POWER SUPPLY

ปรับแรงดัน 0-40 V และปรับกระแส 0-5 A

โดย

1.นายภาณุเดช โสพส รหัส B4507499

2.นายเอกภูมิ ดีระพัฒน์ รหัส B4508236

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา 427494 โครงงานศึกษาวิศวกรรมโทรคมนาคม
และ427499 โครงงานวิศวกรรมโทรคมนาคม
ประจำภาคการศึกษาที่ 1 และ 3 ปีการศึกษา 2548
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ.2541
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

หัวข้อโครงการ POWER SUPPLY ปรับแรงดัน 0-40 V และปรับกระแส 0-5 A

ผู้เสนอโครงการ นายภาณุเดช โสพส รหัส B4507499
นายเอกภูมิ ดีระพัฒน์ รหัส B4508236
ปริญญา วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ. 2548
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน อ.ดร. ชาญชัย ทองโสภา

บทคัดย่อ

การออกแบบวงจร Power supply เป็นการใช้ความรู้ทางอิเล็กทรอนิกส์ในการทำงาน รวมถึงใช้ความชำนาญในการลงมือปฏิบัติการและความรู้ในการใช้โปรแกรมในการออกแบบวงจร ในการออกแบบวงจรต้องมีความรู้เกี่ยวกับวงจรเรียงกระแส วงจรขยายของ Transistor หลักการทำงานของOp-Amp ซึ่งเป็นการประยุกต์จากความรู้ที่ได้เรียนมา ถือว่าเป็นการพัฒนาความรู้และความสามารถของตัวผู้ปฏิบัติเองในการปฏิบัตงานต่อไป

โครงงานฉบับนี้เป็นการออกแบบ Power supply ซึ่งสามารถที่จะปรับแรงดันได้ในช่วง 0-40 Vdc และสามารถปรับกระแสได้ 5 A ซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งโดยเฉพาะการที่จะต้องประกอบและทดลองวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในห้องทดลอง อีกทั้งยังเป็นการทดลองวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการแรงดันที่ไม่เท่ากัน ในแต่ละวงจรที่ทำการทดลองหากจะทำเพาเวอร์ซัพพลายเฉพาะวงจรไปเลย ก็คงจะสิ้นเปลืองอย่างมากโดยไม่จำเป็น และยังเพิ่มความยุ่งยากในการทดลองวงจรอีกด้วย ดังนั้นเพาเวอร์ซัพพลายแบบปรับค่าแรงดันเอาต์พุตได้ ดูจะเป็นการลงทุนและเป็นการวางแผนการทำงานที่คุ้มค่ามากกว่าแบบอื่นใดๆ ทั้งหมดนั่นคือจุดประสงค์หลักของโครงงานเพาเวอร์ซัพพลาย 0 – 40 V / 5 A สำหรับห้องทดลองตัวนี้

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำโครงงาน POWER SUPPLY ปรับแรงดัน 0-40 V และปรับกระแสได้ 5 A สามารถเสร็จสมบูรณ์ได้เนื่องด้วยความกรุณาของบุคคลหลายท่านที่คอยช่วยเหลือและคอยให้คำปรึกษา รวมทั้งข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อโครงงาน ทางคณะผู้จัดทำใคร่ขอแสดงความขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านซึ่งบุคคลเหล่านั้นประกอบด้วย

- อาจารย์ ดร. ชาญชัย ทองโสภา อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานผู้ที่เปิดโอกาสให้คณะผู้จัดทำได้เรียนรู้การทำงานในโครงงานนี้และเป็นผู้ประสิทธ์ประสาทวิชาความรู้รวมทั้งคำปรึกษาและคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ยิ่งเกี่ยวกับโครงงาน
- คณาจารย์ทุกท่านที่เกี่ยวข้องในการให้ความรู้แก่คณะผู้จัดทำและได้นำความรู้นั้นมาใช้ประโยชน์ในการพัฒนาโครงงาน
- คุณประพล จาระตะคุ ที่ช่วยเหลือในการเบิกงบประมาณ
- คุณไพวัลย์ สาสังข์ สำหรับคำแนะนำทุกอย่างในการจัดทำโครงงาน
- เพื่อนๆ วิศวกรรมโทรคมนาคมทุกท่านสำหรับความช่วยเหลือที่ดีทุกด้าน ตลอดจนกำลังใจที่มอบให้แก่คณะผู้จัดทำตลอดมา

สุดท้ายผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา ซึ่งเป็นผู้ให้โอกาสทางการศึกษาและคอยสนับสนุน รวมทั้งกำลังใจที่คอยมอบให้ตลอดมาอย่างหาที่เปรียบมิได้

ผู้จัดทำ
นายภาณุเดช โสพส
นายเอกภูมิ ดีระพัฒน์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....ก
กิตติกรรมประกาศ.....ข
สารบัญ.....ค

บทที่ 1 บทนำ.....1
1.1 กล่าวนำ.....1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน.....1
1.3 ขอบเขตของโครงงาน.....2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....3

บทที่ 2 ทฤษฎีและสัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์วงจร.....4
2.1 ออปแอมป์ Operational Amplifiers.....4
2.2 ทรานซิสเตอร์ (TRANSISTORS).....16
2.3 วงจรทรานซิสเตอร์สวิทซ์ (Transistor Switching Circuit).....33
2.4 วงจรเรียงกระแส.....43
2.5 ไดโอด.....49
2.6 ตัวต้านทาน (Resistor).....60
2.7 ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ Capacitors and inductors.....66
2.8 กฎของโอห์ม.....70
2.9 กฎของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Law).....71
2.10 กฎแรงดันเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's current Law : KVL).....72
2.11 วงจร แบ่งแรงดัน (Voltage Divider Circuit).....73
2.12 วงจรแบ่งกระแส.....79
2.13 ทฤษฎีของเทวินิน.....80
2.14 หม้อแปลงไฟฟ้า.....85
2.15 สัญลักษณ์ที่ใช้ในวงจร(Circuit Symbols).....86

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 หลักการของ Power Supply.....90
Transformer Specifications.....90
The Rectifier.....91
The Center-tapped (CT) Configurations.....92
The bridge rectifier configuration.....93
The Filter.....94
Voltage Regulators.....96

บทที่ 4 หลักการทำงานของวงจร Power supply.....97
การทำงานของวงจร 97
เรกูเลเตอร์และขยายกระแส.....97
ตรวจจับกระแส.....100
จำกัดกระแส.....102
ตรวจจับอุณหภูมิ.....104
วงจรตรวดจับแรงดันริบเปิ้ล.....106

บทที่ 5 การสร้างการออกแบบและการทดสอบ.....108
การออกแบบแผ่น PCB 108
การลงชุดอุปกรณ์.....112
การทดสอบ Power supply.....116

บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....120
บทสรุป.....120
สิ่งที่ได้จากโครงงาน.....120
ปัญหาและอุปสรรค.....121
ข้อเสนอแนะ.....121
บรรณานุกรม.....122
ประวัติผู้เขียน.....123
ภาคผนวก.....124

บทที่ 1

บทนำ

กล่าวนำ

ในปัจจุบันนี้ power supply ที่เราได้ใช้กันอยู่โดยทั่วไปในห้องปฏิบัติการและในท้องตลาดทั่วไปนั้นมีความสามารถที่จะใช้ในการปรับแรงดันได้แต่ไม่สามารถที่จะปรับกระแสไฟได้หรือถึงแม้จะสามารถที่จะปรับได้แต่ก็มีราคาที่สูงตามท้องตลาด ซึ่งในความจริงแล้วการที่ power supply สามารถปรับแรงดันได้อย่างเดียวแต่ไม่สามารถปรับกระแสได้นั้นอาจจะไม่ได้ผลดีนักกับการทดลองหรือการใช้งานที่สามารถควบคุมกระแสไฟฟ้าได้

โครงการนี้จึงได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ power supply โดยออกแบบวงจรเพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของ power supply เพื่อที่จะให้ power supply นี้สามารถที่จะปรับแรงดันให้อยู่ในช่วง 0-40 V และปรับกระแสได้ 5 A และลักษณะเด่นของวงจรที่ออกแบบมานี้ยังสามารถปรบจำกัดกระแสเอาต์พุตได้พร้อมกัน มีวงจรหยุดการทำงานเมื่ออุณหภูมิสูงเกิน และสามารถเซ็ตกระแสได้ด้วยสวิตช์และตัวต้านทานปรับค่าได้ ซึ่งจากคุณสมบัติเบื้องต้นของเพาเวอร์ซัพพลายชุดนี้แล้ว ทำให้มั่นใจได้เลยว่าโครงงานนี้มีความแกร่งต่อการใช้งานที่ทรหดอดทนของการทดลองวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในห้องทดลอง รวมทั้งมั่นใจได้เลยว่าวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่กำลังทดลองอยู่นั้น จะปลอดภัยจากทุกกรณีที่อาจเกิดขึ้นได้กับเพาเวอร์ซัพพลายตัวนี้

วัตถุประสงค์

1.สามารถนำความรู้ที่ได้จากภาคทฤษฎีของวิชาต่างๆ ที่ได้ทำการศึกษามาปฏิบัติและประยุกต์ใช้ เพื่อสร้างชิ้นงานขึ้นมาและสามารถนำมาใช้ได้จริง

2.ศึกษาความรู้เพิ่มเติมในเรื่องต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทำโครงการ เช่น ศึกษาการทำงานของ IC เบอร์ต่างๆ รวมทั้ง ศึกษาการออกแบบแผ่นปริ๊น (PCB) เป็นต้น

3.ศึกษาการทำงานและออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์

4.ศึกษาความรู้ด้วยตัวเองอย่างมีประสิทธิภาพ

5. เพื่อนำความรู้ที่ได้ไปทดลองปฏิบัติงานจริง

6.หาจุดบกพร่อง สาเหตุ และสามารถแก้ไขได้

ขอบข่ายงาน

1.สร้างเครื่องจ่ายกำลังไฟฟ้า (POWER SUPPLY)

2.ใช้ IC เบอร์ต่างๆ ในการควบคุมการทำงาน

3.สามารถปรับแรงดันได้ในช่วง 0-40 V

4.สามารถปรับกระแสได้ 5 A

5.ปรับอัตตราการจำกัดกระแสเอาต์พุตได้พร้อมกัน

6.มีวงจรหยุดการทำงานเมื่ออุณหภูมิสูงเกิน

7.มีสวิตช์เปิด-ปิดแรงดันจ่ายออกทางเอาต์พุต

8.เซ็ตค่ากระแสได้ด้วยสวิตช์และตัวต้านทานปรับค่าได้

9.ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆในการช่วยขยายแรงดันและกระแสตามที่ต้องการ

ขั้นตอนการทำงาน

1.ศึกษาค้นคว้าหาข้อมูล

2.เขียนโครงการและเสนอโครงการกับอาจารย์ที่ปรึกษา

3.ออกแบบวงจร

4.ซื้ออุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการนี้

5.ออกแบบแผ่นปริ๊น PCB

6.สร้างวงจรประดิษฐ์ชิ้นงาน

7.นำวงจรที่สร้างไปทดลองและแก้ไขให้ได้ตามที่ต้องการ

8.สรุปผลการทดลองและเขียนรายงาน

9.นำเสนอโครงงาน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เรียนรู้การใช้โปรแกรม Protel เพื่อสร้างแผ่นลายวงจรPCBสามารถนำโครงงานนี้ไปใช้ในห้องปฏิบัติการทดลอง หรือใช้งานในชีวิตประจำวันที่เกี่ยวข้องกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อใช้เป็นตัวจ่ายไฟได้
2. ได้รับความรู้เพิ่มเติมจากการปฏิบัติ หลังจากได้ศึกษาข้อมูลในภาคทฤษฎีมาแล้ว
3. ได้รับความรู้เพิ่มเติมนอกเหนือจากหลักสูตรที่เรียน
4. รู้จักทำงานเป็นทีม

บทที่2

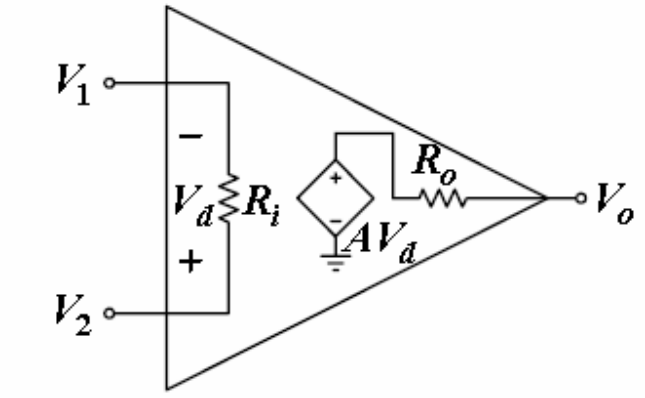
ทฤษฎีและสัญลักษณ์

2.1 ออปแอมป์ Operational Amplifiers

ออปแอมป์ เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งที่มีการทำ งานเป็นแบบ Voltagecontrolled voltage souce ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้กับสัญญาณได้ดังนี้

1. รวมสัญญาณ (sum signal)
2. อนุพันธ์สัญญาณ (differentiate signal)
3. อินทิเกรตสัญญาณ (Integrate signal)
4. ขยายสัญญาณ(Amplify signal)

ภายในตัวออปแอมป์เมื่อพิจารณาถึงวงจรภายใน ในสภาวะที่ไม่เป็นอุดมคติ (non-ideal) จะประกอบไปด้วยวงจรสมมูล ดังรูป



รูปที่ 1 วงจรสมมูลของ non-Ideal Op amp

เมื่อพิจารณาถึงวงจรสมมูล ดังรูปที่ 1 สามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุต และแรงดันเอาท์พุต ดังนี้

$$V_o = AV_d = A(V_2 - V_1)$$

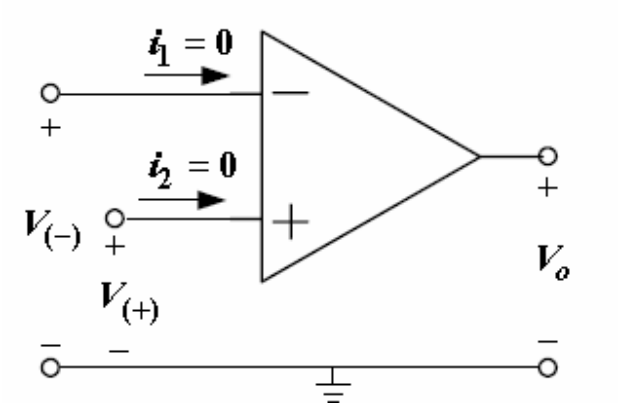
ซึ่งแหล่งจ่ายแรงดัน จะทำงานได้ก็ต่อเมื่อ มีแรงดันตกคร่อมที่ i_R ซึ่งจะเกิดขึ้นจากแรงดันอินพุต 1 v และ 2 v นั่นเอง
เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์วงจรออปแอมป์จะใช้คุณลักษณะทางอุดมคติในการวิเคราะห์วงจร

นิยามของออปแอมป์ในอุดมคติ

การพิจารณาออปแอมป์ทางอุดมคติจะกำหนดให้อัตราขยายลูปเปิด A มีค่าอนันต์ ความต้านทานอินพุตมีค่าเป็นอนันต์ และความต้านทานเอาท์พุตมีค่าเป็นศูนย์ คือ
และสามารถสรุปความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันได้ดังต่อไปนี้

$$A \simeq \infty$$
$$R_i \simeq \infty$$
$$R_o \simeq 0$$

และสามารถสรุปความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2 ออปแอมป์ทางอุดมคติ

ดังนั้นกระแสที่ไหลเข้าออปแอมป์ทางด้านอินพุตจะมีค่าเท่ากับศูนย์

$$i1=0, i2=0 \text{ หรือ } i1 = i2$$

และแรงดันที่ขาบวกและขาลบจะมีค่าเท่ากัน

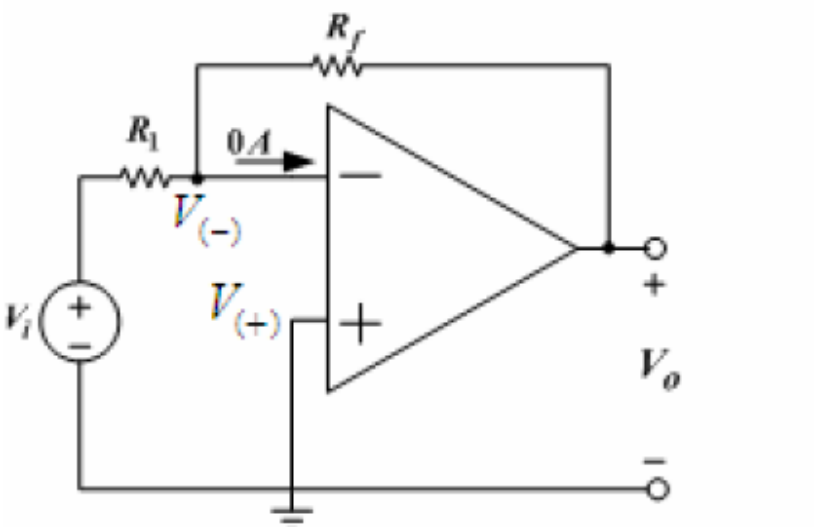
$$V(+) = V(-)$$

Note:เราสามารถหา $V(+)$,$V(-)$ ง่ายๆด้วยการสังเกตที่วงจรถ้าขั้วใดขั้วหนึ่งต่อลงกราวด์ค่าแรงดันตกคร่อมก็จะมีค่าเท่ากับศูนย์ หรือถ้าเกิดต่อกับแหล่งจ่ายแรงดัน ค่าแรงดันตกคร่อมที่ขั้วก็จะมีค่าเท่ากับค่าแรงดันที่แหล่งจ่ายนั้น

เราจะเห็นแล้วว่าสมการเริ่มคำนวณง่ายขึ้น แต่ก็คงสงสัยต่อไปว่าจะคำนวณหาค่าแรงดันเอาท์พุตได้อย่างไรในสภาวะอุดมคตินี้ เราสามารถหาสมการของแรงดันอินพุต และเอาท์พุตได้จากทฤษฎีของ Kirchhoff's Current Laws (KCL) มาช่วยในการคำนวณหาสมการความสัมพันธ์นั้น ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ดังนี้

วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier)

วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส คือ วงจรออปแอมป์ที่กลับสัญญาณอินพุตให้มีเครื่องหมายตรงกันข้ามกับของเดิม



รูปที่ 3 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส

พิจารณาจากรูปด้านบนเราจะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุต คือ

$$V(+) = 0 = V(-)$$

(ขั้วบวกของออปแอมป์ต่อลงกราวด์ แรงดันที่ขั้วมันจึงมีค่าเท่ากับศูนย์)

พิจารณาที่โนด $V(-)$ จาก KCL;

$$\frac{V_{(-)}-V_i}{R_1}+\frac{V_{(-)}-V_o}{R_f}=0$$

เมื่อแทนค่า V(−) = 0 ในสมการข้างต้น จะได้สมการความสัมพันธ์ คือ

$$\frac{-V_i}{R_1}-\frac{V_o}{R_f}=0$$

$$V_o=-\frac{R_f}{R_1}V_i$$

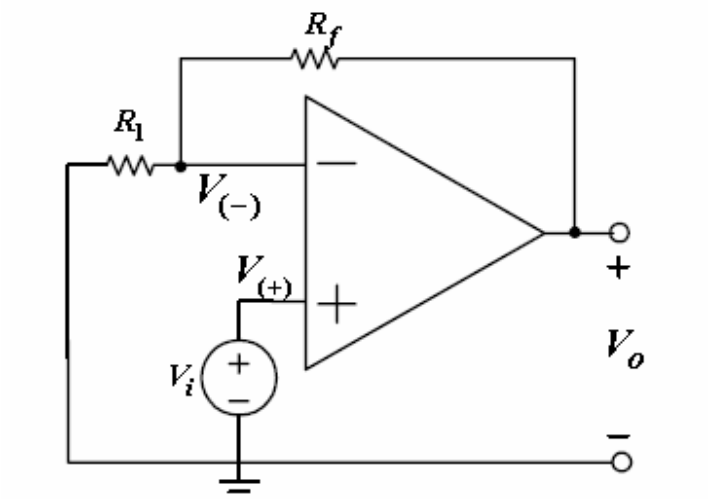
ซึ่ง

$-\frac{R_f}{R_1}$ คือ ค่า voltage gain

จะเห็นได้ว่าค่า voltage gain มีค่าติดลบซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงวงจรดังกล่าวทำหน้าที่กลับสัญญาณ

วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส (Noninverting Amplifier)

วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส คือ วงจรออปแอมป์ที่ออกแบบมาเพื่อให้ voltage gain มีค่าเป็นบวก หรือให้ค่าเอาท์พุตคงค่าเครื่องหมายเหมือนเดิม



รูปที่ 4 วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส

พิจารณาจากรูปจะได้ $V(+) = Vi = V(-)$

(ขั้วบวกของ Op amp ต่อกับแหล่งจ่ายแรงดัน แรงดันที่ขั้วมันจึงมีค่าเท่ากับแรงดันที่แหล่งจ่ายนั้น)

พิจารณาที่โนด $V(-)$ จาก KCL;

$$\frac{V_{(-)}}{R_1} + \frac{V_{(-)} - V_o}{R_f} = 0$$

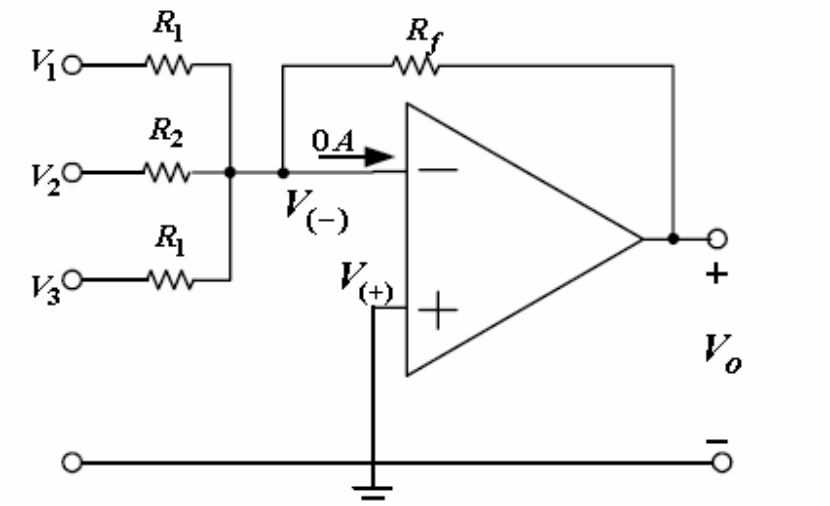
เมื่อแทนค่า $V(-) = Vi$ ในสมการข้างต้น จะได้

$$\frac{V_i}{R_1} + \frac{V_i - V_o}{R_f} = 0$$

$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) V_i$$

วงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ (Summing Amplifier)

วงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ คือ วงจรออปแอมป์ที่รวมอินพุตตั้งแต่ 2 อินพุตขึ้นไปมารวมกัน



รูปที่ 5 วงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ

พิจารณาจากรูป(สังเกตที่ขั้วบวก)จะได้

$$V(+) = 0 = \mathrm{V}(-)$$

พิจารณาที่โนด V(-) จาก KCL;

$$\frac{V_{(-)} - V_1}{R_1} + \frac{V_{(-)} - V_2}{R_2} + \frac{V_{(-)} - V_3}{R_3} + \frac{V_{(-)} - V_o}{R_f} = 0$$

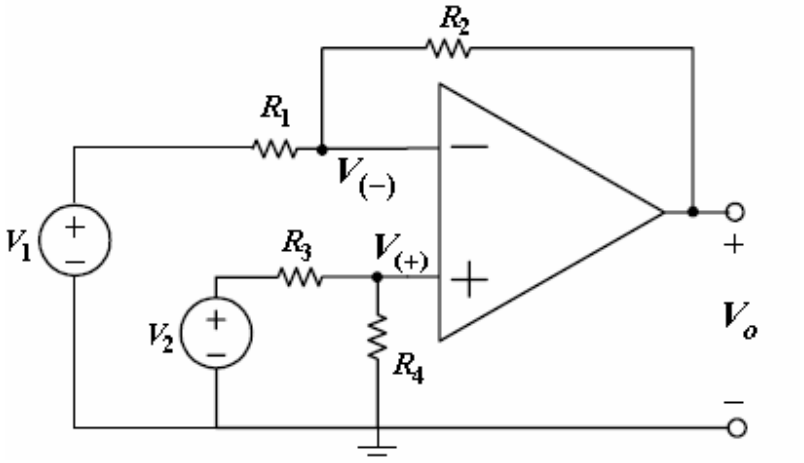
เมื่อแทนค่า $V(-) = 0$ ในสมการข้างต้น จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาท์พุต คือ

$$-\frac{V_1}{R_1}-\frac{V_2}{R_2}-\frac{V_3}{R_3}-\frac{V_o}{R_f}=0$$

$$V_o=-\left(\frac{R_f}{R_1}V_1+\frac{R_f}{R_2}V_2+\frac{R_f}{R_3}V_3\right)$$

วงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบสัญญาณ (Difference Amplifier)

วงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบ คือ วงจรที่ทำหน้าที่เป็นตัวเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างสองอินพุต



รูปที่ 6 วงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบ

จากรูป พิจารณาที่โนด $V(+)$ จาก KCL; $$\frac{V_{(+)}-V_2}{R_3}+\frac{V_{(+)}}{R_4}=0$$

จะได้

$$V_{(+)}=\left(\frac{R_4}{R_3+R_4}\right)V_2 \qquad (1)$$

พิจารณาที่โนด $V(-)$จาก KCL;

$$\frac{V_{(-)}-V_1}{R_1}+\frac{V_{(-)}-V_o}{R_2}=0$$

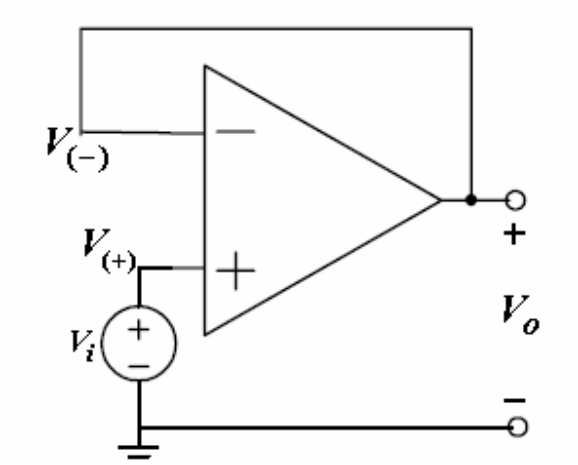
$$V_o=\left(\frac{R_2}{R_1}+1\right)V_{(-)}-\frac{R_2}{R_1}V_1 \qquad (2)$$

จากความสัมพันธ์ของแรงดัน $V(+) = V(-)$ แทนสมการ(1) ใน(2) จะได้

$$V_o=\left(\frac{R_2}{R_1}+1\right)\left(\frac{R_4}{R_3+R_4}\right)V_2-\frac{R_2}{R_1}V_1$$

วงจรขยายสัญญาณแบบตามแรงดัน (Voltage Follower (Buffer)

วงจรขยายสัญญาณแบบตามแรงดัน จะมี่แรงดันทางด้านเอาท์พุตเท่ากับแรงดันทางด้านอินพุต



รูปที่ 7 The voltage follower

พิจารณาจากรูปจะได้

$$V(+) = Vi = V(-)$$

และ

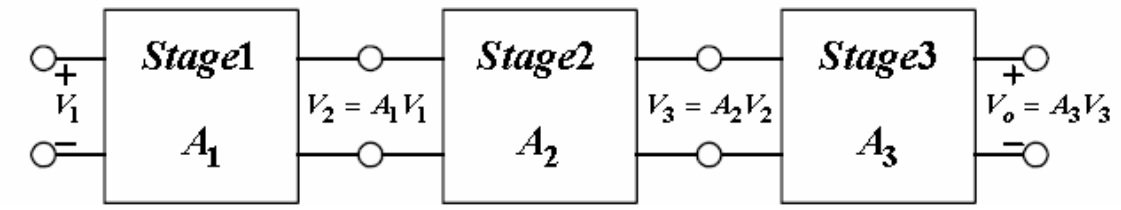
$$V(-) = V0$$

ได้

$$V0 = Vi$$

การต่อวงจรออปแอมป์แบบแคสเคด (Cascaded Op Amp Circuit)

การต่อแบบแคสเคดจะเป็นการต่ออนุกรมออปแอมป์ตั้งแต่ 2 วงจรขึ้นไป โดยค่าเอาท์พุตจะเป็นค่าอินพุตของอีกวงจรหนึ่งต่อไปเรื่อยๆ
(เอาท์พุตของวงจรออปแอมป์ตัวแรกจะเป็นอินพุตของออปแอมป์วงจรที่สอง)



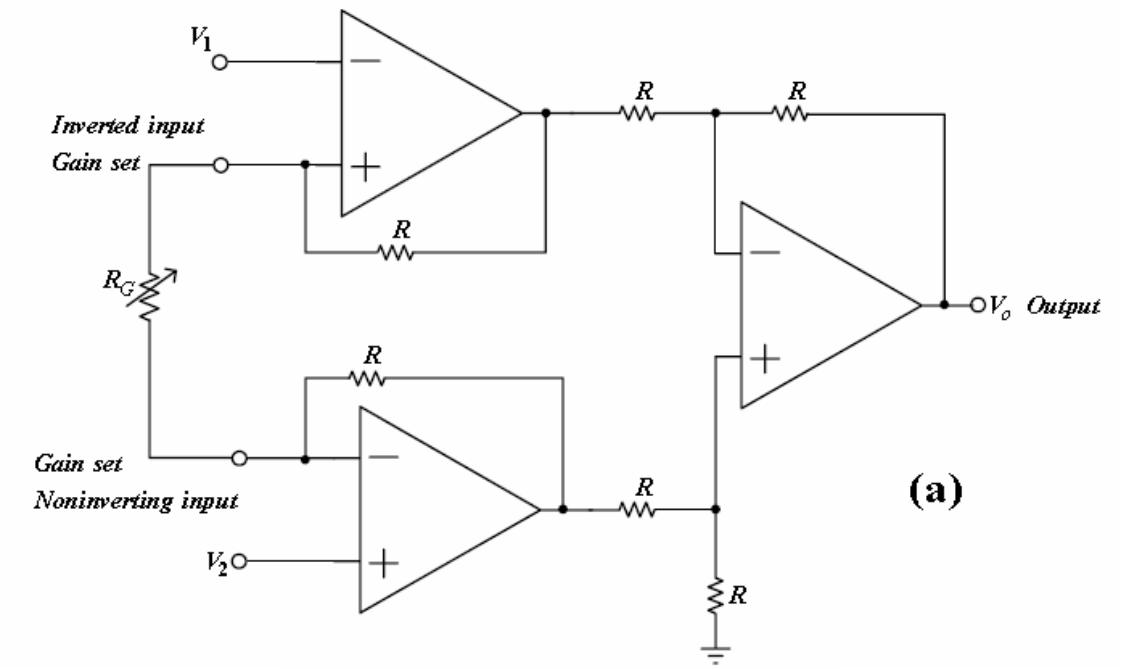
รูปที่ 8 วงจรออปแอมป์ต่ออนุกรมกัน 3 วงจร

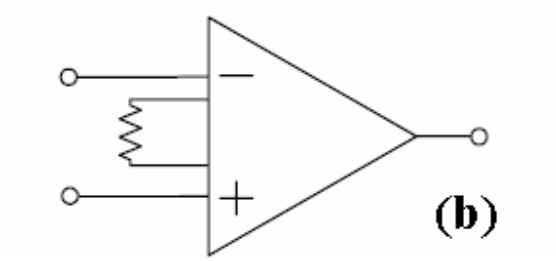
เมื่อพิจารณาจากรูปจะเห็นได้ว่า ค่า voltage gain ของวงจรมีค่าเท่ากับ

$$A = A_1A_2A_3$$

วงจรขยายสัญญาณในการวัดทางอุตสาหกรรม (Instrumentation Amplifiers)

วงจรขยายสัญญาณในการวัดทางอุตสาหกรรม คือ วงจรออปแอมป์ที่ใช้ในการขยายสัญญาณที่ได้จากการวัดซึ่งใช้ในงานอุตสาหกรรมทั่วๆไป จะมีรูปวงจรดังนี้





รูปที่ 9 (a) วงจรขยายสัญญาณในการวัดทางอุตสาหกรรมโดยปรับเกนด้วยตัวต้านทานภายนอก (b) รูปวงจรรวม

วงจรขยายสัญญาณในการวัดทางอุตสาหกรรมจะมีสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาท์พุตและแรงดันอินพุตเป็น

$$V_o = A_v(V_2 - V_1)$$

เมื่อค่า voltage gain หาได้จาก

$$A_v = 1 + \frac{2R}{R_G}$$

สรุป

1. ออปแอมป์ในอุดมคติจะมีค่า $A \simeq \infty, R_i \simeq \infty, R_o \simeq 0$
2. สำหรับออปแอมป์ในอุดมคติกระแสที่ไหลเข้าภายในตัวมันทั้งสองขั้วอินพุตจะมีค่าเท่ากับ “ศูนย์” $i_1=0, i_2=0$ หรือ $i_1 = i_2$ และความต่างศักย์ที่ตกคร่อมขั้วอินพุตจะมีค่าเท่ากัน $V(+) = V(-)$
3. วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส คือ วงจรออปแอมป์ที่กลับสัญญาณอินพุตให้มีเครื่องหมายตรงกันข้ามกับของเดิม
4. วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส คือ วงจรออปแอมป์ที่ออกแบบมาเพื่อให้ voltage gain มีค่าเป็นบวก หรือให้ค่าเอาท์พุตคงค่าเครื่องหมายเหมือนเดิม
5. วงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ คือ วงจรออปแอมป์ที่รวมอินพุตตั้งแต่ 2 อินพุตขึ้นไปมารวมกัน
6. วงจรขยายสัญญาณแบบเปรียบเทียบ คือ วงจรที่ทำหน้าที่เป็นตัวเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างสองอินพุต
7. วงจรขยายสัญญาณแบบตามแรงดัน จะมี่แรงดันทางด้านเอาท์พุตเท่ากับแรงดันทางด้านอินพุต

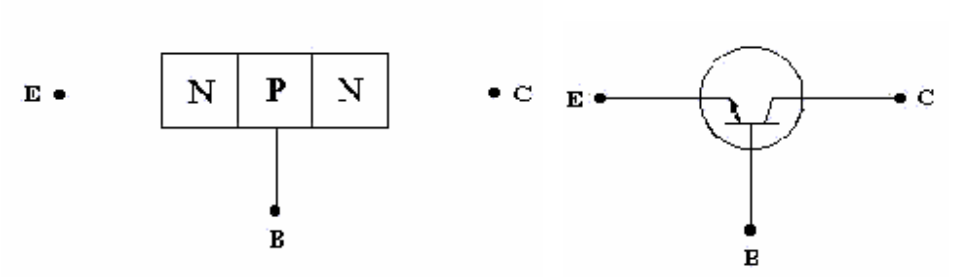
2.2ทรานซิสเตอร์ (TRANSISTORS)

ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์อิเลคตรอนิกส์ซึ่งมีรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ pn จำนวน 2 ตำแหน่ง จึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ (Bipolar Juntion Transistor(BJT)

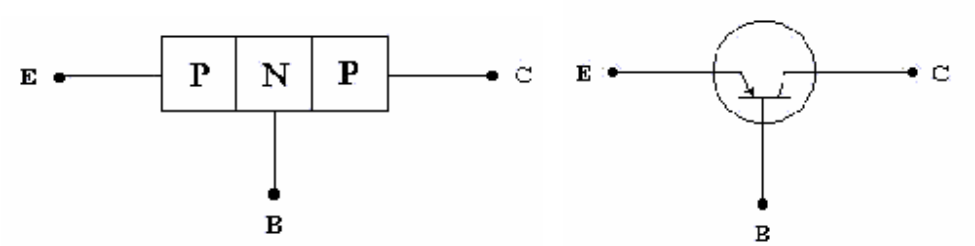
ประเภทของทรานซิสเตอร์ (Type of Transistors)

ทรานซิสเตอร์แบ่งตามโครงสร้างได้ 2 ประเภท คือ ทรานซิสเตอร์แบบ npn (npn Transistor) และทรานซิสเตอร์แบบ pnp (pnp Transistor)

ทรานซิสเตอร์แบบ npn ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิด n จำนวน 2 ชิ้นต่อเชื่อมกับสารกึ่งตัวนำชนิด p จำนวน 1 ชิ้น
แสดงสัญลักษณ์เป็นดังรูป



ทรานซิสเตอร์แบบ pnp ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิด p จำนวน 2 ชิ้นต่อเชื่อมกับสารกึ่งตัวนำชนิด n จำนวน 1 ชิ้น
แสดงสัญลักษณ์เป็นดังรูป



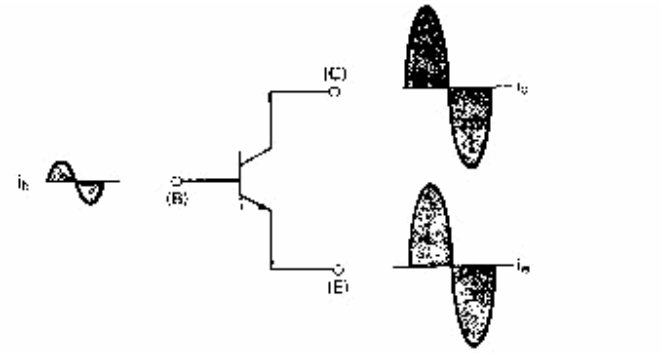
กระแสและแรงดันของทรานซิสเตอร์ (Transistor Current and Voltage)

เนื่องจากทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่มีขั้ว 3 ขั้ว คือ ขั้วคอลเลคเตอร์ (Collector;C), ขั้วเบส (ÚBase;B) และขั้วอิมิเตอร์ (Emitter;E) จึงมีกระแสและแรงดันทรานซิสเตอร์หลายค่า ดังนี้

กระแสของทรานซิสเตอร์

ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ซึ่งถูกควบคุมด้วยกระแสเบส [Base Current; I_B] กล่าวคือ เมื่อ I_B มีการเปลี่ยนแปลงแม้เพียง เล็กน้อยก็จะทำให้กระแสอิมิเตอร์ [Emitter Current; I_E] และกระแสคอลเลคเตอร์ [Collector Current; I_C] เปลี่ยนแปลงไปด้วย

นอกจากนี้ถ้าเราเลือกบริเวณการทำงาน (Operating Region) หรือทำการไบอัสที่รอยต่อของทรานซิสเตอร์ทั้ง 2 ตำแหน่ง ให้เหมาะสม ก็จะได้ I_E และ I_C ซึ่งมีขนาดมากขึ้นเมื่อเทียบกับ I_B



จากรูป เมื่อจ่ายสัญญาณกระแส ac ที่ขั้วเบส (i_b) หรือที่ด้านอินพุตของทรานซิสเตอร์ก็จะได้รับสัญญาณเอาต์พุตที่ขั้ว E (i_e) และที่ขั้ว C (i_c) มีขนาดเพิ่มขึ้น

ตัวประกอบหรือแฟกเตอร์ทีทำให้กระแสไฟฟ้า จากขั้วเบสไปยังขั้วคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเรียกว่า อัตราขยายกระแสไฟฟ้า (Current Gain) ซึ่งแทนด้วยอักษรกรีก คือ เบตา (Beta) ถ้าต้องการหาปริมาณ I_C ของทรานซิสเตอร์ ก็เพียงแต่คูณ I_B ด้วยพิกัด Beta เขียนเป็นสมการได้คือ

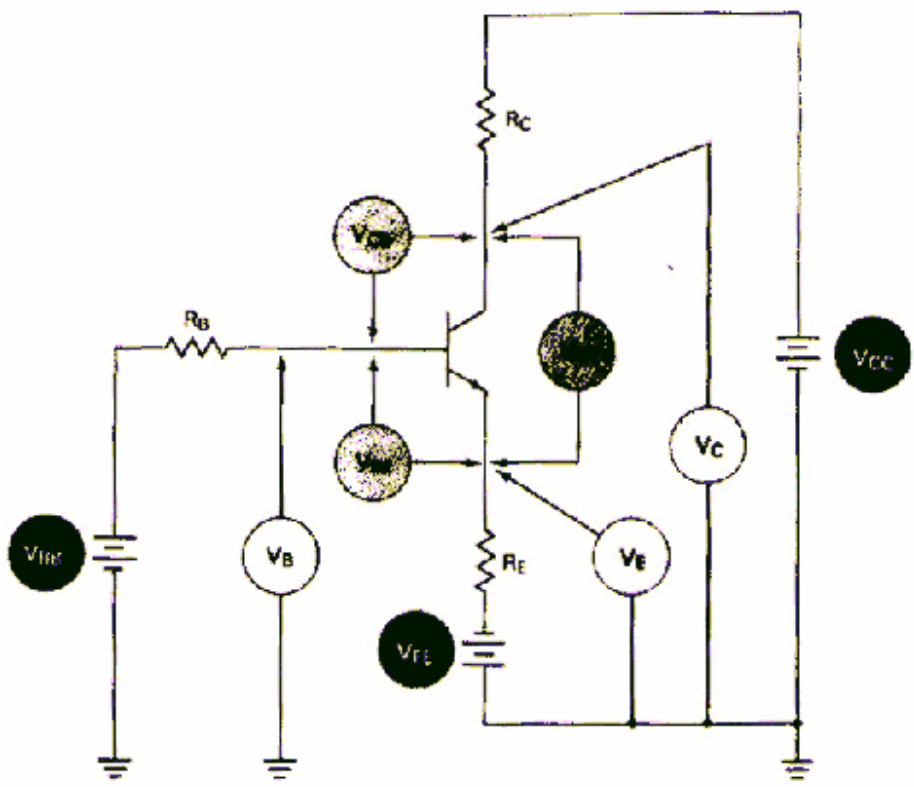
$$I_C = Beta * I_B \quad ; \quad \text{สมการที่ 1}$$

$$I_E = I_B + I_C \qquad ; \qquad \text{สมการที่ 2-a}$$

$$I_C \sim I_E \qquad ; \qquad \text{สมการที่ 2-b}$$

แรงดันของทรานซิสเตอร์

ขณะต่อทรานซิสเตอร์เพื่อใช้กับงานจริง มีแรงดันไฟฟ้าหลายประการเกิดขึ้น ดังนี้



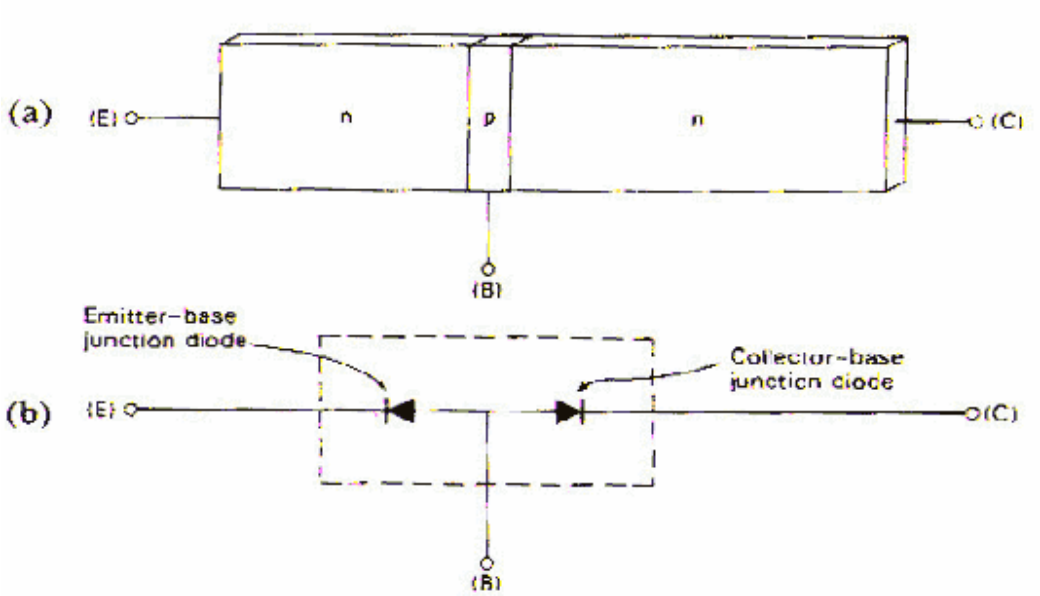
V_{CC}, V_{EE}, และV_{BB} เป็นแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

V_C, V_B และ V_E เป็นแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากขั้ว C, B และ E

V_{CE}, V_{BE} และV_{CB} เป็นแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ระหว่างขั้วที่ระบุตามตัวห้อย

โครงสร้างและการทำงานของทรานซิสเตอร์ (Transistor Construction and Operation)

ได้กล่าวมาแล้วว่าทรานซิสเตอร์ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำ 3 ชิ้นต่อเชื่อมกัน ดังนั้นจึงมีรอยต่อ pn จำนวน 2 ตำแหน่งดังรูป



ตำแหน่งที่อิมิตเตอร์กับเบสเชื่อมกันเป็นรอยต่อ pn เรียกว่า **รอยต่ออิมิเตอร์-เบส (Emitter Base Juntion)** ส่วนตำแหน่งที่ คอลเลคเตอร์กับเบสต่อเชื่อมกันเรียกว่า **รอยต่อคอลเลคเตอร์-เบส (Collector Base Juntion)** เขียนแทนได้ด้วย ค่าเทียบเคียงของไดโอด

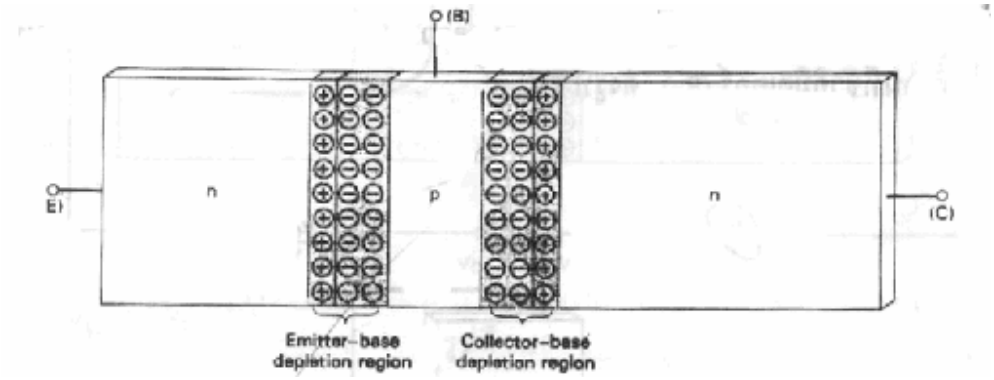
เมื่อนำหลักการ มาร่วมพิจารณา ทำให้ทราบว่าการที่จะนำทรานซิลเตอร์ไปใช้งานได้นั้นต้องต่อแรงดัน ไฟฟ้าเพื่อทำการไบอัสที่รอยต่อหรือไดโอดเทียบเคียงทั้งสอง เนื่องจากทรานซิลเตอร์ มี 3 ขั้ว การต่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเพื่อให้ทราน ซิสเตอร์ทำงานจึงเป็นไปได้ 3 แบบคือ

- การให้ทรานซิสเตอร์ทำงานที่บริเวณคัตออฟ (Cut-off Region)
- การให้ทรานซิสเตอร์ทำงานที่บริเวณอิ่มตัว (Saturation Region)
- การให้ทรานซิสเตอร์ทำงานที่บริเวณแอกตีฟ (Active Region)

ในการอธิบายถึงการทำงานที่บริเวณต่าง ๆ ของทรานซิสเตอร์นั้น จะเริ่มต้นจากกรณีไม่มีการต่อแรงดันที่ขั้ว ของทรานซิสเตอร์ หรือกรณีไม่ได้รับการไบอัส

กรณีไม่ได้รับการไบอัส

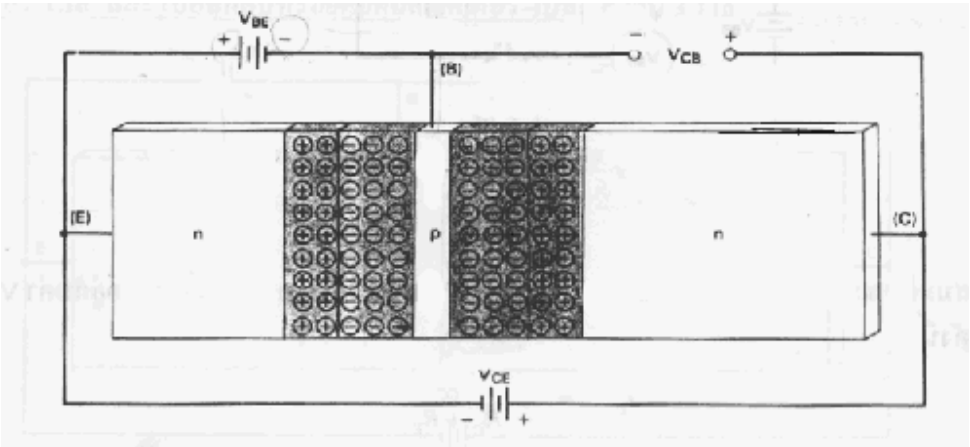
ขณะทรานซิสเตอร์ไม่ได้รับการไบอัส จะเกิดบริเวณปลอดพาหะ (Depletion Region) ที่รอยต่อทั้งสอง



การทำงานที่บริเวณคัตออฟ

การต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในบริเวณคัตออฟเป็นการไบอัสกลับที่รอยต่อทั้ง 2 ตำแหน่ง ซึ่งจะทำให้กระแสที่ไหลผ่านขั้วทั้งสามมีค่าใกล้ศูนย์

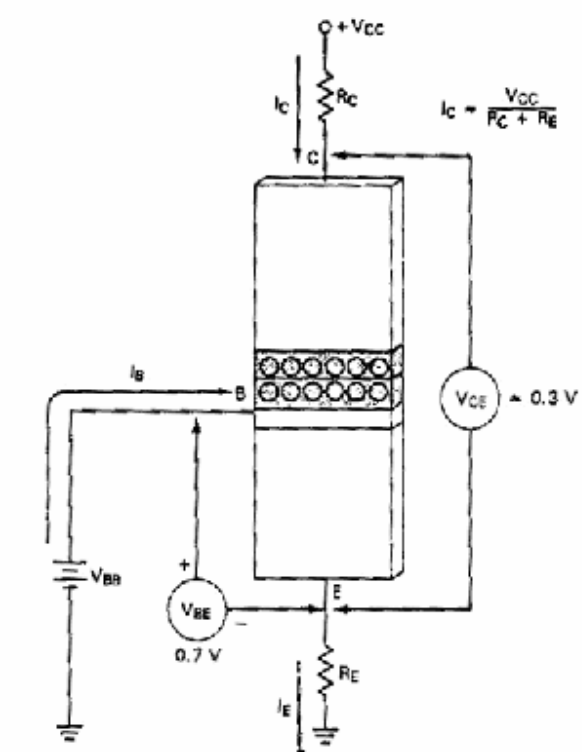
จากการต่อวงจรในลักษณะดังกล่าวบริเวณปลอดพาหะทั้งสองบริเวณจะขยายกว้างขึ้น จึงมีเพียงกระแสย้อน กลับ (Reverse Current) กระแสรั่วไหลปริมาณต่ำมากเท่านั้นที่ไหลจากคอลเลคเตอร์ไปยังอิมิตเตอร์ได้



การทำงานที่บริเวณอิ่มตัว

จากสมการที่1 ทำให้ทราบว่าถ้าค่า I_B เพิ่มขึ้น I_C ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อ I_C เพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุด หรือ เรียกว่า ทรานซิสเตอร์เกิดการอิ่มตัว ณ ตำแหน่งนี้ค่า I_C จะเพิ่มตามค่า I_B ไม่ได้อีกแล้ว

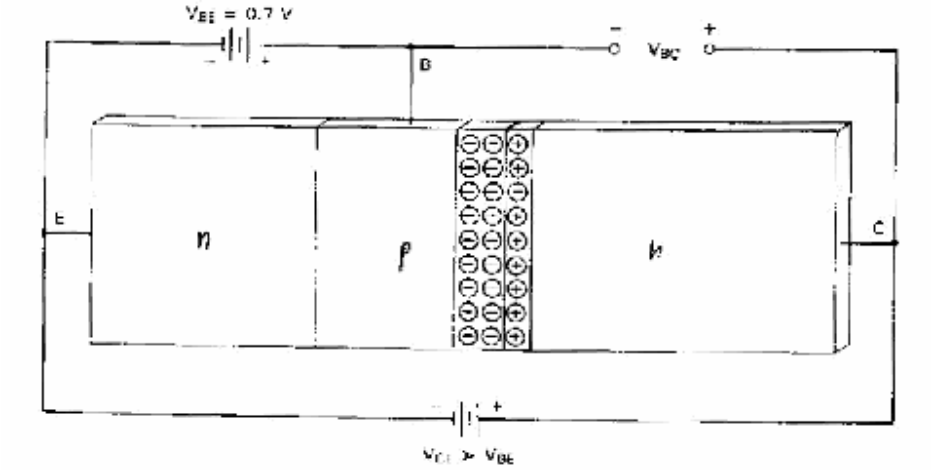
การหาค่า I_C ทำได้โดยใช้ V_{CC} หารด้วยผลรวมของความต้านทานที่ขั้วคอลเลคเตอร์ (R_C) กับความต้านทาน ที่ขั้วอิมิตเตอร์(R_E) ดังรูป



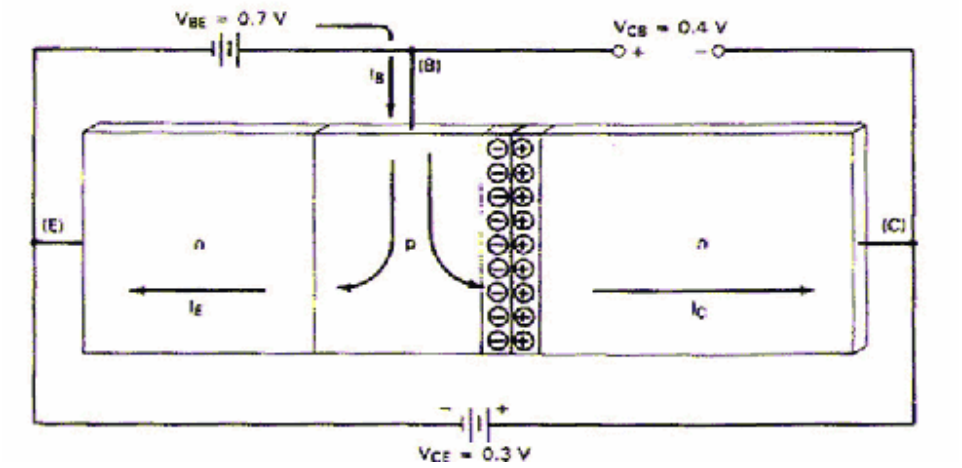
สมมติขณะที่ V_{CE} ของทรานซิสเตอร์มีค่า 0 V (สภาพในอุดมคติ) I_C จะขึ้นอยู่กับค่า V_{CC}, R_C และ R_E ดังนี้

$$I_C = V_{CC} / (R_C + R_E)$$

การต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในบริเวณอิ่มตัว เป็นการไบอัสตรงที่รอยต่อทั้ง 2 ตำแหน่ง ของทรานซิสเตอร์ ดังรูป

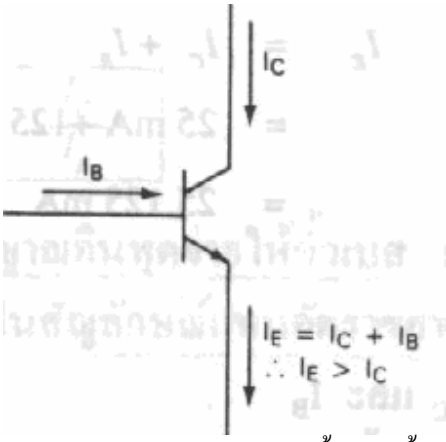


สมมติค่า V_{CE} ของทรานซิสเตอร์ขณะอิ่มตัว มีค่า 0.3 V (ซึ่งต่ำกว่า V_{BE} ที่มีค่า0.7 V) บริเวณรอยต่อคอลเลคเตอร์-เบส จะได้รับการไบอัสตรงด้วยผลต่างระหว่างแรงดัน V_{BE} กับ V_{CE} (เท่ากับ 0.4 V) กระแสไฟฟ้า I_E, I_C และ I_B จะมีทิศทาง
ดังรูป



การทำงานที่บริเวณแอกตีฟ

การต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในบริเวณแอกตีฟเป็นการแอกตีฟเป็นการไบอัสตรงที่รอยต่อ อิมิตเตอร์-เบส และไบอัสกลับที่รอยต่อคอลเลคเตอร์-เบส ดังรูป



การอธิบายหลักการทำงานของทรานซิสเตอร์ในบริเวณนี้จะง่ายขึ้น ถ้าพิจารณาเฉพาะรอยต่ออิมิตเตอร์-เบส โดยแทนด้วยสัญลักษณ์ของไดโอด ดังรูป b [สมมติ V_{BE} มีค่ามากพอที่จะทำให้ไดโอดทำงาน (Si ประมาณ 0.7 V และGe ประมาณ
0.3 V)]

รอยต่อคอลเลคเตอร์-เบสได้รับการไบอัสกลับ ทำให้บริเวณปลอดพาหะกว้างกว่าที่รอยต่ออิมิตเตอร์-เบสซึ่ง ได้รับการไบอัสตรง ดังนั้น ความต้านทานที่เบส (R_B) จึงมีค่าสูง เมื่อพิจารณาในรูปของไดโอดจะเห็นว่า IB เป็นกระแสที่มีค่าต่ำมาก เมื่อเทียบกับกระแสคอลเลคเตอร์ (I_C) และเป็นส่วนหนึ่งของ I_E ดังนั้น I_E ส่วนใหญ่จึงเป็นกระแส I_C ซึ่งผ่านรอยต่อคอลเลคเตอร์- เบส ของทรานซิสเตอร์

ค่าพิกัดของทรานซิสเตอร์

ค่าพิกัดของทรานซิสเตอร์มีหลายประเภท ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงค่าพิกัดเฉพาะบางประเภทอันเป็นพื้นฐาน สำคัญสำหรับการนำทรานซิสเตอร์ไปใช้วานให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด และหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดความเสียหายใด ๆ ซึ่งได้แก่ พิกัดเบตา
ไฟฟ้ากระแสตรง, พิกัดอัลฟาไฟฟ้ากระแสตรง, พิกัดกระแสไฟฟ้าสูงสุด และพิกัดแรงดันไฟฟ้าสูงสุด

เบตาไฟฟ้ากระแสตรง (DC BETA)

พิกัดเบตาไฟฟ้ากระแสตรงของทรานซิสเตอร์ซึ่งมักเรียกสั้น ๆ ว่าเบตา เป็นอัตราส่วนของ I_C ต่อ I_B เขียน เป็นสมการได้ดังนี้ คือ

$$\boldsymbol{Beta = I_C / I_B} \qquad ; \quad \text{สมการที่ 3}$$

วงจรทรานซิสเตอร์ส่วนมากมีสัญญาณอินพุตจ่ายให้ขั้วเบส และสัญญาณเอาต์พุตออกจากขั้วคอลเลคเตอร์ เบตาของทรานซิสเตอร์จึงเป็นสัญลักษณ์แทนอัตราขยายกระแส dc (dc Current Gain) ของทรานซิลเตอร์ จากสมการ 1 และ 3 หาค่ากระแสอิมิตเตอร์ได้ ดังนี้

$$I_C = Beta * I_B \quad ; \quad \text{สมการที่ 4}$$

$$I_E = I_B + I_C$$

$$= I_B + Beta * I_B$$

$$I_E = I_B(1+Beta) \quad ; \quad \text{สมการที่ 5}$$

เราใช้เบตาและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วใดขั้วหนึ่งหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ขั้วอื่น ๆ ได้

อัลฟาไฟฟ้ากระแสตรง (DC Alpha)

พิกัดอัลฟาของทรานซิสเตอร์ ซึ่งมักเรียกสั้น ๆ ว่า อัลฟา คือ อัตราส่วน I_C ต่อ I_E เขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$Alpha = IC / IE \quad \text{สมการที่ 6}$$

เมื่อนำกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์มาร่วมพิจารณา จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ ขั้วทั้งสามของทรานซิสเตอร์เป็นดังสมการ 1 คือ

; $I_E = I_B + I_C$

; $I_C = I_E - I_B$

เนื่องจาก I_C มีค่าต่ำกว่า I_E (เป็นปริมาณเท่ากับ I_B) ดังนั้น Alpha หรือ I_C/I_E จึงมีค่าต่ำกว่า I จากสมการที่ 6 ทำให้ได้

$$I_C = Alpha * I_E \quad \text{สมการที่ 7}$$

จากความสัมพันธ์ดังกล่าว หาค่า IB ได้ดังนี้

$$I_B = I_E - I_C$$
$$= I_E - (Alpha * I_E)$$

$$I_B = I_E(1-Alpha) \quad ; \quad \text{สมการที่ 8}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างอัลฟาและเบตา(The Relationship Between Alpha and Beta)

โดยทั่วไปสเปคของทรานซิสเตอร์จะระบุค่าเบตา แต่จะไม่มีค่าอัลฟาเนื่องจากมักใช้ค่าเบตาสำหรับ การคำนวณในวงจรทรานซิสเตอร์มากกว่าอัลฟา

แต่ในบางครั้งจำเป็นต้องหาค่าอัลฟาเพื่อคำนวณค่าอื่นต่อไป จึงมีวิธีการหาค่าอัลฟาในเทอมของเบตา โดยเริ่มต้นจาก

$$Alpha = I_C / I_E$$

เขียนสมการใหม่โดยใช้สมการที่4 แทนค่า IC และสมการที่5 แทนค่า I_E

$$Alpha = Beta / (1+ Beta) \quad \text{สมการที่ 9}$$

$$I_E = (Beta + 1)*I_B \quad \text{สมการที่ 10}$$

พิกัดกระแสไฟฟ้าสูงสุด

สเปคของทรานซิสเตอร์ระบุค่าพิกัดสูงสุดของกระแสคอลเลคเตอร์ [$I_{C(max)}$] ไว้เสมอ

$I_{C\,(max)}$ หมายถึง กระแสคอลเลคเตอร์สูงสุดที่ทรานซิสเตอร์ทนได้โดยไม่ทำให้เกิดความร้อนจน
ทรานซิสเตอร์ เสียหาย ดังนั้นการนำทรานซิสเตอร์ไปใช้งานต้องระวังไม่ให้ค่า I_C สูงกว่า $I_{C(max)}$

ค่า $I_{C(max)}$ จะขึ้นอยู่กับค่ากระแสเบสสูงสุด [$I_{B(max)}$] ดังนี้

$$I_{B(max)} = I_{C(max)} / Beta_{(max)} \quad ; \text{สมการที่ 11}$$

พิกัดแรงดันไฟฟ้าสูงสุด

สเปคของทรานซิสเตอร์ส่วนมากจะระบุค่าพิกัดสูงสุดของแรงดันที่ขั้วคอลเลคเตอร์-เบส [$V_{CB(max)}$]

$V_{CB(max)}$ หมายถึง แรงดันไบอัสกลับที่ใช้กลับที่ใช้กับรอยต่อคอลเลคเตอร์-เบสได้โดยไม่ทำให้ทรานซิสเตอร์เสียหาย ดังนั้นการนำทรานซิลเตอร์ไปใช้งานจึงต้องระวังไม่ให้ V_{CB} สูงกว่า $V_{CB(max)}$

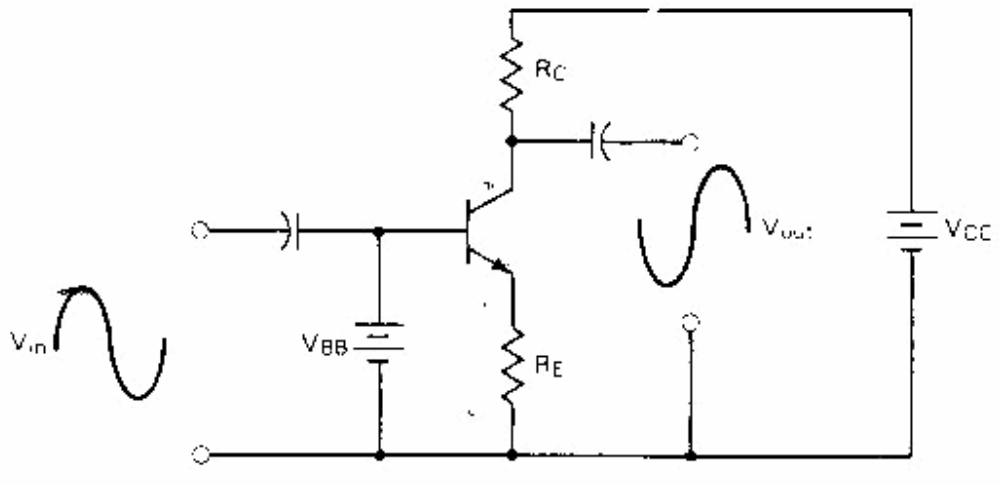
การจัดโครงสร้างของทรานซิสเตอร์พื้นฐาน(Basic Transistor Configuration)

เราทราบว่าโครงสร้างของทรานซิสเตอร์มีจำนวนทั้งหมด 3 ขั้ว จึงจัดโครงสร้างให้อยู่ในรูปวงจรได้ 3 แบบ คือ

- วงจรอิมิตเตอร์ร่วม
- วงจรคอลเลคเตอร์ร่วม
- วงจรเบสร่วม

วงจรอิมิตเตอร์ร่วม(Common Emitter)

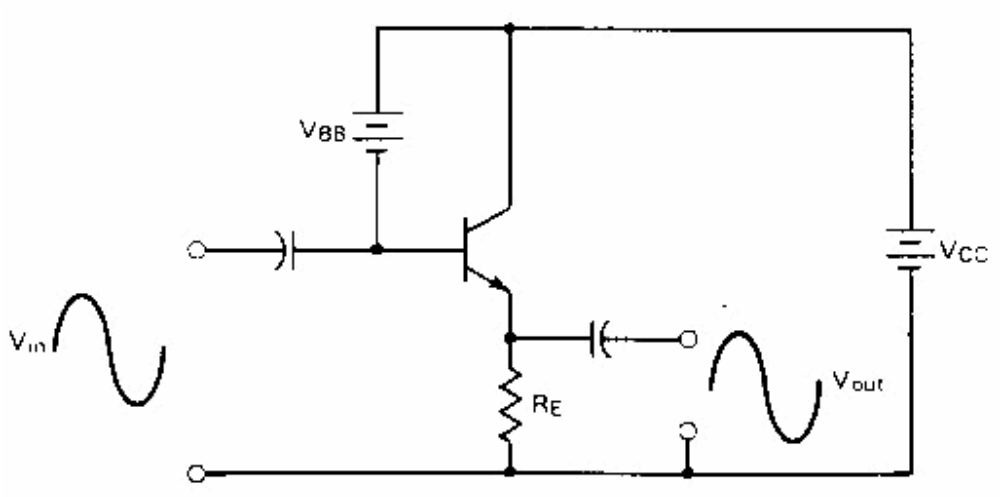
วงจรอิมิตเตอร์ร่วม เป็นวงจรที่มีการจ่ายอินพุตให้กับขั้วเบสและมีเอาต์พุตออกมาจากขั้วคอลเลคเตอร์



ชื่ออิมิตเตอร์ร่วมเป็นนัยแสดงว่าแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าทั้งสองมีจุดต่อร่วมกับขั้วอิมิตเตอร์ วงจรอิมิตเตอร์ร่วมมีอัตราขยายกระแสและอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าสูงและมีการเลื่อนเฟสแรงดัน ac อินพุตไปยังเอาต์พุต เป็นมุม 180 องศา

วงจรคอลเลคเตอร์ร่วมหรือวงจรตามสัญญาณอิมิตเตอร์(CommonCollector or Emitter Follower)

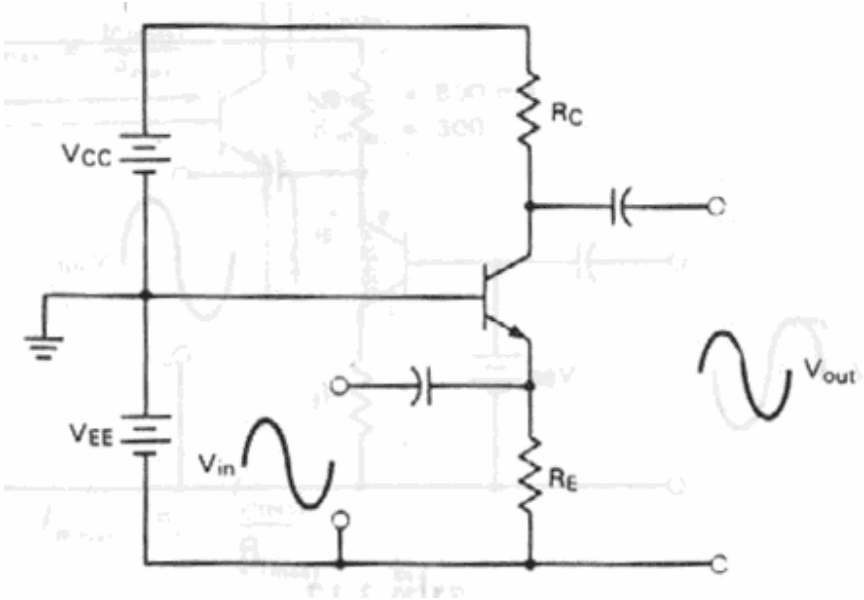
วงจรคอลเลคเตอร์ร่วมหรือวงจรตามสัญญาณอิมิตเตอร์เป็นวงจรที่มีการจ่ายอินพุตให้ ขั้วเบส และเอาต์พุตออกจากขั้วอิมิตเตอร์



วงจรคอลเลคเตอร์ร่วมมีอัตราขยายกระแสไฟฟ้าสูง แต่อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าต่ำ แรงดัน ac อินพุตกับแรงดัน ac เอาต์พุตจะ inphase กัน

วงจรเบสร่วม(Common Base)

วงจรเบสร่วม เป็นวงจรที่มีการจ่ายอินพุตให้ขั้วอิมิตเตอร์ และเอาต์พุตออกจากขั้วคอลเลคเตอร์ ชื่อเบสร่วมเป็นนัยแสดง ให้ทราบว่าขั้วเบสเป็นจุดต่อร่วมกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าทั้งสองวงจรเบสร่วมใช้มากในงานที่ต้องการความถี่สูง มีอัตราขยายกระแสไฟฟ้าต่ำ อัตราขยายแรงดันไฟฟ้า สูง และแรงดัน ac อินพุตกับแรงดัน ac เอาต์พุต Inphase กัน



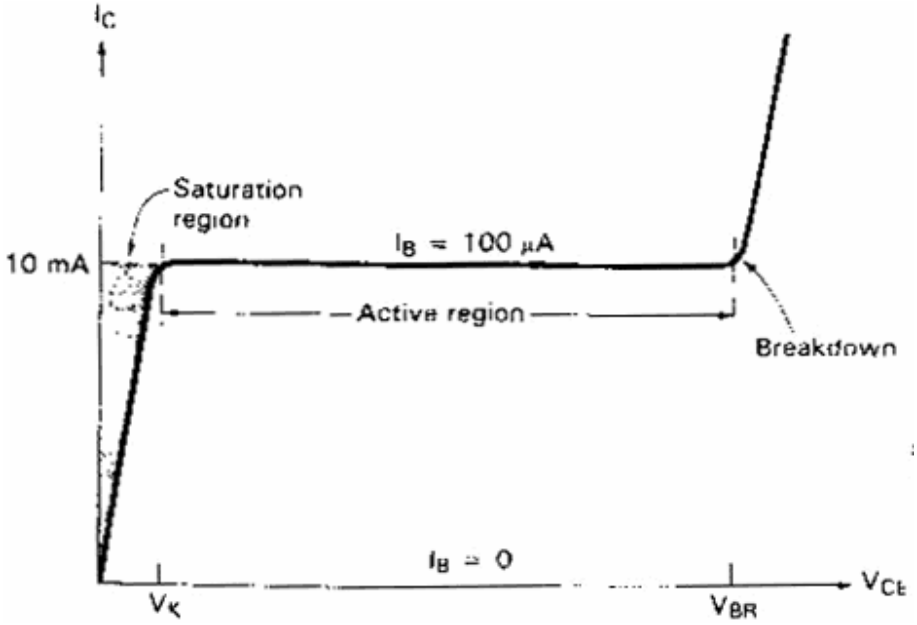
เคอร์ฟคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ (Transistor Characteristic Curves)

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาเคอร์ฟคุณลักษณะที่ใช้อธิบายการทำงานของทรานซิลเตอร์ ซึ่งประกอบด้วย เคอร์ฟคอลเลคเตอร์ เคอร์ฟเบส (ไม่พิจารณาเคอร์ฟของอิมิตเตอร์ เนื่องจากมีคุณลักษณะเหมือนกัลคอลเลคเตอร์) และเคอร์ฟาเบตา

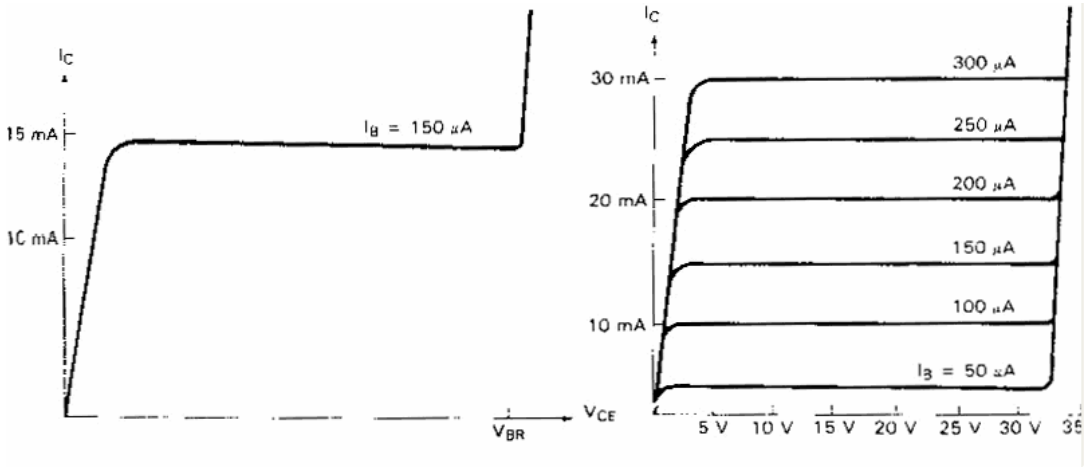
เคอร์ฟคอลเลคเตอร์ (Collector Curves)

เคอร์ฟคอลเลคเตอร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_C I_B และ V_{CE} ดังรูป สังเกตได้ว่าเคอร์ฟแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

1. - บริเวณอิ่มตัว (Saturation Region) คือบริเวณที่มีค่า V_{CE} ต่ำกว่าแรงดันที่ส่วนโค้งของเคอร์ฟ (Knee Voltage; V_K) ซึ่งเป็นระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้ทรานซิสเตอร์เริ่มทำงาน
2. บริเวณแอกตีฟ (Active Region) คือบริเวณที่มีค่า V_{CE} อยู่ระหว่าง V_K ถึงแรงดันพังทลายหรือแรงดันเบรกดาวน์ (Breakdown Voltage; V_{BR})
3. บริเวณเบรกดาวน์ (Breakdown Region) คือบริเวณที่มีค่า V_{CE} มากกว่า V_{BR} ขึ้นไป

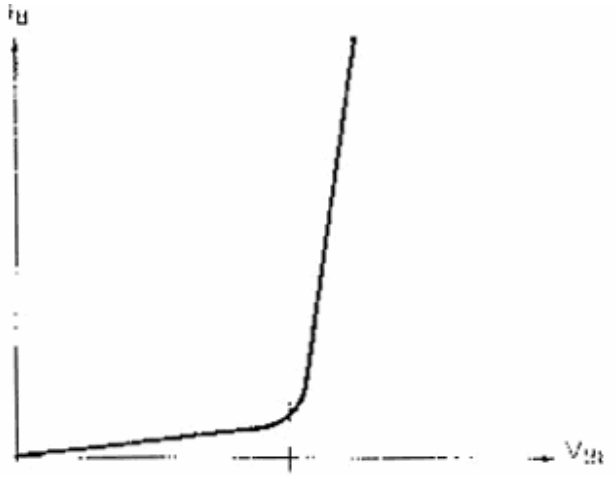


ถ้าเราเพิ่มค่า I_B จาก 100 uA เป็น 150 uA ก็จะได้เคอร์ฟเป็นดังรูป และหากเปลี่ยแปลง I_B หลาย ๆ ค่าก็จะได้เคอร์ฟคอลเลคเตอร์ ดังรูป



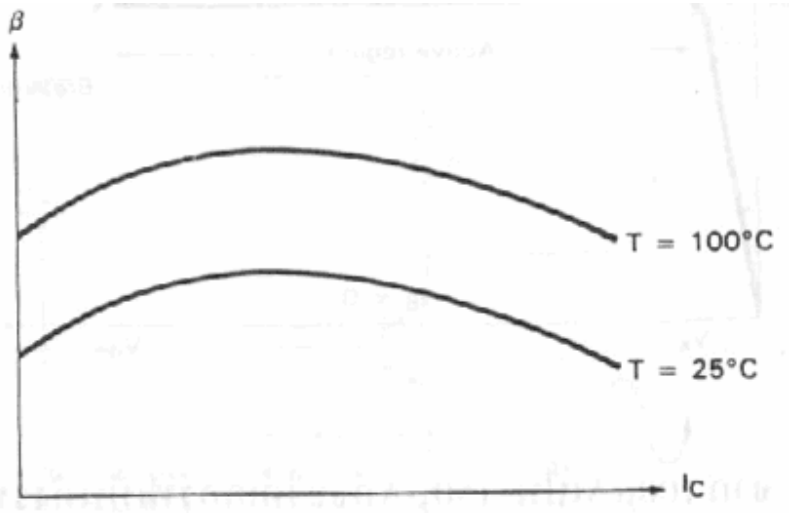
เคอร์ฟเบส (Base Curves)

เคอร์ฟเบสของทรานซิสเตอร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_B กับ V_{BE} ดังรูป จะเห็นได้ว่าเคอร์ฟนี้มีลักษณะคล้ายกัลเคอร์ฟของไดโอดขณะได้รับไบอัสตรง



เคอร์ฟเบตา (Beta Curves)

เคอร์ฟเบตาแสดงลักษณะที่เบตาไฟฟ้ากระแสตรงเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและIC ดังรูป



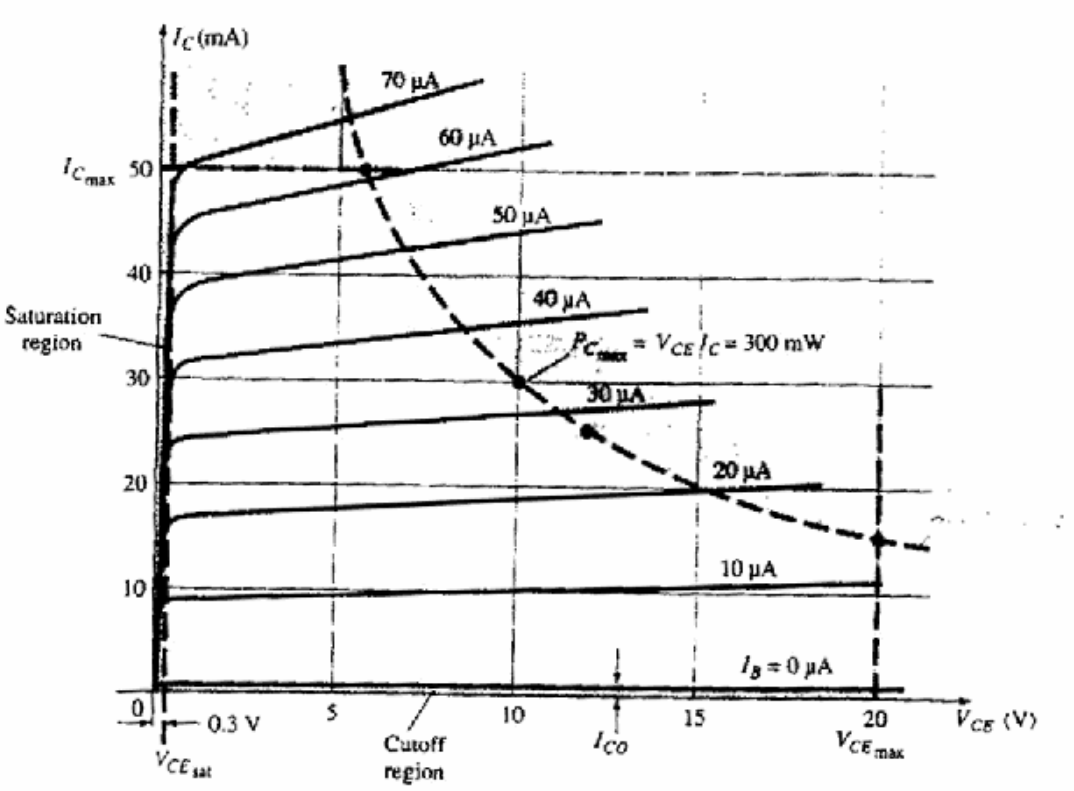
จะเห็นได้ว่าขณะอุณหภูมิ(T) = 100 C° เบตาจะมีค่ามากกว่าขณะอุณหภูมิ(T)= 25 C° นอกจากนี้แบตายังลดลงเมื่อ IC เปลี่ยนแปลงต่ำกว่าและสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้อีกด้วย

ข้อจำกัดในการทำงาน (Limits of Operation)

เราทราบว่าเคอร์ฟคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ประกอบด้วย 3 บริเวณ(ไม่รวมบริเวณเบรกดาวน์) คือบริเวณแอกตีฟ, คัตออฟ และอิ่มตัว ถ้าต้องการได้สัญญาณเอาต์พุตที่ดีที่สุด ไม่เพี้ยนหรือบิดเบี้ยว ต้องกำหนดบริเวณการทำงาน ให้อยู่ใน**ย่านแอกตีฟเท่านั้น**

จากหัวข้อที่ผ่านมา ทำให้ทราบว่าการนำทรานซิสเตอร์ไปใช้งานโดยไม่เกิดความเสียหายนั้น จะต้องมีค่า I_C ต่ำกว่า $I_{C(max)}$ และค่า V_{CB} ต่ำกว่า$V_{CB(max)}$นอกจากนั้นค่า V_{CE} ที่ใช้งานต้องต่ำกว่า $V_{CE(max)}$) ด้วย

เคอร์ฟคอลเลคเตอร์ เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่าง I_C กับ V_{CE} เส้นแนว ตั้งของเคอร์ฟที่ตำแหน่ง $V_{CE(sat)}$ และ $V_{CE(max)}$ เป็นส่วนหนึ่งที่กำหนดขอบเขตการทำงานของทรานซิสเตอร์ในบริเวณแอกตีฟ ตำแหน่ง $V_{CE(sat)}$ เป็นตัวกำหนดค่า V_{CE} ต่ำสุดที่ใช้งานได้ คือบอกให้ทราบว่าการทำงาน ของทรานซิสเตอร์ตั้งแต่ค่านี้เป็นต้นไปไม่อยู่ในบริเวณอิ่มตัว ส่วนตำแหน่ง $V_{CE(max)}$ เป็นตัวกำหนดค่า V_{CE} สูงสุดที่ใช้งานได้ คือบอกให้ทราบว่าการ ทำงานของทรานซิสเตอร์ไม่อยู่ในบริเวณเบรกดาวน์



ตัวบ่งบอกขอบเขตการใช้งานของทรานซิสเตอร์นอกเหนือจาก $V_{CE(sat)}$ และ $V_{CE(max)}$ คือ กำลังสูญเสียสูงสุด $P_{C(max)}$ ซึ่งหาค่าได้จาก

$$P_{C(max)} = V_{CE(max)} * I_{CE(max)}$$

สำหรับคุณลักษณะของทรานซิลเตอร์ในรูป

$$P_{C(max)} = (20V)(50mA) = 300mW$$

เมื่อทราบค่า $P_{C\,(max)}$ ก็จะสามารถเขียนเคอร์ฟกำลังสูญเสียสูงสุดที่มีความสัมพันธ์กับเส้นแนวตั้งของเคอร์ฟที่ตำแหน่ง $V_{CE(sat)}$และ $V_{CE(max)}$ ได้โดยเลือกค่า V_{CE} และ I_C ที่เหมาะสมแล้วแทนลงในสมการ

$$\boldsymbol{P_{C(max)} = V_{CE} I_C} \qquad \text{สมการที่ 12}$$

สำหรับกรณีนี้

$$P_{Cman} = V_{CE}I_C = 300mW$$

เลือกค่า $I_{C(max)} = 50$ mA และแทนค่าลงในสมการข้างต้น

; $V_{CE}I_C = 300$ mW

$V_{CE}(50\text{ mA}) = 300$ mW

$V_{CE} = 6V$

เลือกค่า $V_{CE(max)} = 20V$ แทนค่าลงในสมการเดิม

; $(20V)I_C = 300mW$

$IC = 15mA$

เลือกค่า $I_C = 25$ mA

; $V_{CE}(25mA) = 300mW$

$V_{CE} = 12V$

จากค่าที่ได้นำมาเขียนเคอร์ฟ $P_{C(max)}$เป็นเส้นโค้งประ สำหรับบริเวณคัตออฟคือบริเวณที่ I_C มีค่าเท่ากับกระแสรั่วไหล(I_{CO}) เป็นบริเวณที่ไม่เหมาะสม กับการใช้งาน เพราะจะทำให้ได้สัญญาณเอาต์พุตที่เพี้ยนหรือบิดเบี้ยว ส่วนบริเวณที่อยู่ภายในกรอบเส้นประ เรียกว่า บริเวณแอกตีฟ ถ้าต้องการให้ทรานซิสเตอร์ ทำงานในบริเวณดังกล่าวต้องมี

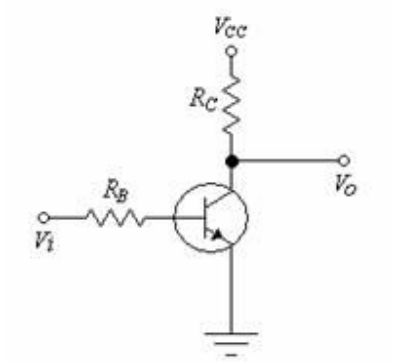
$$\boldsymbol{I_{CO} <= I_C <= I_{C(max)}}$$

$$\boldsymbol{V_{CE(Sat)} <= V_{CE} <= V_{CE(max)}}$$

$$\boldsymbol{V_{CE}I_C <= P_{C(max)}} \qquad \text{สมการที่ 13}$$

2.3วงจรทรานซิสเตอร์สวิทซ์ (Transistor Switching Circuit)

วงจรสวิทช์โดยปกติจะไม่มีการไบอัสแรงดัน เนื่องจากทรานซิสเตอร์จะถูกให้ทำงานแค่สองโหมดเท่านั้นคือ โหมดอิ่มตัว (Saturation Mode) และ โหมดคัตออฟ (Cutoff Mode)



รูป วงจรสวิทช์

จากรูปที่ 4.7 เป็นวงจรทรานซิสเตอร์สวิทช์แบบพื้นฐาน ซึ่งการพิจารณาวงจรจะพิจารณาในภาวะที่ ทรานซิสเตอร์อิ่มตัว (“ON”) หรือ นำกระแสกับทรานซิสเตอร์คัดออฟ (“OFF”) หรือ ไม่นำกระแส) ซึ่งในวงจรดังกล่าวเอาท์พุตที่ได้ (V_O) จะกลับเฟสกับอินพุต (V_I) นั่นคือ ถ้าอินพุตเป็น High (V_I) เอาท์พุตจะมีค่าเป็น Low (0 Volt) และ ถ้าอินพุตเป็น Low เอาท์พุตจะมีค่าเป็น High (มีค่าใกล้เคียง V_{CC}) เรียกวงจรแบบนี้ว่าวงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter)

เมื่อทรานซิสเตอร์ “ON” หรือ saturation

$$I_{Csat} = \frac{V_{CC}}{R_C}$$

การออกแบบจะต้องให้ I_B มีค่ามากพอที่จะทำให้ ทรานซิสเตอร์ “ON” อย่างเต็มที่ดังนั้น

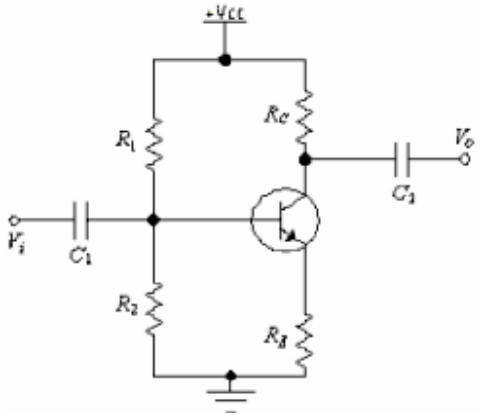
$$I_B > \frac{I_{Csat}}{\beta_{DC}}$$

เมื่อแรงดันอินพุตเท่ากับ V_I และ R_B ดังนั้น

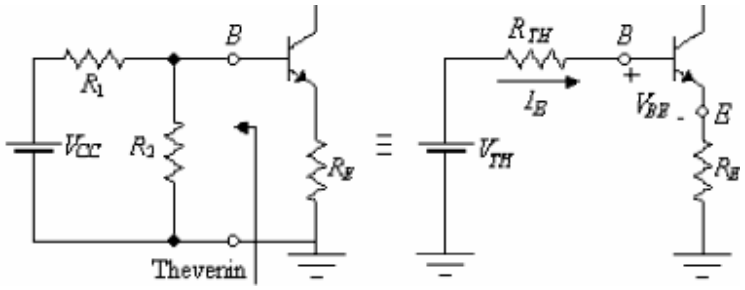
$$V_i = I_B R_B + V_{BE}$$

วงจรแบบแบ่งแรงดัน (Voltage-Divider Bias Circuit)

วงจรไบอัสแบบแบ่งแรงดันคือ วงจรไบอัสแบบรักษาระดับที่ขาอิมิตเตอร์ โดยเพิ่มตัวต้านทานค่าคงที่ต่อร่วมกับขาเบสเทียบกับกราวด์



รูปวงจรแบบแบ่งแรงดัน (Voltage-Divider Bias Circuit)



(a) (b)

รูป (a) Redrawing the input side of the network

(b) The Thevenin equvivalent circuit

วงจรอินพุต (Input Circuit)

สมการของวงจรวิเคราะห์ในรูปของเทวินิน โดยหาค่าความต้านทานเทวินิน (Rth) และหาค่าแรงดันเทวินิน (Vth) จากวงจรสมมูลออกมา นำไปหาค่ากระแส Ib ของวงจร

R_{TH} คือความต้านทานของ terminal เมื่อให้ Voltage Source ลัดวงจร

$$R_{TH} = R_1 \| R_2 \quad \text{--------} (4.14)$$

ส่วน V_{TH} คือ แรงดันปรากฏที่ terminal

$$V_{TH} = V_{R2} = \frac{R_2 V_{CC}}{R_1 + R_2} \quad \text{-------} (4.15)$$

ดังนั้นได้เป็นวงจรสมมูลดังสมการที่ 4.15 ใช้ KVL :

$$V_{TH} = I_B R_{TH} + V_{BE} + I_E R_E$$

จาก

$$I_E = (\beta + 1) I_B$$

ดังนั้น

$$I_B = \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_{TH} + (\beta + 1) R_E} \quad \text{-------} (4.16)$$

และ

$$I_C = \beta I_B$$

วงจรเอาท์พุต (Output Circuit)

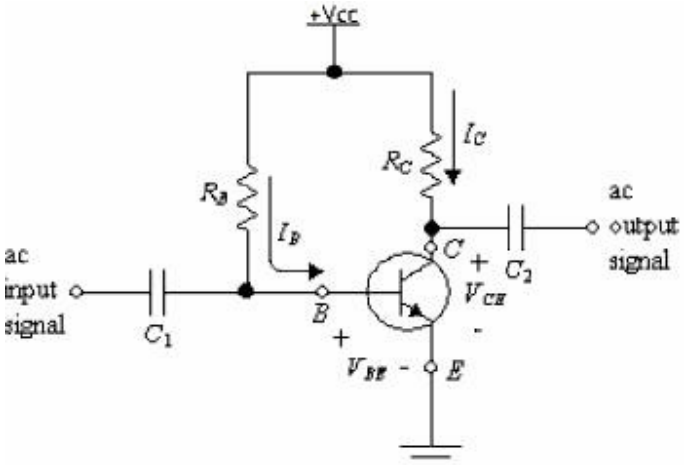
สมการของวงจรหาได้โดย KVL ที่เอาท์พุต ได้สมการดังนี้ :

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E)$$

การหาค่า V_C ,V_E และ V_B ก็สามารถหาได้เช่นเดียวกับใน วงจรเอาท์พุตของ วงจรแบบรักษาระดับที่ขาอิมิตเตอร์เพราะเป็นวงจรที่มีส่วนประกอบเหมือนกัน

วงจรไบอัสแบบคงที่ (FIXED – BIAS CIRCUIT)

เป็นวงจรไบอัสคงตัวของวงจรแบบอิมิตเตอร์ร่วม ในการวิเคราะห์ด้าน DC จากรูปที่ 4.1 วงจรแยกสัญญาณ ac ของอินพุตโดยใช้ตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 ทั้งยังช่วยป้องกันการไหลของกระแส DC ออกจากวงจรด้วย ดังนั้นการคำนวณจึงไม่ต้องนำสัญญาณอินพุตและเอาท์พุตมาคำนวณ การไบอัสของวงจรเกิดจากแหล่งจ่ายแรงดัน V_{CC} เท่านั้น



รูป Fix-Bias Circuit

การคำนวณวงจรไบอัสแบบคงที่ (FIXED-BIAS CIRCUIT)

วงจรอินพุต (Input Equation Base - Emitter) สมการของวงจรหาได้ด้วย KVL ที่อินพุตของทรานซิสเตอร์ ได้สมการดังนี้

$$V_{CC} = I_B R_B + V_{BE}$$

$$\therefore \quad I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

และ $$V_{BE} = V_B - V_E$$

เมื่อ $$V_E = 0$$

ดังนั้น

$$V_{BE} = V_B$$

วงจรเอาท์พุท (Output Equation Collector – Emitter)

จากความสัมพันธ์คุณสมบัติทรานซิสเตอร์

$$I_C = \beta I_B$$

สมการของวงจรหาได้ด้วย KVL ที่เอาท์พุต ดังนี้

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

และ

$$V_{CE} = V_C - V_E$$

แต่

$$V_E = 0$$

ดังนั้น

$$V_{CE} = V_C$$

การอิ่มตัวของทรานซิสเตอร์ (Transistor Saturation)

เมื่อทรานซิสเตอร์ถึงจุดอิ่มตัว

$$V_{CE} \cong 0\ \text{V}.$$

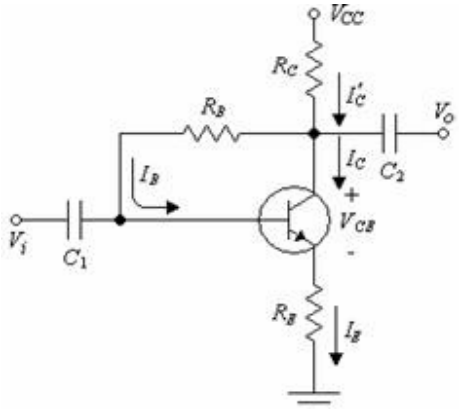
$$R_{CE} = \frac{V_{CE}}{I_C} = \frac{0\ \text{V}.}{I_{csat}}$$
$$= 0\ \Omega.$$

สำหรับวงจรไบอัสคงตัวจะมีค่ากระแส I_C ดังสมการ

$$I_{C\max} = \frac{V_{CC}}{R_C}$$

วงจรไบอัสแบบแบ่งแรงดันป้อนกลับ (DC Bias with voltage feedback)

วงจรไบอัสแบบแรงดันป้อนกลับ คือ การจัดวงจรไบอัสที่ขาเบสใหม่ โดยใช้ตัวต้านทานค่าคงที่ต่อคร่อมขาเบสกับขา collector มีผลให้ระดับแรงดันที่ขาเบสสามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ตามค่าระดับแรงดันที่ขา collector



รูป DC Bias with voltage feedback

วงจรอินพุต (Input Circuit)

สมการของวงจรหาได้ด้วย KVL ที่อินพุตของทรานซิสเตอร์ ได้สมการดังนี้

$$V_{CC} = I_C R_C + I_B R_B + V_{BE} + I_E R_E$$

แทนค่าด้วยสองสมการนี้

$$I_C = \beta I_B$$

$$I_E \cong I_C$$

จะได้

$$V_{CC} = \beta I_B R_C + I_B R_B + V_{BE} + \beta I_B R_E$$

หรือ

$$V_{CC} = V_{BE} + \beta I_B(R_C + R_E) + I_B R_B$$

ดังนั้น

$$I_B = \frac{(V_{CC} - V_{BE})}{R_B + \beta(R_C + R_E)}$$

การปรับปรุงเสถียรภาพของวงจร (Stability Improvement)

วงจรนี้จะทำให้เสถียรภาพดีขึ้นนั่นคือ จะทำให้ค่า I_C และ V_{CE} ซึ่งเป็นจุดทำงานของวงจรไม่ขึ้นกับค่า β พิจารณา เพื่อความสะดวกในการพิจารณาจากสมการ I_B ของวงจรถ้าให้ $V' = V_{CC} - V_{BE}$ และ $R' = R_C + R_E$

ดังนั้น

$$I_B = \frac{V'}{(R_B + \beta R')}$$

จาก

$$I_C = \beta I_B$$

$$I_C = \frac{\beta V'}{(R_B + \beta R')}$$

จากสมการจะเห็นได้ว่า ถ้า

$$\beta R' >> R_B$$

จะทำให้

$$R_B + \beta R' \cong \beta R'$$

ดังนั้น

$$I_C = \frac{\beta V'}{(R_B + \beta R')} \cong \frac{\beta V'}{\beta R'} = \frac{V'}{R'}$$

หรือ

$$I_C = \frac{V_C - V_{BE}}{(R_C + R_B)}$$

จากสมการจะเห็นได้ว่ากระแส I_C ที่จุดทำงานของวงจรไม่ขึ้นอยู่กับค่า จึงทำให้เสถียรภาพของวงจรดีขึ้น อย่างไรก็ตามเงื่อนไขจะเป็นจริงก็ต่อเมื่อ

$$\beta R' >> R_B$$

หรือ

$$\beta(R_E - R_C) >> R_B$$

วงจรเอาท์พุต (Output Circuit)

สมการของวงจรหาได้โดย KVL ที่เอาท์พุต ได้สมการดังนี้:

$$V_{CC} = I_E R_E + V_{CE} + I'_C R_C$$

เมื่อค่า

$$I'_C \cong I_C$$

$$I_E \cong I_C$$

จะได้

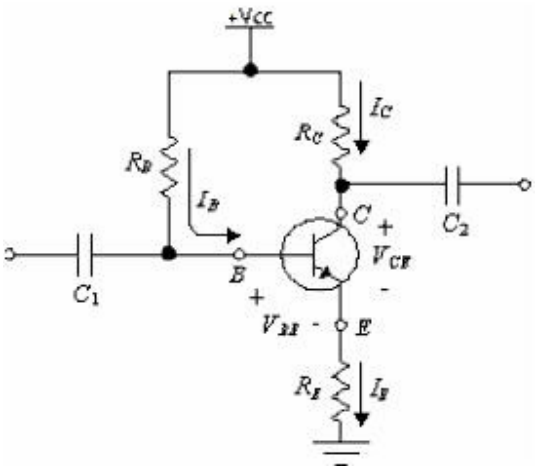
$$V_{CC} = V_{CE} + I_C(R_C + R_E)$$

เพราะฉะนั้น

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C\left(R_C + R_E\right)$$

วงจรอิมิตเตอร์ไบอัส (EMITTER BIAS CIRCUIT)

การไบอัสแบบรักษาระดับที่ขาอิมิตเตอร์ คือ วงจรไบอัสแบบคงที่ที่เพิ่มตัวต้านทานค่าคงที่ (R_E) เข้าไปในวงจรขาที่อิมิตเตอร์



รูปรูปวงจรไบอัสแบบรักษาระดับที่ขาอิมิตเตอร์ (EMITTER BIAS CIRCUIT)

การคำนวณวงจรอิมิตเตอร์ไบอัส

วงจรอินพุต (Input Equation Base - Emitter) พิจารณาวงจรอินพุต จาก KVL :

$$V_{CC} = I_B R_B + V_{BE} + I_E R_E$$

จาก

$$I_E = (\beta + 1) I_B$$

ดังนั้น

$$V_{CC} = I_B R_B + V_{BE} + (\beta + 1) I_B R_E$$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1) R_E}$$

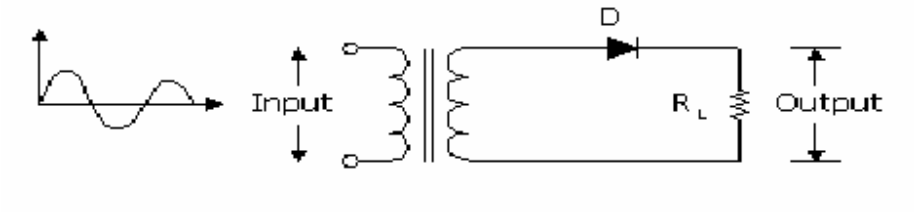
ตัวต้านทาน emitter ที่ปรากฏในวงจรอินพุต จะมีค่าเป็น $(\beta + 1)R_E$

$$R_i = (\beta + 1) R_E$$

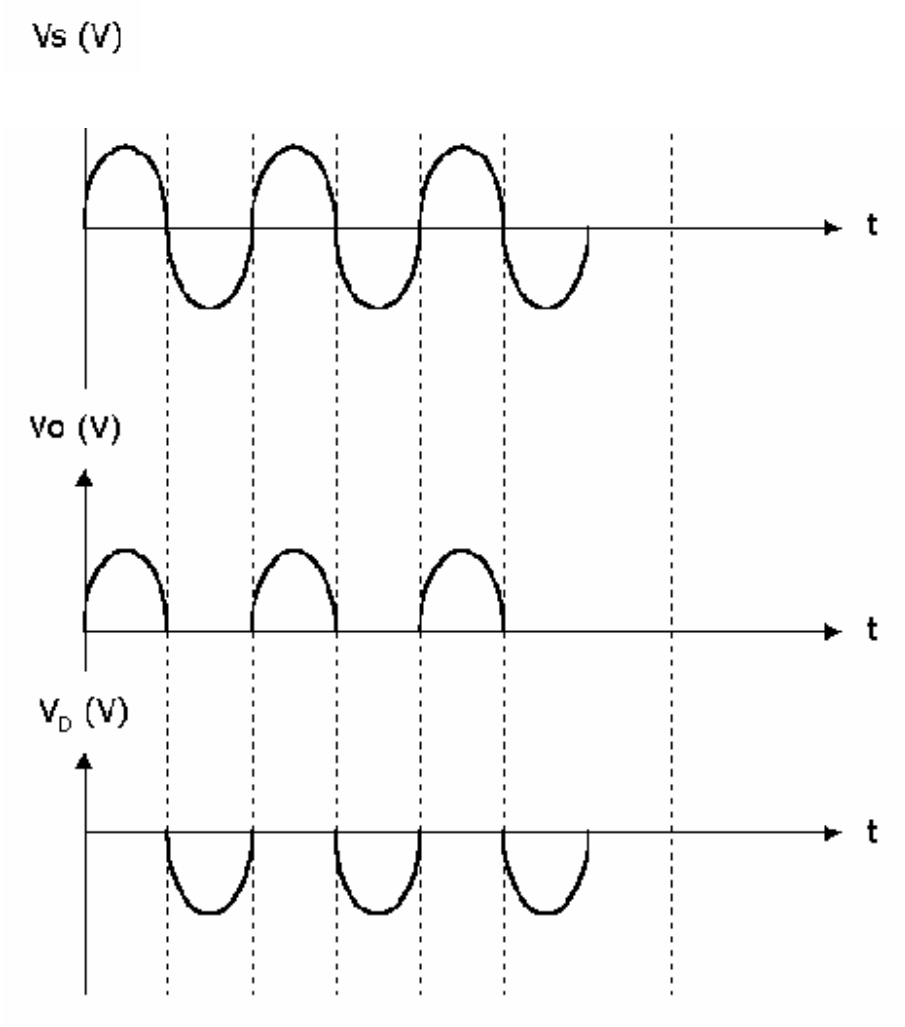
2.4วงจรเรียงกระแส

วงจรฮาล์ฟเวฟเรคติไฟเออร์ (Half wave rectifier)

วงจรเรคติไฟเออร์ คือ วงจรไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติในการแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง อุปกรณ์ที่นิยมใช้ในวงจรได้แก่ ไดโอด



รูปวงจรฮาส์ฟเวฟเรคติไฟเออร์



รูปคลื่นวงจรฮาส์ฟเวฟเรคติไฟเออร์

จากรูปเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้วงจร เมื่อสัญญาณในซีกลบเข้ามา ไดโอดจะได้รับไบแอสกลับจึงไม่กระแสไหลในวงจร แรงดันตกคร่อม RL เท่ากับศูนย์ และเมื่อสัญญาณในซีกบวกเข้ามา ไดโอดจะถูกไบแอสตรงทำให้มีกระแสไหลในวงจร ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม RL ตามสัญญาณอินพุท ดังนั้นวงจรจะยอมให้สัญญาณในซีกบวกผ่านได้เท่านั้น สัญญาณเอาท์พุทที่ออกมาเป็นสัญญาณครึ่งไซเคิลที่เรียกว่า ฮาล์ฟเวฟ (half wave) วงจรฮาล์ฟเวฟจะสามารถจ่ายกระแสให้กับกับโหลด ได้เพียงในช่วงไซเคิลที่เป็นบวกเท่านั้น ดังนั้นวงจรนี้จึงใช้จ่ายกระแสให้โหลดได้ไม่เต็มที่นัก

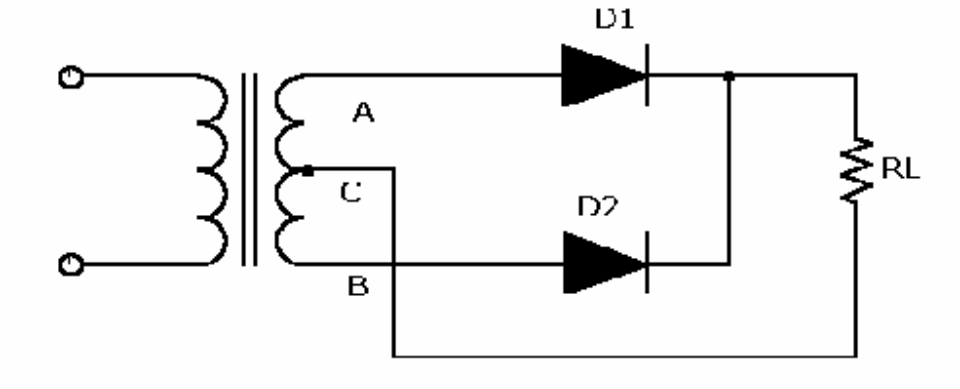
แรงดันเอาท์พุทโดยประมาณ VDC = 0.318 VP

ถ้าคิดแรงดันตกคร่อมไดโอด

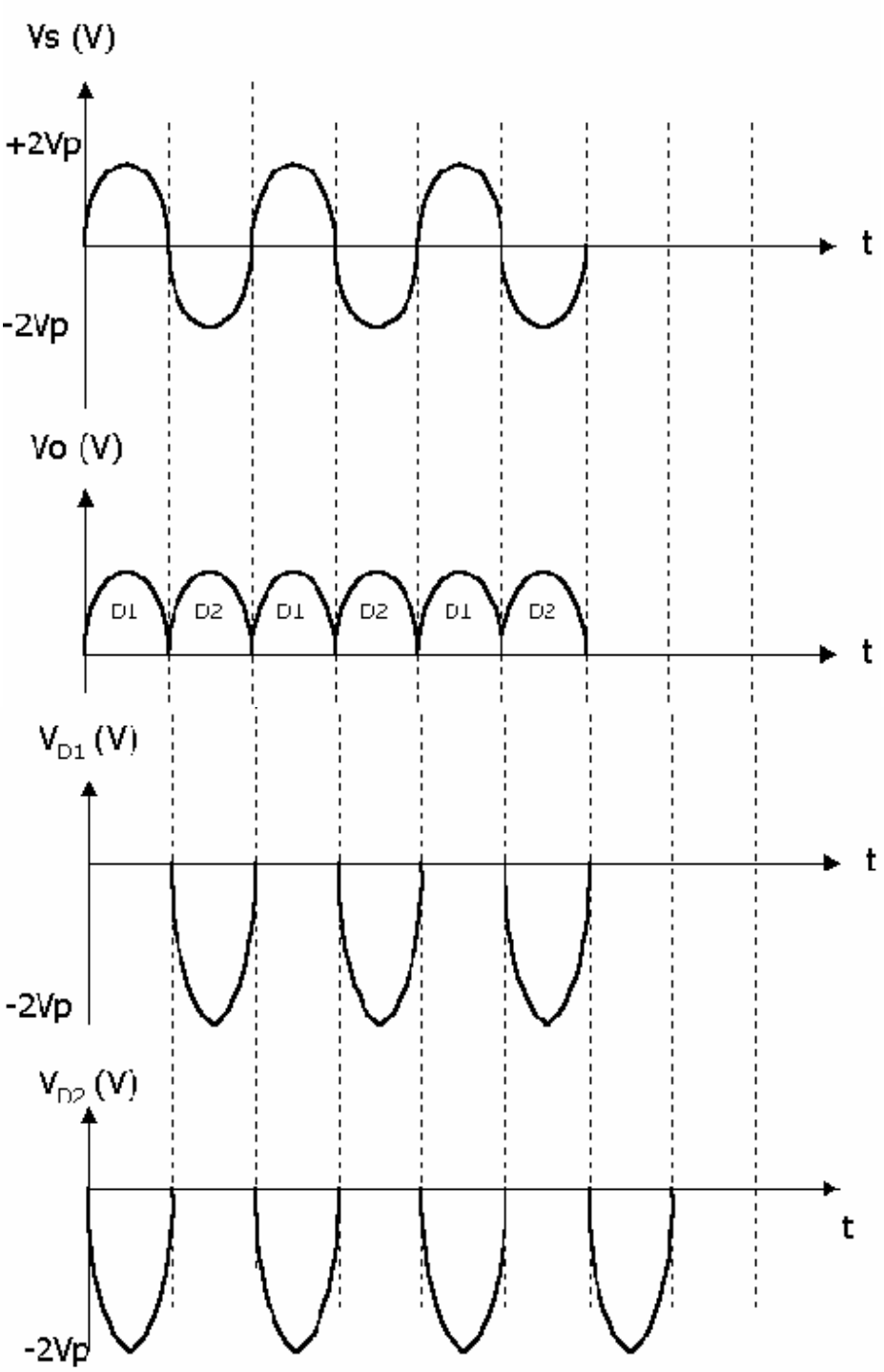
แรงดันเอาท์พุทเท่ากับ VDC = 0.318 (VP-0.7)

วงจรฟูลเวฟเรคติไฟเออร์ (Full wave rectifier)

ข้อเสียของวงจรฮาล์ฟเวฟเรคติไฟเออร์สามารถแก้ไขได้ โดยการใช้วงจรที่เรียกว่าวงจรฟูลเวฟเรคติไฟเออร์ วงจรนี้จะต้องใช้ไดโอด 2 ตัวในวงจร เพื่อจะให้ไดโอดเกิดการนำกระแสตัวละครึ่งไซเคิลของไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นวงจรจะสามารถจ่ายกระแสไฟตรงได้เรียบ และจ่ายกระแสได้สูงกว่าแบบวงจรฮาล์ฟเวฟเรคติไฟเออร์ด้วย



รูปวงจรฟูลเวฟเรคติไฟเออร์



รูปคลื่นวงจรฟูลเวฟเรคติไฟเออร์

จากรูปวงจรฟูลเวฟเรคติไฟเออร์ เมื่อมีสัญญาณซีกบวกเข้าที่จุด A ที่ D1 ได้รับไบแอสตรง ทำให้ไดโอดนำกระแส มีแรงดันตกคร่อม RL และครบวงจรที่จุด C ส่วนที่จุด B มีศักดาลบเมื่อเทียบกับจุด A ทำให้ D2 ได้รับไบแอสกลับ D2 ไม่นำกระแส และเมื่อสัญญาณซีกลบเข้าที่จุด A ทำให้ที่ D1 ไม่นำกระแส แต่ที่จุด B จะมีศักดาบวกเมื่อเทียบกับจุด A ทำให้ D2 นำกระแส มีแรงดันตกคร่อม RL และครบวงจรที่จุด C

ดังนั้นวงจรฟูลเวฟเรคติไฟเออร์จะให้แรงดันไฟที่เอาท์พุททุก ๆ ครึ่งไซเคิลของแรงดันไฟสลับ ค่าเฉลี่ยของแรงดันเอาท์พุทจึงมีค่าเป็น สองเท่าของแรงดันไฟตรงที่ได้จากวงจรฮาล์ฟเวฟเรคติไฟเออร์

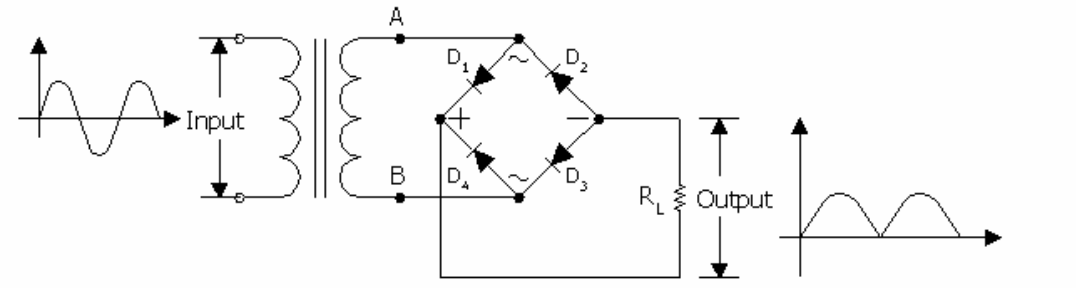
แรงดันเอาท์พุทโดยประมาณ VDC (full wave) = 0.636 VP

ถ้าคิดแรงดันตกคร่อมไดโอด

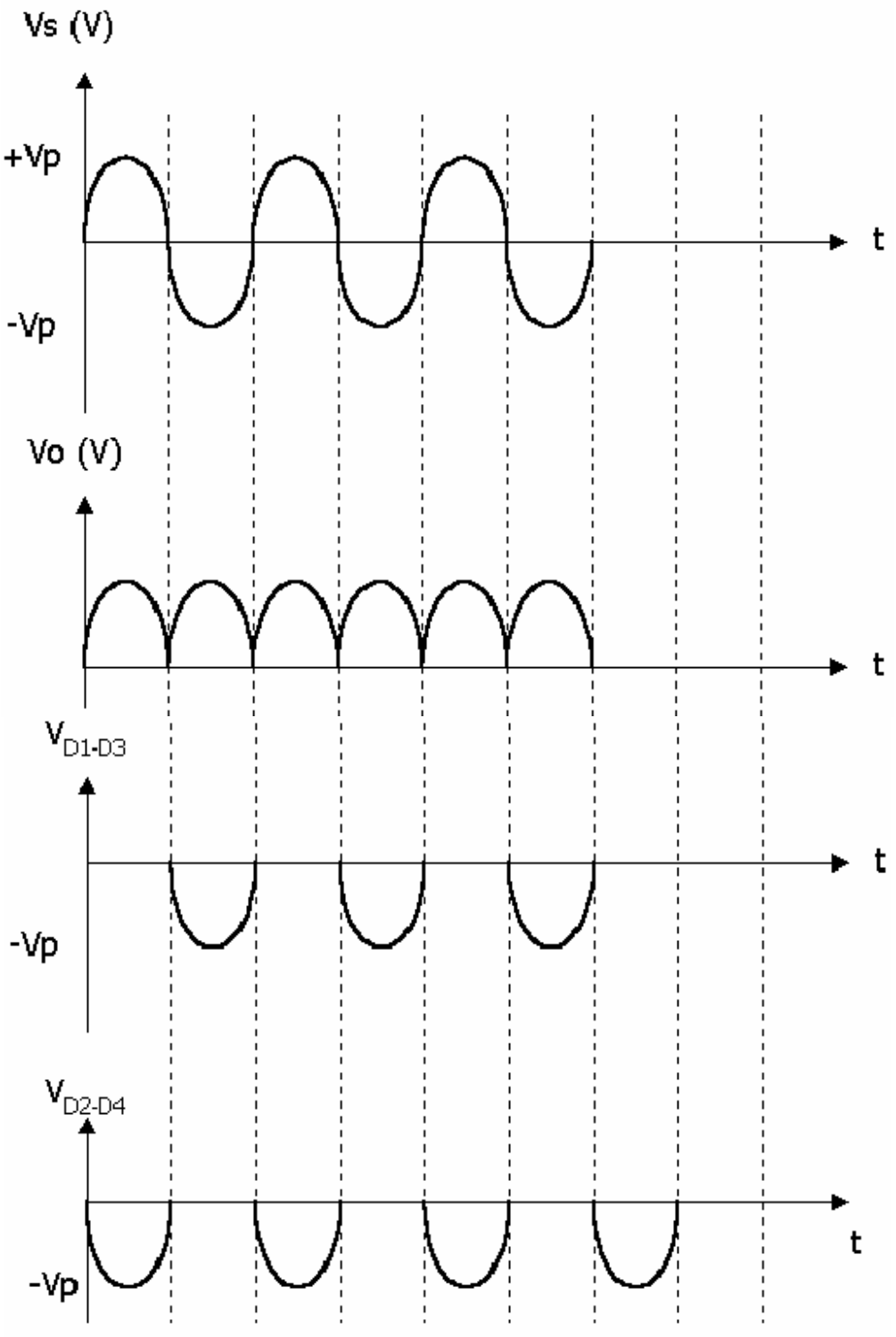
แรงดันเอาท์พุทเท่ากับ VDC (full wave) = 0.636 (VP-0.7)

วงจรบริดส์เรคติไฟเออร์ (Bridge rectifier)

วงจรที่ให้สัญญาณออกเป็นรูปฟูลเวฟ (full wave) อีกแบบหนึ่งคือวงจรบริดส์เรคติไฟเออร์ แต่ที่ต่างกันคือในวงจรบริดส์จะใช้ไดโอด 4 ตัว และหม้อแปลงจะเป็นแบบไม่มีเซ็นเตอร์แท็ป



รูปวงจรบริดส์เรคติไฟเออร์



รูปคลื่นวงจรบริดส์ติไฟเออร์

จากรูปเมื่อมีสัญญาณไฟซีกบวกเข้ามาที่จุด A จะทำให้ที่ D2 และ D4 ได้รับไบแอสตรง กระแสไฟจะไหลผ่าน D2 โหลด RL และ D4 ครบวงจรที่จุด B ในขณะเดียวกันที่ D1 และ D3 จะได้รับไบแอสกลับทำให้ไดโอดไม่นำกระแส และเมื่อที่จุด B มีสัญญาณไฟซีกบวกเข้ามา กระแสจะไหลผ่านD3 โหลด RL และ D1 ครบวงจรที่จุด A แต่ในขณะเดียวกันที่ D2 และ D4 จะไม่นำกระแส วงจรบริดส์จะให้สัญญาณเอาท์พุทเหมือนกับวงจรฟูลเวฟ

แรงดันเอาท์พุทโดยประมาณ VDC (full wave) = 0.636 VP

ถ้าคิดแรงดันตกคร่อมไดโอด
แรงดันเอาท์พุทเท่ากับ VDC (full wave) = 0.636(VP-1.4)

2.5 ไดโอด

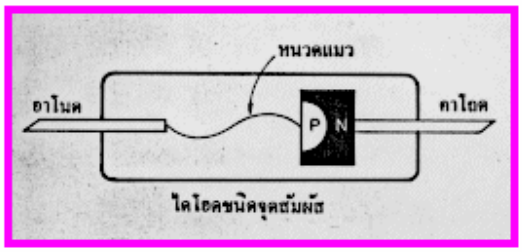
ไดโอดเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งของวงจรอิเลคทรอนิคส์ทั่วไปในสมัยก่อนไดโอดมักจะเป็นแบบหลอดสูญญากาศ ปัจจุบันความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีเป็นไปอย่างรวดเร็วทำให้สิ่งประดิษฐ์ชนิดใหม่ ซึ่งทำด้วยสารกึ่งตัวนำได้เข้ามาแทนที่หลอดสูญญากาศ ไดโอดที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำมีสองขั้วและมีขนาดเล็กใช้งานได้ง่าย

ชนิดของไดโอด

ไดโอดที่ทำจากสารกึ่งตัวนำแบ่งได้ตามชนิดของเนื้อสารที่ใช้ เช่น เป็นชนิดเยอรมันเนียม หรือเป็นชนิดซิลิกอน นอกจากนี้ไดโอดยังแบ่งตามลักษณะตามกรรมวิธีที่ผลิตคือ

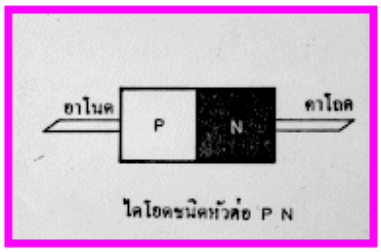
1. ไดโอดชนิดจุดสัมผัส (Point-contact diode) ไดโอดชนิดนี้เกิดจากการนำสารเยอรมันเนียมชนิด N มาแล้วอัดสายเล็ก ๆ ซึ่งเป็นลวดพลาตินั่ม (Platinum) เส้นหนึ่งเข้าไปเรียกว่า หนวดแมว

จากนั้นจึงให้กระแสค่าสูง ๆ ไหลผ่านรอยต่อระหว่างสายและผลึก จะทำให้เกิดสารชนิด P ขึ้นรอบ ๆ รอยสัมผัสในผลึกเยอรมันเนียมดังรูป



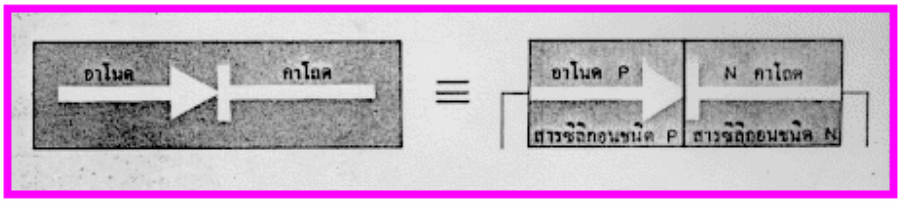
ไดโอดชนิดจุดสัมผัส

2. ไดโอดชนิดหัวต่อ P-N (P-N junction diode) เป็นไดโอดที่สร้างขึ้นจากการนำสารกึ่งตัวนำชนิด N มาแล้วแพร่อนุภาคอะตอมของสารบางชนิดเข้าไปในเนื้อสาร P ขึ้นบางส่วน แล้วจึงต่อขั้วออกใช้งาน ไดโอดชนิดนี้มีบทบาทในวงจรอิเลคทรอนิคส์ และมีที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย



ไดโอดชนิดหัวต่อ P-N

ลักษณะสมบัติของไดโอด

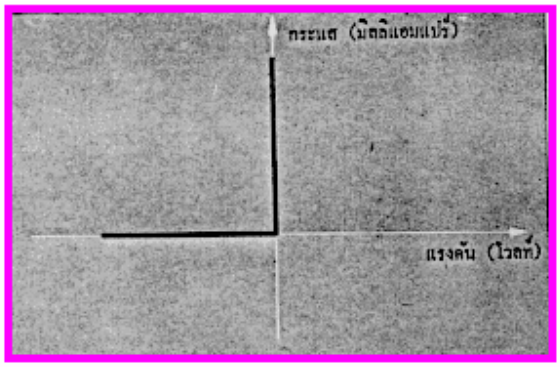


ไดโอดที่ใช้ในวงจรมีสัญญลักษณ์ เป็นรูปลูกศรมีขีดขวางไว้ดังรูป

ตัวลูกศรเป็นสัญญลักษณ์แทนสารกึ่งตัวนำชนิด P ซึ่งเป็นขั้วอาโนด (ขั้วบวก) ของไดโอด ลูกศรจะชี้ในทิศทางที่โฮลเคลื่อนที่ ส่วนขีดคั่นเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด N ซึ่งเป็นขั้วคาโถด (ขั้วลบ) ดังนั้นเราจะสามารถพิจารณาว่า ไดโอดถูกไบแอสตรงหรือไบแอสกลับได้ง่าย ๆ โดยพิจารณาดูว่าถ้าขั้วอาโนดมีศักดาไฟฟ้าเป็นบวกมากกว่าราคาโถดแล้ว ไดโอดจะถูกไบแอสตรง ถ้าขั้วอาโนดมีศักดาไฟฟ้าเป็นบวกน้อยกว่า คาโถดก็แสดงว่าไดโอดถูกไบแอสกลับ

ไบแอสตรง	ไบแอสกลับ
1. มีกระแสไหลผ่านไดโอด	1. มีกระแสไหลผ่านไดโอด
2. ถือว่าไดโอดมีความต้านทานน้อยมาก	2. ถือว่าไดโอดมีความต้านทานสูงมาก
3. โดยทั่วไปถือว่าไดโอดลัดวงจร	3. โดยทั่วไปถือว่าไดโอดเปิดวงจร

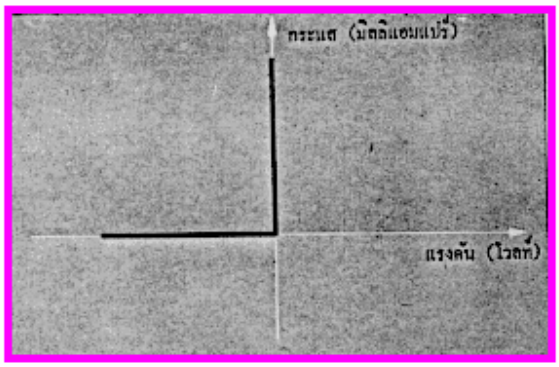
เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของไดโอดเมื่อไบแอสตรงและไบแอสกลับ



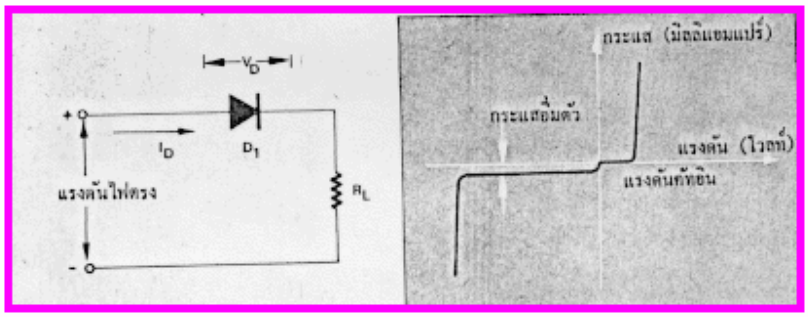
ลักษณะสมบัติของไดโอดอุดมคติ

ลักษณสมบัติระหว่างแรงดันและกระแสของไดโอด

เนื่องจากความต้านทานของตัวไดโอด ขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า ดังนั้นจึงถือว่า สิ่งประดิษฐ์ ไดโอดมีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น ลักษณะ : สมบัติระหว่างแรงดันและกระแสจะเป็นตัวแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของกระแสที่ไหลผ่านตัวไดโอด (ID) กับค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวไดโอด (VD) ทั้งในทิศทางไบแอสตรง และไบแอสกลับดังรูป

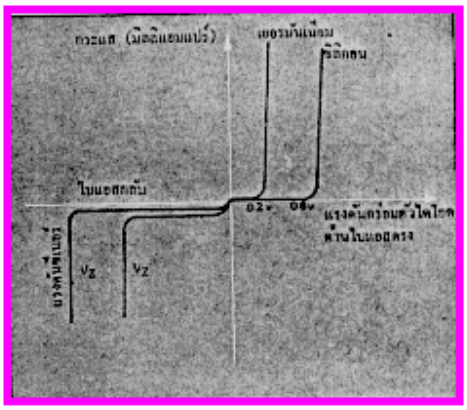


ลักษณะ สมบัติทางด้านไบแอสตรงจะเริ่มมีกระแสไหลผ่านไดโอดเมื่อใส่แรงดันแก่ไดโอดด้วยค่า ๆ หนึ่งแรงดันนี้คือค่าแรงดันที่เราเรียกว่า แรงดันคัทอิน (cutin voltage) ของไดโอด



กราฟลักษณะสัมบัติระหว่างแรงดันและกระแสของวงจรไบแอส

เนื่องจากไดโอดชนิดหัวต่อ P-N แบ่งเป็น 2 ชนิดคือชนิดซิลิกอนและชนิดเยอรมันเนียม ดังนั้น ลักษณะสมบัติทางแรงดันและกระแสของไดโอดทั้งสองชนิด จะเห็นได้ชัดดังในรูป



แรงดันคร่อมตัวไดโอดด้านไบแอสตรง

ค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับสำหรับซิลิกอนไดโอดกับของเยอรมันเนียมไดโอดยังมีค่าไม่เท่ากัน ด้วยซิลิกอนไดโอดมีค่ากระแสอิ่มตัวน้อยกว่าของเยอรมันเนียมไดโอดประมาณ 1000 เท่า สำหรับค่าแรงดันคัทอินทั้งของซิลิกอนและเยอรมันเนียมจะมีค่าไม่เท่ากัน ค่าแรงดันคัทอินของซิลิกอนไดโอดมีค่าประมาณ 0.6 โวลท์ ส่วนของเยอรมันเนียมไดโอดมีค่าประมาณ 0.2 โวลท์

ผลของอุณหภูมิที่มีต่อไดโอด

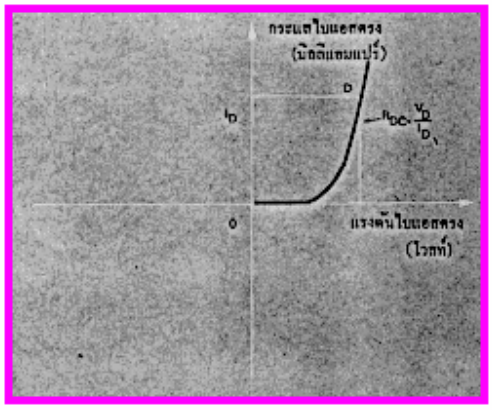
ผลของอุณหภูมิที่มีต่อไดโอด เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะมีผลต่อลักษณะสมบัติทางแรงดันและกระแสของไดโอด เนื่องจากสารกึ่งตัวนำจะมีจำนวนโฮล และอิเลคตรอนอิสระที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมด้วย ดังนั้นในการออกแบบวงจรจำเป็นต้องทราบว่ากระแสไดโอดเมื่อไบแอสกลับ จะเปลี่ยนแปลงอย่างไรกับอุณหภูมิ และแรงดันคร่อมไดโอดขณะไบแอสตรงจะเปลี่ยนแปลงอย่างไรกับอุณหภูมิเมื่อกระแสที่ไหลผ่านไดโอดมีค่าคงที่

ความต้านทานในตัวไดโอด

ความต้านทานในตัวไดโอดพอที่จะแบ่งออกตามชนิดของแรงดันที่ให้กับตัวไดโอดซึ่งแยกออกเปนความต้านทานทางไฟตรงหรือทางสรรคติกและความต้านทานไฟสลับ

ความต้านทานทางไฟตรง (static resistance)

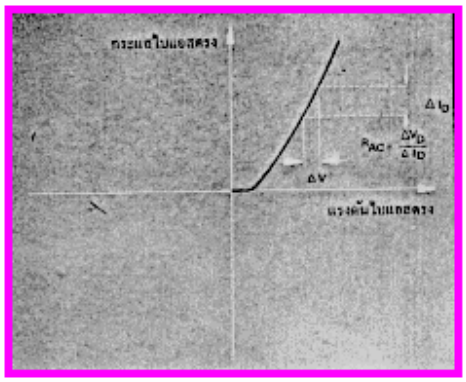
จากลักษณะสมบัติแรงดันและกระแสของไดโอดจะไม่เป็นลักษณะเชิงเส้น ดังนั้นความต้านทานในตัวไดโอดจึงไม่คงที่ จากกฎของโอห์มจะได้ความต้านทานทางไฟตรง ที่จะดทำงานขณะไม่มีสัญญาณอื่นใดเข้ามาเป็น



แสดงค่าความต้านทานในไดโอดทางไฟตรง

ความต้านทานทางไฟสลับ (dynamic resistance)

เมื่อไดโอดทำงานในขณะที่มีค่าสัญญาณแรงดันไฟสลับขนาดเล็ก ๆ ป้อนเข้ามาค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นที่ไดโอดจะเกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาค่าความต้านทานนี้จะแตกต่างจากความต้านทานทางไฟตรงเราเรียกค่าความต้านทานนี้ว่า ความต้านทานทางไฟสลับการหาค่าความต้านทานทางไฟสลับหาค่าได้จากค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของแรงดันคร่อมตัวไดโอดที่เปลี่ยนไปกับค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลในตัวไดโอด เนื่องจากการทำงานของไดโอดเมื่อมีสัญญาณเข้ามา ณ จุดที่ไดโอดทำงานก็จะมีค่าไม่คงที่ไม่แน่นอน เกิดการเปลี่ยนแปลงตามลักษณะสมบัติ แต่เมื่อคิดการเปลี่ยนแปลงกระแสไบแอสตรงค่าเล็ก ๆ ของกระแสและแรงดันแล้วจะสามารถหาค่าความต้านทานทางไดนามิคหรือความต้านทานต่อไฟสลับได้ดังรูป



แสดงการหาความต้านทานทางไฟสลับ

การหาค่าความต้านทานนี้อาจทำได้โดยการใช้สูตร Rac เท่ากับ

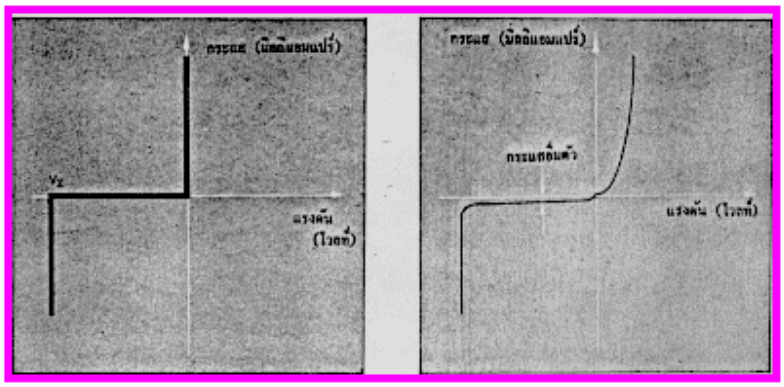
$$= \frac{\text{ช่วงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันคร่อมไดโอด}}{\text{ช่วงการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลผ่านไดโอด}}$$

ซีเนอร์ไดโอด (Zener diode)

ซีเนอร์ไดโอด (Zener diode) ไดโอดธรรมดาเมื่อทำการไบรแอสกลับจนถึงค่าแรงดันพังจะทำให้เกิดการเสียหายได้ ซีเนอร์ไดเอดเป็นซิลิกอนไดโอดชนิดพิเศษที่กระแสย้อนกลับสามารถไหลเฉลี่ยทั่วพื้นที่รอยต่อของไดโอด จึงสามารถทนกระแสย้อนกลับได้สูงมาก ดังนั้นซีเนอร์ไดโอดจึงสามารถใช้ควบคุมแรงดันโดยใช้แรงดันที่ตกคร่อมตัวมันเองเป็นตัวควบคุมสัญญลักษณ์ของตัวซีเนอร์ไดโอดเขียนได้ดังรูป

สัญญลักษณ์ของซีเนอร์ไดโอด

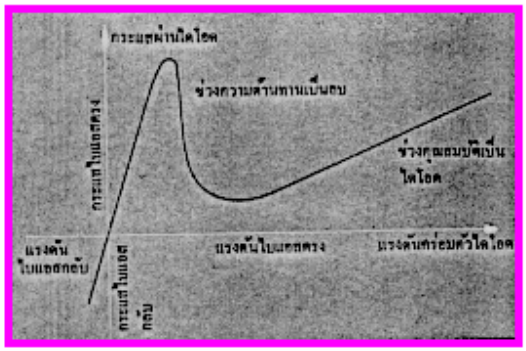
ซีเนอร์ไดโอดทางอุดมคติจะควบคุมแรงดันได้ต่อเมื่อถูกไบแอสกลับกล่าวคือ จะมีกระแสไหลผ่านไดโอดได้ดีต่อเมื่อไบแอสกลับจนถึงค่าแรงดันซีเนอร์เท่านั้น สำหรับกรณีไบแอสตรงซีเนอร์ไดโอดจะทำหน้าที่เหมือนไดโอดะรรมดาคือเสมือนเป็นตัวลัดวงจร



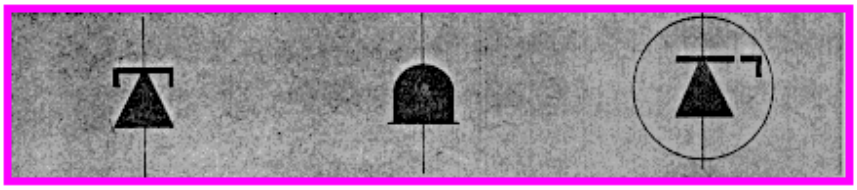
ลักษณะสมบัติของซีเนอร์ไดโอดทางอุดมคติ ลักษณะสมบัติของซีเนอร์ไดโอดจริง ๆ

ทันเนลไดโอด (tunnel diode)

ทันเนลไดโอด (tunnel diode) ต่างจากไดโอดธรรมดาตรงที่ลักษณะสมบัติแรงดันและกระแสบางช่วงเป็นแบบต้านทานลบ กล่าวคือเมื่อเพิ่มแรงดันเกิดค่าค่าหนึ่งแทนที่กระแสจะสูงขึ้นกลับลดลง ดังแสดงในรูป



เหตุที่ลักษณะสมบัติบางช่วงเป็นความต้านทานลบเพราะว่ามีการโด๊ปสารด้านใดด้านหนึ่งของหัวต่อ P-N ให้มีสารเจือปนมากกว่าปกติถึงเป็นร้อยเท่าพันเท่า ซึ่งการโด๊ปมาก ๆ เช่นนี้ทำให้หัวต่อที่เรียกว่าดีพลีชั่นบางมากเมื่อให้ไบแอสตรงจึงทำให้พาหะสามารถวิ่งทะลุรอยต่อไปยังขั้วอีกด้านหนึ่งได้ ดังนั้นกระแสจะสูงขึ้นจนถึงค่าสูงสุด หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มแรงดันอีกกระแสลดลง เพราะพาหะที่วิ่งทะลุรอยต่อลดน้อยลงจนถึงค่าค่าหนึ่งพอเพิ่มแรงดันสูงกว่านี้อีกจะเป็นลักษณะแบบไดโอดธรรมดา

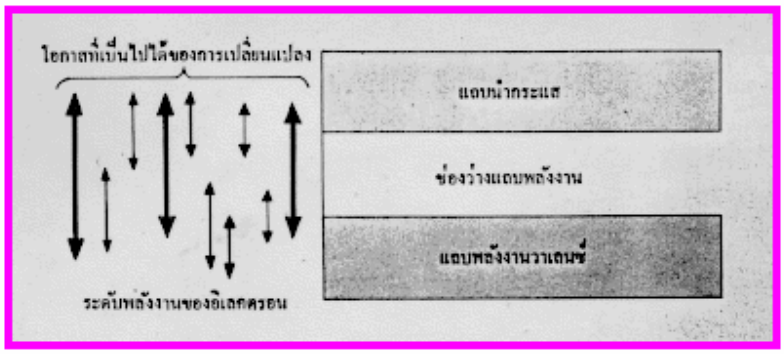


สัญญลักษณ์ของทันเนลไดโอด

ผลของทันเนลไดโอด

การพังตัวแบบอาวาลานซ์ (avalance breakdown) ขึ้นอยู่กับพลังงานที่วาเลนซ์อิเลคตรอนในตัวสารกึ่งตัวนำที่ได้รับเพิ่มขึ้นทำให้มันสามารถหลุดออกมาจากบอนด์ได้

อิเลคตรอนที่มีพลังงานอยู่ในแถบวาเลนซ์ ไม่สามารถที่จะหลุดออกมาจากการเกาะเกี่ยวกับอะตอมข้างเคียงได้ระดับแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่แสดงพลังงานที่อยู่ในแถบวาเลนซ์

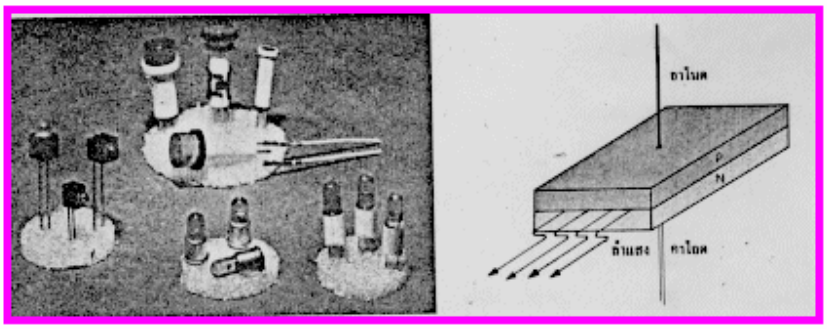


อิเลคตรอนบางตัวจะได้รับพลังงานและจะเคลื่อนจากแถบพลังงานวาเลนซ์ไปสู่แถบนำกระแส เป็นผลของทันเนล

อิเลคตรอนจะมีพลังงานอยู่ในแถบใดก็ได้ ดังนั้นจึงมีอิเลคตรอนเคลื่อนที่อยู่ในเนื้อสารและทำให้เกิดโฮลด้วย เมื่ออิเลคตรอนอิสระเข้าไปแทนที่โฮลก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงาน โดยมันจะคล้ายพลังงานออกให้กับอิเลคตรอนตัวอื่น และมีอิเลคตรอนอีกเป็นจำนวนมากที่มีพลังงานสูงอยู่ในแถบต้องห้าม เมื่อมันได้รับพลังงานสูงขึ้นไปอีก มันอาจจะอยู่ในแถบของการนำกระแสได้ แต่เมื่อทำการโด๊ปสารกึ่งตัวนำทั้ง P และ N อย่างสูง จะทำให้มีอิเลคตอนและโฮลเป็นจำนวนมาก ดังนั้นเมื่อป้อนแรงดันเพียงเล็กน้อยอิเลคตรอนก็สามารถเข้ามาอยู่ในแถบนำกระแสได้ และข้ามรอยต่อเข้ามา

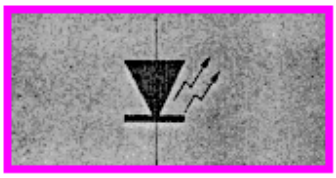
ไดโอดเปล่งแสง (light-emitting diode)

ไดโอดเปล่งแสง (light-emitting diode) เรียกย่อ ๆ ว่า LED คือ ไดโอดซึ่งสามารถเปล่งแสงออกมาได้แสงที่เปล่งออกมาประกอบด้วยคลื่นความถี่เดียวและเฟสต่อเนื่องกัน ซึ่งต่างกับแสงธรรมดาที่ตาคนมองเห็น อันประกอบด้วยคลื่นซึ่งมีเฟสและความถี่ต่าง ๆ ดันมารวมกัน ไดโอด ซึ่งสามารถให้แสงออกมาได้ ทั้งชนิดที่เป็นสารกึ่งตัวนำของเหลวก๊าซ ในที่นี้จะกล่าวถึงชนิดที่เป็นสารกึ่งตัวนำเท่านั้น



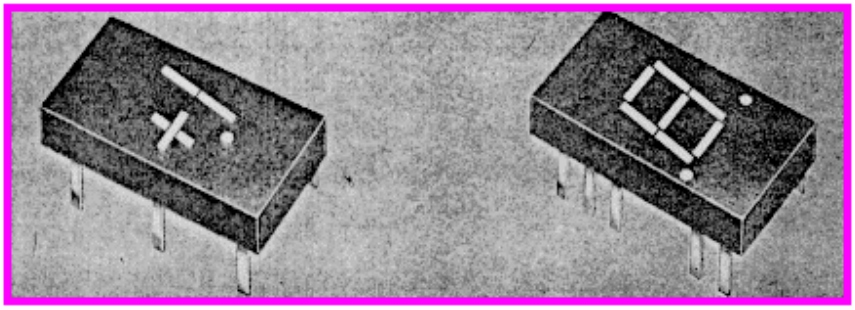
ไดโอดเปล่งแสง

ไดโอดชนิดนี้เหมือนไดโอดทั่ว ๆ ไปที่ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิด P และ N ประกบกันมีผิวข้างหนึ่งเรียบเป็นมันคล้ายกระจก เมื่อไดโอดตกไบแอสตรงจะทำให้อิเลคตรอนที่สารกึ่งตัวนำชนิด N มีพลังงานสูงขึ้นจนสามารถวิ่งข้ามรอยต่อไปรวมกับโฮลใน P ต่อให้เกิดพลังงานในรูปของประจุโฟตอน ซึ่งจะส่งแสงออกมา การประยุกต์ LED ไปใช้งานอย่างกว้างขวางส่วนมากใช้ในภาคแสดงผล (display unit) LED โดยทั่วไปมี 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ LED ชนิดที่ตาคนเห็นได้กับชนิดที่ตาคนมองไม่เห็นต้องใช้ทรานซิสเตอร์มาเป็นตัวรับแสงแทนตาคน



สัญญลักษณ์ของ LED

การใช้งานของ LED ที่เห็นได้บ่อย ๆ คือ ภาคแสดงผลของเครื่องคำนวณอิเลคทรอนิคส์สมัยใหม่ที่ใช้ LED ซึ่งมี 7 ส่วนแสดงเป็นตัวเลขดังรูป

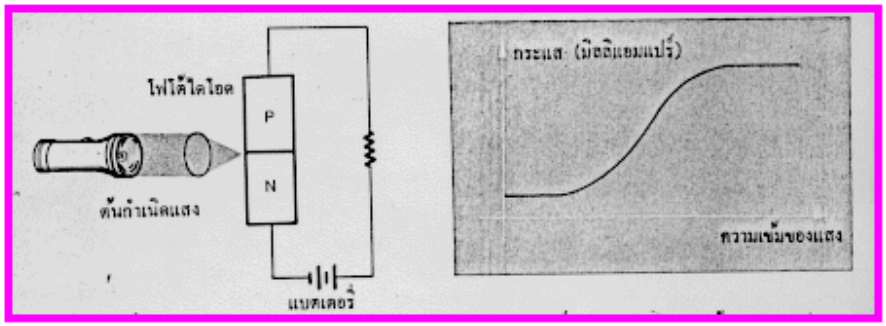


รูป LED เอ็ดส่วนใช้งานการแสดงผล

เมื่อนำ LED มาประกอบกับโฟโต้ทรานซิสเตอร์ ซึ่งเป็นตัวรับแสงจาก LED โฟโต้ทรานซิสเตอร์จะให้กระแสที่เปลี่ยนแปลงกับความเข้มของแสงที่มาจากไดโอดอุปกรณ์ที่รวมกันระหว่าง LED กับโฟโต้ทรานซิสเตอร์เรียกว่า โฟโต้ไอโซเลชั่น (photo isolation)

โฟโต้ไดโอด (Photo diode)

โฟโต้ไดโอด (Photo diode) อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกระแสได้ก็เนื่องจากการให้พลังงานเพื่อดึงอิเลคตรอนให้หลุดจากบอนด์ เป็นผลทำให้เกิดอิเลคตรอนอิสระและโฮล และเมื่อให้แรงดันไฟฟ้าจะเกิดสนามไฟฟ้าในแท่งสารนั้นเป็นผลทำให้ประจุอิเลคตรองและโฮล เคลื่อนที่ โฟโต้ไดโอดจึงมีหลักการทำงานโดยอาศัยแสงในการเพิ่มพลังงานให้กับอิเลคตรอนในเนื้อสารกึ่งตัวนำ



แสดงวงจรโฟโต้ไดโอดและกราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสกับความเข้มของแสง

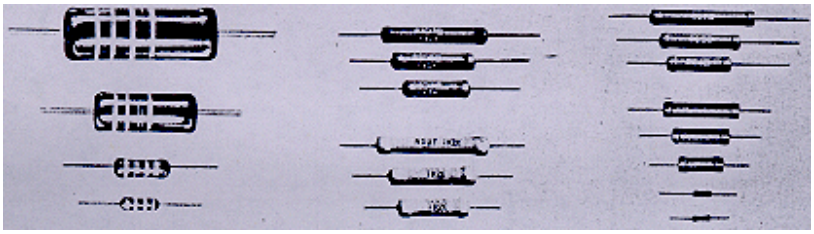
วงจรโฟโต้ไดโอดเบื้องต้นต่อเป็นวงจรความต้านทานโหลดและแหล่งจ่ายไฟดังรูป โดยปกติไดโอดจะถูกไบแอสตรงแต่ในขณะที่ไบแอสตรงนี้ จำนวนอิเลคตรอนและโฮลที่ในเนื้อสารมีจำนวนไม่มากนัก ดังนั้นกระแสที่ไหลในวงจรจึงเป็นส่วนน้อย ครั้นเมื่อส่วนของสารกึ่งตัวนำมีแสงส่องถูก จะทำให้เนื้อสารเกิดอิเลคตรอนอิสระและโฮลเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก จำนวนอิเลคตรอนอิสระที่เกิดขึ้นจะแปรตรงกับความเข้มของแสงแต่เมื่อเพิ่มความเข้มของแสงจนถึงค่าหนึ่งจะไม่มีการเพิ่มของอิเลคตรอนอิสระอีกแล้วในช่วงนี้เราจะเรียกว่า ช่วงอิ่มตัว (saturation region) ในขณะที่ไม่มีแสงตกกระทบจำนวนกระแสที่ไหลผ่านตัวไดโอดนี้เรียกว่า กระแสมืด (dark current)

2.6ตัวต้านทาน (Resistor)

ตัวต้านทาน (Resistor) มีมากมายแตกต่างกันทั้งขนาดและรูปร่าง แต่ก็ทำหน้าที่อย่างเดียวกันคือ จำกัดกระแส (Limit curent) ซึ่งแบ่งออกเป็นพวกใหญ่ ๆ ได้ดังนี้

ตัวต้านทานชนิดค่าคงที่ (Fixed Resistor)

ตัวต้านทานที่พบเห็นได้ง่ายในวงจรมักจะเป็นตัวต้านทานชนิดค่าคงที่ ตัวอย่างของตัวต้านทานแบบนี้แสดงให้เห็นดังรูป



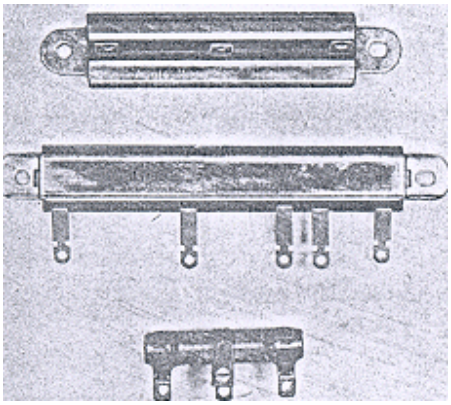
รูปตัวอย่างตัวต้านทานชนิดค่าคงที่แบบต่างๆ

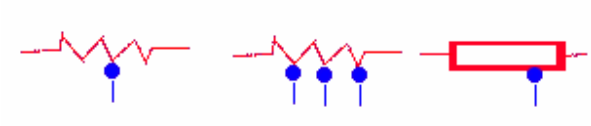
ตัวต้านทานที่มีค่าคงที่เหล่านี้บางชนิดทำมาจากคาร์บอนเคลือบด้วยพลาสติกหรือเซรามิคแข็งสีดำหรือสีน้ำตาล ตัวต้านทานบางแบบทำด้วยสารจำพวกโลหะออกไซด์ ตัวต้านทานชนิดนี้โดยทั่วไปจะมีค่าผิดพลาดน้อย (Tolerance) หรือมีค่าความถูกต้องเชื่อถือได้ตามที่บอกค่าไว้ที่ดีเป็นได้สูงตัวต้านทานคงที่ชนิดลวดพัน (wire wound) ตัวต้านทานชนิดนี้ทำมาจากลวดความต้านทานพันรอบแกนฉนวน ซึ่งทำด้วยสารจำพวกเซรามิค ตัวต้านทานชนิดนี้มีลักษณะสมบัติพิเศษคือสามารถทนต่อการไหลของกระแสผ่านตัวมันได้สูงกว่าตัวต้านทานแบบอื่น สัญญลักษณ์ของตัวต้านทานชนิดค่าคงที่

รูปสัญญลักษณ์ของตัวต้านทานชนิดค่าคงที่

ตัวต้านทานชนิดเลือกค่าได้ (Topped Resistor)

ตัวต้านทานบางชนิดอาจมีการเลือกค่าใดค่าหนึ่งได้ โดยปกติตัวต้านทานชนิดนี้จะมีหลายขั้วแยกออกมาเป็นปุ่มหรือขั้ว การเลือกค่าตัวต้านทานทำโดยวิธีแยกสายหรือโผล่สายออกมาภายนอกที่เรียกว่า แท๊ป (Tap) การแท๊ปสายอาจทำได้มากกว่าหนึ่งที่ดังรูป





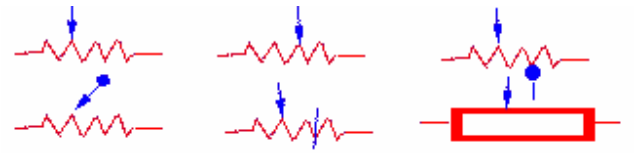
รูปสัญญลักษณ์ของตัวต้านทานชนิดเลือกค่าได้

ตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ (Variable Resistor)

บางครั้งเราจำเป็นต้องเปลี่ยนค่าความต้านทานบ่อย ๆ เช่น ใช้ปรับความดังวิทยุ โทรทัศน์ ปรับเสียงทุ้ม เสียงแหลมในวงจรไฮไฟ ปรับความสว่างของหลอดไฟ ปรับแต่งเครื่องวัดตัวต้านทานชนิดนี้จะมีหน้าคอนแทคสำหรับใช้การหมุนเลื่อนหน้าคอนแทคในการปรับค่าตัวต้านทาน เพื่อเป็นการสะดวกต่อการปรับค่าความต้านทาน จึงมักมีแกนยื่นออกมาหรือมีส่วนที่จะทำให้หมุนปรับค่าได้ ที่ปลายแกนยื่นสามารถประกอบติดกับลูกบิดเพื่อให้หมุนได้ง่ายยิ่งขึ้นนอกจากนี้ในบางระบบอาจทำเป็นรูปเกือกม้า โดยไม่ต้องมีแกนหมุนยื่นออกมาแต่ปรับค่าได้โดยใช้ไขควงหรือวัสดุดื่นสอดเข้าในช่องแล้วหมุนหน้าคอนแทค คอนแทคจะเลื่อนไปทำให้ค่าความตีเนทานเปลี่ยน

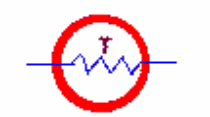
รูปตัวต้านทานชนิดปรับทำได้

ภาษาช่างที่ใช้เรียกตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ว่า โวลุ่ม (Volume)สัญญลักษณ์ของตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้



ตัวต้านทานไวความร้อน (THERMISTOR)

ตัวต้านทานแบบนี้มีค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ส่วนมากอุณหภูมิเพิ่มขึ้นความต้านทานจะลดลง



สัญญลักษณ์ของเทอร์มิสเตอร์

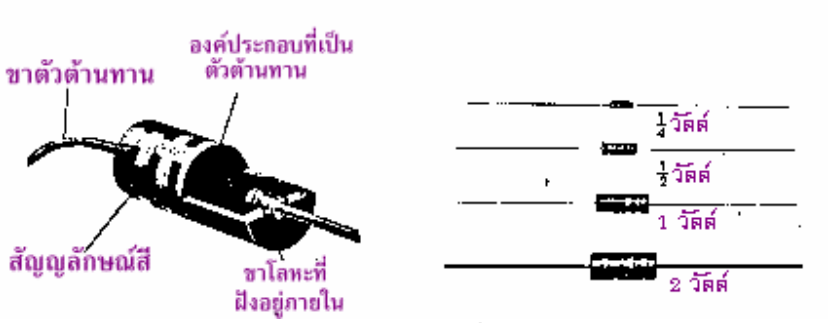
ตัวต้านทานไวแสง (light dicrearing resistor)

ใช้อักษรย่อ LDR ตัวต้านทานชนิดนี้จะเปลี่ยนค่าความต้านทานเมื่อความเข้มของแสงตกกระทบเปลี่ยนแปลง โดยปกติเมื่อความเข้มของแสงมีค่ามากกว่าความต้านทานจะมีค่าลดลง

สัญญลักษณ์ของตัวต้านทานไวแสง

รหัสสี

หน่วยที่ใช้วัดค่าความต้านทานเรียกว่าโอห์มจากนิยามความต้านทานหนึ่งโอห์มหมายความว่า เมื่อป้อนแรงดันคร่อมตัวต้านทานหนึ่งโวลท์แล้วมีค่ากระแสไหลผ่านหนึ่งแอมแปร์ตัวต้านทานนั้นจะมีค่าหนึ่งโอห์ม



โครงสร้างและขนาดของตัวต้านทานที่ทนกำลังงานได้ต่างกัน

เครื่องมือที่ใช้วัดหาค่าความต้านทานเรียกว่า โอห์มมิเตอร์(ohmmiter) แต่เมื่อใช้ตัวต้านทานในวงจรอิเลคทรอนิคส์ ในการที่จะวัดตัวต้านทานที่อยู่ในวงจรทำได้ยาก เพราะไม่สะดวกต่อการวัด ดังนั้นผู้ผลิตจึงกำหนดสัญญลักษณ์สีแทนค่าความต้านทาน

ค่าตัวต้านทานกำหนดด้วยแถบสีสามสีที่พิมพ์ติดอยู่บนตัวต้านทานและการกำหนดค่าควาผิดพลาด (tolerance) โดยปกติมีค่าเช่นน้อยกว่า 5% หรือน้อยกว่า 10% จะใช้แถบสีแถบที่สี่เป็นตัวบอก

แสดงแถบสีของตัวต้านทาน

แถบสีสองสีแรกคือแถบสีแถบ A และแถบ B เป็นตัวเลขที่บอกค่าความต้านทานของตัวต้านทานที่เป็นตัวเลขนัยสำคัญ (Significuntdigit) ส่วนในแถบ C เป็นตัวที่จะบอกให้ทราบว่า มีจำนวนต่อท้ายอยู่จำนวนเท่าใด หรือกล่าวได้ว่าเป็นตัวคูณ (multiplier) ด้วยสิยก กำลังค่าของแถบสีแถบ C ส่วนในแถบสีแถบD นั้น จะเป็นสีทองหรือแถบสีเงิน แถบสีทองมีความหมายเป็นค่าผิดพลาดได้ไม่เกิน 5% ส่วนแถบสีเงินจะบอกความหมายเป็นค่าความผิดพลาด 10% ถ้าในแถบสี D มิได้พิมพ์สีใดไว้ ให้ถือว่ามี

ค่าความผิดพลาดได้ไม่เกิน 20% ค่าความผิดพลาดจะเป็นช่วงที่บอกว่าค่าความต้านทานจะผิดพลาดไปจากค่าที่อ่านจากแถบสีมาน้อยเพียงใด

สีแต่ละสีที่ใช้เป็นสัญญลักษณ์ที่แทนค่าตัวเลขใดตัวเลขหนึ่งมีค่า 0 ถึง 9 ดังตาราง

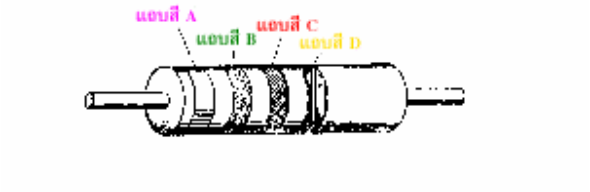
แถบสี	ตัวเลขเทียบเท่า	ตัวคูณ	ความคลาดเคลื่อน
ดำ	0	1	-
น้ำตาล	1	10	-
แดง	2	100	-
ส้ม	3	1,000	-
เหลือง	4	10,000	-
เขียว	5	100,000	-
น้ำเงิน	6	1,000,000	-
ม่วง	7	10,000,000	-
เทา	8	100,000,000	-
ขาว	9	1,000,000,000	-
ทอง	-	0.1	-
เงิน	-	0.01	-
ไม่มีสี	-	0.01	-

ตัวอย่างที่ 1 จงอ่านค่าความต้านทานของตัวต้านทานในรูป

แถบสี	A	B	C	D
สี	น้ำเงิน	แดง	ส้ม	ไม่มีสี
ตัวเลข	6	2	3	ค่าผิดพลาด 20%

แถบสี A และ B เป็นเลขนัยสำคัญ 62 แถบสี C สีส้มมีความหมายเป็นตัวคูณด้วย 10^3 นั่นคือความต้านทานจะมีค่าเป็น 62,000 โอห์ม $\pm$ 20% หรือ 62 k$\Omega\pm$ 20%

ตัวอย่าง 2. จงอ่านแถบสีของตัวต้านทานในรูป



แถบสี	A	B	C	D
สี	ม่วง	เขียว	แดง	ทอง
ตัวเลข	7	5	2	ค่าผิดพลาด 5%

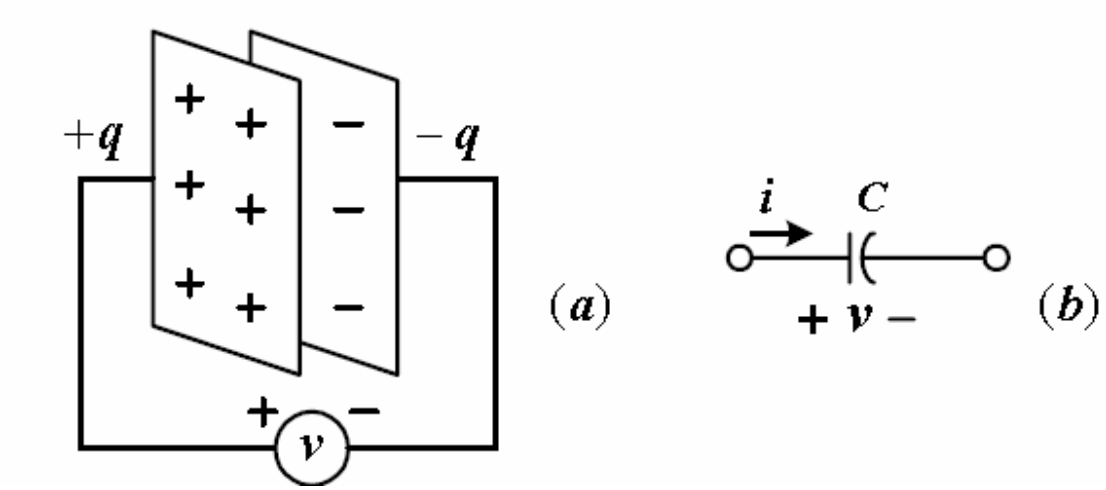
แถบสี A และ B เป็นเลขนัยสำคัญ 75 แถบสี C สีแดงมีความหมายเป็นตัวคูณด้วย 10^2
แถบสี D เป็นค่าผิดพลาด 5% นั่นคือความต้านทานจะมีค่าเป็น 7500 โอห์ม $\pm$ 5% หรือ 7.5 kΩ
ค่าผิดพลาดไม่มากกว่า 5%

2.7ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ *Capacitors and inductors*

ตัวเก็บประจุ (Capacitors)

ตัวเก็บประจุเป็น passive element ถูกออกแบบมาเพื่อเก็บสะสมพลังงานในสนามไฟฟ้า

ตัวเก็บประจุประกอบไปด้วย แผ่นตัวนำสองแผ่นถูกแยกออกจากกันด้วยฉนวน (insulator) หรือวัตถุที่ไม่เป็นสื่อนำไฟฟ้า (dielectric)



รูปที่ 1 (a) A Capacitor with applied voltage V. (b) Circuit symbols for capacitors.

เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง ประจุไฟฟ้า กับ แรงดันได้เป็น

$$q=CV$$

เมื่อ C ย่อมาจาก Capacitance คือ ค่าความเก็บประจุ มีหน่วยเป็น Farad (F) (1 Farad = 1 coulomb/volt) โดยค่าความเก็บประจุ คือ อัตราส่วนของความต่างศักย์ระหว่างแผ่นตัวนำ 2 แผ่น

ซึ่งค่าความเก็บประจุ สามารถคำนวณได้จาก

$$C=\frac{\varepsilon A}{d}$$

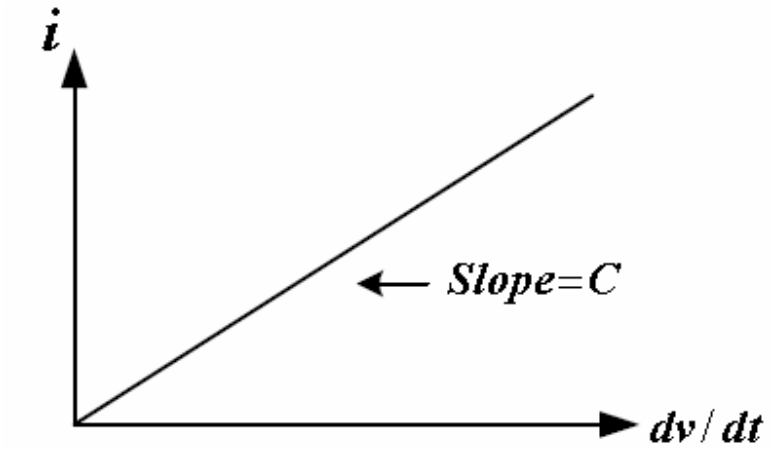
โดย ε คือ ค่า permittivity ของวัสดุที่นำเอามาทำเป็นฉนวน
A คือ พื้นที่ผิวแผ่นตัวนำ
d คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง
เมื่อพิจารณาถึงค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ จะสามารถหาความสัมพันธ์ ระหว่าง

ค่ากระแส และแรงดันที่เปลี่ยนไปตามเวลา t ดังนี้
จากสมการความสัมพันธ์ของกระแสและประจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปตามเวลา t ;

$$i = \frac{dq}{dt}$$

$$i_c = C\frac{dV_c}{dt}$$

ซึ่งจะได้กราฟความสัมพันธ์ของสมการข้างต้นเป็นดังรูป



รูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุ

และจากสมการความสัมพันธ์ข้างต้นสามารถหาค่าแรงดันได้ คือ

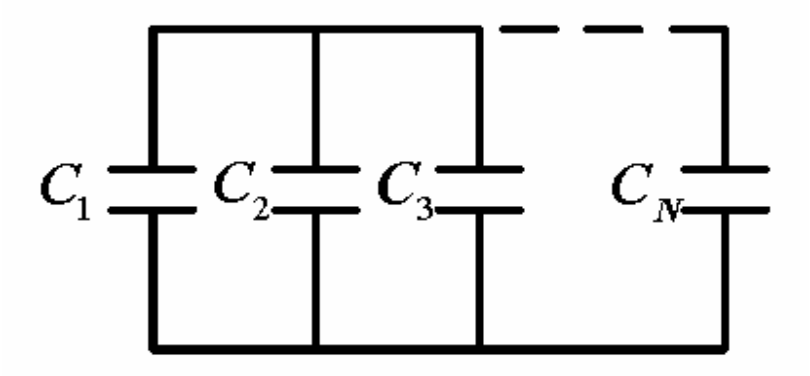
$$V_c = \frac{1}{C}\int_{t_0}^{t} i(t)dt + V(t_0)$$

ค่าพลังงานที่ใช้ในการคายประจุ คือ

$$W = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{q^2}{2C}$$

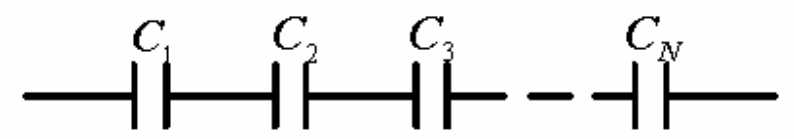
การต่ออนุกรมและขนานของตัวเก็บประจุ

1. ถ้าตัวเก็บประจุต่อแบบขนาน จะรวมกันเหมือนตัวต้านทานต่ออนุกรมกัน



$$C\,eq = C1 + C2 + C3 + \ldots + C\,N$$

2. ถ้าตัวเก็บประจุต่อแบบอนุกรม จะรวมกันเหมือนตัวต้านทานต่อขนานกัน



$$\frac{1}{C_{eq}}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}+...+\frac{1}{C_N}$$

สรุปคุณสมบัติของตัวเก็บประจุ (C)

1. กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุเท่ากับศูนย์ ถ้าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา $(\frac{dV}{dt}=0)$ ดังนั้น ตัวเก็บประจุจะเปรียบเสมือนเปิดวงจร (open circuit) เมื่อต่อกับไฟกระแสตรง

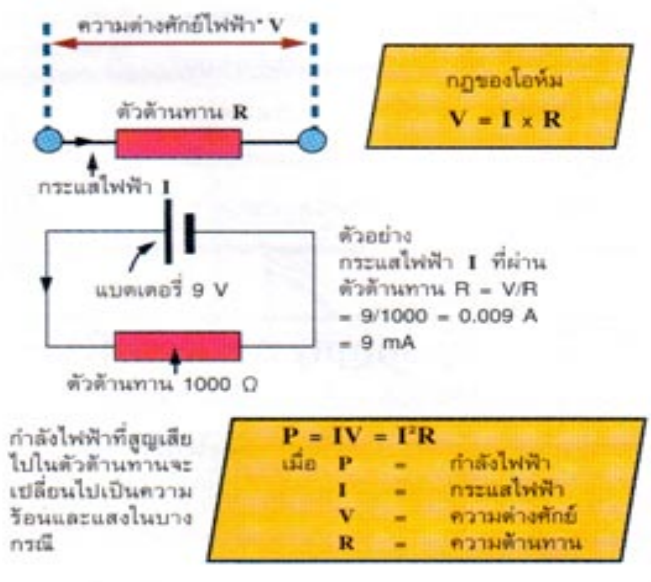
2. ถ้าแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุคงที่ $(\frac{dV}{dt}=0)$ จะทำให้กระแสมีค่าเป็นศูนย์แต่จะมีพลังงานสะสมอยู่ในตัวเก็บประจุจำนวนหนึ่ง

3. การเปลี่ยนแปลงแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุอย่างทันทีทันใด จะทำให้เกิดกระแสไหลเป็นจำนวนมาก

4. ตัวเก็บประจุจะไม่มีพลังงานสูญเสียในตัวเก็บประจุ เพียงแต่สะสมไว้เท่านั้น

2.8 กฎของโอห์ม

กล่าวว่ากระแสไฟฟ้าในวัตถุ ณ อุณหภูมิคงที่ เป็นสัดส่วนกับความต่างศักย์ไฟฟ้าคล่อมวัตถุนั้นอัตราส่วนระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าคือความต้านทานของวัตถุ ทั้งนี้วัตถุนั้นจะต้องมีอุณหภูมิคงที่เมื่อใช้กฎของโอห์มเพราะว่ากระแสไฟฟ้าจะทำให้วัตถุร้อน ซึ่งจะทำให้ความต้านทานเปลี่ยนไป กฎของโอห์มใช้ไม่ได้กับวัตถุบางชนิด เช่น สารกึ่งตัวนำ

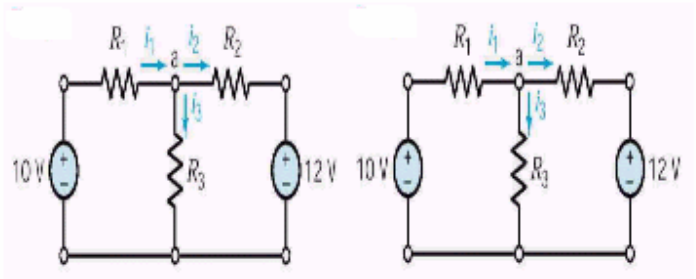


2.9 กฎของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Law)

กฎกระแสเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Current Law : KCL)

กฎของกระแสเคอร์ชอฟฟ์ คือผลรวมทางพีชคณิตของกระแสที่ไหลเข้าโนดใดๆ มีค่าเท่ากับศูนย์ที่ทุกๆเวลา

<u>ตัวอย่าง</u>



รูปที่ 4 รูปตัวอย่างที่ 2

วิธีทำ

$$i1 - i2 - i3 = 0$$

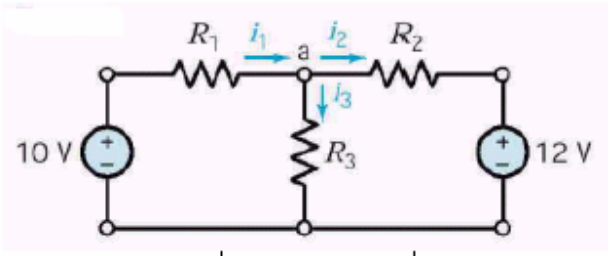
หรือ 1 2 3 $i = i + i$

(ผลรวมกระแสที่ไหลเข้าโนด) = (ผลรวมกระที่ไหลออกจากโนด)

2.10กฎแรงดันเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's current Law : KVL)

กฎของแรงดันเคอร์ชอฟฟ์คือผลรวมทางพีชคณิตของแรงดันในเส้นทางปิดใดๆมีค่าเท่ากับศูนย์ที่ทุกๆเวลา

ตัวอย่าง จงหาค่า $R2$ ของวงจร



รูปที่ 5 รูปตัวอย่างที่ 3

วิธีทำ จาก KVL จะได้

ลูป1, $-10 + v1 + v3 = 0$ -------(1)

ลูป 2, $-v3 + v2 + 12 = 0$ ----------(2)

ลูป 3, $-10+v1+v2+12=0$ ---------- (3)

เมื่อให้ $R1=10\Omega, R3=1\Omega$, $v2=-10V$ และ $3i=2A$ หาค่า $R2$ ได้โดย

ใช้กฎของโอห์ม, $v3=R3i3=1(2)=2V$

จากสมการ (1), $v1=10-v3=10-2=8V$

ใช้กฎของโอห์ม, $v1=R1\,i1$

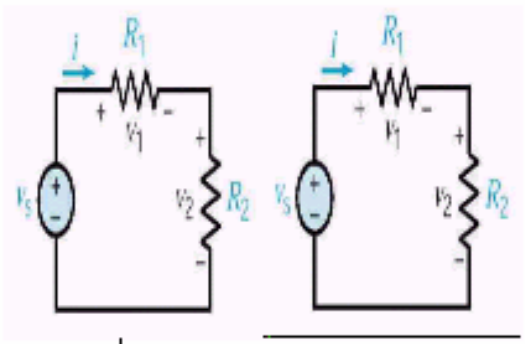
$i1=v1/R1=8/8=1A$

จาก KCL ที่โนด a, $i1-i2-i3=0$

$i2=i1-i3=1-2=-1A$

ดังนั้น $R2=v2/i2=-10/-1=10\Omega$

2.11 วงจร แบ่งแรงดัน (Voltage Divider Circuit)



รูปที่ 6 รูปวงจรแบ่งแรงดัน

จากกฎ KVL จะได้, $-v_s + v1 + v2 = 0$

จากกฎของโอห์ม $v1 = R1\ i1, v2 = R2 i2$

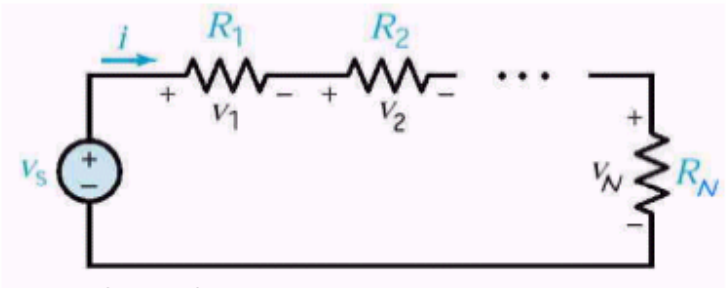
จะได้ $-v_s + R1 i1 + R2 i2 = 0$ หรือ

$$i = \frac{v_s}{R_1 + R_2}$$

สุดท้ายจะได้

$$v_1 = R_1 i = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_s$$
$$v_2 = R_2 i = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_s$$

รูปแบบทั่วไปของวงจรแบ่งแรงดัน



รูปที่ 7 รูปทั่วไปของวงจรความต้านทานต่ออนุกรม

แรงดันตกคร่อมตัวต้านทานที่ n คือ

$$v_n = R_n i = \frac{R_N}{R_1 + R_2 + \ldots R_N} v_s$$

กรณีรูปวงจรความต้านทานต่ออนุกรมดังรูป

KVL: $-v_s + v1 + v2 + \ldots + v_N = 0$

$-v_s + R1i + R2i + \ldots + R_N i = 0$

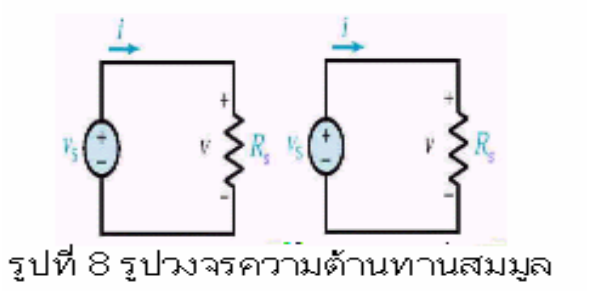
จะได้

$$i = \frac{v_s}{R_1 + R_2 + \ldots + R_N} = \frac{v_s}{R_s}$$

เมื่อ

$$\boxed{R_s = R_1 + R_2 + \ldots + R_N}$$

คือ ความต้านทานสมมูลของวงจร



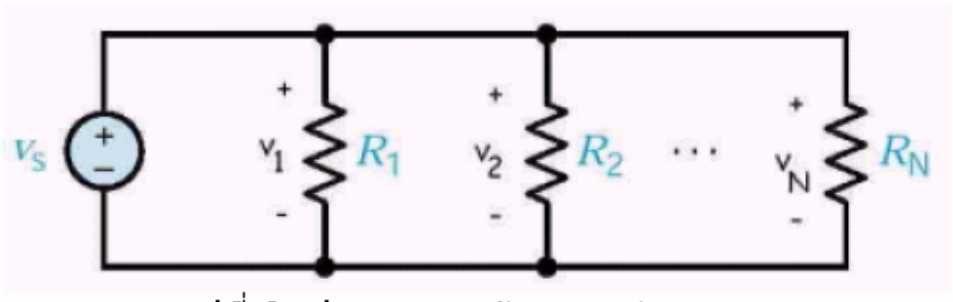
รูปที่ 8 รูปวงจรความต้านทานสมมูล

KVL: $-v_s + v = 0$

$-v_s + R_s i = 0$

$$\boxed{i_s = v_s / R_s}$$

กรณีที่วงจรความต้านทานต่อขนาน



รูปที่ 9 รูปวงจรความต้านทานต่อขนาน

KVL loop 1 : $-v_s + v_1 = 0 \longrightarrow v_1 = v_s$

loop 2 : $-v_s + v_2 = 0 \longrightarrow v_2 = v_s$

.

.

.

.

loop n : $-v_s + v_N = 0 \longrightarrow v_N = v_s$

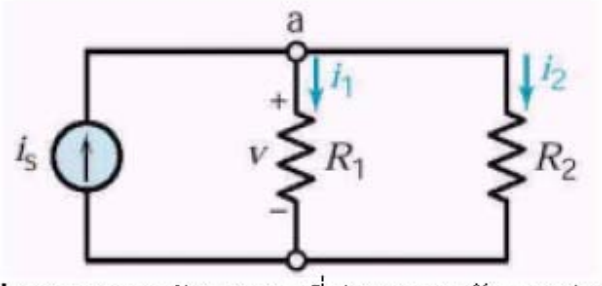
ดังนั้น

$$v_1 = v_2 = \ldots = v_N$$

จากรูปข้างบน

$$i_n = v_s / R_n$$
$$i_s = i_1 + i_2 + .. i_n$$

พิจารณารูปวงจรต่อไปนี้



รูปที่ 10 รูปวงจรความต้านทานที่ต่อขนานกับแหล่งจ่ายกระแส

จากวงจรข้างบนจะได้,

KCL ที่โนด a : $i_s = i1 + i2$

กฎของโอห์ม, $i1 = v/R1$ และ $i2 = v/R2$

จะได้

$$i_s = \frac{v}{R_1} + \frac{v}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} v$$

หรือ

$$\boxed{v = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} i_s}$$

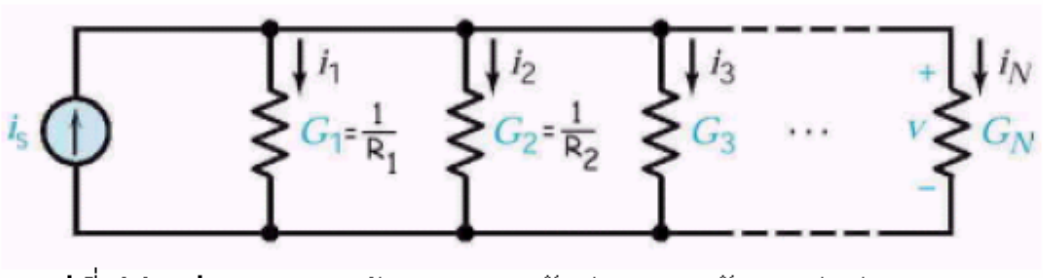
$$\boxed{\begin{aligned} i_1 &= \frac{v}{R_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} i_s \\ i_2 &= \frac{v}{R_2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} i_s \end{aligned}}$$

ให้ $G_1 = \frac{1}{R_1}$ และ $G_2 = \frac{1}{R_2}$

จะได้ $G_p = G_1 + G_2 = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}$

และ $i_1 = \frac{G_1}{G_p} i_s, i_2 = \frac{G_2}{G_p} i_s$

พิจารณาวงจรต่อไปนี้



รูปที่ 11 รูปวงจรความต้านทาน n ตัวต่อขนานกับแหล่งจ่ายกระแส

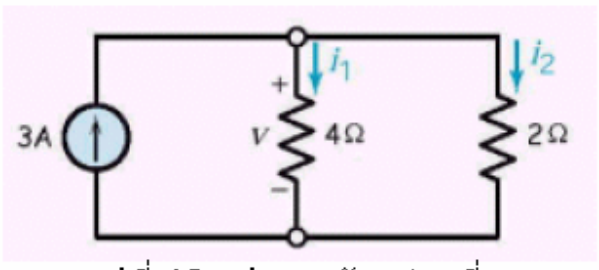
จากรูปวงจรข้างต้นจะได้

$$G_p = \frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_N}$$

และ

$$i_n = \frac{G_n}{G_p} i_s$$

<u>ตัวอย่าง</u> หากระแส $i1$, $i2$ และ v ในวงจร



รูปที่ 12 รูปวงจรตัวอย่างที่ 4

<u>วิธีทำ</u>

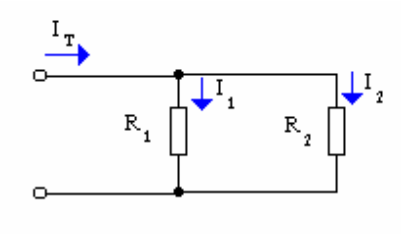
$$i_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} i_s = \frac{2}{4+2} 3 = 1A$$

$$i_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} i_s = \frac{4}{4+2} 3 = 2A$$

$$v = R_1 i_1 = (4)(1) = 4V$$

2.12 วงจรแบ่งกระแส

ในวงจรขนานค่ากระแสรวมของวงจร เราสามารถแยกกระแสการไหลของกระแสไปยังความต้านทาน ในแต่ละสาขา โดยปริมาณของกระแสจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานที่ต่ออยู่ในสาขานั้นๆ จากรูปข้างล่าง จะมีค่ากระแส I_Tเป็นแหล่งจ่ายกระแส และ I_1จะไหลผ่าน R_1 , I_2 จะไหลผ่าน R_2 ซึ่งเราสามารถหาค่าได้ดังนี้



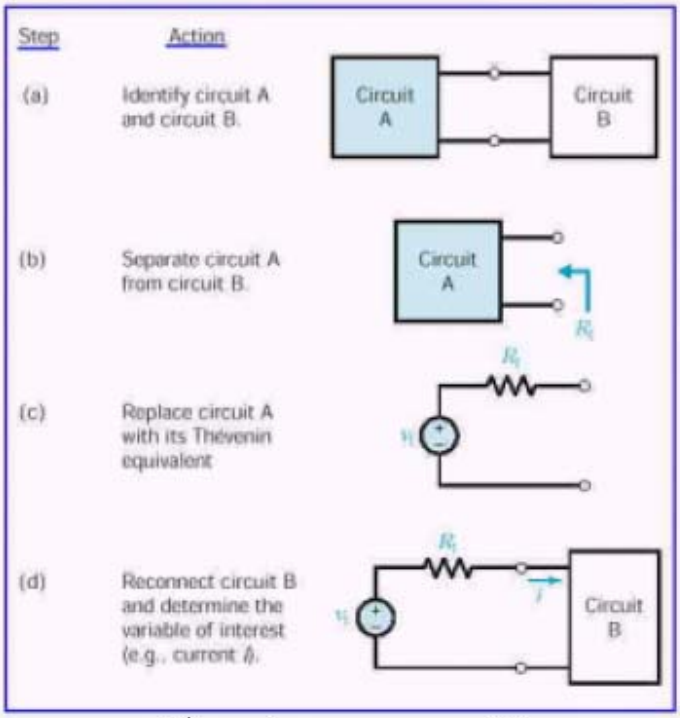
$$I_1 = \frac{I_T * R_2}{R_1 + R_2}$$

$$I_2 = \frac{I_T * R_1}{R_1 + R_2}$$

2.13 ทฤษฎีของเทวินิน

สำหรับวงจรความต้านทานและแรงดันจากแหล่งจ่ายที่ขั้ว a-b สามารถแทนด้วยวงจรอนุกรมของความต้านทาน (R_t) และแหล่งจ่ายแรงดัน (V_t) เมื่อ V_t คือแรงดันตกคร่อม a และ b (ขณะเปิดวงจร) tR_t คืออัตราส่วนแรงดันขณะเปิดวงจรต่อกระแสที่ไหลผ่านขณะลัดวงจรที่ขั้ว a และ b

ทฤษฎีเทวินิน

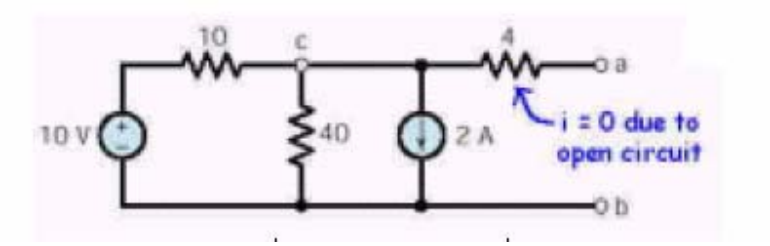


รูปที่ 6 รูปการหาวงจรเทวินิน

การหาวงจรสมมูลเทวินินสามารถหาได้โดย

องค์ประกอบวงจร	**วิธีการหา *V*t**	**วิธีการหาR*t***
ความต้านทานและ แหล่งจ่ายอิสระ	ใช้การวิเคราะห์แบบโนด และเมชหาแรงดันขณะ เปิดวงจร $V\,oc$ ที่ขั้ว a-bและให้ $V\,t = V\,oc$	กำหนดไม่ให้แหล่งจ่ายทำงาน โดยลัดวงจรแหล่งจ่ายแรงดัน และเปิดวงจรแหล่งจ่ายกระแส หาค่าความต้านทาน $R\,t$
		หรือลัดวงจรที่ขั้ว a-b หากระแส *sci* แล้วหา $V_t = \frac{V_{oc}}{i_{sc}}$
ความต้านทาน, แหล่งจ่ายอิสระและ แหล่งจ่ายไม่อิสระ	ใช้การวิเคราะห์แบบโนด หรือเมชหาแรงดันขณะ เปิดวงจร $V\,oc$ ที่ขั้ว a-b และให้ $V\,t= V\,oc$	ลัดวงจรที่ขั้ว a-b หากระแส $i\,sc$ แล้วหา $V_t = \frac{V_{oc}}{i_{sc}}$
ความต้านทานและ แหล่งจ่ายไม่อิสระ	ให้ $V\,t= V\,oc\ = 0$	ต่อแหล่งจ่ายกระแส 1A เข้าไป ที่ขั้ว a-b และหา $V\,ab$

ตัวอย่าง จงหาวงจรสมมูลเทวินิน



รูปที่ 7 รูปตัวอย่างที่ 4

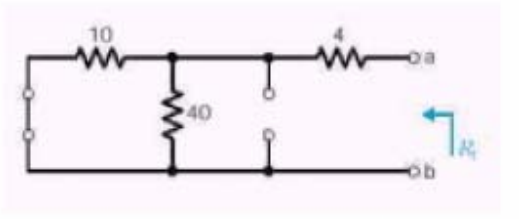
วิธีทำ ขั้นแรกหาแรงดันที่ตกคร่อมขั้ว a-b

KCL ที่โนด c :

$$\frac{v_c - 10}{10} + \frac{v_c}{40} + 2 = 0$$

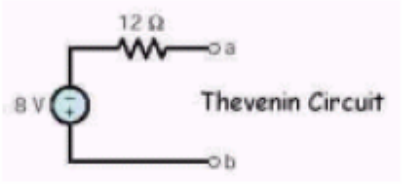
จะได้ $v_c = -8V$

เมื่อ $Vt = v_c = v_{oc} = v_{ab} = 8V$



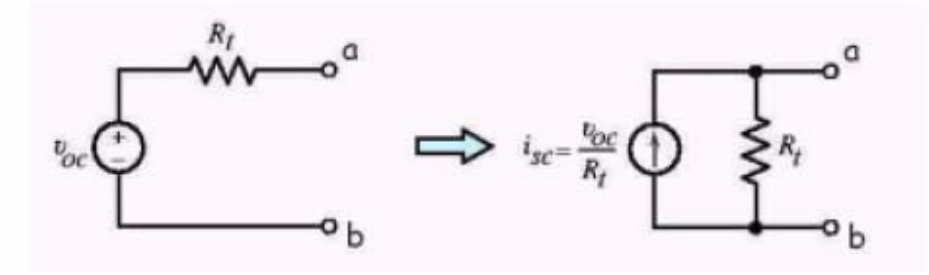
หาความต้านทานสมมูลของวงจร

$$R_t = 4 + \frac{(10)(40)}{10+40} = 12\Omega$$



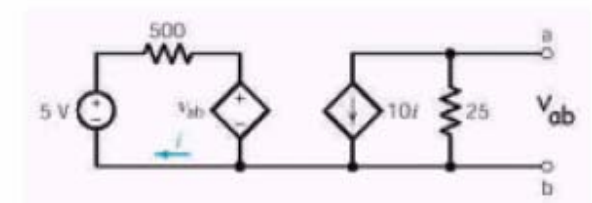
วงจรสมมูลของนอร์ตัน (Norton's equivalent circuit)

วงจรสมมูลของนอร์ตันสามารถหาได้จากวงจรสมมูลเทวินินดังรูป



รูปที่ 10 การหาวงจรสมมูลของนอร์ตันจากวงจรสมมูลเทวินิน

ตัวอย่าง จงหาวงจรสมมูลของนอร์ตันจากรูปวงจรต่อไปนี้



รูปที่ 11 รูปตัวอย่างที่ 7

วิธีทำ

$$Voc = vab = -25(10i) = -250i$$

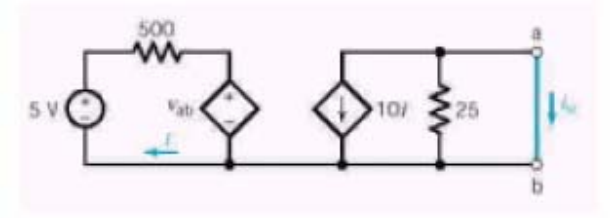
KVL ลูปด้านซ้ายคือ

$$-5+500i-250i=0 \text{ หรือ } i = 20mA$$

จะได้

$$v\,oc = -250\,i = -5V$$

เมื่อทำการปิดวงจรที่ a-b



เมื่อวงจรที่ a-b ถูกปิด จะได้ $v\,ab = 0$และ $isc = -10i$

ต่อไปใช้เมชหาสมการ

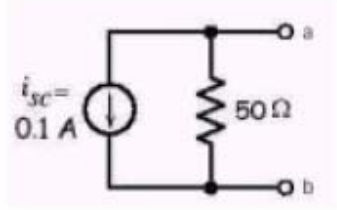
$$-5+500i+0=0 \text{ หรือ } i=10mA$$

ดังนั้น

$$isc = -10\,i = -0.1A$$

สุดท้ายจะได้

$$R_t = \frac{v_{oc}}{i_{sc}} = \frac{-5}{-0.1} = 50\Omega$$



2.14 หม้อแปลงไฟฟ้า

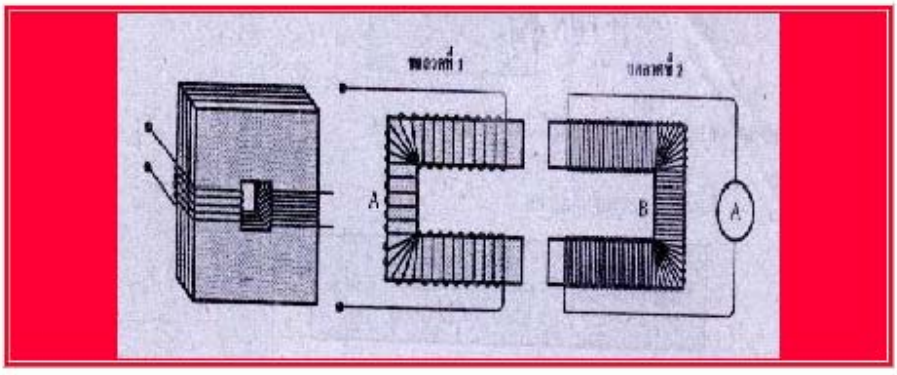
*หม้อแปลงไฟฟ้า(า*Trans former) คือ เครื่องมือสำหรับเพิ่ม หรือลดความต่างศักย์ไฟฟ้าหระแสสลับ ให้สูงขึ้นหรือต่ำลง โดยอาศัยการเหนี่ยวนำไฟฟ้าระหว่างขดลวด มีส่วน ประกอบง่ายๆ คือแกนเหล็กอ่อน ตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลางกลวง โดยมากมัดจะใช้แผ่นเหล็กอ่อนบางๆ หลายๆ แผ่นอันซ้อนกัน แกนเหล็กอ่อน มีหน้าที่รวมเส้นแรงแม่เหล็กจากขดลวดที่ 1 ไปเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสในขดลวดที่ 2, *ทั้ง 2 ข้างของแกนเหล็ก มีขดลวดหุ้มฉนวนบางพันไว้* ข้างหนึ่งมีจำนวนรอบมาก อีกข้างหนึ่งมีจำนวนรอบน้อย

ขดลวดด้านที่ต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า A.C. เรียกว่า ขดลวดปฐมภูมิ (Primary Coil) ขดลวดอีกขดหนึ่งเรียกว่า ขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Coil)

หม้อแปลงนี้ เราจะใช้แปลงไฟขึ้นหรือแปลงไฟลงก็ได้ แล้วแต่เราจะต่อกระแสสลับเข้าทางไหน

ก. หม้อแปลงขึ้น (Step-up Transformer) ต้องต่อกระแสไฟสลับเข้าทางขดลวดน้อย รอบ ในกรณีนี้ ขดลวดน้อยรอบ จะเป็นขดลวดที่ 1 (Primary Coil, ขดลวดปฐมภูมิ) จะมีกระแสไฟฟ้าสลับเกิดขึ้นในขดลวดที่ 2 หรือขดลวด ทุติยภูมิ (Secondary Coil) โดยการเหนี่ยวนำและมีความต่างศักย์สูงขึ้น เพราะขดลวดที่ 2 มีจำนวนรอบมากกว่าขดลวดที่ 1

ข. หม้อแปลงลง (Step-down Transformer) ต้องต่อกระแสไฟฟ้าสลับให้ขดลวด มากรอบ เป็นขดลวดที่ 1 ดังนั้น ขดลวดน้อยรอบ จะเป็นขดลวดที่ 2, ขดลวดที่ 2 จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ำลง เพราะมีจำนวนรอบขดลวดน้อยกว่า

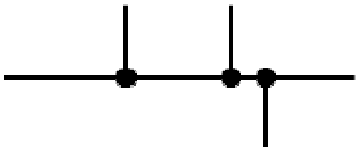
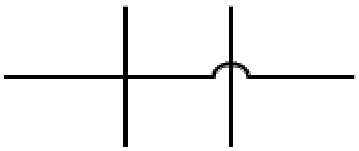


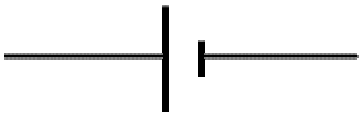
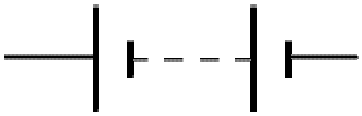
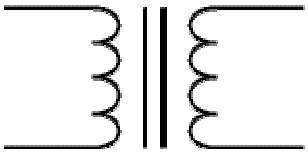
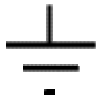
จากรูป ขดลวดด้านซ้ายมือ เป็นขดลวดที่เราป้อนแรงดันไฟฟ้าที่เราต้องการ จะแปลงเข้าไปเรียกว่า ขดลวดปฐมภูมิ

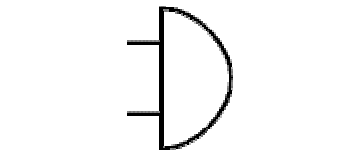
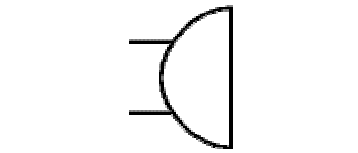
สำหรับขดลวดด้านขวามือ เป็นขดลวดที่เราต้องการจะทำให้เกิดแรงเคลื่อน ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น หรือเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่จะได้ออกมา เรียกว่า ขดลวดทุติยภูมิ

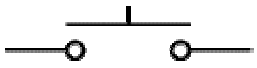
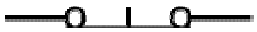
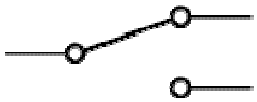
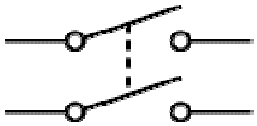
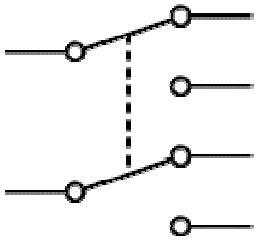
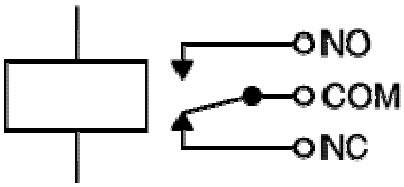
2.15 สัญลักษณ์ที่ใช้ในวงจร(Circuit Symbols)

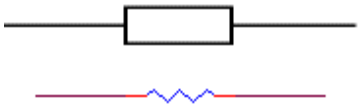
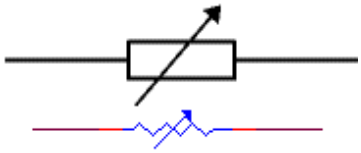
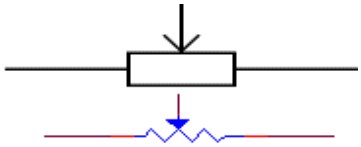
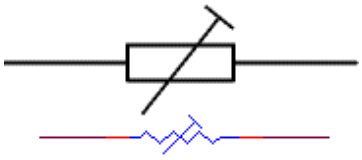
สัญลักษณ์แทนตัวอุปกรณ์จะถูกใช้ใน แผนภาพวงจร เพื่อแสดงให้เห็นการต่อเข้าด้วยกันของวงจร แต่รูปแบบตัวอุปกรณ์จริงจะแตกต่างจากแผนภาพวงจร ฉะนั้นในการสร้างวงจรจึงจำเป็นต้องมีแผนภาพแสดงการวางอุปกรณ์บน สตริปบอร์ด หรือ แผ่นปริ้นท์

สายและการต่อ		
อุปกรณ์	**สัญลักษณ์วงจร**	**หน้าที่ของอุปกรณ์**
สาย (wire)		ให้กระแสผ่านได้ง่ายมากจากส่วนหนึ่งไปยังส่วนอื่นของวงจร
จุดต่อสาย		เขียนหยดจุดที่สายต่อกัน ถ้าสายต่อและตัดกันเป็นสี่แยก ต้องเลื่อนให้เหลื่อมกันเล็กน้อยเป็นรูปตัวทีสองตัวต่อกลับหัว เช่นจุดต่อด้านขวามือ
สายไม่ต่อกัน		ในวงจรที่ซับซ้อนมีสายมากจำเป็นต้องเขียนสายตัดกันแต่ไม่ต่อกัน นิยมใช้สองวิธีคือเส้นตรงตัดกันโดยไม่มีจุดหยด หรือเส้นหนึ่งเขียนโค้งข้าม อีกเส้นที่เป็นเส้นตรงดังรูปทางขวา อยากแนะนำให้ใช้แบบหลังเพื่อป้องกันการเข้าใจผิดว่าเป็นจุดต่อที่ลืมใส่จุดหยด

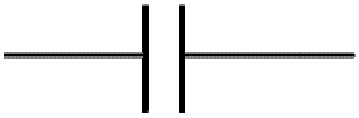
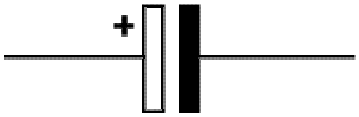
แหล่งจ่ายกำลัง		
อุปกรณ์	**สัญลักษณ์วงจร**	**หน้าที่ของอุปกรณ์**
เซลล์		แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า เซลล์ตัวเดียวจะไม่เรียกว่าแบตเตอรี่
แบตเตอรี่		แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า แบตเตอรี่จะมีมากกว่า 1 เซลล์ต่อเข้าด้วยกัน
ป้อนไฟตรง (DC)		ป้อนพลังงานไฟฟ้า DC = ไฟกระแสตรง ไหลทิศทางเดียวเสมอ
ป้อนไฟสลับ(AC)		ป้อนพลังงานไฟฟ้า AC = ไฟกระแสสลับ เปลี่ยนทิศทางการไหลตลอด
ฟิวส์		ป้องกันอุปกรณ์เสียหาย โดยตัวมันจะละลายขาดหากมีกระแสไหลผ่านเกินค่ากำหนด
หม้อแปลง		ขดลวดสองขดเชื่อมโยงกันด้วยแกนเหล็ก หม้อแปลงใช้แปลงแรงดันกระแสสลับให้สูงขึ้นหรือลดลง พลังงานจะถ่ายโอนระหว่าง ขดลวดโดยสนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก และไม่มีการต่อกันทางไฟฟ้าระหว่างขดลวด ทั้งสอง
ดิน(earth) (กราวด์)		ต่อลงดิน สำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปนี่คือ 0V (ศูนย์โวลท์)ของแหล่งจ่ายกำลัง แต่สำหรับไฟฟ้าหลักและวงจรวิทยุบางวงจรหมายถึงดิน บางที่เราเรียกว่ากราวด์

อุปกรณ์ด้านออก: หลอดไฟ, ใส้ความร้อน, มอเตอร์ ฯลฯ		
อุปกรณ์	**สัญลักษณ์วงจร**	**หน้าที่ของอุปกรณ์**
หลอด (แสงสว่าง)		ตัวแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นแสง สัญลักษณ์นี้เป็นหลอดให้แสงสว่าง ตัวอย่างเช่นหลอดไฟหน้ารถยนต์ หรือหลอดไฟฉาย
หลอด(ตัวชี้) (indicator)		ตัวแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นแสง สัญลักษณ์นี้ใช้สำหรับเป็นหลอดตัวชี้บอก ตัวอย่างเช่นหลอดไฟเตือนบนหน้าปัดรถยนต์
ตัวทำความร้อน (heater)		ตัวแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นความร้อน
มอเตอร์		ตัวแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานจล (หมุน)
กระดิ่ง(bell)		ตัวแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นเสียง
ออด (buzzer)		ตัวแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นเสียง
ตัวเหนี่ยวนำ (ขดลวด, โซลินอยด์)		ขดลวด เมื่อมีกระแสไหลผ่านจะเกิดสนามแม่เหล็ก หากมีแกนเหล็กอยู่ข้างในจะสามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล โดยทำให้เกิดการผลักได้

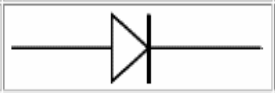
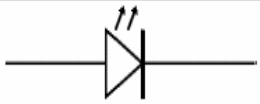
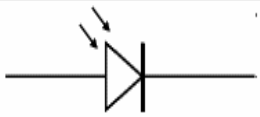
สวิทช์		
อุปกรณ์	**สัญลักษณ์วงจร**	**หน้าที่ของอุปกรณ์**
สวิทช์กดต่อ		สวิทช์กด ยอมให้กระแสไหลผ่านเมื่อสวิทช์ถูกกด เช่น สวิทช์กริ่งประตูบ้าน
สวิทช์กดตัด		สวิทช์แบบกด ซึ่งปกติจะต่อ (on) และเมื่อถูกกดจะตัด (off)
สวิทช์ปิดเปิด (SPST)		SPST(Single Pole Single Throw) สวิทช์ปิดเปิด ยอมให้กระแสไหลผ่านที่ตำแหน่งต่อ (on)
สวิทช์สองทาง (SPDT)		SPDT(Single Pole Double Throw) สวิทช์สองทาง เปลี่ยนสลับการต่อเพื่อให้กระแสไหลผ่านได้ไปทางตำแหน่งที่เลือก สวิทช์สองทางบางแบบจะมีสามตำแหน่ง โดยตำแหน่งกลางไม่ต่อ(off) ตำแหน่งจึงเป็นเปิด-ปิด-เปิด(on-off-on)
สวิทช์ปิดเปิดคู่ (DPST)		DPST(Double Pole Single Throw) สวิทช์ปิดเปิดแบบคู่ ปิดเปิดพร้อมกัน เหมาะสำหรับตัด-ต่อหรือปิด-เปิด วงจรพร้อมกันสองเส้น เช่น ไฟเมน
สวิทช์สองทางคู่ (DPDT)		DPDT(Double Pole Double Throw) สวิทช์สองทางแบบคู่ เปลี่ยนสลับการต่อพร้อมกัน เช่นใช้ในการต่อเพื่อกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ดีซี สวิทช์บางแบบจะมีสามตำแหน่งคือตำแหน่งไม่ต่อ(off)ตรงกลางด้วย
รีเลย์		สวิทช์ทำงานด้วยไฟฟ้า เมื่อมีไฟ เช่น 12โวลท์ 24 โวลท์ มาป้อนให้ขดลวดแกนเหล็ก จะเกิดการดูดตัวสัมผัสให้ต่อกัน ทำหน้าที่เป็นสวิทช์ต่อวงจรหรือตัดวงจร แล้วแต่ว่าต่ออยู่ที่ขา NO หรือ NC NO = ปกติตัด COM = ขาร่วม NC = ปกติต่อ

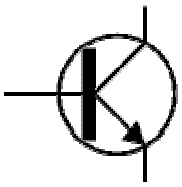
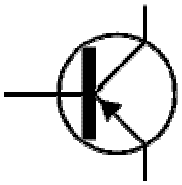
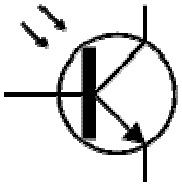
ตัวต้านทาน		
อุปกรณ์	**สัญลักษณ์วงจร**	**หน้าที่ของอุปกรณ์**
ตัวต้านทาน		ตัวต้านทานทำหน้าที่ต้านการไหลของกระแส เช่น การใช้ตัวต้านทานต่อเพื่อจำกัดกระแสที่ไหลผ่าน LED
ตัวต้านทานปรับค่าได้ (รีโอสตาท)		ตัวต้านทานปรับค่าได้ชนิดนี้มีสองคอนแทค (รีโอสตาท)ใช้สำหรับปรับกระแส ตัวอย่างเช่น ปรับความสว่างของหลอดไฟ, ปรับความเร็วมอเตอร์, และปรับอัตราการไหลของประจุเข้าในตัวเก็บประจุ เป็นต้น
ตัวต้านทานปรับค่าได้ (Potentiometer)		ตัวต้านทานปรับค่าได้ชนิดนี้มีสามคอนแทค (โพเทนชิออมิเตอร์) ใช้สำหรับควบคุมแรงดัน สามารถใช้เหมือนกับตัวแปลงเพื่อแปลง ตำแหน่ง(มุมของการหมุน)เป็นสัญญาณไฟฟ้า เช่น วอลุ่มปรับความดัง โทนคอนโทรลปรับทุ้มแหลม
ตัวต้านทานปรับค่าได้ (Preset)		ตัวต้านทานปรับค่าได้ชนิดนี้ใช้สำหรับปรับตั้งล่วงหน้า (preset)ใช้ไขควงเล็กๆหรือเครื่องมืออื่นที่คล้ายกันปรับ ถูกปรับตั้งตอน ประกอบปรับแต่งวงจรจากนั้นอาจไม่มีการปรับอีก บางแบบเป็นรูปเกือกม้าปรับได้ไม่ถึงรอบ บางแบบปรับละเอียดได้หลายรอบ

ตัวเก็บประจุ

อุปกรณ์	สัญลักษณ์วงจร	หน้าที่ของอุปกรณ์
ตัวเก็บประจุ		ตัวเก็บประจุ เก็บสะสมประจุไฟฟ้า ใช้ต่อร่วมกับตัวต้านทาน เป็นวงจรเวลา สามารถใช้เป็นตัวกรอง เป็นตัวกั้นไฟดีซีไม่ให้ผ่าน แต่ยอมให้สัญญาณเอซีผ่านได้
ตัวเก็บประจุมีขั้ว		ตัวเก็บประจุชนิดมีขั้ว เก็บสะสมประจุไฟฟ้า เวลาใช้ต้องต่อให้ถูกขั้ว ใช้ต่อร่วมกับตัวต้านทานเป็นวงจรเวลา สามารถใช้เป็นตัวกรอง เป็นตัวกั้นไฟดีซีไม่ให้ผ่าน แต่ยอมให้สัญญาณเอซีผ่านได้
ตัวเก็บประจุปรับค่าได้		ตัวเก็บประจุปรับค่าได้ใช้ในจูนเนอร์วิทยุ
ตัวเก็บประจุทริมเมอร์		ตัวเก็บประจุปรับค่าได้โดยการใช้ไขควงเล็กๆหรือเครื่องมืออื่นที่คล้ายกันปรับ ถูกปรับตั้งตอน ประกอบปรับแต่งวงจร จากนั้นอาจไม่มีการปรับอีก

ไดโอด

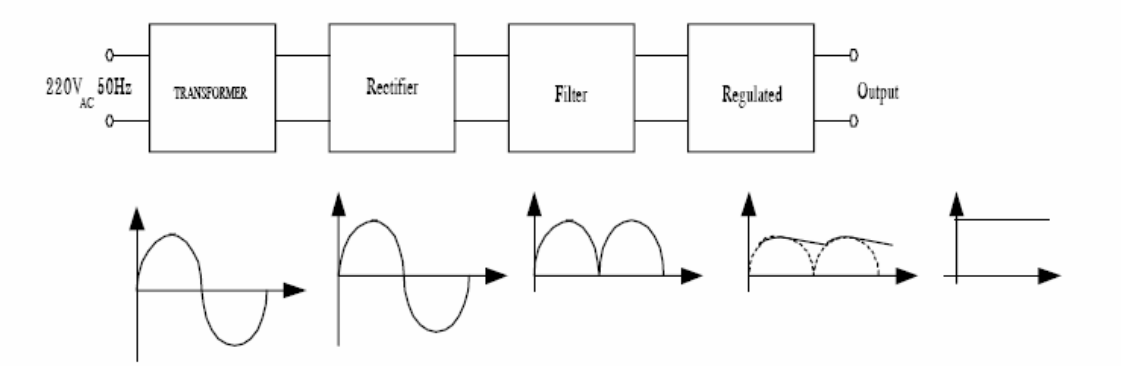
อุปกรณ์	สัญลักษณ์วงจร	หน้าที่ของอุปกรณ์
ไดโอด		อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ยอมให้กระแสไหลผ่านทางเดียว
LED ไดโอดเปล่งแสง		อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นแสง
ซีเนอร์ไดโอด		ไดโอดที่รักษาแรงดันคงที่ตกคร่อมตัวมัน
ไดโอดพลังแสง		ไดโอดที่มีความไวต่อแสง

ทรานซิสเตอร์		
อุปกรณ์	**สัญลักษณ์วงจร**	**หน้าที่ของอุปกรณ์**
ทรานซิสเตอร์ NPN		ทรานซิสเตอร์อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดNPN สามารถต่อร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆเพื่อเป็นตัวขยาย(Amplifier)หรือวงจรสวิทชิ่ง (Switching)
ทรานซิสเตอร์ PNP		ทรานซิสเตอร์อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดPNP สามารถต่อร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆเพื่อเป็นตัวขยาย(Amplifier)หรือวงจรสวิทชิ่ง(Switching)
ทรานซิสเตอร์พลังแสง		ทรานซิสเตอร์ที่มีความไวต่อแสง

มิเตอร์และออสซิลโลสโคป		
อุปกรณ์	**สัญลักษณ์วงจร**	**หน้าที่ของอุปกรณ์**
โวลท์มิเตอร์		โวลท์มิเตอร์ใช้วัดแรงดัน ชื่อที่ถูกต้องของแรงดันคือความต่างศักย์แต่คนส่วนใหญ่ชอบเรียกว่าแรงดัน
แอมป์มิเตอร์		แอมป์มิเตอร์ใช้วัดกระแส
กัลวาโนมิเตอร์		กัลวาโนมิเตอร์เป็นมิเตอร์ที่มีความไวสูงใช้สำหรับวัดค่ากระแสน้อยๆ เช่น1 มิลลิแอมป์หรือต่ำกว่า
โอห์มมิเตอร์		โอห์มมิเตอร์ใช้วัดความต้านทาน เครื่องมัลติมิเตอร์ส่วนใหญ่สามารถตั้งวัดความต้านทานได้
ออสซิลโลสโคป		ออสซิลโลสโคปใช้แสดงรูปคลื่นสัญญาณทางไฟฟ้า และสามารถวัดแรงดันกับช่วงเวลาของสัญญาณ

บทที่ 3

หลักการของ Power Supply



จาก Block Diagram สัญญาณ Sine Wave ขนาด 220 VAC ความถี่ 50Hz จะถูกเหนี่ยวนำให้มีขนาดเล็กลงด้วยหม้อแปลง (Transformer) สัญญาณที่ได้จากหม้อแปลงจะเป็นไฟสลับอยู่ จึงต้องผ่านวงจรเรียงกระแส (Rectifier) เพื่อทำ าให้เป็นไฟตรงก่อน จากนั้นจะผ่านวงจรกรองกระแสเพื่อทำให้ไฟตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสมีความเรียบขึ้น ในที่สุดก็จะเป็นวงจรรักษาระดับแรงดัน(Voltage Regulator) เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟตรงให้คงที่ และตรงตามความต้องการ

Transformer Specifications

ในการเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้ามีหลักการคือ จะต้องเลือกหม้อแปลงที่สามารถจ่ายแรงดันและกระแสได้เพียงพอกับการใช้งานจริง แต่ก็ไม่ควรที่จะเลือกหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่ (จ่ายแรงดันและกระแสได้สูง) เพราะจะทำ าให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายดังนั้นในการเลอืกหม้อแปลงไฟฟ้าให้มีขนาดพอเหมาะกับงานที่ต้องการก็จะพิจารณาขนาดของแรงดันไฟตรง (VO) และกระแสไฟตรงสูงสุด (IO) ที่สามารถจ่ายให้โหลดได้ แล้วนำมากำหนดขนาดของแรงดันชดทุติยภูมิ (Secondary) และกระแสใช้งานที่ขดทุติยภูมิของหม้อแปลง โดยพิจารณาได้จากสมการ

$$V_{rms} = 1.1\frac{V_o + V_{do} + V_{rect} + V_r}{\sqrt{2}}\frac{V_{line(nom)}}{V_{line(low)}}$$

Vrms = The rms voltage of the secondary (V)

VO = Regulated Output Voltage (V)

Vdo = Regulator Dropout Voltage (V)

Vrect = 1 for Center-tapped Rectifier

= 2 for Bridge Rectifier

จากสมการที่ 1 จะทำ าให้รู้ถึงขนาดของ Secondary Voltage ของหม้อแปลง และ Secondary Current(Irms) สามารถหาได้โดย

$$I_{rms} \approx 1.2I_o$$

และ

$$I_{rms} \approx 1.8I_o$$

ต่อมาจะทำ าให้เราทราบถึงขนาดของหม้อแปลงที่ขดทุติยภูมิ (Power Rating of Secondary)ซึ่งมีค่า

$$\text{Power Rating of Secondary} = V_{rms}.I_{rms}\ (VA)$$

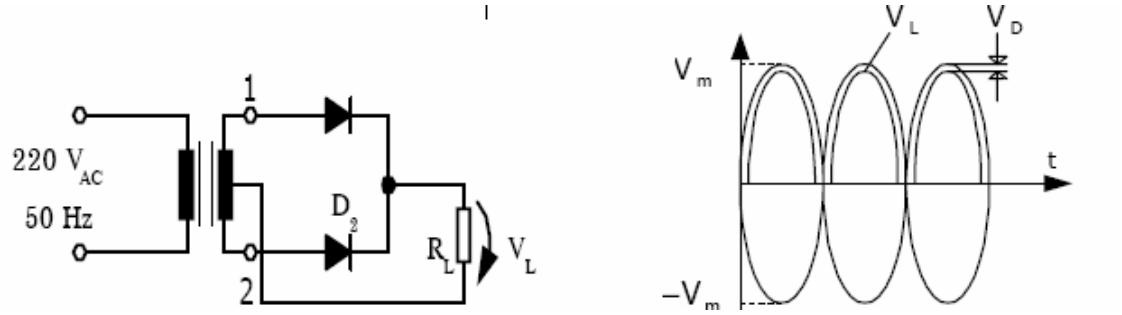
The Rectifier

วงจร Rectifier จะทำ าหน้าที่เป็นตัวเปลี่ยนกระแสไฟสลับที่มาจากหม้อแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยวงจร Rectifier ที่นิยมใช้ในทางปฏิบัติจริง ๆ จะมีอยู่ 2 ชนิด

1. Center-tapped Full-wave Rectifier
2. Full wave Bridge Rectifier

แต่จริง ๆ แล้ว จะมีวงจร Rectifier อีกชนิดหนึ่ง คือ Half-wave, Rectifier แต่ไม่ค่อยนิยมนำมาใช้งาน ถึงแม้อัตราการดึงกำ าลัง และค่าใช้จ่ายจะต่ำกว่า เพราะวงจร Half wave Rectifier ให้ประสิทธิภาพที่ต่ำมาก

The Center-tapped(CT) Configurations



จากวงจร D1 และ D2 จะผลัดกันทำงานในแต่ละช่วงครึ่งรูปคลื่น และจากแรงดันเอาต์พุต (VL) ที่ได้จะเห็นว่า มีค่าน้อยกว่า แรงดันอินพุต โดยขนาดของ VL สูงสุด VL (peak) สามารถหาได้จาก

$$V_{L(peak)} = V_m - V_{D(on)}$$

VD(on)คือ แรงดันตกคร่อมไดโอด D1 หรือD2 ขณะได้รับ Forward bias ซึ่งปกติจะมีค่าประมาณ 0.6V-1V เนื่องจากไดโอดที่นำมาใช้ในวงจร Rectifier ส่วนใหญ่เป็นไดโอดชนิดซิลิกอน (Silicon diode)ในการเลือกใช้ไดโอดในวงจร Rectifier มีข้อควรคำนึง 2 คือ

1. อัตราทนกระแสขณะได้รับ Forward bias (IFmax) ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$I_{F\ max} = \frac{V_{L(peak)}}{R_{L(min)}}$$

เมื่อ RL (min) คือ ค่าต่ำสุดของภาวะ ซึ่งจะทำให้วงจร Rectifier จะต้องจ่ายกระแสออกมาสูงสุด ตามที่เราต้องการนั้นเอง

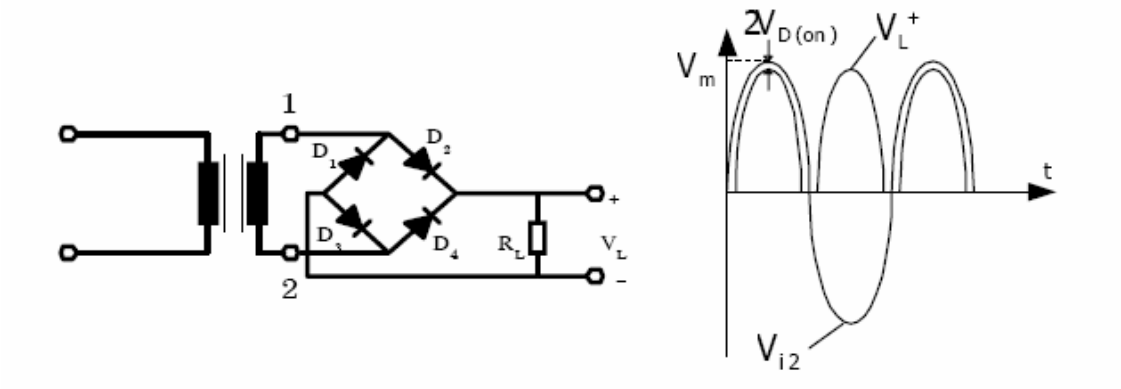
2. อัตราการทนแรงดันสูงสุด ขณะได้รับ Reverse bias (Peak Inverse Voltage, PIV)สำหรับวงจร Center-tapped Fullwave Rectifier นี้สามารถหาค่า PIV ได้จาก

$$PIV = 2V_{m(max)} - V_{D(on)}$$

ค่าพิกัดของไดโอดทั้ง 2 ค่านี้ในการออกแบบจริงควรเลือกใช้ให้มากกว่าค่าที่คำนวณได้อย่างน้อย 50% ทั้งนี้เพื่อป้องกันความเสียหายของไดโอดอันเนื่องมาจากแรงดัน Spike

The bridge rectifier configuration

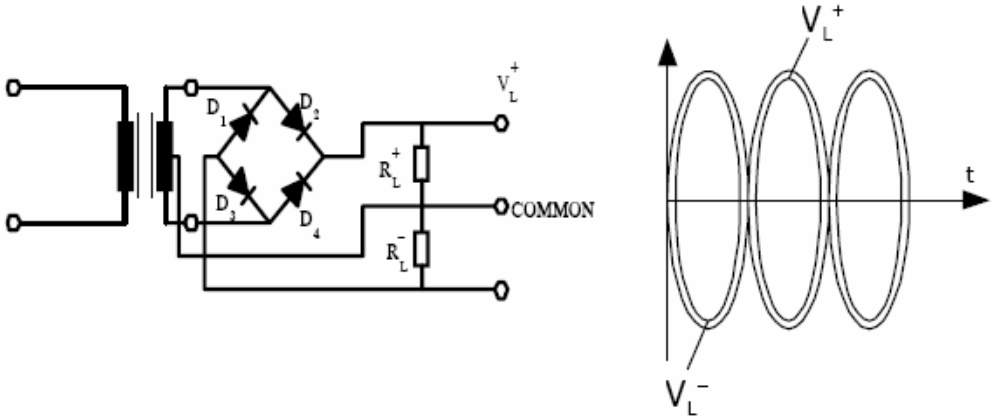
วงจร Bridge Rectifier สามารถให้แรงดันไฟตรงออกมาในลักษณะ Full wave ได้โดยที่ไม่จำเป็นต้องใช้หม้อแปลงที่มี Tap กลาง ดังวงจรข้างล่าง



จากวงจรช่วงครึ่ง Cycle บวก กระแสจะไหลผ่าน D2, RL และ D3 แล้วกลับเข้าขา 2 ของหม้อแปลง ทำให้ได้รูปคลื่นครึ่ง Cycle มาตกคร่อมที่ RLในช่วงครึ่ง Cycle ลบกระแสไฟฟ้าจะไหลจากขา 2 ผ่าน D4 , RLและ D1 กลับเข้าขา 1 ของหม้อแปลง ทำให้ได้รูปคลื่นอีกครึ่ง Cycle มาบวกที่ RL

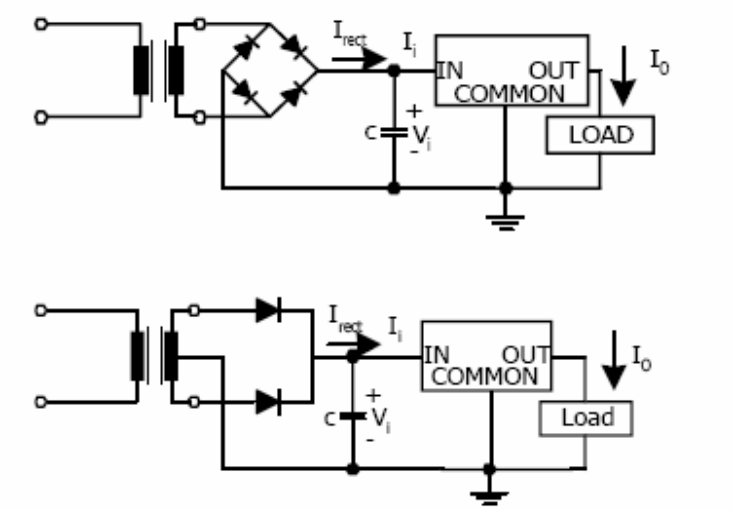
$$V_{L(peak)} = V_m - 2V_{D(on)}$$

สำหรับขนาดของแรงดันเอาต์พุต (VL) สามารถหาได้จากส่วนพิกัดการทนแรงดันย้อนกลับ (PIV) ของไดโอด แต่ละตัวสามารถหาได้จากในกรณีที่เราต้องการออกแบบ แหล่งจ่ายไฟแรงดันคู่ (Dual Power Supply) ก็สามารถใช้วงจร Rectifier ดังวงจรข้างล่างได้ ส่วนค่า PIV ของไดโอดแต่ละตัวของวงจรนี้สามารถหาได้โดยใช้สมการที่ (7)



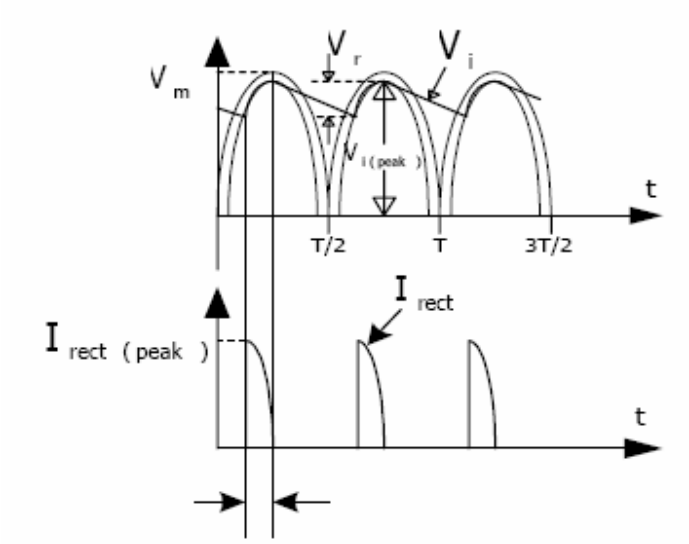
The Filter

วงจรกรองกระแส (Filter) ที่นิยมและได้ผลดี ก็จะเป็นวงจรเรียงกระแสที่ใช้ตัวเก็บประจุ (Capacitor) Filter นี้จะต่ออยู่ระหว่าง Rectifier และ Voltage Regulator ดังในวงจรข้างล่าง



จากวงจรทั้ง(a) และ (b) ในการเลือกค่า C จะต้องผ่าC ที่สามารถเก็บประจุ (Charged) ถึงแรงดัน Vi(peak) ซึ่งหาได้จาก

$$V_{i\,(peak)} = V_m - V_{rect}$$



จากภาพ Vm = Peak Voltage at the transformer Secondary

Vrect = One or two forward diode drop. (แปรตามชนิดของวงจร Rectifier)

Vr = Ripple Voltage

เราสามารถหาขนาดของ Vr นี้ได้จากสมการพื้นฐาน คือ

$$v = \frac{1}{c}\int i_c dt$$

$$dv = \frac{ic}{c}.dt$$

เมื่อ dv = vr = Ripple Voltage

ic = I = I I = IO+IQ $H\square$IO

และ dt = Capacitor Discharge Interval

จากกราฟจะเห็นได้ว่า

$$dt \approx T/2 \text{เมื่อ} T = \frac{1}{f} \text{ดังนั้น}$$

$$V_r \approx \frac{I_O}{2fc}$$

จากสมการที่ (11) Vr = Ripple Voltage

IO = Regulator Output Current

f = Line Frequency(50Hz in Thailand)

วงจร Rectifier จะจ่ายกระแส (Irect) ในช่วง Conduction time (Tcond) เท่านั้น ซึ่งค่าเวลา Tcond สามารถหาได้จาก

$$T_{cond} = \frac{\theta}{360^{\circ}} \bullet T$$

เมื่อ □ □คือ มุมนำ กระแส (Conduction Angle, Degree) หาได้จาก

$$\theta = \cos^{-1} \frac{V_{i\,(peak)} - V_r}{V_{i\,(Peak)}}$$

ในทำ นองเดียวกัน

$$I_{rect\,(peak)} \approx \frac{360^{\circ}}{\theta} I_O$$

จากสมการที่ได้มาทั้งหมดเหล่านี้ ทำ ให้เราสามารถกำ หนดค่า C ที่เหมาะสมได้จาก

$$C \approx \frac{I_O}{V_r}\left(\frac{T}{2} - T_{cond}\right)$$

สำ หรับค่าอัตราการทนแรงดันของตัวเก็บประจุ ควรใช้ระดับแรงดันในวงจร Filter (i (peak) V) ไม่เกิน75% ของอัตราทนแรงดันที่ระบุไว้บนตัวเก็บประจุนั้น

Voltage Regulators

วงจรรักษาระดับแรงดัน (Voltage Regulators) มีหน้าที่รักษาระดับแรงดันไฟตรงที่จ่ายให้โหลดมีค่าคงที่ ไม่เปลี่ยนตามสภาพโหลด โดยทั่วไป สามารถแบ่งชนิดของ Regulator ออกเป็น 2ชนิด คือ Series Regulator และ Switching Regulator

Series Regulator จะควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้โดยการใช้ตัวเปรียบเทียบแรงดันกับแรงดันเอาต์พุตที่ย้อนกลับมา ส่วน Switching Regulator นั้นจะทำ งานในลักษณะ On-off ก็จะผ่านวงจร LC Filter เพื่อกรองกระแสให้เรียบเป็นไฟตรง ส่วนการควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ ทำได้โดยการปรับ ค่าเวลาในการ On (ton)

บทที่ 4

หลักการทำงานของวงจร Power supply

การทำงานของวงจร

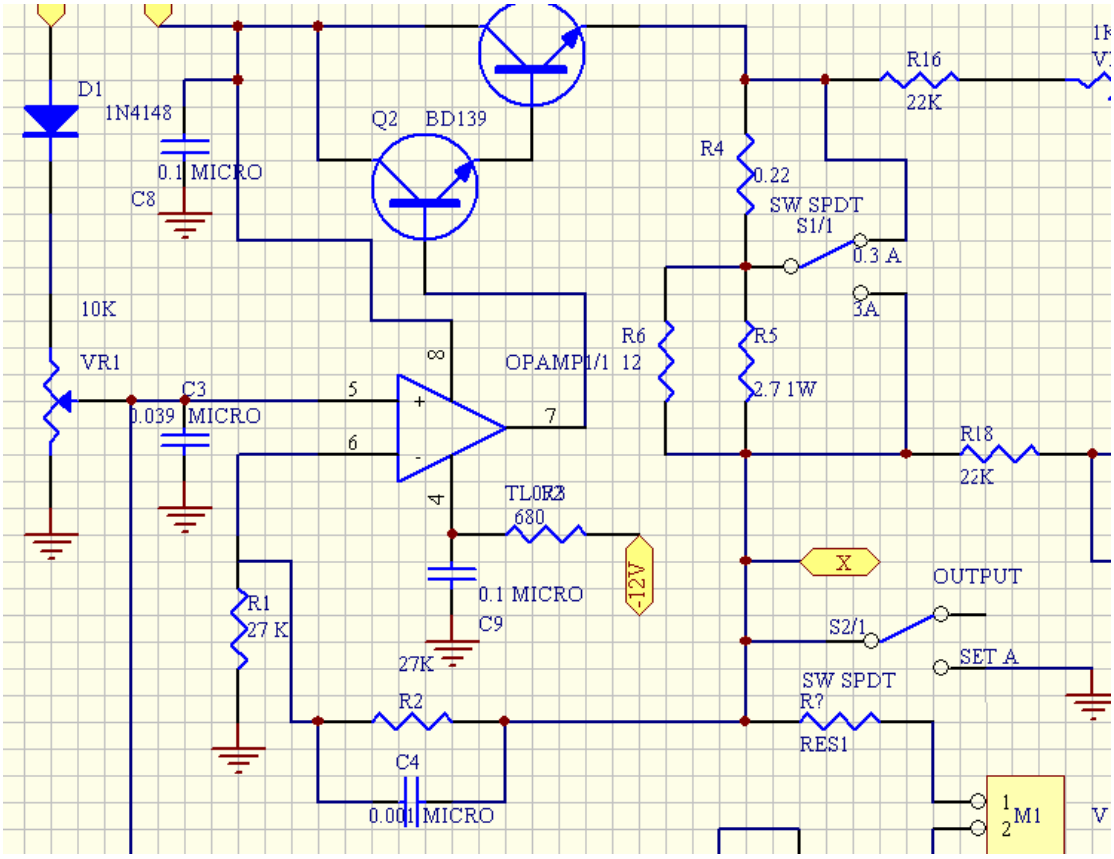
เมื่อทราบจุดประสงค์หลักของการสร้างเพาเวอร์ซัพพลายแล้ว การทราบถึงการทำงานโดยละเอียดของวงจรเพาเวอร์ซัพพลายที่จะสร้างมีส่วนสำคัญมากประการหนึ่ง ดังจะได้อธิบายถึงการทำงานโดยละเอียดของเพาเวอร์ซัพพลาย 0-40 V / 5 A ชุดนี้

การทำงานที่สมบูรณ์ของวงจรเพาเวอร์ซัพพลายในรูปที่ 1 ได้แบ่งกลุ่มการทำงานไว้หลายกลุ่มด้วยกันคือชุด IC1/1 ร่วมกับทรานซิสเตอร์ Q1 และ Q2 ทำหน้าที่เป็นชุดเรกูเลเตอร์ทางด้านไฟบวก, IC1/2 ทำหน้าที่ตรวจจับกระแสเอาต์พุตที่เกิดจากการตกคร่อมของแรงดันที่ R4 และ R5, IC2/1 ร่วมกับ Q3 และ Q4 ทำหน้าที่เป็นชุดเรกูเลเตอร์ทางด้านไฟลบ, IC2/2 ตรวจจับกระแสเอาต์พุตที่เกิดจากแรงดันตกคร่อม R14 และ R15 ทางด้านแรงดันไฟลบ, นอกจากนั้นยังมีส่วนของ IC3 ตรวจจับอุณหภูมิสูงเกิน IC4/1 ตรวจจับการดึงกระแสทางเอาต์พุตเกิน และ IC4/2 ทำหน้าที่แสดงผลเมื่อค่าแรงดัน+/-ออกมาทางเอาต์พุตไม่เท่ากัน

การทำงานที่ละเอียดของแต่ละส่วนก็จะได้แยกอธิบายโดยละเอียดเป็นลำดับต่อกันไป เริ่มต้นจากแรงดันไฟสลับ 15-0-15 V จากขดเซคันดารี่ของหม้อแปลง T1 จะถูกนำมาทำการเรกูเลตผ่านการเรียงกระไฟโดยบริดจ์ไดโอด BR1 ได้แรงดันไฟตรงยังไม่ผ่านการเรกูเลตประมาณ +/-21 V เทียบกับกราวด์ (ขั้วศูนย์โวลต์) แรงดันนี้จะมีตัวเก็บประจุ C1 และ C2 ทำหน้าที่กรองแรงดันไฟให้เรียบและแยกไปเข้าชุดเรกูเลเตอร์แรงดันต่ำ +/- 12 V โดย IC5 และ IC6 ทางด้านแรงดันไฟบวกและลบตามลำดับ แรงดันไฟเลี้ยง +/- 12 V นี้จะใช้เลี้ยงวงจรการทำงานในส่วนต่างๆ ของเพาเวอร์ซัพพลายชุดนี้

เรกูเลเตอร์และขยายกระแส

ชุดเรกูเลตทางด้านแรงดันไฟบวกประกอบด้วย วงจรขยายแบบไม่กลับขั้วสัญญาณ IC1/1 ภาคขยายนี้จัดตามแบบออปแอมป์ ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันและกระแสที่ไบอัสให้กับวงจรขยายกระแสโดยที่กระแสทางเอาต์พุตขา 7 ของ IC1/1 จะไบอัสให้กับทรานซิสเตอร์ Q1 และ Q2 ซึ่งต่อร่วมกันในลักษณะดาร์ลิงตัน ทำหน้าที่เป็นเรกูเลตและขยายกระแสออกทางเอาต์พุต วงจรขยาย IC1/1 นี้มีอัตราขยายเท่ากับสอง กำหนดได้จากค่า R1 และ R2 ส่วนประกอบของชุดดาร์ลิงตัน Q1 กับ Q2 มีตัวต้านทาน R4 และ R5 ทำหน้าที่ป้อนกลับมายังลูป อินพุตขา 5 ของ IC1/1 จะได้รับแรงดันจากตัวต้านทานปรับค่าได้ VR1 แรงดันควบคุมที่ได้จาก VR1 นี้ จะทำหน้าที่ควบคุมแรงดันเรกูเลตของ Q1 และ Q2 ออกทางเอาต์พุต



รูปที่ 4.1 วงจรทางด้านไฟบวก

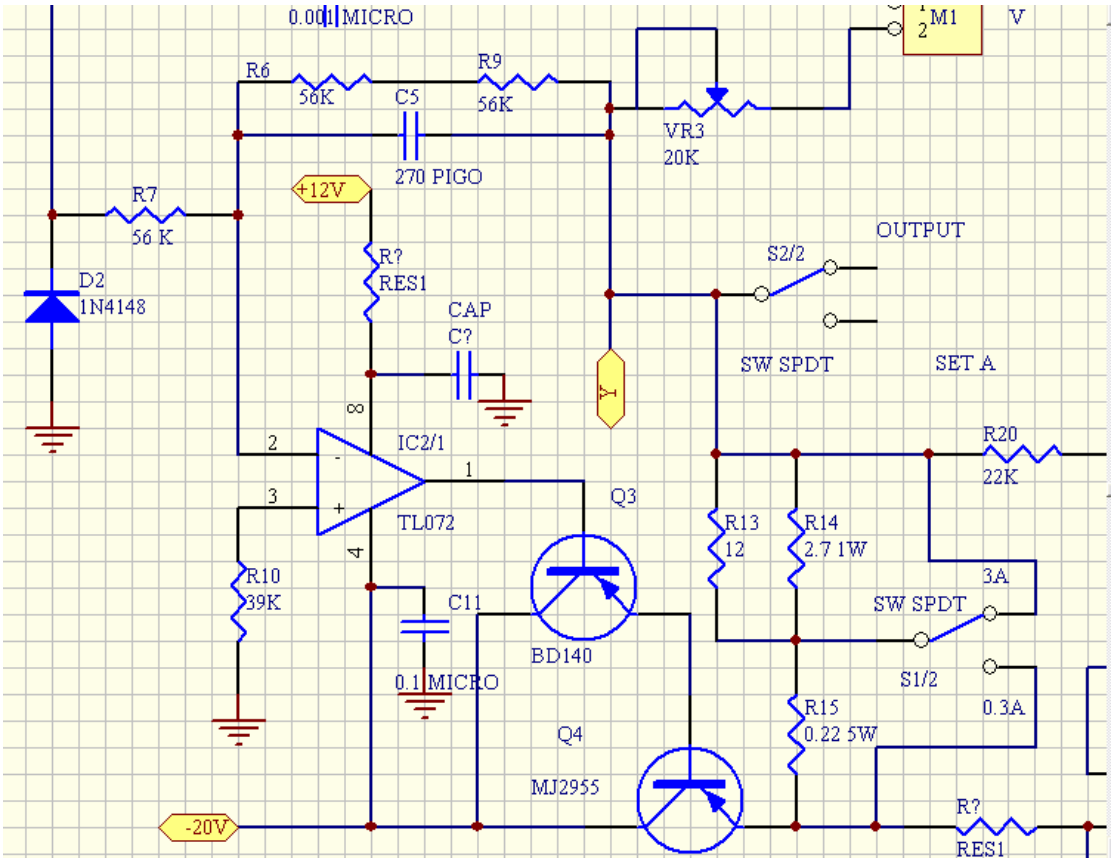
เพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้นในการค้นหาความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในวงจร ในย่านการวัดค่าแรงดันเอาต์พุตโดยที่เมื่อแรงดันเอาต์พุตถูกเซ็ตไว้ที่ 20 V ตรงนี้จะสามารถตอบสนองกระแสทางเอาต์พุตได้ 1 A เมื่อกระแสไหลผ่านตัวต้านทานเป็นโหลด 20 โอห์มตัวต้านทานโหลดเหล่านี้จะต่ออยู่ที่เอาต์พุตโดยมี S2 เป็นตัวควบคุม

ถ้าแรงดันควบคุมตกคร่อมที่ VR1 คงที่หรือประมาณ 10.5 V คงที่ หลังจากนั้นปรับ VR1 ให้แรงดันที่ขากลางมีค่าเทากับ 5 V ได้แรงดันเรกูเลตเอาต์พุตด้านบวก 10 V แรงดันเอาต์พุตของออปแอมป์ที่ขับออกมานั้นจะทำให้แรงดันอินพุตที่ขา 5 และ 6 ของ IC1/1 มีค่าเท่ากันคือ 5 V นั่นก็หมายความว่าถ้าแรงดันเอาต์พุตของออปแอมป์(IC1/1) ลดลงก็จะทำให้แรงดันที่ขาอินเวอร์ติ้งอินพุต(ขา 6) ลดลงด้วย แต่ถ้าแรงดันเอาต์พุตเพิ่มขึ้นแรงดันที่ใช้ขับทรานซิสเตอร์ Q1 และ Q2 ก็จะเพิ่มมากขึ้น แรงดันทางเอาต์พุตก็จะถูกปรับให้ลดลง

ตัวเก็บประจุ C4 ทำหน้าที่จำกัดแบนด์วิดธ์ของแรงดันริปเปิ้ลไม่ให้เกินออกไป C3 ทำหน้าที่บายพาสสัญญาณที่จะเข้าที่อินพุตของ IC1/1 ที่ขา 5 เมื่อทำการปรับค่าของ VR1 ทำให้แรงดันที่ขากลางเพิ่มขึ้น R3,C8 และ C9 ทำหน้าที่กรองแรงดันที่เลี้ยง IC1/1 ตัวต้านทาน R3 ทำหน้าที่ลดอัตราแรงดันที่อาจจะเกินกว่าแรงดันที่ IC1 สามารถทนได้ซึ่งอยู่ในช่วง 32 V ขณะที่เอาต์พุตไม่ได้

ต่อกับโหลด แต่สำหรับแรงดันทางด้านไฟบวกที่จ่ายให้กับ IC1/1 จะไม่มีตัวต้านทานดร็อปแรงดันค่า 680 โอห์มต่ออยู่เพราะว่าแรงดันจะไม่เกินกว่า 22 V เป็นอันขาดซึ่งอัตราทนแรงดันของ IC1/1 นั้นสามารถได้ 32 -36 Vmax (เป็นแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขา 8 กับขา 4)

นั่นคือส่วนของวงจรเรกูเลตแรงดันไฟด้านบวก แต่สำหรับเรกูเลตแรงดันไฟด้านลบนั้นจะทำงานเหมือนกันกับด้านบวกนั่นคือ แรงดันที่ได้จากการปรับของ VR1 จะถูกแยกจากอินพุตของ IC1/1 มาเข้าที่อินพุตของ IC2/1 โดยผ่าน R7 เข้าที่ขาอินเวอร์ติ้งอินพุต (ขา 2) เพื่อทำหน้าที่ขยายแรงดันสำหรับขับทรานซิสเตอร์คู่ดาร์ลิงตัน Q3 กับ Q4 เป็นส่วนขยายกระแสทางด้านไฟลบซึ่งการทำงานของ IC2/1 จะเป็นวงจรขยายแบบกลับขั้วสัญญาณตัวต้านทาน R8, R9 ทำหน้าที่กำหนดอัตราขยายของ IC2/1 และ C5 ทำหน้าที่ลดสัญญาณริปเปิ้ลที่อาจเกินมาทางด้านเอาต์พุต ตัวต้านทาน R14, R15 ทำหน้าที่ป้อนกลับมาในลูป R11 ป้องกันแรงดันตกคร่อม IC2/1 ไม่ให้เกินกว่า 32 V ขณะไม่มีโหลดต่อทางเอาต์พุต ไดโอด D1 ทำหน้าที่แยกแรงดันที่จะใช้ปรับแรงดันเอาต์พุตออกจากแรงดันไฟหลัก D2 ลดริปเปิ้ลด้านลบ

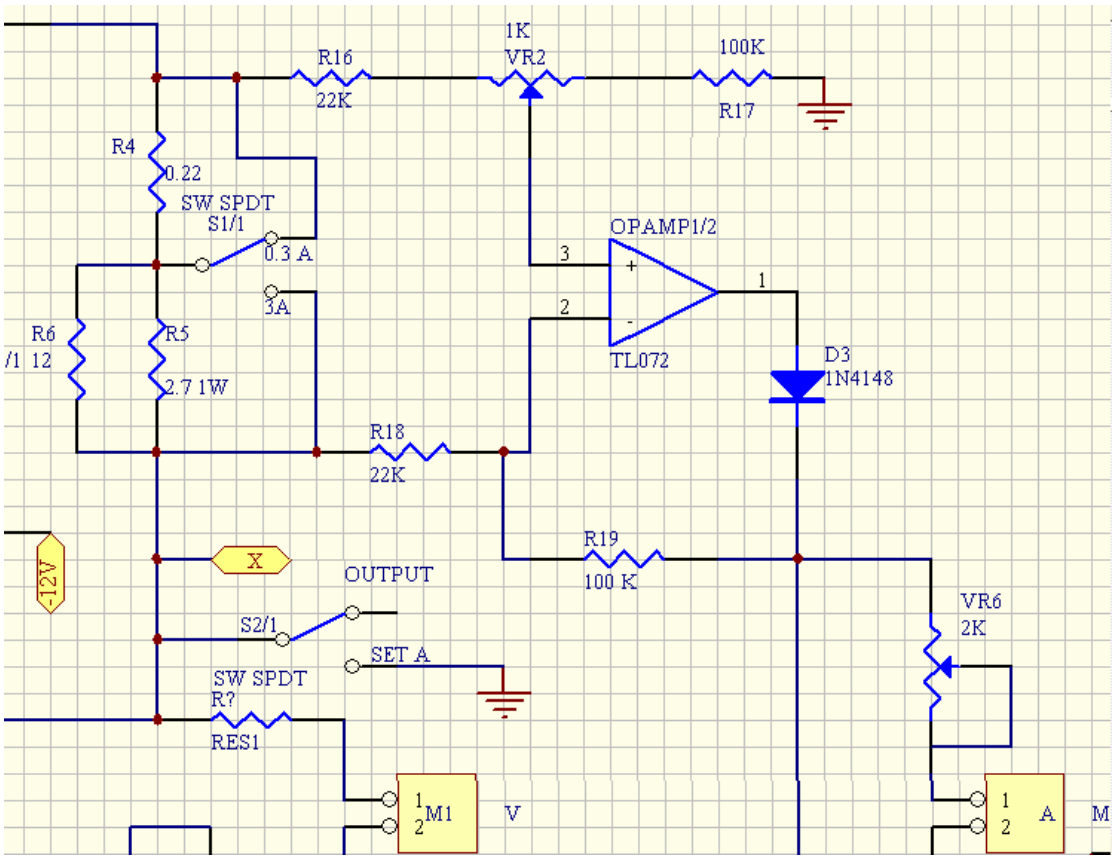


รูปที่ 4.2 วงจรทางด้านไฟลบ

ตรวจจับกระแส

วงจรตรวจจับกระแส ทางด้านแรงดันไฟบวกนั้นจะใช้วงจรขยายความแตกต่าง IC1/2 ทำหน้าที่ตรวจจับแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน R4 หรือ R5 กับ R6 ขนานกันเมื่อมีกระแสไหลผ่านตัวต้านทานเหล่านี้ซึ่งจะเกิดแรงดันตกคร่อมตามปริมาณการไหลของกระแสเทียบกับแรงดันเอาต์พุตที่โหลดต่ออยู่ขณะนั้น ย่านการตรวจจับกระแสนี้สามารถเลือกได้โดยสวิตช์ S1 ในวงจรขยายความแตกต่าง IC1/2 นี้ที่อินพุตทั้งสอง (ขา2 และ 3)

จะมีตัวต้านทานต่อเป็นวงจรแบ่งแรงดันอยู่สองชุดด้วยกันนั่นคือ R16-R19 และ VR2 วงจรขยายความแตกต่างนี้ได้กำหนดอัตราการขยายไว้เท่ากับ 4.5 และอัตราการขยายคอมมอนโหลดใกล้กับศูนย์มากที่สุด ลักษณะการทำงานก็คือเมื่อแรงดันเกิดขึ้นที่เอาต์พุตของชุดเรกูเลต (มีกระแสและแรงดันจ่ายออกไปยังโหลดที่ต่ออยู่ที่เอาต์พุต) ก็จะเกิดแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานตรวจจับกระแสและ IC1/2 ก็จะทำการขยายแรงดันนั้นเพื่อแสดงผลต่อไป



รูปที่ 4.3 วงจรตรวจจับกระแสทางด้านไฟบวก

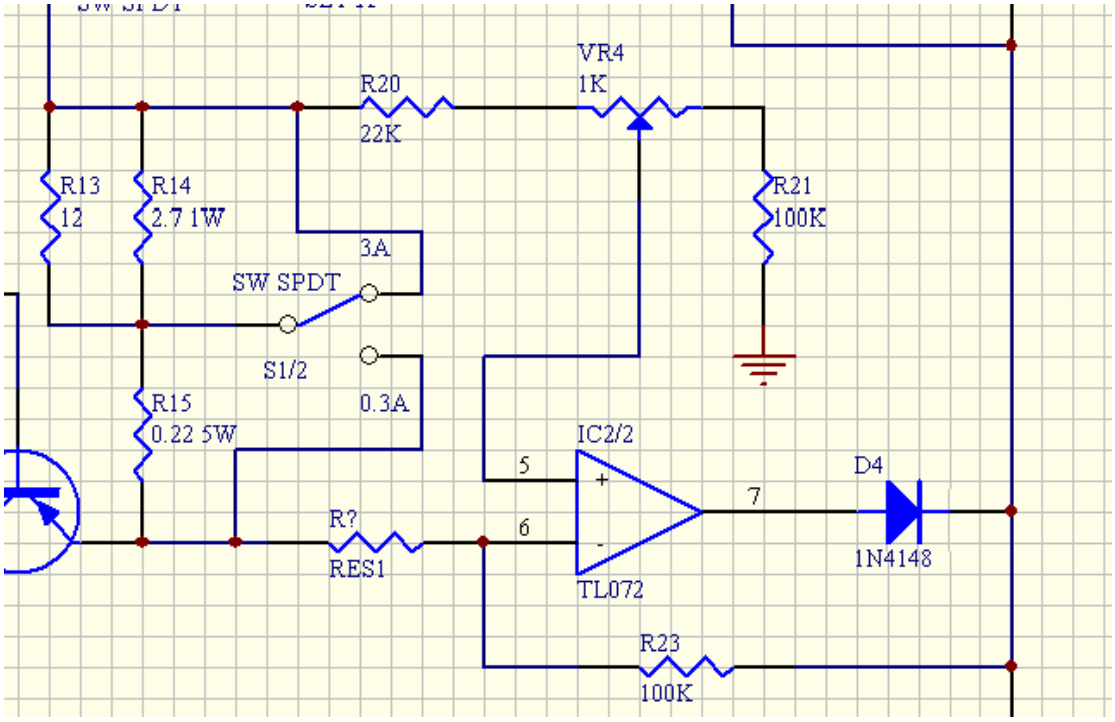
จากที่แสดงไว้ในวงจร ตัวต้านทาน R5 ขนาน R6 จะถูกเซ็ตบายพาสโดยสวิตช์ S1/1 ซึ่งจะเป็นตำแหน่งการตรวจจับกระแสที่ 3 Aสูงสุด นั่นคือ R4 จะเป็นตัวตรวจจับกระแสในตำแหน่งนี้จะ

เป็นการแสดงผลของระดับแรงดันที่ตกคร่อม R4 เท่ากับ 0.22 V ดังนั้นเมื่อ IC1/2 ทำการขยายแรงดันนี้จะทำให้เกิดแรงดันเอาต์พุตเป็น 1 V ปรากฏที่ขาแคโถดของไดโอด D3 เมื่อไม่มีโหลดต่ออยู่ที่เอาต์พุตของชุดเรกูเลเตอร์นี้ จะทำให้แรงดันตกคร่อม R4 ลดลงเป็น 0 V แรงดันเอาต์พุตของ IC1/2 จะมีค่าเป็น 0 V เช่นกัน ในช่วงเวลาสั้นๆนี้ จะเกิดการแปลงกระแสไปเป็นแรงดันที่อินพุตของ IC1/2 ในกรณีนี้ก็จะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตสูงสุดเป็น 1 V ต่อ 1 A เพื่อขับมิเตอร์ให้สามารถอ่านค่าแรงดันออกมาได้โดยมีตัวต้านทาน VR6 และ R32 ทำหน้าที่ปรับความเที่ยงตรงของมิเตอร์ M1 และจะผ่านแรงดันตรงจุดนี้เข้าสู่วงจรจำกัดกระแสโดย IC4/1 ต่อไป

ในตำแหน่งการตรวบจับกระแสและจำกัดกระแสที่ย่าน 0.3 A สวิตช์ S1/1 จะถูกเลือกมาที่ตำแหน่ง 0.3 A จะทำให้ R4 ถูกบายพาส และ R5 ขนานกับ R6 จะเป็นตัวตรวจจับกระแสในย่านนี้ จากการขนานกันของ R5 กับ R6 ทำให้ได้ค่าความต้านทานรวมเท่ากับ 2.2 โอห์ม ซึ่งจากหลักการเดียวกันกับย่านการจำกัดกระแส 3 A ที่กล่าวมาข้างต้น ก็จะทำให้เอาต์พุตของ IC1/2 เปลี่ยนแปลงในอัตราแรงดันเอาต์พุต 1 V / 100 mA นั่นคืออัตราการขยายของ IC1/2 จะเป็น 10 เท่า ซึ่งเพิ่มขึ้นมากกว่าตอนแรก เหตุที่ต้องใช้การต่อขนานกันของตัวต้านทาน R5 กับ R6 ก็เพื่อต้องการ ให้ได้ค่าความต้านทานรวมเท่ากับ 2.2 โอห์มที่เที่ยงตรงที่สุด เพื่อใช้ในการปรับเผื่อและกำหนดให้มีค่าเป็น 10 เท่า ของตัวต้านทาน R4 เนื่องจากผ่านการตรวจจับต่างกันถึง 10 เท่า ดังนั้นอัตราการขยายของ IC1/2 ก็ต้องต่างกัน 10 เท่าเช่นกัน และถ้าหากใช้ตัวต้านทานค่า 2.2 โอห์ม โดยตรงจะมีค่าความผิดพลาดมากกว่าการขนานกันของตัวต้านทานเสียอีก

ที่อินพุตของวงจรขยายความแตกต่าง IC1/2 จะมี VR2 ทำหน้าที่ปรับความสมดุลของอินพุตทั้งสอง (ให้มีแรงดันที่ขาอินพุตเท่ากัน) ที่เอาต์พุตมีไดโอด D3 ทำหน้าที่แยกเอาต์พุตของ IC1/2 กับเอาต์พุตที่ขาแคโถดออกจากกันเพื่อต้องการนำไปรวมกับเอาต์พุตชุดตรวจจับกระแสทางด้านไฟลบต่อไป

การตรวจจับกระทางด้านไฟลบจะทำงานเหมือนกันกับทางด้านไฟบวก นั่นคือ IC2/2 ทำเป็นวงจรขยายความแตกต่างมี R20-R24 และ VR4 ต่อเป็นวงจรแบ่งแรงดันอ้างอิงความแตกต่างให้กับอินพุตทั้งสอง (ขา 5 และ ขา 6) ของ IC2/2 ไดโอด D4 ทำหน้าที่แยกระหว่างเอาต์พุตของ IC2/2 ออกจากเอาต์พุตของ IC1/2 เพื่อต้องการให้เกิดการรวมกันของแรงดันเอาต์พุตที่ขาแคโถดของไดโอดทั้งสอง หากไม่มีแล้วจะเกิดการหักล้างแรงดันและเกิดการโหลดกระแสทางเอาต์พุตของ IC1/2 และ IC2/2 ตัวต้านทาน R24 ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้เกิดการไบอัสย้อนกลับไปเข้าที่เอาต์พุตขา 7 และขา 1 ของ IC2/2 และ IC1/2 ตามลำดับ เมื่อเอาต์พุตของออปแอมป์ทั้งสองมีแรงดันตกลงมาเป็น 0 V



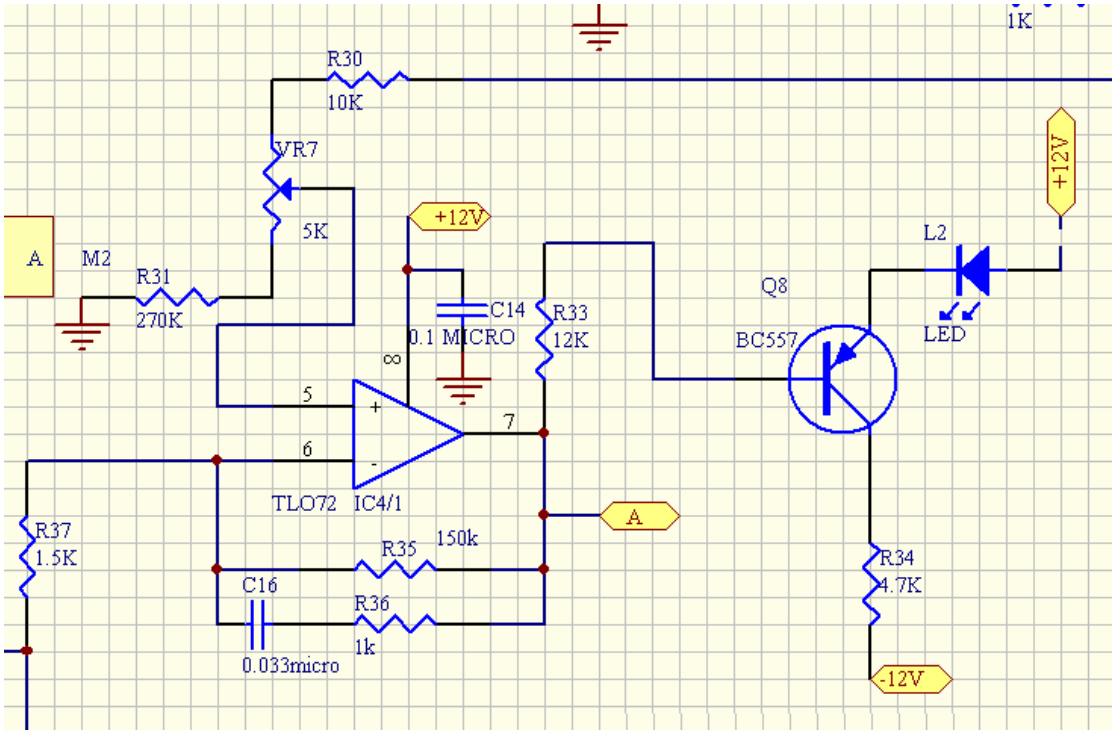
รูปที่ 4.4 วงจรตรวจจับกระแสทางด้านไฟลบ

จำกัดกระแส

วงจรตรวจจับกระแส นอกจากจะตรวจจับกระแกที่จ่ายไปให้โหลดและแปลงกระแสเป็นแรงดันเพื่อขับมิเตอร์ M1 แสดงค่าแรงดันทางเอาต์พุตแล้ว ยังมีการทำงานตรวจจับกระแสและส่งผลไปให้วงจรจำกัดกระแสทำหน้าที่จำกัดกระที่จ่ายออกทางเอาต์พุตอีกเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการจ่ายกระแสเกินวงจรส่วนนี้ทำงานโดย IC4/1 จัดเป็นวงจรเปลียบเทียบแรงดัน โดยหลักการคร่าวๆ ของวงจรคือวงจรจะได้รับแรงดันอ้างอิงจากชุด R30, R31 และ VR7 จ่ายให้กับขา 5 ของ IC4/1 และแรงดันที่จะมาเปรียบเทียบนั้นจะได้จากวงจรตรวจจับกระแสจ่ายเข้ามาที่ขา 6 ของ IC4/1 ถ้าแรงดันที่ขา 6 มีค่าสูงเกินกว่าแรงดันที่ขา 5 เอาต์พุตขา7 ของ IC4/1 ก็จะมีสภาวะเป็น 0 V

จากค่าแรงดันที่แสดงกำกับไว้ในจุดต่างๆในวงจรส่วนนี้ VR7 ทำหน้าที่เซตระดับการตรวจจับกระแสหรือเซ็ตระดับประมาณการจำกัดกระแสไว้ที่สูงสุดได้ถึง 2 A (ที่แรงดันขา 5 ของ IC4/1 เท่ากับ 2 V) และวงจรตรวจจับกระแสจ่ายแรงดันเข้าขา 6 เท่ากับ 1 V ซึ่งแนระดับการตอบสนองของการะแสทางเอาต์พุตของเพาเวอร์ซัพพลายที่ 1 A ในสภาสะปกติ (ที่แรงดัน 1 V) เอาต์พุตของ IC4/1 ที่ขา 7 จะมีแรงดันประมาณ 11 V ทรานซิสเตอร์ Q 8 จะถูกไบอัสกลับ (ไม่ทำงาน) ผ่านทาง R33 ทำให้ LED2 แสดงสภาวะจำกัดกระแสไม่ติดสว่าง แรงดันเอาต์พุตที่ระดับสูงๆนี้นอกจากจะไบอัสกลับให้กลับ Q8 แล้วยังใช้เป็นแรงดันควบคุมการปรับแรงดันเอาต์พุตให้กับชุดเรกูเลต IC1/1 และ IC2/1 ด้วย โดยต่อจากเอาต์พุตขา 7 ของ IC4/1 ไปเข้าแอโนด

ของ D1 จ่าแรงดันให้กับ VR1 ไดโอด D1 นี้ยังใช้เป็นไดโอดไอโซเลตแยกแรงดันสองชุดออกจากกันด้วย

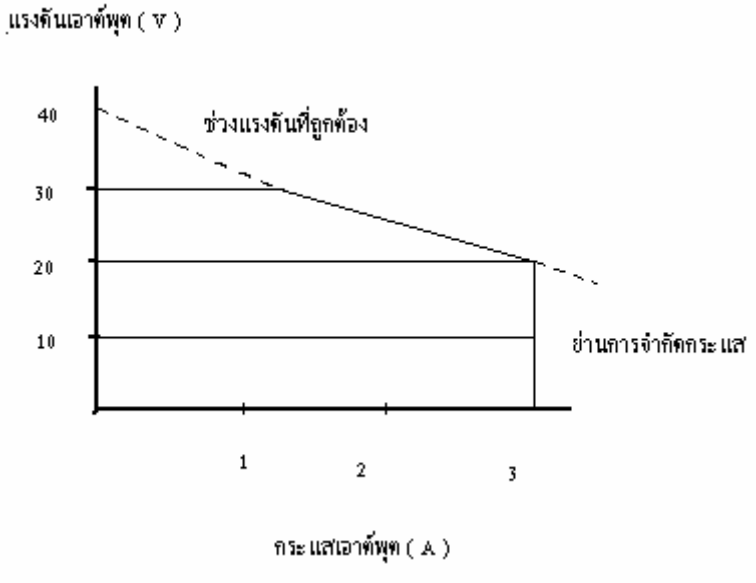


รูปที่ 4.5 รูปวงจรจำกัดกระแส

ถ้าวงจรจ่ายกระแสออกทางเอาต์พุตสูงเกินกว่า 2 A จะทำให้ระดับแรงดันที่ขาอินพุต (ขา 6) ของ IC4/1 สูงเกินกว่าแรงดันที่ขา 5 (ระดับแรงดันอ้างอิงสามารถเซ็ตได้ด้วย VR7) ก็จะทำให้เอาต์พุตขา 7 ของ IC4/1 มีระดับแรงดันตกลงมาเป็น 0 V Q8 ก็จะได้รับการไบอัสตรงผ่าน R33 และนำกระแสทำให้ LED2 ติดสว่างแสดงสภาวะการจำกัดกระแสขึ้น จากกรณีนี้เองขณะที่แรงดันเอาต์พุตขา 7 ของ IC4/1 ตกเป็น 0 V จะทำให้แรงดันควบคุมชุดเรกูเลตเอาต์พุตที่ตกคร่อม VR1 ลดต่ำลงมาด้วย ดังนั้นก็จะทำให้แรงดันเอาต์พุตลดต่ำลงมาด้วยเช่นกัน

การที่จะทำให้วงจรเพาเวอร์ซัพพลายจ่ายกระแสและแรงดันออกไปยังโหลดทางเอาต์พุตได้อีกครั้งนั้นก็โดยการเมระดับแรงดันอ้างอิงที่ขา 5 ของ IC4/1 ให้สูงขึ้นอีกเพื่อที่จะได้แรงดันเปรียบเทียบที่เข้ามาที่ขา 6 นั้นอยู่ในระดับแรงดันต่ำกว่าขา 5 ก็จะทำให้เอาต์พุตของ IC4/1 กลับมามีสภาวะแรงดันสูงขึ้น (11 V) นั่นคือเป็นการปรับความสมดุลระหว่างแรงดันอินพุตทั้งสองของ IC4/1 โดยปรับที่ VR7 เป็นเสมือนการปรับระดับการจำกัดกระแสให้สูงขึ้นอีก ดังนั้นเพาเวอร์ซัพพลายก็จะสามารถจ่ายกระแสและแรงดันออกไปยังโหลดทางเอาต์พุตได้อีกครั้งหนึ่ง อุปกรณ์อื่นๆที่ประกอบร่วมกับ IC4/1 ก็มี R35 และ R37 กำหนดอัตราการขยายของ IC4/1 ไว้ที่ 100 และลดทราน

เซียนต์ด้วยการป้อนกลับผ่าน R36 และ C16 และแสดงกราฟการจำกัดกระแสและปริมาณแรงดันเอาต์พุต ณ จุดจำกัดกระแสต่างๆไว้ในรูปที่ข้างล่างนี้

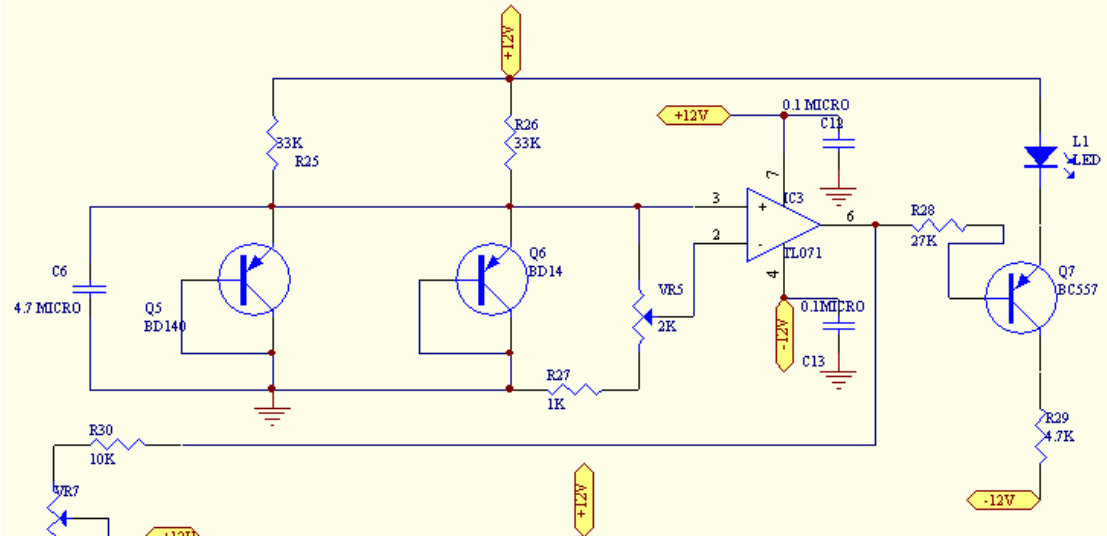


รูปที่ 4.6 รูปแสดงการจำกัดกระแสที่ค่าต่างๆ

ตรวจจับอุณหภูมิ

เมื่อมีการขยายกระแสออกไปจ่ายให้กับโหลดทางเอาต์พุตก็จะต้องเกิดความร้อนขึ้นที่อุปกรณ์ขยายกระแสนั้นอย่างแน่นอน (Q1 และ Q2) หากปล่อยให้เกิดความร้อนขึ้นมากๆโดยไม่มีการควบคุมเห็นทีอายุการใช้งานเพาเวอร์ซัพพลายชุดนี้จะสั้นแน่ๆ ดังนั้นจึงมีวงจรตรวจจับอุณหภูมิขึ้นมาคอยตรวจสอบการทำงานต่างๆของ Q1 และ Q4 ในวงจรส่วนนี้ IC3 ทำหน้าที่เป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดันโดยมีแรงดันอ้างอิงจากชุดแบ่งแรงดัน R26,R27 และ VR5 จ่ายแรงดันให้กับอินพุตขา 2 ของ IC3 และแรงดันเปรียบเทียบจะได้จากแรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์ Q5 และ Q6 จ่ายให้กับขา 3 ของ IC3

สำหรับการตรวจจับอุณหภูมิก็จะอาศัยทรานซิสเตอร์ PNP (Q5 และ Q6) จากวงจรต่อในลักษณะลัดวงจรขาเบส-คอลเล็กเตอร์ ทำให้อยู่ในสถานะเป็นเสมือนไดโอด และกระแสไบอัสจะไหลจากแรงดันไฟ +12 V ผ่านตัวต้านทาน R25 และ ผ่านรอยต่อเบส-อิมิเตอร์ ถึงกราวด์ครบวงจร ซึ่งการทำงานจะอาศัยการตอบสนองต่ออุณหภูมิของรอยต่อ P-N ของสารซิลิกอ เมื่อทรานซิสเตอร์ Q5 และ Q6 เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นก็จะทให้แรงดันตกคร่อมรอยต่อเบส-อิมิเตอร์ (Vbe) ลดลง จากลักษณะการต่อใช้งานต้องเดินสายยาว ดังนั้นจึงอาศัยตัวเก็บประจุ C6 มาต่อคร่อมขาเบสอิมอเตอร์ของทรานซิสเตอร์ทั้งสองเพื่อกรองแรงดันตรงขา 3 ของ IC3



รูปที่ 4.7 วงจรตรวจจับอุณหภูมิ

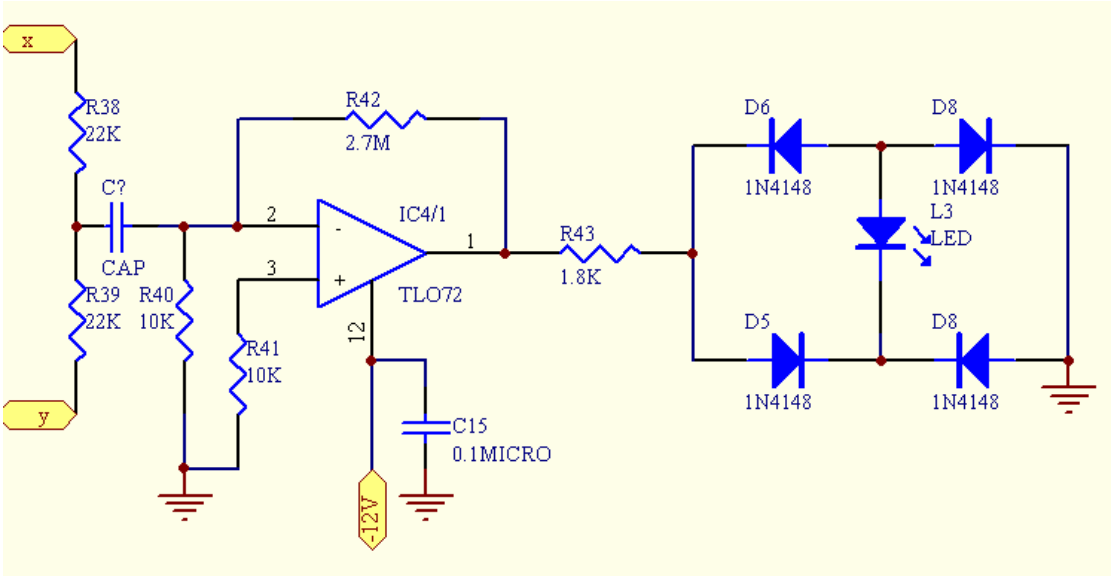
ย้อนกลับมาดูแรงดันอ้างอิงที่ขา 2 ของ IC_3 อีกครั้ง ถ้าแรงดันตกคร่อมขาเบส-อิมิเตอร์ของ Q_5 และ Q_6 ลดลงต่ำกว่า 0.48 v (ต่ำกว่าแรงดันที่ขา 2) ทำให้เอาต์พุตขา 6 ของ IC_3 มีระดับแรงดันมาเป็น 0 v ปกติ 11.4 v จะทำให้ Q_3 ได้รับการไบแอสตรงและขับให้ LED_1 ติดสว่างแสดงสภาวะอุณหภูมิสูงเกินและเนื่องจากใช้การต่อทรานซิสเตอร์ Q_5 และ Q_6 ดังนั้นผลการทำงานก็ขึ้นอยู่กับแรงดันที่ทรานซิสเตอร์แรงดันตัวไหนจะตกมากกว่ากันและเป็นอันดับแรกดังนั้นจึงสามารถแยกอุปกรณ์ตรวดจับอุณหภูมิไปใช้ตรวดจับได้สองแห่งพร้อมกันคือกับแผ่นระบายความร้อนของ Q_1 กับ Q_4 ใช้ทรานซิสเตอร์ Q_5 ตรวดจับและเรียงกระแสบริดจ์ไดโอด BR_1 ใช้ Q_6 ตรวดจับอุณหภูมิ เพื่อผลของการป้องกันสูงสุด

ในขณะที่แรงดันสูงเกินทำให้แรงดันที่ขา 3 ลดลงมาต่ำกว่าที่ขา 2 ของ IC_3 outputของ IC_3 (ขา 6) ก็จะเป็น 0 v จากวงจรก็จะทำให้แรงดันที่ชุดแบ่งแรงดัน R_{30},R_{31} และ VR_7 ตกลงมาเป็น 0 v ด้วย อาจจะเป็นแรงดันไฟลบ ทำให้แรงดันที่ขา 5 ของ $IC_{4/1}$ มีค่าเป็นลบ (ซึ่งประมาณ -2 v) ซึ่งต่ำกว่าแรงดันที่ขา 6 ของ $IC_{4/1}$ ทำให้output ของ $IC_{4/1}$ มีระดับแรงดันเป็น 0 v จึงเกิดการกำจัดกระแสขึ้น LED_1 กับ LED_2 ก็จะติดสว่างพร้อมกัน ทำให้ V_{R1} มีค่าแรงดันเป็น 0 v ชุดเรกูเรตก็จะไม่มีแรงดันไบอัดจึงหยุดนำกระแสชั่วขณะจนกว่าอุณหภูมิของแผ่นระบายความร้อนหรือตัว Q_1,Q_4จะมีอุณหภูมิลดลงทำให้ Q_5และ Q_6 มีอุณหภูมิลดลงด้วย แรงดันที่ขา 3 ของ IC_3 ก็จะเพื่อขึ้นระบบก็จะทำงานตามปกติ

วงจรตรวดจับแรงดันริบเปิ้ล

วงจรตรวจจับแรงดันริบเปิ้ลทางเอาต์พุตทำงานโดย $IC_{4/2}$ซึ่งถูกจัดอัตราการขยายไว้สูงมาก วงจรนี้จะทำการตรวจจับแรงดันริบเปิ้ลทั้งเอาต์พุต แรงดันไฟฟ้าบวกและแรงดันไฟฟ้าลบ ผ่านมาทาง R_{38} และR_{39} แรงดันทั้งด้านบวกและด้านลบจะมีตัวต้านทานเหล่านี้เป็นไอโซเลตแรงดันไว้ และที่จุดรวมของแรงดันจะถูกคับปลิ้งสัญญาณไฟสลับ ซึ่งเป็นแรงดันริบเปิ้ลด้วยตัวเก็บประจุ C_7 แรงดันริบเปิ้ลนี้จะตรวจจับที่ความถี่ขนาด 100 เฮิรตซ์ ซึ่ง C_7 และR_{40} ต่อกันเป็นวงจรกรองความถี่สูงผ่านพร้อมกับสัญญาณริบเปิ้ลถูก $IC_{4/2}$ ขยายให้แรงขึ้น โดยมีอัตราการขยายเท่ากับ 120 กำหนดจากค่า R_{38}, R_{39} และ R_{42}

สัญญาณสลับที่เป็นริบเปิ้ล ที่ถูกขยายโดย $IC_{4/2}$ จะถูกขับออกทางเอาต์พุตด้วยสัญญาณที่แรงขึ้นผ่าน R_{43} เพื่อจำกัดกระแสให้กับ LED_3 โดยมีวงจรฟูลเวฟเร็กติไฟเออร์ จัดเรียงกระแสให้แน่ใจว่าแรงดันบวกจะผ่านเข้าแอโนดของ LED_3 นั่นหมายความว่าถ้าแรงดันริบเปิ้ลมีระดับเกินกว่า 30 mv วงจรจะทำการขยายแรงดันด้วย $IC_{4/2}$ จนเกินกว่าแรงดันไบแอสตรงที่ตกคร่อมไดโอดเร็กติไฟร์ (D_5-D_8) และLED_3 ก็จะสว่างขึ้นแสดงค่าแรงดันริบเปิ้ลที่สูงออกมาทางเอาต์พุต



รูปที่ 4.8 วงจรตรวจจับแรงดันริบเปิ้ล

สุดท้ายที่จุดต่อแรงดันเรกูเลตเอาต์พุตทั้งด้านบวกและด้านลบจะถูกต่ออยู่กับสวิตช์โหลด S_2 ซึ่งจะทำหน้าที่แยกลักษณะการต่อกับโหลดออกเป็น 2 อย่างก่อนจ่ายแรงดันออกทางเอาต์พุต นั่นคือตำแหน่งเซตแรงดัน จะต่อก็ต่อเมื่อสวิตช์ S_2 อยู่ในตำแหน่งต่อโหลด และหากถูกเลือกมาในทางที่แรงดันไฟบวกถูกลัดวงจรกับกราวด์จะเป็นการเซตกระแสในตำแหน่งนี้จะมีกระแสไหลออกทาง

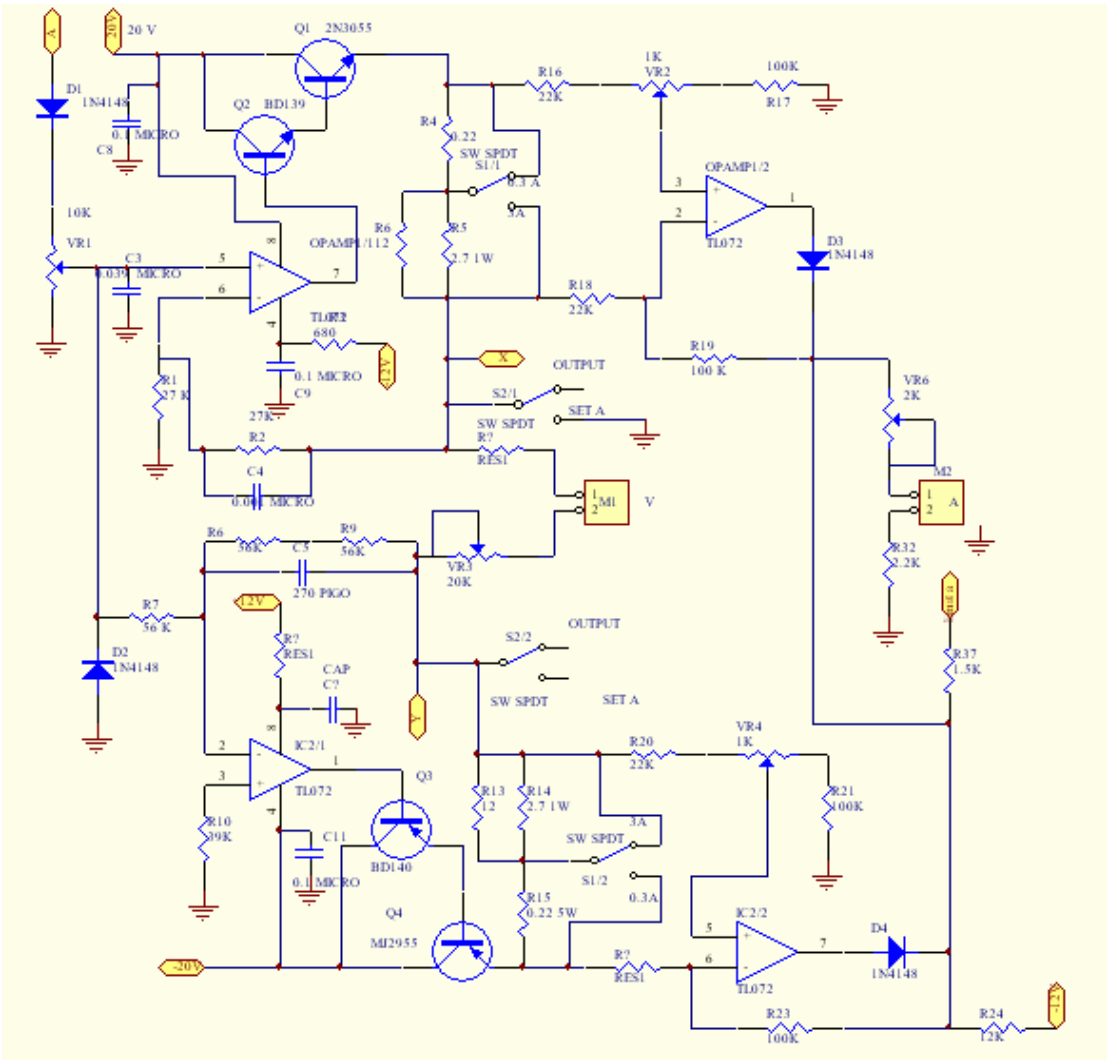
เอาต์พุตอย่างเต็มที่ โวลต์มิเตอร์ M_1 ที่ต่อร่วมกับ R_{12} และ VR_3 ซึ่งอยู่ในระหว่างแรงดันบวกกับแรงดันลบทางด้านเอาต์พุต VR_1 นี้จะทำการปรับความเที่ยงตรงของ M_1 ให้แสดงค่าตรงกับค่าแรงดันเอาต์พุตที่ถูกต้อง

บทที่ 5

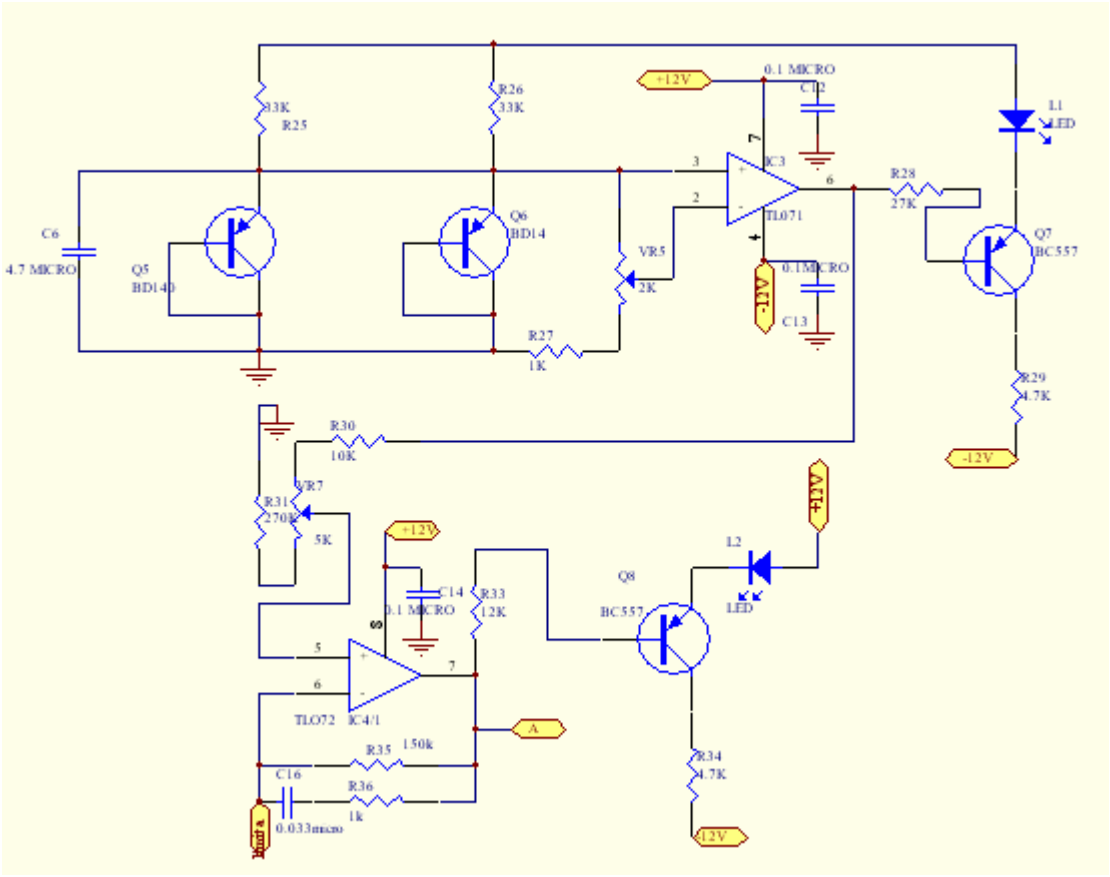
การสร้างการออกแบบและการทดสอบ

เนื้อหาในบทนี้ จะแสดงถึงการออกแบบแผ่นPCBที่สร้างขึ้นมาโดยใช้โปรแกรม PROTEL99 จำลองโครงสร้าง ของชุดอุปกรณ์ให้มาอยู่ในแผ่นPCBซึ่งทำได้โดย

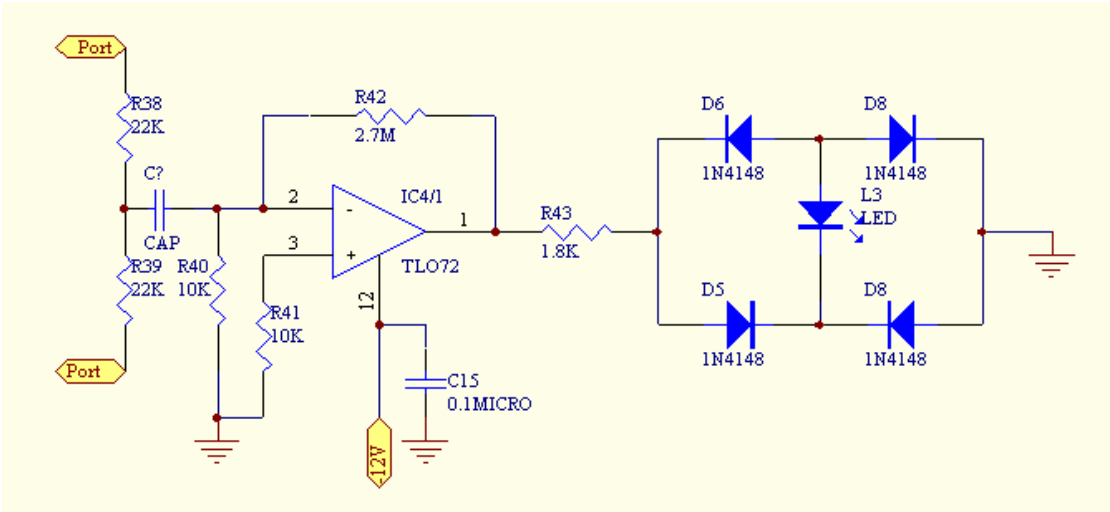
1.ทำการออกแบบวงจรวงจร POWER SUPPLY ตามรูป



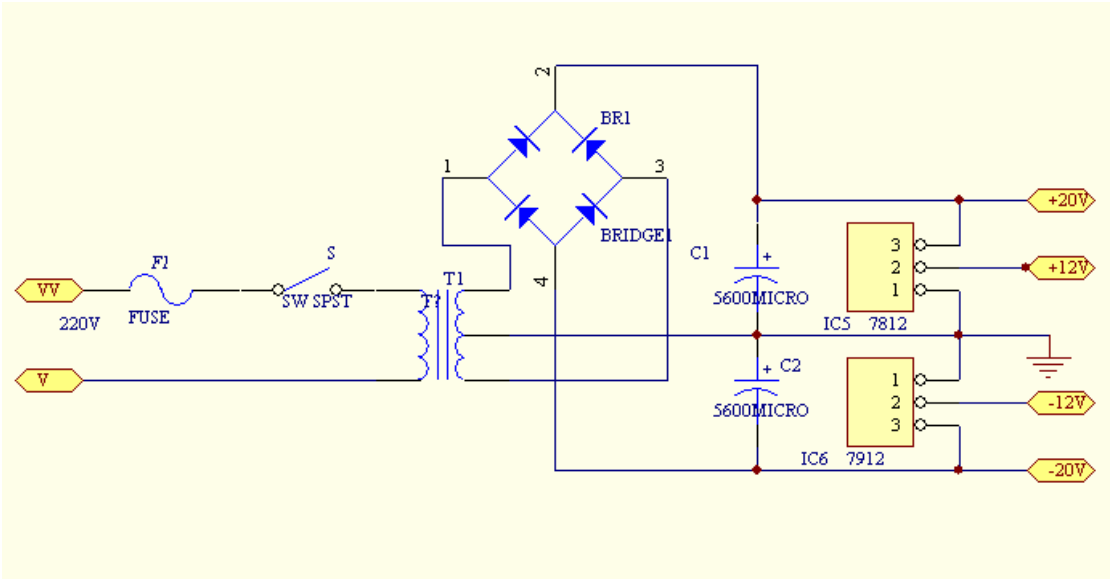
รูป 5.1.1 วงจรชุดเลกูเลเตอร์และขยายกระแส



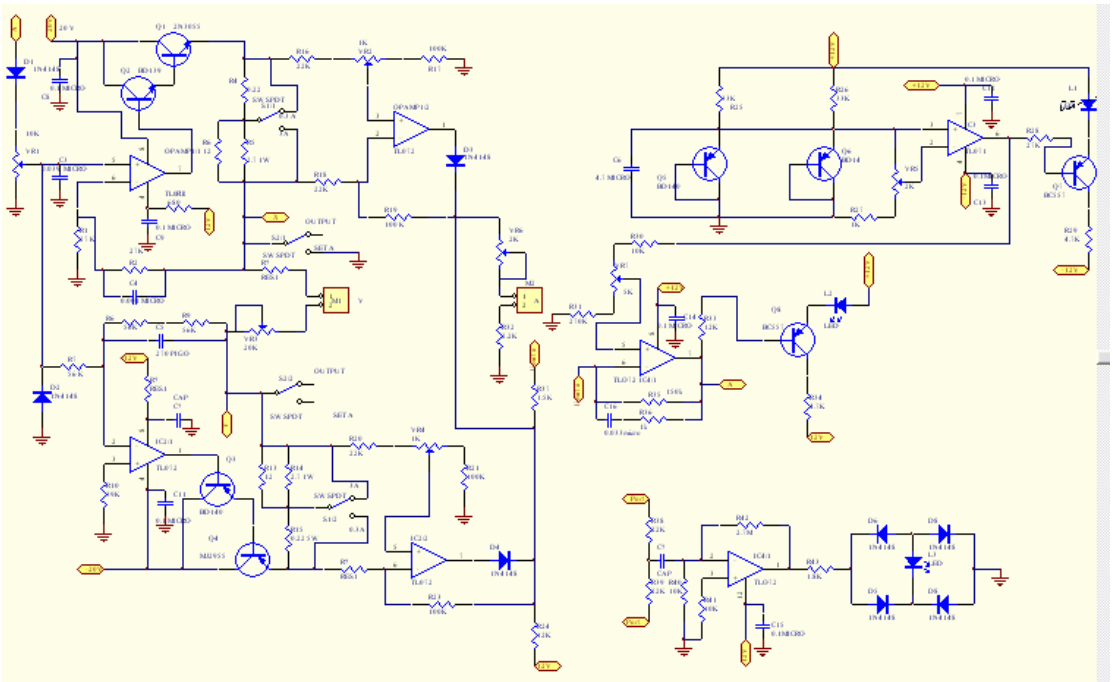
รูป 5.1.2 วงจรจำกัดกระแสและวงจรตรวจจับอุณหภูมิ



รูป 5.1.3 วงจรตรวจจับแรงดันริบเปิ้ล

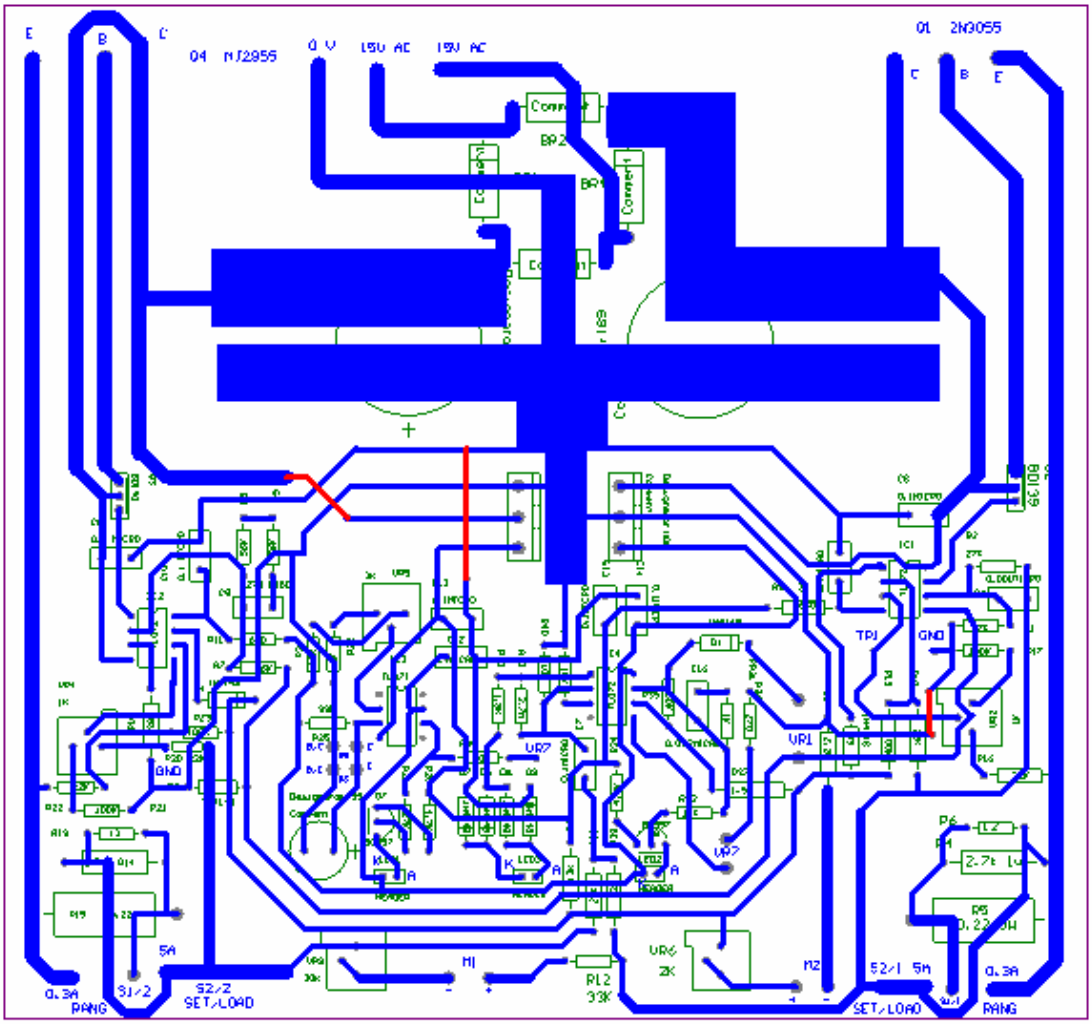


รูป 5.1.4 วงจรจ่ายแรงดัน Input

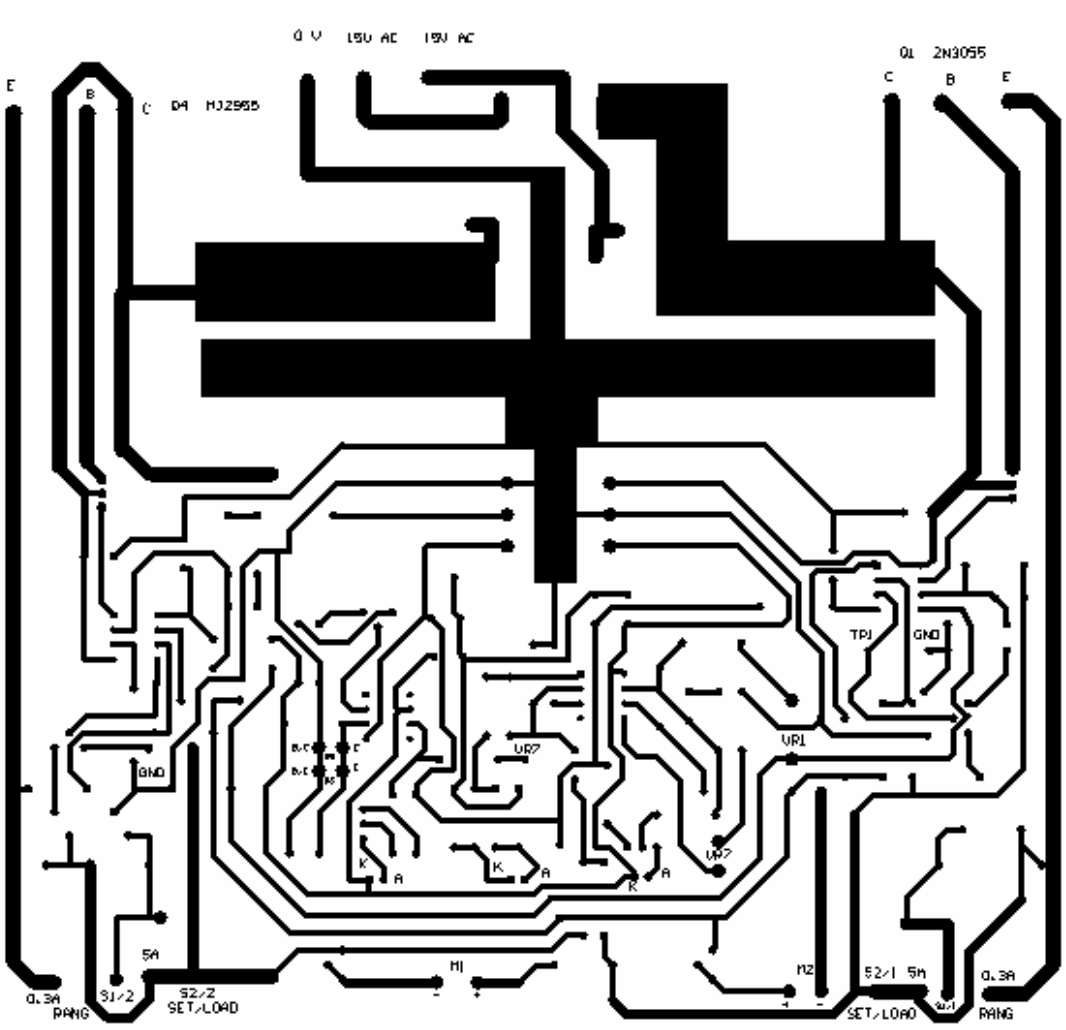


รูป 5.1.5 วงจรรวมของ POWER SUPPLY

2. ทำการROUTEจะได้ลายวงจรสำเร็จออกมาดังรูป



รูป 5.2.1 ลายวงจรและลายชื่ออุปกรณ์บนแผ่น PCB



รูป 5.2.2 ลายวงจรบนแผ่น PCB

จากรูปลายวงจรที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม PROTEL99 ในบทนี้แล้วต้องนำไปกัดให้ได้แผ่น PCB สำเร็จรูปเพื่อที่จะทำการต่อวงจรต่อไป

การลงชุดอุปกรณ์

เมื่อได้ลายวงจรที่กัดเสร็จแล้ว จากนั้นก็นำชุดอุปกรณ์ต่างๆลงในแผ่น PCB ที่ได้ ซึ่งชุดอุปกรณที่ใช้ในการทำ POWER SUPPLY มีรายการดังต่อไปนี้

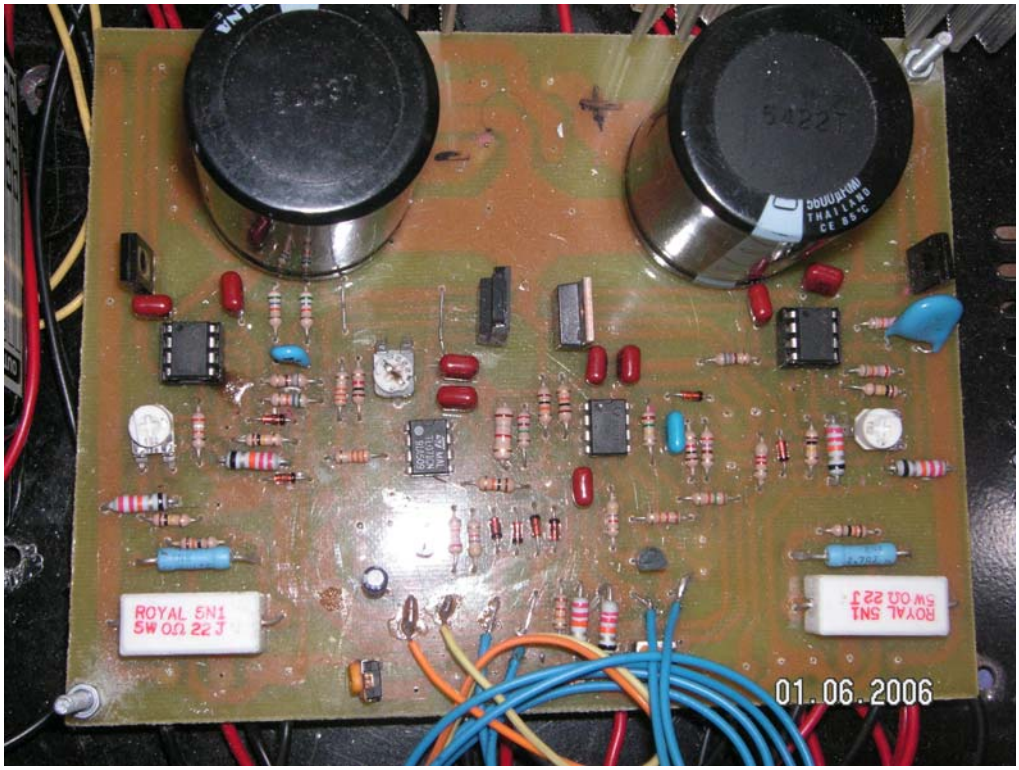
รายการอุปกรณ์

มีรายการดังนี้

ตัวต้านทาน			
ขนาด ¼ วัตต์ ±5%(ยกเว้นที่ระบุ)		VR3-20k Ω	
R1,R2R,28 – 27 kΩ	3 ตัว	เกือกม้าตัวนอนเล็ก	1 ตัว
R3,R11 – 680 Ω	3 ตัว	VR5,VR6-2k Ω	
R4,R15 – 0.22 Ω 5 วัตต์	2 ตัว	เกือกม้าตัวนอนเล็ก	2 ตัว
R5,R14 – 2.7 Ω 1 วัตต์	2 ตัว	VR7-5k Ωโวลุ่มชั้นเดียว	1 ตัว
R6,R13 – 12 Ω	2 ตัว	**ตัวเก็บประจุ**	
R7 – R9 - 56k Ω	3 ตัว	C1,C2-5600 µF 40 v (อิเล็กโตไลต์)	2 ตัว
R10 – 39k Ω	1 ตัว	C3-0.039 µF 63 v	1 ตัว
R12,R25,R26 – 33k Ω	3 ตัว	C4-0.001 µF 63 v	1 ตัว
R16,R18,R20,R12,R38,R39-22k Ω	6 ตัว	C5-270 pF 50 v	1 ตัว
R17,R19,R21,R23-100k Ω	4 ตัว	C6-4.7 µF 63 v	1 ตัว
R24,R33-12k Ω	2 ตัว	C16-0.033 µF 63 v	1 ตัว
R27,R36-1k Ω	2 ตัว	(โพลิเอสเตอร์)	
R29,R34-4.7k Ω	2 ตัว	**อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ**	
R30,R40,R41-10k Ω	3 ตัว	IC1,IC2,IC4-TL072	3 ตัว
R31-270 Ω	1 ตัว	IC3-TL071	1 ตัว
R32-2.2k Ω	1 ตัว	IC5-7812	1 ตัว
R35-150k Ω	1 ตัว	IC6-7912	1 ตัว
R37-1.5k Ω	1 ตัว	Q1-2N3055	1 ตัว
R42-2.7M Ω	1 ตัว	Q2-BD139	1 ตัว
R43-1.8k Ω	1 ตัว	Q3,Q5,Q6-BD140	3 ตัว
ตัวต้านทานปรับค่าได้		Q4-MJ2955	1 ตัว
VR1-10k Ωโวลุ่มชั้นเดียว	1 ตัว	Q7,Q8-BC557	2 ตัว
VR2,VR4-1k Ω		BR1-บริดจ์ไดโอด 400v/6A	1 ตัว
เกือกม้าตัวนอนเล็ก	2 ตัว	D1-D8-1N4148	1 ตัว
		LED1-LED3	1 ตัว

อื่น ๆ -T1 หม้อแปลงเข้า 0-220VAC ออก 15-0-15 VAC 5 A หรือ 18-0-18 VAC 5 A 1 ตัว -S1 – สวิตช์ 2 ทาง 6 ขา 1 ตัว -S2 - สวิตช์ 2 ทาง 6 ขา (ON-OFF-ON) 1 ตัว -กล่องอเนกประสงค์,สายไฟ	-ฟิวส์ กระบอกฟิวส์ 3 A -M1,M2 โวลมิเตอร์ และ แอมมิเตอร์ -แผ่นระบายความร้อนของทรานซิสเตอร์ตัวถัง TO-03 1 ตัว -แผ่นฉนวนกันชอร์ตของทรานซิสเตอร์ที่ติดกับแผ่นระบายความร้อน

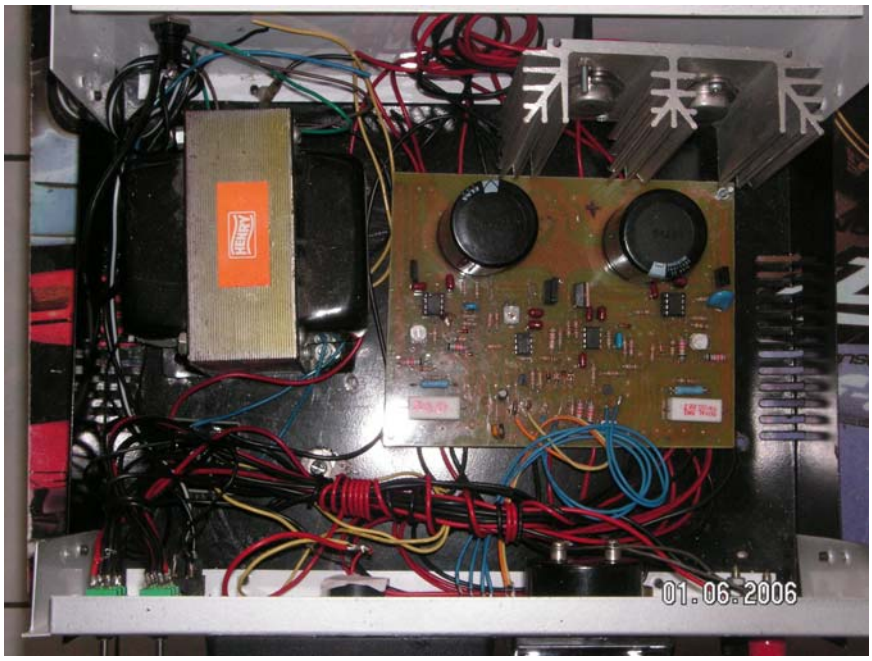
ซึ่งเมื่อได้ทำการลงชุดอุปกรณ์แล้วจะได้ชิ้นงานดังรูป



รูป5.3 ภาพวงจรเมื่อลงชุดอุปกรณ์แล้ว

รูป5.4แผ่น SINK กันความร้อน

เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดแล้วก็มาปรับแต่งมิเตอร์ที่ใช้วัดกระแสและแรงดันเริ่มด้วยการปรับแอมมิเตอร์โดยการเปิดสวิตช์และปรับแรงดันให้สูงสุดลัดวงจรที่จุด Tp1 ลงกราวด์พร้อมกับปรับ VR4 ให้แอมมิเตอร์ M2 อ่านค่าได้ที่ศูนย์พอดี ซึ่งเมื่อลัดวงจรที่จุด Tp1 outputของ IC1/2 ก็จะตกลงเป็นศูนย์ ต่อมาย้ายการลัดวงจรที่ตำแหน่ง Tp2 ลงกราวด์พร้อมกับปรับ VR2 ให้แอมมิเตอร์ M2 อ่านค่าได้ที่ศูนย์พอดี ซึ่งเมื่อลัดวงจรที่จุด Tp2 outputของ IC2/2 ก็จะตกลงเป็นศูนย์ จากนั้นปรับความเมี่ตรงของโวลต์มิเตอร์เทียบกับมัลติมิเตอร์ให้ตรงกัน
จากนั้นนำชิ้นส่วนอุปกรณ์ทั้งหมดลงในกล่อง



รูป5.5 แสดงชิ้นงานเมื่อบรรจุลงกล่องเหล็ก

ได้ POWER SUPPY ออกมาสมบูรณ์ดังรูป

รูป 5.6 แสดงภาพของ POWER SUPPLY ที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว

การทดสอบ Power supply

หลังจากที่บรรจุชิ้นงานลงในกล่อง ต่อไปเป็การทดสอบโดยใช้วิทยุติดรถยนต์เป็นโหลดซึ่งได้ต่อกับลำดลโพงเพื่อทำให้ดึงกระแสให้ได้มากกว่าเดิม จากนั้นนำวิทยุต่อกับ Output ของ power supply ซึ่งจะมีขั้นตอนการเซตดังนี้

- เปิด power supply โดยกดสวิตช์ power
- เซตสวิตช์ S1ไปที่ตำแหน่ง load on จากนั้นปรับโวลต์ให้ได้ 12 V ปรับได้จากโวลุ่มปรับแรงดันซึ่งค่าที่ปรับได้ดูจากโวลมิเตอร์ที่ติดตั้งไว้ ดังรูป 5.7

รูป 5.7

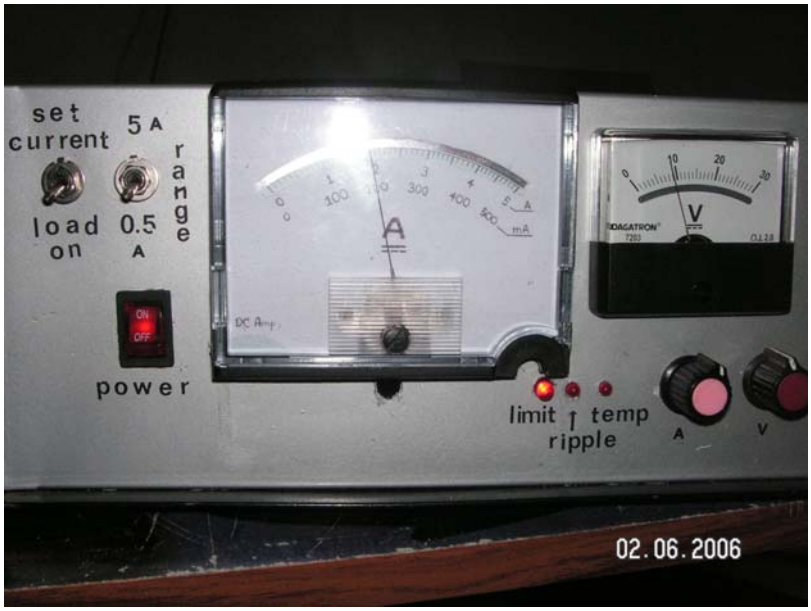
- เซตสวิตช์ S1 ไปที่ตำแหน่ง set current และเซตสวิตช์ S2 ไปที่ตำแหน่ง 0.5 A ซึ่งเรารู้ว่าวิทยุเครื่องนี้ดึงกระแสได้ไม่เกิน 500 mA จึงเซตไปที่ตำแหน่ง 0.5 A จากนั้นตั้งกระแสไว้ที่ 400 mA ดังรูป 5.8

รูป 5.8

- จากนั้นเซตสวิตช์ S1 ไปที่ตำแหน่ง Load on ต่อจากนั้นทำการเปิดวิทยุ และนั้นเปิดเสียงให้ดัง เพื่อทำให้ดึงกระแสได้มากซึ่งจะเห็นได้ว่า power supply จะทำงานเป็นปกติ
- จากนั้นเซตสวิตช์ S1 ไปที่ตำแหน่ง set current ปรับกระแสไว้ที่ 200 mA ดังรูป 5.9

รูป 5.9

- จากนั้นเซตสวิตช์ S1 ไปที่ตำแหน่ง Load on ต่อจากนั้นและทำการเปิดวิทยุ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเปิดวิทยุเสียงดังซึ่งวิทยุจระดึงกระแสมากกว่า 200 mA แต่กระแสที่เซตไว้เป็น 200 mA ดังนั้นแอมป์มิเตอร์เข็มจะไปชี้ที่ค่า 200 mA แต่โวลต์ก็จะตกลง ดังรูป 5.10



รูป 5.10

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อโหลดดึงกระแสมากกว่าที่ตั้งไว้โวลต์ก็จะตกลง แสดงได้ว่าเมื่อโหลดดึงกระแสมากกว่าที่ตั้งไว้ระบบจะตัดไม่ให้ Power supply ทำงาน และ Power supply ชุดนี้จะมีระบบที่สามารถตัดการจ่ายโหลดเมื่อมีอุณหภูมิสูง ซึ่งจะป้องกันไม่ให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายใน power supply และโหลดที่นำมาต่อเสียหาย power supply ชุดนี้สามารถใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในทาง RF เพราะสามารถปรับกระแสและปรับแรงดันได้

บทที่ 6
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

บทสรุป

โครงงานฉบับนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาสร้างเป็น Power supply ที่สามารถปรับแรงดันและกระแสได้ ซึ่งได้ศึกษาคุณสมบัติของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆ และการนำมาใช้งานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ นำมาสร้างเป็นวงจรที่ใช้ในการทำ power supply ซึ่งวงจรที่ใช้ในชิ้นงานนี้คือ วงจรชุดเลกูเลตและขยายกระแส วงจรตรวจจับกระแส วงจรจำกัดกระแส วงจรตรวจจับอุณหภูมิ และวงจรตรวจจับแรงดันริปเปิ้ล (ดังได้อธิบายไว้ในบทที่ 4) วงจรทั้งหมดนี้ได้นำมาสร้างเป็น Power supply ที่สามารถปรับแรงดันและกระแสได้

ในการสร้างลายวงจรได้นำโปรแกรม Protel 99 se ช่วยในการสร้างลายวงจรเพราะวงจรที่นำมาสร้างมีขนาดใหญ่และอุปกรณ์ที่ใช้มีจำนวนมาก สามารถช่วยให้ลายวงจรมีขนาดเล็กลงและไม่ยุ่งยากในการทำลายวงจร เมื่อได้ลายวงจรและลงอุปกรณ์เสร็จ ได้ทำการทดสอบวงจรจะเห็นได้ว่าเกิดความผิดพลาดขึ้นน้อยมาก สามารถตั้งกระแสและปรับแรงดันได้ตามที่ต้องการ

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อโหลดดึงกระแสมากกว่าที่ตั้งไว้โวลต์ก็จะตกลง แสดงได้ว่าเมื่อโหลดดึงกระแสมากกว่าที่ตั้งไว้ระบบจะตัดไม่ให้ Power supply ทำงาน และ Power supply ชุดนี้จะมีระบบที่สามารถตัดการจ่ายโหลดเมื่อมีอุณหภูมิสูง ซึ่งจะป้องกันไม่ให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายใน power supply และโหลดที่นำมาต่อเสียหาย power supply ชุดนี้สามารถใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในทาง RF เพราะสามารถปรับกระแสและปรับแรงดันได้

สิ่งที่ได้จากโครงงาน

- ได้ความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แต่ละชนิด
- ได้ความรู้เกี่ยวกับการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาสร้างเป็นวงจรที่สามารถใช้งานจริง
- มีความรู้ในการใช้โปรแกรม Protel 99 se ในการสร้างลายวงจร
- ได้ความรู้เกี่ยวกับการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์
- มีความรู้ในการปฏิบัติงานจริง
- นำความรู้ที่ได้เรียนมาและจากการค้นคว้ามาใช้ในการปฏิบัติงานจริง
- ในการทำจัดทำโครงงานมีกระบวนการ และขั้นตอนในการทำอย่างเป็นระเบียบทั้งการวางแผนงาน ขั้นตอนการทำงานจริง และขั้นตอนกรทดลอง การสรุปผล จึงทำให้ผู้จัดทำเรียนรู้การทำงาน อย่างเป็นระบบซึ่งสามารถนำไปใช้ได้ในชีวิตจริง

- มีความอดทนและรอบครอบ ในการทำงาน สามารถวิเคราะห์ และ แก้ปัญหาต่างๆ ได้
- ได้ทำงานร่วมกับผู้อื่น
- สามารถนำความรู้ที่ได้จากโครงงานมาประยุกต์ใช้งานจริง

ปัญหาและอุปสรรค

- มีความรู้ในการเขียนPROTEL น้อย จึงต้องใช้เวลาในการศึกษา และทำความเข้าใจมาก ทำให้เสียเวลา
- ไม่มีความรู้เกี่ยกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บางชนิด จึงต้องใช้เวลาในการศึกษาทำให้เสียเวลา
- มีความรู้ในการเลือกใช้อุปกรณ์น้อย จึงต้องอาศัยผู้ที่มีความเชี่ยวชาญช่วย ให้คำแนะนำและใช้เวลาในการเลือกและสั่งซื้ออุปกรณ์นานพอสมควร
- อุปกรณ์บางตัวหาซื้อได้ยาก
- มีความรู้ในการประกอบวงจรบนแผ่น PCB น้อย ทำให้วงจรมีความเสียหายบ่อย และใช้งานไม่ได้ ทำให้ต้องสร้างวงจรหลายครั้ง จึงจะสามารถนำมาใช้งานได้
- อุปกรณ์บางตัวเกิดความเสียหายเมื่อเกิดความร้อนเกิดขึ้น หรือกระแสหรือแรงดันเกิน ต้องเสียเวลาหาซื้อและแก้ไขปัญหา

ข้อเสนอแนะ

สำหรับ Power supply ชุดนี้ จากการทดสอบเมื่อจ่ายโหลดโหลดดึงกระแสมากๆ จะทำให้ทรานซิสเตอร์ ร้อนระบบตรวจจับอุณหภูมิจะทำงานทำให้ระบบของ power supply หยุดทำงาน เนื่องจาก Power supply ชุดนี้ ใช้ทรานซิสเตอร์ในการจ่ายกระแสแค่ 2 ตัว ทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานหนักเกินไปถ้าจายกระแสมากๆ และใช้แผ่นระบายความร้อนตัวเล็กทำให้เกิดความร้อนได้ง่าย ดังนั้นเราควรแก้ไขโดยเพื่อทรานซิสเตอร์ในการจ่ายกระแสเป็น 4 ตัว และเปลี่ยนแผ่นระบายความร้อนให้แผ่นใหญ่ขึ้น จึงจะทำให้ทรานซิสเตอร์ไม่ทำงานหนักเกินไปและเกิดการระบายความร้อนได้ดี

บรรณานุกรม

Charles K. Alexander, Matthew N.O. Sadiku. **FUNDAMENTALS OF ELECTRIC CIRCUITS** . International Edition 2000; McGraw-Hill Book Co , Singapore

Leonard S. Bobraw. **ELEMENTARY LINEAR CIRCUIT ANALYSIS** : Holt, Rinerhart and Winston, Inc.

Robert L. Boylestad, Louis Nashelsky. **ELECTRONIC DEVICES AND CIRCUIT THEORY.** Eighth Edition; Prentice Hall International, Inc.

นภัทร วัจนเทพินทร์. วิจิตรศีลคุณ, สุรศักดิ์ วงษ์ชนะชัย. **ทฤษฎีวงจรไฟฟ้ากระแสตรง** : ศูนย์ส่งเสริมอาชีวะ.

บัญชัย กิ่งรุ้งเพชร. **คู่มือ Protel 99.** เม็ดทรายพริ้นติ้ง**.** กรุงเทพฯ**,** 2543.

ไมตรี วรวุฒิจรรยากุล. ทฤษฎีวงจรไฟฟ้า 1-2 กรุงเทพฯ, 2530.

เศกสิทธิ์ คำชมภู. **เซมิคอนดักเตอร์ อิลักทรอนิกส์.** กรุงเทพฯ, 2538.

สมคิด วิริยะประสิทธิ์ชัย. **วงจรไฟฟ้าเบื้องต้น 1 และทฤษฎีวงจรไฟฟ้ากระแสตรง**. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. กรุงเทพฯ : ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, 2544.

ประวัติผู้เขียน

นาย เอกภูมิ ดีระพัฒน์ เกิดเมื่อ วันอาทิตย์ ที่ 13 มีนาคม พ.ศ. 2526 ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลท่าราบ อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบุรี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนพรหมาณุสรณ์ จ. เพชรบุรี เมื่อปี พ.ศ. 2544 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

นาย ภาณุเดช โสพส เกิดเมื่อ วันเสาร์ ที่ 19 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2526 ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลเขวา อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนสารคามพิทยาคม จ. มหาสารคาม เมื่อปี พ.ศ. 2544 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก