การขนานพาวเวอร์ซัพพลาย

Power supply paralleling

ณัฐนนท์ เสน่หา
Nattanon Saneha

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การขนานพาวเวอร์ซัพพลาย

Power supply paralleling

โดย

ณัฐนนท์ เสน่หา

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.วีระ เพ็งจันทร์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2565

ภาควิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะ วิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การขนานพาวเวอร์ซัพพลาย

Power supply paralleling

ผู้จัดทำ นายณัฐนนท์ เสน่หา รหัสประจำตัว 62010271

ปริญญานิพนธ์นี้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว

(ผศ.ดร.วีระ เพ็งจันทร์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงาน การขนานพาวเวอร์ซัพพลาย
นักศึกษา นายณัฐนนท์ เสน่หา รหัสประจำตัว 62010271
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
ปีการศึกษา 2565
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ผศ.ดร.วีระ เพ็งจันทร์

บทคัดย่อ

โครงงานเล่มนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาหลักการทำงานของแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงแบบสวิตช์ชิ่ง การออกแบบ การวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาที่อาจเกิดขึ้น โดยแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงแบบสวิตช์ชิ่งนี้สามารถจ่ายแรงดันได้ตั้งแต่ 0 – 150V_{DC} ที่กำลังงาน 750W และจะต้องมีค่าประสิทธิภาพไม่ต่ำกว่า 85% โดยแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย อาทิ ระบบชุบโลหะ แหล่งจ่ายไฟของรถ EV เครื่องบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น หลักการทำงานคือแปลงไฟสลับจากไฟบ้านเป็นไฟตรงด้วยวงจร rectifier แล้วใช้วงจร Half bridge converter ในการลดแรงดันลงมาที่ประมาณ 155V_{DC} และในส่วนของวงจรควบคุมจะใช้ IC SG3525 ในการสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อปรับ Duty cycle เพื่อลดหรือเพิ่มแรงดันต่อไป

ในส่วนของการขนานพาวเวอร์ซัพพลายนั้นจะเป็นการนำพาวเวอร์ซัพพลาย 2 ตัวมาทำการขนานกัน ซึ่งการขนานจะทำพาวเวอร์ซัพพลายแต่ละตัวจ่ายกระแสโหลดเพียงครึ่งเดียว นั่นคือจะช่วยลดภาระของพาวเวอร์ซัพพลายลง แต่จะต้องเพิ่มในส่วนของวงจรปรับสมดุลกระแสขึ้นมาเพื่อตรวจสอบการจ่ายกระแสที่เท่ากันของพาวเวอร์ซัพพลายทั้ง 2 ตัว โดยวงจรปรับสมดุลกระแสหรือวงจร Load share จะประกอบวงจรเล็กน้อย และไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยการเขียนโปรแกรมควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Project Title Power supply paralleling
Student Mr. Nattanon Saneha
Degree Bachelor of Engineering
Program Electronic Engineering
Year 2022
Project Advisor Asst. Prof. Weera Pengchan, D.Eng

ABSTRACT

This project is intended to study the working principle of high-voltage switching power supply, design, analysis and problem solving that may occur. This high-voltage switching power supply can supply voltage from 0 – 150V_{DC} with a power of 750W and must have an efficiency of not less than 85%. DC power supplies can be used in a variety of applications such as systems. Metal plating, EV car power supply, waste water treatment machine, etc. The principle of operation is to convert AC power from home power to direct power with a rectifier circuit and then use a half bridge converter circuit to reduce the voltage to about 155V_{DC} and in the control circuit uses IC SG3525 to generate a pulse signal to adjust duty cycle to further reduce or increase the pressure.

In terms of paralleling the power supply, it brings two power supplies in parallel. In parallel, each power supply supplies half the load current. That is, it will reduce the load on the power supply. but must be added to the current balancing circuit to check the equal current supply of both power supplies by the current balancing circuit or load share circuit will assemble a little circuit and microcontroller by writing a control program.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาช่วยเหลือ แนะนำ ให้คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่งจากผศ.ดร.วีระ เพ็งจันทร์ และคณะอาจารย์จากภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงรุ่นพี่ที่ปรึกษาที่คอยชี้แนะ และช่วยเหลือ และที่สำคัญคือบิดา และมารดาที่ช่วยเหลือสนับสนุนทั้งด้านกำลังใจ และกำลังทรัพย์ด้วยดีตลอดมา

ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่าปริญญานิพนธ์การขนานพาวเวอร์ซัพพลายฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่สนใจไม่มากก็น้อย อีกทั้งยังเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์และต่อยอดต่อไป หากมีข้อผิดพลาดประการใดข้าพเจ้าขอน้อมรับไว้และขออภัยมา ณ ที่นี้

ณัฐนนท์ เสน่หา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทคัดย่อ I
ABSTRACT II
กิตติกรรมประกาศ III
สารบัญรูป VII
บทที่ 1 1
1.1 ที่มาและความสำคัญ 1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา 1
1.3 สมมุติฐานการศึกษา 2
1.4 ขอบเขตของโครงงาน 2
บทที่ 2 3
2.1 วงจรเรียงกระแส 3
2.1.1 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half Wave Rectifier) 3
2.1.2 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นโดยใช้หม้อแปลงเซ็นเตอร์แทป 3
2.1.3 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ 5
2.2 วงจรกรองลดแรงดันกระเพื่อม 5
2.3 วงจร Half bridge converter 8
2.4 วงจรควบคุม 9
2.4.1 วงจรควบคุมในโหมดควบคุมจากแรงดัน 9
2.4.2 วงจรควบคุมในโหมดควบคุมจากกระแส 10
2.5 วงจรขับไบโพลาร์พาวเวอร์ทรานซิสเตอร์ 12
- วงจรขับกระแสไบอัสโดยใช้หม้อแปลงและเบเกอร์แคลมป์ 12
- วงจรขับกระแสไบอัสที่นิยมใช้ในคอนเวอร์เตอร์ที่จ่ายกำลังงานสูงๆ 13
2.6 วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟต 13
- วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วย TTL 13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วยไอซี CMOS 14
วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วยหม้อแปลง 15
2.7 วงจรสนับเบอร์ 15
- วงจรสนับเบอร์ช่วงหยุดนำกระแส 15
2.8 อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ 17
2.8.1 เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ 17
2.8.2 เพาเวอร์มอสเฟต 19
2.8.3 ไอจีบีที 20
2.9 กระแสกระชาก (Inrush Current) 23
- กระแสกระชากตัวเก็บประจุ 23
- การป้องกันกระแสกระชาก 24
2.10 วิธีการวัดค่ากระแสไฟ (Current Sensing) 25
- วิธีการตรวจจับกระแสไฟฟ้าของเซนเซอร์ Hall Effect 25
- วิธีการตรวจจับกระแสไฟฟ้าของเซ็นเซอร์ Flux Gate 27
- วิธีการตรวจจับกระแสไฟฟ้า Rogowski Coil 28
- วิธีการตรวจจับกระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า (Current Transformer) 28
- วิธีการตรวจจับกระแสไฟฟ้าของตัวต้านทาน Shunt 29
- วิธีการเลือกวิธีการตรวจจับกระแสที่เหมาะสม 33
บทที่ 3 34
3.1 Block diagram ของวงจร Half bridge power supply 34
3.2 Block diagram ของการขนาน Power supply 34
3.3 วงจร Half bridge converter 35
3.4 วงจร filter 35
3.5 วงจร control 36
3.6 วงจร load share 36
บทที่ 4 37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 การทดลอง Half bridge power supply 37
4.2 การทดลองการขนาน power supply 37
บทที่ 5 38
5.1 สรุปผลการทดลอง 38
5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง 38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น....3
รูปที่ 2.2 การทำงานของวงจรเรียงกระแสแบบเซนเตอร์แทปเมื่ออินพุตเป็นซีกบวก....4
รูปที่ 2.3 การทำงานของวงจรเรียงกระแสแบบเซนเตอร์แทปเมื่ออินพุตเป็นซีกลบ....4
รูปที่ 2.4 การทำงานของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์เมื่ออินพุตเป็นซีกลบ....5
รูปที่ 2.5 การทำงานของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์เมื่ออินพุตเป็นซีกบวก....5
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างวงจรกรองลดแรงดันกระเพื่อมโดยใช้ตัวเก็บประจุ....6
รูปที่ 2.7 กราฟแสดงพฤติกรรมของสัญญาณแรงดันเมื่อผ่านการกรองแรงดันกระเพื่อม....6
รูปที่ 2.8 วงจรอินดัคเตอร์ฟิลเตอร์....7
รูปที่ 2.9 วงจร Half bridge converter....8
รูปที่ 2.10 แสดงวงจรพื้นฐานในโหมดควบคุมแรงดัน....9
รูปที่ 2.11 แสดงรูปสัญญาณที่จุดต่างๆในวงจรควบคุม....10
รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะการทำงานที่จุดต่างๆ ของวงจรควบคุมในโหมดควบคุมกระแส....11
รูปที่ 2.13 แสดงวงจรขับกระแสไบอัสด้วยกระแสคงที่แบบเบเกอร์แคลมป์....12
รูปที่ 2.14 แสดงวงจรขับกระแสไบอัสด้วยกระแสเป็นสัดส่วนกับกระแสคอลเล็กเตอร์....14
รูปที่ 2.15 แสดงการขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วยไอซี TTL แบบต่าง ๆ....14
รูปที่ 2.16 แสดงการขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วยไอซี CMOS....14
รูปที่ 2.17 แสดงวงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วยหม้อแปลง....15
รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์....16
รูปที่ 2.19 แสดงวงจรสนับเบอร์ช่วงหยุดนำกระแส....16
รูปที่ 2.20 การเปรียบเทียบแรงดัน กระแสไฟฟ้า และความถี่ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์....17
รูปที่ 2.21 การตอบสนองต่อสัญญาณสวิตช์ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง....18
รูปที่ 2.22 แสดงลักษณะแรงดันและกระแสที่ขาเกทขณะเพาเวอร์มอสเฟตถูกไบอัสให้นำกระแส....20
รูปที่ 2.23 โครงสร้างของ IGBT....21
รูปที่ 2.24 กราฟแสดงลักษณะของกระแสและแรงดันขณะนำกระแสและหยุดนำกระแส....22
รูปที่ 2.25 ตัวอย่างของการไหลของกระแสกระชากขณะต่อโหลดตัวเก็บประจุ....23
รูปที่ 2.26 การป้องกันกระแสกระชาก....24
รูปที่ 2.27 เทอร์มิสเตอร์ (NTC) 24
รูปที่ 2.28 การวัดกระแสไฟฟ้าในแต่ละแบบ....25
รูปที่ 2.29 เซ็นเซอร์ Hall Effect แบบแคมป์....26
รูปที่ 2.30 ACS770, ACS730 เซ็นเซอร์ Hall Effect แบบวัดกระแสที่ไหลผ่าน IC....26
รูปที่ 2.31 เซ็นเซอร์ Flux Gate 27
รูปที่ 2.33 หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า 29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.34 การตรวจจับกระแสไฟฟ้าของตัวต้านทาน Shunt 30
รูปที่ 2.35วงจรการวัดกระแสด้านต่ำโดยใช้ Texas Instruments INA181.....30
รูปที่ 2.36 วงจรวัดกระแสด้านสูงจะต่อตัวต้านทาน shunt ระหว่างแหล่งจ่ายกับโหลด 31
รูปที่ 2.37 ลักษณะการต่อลากลาย PCB เข้ากับตัวต้านทาน shunt เรียกว่า “Kelvin connections”.....32
รูปที่ 2.38 แผนภาพบล็อก INA250 พร้อมการเชื่อมต่อตัวต้านทานภายใน.....32
รูปที่ 2.39 การใช้ trace pcb เป็น shunt resistor 33
รูปที่ 3.1 Block diagram PWSP 34
รูปที่ 3.2 Block diagram Paralleling.....34
รูปที่ 3.3 HB converter.....35
รูปที่ 3.4 HB filter.....35
รูปที่ 3.5 control 36
รูปที่ 3.6 Load share.....36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงหรือพาวเวอร์ซัพพลาย (Power Supply) เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญอย่างมากต่ออุปกรณ์ในระบบอิเล็กทรอนิกส์ อีกทั้งยังเป็นวงจรพื้นฐานที่สำคัญต่อการวิเคราะห์การทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงนั้นมีลักษณะการทำงาน คือ ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง

สวิตช์ชิ่งเพาเวอร์ซัพพลาย (Switching Power Supply) เป็นแหล่งจ่ายไฟตรงคงค่าแรงดันแบบหนึ่ง และสามารถเปลี่ยนแรงดันจากไฟสลับแรงดันสูงให้เป็นแรงดันไฟตรงค่าต่ำ เพื่อใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์ เช่นเดียวกันกับแหล่งจ่ายไฟเชิงเส้น (Linear Power Supply) ถึงแม้พาวเวอร์ซัพพลายทั้งสองแบบจะต้องมีการใช้หม้อแปลงในการลดทอนแรงดันสูงให้เป็นแรงดันต่ำ แต่สวิตช์ชิ่งพาวเวอร์ซัพพลายนั้นใช้หม้อแปลงที่มีขนาดเล็ก และน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับแหล่งจ่ายไฟเชิงเส้น อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพที่สูงกว่า หลักการทำงานเบื้องต้นของสวิตช์ชิ่งพาวเวอร์ซัพพลายโดยเน้นในส่วนของคอนเวอร์เตอร์และวงจรควบคุม ซึ่งหัวใจสำคัญของสวิตช์ชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายจะอยู่ที่คอนเวอร์เตอร์ เนื่องจากทำหน้าที่ทั้งลดทอนแรงดันและคงค่าแรงดันเอาต์พุตด้วย หลักการเบื้องต้นคือไฟสลับแรงดันสูงผ่านวงจรเรียงกระแสและกรองแรงดันเป็นไฟตรงแรงดันสูงผ่านมายังวงจรคอนเวอร์เตอร์ทำการสวิตช์เปลี่ยนแรงดันไฟตรงเป็นพัลส์สี่เหลี่ยมความถี่สูงประมาณ 20 - 200 kHz จากนั้นจะผ่านหม้อแปลงความถี่สูงเพื่อลดแรงดันลง เอาต์พุตของหม้อแปลงจะต่อกับวงจรเรียงกระแสและกรองแรงดันให้เรียบ การคงค่าแรงดันทำได้โดยการป้อนกลับค่าแรงดันที่เอาต์พุตกลับมายังวงจรควบคุม เพื่อควบคุมให้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์นำกระแสมากขึ้นหรือน้อยลงตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่เอาต์พุต ซึ่งทำให้แรงดันเอาต์พุตคงที่ได้

แหล่งจ่ายพลังงานอื่นที่ไม่ได้เป็นสวิตช์ชิ่งเพาเวอร์ซัพพลาย มักจะมีค่าประสิทธิภาพ (Efficiency) น้อยกว่า 80% เสมอ แต่สำหรับสวิตช์ชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายแล้วค่าประสิทธิภาพจะเท่ากับ 80% หรือมากกว่าเป็นเรื่องที่ปกติ ทั้งนี้สำหรับสวิตช์ชิ่งพาวเวอร์ซัพพลายคือตัวที่เปลี่ยนระดับพลังงานที่เข้าให้พอเหมาะกับความต้องการที่ใช้จริงและการสูญเสียน้อย ในกรณีใช้พลังงานน้อย (พลังงานที่สูญเสียในสวิตช์ชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายส่วนมากเกิดในรูปของความสูญเสียทางความร้อนที่ตัวอุปกรณ์สวิตช์)

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เป็นการฝึกการปฏิบัติงานของคณะผู้จัดทำเพื่อเป็นพื้นฐานในการปฏิบัติงานต่อไปในอนาคต

1.2.2 เป็นการฝึกการวิเคราะห์วงจรและฝึกการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นของวงจร

1.2.3 นำผลงานจากโครงงานไปใช้ในการทำงานทางอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

1.2.4 บูรณาการความรู้ที่ได้จากการเรียนการสอนในภาคทฤษฎีนำมาใช้ในการ ปฏิบัติงานในขั้นต้น

1.2.5 ศึกษาหลักการทำงานของเครื่องจ่ายไฟตรงแบบสวิตช์ชิ่ง

1.2.6 ศึกษาการขนานพาวเวอร์ซัพพลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 สมมุติฐานการศึกษา

สามารถเข้าใจถึงวิธีการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยผ่านการออกแบบโครงงานนี้รวมทั้งขั้นตอนในการผลิตอย่างง่าย และเข้าใจหลักการทำงานของเครื่องจ่ายไฟตรงแบบสวิตช์ชิ่ง สามารถนำความรู้ที่ได้จากการเรียนในห้องเรียนโดยเฉพาะวิชา Electronic Engineering และ Power Electronic มาใช้ในการลงมือปฏิบัติจริง เพื่อการเปรียบเทียบทางทฤษฎีกับผลจากการปฏิบัติจริง และสามารถผลิต เครื่องจ่ายไฟตรงออกใช้ในการปฏิบัติงานได้จริง รวมถึงการขนานพาวเวอร์ซัพพลายด้วยเช่นกัน

1.4 ขอบเขตของโครงงาน

สร้างวงจรสวิตช์ชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายที่จ่ายกำลังได้สูงมีความเสถียร รวมถึงการขนานพาวเวอร์ซัพพลายเพื่อศึกษาหลักการทำงานและสามารถนำไปต่อยอดในอนาคต

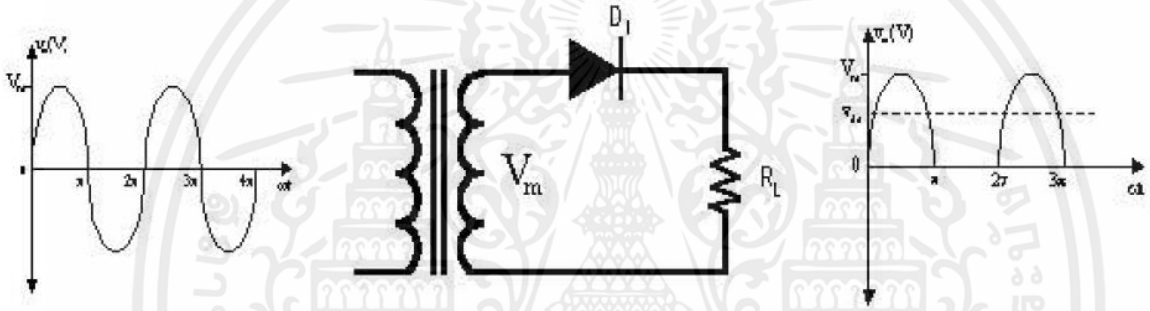
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีวงจรสวิตช์ชิ่งเพาเวอร์ซัพพลาย

2.1 วงจรเรียงกระแส

วงจรเรียงกระแส (Rectifier circuit) เป็นวงจรไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติในการแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงหรือมีคุณสมบัติยอมให้ไฟฟ้าไหลผ่านไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง อุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการแปลงสัญญาณได้แก่ ไดโอด (Diode) โดยวงจรเรียงกระแสสามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ

2.1.1 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half Wave Rectifier)

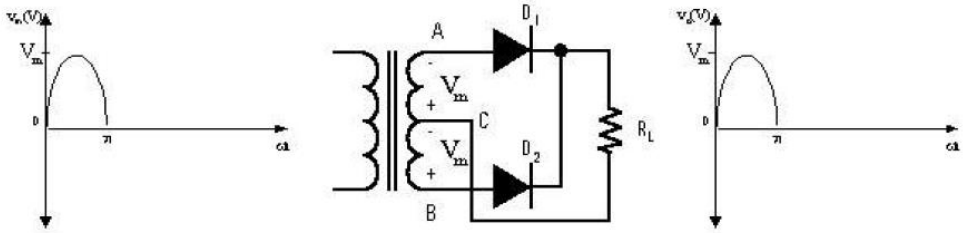


รูปที่ 2.1 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น

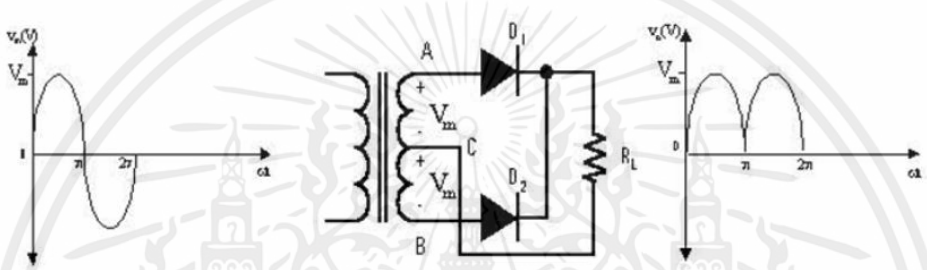
จากรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่า $V_m = V_{D1} + V_{RL}$ ตามกฎของเคิร์ชฮอฟ (KVL) โดยในขณะที่สัญญาณไฟสลับมีค่าเป็นบวก ไดโอดจะได้รับไบอัสตรง ทำให้แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเป็นแรงดันตกคร่อมที่โหลดมีค่าเป็น $V_{RL} = V_m - V_{D1} = V_{msin(\omega t)} - V_{D1}$ เมื่อ $0 \le \omega t \le \pi$ โดย V_{D1} เป็นค่าแรงดันขีดเริ่มของไดโอด แต่ในขณะที่สัญญาณไฟสลับมีค่าเป็นลบ ไดโอดจะได้รับการไบอัสย้อนกลับจะไม่มีกระแสไหลผ่าน ทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเป็น 0 คือ $V_{RL} = 0$ เมื่อ $\pi \le \omega t \le 2\pi$ จะได้ลักษณะลูกคลื่นเป็นกราฟครึ่งคลื่น (Half wave) จะเห็นได้ว่ากระแสจะไหลผ่าน R_L ในทิศทางเดียวเท่านั้น ถึงแม้ว่าแรงดันและกระแสที่ไหลผ่าน R_L จะเป็นกระแสตรงแต่ก็ยังมีลักษณะคล้ายพัลส์ (Pulsating DC) ซึ่งมีการกระเพื่อมสูงมาก คลื่นไฟกระแสสลับ 1 ลูกคลื่น จะได้ลูกคลื่นของไฟตรง 1 ลูก นั่นคือความถี่ของการกระเพื่อม (Ripple Frequency) จะมีค่าเท่ากับความถี่ไฟสลับที่ต่อตรงเข้ามาคือ F_R(Half wave) = F_{AC}line = 50 เฮิร์ท หรือ 60 เฮิร์ท

2.1.2 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นโดยใช้หม้อแปลงเซ็นเตอร์แทป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 การทำงานของวงจรเรียงกระแสแบบเซนเตอร์แทปเมื่ออินพุตเป็นซีกบวก



รูปที่ 2.3 การทำงานของวงจรเรียงกระแสแบบเซนเตอร์แทปเมื่ออินพุตเป็นซีกลบ

เมื่อมีแรงดันสลับป้อนเข้ามาทางขดปฐมภูมิของหม้อแปลง จะเกิดแรงดันขึ้นทางขดทุติยภูมิคือขั้ว A และ B เนื่องจากจุด C เป็นจุดกึ่งกลางของขดทุติยภูมิดังนั้นแรงดันไฟครึ่งหนึ่งจึงเกิดขึ้นที่ขั้ว AC และอีกครึ่งหนึ่งจะปรากฏที่ขั้ว CB แรงดันระหว่างขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิจะมีเฟสตรงข้ามกันคือ 180 องศา เนื่องจากหม้อแปลงทำหน้าที่สลับเฟสของไฟสลับที่ป้อนให้กับไดโอดทั้งสองตัว

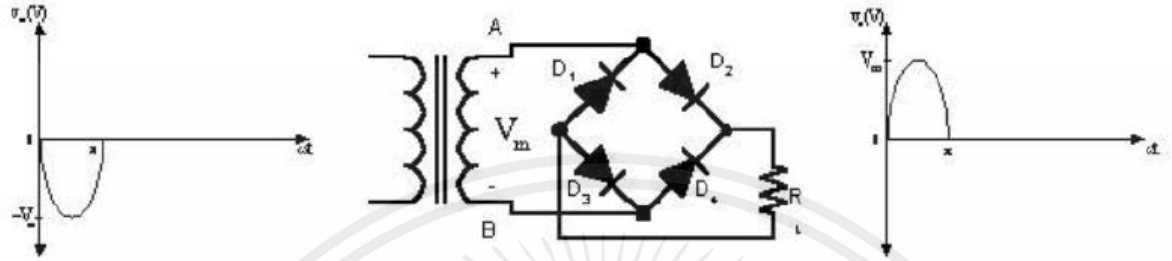
เมื่อแรงดันไฟในครึ่งไซเคิลแรกคือครึ่งไฟบวกเข้ามาที่อินพุตทางด้านขดปฐมภูมิ ศักย์ไฟฟ้าที่จุด B จะมีค่าบวกเมื่อเทียบกับ A หรือ C และศักย์ไฟฟ้าที่จุด C จะมีค่าบวกเมื่อเทียบกับจุด A ดังนั้นไดโอด D_1 จะไม่นำกระแสไฟฟ้า ส่วนไดโอด D_2 จะนำกระแสได้ เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้นในวงจร ตามรูปที่ 2.2 เมื่อแรงดันไฟในครึ่งไซเคิลต่อมาคือครึ่งไฟลบเข้ามาที่อินพุตทางด้านขดปฐมภูมิ ศักย์ไฟฟ้าที่จุด A จะมีค่าบวกเมื่อเทียบกับ B หรือ C และศักย์ไฟฟ้าที่จุด C จะมีค่าบวกเมื่อเทียบกับจุด B ดังนั้นไดโอด D_2 จะไม่นำกระแสไฟฟ้า ส่วนไดโอด D_1 จะนำกระแสได้ เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้นในวงจรตามรูปที่ 2.3 ค่าแรงดันเอาต์พุตจะได้อีกครึ่งไซเคิล กระแสผ่านตัวต้านทาน R_L จะไหลไปในทิศทางเดียวกับตอนแรก โดยค่าเฉลี่ยของแรงดันเอาต์พุตเป็น $V_O(DC) = 2(V_m - 0.7)/\pi$ โวลต์ และ 1 คาบของไฟสลับแรงดันเอาต์พุต V_O จะมีการกระเพื่อม 2 ลูกคลื่น ความถี่ของการกระเพื่อมจะเป็น

$$F_R(Full\ wave) = 2F_{AC}(Line)$$

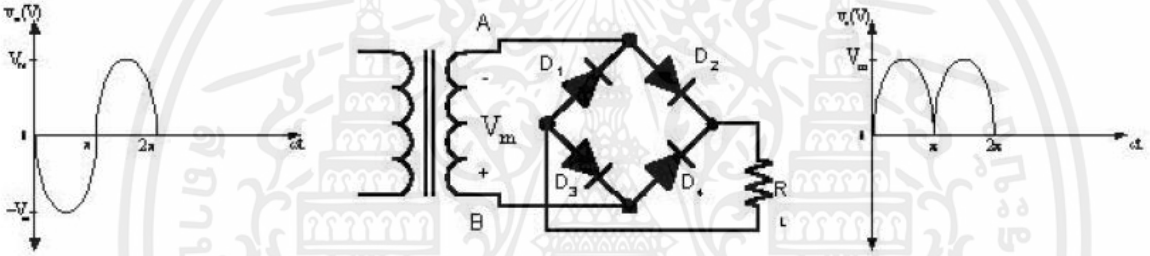
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์

วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์นี้นิยมใช้งานอย่างมาก โดยการใช้งานไดโอด 4 ตัว ไดโอด 2 ตัวในวงจรจะสลับกันทำงานให้มีกระแสไหลผ่านในเวลาครึ่งคาบของไฟสลับ และอีกครึ่งคาบไดโอดอีก 2 ตัวก็จะทำงาน



รูปที่ 2.4 การทำงานของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์เมื่ออินพุตเป็นซีกลบ



รูปที่ 2.5 การทำงานของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์เมื่ออินพุตเป็นซีกบวก

ในแต่ละครึ่งไซเคิลของวงจรอินพุต สมมุติว่าเมื่อขั้ว A ของขดทุติยภูมิมีค่าเป็นบวก และขั้ว B มีค่าเป็นลบ จึงเหมือนกับครึ่งไซเคิลลบถูกป้อนเข้าทางขดปฐมภูมิของหม้อแปลง ไดโอด D_2 และ D_3 จะอยู่ในลักษณะไบอัสตรง ดังนั้นกระแสจึงไหลครบวงจรจากขั้ว A ผ่านไดโอด D_2 ความต้านทานโหลดและไดโอด D_3 แล้วกลับเข้าสู่ขั้ว B ของหม้อแปลงดังรูปที่ 2.4 และเมื่อแรงดันไฟสลับเปลี่ยนข้างมาเป็นบวกที่ขั้ว B และเป็นลบที่ขั้ว A การนำกระแสของไดโอดจะเปลี่ยนไปโดยเริ่มจากจุด B ของขดทุติยภูมิผ่าน D_4 ความต้านทานโหลด และ D_1 กลับเข้าขั้ว A ของหม้อแปลง ทิj4trศทางแรงดันตกคร่อมโหลดจะมีทิศเดียวกับตอนแรก คือมีขั้วบวกอยู่ทางด้านบนดังรูปที่ 2.5 ดังนั้นการนำกระแสไดโอดจะเกิดสลับกันทีละสองตัว D_2 กับ D_3 และ D_1 กับ D_4

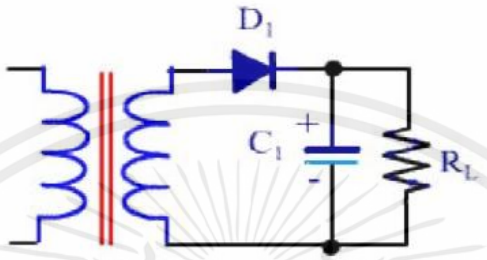
2.2 วงจรกรองลดแรงดันกระเพื่อม

วงจรฟิลเตอร์เป็นวงจรที่ใช้สำหรับกรองกระแสและแรงดันจากวงจรเรียงกระแสให้เรียบ เพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้ เนื่องจากแรงดันที่ได้จากวงจรเรียงกระแสที่เรียกว่าพัลส์เซติงดีซีนั้น ยังไม่สามารถนำไปใช้งานได้ เพราะแรงดันไฟที่ได้ยังคงมีลักษณะที่เป็นรูปคลื่นซึ่งจะทำให้วงจรอิเล็กทรอนิกส์เกิดปัญหาในการทำงาน ดังนั้นจะต้องทำแรงดันที่เป็นคลื่นให้เรียบเสียก่อน โดยวงจรฟิลเตอร์ที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือวงจรคาปาซิเตอร์ฟิลเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

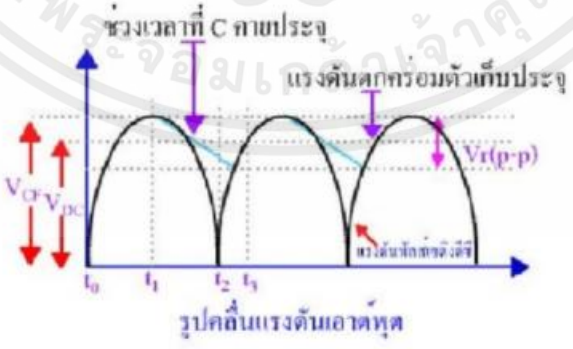
(Capacitor Filter) จะทำหน้าที่กรองแรงดันที่ได้จากวงจรเร็คติไฟร์ให้เรียบเพื่อที่จะนำแรงดันนั้นไปใช้งานหรืออาจใช้วงจรอินดัคทีฟ (Inductive Filter) ในกรณีที่วงจรจ่ายไฟทำงานด้วยความถี่สูง

วงจรกรองลดแรงดันกระเพื่อมโดยใช้ตัวเก็บประจุ (Ripple Filter using capacitors) โดยหลักการทำงานของวงจรกรองลดการกระเพื่อมสามารถอธิบายได้อย่างง่ายๆ คือ ในขณะที่ไดโอดนำกระแสตัวเก็บประจุจะสะสมพลังงานไว้ เมื่อไดโอดหยุดนำกระแสตัวเก็บประจุจะคายพลังงานออกมาให้กับโหลดทำให้โหลดได้รับพลังงานอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างวงจรกรองลดแรงดันกระเพื่อมโดยใช้ตัวเก็บประจุ

เมื่อมีแรงดันพัลส์เซติงดีซีจากวงจรเรียงกระแสป้อนเข้าวงจรฟิลเตอร์ ตัวเก็บประจุจะทำการเก็บประจุทำให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุสูงขึ้นจนค่า V_m จากนั้นแรงดันพัลส์เซติงดีซีที่มีค่าสูงสุดจะมีค่าลดลงเหลือ 0 โวลต์ ในช่วงเวลานี้แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่ามากกว่า แรงดันพัลส์ติงดีซีทำให้ตัวเก็บประจุคายประจุให้กับโหลดแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าลดลงจนแรงดันพัลส์เซติงดีซีมีค่าเพิ่มขึ้นอีก (แต่ในช่วงแรกๆแรงดันพัลส์เซติงดีซียังมีค่าน้อยตัวเก็บประจุจะยังคงคายประจุ) เมื่อแรงดันพัลส์เซติงดีซีจากวงจรเร็คติไฟร์มีค่ามากกว่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุจะทำให้ตัวเก็บประจุทำการเก็บประจุอีกครั้งจนแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าถึงค่า V_m หลังจากนั้นตัวเก็บประจุจะทำการคายประจุอีกครั้งที่เวลา t_0 แรงดันพัลส์เซติงดีซีจะมีค่าเป็นศูนย์และแรงดันตกคร่อม C_1 มีค่าเป็นศูนย์โวลต์เมื่อเวลาผ่านไป ($t_0 - t_1$) แรงดันพัลส์เซติงดีซีจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ C_1 จะทำการเก็บประจุทำให้แรงดันตกคร่อม C_1 มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับแรงดันพัลส์เซติงดีซี



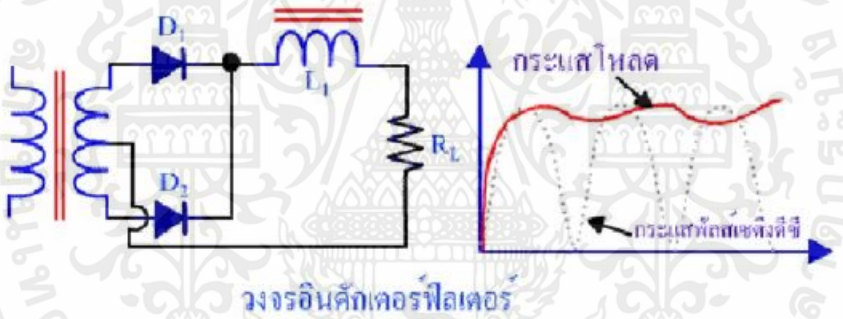
รูปที่ 2.7 กราฟแสดงพฤติกรรมของสัญญาณแรงดันเมื่อผ่านการกรองแรงดันกระเพื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเวลา t_1 แรงดันพัลส์เซติงดีซีมีค่าเท่ากับค่า V_m ดังนั้น C_1 จะเก็บประจุแรงดันตกคร่อม คือ $V_{C1} = V_m$ ด้วยหลังจากนั้นแรงดันพัลส์เซติงดีซีจะมีค่าลดลง C_1 จะทำการคายประจุให้กับโหลด ที่เวลา t_2 แรงดันพัลส์เซติงดีซีมีค่าเท่ากับศูนย์ C_1 ยังคงคายประจุให้กับโหลด เนื่องจากแรงดันตกคร่อม C1 มีค่ามากกว่าแรงดันพัลส์เซติงดีซี จนเมื่อเวลา t_3 แรงดันพัลส์เซติงดีซีมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่ามากกว่าแรงดันตกคร่อม C_1 ตัวเก็บประจุ C_1 จะเริ่มทำการเก็บประจุอีกครั้งซึ่งแรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อม C_1 จะคำนวณได้จากสมการ

$$V_{DC} = V_m - \frac{V_{ripple}}{2}$$

V_{DC} คือแรงดันเฉลี่ยดีซีที่ตกคร่อมโหลด, V_m คือแรงดันพีคสูงสุดที่ขดทุติยภูมิของหม้อแปลงซึ่งมีหน่วยเป็น V_p ส่วน $V_r(pp)$ เป็นค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่มีค่าสูงสุดเนื่องจากการเก็บประจุและเปลี่ยนแปลงต่างสุดเนื่องจากการคายประจุให้กับโหลดของ C_1 มีหน่วยเป็น V_{pp} โดยวงจรอินดักเตอร์ฟิลเตอร์หรือบางครั้งเรียกว่าโช้คฟิลเตอร์จะต่ออนุกรมระหว่างโหลดของวงจรเร็คติไฟร์กับขดลวดหรือโช้คขดลวด โดยโช้คจะมีคุณสมบัติในด้านการไหลของกระแสทำให้กระแสเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ



รูปที่ 2.8 วงจรอินดัคเตอร์ฟิลเตอร์

ในขณะที่มีกระแสไหลผ่านขดลวดและโหลดของวงจรจะทำให้ระยะเวลาในการไหลของกระแสหน่วงออกไปเนื่องจากค่าอินดัคทีฟรีแอกแตนซ์ของขดลวดซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดค่า EMF จะคอยต้านการเปลี่ยนแปลงของกระแส ในตอนแรกค่าอินดักแตนซ์จะต้านการไหลของกระแสให้ไหลผ่านไปอย่างช้าๆและในช่วงหลังจะพยายามเหนี่ยวนำกระแสให้ลดลงอย่างช้าๆ เมื่อมีแรงดันป้อนจากขดทุติยภูมิ ทำให้ไดโอดนำกระแสดังนั้นจะมีกระแสไหลผ่านไดโอดผ่านขดลวดทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่โหลด R_L ในขณะที่มีกระแสไหลผ่านขดลวดนั้นเนื่องจากกระแสมีค่าเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจึงทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กที่ขดลวดขยายตัวออกตัดกับขดลวดเกิดค่า EMF ขึ้น ค่า EMF จะคอยต้านการไหลของกระแสให้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆจนกระแสที่ไหลผ่านไดโอดมีค่าสูงสุดจะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กของขดลวดขยายถึงจุดอิ่มตัวและเมื่อกระแสที่ไหลผ่านไดโอดมีค่าลดลงจากค่าสูงสุดจะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กยุบตัวลงตัดกับขดลวดอีกครั้งทำให้เกิดค่า Back EMF ขึ้น โดยค่า Back EMF จะคอยหน่วงให้กระแสที่ไหลผ่านขดลวดมีค่าลดลงอย่างช้าๆ ซึ่งในการแสดงถึงคุณสมบัติของวงจรกรองลดการกระเพื่อมว่ามีคุณสมบัติดีเพียงใด สามารถดูได้จากค่าเปอร์เซ็นต์ของการกระเพื่อม (Percentage of Ripple : %R) นิยามโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

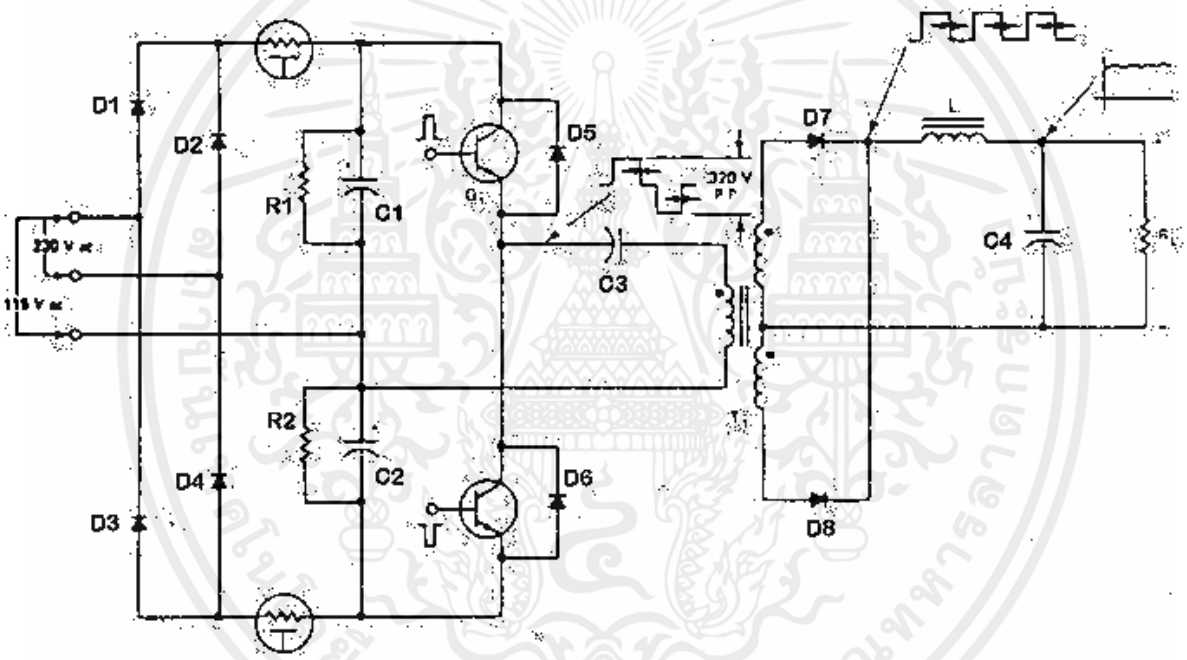
$$\%R = \frac{V_{ripple}}{2} \times 100$$

2.3 วงจร Half bridge converter

วงจร Half Bridge convert ประกอบด้วยเหตุผล 2 ประการที่นำ Half bridge converter มาใช้ ได้แก่

1. Converter ชนิดนี้สามารถใช้กับแรงดันไฟสลับด้านอินพุตได้สองระดับ คือ 110 โวลต์ และ 220 โวลต์ โดยไม่ต้องคำนึงถึงการใช้ทรานซิสเตอร์แรงดันสูง

2. เป็นการร่วมช่วงเวลา Volt-seconds ของการสวิตช์ของทรานซิสเตอร์แต่ละตัว โดยสามารถใช้หม้อแปลงที่ไม่มีช่องว่างอากาศได้



รูปที่ 2.9 วงจร Half bridge converter

หลักการทำงานของวงจร Half-Bridge converter จากรูป มีดังนี้ สังเกตที่ปลายข้างหนึ่งของหม้อแปลงจะต้องต่อระหว่างตัวเก็บประจุ C1 C2 ซึ่งตัวเก็บประจุทั้งสองทำหน้าที่เป็น Floating Voltage Potential มีค่าแรงดันเท่ากับ

$$V_{C1,C2} = \frac{V_{IN}}{2} = \frac{200\sqrt{2}}{2} = 155\ V_{DC}$$

โดยที่ไดโอด D1 ถึง D4 ทำหน้าที่เป็นวงจรเรียงกระแสเต็มรูปคลื่นแบบบริดจ์แปลงไฟสลับ 220 V เป็นไฟตรง 310 V (เมื่อใช้งานกับแรงดันไฟสลับอินพุต 220 V) และ D1 กับ C1 ,D3 กับ C2 ทำหน้าที่เป็นวงจรเรียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสครึ่งคลื่น แปลงไฟสลับ 110 V เป็นไฟตรง 155 V (เมื่อใช้งานกับแรงดันไฟสลับอินพุต 110 V) จะเห็นได้ว่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่า 155 Vdc ตลอดไม่ว่าแรงดันไฟสลับอินพุตจะเท่ากับ 220 Vac หรือ 110 Vac ก็ตาม จึงเป็นข้อดีที่วงจรสามารถทำงานได้ที่แรงดันไฟสลับอินพุตสองระดับ

เมื่อ Q1 ปิดวงจรปลายอีกด้านหนึ่งของหม้อแปลงจะต่ออยู่กับแรงดันบวกของชุดเรียงกระแส ทำให้ได้แรงดันพัลส์เท่ากับ 155 V จนกระทั่ง Q1 เปิดวงจรและ Q2 ปิดวงจร ขั้วของหม้อแปลงจะเปลี่ยนไปต่อกับแรงดันลบของชุดเรียงกระแสทำให้แรงดันพัลส์ลบ 155 V ผลจากการปิด-เปิดวงจรของทรานซิสเตอร์ Q1 และ Q2 ทำให้ได้รูปคลื่นไฟสลับรูปสี่เหลี่ยม มีแรงดันจากยอดถึงยอดเท่ากับ 310 V และถูกลดแรงดัน (Step down) เรียงกระแสและกรองแระแสออกมาเป็นแรงดันไฟตรงทางเอาต์พุต ในทางปฏิบัติใช้ทรานซิสเตอร์ทนแรงดันได้ 400 โวลต์ เนื่องจากแรงดันหม้อแปลงลดลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของแรงดันอินพุต และกระแสคอลเลคเตอร์เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ถ้าสมมติประสิทธิภาพของ converter เท่ากับ 70% และ d_{MAX} = 0.8 ดังนั้นกระแสคอลเลคเตอร์จะเท่ากับ

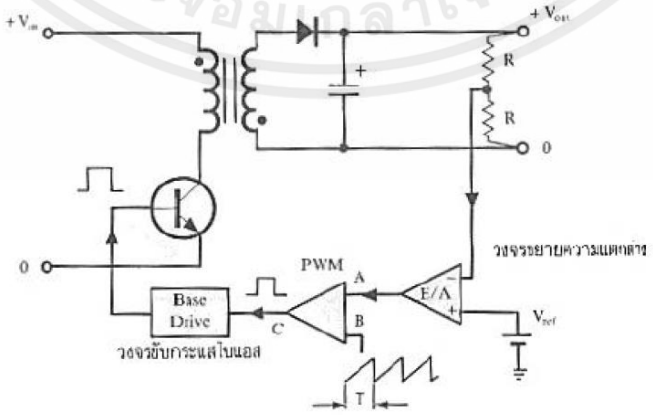
$$I_C \approx \frac{3P_{OUT}}{V_{IN}}$$

2.4 วงจรควบคุม

วงจรคอนเวอร์เตอร์ทุกแบบจะคงค่าแรงดันเอาต์พุตได้โดยการควบคุมช่วงเวลาการนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต ดังนั้นวงจรควบคุมจะใช้เทคนิคพัลส์วิดท์มอดูเลชั่น ซึ่งเป็นหลักการใช้พัลส์วิดท์มอดูเลชั่นเพื่อควบคุมช่วงเวลาในการนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟตในคอนเวอร์เตอร์ โดยสามารถทำได้ 2 ลักษณะ คือ ควบคุมในโหมดควบคุมจากแรงดันและโหมดควบคุมจากกระแส

2.4.1 **วงจรควบคุมในโหมดควบคุมจากแรงดัน**

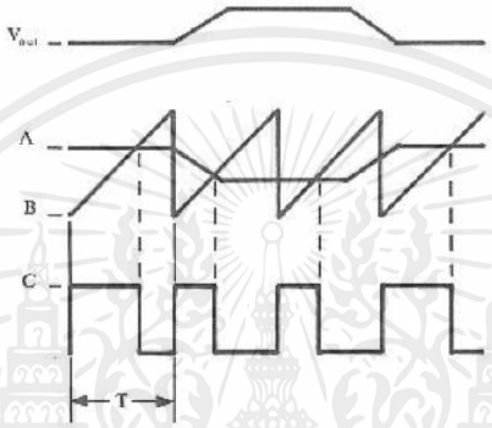
การทำงานของวงจรควบคุมในโหมดนี้ จะอาศัยการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันที่เอาต์พุตมาทำการควบคุมช่วงเวลาในการนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต เพื่อการคงค่าแรงดันเอาต์พุตเป็นหลัก โดยวงจรพื้นฐานของวงจรควบคุมในโหมดควบคุมจากแรงดันแสดงดังรูป



รูปที่ 2.10 แสดงวงจรพื้นฐานในโหมดควบคุมแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.10 วงจรควบคุมอาศัยการป้อนกลับของค่าแรงดันเอาต์พุตนำมาเปรียบเทียบกับ แรงดันอ้างอิงของวงจรเพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่เอาต์พุต ค่าความแตกต่างที่ได้จะ ถูกขยายโดยวงจรขยายวงจรความแตกต่าง (E/A) ก่อนที่จะส่งต่อไปยังวงจรพัลส์วิดท์มอดูเลชั่น โดยค่าแรงดันที่ได้จากวงจรขยายความแตกต่างจะถูกเปรียบเทียบกับแรงดันรูปฟันเลื่อย และเอาต์พุตที่ได้จากวงจรพัลส์วิดท์มอดูเลชั่นจะมีลักษณะเป็นพัลส์สี่เหลี่ยม ซึ่งมีคาบเวลาคงที่เท่ากับคาบเวลาของแรงดันรูปฟันเลื่อยและมีความกว้างของพัลส์แปรเปลี่ยนไปตามผลของการมอดูเลชั่น โดยค่าความกว้างของพัลส์นี้เองจะเป็นตัวกำหนดช่วงเวลาในการนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต



รูปที่ 2.11 แสดงรูปสัญญาณที่จุดต่างๆในวงจรควบคุม

เนื่องจากค่าแรงดันป้อนกลับจะถูกส่งมายังวงจรขยายความแตกต่างที่ขาอินเวอร์ติ้ง ผลแตกต่างของแรงดันเอาต์พุตและแรงดันอ้างอิงที่จุด A จึงมีลักษณะกลับเฟสอยู่ 180 องศา กล่าวคือ เมื่อแรงดันเอาต์พุตมีค่ามากขึ้นแรงดันที่จุด A จะมีค่าลดลง ความกว้างของพัลส์ที่เอาต์พุตของวงจรพัลส์วิดท์มอดูเลชั่นจึงมีค่าลดลงด้วย และทำให้ช่วงเวลานำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟตมีค่าลดลงเช่นกัน ถ้าแรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลง แรงดันที่จุด A ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น ความกว้างของพัลส์ที่ เอาต์พุตของวงจรพัลส์วิดท์มอดูเลชั่นจึงมีค่าเพิ่มขึ้นช่วงเวลาการนำกระแสก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลให้คอนเวอร์เตอร์สามารถคงค่าแรงดันเอาต์พุตไว้ได้

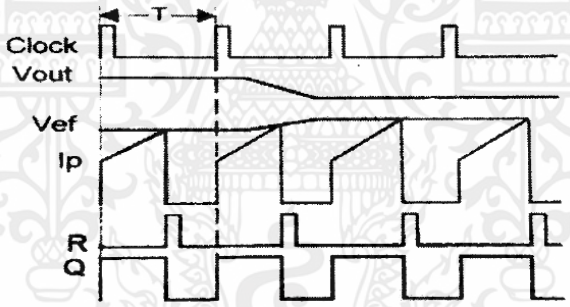
2.4.2 **วงจรควบคุมในโหมดควบคุมจากกระแส**

การคงค่าแรงดันเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ด้วยวงจรควบคุมในโหมดควบคุมจากกระแส มีข้อดีกว่าโหมดควบคุมจากแรงดันหลายประการ จึงเป็นวงจรควบคุมอีกแบบหนึ่งที่นิยมใช้กันมาก โดยการทำงานของวงจรนั้น เราจะแยกคิดการทำงานของวงจรควบคุมด้วยการตัดวงจรขยายความแตกต่าง E/A ออกไปก่อนและกำหนดขาอินเวอร์ติ้งของวงจรเปรียบเทียบให้ต่อเข้ากับแรงดันอ้างอิง V_{ref} วงจร Latch จะทำงานโดยขา 9 ของวงจร Latch จะมีสถานะเป็น High เมื่อมีการกระตุ้นที่ขา S และ Q จะมีสถานะเป็น Low เมื่อมีการกระตุ้นที่ขา R โดยเมื่อวงจรทำงาน วงจรกำเนิดสัญญาณ Clock ที่มีคาบเวลาคงที่ไปกระตุ้นที่ขา S ของวงจร Latch ขา 0 จึงมีสถานะเป็น High เพาเวอร์มอสเฟต Q_1 ก็จะนำกระแส เมื่อ Q_1 นำกระแสจะมีกระแสไหลผ่านขดปฐมภูมิและตัวต้านทาน R_S ที่ต่ออนุกรมไว้กับ Q_1 ทำให้เกิดแรงดัน V_S ตกคร่อมที่ตัวต้านทาน R_S ด้วย แรงดันตกคร่อม R_S ที่เกิดขึ้นจะถูกเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง V_{ref} โดยวงจรเปรียบเทียบ ดังนั้นเมื่อค่าของ V_S เพิ่มขึ้นจนมีค่ามากกว่าค่าของแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อ้างอิง V_{ref} เอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบจะมีสถานะเป็น High และไปกระตุ้นที่ขา R ของวงจร Latch ทำให้ค่า Q มีสถานะเป็น Low และเพาเวอร์มอสเฟต Q_1 หยุดนำกระแสจนกว่าที่ขา S ของวงจร Latch จะได้รับการ กระตุ้นจากสัญญาณ Clock อีกครั้ง ซึ่งจะเห็นได้ว่าความกว้างของเอาต์พุตพัลส์ที่ขา 2 ของวงจร Latch จะถูกควบคุมโดยค่าของ แรงดัน V_S ที่ตกคร่อมตัวต้านทาน R_S นั่นเอง ถ้าค่าแรงดันอินพุตของคอนเวอร์เตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น แรงดัน V_S จะเพิ่มขึ้นจนมีค่ามากกว่าแรงดันอ้างอิง V_{ref} ได้เร็วขึ้นด้วย ทำให้ความกว้างของ เอาต์พุตพัลส์ลดลงเพาเวอร์มอสเฟตจะมีเวลานำกระแสได้น้อยลง ในทางกลับกัน ถ้าแรงดันอินพุตของคอนเวอร์เตอร์มีค่าลดลง แรงดัน V_S จะเพิ่มขึ้นได้ช้า ความกว้างของเอาต์พุตพัลส์จึงเพิ่มขึ้น เพาเวอร์มอสเฟตจะมีช่วงเวลานำกระแสได้มากขึ้นด้วย จะเห็นได้ว่าเมื่อโหลดคงที่ คอนเวอร์เตอร์จะสามารถคงค่าแรงดันเอาต์พุตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุตได้โดยไม่ต้องอาศัยการป้อนกลับแรงดันที่เอาต์พุตเลย ทำให้คอนเวอร์เตอร์ตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุตได้อย่างรวดเร็ว

เมื่อต่อวงจรขยายความแตกต่าง E/A เพิ่มเข้ามา วงจรในลักษณะนี้เมื่อแรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลง เอาต์พุตของวงจรขยายความแตกต่าง E/A จะมีค่ามากขึ้น เพาเวอร์มอสเฟตจะใช้เวลานำกระแสมากขึ้นด้วย เพื่อให้ค่าแรงดัน V_S มากกว่าแรงดันที่เอาต์พุตของวงจรขยายความแตกต่าง E/A ในทางกลับกันเมื่อแรงดันเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น เอาต์พุตของวงจรขยายความแตกต่าง E/A จะมีค่าลดลงเพาเวอร์มอสเฟตจึงใช้เวลานำกระแสลดลงด้วยลักษณะรูปคลื่นและแรงดันขณะที่วงจรทำงานจะเป็นดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะการทำงานที่จุดต่างๆ ของวงจรควบคุมในโหมดควบคุมกระแส

จากลักษณะการทำงานดังกล่าว ทำให้วงจรควบคุมในโหมดควบคุมจากกระแสมีข้อดีกว่าวงจรควบคุมในโหมดควบคุมจากแรงดันดังนี้คือ

1. ตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุตได้รวดเร็วกว่า ทำให้ลดปัญหาการคงค่าแรงดันที่เอาต์พุตเมื่อเกิดทรานเซียนส์และการกระเพื่อมของแรงดันสูงที่แรงดันอินพุต เพราะไม่ต้องรอสัญญาณการป้อนกลับจากเอาต์พุต
2. สามารถป้องกันกระแสโหลดเกินได้ด้วยการจำกัดค่ากระแสสูงที่ขดปฐมภูมิในลักษณะพัลส์ต่อพัลส์อย่างรวดเร็ว
3. ให้ค่าไลน์เรกูเลชั่นที่ดีมาก
4. สามารถต่อขนานคอนเวอร์เตอร์หลายชุดเข้าด้วยกันได้ เพื่อให้จ่ายกระแสได้มากขึ้นและกระแสเฉื่อยที่คอนเวอร์เตอร์แต่ละชุดจะมีค่าเท่ากัน

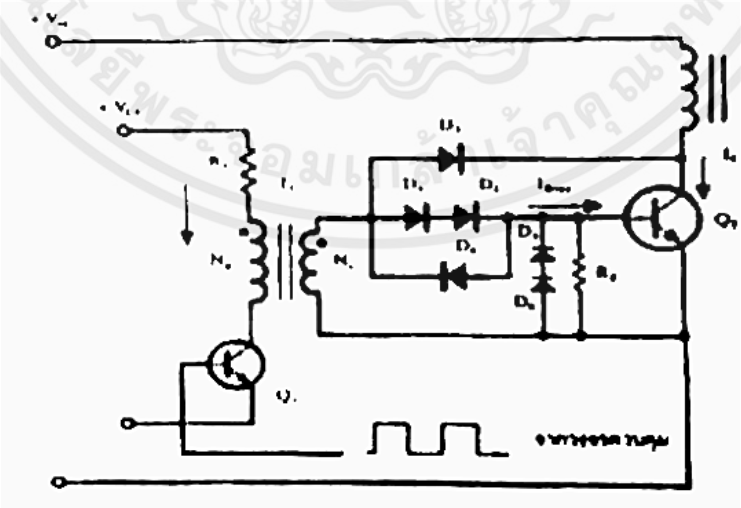
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 วงจรขับไบโพลาร์พาวเวอร์ทรานซิสเตอร์

ไบโพลาร์พาวเวอร์ทรานซิสเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ต้องกระตุ้นการทำงานโดยการใช้กระแส ไบอัสที่ขาเบส เพื่อให้นำกระแสและหยุดนำกระแสได้ และเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าการลดประจุสะสมที่เกิดขึ้นในเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ขณะนำกระแส จะขึ้นอยู่กับลักษณะของกระแสไบอัสที่ให้กับเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ดังนั้นการจัดวงจรขับกระแสไบอัสที่ถูกต้องจะช่วยลดกำลังงานสูญเสียให้กับเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ได้เช่นกัน โดยวงจรขับกระแสไบอัสนั้นทำได้ 2 ลักษณะ คือ วงจรขับกระแสไบอัสด้วยกระแสคงที่ (Fixed Base Drive) และวงจรขับกระแสไบอัสด้วยกระแสเบสเป็นสัดส่วนกับกระแสคอลเลคเตอร์ (Proportional Base Drive) สำหรับคอนเวอเตอร์ที่ใช้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์และมีกำลังต่ำกว่า 500 วัตต์ มักนิยมใช้วงจรขับด้วยกระแสคงที่โดยวงจรขับกระแสทำให้กระแสเบสมีค่าคงที่และมาก พอที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์นำกระแสถึงจุดอิ่มตัวแต่วิธีนี้จะเกิดประจุสะสมในทรานซิสเตอร์ขณะ นำกระแสค่อนข้างสูงและใช้เวลานานในการหยุดนำกระแส ในขณะที่วงจรขับกระแสไบอัสด้วยกระแสเป็นสัดส่วนนั้น ค่ากระแสที่เบสจะขึ้นอยู่กับค่ากระแสที่ไหลผ่านคอลเล็คเตอร์ ประจุสะสมจะเกิดขึ้นน้อยและการหยุดนำกระแสจะเป็นไปอย่างรวดเร็ว แต่วงจรค่อนข้างยุ่งยากมักใช้กับวงจรคอนเวอเตอร์ที่มีกำลังสูงเท่านั้น

- **วงจรขับกระแสไบอัสโดยใช้หม้อแปลงและเบเกอร์แคลมป์**

  เป็นวงจรขับกระแสไบอัสด้วยกระแสคงที่และจัดให้ไดโอดทำงานร่วมกับทรานซิสเตอร์เพื่อป้องกันการเกิดประจุสะสมเมื่อประจุสะสมเกิดขึ้นน้อยเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์จึง หยุดนำกระแสได้อย่างรวดเร็ว การใช้หม้อแปลงในการขับกระแส หม้อแปลงจะเป็นแหล่งจ่ายกระแสสูงให้กับวงจรได้และเนื่องจากเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ต้องการแรงดันตกคร่อมที่ขาเบสและอิมิตเตอร์ประมาณ 1 ถึง 1.8 โวลต์ ดังนั้นหม้อแปลงที่มีอัตราส่วนจำนวนรอบ 10.1 ถ้ามีแรงดันที่ขดปฐมภูมิค่า 10 ถึง 18 โวลต์ และกระแสเพียง 300 มิลลิแอมป์ หม้อแปลงจะให้กระแสได้ถึง 3 แอมป์ดังแสดงวงจรในรูปที่ 2.13

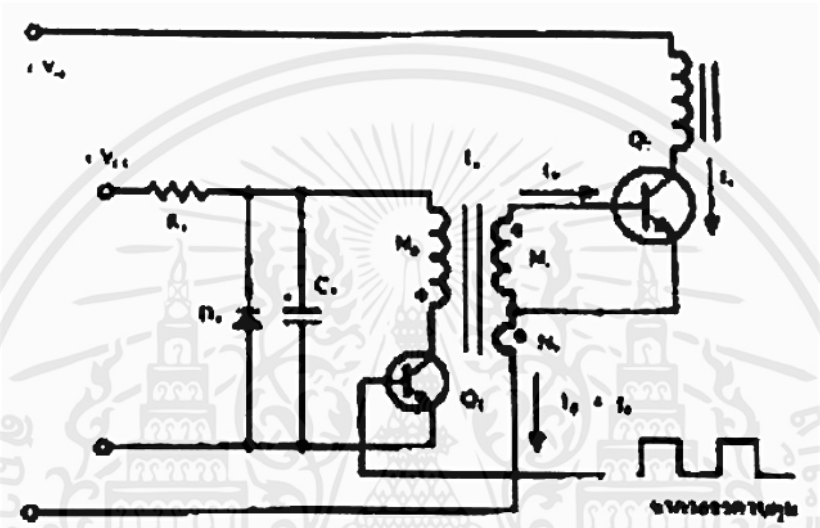


รูปที่ 2.13 แสดงวงจรขับกระแสไบอัสด้วยกระแสคงที่แบบเบเกอร์แคลมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **วงจรขับกระแสไบอัสที่นิยมใช้ในคอนเวอร์เตอร์ที่จ่ายกำลังงานสูงๆ**

วงจรขับกระแสแบบนี้จะลดช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแส ด้วยการให้กระแสไบอัสเป็น สัดส่วนกับกระแสที่ไหลผ่านคอลเล็กเตอร์เพื่อเป็นการลดประจุสะสมให้น้อยที่สุด ขณะที่มีแรงดัน ตกคร่อมตัวมันต่ำสุดที่สุดขณะนำกระแส จากนั้นจึงให้กระแสไบอัสกลับค่าสูงๆ เพื่อหยุดการนำกระแสอย่างรวดเร็ว ซึ่งต่างจากการใช้เบเกอร์แคลมป์ที่ป้องกันไม่ให้ประจุสะสมเกิดขึ้นภายในเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ได้ แต่มีค่าแรงดันตกคร่อมตัวมันสูงขณะนำกระแส ดังแสดงวงจรในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงวงจรขับกระแสไบอัสด้วยกระแสเป็นสัดส่วนกับกระแสคอลเล็กเตอร์

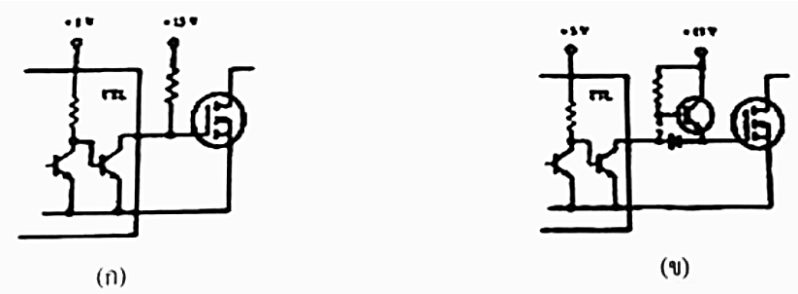
2.6 วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟต

การขับเพาเวอร์มอสเฟตให้นำกระแสนั้น แตกต่างจากการขับกระแสไบอัสในเพาเวอร์สำหรับเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์กระแสจะไหลผ่านคอลเล็คเตอร์และอิมิตเตอร์ได้ที่ทรานซิสเตอร์ต่อเมื่อมีกระแสไบอัสไหลผ่านที่เบสและอิมิตเตอร์ แต่เพาเวอร์มอสเฟตจะมีกระแสไหลผ่านเดรน และซอร์สได้ก็ต่อเมื่อแรงดันตกคร่อมที่ขาเกทและซอร์สมีค่าอย่างต่ำเท่ากับค่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage) แต่ใช้กระแสต่ำ การขับเพาเวอร์มอสเฟตให้นำกระแสจึงทำได้ง่ายและยุ่งยาก น้อยกว่าเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์มาก

- **วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วย** TTL

การขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วย ไอซี TTL โดยตรงนั้นสามารถทำได้แต่ไอซี TTL มีขีดจำกัด ในการจ่ายกระแสและรับกระแสที่เอาต์พุตซึ่งมีผลต่อความเร็วในการเปลี่ยนสถานะของเพาเวอร์มอสเฟต และทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียสูงได้ การต่อวงจรขับชนิดนี้จึงจำเป็นต้องเพิ่มตัวอุปกรณ์อื่นๆเพื่อช่วยในการเปลี่ยนสถานะของเพาเวอร์มอสเฟตเป็นไปอย่างรวดเร็ว

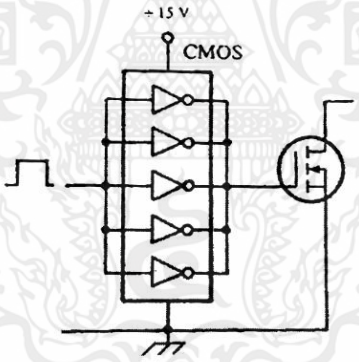
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แสดงการขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วยไอซี TTL แบบต่าง ๆ

รูปที่ 2.15(ก) แสดงวงจรขับด้วยไอซี TTL ที่มีเอาต์พุตเป็นแบบคอลเลคเตอร์เปิดการต่อพูลอัพรีซิสเตอร์เข้าช่วย เพื่อให้มีแรงดันสูงพอที่จะขับเพาเวอร์มอสเฟตให้ทำงานและการหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟตเป็นไปได้เร็วขึ้น แต่ความเร็วขณะเริ่มนำกระแสยังมีค่าจำกัดอยู่ เนื่องจากกระแสยังถูกจำกัดด้วยพูลอัพรีซิสเตอร์ รูปที่ 2.15(ข) ทรานซิสเตอร์จะช่วยในการจ่ายกระแสได้มากขึ้นทำให้ความเร็วในการนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟตดีขึ้น และลดกำลังสูญเสียในตัวไอซี TTL ด้วย

- **วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วยไอซี** CMOS

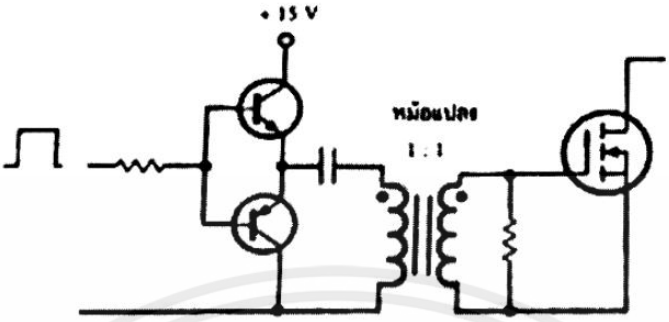


รูปที่ 2.16 แสดงการขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วยไอซี CMOS

พาเวอร์มอสเฟตสามารถต่อโดยตรงเข้ากับไอซี CMOS ได้ ในส่วนเอาต์พุตของไอซี CMOS จะเป็นมอสเฟตต่อกันในลักษณะคอมพลีเมนทารี่ ซึ่งสามารถทำงานได้ที่แรงดันไฟเลี้ยงตั้งแต่ 3 ถึง 18 โวลต์ โดยทั่วไปจะใช้ 12 ถึง 15 โวลต์ เพื่อให้เหมาะสมในการขับเพาเวอร์มอสเฟต สำหรับการขับเพาเวอร์มอสเฟตที่ต้องนำกระแสสูงๆ การต่อ CMOS ในลักษณะขนานกันและทำให้ความเร็วในการเปลี่ยนสถานะของเพาเวอร์มอสเฟต จะสามารถเพิ่มกระแสที่ขาเกทเป็นไปได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วยหม้อแปลง



รูปที่ 2.17 แสดงวงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วยหม้อแปลง

ในกรณีของคอนเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์และฟูลบริดจ์ วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตตัวบน และตัวล่างจะต้องมีการแยกกราวด์ออกจากกัน จึงจำเป็นต้องใช้หม้อแปลงหรือในกรณีที่ต้องการ ขับเพาเวอร์มอสเฟตมากกว่า 1 ตัว พร้อมกันก็อาจต้องใช้หม้อแปลงช่วย

การต่อหม้อแปลงพัลซ์เข้ากับขาเกทและวงจรควบคุมโดยตรงอาจเกิดปัญหาการเลื่อนระดับ ของแรงดันเอาท์พุทที่หม้อแปลง และอาจมีปัญหาในการทำงานของเพาเวอร์มอสเฟตได้ การต่อ วงจรขับเพาเวอร์มอสเฟตด้วยหม้อแปลงจึงควรทำในลักษณะดังรูปที่ 2.17

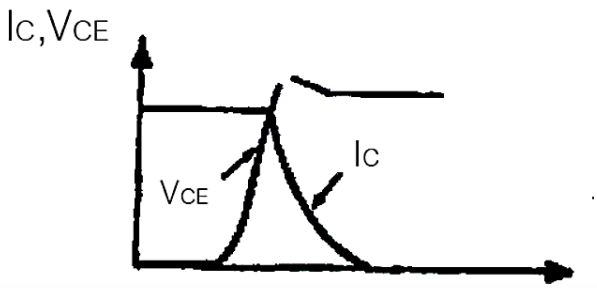
2.7 วงจรสนับเบอร์

วงจรสนับเบอร์เป็นส่วนที่เพิ่มเติมเข้ามาในวงจรคอนเวอเตอร์เพื่อลดการเกิดกำลังสูญเสียและป้องกันการเสียหายที่เกิดขึ้นกับเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในวงจรขณะที่ทำงานปกติ โดยวงจรสนับเบอร์นี้อาจแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ วงจรสนับเบอร์ช่วงหยุดนำกระแส และสนับเบอร์ป้องกันแรงดันเกิน วงจรสนับเบอร์ทั่วไปจะประกอบด้วยตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ ไดโอด เรียกว่าวงจร RCD สนับเบอร์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- **วงจรสนับเบอร์ช่วงหยุดนำกระแส**

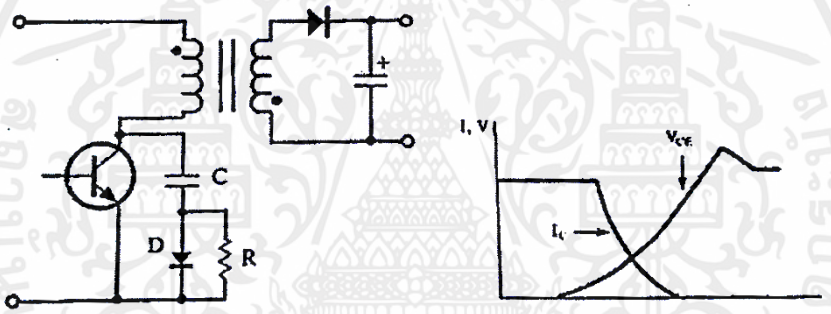
ในการเปลี่ยนสถานะของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์จะทำให้เกิดการสูญเสียกำลังงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งขณะเริ่มหยุดนำกระแส ก่อนที่เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์จะหยุดนำกระแสนั้น กระแสจะลดลงอย่างช้าๆในขณะที่แรงดันเพิ่มขึ้นสู่ค่าแรงดันอินพุตอย่างรวดเร็วดังรูปที่ 2.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์

เพื่อลดการสูญเสียในช่วงนี้สามารถทำได้โดยต่อวงจรสนับเบอร์เข้ากับเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ เพื่อควบคุมแรงดันตกคร่อมที่คอลเลคเตอร์และอิมิตเตอร์ให้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆจนกระทั่ง กระแสที่ไหลผ่านตัวเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ลดลงได้ทันกัน ซึ่งจะทำให้กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำ โดยลักษณะการต่อวงจรสนับเบอร์สามารถทำได้ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงวงจรสนับเบอร์ช่วงหยุดนำกระแส

การทำงานของวงจรสนับเบอร์ช่วงเริ่มหยุดนำกระแสจะเป็นไปได้ดังนี้ คือ เมื่อเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q_1 เริ่มหยุดนำกระแส แรงดันที่ขาคอลเลคเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้กระแสบางส่วนไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_1 และไดโอด D_1 ของวงจรสนับเบอร์ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม C_1 ด้วย แรงดันที่ตกคร่อม C_1 จะทำให้แรงดันที่คอลเลคเตอร์ของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ดังนั้นถ้าให้ C_1 มีค่ามากพอการเพิ่มขึ้นของแรงดันที่คอลเลคเตอร์ก็จะถูกหน่วงออกไปเพื่อให้กระแสที่ไหลผ่านเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ลดลงจนมีค่าน้อยๆได้ทันกัน และจะลดการเกิดกำลัง สูญเสียในตัวเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ได้ ซึ่งขณะที่เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์เริ่มนำกระแสอีกครั้ง C_1 จะคายประจุผ่านตัวต้านทาน R_1 ทิ้ง ไป แรงดันตกคร่อม C_1 ก็จะลดลงต่ำได้อีกครั้งและสามารถทำงานได้ในช่วงต่อไป ค่าของ C_1 และ R_1 ที่เหมาะสมหาได้จาก

$$C_1 = \frac{I_p \cdot t_{on} \cdot \pi}{2V_{in}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_1 = \frac{t_{on} \cdot (min)}{6C_1}$$

เมื่อ I_p คือ ค่ากระแสสูงสุดขณะเริ่มหยุดนำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์

V_{in} คือ ค่าแรงดันอินพุตของวงจรคอนเวอเตอร์

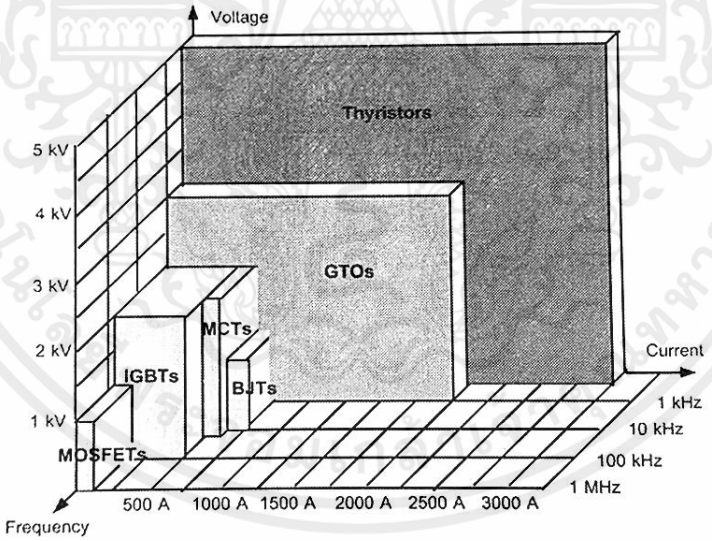
t_{on} คือ ช่วงเวลานำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์

t_{off} คือ ช่วงเวลาหยุดนำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์

การคายประจุของ C ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียในตัว R สูง ดังนั้นตัวต้านทาน R_1 จะต้องทนกำลังได้สูง

2.8 อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์

เนื่องจากวงจรคอนเวอเตอร์มีการทำงานในช่วงความถี่ตั้งแต่ 20 kHz ขึ้นไป และมีการสูญเสียกำลังงานในขณะนำกระแส และในขณะที่เปลี่ยนสภาวะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้อง ทำงานอยู่ในย่านแรงดันสูง ยิ่งทำให้เกิดการสูญเสียมากขึ้น เพราะฉะนั้นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ใช้อยู่ในวงจรคอนเวอเตอร์ควรจะต้องมีค่าแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสต่ำและมีช่วงเวลาคืนตัวสั้นและสามารถทนกำลังได้สูง



รูปที่ 2.20 การเปรียบเทียบแรงดัน กระแสไฟฟ้า และความถี่ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์

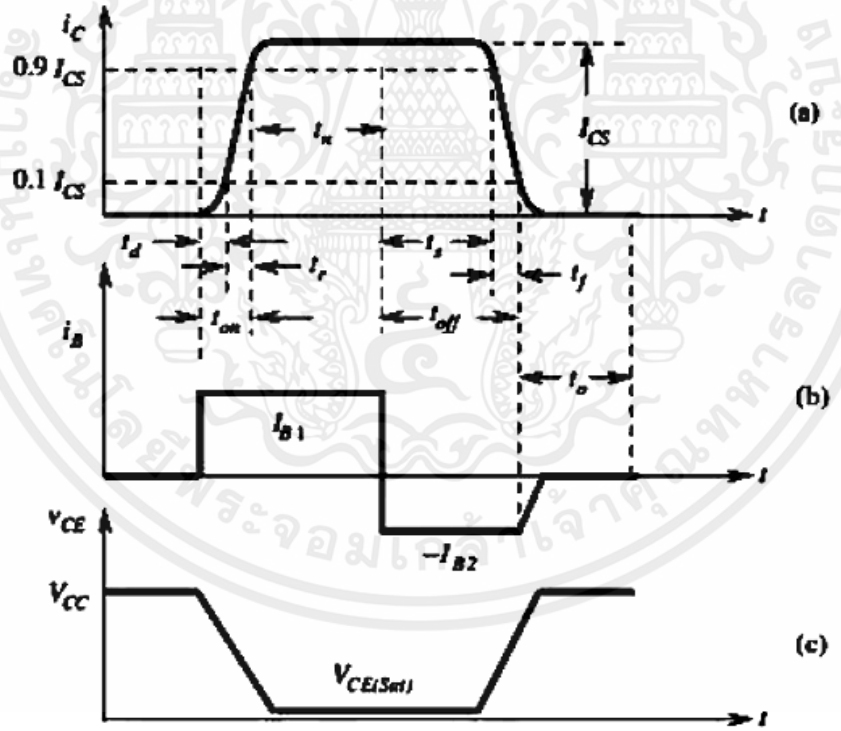
2.8.1 **เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์**

เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในวงจรคอนเวอเตอร์จะมีการทำงานในลักษณะสวิตช์และมีโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งผลที่ได้จะแตกต่างจากโหลดที่มีลักษณะเป็นตัวต้านทาน เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ต้องใช้เวลาช่วงหนึ่งในการเปลี่ยนสถานะของตัวมันเมื่อจะเริ่มนำกระแสและเมื่อจะหยุดนำกระแส รวมทั้งเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ยังมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสอีกด้วย การเปลี่ยนสถานะและแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแส ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในรูปของความร้อน (Power Dissipation) ขึ้นที่ตัวเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ แต่ก็ยังมีข้อดีอยู่คือ มีอัตราทนแรงดันตกคร่อมสูงและราคาถูกกว่า ทั้งยังมีการพัฒนาให้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ทำงานเร็วขึ้นเพื่อให้สามารถใช้งานในย่านความถี่สูงๆและลดกำลังงานสูญเสีย โดยกำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นมี 2 ลักษณะคือ ขณะเปลี่ยนสถานะ และในขณะที่นำกระแสอยู่ในช่วงอิ่มตัว ซึ่งการสูญเสียในการเปลี่ยนสถานะจะเกิดกำลังงานสูญเสียมากที่สุดขณะที่เริ่มหยุดนำกระแสเป็นส่วนใหญ่

เมื่อเริ่มให้กระแส ไบอัสที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ กระแสคอลเลคเตอร์ของเพาเวอร์ ทรานซิสเตอร์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่แรงดันตกคร่อมคอลเลคเตอร์และอิมิตเตอร์ (V_{CC}) จะยังมีค่าเท่ากับ V_{CC} และจะใช้เวลาช่วงหนึ่งคือ t_{on} เพื่อลดค่าแรงดันลงมาเป็น $V_{CC(sat)}$ ดังรูปที่ 2.21 โดยกำลังสูญเสียจะเกิดขึ้นในช่วงเวลา t_{on} นี้ เนื่องจากเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์มีแรงดันตกคร่อมตัวมันสูงขณะมีกระแสไหล แต่อย่างไรก็ตาม ช่วงเวลา t_{on} นี้ค่อนข้างสั้นและกระแสเริ่มต้นที่ไหลผ่านมักมีค่าต่ำ กำลังงานสูญเสียขณะเริ่มนำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในช่วงนี้จึงมีค่าต่ำ เมื่อหยุดให้กระแสไบอัสและป้อนกระแสไบอัสค่าลบให้กับเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์เพื่อหยุดการนำกระแส เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์จะยังคงนำกระแสต่อไปอีกเป็นเวลา t ซึ่งเป็นผลจากการเกิดประจุสะสมขึ้นในเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ขณะนำกระแส ช่วงเวลา t นี้เรียกว่าช่วงเวลาสะสม และขณะช่วงเวลา t นี้ แรงดันตกคร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์จะเริ่มเพิ่มขึ้นและเกิดกำลังงานสูญเสียมากกว่า เมื่อมันนำกระแสขณะมีกระแสไบอัสอยู่



รูปที่ 2.21 การตอบสนองต่อสัญญาณสวิตช์ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง

จากนั้นแรงดันที่ขาคอลเล็กเตอร์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ยังคงนำกระแสอยู่ในช่วงเวลา t_r (Voltage Rise Time) เมื่อประจุสะสมในเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์เริ่มลดลง กระแสที่คอลเลคเตอร์จะเริ่มลดลงและใช้เวลาเท่ากับ t_f (Current Fall Time) เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์จึงหยุดนำกระแส จะเห็นได้ว่ากำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูญเสียที่เกิดขึ้นในเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ใน ช่วงเวลา t_r และ t_f จะมีค่าสูงและเป็นช่วงเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์เกิดกำลังงานสูญเสียมากที่สุดขณะ ทำงาน ช่วงเวลา $t_r + t_f$ จะเรียกว่า ช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแส (Turn Off Time) กำลังงานสูญเสียใน ขณะที่เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์เริ่มหยุดนำกระแสนั้นอาจประมาณได้จาก

$$P_{d(sw)} = \frac{0.5\ V_{cc}\ I_{pk}\ t_c}{T}$$

เมื่อ $P_{d(sw)}$ คือ กำลังงานสูญเสียขณะเริ่มหยุดนำกระแส

V_{cc} คือ แรงดันตกคร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์เมื่อหยุดนำกระแส

I_{pk} คือ ค่ากระแสสูงสุดเมื่อเริ่มหยุดนำกระแส

t_c คือ ช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแส

T คือ คาบเวลาการทำงานของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์

การทำให้กำลังสูญเสียขณะเริ่มหยุดนำกระแส มีค่าน้อยที่สุดจะทำให้การใช้งานเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์มีประสิทธิภาพสูงสุด และลดความร้อนที่เกิดกับเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ขณะทำงาน

2.8.2 **เพาเวอร์มอสเฟต**

เพาเวอร์มอสเฟตสามารถทำงานได้ดีที่ความถี่สูงตั้งแต่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ไปจนถึงประมาณ 400 กิโลเฮิรตซ์ เนื่องจากมันใช้เวลาในการเปลี่ยนสถานะค่อนข้างสั้น ซึ่งจะเป็นผลดีในการลดขนาดของคอนเวอเตอร์ ในส่วนของวงจรขับของเพาเวอร์มอสเฟตนั้นสามารถทำได้ง่าย โดยอาจขับเพาเวอร์มอสเฟตให้ทำงานได้จากไอซีควบคุมแบบพัลส์วิดมอดูเลชั่น โดยโครงสร้างของเพาเวอร์มอสเฟตที่จะใช้ในวงจรคอนเวอร์เตอร์มีทั้งแบบ N-ch และแบบ P-ch ทำงานในลักษณะพุชพูล หรือทำงานเพียงตัวเดียว ซึ่งโดยส่วนมากจะใช้ N-ch เพราะสามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงกว่าแบบ P-ch

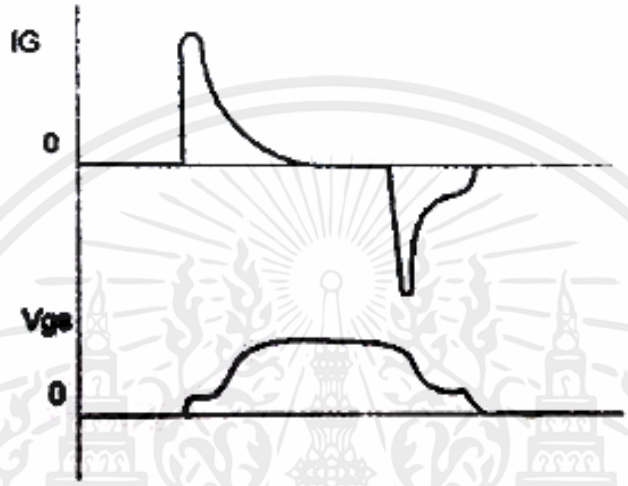
- **กำลังงานสูญเสียในรูปความร้อนของเพาเวอร์มอสเฟต**

กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นกับเพาเวอร์มอสเฟตขณะทำงาน จะเป็นไปได้ทั้งในขณะที่เปลี่ยน สถานะและกำลังสูญเสียขณะนำกระแสแต่เพาเวอร์มอสเฟตจะมีช่วงเวลาเริ่มนำกระแส และช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแสที่สั้นกว่าเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์มาก เพราะเพาเวอร์มอสเฟตจะไม่มี ประจุสะสมเกิดขึ้น แต่เพาเวอร์มอสเฟตจะมีค่าความต้านทานขณะนำกระแสสูงมาก จึงมีการสูญเสียสูงกว่าเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์มาก
ถึงแม้ว่าช่วงเวลาเริ่มนำกระแสและเริ่มหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟตจะค่อนข้างสั้น แต่โดยทั่วไปเพาเวอร์มอสเฟตมักถูกใช้งานที่ย่านความถี่สูง การใช้งานที่ความถี่กว่า 50 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งการคิดค่ากำลังงานสูญเสียขณะทำงานจำเป็นต้องนำค่ากำลังงานสูญเสียขณะเปลี่ยนสถานะมาคิดด้วย และเนื่องจากช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแสกับช่วงเวลาเริ่มนำกระแส ของเพาเวอร์มอสเฟตมีค่า ใกล้เคียงกัน จึงต้องนำมาคิดทั้งสองช่วงเวลาด้วย ดังนั้นกำลังงานสูญเสียของเพาเวอร์มอสเฟตขณะทำงานจะมีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_D = P_{SW(ON)} + P_{SW(OFF)} + P_C$$

$$P_{SW(OFF)} = \frac{I_{pk(on)} t_r \, V_{in}}{2T}$$



รูปที่ 2.22 แสดงลักษณะแรงดันและกระแสที่ขาเกทขณะเพาเวอร์มอสเฟตถูกไบอัสให้นำกระแส

- **ข้อพิจารณาในการเลือกใช้งานเพาเวอร์มอสเฟต**

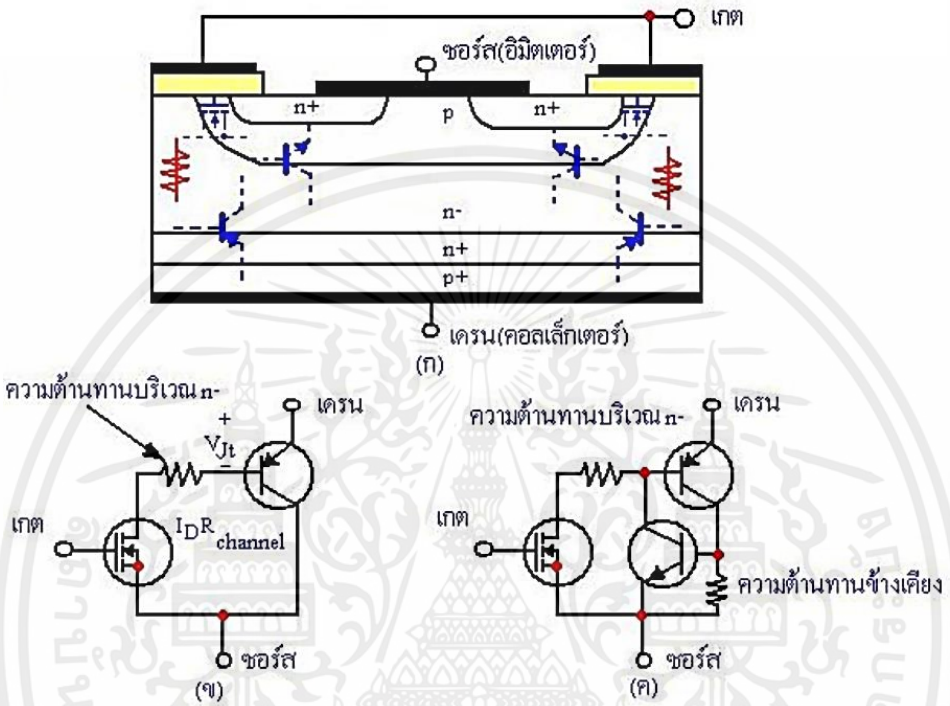
สำหรับเพาเวอร์มอสเฟต การเกิดเซคคันดารีเบรคดาวน์ เช่นในไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์จะไม่เกิดขึ้น เพราะค่าความต้านทานระหว่างเดรนและซอร์สขณะนำกระแสจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้กระแสที่ไหลผ่านมีค่าน้อยลง เพาเวอร์มอสเฟตจึงมีพิกัดความปลอดภัยในกราฟ SOA กว้างกว่าเมื่อเทียบกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์และเนื่องจาก เพาเวอร์มอสเฟตไม่เกิดเซคคันดารีเบรกดาวน์ อัตราทนกำลังสูญเสียสูงสุดของมันจะถูกจำกัดด้วยค่าความร้อนที่เกิดขึ้นที่รอยต่อภายในตัวมันเท่านั้น

2.8.3 **ไอจีบีที**

วงจรสมมูลของ IGBT แสดงไว้ในรูปที่ 2.22 ซึ่งในรูปที่ 2.23(ก) นั้นจะเห็นว่าในบริเวณบอดี้ p ชั้นบริเวณ n- และชั้นอินเจ็คติ้ง p+ จะคล้ายกับทรานซิสเตอร์ชนิดพีเอ็นพี โดยแทนได้ด้วย ขาคอลเลคเตอร์ เบส และอิมิตเตอร์ ตามลำดับ และบริเวณภายใต้เกตก็จะแทนได้ด้วยมอสเฟตซึ่งจะมีความต้านทานบริเวณ n- เชื่อมขาเบสของทรานซิสเตอร์พีเอ็นพี่เข้ากับขาเดรนของมอสเฟต ซึ่ง เมื่อเขียนวงจรสมมูลออกมาจะได้วงจรดังรูปที่ 2.23(ข) จากรูปที่ 2.23 (ข) จะเห็นว่าเป็น “วงจรดาร์ลิงตัน” โดยมีมอสเฟตเป็นตัวขับทรานซิสเตอร์พีเอ็นพี แต่มีจุดพิเศษที่แตกต่างจากวงจรทั่วไป คือกระแสเดรนส่วนใหญ่จะไหลจากอิมิตเตอร์มายังเบส ผ่านความต้านทานบริเวณลอยเลื่อนและผ่านขาเดรนมายังคอลเลคเตอร์และขาซอร์สสำหรับวงจรสมมูลในรูปที่ 2.23(ค) จะแสดงให้เห็นว่าภายใน IGBT มีไทริสเตอร์แฝงอยู่ด้วย โดยดูได้จากการที่ทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็นและพีเอ็นพี่ต่อเข้าด้วยกันในลักษณะที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การป้อนกลับ ทำให้เห็นได้ชัด ถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดการแลตช์ของ IGBT โดยถ้ากระแสส่วนน้อยที่ไหลผ่านจากอิมิตเตอร์มายังคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์พีเอ็นพี ผ่านความต้านทานข้างเคียงแล้วทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมความต้านทานสูงกว่า 0.7 โวลต์ ทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็นจะนำกระแส ส่งผลให้เกิดการแลตช์ขึ้นใน IGBT สำหรับแรงดันตกคร่อมขาเดรนและซอร์ส ของ IGBT ขณะนำกระแส ($V_{DS(on)}$)

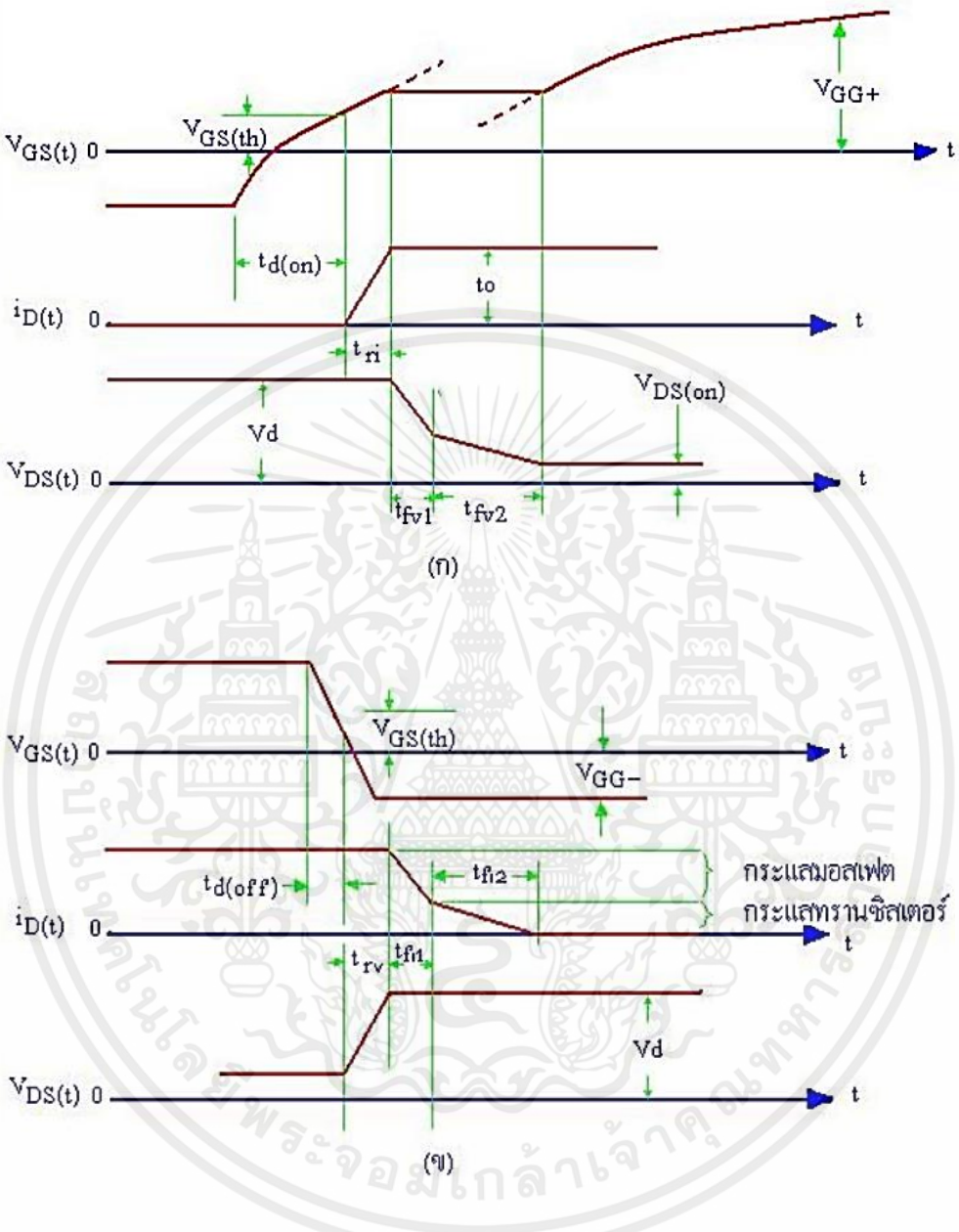


(ก)แสดงโครงสร้างที่มีทรานซิสเตอร์และมอสเฟตแฝงอยู่ภายใน (ข)วงจรสมมูลการทำงานสภาพปกติของ IGBT
(ค)วงจรสมมูลที่แสดงส่วนของไทริสเตอร์ที่แฝงอยู่ใน IGBT

รูปที่ 2.23 โครงสร้างของ IGBT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **ลักษณะการสวิตช์**



(ก)ลักษณะของกระแสและแรงดันขณะนำกระแส (ข)ลักษณะของกระแสและแรงดันขณะหยุดนำกระแส

รูปที่ 2.24 กราฟแสดงลักษณะของกระแสและแรงดันขณะนำกระแสและหยุดนำกระแส

ลักษณะของสัญญาณกระแสและแรงดันในช่วงเวลาที่เกิดการนำกระแสและหยุดนำกระแส แสดงไว้ในรูปที่ 2.23 โดยช่วงเวลาในการนำกระแสของ IGBT แสดงไว้ในรูปที่ 2.24(ก) ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับการนำกระแสของมอสเฟต คือจะมีเวลาก่อนการนำกระแส ($T_{d(on)}$ นับตั้งแต่เวลา ที่แรงดันระหว่างเกตกับซอร์สอยู่ในช่วง V_{GG} จนถึง $V_{GS(th)}$) ความจริงแล้วการป้อนแรงดันนี้จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดจากค่า V_{GG}- เป็น V_{GG}+ แต่กลับมีลักษณะเป็นเอ็กซ์โปเนนเชียล สาเหตุที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากผลการชาร์จประจุของตัวเก็บประจุระหว่างเกตกับซอร์

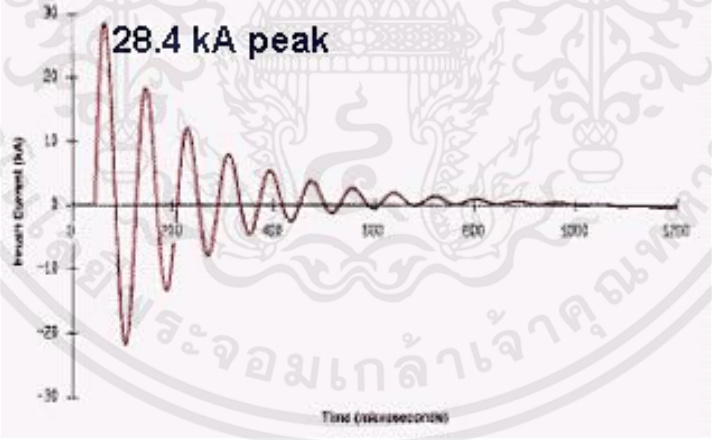
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สและเกตกับเดรนภายใน IGBT แรงดันที่ขาเดรนจะยังคงอยู่ในช่วงเวลาขาขึ้น (T_{ri}) หรือในช่วงเวลาที่กระแส เดรนยังไม่ถึงค่ากระแสทำงาน (I_O) หลังจากนั้นกระแสเดรนก็จะคงที่ แต่แรงดันจะตกลงสู่ค่า ($V_{DS(on)}$) โดยแบ่งช่วงเวลาลงเป็นสองช่วง คือช่วง T_{fv1} เป็นช่วงที่ทำงานอยู่ในย่านความต้านทานสูง ส่วน T_{fv2} ช่วงที่ทำงานอยู่ในย่านความต้านทานต่ำ

ในรูปที่ 2.24(ข) จะเป็นรูปแสดงลักษณะของกระแสและแรงดันในช่วงเวลาที่ IGBT หยุดนำกระแส จะเห็นว่ากระแสเดรนจะยังคงที่อยู่ตลอดช่วงเวลาที่แรงดันขาเดรนเพิ่มขึ้น และมีช่วงเวลาลงของกระแสเดรนที่แตกต่างชัดเจนสองช่วง โดยช่วงแรก T_{fi1} จะเป็นช่วงหยุดนำกระแสของมอสเฟตภายใน IGBT และช่วง T_{fi2} จะเป็นช่วงหยุดนำกระแสของทรานซิสเตอร์พี่เอ็นพี ซึ่งจะช้ากว่ามอสเฟต ทำให้ช่วงเวลานี้นานกว่าช่วงแรก และมีการสูญเสียกำลังงานมากในช่วงนี้

2.9 กระแสกระชาก (Inrush Current)

กระแสไฟกระชากอินพุต , หรือ ไฟกระชากขณะ เปิดสวิตช์ คือ กระแส ไฟ เข้าสูงสุดทันทีที่ถูกดึงโดยอุปกรณ์ไฟฟ้าเมื่อเปิดเครื่องครั้งแรก มอเตอร์และหม้อแปลง ไฟฟ้า กระแสสลับอาจดึงกระแสเต็มโหลดปกติหลายเท่าเมื่อเปิดใช้งานครั้งแรก สำหรับรูปคลื่นอินพุตสองสามรอบ ตัวแปลงพลังงานมักจะมีกระแสไหลเข้าสูงกว่ากระแสคงที่ เนื่องจากกระแสชาร์จของความจุ อินพุต การเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน เช่นฟิวส์และเซอร์กิตเบรกเกอร์มีความซับซ้อนมากขึ้นเมื่อต้องทนต่อกระแสที่ไหลเข้าสูง การป้องกันกระแสเกินต้องตอบสนองอย่างรวดเร็วต่อโอเวอร์โหลดหรือไฟฟ้าลัดวงจรแต่ต้องไม่รบกวนวงจรเมื่อกระแสไหลเข้า (ปกติไม่เป็นอันตราย)



รูปที่ 2.25 ตัวอย่างของการไหลของกระแสกระชากขณะต่อโหลดตัวเก็บประจุ

- **กระแสกระชากตัวเก็บประจุ**

  ตัวเก็บประจุที่คายประจุหรือมีประจุบางส่วนจะปรากฏเป็นการลัดวงจรไปยังแหล่งกำเนิดเมื่อแรงดันไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดสูงกว่าศักยภาพของตัวเก็บประจุ ตัวเก็บประจุที่คายประจุจนเต็มจะใช้เวลาประมาณ 5 รอบเวลา $\underline{RC}$ ในการชาร์จจนเต็ม ในระหว่างส่วนการชาร์จของวงจร กระแสชั่วขณะสามารถเกินกระแสโหลดได้หลายเท่า กระแสชั่วขณะจะปฏิเสธกระแสโหลดเมื่อตัวเก็บประจุมีประจุเต็ม ในกรณี

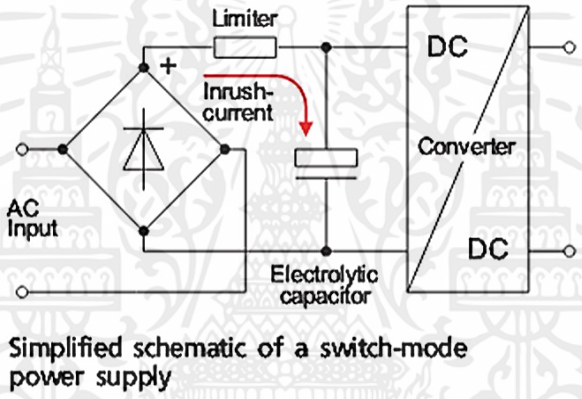
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของวงจรเปิด ตัวเก็บประจุจะถูกชาร์จที่แรงดันไฟ AC สูงสุด (เราไม่สามารถชาร์จตัวเก็บประจุด้วยสายไฟ AC ได้ ซึ่งหมายถึงเอาต์พุตแรงดันไฟสลับทิศทางเดียวจากวงจรเรียงกระแส)

ในกรณีของการชาร์จตัวเก็บประจุจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชิงเส้น เช่นเดียวกับที่ชาร์จจากแบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุจะยังคงดูเหมือนไฟฟ้าลัดวงจร มันจะดึงกระแสจากแหล่งที่จำกัดโดยความต้านทานภายในของแหล่งจ่ายและ ESR ของตัวเก็บประจุเท่านั้น ในกรณีนี้ กระแสไฟชาร์จจะต่อเนื่องและลดลงแบบทวีคูณตามกระแสโหลด สำหรับวงจรเปิด ตัวเก็บประจุจะถูกชาร์จด้วยแรงดันไฟตรง

- **การป้องกันกระแสกระชาก**

สามารถใช้ตัวต้านทานแบบอนุกรมกับสายเพื่อจำกัดตัวเก็บประจุกระแสชาจ อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้ไม่ได้ผลมากนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุปกรณ์กำลังสูง เนื่องจากตัวต้านทานจะมีแรงดันตกคร่อมและสูญเสียเป็นความร้อน



รูปที่ 2.26 การป้องกันกระแสกระชาก

กระแสไหลกระชากยังสามารถลดลงได้ด้วยตัวจำกัดกระแสไหลเข้าเทอร์มิสเตอร์ เทอร์มิสเตอร์ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิติดลบ (NTC) มักใช้ในสวิตช์ชิ่งพาวเวอร์ซัพพลาย มอเตอร์ไดรฟ์ และอุปกรณ์เครื่องเสียง เพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดจากกระแสกระชาก เทอร์มิสเตอร์คือตัวต้านทานที่ไวต่อความร้อน ความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ NTC จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

รูปที่ 2.27 เทอร์มิสเตอร์ (NTC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

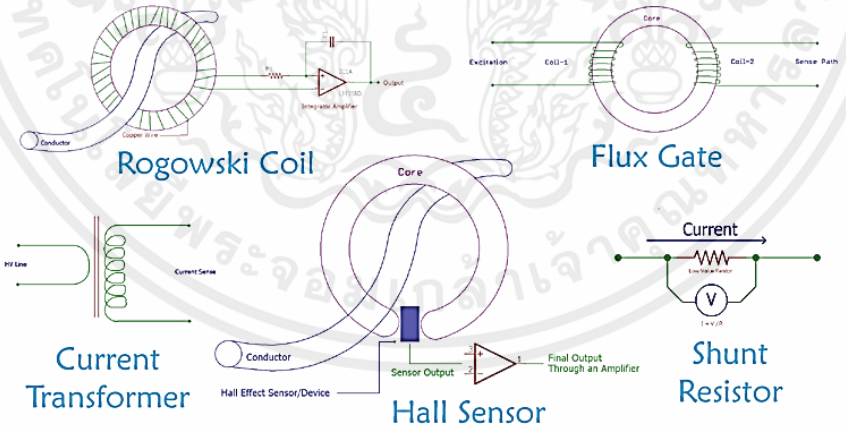
เมื่อกระแสไหลผ่านตัว NTC จะทำให้เกิดความร้อนขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานของ NTC มีค่าค่อยๆลดลง และการไหลของกระแสที่ค่อนข้างเล็กจะชาร์จตัวเก็บประจุอินพุต หลังจากชาร์จตัวเก็บประจุในแหล่งจ่ายไฟแล้ว ค่าความต้านทานจะเริ่มคงที่ที่ค่าหนึ่งทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการดึงกระแสของโหลด ข้อเสียคือทันทีที่ปิดเครื่อง ตัวต้านทาน NTC ยังร้อนอยู่และมีความต้านทานต่ำ ไม่สามารถจำกัดกระแสไหลเข้าได้เว้นแต่จะเย็นลงนานกว่า 1 นาทีเพื่อให้ได้ความต้านทานที่สูงขึ้น ข้อเสียอีกประการหนึ่งคือเทอร์มิสเตอร์ NTC ไม่ป้องกันการลัดวงจรไม่เหมาะกับงานกินกระแสสูงๆ

อีกวิธีหนึ่งในการหลีกเลี่ยงกระแสไหลเข้าของหม้อแปลงคือ "รีเลย์สวิตช์ชิ่งของหม้อแปลง" ไม่จำเป็นต้องใช้เวลาในการเย็นลง นอกจากนี้ยังสามารถจัดการกับแรงดันไฟตกครึ่งคลื่นของสายไฟและป้องกันการลัดวงจร เทคนิคนี้มีความสำคัญสำหรับการทดสอบ IEC 61000-4-11

อีกทางเลือกหนึ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับ วงจรไฟฟ้าแรงสูงคือการใช้วงจรชาร์จล่วงหน้า_วงจรจะรองรับโหมดการชาร์จล่วงหน้าแบบจำกัดกระแสระหว่างการชาร์จตัวเก็บประจุ จากนั้นเปลี่ยนเป็นโหมดไม่จำกัดสำหรับการทำงานปกติเมื่อแรงดันที่โหลดเป็น 90% ของประจุเต็ม

2.10 วิธีการวัดค่ากระแสไฟ (Current Sensing)

กระแสไฟฟ้าเป็นปัจจัยที่สำคัญมากในสาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์หรือไฟฟ้า ในระบบอิเล็กทรอนิกส์กระแสสามารถมีแบนด์วิดธ์ตั้งแต่ไม่กี่นาโนแอมแปร์ไปจนถึงหลายร้อยแอมแปร์ ช่วงนี้สามารถกว้างกว่ามากในโดเมนไฟฟ้าโดยทั่วไปจนถึงหลายพันแอมแปร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน Power Grids มีวิธีการต่างๆในการรับรู้และวัดกระแสภายในวงจรหรือตัวนำ ในบทความนี้ เราจะพูดถึงวิธีการวัดกระแสโดยใช้เทคนิคการตรวจจับกระแสแบบต่างๆ พร้อมข้อดี ข้อเสีย และการนำไปใช้



รูปที่ 2.28 การวัดกระแสไฟฟ้าในแต่ละแบบ

- **วิธีการตรวจจับกระแสไฟฟ้าของเซนเซอร์** Hall Effect

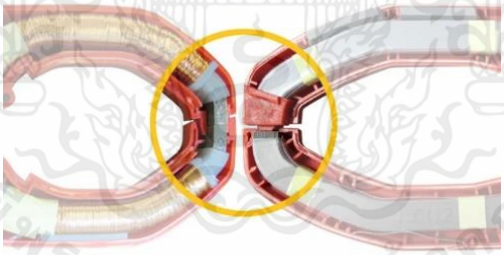
  Hall Effect ถูกค้นพบโดยนักฟิสิกส์ชาวอเมริกัน Edwin Herbert Hall และสามารถใช้รับรู้กระแสได้ โดยทั่วไปจะใช้เพื่อตรวจจับสนามแม่เหล็กและมีประโยชน์ในการใช้งานหลายอย่าง เช่น มาตรวัดความเร็ว, สัญญาณเตือนประตู, DIY BLDC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

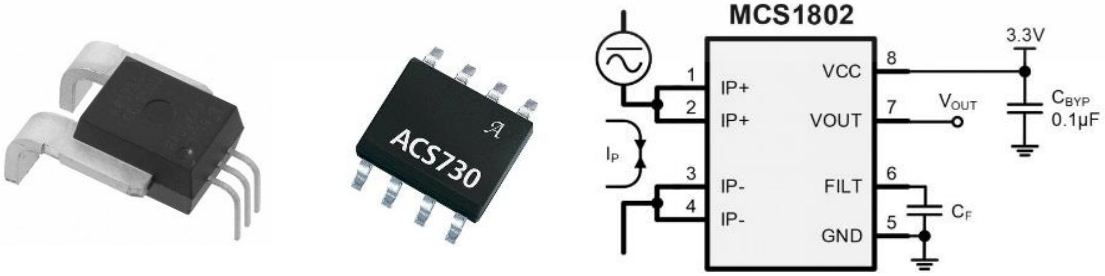
เซ็นเซอร์ Hall Effect แรงดันเอาต์พุตจะขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็ก อัตราส่วนของแรงดันเอาต์พุตแปรผันตามสนามแม่เหล็ก ในระหว่างกระบวนการตรวจจับกระแส กระแสจะถูกวัดโดยการวัดสนามแม่เหล็ก ซึ่งแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะมีค่าต่ำมากและจำเป็นต้องขยายโดยใช้แอมพลิฟายเออร์อัตราขยายสูงที่มีสัญญาณรบกวนต่ำมาก นอกเหนือจากวงจรแอมพลิฟายเออร์ เซ็นเซอร์ Hall Effect ยังต้องการวงจรเพิ่มเติมเนื่องจากเป็นทรานสดิวเซอร์เชิงเส้น

ข้อดี	จุดด้อย
- สามารถใช้ได้ทั้งไฟ AC และ DC ได้อย่างแม่นยำ - วิธีการแบบไม่สัมผัส	- สัญญาณแรงเอาต์พุตมีค่าต่ำ ดังนั้นต้องมีวงจรภายนอกเพื่อขยายสัญญาณ - โดนสนามแม่เหล็กกวนได้ง่าย ถ้าหากไม่มีการ shield ที่ดี

เซ็นเซอร์ Hall Effect ใช้ในแคลมป์มิเตอร์ เช่นเดียวกับการใช้งานตรวจจับกระแสไฟฟ้าในอุตสาหกรรมและยานยนต์ เซนเซอร์ Hall effect เชิงเส้นหลายประเภทสามารถตรวจจับกระแสไฟฟ้าตั้งแต่หลายมิลลิแอมป์ไปจนถึงหลายพันแอมแปร์ ด้วยเหตุนี้ แอปพลิเคชันการตรวจสอบกริดอัจฉริยะจึงใช้เซ็นเซอร์ Hall effect ประเภทต่างๆ เพื่อตรวจสอบกระแสไฟฟ้าของตัวนำ



รูปที่ 2.29 เซ็นเซอร์ Hall Effect แบบแคมป์

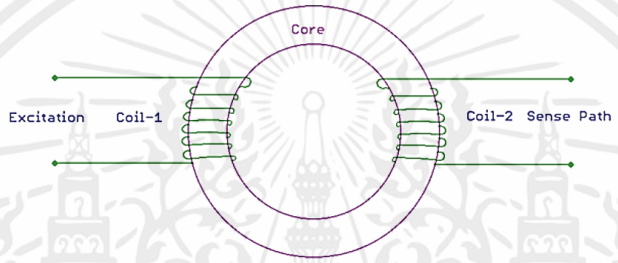


รูปที่ 2.30 ACS770, ACS730 เซ็นเซอร์ Hall Effect แบบวัดกระแสที่ไหลผ่าน IC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **วิธีการตรวจจับกระแสไฟฟ้าของเซ็นเซอร์** Flux Gate

ตัวเหนี่ยวนำที่อิ่มตัวเป็นองค์ประกอบหลักสำหรับเทคนิคการตรวจจับ Fluxgate ด้วยเหตุนี้ เซ็นเซอร์ Fluxgate จึงถูกเรียกว่าเป็นเซ็นเซอร์กระแสเหนี่ยวนำอิ่มตัว แกนตัวเหนี่ยวนำซึ่งใช้สำหรับเซ็นเซอร์ฟลักซ์เกตทำงานในบริเวณความอิ่มตัว ระดับความอิ่มตัวของตัวเหนี่ยวนำนี้มีความไวสูง และความหนาแน่นของฟลักซ์ภายในหรือภายนอกใดๆ จะเปลี่ยนระดับความอิ่มตัวของตัวเหนี่ยวนำ ความสามารถในการซึมผ่านของแกนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระดับความอิ่มตัว ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำจึงเปลี่ยนไปด้วย การเปลี่ยนแปลงค่าตัวเหนี่ยวนำนี้ถูกวิเคราะห์โดยเซ็นเซอร์ฟลักซ์เกตเพื่อรับรู้กระแส ถ้ากระแสสูง ความเหนี่ยวนำจะต่ำ ถ้ากระแสต่ำ ความเหนี่ยวนำจะสูง เซนเซอร์ Hall Effect ทำงานคล้ายกับเซนเซอร์ fluxgate แต่มีความแตกต่างอย่างหนึ่งระหว่างเซนเซอร์เหล่านี้ ความแตกต่างอยู่ในวัสดุหลัก เซ็นเซอร์ Flux Gate ใช้ตัวเหนี่ยวนำที่อิ่มตัว แต่เซ็นเซอร์ Hall Effect ใช้แกนอากาศ



รูปที่ 2.31 เซ็นเซอร์ Flux Gate

จากรูปที่ 2.30 จะแสดงโครงสร้างพื้นฐานของเซ็นเซอร์เกทฟลักซ์ มีขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิสองขดพันรอบแกนตัวเหนี่ยวนำที่อิ่มตัว การเปลี่ยนแปลงของการไหลของกระแสสามารถเปลี่ยนแปลงการซึมผ่านของแกน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเหนี่ยวนำในขดลวดอื่น

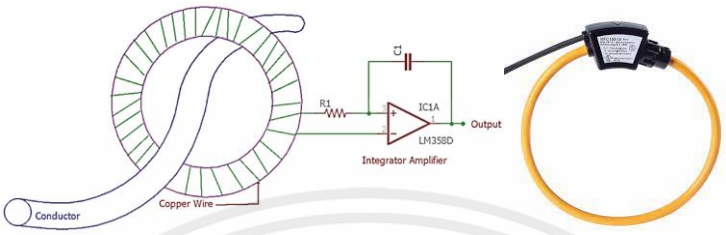
ข้อดี	จุดด้อย
- สามารถวัดความถี่ได้หลากหลาย - มีความแม่นยำมาก - ออฟเซ็ตต่ำ	- การใช้พลังงานทุติยภูมิสูง - ปัจจัยเสี่ยงเพิ่มขึ้นสำหรับสัญญาณรบกวนของแรงดันหรือกระแสในตัวนำหลัก - เหมาะสำหรับ DC หรือ AC ความถี่ต่ำเท่านั้น

เซ็นเซอร์ Fluxgate ใช้ใน Solar Inverters เพื่อตรวจจับกระแสไฟฟ้า นอกเหนือจากนี้ การวัดกระแส AC และ DC แบบลูปปิดสามารถทำได้ง่ายโดยใช้เซ็นเซอร์ Flux Gate นอกจากนี้ยังสามารถใช้วิธีการตรวจจับกระแส Flux Gate ในการวัดกระแสไฟรั่ว การตรวจจับกระแสไฟเกิน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **วิธีการตรวจจับกระแสไฟฟ้า** Rogowski Coil

Rogowski coil ได้รับการตั้งชื่อตาม Walter Rogowski นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ขดลวด Rogowski ทำขึ้นโดยใช้ขดลวดแกนอากาศรูปทรงเกลียวและพันรอบตัวนำสำหรับการวัดกระแส



รูปที่ 2.32 Rogowski Coil

ในภาพด้านบน ขดลวด Rogowski แสดงด้วยวงจรเพิ่มเติม วงจรเพิ่มเติมคือวงจรรวม ขดลวด Rogowski ให้แรงดันเอาต์พุตขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสในตัวนำ จำเป็นต้องมีวงจรอินทิเกรเตอร์เพิ่มเติมเพื่อสร้างแรงดันเอาต์พุตที่เป็นสัดส่วนกับกระแส

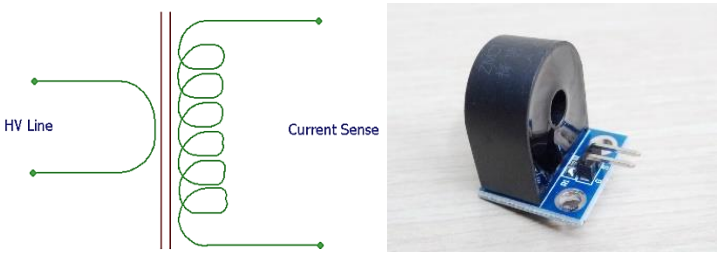
ข้อดี	จุดด้อย
- เป็นวิธีที่ดีในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงกระแสความถี่สูงอย่างรวดเร็ว - การทำงานที่ปลอดภัยในแง่ของการจัดการขดลวดทุติยภูมิ - โซลูชันต้นทุนต่ำ คล่องตัวในการจัดการเนื่องจากโครงสร้างวงเปิด	- เหมาะสำหรับ AC เท่านั้น - มีความไวต่ำกว่าหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า

Rogowski coil มีการใช้งานที่หลากหลาย ตัวอย่างเช่น การวัดกระแสในโมดูลพลังงานขนาดใหญ่ โดยเฉพาะใน MOSFET หรือทรานซิสเตอร์กำลังสูง หรือใน IGBT ขดลวด Rogowski มีตัวเลือกการวัดที่ยืดหยุ่น เนื่องจากการตอบสนองของขดลวด Rogowski นั้นรวดเร็วมากเหนือช่วงชั่วคราวหรือคลื่นไซน์ความถี่สูง จึงเป็นทางเลือกที่ดีในการวัดกระแสชั่วคราวความถี่สูงในสายไฟ ในการกระจายพลังงานหรือในสมาร์ทกริด ขดลวด Rogowski ให้ความยืดหยุ่นที่ยอดเยี่ยมสำหรับการวัดกระแส

- **วิธีการตรวจจับกระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า** (Current Transformer)

หม้อแปลงกระแสหรือ CT ใช้เพื่อตรวจจับกระแสโดยแรงดันทุติยภูมิซึ่งเป็นสัดส่วนกับกระแสในขดลวดทุติยภูมิ เป็นหม้อแปลงอุตสาหกรรมที่แปลงแรงดันหรือกระแสที่มีค่ามากเป็นค่าที่น้อยกว่ามากในขดลวดทุติยภูมิ การวัดจะใช้กับเอาต์พุตทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.33 หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า

ในภาพด้านบนแสดงโครงสร้าง เป็นหม้อแปลง CT ในอุดมคติที่มีอัตราส่วนหลักและรองเป็น 1:N N ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของหม้อแปลง

ข้อดี	จุดด้อย
- ความสามารถในการจัดการกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่ มากกว่าวิธีอื่น ๆที่แสดงในบทความนี้ ไม่ต้องใช้วงจรเพิ่มเติม	- ต้องการการบำรุงรักษา - Hysteresis เกิดขึ้นเนื่องจากการ magnetization - กระแสไฟฟ้าปฐมภูมิสูงทำให้วัสดุแกนเฟอร์ไรต์อิ่มตัว

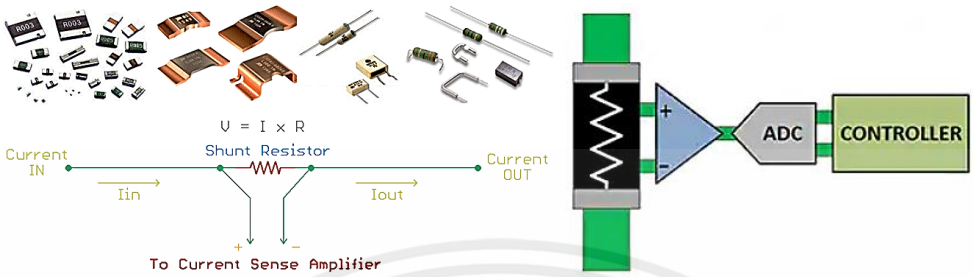
การใช้งานหลักของเทคนิคการตรวจจับกระแสไฟฟ้าที่ใช้หม้อแปลง CT อยู่ในกริดพลังงาน เนื่องจากมีความสามารถในการวัดกระแสไฟฟ้าที่สูงมาก แคลมป์มิเตอร์จำนวนน้อยยังใช้หม้อแปลงกระแสไฟฟ้าสำหรับการวัดกระแสสลับ

- **วิธีการตรวจจับกระแสไฟฟ้าของตัวต้านทาน** Shunt

วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้มากที่สุดในเทคนิคการตรวจจับในปัจจุบัน เทคนิคนี้ใช้กฎของโอห์มพื้นฐานของการวัดกระแส กระแสไฟเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ทั่วไปที่ใช้สำหรับการประเมิน ควบคุม และวินิจฉัยประสิทธิภาพการทำงานของระบบอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากเป็นการวัดทั่วไป นักออกแบบจึงมักประสบปัญหาหากประเมินความแตกต่างของการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่แม่นยำต่ำเกินไป องค์ประกอบการตรวจจับที่ใช้บ่อยที่สุดในการตรวจจับการไหลของกระแสคือตัวต้านทานความแม่นยำค่าต่ำที่วางอยู่ในเส้นทาง ปัจจุบัน ตัวต้านทานนี้เรียกว่า shunt พัฒนาแรงดันคร่อมซึ่งเป็นสัดส่วนกับกระแสที่ไหลผ่าน เนื่องจากตัวต้านทานแบบแบ่งไม่ควรส่งผลต่อการไหลของกระแสอย่างมีนัยสำคัญ จึงมักจะค่อนข้างเล็ก ตามลำดับมิลลิโอห์มหรือเศษส่วนของมิลลิโอห์ม (mΩ) ด้วยเหตุนี้ แรงดันไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นจากตัวต้านทานแบบแบ่งจึงมีขนาดค่อนข้างเล็กเช่นกัน และมักจะต้องมีการขยายสัญญาณก่อนที่จะถูกแปลงโดย ADC ด้วยเหตุนี้ การกำหนดค่าสายสัญญาณทั่วไปสำหรับการตรวจสอบกระแสจึงเกี่ยวข้องกับส่วนหน้าแบบอนาล็อกเพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขยายแรงดันไฟฟ้าที่พัฒนาข้ามตัวต้านทานแบบแบ่ง, ADC เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ขยายเป็นการแสดงแบบดิจิตอล และตัวควบคุมระบบ (รูปที่ 2.33)



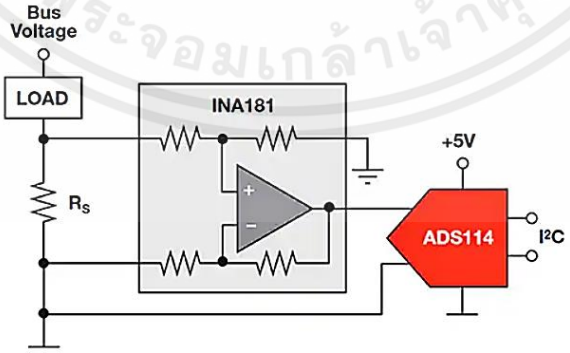
รูปที่ 2.34 การตรวจจับกระแสไฟฟ้าของตัวต้านทาน Shunt

สมมติว่ากระแส 1A ไหลผ่านตัวต้านทาน 1 โอห์ม ตามกฎของโอห์ม แรงดันเทียบเท่ากับกระแส x ความต้านทาน ดังนั้นเมื่อกระแส 1A ไหลผ่านตัวต้านทาน 1 โอห์ม จะเกิด 1V คร่อมตัวต้านทาน กำลังไฟของตัวต้านทานเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณา อย่างไรก็ตาม ยังมีตัวต้านทานที่มีค่าน้อยมากในท้องตลาด ซึ่งค่าความต้านทานจะอยู่ในช่วงมิลลิโอห์ม ในกรณีเช่นนี้ ความต่างศักย์ไฟฟ้าคร่อมตัวต้านทานก็น้อยมากเช่นกัน ต้องใช้แอมพลิฟายเออร์อัตราขยายสูงเพื่อเพิ่มแอมพลิจูดของแรงดัน และสุดท้ายกระแสจะถูกวัดโดยใช้พื้นฐานการคำนวณย้อนกลับ

ตัวต้านทานวัดกระแสไฟ หรือที่เรียกว่า shunt เป็นเทคโนโลยีทางเลือกสำหรับวัดการไหลของกระแส เพื่อไม่ให้ส่งผลกับการไหลของกระแสในวงจรยิ่งตัวต้านทานค่ามากจะส่งผลกับการจ่ายกระแสในวงจรจึงเลือกค่าที่ประมานหลักมิลิโอห์ม เป็นผลให้นักออกแบบต้องใช้วงจรที่ขยายแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทาน ซึ่งจะขยายด้วยวงจรแอมพลิฟายเออร์ (op amp) ซึ่งอาจจะยายในช่วง 20-60 เท่า

มีสองวิธีพื้นฐานในการต่อตัวต้านทาน shunt เข้ากับวงจรสำหรับการวัดกระแสด้านต่ำ (low side) และด้านสูง (high side) ทั้งสองวิธีมีข้อดีและข้อเสีย

1.การวัดกระแสด้านต่ำ



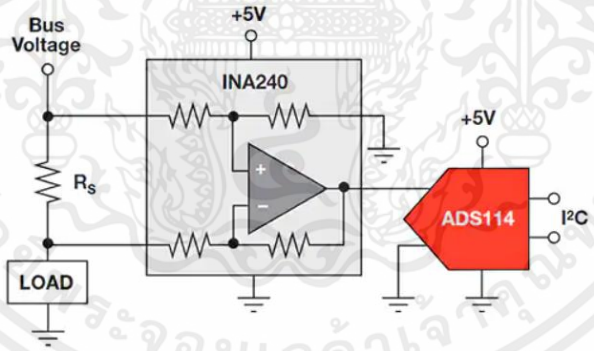
รูปที่ 2.35 วงจรการวัดกระแสด้านต่ำโดยใช้ Texas Instruments INA181 วางตัวต้านทานการรับรู้กระแสระหว่างโหลดที่ใช้งานอยู่และกราวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดค่ากระแสด้านต่ำนั้นง่ายต่อการนำไปใช้ เนื่องจากแรงดันคร่อมตัวต้านทานกระแส shunt นั้นอ้างอิงจากกราวด์ การกำหนดค่านี้ทำให้แอมพลิฟายเออร์ตรวจจับกระแสเป็นชิ้นส่วนแรงดันต่ำได้ เนื่องจากแรงดันที่ตรวจจับอยู่ในลำดับมิลลิโวลต์เทียบกับกราวด์ ในการกำหนดค่านี้ วิธีการวัดด้านต่ำเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดและต้นทุนต่ำที่สุดในการดำเนินการ ข้อเสียของการวัดกระแสด้านต่ำคือโหลดไม่ได้อ้างอิงกราวด์อีกต่อไปเนื่องจากการวางตัวต้านทานแบบ shunt ทำให้ด้านต่ำของโหลดอยู่สูงกว่ากราวน์หลายมิลลิโวลต์ การอ้างอิงกราวด์จะไม่กลายเป็นปัญหาหากมีการลัดวงจรระหว่างโหลดและกราวด์ การลัดวงจรดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้ ตัวอย่างเช่น หากโหลดที่หุ้มด้วยโลหะ เช่น มอเตอร์มีขดลวดลัดถึงกราวด์อ้างอิง ตัวต้านทานกระแสไฟฟ้าอาจไม่สามารถตรวจจับการลัดวงจรดังกล่าวได้ นอกจากนี้ แรงดันไฟฟ้าอินพุตโหมดทั่วไปของแอมพริฟายต้องมีกราวด์เพื่อทำการวัดด้านต่ำ ซึ่งปกติแล้วจะไม่เป็นปัญหาสำหรับแอมพลิฟายเออร์ที่ทำงานบนแหล่งจ่ายไฟบวกและลบ (Dual Supply) แต่อาจเป็นปัญหาได้สำหรับผู้ที่มีแหล่งจ่ายไฟเดียว (Single Supply) ดังนั้น ช่วงแรงดันไฟฟ้าของโหมดทั่วไปที่มีกราวด์จึงกลายเป็นเกณฑ์สำคัญเมื่อเลือกแอมพลิฟายเออร์ที่เหมาะสมเพื่อทำการวัดค่าด้านต่ำ

2.การวัดกระแสด้านสูง

การวัดกระแสด้านสูงจะแทรกตัวต้านทานกระแสแบ่งระหว่างแหล่งจ่ายไฟและโหลดที่ใช้งานตามที่แสดงในรูปที่ 3 โดยใช้เครื่องขยายสัญญาณตรวจจับกระแส Texas Instruments INA240 เป็น AFE แรงดันไฟเข้าโหมดทั่วไปของอุปกรณ์นี้สามารถเกินแรงดันไฟจ่ายได้อย่างมาก ทำให้เป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับการวัดกระแสด้านสูง



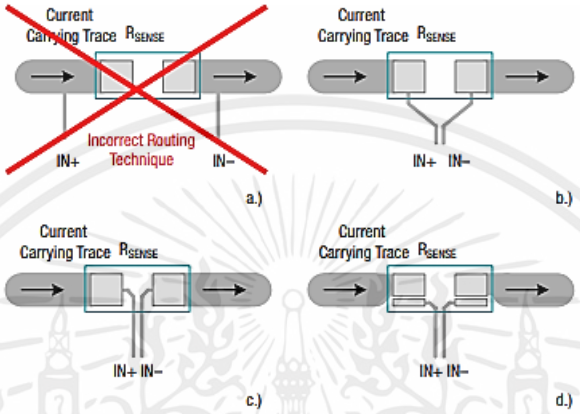
รูปที่ 2.36 วงจรวัดกระแสด้านสูงจะต่อตัวต้านทาน shunt ระหว่างแหล่งจ่ายกับโหลด

การวัดกระแสด้านสูงมีข้อได้เปรียบที่สำคัญสองประการเหนือการวัดด้านต่ำ ประการแรกคือ ง่ายต่อการตรวจจับการลัดวงจรจากภายในโหลดลงกราวด์ เนื่องจากกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นจะไหลผ่านตัวต้านทานกระแส shunt ประการที่สอง เทคนิคการวัดนี้ไม่ได้อ้างอิงกราวด์แต่เป็นการวัดความต่างศักย์ของแรงดันที่แหล่งจ่ายกับโหลด เทคนิคการวัดกระแสด้านสูงมีข้อเสียหลักประการหนึ่ง ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น แอมพลิฟายเออร์ตรวจจับกระแสไฟฟ้าต้องมีการปฏิเสธโหมดทั่วไปสูงเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าขนาดเล็กที่พัฒนาขึ้นในการแบ่งกระแสไฟฟ้าจะต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าของโหลด ขึ้นอยู่กับการออกแบบระบบ แรงดันไฟฟ้าโหมด

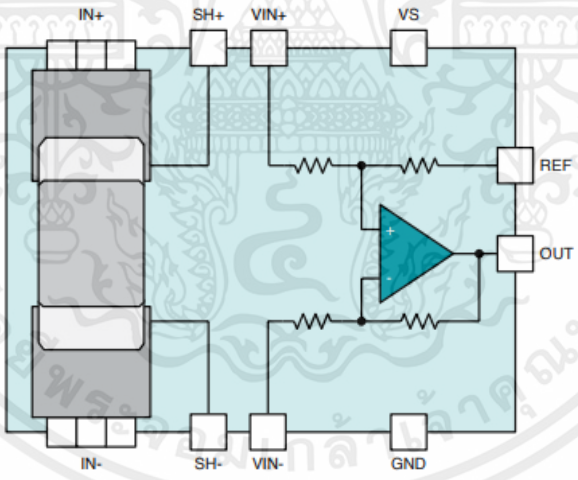
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั่วไปนี้อาจมีขนาดค่อนข้างใหญ่ แอมพลิฟายเออร์ตรวจจับกระแส INA240 ในรูปที่ 2.51 มีช่วงโหมดทั่วไปที่กว้างตั้งแต่ -4 ถึง 80 โวลต์

เนื่องจากความต้านทานของตัวต้านทาน shunt มีค่าน้อยมาก จึงต้องระมัดระวังสำหรับการการวาดลาย PCB และลากให้ถูกหลักการเพื่อได้ความผิดพลาดที่น้อยที่สุดหรือทั้งนี้สามารถเลือกเป็นไอซี current sense amplifier ที่มีตัวต้านทาน shunt ภายในตามรูปที่ 2.36



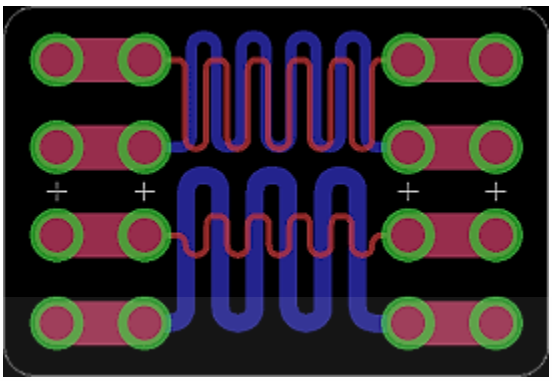
รูปที่ 2.37 ลักษณะการต่อลากลาย PCB เข้ากับตัวต้านทาน shunt เรียกว่า “Kelvin connections”



รูปที่ 2.38 แผนภาพบล็อก INA250 พร้อมการเชื่อมต่อตัวต้านทานภายใน

อีกทางเลือกหนึ่งสำหรับเทคนิคการตรวจจับกระแสประเภทนี้คือการใช้การ PCB trace เป็นตัวต้านทานแบบshunt เนื่องจากรอยทองแดงของ PCB มีความต้านทานน้อยมาก เราจึงสามารถใช้รอยทองแดงเพื่อวัดกระแสได้ อย่างไรก็ตาม ในแนวทางทางเลือกดังกล่าว การพึ่งพาหลายๆ อย่างก็เป็นข้อกังวลอย่างมากเช่นกันเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำ ปัจจัยหลักที่เปลี่ยนแปลงคืออุณหภูมิที่ลดลง ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความต้านทานต่อร่องรอยจะเปลี่ยนไปซึ่งส่งผลให้เกิดข้อผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.39 การใช้ trace pcb เป็น shunt resistor

ข้อดี	จุดด้อย
- โซลูชันนี้ใช้ต้นทุนต่ำ - สามารถทำงานใน AC และ DC - ไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์เพิ่มเติม	- ไม่เหมาะสำหรับการทำงานที่มีกระแสไฟสูงเนื่องจากการกระจายความร้อน - การวัด Shunt ทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลงโดยไม่จำเป็นเนื่องจากการสูญเสียพลังงานทั่วทั้งตัวต้านทาน - การถ่ายเทความร้อนทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง

- **วิธีการเลือกวิธีการตรวจจับกระแสที่เหมาะสม**

การเลือกวิธีที่เหมาะสมสำหรับการตรวจจับกระแสไฟไม่ใช่เรื่องยาก มีปัจจัยบางประการที่ต้องพิจารณาในการเลือกวิธีการที่เหมาะสม เช่น :

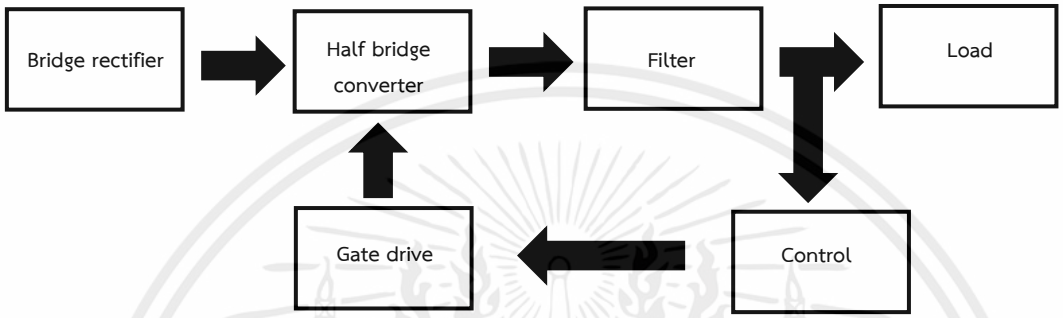
1. ต้องการความแม่นยำมากแค่ไหน
2. การวัด DC หรือ AC หรือทั้งสองอย่าง
3. ต้องใช้ไฟเท่าไหร่
4. ช่วงกระแสและแบนด์วิธที่จะวัดเท่าไหร่
5. ต้นทุน

นอกเหนือจากนั้น ยังต้องคำนึงถึงความไวที่ยอมรับได้และป้องกันสัญญาณรบกวนด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการลำดับความสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

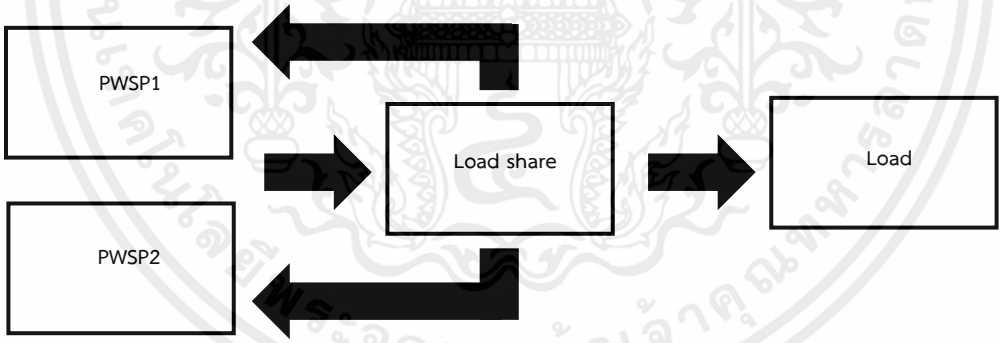
บทที่ 3
วิธีการดำเนินงาน

3.1 Block diagram ของวงจร Half bridge power supply



รูปที่ 3.1 Block diagram PWSP

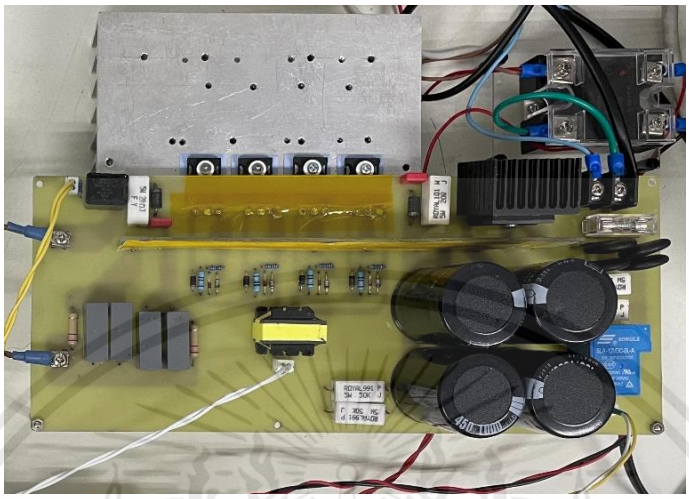
3.2 Block diagram ของการขนาน Power supply



รูปที่ 3.2 Block diagram Paralleling

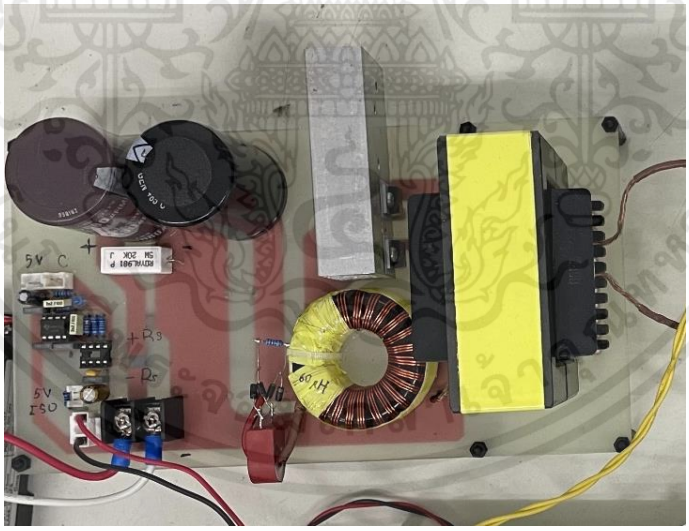
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วงจร Half bridge converter



รูปที่ 3.3 HB converter

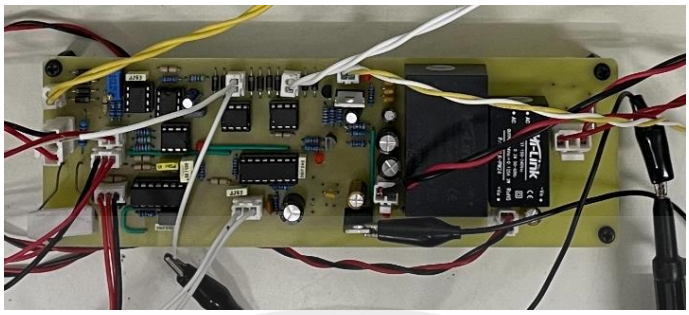
3.4 วงจร filter



รูปที่ 3.4 HB filter

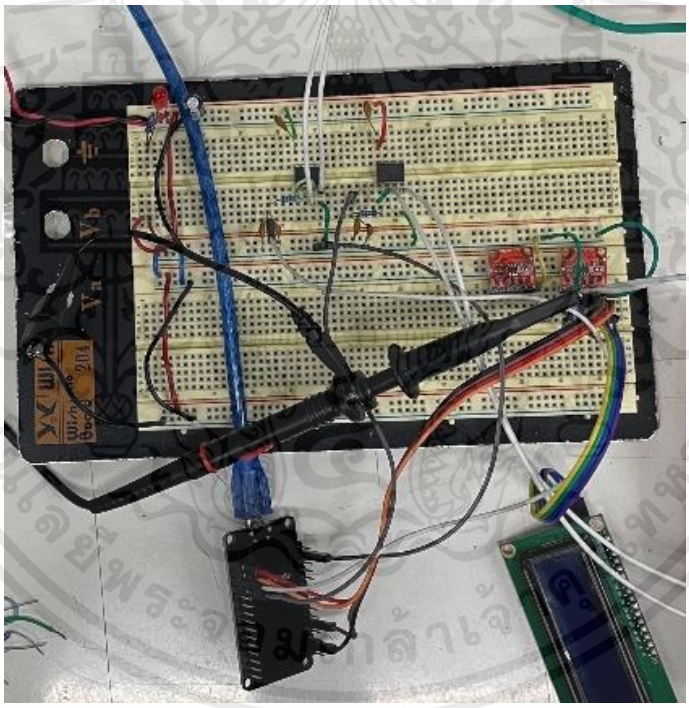
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 วงจร control



รูปที่ 3.5 control

3.6 วงจร load share



รูปที่ 3.6 Load share

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลอง

4.1 การทดลอง Half bridge power supply

ทดลองโดยต่อโหลด 25 โอห์ม แล้วเพิ่มกระแสทีละ 0.5A ซึ่งได้ผลดังตาราง

V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}	eff
316	0.02	6.32	0	0	0	0
316	0.05	15.8	12.28	0.5	6.14	0.388608
316	0.12	37.92	24.13	1	24.13	0.63634
316	0.24	75.84	36.24	1.5	54.36	0.716772
316	0.39	123.24	47.9	2	95.8	0.777345
316	0.6	189.6	60.2	2.5	150.5	0.793776
316	0.84	265.44	71.9	3	215.7	0.812613
316	1.12	353.92	83.8	3.5	293.3	0.828718
316	1.43	451.88	95.7	4	382.8	0.847128
316	1.78	562.48	107.5	4.5	483.75	0.860031
316	2.19	692.04	119.6	5	598	0.864112

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพของวงจร Half bridge power supply

ผลการทดลองจากตารางข้างต้นพบว่าประสิทธิภาพของ Half bridge power supply มีประสิทธิภาพ 86.41% โดยการที่มีประสิทธิภาพเพียงเท่านี้ อันเนื่องมาจากการสูญเสียทางความร้อนของตัวอุปกรณ์สวิตช์

4.2 การทดลองการขนาน power supply

การทดลองในส่วนนี้ยังไม่สามารถทำการทดลองได้เนื่องจากการปรับจูนกระแสของวงจร load share ยังไม่สามารถทำให้ power supply ทั้ง 2 ตัวมีการจ่ายกระแสที่เท่ากันหรือใกล้เคียงกันได้ และอีกประการหนึ่งก็คือในส่วนของการเขียนโปรแกรมที่ยังไม่มีความเสถียรมากพอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองวงจร Half bridge power supply สามารถจ่ายแรงดันและกระแสได้ที่ 150V 3A โดยภาพรวมของวงจรทั้งหมดจะประกอบไปด้วย วงจร Bridge rectifier วงจร Filter วงจร Half bridge converter วงจร Control วงจร Gate drive และ วงจร Soft start

สำหรับในส่วนของหลักการทำงานของวงจร Power Supply ก็จะเป็นการใช้วงจร Bridge rectifier ในการแปลงแรงดันไฟกระสลับ 220V มาเป็นแรงดันไฟกระแสตรง 311V ทำการลดแรงดันกระเพื่อมโดย Capacitor และเข้ากับวงจร Half bridge converter โดยจะได้แรงดันเอาต์พุตสูงสุดจะอยู่ที่ประมาณ $155V_{DC}$ จากนั้นก็จะสามารถจ่ายให้กับโหลด โดยมีการ feedback กลับมาที่วงจร control ซึ่งใช้ IC SG3525 ในการป้อน PWM โดยจะ comparator กับ LM339 เพื่อปรับ Duty cycle เพื่อลดหรือเพิ่มแรงดันให้คงที่ จากนั้นจะนำไปต่อกับวงจร Gate drive เพื่อขับมอสเฟตในวงจร Half Bridge converter ต่อไป

ผลการทดลองการขนาน Power supply พบว่ายังไม่สามารถใช้งานได้อย่างดี เนื่องจากวงจร Load share ที่เพิ่มขึ้นมานั้นมีปัญหาในส่วนของการเขียนโปรแกรม ทำให้ไม่สามารถปรับจูนการจ่ายกระแสที่เท่ากันสำหรับ Power supply ทั้ง 2 ตัวได้ และอีกปัญหาหนึ่งคือ เมื่อมีโหลดเพิ่มขึ้นหรือลดลง การปรับจูนกระแสของวงจร Load share จะใช้เวลานานกว่าที่กระแสของ Power supply ทั้ง 2 ตัวจะมีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้ในช่วงแรกของการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดัน จะมี power supply ตัวเดียวที่จ่ายกระแสแก่โหลด

5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองการทำ Power supply ทั้งแบบ Buck converter (ในภาคเรียนที่ 1) และแบบ Half bridge converter พบว่าส่วนที่มีความซับซ้อนที่สุดเป็นส่วนของวงจร feedback หรือ วงจร control ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้าใจของผู้ปฏิบัติงานและประสบการณ์ อาทิ เช่น กราฟของสัญญาณ PWM เกิดการ Oscillate อันเนื่องมาจากค่าความจุของ capacitor ในวงจร negative feedback ไม่เหมาะสม ซึ่งส่งผลต่อโพลหรือซีโร โดยเรื่องนี้เป็นเรื่องที่มีความซับซ้อนอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] Inrush current สืบค้นได้จาก
https://en.wikipedia.org/wiki/Inrush_current
[2] วิธีวัดกระแสไฟฟ้า สืบค้นได้จาก
https://www.ti.com/lit/eb/slyy154a/slyy154a.pdf?ts=1668644716092&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
https://circuitdigest.com/article/how-to-measure-current-in-a-circuit-with-different-current-sensing-techniques
https://www.digikey.com/en/articles/fundamentals-of-current-measurement-part-1-current-sense-resistors
[3] การคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำ สืบค้นได้จาก
https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/applinote/ic/power/switching_regulator/inductor_calculation_appli-e.pdf
[4] วงจร Half bridge converter และการคำนวณค่าต่างๆ สืบค้นได้จาก
https://www.cpe.ku.ac.th/~yuen/204471/power/converter/index1.html
[5] วงจร Load share สืบค้นได้จาก
https://www.sunpower-uk.com/glossary/what-is-current-sharing/#:~:text=Current%20sharing%20is%20the%20technique,while%20the%20voltage%20remains%20constant.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้