



ตำราวิชาพื้นฐานไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์

พ.ศ. ๒๕๖๗

โดย

กองวิทยาการ กรมสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ทหารอากาศ

กองทัพอากาศ

ดอนเมือง

กรุงเทพมหานคร

คำนำ

วิชาพื้นฐานไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ถือเป็นวิชาหนึ่งที่มีความสำคัญยิ่ง เป็นพื้นฐานสำคัญในการนำไปสู่การประยุกต์ใช้ในระบบและอุปกรณ์เทคโนโลยีที่มีความซับซ้อนต่างๆ ในปัจจุบัน ได้แก่ ระบบจำลอง ระบบสงครามอิเล็กทรอนิกส์ และบริภัณฑ์การภาพ เป็นต้น

ดังนั้น คณะผู้จัดทำ จึงได้รวบรวมและจัดทำตำราพื้นฐานไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ขึ้น เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานได้ศึกษาด้วยตนเอง ซึ่งจะทำให้เข้าใจวิชาพื้นฐาน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีหรืออุปกรณ์ขั้นสูงต่างๆ ได้ต่อไป

คณะผู้จัดทำ ขอขอบคุณเจ้าของเนื้อหา และข้าราชการทุกท่านที่ได้ร่วมกัน จัดทำตำราพื้นฐานไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ โดยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจศึกษาจนสามารถนำไปใช้ ในการทำงานได้เป็นอย่างดี และหากมีข้อผิดพลาดบกพร่องประการใดในตำราเล่มนี้ คณะผู้จัดทำ ต้องขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ



สารบัญ

	หน้า
คำนำ	ก
สารบัญ	ข
สารบัญตาราง	ค
สารบัญภาพ	ง
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ช
บทที่ ๑ อิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น	๑
๑. ประจุไฟฟ้า และกฎคูลอมบ์	๑
๒. วัสดุสารกึ่งตัวนำ	๕
๓. การสร้างพาหะบนสารกึ่งตัวนำ	๗
๔. ไดโอดแบบรอยต่อ P-N	๘
๕. วงจรเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	๑๐
๖. ทรานซิสเตอร์	๑๓
๗. วงจรรวมเบื้องต้น	๑๔
บทที่ ๒ การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า	๑๗
๑. พื้นฐานทางไฟฟ้า (Basic Concept)	๑๗
๒. กฎพื้นฐานทางไฟฟ้า (Basic Law)	๒๕
๓. การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า (Method of Analysis)	๓๑
๔. ทฤษฎีวงจไฟฟ้า (Circuit Theorem)	๕๒
๕. ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ (Capacitors and inductors)	๖๓
บรรณานุกรม	๗

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ ๑-๑ แสดงช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำบางชนิด ที่อุณหภูมิ 0 K และ 300 K	๕
ตารางที่ ๒-๑ แสดงตัวอย่างระบบหน่วย	๒๐
ตารางที่ ๒-๒ แสดงตัวอย่างสัญลักษณ์	๒๑
ตารางที่ ๒-๓ สัมประสิทธิ์ความต้านทานของวัสดุแต่ละชนิด	๒๖
ตารางที่ ๒-๔ เปรียบเทียบคุณสมบัติทั่วไปของ R L C	๖๗

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ ๑-๑ ธาตุมีนิวตรอนและโปรตอนอยู่รวมกันที่นิวเคลียส อิเล็กตรอนอยู่ในวงโคจรรอบนิวเคลียส	๑
ภาพที่ ๑-๒ ตารางธาตุ	๒
ภาพที่ ๑-๓ (ก) แถบพลังงานของฉนวน, (ข) แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ, (ค) แถบพลังงานของตัวนำ	๓
ภาพที่ ๑-๔ (ก) ฉนวนที่มี ๑ อิเล็กตรอน, (ข) พลังงานที่จ่ายให้อิเล็กตรอนไม่มากพอ ที่จะข้ามช่องว่างพลังงาน, (ค) พลังงานที่จ่ายให้อิเล็กตรอนมากพอที่จะข้ามช่องว่าง พลังงาน	๔
ภาพที่ ๑-๕ (ก) สารกึ่งตัวนำชนิด P, (ข) ภาพเสมือนสารกึ่งตัวนำชนิด P, (ค) สารกึ่งตัวนำชนิด N, (ง) ภาพเสมือนสารกึ่งตัวนำชนิด N	๗
ภาพที่ ๑-๖ (ก) ภาพจริงของไดโอด, (ข) สัญลักษณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ของไดโอด	๘
ภาพที่ ๑-๗ (ก) อิเล็กตรอนไหลข้ามรอยต่อ, (ข) เกิดขอบเขตดีพลีชันที่รอยต่อ	๘
ภาพที่ ๑-๘ (ก) ภาพเสมือนของการไบอัสตรง, (ข) การต่อวงจรไบอัสตรง	๙
ภาพที่ ๑-๙ (ก) ภาพเสมือนของการไบอัสกลับ, (ข) การต่อวงจรไบอัสกลับ	๙
ภาพที่ ๑-๑๐ กราฟแรงดัน - กระแสของไดโอด	๑๐
ภาพที่ ๑-๑๑ (ก) วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น, (ข) การไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อแรงดันอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งบวก, (ค) การไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อแรงดันอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งลบ	๑๑
ภาพที่ ๑-๑๒ (ก) วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น, (ข) การไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อแรงดันอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งบวก, (ค) การไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อแรงดันอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งลบ	๑๒
ภาพที่ ๑-๑๓ (ก) วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์, (ข) การไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อแรงดันอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งบวก, (ค) การไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อแรงดันอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งลบ	๑๓
ภาพที่ ๑-๑๔ (ก) ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP, (ข) ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN	๑๔
ภาพที่ ๑-๑๕ (ก) วงจรอินเวอร์เตอร์ และ (ข) การแพร่สารกึ่งตัวนำภายในตัวถังไอซี	๑๔
ภาพที่ ๑-๑๖ แสดงสัญลักษณ์ของเกตพื้นฐาน	๑๕
ภาพที่ ๑-๑๗ แสดงสถานะลอจิกของแต่ละเกต	๑๕

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ ๒-๑ ก วงจรไฟฟ้าทางกายภาพ ข วงจรสมมูล	๑๗
ภาพที่ ๒-๒ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ	๑๗
ภาพที่ ๒-๓ การนิยามขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้า	๑๘
ภาพที่ ๒-๔ ทิศทางของประจุไฟฟ้าบวก	๑๘
ภาพที่ ๒-๕ กระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำ	๑๙
ภาพที่ ๒-๖ ไฟฟ้ากระแสตรง	๑๙
ภาพที่ ๒-๗ ไฟฟ้ากระแสสลับ	๑๙
ภาพที่ ๒-๘ แรงดันตกคร่อมและกระแสที่ไหลผ่านองค์ประกอบในวงจร	๒๑
ภาพที่ ๒-๙ แสดงความต่างศักย์กลับขั้ว	๒๒
ภาพที่ ๒-๑๐ Passive sign convention	๒๒
ภาพที่ ๒-๑๑ วงจรทางกายภาพ	๒๕
ภาพที่ ๒-๑๒ วงจรสมมูลหรือแบบจำลอง	๒๕
ภาพที่ ๒-๑๓ Passive Convention	๒๖
ภาพที่ ๒-๑๔ Active Conventions	๒๖
ภาพที่ ๒-๑๕ ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานของวัสดุต่างๆ	๒๗
ภาพที่ ๒-๑๖ สัญลักษณ์ของความต้านทาน	๒๗
ภาพที่ ๒-๑๗ สัญลักษณ์ของความต้านทานและความนำ	๒๘
ภาพที่ ๒-๑๘ ลักษณะเทียบเคียงทางฟิสิกส์ของความต้านทาน	๒๘
ภาพที่ ๒-๑๙ ตัวอย่าง Passive sign convention	๒๙
ภาพที่ ๒-๒๐ รูปแสดงค่าความต้านทานในขณะเปิดและปิดวงจร	๒๙
ภาพที่ ๒-๒๑ สัญลักษณ์ของแหล่งจ่ายอิสระ	๓๐
ภาพที่ ๒-๒๒ แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าไม่อิสระ	๓๐
ภาพที่ ๒-๒๓ a) รูปวงจรอย่างง่าย b) รูปโนดของวงจร	๓๑
ภาพที่ ๒-๒๔ รูปแสดงลูปของวงจรความต้านทาน	๓๑
ภาพที่ ๒-๒๕ รูปวงจรแบ่งแรงดัน	๓๓

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ ๒-๒๖ รูปทั่วไปของวงจรความต้านทานต่ออนุกรม	๓๔
ภาพที่ ๒-๒๗ รูปวงจรความต้านทานสมมูล	๓๕
ภาพที่ ๒-๒๘ รูปวงจรความต้านทานต่อขนาน	๓๕
ภาพที่ ๒-๒๙ รูปวงจรความต้านทานที่ต่อขนานกับแหล่งจ่ายกระแส	๓๖
ภาพที่ ๒-๓๐ รูปวงจรความต้านทาน n ตัวต่อขนานกับแหล่งจ่ายกระแส	๓๗
ภาพที่ ๒-๓๑ รูปการรวมแหล่งจ่ายอิสระ	๓๘
ภาพที่ ๒-๓๒ รูปวงจรที่มีทั้งแหล่งจ่ายแรงดันและกระแส	๔๒
ภาพที่ ๒-๓๓ รูปการแปลงวงจร	๕๒
ภาพที่ ๒-๓๔ รูปการหาวจรเทวินิน	๕๕
ภาพที่ ๒-๓๕ การหาวจรสมมูลของนอร์ตันจากวงจรสมมูลเทวินิน	๕๙
ภาพที่ ๒-๓๖ รูปวงจร A ต่ออยู่กับโหลด	๖๐
ภาพที่ ๒-๓๗ วงจรสมมูลเทวินินจ่ายกำลังแก่โหลด R_L	๖๐
ภาพที่ ๒-๓๘ กราฟของการส่งผ่านกำลังที่โหลดค่าต่างๆ	๖๑
ภาพที่ ๒-๓๙ วงจรสมมูลนอร์ตันจ่ายกำลังแก่โหลด R_L	๖๑
ภาพที่ ๒-๔๐ (a) A Capacitor with applied voltage V (b) Circuit symbols for capacitors	๖๓
ภาพที่ ๒-๔๑ (a) รูปแบบทั่วไปของตัวเหนี่ยวนำ (b) สัญลักษณ์ในวงจรของตัวเหนี่ยวนำ	๖๕

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์และ/หรือคำย่อ	ความหมายและ/หรือคำเต็ม
eV	Electron Volt
LED	Light Emitting Diode
E	Emitter
C	Collector
B	Base
dB	Decibel
Hz	Hertz
IC	Integrated Circuit
TTL	Transistor–Transistor Logic
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
i	กระแสไฟฟ้ามีหน่วยเป็นแอมแปร์ หรือ คูลอมป์/วินาที
q	ประจุไฟฟ้ามีหน่วยเป็นคูลอม
t	เวลามีหน่วยเป็นวินาที
P	กำลังไฟฟ้ามีหน่วยเป็นวัตต์
W	พลังงานไฟฟ้ามีหน่วยเป็นจูล
R	ค่าความต้านทาน มีหน่วยเป็นโอห์ม
r	สัมประสิทธิ์ความต้านทานของวัสดุ มีหน่วยเป็นโอห์ม-เซนติเมตร
l	ความยาวของขดลวดตัวนำมีหน่วยเป็นเซนติเมตร
A	พื้นที่หน้าตัดของขดลวดมีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร
KCL	Kirchhoff 's Current Law
KVL	Kirchhoff 's Voltage Law

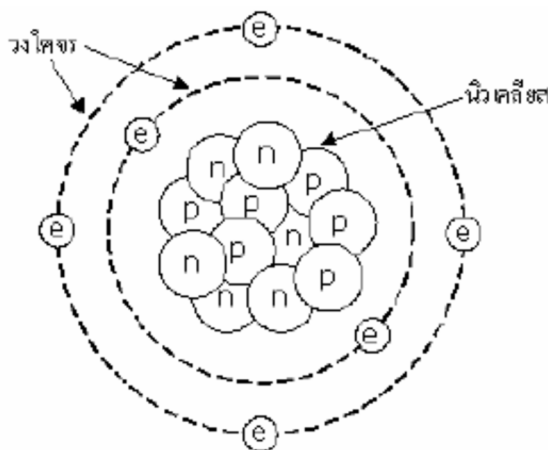
บทที่ ๑

อิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับธาตุ

๑. ประจุไฟฟ้า และกฎคูลอมบ์

ธาตุประกอบด้วยอนุภาค 3 ชนิด คือ นิวตรอน โปรตอน และอิเล็กตรอน นิวตรอนและโปรตอนอยู่รวมกันที่แกนกลาง เรียกว่า “นิวเคลียส” ส่วนอิเล็กตรอนอยู่ในวงโคจรรอบนิวเคลียส ดังภาพที่ ๑-๑



ภาพที่ ๑-๑ ธาตุมีนิวตรอนและโปรตอนอยู่รวมกันที่นิวเคลียส อิเล็กตรอนอยู่ในวงโคจรรอบนิวเคลียส

ผลรวมของจำนวนโปรตอนและนิวตรอนเรียกว่า “เลขมวล” (Mass Number ; A) ส่วนจำนวนโปรตอนเรียกว่า “เลขอะตอม” (Atomic Number ; z) สัญลักษณ์ของธาตุเขียนได้เป็น Z_X สามารถบอกชนิดของธาตุได้ด้วยเลขอะตอม เช่น ธาตุที่มี $z = 1$ คือ ไฮโดรเจน (${}^1_1\text{H}$) , ธาตุที่มี $z = 2$ คือ ฮีเลียม (${}^4_2\text{He}$) และธาตุที่มี $z = 3$ คือ ลิเทียม (${}^7_3\text{Li}$) เป็นต้น อิเล็กตรอนในแต่ละวงโคจรมีจำนวนอิเล็กตรอนสูงสุดจากวงในสุดออกมาเป็น 2 , 8 , 18 , 32 , 64 , ... อิเล็กตรอนในวงโคจรสุดท้ายมีได้สูงสุด 8 ตัว วงโคจรสุดท้ายของธาตุเรียกว่า “วงโคจรวาเลนซ์” (Valance Orbit) อิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรนี้เรียกว่า “อิเล็กตรอนวาเลนซ์” (Valance Electron) ธาตุต่าง ๆ สามารถนำมาเรียงเป็นตารางธาตุ (Periodic Table) ดังภาพที่ ๑-๒ พิจารณาตารางธาตุ ธาตุหมู่ที่ ๑ ถึง ๓ คือ โลหะ (Metallic) ธาตุหมู่ที่ ๕ ถึง ๗ คือ อโลหะ (Non - Metallic) ธาตุหมู่ที่ ๘ คือ ธาตุเฉื่อย (Inert) ที่น่าสนใจคือธาตุหมู่ที่ ๔ หรือสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ซึ่งเป็นสารที่อยู่ระหว่างโลหะและอโลหะ คุณสมบัติทางไฟฟ้าของธาตุหมู่ที่ ๔ ก็คือเป็นฉนวนที่เกือบจะนำไฟฟ้า

THE PERIODIC TABLE OF ELEMENTS

Atomic Number → 1

Symbol → **H**

Name → Hydrogen

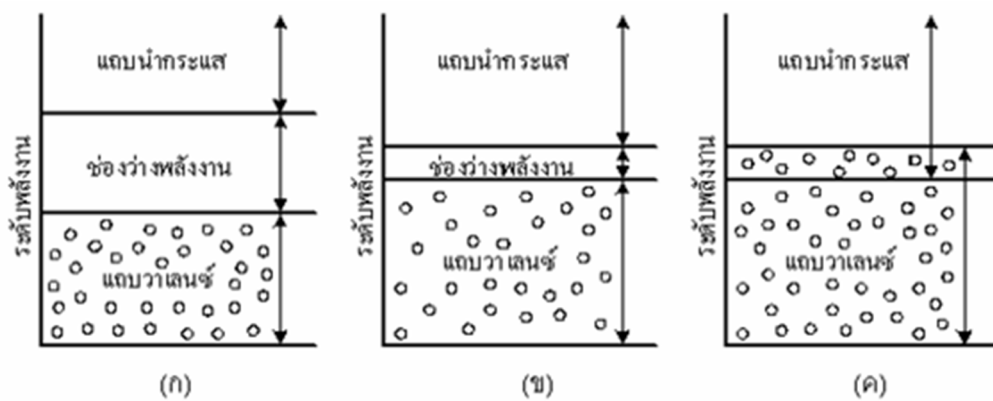
Average Atomic Mass ← 1.008

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18																
1 H Hydrogen	2 He Helium											3 Li Lithium	4 Be Beryllium	5 B Boron	6 C Carbon	7 N Nitrogen	8 O Oxygen	9 F Fluorine	10 Ne Neon														
11 Na Sodium	12 Mg Magnesium											13 Al Aluminum	14 Si Silicon	15 P Phosphorus	16 S Sulfur	17 Cl Chlorine	18 Ar Argon																
19 K Potassium	20 Ca Calcium											21 Sc Scandium	22 Ti Titanium	23 V Vanadium	24 Cr Chromium	25 Mn Manganese	26 Fe Iron	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Copper	30 Zn Zinc												
37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium											39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molybdenum	43 Tc Technetium	44 Ru Ruthenium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Silver	48 Cd Cadmium												
55 Cs Cesium	56 Ba Barium											57-71 Lanthanide Series	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantalum	74 W Tungsten	75 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platinum	79 Au Gold	80 Hg Mercury												
87 Fr Francium	88 Ra Radium											89-103 Actinide Series	104 Rf Rutherfordium	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborgium	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnerium	110 Ds Darmstadtium	111 Rg Roentgenium	112 Cn Copernicium												
		Lanthanide Series																Actinide Series															
		57 La Lanthanum	58 Ce Cerium	59 Pr Praseodymium	60 Nd Neodymium	61 Pm Promethium	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutetium			89 Ac Actinium	90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Americium	96 Cm Curium	97 Bk Berkelium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendelevium	102 No Nobelium	103 Lr Lawrencium

ภาพที่ ๑-๒ ตารางธาตุ

อาจจำแนกธาตุจากคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยพิจารณาจากความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้า อาจเรียกธาตุว่าผลึกสถานะของแข็ง เนื่องจากพิจารณาเฉพาะธาตุในสถานะของแข็ง ตัวนำมีการยึดตัวกันระหว่างอะตอมด้วยพันธะโลหะ (Metallic bond) ซึ่งเป็นพันธะที่ไม่แข็งแรงนัก ดังนั้นตัวนำจึงมีอิเล็กตรอนอิสระ⁽¹⁾ เป็นจำนวนมาก การใช้พลังงานกระตุ้นเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าได้อย่างง่ายดาย⁽²⁾ ในทางตรงข้าม ฉนวนมีการยึดตัวกันระหว่างอะตอมด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalence Bond) ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรงมาก ดังนั้นฉนวนจึงมีอิเล็กตรอนอิสระเป็นจำนวนน้อย และเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ไม่ดี

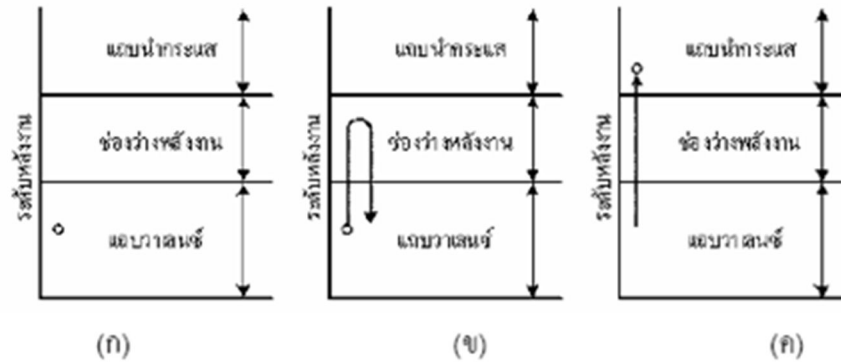
คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของผลึกสถานะของแข็งอาจพิจารณาได้จากแบบจำลองระดับพลังงาน เรียกว่า “ทฤษฎีแถบพลังงาน” โดยแบ่งแถบพลังงานเป็น ๓ ช่วง ช่วงที่ ๑ เป็นแถบพลังงานต่ำเรียกว่า “แถบวาเลนซ์” (Valance Band) อิเล็กตรอนที่อยู่ภายในแถบพลังงานนี้คืออิเล็กตรอนยึดเหนี่ยว⁽³⁾ ซึ่งถูกยึดไว้โดยอะตอมใด ๆ ดังนั้นอิเล็กตรอน ณ แถบพลังงานนี้จึงมีพลังงานศักย์ยึดเหนี่ยวสูง แต่มีพลังงานจลน์น้อย ถัดจากแถบวาเลนซ์คือ “แถบช่องว่างพลังงาน” (Energy Gap Band) ช่องว่างนี้คือที่ว่างระหว่างวงโคจรวาเลนซ์กับภายนอกอะตอม เนื่องจากอิเล็กตรอนวิ่งวนรอบอะตอมเป็นวงโคจร และอิเล็กตรอนต้องอยู่ ณ วงโคจรใด ๆ ดังนั้นอิเล็กตรอนใด ๆ จึงไม่สามารถเข้ามาอยู่ภายในแถบช่องว่างพลังงานได้ แถบพลังงานช่วงที่ ๓ เป็นแถบพลังงานสูงเรียกว่า “แถบนำกระแส” (Conduction Band) อิเล็กตรอนที่อยู่ ณ แถบพลังงานนี้เป็นอิเล็กตรอนที่มีพลังงานมากพอที่จะหลุดออกมาจากการยึดเหนี่ยวของอะตอมและกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ ดังนั้น อิเล็กตรอน ณ แถบพลังงานนี้ จึงมีพลังงานศักย์ยึดเหนี่ยวต่ำมากและมีพลังงานจลน์สูง การกระตุ้นด้วยพลังงานอีกเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าได้ แถบพลังงานของฉนวน สารกึ่งตัวนำและตัวนำ เป็นดังภาพที่ ๑-๓



ภาพที่ ๑-๓ (ก) แถบพลังงานของฉนวน, (ข) แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ, (ค) แถบพลังงานของตัวนำ

- (1) อิเล็กตรอนอิสระ (Free Electron) คือ อิเล็กตรอนที่ไม่ถูกยึดเหนี่ยวไว้โดยอะตอมใด ๆ และมีอิสระในการเคลื่อนย้ายจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งเมื่อได้รับพลังงานกระตุ้นเพียงเล็กน้อย
- (2) กระแสไฟฟ้าเกิดจากการไหลของกลุ่มอิเล็กตรอนอิสระผ่านพื้นที่หน้าตัดใด ๆ ในหนึ่งหน่วยเวลา
- (3) อิเล็กตรอนยึดเหนี่ยว (Bond Electron) คือ อิเล็กตรอนที่ถูกยึดเหนี่ยวไว้ในวงโคจรรอบอะตอมใด ๆ

รูปวงกลมที่อยู่ในภาพที่ ๑-๓ เป็นสัญลักษณ์แทนอิเล็กตรอน ภาพที่ ๑-๓ (ก) แสดงถึงแถบพลังงานของฉนวนช่องว่าง พลังงานของฉนวนกว้างมาก ดังนั้น ต้องใช้พลังงานจำนวนมากในการยกระดับอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงในแถบวาเลนซ์⁽¹⁾ ให้ข้ามช่องว่างพลังงานไปยังแถบนำกระแสได้



ภาพที่ ๑-๔ (ก) ฉนวนที่มี ๑ อิเล็กตรอน, (ข) พลังงานที่จ่ายให้อิเล็กตรอนไม่มากพอที่จะข้ามช่องว่างพลังงาน, (ค) พลังงานที่จ่ายให้อิเล็กตรอนมากพอที่จะข้ามช่องว่างพลังงาน

พิจารณาภาพที่ ๑-๔ (ก) สมมติให้ฉนวนมี ๑ อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ ถ้าใส่พลังงานให้อิเล็กตรอนดังกล่าว อิเล็กตรอนจะเปลี่ยนระดับพลังงาน ถ้าพลังงานไม่เพียงพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนข้ามช่องว่างพลังงานอิเล็กตรอนจะปลดปล่อยพลังงานที่ได้รับออกสู่สิ่งแวดล้อมมาจอยู่ในรูปของแสง ความร้อน ฯลฯ แล้วกลับเข้ามาสู่ระดับพลังงานเดิม ดังภาพที่ ๑-๔ (ข) ในกรณีนี้ไม่เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า ภาพที่ ๑-๔ (ค) อิเล็กตรอนได้รับพลังงานมากเพียงพอที่จะข้ามช่องว่างพลังงาน ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงเปลี่ยนระดับพลังงานเข้าไปสู่แถบนำกระแส และเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า จะเห็นได้ว่า เนื่องจากแถบช่องว่างพลังงานของฉนวนกว้างมาก การทำให้ฉนวนเกิดการนำกระแสไฟฟ้าจึงต้องใช้พลังงานสูงมากเช่น อากาศต้องใช้แรงดันไฟฟ้าประมาณ 30 kV ถึง 50 kV⁽²⁾ จึงทำให้เกิดการนำกระแสในช่วงระยะทาง 1 เซนติเมตร ในวัตถุแข็ง แรงดันพังทลายจะเป็นตัวการทำให้ฉนวนเกิดการนำกระแสและสูญเสียสภาพดั้งเดิมของของแข็งไปเมื่อเลิกนำกระแสแล้ว ถ้าแรงดันพังทลายเกิดขึ้นในลูกถ้วยที่รองรับสายส่งไฟฟ้าตามเสา ก็ต้องเปลี่ยนลูกถ้วยนั้น เนื่องจากลูกถ้วยสูญเสียสภาพไปแล้วนั่นเอง ในกรณีนี้มักเกิดขึ้นเมื่อมีฟ้าผ่าใกล้ ๆ เสาไฟฟ้า ภาพที่ ๑-๓ (ข) คือแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำมีอะตอมยึดกันด้วยพันธะโควาเลนซ์ แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำจึงใกล้เคียงกับฉนวน ในสภาวะที่ยังไม่ถูกกระตุ้นด้วยพลังงาน อิเล็กตรอนอยู่ที่แถบวาเลนซ์ในสภาวะปกติสารกึ่งตัวนำจึงไม่นำไฟฟ้า หรือมีสภาพเป็นฉนวนช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำแคบมากประมาณ 1-3 eV⁽³⁾ การกระตุ้นด้วยพลังงานเพียงเล็กน้อยสามารถทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานไปสู่แถบนำกระแสได้และเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า

(1) อิเล็กตรอนยึดเหนี่ยว ที่อยู่ใกล้ขอบบนของแถบวาเลนซ์

(2) ระดับแรงดันนี้เรียกว่าแรงดันพังทลาย (Breakdown Voltage) ขึ้นอยู่กับความชื้นของอากาศ

(3) $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$

ช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำแปรตามอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิสูงช่องว่างพลังงานจะแคบลงตามตารางที่ ๑-๑

ตารางที่ ๑-๑ แสดงช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำบางชนิด ที่อุณหภูมิ 0 K และ 300 K

สารกึ่งตัวนำ	ช่องว่างพลังงาน (0 K) (eV)	ช่องว่างพลังงาน (300 K) (eV)
Ge	0.7437	0.6630
Si	1.1700	0.1250
GaAs	1.5190	0.4220

ภาพที่ ๑-๓ (ค) คือแถบพลังงานของตัวนำ แถบวาเลนซ์และแถบนำกระแสเหลื่อมกัน และไม่มีช่องว่างพลังงาน ดังนั้น อิเล็กตรอนบางส่วนของแถบวาเลนซ์จึงเป็นอิเล็กตรอนในแถบนำกระแสด้วยอิเล็กตรอนกลุ่มนี้พร้อมที่จะเคลื่อนที่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยพลังงานเพียงเล็กน้อย ตัวนำจึงนำกระแสไฟฟ้าได้ง่าย

๒. วัสดุสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Device)

สารกึ่งตัวนำเป็นสิ่งประดิษฐ์สถานะของแข็ง (Solid State Device) ทำขึ้นจากสารที่เป็นเฟสของแข็ง ปัจจุบันสารกึ่งตัวนำมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ใช้พลังงานน้อย มีประสิทธิภาพสูง และเป็นที่ยอมรับใช้อย่างกว้างขวาง สารกึ่งตัวนำมีหลายประเภท แต่ละประเภทก่อให้เกิดคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม สารกึ่งตัวนำแต่ละประเภทก็มีหลักการทำงานคล้ายกัน หลักการพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำ คือ การทำให้เกิดพาหะทางไฟฟ้า ๒ ชนิด คือ โฮล (Hole) และ อิเล็กตรอน (Electron) เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในผลึกของสารกึ่งตัวนำ ตำราเล่มนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำและการประยุกต์ใช้บางประการเท่านั้น

๒.๑ ประเภทของสารกึ่งตัวนำ

สารกึ่งตัวนำแบ่งเป็น ๓ ประเภท คือ สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุเดี่ยว (Element Semiconductor), สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุประกอบ (Compound Semiconductor) และ สารกึ่งตัวนำประเภทอัลลอยด์ (Alloy Semiconductor)

๒.๑.๑ สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุเดี่ยว

สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุเดี่ยวคือสารกึ่งตัวนำที่อยู่ในธาตุหมู่ ๔ เช่น คาร์บอน (C), ซิลิกอน (Si), เยอรมันเนียม (Ge), ดีบุก (Sn), ตะกั่ว (Pb) เป็นต้น ธาตุเหล่านี้มีอิเล็กตรอนในวงโคจรวาเลนซ์เท่ากัน จำนวน ๔ อิเล็กตรอน ดังนั้น สารกึ่งตัวนำจะเสถียรภาพก็ต่อเมื่อ

มีอิเล็กทรอนิกส์อีก ๔ ตัวเข้ามาอยู่ในวงโคจรดังกล่าวนี้ สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุเดี่ยวที่นิยมใช้มากที่สุด ในปัจจุบันคือ ซิลิกอน เนื่องจากได้หาง่ายเพราะเป็นส่วนหนึ่งของทรายที่มีอยู่ทั่วไป สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุเดี่ยวเป็นวัสดุพื้นฐานในการสร้างวงจรรวม

๒.๑.๒ สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุประกอบ

สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุประกอบเกิดจากสารประกอบของ ๒ ธาตุ สารกึ่งตัวนำประเภทนี้ มีคุณสมบัติพิเศษในการดูดกลืนหรือปลดปล่อยแสง จึงนิยมสร้างเป็น “อุปกรณ์แสง” (Opto – Devices) เช่น ไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode; LED) หรือ ไดโอดเลเซอร์ (Laser Diode) เป็นต้น กลุ่มย่อยของสารกึ่งตัวนำประเภทธาตุประกอบมีดังนี้

๒.๑.๒.๑ สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุประกอบกลุ่ม ๒ – ๖

เป็นธาตุประกอบที่เกิดจากธาตุหมู่ ๒ และ ๖ เช่น แคดเมียมเทลลูไรด์ (Cadmium Telluride ; CdTe) ซิงค์ออกไซด์ Zinc Oxide) เป็นต้น

๒.๑.๒.๒ สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุประกอบกลุ่ม ๓ – ๕

เป็นธาตุประกอบที่เกิดจากธาตุหมู่ ๓ และ ๕ เช่น อะลูมิเนียมอาเซไนด์ (Aluminium Arsenide ; AlAs) แกลเลียมไนไตรด์ (Gallium Nitride) เป็นต้น

๒.๑.๒.๓ สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุประกอบกลุ่ม ๔ – ๔

เป็นธาตุประกอบที่เกิดจาก ๒ ธาตุในหมู่ ๔ เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon Carbide ; SiC) เป็นต้น

๒.๑.๒.๔ สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุประกอบกลุ่ม ๔ – ๖

เป็นธาตุประกอบที่เกิดจาก ๔ ธาตุหมู่ ๔ และ ๖ เช่น ลีดซีลีไนด์ (Lead Selenide ; PbSe) ลีดเทลลูไรด์ (Lead Telluride ; PbTe) เป็นต้น

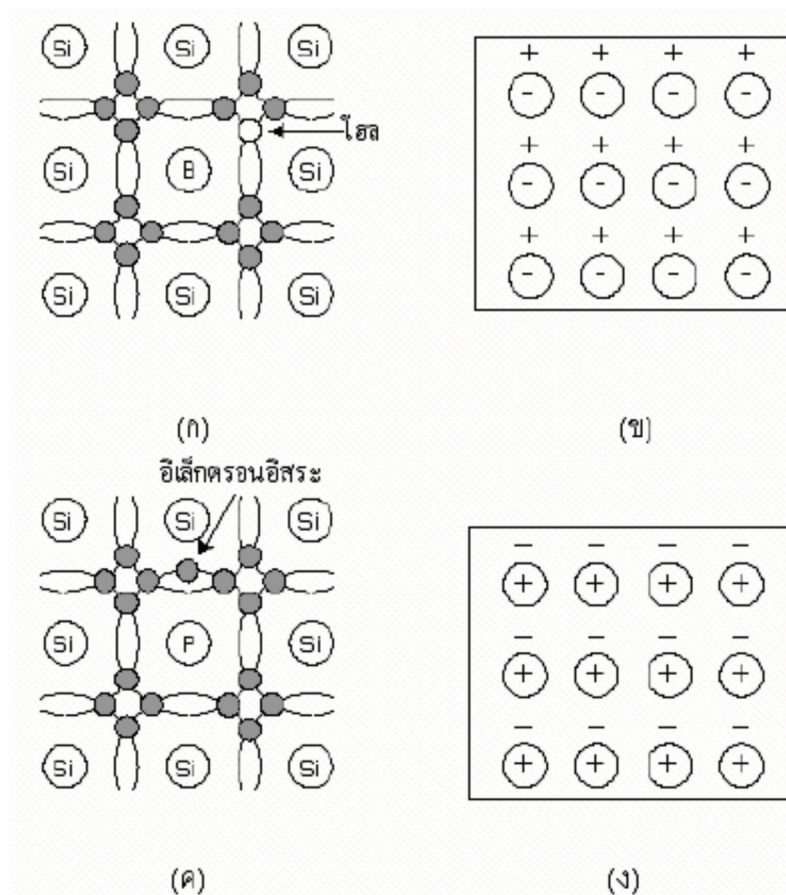
๒.๑.๓ สารกึ่งตัวนำประเภทอัลลอยด์

สารกึ่งตัวนำประเภทอัลลอยด์ เกิดจากอัลลอยด์ของธาตุตั้งแต่ ๒ ชนิดขึ้นไป เช่น อัลลอยด์ของอะลูมิเนียม แกลเลียม สารหนู และ ฟลวง เป็น $Al_aGa_{1-a}As_bSb_{1-b}$ โดย a และ b มีค่าระหว่าง ๐ ถึง ๑ เช่น $Al_{0.4}Ga_{0.6}As_{0.3}Sb_{0.7}$ หมายความว่า อัลลอยด์นี้ประกอบด้วย อะลูมิเนียม ๔ อะตอม แกลเลียม ๖ อะตอม สารหนู ๓ อะตอม และ ฟลวง ๗ อะตอม สารกึ่งตัวนำประเภทอัลลอยด์อื่น เช่น $Si_{1-a}Ge_a$, $GaAs_{1-a}P_a$, $GaIn_{1-a}As_a$, $AlGa_{1-a}As_a$, $GaIn_{1-a}As_{1-b}P_b$ เป็นต้น

๓. การสร้างพาหะบนสารกึ่งตัวนำ

สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ซิลิกอน (Silicon; Si) หรือเยอรมันเนียม (Germanium; Ge) มีอิเล็กตรอนในวงโคจรสุดท้ายเท่ากับ ๔ จับตัวกันเป็นผลึก โดยใช้อิเล็กตรอนร่วมกันเมื่อนำสารกึ่งตัวนำมาเจือปนกับโลหะ เช่น โบรอน (Boron ; B) ซึ่งมีอิเล็กตรอนในวงโคจรสุดท้ายเท่ากับ ๓ ส่งผลให้อิเล็กตรอนในบางวงโคจร มีไม่ครบ ๘ ตัว ตำแหน่งที่อิเล็กตรอนหายไป เรียกว่า โฮล (Hole) มีลักษณะเป็นประจุบวกเสมือน สารผสมนี้มีชื่อเรียกเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด P ดังภาพที่ ๑-๕ (ก) ภาพเสมือนของสารกึ่งตัวนำชนิด P เป็นดังภาพที่ ๑-๕ (ข) เครื่องหมายบวกหมายถึงโฮล วงกลมที่มีเครื่องหมายลบอยู่ภายในคืออะตอมที่มีโฮลอยู่โดยรอบ ถ้าโฮลสูญหายไป อะตอมจะมีศักย์เป็นลบ เมื่อนำสารกึ่งตัวนำมาเจือปนกับโลหะ เช่น ฟอสฟอรัส (Phosphorus; P) ซึ่งมีอิเล็กตรอนในวงโคจรสุดท้ายเท่ากับ ๕ เนื่องจากมีอิเล็กตรอนมากกว่าที่จะจับคู่ในวงโคจรสุดท้าย ส่งผลให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระ อิเล็กตรอนอิสระมีประจุไฟฟ้าลบ สารผสมนี้มีชื่อเรียกเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด N ดังภาพที่ ๕ (ค) ภาพเสมือนของสารกึ่งตัวนำชนิด N เป็นดังภาพที่ ๕ (ง)

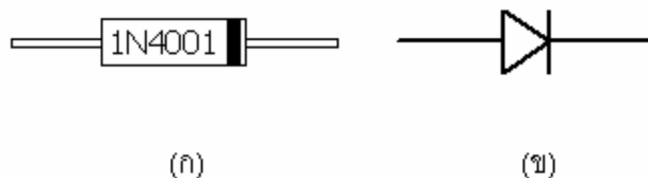
เครื่องหมายลบ หมายถึงอิเล็กตรอนอิสระ วงกลมที่มี เครื่องหมายบวกอยู่ภายในคือ อะตอมที่มีอิเล็กตรอนอิสระอยู่โดยรอบ ถ้าอิเล็กตรอนอิสระสูญหายไป อะตอมจะมีศักย์เป็นบวก



ภาพที่ ๑-๕ (ก) สารกึ่งตัวนำชนิด P , (ข) ภาพเสมือนสารกึ่งตัวนำชนิด P, (ค) สารกึ่งตัวนำชนิด N, (ง) ภาพเสมือนสารกึ่งตัวนำชนิด N

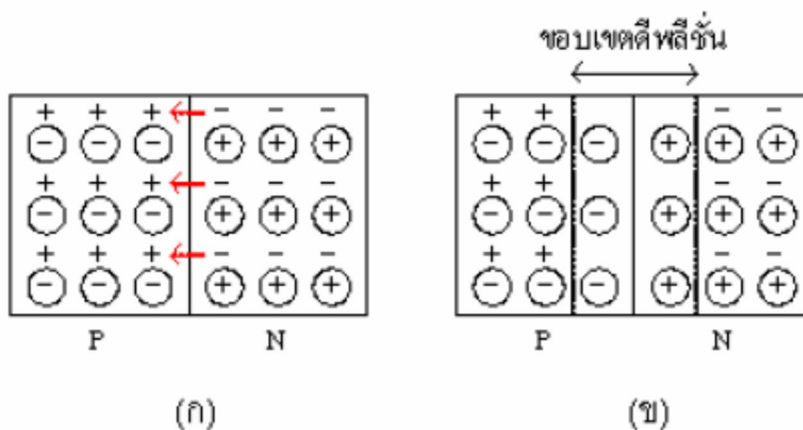
๔. ไดโอดแบบรอยต่อ P – N (P – N Junction Diode)

ไดโอดเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ มีรูปร่างดังภาพที่ ๖ (ก) เบอร์ของไดโอดพิมพ์ที่ด้านข้าง ด้านพิมพ์สีคือด้านที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด N สัญลักษณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ดังภาพที่ ๑-๖ (ข)



ภาพที่ ๑-๖ (ก) ภาพจริงของไดโอด, (ข) สัญลักษณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ของไดโอด

ไดโอดแบบรอยต่อ P – N สร้างจากการนำเอาสารกึ่งตัวนำชนิด P และ N มาประกบกัน โหมด และอิเล็กตรอนที่บริเวณรอยต่อจะรวมตัวกันเป็นชั้นฟิล์มที่เป็นกลางทางไฟฟ้า เรียกว่า “ขอบเขตดีพลีชัน” (Depletion Region) ดังภาพที่ ๑-๗ ขอบเขตดีพลีชัน มีความต่างศักย์มากพอที่จะกั้นไม่ให้อิเล็กตรอนอิสระและโฮลทั้งสองด้านไหลเข้ารวมกันที่อุณหภูมิ ๒๕ องศาเซลเซียส ไดโอดชนิดเยอรมันเนียมมีความต่างศักย์ที่รอยต่อ ๐.๒ โวลต์ ในขณะที่ไดโอดชนิดซิลิกอนมีความต่างศักย์ที่รอยต่อ ๐.๗ โวลต์ ไดโอดมีคุณสมบัติทางไฟฟ้า ๒ ประการคือ ไบอัสตรง (Forward Bias) และ ไบอัสกลับ (Reverse Bias)

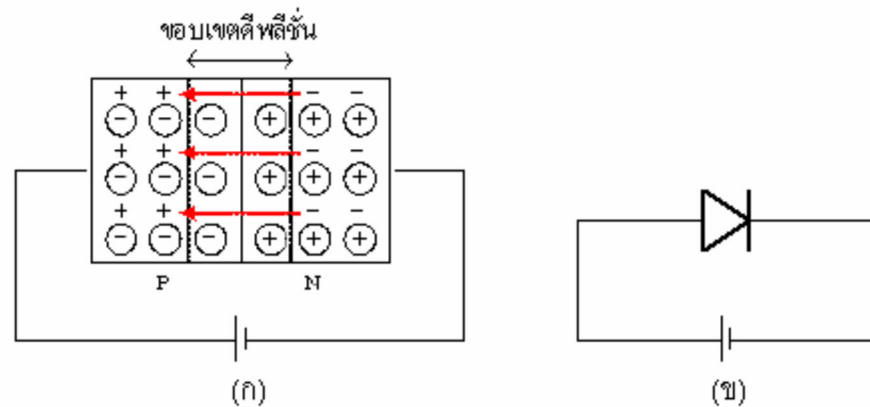


ภาพที่ ๑-๗ (ก) อิเล็กตรอนไหลข้ามรอยต่อ, (ข) เกิดขอบเขตดีพลีชันที่รอยต่อ

๔.๑ ไบอัสตรง

ต่อขั้วบวกและลบของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้ากับขั้ว P และ N ของไดโอด ตามลำดับ ดังภาพที่ ๑-๘ ผลก็คือ อิเล็กตรอนอิสระทางด้าน N ถูกขั้วลบของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ผลักข้ามรอยต่อดีพลีชันไปยังขั้ว P ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า กราฟแรงดัน – กระแสของการไบอัสตรงเป็นรูปพาราโบลา ดังภาพที่ ๑-๑๐ จุดเปลี่ยนโค้งของพาราโบลา (Knee Point) ตรงกับ

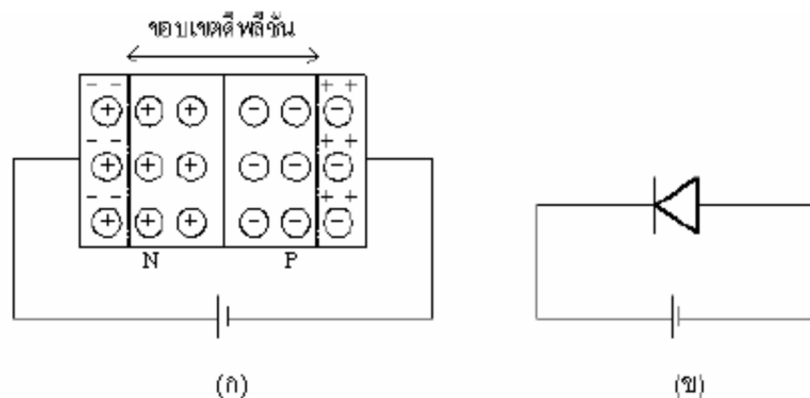
แรงดันที่รอยต่อพอดิถ้าจ่ายแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่งไดโอดจะไหม้เพราะทนอัตรากำลังไม่ไหว จุดนี้เรียกว่า Burnout ไดโอดจะเสียหาย



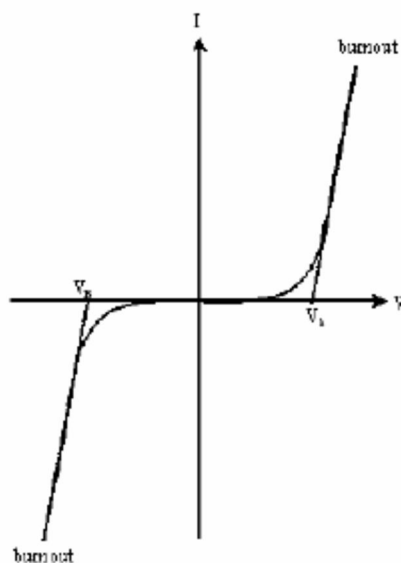
ภาพที่ ๑-๘ (ก) ภาพเสมือนของการไบอัสตรง, (ข) การต่อวงจรไบอัสตรง

๔.๒ ไบอัสกลับ

ต่อขั้วบวกและลบของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้ากับขั้ว N และ P ของไดโอดตามลำดับ ดังภาพที่ ๑-๙ ผลก็คือ อิเล็กตรอนอิสระทางด้าน N ถูกขั้วบวกของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าดึงดูดในขณะเดียวกัน โฮลที่ขั้ว P ก็ถูกขั้วลบของแหล่งจ่ายแรงดันดึงดูด ดังนั้นขอบเขตตีฟลีชันจึงกว้างมากขึ้นกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไดโอดได้น้อยมาก ถ้าเพิ่มแรงดันไปเรื่อย ๆ จนถึงจุดหนึ่งกระแสไฟฟ้าจะเริ่มไหลอย่างทันทีทันใดจุดนี้เรียกว่า Breakdown Voltage ถ้าจ่ายแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นไปอีกจนถึงจุดหนึ่งไดโอดจะไหม้ เพราะทนอัตรากำลังไม่ไหวจุดนี้เรียกว่า Burnout ไดโอดจะเสียหาย



ภาพที่ ๑-๙ (ก) ภาพเสมือนของการไบอัสกลับ, (ข) การต่อวงจรไบอัสกลับ



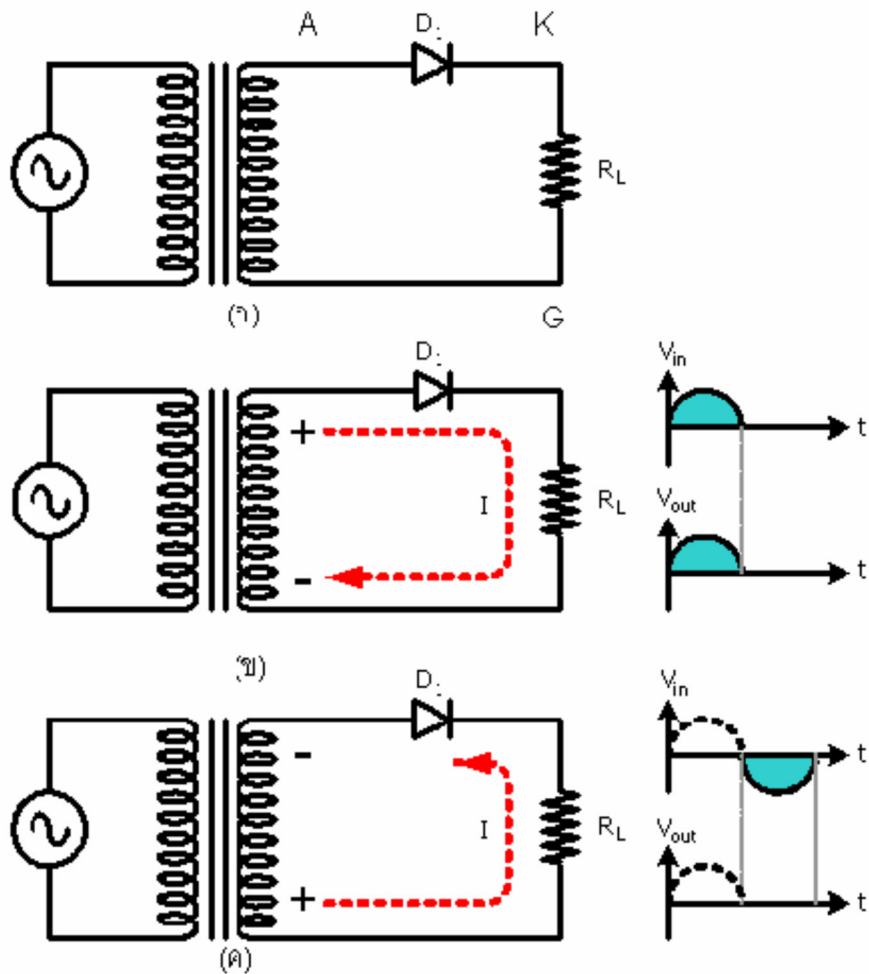
ภาพที่ ๑-๑๐ กราฟแรงดัน - กระแสของไดโอด

๕. วงจรเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Rectifier Circuit)

วงจรเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีอีกชื่อหนึ่ง คือ “วงจรเรียงกระแส” วงจรเรียงกระแสมี ๓ ประเภท คือ วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half - Wave Rectifier), วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (Full - Wave Rectifier) และ วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ (Bridge Rectifier)

๕.๑ วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น

คือวงจรดังภาพที่ ๑-๑๑ (ก) พิจารณาภาพที่ ๑-๑๑ (ข) ถ้าอินพุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งบวก กระแสไหลจากขั้วบวกผ่านไดโอดแบบไบอัสตรงไปยังขั้วลบ ดังนั้นสามารถวัดแรงดันเอาต์พุตที่ R_L ได้ พิจารณาภาพที่ ๑-๑๑ (ค) ถ้าอินพุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งลบ กระแสไหลจากขั้วบวกผ่านไดโอดแบบไบอัสกลับทำให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลไปยังขั้วลบ ดังนั้นจึงไม่สามารถวัดแรงดันเอาต์พุตที่ R_L วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นมีแรงดันเอาต์พุตเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ๐.๔๗ เท่าของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

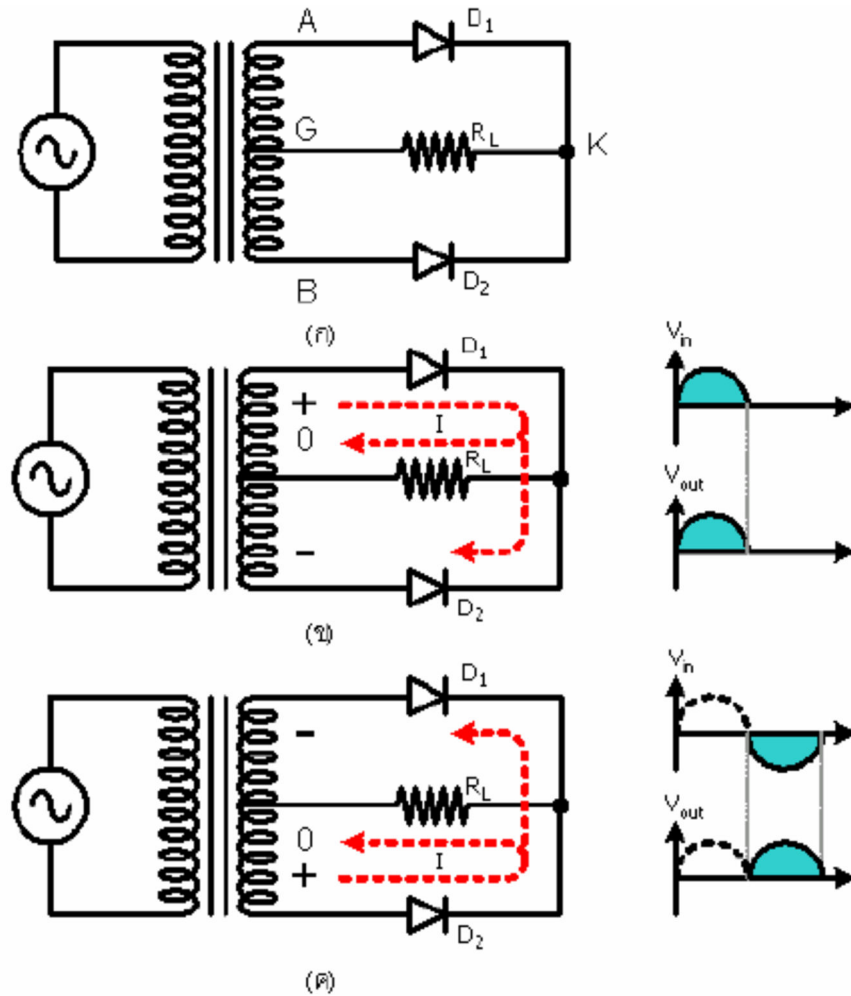


ภาพที่ ๑-๑๑ (ก) วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น, (ข) การไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อแรงดันอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งบวก, (ค) การไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อแรงดันอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งลบ

๕.๒ วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น

คือวงจรดังภาพที่ ๑-๑๒ (ก) พิจารณาภาพที่ ๑-๑๒ (ข) ถ้าอินพุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งบวก กระแสไหลจากขั้วบวกผ่านไดโอด D_1 แบบไบอัสตรงไปถึงกราวด์ ขณะที่กระแสไม่สามารถผ่านไดโอด D_2 ได้เนื่องจากเป็นไบอัสกลับ ดังนั้นจึงสามารถวัดแรงดันเอาต์พุตที่ R_L ได้ ด้านขวาของ R_L เป็นแรงดันไฟฟ้าบวกเมื่อเทียบกับทางด้านซ้าย พิจารณาภาพที่ ๑-๑๒ (ค) ถ้าอินพุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งลบกระแสไหลจากขั้วบวกผ่านไดโอด D_2 แบบไบอัสตรงไปถึงกราวด์ ขณะที่กระแสไม่สามารถผ่านไดโอด D_1 ได้ เนื่องจากเป็นไบอัสกลับ ดังนั้นจึงสามารถวัดแรงดันเอาต์พุตที่ R_L ได้ ด้านขวาของ R_L เป็นแรงดันไฟฟ้าบวกเมื่อเทียบกับทางด้านซ้ายเช่นเดียวกัน ไม่ว่าขั้วของไฟฟ้ากระแสสลับจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรก็ตาม ทางด้านขวาของตัวต้านทาน R_L เป็นบวกเสมอเมื่อเทียบกับทางด้านซ้าย ดังนั้น แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จาก R_L จึงเป็นแรงดันไฟฟ้า

กระแสตรง วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นมีแรงดันเอาต์พุตเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ๐.๒๕ เท่าของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

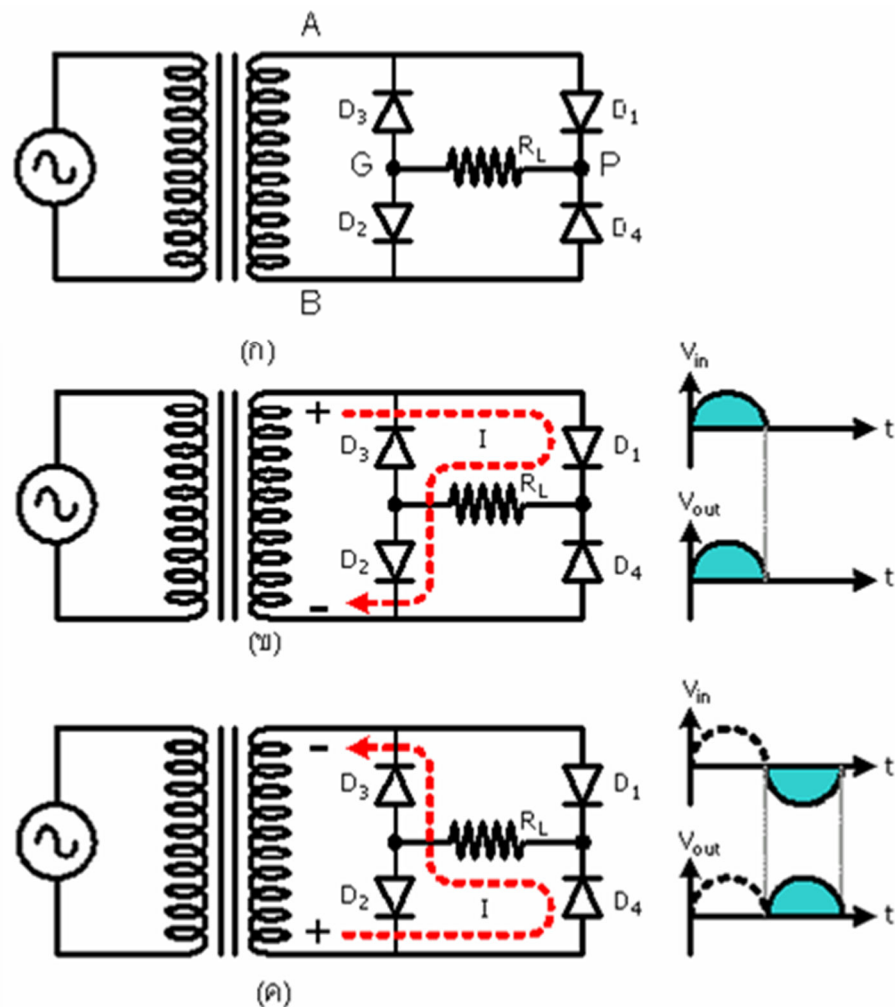


ภาพที่ ๑-๑๒ (ก) วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น, (ข) การไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อแรงดันอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งบวก, (ค) การไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อแรงดันอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งลบ

๕.๓ วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์

คือวงจรดังภาพที่ ๑-๑๓ (ก) พิจารณาภาพที่ ๑-๑๓ (ข) ถ้าอินพุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งบวก กระแสไหลจากขั้วบวกไปอัสตรงผ่านไดโอด D_1 และ D_2 ไปถึงขั้วลบ ดังนั้นจึงสามารถวัดแรงดันเอาต์พุตที่ R_L ได้ ด้านขวาของ R_L เป็นแรงดันไฟฟ้าบวกเมื่อเทียบกับทางด้านซ้ายพิจารณาภาพที่ ๑-๑๓ (ค) ถ้าอินพุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งลบ กระแสไหลจากขั้วบวกไปอัสตรงผ่านไดโอด D_4 และ D_2 ไปถึงขั้วลบ ดังนั้นจึงสามารถวัดแรงดันเอาต์พุตที่ R_L ได้ ด้านขวาของ R_L เป็นแรงดันไฟฟ้าบวกเมื่อเทียบกับทางด้านซ้ายเช่นเดียวกัน จะเห็นได้ว่า ไม่ว่าขั้วของไฟฟ้ากระแสสลับจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรก็ตาม ทางด้านขวาของตัวต้านทาน R_L เป็นบวกเสมอ

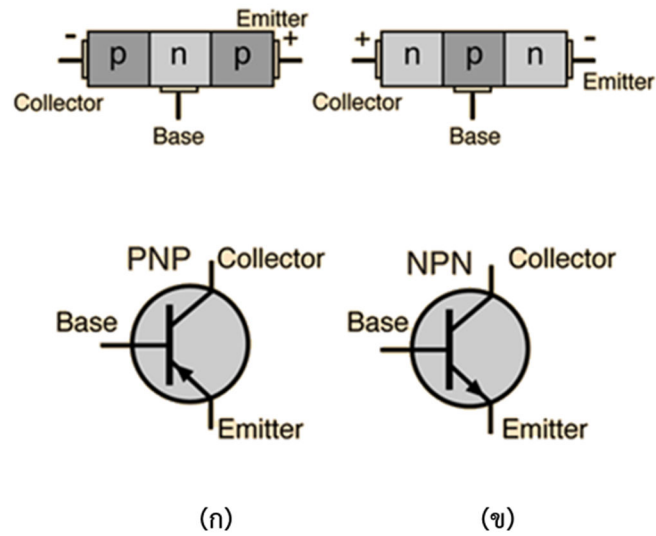
เมื่อเทียบกับทางด้านซ้าย ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จาก R_L จึงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์มีแรงดันเอาต์พุตเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ๐.๔๓ เท่าของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ



ภาพที่ ๑-๑๓ (ก) วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์, (ข) การไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อแรงดันอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งบวก, (ค) การไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อแรงดันอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสสลับครึ่งลบ

๖. ทรานซิสเตอร์ (Transistor)

ทรานซิสเตอร์เกิดจากการนำสารกึ่งตัวนำ ๓ ชั้น มาประกบกัน ส่วนประกบด้านนอกทั้ง ๒ ด้านทำจากสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกัน เรียกว่า “อิมิตเตอร์” (Emitter ; E) และ “คอลเล็กเตอร์” (Collector ; C) ส่วนกลางทำจากสารกึ่งตัวนำชนิดตรงข้าม เรียกว่า “เบส” (Base ; B) การประกบกันของสารกึ่งตัวนำ ทำได้โดยการโด๊ป (Dope) สารกึ่งตัวนำที่ขา E มีความหนาของการโด๊ปน้อยกว่าสารกึ่งตัวนำที่ขา C ของทรานซิสเตอร์ ดังนั้นคุณสมบัติทางไฟฟ้าของขา E และ C จึงไม่เท่ากัน ทรานซิสเตอร์มี ๒ ชนิด ดังภาพที่ ๑-๑๔

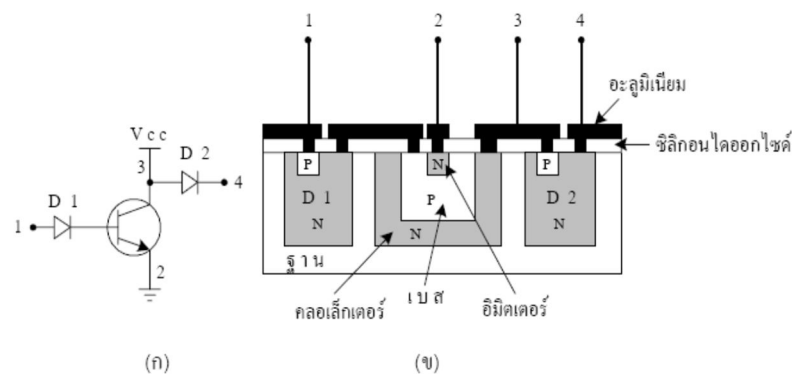


ภาพที่ ๑-๑๔ (ก) ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP, (ข) ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN

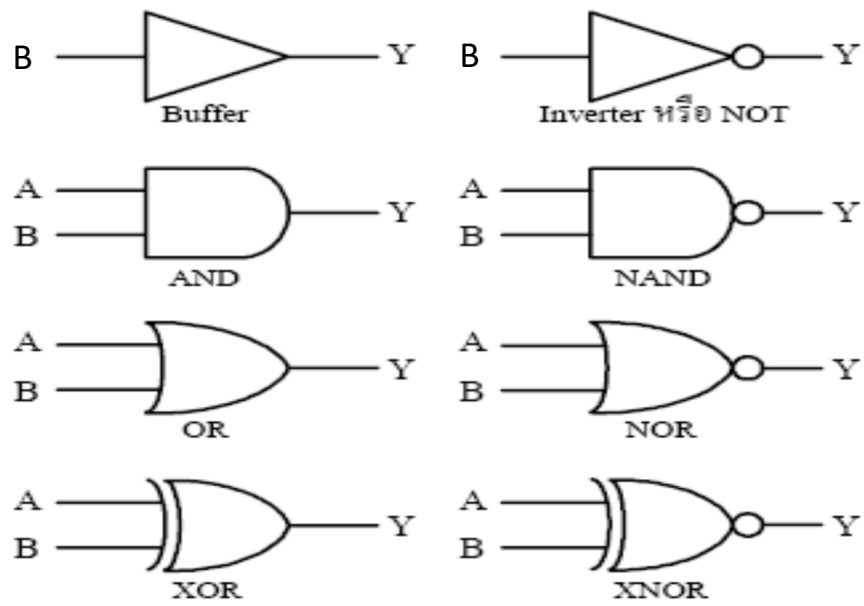
การต่อวงจรทรานซิสเตอร์ทำได้ ๓ แบบ ได้แก่ วงจรเบสร่วม (Common Base Circuit), วงจรคอลเล็กเตอร์ร่วม (Common Collector Circuit) และวงจรอิมิตเตอร์ร่วม (Common Emitter Circuit)

๗. วงจรรวมเบื้องต้น

วงจรรวมหรือไอซี (IC) สร้างขึ้นจากผลึกเดี่ยวของซิลิกอน และจัดรูปให้เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เช่น ทรานซิสเตอร์ หลาย ๆ ตัว ส่วนดีของวงจรรวมก็คือมีขนาดเล็ก กินกระแสต่ำ และมีความน่าเชื่อถือสูง สมมติว่าต้องการสร้าง IC เป็นวงจรรวมอินเวอร์เตอร์ดังภาพที่ ๑-๑๕ (ก) สามารถแพร่ส่วนประกอบต่าง ๆ ดังภาพที่ ๑-๑๕ (ข) ปกติแล้วไอซีอินเวอร์เตอร์ เช่น 74LS04 มีอินเวอร์เตอร์อยู่ ๖ ชุดในตัวถึงเดียวกัน ภาพที่ ๑-๑๕ ยกตัวอย่างอินเวอร์เตอร์เพียงชุดเดียวเท่านั้น



ภาพที่ ๑-๑๕ (ก) วงจรรวมอินเวอร์เตอร์ และ (ข) การแพร่สารกึ่งตัวนำภายในตัวถึงไอซี



ภาพที่ ๑-๑๖ แสดงสัญลักษณ์ของเกตพื้นฐาน

B	Y=Buffer B
0	0
1	1

B	Y=NOT B
0	1
1	0

A	B	Y=A AND B
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

A	B	Y=A NAND B
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

A	B	Y=A OR B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

A	B	Y=A NOR B
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

A	B	Y=A XOR B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

A	B	Y=A XNOR B
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

ภาพที่ ๑-๑๗ แสดงสถานะลอจิกของแต่ละเกต

ไอซีแบ่งได้เป็น ๒ ประเภท คือ TTL และ CMOS โดย TTL เป็นไอซีชนิดทรานซิสเตอร์ ภาพที่ ๑-๑๕ คือไอซีชนิดนี้ ส่วน CMOS เป็นไอซีชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้า TTL มีข้อดีคือสามารถทำงานได้ที่ความถี่สูง แต่จะกินกระแสมากและทำงานได้ที่แรงดัน 5 V เท่านั้น ปกติ TTL สามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงสุดประมาณ 42 MHz. ไอซี CMOS กินกระแสต่ำ และมีช่วงแรงดันใช้งานกว้างตั้งแต่ 3 V ถึง 15 V แต่ทำงานได้ที่ความถี่ไม่สูงนัก ปกติ CMOS สามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงสุดประมาณ 30 MHz. เกตพื้นฐานของไอซี มีสัญลักษณ์ดังภาพที่ ๑-๑๖ ถ้ากำหนดให้แรงดันไฟฟ้า ๕ โวลต์คือลอจิก ๑ และแรงดันไฟฟ้า ๐ โวลต์คือลอจิก ๐ เมื่อกำหนดให้ A และ B คืออินพุต และ Y คือเอาต์พุต สถานะลอจิกของแต่ละเกตเป็นดังภาพที่ ๑-๑๗ ภาพที่ ๑-๑๖ สามารถเขียนเป็นสัญลักษณ์ทางพีชคณิตดังนี้

Y = Buffer B สัญลักษณ์ทางพีชคณิตคือ $Y = B$

Y = NOT B สัญลักษณ์ทางพีชคณิตคือ $Y = \overline{B}$

Y = A AND B สัญลักษณ์ทางพีชคณิตคือ $Y = A \bullet B$

Y = A NAND B สัญลักษณ์ทางพีชคณิตคือ $Y = \overline{A \bullet B}$

Y = A OR B สัญลักษณ์ทางพีชคณิตคือ $Y = A + B$

Y = A NOR B สัญลักษณ์ทางพีชคณิตคือ $Y = \overline{A + B}$

Y = A XOR B สัญลักษณ์ทางพีชคณิตคือ $Y = A \oplus B$

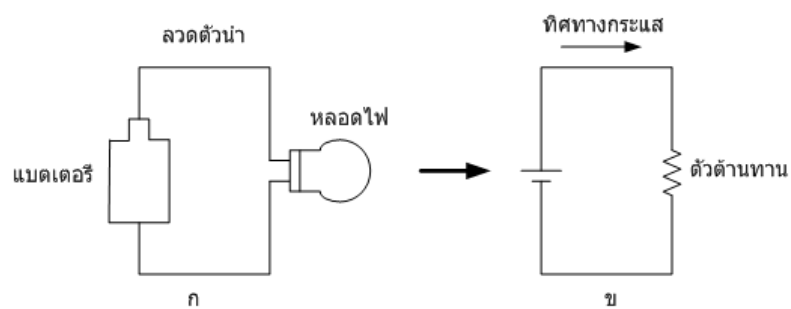
Y = A XNOR B สัญลักษณ์ทางพีชคณิตคือ $Y = \overline{A \oplus B}$

บทที่ ๒

การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า

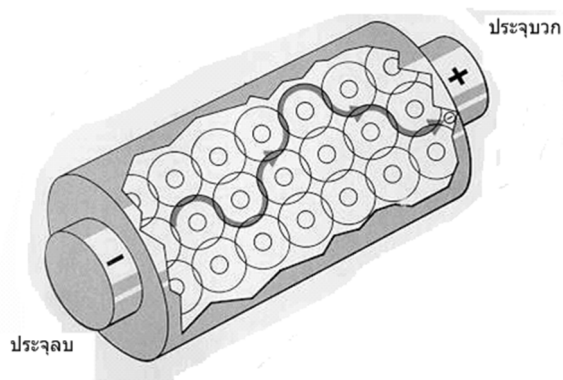
พื้นฐานทางไฟฟ้า (Basic Concept)

๑. พื้นฐานทางไฟฟ้า (Basic Concept)



ภาพที่ ๒-๑ ก วงจรไฟฟ้าทางกายภาพ ข วงจรสมมูล

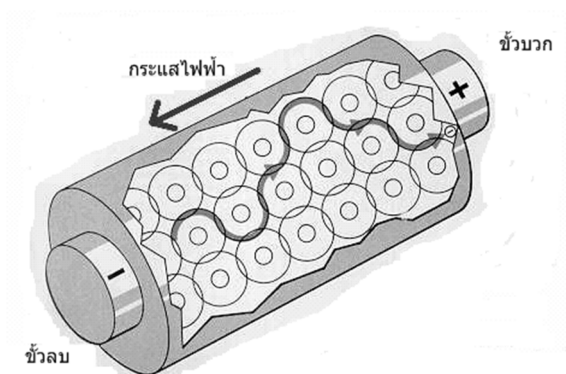
ไฟฟ้าเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของประจุ
วงจรไฟฟ้าคือการเชื่อมต่อร่วมกันระหว่างองค์ประกอบทางไฟฟ้าในลักษณะวงปิด เพื่อให้
กระแสไฟฟ้าสามารถไหลได้อย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ ๒-๒ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ

ประจุอิเล็กตรอนอิสระจะถูกผลักโดยประจุลบและถูกดึงดูดโดยประจุบวก โดยเคลื่อนตัว
ไปยังประจุบวก

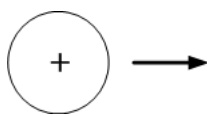
การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระดังกล่าวจะตอบสนองต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอก



ภาพที่ ๒-๓ การนิยามขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้าสามารถนิยามได้ในเทอม “ขนาดและทิศทาง”

๑.๑ กระแสไฟฟ้า



ภาพที่ ๒-๔ ทิศทางของประจุไฟฟ้าบวก

ปกติทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าจะถูกแทนด้วยทิศทางการไหลของประจุบวก
ข้อกำหนดดังกล่าวถูกค้นพบโดย Benjamin Franklin และถูกใช้มาจนกระทั่งปัจจุบัน

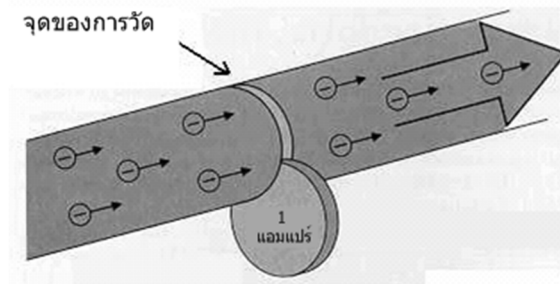
สูตร
$$i(t) = \frac{dq}{dt}$$

i คือ กระแสไฟฟ้ามีหน่วยเป็นแอมแปร์หรือ คูลอมป์/วินาที

q คือ ประจุไฟฟ้ามีหน่วยเป็นคูลอมป์โดยในอิเล็กตรอนหนึ่งตัวมีประจุเท่ากับ -1.602×10^{-19} คูลอมป์

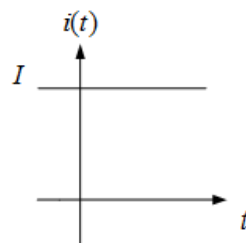
t คือ เวลา มีหน่วยเป็นวินาที

โดย 1 คูลอมป์ต่อวินาที = 1 แอมแปร์ = 6.28×10^{18} อิเล็กตรอนต่อวินาที



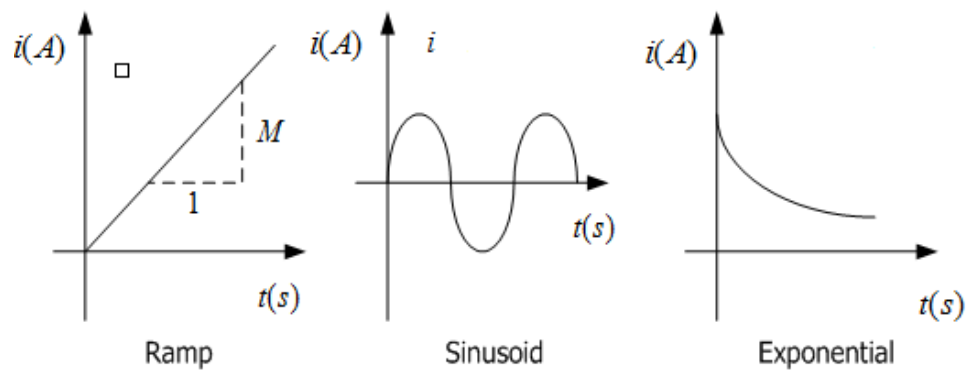
ภาพที่ ๒-๕ กระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำ

๑.๒ รูปแบบต่างๆของกระแสไฟฟ้า



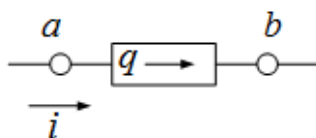
ภาพที่ ๒-๖ ไฟฟ้ากระแสตรง

กระแสไฟฟ้าคงที่ $i(t) = I$ เรียกว่าไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current : DC)



ภาพที่ ๒-๗ ไฟฟ้ากระแสสลับ

ตัวอย่าง จงหากระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าจุดต่อ a เมื่อประจุไฟฟ้า $q(t) = 3t - 2$ คูลอมป์



วิธีทำ $i(t) = \frac{dq}{dt} = 3A$

๑.๓ ระบบหน่วย

ตารางที่ ๒-๑ แสดงตัวอย่างระบบหน่วย

ปริมาณ	ชื่อ	สัญลักษณ์
ความยาว	เมตร	m
มวล	กิโลกรัม	kg
เวลา	วินาที	s
กระแสไฟฟ้า	แอมแปร์	A
อุณหภูมิ	เคลวิน	K
ความเร่ง	เมตร/วินาที ²	m/s^2
ความเร็ว	เมตร/วินาที	m/s
แรง	นิวตัน	N
พลังงานและงาน	จูล	J
กำลัง	วัตต์	W
ประจุ	คูลอม	C
ความต้านทาน	โอห์ม	W
ความต่างศักย์	โวลต์	V
ความส่องสว่าง	แคลเดลล่า	cd

ตารางที่ ๒-๒ แสดงตัวอย่างสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ค่าที่เดิมนำหน้า	องค์ประกอบ
10^{-12}	พิโก	p
10^{-9}	นาโน	n
10^{-6}	ไมโคร	m
10^{-3}	มิลลิ	m
10^{-2}	เซนติ	c
10^3	กิโล	k
10^6	เมกะ	M
10^9	จิกะ	G
10^{12}	เทรา	T

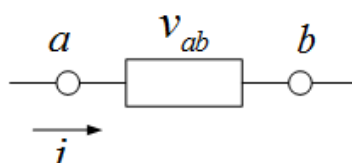
๑.๔ ความต่างศักย์ (Voltage)

ตัวแปรพื้นฐานในวงจรไฟฟ้า นอกจากกระแสไฟฟ้าแล้วยังมีอีกตัวแปรหนึ่งที่สำคัญคือแรงดันไฟฟ้า

โดยแรงดันไฟฟ้าคือการอธิบายถึงพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนประจุข้ามจุดต่อขององค์ประกอบในวงจร

สูตร
$$v(t) = \frac{dw(t)}{dt}$$

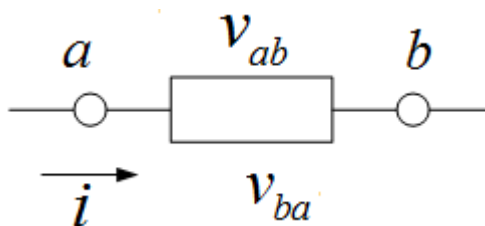
เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านองค์ประกอบของวงจรจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่ขั้วต่อขององค์ประกอบนั้นๆ ดังภาพที่ ๒-๘



ภาพที่ ๒-๘ แรงดันตกคร่อมและกระแสที่ไหลผ่านองค์ประกอบในวงจร

ทิศทางของแรงดันไฟฟ้าจะถูกกำหนดโดยขั้วของมันเองโดยจะเป็นบวกหรือลบก็ได้ ดังแสดงในภาพที่ ๒-๙ ซึ่งแสดงการกำหนดขั้วของแรงดันได้สองวิธี

$$\text{สูตร} \quad v_{ab} = -v_{ba}$$



ภาพที่ ๒-๙ แสดงความต่างศักย์กลับขั้ว

๑.๕ กำลังและพลังงาน

กำลังไฟฟ้าคือ อัตราการจ่ายหรือดูดกลืนพลังงานต่อเวลา

$$\text{สูตร} \quad p(t) = \frac{dw}{dt}$$

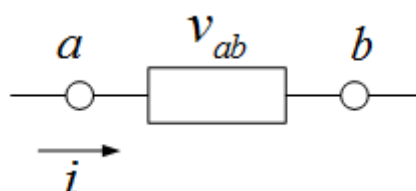
P คือกำลังไฟฟ้ามี่หน่วยเป็นวัตต์ (W)

W คือพลังงานไฟฟ้ามี่หน่วยเป็นจูล (J)

t คือเวลามี่หน่วยเป็นวินาที (sec)

$$p(t) = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = v \cdot i$$

๑.๖ การพิจารณาองค์ประกอบในวงจรทำหน้าที่ดูดกลืนหรือจ่ายกำลังไฟฟ้า

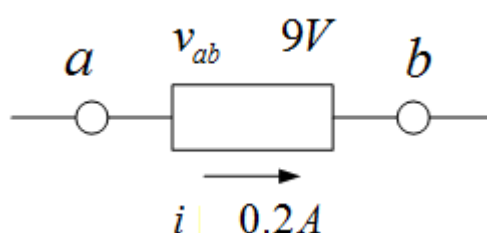


ภาพที่ ๒-๑๐ Passive sign convention

การพิจารณาจะใช้ Passive sign convention โดยกำหนดให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าที่ขั้วบวกและไหลออกจากขั้วลบของแรงดันดังภาพที่ ๒-๑๐

ด้วยลักษณะการกำหนดข้างต้นจะได้ $p = vi$ คือกำลังไฟฟ้าที่ถูกดูดกลืน โดยองค์ประกอบในวงจรนั้นคือ $p > 0$ แต่ถ้า $p < 0$ แล้วกำลังไฟฟ้าจะถูกจ่ายโดยองค์ประกอบในวงจร

ตัวอย่าง จากภาพด้านล่าง จงหาลำลังไฟฟ้าและพิจารณาองค์ประกอบวงจรดังกล่าวว่าทำหน้าที่จ่ายหรือดูดกลืนกำลังไฟฟ้า

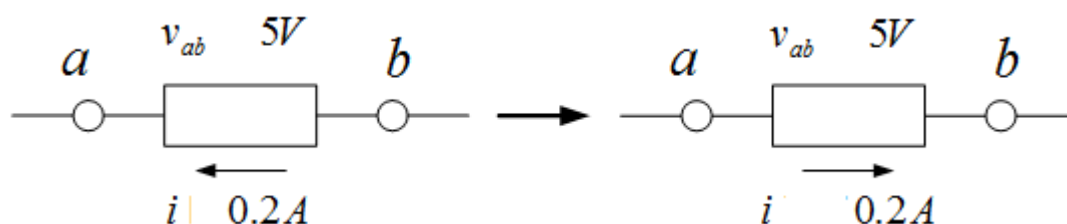


วิธีทำ

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร } p &= vi = 9 \times 0.2 \\ &= 1.8 \text{ W} \end{aligned}$$

พบว่า p เป็นบวกดังนั้นองค์ประกอบดังกล่าวทำหน้าที่ดูดกลืนกำลังไฟฟ้า

ตัวอย่างที่ ๓ พิจารณาภาพด้านล่าง จงหาลำลังไฟฟ้าและพิจารณาว่าองค์ประกอบของวงจรดังกล่าวทำหน้าที่จ่ายหรือดูดกลืนกำลังไฟฟ้า

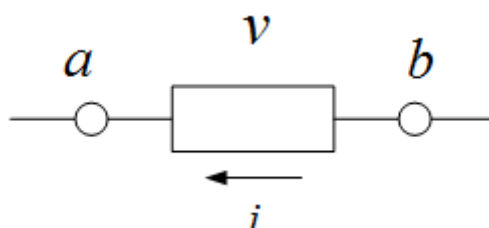


วิธีทำ

$$\text{จากสูตร } p = vi = 5 \times -0.2 = -0.01 \text{ W}$$

พบว่า $P < 0$ ดังนั้นองค์ประกอบดังกล่าวทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้า

ตัวอย่าง พิจารณาองค์ประกอบของวงจรดังภาพ โดย $v = -8e^{-t}V$ และ $i = 20e^{-t}A$ กำหนดให้ กระแสและแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์ ณ เวลา $t < 0$ จงหาพลังงานที่จ่ายโดยองค์ประกอบดังกล่าว ณ เวลา $t = 1$ วินาที



วิธีทำ

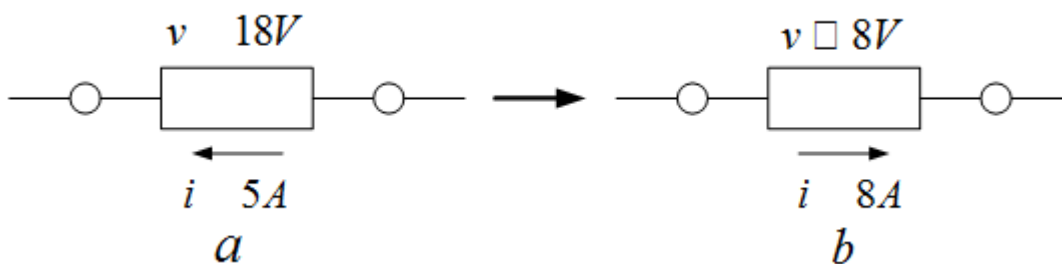
$$p = vi = (-8e^{-t})(20e^{-t}) = -160e^{-2t}W$$

ตัวแปรทางไฟฟ้านี้ให้พลังงานถ้าพลังงานไฟฟ้า

$$w(t) = \int_0^t p dt = \int_0^t -160e^{-2t} dt = -160 \frac{e^{-2t}}{-2} \Big|_0^t = 80(e^{-2t} - 1)$$

$$w(1) = -69.2J \text{ (เครื่องหมายลบ แสดงว่าแหล่งจ่ายพลังงานส่งผ่านพลังงาน)}$$

ตัวอย่างที่ ๕ พิจารณาว่าองค์ประกอบ (a), (b) จ่ายหรือดูดกลืนกำลังไฟฟ้า



วิธีทำ

a) $p = 18 \times (-5) = -90 W$ ตัวจ่ายกำลังไฟฟ้า

b) $p = 8 \times 8 = 64 W$ ตัวดูดซับกำลังไฟฟ้า

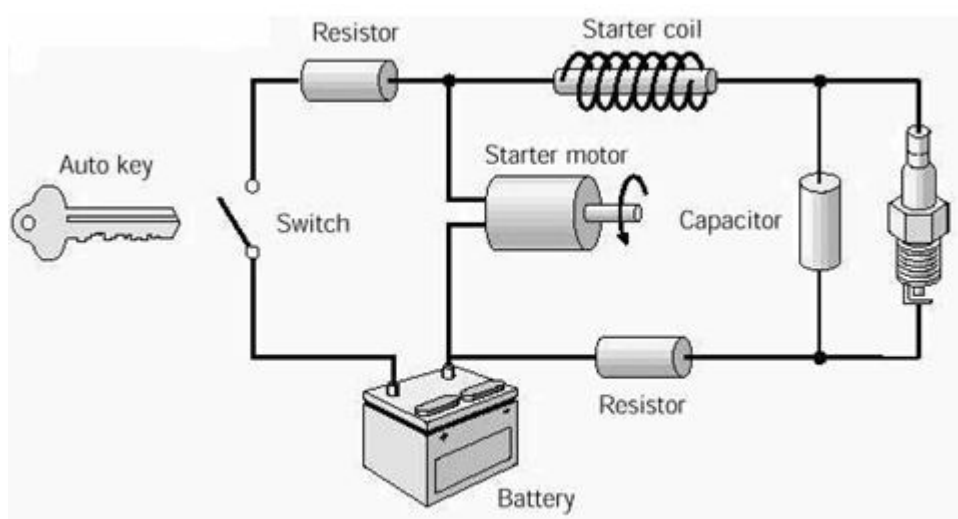
กฎพื้นฐานทางไฟฟ้า (Basic Law)

๒. เราจะใช้แบบจำลองทางไฟฟ้าให้เป็นวงจรสมมูลได้อย่างไร

วิศวกรจะใช้แบบจำลองเพื่อแทนองค์ประกอบของวงจรไฟฟ้าจากนั้นทำการต่อแบบจำลองขององค์ประกอบต่างๆ ให้เป็นวงจรสมมูลดังแสดงดังภาพที่ ๒-๑๑ และ ๒-๑๒

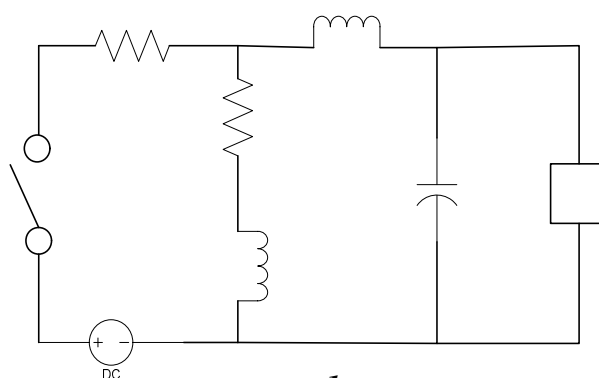
แบบจำลองคือ สมการที่ใช้แทนองค์ประกอบหรือวงจรไฟฟ้า

แบบจำลองของอุปกรณ์ทางฟิสิกส์ที่ใช้พิจารณาในวิชาวิเคราะห์ห้วงจรไฟฟ้าจะพิจารณาเพียงแค่แบบจำลองเท่านั้น แต่ปกติแล้วอุปกรณ์ต่างๆ จะมีความไม่เป็นเชิงเส้นอยู่



a

ภาพที่ ๒-๑๑ วงจรทางกายภาพ

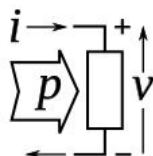


b

ภาพที่ ๒-๑๒ วงจรสมมูลหรือแบบจำลอง

๒.๑ องค์ประกอบวงจรแบบ Active และ Passive

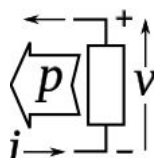
๒.๑.๑ Passive element จะทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานไฟฟ้า



ภาพที่ ๒-๑๓ Passive Convention

พลังงานทั้งหมดที่ถูกดูดกลืนโดยองค์ประกอบแบบ Passive เมื่อพิจารณาตาม Passive sign convention ดังภาพที่ ๒-๑๓ จะมีเครื่องหมายเป็นบวกเสมอ

๒.๑.๒ Active element จะทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้า



ภาพที่ ๒-๑๔ Active Conventions

ปกติแล้วองค์ประกอบแบบ Active จะเป็นแหล่งจ่ายพลังงาน เช่น แบตเตอรี่และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อพิจารณาตาม Passive sign convention ตามภาพที่ ๒-๑๔ องค์ประกอบแบบ Active จะมีเครื่องหมายของพลังงานที่จ่ายเป็น “ลบ” เสมอ

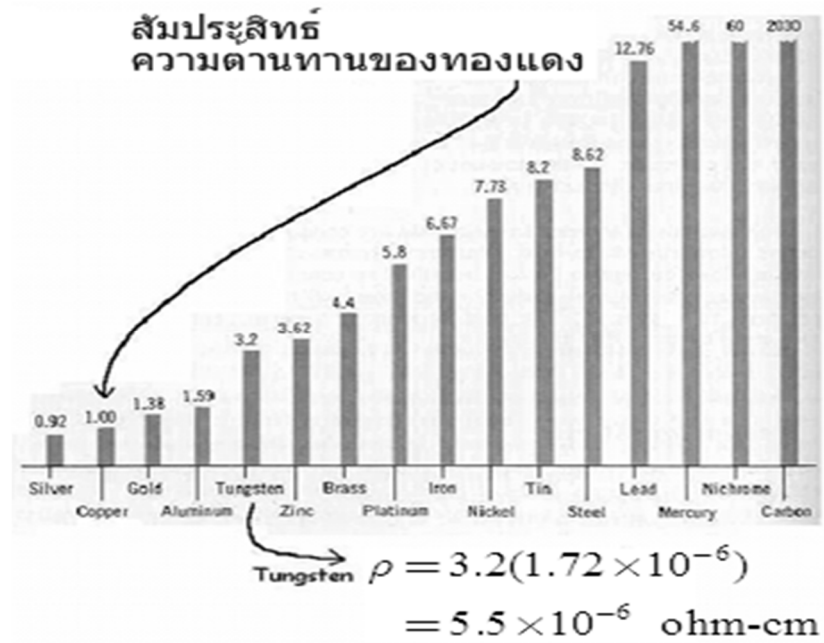
๒.๒ สัมประสิทธิ์ความต้านทาน

ความสามารถของอุปกรณ์ในการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าเราเรียกว่า สัมประสิทธิ์ความต้านทาน สัญลักษณ์คือ มีหน่วยเป็นโอห์ม-เซนติเมตร W-cm.

อุปกรณ์ไฟฟ้าที่นำไฟฟ้าได้ดีจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานต่ำ ดังแสดงในตารางที่ ๒-๓

ตารางที่ ๒-๓ สัมประสิทธิ์ความต้านทานของวัสดุแต่ละชนิด

วัสดุ	ค่าความต้านทาน
ทองแดง	1.72×10^{-6}
อลูมิเนียม	2.7×10^{-6}
คาร์บอน	4×10^{-3}
ซิลิกอน	2.3×10^5
โพลีเอสเตอร์	1×10^{18}

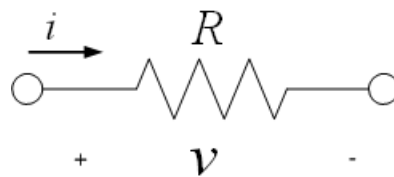


ภาพที่ ๒-๑๕ ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานของวัสดุต่างๆ

๒.๓ ความต้านทาน

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ขององค์ประกอบหรืออุปกรณ์ซึ่งกำหนดการไหลของกระแสไฟฟ้าใช้สัญลักษณ์แทนด้วย R และมีหน่วยเป็นโอห์ม

กฎของโอห์ม (Ohm's Law)



ภาพที่ ๒-๑๖ สัญลักษณ์ความต้านทาน

กฎของโอห์มสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในวงจรที่มีองค์ประกอบเป็นความต้านทานหรือตัวต้านทานดังภาพที่ ๒-๑๖

๒.๓.๑ โอห์มสามารถคำนวณได้จากสมการ

สูตร $V = IR$

๒.๓.๒ ค่าความต้านทานของวัสดุสามารถหาได้จากสมการ

$$\text{สูตร} \quad R = \frac{r l}{A}$$

R คือค่าความต้านทาน มีหน่วยเป็นโอห์ม

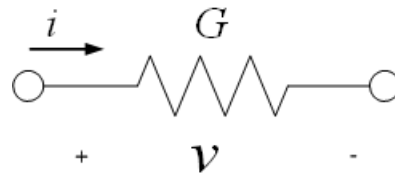
r คือสัมประสิทธิ์ความต้านทานของวัสดุมีหน่วยเป็นโอห์ม-เซนติเมตร

l คือความยาวของขดลวดตัวนำมีหน่วยเป็นเซนติเมตร

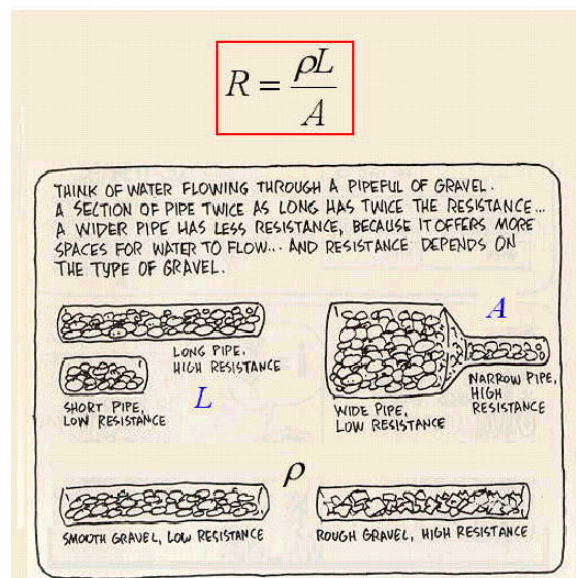
A คือพื้นที่หน้าตัดของขดลวดมีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร

นอกจากนี้กฎของโอห์มยังสามารถอธิบายในเทอมของความนำ (Conductance), G ขององค์ประกอบได้โดย

$$\begin{aligned} \text{สูตร} \quad i &= Gv \\ G &= 1/R \end{aligned}$$

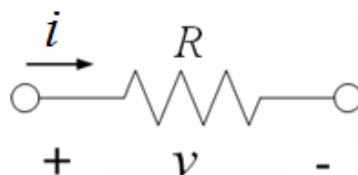


ภาพที่ ๒-๑๗ สัญลักษณ์ของความต้านทานและความนำ



ภาพที่ ๒-๑๘ ลักษณะเทียบเคียงทางฟิสิกส์ของความต้านทาน

๒.๔ กำลังไฟฟ้าในตัวต้านทาน



ภาพที่ ๒-๑๙ ตัวอย่าง Passive sign convention

กำลังไฟฟ้าที่ถูกจ่ายไปยังตัวต้านทานดังภาพที่ ๒-๑๙

$$\text{สูตร} \quad p = vi = v\left(\frac{v}{R}\right) = \frac{v^2}{R} = i^2 R$$

จะเห็นว่ากำลังไฟฟ้ามีเครื่องหมายเป็นบวก นั้นหมายความว่าตัวต้านทานคืออุปกรณ์แบบ Passive ทำหน้าที่ดูดกลืนกำลังไฟฟ้า

๒.๕ แบบจำลองสำหรับ วงจรเปิดและวงจรปิด

Models for open and short circuit

Short circuit: $R = v/i = 0 \text{ ohm}$

Open circuit: $R = v/i = \textit{infinity} \text{ ohm}$

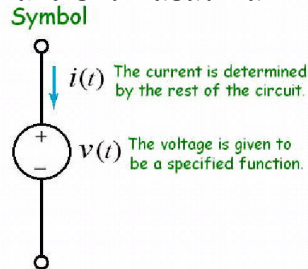
The diagram for a short circuit shows a horizontal line with two terminals. A blue arrow labeled 'i' points from left to right. Below the line, a '+' sign is under the left terminal and a '-' sign is under the right terminal. The text 'v=0' is written between the terminals. Below this, the equation $R = v/i = 0 \text{ ohm}$ is shown.

The diagram for an open circuit shows a horizontal line with two terminals. A blue arrow labeled 'i=0' points from left to right. Below the line, a '+' sign is under the left terminal and a '-' sign is under the right terminal. The text 'v' is written between the terminals. Below this, the equation $R = v/i = \textit{infinity} \text{ ohm}$ is shown.

ภาพที่ ๒-๒๐ รูปแสดงค่าความต้านทานในขณะเปิดและปิดวงจร

๒.๖ แหล่งจ่ายอิสระ (Independent Source)

แหล่งจ่าย คือแหล่งจ่ายอิสระของแรงดันไฟฟ้าที่สามารถให้พลังงานกับวงจรไฟฟ้า แหล่งจ่ายอิสระ คือแหล่งกำเนิดกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับตัวแปร สัญลักษณ์ของแหล่งจ่ายกระแสอิสระแสดงดังภาพที่ ๒-๒๑



ภาพที่ ๒-๒๑ สัญลักษณ์ของแหล่งจ่ายอิสระ

๒.๗ แหล่งจ่ายไฟฟ้าไม่อิสระ (Dependent source)

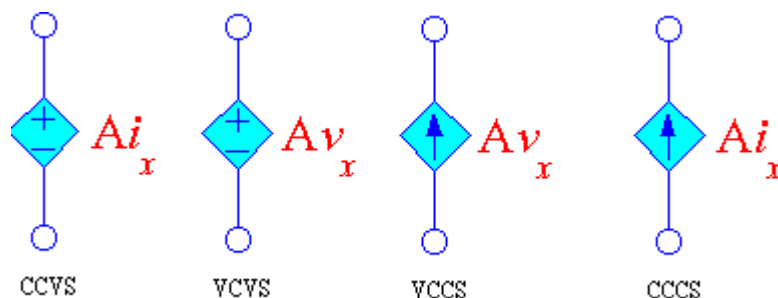
แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าไม่อิสระ แหล่งกำเนิดกระแสและแรงดันไฟฟ้าจึงขึ้นอยู่กับตัวแปรอื่นๆ ในวงจร ดังภาพด้านล่าง แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าไม่อิสระมีอยู่ทั้งหมด ๔ ชนิด ด้วยกันคือ CCVS, VCVS, VCCS และ CCCS

๒.๗.๑ แหล่งจ่ายแรงดันควบคุมด้วยกระแส (Current Controlled Voltage Source ,CCVS)

๒.๗.๒ แหล่งจ่ายแรงดันควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage Controlled Voltage Source ,VCVS)

๒.๗.๓ แหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage Controlled Current Source ,VCCS)

๒.๗.๔ แหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยกระแส (Current Controlled Current Source ,CCCS)

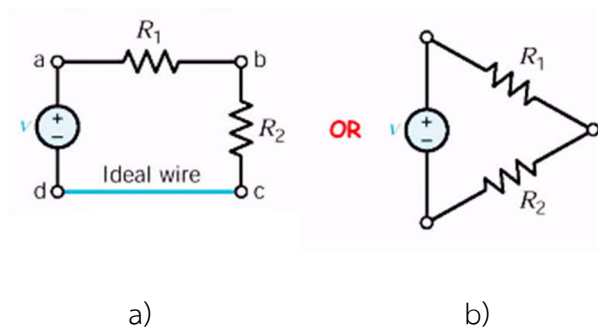


ภาพที่ ๒-๒๒ แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าไม่อิสระ

การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า (Method of Analysis)

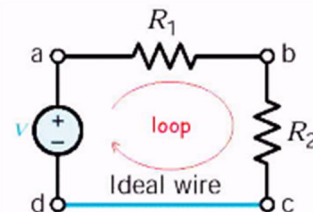
๓. วงจรที่มีองค์ประกอบเป็นความต้านทาน (Resistive Circuits)

ความต้านทานเป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่ใช้มากที่สุดในวงจรไฟฟ้าโดยทั่วไป ในบทนี้เป็นการวิเคราะห์วงจรที่เป็นวงจรความต้านทาน ซึ่งเป็นวงจรที่ประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายและตัวต้านทานกฎที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ได้แก่ กฎของโอห์ม กฎกระแสเคอร์ชอฟฟ์ และ กฎแรงดันเคอร์ชอฟฟ์ วงจรพื้นฐานที่ประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายอิสระและตัวต้านทานสองตัวขึ้นไปดังแสดงในรูป



ภาพที่ ๒-๒๓ a) รูปวงจรอย่างง่าย b) รูปโนดของวงจร

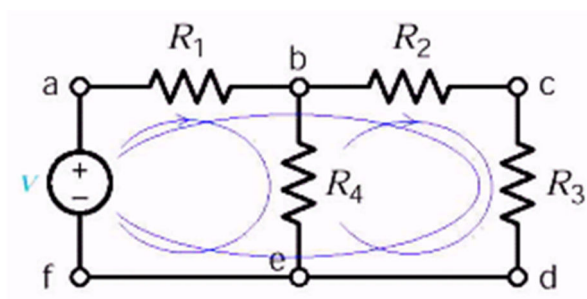
a, b, c และ d เรียกว่าโนด คือ จุดต่อที่มีองค์ประกอบของวงจรตั้งแต่ 2 องค์ประกอบขึ้นไปขึ้นไป



ภาพที่ ๒-๒๔ รูปแสดงลูปของวงจรความต้านทาน

ถ้าเริ่มต้นจากโนด a ไปที่โนด b, c, d และกลับไปยังโนด a เส้นทางดังกล่าวเรียกว่าเส้นทางปิด โดยเส้นทางปิดนี้จะเรียกว่า “ลูป (Loop)”

ตัวอย่าง จงแสดงลูปในวงจร



วิธีทำ จากวงจรมีลูปทั้งหมด ๓ ลูป

ลูป ๑ : a-b-e-f-a

ลูป ๒ : b-c-d-e-b

ลูป ๓ : a-b-c-d-e-f-a

๓.๑ กฎของโอห์ม

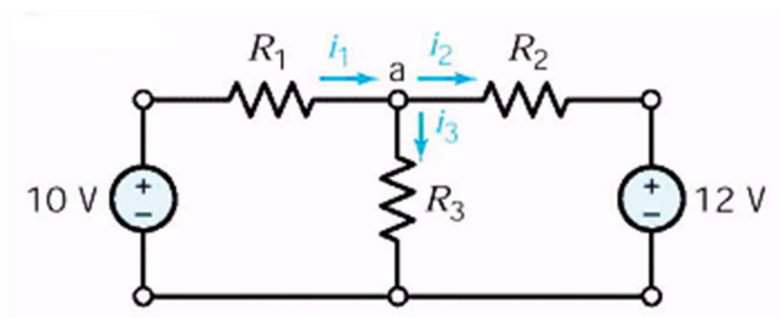
สูตร $V = RI$

๓.๒ กฎของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Law)

กฎกระแสเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Current Law : KCL)

กฎของกระแสเคอร์ชอฟฟ์ คือผลรวมทางพีชคณิตของกระแสที่ไหลเข้าโหนดใด ๆ มีค่าเท่ากับศูนย์ที่ทุกๆเวลา

ตัวอย่าง



วิธีทำ

$$i_1 - i_2 - i_3 = 0$$

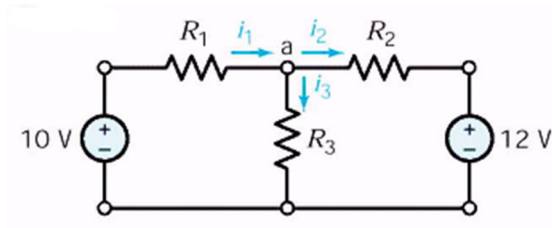
หรือ $i_1 = i_2 + i_3$

(ผลรวมกระแสที่ไหลเข้าโหนด) = (ผลรวมกระแสที่ไหลออกจากโหนด)

๓.๓ กฎแรงดันเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Voltage Law : KVL)

กฎของแรงดันเคอร์ชอฟฟ์คือผลรวมทางพีชคณิตของแรงดันในเส้นทางปิดใดๆมีค่าเท่ากับศูนย์ที่ทุกๆเวลา

ตัวอย่าง จงหาค่า R_2 ของวงจร



วิธีทำ จากกฎแรงดันเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) จะได้

$$\text{ลูป ๑,} \quad -10 + v_1 + v_3 = 0 \quad (๑)$$

$$\text{ลูป ๒,} \quad -v_3 + v_2 + 12 = 0 \quad (๒)$$

$$\text{ลูป 3,} \quad -10 + v_1 + v_2 + 12 = 0 \quad (๓)$$

เมื่อให้ $R_1 = 10\Omega$, $R_3 = 1\Omega$, $v_2 = -10V$ และ $i_3 = 2A$ หาค่า R_2 ได้โดย

$$\text{ใช้กฎของโอห์ม,} \quad v_3 = R_3 i_3 = 1(2) = 2V$$

$$\text{จากสมการ (๑),} \quad v_1 = 10 - v_3 = 10 - 2 = 8V$$

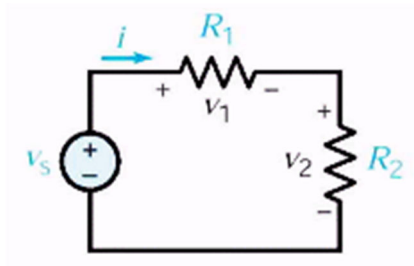
$$\text{ใช้กฎของโอห์ม,} \quad v_1 = R_1 i_1$$

$$i_1 = v_1 / R_1 = 8 / 10 = 0.8A$$

$$\text{จาก KCL ที่โหนด a,} \quad i_2 = i_1 - i_3 = 0.8 - 2 = -1.2A$$

$$\text{ดังนั้น} \quad R_2 = v_2 / i_2 = -10 / -1.2 = 8.33\Omega$$

๓.๔ วงจร แบ่งแรงดัน (Voltage Divider Circuit)



ภาพที่ ๒-๒๕ รูปวงจรแบ่งแรงดัน

จากกฎ KVL จะได้,

$$-v_s + v_1 + v_2 = 0$$

จากกฎของโอห์ม

$$v_1 = R_1 i, v_2 = R_2 i$$

จะได้

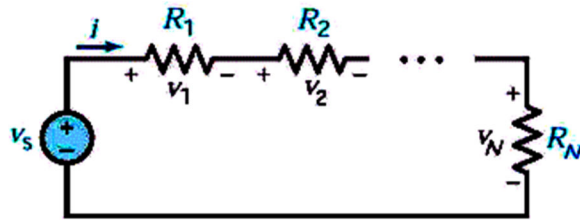
$$-v_s + R_1 i + R_2 i = 0 \quad \text{หรือ} \quad i = \frac{v_s}{R_1 + R_2}$$

สุดท้ายจะได้

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

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

๓.๔.๑ รูปแบบทั่วไปของวงจรแบ่งแรงดัน



ภาพที่ ๒-๒๖ รูปทั่วไปของวงจรความต้านทานต่ออนุกรมแรงดันตกรวมตัวต้านทานที่ n คือ

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

๓.๔.๒ กรณีรูปวงจรความต้านทานต่ออนุกรมดังภาพที่ ๒-๒๖

KVL: $-v_s + v_1 + v_2 + \dots + v_N = 0$

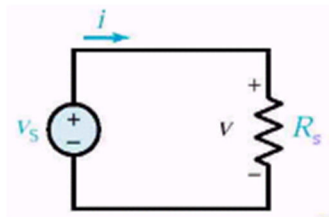
$$-v_s + R_1 i + R_2 i + \dots + R_N i = 0$$

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

เมื่อ

$$R_s = R_1 + R_2 + \dots + R_N$$

ซึ่ง R_s ก็คือ ความต้านทานสมมูลของวงจร



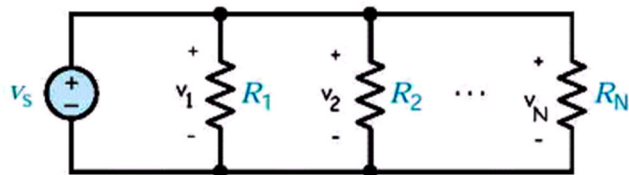
ภาพที่ ๒-๒๗ รูปวงจรความต้านทานสมมูล

KVL: $-v_s + v = 0$

$$-v_s + R_s i = 0$$

$$i_s = v_s / R_s$$

๓.๔.๓ กรณีที่วงจรความต้านทานต่อขนาน



ภาพที่ ๒-๒๘ รูปวงจรความต้านทานต่อขนาน

KVL loop 1 : $-v_s + v_1 = 0 \textcircled{R} v_1 = v_s$

loop 2 : $-v_s + v_2 = 0 \textcircled{R} v_2 = v_s$

loop n : $-v_s + v_N = 0 \textcircled{R} v_N = v_s$

ดังนั้น

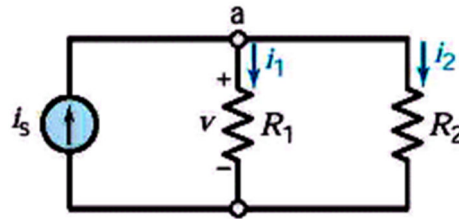
$$v_1 = v_2 = \dots = v_N$$

จากรูปข้างบน

$$i_n = v_s / R_n$$

$$i_s = i_1 + i_2 + \dots + i_n$$

พิจารณารูปวงจรต่อไปนี้



ภาพที่ ๒-๒๙ รูปวงจรความต้านทานที่ต่อขนานกับแหล่งจ่ายกระแส
จากวงจรข้างบนจะได้,

$$\text{KCL ที่โหนด a : } i_s = i_1 + i_2$$

$$\text{กฎของโอห์ม, } i_1 = v/R_1 \quad \text{และ} \quad i_2 = v/R_2$$

$$\text{จะได้} \quad i_s = \frac{v}{R_1} + \frac{v}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} v$$

หรือ

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

$$i_1 = \frac{v}{R_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} i_s$$

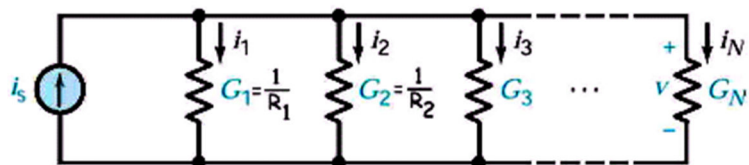
$$i_2 = \frac{v}{R_2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} i_s$$

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

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

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

พิจารณาวงจรต่อไปนี้



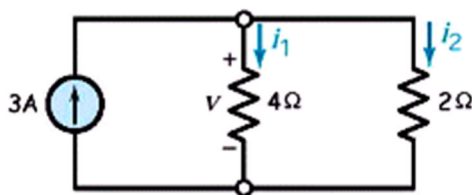
ภาพที่ ๒-๓๐ รูปวงจรรความต้านทาน n ตัวต่อขนานกับแหล่งจ่ายกระแส
จากรูปวงจรถ้างต้นจะได้

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

และ

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

ตัวอย่าง หากกระแส i_1 , i_2 และ v ในวงจร



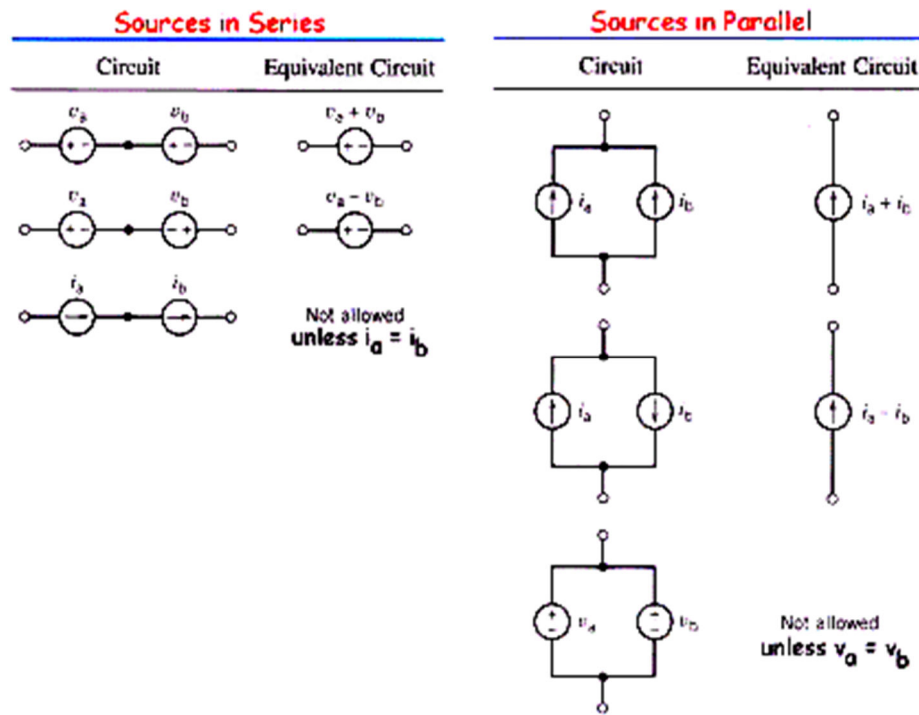
วิธีทำ

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

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

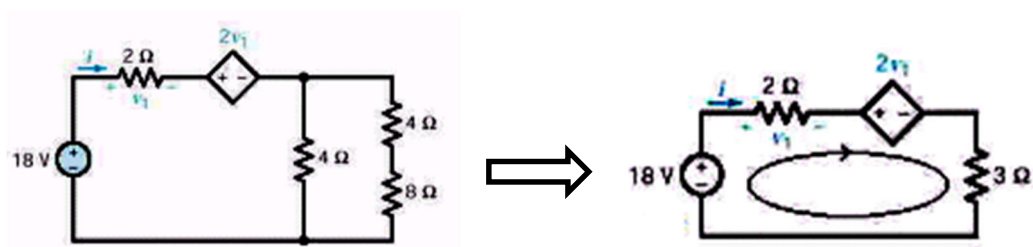
$$v = R_1 i_1 = (4)(1) = 4V$$

๓.๕ การรวมแหล่งจ่ายอิสระ



ภาพที่ ๒-๓๑ รูปการรวมแหล่งจ่ายอิสระ

ตัวอย่าง หาค่ากระแส i



วิธีทำ ทำการรวมความต้านทานจะได้

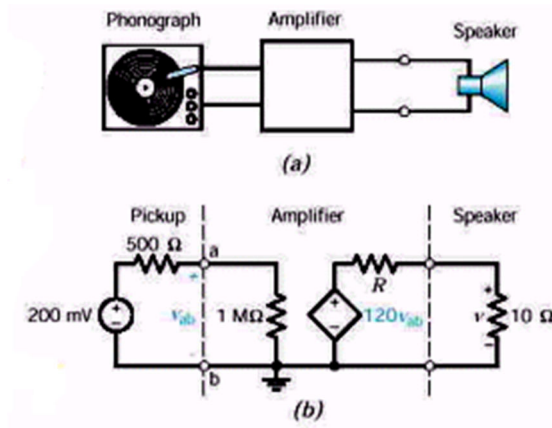
$$1/R = 1/4 + 1/(4 + 8) = 4/12 = 1/3$$

KVL : $- 18 + v_1 + 2v_1 + 3i = 0$

เมื่อ $v_1 = 2i$, $- 18 + 2i + 2(2i) + 3i = 0$

$$i = 2A$$

ตัวอย่าง ระบบที่ประกอบด้วยชุดอ่านแผ่นเสียง, ชุดวงจรถยายและลำโพงดังแสดงดังรูป ซึ่งสามารถเขียนเป็นวงจรเทียบเคียงดังแสดงในรูป จงหาความต้านทานที่ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมโพลดมีค่า 16 V และหากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับลำโพง



วิธีทำ ใช้การแบ่งแรงดัน,

$$v_{ab} = \frac{10^6}{10^6 + 500} 0.2 = 0.2V$$

ใช้หลักการเดียวกันที่ลูปขวามือ,

$$V = \frac{10}{10 + R} 120v_{ab} = \frac{10}{10 + R} (120)(0.2)$$

$$V = 16 = \frac{240}{10 + R}$$

เมื่อ

ดังนั้นจะได้

$$R = 5W$$

และ

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{16^2}{5} = 25.6W$$

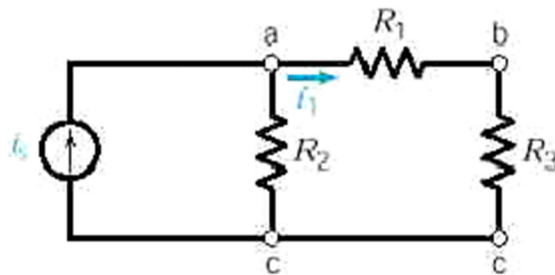
๓.๖ เทคนิคการวิเคราะห์วงจรที่มีเพียงความต้านทาน

ในหัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์วงจรที่ประกอบด้วยตัวต้านทานมีแหล่งจ่ายแรงดันและกระแส เมื่อวงจรมีความซับซ้อนมากขึ้นเส้นจำนวนของโนดเพิ่มขึ้น เทคนิคการวิเคราะห์วงจร มีสองวิธีคือ

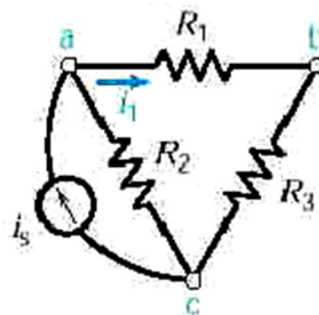
๓.๖.๑ วิธีแรงดันโนดหรือ Node analysis

๓.๖.๒ วิธีกระแสเมชหรือ Mesh analysis

๓.๗ การวิเคราะห์แรงดันโนดกับวงจรที่มีแหล่งจ่ายกระแส



พิจารณาวงจรดังรูปด้านบน สามารถลดรูปวงจรได้ดังรูปด้านล่าง



ใช้กฎของโอห์มในแต่ละโนด จะได้

$$i_2 = \frac{v_a}{R_2}$$

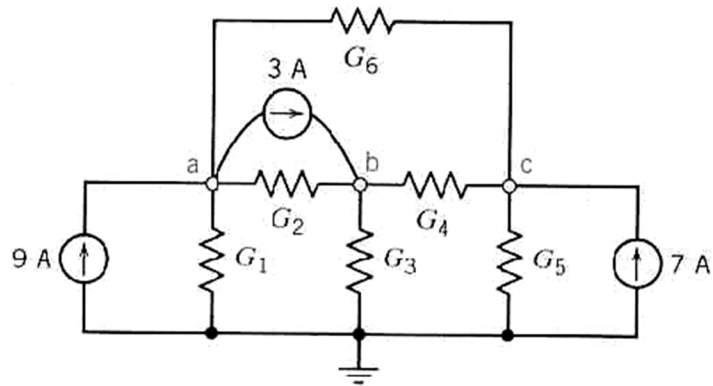
$$i_3 = \frac{v_a}{R_3}$$

$$i_1 = \frac{v_a}{R_1} = \frac{v_a - v_b}{R_1}$$

หรืออธิบายในเทอมกระแสที่ไหลผ่านตัวนำคือ

$$i_2 = G_2 v_a \quad i_3 = G_3 v_a \quad i_1 = G_1 v_a$$

ตัวอย่าง พิจารณาวงจรดังรูป จงหาแรงดันที่โหนด v_a, v_b และ v_c เมื่อค่าความนำทุกค่าเท่ากับ $1S$



$$\text{โหนด a:} \quad (G_1 + G_2 + G_3)v_a - G_2v_b - G_6v_c = 9 - 3$$

$$\text{โหนด b:} \quad -G_2 + (G_4 + G_2 + G_3)v_b - G_4v_c = 3$$

$$\text{โหนด c:} \quad -G_6v_a - G_4v_b + (G_4 + G_5 + G_6)v_c = 7$$

แทนค่าความนำทุกตัวจะได้

$$\begin{aligned} 3v_a - v_b - v_c &= 6 \\ -v_a + 3v_b - v_c &= 3 \\ -v_a - v_b + 3v_c &= 7 \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$G = \begin{pmatrix} 3 & -1 & -1 \\ -1 & 3 & -1 \\ -1 & -1 & 3 \end{pmatrix} \quad \text{และ} \quad i_6 = \begin{pmatrix} 6 \\ 3 \\ 7 \end{pmatrix}$$

$$v_a = \frac{\begin{vmatrix} 6 & -1 & -1 \\ 3 & 3 & -1 \\ 7 & -1 & 3 \end{vmatrix}}{D}$$

$$D = \det \begin{vmatrix} 3 & -1 & -1 \\ -1 & 3 & -1 \\ -1 & -1 & 3 \end{vmatrix}$$

$$= 3(8) - (-1)(-4) - 1(4) = 16$$

$$v_a = \frac{1}{D} [6(8) - 3(4) + 7(4)] = \frac{88}{16} V = 5.5V$$

เช่นเดียวกันจะได้

$$v_b = \frac{1}{16} \begin{vmatrix} 3 & 6 & -1 \\ -1 & 3 & -1 \\ -1 & 7 & 3 \end{vmatrix}$$

$$= \frac{1}{16} [3(16) + 1(25) - 1(-3)] = \frac{76}{16} V = 4.75V$$

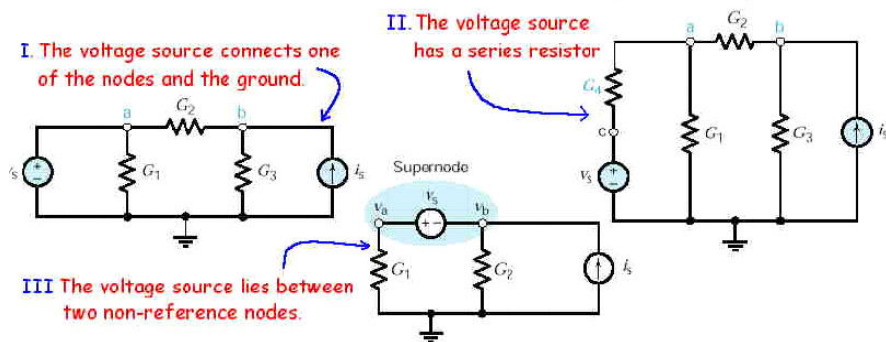
และ

$$v_c = \frac{1}{16} \begin{vmatrix} 3 & -1 & 6 \\ -1 & 3 & 3 \\ -1 & -1 & 7 \end{vmatrix}$$

$$= \frac{1}{16} [3(24) + (-1) - 1(-21)] = \frac{92}{16} V = 5.75V$$

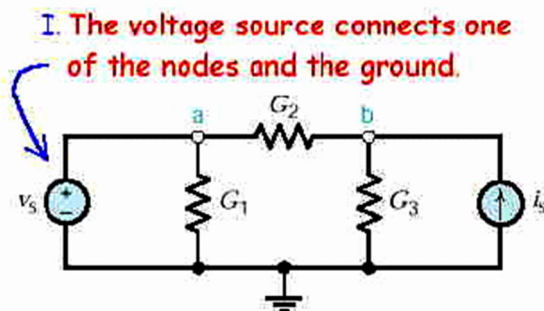
๓.๘ การวิเคราะห์แรงดันโหนดกับวงจรที่มีทั้งแหล่งจ่ายแรงดันและกระแส

สามารถแบ่งพิจารณาได้สามกรณี คือ



ภาพที่ ๒-๓๒ รูปวงจรที่มีทั้งแหล่งจ่ายแรงดันและกระแส

๓.๘.๑ กรณีที่ ๑ ง่ายต่อการวิเคราะห์โดยใช้เพียง KCL ที่โหนด b และแก้สมการแรงดันที่โหนด b เท่านั้น นั่นคือ



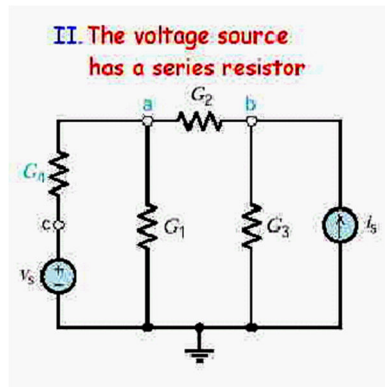
$$v_a = v_b$$

$$i_s = G_3 v_b + G_2 (v_b - v_a)$$

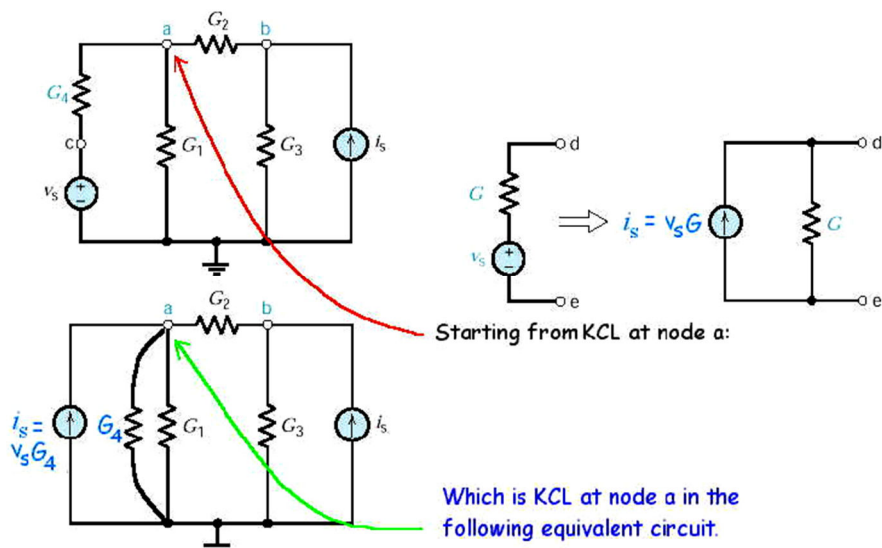
ดังนั้น

$$v_b = \frac{i_s + G_2 v_s}{G_2 + G_3}$$

๓.๘.๒ กรณีที่ ๒



ทำการแปลงแหล่งจ่ายแรงดันเป็นแหล่งจ่ายกระแสดังนี้



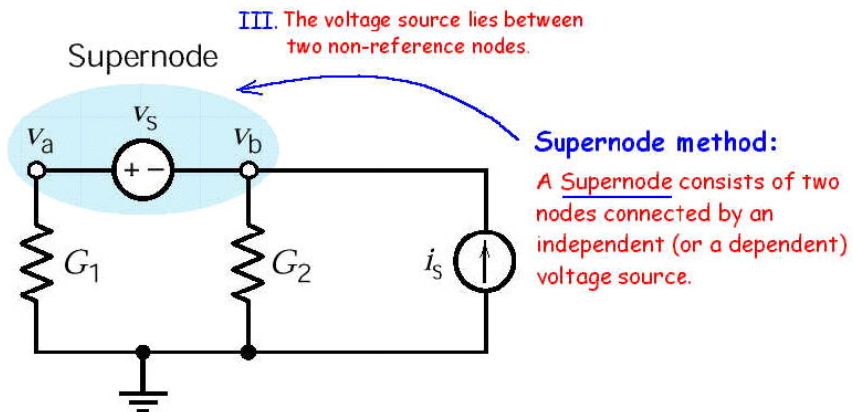
เริ่มต้นด้วย KCL ที่โหนด a

หรือ $(v_a - v_b)G_2 + (G_1 + G_4)v_a = v_s G_4$

$$(v_a - v_b)G_2 + (v_a - v_s)G_4 = 0$$

ข้อนี้คือ KCL ที่โหนด a ในวงจรสมมูลดังนี้

๓.๘.๓ กรณีที่ ๓



วิธี Supernode

Supernode จะประกอบด้วยโหนดสองโหนดที่ต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันอิสระ

KCL ที่ Supernode

$$v_a G_1 + v_b G_2 = i_s$$

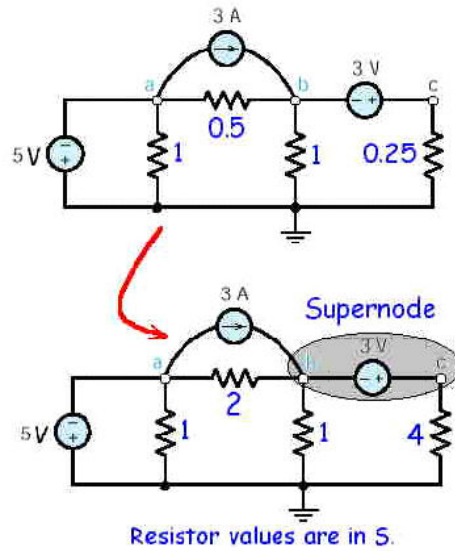
ภายใน Supernode คือ

$$v_a - v_b = v_s$$

แก้สมการจะได้

$$v_b = \frac{i_s - G_1 v_s}{G_1 + G_2}$$

ตัวอย่าง หาค่าแรงดันของทุกโหนดค่าความต้านทานในรูปมีหน่วยเป็นโอห์ม



วิธีทำ

ที่โนด a $v_a = -5V$

ที่ Super node $v_c - v_b = 3V$

KCL ที่ Super node $1' v_b + 2(v_b - v_a) + 4v_c = 3$

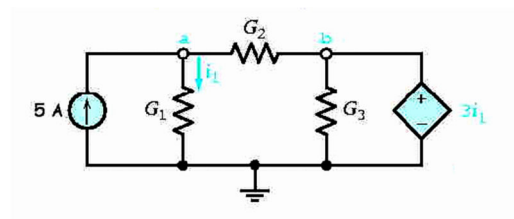
จะได้ $v_b = -\frac{19}{7}V$

สุดท้ายจะได้ $v_c = 3 + v_b = \frac{2}{7}V$

๓.๙ วิเคราะห์วงจรโนดกับแหล่งจ่ายไม่อิสระ

ถ้าวงจรมีแหล่งจ่ายไม่อิสระสมการแรงดันโนดจะต้องเพิ่มสมการที่มีผลของแต่ละแหล่งจ่ายที่ไม่อิสระนี้เราสามารถอธิบายได้ด้วยตัวอย่างดังต่อไปนี้

ตัวอย่าง จงหาแรงดันที่ v_a, v_b และกระแส i_1



วิธีทำ

KCL ที่โหนด a $G_1 v_a + G_2 (v_a - v_b) = 5$

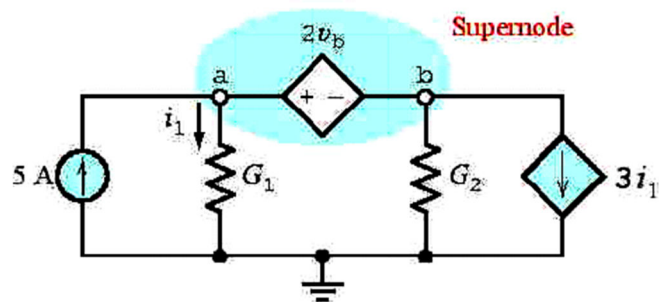
ที่โหนด b $v_b = 3i_1$

จากกฎของโอห์ม $i_1 = G_1 v_a$

$$(v_a, v_b, i_1) = \begin{pmatrix} -5 \\ 15 \frac{G_1}{(-G_1 - G_2 + 3G_2 G_1)} \\ 5 \frac{G_1}{(-G_1 - G_2 + 3G_2 G_1)} \end{pmatrix}$$

$G_1 = 1 \quad G_2 = 1 \quad v_a = -5$

ตัวอย่าง จงหาแรงดันที่ v_a, v_b และกระแส i_1



วิธีทำ

KCL ที่ Super node $G_1 v_a + G_2 v_b = 5 - 3i_1$

ใน Super node $v_a - v_b = 2v_b$

จากกฎของโอห์ม

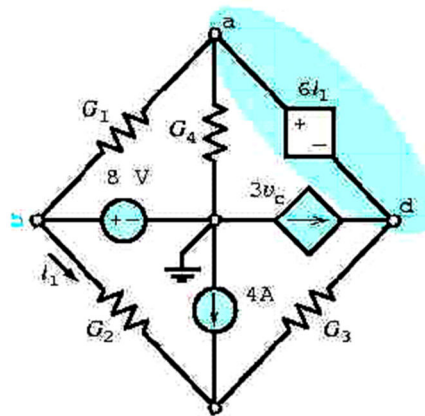
$$i_1 = G_1 v_a$$

$$(v_a, v_b, i_1) = \frac{15}{(12G_1 + G_2)} = \frac{5}{(12G_1 + G_2)} = 5 \frac{G_1}{(12G_1 + G_2)}$$

$$G_1 = 1 \quad G_2 = 1$$

$$v_a = \frac{15}{(12G_1 + G_2)} = \frac{15}{13}$$

ตัวอย่าง เรามีแรงดัน ๔ โหนดและ ๑ กระแสสำหรับค่าที่ไม่ทราบ ๕ ค่าเราต้องสร้างสมการขึ้นมาดังนี้



วิธีทำ

KCL ที่ Super node

$$G_1(v_a - v_b) + G_4 v_a + G_3(v_d - v_c) = 3v_c$$

KCL ที่ node c

$$G_2(v_c - v_b) + G_3(v_c - v_d) = 4$$

ที่ node b

$$v_b = 8V$$

ใน Super node

$$v_a - v_d = 6i$$

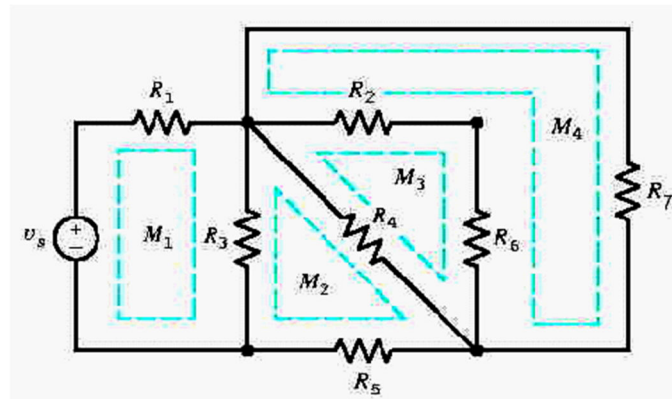
จากกฎของโอห์ม

$$i_1 = G_2(v_b - v_c)$$

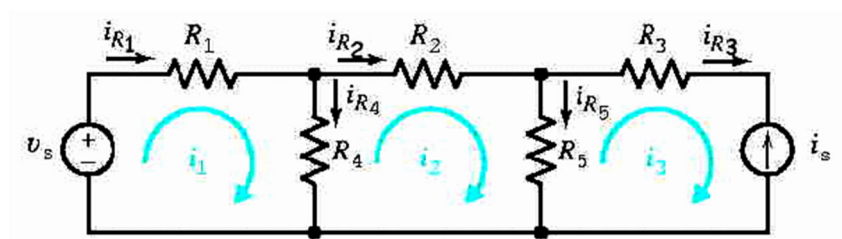
$$\begin{pmatrix} (G_1+G_4) & -G_1 & -(G_3+3) & G_3 & 0 \\ 0 & -G_2 & (G_2+G_3) & -G_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & -6 \\ 0 & G_2 & -G_2 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_d \\ i_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 4 \\ 8 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

๓.๑๐ วิเคราะห์วงจรโดยใช้วิธี Mesh Current

ในการวิเคราะห์วงจรวิธี Mesh Current เราจะใช้ Kirchhoff's voltage law (KVL) รอบลูปปิด Mesh คือการวนลูปปิดโดยไม่ซ้อนทับกับลูปปิดอื่นๆ สำหรับในภาพที่ แสดง Mesh ทั้ง ๔ ลูป



Mesh current คือ การกำหนดกระแสตามองค์ประกอบของ Mesh โดยมีข้อกำหนดให้กระแสแต่ละตัวหมุนตามเข็มนาฬิกา



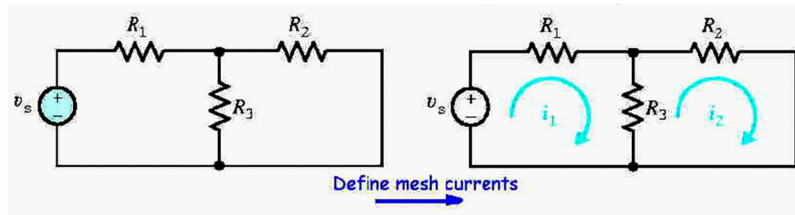
สำหรับรูปข้างต้นแสดงให้เห็นว่ากระแส i_{R1} ไหลผ่านแหล่งกำเนิดแรงดันและตัวต้านทาน R_1 กำหนดให้เป็น i_1 และเช่นเดียวกัน $i_{R2} = i_2$ และ $i_{R3} = i_3$

$$i_{R4} = i_1 - i_2$$

$$i_{R5} = i_2 - i_3$$

ตัวอย่าง

$$i_3 = -i_s$$



วิธีทำ

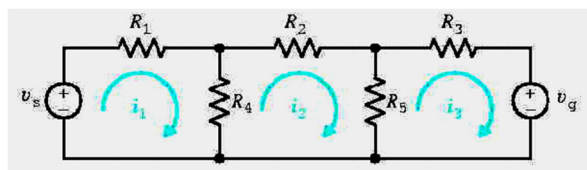
$$\text{Mesh 1 : } -v_s + R_1 i_1 + R_3(i_1 - i_2) = 0$$

$$\text{Mesh 2 : } R_3(i_2 - i_1) + R_2 i_2 = 0$$

จะได้ว่า

$$\begin{pmatrix} R_1 + R_3 & -R_3 \\ -R_3 & R_2 + R_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_s \\ 0 \end{pmatrix}$$

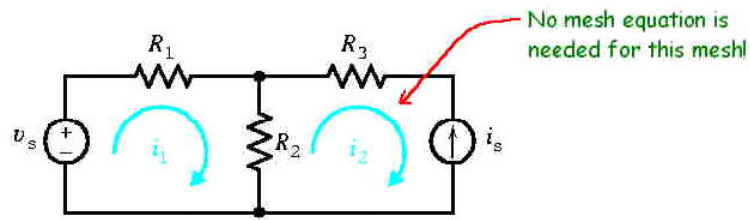
ตัวอย่าง แสดงวงจร 3 Mesh



วิธีทำ

$$\begin{pmatrix} R_4 & -R_4 & 0 \\ R_4 & R_2 + R_4 + R_5 & -R_5 \\ 0 & -R_5 & R_3 + R_5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_s \\ 0 \\ V_s \end{pmatrix}$$

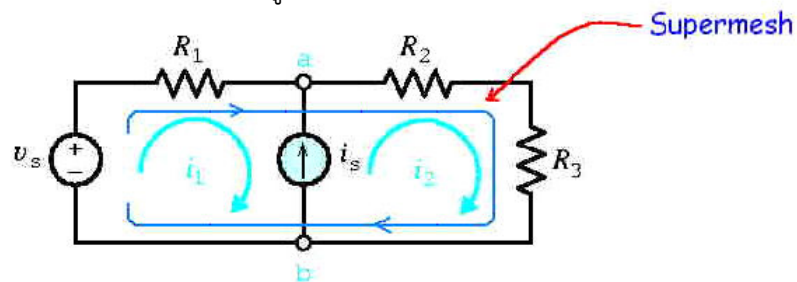
วิธีวิเคราะห์วงจรโดยใช้วิธี Mesh Current สามารถใช้วิเคราะห์กับแหล่งจ่ายกระแสอิสระได้โดยง่าย สามารถแสดงได้สมการดังนี้



Mesh 1 : $-v_s + R_1 i_1 + R_3(i_1 - i_2) = 0$

แหล่งจ่ายกระแสอิสระ : $i_2 = -i_s$

ตัวอย่าง กรณีของแหล่งจ่ายกระแสที่อยู่ระหว่าง 2 Mesh

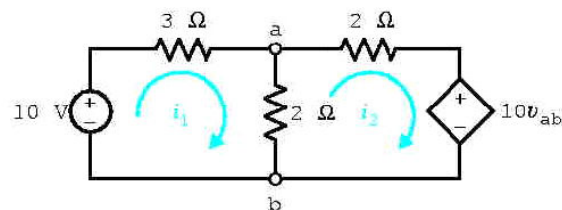


วิธีทำ

Supermesh : $-v_s + R_1 i_1 + R_3 i_2 = 0$

ที่แหล่งจ่ายกระแสอิสระ : $i_1 + i_3 = i_2$

ตัวอย่าง กรณีของแหล่งจ่ายแรงดันอิสระ



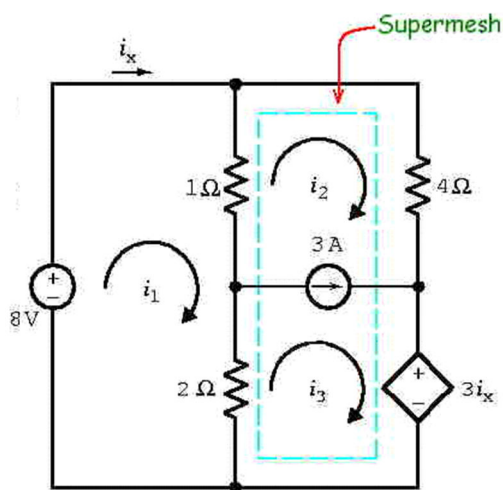
Mesh 1 : $-10 + 3i_1 + 2(i_1 - i_2) = 0$

Mesh 2 : $2(i_2 - i_1) + 2i_2 + 10v_{ab} = 0$

จากกฎของโอห์ม : $v_{ab} = 2(i_1 - i_2)$

$$(i_1, i_2, v_{ab}) = \begin{pmatrix} \frac{40}{11} \\ \frac{45}{11} \\ \frac{10}{11} \end{pmatrix}$$

ตัวอย่าง กรณีที่มีทั้งแหล่งกำเนิดกระแสและแหล่งกำเนิดแรงดัน



$$\text{Mesh 1 :} \quad -8 + 1(i_1 - i_2) + 2(i_1 - i_3) = 0$$

$$\text{Supermesh:} \quad 1(i_2 - i_1) + 4i_2 + 3i_x + 2(i_3 - i_1) = 0$$

$$i_x = i_3$$

$$i_3 - i_2 = 3$$

$$(i_1, i_2) = \begin{pmatrix} \frac{80}{21} \\ \frac{6}{7} \end{pmatrix}$$

สรุป วิธีการใช้ได้ดังตารางด้านล่าง

ลักษณะวงจร	วิธี
มีแหล่งจ่ายแรงดัน	วิเคราะห์แบบ Mesh
มีแหล่งจ่ายกระแส	วิเคราะห์แบบ โหนด
มีแหล่งจ่ายแรงดันมากกว่าแหล่งจ่ายกระแส	วิเคราะห์แบบ Mesh
มีแหล่งจ่ายแรงดันน้อยกว่าแหล่งจ่ายกระแส	วิเคราะห์แบบ โหนด

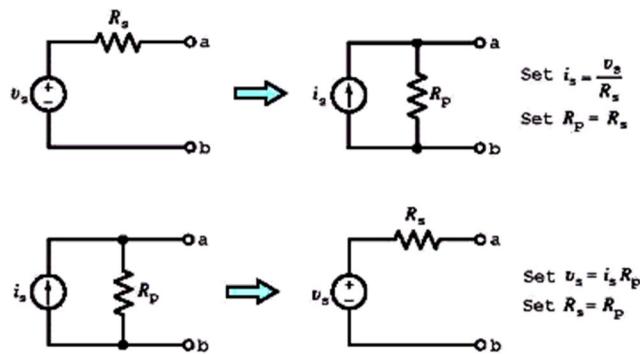
ทฤษฎีวงจรไฟฟ้า (Circuit Theorem)

๔. ทฤษฎีวงจรไฟฟ้า (Circuit Theorem)

วงจรทางไฟฟ้าที่มีความซับซ้อนสามารถลดรูปวงจรก่อนที่นำไปวิเคราะห์ตามทฤษฎีในบทที่ผ่านมา เนื้อหาภายในบทนี้ได้แก่ การลดรูปวงจรไฟฟ้า (Source transformation), Superposition, ทฤษฎีเทวินินและนอร์ตัน (Thevenin and Norton Theorem) และการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Transfer)

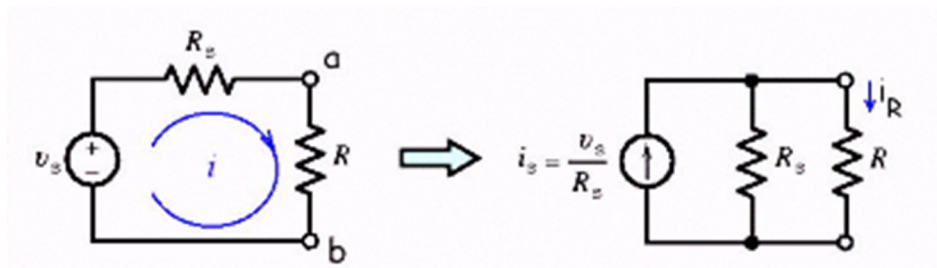
๔.๑ การลดรูปวงจรไฟฟ้า (Source transformation)

การลดรูปวงจรไฟฟ้าที่มีความซับซ้อนช่วยทำให้การวิเคราะห์โดยใช้วิธีโนดหรือเมชง่ายขึ้นสำหรับเทคนิคการลดรูปวงจรไฟฟ้าทำได้ตามรูปและสูตรข้างล่าง



ภาพที่ ๒-๓๓ รูปการแปลงวงจร

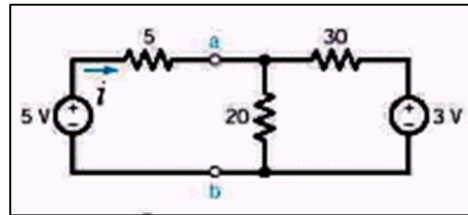
วงจรที่ถูกลดรูปสามารถแสดงด้วยกระแสที่ไหลผ่านโหลดความต้านทานระหว่างขั้วทั้งสองของวงจรซึ่งยังมีคุณลักษณะเช่นเดิม



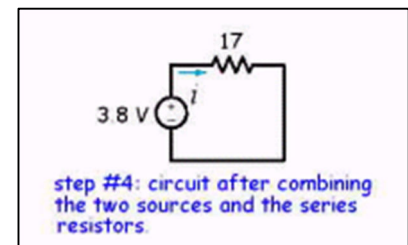
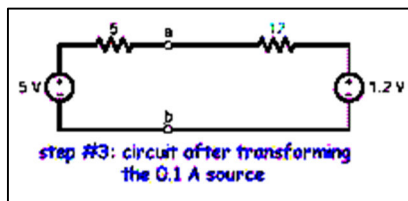
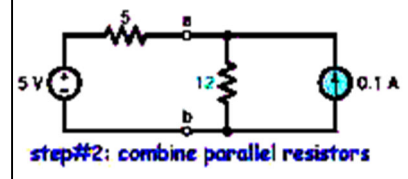
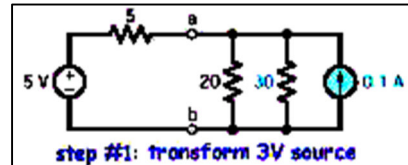
ที่เมชรูป (a) $-v_s + R_s i + Ri = 0$ หรือ $i = \frac{v_s}{R_s + R}$

แบ่งแรงดันภาพที่สอง $i_R = \frac{R_s i_s}{R_s + R} = \frac{R_s}{R_s + R} \frac{v_s}{R_s}$ หรือ $i_R = \frac{v_s}{R_s + R}$

ตัวอย่าง หาค่ากระแส i โดยการลดรูปวงจร



วิธีทำ



สุดท้ายจะได้ $i = 3.8/17 = 0.224A$

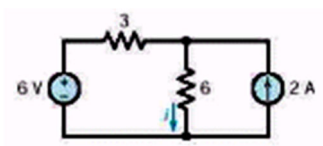
๔.๒ วิธี Superposition

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาวงจรที่เป็นเชิงเส้น ซึ่งวงจรที่เป็นเชิงเส้นถูกสร้างมาจากวัสดุที่มีองค์ประกอบเป็นเชิงเส้น

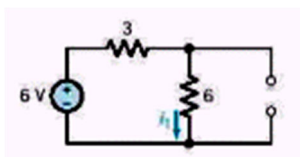
พิจารณาอุปกรณ์ที่เป็นเชิงเส้นเมื่อถูกกระตุ้นด้วย i_1 จะได้ผลตอบสนอง v_1 ในทำนองเดียวกันเมื่อถูกกระตุ้นด้วย i_2 จะได้ผลตอบสนอง v_2 ถ้ากระตุ้นด้วย $i_1 + i_2$ ผลตอบสนองที่ได้คือ $v_1 + v_2$

หลักการของ Superposition คือ ผลรวมทางพีชคณิตอันเนื่องมาจากแหล่งจ่ายแต่ละแหล่งจะเท่ากับผลอันเนื่องมาจากแหล่งจ่ายทั้งหมดรวมกัน

ตัวอย่าง หาค่ากระแส i โดยใช้วิธี Superposition



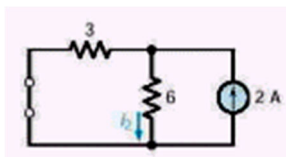
วิธีทำ เมื่อให้แหล่งจ่ายแรงดัน 6 V ทำงาน



จะได้

$$i_1 = \frac{6}{3+6} = 2/3 A$$

เมื่อให้แหล่งจ่ายกระแส 2A ทำงาน



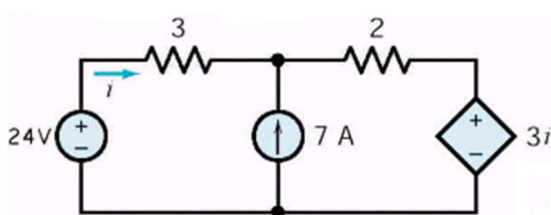
จะได้

$$i_2 = \frac{(3)(2)}{3+6} = 2/3 A$$

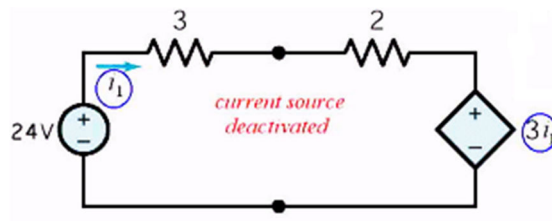
ใช้หลักการ Superposition จะได้

$$i = i_1 + i_2 = 2/3 + 2/3 = 4/3 A$$

ตัวอย่าง จงหากระแสเนื่องจากแหล่งจ่ายแรงดัน 24 V



วิธีทำ เมื่อให้แหล่งจ่ายแรงดัน 24 V ทำงาน



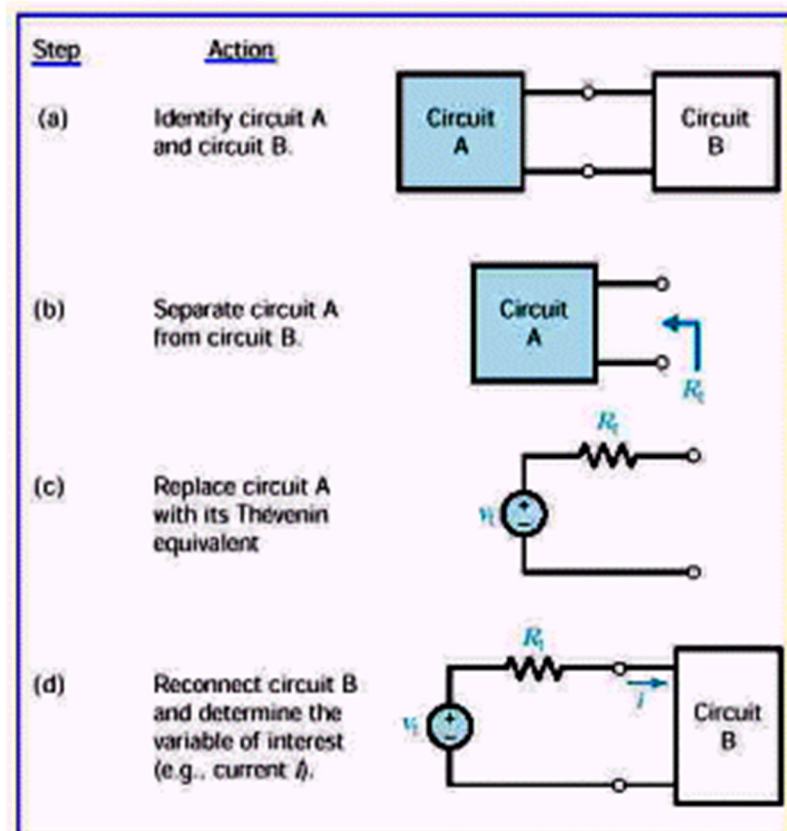
ใช้เมชในการวิเคราะห์

$$- 24 + 5i_1 + 3i_1 = 0$$

$$i_1 = 3A$$

๔.๓ ทฤษฎีของเทวินิน

สำหรับวงจรความต้านทานและแรงดันจากแหล่งจ่ายที่ขั้ว a-b สามารถแทนด้วยวงจรอนุกรมของความต้านทาน (R_T) และแหล่งจ่ายแรงดัน (V_T) เมื่อ V_T คือแรงดันตกคร่อม a และ b (ขณะเปิดวงจร) R_T คืออัตราส่วนแรงดันขณะเปิดวงจรต่อกระแสที่ไหลผ่านขณะลัดวงจรที่ขั้ว a และ b

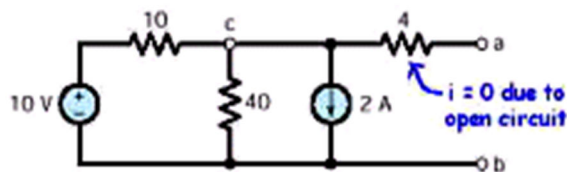


ภาพที่ ๒-๓๔ รูปการหาวงจรเทวินิน

การหาวงจรสมมูลเทวินินสามารถหาได้โดย

องค์ประกอบวงจร	วิธีการหา V_t	วิธีการหา R_t
ความต้านทานและแหล่งจ่ายอิสระ	ใช้การวิเคราะห์แบบโนดและเมฆหาแรงดันขณะเปิดวงจร V_{oc} ที่ขั้ว a-b และให้ $V_t = V_{oc}$	กำหนดไม่ให้นำแหล่งจ่ายทำงานโดยลัดวงจรแหล่งจ่ายแรงดันและเปิดวงจรแหล่งจ่ายกระแส หาค่าความต้านทาน R_t หรือลัดวงจรที่ขั้ว a-b หากระแส i_{sc} แล้วหา $V_t = \frac{V_{oc}}{i_{sc}}$
ความต้านทาน, แหล่งจ่ายอิสระและแหล่งจ่ายไม่อิสระ	ใช้การวิเคราะห์แบบโนดหรือเมฆหาแรงดันขณะเปิดวงจร V_{oc} ที่ขั้ว a-b และให้ $V_t = V_{oc}$	ลัดวงจรที่ขั้ว a-b หากระแส i_{sc} แล้วหา $V_t = \frac{V_{oc}}{i_{sc}}$
ความต้านทานและแหล่งจ่ายไม่อิสระ	ให้ $V_t = V_{oc} = 0$	ต่อแหล่งจ่ายกระแส 1A เข้าไปที่ขั้ว a-b และหา V_{ab}

ตัวอย่าง จงหาวงจรสมมูลเทวินิน



วิธีทำ ขั้นแรกหาแรงดันที่ตกคร่อมขั้ว a-b

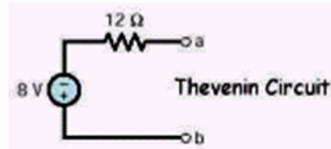
$$\text{KCL ที่โนด c: } \frac{v_c - 10}{10} + \frac{v_c}{40} + 2 = 0$$

$$\text{จะได้ } v_c = -8V$$

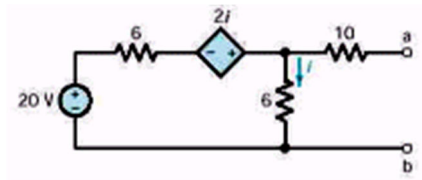
$$\text{เมื่อ } V_t = v_c = v_{oc} = v_{ab} = 8V$$

หาความต้านทานสมมูลของวงจร

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



ตัวอย่าง จงหาวงจรสมมูลเทวินินของรูปวงจรที่มีแหล่งจ่ายไม่อิสระ

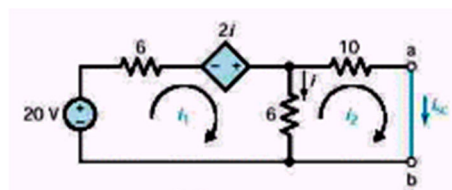


วิธีทำ $v_{oc} = v_{ab} = 6i$

KVL ที่เมฆ i : $-20 + 6i - 2i + 6i = 0$

หรือ $i = 2A$

แล้วจะได้ $v_{oc} = 6i = 12V$



ขั้นต่อไปหากระแสขณะปิดวงจร

ที่เมฆ 1 $-20 + 6i_1 - 2i + 6i = 2$

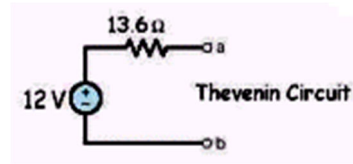
ที่เมฆ 2 $-6i + 10i_2 = 0$

เมื่อ $i = i_1 - i_2$ และ $i_2 = i_{sc}$

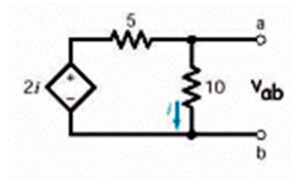
แก้สมการหา i_{sc} $i_{sc} = 120/136A$

แล้วจะได้

$$R_t = \frac{V_{oc}}{i_{sc}} = \frac{12}{120/136} = 13.6\Omega$$



ตัวอย่าง จงหาวงจรสมมูลเทวินินของวงจรที่มีแหล่งไม่อิสระ



วิธีทำ $v_{oc} = 10i$

KVL ที่เมซจ i $- 2i + 5i + 10i = 0$

หรือ $i = 0$

ดังนั้น $v_{oc} = 0$

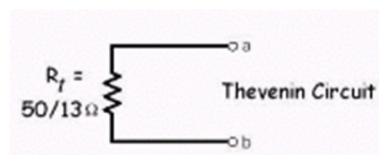
หาความต้านทานเทวินินโดยการป้อนแหล่งจ่ายกระแส 1 A

KCL ที่โนดบน $\frac{v_a - 2i}{5} + \frac{v_a}{10} = 1$

เมื่อ $v_a = v_{ab} = 10i$

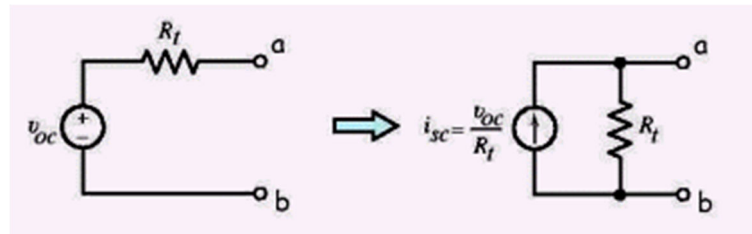
แก้สมการหาแรงดัน $v_a = 50/13V$

ดังนั้น $R_t = \frac{V_{ab}}{1} = 50/13\Omega$



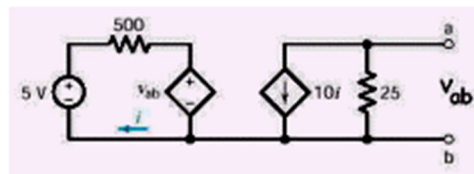
๔.๔ วงจรสมมูลของนอร์ตัน (Norton's equivalent circuit)

วงจรสมมูลของนอร์ตันสามารถหาได้จากวงจรสมมูลเทวินินดังรูป



ภาพที่ ๒-๓๕ การหาวงจรสมมูลของนอร์ตันจากวงจรสมมูลเทวินิน

ตัวอย่าง จงหาวงจรสมมูลของนอร์ตันจากรูปวงจรต่อไปนี้



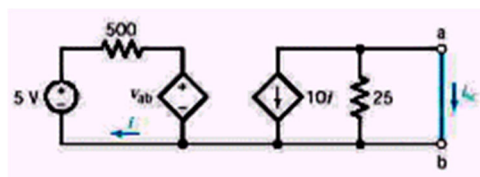
วิธีทำ $v_{oc} = v_{ab} = -25(10i) = -250i$

KVL ลูปด้านซ้ายคือ $-5 + 500i - 250i = 0$

หรือ $i = 20mA$

จะได้ $v_{oc} = -250i = -5V$

เมื่อทำการปิดวงจรที่ a-b



เมื่อวงจรที่ a-b ถูกปิด จะได้ $v_{ab} = 0$ และ $i_{sc} = -10i$

ต่อไปใช้เมฆหาสมการ $-5 + 500i + 0 = 0$

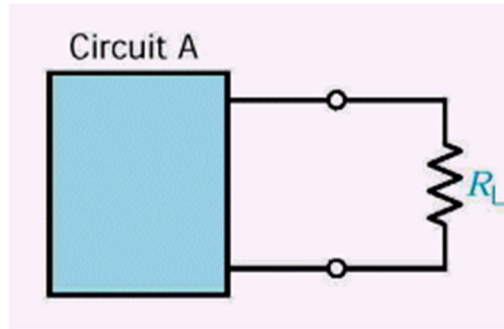
หรือ $i = 10mA$

ดังนั้น $i_{sc} = -10i = -0.1A$

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

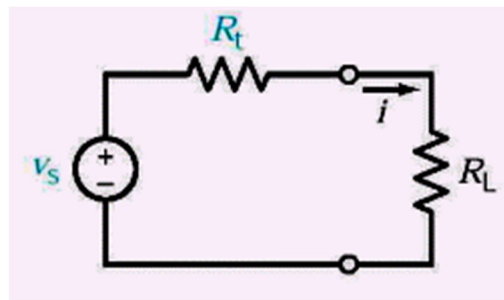
๔.๕ การส่งผ่านกำลังสูงสุด (Maximum Power Transfer)

ปัญหาของการส่งผ่านกำลังสูงสุดอยู่ที่การออกแบบวงจรและโหลดความต้านทาน R_L ที่จะทำให้แหล่งจ่ายสามารถจ่ายกำลังสูงสุดไปยังโหลด



ภาพที่ ๒-๓๖ รูปวงจร A ต่ออยู่กับโหลด

พิจารณารูปวงจรที่เป็นวงจรสมมูลเทวินินต่ออยู่กับโหลด R_L ซึ่งจะทำการหาค่า R_L ที่ทำให้แหล่งจ่ายแรงดันจ่ายกำลังสูงสุด



ภาพที่ ๒-๓๗ วงจรสมมูลเทวินินจ่ายกำลังแก่โหลด R_L

กำลังที่ถูกจ่ายไปยังโหลดคือ

เมื่อกระแส

$$i = \frac{v_s}{R_L + R_t}$$

ดังนั้น

$$P = \left(\frac{v_s}{R_L + R_t} \right)^2 R_L$$

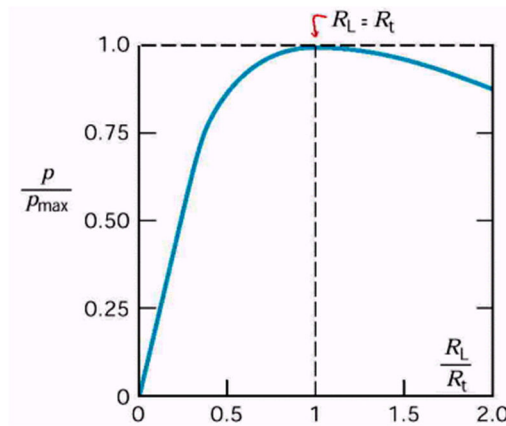
กำลังสูงสุดที่ถูกจ่ายไปยัง R_L สามารถหาได้โดยการดิฟเฟอเรนเชียลสมการ
จะได้

$$P = \left(\frac{v_s}{R_L + R_t} \right)^2 R_L$$

$$R_L = R_t$$

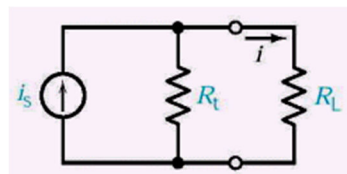
เมื่อต้องการกำลังสูงสุดแล้ว แทน $R_L = R_t$ ในสมการ $P = \left(\frac{v_s}{R_L + R_t} \right)^2 R_L$

จะได้เป็น $P_{\max} = \frac{v_s^2 R_L}{(2R_L)^2} = \frac{v_s^2}{4R_L}$



ภาพที่ ๒-๓๘ กราฟของการส่งผ่านกำลังที่โหลดค่าต่างๆ

สำหรับการส่งผ่านกำลังที่มีวงจรสมมูลของนอร์ตันเป็นชุดจ่ายกำลังแก้อโหลด



ภาพที่ ๒-๓๙ วงจรสมมูลนอร์ตันจ่ายกำลังแก้อโหลด R_L

$$P_{\max} = \frac{i_s^2 R_L}{4}$$

๔.๕.๑ ประสิทธิภาพของการส่งผ่านกำลัง
หาได้จาก

$$h = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

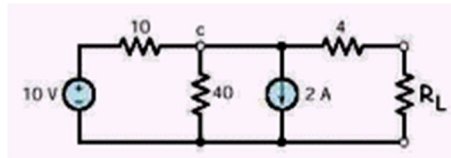
เมื่อ P_{out} คือ กำลังที่ถูกจ่ายไปยังโหลด

P_{in} คือ กำลังที่จ่ายออกไปโดยแหล่งจ่าย

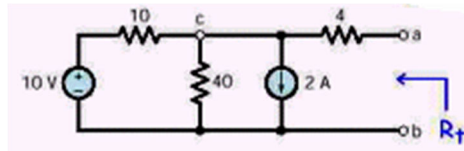
สำหรับประสิทธิภาพของการส่งผ่านกำลังที่ $R_L = R_t$ คือ

$$h = \frac{1}{2}$$

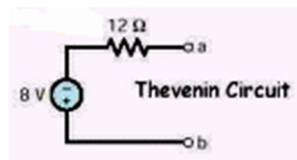
ตัวอย่าง จงหาค่า R_L ที่ทำให้มีการส่งผ่านกำลังสูงสุด



วิธีทำ หาวงจรสมมูลเทวินินโดยการเอาโหลด R_L ออก



จะได้วงจรสมมูลเทวินินดังรูป



ค่า R_L หาได้จาก

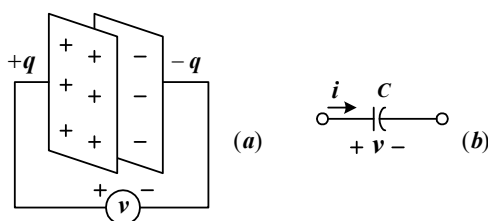
$$R_L = R_t = 12\Omega$$

ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ (Capacitors and inductors)

๕. ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ (Capacitors and inductors)

๕.๑ ตัวเก็บประจุ (Capacitors)

ตัวเก็บประจุเป็น Passive element ถูกออกแบบมาเพื่อเก็บสะสมพลังงานในสนามไฟฟ้า ตัวเก็บประจุประกอบไปด้วยแผ่นตัวนำสองแผ่นถูกแยกออกจากกันด้วยฉนวน (Insulator) หรือวัสดุที่ไม่เป็นสื่อนำไฟฟ้า (dielectric)



ภาพที่ ๒-๔๐ (a) A Capacitor with applied voltage V (b) Circuit symbols for capacitors

เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง ประจุไฟฟ้า กับ แรงดันได้เป็น

สูตร ๑
$$q = CV$$

เมื่อ C ย่อมาจาก Capacitance คือ ค่าความเก็บประจุ มีหน่วยเป็น Farad (F)

(1 Farad = 1 coulomb/volt) โดยค่าความเก็บประจุ คือ อัตราส่วนของความต่างศักย์ระหว่างแผ่นตัวนำ ๒ แผ่น

ซึ่งค่าความเก็บประจุ สามารถคำนวณได้จาก

สูตร ๒
$$C = \frac{eA}{d}$$

โดย e คือ ค่า Permittivity ของวัสดุที่นำเอามาทำเป็นฉนวน

A คือ พื้นที่ผิวแผ่นตัวนำ

d คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง

เมื่อพิจารณาถึงค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส และแรงดันที่เปลี่ยนไปตามเวลา t ดังนี้

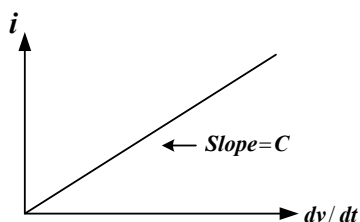
จากสมการความสัมพันธ์ของกระแสและประจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปตามเวลา t ;

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

แทนสมการข้างต้นในสูตร ๑ จะได้

สูตร
$$i_c = C \frac{dV_c}{dt}$$

ซึ่งจะได้กราฟความสัมพันธ์ของสมการข้างต้นเป็นดังรูป



รูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุ และจากสมการความสัมพันธ์ข้างต้นสามารถหาค่าแรงดันได้ คือ

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

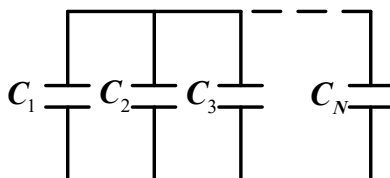
ค่าพลังงานที่ใช้ในการคายประจุ คือ

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

๕.๑.๑ การต่ออนุกรมและขนานของตัวเก็บประจุ

๕.๑.๑.๑ ถ้าตัวเก็บประจุต่อแบบขนาน จะรวมกันเหมือนตัวต้านทาน

ต่ออนุกรมกัน



สูตร

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_N$$

๕.๑.๑.๒ ถ้าตัวเก็บประจุต่อแบบอนุกรม จะรวมกันเหมือนตัวต้านทานต่อขนานกัน



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

๕.๑.๒ สรุปคุณสมบัติของตัวเก็บประจุ (C)

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

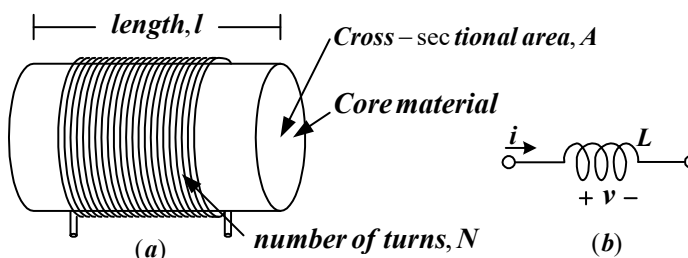
๕.๑.๒.๒ ถ้าแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุที่ ($\frac{dV}{dt} = 0$) จะทำให้กระแสมีค่าเป็นศูนย์ แต่จะมีพลังงานสะสมอยู่ในตัวเก็บประจุจำนวนหนึ่ง

๕.๑.๒.๓ การเปลี่ยนแปลงแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุอย่างทันทีทันใด จะทำให้เกิดกระแสไหลเป็นจำนวนมาก

๕.๑.๒.๔ ตัวเก็บประจุจะไม่มีพลังงานสูญเสียในตัวเก็บประจุ เพียงแต่สะสมไว้เท่านั้น

๕.๒ ตัวเหนี่ยวนำ (Inductors)

ตัวเหนี่ยวนำเป็น Passive element เช่นเดียวกับกับตัวเก็บประจุ มีลักษณะเป็นเส้นลวดตัวนำ ที่ถูกพันเป็นขดลวด (coil)



ภาพที่ ๒-๔๑ (a) รูปแบบทั่วไปของตัวเหนี่ยวนำ (b) สัญลักษณ์ในวงจรของตัวเหนี่ยวนำ

เราสามารถหาความสัมพันธ์ของแรงดันกับกระแสที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา คือ

$$\text{สูตร} \quad V_L = L \frac{di_L}{dt}$$

เมื่อ L คือค่าความเหนี่ยวนำ (inductance) ของตัวเหนี่ยวนำมีหน่วยเป็น Henry(H)

ซึ่ง 1 Henry = 1 Volt second / Ampere

ค่าความเหนี่ยวนำ สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{สูตร} \quad L = \frac{N^2 \mu A}{l}$$

โดย N คือ จำนวนรอบของการพันขดลวด

μ คือ ค่า Permittivity ของวัสดุที่นำเอามาทำเป็นแกน core

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแกน core

จากสมการ $V_L = L \frac{di_L}{dt}$ เราสามารถหาค่ากระแสได้ดังนี้

$$di_L = \frac{V_L}{L} dt$$

$$i_L = \frac{1}{L} \int V(t) dt$$

$$\text{สูตร} \quad i_L = \frac{1}{L} \int_{t_0}^t V(t) dt + i(t_0)$$

และหาค่าพลังงานที่จ่ายออกมาจากตัวเหนี่ยวนำได้เป็น

$$W = \frac{1}{2} Li^2$$

๕.๒.๑ การต่ออนุกรมและขนานของตัวเหนี่ยวนำ

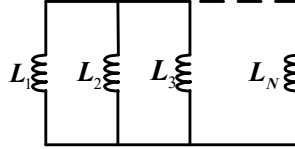
๕.๒.๑.๑ ถ้าตัวเหนี่ยวนำต่อแบบอนุกรม จะรวมกันเหมือนตัวต้านทาน

ต่ออนุกรมกัน



$$L_{eq} = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_N$$

๕.๒.๑.๒ ถ้าตัวเหนี่ยวนำต่อแบบขนาน จะรวมกันเหมือนตัวต้านทาน
ต่อขนานกัน



$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots + \frac{1}{L_N}$$

๕.๒.๒ สรุปคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำ (L)

๕.๒.๒.๑ แรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำจะเท่ากับศูนย์ ถ้ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ($\frac{di}{dt} = 0$) ดังนั้น ตัวเหนี่ยวนำเปรียบเสมือนลัดวงจร (short circuit) เมื่อต่อกับไฟกระแสตรง (ตัวเหนี่ยวนำเหมือนสายไฟเส้นหนึ่งในวงจรไฟกระแสตรง)

๕.๒.๒.๒ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำไม่สามารถเปลี่ยนแปลงไปอย่างทันทีทันใดได้

ตารางที่ ๒-๔ เปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆไปของ R L C

Relation	Resistor(R)	Capacitor(C)	Inductor(L)
$V - i$	$V = iR$	$V_c = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(t)dt + V(t_0)$	$V_L = L \frac{di_L}{dt}$
$i - V$	$i = \frac{V}{R}$	$i_c = C \frac{dV_c}{dt}$	$i_L = \frac{1}{L} \int_{t_0}^t V(t)dt + i(t_0)$
$P \text{ or } W$	$P = i^2 R = \frac{V^2}{R}$	$W = \frac{1}{2} CV^2$	$W = \frac{1}{2} Li^2$
<i>series</i>	$R_{eq} = R_1 + R_2$	$C_{eq} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$	$L_{eq} = L_1 + L_2$
<i>parallel</i>	$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$	$C_{eq} = C_1 + C_2$	$L_{eq} = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}$

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

กองวิทยากร กรมสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ทหารอากาศ. พื้นฐานไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์.
กรุงเทพฯ: ๒๕๕๑