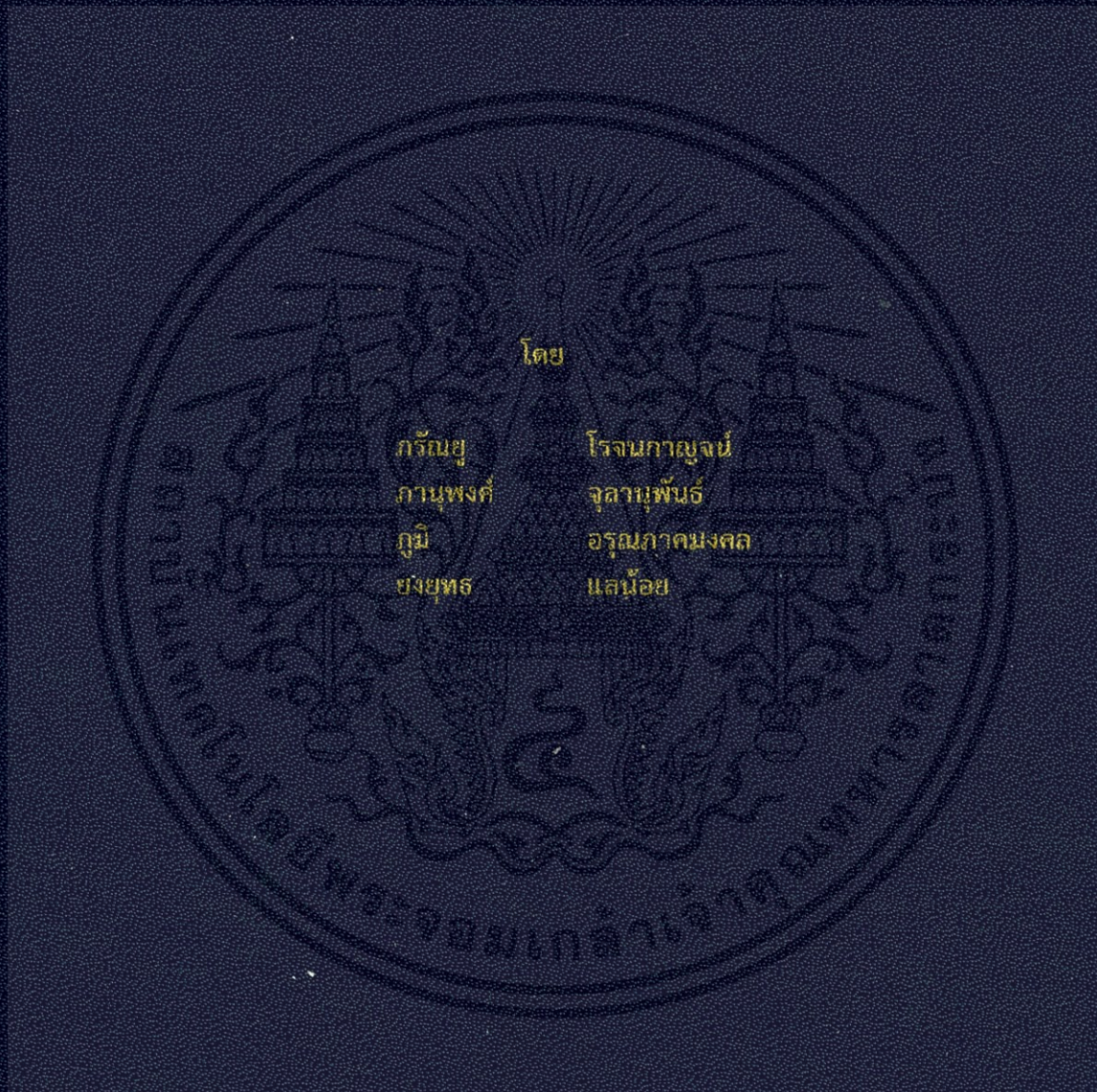


การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น
Design and Construction of a Unit-step Voltage Generator



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น
Design and Construction of a Unit-step Voltage Generator



เอกสารนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

Design and Construction of a Unit-step Voltage Generator



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT

FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2013

ปีการศึกษา 2556

การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น
Design and Construction of a Unit-step Voltage Generator



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. อานันท์วัฒน์ คุณากร

ผศ.ดร.พีรวัติ ยุธโกวิท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า


คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น

Design and construction of a Unit-step Voltage Generator

ผู้จัดทำ

1. นาย ภรณ์ยู โรจนกาญจน์
2. นาย ภาณุพงศ์ จุลานุพันธ์
3. นาย ภูมิ อรุณภาคมงคล
4. นาย ยงยุทธ แลน้อย


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร. อานันท์วัฒน์ คุณากร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องขออนุญาตเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร.พิรุฒิ ยูทธิโกวิท)

การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขึ้น

นาย ภรณ์ยู โจรนกาญจน์
นาย ภาณุพงศ์ จุลานพันธ์
นาย ภูมิ อรุณภาคมงคล
นาย ยงยุทธ แลน้อย
รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร อาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ.ดร.พีรฤติ ยุทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการนำเสนอการออกแบบและการสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ารูปขึ้นโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมการทำงานของมอสเฟต โดยในการทำงานของมอสเฟตต้องอาศัยสัญญาณแรงดันในการขับเคลื่อน เพื่อให้มอสเฟตทำงานเป็นสวิตซ์ในวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขึ้น โดยใช้มอสเฟต BS170 ซึ่งมีเวลาขาขึ้น 10 นาโนวินาที และใช้ตัวขับเคลื่อน TC4429CAT เป็นตัวขับ ทำให้รูปคลื่นแรงดันมีเวลาขาขึ้น 5 นาโนวินาที ที่ระดับแรงดัน 50 โวลต์ และเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขึ้นที่สร้างสามารถสร้างแรงดันคงที่เป็นเวลา 100 ไมโครวินาที โดยเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขึ้นนี้ทำขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์ชนิดความต้านทานที่มีค่าความต้านทานไม่เกิน 1 กิโลโอห์ม ภายในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง โดยผลการทดสอบรูปคลื่นที่สร้างขึ้นอยู่ในเกณฑ์ผ่านมาตรฐานของ IEC 60060-2 [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Design and Construction of a Unit-step Voltage Generator

Mr. Paranyu Rochanagarn

Mr. Panupong Chulanupan

Mr. Poom Aroonpakmongkol

Mr. Yongyut Laenoi

Assoc.Prof. Anantawat Kunakorn Supervisor

Asst.Prof. Peerawut Yutthagawit Supervisor

Year 2013

ABSTRACT

This senior presents the design and construction of a unit step voltage generator by using microcontroller to control the operation of MOSFET. Voltage signal is required to drive the MOSFET to operate as switches in this equipment. TC44229CAT gate drive is used to minimize the rise time of MOSFET BS170 that has 10 ns of rise time to be 5 ns of rise time at 50 v of the operated voltage and this equipment can generate the stable operating voltage level for 100 μ s. This equipment is constructed for test the resistive voltage divider that has the resistance lower than 1 k Ω in high-voltage laboratory. Experimental results show a good agreement between parameters of unit step voltage waveform from the unit step voltage generator and the parameters standard defined by IEC 60060-2 [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องด้วยคณะผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือและความร่วมมือเป็นอย่างดี จากหลายๆฝ่าย

คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ รศ.ดร. อานันท์วัฒน์ คุณากร และ ผศ.ดร. พีรฤทธิ ยุทธโกวิท ที่คอยดูแลเอาใจใส่อย่างใกล้ชิดเสมอมา ช่วยชี้แนะให้คำปรึกษาสิ่งต่างๆ ที่เป็นประโยชน์แก่การศึกษา ค้นคว้าหาข้อมูลเพื่อจัดทำโครงการโดยมิเห็นความเหน็ดเหนื่อย เสียสละเวลามาช่วยคณะผู้จัดทำในด้านการทดสอบ รวมถึงตรวจสอบและแก้ไขปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้ที่มีประโยชน์ต่อการนำมาใช้ในการจัดทำโครงการครั้งนี้ ขอบพระคุณห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ใช้เป็นสถานที่ในการทำการทดสอบและเป็นที่ยอมรับในกลุ่มเพื่อทำงานต่างๆ

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ คุณบุญยวีร์ ฉายศิริ และรุ่นพี่นักศึกษาปริญญาโท รวมไปถึงเพื่อนๆ ร่วมห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงที่คอยให้คำแนะนำ เป็นที่ปรึกษาในเรื่องการออกแบบและการสร้างเป็นอย่างดี และช่วยดูแลตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลอง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยสนับสนุนทางด้านการเรียนตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน อีกทั้งช่วยเหลือทางการเงินและให้กำลังใจในการทำงานเสมอมา

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	1
1.4 ขั้นตอนการทำโครงการ	1
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	2
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานฟังก์ชันบันไดหนึ่งหน่วย	3
2.2 ทฤษฎีการสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ารูปขั้น	4
2.2.1 ตัวเก็บประจุ	5
2.2.2 ช่วงคายประจุ	5
2.2.3 ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ	6
2.3 มอสเฟต (MOSFET; Metal Oxide Semiconductor Effect Transistor)	7
2.3.1 ประเภทของ MOSFET แบ่งโดยตามโครงสร้าง	7
2.3.1.1 ดีพลีชัน (Depletion)	7
2.3.1.2 เอนฮานซ์เมนต์ (enhancement)	8
2.3.2 ประเภทของ MOSFET แบ่งโดยตามชนิดของทรานซิสเตอร์	8
2.3.2.1 nMOS (negative MOSFET)	8
2.3.2.2 pMOS (positive MOSFET)	9
2.3.3 ลักษณะการทำงานของ MOSFET	10
2.3.3.1 การทำงานช่วง Cut off	11
2.3.3.2 การทำงานช่วง Linear region	12
2.3.3.3 การทำงานช่วง Saturation	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3 การประกอบและการสร้าง	29
3.3.1 วงจรไฟเลี้ยง	30
3.3.2 วงจรควบคุม	31
3.3.3 การประกอบ	32
บทที่ 4 ผลการทดสอบและการประเมินผล	34
4.1 วงจรการทดสอบเพื่อหาผลตอบสนองของแรงดันรูปขั้น	34
4.2 รูปคลื่นของเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น	35
4.3 การทดสอบเพื่อหาผลตอบสนองแรงดันรูปขั้นของโวลเตจดีไวเดอร์	37
4.3.1 ผลตอบสนองแรงดันรูปขั้นของโวลเตจดีไวเดอร์ แบบตัวต้านทาน (R divider)	37
4.3.2 ผลตอบสนองแรงดันรูปขั้นของโวลเตจดีไวเดอร์ แบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC divider)	40
4.3.3 ผลตอบสนองแรงดันรูปขั้นของโวลเตจดีไวเดอร์ แบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC Universal)	42
4.4 ตารางเปรียบเทียบผลการทดสอบ	44
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ	47
5.1 สรุปผลการทดสอบ	47
5.2 อุปสรรค ข้อเสนอแนะ และแนวทางการแก้ไข	48
เอกสารอ้างอิง	49
ภาคผนวก	50
ภาคผนวก ก มาตรฐาน IEC 60060-2	51
ภาคผนวก ข รายละเอียดข้อมูลของอุปกรณ์	57
ภาคผนวก ค เอกสารทางวิชาการ	85
ประวัติผู้เขียน	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แรงดันรูปชั้นตามทฤษฎี	3
2.2 วงจรสมมูลที่ใช้สวิตช์	3
2.3 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ารูปชั้น	4
2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าของวัตถุทดสอบ (V) กับเวลา (t)	5
2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าของวัตถุทดสอบ (V) กับเวลา (t) สภาวะชั่วคราว	6
2.6 ตัวอย่างมอสเฟต	7
2.7 MOSFET แบบ Depletion	7
2.8 MOSFET แบบ Enhancement	8
2.9 สัญลักษณ์ nMOS	8
2.10 สัญลักษณ์ pMOS	9
2.11 วงจรสมมูลของมอสเฟตแบบดีพลีชัน (dep) และแบบเอ็นฮานซ์เมนต์ (enh)	9
2.12 โมเดลอย่างง่ายของมอสเฟต	10
2.13 กราฟ I-V curve ของมอสเฟต	10
2.14 ลักษณะการทำงานของมอสเฟต	11
2.15 วงจรขับมอสเฟต	12
2.16 วงจรเรียงกระแสสำหรับสร้างแรงดัน 5 V	13
2.17 PIC 16F877	15
3.1 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ารูปชั้นและวงจรเรียงกระแส	17
3.2 รูปวงจรถอดประจุที่จำลองด้วยโปรแกรม	19
3.3 กราฟแรงดันที่ตัวเก็บประจุ C_r , C_d และกระแสของตัวเก็บประจุ C_d	19
3.4 โครงสร้างภายใน TLP 250	20
3.5 วงจรสมมูลของ TC4429TAC	21
3.6 วงจรรีเซ็ตไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยใช้ขา MCLR	22
3.7 วงจรสัญญาณนาฬิกาให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์	23
3.8 วงจรป้อนสัญญาณอินพุต	24
3.9 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันรูปชั้น	24
3.10 แผนผังการทำงานของโปรแกรมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์	25
3.11 รูปวงจรรวม	29
3.12 รูปลายวงจรไฟเลี้ยงที่ทำการออกแบบ (รูปหน้า/หลังของจริง)	30
3.13 รูปวงจرفไฟเลี้ยงที่สร้างขึ้นสำหรับเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ารูปชั้น	30
3.14 รูปลายวงจรควบคุมเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ารูปชั้น	31
3.15 รูปวงจรถับคุมเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ารูปชั้น	32
3.16 รูปวงจรถับคุมเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ารูปชั้นที่นำมาประกอบกันเป็นวงจรเดียว	32
3.17 อุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ารูปชั้น	33

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 วงจรในการทดสอบโวลเตจติไวดเซอร์แบบต่างๆ	34
4.2 ลักษณะการต่อวงจรเพื่อวัดแรงดันในสภาวะไม่มีภาระไฟฟ้า	35
4.3 รูปคลื่นของเครื่องกำเนิดแรงดันรูปซัน ที่เวลา 50 ns/div	36
4.4 รูปคลื่นของเครื่องกำเนิดแรงดันรูปซัน ที่เวลา 100 ns/div	36
4.5 รูปคลื่นของเครื่องกำเนิดแรงดันรูปซัน ที่เวลา 10 us/div	37
4.6 การต่อวงจรทดสอบของโวลเตจติไวดเซอร์แบบตัวต้านทาน (R divider)	38
4.7 ผลตอบสนองแรงดันรูปซันของโวลเตจติไวดเซอร์แบบตัวต้านทาน (R divider) ที่เวลา 50 ns/div	38
4.8 ผลตอบสนองแรงดันรูปซันของโวลเตจติไวดเซอร์แบบตัวต้านทาน (R divider) ที่เวลา 100 ns/div	39
4.9 ผลตอบสนองแรงดันรูปซันของโวลเตจติไวดเซอร์แบบตัวต้านทาน (R divider) ที่เวลา 1 us/div	39
4.10 ลักษณะการต่อวงจรของโวลเตจติไวดเซอร์แบบตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ (RC divider)	40
4.11 ผลตอบสนองแรงดันรูปซันของโวลเตจติไวดเซอร์แบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC divider) ที่เวลา 50 ns/div	41
4.12 ผลตอบสนองแรงดันรูปซันของโวลเตจติไวดเซอร์แบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC divider) ที่เวลา 100 ns/div	41
4.13 ผลตอบสนองแรงดันรูปซันของโวลเตจติไวดเซอร์แบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC divider) ที่เวลา 10 us/div	42
4.14 ลักษณะการต่อวงจรของโวลเตจติไวดเซอร์แบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC Universal)	42
4.15 ผลตอบสนองแรงดันรูปซันของโวลเตจติไวดเซอร์แบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC Universal) ที่เวลา 50 ns/div	43
4.16 ผลตอบสนองแรงดันรูปซันของโวลเตจติไวดเซอร์แบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC Universal) ที่เวลา 100 ns/div	43
4.17 ผลตอบสนองแรงดันรูปซันของโวลเตจติไวดเซอร์แบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC Universal) ที่เวลา 1us/div	44
4.18 กราฟมาตรฐาน IEC 60060-2 กรณีทดสอบกับติไวดเซอร์ความต้านทาน (R Divider)	45
4.19 กราฟมาตรฐาน IEC 60060-2 กรณีทดสอบกับติไวดเซอร์ความต้านทาน และตัวเก็บประจุ (RC Divider)	46
4.20 กราฟมาตรฐาน IEC 60060-2 กรณีทดสอบกับติไวดเซอร์ความต้านทาน และตัวเก็บประจุ (RC Universal)	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลบางประการ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ตารางแผนการจัดลำดับขั้นตอนการทำปริญญาโท	2
3.1 แสดงค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ตามความถี่	23
4.1 ตารางเปรียบเทียบผลการทดสอบของเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น	44
4.2 ตารางเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆตามมาตรฐาน IEC 60060-2	45



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ารูปชั้นภายในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้อยู่เดิมนั้น มีช่วงเวลาขึ้นอยู่ในช่วงประมาณ 20 นาโนวินาที ซึ่งถือว่ามีค่าค่อนข้างมาก รวมถึงเครื่องกำเนิดแรงดันรูปชั้นดังกล่าวนี้เป็นเครื่องที่นำเข้าจากต่างประเทศ จึงมีราคาค่อนข้างสูง ทางกลุ่มผู้ทำโครงการจึงได้จัดทำโครงการนี้ขึ้น เพื่อลดปัญหาการนำเข้าเครื่องมือจากต่างประเทศ และเพื่อลดเวลาขาขึ้นให้อยู่ในช่วงไม่เกิน 10 นาโนวินาทีเพื่อใช้ในการทดสอบโวลต์เตจดีไวเดอร์เพื่อใช้ในการทดสอบกับโวลต์เตจดีไวเดอร์ในกรณีที่ต้องการผลตอบสนองที่มีความเร็วในช่วงเวลาขาขึ้นค่อนข้างเร็ว โดยใช้มาตรฐาน IEC 60060-2 [1] เป็นตัวชี้วัดการทำงานว่าสามารถใช้งานได้จริง และผลของการทดสอบจะเป็นตัวที่แสดงให้เห็นว่าการออกแบบสร้างเป็นไปตามทฤษฎีที่คำนวณไว้หรือไม่ ประโยชน์ที่ได้เพื่อเป็นการพัฒนาบุคลากรและทักษะในการสร้างเครื่องมือใช้เอง ทำให้ประหยัดงบประมาณและค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อ ซึ่งสามารถใช้งานทดแทนอุปกรณ์ที่มีขายสำเร็จรูปในท้องตลาดได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันรูปชั้น
2. เพื่อศึกษาวิธีการออกแบบเครื่องกำเนิดแรงดันรูปชั้น
3. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของเครื่องกำเนิดแรงดันรูปชั้น
4. เพื่อส่งเสริมให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

1. สามารถออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันรูปชั้นที่มีความเร็วในการสวิตช์ไม่เกิน 10 นาโนวินาที
2. สามารถทดสอบสนองของแรงดันโดยที่แรงดันไม่ตกในช่วงเวลา 100 ไมโครวินาที
3. สามารถทนแรงดันได้ 50 โวลต์

1.4 ขั้นตอนการทำโครงการ

1. ศึกษาการวางจกรสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันรูปชั้น
2. เลือกชนิดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างให้เหมาะสม โดยมีเงื่อนไขคือต้องการเวลาขาขึ้นไม่เกิน 10 นาโนวินาที และสามารถทนแรงดันได้ 50 โวลต์
3. ทำการประกอบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันรูปชั้น
4. ทดสอบกับอิมพัลส์โวลต์เตจดีไวเดอร์เพื่อทดสอบองรูปชั้น
5. ปรับแต่งวงจรหรือตัวอุปกรณ์ภายในวงจรหากเกิดข้อผิดพลาดหรือผลตอบสนองรูปชั้นยังไม่เป็นไปตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูงาน โดยอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ได้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หากมีการเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ทำปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.5 แผนการดำเนินโครงการ

ตารางที่ 1.1 ตารางแผนการจัดลำดับขั้นตอนการทำปริญญานิพนธ์

วิธีการดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2556										
	มิ.ย	ก.ค	ส.ค	ก.ย	ต.ค	พ.ย	ธ.ค	ม.ค	ก.พ	มี.ค	
1. ศึกษาการวงจรการสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น	←-----→										
2. เลือกชนิดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างให้เหมาะสม และจำลองการ	←-----→										
3. ทำการสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น					←-----→						
4. ทดสอบกับอิมพัลส์โวลต์เตจติไวเตอร์ เพื่อหาผลตอบของรูปขั้น							←-----→				
5. ปรับแต่งวงจรหรือตัวอุปกรณ์ภายในวงจรหากเกิดข้อผิดพลาด							←-----→				
6. ทำปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์									←-----→		



วางแผน



ทำจริง

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. มีความเข้าใจหลักการและหน้าที่ของส่วนประกอบต่างๆ ของวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น
2. เข้าใจหลักการออกแบบวงจรและสามารถออกแบบวงจร เครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้นได้ตามมาตรฐาน IEC 60060-2 [1] และเงื่อนไขที่ได้รับมอบหมาย

3. มีความเข้าใจผลตอบสนองของแรงดันรูปขั้นในการทดสอบกับโวลต์เตจติไวเตอร์

4. สามารถแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างการทำโครงการได้อย่างถูกต้อง และเข้าใจที่มาของ

ปัญหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์อื่น การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

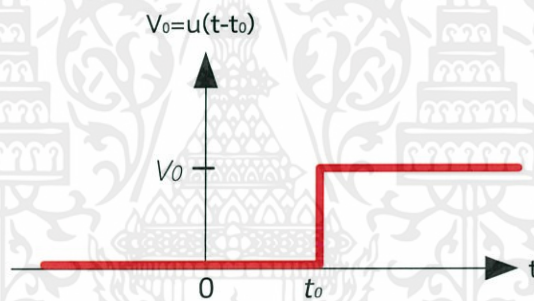
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่งหน่วย

ฟังก์ชันขั้นบันได (Step function) คือการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของค่าระดับแรงดันของวัตถุทดสอบ โดยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันจากระดับแรงดันเริ่มต้นที่มีค่าเท่ากับ 0 โวลต์ จนมีระดับแรงดันเท่ากับ V_0 โวลต์ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยในการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันดังกล่าว จะใช้เวลาในการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันในช่วงสั้นๆ โดยในโครงงานนี้จะใช้ประมาณเวลาดังกล่าวไม่เกิน 3 นาโนวินาที โดยสามารถเขียนสมการของฟังก์ชันขั้นบันไดได้ดังนี้

$$v(t) = \begin{cases} 0 & ; t < t_0 \\ V_0 & ; t > t_0 \end{cases}$$

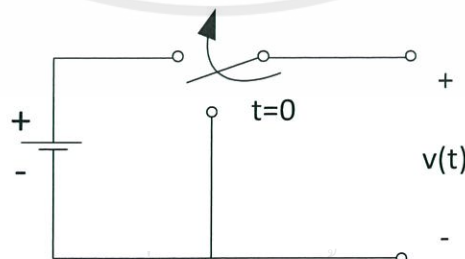
สามารถเขียนในรูปแบบฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่งหน่วยได้ดังสมการที่ 2.1

$$v(t) = V_0 u(t - t_0) \tag{2.1}$$



รูปที่ 2.1 แรงดันรูปขั้นตามทฤษฎี

ในกรณีที่ค่า $t_0 = 0$ จะได้ค่า $v(t) = V_0 u(t)$ สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลที่ใช้สวิตช์ดังแสดงในรูป 2.2 โดยพิจารณาที่เวลา $t < 0$ สวิตช์จะลัดวงจรที่ขั้ว $v(t)$ จะทำให้ไม่มีแรงดันเกิดขึ้น ($v=0$) และเมื่อเวลา $t > 0$ สวิตช์จะเชื่อมต่อที่แหล่งจ่ายแรงดัน จะทำให้ $v=V_0$ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลที่ใช้สวิตช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงหรือทำซ้ำของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจุถูกอัดประจุจนเต็มแล้วจึงตัดวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงออกโดยการส่งสัญญาณควบคุมไปยังอุปกรณ์ตัดต่อวงจร (S_1) ให้เปิดวงจรออก จากนั้นจะใช้ตัวเก็บประจุที่อัดประจุจนเต็มแล้วเป็นแหล่งจ่ายให้กับวัตถุทดสอบ (Load) เพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้ารูปขั้นต่อไป โดยจะทำการส่งสัญญาณควบคุมไปยังอุปกรณ์ตัดต่อวงจร (S_2) ให้ปิดวงจร ซึ่งอุปกรณ์ตัดต่อวงจรตัวนี้จะต้องมีคุณสมบัติเวลาขาขึ้นไม่เกิน 10 นาโนวินาทีตามเงื่อนไขข้างต้น ตัวเก็บประจุที่อัดประจุเต็มที่แล้วจะจ่ายพลังงานให้กับวัตถุทดสอบโดยที่ระดับแรงดันไฟฟ้าจะต้องคงที่ภายในช่วงเวลา 100 ไมโครวินาทีตามเงื่อนไขข้างต้นเช่นกัน

2.2.1 ตัวเก็บประจุ (C_r)

การเลือกค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในการจ่ายพลังงานให้แก่วัตถุทดสอบนั้น ต้องคำนึงถึงแรงดันไฟฟ้าไฟฟ้าอัดประจุที่ต้องการใช้งานและคุณลักษณะเฉพาะของตัวเก็บประจุแต่ละชนิด ดังนั้นจึงต้องเลือกค่าตัวเก็บประจุให้สามารถทนแรงดันไฟฟ้าไฟฟ้าได้โดยไม่เกิดความเสียหายและมีประสิทธิภาพ

2.2.2 ช่วงคายประจุ

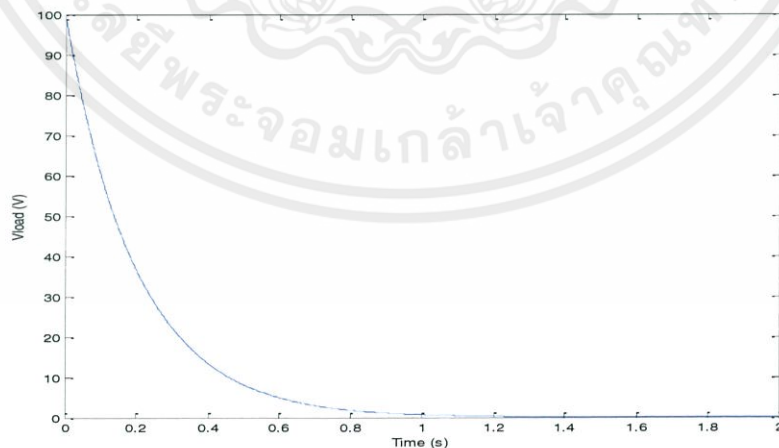
เมื่อมีการสะสมประจุของตัวเก็บประจุ ทำให้เกิดการสะสมของพลังงานมากขึ้นจากการป้อนแรงดันไฟฟ้าไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่สภาวะคงตัว (แรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุ ย่อมเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง) พลังงานที่สะสมไว้นี้จะถูกส่งผ่านมายังวัตถุทดสอบโดยในการทดลองนี้จะพิจารณาจากระดับของแรงดันไฟฟ้าที่วัตถุทดสอบซึ่งจะมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเมื่อต่อวงจรและจะค่อยๆ ลดลงตามเวลา ซึ่งสามารถคำนวณเวลาดังกล่าวได้ดังสมการที่ 2.2

$$V_{LOAD}(t) = V_C e^{-\frac{t}{RC}} \quad (2.2)$$

เมื่อ R คือ ความต้านทานของวัตถุทดสอบ

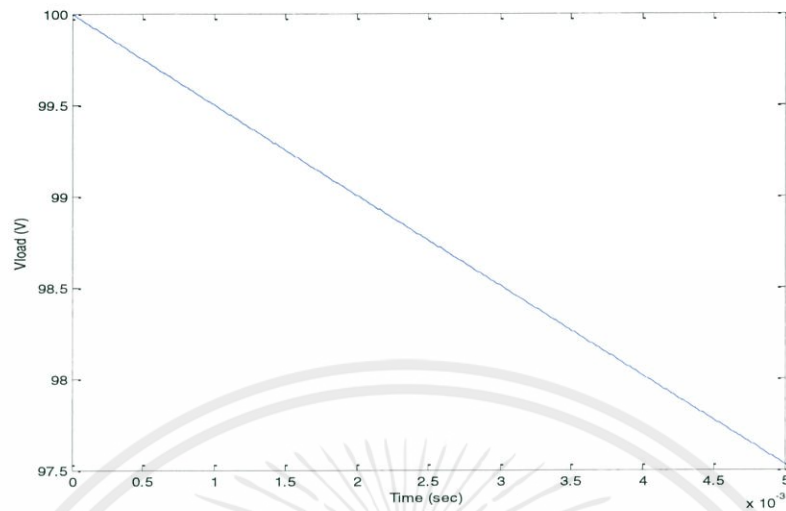
V_C คือ แรงดันของตัวเก็บประจุขณะอัดประจุเต็ม

ผลการจำลองช่วงคายประจุแสดงดังรูปที่ 2.4 และ 2.5



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าของวัตถุทดสอบ (V) กับเวลา (t)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ได้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าของวัตถุทดสอบ (V) กับเวลา (t) สภาวะชั่วคราว

2.2.3 ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ

ในทางปฏิบัติทั่วไปนั้นมีการกำหนดจำนวนครั้งในการอัดประจุ เพราะการใช้เครื่องมือให้อัดประจุด้วยอัตราเร็วเกินไป ย่อมทำให้เกิดผลเสียต่อตัวเก็บประจุ เพราะการอัดประจุเป็นสภาวะชั่วคราว มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว นั่นคือการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีผลต่อองค์ประกอบของเครื่องกำเนิดในด้านความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าหรือความเครียดสนามไฟฟ้า จึงทำให้อายุการใช้งานขององค์ประกอบสั้นลง ถ้าหากการอัดประจุอย่างต่อเนื่องถี่เกินไปไม่มีเว้นช่วง การอัดประจุหมายถึงการคายประจุด้วยเช่นกัน การจำกัดอัตราการอัดประจุทำได้โดยใช้ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ (R_V) ซึ่งต่ออนุกรมคั่นระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงกับตัวเก็บประจุ (C) ให้มีค่าสูงมากพอ เพื่อให้ได้กระแสอัดประจุที่มีค่าต่ำคือไม่เกินพิกัดกระแสของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (I) ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราเพิ่มแรงดันอัดประจุ $\frac{dV}{dt}$ ไม่ควรเร็วเกินไป ค่ากระแสอัดประจุจึงเขียนได้ว่า $i = C \frac{dV}{dt}$ ฉะนั้นค่า R_V อาจหาได้ดังสมการที่ 2.3

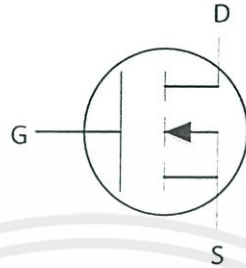
$$R_V \geq \frac{V}{i} \quad (2.3)$$

และมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าอัดประจุของตัวเก็บประจุได้ เพราะความต้านทาน (R_V) นั้นต้องรับแรงดันไฟฟ้าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าอัดประจุที่กำหนดเมื่อตัวเก็บประจุอัดประจุเต็มแล้ว นอกจากนั้นต้องเลือกค่าโอห์มและแรงดันไฟฟ้าแล้วยังต้องคำนึงถึงค่ากำลังไฟฟ้าของการอัดประจุอีกด้วย กล่าวคือ ความต้านทาน (R_V) ต้องทนต่อกระแสอัดประจุได้สูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 มอสเฟต (MOSFET; Metal Oxide Semiconductor Effect Transistor)

มอสเฟต (MOSFET) คือ ทรานซิสเตอร์ที่ใช้อิทธิพลสนามไฟฟ้าในการควบคุมสัญญาณไฟซึ่งมีวงจรภายในแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างมอสเฟต

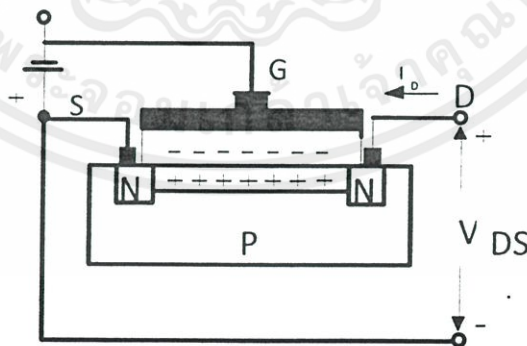
จากรูปที่ 2.6 มอสเฟตประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

1. เกท (GATE) เป็นส่วนที่ทำมาจากออกไซด์ของโลหะ โดยสร้างให้เกิดความต่างศักย์ตกคร่อมระหว่างแผ่นสองแผ่นเพื่อ สร้างสนามไฟฟ้าเพื่อควบคุมการเข้าออกของสัญญาณไฟฟ้า
2. ซอร์ส (SOURCE) เป็นส่วนขาเข้าของสัญญาณ
3. เดรน (DRAIN) เป็นส่วนขาออกของสัญญาณ

2.3.1 ประเภทของ MOSFET แบ่งโดยตามโครงสร้างสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ

2.3.1.1 ดีพลีชัน (Depletion)

การทำงานของมอสเฟตแบบดีพลีชัน พิจารณาจากรูป ให้ขากเกตมีแรงดันเป็นลบ เมื่อเทียบกับขาสอร์ส จะทำให้มีประจุลบเกิดขึ้นที่ขากเกต และเกิดประจุบวกปรากฏขึ้นทางด้านที่ติดฉนวนซิลิกอนออกไซด์ ส่งผลให้เนื้อสารเอ็นที่มีอยู่น้อยมีขนาดลดลง ทำให้ช่องว่างระหว่างขาดเร้น และซอร์ส มากขึ้น กระแสจะไหลได้น้อยลงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.7

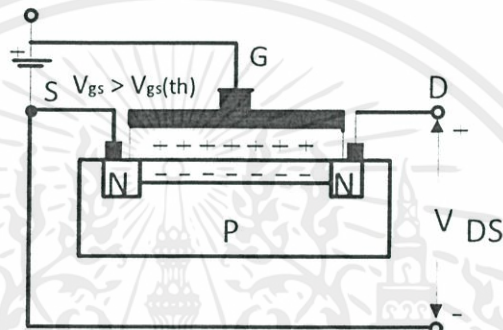


รูปที่ 2.7 MOSFET แบบ Depletion

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.2 เอนฮานซ์เมนต์ (enhancement)

การทำงานของมอสเฟตแบบเอนฮานซ์เมนต์เนื่องจากระหว่างสารเอ็นที่ชาเดรนและซอร์สเป็นสารพี ซึ่งแตกต่างจากมอสเฟตแบบดีพลีชัน ทำให้เมื่อป้อนแรงดันบวกเข้าที่ชาเกตจะเกิดประจุลบขึ้น ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากสารเอ็นที่ชาซอร์สมายังเดรนได้ จึงทำให้มอสเฟตทำงานได้ ดังนั้นมอสเฟตแบบนี้จะทำงานได้ต้องป้อนแรงดันที่ชาเกตเป็นแรงดันบวกเท่านั้น และแรงระหว่างชาเกต และซอร์ส (V_{gs}) ที่ป้อนให้ต้องมามีค่ามากกว่า $V_{gs(th)}$ (Gate Source threshold voltage) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.8

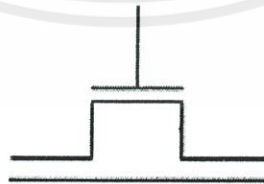


รูปที่ 2.8 MOSFET แบบ Enhancement

2.3.2 ประเภทของ MOSFET แบ่งโดยตามชนิดของทรานซิสเตอร์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ

2.3.2.1 nMOS (negative MOSFET)

ทรานซิสเตอร์ประเภทเอ็นพีเอ็น (NPN) เมื่อปล่อยความต่างศักย์สูง จะเกิดสนามไฟฟ้าในทิศทางอย่างแรง โอลใน p-type จะถูกผลักลงมาอยู่ด้านล่าง ประกอบกับมีอิเล็กตรอนอิสระบางส่วนถูกดูดขึ้นไปด้านบน ส่งผลให้บริเวณด้านบนมีอิเล็กตรอนอิสระมากจนเป็น n-type ได้เรียกว่าแชนแนล (channel) สัญญาณไฟฟ้าก็จะไหลผ่านช่วงแชนแนลนี้ซึ่งเป็น n-type เหมือนกับเดรนและซอร์สได้โดยใช้อิเล็กตรอนอิสระเป็นพาหะแสดงดังรูปที่ 2.9



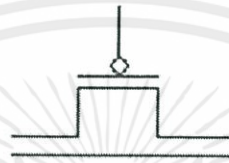
nMOS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.9 สัญลักษณ์ nMOS

2.3.2.2 pMOS (positive MOSFET)

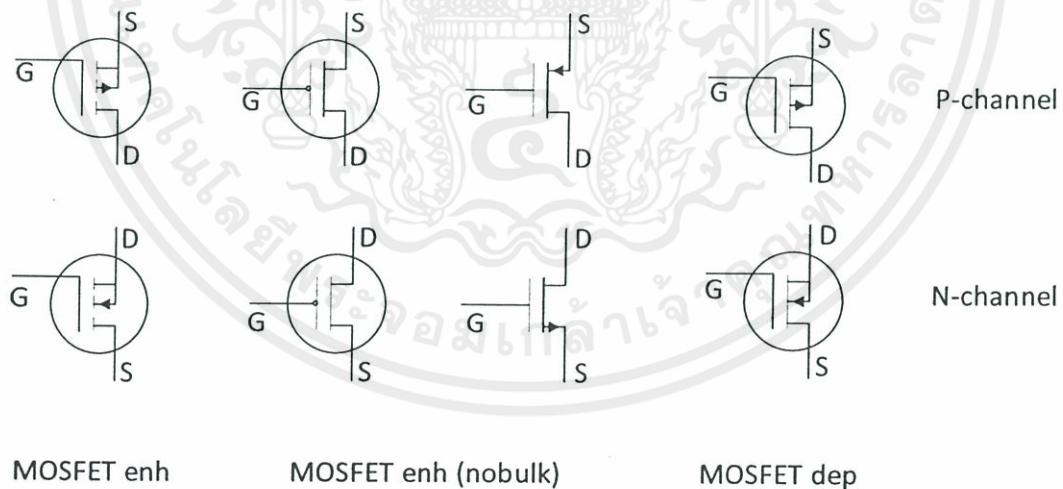
ทรานซิสเตอร์ประเภทพีเอ็นพี (PNP) เมื่อมีความต่างศักย์ต่ำหรือเป็นลบ (สนามไฟฟ้าอ่อน) สัญญาณไฟฟ้าจึงจะไหลจากซอร์สไปเดรนได้ การทำงานของ pMOS จะทำงานกลับกับ nMOS โดยเมื่อปล่อยความต่างศักย์ต่ำ (โดยมากมักจะติดลบ) จะเกิดสนามไฟฟ้าในทิศขึ้นอย่างแรง อิเล็กตรอนอิสระใน n-type จะถูกผลักลงมาอยู่ด้านล่าง ประกอบกับมีโฮลบางส่วนถูกดูดขึ้นไปด้านบน ส่งผลให้บริเวณด้านบนมีโฮลมากจนเป็น p-type ได้เรียกว่าแชนแนล สัญญาณไฟฟ้าก็จะไหลผ่านช่วงแชนแนลนี้ซึ่งเป็น p-type เหมือนกับเดรนและซอร์สได้โดยใช้โฮลเป็นพาหะแสดงดังรูปที่ 2.10



pMOS

รูปที่ 2.10 สัญลักษณ์ pMOS

หากแบ่งประเภทของมอสเฟตโดยใช้เกณฑ์การแบ่งทั้ง 2 แบบคือแบ่งตามโครงสร้างและแบ่งตามชนิดของทรานซิสเตอร์แล้วจะสามารถแบ่งได้หลายชนิดโดยวงจรมูลแต่ละชนิดได้แสดงในรูปที่ 2.11

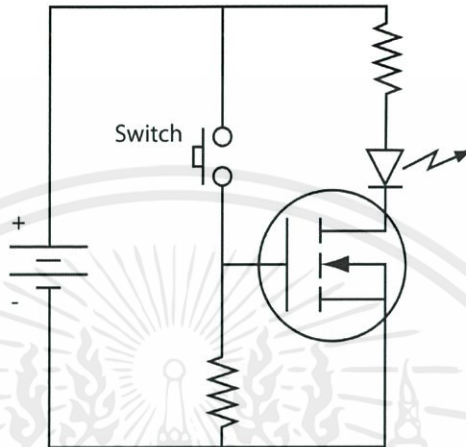


รูปที่ 2.11 วงจรมูลของมอสเฟตแบบดีพลีชัน (dep) และแบบเอ็นฮานเมนต์ (enh)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

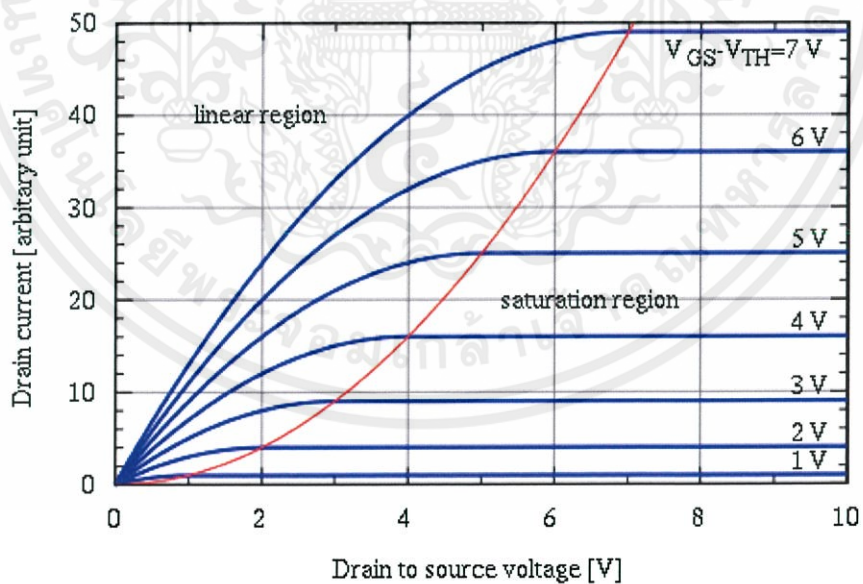
2.3.3 ลักษณะการทำงานของ MOSFET

ลักษณะการทำงานต่อจากนี้จะใช้โมเดลอย่างง่ายของของมอสเฟต ประเภท n-channel enhancement mode แสดงดังรูปที่ 2.12 เพื่อความง่ายต่อการเข้าใจ ซึ่งในความเป็นจริงจะมีความซับซ้อนมากกว่านี้



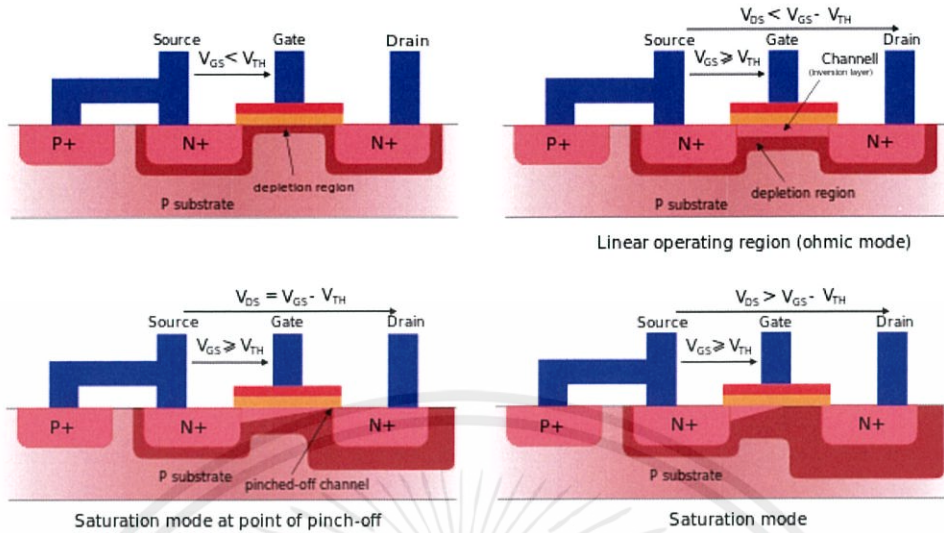
รูปที่ 2.12 โมเดลอย่างง่ายของมอสเฟต

การทำงานของมอสเฟตนั้นสามารถแยกออกได้เป็น 3 ช่วงการทำงานด้วยกันคือ ช่วง Cutoff, ช่วง Linear region และช่วง Saturate ซึ่งจะขึ้นอยู่กับระดับแรงดันที่ขั้วแสดงดังรูปที่ 2.13 และ 2.14



รูปที่ 2.13 กราฟ I-V curve ของมอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 ลักษณะการทำงานของมอสเฟต

2.3.3.1 การทำงานช่วงคัทออฟ (cut off)

จะเกิดเมื่อ $V_{GS} < V_{th}$ โดย V_{GS} คือแรงดันระหว่างขาทเกตและซอร์ส และ V_{th} คือแรงดัน threshold ของอุปกรณ์ ในช่วงการทำงานนี้พบว่าทรานซิสเตอร์จะไม่ทำงาน และไม่มีการนำกระแสระหว่างขาทเรนนและซอร์ส ในโมเดลที่มีความซับซ้อนมากขึ้นจะพิจารณาผลของพลังงานความร้อนของพลังงานไฟฟ้าที่ทำให้อิเล็กตรอนที่ซอร์สมีพลังงานมากขึ้นก่อนจะผ่านไปยังขาทเรนน ผลที่ได้คือค่ากระแส threshold จึงเป็นฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลของแรงดันระหว่างขาทเกตและซอร์ส ในทางอุดมคติแล้วกระแสระหว่างขาทเกตและขาทเรนนจะต้องมีค่าเป็นศูนย์เมื่อทรานซิสเตอร์ไม่ทำงานแต่ในทางปฏิบัติกลับมีกระแสไหลย้อนกลับเล็กน้อยซึ่งบางครั้งถูกเรียกว่า sub-threshold leakage กระแสไหลย้อนกลับนี้สามารถประมาณได้ดังสมการที่ 2.4

$$I_D \approx I_{D0} e^{\frac{V_{GS}-V_{th}}{nV_T}} \tag{2.4}$$

โดย I_{D0} คือ ค่ากระแสเมื่อ $V_{GS} = V_{th}$ และแรงดันที่ขั้ว $V_T = kT/q$ และค่าตัวประกอบความชัน (n) หาได้ดังสมการที่ 2.5

$$n = 2 + C_D/C_{OX} \tag{2.5}$$

โดย C_D คือ ค่าความจุไฟฟ้าของชั้น depletion
 C_{OX} คือ ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3.2 การทำงานช่วง Linear region

จะเกิดเมื่อ $V_{GS} > V_{th}$ และ $V_{DS} < (V_{GS} - V_{th})$ ทรานซิสเตอร์มีการทำงานและมีการสร้างแขนแนลให้กระแสสามารถไหลผ่านขาเดรนและขาซอร์สได้ มอสเฟตจะทำงานคล้ายกับตัวต้านทานตัวหนึ่งซึ่งถูกควบคุมโดยแรงดันเกต ค่าของกระแสที่ไหลระหว่างขาเดรนและขาซอร์สสามารถคำนวณดังสมการที่ 2.6

$$I_D = \mu_n C_{OX} \frac{W}{L} [(V_{GS} - V_{th})V_{DC} - \frac{V_{DS}^2}{2}] \tag{2.6}$$

โดย	μ_n	คือ	charge-carrier effective mobility
	W	คือ	ความกว้างของขาเกต
	L	คือ	ความยาวของขาเกต
	C_{OX}	คือ	ค่าความจุไฟฟ้าออกไซด์ที่ขาเกตต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

2.3.3.3 การทำงานช่วง Saturation

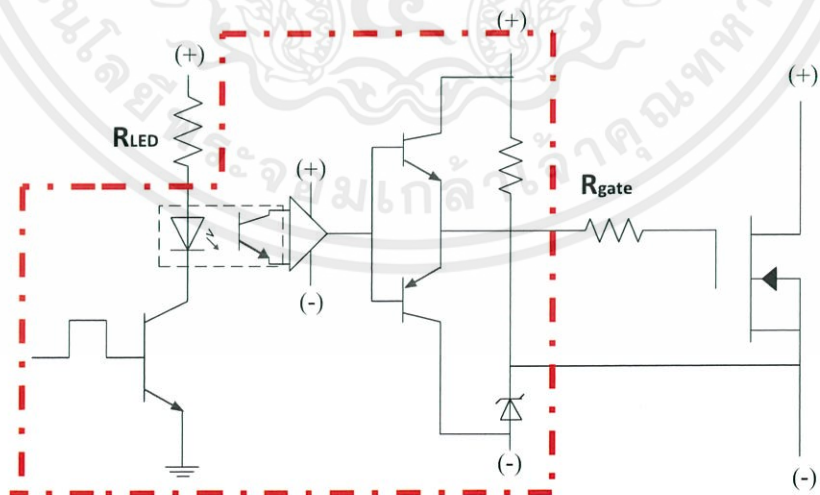
จะเกิดเมื่อ $V_{GS} > V_{th}$ และ $V_{DS} \geq (V_{GS} - V_{th})$ ในกรณีนี้สวิตช์จะทำงานและมีการสร้างแขนแนลขึ้นเพื่อให้กระแสไหลผ่านระหว่างขาเดรนและซอร์ส เมื่อแรงดันที่ขาเดรนมีค่ามากกว่าที่ขาเกต อิเล็กตรอนจะแพร่กระจายตัวออกไป การนำไฟฟ้าจะไม่ผ่านเพียงในแขนแนลแคบๆแต่จะกว้างขึ้น เหตุการณ์นี้เรียกว่า pitch-off ในกรณีนี้กระแสเดรนจะมีค่าต่ำขึ้นอยู่กับแรงดันที่ขาเดรนและการควบคุมขั้นต้นซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.7

$$I_D = \frac{\mu_n C_{OX} W}{2L} (V_{GS} - V_{th})^2 (1 + \lambda(V_{DS} - V_{DSat})) \tag{2.7}$$

โดย	λ	คือ	channel-length modulation parameter
-----	-----------	-----	-------------------------------------

2.4 วงจรที่ใช้ในการขับมอสเฟต

อุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสง (Opto-Isolator) หรือที่เรียกว่าออปโตคัปเปิลเลอร์ (Opto-Coupler) แสดงดังรูปที่ 2.15



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.15 วงจรขับมอสเฟต

2.4.1 อุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสง (Opto-Isolator)

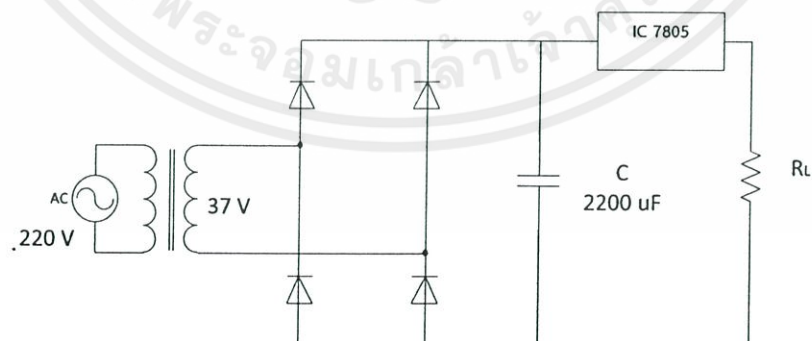
จากรูปที่ 2.15 แสดงอุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสง (Opto-Isolator) หรือออปโตคัปเปิลเลอร์ (Opto-Coupler) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อทางแสงโดยใช้หลักการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณแสง และเปลี่ยนกลับจากแสงเป็นไฟฟ้าตามเดิม ใช้สำหรับการเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างสองวงจรที่ต้องการแยกทางไฟฟ้าอย่างเด็ดขาดเพื่อป้องกันการรบกวนกันทางไฟฟ้า แบ่งออกเป็นหลายชนิดแต่ละชนิดจะประกอบด้วยหลอดแอลอีดี (LED) ทำหน้าที่ส่องแสงซึ่งปกติจะเป็นชนิดอินฟราเรดและตัวรับแสงที่เป็นโฟโตทรานซิสเตอร์หรือโฟโตไดโอด โดยจะถูกผลิตรวมอยู่ในตัวเดียวกัน

เนื่องจากสัญญาณจากควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์ไม่สามารถขับมอสเฟสกำลังได้โดยตรง ในการขับเคลื่อนของมอสเฟสกำลัง (Power Mosfet) จะต้องมีการจ่ายกระแส (Sourcing) และ ดึงกระแส (sinking) อย่างรวดเร็ว เพื่อให้มอสเฟสสามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงๆ จึงจำเป็นต้องใช้วงจรอิมิตเตอร์ตาม (double emitter-follower) ซึ่งประกอบด้วยทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็นและพีเอ็นพี ดังรูป 2.15 โดยหลักการของวงจรในการขับมอสเฟสกำลัง มีดังต่อไปนี้

- 1) เมื่อทรานซิสเตอร์ได้รับสัญญาณพัลส์ จากไมโครคอนโทรลเลอร์ จะทำให้ทรานซิสเตอร์นำกระแส (turn on) จะทำให้ไดโอดเปล่งแสงจะทำงาน และส่งสัญญาณไปยังออปแอมป์เพื่อทำการขยายสัญญาณที่ได้
- 2) เมื่อแรงดันด้านเข้าของวงจรขับมีแรงดันสูง (high) ทรานซิสเตอร์ตัวบนจะทำงาน ส่วนตัวด้านล่างจะไม่ทำงาน ทำให้สามารถมอสเฟสสามารถนำกระแสได้
- 3) เมื่อแรงดันเข้าวงจรขับมีค่าต่ำ (low) ทรานซิสเตอร์ตัวล่างจะทำงาน ส่วนตัวด้านบนจะไม่ทำงาน ทำให้มอสเฟสไม่สามารถนำกระแสได้

2.5 วงจรเรียงกระแส (Rectifier)

วงจรเรียงกระแสคือวงจรไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติในการแปลงสัญญาณกระแสสลับให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงหรือมีคุณสมบัติยอมให้ไฟฟ้าไหลผ่านไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งอุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการแปลงสัญญาณใดแก ไดโอด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.16 วงจรเรียงกระแสสำหรับสร้างแรงดัน 5 V
 ไม่ว่าจะฉีดยุติทุกสิ่ง อื่นทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.16 การสร้างแรงดัน 5 โวลต์ โดยการใช้วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์โดยใช้หม้อแปลงแปลงแรงดันจาก 220 โวลต์ เป็น 12 โวลต์ จากนั้นผ่านวงจรบริดจ์ไดโอดเพื่อเปลี่ยนเป็นกระแสตรงและใช้ตัวเก็บประจุในการกรองกระแสให้เรียบแล้วผ่าน IC เบอร์ 7805 เพื่อแปลงแรงดันเป็น 5 โวลต์ นำไปใช้ต่อไป

สำหรับการสร้างแรงดัน 15 โวลต์ ทำเช่นเดียวกับการสร้างแรงดัน 5 โวลต์ แต่เปลี่ยนจาก IC เบอร์ 7805 เป็น IC เบอร์ 7815

2.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์

2.6.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) คืออุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็กที่ได้พัฒนาและย่อขนาดให้เล็กลงจากระบบคอมพิวเตอร์ มีความสามารถในการประมวลผล คำนวณ และตัดสินใจต่างๆ โดยสามารถเขียนโปรแกรมเพื่อกำหนดรูปแบบการควบคุมได้อย่างอิสระ หรือตามความต้องการของผู้ใช้งาน ทำให้สามารถนำไปใช้งานแทนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดี ช่วยลดจำนวนอุปกรณ์และขนาดของระบบ ในขณะที่มีขีดความสามารถสูงขึ้น

2.6.2 ส่วนประกอบของไมโครคอนโทรลเลอร์

2.6.2.1 หน่วยประมวลผลกลางหรือซีพียู (CPU: Central Processing Unit)

หน่วยประมวลผลกลางหรือซีพียูทำหน้าที่ในการคำนวณ หรือประมวลข้อมูล โดยทำตามโปรแกรมที่เก็บไว้ในหน่วยความจำโปรแกรม

2.6.2.2 หน่วยความจำ (Memory)

หน่วยความจำสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ หน่วยความจำที่มีไว้สำหรับเก็บโปรแกรมหลัก (Program Memory) เปรียบเสมือนฮาร์ดดิสก์ของเครื่องคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ คือข้อมูลใดๆ ที่ถูกเก็บไว้ในนี้จะไม่สูญหายไปแม้ไม่มีไฟเลี้ยง อีกส่วนหนึ่งคือหน่วยความจำข้อมูล (Data Memory) ใช้เป็นเหมือนกระดานขดในการคำนวณของซีพียู และเป็นที่พักข้อมูลชั่วคราวขณะทำงาน แต่หากไม่มีไฟเลี้ยง ข้อมูลก็จะหายไปคล้ายกับหน่วยความจำ (RAM) ในเครื่องคอมพิวเตอร์ทั่วไป แต่สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์สมัยใหม่ หน่วยความจำข้อมูลจะมีทั้งที่เป็นหน่วยความจำแรม ซึ่งข้อมูลจะหายไปเมื่อไม่มีไฟเลี้ยง และเป็นอีอีพรอม (EEPROM : Erasable Electrically Read-Only Memory) ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลได้แม้ไม่มีไฟเลี้ยง

2.6.2.3 ส่วนติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก หรือพอร์ต (Port)

ส่วนติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก หรือพอร์ต (Port) มี 2 ลักษณะคือ พอร์ตอินพุต (Input Port) และพอร์ตส่งสัญญาณหรือพอร์ตเอาต์พุต (Output Port) ส่วนนี้จะใช้ในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก ถือว่าเป็นส่วนที่สำคัญมาก ใช้ร่วมกันระหว่างพอร์ตอินพุตเพื่อรับสัญญาณ อาจจะใช้การกดสวิตช์ เพื่อนำไปประมวลผลและส่งไปพอร์ตเอาต์พุตเพื่อแสดงผล เช่น การติดสว่างของหลอดไฟ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

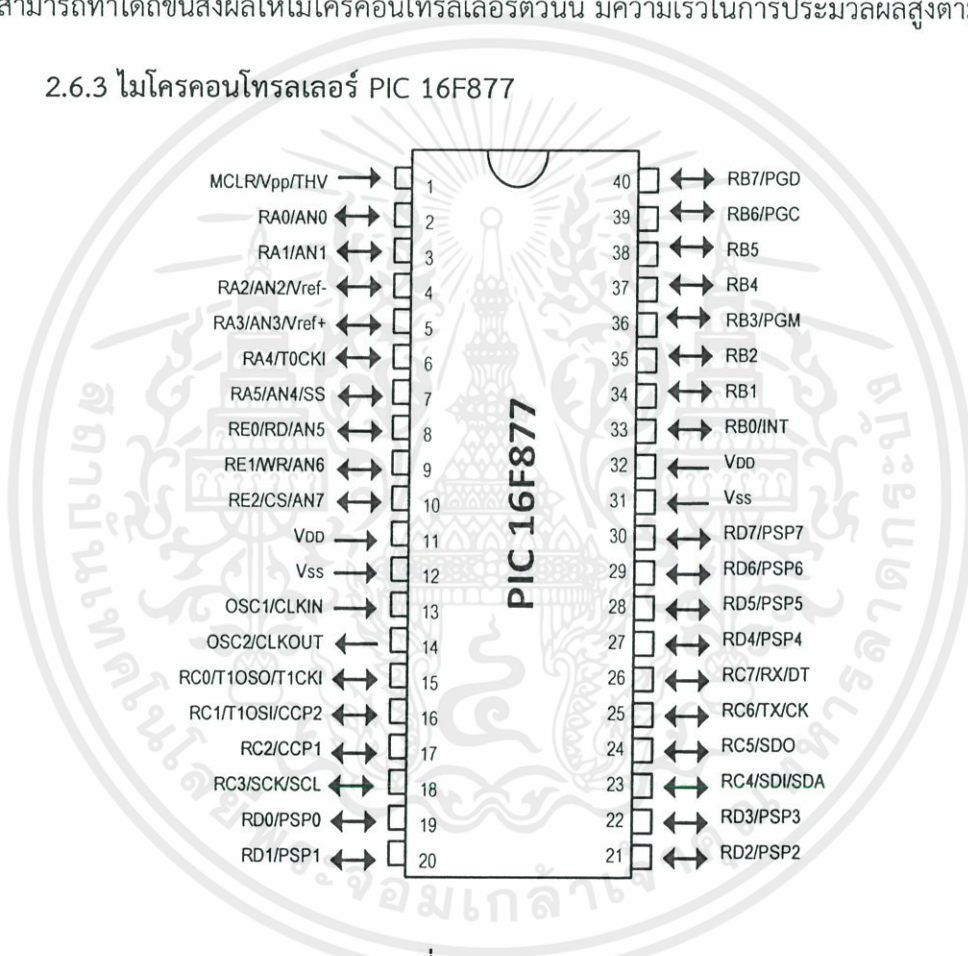
2.6.2.4 ช่องทางเดินของสัญญาณ หรือบัส (BUS)

คือเส้นทางการแลกเปลี่ยนสัญญาณข้อมูลระหว่าง ซีพียู หน่วยความจำและพอร์ตเป็นลักษณะของสายสัญญาณ จำนวนมากอยู่ภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยแบ่งเป็นบัสข้อมูล (Data Bus) บัสแอดเดรส (Address Bus) และบัสควบคุม (Control Bus)

2.6.2.5 วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา

นับเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากอีกส่วนหนึ่ง เนื่องจากการทำงานที่เกิดขึ้นในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ จะขึ้นอยู่กับกำหนัดจังหวะ หากสัญญาณนาฬิกาที่มีความถี่สูง จังหวะการทำงานก็จะสามารถทำได้ถี่ขึ้นส่งผลให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวนั้น มีความเร็วในการประมวลผลสูงตามไปด้วย

2.6.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F877



รูปที่ 2.17 PIC 16F877

จากรูปที่ 2.17 เป็นโครงสร้างภายนอกของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F877 สามารถแบ่งการจัดขาต่อการใช้งานของ PIC 16F877 ได้เป็น 4 กลุ่มคือ

- 1) กลุ่มสัญญาณนาฬิกา มี 2 ขา คือ OSC1/CLKIN และ OSC2/CLKOUT
- 2) กลุ่มควบคุม มี 1 ขา คือ MCLR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ

- 3) กลุ่มพอร์ตอินพุต – เอาต์พุต มี 33 ขา
- 4) กลุ่มไฟเลี้ยง มี 2 ขา คือ ขา Vss หรือขากราวด์และขา VDD หรือขาไฟเลี้ยง

2.6.3.1 คุณสมบัติไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877

- 1) มีคำสั่งในภาษาแอสเซมบลี 35 คำสั่ง
- 2) ใช้ความถี่ออสซิลเลเตอร์ได้สูงสุด 20 MHz
- 3) มีหน่วยความจำโปรแกรม Flash Memory ขนาด 8 K word (14 – bit words)
- 4) มีหน่วยความจำข้อมูลแบบ RAM 368 Bytes
- 5) มีหน่วยความจำข้อมูลแบบ EEPROM 256 Byte
- 6) มีการตอบสนองอินเทอร์รัพท์ทั้งหมด 14 แหล่ง
- 7) สามารถเลือกระดับการป้องกันข้อมูล (Code Protection)
- 8) มีโหมดประหยัดพลังงาน (Sleep Mode)
- 9) สามารถเลือกสัญญาณนาฬิกาได้หลายโหมด XT RC และออสซิลเลเตอร์พลังงานต่ำ
- 10) มีฟังก์ชันการรักษาเสถียรภาพการทำงาน ได้แก่ POR , PWRT, OST, BOR และ WDT
- 11) การโปรแกรมตัวชิพแบบ ICSP (ICSP : In-Circuit Serial Programming)
- 12) สามารถทำงานที่ไฟเลี้ยงวงจรตั้งแต่ 2.0 โวลต์ ถึง 5.5 โวลต์
- 13) ขาพอร์ท I/O แต่ละขา สามารถรับและปล่อยกระแสได้สูงสุด 25 mA
- 14) มีโมดูล Timer / Counter ใช้งานทั้งหมด 3 ตัว Timer 0, Timer 1 และ Timer 2
- 15) มีโมดูล CCP (CCP : Compare / Capture / PWM) จำนวน 2 ชุด
- 16) มีโมดูล Analog to Digital Converter ความละเอียดขนาด 8 บิต และ 10 บิต จำนวน 8 ช่องภายในตัวชิพ
- 17) มีโมดูลสื่อสารอนุกรมแบบ USART (USART : Universal Synchronous Asynchronous Receiver / Transmitter)
- 18) มีพอร์ท I/O จำนวน 5 พอร์ท ได้แก่ พอร์ท A , B , C , D , และ E มีขา I/O รวมกัน 33 ขา

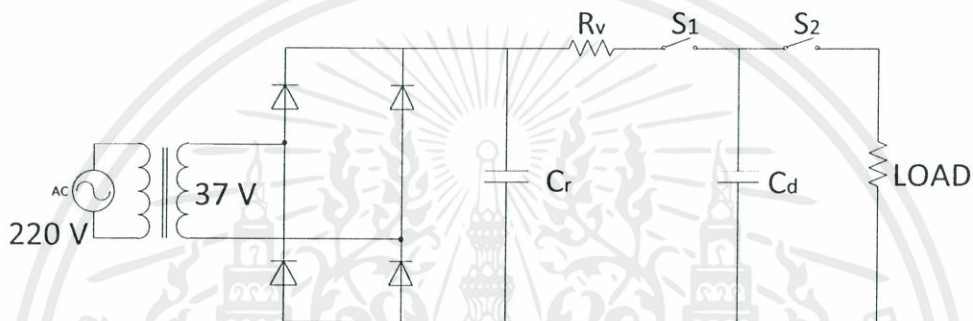
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและประกอบสร้าง

การออกแบบและประกอบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ารูปซันที่ทำการออกแบบโดยใช้หลักการพื้นฐานในการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุและให้ตัวเก็บประจุคายประจุเมื่อได้รับสัญญาณจุดชนวน จึงทำให้การออกเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ารูปซันประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ วงจรควบคุมและวงจรกำลัง

3.1 วงจรกำลัง



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ารูปซันและวงจรเรียงกระแส

3.1.1 ตัวเก็บประจุ

3.1.1.1 ตัวเก็บประจุในวงจรกำเนิดแรงดันรูปซัน (C_d)

ตัวเก็บประจุนี้จะถูกอัดประจุจากวงจรกรองแรงดัน และจ่ายประจุให้กับวัตถุทดสอบเพื่อสร้างแรงดันรูปซัน จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์หรือตัวเก็บประจุชนิดมีขั้ว เป็นตัวเก็บประจุที่ขั้วบวกและขั้วลบถูกกำกับไว้ที่ขาทั้ง 2 ข้าง มีลักษณะเป็นทรงกระบอก มีขนาดค่าความจุมากโดยทั่วไปสามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 6.3 โวลต์ถึง 450 โวลต์ ซึ่งค่าความจุและขนาดแรงดันไฟฟ้าจะกำกับไว้บนตัวเก็บประจุ

การเลือกค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในการจ่ายพลังงานให้แก่วัตถุทดสอบนั้น ต้องคำนึงถึงแรงดันไฟฟ้าไฟฟ้าอัดประจุที่ต้องการใช้งาน จากขอบเขตงานในบทที่ 1 ได้กำหนดแรงดันไฟฟ้าในการอัดประจุเท่ากับ 50 โวลต์ ดังนั้นตัวเก็บประจุจะต้องทนแรงดันได้อย่างน้อย 50 โวลต์ นอกจากนี้ในการออกแบบตัวเก็บประจุของโครงการนี้ ยังต้องคำนึงถึงเวลาในการคายประจุให้กับวัสดุทดสอบโดยที่แรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุลดลงเพียงเล็กน้อยหรือแทบจะไม่ลดลง จากขอบเขตงานในบทที่ 1 ได้กำหนดเวลาในการคายประจุเท่ากับ 100 ไมโครวินาที

จากทฤษฎีการคายประจุของตัวเก็บประจุในวงจรอันดับที่หนึ่งระหว่างตัวเก็บประจุและความต้านทานจะมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและเวลาดังสมการที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{\text{load}}(t) = V_c e^{\frac{-t}{RC}} \quad (3.1)$$

จากสมการที่ 3.1 จะได้ค่าคงที่เวลา (τ) เท่ากับ RC ในการออกแบบของโครงการนี้ต้องการให้ตัวเก็บประจุคายประจุโดยที่แรงดันที่ตัวเก็บประจุลดลงเพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงออกแบบให้ค่าคงที่เวลามีค่าเป็น 2000 เท่าของเวลาที่กำหนดในการคายประจุ และจากขอบเขตงานไบบอทที่ 1 วัสดุที่จะนำมาทดสอบมีค่าน้อยที่สุด 1 กิโลโอห์ม จึงสามารถออกแบบตัวเก็บประจุได้ดังสมการที่ 3.2

$$\tau = RC \quad (3.2)$$

$$2000 \times 100 \times 10^{-6} = 1000 \times C_d$$

$$C_d = 200 \mu\text{F}$$

3.1.1.2 ตัวเก็บประจุในวงจรเรียงกระแส (C_r)

ตัวเก็บประจุในวงจรเรียงกระแส (C_r) มีหน้าที่ในการตรึงแรงดันที่ได้จากวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นเพื่อให้แรงดันขาออกจากรวมมีความเรียบมากขึ้นและ จึงเลือกชนิดอิเล็กโทรไลต์เช่นกัน เนื่องจากตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์เนื่องจากต้องใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่ามากเพื่อให้แรงดันขาออกมีความเรียบมากที่สุด และขนาดของตัวเก็บประจุในวงจรเรียงกระแสนี้สามารถหาได้โดยการประมาณจากค่าตัวเก็บประจุในวงจรกำเนิดแรงดันรูปซัน ซึ่งจะใช้ค่าที่มากกว่าค่าตัวเก็บประจุในวงจรกำเนิดแรงดันรูปซันประมาณ 10 เท่าแสดงในสมการที่ 3.3

$$C_r = 10 \times C_d \quad (3.3)$$

$$C_r = 10 \times 200 \mu\text{F}$$

$$C_r = 2000 \mu\text{F}$$

โดยในการประกอบสร้างจริงได้ทำการเลือกขนาดเพื่อเป็น 2200 μF

3.1.2 ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ

ในการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุนั้นไม่สามารถต่อแหล่งไฟฟ้ากับตัวเก็บประจุทำได้โดยตรง เนื่องจาก ผลของกระแสไฟฟ้าขณะเริ่มอัดประจุจะสูงมากและผลของการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของสนามไฟฟ้าส่งผลเสียต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าและทำให้อายุการใช้งานของตัวเก็บประจุสั้นลงดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น จึงทำให้ปัจจัยที่ต้องคำนึงในการออกแบบความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุนั้นขึ้นอยู่กับความสามารถของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ในโครงการนี้ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจากหม้อแปลงกระแสสลับแปลงระดับแรงดันลงจากนั้นผ่านวงจรเรียงกระแส และเลือกใช้หม้อแปลงที่จ่ายกระแสได้สูงสุด 2 แอมแปร์ ดังนั้นจึงออกแบบกระแสอัดประจุสูงที่ 1.5 แอมแปร์ สามารถออกแบบความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุได้ดังสมการที่ 3.4

$$R_V = \frac{V_c}{I} \quad (3.4)$$

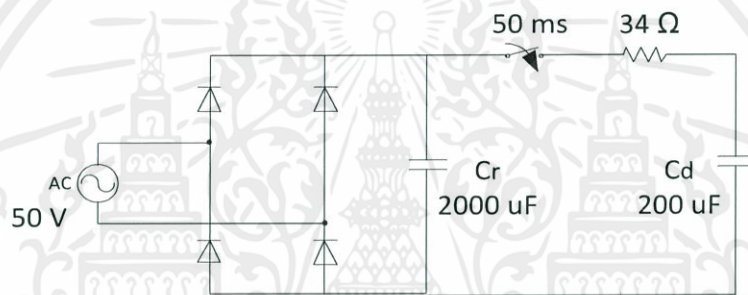
$$R_V = \frac{50}{1.5} \approx 34 \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากค่าความต้านทานที่ได้ตั้งสมการที่ 3.4 แล้วในการใช้งานตัวต้านทานต้องคำนึงถึงกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านด้วย กระแสจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเลือกขนาดตัวต้านทานให้เหมาะสมในโครงการนี้เลือกใช้ชนิดของตัวต้านทานแบบซีเมนต์เนื่องจากมีข้อดีคือสามารถทนกำลังไฟฟ้าได้สูง กรณีที่ กำลังไฟฟ้าสูงเกินพิกัดตัวต้านทานตัวเดียวจะทนรับได้สามารถใช้การต่อขนานของตัวต้านทานเพื่อแบ่ง กระแสที่ไหลผ่านได้ แต่วิธีนี้ค่าความต้านทานจะลดลงไปด้วย ดังนั้นจึงต้องเลือกความต้านทานที่จะมาต่อ ขนานกันให้เหมาะสม โดยเลือกใช้ความต้านทานซีเมนต์ขนาด 100 โอห์มเป็นจำนวน 3 ตัวต่อขนานกัน จึงทำให้มีกระแสไหลผ่านตัวต้านทานแต่ละตัวเพียง 0.5 แอมแปร์ ทำให้สามารถใช้ตัวต้านทานขนาด 30 วัตต์ได้

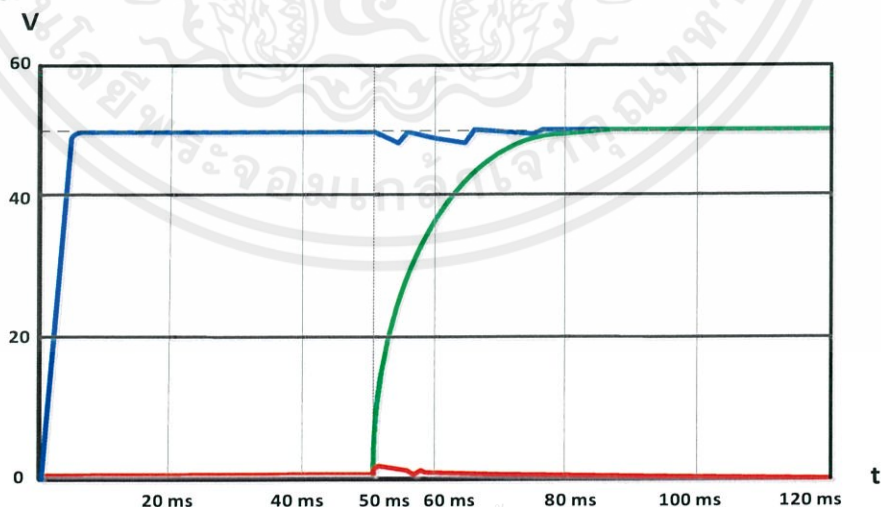
3.1.3 ผลการจำลองการอัดประจุด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ [3]

การจำลองผลได้ตั้งเวลาสวิตซ์ทำการปิดวงจรที่เวลา 50 มิลลิวินาทีเพื่ออัดประจุ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 รูปวงจรการอัดประจุที่จำลองด้วยโปรแกรม

จากผลการจำลองตัวเก็บประจุจะใช้เวลาในการอัดประจุประมาณ 50 มิลลิวินาทีภายหลังจากสวิตซ์ปิดวงจร แสดงดังรูปที่ 3.3

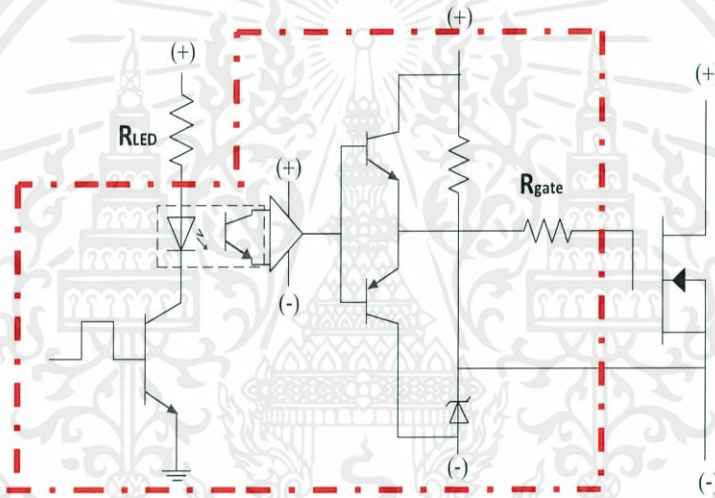


รูปที่ 3.3 กราฟแรงดันที่ตัวเก็บประจุ C_r , แรงดันที่ตัวเก็บประจุ C_d , กระแสของตัวเก็บประจุ C_d

3.2 วงจรควบคุม

3.2.1 การใช้งาน TLP 250 เป็นวงจรขับเคลื่อนหลอดไฟ [4]

TLP 250 เป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสงที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน มีลักษณะเป็น IC มี 8 ขา และมีโครงสร้างภายในดังรูปที่ 3.4 เห็นได้ว่าจะมีเพียงแสงที่เป็นตัวเชื่อมต่อสัญญาณจึงทำให้วงจรทั้งสองฝั่งแยกจากกันโดยสมบูรณ์ ซึ่งเป็นผลดีต่อวงจรควบคุมถ้าหากเกิดการลัดวงจรในวงจรกำลังกระแส ลัดวงจรนั้นจะไม่สามารถทำความเสียหายกับวงจรควบคุมได้ การทำงานเบื้องต้นของอุปกรณ์ตัวนี้ได้ อธิบายไว้ในแล้วบทที่ 2 โครงสร้างภายในทางด้านรับสัญญาณเข้ามีเพียงไดโอดเปล่งแสงเท่านั้น ในการใช้งานจริงจึงต้องมีการใส่ตัวต้านทานค่าหนึ่งก่อนเข้าตัวอุปกรณ์ตัวนี้ เพื่อจำกัดกระแสที่จะรับมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์โดยค่ากระแสที่เหมาะสมสามารถดูได้จากรายละเอียดข้อมูลอุปกรณ์ซึ่งเท่ากับ 10 มิลลิแอมแปร์แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 โครงสร้างภายใน TLP 250

จากรูปที่ 3.4 สามารถออกแบบความต้านทานจำกัดกระแสก่อนเข้า TLP 250 ได้ดังสมการที่ 3.5

$$R_{LED} = \frac{V}{I} \quad (3.5)$$

$$R_{LED} = \frac{5}{10 \times 10^{-3}} = 500 \Omega$$

นอกจากความต้านทานที่ใช้ต่อก่อนเข้าขารับสัญญาณแล้วยังต้องมีการต่อความต้านทานจำกัดกระแสขับเคลื่อนหลอดไฟอีกด้วย เพื่อไม่ให้มีกระแสสูงเกินไป โดยความต้านทานตัวนี้สามารถหาได้จากรายละเอียดข้อมูลอุปกรณ์ซึ่งมีสมการดังสมการที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{gate} = \frac{V_{CC} - V_{EE} - V_{OL}}{I_{OL(peak)}} \tag{3.6}$$

โดยที่ V_{CC} คือ แรงดันไฟฟ้าเลี้ยงวงจรขั้วบวกมีค่า 15 โวลต์
 V_{EE} คือ แรงดันไฟฟ้าเลี้ยงวงจรขั้วลบหรือกราวด์ เลือกใช้ 0 โวลต์
 V_{OL} คือ แรงดันไฟฟ้าขาออกขณะสถานะต่ำจากคุณลักษณะมีค่า -14.2 โวลต์
 $I_{OL(peak)}$ คือ กระแสไฟฟ้าขาออกสูงสุดขณะสถานะต่ำจากคุณลักษณะของตัว
 อุปกรณ์มีค่า 2 แอมแปร์

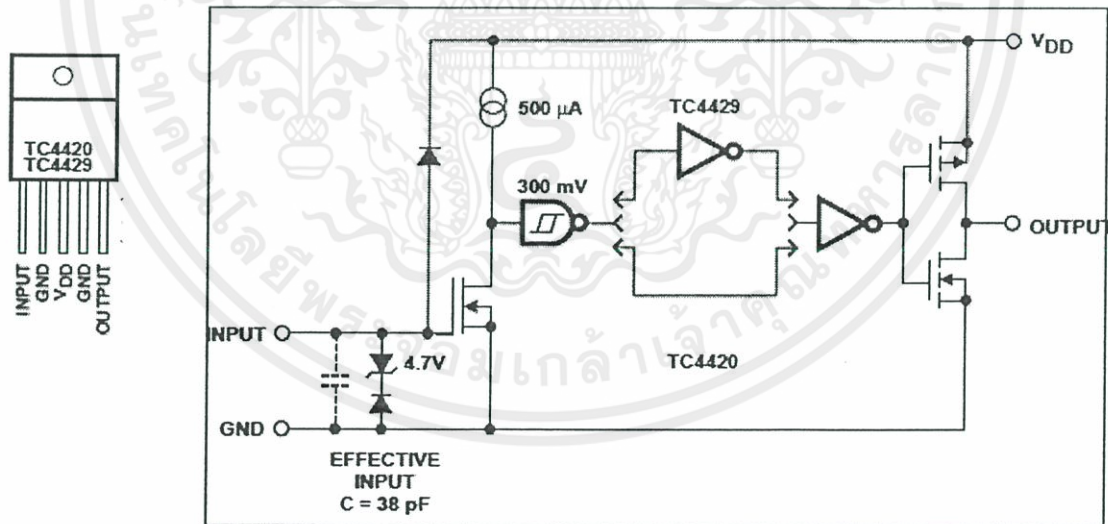
จากสมการที่ 3.6 สามารถนำมาออกแบบความต้านทานจำกัดกระแสขั้วเกตมอสเฟตได้ดังสมการ
 ที่ 3.7

$$R_{gate} = \frac{15 - 0 - (-14.2)}{2}$$

$$R_{gate} = 14.6 \Omega \tag{3.7}$$

3.2.2 การใช้ TC4429CAT เป็นวงจรขั้วเกตมอสเฟต

เนื่องจากการใช้ TLP 250 ในการขั้วเกตมอสเฟตนั้นยังไม่รวดเร็วพอที่จะสร้างแรงดันรูปขั้นโดยมี
 เวลาขาขึ้นตามขอบเขตของการทดลองได้ จึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ขั้วเกตที่มีความรวดเร็วกว่า TLP 250
 คณะผู้จัดทำเลือก TC4429CAT เป็นตัวขั้วเกต ซึ่งมีวงจรสมมูลดังรูปที่ 3.5 ซึ่งอุปกรณ์ขั้วเกตเบอร์นี้มี
 คุณลักษณะเป็นอินเวอร์ตติง ลอจิก



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลของ TC4429TAC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ในการใช้งานนั้นมีความจำเป็นต้องออกแบบค่าความต้านทานกระแสต้านขาเข้า โดย
 ไม่สามารถทำได้ตามสมการที่ 3.8... เปลี่ยนเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R = \frac{V_{DD} - 4.7}{I} \quad (3.8)$$

โดยที่ V_{DD} คือ แรงดันไฟฟ้าขาเข้ามีค่า 15 โวลต์
 I คือ ค่ากระแสไฟฟ้าใช้งานมีค่า 5 mA

$$R = \frac{15 - 4.7}{5 \times 10^{-3}}$$

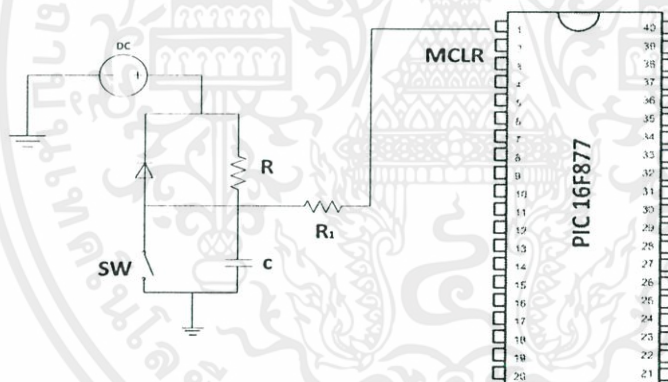
$$R = 2060 \Omega$$

3.2.3 การใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมการทำงานของสวิตช์ [5-6]

ในการควบคุมการทำงานของสวิตช์โดยอาศัยการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ จะต้องอาศัยวงจรที่คอยควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อไม่ให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานผิดพลาดหรือทำการรีเซ็ตในกรณีที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานผิดพลาด โดยอาศัยวงจรต่อไปนี้ในการทำงาน

3.2.3.1 วงจรรีเซ็ตไมโครคอนโทรลเลอร์

วงรีเซ็ตไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำหน้าที่เริ่มต้นการทำงานใหม่ให้กับวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ในกรณีที่มีการเริ่มทำงานในรอบใหม่หรือเกิดปัญหาการทำงานที่ผิดพลาดเกิดขึ้นเพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถทำงานอยู่ในสภาวะปกติได้ โดยในวงจรรีเซ็ตไมโครคอนโทรลเลอร์มีการรีเซ็ตโดยใช้ขาที่ 1 (MCLR) แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรรีเซ็ตไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยใช้ขา MCLR

จากรูปที่ 3.6 ในการรีเซ็ตโดยใช้ขา MCLR จะทำการรีเซ็ตเมื่อสัญญาณที่เข้ามาเป็นสัญญาณแอกทีฟโลว์ (low) โดยจะประกอบด้วยพารามิเตอร์ต่างๆ ในวงจรซึ่งเลือกใช้ค่าตามเอกสารประกอบการสอนวิชาไมโครโพรเซสเซอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์ของ อ.ชัยทัต มณีอินทร์ ดังต่อไปนี้

โดยที่ R = ทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดกระแสที่จะซาร์ทไปยังตัวเก็บประจุ มีค่า 10 กิโลโอห์ม

R_1 = ทำหน้าที่จำกัดกระแสที่จะไหลไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ มีค่า 2.2 กิโลโอห์ม

C = ทำหน้าที่รักษาระดับแรงดัน เพื่อป้องกันไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการรีเซ็ตเอง

แบบอัตโนมัติ เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์จะรีเซ็ตเมื่อระดับแรงดันเป็นแอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ โดย อ.ชัยทัต มณีอินทร์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีก SW = สวิตช์ที่ใช้ในการควบคุมการรีเซ็ต จนถึงเข้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

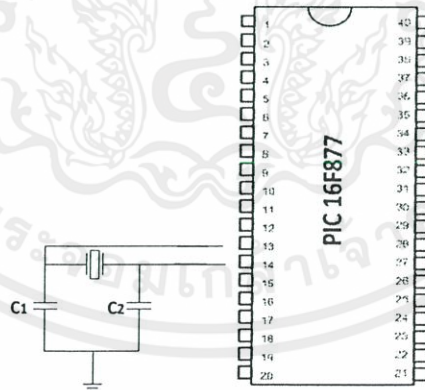
3.2.3.2 วงจรป้อนสัญญาณนาฬิกา (Clock)

ในวงจรป้อนสัญญาณนาฬิกา จะเป็นการป้อนสัญญาณเพื่อควบคุมจังหวะการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยจังหวะการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์จะขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณนาฬิกาที่ป้อน ในโครงการนี้ใช้ความถี่นาฬิกาจากคริสตอล 4 เมกะเฮิร์ตซ์ต่อเข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์ขาที่ 13 และ 14 (OSC1 และ OSC2 ตามลำดับ) ตัวเก็บประจุที่ใช้มีค่า 27 พิโกฟารัด ซึ่งอิงค่าตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ตามความถี่นาฬิกา

ความถี่นาฬิกา (MHz)	ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้กับคริสตอล (pF)	
	C ₁	C ₂
1	33	33
4	27	27

โดยรูปร่างในการต่อสัญญาณนาฬิกาเข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์ขาที่ 13 และ 14 (OSC1 และ OSC2 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 3.7

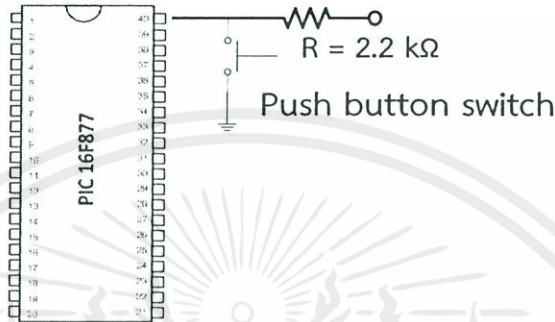


รูปที่ 3.7 วงจรสัญญาณนาฬิกาให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3.3 วงจรป้อนสัญญาณอินพุต

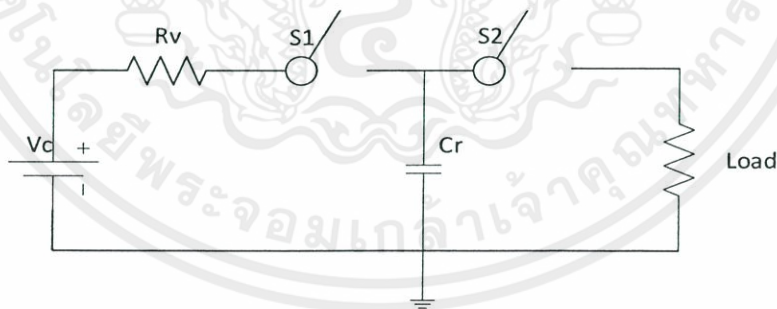
ในการป้อนสัญญาณอินพุตให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์เมื่อทำการกดสวิตช์ทำให้มีสัญญาณเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อให้มีสัญญาณลอจิกเป็นหนึ่งโดยมีความต้านทานกำจัดกระแสก่อนเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์มีค่าเท่ากับ 2.2 กิโลโอห์มแสดงดังรูป 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรป้อนสัญญาณอินพุต

3.2.3.4 การออกแบบโปรแกรมควบคุมการทำงานของสวิตช์โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

ในการควบคุมการทำงานของสวิตช์ในวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้นบันไดนั้น จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F887 ในการควบคุมการทำงานของสวิตช์แต่ละตัวซึ่งในวงจรประกอบด้วยสวิตช์ 2 ตัว ได้แก่ สวิตช์ตัวที่ 1 (S_1) คือสวิตช์มอสเฟส (MOSFET) และสวิตช์ตัวที่ 2 (S_2) คือ อาร์เอฟมอสเฟส (RF MOSFET) ที่มีความถี่ในการสวิตช์สูง ซึ่งมีความถี่เท่ากับ 1 กิโลเฮิร์ต เพื่อให้เวลาขาที่มีค่าเท่ากับ 3 นาโนวินาทีโดยวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้นบันไดแสดงดังรูปที่ 3.9

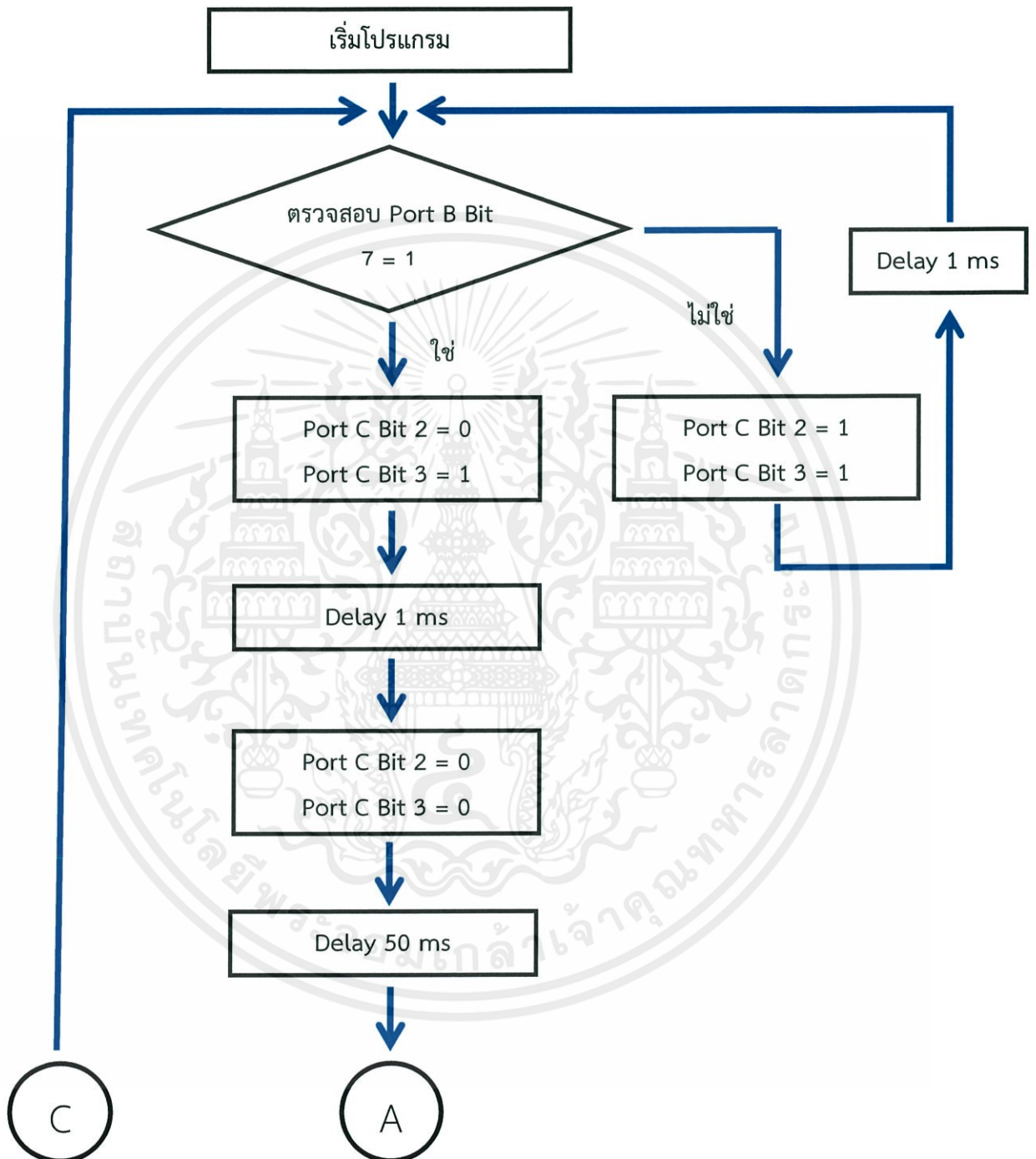


รูปที่ 3.9 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น

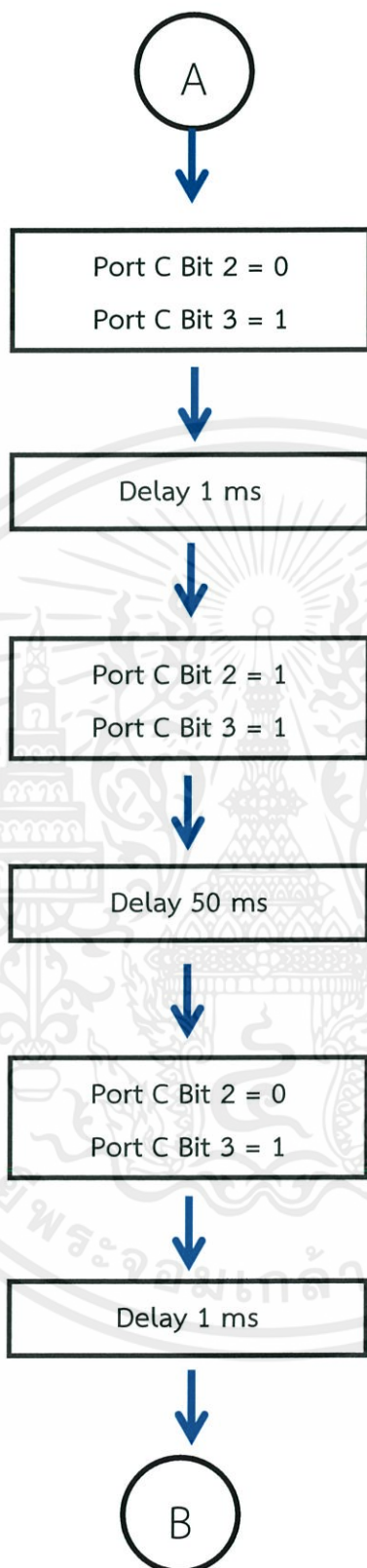
การควบคุมการทำงานของสวิตช์ทั้ง 2 ตัวสามารถแสดงการควบคุมการทำงานของสวิตช์โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F887 โดยจะให้สวิตช์ตัวที่ 1 (S_1) ทำงานก่อนเพื่อทำการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ และจะให้สวิตช์ตัวที่ 2 (S_2) ทำงานเพื่อให้คายประจุให้กับโหลด โดยจะมีข้อควรระวังในช่วงการทำงานของสวิตช์ไม่ให้ต่อเนื่องกัน หรือ การที่สวิตช์ตัวที่ 1 (S_1) ยังไม่เปิดวงจร (OFF) แต่สวิตช์ตัวที่ 2 (S_2)

3.2.2.5 แผนผังการทำงานของโปรแกรมควบคุมสวิตช์โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงดังรูปที่

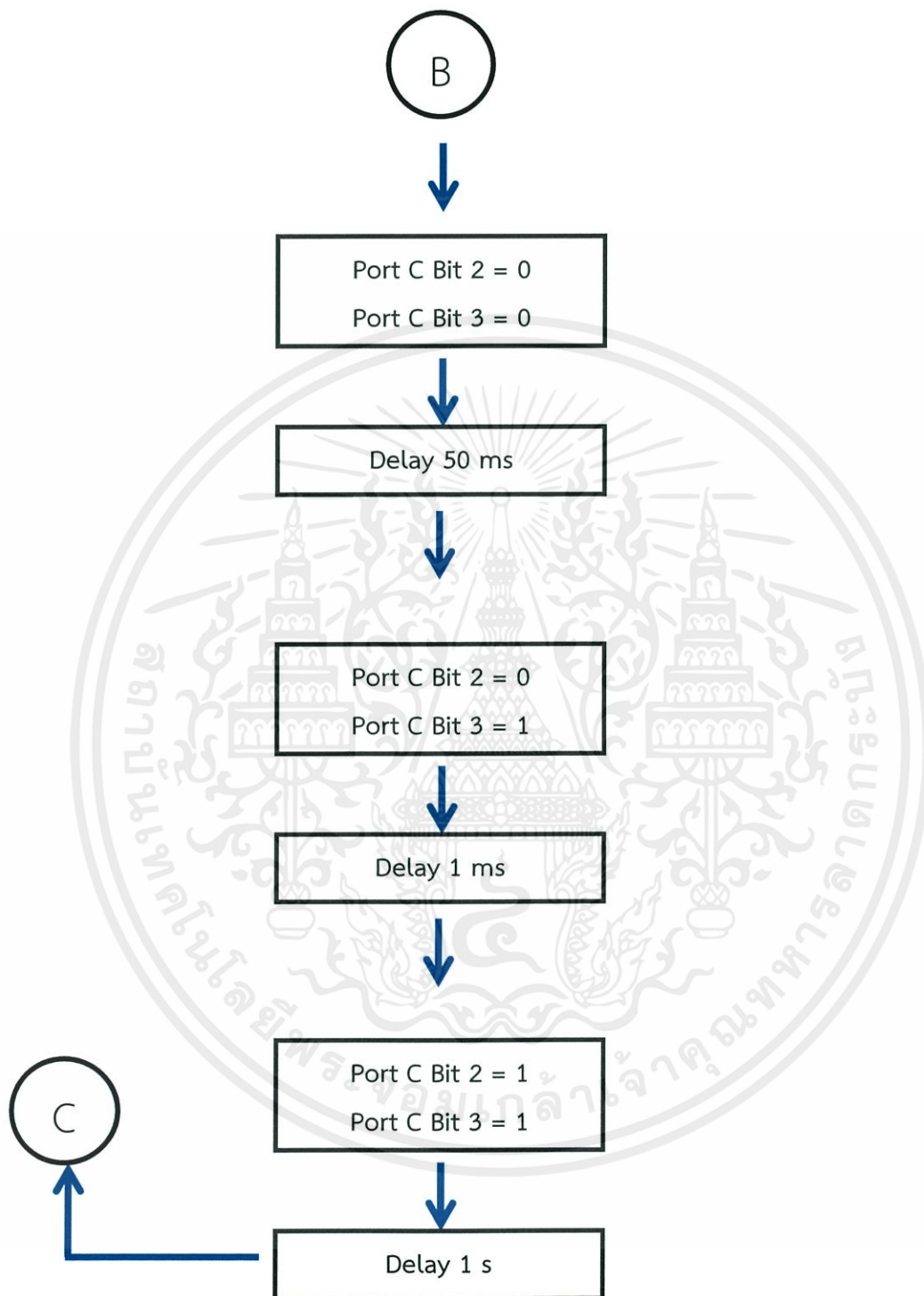
3.10



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 3.10 แผนผังการทำงานของโปรแกรมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์
 ไม่ว่าจะพิมพ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์
 รูปที่ 3.10 แผนผังการทำงานของโปรแกรมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์(ต่อ)
 ไม่ว่าจะพิมพ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ในประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 3.10 แผนผังการทำงานของโปรแกรมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (ต่อ)
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.10 การทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F887 โดยใช้ Port C Bit 2 ในการควบคุมการทำงานของสวิตช์ตัวที่ 1 (S_1) และใช้ Port C Bit 3 ในการควบคุมการทำงานของสวิตช์ตัวที่ 2 (S_2) โดยการควบคุมการทำงานของสวิตช์มีขั้นตอนในการควบคุมดังต่อไปนี้

1) การทำงานของโปรแกรมเริ่มจาก ทำการตรวจสอบแรงดันที่คร่อมตัวเก็บประจุก่อน ว่ามีแรงดันหรือไม่ ถ้ากรณีที่ไม่มีแรงดันที่คร่อมตัวเก็บประจุ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งให้สวิตช์ตัวที่ 1 (S_1) ทำการปิดวงจร (ON) เพื่อทำการชาร์จประจุให้กับตัวเก็บประจุ ในกรณีที่ มีแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ ก็จะทำงานในขั้นตอนที่ 2

2) เมื่อมีแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุแล้ว ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งให้สวิตช์ตัวที่ 1 (S_1) ทำการเปิดวงจร (OFF) และหน่วงเวลา 20 มิลลิวินาที ก่อนที่ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งให้สวิตช์ตัวที่ 2 (S_2) ทำงานเพื่อป้องกันการเกิดการลัดวงจรที่จะเกิดขึ้น

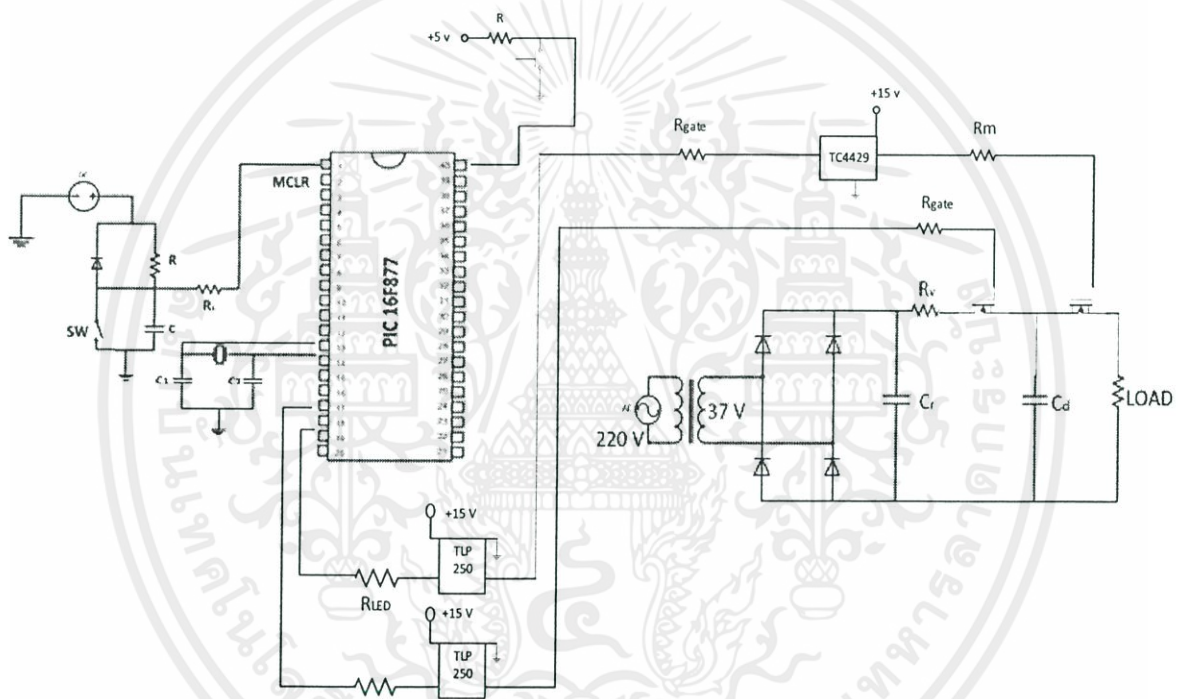
3) เมื่อสวิตช์ตัวที่ 2 (S_2) ทำการปิดวงจร (ON) จะทำการหน่วงเวลา 100 มิลลิวินาที เพื่อให้ตัวเก็บประจุคายประจุไปยังอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือโหลด

4) เมื่อมีการคายประจุในช่วงเวลา 100 มิลลิวินาทีแล้ว ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งให้สวิตช์ตัวที่ 2 (S_2) ทำการเปิดวงจรออก (OFF) จะมีการหน่วงเวลาภายในตัวของไมโครคอนโทรลเลอร์ ก่อนที่จะมีการเริ่มต้นในรอบใหม่อีกครั้งหนึ่ง เพื่อทำการชาร์จแรงดันที่ตัวเก็บประจุให้ตัวเก็บประจุอีกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การประกอบและการสร้าง

การประกอบวงจรกำลังและวงจรควบคุมที่ทำการออกแบบขนาดของอุปกรณ์ต่างๆ ช่างต้นเข้าด้วยกันเป็นวงจรกำเนิดแรงดันรูปขั้นที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในควบคุมการทำงานของสวิทซ์ การสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้นในโครงการนี้ใช้การประกอบอุปกรณ์ต่างๆบนแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB, Printed Circuit Board) ที่ทำการออกแบบลายวงจรในคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรมอัลเทียม ดีไซน์เนอร์ (Altium Designer) ซึ่งในการปฏิบัติสร้างจริงได้แยกวงจรทั้งหมดออกเป็นสองวงจบบนแผ่นวงจรพิมพ์สองแผ่น วงจรแรกคือวงจรไฟเลี้ยงและอุปกรณ์ที่เหลืจะอยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์อีกแผ่น เพื่อความสะดวกในการประกอบอุปกรณ์ในกล่อง ซึ่งรูปวงจรรวมแสดงได้ดังรูปที่ 3.11

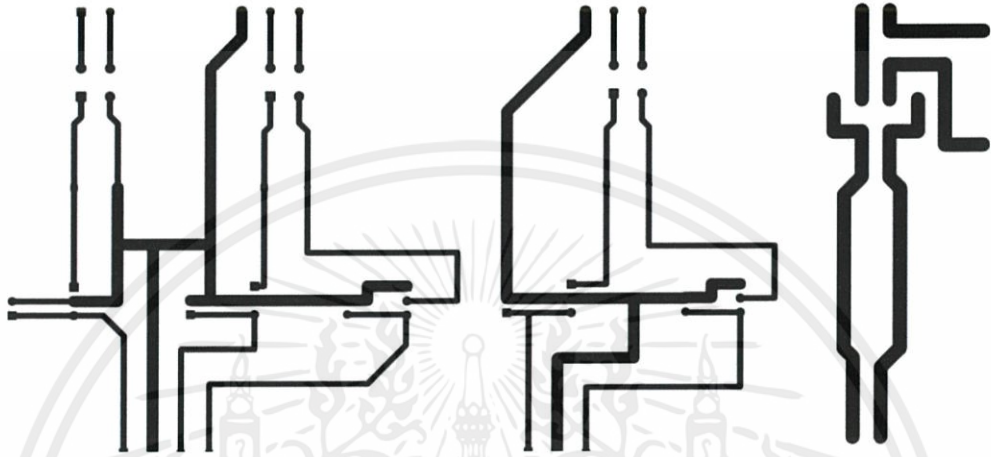


รูปที่ 3.11 รูปวงจรรวม

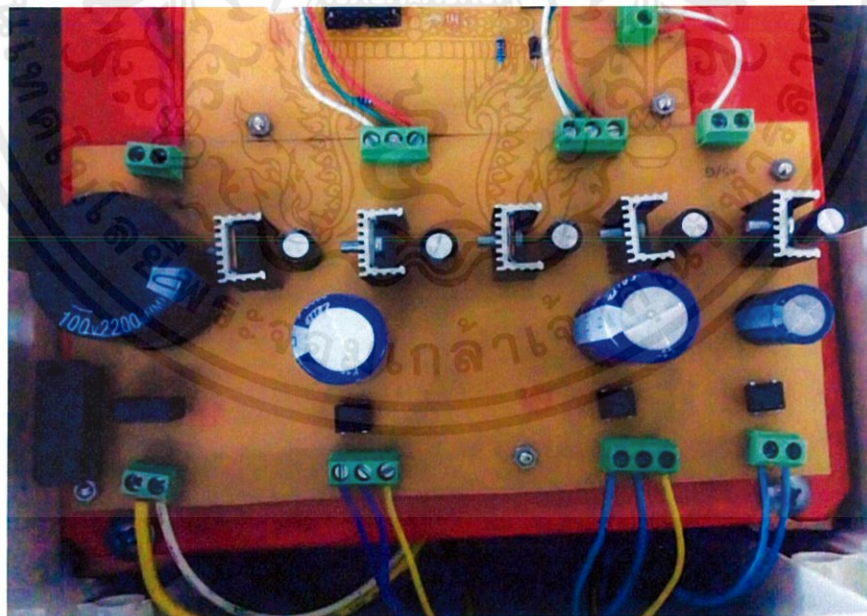
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 วงจรไฟเลี้ยง

ในการสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้วนั้นจำเป็นต้องใช้ไฟเลี้ยงแกว่งจรควบคุม ซึ่งอุปกรณ์แต่ละชนิดนั้นต้องการแรงดันของไฟเลี้ยงต่างกันไป เช่น -5 โวลต์, 5 โวลต์ และ 15 โวลต์ ซึ่งทางคณะผู้จัดทำได้ทำการออกแบบสายทองแดงวงจรไฟเลี้ยงได้ดังรูปที่ 3.12 และเมื่อทำการสร้างจริงจะได้ดังรูปที่ 3.13



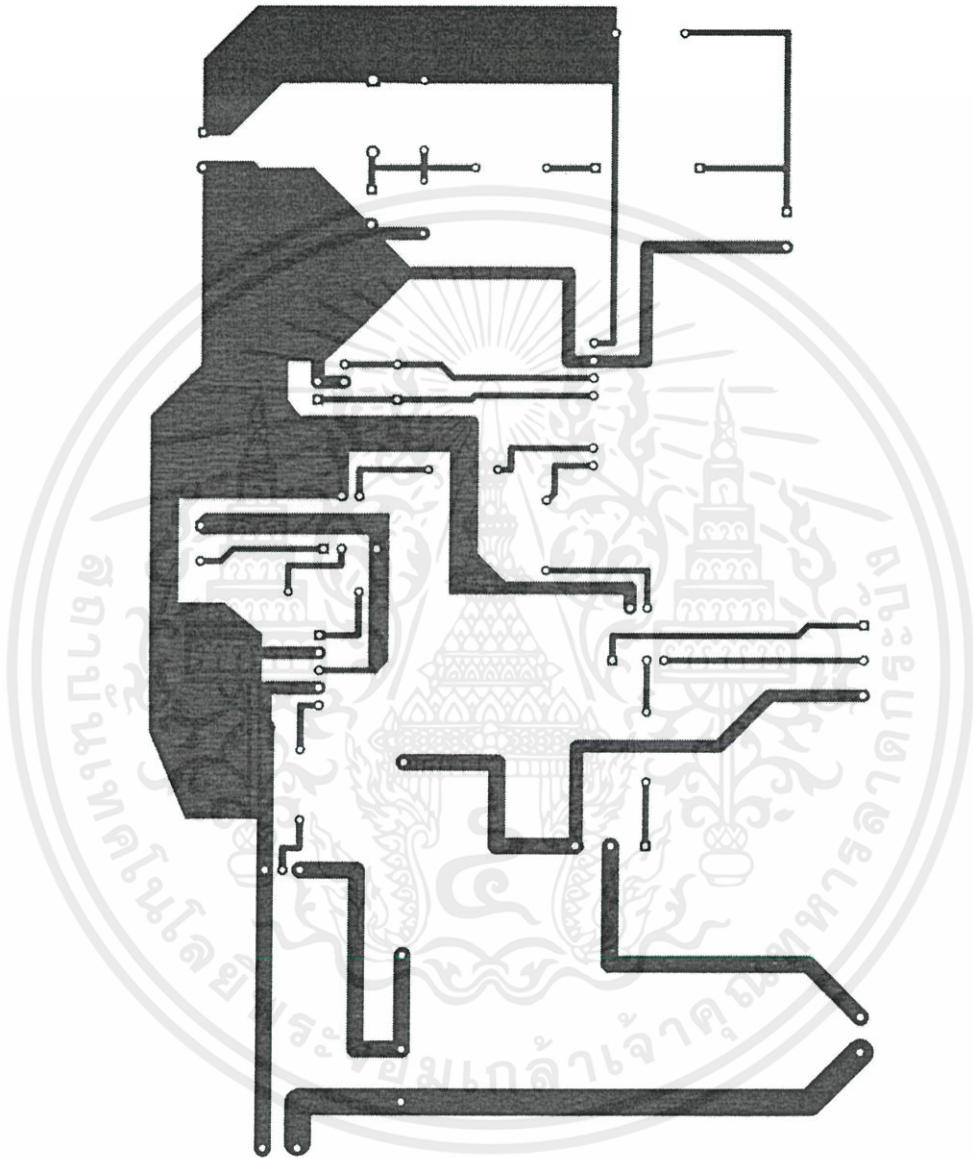
รูปที่ 3.12 รูปลายวงจรไฟเลี้ยงที่ทำการออกแบบ
(รูปหน้า/หลังของจริง)



เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 3.13 รูปวงจไฟเลี้ยงที่สร้างขึ้นสำหรับเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ารูปขั้ว โยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

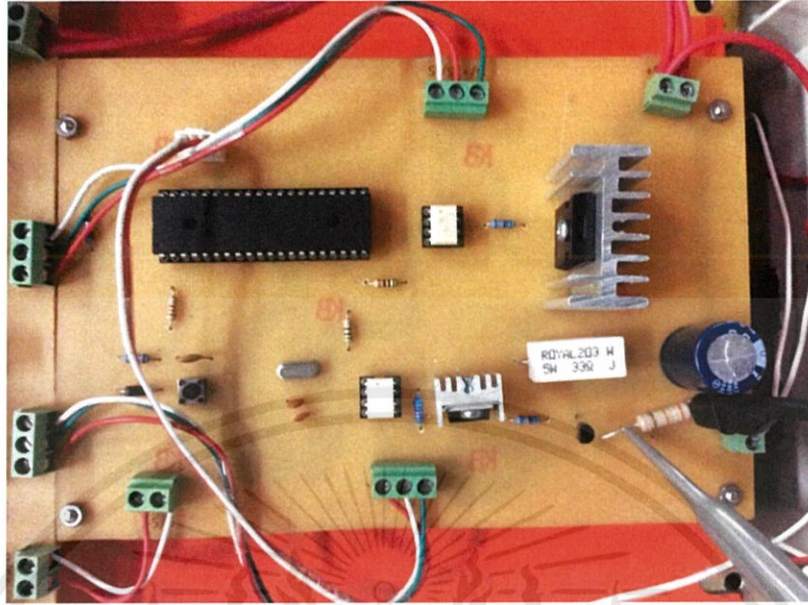
3.3.2 วงจรควบคุม

วงจรควบคุมนั้นมีหน้าที่ควบคุมการทำงานทั้งหมดของเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น ซึ่งผู้จัดทำโครงการได้ออกแบบลายทองแดงวงจรควบคุมได้ดังรูปที่ 3.14 และเมื่อทำการสร้างจริงจะได้ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.14 รูปลายวงจรควบคุมเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ารูปขั้น

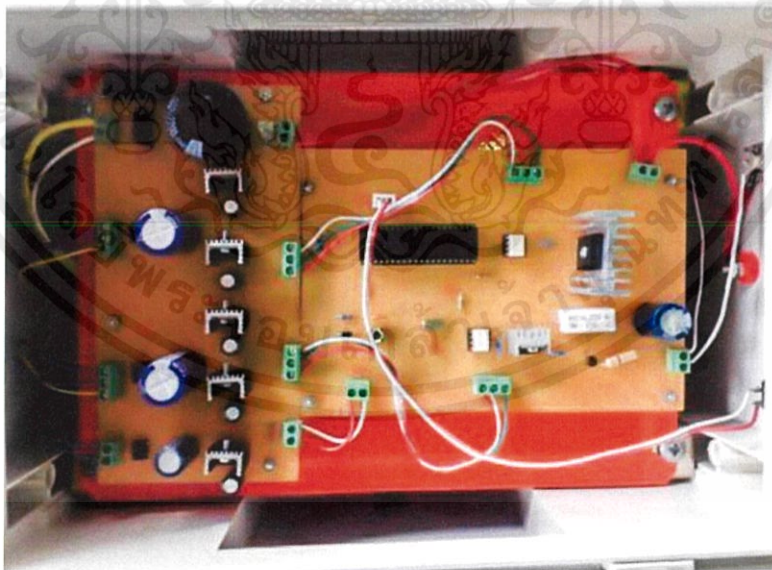
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 รูปวงจรควบคุมเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ารูปขั้น

3.3.3 การประกอบ

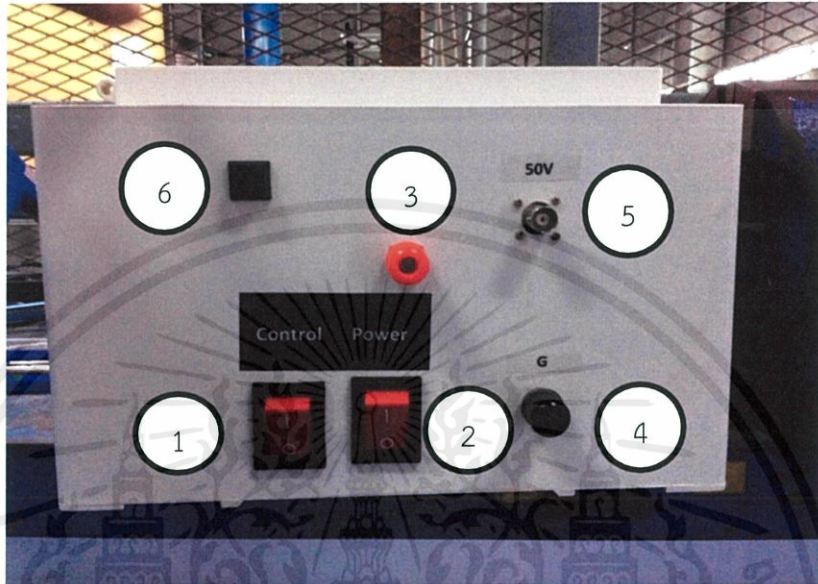
เมื่อทำการสร้างวงจรไฟเลี้ยงและวงจรควบคุมแล้ว จึงนำมาต่อกันด้วยสายตัวนำและติดตั้งบนแผ่นโลหะดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 รูปวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ารูปขั้นที่นำมาประกอบกันเป็นวงจรเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการประกอบวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันรูปชั้นล่งกล่งนั้น ได้แบ่งล่งของวงจรรอกเป็น 2 ชั้น โดยชั้นที่หนึ่งเป็นชั้นสำหรับวงหม้อแปลงทั้ง 4 ลูก ส่วนชั้นที่สองเป็นชั้นสำหรับวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันรูปชั้นและวงจรไฟเลี้ยงของวงจร โดยด้านหน้าล่งมีสวิตช์ควบคุมการทำงานของวงจร ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 อุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ารูปชั้น

โดยที่

1. สวิตช์ควบคุมวงจรคอนโทรล
2. สวิตช์ควบคุมวงจรกำลัง
3. จุดวัดระดับแรงดัน
4. กราวด์
5. เอาต์พุตของเครื่องกำเนิดแรงดันรูปชั้น
6. สวิตช์กำเนิดแรงดันรูปชั้น

เมื่อทำการประกอบเครื่องกำเนิดแรงดันรูปชั้นเสร็จสิ้น จะนำเครื่องกำเนิดแรงดันรูปชั้นไปทดสอบกับโวลเตจดีไวเดอร์ต่อไป เพื่อหาผลตอบสนองของโวลเตจดีไวเดอร์จากเครื่องกำเนิดแรงดันรูปชั้นที่สร้างขึ้นต่อไปในบทที่ 4

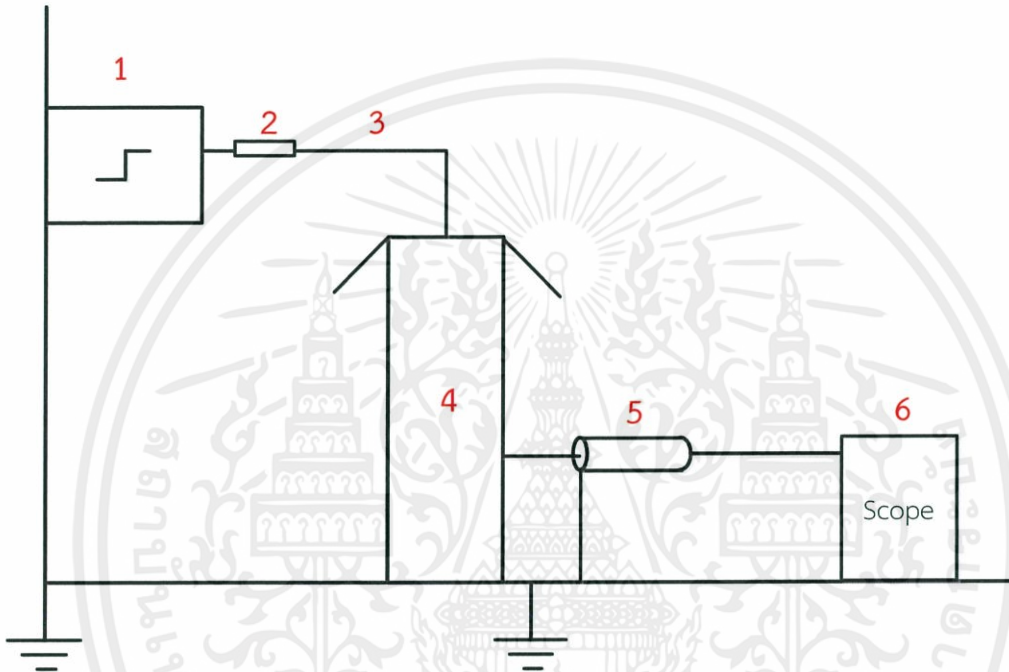
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดสอบและการประเมินผล

4.1 วงจรการทดสอบเพื่อหาผลตอบสนองของแรงดันรูปขึ้น [7]

ในการทดสอบเพื่อหาผลตอบสนองรูปขึ้นเพื่อให้ผลตอบสนองรูปขึ้นที่ได้มีความน่าเชื่อถือ จึงอ้างอิงการต่อวงจรตามมาตรฐาน IEC 60060-2 มีการต่อวงจรตามรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 วงจรในการทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์แบบต่างๆ

โดยที่

หมายเลข 1 คือ เครื่องกำเนิดแรงดันรูปขึ้น

หมายเลข 2 คือ ตัวต้านทานหน่วง ทำหน้าที่หน่วงการแกว่งในสถานะทรานเซียนที่เกิดจากความเหนี่ยวนำของสายตัวนำกับค่าเก็บประจุของโวลเตจดีไวเดอร์

หมายเลข 3 คือ สายตัวนำระหว่างเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขึ้นกับโวลเตจดีไวเดอร์ ความยาวของสายตัวนำจะต้องมีความยาวอย่างน้อยเท่ากับโวลเตจดีไวเดอร์ และต่อในลักษณะขนานกับพื้น

หมายเลข 4 คือ โวลเตจดีไวเดอร์

หมายเลข 5 คือ สายเคเบิล ทำหน้าที่ส่งสัญญาณจากภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์มายังด้านอุปกรณ์วัด

หมายเลข 6 คือ ออสซิลโลสโคป ทำหน้าที่วัดและแสดงผลของรูปคลื่นสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคคลที่ระบุไว้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันรูปซันที่สร้างขึ้นเพื่อวิเคราะห์ผลได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ลักษณะคือ

1. ทำการทดสอบผลแรงดันรูปซันจากเครื่องกำเนิดแรงดันรูปซันโดยตรง โดยวัดผลของแรงดันไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดแรงดันรูปซันที่สร้างขึ้นผ่านออสซิลโลสโคป เทียบกับผลแรงดันไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดแรงดันรูปซันที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง
2. ทำการทดสอบกับโวลเตจดีไวเดอร์เพื่อหาผลตอบสนองแรงดันรูปซันของโวลเตจดีไวเดอร์จากเครื่องกำเนิดแรงดันรูปซันที่สร้างขึ้น โดยทำการเปรียบเทียบกับผลตอบสนองแรงดันรูปซันของโวลเตจดีไวเดอร์จากเครื่องกำเนิดแรงดันรูปซันที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ที่ระดับแรงดัน 50 โวลต์

4.2 รูปคลื่นของเครื่องกำเนิดแรงดันรูปซัน

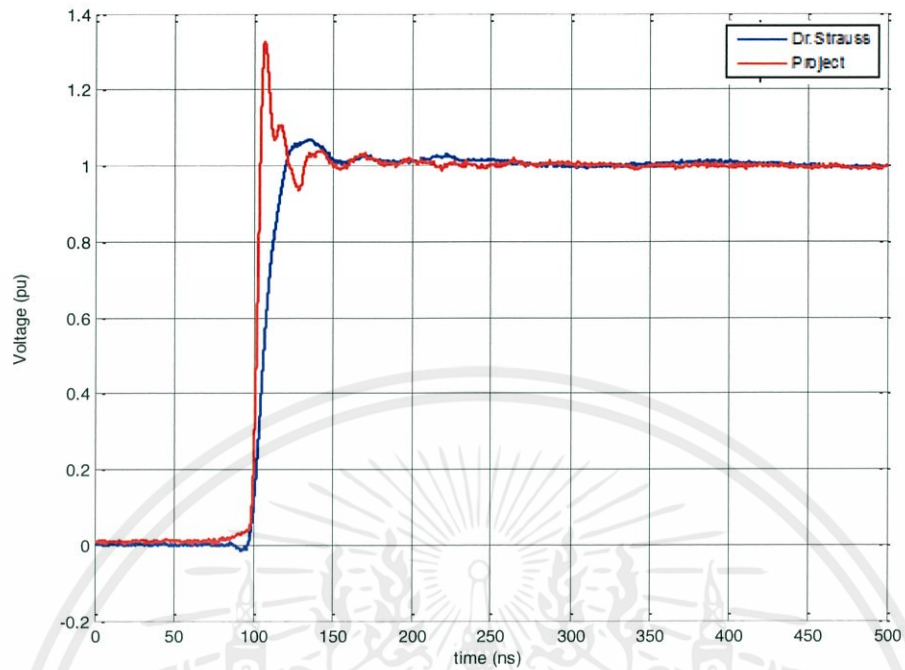
ในการทดสอบเพื่อหาผลตอบสนองแรงดันรูปซันของโวลเตจดีไวเดอร์ ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบสนองของโวลเตจดีไวเดอร์ส่วนหนึ่งมาจากเครื่องกำเนิดแรงดันรูปซัน คือ รูปคลื่นแรงดันในสถานะไม่มีภาระทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแรงดันรูปซัน โดยจะมีผลต่อผลตอบสนองของโวลเตจดีไวเดอร์ ได้แก่ ช่วงเวลาขาขึ้น (Rise time) แรงดันพุ่งเกิน (Overshoot voltage) และการเข้าสู่สถานะคงตัว (Steady state)

การทดสอบทำได้โดยวัดรูปคลื่นของเครื่องกำเนิดแรงดันรูปซันที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับรูปคลื่นของเครื่องกำเนิดแรงดันรูปซันที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งมีการวัดผลผ่านออสซิลโลสโคปโดยตรงและการทดสอบทำที่ระดับแรงดัน 50 โวลต์ มีการต่อวงจรจริงดังรูปที่ 4.2 และผลของแรงดันไฟฟ้าที่ได้ดังรูปที่ 4.3 ถึง 4.5 ตามลำดับ

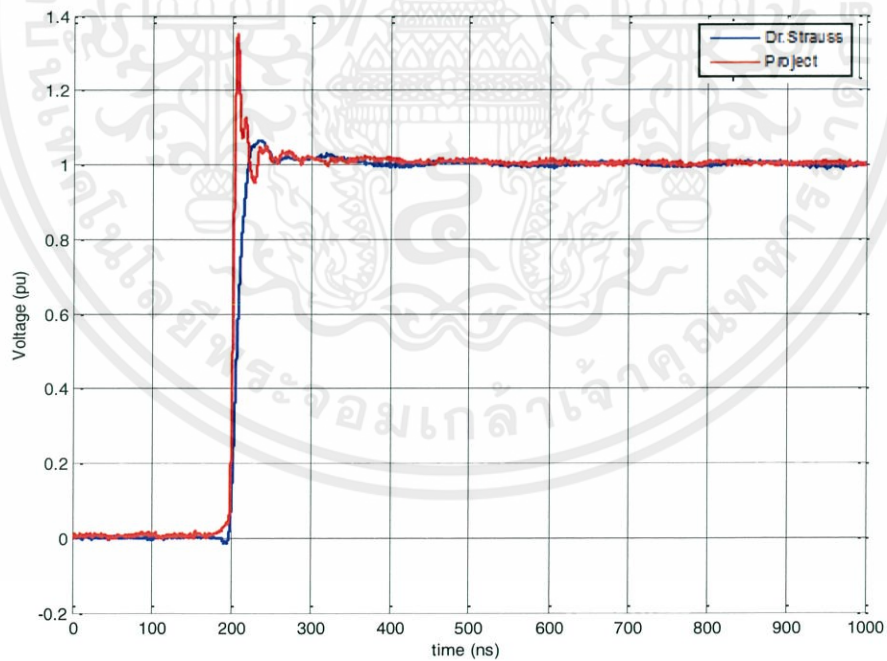


รูปที่ 4.2 ลักษณะการต่อวงจรเพื่อวัดแรงดันในสถานะไม่มีภาระไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

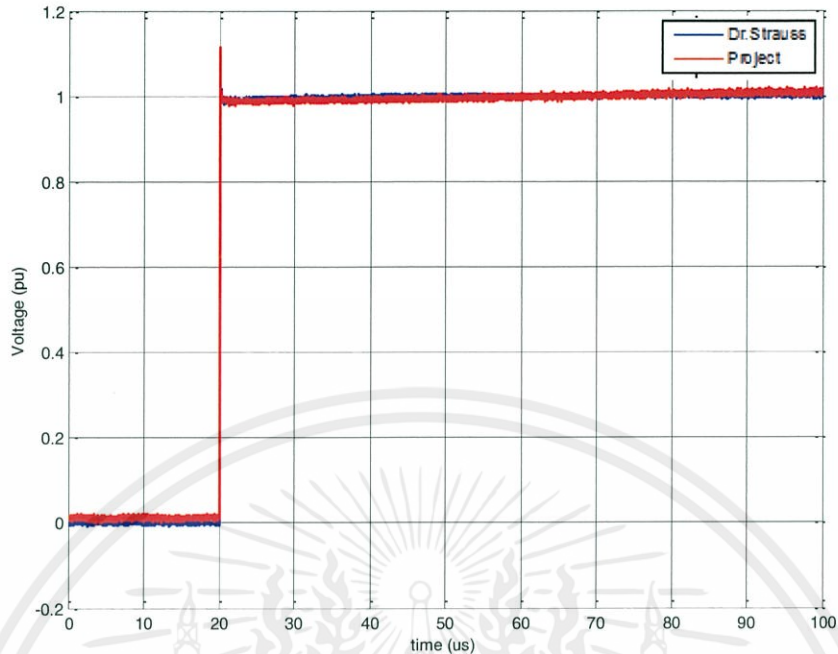


รูปที่ 4.3 รูปคลื่นของเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น ที่เวลา 50 ns/div



รูปที่ 4.4 รูปคลื่นของเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น ที่เวลา 100 ns/div

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโครงการวิจัยที่สนับสนุนโดยศูนย์วิจัยและพัฒนาระบบงานด้านการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 รูปคลื่นของเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น ที่เวลา 10 us/div

4.3 การทดสอบเพื่อหาผลตอบสนองแรงดันรูปขั้นของโวลเตจดีไวเดอร์

ในการทดสอบเพื่อหาผลตอบสนองแรงดันรูปขั้นของโวลเตจดีไวเดอร์ ได้มีการทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์ทั้งหมด 3 ชนิดที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ได้แก่

1. โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทาน (R divider)
2. โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC divider)
3. โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC Universal)

โดยที่ได้ทำการทดสอบที่ระดับแรงดัน 50 โวลต์เพื่อเปรียบเทียบผลตอบสนองของโวลเตจดีไวเดอร์จากเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้นที่สร้างขึ้นกับผลตอบสนองของโวลเตจดีไวเดอร์จากเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้นที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง โดยมีการต่อวงจรจริงและผลตอบสนองแรงดันรูปขั้นของโวลเตจดีไวเดอร์ ดังต่อไปนี้

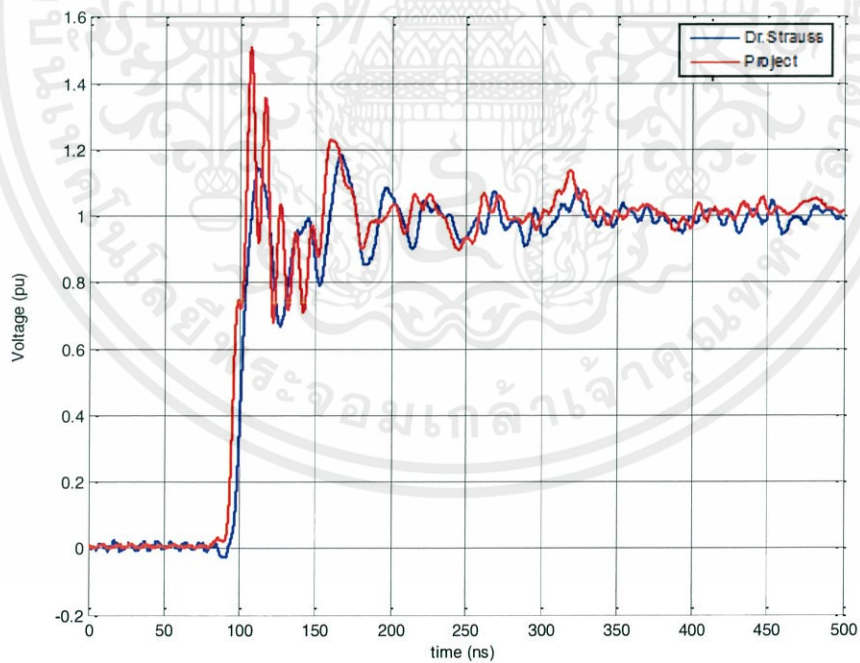
4.3.1 ผลตอบสนองแรงดันรูปขั้นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทาน (R divider)

คุณลักษณะของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทาน (R divider) ที่ใช้ทดสอบมีพิกัดแรงดัน 300 กิโลโวลต์ อัตราส่วนลดทอนแรงดัน 715 ต่อ 1 มีความต้านทาน 7 k Ω มีการต่อวงจรดังรูปที่ 4.6 และผลตอบสนองแรงดันรูปขั้นดังรูปที่ 4.7 ถึง 4.9 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

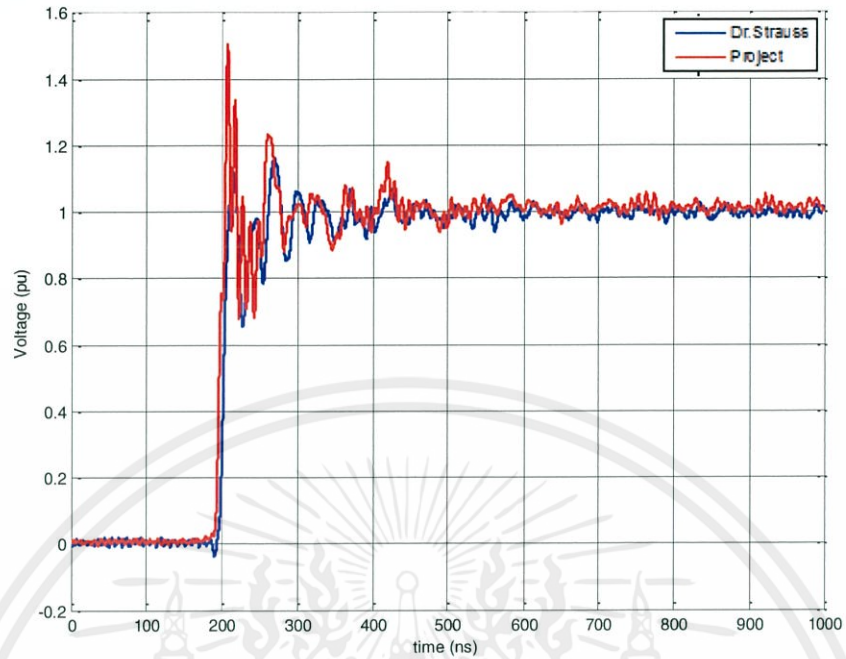


รูปที่ 4.6 การต่อวงจรทดสอบของ โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทาน (R divider)

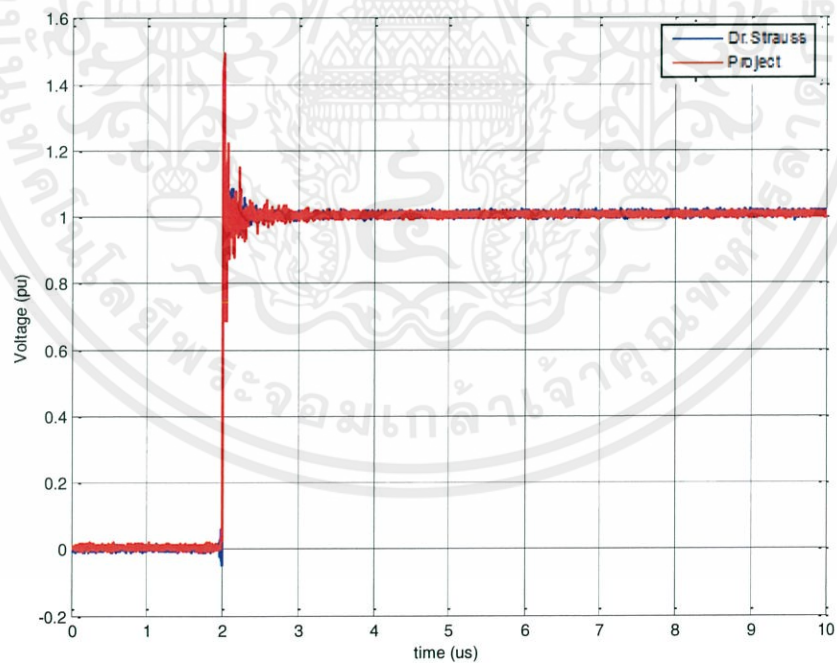


รูปที่ 4.7 ผลตอบสนองแรงดันรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทาน (R divider)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่เวลา 50 ns/div ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ผลตอบสนองแรงดันรูปขั้นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทาน (R divider) ที่เวลา 100 ns/div



รูปที่ 4.9 ผลตอบสนองแรงดันรูปขั้นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

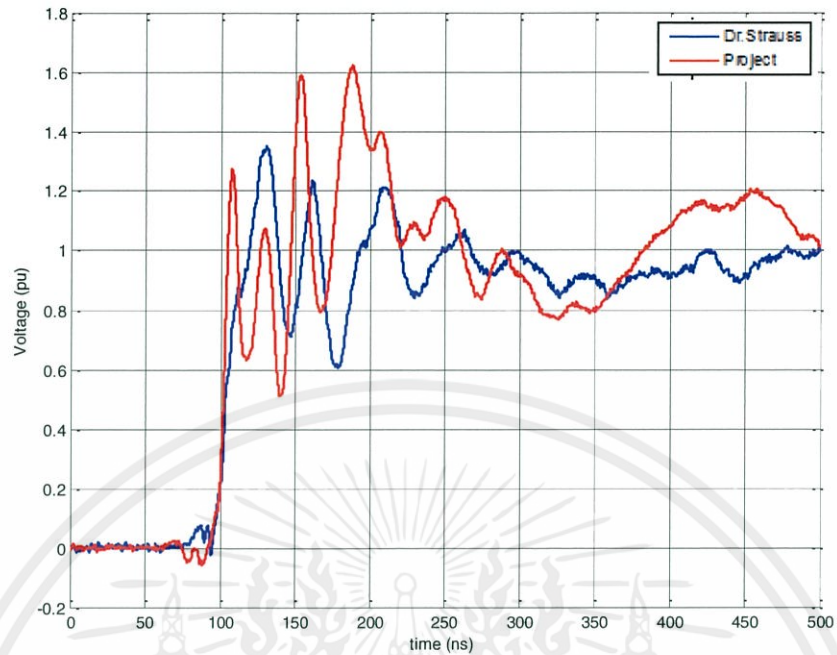
4.3.2 ผลตอบสนองแรงดันรูปคลื่นของโวลต์จีโอไดโวลต์เรเตอร์แบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC divider)

คุณลักษณะของโวลต์จีโอไดโวลต์เรเตอร์แบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC divider) ที่ใช้ทดสอบมี พิกัดแรงดัน 100 กิโลโวลต์ อัตราส่วนลดทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 980 ต่อ 1 อัตราส่วนลดทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 985 ต่อ 1 อัตราส่วนลดทอนแรงดันอิมพัลส์ 993 ต่อ 1 มีความต้านทาน 250 เมกกะโอห์ม ความจุไฟฟ้า 110 pF ทางด้านภาคแรงสูงและมีความต้านทาน 250 โอห์ม ความจุไฟฟ้า 110 pF ทางด้านภาคแรงต่ำ มีลักษณะการต่อวงจรดังรูปที่ 4.10 และผลตอบสนองแรงดันรูปคลื่นดังรูปที่ 4.11 ถึง 4.13 ตามลำดับ

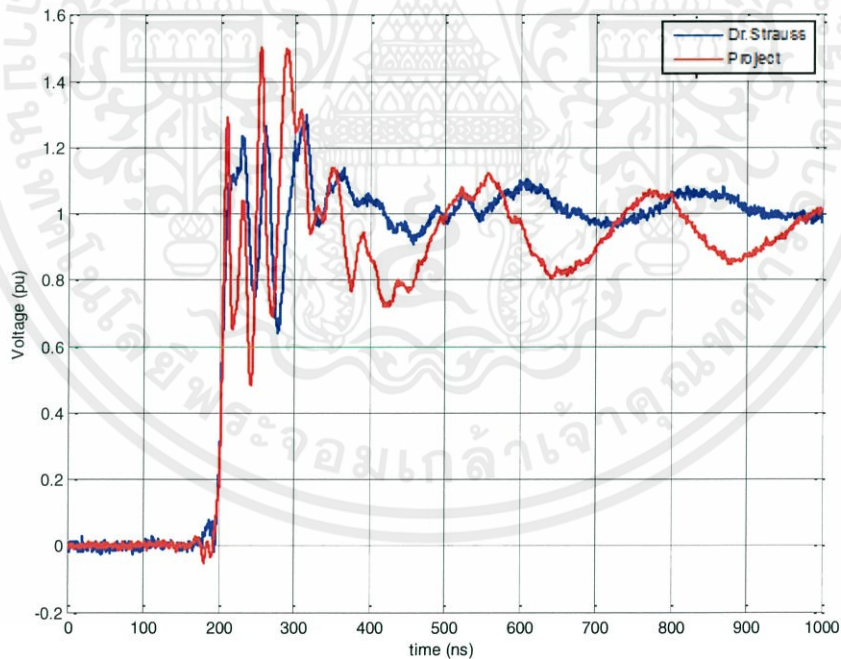


รูปที่ 4.10 ลักษณะการต่อวงจรของโวลต์จีโอไดโวลต์เรเตอร์แบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC divider)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

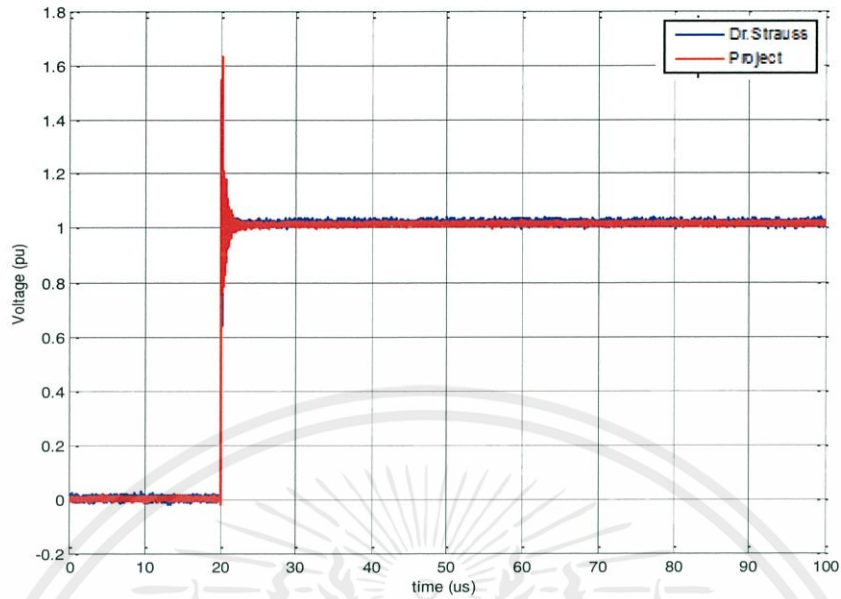


รูปที่ 4.11 ผลตอบสนองแรงดันรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC divider) ที่เวลา 50 ns/div



รูปที่ 4.12 ผลตอบสนองแรงดันรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC divider) ที่เวลา 100 ns/div

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



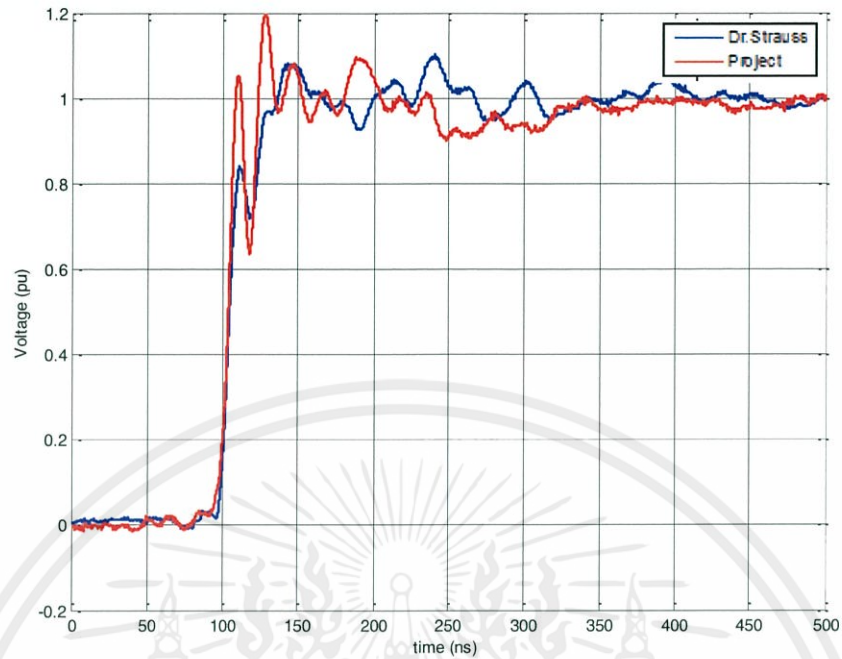
รูปที่ 4.13 ผลตอบสนองแรงดันรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC divider) ที่เวลา 10 us/div

4.3.3 ผลตอบสนองแรงดันรูปคลื่นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC Universal)

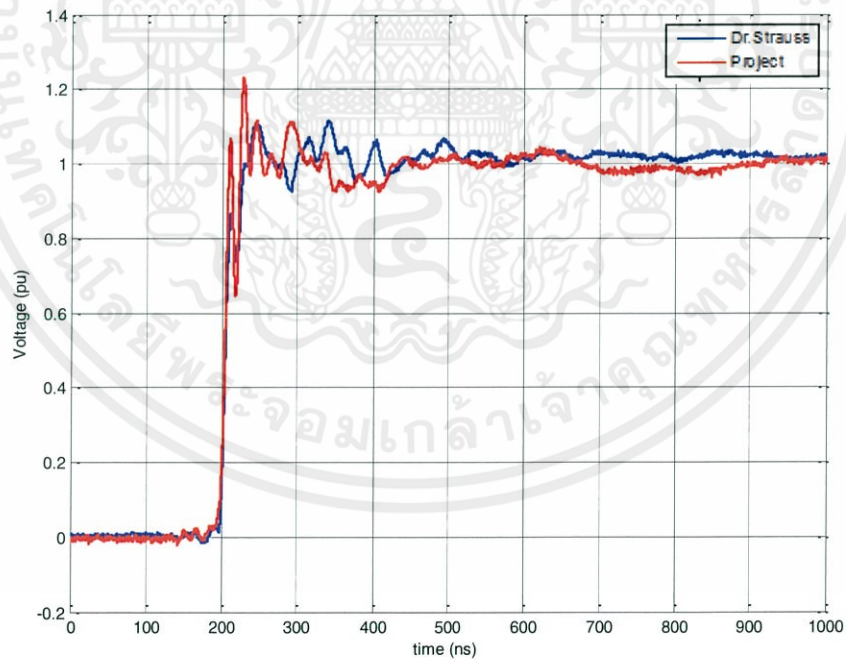
คุณลักษณะของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC Universal) ที่ใช้ทดสอบ มีพิกัดแรงดัน 50 กิโลโวลต์ อัตราส่วนลดทอนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและกระแสตรง 1000 ต่อ 1 มีความต้านทาน 350 M Ω ความจุไฟฟ้า 104.7 pF ทางด้านภาคแรงสูงและมีความต้านทาน 350 โอห์ม ความจุไฟฟ้า 104.7 nF ทางด้านภาคแรงต่ำ มีลักษณะการต่อวงจรดังรูปที่ 4.14 และผลตอบสนองแรงดันรูปคลื่นดังรูปที่ 4.15 ถึง 4.17 ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รูปที่ 4.14 ลักษณะการต่อวงจรของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC Universal)
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

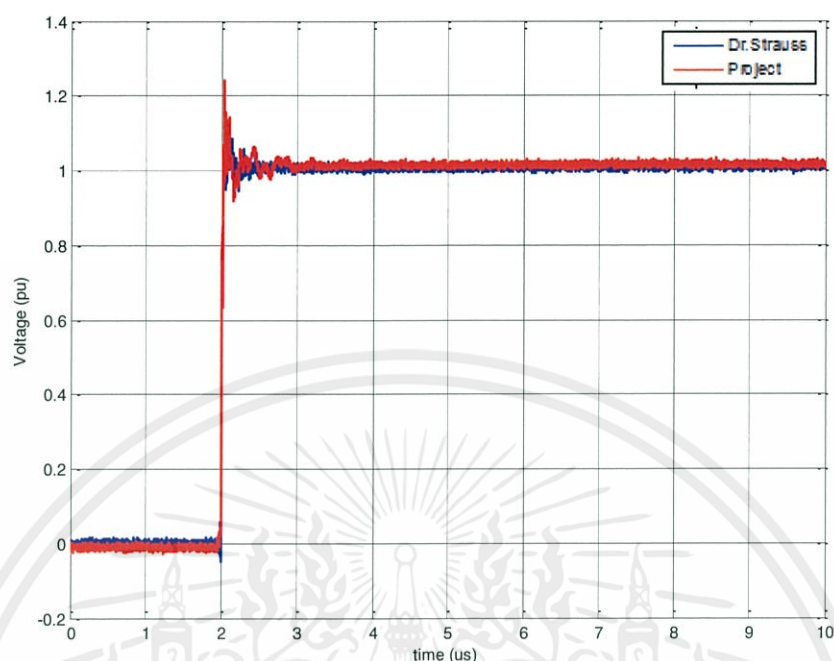


รูปที่ 4.15 ผลตอบสนองแรงดันรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC Universal) ที่เวลา 50 ns/div



รูปที่ 4.16 ผลตอบสนองแรงดันรูปขึ้นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภา (RC Universal) ที่เวลา 100 ns/div ญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ผลตอบสนองแรงดันรูปขั้นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC Universal) ที่เวลา 1us/div

4.4 ตารางเปรียบเทียบผลการทดสอบ

จากการทดสอบผลตอบสนองของโวลเตจดีไวเดอร์ทั้ง 3 แบบ โดยในการทดสอบมีความแตกต่างกันของผลการทดสอบผลตอบสนองของโวลเตจดีไวเดอร์ ได้แก่ ช่วงเวลาขาขึ้น (Rise time) และแรงดันพุ่งเกิน (Overshoot voltage) โดยได้สรุปผลการทดสอบที่ช่วงเวลาต่างๆ ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบผลการทดสอบของเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น

ประเภทการทดสอบ	เวลาขาขึ้น (ns)		ส่วนพุ่งเกิน (p.u.)	
	Dr.Strauss	Project	Dr.Strauss	Project
ไม่มีภาระทางไฟฟ้า	20	5	1.08	1.32
R Divider	20	15	1.14	1.5
RC Divider	25	10	1.37	1.62
RC Universal	10	10	1.1	1.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

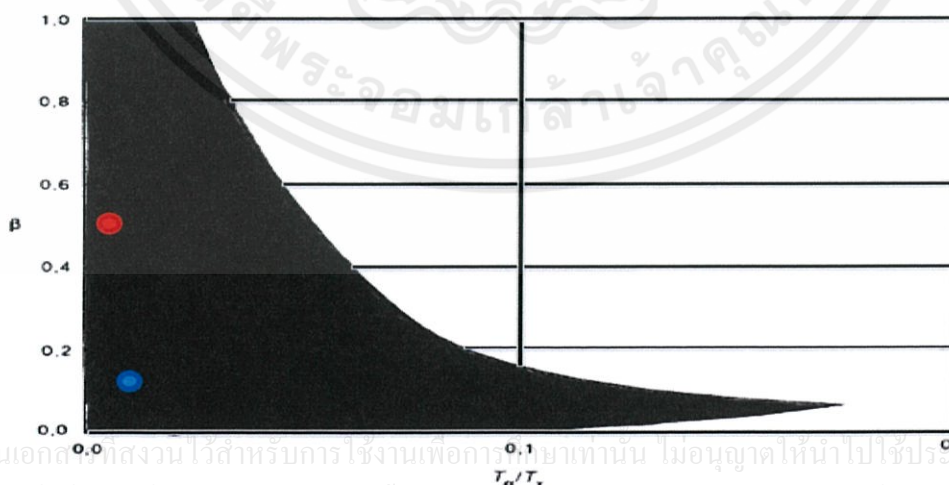
จากการทดสอบผลตอบแทนแรงดันรูปคลื่นของโวลต์เตจติไวเดอร์ทั้งสามแบบรวมไปถึงรูปคลื่นของเครื่องกำเนิดแรงดันรูปคลื่นขณะที่ไม่มีภาระทางไฟฟ้า สังเกตได้ว่าในทุกกรณีเครื่องกำเนิดแรงดันรูปคลื่นที่สร้างขึ้นมีเวลาขาขึ้น (Rise Time) ที่น้อยกว่าเครื่องที่มีอยู่เดิม แต่มีส่วนพุ่งเกิน (Overshoot voltage) ที่สูงกว่า ลักษณะของรูปคลื่นที่ได้มีความใกล้เคียงกันแต่เครื่องกำเนิดแรงดันรูปคลื่นที่สร้างขึ้นจะมีผลของแรงดันไฟฟ้ากระแสที่พุ่งเกินที่มากกว่าเครื่องกำเนิดแรงดันรูปคลื่นที่มีในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง

เพื่อเป็นการยืนยันผลทดสอบข้างต้นจึงทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ T_0 , T_α , T , T_s และ β ตามมาตรฐานการทดสอบโวลต์เตจติไวเดอร์ IEC 60060-2 กรณีเกิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า ได้ผลตามตารางที่ 4.2

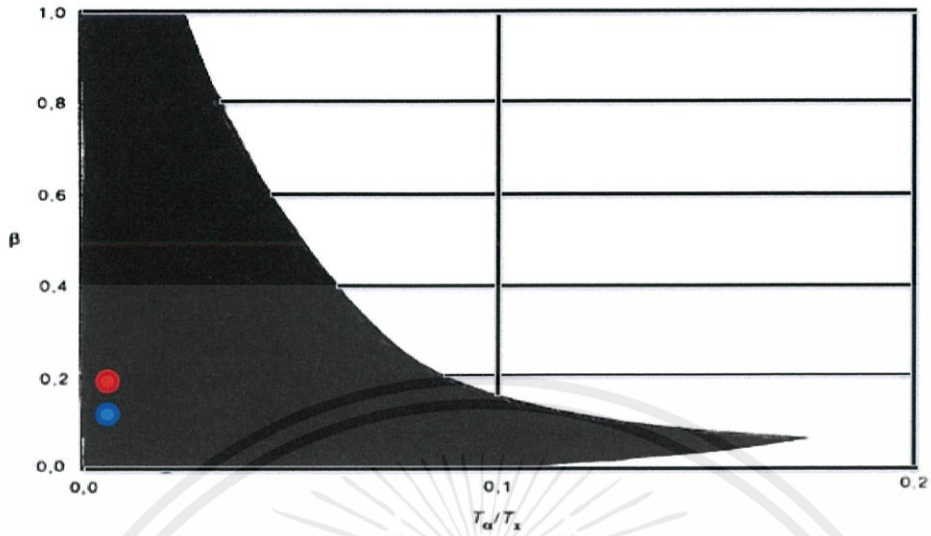
ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆตามมาตรฐาน IEC 60060-2

ประเภทการทดสอบ	เครื่องที่ใช้ทดสอบ	T_0 (s)	T_α (ns)	T (ns)	T_s (ns)	β (%)
R	Dr. Strauss	213.89 p	12.61	12.50	153.92	17.75
	Project	4.44 n	10.11	9.96	156.28	46.53
RC Divider	Dr. Strauss	1.57 n	19.06	19.01	269.96	36.24
	Project	565.14 p	18.14	11.53	309.60	52.46
RC Universal	Dr. Strauss	446.31 p	9.06	3.09	144.60	11.64
	Project	1.77 n	11.06	11.04	192.12	19.87

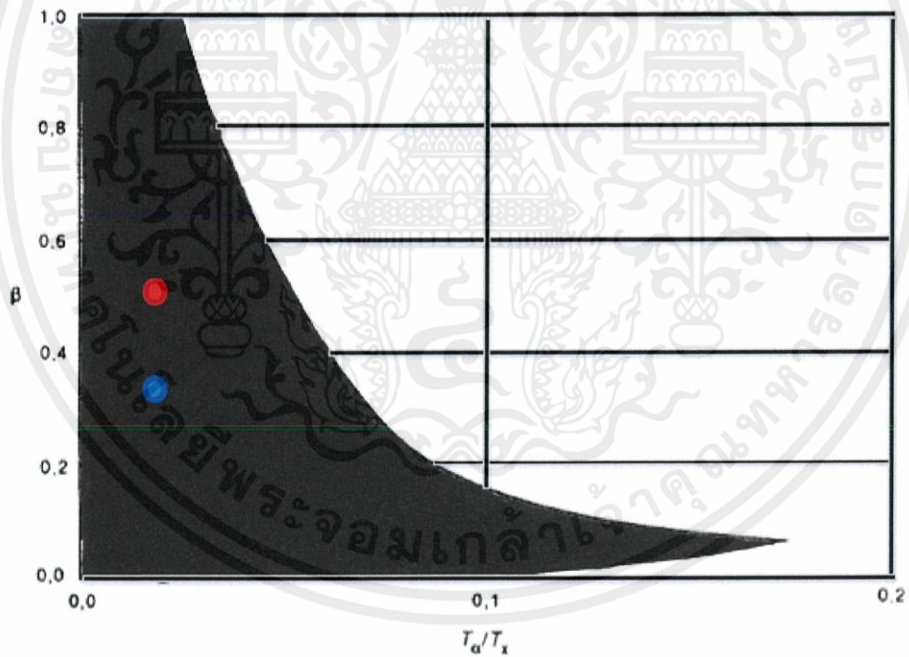
นำค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้มาพล็อตลงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง β และ $\frac{T_\alpha}{T_x}$ โดยค่า T_x นั้นแทนด้วย $1.2 \mu s$ เนื่องจากเป็นการจำลองการเกิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าเพื่อเทียบกับมาตรฐาน IEC 60060-2 ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.18, 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.18 กราฟมาตรฐาน IEC 60060-2 กรณีทดสอบกับดีไวเดอร์ความต้านทาน (R Divider)



รูปที่ 4.19 กราฟมาตรฐาน IEC 60060-2 กรณีทดสอบกับดีไวเดอร์ความต้านทาน และตัวเก็บประจุ (RC Divider)



รูปที่ 4.20 กราฟมาตรฐาน IEC 60060-2 กรณีทดสอบกับดีไวเดอร์ความต้านทาน และตัวเก็บประจุ (RC Universal)

โดยที่ — แสดงถึงของผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับแสดงถึงของ Dr.Strauss ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

การทดสอบเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้นที่สร้างขึ้น มีการทดสอบรูปคลื่นของเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้นและทดสอบกับโวลต์จดีไวเดอร์ 3 ชนิดได้แก่ โวลต์จดีไวเดอร์ชนิดความต้านทาน (R Divider), โวลต์จดีไวเดอร์ชนิดความต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC Divider) และโวลต์จดีไวเดอร์ ชนิดความต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC Universal)

1. ผลการทดสอบรูปคลื่นของเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น

ในกรณีไม่มีภาระทางไฟฟ้าพบว่าเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้นของคณะผู้ทดลองนั้นมีเวลาขาขึ้น 5 นาโนวินาทีหรือคิดเป็น 25 เปอร์เซ็นต์ของเครื่องที่มีอยู่เดิมในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง เป็นผลมาจากเมื่อไม่มีภาระทางไฟฟ้า ทำให้การทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ เช่น วงจรขับหรืออุปกรณ์เปิด-ปิดวงจรสามารถทำงานได้ดีตามที่ระบุไว้ในรายละเอียดข้อมูลของอุปกรณ์ ในส่วนของส่วนพุงเกินนั้นพบว่าเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้นของคณะผู้ทดลองนั้นมีค่า 1.32 ต่อหนึ่งหน่วยหรือมากกว่า 22.22 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับเครื่องที่มีอยู่เดิมในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ทั้งนี้เป็นผลข้างเคียงมาจากการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ในตัวเครื่องของคณะผู้ทดลอง เพื่อให้เวลาขาขึ้นนั้นอยู่ในช่วงไม่เกิน 10 นาโนวินาทีตามขอบเขตของการทดลอง

2. ผลการทดสอบรูปคลื่นของเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้นกับโวลต์จดีไวเดอร์

ในกรณีที่มีภาระทางไฟฟ้าในที่นี้ คือ โวลต์จดีไวเดอร์แบบต่างๆ โดยผ่านการต่อตัวต้านทานหน่วง (R Damp) พบว่าเวลาขาขึ้นของเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้นของคณะผู้ทดลองนั้นมีค่าอยู่ในช่วง 10 นาโนวินาที ถึง 15 นาโนวินาทีเป็นผลมาจากค่าตัวแปรภายนอกเครื่องที่มาจากโวลต์จดีไวเดอร์และการปรับตั้งค่าตัวต้านทานหน่วง (R Damp) เพื่อให้การนำกราฟมาเปรียบเทียบกันนั้นทำได้โดยง่าย ในส่วนของส่วนพุงเกินนั้นพบว่ามีค่ามากกว่า 17.75 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับเครื่องที่มีอยู่เดิมในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง

เมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ β และ $\frac{T_{\alpha}}{T_x}$ พบว่าค่า $\frac{T_{\alpha}}{T_x}$ ระหว่างเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ารูปขั้นที่สร้างขึ้นกับเครื่องที่มีอยู่เดิมในห้องปฏิบัติการมีค่าใกล้เคียงกันมาก ส่วนค่า β นั้นแตกต่างกันอยู่ในช่วง 8.23 เปอร์เซ็นต์ถึง 28.78 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำมาพล็อตลงกราฟตามมาตรฐานของ IEC 60060-2 แล้วพบว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 อุปสรรค ข้อเสนอแนะ และแนวทางการแก้ไข

ในการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้วนั้น ในระหว่างการออกแบบและสร้างได้พบปัญหาต่างๆ โดยได้รวบรวมเป็นข้อเสนอแนะให้แก่ผู้ที่สนใจ ดังต่อไปนี้

1. ในระบบกราวด์ ควรแยกกราวด์ของวงจรควบคุมกับกราวด์ของวงจรกิจักำลังออกจากกันเพื่อให้วงจร เพื่อให้วงจรทำงานไม่เกิดข้อผิดพลาดและป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้น

2. ในการเลือกอุปกรณ์ที่ใช้ในย่านความถี่สูง ควรเลือกอุปกรณ์ที่ทำงานในย่านความถี่ใกล้เคียงกัน เพราะเนื่องจากวงจรอาจไม่สามารถทำงานในย่านความถี่ที่เราต้องการได้

3. ในการออกแบบวงจร ควรเลือกค่าตัวเก็บประจุให้เหมาะสม เพราะเนื่องจาก ถ้าค่าตัวเก็บประจุมีค่ามากเกินไป จะกลายเป็นโหลด แต่ในกรณีที่ค่าตัวเก็บประจุน้อยเกินไป จะทำให้แรงดันกระแสตรงที่ใช้มีรูปคลื่นที่ไม่เรียบตามที่ต้องการได้

4. ในการออกแบบวงจรความถี่สูง ควรคำนึงถึงค่าความเหนี่ยวนำในวงจร เพราะจะเป็นตัวหน่วงที่ทำให้ช่วงเวลาขาขึ้น (Rise time) มีค่ามากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEC 60060-2, High Voltage Test Technique, Part 2, Measuring Systems, Step Response Measurements. 2010.
- [2] IEEE transaction on Electrical Insulation, A step-function HV Generator for Insulation Research, April 1991.
- [3] D.W.Hart, Introduction to Power electronics, Prentice-Hall, 1997
- [4] M.H.Rashid, Power Electronics, Prentice-Hall, 1993
- [5] ชัยทัต มณีอินทร์, ไมโครโปรเซสเซอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์, กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [6] ทีมงานสมาร์ตเลิร์นนิ่ง, Advance PIC Microcontroller in C การประยุกต์ใช้งาน PIC ขั้นสูง ด้วยภาษาซี, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ: ห้างหุ้นส่วนสามัญสมาร์ตเลิร์นนิ่ง, 2550
- [7] สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, เมษายน 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐาน IEC 60060-2

IS/IEC 60060-2 : 2010

Annex C
(informative)

Step response measurements

C.1 General

Step response measurement is a traditional method to characterize an impulse voltage divider, an impulse oscilloscope or a digital recorder. Because there is no direct correlation between unit step response parameters and correct measurement of impulse voltages, it lost its role for the requirements of this standard, but remains important for characterizing the dynamic behaviour in connection with comparison measurements (8.4.2, 9.3.2) and especially for the development of dividers and instruments. Furthermore it is applied for performance checks of the dynamic behaviour (see 8.5.3 and 9.5.3).

For the estimation of errors in time parameter measurement by convolution (Annex D), the precise knowledge of the unit step response is necessary.

C.2 Definitions in addition to Clause 3

C.2.1

reference level (impulse measurements only),

 I_R

mean value of the step response taken over the reference level epoch (see C.2.10 and Figure C.1a), i.e., over the range of $0,5t_{\min}$ to $2t_{\max}$

NOTE A measuring system may have more than one reference level, for example, it may have different scale factors for different waveforms due to the variation of the response level (see 3.5.4 and Figure C.1a).

C.2.2

origin of a step response,

 O_1

Instant when the response curve firstly starts a monotonic rise above the amplitude of the noise at the zero level of the (unit) step response (see Figure C.1a).

NOTE 1 In some cases the unit step response starts with an initial distortion (Figure C.2). Then the origin O_1 should be determined at the crossing of the downward extension from the point of monotonic increase of the unit step response with the zero line. The initial distortion may be characterized by a parameter T_0 (initial distortion time) which corresponds to the partial area(s) between the zero line and the unit step response up to O_1 .

NOTE 2 All the time values (except T_0) are measured from the origin O_1 .

C.2.3

unit step response,

 $g(t)$

step response normalized such that a reference level becomes unity and the zero level remains zero (Figure C.1a).

NOTE A measuring system has a unit step response for each reference level. The origin O_1 of the step response is identical with that of the unit step response.

C.2.4

step response integral,

 $I(t)$

Integral from O_1 to t of one minus the unit step response $g(t)$ (see Figure C.1b):

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของสำนักงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นกรณีเกิดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T(t) = \int_{0_1}^t (1 - g(\tau)) d\tau. \quad (\text{C.1})$$

C.2.5

experimental response time,

T_N
value of the step response integral at $2t_{\max}$:

$$T_N = T(2t_{\max}). \quad (\text{C.2})$$

C.2.6

partial response time,

T_a
maximum value of the step response integral for $t \leq 2t_{\max}$ (see Figure C.1b) equal to the shaded area in Figure C.1a

NOTE Usually $T_a = T(t_1)$ where t_1 is the time when $g(t)$ first reaches the unit amplitude (see Figure C.1a).

C.2.7

residual response time,

$T_R(t)$
experimental response time T_N minus the value of the step response integral at some specific time t , where $t < 2t_{\max}$:

$$T_R(t) = T_N - T(t). \quad (\text{C.3})$$

C.2.8

overshoot of the unit step response,

β_{ov}
difference between the maximum $g_{\max}(t)$ and unity as a percentage of unity (Figure C.1a):

$$\beta_{\text{ov}} = 100 \% (g_{\max}(t) - 1). \quad (\text{C.4})$$

C.2.9

settling time,

t_s
shortest time for which the residual response time $T_R(t)$ becomes and remains less than 2 % of t :

$$|T_N - T(t)| < 0,02t \quad (\text{C.5})$$

for all values of t in the epoch from 0_1 to the longest time-to-half value $T_{2\max}$ of the impulse voltage to be measured (see Figure C.1b)).

C.2.10

reference level epoch (impulse voltage only)

time interval in which the reference level of the step response is determined with its lower limit being equal to 0,5 times of the lower limit of the nominal epoch ($0,5t_{\min}$) and its upper limit being equal to 2 times the upper limit of the nominal epoch ($2t_{\max}$)

C.3 Circuit for step response measurements

The circuit arrangement used for determining the step response should be described in the record of performance and should be as near as possible to the operating conditions.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IS/IEC 60060-2 : 2010

Suitable circuits are shown in Figure C.3. The preferred circuit is shown in Figure C.3a where the step generator is placed at a metallic wall or at a metallic strip conductor at least 1 m wide, which serves as the earth return.

To generate the step the measuring system is supplied by either a slowly rising impulse or a direct voltage which is chopped by a relay or a gap (see Figure C.3d). The following methods of chopping have been found acceptable:

- by a relay with mercury-wetted contacts: this gives steps up to some hundreds of volts,
- by a uniform field gap in air at atmospheric pressure with a spacing up to some millimetres: this gives steps up to several kilovolts,
- by a uniform gap with a spacing up to some millimetres under increased gas pressure: this gives steps up to some tens of kilovolts.

When the step is generated using a repetitive generator, the duration of the step, and of the interval between steps shall be chosen such that no additional errors are introduced with respect to a single pulse.

C.4 Requirements for the step response of a component

The component, normally a converting device or a recording measuring instrument, is subjected to a voltage step and its output is measured. The rise time of the applied step should be less than 1/5 of the partial response time τ_p . Slight smoothing of the recorded data of the step response is recommended to reduce the influence of small oscillations and noise superimposed on the step response.

The unit step response within the selected reference level epoch should not deviate from unity by more than $\pm 2\%$. The unit step response, at the time of the corresponding voltage waveform, t_1 , used for the measurement of the assigned scale factor, should not deviate from the reference level by more than $\pm 1\%$ if t_1 used falls outside the range of the nominal level epoch. When a full lightning impulse voltage is used in determination of the assigned scale factor, t_1 is equal to $2\tau_1$, which is 2 times of the front time of the impulse. When a front chopped lightning impulse voltage is used, t_1 is equal to $2\tau_1$, which is 2 times of the time to chopping of the impulse. When a switching impulse is used, t_1 is equal to τ_1 , which is the time to peak of the impulse. When a direct voltage is used, t_1 is equal to 100 ms. When an alternating voltage is used, t_1 is equal to one quarter of the period of the voltage.

For step response requirements of impulse voltage reference measuring systems, see 10.2.3.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

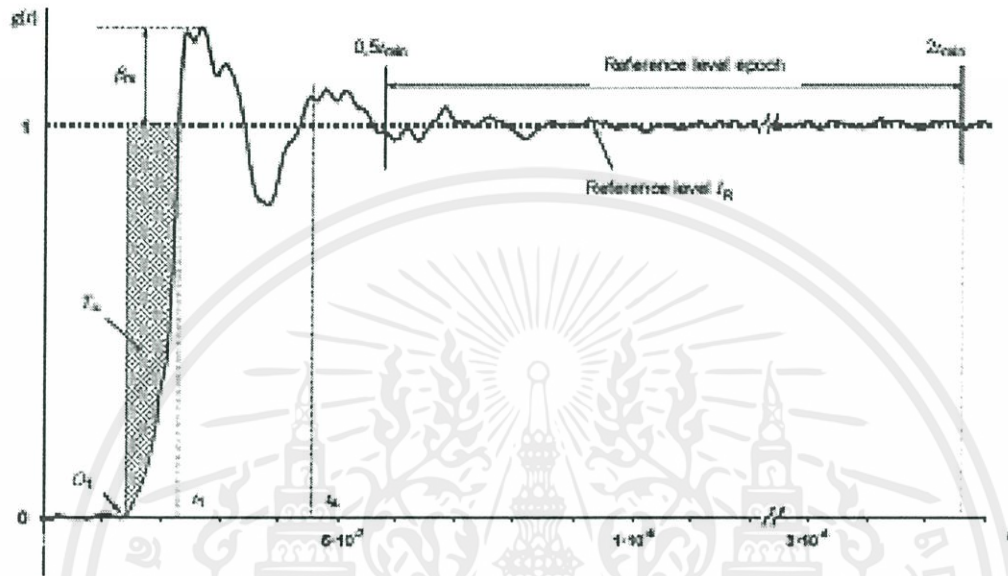


Figure C.1a – Definitions from the unit-step response $g(t)$

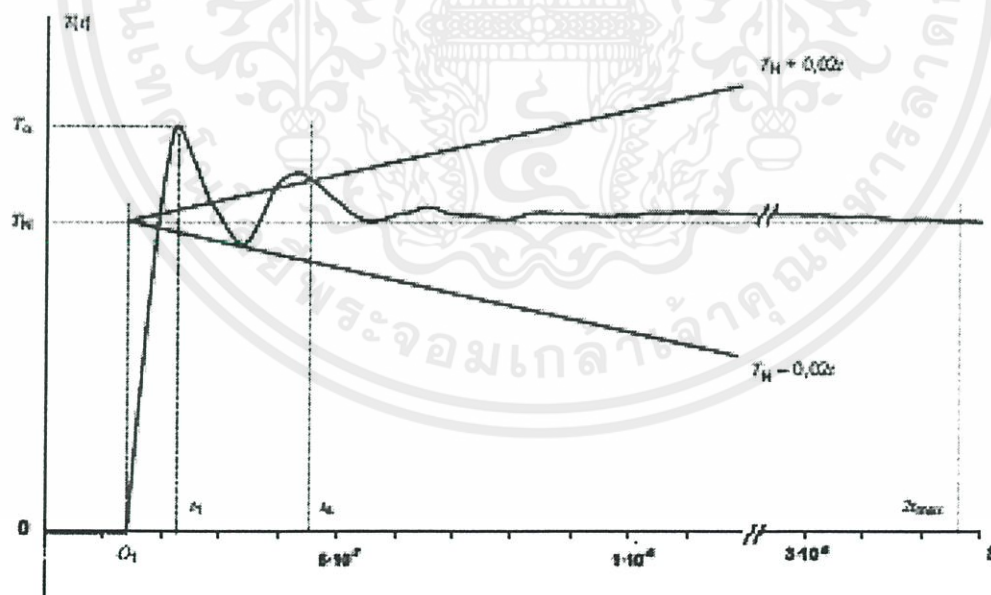


Figure C.1b – Definitions from the step-response integral $T(t)$

Figure C.1 – Definitions of response parameters

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

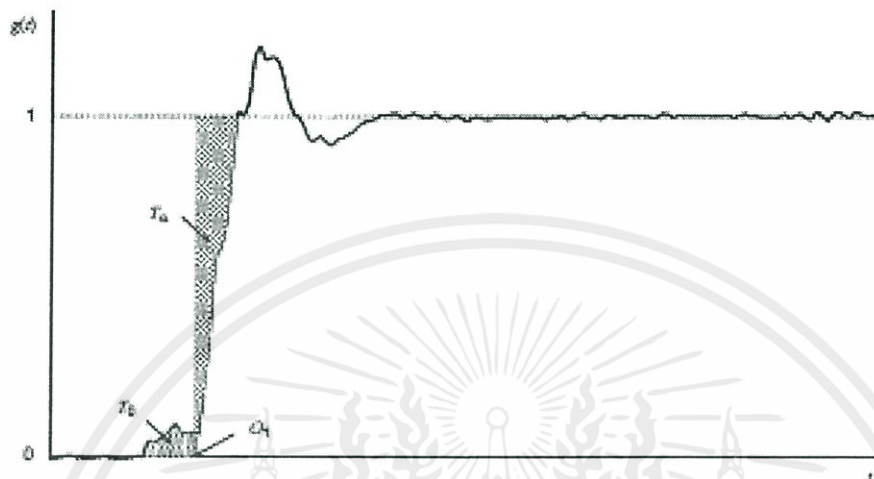


Figure C.2 – A unit-step response $g(t)$ showing an initial distortion of initial distortion time T_0

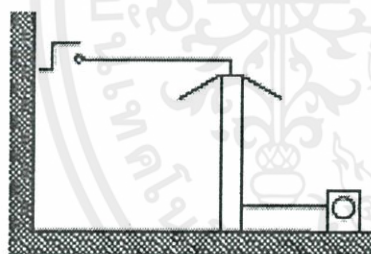


Figure C.3a – Preferred arrangement

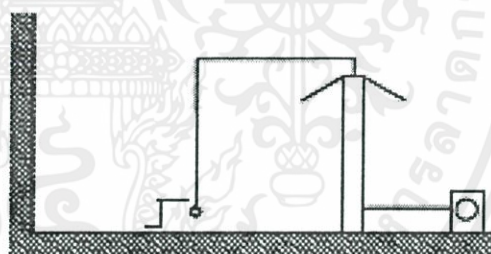


Figure C.3b – Preferred for large dividers

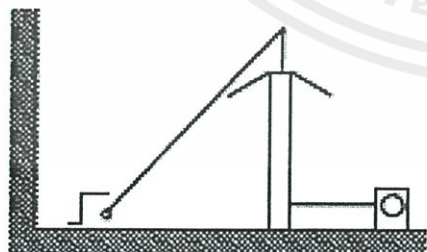


Figure C.3c – Alternative for large dividers

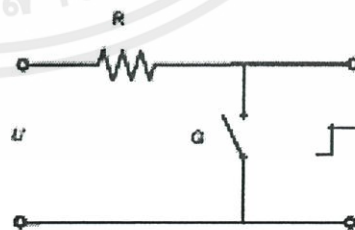


Figure C.3d – A typical step generator circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ
 NOTE G is the chopping device to generate the step. และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure C.3 – Suitable circuits for step response measurement



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TLP 250

TOSHIBA

TLP250

TOSHIBA Photocoupler GaAlAs Ired & Photo-IC

TLP250

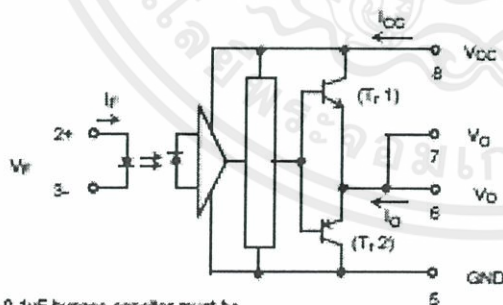
Transistor Inverter
 Inverter For Air Conditionor
 IGBT Gate Drive
 Power MOS FET Gate Drive

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

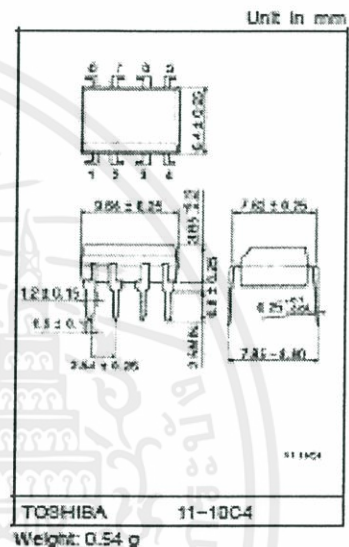
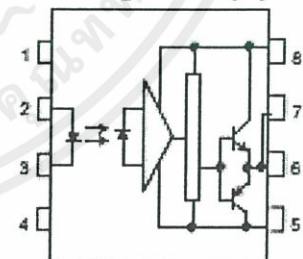
- Input threshold current: $I_T = 8\text{mA}(\text{max.})$
- Supply current (I_{CC}): $11\text{mA}(\text{max.})$
- Supply voltage (V_{CC}): 10-35V
- Output current (I_O): $\pm 1.5\text{A}(\text{max.})$
- Switching time ($t_{p(LH)}/t_{p(HL)}$): $1.5\mu\text{s}(\text{max.})$
- Isolation voltage: $2500V_{\text{rms}}(\text{min.})$
- UL recognized: UL1577, File No.E07349
- Option (D4) type
 VDE approved: DIN VDE0884/06.02, certificate No.76823
 Maximum operating insulation voltage: 650VPK
 Highest permissible over voltage: 4000VPK

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

- Creepage distance: 6.4mm(min.)
- Clearance: 6.4mm(min.)

Schematic

A 0.1 μF bypass capacitor must be connected between pin 8 and 5 (See Note 5).

**Pin Configuration (top view)**

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

Truth Table

Input LED	Tr1	Tr2
On	On	Off
Off	Off	On

เอกสารนี้เป็นเอกสารตัวอย่างไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะมิได้ก็ตาม และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Absolute Maximum Ratings (Ta = 25°C)

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

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

Note 2: Exponential waveform

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

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

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

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

Recommended Operating Conditions

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารตัวอย่าง ไม่ควรนำมาใช้จริงเพื่อการศึกษาด้านนี้ ไม่อนุญาตให้แก้ไขหรือดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TOSHIBA

TLP250

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

Characteristic		Symbol	Test Cir-cuit	Test Condition	Min.	Typ.*	Max.	Unit
Input forward voltage		V _F	—	I _F = 10 mA, Ta = 25°C		1.6	1.8	V
Temperature coefficient of forward voltage		ΔV _F / ΔTa	—	I _F = 10 mA	—	-2.0	—	mV / °C
Input reverse current		I _R	—	V _R = 5V, Ta = 25°C		—	10	μA
Input capacitance		C _T	—	V = 0, f = 1MHz, Ta = 25°C	—	45	250	pF
Output current	"H" level	I _{OPH}	3	V _{CC} = 30V (*) I _F = 10 mA V _{BE-S} = 4V	-0.5	-1.5	—	A
	"L" level	I _{OEL}	2		I _F = 0 V _{BE-S} = 2.5V	0.5	2	
Output voltage	"H" level	V _{OH}	4	V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω, I _F = 5mA	11	12.8	—	V
	"L" level	V _{OL}	5		V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω, V _F = 0.8V	—	-14.2	
Supply current	"H" level	I _{OOH}	—	V _{CC} = 30V, I _F = 10mA Ta = 25°C	—	7	—	mA
	"H" level	I _{OOH}	—	V _{CC} = 30V, I _F = 10mA	—	—	11	
	"L" level	I _{OCL}	—	V _{CC} = 30V, I _F = 0mA Ta = 25°C	—	7.5	—	
	"L" level	I _{OCL}	—	V _{CC} = 30V, I _F = 0mA	—	—	11	
Threshold input current	"Output L→H"	I _{IUH}	—	V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω, V _O > 0V	—	1.2	5	mA
Threshold input voltage	"Output H→L"	V _{IHL}	—	V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω, V _O < 0V	0.8	—	—	V
Supply voltage		V _{CC}	—		10	—	35	V
Capacitance (input-output)		C _S	—	V _S = 0, f = 1MHz Ta = 25°C	—	1.0	2.0	pF
Resistance(input-output)		R _S	—	V _S = 500V, Ta = 25°C R.H. ≤ 60%	1×10 ¹²	10 ¹⁴	—	Ω

* All typical values are at Ta = 25°C (*)1: Duration of I_O time ≤ 50μs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TOSHIBA

TLP250

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

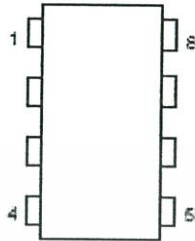
Characteristic	Symbol	Test Cir-cuit	Test Condition	Min	Typ.*	Max	Unit
Propagation delay time	L→H	6	I _f = 8mA (Note 7) V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω	—	0.15	0.5	μs
	H→L			—	0.15	0.5	
Output rise time	t _r			—	—	—	
Output fall time	t _f			—	—	—	
Common mode transient immunity at high level output	C _{MH}	7	V _{CM} = 600V, I _f = 8mA V _{CC} = 30V, Ta = 25°C	-5000	—	—	V / μs
Common mode transient immunity at low level output	C _{ML}	7	V _{CM} = 600V, I _f = 0mA V _{CC} = 30V, Ta = 25°C	5000	—	—	V / μs

* All typical values are at Ta = 25°C

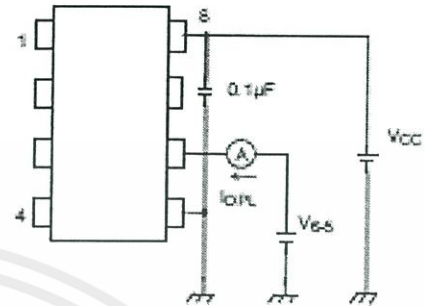
Note 7: Input signal rise time (fall time) < 0.5 μs.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

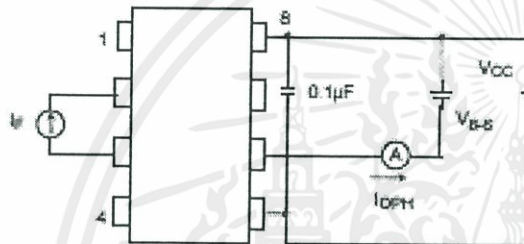
Test Circuit 1 :



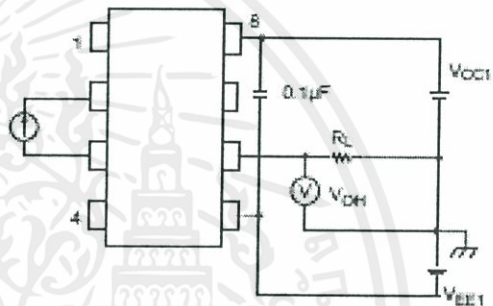
Test Circuit 2 : IOPL



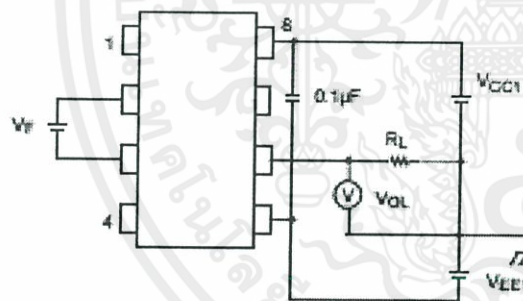
Test Circuit 3 : IOPH



Test Circuit 4 : VOH



Test Circuit 5 : VOL

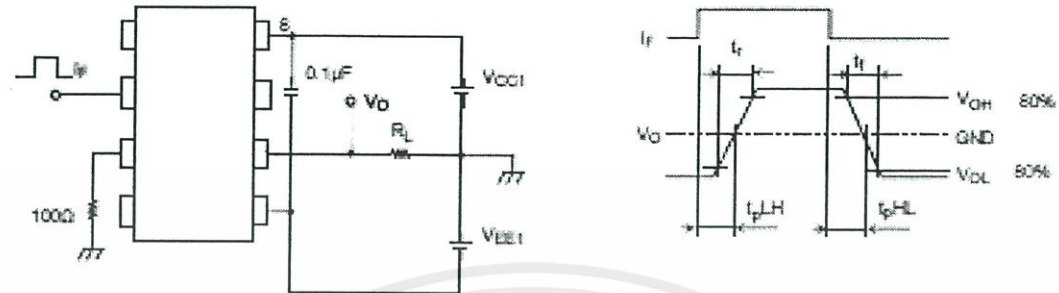


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

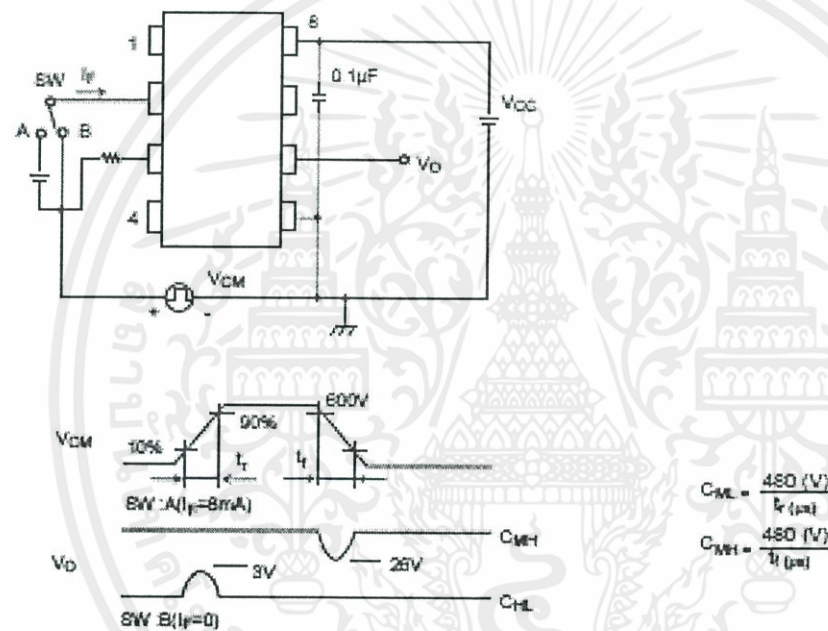
TOSHIBA

TLP250

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

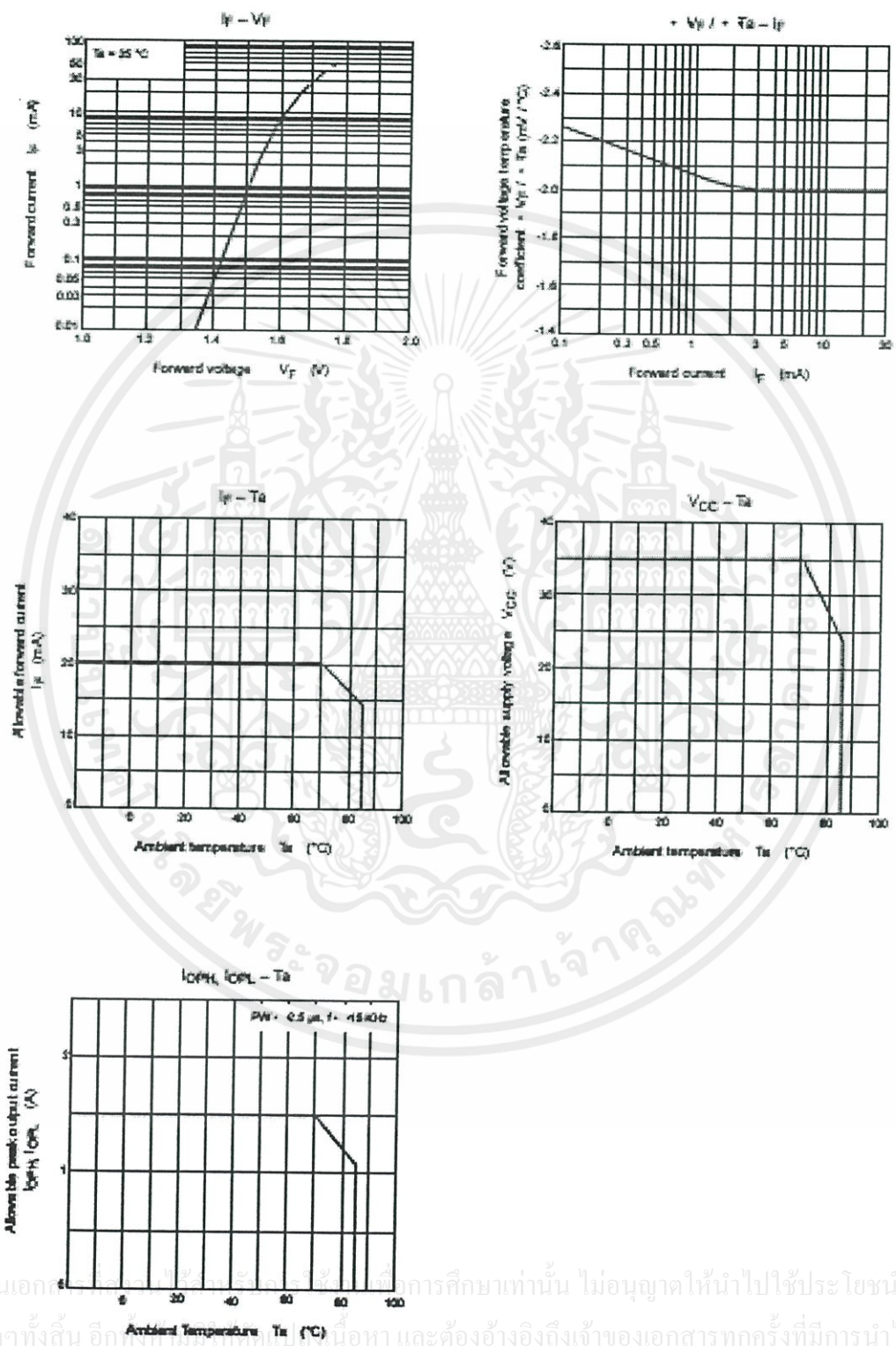


Test Circuit 7: C_{MH} , C_{ML}



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะตีพิมพ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัท... การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะพิมพ์ใดๆทั้งสิ้น อีก... นี้อาจจะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RESTRICTIONS ON PRODUCT USE

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีที่ตีพิมพ์สิ่งนี้อีก และที่ยังมีสิ่งนี้ของเอกสารของคุณซึ่งมีลิขสิทธิ์

TC4429CAT


TC4420
TC4429

6A HIGH-SPEED MOSFET DRIVERS

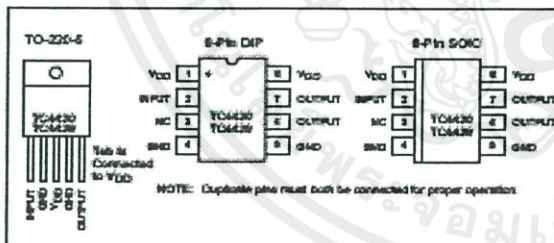
FEATURES

- Latch-Up Protected Will Withstand >1.5A Reverse Output Current
- Logic Input Will Withstand Negative Swing Up to 5V
- ESD Protected 4kV
- Matched Rise and Fall Times 25nsec
- High Peak Output Current 6A Peak
- Wide Operating Range 4.5V to 18V
- High Capacitive Load Drive 10,000pF
- Short Delay Time 55nsec Typ.
- Logic High Input, Any Voltage 2.4V to V_{DD}
- Low Supply Current With Logic "1" Input ... 450 μ A
- Low Output Impedance 2.5 Ω
- Output Voltage Swing to Within 25mV of Ground or V_{DD}

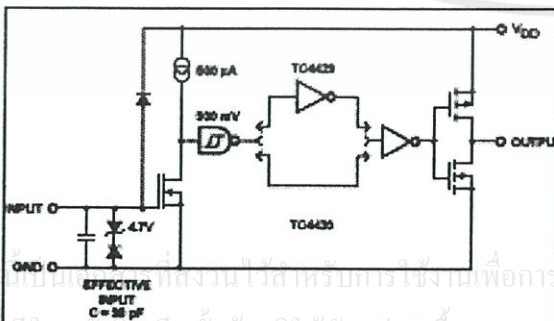
APPLICATIONS

- Switch-Mode Power Supplies
- Motor Controls
- Pulse Transformer Driver
- Class D Switching Amplifiers

PIN CONFIGURATIONS



FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



GENERAL DESCRIPTION

The TC4420/4429 are 6A (peak), single output MOSFET drivers. The TC4429 is an inverting driver (pin-compatible with the TC429), while the TC4420 is a non-inverting driver. These drivers are fabricated in CMOS for lower power, more efficient operation versus bipolar drivers.

Both devices have TTL-compatible inputs, which can be driven as high as $V_{DD} + 0.3V$ or as low as $-5V$ without upset or damage to the device. This eliminates the need for external level shifting circuitry and its associated cost and size. The output swing is rail-to-rail ensuring better drive voltage margin, especially during power up/power down sequencing. Propagational delay time is only 55nsec (typ.) and the output rise and fall times are only 25nsec (typ.) into 2500pF across the usable power supply range.

Unlike other drivers, the TC4420/4429 are virtually latch-up proof. They replace three or more discrete components saving PCB area, parts and improving overall system reliability.

ORDERING INFORMATION

Part No.	Logic	Package	Temperature Range
TC4420CAT	NonInverting	5-Pin TO-220	0°C to +70°C
TC4420COA	NonInverting	8-Pin SOIC	0°C to +70°C
TC4420CPA	NonInverting	8-Pin PDIP	0°C to +70°C
TC4420EOA	NonInverting	8-Pin SOIC	-40°C to +85°C
TC4420EPA	NonInverting	8-Pin PDIP	-40°C to +85°C
TC4420UA	NonInverting	8-Pin CerDIP	-25°C to +85°C
TC4420MUA	NonInverting	8-Pin CerDIP	-55°C to +125°C
TC4429CAT	Inverting	5-Pin TO-220	0°C to +70°C
TC4429COA	Inverting	8-Pin SOIC	0°C to +70°C
TC4429CPA	Inverting	8-Pin PDIP	0°C to +70°C
TC4429EOA	Inverting	8-Pin SOIC	-40°C to +85°C
TC4429EPA	Inverting	8-Pin PDIP	-40°C to +85°C
TC4429UA	Inverting	8-Pin CerDIP	-25°C to +85°C
TC4429MUA	Inverting	8-Pin CerDIP	-55°C to +125°C

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของบริษัทไมโครชิพ เทคโนโลยี จำกัด เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ กรุณาแจ้งบริษัทไมโครชิพ เทคโนโลยี จำกัด และทางอีแมจอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6A HIGH-SPEED MOSFET DRIVERS

TC4420
TC4429

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS*

Supply Voltage	+20V	Storage Temperature Range	-65°C to +150°C
Input Voltage	-5V to V_{DD}	Operating Temperature (Chip)	+150°C
Input Current ($V_{IN} > V_{DD}$)	50mA	Operating Temperature Range (Ambient)	
Power Dissipation, ($T_A \leq 70^\circ\text{C}$)		C Version	0°C to +70°C
PDIP	730mW	I Version	-25°C to +85°C
SOIC	470mW	E Version	-40°C to +85°C
CerDIP	800mW	M Version	-55°C to +125°C
5-Pin TO-220	1.6W	Lead Temperature (Soldering, 10 sec)	+300°C
Package Power Dissipation, $T_C \leq 25^\circ\text{C}$		*Static-sensitive device. Unused devices must be stored in conductive material. Protect devices from static discharge and static fields. Stresses above those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operation sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.	
5-Pin TO-220 (With Heat Sink)	12.5W		
Derating Factors (To Ambient)			
PDIP	8mW/°C		
SOIC	4mW/°C		
CerDIP	6.4mW/°C		
5-Pin TO-220	12mW/°C		
Thermal Impedances (To Case)			
5-Pin TO-220 $R_{\theta JC}$	10°C/W		

ELECTRICAL CHARACTERISTICS: $T_A = +25^\circ\text{C}$ with $4.5\text{V} \leq V_{DD} \leq 18\text{V}$, unless otherwise specified.

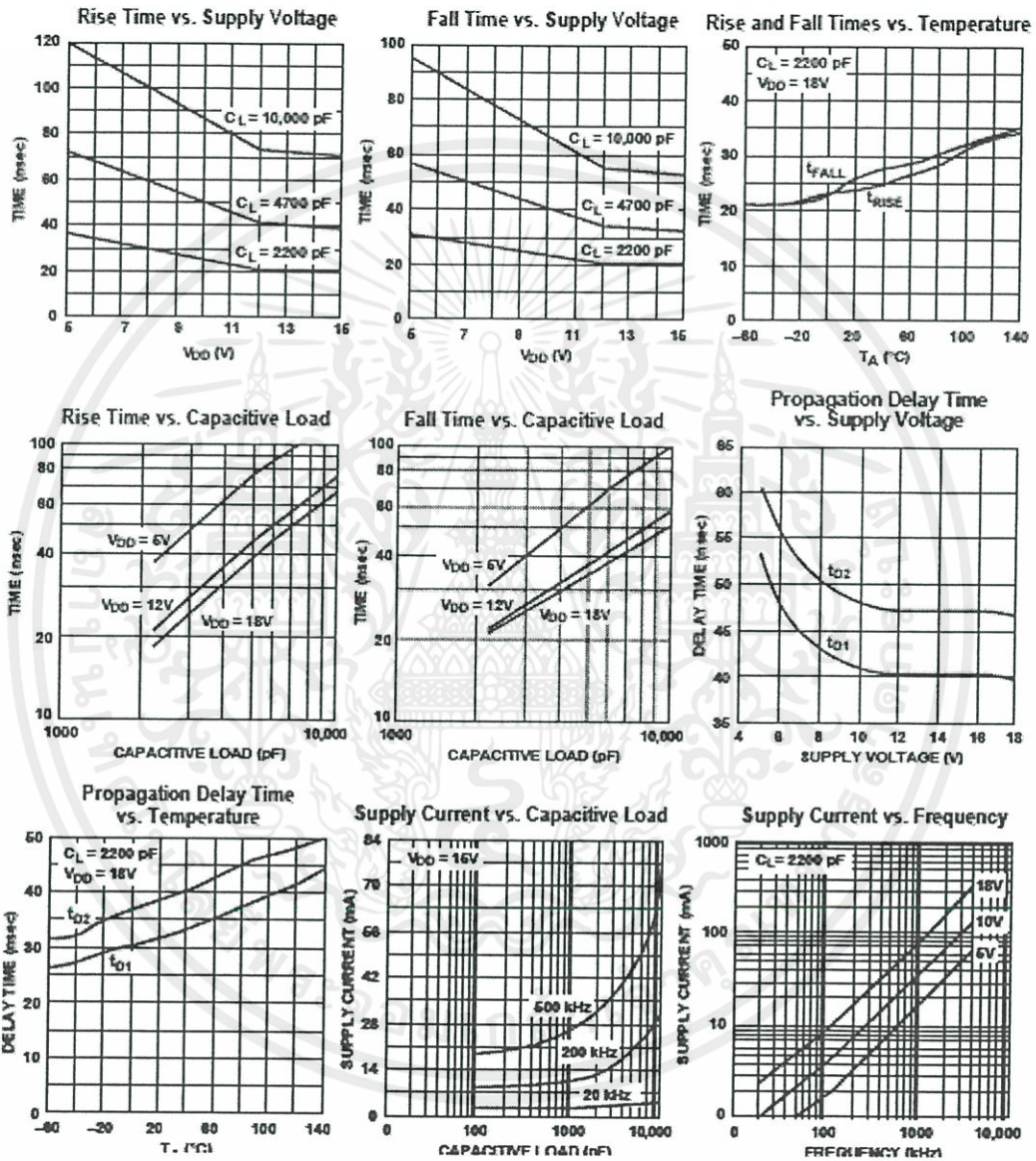
Symbol	Parameter	Test Conditions	Min	Typ	Max	Unit
Input						
V_{IH}	Logic 1 High Input Voltage		2.4	1.8	—	V
V_{IL}	Logic 0 Low Input Voltage		—	1.3	0.8	V
$V_{IN}(\text{Max})$	Input Voltage Range		-5	—	$V_{DD} + 0.3$	V
I_{IN}	Input Current	$0\text{V} \leq V_{IN} \leq V_{DD}$	-10	—	10	μA
Output						
V_{OH}	High Output Voltage	See Figure 1	$V_{DD} - 0.025$	—	—	V
V_{OL}	Low Output Voltage	See Figure 1	—	—	0.025	V
R_{OH}	Output Resistance, High	$I_{OUT} = 10\text{ mA}$, $V_{DD} = 18\text{V}$	—	2.1	2.8	Ω
R_{OL}	Output Resistance, Low	$I_{OUT} = 10\text{ mA}$, $V_{DD} = 18\text{V}$	—	1.5	2.5	Ω
I_{PK}	Peak Output Current	$V_{DD} = 18\text{V}$ (See Figure 5)	—	6	—	A
I_{REV}	Latch-Up Protection Withstand Reverse Current	Duty Cycle $\leq 2\%$ $t \leq 300\mu\text{sec}$	1.5	—	—	A
Switching Time (Note 1)						
t_R	Rise Time	Figure 1, $C_L = 2500\text{pF}$	—	25	35	nsec
t_F	Fall Time	Figure 1, $C_L = 2500\text{pF}$	—	25	35	nsec
t_{d1}	Delay Time	Figure 1	—	55	75	nsec
t_{d2}	Delay Time	Figure 1	—	55	75	nsec
Power Supply						
I_S	Power Supply Current	$V_{IN} = 3\text{V}$ $V_{IN} = 0\text{V}$	—	0.45	1.5	mA
			—	55	150	μA
V_{DD}	Operating Input Voltage		4.5	—	18	V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6A HIGH-SPEED MOSFET DRIVERS

TC4420
TC4429

TYPICAL CHARACTERISTICS

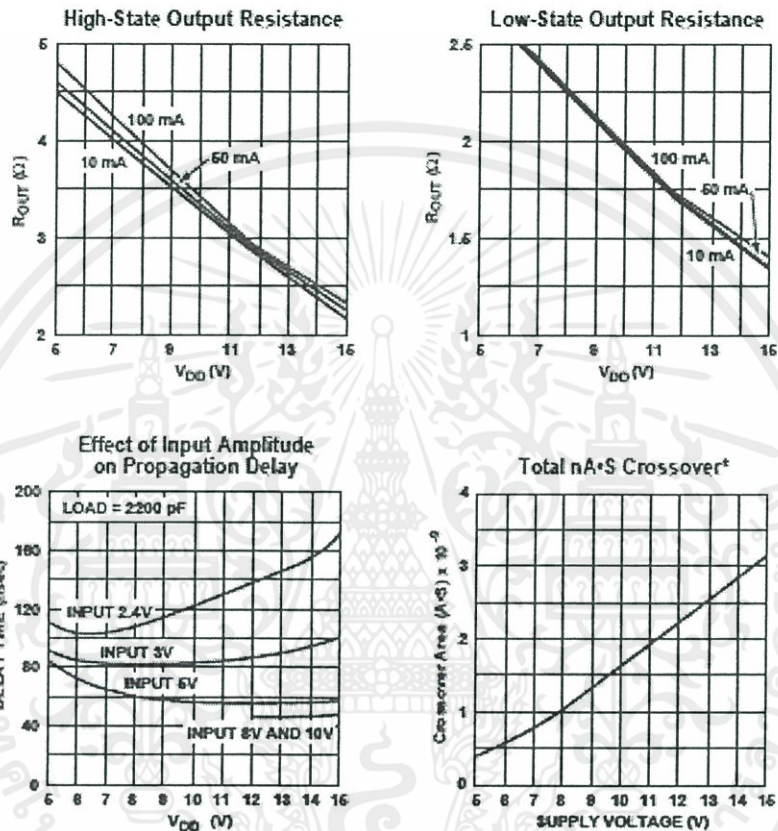


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6A HIGH-SPEED MOSFET DRIVERS

TC4420
TC4429

TYPICAL CHARACTERISTICS (Cont.)



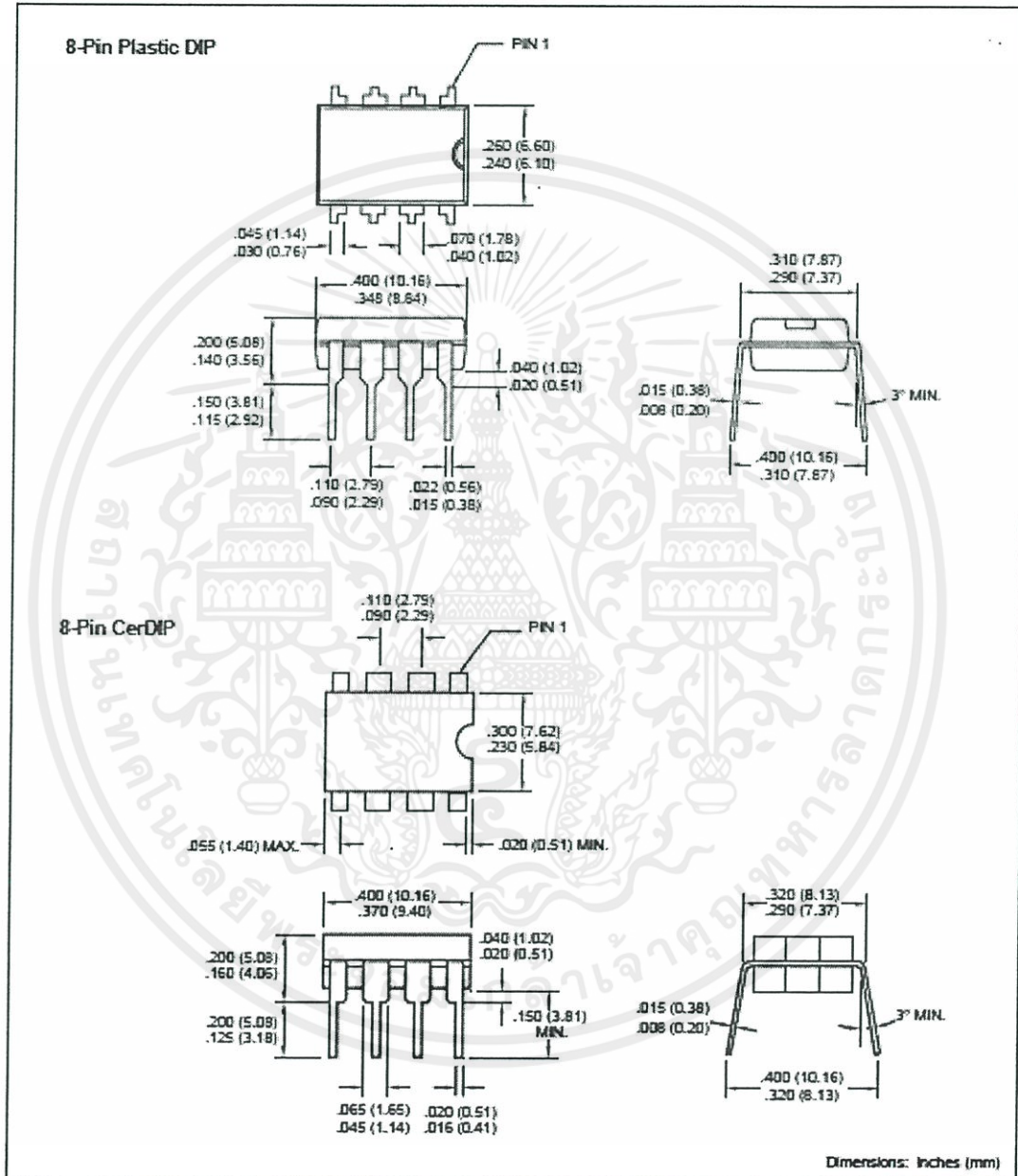
[†] The values on this graph represent the loss seen by the driver during one complete cycle. For a single transition, divide the value by 2.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6A HIGH-SPEED MOSFET DRIVERS

TC4420
TC4429

PACKAGE DIMENSIONS

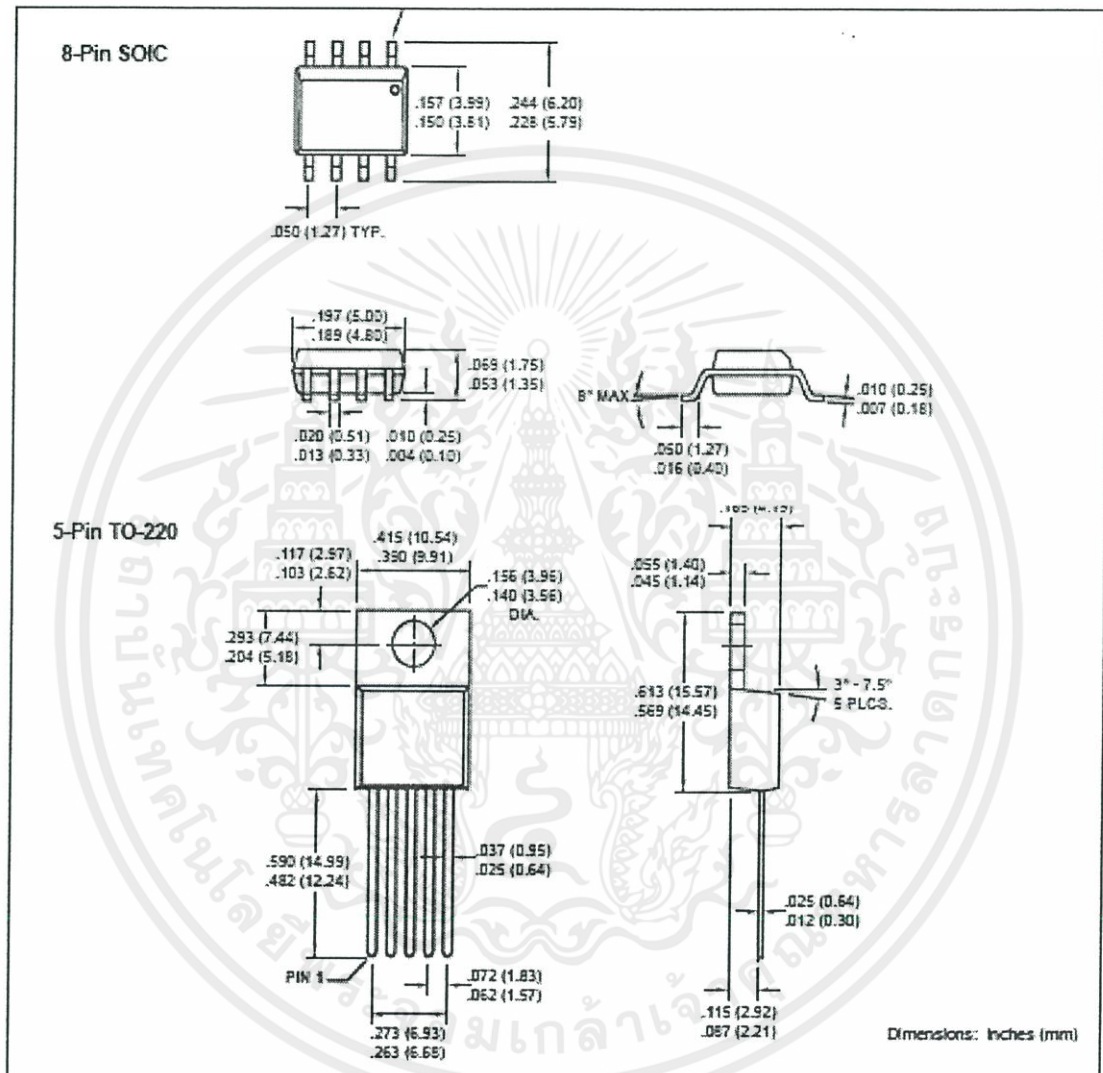


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6A HIGH-SPEED MOSFET DRIVERS

TC4420
TC4429

PACKAGE DIMENSIONS (Cont.)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IRFP460



WORLDWIDE SALES AND SERVICE

AMERICAS

Corporate Office

2355 West Chandler Blvd.
Chandler, AZ 85224-6199
Tel: 480-792-7200 Fax: 480-792-7277
Technical Support: 480-792-7637
Web Address: <http://www.microchip.com>

Rocky Mountain

2355 West Chandler Blvd.
Chandler, AZ 85224-6199
Tel: 480-792-7968 Fax: 480-792-7458

Atlanta

500 Sugar Mill Road, Suite 200B
Atlanta, GA 30350
Tel: 770-640-0034 Fax: 770-640-0307

Austin

Analog Product Sales
8303 MoPac Expressway North
Suite A-201
Austin, TX 78750
Tel: 512-345-2030 Fax: 512-345-8065

Boston

2 Lan Drive, Suite 120
Wareford, MA 01586
Tel: 978-662-3845 Fax: 978-662-3821

Boston

Analog Product Sales
Unit A-8-1 Millbrook Terry Condominium
97 Lowell Road
Concord, MA 01742
Tel: 978-371-6400 Fax: 978-371-0350

Chicago

333 Pierce Road, Suite 180
Roselle, IL 60443
Tel: 630-285-0071 Fax: 630-285-0075

Dallas

4570 Westgrove Drive, Suite 180
Addicks, TX 75001
Tel: 972-818-7423 Fax: 972-818-2924

Dayton

Two Prestige Place, Suite 130
Miamiburg, OH 45342
Tel: 937-291-1854 Fax: 937-291-9175

Detroit

Tri-Alert Office Building
32255 Northwestern Highway, Suite 190
Farmington Hills, MI 48334
Tel: 248-838-2250 Fax: 248-838-2280

Los Angeles

18201 Van Kaman, Suite 1000
Irvine, CA 92612
Tel: 949-263-1885 Fax: 949-263-1338

Mountain View

Analog Product Sales
1300 Tara Falls Avenue
Mountain View, CA 94043-1826
Tel: 650-668-8241 Fax: 650-967-1580

New York

150 Motor Parkway, Suite 202
Hauppauge, NY 11788
Tel: 631-273-5305 Fax: 631-273-5335

San Jose

Microchip Technology Inc.
2107 North First Street, Suite 500
San Jose, CA 95131
Tel: 408-435-7050 Fax: 408-435-7055

Toronto

6285 Northern Drive, Suite 105
Mississauga, Ontario L4V 1X5, Canada
Tel: 905-673-0939 Fax: 905-673-8500

ASIA/PACIFIC

China - Beijing

Microchip Technology Beijing Office
Unit 015
New China Hong Kong Manhattan Bldg.
No. 6 Chaoyangmen Beidajie
Beijing, 100027, No. China
Tel: 86-10-85262100 Fax: 86-10-85262104

China - Shanghai

Microchip Technology Shanghai Office
Room 701, Bldg. B
Far East International Plaza
No. 317 Xian Xia Road
Shanghai, 200051
Tel: 86-21-6275-6700 Fax: 86-21-6275-8060

Hong Kong

Microchip Asia Pacific
RM 2101, Tower 2, Metroplaza
223 Hing Fong Road
Kwai Fong, N. T., Hong Kong
Tel: 852-2401-1200 Fax: 852-2401-3431

India

Microchip Technology Inc.
India Liaison Office
Divyansu Chambers
1 Floor, Wing A (AS/4A)
No. 11, O'Shaughnessy Road
Bangalore, 560 025, India
Tel: 91-80-2290051 Fax: 91-80-2290062

Japan

Microchip Technology Int. Inc.
Berax 6-1 6F
3-18-2D, Shingyokohama
Kohoku-Ku, Yokohama-shi
Kanagawa, 223-0003, Japan
Tel: 81-45-471-6162 Fax: 81-45-471-6122

Korea

Microchip Technology Korea
108-1, Youngbo Bldg. 3 Floor
Samsung-Dong, Kangnam-Ku
Seoul, Korea
Tel: 82-2-554-7200 Fax: 82-2-558-8934

ASIA/PACIFIC (continued)

Singapore

Microchip Technology Singapore Pte Ltd
200 Middle Road
#07-02 Prime Centre
Singapore, 180060
Tel: 65-334-8870 Fax: 65-334-8850

Taiwan

Microchip Technology Taiwan
11F-3, No. 207
Tung Hua North Road
Taipei, 105, Taiwan
Tel: 886-2-2717-7175 Fax: 886-2-2545-0130

EUROPE

Australia

Microchip Technology Australia Pty Ltd
Suite 22, 41 Rawson Street
Epping 2121, NSW
Australia
Tel: 61-2-9868-6733 Fax: 61-2-9868-6755

Denmark

Microchip Technology Denmark ApS
Rugens Business Centre
Lushupvej 1-3
Ballerup DK-2750 Denmark
Tel: 45-4420 8686 Fax: 45-4420 9010

France

Arizona Microchip Technology SARL
Parc d'Activité du Moulin de Massey
43 Rue du Seuil Trepas
Batiment A - 1er Etage
91300 Massey, France
Tel: 33-1-69-63-63-20 Fax: 33-1-69-33-60-70

Germany

Arizona Microchip Technology GmbH
Garten-Heimstrasse 125
D-61730 Munich, Germany
Tel: 49-89-527-144 0 Fax: 49-89-527-144-44

Germany

Analog Product Sales
Lothamer Strasse 13
D-82152 Martinsried, Germany
Tel: 49-89-886650-0 Fax: 49-89-886650-32

Italy

Arizona Microchip Technology S.R.L.
Centro Direzionale Colosani
Palazzo Telemis 1 V. La Colosani 1
20041 Agrate Brianza
Milan, Italy
Tel: 39-039-65791-1 Fax: 39-039-6569583

United Kingdom

Arizona Microchip Technology Ltd.
505 Eskdale Road
Winnech Triangle
Watlington
Berks, England RG24 1STU
Tel: 44 118 921 5068 Fax: 44-118 921-8820

All rights reserved. © 2001 Microchip Technology Incorporated. Printed in the USA. 10/01 Printed on recycled paper. 01/0901

Information contained in this publication regarding device applications and the like is intended through suggestion only and may be superseded by updates. It is your responsibility to ensure that your application meets with your specifications. No representation or warranty is given and no liability is assumed by Microchip Technology Incorporated with respect to the accuracy or use of such information, or infringement of patents or other intellectual property rights arising from such use or otherwise. Use of Microchip's products as critical components in life support systems is not authorized except with express written approval by Microchip. No licenses are conveyed, implicitly or otherwise, except as maybe explicitly expressed herein, under any intellectual property rights. The Microchip logo and name are registered trademarks of Microchip Technology Inc. in the U.S.A. and other countries. All rights reserved. All other trademarks mentioned herein are the property of their respective companies.

เอกสารนี้เป็น

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นมีมติเห็นชอบเปลี่ยนเนื้อหา และต้องขออนุญาตเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

มีข้อจำกัดในการค้า

PowerMOS transistors
Avalanche energy rated

IRFP460

THERMAL RESISTANCES

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
$R_{\theta j-c}$	Thermal resistance junction to mounting base	SOT429 package, in free air	-	-	0.5	K/W
$R_{\theta j-a}$	Thermal resistance junction to ambient		-	45	-	K/W

ELECTRICAL CHARACTERISTICS $T_j = 25\text{ }^\circ\text{C}$ unless otherwise specified

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
$V_{(BR)DSS}$	Drain-source breakdown voltage	$V_{GS} = 0\text{ V}; I_D = 0.25\text{ mA}$	500	-	-	V
$\Delta V_{(BR)DSS} / \Delta T_j$	Drain-source breakdown voltage temperature coefficient	$V_{GS} = V_{GS0}; I_D = 0.25\text{ mA}$	-	0.1	-	%/K
$R_{DS(on)}$	Drain-source on resistance	$V_{GS} = 10\text{ V}; I_D = 10\text{ A}$	-	0.2	0.27	Ω
$V_{GS(th)}$	Gate threshold voltage	$V_{GS} = V_{DS}; I_D = 0.25\text{ mA}$	2.0	3.0	4.0	V
g_m	Forward transconductance	$V_{GS} = 30\text{ V}; I_D = 10\text{ A}$	13	18	-	S
I_{DSS}	Drain-source leakage current	$V_{GS} = 500\text{ V}; V_{DS} = 0\text{ V}$	-	2	50	μA
I_{GSS}	Gate-source leakage current	$V_{GS} = 400\text{ V}; V_{DS} = 0\text{ V}; T_j = 125\text{ }^\circ\text{C}$	-	100	1000	μA
		$V_{GS} = \pm 30\text{ V}; V_{DS} = 0\text{ V}$	-	10	200	nA
$Q_{g(tot)}$	Total gate charge	$I_D = 20\text{ A}; V_{GS} = 400\text{ V}; V_{DS} = 10\text{ V}$	-	147	190	nC
Q_{gs}	Gate-source charge		-	12	18	nC
Q_{gd}	Gate-drain (Miller) charge		-	78	100	nC
$t_{d(on)}$	Turn-on delay time	$V_{DD} = 250\text{ V}; R_{\theta j-c} = 12\text{ }^\circ\text{C/W}; R_{\theta j-a} = 3.9\text{ }^\circ\text{C/W}$	-	23	-	ns
t_r	Turn-on rise time		-	72	-	ns
$t_{d(off)}$	Turn-off delay time		-	150	-	ns
t_f	Turn-off fall time		-	75	-	ns
L_c	Internal drain inductance	Measured from tab to centre of die	-	3.5	-	nH
L_d	Internal drain inductance	Measured from drain lead to centre of die	-	4.5	-	nH
L_s	Internal source inductance	Measured from source lead to source bond pad	-	7.5	-	nH
C_{iss}	Input capacitance	$V_{GS} = 0\text{ V}; V_{DS} = 25\text{ V}; f = 1\text{ MHz}$	-	3000	-	pF
C_{oss}	Output capacitance		-	480	-	pF
C_{rss}	Feedback capacitance		-	270	-	pF

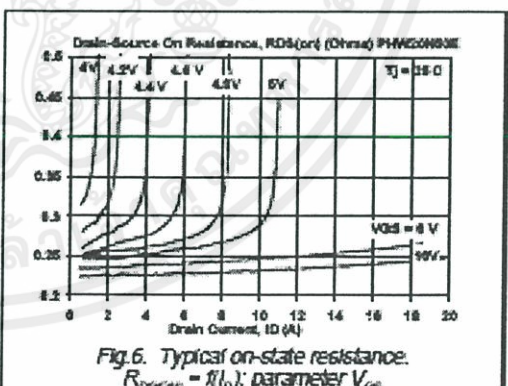
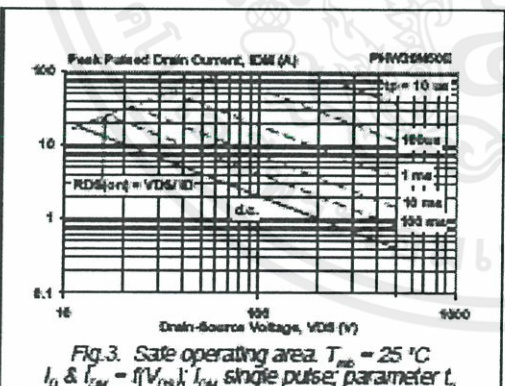
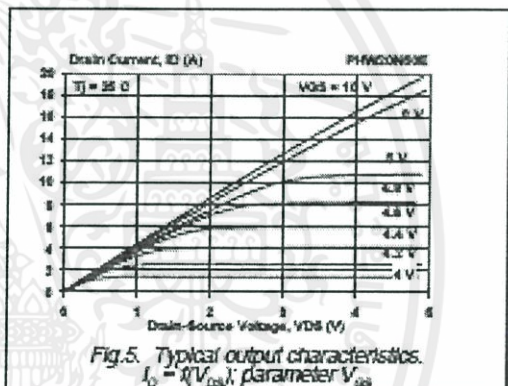
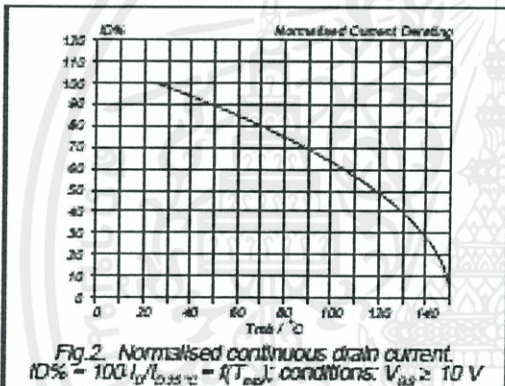
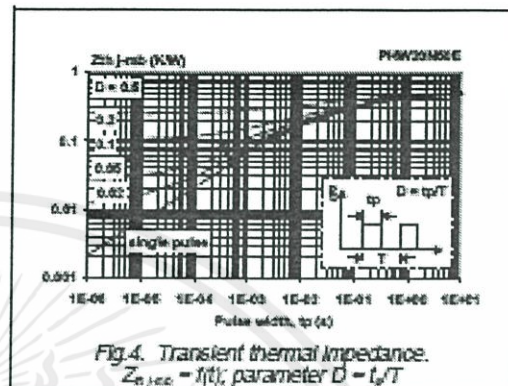
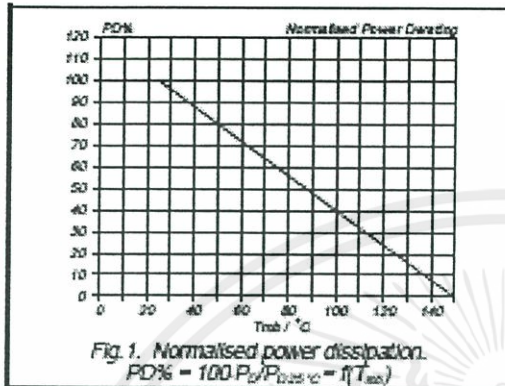
SOURCE-DRAIN DIODE RATINGS AND CHARACTERISTICS $T_j = 25\text{ }^\circ\text{C}$ unless otherwise specified

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
I_S	Continuous source current (body diode)	$T_{st} = 25\text{ }^\circ\text{C}$	-	-	20	A
I_{SM}	Pulsed source current (body diode)	$T_{st} = 25\text{ }^\circ\text{C}$	-	-	80	A
V_{SD}	Diode forward voltage	$I_S = 20\text{ A}; V_{GS} = 0\text{ V}$	-	-	1.5	V
t_r	Reverse recovery time	$I_S = 20\text{ A}; V_{GS} = 0\text{ V}; di/dt = 100\text{ A}/\mu\text{s}$	-	900	-	ns
Q_r	Reverse recovery charge		-	15	-	μC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PowerMOS transistors
Avalanche energy rated

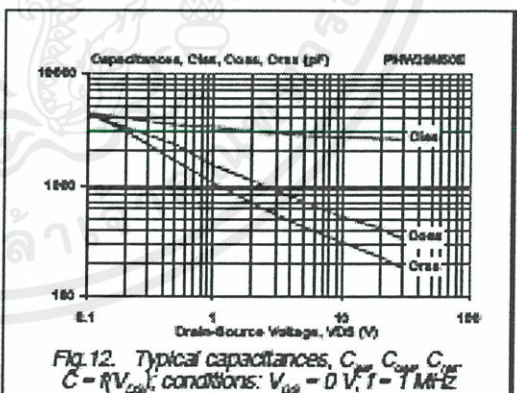
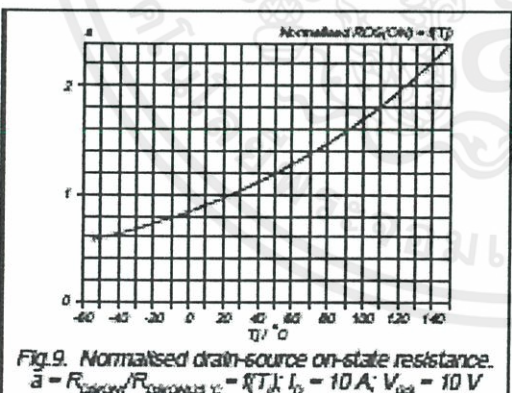
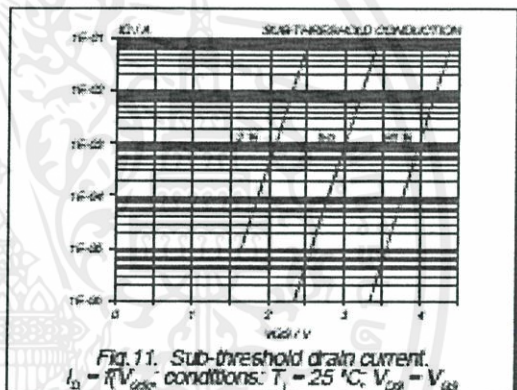
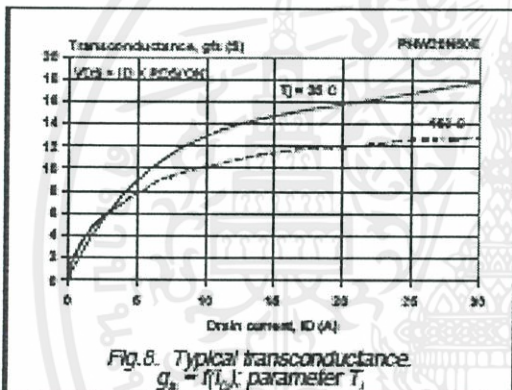
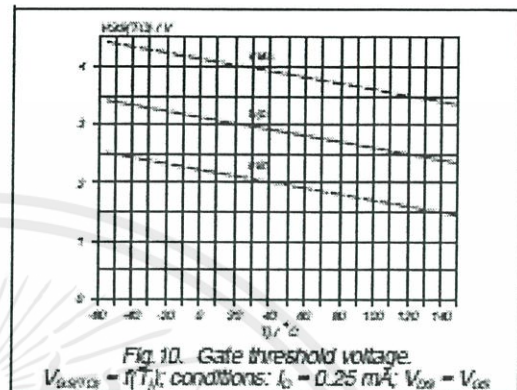
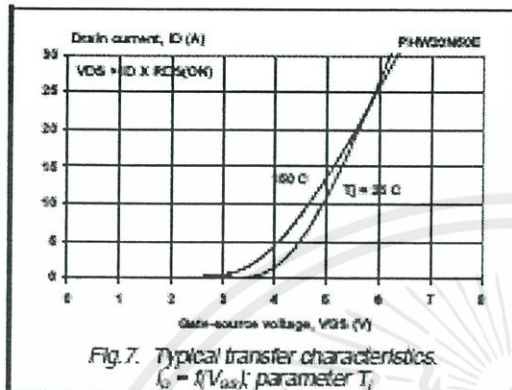
IRFP460



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PowerMOS transistors
Avalanche energy rated

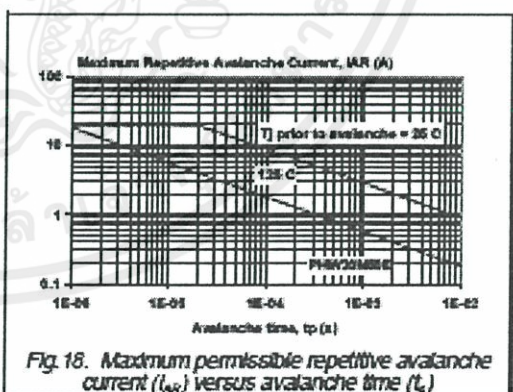
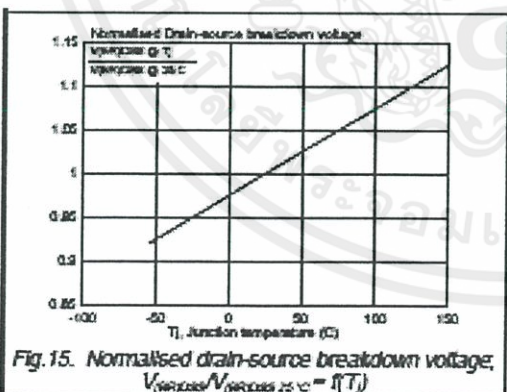
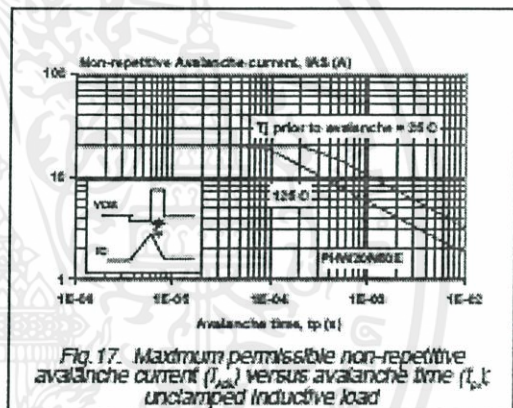
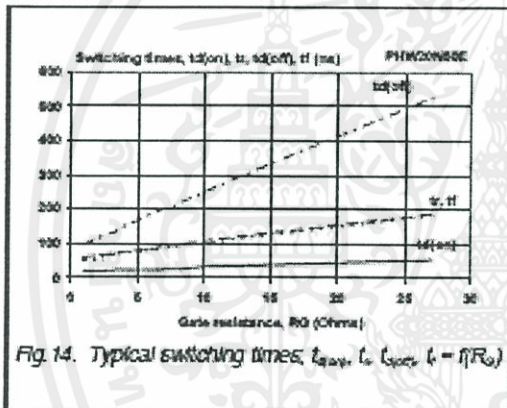
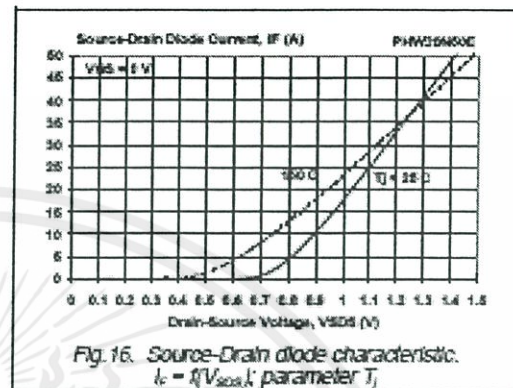
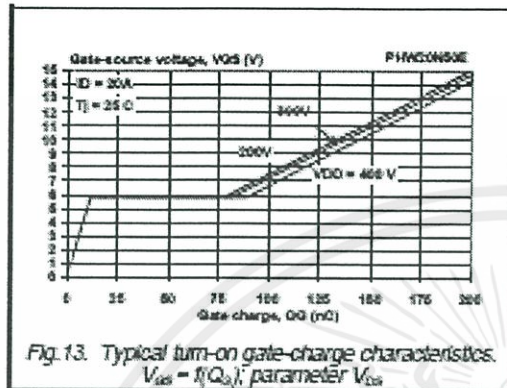
IRFP460



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PowerMOS transistors
Avalanche energy rated

IRFP460



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะผิดใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PowerMOS transistors
Avalanche energy rated

IRFP460

MECHANICAL DATA

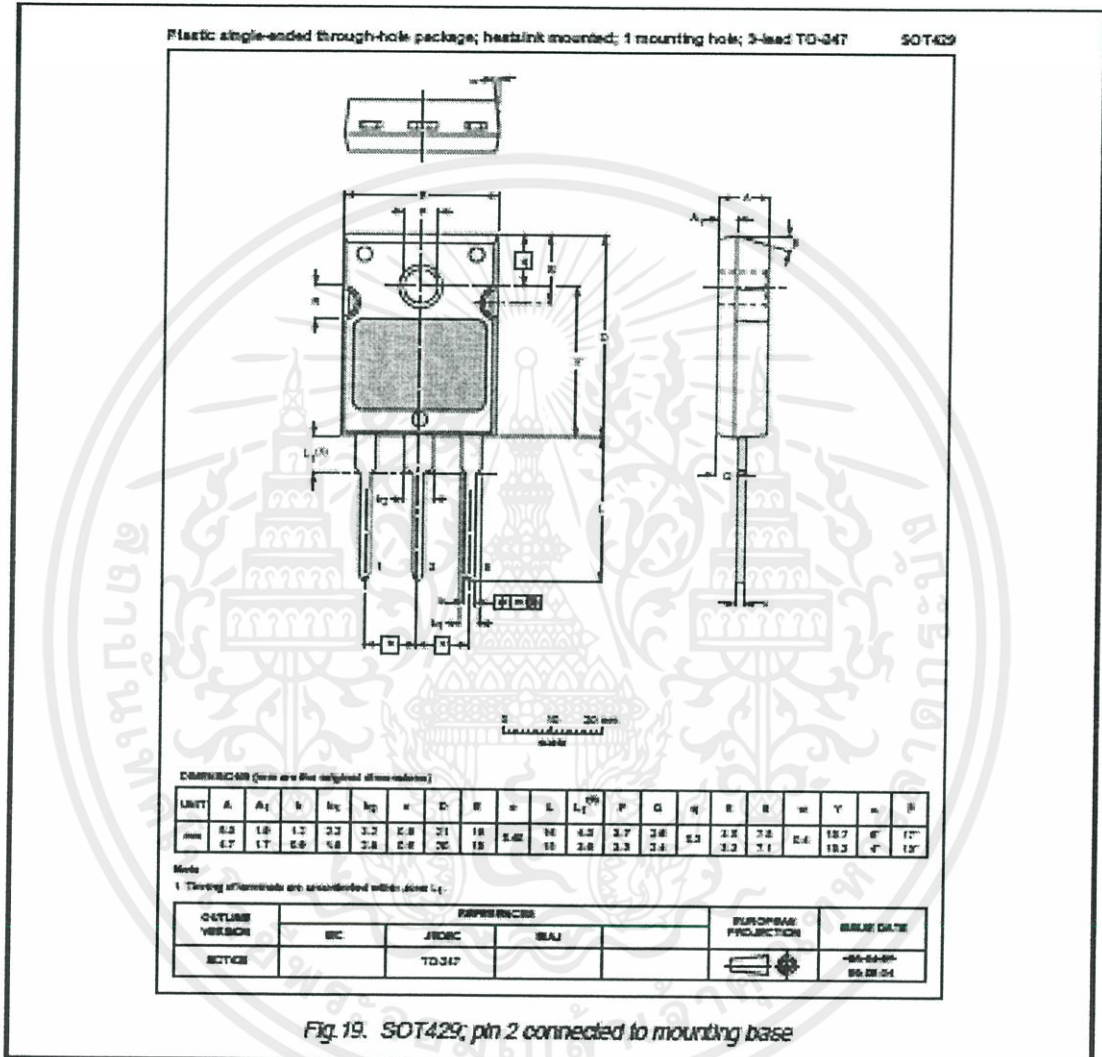


Fig. 19. SOT429; pin 2 connected to mounting base

Notes

1. Observe the general handling precautions for electrostatic-discharge sensitive devices (ESDs) to prevent damage to MOS gate oxide.
2. Refer to mounting instructions for SOT429 envelope.
3. Epoxy meets UL94 V0 at 1/8".

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**PowerMOS transistors
Avalanche energy rated**

IRFP460

DEFINITIONS

Data sheet status	
Objective specification	This data sheet contains target or goal specifications for product development.
Preliminary specification	This data sheet contains preliminary data; supplementary data may be published later.
Product specification	This data sheet contains final product specifications.
Limiting values	
Limiting values are given in accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 134). Stress above one or more of the limiting values may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only and operation of the device at these or at any other conditions above those given in the Characteristics sections of this specification is not implied. Exposure to limiting values for extended periods may affect device reliability.	
Application information	
Where application information is given, it is advisory and does not form part of the specification.	
© Philips Electronics N.V. 1999	
All rights are reserved. Reproduction in whole or in part is prohibited without the prior written consent of the copyright owner.	
The information presented in this document does not form part of any quotation or contract. It is believed to be accurate and reliable and may be changed without notice. No liability will be accepted by the publisher for any consequence of its use. Publication thereof does not convey nor imply any license under patent or other industrial or intellectual property rights.	

LIFE SUPPORT APPLICATIONS

These products are not designed for use in life support appliances, devices or systems where malfunction of these products can be reasonably expected to result in personal injury. Philips customers using or selling these products for use in such applications do so at their own risk and agree to fully indemnify Philips for any damages resulting from such improper use or sale.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BS170

BS170

Preferred Device

Small Signal MOSFET
500 mA, 60 Volts
N-Channel TO-92 (TO-226)**ON Semiconductor®**<http://onsemi.com>

Features

- Pb-Free Package is Available*

500 mA, 60 Volts

 $R_{DS(on)} = 5.0 \Omega$

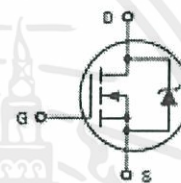
MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Drain-Source Voltage	V_{DS}	60	Vdc
Gate-Source Voltage	V_{GS}	± 20	Vdc
- Continuous	V_{GS}	± 40	Vpk
- Non-repetitive ($t_p \leq 50 \mu s$)	V_{GS}		
Drain Current (Note)	I_D	0.5	Adc
Total Device Dissipation @ $T_A = 25^\circ C$	P_D	350	mW
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{stg}	-55 to $+150$	$^\circ C$

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

NOTE: The Power Dissipation of the package may result in a lower continuous drain current.

N-Channel

TO-92 (TO-226)
CASE 28
STYLE 30MARKING DIAGRAM
& PIN ASSIGNMENT1 2 3
Drain Gate Source

BS170 = Device Code
A = Assembly Location
Y = Year
WW = Work Week
• = Pb-Free Package
(Note: Microdot may be in either location)

ORDERING INFORMATION

See detailed ordering and shipping information in the package dimensions section on page 2 of this data sheet.

Preferred devices are recommended choices for future use and best overall value.

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

© Semiconductor Components Industries, LLC, 2005
August, 2005 - Rev. 6

1

Publication Order Number:
BS170/D

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของ ON Semiconductor และสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าในรูปแบบใดๆก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีทำเนาไปใช้

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
OFF CHARACTERISTICS					
Gate Reverse Current ($V_{GS} = 15\text{ Vdc}$, $V_{DS} = 0$)	I_{GSS}	-	0.01	10	nAdc
Drain-Source Breakdown Voltage ($V_{GS} = 0$, $I_D = 100\ \mu\text{Adc}$)	$V_{(BR)DSS}$	60	90	-	Vdc
ON CHARACTERISTICS (Note 1)					
Gate Threshold Voltage ($V_{DS} = V_{GS}$, $I_D = 1.0\ \text{mAdc}$)	$V_{GS(TH)}$	0.8	2.0	3.0	Vdc
Static Drain-Source On Resistance ($V_{GS} = 10\text{ Vdc}$, $I_D = 200\ \text{mAdc}$)	$r_{DS(on)}$	-	1.8	5.0	Ω
Drain Cutoff Current ($V_{DS} = 25\text{ Vdc}$, $V_{GS} = 0\text{ Vdc}$)	$I_D(off)$	-	-	0.5	μA
Forward Transconductance ($V_{DS} = 10\text{ Vdc}$, $I_D = 250\ \text{mAdc}$)	g_m	-	200	-	mmhos
SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS					
Input Capacitance ($V_{DS} = 10\text{ Vdc}$, $V_{GS} = 0$, $f = 1.0\ \text{MHz}$)	C_{iss}	-	-	60	pF
SWITCHING CHARACTERISTICS					
Turn-On Time ($I_D = 0.2\ \text{Adc}$) See Figure 1	t_{on}	-	4.0	10	ns
Turn-Off Time ($I_D = 0.2\ \text{Adc}$) See Figure 1	t_{off}	-	4.0	10	ns

1. Pulse Test: Pulse Width $\leq 300\ \mu\text{s}$, Duty Cycle $\leq 2.0\%$.

ORDERING INFORMATION

Device	Package	Shipping†
BS170	TO-92 (TO-226)	1000 Unit/Tube
BS170G	TO-92 (TO-226) (Pb-Free)	1000 Unit/Tube
BS170RLRA	TO-92 (TO-226)	2000 Tape & Reel
BS170RLRAG	TO-92 (TO-226) (Pb-Free)	2000 Tape & Reel
BS170RLRM	TO-92 (TO-226)	2000 Tape & Reel
BS170RLRMG	TO-92 (TO-226) (Pb-Free)	2000 Tape & Reel
BS170RLRP	TO-92 (TO-226)	2000 Tape & Reel
BS170RLRPG	TO-92 (TO-226) (Pb-Free)	2000 Tape & Reel
BS170RL1	TO-92 (TO-226)	2000 Tape & Reel
BS170RL1G	TO-92 (TO-226) (Pb-Free)	2000 Tape & Reel
BS170ZL1	TO-92 (TO-226)	2000 Tape & Reel
BS170ZL1G	TO-92 (TO-226) (Pb-Free)	2000 Tape & Reel

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RESISTIVE SWITCHING

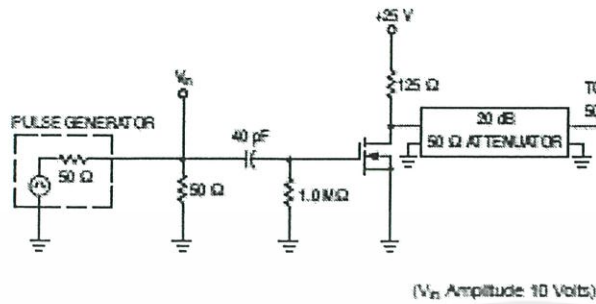


Figure 1. Switching Test Circuit

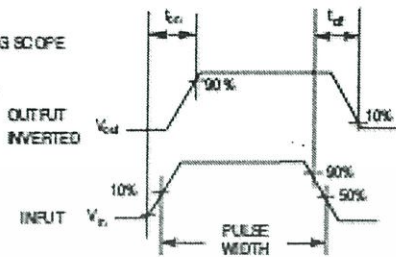


Figure 2. Switching Waveforms

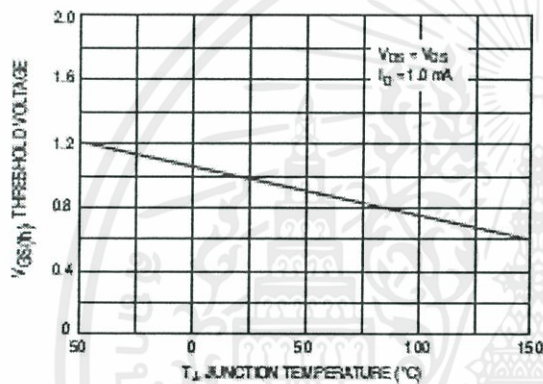
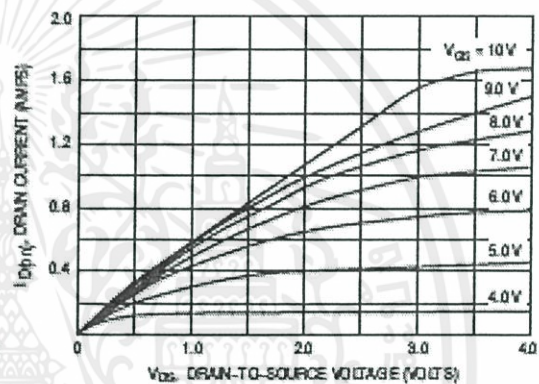
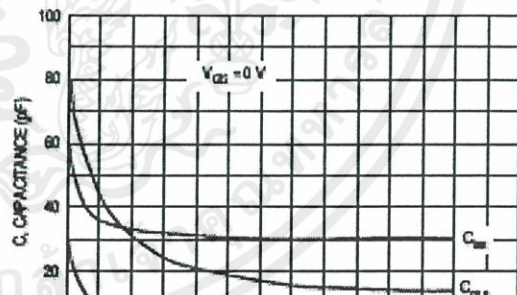
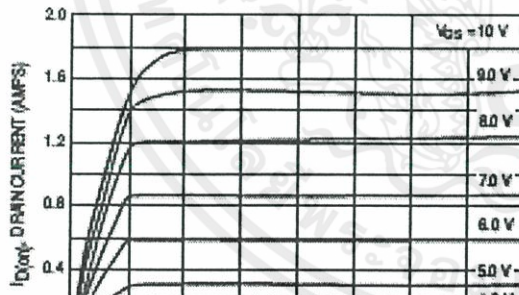
Figure 3. $V_{GS(th)}$ Normalized versus Temperature

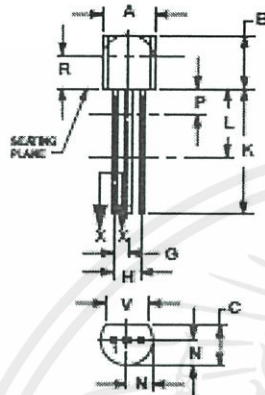
Figure 4. On-Region Characteristics



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PACKAGE DIMENSIONS


TO-92 (TO-226)
CASE 29-11
ISSUE A1



- NOTES
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
 2. CONTROLLING DIMENSION IS INCH.
 3. CONTOUR OF PACKAGE BEYOND DIMENSIONS R IS UNCONTROLLED.
 4. LEAD DIMENSIONS UNCONTROLLED IN P AND BEYOND DIMENSION K MINIMUM.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.175	0.205	4.43	5.21
B	0.175	0.210	4.43	5.33
C	0.185	0.205	4.69	5.21
D	0.075	0.091	1.91	2.31
G	0.045	0.055	1.14	1.40
H	0.035	0.055	0.89	1.40
J	0.075	0.095	1.91	2.41
K	0.030	---	0.76	---
L	0.030	---	0.76	---
M	0.030	0.205	0.76	5.21
P	---	0.200	---	5.08
R	0.175	---	4.43	---
V	0.135	---	3.43	---

STYLE:
PIN 1: DRAIN
2: GATE
3: SOURCE

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

PUBLICATION ORDERING INFORMATION

LITERATURE FULFILLMENT
Literature Distribution Center for ON Semiconductor
P.O. Box 61317, Phoenix, Arizona 85062-1317 USA
Phone: 480-429-7710 or 800-344-3880 Toll Free USA/Canada
Fax: 480-429-7709 or 800-344-3887 Toll Free USA/Canada
E-mail: orderlit@onsemi.com

N. American Technical Support: 800-282-6255 Toll Free
USA/Canada

Japan: ON Semiconductor, Japan Customer Focus Center
2-6-1 Kamaguro, Maguro-ku, Tokyo, Japan 153-0021
Phone: 81-3-6773-3800

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

Order Literature: <http://www.onsemi.com/order>

For additional information, please contact your
local Sales Representative.

BS170D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น

Design and Construction of a Voltage Step Generator

ภรณ์ยู โรจนกาญจน์ ภาณุพงศ์ จุลานพันธ์ ภูมิ อรุณภาคมงคล ยงยุทธ แลน้อย
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
E-mail: poom80535@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้ เป็นการนำเสนอการออกแบบและการสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ารูปขั้นโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมการทำงานของมอสเฟต โดยในการทำงานของมอสเฟตต้องอาศัยสัญญาณแรงดันในการขับเคลื่อน เพื่อให้มอสเฟตทำงานเป็นสวิตช์ในวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น โดยใช้มอสเฟต BS170 ซึ่งมีเวลาขาขึ้น 10 นาโนวินาทีและใช้ตัวขับเคลื่อน TC4429CAT เป็นตัวขับ ทำให้รูปคลื่นแรงดันมีเวลาขาขึ้น 5 นาโนวินาที ที่ระดับแรงดัน 50 โวลต์และเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้นที่สร้างสามารถสร้างแรงดันคงที่เป็นเวลา 100 ไมโครวินาที โดยเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้นนี้ทำขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์ชนิดความต้านทานที่มีค่าความต้านทานไม่เกิน 1 กิโลโอห์มภายในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงโดยผลการทดสอบรูปคลื่นที่สร้างขึ้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ IEC 60060-2 [1]

คำสำคัญ: เครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น

Abstract

This project presents the design and construction of a unit step voltage generator by using microcontroller to control the operation of MOSFET. Voltage signal is required to drive the MOSFET to operate as switches in this equipment. TC4429CAT gate drive is used to minimize the rise time of MOSFET BS170 that has 10 ns of rise time to be 5 ns of rise time at 50 v of the operated voltage and this equipment can generate the stable operating voltage level for 100 μ s. This equipment is constructed for test the resistive voltage divider that has the resistance lower than 1 k Ω in high-voltage laboratory. Experimental results show a good agreement between parameters of unit step voltage waveform from the unit step voltage generator and the parameters standard defined by IEC 60060-2 [1]

Key words: step voltage generator

1. บทนำ

เนื่องจากเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ารูปขั้นภายในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้อยู่เดิมนั้น มีช่วงเวลาขาขึ้นอยู่ในช่วงประมาณ 20 นาโนวินาที ซึ่งถือว่ามีความล่าช้ามาก รวมถึงเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้นดังกล่าวนี้เป็นเครื่องที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ จึงมีราคาค่อนข้างสูง ทางกลุ่มผู้ทำโครงการจึงจัดทำโครงการนี้ขึ้น เพื่อลดปัญหาการนำเข้าเครื่องมือจากต่างประเทศ และเพื่อลดเวลาขาขึ้นให้อยู่ในช่วงไม่เกิน 10 นาโนวินาทีเพื่อใช้ในการทดสอบโวลต์เดจดีไวเดอร์เพื่อใช้ในการทดสอบกับโวลต์เดจดีไวเดอร์ในกรณีที่ต้องการผลตอบสนองที่มีความเร็วในช่วงเวลาขาขึ้นค่อนข้างเร็ว โดยใช้มาตรฐาน IEC 60060-2 [1]

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานฟังก์ชันบันไดหนึ่งหน่วย

ฟังก์ชันขั้นบันไดคือการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของค่าระดับแรงดันของวัตถุทดสอบ โดยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันจากระดับแรงดันเริ่มต้นที่มีค่าเท่ากับ 0 โวลต์จนมีระดับแรงดันเท่ากับ V_0 โวลต์ โดยในการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันดังกล่าวจะใช้เวลาในการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันในช่วงสั้นๆ

2.2 วงจรสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ารูปขั้น

การสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้ารูปขั้นในการทดลองนี้นั้นมีเงื่อนไขหรือข้อกำหนดที่สำคัญคือ ต้องมีเวลาขาขึ้นไม่เกิน 10 นาโนวินาที โดยที่ระดับของแรงดันนั้นมีค่าไม่เกิน 50 โวลต์และยังต้องสามารถสร้างระดับแรงดันได้โดยต้องมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดภายใน 100 ไมโครวินาที

3. การออกแบบและประกอบสร้าง

3.1 ตัวเก็บประจุในวงจรกำเนิดแรงดันรูปขั้น (C_p)

ตัวเก็บประจุจะถูกอัดประจุจากวงจรกรองแรงดัน และจ่ายประจุให้กับวัตถุทดสอบเพื่อสร้างแรงดันรูปขั้นโดยเลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 6.3 โวลต์ ถึง 450 โวลต์

นอกจากนี้ในการออกแบบตัวเก็บประจุ ยังต้องคำนึงถึงเวลาในการคายประจุให้กับวัสดุทดสอบ โดยที่แรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุลดลงเพียงเล็กน้อยซึ่งมีเวลาในการคายประจุ 100 ไมโครวินาทีแสดงดังสมการที่ 1

$$V_{load}(t) = V_c e^{-\frac{t}{RC}} \quad (1)$$

ในส่วนของค่าคงที่เวลา ($\tau = RC$) กำหนดค่าเป็น 2000 เท่าของเวลาในการคายประจุและวัสดุที่จะนำมาทดสอบกับอุปกรณ์ที่มีค่าอย่างน้อย 1 k Ω แสดงดังสมการที่ 2

$$C_d = \frac{\tau}{R} = \frac{2000 \times 100 \times 10^{-6}}{1000} = 200 \mu F \quad (2)$$

3.2 ตัวเก็บประจุในวงจรเรียงกระแส (C_r)

ตัวเก็บประจุในวงจรเรียงกระแส (C_r) มีหน้าที่ในการตรึงแรงดันที่ได้จากวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นเพื่อให้แรงดันขาออกจากรวมนี้มีความเรียบมากขึ้นซึ่งจะใช้เป็น 10 เท่าของ (C_d) ดังสมการที่ 3

$$C_r = 10 \times C_d = 10 \times 200 \mu F = 2000 \mu F \quad (3)$$

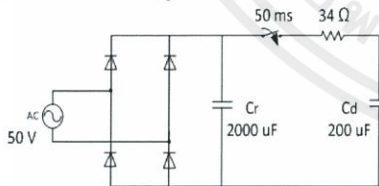
3.3 ความต้านทานจำกัดกระแสลัดประจุ

เนื่องจากผลของกระแสไฟฟ้าขณะเริ่มลัดประจุจะสูงมากและผลของการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของสนามไฟฟ้าส่งผลเสียต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าและทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลงจึงจำเป็นต้องออกแบบความต้านทานจำกัดกระแสลัดประจุโดยมีแรงเคลื่อนไฟฟ้า 50 โวลต์ดังสมการที่ 4

$$R_V = \frac{V_c}{I} = \frac{50}{1.5} \approx 34 \Omega \quad (4)$$

3.4 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ [2]

วงจรที่ใช้ในการจำลองการคายประจุโดยนำค่าพารามิเตอร์ที่ออกแบบไว้ในข้างต้นแสดงดังรูปที่ 1

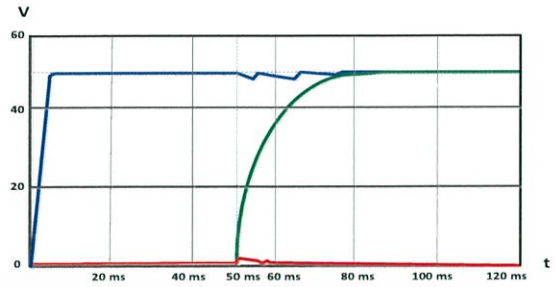


รูปที่ 1 วงจรที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม

ผลของการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยกำหนดเวลาให้การเปิดวงจร (ปิดสวิตช์) ที่เวลา 50 มิลลิวินาที จะได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 2

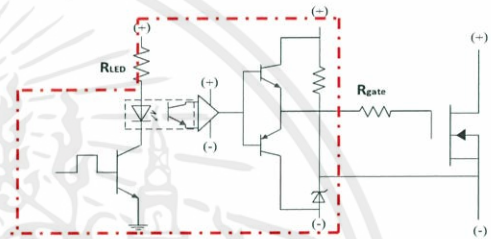
โดยที่ กราฟสีน้ำเงินแสดงแรงดันที่ตัวเก็บประจุ C_r

กราฟสีเขียวแสดงแรงดันที่ตัวเก็บประจุ C_d รับการใช้งานเพื่อการศึกษา การออกแบบโปรแกรมควบคุมการทำงานของสวิตช์โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 2 กราฟแสดงผลที่ได้จากการจำลอง

3.5 วงจรควบคุม



รูปที่ 3 TLP 250 วงจรเกตขับเคลื่อนสเฟด [3]

จากรูปที่ 3 TLP 250 เป็นวงจรขับเคลื่อนสเฟดเป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสงมีเพียงแสงที่เป็นตัวเชื่อมต่อสัญญาณจึงทำให้วงจรทั้งสองฝั่งแยกจากกันโดยสมบูรณ์ใช้งานจริงจึงต้องใส่ตัวต้านทานในวงจรก่อนเข้าตัวอุปกรณ์เพื่อจำกัดกระแสที่รับมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์โดยค่ากระแสที่เหมาะสมสามารถดูได้จากคู่มือของอุปกรณ์ซึ่งเท่ากับ 10 มิลลิแอมป์

สามารถออกแบบค่าความต้านทานจำกัดกระแสก่อนเข้า TLP 250 ความต้านทานมีค่าดังสมการที่ 5

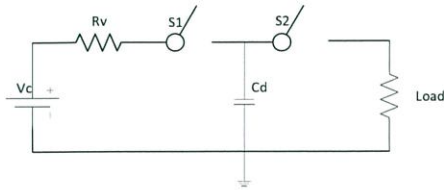
$$R_{LED} = \frac{V}{I} = \frac{5}{10 \times 10^{-3}} = 500 \Omega \quad (5)$$

นอกจากความต้านทานที่ใช้ก่อนเข้ารับสัญญาณแล้วยังต้องมีการต่อความต้านทานจำกัดกระแสกับเกตสเฟดเพื่อไม่ให้สูงมากจนเกินโดยมีแรงดันไฟเลี้ยงวงจร ($V_{CC}=15 V$) แรงดันไฟเลี้ยงวงจรขั้วลบ ($V_{EE}=0$) แรงดันขาออกต่ำจากคุณลักษณะ ($V_{OL}=-14.2 V$) กระแสไฟฟ้าขาออกสูงสุดขณะสถานะต่ำของอุปกรณ์ ($I_{OL(peak)}=2 A$) จะได้ค่าความต้านทานเกตดังสมการที่ 6

$$R_{gate} = \frac{V_{CC}-V_{EE}-V_{OL}}{I_{OL(peak)}} = \frac{15-0-(-14.2)}{2} = 14.6 \Omega \quad (6)$$

3.6 การออกแบบโปรแกรมควบคุมการทำงานของ [4]

การออกแบบโปรแกรมควบคุมการทำงานของสวิตช์โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมวงจรแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น

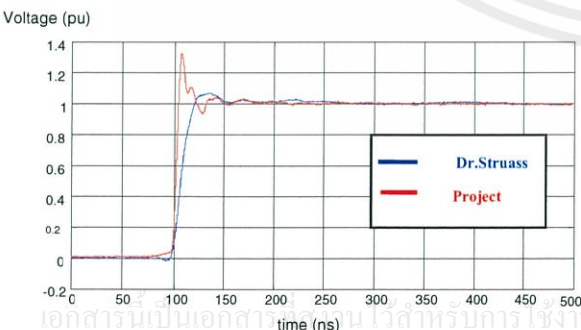
การควบคุมการทำงานของสวิตช์ทั้ง 2 ตัวสามารถแสดงการควบคุมการทำงานของสวิตช์โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F877 โดยจะให้สวิตช์ตัวที่ 1 (S₁) ทำงานก่อนเพื่อทำการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ และจะให้สวิตช์ตัวที่ 2 (S₂) ทำงานเพื่อให้คายประจุให้กับโหลด โดยจะมีข้อควรระวังในช่วงการทำงานของสวิตช์ไม่ให้ต่อเนื่องกัน หรือการที่สวิตช์ตัวที่ 1 (S₁) ยังไม่เปิดวงจร (OFF) แต่สวิตช์ตัวที่ 2 (S₂) กลับทำการปิดวงจร (ON) จะทำให้เกิดการลัดวงจรเกิดขึ้นระหว่างสวิตช์ได้ หรือที่เรียกว่าเวลาเว้นว่าง

4. ผลการทดสอบเพื่อหาผลตอบสนอง

ในการทดสอบโวลเตจดีไวเดอร์ เพื่อหาผลตอบสนองของแรงดันรูปขั้นของชุดทดลองโวลเตจดีไวเดอร์แบบต่างๆที่แรงดัน 50 โวลต์ ได้แก่ โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทาน (R divider) โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC divider) และโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC Universal) โดยสิ่งที่สำคัญในการทดสอบเพื่อหาผลตอบสนองของโวลเตจดีไวเดอร์จากเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้นคือรูปคลื่นแรงดันของเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น โดยจะมีผลต่อการทดสอบดีไวเดอร์ได้แก่ ช่วงเวลาขาขึ้น แรงดันพุ่งเกิน และการเข้าสู่สภาวะคงตัว

4.1 รูปคลื่นของเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น

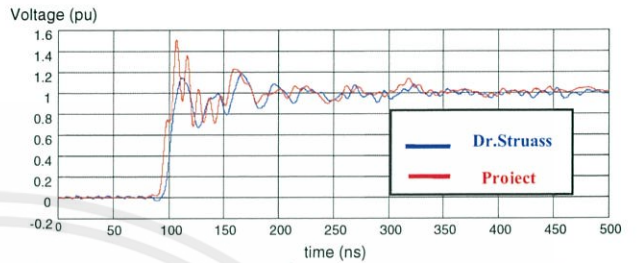
ทำการทดสอบเปรียบเทียบกับเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น ในสภาวะไร้ภาระทางไฟฟ้าที่แรงดัน 50 โวลต์แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 รูปคลื่นของเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น ที่เวลา 50 ns/div

4.2 การทดสอบหาผลตอบสนองแรงดันรูปขั้นของโวลเตจดีไวเดอร์ชนิดตัวต้านทาน (R divider)

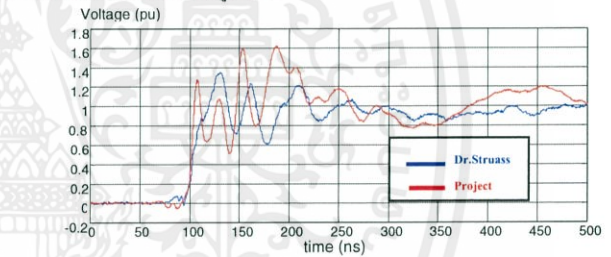
ทำการทดสอบเปรียบเทียบกับเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้นที่แรงดัน 50 โวลต์แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ผลตอบสนองแรงดันรูปขั้นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทาน (R divider) ที่เวลา 50 ns/div

4.3 ผลตอบสนองแรงดันรูปขั้นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC divider)

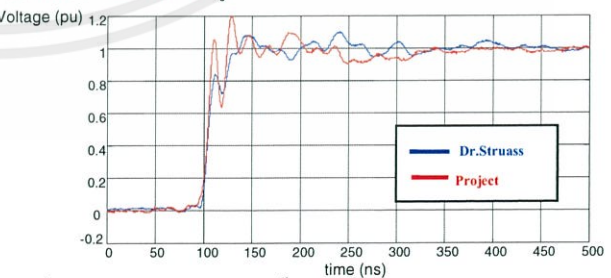
ทำการทดสอบเปรียบเทียบกับเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้นที่แรงดัน 50 โวลต์แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ผลตอบสนองแรงดันรูปขั้นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC divider) ที่เวลา 50 ns/div

4.4 การทดสอบหาผลตอบสนองแรงดันรูปขั้นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC Universal)

ทำการทดสอบเปรียบเทียบกับเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้นที่แรงดัน 50 โวลต์แสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ผลตอบสนองแรงดันรูปขั้นของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC Universal) ที่เวลา 500 ns

เอกสารนี้เป็นเอกสารของงานวิจัยสำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ตารางเปรียบเทียบผลการทดสอบ

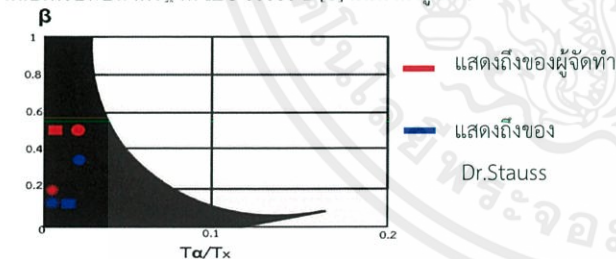
จากการทดสอบผลตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์ทั้ง 3 แบบ โดยในการทดสอบมีความแตกต่างของผลการทดสอบและผลตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์ ได้แก่ ช่วงเวลาขาขึ้น (Rise time) และแรงดันพุ่งเกิน (Overshoot voltage) โดยได้สรุปผลการทดสอบของเครื่องกำเนิดแรงดันในห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูง (Dr.Struass) เทียบกับเครื่องกำเนิดแรงดันรูปปั้นที่ประกอบสร้างขึ้นมา (project) โดยทำการเปรียบเทียบได้ตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตารางเปรียบเทียบผลการทดสอบของเครื่องกำเนิดแรงดันรูปปั้น

ประเภทการทดสอบ	เวลาขาขึ้น (ns)		ส่วนพุ่งเกิน (p.u.)	
	Dr.Strauss	Project	Dr.Strauss	Project
ไม่มีภาระทางไฟฟ้า	20	5	1.08	1.32
R Divider	20	15	1.14	1.5
RC Divider	25	10	1.37	1.62
RC Universal	10	10	1.1	1.22

4.6 ผลตอบสนองเทียบกับมาตรฐาน IEC 60060-2 [1]

ผลการตอบสนองของคณะผู้จัดทำกับห้องปฏิบัติการในห้องแล็บเทียบกับมาตรฐาน IEC 60060-2 [1] แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ผลตอบสนองเทียบกับมาตรฐาน IEC 60060-2

- ทดสอบกับดิไวเดอร์ความต้านทาน (R Divider)
- ทดสอบกับดิไวเดอร์ความต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC Universal)
- ทดสอบกับดิไวเดอร์ความต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC Divider)

5. สรุปผลการทดลอง

บทความฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและการออกแบบเครื่องกำเนิดแรงดันรูปปั้น โดยทำการเปรียบเทียบกับเครื่องกำเนิดแรงดันรูปปั้นในห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูงทำการสรุปเป็น 2 กรณีได้ดังนี้

1. ผลการทดสอบรูปคลื่นของเครื่องกำเนิดแรงดันรูปปั้น

ในกรณีไม่มีภาระทางไฟฟ้าพบว่าเครื่องกำเนิดแรงดันรูปปั้นของคณะผู้ทดลองนั้นมีเวลาขาขึ้น 5 นาโนวินาที คิดเป็น 25 เปอร์เซ็นต์ของเครื่องที่มีอยู่เดิมในห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูง เป็นผลมาจากเมื่อไม่มีภาระทางไฟฟ้า ในส่วนของส่วนพุ่งเกินนั้นพบว่าเครื่องกำเนิดแรงดันรูปปั้นของคณะผู้ทดลองนั้นมีค่า 1.32 ต่อหนึ่งหน่วย คิดเป็น 122.22 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับเครื่องที่มีอยู่เดิมในห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูง

2. ผลการทดสอบกับโวลเตจดิไวเดอร์

ในกรณีที่มีภาระทางไฟฟ้าในที่นี้ คือ โวลเตจดิไวเดอร์แบบต่างๆ โดยผ่านการต่อตัวต้านทานหน่วง (R Damp) พบว่าเวลาขาขึ้นของเครื่องกำเนิดแรงดันรูปปั้นของคณะผู้ทดลองนั้นมีค่าอยู่ในช่วง 10 นาโนวินาที ถึง 15 นาโนวินาที เป็นผลมาจากค่าตัวแปรภายนอกเครื่องที่มาจากโวลเตจดิไวเดอร์และการค่าตัวต้านทานหน่วง (R Damp) เพื่อให้การนำกราฟมาเปรียบเทียบนั้นทำได้โดยง่าย ในส่วนของส่วนพุ่งเกินนั้นพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 1.22 ถึง 1.62 ต่อหนึ่งหน่วย คิดเป็น 10 ถึง 31 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับเครื่องที่มีอยู่เดิมในห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูง

เมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ β และ $\frac{T\alpha}{T_x}$ พบว่าค่า $\frac{T\alpha}{T_x}$ ระหว่างเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ารูปปั้นที่สร้างขึ้นกับเครื่องที่มีอยู่เดิมในห้องปฏิบัติการมีค่าใกล้เคียงกันมาก ส่วนค่า β นั้นแตกต่างกันอยู่ในช่วง 8.23 เปอร์เซ็นต์ถึง 28.78 เปอร์เซ็นต์ซึ่งจะไปตามเกณฑ์มาตรฐาน IEC 60060-2 [1]

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำโครงการนุสรณ์รำลึกทราชมิ่งและขอบคุณต่อความกรุณาที่อาจารย์ ผศ.ดร. ธีรวิมล ยุทธโกวิท และรศ.ดร. อานันท์วัฒน์ คุณากร อาจารย์ที่ปรึกษาที่ช่วยให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาด้วยดีตลอดจนอาจารย์ในภาควิชาที่ประสิทธิประสาทความรู้ให้กับผู้จัดทำโครงการในครั้งนี้ก็ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูงที่ช่วยสนับสนุนอุปกรณ์ในการทำโครงการครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] IEC 60060-2, High Voltage Test Technique, Part 2, Measuring Systems, Step Response Measurements. 2010.
 [2] D.W.Hart, Introduction to Power electronics, Prentice-Hall, 1997
 [3] M.H.Rashid, Power Electronics, Prentice-Hall, 1993
 [4] ชัยทัต มณีอินทร์, ไมโครโปรเซสเซอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์, กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประวัติผู้เขียน



นายภรณ์ยู โรจนกาญจน์ เกิดเมื่อวันที่ 25 มีนาคม พ.ศ.2535 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาจากโรงเรียนทวีธาภิเศก และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

E-mail mhouz_3@hotmail.com

ฝึกงานที่: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย



นายอนุพงศ์ จุลานพันธ์ เกิดเมื่อวันที่ 24 มกราคม พ.ศ.2535 ที่จังหวัดยะลา สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาจากโรงเรียนเบญจมราชูทิศ ราชบุรี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

E-mail sineren087@hotmail.com

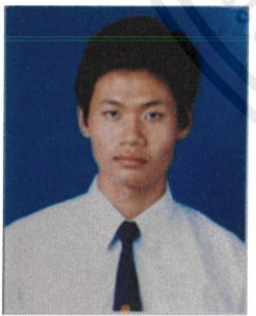
ฝึกงานที่: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย



นายภูมิ อรุณภาคมงคล เกิดเมื่อวันที่ 8 พฤษภาคม พ.ศ.2535 ที่จังหวัดราชบุรี สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาจากโรงเรียนเบญจมราชูทิศ ราชบุรี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

E-mail poom80535@gmail.com

ฝึกงานที่: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย



นายยงยุทธ แลน้อย เกิดเมื่อวันที่ 17 มกราคม พ.ศ.2534 ที่จังหวัดเชียงราย สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาจากโรงเรียนแม่จันวิทยาคม และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

E-mail the-noom@hotmail.co.th

ฝึกงานที่: บริษัท อีเทลไทยวิศวกรรม จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้