كلية العلوم

القسم : **الفيزياء**

السنة : **الثالثة**

المادة : الكترونيات ١

المحاضرة : الاولى/نظري/

إلكترونيات 1

المحاضرة الأولى
مراجعة أسس كهربائية

Ohm’s Law قانون أوم

يحدد قانون أوم العلاقة بين الجهد والتيار والمقاومة ضمن الدارة الكهربائية ، ويُعطى على النحو الآتي:

$$I = \frac{E}{R} \quad \text{[amps, A]}$$

E is the applied voltage in volts,
R is the resistance in ohms,
I is the current in amperes.

ينص قانون أن التيار يتناسب طرداً مع الجهد وعكساً مع المقاومة.

George Simon Ohm.

German (Erlangen, Cologne)
(1789–1854)
Physicist and Mathematician
Professor of Physics, University of Cologne

In 1827, developed one of the most important laws of electric circuits: *Ohm's law.* When the law was first introduced, the supporting documentation was considered lacking and foolish, causing him to lose his teaching position and search for a living doing odd jobs and some tutoring. It took some 22 years for his work to be recognized as a major contribution to the field. He was then awarded a chair at the University of Munich and received the Copley Medal of the Royal Society in 1841. His research also extended into the areas of molecular physics, acoustics, and telegraphic communication.

Examples

أحسب قيمة التيار المار عبر مقاومة قيمتها 2.2Ω،
إذا كان الجهد المطبق على طرفيها 9 V.

$$I = \frac{V_R}{R} = \frac{E}{R} = \frac{9\ \text{V}}{2.2\ \Omega} = \mathbf{4.09\ A}$$

أحسب قيمة المقاومة إذا كان التيار المار عبرها
500mA، والجهد المطبق على طرفيها 120 V.

$$R = \frac{V_R}{I} = \frac{E}{I} = \frac{120\ \text{V}}{500 \times 10^{-3}\ \text{A}} = \mathbf{240\ \Omega}$$

أحسب قيمة التيار المار عبر مقاومة قيمتها 2kΩ،
إذا كان الجهد المطبق على طرفيها 16 V.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{16\ \text{V}}{2 \times 10^{3}\ \Omega} = \mathbf{8\ mA}$$

أحسب قيمة الجهد المطبق على طرفي مقاومة قيمتها
80Ω، إذا كان التيار المار عبرها 1.5A.

$$E = V_R = IR = (1.5\ \text{A})(80\ \Omega) = \mathbf{120\ V}$$

قانون كيرشوف للجهد

تعاريف مصطلحات:

<u>الدارة الكهربائية:</u> عبار عن وصل بيني بين عناصر كهربائية.

<u>العقدة:</u> عبارة عن نقطة وصل بين عنصرين كهربائيين أو أكثر.

<u>الحلقة المغلقة:</u> نقول عن حلقة مغلق **closed loop** أو مسار مغلق **closed path**، ضمن دارة كهربائية، إذا شكلنا تتابع بين العقد، بحيث ننطلق من عقدة ونعود إليها، من دون أن نمر على العقدة إلاّ مرة واحدة.

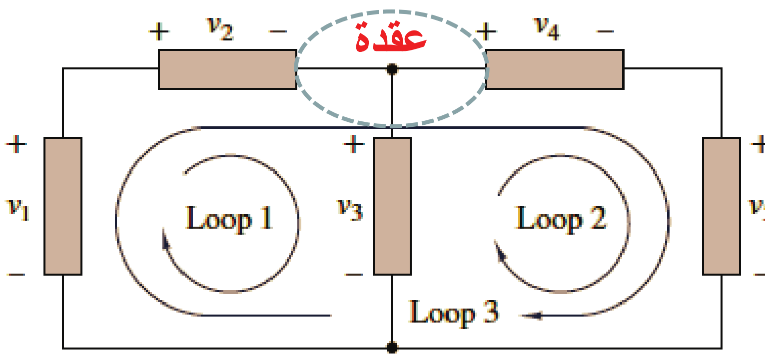


FIG. 25
Gustav Robert Kirchhoff.
Courtesy of the Smithsonian Institution, Photo No. 58,283.

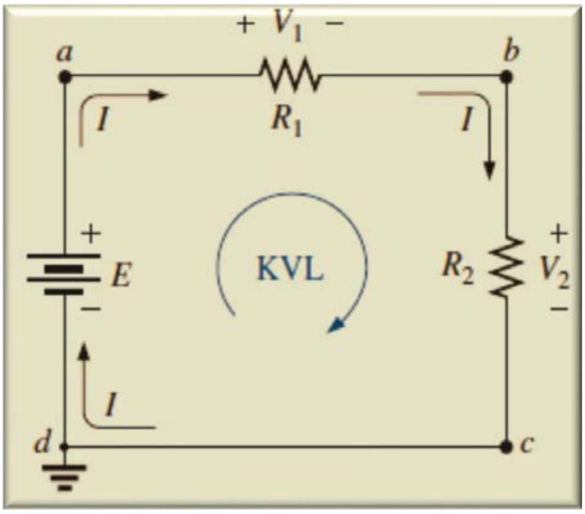
German (Königsberg, Berlin)
(1824–87),
Physicist
Professor of Physics, University of Heidelberg

Although a contributor to a number of areas in the physics domain, he is best known for his work in the electrical area with his definition of the relationships between the currents and voltages of a network in 1847. Did extensive research with German chemist Robert Bunsen (developed the *Bunsen burner*), resulting in the discovery of the important elements of *cesium and rubidium.*

Kirchhoff's voltage law قانون كيرشوف للجهد KVL

ينص قانون كيرشوف للجهد KVL على أن:
المجموع الجبري للجهود الكهربائية (جهود منابع تغذية – هبوط الجهود على أطراف العناصر الكهربائية) ضمن حلقة مغلقة أو مسار مغلق يساوي الصفر.

$\boxed{\Sigma_{\circlearrowright} V = 0}$ (Kirchhoff's voltage law in symbolic form)



$$+E - V_1 - V_2 = 0$$
$$E = V_1 + V_2$$

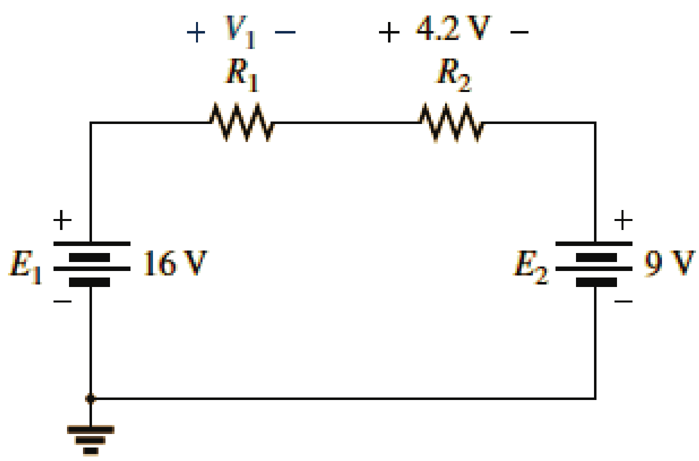
مجموع جهود منابع تغذية = مجموع هبوط الجهود على أطراف العناصر الكهربائية ضمن حلقة مغلقة أو مسار مغلق يساوي الصفر.

$$\boxed{\Sigma_{\circlearrowright} V_{\text{rises}} = \Sigma_{\circlearrowright} V_{\text{drops}}}$$

$$-E + V_2 + V_1 = 0$$
$$E = V_1 + V_2$$

مثال (1)

باستخدام قانون كيرشوف للجهد KVL، احسب جهود المجهولة في الدارة المبينة بالشكل.
عند تطبيق قانون كيرشوف للجهد، يجب الانتباه إلى قطبية جهود منابع التغذية الكهربائية، و الجهود على أطراف المقاومات



$$+E_1 - V_1 - V_2 - E_2 = 0$$
$$V_1 = E_1 - V_2 - E_2$$
$$= 16\text{ V} - 4.2\text{ V} - 9\text{ V}$$
$$V_1 = 2.8\text{ V}$$

مثال (2)

باستخدام قانون كيرشوف للجهد KVL، احسب جهود المجهولة في الدارة المبينة بالشكل.
عند تطبيق قانون كيرشوف للجهد، يجب الانتباه إلى قطبية جهود منابع التغذية الكهربائية، و الجهود على أطراف المقاومات ، أو فرق الجهد بين أي نقطتين في الدارة الكهربائية.

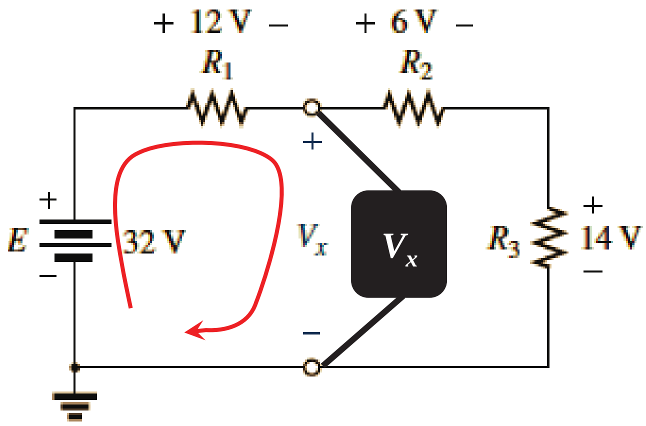
$$+E - V_1 - V_x = 0$$

$$V_x = E - V_1 = 32\text{ V} - 12\text{ V} = \mathbf{20\text{ V}}$$

$$+V_x - V_2 - V_3 = 0$$

$$V_x = V_2 + V_3 = 6\text{ V} + 14\text{ V}$$

$$V_x = \mathbf{20\text{ V}}$$



مثال (3)

باستخدام قانون كيرشوف للجهد KVL، احسب جهود V1, V2.

من أجل الحلقة الأولى:

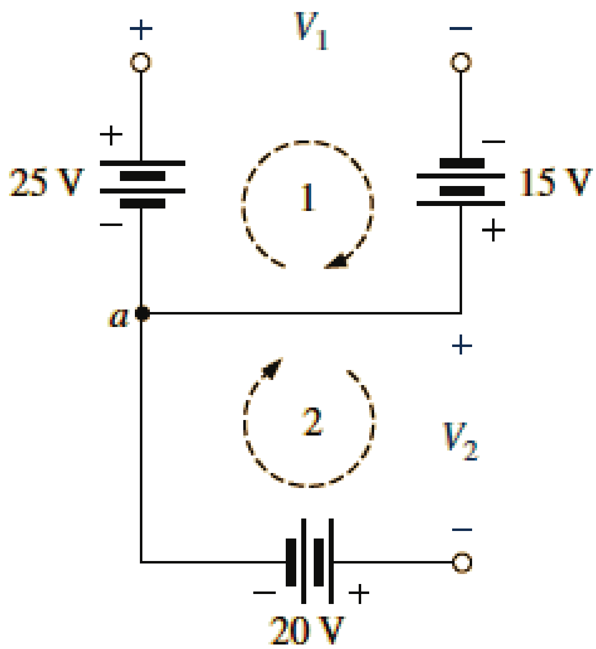
$$+25\text{ V} - V_1 + 15\text{ V} = 0$$

$$V_1 = \mathbf{40\text{ V}}$$

من أجل الحلقة الثانية:

$$-V_2 - 20\text{ V} = 0$$

$$V_2 = \mathbf{-20\text{ V}}$$



مثال (4)

باستخدام قانون كيرشوف للجهد KVL، احسب الجهد V2، والتيار I2.
احسب قيمة R_1 و R_3.

$$-E + V_3 + V_2 + V_1 = 0$$

$$E = V_1 + V_2 + V_3 \text{ (as expected)}$$

$$V_2 = E - V_1 - V_3 = 54\text{ V} - 18\text{ V} - 15\text{ V}$$

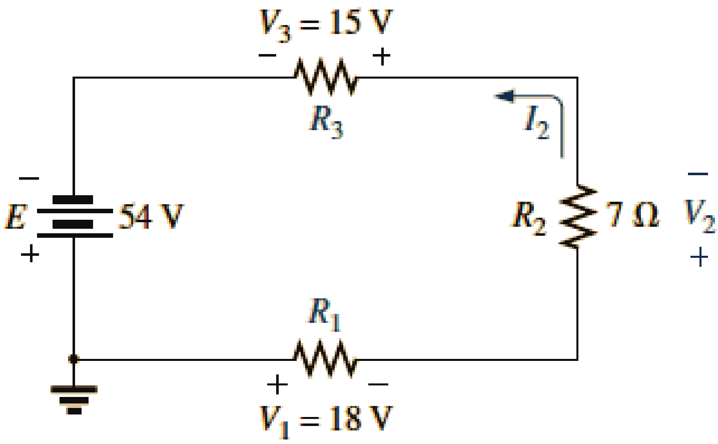
$$V_2 = 21\text{ V}$$

$$I_2 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{21\text{ V}}{7\,\Omega}$$

$$I_2 = 3\text{A}$$

$$R_1 = \frac{V_1}{I_1} = \frac{18\text{ V}}{3\text{ A}} = 6\,\Omega$$

$$\text{with } R_3 = \frac{V_3}{I_3} = \frac{15\text{ V}}{3\text{ A}} = 5\,\Omega$$



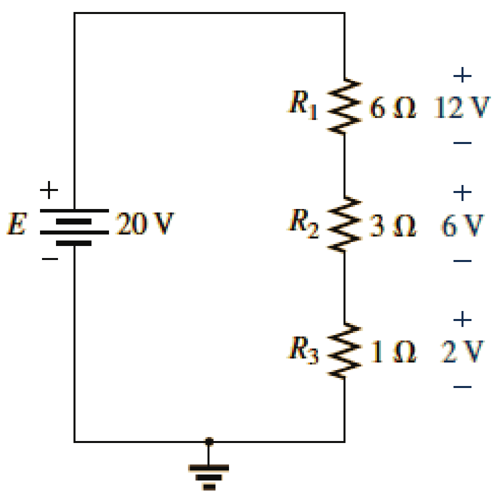
Voltage Division تقسيم الجهد

- كما ذكرنا سابقاً أن جهد منبع التغذية يساوي مجموع هبوط الجهد على أطراف المقاومات.
- بالتالي يمكننا تقسيم جهد منبع التغذية إلى عدة جهود حسب قيم المقاومات المختارة وعددها.

يبين الشكل دارة كهربائية لتقسيم جهد التغذية 20 V إلى عدة جهود وفقاً لقيم المقاومات المربوطة على التسلسل، توزعت الجهود إلى 12 V و 6 V و 2 V.

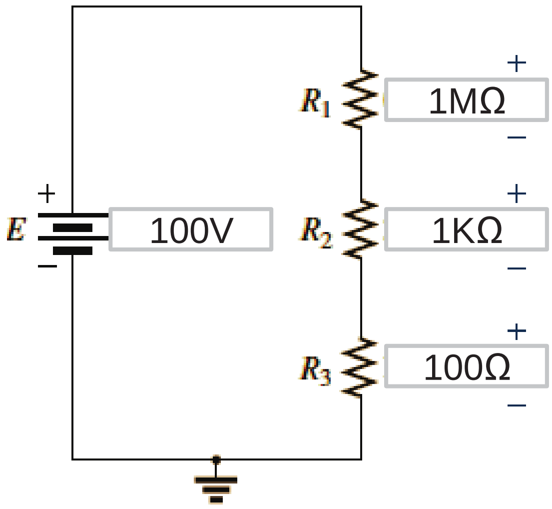
كما هو الملاحظ أن النسب بين الجهود المقسمة تتطابق مع نسب قيم المقاومات. على سبيل المثال فإن قيمة المقاومة R1 تساوي ضعف المقاومة R2، لذلك فإن الجهد الهابط على طرفي المقاومة R1 يساوي ضعف الجهد الهابط على طرفي المقاومة R2.

بالنتيجة كلما كانت قيمة المقاومة أكبر، كلما كان الجهد على طرفيها أكبر (كانت حصتها أكبر من قيمة جهد التغذية)



مثال (5)

يطلب تقسيم جهد التغذية E = 20 V، إلى ثلاث جهود حسب قيم المقاومات المربوطة على التسلسل.
احسب قيم الجهود على أطراف المقاومات.



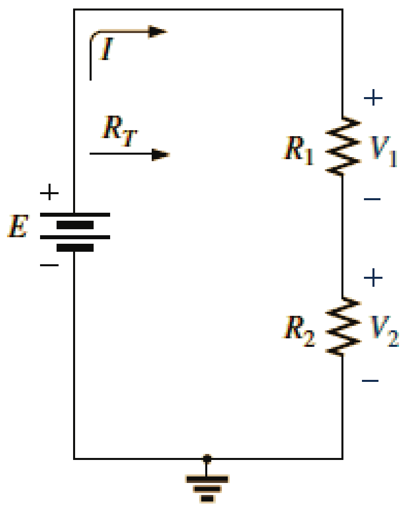
$$R_T = R_1 + R_2 + R_3$$
$$= 1\ \text{M}\Omega + 1\ \text{k}\Omega + 100\ \Omega$$
$$R_T = \mathbf{1{,}001{,}100\ \Omega}$$

$$I_s = \frac{E}{R_T} = \frac{100\ \text{V}}{1{,}001{,}100\ \Omega} \cong 99.89\ \mu\text{A} \qquad (\text{about } 100\ \mu\text{A})$$

$$V_1 = I_1R_1 = I_sR_1 = (99.89\ \mu\text{A})(1\ \text{M}\Omega) = \mathbf{99.89\ V} \quad (\text{almost the full } 100\ \text{V})$$
$$V_2 = I_2R_2 = I_sR_2 = (99.89\ \mu\text{A})(1\ \text{k}\Omega) = \mathbf{99.89\ mV} \quad (\text{about } 100\ \text{mV})$$
$$V_3 = I_3R_3 = I_sR_3 = (99.89\ \mu\text{A})(100\ \Omega) = \mathbf{9.989\ mV} \quad (\text{about } 10\ \text{mV})$$

Voltage Divider Rule (VDR) قاعدة مقسم الجهد

تسمح قاعدة تقسيم الجهد بحساب الجهد على أطراف المقاومات من دون الحاجة لحساب قيمة التيار. لاستنتاج هذه القاعدة نأخذ الدارة الآتية:



بحساب المقاومة الكلية والتيار

$$R_T = R_1 + R_2$$

$$I_s = I_1 = I_2 = \frac{E}{R_T}$$

نطبق قانون أوم على كل مقاومة:

$$V_1 = I_1R_1 = \left(\frac{E}{R_T}\right)R_1 = R_1\frac{E}{R_T}$$

$$V_2 = I_2R_2 = \left(\frac{E}{R_T}\right)R_2 = R_2\frac{E}{R_T}$$

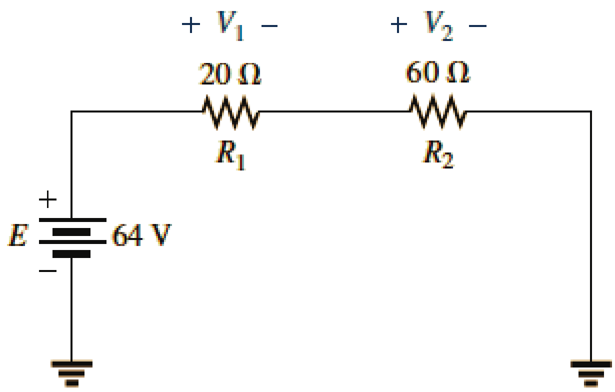
بالتعميم نجد:

$$\boxed{V_x = R_x\frac{E}{R_T}} \qquad (\text{voltage divider rule})$$

<u>تنص القاعدة: الجهد الهابط على طرفي مقاومة يساوي إلى جداء قيمة جهد التغذية مع المقاومة على المقاومات الكلية</u>

مثال (6)

A. من دون إجراء أي حسابات، ما هي النسبة بين جهد المقاومة R1 وجهد المقاومة R2.
B. احسب قيمة الجهد V1 على طرفي المقاومة R1، وفقاً لقاعدة تقسيم الجهد.
C. ما قيمة الجهد V2 على طرفي المقاومة R2.
D. احسب قيمة الجهد V2 على طرفي المقاومة R2، وفقاً لقاعدة تقسيم الجهد.
E. قارن بين النتيجتين للجهد V2.



a. Since resistor R_2 is three times R_1, it is expected that $V_2 = 3V_1$.

b. $V_1 = R_1\dfrac{E}{R_T} = 20\ \Omega\left(\dfrac{64\ \text{V}}{20\ \Omega + 60\ \Omega}\right) = 20\ \Omega\left(\dfrac{64\ \text{V}}{80\ \Omega}\right) = \mathbf{16\ V}$

c. $V_2 = 3V_1 = 3(16\ \text{V}) = \mathbf{48\ V}$

d. $V_2 = R_2\dfrac{E}{R_T} = (60\ \Omega)\left(\dfrac{64\ \text{V}}{80\ \Omega}\right) = \mathbf{48\ V}$

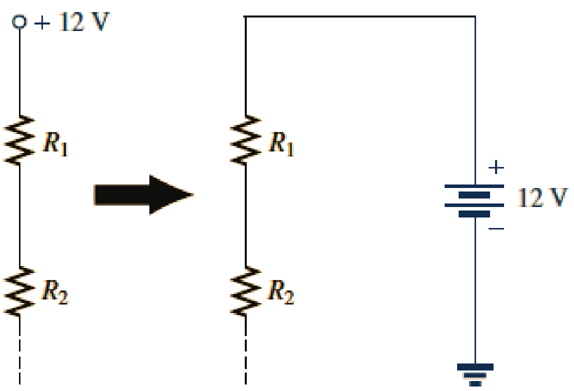
The results are an exact match.

e. $E = V_1 + V_2$

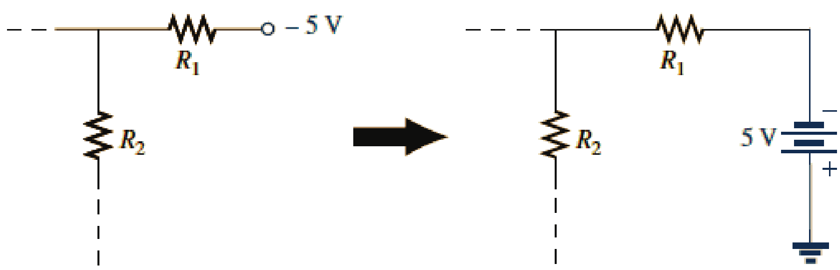
$64\ \text{V} = 16\ \text{V} + 48\ \text{V} = \mathbf{64\ V}$ (checks)

طرق رسم الدارة الكهربائية

يمكن رسم منبع جهد التغذية الكهربائية برمزه الكهربائي أو من خلال نقطة يوضع عليها قيمة جهد المنبع مع إشارة موجب أو سالب حسب قطبية المنبع.



(a) (b)

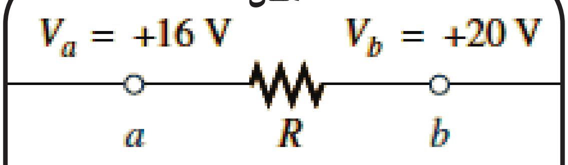


(a) (b)

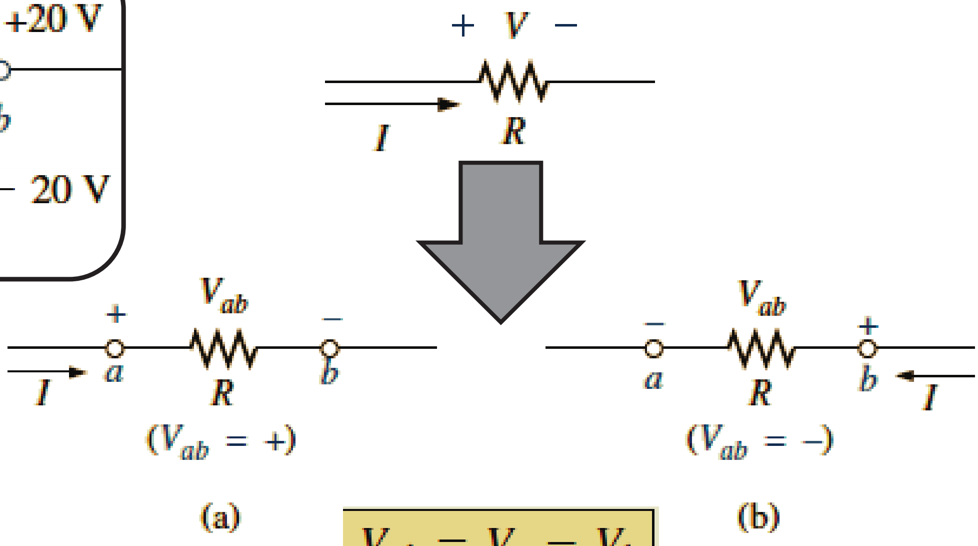
التعبير عن الجهد بفرق الكمون بين نقطتين

يمكن استبدال رمز الجهد الهابط على المقاومة V بفرق الجهد بن النقطتين اللتين تُربط المقاومة بينهما، فيصبح رمز الجهد $V_{ab} = V_a - V_b$ ، باعتبار المحرف a هو المحرف الأول، لذلك يجب أن يكون قيمة جهد النقطة a أكبر من قيمة جهد النقطة b. أما إذا كان العكس، أي جهد النقطة b أكبر من جهد النقطة a، بالتالي ستكون قيمة الجهد V_{ab} سالبة. بالنتيجة الجهد V_{ab} هو جهد النقطة a بالنسبة للنقطة المرجعية b.

مثال



$$V_{ab} = V_a - V_b = 16\text{ V} - 20\text{ V} = -4\text{ V}$$



$$\boxed{V_{ab} = V_a - V_b}$$

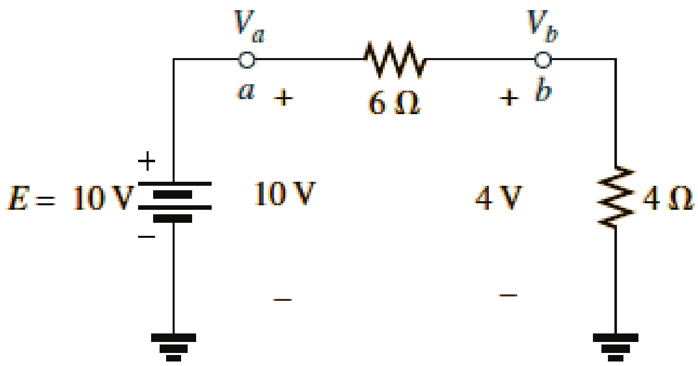
التعبير عن الجهد بفرق الكمون بين نقطتين

إذا كان جهد النقطة b هو جهد نقطة الأرضي (جهدها يساوي الصفر) فيمكن التعبير عن الجهد بجهد النقطة الأولى دون الحاجة لذكر النقطة الأخرى، ونفهم من ذلك أن جهد النقطة الأولى يؤخذ بالنسبة للنقطة المرجعية الأرضي بشكل افتراض.

$V_{ab} = V_a - V_b$ جهد النقطة a بالنسبة للنقطة b.

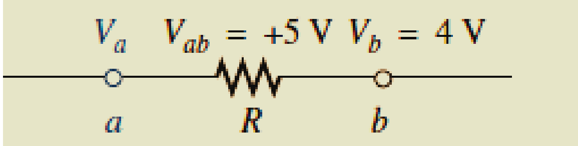
V_a جهد النقطة a بالنسبة للنقطة للأرضي.

V_b جهد النقطة b بالنسبة للنقطة للأرضي.



مثال (7)

V_a ?

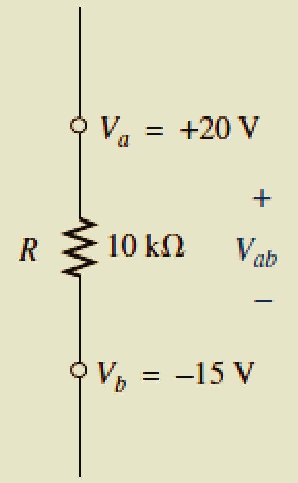


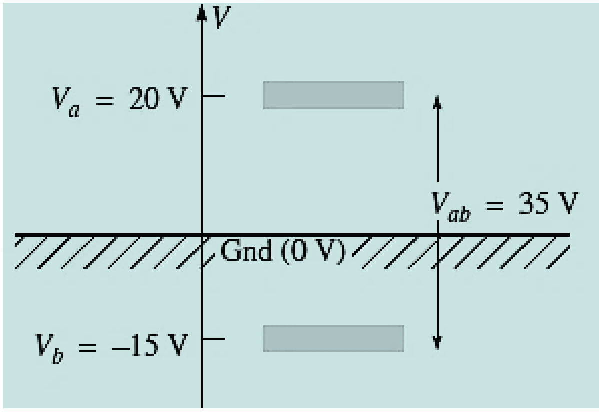
$$V_{ab} = V_a - V_b$$

$$V_a = V_{ab} + V_b = 5\text{ V} + 4\text{ V} = \mathbf{9\text{ V}}$$

V_{ab} ?

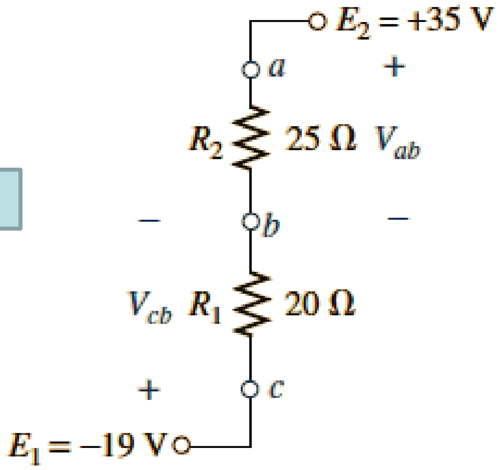
$$V_{ab} = V_a - V_b = 20\text{ V} - (-15\text{ V}) = 20\text{ V} + 15\text{ V} = \mathbf{35\text{ V}}$$

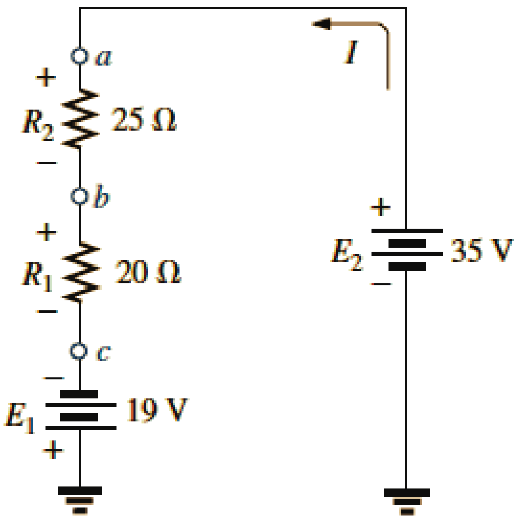




مثال (8)

احسب الجهود V_{ab}, V_{cb}, V_c





$$I = \frac{54\text{ V}}{45\ \Omega} = 1.2\text{ A}$$

$$V_{ab} = IR_2 = (1.2\text{ A})(25\ \Omega) = \mathbf{30\text{ V}}$$

$$V_{cb} = -IR_1 = -(1.2\text{ A})(20\ \Omega) = \mathbf{-24\text{ V}}$$

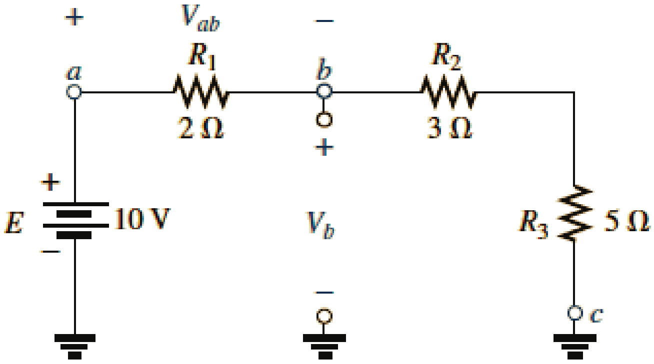
$$V_c = E_1 = \mathbf{-19\text{ V}}$$

$$I = \frac{E_1 + E_2}{R_T} = \frac{19\text{ V} + 35\text{ V}}{45\ \Omega} = \frac{54\text{ V}}{45\ \Omega} = 1.2\text{ A}$$

$$V_{ab} = \mathbf{30\text{ V}} \qquad V_{cb} = \mathbf{-24\text{ V}} \qquad V_c = \mathbf{-19\text{ V}}$$

مثال (9)

احسب V_{ab}, V_b, V_c؟



a. Voltage divider rule:

$$V_{ab} = \frac{R_1 E}{R_T} = \frac{(2\ \Omega)(10\ \text{V})}{2\ \Omega + 3\ \Omega + 5\ \Omega} = \mathbf{+2\ V}$$

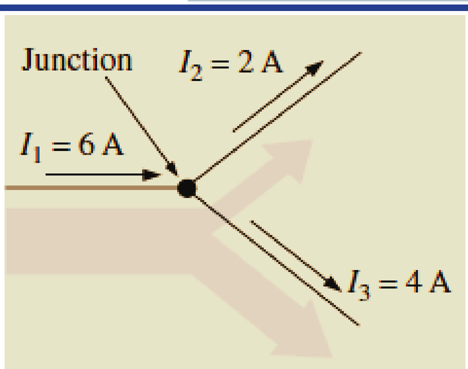
b. Voltage divider rule:

$$V_b = V_{R_2} + V_{R_3} = \frac{(R_2 + R_3)E}{R_T} = \frac{(3\ \Omega + 5\ \Omega)(10\ \text{V})}{10\ \Omega} = \mathbf{8\ V}$$

or $\quad V_b = V_a - V_{ab} = E - V_{ab} = 10\ \text{V} - 2\ \text{V} = \mathbf{8\ V}$

c. $V_c = \text{ground potential} = \mathbf{0\ V}$

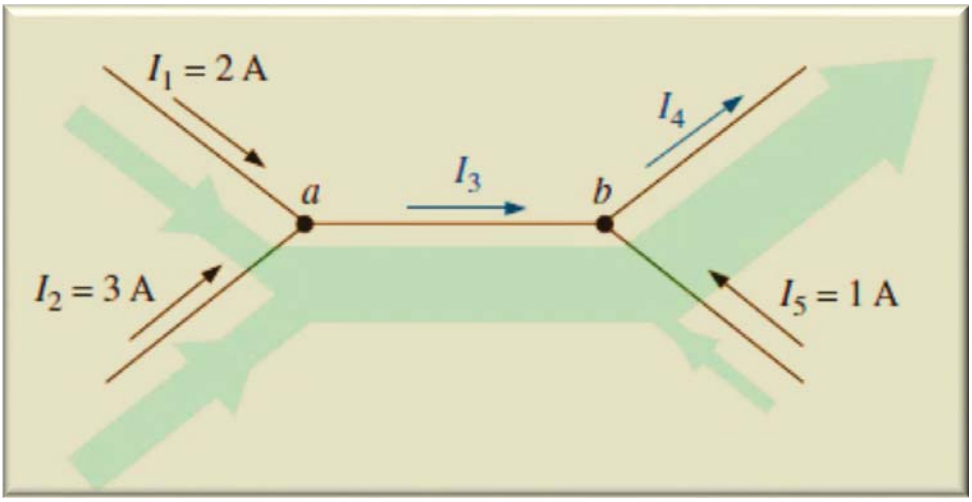
Kirchhoff's Current Law



ينص قانون كيرشوف أن مجموع التيارات الداخلة إلى عقدة في دارة كهربائية يساوي مجموع التيارات الخارجة.
أو: مجموع التيارات في عقدة يساوي الصفر مع مراعاة التيارات الداخلة بإشارة والتيارات الخارجة بإشارة معاكسة لها.

$$\boxed{\Sigma I_i = \Sigma I_o}$$

مثال (10)



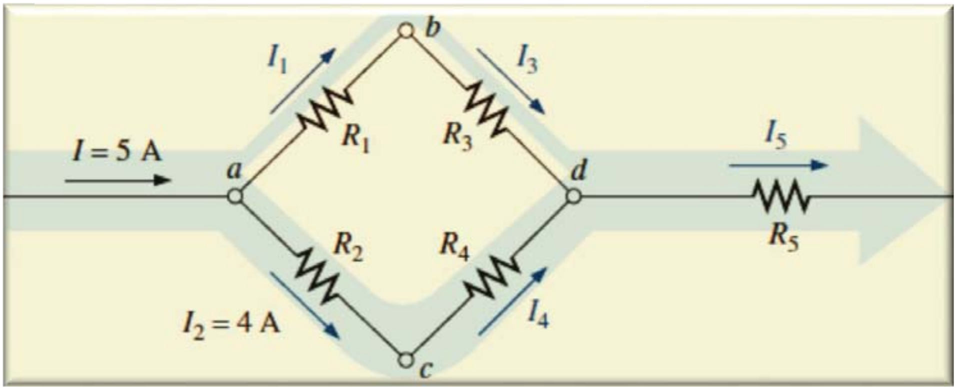
بتطبيق قانون كيرشوف
للتيار على العقدة a

$$\Sigma I_i = \Sigma I_o$$
$$I_1 + I_2 = I_3$$
$$2\text{ A} + 3\text{ A} = I_3 = \mathbf{5\text{ A}}$$

بتطبيق قانون كيرشوف
للتيار على العقدة b

$$\Sigma I_i = \Sigma I_o$$
$$I_3 + I_5 = I_4$$
$$5\text{ A} + 1\text{ A} = I_4 = \mathbf{6\text{ A}}$$

مثال (11)



حساب التيارات المجهولة
بتطبيق كيرشوف للتيار
KCL

بتطبيق قانون كيرشوف
للتيار على العقدة a

$$\Sigma I_i = \Sigma I_o$$
$$I = I_1 + I_2$$
$$5\text{ A} = I_1 + 4\text{ A}$$
$$I_1 = 5\text{ A} - 4\text{ A} = \mathbf{1\text{ A}}$$

بتطبيق قانون كيرشوف
للتيار على العقدة b

$$\Sigma I_i = \Sigma I_o$$
$$I_1 = I_3$$
$$I_3 = I_1 = \mathbf{1\text{ A}}$$

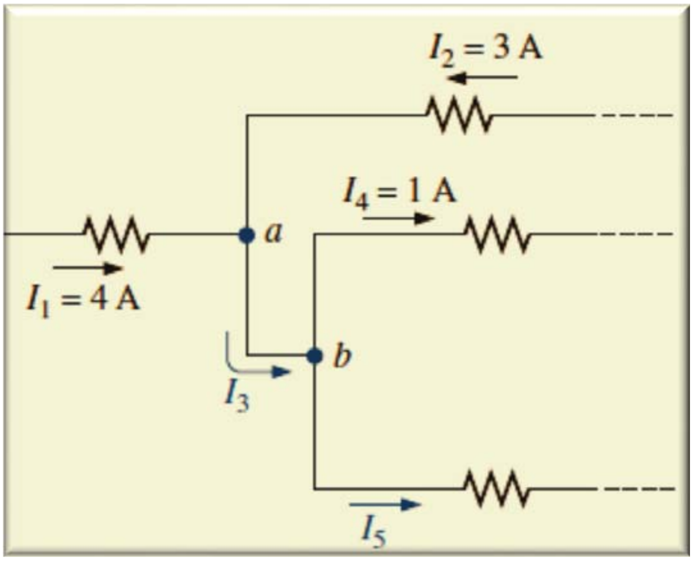
بتطبيق قانون كيرشوف
للتيار على العقدة c

$$\Sigma I_i = \Sigma I_o$$
$$I_2 = I_4$$
$$I_4 = I_2 = \mathbf{4\text{ A}}$$

بتطبيق قانون كيرشوف
للتيار على العقدة d

$$\Sigma I_i = \Sigma I_o$$
$$I_3 + I_4 = I_5$$
$$1\text{ A} + 4\text{ A} = I_5 = \mathbf{5\text{ A}}$$

مثال (12)



حساب التيارات المجهولة
بتطبيق كيرشوف للتيار
KCL

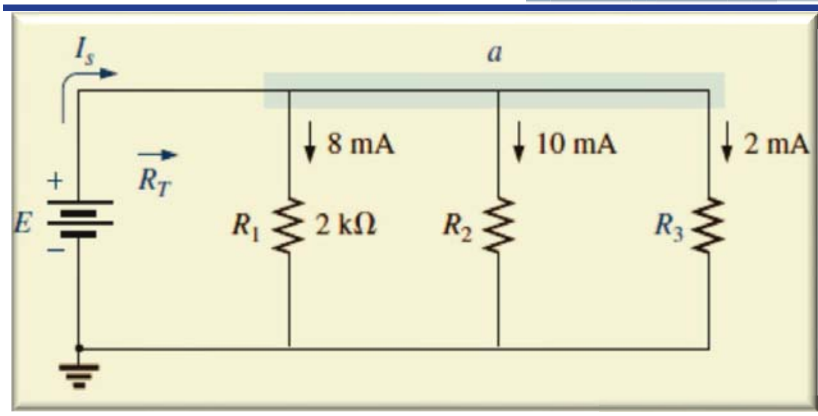
بتطبيق قانون كيرشوف
للتيار على العقدة a

$$\Sigma I_i = \Sigma I_o$$
$$I_1 + I_2 = I_3$$
$$4\text{ A} + 3\text{ A} = I_3 = \mathbf{7\text{ A}}$$

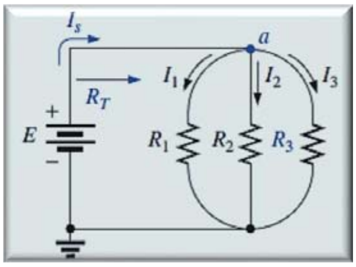
بتطبيق قانون كيرشوف
للتيار على العقدة b

$$\Sigma I_i = \Sigma I_o$$
$$I_3 = I_4 + I_5$$
$$7\text{ A} = 1\text{ A} + I_5$$
$$I_5 = 7\text{ A} - 1\text{ A} = \mathbf{6\text{ A}}$$

مثال (13)



حساب التيار Is، وقيمة منبع التغذية E، و
المقاومة R3، والمقاومة المكافئة RT



Applying Ohm's law gives

$$E = V_1 = I_1 R_1 = (8\text{ mA})(2\text{ k}\Omega) = \mathbf{16\text{ V}}$$

Applying Ohm's law in a different form gives

$$R_3 = \frac{V_3}{I_3} = \frac{E}{I_3} = \frac{16\text{ V}}{2\text{ mA}} = \mathbf{8\text{ k}\Omega}$$

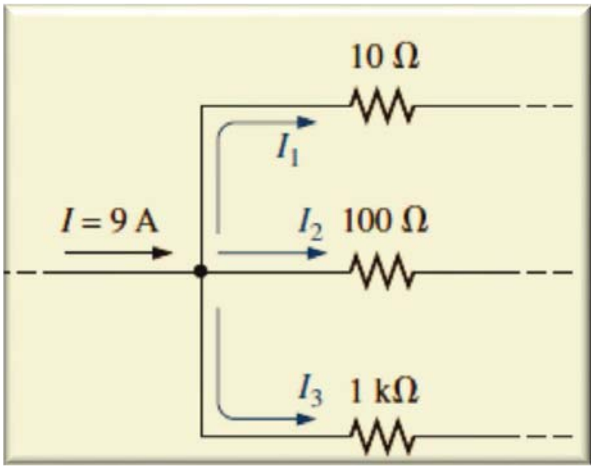
Applying Ohm's law again gives

$$R_T = \frac{E}{I_s} = \frac{16\text{ V}}{20\text{ mA}} = \mathbf{0.8\text{ k}\Omega}$$

بتطبيق قانون كيرشوف للتيار
على العقدة a

$$\Sigma I_i = \Sigma I_o$$
$$I_s = I_1 + I_2 + I_3$$
$$I_s = 8\text{ mA} + 10\text{ mA} + 2\text{ mA} = \mathbf{20\text{ mA}}$$

Current Divider تقسيم التيار



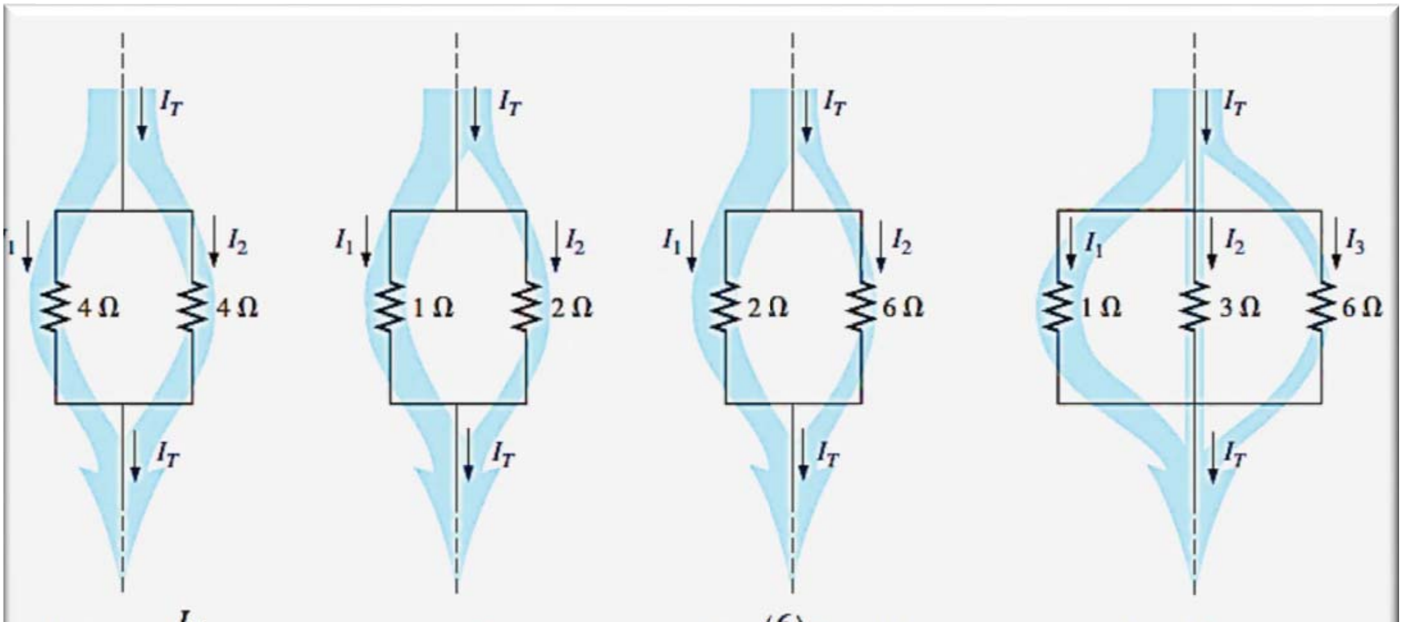
بالنسبة للعناصر المربوطة تفرعياً التي لها القيمة نفسها، سوف يتقسم التيار بشكل متساوٍ على فروع الدارة.

بالنسبة للعناصر التفرعية التي تختلف قيمها، سوف يتقسم التيار بنسبة مساوية لمقلوب قيم مقاومتها (أو ناقليتها G)

بالنسبة للعناصر التفرعية التي تختلف قيمها، ستكون قيمة التيار الأكبر تمر عبر الفرع الذي يحوي المقاومة الأصغر.

ستكون قيمة التيار المار عبر المقاومة 10Ω مساوية عشرة أضعاف قيمة التيار المار عبر المقاومة 100Ω، كذلك بالنسبة للتيار عبر المقاومة ستكون مساوية عشرة أضعاف قيمة التيار المار عبر المقاومة 1kΩ، بالنتيجة ستكون قيمة التيار المار عبر المقاومة 10Ω مساوية مئة ضعف قيمة التيار المار عبر المقاومة 1kΩ

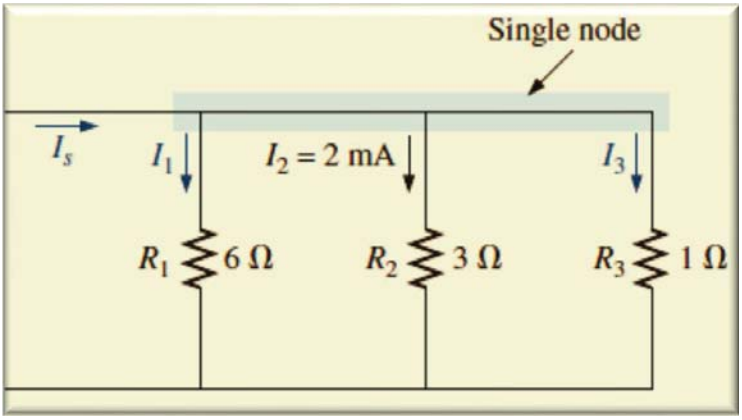
Current Divider تقسيم التيار



$I_1 = I_2 = \frac{I_T}{2}$ $I_1 = 2I_2$ $I_1 = \left(\frac{6}{2}\right) I_2 = 3I_2$

$I_1 = 6I_3$
$I_1 = 3I_2$
$I_2 = \left(\frac{6}{3}\right) I_3 = 2I_3$

مثال (14)



باعتبار أن قيمة المقاومة R_1 مساوية لضعفي قيمة المقاومة R_2 $(R_1 = 2R_2)$، بالتالي التيار عبر R_1 سيكون نصف قيمة التيار المار عبر R_2:

$$I_1 = \frac{I_2}{2} = \frac{2\text{ mA}}{2} = \mathbf{1\text{ mA}}$$

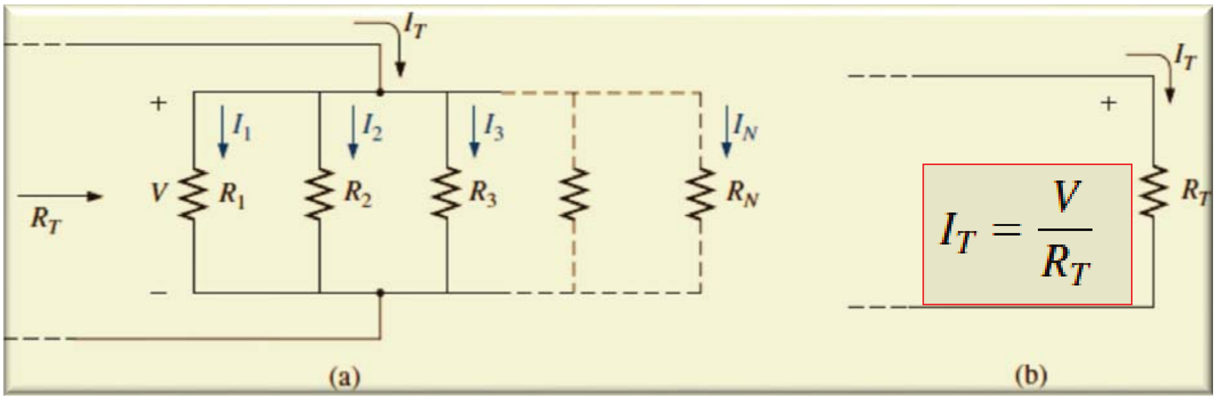
$(R_2 = 3R_3)$، بالتالي التيار عبر R_3 سيكون ثلاث أضعاف قيمة التيار المار عبر R_2:

$$I_3 = 3I_2 = 3(2\text{ mA}) = \mathbf{6\text{ mA}}$$

بتطبيق قانون كيرشوف للتيار نجد:

$$\Sigma I_i = \Sigma I_o$$
$$I_s = I_1 + I_2 + I_3$$
$$I_s = 1\text{ mA} + 2\text{ mA} + 6\text{ mA} = \mathbf{9\text{ mA}}$$

قاعدة تقسيم التيار Current Divider Rule



كما هو معلوم أن الجهد المطبق على المقاومات التفرعية يكون متساوٍ

$$V = I_1R_1 = I_2R_2 = I_3R_3 = \cdots = I_xR_x$$

بالتعويض عن قيمة الجهد وفقاً لقانون أوم بدلالة المقاومة المكافئة R_T والتيار الكلي I_T نجد I_x (يمثل التيار أي من تيارات الفروع):

$$I_T = \frac{I_xR_x}{R_T}$$

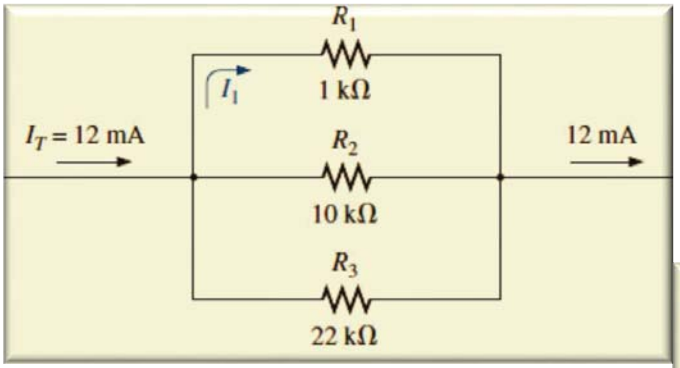
$$I_x = \frac{R_T}{R_x}I_T$$

تنص قاعدة تقسيم التيار على أن التيار المار في أي من فروع الدارة يساوي إلى جداء التيار الكلي الداخل إلى الدارة التفرعية I_T في المقاومة المكافئة R_T مقسوم على قيمة المقاومة المار في الفرع.

$$I_x = \frac{G_x}{G_T}I_T$$

مثال (15)

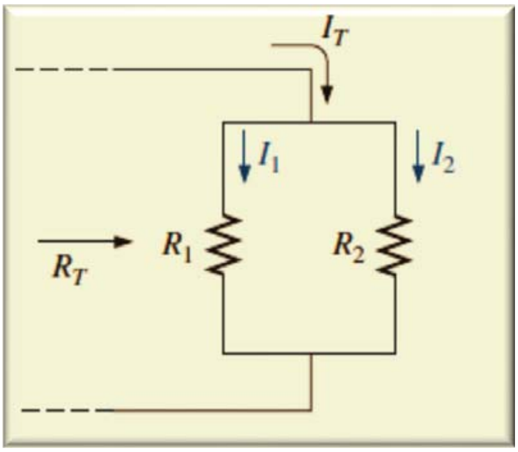
حساب قيم التيار I_1 باستخدام قاعدة مقسم التيار.



$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}} = \frac{1}{\frac{1}{1\text{ k}\Omega}+\frac{1}{10\text{ k}\Omega}+\frac{1}{22\text{ k}\Omega}} = \frac{1}{1\times10^{-3}+100\times10^{-6}+45.46\times10^{-6}} = \frac{1}{1.145\times10^{-3}} = \mathbf{873.01\ \Omega}$$

$$I_1 = \frac{R_T}{R_1}I_T = \frac{(873.01\ \Omega)}{1\text{ k}\Omega}(12\text{ mA}) = (0.873)(12\text{ mA}) = \mathbf{10.48\ mA}$$

حالة خاصة لمقسم التيار



علاقة المقاومة المكافئة لمقاومتين موصولتين على التفرع

$$R_T = \frac{R_1R_2}{R_1+R_2}$$

علاقة مقسم التيار:

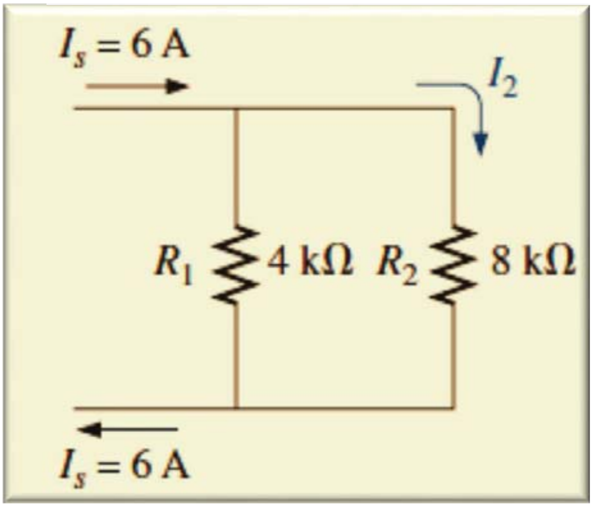
$$I_1 = \frac{R_T}{R_1}I_T = \frac{\left(\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}\right)}{R_1}I_T$$

$$\boxed{I_1 = \left(\frac{R_2}{R_1+R_2}\right)I_T}$$

$$\boxed{I_2 = \left(\frac{R_1}{R_1+R_2}\right)I_T}$$

التيار المار في فرع دارة كهربائي يساوي جداء التيار الكلي في المقاومة التي لا يمر فها التيار (في الفرع الآخر) على مجموع المقاومات.

مثال (16)



المطلوب حساب I2
باستخدام علاقة مقسم التيار العامة، وعلاقة مقسم التيار الخاصة

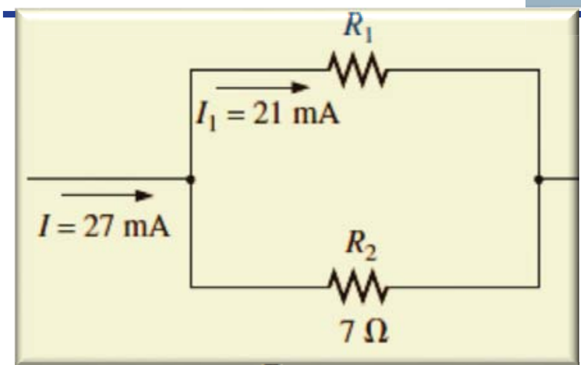
$$I_2 = \frac{R_T}{R_2} I_T$$

$$R_T = 4\text{ k}\Omega \parallel 8\text{ k}\Omega = \frac{(4\text{ k}\Omega)(8\text{ k}\Omega)}{4\text{ k}\Omega + 8\text{ k}\Omega} = 2.667\text{ k}\Omega$$

$$I_2 = \left(\frac{2.667\text{ k}\Omega}{8\text{ k}\Omega}\right) 6\text{ A} = (0.333)(6\text{ A}) = \mathbf{2\text{ A}}$$

$$I_2 = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) I_T$$
$$= \left(\frac{4\text{ k}\Omega}{4\text{ k}\Omega + 8\text{ k}\Omega}\right) 6\text{ A} = (0.333)(6\text{ A}) = \mathbf{2\text{ A}}$$

مثال (17)



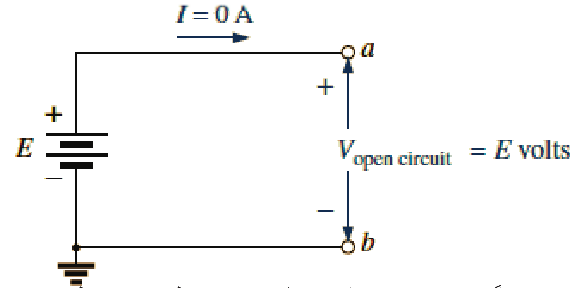
حساب قيمة المقاومة R1 باستخدام قانون كيرشوف للتيار وقاعدة مقسم التيار.

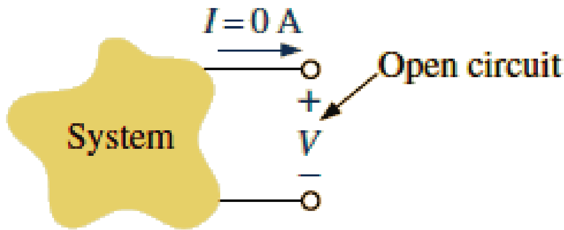
$$\Sigma I_i = \Sigma I_o$$
$$I = I_1 + I_2$$
$$27\text{ mA} = 21\text{ mA} + I_2$$
$$I_2 = 27\text{ mA} - 21\text{ mA} = 6\text{ mA}$$
$$V_2 = I_2 R_2 = (6\text{ mA})(7\ \Omega) = 42\text{ mV}$$
$$V_1 = V_2 = 42\text{ mV}$$
$$R_1 = \frac{V_1}{I_1} = \frac{42\text{ mV}}{21\text{ mA}} = \mathbf{2\ \Omega}$$

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I_T$$
$$21\text{ mA} = \left(\frac{7\ \Omega}{R_1 + 7\ \Omega}\right) 27\text{ mA}$$

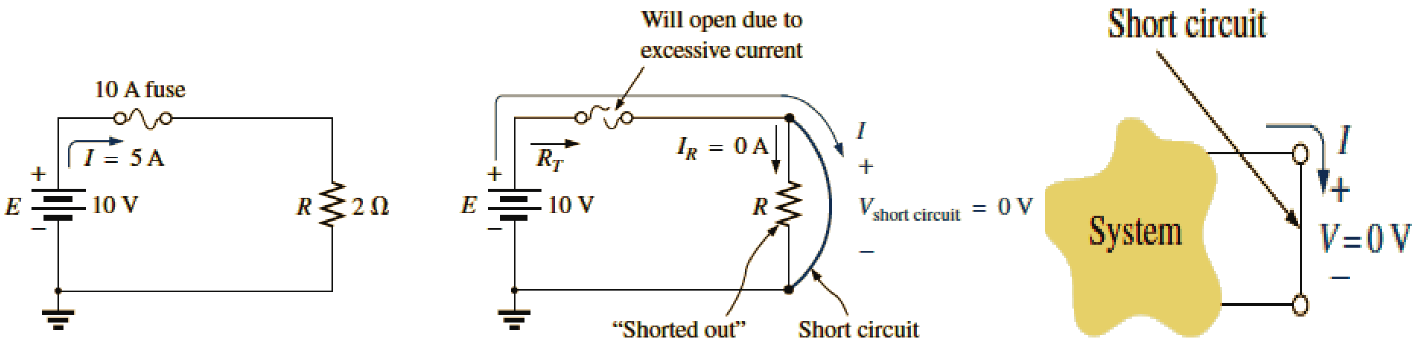
$$(R_1 + 7\ \Omega)(21\text{ mA}) = (7\ \Omega)(27\text{ mA})$$
$$(21\text{ mA})R_1 + 147\text{ mV} = 189\text{ mV}$$
$$(21\text{ mA})R_1 = 189\text{ mV} - 147\text{ mV} = 42\text{ mV}$$
$$R_1 = \frac{42\text{ mV}}{21\text{ mA}} = \mathbf{2\ \Omega}$$

Open and Short Circuits



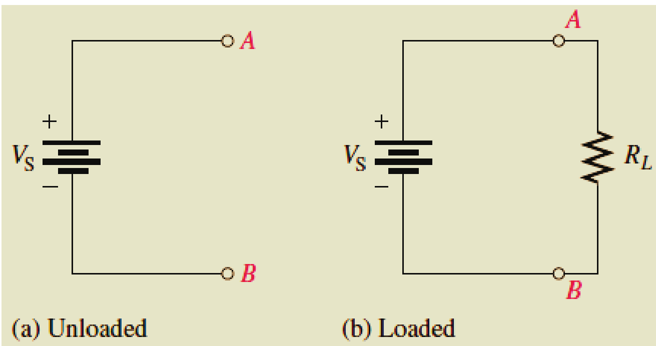


بالنسبة للدارة المفتوحة (حالة قطع بين النقطتين a,b) يكون التيار مساوياً للصفر، وهذا يكافئ مقاومة لانهائية، ويكون للدارة المفتوحة قيمة جهد معلومة حسب طريقة الربط.

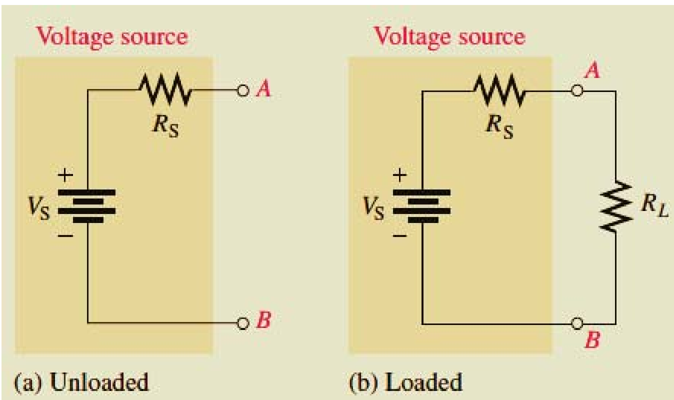


بالنسبة للدارة المقصورة (حالة قصر بين النقطتين a,b) يكون الجهد مساوياً للصفر، وهذا يكافئ مقاومة قيمتها تساوي الصفر، ويكون للدارة المقصورة قيمة تيار معلومة حسب طريقة الربط.

DC Voltage Source



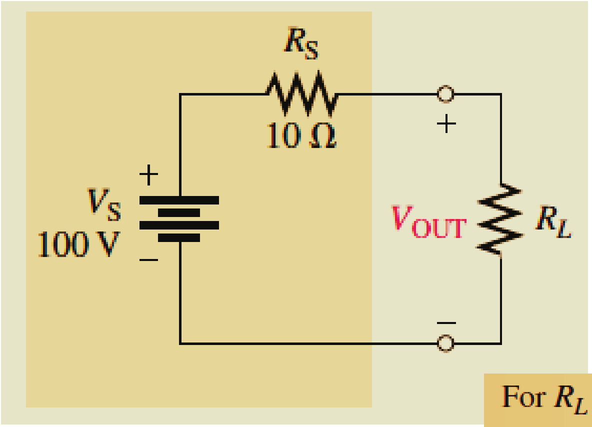
Ideal dc voltage source.



Practical voltage source.

المقاومة الداخلية لمنبع الجهد المثالي تساوي الصفر، لذلك كلما كانت المقاومة الداخلية للمنبع العملي صغيرة كان المنبع أفضل.

DC Voltage Source



حساب جهد الخرج من أجل قيم لمقاومة الحمل الآتية:

R_L: 100 Ω, 560 Ω, and 1.0 kΩ.

For $R_L = 100\ \Omega$, the voltage output is

$$V_{OUT} = \left(\frac{R_L}{R_S + R_L}\right)V_S = \left(\frac{100\ \Omega}{110\ \Omega}\right)100\ \text{V} = \mathbf{90.9\ V}$$

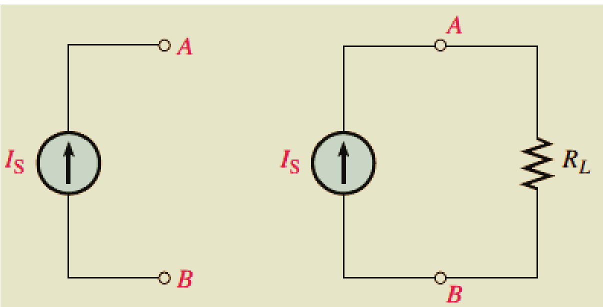
For $R_L = 560\ \Omega$,

$$V_{OUT} = \left(\frac{560\ \Omega}{570\ \Omega}\right)100\ \text{V} = \mathbf{98.2\ V}$$

For $R_L = 1.0\ \text{k}\Omega$,

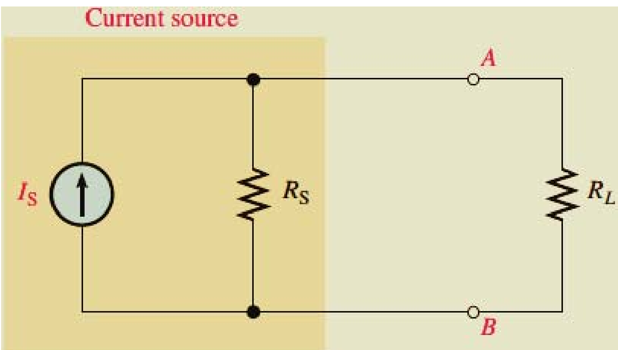
$$V_{OUT} = \left(\frac{1000\ \Omega}{1010\ \Omega}\right)100\ \text{V} = \mathbf{99.0\ V}$$

DC Current Sources



(a) Unloaded (b) Loaded

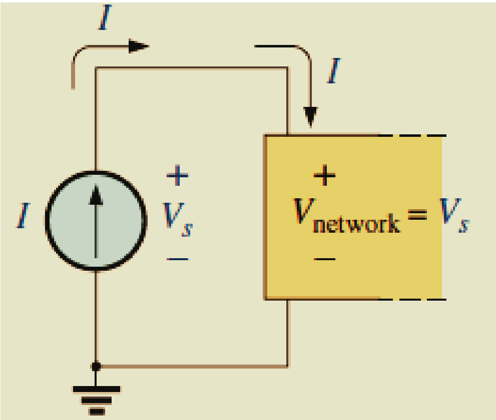
Ideal dc current source.



Practical current source.

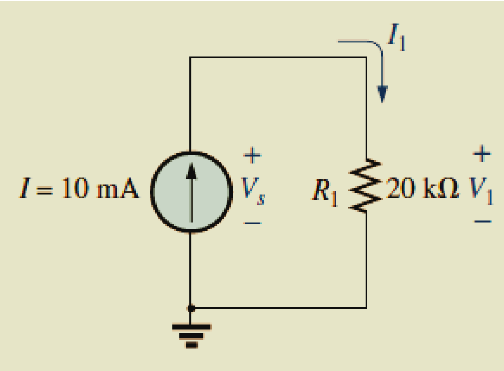
المقاومة الداخلية لمنبع التيار المثالي تساوي اللانهاية (دارة مفتوحة)، لذلك كلما كانت المقاومة الداخلية للمنبع العملي كبيرة كان المنبع أفضل.

DC Current Sources



يحدد منبع التيار اتجاه وقيمة التيار المار عبر الفروع حسب موضع الفرع

قطبية واتجاه الجهد عبر منبع التيار تحدد من خلال مكان تطبيق منبع الجهد.



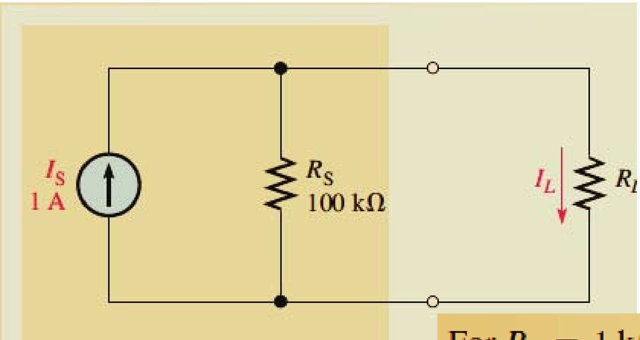
Find the source voltage, the voltage V_1, and current I_1

$$I_1 = I = 10\text{ mA}$$

$$V_1 = I_1R_1 = (10\text{ mA})(20\ \Omega) = 200\text{ V}$$

$$V_s = V_1 = 200\text{ V}$$

DC Current Sources



حساب التيار I_L من أجل قيم لمقاومة الحمل 1 kΩ, 5.6 kΩ, 10 kΩ

For $R_L = 1\text{ k}\Omega$, the load current is

$$I_L = \left(\frac{R_S}{R_S + R_L}\right)I_S = \left(\frac{100\text{ k}\Omega}{101\text{ k}\Omega}\right)1\text{ A} = \mathbf{990\text{ mA}}$$

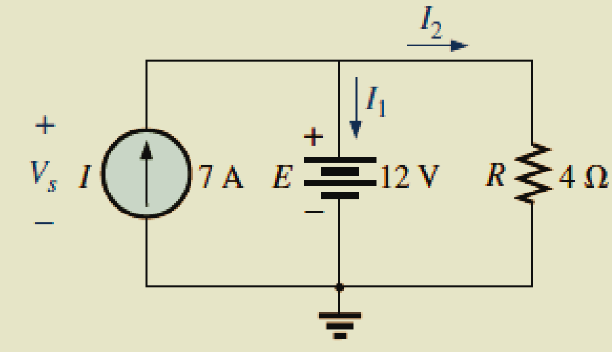
For $R_L = 5.6\text{ k}\Omega$,

$$I_L = \left(\frac{100\text{ k}\Omega}{105.6\text{ k}\Omega}\right)1\text{ A} = \mathbf{947\text{ mA}}$$

For $R_L = 10\text{ k}\Omega$,

$$I_L = \left(\frac{100\text{ k}\Omega}{110\text{ k}\Omega}\right)1\text{ A} = \mathbf{909\text{ mA}}$$

مثال (18)



Find the voltage V_s and currents I_1 and I_2 for the network

كون منبع التيار على التفرع مع منبع الجهد

$$V_s = E = \mathbf{12\ V}$$

كون المقاومة على التفرع مع منبع الجهد

$$V_R = E = 12\ V$$

$$I_2 = \frac{V_R}{R} = \frac{12\ V}{4\ \Omega} = \mathbf{3\ A}$$

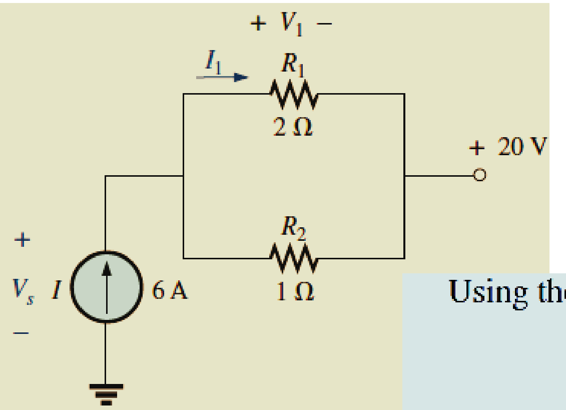
يمكن تحديد التيار المار عبر منبع الجهد باستخدام قانون كيرشوف للتيار:

$$\Sigma I_i = \Sigma I_o$$

$$I = I_1 + I_2$$

$$I_1 = I - I_2 = 7\ A - 3\ A = \mathbf{4\ A}$$

مثال (19)



Find the voltage V_s and currents I_1 for the network

Using the current divider rule gives

$$I_1 = \frac{R_2 I}{R_2 + R_1} = \frac{(1\ \Omega)(6\ A)}{1\ \Omega + 2\ \Omega} = \frac{1}{3}(6\ A) = \mathbf{2\ A}$$

The voltage V_1 is given by

$$V_1 = I_1 R_1 = (2\ A)(2\ \Omega) = 4\ V$$

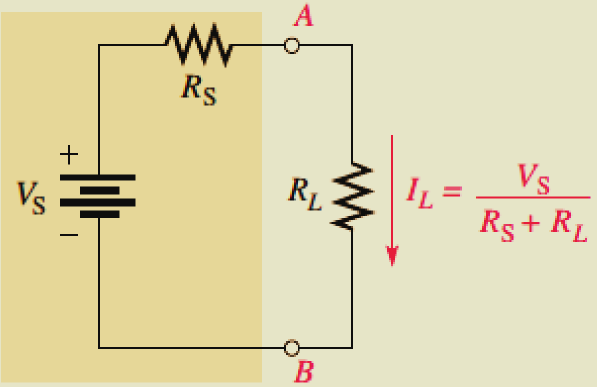
Applying Kirchhoff's voltage rule to determine V_s gives

$$+V_s - V_1 - 20\ V = 0$$

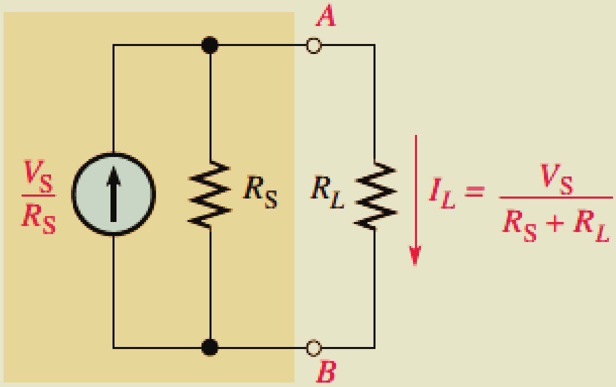
and $$V_s = V_1 + 20\ V = 4\ V + 20\ V = \mathbf{24\ V}$$

In particular, note the polarity of the voltage V_s as determined by the network.

Source Conversions



(a) Loaded voltage source



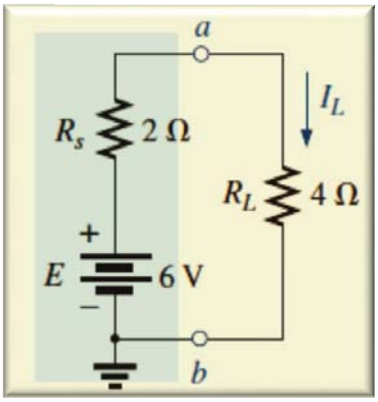
(b) Loaded current source

$$I_L = \frac{V_S}{R_S + R_L}$$

$$I_L = \left(\frac{R_S}{R_S + R_L}\right)\frac{V_S}{R_S} = \frac{V_S}{R_S + R_L}$$

مثال (20)

المطلوب حساب التيار I_L، وتحويل منبع الجهد إلى منبع تيار، وحساب التيار عبر مقاومة الحمل I_L. قارن النتائج قبل وبعد التحويل.

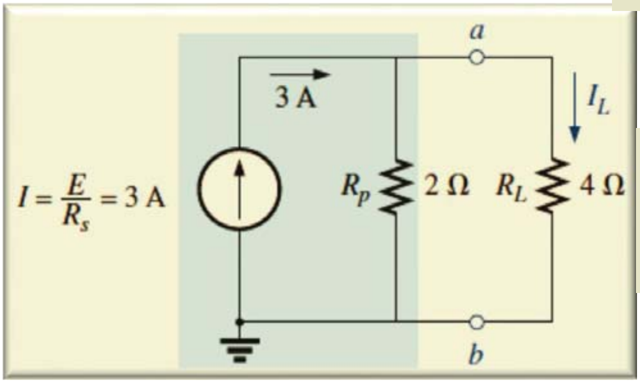


Applying Ohm's law gives

$$I_L = \frac{E}{R_s + R_L} = \frac{6\text{ V}}{2\,\Omega + 4\,\Omega} = \frac{6\text{ V}}{6\,\Omega} = \mathbf{1\ A}$$

Using Ohm's law again gives

$$I = \frac{E}{R_s} = \frac{6\text{ V}}{2\,\Omega} = \mathbf{3\ A}$$



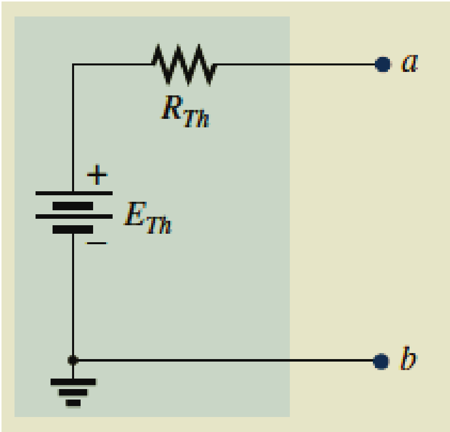
Using the current divider rule gives

$$I_L = \frac{R_p I}{R_p + R_L} = \frac{(2\,\Omega)(3\text{ A})}{2\,\Omega + 4\,\Omega} = \frac{1}{3}(3\text{ A}) = \mathbf{1\ A}$$

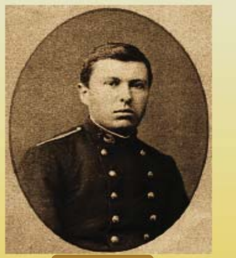
قيم التيار متساوية

Thevenin’s Theorem

تقوم نظرية ثيفنن على اختصار الدارة الكهربائية ، بحيث تنتج دارة كهربائية مكونة فقط من منبع جهد وحيد يُدعى V_{TH} ومقاومةً وحيدة مربوطة على التسلسل مع المنبع، تدعى مقاومة ثيفنن R_{TH}.
تعتمد قيمة جهد ثيفنن ومقاومة ثيفنن على قيم عناصر الدارة الأصلية.
يمكن اختصار أي دارة كهربائية بغض النظر عن درجة تعقيدها إلى دارة ثيفنن.



دارة ثفنن المكافئة، مكونة من منبع جهد ومقاومة على التسلسل.



Leon-Charles Thévenin.

French (Meaux, Paris)
(1857–1927)
Telegraph Engineer, Commandant and Educator
École Polytechnique and École Supérieure de Télégraphie

Although active in the study and design of telegraphic systems (including underground transmission), cylindrical condensers (capacitors), and electromagnetism, he is best known for a theorem first presented in the French *Journal of Physics—Theory and Applications* in 1883. It appeared under the heading of “Sur un nouveau théorème d’électricité dynamique” (“On a new theorem of dynamic electricity”) and was originally referred to as the *equivalent generator theorem.* There is some evidence that a similar theorem was introduced by Hermann von Helmholtz in 1853. However, Professor Helmholtz applied the theorem to animal physiology and not to communication or generator systems, and therefore he has not received the credit in this field that he might deserve. In the early 1920s AT&T did some pioneering work using the equivalent circuit and may have initiated the reference to the theorem as simply Thévenin’s theorem. In fact, Edward L. Norton, an engineer at AT&T at the time, introduced a current source equivalent of the Thévenin equivalent currently referred to as the Norton equivalent circuit. As an aside, Commandant Thévenin was an avid skier and in fact was commissioner of an international ski competition in Chamonix, France, in 1912.

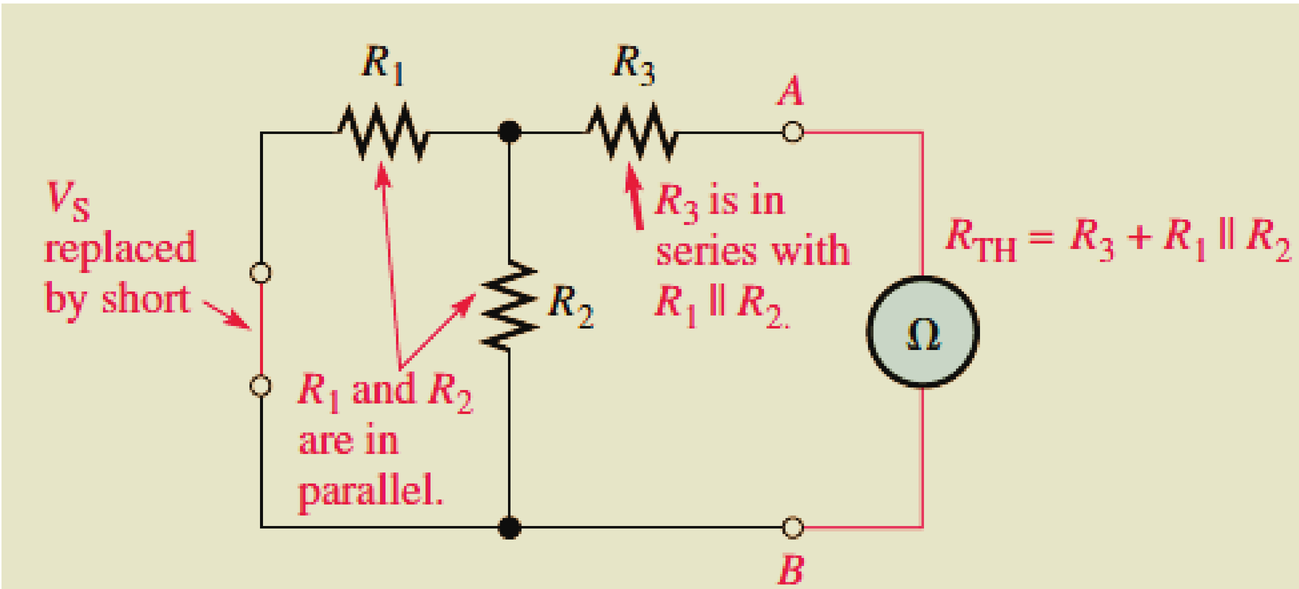
Thevenin’s Theorem

- تمكن نظرية ثيفنن من دراسة التغير في قيمة عنصر معين على سلوك الدارة من دون الحاجة لتحليل الدارة الكهربائية الأصلية بشكل كامل من أجل كل تغير في قيمة العنصر.
- يمكن اختصار أي دارة كهربائية بغض النظر عن درجة تعقيدها إلى دارة ثيفنن، مكونة من منبع ومقاومة على التسلسل.
- يتم اختيار نقطتين في الدارة الأصلية، والابقاء على العنصر الموجود في هذا الفرع (في حالتنا هنا عبارة عن مقاومة)، يُسمى العنصر في هذا الفرع بمقاومة الحمل R_L، واستبدال كل الدارة الباقية بدارة ثفنن.
- جهد ثيفنن V_{TH} عبارة عن جهد الدارة المفتوحة (من دون مقاومة الحمل) بين النقطتين المختارتين.
- مقاومة ثفنن R_{TH} هي عبارة عن المقاومة المكافئة الكلية المنظورة من هاتين النقطتين (من دون مقاومة الحمل).
- إعادة ربط دارة ثيفنن مع مقاومة الحمل لحساب التيار المار خلال مقاومة الحمل والجهد المطبق عبر الحمل.

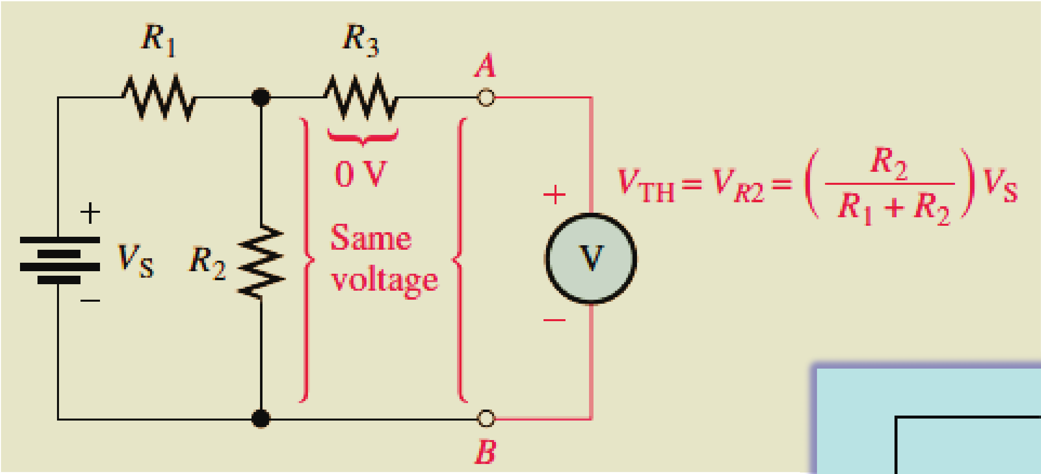
خطوات تطبيق نظرية ثيفنن

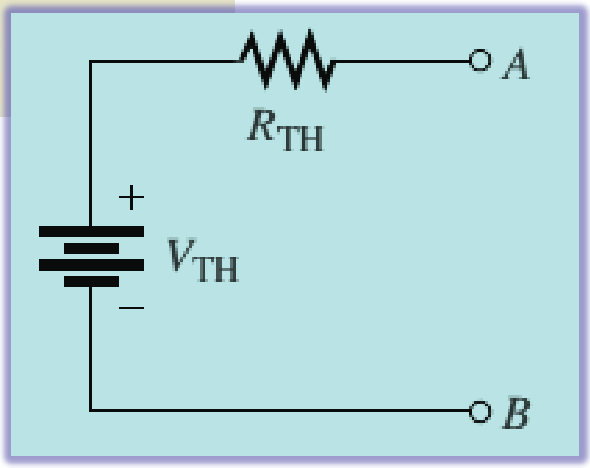
1. إزالة جزء الدارة الكهربائية بين النقطتين المختارتين، حيث نريد ايجاد دارة ثيفنن المكافئة بين هاتين النقطتين، هذا يتطلب إزالة مقاومة الحمل R_L بشكل مؤقت من بين النقطتين المختارتين.
2. حساب مقاومة ثيفنن R_{TH}:
   - I. تُحسب مقاومة ثيفنن بعد التعويض عن منابع الجهد بدارة مقصورة، والتعويض عن منابع التيار بدارة مفتوحة.
   - II. حساب المقاومة المكافئة للدارة الناتجة بين المقطتين المختارتين. في حال كان لمنبع الجهد أو منبع التيار مقاومة داخلية، يجب الابقاء عليها عند حساب مقاومة ثيفنن، حتى لو وضعت قيمة المنابع مساوية للصفر.
3. حساب جهد ثيفنن E_{TH} أو V_{TH}:
   - i. تعاد منابع التيار والجهد إلى موضعها في الدارة.
   - ii. يُحسب جهد الدارة المفتوحة بين النقطتين المختارتين.
4. ربط دارة ثيفنن المكافئة مع قيمة جهد ثيفنن E_{TH}، وقيمة مقاومة ثيفنن R_{TH}، مع مقاومة الحمل R_L، (إعادة مقاومة الحمل إلى موضعها بين النقطتين المختارتين).

حساب مقاومة ثيفنن R_{TH}



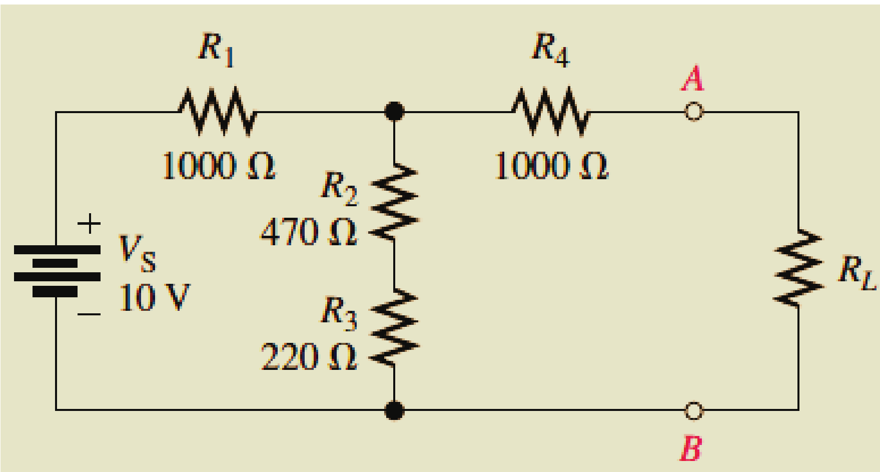
حساب جهد ثيفنن V_{TH}



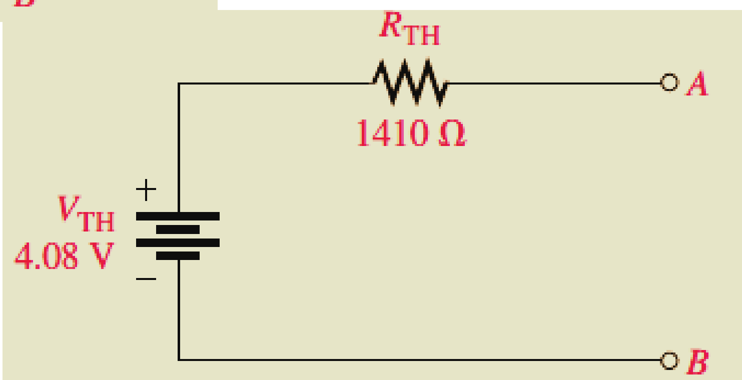


دارة ثيفنن المكافئة

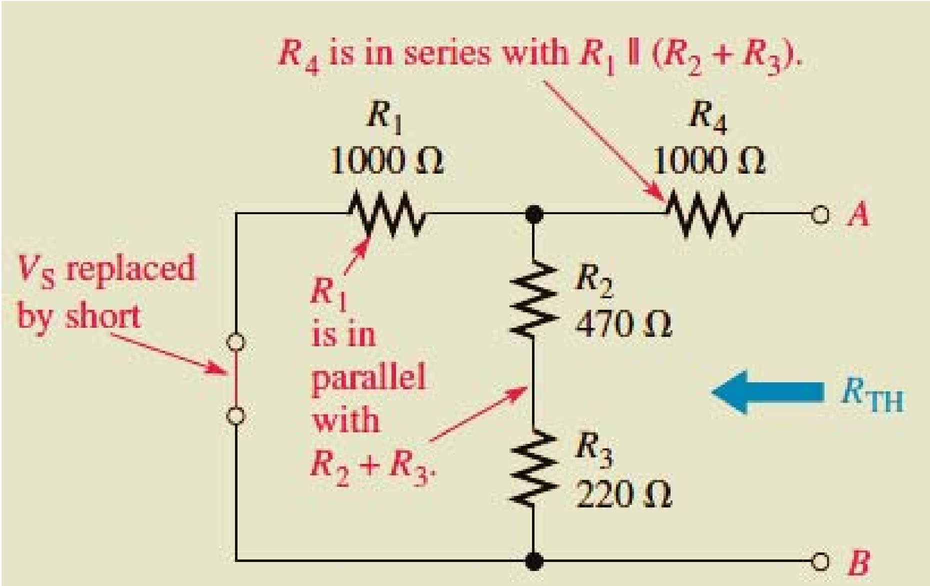
مثال (21)



Find the Thevenin equivalent circuit between *A* and *B*

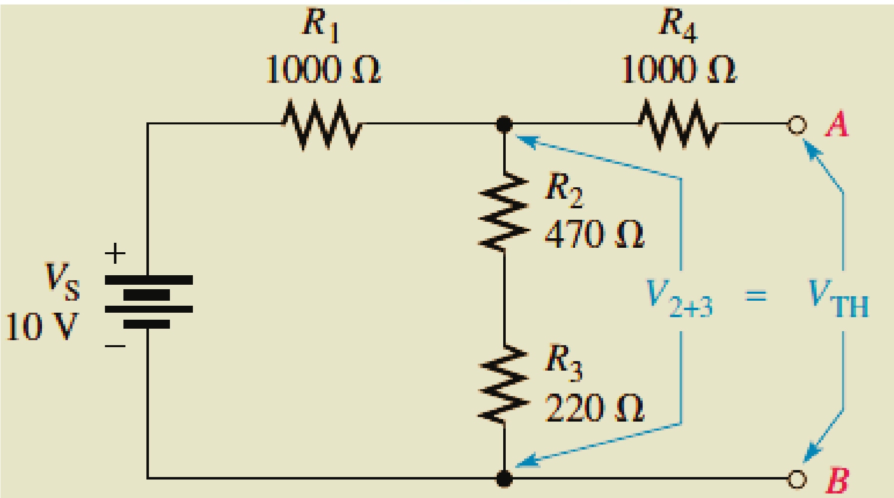


حساب مقاومة ثيفنن R_{TH}

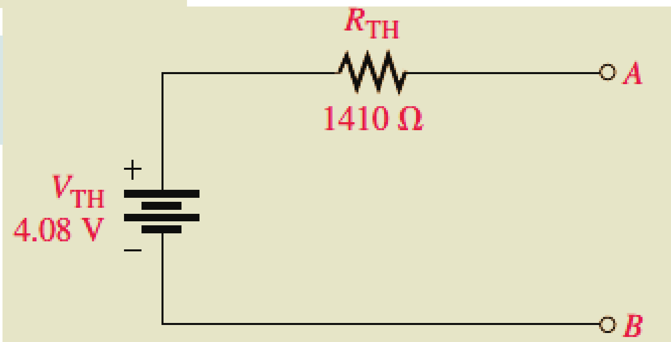


$$R_{TH} = R_4 + \frac{R_1(R_2 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3} = 1000\ \Omega + \frac{(1000\ \Omega)(690\ \Omega)}{1690\ \Omega} = \mathbf{1410\ \Omega}$$

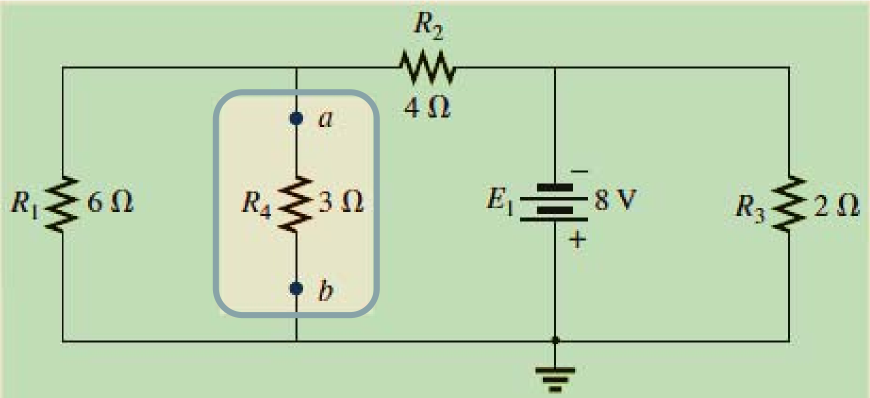
حساب جهد ثيفنن V_{TH}

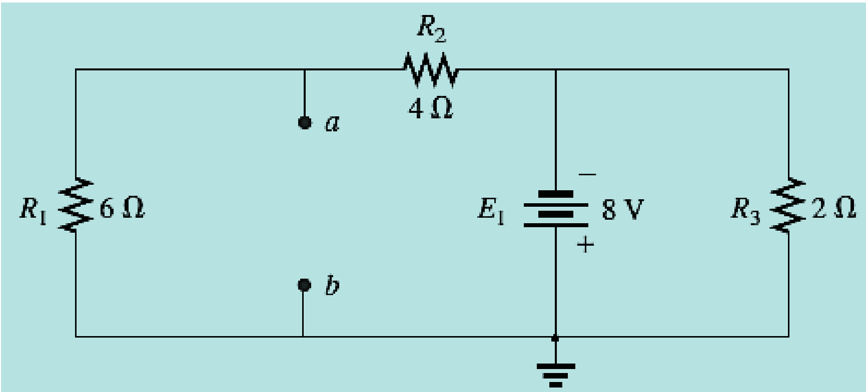


$$E_{Th} = \frac{R_1E_1}{R_1 + R_2} = \frac{(6\ \Omega)(8\ \text{V})}{6\ \Omega + 4\ \Omega} = \frac{48\ \text{V}}{10} = \mathbf{4.8\ V}$$



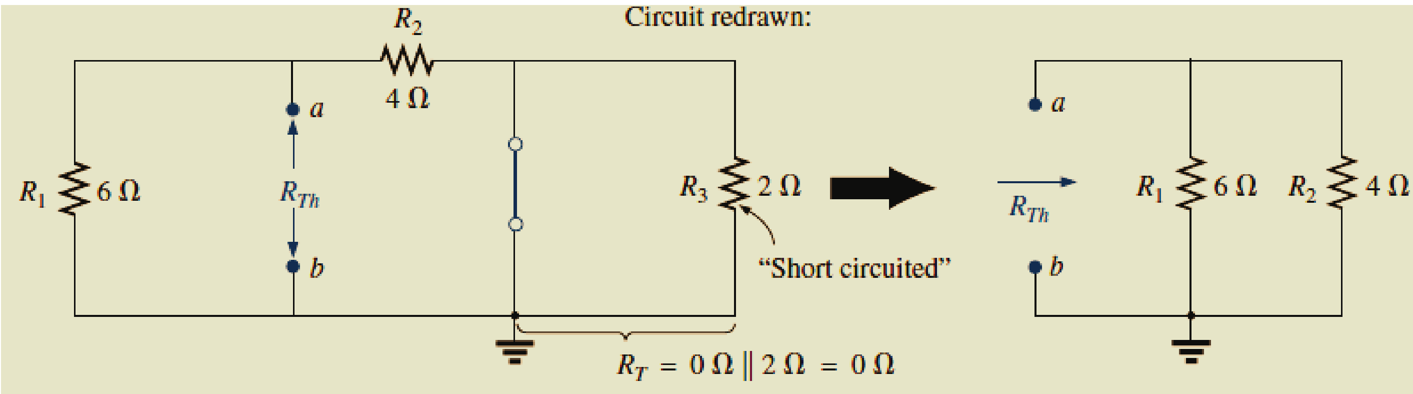
مثال (22)





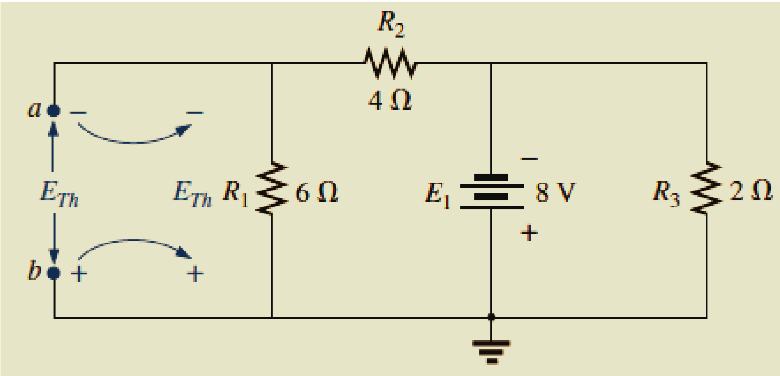
Find the Thevenin equivalent circuit between *a* and *b*

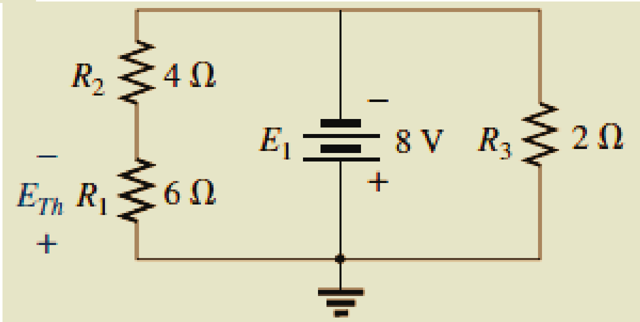
حساب مقاومة ثيفنن R_{TH}



$$R_{Th} = R_1 \parallel R_2 = \frac{(6\,\Omega)(4\,\Omega)}{6\,\Omega + 4\,\Omega} = \frac{24\,\Omega}{10} = \mathbf{2.4\,\Omega}$$

حساب جهد ثيفنن E_{TH}





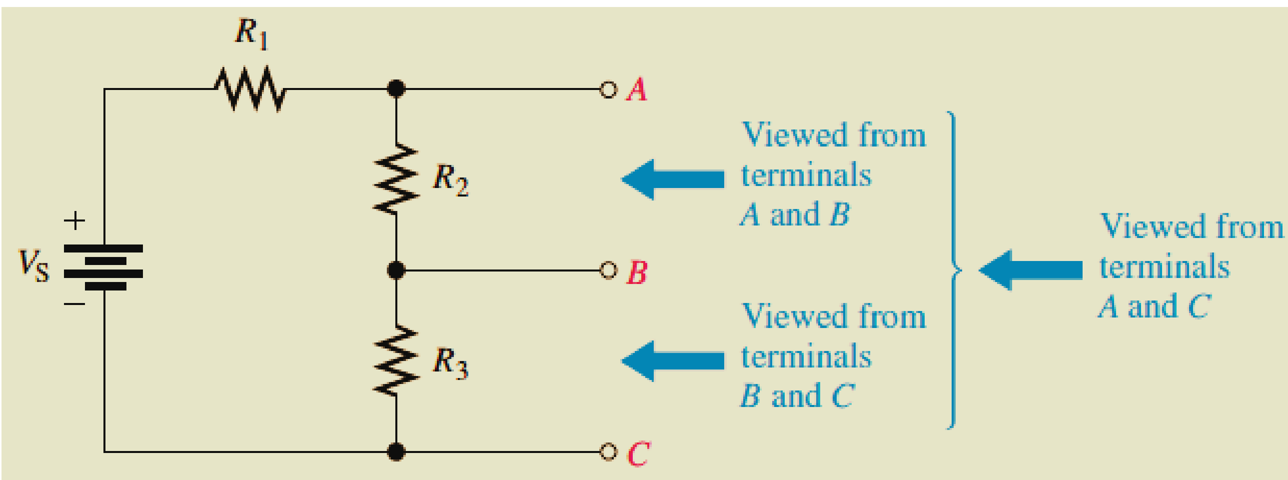
علاقة مقسم الجهد

$$E_{Th} = \frac{R_1 E_1}{R_1 + R_2} = \frac{(6\ \Omega)(8\ \text{V})}{6\ \Omega + 4\ \Omega} = \frac{48\ \text{V}}{10} = \mathbf{4.8\ V}$$

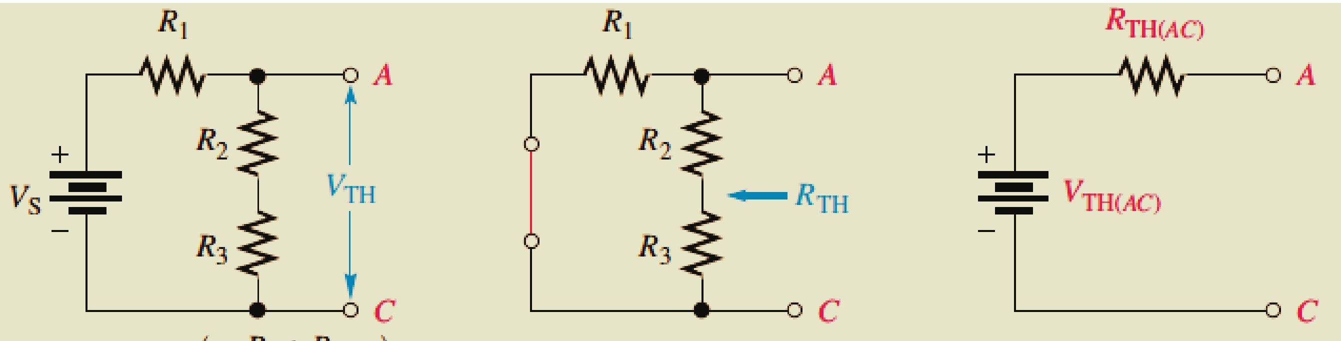
Thevenin Equivalency Depends on the Viewpoint

دارة ثيفنن المكافئة تعتمد على موضع النقطتين المختارتين، بالتالي يمكن تطبيق نظرية ثيفنن على أي جزء من الدارة، حسب موقع النقطتين المختارتين التي ينظر من خلالهما إلى الدارة.

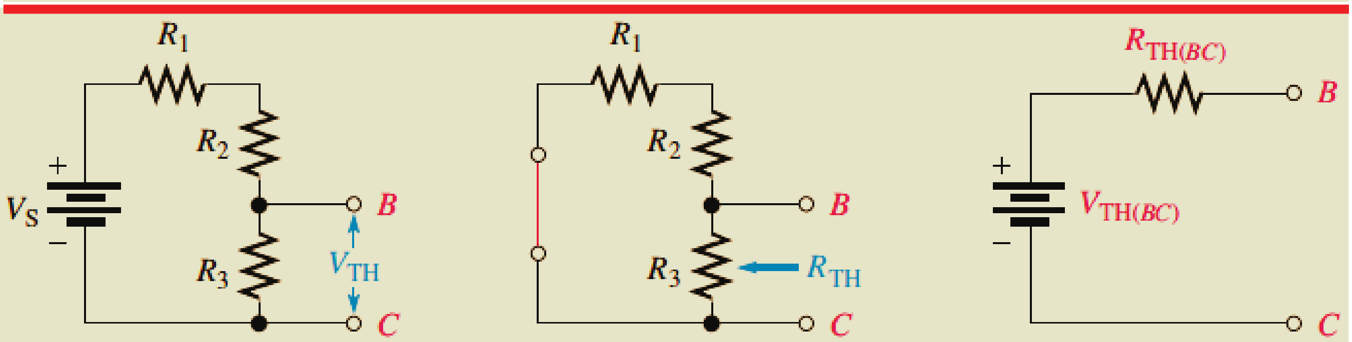
<u>على سبيل المثال:</u>
في الدارة المبينة في الشكل يمكن النظر إلى الدارة من النقطتين A, B أو من النقطتين B, C، أو من النقطتين B, C.



دارة ثيفنن بين النقطتين A, C و النقطتين B, C

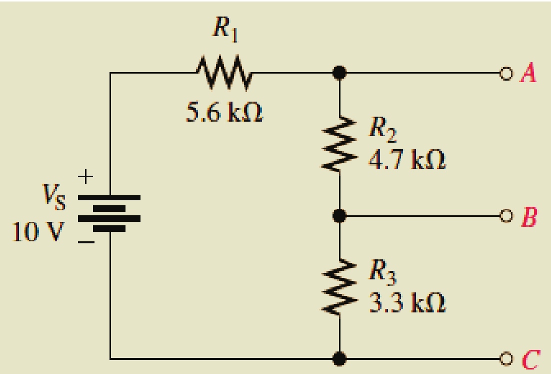


(a) $V_{TH(AC)} = \left(\frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3}\right)V_S$ (b) $R_{TH(AC)} = R_1 \parallel (R_2 + R_3)$ (c) Thevenin equivalent

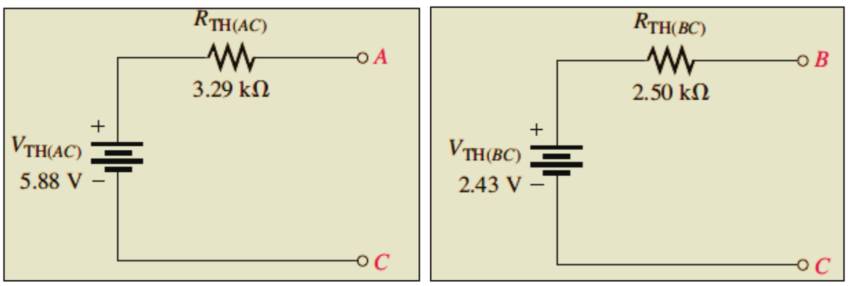


(d) $V_{TH(BC)} = \left(\frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3}\right)V_S$ (e) $R_{TH(BC)} = R_3 \parallel (R_1 + R_2)$ (f) Thevenin equivalent

مثال (23)



جد دارة ثيفنن بين النقطتين A, C و النقطتين B, C



(a) $V_{TH(AC)} = \left(\frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3}\right)V_S = \left(\frac{4.7\,k\Omega + 3.3\,k\Omega}{5.6\,k\Omega + 4.7\,k\Omega + 3.3\,k\Omega}\right)10\text{ V} = \mathbf{5.88\text{ V}}$

$R_{TH(AC)} = R_1 \parallel (R_2 + R_3) = 5.6\,k\Omega \parallel (4.7\,k\Omega + 3.3\,k\Omega) = \mathbf{3.29\,k\Omega}$

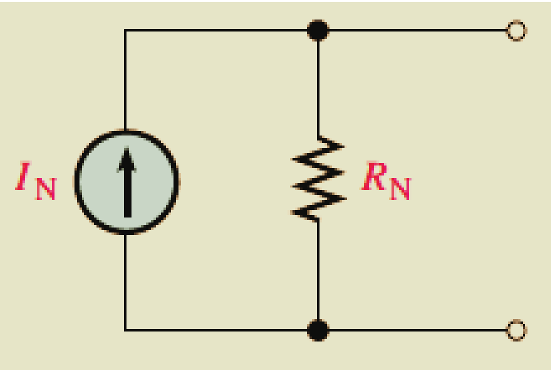
The Thevenin equivalent circuit is shown in Figure 38(a).

(b) $V_{TH(BC)} = \left(\frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3}\right)V_S = \left(\frac{3.3\,k\Omega}{5.6\,k\Omega + 4.7\,k\Omega + 3.3\,k\Omega}\right)10\text{ V} = \mathbf{2.43\text{ V}}$

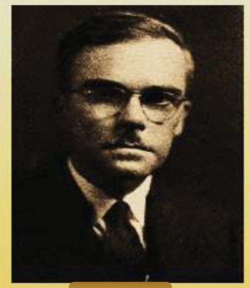
$R_{TH(BC)} = R_3 \parallel (R_1 + R_2) = 3.3\,k\Omega \parallel (5.6\,k\Omega + 4.7\,k\Omega) = \mathbf{2.50\,k\Omega}$

Norton's Theorem

- تقوم نظرية نورتن على اختصار الدارة الكهربائية ، بحيث تنتج دارة كهربائية مكونة فقط من منبع تيار وحيد يُدعى I_N ومقاومة وحيدة مربوطة على التفرع مع المنبع، تدعى مقاومة ثيفنن R_N.
- تعتمد قيمة تيار نورتن ومقاومة نورتن على قيم عناصر الدارة الأصلية.
- يمكن اختصار أي دارة كهربائية بغض النظر عن درجة تعقيدها إلى دارة نورتن المكافئة.



دارة نورتن المكافئة



Edward L. Norton.

American (Rockland, Maine; Summit, New Jersey) 1898–1983
Electrical Engineer, Scientist, Inventor
Department Head: Bell Laboratories
Fellow: Acoustical Society and Institute of Radio Engineers

Although interested primarily in communications circuit theory and the transmission of data at high speeds over telephone lines, Edward L. Norton is best remembered for development of the dual of Thévenin equivalent circuit, currently referred to as *Norton's equivalent circuit*. In fact, Norton and his associates at AT&T in the early 1920s are recognized as being among the first to perform work applying Thévenin's equivalent circuit and referring to this concept simply as Thévenin's theorem. In 1926, he proposed the equivalent circuit using a current source and parallel resistor to assist in the design of recording instrumentation that was primarily current driven. He began his telephone career in 1922 with the Western Electric Company's Engineering Department, which later became Bell Laboratories. His areas of active research included network theory, acoustical systems, electromagnetic apparatus, and data transmission. A graduate of MIT and Columbia University, he held nineteen patents on his work.

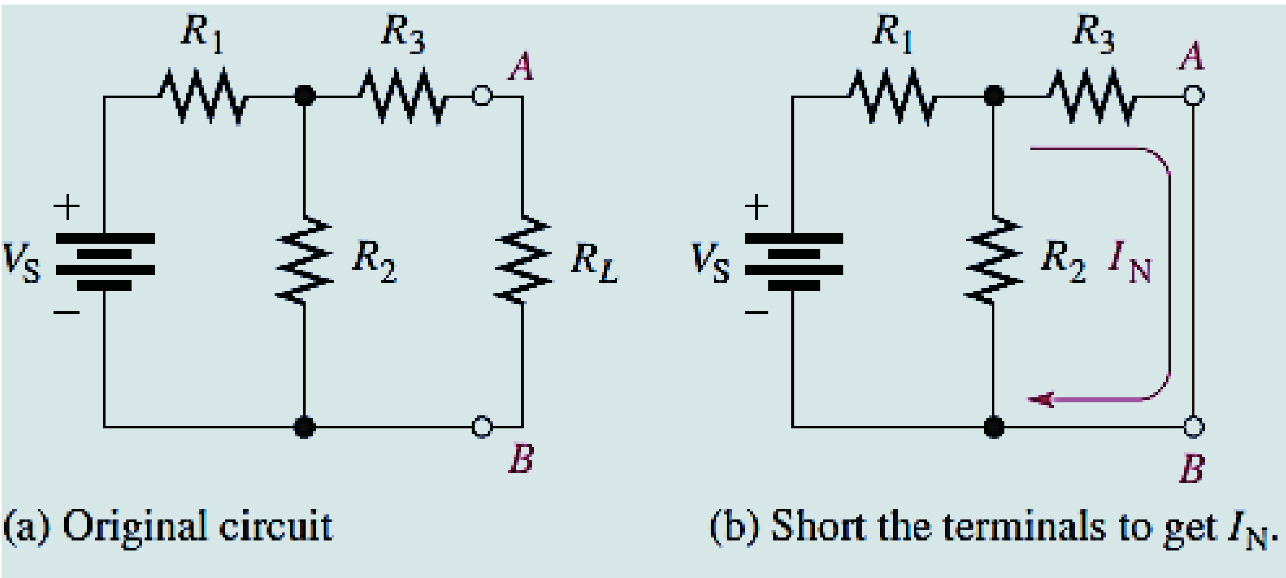
Norton's Theorem

- تمكن نظرية نورتن من دراسة التغير في قيمة عنصر معين على سلوك الدارة من دون الحاجة لتحليل الدارة الكهربائية الأصلية بشكل كامل من أجل كل تغير في قيمة العنصر.
- يمكن اختصار أي دارة كهربائية بغض النظر عن درجة تعقيدها إلى دارة نورتن ، مكونة من منبع تيار ومقاومة على التفرع.
- يتم اختيار نقطتين في الدارة الأصلية، والابقاء على العنصر الموجود في هذا الفرع (في حالتنا هنا عبارة عن مقاومة)، يُسمى العنصر في هذا الفرع بمقاومة الحمل R_N، واستبدال كل الدارة الباقية بدارة نورتن.
- تيار نورتن I_N عبارة عن تيار الدارة المقصورة (توصل مكان موضع مقاومة الحمل) بين النقطتين المختارتين.
- مقاومة نورتن R_N هي عبارة عن المقاومة المكافئة الكلية المنظورة من هاتين النقطتين (من دون مقاومة الحمل).
- إعادة ربط دارة نورتن مع مقاومة الحمل لحساب التيار المار خلال مقاومة الحمل والجهد المطبق عبر الحمل.

خطوات تطبيق نظرية نورتن

1. إزالة جزء الدارة الكهربائية بين النقطتين المختارتين، حيث نريد ايجاد دارة نورتن المكافئة بين هاتين النقطتين، هذا يتطلب إزالة مقاومة الحمل R_L بشكل مؤقت من بين النقطتين المختارتين.
2. حساب مقاومة نورتن R_N:
   1. تُحسب مقاومة نورتن بعد التعويض عن منابع الجهد بدارة مقصورة، والتعويض عن منابع التيار بدارة مفتوحة، ثمّ حساب المقاومة المكافئة للدارة الناتجة بين المقطتين المختارتين. في حال كان لمنبع الجهد أو منبع التيار مقاومة داخلية، يجب الابقاء عليها عند حساب مقاومة ثيفنن، حتى لو وضعت قيمة المنابع مساوية للصفر. (كما هو ملاحظ فإن خطوة حساب مقاومة ثيفنن ونورتن متكافئة)، لذلك فإن $R_{TH} = R_N$
3. حساب تيار نورتن I_N :
   1. تعاد منابع التيار والجهد إلى موضعها في الدارة.
   2. يُحسب تيار الدارة المقصورة بين النقطتين المختارتين.
4. ربط دارة نورتن المكافئة مع مقاومة الحمل R_L، (إعادة مقاومة الحمل إلى موضعها بين النقطتين المختارتين).

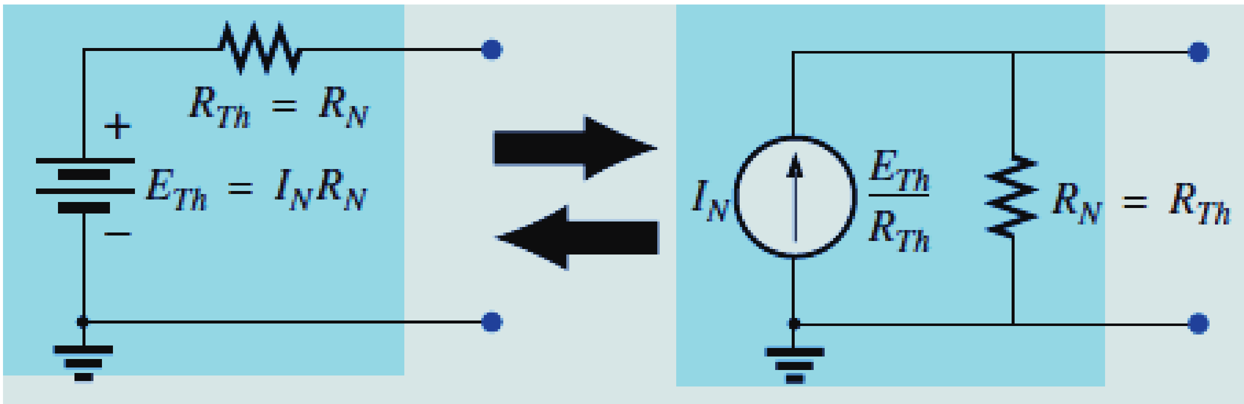
Norton’s Theorem



Determining the Norton equivalent current, I_N.

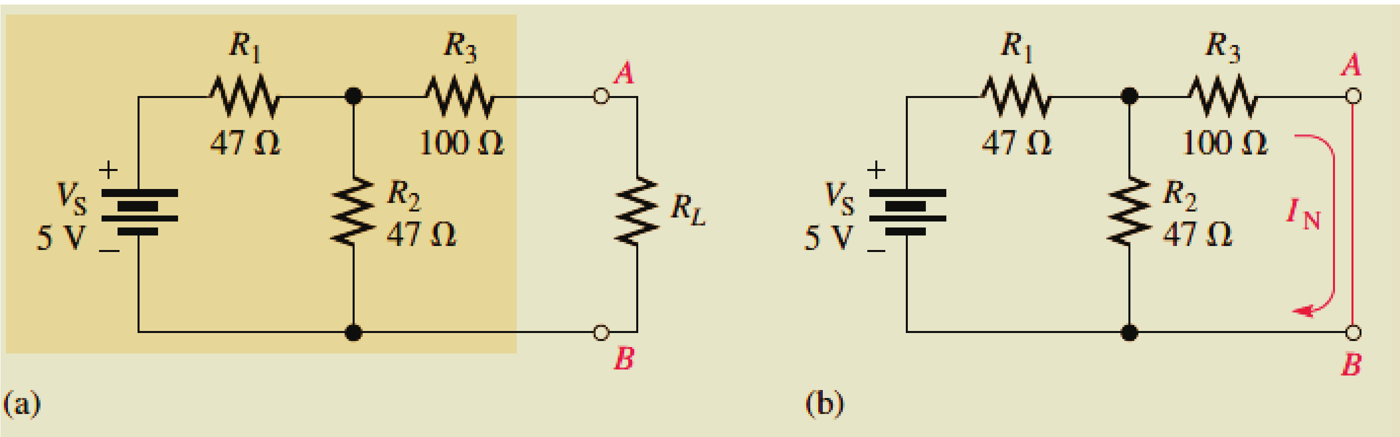
Converting between Thévenin and Norton equivalent circuits

وجدنا سابقاً إمكانية تحويل منبع الجهد مع مقاومة على التسلسل إلى منبع تيار مع مقاومة على التفرع، لذلك يمكننا التحويل بين دارة ثيفن المكافئة ودارة نورتن المكافئة كما هو مبين بالشكل الآتي:



مثال (24)

حساب تيار نورتن I_N ومقاومة R_N



$$R_T = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = 47\ \Omega + \frac{(47\ \Omega)(100\ \Omega)}{147\ \Omega} = 79\ \Omega$$

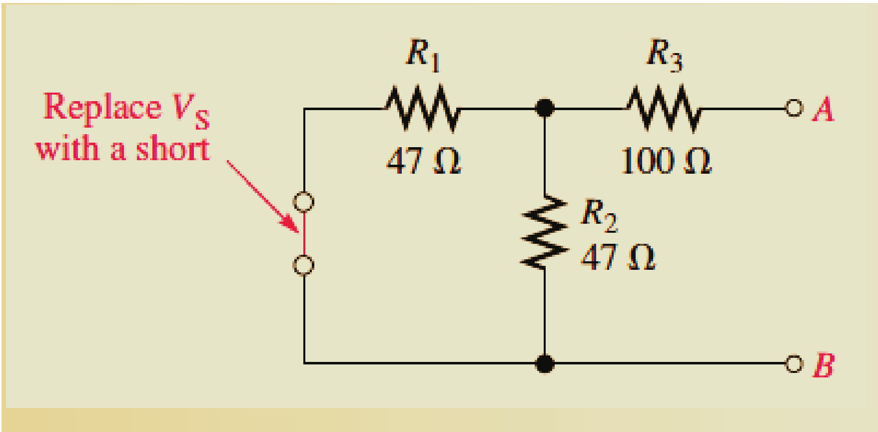
علاقة مقسم التيار

$$I_T = \frac{V_S}{R_T} = \frac{5\ \text{V}}{79\ \Omega} = 63.3\ \text{mA}$$

$$I_N = \left(\frac{R_2}{R_2 + R_3}\right) I_T = \left(\frac{47\ \Omega}{147\ \Omega}\right) 63.3\ \text{mA} = \mathbf{20.2\ mA}$$

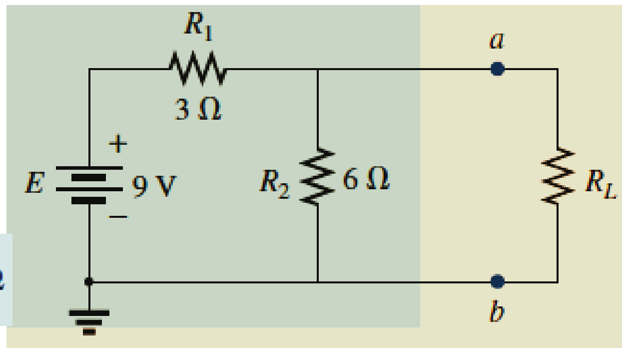
مثال (24)

$$R_N = R_3 + \frac{R_1}{2} = 100\ \Omega + \frac{47\ \Omega}{2} = \mathbf{124\ \Omega}$$

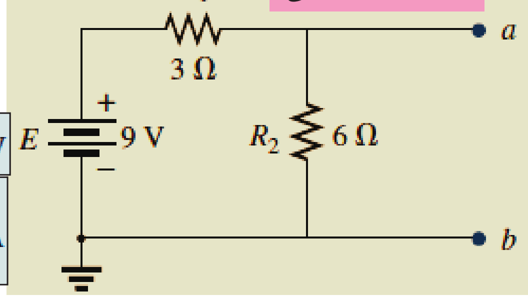


مثال (25)

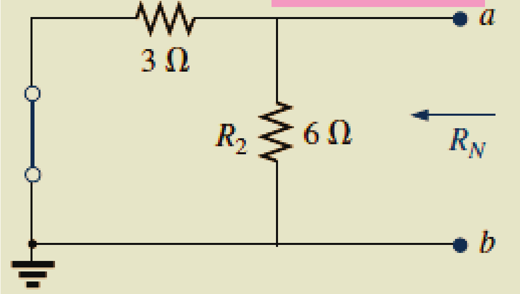
جد دارة نورتن المكافئة، ثمّ حول دارة نورتن المكافئة إلى دارة ثيفنن المكافئة



الخطوة الأولى

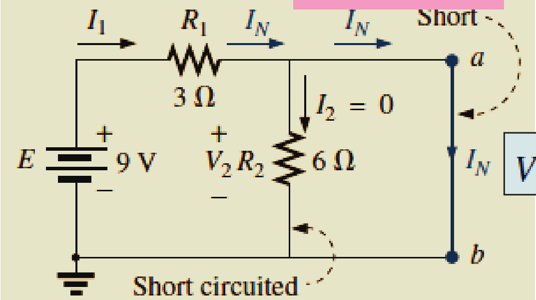


الخطوة الثانية



$$R_N = R_1 \parallel R_2 = 3\ \Omega \parallel 6\ \Omega = \frac{(3\ \Omega)(6\ \Omega)}{3\ \Omega + 6\ \Omega} = \frac{18\ \Omega}{9} = \mathbf{2\ \Omega}$$

الخطوة الثالثة



$$V_2 = I_2R_2 = (0)6\ \Omega = 0\ \text{V}$$

$$I_N = \frac{E}{R_1} = \frac{9\ \text{V}}{3\ \Omega} = \mathbf{3\ A}$$