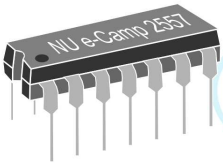
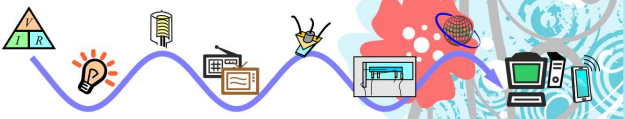
อิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น

Introduction to Electronics





NECTEC
a member of NSTDA

อิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น

Introduction to Electronics

สนับสนุนการจัดทำโดย
มหาวิทยาลัยนเรศวร (งบบริการวิชาการ ปี พ.ศ. 2557)
และ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

ผู้แต่ง

สุวิทย์ กิระวิทยา

ชื่อหนังสือ

อิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น

พิมพ์ครั้งที่ 1 กุมภาพันธ์ 2557

จังหวัดพิษณุโลก

100 หน้า

ราคา 120 บาท

ISBN 978-616-348-529-8

จัดพิมพ์และจัดจำหน่ายโดย ชุติปภา ธนบุญญาวงศ์

พรพรหมการพิมพ์

397 ม.4 ต.บึงพระ อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000

โทรศัพท์ 0-5524-6882

โทรสาร 0-5524-6883

คำนำ

หนังสือที่ถืออยู่ในมือนี้ เป็นเอกสารประกอบการอบรม ในโครงการ ค่ายอิเล็กทรอนิกส์รุ่นเยาว์ ปี พ.ศ. 2557 หรือ NU e-Camp 2557 ที่จัดขึ้นที่ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก โครงการนี้ เป็นโครงการที่ มหาวิทยาลัยนเรศวร ร่วมกับ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (เนคเทค) โดยจัดขึ้นเพื่อให้ผู้เข้าร่วมได้มีโอกาส พัฒนาทักษะทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ โดย คณะผู้จัดมีความคาดหวังว่า ผู้เข้าร่วม ทั้งนักเรียน และ นิสิต จะได้นำความรู้ที่ได้รับจากการเข้าค่ายนี้ มาทำการประดิษฐ์คิดค้น สิ่งประดิษฐ์ต่าง ๆ เพื่อประยุกต์ใช้งาน ด้วยตนเอง ต่อไป

เอกสารประกอบการอบรมนี้ แบ่งออกเป็น 4 บท ได้แก่ บทที่ 1 ที่เป็นบทแนะนำเบื้องต้นเกี่ยวกับอิเล็กทรอนิกส์ในชีวิตประจำวัน บทที่ 2 จะกล่าวถึงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ โดย วงจรหลักที่ใช้อุปกรณ์เหล่านี้จะถูกนำเสนอใน บทที่ 3 สำหรับ ในส่วนของวงจรแอนะล็อก และ บทที่ 4 สำหรับวงจรดิจิทัล

ในการจัดเตรียมเอกสารนี้ ผู้เขียนคาดหวังว่า เนื้อหาที่นำเสนอนี้จะ ไม่มากเกินไปและไม่ยากเกินไปสำหรับการอบรม โดยผู้รับการอบรมเป็นนักเรียนที่กำลังเรียนในระดับชั้นมัธยม และ ก็หวังเป็นอย่างยิ่งว่า ผู้เข้าร่วมอบรมนี้ จะสามารถนำความรู้จากตำราเล่มนี้ไปใช้ประโยชน์ต่อไป

สุวิทย์ กิระวิทยา

พฤศจิกายน 2556

สารบาญ

หน้า

บทที่ 1 อิเล็กทรอนิกส์ในชีวิตประจำวัน **7**

1.1 ประวัติความเป็นมา 7

1.2 ความสำคัญของอิเล็กทรอนิกส์ 8

1.3 แอนะล็อก ดิจิทัล และ คอมพิวเตอร์ 9

1.4 การเริ่มต้นศึกษาอิเล็กทรอนิกส์ 11

บทที่ 2 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ **13**

2.1 แบตเตอรี่ และ แหล่งจ่ายไฟ 13

2.2 ตัวต้านทาน 16

2.3 ตัวเหนี่ยวนำ 23

2.4 ตัวเก็บประจุ 25

2.5 สวิตช์ และ รีเลย์ 28

2.6 ไดโอด และ แอลอีดี 30

2.7 ทรานซิสเตอร์ 37

2.8 เซนเซอร์ทางแสง 45

2.9 หม้อแปลงไฟฟ้า 47

2.10 มอเตอร์ 48

หน้า

บทที่ 3 วงจรแอนะล็อก **52**

3.1 วงจรกรอง RC 52

3.2 วงจรเรียงกระแส 54

3.3 วงจรขยายด้วยทรานซิสเตอร์ 60

3.4 วงจรออปแอมป์ 62

บทที่ 4 วงจรดิจิทัล **73**

4.1 สัญญาณดิจิทัล กับ เลขฐานสอง 73

4.2 ตรรกศาสตร์ และ วงจรตรรก 78

4.3 วงจรคอมบิเนชั่น 85

ภาคผนวก

ก. กฎของเคอร์ชอฟฟ์ 90

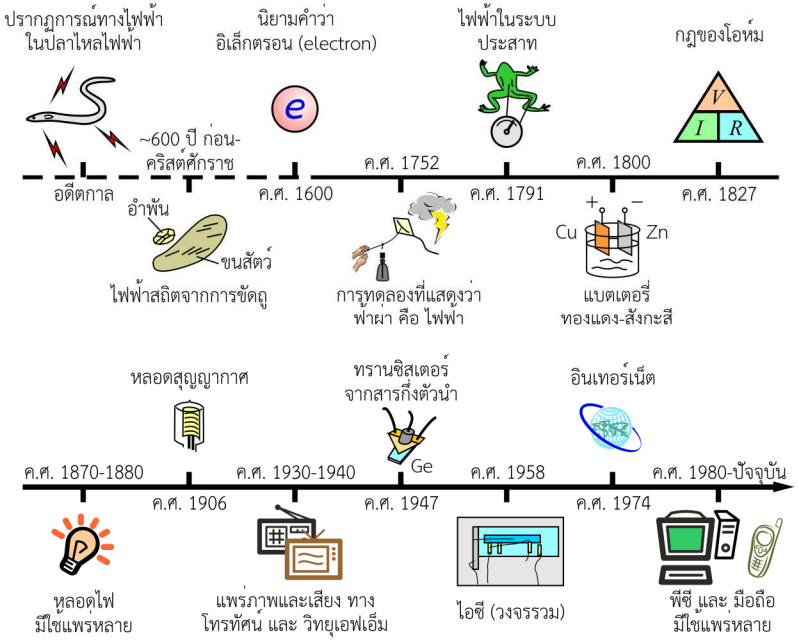
ข. การใช้มัลติมิเตอร์ 92

ดัชนี 96

บทที่ 1 อิเล็กทรอนิกส์ในชีวิตประจำวัน

1.1 ประวัติความเป็นมา

อิเล็กทรอนิกส์ (Electronics) เป็นความรู้ หรือ ศาสตร์แขนงหนึ่ง ของศาสตร์ด้านไฟฟ้า (Electricity) โดย อิเล็กทรอนิกส์ ถูกพัฒนา อย่างต่อเนื่อง และ เป็นไปอย่างรวดเร็วหลังจากที่มีการ คิดค้นทรานซิสเตอร์ ในปี ค.ศ. 1947 และ ไอซี ในปี ค.ศ. 1958 (ดูรูปที่ 1-1) ปัจจุบันเชื่อว่า ทุกคน คงรู้จักหรือเคยได้ยินคำว่า อิเล็กทรอนิกส์ อยู่บ้าง ไม่มากก็น้อย



รูปที่ 1-1 เหตุการณ์สำคัญที่เกี่ยวกับ การพัฒนาอิเล็กทรอนิกส์

1.2 ความสำคัญของอิเล็กทรอนิกส์

หากเราสังเกตรอบ ๆ ตัวเรา เราจะพบว่า เครื่องใช้ในชีวิตประจำวัน ส่วนหนึ่งจะเป็น เครื่องใช้ไฟฟ้า/อิเล็กทรอนิกส์ โดยเครื่องใช้เหล่านี้ มีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้น และ มีความสำคัญต่อการดำเนินชีวิตมากขึ้นทุกวัน (ดูรูปที่ 1-2) ปัจจุบันมีคนจำนวนมากในโลกบอกว่า ตนเองไม่สามารถดำเนินชีวิตอยู่ได้ หากปราศจากเครื่องใช้ไฟฟ้า/อิเล็กทรอนิกส์ โดยเครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญมากชนิดหนึ่ง คือ คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล หรือ พีซี (Personal Computer : PC)

สำหรับคนในยุคปัจจุบัน การมีความรู้ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ เป็นเรื่องที่จำเป็นอย่างมาก เพราะ จะทำให้ (1) สามารถทำความเข้าใจเรื่องพื้นฐานในการดำเนินชีวิตได้อย่างถูกต้อง (2) สามารถซ่อมแซมหรือแก้ไขเครื่องใช้ไฟฟ้า/อิเล็กทรอนิกส์ เมื่อถึงคราวจำเป็น และ (3) อาจทำให้เราสามารถออกแบบหรือสร้าง นวัตกรรม โดยการใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์ในการควบคุมการทำงาน

รูปที่ 1-2 เครื่องใช้ไฟฟ้า/อิเล็กทรอนิกส์รอบ ๆ ตัว

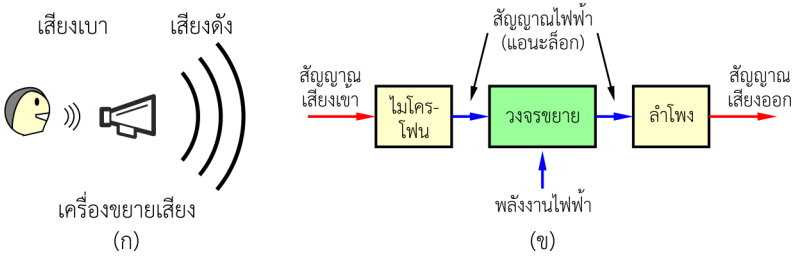
1.3 แอนะล็อก ดิจิทัล และ คอมพิวเตอร์

หากเราจำแนก เครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์ ที่มีอยู่ในปัจจุบัน เราแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ เครื่องใช้ระบบแอนะล็อก (Analog Devices) และ เครื่องใช้ระบบดิจิทัล (Digital Devices) สำหรับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่มีใช้แพร่หลายอยู่ ถือเป็นเครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์ระบบดิจิทัล ชนิดหนึ่ง

ระบบแอนะล็อก คือ ระบบที่ใช้สัญญาณแอนะล็อกในการทำงาน สัญญาณแอนะล็อก คือ สัญญาณที่มีความต่อเนื่องในเชิงขนาดตามเวลา

ตัวอย่างระบบแอนะล็อกที่มีใช้แพร่หลาย คือ เครื่องขยายเสียง (ดูรูปที่ 1-3) โดยทั่วไป การทำงานของเครื่องขยายเสียงจะเริ่มจาก การรับสัญญาณเสียงเข้า ผ่านไมโครโฟน ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่แปลงสัญญาณเสียง เป็นสัญญาณไฟฟ้าแบบแอนะล็อก จากนั้นสัญญาณไฟฟ้าจึงถูกขยายด้วยวงจรขยาย แล้ว สัญญาณไฟฟ้าขาออก จึงถูกแปลงกลับเป็นสัญญาณเสียงที่ดังขึ้น ผ่านลำโพง

นอกจากเครื่องขยายเสียงแล้ว เครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์ในระบบแอนะล็อกยังมีอีกมากมาย เช่น วิทยุ โทรทัศน์ เครื่องเล่นวีดีโอ ฯลฯ



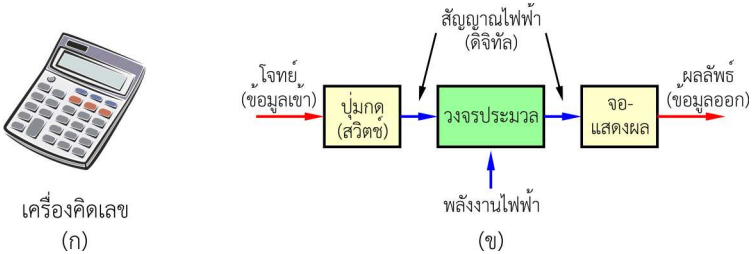
รูปที่ 1-3 (ก) เครื่องขยายเสียง และ (ข) แผนภาพระบบภายในที่ประกอบด้วย ไมโครโฟน วงจรขยาย และ ลำโพง

ระบบดิจิทัล คือ ระบบที่ใช้สัญญาณดิจิทัลในการทำงาน โดยสัญญาณดิจิทัลนี้จะมีขนาด (หรือ ค่า) ไม่ต่อเนื่อง ซึ่งโดยทั่วไป สัญญาณดิจิทัลจะแบ่งเป็นสองระดับ ซึ่งเรียกว่า “0” และ “1” การประมวลสัญญาณดิจิทัล คือ การดำเนินการกับตัวเลข “0” และ “1” นั่นเอง

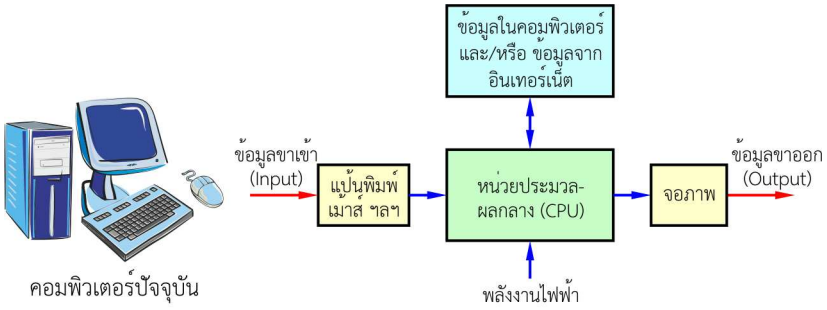
ตัวอย่างระบบดิจิทัล ตัวอย่างหนึ่ง คือ เครื่องคิดเลข (ดูรูปที่ 1-4) โดยระบบภายในของเครื่องคิดเลข จะประกอบด้วย (1) ส่วนรับข้อมูลเข้า ด้วยปุ่มกด หรือสวิตช์ต่าง ๆ (2) วงจรประมวล ที่รับสัญญาณไฟฟ้าแบบดิจิทัลเข้ามาประมวล และ (3) จอแสดงผลที่แสดงผลลัพธ์จากการคำนวณ เป็นข้อมูลขาออก

โดยระบบทางอิเล็กทรอนิกส์ใด ๆ ทั้งระบบแอนะล็อก และ ระบบดิจิทัล จะทำงานได้เมื่อมีการป้อนพลังงานไฟฟ้าให้กับวงจรที่เป็นหัวใจของระบบ

สำหรับ คอมพิวเตอร์ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน รวมถึง คอมพิวเตอร์ในแทปเลต และโทรศัพท์มือถือ เราถือว่ามันเป็นระบบดิจิทัลระบบหนึ่ง ทุกวันนี้ ระบบเหล่านี้ถูกพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว และ ถูกทำให้สามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ได้หลากหลายมากขึ้น โดยทั่วไป คอมพิวเตอร์ จะประกอบด้วย (1) ส่วนรับข้อมูลขาเข้า (Input Unit) (2) หน่วยประมวลผล หรือ ซีพียู (Central Processing Unit: CPU)



รูปที่ 1-4 (ก) เครื่องคิดเลข และ (ข) แผนภาพระบบภายใน
ที่ประกอบด้วย ปุ่มกด วงจรประมวล และ จอแสดงผล



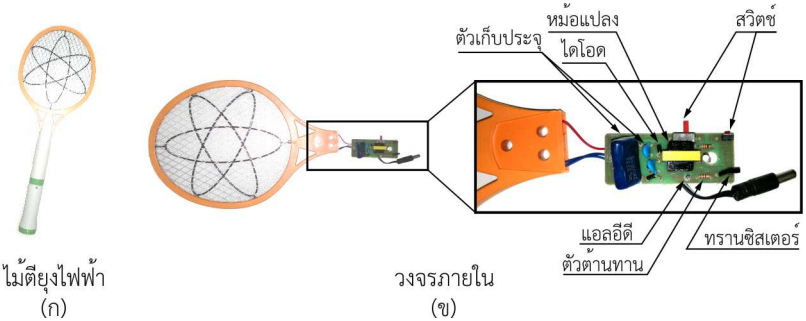
รูปที่ 1-5 (ก) คอมพิวเตอร์ปัจจุบัน และ (ข) แผนภาพระบบภายใน ที่ประกอบด้วย อุปกรณ์รับข้อมูล (แป้นพิมพ์ เม้าส์ และ อื่น ๆ) หน่วยประมวลผลกลาง (Central Processing Unit : CPU) ฐานข้อมูล และ หน่วยแสดงผล (จอภาพ)

(3) หน่วยความจำ (Memory) ที่ใช้เก็บข้อมูลที่ใช้ประกอบการประมวลผล และ (4) หน่วยแสดงผล ได้แก่ จอภาพ เครื่องพิมพ์ และ อุปกรณ์ต่อพ่วงอื่น ๆ

1.4 การเริ่มต้นศึกษาอิเล็กทรอนิกส์

หากเราเริ่มต้นศึกษาด้านอิเล็กทรอนิกส์ จากการศึกษาภายในเครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่ (เช่น แกะโทรศัพท์มือถือออกมาดู) เราอาจรู้สึกว่า เราไม่สามารถทำความเข้าใจได้เลย เนื่องจากวงจรเกือบทั้งหมดถูกบรรจุอยู่ในไอซี ที่มีการทำงานที่มีความซับซ้อนมาก และ ปิดผนึกไว้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม หากเราเริ่มศึกษาด้านอิเล็กทรอนิกส์ จากการพิจารณาเครื่องใช้ที่มีหลักการง่าย ๆ เราก็จะสามารถเข้าใจการทำงานของอุปกรณ์ภายในเครื่องใช้นั้น ๆ ได้ อย่างไม่ยากนัก ยิ่งไปกว่านั้น ในปัจจุบัน เราสามารถใช้อินเทอร์เน็ต ในการสืบค้นข้อมูลที่เราสนใจได้อย่างง่ายดาย ดังนั้น การศึกษาด้านอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบัน จึงไม่เป็นเรื่องยากเกินไป

เครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์ที่จะขอนำเสนอวงจรภายในให้ดูเป็นตัวอย่าง คือ ไม้ตียุงไฟฟ้า (Electric Flywatters หรือ Mosquito Bats) เครื่องใช้นี้เริ่มมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายเมื่อไม่นานนี้ (ประมาณปี ค.ศ. 2005) รูปที่ 1-6 แสดงตัวอย่างไม้ตียุง และ รูปภาพวงจรภายใน จากรูปจะเห็นได้ว่า วงจรนี้ ประกอบด้วย อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพียงไม่กี่ตัว ซึ่งได้แก่ ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ สวิตช์ ไดโอด แอลอีดี ทรานซิสเตอร์ และ หม้อแปลง หากเราสามารถทำความเข้าใจการทำงานของอุปกรณ์เหล่านี้ (ซึ่งเป็นเนื้อหาในบทที่ 2) และ เข้าใจลักษณะการเชื่อมต่อกัน เป็น **วงจร (Circuit)** เราก็จะสามารถเข้าใจการทำงานของไม้ตียุงไฟฟ้านี้ได้ โดยเมื่อเราเข้าใจวงจรแล้ว เมื่อเกิดปัญหากับการใช้เครื่องใช้นี้ เราเองก็อาจจะสามารถซ่อมแซมได้ด้วยตัวเอง และ อาจจะสามารถพัฒนาต่อยอด ให้กลายเป็นเครื่องใช้ชนิดใหม่ ๆ จากความรู้ที่มีได้อีกด้วย



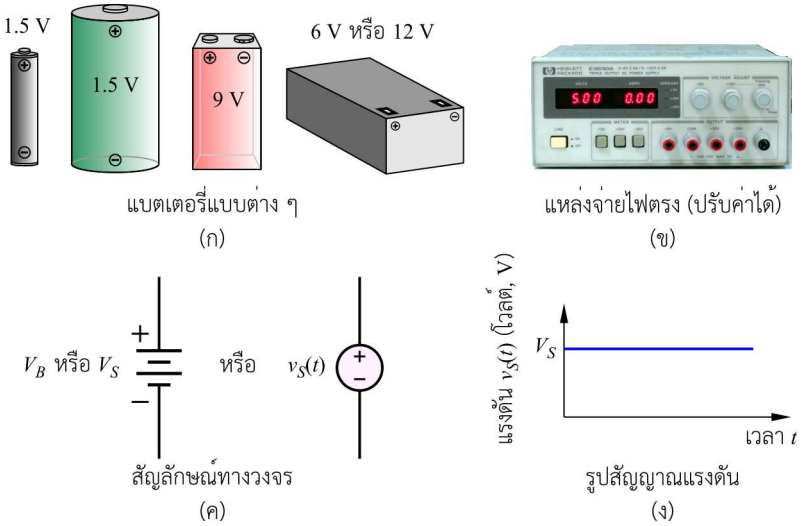
รูปที่ 1-6 (ก) ไม้ตียุงไฟฟ้า และ (ข) ภาพวงจรภายใน
ที่ประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ

บทที่ 2 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ในบทนี้ เราจะทำความรู้จักกับ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน ที่มีให้พบเห็นกันอย่างแพร่หลาย ความเข้าใจในลักษณะสมบัติของอุปกรณ์เหล่านี้ จะทำให้เราสามารถเข้าใจวงจร และ นำมันไปใช้ ออกแบบ และ สร้าง วงจรใหม่ ๆ ได้

2.1 แบตเตอรี่ และ แหล่งจ่ายไฟ

แบตเตอรี่ (Battery) คือ อุปกรณ์ที่ประกอบด้วยเซลล์ทางเคมีไฟฟ้า ที่สามารถแปลงพลังงานเคมีที่สะสมอยู่เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ตัวอย่างลักษณะแบตเตอรี่แบบต่าง ๆ คือ ถ่านไฟฉาย (แบบ 1.5 โวลต์ และ 9 โวลต์) และ แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด (6 โวลต์ หรือ 12 โวลต์) แสดงดังรูปที่ 2-1(ก)



รูปที่ 2-1 (ก) แบตเตอรี่แบบต่าง ๆ (ข) แหล่งจ่ายไฟตรงปรับค่าได้ (ค) สัญลักษณ์ทางวงจรของแบตเตอรี่ และ แหล่งจ่ายไฟตรง และ (ง) รูปสัญญาณแรงดันตามเวลา

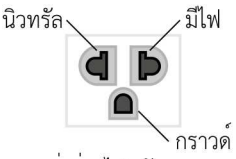
แบตเตอรี่ ถือเป็น **แหล่งจ่ายไฟตรง (Direct Current (DC) Power Supply)** ชนิดหนึ่ง ที่ไม่สามารถปรับค่าแรงดันได้ ดังนั้น หากเราใช้แหล่งจ่ายชนิดนี้ในการทดลองทางอิเล็กทรอนิกส์ เราก็อาจจะพบความไม่สะดวก เมื่อเราต้องการปรับค่าแรงดันต่าง ๆ ดังนั้น ในห้องทดลอง เราจะใช้ แหล่งจ่ายไฟตรงชนิดปรับค่าได้ (รูปที่ 2-1(ข)) เป็นอุปกรณ์หลักในการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

สัญลักษณ์ทางวงจรของแบตเตอรี่ และ แหล่งจ่ายไฟตรง แสดงดังรูปที่ 2-1(ค) สำหรับแหล่งจ่ายไฟตรงนี้ เราจะมีการระบุขั้วบวก-ลบ และ กำหนดค่าแรงดันด้วยเสมอ โดยรูปสัญญาณแรงดันไฟตรง แสดงดังรูปที่ 2-1(ง) รูปสัญญาณแรงดันไฟตรงจะเป็นค่าคงที่ (ไม่ขึ้นกับเวลา แต่ขึ้นกับระดับแรงดันที่ปรับ)

สำหรับ แหล่งจ่ายไฟอีกประเภทหนึ่ง คือ **แหล่งจ่ายไฟสลับ (Alternating Current (AC) Power Supply)** มันจะเป็นแหล่งจ่ายที่กำเนิดสัญญาณไฟสลับที่เป็นคลื่นรูปต่าง ๆ โดยแหล่งจ่ายไฟสลับขนาด 220 โวลต์ (รูปที่ 2-2(ก)) เป็นแหล่งจ่ายมาตรฐานในระบบส่งไฟฟ้าสู่ที่พักอาศัย โดยทั่วไป แหล่งจ่ายชนิดนี้นอกจาก สายต่อหลัก ๆ สองสาย คือ สายมีไฟ (Hot) และ สายนิวทรัล (Neutral) แล้ว ยังมี สายกราวด์ (Ground) หรือ สายดิน ที่ใช้เพื่อทำให้เกิดความปลอดภัยในการใช้เครื่องใช้ไฟฟ้า มาอีกด้วย

เครื่องกำเนิดสัญญาณไฟสลับ (Function Generator) เป็น แหล่งจ่ายไฟสลับที่สามารถปรับชนิดรูปคลื่น (รูปไซน์ รูปสี่เหลี่ยม รูปสามเหลี่ยม ฯลฯ) ขนาดแรงดัน และ ความถี่ ได้ (รูปที่ 2-2(ข)) โดยปกติ เราจะใช้เครื่องมือชนิดนี้ ในห้องทดลอง เพื่อศึกษา และ พัฒนาวงจรใหม่ ๆ

สัญลักษณ์ทางวงจรของแหล่งจ่ายไฟสลับ แสดงดังรูปที่ 2-2(ค) โดยตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันคลื่นรูปไซน์ ที่มี ขนาดสูงสุด V_p และ ความถี่ f (ความถี่เชิงมุม $\omega = 2\pi f$, คาบ $T = 1/f$) แสดงดังรูปที่ 2-2(ง) โดย ความถี่ มีหน่วยเฮิรตซ์ (hertz: Hz) ความถี่เชิงมุม มีหน่วยเป็น เรเดียนต่อวินาที (rad/s) และ คาบ มีหน่วยเป็นวินาที (s)

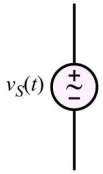


แหล่งจ่ายไฟสลับ 220 V

(ก)

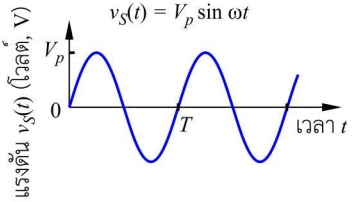
เครื่องกำเนิดสัญญาณไฟสลับ

(ข)



สัญลักษณ์ทางวงจร

(ค)



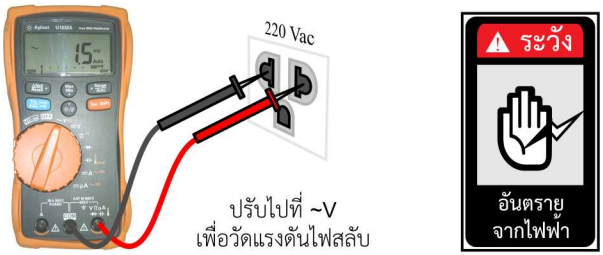
รูปสัญญาณแรงดัน

(ง)

รูปที่ 2-2 (ก) แหล่งจ่ายไฟสลับ มาตรฐาน 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ (ข) เครื่องกำเนิดสัญญาณไฟสลับปรับค่าได้ (ค) สัญลักษณ์ทางวงจรของแหล่งจ่าย และ (ง) รูปสัญญาณแรงดันคลื่นรูปไซน์ (คาบ $T = 1/f = 20$ ms สำหรับไฟสลับความถี่ 50 เฮิรตซ์)

สำหรับไฟสลับนี้จะมีข้อดีเหนือไฟตรง ตรงที่ มันสามารถถูกแปลงค่าระดับแรงดันโดยการใช้หม้อแปลงไฟฟ้าได้ ด้วยเหตุนี้ ทำให้ระบบส่งไฟฟ้าที่ใช้ในโลก เป็นระบบไฟสลับ แต่สำหรับไฟตรง หรือ ไฟฟ้ากระแสตรง จะมีใช้ เป็นแหล่งจ่ายพลังงานในระบบอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นเราจึงต้องมีวงจรที่ใช้การแปลงไฟสลับมาเป็นไฟตรง ในระบบอิเล็กทรอนิกส์ ที่รับพลังงานในรูปไฟสลับ

การตรวจสอบแรงดัน ทั้งไฟตรง และ ไฟสลับ เราสามารถทำได้โดยใช้มัลติมิเตอร์ (ดูรูปที่ 2-3(ก)) โดยปรับโหมดการวัดไปที่โหมดที่เหมาะสม สำหรับการวัดไฟฟ้าแรงดันสูง (มากกว่า 100 โวลต์) ผู้วัดต้องระวังอันตรายจากการสัมผัสถูกส่วนที่มีระดับแรงดันสูง (รูปที่ 2-3(ข)) เนื่องจาก การสัมผัสไฟฟ้าแรงดันสูงจะทำให้เกิด **ไฟดูด (Electric Shock)** ซึ่งก็คือ การมีกระแสไฟฟ้าปริมาณมาก ไหลผ่านร่างกายผู้สัมผัส

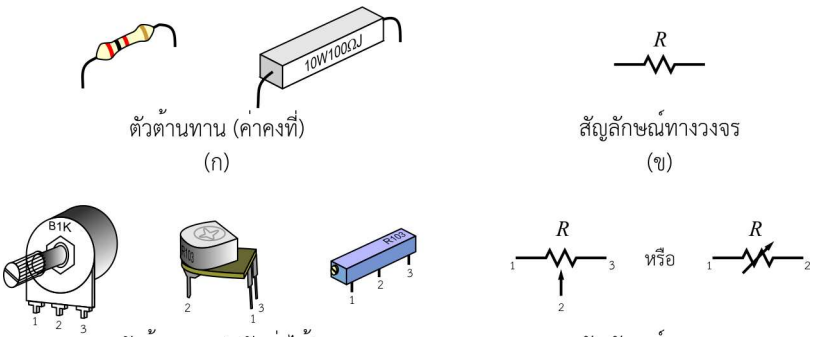


(ก) (ข)

รูปที่ 2-3 (ก) การใช้มัลติมิเตอร์วัดค่าแรงดันไฟสลับ
และ (ข) ป้ายเตือนอันตรายจากไฟฟ้า

2.2 ตัวต้านทาน

ตัวต้านทาน (Resistor) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน ที่มีใช้แพร่หลาย โดยหน้าที่ของมัน คือ ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมจากกระแสที่ไหลผ่าน โดยลักษณะรูปร่างของตัวต้านทาน ที่มีค่าความต้านทานคงที่ (ชนิดคาร์บอน และ ชนิดเซรามิกส์) แสดงดังรูป 2-4(ก)



ตัวต้านทาน (ค่าคงที่) สัญลักษณ์ทางวงจร
(ก) (ข)

ตัวต้านทาน (ปรับค่าได้) สัญลักษณ์ทางวงจร
(ค) (ง)

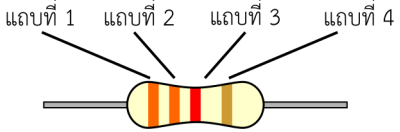
รูปที่ 2-4 (ก) ตัวต้านทานที่มีค่าคงที่แบบต่าง ๆ (ข) สัญลักษณ์ทางวงจร
(ค) ตัวต้านทานปรับค่าได้แบบต่าง ๆ และ (ง) สัญลักษณ์ทางวงจร

นอกจากตัวต้านทานแบบคงที่แล้ว เรายังมีการใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ (รูปที่ 2-4(ค)) เพื่อปรับแต่ง ขนาดแรงดัน และ กระแส ที่ไหลในวงจร โดยทั่วไป ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ จะระบุขนาดค่าความต้านทานสูงสุด ไว้ที่ตัวถัง

เราจะใช้สัญลักษณ์ R สำหรับ ตัวต้านทาน โดยค่าความต้านทาน มีหน่วยเป็นโอห์ม (ohm : Ω) สัญลักษณ์ทางวงจรของตัวต้านทานแบบคงที่ และ แบบปรับค่าได้ แสดงดังรูปที่ 2-4(ข) และ (ง) ตามลำดับ

ตัวต้านทานแบบค่าคงที่ ที่มีใช้ในการสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ส่วนใหญ่จะมีการบอกขนาดค่าความต้านทานด้วยแถบสี 4 หรือ 5 แถบ การอ่านแถบสีนี้ เราจะต้องจำ

ตารางที่ 2-1 การอ่านแถบสีของตัวต้านทาน



สี	แถบสีที่ 1 และ 2	แถบสีที่ 3	แถบสีที่ 4
ดำ	0	0	-
น้ำตาล	1	1	-
แดง	2	2	±1%
ส้ม	3	3	±2%
เหลือง	4	4	-
เขียว	5	5	-
น้ำเงิน	6	6	-
ม่วง	7	-	-
เทา	8	-	-
ขาว	9	-	-
ทอง	-	-1	±5%
เงิน	-	-2	±10%
ไม่มีสี	-	-	±20%

รหัสสี (ตารางที่ 2-1) โดยแถบสีแถบที่ 1 และ 2 จะระบุค่าหลักสองตัวแรก แถบสีแถบที่ 3 จะระบุค่าตัวเลขยกกำลัง และ แถบสีแถบที่ 4 จะบอกค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความต้านทานที่ระบุ ตัวอย่างเช่น หากเราอ่านแถบสีได้เป็น ส้ม-ส้ม-แดง-ทอง จะได้ว่า ค่าความต้านทานคือ **33**×10^{2} **Ω** หรือ 3300 **Ω** หรือ 3.3 k**Ω** ±**5**%

สำหรับตัวต้านทานที่ระบุค่าด้วยแถบสี 5 แถบ จะมีความคลาดเคลื่อนน้อย (เช่น ±1%) โดยมีแถบสีที่ 1-3 ระบุค่าหลักสามตัว แถบที่ 4 จะระบุค่าตัวเลขยกกำลัง และ แถบสีสุดท้าย จะบอกค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน

ค่าความต้านทานของตัวต้านทานที่มีขายทั่วไปตามท้องตลาดแสดงในตารางที่ 2-2 โดยทั่วไป ในการต่อวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป เราจะใช้ค่าความต้านทานระหว่าง 100 **Ω** – 1.0 M**Ω** (= 10^{6} **Ω**) เพราะ ค่าความต้านทานที่ต่ำเกินไป จะทำให้เกิดกระแสไหลมาก (สูญเสียพลังงานมาก) และ ค่าความต้านทานที่สูงเกินไป จะทำให้กระแสไหลน้อยเกินไป (และ ทำให้มีสัญญาณรบกวนมาก)

ตารางที่ 2-2 ค่าความต้านทานของตัวต้านทานที่มีขายทั่วไป

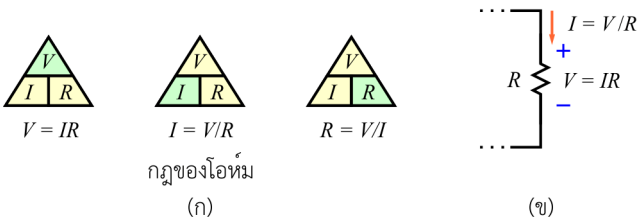
1.0	10	100	1.0 k	10 k	100 k	1.0 M
1.2	12	120	1.2 k	12 k	120 k	1.2 M
1.5	15	150	1.5 k	15 k	150 k	1.5 M
1.8	18	180	1.8 k	18 k	180 k	1.8 M
2.2	22	220	2.2 k	22 k	220 k	2.2 M
2.7	27	270	2.7 k	27 k	270 k	2.7 M
3.3	33	330	3.3 k	33 k	330 k	3.3 M
3.9	39	390	3.9 k	39 k	390 k	3.9 M
4.7	47	470	4.7 k	47 k	470 k	4.7 M
5.6	56	560	5.6 k	56 k	560 k	5.6 M
6.8	68	680	6.8 k	68 k	680 k	6.8 M
8.2	82	820	8.2 k	82 k	820 k	8.2 M

ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสที่ไหลผ่าน และ แรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน จะเป็นไปตามกฎของโอห์ม (Ohm's Law) โดยการใช้กฎนี้ ทำได้ 3 วิธี ดังแสดงในรูปที่ 2-5 คือ

(1) หากเราทราบ ค่ากระแส I ที่ไหล และ ค่าความต้านทาน R เราจะคำนวณได้ว่า ความต่างศักย์ หรือ แรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน คือ $V = IR$

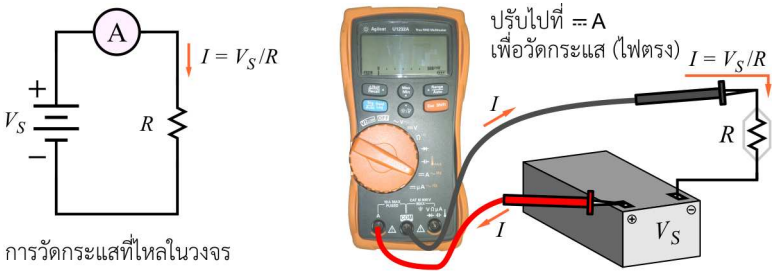
(2) หากเราทราบ ค่าแรงดัน V ที่ตกคร่อมตัวต้านทาน และ ค่าความต้านทาน R เราจะคำนวณได้ว่า กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน คือ $I = V/R$

(3) หากเราทราบ ค่ากระแส I ที่ไหล และ ค่าแรงดัน V ที่ตกคร่อมตัวต้านทาน เราจะคำนวณได้ว่า ค่าความต้านทานของตัวต้านทาน คือ $R = V/I$



รูปที่ 2-5 (ก) กฎของโอห์ม และ (ข) การใช้กฎนี้กับตัวต้านทานในวงจร

สำหรับ การวัดเพื่อให้ทราบค่า แรงดันและกระแสนั้น เราทำได้โดยการใช้ **มัลติมิเตอร์ (Multimeter)** โดยการวัดแรงดันนั้น ทำโดย การใช้โพรบวัดที่ขั้วที่ต้องการทราบค่าแรงดันได้ทันที โดยไม่ต้องทำการตัดวงจร แต่สำหรับการวัดกระแสนั้น เราจะต้องวัดในโหมดการวัดกระแส ด้วยขั้วต่ออีกขั้วหนึ่งบนมิเตอร์ และ เราจะต้องตัดวงจร เพื่อนำขั้วต่อจากมิเตอร์เข้าไปต่อ เพื่อให้เกิดกระแสไหลผ่านมิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2-6 และ ศึกษาภาคผนวก ข. สำหรับการใช้งานมัลติมิเตอร์ในการวัดปริมาณทางไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ



รูปที่ 2-6 (ก) วงจรที่มีการวัดกระแสที่ไหลในวงจร และ
(ข) การใช้มัลติมิเตอร์วัดกระแสที่ไหลในวงจร

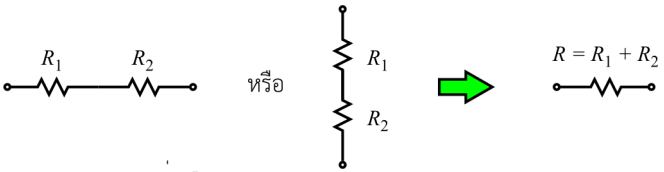
เนื่องจากตัวต้านทานแบบค่าคงที่ ที่มีอยู่ มีค่าไม่ต่อเนื่อง ในบางครั้ง หากเราต้องการค่าความต้านทาน ที่ไม่มีในท้องตลาด เราจะต้องสร้าง ขึ้นมาเอง โดยอาศัยการต่อแบบอนุกรม ขนาน หรือ ต่อแบบผสม ระหว่างอนุกรมกับขนาน

การต่ออนุกรม (Series Connection)

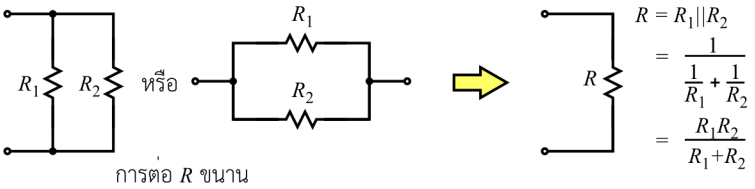
การต่อตัวต้านทานอนุกรมกัน แสดงดังรูปที่ 2-7 ค่าความต้านทานรวม หรือความต้านทานสมมูล (Equivalent Resistance) R จะมีค่าเท่ากับผลบวกของค่าความต้านทานที่นำมาต่อกัน ดังนั้น ค่าความต้านทานสมมูลของการต่ออนุกรม จะมากกว่าค่าความต้านทานแต่ละตัวเสมอ

การต่อขนาน (Parallel หรือ Shunt Connection)

การต่อตัวต้านทานขนานกัน แสดงดังรูปที่ 2-8 ค่าความต้านทานสมมูล R จะมีค่าเท่ากับ ส่วนกลับของ ผลบวกของ ส่วนกลับของค่าความต้านทาน แต่ละตัว โดยความต้านทานสมมูลของการต่อกันแบบขนานนี้ จะมีค่าน้อยกว่า ค่าความต้านทานตัวที่น้อยที่สุดที่นำมาต่อกัน



รูปที่ 2-7 ความต้านทานสมมูลของตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมกัน

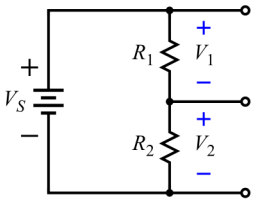


รูปที่ 2-8 ความต้านทานสมมูลของตัวต้านทานที่ต่อขนานกัน

การต่อตัวต้านทานแบบขนานนั้น เราอาจใช้สัญลักษณ์ขนาน || แทนการเขียนเศษส่วน เช่น ตัวต้านทาน 2 ตัวขนานกัน เขียนได้เป็น $R_1 \| R_2$ ดังในรูปที่ 2-8

หากตัวต้านทาน*สองตัว* ที่นำมาต่อขนานกัน มีขนาดเท่ากัน จะได้ว่า ความต้านทานสมมูล จะมีค่าลดลงเป็น*ครึ่งหนึ่ง*ของความต้านทานของตัวต้านทานแต่ละตัว สำหรับ กรณี ตัวต้านทาน N ตัว ต่อขนานกัน เราจะมีค่าความต้านทานสมมูลลดลง N เท่า เช่น ตัวต้านทาน 100 โอห์ม 4 ตัว ต่อขนานกัน จะมีค่าความต้านทานสมมูลเท่ากับ 100/4 =25 โอห์ม

เมื่อเราต่อแหล่งจ่ายไฟ กับ ตัวต้านทานที่ต่อกันแบบอนุกรม (รูปที่ 2-9) ก็จะเกิด**การแบ่งแรงดัน (Voltage Division)** ขึ้น แรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานแต่ละตัว จะถูกแบ่ง โดย แรงดันนี้ จะขึ้นกับ ค่าความต้านทานที่นำมาต่อ เราอาจนำค่าแรงดันที่แบ่งนี้ ไปใช้ต่อไป ในส่วนอื่น ๆ ของวงจร เช่น ใช้เป็นค่าแรงดันอ้างอิง ต่อไป



(ก)

วงจรแบ่งแรงดัน (Voltage Divider)

$$V_1 = \frac{R_1}{R_1+R_2} V_S$$

$$V_2 = \frac{R_2}{R_1+R_2} V_S$$

(ข)

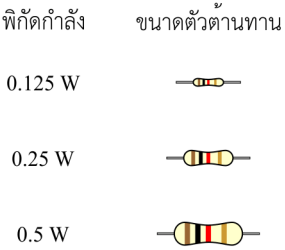
รูปที่ 2-9 การแบ่งแรงดัน

อีกสิ่งหนึ่งที่ต้องคำนึงถึง ในการเลือกใช้ ตัวต้านทาน คือ **พิกัดกำลัง (Power Rating)** ของตัวต้านทาน โดยในวงจรที่เราสร้าง เราจะต้องใช้ตัวต้านทานที่มีพิกัดกำลังมากกว่า กำลังที่ตัวต้านทานนั้นได้รับเสมอ โดย ค่ากำลัง P ที่มีหน่วยเป็นวัตต์ (watt: W) จะคำนวณได้จาก ผลคูณระหว่าง ค่าแรงดัน V *ที่ตกคร่อม* และ ค่ากระแส I *ที่ไหลผ่าน* ตัวต้านทานตัวนั้น และ เมื่อใช้นิยามนี้ ร่วมกับกฎของโอห์ม เราจะเขียนกำลังได้เป็นสูตร คือ

$$P = VI = V^2/R = I^2R$$

สำหรับตัวต้านทานขนาดเล็ก ที่แสดงค่าความต้านทานด้วยแถบสี พิกัดกำลังจะถูกระบุผ่านขนาดของตัวต้านทาน (รูปที่ 2-10) โดยทั่วไป จะมีค่า 0.125 วัตต์ (หรือ 1/8 วัตต์), 0.25 วัตต์ (หรือ 1/4 วัตต์) และ 0.5 วัตต์ (หรือ 1/2 วัตต์) สำหรับตัวต้านทานที่มีพิกัดกำลังสูง ๆ ค่าพิกัดกำลังจะถูกระบุอยู่บนตัวต้านทานนั้น

ตัวอย่างเช่น หากเราใช้ไฟฟ้าแรงดัน 12 V และ ตัวต้านทานที่มีพิกัดกำลัง 0.25 W เราจะต้องเลือกใช้ ตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานมากกว่า $12^2/0.25 = 576\ \Omega$ เพื่อให้ กำลังสูญเสียในตัวต้านทานน้อยกว่าค่าพิกัดกำลังของตัวต้านทานที่ใช้



รูปที่ 2-10 พิกัดกำลังและขนาดของตัวต้านทานชนิดคาร์บอน

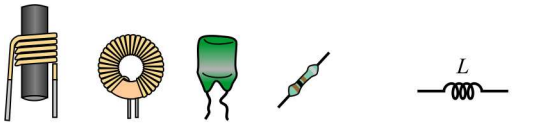
2.2 ตัวเหนี่ยวนำ

ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้า ที่สามารถสะสมพลังงานในรูปของสนามแม่เหล็ก โดยปกติ ตัวเหนี่ยวนำจะทำจากขดลวดที่พันรอบแกนชนิดต่าง ๆ (แกนเหล็ก แกนเฟอร์ไรต์ และ แกนอากาศ) ลักษณะของตัวเหนี่ยวนำที่มีใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ แสดงดังรูปที่ 2-11(ก) โดยสัญลักษณ์ ทางวงจรของตัวเหนี่ยวนำแสดงดังรูป 2-11(ข) โดยเราจะใช้ตัวอักษร L กำกับที่ตัวเหนี่ยวนำในวงจร และ แทนค่าตัวแปรความเหนี่ยวนำ

ความเหนี่ยวนำ (Inductance) เป็นตัวบ่งบอกความสามารถในการสะสมพลังงาน ค่าความเหนี่ยวนำมีหน่วยเป็น เฮนรี่ (henry: H) โดย ค่าความเหนี่ยวนำทั่ว ๆ ไป ที่มีขายในท้องตลาด จะมีค่าอยู่ในระดับ $\mu H - mH$ ($10^{-6} - 10^{-3}$ H)

การใช้งานตัวเหนี่ยวนำในวงจรนั้น ปกติ เราจะใช้มันกับวงจรไฟสลับ โดยค่า **ความต้านทานไฟสลับ (AC Resistance)** หรือ **รีแอคแตนซ์ (Reactance)** X_L ของตัวเหนี่ยวนำ จะขึ้นกับค่าความถี่ f ของไฟสลับด้วย โดยมีสูตรคือ

$$X_L = 2\pi f L$$



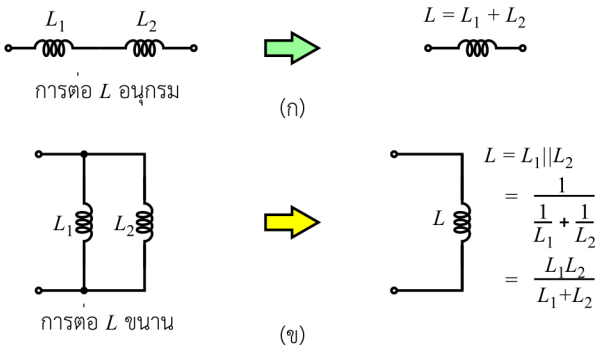
ตัวเหนี่ยวนำแบบต่าง ๆ (ก)　　สัญลักษณ์ทางวงจร (ข)

รูปที่ 2-11 (ก) ตัวเหนี่ยวนำแบบต่าง ๆ และ (ข) สัญลักษณ์ทางวงจร

ในกรณีไฟตรง ($f = 0$ Hz) ตัวเหนี่ยวนำนี้ จะเปรียบเสมือน วงจรปิด (Closed Circuit) คือ เป็นเหมือนลวดตัวนำที่ยอมให้กระแสไหลผ่านได้โดยไม่มีความต้านทาน

การต่อตัวเหนี่ยวนำ เราก็สามารถทำได้ ในลักษณะเดียวกันกับ การต่อตัวต้านทาน โดยการต่อตัวเหนี่ยวนำ แบบอนุกรม และ แบบขนาน พร้อมสูตรที่ใช้คำนวณ ค่าความเหนี่ยวนำสมมูล แสดงดังรูปที่ 2-12

โดย วงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่มีการใช้ตัวเหนี่ยวนำ จะเป็น วงจรจำพวกวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น วงจรสวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลาย (แหล่งจ่ายไฟในคอมพิว-



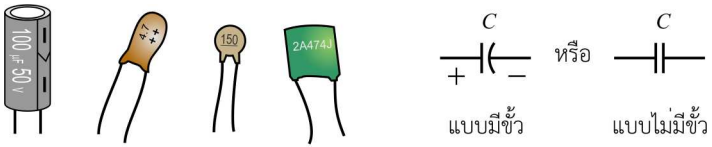
รูปที่ 2-12 ความเหนี่ยวนำสมมูลของตัวตัวเหนี่ยวนำ
ที่ต่อ (ก) แบบอนุกรม และ (ข) แบบขนาน

เตอร์) สำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์อย่างง่าย เรามักจะหลีกเลี่ยงการใช้ตัวเหนี่ยวนำ โดยหลักการของตัวเหนี่ยวนำนี้ จะเป็นพื้นฐานการทำงานของ รีเลย์ และ หม้อแปลงไฟฟ้า ที่จะกล่าวถึงต่อไป

2.3 ตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุ (Capacitor) เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้า ที่สามารถสะสมพลังงานในรูปของสนามไฟฟ้า โดยตัวเก็บประจุ จะมีโครงสร้างอย่างง่าย คือ แผ่นเพลตสองแผ่นอยู่ใกล้ ๆ กัน โดยลักษณะของตัวเก็บประจุที่มีใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ แสดงดังรูปที่ 2-13(ก) ซึ่งตัวเก็บประจุเหล่านี้ มีทั้งแบบมีขั้ว (คือ ชนิดอิเล็กทรอไลต์ และ ชนิดแทนทาลัม) และ แบบไม่มีขั้ว (คือ ชนิดเซรามิก และ ชนิดไมลาร์) โดยสัญลักษณ์ ทางวงจรของตัวเก็บประจุ แสดงดังรูป 2-13(ข) โดยเราจะใช้ตัวอักษร C กำกับตัวเก็บประจุ และ แทนค่าตัวแปรความจุไฟฟ้า **ความจุไฟฟ้า (Capacitance)** เป็นตัวบ่งบอกความสามารถในการสะสมพลังงาน ค่าความจุไฟฟ้ามีหน่วยเป็น ฟารัด (farad: F) โดย ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุทั่ว ๆ ไป จะมีค่าอยู่ในระดับ pF – mF (10^{-12} – 10^{-3} F)

การอ่านค่าขนาดความจุไฟฟ้าที่ระบุบนตัวเก็บประจุนั้น จะขึ้นกับ ชนิดของตัวเก็บประจุด้วย สำหรับตัวเก็บประจุชนิดไมลาร์ เราจะใช้ตัวเลข 3 ตัว ในการระบุค่าความจุไฟฟ้า โดย ตัวเลข 2 ตัวแรก จะเป็นเลขหลัก และ ตัวเลขตัวที่ 3 จะบอกค่าตัวเลขยกกำลัง โดยค่าที่อ่านได้ จะมีหน่วยเป็น พิโคฟารัด ($1\ pF = 10^{-12}\ F$) ตัวอย่าง หากเราอ่านค่าบนตัวเก็บประจุได้ 473 จะบอกได้ว่า ค่าความจุไฟฟ้า คือ $47\times10^{3}\ pF = 0.047\ \mu F$



ตัวเก็บประจุ แบบต่าง ๆ (ก)

สัญลักษณ์ทางวงจร (ข)

รูปที่ 2-13 (ก) ตัวเก็บประจุแบบต่าง ๆ และ (ข) สัญลักษณ์ทางวงจร ของตัวเก็บประจุแบบมีขั้ว และ แบบไม่มีขั้ว

ตารางที่ 2-3 ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่มีขายทั่วไป

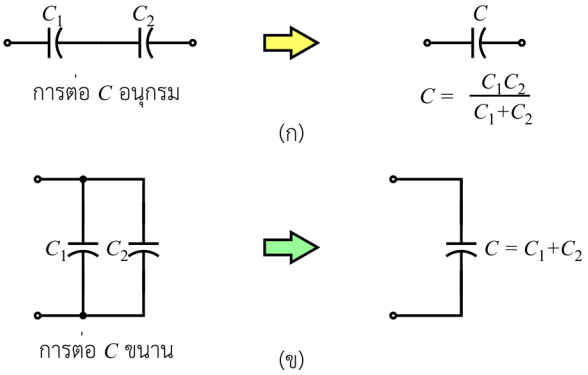
pF	pF	pF	pF	µF	µF	µF	µF	µF	µF
1.0	10	100	1000	0.01	0.1	1.0	10	100	1000
1.5	15	150	1500	0.015	0.15	1.5	15	150	1500
2.2	22	220	2200	0.022	0.22	2.2	22	220	2200
3.3	33	330	3300	0.033	0.33	3.3	33	330	3300
4.7	47	470	4700	0.047	0.47	4.7	47	470	4700
6.8	68	680	6800	0.068	0.68	6.8	68	680	6800

ตารางที่ 2-3 แสดงค่าความจุไฟฟ้า ของตัวเก็บประจุที่มีขายในท้องตลาด โดยช่วงของค่าที่มีนี้ และ ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าที่ระบุ จะขึ้นกับชนิดของตัวเก็บประจุด้วย

นอกจากค่าความจุไฟฟ้าแล้ว การเลือกใช้ตัวเก็บประจุ เราจะต้องคำนึงถึง ค่าพิกัดแรงดันที่ตัวเก็บประจุสามารถทนได้ด้วย เช่น หากเราใช้ตัวเก็บประจุกับวงจรที่มีไฟเลี้ยงขนาดแรงดัน 12 โวลต์ เราจะต้องใช้ตัวเก็บประจุที่ทนแรงดันได้มากกว่า 12 โวลต์ เช่น เราอาจจะเลือก ตัวเก็บประจุที่มีพิกัดแรงดัน 25 โวลต์

สำหรับการใช้งานตัวเก็บประจุในวงจรนั้น เราจะใช้ได้ค่อนข้างหลากหลาย โดยสำหรับกรณีไฟตรง ตัวเก็บประจุจะถูกใช้ในการ จ่ายกระแส (ประจุ) ในช่วงเวลาสั้น ๆ ให้กับส่วนอื่นของวงจร เมื่อแหล่งจ่ายถูกตัด และ มันอาจใช้ในการ*กั้น*ไฟตรงไม่ให้ผ่านออกไป ดังนั้น ตัวเก็บประจุ จะเปรียบเสมือนวงจรเปิด (Open Circuit) สำหรับไฟฟ้ากระแสตรง วงจรอิเล็กทรอนิกส์พื้นฐานที่ใช้ตัวเก็บประจุทำงาน คือ วงจรกรอง RC และ วงจรเรียงกระแส ที่เป็นพื้นฐานของวงจรแหล่งจ่ายไฟ จะนำเสนอต่อไป

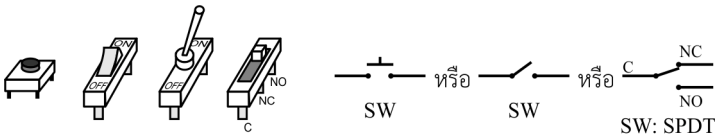
การต่อตัวเก็บประจุก็สามารถทำได้ ในลักษณะเดียวกันกับ การต่อตัวต้านทาน คือ การต่อแบบอนุกรม และ ขนาน แต่สำหรับกรณีตัวเก็บประจุนี้ สูตรสำหรับ ค่าความจุไฟฟ้าสมมูล จะแตกต่างกับ ค่าความต้านทานสมมูล โดยลักษณะการต่อ และสูตรการหาค่าความจุไฟฟ้าสมมูล แสดงในรูปที่ 2-14



รูปที่ 2-14 ความจุไฟฟ้าสมมูลของตัวเก็บประจุ
ที่ต่อ (ก) แบบอนุกรม และ (ข) แบบขนาน

2.4 สวิตช์ และ รีเลย์

สวิตช์ (Switch: SW) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐานตัวหนึ่ง ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เรามักจะใช้สวิตช์ในการรับข้อมูลจากผู้ใช้ โดยสวิตช์เหล่านี้ อาจมีลักษะเป็นปุ่มกด สวิตช์เปิด-เปิด ทั่วไป หรือ สวิตช์หลายทาง ก็ได้ (ดูรูปที่ 2-15(ก)) โดยสัญลักษณ์ทางวงจรจะขึ้นกับลักษณะสวิตช์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2-15(ข) ในกรณีสวิตช์หลายทาง เราก็จะมีขั้วต่อร่วม ที่เรียกว่า คอมมอน (Common: C) ขั้วต่อปกติปิด (Normally Closed: NC) และ ขั้วต่อปกติเปิด (Normally Open: NO) โดยขั้วต่อปกติปิดจะมีการเชื่อมต่อ ในขณะที่ไม่มีการกดสวิตช์ และ จะตัด ไปต่อขั้วต่อปกติเปิดเมื่อกดสวิตช์ นอกจากนี้ สวิตช์ที่ซับซ้อนบางตัวอาจมีหลายขั้ว (Pole) สำหรับ รูปสวิตช์หลายทางที่นำเสนอในรูปที่ 2-15 จะเป็น สวิตช์แบบซิงเกิลโพลดับเบิลโทรว์ (Single-Pole Double-Throw: SPDT)



สวิตช์แบบต่าง ๆ (ก)

สัญลักษณ์ทางวงจร (ข)

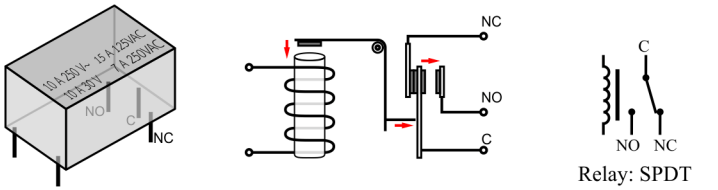
รูปที่ 2-15 (ก) สวิตช์แบบต่าง ๆ และ (ข) สัญลักษณ์ทางวงจรของสวิตช์

รีเลย์ (Relay) เป็นอุปกรณ์ที่อาศัยการทำงานในลักษณะสวิตช์ ร่วมกับแม่เหล็กไฟฟ้า คือ เราจะใช้แม่เหล็กไฟฟ้าในการควบคุมการเปิด-ปิดสวิตช์ รูปที่ 2-16(ก) แสดงลักษณะรีเลย์ ที่มีใช้งานทั่วไปในวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ลักษณะภายในรีเลย์ คือ มันจะมีขดลวดชุดหนึ่ง ที่เมื่อจ่ายไฟให้กับมันแล้ว ก็จะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้น โดยสนามแม่เหล็กนี้ จะดึงดูดโครงสร้างสวิตช์ให้ปิด (หรือเปิด) วงจรอีกด้านหนึ่ง (ดูรูปที่ 2-16(ข)) โดยวงจรทั้งสองด้านนี้ อาจไม่มีความ

เชื่อมโยงกันทางไฟฟ้าเลย บนตัวถังของรีเลย์ มักจะระบุค่าพิกัด กระแส-แรงดัน ของตัวรีเลย์ ทั้งด้านที่เป็นสวิตช์และด้านที่เป็นขดลวด (ขดลวดของรีเลย์ตัวเล็ก จะทนกระแสได้น้อย)

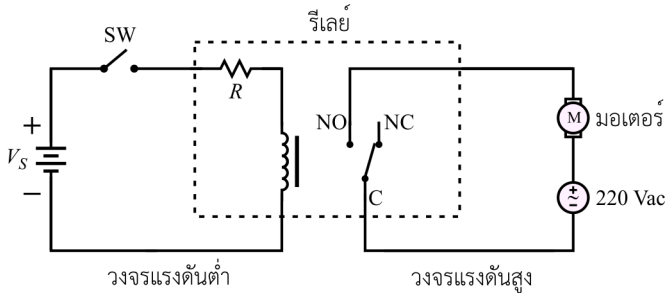
รูปที่ 2-16(ค) แสดงสัญลักษณ์ทางวงจรของรีเลย์ โดยการเรียกชื่อขั้วต่อ จะเหมือนกับ กรณีสวิตช์ คือ มีขั้วคอมมอน ปกติปิด และ ปกติเปิด รีเลย์ขนาดใหญ่อาจมีขั้วเหล่านี้หลาย ๆ ชุดก็ได้



รีเลย์ (ก) ลักษณะโครงสร้างภายใน (ข) สัญลักษณ์ทางวงจร (ค)

รูปที่ 2-16 (ก) ลักษณะภายนอกของรีเลย์ (ข) ลักษณะโครงสร้างภายใน และ (ค) สัญลักษณ์ทางวงจรของรีเลย์

ในการใช้งานเบื้องต้นของรีเลย์ เราอาจใช้มันเป็นสวิตช์ที่แยกวงจรออกจากกัน เช่น หากเราต้องการควบคุมมอเตอร์ที่มีพิกัดกำลังสูง ๆ (เช่น 1 แรงม้า) เราอาจสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่ใช้แรงดันต่ำ แล้ว นำมันมาควบคุมมอเตอร์ ผ่านการทำงานของรีเลย์ ดังแสดงในรูปที่ 2-17 โดยสำหรับ ตัวต้านทาน R ที่อาจถูกติดมาภายในรีเลย์ (หรือต่อภายนอก) นั้น จะทำหน้าที่จำกัดกระแสที่ไหลเข้าขดลวดรีเลย์ ทั้งนี้เพราะขดลวดเหนี่ยวนำจะเปรียบเสมือนตัวนำสำหรับไฟตรง หากไม่มีตัวต้านทาน กระแสปริมาณมากจะไหลผ่านขดลวดนี้ และ ทำให้มันเสียหายได้

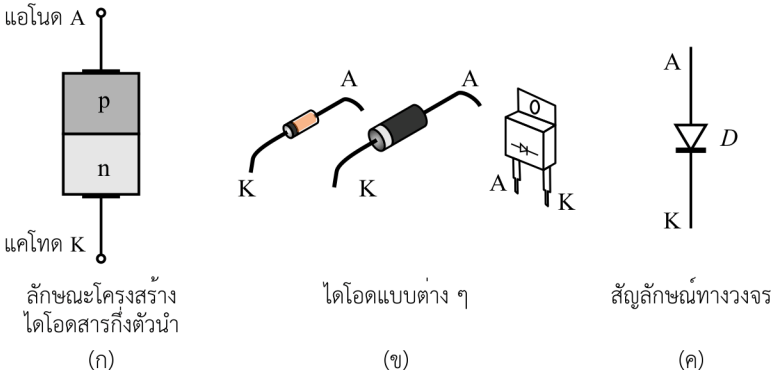


รูปที่ 2-17 ตัวอย่างวงจรที่ใช้รีเลย์ในการควบคุมมอเตอร์

2.5 ไดโอด และ แอลอีดี

ไดโอด (Diode) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน (Si) โดยสารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้สร้างไดโอดนั้น จะต้องถูกเจือ หรือ โด๊ป เพื่อให้มีลักษณะสมบัติที่เหมาะสม โดยเราเรียก สารกึ่งตัวนำที่โด๊ปนี้ว่า เป็น ชนิดพี และ ชนิดเอ็น ขึ้นกับ สารที่เจือ ไดโอด จึงเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากรอยต่อพีเอ็น (ดูรูปที่ 2-18(ก)) โดยขั้วต่อออกมาจากไดโอด มีชื่อเรียก คือ แอโนด (Anode) และ แคโทด (Cathode)

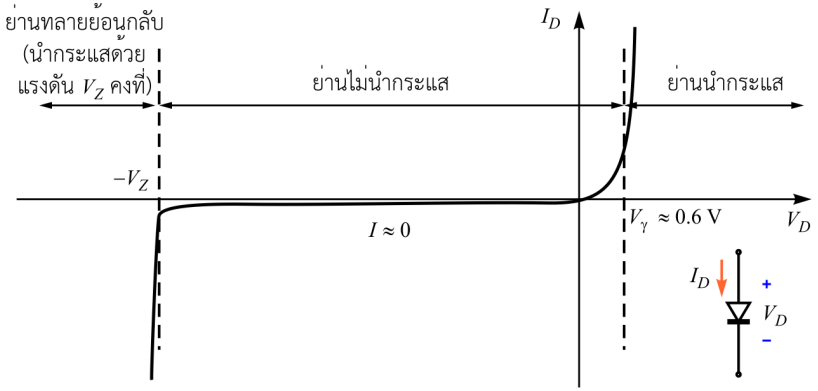
ลักษณะไดโอดที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ มีหลายรูปแบบ (รูปที่ 2-18(ข)) โดยเนื่องจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอด มีลักษณะ ไม่สมมาตร (คือ ไม่เหมือน ตัวต้านทาน ที่สามารถสลับขากันได้) ทำให้ ต้องมีการระบุ สัญลักษณ์เส้นที่บอกว่า ขั้วแคโทดอยู่ด้านใด ไว้บนตัวไดโอดเสมอ สำหรับสัญลักษณ์ทางวงจรของไดโอด แสดงดังรูปที่ 2-18(ค) โดยเรามักจะใช้ ตัวอักษร D ในการระบุว่าเป็นไดโอด



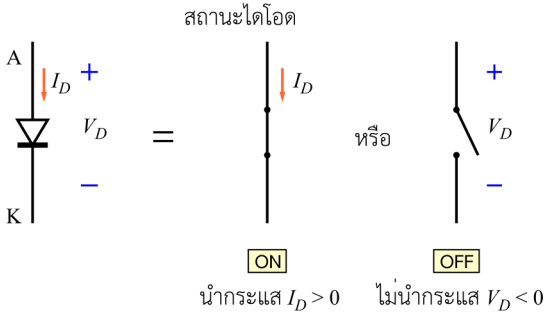
รูปที่ 2-18 (ก) ลักษณะโครงสร้างของไดโอดสารกึ่งตัวนำ
(ข) รูปร่างลักษณะไดโอดแบบต่าง ๆ และ (ค) สัญลักษณ์ทางวงจร

ในการใช้งานไดโอด ซึ่งก็คือ การจ่ายแรงดัน หรือ กระแสให้กับมัน เราจะต้องรู้จัก คำว่า **ไบแอส (Bias)** เสียก่อน การไบแอส มีสองชนิด คือ ไบแอสตาม (Forward Bias) และ ไบแอสย้อน (Reverse Bias) โดย *การไบแอสตาม คือ การจ่ายแรงดันบวก ให้กับ แอโนด* และ การไบแอสย้อน คือ การจ่ายแรงดัน ขั้วบวกให้กับแคโทด

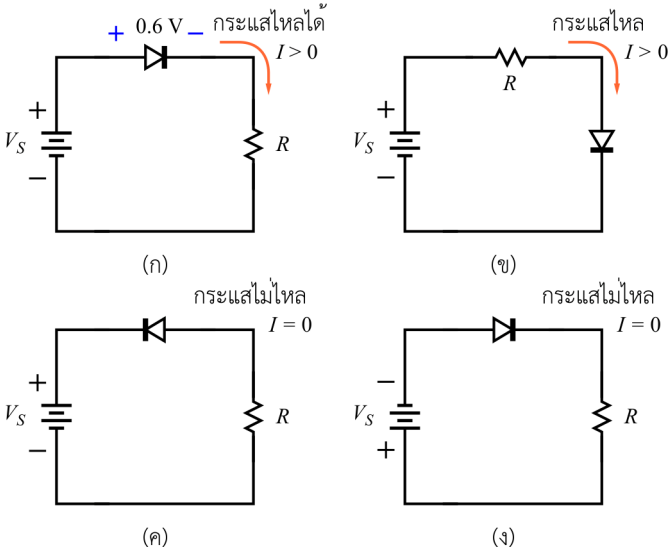
ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของไดโอดทั่วไปที่ทำจากซิลิกอน แสดงดังรูปที่ 2-19 โดยเราจะกำหนดให้ กระแสที่ไหลผ่านจากแอโนด ไปแคโทด มีค่าเป็นบวก I_D และ แรงดันที่ตกคร่อมไดโอด V_D เป็นบวกที่ขั้วแอโนด ดังนั้น ไดโอดจะถูกไบแอสตามเมื่อ $V_D > 0$ ในการใช้งานไดโอดทั่ว ๆ ไป เราจะใช้งานมันเป็นสวิตช์ ซึ่งมันจะทำงานในสองย่าน คือ ย่านนำกระแส (ไดโอด ON) และ ย่านไม่นำกระแส (ไดโอด OFF) นั่นคือ ไดโอดจะให้กระแสไหลผ่านตัวมัน ($I_D > 0$) เมื่อมันมีแรงดันตกคร่อมตัวมัน เกินค่าแรงดันออฟเซต V_γ ($V_D > V_\gamma$) ซึ่งสำหรับไดโอดที่ทำจากซิลิกอน ค่าแรงดันออฟเซตนี้จะมีค่าประมาณ 0.6 โวลต์ สำหรับในย่านที่ไดโอดไม่นำกระแส ไดโอด จะเป็นเสมือนวงจรเปิด (ดูรูปที่ 2-20)



รูปที่ 2-19 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของไดโอดทั่วไปที่สร้างจากซิลิกอน



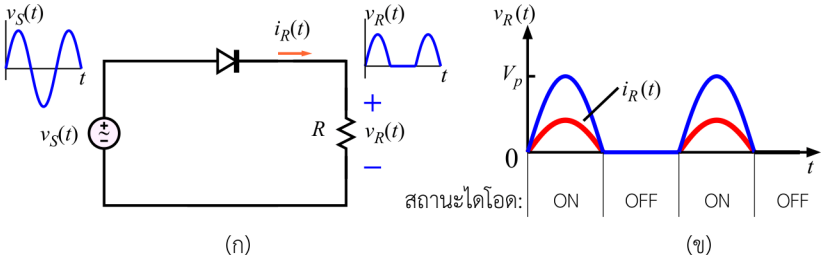
รูปที่ 2-20 สถานะการทำงานของไดโอด คือ นำกระแส และ ไม่นำกระแส



รูปที่ 2-21 ลักษณะการต่อไดโอดในรูปแบบต่าง ๆ โดยไดโอดในวงจร (ก) และ (ข) จะนำกระแส แต่ไดโอดในวงจร (ค) และ (ง) จะไม่นำกระแส

โดยทั่วไป หากเราจะนำไดโอดมาใช้ในวงจร เราจะต้องคำนึงถึง กระแสสูงสุดที่ไดโอดสามารถรับได้ เรียกว่า กระแสไหลตามสูงสุด (Maximum Forward Current) และ แรงดันย้อนกลับสูงสุด (Maximum Reversed Voltage) ซึ่งค่าเหล่านี้ จะระบุอยู่ใน แผ่นข้อมูล ของไดโอด โดยไดโอดทั่วไป เบอร์ 1N4001 จะมีค่ากระแสไหลตามสูงสุดอยู่ที่ 1 แอมแปร์ และ แรงดันย้อนกลับสูงสุดอยู่ที่ 50 โวลต์

วงจรในรูปที่ 2-21 แสดงตัวอย่างลักษณะการต่อไดโอดแบบต่าง ๆ ให้มันนำกระแส และ ไม่นำกระแส โดยไดโอดจะนำกระแสก็ต่อเมื่อ กระแสที่ไหลผ่านตัวมันจะต้องมีค่ามากกว่าศูนย์ เมื่อเราสมมุติให้มันนำกระแส

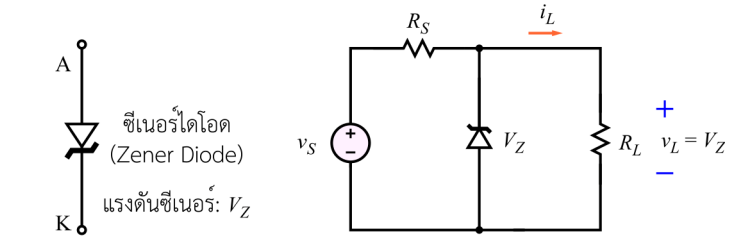


(ก) (ข)

รูปที่ 2-22 (ก) วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น ที่ใช้ไดโอดตัวเดียวในการทำงาน และ (ข) ลักษณะกราฟสัญญาณแรงดัน และ กระแส ที่ตัวต้านทานโหลด R

วงจรในรูปที่ 2-22(ก) แสดงการใช้ไดโอด ใน**วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half-Wave Rectifier)** โดยวงจรนี้ มีการนำไปใช้งานจริง เช่น ในวงจรชาร์จแบตเตอรี่อย่างง่าย โดยเมื่อสัญญาณขาเข้า ที่เป็นไฟสลับ มีทั้งแรงดันค่าบวกและลบ ไดโอด ก็จะทำงาน (คือ นำกระแส) ในช่วงที่แรงดันเป็นบวกเท่านั้น รูปคลื่นในรูปที่ 2-22(ข) แสดงลักษณะแรงดัน และ กระแส ที่ ตัวต้านทาน R สำหรับรายละเอียดเรื่องวงจรเรียงกระแส จะกล่าวอีกครั้งในบทที่ 3

นอกจากไดโอด ที่นำมาใช้เป็นสวิตช์แล้ว ยังมีไดโอดอีกประเภทหนึ่ง ที่ใช้ลักษณะการกลับมานำกระแสอีกครั้ง เมื่อมีการไบแอสย้อนมาก ๆ ที่แรงดัน $-V_Z$ (ดูรูป 2-19) เราเรียกไดโอดประเภทนี้ว่า **ซีเนอร์ไดโอด (Zener Diode)** โดยเมื่อไดโอดนี้นำกระแสในย่านที่เราไบแอสย้อน มันจะมีคุณสมบัติคือ แรงดันที่ตกคร่อมมัน ที่มีชื่อว่า แรงดันซีเนอร์ (Zener Voltage, V_Z) จะคงที่ ซึ่งค่าแรงดันคงที่นี้ มักถูกนำมาใช้สร้างแรงดันอ้างอิงในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดย สัญลักษณ์ และ ตัวอย่างวงจรที่ใช้ซีเนอร์ไดโอด แสดงดังรูปที่ 2-23 โดยในรูปที่ 2-23(ข) เมื่อจ่ายแรงดัน v_S มาก ๆ ค่าแรงดันนี้จะลดลงเป็นแรงดันระดับ V_Z ที่ตัวโหลด ($v_L = V_Z$)

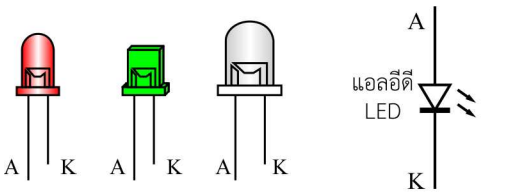


สัญลักษณ์ทางวงจร (ก)

ตัวอย่างการใช้งาน (ข)

รูปที่ 2-23 (ก) สัญลักษณ์ทางวงจรของซีเนอร์ไดโอด และ (ข) ลักษณะอย่างง่ายของ วงจรที่มีการนำซีเนอร์ไดโอดไปใช้งาน

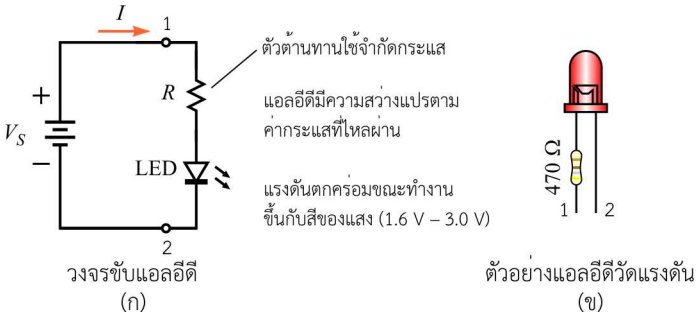
ไดโอดที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ อีกชนิด คือ **แอลอีดี หรือ ไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode, LED)** โดยแอลอีดี ก็คือ ไดโอด ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ ที่เปล่งแสงได้นั่นเอง โดยสีของแอลอีดีจะกำหนดได้จากสารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้สร้าง สำหรับลักษณะของแอลอีดีมีหลายรูปแบบ รูปที่ 2-24(ก) แสดงลักษณะแอลอีดีที่พบเห็นได้ทั่วไป สำหรับข้อกำหนดเรื่องขาของแอลอีดีนั้น จะไม่มีขีดบอกเหมือนไดโอดทั่วไป โดยผู้ใช้ต้องสังเกตจาก ลักษณะภายในตัวแอลอีดี คือ ขั้วภายในที่เล็กกว่า จะเป็นแอโนด (A) และ ขั้วที่ใหญ่กว่าจะเป็นแคโทด (K) สัญลักษณ์ทางวงจรของแอลอีดีแสดงดังรูปที่ 2-24(ข)



แอลอีดีแบบต่าง ๆ (ก)

สัญลักษณ์ทางวงจร (ข)

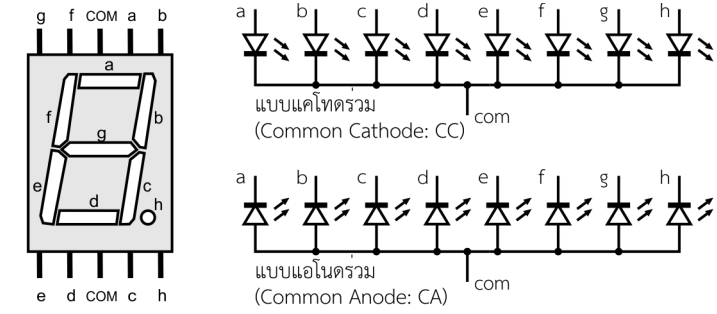
รูปที่ 2-24 (ก) ลักษณะรูปร่างของแอลอีดี และ (ข) สัญลักษณ์ทางวงจร



รูปที่ 2-25 (ก) วงจรขับแอลอีดี ให้เปล่งแสง และ (ข) ลักษณะการนำแอลอีดีที่ต่อกับตัวต้านทาน มาใช้วัดขณะพัฒนาวงจร

ในการใช้งานแอลอีดีนั้น เราจะต้องไบแอสตาม ให้แอลอีดีนั้นนำกระแส โดยกระแสที่ไหลผ่านมัน จะทำให้เกิดแสง โดยความเข้มแสงจะสัมพันธ์กับปริมาณกระแส (กระแสยิ่งมาก แสงยิ่งเข้ม) โดยหากเรานำแอลอีดีมาต่อกับแหล่งจ่ายโดยตรง ก็จะเกิดการนำกระแสผ่านแอลอีดีอย่างมาก ทำให้แอลอีดีเสียหายในทันที ดังนั้นในการใช้งานปกติ เราจะต้องต่อตัวต้านทานเพื่อจำกัดกระแสที่ไหลผ่านแอลอีดี (ดูรูปที่ 2-25 (ก)) โดยในระหว่างการทดลองสร้างวงจร เราอาจต่อ แอลอีดีกับตัวต้านทาน ด้วยการบัดกรี (Soldering) เพื่อใช้วัดแรงดันอย่างหยาบๆ ณ จุดต่างๆ ในวงจร ก็ได้ (ดังรูปที่ 2-25(ข))

สำหรับรูปแบบของแอลอีดีปัจจุบันมีมากมาย เช่น แอลอีดีบางตัว มีสองสี หรือ สามสี ในตัวถังเดียว หรือ **เซเว่นเซกเมนต์ (Seven-Segment)** ที่ใช้แสดงตัวเลข ก็เป็นการนำแอลอีดีหลาย ๆ ตัวมาต่อกัน ลักษณะเซเว่นเซกเมนต์ทั่วไป ที่มีขายตามท้องตลาด มีทั้งแบบ แคโทดร่วม (Common Cathode, CC) และ แอโนดร่วม (Common Anode, CA) โดยมีลักษณะการวางขา และ สัญลักษณ์ทางวงจร ดังแสดงในรูปที่ 2-26(ก) และ (ข) ตามลำดับ



ลักษณะเซเว่นเซกเมนต์ (ก)

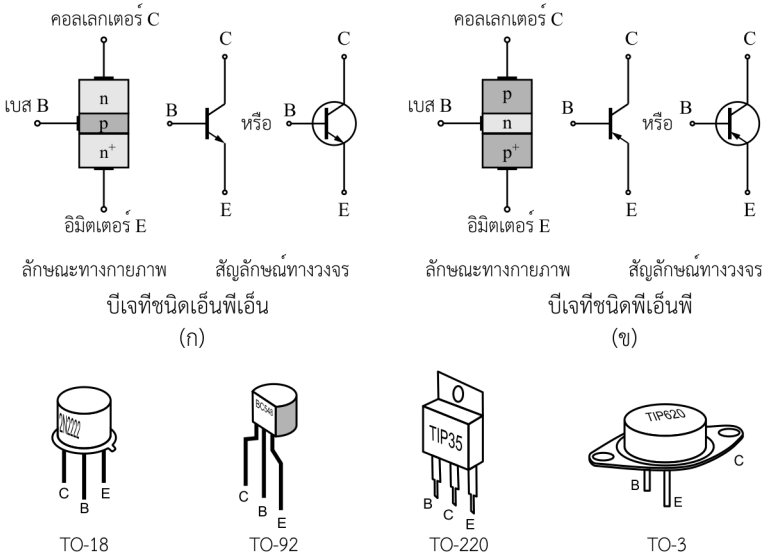
สัญลักษณ์ทางวงจร (ข)

รูปที่ 2-26 (ก) ลักษณะการวางขา และ แอลอีดี ใน เซเว่นเซกเมนต์ทั่วไป และ (ข) สัญลักษณ์ทางวงจร

2.6 ทรานซิสเตอร์

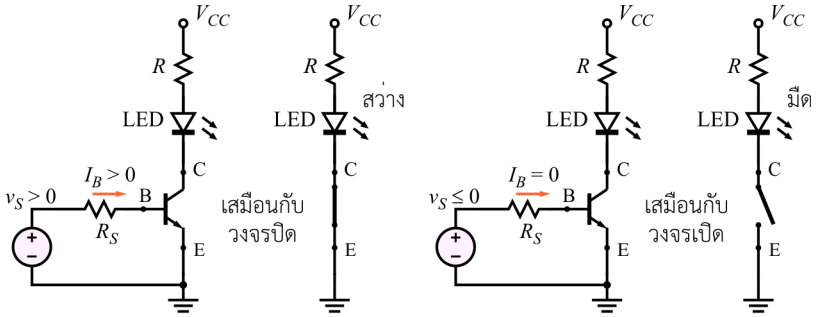
อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์พื้นฐานที่สำคัญมากตัวหนึ่ง คือ **ทรานซิสเตอร์ (Transistor)** ทรานซิสเตอร์เป็นสิ่งประดิษฐ์สามขา ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ โดยคุณสมบัติที่สำคัญของทรานซิสเตอร์ คือ ความสามารถในการ การขยายสัญญาณ (Amplification) และ การสวิตช์ (Switching) จากคุณสมบัตินี้ ทำให้มันถูกใช้แพร่หลาย ทั้งในแบบเป็นอุปกรณ์เดี่ยว ๆ และ ในวงจรรวม

ทรานซิสเตอร์ ถูกแบ่งย่อย เป็นหลายประเภท ซึ่งหลัก ๆ ได้แก่ **ทรานซิสเตอร์แบบรอยต่อไบโพลาร์ หรือ บีเจที (Bipolar Junction Transistor, BJT)** บีเจที ทำจากสารกึ่งตัวนำที่เป็นโครงสร้างรอยต่อพีเอ็นสองรอยต่อ ที่อยู่ใกล้ ๆ กัน โดย บีเจที ยังถูกแบ่งย่อยเป็นสองชนิด คือ **เอ็นพีเอ็น (npn)** และ **พีเอ็นพี (pnp)** ชื่อชนิดของบีเจทีนี้ มาจากชื่อของชั้นรอยต่อที่นำมาสร้าง (ดูรูปที่ 2-27(ก) และ (ข))



รูปที่ 2-27 ลักษณะทางกายภาพ และ สัญลักษณ์ทางวงจรของ
(ก) บีเจทีชนิดเอ็นพีเอ็น และ (ข) บีเจทีชนิดพีเอ็นพี และ
(ค) รูปร่างและชื่อของตัวถังแบบต่าง ๆ ของทรานซิสเตอร์

บีเจที เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สามขา ที่มีชื่อเรียกแต่ละขา คือ **เบส (Base, B) อิมิตเตอร์ (Emitter, E)** และ **คอลเลกเตอร์ (Collector, C)** สัญลักษณ์ทางวงจรของบีเจทีที่แสดงดังในรูปที่ 2-27(ก) และ (ข) มีใช้ทั้งแบบไม่มีและมีวงกลม โดยลูกศรที่ระบุในสัญลักษณ์ จะบ่งบอกทิศทางการไหลของกระแส เมื่อบีเจทีทำงานในโหมดปกติ



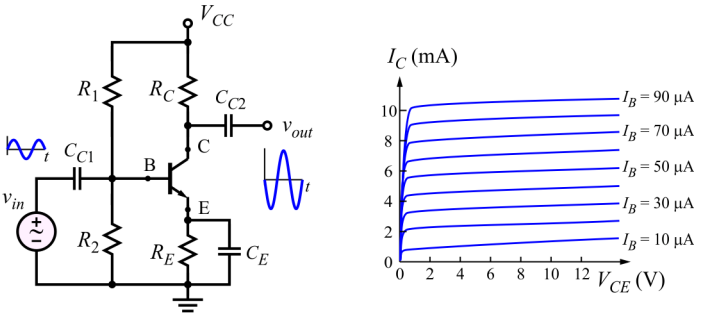
สถานะนำกระแส (แอลอีดีเปล่งแสง) (ก)

สถานะไม่นำกระแส (แอลอีดีไม่เปล่งแสง) (ข)

รูปที่ 2-28 การใช้ทรานซิสเตอร์เป็นสวิตช์ (ก) เปิด และ (ข) ปิด แอลอีดี

รูปที่ 2-27(ค) แสดงรูปร่างของบีเจที ในตัวถังแบบต่าง ๆ ที่เราพบเห็นทั่วไป โดยเบอร์ของทรานซิสเตอร์ จะระบุอยู่บนตัวถังนี้ สำหรับตัวถัง TO-220 และ TO-3 มักจะใช้บรรจุบีเจทีที่สามารถทนกระแสและแรงดันได้สูง ๆ ที่เรียกว่าเป็น บีเจทีแบบกำลัง (Power BJT) โดยโลหะที่ตัวถัง TO-3 จะทำหน้าที่เป็นขาๆ หนึ่งของบีเจทีด้วย

อย่างที่กล่าวไปข้างต้น ทรานซิสเตอร์ สามารถทำงานเป็นสวิตช์ และ ตัวขยายสัญญาณ สำหรับบีเจทีนั้น การทำงานเป็นสวิตช์ทำได้โดยการป้อนกระแสให้กับขาเบส (ดูรูปที่ 2-28) โดยเมื่อกระแสไหลเข้าขาเบสแล้ว บีเจทีชนิดเอ็นพีเอ็น ก็จะเป็นเสมือนวงจรปิดที่ด้าน คอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์ โดยหากเราต่อแอลอีดี (หรือ อุปกรณ์อื่น ๆ เช่น รีเลย์ มอเตอร์) อุปกรณ์เหล่านั้นก็จะทำงาน เพราะเกิดกระแสไหลผ่าน แต่เมื่อเราหยุดป้อนกระแสให้กับขาเบส บีเจทีชนิดเอ็นพีเอ็นก็จะทำหน้าที่เป็นสวิตช์เปิด



(ก) (ข)

การใช้ทรานซิสเตอร์ขยายสัญญาณ

รูปที่ 2-29 การใช้ทรานซิสเตอร์ขยายสัญญาณ (ก) วงจรขยาย และ (ข) ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ด้านขาออก (คอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์) ของบีเจทีชนิดเอ็นพีเอ็น

ถึงตรงนี้ บางคนอาจจะสงสัยว่า ทำไมเราไม่เอาแหล่งจ่ายของเราไปต่อกับแอลอีดี (หรือ อุปกรณ์อื่น ๆ) โดยตรง นั่นเพราะว่า ในการใช้งานวงจรนั้น แหล่งจ่ายของเรา อาจจะไม่สามารถจ่ายกระแสสูง ๆ ได้ เช่นหากแหล่งจ่าย คือ สัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์ ที่มีระดับแรงดันต่ำมาก ๆ (ระดับไม่กี่มิลลิโวลต์) และ แอลอีดีต้องการกระแสในระดับ สิบมิลลิแอมแปร์ในการทำงาน สำหรับการใช้ทรานซิสเตอร์นั้น กระแสเบส I_B ที่ใช้นี้ ปกติจะอยู่ในระดับต่ำมาก และ เราสามารถเลือกทรานซิสเตอร์ให้เหมาะสม ได้จากการดูข้อมูลจำเพาะของทรานซิสเตอร์แต่ละเบอร์ที่มีอยู่

การใช้ทรานซิสเตอร์ขยายสัญญาณ ทำได้โดยการต่อวงจร และ เลือกระดับการไบแอสให้เหมาะสม ด้วยการเลือกใช้ตัวต้านทาน และ ตัวเก็บประจุค่าต่าง ๆ รูปที่ 2-29(ก) แสดงตัวอย่างวงจรขยายสัญญาณที่ใช้บีเจทีตัวเดียว สัญญาณไฟสลับจากแหล่งกำเนิด v_{in} จะสามารถผ่านตัวเก็บประจุ C_{C1} มาที่ขาเบสได้ ซึ่งสัญญาณนี้ จะทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานตามจังหวะของสัญญาณ และ ทำให้เกิดเป็นสัญญาณที่ถูกขยาย (แบบกลับเฟส) ออกไปที่ขั้วคอลเลกเตอร์ ผ่านตัวเก็บประจุ C_{C2}

โดยหากระดับของ กระแสเบส I_B มีค่าเหมาะสม สัญญาณขาออก ก็คือ กระแสคอลเลกเตอร์ I_C ก็จะมีค่าแปรเปลี่ยนตาม I_B ด้วยความสัมพันธ์ คือ

$$I_C = \beta I_B$$

โดย β คือ อัตราขยายกระแส (Current Gain) ซึ่งมีค่าทั่วไป ระหว่าง 10-1000 และจะระบุอยู่ในแผ่นข้อมูลของทรานซิสเตอร์ที่ใช้ ในชื่อตัวแปร h_{FE}

Philips Semiconductors — **Product specification**

NPN switching transistors — 2N2222; 2N2222A

FEATURES

- High current (max. 800 mA)
- Low voltage (max. 40 V).

APPLICATIONS

- Linear amplification and switching.

DESCRIPTION

NPN switching transistor in a TO-18 metal package.
PNP complement: 2N2907A.

PINNING

PIN	DESCRIPTION
1	emitter
2	base
3	collector, connected to case

(1)

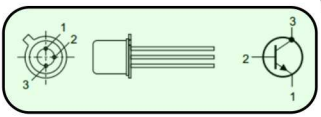


Fig.1 Simplified outline (TO-18) and symbol.

CHARACTERISTICS

T_j = 25 °C unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
I_{CBO}	collector cut-off current 2N2222	I_E = 0; V_{CB} = 50 V	–	10	nA
		I_E = 0; V_{CB} = 50 V; T_{amb} = 150 °C	–	10	µA
I_{CBO}	collector cut-off current 2N2222A	I_E = 0; V_{CB} = 60 V	–	10	nA
		I_E = 0; V_{CB} = 60 V; T_{amb} = 150 °C	–	10	µA
I_{EBO}	emitter cut-off current	I_C = 0; V_{EB} = 3 V	–	10	nA
h_{FE}	DC current gain	I_C = 0.1 mA; V_{CE} = 10 V	35	–	
		I_C = 1 mA; V_{CE} = 10 V	50	–	
		I_C = 10 mA; V_{CE} = 10 V	75	–	
		I_C = 150 mA; V_{CE} = 1 V; note 1	50	–	
		I_C = 150 mA; V_{CE} = 10 V; note 1	100	300	

(2)

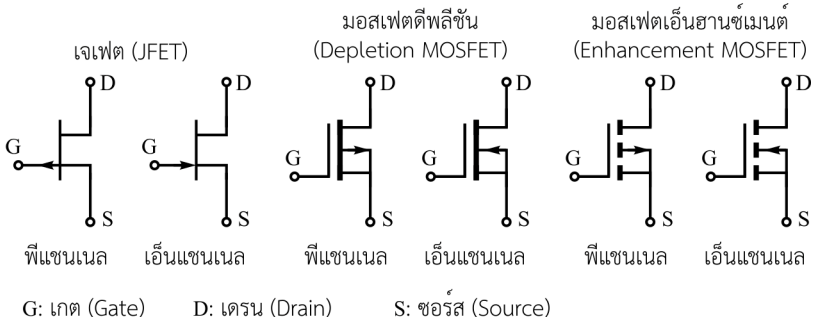
รูปที่ 2-30 ส่วนของแผ่นข้อมูลของบีเจทีเบอร์ 2N2222A ที่ระบุชนิดตัวถัง การวางขา และ ลักษณะสมบัติ โดย h_{FE} คือ อัตราขยายกระแส ที่ต้องพิจารณาในการใช้งาน

รูปที่ 2-30 แสดงส่วนหนึ่งของแผ่นข้อมูลของบีเจทีเบอร์ 2N2222A โดยสิ่งที่เราจะต้องพิจารณาในแผ่นข้อมูลนี้ การวางขาของทรานซิสเตอร์ ว่า ขั้วเบส คอลเลกเตอร์ และ อิมิตเตอร์ อยู่ที่ใด และ ค่าอัตราขยายของทรานซิสเตอร์ h_{FE} โดยค่านี้อาจจะมีค่าขึ้นกับ กระแสคอลเลกเตอร์ I_C และ แรงดันที่ตกคร่อมขั้วคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์ V_{CE} ด้วย นอกจากนี้ ในการออกแบบวงจรทรานซิสเตอร์ เราต้องคำนึงถึงค่าพิกัดด้านต่าง ๆ ซึ่งจะระบุอยู่ในแผ่นข้อมูล

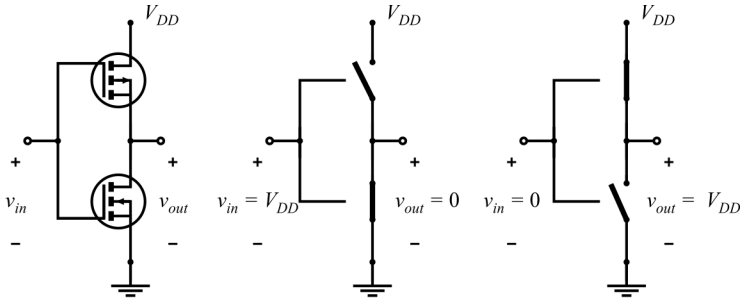
ทรานซิสเตอร์อีกตระกูลหนึ่ง ที่ได้รับความนิยมใช้ คือ **ทรานซิสเตอร์ชนิดปรากฏการณ์สนาม หรือ เฟต (Field Effect Transistor, FET)** เฟต มีด้วยกันหลายชนิด หลัก ๆ ได้แก่ **เจเฟต (Junction FET, J-FET)** และ **มอสเฟต (Metal-Oxide-Semiconductor FET, MOSFET)** โดยมอสเฟต ยังแบ่งย่อยออกไปอีกเป็น มอสเฟตดีพลีชัน และ มอสเฟตเอ็นฮานซ์เมนต์

รูปที่ 2-31 แสดงสัญลักษณ์ทางวงจรของเฟตเหล่านี้ สำหรับชื่อเรียกขาต่าง ๆ นั้น จะต่างจากบีเจที คือ เราเรียกขาที่นำสัญญาณเข้า ว่าเป็น **เกต (Gate)** ซึ่งเทียบเคียงได้กับขาเบส และ ขาที่ส่งผ่านสัญญาณออก คือ **เดรน (Drain)** และ **ซอร์ส (Source)** ซึ่งเทียบเคียงได้กับ ขาคอลเลกเตอร์ และ อิมิตเตอร์ ในบีเจที ตามลำดับ

ข้อดีของการใช้ เฟต เมื่อเทียบกับ บีเจที คือ เฟตแทบจะไม่กินกระแส (พลังงาน) โดย สัญญาณต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับวงจรเฟต จะเป็นสัญญาณแรงดันเป็นหลัก ทำให้การพิจารณาออกแบบวงจรด้วยเฟต *ง่ายกว่า* บีเจที



รูปที่ 2-31 สัญลักษณ์ทางวงจรของทรานซิสเตอร์ประเภท เจเฟต มอสเฟต-ดีพลีชัน และ มอสเฟตเอ็นฮานซ์เมนต์ โดยทรานซิสเตอร์ทั้งสามประเภทมีทั้งแบบพีแชนเนล และ เอ็นแชนเนล



(ก)

v_{in}	v_{out}
0	V_{DD}
V_{DD}	0

in	out
"0"	"1"
"1"	"0"

(ข)

รูปที่ 2-32 ตัวอย่างการใช้มอสเฟตสองตัว ในการสร้างเกตอินเวอร์เตอร์ (ก) ลักษณะวงจร และ การพิจารณาที่ระดับแรงดัน V_{DD} และ ศูนย์โวลต์ และ (ข) ตารางค่าแรงดันขาเข้า-ออก ที่แปลงเป็น ข้อมูลดิจิทัล “0” และ “1”

จากความก้าวหน้าในเทคโนโลยีของการผลิตไอซี ทำให้เราสามารถสร้างเฟตสองชนิด คือชนิด พีแชนเนล และ เอ็นแชนเนล บนแผ่นวงจรรวมเดียวกันได้อย่างดี ซึ่งการพัฒนานี้ นำไปสู่การผลิตวงจรรวมประเภท **ซีมอส (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, CMOS)** ซึ่งเป็นวงจรรวมที่ใช้งานในระบบดิจิทัล โดยตัวอย่างของเกตแบบซีมอส แสดงดังรูปที่ 2-32 ซึ่งเกตนี้ ทำหน้าที่กลับสัญญาณ หรือที่เรียกว่า อินเวอร์เตอร์ (Inverter) รายละเอียดการทำงานของวงจรดิจิทัล จะกล่าวถึงในบทที่ 4

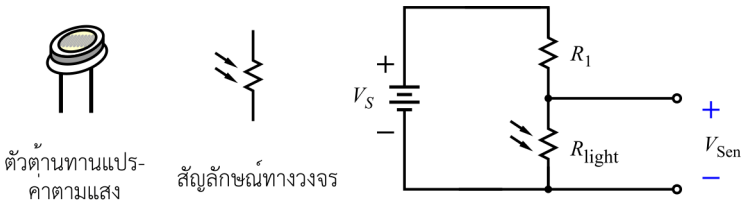
ซีมอสเป็นเทคโนโลยีทันสมัย ที่ทำให้เราสามารถรวมทรานซิสเตอร์จำนวนมากไว้บนชิปเดียวได้ ตัวอย่างเช่น วงจรของซีพียูคอมพิวเตอร์ปัจจุบัน (Core i7 – Sandy Bridge - E) สร้างด้วยเทคโนโลยีซีมอส ที่รวมทรานซิสเตอร์จำนวนมากกว่าสองพันล้านตัว ไว้บนซิลิกอนแผ่นเดียว

2.7 เซนเซอร์ทางแสง

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับแสง หรือ ที่เรียกว่า **อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (Opto-Electronic Devices)** เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญมาก ในการแปลงข้อมูลทางไฟฟ้าไปเป็นข้อมูลทางแสง หรือ ในทำนองกลับกัน โดยตัวอย่างอุปกรณ์ที่มีการนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย ในการสร้างวงจรที่ใช้ตรวจจับแสงและสี คือ ตัวต้านทานแปรค่าตามแสง หรือ แอลดีอาร์ โฟโต้ไดโอด และโฟโต้ทรานซิสเตอร์ โดยอุปกรณ์ที่แปลงสัญญาณแสงไฟเป็นสัญญาณไฟฟ้า จะเรียกรวม ๆ กันว่า **เซนเซอร์ทางแสง (Optical Sensor)**

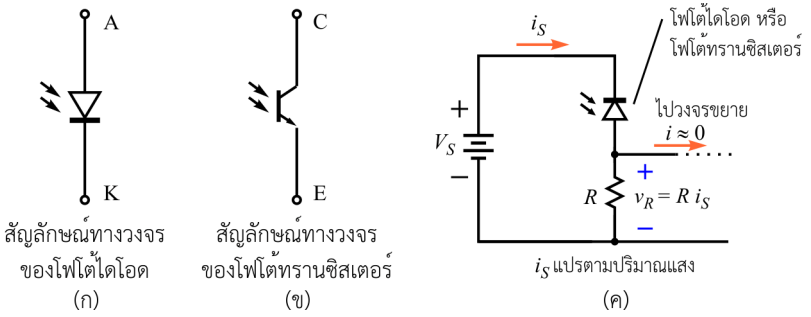
แอลดีอาร์ (Light Dependent Resistor, LDR) จะเป็นเหมือนลักษณะทางไฟฟ้าเหมือนตัวต้านทาน แต่จะมีหน้าต่างรับแสง (ดูรูปที่ 2-33(ก)) โดยปริมาณแสงที่ตกกระทบมัน จะกำหนด ค่าความต้านทานของมัน สัญลักษณ์ทางวงจรของแอลดีอาร์ แสดงดังรูปที่ 2-33(ข)

วงจรอย่างง่ายที่ใช้แอลดีอาร์ในการตรวจจับแสง แสดงดังรูปที่ 2-33(ค) โดยในวงจรนี้ ค่าแรงดัน V_{Sen} เกิดจากการแบ่งแรงดัน ระหว่าง ความต้านทาน R_{light} ของแอลดีอาร์ และ ตัวต้านทาน R_1 โดยตัวต้านทาน R_1 จะต้องมีค่าที่เหมาะสม (หาได้



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 2-33 (ก) ลักษณะของตัวต้านทานแปรค่าตามแสง หรือ แอลดีอาร์ (ข) สัญลักษณ์ทางวงจร และ (ค) ลักษณะวงจรอย่างง่ายที่ใช้แอลดีอาร์ในการตรวจวัดแสง



รูปที่ 2-34 สัญลักษณ์ทางวงจรของ (ก) โฟโต้ไดโอด และ (ข) โฟโต้ทรานซิสเตอร์ และ (ค) ตัวอย่างวงจรที่นำโฟโต้ไดโอด ไปใช้ตรวจจับแสง

จากการทดลอง) เราจึงจะได้สัญญาณที่มีความไวต่อแสงที่กระทบ ในช่วงแรงดันขาออกที่ต้องการ

นอกจากแอลดีอาร์แล้ว **โฟโต้ไดโอด (Photo Diode)** (รูปที่ 2-34(ก)) และโฟโต้ทรานซิสเตอร์ (รูปที่ 2-34(ข)) ก็สามารถนำมาใช้ตรวจจับแสงได้ ในลักษณะคล้าย ๆ กัน โดยความแตกต่าง ของโฟโต้ไดโอด กับ แอลดีอาร์ก็คือ โฟโต้ไดโอด จะแปลงสัญญาณแสง เป็น สัญญาณกระแสไฟฟ้า โดยตรง (ไม่ใช่เป็นค่าความต้านทานอย่างในแอลดีอาร์) โดยสัญญาณนี้อาจมีค่าน้อยแต่สามารถถูกนำไปขยายในขั้นต่อไปได้ (รูปที่ 2-34(ค)) ด้วยวงจรขยายที่นำเสนอในบทที่ 3

สำหรับ **โฟโต้ทรานซิสเตอร์ (Photo Transistor)** จะมีสองขา (ไม่มีขาเบส) เนื่องจาก กระแสเบสที่ถูกนำมาขยายนั้น ได้จากการแปลงแสงเป็นกระแสไฟฟ้าโดยตรง โฟโต้ทรานซิสเตอร์ จึงเสมือน โฟโต้ไดโอด ที่ต่อกับทรานซิสเตอร์ โดยทรานซิสเตอร์นี้ จะมีการขยายกระแสด้วยทำให้ สัญญาณกระแสที่ได้จากแสง มีค่ามากกว่า โฟโต้ไดโอด

2.8 หม้อแปลงไฟฟ้า

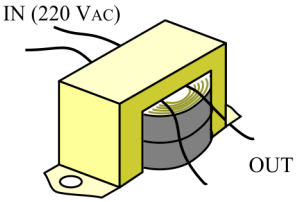
หม้อแปลงไฟฟ้า (Electrical Transformer) เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้า ที่สำคัญที่มีการใช้งานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ หม้อแปลงมีหน้าที่แปลงระดับแรงดันไฟฟ้าจากระดับหนึ่งไปอีกระดับหนึ่ง โดยอาศัยปรากฏการณ์การเหนี่ยวนำทางแม่เหล็ก

โดยทั่วไป หม้อแปลงจะประกอบด้วยขดลวดอย่างน้อย 2 ขดลวด คือ ขดลวดปฐมภูมิ (Primary Coil) และ ขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Coil) โดยขดลวดชุดแรกจะรับไฟสลับแรงดัน v_1 แล้ว แปลงมาเป็นไฟสลับแรงดัน v_2 โดย จำนวนรอบการพันขดลวด เป็นตัวกำหนดขนาดแรงดัน โดยมีความสัมพันธ์ คือ

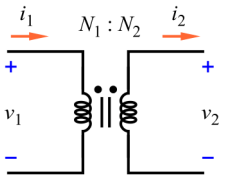
$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} \qquad \text{หรือ} \qquad v_2 = \frac{N_2}{N_1} v_1$$

โดย N_1 และ N_2 คือ จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ และ ขดลวดทุติยภูมิ ตามลำดับ

นอกจาก หม้อแปลงขนาดใหญ่ที่ต้องติดตั้งภายนอกแผ่นวงจร (รูปที่ 2-35(ก)) ยังมีหม้อแปลงขนาดเล็ก สามารถวางรวมกับอุปกรณ์ต่าง ๆ ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ได้

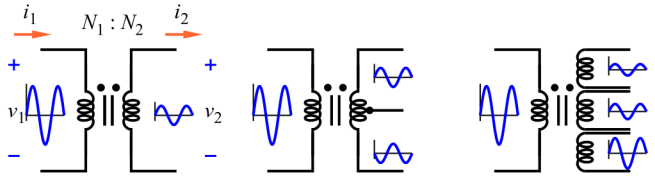


ลักษณะหม้อแปลงไฟฟ้า
(ก)



สัญลักษณ์ทางวงจร
(ข)

รูปที่ 2-35 (ก) ลักษณะหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไป ที่แปลงไฟสลับ 220 โวลต์ เป็นไฟสลับระดับต่ำลง เพื่อใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และ (ข) สัญลักษณ์ทางวงจรของหม้อแปลง



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 2-35 ลักษณะสัญลักษณ์ทางวงจรและรูปคลื่นแรงดัน ของหม้อแปลงชนิดต่าง ๆ (ก) หม้อแปลง 2 ขดทั่ว ๆ ไป (ข) หม้อแปลงแบบมีแท๊ปกลาง และ (ค) หม้อแปลงแบบที่มีหลายขดลวด

(ดูรูปในบทที่ 1 รูปที่ 1-6 ไม้ตียุงไฟฟ้า) โดยหม้อแปลงนี้ มีสัญลักษณ์ทางวงจร ดังแสดงในรูปที่ 2-35(ข)

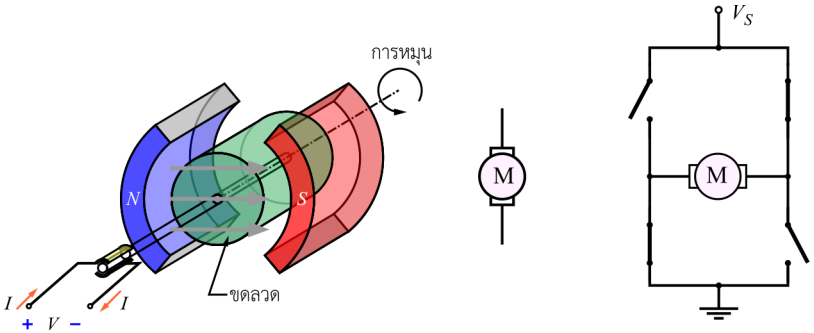
นอกจาก หม้อแปลง 2 ขดลวดแล้ว (รูปที่ 2-35(ก)) ยังมีหม้อแปลงประเภทอื่น ๆ เช่น หม้อแปลงที่มีแท๊ปกลาง ซึ่งเป็นหม้อแปลงที่มีการเชื่อมต่อขดลวด ตรงกลาง เพื่อนำมาใช้เป็นระดับอ้างอิง (ศูนย์โวลต์) ในการสร้างวงจรแหล่งจ่ายไฟที่มีทั้งไฟบวกและลบ (รูปที่ 2-35(ข)) และ หม้อแปลงหลายขดลวด ที่ทำหน้าที่แปลงแรงดันหลาย ๆ ระดับในตัวเดียว (รูปที่ 2-35(ค)) ในการเลือกใช้หม้อแปลง เราจะต้องคำนึงถึงลักษณะการพันขดลวด ค่ากระแส/กำลังพิกัด และ ความถี่ของไฟสลับที่ใช้ (50 เฮิรตซ์ หรือ หม้อแปลงสวิตชิ่งความถี่สูง) ด้วย

2.9 มอเตอร์

มอเตอร์ไฟฟ้า (Electric Motor) เป็นอุปกรณ์เครื่องกลไฟฟ้าที่สำคัญมากในด้านอิเล็กทรอนิกส์ มอเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นดูมีชีวิต (เช่น ใช้ขยับส่วนต่าง ๆ ของหุ่นยนต์) มอเตอร์มีด้วยกันมากมายหลายประเภท

โดยมอเตอร์ประเภทที่มีการใช้งานมากในด้านอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ มอเตอร์ไฟตรงชนิดแม่เหล็กถาวร เซอร์โวมอเตอร์ และ สเต็ปปิ้งมอเตอร์

มอเตอร์ไฟตรงชนิดแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet DC Motor) เป็นมอเตอร์ขนาดเล็กที่ใช้ขับเคลื่อนได้ดี หมุนด้วยความเร็วรอบสูง และอาจถูกลดความเร็วรอบลงตามต้องการโดยการใช้ชุดเกียร์ กำลังการขับเคลื่อนของมอเตอร์นี้จะขึ้นกับขนาด (พิกัด) ของมัน พื้นฐานการทำงานของมอเตอร์ไฟตรง แสดงดังรูปที่ 2-36(ก) โดยกระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก จากการเหนี่ยวนำ โดยสนามแม่เหล็กนี้ จะตัดกับสนามแม่เหล็กอีกชุดหนึ่งที่เกิดจากแม่เหล็กถาวรที่ติดตั้งอยู่ภายในมอเตอร์ ส่งผลให้ สนามแม่เหล็ก 2 ชุดนี้ พยายามเรียงตัวกัน ทำให้เกิดแรงบิด และ การหมุนขึ้น โดยการหมุนต่อเนื่องจะเกิดจาก การเปลี่ยนทิศทางของสนามแม่เหล็ก ที่เกิดจากการเปลี่ยนทิศการไหลของกระแส ที่จุดเชื่อมต่อระหว่างส่วนที่หมุน และ ขั้วต่อ

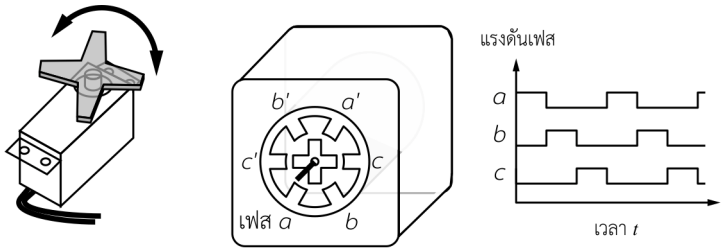


ลักษณะภายในมอเตอร์ไฟตรง (ก) สัญลักษณ์ทางวงจร (ข) การต่อให้มอเตอร์หมุนกลับทิศทางได้ (ค)

รูปที่ 2-36 (ก) ลักษณะภายในมอเตอร์ไฟตรง (ข) สัญลักษณ์ทางวงจร และ (ค) การต่อมอเตอร์แบบเฮดบริดจ์ (H-Bridge) เพื่อให้มอเตอร์หมุนกลับทิศทางได้

ในการควบคุมมอเตอร์ไฟตรงนี้ นอกจากจะสั่งให้มันทำงานในลักษณะหมุน (ON) และ หยุดหมุน (OFF) เราอาจจะต้องการให้มันหมุนกลับทิศทางได้อีกด้วย โดยการทำให้มอเตอร์หมุนกลับทิศทาง ทำได้โดยกลับทิศทางการจ่ายกระแสให้กับมัน ลักษณะวงจรที่ทำให้มอเตอร์หมุนกลับทิศทางได้ แสดงดังรูปที่ 2-36(ค) โดย สวิตช์ทั้ง 4 ตัว อาจจะเป็น ทรานซิสเตอร์ชนิดใดชนิดหนึ่ง หรือ รีเลย์ ก็ได้ เราเรียกการต่อมอเตอร์ลักษณะนี้ว่า การต่อแบบ **เฮดบริดจ์ (H-Bridge)**

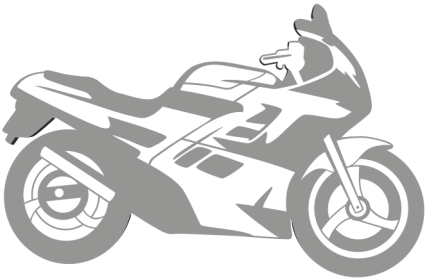
เซอร์โวมอเตอร์ หรือ เซอร์โว (Servo) เป็นมอเตอร์อีกชนิด ที่ใช้ในการควบคุมตำแหน่งได้อย่างแม่นยำ โดยมอเตอร์ชนิดนี้ จะไม่หมุนครบรอบ แต่จะสามารถถูกบังคับ ด้วยค่าสัญญาณแรงดัน ให้หมุนไปอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ การบังคับลักษณะนี้ ใช้มากในการควบคุม ตำแหน่งของแขนกล หรือ มุมของพวงมาลัย หรือ มุมเอียงของแกนต่างๆ



เซอร์โวมอเตอร์ (ก) สเต็ปปิ้งมอเตอร์ (ข) สัญญาณควบคุมสเต็ปปิ้งมอเตอร์ (ค)

รูปที่ 2-37 (ก) ลักษณะเซอร์โวมอเตอร์ (ข) สเต็ปปิ้งมอเตอร์ และ (ค) สัญญาณควบคุมสเต็มปิ้งมอเตอร์แบบ 3 เฟส

สเต็ปปิ้งมอเตอร์ (Stepping Motor) เป็น มอเตอร์อีกประเภทหนึ่งที่ใช้มากในงานอิเล็กทรอนิกส์ โดยมอเตอร์ชนิดนี้ รวมเอาข้อดีของมอเตอร์ไฟตรง และ เซอร์โว เข้าด้วยกัน คือ มันสามารถถูกควบคุมให้หมุนไปได้อย่างต่อเนื่อง และ สามารถถูกบังคับ ให้อยู่ในมุมใดมุมหนึ่งได้ โดยลักษณะของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ ในรูปที่ 2-37(ข) เป็นชนิด 3 เฟส คือมีขดลวดอยู่ 3 ชุด การบังคับให้หมุนหรือหยุดนิ่งทำได้โดยการป้อนสัญญาณแรงดัน ซึ่งทำให้เกิดสนามแม่เหล็กลัพธ์ที่ควบคุมขั้วของแกนมอเตอร์ ให้อยู่ที่มุมต่าง ๆ ตามต้องการ โดยหากเราต้องการให้สเต็ปปิ้งมอเตอร์หมุนต่อเนื่อง เราก็จะต้องป้อนสัญญาณแรงดันที่เปลี่ยนแปลงแบบตามเวลาแบบต่อเนื่อง ในลักษณะที่แสดงในรูปที่ 2-37(ค)



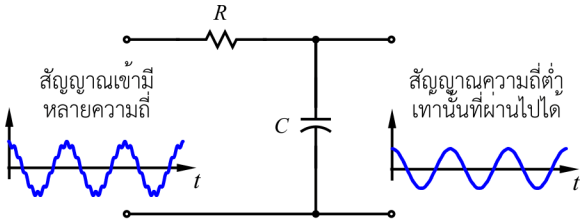
บทที่ 3 วงจรแอนะล็อก

ในบทนี้ จะกล่าวถึง **วงจรแอนะล็อก (Analog Circuit)** ที่เป็นวงจรพื้นฐานที่มีการนำไปใช้งานเป็นส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบ/วงจรอิเล็กทรอนิกส์ กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ (1) วงจรกรอง RC ที่ใช้เป็นวงจรกรองสัญญาณอย่างง่าย (2) วงจรเรียงกระแส ที่ใช้ในภาคไฟเลี้ยง ซึ่งทำหน้าที่แปลงไฟสลับเป็นไฟตรง และ (3) วงจรขยายด้วยทรานซิสเตอร์ และ ออปแอมป์ ความเข้าใจในการทำงานของวงจรเหล่านี้ จะทำให้เราสามารถนำมันไปใช้ ออกแบบวงจรใหม่ ๆ ได้ด้วยตัวเอง

3.1 วงจรกรอง RC

วงจรกรอง มีด้วยกันหลายชนิด ในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงเฉพาะ วงจรกรองอย่างง่าย คือ วงจรกรอง RC ผ่านต่ำ และ วงจรกรอง RC ผ่านสูง โดยการสร้างวงจรกรองอย่างง่าย ทำได้โดย นำตัวต้านทาน และ ตัวเก็บประจุ เพียงอย่างละหนึ่งตัว มาต่ออนุกรมกัน โดยเราเรียก วงจรกรองนี้ว่า **วงจรกรอง RC (RC Filter)**

วงจรกรองผ่านต่ำ (Low-Pass Filter) แสดงดังรูปที่ 3-1 โดยเมื่อป้อนสัญญาณขาเข้าที่มีหลายความถี่ มันจะถูกกรอง ให้เหลือเพียงองค์ประกอบความถี่ต่ำ



วงจรกรองผ่านต่ำ (Low-Pass Filter)

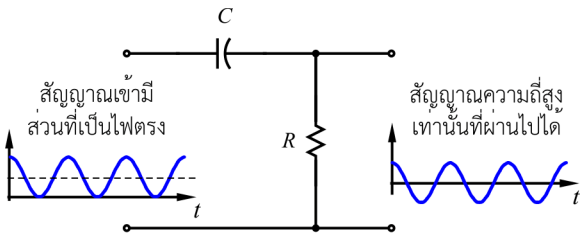
รูปที่ 3-1 วงจรกรอง RC ที่สร้างเป็น วงจรกรองผ่านต่ำ โดยสัญญาณเข้าที่มีหลายความถี่ จะถูกกรอง ให้สัญญาณความถี่ต่ำเท่านั้นที่ผ่านไปได้

เท่านั้น โดยวงจรนี้ มีการนำไปใช้งาน เป็นตัวกรองสัญญาณรบกวนความถี่สูงออกจากสัญญาณที่ต้องการ สำหรับ ความถี่ของสัญญาณ ที่จะถูกกรองออก คือ สัญญาณที่มีค่าความถี่เกินค่าความถี่ตัด (Cutoff Frequency, f_c) ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

ดังนั้น ในการสร้าง วงจรกรอง RC เราจะต้องเลือก ค่า ความต้านทาน R และ ความจุไฟฟ้า C ที่เหมาะสมกับสัญญาณที่เราต้องการกรอง

วงจรกรองผ่านสูง (High-Pass Filter) สร้างได้โดยการต่อตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุในลักษณะที่แสดงในรูปที่ 3-2 โดยเมื่อสัญญาณขาออก คือ แรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน เราจะได้ว่า สัญญาณความถี่ต่ำ (รวมถึง สัญญาณไฟตรง ซึ่งคือสัญญาณที่มีความถี่เป็นศูนย์) จะถูกลดทอนหายไป วงจรกรองผ่านสูงนี้ สามารถนำมาใช้กรอง เอาความถี่สัญญาณที่เราไม่ต้องการ เช่น ไฟตรง และ สัญญาณความถี่ 50 เฮิรตซ์ ออกไปได้ โดยสูตรสำหรับการหาความถี่ตัด เป็นสูตรเดียวกันกับ วงจรกรองผ่านต่ำ



วงจรกรองผ่านสูง (High-Pass Filter)

รูปที่ 3-2 วงจรกรอง RC ที่สร้างเป็น วงจรกรองผ่านสูง โดยสัญญาณเข้าที่มีส่วนที่เป็นไฟตรง (หรือ ส่วนที่มีความถี่ต่ำมาก) จะถูกกรอง ให้ผ่านเฉพาะสัญญาณความถี่สูง

3.2 วงจรเรียงกระแส

ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.5 เราได้กล่าวถึง ไดโอด ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญตัวหนึ่ง สำหรับ ไดโอดทั่วไปมีการใช้งานอยู่แพร่หลายในวงจรที่ทำหน้าที่แปลงไฟสลับ (AC) เป็นไฟตรง (DC) โดยเราเรียกองค์ประกอบหลักของวงจรที่ทำหน้าที่แปลงไฟสลับเป็นไฟตรง นี้ว่า **วงจรเรียงกระแส (Rectifier)**

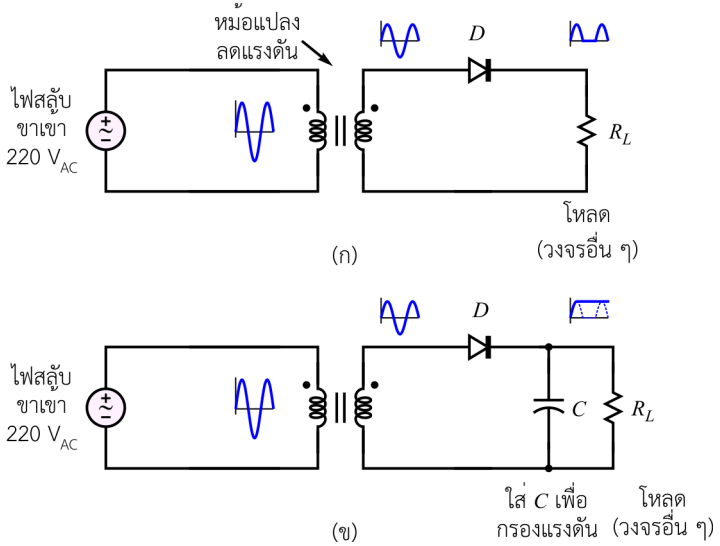
วงจรเรียงกระแสที่มีใช้งาน ทั่วไป คือ วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นที่ใช้หม้อแปลงที่มีแท็ปกลาง และ วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์

วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half-Wave Rectifier) มีรูปแบบวงจรแสดงดังในรูปที่ 3-3(ก) โดยแหล่งจ่ายไฟสลับขาเข้า 220 โวลต์ คือ เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าขาเข้า ที่จ่ายสัญญาณแรงดัน คลื่นรูปไซน์ โดยเมื่อใช้หม้อแปลงลดแรงดันลงแล้ว จะได้สัญญาณแรงดันเคลื่อนรูปไซน์ที่มีขนาดลดลงออกมา และ เมื่อใช้ไดโอดกั้นการไหลของกระแสในทิศทางหนึ่งแล้วจะได้ว่า กระแสที่ไหลเข้าสู่โหลดสามารถไหลได้ในทิศทางเดียว ดังนั้น ไดโอดจะทำงานเป็นเหมือนสวิตช์ปิด-เปิด ทุก ๆ ครึ่งคาบของสัญญาณแรงดัน ลักษณะแรงดันและกระแสที่ได้ จะมีค่าไม่ต่อเนื่อง เป็นรูปครึ่งด้านบวกของสัญญาณไซน์

ในทางปฏิบัติ หากเราต้องการให้ได้สัญญาณไฟตรง ที่มีความสม่ำเสมอมากคือมีค่าแรงดันคงที่ ไม่ขึ้นกับเวลา (เช่น 5 โวลต์คงที่) ดังนั้น เราจึงมีการใช้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ ใส่เข้าที่ขั้วออกของไดโอด ดังแสดงในรูปที่ 3-3(ข) โดยตัวเก็บประจุนี้ มีหน้าที่กรองแรงดันให้สม่ำเสมอมากขึ้น โดยหากเลือกค่า C ที่มีขนาดใหญ่เพียงพอ จะได้ว่า สัญญาณแรงดันที่ไปยังโหลดจะมีค่าคงที่ ทั้งนี้ การคำนวณหาค่า C ที่เหมาะสมจะขึ้นกับ ขนาดของโหลด R_L ซึ่งอาจไม่ทราบล่วงหน้า ดังนั้น ในทางปฏิบัติ เรามักจะใช้ C ที่มีค่ามาก ๆ เช่น 1000 ไมโครฟารัด เพื่อมิให้แรงดันไฟตรงมีค่าลดลง เมื่อมีโหลด

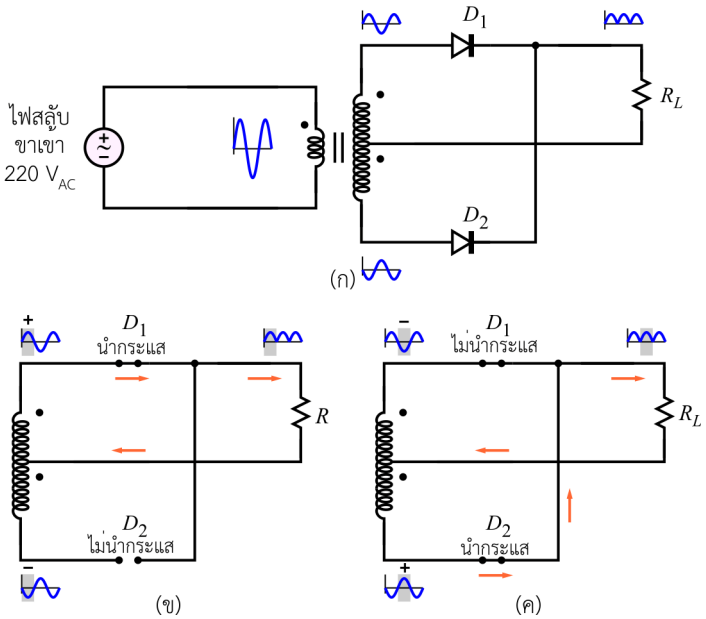
วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นที่นำเสนอนี้ มีข้อเสียคือ การใช้แรงดัน จากแหล่งจ่าย ทำได้เพียงช่วงครึ่งเดียวของลูกคลื่น ดังนั้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งกำลัง จึงได้มีการคิดค้น วงจรเรียงกระแสแบบอื่น ๆ ที่ใช้ทั้งสองช่วงคลื่น (คือช่วงที่มีค่าเป็น บวก และ ลบ) ซึ่งก็คือ วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น

รูปที่ 3-4(ก) แสดง ลักษณะ**วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นที่ใช้หม้อแปลงที่มีแท็ปกลาง (Full-Wave Rectifier with Center-Tapped Transformer)** โดยหม้อแปลงชนิดนี้ จะมีการแบ่งแรงดันออกมาที่จุดกึ่งกลางของขดลวด ทำให้เรา



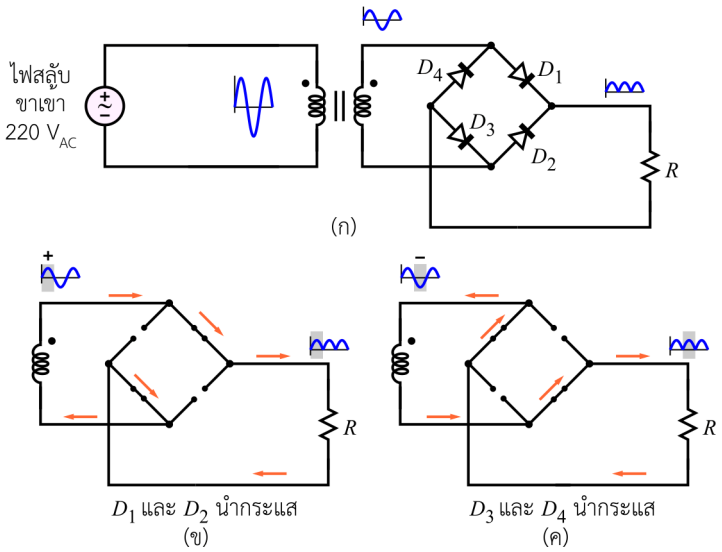
รูปที่ 3-3 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half-Wave Rectifier) ที่ (ก) ไม่มีการกรองแรงดัน และ (ข) มีการกรองแรงดัน ด้วยตัวเก็บประจุ C

สามารถมีแรงดันอ้างอิงเป็นค่าตรงกลาง และ โดยการต่อวงจรในลักษณะที่เป็นวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น*สอง*วงจร จะทำให้เราสามารถเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นได้ โดยไดโอดทั้งสองตัว สลับกันทำงาน ในแต่ละครึ่งช่วงของลูกคลื่น ลักษณะการทำงานของวงจรนี้แสดงดังรูปที่ 3-4(ข) และ 3-4(ค) โดยทิศทางการไหลของกระแสผ่านโหลด R_L จะมีทิศทางเดียว ในทั้งสองช่วงที่พิจารณา



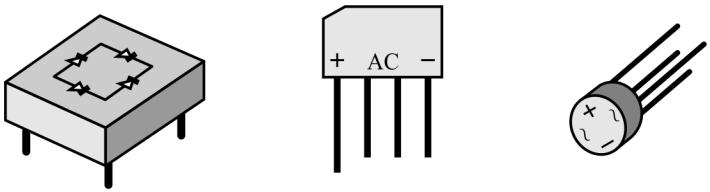
รูปที่ 3-4 (ก) วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นที่ใช้หม้อแปลงที่มีแท็ปกลาง (ข) ลักษณะวงจรในช่วงครึ่งคลื่นแรก (ไดโอด D_1 นำกระแส และ ไดโอด D_2 ไม่นำกระแส) และ (ค) ลักษณะวงจรในช่วงครึ่งคลื่นหลัง (ไดโอด D_1 ไม่นำกระแส และ ไดโอด D_2 นำกระแส)

หากเราไม่มีหม้อแปลงที่มีแท็ปกลาง เราอาจจะใช้ไดโอดสี่ตัว มาต่อเป็นลักษณะบริดจ์ เพื่อให้ได้วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นก็ได้ รูปที่ 3-5(ก) แสดง**วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ (Bridge Rectifier)** โดยไดโอดสี่ตัว ในวงจรนี้ จะผลัดกันทำงานเป็นคู่ ๆ ในแต่ละช่วงครึ่งคลื่นของแรงดันไฟสลับขาเข้า ซึ่งทำให้ผลที่ได้เหมือนกับ วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นที่ใช้หม้อแปลงที่มีแท็ปกลาง



รูปที่ 3-5 (ก) วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นที่ใช้ไดโอดบริดจ์ (ข) ลักษณะวงจรในช่วงครึ่งคลื่นแรก (ไดโอด D_1 และ D_3นำกระแส และ ไดโอด D_2 และ D_4 ไม่นำกระแส) และ (ค) ลักษณะวงจรในช่วงครึ่งคลื่นหลัง (ไดโอด D_1 และ D_3 ไม่นำกระแส และ ไดโอด D_2 และ D_4 นำกระแส)

สำหรับการต่อไดโอดแบบบริดจ์นี้ นอกจากที่เราจะใช้ไดโอดเป็นตัว ๆ มาต่อกันแล้ว เราอาจหาไดโอดบริดจ์ที่ต่อสำเร็จรูป และ บรรจุในตัวถังแบบต่าง ๆ มาใช้ได้ ตัวอย่างลักษณะตัวถังไดโอดบริดจ์ที่พบเห็นได้ทั่วไป แสดงดังในรูปที่ 3-6

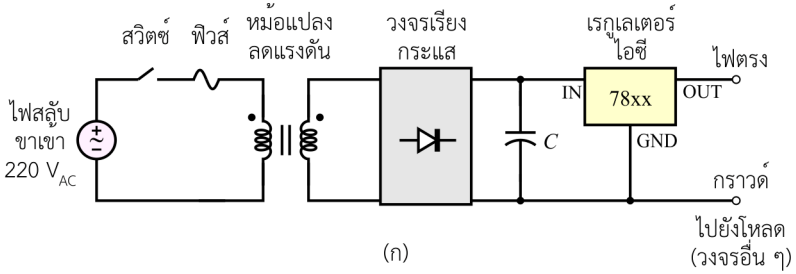


(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 3-6 ลักษณะตัวถังแบบต่าง ๆ ของ ไดโอดบริดจ์

จากที่ผ่านมาในหัวข้อนี้ จะเห็นได้ว่า เราสามารถแปลงไฟสลับ มาเป็นไฟตรง เพื่อใช้เป็นตัวจ่ายแรงดันให้กับส่วนอื่น ๆ ของวงจร การสร้างวงจรเรียงกระแส จะได้ค่าแรงดันที่มีค่าคงที่ ที่กำหนดโดย แรงดันที่ออกมาจากหม้อแปลงที่นำมาใช้ ในทางปฏิบัติ หากเราต้องการมีค่าแรงดัน ที่เหมาะสม เช่น 5 โวลต์ สำหรับ วงจรดิจิทัล หรือ ±9 โวลต์ สำหรับวงจรออปแอมป์ เราอาจจะใช้ วงจรรวมชนิดวงจรคุมค่า หรือ เรกูเลเตอร์ไอซี (Regulator IC)

วงจรแหล่งจ่ายไฟตรง (DC Power Supply) ที่มีองค์ประกอบต่าง ๆ ที่นำเสนอในหัวข้อนี้ แสดงเป็นภาพรวมในรูปที่ 3-7(ก) โดยเบื้องต้น เราจะติดตั้งสวิตช์และฟิวส์ไว้ที่ด้านไฟแรงดันสูง เพื่อป้องกัน มิให้มีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าวงจร ในขณะไม่ทำงาน และ ฟิวส์ก็จะถูกติดตั้งไว้เพื่อป้องกันกระแสเกินพิกัด โดยเมื่อไฟสลับถูกแปลงเป็นไฟตรง ด้วยวงจรเรียงกระแสแล้ว ค่าแรงดันที่ต้องการ จะสร้างได้จากการ



(ก)

IC	OUT	IC	OUT
7805	5 V	7810	10 V
7806	6 V	7812	12 V
7808	8 V	7815	15 V
7809	9 V	7818	18 V
		7824	24 V

(ข)

รูปที่ 3-7 (ก) ลักษณะภาพรวมของวงจรแหล่งจ่ายไฟ ที่ประกอบด้วย สวิตช์ ฟิวส์ หม้อแปลง วงจรเรียงกระแส ตัวเก็บประจุ และ เรกูเลเตอร์ไอซี และ (ข) ลักษณะเรกูเลเตอร์ไอซี ตระกูล 78xx ที่ให้แรงดันไฟตรงที่ขั้วขาออก (OUT) ตามเบอร์ไอซี

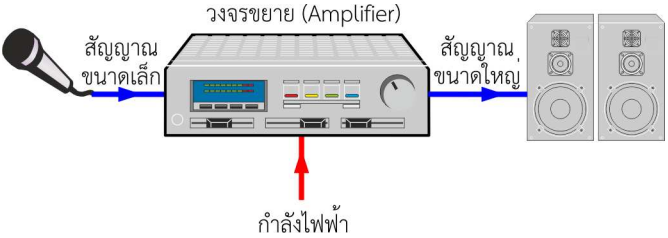
ใช้เรกูเลเตอร์ไอซี โดยเรกูเลเตอร์ไอซี ที่นิยมใช้ ได้แก่ ไอซีตระกูล 78xx (xx = ค่าแรงดันที่ต้องการ) รูปที่ 3-7(ข) แสดงลักษณะตัวถังเรกูเลเตอร์ไอซี และ เบอร์และค่าแรงดัน ที่วงจรสร้างได้

นอกจากเรกูเลเตอร์ไอซี ตระกูล 78xx ที่จ่ายไฟบวก แล้ว มันยังมี เรกูเลเตอร์ไอซี ตระกูล 79xx ที่จ่ายไฟลบ และ เรกูเลเตอร์ชนิดที่ให้แรงดันชนิดปรับค่าได้ ผู้ที่สนใจ สามารถศึกษาการต่อ/สร้างวงจรเหล่านี้เพิ่มเติมได้จากแผ่นข้อมูลของตัวไอซี และ หนังสือเกี่ยวกับการสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ

3.3 วงจรขยายด้วยทรานซิสเตอร์

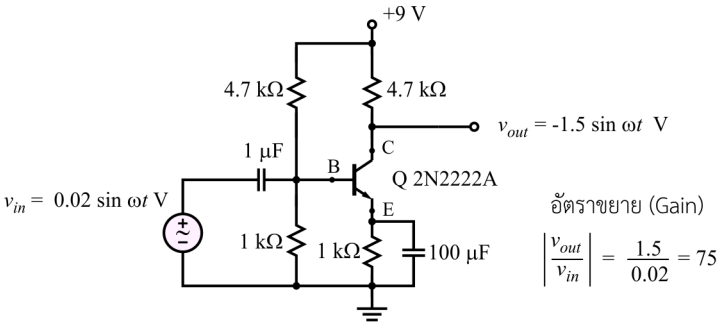
วงจรขยาย (Amplifier) เป็น วงจรประเภทหนึ่ง ที่มีความสำคัญมากในระบบทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยทั่วไป ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบแอนะล็อกแทบทุกชนิด จะต้องมีการขยายสัญญาณ ตัวอย่างที่พบเห็นได้ทั่วไป คือ ระบบเครื่องเสียง (ดูรูปที่ 3-8) ที่มีองค์ประกอบภายใน ประกอบด้วย แหล่งรับสัญญาณขนาดเล็ก (เช่น ไมโครโฟน) วงจรขยาย และ ลำโพง ในวงจรขยายนี้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญที่ทำให้เกิดการขยายสัญญาณได้ ในภาคขยาย คือ ทรานซิสเตอร์ นั่นเอง

จากที่เราได้ทราบกันมาแล้วในหัวข้อ 2.6 ว่า ทรานซิสเตอร์ สามารถทำหน้าที่เป็นได้ทั้งสวิตช์ และ ตัวขยาย การทำให้ทรานซิสเตอร์เป็นตัวขยาย เราจะต้องไบแอสมันอย่างเหมาะสม โดยการไบแอสทรานซิสเตอร์นี้ ทำโดยการใช้ ตัวต้านทาน และ ตัวเก็บประจุร่วมกันในการสร้างวงจรขยาย ตัวอย่างรูปที่ 3-9(ก) เป็นวงจรขยายที่สร้างได้จาก การนำอุปกรณ์แต่ละตัวมาต่อกันบนบอร์ดทดลอง โดยทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N2222A เป็นบีเจทีชนิดเอ็นพีเอ็น ที่มีอัตราขยาย*กระแส* β ประมาณ 35 - 300 ดังนั้นเมื่อนำมาต่อเป็นวงจรขยาย โดยสัญญาณที่ใช้เป็นสัญญาณแรงดัน วงจรขยายที่แสดงในรูปที่ 3-9(ก) ทำให้เกิดอัตราขยายสัญญาณแรงดัน โดยสัญญาณ

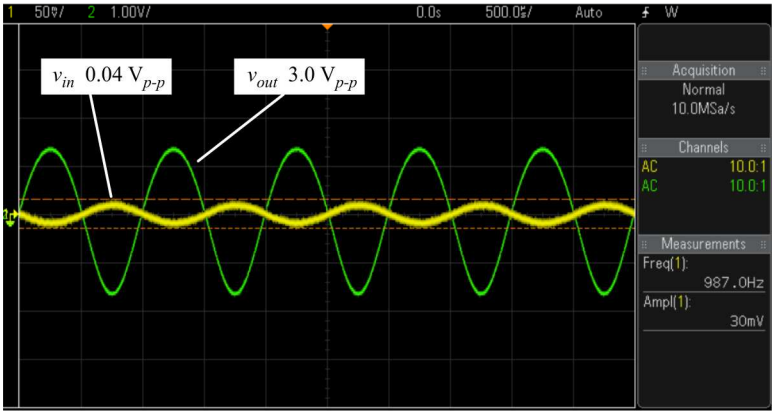


รูปที่ 3-8 ระบบเครื่องเสียง ที่ประกอบด้วยตัวรับสัญญาณ (ไมโครโฟน) วงจรขยาย และ ลำโพง โดยสัญญาณจะถูกขยายในวงจรขยาย ที่มีทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์หลัก

ที่ถูกขยายนี้ จะมีลักษณะกลับเฟส (สัญญาณกลับจากบวกเป็นลบ และ จากลบเป็นบวก) รูปที่ 3-9(ข) แสดงผลการวัดสัญญาณขาเข้า และ สัญญาณขาออกจากวงจรขยายในรูปที่ 3-9(ก) ด้วย**ออสซิโลสโคป (Oscilloscope)** โดยจากผลการวัดจะเห็นได้ว่า วงจรขยายนี้ ขยายสัญญาณแรงดัน ด้วยอัตราขยาย*แรงดัน* เท่ากับ 75



(ก)

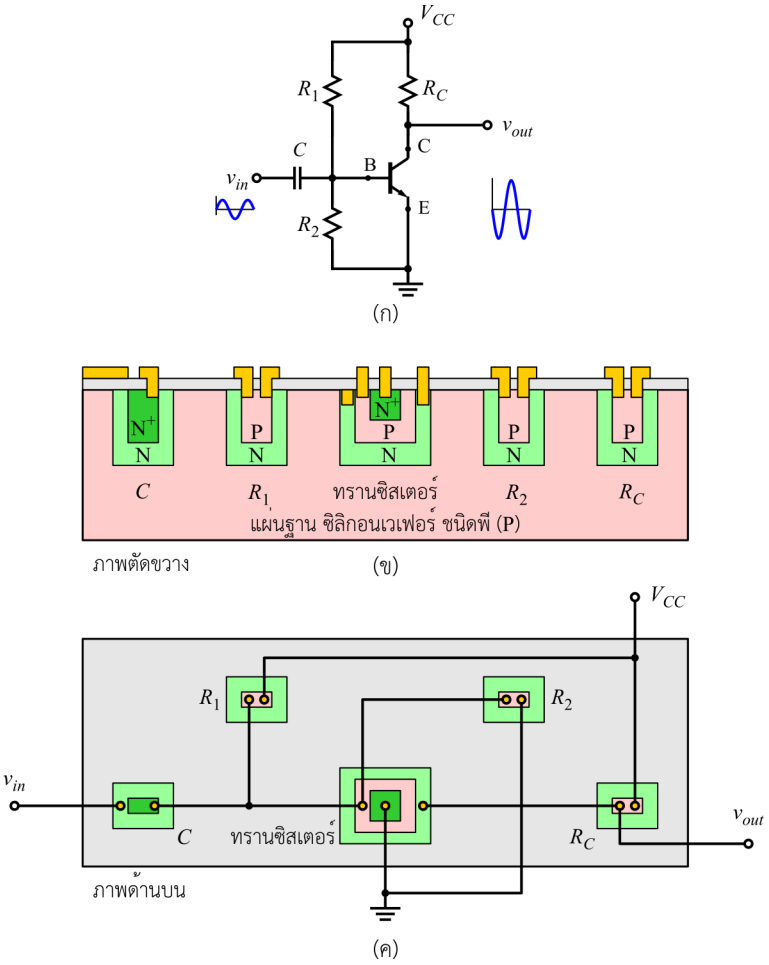


(ข)

รูปที่ 3-9 (ก) วงจรขยายที่ใช้บีเจทีแบบพีเอ็นพี (เบอร์ 2N2222A) กับตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (ข) ลักษณะรูปคลื่นสัญญาณขาเข้า v_{in} และ สัญญาณขาออก v_{out} โดยสัญญาณขาออก เป็นสัญญาณที่ถูกขยายแบบกลับเฟส

โดยทั่วไป การออกแบบวงจรขยายด้วยทรานซิสเตอร์นั้น เป็นงานที่มีความยุ่งยากซับซ้อนอยู่พอสมควร โดย ทรานซิสเตอร์ที่ใช้ออกแบบ ก็มีทั้ง บีเจที (ทั้งชนิดพีเอ็นพี และ ชนิดเอ็นพีเอ็น) และ เฟต (ทั้งเจเฟต และ มอสเฟต) โดย การคำนวณเกี่ยวกับ วงจรขยาย นอกจากเรื่องอัตราขยายแล้ว เรายังต้องคำนึงถึง เสถียรภาพของวงจร ผลตอบสนองเชิงความถี่ และ พิกัดกำลังของวงจร ด้วย ดังนั้นเนื้อหาเกี่ยวกับการออกแบบวงจรขยายด้วยทรานซิสเตอร์ จึงมีรายละเอียด มากเกินกว่าที่จะกล่าวถึงในเอกสารนี้

สำหรับวงจรขยายที่ใช้ทรานซิสเตอร์นั้น นอกจากที่เราจะนำทรานซิสเตอร์ และ อุปกรณ์อื่น ๆ มาประกอบกันเองดังที่แสดงในหัวข้อนี้ เรายังสามารถหาวงจรขยาย ที่มีลักษณะเป็น**วงจรรวม (Integrated Circuit, IC) หรือ ไอซี** มาใช้งาน ตามลักษณะงานของเราได้อีกด้วย ตัวอย่างเช่น ลักษณะวงจรรวม ที่เป็นวงจรขยาย ที่มีวงจรแสดงในรูปที่ 3-10(ก) สามารถนำมาสร้างได้บนแผ่นฐาน ที่เป็นซิลิกอนเวเฟอร์แผ่นเดียวได้ โดยลักษณะโครงสร้างอุปกรณ์ และ การเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 3-10(ข) และ (ค) การใช้งานวงจรขยายประเภทนี้ จะทำให้การต่อวงจรทำได้ง่าย และ รวดเร็วขึ้นมาก

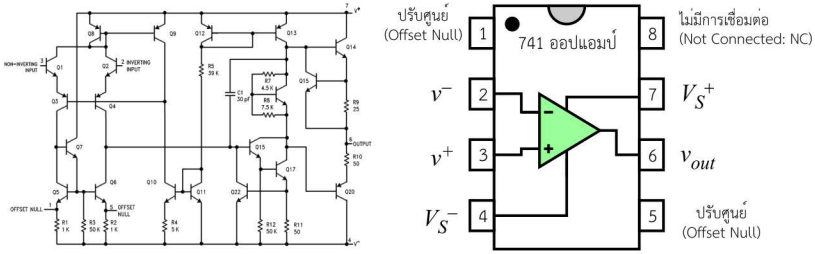


รูปที่ 3-10 (ก) วงจรขยายด้วยบีเจที (ข) ลักษณะภาพตัดขวางของโครงสร้างอุปกรณ์ในวงจร ที่สร้างอยู่บนแผ่นฐาน ซิลิกอนเวเฟอร์ แผ่นเดียว และ (ค) ลักษณะภาพด้านบน ที่แสดงการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ต่าง ๆ บนแผ่นฐานเดียวกัน

3.4 วงจรออปแอมป์

ออปแอมป์ (Op-Amp) หรือ วงจรขยายเชิงดำเนินการ (Operational Amplifier) เป็น วงจรรวมประเภทหนึ่ง ที่สร้างจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เพื่อให้วงจรทำงานตามที่ผู้ออกแบบต้องการ ออปแอมป์นี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย ในวงจรต่าง ๆ เช่น วงจรเปรียบเทียบ วงจรบัฟเฟอร์ วงจรขยาย และวงจรบวก เรานิยมใช้ออปแอมป์ในการสร้างวงจรสำหรับการประมวลผลสัญญาณแอนะล็อกแบบต่าง ๆ รวมถึง การขยายสัญญาณ เนื่องจาก มันใช้งานง่าย และ ได้ผลที่ดี (หากเลือกเบอร์ที่เหมาะสม) ในหัวข้อนี้ เราจะศึกษา การใช้งานออปแอมป์ ในวงจรชนิดต่าง ๆ โดยจะกล่าวถึง ออปแอมป์เบอร์ 741 ซึ่งเป็นออปแอมป์ที่ใช้งานทั่วไปในการพัฒนาวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ลักษณะวงจรภายในของออปแอมป์เบอร์ LM741 (ของบริษัท Texas Instrument) แสดงดังรูปที่ 3-11(ก) โดยในเบื้องต้น *เราไม่จำเป็นต้องทราบลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในตัวออปแอมป์* สำหรับการใช้งานออปแอมป์ สิ่งที่เราต้องทราบคือ การต่อขั้วต่อต่าง ๆ ของออปแอมป์ โดยมันจะมีขั้วต่อหลักอยู่



(ก) (ข)

รูปที่ 3-11 (ก) วงจรภายในของออปแอมป์เบอร์ LM741 (จาก http://www.ti.com/) และ (ข) ลักษณะตัวถัง และ การวางขั้วต่อ

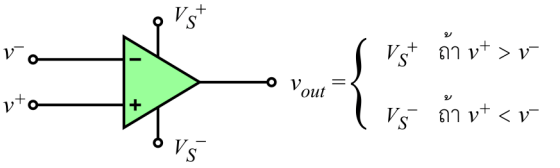
ด้วยกัน 5 ขั้ว (5 ขา) คือ ขั้วแรงดันไฟบวก V_S^+ (ขาที่ 7) ขั้วแรงดันไฟลบ V_S^- (ขาที่ 4) ขั้วขาเข้าแบบกลับเฟส v^- (ขาที่ 2) ขั้วขาเข้าแบบไม่กลับเฟส v^+ (ขาที่ 3) และขั้วขาออก v_{out} (ขาที่ 6) สำหรับสัญลักษณ์ทางวงจรของออปแอมป์ คือรูปสามเหลี่ยมที่แสดงอยู่ภายในตัวถังไอซี ในรูปที่ 3-11(ข)

โดยการทำงานของออปแอมป์ จะทำงานเป็น วงจรขยายในอุดมคติ คือ มีอัตราขยายสูงมาก ($A > 10000$) มีความต้านทานขาเข้าสูง (ทำให้ไม่กินกระแส จากสัญญาณแรงดันขาเข้า) และ มีความต้านทานขาออกต่ำ (คือ สามารถจ่ายกระแสออกไปได้มาก) โดยขนาดของแรงดันขาออก จะสัมพันธ์กับแรงดันขาเข้า คือ

$$v_{out} = A \cdot (v^+ - v^-)$$

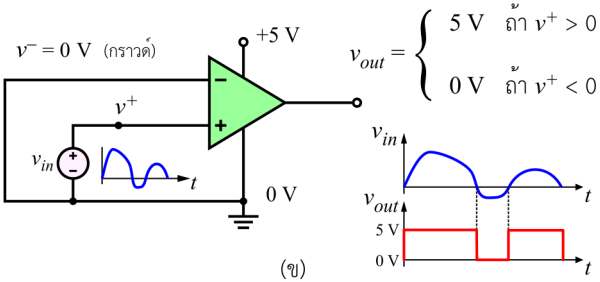
3.4.1 วงจรเปรียบเทียบ

สำหรับการใช้งานพื้นฐานของออปแอมป์ คือ ใช้เป็น**วงจรเปรียบเทียบแรงดัน (Voltage Comparator)** เนื่องจาก ออปแอมป์ทั่วไปมีอัตราขยายสัญญาณสูงมาก ดังนั้น เมื่อสัญญาณขาเข้า $v^+ - v^-$ มีความต่างกันเพียงเล็กน้อย เราจะได้ว่า สัญญาณขาออก v_{out} จะอิ่มตัว คือ มันจะมีค่าแรงดัน เท่ากับแรงดันไฟบวก V_S^+ หรือแรงดันไฟลบ V_S^- ขึ้นกับเครื่องหมายของค่า $v^+ - v^-$ รูปที่ 3-12(ก) แสดงตัวอย่างการใช้ออปแอมป์เป็นวงจรเปรียบเทียบ และ รูปที่ 3-12(ข) เป็นตัวอย่างการต่อสัญญาณใด ๆ เข้ากับ วงจรเปรียบเทียบ โดยจ่ายไฟแรงดัน 0 และ 5 โวลต์ ให้กับออปแอมป์ หากสัญญาณขาเข้า v_{in} นี้ มีขนาดมากกว่า 0 แล้ว สัญญาณออก v_{out} จะมีค่าเป็น 5 โวลต์ ตัวอย่างวงจรลักษณะนี้ สามารถนำมาใช้แปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็น สัญญาณดิจิทัลขนาด 1 บิต โดยสัญญาณออกจะเหลือเพียงสองระดับแรงดัน



วงจรเปรียบเทียบ

(ก)



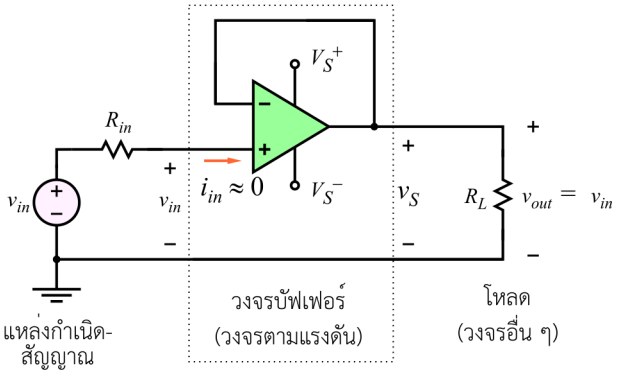
(ข)

รูปที่ 3-12 (ก) วงจรเปรียบเทียบแรงดัน โดยใช้ออปแอมป์ และ (ข) ลักษณะการต่อวงจร เพื่อใช้บอก เครื่องหมาย (บวกหรือลบ) ของสัญญาณ v_{in} โดยการเทียบสัญญาณนี้กับแรงดันกราวด์ (0 โวลต์)

3.4.2 วงจรบัฟเฟอร์ หรือ วงจรตามแรงดัน

วงจรบัฟเฟอร์ (Buffer Circuit) หรือ วงจรตามแรงดัน (Voltage Follower) ดังแสดงในรูปที่ 3-13 เป็นวงจรที่ใช้ออปแอมป์เพียงตัวเดียวในการต่อวงจร วงจรบัฟเฟอร์นี้ทำให้แหล่งกำเนิดสัญญาณ v_{in} ที่ต่ออยู่ด้วยไม่ได้รับผลกระทบจากการมีโหลด เนื่องจากออปแอมป์จะเป็นตัวจ่ายกระแสแทนแหล่งกำเนิดสัญญาณ

สำหรับการใช้วงจรตามแรงดัน จะทำให้แหล่งจ่ายแทบจะไม่ต้องจ่ายกำลังออกมาเลย จากการที่กระแสที่ไหลเข้าสู่ออปแอมป์จะมีค่าน้อยมาก ($i_{in} \approx 0$) ทำให้แรงดันที่เข้าสู่ขาบวกของออปแอมป์จะมีค่าเท่ากับแรงดันของแหล่งจ่าย ในขณะที่โหลดจะได้รับ สัญญาณแรงดันจากออปแอมป์ โดยกำลัง (กระแส และ แรงดัน) ที่ออปแอมป์จ่าย จะมาจากไฟที่เลี้ยงวงจรออปแอมป์



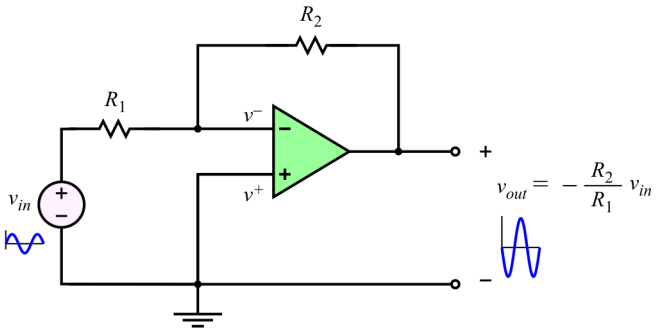
รูปที่ 3-13 วงจรบัฟเฟอร์ หรือ วงจรตามแรงดัน โดยการเชื่อมต่อขั้วขาเข้าแบบกลับเฟส กับ ขั้วขาออกของออปแอมป์ จะทำให้แรงดันที่ขั้วขาออกเท่ากับแรงดันของแหล่งกำเนิดสัญญาณ $v_{out} = v_{in}$ เสมอ

3.4.2 วงจรขยายแบบกลับเฟส

วงจรขยายแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier) เป็นวงจรขยายชนิดหนึ่งที่ มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย โดยลักษณะการต่อวงจรแสดงดังรูปที่ 3-14 ในการออกแบบให้ได้อัตราขยายที่ต้องการ เราสามารถทำได้โดยการเลือกสัดส่วนของค่าความต้านทาน R_1 และ R_2 ให้เหมาะสม โดยค่าอัตราขยายแรงดันของวงจร จะมีค่าคือ

$$A = \frac{v_{out}}{v_{in}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

ดังนั้น ในการใช้งานเป็นวงจรขยาย เราจะเลือกให้ $R_2 > R_1$ เสมอ เช่น ถ้าให้ R_1 = 1 kΩ และ R_2 = 10 kΩ จะได้อัตราขยายแรงดัน A = -10 สำหรับเครื่องหมายลบจะบอกว่า สัญญาณออกจะมีลักษณะกลับเฟส (จากบวกเป็นลบ)



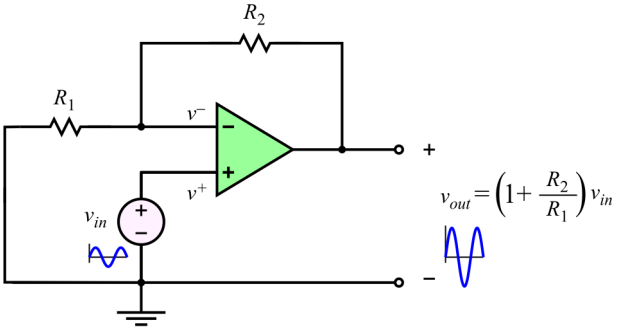
วงจรขยายแบบกลับเฟส

รูปที่ 3-14 วงจรขยายแบบกลับเฟส อัตราขยายสัญญาณแรงดันมีค่าเท่ากับสัดส่วนของตัวต้านทาน R_1 และ R_2 ที่นำมาต่อกับออปแอมป์ โดยสัญญาณที่ถูกขยายมีเฟสกลับเมื่อเทียบกับสัญญาณขาเข้า

3.4.3 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส

นอกจากวงจรขยายแบบกลับเฟสแล้ว เราสามารถสร้างวงจรขยายโดยไม่ให้เกิดการกลับเฟสได้ โดยเราเรียกวงจรนี้ว่าเป็น **วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amplifier)** และ มีลักษณะการต่อวงจรดังรูปที่ 3-15 จากรูปวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส เราสามารถวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันขาเข้า และแรงดันขาออกได้ คือ

$$A = \frac{v_{out}}{v_{in}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$



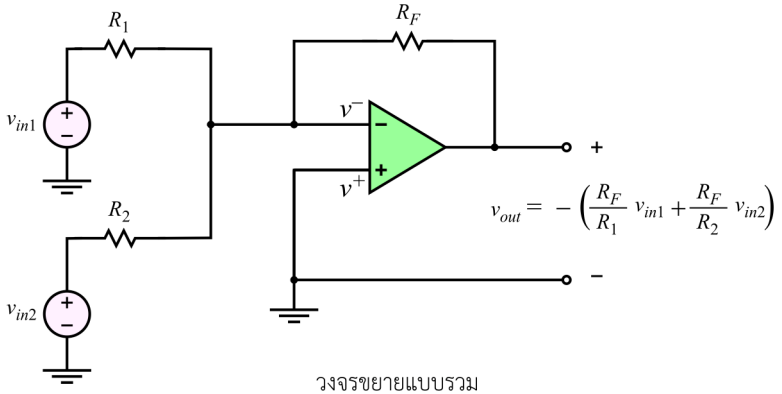
วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส

รูปที่ 3-15 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส อัตราขยายสัญญาณแรงดัน มีค่าเท่ากับ $(1+ R_2/R_1)$ โดยสัญญาณที่ถูกขยายมีเฟสคงเดิม

3.4.4 วงจรขยายแบบรวม

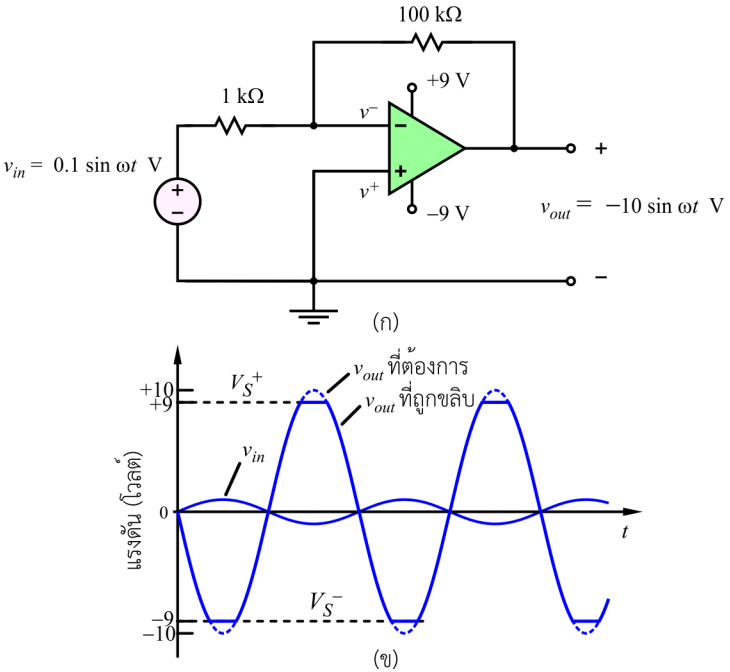
การต่อออปแอมป์กับแหล่งกำเนิดสัญญาณหลาย ๆ แหล่ง ในลักษณะที่เป็นวงจรขยายแบบกลับเฟส ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3-16 สำหรับกรณี 2 แหล่งกำเนิดนั้น เราจะได้สัญญาณขาออกที่รวมเอาสัญญาณจากแหล่งกำเนิดเหล่านี้ เข้ามาด้วยกัน โดยเราเรียกวงจรลักษณะนี้ว่าคือ **วงจรขยายแบบรวม (Summing Amplifier)** และ มีความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณขาออกและสัญญาณขาเข้า คือ

$$v_{out} = -\left(\frac{R_F}{R_1} v_{in1} + \frac{R_F}{R_2} v_{in2} \right)$$



รูปที่ 3-16 วงจรขยายแบบรวม (Summing Amplifier) ที่รวมเอาสัญญาณสองแหล่งเข้าด้วยกัน และ สามารถขยายสัญญาณที่รวมนี้ด้วย

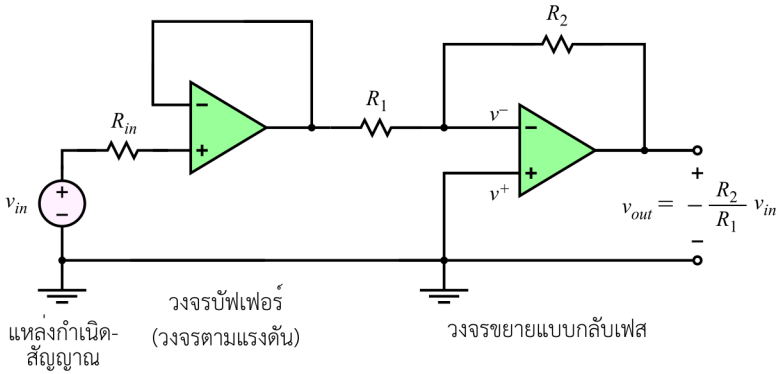
สำหรับวงจรขยาย ที่สร้างจากออปแอมป์ ที่นำเสนอในหัวข้อนี้ เราจะต้องคำนึงถึงค่าสูงสุดของสัญญาณขาออกที่ต้องการด้วย นั่นคือ ค่าสูงสุดนี้จะต้องมีค่าไม่เกิน ค่าแรงดันของแหล่งจ่ายไฟ เนื่องจาก สัญญาณขาออก จะมีลักษณะถูกขลิบที่ค่าระดับแรงดันแหล่งจ่าย เมื่อมันมีขนาดของสัญญาณขาเข้า มากเกินกว่าที่จะขยายได้ ตัวอย่างเช่น วงจรขยาย รูปที่ 3-17(ก) จะมีสัญญาณขาออกที่ถูกขยาย 100 เท่า และถูกขลิบด้วยค่าแรงดันแหล่งจ่าย (±9 โวลต์) เนื่องจากสัญญาณขาเข้ามาขนาดใหญ่เกินไป โดยลักษณะสัญญาณแสดงดังรูปที่ 3-17(ข)



รูปที่ 3-17 (ก) ตัวอย่างวงจรขยายแบบกลับเฟส ที่มีค่าอัตราขยายแรงดันเท่ากับ 100 และ มีสัญญาณขาเข้ามีขนาดสูงสุด 0.1 โวลต์ (ข) ลักษณะสัญญาณขาเข้า v_{in} และ สัญญาณขาออก v_{out} ที่ต้องการและที่ถูกขลิบ

สำหรับ วงจรออปแอมป์ ซึ่งเป็นวงจรแอนะล็อกประเภทหนึ่ง ที่นำเสนอในหัวข้อนี้ เป็นเพียงส่วนหนึ่งของวงจรที่สามารถสร้างได้จริง ในทางทฤษฎี เราสามารถนำออปแอมป์ไปสร้างเป็นวงจรอื่น ๆ ได้อีกมากมาย เช่น วงจรกรองแบบแอคทีฟ วงจรคูณสัญญาณ วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก วงจรล็อก วงจรปริพันธ์ ฯลฯ ออปแอมป์จึงเป็นวงจรรวมที่มีประโยชน์อย่างยิ่ง โดยในทางปฏิบัติ เราสามารถนำวงจรออปแอมป์ต่าง ๆ มาต่อกันได้อย่างแทบไม่มีข้อจำกัด ตัวอย่างเช่น หากเรามีสัญญาณแรงดันขนาดเล็ก (เช่น สัญญาณชีพจรจากร่างกาย หรือ สัญญาณ

คลื่นหัวใจ) เราอาจนำสัญญาณนี้มาใช้ โดยการต่อกับวงจรบัฟเฟอร์ เพื่อป้องกันผลของวงจรที่มีต่อแหล่งกำเนิดสัญญาณ จากนั้น เราจึงขยายสัญญาณด้วยวงจรขยาย โดยวงจรเหล่านี้ สามารถออกแบบได้โดยง่าย โดยใช้ออปแอมป์เป็นอุปกรณ์หลักในวงจร รูปที่ 3-18 เป็นตัวอย่างการสร้างวงจรออปแอมป์ที่ทำหน้าที่ป้องกันและขยายสัญญาณ เพื่อนำออกมาใช้ประมวลผลต่อไป



รูปที่ 3-18 ตัวอย่างวงจรบัฟเฟอร์และวงจรขยายแบบกลับเฟส ที่ทำหน้าที่ป้องกันและขยายสัญญาณ เพื่อนำออกมาใช้ประมวลผลต่อไป

บทที่ 4 วงจรดิจิทัล

วงจรดิจิทัลพื้นฐานประเภทหนึ่ง ซึ่งเป็นพื้นฐานของการทำงานของคอมพิวเตอร์ที่ใช้งานในปัจจุบัน คือ วงจรตรรก และ วงจรคอมบิเนชัน ซึ่งจะกล่าวถึงในบทนี้ โดยในการทำความเข้าใจวงจรเหล่านี้ เราจะต้องใช้พื้นฐานคณิตศาสตร์เรื่องตรรกศาสตร์ และ เลขฐาน ดังนั้น เราจึงเริ่มจากการกล่าวถึง การเชื่อมโยงระหว่างสัญญาณดิจิทัล กับ เลขฐานสอง โดยจะสอดแทรกคณิตศาสตร์ที่จำเป็นต้องใช้ในการทำความเข้าใจวงจรดิจิทัลลงไปด้วย

4.1 สัญญาณดิจิทัล กับ เลขฐานสอง

สัญญาณดิจิทัล (Digital Signal) เป็นสัญญาณที่มีค่าระดับแรงดันเพียงไม่กี่ระดับ โดยจะมีระดับสัญญาณอย่างน้อยที่สุดคือ **สองระดับ (Binary)** ที่เรียกว่า **ระดับสูง (High)** และ **ระดับต่ำ (Low)** โดย สัญญาณนี้ มักจะเป็นสัญญาณแรงดัน สำหรับวงจรดิจิทัลที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เราจะยอมรับว่า ระดับต่ำ คือ ระดับแรงดัน ระหว่าง 0.0 ถึง 0.8 โวลต์ และ ระดับสูง คือ ระดับแรงดันระหว่าง 2.0 ถึง 5.0 โวลต์ โดยการแบ่งสัญญาณเป็นสองระดับนี้ เปรียบเทียบได้กับ ค่าความจริง **จริง (True, T)** และ **เท็จ (False, F)** ในตรรกศาสตร์ หรือ เทียบเป็น **ลอจิก “1”** และ **ลอจิก “0”** ตารางที่ 4-1 เปรียบเทียบปริมาณต่าง ๆ ในระบบดิจิทัล

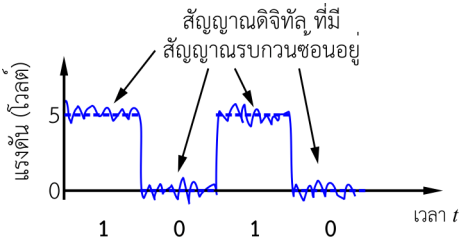
ตารางที่ 4-1 การเปรียบเทียบปริมาณต่าง ๆ ในระบบดิจิทัล

ค่าความจริง	ลอจิก	ระดับแรงดัน	ระดับ
T (True, จริง)	"1"	2.0 - 5.0 V	High (สูง)
F (False, เท็จ)	"0"	0.0 - 0.8 V	Low (ต่ำ)

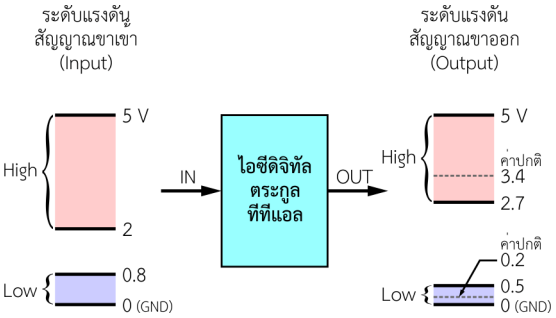
หากเราเทียบ สัญญาณดิจิทัล กับ สัญญาณแอนะล็อก จะเห็นได้ว่า สัญญาณแอนะล็อกซึ่งมีค่าต่อเนื่องสามารถเก็บข้อมูลได้มาก แต่ข้อเสียประการหนึ่งของสัญญาณแอนะล็อก คือ มันมีความไวต่อ**สัญญาณรบกวน (Noise)** มาก ดังนั้น ในวงจรแอนะ-ล็อกเรามักจะต้องใช้แรงดันที่ค่อนข้างสูง และ จะต้องมีการขยายสัญญาณเพื่อให้ข้อมูลคงอยู่เสมอ สำหรับสัญญาณดิจิทัลนี้ มันมีข้อดีคือ แม้ระบบ (วงจรดิจิทัล) ได้รับสัญญาณรบกวนมาก แต่หากระดับแรงดันยังไม่ถูกเปลี่ยนแปลงไปมากเกินไป สัญญาณดิจิทัลก็ยังคงส่งข้อมูลได้อย่างถูกต้อง รูปที่ 4-1 แสดงตัวอย่างสัญญาณดิจิทัล ที่มีสัญญาณรบกวนซ้อนอยู่ แต่เรายังคงสามารถอ่านค่าของข้อมูลที่เก็บอยู่ในสัญญาณนี้ได้อย่างถูกต้อง

สำหรับไอซีดิจิทัล ที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย คือ ไอซีตระกูล**ทีทีแอล (TTL)** ซึ่งย่อมาจาก Transistor-Transistor Logic (ทรานซิสเตอร์-ทรานซิสเตอร์ลอจิก) โดยไอซีตระกูลนี้ใช้ทรานซิสเตอร์ชนิดบีเจทีเป็นองค์ประกอบหลัก

สำหรับมาตรฐานระดับแรงดันขาเข้าและแรงดันขาออกของไอซีดิจิทัลตระกูลทีทีแอล จะมีความต่างกันอยู่บ้างในรายละเอียด โดยในรูปที่ 4-2 แสดง ระดับแรงดันสัญญาณขาเข้า และ ระดับสัญญาณแรงดันขาออก ที่ใช้ได้กับไอซีตระกูลนี้



รูปที่ 4-1 ตัวอย่างสัญญาณข้อมูลดิจิทัล ที่มีสัญญาณรบกวน (Noise) ซ้อนอยู่ โดยข้อมูลนี้แทนด้วยเลขฐานสอง คือ 1010_2



รูปที่ 4-2 มาตรฐานระดับแรงดันสัญญาณขาเข้า และ
แรงดันขาออก ของไอซีดิจิทัลตระกูลทีทีแอล

สัญญาณดิจิทัลหนึ่งสัญญาณ ที่มีสองระดับ เปรียบได้เสมือนกับ เลขฐานสองหนึ่งหลัก ดังนั้น ในการประมวลข้อมูลในระบบดิจิทัล เรามักจะนำเสนอข้อมูลนี้ด้วยตัวเลขในระบบเลขฐานสอง ในระบบเลขฐานสอง เรามีตัวฐานคือ เลขยกกำลังของสอง ในขณะที่เลขฐานสิบ เรามีตัวฐานคือ เลขยกกำลังของสิบ เช่น 2557 ฐาน 10 ในระบบเลขฐานสอง เราเขียนได้เป็น

$$2557 = (2\times10^{3}) + (5\times10^{2}) + (5\times10^{1}) + (7\times10^{0})$$

สำหรับเลขฐานสอง ตัวอย่างเช่น 1010_2 เราจะหาค่าในระบบเลขฐานสิบได้คือ

$$1010_2 = (1\times2^{3}) + (0\times2^{2}) + (1\times2^{1}) + (0\times2^{0})$$

โดยเราสามารถแปลงเลขฐานสองให้เป็นเลขฐานสิบได้โดยการคำนวณผลรวมข้างต้น คือ $1010_2 = 8 + 0 + 2 + 0 = 10$

ตารางที่ 4-2 แสดงตัวอย่างการนำเสนอจำนวนเต็ม 0 ถึง 15 ในระบบเลขฐานต่าง ๆ โดยสำหรับเลขฐานสอง เราจะต้องใช้เลข 4 หลัก หรือ 4 บิต (bits) ในการนำเสนอ เนื่องจากเลขฐานสองแต่ละหลัก เก็บข้อมูลได้เพียง 0 กับ 1 เท่านั้น โดยปกติบิตที่อยู่ซ้ายสุด (มีค่าประจำหลักมากที่สุด) จะถูกเรียกว่า **MSB (Most Significant Bit, บิตที่มีนัยสำคัญสูงสุด)** และ บิตที่อยู่ขวาสุด (มีค่าประจำหลักน้อยที่สุด) จะถูกเรียกว่า **LSB (Least Significant Bit, บิตที่มีนัยสำคัญต่ำสุด)** โดยทั่วไปในระบบคอมพิวเตอร์ เราจะกำหนดให้ 8 บิต คือ 1 ไบต์ (Byte)

ตารางที่ 4-2 การนำเสนอ 0 ถึง 15 ในระบบเลขฐานต่าง ๆ

เลขฐาน 10	เลขฐาน 2	เลขฐาน 8	เลขฐาน 16
0	0000	0	0
1	0001	1	1
2	0010	2	2
3	0011	3	3
4	0100	4	4
5	0101	5	5
6	0110	6	6
7	0111	7	7
8	1000	10	8
9	1001	11	9
10	1010	12	A
11	1011	13	B
12	1100	14	C
13	1101	15	D
14	1110	16	E
15	1111	17	F
	MSB LSB		

MSB = Most Significant Bit, LSB = Least Significant Bit

ในบางครั้ง เราจะใช้ เลขฐานสิบหก ในการนำเสนอ ค่าสัญญาณดิจิทัล เนื่องจากการเขียนเลขฐานสองจำนวนใหญ่ ๆ ทำได้ยาก ทั้งนี้ เลขฐานสิบหก มีข้อดี คือ ตัวเลขเพียงตัวเดียว (หลักเดียว) ในเลขฐานสิบหกนี้ สามารถแทน เลขสี่ตัว (สี่หลัก) ในระบบเลขฐานสอง

การแปลงเลขฐานสิบเป็นเลขฐานสอง ทำได้โดยการหาเศษจากการหารด้วยสองไปเรื่อย ๆ ดังแสดงในตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่าง จงแปลงเลข 25 ในเลขฐานสิบเป็นเลขฐานสอง

		จำนวนเต็ม	**เศษ**
25 / 2	=	12	1
12 / 2	=	6	0
6 / 2	=	3	0
3 / 2	=	1	1
1 / 2	=	0	1

25_{10} = 11001_2

โดย 11011_2 แปลงเป็นเลขฐานสิบหกได้ คือ 19_{16} หรือเขียนเป็น 0x19 โดยในทางคอมพิวเตอร์ เรานิยมใช้ ‘0x’ นำหน้าตัวเลขฐานสิบหก

สำหรับ 2557 ฐานสิบ เราแปลงได้เป็น 100111111101_2 และ $9FD_{16}$

4.2 ตรรกศาสตร์ และ วงจรตรรก

ในตรรกศาสตร์ เราคำนึงถึง ค่าความจริง (ค่าจริง หรือ เท็จ) ซึ่งสามารถเทียบได้กับลอจิก “1” หรือ “0” หรือ ระดับสูงหรือต่ำ สำหรับสัญญาณดิจิทัล โดยในทางตรรกศาสตร์ เรามีตัวดำเนินการพื้นฐาน คือ “และ” “หรือ” และ “นิเสธ” โดยตัวดำเนินการเหล่านี้ สามารถเทียบได้กับ สัญลักษณ์ “แอนด์ (AND)” “ออร์ (OR)” และ “นอต (NOT)” ในพีชคณิตบูลีน (Boolean Algebra) ดังแสดงในตารางที่ 4-3

ในการแสดงการคำนวณเกี่ยวกับ ตรรกศาสตร์ เรามักจะใช้ **ตารางค่าความจริง (Truth Table)** ในการนำเสนอผลของการดำเนินการ ในกรณีที่ค่าตัวแปรต้น มีค่าต่างๆ ตัวอย่าง ตารางค่าความจริงของ การดำเนินการ แอนด์ ออร์ และ นอต แสดงดังในรูปที่ 4-2

ตารางที่ 4-3 สัญลักษณ์ของตัวดำเนินการแอนด์ ออร์ และ นอต

ชนิด	สัญลักษณ์ ในตรรกศาสตร์	สัญลักษณ์ ในพีชคณิตบูลีน
แอนด์ (AND)	$x \wedge y$	$x \cdot y$ หรือ xy
ออร์ (OR)	$x \vee y$	$x + y$
นอต (NOT)	$\neg x$	$\bar{x}$ หรือ x'

ค่าตัวแปร		ผลลัพธ์	
x	y	x·y	x+y
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	1

(ก)

x	$\bar{x}$
0	1
1	0

(ข)

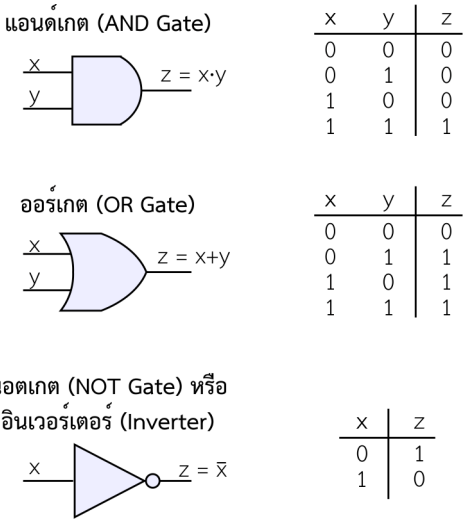
รูปที่ 4-2 ตารางค่าความจริงของการดำเนินการ (ก) แอนด์ และ ออร์ และ (ข) นอต

กฎพื้นฐานในพีชคณิตบูลีน หากเรานำ ตัวดำเนินการ แอนด์ ออร์ และ นอต มาใช้ เราอาจต้องใช้ กฎต่าง ๆ ต่อไปนี้ ในการ วิเคราะห์หาผลลัพธ์

(กฎการเปลี่ยนหมู่การแอนด์)	x•y•z	=	x•(y•z)	=	(x•y)•z
(กฎการเปลี่ยนหมู่การออร์)	x+y+z	=	x+(y+z)	=	(x+y)+z
(กฎการสลับที่การแอนด์)	x•y	=	y•x		
(กฎการสลับที่การออร์)	x+y	=	y+x		
(กฎการกระจายการแอนด์)	x•(y+z)	=	x•y+x•z		
(กฎการกระจายการออร์)	x+(y•z)	=	(x+y)•(x+z)		
(เอกลักษณ์การแอนด์)	x•1	=	x		
(เอกลักษณ์การออร์)	x+0	=	x		
	x•0	=	0		
	x+1	=	1		
	x•x	=	x		
	x+x	=	x		
	x•(x+y)	=	x		
	x+(x•y)	=	x		
	x•x’	=	0		
	x+x’	=	1		
	(x’)’	=	x		
(กฎของ เดอร์มอร์แกน 1)	(x’)•(y’)	=	(x+y)’		
(กฎของ เดอร์มอร์แกน 2)	(x’)+(y’)	=	(x•y)’		

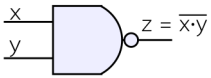
สำหรับ ในวงจรดิจิทัล ที่ใช้ในการประมวลสัญญาณดิจิทัล เรามีการสร้าง **ลอจิกเกต (Logic Gate)** ชนิดต่าง ๆ โดย เกตพื้นฐาน ที่มีการดำเนินการเหมือนกับตัวดำเนินการพื้นฐานในตรรกศาสตร์ คือ **แอนด์เกต (AND Gate) ออร์เกต (OR Gate) และ นอตเกต (NOT Gate) หรือ อินเวอร์เตอร์ (Inverter)** มีสัญลักษณ์ทางวงจร แสดงในรูปที่ 4-3

นอกจากเกตพื้นฐานแล้ว เรายังมีการใช้เกตดิจิทัลอื่น ๆ (ดูรูปที่ 4-4) ได้แก่ **แนนด์เกต (NAND Gate) นอร์เกต (NOR Gate) เอ็กซ์ออร์เกต (XOR Gate)** หรือ เอ็กซ์คลูซิฟออร์เกต (Exclusive OR Gate) และ **เอ็กซ์นอร์เกต (XNOR Gate)** หรือ เอ็กซ์คลูซิฟนอร์เกต (Exclusive NOR Gate) โดยเกตเหล่านี้ ถูกสร้างขึ้นเพื่อให้เราสามารถนำมาใช้สร้างวงจรลอจิกลักษณะต่าง ๆ ได้อย่างสะดวก



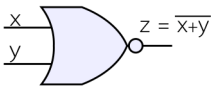
รูปที่ 4-3 สัญลักษณ์ทางวงจร ของ แอนด์เกต ออร์เกต และ นอตเกต และ ตารางค่าความจริงของการดำเนินการด้วยเกตเหล่านี้

แนนด์เกต (NAND Gate)



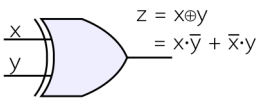
x	y	z
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

นอร์เกต (NOR Gate)



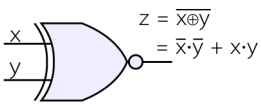
x	y	z
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

เอ็กซ์ออร์เกต (XOR Gate)
หรือ เอ็กซ์คลูซิฟออร์เกต



x	y	z
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

เอ็กซ์นอร์เกต (XNOR Gate)
หรือ เอ็กซ์คลูซิฟนอร์เกต



x	y	z
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

รูปที่ 4-4 สัญลักษณ์ทางวงจร ของ แนนด์เกต นอร์เกต เอ็กซ์ออร์เกต และ เอ็กซ์นอร์เกต และ ตารางค่าความจริงของการดำเนินการด้วยเกตเหล่านี้

การใช้ลอจิกเกตต่าง ๆ ในรูปที่ 4-3 และ 4-4 นั้น นอกจากที่เราจะต้องทราบผลลัพธ์ที่ได้จาก ตารางค่าความจริงของเกตแต่ละตัวแล้ว เราจะต้องเลือกเบอร์ไอซีที่ถูกต้องด้วย โดยสำหรับลอจิกเกตพื้นฐาน มีเบอร์ไอซีดิจิทัลตระกูลทีทีแอล เบอร์ 74xxyy ดังแสดงในตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 เบอร์ไอซีดิจิทัลตระกูลทีทีแอล

เบอร์	ตัวดำเนินการ
74xx08	แอนด์ (AND)
74xx32	ออร์ (OR)
74xx04	นอต (NOT)
74xx00	แนนด์ (NAND)
74xx02	นอร์ (NOR)
74xx86	เอ็กซ์ออร์ (XOR)
74xx7266	เอ็กซ์นอร์ (XNOR)

เบอร์ของไอซีตระกูลทีทีแอล ระบุชนิดของตัวดำเนินการ ดังแสดงในตารางที่ 4-4 และ มันยังมีส่วนที่บ่งบอกชนิดของวงจรภายในตัวไอซีด้วย โดยชนิดเหล่านี้ ถูกระบุด้วยตัวย่อ ดังแสดงในตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 ชนิดของไอซีดิจิทัลตระกูล TTL (74xxyy)

ชนิด	เบอร์	ลักษณะ
มาตรฐาน	74yy เช่น 7400	ใช้ทรานซิสเตอร์มาตรฐาน (10 mW, 10 ns)
ความเร็วสูง	74Hyy	ความเร็วสูง (22 mW, 6 ns)
ช็อตกี้	74Syy	ใช้ช็อตกี้ไดโอด ความเร็วสูง (20 mW, 3 ns)
ช็อตกี้-กำลังสูญเสียต่ำ	74LSyy	กำลังสูญเสียต่ำ ความเร็วสูง (2 mW, 10 ns)
แอดวานซ์-ช็อตกี้	74ASyy	ความเร็วสูงมาก (8 mW, 1.7 ns)
ซีมอส	74Cyy	ทำงานที่ระดับแรงดันเดียวกับเกตแบบซีมอส
ซีมอส-ความเร็วสูง	74HCyy	ใช้ร่วมกับซีมอสได้ และมีความเร็วสูง (12 ns)

ในการใช้ไอซีดิจิทัลเบอร์ต่าง ๆ นั้น เราจะต้องทราบรายละเอียดของไอซี ซึ่งมีอยู่ในแผ่นข้อมูล (Datasheet) ของไอซีเบอร์นั้น ๆ โดยตัวอย่างแผ่นข้อมูลของ ไอซีเบอร์ 74LS00 ซึ่งมีแนนด์เกต 4 ตัวอยู่ภายใน แสดงดังในรูปที่ 4-5 ข้อมูลในแผ่นข้อมูลนี้ มีรายละเอียดต่าง ๆ แบ่งได้เป็น 5 ส่วน คือ

1. ลักษณะภายนอกไอซี และ ขั้วต่อ โดยจากรูปจะเห็นได้ว่า ขั้วต่อใด เป็นขั้วต่อขาเข้า ขั้วต่อขาออก ขั้วต่อไฟเลี้ยง (V_{CC}) และ ขั้วต่อกราวด์ (GND)

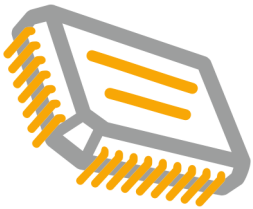
2. ช่วงของค่า แรงดัน กระแส และ อุณหภูมิ ที่ไอซีทำงาน

3. ค่าแรงดัน (สูงสุด ปกติ และ ต่ำสุด) ขณะทำงานที่ระดับสูง และ ต่ำ

4. ค่ากระแสพิกัดต่าง ๆ

5. ค่าเวลาประวิง (delay) ซึ่งก็คือเวลาในการตอบสนองของวงจร โดยเวลานี้จะเป็นตัวกำหนดความเร็วสูงสุดในการทำงานของไอซี

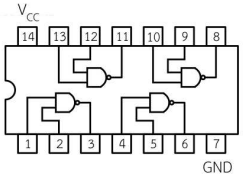
นอกจากไอซีเบอร์ 74xxyyy ซึ่งเป็นไอซีดิจิทัลตระกูลทีทีแอลแล้ว เรายังมีการใช้ไอซีดิจิทัลตระกูลซีมอส ซึ่งสร้างจากการใช้ทรานซิสเตอร์แบบมอสเฟต เป็นหลัก โดยไอซีตระกูลนี้ จะมีเบอร์ 4zzzz เช่น ไอซีเบอร์ 4011 คือ แนนด์เกต



MOTOROLA

QUAD 2-INPUT NAND GATE

SN54/74LS00



①

J SUFFIX
CERAMIC
CASE 632-08

GUARANTEED OPERATING RANGES

Symbol	Parameter		Min	Typ	Max	Unit
V_{CC}	Supply Voltage	54 74	4.5 4.75	5.0 5.0	5.5 5.25	V
T_A	Operating Ambient Temperature Range	54 74	−55 0	25 25	125 70	°C
I_{OH}	Output Current — High	54, 74			−0.4	mA
I_{OL}	Output Current — Low	54 74			4.0 8.0	mA

②

DC CHARACTERISTICS OVER OPERATING TEMPERATURE RANGE (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter		Limits Min	Limits Typ	Limits Max	Unit	Test Conditions	
V_{IH}	Input HIGH Voltage		2.0			V	Guaranteed Input HIGH Voltage for All Inputs	
V_{IL}	Input LOW Voltage	54			0.7	V	Guaranteed Input LOW Voltage for All Inputs	
		74			0.8			
V_{IK}	Input Clamp Diode Voltage			−0.65	−1.5	V	V_{CC} = MIN, I_{IN} = −18 mA	
V_{OH}	Output HIGH Voltage	54	2.5	3.5		V	V_{CC} = MIN, I_{OH} = MAX, V_{IN} = V_{IH} or V_{IL} per Truth Table	
		74	2.7	3.5		V		
V_{OL}	Output LOW Voltage	54, 74		0.25	0.4	V	I_{OL} = 4.0 mA	V_{CC} = V_{CC} MIN, V_{IN} = V_{IL} or V_{IH} per Truth Table
		74		0.35	0.5	V	I_{OL} = 8.0 mA	
I_{IH}	Input HIGH Current				20	μA	V_{CC} = MAX, V_{IN} = 2.7 V	
					0.1	mA	V_{CC} = MAX, V_{IN} = 7.0 V	
I_{IL}	Input LOW Current				−0.4	mA	V_{CC} = MAX, V_{IN} = 0.4 V	
I_{OS}	Short Circuit Current (Note 1)		−20		−100	mA	V_{CC} = MAX	
I_{CC}	Power Supply Current Total, Output HIGH				1.6	mA	V_{CC} = MAX	
	Total, Output LOW				4.4			

③ ④

Note 1: Not more than one output should be shorted at a time, nor for more than 1 second.

AC CHARACTERISTICS (T_A = 25°C)

Symbol	Parameter	Limits Min	Limits Typ	Limits Max	Unit	Test Conditions
t_{PLH}	Turn-Off Delay, Input to Output		9.0	15	ns	V_{CC} = 5.0 V C_L = 15 pF
t_{PHL}	Turn-On Delay, Input to Output		10	15	ns	

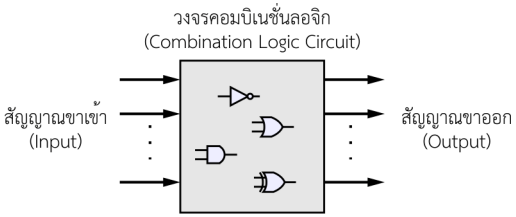
⑤

รูปที่ 4-5 แผ่นข้อมูลของไอซีเบอร์ 74LS00 ที่มีแนนด์เกต 4 ตัวบรรจุอยู่ (ผลิตโดยบริษัท Motorola)

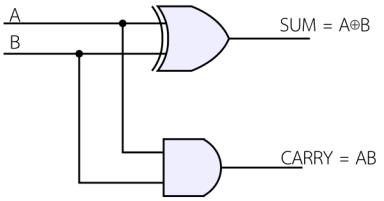
4.3 วงจรคอมบิเนชั่น

สำหรับวงจรตรรกที่กล่าวถึงในหัวข้อที่แล้ว เราสามารถนำมันมาประกอบกันเป็นวงจรที่ซับซ้อนได้ในไอซีตัวเดียว เทคโนโลยีการสร้างวงจรรวมในปัจจุบันทำให้เราสามารถรวมเกตต่าง ๆ ได้จำนวนมาก โดยเราเรียกวงจรรวมที่ใช้ประมวลสัญญาณดิจิทัลที่มีลักษณะไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา แต่เปลี่ยนแปลงตามระดับสัญญาณขาเข้าเท่านั้น ว่าคือ **วงจรคอมบิเนชั่นลอจิก (Combination Logic Circuit)** รูปที่ 4-6 แสดงลักษณะวงจรคอมบิเนชั่น ที่มีสัญญาณขาเข้าและสัญญาณขาออกหลายสัญญาณ

ตัวอย่างหนึ่งสำหรับ วงจรคอมบิเนชั่น คือ วงจรบวก 1 บิต ที่เรียกว่า Half Adder ดังแสดงในรูปที่ 4-7 โดย A และ B คือ ข้อมูลขาเข้า (Input) ที่เป็นสัญญาณ



รูปที่ 4-6 วงจรคอมบิเนชั่นลอจิก

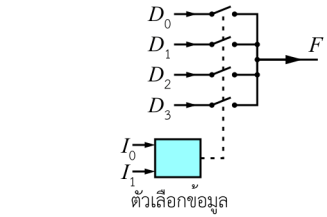


INPUT		OUTPUT	
A	B	SUM	CARRY
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

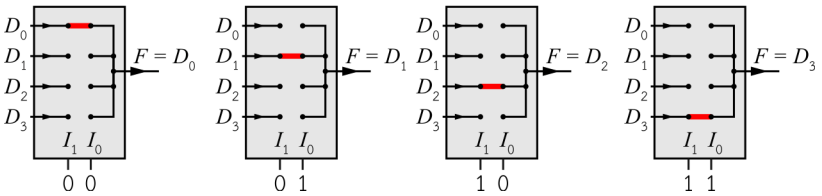
รูปที่ 4-7 วงจรบวกขนาดหนึ่งบิต (Half Adder)

ดิจิทัล (มีค่าเป็น “0” หรือ “1” เท่านั้น) โดยผลลัพธ์ คือ ผลบวก (SUM) และ ตัวทด (CARRY) จะหาได้จากการใช้ เอ็กซ์ออร์เกต สำหรับ ผลบวก และ แอนด์เกต สำหรับ ตัวทด วงจรบวกหนึ่งบิตนี้ สามารถนำไปสร้างขยายออกไปเป็นวงจรบวกเลขฐานสองในระบบดิจิทัลได้

อีกตัวอย่างหนึ่งสำหรับ วงจรคอมบิเนชั่น ที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย คือ **วงจรมัลติเพลกเซอร์ (Multiplexer)** ซึ่งเป็นวงจรที่ใช้ในการเลือกสัญญาณออกจากสัญญาณเข้าหลาย ๆ สัญญาณ โดยจะมีลักษณะเหมือนอย่างง่ายเหมือนสวิตช์ รูปที่ 4-8 แสดง ลักษณะมัลติเพลกเซอร์ ชนิด 4-เป็น-1 โดยการกำหนดค่าของตัวเลือกข้อมูล I_0 และ I_1 เราจะสามารถเลือกให้สัญญาณ D_0, D_1, D_2 หรือ D_3 ผ่านออกไปได้



I_1	I_0	F
0	0	D_0
0	1	D_1
1	0	D_2
1	1	D_3

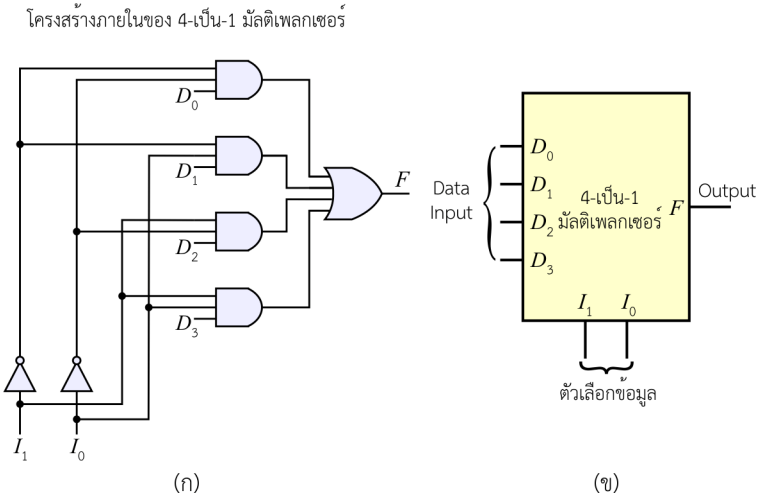


รูปที่ 4-8 ลักษณะวงจรมัลติเพลกเซอร์ ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์เลือกสัญญาณออก F จากสัญญาณเข้า D_0, D_1, D_2 และ D_3 โดยตัวเลือกข้อมูล คือ สัญญาณ I_0 และ I_1

ในการวิเคราะห์เพื่อสร้างวงจรมัลติเพลกเซอร์ที่นำเสนอในรูปที่ 4-8 เราสามารถทำได้โดยการเขียนรูปแบบทางคณิตศาสตร์บูลีนของสัญญาณขาออกที่ต้องการ ซึ่งก็คือ

$$F = \bar{I}_1 \cdot \bar{I}_0 \cdot D_0 + \bar{I}_1 \cdot I_0 \cdot D_1 + I_1 \cdot \bar{I}_0 \cdot D_2 + I_1 \cdot I_0 \cdot D_3$$

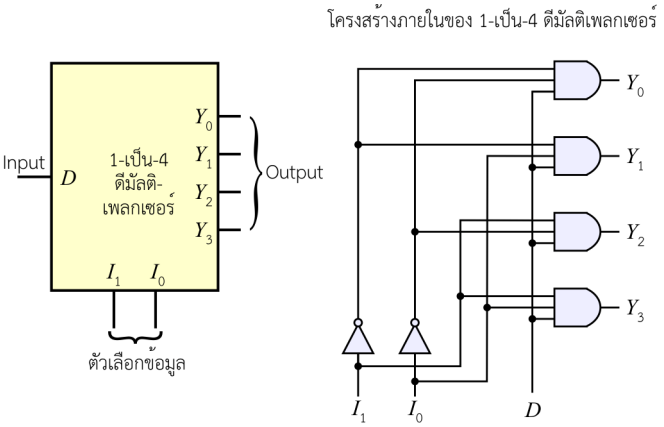
ดังนั้น เราจึงสามารถสร้างวงจรนี้ได้จริง โดยใช้เกตต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4-9(ก) และ เราสามารถเขียนเป็นแผนภาพบล็อกของมัลติเพลกเซอร์นี้ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4-9(ข)



รูปที่ 4-9 (ก) ลักษณะโครงสร้างภายใน และ
(ข) แผนภาพบล็อกของ 4-เป็น-1 มัลติเพลกเซอร์

สำหรับ วงจรคอมบิเนชั่น อีกวงจรหนึ่งที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย คือ **วงจรดีมัลติเพลกเซอร์ (Demultiplexer)** ซึ่งเป็นวงจรที่ใช้ในการเลือกขาออกของสัญญาณ จากสัญญาณเข้าเพียงสัญญาณเดียว โดยมันจะมีลักษณะคล้ายวงจรมัลติเพลกเซอร์ รูปที่ 4-10 แสดง ลักษณะแผนภาพบล็อกของดีมัลติเพลกเซอร์ ชนิด 1-เป็น-4 พร้อมทั้งวงจรภายใน และ ตารางค่าความจริง

นอกจาก เกต และ วงจรดิจิทัล ที่ศึกษาในบทนี้ วงจรดิจิทัลยังมีอีกจำนวนมาก เกินกว่าที่จะกล่าวในรายละเอียดได้หมดในที่นี้ โดยวงจรดิจิทัลอีกประเภทหนึ่งที่มีการนำไปใช้งานอย่างมาก คือ **วงจรซีเควนเชียลลอจิก (Sequential Logic**

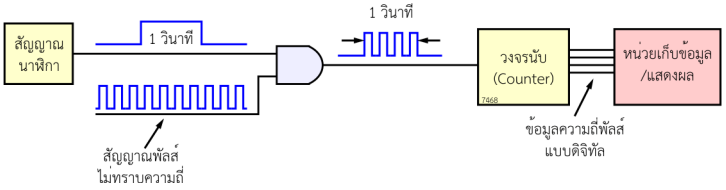


I_1	I_0	Y_0	Y_1	Y_2	Y_3
0	0	D	0	0	0
0	1	0	D	0	0
1	0	0	0	D	0
1	1	0	0	0	D

รูปที่ 4-10 แผนภาพบล็อกของ 1-เป็น-4 ดีมัลติเพลกเซอร์
ลักษณะวงจรภายใน และ ตารางค่าความจริงของวงจร

Circuit) ที่มีลักษณะของสัญญาณขาออกที่ขึ้นกับเวลาด้วย ตัวอย่างหนึ่งของวงจรลักษณะนี้ คือ วงจรนับ (Counter) ซึ่งใช้มาก ในงานด้านการประมวลผลข้อมูล รูปที่ 4-11 แสดงตัวอย่างการสร้างวงจรที่ใช้ในการนับพัลส์ เพื่อหาความถี่ของสัญญาณ

สำหรับการเชื่อมต่อระหว่างระบบดิจิทัล และ ระบบแอนะล็อก หรือ การนำสัญญาณดิจิทัลไปใช้งาน เราก็สามารถทำได้โดยการใช้ ไอซีประเภท **เอทูดี (A/D)** หรือ แอนะล็อก-ทู-ดิจิทัล (Analog-to-Digital) ในการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล และ เราจะใช้ ไอซีประเภท **ดีทูเอ (D/A)** หรือ ดิจิทัล-ทู-แอนะล็อก (Digital-to-Analog) ในการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก



รูปที่ 4-11 ตัวอย่างวงจรนับพัลส์ ที่ใช้วงจรซีเควนเชียลลอจิก
ซึ่งเป็นวงจรดิจิทัลประเภทหนึ่ง

ภาคผนวก

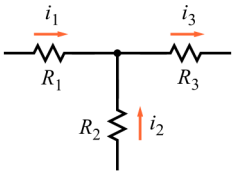
ก. กฎของเคอร์ชอฟฟ์

ในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า บ่อยครั้งที่เราจะต้องใช้กฎทางไฟฟ้า ซึ่งได้แก่ กฎของโอห์ม กฎการแบ่งแรงดัน กฎของเคอร์ชอฟฟ์สำหรับกระแส และ กฎของเคอร์-ชอฟฟ์สำหรับแรงดัน ในการวิเคราะห์เพื่อให้ทราบค่ากระแสและแรงดันที่เกี่ยวข้อง โดย สำหรับกฎของโอห์ม และ กฎการแบ่งแรงดัน เราได้กล่าวถึงแล้วในหัวข้อที่ 2.2 เรื่อง ตัวต้านทาน ในภาคผนวกนี้ เราจะขอนำเสนอกฎของเคอร์ชอฟฟ์

กฎของเคอร์ชอฟฟ์สำหรับกระแส (Kirchhoff's Current Law) หรือ KCL มีใจความว่า "ผลรวมทางพีชคณิตของกระแสไฟฟ้าที่ไหลที่จุดใด ๆ ในวงจรจะมีค่าเป็นศูนย์เสมอ" ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\sum_{n=1}^{N} i_n = 0$$

โดยที่ i_n คือ กระแสไฟฟ้าที่ n ที่ไหลออก (+) หรือ ไหลเข้า (-) สู่จุดใด ๆ ที่พิจารณา และ N คือ จำนวนส่วนที่เชื่อมต่อกับจุดที่พิจารณา รูปที่ ผ-1 แสดงตัวอย่างการใช้ KCL สำหรับ จุดต่อหนึ่งในวงจร ที่เชื่อมต่อตัวต้านทาน 3 ตัว โดยมีการกำหนดกระแสดังแสดงในรูป การใช้ KCL นี้ จะทำให้เราสามารถทราบค่ากระแส ในส่วนต่าง ๆ ของวงจรได้ โดยเมื่อใช้ร่วมกับกฎของโอห์ม ($V = IR$) เราก็จะทราบค่าแรงดัน ที่ตกคร่อมตัวต้านทานที่เกี่ยวข้องได้



$$\sum_{n=1}^{3} i_n = 0$$

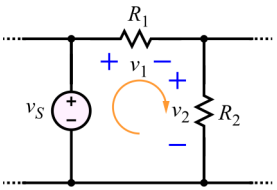
$$-i_1 - i_2 + i_3 = 0$$

รูปที่ ผ-1 การใช้ KCL ในการวิเคราะห์หากระแสที่ไหลเข้า-ออก จากจุดต่อในวงจร

กฎของเคอร์ชอฟฟ์สำหรับแรงดัน (Kirchhoff's Voltage Law) หรือ **KVL** มีใจความว่า "ผลรวมทางพีชคณิตของแรงดันไฟฟ้ารอบวงปิดใด ๆ ในวงจรจะมีค่าเป็นศูนย์เสมอ" ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\sum_{n=1}^{N} v_n = 0$$

โดยที่ v_n คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมอุปกรณ์ตัวที่ n ในวงจร และ N คือ จำนวนอุปกรณ์ในวงจร ที่อยู่ภายในวงปิดที่พิจารณา รูปที่ ผ-2 แสดงตัวอย่างการใช้ KVL สำหรับ วงปิดหนึ่งในวงจร ที่เชื่อมต่อแหล่งจ่ายแรงดัน และ ตัวต้านทาน 2 ตัว ที่การกำหนดชื่อและทิศทางของแรงดันดังแสดงในรูป การใช้ KVL นี้ จะทำให้เราสามารถทราบค่าแรงดัน ในส่วนต่าง ๆ ของวงจรได้ โดยเมื่อใช้ร่วมกับกฎของโอห์ม ($I = V/R$) เราก็จะทราบค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานที่เกี่ยวข้องได้



$$\sum_{n=1}^{3} v_n = 0$$

$$-v_S + v_1 + v_2 = 0$$

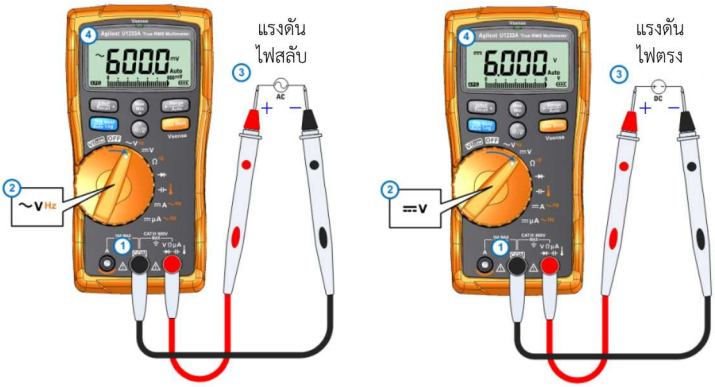
รูปที่ ผ-2 การใช้ KVL ในการวิเคราะห์หาแรงดันที่ตกคร่อมส่วนต่าง ๆ ภายวงรอบปิดในวงจร

ข. การใช้มัลติมิเตอร์

มัลติมิเตอร์ (Multimeter) เป็นเครื่องวัดทางไฟฟ้าที่สามารถวัดปริมาณทางไฟฟ้าได้หลายชนิดและใช้ตรวจสอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บางชนิดได้ ในหัวข้อนี้เราจะกล่าวถึง การใช้มัลติมิเตอร์ในการวัดค่าแรงดัน (เป็นโวลต์มิเตอร์) ค่ากระแส (เป็นแอมป์มิเตอร์) ค่าความต้านทาน (เป็นโอห์มมิเตอร์) และ ตรวจสอบไดโอด และทรานซิสเตอร์

การวัดค่าแรงดัน

การวัดค่าแรงดัน แบ่งเป็น 2 โหมด คือ การวัดแรงดันไฟสลับ (ไฟ AC) และแรงดันไฟตรง (ไฟ DC) ซึ่งเราสามารถทำได้โดย การต่อโพรบวัด และ ปรับมิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ ผ-3(ก) สำหรับการวัดแรงดันไฟสลับ และ รูปที่ ผ-3(ข) สำหรับการวัดแรงดันไฟตรง



(ก) (ข)

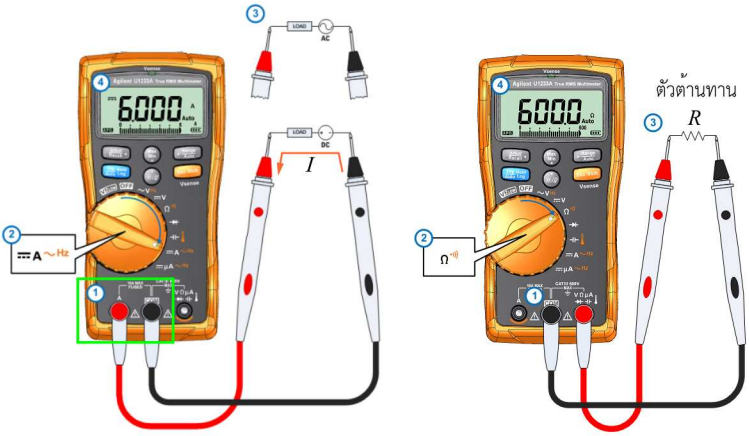
รูปที่ ผ-3 การใช้มัลติมิเตอร์ในการวัดค่าแรงดัน (ก) ไฟสลับ และ (ข) แรงดันไฟตรง

การวัดค่ากระแส

การวัดค่ากระแสทั้งแบบกระแสสลับและกระแสตรง เราสามารถทำได้โดยการต่อโพรบวัด และ ปรับมิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ ผ-4(ก) โดย ในการวัดกระแสนี้ มีข้อสังเกต คือ เราจะต้องตัดวงจร และ นำมิเตอร์เข้าไปต่อเป็นส่วนหนึ่งของวงจร เพื่อให้กระแสไหลผ่านมิเตอร์ โดยมัลติมิเตอร์ที่ใช้นี้ จะมีช่องสำหรับต่อโพรบในการวัดกระแส ต่างจากช่องสำหรับต่อโพรบในการวัดแรงดัน

การวัดค่าความต้านทาน

การวัดค่าความต้านทานทำได้โดย การต่อโพรบวัด และ ปรับมิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ ผ-4(ข) โดยการวัดนี้ มีข้อพึงระลึกไว้ว่า ตัวต้านทานที่ต้องการวัด ต้องนำออกมาจากวงจรอื่น ๆ เสียก่อน มิฉะนั้นจะอ่านได้ค่าความต้านทานที่ไม่ถูกต้อง สำหรับช่องต่อโพรบในการวัดค่าความต้านทานจะเป็นช่องเดียวกับการวัดแรงดัน

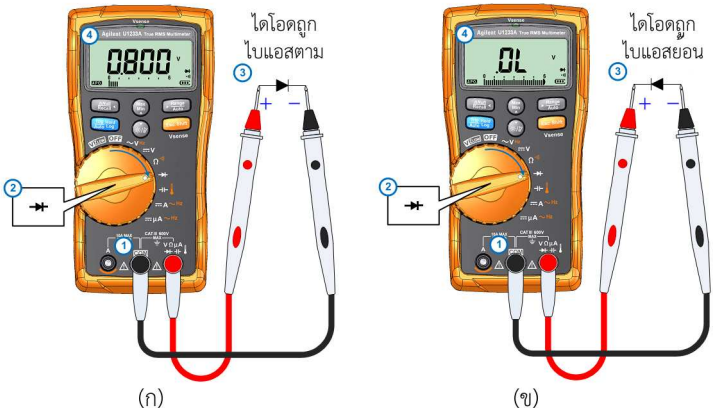


(ก) (ข)

รูปที่ ผ-4 (ก) การใช้มัลติมิเตอร์ในการวัดค่ากระแส (ทั้งไฟตรง และ ไฟสลับ) และ (ข) การใช้มัลติมิเตอร์ในการวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทาน

การตรวจสอบไดโอด

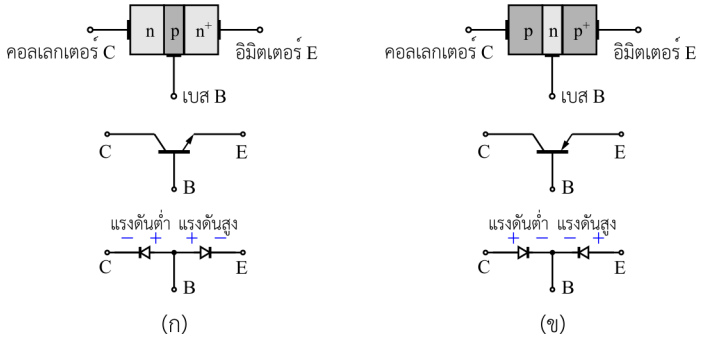
การตรวจสอบไดโอด ว่าสามารถนำกระแสได้ในทิศทางเดียว ทำได้โดยการวัดค่าความต้านทานของไดโอด โดยทดสอบกับการต่อโพรบทั้งสองชั้ว โดยในกรณีไบแอสตาม (จ่ายแรงดันให้กับขั้วแอโนด) ค่าความต้านทานไดโอดที่อ่านได้จะมีค่าน้อย ในขณะที่เมื่อเราไบแอสย้อน (จ่ายแรงดันให้กับขั้วแคโทด) ความต้านทานที่อ่านได้จะมีค่ามาก (เป็นอนันต์) โดยสำหรับมัลติมิเตอร์ที่มีโหมดการวัดไดโอด (สัญลักษณ์เป็นรูปไดโอด) เราจะสามารถอ่านค่าแรงดันออฟเซตของไดโอดที่วัดได้ด้วย การตรวจสอบไดโอด การต่อโพรบวัด และ ปรับมิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ ผ-5



รูปที่ ผ-5 การใช้มัลติมิเตอร์ในการตรวจสอบไดโอด ในกรณี (ก) ไบแอสตาม และ (ข) ไบแอสย้อน โดยในกรณีไบแอสตาม เราสามารถอ่านค่าแรงดันออฟเซตของไดโอดได้ กรณีไบแอสย้อน มิเตอร์แสดงสัญลักษณ์ที่บ่งบอกว่ามันอ่านค่าไม่ได้

การตรวจสอบทรานซิสเตอร์

การตรวจสอบทรานซิสเตอร์ ว่าเป็นชนิดใด หรือว่า มีการเรียงขาอย่างไร หรือว่า เสียหรือไม่ ทำได้โดยการพิจารณาทรานซิสเตอร์เป็นเสมือนไดโอด 2 ตัว ดังรูปที่ ผ-6 โดยเราสามารถนำมัลติมิเตอร์ในโหมดการวัดค่าความต้านทาน หรือ โหมดการวัดไดโอดมาใช้วัดที่ขาคู่ต่าง ๆ ของทรานซิสเตอร์ ทั้ง 3 คู่ (เบส-อิมิตเตอร์, อิมิตเตอร์-คอลเลกเตอร์ และ เบส-คอลเลกเตอร์) ซึ่งจะต้องวัดทั้งหมด 6 ครั้ง โดยหากทรานซิสเตอร์เป็นปกติ เราจะได้ว่า จะมีขาร่วมเพียงขอเดียวที่วัดค่าแรงดันออฟเซตได้ ซึ่งก็คือขาเบสของบีเจที โดยลักษณะไดโอด 2 ตัวที่ต่ออยู่ในทรานซิสเตอร์จะต่างกัน คือ แรงดันออฟเซต ระหว่าง ขา เบส-อิมิตเตอร์ จะสูงกว่า แรงดันออฟเซต ระหว่าง ขา เบส-คอลเลกเตอร์ ทั้งในบีเจทีชนิดเอ็นพีเอ็น และ พีเอ็นพี



รูปที่ ผ-6 การพิจารณาวงจรสมมูลของทรานซิสเตอร์ ที่แทนด้วยไดโอด 2 ตัว เพื่อใช้ในการใช้ตรวจสอบ (ก) บีเจทีชนิดเอ็นพีเอ็น และ (ข) บีเจทีชนิดพีเอ็นพี

ดัชนี

กฎของเคอร์ชอฟฟ์สำหรับกระแส (Kirchhoff's Current Law, KCL) 90
กฎของเคอร์ชอฟฟ์สำหรับแรงดัน (Kirchhoff's Voltage Law, KVL) 91
กฎของโอห์ม (Ohm's Law) 19
กระแสไหลตามสูงสุด (Maximum Forward Current) 33
การขยายสัญญาณ (Amplification) 37
การต่อขนาน (Parallel หรือ Shunt Connection) 20
การต่ออนุกรม (Series Connection) 19
การแบ่งแรงดัน (Voltage Division) 21
การสวิตช์ (Switching) 37
เกต (Gate) 42
ขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Coil) 47
ขดลวดปฐมภูมิ (Primary Coil) 47
ขั้วต่อปกติปิด (Normally Closed: NC) 28
ขั้วต่อปกติเปิด (Normally Open: NO) 28
ความจุไฟฟ้า (Capacitance) 25
ความต้านทาน (Resistance) 16
ความต้านทานไฟสลับ (AC Resistance) 23
ความต้านทานสมมูล (Equivalent Resistance) 20
ความถี่ (Frequency) 14
ความถี่เชิงมุม (Angular Frequency) 14
ความเหนี่ยวนำ (Inductance) 23
คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal Computer) 8
คอลเลกเตอร์ (Collector, C) 38
คาบ (Period) 14
เครื่องกำเนิดสัญญาณไฟสลับ (Function Generator) 14
เครื่องใช้ระบบดิจิทัล (Digital Devices) 9
เครื่องใช้ระบบแอนะล็อก (Analog Devices) 9
แคโทด (Cathode) 30,35
แคโทดร่วม (Common Cathode, CC) 36
เจเฟต (Junction FET, J-FET) 42
ซอร์ส (Source) 42
ซีเนอร์ไดโอด (Zener Diode) 34
ซีพียู (CPU) 10
ซีมอส (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, CMOS) 44
เซนเซอร์ทางแสง (Optical Sensor) 45
เซเว่นเซกเมนต์ (Seven-Segment) 36

เซอร์โว (Servo) 50
เซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) 50
ดิจิทัล-ทู-แอนะล็อก (Digital-to-Analog) 89
ดีทูเอ (D/A) 89
เดรน (Drain) 42
ไดโอด (Diode) 30,94
ไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode) 35
ตัวเก็บประจุ (Capacitor) 25
ตัวต้านทาน (Resistor) 16
ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) 23
ตารางค่าความจริง (Truth Table) 78
ทรานซิสเตอร์ (Transistor) 37,95
ทรานซิสเตอร์ชนิดปรากฏการณ์สนาม (Field Effect Transistor) 42
ทรานซิสเตอร์แบบรอยต่อไบโพลาร์ (Bipolar Junction Transistor) 37
ทีทีแอล (TTL) 74,81
นอตเกต (NOT Gate) 80
นอร์เกต (NOR Gate) 80
แนนด์เกต (NAND Gate) 80
บิตที่มีนัยสำคัญต่ำสุด (Least Significant Bit,LSB) 76
บิตที่มีนัยสำคัญสูงสุด (Most Significant Bit, MSB) 76
บีเจที (BJT) 37
บีเจทีแบบกำลัง (Power BJT) 39
เบส (Base, B) 38
แบตเตอรี่ (Battery) 13
ไบต์ (Byte) 76
ไบแอส (Bias) 31
ไบแอสตาม (Forward Bias) 31
ไบแอสย้อน (Reverse Bias) 31
แผ่นข้อมูล (Datasheet) 33,41,82
พิกัดกำลัง (Power Rating) 22
พีชคณิตบูลีน (Boolean Algebra) 78
พีแชนเนล (p-Channel) 44
พีซี (PC) 8
พีเอ็นพี (pnp) 37
เฟต (FET) 42
โฟโต้ไดโอด (Photo Diode) 46
โฟโต้ทรานซิสเตอร์ (Photo Transistor) 46
ไฟดูด (Electric Shock) 15
ไฟฟ้า (Electricity) 7
มอเตอร์ไฟตรงชนิดแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet DC Motor) 49
มอเตอร์ไฟฟ้า (Electric Motor) 48
มอสเฟต (Metal-Oxide-Semiconductor FET, MOSFET) 42
มัลติมิเตอร์ (Multimeter) 19,92
ไม้ตียุงไฟฟ้า (Electric Flywatters หรือ Mosquito Bats) 12

ระบบดิจิทัล (Digital System) 10
ระบบแอนะล็อก (Analog System) 9
รีเลย์ (Relay) 28
รีแอคแตนซ์ (Reactance) 23
เรกูเลเตอร์ไอซี (Regulator IC) 58
แรงดันซีเนอร์ (Zener Voltage) 34
แรงดันย้อนกลับสูงสุด (Maximum Reversed Voltage) 33
แรงดันออฟเซต (Offset Voltage) 31
ลอจิก (Logic) 73
ลอจิกเกต (Logic Gate) 80
วงจร (Circuit) 12
วงจรกรอง RC (RC Filter) 52
วงจรกรองผ่านต่ำ (Low-Pass Filter) 52
วงจรกรองผ่านสูง (High-Pass Filter) 53
วงจรขยาย (Amplifier) 60
วงจรขยายเชิงดำเนินการ (Operational Amplifier) 64
วงจรขยายแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier) 67
วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amplifier) 68
วงจรขยายแบบรวม (Summing Amplifier) 69
วงจรคอมบิเนชั่นลอจิก (Combination Logic Circuit) 85
วงจรซีเควนเชียลลอจิก (Sequential Logic Circuit) 89
วงจรดีมัลติเพลกเซอร์ (Demultiplexer) 88
วงจรตามแรงดัน (Voltage Follower) 66
วงจรนับ (Counter) 89
วงจรบัฟเฟอร์ (Buffer Circuit) 65
วงจรปิด (Closed Circuit) 24
วงจรเปรียบเทียบแรงดัน (Voltage Comparator) 65
วงจรเปิด (Open Circuit) 27
วงจรมัลติเพลกเซอร์ (Multiplexer) 86
วงจรรวม (Integrated Circuit) 62
วงจรรวมชนิดวงจรคุมค่า (Regulator IC) 58
วงจรเรียงกระแส (Rectifier) 54
วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half-Wave Rectifier) 34,56
วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นที่ใช้หม้อแปลงที่มีแท็ปกลาง (Full-Wave Rectifier with Center-Tapped Transformer) 55
วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ (Bridge Rectifier) 57
วงจรแหล่งจ่ายไฟตรง (DC Power Supply) 58
วงจรแอนะล็อก (Analog Circuit) 52
สเต็ปปิ้งมอเตอร์ (Stepping Motor) 51
ส่วนรับข้อมูลขาเข้า (Input Unit) 10

สวิตช์ (Switch: SW) 28
สวิตช์แบบซิงเกิลโพลดับเบิลโทรว์ (Single-Pole Double-Throw: SPDT) 28
สัญญาณดิจิทัล (Digital Signal) 73
สัญญาณรบกวน (Noise) 74
สายกราวด์ (Ground) 14
สายดิน (Ground) 14
สายนิวทรัล (Neutral) 14
สายมีไฟ (Hot) 14
หน่วยประมวลผลกลาง (Central Processing Unit) 10
หม้อแปลงไฟฟ้า (Electrical Transformer) 47
แหล่งจ่ายไฟตรง (DC Power Supply) 14
แหล่งจ่ายไฟสลับ (AC Power Supply) 14
ออปแอมป์ (Op-Amp) 64
ออร์เกต (OR Gate) 80
ออสซิโลสโคป (Oscilloscope) 61
อัตราขยายกระแส (Current Gain) 41
อินเวอร์เตอร์ (Inverter) 44,80
อิมิตเตอร์ (Emitter, E) 38
อิเล็กทรอนิกส์ (Electronics) 7
อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (Opto-Electronic Devices) 45
เอ็กซ์คลูซิฟนอร์เกต (Exclusive NOR Gate) 80
เอ็กซ์คลูซิฟออร์เกต (Exclusive OR Gate) 80
เอ็กซ์นอร์เกต (XNOR Gate) 80
เอ็กซ์ออร์เกต (XOR Gate) 80
เอทูดี (A/D) 89
เอ็นแชนเนล (n-Channel) 44
เอ็นพีเอ็น (npn) 37
แอนด์เกต (AND Gate) 80
แอนะล็อก-ทู-ดิจิทัล (Analog-to-Digital) 89
แอโนด (Anode) 30,35
แอโนดร่วม (Common Anode, CA) 36
แอลดีอาร์ (Light Dependent Resistor, LDR) 45
แอลอีดี (LED) 35
ไอซี (IC) 62
เฮดบริดจ์ (H-Bridge) 50

อิเล็กทรอนิกส์ (Electronics) เป็นศาสตร์แขนงหนึ่งของศาสตร์ด้านไฟฟ้า (Electricity) โดยหากเราสังเกตรอบ ๆ ตัวเรา เราจะพบว่า เครื่องใช้ในชีวิตประจำวัน ส่วนหนึ่งจะเป็นเครื่องใช้ไฟฟ้า/อิเล็กทรอนิกส์ โดยเครื่องใช้เหล่านี้มีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้น และมีความสำคัญต่อการดำเนินชีวิตมากขึ้น ดังนั้นการมีความรู้ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์น่าจะเป็นเรื่องที่จำเป็นอย่างมาก เพราะ จะทำให้ (1) สามารถทำความเข้าใจเรื่องพื้นฐานในการดำเนินชีวิตได้อย่างถูกต้อง (2) สามารถซ่อมแซมหรือแก้ไขเครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์เมื่อถึงคราวจำเป็น และ (3) อาจทำให้เราสามารถออกแบบหรือสร้างนวัตกรรมโดยการใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์ในการควบคุมการทำงาน

การศึกษาตามเนื้อหาในเอกสารนี้จะเป็นการเปิดประตูสู่โลกแห่งการเรียนรู้ด้านอิเล็กทรอนิกส์จากสิ่งที่พบเห็นอยู่รอบตัวในชีวิตประจำวันได้ โดยเอกสารนี้แบ่งออกเป็น 4 บท ได้แก่ บทที่ 1 ที่เป็นบทแนะนำเบื้องต้นเกี่ยวกับอิเล็กทรอนิกส์ในชีวิตประจำวัน บทที่ 2 จะกล่าวถึงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ โดย วงจรหลักที่ใช้อุปกรณ์เหล่านี้จะถูกนำเสนอในบทที่ 3 สำหรับวงจรแอนะล็อก และ บทที่ 4 สำหรับวงจรดิจิทัล

ISBN 978-616-348-529-8