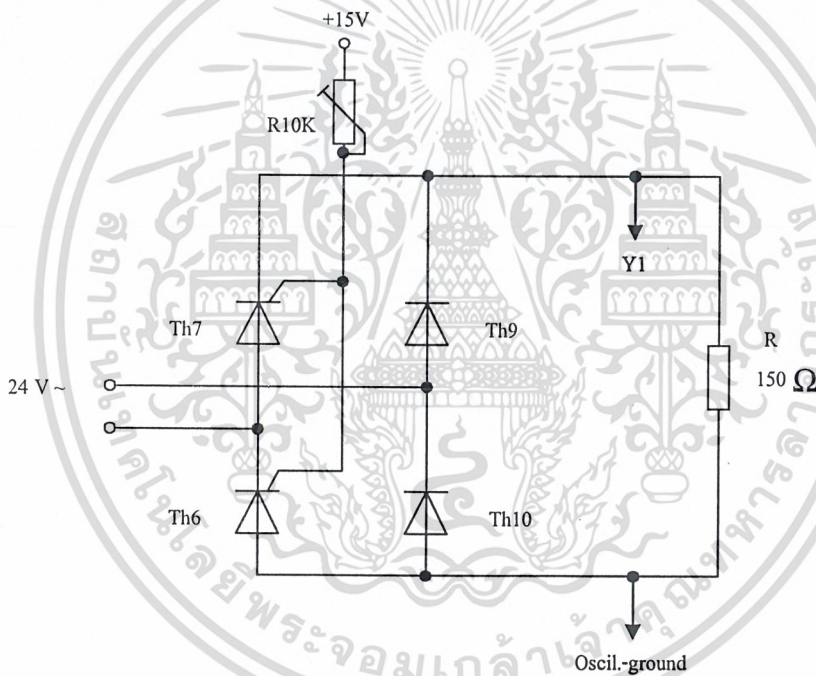
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## อุปกรณ์

1. ไทริสเตอร์ (Th6, Th7, Th9, Th10)
2. รีซิสเตอร์ (R1) 10 กิโลโอห์ม
3. รีซิสเตอร์ (R2) 150 โอห์ม

## ลำดับขั้นตอนการทดลอง

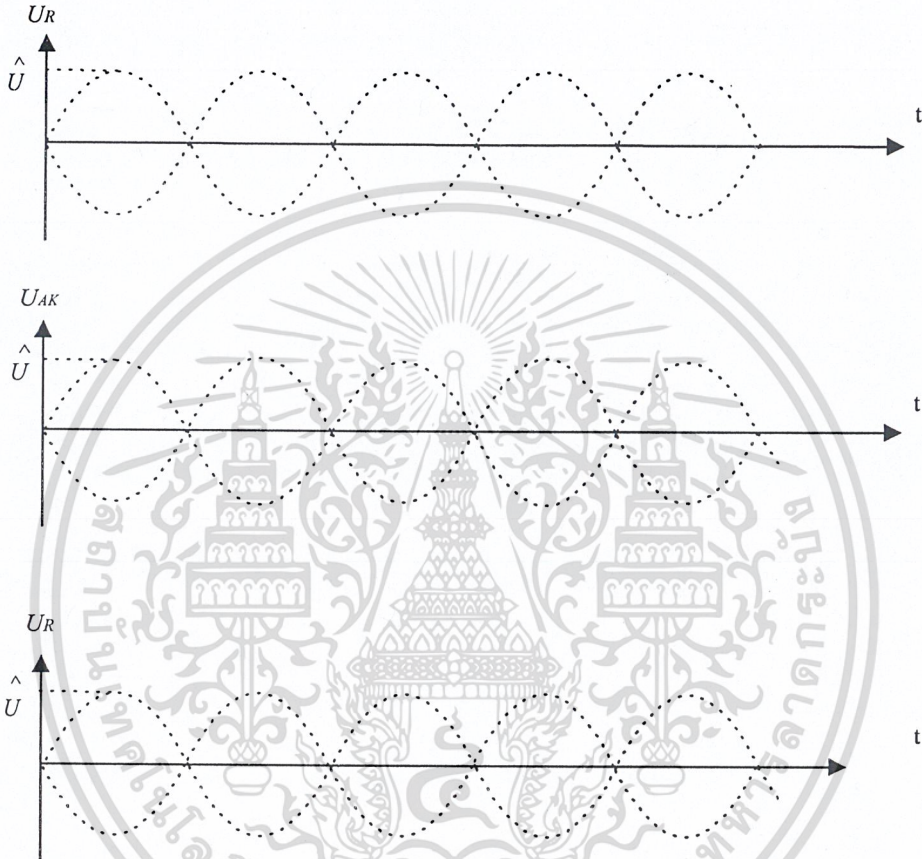
1. ต่อดังรูปที่ 1 รีซิสเตอร์ (R1) 10 กิโลโอห์ม เตรียมไว้ใช้เป็น Forward Resistance สำหรับเกตของไทริสเตอร์ Th6 และ Th7 ดังนั้นจึงถูกทรักกที่ ในกรณีนี้ไทริสเตอร์จะทำงานเหมือนไดโอด



รูปที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วัสดุปลิ้นแรงดันที่ตกคร่อมรีซิสเตอร์ บันทีกผล
3. วัสดุปลิ้นแรงดันที่ตกคร่อมไดโอด บันทีกผล
4. วัสดุปลิ้นแรงดันที่ตกคร่อมไทรสเตอร์ บันทีกผล



สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

คำถามท้ายการทดลอง

1. จากการทดลองอธิบายกระแสที่ไหลระหว่าง Half-wave ด้านบวกและลบ

.....

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้เฉพาะที่อาคารศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่และต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

## ใบงานที่ 8

### BRANCH-PAIR HALF-WAVE

#### (HALF-CONTROLLED TWO PULSE BRIDGE CONNECTION)

#### วัตถุประสงค์

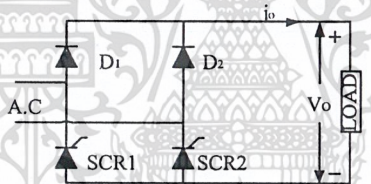
1. เพื่อศึกษาการทำงานของวงจรที่มีลักษณะในการต่อแบบ Branch-pair Half-wave ที่มีโหลด ลักษณะเป็นรีซิสเตอร์และอินดักเตอร์

#### ทฤษฎี

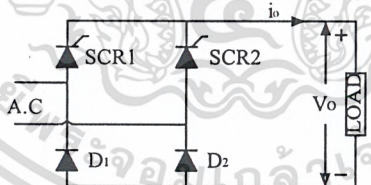
Single Phase Half Controlled Bridge

การแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสไฟฟ้าตรงชนิด 1 เฟส แบบ Half Controlled Bridge

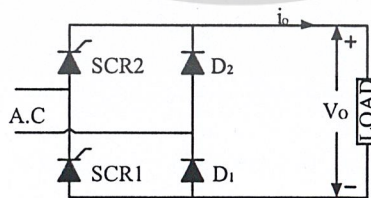
โดยใช้เอสซีอาร์ 2 ตัว สามารถต่อได้ 3 ลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 1



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 1 (ก) แอนโอดของเอสซีอาร์ต่อกัน

(ข) แคโทดของเอสซีอาร์ต่อกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

(ค) แอนโอดและแคโทดของเอสซีอาร์ต่อกัน

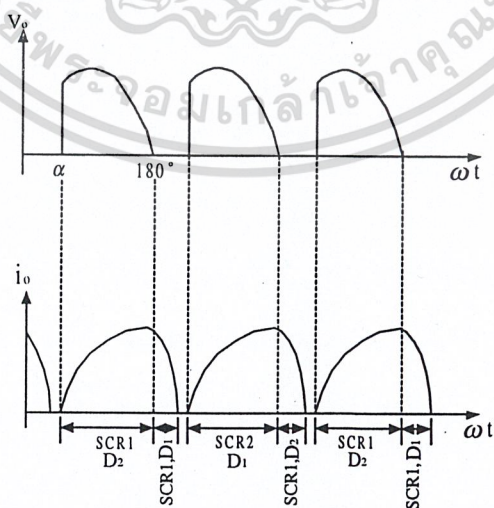
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวงจรรูปที่ 1 เมื่อทำการทริกเอสซีอาร์ 1 ให้นำกระแสเมื่อเอสซีอาร์ 1 ได้รับฟอร์เวิร์ดไบแอสจะมีกระแสไหลผ่านเอสซีอาร์ 1, D<sub>2</sub> และโหลดทำการทริกเอสซีอาร์ 2 ให้นำกระแสเมื่อเอสซีอาร์ 2 ได้รับฟอร์เวิร์ดไบแอสจะมีกระแสไหลผ่านเอสซีอาร์ 2, D<sub>1</sub> และโหลดดังแสดงในวงจรรูปที่ 1 (ก) และ (ค) วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างสัญญาณทริกเอสซีอาร์ทั้งสองแยกจากกันดังแสดงในวงจรรูปที่ 1 (ข) ไม่ต้องใช้ Pulse Transformer วงจรรูปที่ 1 (ค) ไดโอด D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> ทำหน้าที่เป็น Free-wheeling Diode ดังแสดงสัญญาณต่าง ๆ ในรูปที่ 3 (ข)

ในกรณีที่โหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว เมื่อทำการทริกเอสซีอาร์ให้นำกระแสที่มุม  $\alpha$  เอสซีอาร์ก็จะนำกระแสจนกระทั่งแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับตกเป็นศูนย์หรือมุมที่ 180 องศา แรงดันเฉลี่ยที่โหลดจะมีค่าเท่ากับ  $\frac{\sqrt{2}V}{\pi}(1 + \cos\alpha)$  สัญญาณแรงดันที่โหลดเหมือนกับที่แสดงในรูปที่ 2.32

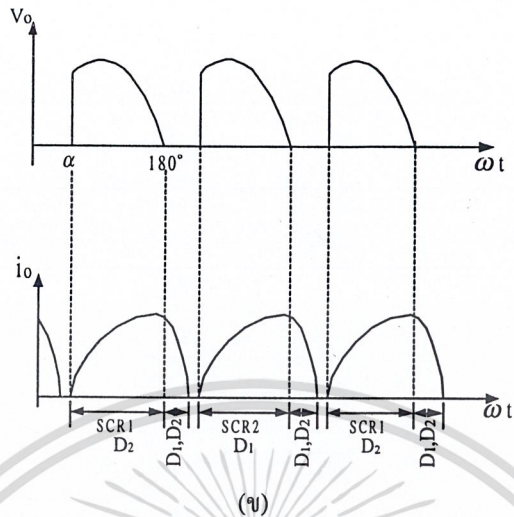
ในกรณีที่โหลดเป็นอินดักติฟโหลดแต่กระแสไหลไม่ไหลต่อเนื่อง เมื่อทำการทริกให้เอสซีอาร์ 1 ให้นำกระแสที่มุม  $\alpha$  กระแสจะไหลผ่านเอสซีอาร์ 1 และ D<sub>1</sub> เมื่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับตกเป็นศูนย์หรือมุมที่ 180 องศา แต่ในวงจรรูปที่ 1 (ก) และ (ข) กระแสไหลจะไหลผ่านเอสซีอาร์ 1 และ ไดโอด D<sub>1</sub> แทน แต่ในวงจรรูปที่ 1 (ค) กระแสไหลจะไหลผ่านไดโอด D<sub>1</sub> และ D<sub>2</sub> แทนจนกระทั่งกระแสไหลผ่านโหลดตกเป็นศูนย์จึงจะทำการทริกเอสซีอาร์ 2 ให้นำกระแสที่มุม  $180^\circ + \alpha$  ซึ่งมีลักษณะการนำกระแสเหมือนกับที่อธิบายผ่านมา สัญญาณต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2

และแรงดันเฉลี่ยที่โหลดมีค่าเท่ากับ  $\frac{\sqrt{2}V}{\pi}(1 + \cos\alpha)$

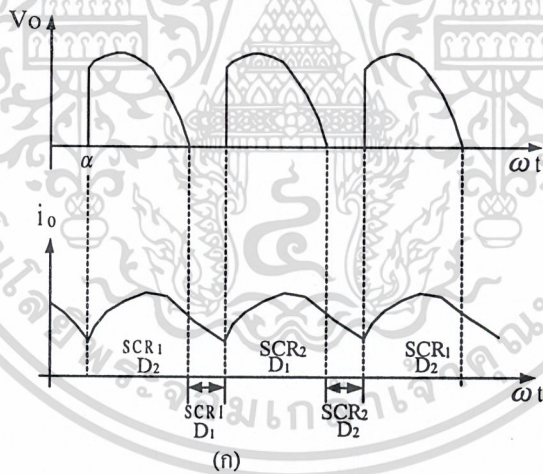


(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 2 กรณีที่โหลดเป็นอินดักติฟโหลดแต่กระแสไหลไม่ต่อเนื่อง ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อี(ก) ของวงจรรูปที่ 1 (ก) และ (ข) ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



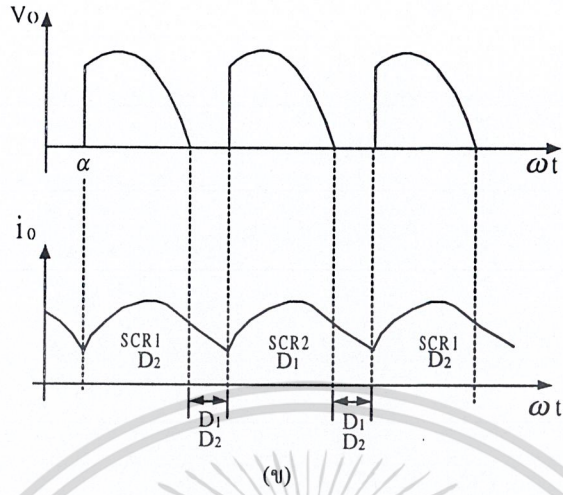
รูปที่ 2 (ต่อ) กรณีที่โหลดเป็นอินดักทีฟโหลดแต่กระแสไหลต่อเนื่อง (ข) ของรูปวงจรที่ 2.37 (ค)



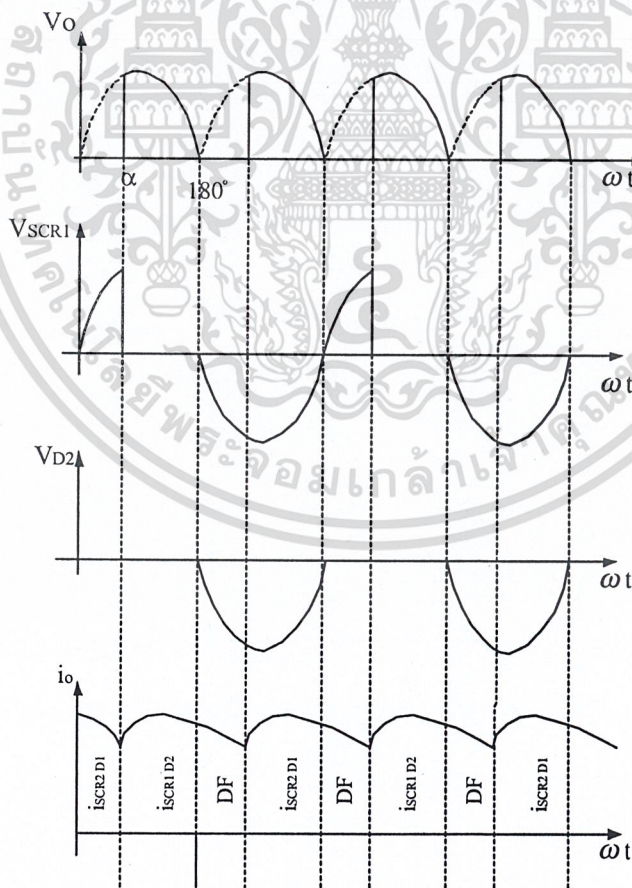
รูปที่ 3 กระแสไหลอย่างต่อเนื่อง

(ก) สัญญาณของวงจรรูปที่ 1 (ก) และ (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 (ต่อ) กระแสไหลอย่างต่อเนื่อง  
(ข) สัญญาณของวงจรรูปที่ 1 (ค)



เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับอาจารย์ผู้สอนที่ขอสงวนสิทธิ์ในการนำไปเผยแพร่โดยไม่หวังผลตอบแทน  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่โหลดเป็นอินดักทีฟโหลดแต่ละกระแสไหลอย่างต่อเนื่อง เมื่อทำการทริกให้ เอสซีอาร์ 1 ให้นำกระแสที่มุม  $\alpha$  กระแสจะไหลผ่านเอสซีอาร์ 1 และ  $D_1$  เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่าย ไฟกระแสสลับตกเป็นศูนย์หรือที่มุม  $180$  องศา วงจรรูปที่ 1 (ค) กระแสโหลดจะไหลผ่านไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  จนกระทั่งทริกให้เอสซีอาร์ 2 นำกระแส สัญญาณต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3 (ข) สำหรับ วงจรรูปที่ 1 (ก) และ (ข) กระแสจะไหลผ่านเอสซีอาร์ 1 และไดโอด  $D_1$  แทนดังแสดงในรูปที่ 3 กระแสที่ไหลผ่านโหลดจะไหลอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งทำการทริกเอสซีอาร์ 2 ให้นำกระแส ซึ่งในการทริกเอสซีอาร์ 2 จะทำให้เอสซีอาร์ 1 หยุดนำกระแส พิจารณาวงจรรูปที่ 1 (ก) และ (ข) และรูปที่ 3 (ก) เมื่อทริกให้เอสซีอาร์ 1 ให้นำกระแสที่มุม  $\alpha$  จนกระทั่งกระแสโหลดไหลผ่านเอสซีอาร์ 1 และไดโอด  $D_1$  ถ้าสัญญาณทริกเกอร์ที่จ่ายให้กับเอสซีอาร์ 2 ไม่มี และกระแสโหลดที่ไหลผ่าน เอสซีอาร์ 1 และไดโอด  $D_1$  ยังมีอยู่จนกระทั่งถึงมุม  $360$  องศา เอสซีอาร์ 1 จะนำกระแสต่อไปโดยมี กระแสไหลผ่านเอสซีอาร์ 1 และไดโอด  $D_2$  ที่มุม  $360$  องศา ในกรณีนี้จึงไม่สามารถควบคุมแรงดัน เอาต์พุตเป็นศูนย์ เพื่อไม่ให้เกิดข้อผิดพลาดนี้จึงจำเป็นต้องต่อ Free-wheeling Diode ขนานกับโหลด ดังแสดงสัญญาณต่าง ๆ ในรูปที่ 4

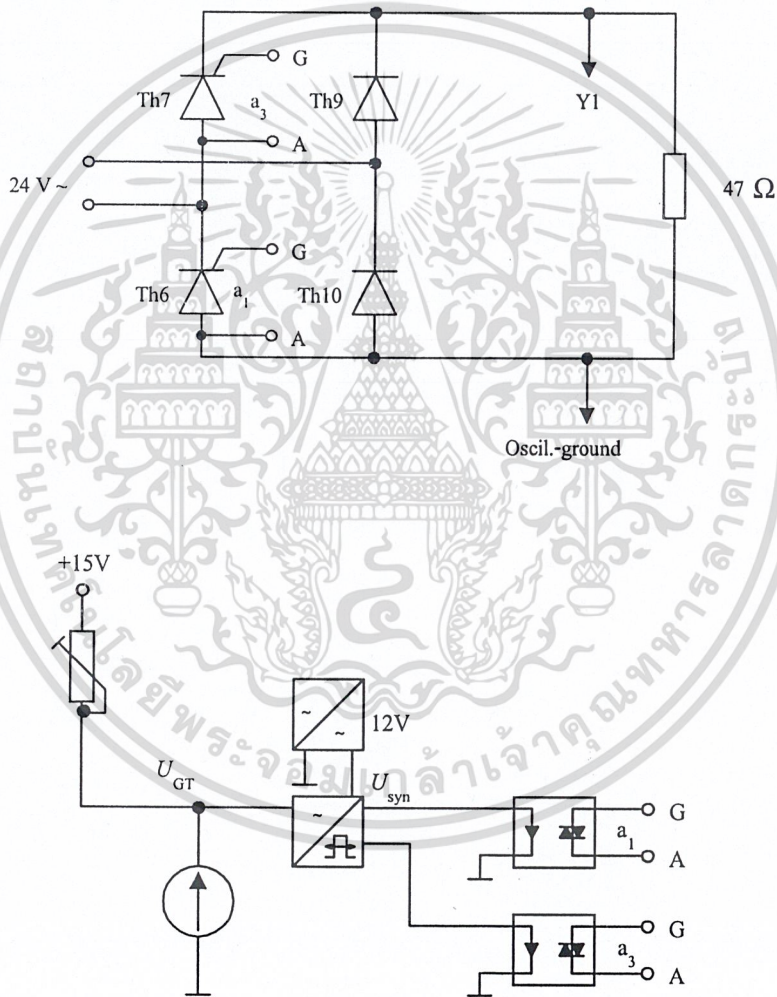
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### อุปกรณ์

1. ไทริสเตอร์ (Th6, Th7, Th9, Th10)
2. รีซิสเตอร์ 47 โอห์ม
3. อินดักเตอร์ 100 mH

### ลำดับขั้นตอนการทดลอง

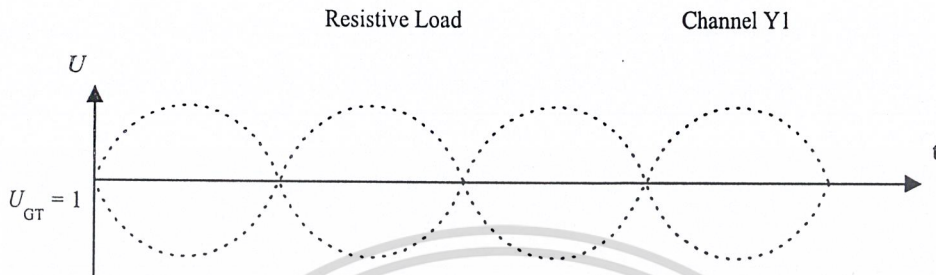
1. ต่อวงจรดังรูปที่ 5



รูปที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เพิ่ม  $U_{GT}$  อย่างช้า ๆ จาก 0 V ถึง 2V สังเกตรูปคลื่นจากออสซิลโลสโคป บันทึกรูปคลื่นแรงดันที่  $U_{GT} = 1$  V



3. อธิบายลักษณะของ Load Current ในช่วง 1 ไซเคิล ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับอินพุต

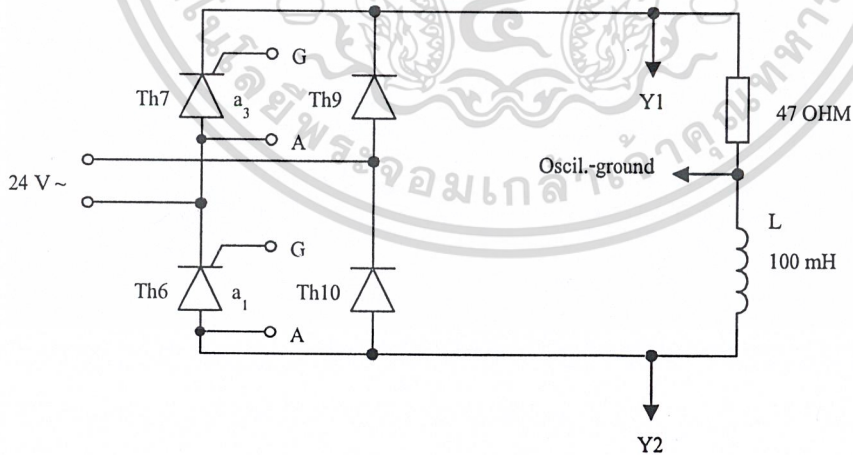
.....

.....

.....

.....

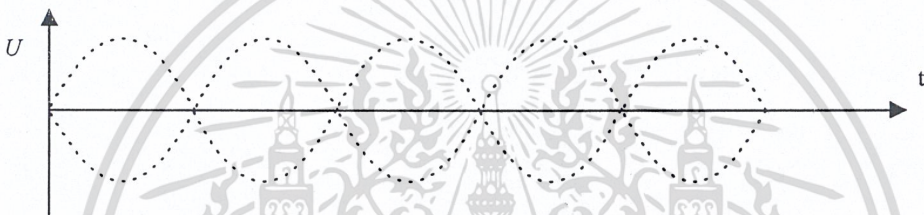
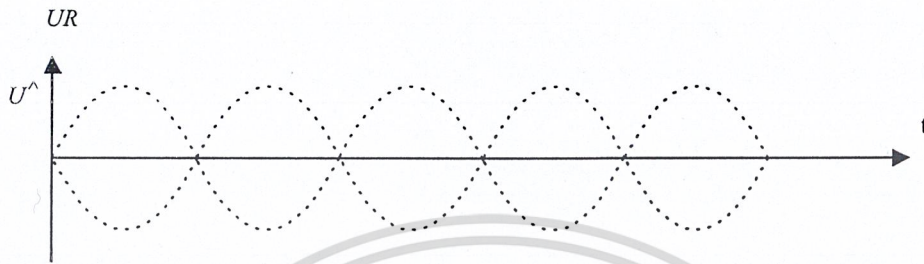
4. เปลี่ยนวงจรเป็นดังรูปที่ 6



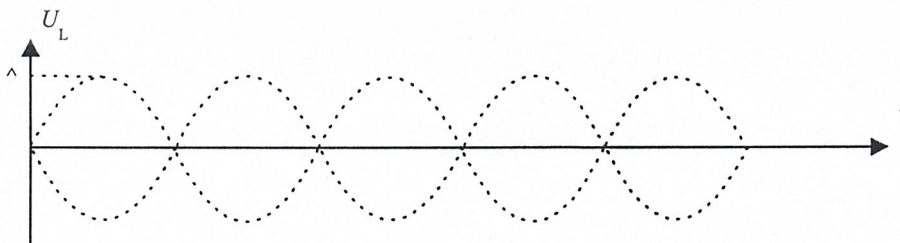
รูปที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เพิ่ม  $U_{GT}$  อย่างช้า ๆ จาก 0 V ถึง 2 V สังเกตรูปคลื่น
6. ปรับ  $U_{GT} = 1$  V วาดรูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมรีซิสเตอร์ และอินดักเตอร์

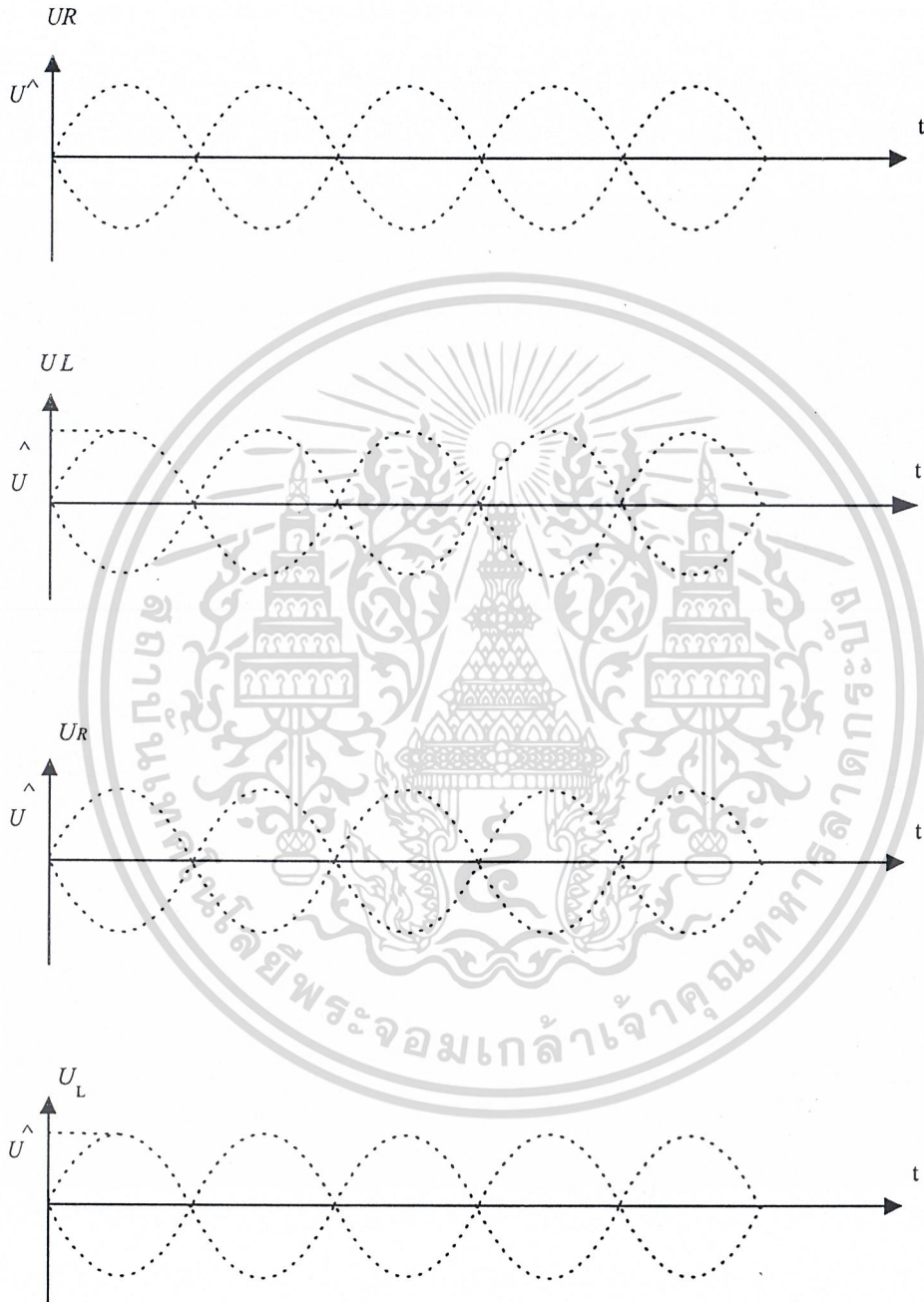


7. บายพาส (By-pass) อินดักเตอร์ ด้วยสายตัวนำและบันทึกรูปคลื่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ทำการทดลองซ้ำเช่นเดียวกับข้อ 6 และ 7 โดยใช้  $U_{GT} = 0 \text{ V}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

.....  
.....  
.....  
.....

คำถามท้ายการทดลอง

1. จากการทดลองจงอธิบายลักษณะของกระแสที่มีไหลดเป็นอินดักเตอร์

.....  
.....  
.....  
.....

2. จากการทดลองจงอธิบายลักษณะของกระแสที่มีไหลดเป็นอินดักเตอร์ โดยที่มีมุมการทริก  
ที่ 0 องศา

.....  
.....  
.....  
.....



# ใบงานที่ 9

## ONE-POLE CONTROLLED

### TWO PULSE BRIDGE CONNECTION

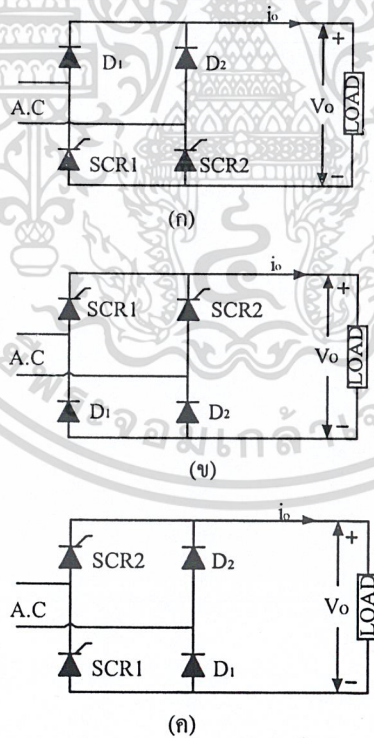
#### วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการทำงานของวงจรที่มีลักษณะการต่อแบบ One-pole Controlled Two Pulse Connection ที่มีโหนดลักษณะเป็นรีซิสเตอร์และอินดักเตอร์

#### ทฤษฎี

##### Single Phase Half Controlled Bridge

การแปลงไฟฟ้ากระแสลับเป็นกระแสไฟฟ้าตรงชนิด 1 เฟส แบบ Half Controlled Bridge โดยใช้เอสซีอาร์ 2 ตัว สามารถต่อได้ 3 ลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 (ก) แอนโอดของเอสซีอาร์ต่อกัน

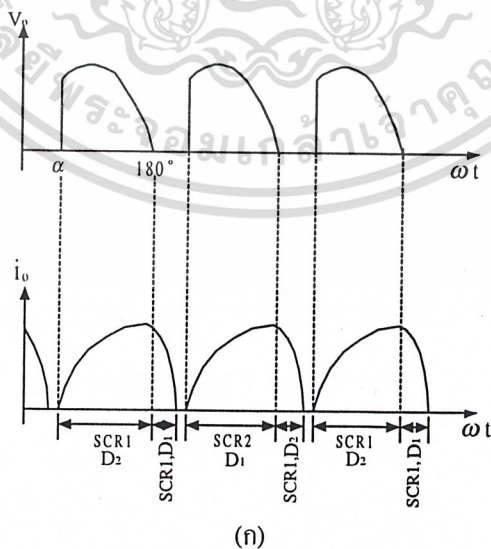
(ข) แคโทดของเอสซีอาร์ต่อกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
(ค) แอนโอดและแคโทดของเอสซีอาร์ต่อกัน  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวงจรรูปที่ 1 เมื่อทำการทริกเอสซีอาร์ 1 ให้นำกระแสเมื่อเอสซีอาร์ 1 ได้รับฟอร์เวิร์ดไบแอสจะมีกระแสไหลผ่านเอสซีอาร์ 1,  $D_2$  และไหลดทำการทริกเอสซีอาร์ 2 ให้นำกระแสเมื่อเอสซีอาร์ 2 ได้รับฟอร์เวิร์ดไบแอสจะมีกระแสไหลผ่านเอสซีอาร์ 2,  $D_1$  และไหลดคังแสดงในวงจรรูปที่ 1 (ก) และ (ค) วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างสัญญาณทริกเอสซีอาร์ทั้งสองแยกจากกันดังแสดงในวงจรรูปที่ 1 (ข) ไม่ต้องใช้ Pulse Transformer วงจรรูปที่ 1 (ค) ไดโอด  $D_1, D_2$  ทำหน้าที่เป็น Free-wheeling Diode ดังแสดงสัญญาณต่าง ๆ ในรูปที่ 3 (ข)

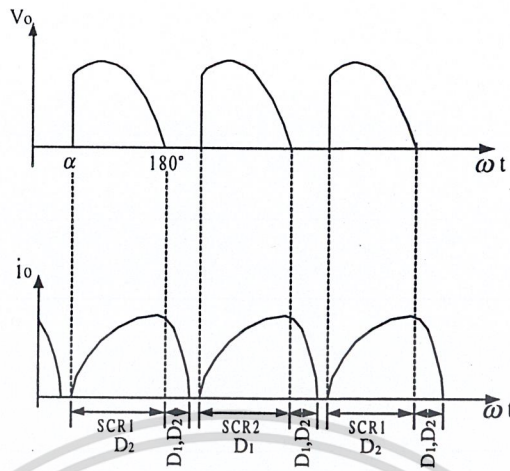
ในกรณีที่โหลดเป็นความต้านทานเพียงอย่างเดียว เมื่อทำการทริกเอสซีอาร์ให้นำกระแสที่มุม  $\alpha$  เอสซีอาร์ก็จะนำกระแสจนกระทั่งแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับตกเป็นศูนย์หรือมุมที่ 180 องศา แรงดันเฉลี่ยที่โหลดจะมีค่าเท่ากับ  $\frac{\sqrt{2}V}{\pi}(1 + \cos\alpha)$  สัญญาณแรงดันที่โหลด

ในกรณีที่โหลดเป็นอินดักทีฟโหลดแต่กระแสไหลไม่ไหลต่อเนื่อง เมื่อทำการทริกให้เอสซีอาร์ 1 ให้นำกระแสที่มุม  $\alpha$  กระแสจะไหลผ่านเอสซีอาร์ 1 และ  $D_1$  เมื่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับตกเป็นศูนย์หรือมุมที่ 180 องศา แต่ในวงจรรูปที่ 1 (ก) และ (ข) กระแสไหลจะไหลผ่านเอสซีอาร์ 1 และ ไดโอด  $D_1$  แทน แต่ในวงจรรูปที่ 1 (ค) กระแสไหลจะไหลผ่านไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  แทน จนกระทั่งกระแสไหลผ่านโหลดตกเป็นศูนย์จึงทำการทริกเอสซีอาร์ 2 ให้นำกระแสที่มุม  $180^\circ + \alpha$  ซึ่งมีลักษณะการนำกระแสเหมือนกับที่อธิบายผ่านมา สัญลักษณ์ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2 และแรงดันเฉลี่ยที่โหลดมีค่าเท่ากับ  $\frac{\sqrt{2}V}{\pi}(1 + \cos\alpha)$



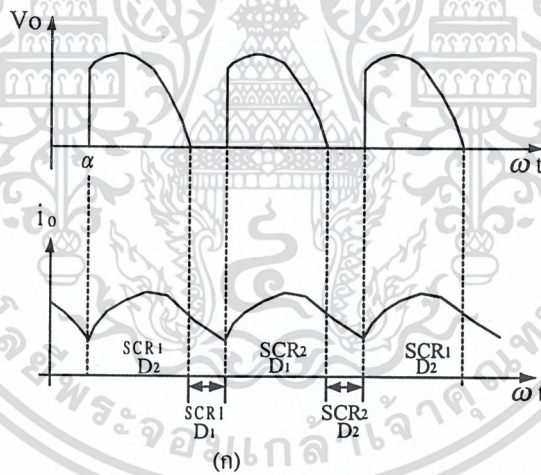
รูปที่ 2 กรณีที่โหลดเป็นอินดักทีฟโหลดแต่กระแสไหลไม่ต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 (ก) ของวงจรรูปที่ 1 (ก) และ (ข)  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 2 (ต่อ) กรณีที่โหลดเป็นอินดักทีฟโหลดแต่กระแสไหลต่อเนื่อง  
(ข) ของรูปวงจรที่ 2.37 (ค)

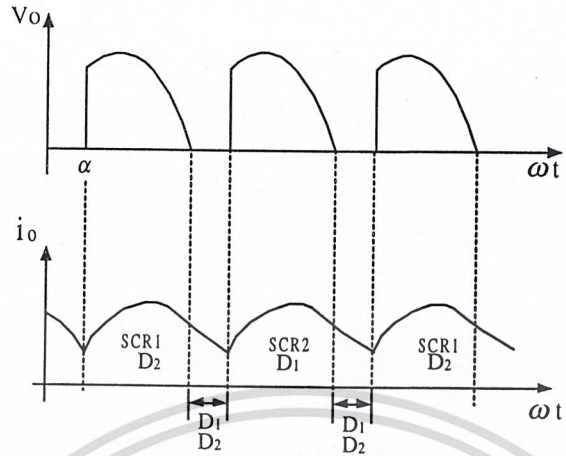


(ก)

รูปที่ 3 กระแสไหลอย่างต่อเนื่อง

(ก) สัญญาณของวงจรรูปที่ 1 (ก) และ (ข)

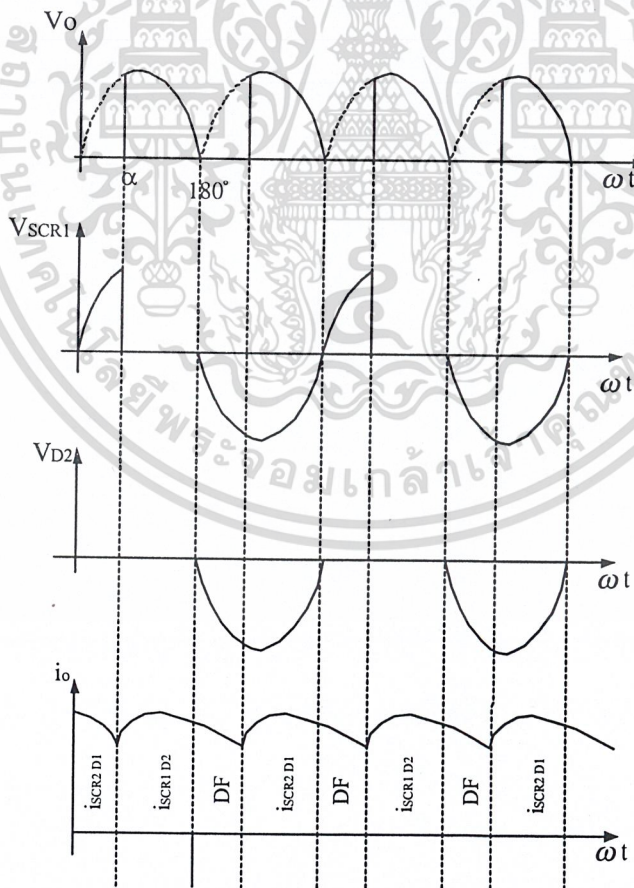
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 3 (ต่อ) กระแสไหลอย่างต่อเนื่อง

(ข) สัญญาณของวงจรรูปที่ 1 (ค)



เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับอาจารย์ผู้สอนเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่โหลดเป็นอินดักทีฟโหลดแต่กระแสไหลอย่างต่อเนื่อง และเมื่อทำการทริกให้เอสซีอาร์ 1 ให้นำกระแสที่มุม  $\alpha$  กระแสจะไหลผ่านเอสซีอาร์ 1 และ  $D_1$  เมื่อแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับตกเป็นศูนย์หรือที่มุม  $180$  องศา วงจรรูปที่ 1 (ค) กระแสไหลจะไหลผ่านไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  จนกระทั่งทริกให้เอสซีอาร์ 2 นำกระแส สัญญาณต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3 (ข) สำหรับวงจรรูปที่ 1 (ก) และ (ข) กระแสจะไหลผ่านเอสซีอาร์ 1 และไดโอด  $D_1$  แทนดังแสดงในรูปที่ 3 กระแสที่ไหลผ่านโหลดจะไหลอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งทำการทริกเอสซีอาร์ 2 ให้นำกระแส ซึ่งในการทริกเอสซีอาร์ 2 จะทำให้เอสซีอาร์ 1 หยุดนำกระแส พิจารณาวงจรรูปที่ 1 (ก) และ (ข) และรูปที่ 3 (ก) เมื่อทริกให้เอสซีอาร์ 1 ให้นำกระแสที่มุม  $\alpha$  จนกระทั่งกระแสไหลผ่านเอสซีอาร์ 1 และไดโอด  $D_1$  ถ้าสัญญาณทริกเกอร์ที่จ่ายให้กับเอสซีอาร์ 2 ไม่มีและกระแสไหลที่ไหลผ่านเอสซีอาร์ 1 และไดโอด  $D_1$  ยังมีอยู่จนกระทั่งถึงมุม  $360$  องศา เอสซีอาร์ 1 จะนำกระแสต่อไปโดยมีกระแสไหลผ่านเอสซีอาร์ 1 และไดโอด  $D_2$  ที่มุม  $360$  องศา ในกรณีนี้จึงไม่สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตเป็นศูนย์ เพื่อไม่ให้เกิดข้อผิดพลาดนี้จึงจำเป็นต้องต่อ Free-wheeling Diode ขนานกับโหลด ดังแสดงสัญญาณต่าง ๆ ในรูปที่ 4

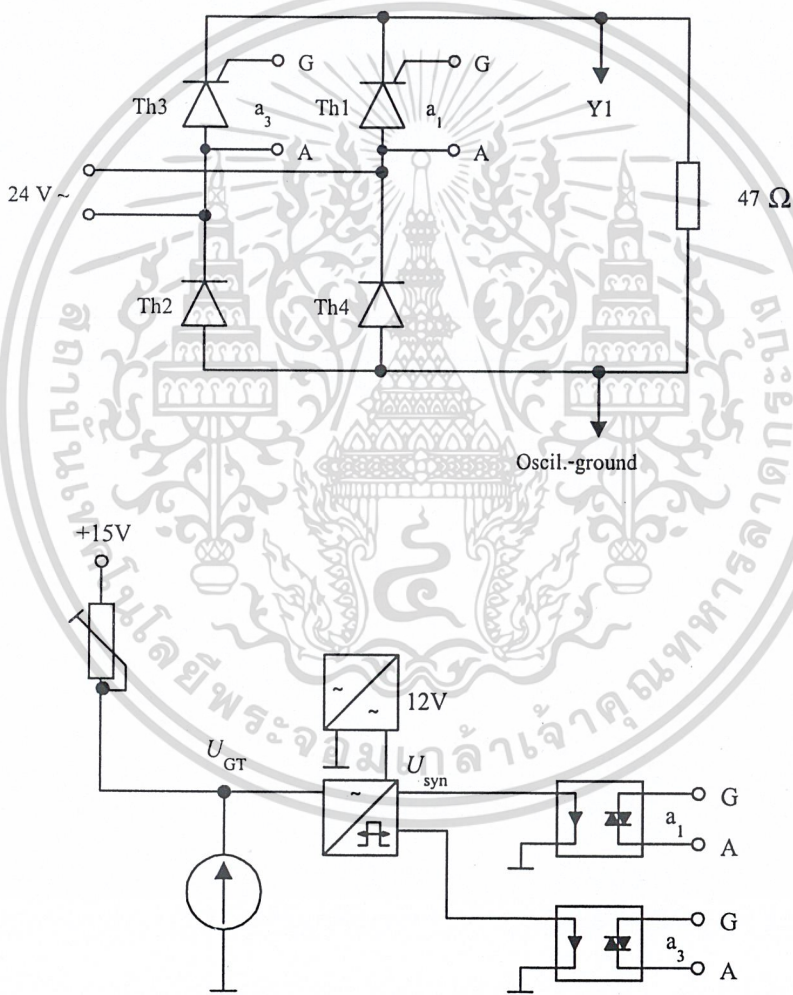
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## อุปกรณ์

1. ไทริสเตอร์ (Th1, Th2, Th3, Th4)
2. รีซิสเตอร์ 47 โอห์ม
3. อินดักเตอร์ 100 mH

## ลำดับขั้นการทดลอง

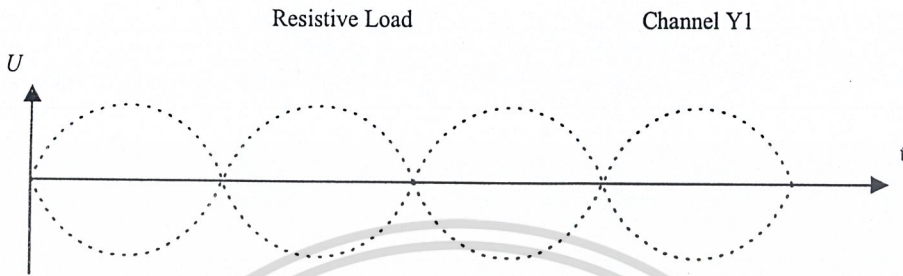
1. ต่วงจรดังรูปที่ 5



รูปที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เพิ่ม  $U_{GT}$  อย่างช้า ๆ จาก 0 V ถึง 2 V สังเกตรูปคลื่นจากออสซิลโลสโคป บันทึกรูปคลื่นแรงดันที่  $U_{GT} = 1 V$



3. อธิบายลักษณะของ Load Current ในช่วง 1 ไซเคิล ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับอินพุต

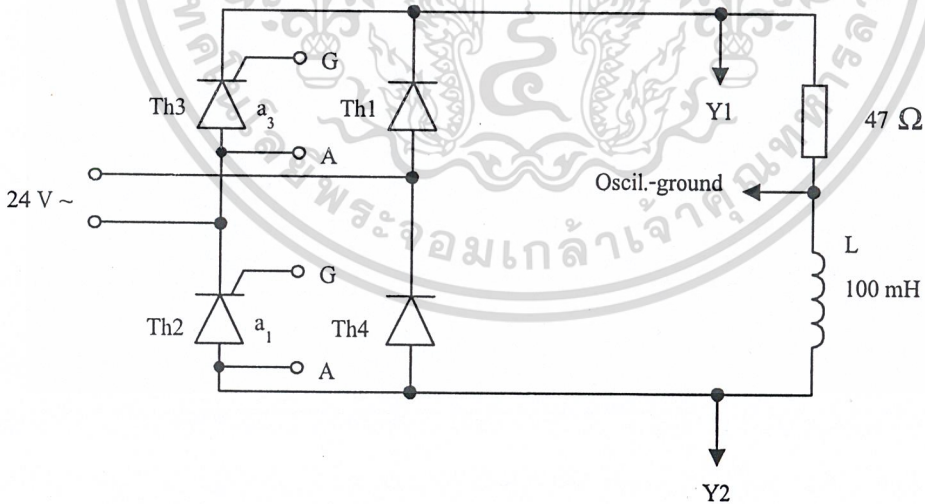
.....

.....

.....

.....

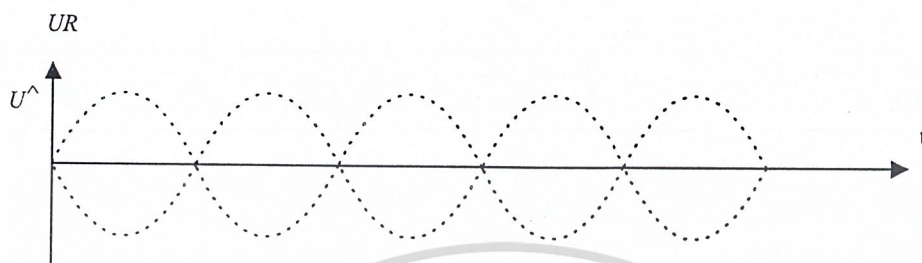
4. เปลี่ยนวงจรเป็นดังรูปที่ 6



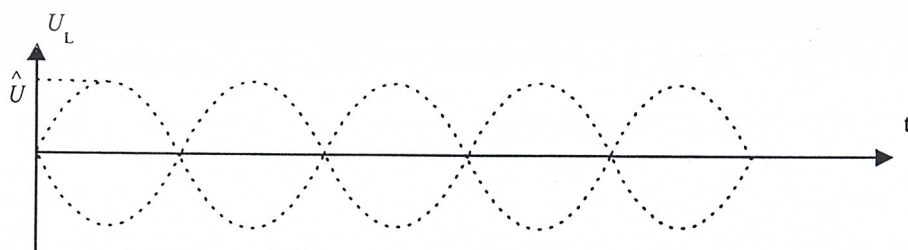
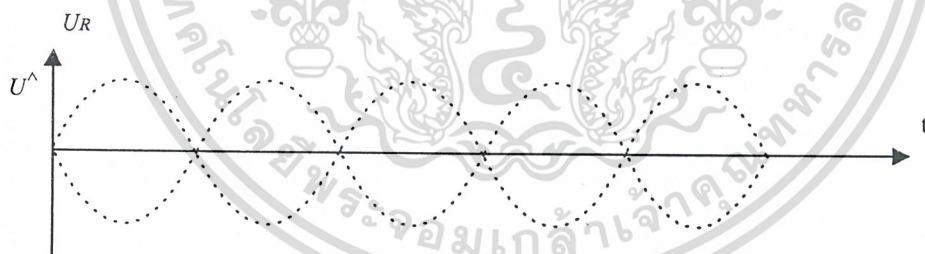
รูปที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เพิ่ม  $U_{GT}$  อย่างช้า ๆ จาก 0 V ถึง 2 V สังเกตรูปคลื่น
6. ปรับ  $U_{GT} = 1V$  วาดรูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมรีซิสเตอร์และอินดักเตอร์

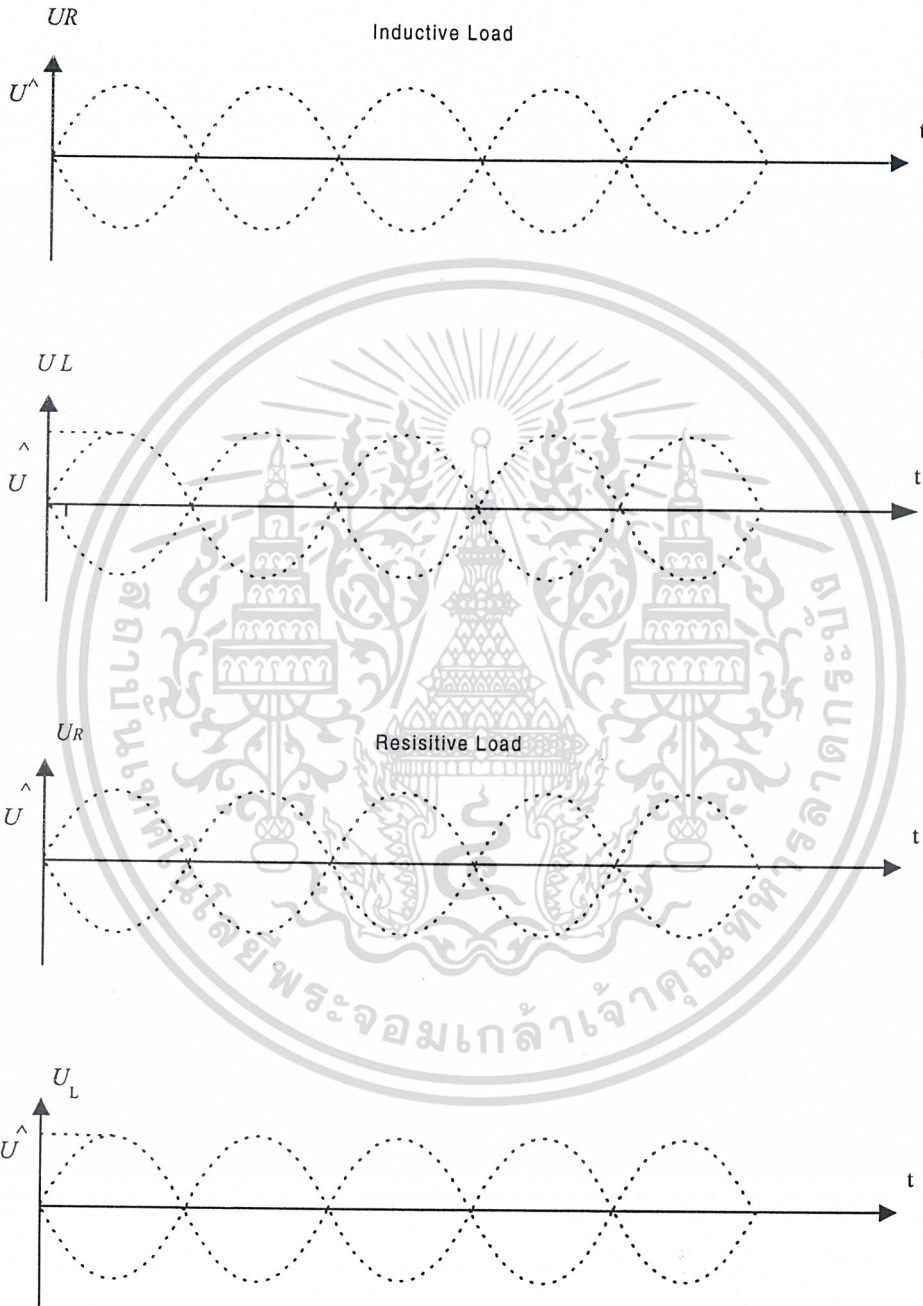


7. บายพาส (By-pass) อินดักเตอร์ ด้วยสายตัวนำและบันทึกรูปคลื่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. การทดลองซ้ำเช่นเดียวกับข้อ 6 และ 7 โดยใช้  $U_{GT} = 0 \text{ V}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

คำถามท้ายการทดลอง

1. จากการทดลองจงอธิบายลักษณะของกระแสที่มีไหลดเป็นอินดักเตอร์

.....

.....

.....

.....

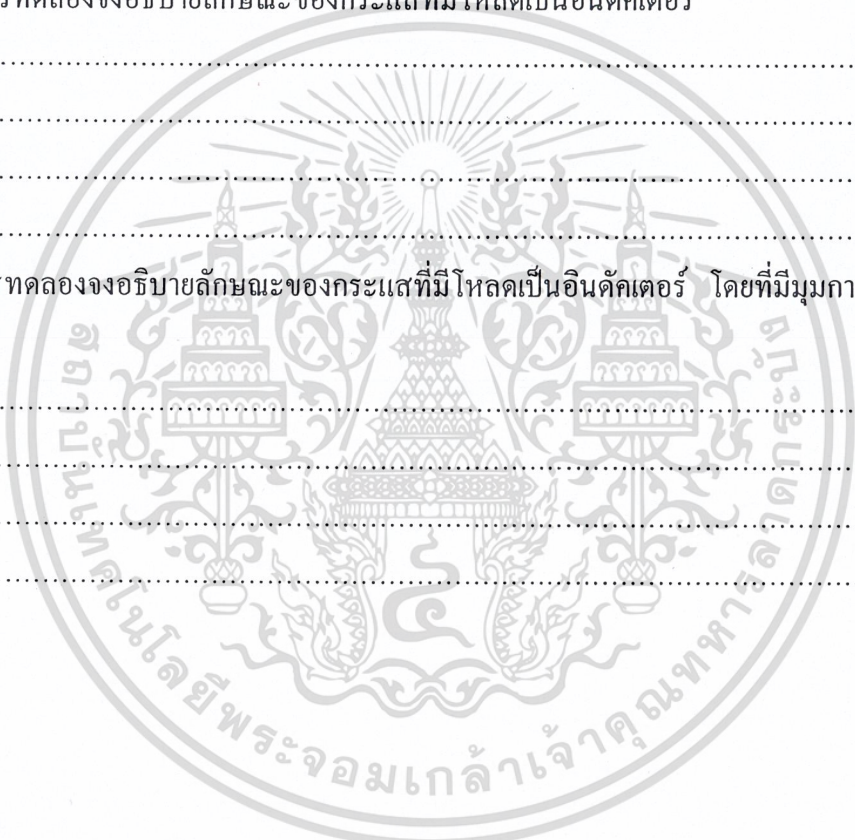
2. จากการทดลองจงอธิบายลักษณะของกระแสที่มีไหลดเป็นอินดักเตอร์ โดยที่มีมุมการทริกที่มุม 0 องศา

.....

.....

.....

.....



## ใบงานที่ 10

### FULLY CONTROLLED SINGLE PHASE BRIDGE WITH RESISTIVE AND INDUCTIVE LOAD

#### วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการทำงานของวงจรเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ Fully Controlled Single Phase Bridge ที่มีโหลดเป็นรีซิสเตอร์และอินดักเตอร์

#### ทฤษฎี

##### Fully Controlled Single Phase Bridge

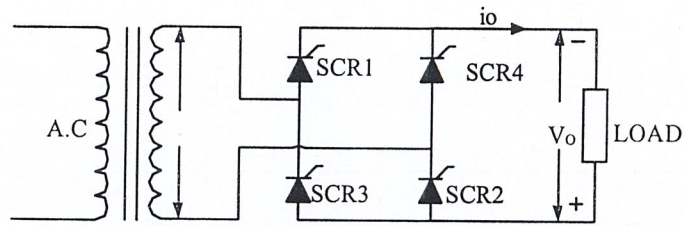
วงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบบริดจ์ โดยการควบคุมเต็มจะประกอบด้วยเอสซีอาร์ จำนวน 4 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 1 ในการควบคุมแบบนี้จะสามารถจ่ายพลังงานกลับสู่แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับได้ คือ ในกรณีที่โหลดเป็นมอเตอร์กระแสตรง

กระแสไหลผ่านโหลดเมื่อเอสซีอาร์ 1 และ 2 ถูกทริกให้นำกระแสพร้อมกัน และเอสซีอาร์ 3 และ 4 จะต้องถูกทริกให้นำกระแสในครั้งถัดไป จะสังเกตว่าเอสซีอาร์สองตัวที่ต้องทริกให้นำกระแสพร้อมกัน ขั้วแคโทดไม่ได้ต่อร่วมกันและมีระดับต่างกัน เมื่อต้องการจะใช้วงจรสร้างสัญญาณทริกวงจรเดียวกัน จึงจำเป็นจะต้องใช้ Pulse Transformer ดังแสดงในรูปที่ 4 หรือใช้ Opto-coupler มาแยกแคโทดของเอสซีอาร์ทั้งสองออกจากกัน

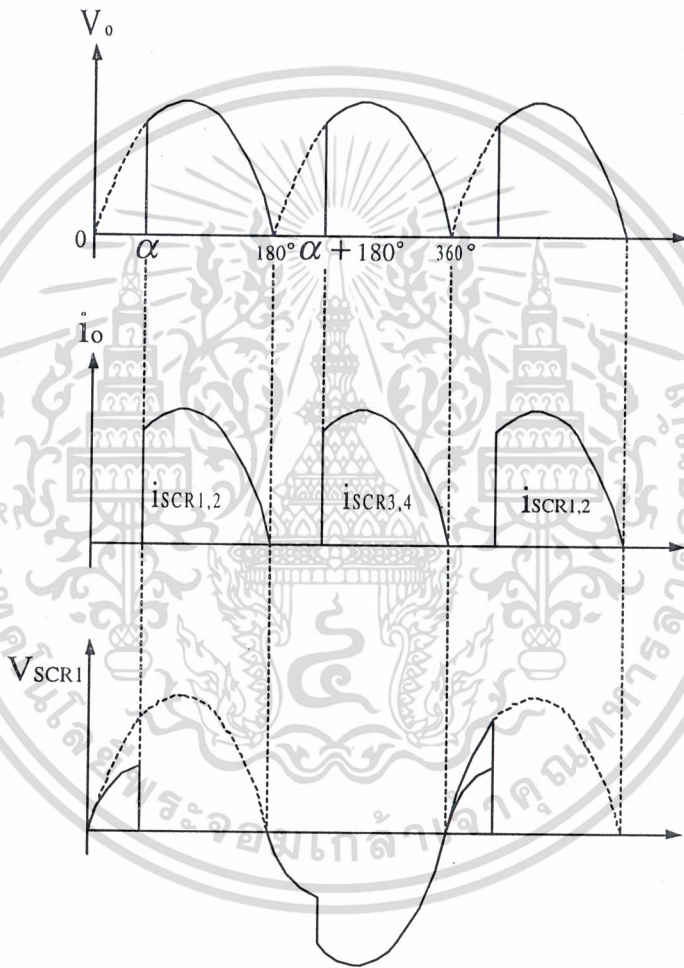
สัญญาณของแรงดันขณะที่มีโหลดเป็นความต้านทานอย่างเดียว ดังแสดงในรูปที่ 1 (ข) ทำการทริกเอสซีอาร์ให้นำกระแสที่มุม  $\alpha$  เอสซีอาร์จะนำกระแสจนกระทั่งแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับตกเป็นศูนย์แรงดันเฉลี่ยที่โหลดที่ค่าเท่ากับ

$$V_{O(ave)} = \frac{\sqrt{2}V}{\pi} (1 + \cos \alpha) \quad (1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



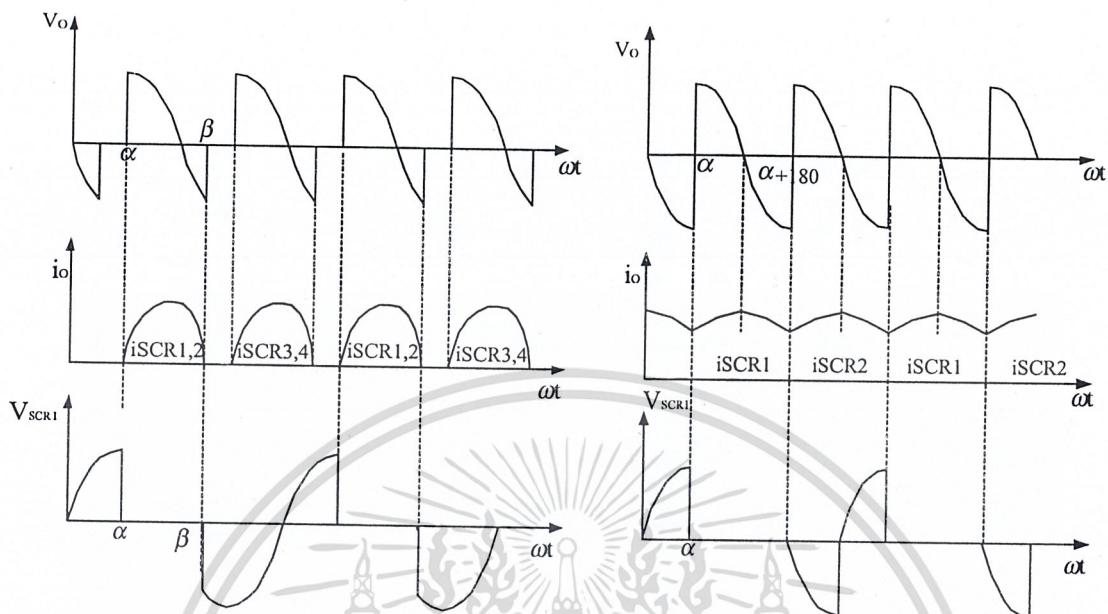
(ก)



(ข) โหลดเป็นความต้านทาน

รูปที่ 1 Full-controlled Single Phase Bridge with Resistive Load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 Fully-controlled Single Phase Bridge with Inductive Load

สัญญาณของแรงดันขณะที่มีโหลดเป็นอินดักทีฟโหลด แต่กระแสไหลไม่ต่อเนื่องทำการ  
 ทริกเอสซีอาร์ให้นำกระแสที่มุม  $\alpha$  และเอสซีอาร์จะหยุดนำกระแสที่มุม  $\beta$

$$V_{o(ave)} = \frac{\sqrt{2}V}{\pi} (\cos - \cos) \text{ ที่ } \alpha < \phi \tag{2}$$

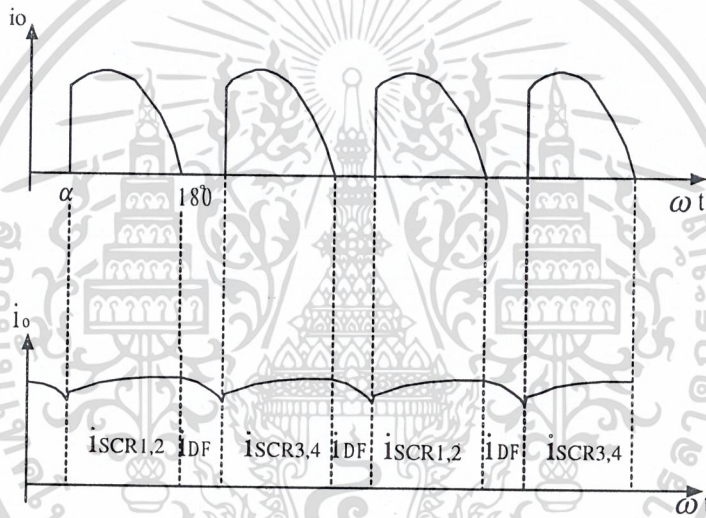
สัญญาณของแรงดันขณะที่มีโหลดเป็นอินดักทีฟโหลด แต่กระแสไหลต่อเนื่อง  
 คือ เริ่มทริกเอสซีอาร์ 1 และ 2 ให้นำกระแสที่มุม  $\alpha$  เอสซีอาร์ทั้งสองหยุดนำกระแสที่มุม  $180^\circ + \alpha$   
 และเริ่มทริกเอสซีอาร์ 3 และ 4 ให้นำกระแสที่มุม  $180^\circ + \alpha$  ดังแสดงในรูปที่ 2 (ข) แรงดันเฉลี่ยที่  
 โหลดมีค่าเท่ากับ

$$V_{o(ave)} = \frac{2\sqrt{2}V}{\pi} \cos\alpha \text{ ที่ } \alpha \leq \phi \tag{3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

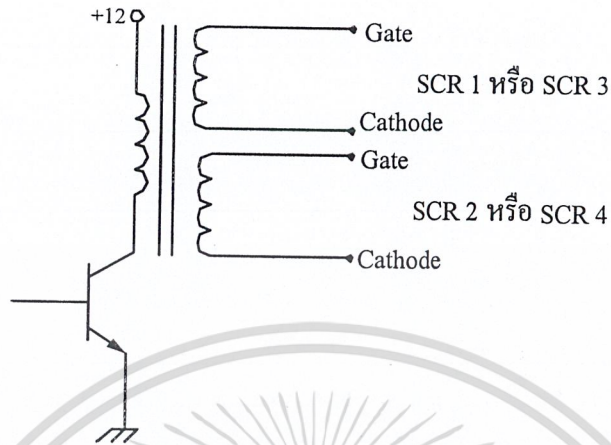
สัญญาณของแรงดันขณะที่มีโหลดเป็นอินดักทีฟโหลดที่มี Free-wheeling Diode ต่อขนานอยู่ เมื่อทริกเอสซีอาร์ให้นำกระแสที่มุม  $\alpha$  และเอสซีอาร์จะหยุดนำกระแส เมื่อแรงดันตกเป็นศูนย์หรือที่มุม  $180$  องศา กระแสจากโหลดจะไหลผ่าน Free-wheeling Diode แทน จะได้สัญญาณของแรงดัน ดังแสดงในรูปที่ 3 แรงดันเฉลี่ยที่มีโหลดมีค่าเท่ากับ

$$V_{O(ave)} = \frac{\sqrt{2}V}{\pi} (1 + \cos\alpha) \quad (4)$$



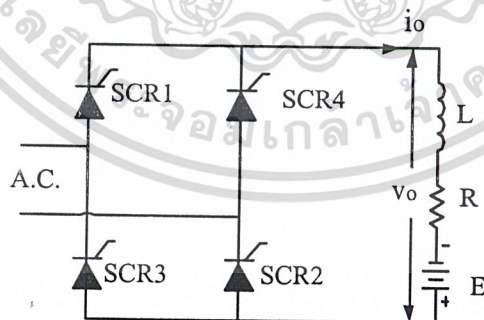
รูปที่ 3 Fully-controlled Single Phase Bridge with Free-wheeling Diode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



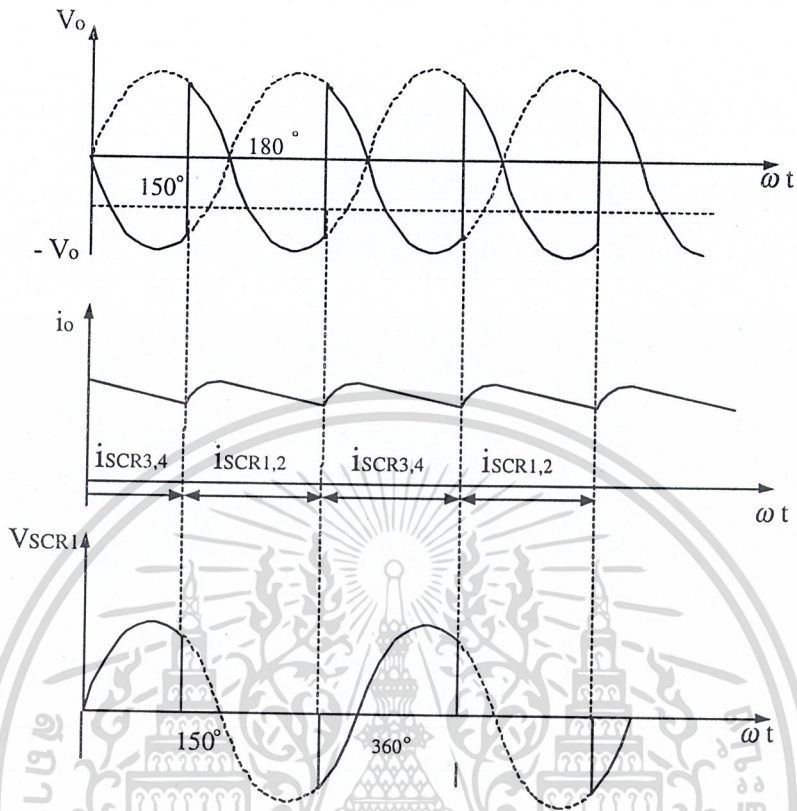
รูปที่ 4 Firing Circuit Output Connections

จากสมการที่ (3) จะเห็นว่า ถ้า  $\alpha > 90$  องศา แรงดันเฉลี่ยที่โหลด  $V_{O(ave)}$  จะมีค่าเป็นลบ ในสภาวะนี้ ถ้าที่โหลดมีแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง เช่น แบตเตอรี่หรือ E.M.F. ที่อาร์มาเจอร์ของมอเตอร์กระแสตรง พลังงานจากแหล่งจ่ายไฟกระแสจะจ่ายสู่แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ เรียกว่า เป็นสภาวะของ Regeneration หรือ อินเวอร์เตอร์ (Inverter) สำหรับในกรณี  $\alpha = 150$  องศา แรงดันเฉลี่ยที่โหลดและแรงดันคร่อมเอสซีอาร์ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ในภาวะของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 (ต่อ) ในสถานะของอินเวอร์เตอร์

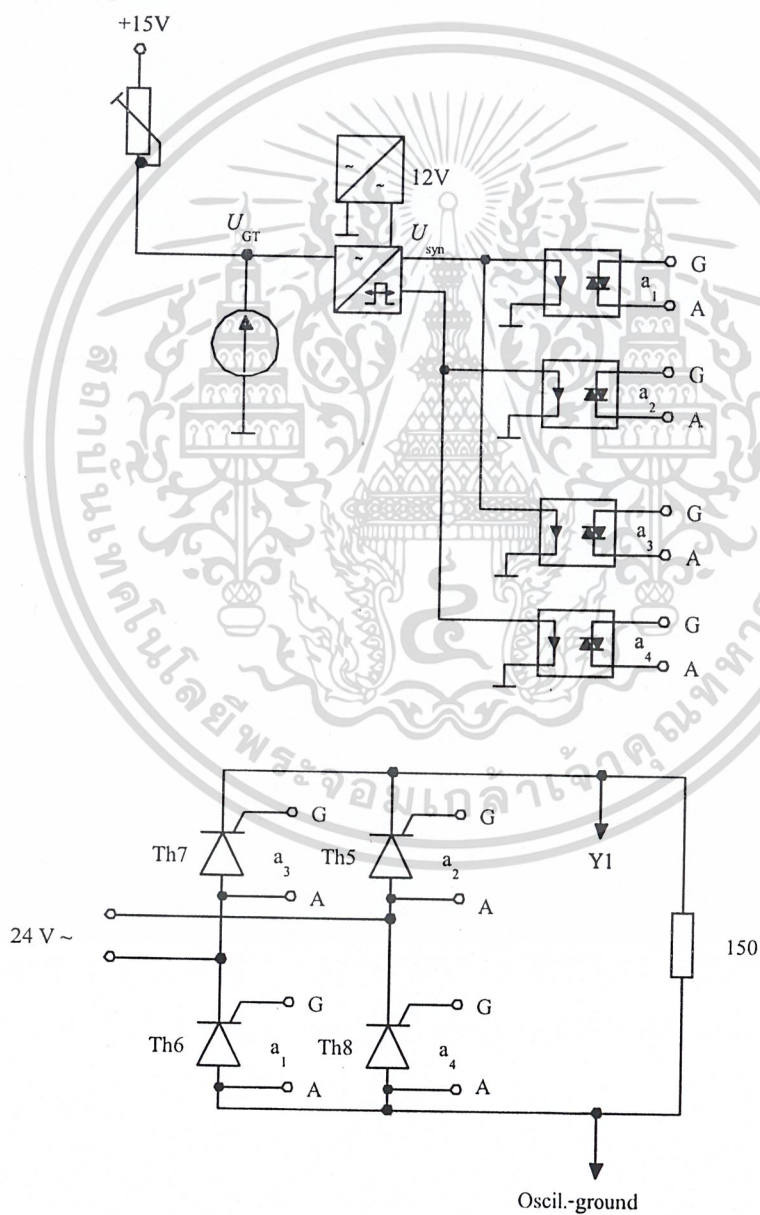
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## อุปกรณ์

1. ไทริสเตอร์ (Th5, Th6, Th7, Th8)
2. รีซีสเตอร์ 150 โอห์ม
3. อินดักเตอร์ 400 mH

## ลำดับขั้นตอนการทดลอง

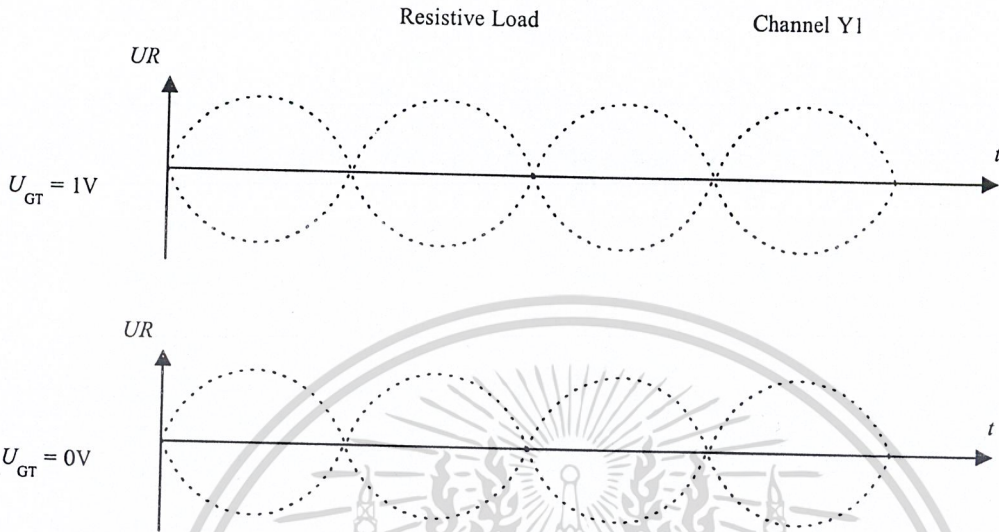
1. ต่อดังตามรูปที่ 6



รูปที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วัดและบันทึกรูปคลื่นแรงดันที่  $U_{GT} = 1\text{ V}$  และ  $U_{GT} = 0\text{ V}$



3. อธิบายลักษณะของกระแสไหลใน ช่วง 1 ไซเคิล ของแรงดันอินพุต

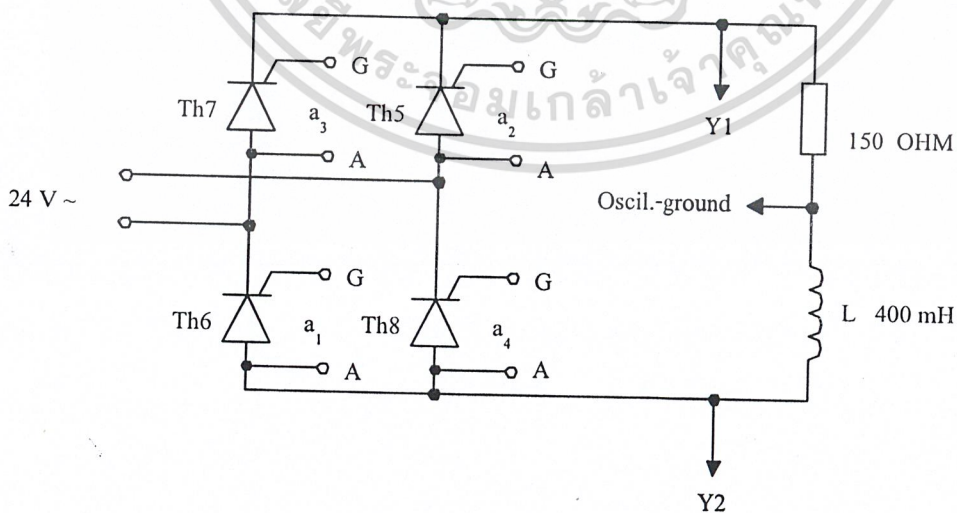
.....

.....

.....

.....

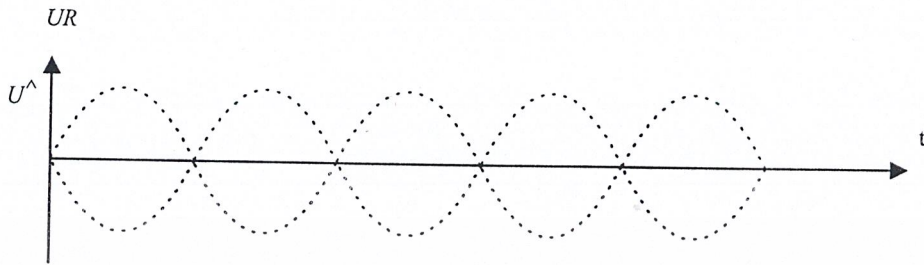
4. เปลี่ยนวงจรเป็นวงจรที่ 2



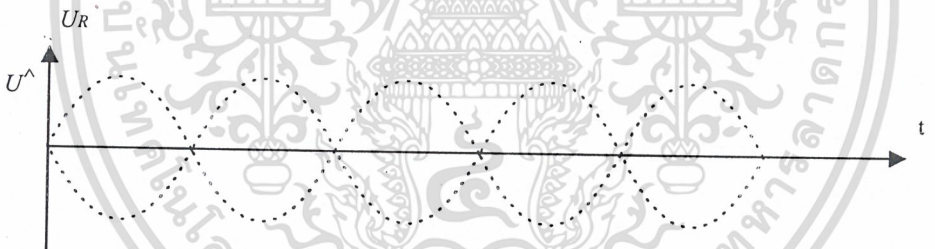
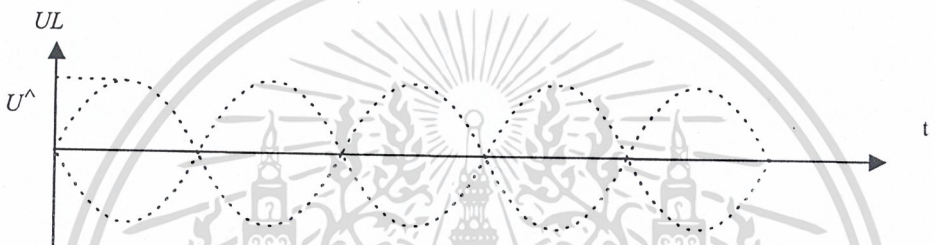
รูปที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

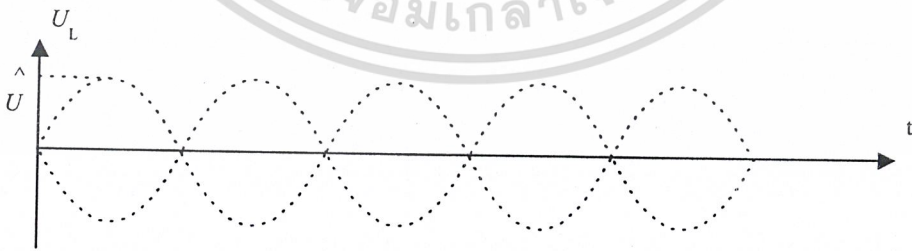
5. วัดและบันทึกแรงดันที่ตกคร่อมรีซิสเตอร์และอินดักเตอร์ที่  $U_{GT} = 1V$  และ  $U_{GT} = 0V$



$U_{GT} = 1 V$



$U_{GT} = 0 V$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

## คำถามท้ายการทดลอง

1. จากการทดลองจงอธิบายลักษณะของแรงดันและกระแสที่มีโหลดเป็นอินดักเตอร์ ขณะที่มี การทรigger ที่ 0 องศา และ 90 องศา

.....

.....

.....

.....

2. จงอธิบายลักษณะของแรงดันและกระแสที่มีโหลดเป็นอินดักเตอร์ และมีการต่อ Free-wheeling Diode

.....

.....

.....

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ใบงานที่ 11

### TWO PULSE BRIDGE CONNECTION LOAD WITH BACK EMF

#### วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการทำงานของวงจร Two Pulse Bridge Connection สำหรับ Load ที่มี Back E.M.F

#### ทฤษฎี

##### การควบคุมมอเตอร์ดีซี

ปัจจุบันนิยมใช้มอเตอร์ดีซีกันมาก ก็เนื่องจากสามารถปรับอัตราความเร็วได้พิสัยกว้างมาก จึงทำให้มองข้ามข้อเสียในการที่มีคอมมิวเตเตอร์กับการที่มีขนาดใหญ่กว่ามอเตอร์เอซีที่มีกำลังม้าเท่ากัน แต่อย่างไรก็ตามถ้าเป็นระบบที่มีกำลังใหญ่มากกว่าก็จำเป็นต้องหันไปใช้มอเตอร์เอซี

เมื่อเลือกใช้มอเตอร์เอซีแล้วก็สามารถปรับค่าแรงดันดีซีเลียวงจร (DC Voltage Supply) ที่ป้อนเข้าวงจรอาร์มาเจอร์หรือวงจรฟิลด์ ซึ่งจะสามารถปรับค่าวงจรได้หลากหลายแบบตามชนิดของมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 1

ทุก ๆ กรณีที่แสดงในรูปที่ 1 จะให้สมการสาเหตุและผลดังต่อไปนี้

$$E = E_b + I_a R_a \quad (1)$$

$$\omega = \frac{E_b}{K \omega \phi} \quad (2)$$

$$T = K_t \phi I_a \quad (3)$$

$$\phi = K_f I_f \quad (4)$$

เมื่อ	E	เป็นแรงดันดีซีเลียวงจร
	E <sub>b</sub>	เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าโต้กลับของมอเตอร์ที่มีอัตราเร็ว $\omega$ และที่ฟิลด์ฟลักซ์ (Field Flux)
	I <sub>a</sub>	เป็นค่าของกระแสในอาร์มาเจอร์ซึ่งทำให้มอเตอร์เกิดแรงหมุน T
	I <sub>f</sub>	เป็นค่าของกระแสฟิลด์

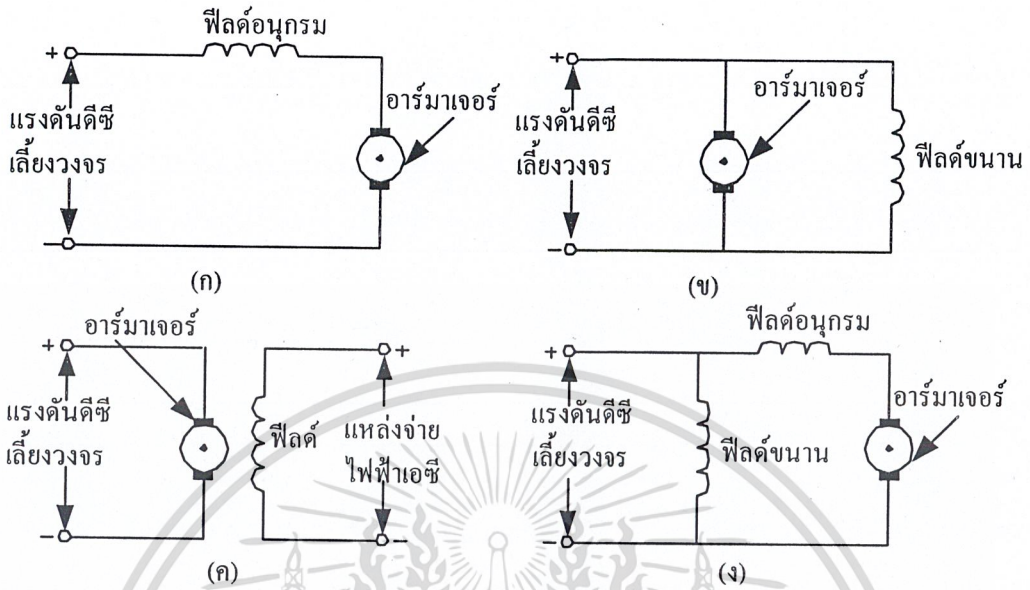
และ  $K_\omega$ ,  $K_t$  และ  $K_f$  เรียกว่า เป็นตัวคงที่ของอัตราเร็วของแรงหมุนและฟลักซ์ ใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$R_a$  เป็นความต้านทานต่าง ๆ ที่ต่ออนุกรมในวงจรที่ผ่านอาร์มาเจอร์ ซึ่งอาจเป็นความต้านทานของขดลวดอาร์มาเจอร์ ร่วมกับความต้านทานของรอยสัมผัสที่แปรกับคอมมิวเตเตอร์ (ซึ่งเรียกสั้น ๆ ว่าความต้านทานอาร์มาเจอร์  $R_a$ ) หรืออาจเป็นผลบวกของความต้านทานอาร์มาเจอร์  $R_a$  กับความต้านทานของฟิลด์  $R_f$  ขึ้นอยู่กับแบบที่เราใช้ต่อวงจรของมอเตอร์

ถ้าเราให้แรงดันป้อนให้มอเตอร์มีค่าคงที่แต่เปลี่ยนค่าของกระแสฟิลด์ ก็จะไปทำให้ฟิลด์พลิกซ์เปลี่ยนค่าตามไปด้วยโดยสมการที่ (2) เราจะเห็นได้ว่าอัตราเร็วของมอเตอร์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับฟิลด์พลิกซ์หรือกระแสฟิลด์ คือเมื่อกระแสฟิลด์มีค่ามากมอเตอร์จะหมุนช้าลงแต่กระแสฟิลด์มีค่าน้อยมอเตอร์จะหมุนเร็วขึ้น ทั้งนี้เพราะถ้าพิจารณาสมการที่ (1) และ (2) เมื่อให้ฟิลด์  $\phi$  มีค่าคงที่ เราจะเห็นได้ว่าอัตราเร็ว  $\omega$  เป็นสัดส่วนโดยตรงอย่างหยาบ ๆ กับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ (โดยถือว่าแรงดันตกคร่อมอาร์มาเจอร์มีค่ามากจึงไม่ต้องคำนึงถึง) ทั้งนี้ก็เนื่องจากเมื่อมีแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าสู่ก็จะมีการแสอาร์มาเจอร์สูงขึ้นซึ่งทำให้แรงหมุนมากขึ้น (ดังสมการที่ (3)) เพราะฉะนั้นก็จะทำให้มอเตอร์หมุนเร็วขึ้น และถ้าเราลดแรงดันป้อนเข้าสู่กระแสอาร์มาเจอร์จะลดลงและแรงหมุนก็น้อยลงทำให้มอเตอร์หมุนช้าลงการที่ (3) เพราะฉะนั้นก็จะทำให้มอเตอร์หมุนเร็วขึ้น และถ้าเราลดแรงดันป้อนเข้าสู่กระแสอาร์มาเจอร์จะลดลงและแรงหมุนก็น้อยลงทำให้มอเตอร์หมุนช้าลง ..

ขณะที่มอเตอร์กำลังหมุนอยู่นั้นก็จะมีแรงแม่เหล็กมาดึงคู่อาร์มาเจอร์ไว้ด้วยค่าหนึ่ง เมื่อเราเพิ่มกระแสฟิลด์แรงดึงคู่อแม่เหล็กมีกำลังแรงขึ้นจึงทำให้มอเตอร์หมุนช้าลง แต่เมื่อเราลดกระแสฟิลด์ลงแรงดึงคู่อแม่เหล็กจะลดลง ทำให้แรงหมุนแห่งความเฉื่อยของมอเตอร์ร่วมกับแรงหมุนที่เกิดขึ้นเนื่องจากไฟฟ้าจะมากกว่าแรงดึงคู่อแม่เหล็ก มอเตอร์จึงหมุนเร็ว แต่ถ้าเราลดกระแสฟิลด์เป็นศูนย์ มอเตอร์จะไม่สามารถหมุนเร็วเข้าหาอินฟินิตี้ได้เพราะว่าแรงหมุนของมอเตอร์ในสมการ (3) มีค่าเป็นศูนย์ด้วย มอเตอร์ก็จะหมุนด้วยความเฉื่อยซึ่งจะค่อย ๆ หมุนช้าลงและหยุดลงในที่สุด ดังการควบคุมอัตราเร็วได้พิสัยกว้างมากนั้นจะเป็นมอเตอร์อนุกรม (คือต่อฟิลด์อนุกรมกับอาร์มาเจอร์) และจะให้แรงหมุนตอนสตาร์ทสูงและจะได้พิสัยกว้างพอสมควร จะเป็นมอเตอร์แบบต่อฟิลด์แยกออกจากวงจรอาร์มาเจอร์ แต่สำหรับมอเตอร์แบบขนาน (คือต่อฟิลด์ขนานกับวงจรอาร์มาเจอร์) จะมีอัตราเร็วค่อนข้างคงที่ที่เราอาจปรับอัตราเร็วได้ด้วยการปรับค่าความต้านทานภายในวงจรอาร์มาเจอร์และวงจรฟิลด์ได้ แต่แรงหมุนตอนสตาร์ทมีไม่ค่อนมากสู่มอเตอร์แบบอนุกรมไม่ได้ ดังนั้นมอเตอร์อนุกรมเหมาะสมที่ใช้ในการขับเคลื่อนต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 การต่อวงจรอาร์มาเจอร์และวงจรฟิลต์ของเครื่องกลไฟฟ้าดีซี

- (ก) ต่อวงจรฟิลต์เป็นอนุกรมกับวงจรอาร์มาเจอร์
- (ข) ต่อวงจรฟิลต์ขนานกับวงจรอาร์มาเจอร์
- (ค) ต่อวงจรฟิลต์แยกออกจากวงจรอาร์มาเจอร์
- (ง) ต่อวงจรฟิลต์แบบผสม

ถ้าพิจารณาสมการที่ (2) ขณะที่มอเตอร์กำลังเริ่มเดินเครื่องหรือสตาร์ท เราจะได้ว่ามอเตอร์แรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับมีค่าต่ำมากเมื่อมอเตอร์หมุนช้า ๆ เพราะฉะนั้นจากสมการที่ (1) เราจะเห็นว่ากระแสอาร์มาเจอร์ที่มีค่าสูงมาก และสมการที่ (3) ก็จะทำให้เราเห็นว่าแรงหมุนตอนสตาร์ทที่มีค่าสูงซึ่งเป็นข้อดีของมอเตอร์ดีซี โดยเฉพาะอย่างยิ่งมอเตอร์อนุกรม กระแสที่ไหลผ่านอาร์มาเจอร์ก็จะไหลผ่านฟิลต์ด้วยจึงมีกระแสและฟลักซ์ตอนสตาร์ทที่มีค่าสูงด้วยกันทั้งคู่ จะทำให้แรงหมุนตอนสตาร์ทสูงกว่ามอเตอร์ดีซีที่ต่อแบบอื่น ๆ

ดังนั้นในตอนสตาร์ทและการปรับอัตราเร็ว จะขึ้นอยู่กับ การปรับกระแสและแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ ซึ่งอาจจะทำได้ด้วยการต่อความต้านทานเข้าไปในวงจรที่ต้องการ แล้วปรับค่าความต้านทานตัวนั้น แต่มีข้อเสียที่มีกำลังสูญเสียในความต้านทานและขณะปรับเปลี่ยนความต้านทานจะมีการขัดสีและเกิดประกายไฟทำให้ความต้านทานเสียได้ จึงต้องการการซ่อมบำรุง ดังนั้นในปัจจุบันเราใช้ทรিসเตอร์เข้ามาต่อแทนตัวต้านทานที่กล่าวมานั้น แล้วควบคุมการนำกระแสของ

ทรিসเตอร์เราจะได้เราสามารถเปลี่ยนค่าแรงดันและกระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์ได้ ดังแสดงในรูป

ที่ 1 ซึ่งเราจะได้แหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นดิซีหรือเอชกีก็ได้ ไทริสเตอร์จะเรียงกระแสให้ไหลได้ทางเดียวเสมอเมื่อบังคับให้ไทริสเตอร์ปิดและเปิดการนำกระแสให้มีลักษณะขาดความต่อเนื่องต่าง ๆ ด้วยความถี่ปิดเปิดเร็วมากก็จะให้ค่าเฉลี่ยระดับแรงดันต่าง ๆ ซึ่งอัตราเร็วของมอเตอร์จะขึ้นอยู่กับค่าของระดับเฉลี่ยนี้ที่ป้อนเข้ามอเตอร์ วิธีการที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้ารูปแบบต่าง ๆ ให้เป็นแรงดันไฟฟ้าดิซีเรียกว่า “การมอดูเลตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง” (Modulation)

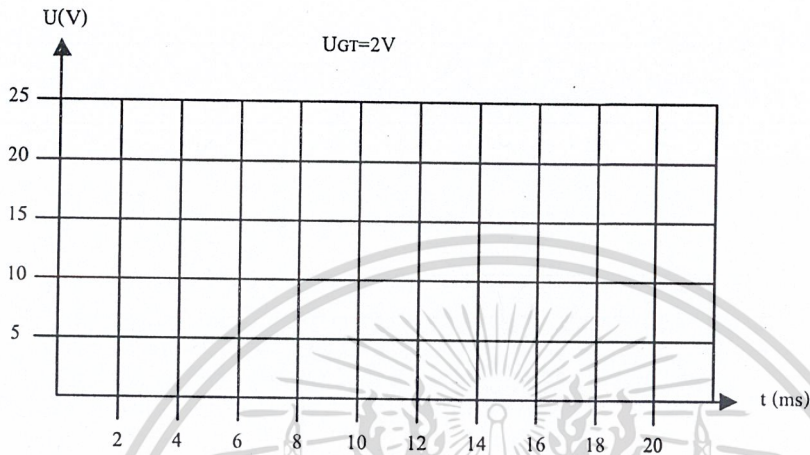
สองรูปแรกของรูปที่ 1 เป็นวิธีการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าดิซีอินพุตคงที่ให้เป็นแรงดันไฟฟ้าดิซีเอาต์พุตที่มีระดับเปลี่ยนแปลงค่าได้ ซึ่งจะทำให้ได้ด้วยการบังคับให้ไทริสเตอร์ปิด ๆ เปิด ๆ การนำกระแสอย่างรวดเร็ว วิธีการนี้จะทำให้แรงดันไฟฟ้าดิซีอินพุตถูก “สับ” (Chop) ให้ขาดตอนเป็นในช่วง ๆ หรือเป็นพัลส์จำนวนมากที่เอาต์พุตของไทริสเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็น “ผู้สับหรือวงจรสับไฟฟ้า” (Chopper) โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยน้อยกว่าอินพุต เราสามารถปรับค่าเฉลี่ยของแรงดันเอาต์พุตได้ด้วยการปรับอัตราส่วนของเวลาที่ไทริสเตอร์เปิดให้นำกระแสต่อเวลาปิดให้หยุดนำกระแส เราเรียกว่า “อัตราส่วนมาร์ค-สเปซ (Marks-space Ratio) หรือ “ควบคุมอัตราส่วนเวลา” (Time Ratio Control : TRC) ซึ่งเราอาจทำได้ 3 วิธีดังนี้

1. ปรับค่าของ  $t_{on}$  แต่รักษาคาบ T (หรือความถี่) ให้คงที่
2. รักษาค่า  $t_{on}$  ให้คงที่ แต่ปรับค่าของคาบ T
3. ปรับค่าของ  $t_{on}$  และของคาบ T ทั้งคู่

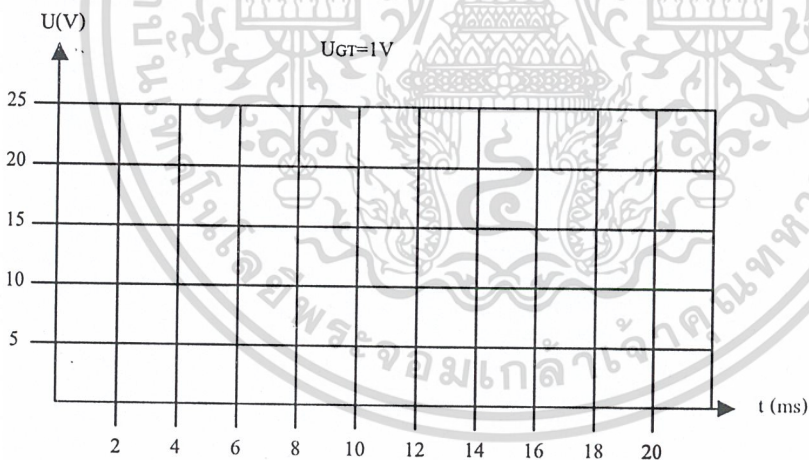
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2. ปรับแรงดัน  $U_{GT} = 2\text{ V}$  วัดและบันทึกรูปคลื่นของแรงดันมอเตอร์



3. ปรับ  $U_{GT} = 1\text{ V}$  วัดและบันทึกรูปคลื่นของแรงดันมอเตอร์



4. อธิบายและให้เหตุผลสำหรับรูปคลื่นที่ได้ในข้อ 2 และ 3

$U_{GT} = 2\text{ V}$  :

.....

.....

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U_{GT} = 1 \text{ V} :$$

.....

.....

.....

.....

5. ลด  $U_{GT}$  เป็น 0 V และอธิบายการทำงานของมอเตอร์

.....

.....

.....

.....

### สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

### คำถามท้ายการทดลอง

1. ความเร็วการหมุนของมอเตอร์ขึ้นอยู่กับอะไร จากการทดลองควบคุมได้อย่างไร

.....

.....

.....

.....

2. Back E.M.F คืออะไร

.....

.....

.....

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ใบงานที่ 12

### TWO-PULSE BRIDGE CONNECTION WITH CONTROL UNIT

#### วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาหน้าที่ของ Static Converter
2. เพื่อศึกษาการนำเอา Static Converter ไปใช้งาน

#### ทฤษฎีการทดลอง

##### Fully Controlled Single-phase Bridge

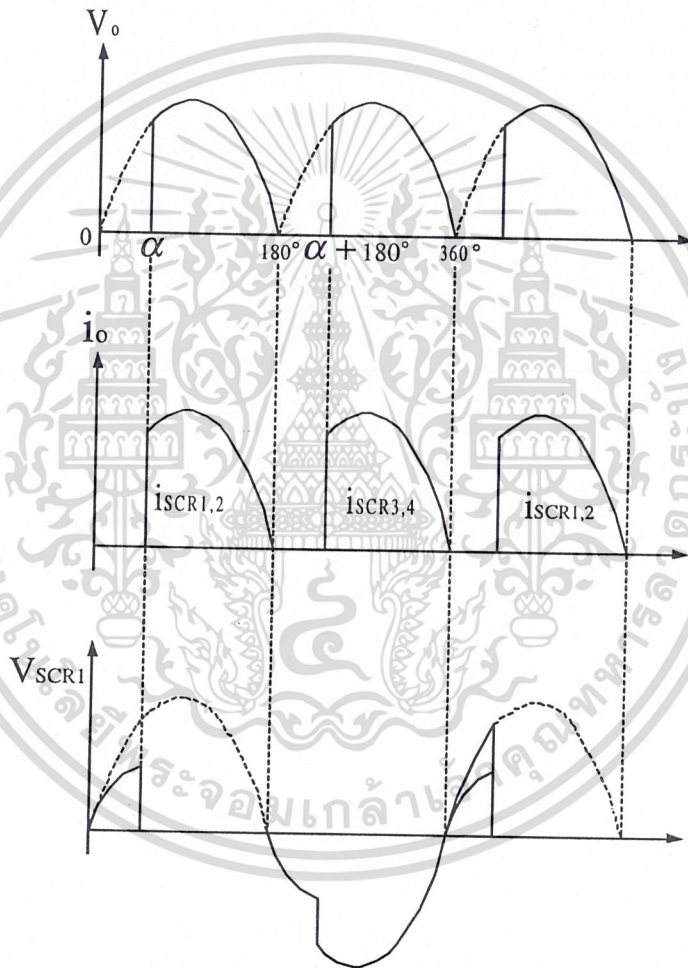
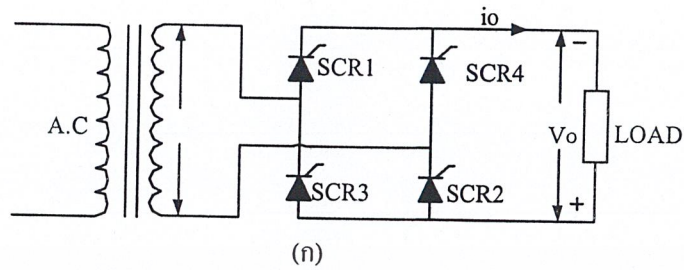
วงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบบริดจ์ โดยควบคุมเต็มคลื่นจะประกอบด้วยเอสซีอาร์ จำนวน 4 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 1 ในการควบคุมแบบนี้จะสามารถจ่ายพลังงานกลับสู่แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับได้ คือ ในกรณีที่โหลดเป็นมอเตอร์กระแสตรง

กระแสไหลผ่านโหลดเมื่อเอสซีอาร์ 1 และ 2 ถูกทริกให้นำกระแสพร้อมกัน และเอสซีอาร์ 3 และ 4 จะต้องถูกทริกให้นำกระแสในครั้งถัดไป จะสังเกตว่าเอสซีอาร์สองตัวที่ต้องทริกให้นำกระแสพร้อมกัน ขั้วแคโทดจะไม่ได้ต่อร่วมกันและมีระดับต่างกัน เมื่อต้องการใช้วงจรสร้างสัญญาณทริกวงจรเดียวกัน จึงจำเป็นต้องใช้ Pulse Transformer หรือใช้ Opto-coupler มาแยกแคโทดของเอสซีอาร์ทั้งสองออกจากกัน

สัญญาณของแรงดันขณะที่มีโหลดเป็นความต้านทานอย่างเดียว ดังแสดงในรูปที่ 1 (ข) ทำการทริกเอสซีอาร์ให้นำกระแสที่มุม เอสซีอาร์จะนำกระแสจนกระทั่งแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับตกเป็นศูนย์แรงดันเฉลี่ยที่โหลดที่ค่าเท่ากับ

$$V_{O(ave)} = \frac{\sqrt{2}V}{\pi}(1 + \cos) \quad (1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) โหลดเป็นความต้านทาน

รูปที่ 1 Full-controlled Single Phase Bridge with Resistive Load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**อุปกรณ์การทดลอง**

1. ไทริสเตอร์ (Th5, Th6, Th7, Th8)
2. รีซิสเตอร์ 220 โอห์ม และ 47 โอห์ม

**ลำดับขั้นการทดลอง**

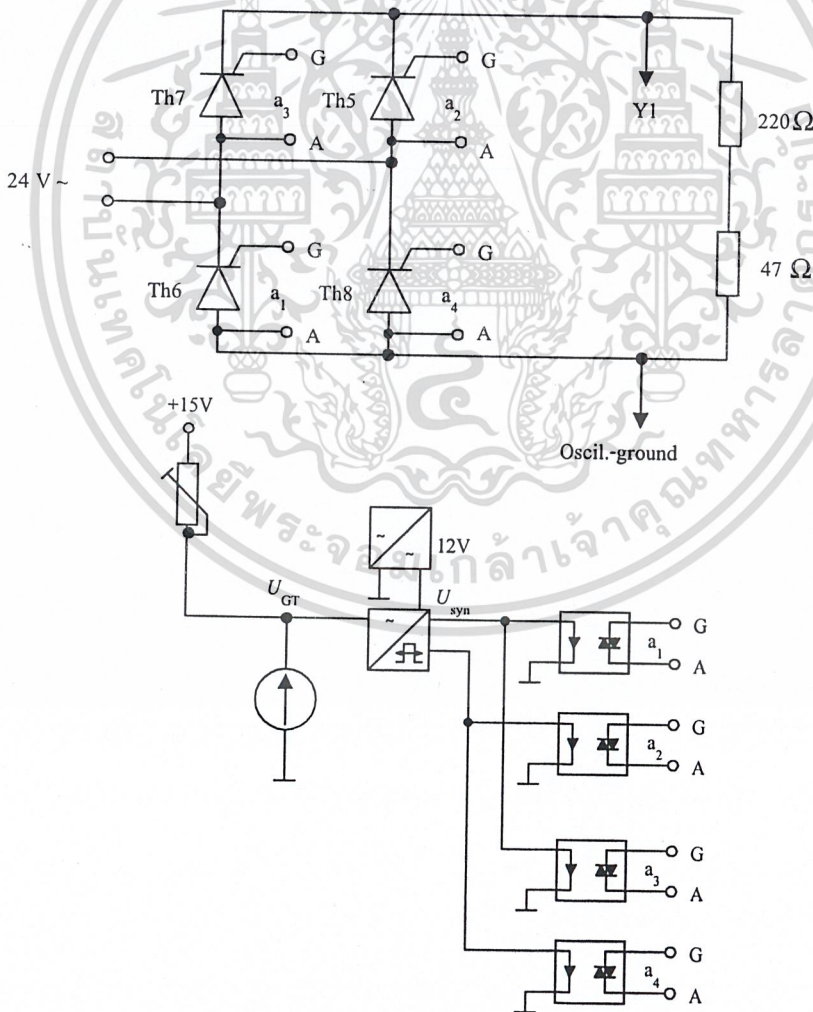
1. วัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของหม้อแปลงในลักษณะที่มีโหลด และวัดเฟสของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยออสซิลโลสโคป บันทึกผล

12 Vac ค่าที่วัดได้ = .....V

24 Vac ค่าที่วัดได้ = .....V

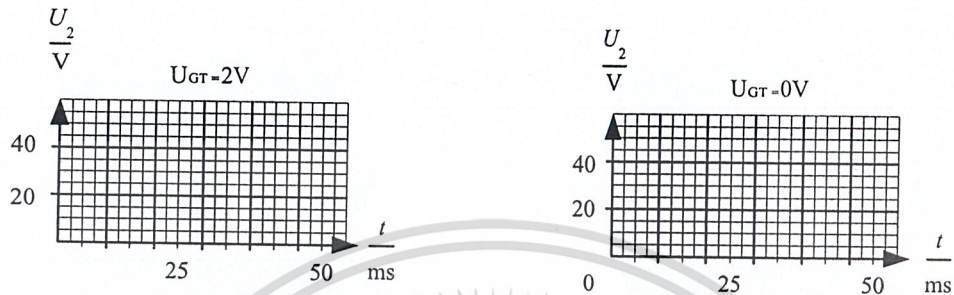
ความแตกต่างของเฟส = .....องศา

2. ต่อวงจรตามรูปที่ 2

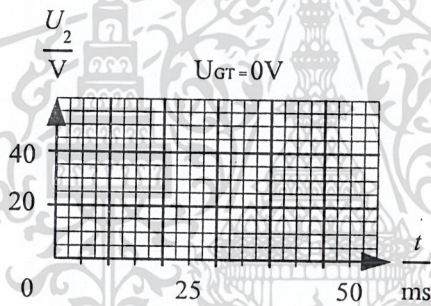


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานรูปที่ 2 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ใช้ออสซิลโลสโคป วัดแรงดันที่  $U_2$  เพื่อดูสัญญาณของกระแส บันทึกลงผล เมื่อ  $U_{GT} = 2\text{ V}$   
 $U_{GT} = 0\text{ V}$

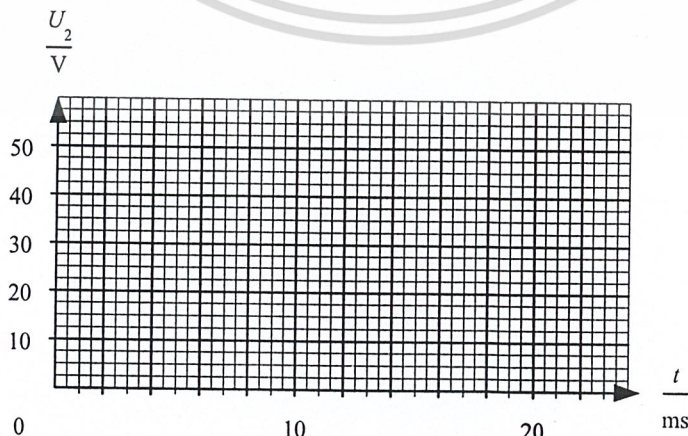


4. ปลดวงจรควบคุมเกตของ Th5 บันทึกรูปสัญญาณแรงดัน  $U_2$  เมื่อ  $U_{GT} = 0\text{ V}$



ต่อวงจรควบคุมของ Th5 ไว้เหมือนเดิม

5. ปรับตั้ง  $U_{GT}$  ของวงจร 4-Pulse Trigger เพื่อควบคุมมุมการทริกจาก 45 องศา ถึง 180 องศา  
 บันทึกผล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**สรุปผลการทดลอง**

.....

.....

.....

.....

**คำถามท้ายการทดลอง**

1. ให้ออกเหตุผลของการจำกัดช่วงของมุมการควบคุมของ Static Converter เมื่อจะใช้งานร่วมกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

.....

.....

.....

.....



## ใบงานที่ 13

# RECORDING OF STATIC CONVERTER CHARACTERISTICS

### วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการทำงานของ Static Converter โดยบันทึกกราฟคุณลักษณะของวงจร

### ทฤษฎี

การค้นหาข้อบกพร่องใน Static Converter Circuit ทำได้โดยการทดสอบส่วนประกอบแต่ละส่วน ดังนี้

#### 1. Thyristor

ความต้านทานระหว่างแอโนดและแคโทดทั้งสองทิศทางของขั้วมิเตอร์จะต้องอยู่ระหว่าง 100k ถึง 1M ความต้านทานจะมีค่าเป็นอนันต์เมื่อแอโนดและแคโทดต่อไม่ถึงกัน ความต้านทานระหว่างเกตและแคโทดมีค่าอยู่ระหว่าง 2-3 โอห์ม ถึง 100 โอห์ม ถ้าความต้านทานเป็นอนันต์แสดงว่าเกิดการขาดวงจรกันระหว่างเกตและแคโทด โดยส่วนใหญ่แล้วถ้าไทรสเตอร์เสียหาย เนื่องจากแรงดันเกินหรือกระแสเกินการวัดจะให้ผลเป็นศูนย์

#### 2. Trigger Set and Pulse

พัลส์ที่ผลิตโดยชุดกำเนิดพัลส์จะต้องถูกเลือกตามข้อมูลของไทรสเตอร์ และวงจร Static Converter การวัดต้องใช้ออสซิลโลสโคป 2 ช่อง เพื่อทำการเปรียบเทียบเฟสระหว่างพัลส์และแรงดันอินพุตของวงจร

#### 3. Static Converter and Trigger Set

ชุด Static Converter หน้าที่ของมันสามารถตรวจสอบได้ด้วยชุดทริกที่สมนัยของมัน และจะต้องหากราฟคุณลักษณะของ Static Converter ก่อน จะต้องมีการ Steady Curve และค่าคำนวณของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จะต้องเท่ากับค่าที่วัดได้จากการวัดของเครื่องมือวัด ถ้าไทรสเตอร์ไม่ได้รับการทริกจะมีเพียงครึ่งของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเท่านั้นที่ถูกเร็คตีไฟฟ์ ขนาดของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จึงเหลือเพียงครึ่งเดียวเท่านั้น

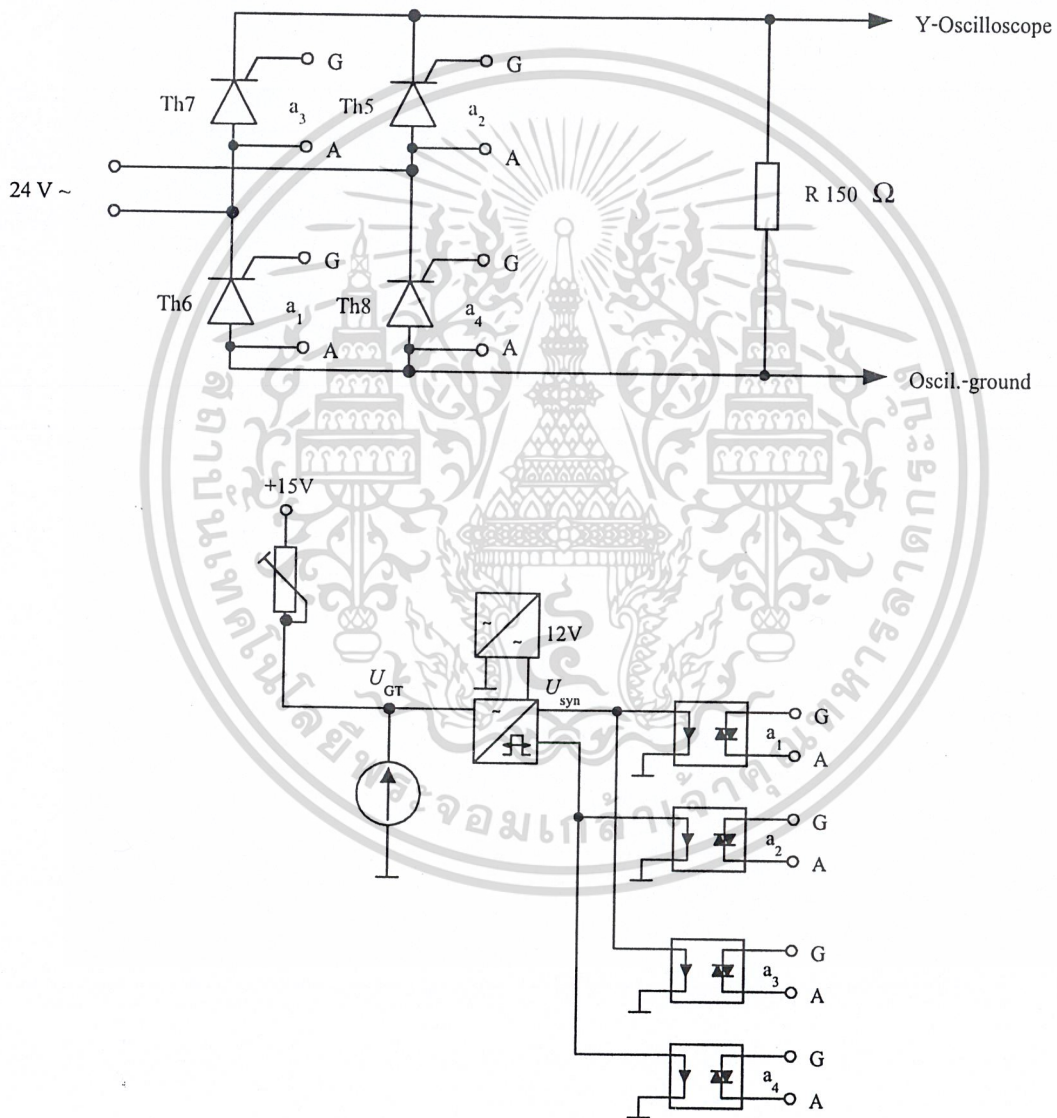
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### อุปกรณ์การทดลอง

1. ไทริสเตอร์ (Th5, Th6, Th7, Th8)
2. รีซิสเตอร์ 150 โอห์ม

### ลำดับขั้นการทดลอง

1. ต่อวงจรตามรูปที่ 1



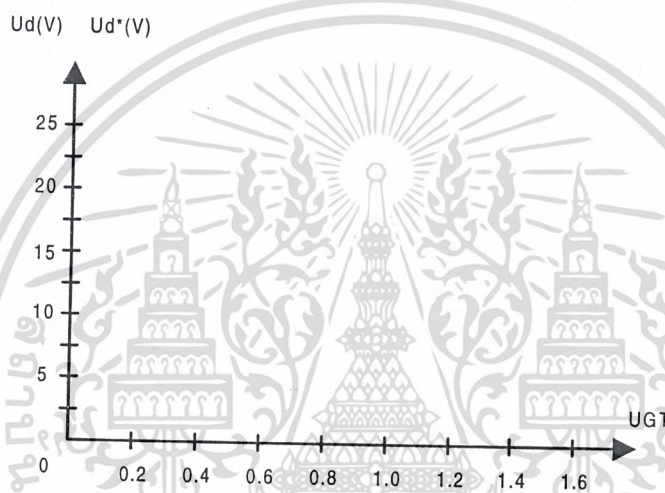
รูปที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ปรับค่า  $U_{GT}$  ตามตาราง บันทึกค่า  $U_d$

$U_{GT}(V)$	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6
$U_d(V)$								

3. วาดกราฟ  $U_d = f(U_{GT})$



4. จำลองความผิดพลาดที่เกิดขึ้นภายในวงจร Static Converter โดยการไม่ควบคุมขาเกตของ อุปกรณ์ไทรสเตอร์ตัวใดตัวหนึ่ง บันทึกค่าแรงดันที่ได้ตามตาราง

$U_{GT}(V)$	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6
$U_d^*(V)$								

5. วาดกราฟคุณลักษณะตามค่าที่ได้ในการทดลอง โดยใช้กราฟในข้อ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

## คำถามท้ายการทดลอง

1. ให้ความหมายเกี่ยวกับความชันของกราฟคุณลักษณะ และความเป็นไปได้ที่จะใช้ในการตรวจสอบข้อผิดพลาดในวงจร Static Converter

.....

.....

.....

.....



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ใบงานที่ 14

### PI-CONTROLLER (TRANSITION BEHAVIOUR)

#### วัตถุประสงค์

1. เพื่อสร้างกราฟคุณลักษณะ ของ PI-Controller และหาขบวนการควบคุมที่เป็นเชิงเส้น และหาค่า Proportional Gain โดยใช้กราฟคุณลักษณะ
2. พิจารณาการตอบสนอง และหาค่าต่างๆ ของการควบคุม

#### ทฤษฎี

การควบคุมแบบสัดส่วน หรือ Proportional Control (P-Control)

ในกรณีที่ชนิดของการควบคุมเป็นแบบสัดส่วน การทำงานของ Controlling Element หรือ Controller จะเข้าไปในลักษณะของสัดส่วน คือ Manipulating Variable จะมีค่ามากน้อยตามความมากน้อยของ Error หรือ Actuating Error (e) กล่าวคือ



รูปที่ 1 Block Diagram of P-Controller

$$m = K_p \cdot e$$

(1)

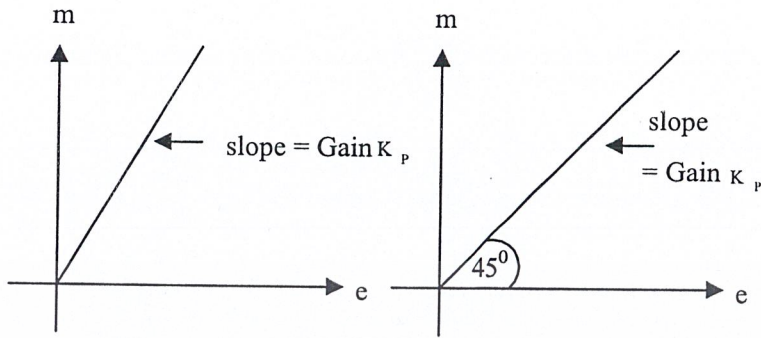
โดยที่  $m$  = การเปลี่ยนแปลงของ Manipulating Variable (จาก Ref. Op. Condition)

$K_p$  = Gain หรือกำลังขยายของ Proportional Controller

และ  $e$  = การเปลี่ยนแปลงของ Error หรือ Actuating Error (จาก Ref. Op. Condition)

และอาจแสดงความสัมพันธ์นี้ได้ดังรูปที่ 2 ซึ่งจะเห็นว่าเป็นเส้นตรง ในบางครั้งจึงเรียก Controller ชนิดนี้ว่า Amplifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) Gain  $K_p > 1$

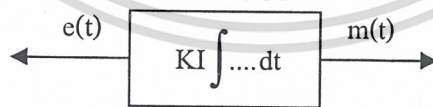
ข) Gain  $K_p = 1$

รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Output กับ Input ของ Proportional Controller

คุณสมบัติที่สำคัญของการควบคุมแบบสัดส่วน หรือ Proportional Control นี้ก็คือถ้าหาก Input ของ Controller คือ Actuating Error (e) มีค่ามาก, Output ของ Controller ซึ่งได้แก่ Manipulating Variable (m) ก็จะมีค่าสูงตามไปด้วย ในทางปฏิบัติก็คือ มีผลทำให้ระบบควบคุมทั้งระบบตอบสนองได้เร็ว

การควบคุมแบบรวม หรือ Integral Control (I-Control)

Controller มีลักษณะการทำงาน (Control Action) เป็นแบบรวม หรือ Integral Control คือ Controller ที่ให้การแก้ไขความคลาดเคลื่อน (m) ในลักษณะที่เป็นสัดส่วนกับ Time Integral ของ Actuating Variable หรือ Actuating Error (e)



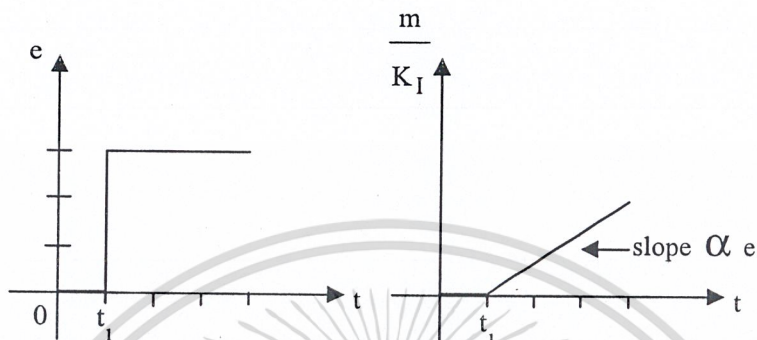
รูปที่ 3 Block Diagram of I-Controller

$$m \propto \int edt$$

หรือ  $m = K_i \int edt$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $K_I$  คือตัวคงค่า หรือ Constant of Proportionality เรียกว่า Gain หรือ กำลังขยายของ Integral Controller และอาจแสดงความสัมพันธ์นี้ได้ดังแสดงในรูปที่ 4



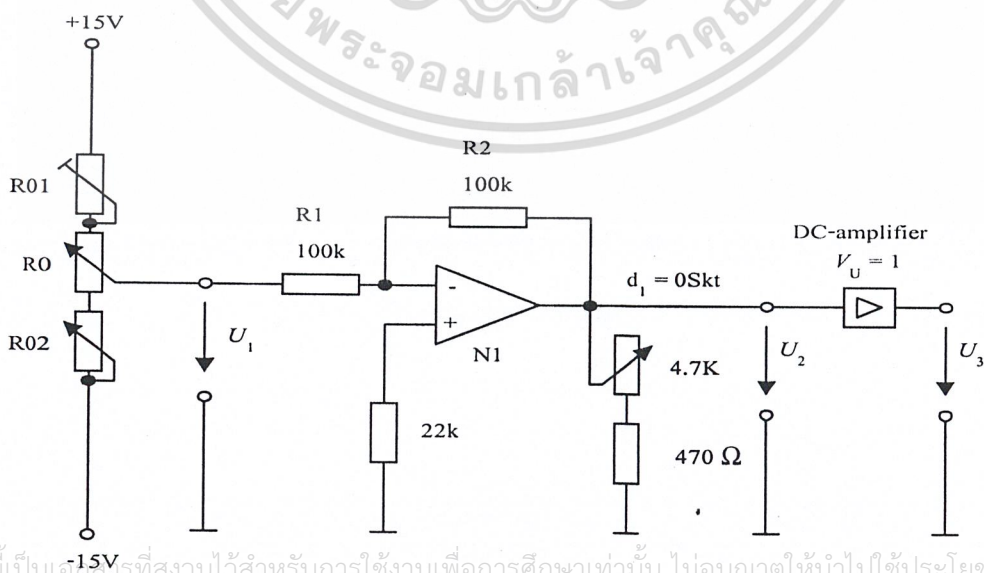
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Output กับ Input

**อุปกรณ์**

1. ชุด DC-Amplifier
2. ชุด Control Amplifier
3. Pulse Generator

**ลำดับขั้นตอนการทดลอง**

1. ต่อบางจรตามรูปที่ 5

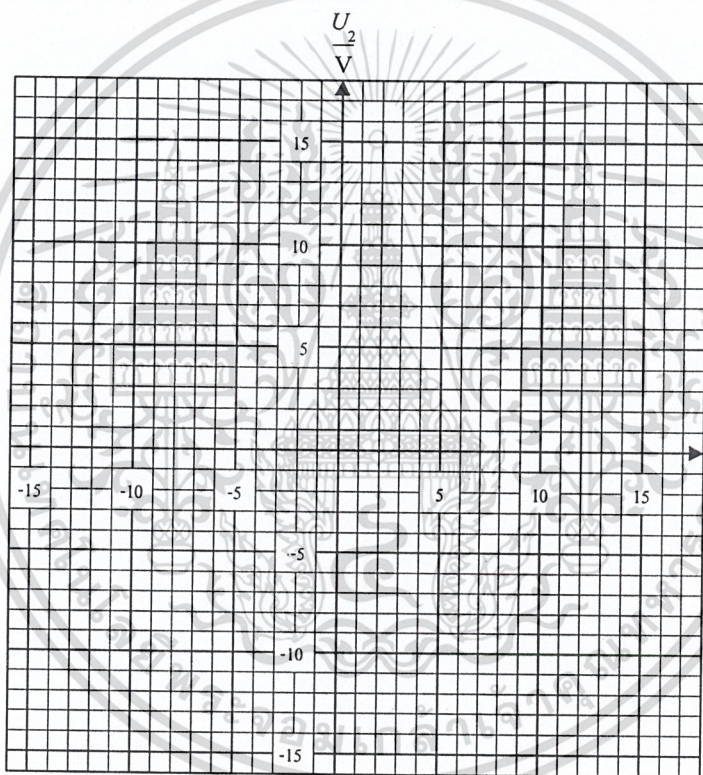


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหารูปที่ 5 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วัดแรงดันเอาต์พุต  $U_2 = U_3$  ของ P-Controller ที่ค่าแรงดันอินพุต  $U_1$  ตามตาราง

U1(V)	-15	-12	-10	-5	0	+5	+10	+12	+15
U3(V)									

3. สร้างกราฟคุณลักษณะ  $U_2 = f(U_1)$  โดยใช้ค่าที่วัดได้จากตาราง และหาอัตราการควบคุมที่เป็นเชิงเส้น



4. หาค่า Proportional Gain ( $V_R$ ) ของการควบคุมที่เป็นเชิงเส้น

$$V_R = \frac{\Delta U_2}{\Delta U_1} = \dots\dots\dots$$

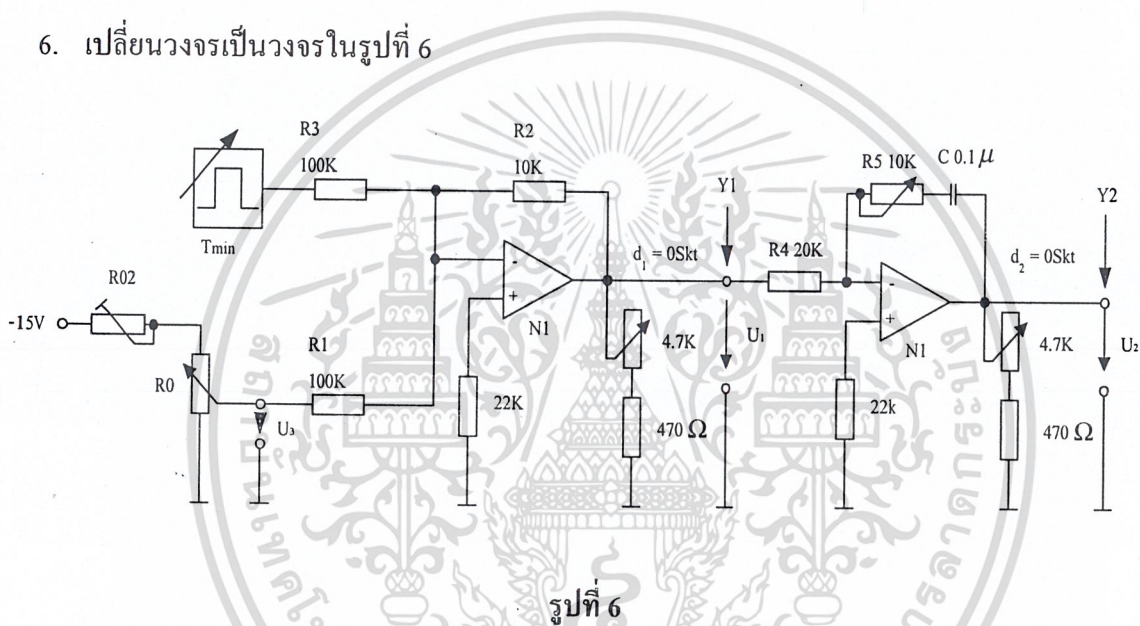
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. คำนวณค่า Porportional Gain ( $V_R$ ) โดยพิจารณาจากการจัดวงจร

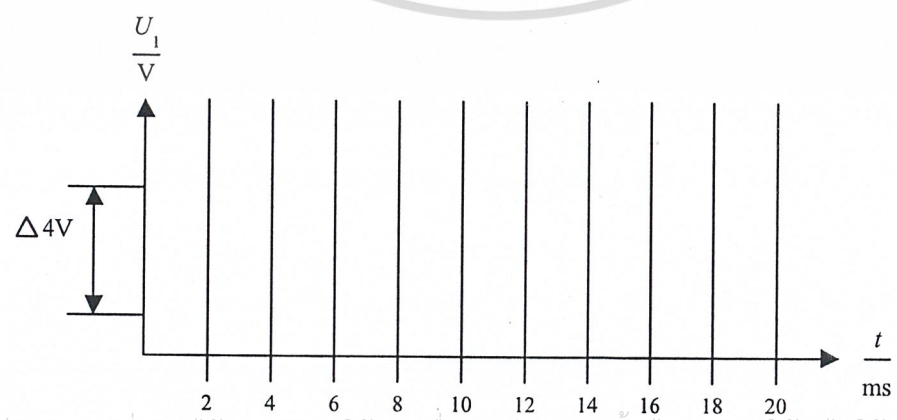
$$V_R = -\frac{R_2}{R_1} = \dots\dots\dots$$

$$V_R = -\frac{R_2}{R_1} = \dots\dots\dots$$

6. เปลี่ยนวงจรเป็นวงจรในรูปที่ 6

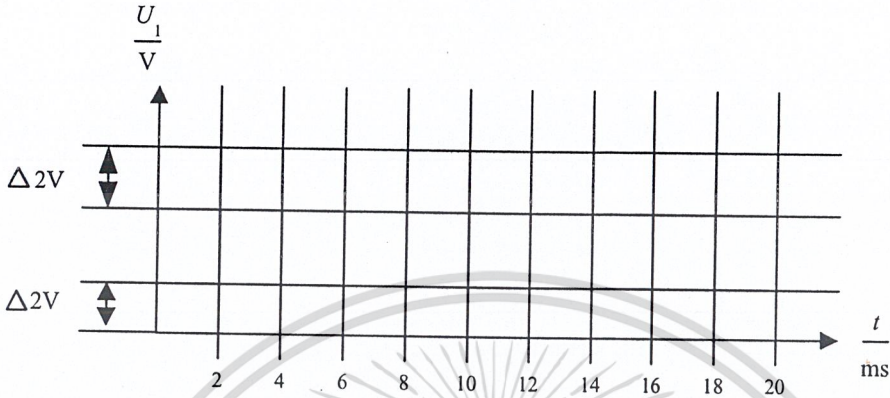


7. วัตถุประสงค์แรงดันเอาต์พุต  $U_1$  โดยใช้ฮอสซิลโลสโคป ช่องที่ 1 เซ็ตค่าแรงดันที่  $U_1 = \pm 2V$  โดยการปรับที่รีซีเตอร์ 4.7 กิโลโอห์ม

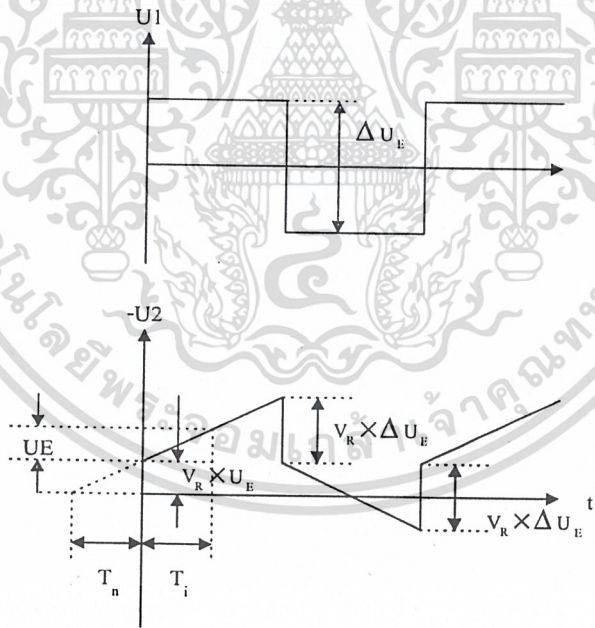


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. วาดรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุต  $U_2$  โดยใช้ฮอสซิลโลสโคปช่องที่ 2 บันทึกรูปคลื่นที่ได้



9. หาค่าต่าง ๆ ของ Proportional Gain ( $V_R$ ), Intergration Time และ Reset Time โดยพิจารณาจาก Step Responce



ค่า  $T_i, T_n, V_R$  ต้องได้จากฮอสซิลโลสโคป

$(\Delta U_E = 4V \quad U_E = +2V \text{ resp. } U_E = -2V)$

$V_R = \dots\dots\dots$

$T_i = \dots\dots\dots \text{ms}$

$T_n = \dots\dots\dots \text{ms}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดเบงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. คำนวณค่า Proportional Gain ( $V_R$ ), Intergration Time และ Reset Time โดยพิจารณาจากการจัดวงจร

$$V_R = \frac{R_5}{R_4}$$

$$V_R = \dots\dots\dots$$

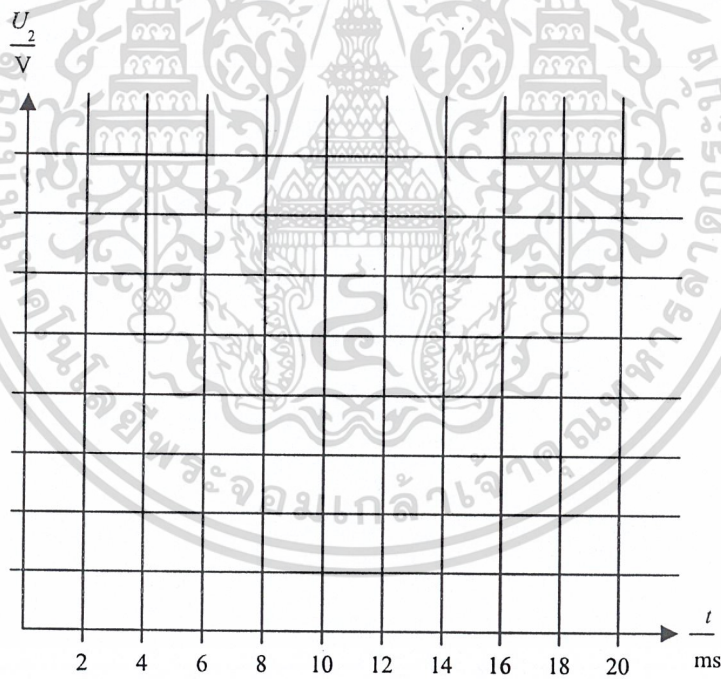
$$T_i = R_4 \times C$$

$$= \dots\dots\dots \text{ms}$$

$$T_n = R_5 \times C$$

$$= \dots\dots\dots \text{ms}$$

11. เปลี่ยน  $R_4 = 20k$  เป็น  $10k$  ทำการทดลองซ้ำ



จากออสซิลโลสโคป  $V_R = \dots\dots\dots$

$T_i = \dots\dots\dots \text{ms}$

$T_n = \dots\dots\dots \text{ms}$

จากการคำนวณ  $V_R = \dots\dots\dots$

$T_i = \dots\dots\dots \text{ms}$

$T_n = \dots\dots\dots \text{ms}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

คำถามท้ายการทดลอง

1. การเปลี่ยนค่ารีซีสเตอร์อินพุตของวงจร I-Controller มีผลอย่างไร

.....

.....

.....

.....

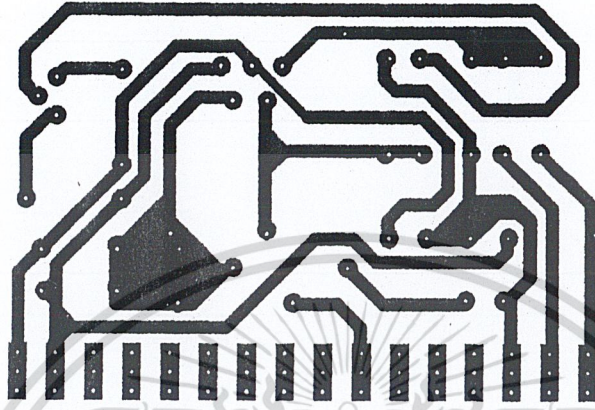


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

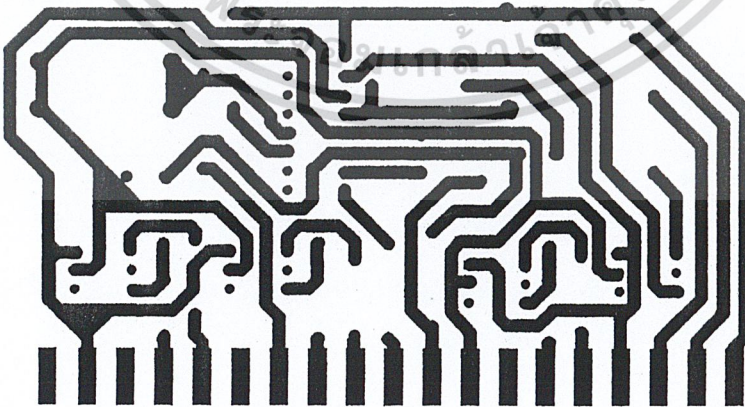


ภาคผนวก ข  
วงจรและลายวงจรพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

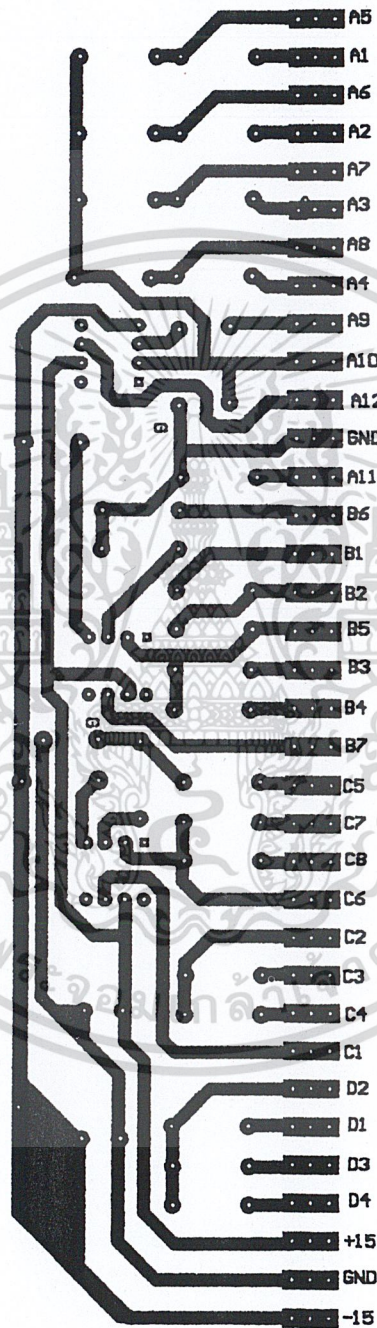


รูปที่ ข.1 ลายวงจรพิมพ์ของวงจร DC Amplifier

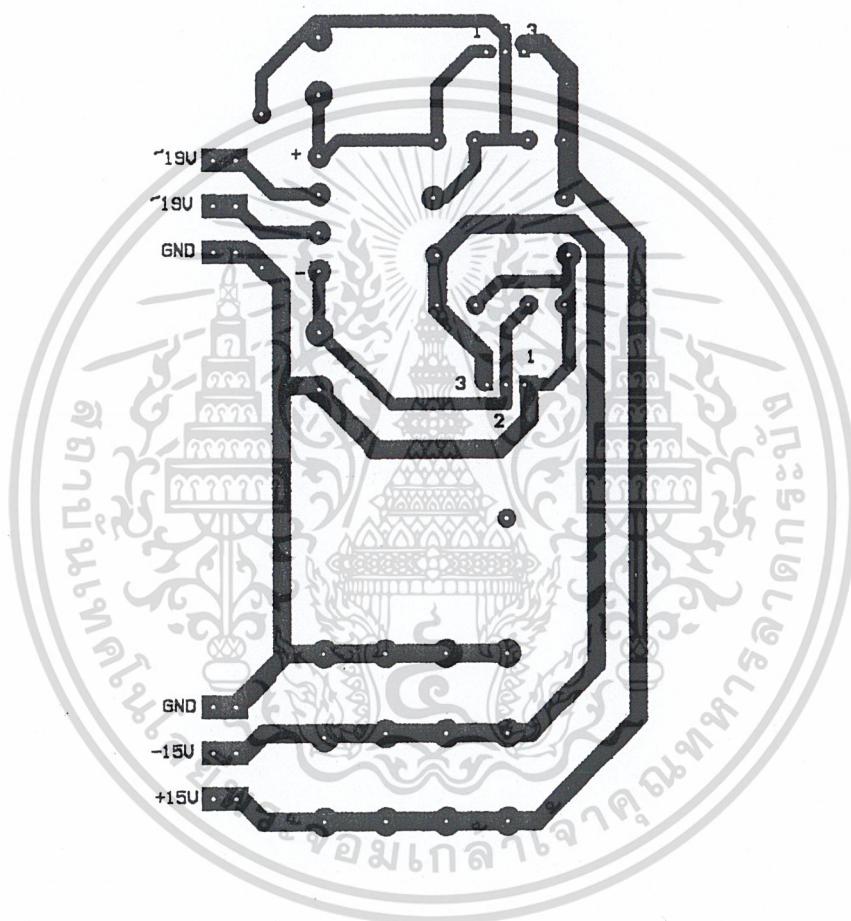


รูปที่ ข.2 ลายวงจรพิมพ์ของวงจร Trigger Pulse

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดาวน์โหลดฟรีบนโลกออนไลน์และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

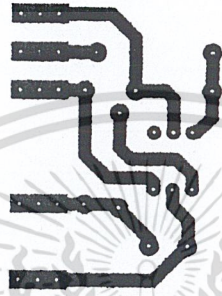


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ ข.3** ลายวงจรพิมพ์ของวงจร Triac  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

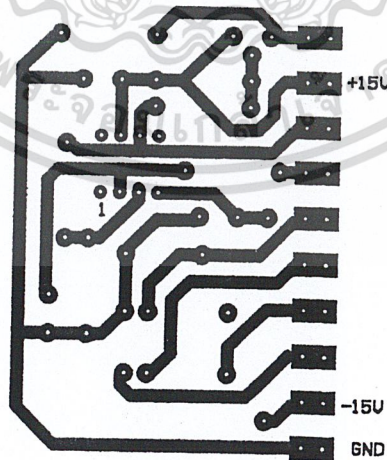


รูปที่ ข.4 ลายวงจรพิมพ์ของวงจร Power Supply

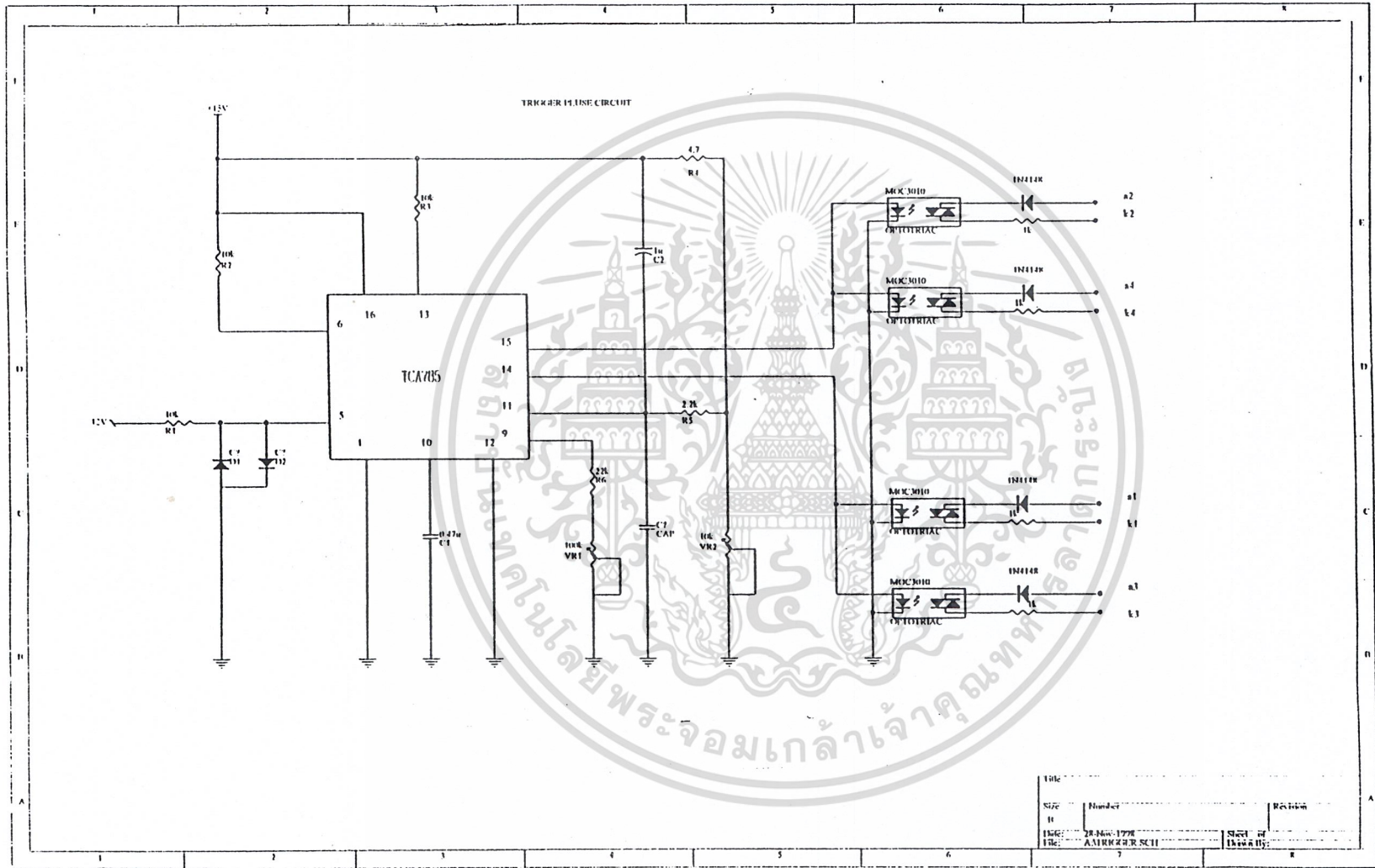
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.5 ลายวงจรพิมพ์ของวงจร Opto Diode

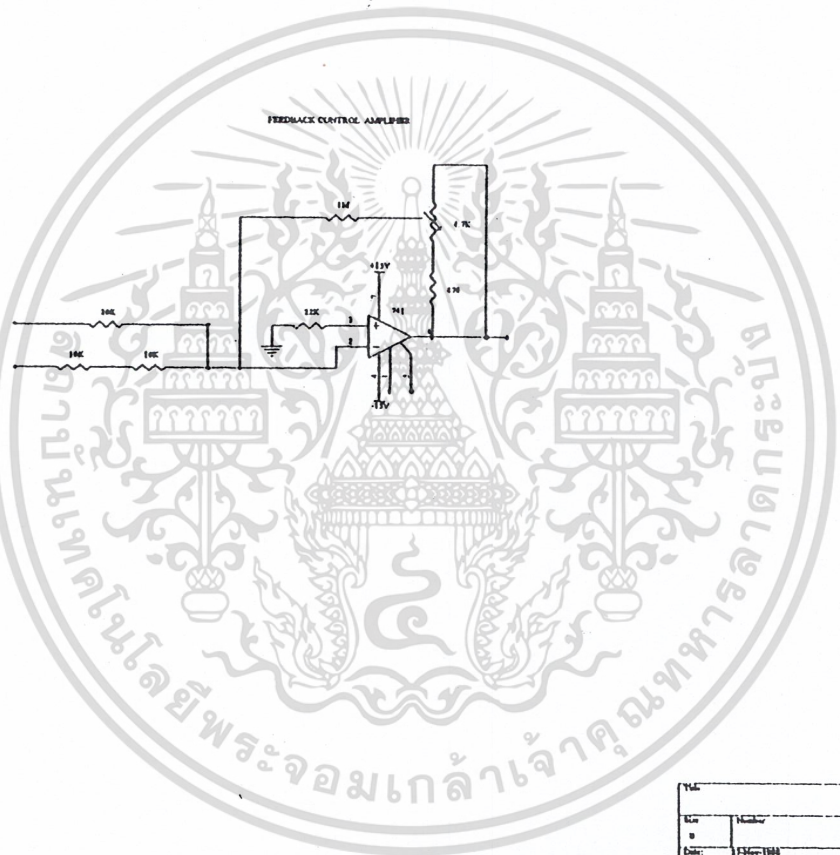


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีก **รูปที่ ข.6** ลายวงจรพิมพ์ของวงจร Phase Generator เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

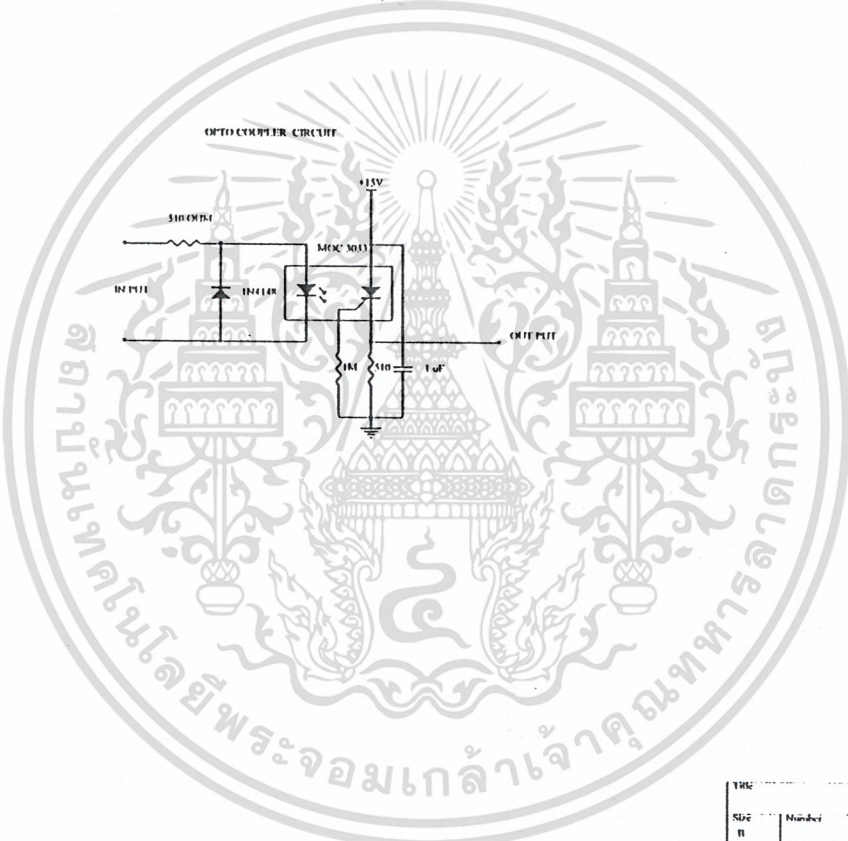


Title		
Rev	Number	Revision
1		
Desg	Drawn	Checked
178	ANIRAKHAR SUTTI	18/04/05

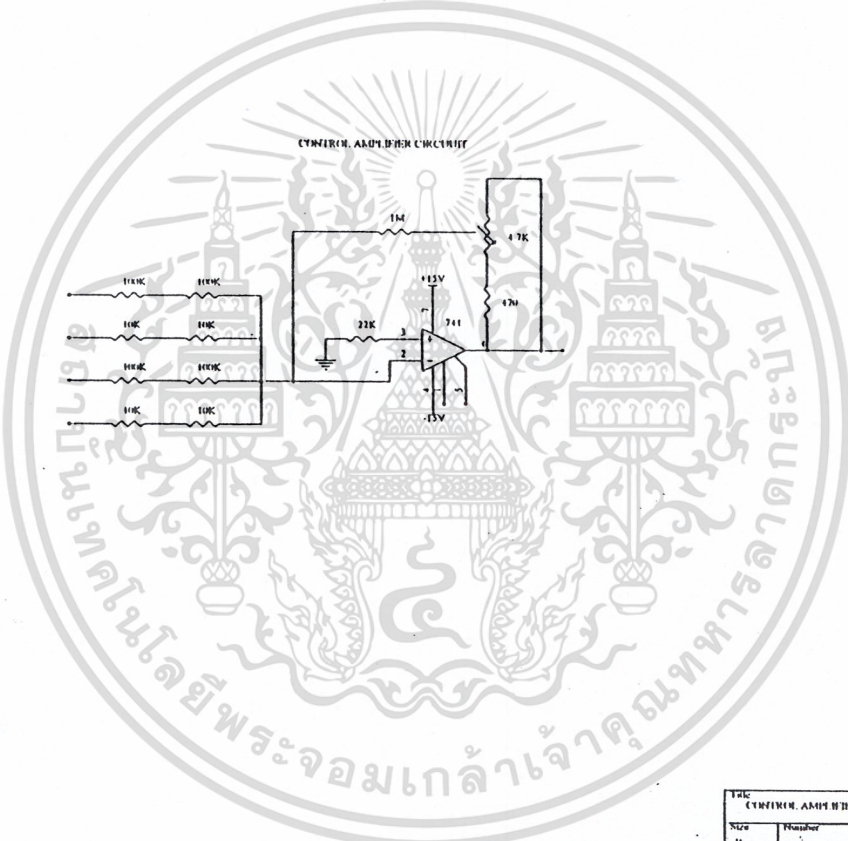




Title		
No.	Name	Grade
Date	13/11/1994	Year 2
Eng.	DR. WICHITWONGSUK	Dr. W. C.



DATE	Number	Revision
17 Nov 1998		
BY: A.M. THUSIT	Sheet of	Thussit



Title CENTER AMPLIFIER		
Size H	Number	Revision
Date: 18-06-1998	Drawn By: A.MOHAMMAD	Sheet of 1 Drawn By: ENGINEER 19



ภาคผนวก ค  
รายการอุปกรณ์และคุณสมบัติของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# μA741

## FREQUENCY-COMPENSATED OPERATIONAL AMPLIFIER

### FAIRCHILD LINEAR INTEGRATED CIRCUIT

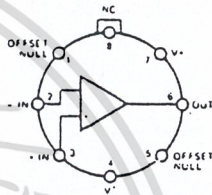
**GENERAL DESCRIPTION** — The μA741 is a high performance monolithic Operational Amplifier constructed using the Fairchild Planar\* epitaxial process. It is intended for a wide range of analog applications. High common mode voltage range and absence of latch-up tendencies make the μA741 ideal for use as a voltage follower. The high gain and wide range of operating voltage provides superior performance in integrator, summing amplifier, and general feedback applications. Electrical characteristics of the μA741A and E are identical to MIL-M-38510/10101.

- NO FREQUENCY COMPENSATION REQUIRED
- SHORT CIRCUIT PROTECTION
- OFFSET VOLTAGE NULL CAPABILITY
- LARGE COMMON MODE AND DIFFERENTIAL VOLTAGE RANGES
- LOW POWER CONSUMPTION
- NO LATCH-UP

**ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS**

Supply Voltage		
μA741A, μA741, μA741E		: 22 V
μA741C		: 18 V
Internal Power Dissipation (Note 1)		
Metal Can	500 mW	
Molded and Hermetic DIP	670 mW	
Mini DIP	310 mW	
Flatpak	570 mW	
Differential Input Voltage		: 30 V
Input Voltage (Note 2)		: 15 V
Storage Temperature Range		
Metal Can, Hermetic DIP, and Flatpak	-65°C to +150°C	
Mini DIP, Molded DIP	-55°C to +125°C	
Operating Temperature Range		
Military (μA741A, μA741)	-55°C to +125°C	
Commercial (μA741E, μA741C)	0°C to +70°C	
Lead Temperature (Soldering)		
Metal Can, Hermetic DIPs, and Flatpak (60 s)	300°C	
Molded DIPs (10 s)	260°C	
Output Short Circuit Duration (Note 3)		Indefinite

**CONNECTION DIAGRAMS**  
**B-LEAD METAL CAN (TOP VIEW)**  
**PACKAGE OUTLINE 5B**

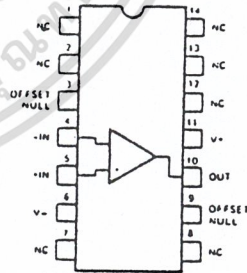


Note: Pin 4 connected to case

**ORDER INFORMATION**

TYPE	PART NO.
μA741A	μA741AHM
μA741	μA741HM
μA741E	μA741EHC
μA741C	μA741HC

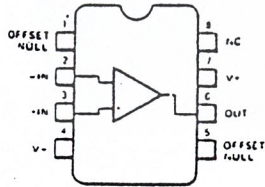
**14-LEAD DIP (TOP VIEW)**  
**PACKAGE OUTLINE 6A, 9A**



**ORDER INFORMATION**

TYPE	PART NO.
μA741A	μA741ADM
μA741	μA741DM
μA741E	μA741EDC
μA741C	μA741DC
μA741C	μA741PC

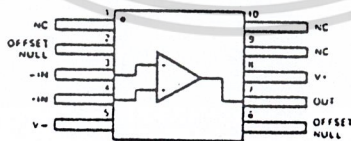
**B-LEAD MINIDIP (TOP VIEW)**  
**PACKAGE OUTLINES 6T 9T**  
**PACKAGE CODES T R**



**ORDER INFORMATION**

TYPE	PART NO.
μA741C	μA741TC
μA741C	μA741RC

**10-LEAD FLATPAK (TOP VIEW)**  
**PACKAGE OUTLINE 3F**



**ORDER INFORMATION**

TYPE	PART NO.
μA741A	μA741AFM
μA741	μA741FM

Notes on following pages.

\*Planar is a patented Fairchild process.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FAIRCHILD LINEAR INTEGRATED CIRCUITS •  $\mu A741$ 

$\mu A741A$						
ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $V_S = \pm 15V$ , $T_A = 25^\circ C$ unless otherwise specified)						
PARAMETERS (see definitions)	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	
Input Offset Voltage	$R_S < 50\Omega$		0.8	3.0	mV	
Average Input Offset Voltage Drift				15	$\mu V/^\circ C$	
Input Offset Current			3.0	30	nA	
Average Input Offset Current Drift				0.5	$nA/^\circ C$	
Input Bias Current			30	80	nA	
Power Supply Rejection Ratio	$V_S = +10, -20; V_S = +20, -10V, R_S = 50\Omega$		15	50	$\mu V/V$	
Output Short Circuit Current		10	25	35	mA	
Power Dissipation	$V_S = \pm 20V$		80	150	mW	
Input Impedance	$V_S = \pm 20V$	1.0	6.0		M $\Omega$	
Large Signal Voltage Gain	$V_S = \pm 20V, R_L = 2k\Omega, V_{OUT} = \pm 15V$	50			V/mV	
Transient Response	Rise Time		0.25	0.8	$\mu s$	
	Overshoot		6.0	20	%	
Bandwidth (Note 4)		437	1.5		MHz	
Slew Rate (Unity Gain)	$V_{IN} = \pm 10V$	0.3	0.7		V/ $\mu s$	
The following specifications apply for $-55^\circ C < T_A < +125^\circ C$						
Input Offset Voltage				4.0	mV	
Input Offset Current				70	nA	
Input Bias Current				210	nA	
Common Mode Rejection Ratio	$V_S = \pm 20V, V_{IN} = \pm 15V, R_S = 50\Omega$	80	95		dB	
Adjustment For Input Offset Voltage	$V_S = \pm 20V$	10			mV	
Output Short Circuit Current		10		40	mA	
Power Dissipation	$V_S = \pm 20V$	$-55^\circ C$		165	mW	
		$+125^\circ C$		135	mW	
Input Impedance	$V_S = \pm 20V$	0.5			M $\Omega$	
Output Voltage Swing	$V_S = \pm 20V, R_L = 10k\Omega$		$\pm 16$		V	
		$R_L = 2k\Omega$	$\pm 15$		V	
Large Signal Voltage Gain	$V_S = \pm 20V, R_L = 2k\Omega, V_{OUT} = \pm 15V$	32			V/mV	
	$V_S = \pm 5V, R_L = 2k\Omega, V_{OUT} = \pm 2V$	10			V/mV	

NOTES

- Rating applies to ambient temperatures up to 70°C. Above 70°C ambient, derate linearly at 6.3mW/°C for the metal can, 8.3mW/°C for the DIP and 7.1mW/°C for the Flatpak.
- For supply voltages less than  $\pm 15V$ , the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.
- Short circuit may be to ground or either supply. Rating applies to  $+125^\circ C$  case temperature or  $75^\circ C$  ambient temperature.
- Calculated value from:  $BW(MHz) = \frac{0.35}{\text{Rise Time } (\mu s)}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# SIEMENS

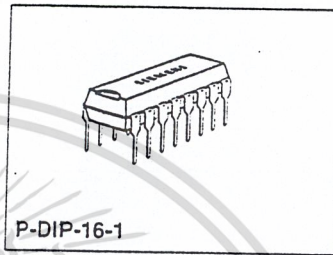
## Phase Control IC

TCA 785

Bipolar IC

### Features

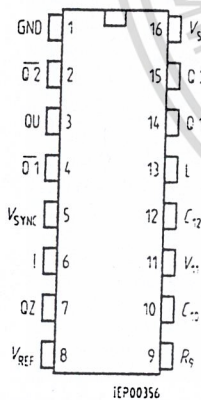
- Reliable recognition of zero passage
- Large application scope
- May be used as zero point switch
- LSL compatible
- Three-phase operation possible (3 ICs)
- Output current 250 mA
- Large ramp current range
- Wide temperature range



Type	Ordering Code	Package
TCA 785	Q67000-A2321	P-DIP-16-1

This phase control IC is intended to control thyristors, triacs, and transistors. The trigger pulses can be shifted within a phase angle between  $0^\circ$  and  $180^\circ$ . Typical applications include converter circuits, AC controllers and three-phase current controllers.

This IC replaces the previous types TCA 780 and TCA 780 D.



Pin Configuration  
(top view)

Semiconductor Group

### Pin Definitions and Functions

Pin	Symbol	Function
1	GND	Ground
2	Q2	Output 2 inverted
3	QU	Output U
4	Q1	Output 1 inverted
5	V <sub>SYNC</sub>	Synchronous voltage
6	I	Inhibit
7	QZ	Output Z
8	V <sub>REF</sub>	Stabilized voltage
9	R <sub>9</sub>	Ramp resistance
10	C <sub>10</sub>	Ramp capacitance
11	V <sub>11</sub>	Control voltage
12	C <sub>12</sub>	Pulse extension
13	L	Long pulse
14	Q 1	Output 1
15	Q 2	Output 2
16	V <sub>s</sub>	Supply voltage

09.94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Functional Description**

The synchronization signal is obtained via a high-ohmic resistance from the line voltage (voltage  $V_s$ ). A zero voltage detector evaluates the zero passages and transfers them to the synchronization register.

This synchronization register controls a ramp generator, the capacitor  $C_{10}$  of which is charged by a constant current (determined by  $R_9$ ). If the ramp voltage  $V_{10}$  exceeds the control voltage  $V_{11}$  (triggering angle  $\varphi$ ), a signal is processed to the logic. Dependent on the magnitude of the control voltage  $V_{11}$ , the triggering angle  $\varphi$  can be shifted within a phase angle of  $0^\circ$  to  $180^\circ$ .

For every half wave, a positive pulse of approx.  $30 \mu s$  duration appears at the outputs Q 1 and Q 2. The pulse duration can be prolonged up to  $180^\circ$  via a capacitor  $C_{12}$ . If pin 12 is connected to ground, pulses with a duration between  $\varphi$  and  $180^\circ$  will result.

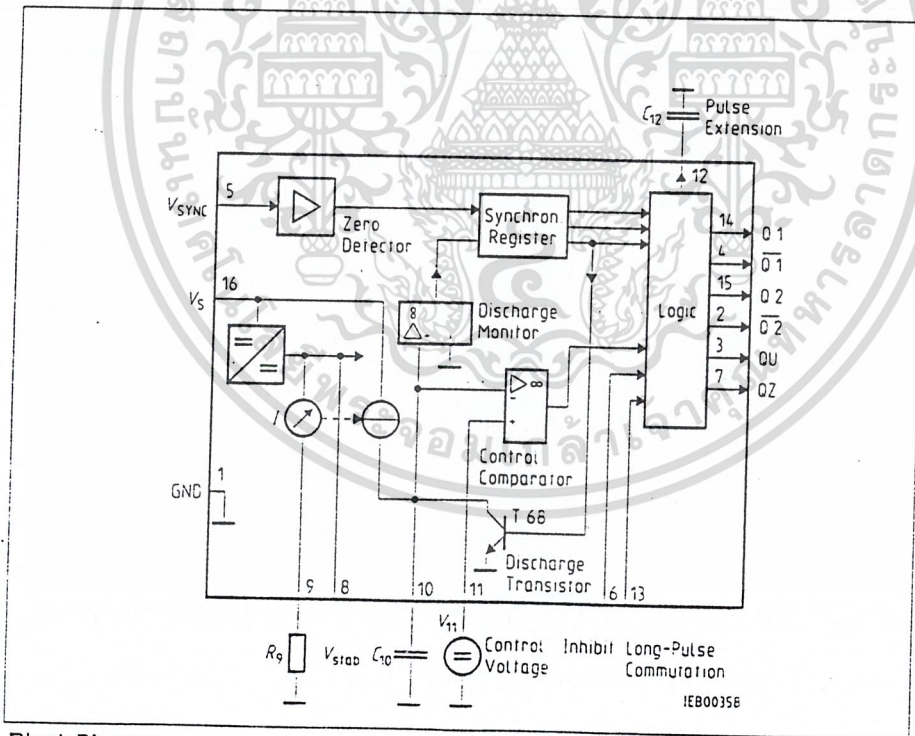
Outputs  $\overline{Q1}$  and  $\overline{Q2}$  supply the inverse signals of Q 1 and Q 2.

A signal of  $\varphi + 180^\circ$  which can be used for controlling an external logic, is available at pin 3.

A signal which corresponds to the NOR link of Q 1 and Q 2 is available at output Q Z (pin 7).

The inhibit input can be used to disable outputs Q1, Q2 and  $\overline{Q1}$ ,  $\overline{Q2}$ .

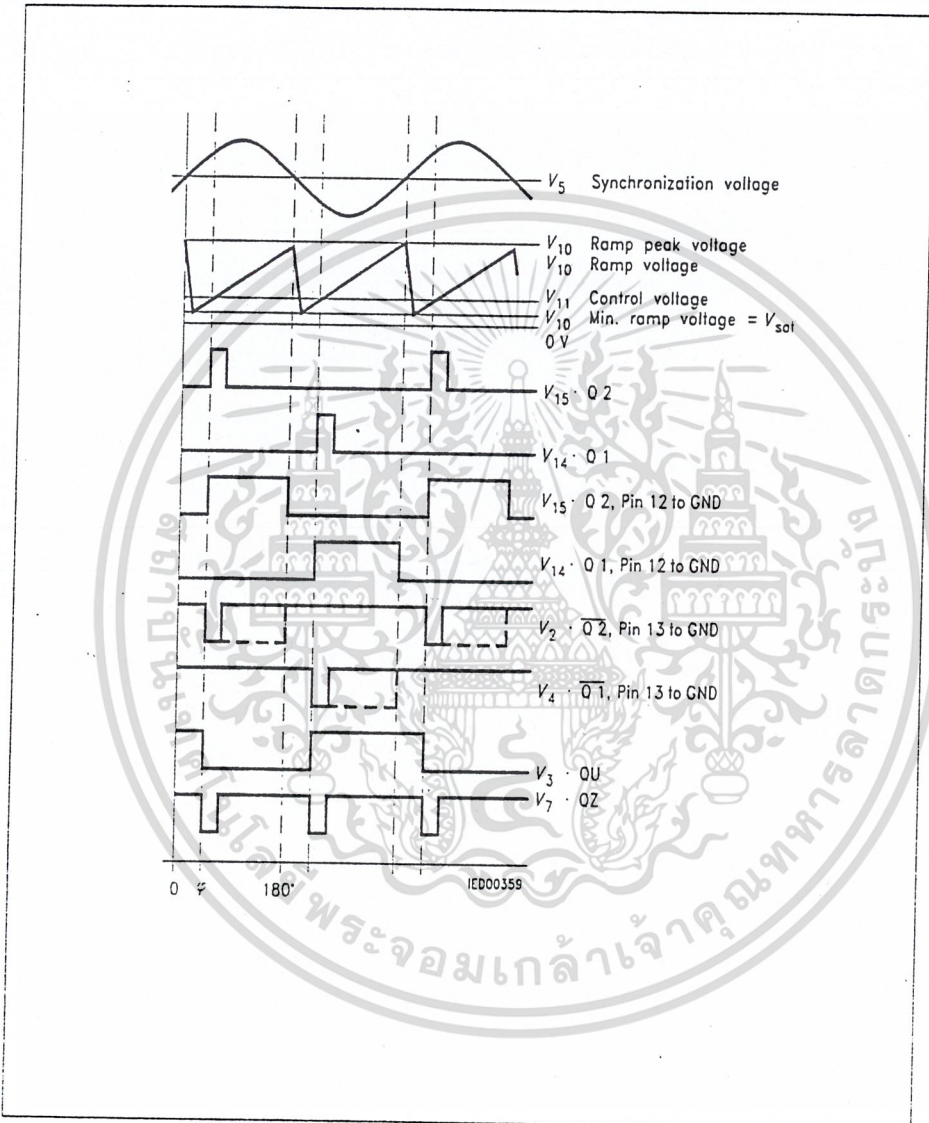
Pin 13 can be used to extend the outputs  $\overline{Q1}$  and  $\overline{Q2}$  to full pulse length ( $180^\circ - \varphi$ ).



Block Diagram

Semiconductor Group

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Pulse Diagram

Semiconductor Group

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SIEMENS

TCA 785

## Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Limit Values		Unit
		min.	max.	
Supply voltage	$V_S$	-0.5	18	V
Output current at pin 14, 15	$I_O$	-10	400	mA
Inhibit voltage	$V_6$	-0.5	$V_S$	V
Control voltage	$V_{11}$	-0.5	$V_S$	V
Voltage short-pulse circuit	$V_{13}$	-0.5	$V_S$	V
Synchronization input current	$V_5$	-200	$\pm 200$	$\mu A$
Output voltage at pin 14, 15	$V_O$		$V_S$	V
Output current at pin 2, 3, 4, 7	$I_O$		10	mA
Output voltage at pin 2, 3, 4, 7	$V_O$		$V_S$	V
Junction temperature	$T_J$		150	$^{\circ}C$
Storage temperature	$T_{stg}$	-55	125	$^{\circ}C$
Thermal resistance system - air	$R_{th SA}$		80	K/W

## Operating Range

Supply voltage	$V_S$	8	18	V
Operating frequency	$f$	10	500	Hz
Ambient temperature	$T_A$	-25	85	$^{\circ}C$

## Characteristics

 $8 \leq V_S \leq 18 \text{ V}; -25 \text{ }^{\circ}C \leq T_A \leq 85 \text{ }^{\circ}C; f = 50 \text{ Hz}$ 

Parameter	Symbol	Limit Values			Unit	Test Circuit
		min.	typ.	max.		
Supply current consumption S1 ... S6 open $V_{11} = 0 \text{ V}$ $C_{10} = 47 \text{ nF}; R_9 = 100 \text{ k}\Omega$	$I_S$	4.5	6.5	10	mA	1
Synchronization pin 5 Input current $R_2$ varied	$I_{5 ms}$	30		200	$\mu A$	1
Offset voltage	$\Delta V_S$		30	75	mV	4
Control input pin 11 Control voltage range Input resistance	$V_{11}$ $R_{11}$	0.2		$V_{10 peak}$ 15	V k $\Omega$	1 5

Semiconductor Group

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Characteristics (cont'd)

 $8 \leq V_s \leq 18 \text{ V}; -25 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_A \leq 85 \text{ }^\circ\text{C}; f = 50 \text{ Hz}$ 

Parameter	Symbol	Limit Values			Unit	Test Circuit
		min.	typ.	max.		
Ramp generator						
Charge current	$I_{10}$	10		1000	$\mu\text{A}$	
Max. ramp voltage	$V_{10}$			$V_2 - 2$	V	1
Saturation voltage at capacitor	$V_{10}$	100	225	350	mV	1.6
Ramp resistance	$R_9$	3		300	$\text{k}\Omega$	1
Sawtooth return time	$t_r$		80		$\mu\text{s}$	1
Inhibit pin 6 switch-over of pin 7						
Outputs disabled	$V_{6L}$		3.3	2.5	V	1
Outputs enabled	$V_{6H}$	4	3.3		V	1
Signal transition time	$t_r$	1		5	$\mu\text{s}$	1
Input current $V_6 = 8 \text{ V}$	$I_{6H}$		500	800	$\mu\text{A}$	1
Input current $V_6 = 1.7 \text{ V}$	$-I_{6L}$	80	150	200	$\mu\text{A}$	1
Deviation of $I_{10}$ $R_9 = \text{const.}$ $V_s = 12 \text{ V}; C_{10} = 47 \text{ nF}$	$I_{10}$	-5		5	%	1
Deviation of $I_{10}$ $R_9 = \text{const.}$ $V_s = 8 \text{ V to } 18 \text{ V}$	$I_{10}$	-20		20	%	1
Deviation of the ramp voltage between 2 following half-waves, $V_s = \text{const.}$	$\Delta V_{10 \text{ max}}$		$\pm 1$		%	
Long pulse switch-over pin 13 switch-over of S8						
Short pulse at output	$V_{13H}$	3.5	2.5		V	1
Long pulse at output	$V_{13L}$		2.5	2	V	1
Input current $V_{13} = 8 \text{ V}$	$I_{13H}$			10	$\mu\text{A}$	1
Input current $V_{13} = 1.7 \text{ V}$	$-I_{13L}$	45	65	100	$\mu\text{A}$	1
Outputs pin 2, 3, 4, 7						
Reverse current $V_0 = V_s$	$I_{CEO}$			10	$\mu\text{A}$	2.6
Saturation voltage $I_0 = 2 \text{ mA}$	$V_{sat}$	0.1	0.4	2	V	2.6

Semiconductor Group

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SIEMENS

TCA 785

## Characteristics (cont'd)

 $8 \leq V_s \leq 18 \text{ V}; -25 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_A \leq 85 \text{ }^\circ\text{C}; f = 50 \text{ Hz}$ 

Parameter	Symbol	Limit Values			Unit	Test Circuit
		min.	typ.	max.		
Outputs pin 14, 15 H-output voltage $- I_o = 250 \text{ mA}$	$V_{14/15-H}$	$V_s - 3$	$V_s - 2.5$	$V_s - 1.0$	V	3.6
L-output voltage $I_o = 2 \text{ mA}$	$V_{14/15-L}$	0.3	0.8	2	V	2.6
Pulse width (short pulse) S9 open	$t_p$	20	30	40	$\mu\text{s}$	1
Pulse width (short pulse) with $C_{12}$	$t_p$	530	620	760	$\mu\text{s}/\text{nF}$	1
Internal voltage control Reference voltage Parallel connection of 10 ICs possible	$V_{REF}$	2.8	3.1	3.4	V	1
TC of reference voltage	$\alpha_{REF}$		$2 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$	1/K	1

Semiconductor Group

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

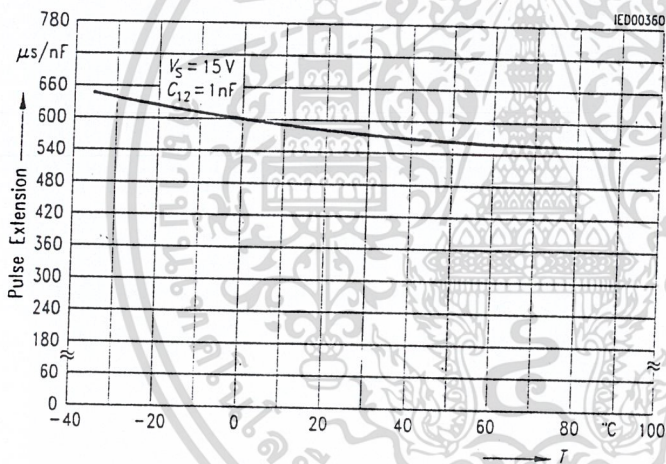
Application Hints for External Components

Ramp capacitance  $C_{10}$       min      max  
 500 pF      1  $\mu$ F<sup>1)</sup>      The minimum and maximum values of  $I_{10}$  are to be observed

Triggering point       $t_{Tr} = \frac{V_{11} \times R_9 \times C_{10}}{V_{REF} \times K}$       2)

Charge current       $I_{10} = \frac{V_{REF} \times K}{R_9}$       2)      Ramp voltage  
 $V_{10\max} = V_S - 2\text{ V}$        $V_{10} = \frac{V_{REF} \times K \times t}{R_9 \times C_{10}}$       2)

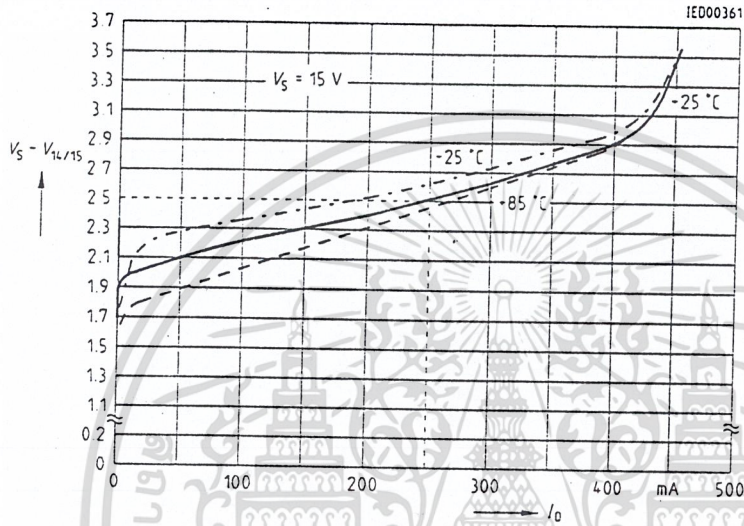
Pulse Extension versus Temperature



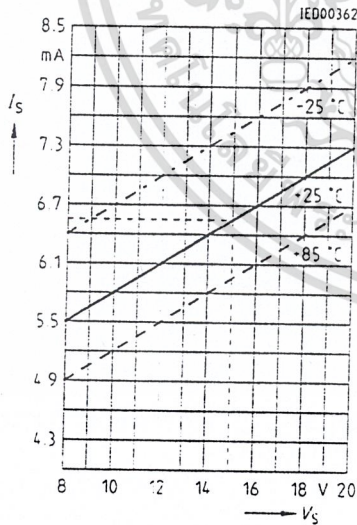
1) Attention to flyback times  
 2)  $K = 1.10 \pm 20\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Output Voltage measured to +  $V_S$

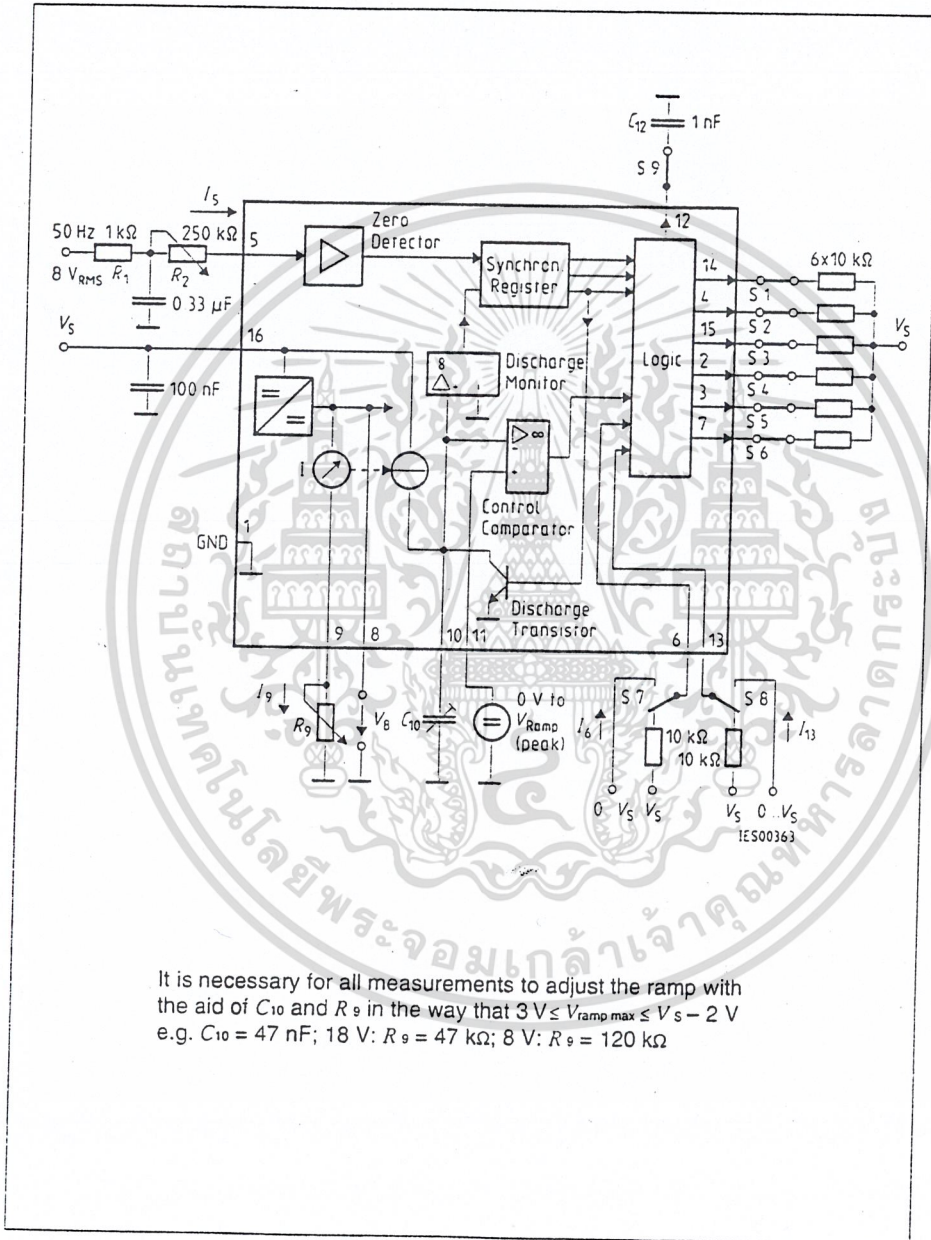


Supply Current versus Supply Voltage



Semiconductor Group

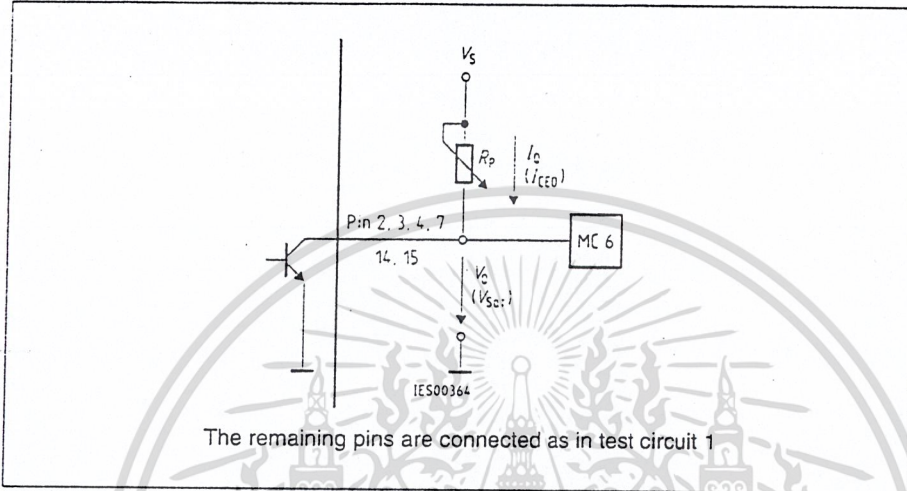
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



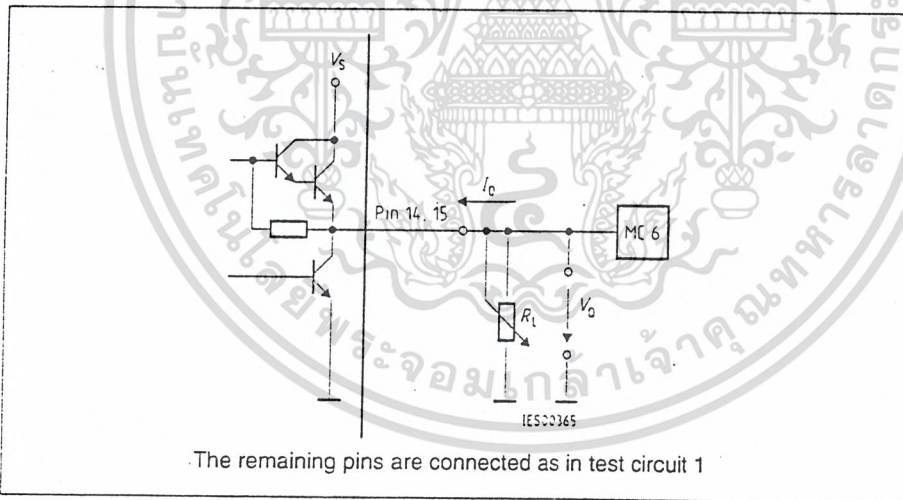
Test Circuit 1

Semiconductor Group

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



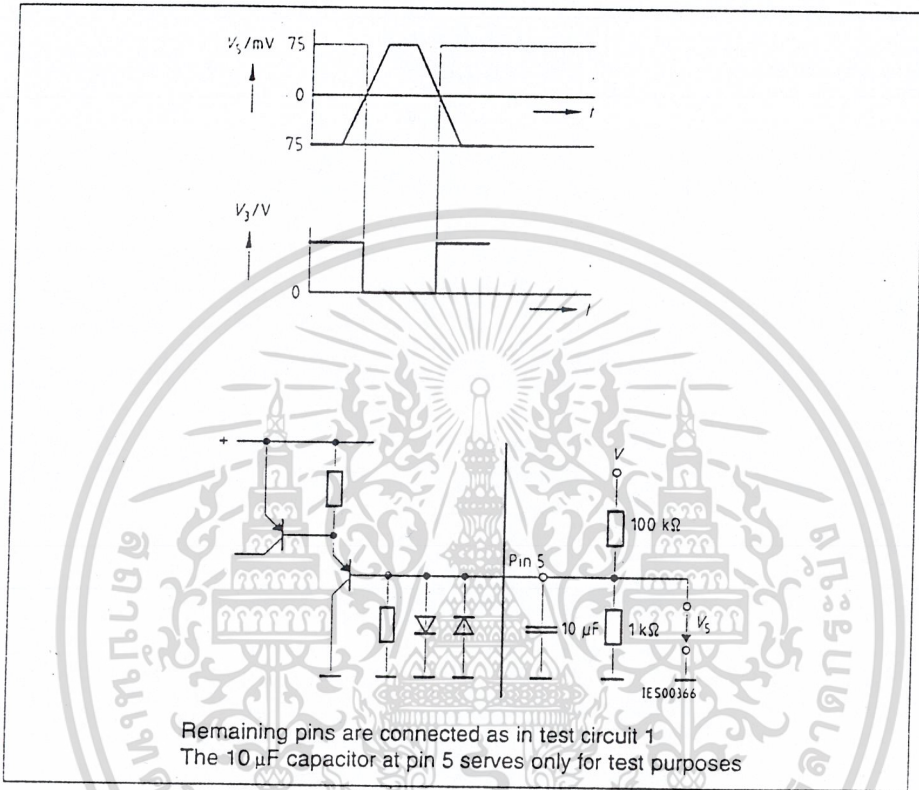
Test Circuit 2



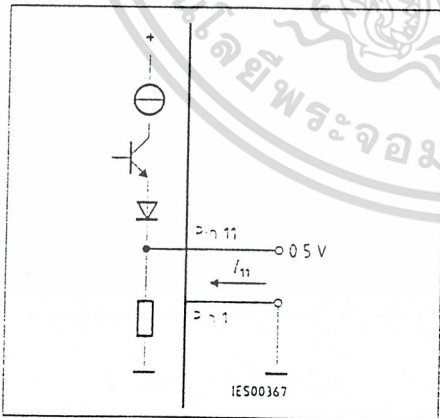
Test Circuit 3

Semiconductor Group

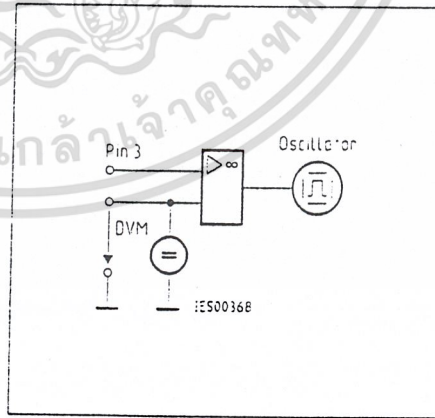
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Test Circuit 4



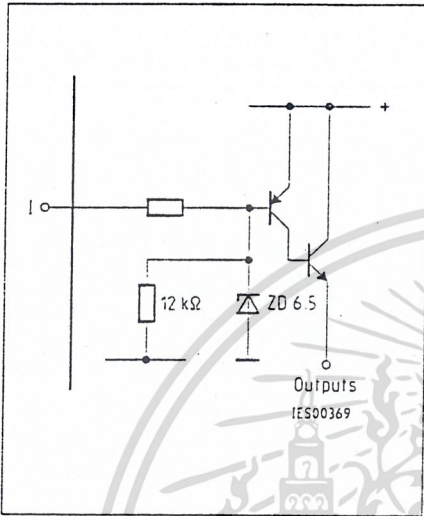
Test Circuit 5



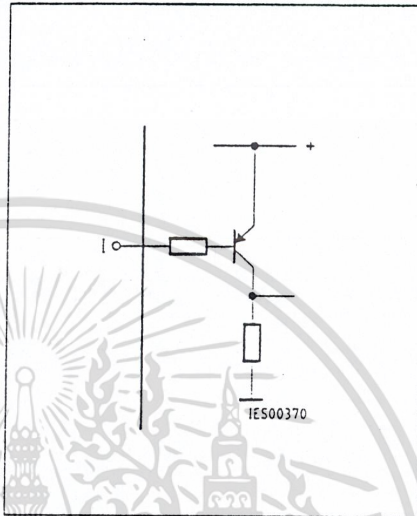
Test Circuit 6

Semiconductor Group

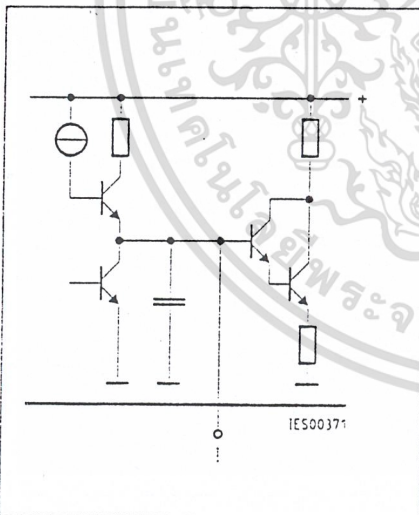
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



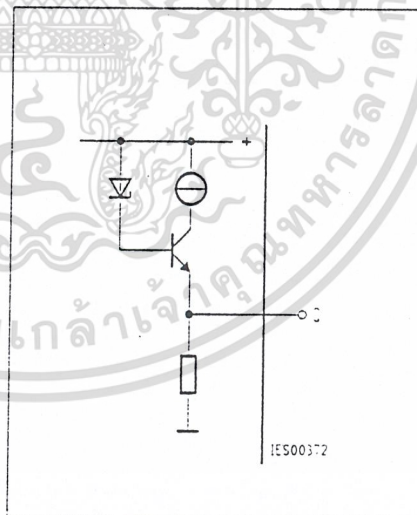
Inhibit 6



Long Pulse 13



Pulse Extension 12

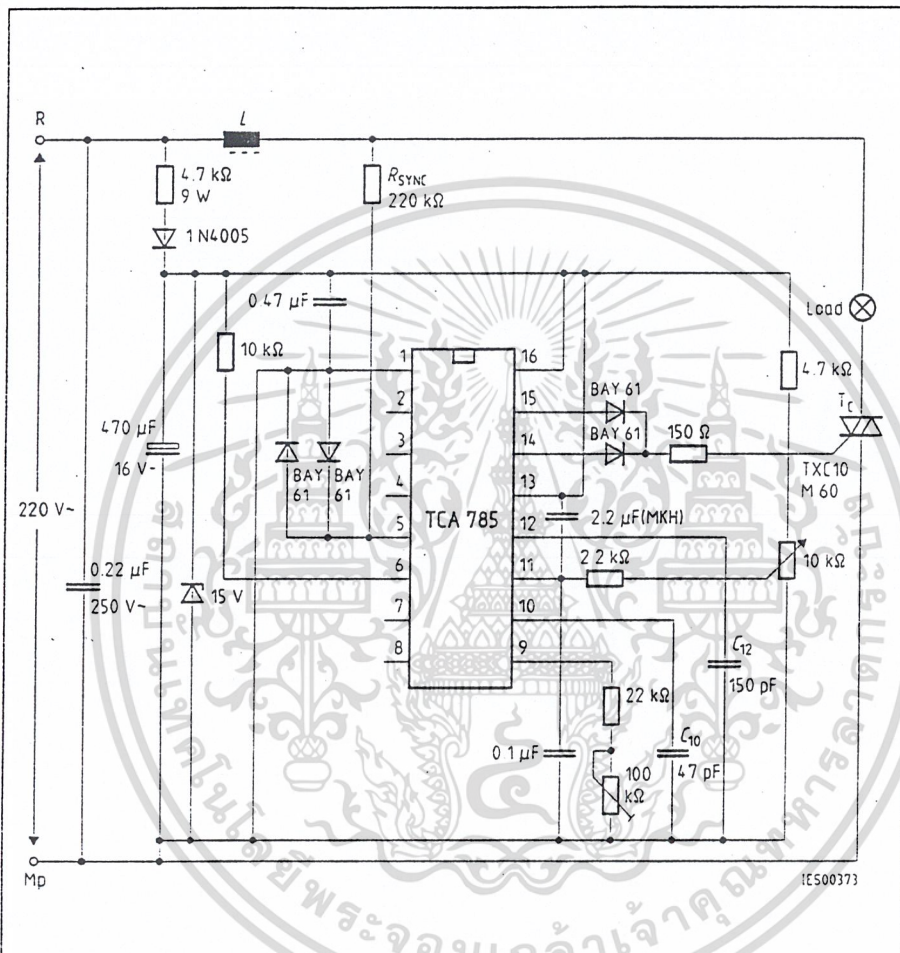


Reference Voltage 8

Semiconductor Group

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



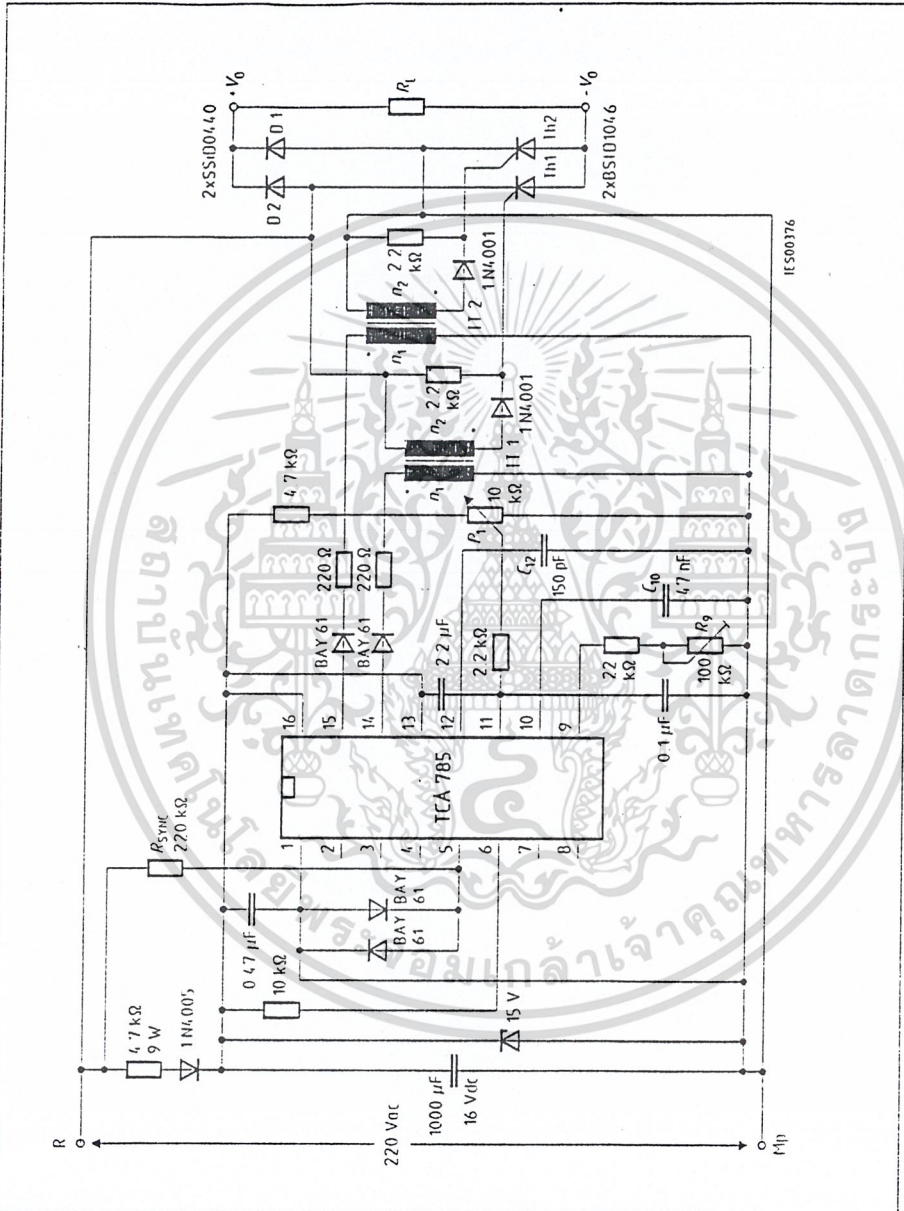


**Application Examples**  
**Triac Control for up to 50 mA Gate Trigger Current**

A phase control with a directly controlled triac is shown in the figure. The triggering angle of the triac can be adjusted continuously between 0° and 180° with the aid of an external potentiometer. During the positive half-wave of the line voltage, the triac receives a positive gate pulse from the IC output pin 15. During the negative half-wave, it also receives a positive trigger pulse from pin 14. The trigger pulse width is approx. 100 μs.

Semiconductor Group

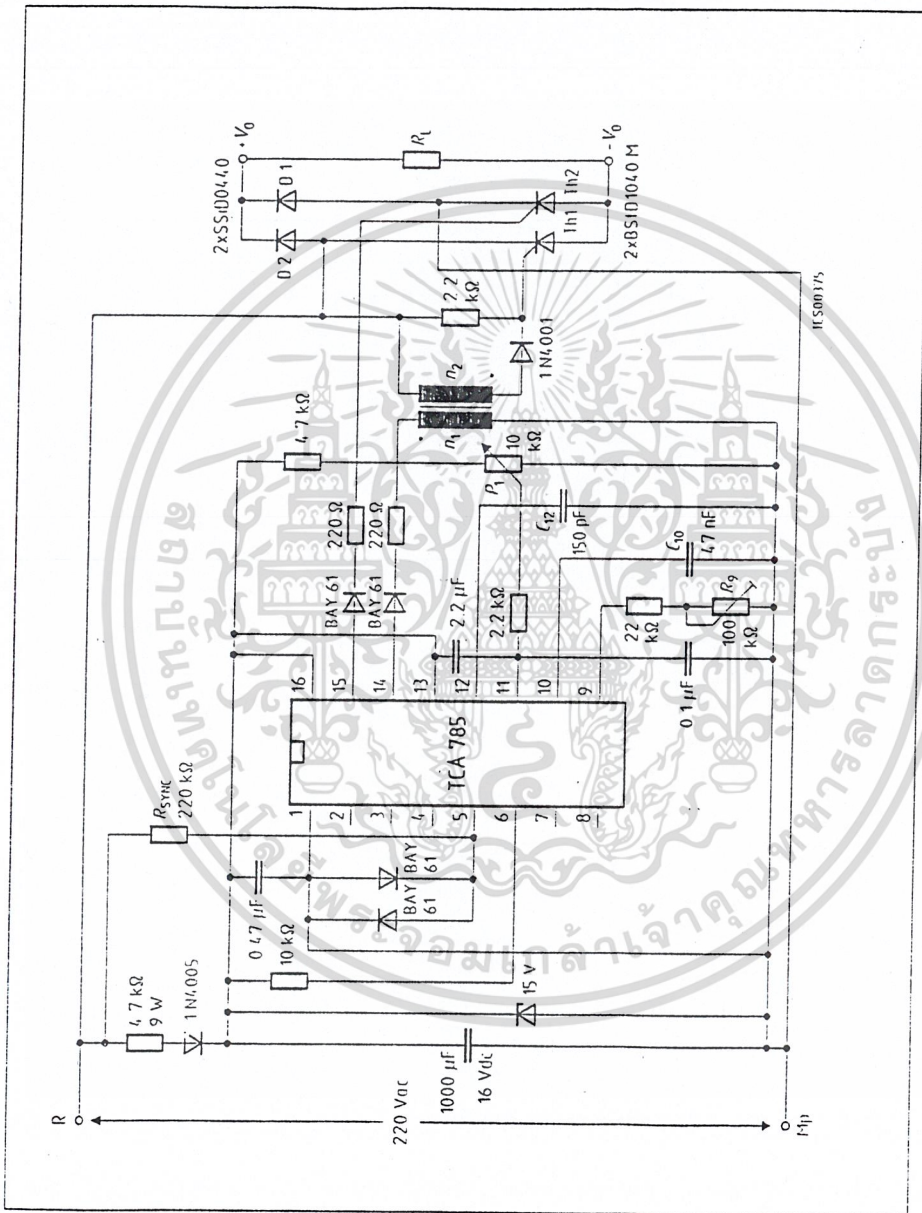
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Half-Controlled Single-Phase Bridge Circuit with Two Trigger Pulse Transformers for Low-Power Thyristors

Semiconductor Group

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Half-Controlled Single-Phase Bridge Circuit with Trigger Pulse Transformer and Direct Control for Low-Power Thyristors

Semiconductor Group

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

วิชัย สังข์จันทรานนท์. “ควบคุมเครื่องกลไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง 1”.

กรุงเทพ : บริษัท ส.เอเชียเพรส จำกัด, พิมพ์ครั้งที่ 5, 2537

อุดมศักดิ์ ยั่งยืน. “Power Electronics I”. กรุงเทพ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

วิทยาเขตธนบุรี, 2528



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้แต่ง



ชื่อผู้ทำปริญญาบัตร	นางสาวกาญจนา อุงศ์
วันเดือนปีเกิด	12 สิงหาคม 2517
สถานที่เกิด	จังหวัดลำพูน
ภูมิลำเนาเดิม	89 หมู่ 4 ต.ป่าซาง อ.ป่าซาง จ.ลำพูน 51120
ที่อยู่ปัจจุบัน	89 หมู่ 4 ต.ป่าซาง อ.ป่าซาง จ.ลำพูน 51120
โทรศัพท์	(053) 556551

## ประวัติการศึกษา

ประถมศึกษา	โรงเรียนบ้านนางขำน้อย
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนป่าซาง
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.)	วิทยาลัยเทคนิคลำพูน
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.)	วิทยาลัยเทคนิคลำพูน
ปริญญาตรี	สาขาวิชาเทคโนโลยีการวัดคุม ทางอุตสาหกรรม ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 กติกาฉบับนี้จัดทำขึ้นให้ดีที่สุด  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้แต่ง



ชื่อผู้ทำปริญญาบัตร	นายเกรียงศักดิ์ เลขตะระโก
วันเดือนปีเกิด	1 มิถุนายน 2516
สถานที่เกิด	จังหวัดเลย
ภูมิลำเนาเดิม	425 หมู่ 7 ต.ผาอินทร์แปลง กิ่งอำเภอเอราวัณ จ.เลย 42220
ที่อยู่ปัจจุบัน	425 หมู่ 7 ต.ผาอินทร์แปลง กิ่งอำเภอเอราวัณ จ.เลย 42220
โทรศัพท์	-

## ประวัติการศึกษา

ประถมศึกษา	โรงเรียนบ้านเอราวัณ
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนผาอินทร์แปลงวิทยา
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.)	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตขอนแก่น
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.)	วิทยาลัยเทคนิคเลย
ปริญญาตรี	สาขาวิชาเทคโนโลยีการวัดคุม ทางอุตสาหกรรม ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
กตัญญู

## ประวัติผู้แต่ง



ชื่อผู้ทำปฏิญานิพนธ์

นายวรพงษ์ เพชรสุวรรณ

วันเดือนปีเกิด

12 ธันวาคม 2518

สถานที่เกิด

จังหวัดชุมพร

ภูมิลำเนาเดิม

19 หมู่ 11 ต.แหลมทราย อ.หลังสวน

ที่อยู่ปัจจุบัน

จ.ชุมพร

3 หมู่ 1 เขตดินแดง แขวงดินแดง

โทรศัพท์

จ.กรุงเทพฯ 10400

(02) 2482527

## ประวัติการศึกษา

ประถมศึกษา

โรงเรียนสตรีจางค์

มัธยมศึกษาตอนต้น

โรงเรียนสุรศักดิ์มนตรี

ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.)

วิทยาลัยเทคนิควิทยา

ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.)

วิทยาลัยเทคนิคดอนเมือง

ปริญญาตรี

สาขาวิชาเทคโนโลยีการวัดคุม

ทางอุตสาหกรรม

ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 คติพจน์  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้แต่ง



ชื่อผู้ทำปฏิญานิพนธ์

นายสยาม พึ่งเกิด

วันเดือนปีเกิด

5 พฤศจิกายน 2519

สถานที่เกิด

จังหวัดจันทบุรี

ภูมิลำเนาเดิม

4 หมู่ 6 ต.ชากไทย กิ่งอ.เขาคิชฌกูฏ  
จ.จันทบุรี

ที่อยู่ปัจจุบัน

4 หมู่ 6 ต.ชากไทย กิ่งอ.เขาคิชฌกูฏ  
จ.จันทบุรี

โทรศัพท์

## ประวัติการศึกษา

ประถมศึกษา

โรงเรียนบ้านคลองน้ำเป็น

มัธยมศึกษาตอนต้น

โรงเรียนพลวงวิทยาคม

ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.)

วิทยาลัยเทคนิคจันทบุรี

ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.)

วิทยาลัยเทคนิคจันทบุรี

ปริญญาตรี

สาขาวิชาเทคโนโลยีการวัดคุม

ทางอุตสาหกรรม

ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 คติพจน์ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้