บทที่ 2

BASIC LAWS

2.1 บทนำ

ในบทที่ 1 เรากล่าวถึงค่าต่าง ๆที่สำคัญทางไฟฟ้าเช่น กระแสไฟฟ้า แรงดัน และกำลังงาน ซึ่งการจะหาค่าต่าง ๆนี้เราจะต้องเข้าใจกฎที่สำคัญก็คือ กฎของโอห์ม (Ohm) และกฎของ เคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff) ซึ่งจะได้กล่าวไว้ในบทนี้รวมถึงหลักการพื้นฐานต่าง ๆในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าและการประยุกต์ใช้งานจริง

2.2 กฎของโอห์ม (Ohm's law)

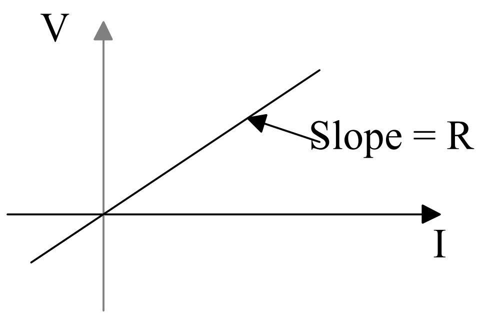
วัสดุต่าง ๆจะมีคุณสมบัติในการต้านทานการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า ซึ่งเราเรียกคุณสมบัตินี้ว่า *"ความต้านทานไฟฟ้า" (Resistance)* เขียนเป็นสัญลักษณ์ได้คือ R มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω, Ohms) อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในการต้านทานกระแสไฟฟ้านี้เราเรียกว่า *"ตัวต้านทาน" (Resistor)* กฎของโอห์มกล่าวไว้ว่า

นิยาม "แรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน มีค่าแปรผันตามค่ากระแสที่ไหลผ่าน ตัวต้านทานนั้น"

แสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$v = Ri \tag{2.1}$$

ในกรณีที่ R เป็นค่าคงที่ เราอาจเขียนความสัมพันธ์ ของ v และ i ในรูป ของกราฟ เส้นตรง ได้

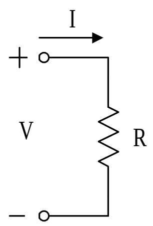


รูปที่ 2.1 ตัวต้านทานเป็นค่าคงที่

เราเรียกความต้านทาน ที่เป็นค่าคงที่นี้ว่าเป็น *ความต้านทานแบบเชิงเส้น (linear resistance)*

ความต้านทาน อีกกรณีหนึ่งก็คือ*ความต้านทานแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear resistor)* ซึ่งจะมีกราฟระหว่างแรงดันกับกระแสไม่เป็นเส้นตรงเหมือนกับในรูปที่ 2.1

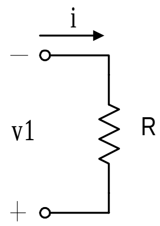
ในทางปฏิบัติเราจะกำหนดให้ตัวต้านทานเป็นอุปกรณ์แบบ passive เสมอนั่นก็คือการกำหนดทิศทางของ กระแส i และแรงดัน v ที่ตกคร่อม R จะเป็นไปตาม **Passive sign convention** ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงทิศทางกระแส i และขั้วของแรงดัน v ที่เป็นไปตาม **Passive sign convention**

หากเมื่อใดก็ตามที่แรงดันตกคร่อม R มีขั้วเปลี่ยนแปลงไปจากที่เป็นดังรูปที่ 2.2 แล้วละก็ การใช้ Ohm’s law สำหรับวงจร นั้นๆ ก็จะ ต้องเปลี่ยน แปลง ตามไปด้วย

ดูตัวอย่างดังรูป 2.3 กำหนดให้แรงดันที่ตกคร่อม R คือ V1 มีค่าเท่ากับ V แต่กลับขั้ว



รูปที่ 2.3 แรงดันตกคร่อม R กลับขั้ว

การใช้ Ohm’s law กับวงจรรูปที่ 2.3 จะทำให้ได้ว่า

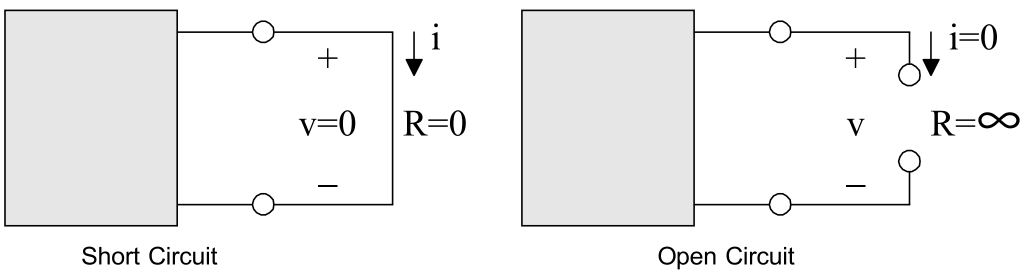
$$v_1 = -Ri \tag{2.2}$$

และเปรียบเทียบกับ v ก็จะได้ว่า

$$v_1 = -v \tag{2.3}$$

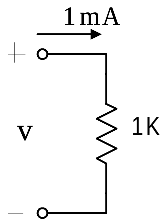
เมื่อค่า R เท่ากับศูนย์เราจะเรียกว่า *“ลัดวงจร” (Short Circuit)* ซึ่งค่าแรงดันจะเท่ากับศูนย์แต่กระแสจะมีค่าเท่าใดก็ได้

เมื่อค่า R เท่ากับ ∞ เราจะเรียกว่า *“เปิดวงจร” (Open Circuit)* ซึ่งค่ากระแสจะเท่ากับศูนย์แต่แรงดันจะมีค่าเท่าใดก็ได้

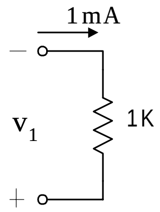


รูปที่ 2.4

ตัวอย่าง2.1 จงหาแรงดัน V และ V_1ที่ตกคร่อม R ของรูป 2.5



รูปที่ 2.5 (a)



รูปที่ 2.5 (b)

<u>วิธีทำ</u>

จากรูป 2.5(a)

$$v = Ri = 1k\Omega * 1mA = 1V$$

จากรูป 2.5(b)

$$v_1 = -Ri = -1k\Omega * 1mA = -1V$$

สรุป ก็คือ

$$v_1 = -v$$

กำลัง ค่ากำลัง (P) ของ R หาได้จาก

$$p = vi = Ri^2 = \frac{v^2}{R} \qquad (2.4)$$

โดยการกำหนดขั้วของแรงดันและทิศทางของกระแสเป็นไปตาม Passive sign convention ดังรูปที่ 2.2 จากสมการจะพบว่า กำลังของตัวต้านทานจะเป็นบวกเสมอ ดังนั้นตัวต้านทานจึงมีพลังงานที่เป็นบวกด้วย นั่นคือตัวต้านทานไม่สามารถจ่ายพลังงานได้หรือ ตัวต้านทานเป็นอุปกรณ์แบบ Passive นั่นเอง

ค่าความนำไฟฟ้า (Conductance)

คือคุณสามารถของวัสดุที่จะนำกระแสไฟฟ้าได้ โดยค่าความนำ(G) กำหนดเป็นส่วนกลับของ R คือ

$$G = \frac{1}{R} \qquad (2.5)$$

หน่วยของ G คือ ซีเมนส์ (Siemens) เขียนโดยย่อเป็น S หรือเป็นหน่วย mhos

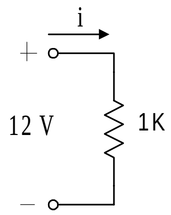
ความสัมพันธ์ของกระแส i และ แรงดัน v ในรูปของความนำก็คือ

$$i = Gv \qquad (2.6)$$

ดังนั้นค่ากำลังงาน p ก็จะเป็น

$$p = \frac{i^2}{G} = Gv^2 \qquad (2.7)$$

ตัวอย่าง2.2 หาค่า i ไหลเข้าและ power ที่R 1 kΩ



รูปที่ 2.6

<u>วิธีทำ</u>

จากกฎของโอห์มจะได้ว่า

$$i = \frac{v}{R} = \frac{12V}{1K\Omega} = 12mA$$

และ

$$p = \frac{v^2}{R} = \frac{12^2}{1K\Omega} = 144mW$$

หรือหากเปลี่ยน v เป็น 10cos(t) V ก็จะได้ว่ากระแส i คือ

$$i = \frac{10\cos(t)}{1K\Omega} = 10\cos(t)\,mA$$

และ p เป็น

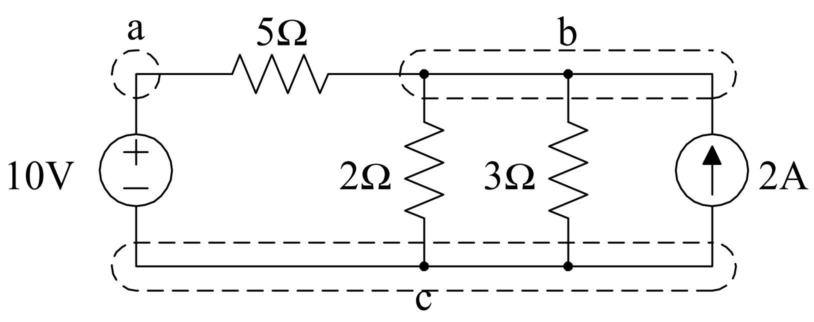
$$p = 0.1\cos^2(t)W$$

2.3 โนด, กิ่ง และ ลูป (Nodes, Branches and Loops)

นิยาม กิ่ง(branches) คือสิ่งที่ใช้แทนอุปกรณ์ไฟฟ้า 2 ขั้ว 1 ตัวในวงจรไฟฟ้าเช่น แหล่งจ่ายแรงดันหรือกระแส หรือตัวต้านทาน

โนด(Nodes) จุดเชื่อมต่อของอุปกรณ์(หรือกิ่ง) ตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป

ลูป(Loops) คือวงรอบปิดใดๆในวงจร



รูปที่ 2.5

ในรูป 2.5 ประกอบด้วยกิ่งจำนวน 5 กิ่งคือแหล่งจ่ายแรงดัน,แหล่งจ่ายกระแส และตัวต้านทาน 3 ตัว มีโนด 3 โนดคือ โนด a, โนด b และโนด c

ส่วนลูปนั้นจะมีทั้งหมด 6 ลูป แต่จะมีลูปอิสระอยู่ 3 ลูปโดย*ลูปอิสระคือลูปที่ไม่มีการทับซ้อนกันของอุปกรณ์หรือกิ่งกับลูปอื่น* ดังนั้นลูปอิสระ 3 ลูปมีดังนี้ ลูป abca ที่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน 10V,ตัวต้านทาน 5Ω และ ตัวต้านทาน 2 Ω, ลูป bcb 2 ลูปโดยที่ bcb ลูปที่ 1 ประกอบด้วยตัวต้านทาน 2 Ωและตัวต้านทาน 3 Ω และ bcb ลูปที่ 2 ประกอบด้วยตัวต้านทาน 3 Ωและแหล่งจ่ายกระแส 2A

อนุกรมและขนาน (Series and Parallel)

นิยาม อุปกรณ์ 2 ตัว หรือมากกว่า 2 ตัวจะ***อนุกรมกัน*** เมื่ออุปกรณ์นั้นต่อกันเรียงตามลำดับไปเรื่อยๆ ดังนั้นอุปกรณ์นั้นจะมีกระแสไหลผ่านเท่ากัน อุปกรณ์ 2 ตัว หรือมากกว่า 2 ตัวจะ***ขนานกัน*** เมื่อขั้วทั้งสองของอุปกรณ์นั้นต่ออยู่ที่โนด 2 โนดเดียวกัน ดังนั้นอุปกรณ์นั้นจะมีแรงดันตกคร่อมเท่ากัน

ตัวอย่างในรูปที่ 2.5 แหล่งจ่ายแรงดัน 10Vและตัวต้านทาน 5Ω จะอนุกรมกัน, แหล่งจ่ายกระแส 3, ตัวต้านทาน 2Ω และ ตัวต้านทาน 3Ω จะขนานกัน ส่วนตัวต้านทาน 5Ω และตัวต้านทาน 2Ω ไม่ได้ทั้งขนานหรืออนุกรมกัน

2.4 กฏของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Laws)

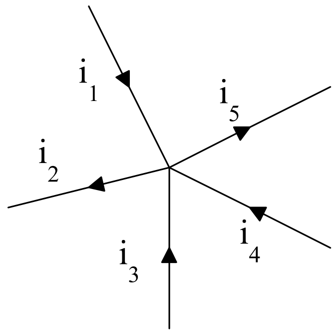
เนื่องจากกฏของโอห์มเป็นความสัมพันธ์ ของกระแสและแรงดัน ของตัวต้านทาน 1 ตัวเท่านั้น ซึ่งไม่เพียงพอในการวิเคราะห์วงจร ดังนั้นกฏของเคอร์ชอฟฟ์จะสามารถใช้ร่วมกับกฏของโอห์มเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ได้ ซึ่งจมี 2 ข้อ ดังนี้

- **กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ หรือ Kirchhoff 's Current Law (KCL)**

นิยาม กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์(KCL) คือ"ผลรวมทางพีชคณิต ของกระแสที่ไหลเข้าโนดหรือพื้นผิวปิดใดๆ มีค่าเป็นศูนย์"

ดังนั้น

$$\sum i = 0 \qquad (2.8)$$



รูปที่ 2. 6

จาก KCL ได้ว่า

$$i_1 + (-i_2) + i_3 + i_4 + (-i_5) = 0 \tag{2.9}$$

i_2 และ i_5 มีเครื่องหมายลบ เพราะไหลออกจากโหนด หากเราย้ายข้างของสมการเป็นดังนี้

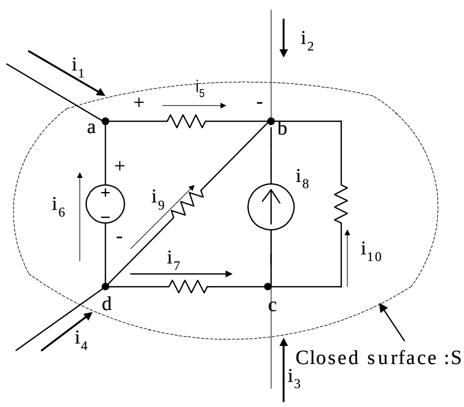
$$i_1 + i_3 + i_4 = i_2 + i_5 \tag{2.10}$$

ด้านซ้ายของสมการคือกระแสที่ไหลเข้าโนด ส่วนด้านขวาของสมการคือกระแสที่ไหลออกจากโนด ดังนั้นจะสรุป KCL ได้อีกนัยหนึ่งว่า

นิยาม กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์(KCL) คือ"ผลรวมของกระแสที่ไหลเข้าโนดจะเท่ากับผลรวมของกระแสที่ไหลออกจากโนด"

กระแสในพื้นผิวปิด (Closed surface current)

ดูวงจร ในรูป



รูปที่ 2.7 กระแสในพื้นผิวปิด

หากเรามีพื้นผิวปิด S ดังรูปและเราใช้นิยามของ KCL เราจะกล่าวได้ว่า

$$i_1 + i_2 + i_3 + i_4 = 0 \tag{2.11}$$

หรือก็คือจะกล่าว KCL ได้อีกนัยหนึ่งว่า

"ผลรวม(ทางพีชคณิต) ของกระแสที่ไหลเข้า พื้นผิวปิด ใดๆ มีค่า เป็นศูนย์"

เนื่องจากเราพิสูจน์ได้จากสมการ KCL ที่แต่ละโหนดได้ว่า

โนด a
$$i_1 = i_5 - i_6 \tag{2.12}$$

โนด b
$$i_2 = -i_5 - i_8 - i_9 - i_{10} \tag{2.13}$$

โนด c
$$i_3 = -i_7 + i_8 + i_{10} \tag{2.14}$$

โนด d
$$i_4 = i_6 + i_7 + i_9 \tag{2.15}$$

ซึ่งหากรวมสมการทั้ง 4 เข้าด้วยกันก็จะได้ว่า

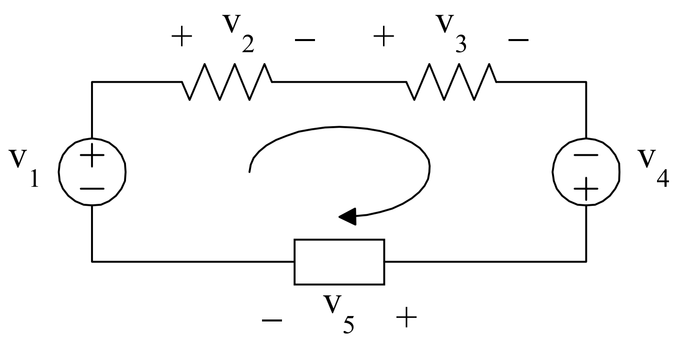
$$i_1 + i_2 + i_3 + i_4 = 0 \tag{2.16}$$

- **กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ หรือ (Kirchhoff's Voltage Law) (KVL)**

นิยาม กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์(KVL) คือ"ผลรวม(ทางพีชคณิต) ของแรงดัน รอบวงปิด ใดๆ มีค่า เป็นศูนย์"

ดังนั้น

$$\sum v = 0 \tag{2.17}$$



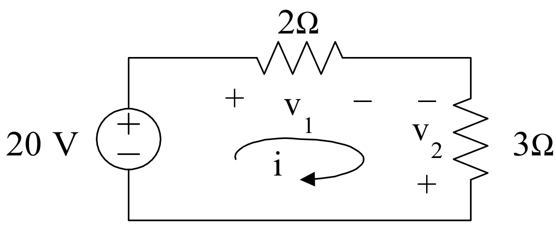
รูปที่ 2.8

จากนิยามเราได้ว่า

$$-v_1 + v_2 + v_3 - v_4 + v_5 = 0$$

โดยในที่นี้การกำหนดเครื่องหมายบวกหรือลบให้ดูจากเครื่องหมายแรกที่พบ โดยจากรูปที่ 2.8 เราเริ่มต้นจากแหล่งจ่ายแรงดัน v_1 วนไปตามเข็มนาฬิกา พบว่า v_1 และ v_4 จะพบเครื่องหมายลบก่อนจึงได้สมการดังสมการที่ (2.4)

ตัวอย่าง2.3 จากวงจรให้หาค่าแรงดัน v_1 และ v_2



รูปที่ 2.9

<u>วิธีทำ</u>

จากกฎของโอห์มจะได้ว่า

$$v_1 = 2i$$

$$v_2 = -3i$$

ใช้ KVL ตามลูปในรูป

$$-20 + v_1 - v_2 = 0$$

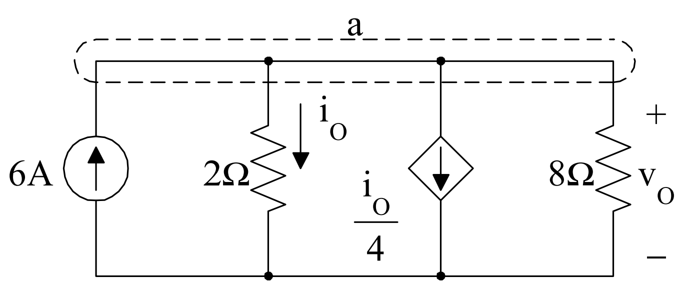
แทนค่า v_1 และ v_2 จะได้

$$-20 + 2i - (-3i) = 0$$

จะได้ $$i = 4A$$

ดังนั้น $$v_1 = 8V\,,\ v_2 = -12V$$

ตัวอย่าง2.4 จากวงจรดังรูปจงหาค่าของ v_O และ i_O



รูปที่ 2.10

<u>วิธีทำ</u>

แรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน 2Ω มีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน 8Ω คือเท่ากับ v_O จากกฎของโอห์มที่ตัวต้านทาน 2Ω จะได้ว่า

$$v_O = 2i_O$$

จาก KCL ที่โหนด a จะได้ว่า

$$-6 + i_O + \frac{i_O}{4} + \frac{v_O}{8} = 0$$

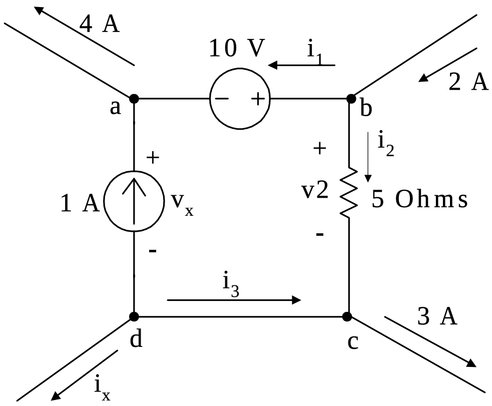
แทนค่า v_O จะได้

$$-6 + i_O + \frac{i_O}{4} + \frac{2i_O}{8} = 0$$

จะได้

$$i_O = 4A, v_O = 8V$$

ตัวอย่าง2.5 แสดงถึงการใช้ KCL และ KVL ในวงจร เดียวกัน โดยให้หา i_x และ v_x



รูปที่ 2.11

<u>วิธีทำ</u>

ที่โนด a ใช้ KCL ก็จะได้ว่า

$$-4 + 1 + i_1 = 0$$

หรือ $$i_1 = 3A$$

โนด b

$$-i_1 + 2 - i_2 = 0$$

ก็จะได้ $$i_2 = -1A$$

โนด c

$$i_2 + i_3 - 3 = 0$$

ได้ $$i_3 = 4A$$

โนด d

$$-i_x - 1 - i_3 = 0$$

ได้

$$i_x = -5A$$

ใช้ KVL ก็จะได้ว่า

$$-10 + v_2 - v_x = 0$$

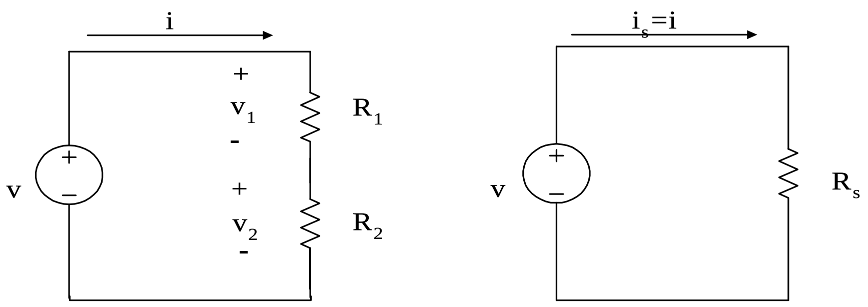
เราจะได้จาก Ohm’s law ว่า

$$v_2 = 5 \times i_2 = -5V$$

ซึ่งจะได้ว่า

$$v_x = -15V$$

2.5 ผลรวมตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมและการแบ่งแรงดัน(Series Resistors And Voltage Division)



a) Single-loop circuit

b) equivalent circuit

รูปที่ 2.12

หากใช้ KVL ในรูปที่ 2.12(a) จะได้ว่า

$$v = v_1 + v_2 \tag{2.17}$$

และจาก Ohm’s law

$$v_1 = R_1 i \text{ , } v_2 = R_2 i \tag{2.18}$$

รวมทั้งสองสมการเข้าด้วยกันจะได้ว่า

$$v = R_1 i + R_2 i \tag{2.19}$$

ได้

$$i = \frac{v}{R_1 + R_2} \tag{2.20}$$

จาก รูป 2.12(b) เราได้ว่า

$$i_s = \frac{v}{Rs} = i \tag{2.21}$$

จะเรียกรูป 2.12(b) ว่าเป็น วงจรสมมูล (equivalent circuit) ของวงจร 2.12(a)
และจะเรียก Rs ว่าเป็น ความต้านทานสมมูล (Equivalent resistance) ของวงจรอนุกรม โดยที่

$$Rs = R_1 + R_2 \tag{2.22}$$

ในทำนองเดียวกันกับตัวต้านทานหลาย ๆตัวอนุกรมกันจะสรุปได้ว่า

“ความต้านทานสมมูลของตัวต้านทานอนุกรมก็คือผลรวมของค่าความต้านทานของตัวต้านทานแต่ละตัว”

ถ้ามีตัวต้านทานอนุกรมกัน N ตัวจะได้ความต้านทานสมมูลดังนี้

$$Rs = R_1 + R_2 + ..R_N = \sum_{n=1}^{N} R_n \tag{2.23}$$

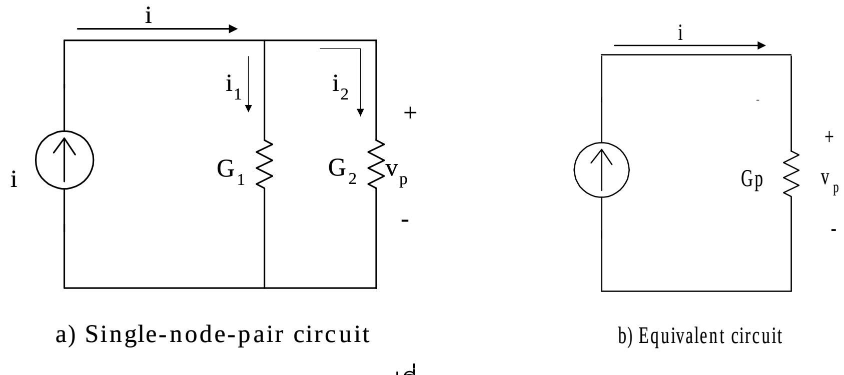
จากสมการ (2.17) และสมการ (2.19) จะได้ว่า

$$v_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v \quad \text{และ} \quad v_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v \tag{2.24}$$

จะเห็นได้ว่าแรงดัน v ถูกแบ่งออกเป็นแรงดัน v_1 และ v_2 ซึ่งแรงดันทั้งสองนี้ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานที่ตัวมันเองนั่นเอง นี่ก็คือ หลักการของการแบ่งแรงดัน (Principle of voltage division) หากวงจรประกอบด้วยความต้านทาน N ตัวต่ออนุกรมกัน แรงดันที่ตกคร่อม R ตัวที่ m จะได้เท่ากับ

$$v_m = \frac{R_m}{R_1 + R_2 + \cdots + R_N} v \tag{2.25}$$

2.6 ผลรวมการของตัวต้านทานที่ต่อขนานและการแบ่งกระแส(Parallel Resistors And Current Division)



รูปที่ 2.13

ใช้ KCL ที่ โนดด้านบนของรูป 2.13(a)

$$i = i_1 + i_2 \tag{2.26}$$

และจาก Ohm's law

$$i_1 = G_1 v \text{ , } i_2 = G_2 v \tag{2.27}$$

$$i = G_1 v + G_2 v \tag{2.28}$$

$$v = \frac{i}{G_1 + G_2} \tag{2.29}$$

หากเราใช้รูป 2.13(b)

$$v_p = \frac{i}{G_p} = v \tag{2.30}$$

โดยที่

$$G_p = G_1 + G_2 \tag{2.31}$$

โดยที่

$$G_p = \frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \tag{2.32}$$

ในทำนองเดียวกันกับตัวต้านทานหลาย ๆตัวขนานกันจะสรุปได้ว่า

“ค่าความนำสมมูลของตัวต้านทานขนาน คือผลรวมของค่าความนำ(G)ของตัวต้านทานแต่ละตัว”

ถ้ามีตัวต้านทานขนานกัน N ตัวจะได้ความต้านทานสมมูลดังนี้

$$G_p = G_1 + G_2 + \ldots + G_N = \sum_{i=1}^{N} G_i \tag{2.33}$$

หรือ เขียนในเทอมของ R ได้เป็น

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_N} = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{R_i} \tag{2.34}$$

จากสมการ (2.26) และ สมการ (2.28) จะได้

$$i_1 = \frac{G_1}{G_1 + G_2} i \text{ , } i_2 = \frac{G_2}{G_1 + G_2} i \tag{2.35}$$

หรือ

$$i_1 = \frac{\frac{1}{R_1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} i \text{ , } i_2 = \frac{\frac{1}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} i \tag{2.36}$$

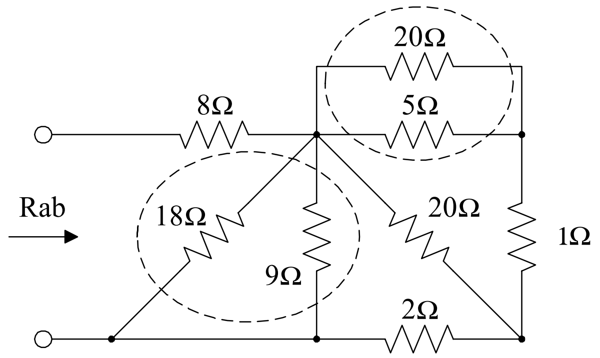
จะเห็นได้ว่ากระแส i ถูกแบ่งออกเป็นกระแส i_1 และ i_2 ซึ่งกระแสทั้งสองนี้ขึ้นอยู่กับส่วนกลับของค่าความต้านทานที่ตัวมันเองนั่นเอง นี่ก็คือ หลักการของ การแบ่งกระแส (Principle of current division) หากวงจรประกอบด้วยความต้านทาน N ตัวต่อขนานกัน กระแสที่ไหลผ่าน R ตัวที่ m จะได้เท่ากับ

$$i_m = \frac{G_m}{G_1 + G_2 + \cdots + G_N} i \tag{2.37}$$

หรือ

$$i_m = \frac{R_P}{R_m} i \tag{2.38}$$

ตัวอย่าง2.6 จงหาค่าความต้านทานรวม Rab

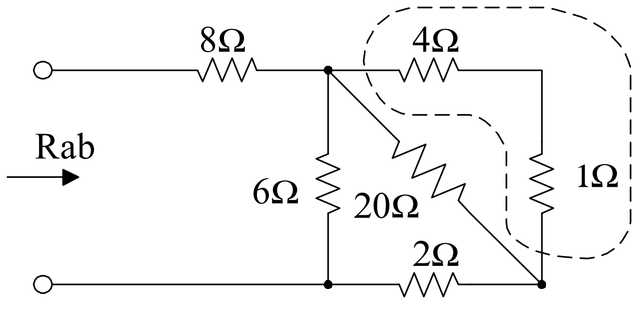


รูปที่ 2.14

จากรูปที่ 2.16

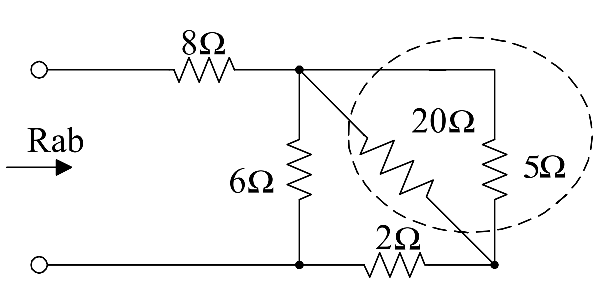
ตัวต้านทาน 18Ω กับ 9Ω ขนานกันจะได้ $18\Omega \| 9\Omega = 6\Omega$

ตัวต้านทาน 20Ω กับ 5Ω ขนานกันจะได้ $20\Omega \| 5\Omega = 4\Omega$



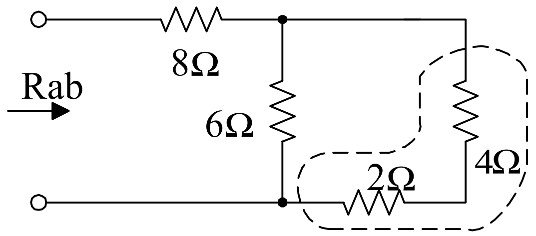
ตัวต้านทาน 4Ω กับ 1Ω อนุกรมกัน จะได้ค่าความต้านทานรวม

$1\Omega + 4\Omega = 5\Omega$



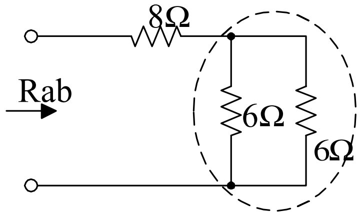
ตัวต้านทาน 20Ω กับ 5Ω ขนานกัน จะได้ค่าความต้านทานรวม

$20\Omega \| 5\Omega = 4\Omega$



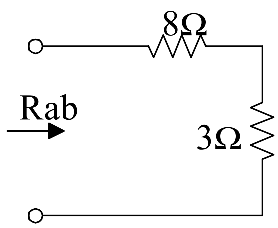
ตัวต้านทาน 4Ω กับ 2Ω อนุกรมกัน จะได้ค่าความต้านทานรวม

$2\Omega + 4\Omega = 6\Omega$



ตัวต้านทาน 6Ω กับ 6Ω ขนานกัน จะได้ค่าความต้านทานรวม

$6\Omega \| 6\Omega = 3\Omega$



ตัวต้านทาน 8Ω กับ 3Ω อนุกรมกัน จะได้ค่าความต้านทานรวม

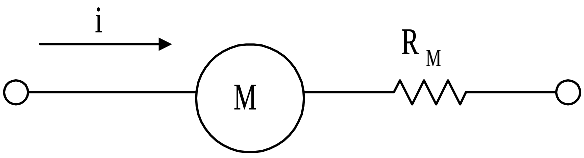
$8\Omega + 3\Omega = 11\Omega$

ดังนั้น Rab = 11Ω

2.7 แอมป์มิเตอร์ (Ammeters)

แอมป์มิเตอร์ โวลท์มิเตอร์ และ โอห์มมิเตอร์ (Ammeters Voltmeters and Ohmmeters)

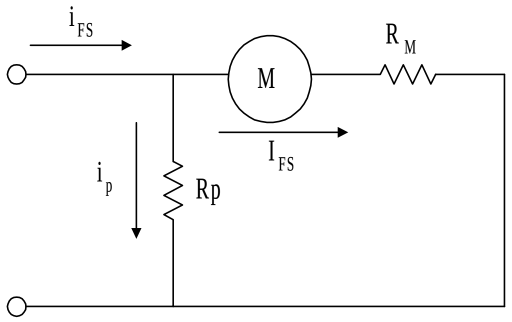
แอมป์มิเตอร์แบบ D'Arsonval มีวงจรสมมูล ดังรูป ข้างล่าง



รูปที่ 2.15

M คือ ideal ammeter R_M คือ ความต้านทานของขดลวด

แอมป์มิเตอร์มีค่ากระแสเต็มสเกลเป็นตัวบอกความสามารถในการวัดค่ากระแสได้สูงสุด เราเรียกกระแสนี้เป็น I_{FS}(Full-scale current) ซึ่งมีค่าโดยทั่วไปอยู่ในช่วง 10 uA ถึง 10 mA จึงไม่สามารถวัดค่ากระแสที่เกินไปจากนี้ได้ และค่า I_{FS} ก็ทำให้เกิดแรงดันเต็มสเกล V_{FS}(Full-scale voltage) ตกคร่อม D'Arsonval meter ด้วย หากต้องการ วัดกระแส ค่าสูง เราจะต่อ Rp ช่วยแบ่งกระแส



รูปที่ 2.16

ซึ่งจากหลักการ Current division

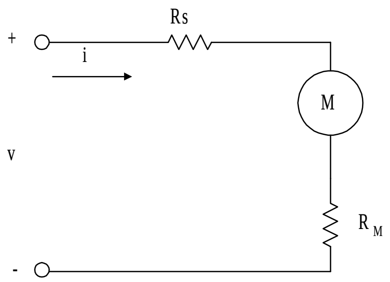
$$I_{FS} = \frac{Rp}{R_M + Rp} i_{FS} \quad (2.39)$$

โดยที่กระแสเต็มสเกลของ D'Arsonval meter คือ I_{FS} ส่วน i_{FS} คือ กระแสเต็มสเกลค่าใหม่ที่ต้องการ ซึ่งจะทำให้แอมป์มิเตอร์วัดค่าของกระแสได้สูงขึ้นตามต้องการ

หาก ทราบว่าต้องการ i_{FS} เท่าใดก็สามารถคำนวณหา Rp ได้จาก

$$Rp = \frac{R_M I_{FS}}{i_{FS} - I_{FS}} \quad (2.40)$$

DC voltmeterก็ได้มาจากการใช้ D'Arsonval ammeter ในการวัดแรงดันที่ไม่เกินแรงดันเต็มสเกล V_{FS} วงจรสมมูล ของโวลท์มิเตอร์ คือ



รูปที่ 2.17

ขณะที่กระแสไหลเต็มที่คือ $i = I_{FS}$ จะได้ว่าแรงดันที่วัดเป็นแรงดันที่เต็มสเกลด้วยคือ $v = v_{FS}$
จาก KVL ก็จะได้ว่า

$$-v_{FS} + RsI_{FS} + R_M I_{FS} = 0 \quad (2.41)$$

ซึ่งจะได้ว่า

$$Rs = \frac{v_{FS}}{I_{FS}} - R_M \quad (2.42)$$

v_{FS} คือค่าของแรงดันสูงที่สุดที่โวลท์มิเตอร์สามารถวัดได้

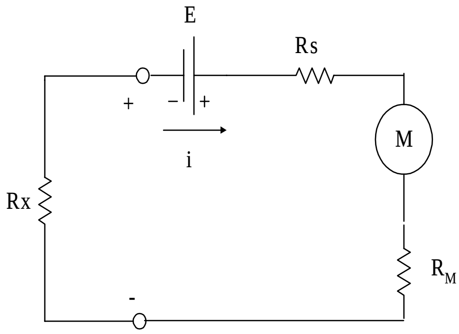
ความไว (SENSITIVITY) ของโวลท์มิเตอร์หาได้จากค่า โอห์มต่อโวลท์ หรือ ค่าความต้านทานของโวลท์มิเตอร์ หารด้วยค่าแรงดันเต็มสเกล

$$\Omega/V\,rating = \frac{Rs + R_M}{v_{FS}} \approx \frac{Rs}{v_{FS}} \qquad (2.43)$$

รูปที่ 2.18 การต่อโวลท์ มิเตอร์และแอมป์มิเตอร์

โวลท์มิเตอร์นั้นเราใช้ในการวัดแรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์ดังนั้นการต่อโวลท์มิเตอร์จึงต้องต่อ **ขนาน** กับอุปกรณ์

ส่วนแอมป์มิเตอร์นั้นใช้ในการวัดกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์ดังนั้นการต่อแอมป์มิเตอร์จึงต้องต่อ **อนุกรม** กับอุปกรณ์ที่จะวัดกระแส Ohmmeter ใช้เพื่อวัดค่า Rx ดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.19

จาก KVL เราได้ว่า

$$-E + (Rs + R_M + Rx)i = 0 \qquad (2.44)$$

ซึ่งเราได้ว่า

$$Rx = \frac{E}{i} - (Rs + R_M) \qquad (2.45)$$

กระแส i จะไหลสูงสุดเมื่อค่าของ Rx มีค่าเท่ากับศูนย์

ดังนั้นขณะที่ Rx=0 เราจะเลือก E และ Rs ให้มีค่า $i=I_{FS}$ ซึ่งจะได้

$$I_{FS} = \frac{E}{Rs + R_M} \qquad (2.46)$$

จากสมการ(2.14) และสมการ (2.15) จะได้ว่า

$$Rx = \left(\frac{I_{FS}}{i} - 1\right)\left(Rs + R_M\right) \tag{2.47}$$