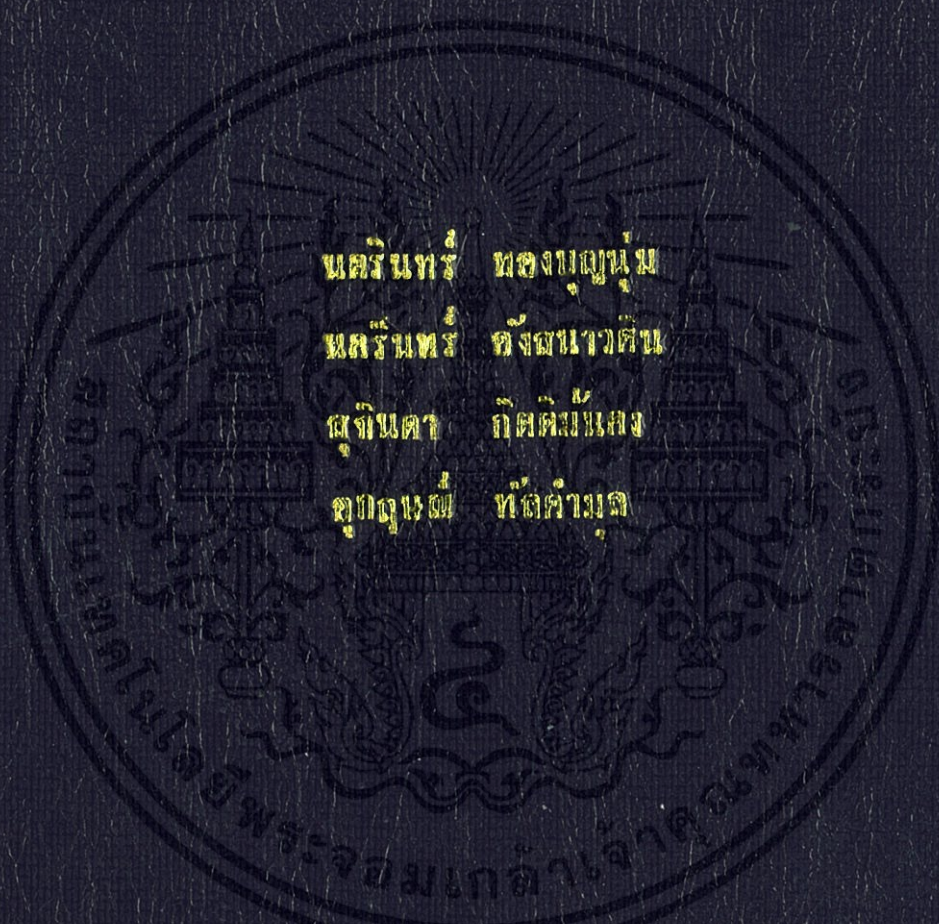


เครื่องกำเนิดแรงดันอัดประจุกระแสตรง
A DC HIGH VOLTAGE CHARGING SYSTEM



นครินทร์ ทองบุญนุ้ม
นครินทร์ อังฉนวนวดีน
สุจินดา กิตติเมธี
อุกฤษณ์ ทัดคำมด

ปริญญาโท ๕๕๓ เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิตวิชา

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

เครื่องกำเนิดแรงดันอัดประจุกระแสตรง
A DC HIGH VOLTAGE CHARGING SYSTEM



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A DC HIGH VOLTAGE CHARGING SYSTEM



NACKARIN THONGBUNNUM
NAKARIN ANGSANAWASIN
SUCHINDA KITTIMANKHONG
AUGIT THANKHAMMUN

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

2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2556

เครื่องกำเนิดแรงดันอัดประจุกระแสตรง
A DC HIGH VOLTAGE CHARGING SYSTEM



ผศ.ดร. พีรวุฒิ ยุทธโกวิท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

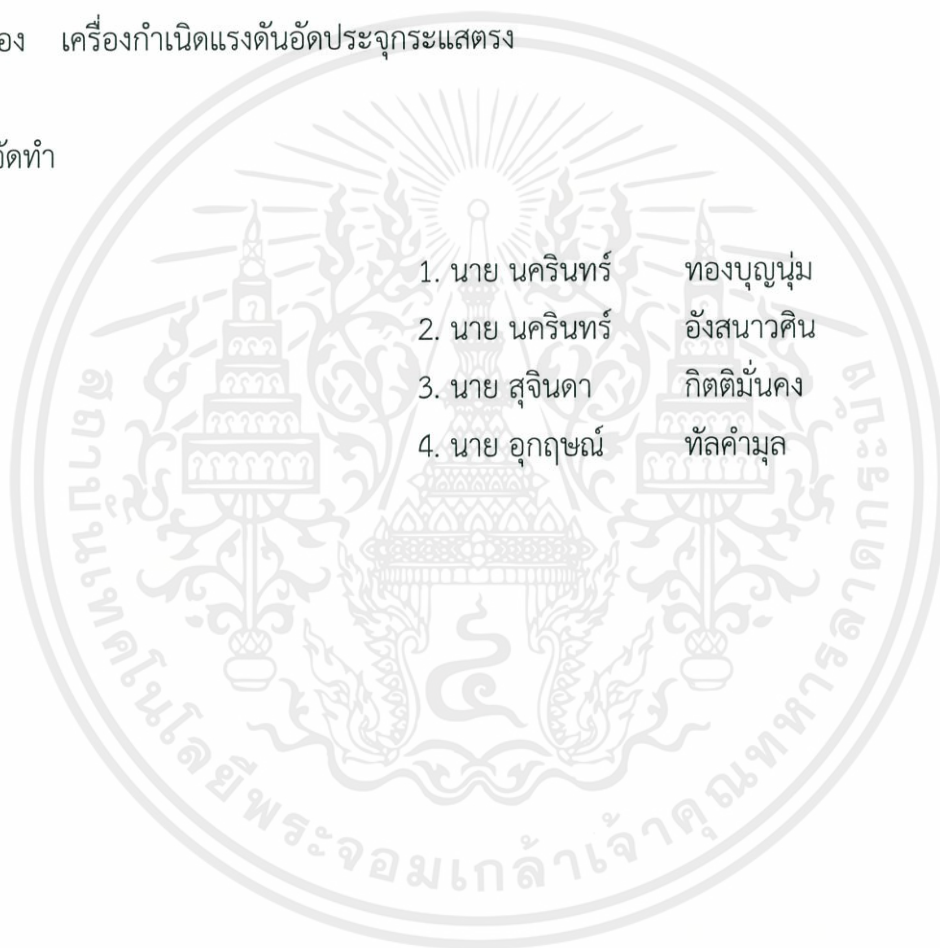
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องกำเนิดแรงดันอัดประจุกระแสตรง

ผู้จัดทำ

1. นาย นครินทร์ ทองบุญนุ่ม
2. นาย นครินทร์ อังสนาวศิน
3. นาย สุจินดา กิตติมันคง
4. นาย อุกฤษณ์ ทัลคำมูล




..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องกำเนิดแรงดันอัดประจุกระแสตรง

นาย นครินทร์ ทองบุญน่ม

นาย นครินทร์ อังสนาวคิน

นาย สุจินดา กิตติมันคง

นาย อุกฤษณ์ ทัลคำมูล

ผศ.ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมแรงดันกระแสตรงอัดประจุเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ขนาด 5 kVA โดยใช้หลักการตัดรูปคลื่นแรงดันกระแสสลับด้วยไทรสเตอร์เพื่อควบคุมแรงดันกระแสสลับค่ายอด ซึ่งการทำงานของไทรสเตอร์นั้นต้องอาศัยสัญญาณกระแสขาเกิดไทรสเตอร์ การสร้างสัญญาณนี้ใช้วงจรรวม TCA 785 เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ควบคุมมุมจุดชนวน และ NE555 สร้างสัญญาณพัลส์ความถี่สูง แล้วนำสัญญาณสองสัญญาณนี้มารวมกันโดยใช้แอนเกต จะได้สัญญาณกระแสขาเกิดในลักษณะของพัลส์เทรน จากการทดสอบชุดควบคุมแรงดันอัดประจุเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้น พบว่าสามารถควบคุมระดับแรงดันด้วยความแม่นยำ ± 1 kV และสามารถควบคุมแรงดันอัดประจุได้ตั้งแต่ 2 kV ถึง 120 kV จากความสำเร็จในการสร้างชุดควบคุมนี้เป็นการเพิ่มศักยภาพการทดสอบของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A DC High Voltage Charging System

Mr.Nackarin Thongbunnum
Mr.Nakaran Angsanawasin
Mr.Suchinda Kittimankhong
Mr.Augit Thankhammun
Asst.Prof.Dr.Peerawut Yutthakowit Supervisor
Year 2013

ABSTRACT

This senior project presents the design and construction of the 5 kVA DC charging unit for an impulse voltage generator. The charging unit uses thyristors for chopping AC voltage to control AC voltage peak. The TCA785 integrated circuit generates a square wave corresponding to the control phase angle. The NE555 integrated circuit generates a high frequency pulse train signals. Driving gate signal for controlling operation of thyristors is obtained from the signals of TCA785 and NE555 integrated circuits through the AND gate. The experiment shows that the charging unit is capable to control high voltage level with accuracy of ± 1 kV. The charging unit is able to control charging voltage in the range of 2 kV to 120 kV. From this accomplishment, it increases the testing performance of KMITL high voltage laboratory.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

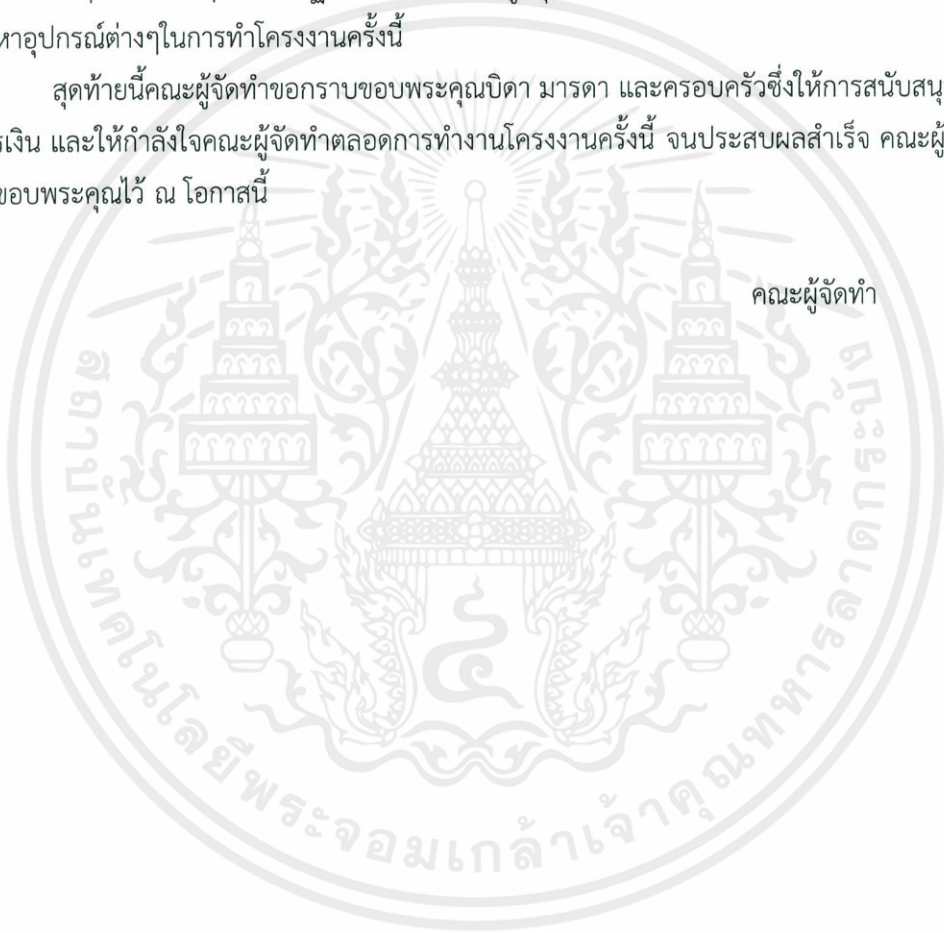
กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจาก ผศ.ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ที่ได้ให้แนวทางการศึกษา การแก้ปัญหาและการแก้ไขข้อบกพร่องของปริญญาานิพนธ์ อีกทั้งคุณปยุณวีร์ ฉายศิริ ที่ช่วยตรวจสอบและกรุณาแก้ไขปริญญาานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณพลวัฒน์ ศุภมาศ ที่ให้คำแนะนำในการออกแบบวงจรและเลือกใช้อุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนพี่ๆและเพื่อนๆในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกท่าน ที่เป็นกำลังใจและช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆในการทำโครงงานครั้งนี้

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงิน และให้กำลังใจคณะผู้จัดทำตลอดการทำงานโครงงานครั้งนี้ จนประสบผลสำเร็จ คณะผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	VI
สารบัญรูป	XI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	1
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงการ	2
1.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 การสร้างแรงดันสูงกระแสตรง	4
2.2 หลักการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ	5
2.3 หลักการทำงานของไทรสเตอร์	9
2.3.1 โครงสร้างของไทรสเตอร์	9
2.3.2 กลไกการเริ่มนำไฟฟ้า	10
2.3.3 ลักษณะสมบัติของไทรสเตอร์	12
2.3.4 วิธีการทำให้ไทรสเตอร์เริ่มนำกระแสไฟฟ้า	15
2.3.5 วิธีทำให้ไทรสเตอร์หยุดนำกระแสไฟฟ้า	15
2.3.6 ลักษณะสมบัติของเกต	16
2.3.7 วงจรป้องกันไทรสเตอร์	18
2.4 การควบคุมการจุดชนวนเกตของไทรสเตอร์	19
2.5 วงจรสับเบอร์	20
2.6 วงจรสร้างสัญญาณพัลส์ความถี่สูง	26
2.6.1 โครงสร้างของไอซี 555	26
2.6.2 วงจรโมโนสเตเบิล	27
2.6.3 วงจรอะสเตเบิล	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 หลักการทำงาน AND GATE	34
2.7.1 ลอจิกเกตพื้นฐาน (BASIC LOGIC GATE)	34
2.7.2 การกระทำ AND	35
2.8 ทฤษฎีวงจรรักษาระดับแรงดัน (Voltage Regulator Circuits)	35
2.8.1 วงจรเรกกูเลเตอร์โดยใช้ไอซี 3 ขา แบบแรงดันเอาท์พุตคงที่	36
บทที่ 3 การออกแบบและประกอบสร้าง	38
3.1 การออกแบบและสร้างชุดควบคุมมูมเฟส	39
3.1.1 เซอร์กิตเบรกเกอร์	39
3.1.2 ตัวสัมผัสแบบแม่เหล็ก	39
3.1.3 ฟิวส์	39
3.1.4 ไทริสเตอร์	40
3.1.5 วงจรสับเบอร์	40
3.1.6 ดีแมกนิไตซ์อิมพีแดนซ์	41
3.2 การออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมไทริสเตอร์	42
3.2.1 การสร้างสัญญาณควบคุมจุดชนวนขาเกตของไทริสเตอร์	44
3.2.2 การสร้างสัญญาณพัลส์เทรนความถี่สูง	45
3.2.3 การรวมสัญญาณควบคุมจุดชนวนกับสัญญาณพัลส์เทรนความถี่สูง	45
3.2.4 การแยกโศดทางไฟฟ้าของสัญญาณกระแสชั้บเกิดกับวงจรกำลัง	46
บทที่ 4 การทดสอบและวิเคราะห์ผล	48
4.1 การทดสอบวงจรควบคุมแต่ละส่วน	48
4.1.1 การทดสอบวงจรสร้างสัญญาณควบคุมจุดชนวนไทริสเตอร์	48
4.1.2 การทดสอบวงจรควบคุมมูมเฟส	50
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	55
5.1 สรุปผลการดำเนินงานในโครงการ	55
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	55
เอกสารอ้างอิง	57
ภาคผนวก	58
ภาคผนวก ก. บทควมวิชาการ	59
ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบ	63
ภาคผนวก ค. วงจรควบคุมจุดชนวนของไทริสเตอร์	72
ประวัติผู้เขียน	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.35	36
รูปที่ 2.36	37
รูปที่ 3.1	38
รูปที่ 3.2	39
รูปที่ 3.3	40
รูปที่ 3.4	41
รูปที่ 3.5	41
รูปที่ 3.6	42
รูปที่ 3.7	42
รูปที่ 3.8	43
รูปที่ 3.9	43
รูปที่ 3.10	44
รูปที่ 3.11	45
รูปที่ 3.12	46
รูปที่ 3.13	46
รูปที่ 3.14	47
รูปที่ 3.15	47
รูปที่ 4.1	48
รูปที่ 4.2	49
รูปที่ 4.3	49
รูปที่ 4.4	50
รูปที่ 4.5	51
รูปที่ 4.6	53
รูปที่ 4.7	53
รูปที่ 4.8	54
รูปที่ ข.1	64
รูปที่ ข.2	64
รูปที่ ข.3	64
รูปที่ ข.4	65
รูปที่ ข.5	65
รูปที่ ข.6	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นมีตัวเก็บประจุรองกระแส	4
รูปที่ 2.2 วงจรเรียงกระแสแบบแรงดันสองเท่า	4
รูปที่ 2.3 วงจรควบคุมเฟสเดียวแบบเต็มรูปคลื่นสำหรับโหลดRL	6
รูปที่ 2.4 ค่า γ ของวงจรรูปที่ 2.3	7
รูปที่ 2.5 แสดงค่า I_N เทียบกับมุมจุดชนวน (α)	8
รูปที่ 2.6 แสดงค่า I_{RN} เทียบกับมุมจุดชนวน (α)	9
รูปที่ 2.7 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของไทรสเตอร์	10
รูปที่ 2.8 การแทนโครงสร้างของไทรสเตอร์ด้วยทรานซิสเตอร์ 2 ตัว	10
รูปที่ 2.9 ลักษณะสมบัติของไทรสเตอร์ในสภาพอยู่ตัว	12
รูปที่ 2.10 ลักษณะสมบัติของไทรสเตอร์ในช่วงเปลี่ยนสภาพ	13
รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะของเกตชนิดต่างๆ	14
รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะตัวเก็บประจุที่เกิดขึ้นตามรอยต่อของไทรสเตอร์	14
รูปที่ 2.13 ลักษณะของเกตไทรสเตอร์	16
รูปที่ 2.14 การปรับค่าของสัญญาณจุดชนวนต่ออุณหภูมิ	17
รูปที่ 2.15 ขนาดความกว้างต่ำสุดของสัญญาณจุดชนวนเกต	17
รูปที่ 2.16 วงจรป้องกันเล็รจสำหรับไทรสเตอร์	18
รูปที่ 2.17 โครงสร้างภายในของวงจรรวม TCA785	20
รูปที่ 2.18 คุณลักษณะคอนเวอร์เตอร์ที่มีโหลดตัวเหนี่ยวนำมีค่าสูง	21
รูปที่ 2.19 คุณลักษณะคอนเวอร์เตอร์ที่มีสแน็บเบอร์สำหรับตัวทรานซิสเตอร์กำลัง	22
รูปที่ 2.20 กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ทรานซิสเตอร์ วงจรสแน็บเบอร์และกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมต่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุสแน็บเบอร์	25
รูปที่ 2.21 ตัวถังของไอซี 555	26
รูปที่ 2.22 โครงสร้างภายในไอซี 555	27
รูปที่ 2.23 วงจรโมโนสเตเบิลที่ใช้ไอซี 555	27
รูปที่ 2.24 วงจรโมโนสเตเบิลที่ใช้ไอซี 555	27
รูปที่ 2.25 ผังเวลาการทำงานของวงจรโมโนสเตเบิลในรูปที่ 2.24	28
รูปที่ 2.26 ผังเวลาการทำงานของวงจรโมโนสเตเบิลกรณีรีทริก	29
รูปที่ 2.27 ผังเวลาการทำงานของวงจรโมโนสเตเบิลกรณีพัลส์อินพุตกว้างเกินไป	30
รูปที่ 2.28 วงจรโมโนสเตเบิลที่ใช้วงจรตรวจจับขอบขาลงของสัญญาณทริก	30
รูปที่ 2.29 ผังเวลาการทำงานของวงจรตรวจจับขอบขาลง	31
รูปที่ 2.30 วงจรอะสเตเบิลที่ใช้ไอซี 555	31
รูปที่ 2.31 วงจรอะสเตเบิลพร้อมแสดงโครงสร้างภายในไอซี 555	32
รูปที่ 2.32 ผังเวลาการทำงานของวงจรอะสเตเบิลในรูปที่ 2.31 ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า	33
รูปที่ 2.33 แสดงตารางความจริงและสัญลักษณ์ของ AND Gate	35
รูปที่ 2.34 บล็อกไดอะแกรมของแหล่งจ่ายไฟตรงคงค่าแรงดัน	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ ข.7 แรงดันปฐมภูมิ 65.6 v	66
รูปที่ ข.8 แรงดันปฐมภูมิ 70.0 v	66
รูปที่ ข.9 แรงดันปฐมภูมิ 80.0 v	66
รูปที่ ข.10 แรงดันปฐมภูมิ 86.0 v	67
รูปที่ ข.11 แรงดันปฐมภูมิ 94.0 v	67
รูปที่ ข.12 แรงดันปฐมภูมิ 102.0 v	67
รูปที่ ข.13 แรงดันปฐมภูมิ 110.0 v	68
รูปที่ ข.14 แรงดันปฐมภูมิ 118.0 v	68
รูปที่ ข.15 แรงดันปฐมภูมิ 124.0 v	68
รูปที่ ข.16 แรงดันปฐมภูมิ 130.0 v	69
รูปที่ ข.17 แรงดันปฐมภูมิ 138.0 v	69
รูปที่ ข.18 แรงดันปฐมภูมิ 144.0 v	69
รูปที่ ข.19 แรงดันปฐมภูมิ 152.0 v	70
รูปที่ ข.20 แรงดันปฐมภูมิ 158.0 v	70
รูปที่ ข.21 แรงดันปฐมภูมิ 168.0 v	70
รูปที่ ข.22 แรงดันปฐมภูมิ 172.0 v	71
รูปที่ ข.23 แรงดันปฐมภูมิ 188.0 v	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนการทำปริญญานิพนธ์	3
4.1 ผลการทดสอบวงจรควบคุมมมเฟส	52
ข.1 ผลการทดสอบ	63



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันการขึ้นแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงที่นิยมใช้กันมากคือ การใช้หม้อแปลงอัตโนมัติ (Auto transformer) หรือ หม้อแปลงปรับแรงดัน (Variac) ปรับขนาดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจาก 0-220 V ป้อนให้แก่หม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อปรับขนาดแรงดันให้สูงขึ้น ดังในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังใช้อยู่ในปัจจุบัน เทคโนโลยีของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมีการพัฒนาก้าวหน้าไปมาก กระทั่งสามารถใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สามารถรับกระแสได้สูง มาใช้เป็นสวิตช์ควบคุมได้ ดังนั้นเครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงที่ทำการออกแบบและสร้างขึ้นนั้น เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการควบคุมแรงดัน โดยนำไปใช้กับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งมักมีปัญหาในการควบคุมแรงดันการจุดชนวน ซึ่งไม่มีความแม่นยำในการควบคุมแรงดันจุดชนวนทำให้ได้แรงดันตามที่ต้องการเป็นไปได้อย่างยาก เป็นผลให้การจ่ายแรงดันให้กับวัตถุทดสอบมีความผิดพลาด โดยในบางครั้งวัตถุทดสอบอาจได้รับแรงดันมากกว่าหรือน้อยกว่าระดับแรงดันที่ต้องการ เพื่อให้การจ่ายแรงดันให้กับวัตถุทดสอบมีความแม่นยำมากขึ้น จึงใช้การปรับแรงดันควบคุมจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังประเภท ไทริสเตอร์ หรือ เอสซีอาร์ (Thyristor, Silicon Controlled Rectifier) ที่มีพิทกกระแสสูงทำหน้าที่ควบคุมขนาดของแรงดันไฟฟ้า โดยการควบคุมการนำกระแสของไทริสเตอร์ แทนการใช้การเปลี่ยนจำนวนรอบของขดลวด โดยการเปลี่ยนจุดต่อขดลวดของหม้อแปลงอัตโนมัติ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการขึ้นแรงดัน จึงทำการออกแบบและสร้างเครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุอัตโนมัติที่ควบคุมการทำงานด้วยการปรับแรงดันควบคุมจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1) เพื่อสร้างชุดควบคุมการขึ้นแรงดันของหม้อแปลงแรงสูงด้วยวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง
- 2) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการขึ้นแรงดันหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง
- 3) เพื่อลดความเสี่ยงอันตรายในการปฏิบัติงานของผู้ปฏิบัติงานจากการขึ้นแรงดันหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง
- 4) เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านเทคโนโลยีไฟฟ้าแรงสูง
- 5) เพื่อนำไปใช้งานและเป็นต้นแบบในการพัฒนาเครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

- 1) ออกแบบและสร้างเครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 5 kVA ควบคุมด้วยวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์กำลังโดยใช้ไทริสเตอร์
- 2) ทดสอบการทำงานเครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 5 kVA ควบคุมด้วยวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์กำลังโดยใช้ไทริสเตอร์

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการควบคุมมุมเฟสของ Thyristor
- 2) ศึกษาทฤษฎีที่ใช้สร้างชุดขับ Thyristor
- 3) ออกแบบสร้างวงจรควบคุมการขึ้นแรงดันหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง
- 4) ทำการทดสอบและสรุปผลการทดสอบ
- 5) จัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงการ

- 1) ใช้เครื่องควบคุมแรงดันอัตโนมัติที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อควบคุมแรงดันหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับทำการศึกษาและทดสอบด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงเรื่องการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง
- 2) เป็นต้นแบบของการพัฒนาออกแบบสร้างเครื่องควบคุมแรงดันอัตโนมัติที่จะนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม สำหรับการทดสอบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงตามที่มาตรฐานอุตสาหกรรมกำหนด

ตารางที่ 1.1 การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนการทำปริญญานิพนธ์

การทำงาน	ภาคเรียนที่ 1					ภาคเรียนที่ 2				
	พ.ศ. 2556					พ.ศ. 2557				
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1) ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการควบคุมมุมเฟสของ Thyristor	←---→ ↔									
2) ศึกษาทฤษฎีที่ใช้สร้างชุดขับ Thyristor	←---→ ↔									
3) ทำการจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อดูลักษณะรูปคลื่นแรงดันและกระแสให้ได้ตามที่ต้องการ		←---→ ↔								
4) ออกแบบสร้างวงจรควบคุมการขึ้นแรงดันไฟฟ้าแรงสูง			←---→ ↔							
5) ทำการทดสอบและสรุปผลการทดสอบ								←---→ ↔		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยและต้องอภัยถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มาใช้

การทำงาน	ภาคเรียนที่ 1					ภาคเรียนที่ 2							
	พ.ศ. 2556										พ.ศ. 2557		
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.			
6) ทำปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์									←-----→	←-----→			

←-----→ วางแผน

←-----→ ดำเนินงานจริง

1.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี พ.ศ.2533 นายจิระชัย ทองทิพยา และ นายธรรมศักดิ์ แจ่มศรี [1] ได้ออกแบบและสร้างเครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุเข้าวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ด้วยเอสซีอาร์ ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งสามารถปรับแรงดันกระแสสลับขนาด 0-220 V ที่ความถี่ 50 Hz กำลังไฟฟ้า 7.5 kVA โดยสามารถควบคุมโดยวิธีใช้คนควบคุมการปรับแรงดัน และใช้ขนาดของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาดต่ำๆ ในการควบคุมมุมการจุดชนวนของเอสซีอาร์เพื่อควบคุมมุมเฟสของรูปคลื่นแรงดันที่ทุกๆ คาบของรูปคลื่น (Cycle) ที่จะจ่ายให้หม้อแปลงทดสอบ ซึ่งวิธีการดังกล่าวยังต้องใช้ผู้ปฏิบัติงานควบคุมแรงดันอัดประจุ และควบคุมระยะเวลาในการปรับขนาดแรงดันดังกล่าวเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหากระแสเกินที่อาจเกิดขึ้นได้

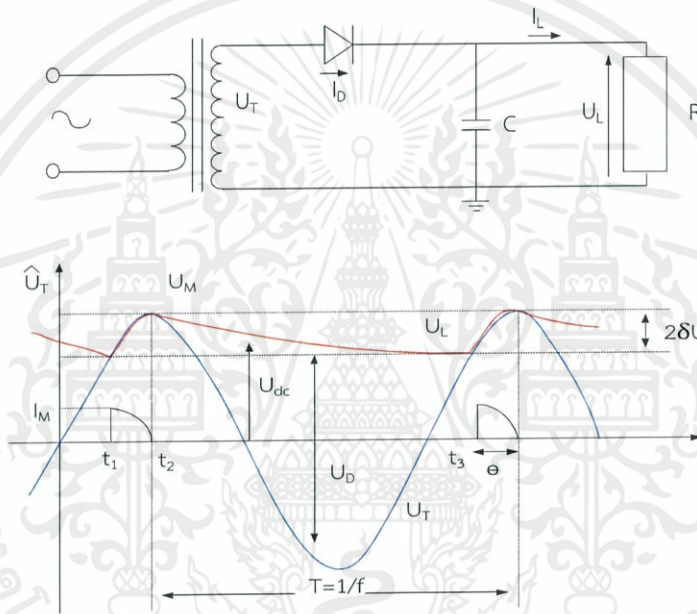
ปี พ.ศ. 2544 นายสิน เตียพิริยะกิจ [2] ได้พัฒนาออกแบบและสร้างควบคุมแรงดันอัดประจุเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 7.5 kVA เพื่อใช้ควบคุมแรงดันอัดประจุแบบอัตโนมัติช่วยผู้ปฏิบัติงานการทดสอบที่เกี่ยวกับการสร้างแรงดันอิมพัลส์ทดสอบความคงทนอยู่ได้ของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต่อแรงดันอิมพัลส์ตามที่มาตรฐานอุตสาหกรรมกำหนด การทดสอบสมรรถนะของเครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุทำได้โดยการสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุสามารถควบคุมแรงดันอัดประจุตามที่ได้ออกแบบไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

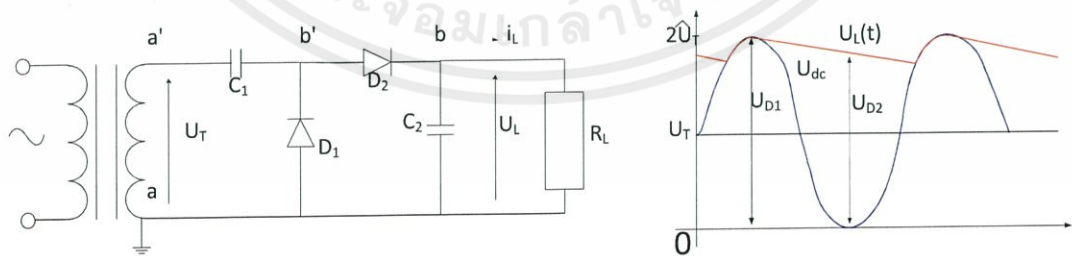
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี

2.1 การสร้างแรงดันสูงกระแสตรง

การสร้างแรงดันสูงกระแสตรงสำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง จะใช้วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นเพื่อแปลงแรงดันสูงกระแสสลับเป็นแรงดันสูงกระแสตรง โดยมีไดโอดเป็นอุปกรณ์เรียงกระแส และมีตัวเก็บประจุกรอง ทำหน้าที่เก็บประจุในช่วงเวลาที่ไดโอดนำกระแสและคายประจุให้กับโหลดในช่วงเวลาที่ไดโอดไม่นำกระแส ดังรูปที่ 2.1 ในกรณีที่ต้องการสร้างแรงดันสูงกระแสตรงที่มีพิคตแรงดันสูงกว่า 100 kV จะใช้วงจรเรียงกระแสแบบแรงดันสองเท่า ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นมีตัวเก็บประจุกรองกระแส



รูปที่ 2.2 วงจรเรียงกระแสแบบแรงดันสองเท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันกระแสตรงที่ได้จากการเรียงกระแส โดยใช้ไดโอดเรียงกระแส และมีตัวเก็บประจุกรองกระแส เพื่อให้รูปคลื่นเรียบ แต่คลื่นที่ได้ก็ยังเป็นระลอก แรงดันระลอก (ripple voltage) อาจคำนวณจากความสัมพันธ์สมการที่ (2.1)

$$\delta U = \frac{I_d}{2fc} \quad (2.1)$$

เมื่อ I_d คือ กระแสที่จ่ายให้กับโหลด ความเรียบของแรงดันกระแสตรงกำหนดด้วย แฟกเตอร์ระลอก (ripple factor) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2.2)

$$r = \frac{\delta U}{U_{dc}} \quad (2.2)$$

โดย U_{dc} คือแรงดันเฉลี่ยของแรงดันกระแสตรง
ในกรณีของแรงดันกระแสตรง ที่ได้จากวงจรเรียงกระแสแบบแรงดันสองเท่าในรูปที่ 2.2 จะคำนวณได้จากสมการที่ (2.3)

$$U_{dc} = 2U_t - \frac{2I_{dc}}{3fc} \quad (2.3)$$

เมื่อ U_t คือ แรงดันค่ายอดด้านแรงดันสูงของหม้อแปลงแหล่งจ่าย

2.2 หลักการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

การควบคุมไฟฟ้ากระแสสลับ คือ การเปลี่ยนค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงดัน (V_{rms}) ที่จ่ายให้แก่โหลดโดยใช้ไทรสเตอร์ควบคุม โดยทั่วไปมี 2 วิธีคือ

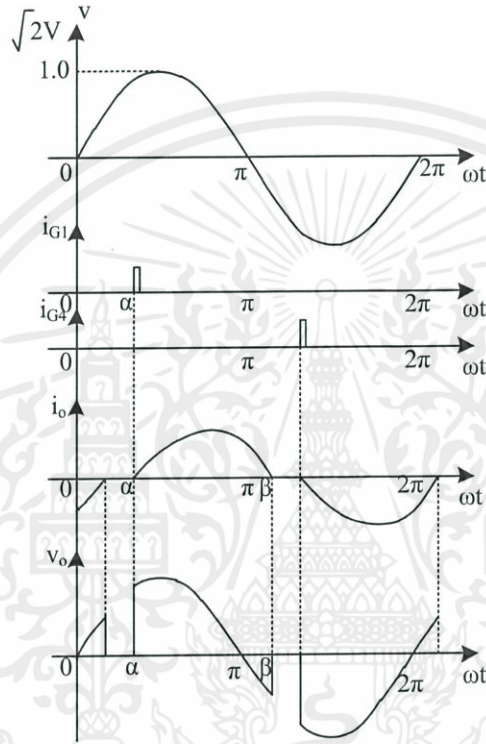
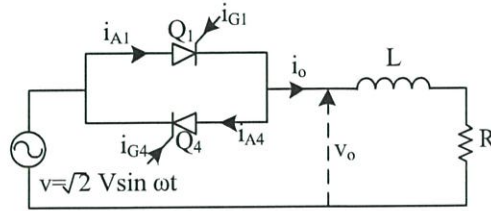
1) การควบคุมการเปิด-ปิดวงจร (On-off control) ในการควบคุมการปิด-เปิดจะใช้ไทรสเตอร์ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ สำหรับต่อแหล่งจ่ายไฟให้แก่โหลดในบางคาบของแหล่งจ่ายไฟ และจะปลดโหลดออกเมื่อถึงคาบเวลาที่เหมาะสม ไทรสเตอร์ในการควบคุมแบบนี้จะทำหน้าที่เหมือนสวิตช์ความเร็วสูง

2) การควบคุมมุมเฟส (Phase control) ไทรสเตอร์จะทำหน้าที่เป็นสวิตช์ที่สามารถควบคุมต่อโหลดเข้ากับแหล่งจ่ายไฟโดยสามารถเลือกมุมเฟสของรูปคลื่นแรงดัน แหล่งจ่ายที่จะต่อโหลดเข้าได้ในแต่ละคาบของรูปคลื่นแรงดัน

วงจรเครื่องควบคุมแรงดันอัตโนมัติที่จะออกแบบและสร้างจะใช้หลักการควบคุมมุมเฟสโดยโหลดของวงจรเป็นหม้อแปลงทดสอบซึ่งพิจารณาเป็นโหลดแบบความต้านทานและความเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 การควบคุมเฟสเดียวแบบเต็มรูปคลื่น (Single-phase full-wave control)



รูปที่ 2.3 วงจรควบคุมเฟสเดียวแบบเต็มรูปคลื่นสำหรับโหลด RL

จากรูปที่ 2.3 แสดงวงจรควบคุมแหล่งจ่ายไฟสำหรับโหลดแบบความต้านทานและความเหนี่ยวนำ โดยไทรสเตอร์ทั้ง 2 ตัวจะไม่นำกระแสพร้อมกัน สมมุติให้ไทรสเตอร์ Q_1 ถูกจุดชนวนให้นำกระแสในช่วงครึ่งบวกและมีกระแสไหลต่อเนื่อง เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำของโหลดจะทำให้กระแสไหลที่ผ่านไทรสเตอร์ Q_1 (i_{A1}) มีค่าเป็นศูนย์ที่ $\omega t = \beta$ ซึ่งจะทำให้ไทรสเตอร์ Q_1 หยุดนำกระแส ดังนั้นค่ามุมนำกระแส (Conduction angle, γ) มีค่าเท่ากับ $\beta - \alpha$ และค่าแรงดัน V_0 สามารถหาได้จากสมการที่ (2.4)

$$V_0 = V_L + V_R \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
หรือ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปะลงเนื้อหาที่ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sqrt{2}V \sin(\omega t) = L \frac{di}{dt} + Ri_{AL} \quad (2.5)$$

ซึ่งสามารถแก้สมการหาผลตอบได้ดังนี้

$$i_{AI} = \frac{\sqrt{2}}{Z} V \sin(\omega t - \phi) + A e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t} \quad (2.6)$$

โดยที่ $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ และ $\phi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$

จากสมการที่ (2.6) สมมติให้สภาพเริ่มต้น $\omega t = \alpha$, $i_{AI} = 0$ จะได้ว่า

$$A = -\frac{\sqrt{2}}{Z} V \sin(\alpha - \phi) e^{-\left(\frac{R}{\omega L}\right)\alpha} \quad (2.7)$$

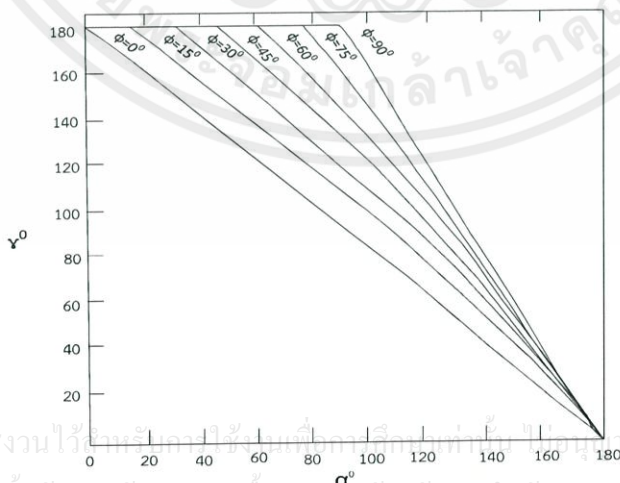
แทนค่า A ลงในสมการที่ 2.6 จะได้

$$A = \frac{\sqrt{2}}{Z} V [\sin(\omega t - \phi) - \sin(\alpha - \phi) e^{\left(\frac{R}{\omega L}\right)(\alpha - t)}] \quad (2.8)$$

ที่ $\omega t = \alpha$, $i_{AI} = 0$ แทนค่าลงในสมการที่ 2.8 จะได้

$$\sin(\beta - \phi) = \sin(\alpha - \phi) e^{\left(\frac{R}{\omega L}\right)(\alpha - t)} \quad (2.9)$$

มุม β จะเรียกว่ามุมหยุดนำกระแสสามารถหาได้โดย Iteration method เมื่อหามุม β ได้แล้ว จะสามารถหาค่ามุมนำกระแสได้จาก $\gamma = \beta - \alpha \leq 180^\circ$ ค่า γ สามารถนำมาแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ค่า γ ของวงจรรูปที่ 2.3

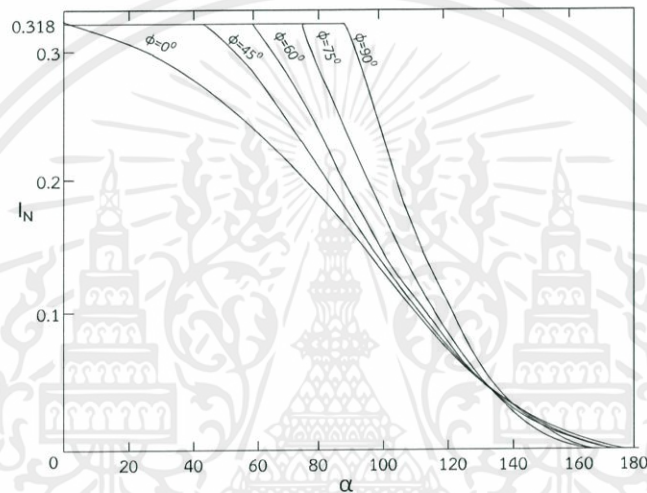
จากสมการที่ 2.8 สามารถหาค่ากระแสไหลเฉลี่ยได้ดังนี้

กำหนดให้ I_N = ค่ากระแสเฉลี่ยที่ผ่านไทรสเตอร์ Q_1 เทียบหนึ่งหน่วย

I_{o1} = ค่ากระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านไทรสเตอร์ Q_1

$$I_N = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} [\sin(\omega t - \phi) - \sin(\alpha - \phi)] e^{\frac{R}{L}(\frac{\alpha}{\omega} - t)} d(\omega t) \quad (2.10)$$

$$I_o = \frac{\sqrt{2}}{Z} \cdot I_N \quad (2.11)$$



รูปที่ 2.5 แสดงค่า I_N เทียบกับมุมจุดชนวน (α)

กำหนดให้ I_{RN} = ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสไหลเฉลี่ยเทียบค่าหนึ่งหน่วย

$I_{o,rms}$ = ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสไหล

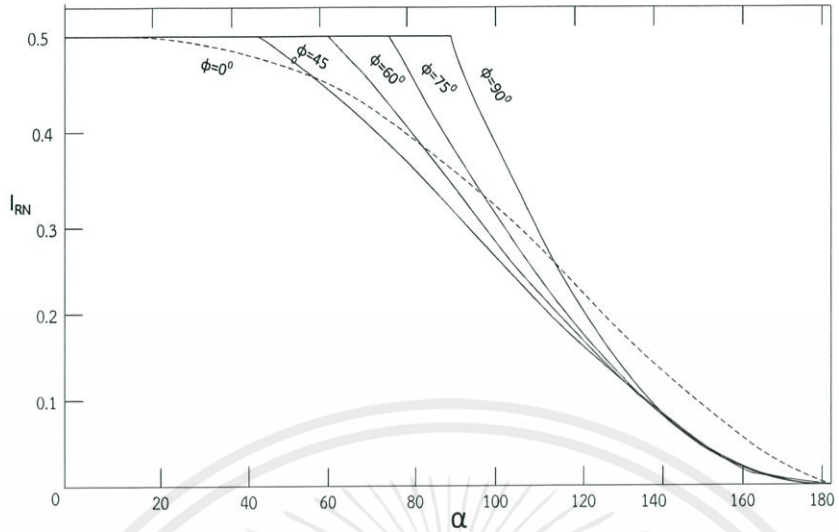
ดังนั้น

$$I_{RN} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} [\sin(\omega t - \phi) - \sin(\alpha - \phi)] e^{\frac{R}{L}(\frac{\alpha}{\omega} - t)} d(\omega t)} \quad (2.12)$$

ดังนั้นค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสไหลคือ

$$I_{o,rms} = \frac{\sqrt{2}}{Z} \cdot I_{RN} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แสดงค่า I_{RN} เทียบกับมุมจุดชนวน(α)

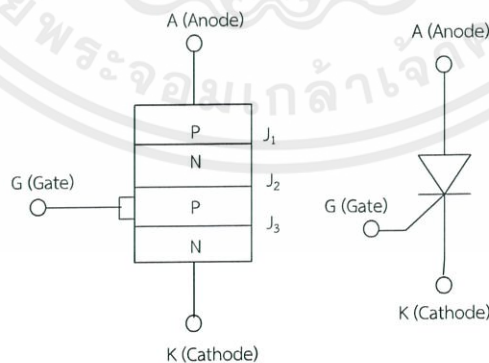
จากรูปที่ 2.3 สามารถหาค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของ V_o ได้ดังนี้

$$V_o = \sqrt{\left[\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} (\sqrt{2} \cdot V \cdot \sin \omega t)^2 \cdot d(\omega t) \right]} \tag{2.14}$$

$$V_o = \sqrt{2} \cdot V \cdot \sqrt{\left\{ \frac{1}{2\pi} \left[\gamma + \frac{1}{2} \sin 2\alpha - \frac{1}{2} \sin 2(\alpha + \gamma) \right] \right\}} \tag{2.15}$$

2.3 หลักการทำงานของไทรสเตอร์

2.3.1 โครงสร้างของไทรสเตอร์



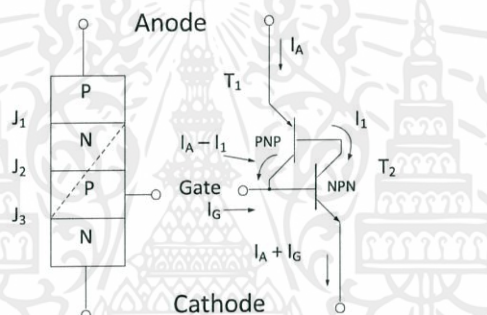
รูปที่ 2.7 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของไทรสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไทรสเตอร์เป็นสิ่งประดิษฐ์พีเอ็นพีเอ็น 4 ชั้น ซึ่งสามารถกันแรงดันได้ทั้งสองทิศทาง และมีรอยต่อพีเอ็น 3 รอยต่อ (J_1, J_2 และ J_3) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เมื่ออานอดเป็นลบเทียบกับคาโทดรอยต่อ J_2 จะถูกไบแอสตามส่วนรอยต่อ J_1 และ J_3 จะถูกไบแอสย้อน ดังนั้น ไทรสเตอร์จะสามารถกันการไหลของกระแสจนกระทั่งแรงดันเกิน แรงดันพังทลายของรอยต่อ J_1 และ J_3 อนุกรมกัน เมื่ออานอดเป็นบวกเทียบกับคาโทด รอยต่อ J_1 และ J_3 จะถูกไบแอสไปตาม แต่รอยต่อ J_2 จะถูกไบแอสย้อน ดังนั้น กระแสจะถูกกันจนกระทั่งแรงดันเกินแรงดันพังทลายของรอยต่อ J_2

ขั้วที่ 3 ของไทรสเตอร์ หรือ ขั้วเกตนั้น ต่อกับชั้นพี ซึ่งอยู่ติดกับชั้นเอ็นของคาโทด ถ้าขั้วนี้เป็นบวกเทียบกับคาโทดจะมีกระแสไหลผ่านรอยต่อคาโทด (J_3) และถ้าอานอดเป็นบวก กระแสที่ไหลตัวต่อคาโทดจะทำให้เกิดการทวีคูณแบบอะวาลานซ์ (avalanche multiplication) ซึ่งทำให้กระแสไหลผ่าน J_2 และไทรสเตอร์นำไฟฟ้า เมื่อไทรสเตอร์นำไฟฟ้าแล้ว เกตก็จะไม่สามารถควบคุมต่อไปได้ ไทรสเตอร์จะนำไฟฟ้าต่อไป จนกว่ากระแสจะถูกทำให้หยุดไหลโดยวิธีการอื่น

2.3.2 กลไกการเริ่มนำไฟฟ้า



รูปที่ 2.8 การแทนโครงสร้างของไทรสเตอร์ด้วยทรานซิสเตอร์ 2 ตัว

กลไกการเริ่มนำไฟของไทรสเตอร์สามารถอธิบายง่ายๆ โดยการแบ่งชั้นภายใน 4 ชั้นออกเป็นทรานซิสเตอร์ 2 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.8 เมื่อไบแอสให้อานอดเป็นบวก อานอดจะเป็น อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์พีเอ็นพี และคาโทดจะเป็นอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็น คอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์แต่ละตัวส่งกระแสไปให้กับเบสของทรานซิสเตอร์อีกตัวหนึ่ง

การวิเคราะห์เริ่มจากการใช้สมการของทรานซิสเตอร์คือ

$$I_c = \alpha I_E + I_{CBO} \tag{2.16}$$

- โดยที่ I_c คือ กระแสคอลเล็กเตอร์
- I_E คือ กระแสอิมิตเตอร์
- I_{CBO} คือ กระแสรั่วระหว่างคอลเล็กเตอร์กับเบส
- I_{CBON} คือ กระแสรั่วระหว่างคอลเล็กเตอร์กับเบส
- α_p คือ อัตราการขยายกระแสในสภาพเบสรวม

α_N คือ อัตราการขยายกระแสในสภาพเบสร่วม

สำหรับทรานซิสเตอร์พีเอ็นพี

$$I_A - I_1 = \alpha_P I_A + I_{CBOP} \quad (2.17)$$

สำหรับทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็น

$$I_1 = \alpha_N (I_A + I_G) + I_{CBON} \quad (2.18)$$

เมื่อรวมสมการที่ 2.11 กับสมการที่ 2.12 เพื่อขจัด I_1 และแก้สมการเพื่อหา I_A จะได้

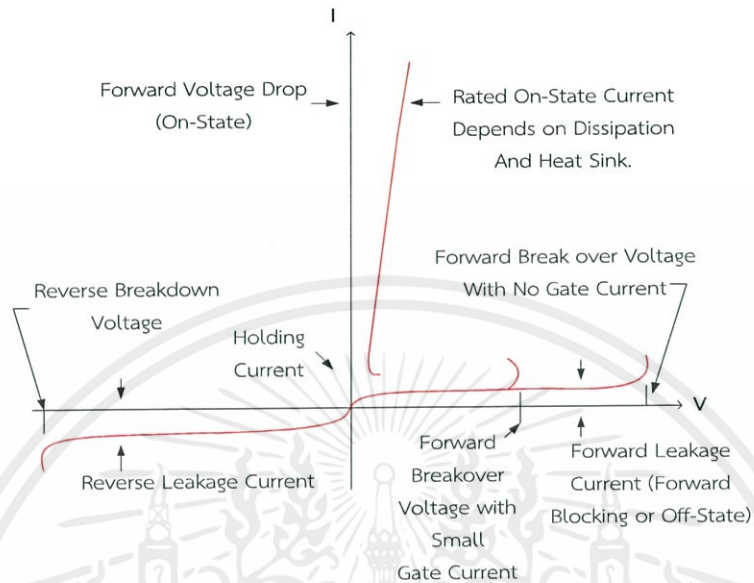
$$I_A = \frac{\alpha_N I_G + I_{CBON} + I_{CBOP}}{1 - (\alpha_N + \alpha_P)} \quad (2.19)$$

ก่อนที่ทรานซิสเตอร์จะนำไฟฟ้า กระแสของคอลเล็กเตอร์มีค่าต่ำมาก ทำให้ α มีค่าต่ำกว่า 1 มาก ในสภาพไม่นำไฟฟ้า และ $I_G = 0$ กระแสรั่วมีค่าต่ำมาก ทำให้ผลรวมของ α_N และ α_P มีค่าต่ำกว่า 1 กระแสอาโนดจึงมีค่าเสถียรอยู่ที่ค่าต่ำๆ ค่าหนึ่ง การเปลี่ยนสภาพจากไม่นำไฟฟ้าเป็นนำไฟฟ้าสามารถทำได้โดยการใส่กระแสเกต ซึ่งทำให้กระแสเบสของทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็นเพิ่มขึ้น ทำให้ α_N มากขึ้น ทำให้กระแสคอลเล็กเตอร์พีเอ็นพีมีค่ามากขึ้น และ α_P มากขึ้น เมื่อ $\alpha_N + \alpha_P$ มีค่าใกล้ 1 ตัวหารของสมการที่ (2.19) จะมีค่าใกล้ศูนย์ ทรานซิสเตอร์ทั้งสองจะอิ่มตัว และกระแสอาโนดก็เพิ่มอย่างรวดเร็วถึงขนาดที่จำกัดโดยวงจรภายนอก กระแสไหลจะทำให้ $\alpha_N + \alpha_P > 1$ และ ทรานซิสเตอร์จะค้างอยู่ในสภาพนำไฟฟ้าถึงแม้ว่าจะไม่มีกระแสเกตแล้วก็ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 ลักษณะสมบัติของไทรสเตอร์

2.3.3.1 ลักษณะสมบัติของไทรสเตอร์ในสภาพอยู่ตัว



รูปที่ 2.9 ลักษณะสมบัติของไทรสเตอร์ในสภาพอยู่ตัว

จากรูปที่ 2.9 อาจแบ่งเขตการทำงานของไทรสเตอร์ออกเป็น 3 เขตคือ

- 1) สถานะปิดกั้นย้อนกลับ (Reverse blocking state) คือจุดภาค (gradient) ที่ 3 ในรูปที่ (2.9) ไทรสเตอร์จะไม่นำไฟฟ้าแต่มีกระแสรั่ว (I_R) ไหลเล็กน้อย จนกระทั่งแรงดันป้อนกลับข้ามมีค่าสูงเกินค่าแรงดันพังทลาย ก็จะมีการเพิ่มขึ้นของกระแสรั่วอย่างมากหรือเกิดการพังทลาย
- 2) สถานะปิดกั้นตาม (Forward conditioning state) คือ จุดภาคที่ 1 ในช่วงนี้ ไทรสเตอร์ไม่นำไฟฟ้า แต่จะมีกระแสรั่ว (I_D) ไหลเล็กน้อย
- 3) สถานะนำไฟฟ้าตาม (Forward conducting state) คือ จุดภาคที่ 1 อีก เมื่อส่งกระแสไฟฟ้าเข้าไปทางขั้วเกตจะทำให้แรงดันปล่อยกระแสเดินทาง (forward breakover voltage) ลดลง หากลดลงต่ำกว่าแรงดันระหว่างแอนดและคาโทด ไทรสเตอร์ก็จะนำไฟฟ้ามให้มีกระแสไหลจำนวนมาก แรงดันระหว่างแอนดและคาโทดจะมีค่าต่ำราว 1.4 โวลต์ ทั้งนี้สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2.8 สามารถหาค่าแรงดันระหว่างแอนดกับคาโทด คือ

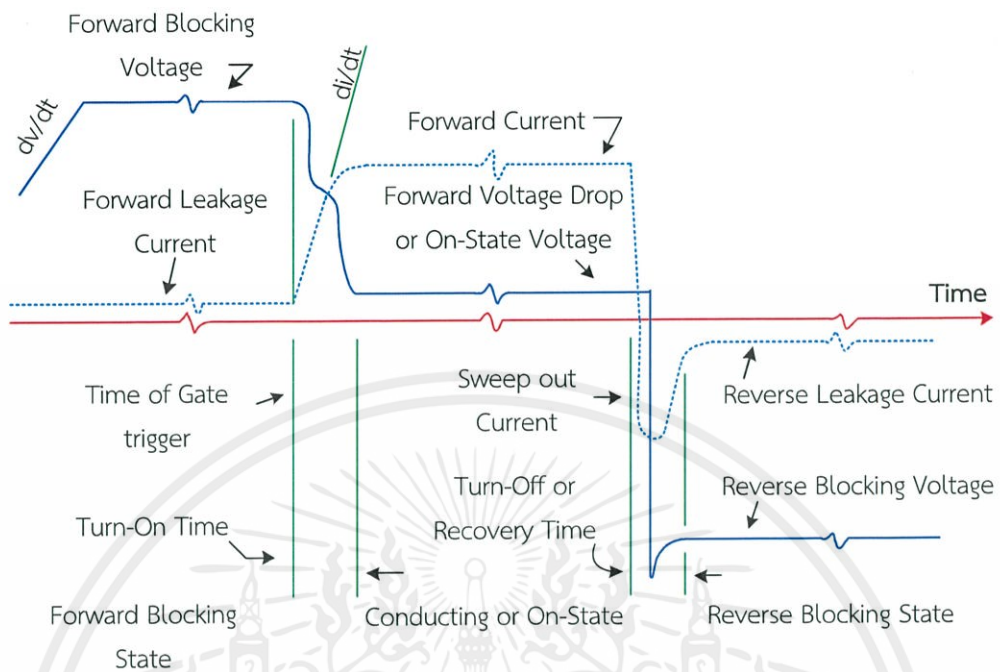
$$V_{EB(SAT)} (PNP) + V_{CE(SAT)} (NPN)$$

หรือ

$$V_{EC(SAT)} (NPN) + V_{BE(SAT)} (NPN)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และข้อมูลอ้างอิงอื่น ๆ ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ซึ่งจะมีค่าสูงกว่าแรงดันไบแอสตามคอมโอดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

2.3.3.2 ลักษณะสมบัติของไทรสเตอร์ในช่วงเปลี่ยนสภาพ

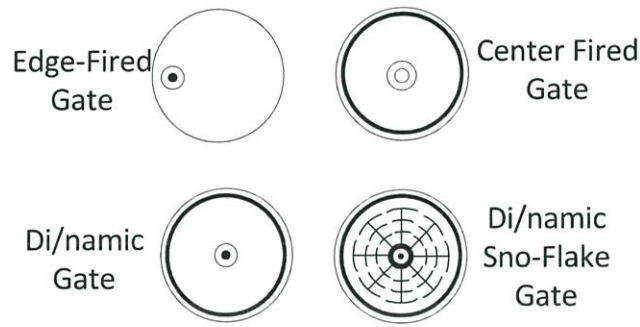


รูปที่ 2.10 ลักษณะสมบัติของไทรสเตอร์ในช่วงเปลี่ยนสภาพ

ลักษณะสมบัติของไทรสเตอร์ในช่วงเปลี่ยนสภาพดังรูปที่ 2.10 นั้น คล้ายกับของไดโอดที่ว่า การเริ่มนำไฟฟ้า (turn on) และการหยุดนำไฟฟ้า (turn off) ไม่สามารถเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด และเมื่อองค์ประกอบถูกไบแอสย้อนทันทีหลังจากการนำไฟฟ้า จะมีพัลส์ของกระแสไหลกลับอันเกิดจากประจุที่ตกค้างอยู่ในรอยต่อ แต่ไทรสเตอร์มีสถานะปิดกั้นตาม ซึ่งไม่มีไดโอด

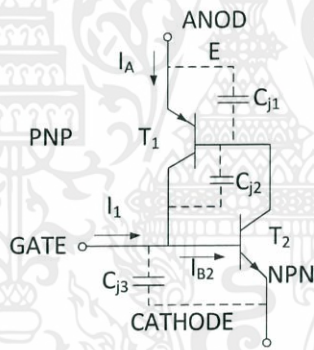
พิจารณาการเริ่มนำไฟฟ้าก่อน เมื่อไดโอดถูกไบแอสตามจะเริ่มนำไฟฟ้าทันที ดังนั้น ทัวทั้งพื้นที่ของไดโอดจะนำไฟฟ้าพร้อมกัน แต่การเริ่มนำไฟของไทรสเตอร์นั้นเริ่มที่พื้นที่เล็กๆ ติดกับขั้วเกต แล้วจะกระจายจากพื้นที่นี้ออกทางด้านข้าง ความเร็วของการกระจายประมาณ 0.1 มิลลิเมตร ต่อไมโครวินาที ดังนั้น สิ่งประดิษฐ์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร และมีขั้วเกตตรงจุดศูนย์กลาง จะต้องใช้เวลาราว 100 ไมโครวินาที ก่อนที่ทัวทั้งพื้นที่ที่จะนำไฟฟ้า ถึงแม้แรงดันไบแอสตามจะถึงค่าอยู่ตัวนานแล้วก็ตาม เนื่องจากพื้นที่ที่เริ่มนำไฟฟ้านั้นมีขนาดเล็กมากตอนเริ่มต้น ความหนาแน่นของกระแสอาจสูงมาก ถ้าไม่มีการจำกัดอัตราการเพิ่มของกระแส ความหนาแน่นของกระแสที่มากเกินไปนั้นจะทำให้เกิดบริเวณที่ร้อนมาก ซึ่งอาจทำให้สิ่งประดิษฐ์เสียหายได้ ดังนั้นไทรสเตอร์กำลังสูงจึงต้องมีขีดจำกัดค่า di/dt สูงสุดขนาดเริ่มนำไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะของเกตชนิดต่างๆ

เดิมนั้น จุดต่อขั้วเกตของไทรสเตอร์อยู่ตรงขอบดังรูปที่ 2.11 การนำไฟฟ้าจะต้องกระจายจากจุดนี้ไปทั่วทั้งพื้นที่ต่อมาได้มีการย้ายจุดต่อไปอยู่ตรงกลางทำให้เวลาเริ่มนำไฟของ ไทรสเตอร์ลดลงครึ่งหนึ่ง ไทรสเตอร์ใหม่ๆ มีเกตรูปแบบอื่นๆ ซึ่งจะทำให้การเริ่มนำไฟฟ้าเกิดขึ้นที่พื้นที่ใหญ่ขึ้น ทำให้เวลาเริ่มนำไฟลดลงและทำให้ขีดจำกัด di/dt มีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะตัวเก็บประจุที่เกิดขึ้นตามรอยต่อของไทรสเตอร์

พารามิเตอร์ที่สำคัญมากอีกตัวหนึ่งคือ dv/dt เราทราบแล้วว่าเมื่อ ไทรสเตอร์อยู่ในสถานะปิดกั้นตามรอยต่อกลาง (J_2) จะถูกไบแอสกลับ ทำให้มีกระแสรั่วต่ำมาก แต่รอยต่อนี้ก็มีค่าเก็บประจุแฝง C_{J2} ต่อขนานอยู่ดังรูปที่ 2.12 ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงแรงดันอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดกระแสจำนวนหนึ่งไหลผ่านได้

$$I_{B2} = V_{J2} \frac{dC_{J2}}{dt} + C_{J2} \frac{dV_{J2}}{dt} \tag{2.20}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.20 จะพบว่า การเปลี่ยนแปลงแรงดัน ก็มีผลเหมือนกับการป้อนกระแสเกต I_1 หาก I_{B2} มีขนาดมากพอจะทำให้ทรานซิสเตอร์ทั้งสองนำไฟ และอัตราขยายวงรอบเพิ่มเป็นหนึ่ง ดังนั้น ทรานซิสเตอร์ที่ถูกไบแอสตามจะเริ่มนำไฟได้ถ้าแรงดันคร่อมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (dv/dt เป็นบวก)

เมื่อทรานซิสเตอร์คอมมิวเทตโดยธรรมชาติ (natural commutation) จะมีกระแสย้อนกลับอยู่ชั่วขณะเช่น ในกรณีของไดโอด โดยปกติทรานซิสเตอร์ที่คอมมิวเทตโดยธรรมชาติ จะถูกไบแอสย้อนเป็นช่วงเวลานานมากกว่าช่วงเวลาคืนตัวของรอยต่อ (recovery time) ส่วนทรานซิสเตอร์ที่คอมมิวเทตโดยการบังคับ (forced commutation) ทรานซิสเตอร์จะถูกไบแอสกลับชั่วขณะหนึ่ง แล้วหลังจากนั้นจะต้องปิดกั้นแรงดันตามให้ได้

2.3.4 วิธีการทำให้ทรานซิสเตอร์เริ่มนำกระแสไฟฟ้า

2.3.4.1 การเริ่มนำไฟฟ้าด้วยกระแสเกต

การให้แรงดันของเกตเป็นบวกเมื่อเทียบกับคาโทด จะทำให้เกิดกระแสไหลเข้าไปในขั้วเกต ถ้ากระแสนี้มีขนาดเพียงพอจะทำให้ทรานซิสเตอร์เริ่มนำกระแสไฟฟ้าทันทีที่ความต่างศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับคาโทด กระแสเกตนี้อาจเป็นไฟตรง หรือเป็นพัลส์กว้าง 4-5 ไมโครวินาที ขนาดที่ต้องการอาจแปรจาก 2-3 มิลลิแอมแปร์ไปจนถึงกว่า 250 มิลลิแอมแปร์

2.3.4.2 การเริ่มนำไฟฟ้าด้วยแสง

วิธีนี้ใช้กับทรานซิสเตอร์ไวแสง (Light sensitive SCR หรือ Light triggered SCR) การส่องแสงไปยังรอยต่อคาโทด J_3 ทำให้การยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำขาดพาหะส่วนข้างน้อยที่เพิ่มขึ้นนี้จะทำให้ทรานซิสเตอร์เริ่มนำกระแสได้

2.3.5 วิธีทำให้ทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแสไฟฟ้า

เมื่อไรที่ทรานซิสเตอร์นำไฟฟ้าแล้ว ก็จะนำไฟฟ้าเรื่อยไปจนกระทั่งกระแสเอาโนดมีค่าต่ำกว่ากระแสยึดเหนี่ยว (holding current) จึงจะหยุดนำไฟฟ้า กระแสยึดเหนี่ยวนี้มีค่าประมาณเศษหนึ่งส่วนพันของกระแสเอาโนดสูงสุด เมื่อทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแสไฟฟ้า ถึงแม้จะมีแรงดันตกคร่อมขั้วเอาโนด-คาโทดอีก ก็จะไม่สามารถทำให้ทรานซิสเตอร์นำไฟฟ้าได้ถ้าไม่มีการป้อนกระแสเกต วิธีทำให้ทรานซิสเตอร์หยุดนำไฟฟ้ามี 3 วิธีคือ

2.3.5.1 การคอมมิวเทตโดยธรรมชาติ (Natural commutation)

ในแรงดันไฟสลับเมื่อวงจรกลับเฟสจากบวกเป็นลบ กระแสเอาโนดจะลดลงเป็นศูนย์ จะทำให้ทรานซิสเตอร์หยุดนำไฟฟ้าได้

2.3.5.2 การคอมมิวเทตโดยการบังคับ (Force commutation)

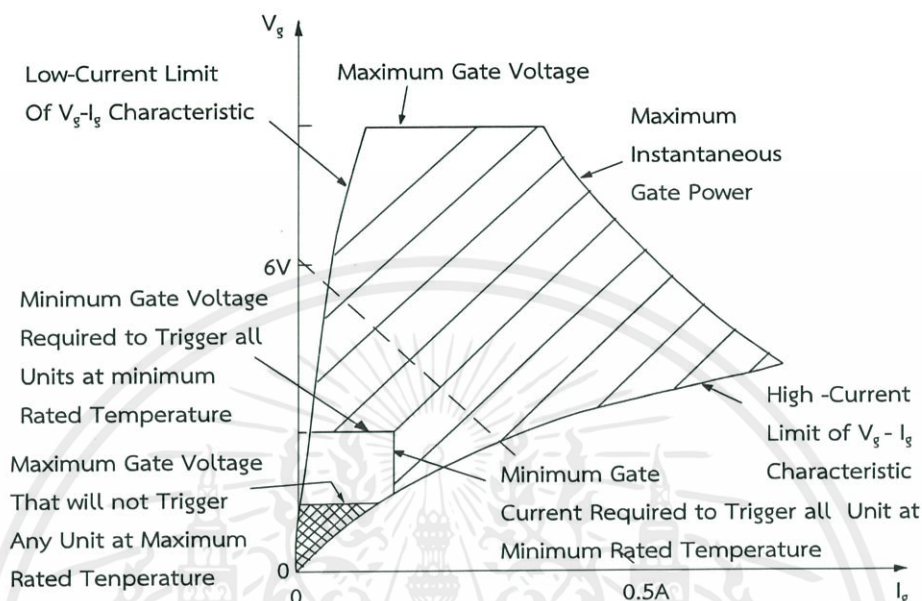
ในวงจรไฟตรง ทรานซิสเตอร์จะไม่สามารถหยุดนำไฟฟ้าได้เอง จึงต้องใช้การคอมมิวเทตโดยการบังคับ โดยการต่อตัวเก็บประจุที่มีแรงดันตรงข้ามคร่อมทรานซิสเตอร์ ทำให้เกิดการไบแอสกลับชั่วคราว ทรานซิสเตอร์ก็จะหยุดนำไฟฟ้าได้ การคอมมิวเทตโดยไหลดคือการเปลี่ยนลักษณะของโหลดจนทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแส เช่น การเพิ่มอินพีแดนซ์ของโหลดจนกระทั่งกระแสเอาโนดมีค่าต่ำกว่ากระแสยึดเหนี่ยว

2.3.5.3 การหยุดนำไฟฟ้าด้วยเกต

ทรานซิสเตอร์ที่ออกแบบพิเศษมีคุณสมบัติที่ว่า กระแสเกตที่เป็นลบจะเพิ่มกระแสยึดเหนี่ยวว่าการค้า
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม กระแสที่มีค่าเกินกระแสเอาโนด ทำให้ทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแส ในอดีตทรานซิสเตอร์ชนิดนี้มีแต่ชนิด

ผ่านกระแสต่ำกว่า 10 แอมแปร์ แต่ปัจจุบันไทรสเตอร์ชนิดนี้สามารถหยุดกระแสหลายร้อยแอมแปร์ โดยใช้เกตเท่านั้น

2.3.6 ลักษณะสมบัติของเกต



รูปที่ 2.13 ลักษณะของเกตไทรสเตอร์

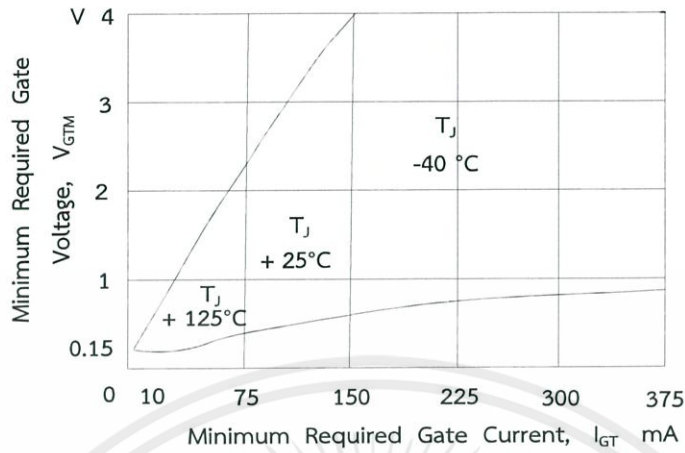
จากรูปที่ 2.13 แสดงลักษณะของเกตที่ผู้ผลิตให้สำหรับออกแบบวงจรจุดชนวนเกต จุดทำงานที่ปลอดภัยของเกตถูกกั้นด้วยเส้นกระแสต่ำสุด เส้นกระแสสูงสุด เส้นแรงดันสูงสุด และเส้นกำลังสูงสุด ภายใต้เส้นกั้นเหล่านี้เขต 3 เขตที่สำคัญ

เขตที่ 1 อยู่ใกล้จุดเริ่มต้น (เป็นดาข่าย) และกำหนดโดยค่าแรงดันเกตสูงสุดที่จะไม่สามารถจุดชนวนไทรสเตอร์ได้ ค่าแรงดันนี้กำหนดที่อุณหภูมิสูงสุดของรอยต่อเกต (โดยทั่วไป 125°C) เขตทำงานนี้ เมื่อมีแรงดันตามคร่อมตัวไทรสเตอร์ แต่ไม่ต้องการให้มีการจุดชนวน หรืออีกนัยหนึ่งก็คือเขตนี้กำหนดสัญญาณที่ไม่ต้องการสูงสุดที่มีในวงจรจุดชนวนได้

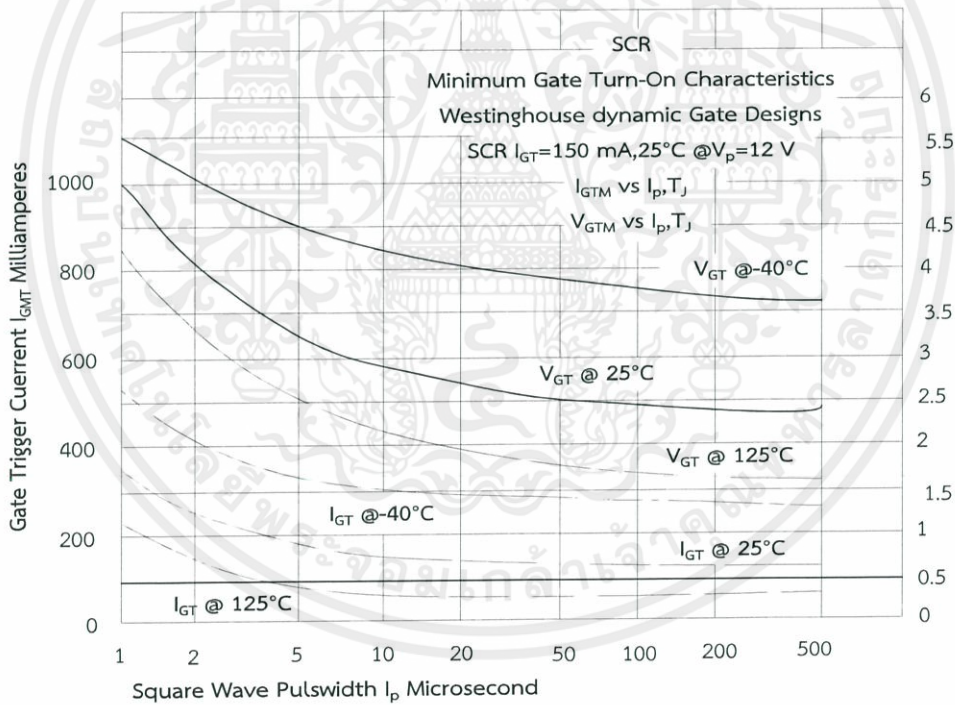
เขต 2 กำหนดโดยค่าแรงดันกระแสเกตต่ำสุด เขตนี้เป็นเขตที่ไม่ควรใช้ เพราะไม่สามารถมั่นใจว่าสัญญาณในเขตนี้จะสามารถใช้จุดชนวนสิ่งประดิษฐ์ได้ทุกตัว หรือจะไม่จุดชนวนสิ่งประดิษฐ์ตัวใดเลย

เขต 3 ซึ่งเป็นเขตที่ใหญ่ที่สุด แสดงเขตสัญญาณเกตสามารถจุดชนวนได้อย่างเชื่อถือได้โดยทั่วไปแล้วสัญญาณที่อยู่บริเวณซ้ายล่างก็เพียงพอแล้ว แต่ในกรณีที่ต้องการเริ่มนำไฟฟ้าเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อาจต้องใช้สัญญาณจุดชนวนขนาดใหญ่ ("HARD" firing signal) ในเขตขวาบน โดยเกตต้องการแรงดันระหว่าง 2 ถึง 10 โวลต์ และกระแสระหว่างไมโครแอมแปร์ ถึง 1.5 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 การปรับค่าของสัญญาณจุดชนวนต่ออุณหภูมิ



รูปที่ 2.15 ขนาดความกว้างต่ำสุดของสัญญาณจุดชนวนเกต

จากรูปที่ 2.14 แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิต่ำต้องใช้แรงดันและกระแสในการจุดชนวนสูงกว่าที่อุณหภูมิสูง ตัวอย่างในรูปเป็นไทรสเตอร์ที่ต้องใช้กระแสเกต 150 มิลลิแอมแปร์ ที่ $25^\circ C$ และที่ $125^\circ C$ กระแสเกตที่ต้องใช้จะลดลงครึ่งหนึ่ง และที่ $-40^\circ C$ กระแสที่ต้องใช้จะเพิ่มขึ้นเท่าหนึ่ง

สำหรับการจุดชนวนโดยใช้พัลส์ เมื่อพัลส์มีความกว้างต่ำกว่า 20 ไมโครวินาที จะต้องใช้พัลส์ใช้ที่มีขนาดกระแสมากขึ้น ทั้งนี้เป็นไปตามทฤษฎีที่ว่าทำให้ไทรสเตอร์เริ่มนำไฟฟ้านั้นต้องใช้ประจุ

จำนวนหนึ่ง ดังนั้นเมื่อความกว้างลดต่ำลงไปก็ต้องเพิ่มขนาดของกระแสมาชดเชยให้ขนาดของประจุมีขนาดคงที่ รูปที่ 2.15 แสดงขนาดของกระแสที่ต้องใช้ความถี่ของพัลส์ต่างๆ

2.3.7 วงจรป้องกันไทรสเตอร์

ไทรสเตอร์เกิดความเสียหายในกรณีเดียวเท่านั้น คือ อุณหภูมิของรอยต่อมีค่าสูงเกินไป ปกติไทรสเตอร์จะทำงานได้ที่อุณหภูมิรอยต่อ 125°C แต่ปัจจุบันนี้ ไทรสเตอร์บางตัวก็ทำงานได้ถึง 150°C สาเหตุที่ทำให้อุณหภูมิที่รอยต่อมีค่าเกินและไทรสเตอร์เสีย ก็คือ

1) การระบายความร้อนไม่ดีพอ การระบายความร้อนไม่ดีพอทำให้ไทรสเตอร์ร้อนเกินไป เนื่องจากตัวระบายความร้อน (heat sink) มีขนาดเล็กไป พัดลมไม่ได้เป่า หรือน้ำที่ใช้ระบายความร้อนไม่ไหล

2) แรงดันสูงเกินไป ไทรสเตอร์มีความสามารถป้องกันแรงดันเกินอยู่ในตัวเมื่อแรงดันสูงเกินไป ไทรสเตอร์ก็จะนำแรงดันไฟฟ้าทำให้แรงดันตก และมีกระแสจำนวนมากไหล ปัญหาแรงดันเกิน ก็เป็นปัญหากระแสเกินไป

3) กระแสเกิน เราสามารถป้องกันหากกระแสเกินได้โดยใช้ เซอร์กิตเบรกเกอร์แม่เหล็ก (magnetic circuit breaker) และฟิวส์ เซอร์กิตเบรกเกอร์แม่เหล็กจะสามารถตัดวงจรได้เร็วถึง 10 มิลลิวินาที ฟิวส์อาจตัดวงจรได้เร็วถึง 1 มิลลิวินาที แต่ฟิวส์ที่ใช้ต้องเป็นฟิวส์ความเร็วสูงชนิดพิเศษ เรียกว่า ไทรสเตอร์ฟิวส์ (Thyristor fuse) หรือฟิวส์เงิน (Silver fuse) ที่สำคัญที่สุดคือ ไทรสเตอร์ที่ใช้ต้องมีขนาดใหญ่พอ ที่จะทนกระแสเกินได้โดยไม่เกิดความเสียหายจนกว่าเซอร์กิตเบรกเกอร์แม่เหล็กตัด หรือ ฟิวส์ขาด



รูปที่ 2.16 วงจรป้องกันเสิร์จสำหรับไทรสเตอร์

4) แรงดันเสิร์จ ผู้ออกแบบวงจรไทรสเตอร์ไม่สามารถควบคุมแรงดันเสิร์จ จึงต้องใช้วงจรป้องกันเช่นรูปที่ 2.16 ถ้าสะพานไฟถูกตัดขณะที่ไม่มีโหลด พลังงานแม่เหล็กในแกนหม้อแปลงขาเข้าก็จะถูกย้ายมายัง C_1 หรือเมื่อโหลดลดพลังงานแม่เหล็กในสนามแม่เหล็กรั้วของหม้อแปลงขาเข้า หรือในตัวเหนี่ยวนำ L ก็จะย้ายมายัง C_1 เช่นกัน C_1 นั้นจะรับพลังงานไฟฟ้าสถิตที่เกิดจากความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับทุติยภูมิของหม้อแปลง เมื่อปิดสะพานตอนไม่มีโหลด แต่การทำงานนี้อาจทำให้เกิดการแกว่งในวงจร $L C_1$ ได้ ดังนั้นจึงมีการใส่ R_1 เป็นตัวหน่วงเนื่องจากว่าแรงดันขนาด 2 เท่า ของค่าสูงสุดของแหล่งจ่ายไฟอาจปรากฏบน C_1 ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสวิตช์ของไทรสเตอร์ของไทรสเตอร์ ก็ทำให้เกิดแรงดันเล็รจภายใน แต่มีพลังงานขนาดเล็กเท่านั้นในการเริ่มนำไฟฟ้าของไทรสเตอร์ L และ R จะจำกัดอัตราการเพิ่มของกระแส (di/dt) R ยังจำกัดกระแสประจุของ C จะช่วยรับกระแสของพาหะข้างน้อยในไทรสเตอร์ทำให้ไทรสเตอร์หยุดนำไฟได้และขณะเดียวกันจำกัดอัตราการเพิ่มแรงดัน (dv/dt) ด้วย

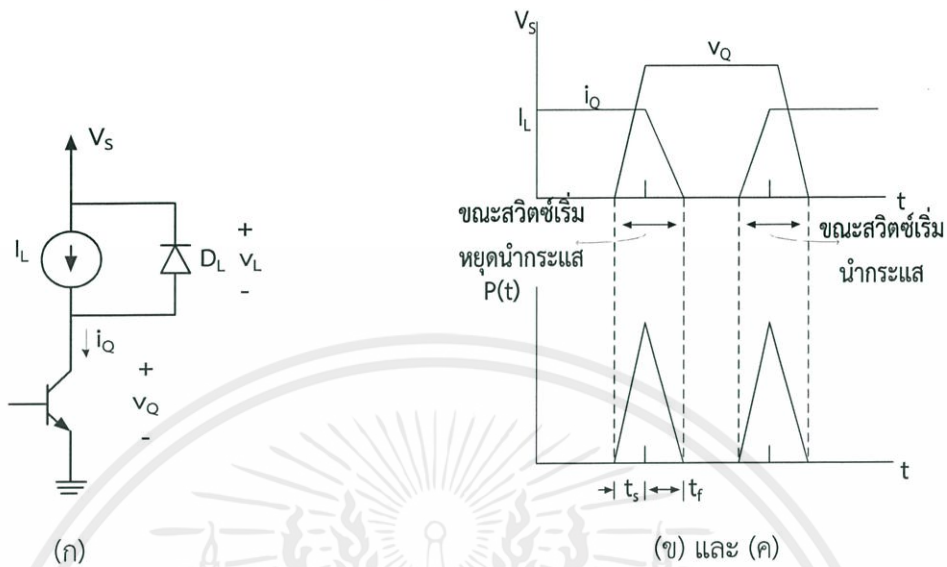
2.4 การควบคุมการจุดชนวนเกตของไทรสเตอร์

การควบคุมมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับใช้การควบคุมมุมจุดชนวนเกตของไทรสเตอร์ โดยอาศัยคุณสมบัติของวงจรรวมเฉพาะงานเช่น TCA 785 ของบริษัท Siemens ทำให้ลดขั้นตอนการออกแบบวงจรและใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์น้อยลงรวมทั้งฟังก์ชันการใช้งานมีสมรรถนะการควบคุมที่เชื่อถือได้ โดยมีคุณสมบัติดังนี้

- 1) สามารถจุดชนวนเกตไทรสเตอร์ได้ 2 ตัวต่อวงจรรวม 1 ตัว
- 2) ควบคุมมุมจุดชนวนเกตได้ระหว่าง 0° ถึง 180°
- 3) สามารถควบคุมความกว้างของสัญญาณจุดชนวนได้
- 4) กระแสจุดชนวนเกตสามารถจ่ายได้สูงสุด 250 มิลลิแอมแปร์
- 5) สัญญาณจุดชนวนเกตสามารถควบคุมได้โดยขา Inhibit
- 6) สัญญาณจุดชนวนเกตสามารถที่จะกำหนดความกว้างของรูปคลื่นได้
- 7) ความถี่ที่ใช้งาน 10-500 เฮิร์ตซ์
- 8) ใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิ -25°C ถึง 180°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์มีค่าสูงสุดดังแสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียชั่วขณะจากการสวิตช์ (instantaneous power : $P_Q(t)$) ซึ่งมีลักษณะโดยประมาณเป็นรูปสามเหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 2.20 (ข) และ (ค)

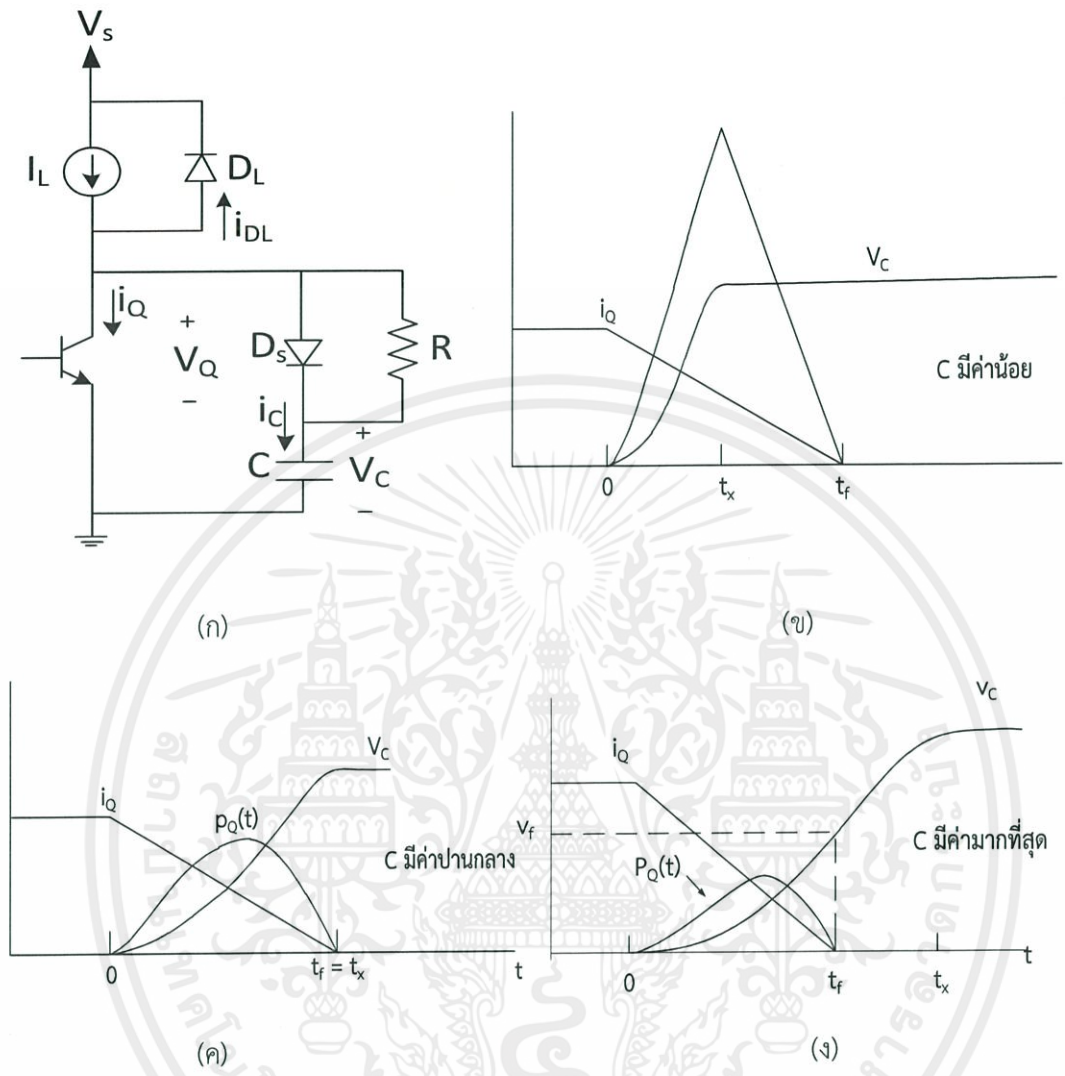


รูปที่ 2.18 (ก) โมเดลวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีโหลดตัวเหนี่ยวนำค่าสูงๆ
(ข) รูปคลื่นแรงดันและกระแสขณะสวิตช์ (ค) ค่ากำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ทรานซิสเตอร์กำลัง

ขณะที่ทรานซิสเตอร์ไม่นำกระแส (off state) โหลดเหนี่ยวนำจะคายพลังงานทั้งหมดผ่านทางไดโอด และเมื่อทรานซิสเตอร์เริ่มนำกระแส (turn on) แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมทรานซิสเตอร์จะไม่สามารถลดลงต่ำกว่าแรงดัน V_s จนกระทั่งไดโอดเริ่มหยุดนำกระแส ซึ่งช่วงเวลาที่ไดโอดเริ่มหยุดนำกระแสจะเป็นช่วงเวลาที่กระแสไหลทั้งหมดไหลผ่านทรานซิสเตอร์และไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไดโอดในทำนองเดียวกัน จุดที่แรงดันกระแสชั่วขณะที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์มีค่าสูงสุด ก็จะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการสวิตช์สูงสุดเช่นกัน

วงจรสับเบอร์จะจำกัดระดับแรงดันและกระแสคั่นที่ตกคร่อมทรานซิสเตอร์กำลังให้อยู่ในระดับที่ต้องการ สำหรับรูปแบบโดยทั่วไปของวงจรสับเบอร์จะได้แก่ วงจร R-C-D สับเบอร์ ดังแสดงใน รูปที่ 2.18 (ก) เมื่อทรานซิสเตอร์เริ่มหยุดนำกระแสจะทำให้ระดับแรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้ไดโอด D_S ได้รับไบแอสไปข้างหน้า (forward bias) และตัวเก็บประจุทำการสะสมประจุ ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์ถูกกำหนด โดยค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่มีค่าสูง จะทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์เป็นไปอย่างช้าๆ ดังแสดงผลของค่าความจุไฟฟ้าต่ออัตราการเปลี่ยนระดับแรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์จากค่าน้อยไปยังค่ามาก ดังรูปที่ 2.18 (ข) ถึง 2.18 (ง) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 (ก) คอนเวอร์เตอร์ที่มีสับเบอร์สำหรับตัวทรานซิสเตอร์กำลัง (ข-ง) รูปคลื่นขณะสวิตช์เริ่มหยุดนำกระแสโดยมีการเพิ่มความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุสับเบอร์ตามลำดับ

ค่าความจุไฟฟ้าสำหรับตัวเก็บประจุของวงจรสับเบอร์จะหาได้จากอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์ขณะเริ่มหยุดนำกระแสดังสมการ (2.21)

$$i_Q(t) = \begin{cases} I_L \left(1 - \frac{t}{t_f}\right) & 0 \leq t < t_f \\ 0 & t \geq t_f \end{cases} \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ (L_L - i_Q(t)) = (I_L(t) / t_f) ใช้เท่านั้น ไม่ 0 ≤ t < t_f นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังต้องอ้างอิงถึงเจ้า t_f ≤ t < t_x การทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ t_x ≥ t_x

โดยที่ t_x หมายถึง เวลาที่แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับค่าที่กำหนดซึ่งโดยมากจะมีค่าเท่าแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย โดยสามารถหาค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุได้จากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของวงจร พิจารณารูปที่ 2.19 (ข) ถึง 2.19 (ง) จะเห็นได้ว่าที่ค่าความจุไฟฟ้าสูงๆ จะทำให้เวลา t_x ยาวนาน และในทำนองกลับกันที่ค่าความจุไฟฟ้าต่ำๆ เวลา t_x จะสั้น นอกจากนี้กำลังไฟฟ้าสูญเสียชั่วขณะจากการสวิตซ์ที่ตัวทรานซิสเตอร์จะมีค่าลดลงเมื่อตัวเก็บประจุสลับเบอร์มีค่าสูงขึ้น

การเลือกตัวเก็บประจุสลับเบอร์ จะพิจารณาจากค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมทรานซิสเตอร์ที่ต้องการ ณ จุดที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านซิสเตอร์มีค่าลดลงเป็นศูนย์ พิจารณารูปที่ 2.19 (ง) จะได้สมการแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุสลับเบอร์เท่ากับ

$$v_c(t) = \begin{cases} \frac{1}{C} \int_0^t \frac{I_L t}{t_f} dt = \frac{I_L t^2}{2Ct_f} & 0 \leq t \leq t_f \\ \frac{1}{C} \int_{t_f}^t I_L dt + v_c(t_f) = \frac{I_L}{C}(t-t_f) + \frac{I_L t_f}{2C} & t_f \leq t \leq t_x \\ V_s & t \geq t_x \end{cases} \quad (2.23)$$

ถ้ากระแสที่ไหลผ่านสวิตซ์มีค่าลดลงเป็นศูนย์ก่อนเวลาที่ตัวเก็บประจุจะสะสมประจุได้สมบูรณ์ (fully charge) แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุจะหาได้จากส่วนแรกของสมการที่ (2.23) โดยการแทนค่า $v_c(t_f) = V_f$ ดังนี้

$$V_f = \frac{I_L (t_f)^2}{2Ct_f} = \frac{I_L t_f}{2C} \quad (2.24)$$

แก้สมการหาค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุสลับเบอร์จะได้สมการที่ (2.25)

$$C = \frac{I_L t_f}{2V_f} \quad (2.25)$$

โดยที่ V_f หมายถึงแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุสลับเบอร์จะที่ต้องการเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านทรานซิสเตอร์ลดลงเป็นศูนย์ ($V_f \leq V_s$)

สำหรับกรณี que เลือกค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมทรานซิสเตอร์เท่ากับค่าที่กำหนด ณ จุดที่กระแสไหลผ่านทรานซิสเตอร์มีค่าเป็นศูนย์ จะได้สมการที่ (2.26)

$$C = \frac{I_L t_f}{2V_s} \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารโดย V_s หมายถึง แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ตกคร่อมทรานซิสเตอร์ขณะที่ทรานซิสเตอร์ไม่มีการนำกระแส (ซึ่งโดยมากจะเท่ากับแหล่งจ่ายแรงดันด้านเข้า) และควรจำไว้ว่า ในบางวงจร ค่าแรงดันสูงสุดตกคร่อมทรานซิสเตอร์อาจมีค่าแตกต่างจากแหล่งจ่ายแรงดัน เช่น วงจรฟอร์เวิร์ดและพลา

แบ็กคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งจะมีแรงดันตกคร่อมสวิตช์ขณะไม่นำกระแสเท่ากับสองเท่าของแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายแรงดัน เป็นต้น กำลังไฟฟ้าที่ตัวทรานซิสเตอร์จะสามารถลดลงได้ด้วยการใช้วงจรสับเบอร์ อย่างไรก็ตามสำหรับกรณีที่ไม่ใส่วงจรสับเบอร์ จะสามารถหาค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าที่ตัวทรานซิสเตอร์ขณะทรานซิสเตอร์เริ่มหยุดนำกระแส ได้จากสมการ (2.26)

$$P_Q = \frac{1}{T} \int_0^T P_Q(t) dt \quad (2.27)$$

สมการที่ (2.26) จะเป็นการอินทิเกรตเพื่อหาพื้นที่ใต้กราฟของรูปสามเหลี่ยมในรูปที่ 2.18 (ค) ขณะที่ทรานซิสเตอร์เริ่มหยุดนำกระแสในกรณีที่ใส่วงจรสับเบอร์ ซึ่งจะมีคำตอบเท่ากับสมการ (2.28)

$$P_Q = \frac{1}{2} I_L V_s (t_s + t_f) f_s \quad (2.28)$$

โดยที่ $(t_s + t_f)$ หมายถึง ช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแส และ $f_s = 1/T_s$ หมายถึงความถี่สวิตช์ซึ่งสำหรับกำลังไฟฟ้าที่ตัวทรานซิสเตอร์ในช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแสหลังจากใส่วงจรสับเบอร์ จะสามารถหาได้จากสมการที่ (11.6), (11.8) และ (11.12) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับสมการ (2.29)

$$P_Q = \frac{1}{T} \int_0^T v_Q i_Q dt = f_s \int_0^{t_f} \left(\frac{I_L t^2}{2C_t} \right) I_L \left(\frac{1-t}{t_f} \right) dt = \frac{I_L^2 t_f^3}{24C} \quad (2.29)$$

โดยสมการที่ (2.28) จะเป็นจริงเมื่อ $t_f < t_{on}$ ดังแสดงในรูปที่ 11.11 (ค) และ (ง)

สำหรับการเลือกค่าความต้านทานที่เหมาะสมสำหรับตัวเก็บประจุสับเบอร์ที่เลือก จะพิจารณาค่าความต้านทาน ที่ทำให้ตัวเก็บประจุสามารถคายประจุได้หมดก่อนเวลาที่ทรานซิสเตอร์จะเริ่มหยุดนำกระแสในคาบต่อไป โดยที่ช่วงเวลาประมาณเท่ากับ 3 ถึง 5 เท่าของค่าคงตัวเวลาจะถือว่าเป็นช่วงเวลาที่ตัวเก็บประจุใช้ในการคายประจุได้หมด และถ้ากำหนดให้ช่วงเวลาเท่ากับ 5 เท่าของค่าคงตัวเวลาคือ ช่วงเวลาที่ตัวเก็บประจุใช้ในการคายประจุได้หมด ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากเวลาในการนำกระแสของทรานซิสเตอร์จะเท่ากับ

$$t_{on} > 5RC \quad (2.30)$$

หรือ
$$R < \frac{t_{on}}{5C} \quad (2.31)$$

ตัวเก็บประจุจะทำการคายประจุผ่านทางตัวต้านทานสับเบอร์ และทรานซิสเตอร์ขณะที่ทรานซิสเตอร์เริ่มนำกระแส ดังนั้นพลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุหาได้จากสมการ (2.32)

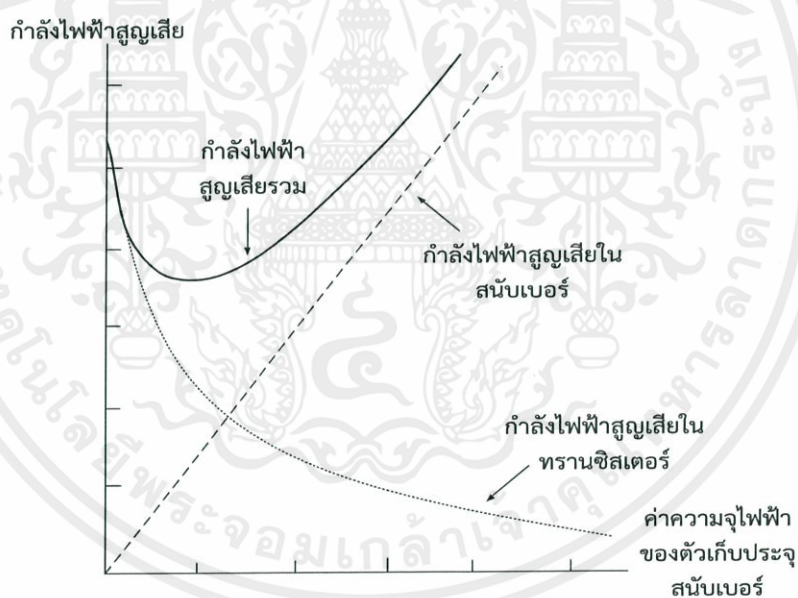
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นไว้สำหรับศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำค่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

$$W = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2.32)$$

ซึ่งพลังงานโดยส่วนใหญ่จะถูกถ่ายเทไปยังตัวต้านทานสนับเบอร์ขณะที่ทรานซิสเตอร์นำกระแส ดังนั้น กำลังไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานสนับเบอร์มีค่าเท่ากับสมการ (2.33)

$$P_R = \frac{\frac{1}{2} CV_s^2}{T_s} = \frac{1}{2} CV_s^2 f_s \quad (2.33)$$

จากสมการที่ (2.33) แสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าที่ตัวต้านทานสนับเบอร์ซึ่งกระจายพลังงานให้อยู่ในรูป กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ทรานซิสเตอร์จะมีค่าต่ำสุดเมื่อตัวเก็บประจุมีค่าสูงสุด แต่กำลังไฟฟ้าที่ตัวต้านทานสนับเบอร์ก็จะมีค่าสูงเช่นกัน รูปที่ 2.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ทรานซิสเตอร์ ที่สนับเบอร์และกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวม ซึ่งจะเห็นว่าการใช้วงจรสับเบอร์จะสามารถลด กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ตัวทรานซิสเตอร์ ซึ่งจะหมายถึงลดความต้องการในการระบายความร้อนสำหรับตัวทรานซิสเตอร์ลง เพราะการระบายความร้อนสำหรับตัวต้านทานทำได้ง่ายกว่าทรานซิสเตอร์มาก ดังนั้นการออกแบบวงจรสับเบอร์ร่วมกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะทำให้ระบบโดยรวมดีขึ้น



รูปที่ 2.20 กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ทรานซิสเตอร์ วงจรสับเบอร์และกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวม ต่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุสนับเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 วงจรสร้างสัญญาณพัลส์ความถี่สูง

การสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อกำหนดมุมจูนของทรานซิสเตอร์โดยใช่วงจรรวม ไอซี 555 เพื่อลดขั้นตอนการออกแบบโดยไอซี 555 มีโหมดการทำงาน 3 โหมด ดังนี้

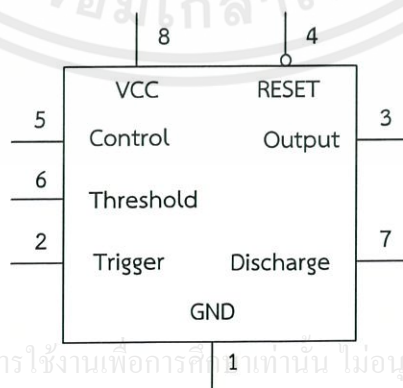
1. โมโนสเตเบิล (Monostable) ในโหมดนี้ การทำงานของ 555 จะเป็นแบบซิงเกิ้ลช็อต หรือ วันช็อต (one-shot) โดยการสร้างสัญญาณครั้งเดียว ประยุกต์การใช้งานสำหรับการนับเวลา การตรวจสอบพัลส์ สวิตช์สัมผัส ฯลฯ

2. ออสเตเบิล (Astable) ในโหมดนี้ การทำงานจะเป็นออสซิลเลเตอร์การใช้งาน ได้แก่ ทำไฟกะพริบ, กำเนิดพัลส์, กำเนิดเสียง, เตือนภัย ฯลฯ

3. ไบสเตเบิล (Bistable) ในโหมดนี้ ไอซี 555 สามารถทำงานเป็นฟลิปฟล็อป (flip-flop) ถ้าไม่ต่อขา DIS และไม่ใช้คาปาซิเตอร์ ใช้เป็นสวิตช์ bouncefree latched switches เป็นต้น ไอซี 555 จัดเป็นไอซีประเภทไทเมอร์ มันสามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวางและหลากหลายรูปแบบ แต่ส่วนใหญ่จะใช้ในวงจรประเภท โมโนสเตเบิล และ ออสเตเบิล ซึ่งจะอธิบายดังต่อไปนี้

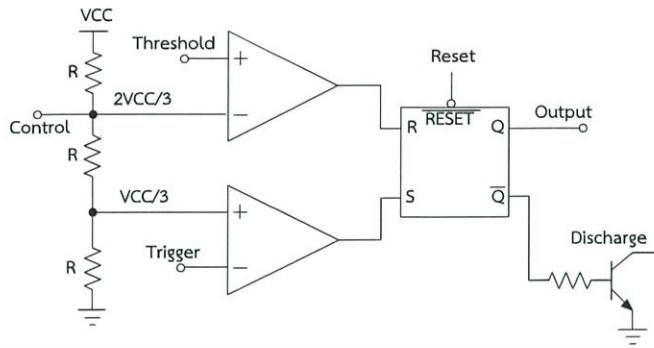
2.6.1 โครงสร้างของไอซี 555

ตัวถังของไอซี 555 มีจำนวน 8 ขาดังแสดงในรูปที่ 2.21 ส่วนโครงสร้างภายในตัวไอซีดังแสดงในรูปที่ 2.22 ตัวต้านทาน R 3 ตัวมีค่าเท่ากันทำหน้าที่แบ่งแรงดันซัพพลาย V_{CC} เพื่อสร้างแรงดันอ้างอิง $V_{CC}/3$ และ $V_{CC}/3$ ให้กับตัวเปรียบเทียบแรงดันเอาต์พุตของตัวเปรียบเทียบแรงดันถูกต่อไปเพื่อเซตและรีเซตแลตซ์ ขา Q ของแลตซ์ต่อเป็นเอาต์พุตของไอซี ส่วนขา Q ถูกต่อไปควบคุมทรานซิสเตอร์ให้เปิด-ปิดวงจร สำหรับการทำงานของตัวเปรียบเทียบแรงดัน ถ้าขาบวกมีศักย์สูงกว่า ขาลบแล้วจะให้เอาต์พุตเป็น '1' ในทางตรงข้ามจะให้เอาต์พุตเป็น '0' เมื่อแรงดันที่ขา Threshold สูงกว่า $2V_{CC}/3$ จะทำให้แลตซ์ถูกรีเซต เอาต์พุตจะมีค่าเป็น '0' ทรานซิสเตอร์จะเปิดวงจร ในอีกกรณีเมื่อแรงดันที่ขา Trigger ต่ำกว่า $V_{CC}/3$ จะทำให้แลตซ์ถูกเซต เอาต์พุตจะมีค่าเป็น '1' ทรานซิสเตอร์จะปิดวงจรซึ่งมีผลเสมือนว่าต่อขา 7-Discharge ถูกต่อลงกราวด์ ข้อควรระวัง เราจะต้องไม่ให้เกิดกรณี แรงดัน Threshold สูงกว่า $2V_{CC}/3$ พร้อมกับ แรงดัน Trigger ต่ำกว่า $V_{CC}/3$ เพราะจะทำให้ขา S และ R ของแลตซ์แอกทีฟพร้อมกัน และจะระบุสถานะของแลตซ์ไม่ได้ ขา 4 RESET จะแอกทีฟโลว์ เมื่อมันแอกทีฟจะทำให้เอาต์พุตของแลตซ์มีค่าเป็น '0' โดยไม่สนใจค่าของ R และ S ในการใช้งานที่ไม่ต้องการให้ RESET แอกทีฟ ให้ต่อขา 4 เข้ากับ V_{CC}



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

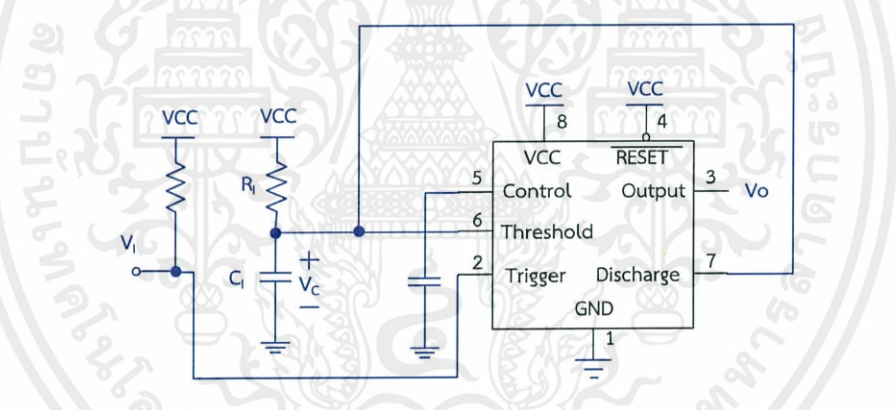
รูปที่ 2.21 ตัวถังของไอซี 555



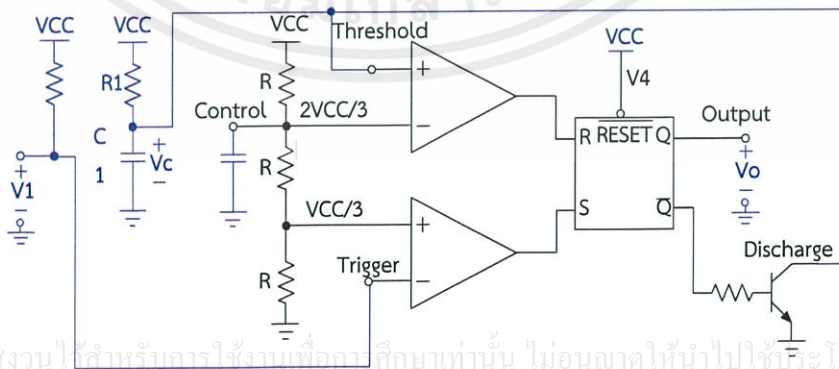
รูป 2.22 โครงสร้างภายในไอซี 555

2.6.2 วงจรโมโนสเตเบิล

ไอซี 555 สามารถนำมาต่อเป็นวงจรโมโนสเตเบิลได้ตามรูปที่ 2.23 และรูปที่ 2.24 แสดงวงจรโมโนสเตเบิลพร้อมโครงสร้างภายใน (ส่วนสีน้ำเงินเป็นภายนอกไอซี 555, สีดำเป็นภายในไอซี 555), ขา Discharge และ Threshold ถูกต่อเข้าด้วยกัน และต่อกับโหนดร่วมระหว่าง R_1 กับ C_1 แรงดันของขาทั้งสองคือ V_C , ขา Trigger ต่อกับอินพุต V_I และถูกดึงขึ้นด้วยตัวต้านทาน, ขา Output ของไอซี 555 ถูกต่อไปเป็นเอาต์พุต V_O ของวงจรด้วย



รูปที่ 2.23 วงจรโมโนสเตเบิลที่ใช้ไอซี 555



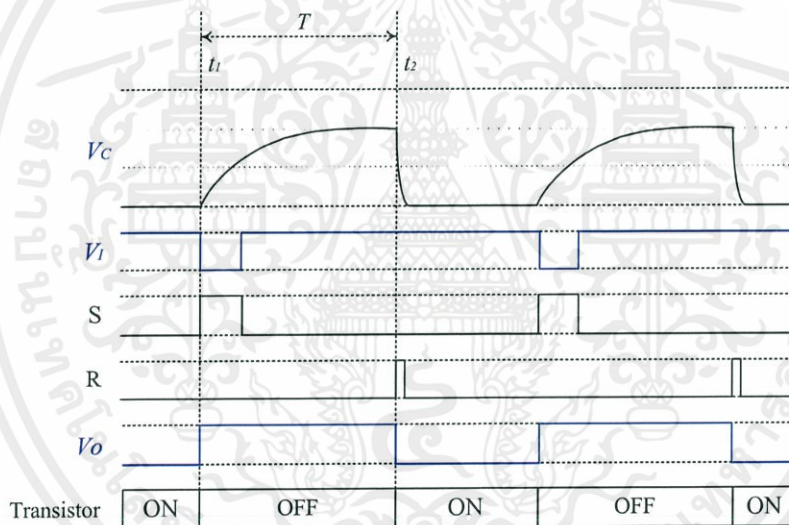
รูปที่ 2.24 วงจรโมโนสเตเบิลที่ใช้ไอซี 555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดรูปที่ 2.24 ออกเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาผังเวลาในรูปที่ 2.25 เพื่อศึกษาการทำงานของวงจรโมนอสเตเบิล ตอนเริ่มต้นสมมติให้แลตช์ มีสถานะเป็น '0' ทำให้ทรานซิสเตอร์ปิดวงจรและคายประจุใน C_1 ลงกราวน์ ทำให้ V_C มีค่าเป็นศูนย์ ลอจิกที่ขา R จึงเป็น '0' และ V_I มีค่าเป็นลอจิก '1' หรือ V_{CC} ทำให้ลอจิกที่ขา S จึงเป็น '0' เช่นกัน ต่อมา ณ เวลา t_1 ลอจิกของ V_I มีค่าเป็น '0' ชั่วขณะ ทำให้ S มีค่าเป็น '1' แลตช์จึงถูกเซต V_O มีค่าเป็น '1' และทรานซิสเตอร์ก็ถูกเปิดวงจรทำให้ C_1 ถูกอัดประจุจาก V_{CC} โดยผ่าน R_1 ดังนั้น V_C จึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาด้วยสมการ

$$V_C(t) = V_{CC}(1 - e^{-\frac{t}{R_1C_1}}) \quad (2.34)$$

ณ เวลา t_1 ค่าของ V_C มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่า $2V_{CC}/3$ ทำให้ R มีค่าเป็น '1' แลตช์จึงถูกรีเซต V_O มีค่าเป็น '0' และทรานซิสเตอร์ลัดวงจร C_1 ลงกราวน์ทำให้เกิดการคายประจุอย่างรวดเร็วจน V_C มีค่าเป็นศูนย์เหมือนตอนเริ่มต้นจะเห็นได้ว่าการทำงานของโมนอสเตเบิล เมื่ออินพุต C_1 เกิดพัลส์ '0' จะทริกวงจรให้เกิดพัลส์ '1' ที่เอาต์พุต V_C ออกมา 1 ลูก โดยที่ความกว้างของพัลส์จะมีค่าเท่ากับ T เสมอ



รูปที่ 2.25 ผังเวลาการทำงานของวงจรโมนอสเตเบิลในรูปที่ 2.24

การคำนวณหาความกว้างพัลส์ T สามารถทำได้โดยแก้ (2.33) เพื่อหาค่า T เมื่อ $V_C(T) = 2V_{CC}/3$ จะได้

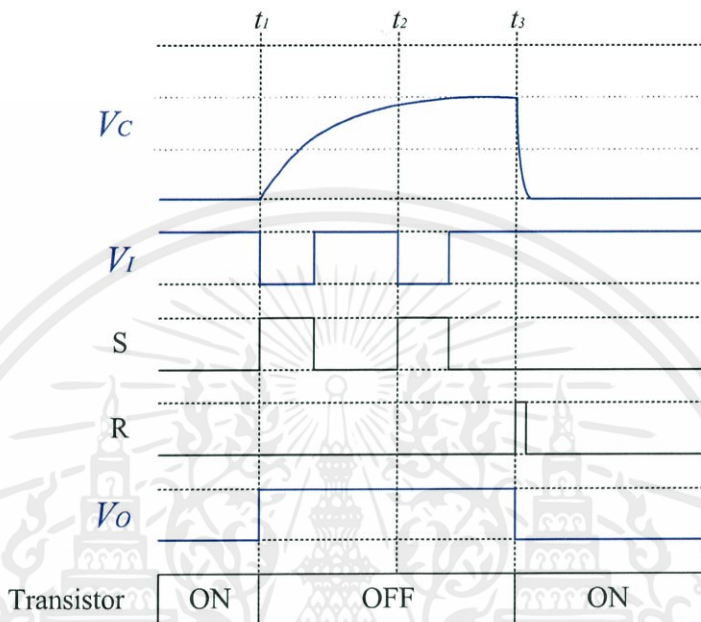
$$\frac{2V_{CC}}{3} = V_{CC}(1 - e^{-\frac{T}{R_1C_1}})$$

$$e^{-\frac{T}{R_1C_1}} = \frac{1}{3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา T = ln(3)R₁C₁ จึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T \approx 1.1R_1C_1 \tag{2.35}$$

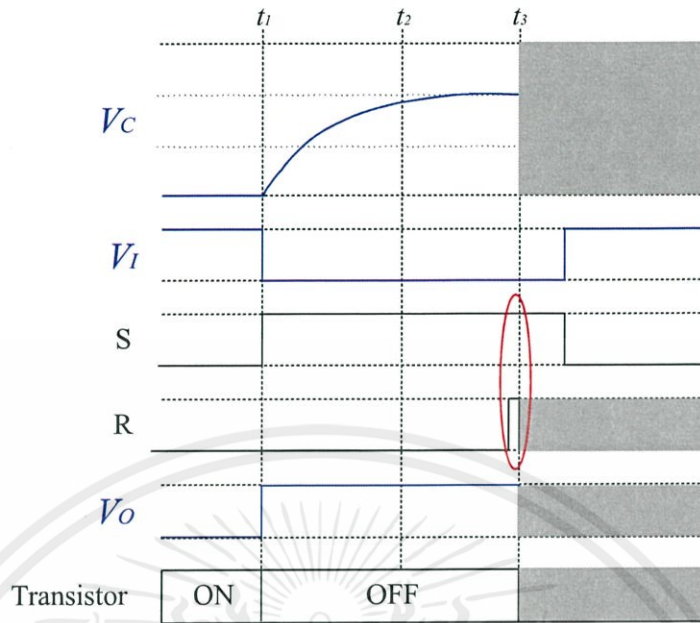
สังเกตได้ว่าความกว้างพัลส์ขึ้นอยู่กั R_1C_1 เท่านั้น ไม่ขึ้นอยู่กัค่าแรงดันซัพพลาย V_{CC} เราเรียกค่า R_1C_1 ว่า ค่าคงที่เวลา



รูปที่ 2.26 ผังเวลาการทำงานของวงจรโมโนสเตเบิลกรณีสรีทริก

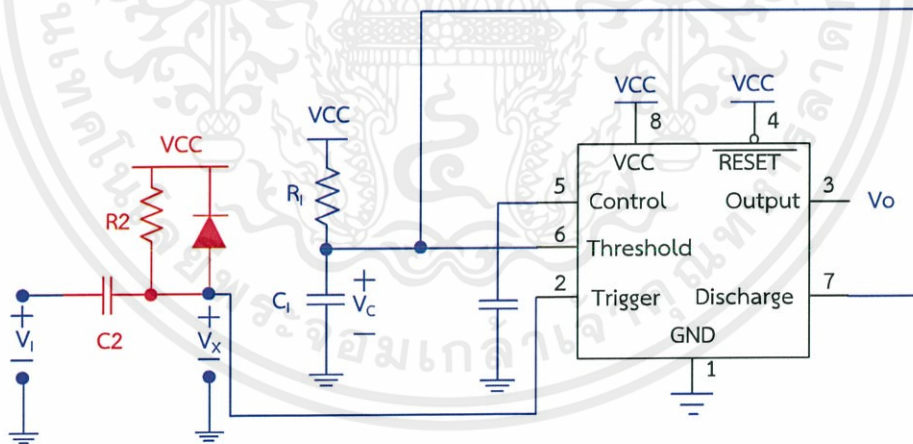
พิจารณาผังเวลาในรูปที่ 2.26 เกิดพัลส์ V_i ณ เวลา t_1 กลไกของวงจรทำงานไปตามปกติ แต่พอถึงเวลา t_2 เกิดพัลส์ V_i ขึ้นอีกครั้ง พัลส์ลูกที่สองนี้จะทำให้ขา S เป็นลอจิก ‘1’ เช่นกันแต่ทว่าแลตซ์อยู่ในสถานะ ‘1’ อยู่แล้ว พัลส์ลูกที่สองจึงไม่ส่งผลใดๆต่อวงจร พอเวลา t_3 ซึ่งห่างจาก t_1 เป็นระยะเวลา T เอาต์พุตก็จะกลับมาเป็น ‘0’ ศูนย์ เราจะเรียกลักษณะของการทริกของ V_i ที่ซ้อนกันขณะที่สถานะเป็น ‘1’ อยู่ว่า รีทริก ซึ่งจะเห็นได้ว่าวงจรโมโนสเตเบิลในรูปที่ 14.3 ไม่สามารถรีทริกได้ (การทริกครั้งที่สองไม่มีผล) ข้อควรระวังอีกประการหนึ่งวงจรโมโนสเตเบิลก็คือ ความกว้างของพัลส์อินพุต V_i มีค่ามากกว่า T จะทำให้เกสถานะที่ระบุไม่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.27 เมื่อ V_c มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึง $2V_{CC}/3$ แล้วขา R มีค่าเป็น ‘1’ แต่ขา V_i ยังมีเป็น ‘0’ อยู่ จึงเป็นผลให้ขา S เป็นลอจิก ‘1’ อยู่เช่นกัน ขา R และ S จึงแอกทีฟพร้อมกัน (สังเกตวงรีสีแดง) ส่งผลให้ไม่สามารถระบุสถานะของแลตซ์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.27 ผังเวลาการทำงานของวงจรโมโนสเตเบิลที่มีพัลส์อินพุตกว้างเกินไป

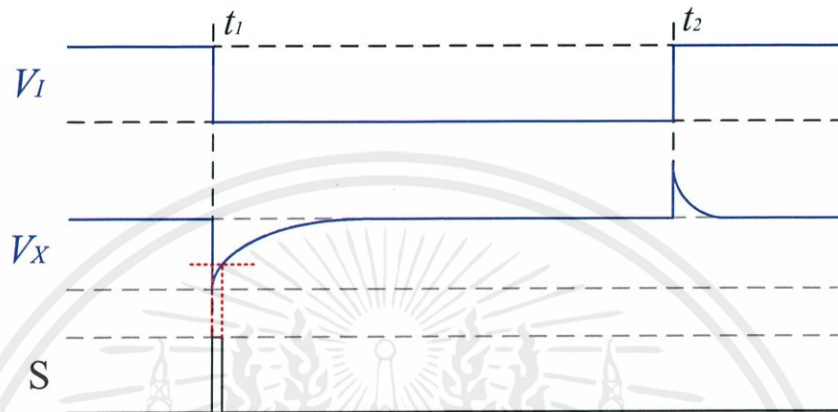
เพื่อป้องกันปัญหาอินพุตมีพัลส์กว้างเกินไป วงจรตรวจจับขอบขาของ (ส่วนสีแดงในรูปที่ 2.28) จึงถูกนำมาใช้รับอินพุตก่อนป้อนให้ขา Trigger ของไอซี 555



รูปที่ 2.28 วงจรโมโนสเตเบิลที่ใช้วงจรตรวจจับขอบขาของสัญญาณทริก

พิจารณาผังเวลาในรูปที่ 2.29 เพื่อศึกษาการทำงานของวงจรตรวจจับขอบขาของ ตอนเริ่มต้น V_i และ V_x มีค่าเป็น V_{CC} แรงดันตกคร่อม C_2 มีค่าเป็นศูนย์จึงไม่มีประจุอยู่ภายใน ต่อมา ณ เวลา t_1 V_i มีค่าเป็นศูนย์ V_x จึงถูกดึงลงให้มีค่าเป็นศูนย์ด้วยเนื่องจากแรงดันตกคร่อม C_2 มีค่าเป็นศูนย์และไม่สามารถเปลี่ยนแปลงทันทีได้ จากนั้น C_2 จะถูกอัดประจุผ่าน R_2 ทำให้แรงดัน V_x เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เพราะค่า R_2C_2 มีค่าน้อย ขณะที่ R_2 มีค่าน้อยกว่า $V_{CC}/3$ ขา S จึงแอกทีฟ จะเห็นได้ว่าช่วงเวลา

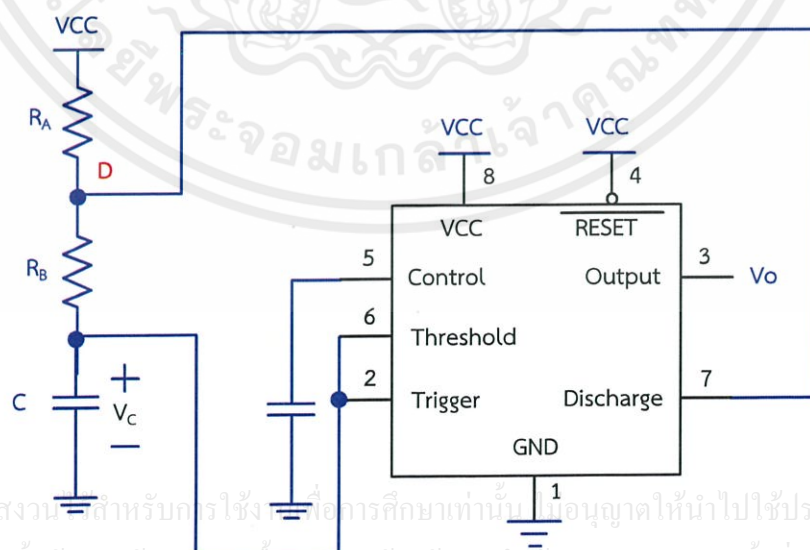
ขา S แยกที่พินนั้นจะขึ้นอยู่กั R_2C_2 โดยไม่ขึ้นกับความกว้างของพัลส์ V_I ต่อมา ณ เวลา t_2V_I มีค่ากลับขึ้นมาเป็น V_{CC} ทำให้ V_X มีค่าเท่ากับ V_I รวมกับแรงดันคร่อม C_2 ซึ่งก็เท่ากับ V_{CC} ดังนั้น $V_X \approx 2V_{CC}$ เมื่อ V_X มีค่ามากกว่า V_{CC} ประจุใน C_2 จึงถูกคายออกมาผ่าน R_2 และ ไดโอด ซึ่งทำให้การคายประจุเป็นไปอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งแรงดันตกคร่อม C_2 มีค่าเป็นศูนย์เหมือนในตอนเริ่มต้น



รูปที่ 2.29 ผังเวลาการทำงานของวงจรตรวจจับขอบขาลง

2.6.3 วงจรอะสเตเบิล

วงจรอะสเตเบิลทำหน้าที่สังเคราะห์รูปคลื่นกระบวนพัลส์ โดยสามารถกำหนดความถี่และมิติไซเคิลได้โดยการเลือกค่า R_A, R_B, C ในรูปที่ 2.30 และรูปที่ 2.31 แสดงวงจรอะสเตเบิลพร้อมโครงสร้างของไอซี 555

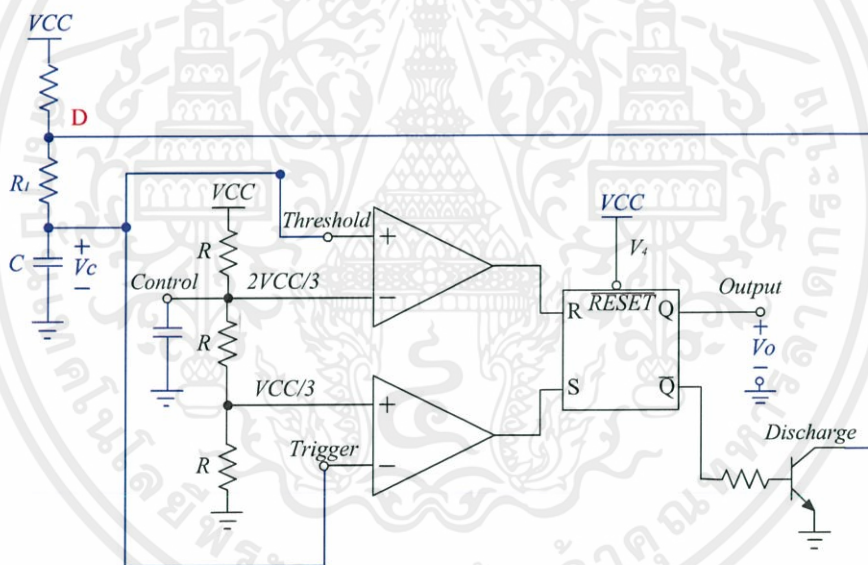


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.30 วงจรอะสเตเบิลที่ใช้ไอซี 555

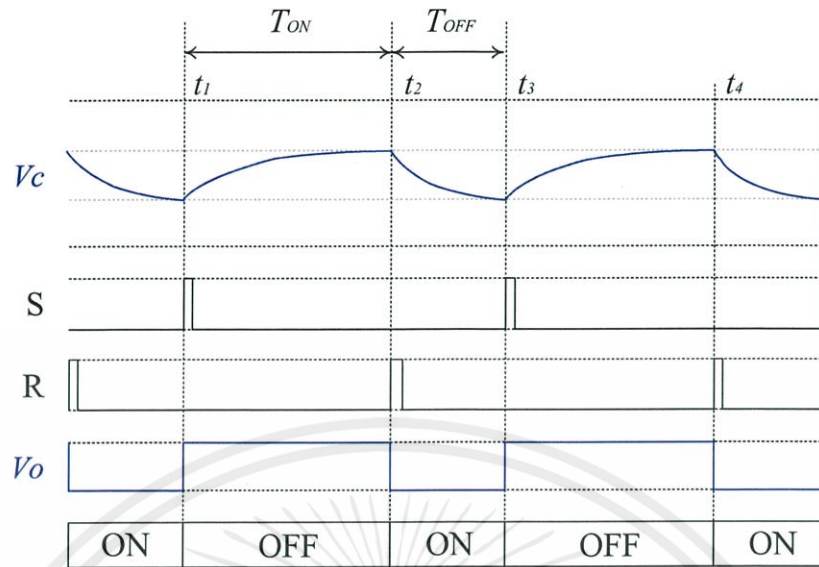
ขา Threshold และ Trigger จะถูกต่อเข้าด้วยกันและต่อไปที่ C แรงดันของขาทั้งสองก็คือ V_C และขา Discharge ต่อกับโหนด D ระหว่าง R_A กับ R_B พิจารณาผังเวลาในรูปที่ 2.32 เพื่อศึกษาการทำงานของวงจระะเตเบิล ก่อนเวลา t_1 กำหนดให้แลตซ์อยู่ในสถานะรีเซต V_0 มีค่าเป็น '0' ทรานซิสเตอร์จะลัดวงจรต่อโหนด D ลงกราว์ ทำให้เกิดการคายประจุผ่าน R_B ลงกราว์ จนทำให้ V_C มีค่าลดลงต่ำกว่า $V_{CC}/3$ ณ เวลา t_1 ทำให้ขา S แยกทีฟ แล้วทำให้แลตซ์เปลี่ยนสถานะเป็นเซต V_0 มีค่าเป็น '1' ทรานซิสเตอร์จะเปิดวงจรทำให้เกิดการอัดประจุผ่าน R_A และ R_B ที่ต่ออนุกรมกันไว้ ทำให้ V_C เพิ่มขึ้นจนมากกว่า $2V_{CC}/3$ ณ เวลา t_2 ทำให้ขา R แยกทีฟแล้วทำให้แลตซ์กลับมาเป็นสถานะรีเซตอีกครั้ง V_C จึงลดลงมาอีก วนเป็นเช่นนี้เรื่อยไป จะเห็นได้ว่า V_C จะแกว่งอยู่ระหว่าง $V_{CC}/3$ กับ $2V_{CC}/3$ และค่าคงที่เวลาของการอัดประจุมีค่าเป็น $(R_A+R_B)C$ ส่วนค่าคงที่เวลาของการคายประจุเท่ากับ $R_B C$ ทำให้ช่วงเวลาทั้งสองไม่เท่ากัน ช่วงเวลาการอัดประจุซึ่ง V_0 มีค่าเป็น '1' เรียกว่า T_{ON} และช่วงเวลาการคายประจุซึ่ง V_0 มีค่าเป็น '0' เรียกว่า T_{OFF} สัญเกต V_0 จะเป็นสัญญาณร่ายคาบ โดยมีคาบเป็น $T=T_{ON}+T_{OFF}$ ส่วนดิวิตีไซเคิล %D คำนวณได้จาก

$$\%D = \frac{T_{ON}}{T} \times 100\% = \frac{T_{ON}}{T_{ON}+T_{OFF}} \times 100\% \quad (2.36)$$



รูปที่ 2.31 วงจระะเตเบิลพร้อมแสดงโครงสร้างภายในไอซี 555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.32 พังเวลาการทำงานของวงจระะสเตรเบิลในรูปที่ 2.31

การคำนวณหาค่า T_{ON} และ T_{OFF} สามารถใช้สมการ (2.33) เป็นฐานได้ กำหนดให้ t_a คือเวลาที่ใช้อัดประจุโดยเริ่มจากศูนย์จนถึง $V_{CC}/3$ และ t_b คือเวลาที่ใช้อัดประจุโดยเริ่มจากศูนย์จนถึง $2V_{CC}/3$ ซึ่งคำนวณได้เป็น

$$t_a = \ln(3/2)(R_A + R_B)C$$

$$t_b = \ln(3)(R_A + R_B)C$$

$$T_{ON} = t_b - t_a = (\ln(3) - \ln(3/2))(R_A + R_B)C$$

$$T_{ON} \approx 0.693(R_A + R_B)C \quad (2.37)$$

$$V_c(t) = V_{CC} e^{-\frac{t}{R_1C_1}} \quad (2.38)$$

ส่วนการคำนวณหาค่า T_{OFF} ก็ทำได้ในทำนองเดียว แต่ใช้สมการคายประจุ (2.37) แทน โดยพิจารณา t_c เวลาที่ใช้คายประจุ จาก V_{CC} เหลือ $2V_{CC}/3$ และ t_d เวลาที่ใช้คายประจุจาก V_{CC} เหลือ $V_{CC}/3$ และ คำนวณ T_{OFF} ได้เป็น

$$T_{OFF} = t_d - t_c = (\ln(3) - \ln(3/2))R_B C$$

$$T_{OFF} \approx 0.693R_B C \quad (2.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก (2.36) และ (2.38) เราสามารถคำนวณหาคาบของเอาต์พุตได้เป็น

$$T = T_{ON} + T_{OFF} \approx 0.693(R_A + 2R_B)C \quad (2.40)$$

และจาก (2.35) และ (2.39) เราจะได้

$$\%D = \frac{R_A + R_B}{R_A + 2R_B} \times 100\% \quad (2.41)$$

จากสมการข้างบนสังเกตได้ว่า %D จะมีค่ามากกว่า 50% และเข้าใกล้ 50% เมื่อ R_A มีค่าน้อยๆ

2.7 หลักการทำงาน And gate

2.7.1 ลอจิกเกตพื้นฐาน (BASIC LOGIC GATES)

เครื่องคอมพิวเตอร์ เครื่องคำนวณเลข และอุปกรณ์ทางดิจิทัลมากมายที่สามารถทำงานให้กับมนุษย์ ได้อย่างน่าอัศจรรย์นั้น ล้วนประกอบขึ้นจากอุปกรณ์และวงจรทางดิจิทัล ที่มีการทำงานในลักษณะของลอจิกและวงจรดิจิทัลนั้น จะมีส่วนประกอบพื้นฐาน คือ ลอจิกเกต (Logic gate) ซึ่งจะมีการทำงานเหมือนระบบ เลขไบนารี (มีเลข 0 กับเลข 1) ดังนั้น บุคคลที่ต้องทำงานหรือเกี่ยวข้องกับระบบดิจิทัลอิเล็กทรอนิกส์ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเข้าใจและใช้งานได้อย่างถูกต้องของการทำงานแบบไบนารีของลอจิกเกต (logic gate) ในส่วนนี้จะศึกษาการทำงานของลอจิกเกตพื้นฐาน เช่น AND, OR, NOT, NOR และ NAND เพื่อเป็นพื้นฐาน ในการสร้างวงจรลอจิกที่ซับซ้อนต่อไป ค่าคงที่ลอจิกและตัวแปรลอจิก (logic constants and logic variables) พีชคณิตทางลอจิก ใช้สำหรับหาข้อเท็จจริงต่างๆ เกี่ยวกับการกระทำทางลอจิก ซึ่งจะแตกต่างกับพีชคณิต ทั่วๆ ไป ตรงที่พีชคณิตทางลอจิกประกอบด้วยชุดของตัวคงที่ และตัวแปรที่มีค่าได้เพียง 2 ค่าเท่านั้น คือ 0 และ 1 ตัวแปรนี้ จะเรียกว่า ตัวแปรลอจิก (Logic variables) อาจแทนด้วยตัวอักษร เช่น A, B, C, a, b, c,... ฯลฯ สำหรับค่าของตัวแปรลอจิกที่มีค่าเป็น 0 หรือ 1 ที่เวลาต่างๆ กันนั้น เราจะเรียกว่า ระดับลอจิก (logic level) ดังนั้น ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าของวงจรดิจิทัลที่ขั้วอินพุตและเอาต์พุตของวงจร เราสามารถแทนได้ด้วยระดับลอจิก เช่น ระดับแรงดันจาก 2 - 5 โวลต์ ให้มีค่าเป็นลอจิก 1 ดังนั้นค่าแรงดันในวงจรดิจิทัลจะมีระดับลอจิกเป็น 0 หรือ 1 ก็ขึ้นอยู่กับค่าจริงของการทำงานของวงจรการกระทำทางลอจิกพื้นฐาน สำหรับตัวแปรลอจิกดังที่ได้กล่าวมาแล้ว เราสามารถนำมากระทำกันด้วยตัวกระทำทางลอจิกพื้นฐาน มี 3 แบบ คือ

1. การคูณทางลอจิก เรียกว่า การคูณแบบ AND หรือ การกระทำ AND มีสัญลักษณ์ คือ เครื่องหมายคูณแบบจุด (.)
2. การบวกทางลอจิก เรียกว่า การบวกแบบ OR หรือ การกระทำ OR มีสัญลักษณ์ คือ เครื่องหมายบวก (+)
3. การคอมพลิเมนต์ทางลอจิก หรือการกลับค่า เรียกว่า การกระทำ NOT มีสัญลักษณ์คือขีดบน (-)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือมีการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิฉะนั้นผู้ใดเห็นว่าเป็นประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2 การกระทำ AND

ถ้ากำหนดให้ A และ B แทนตัวแปรอินพุตทั้งสอง ถ้าตัวแปร A มากระทำแบบ AND กับตัวแปร B ได้ผลลัพธ์ เป็น X ทำให้เขียนสมการ ลอจิก (ทางด้านเอาต์พุต x) ได้ดังนี้

$$X = A \times B$$

จากสมการลอจิก เครื่องหมาย (.) ก็คือการคูณแบบ AND ซึ่งสามารถเขียนตารางความจริงและสัญลักษณ์ได้ดังรูปที่ 1

A	B	$X = A \times B$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1



รูปที่ 2.33 แสดงตารางความจริงและสัญลักษณ์ของ AND Gate

เมื่อพิจารณาจากตารางความจริง จะเห็นว่าการคูณแบบ AND เหมือนกับการคูณทางพีชคณิตธรรมดา เมื่อใดก็ตามที่ A และ B เป็น 0 จะได้ผลคูณเป็น 0 แต่ถ้า A และ B เป็น 1 จะได้ผลคูณเป็น 1 ดังนั้นจากเหตุผลดังกล่าว เราสามารถสรุปได้ว่า การกระทำแบบ AND นั้น จะได้ผลคูณเป็น 1 ก็ต่อเมื่อ อินพุตทั้งหมดจะต้องเป็น 1 สำหรับการณอื่นๆ นอกจากนี้ จะได้ผลลัพธ์เป็น 0

จากสมการ $X = A \cdot B$ อ่านว่า "X" เท่ากับ A AND B สำหรับเครื่องหมายคุณนั้น เราสามารถเขียนใหม่ให้เหมือนพีชคณิตธรรมดาจะได้ $X = AB$ เนื่องจากการกระทำแบบแอนเหมือนกับการคูณทางพีชคณิตธรรมดานั่นเอง

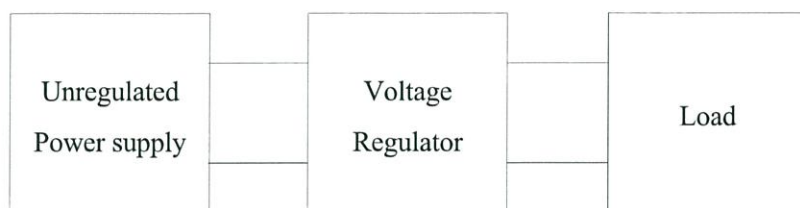
ถ้าเราจะให้ระดับลอจิกที่อินพุตควบคุม (ก็คืออินพุต B) เป็น 0 จะทำให้เอาต์พุต เป็น 0 สภาวะการทำงานในลักษณะนี้เรียกว่า Inhibit Condition แต่ถ้าเราให้อินพุตควบคุม (B) เป็น 1 สามารถทำให้อุปกรณ์ A ออกไปที่เอาต์พุตได้ เราเรียกลักษณะการทำงานนี้ว่า Enable Condition

2.8 ทฤษฎีวงจรรักษาระดับแรงดัน (Voltage Regulator Circuits)

วงจรรักษาระดับแรงดันคือ วงจรที่ต่อระหว่างแหล่งจ่ายไฟตรงไม่คงที่ (Unregulated Power Supply) กับโหลด มีหน้าที่จ่ายไฟตรงให้กับโหลดและสามารถรักษาแรงดันให้คงตัวขณะที่

- 1) โหลดเปลี่ยนแปลง นั่นคือกระแสขาออกเปลี่ยนแปลง
- 2) แรงดันของแหล่งจ่ายไฟตรงไม่คงค่า เปลี่ยนแปลงทั้งนี้รวมถึงระลอกคลื่นด้วย
- 3) อุณหภูมิของวงจรเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.34 บล็อกไดอะแกรมของแหล่งจ่ายไฟตรงคงค่าแรงดัน

จากบล็อกไดอะแกรม จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่ออกมาจากเอาต์พุตของวงจรคงค่าแรงดันคือบล็อกแรกในรูปที่ 2.34 ซึ่งยังไม่เรียบเท่าที่ควร ยังมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่คงที่ ในลักษณะคล้ายสัญญาณฟันเลื่อย เพราะว่าตัวเก็บประจุจะเก็บและคายประจุอยู่ตลอดเวลา ถ้าจะนำวงจรนี้ไปใช้งานเลยก็ได้ แต่ต้องใช้กับงานที่ไม่ต้องการความละเอียดของแหล่งจ่ายไฟมากนัก แต่ถ้าเป็นงานที่ต้องการความละเอียดของแหล่งจ่ายไฟ วงจรนี้จะใช้งานไม่ได้ หนทางที่จะนำมาแก้ไขคือ ใช้วงจรเรกกูเลเตอร์ ซึ่งจะทำหน้าที่ปรับแต่งสัญญาณที่ไม่ราบเรียบอยู่นั้น ให้เรียบจนเกือบเป็นไฟ DC 100%

การสร้างวงจรเรกกูเลเตอร์จะมีอยู่ 2 ลักษณะคือ การสร้างแบบอนุกรมกับโหลด และแบบขนานกับโหลด



ก. แบบอนุกรมกับโหลด

ข. แบบขนานกับโหลด

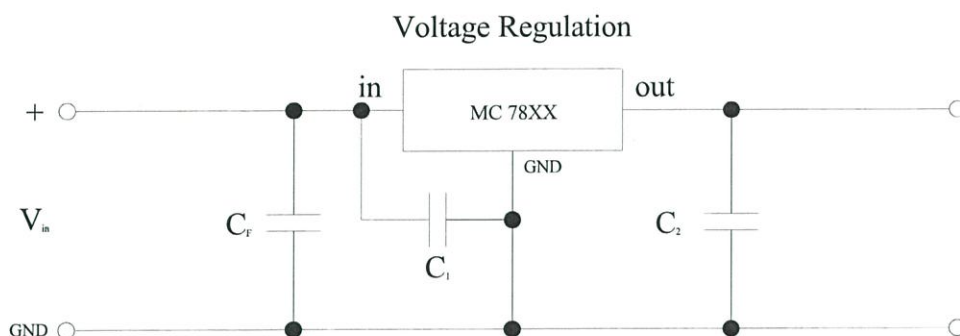
รูปที่ 2.35 การสร้างวงจรเรกกูเลเตอร์แบบอนุกรมและแบบขนาน

2.8.1 วงจรเรกกูเลเตอร์โดยใช้ไอซี 3 ขา แบบแรงดันเอาต์พุตคงที่

ไอซี 3 ขา แบบแรงดันเอาต์พุตคงที่ที่นิยมใช้กันมากคือตระกูล MC78XX และตระกูล MC79xx โดยตระกูล 78XX จะใช้แรงดันแบบบวกที่คงที่ ส่วนตระกูล 79XX จะให้แรงดันแบบลบคงที่โดยที่ XX จะบอกขนาดแรงดัน ตัวอย่างเช่น MC7805 คือ ไอซีตระกูล MC78XX ที่ให้แรงดันแบบบวกคงที่ ขนาด 5 V และ MC 7912 คือไอซีตระกูล MC79XX ที่ให้แรงดันแบบลบคงที่ ขนาด 12 V เป็นต้น

วงจรเรกกูเลเตอร์พื้นฐานโดยใช้ไอซีตระกูล MC78XX และ MC79XX ในรูปที่ 2.51 แสดงวงจรมาตรฐานของแหล่งจ่ายไฟแบบแรงดันเอาต์พุตคงที่โดยใช้ MC78XX เป็นวงจรเรกกูเลเตอร์ จะเห็นได้ว่าขา in ของ MC78XX จะต่อกับไฟบวกส่วนขา GND จะต่อกับไฟลบ 1 C ใส่ไว้เพื่อลดความเหนียวภายในไอซี ซึ่งมักใช้ค่า 1 μF แบบแทนทาลัมหรือ 0.1 μF แบบเซรามิก ส่วน C_2 มีไว้เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวน ซึ่งมักใช้ค่า 1 μF แบบแทนทาลัม หรือ 0.1 μF แบบเซรามิก การป้องกันแรงดันที่ขา in และขา out ของ MC78XX จะต้องมีค่าต่างกันพอสมควร โดยดูจากค่า $V_{in} - V_{out}$ ใน Data Sheet เช่น MC7805 ค่า $V_{in} - V_{out} = 2 \text{ V}$ ฉะนั้นแรงดันที่ขา in ต้องป้อนมากกว่า 7 V ขึ้นไปแต่ต้องน้อยกว่าค่า $V_{in}(\text{max})$ ซึ่งจาก Data Sheet มีค่าเท่ากับ 35 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์อื่นใด การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย



รูปที่ 2.36 วงจรแหล่งจ่ายไฟโดยใช้ MC78XX



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

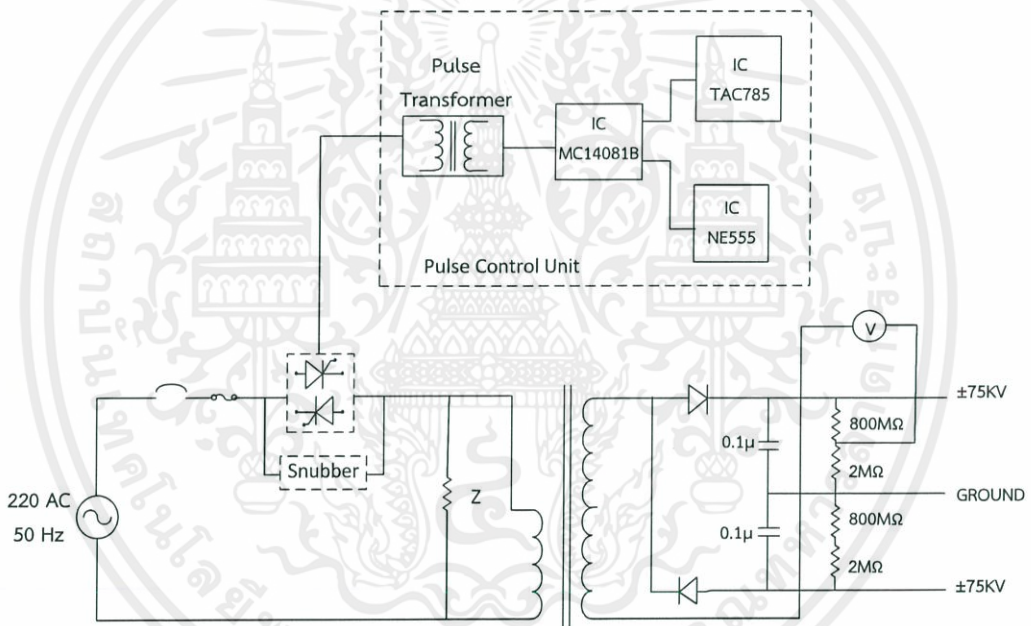
บทที่ 3

การออกแบบและประกอบสร้าง

เครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุที่ออกแบบและสร้างได้ใช้หลักการควบคุมมมเฟสของแรงดันที่จ่ายให้หม้อแปลงแรงสูงโดยการออกแบบสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนดังนี้

- 1) การออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมมมเฟส
- 2) การออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมไทรสเตอร์

โดยภาพรวมของเครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 และบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและสร้างในแต่ละส่วนต่อไป



รูป 3.1 วงจรเครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ชุดเครื่องควบคุมแรงดันอัตโนมัติที่ประกอบสร้าง

3.1 การออกแบบและสร้างชุดควบคุมมูมเฟส

เครื่องควบคุมแรงดันอัตโนมัติที่จะทำการสร้าง ได้กำหนดให้มีขนาดกำลังไฟฟ้าที่จ่ายได้เท่ากับ 5 kVA และมีขนาดแรงดันที่ขาออกไม่เกิน 220 V ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่ากระแสพิกัดได้จาก

$$I_N = \frac{S}{V} = \frac{5000}{220} = 22.73 \text{ A} \quad (3.1)$$

จากค่ากระแสพิกัดที่คำนวณได้ สามารถกำหนดขนาดของอุปกรณ์ต่างๆ ได้ดังนี้

3.1.1 เซอร์กิตเบรกเกอร์ (C.B.) เพื่อป้องกันกระแสลัดวงจรกำหนดให้ค่ากระแสตัดวงจรมีขนาดไม่ควรเกิน 3 เท่าของกระแสพิกัด [7] ดังนั้นจึงเลือกใช้ขนาด 2 เท่าของกระแสพิกัด

$$AT = 2 \times I_N = 45.45 \approx 50 \text{ A} \quad (3.2)$$

3.1.2 ตัวสัมผัสแบบแม่เหล็ก (K1) ใช้ควบคุมการจ่ายแรงดันกระแสสลับเข้าขั้วอาโนดของไทรสเตอร์โดยรับคำสั่งจากวงจรควบคุมและมีการติดตั้งตัวป้องกันโหลดเกิน

3.1.3 ฟิวส์ (Fuse) เพื่อป้องกันไทรสเตอร์เสียหายเนื่องจากกระแสเกิน การเลือกใช้ฟิวส์ควรมีขนาดไม่เกิน 2 เท่าของกระแสพิกัด [8] ดังนั้นจึงเลือกขนาด 1.5 เท่าของกระแสพิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ 1.5 × I_N = 34.09 ≈ 32 A ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (3.3) ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 ไทริสเตอร์ เลือกใช้ไทริสเตอร์กำลัง ที่ติดตั้งพร้อมชุดระบายความร้อนด้วยอากาศ โดยเลือกขนาดพิกัดกระแสเท่ากับ

$$1.5 \times I_N = 34.09 \approx 32 \text{ A} \quad (3.4)$$

และมีขนาดพิกัดทนแรงดันเลือกให้สามารถทนแรงดันได้มากกว่าหรือเท่ากับ 2-2.5 เท่าของ ค่ายอดแรงดันใช้งานปกติ [9]

$$2 \times V_{\text{PEAK}} = 2 \times 220\sqrt{2} = 662.25 \approx 700\text{V} \quad (3.5)$$

ดังนั้นจึงเลือกใช้ไทริสเตอร์ของ Semikron model SKKT106/18E ที่มีพิกัดกระแส 106 A และสามารถทนแรงดันย้อนกลับได้ 1800 V



รูปที่ 3.3 ไทริสเตอร์ Semikron model SKKT106/18E

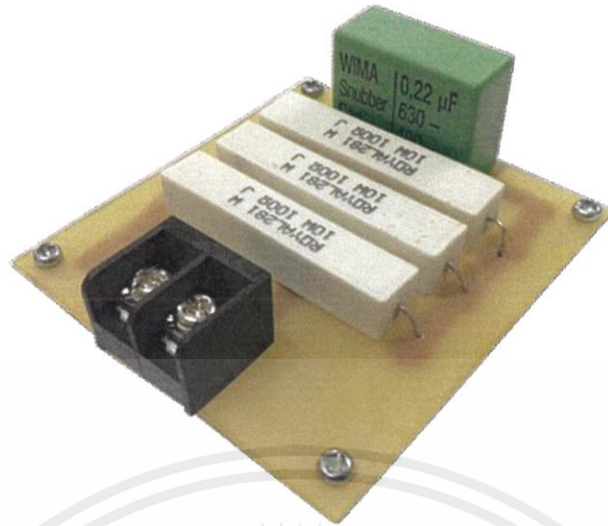
3.1.5 วงจรสับเบอร์ เพื่อป้องกันและลดอัตราการเพิ่มแรงดันต่อหน่วยเวลา ที่ตกคร่อม ไทริสเตอร์ขณะเปิดวงจรไม่ให้มีค่าสูงเกินพิกัดของไทริสเตอร์ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 จึงเลือกใช้ตาม ข้อเสนอแนะของไทริสเตอร์จากคู่มือไทริสเตอร์ ได้กำหนดให้ใช้

ค่าความต้านทานมีขนาด 33Ω 10 W

ค่าตัวเก็บประจุขนาด $0.22 \mu\text{F}$

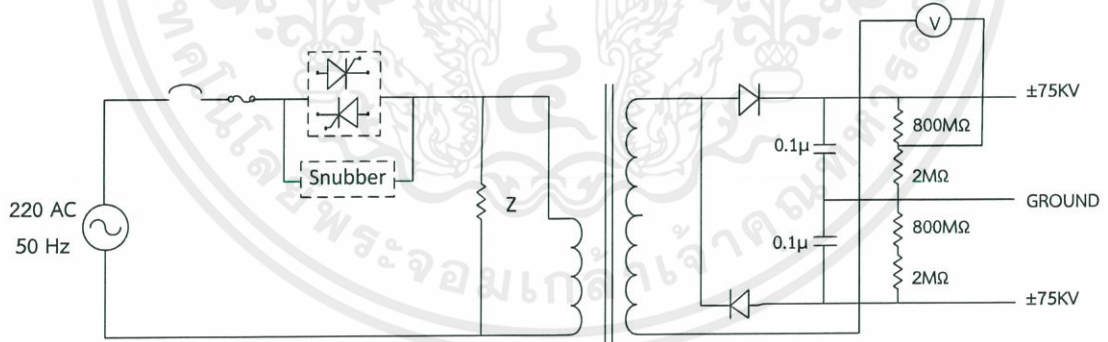
จากข้อเสนอแนะดังกล่าวจึงออกแบบและประกอบวงจรสับเบอร์ขึ้นเนื่องจากมีราคาประมาณ ร้อยละ 30 ของราคาชุดสำเร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 วงจรสับเบอร์

3.1.6 ดีแมกไนต์ซึ่งอิมพีแดนซ์ (Z_1) เนื่องจากการหยุดนำกระแสของไทรสเตอร์นั้นไม่สามารถหยุดนำกระแสเมื่อกระแสไหลตมมีค่าเท่ากับศูนย์ทันทีได้ เนื่องจากต้องรอระยะเวลาคืนตัวของประจุภายในรอยต่อของไทรสเตอร์และจะมีค่ายอดของกระแสค่าหนึ่ง ทำให้มีการเก็บพลังงานส่วนหนึ่งไว้ในค่าความเหนี่ยวนำร้าวของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง ดังนั้นจึงต้องต่อดีแมกไนต์ซึ่งอิมพีแดนซ์ขนานกับโหลดรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง เพื่อถ่ายเทพลังงานออกจากค่าความเหนี่ยวนำ และยังคงช่วยสร้างกระแสเริ่มต้นสำหรับให้ไทรสเตอร์สามารถทนที่สภาวะนำกระแสที่มุมจุดชนวนที่มีค่าแรงดันต่ำ โดยจากการทดลองได้เลือกใช้ค่าความต้านทานประมาณ 4.8Ω

รูปที่ 3.5 วงจรการต่อสำหรับการคำนวณค่า Z_1

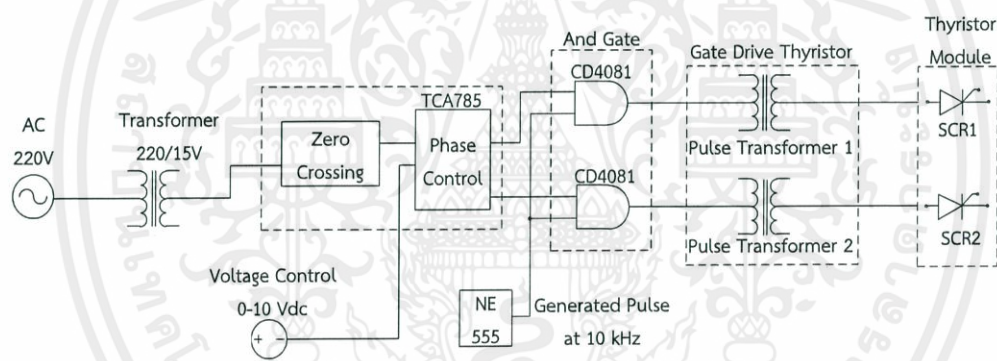
อิมพีแดนซ์ดังกล่าวได้สร้างโดยใช้หลอดไฟขนาด 100 W ขนานกัน 8 หลอด เพื่อให้ได้ค่าความต้านทาน 4.8Ω ซึ่งหลอดไฟสามารถรองรับกำลังไฟฟ้าที่แรงดัน 220 V ได้ เนื่องจากการใช้งานในแต่ละครั้งจะเกิดกำลังไฟฟ้าที่อิมพีแดนซ์สูง จึงจำเป็นต้องใช้หลอดไฟแทนอิมพีแดนซ์ที่พันจากขดลวด ซึ่งการวัดค่าอิมพีแดนซ์ดังกล่าว ใช้ True RMS Multimeter รุ่น Fluke 179 ในการวัดขนาดการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 หลอดไฟที่นำมาเป็นดีแมกเนโตซึ่งอิมพีแดนซ์

3.2 การออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมไทรสเตอร์

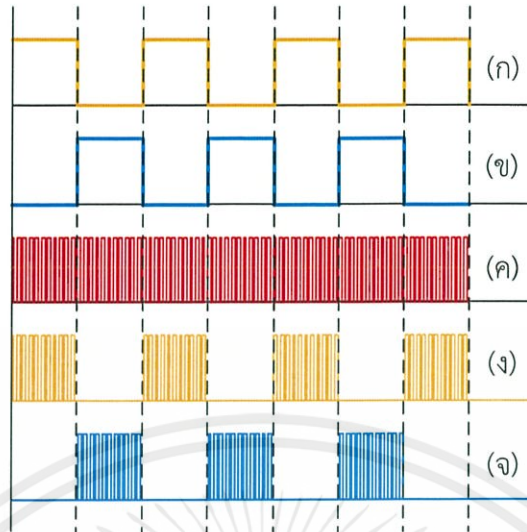
แผนผังของการออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมไทรสเตอร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.7 และเนื้อหาต่อไปนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและสร้างชุดควบคุมไทรสเตอร์



รูปที่ 3.7 แผนภาพการควบคุมไทรสเตอร์

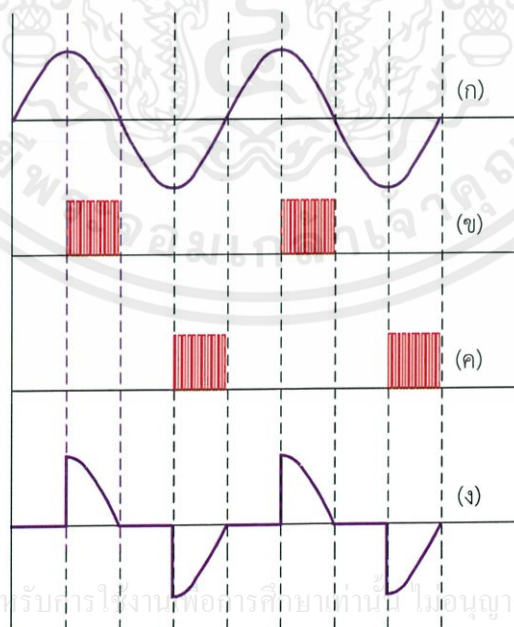
ในการออกแบบเครื่องควบคุมแรงดันอัตโนมัติ จะอาศัยไทรสเตอร์ในการควบคุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า โดยการทำงานของไทรสเตอร์ที่ใช้ควบคุมหม้อแปลง ซึ่งหม้อแปลงมีคุณลักษณะเป็นความต้านทานกับความเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกัน จะต้องอาศัยสัญญาณกระแสที่เป็นลักษณะพัลส์เทรนในการขับขาเกต ดังนั้นหลักการของการออกแบบควบคุมการทำงานของไทรสเตอร์ สามารถทำได้โดยการสร้างสัญญาณพัลส์ควบคุมมุมจุดชนวนและสัญญาณความถี่สูง แล้วนำสองสัญญาณนี้มารวมกัน เพื่อให้ได้สัญญาณพัลส์เทรนนำไปใช้ในการควบคุมการทำงานของไทรสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 สัญญาณพัลส์ที่มีมุมจุดชนวนของแรงดัน
เมื่อ (ก) สัญญาณพัลส์ที่มีมุมจุดชนวนแรงดันซีกบวก (ข) สัญญาณพัลส์ที่มีมุมจุดชนวนแรงดันซีกลบ
(ค) สัญญาณความถี่สูง (ง) สัญญาณพัลส์เทรนควบคุมการทำงานซีกบวก
(จ) สัญญาณพัลส์เทรนควบคุมการทำงานซีกลบ

เมื่อได้สัญญาณพัลส์เทรนก็จะนำสัญญาณไปควบคุมการจุดชนวนของไทรสเตอร์ ตามรูปที่ 3.9 (ก) คือสัญญาณแรงดัน 220 V ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ รูปที่ 3.9 (ข) และ 3.9 (ค) คือสัญญาณพัลส์เทรนที่ควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ซีกบวกและซีกลบที่มีมุม 90 องศา ตามลำดับ รูปที่ 3.9 (ง) คือ สัญญาณแรงดันที่ได้จากการควบคุมของไทรสเตอร์และเป็นสัญญาณที่จ่ายเข้าให้หม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 3.9 การควบคุมสัญญาณแรงดันด้วยไทรสเตอร์ที่มีมุม 90 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

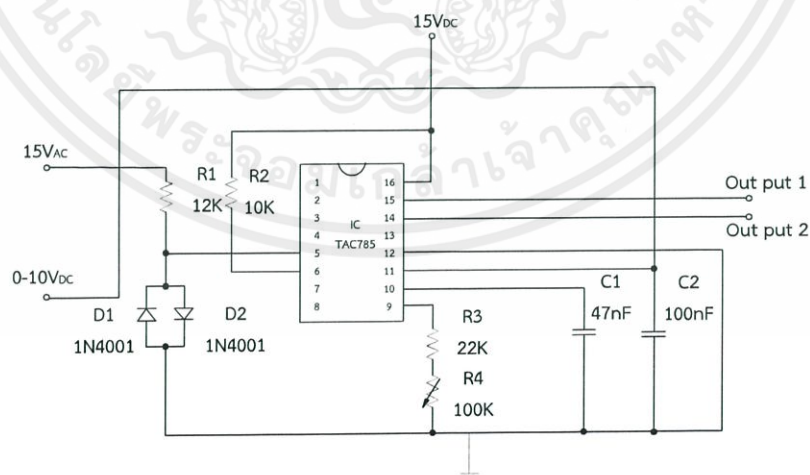
การออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมไทรสเตอร์ โดยการสร้างสัญญาณไปขับขาเกตของไทรสเตอร์ โดยสัญญาณที่ใช้ขับขาเกตจะเป็นลักษณะพัลส์เทรน สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วนการทำงานดังนี้

3.2.1 การสร้างสัญญาณควบคุมมุมจุดชนวนขาเกตของไทรสเตอร์

การควบคุมมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับใช้การควบคุมมุมจุดชนวนเกตของไทรสเตอร์ โดยอาศัยคุณสมบัติของวงจรรวมเฉพาะงาน คือ TCA 785 ของบริษัท Siemens ทำให้ลดขั้นตอนการออกแบบวงจรและใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์น้อยลงรวมทั้งฟังก์ชันการใช้งานมีสมรรถนะการควบคุมที่เชื่อถือได้ โดยมีคุณสมบัติดังนี้

- 1) สามารถจุดชนวนเกตไทรสเตอร์ได้ 2 ตัวต่อวงจรรวม 1 ตัว
- 2) ควบคุมมุมจุดชนวนเกตได้ระหว่าง 0° ถึง 180°
- 3) สามารถควบคุมความกว้างของสัญญาณจุดชนวนได้
- 4) กระแสจุดชนวนเกตสามารถจ่ายได้สูงสุด 250 มิลลิแอมแปร์
- 5) สัญญาณจุดชนวนเกตสามารถควบคุมได้โดยขา Inhibit
- 6) สัญญาณจุดชนวนเกตสามารถที่จะกำหนดความกว้างของรูปคลื่นได้
- 7) ความถี่ที่ใช้งาน 10-500 เฮิรตซ์
- 8) ใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิ -25°C ถึง 180°C

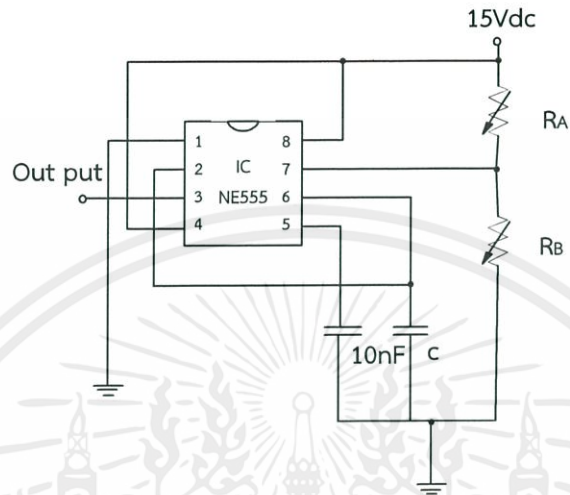
ซึ่งการต่อวงจรได้ต่อตามแบบในรายละเอียดคุณสมบัติของอุปกรณ์ ซึ่งมีลักษณะการวางอุปกรณ์และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุมมุมเฟส ซึ่งการทำงานของวงจรจะต้องจ่ายไฟเลี้ยงกระแสตรง 15 V ให้กับ TCA 785 และมีสัญญาณไฟฟ้กระแสสลับ 15 V ความถี่ 50 Hz จ่ายเข้าวงจรเพื่อเป็นสัญญาณอ้างอิงในการตรวจจับมุมผ่านศูนย์ของระบบไฟฟ้า โดยการควบคุมมุมจุดชนวนจะขึ้นอยู่กับแรงดันควบคุม 0-10 V ที่จ่ายให้กับวงจร ซึ่งถ้าแรงดันควบคุมมากจะทำให้มุมในการจุดชนวนมาก ส่งผลให้ได้แรงดันที่ต้องการควบคุมน้อย ในทางกลับกันถ้าแรงดันควบคุมน้อยจะทำให้มุมจุดชนวนน้อย ส่งผลให้ได้แรงดันควบคุมมาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.10 วงจรควบคุมมุมจุดชนวนขาเกตของไทรสเตอร์ ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การสร้างสัญญาณพัลส์เทรนความถี่สูง

ในการสร้างและออกแบบสัญญาณพัลส์เทรนความถี่สูงนั้น อาศัยคุณสมบัติของวงจรเฉพาะงาน คือ NE 555 โดยนำมาต่อต่อในลักษณะของวงจระอสเตเบิล ซึ่งทำหน้าที่สังเคราะห์รูปคลื่นพัลส์เทรน โดยกำหนดค่าตัวที่ไซเคิล 50 % และความถี่ของพัลส์เทรน 15 kHz



รูปที่ 3.11 วงจระอสเตเบิลที่ใช้ NE555

หลังจากกำหนดค่าตัวที่ไซเคิลและความถี่ของพัลส์เทรน ก็จะมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังนี้

$$\text{กำหนดค่า } C = 220 \text{ pF}$$

$$R_A = 7 \text{ k}\Omega$$

จากสมการที่ 2.36 สามารถคำนวณหาค่า R_B ได้ดังนี้

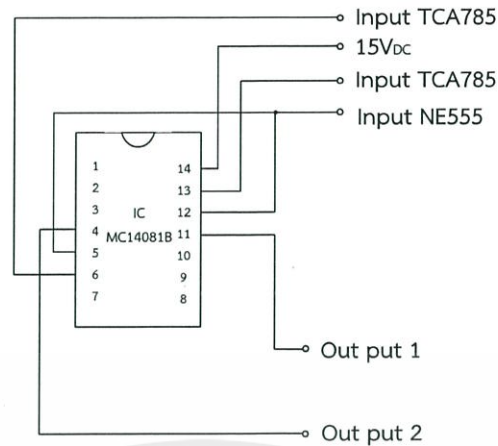
$$2R_B = \frac{1}{0.693fC} - R_A \quad (3.6)$$

จะได้ $R_B = 215 \text{ k}\Omega$

3.2.3 การรวมสัญญาณควบคุมมุมจุดชนวนกับสัญญาณพัลส์เทรนความถี่สูง

ในการควบคุมมุมจุดชนวนไทรสเตอร์เราต้องใช้สัญญาณจุดชนวนที่เป็นพัลส์เทรน เนื่องจากการใช้ไทรสเตอร์ควบคุมหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงมีคุณสมบัติเป็นโหลดความต้านทานต่ออนุกรมกับความเหนี่ยวนำ จึงจำเป็นต้องใช้สัญญาณกระแสที่มีลักษณะพัลส์เทรนจ่ายให้กับขาเกตของไทรสเตอร์ การรวมสัญญาณจะใช้วงจรรวมเฉพาะงาน คือ MC14081B ซึ่งเป็นแอนเกต เพื่อรวมสัญญาณควบคุมมุมจุดชนวนกับสัญญาณพัลส์เทรนความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อใช้ในการใช้งานโดยไม่แสวงหาผลกำไร ในอนาคตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คิดเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

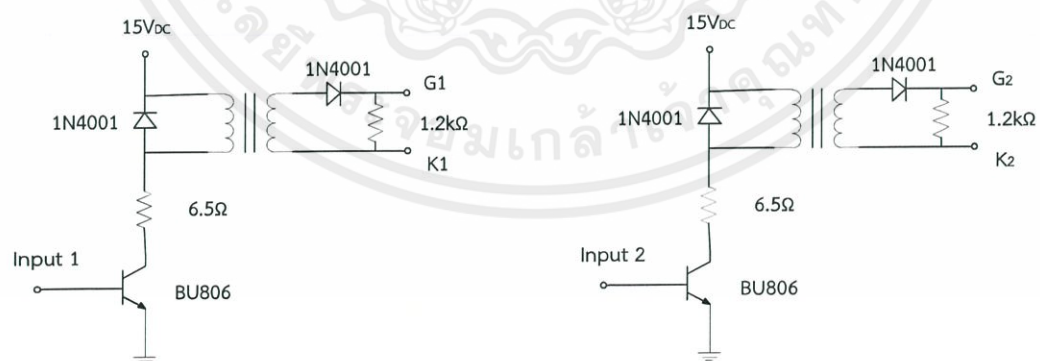


รูปที่ 3.12 ลักษณะการต่อใช้งาน MC14081B

3.2.4 การแยกโดดทางไฟฟ้าของสัญญาณกระแสชับเกิดกับวงจรกำลัง

เมื่อได้สัญญาณควบคุมมมเฟสมาจาก MC14081B จะนำสัญญาณไปเข้าขาเบสของทรานซิสเตอร์เพื่อควบคุมการสวิตซ์ของทรานซิสเตอร์ BU 806 เพื่อควบคุมกระแสที่ใช้ขับขาเกตของไทรสเตอร์ โดยค่าของกระแสจะขึ้นอยู่กับค่าของความต้านทานที่ต่ออยู่ที่ขาคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ ซึ่งมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณทำให้เกิดกระแส จากการทดลองเพื่อให้ได้กระแสชับเกิดที่เพียงพอและอุปกรณ์สามารถทนต่อกระแสได้ จึงเลือกใช้ค่าความต้านทาน 6.5Ω โดยใช้ความต้านทานขนาด 39Ω $5 W$ มาต่อขนานกัน 6 ตัว ซึ่งกระแสชับเกิดที่สร้างขึ้นจะต่ออยู่ที่ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงสัญญาณพัลส์อัตราส่วน 1:1 และด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงสัญญาณพัลส์ จะมีไดโอดต่ออยู่เพื่อเรียงกระแส จากนั้นจะนำไปต่อเข้ากับขาเกตของไทรสเตอร์

ซึ่งการแยกโดดทางไฟฟ้าระหว่างสัญญาณที่มาจากวงจรควบคุมมมเฟสกับวงจรกำลัง โดยหม้อแปลงสัญญาณพัลส์จะช่วยป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับวงจรควบคุมมมเฟส ลักษณะต่อแสดงวงจรแยกโดดทางไฟฟ้าของสัญญาณชับเกิดทั้ง 2 ชุดแสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.13 วงจรแยกโดดทางไฟฟ้าของสัญญาณกระแสชับเกิดทั้ง 2 ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า จากส่วนต่างๆ ที่ได้กล่าวมาในส่วนของกรอกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมไทรสเตอร์ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ และขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏไว้ ไม่สามารถนำมาใช้ เมื่อนำวงจรแต่ละส่วนมาประกอบกันเพื่อใช้เป็นชุดควบคุมไทรสเตอร์ ก็จะได้วงจรดังรูป 3.12

บทที่ 4

การทดสอบและวิเคราะห์ผล

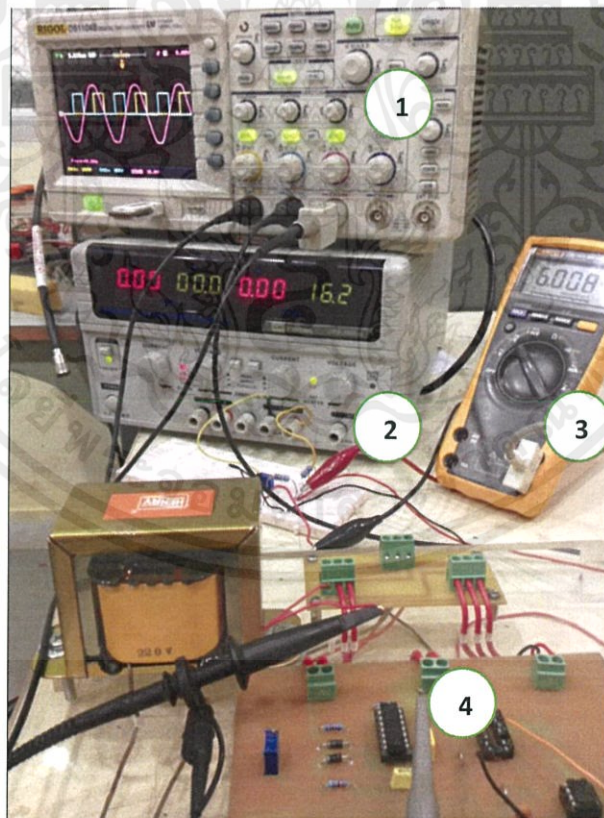
4.1 การทดสอบวงจรควบคุมแต่ละส่วน

ในบทที่ 3 ได้กล่าวถึงการออกแบบและประกอบสร้างวงจรควบคุมแต่ละส่วน ซึ่งหลังจากประกอบสร้างแล้วได้นำมาทดสอบวงจรควบคุมแต่ละส่วนดังนี้

4.1.1 การทดสอบวงจรสร้างสัญญาณควบคุมมุมจุดชนวนไทรสเตอร์

การทดสอบวงจรสร้างสัญญาณควบคุมมุมจุดชนวนไทรสเตอร์ด้วยการป้อนแรงดันควบคุมและวัดสัญญาณพัลส์ โดยใช้อุปกรณ์ดังต่อไปนี้

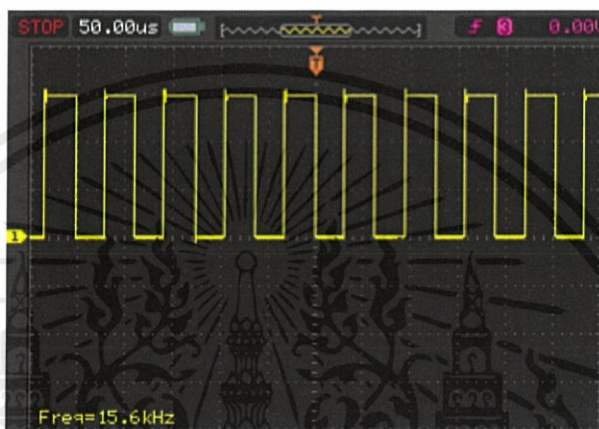
- 1) Digital Oscilloscope RIGOL/DS11048
- 2) DC Power supply (0-30V,0-5A)
- 3) มัลติมิเตอร์ Fluke179
- 4) วงจรที่ใช้ในการทดสอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวงจรสร้างสัญญาณควบคุมมุมจุดชนวนไทรสเตอร์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.1 การทดสอบสัญญาณความถี่จาก ไอซี NE 555

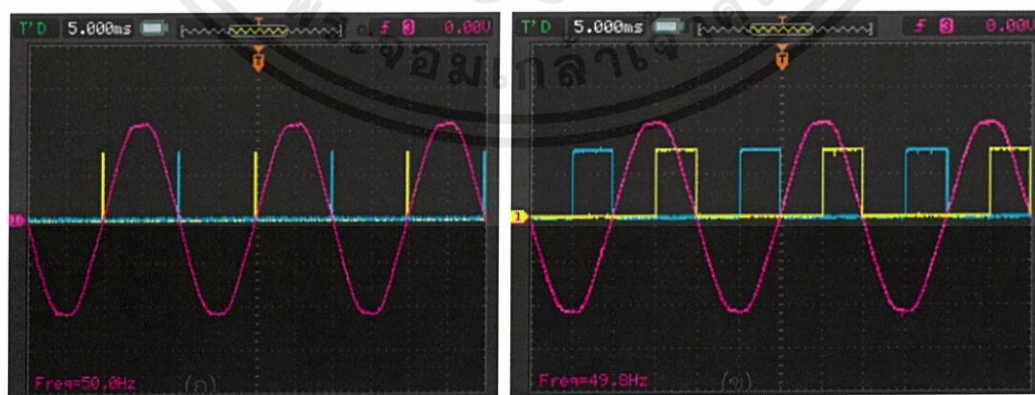
ในการสร้างสัญญาณความถี่เพื่อไปรวมสัญญาณควบคุมมุมจุดชนวนของ TCA 785 โดยในการควบคุมการจุดชนวนสำหรับโหลด RL นั้น จะต้องใช้สัญญาณพัลส์เทรนที่มีความถี่ 10 kHz ขึ้นไป ซึ่งผลที่ได้จากการทดลอง คือ สัญญาณความถี่ 15.6 kHz เนื่องจากจะทำให้ได้กระแสเกตที่เหมาะสมในการขับไทรสเตอร์



รูปที่ 4.2 สัญญาณความถี่ 15.6 kHz

4.1.1.2 การทดสอบสัญญาณควบคุมมุมจุดชนวนจาก TCA 785

การควบคุมมุมเฟสของแรงดันจะใช้ TCA 785 เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมมุมจุดชนวนโดยภายในจะมีการสร้างสัญญาณตรวจจับมุมผ่านศูนย์ของแรงดันอ้างอิง ซึ่งในการควบคุมมุมจุดชนวนจะต้องอาศัยการจ่ายแรงดันควบคุม 0-10 V ให้กับ TCA 785 โดยเมื่อแรงดันควบคุมมากจะทำให้ได้มุมจุดชนวนมาก และแรงดันน้อยจะทำให้ได้มุมจุดชนวนน้อย ดังรูป 4.3

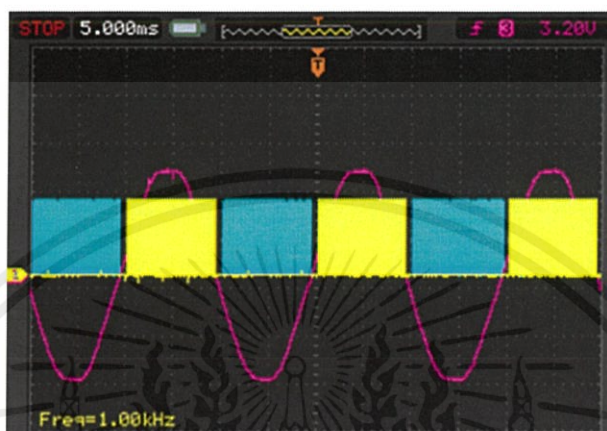


รูปที่ 4.3 สัญญาณจุดชนวนซิกบวก (สีเหลือง) ซิกลบ (สีฟ้า) และแรงดันอ้างอิง (สีม่วง)

โดยป้อนแรงดันควบคุม 10V,6V ซึ่งเป็นไปตามรูป (ก) และ (ข) ตามลำดับ

4.1.1.3 ทดสอบการรวมสัญญาณพัลส์ด้วยลอจิกเกต

การรวมสัญญาณความถี่ของไอซี NE 555 และสัญญาณควบคุมการจุดชนวนของ TCA 785 โดยใช้ AND GATE MC14018B เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์เทรนเป็นสัญญาณควบคุมมุมจุดชนวนให้กับ ไทริสเตอร์

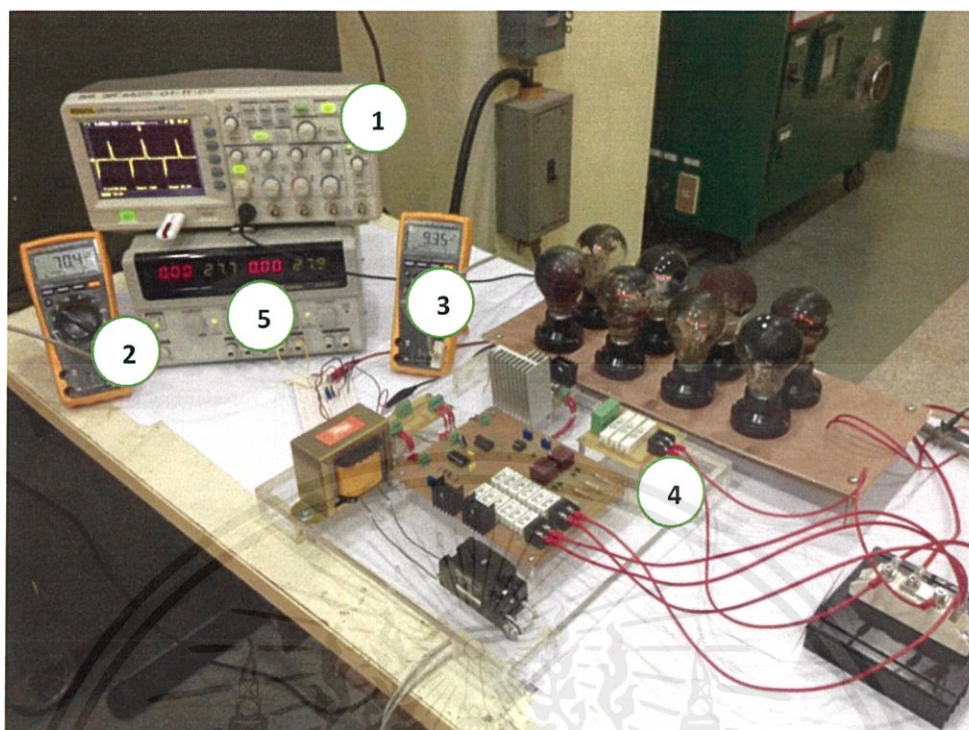


รูปที่ 4.4 สัญญาณพัลส์เทรนที่ได้จากการรวมสัญญาณ

4.1.2 การทดสอบวงจรควบคุมมุมเฟส

ทำการทดสอบป้อนแรงดันอัดประจุโดยการป้อนแรงดันควบคุมปรับค่าด้วยมือ ซึ่งความละเอียดของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงนั้นมีค่าไม่เพียงพอ จึงต้องให้โวลต์เตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทานมาช่วยเพื่อเพิ่มความละเอียด เพื่อจ่ายให้กับวงจรควบคุมมุมเฟส โดยการทดสอบการทำงาน จะจ่ายแรงดันควบคุมไปควบคุมการทำงานของไทรสเตอร์ เพื่อควบคุมการขึ้นแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้าและในการขึ้นแรงดันไม่ควรขึ้นแรงดันเกิน 120 kV (80% ของพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้า) เพื่อป้องกันหม้อแปลงเสียหาย ซึ่งการทดสอบมีการต่อวงจรดังรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวงจรควบคุมมุมเฟส

- เมื่อ
- 1) Digital Oscilloscope RIGOL/DS11048
 - 2) Multimeter FLUKE179 วัดด้านแรงดันสูงโดยค่าที่ได้เป็นค่าผ่านดิโวลเตอร์
ค่าจริง=ค่าที่วัดได้ x 1000
 - 3) Multimeter FLUKE179 วัดแรงดันควบคุม
 - 4) วงจรที่ใช้ในการทดสอบ
 - 5) DC Power supply (0-5A,0-30V) เพื่อจ่ายแรงดันควบคุมโดยมีโวลต์เตจดิโวลเตอร์เพื่อเพิ่มความละเอียดในการจ่ายแรงดัน

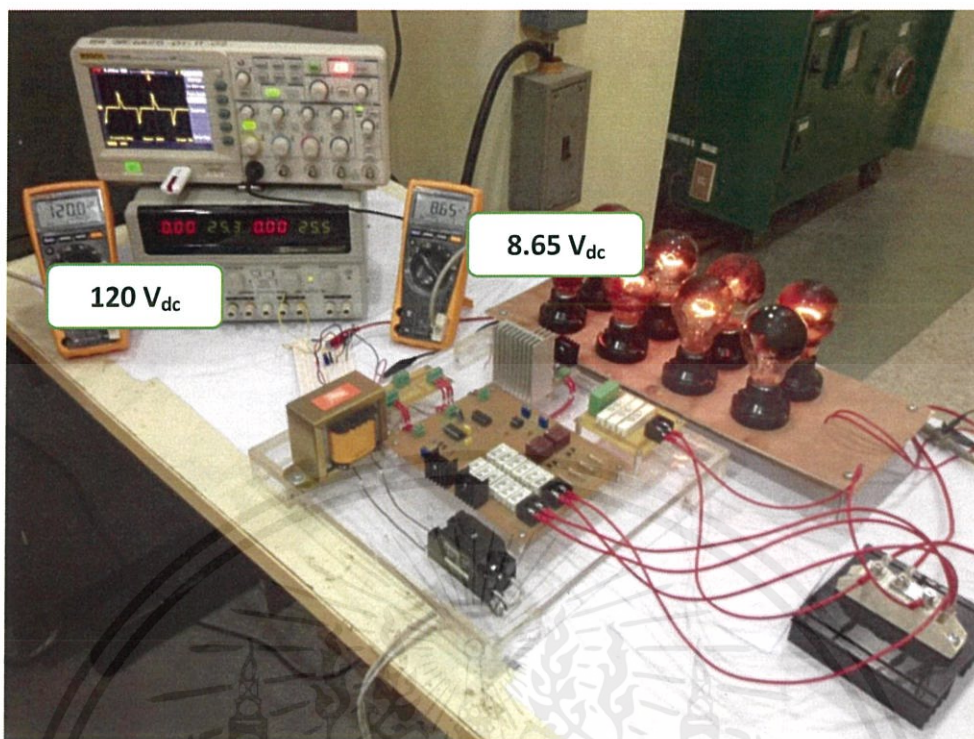
ในการทดสอบ ได้ทำการป้อนแรงดันควบคุมให้กับวงจรควบคุมมุมเฟสของไทรสเตอร์ เพื่อให้ไทรสเตอร์ควบคุมการขึ้นแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยการสับรูปคลื่นของแรงดันด้านปฐมภูมิแล้วจ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งในการวัดค่าของแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิได้ใช้ Digital Oscilloscope RIGOL/DS11048 ในการวัดค่าแรงดันค่ายอดและแสดงรูปคลื่นของแรงดัน ซึ่งโครงสร้างภายในทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงจะมีวงจรเรียงกระแสแรงสูงต่ออยู่ภายในตัวหม้อแปลง ทำให้แรงดันที่ออกมาจากหม้อแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ในการวัดแรงดันใช้โวลต์เตจดิโวลเตอร์อัตราส่วน 1000:1 ของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง แล้วใช้ Multimeter FLUKE179 วัดแรงดันทุติยภูมิ ซึ่งผลการทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานห้องปฏิบัติการเท่านั้น มิฉะนั้นผู้ใดที่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบวงจรควบคุมมูมเฟส

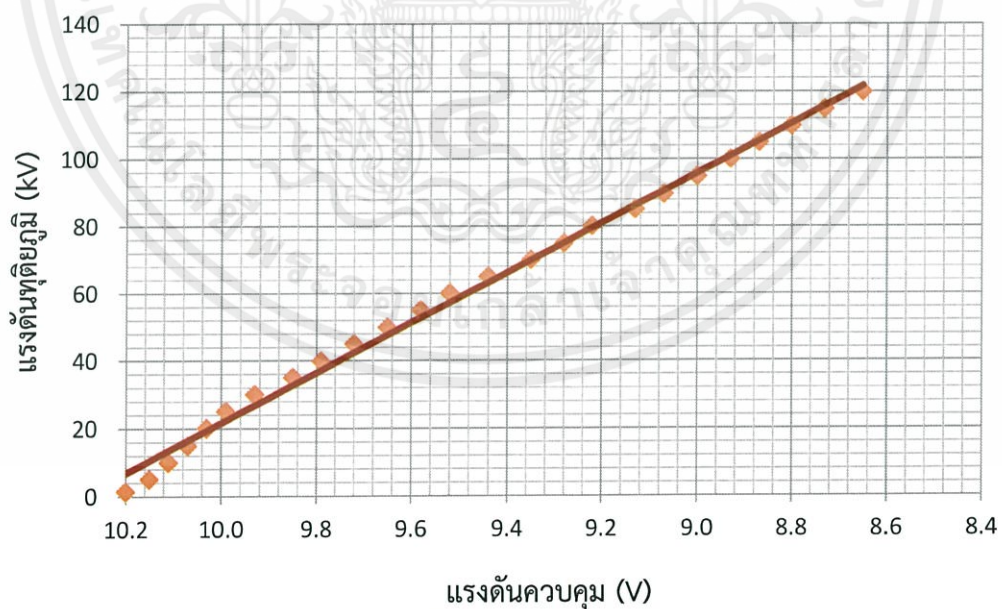
แรงดันควบคุม (V_{dc})	แรงดันด้านปฐมภูมิ ของหม้อแปลง (V_{peak})	แรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง (kV_{peak})		
		แรงดันอัดประจุ ที่ต้องการ	แรงดันอัดประจุ ที่วัดได้	%Error
10.20	8.00	-	1.43	-
10.15	16.53	5	5.01	0.20
10.11	26.47	10	10.01	0.07
10.07	34.40	15	14.96	0.24
10.03	42.47	20	20.05	0.23
9.99	49.53	25	25.11	0.43
9.93	57.07	30	30.03	0.11
9.85	65.33	35	35.08	0.23
9.79	72.67	40	40.04	0.10
9.72	80.00	45	45.07	0.15
9.65	86.67	50	49.89	0.21
9.58	93.33	55	55.11	0.21
9.52	103.33	60	59.99	0.01
9.44	112.67	65	65.01	0.01
9.35	118.00	70	70.04	0.05
9.28	125.33	75	74.98	0.03
9.22	131.33	80	80.07	0.08
9.13	136.67	85	85.07	0.08
9.07	143.33	90	89.69	0.34
9.00	152.67	95	94.93	0.07
8.93	156.00	100	100.09	0.09
8.87	165.33	105	105.03	0.03
8.80	173.33	110	109.98	0.02
8.73	181.33	115	115.04	0.03
8.65	188.67	120	120.03	0.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



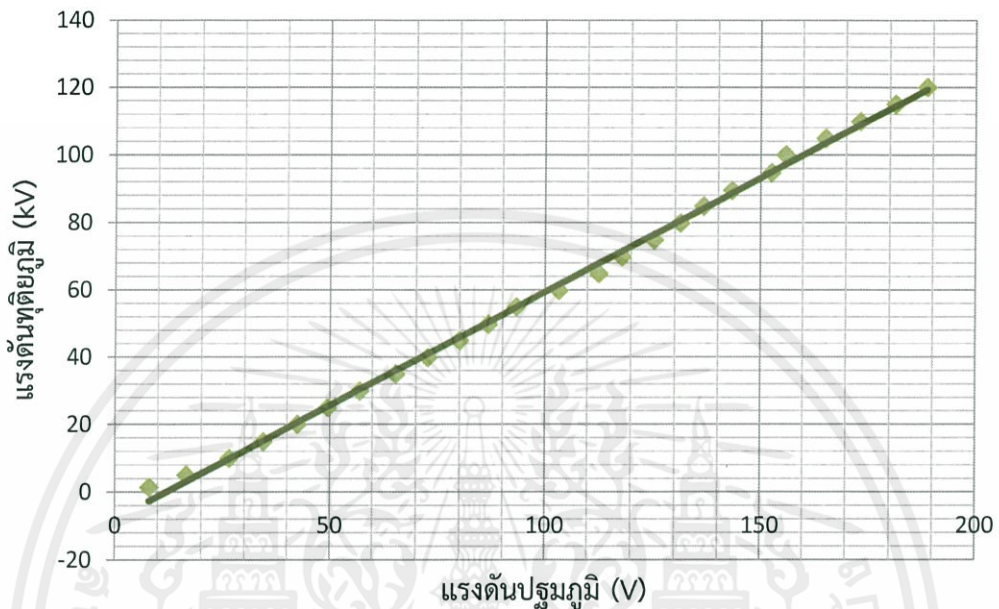
รูปที่ 4.6 แสดงแรงดันทุติยภูมิที่วัดได้ 120 V_{dc} โดยใช้แรงดันควบคุม $8.65\text{ V}_{\text{dc}}$

จากผลการทดสอบสามารถนำข้อมูลที่ได้มาวาดเป็นกราฟเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของการทำงานของชุดควบคุมมูเฟสของการขึ้นแรงดันได้ดังรูปที่ 4.7 และ รูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันควบคุม ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า กับค่าแรงดันทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันควบคุมกับค่าแรงดันทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า พบว่าในช่วงแรงดันทุติยภูมิต่ำกว่า 30 kV ช่วงระยะของแรงดันควบคุมจะค่อนข้างแคบ เนื่องมาจากการสับรูปคลื่นไซน์ของไทรสเตอร์ ซึ่งลักษณะของรูปคลื่นไซน์ทำให้การเพิ่มขึ้นของแรงดันค่ายอดที่แรงดันต่ำ เพิ่มขึ้นเร็วและเป็นเชิงเส้นกว่าการเพิ่มขึ้นของแรงดันค่ายอดที่แรงดันสูง



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันปฐมภูมิกับค่าแรงดันทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันปฐมภูมิกับค่าแรงดันทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า พบว่ามีอัตราส่วนของการขึ้นแรงดันในลักษณะเชิงเส้น ตามคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการดำเนินงานในโครงการ

จากการประกอบสร้างเครื่องควบคุมการขึ้นแรงดันอัตโนมัติประยุกต์เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ โดยใช้หลักการตัดรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยไทรสเตอร์เพื่อควบคุมแรงดันกระแสสลับค่ายอด ซึ่งการทำงานของไทรสเตอร์นั้นอาศัยสัญญาณกระแสขาเข้าของไทรสเตอร์ การสร้างสัญญาณนี้ใช้ วงจรรวม TCA 785 เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ควบคุมมุมจุดชนวน NE555 สร้างสัญญาณพัลส์ความถี่สูง แล้วนำสัญญาณสองสัญญาณนี้มาใช้รวมกันโดยใช้แอนเกต จะได้สัญญาณในลักษณะพัลส์ทรีน จาก ผลการทดสอบพบว่าสามารถเริ่มขึ้นแรงดันอัตโนมัติเริ่มต้นได้ที่ 2 kV และขึ้นแรงดันอัตโนมัติสูงสุดได้ที่ 120 kV ซึ่งความละเอียดของการขึ้นแรงดันสามารถขึ้นแรงดันได้ที่ละ 1 kV โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของการขึ้นแรงดันอยู่ที่ 0.13 % จะเห็นว่าการขึ้นแรงดันอัตโนมัติของเครื่องควบคุมการขึ้นแรงดันอัตโนมัติประยุกต์เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ในการควบคุมมุมเฟสของแรงดันให้ความแม่นยำกว่า การขึ้นแรงดันแบบเดิมโดยการใช้หม้อแปลงปรับแรงดัน

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1) มีความละเอียดในการเพิ่มของระดับแรงดันมากกว่าการขึ้นแรงดันด้วยการเพิ่มแรงดันด้วยการปรับวารีแอก แต่ความละเอียดนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการจ่ายแรงดันควบคุมของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ว่ามีความละเอียดเพียงใด ซึ่งแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังมีอยู่นั้นยังมีความละเอียดไม่มากนัก และอีกสาเหตุหนึ่งก็คือการปรับแรงดันควบคุมของผู้ปฏิบัติงาน

2) ช่วงระยะของแรงดันควบคุมในช่วงขึ้นแรงดันเริ่มต้นถึง 30 kV นั้นมีระยะค่อนข้างแคบ และมีความสัมพันธ์ของแรงดันควบคุมกับแรงดันไฟฟ้าเป็นเชิงเส้น เนื่องมาจากการสับรูปคลื่นไซน์ของไทรสเตอร์ ซึ่งลักษณะของรูปคลื่นไซน์ทำให้การเพิ่มขึ้นของแรงดันค่ายอดที่แรงดันต่ำ เพิ่มขึ้นเร็วและเป็นเชิงเส้นกว่าการเพิ่มขึ้นของแรงดันค่ายอดที่แรงดันสูง ทำให้การปรับขึ้นแรงดันนั้นทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากมีความละเอียดของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงน้อย ควรที่จะหารแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความละเอียด เช่น ใช้การปรับแรงดันควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีจำนวนบิตสูง แต่หลังจาก 30 kV ขึ้นไป พบว่ามีช่วงของการปรับแรงดันควบคุมที่กว้างขึ้นและความสัมพันธ์ของแรงดันควบคุมกับแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการมีลักษณะเป็นเชิงเส้น อันเนื่องมาจากเหตุผลข้างต้น

3) สามารถนำไปพัฒนาต่อเพื่อประสิทธิภาพการขึ้นแรงดันที่เพิ่มขึ้น ด้วยการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าควบคุมให้กับวงจรควบคุมมุมเฟส ซึ่งความละเอียดนี้ก็จะขึ้นอยู่กับจำนวนบิตของตัวไมโครคอนโทรลเลอร์เอง ยิ่งจำนวนบิตสูงๆก็จะทำให้การควบคุมการขึ้นแรงดันละเอียดมากขึ้น และนอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มความสามารถในการทำงานแบบอัตโนมัติ

โดยสามารถตั้งการควบคุมอัตราการขึ้นแรงดันต่อเวลาให้ได้ตามที่ผู้ปฏิบัติงานต้องการ มีจอแสดงผลการทำงาน มีระบบป้องกันกระแสเกินที่จะทำให้เครื่องหยุดทำงานโดยอัตโนมัติก่อนเกิดที่ความเสียหายจะเกิดขึ้นทั้งกับผู้ปฏิบัติงาน และอุปกรณ์ไฟฟ้า

4) พิกัดของไทรสเตอร์สามารถทนแรงดันได้ 800 V และทนกระแสได้ 106 A จึงสามารถนำไปพัฒนาใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงที่มีพิกัดสูงกว่านี้ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] จิระชัย ทองทิพยา และ ธรรมศักดิ์ แจ่มศรี. เครื่องควบคุมแรงดันเข้าวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ด้วย ไทริสเตอร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533.
- [2] สีน เตียพิริยะกิจ. การออกแบบและสร้างควบคุมแรงดันอัดประจุเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 7.5 kVA ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [3] สำราญ สังข์สะอาด. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.
- [4] Dewan S.B., Straughen A. Power Semiconductor Circuits. John Wiley & Sons, 1975.
- [5] Siemens. Phase Control IC TCA785. Siemens Semiconductor Group, 1994.
- [6] รศ.ดร. วีระเชษฐ์ ชันเงิน และ วุฒิพล ธาธาธิ์เศรษฐ์. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronic) : ห้างหุ้นส่วนจำกัด วิ.เจ.พรินตัง
- [7] ศุภี บรรจงจิตร. หลักการและเทคนิคการออกแบบระบบไฟฟ้ากำลัง : ฉบับปรับปรุงและเพิ่มเติม. ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2533
- [8] R.K. Sughandi and K.K. Sughandi. Thyristor : theory and applications. Wiley, 1984
- [9] Semikron. Semikron Power Electronic. Semikron International, 1998

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
บทความวิชาการ
เครื่องกำเนิดแรงดันอัดประจุกระแสตรง
A DC High Voltage Charging System

นครินทร์ ทองบุญน่ม นครินทร์ อังสาวาทิน สุจินดา กิตติมันคง อุทกฤษณ์ ทัลก้ามุล
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทร/โทรสาร 0-2739-2478

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมแรงดันกระแสตรงอัดประจุของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ขนาด 5 kVA โดยใช้หลักการตัดรูปคลื่นแรงดันกระแสสลับด้วยไทรสเตอร์เพื่อควบคุมแรงดันกระแสสลับค่ายอด ซึ่งการทำงานของไทรสเตอร์นั้นต้องอาศัยสัญญาณกระแสขาเข้าเกตไทรสเตอร์ การสร้างสัญญาณนี้ใช้วงจรรวม TCA 785 เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ควบคุมจุดชนวน และ NE555 สร้างสัญญาณพัลส์ความถี่สูง แล้วนำสัญญาณสองสัญญาณมารวมกันโดยใช้แอนเกต จะได้สัญญาณกระแสขาเข้าเกตในลักษณะของพัลส์ทรีแองเกิลจากการทดสอบชุดควบคุมแรงดันอัดประจุเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นพบว่าสามารถควบคุมระดับแรงดันด้วยความแม่นยำ ± 1 kV และสามารถควบคุมแรงดันอัดประจุได้ตั้งแต่ 2 kV ถึง 120 kV จากความสำเร็จในการสร้างชุดควบคุมนี้เป็นการเพิ่มศักยภาพการทดสอบของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คำสำคัญ : ชุดควบคุมแรงดันอัดประจุ, เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ABSTRACT

This paper presents the design and construction of the 5 kVA DC charging unit for an impulse voltage generator. The charging unit uses thyristors for chopping AC voltage to control AC voltage peak. The TCA785 integrated circuit generates a square wave corresponding to the control phase angle. The NE555 integrated circuit generates a high frequency pulse train signals. Driving gate signal for controlling operation of thyristors is obtained from the signals of TCA785 and NE555 integrated circuits through the AND gate. The experiment shows that the charging unit is capable to control high voltage level with accuracy of

± 1 kV. The charging unit is able to control charging voltage in the range of 2 kV to 120 kV. From this accomplishment, it increases the testing performance of KMITL high voltage laboratory.

Keyword : Voltage Charging System, Impulse Lighting Voltage Generater

1. บทนำ

ในปัจจุบันการขึ้นแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงที่นิยมใช้กันมากคือ การใช้หม้อแปลงออโต (Auto transformer) หรือ หม้อแปลงปรับแรงดัน (Variac) ปรับขนาดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจาก 0-220 V ป้อนให้แก่หม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อปรับขนาดแรงดันให้สูงขึ้น ดังในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังใช้อยู่ในปัจจุบันเทคโนโลยีของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมีการพัฒนาก้าวหน้าไปมากกระทั่งสามารถใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สามารถรับกระแสได้สูงมาใช้เป็นสวิตช์ควบคุมได้เพื่อความแม่นยำในการขึ้นแรงดัน ดังนั้นเครื่องควบคุมแรงดันอัดประจุหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงที่ทำการออกแบบและสร้างขึ้นนั้นเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการควบคุมแรงดัน โดยนำไปใช้กับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งมักมีปัญหาในการควบคุมแรงดันการจุดชนวน ซึ่งไม่มีความแม่นยำในการควบคุมแรงดันจุดชนวนทำให้ได้แรงดันตามที่ต้องการเป็นไปได้ยาก เป็นผลให้การจ่ายแรงดันให้กับวัตถุทดสอบมีความผิดพลาดโดยในบางครั้งวัตถุทดสอบอาจได้รับแรงดันมากกว่าหรือน้อยกว่าระดับแรงดันที่ต้องการ เพื่อให้การจ่ายแรงดันให้กับวัตถุทดสอบมีความแม่นยำมากขึ้นจึงใช้การปรับแรงดันควบคุมจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อควบคุมการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังประเภท ไทรสเตอร์ หรือ เอสซีอาร์ (Thyristor, Silicon Controlled Rectifier) ที่มีพิสัยกระแสสูงทำหน้าที่ควบคุมขนาดของแรงดันไฟฟ้าโดยการควบคุมการนำกระแสของ ไทรสเตอร์แทนการใช้การเปลี่ยนจำนวนรอบของขดลวดโดยการเปลี่ยนจุดต่อขดลวดของหม้อแปลงออโต เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการขึ้นแรงดันจึงทำการออกแบบและสร้าง

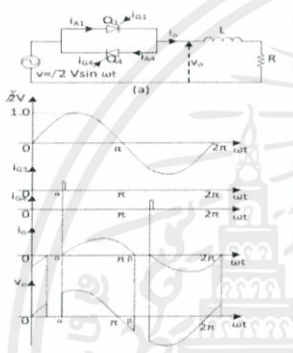
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องควบคุมแรงดันอัตโนมัติที่ควบคุมการทำงานด้วยการปรับแรงดันควบคุมจากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง

2. ทฤษฎี

2.1 หลักการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

วงจรเครื่องควบคุมแรงดันอัตโนมัติที่จะออกแบบและสร้างจะใช้หลักการควบคุมมุมเฟส โดยโพลของวงจรเป็นหม้อแปลงทดสอบซึ่งพิจารณาเป็นโพลแบบค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำ การควบคุมเฟสเดียวแบบเต็มรูปคลื่น (Single-phase full-wave control)

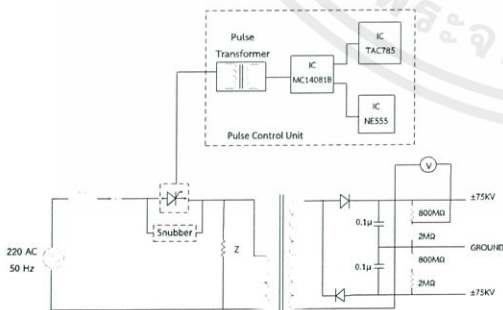


รูปที่ 1 วงจรควบคุมเฟสเดียวแบบ เต็มรูปคลื่นสำหรับโหลด RL

3. การออกแบบและประกอบสร้าง

เครื่องควบคุมแรงดันอัตโนมัติที่ออกแบบและสร้างได้ใช้หลักการควบคุมมุมเฟสของแรงดันที่จ่ายให้หม้อแปลงแรงสูง โดยการออกแบบสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนดังนี้

- 1) การออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมมุมเฟส
- 2) การออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมไทรสเตอร์



รูปที่ 2 วงจรควบคุมแรงดันอัตโนมัติ

3.1) การออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมมุมเฟส

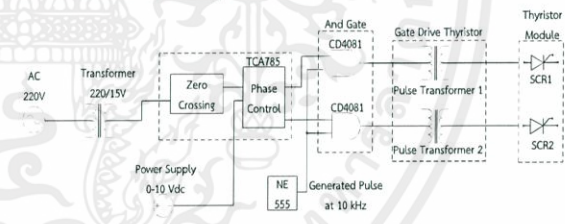
เครื่องควบคุมแรงดันอัตโนมัติที่จะทำการสร้างได้กำหนดให้มีขนาดกำลังไฟฟ้าที่จ่ายได้เท่ากับ 5 kVA และมีขนาดแรงดันที่ขาออกไม่เกิน 220 V ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่ากระแสที่คิดได้จาก

$$I_N = \frac{S}{V} = \frac{5000}{220} = 22.73 \text{ A}$$

ดังนั้นสามารถเลือกอุปกรณ์ต่างๆ ได้ดังนี้

- 1) เซอร์คิตเบรกเกอร์ ขนาด 50 A
- 2) แมกเนติกคอนแทคเตอร์เพื่อใช้ควบคุมการจ่ายแรงดันกระแสสลับเข้าขั้วอินของไทรสเตอร์
- 3) ฟิวส์เพื่อป้องกันไทรสเตอร์เสียหาย 32A
- 4) ไทรสเตอร์ของ Semikron model SKKT106/18E ที่มีพิกัดกระแส 106 A และสามารถทนแรงดันย้อนกลับได้ 1800 V
- 5) วงจรสแน็บเบอร์ เพื่อป้องกันและลดอัตราการเพิ่มแรงดันต่อหน่วยเวลาที่ตกคร่อมไทรสเตอร์ขณะเปิดวงจรไม่ให้มีค่าสูงเกินพิกัดของไทรสเตอร์

3.2) การออกแบบชุดควบคุมไทรสเตอร์

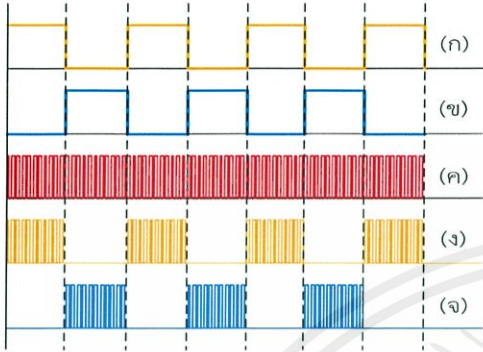


รูปที่ 3 แผนภาพการควบคุมไทรสเตอร์

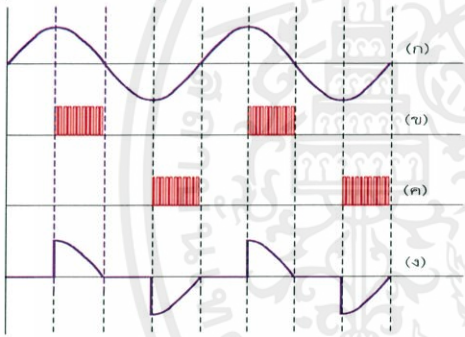
ในการสร้างสัญญาณควบคุมมุมจุดชนวนขาเกตของไทรสเตอร์ จะอาศัยวงจรรวม TCA 785 เพื่อนำไปรวมกับสัญญาณพัลส์ความถี่สูง 15 kHz ที่ถูกสร้างขึ้น โดยวงจรรวม NE555 ซึ่งในการรวมสัญญาณควบคุมมุมจุดชนวนกับสัญญาณพัลส์ความถี่สูงนั้นจะอาศัย แอนเกด MC14081B โดยสัญญาณที่ได้นั้นจะมีลักษณะเป็นพัลส์เทรนซึ่งใช้ในการขับเคลื่อนของไทรสเตอร์ ในการควบคุมแรงดันเฟสของหม้อแปลง สัญญาณจุดชนวนขาเกตไทรสเตอร์ต้องเป็นพัลส์เทรน เนื่องจากหม้อแปลงมีคุณลักษณะเป็นความต้านทานต่อกับความเหนี่ยวนำแบบอนุกรม จึงใช้สัญญาณกระแสที่มีลักษณะพัลส์เทรนจ่ายให้กับขาเกตของไทรสเตอร์ ซึ่งลักษณะการรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

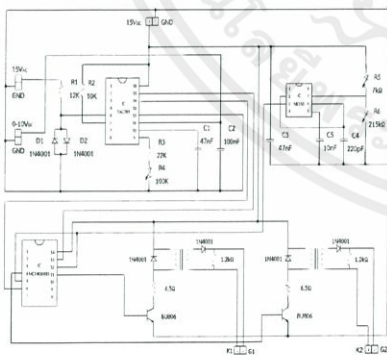
สัญญาณจาก TCA785 กับ NE555 โดย MC14081B เป็นไปตามรูปที่ 4 และรูปที่ 6 คือ ใช้พัลส์เทรนควบคุมการจุดชนวนเพื่อควบคุมรูปคลื่นแรงดัน



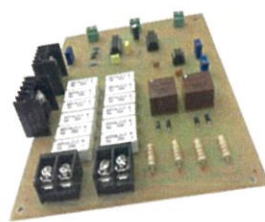
รูปที่ 5 สัญญาณพัลส์ที่มุมจุดชนวนของแรงดันเมื่อ (ก) สัญญาณพัลส์ที่มุมจุดชนวนแรงดันซิกบวก (ข) สัญญาณพัลส์ที่มุมจุดชนวนแรงดันซิกลบ (ค) สัญญาณความถี่สูง (ง) สัญญาณพัลส์เทรนควบคุมการทำงานซิกบวก (จ) สัญญาณพัลส์เทรนควบคุมการทำงานซิกลบ



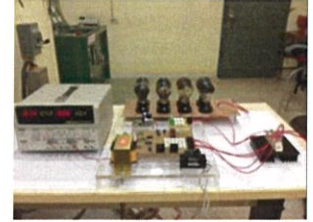
รูปที่ 5 การควบคุมสัญญาณแรงดันด้วย ไทริสเตอร์ที่มุม 90 องศา



รูปที่ 6 วงจรควบคุมไทริสเตอร์



(ก)



(ข)

รูปที่ 7 ชุดควบคุมไทริสเตอร์(ก) และ เครื่องควบคุมแรงดันอัตโนมัติ (ข)

4) การทดสอบและวิเคราะห์ผล

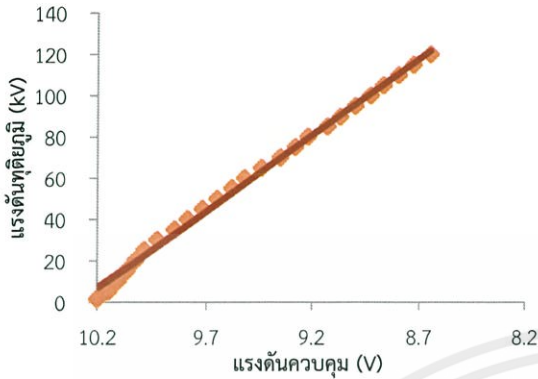
ในการทดสอบ ได้ทำการป้อนแรงดันควบคุมให้กับวงจรควบคุมมุมเฟสของไทริสเตอร์ เพื่อให้ไทริสเตอร์ควบคุมการขึ้นแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยการสับรูปคลื่นของแรงดันด้านปฐมภูมิแล้วจ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งในการวัดค่าของแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิได้ใช้ Digital Oscilloscope RIGOL/DS11048 ในการวัดค่าแรงดันค่าออกและแสดงรูปคลื่นของแรงดัน ซึ่งโครงสร้างภายในทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงจะมีวงจรเรียงกระแสแรงสูงต่ออยู่ภายในตัวหม้อแปลง ทำให้แรงดันที่ออกมาจากหม้อแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ในการวัดแรงดันใช้โวลต์เดจิติไวเคอร์อัตราส่วน 1000:1 ของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง แล้วใช้ Multimeter FLUKE179 วัดแรงดันทุติยภูมิ

ผลการทดสอบสามารถนำข้อมูลที่ได้อาวาดเป็นกราฟเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของการทำงานของชุดควบคุมมุมเฟสของการขึ้นแรงดัน ได้ดังรูปที่ 9 และ รูปที่ 10



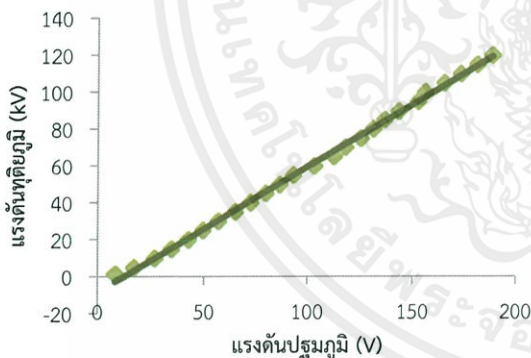
รูปที่ 8 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวงจรควบคุมมุมเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันควบคุม กับค่าแรงดันที่ขั้วขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้า

พบว่าในช่วงแรงดันที่ขั้วขั้วต่ำกว่า 30 kV ช่วงระยะของแรงดันควบคุมจะค่อนข้างแคบ เนื่องจากจากการสับรูปคลื่นไซน์ของทรานซิสเตอร์ ซึ่งลักษณะของรูปคลื่นไซน์ทำให้การเพิ่มขึ้นของแรงดันที่ขั้วขั้วที่แรงดันต่ำเพิ่มขึ้นเร็วและเป็นเชิงเส้นกว่าการเพิ่มขึ้นของแรงดันที่ขั้วขั้วที่แรงดันสูง และจากรูปที่ 10 พบว่ามีอัตราส่วนของการขึ้นแรงดันในลักษณะเชิงเส้นตามคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันปฐมภูมิ กับค่าแรงดันที่ขั้วขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้า

5. สรุปผลการทดลอง

จากการประกอบสร้างเครื่องควบคุมการขึ้นแรงดันอัตโนมัติ อุปกรณ์กำเนิดแรงดันอิมพัลส์ โดยใช้หลักการตัดรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยทรานซิสเตอร์เพื่อควบคุมแรงดันกระแสสลับค่าขอด จากผล

ผลการทดสอบพบว่าสามารถเริ่มขึ้นแรงดันอัตโนมัติได้ตั้งที่ 2 kV และขึ้นแรงดันอัตโนมัติสูงสุดได้ตั้งที่ 120 kV ซึ่งความละเอียดของการขึ้นแรงดันสามารถขึ้นแรงดันได้ทีละ 1 kV โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของการขึ้นแรงดันอยู่ที่ 0.13 % จะเห็นว่าการขึ้นแรงดันอัตโนมัติของเครื่องควบคุมการขึ้นแรงดันอัตโนมัติเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ในการควบคุมมุมเฟสของแรงดันให้ความแม่นยำกว่าการขึ้นแรงดันแบบเดิมด้วยหม้อแปลงปรับแรงดัน

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.พีรวิชญ์ ยุทธ โกวิท อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท ที่ได้ให้แนวทางศึกษา การแก้ปัญหาข้อบกพร่องของปริญญาโท อีกทั้งคุณปณชวีร์ ฉายศิริ ที่ช่วยตรวจสอบและกรุณาแก้ไขปริญญาโท และคุณพลวัฒน์ สุภมาศ ที่ให้คำแนะนำในการออกแบบวงจรและเลือกใช้อุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนพี่และเพื่อนๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกท่าน ที่เป็นกำลังใจและช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงการครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] จิระชัย ทองทิพยา และ ชรรมศักดิ์ แจ่มศรี. เครื่องควบคุมแรงดันเข้าวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ด้วยทรานซิสเตอร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533.
- [2] สัน เตียพิริยะกิจ. การออกแบบและสร้างควบคุมแรงดันอัตโนมัติเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 7.5 kVA ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [3] สําราย สังข์สะอาด. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.
- [4] Dewan S.B., Straughen A. Power Semiconductor Circuits. John Wiley & Sons, 1975.
- [5] Siemens. Phase Contorl IC TCA785. Siemens Semiconductor Group, 1994.
- [6] ผศ.ดร.วีระเชษฐ ชันเงิน และ วุฒิพล ธาราธิระสมฐ์. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronic) : หัวหุ่นส่วนจำกัด วิ.เจ.พริตติง
- [7] ศุทธิ์ บรรจงจิตร. หลักการและเทคนิคการออกแบบระบบไฟฟ้ากำลัง : ฉบับปรับปรุงและเพิ่มเติม. ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2533
- [8] R.K. Sughandi and K.K. Sughandi. Thyristor : theory and applications. Wiley, 1984
- [9] Semikron. Semikron Power Electronic. Semikron International, 1998

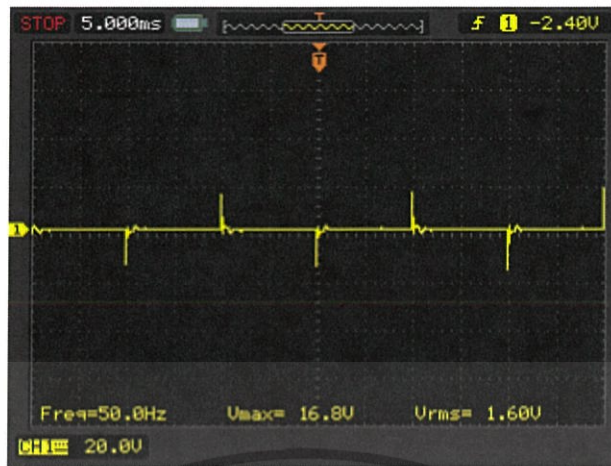
เอกสารนี้เป็นเอกสารผลงาน วิชาสำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
ผลการทดสอบ

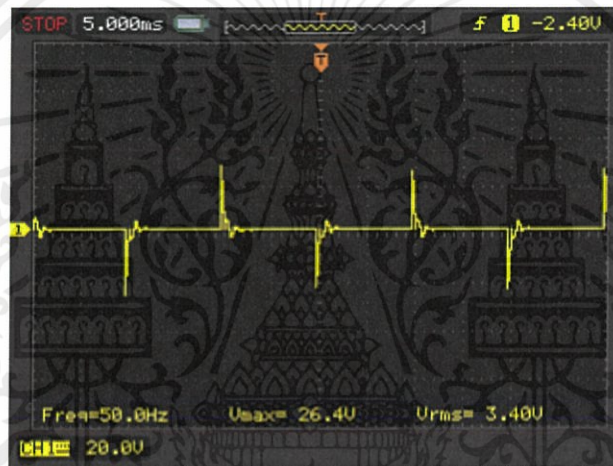
ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบ

แรงดัน ควบคุม (V_{dc})	แรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง (V_{peak})			แรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง (kV_{dc})			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Fix Voltage	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
10.20	7.60	8.00	8.40	-	1.34	1.43	1.52
10.15	16.00	16.80	16.80	5	4.92	5.06	5.06
10.11	26.40	26.60	26.40	10	10.02	9.98	10.02
10.07	34.40	34.60	34.20	15	14.91	15.10	14.88
10.03	42.40	42.60	42.40	20	20.02	20.10	20.02
9.99	49.60	49.60	49.40	25	25.15	25.15	25.02
9.93	56.80	57.20	57.20	30	29.90	30.10	30.10
9.85	65.40	65.60	65.00	35	35.12	35.20	34.92
9.79	72.00	72.00	74.00	40	40.00	40.00	40.12
9.72	80.00	78.00	82.00	45	45.10	44.92	45.18
9.65	86.00	86.00	88.00	50	49.82	49.82	50.04
9.58	92.00	94.00	94.00	55	55.02	55.16	55.16
9.52	104.00	102.00	104.00	60	60.04	59.90	60.04
9.44	110.00	110.00	118.00	65	65.03	65.03	64.96
9.35	116.00	120.00	118.00	70	69.96	70.10	70.05
9.28	124.00	126.00	126.00	75	74.90	75.02	75.02
9.22	130.00	132.00	132.00	80	79.80	80.20	80.20
9.13	136.00	138.00	136.00	85	85.00	85.20	85.00
9.07	142.00	144.00	144.00	90	89.06	90.01	90.01
9.00	154.00	152.00	152.00	95	95.00	94.90	94.90
8.93	158.00	156.00	154.00	100	100.20	100.08	100.00
8.87	164.00	164.00	168.00	105	105.00	105.00	105.08
8.80	172.00	174.00	174.00	110	109.90	110.02	110.02
8.73	180.00	182.00	182.00	115	115.00	115.06	115.06
8.65	188.00	188.00	190.00	120	120.00	120.00	120.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.1 แรงดันปริมภูมิ 16.8 V

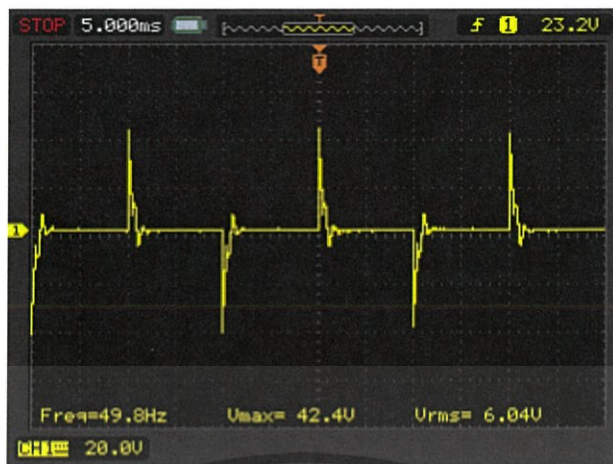


รูปที่ ข.2 แรงดันปริมภูมิ 26.4 V

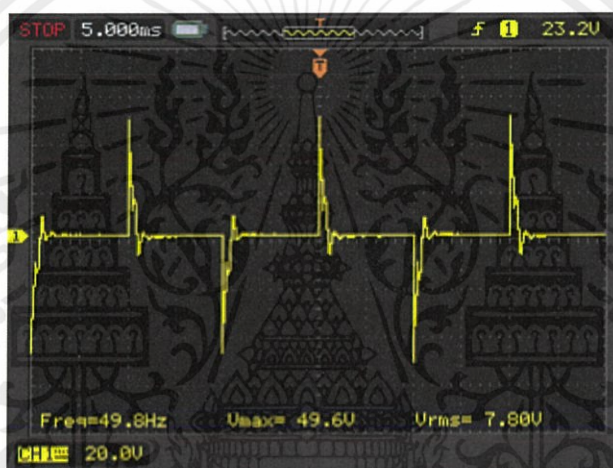


รูปที่ ข.3 แรงดันปริมภูมิ 34.4 V

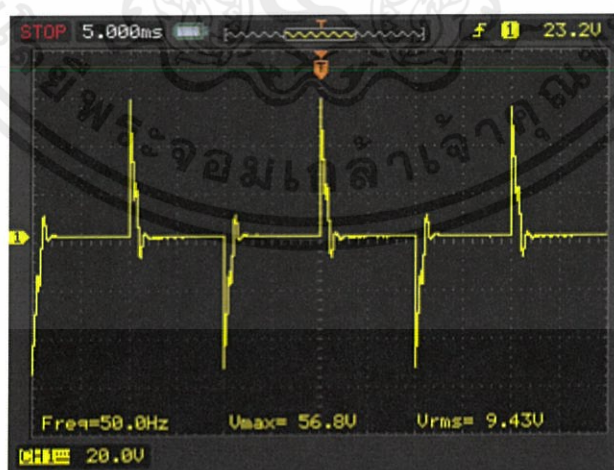
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่โรงเรียนเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.4 แรงดันป้อน 42.4 V



รูปที่ ข.5 แรงดันป้อน 49.6 V



รูปที่ ข.6 แรงดันป้อน 56.8 V

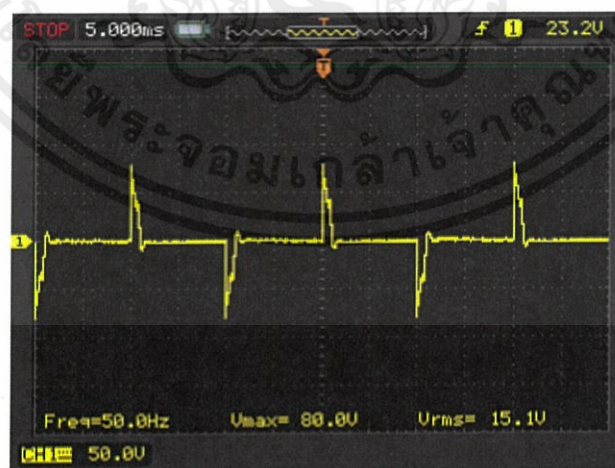
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.7 แรงดันปฐมภูมิ 65.6 V

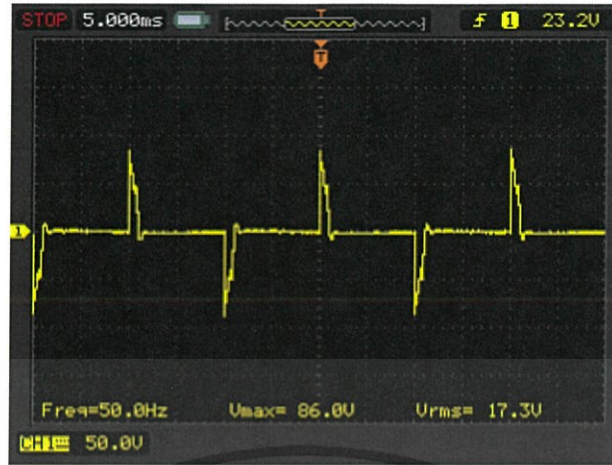


รูปที่ ข.8 แรงดันปฐมภูมิ 72.0 V



รูปที่ ข.9 แรงดันปฐมภูมิ 80.0 V

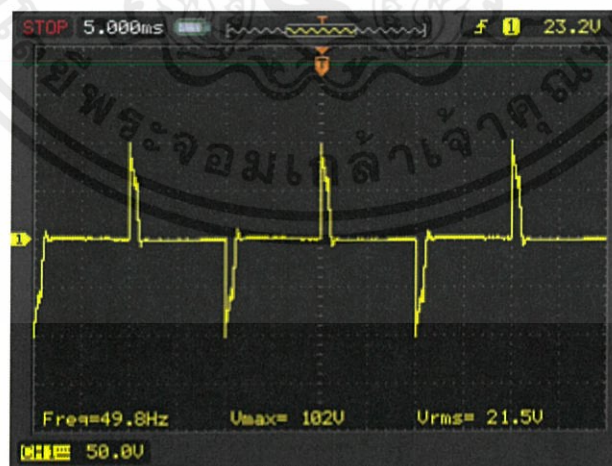
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในของหน่วยงานที่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.10 แรงดันปฐมภูมิ 86.0 V

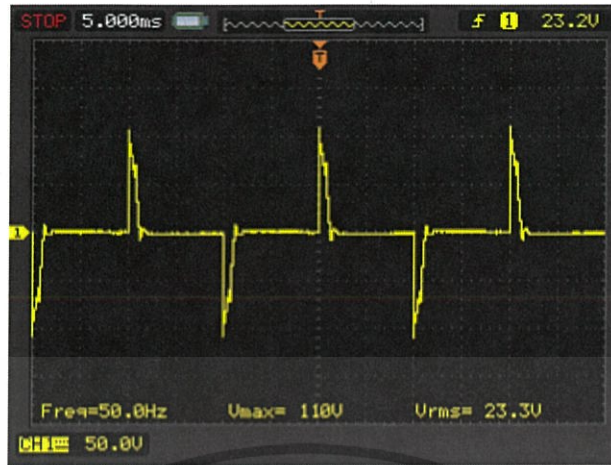


รูปที่ ข.11 แรงดันปฐมภูมิ 94.0 V

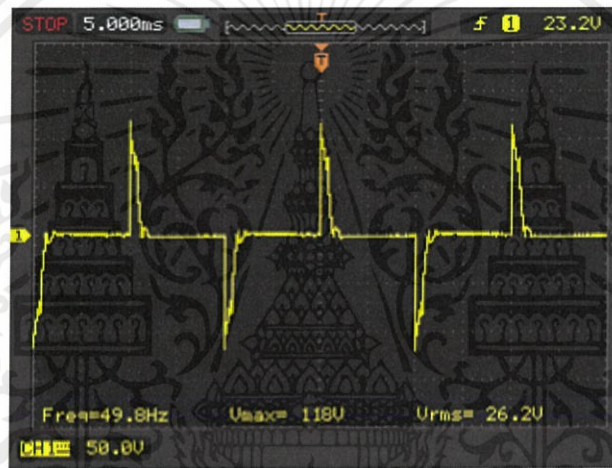


รูปที่ ข.12 แรงดันปฐมภูมิ 102.0 V

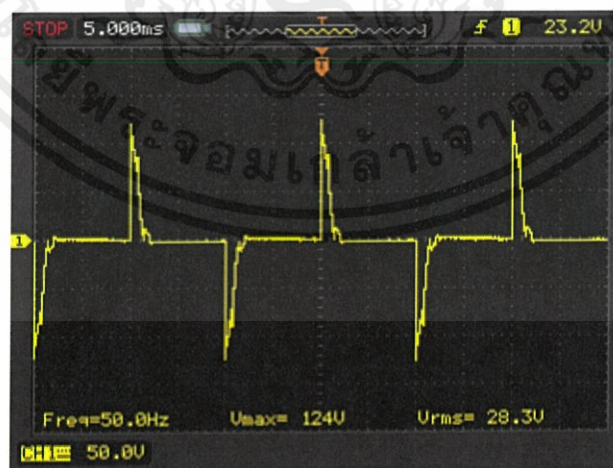
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.13 แรงดันปฐมภูมิ 110.0 V



รูปที่ ข.14 แรงดันปฐมภูมิ 118.0 V

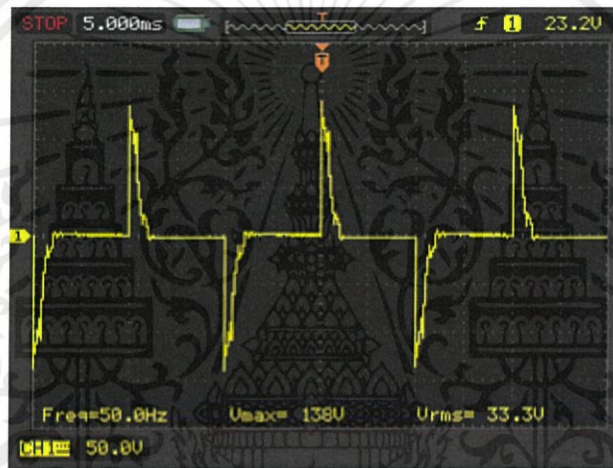


รูปที่ ข.15 แรงดันปฐมภูมิ 124.0 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ออกชื่อมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุณาอย่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



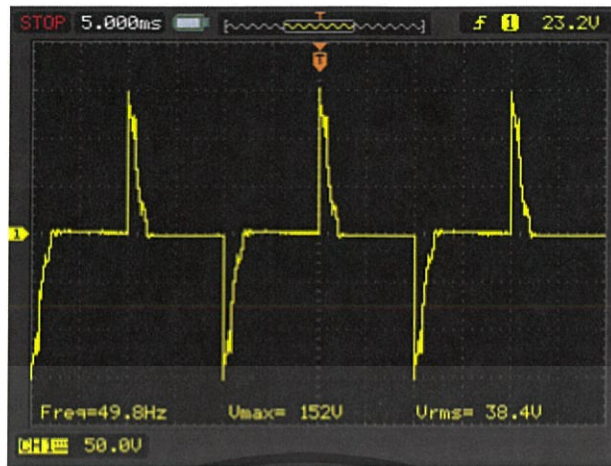
รูปที่ ข.16 แรงดันปฐมภูมิ 130.0 V



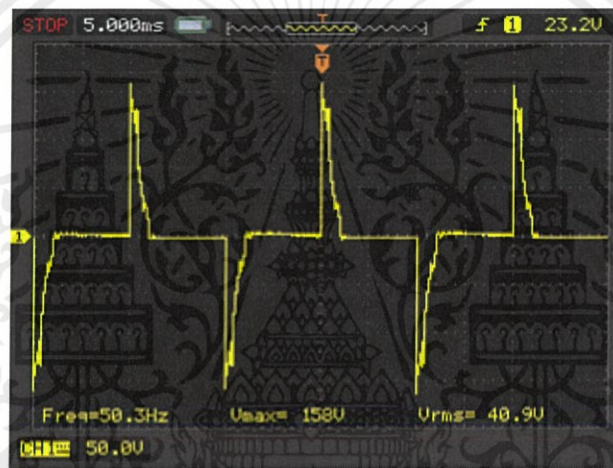
รูปที่ ข.17 แรงดันปฐมภูมิ 138.0 V



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ออกเสียงเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ ข.18 แรงดันปฐมภูมิ 144.0 V
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.19 แรงดันปฐมภูมิ 152.0 V



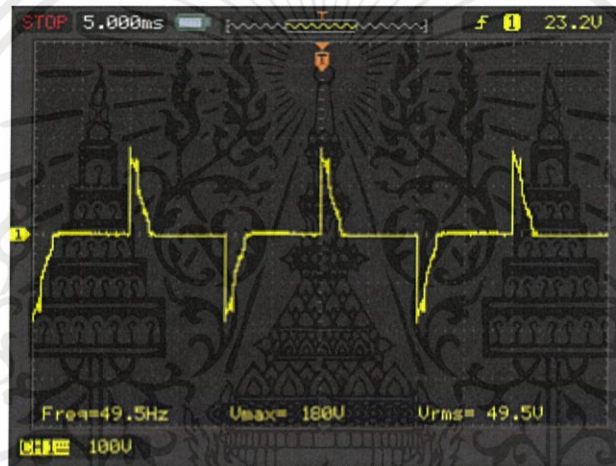
รูปที่ ข.20 แรงดันปฐมภูมิ 158.0 V



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ ข.21 แรงดันปฐมภูมิ 168.0 V อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



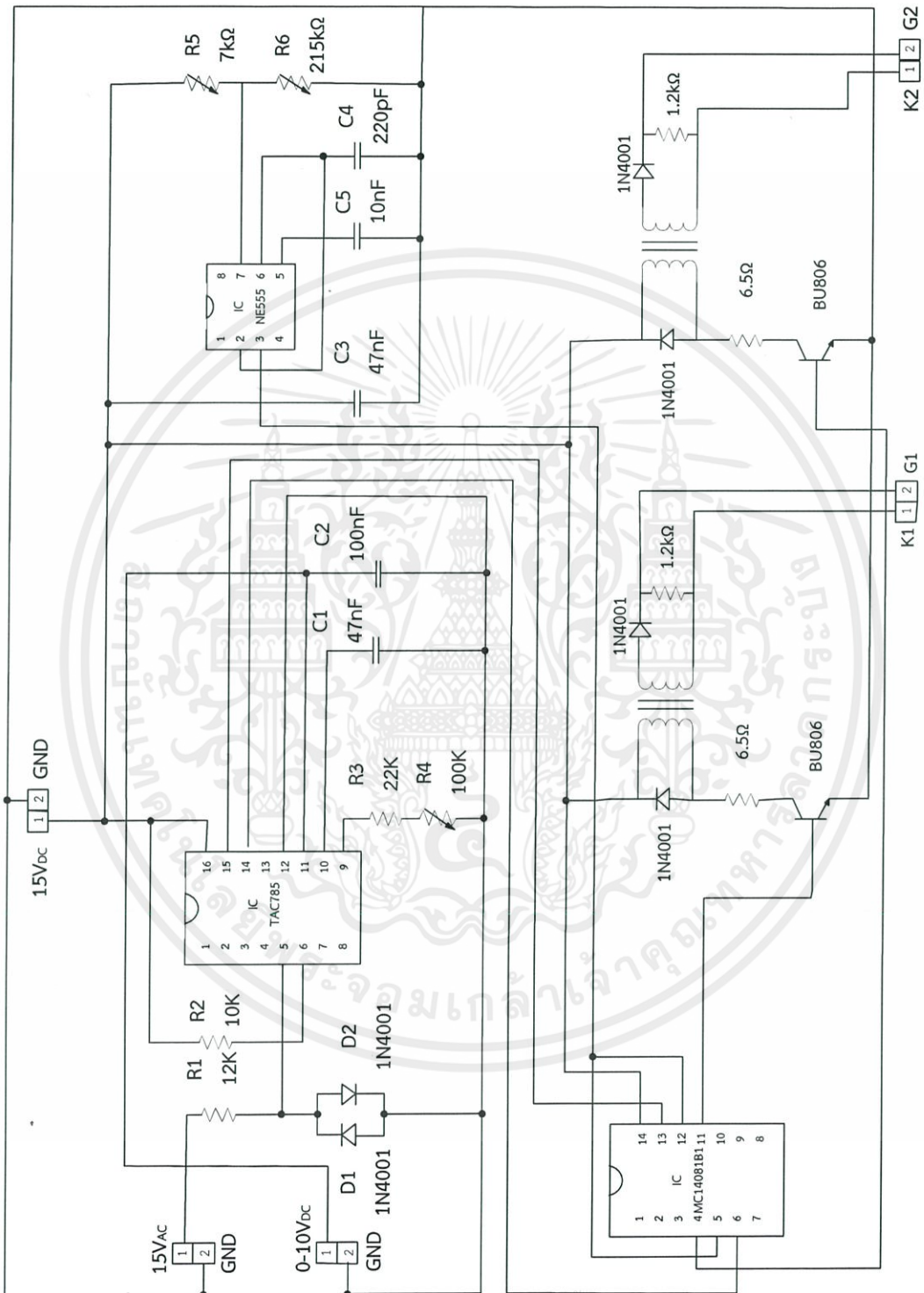
รูปที่ ข.22 แรงดันปฐมภูมิ 172.0 V



รูปที่ ข.23 แรงดันปฐมภูมิ 188.0 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค
วงจรควบคุมมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



นายนครินทร์ ทองบุญน่ม เกิดเมื่อวันที่ 10 มิถุนายน 2534 ที่จังหวัดพิษณุโลก สำเร็จมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนพิษณุโลกพิทยาคมและสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง E-mail: nackarin007@gmail.com



นายนครินทร์ อังสรวาทิน เกิดเมื่อวันที่ 17 สิงหาคม 2534 ที่จังหวัดนครปฐม สำเร็จมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนพระปฐมวิทยาลัยและสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง E-mail: nakarin.ang624@gmail.com



นายสุจินดา กิตติมั่นคง เกิดเมื่อวันที่ 23 พฤศจิกายน 2534 ที่จังหวัดนครปฐม สำเร็จมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนวัดดอนตูมและสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง E-mail: k.suchinda@gmail.com



นายอุกฤษณ์ ทัลคำมูล เกิดเมื่อวันที่ 25 ธันวาคม 2534 ที่จังหวัดอุดรธานี สำเร็จมัธยมศึกษาตอนปลายโรงเรียนกุมภวาปีและสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง E-mail: augit1947@gmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้