

เครื่องเหนี่ยวนำความร้อน
INDUCTION HEATING



T104040



วพ.
๗๘๔๘ค
๒๕๕๑

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 104040
วัน,เดือน,ปี 28 ต.ค. 2552

12110632
.b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาอิเล็กทรอนิกส์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องเหนี่ยวนำความร้อน

INDUCTION HEATING



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อ โครงการภาษาไทย

เครื่องเหนี่ยวนำความร้อน

ชื่อ โครงการภาษาอังกฤษ

INDUCTION HEATING

จัดทำโดย

นายวีระศักดิ์ จีแก้ว รหัส 49015164

นายศุภชัย ตีลีน รหัส 49015166

นายประดิษฐ์ เครือกกล้วย รหัส 49015237

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. สมศักดิ์ เขียวศรีกุล

โครงการฉบับนี้ได้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว

ลงชื่อ.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ. สมศักดิ์ เขียวศรีกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายงานโครงการประจำภาคเรียนที่1 ปีการศึกษา 2551

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องเหนี่ยวนำความร้อน

ผู้จัดทำ

- 1.นายวีระสันต์ จีแก้ว รหัส 49015164
- 2.นายสุภชัย ตีลัน รหัส 49015166
- 3.นายประดิษฐ์ เครือกล้วย รหัส 49015237

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ. สมศักดิ์ เขียวศิริกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องเหนี่ยวนำความร้อน

นายวีระสันต์ จีแก้ว รหัส 49015164
 นายศุภชัย ดีลิ้น รหัส 49015166
 นายประดิษฐ์ เครือกล้วย รหัส 49015237
 รศ. สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล (อาจารย์ที่ปรึกษา)
 ปีการศึกษา 2551

บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอถึงการออกแบบ และโครงสร้างของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนวงจรที่ใช้ ซึ่งประกอบไปด้วย 6 ส่วนหลัก ๆ คือ วงจรภาคเรียงกระแส วงจรภาคพัลส์วิดมอด-คูเลชั่น วงจรภาคขับเคลื่อน วงจรที่ใช้เป็นฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ทั้งยังวงจรสับเบอร์และขดลวดเหนี่ยวนำ เครื่องเหนี่ยวนำความร้อนคือกระบวนการให้ความร้อนโดยไม่สัมผัสกับชิ้นงาน โดยใช้การเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้าที่ความถี่สูง เป็นตัวให้ความร้อนแก่วัสดุชิ้นงานเหล่านั้นเนื่องจากการที่กระบวนการที่ไม่สัมผัสวัสดุชิ้นงาน จึงทำให้กระบวนการให้ความร้อนไม่ทำให้วัสดุชิ้นงานเกิดสิ่งเจือปนในวัสดุยิ่งไปกว่านั้นเนื่อง จากความร้อนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานจะทำให้เกิดประสิทธิภาพมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INDUCTION HEATING

Mr. Weerasun Jeekiew ID.49015164

Mr. Supcachai Deelin ID.49015166

Mr. Pradid Kreukluay ID.49015237

Mr. Somsak Cheersirikul (Advisor)

2008

Abstract

This report describes a design and construction of induction heating. The circuit used in this consist of six main parts which are a rectifier circuit, a PWM circuit, a gate driver circuit, a full bridge inverter, a snubber circuit and coil. Induction heating is non-contact heating process. It uses high frequency electricity to heat materials that are electrically conductive. Since it is noncontact, the heating process does not contaminate the material being heated. It is also very efficient since the heat is actually generated inside the workpiece.

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎี	3
2.1 หลักการเบื้องต้น	3
2.1.1 หลักการทำงานของเครื่องชูปแข็งผิวเหล็ก	3
2.1.2 แหล่งจ่ายพลังงาน	4
2.1.3 ความลึกจากผิว	7
2.1.4 กำลังงานที่เกิดขึ้นในโลหะ	7
2.1.5 การกระจายของกระแสในแท่งกลมทรงกระบอก	8
2.1.6 โลหะวิทยาของเหล็ก	9
2.1.7 จุดเปลี่ยนสภาพแม่เหล็ก (Magnetic Change Point)	9
2.2 Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)	10
2.2.1 หลักการทำงานของ IGBT	12
2.3 คอนเวอเตอร์	13
2.3.1 ฟลายแบคคอนเวอเตอร์	15
2.3.2 ฟอร์เวิร์ดคอนเวอเตอร์	15
2.3.3 พุช-พูลคอนเวอเตอร์	16
2.3.4 ฮาล์ฟบริดจ์คอนเวอเตอร์	16
2.3.5 ฟูลบริดจ์คอนเวอเตอร์	16
2.4 วงจรสับเบอร์	17
2.4.1 วงจรสับเบอร์ช่วงหยุดนำกระแส	17
2.4.2 วงจรสับเบอร์ป้องกันแรงดันเกิน	19
2.5 วงจรเรโซแนนซ์	21
2.5.1 ผลของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานที่มีต่อสัญญาณกระแสสลับ	23
2.5.2 ผลของวงจรเรโซแนนซ์แบบอันดับที่มีต่อสัญญาณกระแสสลับ	25
2.6 ไดโอด (Diode)	26
2.6.1 ชนิดและการเลือกใช้ไดโอด	26
2.6.2 ฟาสต์-รีคัฟเวอรี่ ไดโอด และอัลตราฟาสต์-รีคัฟเวอรี่ ไดโอด	27
2.6.3 ซอตต์กี ไดโอด (Schottky Diode)	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ	27
2.7.1 การให้ความร้อนที่ความถี่ต่ำ	28
2.7.2 ขดลวดเหนี่ยวนำที่ความถี่ปานกลางถึงความถี่สูง	30
2.8 หม้อแปลงสวิตซิ่ง	31
2.8.1 ส่วนประกอบของหม้อแปลงแกนเฟอร์ไรต์	31
2.8.2 ลักษณะสมบัติของเนื้อสารที่ใช้ทำแกนเฟอร์ไรต์	32
2.8.3 การกำหนดค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด ในแกนหม้อแปลง	35
2.8.4 การเลือกขนาดของแกนเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสม	36
2.8.5 ช่องอากาศคั่นทางเดินแม่เหล็กในแกนเฟอร์ไรต์ (Air Gap)	37
2.8.6 ความสัมพันธ์ระหว่างขดไฟรารีและขดเซคันดารี ของหม้อแปลงสวิตซิ่ง	38
2.8.7 การกำหนดขนาดของขดลวด	39
2.8.8 ผลจากการนำกระแสที่ผิวของทองแดง (Skin effect)	41
2.9 เพาเวอร์มอสเฟต	42
2.9.1 โครงสร้างพื้นฐานของเพาเวอร์มอสเฟต	42
2.9.2 ลักษณะสมบัติที่สภาวะคงตัวของมอสเฟต	44
2.9.3 โครงสร้างของเพาเวอร์มอสเฟต (Structure of Power Mosfet)	46
2.9.4 การทำงานของเพาเวอร์มอสเฟต	47
2.9.5 ข้อดีของเพาเวอร์มอสเฟต	49
บทที่ 3 โครงสร้างระบบและการออกแบบวงจร	50
3.1 โครงสร้างและระบบ	50
3.2 วงจรจ่ายไฟตรง (Rectifier and filter)	51
3.3 วงจรควบคุม (PWM Control Circuit)	52
3.4 วงจรขับเกต (Gate Driver)	53
3.5 Inverter by IGBT	53
3.6 วงจรสับเบอร์	54
3.7 วงจรโหลด (Load Circuit)	55
บทที่ 4 การทดสอบการทำงาน	59
4.1 ขั้นตอนการทดลอง	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การตรวจวัดรูปสัญลักษณ์ที่จุดต่างๆในวงจร	62
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	63
5.1 สรุปผลการทดลอง	66
5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางการแก้ไข	66



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 แสดงการไหลเวียนของกระแสแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล ในโลหะ	2
รูปที่ 2.1 ทิศทางของสนามแม่เหล็กของแท่งเหล็ก	5
รูปที่ 2.2 การกระจายของกระแสตามความลึกและการประมาณ	5
รูปที่ 2.3 กราฟแสดงการกระจายความหนาแน่นกระแสที่แท่งกลม ทรงกระบอก	9
รูปที่ 2.4 แสดงหน้าตัดขวางของตัว IGBT	11
รูปที่ 2.5 กราฟแสดงคุณสมบัติทางกระแส-แรงดัน และสัญลักษณ์ ของ IGBT	11
รูปที่ 2.6 รูปคลื่นของ IGBT ขณะ Turn-on ใน step-down convertor	12
รูปที่ 2.7 คลื่นของ IGBT ขณะ Turn-off ในวงจร step-down convertor	13
รูปที่ 2.8 คอนเวอร์เตอร์ในลักษณะต่างๆ	14
รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะการลดลงของกระแสและการเพิ่มขึ้นของแรงดัน ตกคร่อมเพาเวอร์มอสเฟตขณะเริ่มหยุดนำกระแส	17
รูปที่ 2.10 แสดงการต่อวงจรสับเบอร์ดช่วยหยุดนำกระแสเพื่อหน่วง แรงดันตกคร่อมเพาเวอร์มอสเฟตให้เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ	18
รูปที่ 2.11 แสดงการต่อสับเบอร์ดป้องกันแรงดันเกินเพื่อจำกัดค่ากระแส สูงสุดที่จะตกคร่อมเพาเวอร์มอสเฟตขณะเริ่มหยุดนำกระแส	19
รูปที่ 2.12 แสดงวงจรเรโซแนนซ์แบบอันดับและอนุกรม	21
รูปที่ 2.13 แสดงผลของ L และ C ที่มีต่อสัญญาณกระแสสลับที่ความถี่ต่างๆ	23
รูปที่ 2.14 แสดงรูปคลื่นเมื่อเกิดการเรโซแนนซ์	24
รูปที่ 2.15 แสดงรูปคลื่นเมื่อเกิดการเรโซแนนซ์จะเห็นได้ว่าอิมพีแดนซ์ ของวงจรคือ Z จะมีค่าเท่ากับ	25
รูปที่ 2.16 แสดงรูปร่างของขดลวดเหนี่ยวนำความถี่ต่ำ	29
รูปที่ 2.17 แสดงรูปร่างของขดลวดเหนี่ยวนำความถี่สูง	30
รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะที่สมบูรณ์ของเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิสซึ่งจะมี ลักษณะสมมาตรของกราฟชีกบนและชีกล่าง	33
รูปที่ 2.19 แสดงเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิสของแกนเฟอร์ไรต์ที่เป็นเนื้อสาร	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิด 3C8 และ 3C6A	
รูปที่ 2.20 แสดงค่าการสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ของเนื้อสารชนิด 3C8 (ก) และ 3C6A (ข)	35
รูปที่ 2.21 แสดงการกำหนดช่องอากาศ	37
รูปที่ 2.22 แสดงความสัมพันธ์พื้นฐานของหม้อแปลง	38
รูปที่ 2.23 แสดงลักษณะกระแสไหลวนภายในขดลวดทองแดงเมื่อ มีกระแสสลับไหลผ่าน	41
รูปที่ 2.24 (ก) ดีฟลิชั่นมอสเฟตชนิดเอ็น	42
รูปที่ 2.24 (ข) ดีฟลิชั่นมอสเฟตชนิดพี	43
รูปที่ 2.25 (ก) เอ็นฮานซ์เมนต์มอสเฟตชนิดเอ็น	44
รูปที่ 2.25 (ข) เอ็นฮานซ์เมนต์มอสเฟตชนิดพี	44
รูปที่ 2.26 ลักษณะสมบัติไอพ่ายของมอสเฟต	45
รูปที่ 2.27 ลักษณะสมบัติทางเอาท์พุทของเอ็นฮานซ์เมนต์มอสเฟต	46
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของระบบ	50
รูปที่ 3.2 วงจรภาคจ่ายไฟตรง	51
รูปที่ 3.3 วงจรควบคุมของ SG 3526	52
รูปที่ 3.4 วงจรขับเคลื่อน	53
รูปที่ 3.5 วงจร อินเวอร์เตอร์	54
รูปที่ 3.6 วงจรโหลด	55
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงชิ้นงานและกระแสกรณีนี full load ที่ทำให้ ชิ้นงานร้อนแดงที่VACค่าต่างๆ	61
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงขนาดชิ้นงานและเวลาที่ทำให้ชิ้นงานร้อนแดง เมื่อป้อนVACค่าต่างๆ	61
รูปที่ 4.3 รูปแสดงสัญญาณพื้นเลื้อยซึ่งเป็นฐานเวลาในการสร้างพัลส์	62
รูปที่ 4.4 รูปแสดงสัญญาณพัลส์ที่เอาท์พุท A ของไอซี SG3526	63
รูปที่ 4.5 รูปแสดงสัญญาณพัลส์ที่เอาท์พุท B ของไอซี SG3526	63
รูปที่ 4.6 รูปแสดงสัญญาณพัลส์ก่อนส่งเข้าหม้อแปลงคัปปลิ่ง	64
รูปที่ 4.7 รูปแสดงสัญญาณพัลส์ที่ขาเกตของเพาเวอร์มอสเฟต	65
รูปที่ 4.8 รูปแสดงชิ้นงานขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8mm. ใช้เวลา 8 วินาที ทำให้ชิ้นงานร้อนแดง	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีอุตสาหกรรมหุขบผิวเจ่งจำนวนมาก ซึ่งเป็นพื้นฐานในการพัฒนาประเทศเช่น อุตสาหกรรมประกอบรถยนต์ ทำเพลาเฟือง ผลิตชิ้นส่วนที่ด้องการความเจ่งของผิวในปี่หนึ่งๆประเทศไทยด้องเสียเงินตราจำนวนมากในการซื้อและพัฒนาให้ความร้อนแบบเหนียวนำได้เองก็จะเป็นประโยชน์อย่างมาก โดยลดการสูญเสียเงินตราออกนอกประเทศและมีการพึ่งพาเทคโนโลยีของตัวเองจึงมีความคล่องตัวในการซ่อมบำรุงและเป็นพื้นฐานในการพัฒนาต่อไป

การให้ความร้อนแบบเหนียวนำเป็นปรากฏการณ์เหนียวนำ โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพบว่าถ้าขดทุติยภูมิเป็นวงจรมัด เมื่อเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าสลับทางขดทุติยภูมิจะก่อให้เกิดการไหลของกระแส เหนียวนำขึ้นทางขดทุติยภูมิโดยไหลในทิศทางที่ก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กด้านกับสนามแม่เหล็กของตัว เหนียวนำ หลักการเหล่านี้นำไปใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์และหม้อแปลงเป็นต้น ซึ่งกระแส เหนียวนำจะก่อให้เกิดความร้อนที่ไม่ต้องการ เช่น กระแสไหลวน (Eddy current) ที่แกนของหม้อแปลง และมอเตอร์ แต่สิ่งเหล่านี้กลับเป็นประโยชน์ต่อการให้ความร้อนแบบเหนียวนำซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงจ่ายพลังงานเข้าสู่ขดลวดเหนียวนำ จากนั้นขดลวดเหนียวนำจะ สร้างสนามแม่เหล็กความถี่สูงคล่องผ่านชิ้นงาน ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าความถี่สูงไหลวนรอบชิ้นงานขึ้น ถ้ากระแสจากการเหนียวนำเท่ากับ I และความต้านทานเสมือนในทิศทางไหลของกระแสเป็นเส้นทางมัด ของชิ้นงานเท่ากับ R ความร้อนที่เกิดจากการเหนียวนำจึงมีค่า $2IR$ พบว่าความร้อนจากการเหนียวนำด้วย สนามแม่เหล็กไม่มีการสัมผัสกันทางไฟฟ้าระหว่างขดลวดกับชิ้นงานและเป็นการสร้างความร้อนที่ชิ้นงานโดยตรง ทำให้มีประสิทธิภาพสูงสามารถกำหนดตำแหน่งและลักษณะการให้ความร้อนได้ง่ายและช่วยลดมลภาวะ

เครื่องให้ความร้อนแบบเหนียวนำที่ศึกษา นี้ มีจุดประสงค์เพื่อให้งานหุขบผิวเจ่งที่ผิวโดยนำสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูง คือมีค่าพิคดของแรงดันและกระแสสูงและทำงานได้ดีที่ความถี่สูง โดยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ที่แพร่หลายได้แก่ทรานซิสเตอร์กำลังมอสเฟตกำลังและไทรสเตอร์ ซึ่งแต่ละชนิดมีขีดจำกัดในการใช้งานแตกต่างกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่น ไทริสเตอร์จะมีข้อดีในแง่การทนต่อแรงดันและกระแสสูง แต่สามารถทำงานที่ความถี่สูงไม่มากนัก (ไม่เกิน 10kHz) ส่วนทรานซิสเตอร์กำลังมีข้อดีในแง่ราคาถูก หาง่าย แต่มีข้อจำกัดในแง่ความเร็วในการทำงานคือ ใช้ในช่วงความถี่สูงไม่เกิน 50 kHz และมีการขับนำที่ยุ่งยากเมื่อต้องการขับนำให้ทำงานที่ความถี่สูงก็ยิ่งทำให้วงจรขับนำมีความซับซ้อนมากขึ้น ส่วนมอสเฟตกำลังสามารถทำงานในความถี่สูงได้ถึง 200 kHz แต่มีข้อจำกัดในเรื่องการทนต่อแรงดันและกระแส

การให้ความร้อนแบบอินดักทีฟนี้ ชีงงานจะได้รับพลังงานจากสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงการถ่ายเทพลังงานจะเป็นแบบ ไม่มีการสัมผัส และชีงงานจะถูกทำให้ร้อนขึ้นจากกระแสที่ไหลผ่านในชีงงานเนื่องจากแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ



รูปที่ 1.1 แสดงการไหลเวียนของกระแสแบบเอ็ดดี้ไปแนนเซียลในโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 หลักการเบื้องต้น

2.1.1 หลักการทำงานของเครื่องชุบแข็งผิวเหล็ก

จะอาศัยหลักการเหนี่ยวนำความร้อน (Induction Heating) แก่แท่งเหล็กด้วยกระแสเหนี่ยวนำความถี่สูง ซึ่งเป็นผลทำให้เหล็กเกิดความร้อนสูงที่ผิว จนถึงจุดที่เปลี่ยนเป็นโครงสร้างอื่น โดยที่บริเวณเนื้อเหล็กที่ลึกลงไปถึงแกนกลางจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่อนำเหล็กที่มีความร้อนสูงไปทำให้เย็นตัวโดยรวดเร็ว จะทำให้เหล็กมีความแข็งขึ้นที่บริเวณผิวทนต่อการเสียดสี และความล้าได้ดีทนต่อการบดขีดและมีคุณสมบัติทางความเหนียวสูง ซึ่งสามารถนำไปใช้กับชิ้นส่วนรถยนต์ เครื่องจักรอื่นๆ ได้มาก

หลักการทำให้เหล็กร้อนได้มีหลักการทำงานดังนี้ จะเริ่มจ่ายกระแสให้กับขดลวด โดยเป็นลักษณะของกระแสสลับ การสร้างกระแสสลับจะใช้วงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์เพาเวอร์ มอสเฟต ซึ่งเป็นวงจรวัดซึ่งทำให้เกิดการจ่ายกระแสไหลไปมาจนเกิดการเหนี่ยวนำที่หม้อแปลงความถี่สูง และหม้อแปลงความถี่สูงจะทำการแปลงกระแสที่เหนี่ยวนำสูงตัวโหลดซึ่งเป็นขดลวด เมื่อเรานำแท่งเหล็กผ่านเข้าที่ตัวเหนี่ยวนำขดลวดจะทำให้เกิดกระแสความถี่สูงเดินตามผิว หรือที่เรียกว่า “สกินเอฟเฟค” (Skin Effect) ซึ่งแท่งเหล็กจะเกิดความร้อนสูงและเกิดการเปลี่ยนแปลงที่แท่งเหล็ก เมื่อนำมาทำให้เย็นตัวลง โดยลึบปล้นจะทำให้ผิวเหล็กแข็งขึ้น การเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวเหล็กเท่านั้น เนื่องจากแหล่งจ่ายมีความถี่สูงซึ่งเมื่อความถี่สูงมากจะยิ่งทำให้กระแสไหลที่บริเวณผิวเหล็กเท่านั้นเนื่องจากแหล่งจ่ายมีความถี่สูงซึ่งจากสูตร “สกินเดฟ” (Skin Depth) ความถี่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงด้านความลึกซึ่งเมื่อความถี่สูงมากจะยิ่งทำให้กระแสไหลที่บริเวณผิวมากและมีความลึกน้อย

การเกิดกระแสเหนี่ยวนำจะเกิดที่บริเวณผิว ยิ่งความถี่ของกระแสไฟฟ้าสูงจะยิ่งเกิดกระแสขึ้นที่บริเวณผิวเหล็กเข้มข้นมากขึ้น นอกจากนี้ถ้าหากมีการป้อนกลับเพื่อทำการควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง จะทำให้ความถี่ขณะชุบแข็งมีความถี่เท่ากันตลอดทั่วทั้งชิ้นงาน

หลักการเหนี่ยวนำความร้อนจะคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าขดลวดเหนี่ยวนำ จะทำหน้าที่เหมือนขดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าและชิ้นงานจะทำหน้าที่เหมือนขดทุติยภูมิ ของหม้อแปลง โดยที่ขดทุติยภูมิจะมีจำนวนรอบเท่ากับหนึ่ง เมื่อมีกระแสสลับป้อนเข้าที่กระแสไฟฟ้าความถี่สูงไหลในชิ้นงานที่เป็นตัวนำ จะทำให้เกิดความร้อนขึ้น ณ บริเวณที่มีกระแสไหลผ่าน

เครื่องเหนี่ยวนำความร้อนถูกนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรม โลหะอย่างกว้างขวาง โดยทำให้โลหะร้อนขึ้นเพื่อใช้ในงานเชื่อม บัดกรี หลอม และชุบแข็ง เป็นต้น

เหตุผลที่มีการใช้เครื่องเหนี่ยวนำความร้อนกันแพร่หลาย เนื่องจากข้อดีหลายประการคือ

1. ความร้อนจะถูกเหนี่ยวนำโดยตรงให้กับวัสดุ เป็นวิธีให้ความร้อนที่เร็ว เมื่อเทียบกับวิธีอื่น
2. สามารถควบคุมปริมาณความร้อนและพื้นที่ที่ต้องการจะทำให้ร้อน ได้ง่ายและแม่นยำ
3. เครื่องเหนี่ยวนำความร้อนง่ายต่อการควบคุมทำให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพสูง
4. ใช้เวลาในการเปิด - ปิดเครื่องน้อย และมีกำลังสูญเสียต่ำหรือ แทบจะไม่มีเลยเมื่อเปิดเครื่องทิ้งไว้เฉยๆ
5. สภาพการทำงานจะดีกว่าเนื่องจากไม่มีมลภาวะอื่นๆ เช่น ควันหรือความร้อนที่แพร่กระจายออกมา

2.1.2 แหล่งจ่ายพลังงาน

อุปกรณ์ที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานขึ้นอยู่กับความถี่ที่ใช้ งาน เช่น ที่ความถี่ 50 kHz

จะต้อง เลือกใช้หม้อแปลงที่เหมาะสมและต้องใช้ตัวเก็บประจุเพื่อแก้ตัวประกอบกำลัง (Power Factor) ด้วยสำหรับความถี่ที่สูงกว่า 10 kHz จะต้องเลือกชนิดของขดลวดเหนี่ยวนำให้เหมาะสมและจะต้องรับพลังงานได้ถึง 300 kW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอนเวอร์เตอร์ (Converter) จะถูกนำมาใช้ที่ความถี่ 10-200kHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ใช้ในการหลอมละลายโลหะ สำหรับความถี่มากกว่า 200 kHz ขึ้นไปจะใช้ชุดผลิตความถี่ใช้หลอดสุญญากาศเป็นแหล่งจ่ายพลังงานที่ความถี่สูงๆนี้ จะใช้ในงานเชื่อมหรืองานชุบแข็งโลหะ

ในปัจจุบันอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้เข้ามามีบทบาทในงานพวกนี้มาก เนื่องจากเทคโนโลยีการผลิตจะทำให้สามารถผลิตอุปกรณ์สวิตช์เพื่อใช้ในงานแรงดันและกระแสสูงได้ และในรายงานนี้จะใช้เพาเวอร์มอสเฟตเป็นอุปกรณ์สวิตช์

Frequency(Hz)	Source of Power	Uses
60-90	Rotating generator or converter	Mass induction heating
960-10,000	Motor-Generate	For melting hardening
10,000-60,000	Converter	For small-scale sintering
200,000-550,000	Vacuum-tube oscillator	Surface induction heating
2,000,000-90,000,000	Vacuum-tube oscillator	Dielectric heating

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงถึงความถี่ใช้งานเหนี่ยวนำความร้อน

และลักษณะการนำไปใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ทิศทางของสนามแม่เหล็กของแท่งเหล็ก

รูปที่ 2.2 การกระจายของกระแสตามความลึกและการประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ความลึกจากผิว

เมื่อนำเอาขดลวดพันรอบแท่งโลหะและให้กระแสไหลผ่านขดลวดดังรูปที่ 2.1 จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของกระแสในเนื้อโลหะ ทิศทางของกระแสจะตรงข้ามกับกระแสในขดลวด และจะเกิดความร้อนแบบจูล (joule) กระแสที่เหนี่ยวนำไหลในแท่งโลหะจะอยู่ใกล้ๆผิวของแท่งโลหะ

ผลของการไหลที่ผิว การกระจายตามรูปที่ 2.3 เนื่องจากการกระจายจะอยู่ในรูปของเอ็กซ์โปเนนเชียลเราจึงต้องประมาณค่าขึ้นมาค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นค่าความลึกที่ผิวทุกๆ มีคุณสมบัติโลหะเท่ากันตลอดความลึกของผิวของการไหลของกระแสหาได้จากสมการ

$$\delta = 5.03(\rho / \alpha_r f)^{1/2} \quad (2.1)$$

ρ = ค่าความต้านทานจำเพาะของโลหะ (resistivity of metal)

α_r = ค่าความซึมซาบสัมพัทธ์ (relative permeability)

f = ความถี่ (frequency)

2.1.4 กำลังงานที่เกิดขึ้นในโลหะ

เกิดจากการเหนี่ยวนำตามสมการ

$$P = 2.5H_0^2 \alpha_r LAQ \times 10^8 \quad (2.2)$$

p = ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่บริเวณของแท่งโลหะ (Strength of magnetic files at surface of metal cylinder)

L = ความยาวของแท่งโลหะ (Length of metal cylinder (cm))

A = พื้นที่หน้าตัดของแท่งโลหะ (Cross section area)[cm^2]

Q = ค่าคงที่ขึ้นกับค่าของ $2\alpha / Q$ (Function determined by $2\alpha / Q$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 การกระจายของกระแสในแท่งกลมทรงกระบอก

การหาค่าการไหลของกระแสที่รัศมีต่างๆกันในชิ้นงาน ที่เป็นแท่งทรงกระบอก นั้นมีความสำคัญมากในการใช้งานจริง เพราะจะทำให้นำไปกำหนดค่ากระแสในการออกแบบใช้งานจริงได้ โดยรูปที่ 2.3 เป็นกราฟที่ช่วยในการหาค่าการไหลของกระแส ณ จุดที่รัศมีต่างกันไปจากรูปที่ 2.3 แนวตั้งเป็นค่าของความหนาแน่นกระแสที่รัศมีใดๆ เทียบกับความหนาแน่นกระแสที่ผิว แนวอนจะเป็นค่าคงที่ของการกระจายความหนาแน่นกระแสที่รัศมีใดๆ เทียบกับอัตราส่วนจากค่าคงที่ของการกระจายความหนาแน่นที่รัศมีเท่ากับ 70 % ของรัศมีชิ้นงาน จากค่าคงที่ของการกระจายความหนาแน่น กระแสที่ผิวคูณกับรัศมีที่ต้องการทราบค่าคงที่ของการกระจาย จะได้ค่าคงที่ของการกระจายกระแสที่รัศมีนั้นๆ เมื่อ

I_r = กระแสที่รัศมี

I_a = กระแสที่ผิว (รัศมี a)

a = รัศมีขอบนอกสุดของแท่งกลมทรงกระบอก

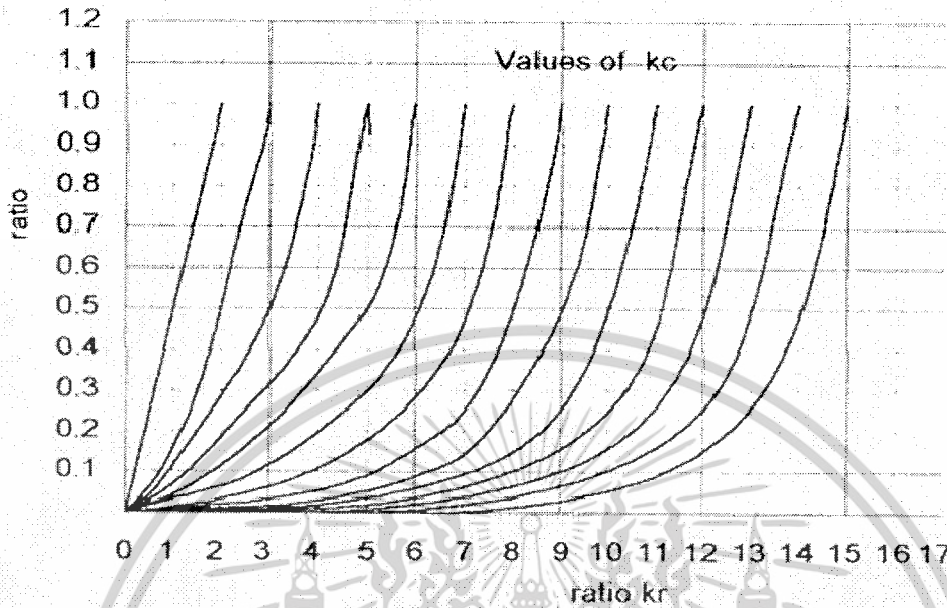
$$K = \pi a / \rho$$

(2.3)

α = ค่าความซึมซับ (permeability)

ρ = ค่าความต้านทานจำเพาะ (resistivity)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงการกระจายความหนาแน่นกระแสที่แท่งกลมทรงกระบอก

2.1.6 โลหะวิทยาของเหล็ก

โดยทั่วไปเหล็กที่เป็นตัวนำสนามแม่เหล็ก จะมีคุณสมบัติที่แน่นอนกว่าโลหะชนิดอื่นๆ ที่ไม่ได้เป็นตัวนำสนามแม่เหล็ก และเป็นสิ่งสำคัญมากในการเหนี่ยวนำความร้อน คุณสมบัติหลักอย่างหนึ่งที่โลหะมีอยู่ก็คือค่าความนำแม่เหล็กจำเพาะ ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน โดยทั่วไปความนำแม่เหล็กจำเพาะจะเป็น 1 ที่อุณหภูมิระหว่าง 1275-1600 F ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าความเข้ม สนามแม่เหล็กและส่วนผสมโลหะอื่นในเหล็กด้วย และมีการแสดงให้เห็นว่าที่สนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูง ค่าความนำแม่เหล็กจำเพาะจะลดลงอย่างรวดเร็วที่ 1400-1475 F โดยลดลงถึง 100 เท่า ของความถี่เดิม

2.1.7 จุดเปลี่ยนสภาพแม่เหล็ก (Magnetic Change Point)

ค่าอุณหภูมิวิกฤต (critical temperature) เหล่านี้เรียกว่าจุด คิวรี (curie point) เป็นจุดที่ค่าความนำแม่เหล็กจำเพาะของโลหะลดลงอย่างรวดเร็วเป็น 1 ทำให้ตัวมันทำหน้าที่เป็นแกนอากาศของ สนามแม่เหล็ก และพบว่ามีโบลิเนียมและซิลิกอนจะเป็นตัวผสมช่วยให้อุณหภูมิที่จุดคิวรีมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่เมงกานีสและนิกเกิลจะลดค่าอุณหภูมิที่จุดคิวรี ดูตารางที่ 2.2

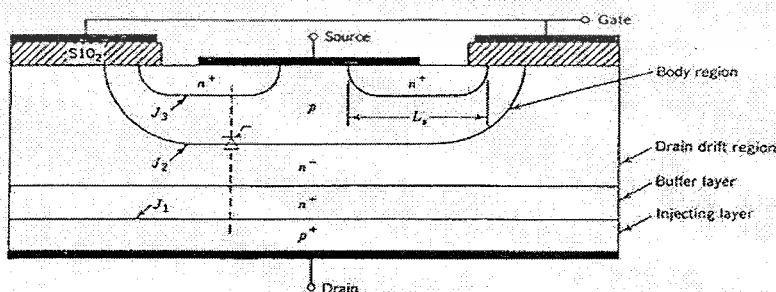
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดโลหะ	อุณหภูมิ
เหล็ก (Iron)	1420
โคบอล (Cobalt)	2105
นิกเกิล (Nickel)	680
เหล็กผสมนิกเกิล (Nickel-Iron (30Ni-70Fe))	160
โลหะผสม (Permalloy(78Ni-22Fe))	1020
โลหะผสม (Nickel-Copper(Thermaloy,Thermopern))	50-160
โลหะผสม (Carbon-steel(medium))	1330

ตารางที่ 2.2 ค่าอุณหภูมิวิกฤตแต่ละชนิดของโลหะแต่ละชนิด

2.2 Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)

IGBT เป็นอุปกรณ์ที่สร้างจากแนวความคิดที่ว่า จากการที่ทราบว่าทรานซิสเตอร์กำลังมีการสูญเสียในขณะที่นำกระแสที่ต่ำ มีศักดาพังทลายสูง แต่มีความเร็วในการสวิตช์ช้าเนื่องจากผลของการสะสมของประจุที่บริเวณปลดพาหะ ขณะที่เพาเวอร์มอสเฟตมีการสูญเสียตอนนำกระแสสูงเนื่องจากความต้านทาน R_{ds} และมีค่าแรงดันพังทลายที่ต่ำแต่มีความเร็วในการสวิตช์สูง ด้วยเหตุนี้จึงมีการคิดสร้างมันขึ้นมา โดยการรวมเอาข้อดีของอุปกรณ์ทั้งสองเข้าด้วยกัน เมื่อเรามาศึกษาโครงสร้างของมันพบว่า โครงสร้างของมันเหมือนมอสเฟตเพียงแต่มีชั้น P+ที่เป็นชั้นฐานรองเพิ่มเข้ามาจะช่วยให้การฉีดพาหะส่วนมากเข้าไปในชั้น N-



รูปที่ 2.4 แสดงหน้าตัดขวางของตัว IGBT

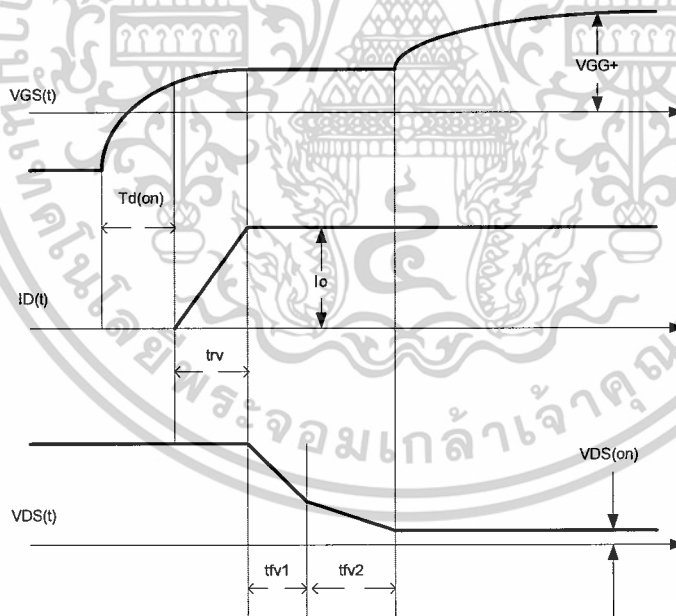
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อใช้ประโยชน์ส่วนตัวเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นที่ชั้นสารหลังต่อวงจรเรียบร้อยแล้ว เราพิจารณาที่สถานะทำงานแรงดันไบแอสที่ขาเกตมากกว่าแรงดันขีดเริ่ม จะเกิดบริเวณชั้นขึ้นที่บริเวณ N^- ไปจนถึง N^+ ทำให้เกิดการเดินของกระแสขึ้นเป็นผลให้อิเล็กตรอนจากซอร์ส ไหลผ่านเขตปลอดพาหะที่ชั้น N^+ และ P ที่ต่อกับเดรน ซึ่งมีโฮลจาก P^+ ถูกฉีดข้ามไปยัง N^+ เป็นผลให้เกิดกระแสไหลผ่าน

เมื่อสังเกตดู พบว่าจะเกิดวงจรเสมือนของตัวมอสเฟตและทรานซิสเตอร์ขึ้นที่ชั้นสารรวม ทั้งตัวความต้านทานที่เกิดขึ้นทำให้สามารถเขียนวงจรเสมือนได้ดังรูป จากรูปของวงจรเสมือนทำให้เราสามารถหาแรงดันขณะ $V_{ds(on)}$ ได้ดังสมการ

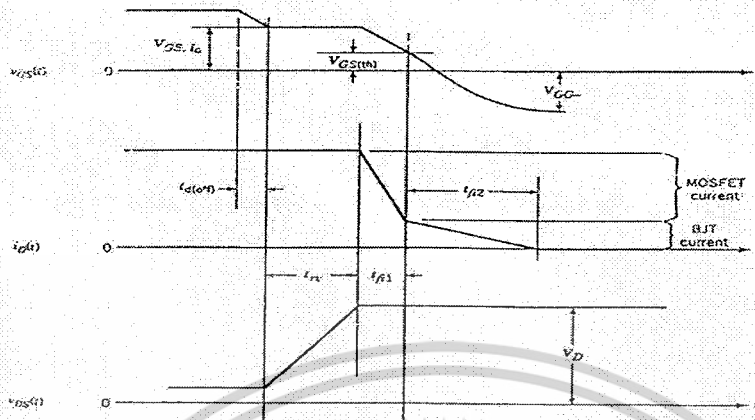
$$V_{DS(ON)} = V_{J1} + V_{drift} + I_D R_{Channel} \quad (2.4)$$

จากการที่มันมีลักษณะคล้ายมอสเฟต ทำให้คุณสมบัติทางการสวิทช์ของมันคล้ายกับมอสเฟตด้วยทั้งในสถานะ on state และ off state ดังรูป



รูปที่ 2.6 รูปคลื่นของ IGBT ขณะ Turn-on ในวงจร step-down converter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 คลื่นของ IGBT ขณะ Turn-off ในวงจร step-down convert

2.3 คอนเวอร์เตอร์

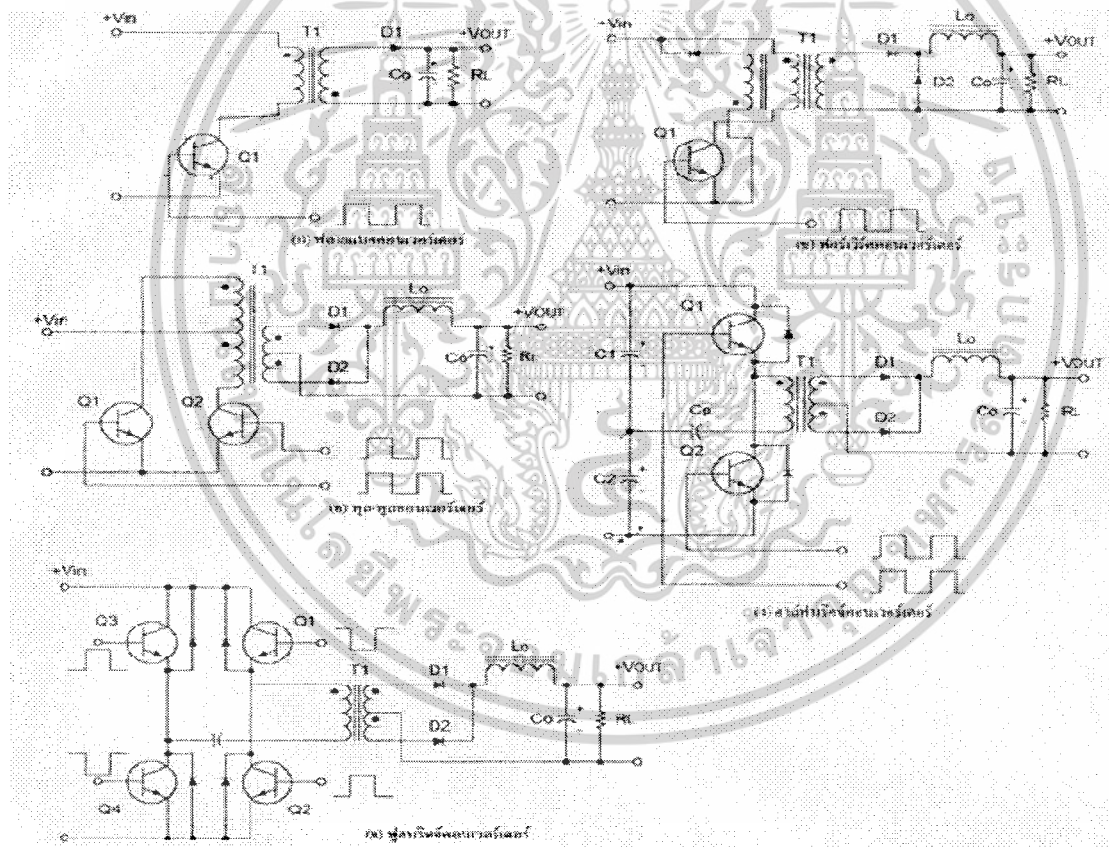
คอนเวอร์เตอร์นับเป็นส่วนสำคัญที่สุดในวงจรสวิตซ์ซึ่งเพาเวอร์ซัพพลาย มีหน้าที่ลดทอนแรงดันไฟตรงค่าสูงลงมาเป็นแรงดันไฟตรง ค่าต่ำและสามารถคงค่าแรงดันได้คอนเวอร์เตอร์มีหลายแบบ ขึ้นอยู่กับการจัดลักษณะวงจรภายใน โดยคอนเวอร์เตอร์แต่ละแบบจะมีข้อดีข้อเสียต่างกัน การเลือกใช้คอนเวอร์เตอร์แบบใดสำหรับสวิตซ์ซึ่งเพาเวอร์ซัพพลาย นั้นมีข้อควรพิจารณาจากลักษณะพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์แต่ละแบบดังนี้

1. ลักษณะการแยกจากกันทางไฟฟ้าระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์
2. ค่าแรงดันอินพุตที่จะนำมาใช้กับคอนเวอร์เตอร์
3. ค่ากระแสสูงสุดที่ไหลผ่านเพาเวอร์มอสเฟตในคอนเวอร์เตอร์ขณะทำงาน
4. ค่าแรงดันสูงสุดที่ตกคร่อมเพาเวอร์มอสเฟตขณะทำงาน
5. การรักษาระดับแรงดันในกรณีที่คอนเวอร์เตอร์มีค่าเอาต์พุตหลายค่าแรงดัน
6. การกำเนิดสัญญาณรบกวน RFI/EMI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอนเวอร์เตอร์ที่นิยมช้มีดังนี้

1. ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (Flyback Converter)
2. ฟอว์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ (Forward Converter)
3. พูช-พูลคอนเวอร์เตอร์ (Push-Pull Converter)
4. ฮาล์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (Half Bridge Converter)
5. ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (Full Bridge Converter)



รูปที่ 2.8 คอนเวอร์เตอร์ในลักษณะต่างๆ

คอนเวอร์เตอร์ทั้ง 5 แบบนี้มีลักษณะการทำงานที่ไม่แตกต่างกันจนเกินไปนักและค่อนข้างง่ายต่อการเข้าใจและศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 2.8 ก. เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q1 ในฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์จะทำงานในลักษณะเป็นสวิตช์ และจะนำกระแสตามคำสั่งของพัลส์สี่เหลี่ยมป้อนให้กับขาเบส เนื่องจากหม้อแปลง T1 จะกำหนดขดไฟมารีและเซคคันดารี ให้มีลักษณะกลับเฟสกันอยู่ดังนั้นเมื่อ Q1 นำกระแส ไดโอด D1 จึงอยู่ในลักษณะไบอัสกลับและไม่นำกระแส จึงมีการสะสมพลังงานที่ขดไฟมารีของหม้อแปลง T1 แทนเมื่อ Q1 หยุดนำกระแส สนามแม่เหล็ก T1 ยุบตัวทำให้เกิดการกลับขั้วแรงดันที่ขดไฟมารีและเซคคันดารี D1 ก็จะอยู่ในลักษณะไบอัสตรง พลังงานที่สะสมในขดไฟมารีของหม้อแปลง ก็จะถูกถ่ายเทออกไปยังขดเซคคันดารีและมีกระแสไหลผ่าน D1 ไปยังตัวเก็บประจุเอาต์พุต C_o และโหลดได้ ค่าของแรงดันที่เอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์จะขึ้นอยู่กับค่าความถี่การทำงานของ Q1 ช่วงเวลานำกระแสของ Q1 อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงและค่าแรงดันที่อินพุต ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์เป็นคอนเวอร์เตอร์ที่ให้กำลังงานได้ไม่สูงนัก โดยอยู่ในช่วงไม่เกิน 150 วัตต์ และให้ค่าสัญญาณรบกวน EMI/EMI ก่อนข้างสูงแต่ใช้อุปกรณ์น้อยและมีราคาถูก

2.3.2 ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์

ในรูปที่ 2.8 ข. จะเห็นได้ว่าคอนเวอร์เตอร์มีลักษณะใกล้เคียงกับฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แต่หม้อแปลง T1 จะกำหนดขดไฟมารีและขดเซคคันดารีให้มีเฟสตรงกัน ดังนั้นเมื่อ Q1 นำกระแส ไดโอด D1 จะอยู่ในลักษณะถูกไบอัสตรง แต่ D2 จะอยู่ในลักษณะถูกไบอัสกลับและไม่นำกระแส กระแสจึงไหลผ่าน D1 และตัวเหนี่ยวนำ L_o ไปยังตัวเก็บประจุเอาต์พุต C_o และ L_o จะยุบตัวทำให้มีการกลับขั้วแรงดันที่ตกคร่อมตัวมัน ไดโอด D2 ก็จะอยู่ในลักษณะไบอัสตรง L_o จะถ่ายเทพลังงานออกมาทำให้มีกระแสไหลผ่านตัวมัน และ D2 ออกไปยังโหลดได้ จะเห็นว่ามีกระแสไหลผ่านโหลดได้อย่างต่อเนื่อง ทั้งในช่วงที่ Q1 นำกระแสและหยุดนำกระแส ทำให้มีการกระเพื่อมที่แรงดันเอาต์พุต ต่ำกว่าฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ให้กำลังงานในช่วงเดียวกันแต่กระแสที่ได้จะมีการกระเพื่อมต่ำกว่าแต่มีราคาสูงกว่า

2.3.3 พุช-พุลคอนเวอร์เตอร์

เป็นคอนเวอร์เตอร์ที่สามารถจ่ายกำลังงานได้สูงตั้งแต่ 500 วัตต์ ขึ้นไปแต่มีข้อเสียคือมักเกิดการไม่สมมาตรฟลักซ์แม่เหล็กของแกนหม้อแปลงซึ่งจะมีผลต่อการพังเสียหายของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ได้ง่าย จากรูปที่ 2.8 ค. Q1 และ Q2 จะสลับกันนำกระแสแต่ละครึ่งคาบการทำงาน เมื่อ Q1 นำกระแส D1 จะอยู่ในลักษณะถูกไบอัสกลับ D2 จะถูกไบอัสตรง และนำกระแสผ่าน L_o ไปยังโหลดได้เมื่อ Q1 หยุดนำกระแส Q2 จะเริ่มนำกระแส D2 จะถูกไบอัสกลับ และ D1 ถูกไบอัสตรง และนำกระแสผ่าน L_o ไปยังโหลดได้เช่นกัน ดังนั้น โหลดจึงมีกระแสไหลได้อย่างต่อเนื่องกระแสที่ได้จากทางเอาต์พุตจึงค่อนข้างเรียบ

2.3.4 ฮาล์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

จัดเป็นคอนเวอร์เตอร์ชนิดเดียวกับพุชพุลและให้กำลังงานค่อนข้างสูง และมีข้อดีคือ เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในวงจรมีค่าแรงดันตกคร่อม ขณะไม่นำกระแสต่ำกว่าคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 3 แบบและลดการเกิดการไม่สมมาตรฟลักซ์ได้ จากรูปที่ 2.8 ง. จะเห็นได้ว่าทรานซิสเตอร์ตัวใดตัวหนึ่งนำกระแสค่าแรงดันตกคร่อมตัวที่เหลือจะมีค่าแรงดันอินพุตเท่านั้น เมื่อ Q1 และ Q2 สลับกันนำกระแส ผลที่ได้จะมีลักษณะ เดียวกันการทำงานของพุช-พุลคอนเวอร์เตอร์ยกเว้นค่าแรงดันตกคร่อมขณะทำงาน ของขดไฟมารี จะมีค่าเพียงครึ่งหนึ่งอินพุต เนื่องจากผลของการต่อตัวเก็บประจุ C1 และ C2 เพื่อแบ่งแรงดัน กระแสที่ไหลผ่านขดไฟมารีจึงมีค่าสูง โดยกำลังงานสูงสุดจะอยู่ในช่วงไม่เกิน 500 วัตต์

2.3.5 ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 2.8 จ. มีทรานซิสเตอร์ทั้ง 4 ตัว แต่จะทำงานสลับกันเป็นคู่ๆ โดย Q1 จะนำกระแสพร้อมกัน Q4 และ Q2 จะนำกระแสพร้อมกัน Q3 กระแสที่ไหลผ่านขดไฟมารีของหม้อแปลงจะมีลักษณะเช่นเดียวกับฮาล์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ แต่มีข้อได้เปรียบที่ขณะทำงานที่ขดไฟมารีจะมีแรงดันตกคร่อมเท่ากับค่าที่แรงดันอินพุต กระแสที่ไหลผ่านขดไฟมารีจึงมีค่าต่ำกว่าแต่จ่ายกำลังงานได้สูงกว่า โดยจะทำงานได้ตั้งแต่ 500-1000 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

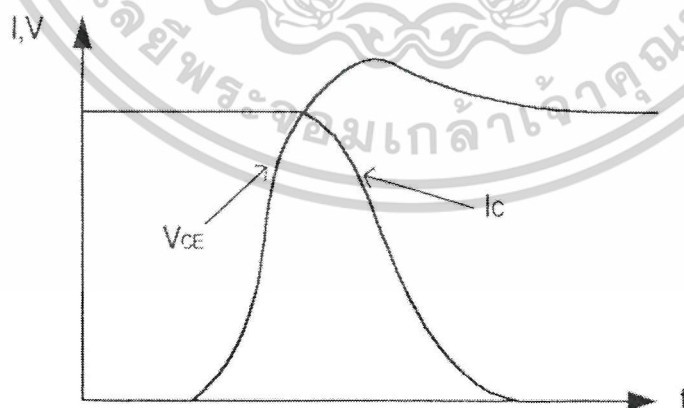
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2.4 วงจร snubber

วงจร snubber (snubber network) เป็นส่วนที่เพิ่มเข้ามาในคอนเวอร์เตอร์เพื่อลดการเกิดกำลังงานสูญเสียและป้องกันการเสียหาย ที่อาจเกิดขึ้นกับเพาเวอร์มอสเฟตขณะทำงานปกติ วงจร snubber ในที่นี้อาจแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือ วงจร snubber ช่วงหยุดนำกระแส (turnoff snubber) และวงจร snubber ป้องกันไฟเกิน (clamp snubber) วงจร snubber โดยทั่วไปจะประกอบด้วยตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุและไดโอดในบางครั้งอาจเรียกว่า วงจร RLD snubber

2.4.1 วงจร snubber ช่วงหยุดนำกระแส

กำลังที่สูญเสียในเพาเวอร์มอสเฟตจะเป็นไปได้สูง ขณะเปลี่ยนสถานะการทำงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งขณะเริ่มหยุดนำกระแส ก่อนที่เพาเวอร์มอสเฟตจะเริ่มหยุดนำกระแสแล้ว กระแสจะลดลงอย่างช้าๆ ในขณะที่แรงดันเพิ่มขึ้นสู่ค่าแรงดันอินพุทอย่างรวดเร็ว กำลังงานสูญเสียในรูปความร้อน ในช่วงนี้จึงเกิดขึ้นสูง เพื่อลดการเกิดกำลังงานสูญเสียในช่วงนี้อาจทำได้โดยการต่อวงจร snubber เข้ากับเพาเวอร์มอสเฟต เพื่อควบคุมแรงดันตกคร่อมที่ซอสและเดรนให้เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนกระทั่งกระแสที่ไหลผ่านเพาเวอร์มอสเฟตลดลงได้ทันกัน ซึ่งจะทำการกำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำ

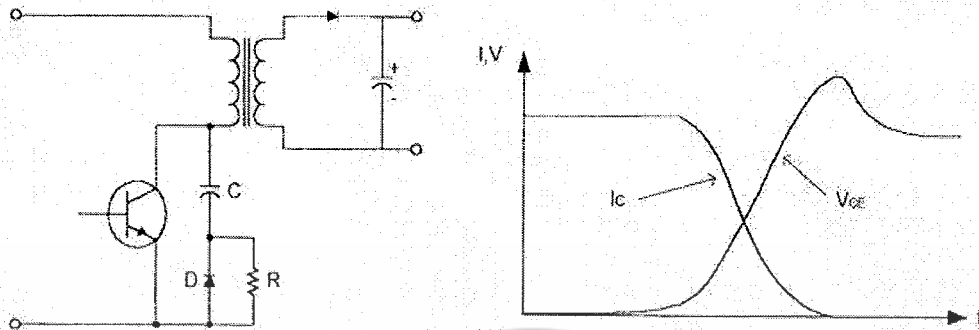


รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะการลดลงของกระแสและการเพิ่มขึ้นของแรงดันตกคร่อม

เพาเวอร์มอสเฟตขณะเริ่มหยุดนำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

104040



รูปที่ 2.10 แสดงการต่อวงจรสับเบอร์ดช่วยหยุดนำกระแสเพื่อนำพลังงานคืน

ตกคร่อมเพาเวอร์มอสให้เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ

การทำงานของวงจร RCD สับเบอร์ดช่วยหยุดนำกระแสจะเป็นดังนี้คือ เมื่อเพาเวอร์มอสเฟต Q1 เริ่มหยุดนำกระแสแรงดันที่ขาซอร์สจะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้มีกระแสบางส่วนไหลผ่านตัวเก็บประจุ C1 และไดโอด D1 ของวงจรสับเบอร์ดทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม C1 ด้วยแรงดันตกคร่อม C1 จะทำให้แรงดันที่ซอร์สของเพาเวอร์มอสเฟตเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ดังนั้นถ้าให้ C1 มีค่ามากพอ การเพิ่มขึ้นของแรงดันที่ขาซอร์สจะถูกหน่วงออกไปเพื่อให้กระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตมากพอ การเพิ่มขึ้นของแรงดันที่ขาซอร์สจะถูกหน่วงออกไปเพื่อให้กระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตลดลงจนมีค่าน้อยๆ ได้ทันกันและจะลดการสูญเสียในตัวเพาเวอร์มอสเฟตได้

ขณะที่เพาเวอร์มอสเฟตเริ่มนำกระแสอีกครั้ง C1 จะคายประจุผ่านตัวต้านทาน R1 ทิ้งไปแรงดันตกคร่อม C1 จึงลดต่ำลงได้อีกครั้งและสามารถทำงานได้ในช่วงต่อไป ค่าของ C1 และ R1 ที่เหมาะสมหาได้จาก

$$C_1 = (I_{p(pk)} \times t_{OFF}) / 2V_{in} \quad (2.5)$$

$$R_1 = (t_{on(min)}) 2.3C_1 \quad (2.6)$$

เมื่อ $I_{p(pk)}$ คือค่ากระแสสูงสุดขณะเริ่มหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต

V_{in} คือค่าแรงดันอินพุทของคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$t_{on(min)}$ คือช่วงเวลาการนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต

t_{OFF} คือช่วงเวลาหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต

การคายประจุของ C1 จะทำให้เกิดกำลังสูญเสียในตัว R1 สูงตัวต้านทาน R1 จะทนกำลังงานได้สูง โดยกำลังสูญเสียในตัว R1 อาจหาได้จาก

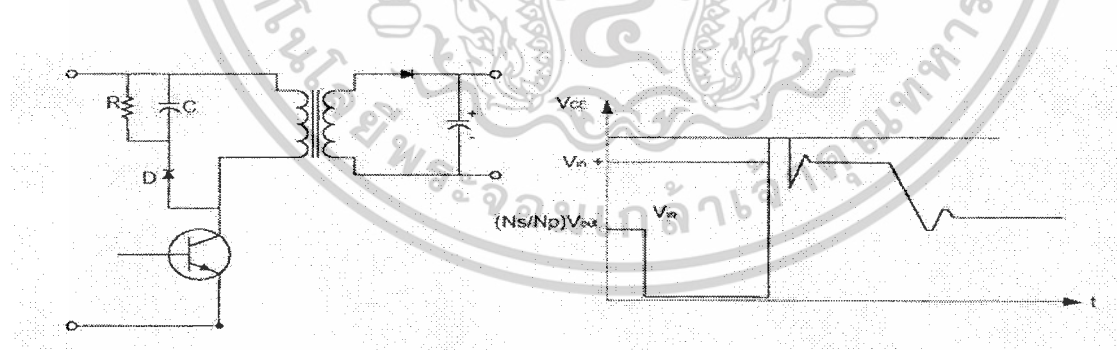
$$P_D = (2V_{in})^2 / 2T \quad (\text{วัตต์}) \quad (2.7)$$

เมื่อ T คือค่าคาบเวลาการทำงานของเพาเวอร์มอสเฟต

2.4.2 วงจรสับเบอ์ป้องกันแรงดันเกิน

ปกติการพังเสียหายของเพาเวอร์มอสเฟตขณะทำงาน มักมีสาเหตุหลักมาจากการทำงานเกินพิกัดตลอดภัย SBSOA แรงดันสไปค์ขณะหยุดนำกระแส มักทำให้ค่าแรงดันตกคร่อมเพาเวอร์มอสเฟตขณะเริ่มหยุดนำกระแสมีค่าสูงเกินค่าแรงดันสูงสุดที่มันจะทนได้และเกิดการพังเสียหายขึ้น วงจรสับเบอ์ป้องกันแรงดันเกินจึงมีหน้าที่ป้องกันค่าแรงดันสไปค์ที่เกินขึ้นไม่ให้เกินค่าตลอดภัยของเพาเวอร์มอสเฟต การต่อวงจร RCD สับเบอ์ป้องกันแรงดันเกินอาจทำได้ดังรูปที่

2.11



รูปที่ 2.11 แสดงการต่อสับเบอ์ป้องกันแรงดันเกินเพื่อบังคับค่ากระแสสูงสุด

ที่จะตกคร่อมเพาเวอร์มอสเฟตขณะเริ่มหยุดนำกระแส

การทำงานของวงจรสับเบอ์ป้องกันแรงดันเกินจะเป็นดังนี้คือในขณะที่เพาเวอร์มอสเฟตเริ่มหยุดนำกระแสตัวเก็บประจุ C จะถูกชาร์จประจุผ่านไดโอด D จากค่าแรงดันสไปค์ ค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ R_1 จะทำให้แรงดันตกคร่อม C มีค่ามากกว่าแรงดันสไปค์และมีค่าคงที่ตลอดช่วงการเกิดแรงดันสไปค์ค่าแรงดันสูงสุดที่ซอร์สขณะเกิดสไปค์จึงถูกกั้นไว้ด้วยแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C และเนื่องจากแรงดันสไปค์จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ ดังนั้นขณะที่แรงดันสไปค์มีค่าลดลง C_1 จะคายประจุออกมาผ่านตัวต้านทาน R แรงดันตกคร่อมที่ซอร์สจะกลับสู่ค่าแรงดันตามการทำงานปกติ

อาจกล่าวได้ว่า วงจรสับเบอ์ป้องกันแรงดันเกินทำงานโดยการถ่ายเทพลังงานที่สะสมไปตัวเหนี่ยวนำแฝงอันเป็นตัวทำให้เกิดแรงดันสไปค์ไปไว้ที่ตัวเก็บประจุ C_1 แทนนั้นคือ

$$C_1 V^2 = L_i I^2 p(pk) \quad (2.8)$$

เนื่องจาก V_C จะมีค่าได้ไม่เกิน $V_{ce0} - V_{clamp}$ ดังนั้น

$$C = L_i I^2 p(pk) / (V_{ce0} - V_{clamp})^2 \quad (2.9)$$

เมื่อ L_i คือ ค่าความเหนี่ยวนำแฝงที่เกิดจากฟลักซ์รั่วของขดไพมารี (leakage inductance)

$I_{p(pk)}$ คือ ค่ากระแสสูงสุดขณะเริ่มหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต

V_{ce0} คือ อัตราแรงดันตกคร่อมสูงสุดของเพาเวอร์มอสเฟต

V_{clamp} คือ ค่าแรงดันสูงสุดที่ยอมให้เกิดได้เมื่อเพาเวอร์มอสเฟตเริ่มหยุดนำกระแส

ค่า R อาจหาได้จาก

$$R_1 = t_{OFF(min)} / 2.23 C_1 \quad (2.10)$$

กำลังงานสูญเสียใน R_1 มีค่าเท่ากับ

$$C = L_i I^2 p(pk) / T \quad (2.11)$$

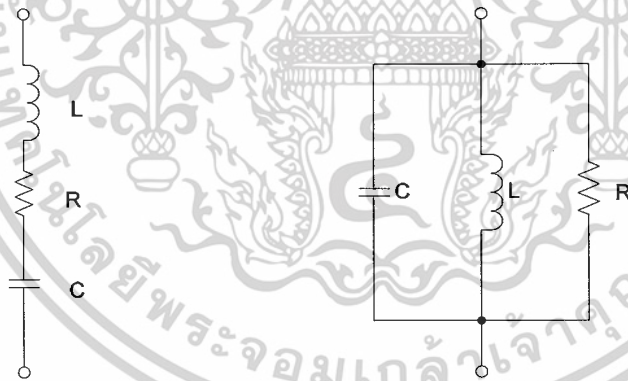
เมื่อ T คือ คาบเวลาการทำงานของเพาเวอร์มอสเฟต

t_{OFF} คือ ช่วงเวลาหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 วงจรเรโซแนนซ์

วงจรเรโซแนนซ์ เป็นวงจรผสมต่อร่วมกันอยู่ระหว่างคาปาซิเตอร์ กับขดลวดเหนี่ยวนำซึ่งมีความสำคัญ และใช้มากพอสมควรในวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบแอนะล็อก ด้วยผลต่อสัญญาณกระแสสลับของขดลวด และคาปาซิเตอร์ซึ่งแตกต่างกันไปในทางตรงกันข้ามจะทำให้เกิดผลต่อ แรงดัน กระแสตรง และแรงดันกระแสสลับในลักษณะต่างๆ เช่น เกิดการจ่ายและรับกระแสให้ซึ่งกันและกันทำให้เกิดสัญญาณกระแสสลับตกคร่อมวงจรขึ้น เมื่อวงจรได้รับแรงดันกระแสตรงจะเกิดการต่อต้านยอมให้สัญญาณกระแสสลับบางความถี่ให้กับวงจรออสซิลเลเตอร์นำมาใช้สำหรับเลือก ให้สัญญาณที่ต้องการผ่านให้ใช้เป็นวงจรกั้นหรือกำจัดสัญญาณที่ไม่ต้องการ วงจรเรโซแนนซ์มีอยู่ 2 ชนิด พิจารณาจากลักษณะการต่อร่วมกันระหว่างขดลวด และ คาปาซิเตอร์ ถ้าคาปาซิเตอร์ต่อร่วมกัน แบบอันดับเรียกว่า วงจรเรโซแนนซ์แบบอันดับ (Series Resonance Circuit) และถ้าต่อขนานกันก็เรียกว่า วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel Resonance circuit) ซึ่งจะมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 2.12



(a) แบบอันดับ

(b) แบบขนาน

รูปที่ 2.12 แสดงวงจรเรโซแนนซ์แบบอันดับและแบบขนาน

วงจรเรโซแนนซ์ประกอบด้วยคอนเดนเซอร์ และขดลวดเหนี่ยวนำมีผลต่อไฟฟ้ากระแสสลับตรงกันข้ามกัน คือ คาปาซิเตอร์จะมีค่าความต้านทานต่อไฟฟ้ากระแสสลับในแบบเป็นกระแสสลับของคอนเดนเซอร์ (X_c) จะลดลง แต่ถ้าความถี่ต่ำจะผ่าน คาปาซิเตอร์ได้น้อย เพราะค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X_c จะมีค่าสูง และถ้าเป็นไฟตรงจะผ่านคาปาซิเตอร์ไม่ได้เลย อัตราค่าความต้านทาน ไฟฟ้า
กระแสสลับของคอนเดนเซอร์ (X_c) แสดงให้เห็นได้ตามสูตร

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad (2.12)$$

โดย X_c คือ คอนเดนเซอร์มีค่าเป็นโอห์ม

f คือ ความถี่มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์

C คือ คาปาซิเตอร์มีหน่วยเป็นฟารัด

ขดลวดเหนี่ยวนำจะมีคุณสมบัติต้านไฟกระแสสลับ ในทางตรงข้ามคาปาซิเตอร์
คือจะมีสัดส่วน โดยตรงต่อความถี่ของไฟกระแสสลับที่ป้อนผ่าน ถ้าไฟกระแสสลับที่ป้อนผ่านมี
ค่าความถี่สูง ขดลวดจะมีค่าความต้านทานไฟกระแสสลับ (X_c) มาก และถ้าไฟกระแสสลับมี
ค่าความถี่ต่ำ ค่าความต้านทานต่อไฟกระแสสลับของขดลวดก็จะน้อย ถ้าจ่ายไฟกระแสตรงให้ผ่าน
ขดลวด จะไม่มีค่าเหนี่ยวนำกระแสเลย นอกจากค่าความต้านทานปกติของขดลวด จะไม่มีค่า
เหนี่ยวนำกระแสเลย นอกจากค่าความต้านทานปกติของขดลวดเท่านั้นและค่าความสัมพันธ์
ระหว่างความต้านทานไฟกระแสสลับของขดลวดที่มีต่อไฟกระแสสลับค่าความถี่ต่างๆ จะแสดงได้
ดังสูตร

$$X_L = 2\pi f L \quad (2.13)$$

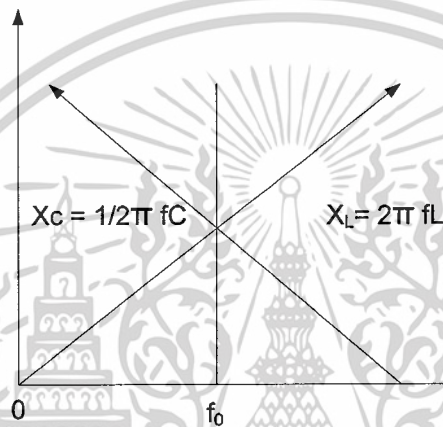
โดย X_L มีหน่วยเป็นโอห์ม

f คือ ค่าความถี่ของไฟกระแสสลับมีหน่วยเป็นเฮิรตซ์

L คือ คาปาซิเตอร์มีหน่วยเป็นฟารัด

คุณสมบัติข้างต้นจะเห็นได้ว่า ค่าความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำและคาปาซิ
เตอร์ที่มีต่อไฟกระแสสลับความถี่ต่างๆ นั้นจะมีค่าไม่เท่ากัน เมื่อจ่ายไฟกระแสสลับให้กับวงจรเร
โซแนนซ์จะเกิดผลอย่างไรนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของวงจรเรโซแนนซ์ ว่าเป็นแบบอันดับหรือขนาน
แต่ผลที่เหมือนกันก็คือถ้าความถี่สูง ค่า X_L จะมีค่ามาก และ X_c จะมีค่าน้อย และถ้าความถี่ต่ำค่า X_L
จะไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีค่าน้อยและค่า X_C จะมีค่ามาก ซึ่งในวงจรแสดงค่ารีแอกแตนซ์ของ C หรือ L ออกมา ดังแสดงในภาพที่ 2.11 ค่าของ X_L และ X_C จะสวนทางกัน ดังนั้นความถี่ของไฟกระแสสลับที่เข้ามาทำให้ X_L และ X_C มีค่าเท่ากัน จึงทำให้ค่ารีแอกแตนซ์หักล้างกันหมดไปจึงเหลือแต่เฉพาะค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงเท่านั้นที่ปรากฏอยู่ในวงจรความถี่ทำให้เกิดผลดังกล่าวเรียกว่า ความถี่เรโซแนนซ์ (f_0)



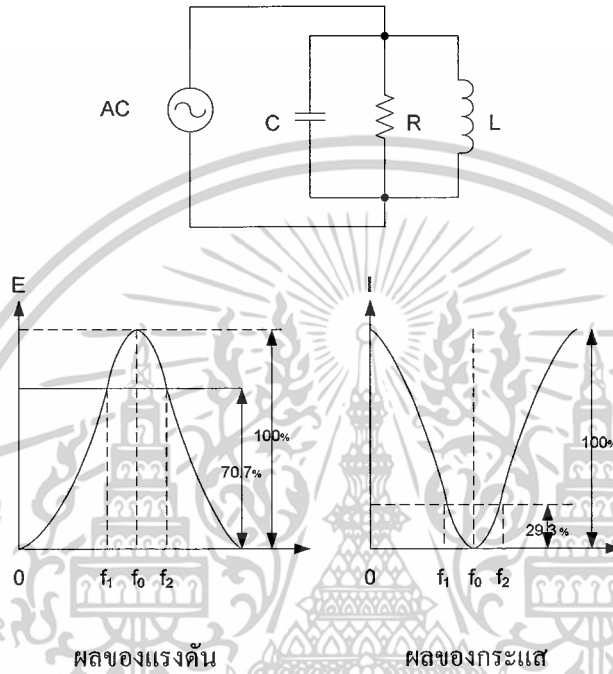
รูปที่ 2.13 แสดงผลของ L และ C ที่มีต่อสัญญาณกระแสสลับที่ความถี่ต่างๆ

2.5.1 ผลของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานที่มีต่อสัญญาณกระแสสลับ

เมื่อสัญญาณกระแสสลับที่ป้อนเข้ามาความถี่ที่ต่ำกว่า ความถี่เรโซแนนซ์ในวงจร (f_1) ค่าของ X_C จะน้อยกว่า X_L เปรียบเหมือน C เปิดวงจร ดังนั้นค่าแรงดันที่ตกคร่อม L ในขณะนั้นจะมีค่าน้อย เนื่องจากค่า X_L ต่ำ เมื่อความถี่ต่ำวงจรจึงแสดงคุณสมบัติของขดลวด ซึ่งทำให้เฟสของแรงดันที่ตกคร่อมวงจรมำหน้าเฟสของกระแสที่ไหลผ่านวงจร

เมื่อความถี่ของสัญญาณกระแสสลับที่ป้อนเข้ามาสูงกว่า ค่าความถี่เรโซแนนซ์ ในวงจร (f_2) ค่าของ X_C จะน้อยกว่า X_L โดย L ขณะนั้นเหมือนเปิดวงจร แรงดันที่ตกคร่อม C ขณะนั้นจะมีค่าต่ำเพราะ C ลดค่าความต้านทานต่ำลงเมื่อความถี่สูง ดังนั้นวงจรจึงแสดงคุณสมบัติของคาปาซิเตอร์ทำให้เฟสของกระแสที่ไหลในวงจร นำหน้าเฟสของแรงดันที่ตกคร่อม ถ้าความถี่ของสัญญาณที่ป้อนเข้ามามีค่าเท่ากับค่าความถี่เรโซแนนซ์ของวงจร (f_0) ค่าของ X_L จะเท่ากับ X_C วงจรจะไม่มีค่ารีแอกแตนซ์เปรียบเสมือนมีแต่ตัวต้านทานต่ออยู่ในวงจรเท่านั้น ซึ่งค่าความต้านทานจะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงทำให้กระแสไหลผ่านวงจรได้น้อยที่สุด ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมวงจรมีค่าสูงสุด โดยเฟสของกระแสที่ไหลผ่านวงจร และเฟสของแรงดันที่ตกคร่อมวงจรจะตรงกัน (เนื่องจากวงจรไม่แสดงค่ารีแอคแตนซ์)



รูปที่ 2.14 แสดงรูปคลื่นเมื่อเกิดการเรโซแนนซ์

จะเห็นได้ว่าค่าแอดมิตแตนซ์ของวงจรคือ Y จะมีค่าเท่ากับ

$$Y = G + j\omega_c - j_1/\omega L \tag{2.14}$$

$$Y = G + j(\omega_c - \frac{1}{\omega L}) \tag{2.15}$$

$$Y = G + jB \tag{2.16}$$

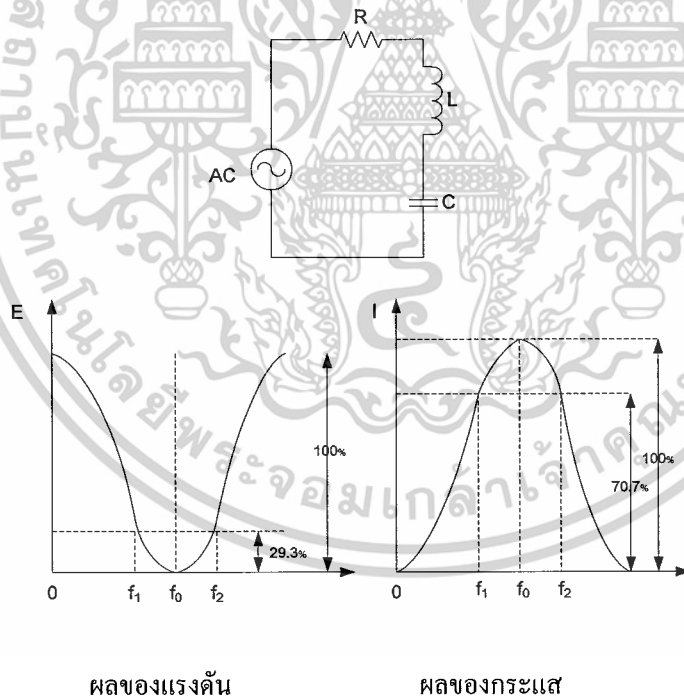
ในที่นี้ $B = BC - BL$, $BC = \omega_c$ และ $BL = 1/\omega L$ เมื่อวงจรเกิดเรโซแนนซ์จะได้ $B = 0$ นั่นคือ $\omega C = 1/\omega L$ หรือ $\omega^2 = 1/LC$ นั่นคือความถี่เรโซแนนซ์ f_r ในวงจร RLC ขนาน จะมีค่าเท่ากับ ความถี่เรโซแนนซ์ f_r ในวงจร RLC อนุกรม คือมีค่าเท่ากับ

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{2.17}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 ผลของวงจรเรโซแนนซ์แบบอันดับที่มีต่อสัญญาณกระแสลับ

เมื่อสัญญาณอินพุตมีความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์วงจร (f_1) X_L จะมีค่าแต่ X_C มีค่าสูง กระแสจะไหลผ่านวงจรได้น้อย และแรงดันตกคร่อมวงจรสูง วงจรแสดงค่า X_C ทำให้กระแสที่ไหลในวงจรมีเฟสนำหน้าแรงดันที่ตกคร่อมวงจร เมื่อสัญญาณอินพุตมีความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ของวงจร (f_2) X_C จะมีค่าต่ำ และ X_L มีค่าสูง กระแสจึงไหลผ่านวงจรได้น้อยทำให้แรงดันที่ตกคร่อมวงจรสูง วงจรแสดงค่า X_L ทำให้กระแสที่ไหลในวงจรมีเฟสล้าหลังแรงดันตกคร่อมวงจร เมื่อสัญญาณอินพุตมีความถี่เท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ของวงจร (f_0) ค่า X_L เท่ากับ X_C จึงหักล้างกันหมดไปทำให้วงจรไม่มีค่ารีแอกแตนซ์ เหลือแต่เฉพาะค่าความต้านทานกระแสและแรงดันในวงจร จึงมีเฟสตรงกัน โดยค่าความต้านทานรวมของวงจรจะต่ำสุดทำให้มีกระแสไหลได้มากที่สุดและมีแรงดันตกคร่อมวงจรต่ำที่สุด



รูปที่ 2.15 แสดงรูปคลื่นเมื่อเกิดการเรโซแนนซ์

จะเห็นได้ว่าอิมพีแดนซ์ของวงจรคือ Z จะมีค่าเท่ากับ

$$Z = R + j\omega L - \frac{j}{\omega C} \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega}) \quad (2.19)$$

$$Z = R + jX \quad (2.20)$$

เมื่อวงจรเกิดสภาวะเรโซแนนซ์จะได้ $X=0$ นั่นคือ $\omega = 1/\omega C$ หรือ $\omega^2 = 1/LC$

หรือ $\omega = \omega_r$ แต่ $\omega = 2\pi f$ เพราะฉะนั้น ความถี่เรโซแนนซ์ f_r จะมีค่าเท่ากับ

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 2\pi f_r \quad (2.21)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.22)$$

2.6 ไดโอด (Diode)

ไดโอดเป็นอุปกรณ์ อีกตัวหนึ่งที่ไม่อาจมองข้ามการเกิดกำลังงานสูญเสีย ในรูปของความร้อนในขณะมันทำงาน เนื่องจากมันต้องทำงานที่ความถี่สูง กำลังงานสูญเสียในไดโอดสามารถเกิดได้ 2 ลักษณะคือ กำลัง สูญเสียในขณะนำกระแส และกำลังสูญเสียในขณะเปลี่ยนสถานะ การใช้ งานที่ความถี่ต่ำๆ กำลังสูญเสียในขณะนำกระแส และกำลังสูญเสียส่วนใหญ่จะเกิดขณะนำกระแส แต่ที่ความถี่สูง กำลังสูญเสียในขณะเปลี่ยนสถานะของไดโอดจะมีค่าสูงขึ้นด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกไดโอดให้ถูกต้องเพื่อลดการเกิดกำลังงานสูญเสีย

2.6.1 ชนิดและการเลือกใช้ไดโอด

เนื่องจากวงจรคอนเวอร์เตอร์จะมีค่าความถี่การทำงานของวงจรตั้งแต่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ขึ้นไป ไดโอดที่ใช้ในคอนเวอร์เตอร์จึงจำเป็นที่จะต้องมีความถี่ที่กว้างไป ดังนี้คือ

- (1) มีแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสต่ำ
- (2) มีช่วงเวลาคืนตัวสั้น (Recovery time)
- (3) สามารถทนกำลังได้สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลิกอนไดโอดที่ใช้ในวงจรเรกติไฟเออร์ทั่วไป ไม่สามารถนำมาใช้กับคอนเวอร์เตอร์ได้ เนื่องจากใช้เวลาดำเนินตัวนาน เกิดกำลังงานสูญเสียในรูปของความร้อนขึ้นสูง และมีประสิทธิภาพต่ำ ปกติไดโอดที่ใช้ในวงจรคอนเวอร์เตอร์ควรเลือกใช้ไดโอด 3 ชนิด

- (1) ฟาสต์ – รีคัพเวอรี่ไดโอด (Fast Recovery Diode)
- (2) อัลตราฟาสต์ – รีคัพเวอรี่ไดโอด (Ultra Fast Recovery Diode)
- (3) ซอตต์กีไดโอด (Schottky Diode)

2.6.2 ฟาสต์-รีคัพเวอรี่ไดโอด และอัลตราฟาสต์-รีคัพเวอรี่ไดโอด

ฟาสต์ – รีคัพเวอรี่ไดโอดมีช่วงเวลาดำเนินตัว t_{rr} ประมาณ 200 ถึง 750 นาโนวินาที ซึ่งสั้นกว่าซิลิกอนไดโอดมาก และฟาสต์ – รีคัพเวอรี่ มีอัตราทนแรงดันไบแอสกลับสูงถึง 1000 โวลต์ ส่วนอัลตราฟาสต์-รีคัพเวอรี่ไดโอด มีช่วงเวลาดำเนินตัว t_{rr} ประมาณ 25 ถึง 100 นาโนวินาที และมีอัตราทนแรงดันไบแอสย้อนกลับได้สูงถึง 1000 โวลต์ แรงดันตกคร่อมขณะนำกระแส (VF) ของไดโอดทั้งสองชนิดมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกันคือ ประมาณ 0.6 ถึง 1.5 โวลต์

2.6.3 ซอตต์กีไดโอด (Schottky Diode)

ซอตต์กีไดโอดมีค่าแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสประมาณ 0.5 โวลต์ จึงกลับได้ 100 โวลต์ เท่านั้น ซอตต์กีไดโอดมีกระแสรั่วไหลสูง ทำให้มีพลังงานสูญเสียขณะถูกไบแอสกลับได้สูงและยังมีปัญหาที่เกิดขึ้น เมื่อนำซอตต์กีไดโอดมีกระแสรั่วไหลสูง ทำให้มีพลังงานสูญเสียขณะถูกไบแอสกลับได้สูงและยังมีปัญหาที่เกิดขึ้น เมื่อนำซอตต์กีไดโอดมาใช้ในคอนเวอร์เตอร์อีกประการหนึ่งคือ ซอตต์กีไดโอดจะให้ทรานเซียนต์ขณะเริ่มหยุดนำกระแสสูง

2.7 การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ

คุณสมบัติที่ควรคำนึงถึงในการออกแบบมีดังนี้

1. ขดลวดที่นำมาใช้ควรจะมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทพลังงานได้สูง

2. เส้นแรงแม่เหล็กในขดลวดโซลีนอยด์จะมีทิศทางไปที่ศูนย์กลางของขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เองในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็ก จะมีอยู่มากบริเวณรอบๆขดลวดและจะลดลงเมื่ออยู่ห่างขดลวด

ณ จุดที่มีการต่อเส้นลวดจะมีเส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้นน้อยเนื่องจากเส้นลวดจะมีศูนย์กลางที่เป็นเรขาคณิต ศูนย์กลางสนามแม่เหล็กจึงคลาดเคลื่อน

ชนิดของขดลวด	ประสิทธิภาพในการใช้งานที่ย่านความถี่			
	10 Hz		450 Hz	
	สารแม่เหล็ก	วัสดุอื่น	สารแม่เหล็ก	วัสดุอื่น
ขดลวดชั้นวงสปริงรอบชิ้นงาน	75%	50%	80%	60%
แพนเค้ก	35%	25%	50%	30%
เข็มปักผมที่ทำด้วยลวด โค้ง	45%	30%	60%	40%
ขดเป็นวงเดี่ยวรอบชิ้นงาน	60%	40%	70%	50%
ช่อง	65%	45%	70%	50%
ขดอยู่ภายในชิ้นงาน	40%	20%	50%	25%

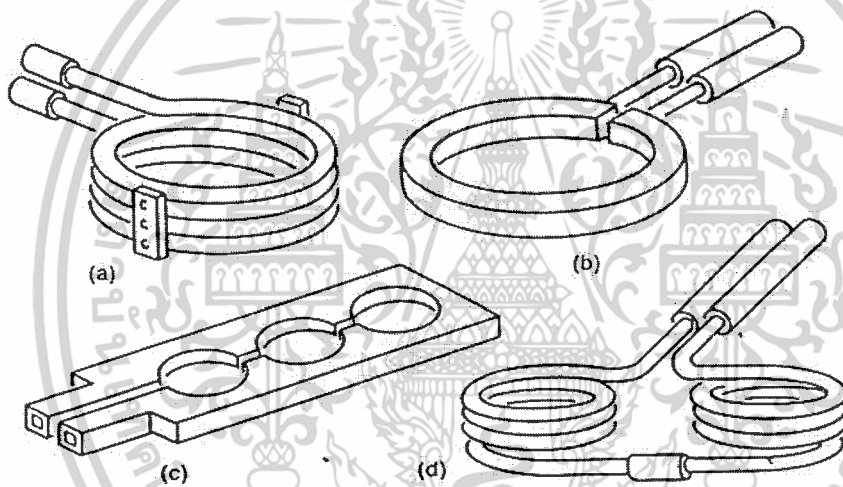
ตารางที่ 2.3 แสดงประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำแต่ละชนิดที่ใช้งาน

2.7.1 การใช้ความร้อนที่ความถี่ต่ำ

วัตถุประสงค์ของการใช้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่ต่ำก็คือ สามารถให้ความร้อนแก่โลหะให้ทั่วทั้งชิ้นงานที่ต้องการการให้ความร้อนแบบนี้นำไปใช้ในงานหลอม ซึ่งต้องการปริมาณ ความร้อนสูงทั่วทั้งปริมาตรของวัตถุดิบที่หลอมหรือในงานขึ้นรูปโลหะสำหรับเครื่องรีดโลหะแผ่น ในกรณีนี้มีก๊อกรูปแบบขดลวดอย่างง่าย ๆ โดยนิยมทำขึ้นจากขดลวดอย่างง่าย ๆ โดยนิยมทำขึ้นจากขดลวด โซลีนอยด์แล้วจัดรูปของขดลวดเหนี่ยวนำให้เหมาะสมกัน ลักษณะรูปทรงชิ้นงานที่จะให้ความร้อนอย่างลักษณะรูปร่างของชิ้นงานเบื้องต้น ได้แก่ ขดลวดแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า สี่เหลี่ยมจัตุรัสสี่เหลี่ยมคางหมู เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้ในการเหนี่ยวนำความถี่ต่ำมักจะมีจำนวนรอบมากฉะนั้นการพันขดลวดเหนี่ยวนำจึงพันในรูปแบบที่ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำรวมมีค่าสูง ในวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน โดยทั่วไปการใช้งานในย่านความถี่ต่ำ ขนาดเส้นลวดที่นำมาใช้ทำขดลวดเหนี่ยวนำจะมีขนาดใหญ่ และมีจำนวนหลายรอบขดลวดที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำจะต้องต่อหม้อแปลงไอโซเลทควบคู่กันไปอย่างไรก็ตามจะพิจารณาที่ความถี่เป็นหลัก ซึ่งต้องดูที่ความเหมาะสมของลักษณะชิ้นงานและขดลวดเหนี่ยวนำและตัวส่งกำลังที่ระบบทั้งหมด ซึ่งผลตอบสนองในการปฏิบัติงานจะขึ้นอยู่กับระบบแหล่งจ่ายกำลัง



รูปที่ 2.16 แสดงรูปร่างของขดลวดเหนี่ยวนำความถี่ต่ำ

(a) แบบซ้อนกันตำแหน่งเดียว

(b) แบบรอบเดียวตำแหน่งเดียว

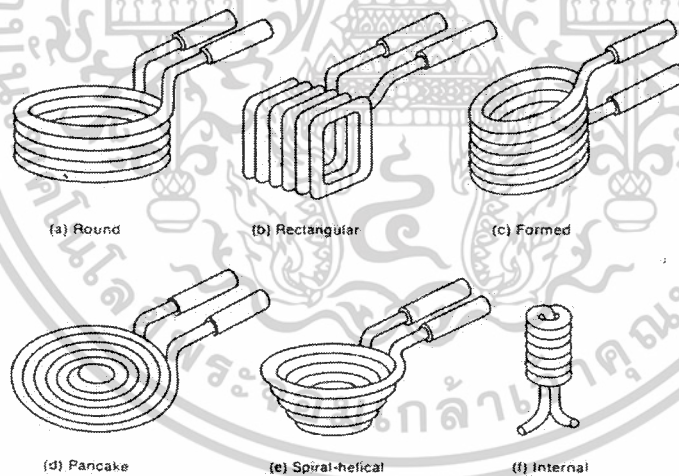
(c) แบบรอบเดียวหลายตำแหน่ง

(d) แบบซ้อนกันหลายตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2 ขดลวดเหนี่ยวนำที่ความถี่ปานกลางถึงความถี่สูง

ขดลวดโซลีนอยด์ที่ใช้งานในความถี่ประเภทความถี่ปานกลาง ถึงความถี่สูง สามารถออกแบบได้ทั้งแบบรอบเดียว และแบบซ้อนกันหลายรอบ ในรูปที่ 2.16 แสดงการออกแบบ ขดลวดโซลีนอยด์ รูปที่ 2.16 (a) แสดงขดลวดแบบซ้อนกันหลายรอบตำแหน่งเดียวใช้กับชิ้นงานที่จะให้ความร้อนมีส่วนประกอบเป็นชิ้นเดียวกัน แบบรอบเดียวตำแหน่งเดียวแสดงในรูปที่ 2.16 (b) ในรูปที่ 2.16 (c) เป็นแบบรอบเดียวหลายตำแหน่ง ซึ่งในการออกแบบจะมีผลกระทบซึ่งกันและกัน ซึ่งชิ้นงานแต่ละชิ้นจะตั้งได้หลายตำแหน่ง และในรูปที่ 2.16 (d) เป็นแบบซ้อนกันหลายรอบหลายตำแหน่ง ขดลวดที่กับความถี่ปานกลางถึงสูง จะนำไปใช้งานตามความต้องการของชิ้นงานหรือ ขนาดและรูปทรงของชิ้นงาน อัตราการทนแรงดันไบแอสย้อนกลับได้สูงถึง 1000 โวลต์ แรงดันตกคร่อมขณะนำกระแส (VF) ของไดโอดทั้งสองชนิดมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกันคือ ประมาณ 0.6 ถึง 1.5 โวลต์



รูปที่ 2.17 แสดงรูปแบบของขดลวดเหนี่ยวนำความถี่สูง

- | | |
|-------------------------|-------------------------|
| (a) แบบขดวนรอบเป็นชั้นๆ | (b) แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า |
| (c) แบบลูกเบี้ยว | (d) แบบแพนเค้ก |
| (e) แบบขดวงสปริง | (f) แบบขดภายใน |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อใช้ในชิ้นงานรูปโค้ง หรือขนาดใดๆแบบวนรอบ แสดงดังรูปที่ 2.17 (a) แบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก แสดงดังรูปที่ 2.17 (b) หรือใช้กับชิ้นงานรูปทรงพิเศษ เช่น ขดลวดแบบลูกเบี้ยวดังแสดงในรูปที่ 2.1 (c) ส่วนขดลวดแบบแพนเค้กที่แสดงดังรูปที่ 2.17 (d) เป็นการใช้ประโยชน์โดยทั่วไปเมื่อต้องการให้ความร้อนเฉพาะด้านเดียวหรือ ใช้กับส่วนของชิ้นงานที่ไม่สามารถกระจายความร้อนเข้าไปได้ด้วยขดลวดแบบต่างๆไปขดลวดแบบวงสปริงแสดงดังรูปที่ 2.17 (e) ใช้ในการให้ความร้อนกับชิ้นงานที่มีรูปทรงกรวยหรือรูปกลมภายในรูเจาะ ก็สามารถให้ความร้อนได้ด้วยขดลวดแบบขดภายในดังแสดงในรูปที่ 2.17 (f) ข้อแตกต่างที่สำคัญของขดลวดแบบแพนเค้กและขดภายในกับแบบอื่นๆ คือ ในแบบอื่นๆ ที่นอกเหนือจากทั้ง 2 แบบนี้ชิ้นส่วนที่ให้ความร้อนจะอยู่ภายในศูนย์กลางของสนามแม่เหล็กเสมอ

2.8 หม้อแปลงสวิตชิง

หม้อแปลงสวิตชิง (Switching Transformer) จัดเป็นอุปกรณ์หลักสำคัญสำหรับสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย ดังนั้นในการออกแบบสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายจึงจำเป็นต้องศึกษารูปแบบที่เป็นไปได้ในลักษณะต่างๆ ของหม้อแปลงสวิตชิง ตามความเหมาะสมในการใช้งานและการคำนวณขนาดแกนเฟอร์ไรต์ และขนาดขดลวดทองแดง รวมทั้งการกำหนดพิกัดความปลอดภัยทางไฟฟ้าเพื่อความปลอดภัยและลดกำลังงานสูญเสียในหม้อแปลงสวิตชิงขณะทำงาน

2.8.1 ส่วนประกอบของหม้อแปลงแกนเฟอร์ไรต์

หม้อแปลงสวิตชิงมีหน้าที่ลดทอนแรงดันไฟตรงที่อินพุตของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งอาจมีค่าสูงถึง 310 โวลต์ ให้มีค่าลดลงเป็นแรงดันไฟฟ้าค่าต่ำที่เอาต์พุตและทำให้เกิดการแยกจากกันทาง ไฟฟ้าระหว่างแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตได้เพื่อป้องกันอันตรายจากการถูกไฟฟ้าดูดมีส่วนประกอบที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. แกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite Core)

เฟอร์ไรต์เป็นวัสดุประเภทสารแม่เหล็ก หรือสารเฟอร์โรแมกเนติก ซึ่งการเหนี่ยวนำแม่เหล็กบนแกนเฟอร์ไรต์จะมีผลทำให้เกิดความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กค่อนข้างสูงประมาณ 3,000 – 4,000 เกาส์ และเกิดการสูญเสียในตัวมันต่ำที่ความถี่สูงๆ ดังนั้นหม้อแปลงสวิตชิง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงนิยมใช้แกนเป็นเฟอร์ไรต์มากที่สุด เฟอร์ไรต์ที่นำมาใช้ทำแกนของหม้อแปลงสวิตชิงจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับการใช้งานและมาตรฐานการออกแบบ

2. บอบบิ้น (Bobbin)

บอบบิ้นหรือแบบรองพันปกติจะทำจากพลาสติกชนิดที่ทนความร้อนได้สูงและไม่ติดไฟได้ง่าย บอบบิ้นจะช่วยให้การพันขดลวดบนแกนเฟอร์ไรต์สะดวกขึ้น และป้องกันปัญหาการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับแกนเฟอร์ไรต์ บอบบิ้นจะมีขนาดตามมาตรฐานของแกน

3. ลวดทองแดงอาบนํ้ายา (Enamelled Copper Wire)

การพันขดลวดทั้งไพรมารีและเซคันดารี ของหม้อแปลงสวิตชิงที่มีกำลังไม่สูงมากนักปกติจะใช้ลวดอาบนํ้ายาพันบนแกนของบอบบิ้น ให้ได้จำนวนรอบตามต้องการขนาดของลวดทองแดงที่จะใช้พันนั้น ขึ้นอยู่กับค่ากระแสสูงสุดที่ไหลผ่านขดลวดความถี่และผลข้างเคียงอื่นๆ เช่นการพันขดลวด

4. เทปฉนวน (Insulation Tape)

เทปฉนวนใช้พันสำหรับเป็นตัวรอง ระหว่างชั้นของขดลวดในหม้อแปลงสวิตชิง และจะมีหน้าที่สำคัญในการแยกส่วนทางไฟฟ้า ระหว่างขดไพรมารีและเซคันดารี ด้วยวัสดุที่ใช้ทำเทปฉนวนอาจจะเป็นพวคไมลาร์ (Milar) หรือโพลีเอสเตอร์ (Ployester) ที่มีความหนาอยู่ในช่วง 0.05-0.1 มิลลิเมตร การเลือกใช้จะขึ้นอยู่กับกรออกแบบและค่าความปลอดภัยที่ต้องการจากหม้อแปลงสวิตชิงเป็นหลัก

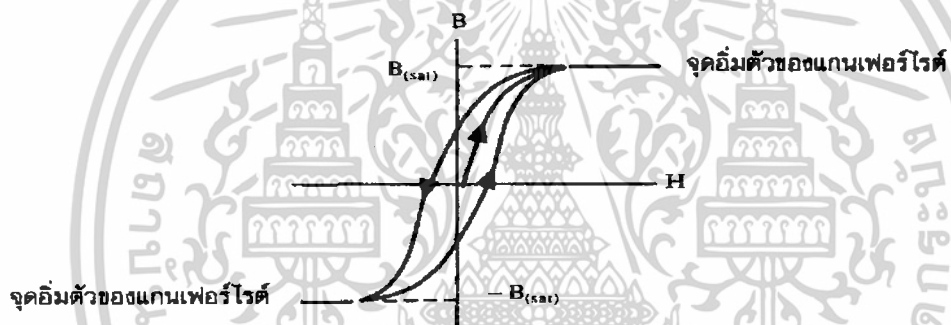
2.8.2 ลักษณะสมบัติของเนื้อสารที่ใช้ทำแกนเฟอร์ไรต์

ชนิดของเนื้อสารเฟอร์ไรต์ที่แตกต่างกัน จะให้สมบัติทางแม่เหล็กนั้นแตกต่างกัน ด้วยถึงแม้จะมีขนาดเท่ากันทุกประการ ในแผ่นข้อมูลเนื้อสารที่ให้มากับแกนเฟอร์ไรต์จะต้องมีรายละเอียดคุณสมบัติเนื้อสารแสดงไว้เสมอข้อมูลที่ควรจะทำความเข้าใจและศึกษาไว้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.เส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis Curve)

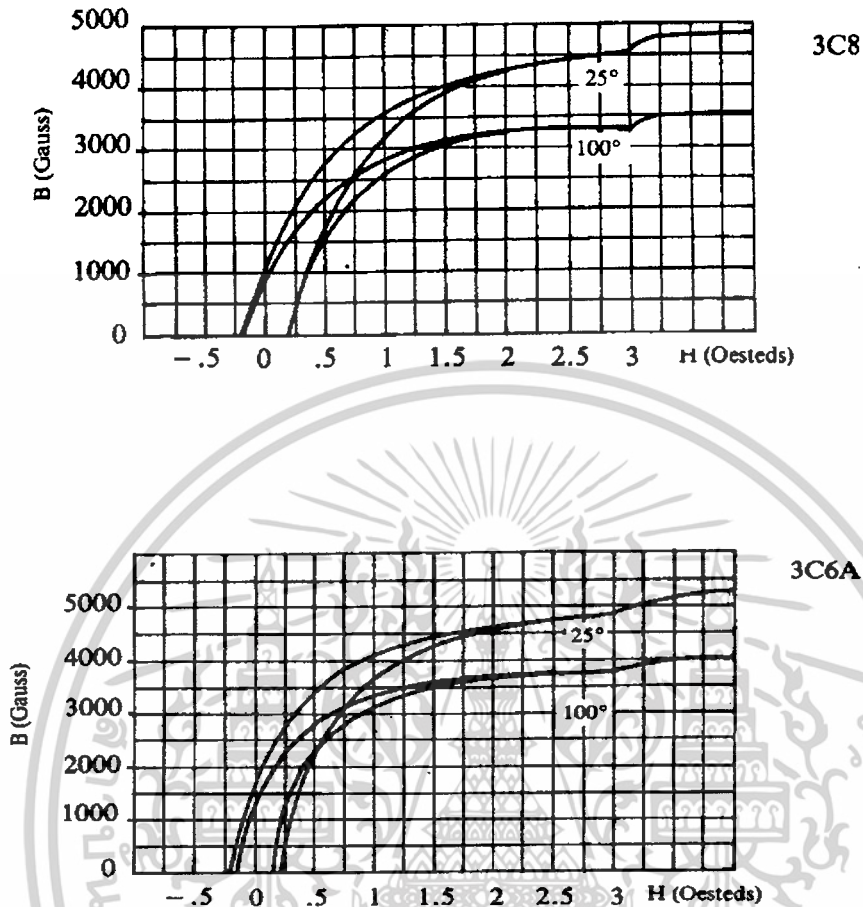
เส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิสแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของ ฟลักซ์แม่เหล็ก (B) ที่เกิดขึ้นในแกนกับความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของขดลวดพันบนแกนในรูปที่ 2.19(ก),(ข)แสดงลักษณะของเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิส ของเนื้อสารชนิด 3C8 และ 3C6A ตามลำดับ จุดที่ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กจะมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยมาก แม้ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของความเข้มสนามแม่เหล็ก H เรียกว่าจุดอิ่มตัวของ ฟลักซ์แม่เหล็ก (Saturation) โดยปกติผู้ผลิตจะแสดงกราฟของเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิสเพียง ครั้งเดียวเนื่องจากอีกครั้งหนึ่งของเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิสมีลักษณะกลับทิศกันดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะที่สมบูรณ์ของเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิสซึ่งจะมีลักษณะสมมาตรของกราฟซีกบนและซีกล่าง

การใช้งานแกนเฟอร์ไรต์มาทำหม้อแปลงสวิตติง จะต้องระวังอย่าทำให้แกนเฟอร์ไรต์เกิดการอิ่มตัวขึ้นได้ ดังนั้นการออกแบบหม้อแปลงสวิตติงจึงควรกำหนดค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ในแกน ขณะทำงานมีค่าไม่เกินครึ่งหนึ่งของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดของแกนเฟอร์ไรต์เพื่อความปลอดภัย

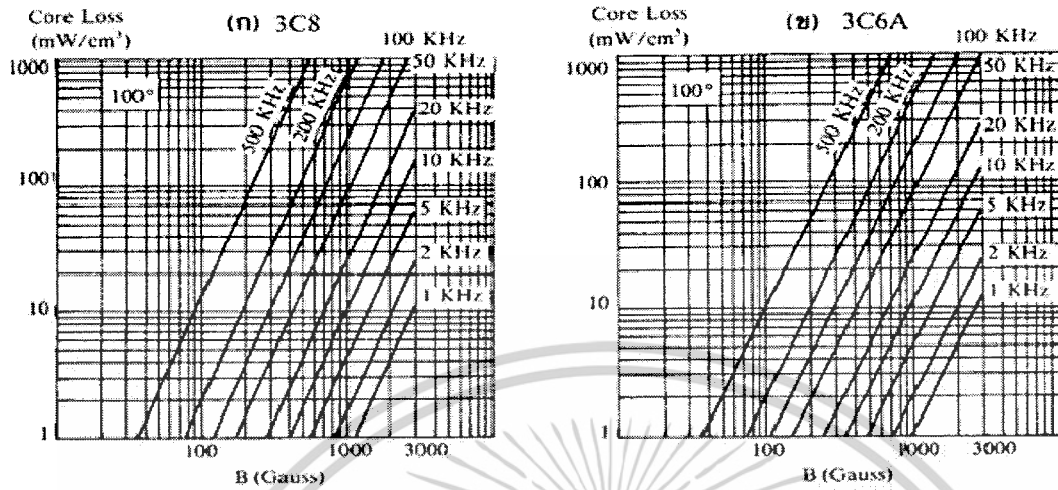
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 แสดงเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิสของแกนเฟอร์ไรต์ที่เป็นเนื้อสารชนิด 3C8 และ 3C6A

การสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์ จะทำให้แกนเฟอร์ไรต์ร้อนซึ่งมีสาเหตุหลัก 2 ประการคือ การสูญเสียเกิดจากลักษณะฮิสเตอร์รีซิสของแกน (Hysteresis Loss) และการสูญเสียจากการเกิดกระแสไหลวนภายในแกนเฟอร์ไรต์ (Eddy Current Loss) ที่ความถี่ต่ำกว่า 100 กิโลเฮิร์ตซ์ การสูญเสียจากการเกิดกระแสไหลวนในแกนจะมีค่าน้อยสำหรับแกนที่มีขนาดไม่ใหญ่มากนัก ดังนั้นการสูญเสียที่ก่อให้เกิดความร้อนในแกนอาจจะพิจารณาได้จากการสูญเสียทางฮิสเตอร์รีซิสเพียงอย่างเดียว ตัวอย่างของกราฟแสดงค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์แสดงในรูปที่ 2.20 ปกติค่ากำลังสูญเสียจะถูกระบุค่าไว้เป็นมิลลิวัตต์ต่อหนึ่งลูกบาศก์เซนติเมตร (mW/cm^3) และค่าขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กความถี่การใช้งาน รวมถึงอุณหภูมิขณะที่ใช้แกนเฟอร์ไรต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 แสดงค่าการสูญเสียในแกนเออร์ไรต์ของเนื้อสารชนิด 3C8 (ก) 3C6A (ข)

2.8.3 การกำหนดค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดในแกนหม้อแปลง

ค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก ในแกนของหม้อแปลงจะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดไพรมารีและขนาดของแกน จากกฎของฟาราเดย์จะได้ว่า

$$\frac{V \cdot t}{N_p \cdot A_e} \times 10^8 \quad [\text{Gauss}] \quad (2.23)$$

เมื่อ ΔB คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกน [Gauss]

V คือ ค่าแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดไพรมารี [V]

N_p คือ ค่าจำนวนรอบของขดไพรมารี [N]

A_e คือ ขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกน [cm^2]

t คือ ช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กเกิดขึ้น [sec]

จะเห็นว่ายิ่งจำนวนรอบของขดลวดไพรมารี มีค่าน้อยลงค่าความหนาแน่นของฟลักซ์ที่เกิดขึ้น จะยิ่งมีค่ามากขึ้น ซึ่งการลดจำนวนรอบของขดลวดไพรมารีลงจะทำได้โดยใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลวดทองแดงขนาดใหญ่ขึ้นได้ และสามารถทนกระแสได้สูงทำให้หม้อแปลง ให้กำลังได้สูงขึ้น อย่างไรก็ตามหากค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กจะมีค่าเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัวจะทำให้แรงดันทางขดไพรมารีมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว แรงดันอินพุตจะมาตกคร่อมที่เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในขณะที่กำลังนำกระแสสูงๆ แทนทำให้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์เสียหายและความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่มีค่าสูงทำให้เกิดการสูญเสียภายในแกนสูงด้วย ดังนั้นการกำหนดค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดในแกนเฟอร์ไรต์ขณะทำงานจึงมีข้อที่ควรคำนึงถึง 2 ประการคือ

1. แกนเฟอร์ไรต์ต้องไม่เกิดการอิ่มตัวขณะทำงาน

2. ที่ค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด ที่เกิดขึ้นในแกนขณะทำงานจะต้องเกิดการสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ต่ำที่สุด

2.8.4 การเลือกขนาดของแกนเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสม

การใช้แกนเฟอร์ไรต์ที่มีขนาดใหญ่มากเกินไป สำหรับหม้อแปลงสวิตชิงจะเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายโดยไม่จำเป็น ส่วนการใช้แกนเฟอร์ไรต์ที่มีขนาดเล็กเกินไป ขดลวดและแกนเฟอร์ไรต์จะร้อนกำลังสูงสุดที่เหมาะสมสำหรับแกนเฟอร์ไรต์ขนาดต่างๆ พิจารณาได้จากขนาดหน้าตัดของแกน (A_e) และขนาดช่องสำหรับพันขดลวดของบอบบิน (A_w) พิจารณาค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กความถี่ที่ใช้งานและชนิดของอินเวอร์เตอร์ ด้วยตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ของอินเวอร์เตอร์ความถี่ที่ใช้งานและความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กสำหรับฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์

$$P = \frac{1.4\Delta B_{(MAX)} f A_e A_w}{D} \times 10^3 \quad [W] \quad (2.24)$$

$B_{(MAX)}$ คือ ค่าความหนาแน่นของฟลักซ์สูงสุดในแกนเฟอร์ไรต์ [Gauss]

f คือ ค่าความถี่ในการทำงานของแกนเฟอร์ไรต์ [Hz]

A_e คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเฟอร์ไรต์ [cm^2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A_w คือ พื้นที่สำหรับพันขดลวดของบอบบิ้น [cm²]

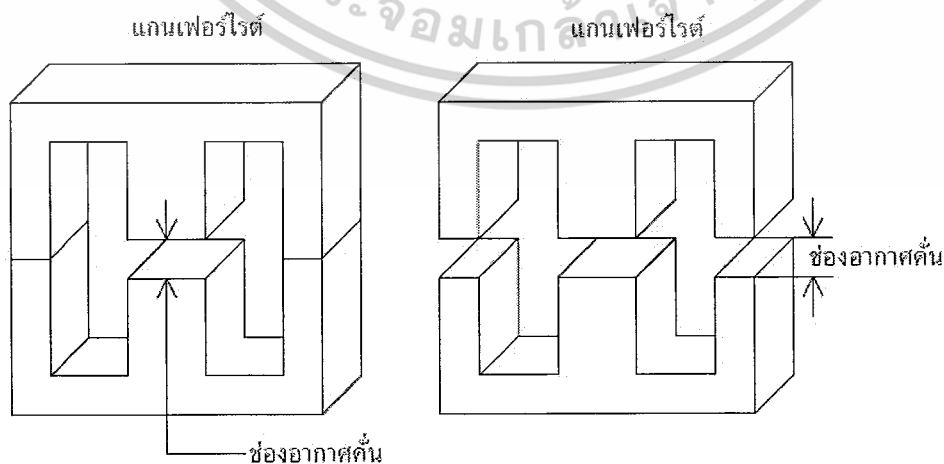
D คือ ค่าความหนาแน่นของกระแส [cercuramin/A]

P คือ กำลังงานสูงสุดที่ได้จากแกนเฟอร์ไรต์ [W]

2.8.5 ช่องอากาศคั่นทางเดินแม่เหล็กในแกนเฟอร์ไรต์ (Air Gap)

การเพิ่มช่องอากาศคั่นทางเดินแม่เหล็ก (Air Gap) ในแกนเฟอร์ไรต์เป็นวิธีการอย่างหนึ่ง ที่ใช้ป้องกันการอิ่มตัวของแกนเฟอร์ไรต์ และจะช่วยการสะสมพลังงานของขดลวดในหม้อแปลงสวิตช์ซึ่งมีค่ามากขึ้นได้ด้วย อย่างไรก็ตามช่องอากาศคั่นในแกนเฟอร์ไรต์ จะทำให้เกิดการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวน EMI ออกมาและอาจรบกวนอุปกรณ์ภายนอก

สำหรับแกนเฟอร์ไรต์แบบ EE , EI , ETD เหมือนแบบ POT สามารถกำหนดลักษณะของช่องอากาศคั่นในแกนได้ 2 ลักษณะ ดังภาพที่ 20-30 คือการกำหนดช่องอากาศคั่นที่แกนกลางอย่างเดียว และการคั่นแกนด้วยช่องอากาศระหว่างคู่ประกบการคั่นแกนด้วย ช่องอากาศระหว่าง คู่ประกบสามารถทำได้ง่ายกว่าการคั่นช่องอากาศที่แกนกลางซึ่งทำได้โดยการใช้แผ่นฉนวนที่มีความหนาเป็นครึ่งหนึ่งของระยะช่องอากาศที่ต้องการ นำมาคั่นระหว่างแกนของคู่ประกบ ส่วนการกำหนดช่องอากาศคั่นที่แกนกลางต้องสั่ง โดยตรงจากผู้ผลิตแกนเฟอร์ไรต์ หรือการขัดแกนออกเพื่อให้ได้ระยะช่องอากาศที่ต้องการ

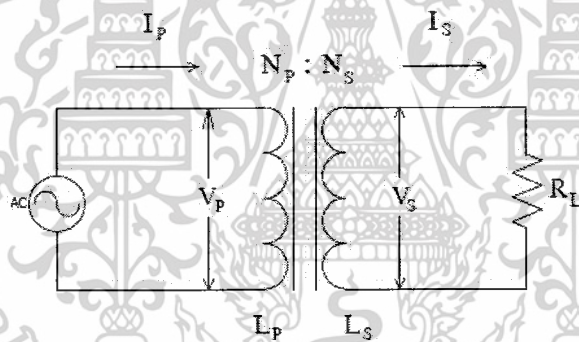


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีข้อสังเกตคือ การค้นช่องอากาศระหว่างคู่ประกบ ความหนาของแผ่นฉนวนคั่นที่ใช้จะมีค่าเพียงครั้งหนึ่ง ของระยะช่องอากาศคั่นที่ต้องการเท่านั้น เนื่องจากช่องอากาศที่เกิดขึ้นจะคั่นทางเดินฟลักซ์แม่เหล็กถึงสองครั้งในแกน ดังนั้นระยะช่องอากาศคั่นที่ได้จึงเป็นผลรวมของระยะช่องอากาศที่เกิดขึ้นทั้งหมด

2.8.6 ความสัมพันธ์ระหว่างขดไพรมารีและขดเซคันดารีของหม้อแปลงสวิตชิง

หม้อแปลงสวิตชิงจะมีความสัมพันธ์ของขดไพรมารี และขดเซคันดารีเป็นไปตามทฤษฎีของหม้อแปลงผลของจำนวนรอบและค่าของแรงดันที่เกิดขึ้นในวงจรจากรูปที่ 2.22 จะเป็นดังนี้



รูปที่ 2.22 แสดงความสัมพันธ์พื้นฐานของหม้อแปลง

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p} \quad (2.25)$$

$$\frac{N_p}{N_s} = \sqrt{\frac{L_p}{L_s}} \quad (2.26)$$

เมื่อ N_p คือ จำนวนรอบของขดไพรมารี

N_s คือ จำนวนรอบของขดเซคันดารี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V_p คือ ค่าแรงดันตกคร่อมขดไพรมารี

V_s คือ ค่าแรงดันตกคร่อมขดเซคันดารี

L_p คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดไพรมารี

L_s คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดเซคันดารี

I_p คือ ค่ากระแสที่ไหลผ่านขดไพรมารี

I_s คือ ค่ากระแสที่ไหลผ่านขดเซคันดารี

ข้อสังเกตคือแรงดัน V_p เป็นค่าแรงดันที่ตกคร่อมขดไพรมารีเกิดการอิ่มตัวอัตรา การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กในแกนของหม้อแปลง เนื่องจากกระแสไหลผ่านขดไพรมารี ไม่ใช่ค่าแรงดันอินพุต V_1 โดย V_p จะมีค่าเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$V_p = N_p \cdot A_e \left[\frac{dB}{dt} \right] \times 10^8 \quad [\text{V}] \quad (2.27)$$

และค่า V_p ที่เกิดขึ้นจะมีค่าใกล้เคียงกับค่า V_1 แต่ถ้าแกนเฟอร์ไรต์ เกิดการอิ่มตัว อัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กจะมีค่าน้อยมากหรือมีค่าเป็นศูนย์แรงดันตกคร่อม V_p จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเหมือนเกิดการลัดวงจร และจะมีผลต่อการทำงานของหม้อแปลงและวงจรที่เกี่ยวข้อง

2.8.7 การกำหนดขนาดของขดลวด

ปกติการพันขดลวดในหม้อแปลงสวิตชิง จะใช้ลวดทองแดงอาบน้ำยาใช้เป็นตัว พัน (ตารางที่ 2.4 จะแสดงขนาดและข้อมูลอื่นๆ ของเส้นลวดทองแดงอาบน้ำยาตามมาตรฐาน AWG ที่มีการผลิตจำหน่าย) ในขณะที่หม้อแปลงทำงานสำหรับแปลงสวิตชิงกระแสสลับที่ไหลผ่าน ขดลวดนั้นมีความถี่สูงที่ความถี่สูงๆ ลวดทองแดงจะนำกระแสได้เพียงที่ผิวซึ่งจะมีผลทำให้ พื้นที่หน้าตัดในการนำกระแสของลวดทองแดงลดลง การสูญเสียในขดลวดจะมีมากขึ้นรวมทั้งการ เรียงซ้อนกันของขดลวดก็มีผลให้เกิดการสูญเสียขึ้นในขดลวดได้เช่นกัน ซึ่งกำลังงานที่สูญเสีย เหล่านี้จะทำให้ขดลวดร้อน ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในขณะที่หม้อแปลงทำงานการ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็น ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดขนาดและ วิธีการพันขดลวดทองแดงจึงต้องทำอย่างเหมาะสมเพื่อลดการสูญเสียในขดลวดทองแดงให้มีย่าน้อยที่สุด

เบอร์ AWG (B.&S.)	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง(d)		พื้นที่หน้าตัด ปกติ mm ²	ค่าความ ต้านทานที่ 100 °C Ω/m	ระยะเรียง ชิดต่ำสุด mm.	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางรวม จนวน mm
	Inch.	mm.				
44	0.00198	0.0503	0.0503	11.180	0.071	0.06604
43	0.00222	0.0564	0.0564	8.899	0.079	0.07366
42	0.00249	0.0633	0.0633	7.073	0.087	0.08128
41	0.0028	0.0711	0.0711	5.594	0.098	0.09144
40	0.0314	0.0798	0.0798	4.448	0.111	0.1041
39	0.003535	0.0897	0.0897	3.159	0.122	0.1143
38	0.00397	0.1008	0.1008	2.783	0.138	0.1295
37	0.00445	0.1130	0.1130	2.215	0.154	0.1448
36	0.00500	0.1270	0.1270	1.757	0.172	0.1626
35	0.0056	0.1422	0.1422	1.398	0.188	0.1778
34	0.0063	0.1600	0.1600	1.105	0.209	0.1981
33	0.0071	0.183	0.183	0.8700	0.236	0.2235
31	0.0089	0.2261	0.2261	0.5537	0.287	0.2743
30	0.0100	0.2540	0.2540	0.4386	0.319	0.3048
29	0.0113	0.2870	0.2870	0.3435	0.356	0.3404
28	0.0126	0.3200	0.3200	0.2762	0.393	0.3759
27	0.0142	0.3607	0.1022	0.2175	0.438	0.4191
26	0.0159	0.4039	0.128	0.1735	0.491	0.4699
25	0.0179	0.4547	0.162	0.1369	0.547	0.5232
24	0.0201	0.5105	0.205	0.1086	0.608	0.5817
23	0.0226	0.5740	0.259	0.08586	0.679	0.6502
22	0.0253	0.6426	0.324	0.06852	0.754	0.7214
21	0.0285	0.7239	0.412	0.05399	0.841	0.8052

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

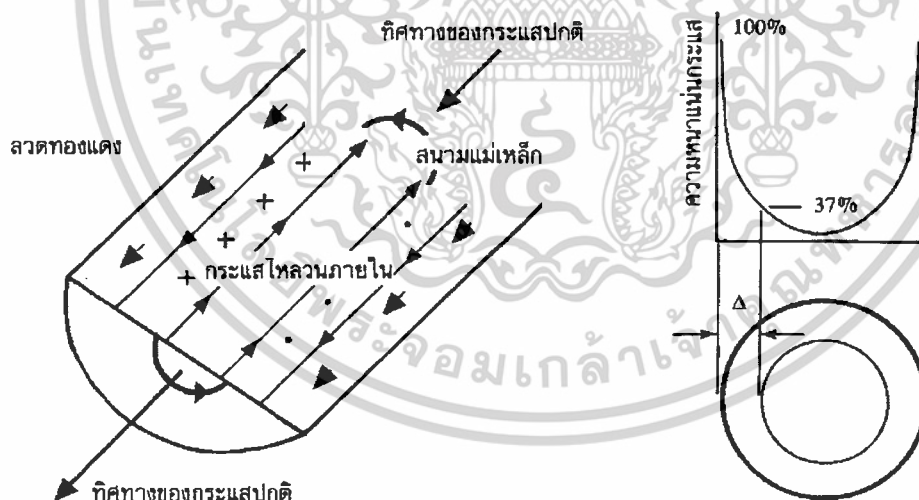
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20	0.0320	0.8128	0.519	0.04283	0.937	0.8966
19	0.0359	0.911	0.653	0.03403	1.048	1.003
18	0.0403	1.024	0.823	0.02700	1.168	1.118
17	0.0453	1.151	1.040	0.02137	1.303	1.247
16	0.0508	1.290	1.308	0.01699	1.452	1.389
15	0.0571	1.450	1.652	0.01345	1.627	1.557

ตารางที่ 2.4 แสดงขนาดมาตรฐาน AWG และข้อมูลอื่นๆ ของลวดทองแดงอาบน้ำยา

2.8.8 ผลจากการนำกระแสที่ผิวของทองแดง (Skin effect)

ลวดทองแดงเมื่อมีกระแสสลับไหลผ่านจะเกิดสนามแม่เหล็กไหลวนภายใน และรอบๆ ตัวมันสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสไหลวน (Eddy Current) ภายในตัวลวดทองแดงอีกทอดหนึ่ง การไหลของกระแสไหลวนนี้จะทำให้กระแสปกติไหลได้เฉพาะที่ผิวของลวดทองแดงดังแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 แสดงลักษณะกระแสไหลวนภายในขดลวดทองแดงเมื่อมีกระแสสลับไหลผ่าน

ปริมาณของกระแสปกติที่ไหลในลวดทองแดง จะยังคงมีค่าเท่าเดิมแต่ความหนาแน่นของกระแสในลวดทองแดง ที่ใกล้ผิวจะมีค่าสูงเพราะกระแสส่วนใหญ่ไหลได้เฉพาะที่ผิวเท่านั้น การไหลของกระแสไหลวนจะเป็นการจำกัดพื้นที่นำกระแสของลวดทองแดงและเหมือนผลที่พื้นที่นำกระแสของลวดทองแดง ลดลงจากพื้นที่หน้าตัดเดิมจากผิวของลวดทองแดงลึกลงมาในเนื้อ

ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลวดทองแดง จนถึงจุดที่ค่าความหนาแน่นของกระแสมีค่าลดลงมาเพียง 37 % ของค่าความหนาแน่นกระแสที่ผิว นั่น เราเรียกระยะนี้ว่าเป็นความหนาผิวนำกระแสของขดลวดทองแดง (Skin depth) ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.23 ความหนาของผิวนำกระแสนี้มีค่าขึ้นอยู่กับความถี่และสำหรับลวดทองแดงที่อุณหภูมิ 100°C ความหนาของผิวนำกระแสจะมีค่า

$$\Delta = \sqrt{\frac{5.62}{f}} \quad [\text{mm}] \quad (2.28)$$

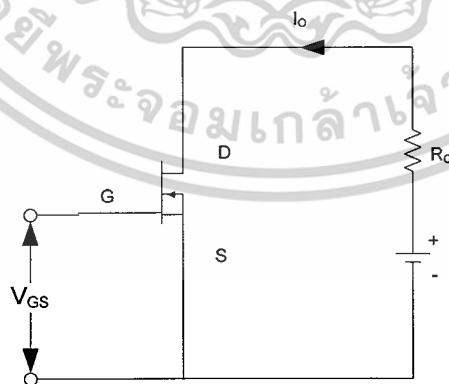
เมื่อ Δ คือ ค่าความหนาผิวนำกระแส [mm]

f คือ ค่าความถี่ของกระแส [kHz]

2.9 เพาเวอร์มอสเฟต

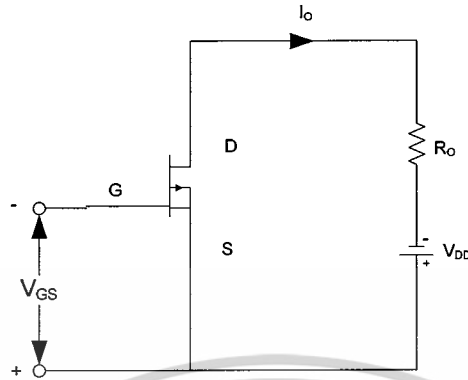
2.9.1 โครงสร้างพื้นฐานของเพาเวอร์มอสเฟต

เพาเวอร์มอสเฟตเป็นอุปกรณ์ที่ควบคุมกระแสเอาต์พุตด้วยแรงดันที่ขาเกต และต้องการกระแสอินพุตต่ำมาก มีความเร็วในการสวิตช์สูง เวลาในการสวิตช์ต่ำมากเป็นนาโนวินาที เพาเวอร์มอสเฟตได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในหลายๆด้านเนื่องจากใช้ได้ดีที่ความถี่สูง แต่มีปัญหาเกี่ยวกับไฟฟ้าสถิตและต้องการการเก็บรักษาอย่างเป็นพิเศษ



รูปที่ 2.24(ก) ดิฟฟิชั่นมอสเฟตชนิดเอ็น

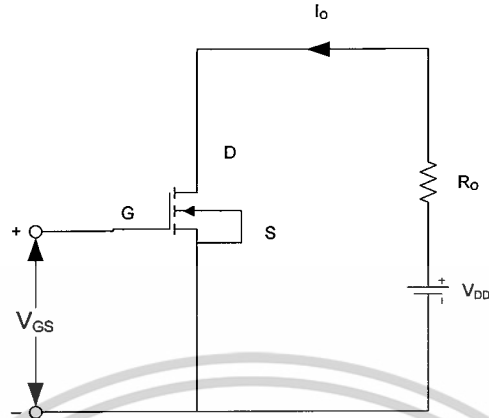
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



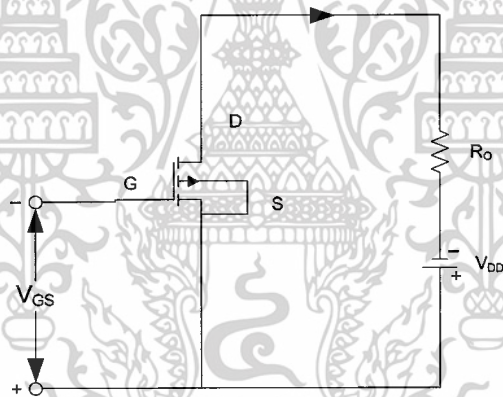
รูปที่ 2.24(ข) ดีพลีชั่นมอสเฟตชนิดพี

มอสเฟตมีด้วยกัน 2 ชนิดคือ ดีพลีชั่นมอสเฟต และเอ็นฮานซ์เมนต์มอสเฟต (Depletion Mosfet and Enhancement Mosfet) ดีพลีชั่นมอสเฟตชนิดเอ็นจะมีโครงสร้างที่เป็นชั้นสารซิลิคอนชนิดพีดังรูปที่ 2.24.(ก) และถูกโด๊ป (dope) ด้วยซิลิคอนชนิด n^+ ซึ่งมีความต้านทานต่ำ เกทถูกแยกออกจากแชนแนลด้วยชั้นของออกไซด์บางๆ ขาทั้งสามของมอสเฟตมีชื่อเรียกว่า เกท เดรน และ ซอร์ส แรงดันที่เกทซอร์ส (V_{GS}) นั้นจะเป็นบวกหรือลบก็ได้ ถ้า V_{GS} เป็นลบ อิเล็กตรอนบางส่วนในพื้นที่ของเอ็นแชนแนลจะถูกผลักออกไป และบริเวณปลอดพาหะจะถูกสร้างขึ้นที่ด้านล่างของชั้นของออกไซด์เป็นผลทำให้แชนแนลแคบลง ค่าความต้านทานระหว่างเดรนและซอร์ส R_{DS} จะสูงขึ้นถ้า V_{GS} มีค่าเป็นลบมากพอที่จะทำให้แชนแนลปลอดพาหะอย่างสมบูรณ์ ซึ่งทำให้ R_{DS} มีค่าสูงขึ้น จนไม่มีกระแสไหลจากเดรนไปยังซอร์ส ($I_{DS}=0$) แรงดัน V_{GS} ดังกล่าวเรียกว่าแรงดันพินช์ออฟ (pinch off voltage), V_D เมื่อ V_{GS} มีค่าเป็นบวกแชนแนลจะเริ่มกว้างมากขึ้น และ I_{DS} จะไหลมากขึ้นเนื่องจากในเอ็นฮานซ์เมนต์มอสเฟตชนิดเอ็นจะไม่มีแชนแนลดังรูปที่ 2.25 (ก) ถ้า V_{GS} เป็นบวกอิเล็กตรอนจะถูกดูดจากซับสเตรทชนิดพี (p-type substrate), V_T แล้ว อิเล็กตรอนที่สะสมจะมีปริมาณมากพอที่จะทำให้เกิดเอ็นแชนแนลเสมือนขึ้นและจะทำให้กระแสไหลจากเดรนไปซอร์สได้ สำหรับเอ็นฮานซ์เมนต์มอสเฟตชนิดพี สภาพขั้วของ V_{GS} , I_{DS} และ V_{GS} จะตรงข้ามกับชนิดเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25(ก) เอ็นฮานซ์เมนต์มอสเฟตชนิดเอ็น



รูปที่ 2.25(ข) เอ็นฮานซ์เมนต์มอสเฟตชนิดพี

2.9.2 ลักษณะสมบัติที่สภาวะคงตัวของมอสเฟต

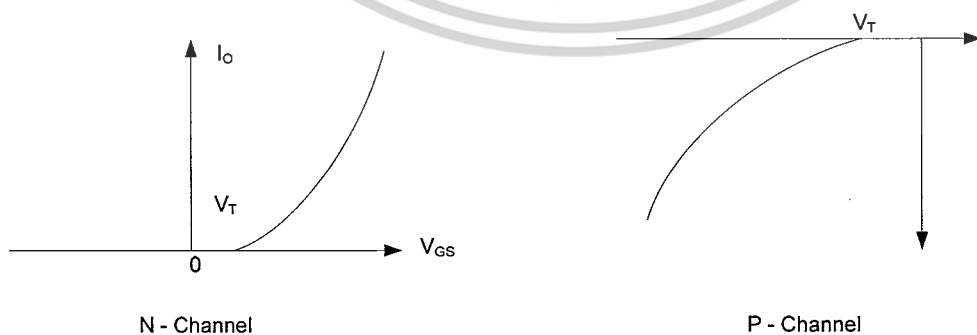
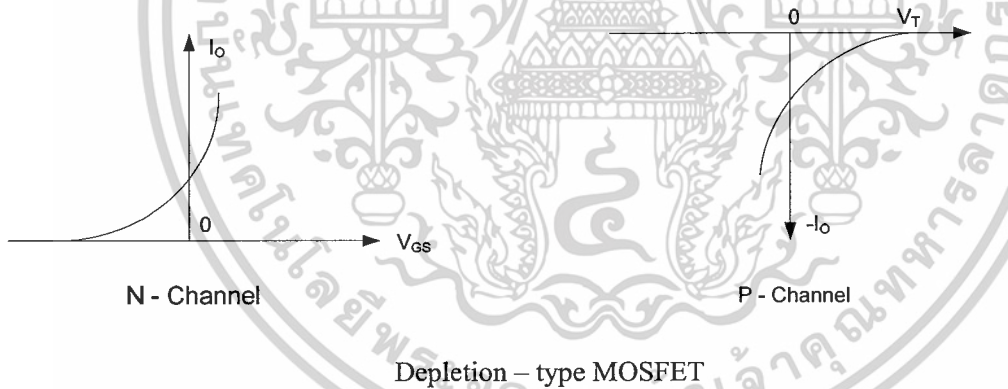
มอสเฟตเป็นอุปกรณ์ที่ควบคุมได้ด้วยแรงดัน มีค่าอินพุทอิมพีแดนซ์สูงมาก ทำให้กระแสเกตไหลต่ำมากเป็นนาโนแอมแปร์ อัตราการขยายกระแสซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างกระแสเดรน I_D กับกระแสเกต I_G อย่างไรก็ตามอัตราการขยายกระแสไม่ได้เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ ค่าทรานสคอนดักแตนซ์ซึ่งเป็นอัตราส่วนของกระแสเดรนและแรงดันเกตจะเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะสมบัติไอออนย้ายของมอสเฟตชนิดเอ็นและชนิดพีแสดงดังรูปที่ 2.26 และรูปที่ 2.27 จะเป็นลักษณะสมบัติทางเอาท์พุทของเอ็นฮานซ์เมนท์มอสเฟตชนิดเอ็นจะมีการทำงานใน 3 บริเวณคือ บริเวณคัทออฟ (cut off region) เมื่อ $V_{GS} < V_T$ บริเวณอิ่มตัวหรือพินช์ออฟ (saturation or pinch off region) เมื่อ $V_{DS} > (V_{GS} - V_T)$ และบริเวณเชิงเส้น (linear region) เมื่อ $V_{DS} < (V_{GS} - V_T)$ การพินช์ออฟจะเกิดขึ้นเมื่อ $V_{DS} = V_{GS} - V_T$ ในบริเวณเชิงเส้น กระแส I_D

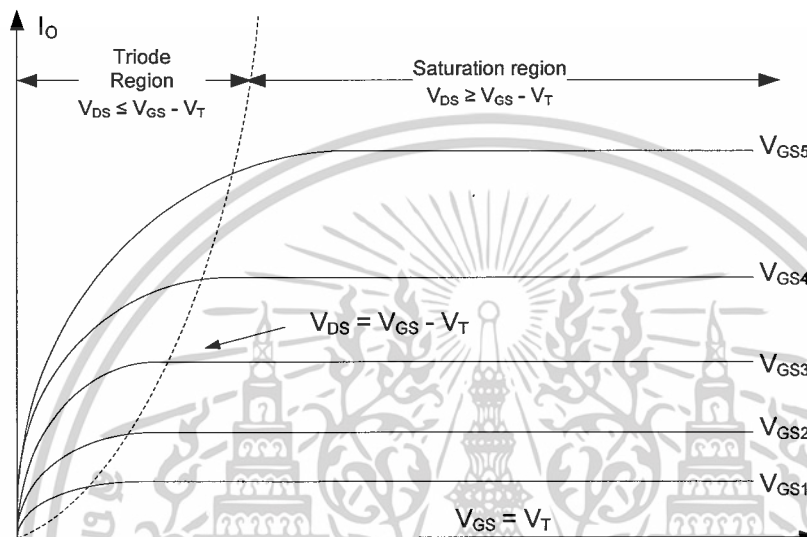
จะเปลี่ยนโดยเป็นสัดส่วนกับแรงดัน V_{DS} เนื่องจากกระแสเดรนสูงและแรงดันเดรนต่ำทำให้มอสเฟตทำงานได้ในบริเวณเชิงเส้น สำหรับการสวิทช์ชิ่งในบริเวณอิ่มตัว กระแสเดรนจะคงที่เมื่อแรงดัน V_{DS} เพิ่มขึ้น ในบริเวณนี้มอสเฟตจะถูกนำไปใช้ขยายแรงดัน มอสเฟตทั้งชนิดดีพีเอ็นและเอ็นฮานซ์เมนท์ จะมีโมเดลที่สภาวะคงตัวดังรูปที่ 2.28 ค่าทรานสคอนดักแตนซ์ $G_m = dI_D/dV_{GS}$

เมื่อ V_{DS} คงที่และความต้านทานด้านเอาท์พุท $r_o = R_{DS}$ หาได้จาก $R_{DS} = dV_{DS}/dI_D$ (R_{DS} ในบริเวณพินช์ออฟจะมีค่าสูงเป็นเมกะโอห์ม และในบริเวณเชิงเส้นจะมีค่าต่ำเป็นมิลลิโอห์ม)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 2.26 ลักษณะสมบัติไอออนย้ายของมอสเฟต
 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับดีฟิชั่นมอสเฟตทำงานที่แรงดันเกตเป็นบวกหรือลบก็ได้ แต่สำหรับเอ็นฮานซ์เมนต์มอสเฟตจะทำงานที่แรงดันเกตเป็นบวกเท่านั้น เพาเวอร์มอสเฟตที่ใช้ทั่วไปจะเป็นชนิดเอซาทซ์เมนต์



รูปที่ 2.27 ลักษณะสมบัติทางเอาท์พุทของเอ็นฮานซ์เมนต์มอสเฟต

2.9.3 โครงสร้างของเพาเวอร์มอสเฟต (Structure of Power Mosfet)

1. ผลจากความสามารถทางอินพุทอิมพีแดนซ์ที่มีค่าเข้าใกล้อนันต์

- ใช้แรงดันเป็นตัวขับ (Voltage driven input)
- ใช้กำลังค่านอินพุทต่ำ (Low input power)
- ใช้อุปกรณ์ในการขับขาเกตน้อย (Few driven circuit components)

2. มีความเร็วในกานสวิตช์สูงมาก (Very fast switching times)

- ไม่มีพาหะส่วนน้อย (No minority carrier)
- มีค่าเวลาในการหยุดนำกระแสต่ำ (Minimal turn-off time)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- พื้นที่ทำงานอย่างปลอดภัยเมื่อไบอัสกลับกว้าง (Large reverse biased safe operating area)

- มีค่าแบนวิดท์ของอัตราขยายสูง (High gain bandwidth product)

3. มีสัมประสิทธิ์บวกทางอุณหภูมิต่อความต้านทานขณะนำกระแส

(Positive temperature coefficient of on resistance)

2.9.4 การทำงาน

แรงดันรักษาสภาพคงตัว (Threshold Voltage), V_T

แรงดันรักษาสภาพคงตัวเป็นแรงดันเกณฑ์ถึงชอร์สที่ต้องการทำให้เกิดการแพร่กระจายประจุตรงข้ามบริเวณผิวของช่องในเชิงอุตสาหกรรมแรงดันรักษาสภาพคงตัวสามารถหาได้โดยกำหนดค่ากระแส 1mA ดังนั้นแรงดันที่ทำให้เกิดกระแสไหล 1mA คือแรงดันรักษาสภาพคงตัว ค่านี้จะขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นเกตออกไซด์และการแพร่ภายในช่อง ค่าต่ำสุดที่อุณหภูมิห้องมีค่า 1.5 โวลต์ เป็นค่าที่แน่นอนที่ทำให้อุปกรณ์ทำงานอยู่สภาวะการทำงานที่แน่นอนจนกระทั่งอุณหภูมิของรอยต่อถึง 150 °C

ความต้านทานขณะเปิดวงจร(On-Resistance), $r_{DS(on)}$

ค่าความต้านทานขณะเปิดวงจรสามารถหาได้จากความต้านทานรวมที่กระแสเดรนไหลกระแสเดรนจะไหลจากขาเดรนไปขาชอร์ส จากรูปที่ 2.29 $r_{DS(on)}$ ประกอบด้วยความต้านทาน 4 ตัวคือ อินเวอร์สชันแซนแนล (The inversion channel), r_{CH} , บริเวณเกต-เกรนแอคคิวมูเลชัน (The gate-strain Accumulation region), r_{ACC} , บริเวณพินช์จังก์ชันเฟต (The junction FET pinch region), r_{JFET} และบริเวณเดรนที่แพร่เจือจาง (The lightly doped drain region), r_D ตามสมการ

$$r_{DS} = r_{CH} + r_{ACC} + r_{JFET} + r_D \quad (2.23)$$

r_{CH} ขึ้นอยู่กับความยาวของช่อง (Channel)

r_{ACC} ขึ้นอยู่กับความกว้างของชั้น โพลี (Poly width)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

r_{JFET} ขึ้นอยู่กับความต้านทานจำเพาะ (epi resistivity)

ทั้งสามตัวนี้จะแปรผกผันกับความกว้างของช่อง และแรงดันเทถึงซอร์ส

r_D ขึ้นกับสัดส่วนของความต้านทานจำเพาะความกว้างของชั้น โพลีและเป็นสัดส่วนกลับกับความกว้างของช่อง

แรงดันพังทลาย (Breakdown Voltage), $V_{(BR)DSS}$

แรงดันพังทลายหรือแรงดันกลับต่อต้านของเพาเวอร์มอสเฟต มีลักษณะเหมือน v ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์และจะเกิดเหมือนการพังทลายแบบอะวาลานซ์ (avalanche breakdown) ค่าจำกัดของแรงดันจะถึงจุดเมื่อพังทลายในบริเวณดีพลีชั่น (depletion region) ขณะป้อนแรงดันไบอัสกลับให้แก่รอยต่อพีเอ็นจนได้รับพลังงานจลน์เพียงพอที่จะทำให้เกิดการไอออนไนเซชัน (ionization) หรือเมื่อสนามไฟฟ้าถึงจุดวิกฤต ขนาดของแรงดันสามารถพิจารณาจากพฤติกรรมของบริเวณที่แพร่สารเจือจางของชั้นเดรน และชนิดจุดเชื่อมต่อของ die's surface electric field รูปที่ 2.29 เป็นวงจรไฟฟ้าของโครงสร้างจะเห็นได้ว่าโครงสร้างเป็นทรานซิสเตอร์ประกอบอยู่ในอีพิเลเยอร์ (epi layer) จุด A จะให้เห็นว่าอิมิตเตอร์และเบสจะต่อเข้าด้วยกันดังนั้นจึงเป็นเหตุผลว่าทำไมค่า $V_{(BR)DSS}$ ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ และสังเกตที่เบสที่ต่อกับโลหะซอร์สจะใช้เป็นรอยต่อเบสคอลเลคเตอร์ นั่นคือไดโอด (diode) ที่ต่อคร่อมมาเดรนและซอร์สของเพาเวอร์มอสเฟต

ค่าความเก็บประจุของเพาเวอร์มอสเฟต (POWER MOSFET CAPACITANCE)

ค่าความเก็บประจุของเพาเวอร์มอสเฟตเกิดจาก โครงสร้างของมอสและรอยต่อพีเอ็น ค่าความเก็บประจุที่เกิดจากโครงสร้างมอสประกอบด้วยค่าความเก็บประจุของเกต-ซอร์ส (gate-source capacitance), c และค่าความเก็บประจุของเกต-เดรน (gate-drain capacitance), C_{GS} ขนาดของค่าความเก็บประจุทั้งสองขึ้นอยู่กับ โครงสร้างและออกไซด์ที่ชั้นเกตที่เป็นซิลิกอน รอยต่อพีเอ็นที่มีการวางชั้นของสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดค่าความเก็บประจุเดรนถึงซอร์ส และค่าความเก็บประจุนี้สามารถหาได้เหมือนตัวเก็บประจุทั่วไป (reverse biased junction depletion region)

จนวนไดอิเล็กตริกของ C_{GD} และ C_{GS} มักใช้แก้ว จึงเป็นตัวประจุที่ค่อนข้างเสถียรมาก ไม่เปลี่ยนแปลง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามอุณหภูมิจึงหรือแรงดัน ถ้าแรงดันที่ป้อนให้ขาเกตของเพาเวอร์มอสเฟตเกินจะทำให้เกิดการพังทลายผ่านแก๊วและกลายเป็นค่าความต้านทาน นั่นคือ เพาเวอร์มอสเฟตเสียหาย

2.9.5 ข้อดีของเพาเวอร์มอสเฟต

ความเร็ว (speed)

เพาเวอร์มอสเฟตเป็นอุปกรณ์ที่ใช้พาหะส่วนใหญ่ (majority carrier) ดังนั้นจึงทำให้มีความเร็วในการสวิตช์เร็ว ซึ่งต่างกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีพาหะส่วนน้อย (majority carrier) ค้างเหลืออยู่ที่เบส ทำให้เวลาค้างค่า (storage time) มากขึ้น ทำให้เวลาค้างค่ามากขึ้น ความเร็วในการสวิตช์ของเพาเวอร์มอสเฟตจะขึ้นอยู่กับกรเก็บประจุและคายประจุของค่าความเก็บประจุภายในเพาเวอร์มอสเฟต แต่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิขณะทำงาน

คุณสมบัติทางด้านอินพุต (Input characteristics)

เกตของเพาเวอร์มอสเฟตแยกออกจากซอร์สโดยชั้นออกไซด์ สามารถแทนด้วยค่าความต้านทานมีค่ามากถึง $40\text{ M}\Omega$ เพาเวอร์มอสเฟตสามารถจะรับไบอัสปิดวงจร (biased-on) ที่ขาเกตได้ถึง 10 โวลต์ ดังนั้นสามารถต่อมาจาก TTL หรือ CMOS ได้

เมื่อเกตแยกออกจากซอร์สจึงทำให้ชุดขับเกต (gate drive) ไม่เกี่ยวข้องกับกระแสไหล จึงทำให้ลดความยุ่งยากในการจัดวงจรขับลง มีผลทำให้ราคาของระบบลดลง

พื้นที่ทำงานปลอดภัย (Safe operating area)

เพาเวอร์มอสเฟตจะไม่ต้องการอัตราความสามารถในการรับกำลังมากตามแรงดันที่จ่ายให้ดังนั้นการเกิดการพังทลายครั้งที่สอง (secondary breakdown) จะไม่เกิดในพิกัดของอุปกรณ์ อาจทำให้ไม่ต้องใช้วงจรสับเบอร์หรือค่าตัวเก็บประจุน้อยๆ ในวงจรสับเบอร์

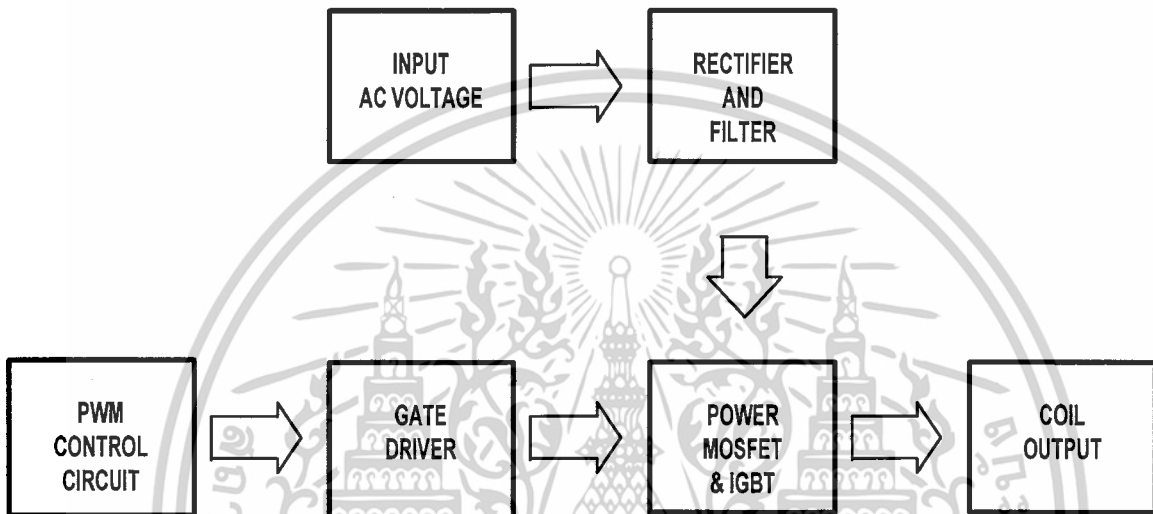
ขอบเขตการทำงานปลอดภัย (safe operating boundaries) ถูกจำกัดโดยระดับกระแสสูงสุดแรงดันพังทลาย และความสามารถในการรับกำลังของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

โครงสร้างระบบและการออกแบบวงจร

3.1 โครงสร้างของระบบ



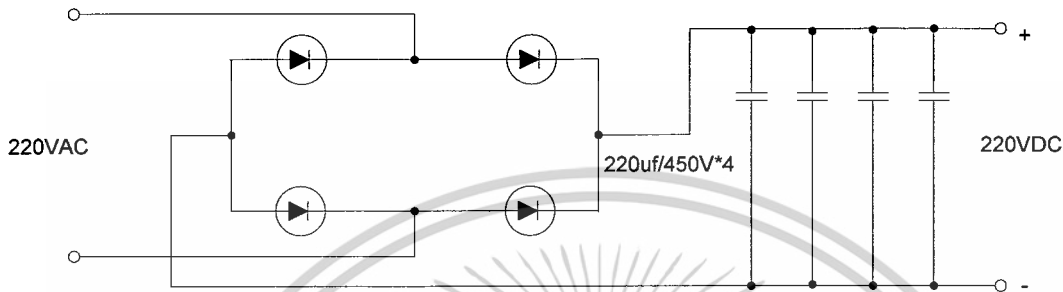
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของระบบ

อธิบายการทำงานส่วนต่างๆ ได้ดังนี้

1. RECTIFIER AND FILTER เป็นส่วนที่แปลงไฟสลับให้เป็นไฟตรงและกรองแรงดันให้เรียบขึ้น
2. PWM CONTROL CIRCUIT เป็นส่วนที่ควบคุมความถี่ของการทำงาน ควบคุมเดทไทม์ ควบคุมดิวตีไซเคิล และความกว้างของพัลส์ (PWM)
3. GATE DRIVER เป็นส่วนที่ออกแบบสำหรับขับเกทโดยเฉพาะเพื่อเป็นตัวช่วยในการสวิตช์ของเพาเวอร์มอสเฟตให้มีความเร็วในการทำงาน (Switching speed) เร็วขึ้น
4. INVERTER BY IGBT เป็นส่วนที่ทำการสวิตช์ตามจังหวะของพัลส์จากวงจรควบคุม เพื่อผ่านกระแสไปยังกระแสเอาต์พุต
5. COIL OUTPUT เป็นส่วนที่ส่งผ่านพลังงานทั้งหมดไปยังชิ้นงานที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วงจรจ่ายไฟตรง (RECTIFIER AND FILTER)



รูปที่ 3.2 วงจรภาคจ่ายไฟตรง

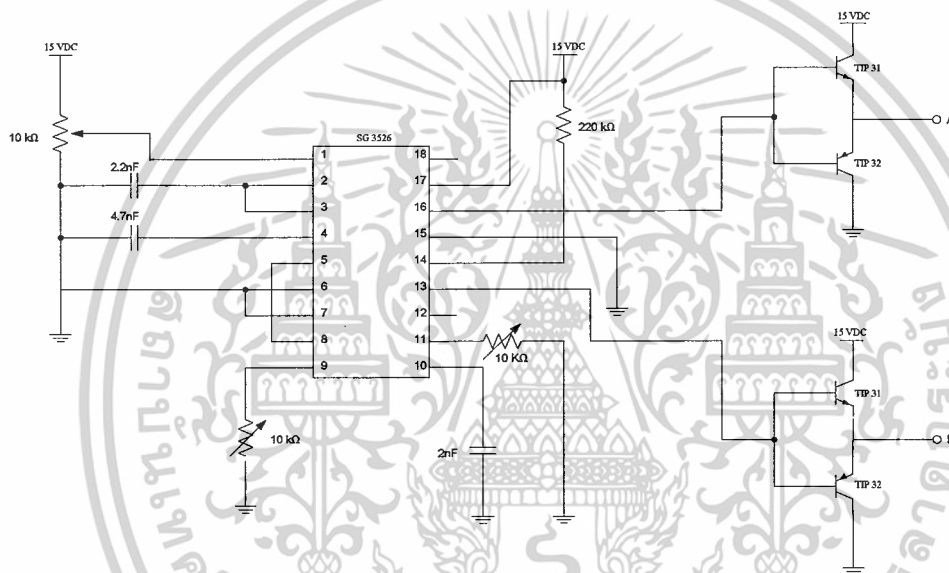
หน้าที่ของวงจรส่วนนี้คือ รับพลังงานโดยตรงจากไฟบ้านมาแปลงแรงดันไฟสลับที่มีความถี่ 50 Hz เพื่อเป็นไฟตรงแล้วผ่านส่วนของวงจรกรองแรงดันเพื่อกำจัดแรงดันกระเพื่อม (ripple) สำหรับวงจรในส่วนนี้ส่วนที่สำคัญที่สุดคือบริดจ์เรกติไฟเออร์ ซึ่งเวลาเลือกใช้จะต้องแน่ใจว่าสามารถทนกระแสขณะได้รับไบอัสตรงของกระแสที่ใช้งานได้มีแรงดันเบรคดาวน์ (breakdown voltage) สูงและต้องทนต่อกระแสกระชากขณะเริ่มต้นใช้งานได้สำหรับการเรกติไฟร์ในรายงานนี้ได้เลือกใช้ในลักษณะของบริดจ์ เนื่องจากจ่ายกำลังได้สูงโดยเฉพาะวงจรบริดจ์เรกติไฟร์ (D1-D4) ดังรูปที่ 3.2 เป็นตัวแปลงไฟสลับจากไฟตรงโดยนำไฟกระแสสลับเป็นไฟตรงโดยนำไฟกระแสสลับเข้ามาเพื่อส่งผ่านส่วนของวงจรบริดจ์เรกติไฟร์แล้วส่งผ่านไปยังขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งจะเป็นตัวช่วยในการสะสมพลังงานและมี ตัวเก็บประจุเป็นตัวกรองแรงดันให้ได้ไฟตรงที่เรียบขึ้นในลักษณะของ C filter

จากรูปที่ 3.2 ค่าของตัวเก็บประจุที่ใช้ทั้งสี่ตัวนี้มีค่าเท่ากันคือ 220 uF/400v ต่อขนานกันเพื่อเป็นการเพิ่มความจุ จะได้ความจุประมาณ 880uF เหตุผลที่สำคัญของการต่อขนานกันของตัวเก็บประจุนี้ก็เพื่อเป็นการลดค่าความต้านทานแรงแง (ESR) ที่อยู่ภายในตัวเก็บประจุนี้ในให้มีค่าน้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วงจรควบคุม (PWM CONTROL CIRCUIT)

ในปัจจุบันได้มีการผลิตไอซีใช้ในลักษณะของ PWM หลายเบอร์ แต่ละเบอร์ก็มีลักษณะการทำงานคล้ายกัน ดังเช่นในรายงานนี้ได้เลือกเบอร์ SG 3526 เป็นส่วนของการควบคุม เพราะมีขาควบคุมในการป้อนกลับให้ประยุกต์ใช้งานได้หลายประเภท ดังนั้นจึงจะขอกว่าเฉพาะรายละเอียดของไอซีเบอร์ SG3526



รูปที่ 3.3 วงจรควบคุมของ SG 3526

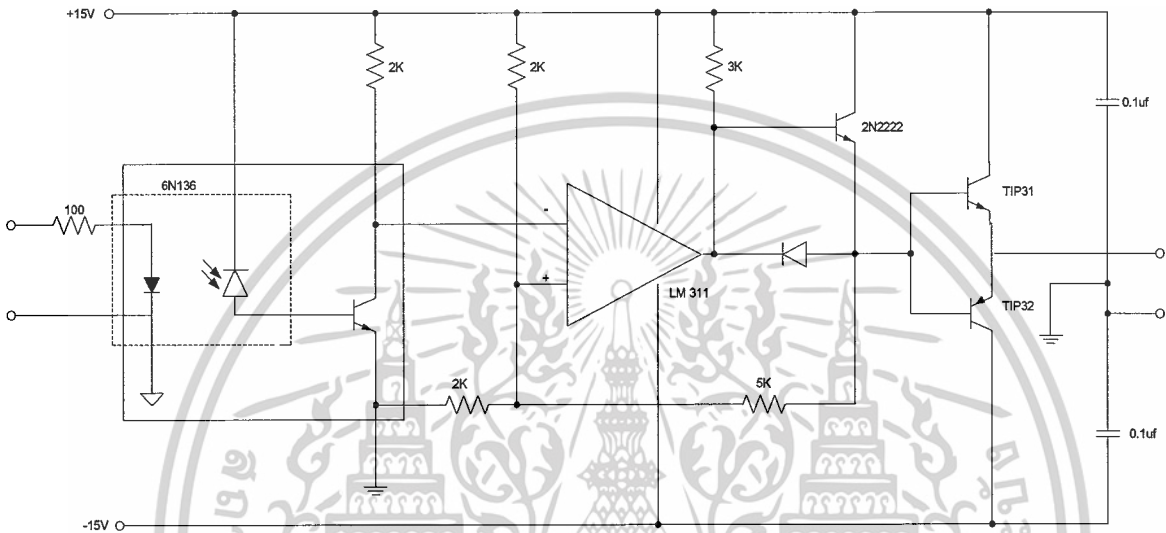
SG 3526 เป็นวงจรไอซีที่ใช้ควบคุม PWM แบบความถี่คงที่ และมีโครงสร้างออสซิลเลเตอร์ที่ขา 9 และขา 10 ซึ่งวงจรนี้ใช้ความถี่ประมาณ 96 kHz

ขาที่ 1,2 เป็น Error โดยการนำค่าแรงดันเข้ามาควบคุมซึ่งเราคงที่ไว้ค่าหนึ่ง ซึ่งจะให้ค่าเดาท์โคม์คงที่ หรือปรับความกว้างของวงจรพัลส์ ส่วนขา 2 จะต่อค่า C ลงกราวด์เอาไว้ ขา 3 เป็นขาที่เอาไว้สำหรับชดเชยกับวงจรขยายในกรณีเปิดลูป โดยต่อ C ลงกราวด์เอาไว้ ขา 4 เป็นขาสำหรับไว้ Start ขา 5 เป็นขารีเซ็ต ขา 6,7 เป็น Current Sense ซึ่งในวงจรไม่มีการป้อนกลับ เราจึงต่อลงกราวด์เอาไว้ ขา 8 เป็นขาสำหรับการชดความันจากภายนอก ขา 12 เป็นขาสัญญาณที่ออกจากวงจรกำเนิดสัญญาณต่อมายังภายนอก เพื่อนำไปใช้กับวงจรอื่นที่มีสัญญาณคาบเวลาการทำงานเดียวกัน ขา 13,16 เป็นขาก่อนออกมาทำการเลี้ยงวงจรภายในไอซี โดยผ่านวงจรสร้างค่าแรงดันอ้างอิง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(5 โวลต์) ก่อนเพื่อให้ทำงานเต็มที่ ขา 18 เป็นขาเอาต์พุตของวงจรกำเนิดแรงดันอ้างอิงภายในตัวไอซีเพื่อที่จะนำแรงดันอ้างอิงนี้ไปใช้กับวงจรภายนอกเพื่อให้มีค่าแรงดันอ้างอิงเดียวกัน

3.4 วงจรขับเคลื่อน (GATE DRIVER)



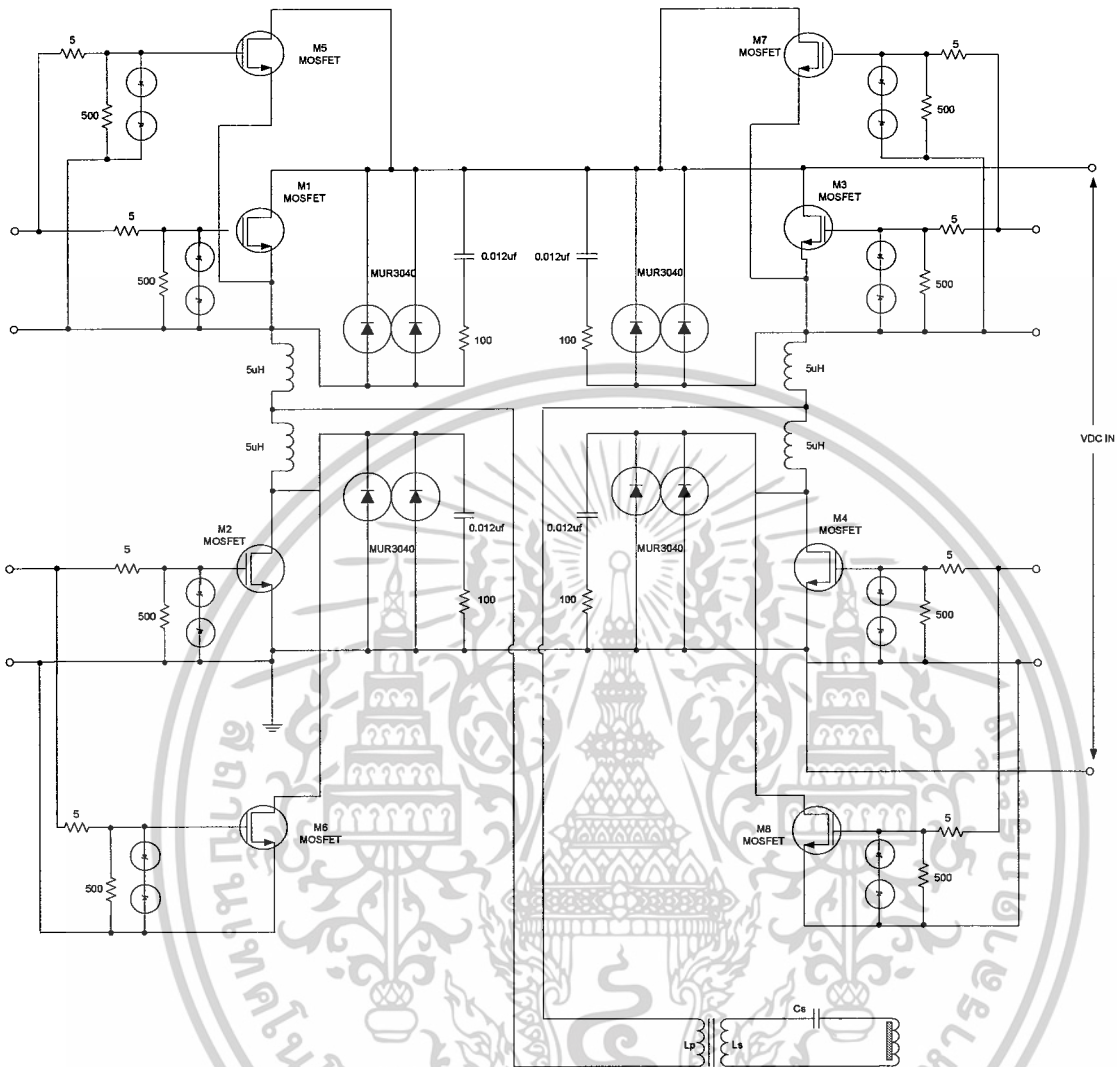
รูปที่ 3.4 วงจรขับเคลื่อน

วงจรขับเคลื่อนประกอบด้วย Opto isolation เพื่อทำการแยกกราวด์ทางด้าน คอนโทรลกับทางเพาเวอร์ออกจากกัน เพื่อป้องกันการ รบกวนกัน โดยใช้ Opto เบอร์ 1N136 Output จะเป็นทรานซิสเตอร์ รับอินพุตจาก SG 3526 จากนั้นจะถูกขยายโดย Opamp LM 311 ขยายสัญญาณ และส่งให้ชุดไดร์ โดยทรานซิสเตอร์ เบอร์ TP31 กับ TP32 ซึ่งเป็นคู่ Match pair กันและนำไปขับเคลื่อนของเพาเวอร์มอสเฟต โดยจะมีค่าความต้านทาน และซีเนอร์ไดโอด (Zener Diode) เป็นตัวรักษาระดับแรงดันให้คงที่เพื่อต่อเข้ากับที่เกทของมอสเฟต

3.5 INVERTER BY MOSFET

ลักษณะการทำงานของวงจรในโครงงานนี้ใช้อินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ในการแปลงแรงดันไฟตรงให้เป็นแรงดันไฟสลับความถี่สูงโดยอาศัยการสวิตช์ซึ่งของ MOSFET ดังแสดงในรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 วงจร อินเวอร์เตอร์

3.6 วงจร snubber

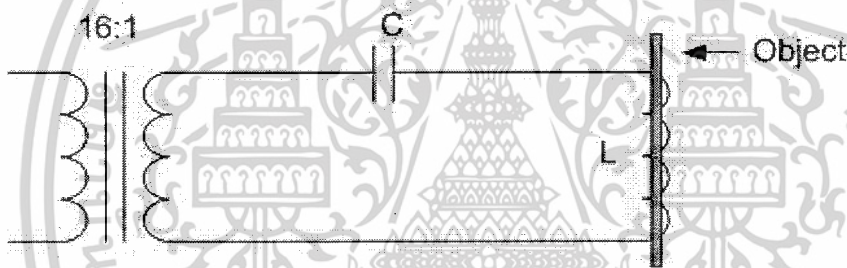
วงจร snubber (snubber network) เป็นส่วนที่เพิ่มเข้ามาในคอนเวอร์เตอร์เพื่อลดการเกิดกำลังสูญเสียและป้องกันการเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับ MOSFET ขณะทำงานปกติ วงจร snubber โดยทั่วไปจะประกอบด้วยตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุและไดโอด ในบางครั้งอาจเรียกวงจร RCD snubber ซึ่งทำหน้าที่ในวงจรคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ป้องกันการเกิดแรงดันสไปค์ขณะที่มอสเฟตเริ่มหยุดนำกระแส เนื่องจากความเหนี่ยวนำในตัวหม้อแปลงโดยพลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเหนี่ยวนำแผ่นนี้จะถูกถ่ายทอดออกไปยังภาคอินพุทด้วยวงจรถนั้บเบอร์จึงไม่เกิดแรงดันสไปค์เมื่อ MOSFET เริ่มหยุดนำกระแส

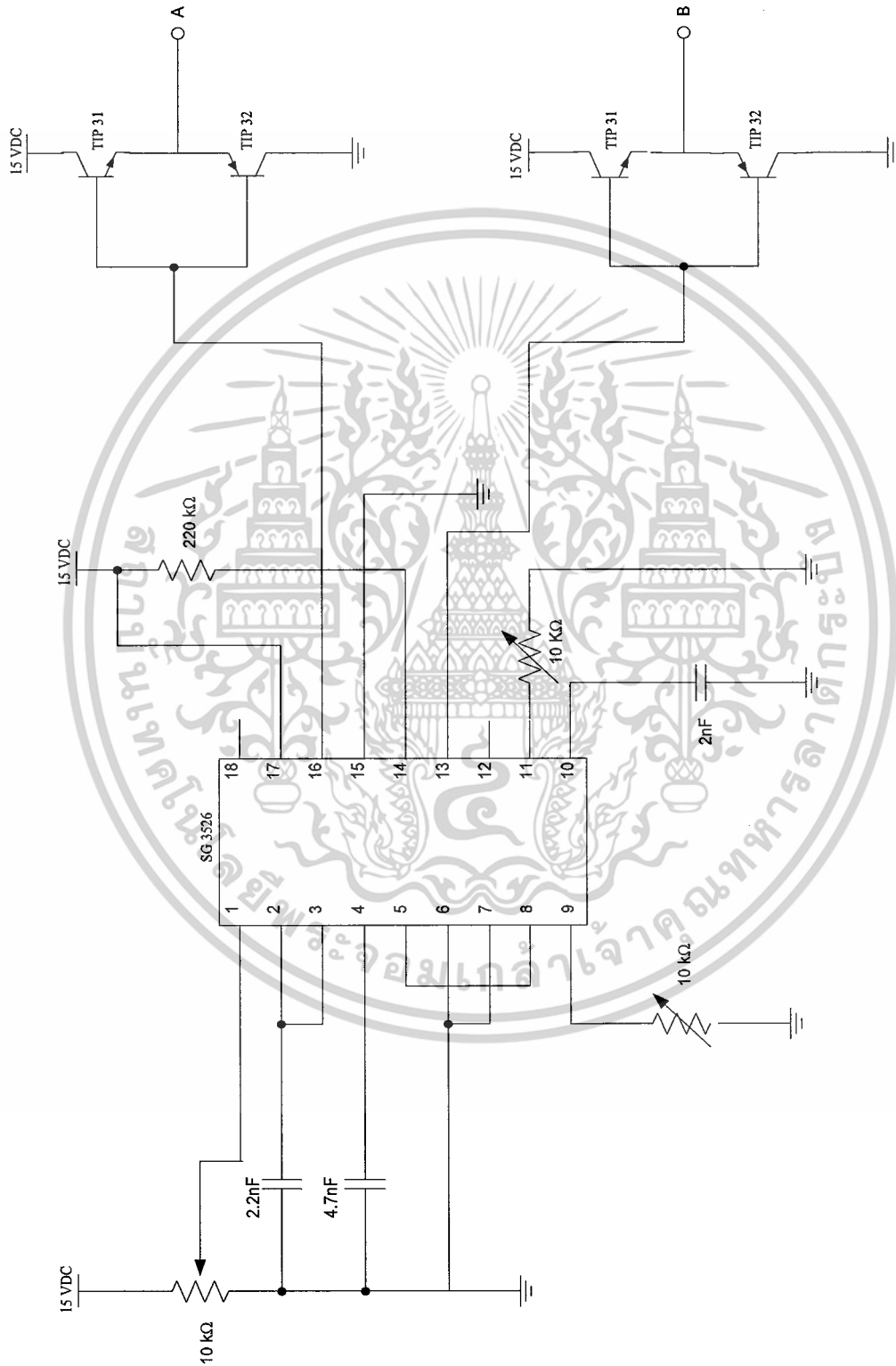
2. ในขณะที่ MOSFET ตัวที่ 1 เริ่มหยุดนำกระแส ขดลวดไพมารีจะมีการกลับขั้วแรงดันขึ้น ถ้าไม่มีสับเบอร์ MOSFET ตัวที่ 2 จะได้รับแรงดันตกคร่อมที่ V_{DS} เป็นลบ ในขณะที่ตัวที่ 1 ก็จะมีแรงดันตกคร่อมมากกว่า V_{in} ในกรณีนี้ไดโอดก็จะอยู่ในลักษณะไบอัสตรงจากแรงดันขดไพมารีและค่านี้อิงไปเพื่อป้องกัน MOSFET

3.7 วงจรโหลด (Load Circuit)

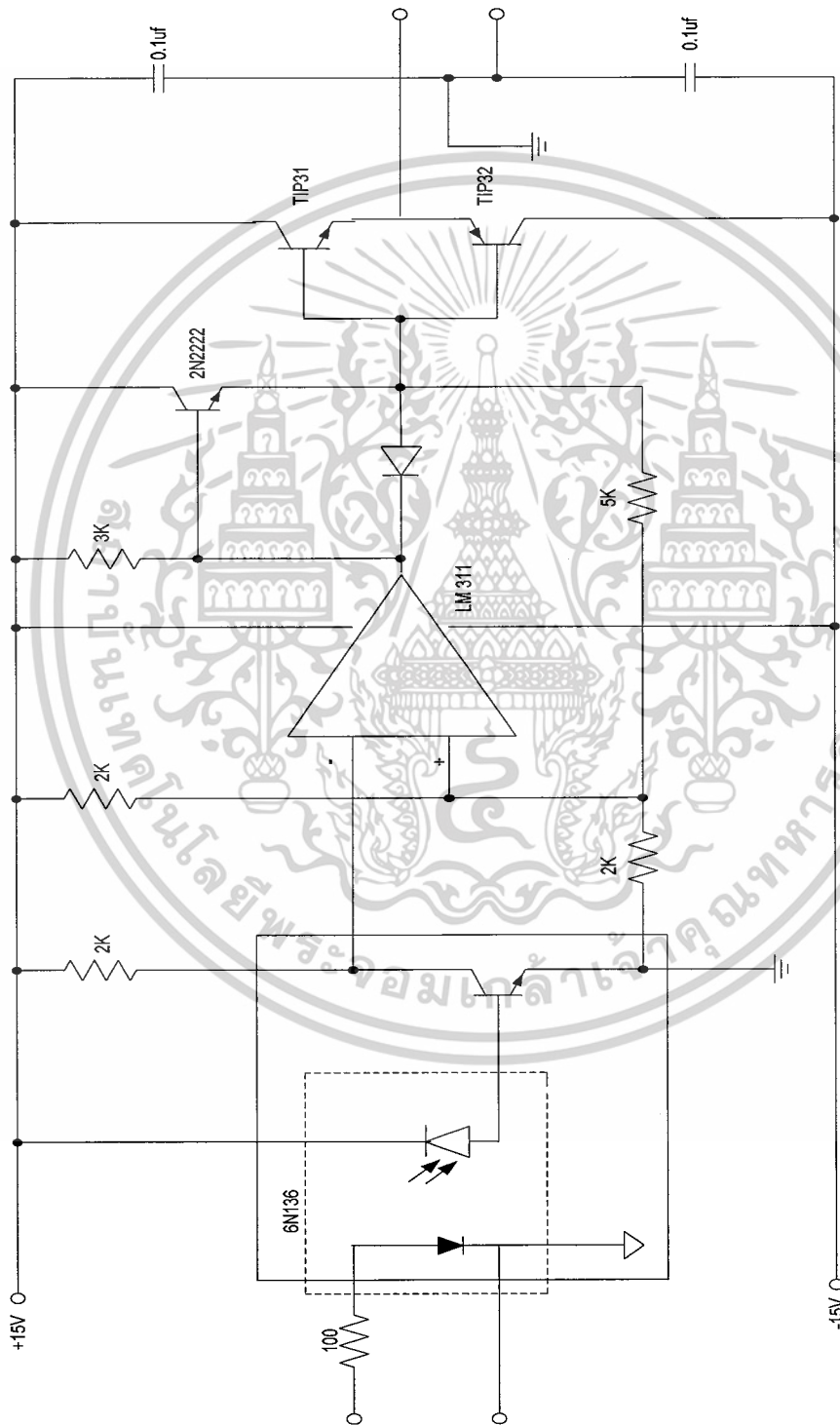


รูปที่ 3.6 วงจรโหลด

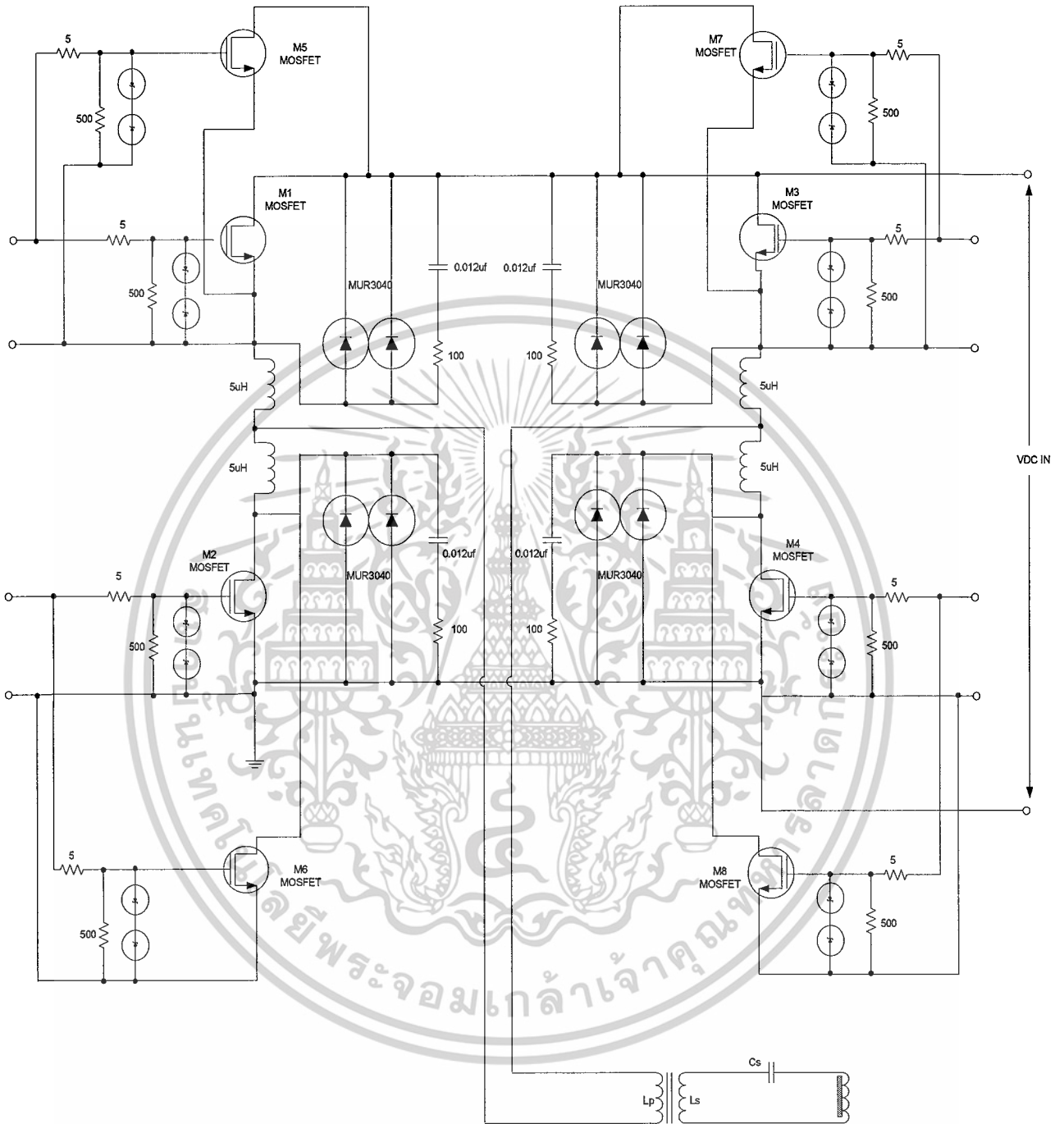
วงจรเป็นวงจรที่มาจากภาคอินเวอร์เตอร์ ตามรูปที่ 3.6 ซึ่งประกอบไปด้วยหม้อแปลงความถี่สูงที่ใช้สำหรับส่งถ่ายพลังงานไปยัง coil output เพื่อให้เกิดความร้อนที่ชิ้นงานโดยที่เราใช้แกนเฟอร์ไรท์ และที่ต่อจากหม้อแปลงนั้นเราต่อตัวเก็บประจุเอาไว้ด้วย เพื่อให้ได้วงจรเรโซแนนท์เพื่อที่จะให้ได้กระแสสูงสุดในการใช้งาน ซึ่งค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ต้องเป็นตัวเก็บประจุที่สามารถทนกระแสได้สูงดังนั้นเราจึงต้องนำตัวเก็บประจุมาทำการต่อขนานกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ**วงจรรักษาคุณภาพ SG3526** เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในของภาควิชาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



วงจรมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลองเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน

4.1 ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองต่างๆ มีดังต่อไปนี้

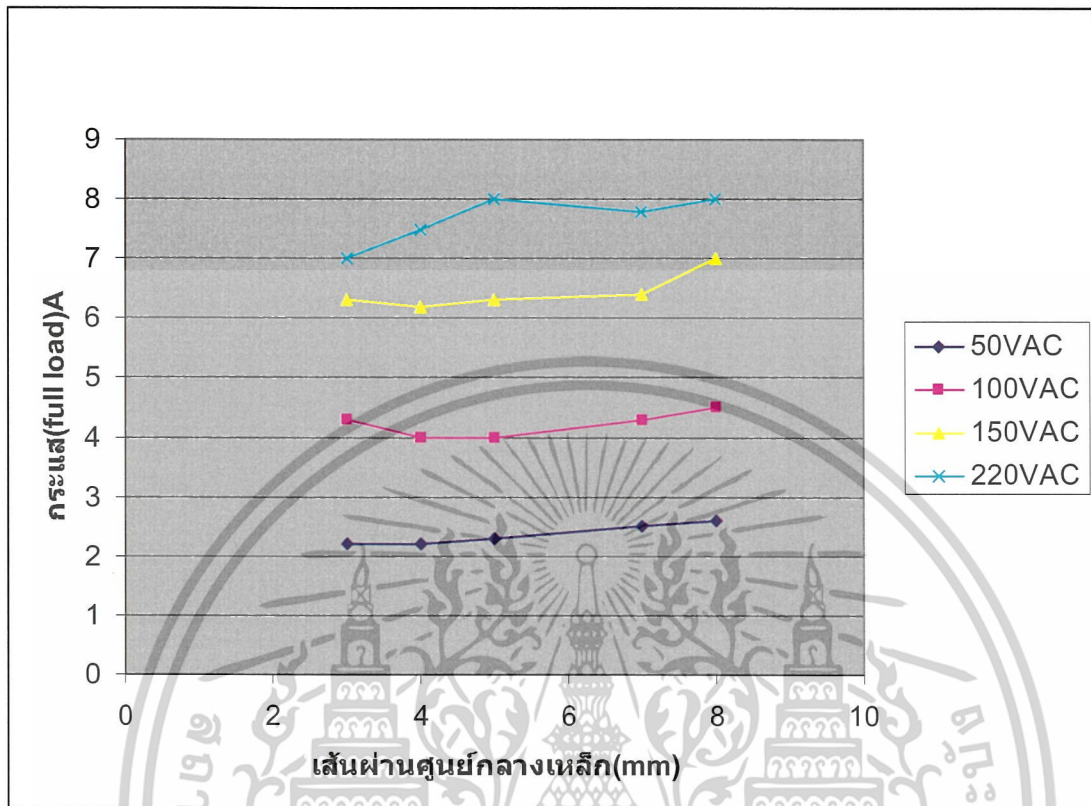
1. ปรับความถี่ของซิลิเลตเตอร์ไว้ที่ประมาณ 52 kHz
2. ปรับเดทโทมิ์ไว้คงที่
3. วัดสัญญาณที่ภาคคอนโทรล ขา 13 และ 16
4. วัดสัญญาณเอาต์พุตจากภาคไดร์เกท
5. ป้อนไฟสลับจากวาริแอกผ่าน Rectifier ให้ได้แรงดันอินพุต 50 VAC
6. นำชิ้นงานใส่ใน Coil Output ที่มีขนาดต่างๆ ตามต้องการ
7. จับเวลาจนชิ้นงานเริ่มแดง
8. บันทึกผลการทดลอง
9. ทำซ้ำข้อที่ 5-8 โดยเปลี่ยนป้อนไฟสลับจากวาริแอกผ่าน Rectifier ให้ได้แรงดันอินพุต 50, 100, 150, 220 VAC

ตารางผลการทดลอง

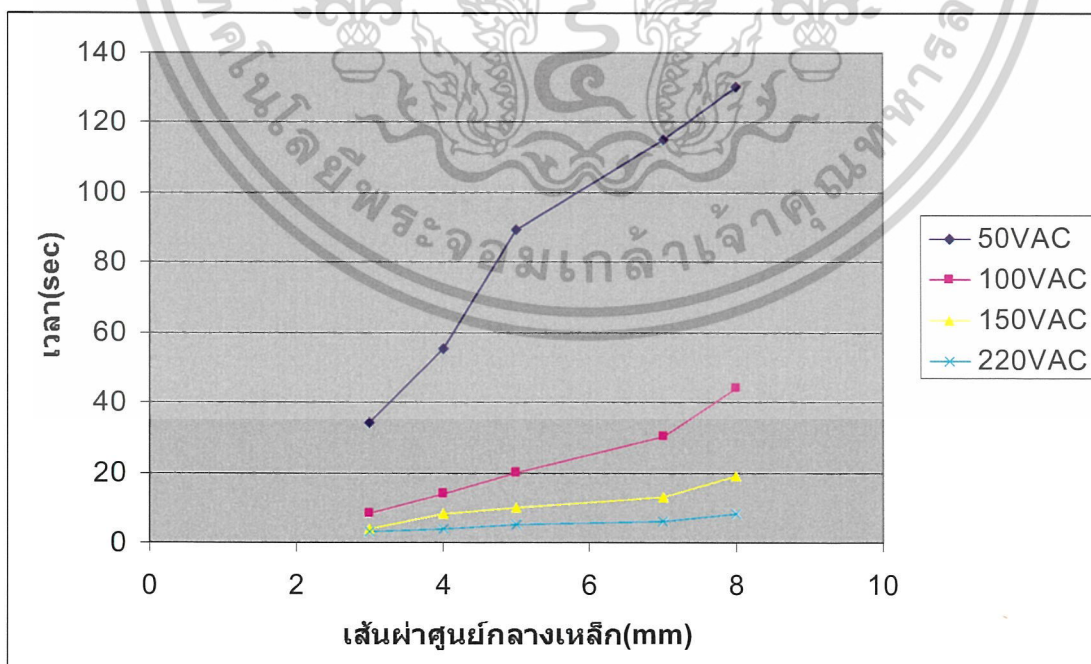
VIN (Vac)	จุดที่วัด	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง					UNIT
		Ø =3mm.	Ø=4mm.	Ø=5mm.	Ø=7mm.	Ø=8mm.	
50	lin (no load)	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	A
	lin (full load)	2.2	2.2	2.3	2.5	2.6	A
	VL (no load)	38	38	38	38	38	Vpp
	VL (full load)	29	20	24	24	25	Vpp
	Time	34	56	89	115	130	Sec
100	lin (no load)	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	A
	lin (full load)	4.3	4	4	4.3	4.5	A
	VL (no load)	56	56	56	56	56	Vpp
	VL (full load)	58	50	3	52	50	Vpp
	Time	8	14	20	30	44	Sec
150	lin (no load)	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	A
	lin (full load)	6.3	6.2	6.3	6.4	7	A
	VL (no load)	88	88	88	88	88	Vpp
	VL (full load)	84	72	78	80	79	Vpp
	Time	4	8	10	13	19	Sec
220	lin (no load)	9	9	9	9	9	A
	lin (full load)	7	7.5	8	7.8	8	A
	VL (no load)	124	124	124	124	124	Vpp
	VL (full load)	120	120	120	120	120	Vpp
	Time	3	4	5	6	8	Sec

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงชิ้นงานและกระแสกรณี full load ที่ทำให้ชิ้นงานร้อนแดงที่ VAC ค่าต่างๆ

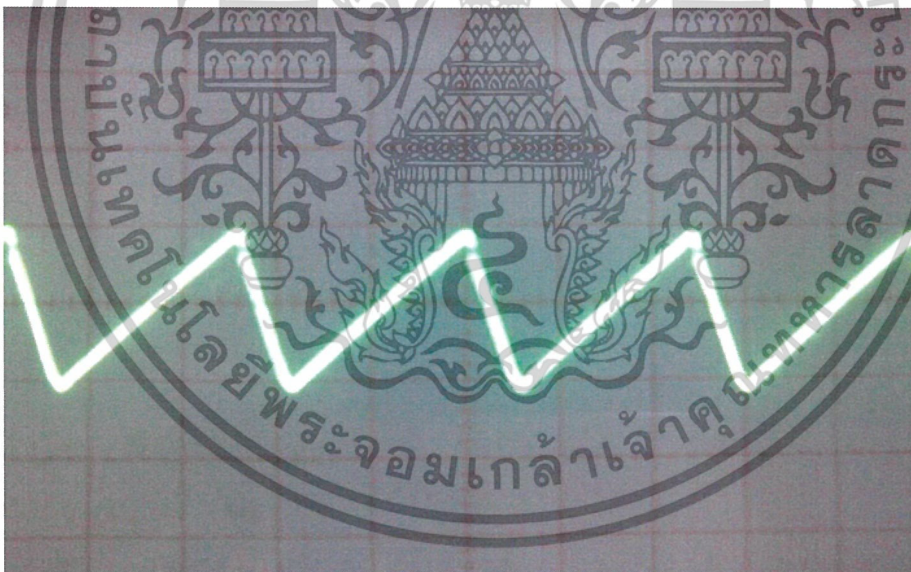


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงขนาดชิ้นงานและเวลาที่ทำให้ชิ้นงานร้อนแดงเมื่อป้อน VAC ค่าต่างๆ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การตรวจวัดรูปสัญญาณที่จุดต่างๆในวงจร

ในขณะที่ทำการทดสอบใช้งานเครื่องเชื่อมนั้นสามารถวัดรูปสัญญาณที่จุดต่างๆของวงจรได้ดังนี้

4.2.1 รูปสัญญาณที่วัดจากขา 10 ของไอซี SG3526 มีลักษณะเป็นคลื่นเอียง (Ramp Wave) ส่วนคาบเวลาที่ได้นั้นจะเป็นฐานเวลาให้กับวงจรสวิตชิง ส่วนช่วงเวลาที่ในจังหวะขาของรูปสัญญาณจะเป็นตัวบอกค่าเวลาที่รอให้อุปกรณ์สวิตชิงหยุดนำกระแส (Dead Time) โดยความถี่ของสัญญาณนี้จะมีค่าประมาณสองเท่าของความถี่สวิตชิง

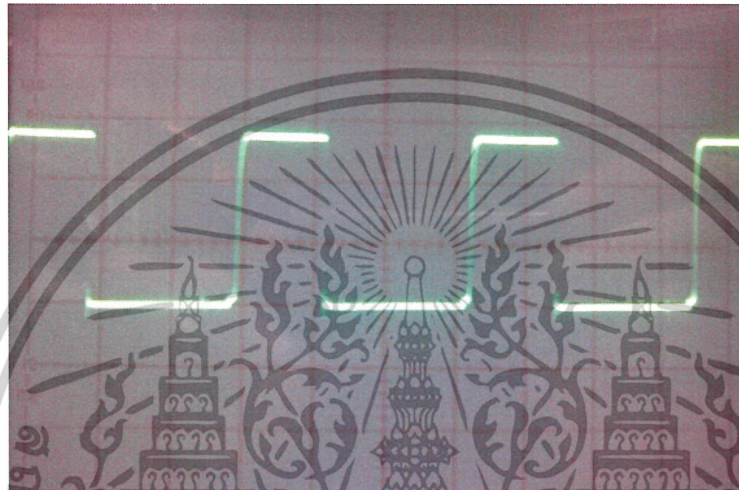


Time/Divs. : 5us Volt/Divs : 0.5 V f : 52 kHz

รูปที่ 4.3 รูปแสดงสัญญาณพื้นฐานซึ่งเป็นฐานเวลาในการสร้างพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 รูปสัญญาณที่วัดจากขา 13 และ 16 (เอาต์พุต A และ B) ของไอซี SG3526 โดยช่องสัญญาณที่ 1 วัดสัญญาณจากเอาต์พุต A ของไอซี และช่องสัญญาณที่ 2 วัดสัญญาณจากเอาต์พุต B ของไอซี โดยสัญญาณทั้งสองวัดเทียบกับกราวด์ ซึ่งเป็นสัญญาณพัลส์เอาต์พุตที่จะส่งไปควบคุมการสวิทช์ของอุปกรณ์เพาเวอร์สวิทช์ โดยผ่านวงจรถับ จะมีลักษณะกลับเฟสกัน 180 องศา



Time/Divs. : 5us Volt/Divs : 5 V f : 52 kHz

รูปที่ 4.4 รูปแสดงสัญญาณพัลส์ที่เอาต์พุต A ของไอซี SG3526

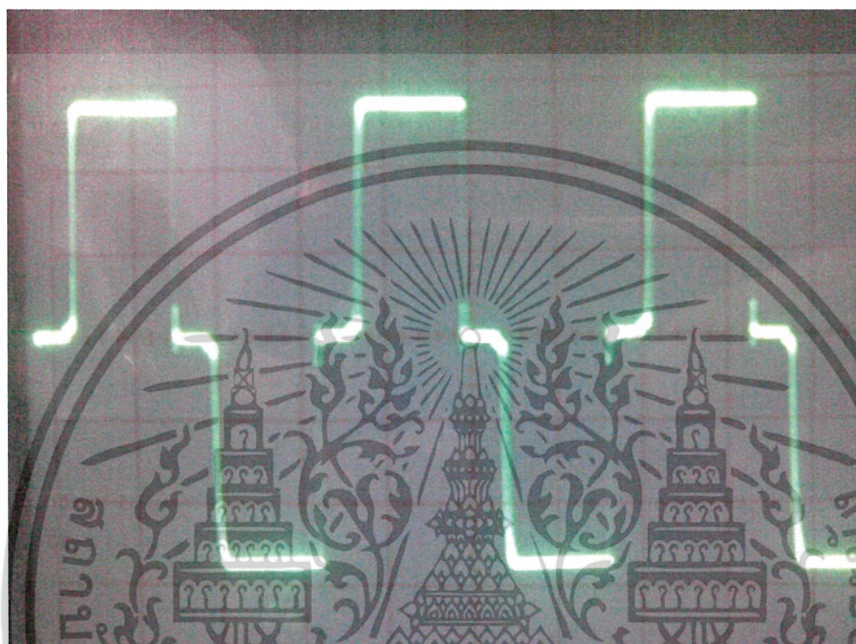


Time/Divs. : 5us Volt/Divs : 5 V f : 52 kHz

รูปที่ 4.5 รูปแสดงสัญญาณพัลส์ที่เอาต์พุต B ของไอซี SG3526

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 รูปสัญญาณที่วัดหลังจากมอสเฟตในภาคขับมีลักษณะเป็นพัลส์สี่เหลี่ยม แต่ช่วงเวลาขอบขาขึ้น และขอบขาลงจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการดีเลย์ในการสวิตช์ของมอสเฟตในวงจรขับ และค่า deadtime ก่อนเข้าวงจรขับ



Time/Divs. : 5us Volt/Divs : 5 V f : 52 kHz

รูปที่ 4.6 รูปแสดงสัญญาณพัลส์ก่อนส่งเข้าหม้อแปลงคัปปลิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 รูปสัญญาณพัลส์จากวงจรขับที่ส่งผ่านหม้อแปลงเพื่อแยกภาพเอเวอร์สวิตชิงกับภาค
ควบคุม มายังขาเกตของเพาเวอร์มอสเฟต



Time/Divs. : 5us Volt/Divs : 5 V f : 52 kHz

รูปที่ 4.7 รูปแสดงสัญญาณพัลส์ที่ขาเกตของเพาเวอร์มอสเฟต



รูปที่ 4.8 รูปแสดงชิ้นงานขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8mm. ใช้เวลา 8 วินาที ทำให้ร้อนแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

5.1 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองจะพบว่าค่า L และ C ที่ใช้ในการทดลองนั้นจะต้องทำให้ได้ค่าที่ความถี่ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 40-60 kHz และที่ความถี่ประมาณ 52 kHz จะทำให้หลอดร้อนแดงโดยใช้เวลาน้อยที่สุดซึ่งค่าความถี่นี้จะทำให้ได้ค่ากระแสสูงสุดดังนั้นจึงได้ค่ากำลังงานสูงสุด

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อแรงดันอินพุท VAC มีค่าน้อยระยะเวลาในการทำให้หลอดร้อนแดงก็จะมาก และเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางขั้วขั้วงานมีค่ามากขึ้นก็จะทำให้ใช้เวลานานในการทำให้หลอดร้อนแดง แต่เมื่อเพิ่มแรงดันอินพุท VAC ก็จะทำให้ขั้วขั้วงานแต่ละขนาดร้อนแดงเร็วขึ้น ค่ากระแสที่ได้ก็จะเปลี่ยนไปตามขั้วขั้วงานแต่ละขนาด โดยขั้วขั้วงานที่มีขนาดใหญ่ขึ้นกระแสก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการทดลองวางขั้วขั้วงานใน Coil นั้น จะทำให้ค่า L ของ Coil เปลี่ยนไปทำให้จุดรีโซแนนซ์ของวงจรเปลี่ยนไปทำให้ไม่ได้กำลังสูงสุดทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของขั้วขั้วงานนั้นด้วย

5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางการแก้ไข

ปัญหาที่เกิดขึ้น

1. เวลาทดลองความต้านทานสนับเบอร์จะร้อนเมื่อแรงดันอินพุทมีค่ามากขึ้น
2. เมื่อทดลองไปสักระยะ Coil จะร้อนแดง
3. เมื่อเวลาทดลองนาน จะทำให้ C ที่รีโซแนนซ์ร้อนเนื่องจากกระแสสูง

แนวทางการแก้ไข

1. ทดลองหาค่าความต้านทานสนับเบอร์ที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้อุณหภูมิคงที่
 2. ต้องระบายความร้อนโดยการใช้น้ำหล่อเย็นกับ Coil
 3. ต้องหา C ที่มีค่าต่ำกว่ามาขนานเพื่อให้ได้ค่า C ที่จุดรีโซแนนซ์เพื่อให้ทนกระแสได้มากขึ้น
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.ควรมีการศึกษาและปรับเปลี่ยนให้สามารถชุปแข็งกับวัสดุที่มีลักษณะของชิ้นงานที่หลากหลาย

5.ควรมีการศึกษาให้ใช้งานได้กับชิ้นงานที่มีความแตกต่างไปจากนี้และสามารถควบคุมรีโซแนนซ์ให้ได้ประสิทธิภาพของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนสูงสุดตามชิ้นงานนั้นๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จากการสนับสนุนของหลายๆฝ่าย ดังนี้ ขอขอบคุณ รศ.สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตร ขอขอบคุณคุณพ่อคุณแม่ รวมถึงเพื่อนๆที่คอยช่วยเหลือแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดมา จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย หากปริญญาบัตรฉบับนี้มีความผิดพลาดประการใดทางคณะผู้จัดทำขออ้อมรับข้อบกพร่องทุกประการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. เกรียงไกร แสงคุณธรรม, วินัย ชาติเวียง “ปริญญานิพนธ์”,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. สุวัฒน์ ตัน “สวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย”
3. Harris, “Power Mosfet Data”, 1991



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



SG3526

Pulse Width Modulation Control Circuit

The SG3526 is a high performance pulse width modulator integrated circuit intended for fixed frequency switching regulators and other power control applications.

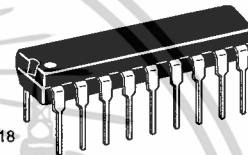
Functions included in this IC are a temperature compensated voltage reference, sawtooth oscillator, error amplifier, pulse width modulator, pulse metering and steering logic, and two high current totem pole outputs ideally suited for driving the capacitance of power FETs at high speeds.

Additional protective features include soft start and undervoltage lockout, digital current limiting, double pulse inhibit, adjustable dead time and a data latch for single pulse metering. All digital control ports are TTL and B-series CMOS compatible. Active low logic design allows easy wired-OR connections for maximum flexibility. The versatility of this device enables implementation in single-ended or push-pull switching regulators that are transformerless or transformer coupled. The SG3526 is specified over a junction temperature range of 0° to +125°C.

- 8.0 V to 35 V Operation
- 5.0 V ±1% Trimmed Reference
- 1.0 Hz to 400 kHz Oscillator Range
- Dual Source/Sink Current Outputs: ±100 mA
- Digital Current Limiting
- Programmable Dead Time
- Undervoltage Lockout
- Single Pulse Metering
- Programmable Soft-Start
- Wide Current Limit Common Mode Range
- Guaranteed 6 Unit Synchronization

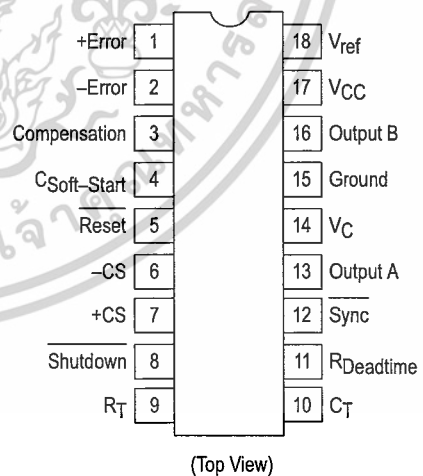
PULSE WIDTH MODULATION CONTROL CIRCUIT

SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

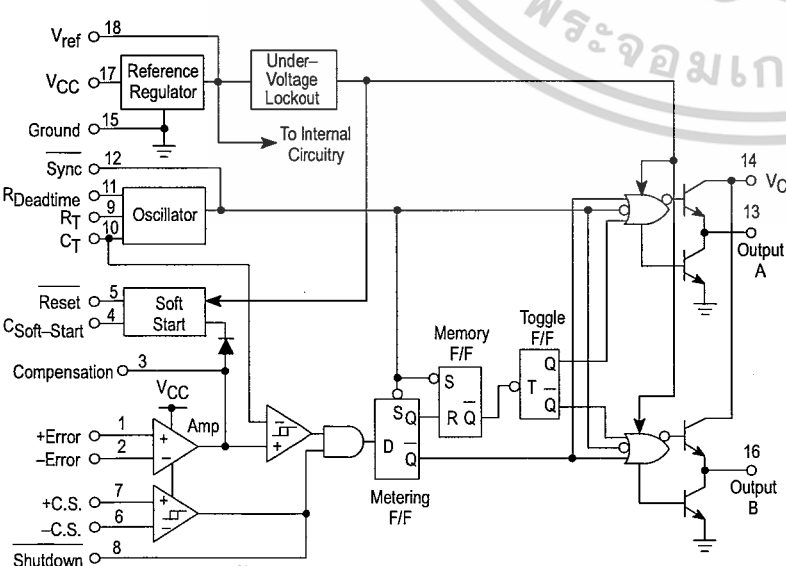


N SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 707

PIN CONNECTIONS



Representative Block Diagram



ORDERING INFORMATION

Device	Operating Temperature Range	Package
SG3526N	T _J = 0° to +125°C	Plastic DIP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SG3526

MAXIMUM RATINGS (Note 1)

Rating	Symbol	Value	Unit
Supply Voltage	V _{CC}	+40	Vdc
Collector Supply Voltage	V _C	+40	Vdc
Logic Inputs		-0.3 to +5.5	V
Analog Inputs		-0.3 to V _{CC}	V
Output Current, Source or Sink	I _O	±200	mA
Reference Load Current (V _{CC} = 40 V, Note 2)	I _{ref}	50	mA
Logic Sink Current		15	mA
Power Dissipation T _A = +25°C (Note 3) T _C = +25°C (Note 4)	P _D	1000 3000	mW
Thermal Resistance Junction-to-Air	R _{θJA}	100	°C/W
Thermal Resistance Junction-to-Case	R _{θJC}	42	°C/W
Operating Junction Temperature	T _J	+150	°C
Storage Temperature Range	T _{stg}	-65 to +150	°C
Lead Temperature (Soldering, 10 Seconds)	T _{Solder}	±300	°C

- NOTES:** 1. Values beyond which damage may occur.
 2. Maximum junction temperature must be observed.
 3. Derate at 10 mW/°C for ambient temperatures above +50°C.
 4. Derate at 24 mW/°C for case temperatures above +25°C.

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

Characteristics	Symbol	Min	Max	Unit
Supply Voltage	V _{CC}	8.0	35	Vdc
Collector Supply Voltage	V _C	4.5	35	Vdc
Output Sink/Source Current (Each Output)	I _O	0	±100	mA
Reference Load Current	I _{ref}	0	20	mA
Oscillator Frequency Range	f _{osc}	0.001	400	kHz
Oscillator Timing Resistor	R _T	2.0	150	kΩ
Oscillator Timing Capacitor	C _T	0.001	20	μF
Available Deadtime Range (40 kHz)	—	3.0	50	%
Operating Junction Temperature Range	T _J	0	+125	°C

SG3526

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = +15\text{ Vdc}$, $T_J = T_{low}$ to T_{high} [Note 5], unless otherwise noted.)

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
REFERENCE SECTION (Note 6)					
Reference Output Voltage ($T_J = +25^\circ\text{C}$)	V_{ref}	4.90	5.00	5.10	V
Line Regulation ($+8.0\text{ V} \leq V_{CC} \leq +35\text{ V}$)	Reg_{line}	–	10	30	mV
Load Regulation ($0\text{ mA} \leq I_L \leq 20\text{ mA}$)	Reg_{load}	–	10	50	mV
Temperature Stability	$\Delta V_{ref}/\Delta T$	–	10	–	mV
Total Reference Output Voltage Variation ($+8.0\text{ V} \leq V_{CC} \leq +35\text{ V}$, $0\text{ mA} \leq I_L \leq 20\text{ mA}$)	ΔV_{ref}	4.85	5.00	5.15	V
Short Circuit Current ($V_{ref} = 0\text{ V}$) (Note 2)	I_{SC}	25	80	125	mA
UNDERVOLTAGE LOCKOUT					
Reset Output Voltage ($V_{ref} = +3.8\text{ V}$)		–	0.2	0.4	V
Reset Output Voltage ($V_{ref} = +4.8\text{ V}$)		2.4	4.8	–	V
OSCILLATOR SECTION (Note 7)					
Initial Accuracy ($T_J = +25^\circ\text{C}$)		–	± 3.0	± 8.0	%
Frequency Stability over Power Supply Range ($+8.0\text{ V} \leq V_{CC} \leq +35\text{ V}$)	$\frac{\Delta f_{osc}}{\Delta V_{CC}}$	–	0.5	1.0	%
Frequency Stability over Temperature ($\Delta T_J = T_{low}$ to T_{high})	$\frac{\Delta f_{osc}}{\Delta T_J}$	–	2.0	–	%
Minimum Frequency ($R_T = 150\text{ k}\Omega$, $C_T = 20\text{ }\mu\text{F}$)	f_{min}	–	0.5	–	Hz
Maximum Frequency ($R_T = 2.0\text{ k}\Omega$, $C_T = 0.001\text{ }\mu\text{F}$)	f_{max}	400	–	–	kHz
Sawtooth Peak Voltage ($V_{CC} = +35\text{ V}$)	$V_{osc(P)}$	–	3.0	3.5	V
Sawtooth Valley Voltage ($V_{CC} = +8.0\text{ V}$)	$V_{osc(V)}$	0.45	0.8	–	V
ERROR AMPLIFIER SECTION (Note 8)					
Input Offset Voltage ($R_S \leq 2.0\text{ k}\Omega$)	V_{IO}	–	2.0	10	mV
Input Bias Current	I_B	–	–350	–2000	nA
Input Offset Current	I_{IO}	–	35	200	nA
DC Open Loop Gain ($R_L \geq 10\text{ M}\Omega$)	A_{VOL}	60	72	–	dB
High Output Voltage ($V_{Pin\ 1} - V_{Pin\ 2} \geq +150\text{ mV}$, $I_{source} = 100\text{ }\mu\text{A}$)	V_{OH}	3.6	4.2	–	V
Low Output Voltage ($V_{Pin\ 2} - V_{Pin\ 1} \geq +150\text{ mV}$, $I_{sink} = 100\text{ }\mu\text{A}$)	V_{OL}	–	0.2	0.4	V
Common Mode Rejection Ratio ($R_S \leq 2.0\text{ k}\Omega$)	CMRR	70	94	–	dB
Power Supply Rejection Ratio ($+12\text{ V} \leq V_{CC} \leq +18\text{ V}$)	PSRR	66	80	–	dB

NOTES: 2. Maximum junction temperature must be observed.

5. $T_{low} = 0^\circ\text{C}$

$T_{high} = +125^\circ\text{C}$

6. $I_L = 0\text{ mA}$ unless otherwise noted.

7. $f_{osc} = 40\text{ kHz}$ ($R_T = 4.12\text{ k}\Omega \pm 1\%$, $C_T = 0.01\text{ }\mu\text{F} \pm 1\%$, $R_D = 0\text{ }\Omega$)

8. $0\text{ V} \leq V_{CM} \leq +5.2\text{ V}$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

โปรดอ่านคู่มือฉบับนี้ให้ถี่ถ้วนก่อนใช้ทุกครั้ง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SG3526

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
PWM COMPARATOR SECTION (Note 7)					
Minimum Duty Cycle ($V_{\text{Compensation}} = +0.4 \text{ V}$)	DC_{min}	–	–	0	%
Maximum Duty Cycle ($V_{\text{Compensation}} = +3.6 \text{ V}$)	DC_{max}	45	49	–	%
DIGITAL PORTS (SYNC, SHUTDOWN, RESET)					
Output Voltage (High Logic Level) ($I_{\text{source}} = 40 \mu\text{A}$) (Low Logic Level) ($I_{\text{sink}} = 3.6 \text{ mA}$)	V_{OH} V_{OL}	2.4 –	4.0 0.2	– 0.4	V
Input Current — High Logic Level (High Logic Level) ($V_{\text{IH}} = +2.4 \text{ V}$) (Low Logic Level) ($V_{\text{IL}} = +0.4 \text{ V}$)	I_{IH} I_{IL}	– –	–125 –225	–200 –360	μA
CURRENT LIMIT COMPARATOR SECTION (Note 9)					
Sense Voltage ($R_{\text{S}} \leq 50 \Omega$)	V_{sense}	80	100	120	mA
Input Bias Current	I_{IB}	–	–3.0	–10	μA
SOFT-START SECTION					
Error Clamp Voltage (Reset = +0.4 V)		–	0.1	0.4	V
$C_{\text{Soft-Start}}$ Charging Current (Reset = +2.4 V)	I_{CS}	50	100	150	μA
OUTPUT DRIVERS (Each Output, $V_{\text{C}} = +15 \text{ Vdc}$, unless otherwise noted.)					
Output High Level $I_{\text{source}} = 20 \text{ mA}$ $I_{\text{source}} = 100 \text{ mA}$	V_{OH}	12.5 12	13.5 13	– –	V
Output Low Level $I_{\text{sink}} = 20 \text{ mA}$ $I_{\text{sink}} = 100 \text{ mA}$	V_{OL}	– –	0.2 1.2	0.3 2.0	V
Collector Leakage, $V_{\text{C}} = +40 \text{ V}$	$I_{\text{C(leak)}}$	–	50	150	μA
Rise Time ($C_{\text{L}} = 1000 \text{ pF}$)	t_{r}	–	0.3	0.6	μs
Fall Time ($C_{\text{L}} = 1000 \text{ pF}$)	t_{f}	–	0.1	0.2	μs
Supply Current (Shutdown = +0.4 V, $V_{\text{CC}} = +35 \text{ V}$, $R_{\text{T}} = 4.12 \text{ k}\Omega$)	I_{CC}	–	18	30	mA

NOTES: 7. $f_{\text{osc}} = 40 \text{ kHz}$ ($R_{\text{T}} = 4.12 \text{ k}\Omega \pm 1\%$, $C_{\text{T}} = 0.01 \mu\text{F} \pm 1\%$, $R_{\text{D}} = 0 \Omega$)
 8. $0 \text{ V} \leq V_{\text{CM}} \leq +5.2 \text{ V}$
 9. $0 \text{ V} \leq V_{\text{CM}} \leq +12 \text{ V}$

Figure 1. Reference Stability over Temperature

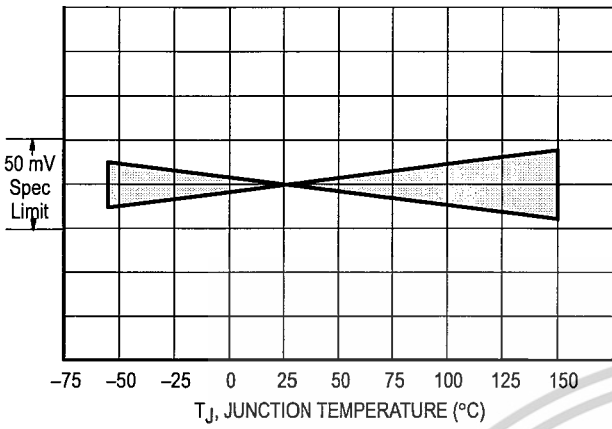


Figure 2. Reference Voltage as a Function Supply Voltage

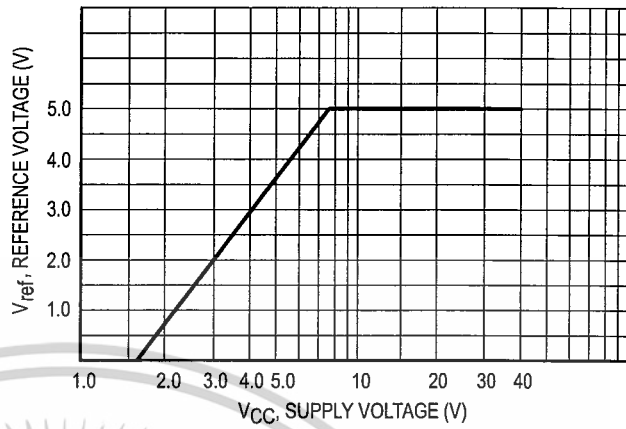


Figure 3. Error Amplifier Open Loop Frequency Response

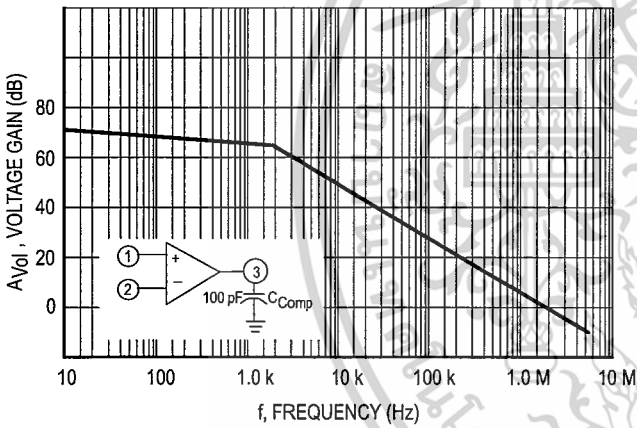


Figure 4. Current Limit Comparator Threshold

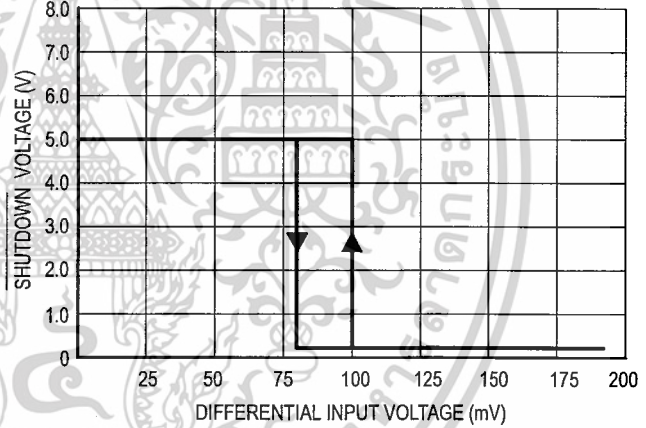


Figure 5. Undervoltage Lockout Characteristic

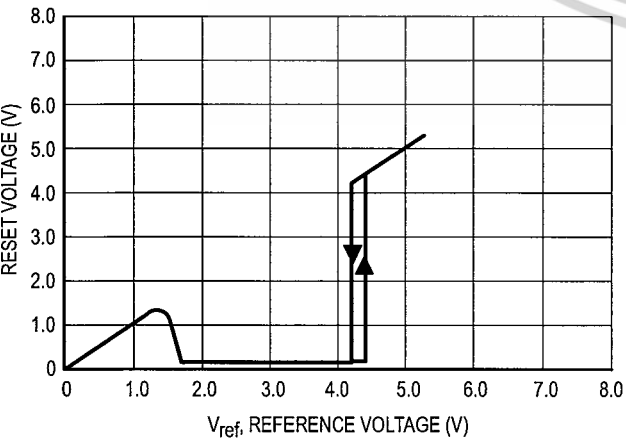
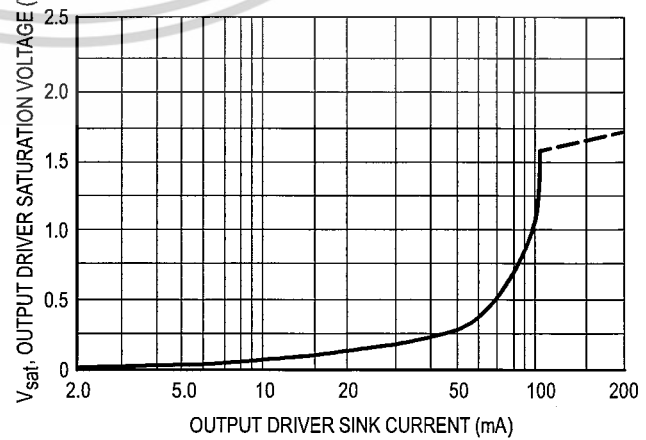


Figure 6. Output Driver Saturation Voltage as a Function of Sink Current



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น บริษัทฯ ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำเนื้อหาไปใช้

Figure 7. V_{C} Saturation Voltage as a Function of Sink Current

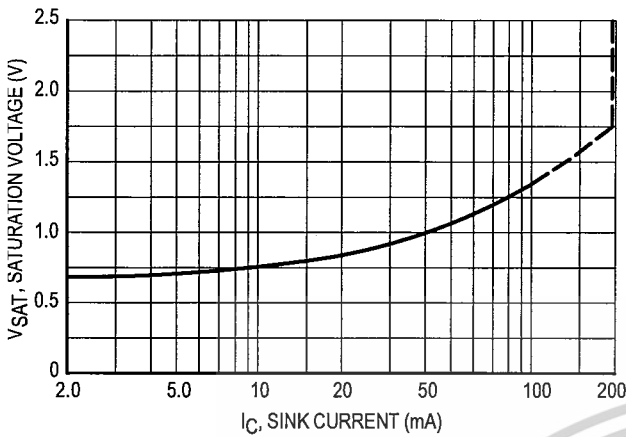


Figure 8. Oscillator Period

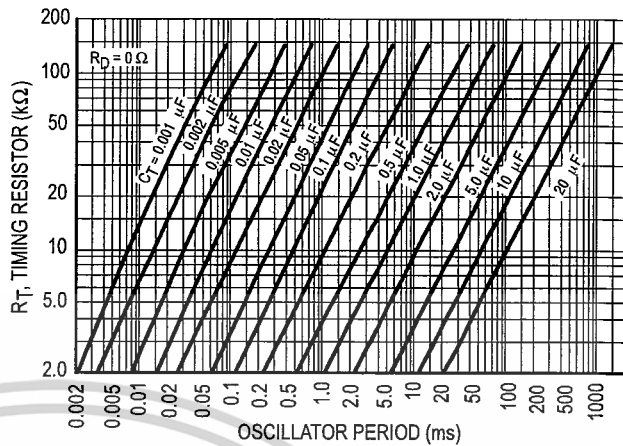


Figure 9. Error Amplifier

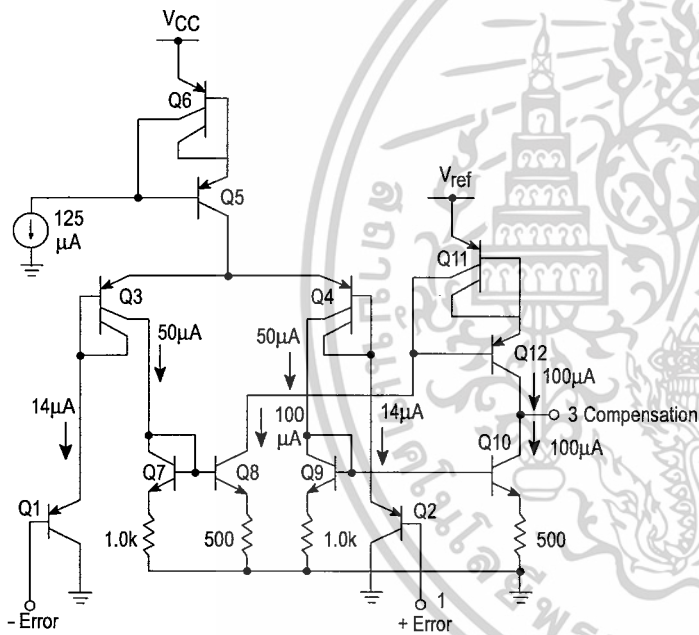


Figure 10. Undervoltage Lockout

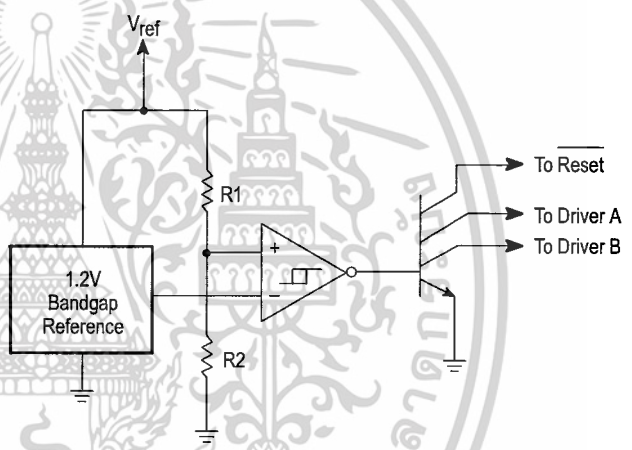
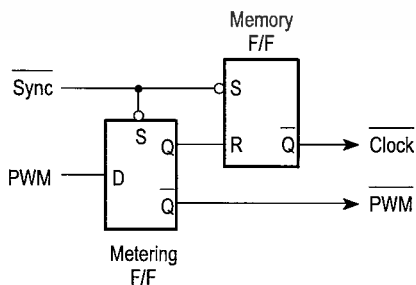


Figure 11. Pulse Processing Logic



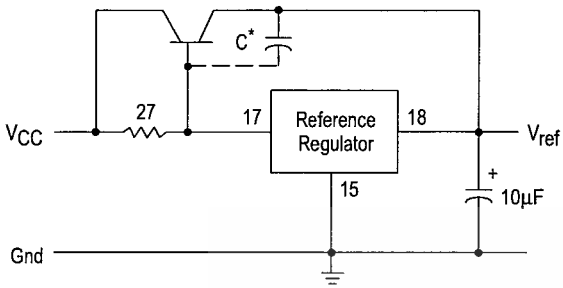
The metering Flip-Flop is an asynchronous data latch which suppresses high frequency oscillations by allowing only one PWM pulse per oscillator cycle.

The memory Flip-Flop prevents double pulsing in a push-pull configuration by remembering which output produced the last pulse.

SG3526

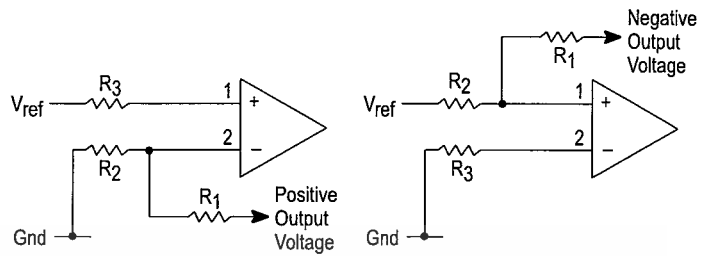
APPLICATIONS INFORMATION

Figure 12. Extending Reference Output Current Capability



* May be required with some types of transistors

Figure 13. Error Amplifier Connections



$$V_{out} = V_{ref} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_2} \right)$$

$$V_{out} = V_{ref} \left(\frac{R_1}{R_2} \right)$$

$$R_3 = \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

Figure 14. Oscillator Connections

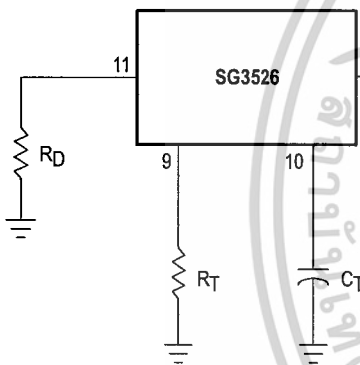
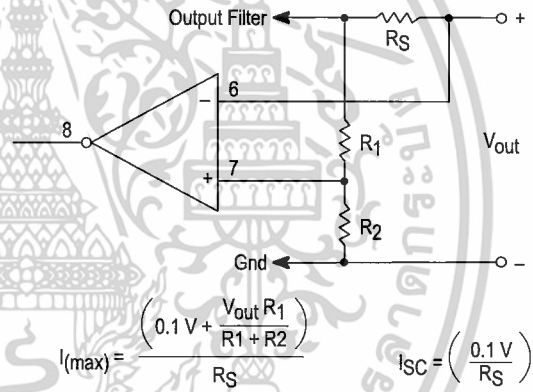


Figure 15. Foldback Current Limiting



$$I_{(max)} = \frac{0.1V + \frac{V_{out} R_1}{R_1 + R_2}}{R_S}$$

$$I_{SC} = \left(\frac{0.1V}{R_S} \right)$$

Figure 16. Soft-Start Circuitry

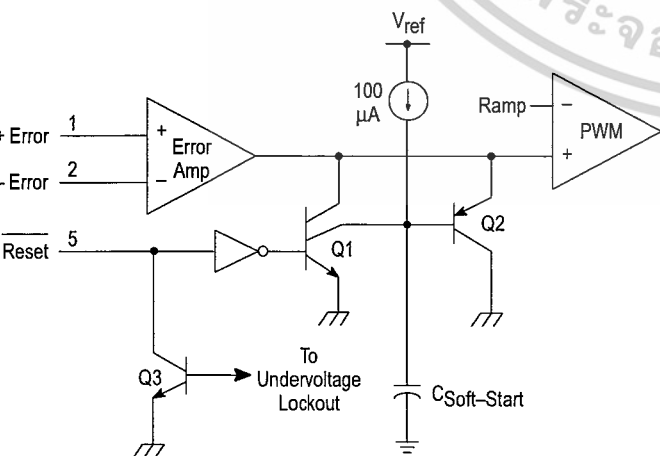
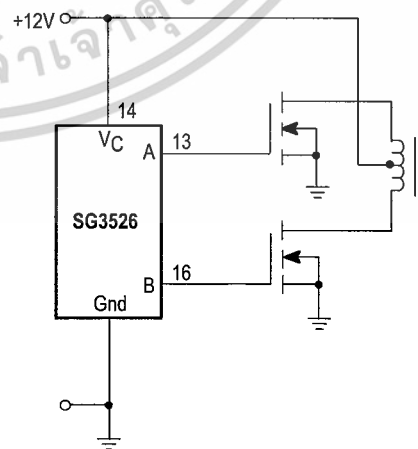


Figure 17. Driving VMOS Power FETs



The totem pole output drivers of the SG3526 are ideally suited for driving the input capacitance of power FETs at high speeds.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ลีดทั้งหมดมีให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำใช้

Figure 18. Half-Bridge Configuration

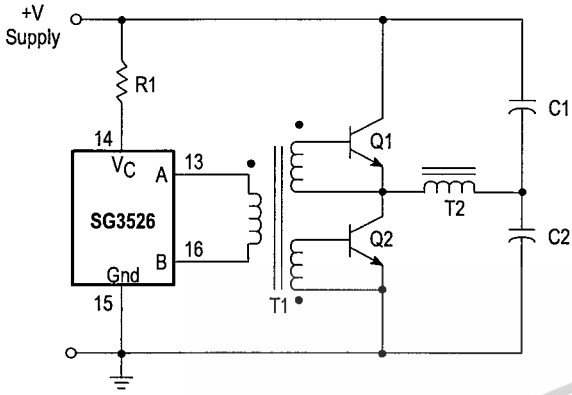
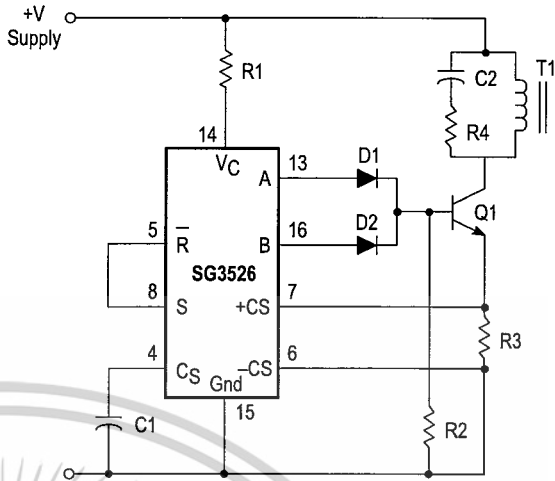


Figure 19. Flyback Converter with Current Limiting



In the above circuit, current limiting is accomplished by using the current limit comparator output to reset the soft-start capacitor.

Figure 20. Single-Ended Configuration

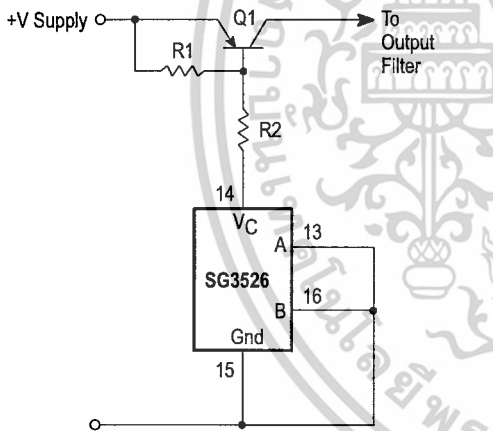
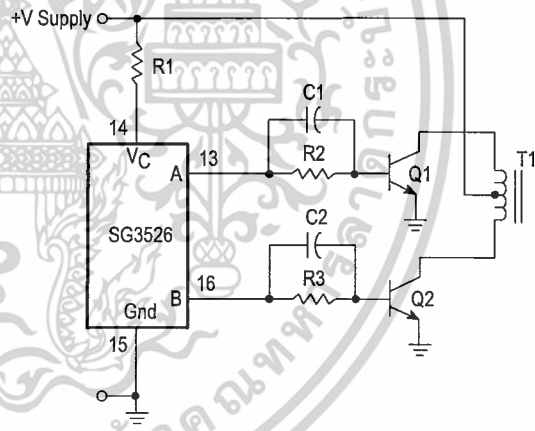


Figure 21. Push-Pull Configuration



SG3526

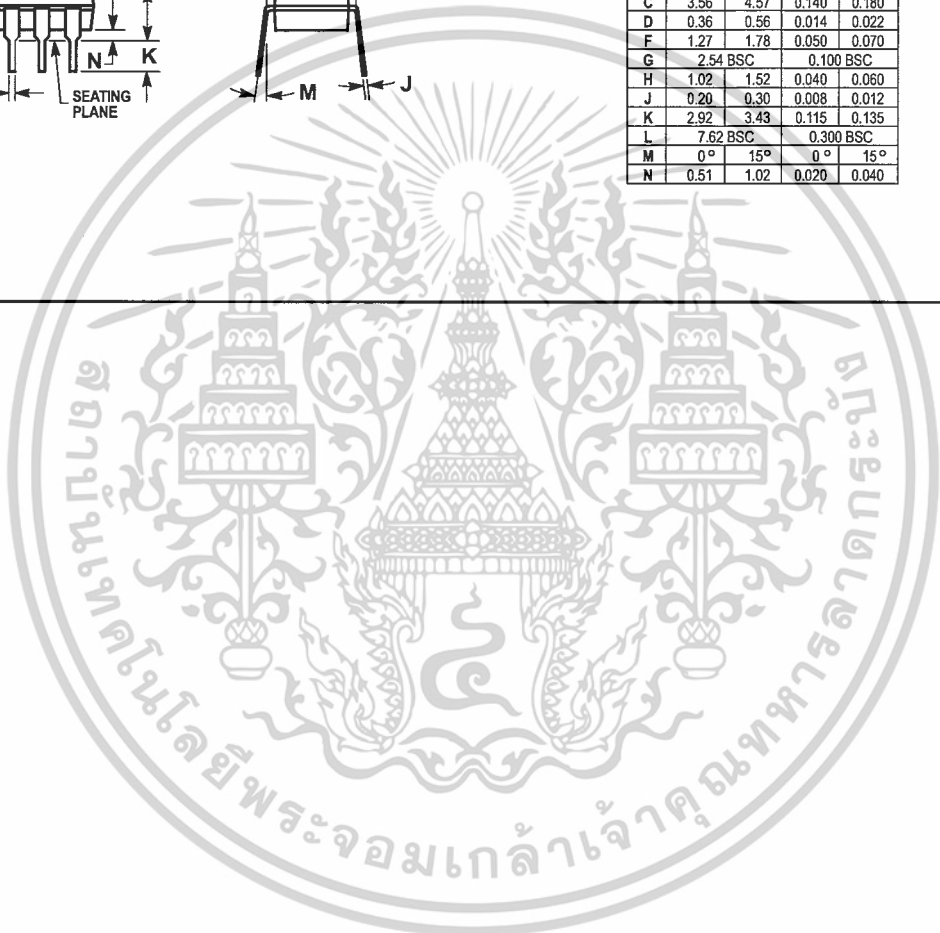
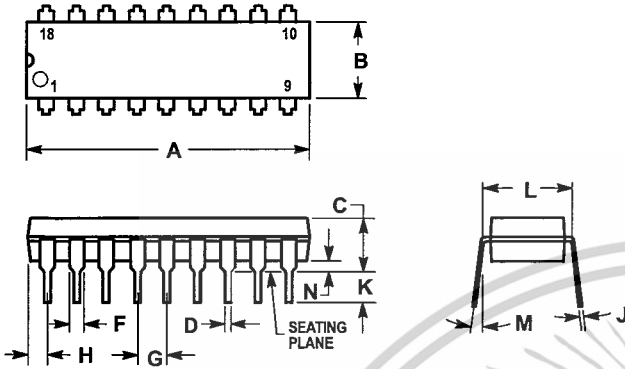
OUTLINE DIMENSIONS

N SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 707-02
ISSUE C

NOTES:

1. POSITIONAL TOLERANCE OF LEADS (D), SHALL BE WITHIN 0.25 (0.010) AT MAXIMUM MATERIAL CONDITION, IN RELATION TO SEATING PLANE AND EACH OTHER.
2. DIMENSION L TO CENTER OF LEADS WHEN FORMED PARALLEL.
3. DIMENSION B DOES NOT INCLUDE MOLD FLASH.


DIM	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	22.22	23.24	0.875	0.915
B	6.10	6.60	0.240	0.260
C	3.56	4.57	0.140	0.180
D	0.36	0.56	0.014	0.022
F	1.27	1.78	0.050	0.070
G	2.54 BSC		0.100 BSC	
H	1.02	1.52	0.040	0.060
J	0.20	0.30	0.008	0.012
K	2.92	3.43	0.115	0.135
L	7.62 BSC		0.300 BSC	
M	0°	15°	0°	15°
N	0.51	1.02	0.020	0.040



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่มีการแก้ไขใด ๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นที่ เมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณี่แก้ไข



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

How to reach us:
USA/EUROPE/Locations Not Listed: Motorola Literature Distribution;
P.O. Box 20912; Phoenix, Arizona 85036. 1-800-441-2447 or 602-303-5454

JAPAN: Nippon Motorola Ltd.; Tatsumi-SPD-JLDC, 6F Seibu-Butsuryu-Center,
3-14-2 Tatsumi Koto-Ku, Tokyo 135, Japan. 03-81-3521-8315

MFAX: RMFAX0@email.sps.mot.com – TOUCHTONE 602-244-6609
INTERNET: http://Design-NET.com

ASIA/PACIFIC: Motorola Semiconductors H.K. Ltd.; 8B Tai Ping Industrial Park,
51 Ting Kok Road, Tai Po, N.T., Hong Kong. 852-26629298

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

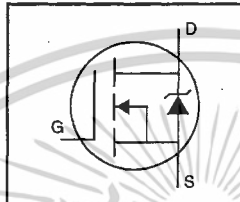


ห้ามฉีก หัก หรือลอกออก และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



HEXFET® Power MOSFET

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

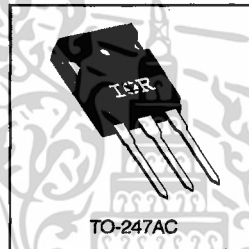


$V_{DSS} = 500V$
$R_{DS(on)} = 0.27\Omega$
$I_D = 20A$

Description

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

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



DATA SHEETS

Absolute Maximum Ratings

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


Thermal Resistance

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


IRFP460



Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	500	—	—	V	$V_{GS}=0V, I_D=250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.63	—	V/°C	Reference to $25^\circ\text{C}, I_D=1\text{mA}$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.27	Ω	$V_{GS}=10V, I_D=12A$ ③
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS}=V_{GS}, I_D=250\mu A$
g_{fs}	Forward Transconductance	13	—	—	S	$V_{DS}=50V, I_D=12A$ ④
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	$V_{DS}=500V, V_{GS}=0V$
		—	—	250	μA	$V_{DS}=400V, V_{GS}=0V, T_J=125^\circ\text{C}$
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS}=20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100	nA	$V_{GS}=-20V$
Q_g	Total Gate Charge	—	—	210	nC	$I_D=20A$
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	29	nC	$V_{DS}=400V$
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	110	nC	$V_{GS}=10V$ See Fig. 6 and 13 ④
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	18	—	ns	$V_{DD}=250V$
t_r	Rise Time	—	59	—	ns	$I_D=20A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	110	—	ns	$R_G=4.3\Omega$
t_f	Fall Time	—	58	—	ns	$R_D=13\Omega$ See Figure 10 ④
L_D	Internal Drain Inductance	—	5.0	—	nH	Between lead, 6 mm (0.25in.) from package and center of die contact 
L_S	Internal Source Inductance	—	13	—	nH	
C_{iss}	Input Capacitance	—	4200	—	pF	$V_{DS}=0V$
C_{oss}	Output Capacitance	—	670	—	pF	$V_{DS}=25V$
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	350	—	pF	$f=1.0\text{MHz}$ See Figure 5

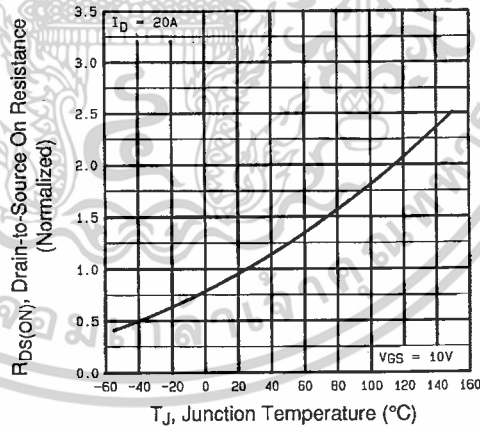
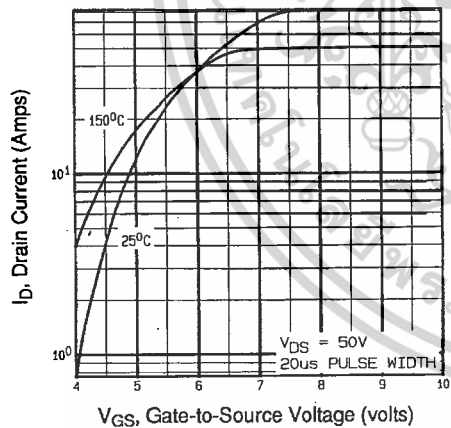
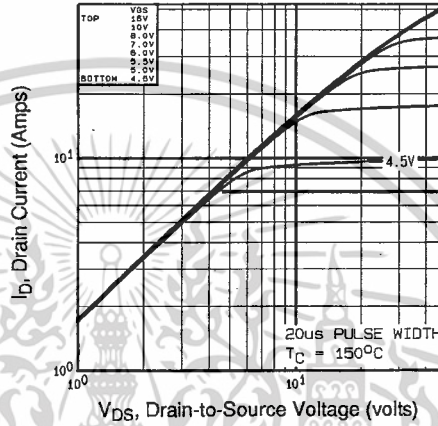
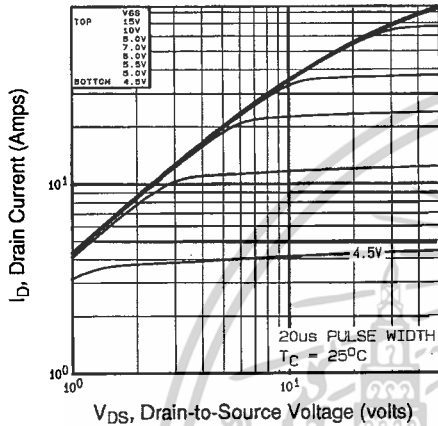
Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	20	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode. 
I_{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	80	A	
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.8	V	$T_J=25^\circ\text{C}, I_S=20A, V_{GS}=0V$ ②
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	570	860	ns	$T_J=25^\circ\text{C}, I_F=20A$
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	5.7	8.6	μC	$di/dt=100A/\mu s$ ④
t_{on}	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L_S+L_D)				

Notes:

- ① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature (See Figure 11)
- ② $V_{DD}=50V$, starting $T_J=25^\circ\text{C}$, $L=4.3\text{mH}$, $R_G=25\Omega$, $I_{AS}=20A$ (See Figure 12)
- ③ $I_{SD}\leq 20A$, $di/dt\leq 160A/\mu s$, $V_{DD}\leq V_{(BR)DSS}$, $T_J\leq 150^\circ\text{C}$
- ④ Pulse width $\leq 300\mu s$; duty cycle $\leq 2\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DATA SHEETS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

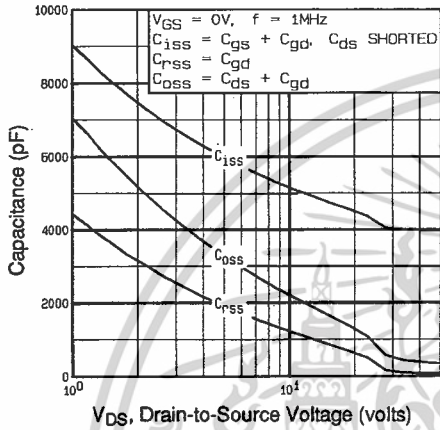


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

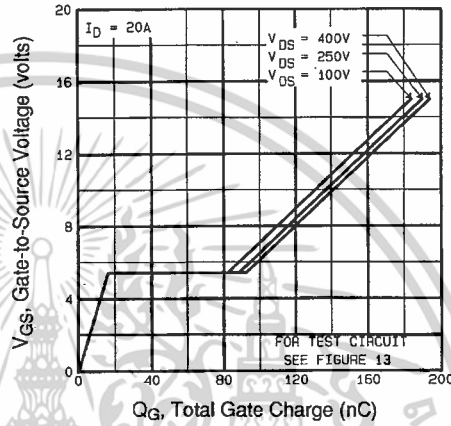


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

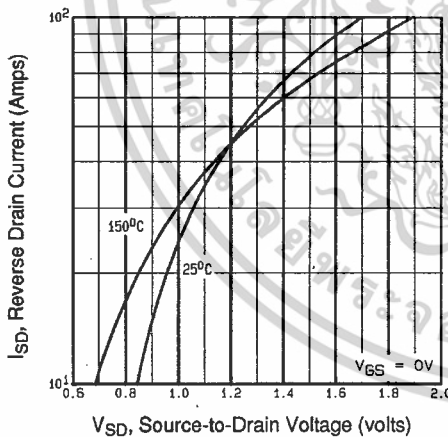


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

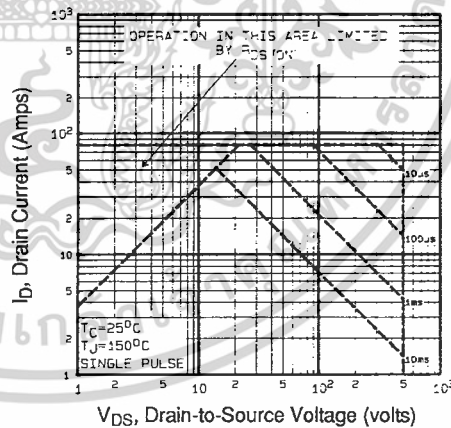


Fig 8. Maximum Safe Operating Area

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

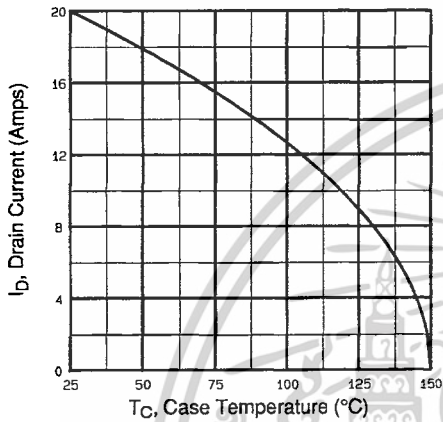


Fig 9. Maximum Drain Current Vs. Case Temperature

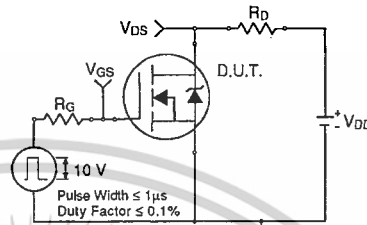


Fig 10a. Switching Time Test Circuit

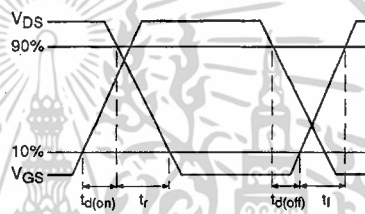


Fig 10b. Switching Time Waveforms

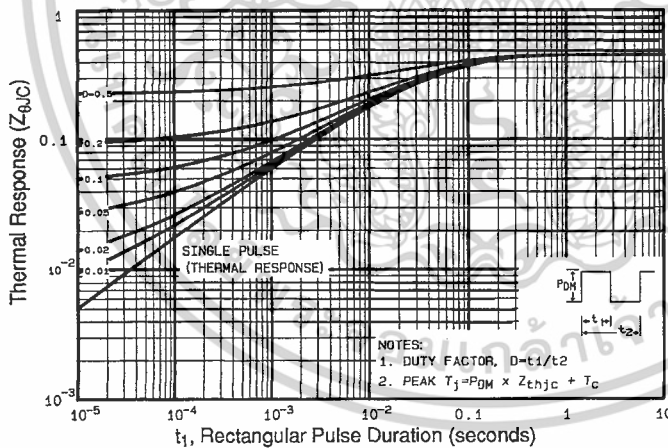


Fig 11. Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

DATA SHEETS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

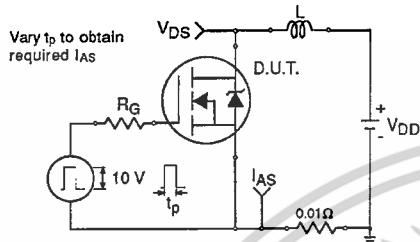


Fig 12a. Unclamped Inductive Test Circuit

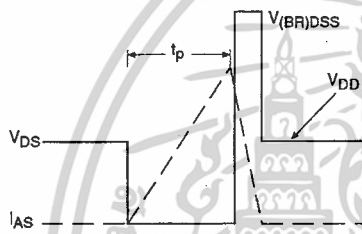


Fig 12b. Unclamped Inductive Waveforms

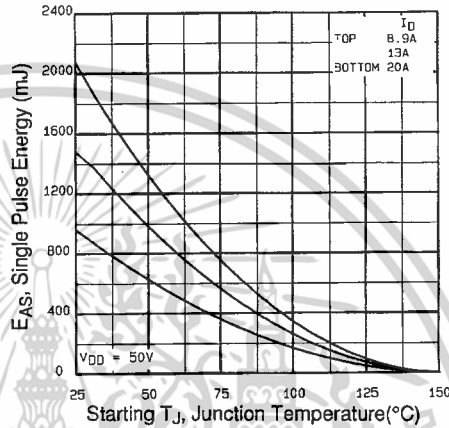


Fig 12c. Maximum Avalanche Energy Vs. Drain Current

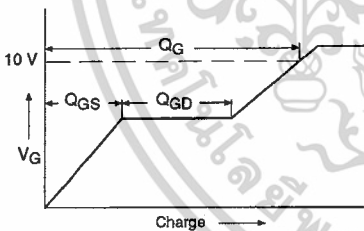


Fig 13a. Basic Gate Charge Waveform

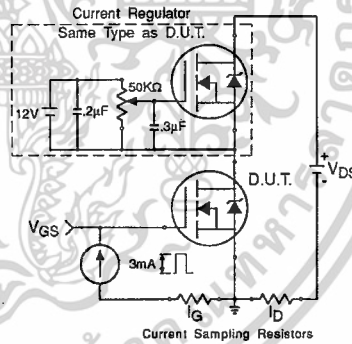


Fig 13b. Gate Charge Test Circuit

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

Appendix B: Package Outline Mechanical Drawing – See page 1511

Appendix C: Part Marking Information – See page 1517

This datasheet has been download from:

www.datasheetcatalog.com

Datasheets for electronics components.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้