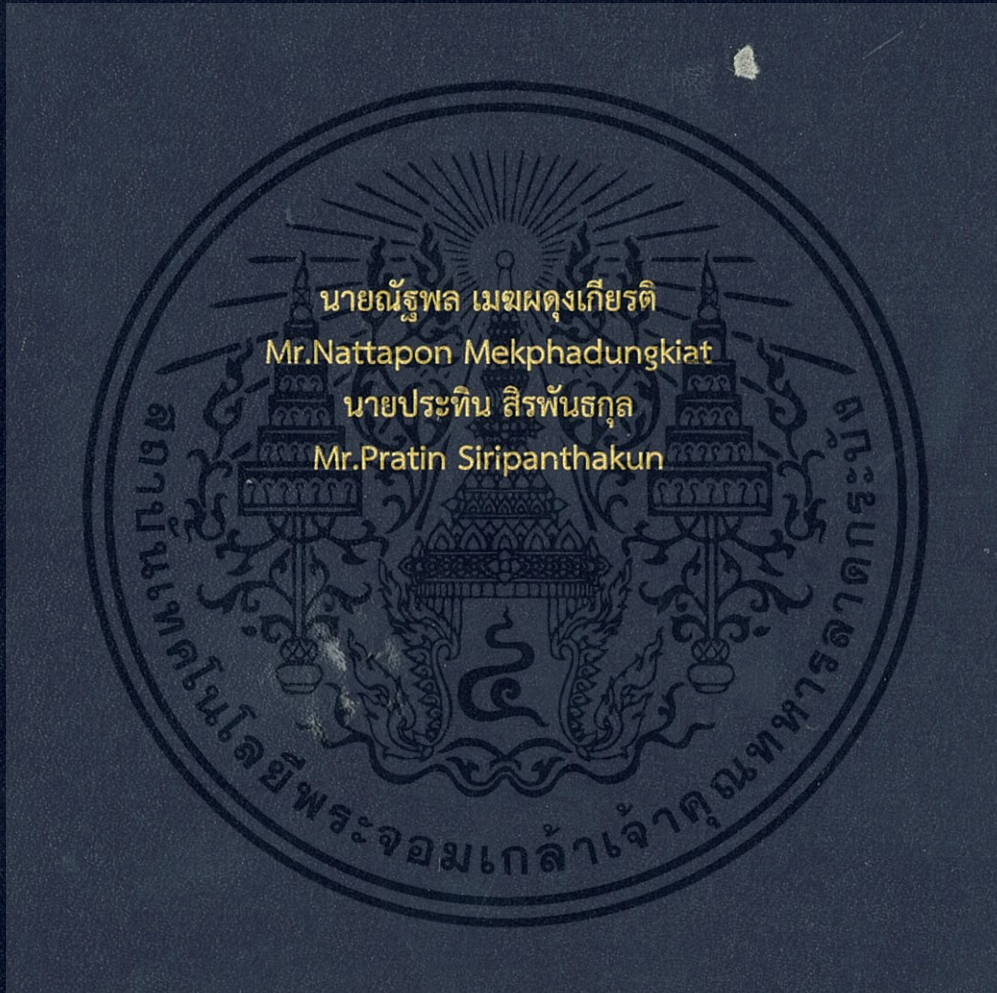


เครื่องจ่ายพลังงานแรงดันสูงแบบสวิชชิง

SWITCHING HIGH VOLTAGE POWER SUPPLY



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

เครื่องจ่ายพลังงานแรงดันสูงแบบสวิชชิง

SWITCHING HIGH VOLTAGE POWER SUPPLY



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2560

ภาควิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะ วิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องจ่ายพลังงานแรงดันสูงแบบสวิชชิง

Switching High Voltage Power Supply

ผู้จัดทำ นายณัฐพล เมฆผดุงเกียรติ รหัสนักศึกษา 57010447

นายประทีน สิริพันธุ์กุล รหัสนักศึกษา 57010737

ปริญญาานิพนธ์นี้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว



(ผศ.ดร.วีระ เพ็งจันทร์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	เครื่องจ่ายพลังงานแรงดันสูงแบบสวิตซ์ซิ่ง (Switching High Voltage Power Supply)	
นักศึกษา	นายณัฐพล เมฆผดุงเกียรติ	รหัสประจำตัว 57010447
	นายประทีน สิริพันธ์กุล	รหัสประจำตัว 57010737
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
ภาควิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์	
ปีการศึกษา	2560	
อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์	ผศ.ดร.วีระ เพ็งจันทร์	

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้อธิบายถึงการออกแบบและการเครื่องจ่ายพลังงานแรงดันสูงแบบสวิตซ์ซิ่ง ซึ่งมีแรงดันเอาต์พุตที่ 1KV โดยใช้สัญญาณพัลส์จากบอร์ด Arduino เป็นตัวควบคุมการสวิตซ์ซิ่งของวงจร และใช้เทคนิคพัลส์วิดมอดดูเลชันในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ซิ่ง สำหรับการสวิตซ์ซิ่งของ IGBT ได้ใช้หลักการของวงจรพูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ในการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นพัลส์ 1KV แล้วผ่านวงจรเรียงกระแสซึ่งจะได้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่เอาต์พุต

Thesis Title	Switching High Voltage Power Supply	
Student	Mr.Nattapon Mekphadungkiat	Student ID 57010447
	Mr.Pratin Sirapanthakun	Student ID 57010737
Degree	Bachelor of Engineering	
Program	Electronic Engineering	
Year	2560	
Thesis Advisor	Asist.Prof.Dr. Weera Pengchan	

Abstract

This report the design and creation. Switching High Voltage Power Supply with voltage output 1KV using the signal PWM from the Arduino board to control the switching of the circuit. And using pulse modulation bandwidth in the control of the switching device. For the switching of IGBT. It uses the principle of a full-bridge inverter. To change the DC voltage into PWM is 1KV. Then through the rectifier circuit which will output DC voltage.

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้สนับสนุนอุปกรณ์และโปรแกรมสำหรับทำโครงการ

โครงการเรื่องเครื่องจ่ายพลังงานแรงดันสูงแบบสวิชชิง (Switching High Voltage Power Supply) เล่มนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้กำลังใจในการศึกษาเล่าเรียนรวมถึงค่าใช้จ่ายต่างๆในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.สมศักดิ์ เขียวศิริกุล ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและแนะนำวิธีการจัดทำเล่มปริญญานิพนธ์นี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. วีระ เพ็งจันทร์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้ความช่วยเหลือในการการทำงานวิจัยนี้ จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี คณะผู้จัดทำจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณทุกๆท่านที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำตลอดการทำโครงการนี้ ทำให้โครงการฉบับนี้สมบูรณ์มีประโยชน์และคุณค่า สำหรับการศึกษาและการค้นคว้า

คณะผู้จัดทำ

นายณัฐพล เมฆผดุงเกียรติ

นายประทีน สิริพันธกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูปภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง.....	3
2.2 หลักการทำงานของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง.....	3
2.2.1 วงจรควบคุม.....	4
2.2.2 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบฟูล-บริดจ์ (Full-Bridge converter).....	5
2.3 องค์ประกอบหรืออุปกรณ์ของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง.....	6
2.3.1 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)	6
2.3.2 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer).....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.3 ไดโอด (Diode).....	22
2.3.4 ขดลวดเหนี่ยวนำ (Inductor).....	27
2.3.5 ตัวเก็บประจุ (Capacitor).....	32
2.3.6 วงจรสับเบอ์.....	36
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	
3.1 โปรแกรม Arduino	38
3.2 ออกแบบวงจรพูล-บริดจ์คอนเวอร์.....	40
3.3 การออกแบบวงจร.....	42
3.4 ตัวไดรฟ์สัญญาณพัลส์(PWM) ที่จะไปควบคุม IGBT.....	44
3.5 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor or IGBT Transistor).....	45
3.6 ไดโอดที่เลือกใช้ใช้งาน.....	46
3.7 การออกแบบหม้อแปลงขาออก.....	48
3.8 โหลดที่ใช้ในการทดลอง.....	52
บทที่ 4 วิธีการทดลอง และผลการทดลองแหล่งจ่ายไฟ.....	53
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองประสิทธิภาพของวงจร	
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	55
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	58
บรรณานุกรม.....	59
ภาคผนวก.....	60

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ขนาดของลวดทองแดงเบอร์ต่างๆ.....	49
5.1 ผลการทดลอง.....	56



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
2.1 Block diagram ของแหล่งจ่ายไฟ.....	3
2.2. Arduino Nano.....	4
(ก) บอร์ด Arduino Nano.....	4
(ข) Mechanical Drawing.....	4
(ค) การจัดเรียงขาของ Arduino Nano.....	4
2.3 วงจรคอนเวอร์เตอร์พื้นฐาน.....	5
2.4 สัญลักษณ์ของ IGBT แบบ N-Channel.....	6
2.5 ภาพหน้าตัดโครงสร้างพื้นฐานของ IGBT.....	7
2.6 (ก) กราฟแสดงคุณสมบัติระหว่างกระแสและแรงดันของ IGBT.....	7
(ข) กราฟแสดงลักษณะสมบัติการถ่ายโอนของ IGBT.....	7
2.7 ทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนและโฮลในขณะนำกระแส.....	8
2.8 การแบ่งระดับความหนาแน่นในการโต้ปสารของบริเวณบอดี้.....	11
2.9 (ก) แสดงโครงสร้างที่มีทรานซิสเตอร์และมอสเฟตฝังอยู่ภายใน.....	13
(ข) วงจรสมมูลสำหรับการทำงานสภาพปกติของ IGBT.....	13
(ค) วงจรสมมูลที่แสดงส่วนของไทรสเตอร์ที่แฝงอยู่ใน IGBT.....	13
2.10 (ก) ลักษณะของกระแสและแรงดันขณะนำกระแส.....	14
(ข) ลักษณะของกระแสและแรงดันขณะหยุดนำกระแส.....	14
2.11 (ก) พื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยในสภาวะไบอัสตรง.....	15
(ข) พื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยในสภาวะไบอัสกลับ.....	15
2.12 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	17
2.13 แกนเหล็กแบบคอร์และแบบเชลล์.....	17
2.14 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบทอร์รอยด์.....	18
2.15 หม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียว.....	18

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.16 หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส.....	18
2.17 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า.....	28
2.18 ตัวเหนี่ยวนำอากาศ.....	29
2.19 ตัวเหนี่ยวนำแกนผงเหล็กอัด.....	29
2.20 ตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์.....	30
2.21 ตัวเหนี่ยวนำแกนทอรอยต์.....	30
2.22 ตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็กแผ่น.....	31
2.23 แสดงตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่.....	33
2.24 แสดงตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์.....	33
2.25 แสดงตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัมอิเล็กโทรไลต์.....	34
2.26 แสดงตัวเก็บประจุชนิดโปลาร์.....	34
2.27 แสดงตัวเก็บประจุชนิดเซรามิค.....	34
2.28 แสดงตัวเก็บประจุชนิดไมลาร์.....	35
2.29 แสดงตัวเก็บประจุชนิดซิลเวอร์ไมก้า.....	35
2.30 แสดงโครงสร้างและสัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้.....	35
2.31 แสดงโครงสร้างและสัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุแบบเลือกค่าได้.....	36
2.32 วงจร RC snubbers.....	37
3.1 ซอร์ฟแวร์ของ Arduino ที่ใช้เขียนโปรแกรมภายในของ Atmega328.....	38
3.2 สัญญาณ PWM ของ Arduino ที่จ่ายให้วงจรคอนเวอร์เตอร์.....	38
3.3 วงจรฟูล-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์พื้นฐานที่ใช้งาน.....	40
3.4 โหมด I.....	40
3.5 โหมด II.....	41
3.6 Sch. วงจร Bridge rectifier.....	42
3.7 Sch. วงจร Liner regulator.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 Sch. TLP250 และวงจร Full-Bridge converter.....	43
3.9 การจัดเรียงขาของอุปกรณ์ TLP250.....	44
3.10 ตัวอุปกรณ์ TLP250 บนบอร์ดที่ใช้งานจริง.....	44
3.11 ตัวอุปกรณ์ที่ใช้และการจัดเรียงขาของ IGBT.....	45
3.12 ตัวอุปกรณ์ IGBT บนบอร์ดที่ใช้งานจริง.....	45
3.13 รูปแบบการต่อซีเนอร์ไดโอดที่ใช้งาน.....	46
3.14 ซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 1N4744A.....	46
3.15 ไดโอดเบอร์ FR207.....	46
3.16 ไดโอดเบอร์ RHRP8120.....	47
3.17 แบกกาไลท์(Bakelite).....	48
3.18 แบบของ Bobbin ที่ใช้งาน.....	50
3.19 Bobbin ที่ใส่ให้หม้อแปลงแล้ว.....	51
3.20 ตัวต้านทานที่ใช้งานในการทดลอง.....	52
3.21 ตัวต้านทานตัวละ 220 โอห์ม ที่ใช้งานในการทดลอง.....	52
4.1 สัญญาณที่ออกมาจาก Controller ไป Gate driver.....	53
4.2 สัญญาณที่ขา Gate ของ IGBT.....	53
4.3 สัญญาณที่ออกจากวงจร Full-Bridge converter.....	54
5.1 เปรียบเทียบระหว่าง Iout และ Vout.....	57
5.2 เปรียบเทียบระหว่าง Efficiency และ Iout.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

สวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลาย(Switching Power Supply) เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าค่าคงที่แบบหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนแรงดันไฟจากไฟบ้านซึ่งเป็นไฟฟ้าจากระบบมีค่าแรงดันไฟสลับที่ 220V ให้เป็นแรงดันไฟกระแสตรงค่าๆหนึ่ง เพื่อใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์เช่นเดียวกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้น หรือที่เรียกว่าลิเนียร์เพาเวอร์ซัพพลาย(Linear Power Supply) ข้อได้เปรียบของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตซ์เมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบเชิงเส้น คือประสิทธิภาพที่สูงกว่า ขนาดเล็กกว่า และน้ำหนักที่น้อยกว่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบเชิงเส้น เพราะแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบเชิงเส้นใช้หม้อแปลงความถี่ต่ำซึ่งมีขนาดของหม้อแปลงที่ใหญ่ และน้ำหนักมาก และขณะที่ใช้งานจะมีแรงดันและกระแสผ่านที่ตัวหม้อแปลงตลอดเวลาทำให้กำลังงานที่สูญเสียที่เกิดจากหม้อแปลงมีค่าสูง สำหรับการรักษาค่าแรงดันของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบเชิงเส้นส่วนมากจะใช้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ต่ออนุกรมที่เอาต์พุตเพื่อจ่ายกระแสและรักษาแรงดันไว้ กำลังงานที่สูญเสียในรูปของความร้อนจะมีค่าสูงจึงต้องใช้แผ่นระบายความร้อนขนาดใหญ่ซึ่งกินเนื้อที่มาก ปกติแหล่งจ่ายไฟฟ้าเชิงเส้นจะมีประสิทธิภาพประมาณ 30%-50% ในบางกรณี ซึ่งค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตซ์ซึ่งมีประสิทธิภาพประมาณ 65%-80%

ในปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ส่วนมาก ต้องจ่ายพลังงานให้กับระบบด้วยไฟกระแสตรงที่สม่ำเสมอและคงที่ อุปกรณ์และวงจรถึงจำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง โดยจะทำการแปลงกระแสไฟกระแสสลับ 220 โวลต์ ที่ใช้กันตามบ้านเรือนให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงขนาดโวลต์ต่างๆ เพื่อจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์ ซึ่งเป็นส่วนที่มีความสำคัญต่อระบบเป็นอย่างมาก และมีความสำคัญต่อการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมศาสตร์หรืออุตสาหกรรมที่มีการฝึกปฏิบัติการที่จำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในการฝึกปฏิบัติการ เช่น สาขาวิชาทางด้านไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งโดยทั่วไปแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงจะมีโครงสร้างพื้นฐานคล้ายกัน

รายงานฉบับนี้จึงศึกษาการสร้างเครื่องจ่ายพลังงานแรงดันสูงแบบสวิชชิงเพาเวอร์ซัพพลาย เพื่อการออกแบบเครื่องจ่ายพลังงานแรงดันสูงแบบสวิชชิงเพาเวอร์ซัพพลาย วิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้น แก้ไขปัญหาได้ในเบื้องต้น และเป็นการประยุกต์ใช้ความรู้ที่ได้เรียนรู้มาให้ได้สร้างเป็นชิ้นงานที่ใช้ได้จริงและมีคุณภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการทำงานของเครื่องจ่ายพลังงานแรงดันสูงแบบสวิชชิงเพาเวอร์ซัพพลาย
2. เพื่อให้ได้เครื่องจ่ายพลังงานแรงดันสูงแบบสวิชชิงเพาเวอร์ซัพพลายที่มีประสิทธิภาพ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. สร้างเครื่องจ่ายพลังงานแรงดันสูงแบบสวิชชิง ที่มีแรงดันตั้งแต่ 600V ขึ้นไป และเอาไปใช้งานในเครื่องจักร

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจหลักการทำงานของเครื่องจ่ายพลังงานแรงดันสูงแบบสวิชชิง
2. ช่วยสร้างเสริมประสบการณ์และทักษะในการทำงาน
3. สามารถวิเคราะห์และแก้ปัญหาของเครื่องจ่ายพลังงานแรงดันสูงแบบสวิชชิงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

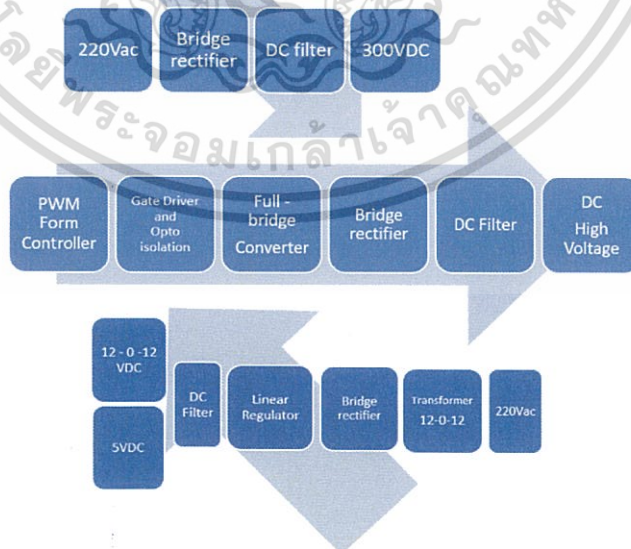
2.1 แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง

แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (DC Power Supply) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการจ่ายพลังงานให้แก่ วงจร อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งถือเป็นหัวใจสำคัญอย่างหนึ่งเพราะในอุปกรณ์ต่างชนิดกันก็ต้องการ แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่ แตกต่างกันในปัจจุบันได้มีการนำเอาเทคโนโลยีสมัยใหม่มาการพัฒนา ปรับปรุงและเปลี่ยนแปลง ทำให้ แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นไป แต่โดยทั่วไปแล้ว จะมีโครงสร้างพื้นฐานคล้ายๆกัน โดยแบ่ง ออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

- แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแบบเชิงเส้น (Linear Power Supply)
- แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแบบสวิตซ์ซิ่ง (Switching Power Supply)

2.2 หลักการทำงานของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง

สวิตซ์ซิ่งเพาเวอร์ซัพพลายโดยทั่วไปจะมียังค์ประกอบพื้นฐานที่คล้ายคลึงกัน และไม่ซับซ้อน มากนัก สำหรับสวิตซ์ซิ่งเพาเวอร์ซัพพลายในรายงานนี้ มีการทำงานดังแสดงในรูปที่ 2.1 ส่วนสำคัญของสวิตซ์ซิ่งเพาเวอร์ซัพพลายจะอยู่ที่ภาคคอนเวอร์เตอร์ สำหรับในรายงานนี้จะใช้เป็น วงจรฟูล-บริดจ์ คอนเวอร์เตอร์ ในการแปลงสัญญาณไฟกระแสตรงให้เป็นไฟสัญญาณพัลส์ และองค์ประกอบต่างๆ ของสวิตซ์ซิ่งเพาเวอร์ซัพพลายนั่นจะทำงานตามลำดับดังรูปที่ 2.1



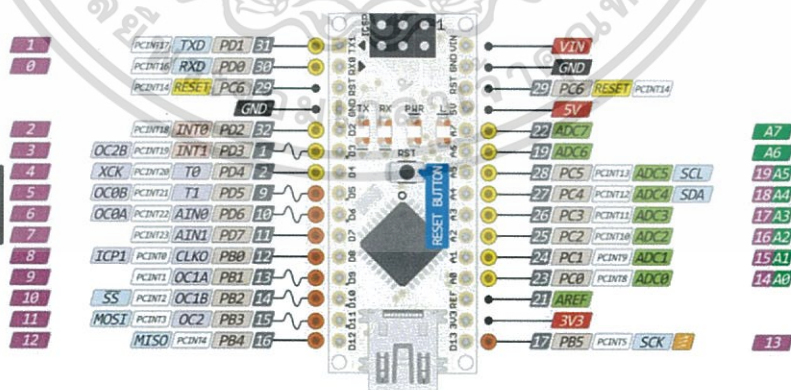
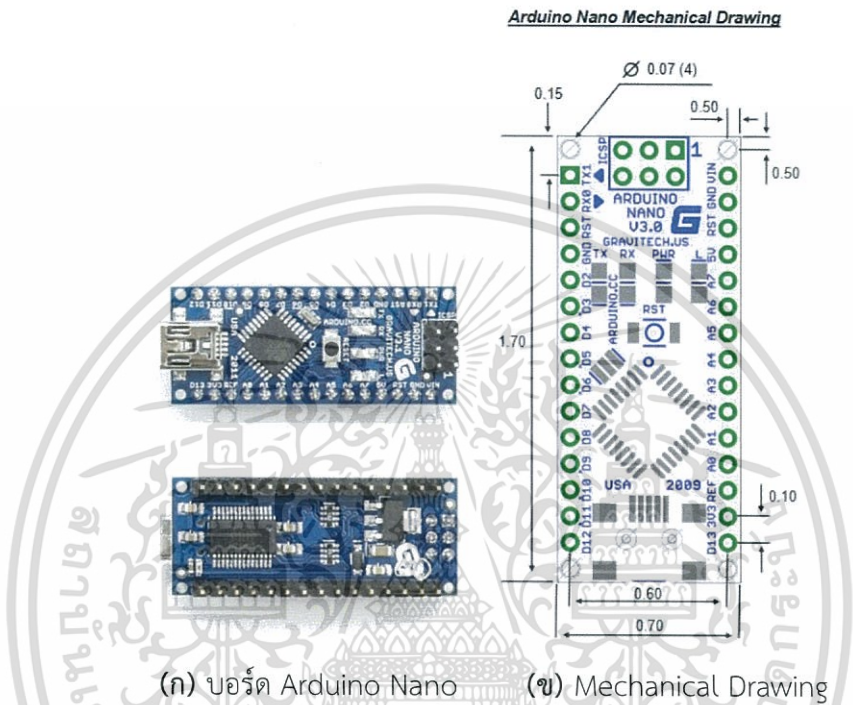
รูปที่ 2.1 Block diagram ของแหล่งจ่ายไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 วงจรควบคุม

วงจรควบคุมจะจ่ายสัญญาณ PWM จากบอร์ด Arduino รุ่น Arduino Nano

บอร์ด Arduino ที่ใช้งานนั้นจะเป็นรุ่น Arduino Nano เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ที่มี Atmega328 เป็นตัวประมวลผล ลักษณะภายนอกจะเป็นตามรูปที่ 2.2 (ก) ที่ Mechanical Drawing ของบอร์ดดูได้จากรูปที่ 2.2 (ข) และมีการจัดเรียงขาตามรูป 2.2 (ค)

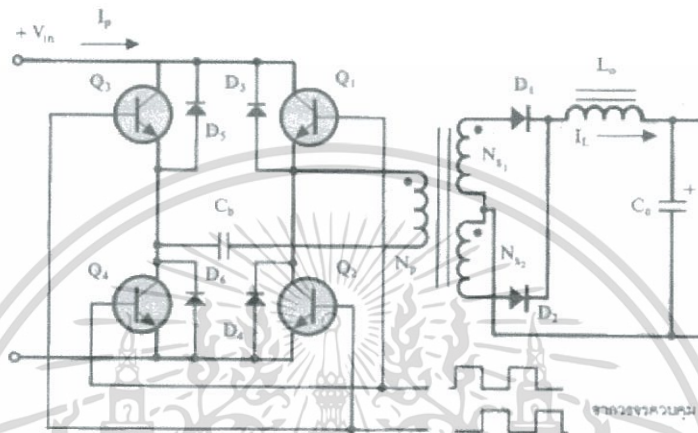


รูปที่ 2.2 Arduino Nano

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบฟูล-บริดจ์ (Full-Bridge converter)

วงจรฟูล-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ขณะทำงานจะมีแรงดันตกคร่อมขดไฟปฐมารีเท่ากับแรงดันอินพุต แต่แรงดันตกคร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์มีค่าเพียงครึ่งหนึ่งของแรงดันอินพุตเท่านั้น และค่ากระแสสูงสุดที่เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์แต่ละตัวนั้น มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่ากระแสสูงสุดในฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ที่กำลังขาออกเท่ากัน เนื่องจากข้อจำกัดด้านเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ลดน้อยลงไป กำลังงานสูงสุดที่ได้จากฟูล-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์จึงมีค่าสูง ตั้งแต่ 500 วัตต์ ถึง 1000 วัตต์



รูปที่ 2.3 วงจรคอนเวอร์เตอร์พื้นฐาน

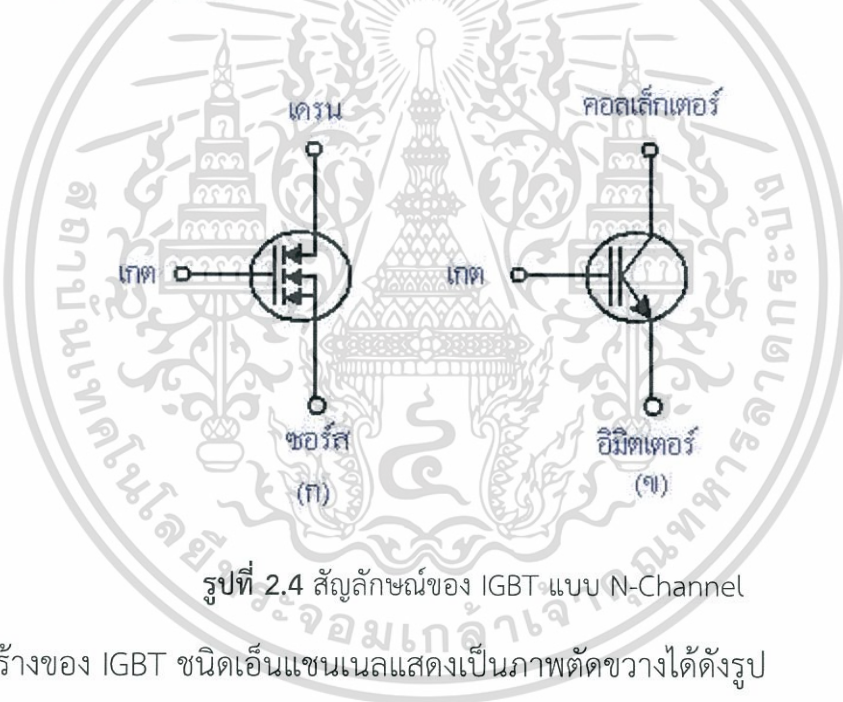
วงจรพื้นฐานของฟูล-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์แสดงในรูป 2.3 เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ทั้ง 4 ตัว จะทำงานโดยนำกระแสและหยุดนำกระแสสลับกันเป็นคู่ๆ ในแต่ละครึ่งคาบเวลา Q1 และ Q4 จะนำกระแสพร้อมกันในครึ่งคาบเวลา และเมื่อหยุดนำกระแส Q2 และ Q3 จะนำกระแสพร้อมกันในครึ่งคาบเวลาที่เหลือ สลับกันเช่นนี้เรื่อยไป ลักษณะการทำงานของวงจรที่ได้จึงเป็นเช่นเดียวกับฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ยกเว้นแรงดันตกคร่อมขดไฟปฐมารีจะมีค่าเท่ากับ $V_{in} - 2V_{ce(sat)}$ ดังนั้นผลของการทำงานของวงจรจึงเหมือนกับผลที่ได้จากฟูล-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์นั่นเอง ส่วนตัวเก็บประจุล้อยก C_b จะมีผลเช่นเดียวกับวงจรฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ จะเห็นได้ว่าแรงดันที่ตกคร่อม Q1 และ Q4 ขณะหยุดนำกระแสจะมีค่าเท่ากับ $V_{in} - V_{ceq2(sat)}$ และ $V_{in} - V_{ceq3(sat)}$ ตามลำดับ ส่วนแรงดันที่ตกคร่อม Q2 และ Q3 ขณะหยุดนำกระแสก็จะมีค่า $V_{in} - V_{ceq1(sat)}$ และ $V_{in} - V_{ceq4(sat)}$ ตามลำดับเช่นเดียวกัน ส่วนไดโอด D3-D6 ทำหน้าที่เป็นคอมมิวเตตติ้งไดโอดให้กับวงจร เพื่อป้องกัน Q1-Q4 เช่นเดียวกับฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์

2.3 องค์ประกอบหรืออุปกรณ์ของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง

2.3.1 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor or IGBT Transistor)

IGBT ค่อนข้างจะเป็นอุปกรณ์ที่ใหม่อยู่ แต่พอจะมีใช้กันบ้างและมีจำหน่ายกันหลายเบอร์ด้วยกันจึงมีสัญลักษณ์อยู่หลายรูปแบบด้วยกัน ขึ้นอยู่กับผู้ผลิตว่าจะใช้สัญลักษณ์ใดเป็นสัญลักษณ์ประจำสินค้าที่ผลิตขึ้น ส่วนมากจะมีอยู่ 2 แบบดังรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นสัญลักษณ์และชื่อเรียกขาต่างๆของ IGBT ชนิดเอ็นแชนเนลจากรูป

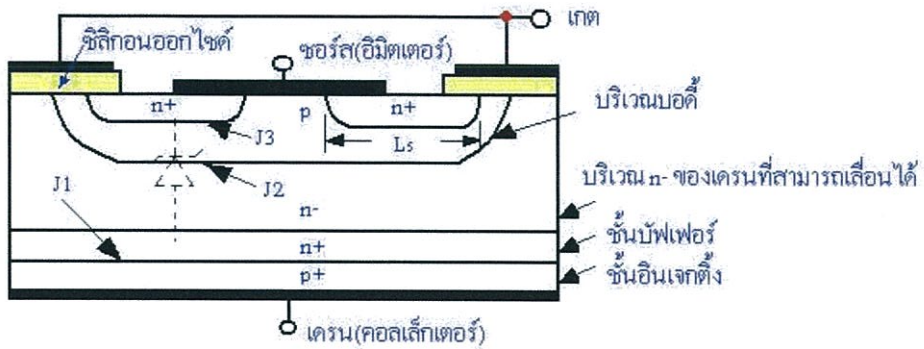
- (ก) จะเห็นว่ามีสัญลักษณ์คล้ายกับมอสเฟตมากเพียงแต่สัญลักษณ์จะมีลูกศรเพิ่มขึ้นมาตรงขาเดรน ลักษณะของลูกศรจะชี้เข้าหาตัวหรือชี้เข้าหาชั้นของซิลิคอนภายในตัว IGBT
- (ข) จะเหมือนกับสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ แต่ตรงขาเกต(หรือขาเบสของทรานซิสเตอร์) จะเพิ่มขีดขึ้นมาอีกหนึ่งขีด เพื่อให้เห็นว่าขีดที่เพิ่มมานั้นไม่ได้ต่อถึงกันโดยตรงกับขาที่ต่อออกมาภายนอก



รูปที่ 2.4 สัญลักษณ์ของ IGBT แบบ N-Channel

โครงสร้างของ IGBT ชนิดเอ็นแชนเนลแสดงเป็นภาพตัดขวางได้ดังรูป

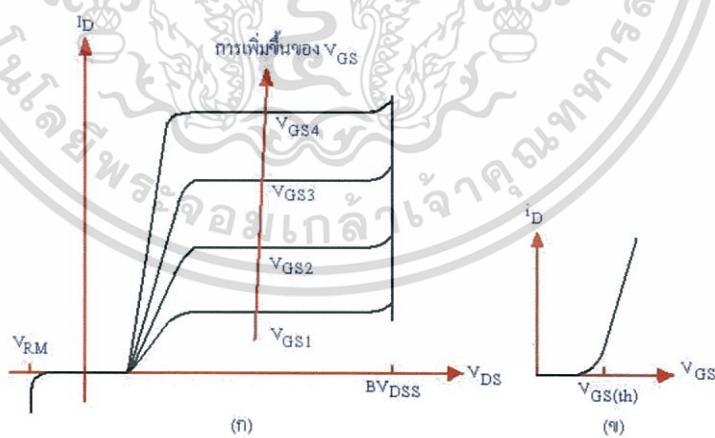
โครงสร้างส่วนมากจะมีลักษณะเหมือนมอสเฟต จะแตกต่างตรงที่ IGBT จะมีชั้น P+ หรือชั้นอิงเจกต์ติ้ง (injecting) ต่ออยู่ระหว่างขาเดรน ซึ่งในมอสเฟตจะไม่มี จากการที่ขาเกตถูกกันด้วยชั้นของซิลิคอนออกไซด์ (SiO₂) เป็นผลทำให้ความต้านทานอินพุตที่ขาเกตมีค่าสูงมากเหมือนกับเพาเวอร์มอสเฟต โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ช่วง 10 จิกะโอห์ม



รูปที่ 2.5 ภาพหน้าตัดโครงสร้างพื้นฐานของ IGBT

จากผลดังกล่าวทำให้ลักษณะของกราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของ IGBT มีลักษณะคล้ายกับกราฟของทรานซิสเตอร์ แต่การควบคุมกระแสเดรนจะอาศัยการควบคุมแรงดันระหว่างขาเกตและขาซอร์สมากกว่า การควบคุมกระแสที่ขานี้เหมือนกับทรานซิสเตอร์ ซึ่งกราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของ IGBT แสดงดังรูปที่ 2.6 (ก) และรูปที่ 2.6 (ข) เป็นกราฟคุณสมบัติการถ่ายโอนกระแสและแรงดัน

รูปกราฟแสดงให้เห็นว่าส่วนใหญ่ของเส้นกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงแต่จะเริ่มโค้งที่กระแสเดรนต่ำๆ นั่นก็คือจุดที่แรงดันระหว่างขาเกตและขาซอร์สต่ำลงใกล้แรงดันจุดเริ่มเปลี่ยนสภาวะการทำงาน (จุด threshold voltage: $V_{GS(th)}$) โดยถ้าแรงดันระหว่างเกตและซอร์สนี้ต่ำกว่าแรงดันที่จุด $V_{GS(th)}$ แล้ว IGBT จะอยู่ในสภาวะหยุดนำกระแสหรือคัทออฟ ในกรณีของ IGBT ชนิดพีแชนแนลนั้น คุณสมบัติจะคล้ายกับเอ็นแชนแนลแต่โครงสร้างและสัญลักษณ์มีลักษณะตรงกันข้ามกับเอ็นแชนแนล



รูปที่ 2.6 (ก) กราฟแสดงคุณสมบัติระหว่างกระแสและแรงดันของ IGBT

(ข) กราฟแสดงลักษณะสมบัติการถ่ายโอนของ IGBT

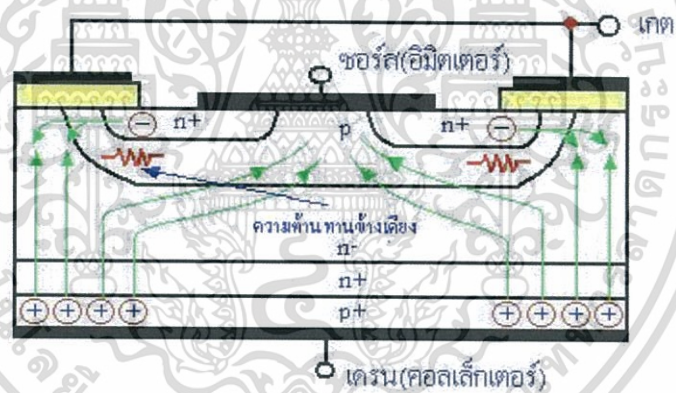
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะนำกระแส

ขาเดรนเมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรงคือเป็นบวกเมื่อเทียบกับซอร์สและแรงดันระหว่างเกตกับซอร์สมีค่าเกิน $V_{GS(th)}$ ประจุไฟฟ้าบวกที่เกิดจากแรงดันที่ขาเกตจะดึงเอาอิเล็กตรอนให้มารวมกันอยู่ในบริเวณภายใต้เกต ทำให้ชั้นบอดี้ตรงส่วนใต้เกตแปรสภาพเป็น n ทำให้เกิดการต่อกันของบริเวณ n - (drift region) เข้ากับบริเวณซอร์ส $n+$ (source region) ซึ่งการทำงานเช่นนี้เหมือนกับมอสเฟต

กระแสอิเล็กตรอนที่ไหลจากขาซอร์สผ่านบริเวณใต้เกตมายังบริเวณรอยเลื่อน n - จะรวมกับโฮลที่เป็นพาหะข้างน้อยที่ถูกฉีดมาจากชั้นอินเจกต์ติ้ง $p+$ เพราะรอยต่อ $J1$ ได้รับแรงดันไบอัสตรง ทำให้ IGBT อยู่ในสภาวะนำกระแสเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าจากเดรนไปซอร์สได้ การรวมกันของโฮลและอิเล็กตรอนภายในบริเวณ n - เรียกว่า การมอดูเลตสภาพนำ (conductivity modulation)

ผลการมอดูเลตนี้จะทำให้ความต้านทานของบริเวณ n - มีค่าต่ำลงเป็นการเพิ่มความสามารถในการขับผ่านกระแสได้สูงขึ้น ซึ่งมีลักษณะเหมือนเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ผลของความต้านทานที่ลดลงทำให้แรงดันตกคร่อมที่สภาวะนำกระแสลดต่ำลงด้วย การสูญเสียกำลังงานขณะนำกระแสจึงลดลงด้วยทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนและโฮลแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนและโฮลในขณะนำกระแส

สภาวะหยุดนำกระแส

เมื่อแรงดันระหว่างขาเกตและซอร์สลดลงต่ำกว่าแรงดัน $V_{GS(th)}$ จะทำให้มีแรงดันไม่เพียงพอสำหรับการแปรสภาพชั้นบอดี้ p เป็น n ได้ทำให้บริเวณ $n-$ ไม่ตรงกับบริเวณซอร์ส $n+$ IGBT จึงอยู่ในสภาวะหยุดนำกระแส ในสภาวะนี้รอยต่อ J_2 ที่ได้รับแรงดันไบอัสกลับจะทำให้เกิดกระแสรั่วไหลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้ยังทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะ (depletion region) ขึ้นที่รอยต่อ J_2 ด้วย บริเวณปลอดพาหะนี้จะขยายบริเวณกว้างขึ้นจนเกินเข้ามายังบริเวณ $n-$ มากกว่าที่จะขยายไปยังบริเวณชั้นบอดี้ p เพราะชั้นบอดี้ p มีความหนาแน่นของสารที่โด๊ปบริเวณรอยต่อ $n-$ มากเพียงพอที่จะทำให้การขยายบริเวณปลอดพาหะไม่สามารถแตะกับชั้นอินเจ็กต์ $p-$ ได้ ชั้นบัฟเฟอร์ $n+$ (buffer layer) ก็ไม่จำเป็นต้องทำให้เกิดขึ้น หรือไม่จำเป็นต้องโด๊ปสาร

ทั้งนี้เพราะการแตะกันของบริเวณทั้งสองจะทำให้เกิดการพังทลายทางด้านไบอัสตรงสำหรับ IGBT ที่ไม่การโด๊ปสารในชั้นบัฟเฟอร์ $n+$ นี้จะเรียกว่า IGBT แบบสมมาตรซึ่งจะมีอัตราทนแรงดันย้อนกลับ (VRM หรือ BVSDS) เหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

การลดบริเวณความหนาของ $n-$ ลงแต่ยังคงความสามารถของอัตราทนแรงดันตรงไว้ สามารถทำได้โดยเพิ่มชั้นบัฟเฟอร์ $n+$ เข้าไปเพื่อป้องกันการแตะกันของบริเวณปลอดพาหะกับบริเวณอินเจ็กต์ $p+$ ซึ่งจะเรียก IGBT ชนิดนี้ว่า IGBT แบบไม่สมมาตร และจากการลดความหนาแน่นของบริเวณรอยต่อ $n-$ จะช่วยส่งผลให้เกิดข้อดีสองประการคือ

1. ทำให้แรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสต่ำลง เป็นผลให้การสูญเสียกำลังงานลดน้อยลงด้วย
2. ช่วยลดช่วงเวลาหยุดนำกระแสให้สั้นลงได้

แต่ข้อเสียของการเพิ่มชั้นบัฟเฟอร์ $n+$ ก็คือจะลดความสามารถของอัตราทนแรงดันย้อนกลับให้เหลือน้อยลงเพียงไม่กี่สิบลีโวลต์ ทั้งนี้เมื่อ IGBT ได้รับแรงดันไบอัสกลับที่ขาเดรน รอยต่อ J_1 ซึ่งทั้งสองข้างมีความหนาแน่นในการโด๊ปของสารมาก จะไม่สามารถทนแรงดันย้อนกลับได้สูง ดังนั้น IGBT ชนิดนี้ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

การแลตซ์ใน IGBT

นอกจากโฮลส่วนใหญ่ที่รวมกับอิเล็กตรอนภายใต้บริเวณ $n-$ แล้วยังมีกระแสโฮลบางส่วนที่ไหลข้ามบริเวณ $n-$ เข้าสู่บริเวณชั้นบอดี้ p โดยตรงผลของกระแสโฮลนี้ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมความต้านทานข้างเคียง (lateral resistance) ดังรูปที่ 2.9 ถ้าแรงดันนี้มีค่ามากพอคือประมาณ 0.7 โวลต์ จะทำให้รอยต่อ J_3 ได้รับไบอัสตรง เป็นผลให้อิเล็กตรอนจากบริเวณซอร์ส $n+$ ถูกฉีดเข้ามาในชั้นบอดี้ p ถ้าดูจากรูปที่ 2.9(ค) จะหมายถึงขาเบสและอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็นได้รับแรงดันไบอัสตรงส่งผลให้ทรานซิสเตอร์ซึ่งแฝงอยู่ภายในโครงสร้างของ IGBT อยู่ในสภาวะแลตซ์การนำกระแส ทำให้ที่ขาเกตไม่สามารถควบคุมปริมาณของกระแสเดรนได้อีกต่อไป แต่การควบคุมของกระแสเดรนนี้จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นอยู่กับตัวต้านทานที่นำมาต่อในวงจรภายนอก ถ้าหากมีการแล้ตซ์เกิดขึ้นเป็นเวลานาน อาจทำให้ IGBT เสียหายได้ เพราะมีการสูญเสียกำลังงานเกินค่าพิกัดที่ทนได้ ส่วนใหญ่หรือมาตรฐานคู่มือการผลิต มักจะมีการบอกค่ากระแสเดรนสูงสุด ที่สามารถไหลผ่าน IGBT ได้โดยยังไม่เกิดการแล้ตซ์ขึ้น (IDM) แต่เนื่องจากกระแสเดรนถูกกำหนดหรือควบคุมโดยตรงจากแรงดันระหว่างขาเกตและซอร์ส บางครั้งคู่มือบอกแรงดันสูงสุดระหว่างขาเกตและซอร์สสูงสุดที่จะทำให้ไม่เกิดการแล้ตซ์ แทนการบอกค่ากระแสเดรนสูงสุด (IDM)

การแล้ตซ์ที่กล่าวถึงข้างต้นเรียกว่าการแล้ตซ์ใน โหมดสแตติก เพราะเกิดขึ้นเมื่อกระแสที่ไหลในสภาวะนำกระแสมีค่าเกิน IDM แต่ลักษณะการแล้ตซ์นี้ก็สามารถเกิดขึ้นได้ เรียกว่า โหมดไดนามิก ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนการทำงานจากสภาวะนำกระแสเข้าสู่สภาวะหยุดนำกระแสได้ด้วย บางครั้งการแล้ตซ์นี้เกิดขึ้นได้แม้ว่ากระแสเดรนขณะนำกระแสยังมีค่าต่ำกว่าค่า IDM ก็ตาม ทั้งนี้เพราะเมื่อ IGBT เริ่มหยุดนำกระแส กระแสเดรนจะตกลงอย่างรวดเร็วรอยต่อ J2 จะต้องรับแรงดันย้อนกลับที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นกัน

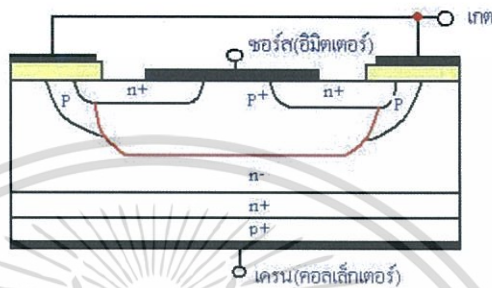
ผลที่เกิดขึ้นทำให้บริเวณปลอดภัยขยายบริเวณชั้นบอด้ p โดยเฉพาะจะขยายเข้าสู่บริเวณ n-มากกว่า เพราะมีความหนาแน่นของการโด๊ปต่ำกว่า การขยายบริเวณปลอดภัยอย่างรวดเร็ว จะทำให้โฮลที่ค้างอยู่บริเวณ n- ขณะนำกระแสและยังไม่ได้รวมกับอิเล็กตรอนหลุดรอดจากการขัดขวางของบริเวณปลอดภัยเข้าไปสะสมอยู่ในบริเวณรอยต่อ J2 เป็นการเพิ่มกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานข้างเคียงให้สูงขึ้น ทำให้เทริสเตอร์ภายใน IGBT เกิดการแล้ตซ์ขึ้นได้ เมื่อเกิดการแล้ตซ์ขึ้นแรงดันตกคร่อมขาซอร์สและเดรนขณะนำกระแสจะมีค่าต่ำกว่าระดับปกติ นอกจากนี้การแล้ตซ์ยังสามารถเกิดขึ้นได้อีก เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิรอยต่อ ในขณะที่กระแสเดรนยังมีค่าต่ำกว่า IDM นั้นเอง

การป้องกันการแลตช์

การหลีกเลี่ยงการแลตช์ของ IGBT สามารถทำได้ทั้งผู้ผลิตและผู้ใช้งานเองผู้ผลิตอาจจะ ออกแบบโครงสร้างในส่วนบริเวณบอดี้ p ให้มีความต้านทานข้างเคียงค่าต่ำที่สุด เพื่อจะได้ค่า IDM เพิ่มขึ้นให้มากที่สุด ซึ่งเป็นการลดโอกาสที่จะเกิดการแลตช์ลงได้

วิธีแรกอาจทำได้โดยลดความกว้างของบริเวณซอร์ส n+ ลงนั่นคือลดค่า L_s ลงนั่นเอง

วิธีที่สองเป็นการแบ่งระดับความหนาแน่นในการโด๊ปสารของบริเวณบอดี้ p ดังในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การแบ่งระดับความหนาแน่นในการโด๊ปสารของบริเวณบอดี้

จะเห็นว่าบริเวณบอดี้ p ภายใต้เกตจะโด๊ปด้วยความหนาแน่นในระดับปกติ 10^{16} cm^3 และมีความหนาแน่นน้อยกว่าของบริเวณซอร์ส n+ แต่ส่วนอื่นที่เหลือของบริเวณบอดี้ p จะโด๊ปด้วยความหนาแน่นที่มากกว่าคือ 10^{19} cm^3 รวมถึงความหนาแน่นก็จะมากกว่าด้วยการทำเช่นนี้จะทำให้เพิ่มความสามารถในการนำกระแสให้สูงขึ้น เป็นการลดความต้านทานข้างเคียงให้น้อยลงได้

สำหรับผู้ใช้งานก็สามารถป้องกันการแลตช์ในโหมดสแตติกได้ โดยออกแบบไม่ให้กระแสที่ไหลในโหนดโวลเทจเกินค่ากระแส IDM และป้องกันการแลตช์ในโหมดไดนามิกได้ โดยหน่วงเวลาขณะหยุดนำกระแสให้ยาวขึ้น เพื่อให้โวลที่ค้างอยู่ในบริเวณ n- มีเวลาพอที่จะรวมกับอิเล็กตรอน เป็นการลดกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานข้างเคียงให้น้อยลงได้ การหน่วงเวลาขณะหยุดนำกระแสให้ยาวนานขึ้น ทำได้โดยการเพิ่มความต้านทานภายนอกอนุกรมเข้ากับขาเกตของ IGBT

วงจรมูลของ IGBT

วงจรมูลของ IGBT แสดงไว้ในรูปที่ 2.8 โดยในรูป (ก) นั้นจะเห็นว่าในบริเวณบอดี้ p ชั้นบริเวณ n- และชั้นอิงเจ็กต์ p+ จะคล้ายกับทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นพีเอ็น โดยแทนได้ด้วยขาคอลเล็กเตอร์ เบส และอิมิตเตอร์ ตามลำดับและบริเวณภายใต้เกตก็จะแทนได้ด้วยมอสเฟตซึ่งจะมีความต้านทานบริเวณ n- เชื่อมขาเบสของทรานซิสเตอร์พีเอ็นพีเข้ากับขาเดรนของมอสเฟต ซึ่งเมื่อเขียนวงจรมูลออกมาจะได้วงจดังรูปที่ 2.9 (ข)

จากรูปที่ 2.9 (ข) จะเห็นว่าเป็นวงจรถาร์ลิ่งตัน โดยมีมอสเฟตเป็นตัวขับทรานซิสเตอร์พีเอ็นพี แต่มีจุดพิเศษที่แตกต่างจากวงจรถาร์ลิ่งตันทั่วไป คือกระแสทรานซิสเตอร์ส่วนใหญ่จะไหลจากอิมิตเตอร์มายังเบส ผ่านความต้านทานบริเวณรอยเลื่อน และผ่านขาเดรนของมอสเฟตมาจบลงที่ขาซอร์สจะมีกระแสส่วนน้อยเท่านั้นที่ไหลจากอิมิตเตอร์มายังคอลเล็กเตอร์และขาซอร์สสำหรับวงจรถาร์ลิ่งตันในรูปที่ 2.9 (ค) จะแสดงให้เห็นว่าภายใน IGBT มีไทรสเตอร์แฝงอยู่ด้วย โดยดูได้จากทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นพีเอ็นและพีเอ็นพีต่อเข้าด้วยกันในลักษณะที่มีการป้อนกลับ ทำให้เห็นได้ชัดถึงเหตุที่ทำให้เกิดการแลตช์ของ IGBT

ถ้ากระแสส่วนน้อยที่ไหลผ่านจากอิมิตเตอร์มายังคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์พีเอ็นพีผ่านความต้านทานข้างเคียงแล้วทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมความต้านทานสูงกว่า 0.7 โวลต์ ทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็นจะนำกระแส ส่งผลให้เกิดการแลตช์ขึ้นใน IGBT สำหรับแรงดันตกคร่อมขาเดรนและซอร์สของ IGBT ขณะนำกระแส (VDS(on)) สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

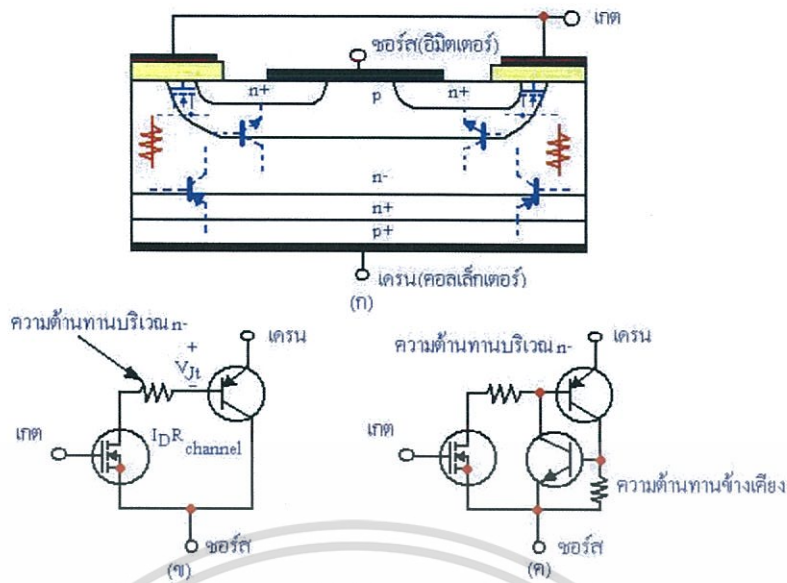
$$VDS(on) = Vj1 + Vdrift + IDRchannel \dots\dots\dots(2.1)$$

เมื่อ Vj1 เป็นแรงดันไบอัสตรงที่ตกคร่อมรอยต่อพีเอ็นพีจึงมีค่าค่อนข้างคงที่ จะมีการเปลี่ยนแปลงบ้างก็เล็กน้อย เพราะมีความสัมพันธ์โดยตรงในลักษณะเอ็กซ์โปเนนเชียลกับกระแส ทำให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.7 โวลต์ ถึง 1 โวลต์

Vdrift เป็นแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานบริเวณรอยเลื่อน ซึ่งความต้านทานนี้มีค่าค่อนข้างคงที่ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าแรงดันในมอสเฟตแล้วจะมีค่าน้อยกว่าเพราะผลของการมอดูเลตสภาพนำที่เพิ่มขึ้นใน IGBT

- Rchannel เป็นค่าความต้านทานในย่าน 1 โอห์ม ถึง 1,000 โอห์ม มีค่าค่อนข้างคงที่
- IDRchannel เป็นแรงดันตกคร่อมมอสเฟต

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า VDS(on) จะมีค่าสูงมากขึ้นตามค่ากระแสทรานซิสเตอร์ที่สูงขึ้นโดยทั่วไป IGBT จะสามารถทำงานได้ในอุณหภูมิรอยต่อสูงสุดถึง 150 องศาเซลเซียส และผลของการเปลี่ยนอุณหภูมิจากค่าอุณหภูมิห้องไปถึงค่าสูงสุดนี้ จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า VDS(on) เพียงเล็กน้อยเท่านั้น เพราะ IGBT มีค่า VDS(on) เป็นผลรวมระหว่างแรงดันตกคร่อมมอสเฟตที่มีสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิเป็นบวก (อุณหภูมิสูงขึ้นแรงดันตกคร่อมความต้านทานบริเวณรอยเลื่อนจะสูงขึ้นตาม) กับแรงดันตกคร่อมความต้านทานบริเวณรอยเลื่อนที่มีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเป็นลบ



รูปที่ 2.9 (ก) แสดงโครงสร้างที่มีทรานซิสเตอร์และมอสเฟตฝังอยู่ภายใน
 (ข) วงจรสมมูลสำหรับการทำงานสภาพปกติของ IGBT
 (ค) วงจรสมมูลที่แสดงส่วนของไทรสเตอร์ที่แฝงอยู่ใน IGBT

ลักษณะการสวิตช์

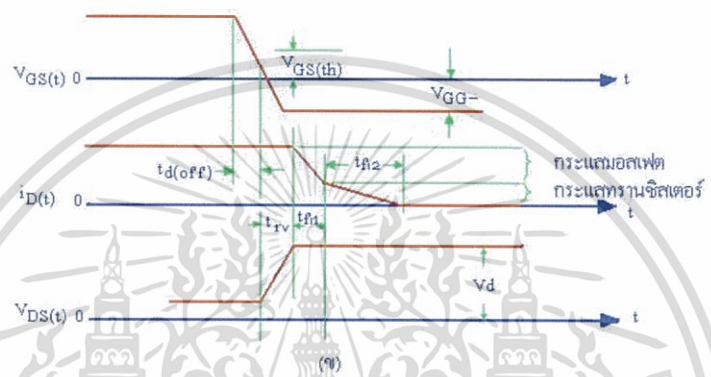
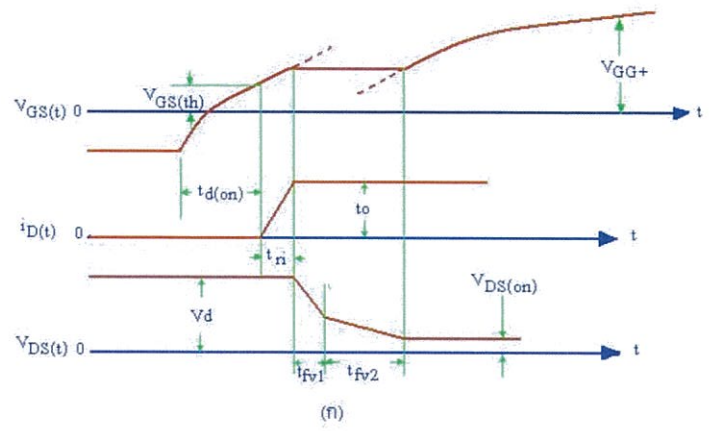
ลักษณะของสัญญาณกระแสและแรงดันในช่วงเวลาที่เกิดการนำกระแสและหยุดนำกระแสแสดงไว้ในรูปที่ 2.10

โดยช่วงเวลาในการนำกระแสของ IGBT แสดงไว้ในรูปที่ 2.10 (ก) ซึ่งมีลักษณะการนำกระแสคล้ายกับการนำกระแสของมอสเฟต คือจะมีเวลาก่อนการนำกระแส ($t_d(on)$) นับตั้งแต่เวลาที่แรงดันระหว่างเกตกับซอร์สอยู่ในช่วง V_{Gg-} จนถึง $V_{Gg(th)}$ ความจริงแล้วการป้อนแรงดันนี้จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดจากค่า V_{Gg-} เป็น V_{Gg+} แต่มีลักษณะเป็นเอ็กซ์โปเนนเชียล

เหตุที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากผลการชาร์จประจุของตัวเก็บประจุระหว่างเกตกับซอร์สและเกตกับเดรนภายใน IGBT แรงดันที่ขาเดรนจะยังคงที่ในช่วงเวลาขาขึ้น (t_{ri}) หรือในช่วงเวลาที่กระแสเดรนยังไม่ถึงค่ากระแสทำงาน (I_o) หลังจากนั้นกระแสเดรนก็จะคงที่แต่แรงดันจะตกลงสู่ค่า $V_{SD(on)}$ โดยแบ่งช่วงเวลาลงเป็นสองช่วงคือช่วง t_{fv1} เป็นช่วงที่ทำงานอยู่ในย่านความต้านทานสูง ($R_{channel}$) ส่วน t_{fv2} ช่วงที่ทำงานอยู่ในช่วงความต้านทานต่ำ ($R_{channel}$)

ในรูปที่ 2.10 (ข) เป็นรูปแสดงลักษณะกระแสและแรงดันในช่วงเวลาที่ IGBT หยุดนำกระแส จะเห็นได้ว่ากระแสเดรนยังคงที่อยู่ตลอดเวลาที่แรงดันขาเดรนเพิ่มขึ้น และมีช่วงเวลาลงของกระแสเดรนที่แตกต่างชัดเจนสองช่วงโดยช่วงแรก t_{fi1} จะเป็นช่วงหยุดนำกระแสของมอสเฟตภายใน IGBT และช่วง t_{fi2} จะเป็นช่วงหยุดนำกระแสของทรานซิสเตอร์ที่เอ็นพี ซึ่งจะช้ากว่ามอสเฟต ทำให้ช่วงเวลานี้นานกว่าช่วงแรกและมีการสูญเสียกำลังงานมากในช่วงนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 (ก) ลักษณะของกระแสและแรงดันขณะนำกระแส
(ข) ลักษณะของกระแสและแรงดันขณะหยุดนำกระแส

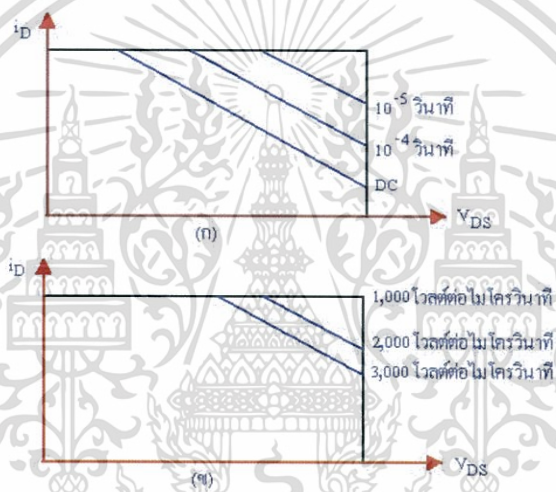
พื้นที่การทำงานที่ปลอดภัย

IGBT มีพื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยทั้งในระหว่างนำกระแสและหยุดนำกระแส โดยมีพื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยในขณะไบอัสตรง (forward bias safe operating area : FBSOA) ที่กว้างมากเกือบได้เป็นสี่เหลี่ยมสำหรับเวลาในการสวิตช์ที่สั้นๆ แต่จะแคบลงเมื่อเวลาในการสวิตช์ยาวนานขึ้นซึ่งถ้าเทียบกับเพาเวอร์มอสเฟตแล้ว IGBT จะทำงานได้ในช่วงพื้นที่ที่กว้างกว่าเมื่อเวลาในการสวิตช์ที่เท่ากัน

ในช่วงระยะเริ่มนำกระแสและขณะที่นำกระแสแล้ว จุดการทำงานของ IGBT จะต้องมีความแรงดันและกระแสที่ขาเดรนอยู่ในพื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยในช่วงไบอัสตรงเสมอ ดังรูปที่ 2.11 (ก) หากไม่เช่นนั้นแล้วจะทำให้เกิดการเสียหายขึ้นกับ IGBT จากรูปพื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยของ IGBT นี้แสดงถึงขีดจำกัดของกระแสเดรน อัตราทนแรงดันไหลตรง และอุณหภูมิรอยต่อของ IGBT ตามลำดับ

สำหรับการทำงานที่ปลอดภัยในช่วงไบอัสกลับ (reverse bias safe operating area : RBSOA) จะแตกต่างจากในช่วงไบอัสตรง โดยในรูปนี้จะแสดงค่าจำกัดของค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ขาเดรนต่อเวลา (dv_{DS}/dt) ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงระหว่างหยุดนำกระแส แทนขีดจำกัดทางด้านอุณหภูมิรอยต่อ และจะมีพื้นที่แคบลงถ้า dv_{DS}/dt มีค่าสูงมากขึ้น ส่วนเหตุผลที่ถูกจำกัดโดยค่านี้เพราะไม่ต้องการให้เกิดการแลตซ์ขึ้นที่ IGBT

ค่า dv_{DS}/dt นี้จะมีผลโดยตรงกับช่วงเวลาหยุดนำกระแส หมายความว่าถ้ามีอัตราการเปลี่ยนแปลงเร็วจะทำให้ช่วงเวลาหยุดนำกระแสสั้นลง แต่ก็ยังถือว่าขีดจำกัด dv_{DS}/dt ของ IGBT มีค่าสูงมาก เมื่อเทียบกับอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์ตัวอื่นๆ ดังนั้นความจำเป็นในการใช้วงจร snubber เพื่อป้องกันการแลตซ์ก็ไม่มีมีความจำเป็นต้องใช้ และการควบคุมค่า dv_{DS}/dt ที่เกิดขึ้นยังทำได้ง่ายขึ้นด้วยการออกแบบวงจรชั้บเบตที่มีค่าความต้านทานที่ต่อกับขาเกตและค่า VGG- ที่เหมาะสม



รูปที่ 2.11 (ก)พื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยในสภาวะไบอัสตรง
(ข)พื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยในสภาวะไบอัสกลับ

2.3.2 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)

หม้อแปลงไฟฟ้า(Transformer) คือ เครื่องกลไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ใช้เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยสามารถเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า(Voltage) ให้เพิ่มขึ้นเรียกว่า “Step up Transformer” และให้ลดลงเรียกว่า “Step down Transformer” แต่ไม่เปลี่ยนกำลังไฟฟ้า (Power/Watt) และความถี่(Frequency/Hz)

โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้ามีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 3 ส่วน คือ แกนเหล็ก ขดลวดตัวนำ และฉนวน (และอาจมีส่วนประกอบย่อยซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของหม้อแปลง เช่น หม้อแปลงขนาดใหญ่ อาจมีถังบรรจุหม้อแปลง น้ำมันหม้อแปลง และขั้วของหม้อแปลง เป็นต้น)

แกนเหล็กของหม้อแปลงจะมีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ เคลือบด้วยฉนวน เรียกกันว่า แผ่นลามิเนต

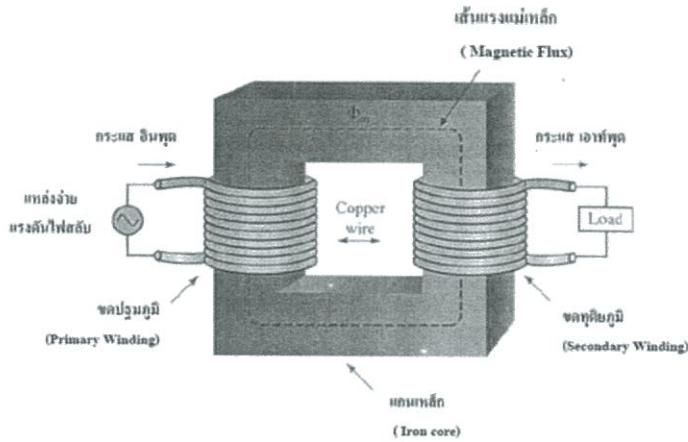
ขดลวดตัวนำของหม้อแปลงจะมีลักษณะเป็นขดลวดทองแดงหรืออลูมิเนียมหุ้มด้วยฉนวน โดยทั่วไป หม้อแปลงจะมีขดลวด 2 ชุด คือ ขดลวดปฐมภูมิ(Primary Winding) และขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Winding)

ฉนวนของหม้อแปลงจะมีไว้เพื่อป้องกัน ไม่ให้ขดลวดสัมผัสกับส่วนที่เป็นแกนเหล็ก และป้องกันไม่ให้ขดลวดแต่ละชั้นสัมผัสกัน

หลักการทำงาน

การทำงานของหม้อแปลงใช้การส่งถ่ายพลังงานไฟฟ้าจากวงจรหนึ่ง(ขดลวดปฐมภูมิ-Primary Winding) ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามาจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก(Flux) และแรงแม่เหล็ก (Magnetomotive Force) ขึ้นในแกนเหล็ก(Iron Core) กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจึงสลับขั้วกลับไปกลับมาด้วยความเร็วเท่ากับความถี่ไฟฟ้า (Frequency) เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ติดกับขดลวดที่พันอยู่บนแกนเหล็ก ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้า(Induce EMF) ไปยังอีกวงจรหนึ่ง(ขดลวดทุติยภูมิ – Secondary Winding) ส่งถ่ายเป็นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าออกมา โดยมีความถี่ไฟฟ้าเท่ากับความถี่ไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามา (ที่ใช้กันอยู่ปกติได้แก่ 50-60 เฮิร์ตซ์)

การทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าจะไม่มีส่วนใดเคลื่อนที่เหมือนมอเตอร์ จึงมีการสูญเสียกำลังงานในขณะที่ทำงานน้อยกว่ามอเตอร์



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า

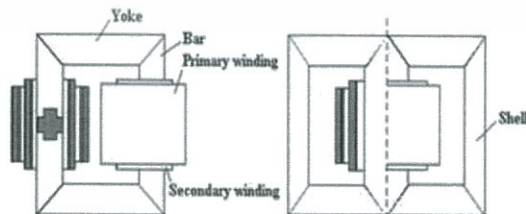
ประเภทของหม้อแปลง

หม้อแปลงไฟฟ้าสามารถจำแนกชนิด หรือประเภทตามลักษณะต่างๆ เช่น

แบ่งตามลักษณะของแกนเหล็ก

- 1) แกนเหล็กแบบคอร์ (Core Type) แกนเหล็กจะเป็นแผ่นเหล็กบางๆ มีลักษณะเป็นรูป L-L หรือ U-I ประกอบเข้าด้วยกัน จะมีวงจรแม่เหล็กวงจรเดียว-วงจรเดียว หรือวงจรแม่เหล็กแบบอนุกรม (ขดลวดด้านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิ จะถูกพันอยู่บนแกนเหล็กทั้งสองด้านแยกกันอยู่คนละข้าง)
- 2) แกนเหล็กแบบเชลล์ (Shell Type) แกนเหล็กจะเป็นแผ่นเหล็กบางๆ มีลักษณะเป็นรูป E-I เมื่อประกอบเข้าด้วยกัน จะมีวงจรแม่เหล็ก 2 วง หรือวงจรแม่เหล็กแบบขนาน (ขดลวดด้านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิ จะถูกพันอยู่บนแกนกลางของแกนเหล็กทั้งสอง ซึ่งจะพันทับกันอยู่)

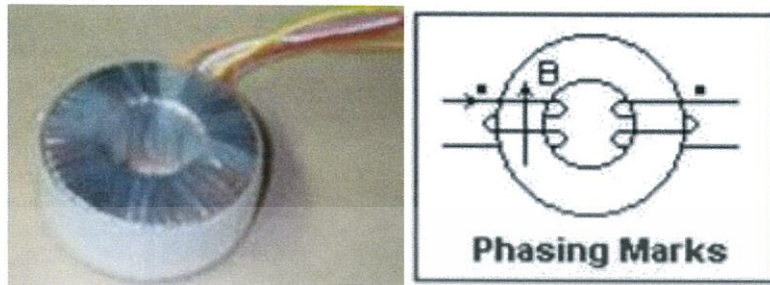
แกนเหล็กแบบเชลล์นี้ อาจแบ่งออกเป็น แบบแกนเดี่ยว(แผ่นเหล็กมีลักษณะเป็นรูป E-I ประกอบเข้าด้วยกัน) หรือชนิดแกนเหล็กแบบกระจาย (แผ่นเหล็กเมื่อประกอบขึ้นแล้ว จะมีวงจรแม่เหล็กมีหลายวงจร กระจายรอบขดลวดซึ่งพันอยู่ตรงกลาง)



รูปที่ 2.13 แกนเหล็กแบบคอร์และแบบเชลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

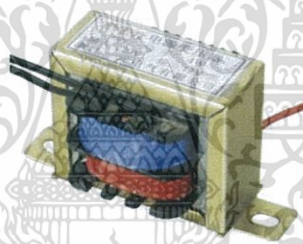
- 3) แกนเหล็กแบบทอรรอยด์ (Toroid Type) แกนเหล็กจะเป็นแผ่นเหล็กบางๆมีลักษณะเป็นวงแหวน เมื่อประกอบเข้าด้วยกันจะมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก (ขดลวดด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ จะถูกพันรอบแกนเหล็ก และเรียงเส้นกันอย่างเป็นระเบียบ) แกนเหล็กหม้อแปลงชนิดนี้จะมีค่าการสูญเสียต่ำ และมีประสิทธิภาพสูง



รูปที่ 2.14 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบทอรรอยด์

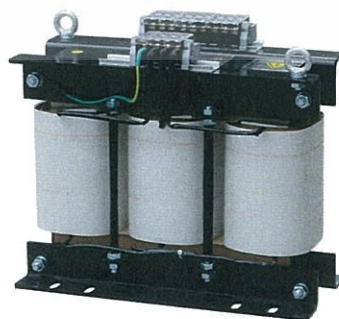
แบ่งตามชนิดของระบบไฟฟ้า

- 1) หม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียว (Single Phase Transformer) หมายถึง หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้กับระบบไฟฟ้าเฟสเดียว ประกอบด้วยขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิหนึ่งชุด



รูปที่ 2.15 หม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียว

- 2) หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส (Three Phase Transformer) หมายถึง หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้กับระบบไฟฟ้า 3 เฟส ดังนั้นจึงมีขดลวดด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิอย่างละ 3 ชุด และอาจต่อเข้าด้วยกัน เป็นแบบวายหรือสตาร์ (Wye or Star Connection) หรืออาจต่อเข้าด้วยกันเป็นแบบเดลต้า (Delta Connection)



รูปที่ 2.16 หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบ่งตามลักษณะการใช้งาน

- 1) หม้อแปลงกำลัง (Power Transformer) เป็นหม้อแปลงที่ใช้สำหรับการจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งจะมีค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้งานสูงและแรงดันไฟฟ้าใช้งานอย่างต่อเนื่อง พิกัดของหม้อแปลงจะเหมือนพิกัดของเครื่องจักรที่ใช้ไฟฟ้าสลับ คือกำหนดค่าเป็นโวลท์-แอมแปร์ (VA)
- 2) หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Transformer) หมายถึง หม้อแปลงที่ใช้จ่ายไฟให้กับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จะมีขนาดไม่เกิน 100VA
- 3) หม้อแปลงเครื่องมือวัด (Instrument Transformer) หมายถึง หม้อแปลงที่ใช้สำหรับวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้า ทั้งในวงจรไฟฟ้ากำลัง และวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เรียกว่า หม้อแปลงความต่างศักย์ (Potential Transformer) และหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า (Current Transformer)
- 4) หม้อแปลงเฉพาะงาน หมายถึง หม้อแปลงซึ่งจะครอบคลุมหลายแบบ และหลายลักษณะการใช้งาน รวมถึงอุปกรณ์ที่ใช้งานร่วมด้วย ได้แก่ หม้อแปลงแรงดันคงที่ หม้อแปลงกระแสคงที่ หม้อแปลงเฟอร์โรเรโซแนนซ์ (Ferroresonance Transformer) และหม้อแปลงหลายแทป (Multi Tap Transformer)

แบ่งตามความถี่ที่ใช้งาน

- 1) หม้อแปลงกำลัง เป็นหม้อแปลงที่ใช้งานในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยมีความถี่คงที่ตามความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลัง
- 2) หม้อแปลงย่านความถี่เสียง เป็นหม้อแปลงที่ใช้สำหรับงานสื่อสารที่ย่านความถี่เสียง
- 3) หม้อแปลงความถี่สูง เป็นหม้อแปลงที่ใช้งานย่านความถี่สูงมาก (Ultra High Frequency)
- 4) หม้อแปลงความถี่กว้าง เป็นหม้อแปลงที่ใช้งานวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ทำงานในย่านความถี่กว้าง
- 5) หม้อแปลงความถี่แคบ เป็นหม้อแปลงที่ใช้งานวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ออกแบบให้ใช้งานย่านความถี่เฉพาะ
- 6) หม้อแปลงสัญญาณพัลส์ (Pulse Transformer) เป็นหม้อแปลงที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่ทำงานเพื่อส่งสัญญาณพัลส์ ทำงานด้านไฟฟ้ากำลัง หรืออิเล็กทรอนิกส์กำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบ่งตามลักษณะการพันขดลวด

- 1) หม้อแปลงแบบแยกขด (Ordinary Transformer / Isolate Transformer) หมายถึง หม้อแปลงที่มีขดลวดปฐมภูมิ และขดลวดทุติยภูมิแยกออกจากกันโดยเด็ดขาด
- 2) หม้อแปลงแบบอัตโนมัติ (Auto Transformer) หมายถึง หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิเป็นขดลวดชุดเดียวกัน

โวลท์เตจเรกกูเลชัน และประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

โวลท์เตจเรกกูเลชัน (Voltage regulation)

เนื่องจากแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อมีโหลดกับไม่มีโหลดนั้น จะแตกต่างกันมากบ้างน้อยบ้าง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับหลายสิ่งด้วยกัน เช่น ขึ้นอยู่กับแกนเหล็ก การอัดแกนเหล็ก การพันขดลวด รวมถึงการออกแบบที่ดี เป็นต้น

ถ้าแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อไม่มีโหลด กับเมื่อมีโหลดต่างกันมาก หม้อแปลงตัวนั้นก็ไม่ได้ดี ถ้าแรงดันเมื่อไม่มีโหลดกับเมื่อมีโหลดแตกต่างกันน้อย หรือออกแบบให้ไม่แตกต่างกันเลย แสดงว่าการควบคุมแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้าดี

สิ่งที่บอกอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของขดลวดทางด้านทุติยภูมิเรียกว่า โวลท์เตจเรกกูเลชัน (Voltage regulation)

ความสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า (Losses)

หม้อแปลงไฟฟ้านับได้ว่าเป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่มีการสูญเสียน้อยที่สุด เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับเครื่องกลไฟฟ้าชนิดอื่น เช่น มอเตอร์ หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพราะหม้อแปลงไฟฟ้าไม่มีส่วนประกอบใดๆที่เคลื่อนที่ได้ ดังนั้นจึงไม่มีการสูญเสียเนื่องจากความฝืดและแรงต้านจากลม จะมีการสูญเสียเพียงสองส่วนเท่านั้น คือ การสูญเสียในแกนเหล็ก และการสูญเสียในขดลวดตัวนำ

การสูญเสียในแกนเหล็กจะมีค่าไม่สูงนักและมีค่าคงที่ตลอดเวลาไม่ว่าโหลดจะเปลี่ยนแปลงอย่างไร ส่วนการสูญเสียในขดลวดตัวนำ จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตามการเปลี่ยนแปลงของโหลด ถ้าโหลดมากการสูญเสียในขดลวดตัวนำก็มาก ถ้าโหลดน้อยการสูญเสียในขดลวดตัวนำก็น้อย

ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

ประสิทธิภาพของหม้อแปลง หมายถึง ความสามารถในการทำงานของหม้อแปลง ซึ่งจะเท่ากับอัตราส่วนระหว่างกำลังขาออก (Power Output) ต่อ กำลังขาเข้า (Power Input)

ถ้ากำลังขาออกกับกำลังขาเข้ามีค่าแตกต่างกันมาก แสดงว่าหม้อแปลงมีประสิทธิภาพต่ำ แต่ถ้ามูลค่ากำลังขาออกกับกำลังขาเข้ามีค่าใกล้เคียงกันก็แสดงว่าหม้อแปลงมีประสิทธิภาพสูง องค์ประกอบที่ทำให้ประสิทธิภาพหม้อแปลงมีค่ามากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับ การสูญเสียในหม้อแปลงนั่นเอง

การระบายความร้อน และการบำรุงรักษาหม้อแปลง

การระบายความร้อน

หม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อใช้งานไปก็จะเกิดความร้อนขึ้นทำให้เกิดการสูญเสียขึ้นในหม้อแปลง จึงจำเป็นต้องระบายความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน การระบายความร้อนจะมีอยู่หลายวิธี เช่น การระบายความร้อนตามธรรมชาติ การระบายความร้อนด้วยน้ำมัน การระบายความร้อนด้วยน้ำมันและการเป่าลม การระบายความร้อนด้วยน้ำมันและน้ำ และการระบายความร้อนด้วยการปั้มน้ำมัน

- 1) การระบายความร้อนตามธรรมชาติ คือ การใช้อากาศรอบๆ ช่วยในการระบายความร้อน
- 2) การระบายความร้อนด้วยน้ำมัน เป็นการระบายความร้อนโดยการแช่ตัวหม้อแปลงอยู่ในน้ำมันที่บรรจุอยู่ในถังหม้อแปลง
- 3) การระบายความร้อนด้วยน้ำมันและการเป่าลม เป็นการระบายความร้อนโดยการแช่ตัวหม้อแปลงอยู่ในน้ำมันที่บรรจุอยู่ในถังหม้อแปลง และใช้พัดลมเป่าที่ผิวภายนอกถังเป็นการเร่งระบายความร้อน
- 4) การระบายความร้อนด้วยน้ำมันและน้ำ เป็นการระบายความร้อนโดยการแช่ตัวหม้อแปลงอยู่ในน้ำมันที่บรรจุอยู่ในถังหม้อแปลง และมีท่อน้ำขดเป็นวงรอบหม้อแปลงไฟฟ้าภายในถัง น้ำมันจะเป็นตัวระบายความร้อนแก่หม้อแปลง และน้ำจะเป็นตัวระบายความร้อนแก่น้ำมันอีกครั้งหนึ่ง
- 5) การระบายความร้อนด้วยการปั้มน้ำมัน เป็นการระบายความร้อนด้วยการปั้มน้ำมันโดยการใช้ปั้มน้ำมันให้ไหลวนเวียนได้เร็วขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันหม้อแปลง

น้ำมันที่ใช้ระบายความร้อนหม้อแปลง จะต้องมีความร้อนหม้อแปลง จะต้องมีความร้อนหม้อแปลง คือ เป็นฉนวนที่ดี และทำหน้าที่ระบายความร้อนให้แก่ขดลวดและแกนเหล็ก นอกจากนี้ยังต้องทนต่อไฟฟ้าแรงดันสูงได้ และมีอายุการใช้งานยาวนาน คุณสมบัติหม้อแปลงโดยทั่วไปจะต้องมีความหนืดต่ำ จุดวาบไฟสูง จุดติดไฟสูง ความหนาแน่นต่ำ

การบำรุงรักษาหม้อแปลง

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่ต้องบำรุงรักษาน้อยกว่าเครื่องกลไฟฟ้าชนิดอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตามหม้อแปลงไฟฟ้าก็ยังคงต้องการ การตรวจสอบและบำรุงรักษาตามวาระซึ่งจำเป็นต้องจัดทำอย่างสม่ำเสมอ ส่วนวาระจะยาวนานเท่าใดนั้นจะต้องพิจารณาจากภาวการณ์ใช้งานของหม้อแปลง สภาพของสิ่งแวดล้อมที่หม้อแปลงติดตั้งอยู่ การบำรุงรักษาที่ดีนั้นควรจัดทำแผนการตรวจสอบและบำรุงรักษา และดำเนินการตามแผนอย่างจริงจัง

2.3.3 ไดโอด (Diode)

ไดโอด(Diode)

ไดโอดประกอบด้วยขั้วต่อ 2 ขั้ว มีชื่อเรียกว่า อาโนด (Anode) และคาโทด (Cathod)

การทำงานของไดโอด

ไดโอดจะทำงานเหมือนสวิตช์ โดยถ้าศักย์ไฟฟ้าทางด้านอาโนดเป็นบวกเมื่อเทียบกับคาโทด สถานะการทำงานของไดโอดลักษณะนี้ เรียกว่า ไดโอดอยู่ในสถานะ ON หรือไบอัสตรง (Forward Bias) ในทางตรงกันข้าม ถ้าศักย์ไฟฟ้าทางด้านอาโนดเป็นลบเมื่อเทียบกับคาโทด ดังแสดงใน สถานะการทำงานของไดโอดลักษณะนี้เรียกว่า ไดโอดอยู่ในสถานะ OFF หรือไบอัสกลับ (Reverse Bias)

รอยต่อ P-N ภายในไดโอด

ไดโอดเกิดจากการนำสารกึ่งตัวนำชนิด n-type และ p-type มาต่อกัน ซึ่งจุดที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองสัมผัสกันเรียกว่า รอยต่อ (Junction) โดยรอยต่อนี้จะยอมให้อิเล็กตรอนอิสระที่มีอยู่มากในด้าน n-region เคลื่อนที่ข้ามไปรวมกับโฮลในด้าน p-region และเนื่องจากอิเล็กตรอนจาก n-region เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อไปรวมกับโฮลในด้าน p-region จึงทำให้เกิดประจุไฟฟ้าลบใน p-region ขึ้น และทั้งบริเวณที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ออกมาจาก n-region ให้เป็นประจุไฟฟ้าบวก จากปรากฏการณ์นี้จึงทำให้พื้นที่หรือชั้นของรอยต่อซึ่งประกอบขึ้นจากประจุไฟฟ้าบวกด้านหนึ่ง และประจุไฟฟ้าลบอีกด้านหนึ่ง ซึ่งชั้นของรอยต่อที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า "Depletion Region" ซึ่งเมื่อชั้นของรอยต่อเริ่มก่อตัวขึ้นก็จะไปมีผลทำให้ไม่มีการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนอิสระ และโฮลข้ามรอยต่ออีกต่อไป กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ประจุไฟฟ้าลบใน p-region ที่อยู่ใกล้กับบริเวณรอยต่อจะผลักอิเล็กตรอนอิสระจาก n-region ไม่ให้เข้ามารวมอีก จากปฏิกิริยานี้จะเป็นการป้องกันไม่ให้ Depletion Region ขยายกว้างออกไปอีก

ประจุไฟฟ้าบวก และประจุไฟฟ้าลบที่บริเวณรอยต่อนี้จะมีศักย์ไฟฟ้าสะสมในตัวระดับหนึ่ง และเนื่องด้วยประจุทั้งสองมีขั้วตรงกันข้ามกัน จึงทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าปรากฏคร่อมรอยต่อ ซึ่งความต่างศักย์ไฟฟ้านี้มีชื่อเรียกว่า กำแพงศักย์ไฟฟ้า (Barrier Potential) หรือ กำแพงแรงดันไฟฟ้า (Barrier Voltage) โดยขนาดของกำแพงแรงดันไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ P-N สำหรับซิลิกอนไดโอดจะมีค่าประมาณ 0.7V และถ้าเป็นของเยอรมันเนียมไดโอดจะมีค่าประมาณ 0.3V ที่อุณหภูมิห้อง

การไบอัสไดโอด

ไดโอดเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดรอยต่อ P-N ดังนั้นการที่จะทำให้ไดโอดทำงานจะต้องให้ขนาดแรงดันไฟฟ้า และชนิดของขั้วที่ถูกต้องแก่ไดโอด แรงดันไฟฟ้าที่ให้กับไดโอดเรียกว่า แรงดันไบอัส (Bias Voltage) แรงดันไบอัสทำหน้าที่ควบคุมความกว้างของส่วนที่เป็น Depletion Region ซึ่งเป็นความต้านทานที่เกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อ ดังนั้นจึงเสมือนเป็นการควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จะไหลผ่านไดโอดนั่นเอง

การไบอัสตรงแก่ไดโอด (Forward Biasing a Diode)

การจัดไบอัสตรงให้กับไดโอด จากที่ทราบมาแล้วว่าการทำงานของไดโอดถูกกำหนดโดยชนิดของขั้วไฟฟ้า ขั้วลบของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าต่อเข้ากับ n-region และขั้วบวกของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าต่อเข้ากับส่วนที่เป็น p-region ของไดโอด อิเล็กตรอนอิสระจะถูกผลักออกจากส่วน n-region เนื่องจากอิทธิพลของขั้วลบของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า และถูกดึงไปยังขั้วบวกของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า การไหลของอิเล็กตรอนนี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อขนาดของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามากพอที่จะเอาชนะกำแพงแรงดันที่อยู่บริเวณรอยต่อ ซึ่งสำหรับซิลิกอนไดโอดแรงดันของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0.7V หรือมากกว่า ในขณะที่เยอรมันเนียมไดโอดจะเท่ากับ 0.3V หรือมากกว่า

ไดโอดจะยังคงนำกระแสอยู่ตลอดเวลาถ้ายังได้รับการไบอัสที่ถูกต้องอยู่ การไหลของกระแสโพลหรือที่เรียกว่า กระแสนิยม (Conventional Current) จะไหลในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางการไหลของกระแสอิเล็กตรอน จึงสรุปได้ว่า การไหลของกระแสอิเล็กตรอนจะไหลจากขั้วลบไปยังขั้วบวก ในขณะที่กระแสโพลหรือกระแสนิยมจะไหลจากขั้วบวกไปยังขั้วลบ การที่ทราบถึงแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมไดโอด ($V_{Si} = 0.7V$, $V_{Ge} = 0.3V$) ขนาดของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าและค่าความต้านทานของวงจรก็สามารถคำนวณหาปริมาณกระแสทางตรงได้

$$I(f) = [V(s) - V(\text{diode})] / R$$

โดยที่ $I(f)$ หมายถึง กระแสทางตรงของวงจร มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)

$V(s)$ หมายถึง แรงดันของแหล่งจ่ายไฟ มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

$V(\text{diode})$ หมายถึง แรงดันตกคร่อมไดโอด มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

R หมายถึง ค่าความต้านทานของวงจร มีหน่วยเป็น โอห์ม

คุณลักษณะของไดโอดเมื่อได้รับการไบอัสตรง (Forward Characteristics)

เมื่อแรงดันไบอัสตรงที่ให้กับไดโอดมีขนาดเกินกว่า กำแพงแรงดันไฟฟ้า (Barrier Voltage) ก็จะทำให้ความต้านทานภายในของไดโอดลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าทางตรงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

จุดของแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เส้นกราฟชันขึ้นอย่างรวดเร็วนี้มีชื่อเรียกว่า แรงดัน Knee Voltage ซึ่งแรงดันไฟฟ้านี้จะใช้เป็นชื่อเรียกของกำแพงแรงดันไฟฟ้าภายในไดโอดได้อีกชื่อหนึ่ง ไม่ว่ากระแสไฟฟ้าทางตรงจะเปลี่ยนแปลงไปมากหรือน้อย แต่แรงดันทางตรงที่ตกคร่อมไดโอดก็ยังอยู่ในระดับที่เกือบจะคงที่

การให้ไบอัสกลับแก่ไดโอด (Reverse Biasing a Diode)

ต่อขั้วบวกของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้ากับ n-region และขั้วลบเข้ากับ p-region ของไดโอด การต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าในลักษณะนี้จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระใน n-region ถูกดึงให้เคลื่อนที่ไปยังขั้วบวก ในขณะที่โฮลก็ถูกดึงจากขั้วลบเช่นกัน จากเหตุผลดังกล่าวจึงส่งผลให้บริเวณ Depletion Region ขยายกว้างมากขึ้น จนทำให้แรงดันไฟฟ้าภายในมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแต่มีขั้วตรงกันข้าม จึงส่งผลให้ไดโอดไม่นำกระแสไฟฟ้าในที่สุด

คุณลักษณะของไดโอดเมื่อได้รับการไบอัสกลับ (Reverse Characteristics)

เป็นการต่อเข้ากับขั้วแอนอด และขั้วบวกต่อเข้ากับขั้วคาโทด ดังนั้น เมื่อป้อนแรงดันไบอัสกลับให้แก่ไดโอดก็จะทำให้ค่าแอมแปร์แรงดันของไดโอดเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีขนาดเท่ากับแรงดันของแหล่งจ่ายไฟภายนอก ซึ่งในกรณีนี้กระแสไฟฟ้าที่จะไหลผ่านไดโอดจึงมีค่าน้อยหรือเกือบเป็นศูนย์ ดังนั้น ไดโอดจึงอยู่ในสภาวะปิด (OFF) หรือเท่ากับไดโอดเปิดสวิตช์นั่นเอง

แต่การไบอัสกลับจะก่อให้เกิดกระแสไฟรั่วไหล (Leakage Current) ซึ่งมีค่าน้อยมากจึงไม่นำมาพิจารณา แต่ถ้าแรงดันย้อนกลับ (VR) ยังคงเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดพัง (Break Down) ของไดโอด ก็จะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าอย่างทันทีทันใดนี้เรียกว่า แรงดันพัง (Breakdown Voltage) ซึ่งแรงดันพังของซิลิกอนไดโอดอาจมีค่าสูงถึง 50V

ชนิดของไดโอด

ไดโอดมีหลายชนิดแล้วแต่การใช้งานเฉพาะที่แตกต่างกัน เช่น

1. ซีนเนอร์ไดโอด (ใช้ควบคุมเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า)
 2. วาเรคเตอร์ไดโอด (ใช้ปรับความถี่)
 3. ซอดักไดโอด (การสวิตซ์ซึ่งที่มีความเร็วสูง)
- นอกจากนี้ยังมีไดโอดที่ใช้งานย่านความถี่ไมโครเวฟ เช่น
4. ทันเนลไดโอด
 5. อิมแพคไดโอด (ใช้ในการกำเนิดและขยายสัญญาณไมโครเวฟ)
 6. กัณน์ไดโอด

ไดโอดกำลัง (Power Diode)

ไดโอดกำลัง เป็นไดโอดที่ออกแบบให้บริเวณรอยต่อมีช่วงกว้างมากกว่าไดโอดทั่วไป เพื่อนำไปใช้กับงานที่มีกำลังและกระแสไฟฟ้าสูงๆ ไดโอดกำลังนี้ทนต่ออุณหภูมิสูงได้

ประเภทของไดโอดกำลัง

1) แบบใช้งานทั่วไป (Standard Diodes)

ไดโอดแบบใช้งานทั่วไป แบ่งตามโครงสร้างได้ 2 ประเภทคือแบบ ดิสก์ (Disk Type) และแบบมีส่วนยื่นหรือแบบ สตัด (Stud Type)

2) ไดโอดแบบฟื้นตัวเร็ว (Fast Recovery Diodes)

ไดโอดแบบฟื้นตัวเร็ว มีช่วงเวลาในการฟื้นตัวย้อนกลับ (Reverse Recovery Time) ระหว่าง 0.1 ถึง 5 ms ใช้มากในการเปิด-ปิดสะพานไฟหรือในการสวิตช์ความถี่สูงของการแปลงผันกำลังไฟฟ้า

3) ไดโอดแบบชอททกี (Schottky Diodes)

เป็นไดโอดที่มีแรงดันในการเปิด (on-state Voltage) ต่ำและเวลาในการฟื้นตัวย้อนกลับต่ำมาก ส่วนใหญ่ใช้เวลาเป็น ns

การฟื้นตัวย้อนกลับ

ขณะการใช้ไดโอดเป็นสวิตช์ จะถูกจำกัดด้วยเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ กล่าวคือขณะไดโอดนำกระแสแล้วได้รับแรงดันไบแอสกลับเป็นไปไม่ได้ที่ไดโอดจะหยุดนำกระแสและพร้อมที่จะนำกระแสได้ใหม่ทันที แต่จะนำกระแสต่อไปอีกช่วงเวลาหนึ่ง จึงพร้อมที่จะนำกระแสได้หรือฟื้นตัวย้อนกลับเวลาดังกล่าวเกิดจากพาหะข้างน้อยที่บริเวณรอยต่อ PN ต้องการเวลาเพื่อเชื่อมกับประจุชนิดตรงข้าม ไดโอดในทางอุดมคติ

ไดโอดในอุดมคติ (Ideal Diode) มีลักษณะเหมือนสวิตช์ที่สามารถนำกระแสไหลผ่านได้ในทิศทางเดียว ถ้าต่อขั้วแบตเตอรี่ให้เป็นแบบไบอัสตรงไดโอดจะเปรียบเป็นเสมือนกับสวิตช์ที่ปิด (Close Switch) หรือไดโอดลัดวงจร (Short Circuit) I_d ไหลผ่านไดโอดได้ แต่ถ้าต่อขั้วแบตเตอรี่แบบไบอัสกลับ ไดโอดจะเปรียบเป็นเสมือนสวิตช์เปิด (Open Switch) หรือเปิดวงจร (Open Circuit) ทำให้ I_d เท่ากับศูนย์

ไดโอดในทางปฏิบัติ

ไดโอดในทางปฏิบัติ (Practical Diode) มีการแพร่กระจายของพาหะส่วนน้อยที่บริเวณรอยต่ออยู่จำนวนหนึ่ง ดังนั้น ถ้าต่อไบอัสตรงให้กับไดโอดในทางปฏิบัติก็จะเกิด แรงดันเสมือน ($V_G \geq 0.3V$; $V_{Si} \geq 0.7V$) ซึ่งต้านแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเพื่อการไบอัสตรง ขนาดของแรงดันเสมือนจึงเป็นตัวบอกจุดทำงาน ดังนั้น จึงเรียก "แรงดันเสมือน" อีกอย่างหนึ่งว่า "แรงดันในการเปิด" (Turn-on Voltage ; V_t)

กรณีไบอัสกลับ เราทราบว่า Depletion Region จะขยายกว้างขึ้น แต่ก็ยังมีพาหะข้างน้อยแพร่กระจายที่รอยต่ออยู่จำนวนหนึ่ง แต่ก็ยังมีกระแสรั่วไหลอยู่จำนวนหนึ่ง เรียกว่า กระแสรั่วไหล (Leakage Current) เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นเรื่อยๆ กระแสรั่วไหลจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่ไดโอดนำกระแสเพิ่มขึ้นมาก ระดับกระแสที่จุดนี้ เรียกว่า "กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ" (Reverse Saturation Current ; I_s) แรงดันไฟฟ้าที่จุดนี้ เรียกว่า แรงดันพังทลาย (Breakdown Voltage) และถ้าแรงดันไบอัสกลับสูงขึ้นจนถึงจุดสูงสุดที่ไดโอดทนได้ เราเรียกว่า "แรงดันพังทลายซีเนอร์" (Zener Breakdown Voltage ; V_z) ถ้าแรงดันไบอัสกลับสูงกว่า V_z จะเกิดความร้อนอย่างมากที่รอยต่อของไดโอด ส่งผลให้ไดโอดเสียหายหรือพังได้ แรงดันไฟฟ้าที่จุดนี้เราเรียกว่า แรงดันพังทลายอวาแลนซ์ (Avalanche Breakdown Voltage) ดังนั้น การนำไดโอดไปใช้งานจึงใช้กับการไบอัสตรงเท่านั้น

ผลกระทบของอุณหภูมิ (Temperature Effects)

จากการทดลองพบว่า I_s ของ Si จะมีค่าเพิ่มขึ้นเกือบ 2 เท่า ทุกๆ ครั้งที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10 องศาเซลเซียส ขณะที่ Ge มีค่า I_s เป็น 1 หรือ 2 micro-amp ที่ 25 องศาเซลเซียส แต่ที่ 100 องศาเซลเซียสจะมีค่า I_s เพิ่มขึ้นเป็น 100 micro-amp ระดับกระแสไฟฟ้าขนาดนี้จะเป็นปัญหาต่อการเปิดวงจรเนื่องจากได้รับการไบอัสกลับ เพราะแทนที่ I_d จะมีค่าใกล้เคียงศูนย์ แต่กลับนำกระแสได้จำนวนหนึ่งตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

2.3.4 ขดลวดเหนี่ยวนำ (Inductor)

ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)

ตัวเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญอีกชนิดหนึ่ง โดยมีการใช้งานกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป มีตั้งแต่ขนาดเล็กมาก ๆ ประมาณปลายนิ้วมือจนกระทั่งถึงขนาดใหญ่เท่าห้องปฏิบัติการ ลักษณะของตัวเหนี่ยวนำจะเป็นการนำเอาลวดตัวนำมาพันเรียงกันเป็นขดลวด อาจมีจำนวนรอบไม่กี่รอบจนกระทั่งถึงพันรอบแล้วแต่ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการ ใช้งาน การพันขดลวดของตัวเหนี่ยวนำอาจพันบนแกนชนิดต่าง ๆ หรือเป็นแบบไม่มีแกน (แกนอากาศ) ซึ่งแต่ละแบบก็จะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน

ตัวเหนี่ยวนำประเภทต่างๆ

ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าประเภทต่างๆ

หลักการการทำงานของตัวเหนี่ยวนำใช้หลักการสนามแม่เหล็กตัดผ่านขดลวด จะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในขดลวด ซึ่งจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้น ตัวเหนี่ยวนำแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือแบบค่าคงที่และแบบปรับค่าได้ ตัวเหนี่ยวนำเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า อินดักเตอร์ หรือ คอยล์ (Coil) หรือเรียกย่อ ๆ ว่าตัวแอล (L) หน่วยของการเหนี่ยวนำคือ เฮนรี (Henry)



รูปที่ 2.17 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

การเรียกชื่อตัวเหนี่ยวนำ

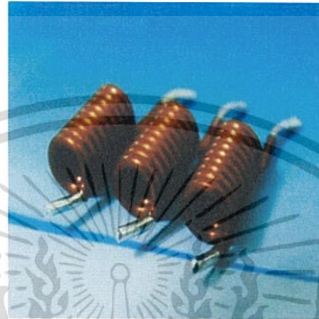
การเรียกชื่อตัวเหนี่ยวนำ เรียกตามโครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งโครงสร้างประกอบด้วยขดลวด (Coil) พันรอบแกน (Core) ซึ่งแกนนี้อาจจะเป็นแกนอากาศ, แกนเหล็ก, หรือแกนเฟอร์ไรท์ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของการเหนี่ยวนำไฟฟ้า แบ่งออกได้เป็น

- 1) ตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศ (Air Core Inductor)
- 2) ตัวเหนี่ยวนำแกนผงเหล็กอัด (Powdered-Iron Core Inductor)
- 3) ตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite Core Inductor)
- 4) ตัวเหนี่ยวนำแกนทอรอยด์ (Toroidal Core Inductor)
- 5) ตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็กแผ่น (Laminated-Iron Core Inductor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเหนี่ยวนำอากาศ

ตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศ เป็นตัวเหนี่ยวนำที่แกนหรือฐานรองทำมาจากวัสดุที่เป็นฉนวน เช่น คาร์บอน พลาสติก ไฟเบอร์ และ PVC เป็นต้น หรืออาจพันลอยๆ ไว้โดยไม่มีอะไรรองรับ ตัวเหนี่ยวนำประเภทนี้นิยมนำไปใช้งานกับพวกความถี่สูงๆ หรือความถี่วิทยุ (RF) จึงมักเรียกตัวเหนี่ยวนำประเภทนี้ว่า RF โข้ด ตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศเป็นตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เพราะแกนไม่สามารถช่วยเสริมค่าความเหนี่ยวนำได้ การจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นต้องใช้จำนวนรอบในการพันขดลวดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.18 ตัวเหนี่ยวนำอากาศ

ตัวเหนี่ยวนำแกนผงเหล็กอัด

ตัวเหนี่ยวนำแกนผงเหล็กอัด เป็นตัวเหนี่ยวนำที่แกนหรือฐานรองรับเส้นลวดทำด้วยผงเหล็กชนิดอัดแน่น โดยนำผงเหล็กผสมกับกาวอัดแน่นเป็นแท่ง ช่วยลดการสูญเสียสัญญาณจากกระแสไหลวน (Eddy Current) ลงได้ สัญญาณส่งผ่านตัวเหนี่ยวนำแกนผงเหล็กอัดได้สูงขึ้น เกิดการสูญเสียสัญญาณภายในตัวเหนี่ยวนำลดลง ใช้งานได้ดีในย่านความถี่สูงๆ มีความเหนี่ยวนำสูงแต่มีขนาดเล็ก

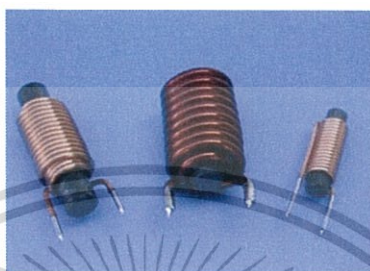


รูปที่ 2.19 ตัวเหนี่ยวนำแกนผงเหล็กอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์

ตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์ เป็นตัวเหนี่ยวนำที่แกนหรือฐานรองรับเส้นลวดทำด้วยเฟอร์ไรต์ ส่วนผสมของเฟอร์ไรต์มีความแตกต่างกันหลายอย่าง เช่น แมกนีเซียมกับสังกะสี แมกนีเซียมกับแมงกานีส แมกนีเซียมกับทองแดง นิกเกิลกับสังกะสี และแมงกานีสกับสังกะสี เป็นต้น แต่ละชนิดของเฟอร์ไรต์ให้ความเข้มของค่าความเหนี่ยวนำแตกต่างกัน ข้อดีของตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์ คือ สามารถสร้างให้มีรูปร่างลักษณะต่างๆ ได้ ใช้งานได้ดีทั้งความถี่ต่ำ และความถี่สูง



รูปที่ 2.20 ตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์

ตัวเหนี่ยวนำแกนทอรอยด์

ตัวเหนี่ยวนำแกนทอรอยด์ เป็นตัวเหนี่ยวนำที่แกนหรือฐานรองรับเส้นลวดทำด้วยผลเหล็กชนิดอัดแน่น หรือเฟอร์ไรต์ โดยสร้างขึ้นเป็นรูปวงแหวน ขดลวดถูกพันรอบแกนทอรอยด์โดยรอบ ข้อดีของการใช้แกนทอรอยด์ คือ เส้นแรงแม่เหล็กจะไม่แพร่กระจายออกไปภายนอก และสนามแม่เหล็กจากภายนอกก็ไม่เข้ามารบกวน สามารถทำให้ตัวเหนี่ยวนำแบบนี้มีความเหนี่ยวนำสูงในขนาดที่สร้างได้เล็กลง นิยมนำไปใช้งานวงจรอิเล็กทรอนิกส์ความถี่สูง ที่ต้องการหาค่าความเหนี่ยวนำสูงและมีสนามแม่เหล็กรบกวนต่ำ



รูปที่ 2.21 ตัวเหนี่ยวนำแกนทอรอยด์

ตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็กแผ่น

ตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็กแผ่น เป็นตัวเหนี่ยวนำที่แกนหรือฐานรองรับเส้นลวดทำด้วยเหล็กแผ่น บางวางซ้อนกัน เหล็กแผ่นบางแต่ละแผ่นเคลือบฉนวนไว้ เพื่อช่วยลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนและช่วยทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น การใช้งานนิยมนำไปใช้งานในย่านความถี่ต่ำในย่านความถี่เสียง (AF) มักเรียกว่า AF โซลด์ เช่น ใช้เป็นตัวกรองไฟ (Filter) แรงดันไฟสลับเป็นแรงดันไฟตรง เป็นต้น



รูปที่ 2.22 ตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็กแผ่น

ชนิดของตัวเหนี่ยวนำ

ตัวเหนี่ยวนำที่ผลิตออกมาในปัจจุบันมีหลายแบบหลายขนาด วัสดุที่ใช้ทำแกนที่นิยมก็คือ แกนอากาศ แกนเหล็ก และแกนเฟอร์ไรท์ เราสามารถแบ่งตัวเหนี่ยวนำได้ 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ตัวเหนี่ยวนำแบบค่าคงที่ (Fixed Inductors) และตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้ (Variable Inductors)

1. ตัวเหนี่ยวนำแบบค่าคงที่ (Fixed Inductors)

ตัวเหนี่ยวนำแบบค่าคงที่ (Fixed Inductors) คือตัวเหนี่ยวนำที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ โดยปกติตัวเหนี่ยวนำประเภทนี้ ทำมาจากขดลวดทองแดง แกนที่ใช้พันขดลวดจะมีปลายลวดยื่นออกมาทั้งสองข้าง รูปร่างโดยทั่วไปจะเป็นแกนยาวแบบทรงกระบอก มีชื่อเรียกแตกต่างกัน เช่น โซลินอยด์, เซอร์เฟสเมาส์, โซลด์, ทอร์รอยด์ และแบบแถบสี ฯลฯ เป็นต้น

2. ตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้ (Variable Inductors)

ตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้ (Variable Inductors) นิยมใช้ในเครื่องรับวิทยุ ค่าการเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเคลื่อนที่ของแกนหมุน ที่สามารถปรับสกรูเลื่อนตำแหน่งของขดลวดให้เข้าหรือออก เพื่อเปลี่ยนค่าของความเหนี่ยวนำ ถ้าแกนเคลื่อนที่ออกมาจนสุด ค่าความเหนี่ยวนำจะมีค่าต่ำ แต่ถ้าหมุนสกรูให้แกนเคลื่อนที่เข้าไปในขดลวดมาก จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมากขึ้นตามไปด้วย ในการปรับควรใช้เครื่องมือที่ทำด้วยพลาสติก หรืออุปกรณ์จำพวกที่ไม่ใช่โลหะ เนื่องจากวัสดุที่ทำมาจากโลหะจะไปรบกวนการเกิดสนามแม่เหล็ก และมีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำได้

ปัจจัยที่มีผลต่อความเหนียวนำ

ค่าความเหนียวนำจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับตัวแปร 4 ประการคือ

- 1) จำนวนรอบของขดลวดเขียนแทนด้วยอักษร N ถ้าจำนวนรอบของขดลวดมีปริมาณมาก ก็จะทำให้เกิดค่าความเหนียวนำมากขึ้นตามไปด้วย ค่าความเหนียวนำจะแปรผันตรงกับจำนวนรอบของขดลวด
 - 2) วัสดุที่นำมาทำเป็นแกนมีหลายชนิดเช่น อากาศ เหล็ก เฟอร์ไรท์ โคบอล ฯลฯ เป็นต้น แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติในการเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็ก ที่เรียกว่าความซาบซึม (Permeability) แตกต่างกันในกรณีที่มีความซาบซึมมากก็จะทำให้เกิดค่าความเหนียวนำมาก ค่าความเหนียวนำจะแปรผันตรงกับความซาบซึมของแกน
 - 3) พื้นที่หน้าตัดของแกน เขียนแทนด้วยอักษร A ถ้าพื้นที่ของแกนมีปริมาณมาก ก็จะทำให้เกิดค่าความเหนียวนำมากขึ้นตามไปด้วย ค่าความเหนียวนำจะแปรผันตรงกับพื้นที่ของแกน
 - 4) ความยาวของแกน เขียนแทนด้วยอักษร l ถ้าความยาวของแกนมีปริมาณมาก ก็จะทำให้เกิดค่าความเหนียวนำน้อย ค่าความเหนียวนำจะแปรผกผันกับความยาวของแกน
- ดังนั้นจะพบว่า ค่าความเหนียวนำขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง และจำนวนรอบของขดลวด นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับค่าคงตัวที่เรียกว่า สภาพให้ซึมผ่านได้หรือเพอร์มิอิตีทีทางแม่เหล็ก (permeability) ของตัวกลาง

2.3.5 ตัวเก็บประจุ (Capacitor)

ชนิดของตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุที่ผลิตออกมาในปัจจุบันมีมากมาย เราสามารถแบ่งชนิดของตัวเก็บประจุตามลักษณะทางโครงสร้างหรือตามสารที่นำมาใช้เป็นไดอิเล็กตริก การแบ่งโดยใช้สารไดอิเล็กตริกเป็นวิธีการที่ค่อนข้างละเอียดเพราะว่าค่าไดอิเล็กตริกจะเป็นตัวกำหนดค่าตัวเก็บประจุนั้น ๆ ว่าจะนำไปใช้งานในลักษณะใด ทนแรงดันเท่าใด แต่ถ้าหากแบ่งตามระบบเก่าที่เคยแบ่งกันมาจะสามารถแบ่งตัวเก็บประจุได้เป็น 3 ชนิดด้วยกันคือ

1. ตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่ (Fixed Capacitor)
2. ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้ (Variable Capacitor)
3. ตัวเก็บประจุแบบเลือกค่าได้ (Select Capacitor)

ตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่ (Fixed Capacitor)

คือตัวเก็บประจุที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ โดยปกติจะมีรูปลักษณะเป็นวงกลม หรือเป็นทรงกระบอก ซึ่งมักแสดงค่าที่ตัวเก็บประจุ เช่น 5 พิโกฟารัด (pF) 10 ไมโครฟารัด (F) แผ่นเพลทตัวนำมักใช้โลหะและมีไดอิเล็กตริกประเภท ไมก้า เซรามิก อิเล็กโตรไลติกคั่นกลาง เป็นต้น การเรียกชื่อตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่นี้จะเรียกชื่อตามไดอิเล็กตริกที่ใช้ เช่น ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโตรไลติก ชนิดเซรามิก ชนิดไมก้า เป็นต้น ตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่มีใช้งานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปมีดังนี้คือ



รูปที่ 2.23 แสดงตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่

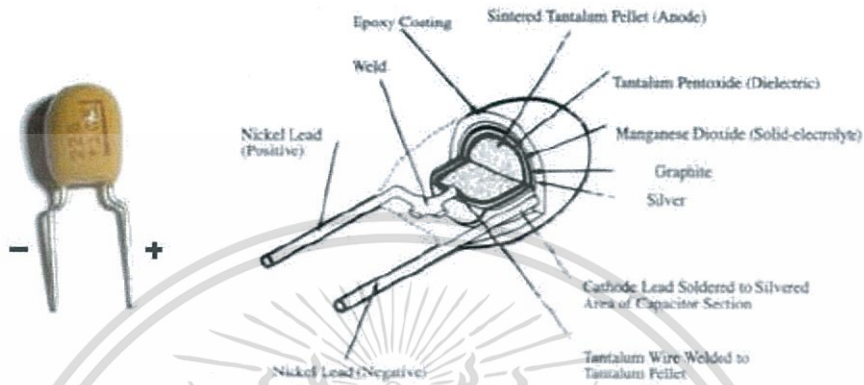
ชนิดอิเล็กโตรไลต์ (Electrolyte Capacitor) เป็นที่นิยมใช้กันมากเพราะให้ค่าความจุสูง มีขั้ววอกกลับ เวลาใช้งานต้องติดตั้งให้ถูกขั้ว โครงสร้างภายในคล้ายกับแบตเตอรี่ นิยมใช้กับงานความถี่ต่ำหรือใช้สำหรับไฟฟ้ากระแสตรง มีข้อเสียคือกระแสรั่วไหลและความผิดพลาดสูงมาก



รูปที่ 2.24 แสดงตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโตรไลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดแทนทาลัมอิเล็กโทรไลต์ (Tantalum Electrolyte Capacitor) ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการความผิดพลาดน้อยใช้กับไฟฟ้ากระแสตรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ มักจะใช้ตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัมอิเล็กโทรไลต์แทนชนิดอิเล็กโทรไลต์ธรรมดา เพราะให้ค่าความจุสูงเช่นกัน โครงสร้างภายในประกอบด้วยแผ่นตัวนำทำมาจากแทนทาลัมและแทนทาลัมเปอร์ออกไซด์อีกแผ่น นอกจากนี้ยังมีแมงกานีสไดออกไซด์ เงิน และเคลือบด้วยเรซิน ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 แสดงตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัมอิเล็กโทรไลต์

ชนิดไบโพลาร์ (Bipolar Capacitor) นิยมใช้กันมากในวงจรภาคจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเครื่องขยายเสียง เป็นตัวเก็บประจุจำพวกเดียวกับชนิดอิเล็กโทรไลต์ แต่ไม่มีขั้วบวกขั้วลบ บางครั้งเรียกสั้นๆ ว่าไบแคป



รูปที่ 2.26 แสดงตัวเก็บประจุชนิดไบโพลาร์

ชนิดเซรามิก (Ceramic Capacitor) เป็นตัวเก็บประจุที่มีค่าไม่เกิน 1 ไมโครฟารัด (uF) นิยมใช้กันทั่วไปเพราะมีราคาถูก เหมาะสำหรับวงจรประเภทคัปปลิงความถี่วิทยุ ข้อเสียของตัวเก็บประจุชนิดเซรามิกคือมีการสูญเสียมาก



รูปที่ 2.27 แสดงตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดไมลาร์ (Mylar Capacitor) เป็นตัวเก็บประจุที่มีค่ามากกว่า 1 ไมโครฟารัด (uF) เพราะฉะนั้นในงานบางอย่างจะใช้ไมลาร์แทนเซรามิก เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดและการรั่วไหลของกระแสต่ำกว่าชนิดเซรามิก เหมาะสำหรับวงจรกรองความถี่สูง วงจรภาคไอเอฟของวิทยุโทรทัศน์ ตัวเก็บประจุชนิดไมลาร์จะมีตัวถังที่ใหญ่กว่าเซรามิกในอัตราทนแรงดันที่เท่ากัน



รูปที่ 2.28 แสดงตัวเก็บประจุชนิดไมลาร์

ชนิดซิลเวอร์ไมก้า (Silver Mica Capacitor) เป็นตัวเก็บประจุที่มีค่า 10 พิโกฟารัด (pF) ถึง 10 นาโนฟารัด (nF) เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดน้อย นิยมใช้กับวงจรความถี่สูง จัดเป็นตัวเก็บประจุระดับเกรด A อีกชนิดหนึ่ง



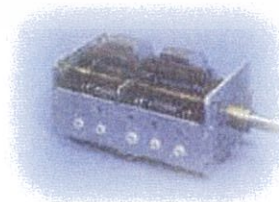
รูปที่ 2.29 แสดงตัวเก็บประจุชนิดซิลเวอร์ไมก้า

ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้ (Variable Capacitor)

ค่าการเก็บประจุจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเคลื่อนที่ของแกนหมุน โครงสร้างภายในประกอบด้วย แผ่นโลหะ 2 แผ่นหรือมากกว่าวางใกล้กัน แผ่นหนึ่งจะอยู่กับที่ส่วนอีกแผ่นหนึ่งจะเคลื่อนที่ได้ ไดโอดเล็กทรอนิกส์ที่มีหลายชนิดด้วยกันคือ อากาศ ไมก้า เซรามิก และพลาสติก เป็นต้น



ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้
หรือเพคเตอร์



รูปที่ 2.30 แสดงโครงสร้างและสัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้อีกชนิดหนึ่งที่เป็นที่รู้จักกันดีคือทริมเมอร์และแพดเดอร์ (Trimmer and Padder) โครงสร้างภายในประกอบด้วยแผ่นโลหะ 2 แผ่นวางขนานกัน ในกรณีที่ต้องการปรับค่าความจุ ให้ใช้ไขควงหมุนสลักตรงกลางค่าที่ปรับจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 พิโกฟารัด (pF) ถึง 20 พิโกฟารัด (pF) การเรียกชื่อตัวเก็บประจุแบบนี้ว่าทริมเมอร์หรือแพดเดอร์นั้นขึ้นอยู่กับว่าจะนำไปต่อในลักษณะใด ถ้านำไปต่อขนานกับตัวเก็บประจุตัวอื่นจะเรียกว่า ทริมเมอร์ แต่ถ้านำไปต่ออนุกรมจะเรียกว่า แพดเดอร์

ตัวเก็บประจุแบบเลือกค่าได้ (Select Capacitor)

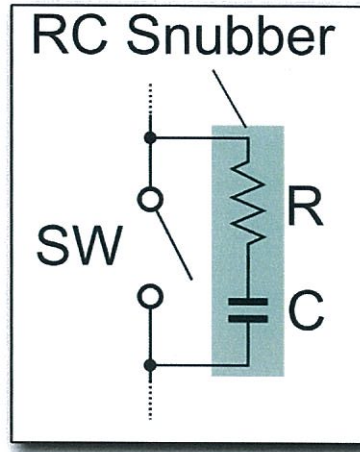
คือตัวเก็บประจุในตัวถังเดียว แต่มีค่าให้เลือกใช้งานมากกว่าหนึ่งค่าดังแสดงในรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 แสดงโครงสร้างและสัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุแบบเลือกค่าได้

2.3.6 วงจรสับเบอร์

วงจรสับเบอร์ มักมีการใช้ในระบบไฟฟ้าที่มีอุปนัยไหลดที่หยุดชะงักอย่างฉับพลันนำไปสู่การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของแรงดันไฟฟ้าในอุปกรณ์ สอดคล้องกับกฎของฟาราเดย์ สัญญาณรบกวนชั่วคราวนี้อาจเป็นสัญญาณรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) ในวงจรอื่น ๆ นอกจากนี้หากแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์เกินกว่าที่อุปกรณ์สามารถทนต่อความเสียหายได้ อาจทำให้อุปกรณ์เสียหายหรือชำรุดได้ วงจรสับเบอร์เป็นทางเลือกใหม่ในระยะสั้นสำหรับอุปกรณ์กระแสสลับในปัจจุบันเพื่อให้ชิ้นส่วนอุปนัยสามารถระบายออกได้อย่างปลอดภัยและเงียบ องค์ประกอบอุปนัยมักไม่ได้ตั้งใจ แต่เกิดขึ้นจากลูปปัจจุบันที่เกิดขึ้นโดยวงจรทางกายภาพ ในขณะที่การเปลี่ยนอย่างฉับพลันคือทุก วงจรสับเบอร์ โดยทั่วไปจะถูกต้องซึ่งเป็นเส้นทางปัจจุบันที่สำคัญคือการเปลี่ยนเช่นในอุปกรณ์ไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีการใช้วงจรสับเบอร์นั้นเพื่อป้องกันการรั่วซึมบนหน้าสัมผัสของรีเลย์และสวิตช์ และป้องกันการรบกวนทางไฟฟ้าและการเชื่อม หรือเกาะตัวบริเวณหน้าสัมผัสที่อาจเกิดขึ้น



รูปที่ 2.32 วงจร RC snubbers

วงจร RC snubber แบบง่าย ที่ใช้ตัวต้านทานขนาดเล็ก(R) ต่อกับตัวเก็บประจุขนาดเล็ก(C) วงจรชนิดนี้สามารถใช้ในการป้องกันการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของแรงดันไฟฟ้าทั่วไปของ SCR ป้องกันไม่ให้เกิดความผิดพลาดของ SCR ทำได้โดยการ จำกัดอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้า (dV/dt) SCR เป็นค่าที่จะไม่ทรigger ตัวโหลดแรงเสียดทาน RC ที่ออกแบบอย่างเหมาะสมสามารถใช้กับไฟ DC หรือ AC load ได้ วงจร snubber ประเภทนี้มักใช้กับโหลดอุปนัยเช่นมอเตอร์ไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าในตัวเก็บประจุไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ทันที ดังนั้นกระแสชั่วครวที่ลดลงจะไหลผ่านไปเป็นจำนวนที่น้อยในหนึ่งวินาทีที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าทั่วสวิตช์เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆเมื่อเปิดสวิตช์ การกำหนดระดับแรงดันไฟฟ้าอาจเป็นเรื่องยากเนื่องจากรูปแบบของสัญญาณแบบชั่วครวและอาจมีการกำหนดโดยการให้ค่าของส่วนประกอบในวงจร snubber และแอปพลิเคชัน ของ RC snubbers สามารถทำให้เกิด discretely และยังสามารถสร้างเป็นส่วนประกอบเดียวได้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 โปรแกรม Arduino

สัญญาณ PWM จากบอร์ด Arduino จะต้องเขียนโปรแกรมภาษาซี ผ่านซอฟต์แวร์ของ Arduino

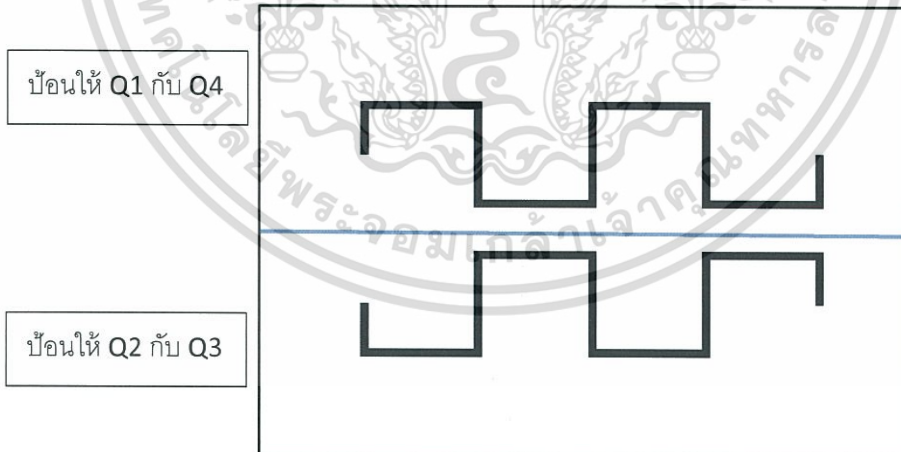


```

sketch_apr23a | Arduino 1.8.1
File Edit Sketch Tools Help
sketch_apr23a
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
}
void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
}
Arduino Nano, ATmega328 on CC1M4
  
```

รูปที่ 3.1 ซอร์ฟแวร์ของ Arduino ที่ใช้เขียนโปรแกรมภายในของ Atmega328

สัญญาณ PWM ที่ใช้ควบคุมการทำงานของ Insulated Gate Bipolar Transistor or IGBT Transistor (IGBT) ในวงจรพูล-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์แต่ละตัวนั้นจะใช้เป็นสัญญาณตามรูป



รูปที่ 3.2 สัญญาณ PWM ของ Arduino ที่จ่ายให้วงจรคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของโค้ดภาษาซีที่ใช้เขียนในโปรแกรม Arduino นั้นจะใช้เป็นโค้ดดังนี้

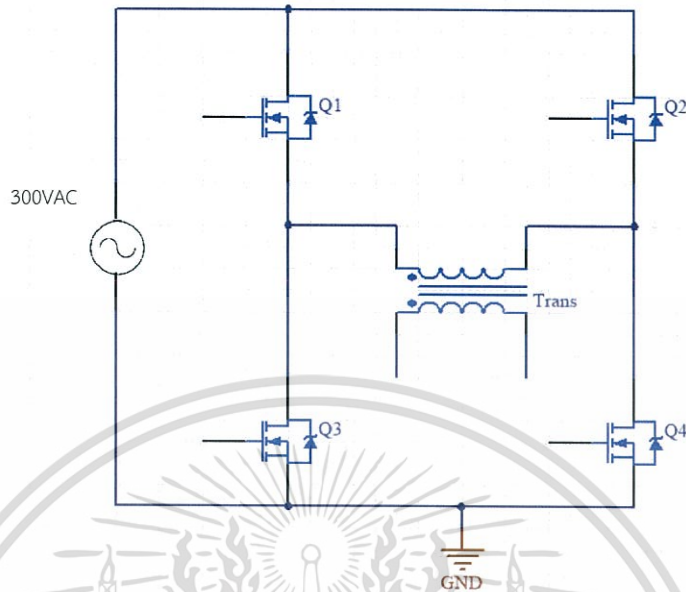
```
void setup() {
  pinMode(10, OUTPUT);
  pinMode(11, OUTPUT);
  pinMode(12, OUTPUT);
  pinMode(13, OUTPUT);
  cli();
  DDRB = 0b11110000;
  PORTB = 0;
}
```

```
void loop() {
  PORTB = 0b01100000;
  delayMicroseconds(25);
  PORTB = 0b00000000;
  delayMicroseconds(2);
  PORTB = 0b10010000;
  delayMicroseconds(25);
  PORTB = 0b00000000;
  delayMicroseconds(2);
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

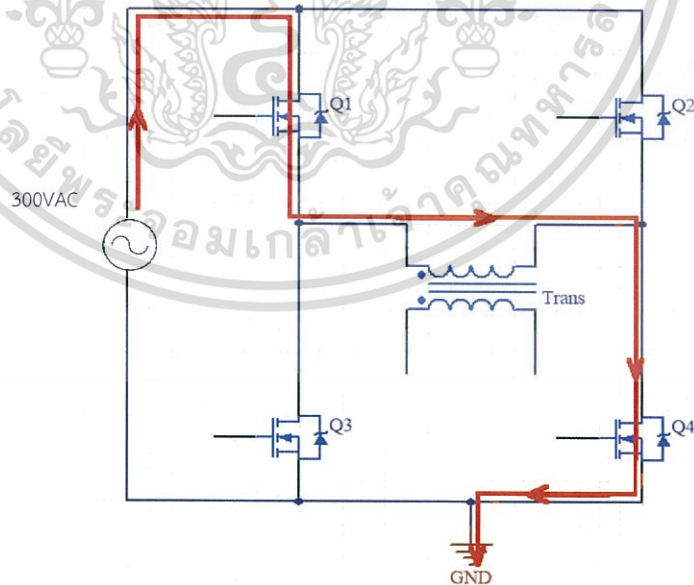
3.2 ออกแบบวงจรฟูล-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์

วงจรฟูล-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้งาน(เบื้องต้น)



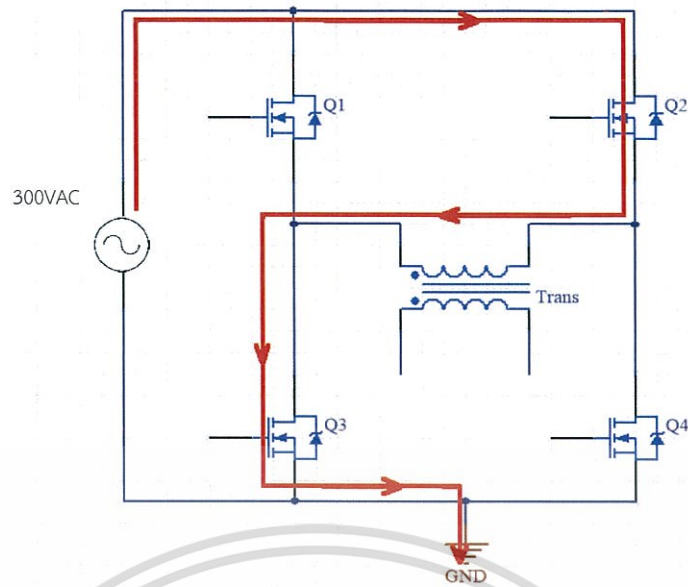
รูปที่ 3.3 วงจรฟูล-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์พื้นฐานที่ใช้งาน

การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ฟูล-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้งานนั้นจะมีสัญญาณพัลส์เป็นตัวควบคุมการทำงาน สัญญาณพัลส์จะมาจากบอร์ด Arduino ที่ลงโปรแกรมไว้แล้ว
โหมดการทำงานของวงจรฟูล-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.4 โหมด I

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

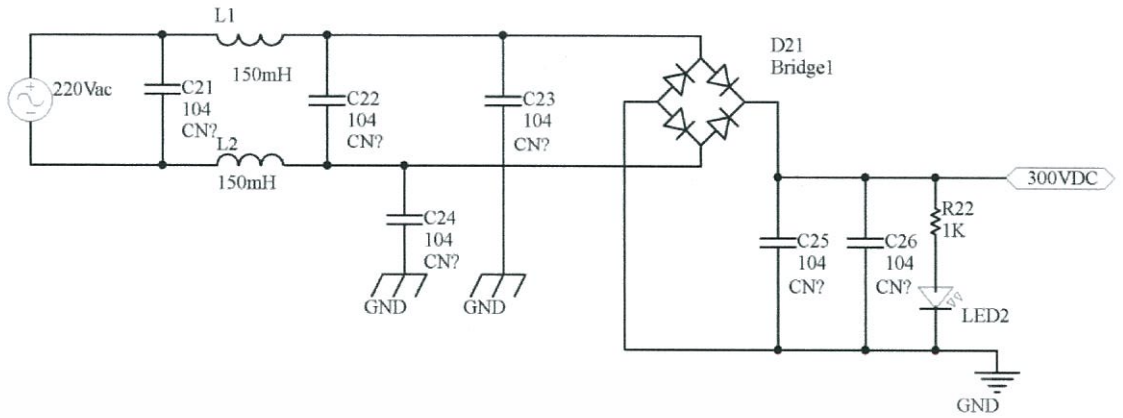


รูปที่ 3.5 โหมด II

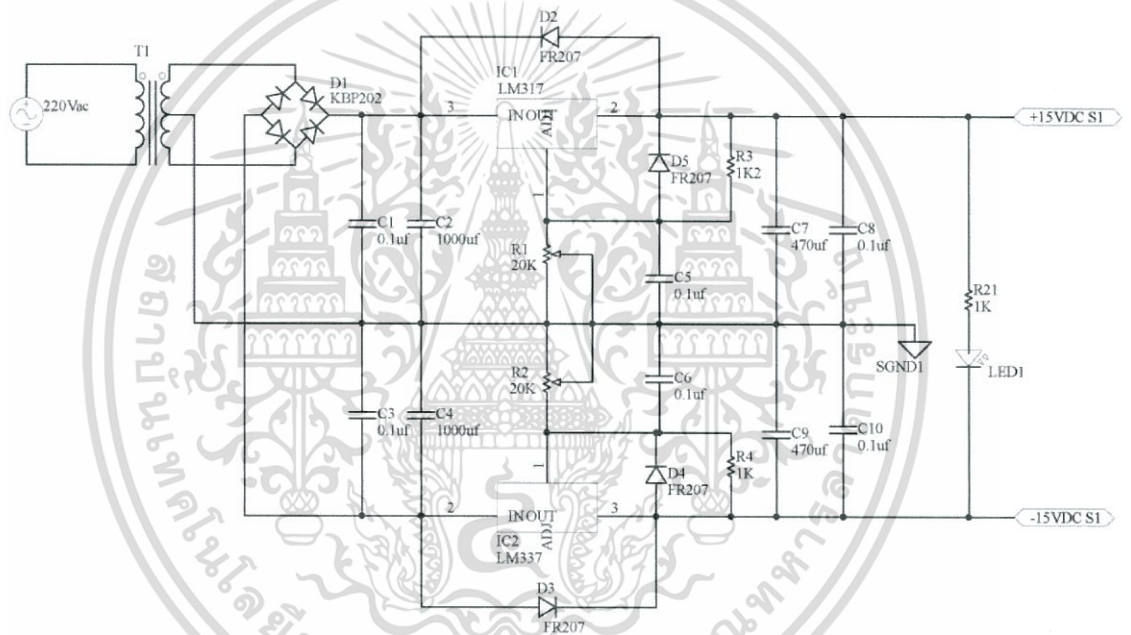


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบวงจร

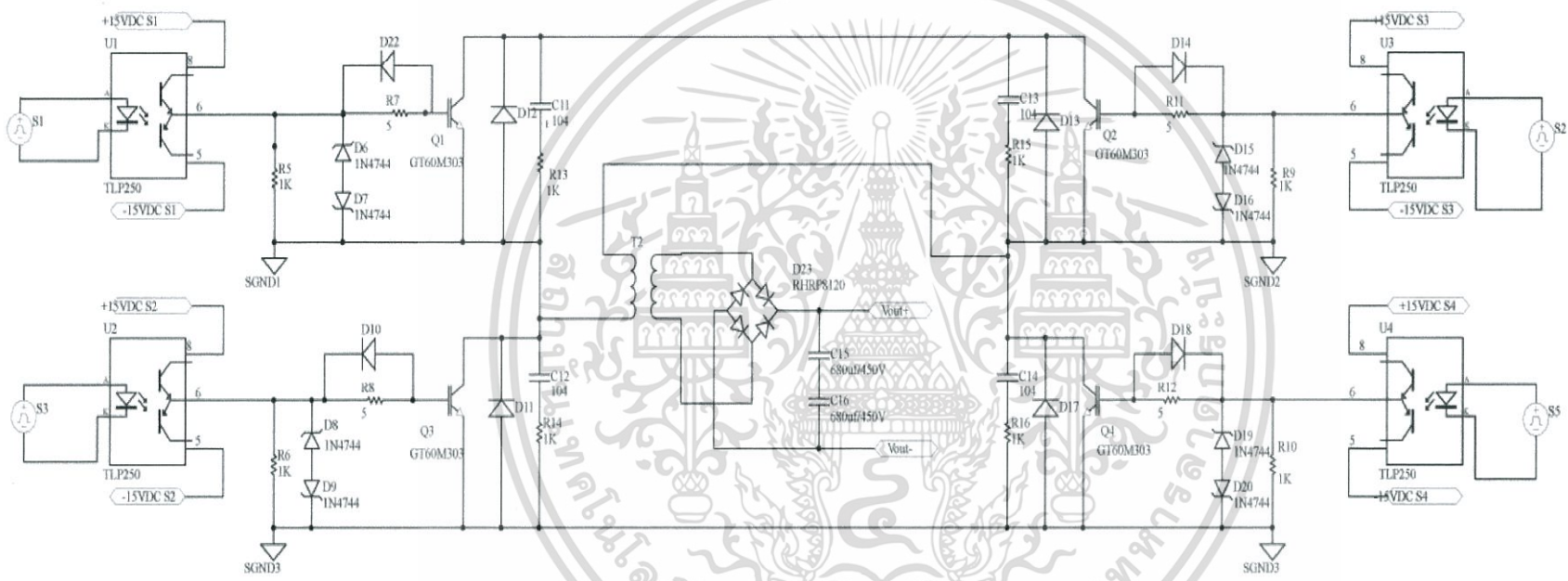


รูปที่ 3.6 Sch. วงจร Bridge rectifier



รูปที่ 3.7 Sch. วงจร Liner regulator

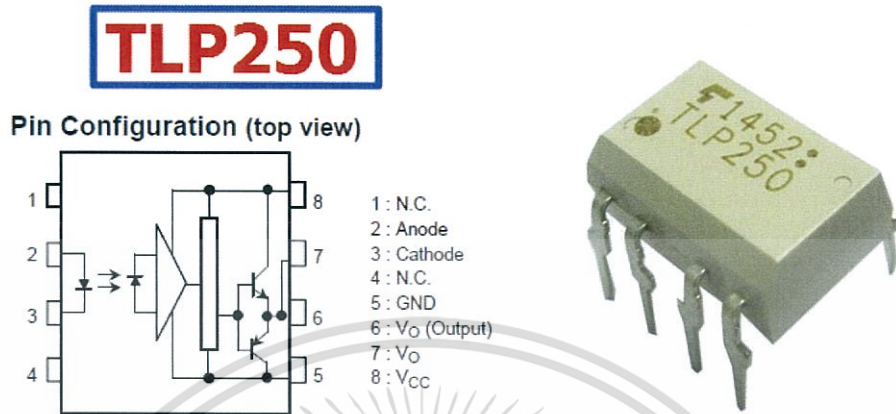
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



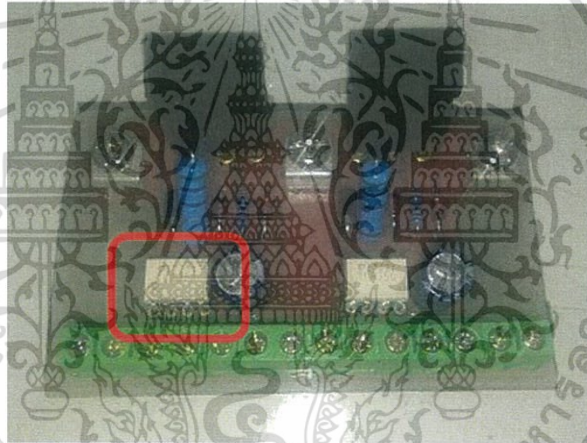
รูปที่ 3.8 Sch. TLP250 และวงจร Full-Bridge converter

3.4 ตัวไดร์ฟสัญญาณพัลส์(PWM) ที่จะไปควบคุม IGBT

ตัวไดร์ฟสัญญาณพัลส์(PWM) ในวงจรคอนเวอร์เตอร์นั้นจะใช้เป็นตัวอุปกรณ์เบอร์ TLP250 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ Power MOSFET Gate Drive มีกระแสขาออกสูงสุดที่ 1.5A



รูปที่ 3.9 การจัดเรียงขาของอุปกรณ์ TLP250



รูปที่ 3.10 ตัวอุปกรณ์ TLP250 บนบอร์ดที่ใช้งานจริง

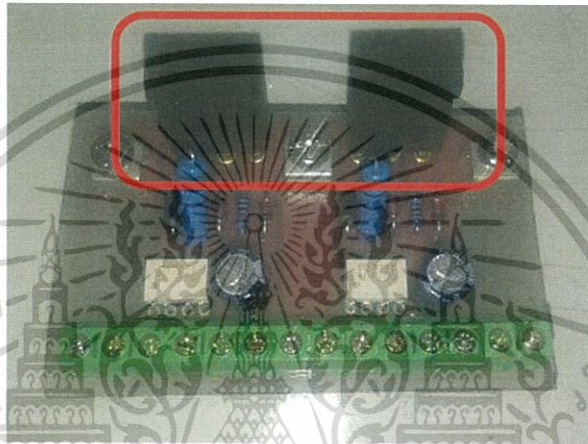
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor or IGBT Transistor)

IGBT ที่ใช้งานในวงจรคอนเวอร์เตอร์คือเบอร์ GT60M303 มีการจัดเรียงขาตั้งรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ตัวอุปกรณ์ที่ใช้และการจัดเรียงขาของ IGBT

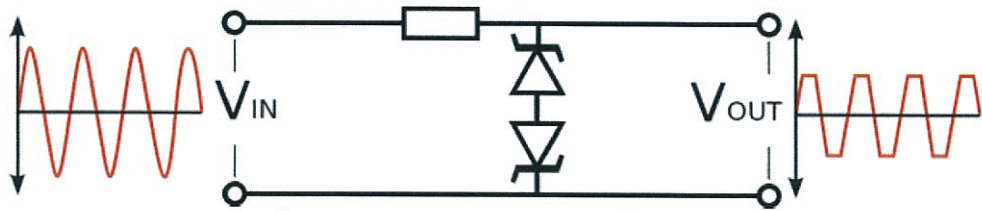


รูปที่ 3.12 ตัวอุปกรณ์ IGBT บนบอร์ดที่ใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 ไดโอดที่เลือกใช้งาน

ซีเนอร์ไดโอดที่เลือกใช้งานคือเบอร์ 1N4744A มีรูปแบบการต่อดังรูปที่ 3.13 ทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดแรงดันด้านบวกและด้านลบที่เกินมากก่อนที่จะเข้าไปที่ IGBT

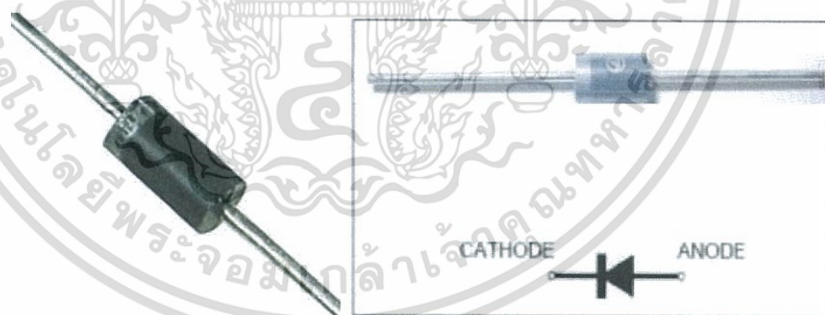


รูปที่ 3.13 รูปแบบการต่อซีเนอร์ไดโอดที่ใช้งาน



รูปที่ 3.14 ซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 1N4744A

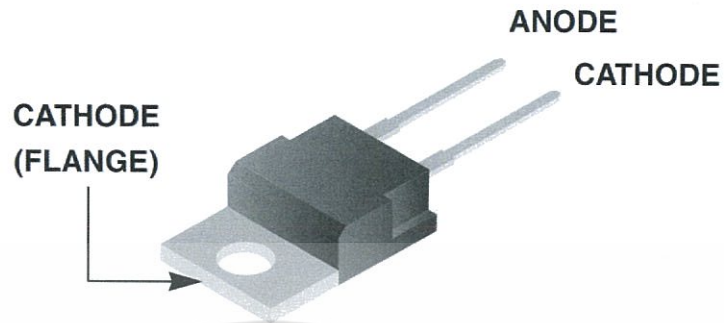
ไดโอดอีกเบอร์ที่เลือกใช้งานคือเบอร์ FR207 มีลักษณะการทำงานเป็น Fast switching for high efficiency ทนแรงดันที่ไบอัสย้อนกลับสูงสุดได้ 1000V และทนกระแสเฉลี่ยได้สูงสุดในการไบอัสตรงที่ 2A



รูปที่ 3.15 ไดโอดเบอร์ FR207

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดโอดอีกเบอร์ที่เลือกใช้งานคือเบอร์ RHRP8120 มีลักษณะการทำงานเป็น HYPERFAST DIODE ทนแรงดันที่ไบอัสย้อนกลับสูงสุดได้ 1200V และทนกระแสเฉลี่ยได้สูงสุดในการไบอัสตรงที่ 8A ใช้ต่อแบบวงจร Bridge Rectifier ที่ขาออก



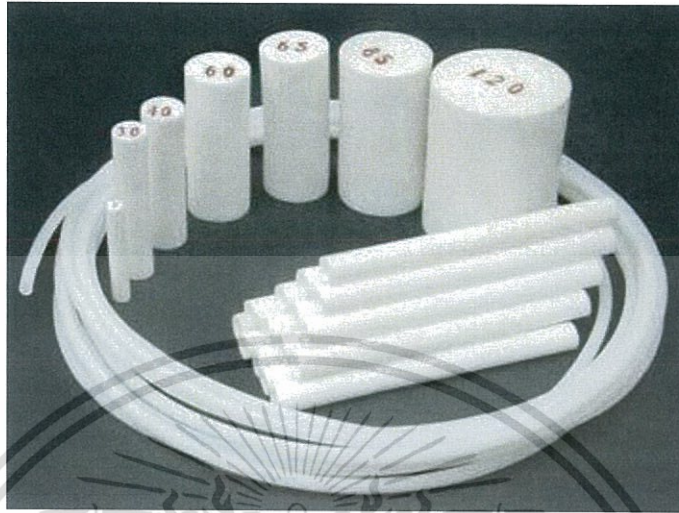
รูปที่ 3.16 ไดโอดเบอร์ RHRP8120



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 การออกแบบหม้อแปลงขาคอก

แกนหม้อแปลงที่ใช้กำหนดรอบไว้ที่ 20 : 50 โดย Bobbin ที่ใช้นั้นมาจากการออกแบบดังรูปที่ 3.18 และวัสดุที่ใช้เป็น แบกกาไลท์(Bakelite)



รูปที่ 3.17 แบกกาไลท์(Bakelite)

แกนเหล็ก ใช้กับความถี่สูง

50Hz-20KHz

แกนผงเหล็กอัด หรือ แกนเฟอร์ไรต์ ใช้กับความถี่สูง

10KHz-0.5MHz

การคำนวณหม้อแปลง

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

$$V_s = 2V_p$$

$$I = \frac{\mu NA}{L}$$

L = ค่าความเหนี่ยวนำ

N = จำนวนรอบของขดลวด

A = พื้นที่หน้าตัดของแกนที่พันขดลวด

μ = ค่าความซึมซาบได้ของชนิดของแกน(เฟอร์ไรต์)

I = ค่ากระแสที่กำหนด

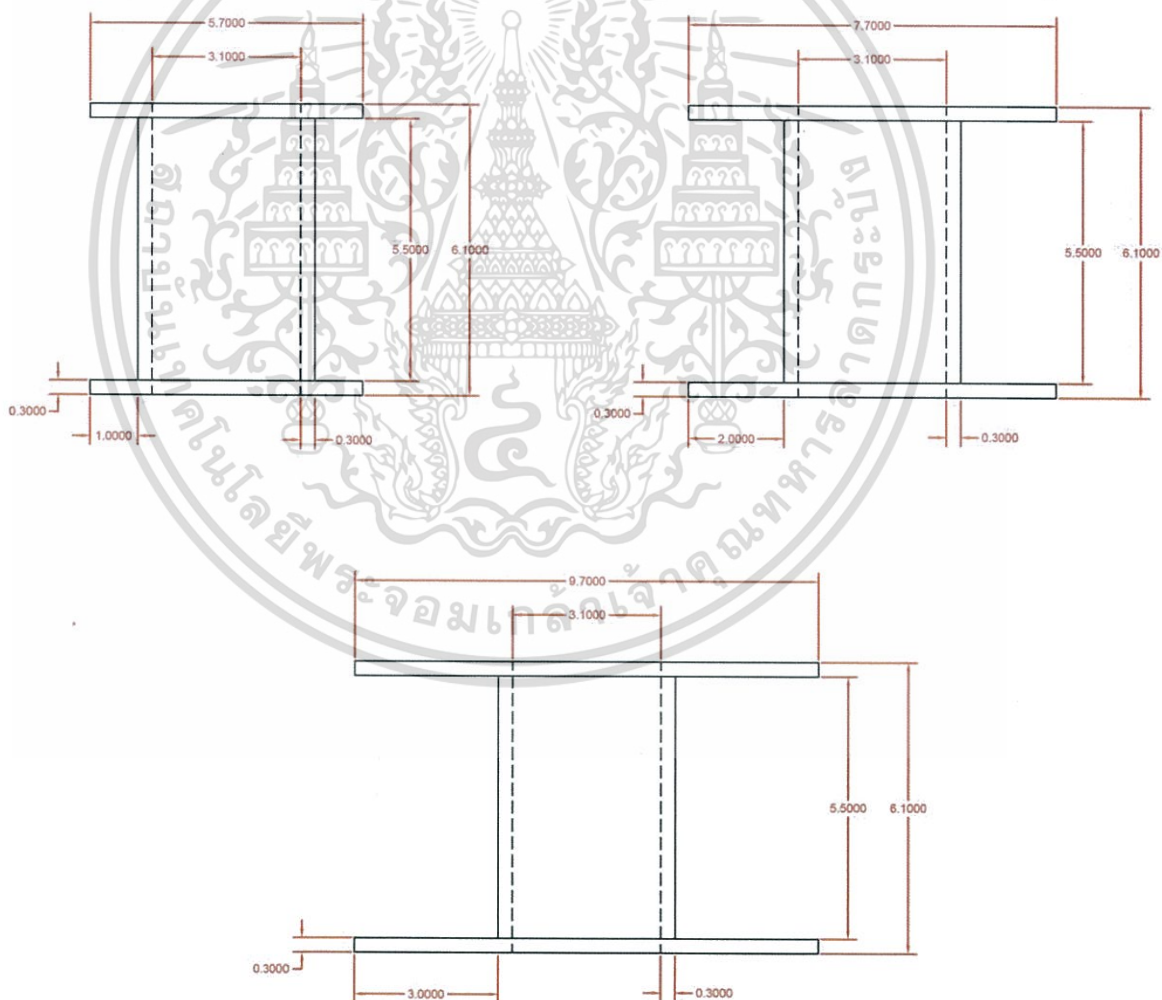
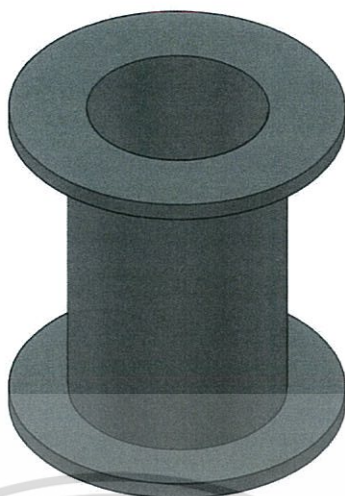
$$L = N^2 A_H$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงขนาดของลวดทองแดงเบอร์ต่างๆ

Wire Gauge and Current Limit Table							
AWG gauge	Conductor Diameter		Ohms per		Maximum amps for		Maximum frequency for 100% skin depth for solid conductor copper
	Inches	mm	1000 ft	mm	Chassis wiring	Power transmission	
15	0.0571	1.45034	3.184	10.44352	28	4.7	8250 Hz
16	0.0508	1.29032	4.016	13.17248	22	3.7	11 kHz
17	0.0453	1.15062	5.064	16.60992	19	2.9	13 kHz
18	0.0403	1.02362	6.385	20.94280	16	2.3	17 kHz
19	0.0359	0.91186	8.051	26.40728	15	1.8	21 kHz
20	0.0320	0.8128	10.15	33.29200	11	1.5	27 kHz
21	0.0285	0.7239	12.80	41.98400	9	1.2	33 kHz
22	0.0254	0.64516	16.14	52.93920	7	0.92	42 kHz
23	0.0226	0.57404	20.36	66.78080	4.9	0.729	53 kHz
24	0.0201	0.51054	25.67	84.19760	3.5	0.577	68 kHz
25	0.0179	0.45466	32.37	106.1736	2.7	0.457	85 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 แบบของ Bobbin ที่ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 Bobbin ที่ใส่ให้หม้อแปลงแล้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 โหลดที่ใช้ในการทดลอง

โหลดที่เลือกใช้งานนั้นจะเป็นตัวต้านทานแบบกระเบื้องที่ต่อแบบอนุกรมกัน การทดลองเบื้องต้นนี้ใช้ความต้านทาน 60 โอห์ม ทนความร้อนได้ถึง 800W



รูปที่ 3.20 ตัวต้านทานที่ใช้งานในการทดลอง



รูปที่ 3.21 ตัวต้านทานตัวละ 220 โอห์ม ที่ใช้งานในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

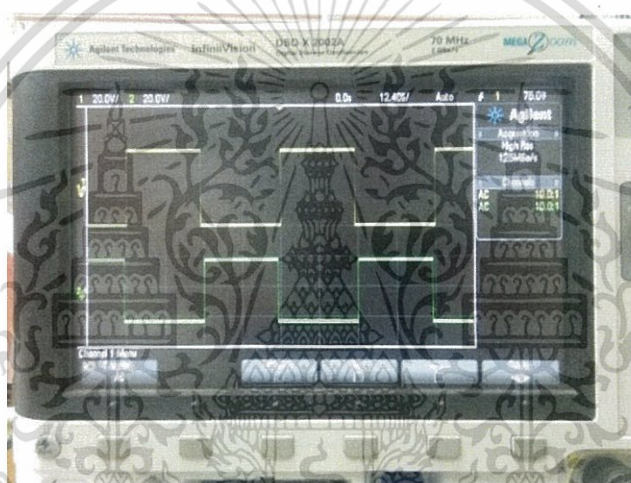
วิธีการทดลอง และผลการทดลองเครื่องจ่ายพลังงานแรงดันสูง

การทดลองเครื่องจ่ายพลังงานแรงดันสูง

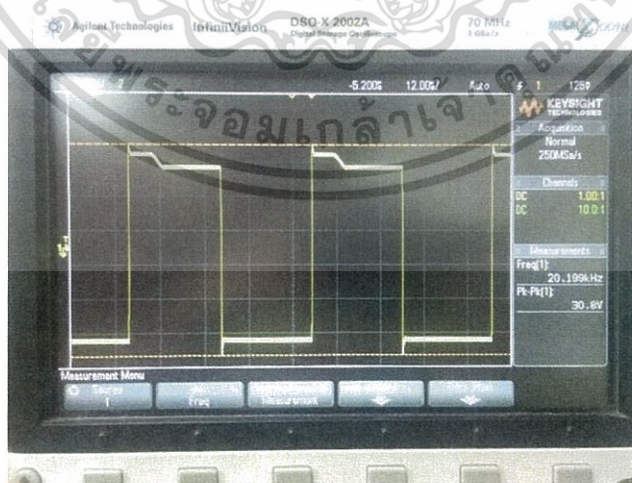
4.1 การสร้างสัญญาณ Gate driver จาก Controller ด้วย TLP250

จาก 220Vac ผ่านหม้อแปลงความถี่ต่ำ 12-0-12 Vac ผ่านวงจร liner regulator ได้เป็น 14-0-14 VDC นำมาจ่ายให้ TLP250 เพื่อใช้งาน

TLP250 ทำงานเป็น Opto-isolation และ Gate driver ที่รับสัญญาณ PWM จาก Controller เพื่อไปควบคุมการทำงานของ IGBT



รูปที่ 4.1 สัญญาณที่ออกมาจาก Controller ไป Gate driver



รูปที่ 4.2 สัญญาณที่ขา Gate ของ IGBT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 สัญญาณที่ออกจากวงจร Full-Bridge converter



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองประสิทธิภาพของวงจร

5.1 สรุปผลการทดลอง

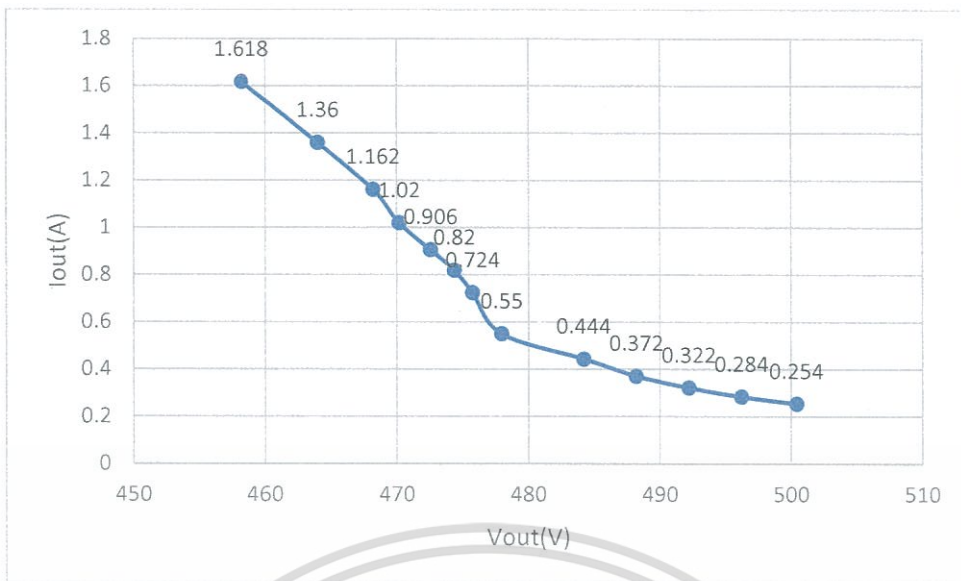
จากการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในหัวข้อที่กำหนดไว้ และจากการทดลองที่ได้ทดลองมาตั้งแต่เริ่มโครงการนั้น เริ่มตั้งแต่โค้ดภาษาซีที่ใช้เขียนในโปรแกรม Arduino เพื่อกำเนิดสัญญาณ PWM สัญญาณ PWM ที่ได้ทั้ง 4 สัญญาณจะไปควบคุมการทำงานของ IGBT 4 ตัว โดยสัญญาณที่ป้อนให้ Q1 และ Q3 จะเหมือนกัน แต่สัญญาณที่ป้อนให้ Q2 และ Q4 จะเป็นสัญญาณตรงข้ามกัน (สัญญาณที่เลื่อนไป 180 องศา) TLP250 เป็นอุปกรณ์ไดโอดและแยกกราวด์ส่วนคอนโทรลเลอร์กับส่วนวงจรคอนเวอร์เตอร์ และ TLP250 จะทำงานเมื่อมีไฟเลี้ยง $-15V$ ถึง $+15V$ วงจรคอนเวอร์เตอร์จะทำงานได้เมื่อป้อนสัญญาณ PWM และป้อนแรงดันให้ขา Drain-Source ของ IGBT แต่ถ้าป้อนแค่สัญญาณ PWM หรือป้อนแรงดันให้ขา Drain-Source ของ IGBT แค่อำนาจใดอย่างหนึ่งให้วงจรคอนเวอร์เตอร์จะทำให้ IGBT เสียหายได้ การทดลองดึงกระแสที่ใส่โหลด (60-360โอห์ม) และมีวงจรเรียงกระแส การทดลองสามารถดึงกระแสได้และมีการกระเพื่อมได้ค่าที่พอรับได้(2-10%)ตั้งผลการทดลอง แต่อุปกรณ์ IGBT ในวงจรคอนเวอร์เตอร์ก็ยังมีเสียหายอยู่ จึงใส่วงจรสับเบอร์เพื่อแก้ปัญหาในส่วนนี้

ตารางที่ 5.1 ตารางผลการทดลอง

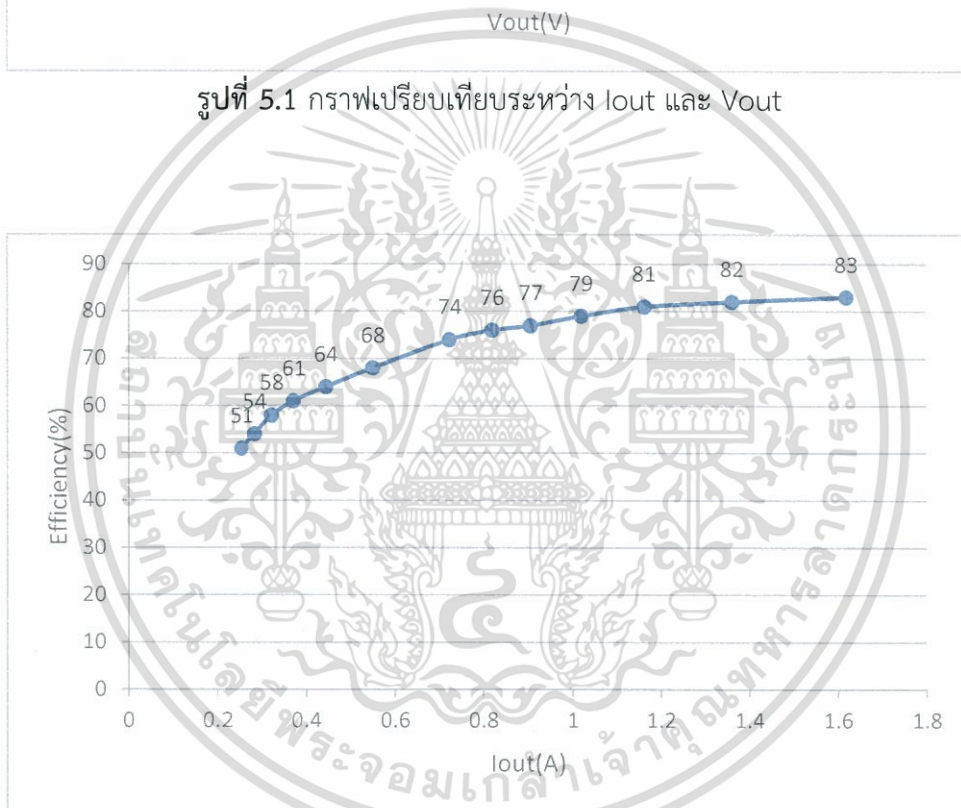
Load(Ohm)	280	340	400	460	520	580
Vin(V)	309.2	309.2	309.2	309.2	309.2	309.2
Iin(A)	2.88	2.48	2.16	1.94	1.78	1.64
Pin(W)	890	766	667	599	550	507
Vout(V)	458.2	464	468.2	470.2	472.6	474.4
Iout(A)	1.618	1.36	1.162	1.02	0.906	0.82
Pout(W)	741	631	544	479	428	389
Efficiency(%)	83	82	81	79	77	76

Load(Ohm)	660	880	1100	1320	1540	1760	1980
Vin(V)	309.2	309.2	309.2	309.2	309.2	309.2	309.2
Iin(A)	1.5	1.24	1.08	0.96	0.88	0.84	0.8
Pin(W)	463	383	333	296	272	259	247
Vout(V)	475.8	478	484.2	488.2	492.2	496.2	500.4
Iout(A)	0.724	0.55	0.444	0.372	0.322	0.284	0.254
Pout(W)	344	262	214	181	158	140	127
Efficiency(%)	74	68	64	61	58	54	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง Iout และ Vout



รูปที่ 5.2 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง Efficiency และ Iout

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. สามารถใช้โปรแกรมภาษาซีออกแบบสัญญาณ PWM ไปควบคุมอุปกรณ์ IGBT ในวงจรคอนเวอร์เตอร์ในการทำงานได้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นได้
2. ในงานวิจัยครั้งต่อไปอาจทำการสร้างหรือพัฒนาอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- วงจร RC สนับเบอร์(Snubber Circuit).//(2560).//สืบค้นเมื่อ 10 พฤศจิกายน 2560.//จาก/
<http://automationreview.blogspot.com/2013/10/snubber-circuit-for-relay-contact.html>
- สุวัฒน์ ตัน.//(2538).//เทคนิคและการออกแบบสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย.//เอนเทลไทย.//
 สืบค้นเมื่อ 13 ตุลาคม 2560,/จาก/
https://www.cpe.ku.ac.th/~yuen/204471/power/switching_regulator/converter.html
- ตัวเหนี่ยวนำ.//(2560).//สืบค้นเมื่อ 14 ตุลาคม 2560.//จากวิกิพีเดีย
<https://th.wikipedia.org/wiki/ตัวเหนี่ยวนำ>
- บริษัท สเตเบิล อิเล็กตริก ซัพพลาย จำกัด.//(2560).//หม้อแปลงไฟฟ้า.//สืบค้นเมื่อ 14 ตุลาคม 2560,/จาก/
www.stable.co.th/index.php?lay=show&ac=article&id=539185370&Ntype=17
- Arduino.//(2560).//Arduino Nano.//สืบค้นเมื่อ 16 ตุลาคม 2560,/จาก/
<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardNano>
- บุญสืบ โพธิ์ศรี ; และคนอื่น ๆ.//(2550).//งานไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น.//
 กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมอาชีวะ.//สืบค้นเมื่อ 16 ตุลาคม 2560,/จาก/
www.mwit.ac.th/~ponchai/webCapacitor/WBTPI_Model/Capacitor/capacitor3.html
- อิเล็กทรอนิกส์.//(2011).//IGBT.//สืบค้นเมื่อ 20 ตุลาคม 2560,/จาก/
<https://www.nawattakam.com/talk/index.php?topic=604.0>

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GT60M303

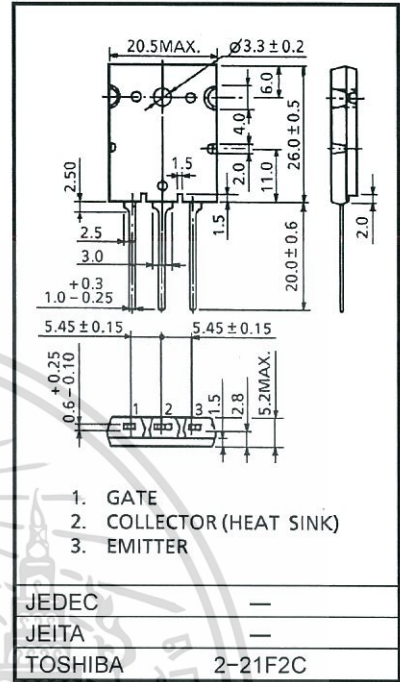
HIGH POWER SWITCHING APPLICATIONS

- Fourth generation IGBT
- FRD included between emitter and collector
- Enhancement mode type
- High speed IGBT : $t_f = 0.25\mu s$ (TYP.)
FRD : $t_{rr} = 0.7\mu s$ (TYP.)
- Low saturation voltage : $V_{CE(sat)} = 2.1V$ (TYP.)

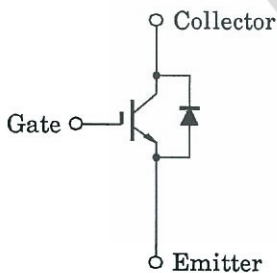
MAXIMUM RATINGS (Ta = 25°C)

CHARACTERISTIC	SYMBOL	RATING	UNIT
Collector-Emitter Voltage	V_{CES}	900	V
Gate-Emitter Voltage	V_{GES}	±25	V
Collector Current	DC	I_C	60
	1ms	I_{CP}	120
Emitter-Collector Forward Current	DC	I_{ECF}	15
	1ms	I_{ECFP}	120
Collector Power Dissipation (Tc = 25°C)	P_c	170	W
Junction Temperature	T_j	150	°C
Storage Temperature Range	T_{stg}	-55~150	°C
Screw Torque	—	0.8	N·m

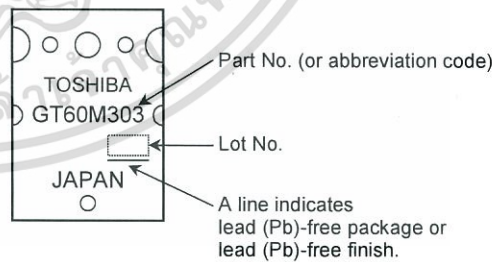
Unit: mm



EQUIVALENT CIRCUIT

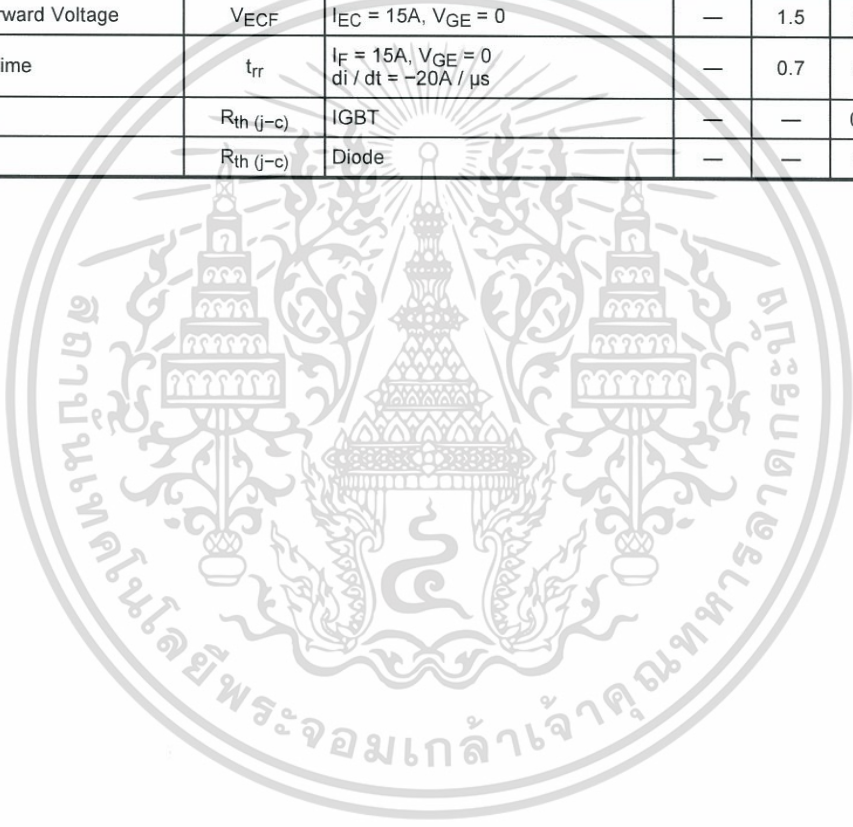


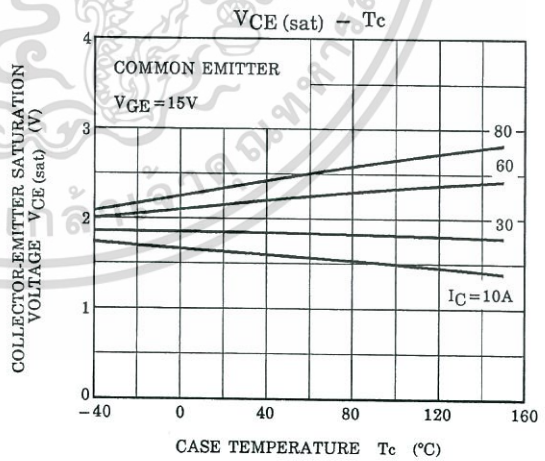
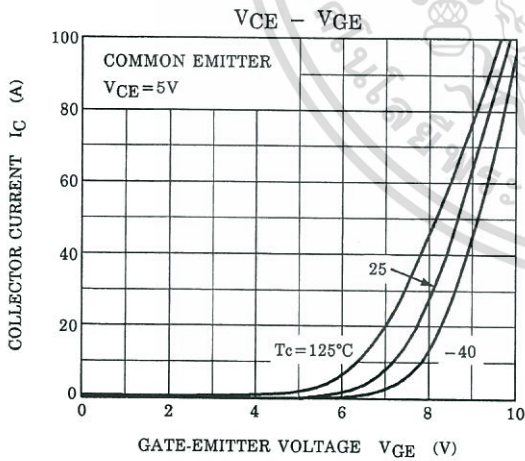
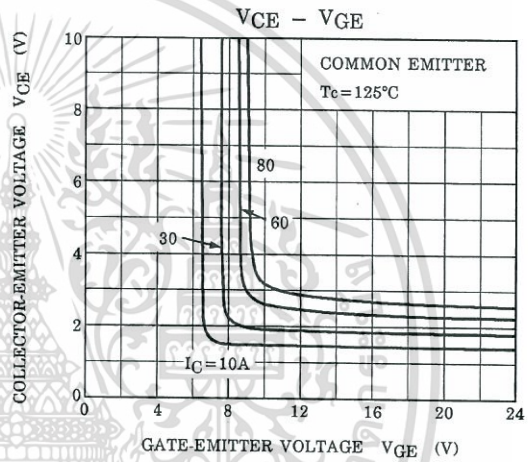
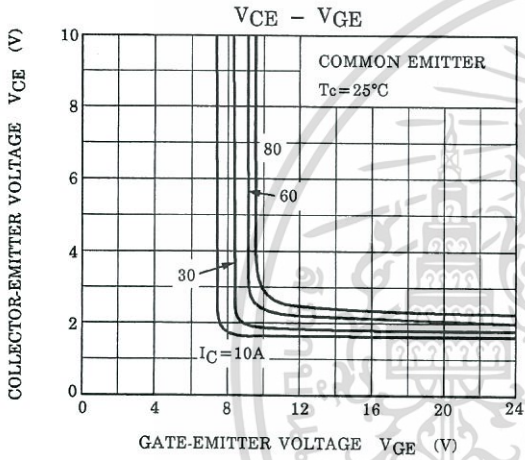
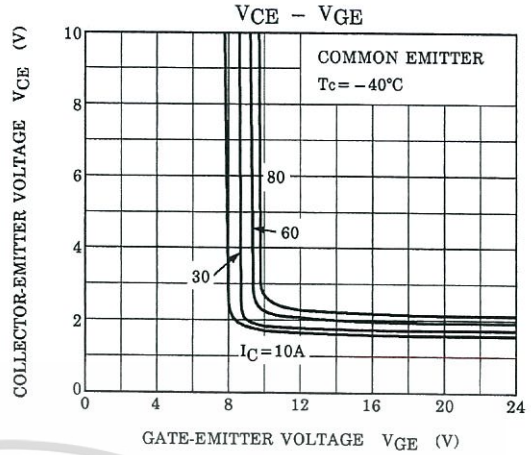
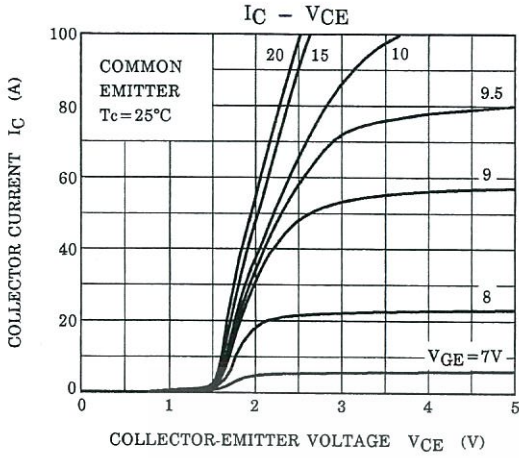
MARKING

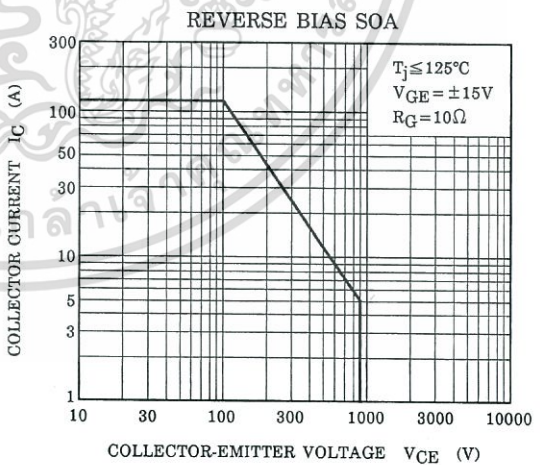
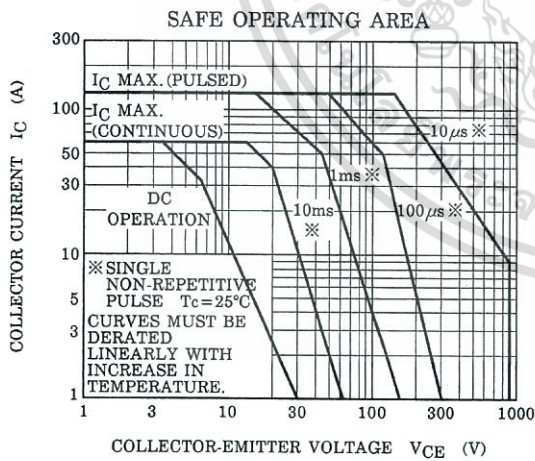
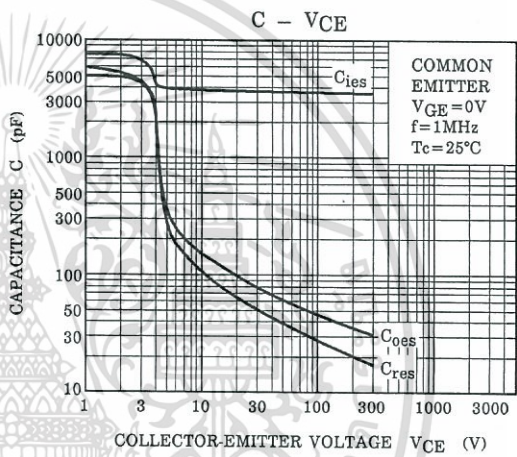
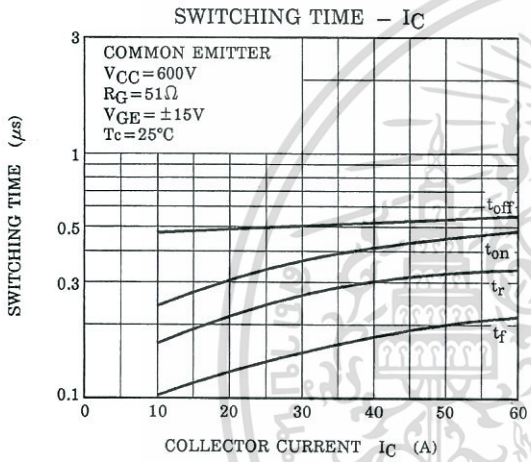
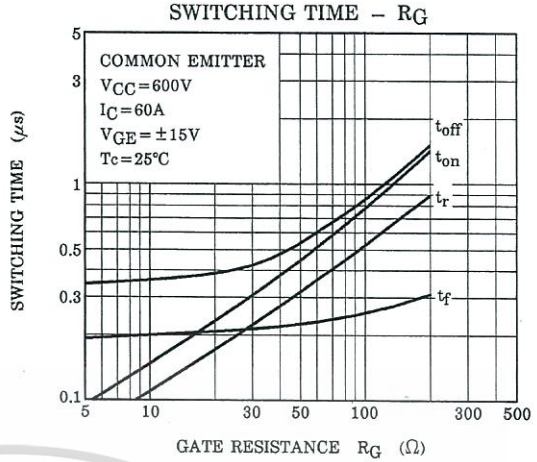
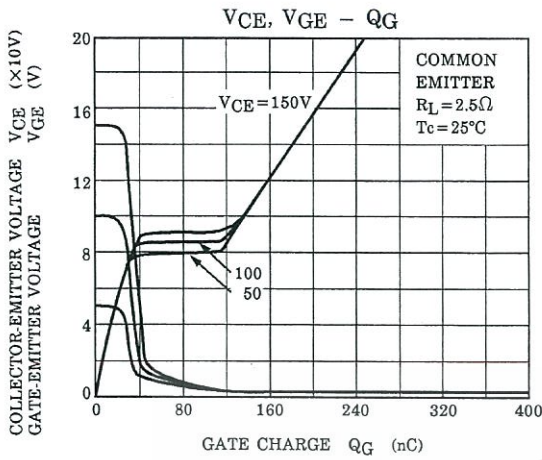


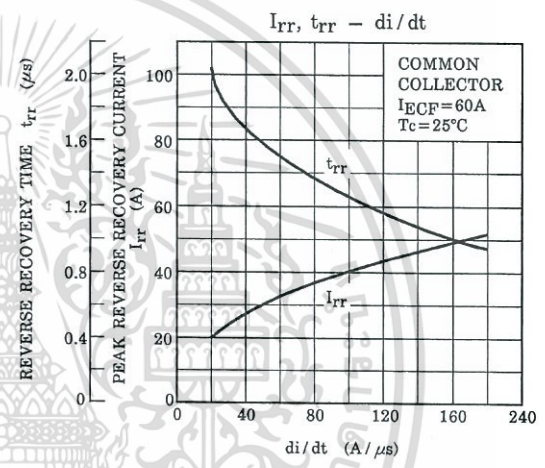
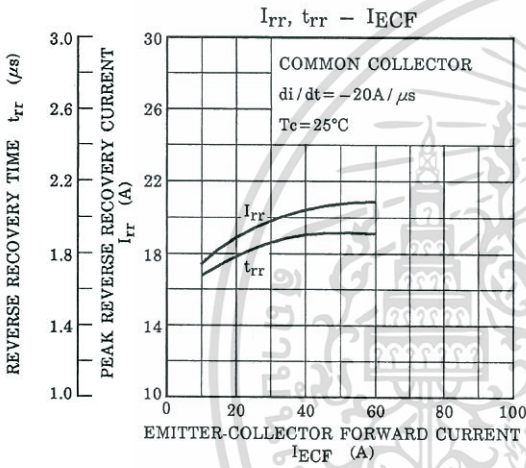
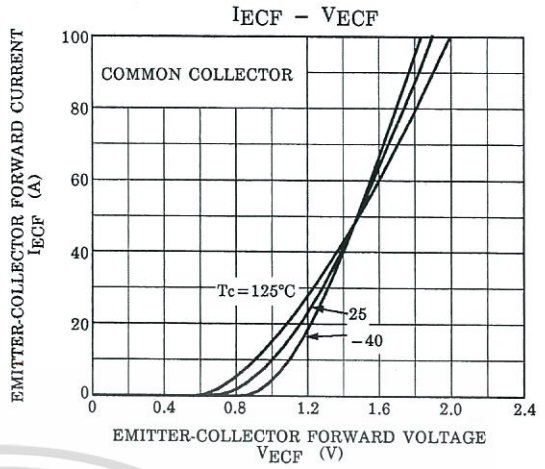
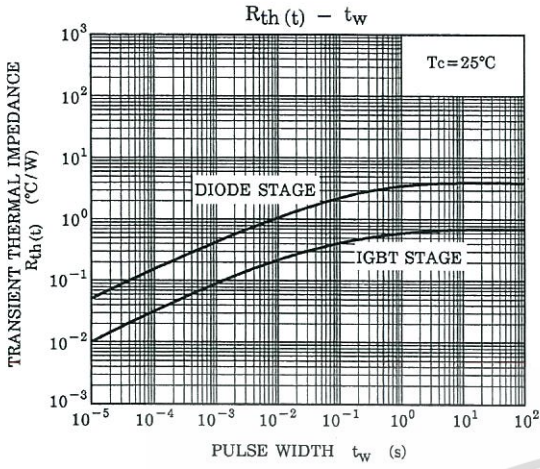
ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Ta = 25°C)

CHARACTERISTIC	SYMBOL	TEST CONDITION	MIN	TYP.	MAX	UNIT	
Gate Leakage Current	I _{GES}	V _{GE} = ±25V, V _{CE} = 0	—	—	±500	nA	
Collector Cut-off Current	I _{CES}	V _{CE} = 900V, V _{GE} = 0	—	—	1.0	mA	
Gate-Emitter Cut-off Voltage	V _{GE (OFF)}	I _C = 60mA, V _{CE} = 5V	3.0	—	6.0	V	
Collector-Emitter Saturation Voltage	V _{CE (sat) (1)}	I _C = 10A, V _{GE} = 15V	—	1.6	2.2	V	
Collector-Emitter Saturation Voltage	V _{CE (sat) (2)}	I _C = 60A, V _{GE} = 15V	—	2.1	2.7	V	
Input Capacitance	C _{ies}	V _{CE} = 10V, V _{GE} = 0, f = 1MHz	—	3800	—	pF	
Switching Time	Rise Time	t _r		—	0.35	0.60	μs
	Turn-On Time	t _{on}		—	0.46	0.75	
	Fall Time	t _f		—	0.25	0.40	
	Turn-Off Time	t _{off}		—	0.60	0.70	
Emitter-Collector Forward Voltage	V _{ECF}	I _{EC} = 15A, V _{GE} = 0	—	1.5	2.0	V	
Reverse Recovery Time	t _{rr}	I _F = 15A, V _{GE} = 0 di/dt = -20A/μs	—	0.7	2.5	μs	
Thermal Resistance	R _{th (j-c)}	IGBT	—	—	0.74	°C/W	
Thermal Resistance	R _{th (j-c)}	Diode	—	—	4.0	°C/W	









RESTRICTIONS ON PRODUCT USE

030619EAA

- 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.
- TOSHIBA products should not be embedded to the downstream products which are prohibited to be produced and sold, under any law and regulations.

TLP250

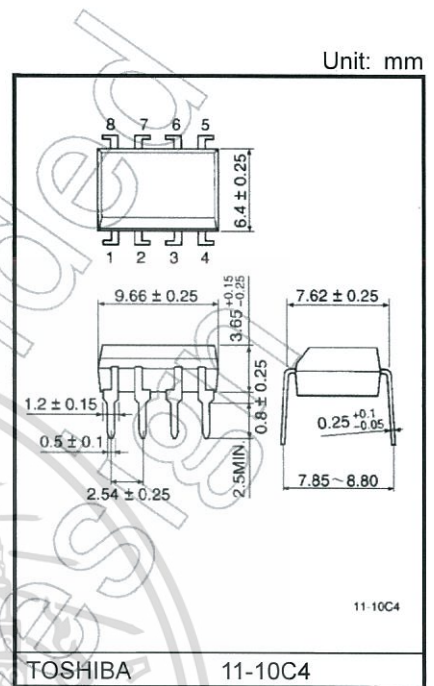
Industrial Inverter
 Inverter For Air Conditioner
 IGBT Gate Drive
 Power MOS FET Gate Drive

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: 5mA(max)
- Supply current : 11mA(max)
- Supply voltage : 10-35V
- Output current : $\pm 1.5A$ (max)
- Switching time t_{pLH}/t_{pHL} : 0.5 μs (max)
- Isolation voltage: 2500V_{rms}(min)
- UL recognized: UL1577, file No.E67349
- c-UL approved : CSA Component Acceptance Service No. 5A, File No.E67349

• Option(D4)
 VDE Approved : EN60747-5- 5

Note: When a EN60747-5-5 approved type is needed, Please designate "Option(D4)"

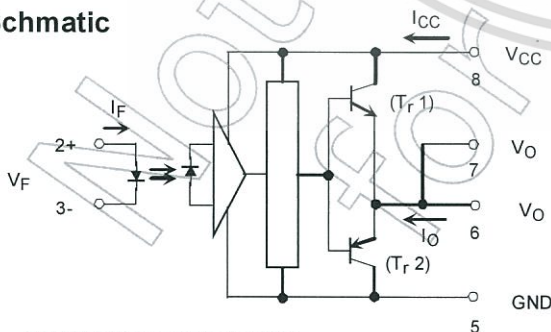


Weight: 0.54 g (typ.)

Truth Table

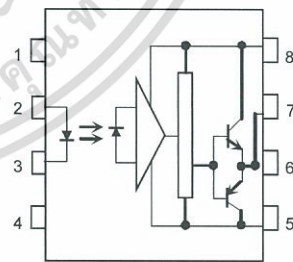
		Tr1	Tr2
Input LED	On	On	Off
	Off	Off	On

Schematic



A 0.1 μF bypass capacitor must be connected between pin 8 and 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_{C C}

Start of commercial production

1990-11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านใด ๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ถือทั้งห้าฉบับให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Absolute Maximum Ratings (Ta = 25°C)

Characteristic		Symbol	Rating	Unit	
LED	Forward current	IF	20	mA	
	Forward current derating (Ta ≥ 70°C)	ΔIF / ΔTa	-0.36	mA / °C	
	Peak transient forward current (Note 1)	IFPT	1	A	
	Reverse voltage	VR	5	V	
	Diode power dissipation	PD	40	mW	
	Diode power dissipation derating (Ta ≥ 70°C)	ΔPD / °C	-0.72	mW / °C	
	Junction temperature	Tj	125	°C	
Detector	"H" peak output current (PW ≤ 2.5μs, f ≤ 15kHz) (Note 2)	IOPH	-1.5	A	
	"L" peak output current (PW ≤ 2.5μs, f ≤ 15kHz) (Note 2)	IOPL	+1.5	A	
	Output voltage	VO	(Ta ≤ 70°C)	35	V
			(Ta ≤ 85°C)	24	
	Supply voltage	VCC	(Ta ≤ 70°C)	35	V
			(Ta ≤ 85°C)	24	
	Output voltage derating (Ta ≥ 70°C)	ΔVO / ΔTa	-0.73	V / °C	
	Supply voltage derating (Ta ≥ 70°C)	ΔVCC / ΔTa	-0.73	V / °C	
	Power dissipation	PC	800	mW	
	Power dissipation derating (Ta ≥ 70°C)	ΔPC / °C	-14.5	mW / °C	
	Junction temperature	Tj	125	°C	
Operating frequency (Note 3)	f	25	kHz		
Operating temperature range	Topr	-20 to 85	°C		
Storage temperature range	Tstg	-55 to 125	°C		
Lead soldering temperature (10 s)	Tsol	260	°C		
Isolation voltage (AC, 60 s., R.H. ≤ 60%) (Note 4)	BVS	2500	Vrms		

Note: Using continuously under heavy loads (e.g. the application of high temperature/current/voltage and the significant change in temperature, etc.) may cause this product to decrease in the reliability significantly even if the operating conditions (i.e. operating temperature/current/voltage, etc.) are within the absolute maximum ratings.

Please design the appropriate reliability upon reviewing the Toshiba Semiconductor Reliability Handbook ("Handling Precautions"/"Derating Concept and Methods") and individual reliability data (i.e. reliability test report and estimated failure rate, etc.).

Note 1: Pulse width PW ≤ 1μs, 300pps

Note 2: Exponential waveform

Note 3: Exponential waveform, IOPH ≤ -1.0A (≤ 2.5μs), IOPL ≤ +1.0A (≤ 2.5μs)

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

Recommended Operating Conditions

Characteristic	Symbol	Min	Typ.	Max	Unit
Input current, on	IF(ON)	7	8	10	mA
Input voltage, off	VE(OFF)	0	—	0.8	V
Supply voltage	VCC	15	—	30	V
Peak output current	IOPH/IOPL	—	—	±0.5	A
Operating temperature	Topr	-20	25	85	°C

Note: Recommended operating conditions are given as a design guideline to obtain expected performance of the device. Additionally, each item is an independent guideline respectively. In developing designs using this product, please confirm specified characteristics shown in this document.

Note : 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.

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

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

Characteristic		Symbol	Test Circuit	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 V, f = 1MHz, Ta = 25°C	—	45	250	pF	
Output current	"H" level	I _{OPH}	1	V _{CC} = 30V (Note 1)	I _F = 10 mA V ₈₋₆ = 4V	-0.5	-1.5	—	A
	"L" level	I _{OPL}	2		I _F = 0 mA V ₆₋₅ = 2.5V	0.5	2	—	
Output voltage	"H" level	V _{OH}	3	V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω, I _F = 5mA	11	12.8	—	V	
	"L" level	V _{OL}	4	V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω, V _F = 0.8V	—	-14.2	-12.5		
Supply current	"H" level	I _{CCH}	—	V _{CC} = 30V, I _F = 10mA Ta = 25°C	—	7	—	mA	
				V _{CC} = 30V, I _F = 10mA	—	—	11		
	"L" level	I _{CCL}	—	V _{CC} = 30V, I _F = 0mA Ta = 25°C	—	7.5	—		
				V _{CC} = 30V, I _F = 0mA	—	—	11		
Threshold input current	"Output L→H"	I _{FLH}	—	V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω, V _O > 0V	—	1.2	5	mA	
Threshold input voltage	"Output H→L"	V _{FHL}	—	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 V, 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

Note 1: Duration of IO time ≤ 50μs

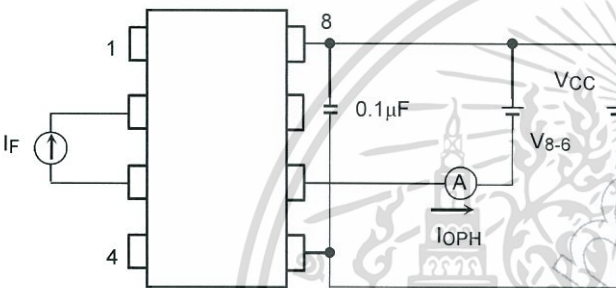
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

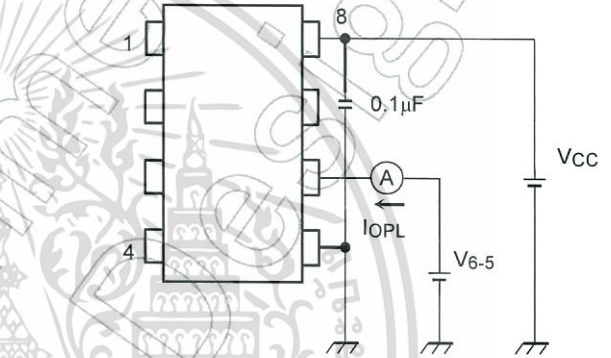
Characteristic	Symbol	Test Circuit	Test Condition	Min	Typ.	Max	Unit
Propagation delay time	L→H	5	IF = 8mA VCC1 = +15V, VEE1 = -15V RL = 200Ω	—	0.15	0.5	μs
	H→L			—	0.15	0.5	
Common mode transient immunity at high level output	CMH	6	VCM = 600V, IF = 8mA VCC = 30V, Ta = 25°C	-5000	—	—	V / μs
Common mode transient immunity at low level output	CML		VCM = 600V, IF = 0mA VCC = 30V, Ta = 25°C	5000	—	—	V / μs

Note: All typical values are at Ta = 25°C

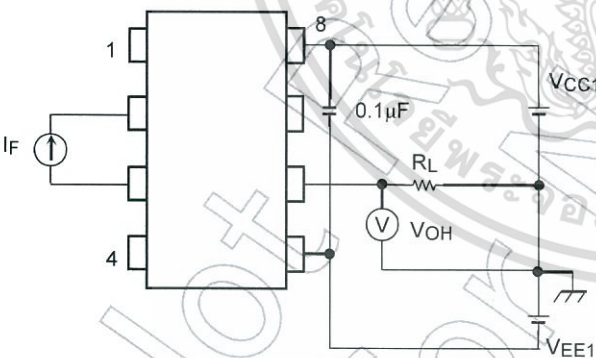
Test Circuit 1 : IOPH



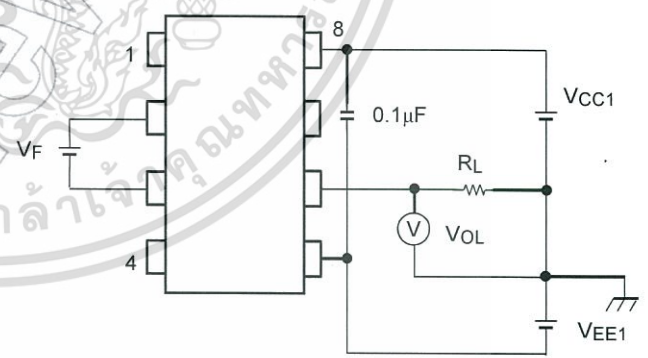
Test Circuit 2 : IOPL



Test Circuit 3 : VOH

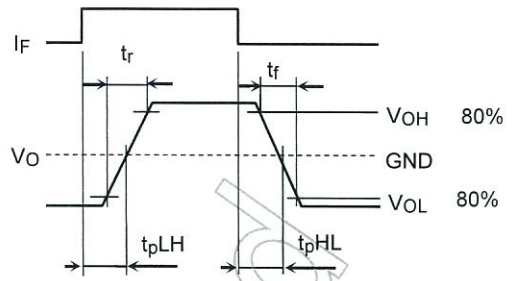
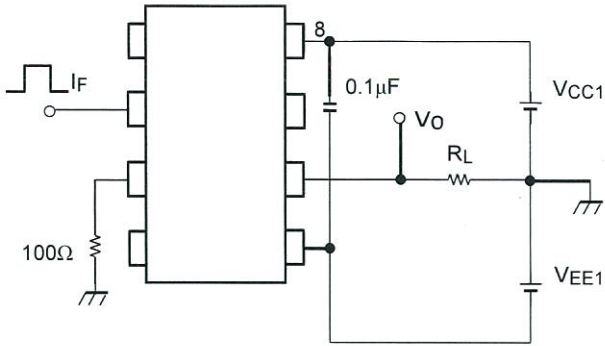


Test Circuit 4 : VOL

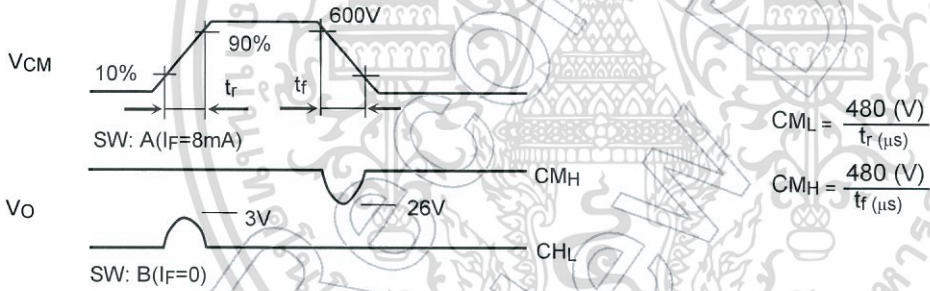
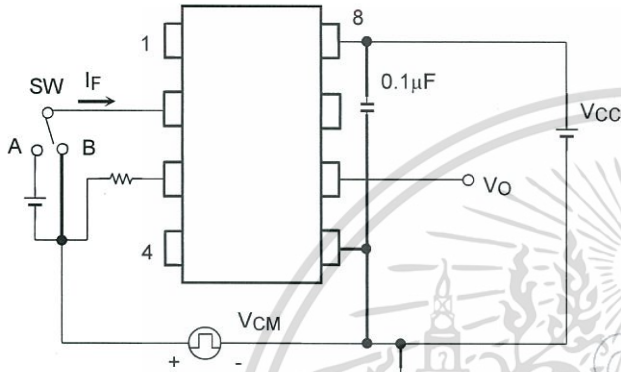


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ลึกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

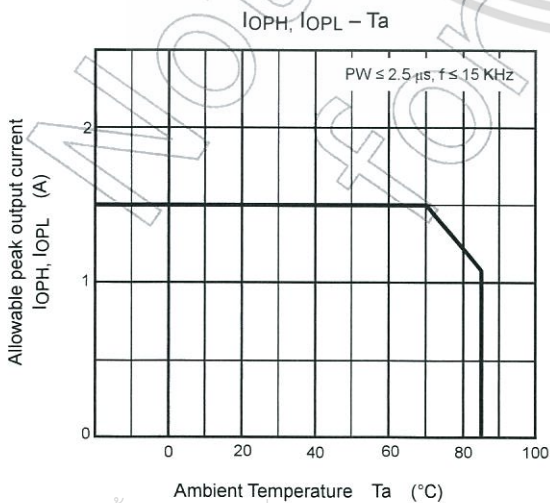
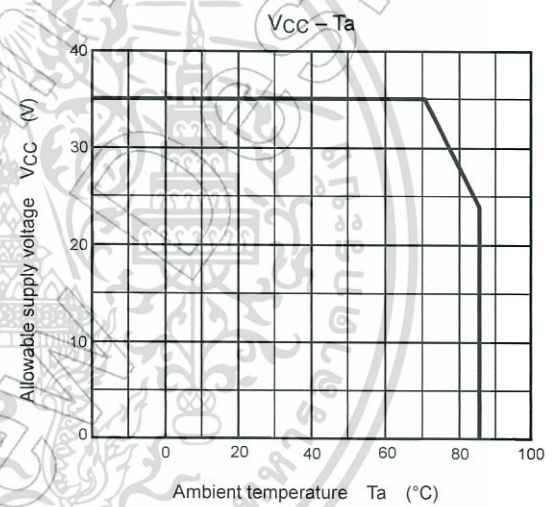
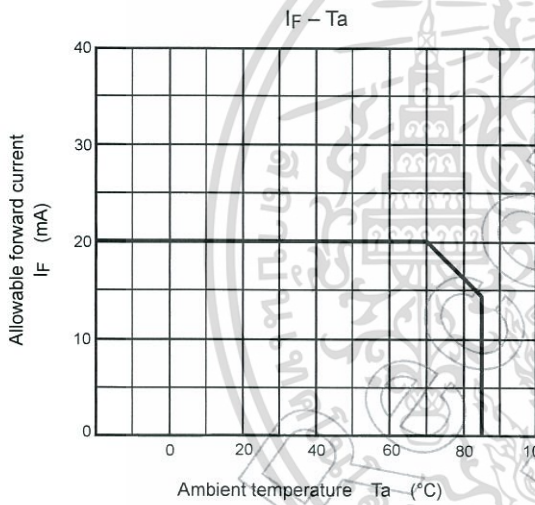
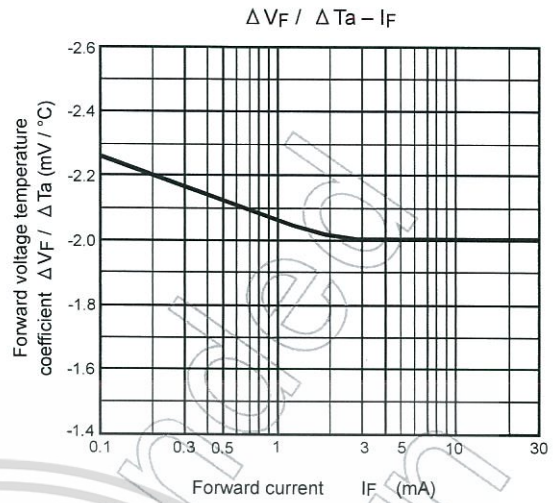
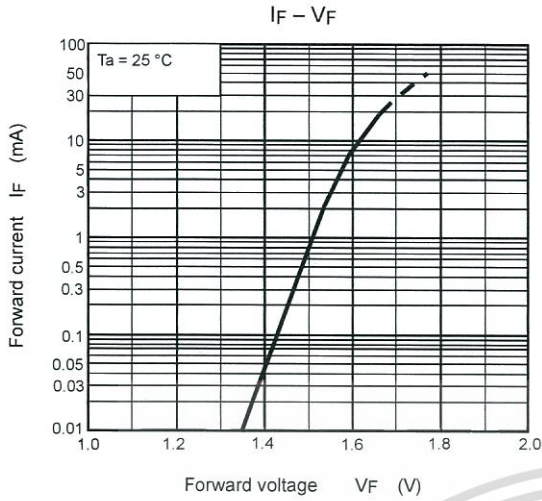
Test Circuit 5: t_{pLH} , t_{pHL} , t_r , t_f



Test Circuit 6: CM_H , CM_L



CM_L (CM_H) 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
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RESTRICTIONS ON PRODUCT USE

- Toshiba Corporation, and its subsidiaries and affiliates (collectively "TOSHIBA"), reserve the right to make changes to the information in this document, and related hardware, software and systems (collectively "Product") without notice.
- This document and any information herein may not be reproduced without prior written permission from TOSHIBA. Even with TOSHIBA's written permission, reproduction is permissible only if reproduction is without alteration/omission.
- Though TOSHIBA works continually to improve Product's quality and reliability, Product can malfunction or fail. Customers are responsible for complying with safety standards and for providing adequate designs and safeguards for their hardware, software and systems which minimize risk and avoid situations in which a malfunction or failure of Product could cause loss of human life, bodily injury or damage to property, including data loss or corruption. Before customers use the Product, create designs including the Product, or incorporate the Product into their own applications, customers must also refer to and comply with (a) the latest versions of all relevant TOSHIBA information, including without limitation, this document, the specifications, the data sheets and application notes for Product and the precautions and conditions set forth in the "TOSHIBA Semiconductor Reliability Handbook" and (b) the instructions for the application with which the Product will be used with or for. Customers are solely responsible for all aspects of their own product design or applications, including but not limited to (a) determining the appropriateness of the use of this Product in such design or applications; (b) evaluating and determining the applicability of any information contained in this document, or in charts, diagrams, programs, algorithms, sample application circuits, or any other referenced documents; and (c) validating all operating parameters for such designs and applications. **TOSHIBA ASSUMES NO LIABILITY FOR CUSTOMERS' PRODUCT DESIGN OR APPLICATIONS.**
- **PRODUCT IS NEITHER INTENDED NOR WARRANTED FOR USE IN EQUIPMENTS OR SYSTEMS THAT REQUIRE EXTRAORDINARILY HIGH LEVELS OF QUALITY AND/OR RELIABILITY, AND/OR A MALFUNCTION OR FAILURE OF WHICH MAY CAUSE LOSS OF HUMAN LIFE, BODILY INJURY, SERIOUS PROPERTY DAMAGE AND/OR SERIOUS PUBLIC IMPACT ("UNINTENDED USE").** Except for specific applications as expressly stated in this document, Unintended Use includes, without limitation, equipment used in nuclear facilities, equipment used in the aerospace industry, medical equipment, equipment used for automobiles, trains, ships and other transportation, traffic signaling equipment, equipment used to control combustions or explosions, safety devices, elevators and escalators, devices related to electric power, and equipment used in finance-related fields. **IF YOU USE PRODUCT FOR UNINTENDED USE, TOSHIBA ASSUMES NO LIABILITY FOR PRODUCT.** For details, please contact your TOSHIBA sales representative.
- Do not disassemble, analyze, reverse-engineer, alter, modify, translate or copy Product, whether in whole or in part.
- Product shall not be used for or incorporated into any products or systems whose manufacture, use, or sale is prohibited under any applicable laws or regulations.
- The information contained herein is presented only as guidance for Product use. No responsibility is assumed by TOSHIBA for any infringement of patents or any other intellectual property rights of third parties that may result from the use of Product. No license to any intellectual property right is granted by this document, whether express or implied, by estoppel or otherwise.
- **ABSENT A WRITTEN SIGNED AGREEMENT, EXCEPT AS PROVIDED IN THE RELEVANT TERMS AND CONDITIONS OF SALE FOR PRODUCT, AND TO THE MAXIMUM EXTENT ALLOWABLE BY LAW, TOSHIBA (1) ASSUMES NO LIABILITY WHATSOEVER, INCLUDING WITHOUT LIMITATION, INDIRECT, CONSEQUENTIAL, SPECIAL, OR INCIDENTAL DAMAGES OR LOSS, INCLUDING WITHOUT LIMITATION, LOSS OF PROFITS, LOSS OF OPPORTUNITIES, BUSINESS INTERRUPTION AND LOSS OF DATA, AND (2) DISCLAIMS ANY AND ALL EXPRESS OR IMPLIED WARRANTIES AND CONDITIONS RELATED TO SALE, USE OF PRODUCT, OR INFORMATION, INCLUDING WARRANTIES OR CONDITIONS OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, ACCURACY OF INFORMATION, OR NONINFRINGEMENT.**
- GaAs (Gallium Arsenide) is used in Product. GaAs is harmful to humans if consumed or absorbed, whether in the form of dust or vapor. Handle with care and do not break, cut, crush, grind, dissolve chemically or otherwise expose GaAs in Product.
- Do not use or otherwise make available Product or related software or technology for any military purposes, including without limitation, for the design, development, use, stockpiling or manufacturing of nuclear, chemical, or biological weapons or missile technology products (mass destruction weapons). Product and related software and technology may be controlled under the applicable export laws and regulations including, without limitation, the Japanese Foreign Exchange and Foreign Trade Law and the U.S. Export Administration Regulations. Export and re-export of Product or related software or technology are strictly prohibited except in compliance with all applicable export laws and regulations.
- Please contact your TOSHIBA sales representative for details as to environmental matters such as the RoHS compatibility of Product. Please use Product in compliance with all applicable laws and regulations that regulate the inclusion or use of controlled substances, including without limitation, the EU RoHS Directive. **TOSHIBA ASSUMES NO LIABILITY FOR DAMAGES OR LOSSES OCCURRING AS A RESULT OF NONCOMPLIANCE WITH APPLICABLE LAWS AND REGULATIONS.**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ลึกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FR201 - FR207-STR

PRV : 50 - 1000 Volts

Io : 2.0 Amperes

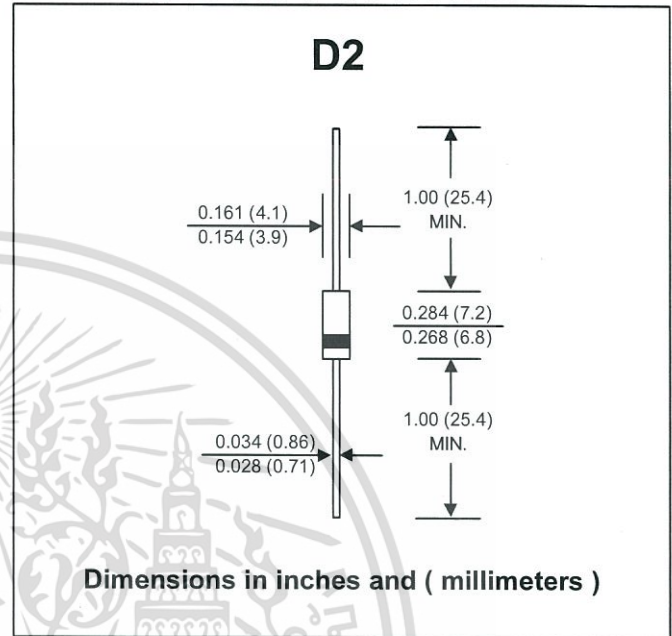
FEATURES :

- * High current capability
- * High surge current capability
- * High reliability
- * Low reverse current
- * Low forward voltage drop
- * Fast switching for high efficiency
- * Pb / RoHS Free

MECHANICAL DATA :

- * Case : D2 Molded plastic
- * Epoxy : UL94V-O rate flame retardant
- * Lead : Axial lead solderable per MIL-STD-202, Method 208 guaranteed
- * Polarity : Color band denotes cathode end
- * Mounting position : Any
- * Weight : 0.465 gram

FAST RECOVERY RECTIFIER DIODES



MAXIMUM RATINGS AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Rating at 25 °C ambient temperature unless otherwise specified.
Single phase, half wave, 60 Hz, resistive or inductive load.
For capacitive load, derate current by 20%.

RATING	SYMBOL	FR201	FR202	FR203	FR204	FR205	FR206	FR207	FR207-STR	UNIT	
Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage	VRRM	50	100	200	400	600	800	1000	1000	V	
Maximum RMS Voltage	VRMS	35	70	140	280	420	560	700	700	V	
Maximum DC Blocking Voltage	VDC	50	100	200	400	600	800	1000	1000	V	
Maximum Average Forward Current 0.375"(9.5mm) Lead Length Ta = 55 °C	IF(AV)	2.0									A
Peak Forward Surge Current, 8.3ms Single half sine wave Superimposed on rated load (JEDEC Method)	IFSM	75									A
Maximum Peak Forward Voltage at IF = 2.0 Amps.	VF	1.3									V
Maximum DC Reverse Current Ta = 25 °C at Rated DC Blocking Voltage Ta = 100 °C	IR	10									µA
	IR(H)	500									µA
Maximum Reverse Recovery Time (Note 1)	Trr	150			250		500	250		ns	
Typical Junction Capacitance (Note 2)	CJ	15									pf
Junction Temperature Range	TJ	- 65 to + 150									°C
Storage Temperature Range	TSTG	- 65 to + 150									°C

Notes :

- (1) Reverse Recovery Test Conditions : IF = 0.5 A, IR = 1.0 A, Irr = 0.25 A.
- (2) Measured at 1.0 MHz and applied reverse voltage of 4.0 Vdc

RATING AND CHARACTERISTIC CURVES (FR201 - FR207-STR)

FIG.1 - REVERSE RECOVERY TIME CHARACTERISTIC AND TEST CIRCUIT DIAGRAM

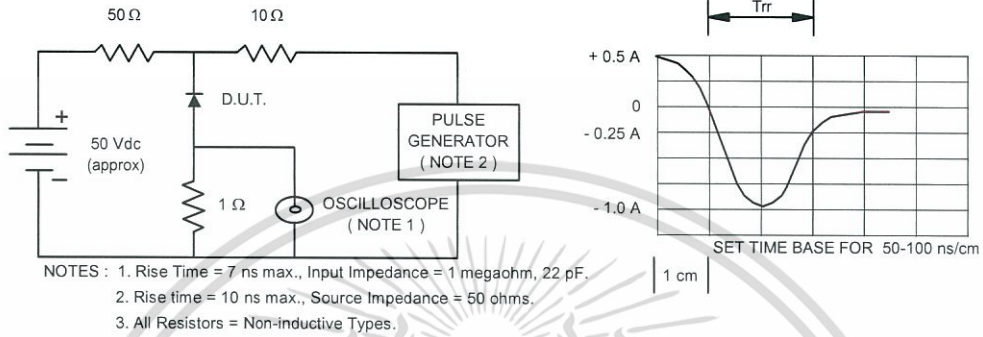


FIG.2 - DERATING CURVE FOR OUTPUT RECTIFIED CURRENT

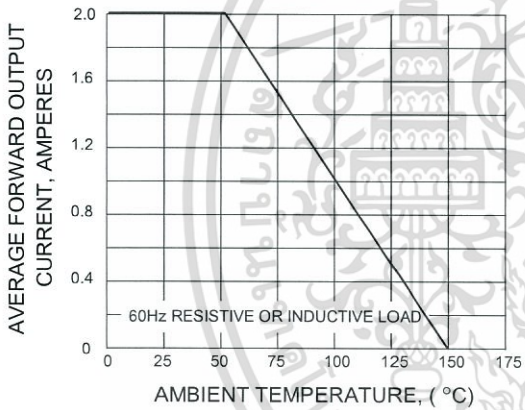


FIG.3 - MAXIMUM NON-REPETITIVE PEAK FORWARD SURGE CURRENT

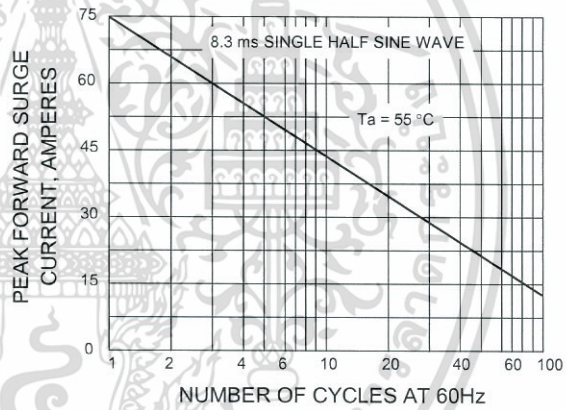


FIG.4 - TYPICAL FORWARD CHARACTERISTICS

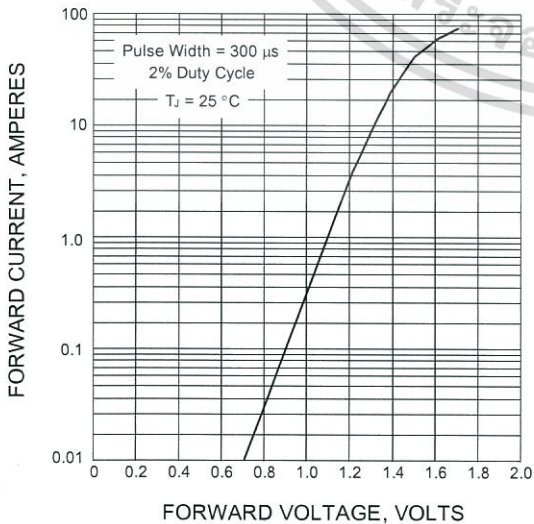
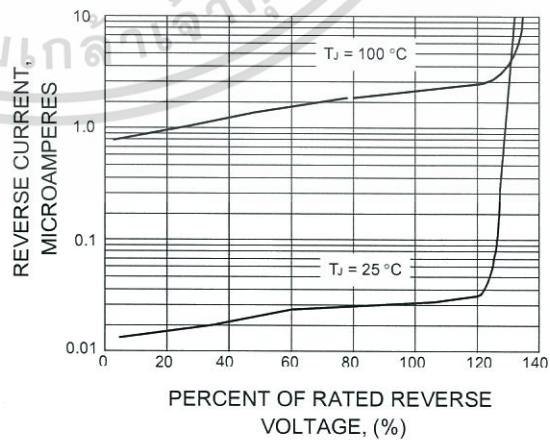


FIG.5 - TYPICAL REVERSE CHARACTERISTICS



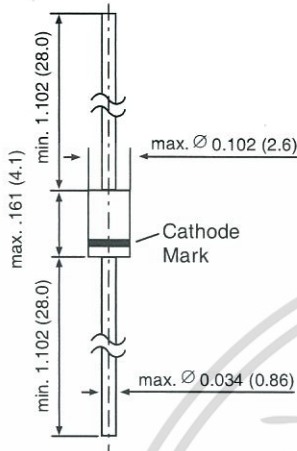
1N4728 THRU 1N4764

ZENER DIODES

FEATURES

- ◆ Silicon Planar Power Zener Diodes
- ◆ For use in stabilizing and clipping circuits with high power rating.
- ◆ Standard Zener voltage tolerance is $\pm 10\%$. Add suffix "A" for $\pm 5\%$ tolerance. Other Zener voltages and tolerances are available upon request.
- ◆ These diodes are also available in the MELF case with type designation ZM4728 thru ZM4764

DO-41 Glass



Dimensions in inches and (millimeters)

MECHANICAL DATA

Case: DO-41 Glass Case

Weight: approx. 0.35 g

MAXIMUM RATINGS

Ratings at 25°C ambient temperature unless otherwise specified.

	SYMBOL	VALUE	UNIT
Zener Current (see Table "Characteristics")			
Power Dissipation at $T_{amb} = 25^\circ\text{C}$	P_{tot}	1.0 ⁽¹⁾	Watts
Junction Temperature	T_j	175	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	T_s	-65 to +175	$^\circ\text{C}$

Characteristics at $T_{amb} = 25^\circ\text{C}$

	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Thermal Resistance Junction to Ambient Air	R_{thJA}	-	-	170 ⁽¹⁾	$^\circ\text{C/W}$
Forward Voltage at $I_F = 200\text{ mA}$	V_F	-	-	1.2	Volts

NOTES:

(1) Valid provided that electrodes at a distance of 10mm from case are kept at ambient temperature

1N4728 THRU 1N4764

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Ratings at 25°C ambient temperature unless otherwise specified.

Type	Nominal Zener voltage ⁽³⁾ at I _{ZT} V _Z V	Test current I _{ZT} mA	Maximum Zener impedance ⁽¹⁾			Maximum reverse leakage current		Surge current at T _A = 25°C I _R mA	Maximum regulator current ⁽²⁾ I _{ZM} mA
			Z _{ZT} at I _{ZT} Ω	Z _{ZK} Ω	at I _{ZK} mA	I _R μA	at V _R V		
1N4728	3.3	76	10	400	1.0	100	1	1380	276
1N4729	3.6	69	10	400	1.0	100	1	1260	252
1N4730	3.9	64	9	400	1.0	50	1	1190	234
1N4731	4.3	58	9	400	1.0	10	1	1070	217
1N4732	4.7	53	8	500	1.0	10	1	970	193
1N4733	5.1	49	7	550	1.0	10	1	890	178
1N4734	5.6	45	5	600	1.0	10	2	810	162
1N4735	6.2	41	2	700	1.0	10	3	730	146
1N4736	6.8	37	3.5	700	1.0	10	4	660	133
1N4737	7.5	34	4.0	700	0.5	10	5	605	121
1N4738	8.2	31	4.5	700	0.5	10	6	550	110
1N4739	9.1	28	5.0	700	0.5	10	7	500	100
1N4740	10	25	7	700	0.25	10	7.6	454	91
1N4741	11	23	8	700	0.25	5	8.4	414	83
1N4742	12	21	9	700	0.25	5	9.1	380	76
1N4743	13	19	10	700	0.25	5	9.9	344	69
1N4744	15	17	14	700	0.25	5	11.4	304	61
1N4745	16	15.5	16	700	0.25	5	12.2	285	57
1N4746	18	14	20	750	0.25	5	13.7	250	50
1N4747	20	12.5	22	750	0.25	5	15.2	225	45
1N4748	22	11.5	23	750	0.25	5	16.7	205	41
1N4749	24	10.5	25	750	0.25	5	18.2	190	38
1N4750	27	9.5	35	750	0.25	5	20.6	170	34
1N4751	30	8.5	40	1000	0.25	5	22.8	150	30
1N4752	33	7.5	45	1000	0.25	5	25.1	135	27
1N4753	36	7.0	50	1000	0.25	5	27.4	125	25
1N4754	39	6.5	60	1000	0.25	5	29.7	115	23
1N4755	43	6.0	70	1500	0.25	5	32.7	110	22
1N4756	47	5.5	80	1500	0.25	5	35.8	95	19
1N4757	51	5.0	95	1500	0.25	5	38.8	90	18
1N4758	56	4.5	110	2000	0.25	5	42.6	80	16
1N4759	62	4.0	125	2000	0.25	5	47.1	70	14
1N4760	68	3.7	150	2000	0.25	5	51.7	65	13
1N4761	75	3.3	175	2000	0.25	5	56.0	60	12
1N4762	82	3.0	200	3000	0.25	5	62.2	55	11
1N4763	91	2.8	250	3000	0.25	5	69.2	50	10
1N4764	100	2.5	350	3000	0.25	5	76.0	45	9

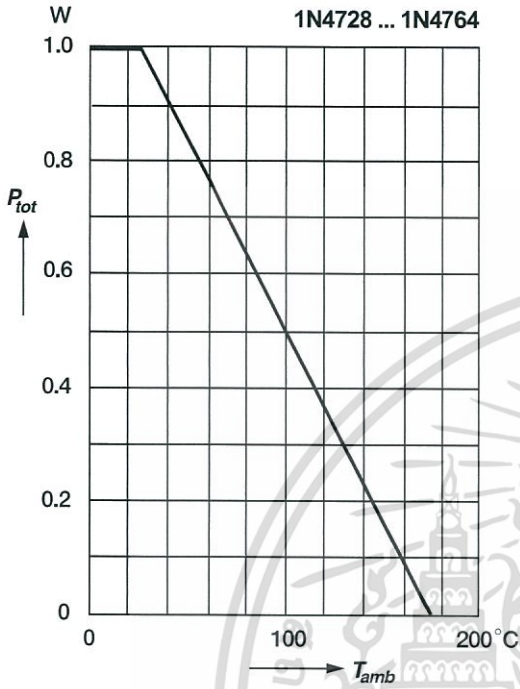
NOTES:

- (1) The Zener impedance is derived from the 1KHz AC voltage which results when an AC current having an RMS value equal to 10% of the Zener current (I_{ZT} or I_{ZK}) is superimposed on I_{ZT} or I_{ZK}. Zener impedance is measured at two points to insure a sharp knee on the breakdown curve and to eliminate unstable units
- (2) Valid provided that electrodes at a distance of 10mm from case are kept at ambient temperature
- (3) Measured under thermal equilibrium and DC test conditions

RATINGS AND CHARACTERISTIC CURVES 1N4728 THRU 1N4764

Admissible power dissipation versus ambient temperature

Valid provided that leads are kept at ambient temperature at a distance of 10 mm from case



8A, 1200V Hyperfast Diode

The RHRP8120 is a hyperfast diodes with soft recovery characteristics ($t_{rr} < 55ns$). It has half the recovery time of ultrafast diodes and is of silicon nitride passivated ion-implanted epitaxial planar construction.

This device is intended for use as a freewheeling/clamping diode and rectifier in a variety of switching power supplies and other power switching applications. Its low stored charge and hyperfast soft recovery minimize ringing and electrical noise in many power switching circuits, thus reducing power loss in the switching transistors.

Formerly developmental type TA49096.

Ordering Information

PART NUMBER	PACKAGE	BRAND
RHRP8120	TO-220AC	RHRP8120

NOTE: When ordering, use the entire part number.

Symbol



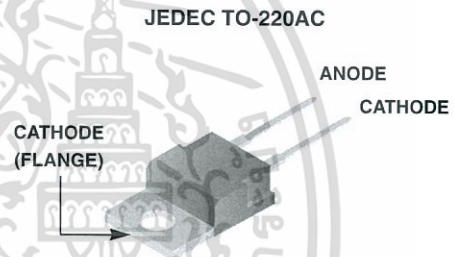
Features

- Hyperfast with Soft Recovery <55ns
- Operating Temperature 175°C
- Reverse Voltage 1200V
- Avalanche Energy Rated
- Planar Construction

Applications

- Switching Power Supplies
- Power Switching Circuits
- General Purpose

Packaging



Absolute Maximum Ratings $T_C = 25^\circ C$, Unless Otherwise Specified

	RHRP8120	UNITS
Peak Repetitive Reverse Voltage	V_{RRM} 1200	V
Working Peak Reverse Voltage	V_{RWM} 1200	V
DC Blocking Voltage	V_R 1200	V
Average Rectified Forward Current ($T_C = 140^\circ C$)	$I_{F(AV)}$ 8	A
Repetitive Peak Surge Current (Square Wave, 20kHz)	I_{FRM} 16	A
Nonrepetitive Peak Surge Current (Halfwave, 1 Phase, 60Hz)	I_{FSM} 100	A
Maximum Power Dissipation	P_D 75	W
Avalanche Energy (See Figures 10 and 11)	E_{AVL} 20	mJ
Operating and Storage Temperature	T_{STG}, T_J -65 to 175	°C

RHRP8120

Electrical Specifications $T_C = 25^\circ\text{C}$, Unless Otherwise Specified

SYMBOL	TEST CONDITION	MIN	TYP	MAX	UNITS
V_F	$I_F = 8\text{A}$	-	-	3.2	V
	$I_F = 8\text{A}, T_C = 150^\circ\text{C}$	-	-	2.6	V
I_R	$V_R = 1200\text{V}$	-	-	100	μA
	$V_R = 1200\text{V}, T_C = 150^\circ\text{C}$	-	-	500	μA
t_{rr}	$I_F = 1\text{A}, dI_F/dt = 200\text{A}/\mu\text{s}$	-	-	55	ns
	$I_F = 8\text{A}, dI_F/dt = 200\text{A}/\mu\text{s}$	-	-	70	ns
t_a	$I_F = 8\text{A}, dI_F/dt = 200\text{A}/\mu\text{s}$	-	30	-	ns
t_b	$I_F = 8\text{A}, dI_F/dt = 200\text{A}/\mu\text{s}$	-	20	-	ns
Q_{RR}	$I_F = 8\text{A}, dI_F/dt = 200\text{A}/\mu\text{s}$	-	165	-	nC
C_J	$V_R = 10\text{V}, I_F = 0\text{A}$	-	25	-	pF
$R_{\theta JC}$		-	-	2	$^\circ\text{C}/\text{W}$

DEFINITIONS

V_F = Instantaneous forward voltage ($p_w = 300\mu\text{s}, D = 2\%$).

I_R = Instantaneous reverse current.

t_{rr} = Reverse recovery time (See Figure 9), summation of $t_a + t_b$.

t_a = Time to reach peak reverse current (See Figure 9).

t_b = Time from peak I_{RM} to projected zero crossing of I_{RM} based on a straight line from peak I_{RM} through 25% of I_{RM} (See Figure 9).

Q_{RR} = Reverse Recovery Charge.

C_J = Junction Capacitance.

$R_{\theta JC}$ = Thermal resistance junction to case.

p_w = Pulse Width.

D = Duty Cycle.

Typical Performance Curves

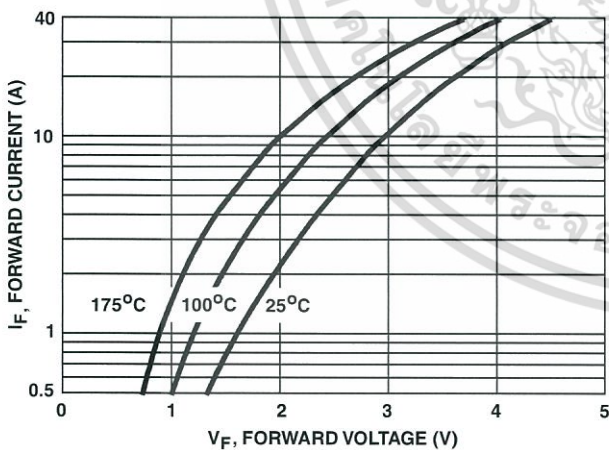


FIGURE 1. FORWARD CURRENT vs FORWARD VOLTAGE

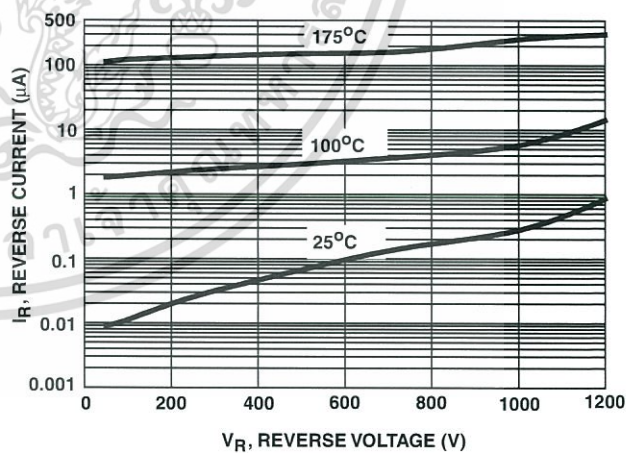


FIGURE 2. REVERSE CURRENT vs REVERSE VOLTAGE

Typical Performance Curves (Continued)

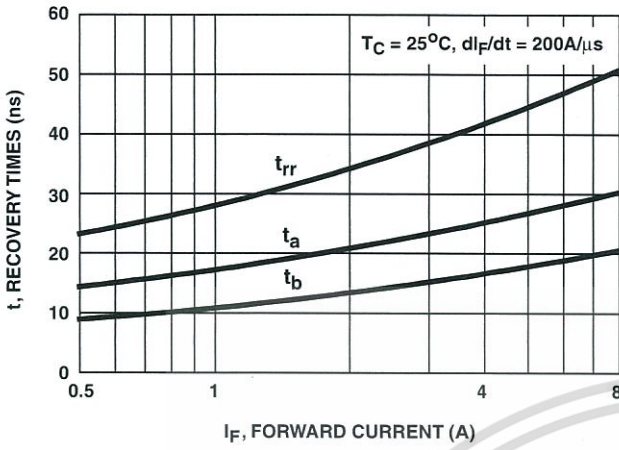


FIGURE 3. t_{rr}, t_a AND t_b CURVES vs FORWARD CURRENT

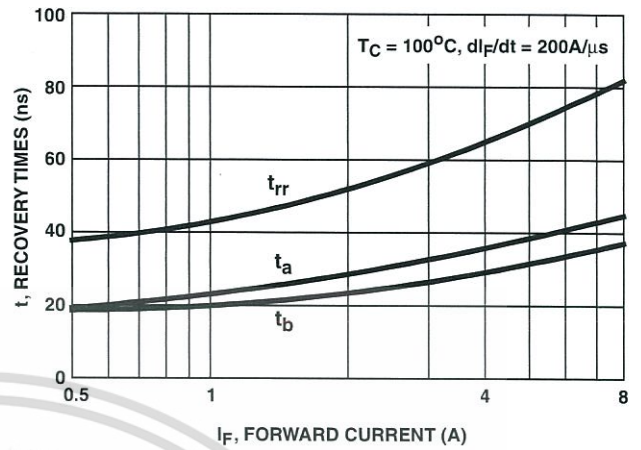


FIGURE 4. t_{rr}, t_a AND t_b CURVES vs FORWARD CURRENT

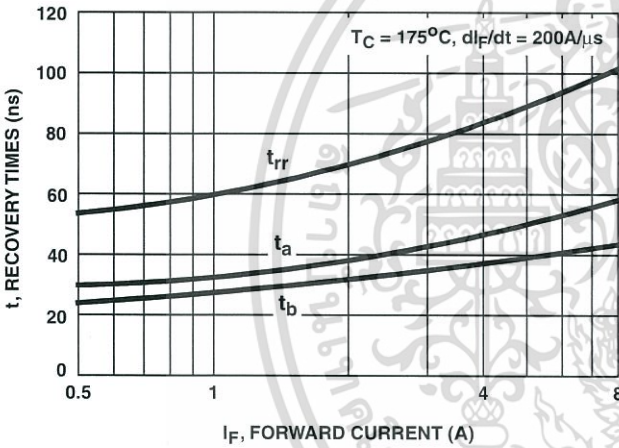


FIGURE 5. t_{rr}, t_a AND t_b CURVES vs FORWARD CURRENT

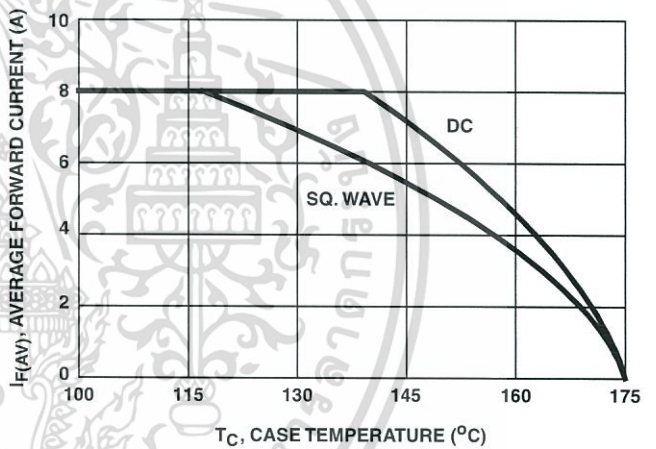


FIGURE 6. CURRENT DERATING CURVE

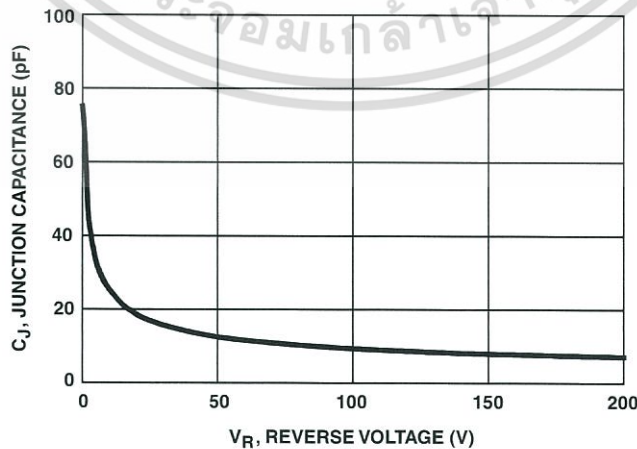


FIGURE 7. JUNCTION CAPACITANCE vs REVERSE VOLTAGE

Test Circuits and Waveforms

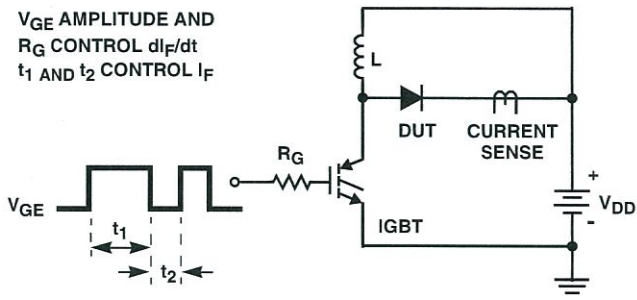


FIGURE 8. t_{rr} TEST CIRCUIT

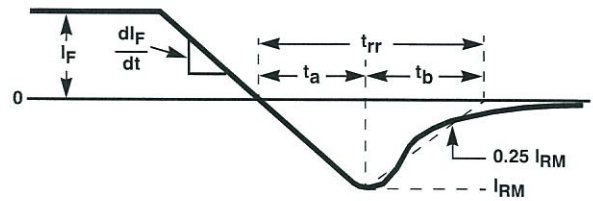


FIGURE 9. t_{rr} WAVEFORMS AND DEFINITIONS

$I_{MAX} = 1A$
 $L = 40mH$
 $R < 0.1\Omega$
 $E_{AVL} = 1/2LI^2 [V_{R(AVL)}/(V_{R(AVL)} - V_{DD})]$
 $Q_1 = IGBT (BV_{CES} > DUT V_{R(AVL)})$

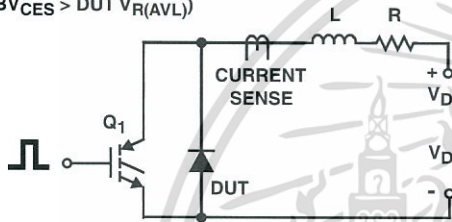


FIGURE 10. AVALANCHE ENERGY TEST CIRCUIT

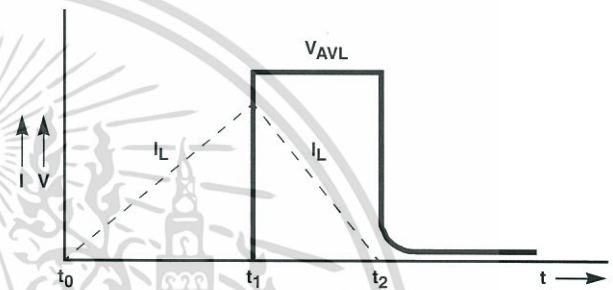
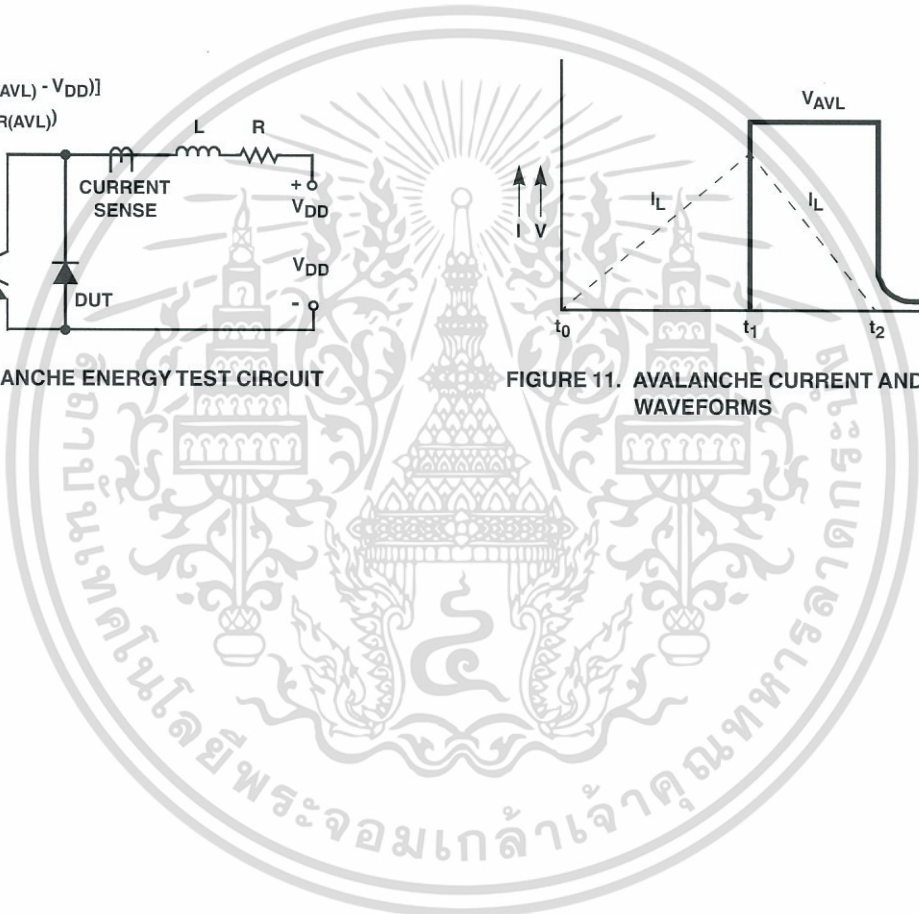


FIGURE 11. AVALANCHE CURRENT AND VOLTAGE WAVEFORMS



TRADEMARKS

The following are registered and unregistered trademarks Fairchild Semiconductor owns or is authorized to use and is not intended to be an exhaustive list of all such trademarks.

ACE ^x ™	FAST [®]	OPTOLOGIC™	SMART START™	VCX™
Bottomless™	FASTr™	OPTOPLANAR™	STAR*POWER™	
CoolFET™	FRFET™	PACMAN™	Stealth™	
CROSSVOLT™	GlobalOptoisolator™	POP™	SuperSOT™-3	
DenseTrench™	GTO™	Power247™	SuperSOT™-6	
DOME™	HiSeC™	PowerTrench [®]	SuperSOT™-8	
EcoSPARK™	ISOPLANAR™	QFET™	SyncFET™	
E ² CMOS™	LittleFET™	QS™	TinyLogic™	
EnSigna™	MicroFET™	QT Optoelectronics™	TruTranslation™	
FACT™	MicroPak™	Quiet Series™	UHC™	
FACT Quiet Series™	MICROWIRE™	SILENT SWITCHER [®]	UltraFET [®]	

STAR*POWER is used under license

DISCLAIMER

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR RESERVES THE RIGHT TO MAKE CHANGES WITHOUT FURTHER NOTICE TO ANY PRODUCTS HEREIN TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN. FAIRCHILD DOES NOT ASSUME ANY LIABILITY ARISING OUT OF THE APPLICATION OR USE OF ANY PRODUCT OR CIRCUIT DESCRIBED HEREIN; NEITHER DOES IT CONVEY ANY LICENSE UNDER ITS PATENT RIGHTS, NOR THE RIGHTS OF OTHERS.

LIFE SUPPORT POLICY

FAIRCHILD'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, or (c) whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

PRODUCT STATUS DEFINITIONS

Definition of Terms

Datasheet Identification	Product Status	Definition
Advance Information	Formative or In Design	This datasheet contains the design specifications for product development. Specifications may change in any manner without notice.
Preliminary	First Production	This datasheet contains preliminary data, and supplementary data will be published at a later date. Fairchild Semiconductor reserves the right to make changes at any time without notice in order to improve design.
No Identification Needed	Full Production	This datasheet contains final specifications. Fairchild Semiconductor reserves the right to make changes at any time without notice in order to improve design.
Obsolete	Not In Production	This datasheet contains specifications on a product that has been discontinued by Fairchild semiconductor. The datasheet is printed for reference information only.

Rev. H4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้