

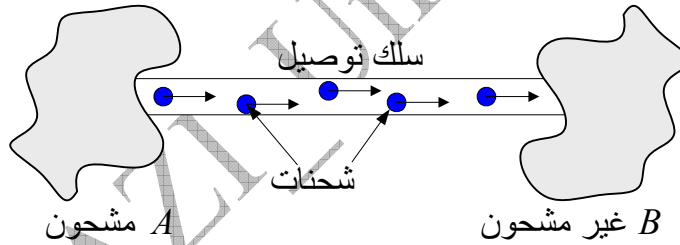
III / الكهرباء المتحركة ELECTROCINETIQUE

الكهرباء المتحركة هي دراسة التيارات الكهربائية ، أي دراسة الشحنات الكهربائية في حالة الحركة في أوساط مادية تسمى النواقل. و بعبارة أخرى ، فإنها دراسة الدارات و الشبكات الكهربائية.

في ما يتبع نعتني بالسبب الذي يجعل الشحنات تتحرك و السبب الذي يعيق حركتها.

A / التيار الكهربائي: (courant électrique)

يمثل الشكل 1.3 جسمين ، B غير مشحون و هو في حالة توازن ، والجسم A مشحون بإحدى طرق التكهرب. نوصل الجسمين بواسطة سلك. يشحن الجسم B ، أي أنه يكتسب شحنة dQ خلال وقت وجيز dt ، و هكذا فإنه فقد التوازن الكهروساكن مؤقتا.



الشكل 1.3: مرور التيار الكهربائي من A نحو B

نفسر هذا بانتقال شحنات كهربائية من الجسم A نحو الجسم B عبر السلك الموصل بينهما. و من هنا نعرف التيار الكهربائي:

❖ **تعريف:** التيار الكهربائي هو انتقال جماعي ومنظم لحاملات الشحنة (إلكترونات أو شوارد) . قد يحدث هذا السيل من الشحنات في الفراغ (حزمة إلكترونات في أنبوب مهبطي...) أو في المادة الناقلة (الإلكترونات في المعادن أو الشوارد في المحاليل المائية...).

يظهر تيار كهربائي في الناقل عندما يوجد فرق في الكمون بين طرفي هذا الأخير.

1/ شدة التيار الكهربائي: (intensité du courant électrique)

❖ الشدة المتوسطة: (intensité moyenne) الشدة المتوسطة للتيار الكهربائي هي كمية

الكهرباء (الشحنة) التي تجتاز مقطعاً من الناقل خلال واحدة الزمن:

$$(1.3) \quad I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

❖ الشدة اللحظية: (intensité instantanée) هي مشتق الشحنة الكهربائية بالنسبة للزمن:

$$(2.3) \quad i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{dQ}{dt}$$

❖ الوحدة: الأمبير (A) ، (نسبة للعالم 1775-1836 André-Marie Ampère) ، هو شدة

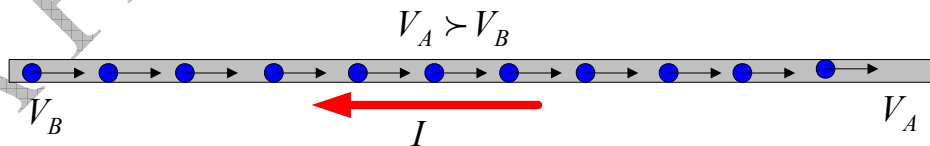
تيار كهربائي مناسبة لمرور شحنة مقدارها 1 كولومب عبر مقطع الناقل خلال ثانية واحدة.

❖ رتبة سرعة حاملات الشحنات: (ordre de grandeur de la vitesse des porteurs de charges)

- في سلك معدني تنتقل الإلكترونات الحرة بسرعة متوسطة تقارب $1mm/s$.
- في المحاليل المائية سرعة الشوارد تكون أضعف.
- في الفراغ سرعة الإلكترونات تقارب $10000km/s$ و حتى هذه القيمة تبقى ضعيفة جداً أمام سرعة انتشار الضوء ($c = 3.10^5 kms^{-1}$).

❖ إتجاه التيار الكهربائي: (sens du courant)

يسري التيار الكهربائي في الجهة المتناقصة للكمونات أي في إتجاه شعاع الحقل الكهربائي. و هكذا فإن الإتجاه المختار إصطلاحاً هو عكس إتجاه حركة الشحنات السالبة.



الشكل 2.3: الإتجاه الإصطلاحي للتيار الكهربائي

❖ تذكير بقانون أوم: (Georges-Simon Ohm 1789-1854)

السهولة التي تتدفق بها الشحنات بين قطبين تتعلق بالطريقة التي يربط بها هذين القطبين. إذا وصلناهما بسلك توصيل، فإن الشحنات لا تواجه أي صعوبات تذكر للانتقال، أما إذا وصلناهما بعازل ، فإن كل انتقال للشحنات يصبح صعباً جداً، إن لم يكن مستحيلاً.

هذه الخاصية التي تميّز المادة، بالسماح أو بمنع الشحنات الكهربائية من المرور، تسمى **بـ مقاومة** المادة المذكورة. تقاس المقاومة بـ الأوم (Ω).

في حين تكون مقاومة المعادن ضعيفة، فإن مقاومة العوازل كبيرة جدا و لا متناهية حتى. في الصناعة توجد عناصر صغيرة (تسمى مقاومات) يمكن لمقاومتها أن تتراوح بين بضع أومات إلى ملايين الأومات.

بالنسبة لناقل معدني، تحت درجة حرارة ثابتة، فإن النسبة بين فرق الكمون (التوتر) U بين طرفيه، و شدة التيار الكهربائي I الذي يجتازه، ثابتة و تساوي مقاومة الناقل:

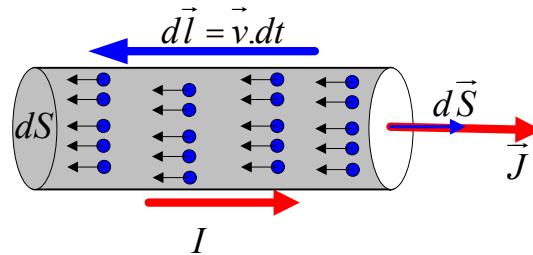
$$(3.3) \quad R = \frac{U}{I} = C^{te}$$

هذه العبارة بين شدة التيار و التوتر و المقاومة تعرف بـ **قانون أوم**. قانون أوم يظهر أنه من أجل فرق في الكمون محدد، يمكن وضع عدد من المقاومات في الدارة و هذا للحد من شدة التيار الكهربائي الذي يعبر الجهاز المغذى كهربائيا.

2/ كثافة التيار الكهربائي: (densité de courant)

سبق و أن عرفنا التيار الكهربائي على أنه سيل من الشحنات في الفراغ أو عبر وسط مادي ناقل. يمكن التعبير عن شدة التيار الكهربائي بدلالة سرعة الشحنات المتحركة (الحرّة).

نعتبر ناقلا مقطعه dS . ليكن n عدد الشحنات q المتحركة و المحصورة داخل واحدة الحجم و تتحرك بسرعة \vec{v} ثابتة.



الشكل 3.3: كثافة التيار

نتقدم الشحنات خلال المدة الوجيزة dt بمسافة: $d\vec{l} = \vec{v}.dt$

خلال نفس المدة dt ، الشحنة dQ المحصورة داخل حجم عنصري dV من الناقل هي

$$dQ = nq.dV \quad \text{إذن:}$$

$$dV = d\vec{l}.d\vec{S} \quad \text{و بما أن}$$

$$dQ = n.q.\vec{v}.dt.d\vec{S} \quad \text{فإن:}$$

❖ **تعريف:** كثافة التيار الكهربائي هي المقدار الشعاعي \vec{J} المساوي للشحنة المارة خلال واحدة الزمن عبر واحدة السطح:

$$(4.3) \quad \boxed{\vec{J} = nq.\vec{v}}$$

و من ثمة فإن:

$$dQ = \vec{J}.dt.d\vec{S}$$

في حالة بلّور متكون من شوارد ساكنة و إلكترونات حرة متحركة فإن:

$$(5.3) \quad \boxed{\vec{J} = -ne.\vec{v}}$$

نلاحظ هنا أن شعاع كثافة التيار يعاكس في اتجاهه الحركة الحقيقية للإلكترونات، أي أن اتجاه التيار هو اتجاه الشعاع \vec{J} .
إذا كان \vec{S} يمثل شعاع السطح للمقطع العرضي للناقل، و المنطبق على الشعاع \vec{J} فإن شدة التيار الكهربائي هي المقدار السلمي:

$$(6.3) \quad I = \frac{dQ}{dt} = \int_S \vec{J}.d\vec{S}$$

$$I = \vec{J}.\vec{S} \Rightarrow \boxed{I = nqv.S}$$

نعبّر عن وحدة كثافة التيار الكهربائي بـ **الأمبير المتر المربع** ($A.m^{-2}$).

✓ **مثال 1.3:** الكتلة المولية الجزيئية للنحاس تساوي $M = 63,54 g.mol^{-1}$ ، و كتلته

$$\text{الحجمية } \rho = 8,8.10^3 kg.m^{-3}.$$

أ/ أحسب عدد الذرات في وحدة الحجم،

ب/ بافتراض أن كل ذرة من النحاس تحرر إلكترونين، و أن سلكا من نحاس

مقطعه $10mm^2$ يجتازه تيار كهربائي شدته $30A$ ، أحسب كثافة التيار الكهربائي،

ج/ استنتج سرعة انتقال الإلكترونات داخل بلّور النحاس.

الإجابة:

أ/ حساب عدد الذرات في $1m^3$ من مادة النحاس:

$$\eta = \frac{N \cdot \rho}{M} \Rightarrow \eta = \frac{6,03 \cdot 10^{23} \times 8,8 \cdot 10^6}{63.54} \Rightarrow \boxed{\eta = 8,35 \cdot 10^{28}}$$

ب/ حساب الكثافة: $J = \frac{I}{S} \Rightarrow J = \frac{30}{10 \cdot 10^{-6}} \Rightarrow \boxed{J = 3 \cdot 10^6 A/m^2}$

ج/ استنتاج سرعة تحرك الإلكترونات:

$$J = nev \Rightarrow \boxed{v = \frac{J}{ne}} \Rightarrow v = \frac{3 \cdot 10^6}{2 \times 8,35 \cdot 10^{28} \times 1,66 \cdot 10^{-19}} \Rightarrow \boxed{v = 108 \mu m.s^{-1}}$$

❖ **العلاقة بين الحقل الكهربائي و كثافة التيار الكهربائي:**

نعتبر جزءا $AB = l$ من ناقل يجتازه تيار كهربائي شدته I . وجود تيار كهربائي يعني بالضرورة وجود فرق في الكمون بين النقطتين A و B .

كنا تعلمنا في درس سابق كيف نحسب فرق الكمون الكهربائي المطبق بين نقطتين:

$$(7.3) \quad U = V_A - V_B = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

إذا كان الناقل سلكا مقطعه S فإن الحقل الكهروساكن منتظم على طول الجزء AB .

بما أن:

$$(8.3) \quad U = E.l$$

فإن:

$$U = R.I = E.l \Rightarrow RJS = E.l$$

و هكذا نحصل على عبارة جديدة لكثافة التيار:

$$(9.3) \quad \boxed{J = \frac{l}{S.R} E}$$

$$(10.3) \quad \sigma = \frac{l}{S.R} = C^{te} \quad \text{نضع}$$

نطلق على هذا الثابت اسم **الناقلية الكهربائية** (conductivité électrique) للمادة الناقلة ، و وحدتها واحد على الأوم متر ($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$).

تتعلق الناقلية بالخواص المجهرية للمادة ، فهي كمية محلية تفيد في تمييز الخواص الكهربائية للمادة. على أساس الناقلية تصنف المواد إلى نواقل ، عوازل و شبه نواقل. مقلوب الناقلية يدعى المقاومية الكهربائية (résistivité électrique) للناقل (أو المقاومة النوعية):

$$(11.3) \quad \rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{R.S}{l}$$

و وحدتها هي الأوم.متر ($\Omega.m$).

و هكذا يمكن كتابة عبارة مقاومة ناقل على الشكل:

$$(12.3) \quad R = \frac{l}{\sigma.S} = \rho \frac{l}{S}$$

هذه العبارة البسيطة بين مقاومة سلك أسطواني و خصائصه الهندسية معروفة باسم **قانون بويه** نسبة لصاحبه (Claude Pouillet 1719-1868).

يبين المخطط (الشكل 4.3) تصنيفا عاما للمواد من جهة نظر كهربائية.



الشكل 4.3 : مرتبة الناقلية و المقاومة

مقاومية بعض الأجسام :

المعادن ($\Omega.m$)	الشبه نواقل ($\Omega.m$) في 300K	العوازل ($\Omega.m$)
الفضة: $1,47.10^{-8}$	السيليسيوم: 2400	الزجاج: من 10^{11} إلى 10^{14}
النحاس: $1,72.10^{-8}$	الجير مانيوم: 0,5	الميكال: من 10^{11} إلى 10^{15}
الألمونيوم: $2,63.10^{-8}$		الماء: من 0,1 إلى 10^5

❖ **ملاحظة:** تتغير مقاومة ناقل بدلالة درجة الحرارة. بالنسبة للمعادن تزداد المقاومة بازدياد درجة الحرارة (إن المقاومة تزداد). بينما بالنسبة لأشباه النواقل ، فإن العكس هو الذي يحدث. بعض الخلطات المعدنية (alliages) ، مقاومتها تؤول إلى

الصفر حين تنخفض درجة الحرارة و تقارب الصفر المطلق. يتعلق الأمر بالنواقل الفائقة الناقلية (supraconducteurs).

بالنسبة للمعادن فإن تغير مقاومتها يحكمها القانون:

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha (T - T_0)] \quad (13.3)$$

ρ : المقاومة في درجة الحرارة $T^\circ C$.

ρ_0 : المقاومة في درجة الحرارة $T_0^\circ C$ المرجعية.

α : المعامل الحراري للمقاومة و يساوي بالتقريب $\frac{1}{273}$.

تغير المقاومة مع درجة الحرارة يتبعه بالضرورة تغير المقاومة وفق القانون:

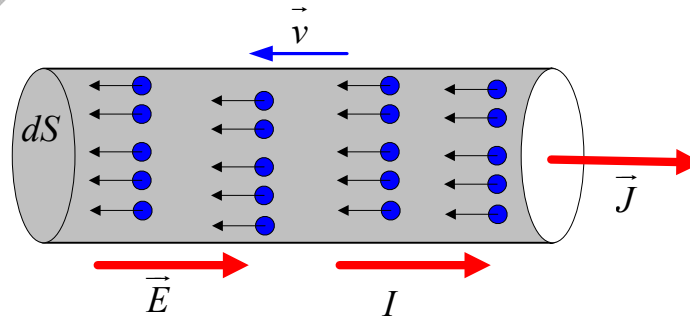
$$R = R_0 [1 + \alpha (T - T_0)]$$

يشذ عن قاعدة تغير المقاومة مع درجة الحرارة، وفق القانون السابق، عنصر الكربون (الفحم) ، و جميع السوائل القابلة للتحليل الكهربائي ، إذ أن مقاومتها تزداد كلما انخفضت درجة الحرارة و تنقص كلما ارتفعت. كما أن مقاومة بعض الخلائط المعدنية (مثل المانكنين (manganine) و الكونستنتان (Constantin) تكاد تكون ثابتة ، فلا تتغير بتغير درجة الحرارة. و لذلك يستعمل المانكنين في عمل المقاومات القياسية. و تنعدم المقاومة الكهربائية للنواقل قرب درجة الصفر المطلق. و تتغير مقاومة الناقل بتغير مقاوته كذلك.

❖ العلاقة بين \vec{E} ، \vec{J} و I :

من المعادلة $\vec{J} = \frac{l}{S.R} \vec{E}$ يتبين لنا أن الشعاعين \vec{E} و \vec{J} لهما نفس الاتجاه. و بما أن

I و \vec{E} لهما نفس الاتجاه فإن التيار الكهربائي يسري في اتجاه الشعاعين \vec{E} و \vec{J} .



الشكل 5.3: اتجاهات \vec{E} و I

3/ فعل جول: (James Prescott Joule 1818-1889)

حسب تعريف الكمون الكهربائي، العمل dW المنجز من قبل شحنة عنصرية dq تنتقل بين نقطتين، يسود بينهما فرق في الكمون الكهربائي (أو توتر) U هو:

$$dW = U.dq$$

نعرف بصفة عامة (في الكهرباء كما في الميكانيك) الاستطاعة على أنها العمل المنجز خلال واحدة الزمن ، أي:

$$P = \frac{dW}{dt}$$

في حالتنا هذه ، لدينا:

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{U.dq}{dt} = U.I$$

و هكذا يمكن كتابة:

$$(14.3) \quad \boxed{P = U.I}$$

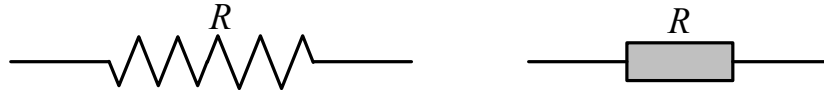
هذه العبارة تترجم ما يعرف باسم **فعل جول** (effet joule) في الحالة العامة. وحدة

الاستطاعة هي **واط** (W). (James Watt 1736-1819).

بالنسبة لثنائيات القطب التي تخضع لقانون أوم ($U = RI$) ، فإن مرور تيار كهربائي من خلالها ينتج حرارة: تسمى هذه الظاهرة كذلك **فعل جول**. و بالفعل فإن ثنائي قطب خامل يحول الطاقة الكهربائية إلى طاقة حرارية. الاستطاعة المبددة من قبل ثنائي القطب تساوي:

$$(15.3) \quad \boxed{P = RI^2}$$

نمثل الناقل الأومي بأحد الرسمين كما في الشكل 6.3.



الشكل 6.3 : تمثيل المقاومة

تبدد الطاقة على شكل حرارة يوحي لنا بتمائل بين المقاومة الكهربائية و قوى الاحتكاك الميكانيكي. كل احتكاك يؤدي إلى ضياع في الطاقة الميكانيكية الذي نجده على شكل حرارة (طاقة حرارية) ، بينما في المقاومة الكهربائية، "احتكاك" الإلكترونات داخل المادة، يؤدي بالمثل إلى تبدد الطاقة الكهربائية على شكل طاقة حرارية...هنا تتجلى لنا فائدة

النواقل الفائقة الناقلية، أي المواد ذات المقاومة المعدومة تماما، التي تسمح بنقل التيار الكهربائي بدون أي ضياع للطاقة.

حسب تعريف الطاقة، نستنتج أن الطاقة E التي ينتجها منبع أو الطاقة المستهلكة من قبل مقاومة خلال مدة زمنية t تساوي:

$$E = U.I.t = R.I^2.t = \frac{U^2}{R}.t \quad (16.3)$$

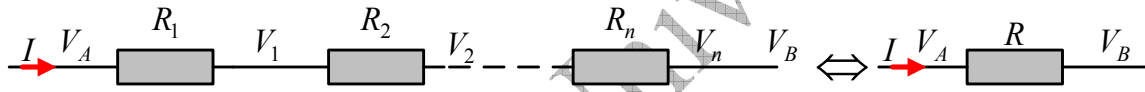
وحدة الطاقة هي الجول (J).

4/ تذكير بربط النواقل الأومية: (groupement de résistances)

نميز حالتين لربط النواقل الأومية أو المقاومات:

أ/ الربط على التسلسل: (groupement en série) الشكل 7.3

كل المقاومات R_i يعبرها نفس التيار الكهربائي I و ليس لها إلا طرف مشترك واحد مع ثنائي قطب آخر. التوتر $U_{AB} = U$ يساوي مجموع التوترات بين طرفي كل ثنائي قطب.



الشكل 7.3 : ربط المقاومات على التسلسل

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n = R.I$$

$$U = R_1.I + R_2.I + R_3.I + \dots + R_n.I = R.I$$

و هكذا نحصل على المقاومة المكافئة لمجموع ثنائيات القطب الخاملة المربوطة على التسلسل:

$$(17.3) \quad R = \sum_{i=1}^n R_i$$

ب/ الربط على التفرع: (groupement en parallèle) الشكل 8.3(أ)

هذا الربط يتميز بكون كل ثنائيات القطب أطرافها مشتركة مثنى مثنى. التوتر هو

نفسه بين طرفي أي من المقاومات R_i .

التيار الكهربائي المغذي يتفرع على ثنائيات القطب بحيث:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n$$

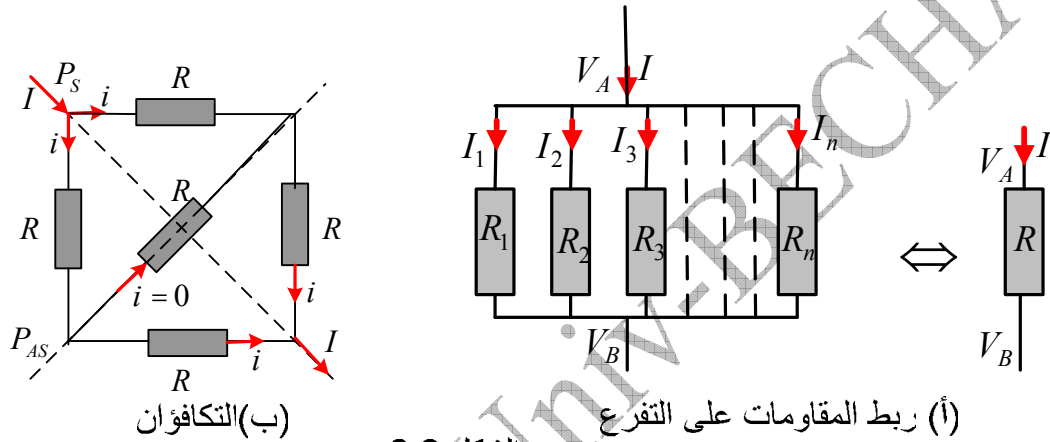
$$I = \frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} + \dots + \frac{U}{R_n} \Rightarrow \frac{U}{R} = \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \right] U$$

و هكذا نحصل على المقاومة المكافئة لمجموع ثنائيات القطب الخاملة المربوطة على

التفرع:

$$(18.3) \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \Rightarrow \boxed{\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}}$$

المقاومة المكافئة لمقاومات مربوطة على التفرع (أو التوازي) تكون قيمتها أصغر من قيمة أصغر مقاومة من المقاومات المتفرعة.



الشكل 8.3

ج/ تكافؤات مفيدة: (Des équivalences utiles)

➤ إذا كان، من أجل ناقل أومي (مقاومة) و في كل الأحوال، $i = 0$ (أو $u = 0$) فإنه يمكن استبداله بسلك أو حذفه من الدارة.

➤ إذا كانت نقطتان في نفس الكمون فإنه يمكن وصلهما بسلك.

➤ إذا كان يسري في سلك تيار كهربائي معدوم فإنه يمكن حذف هذا السلك.

د/ تناظران: (symétries) الشكل 3.8 ب-

في بعض الحالات يصبح استعمال التناظر جد مفيد و يجنبنا كثير من الحسابات.

P : مستوى تناظر فيزيائي للشبكة. من وجهة النظر الكهربائية يمكن لـ P أن

يكون من نوعين:

P_S : مستوى التناظر للتيارات و الكمونات.

P_{AS} : مستوى لاتناظر للتيارات و الكمونات (باعتبار الكمون معدوم على

المستوى). فرع موضوع على P_{AS} يجتازه تيار معدوم.

لتوضيح هذه القواعد نعتبر كمثال الشكل 8.3(ب) أعلاه. كل المقاومات (R) متماثلة مما ينتج عنه عدد من التناظرات P_S أو P_{AS} .

التيار I يتفرق إلى تيارين متماثلين i و بالفعل لا يوجد أي سبب يجعل حاملات الشحنة تتسرب في جهة بأكثر عدد من في الجهة الأخرى. نفس الشيء يحدث حين يخرج التيار I .

عند تطبيق قانون العقد فإن المقاومة المركزية يجتازها تيار معدوم مهما كان التيار I أو التوتر U المفروضين على الجزء من الدارة.

حسب قواعد التكافؤات المذكورة أعلاه فإنه يمكننا حذف هذه المقاومة المركزية (دون حذف الفرع). تصبح المقاومة المكافئة تساوي بكل

$$\text{بساطة: } R_{eq} = \frac{R}{2} + \frac{R}{2} = R$$

B / عناصر الدارة الكهربائية: (éléments d'un circuit électrique)

كل التطبيقات في الكهرباء تستغل السهولة التي يتم بها تحويل الطاقة الكهربائية من منبع كهربائي إلى جهاز مهما كان (مكواة ، مصباح ، جهاز التلفزيون). هذا التحويل يتم بواسطة دارة كهربائية تصل المنبع بالجهاز ، و تسمح بانتقال الإلكترونات. المنابع الكهربائية متعددة: الأعمدة ، البطاريات ، الخلايا الشمسية ، المولدات... في كل هذه الحالات المنابع لها قطبان على الأقل يسود بينهما فرق في الكمون.

1 / عناصر و مصطلحات الدارة الكهربائية: (éléments et vocabulaire)

تتكون الدارة الكهربائية من مجموعة عناصر تسمى ثنائيات قطب موصلة فيما بينها بأسلاك ناقلية، فتشكل بنية مغلقة.

- ✓ **العقدة: (noeud)** هي نقطة من الدارة حيث تصل ثلاث أسلاك أو أكثر.
- ✓ **الفرع: (branche)** هو جزء من دارة محصور بين عقدتين.
- ✓ **العروة: (maille)** هي مجموعة فروع تشكل حلقة مغلقة.
- ✓ **ثنائي القطب: (dipôle)** ثنائي القطب ينحصر في دارة كهربائية بواسطة قطبين ، يدخل التيار من أحدهما و يخرج من الثاني. يتميز ثنائي القطب بالاستجابة لفرق في الكمون بين طرفيه، أي المنحنى المميز $U = f(I)$.
- ✓ **ثنائي القطب الخامل: (dipôle passif)** يستهلك الطاقة الكهربائية.
- ✓ **ثنائي القطب النشط: (dipôle actif)** ينتج تيارا كهربائيا.

✓ ثنائي القطب الخطي: (dipôle linéaire) يكون المنحنى المميز له $U = f(I)$ عبارة عن مستقيم.

✓ أسلاك التوصيل: (fils de jonction) نهمل مقاومتها أمام مقاومات ثنائيات قطب أخرى، بحيث نعتبرها متساوية الكمونات.

✓ الشبكة: (réseau) هي مجموعة من الدارات الكهربائية.

أصطلاح: (convention) في الدراسة العملية لثنائيات القطب يستعمل مصطلحان:

مصطلح الآخذة: التوتر و التيار الكهربائيان موجهان إيجابا و في اتجاهين متعاكسين. الشكل 9.3 (أ).

مصطلح المولد: التوتر و التيار الكهربائيان موجهان إيجابا و في نفس الجهة. الشكل 9.3 (ب).



2/ ضرورة توفر قوة محركة كهربائية: (force électromotrice)

يجب على المولد أن يكون قادرا على بذل عمل كهربائي على الشحنات لتمريرها من خلاله من القطب ذي الكمون المنخفض إلى القطب ذي الكمون العالي. إن عمل المولد يشبه عمل مضخة تضخ الماء من مستوى منخفض إلى مستوى أعلى. بالفعل يمكن فهم ظاهرة التيار الكهربائي بمقارنته مع التيار المائي في نهر:

الماء يجري من منطقة مرتفعة نحو منطقة منخفضة بفضل قوة الجاذبية أي الثقل. لكن إذا أردنا إنشاء دائرة مغلقة للماء فلا بد من توفير طاقة (وجوب استعمال مضخة) لسحب الماء إلى ارتفاع أعلى.

يمكن تعريف القوة المحركة الكهربائية لمنبع كهربائي بأنها العمل المبذول على واحدة الشحنة لنقلها خلال دائرة مغلقة. فإذا كان dW هو العمل المبذول لتمرير شحنة مقدارها dq خلال الفترة الزمنية الصغيرة dt في الدائرة، فإن القوة المحركة الكهربائية e تكون :

$$e = \frac{dW}{dq}$$

وبما أن الاستطاعة هي العمل المبذول خلال واحدة الزمن فإن:

$$P = \frac{dW}{dt} \Rightarrow P = e \cdot \frac{dq}{dt}$$

و من هذا نصل إلى العبارة:

$$(19.3) \quad \boxed{P = e.I}$$

$$U = V_A - V_B = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l} = e \quad \text{نعرف من جهة أخرى أن :}$$

في حالة دائرة مغلقة: الاستطاعة الكلية المقدمة بين A و A من قبل قوة كولومب تساوي:

$$P = U.I = I \int_A^A \vec{E} \cdot d\vec{l} = I(V_A - V_A) = 0$$

أي استطاعة معدومة. و هذا يعني أن الحقل الكهروساكن لا يضمن استمرارية تيار كهربائي في دائرة مغلقة.

حين يسري تيار كهربائي في دائرة مغلقة، فهذا يدل على أن قوة كولومب ليست المسؤولة عن الحركة الإجمالية لحاملات الشحنة في الناقل.

هذا ما يحدث تماما في دائرة كهربائية، بحيث يجب على قوة أخرى غير القوة الكهروساكنة الكولومبية من تمكين حاملات الشحنة صعود الكون و التغلب عليه.

للحصول على تيار كهربائي متواصل في دائرة مغلقة لا بد من تغذية الدارة بطاقة.

الأجهزة التي تنتج هذه الطاقة تسمى مولدات كهربائية، و يمكن القول على أنها منابع للقوة المحركة الكهربائية (e).

هناك طرق عديدة لإنتاج قوة محرركة كهربائية:

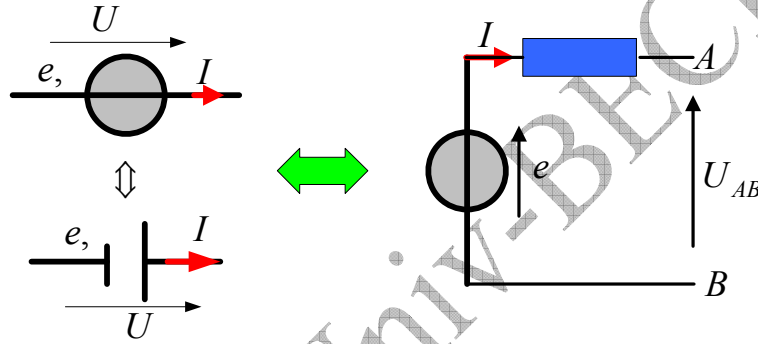
- ➡ البطارية تحول الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية ،
- ➡ مولد كهروساكن يحول الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية ،
- ➡ المولد الكهربائي يحول الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية ،
- ➡ الخلية الشمسية تحول الطاقة الإشعاعية إلى طاقة كهربائية .

3/ نوعا المولدات: (les deux types de générateurs)

أ/ مولدات أو منابع التوتر: (générateurs ou sources de tension)

منبع التوتر ، أو مولد التوتر ، هو ثنائي قطب يتميز بتوتر ثابت بين طرفيه مهما كانت شدة التيار الذي يجريه. لا نهتم في كل ما يتبع، في هذا الفصل، إلا بمولدات التوتر المستمر. تتميز هذه المولدات بقوة محرّكة كهربائية (e) و مقاومة داخلية (r) ضعيفة، و نمثلها كما في الشكل 10.3.

كما يمكن تعويض مولد توتر مميزاته (e, r) بمنبع توتر مثالي، قوته المحركة الكهربائية e ، مربوط على التسلسل مع ناقل أومي، مقاومته . الشكل 10.3



الشكل 10.3: تمثيل مولد توتر

القوة المحركة الكهربائية لمولد توتر تساوي فرق الكمون بين طرفيه حين لا يجري أي تيار كهربائي.

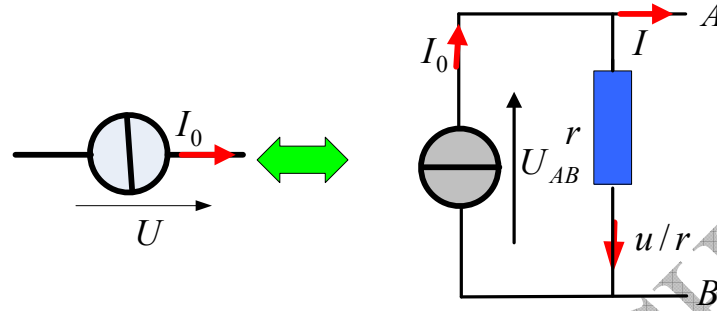
$$(20.3) \quad I = 0 \Rightarrow e = U_{AB}$$

ب/ مولدات أو منابع التيار: (générateurs ou sources de courant)

منبع التيار، أو مولد التيار، هو ثنائي قطب يتميز بإجراء تيار ثابت مهما كان فرق الكمون المتغير بين طرفيه. لا نهتم في كل ما يتبع، في هذا الفصل، إلا بمولدات التيار المستمر. يمكن تحقيق مثل هذه المنابع بواسطة أنظمة إلكترونية و يكون التوتر بين طرفي كل منها محدودا بقيمة أعظمية. نمثل مولد التيار كما في الشكل 11.3.

يمكن تعويض مولد تيار بمنبع تيار مثالي، يجري تيارا ثابتا I_0 ، مربوط على التفرع مع ناقل أومي، مقاومته . الشكل 11.3

$$(21.3) \quad I = I_0 - \frac{u}{r}$$

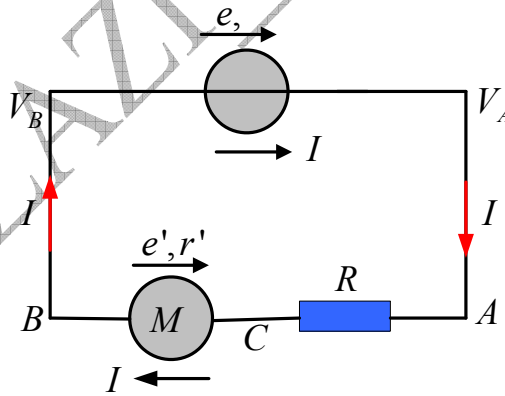


الشكل 11.3: تمثيل مولد تيار

C / القوانين المسيرة للدارات الكهربائية: (lois régissant les circuits électriques)

1 / معادلة الدارة الكهربائية: (équation du circuit électrique)

لتكن الدارة الممثلة على الشكل 12.3 و المتكونة من مولد، قوته المحركة الكهربائية e و مقاومته الداخلية ، مقاومة خارجية R ، و محرك قوته المحركة الكهربائية العكسية e' و مقاومته الداخلية r' .



الشكل 12.3: دارة مغلقة

المولد ينتج استطاعة كهربائية : $P = e.I$

الناقل الأومي (R) يحول الطاقة الكهربائية إلى طاقة حرارية مقدارها RI^2 .
المقاومة الداخلية للمولد هي بدورها تستهلك استطاعة مقدارها rI^2 (هذا ما يفسر سخونة المولد). في حين يستهلك المحرك M (أو آخذة أو مولد مركب على التضاد بشرط أن

تكون $e' < e$) استطاعة $e'I$ و التي يحولها إلى طاقة ميكانيكية، و مقاومته الداخلية تستهلك استطاعة تساوي $r'I^2$ (بسبب وجود نواقل أومية بداخل المولد).
استنادا إلى قانون انحفاظ الطاقة فإن الطاقة المنتجة تساوي الطاقة المستهلكة:

$$eI = e'I + RI^2 + rI^2 + r'I^2$$

و منه فإن شدة التيار الذي يجتاز الدارة تساوي:

$$I = \frac{e - e'}{R + r + r'}$$

و في الحالة العامة إذا رمزنا بـ للمقاومات الداخلية و بـ R للمقاومات

$$(22.3) \quad I = \frac{\sum e}{\sum r + \sum R}$$

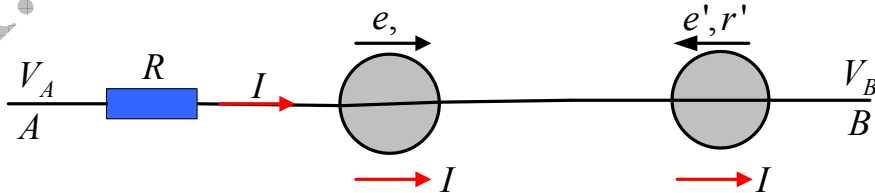
الخارجية فإن:

شدة التيار الكهربائي في دارة كهربائية تساوي المجموع الجبري للقوى المحركة الكهربائية مقسومة على مجموع المقاومات. تسمى هذه العلاقة بمعادلة الدارة الكهربائية.
اصطلاح: عند تطبيق العلاقة (22.3)، نختار اتجاهها معينا حول الدارة و نعتبره موجبا؛ تكون التيارات و القوى المحركة الكهربائية موجبة إذا كانت في نفس الاتجاه المختار، و تكون سالبة عكس ذلك.

2/ فرق الكمون بين نقطتين من دارة (قانون أوم المعمم)

(différence de potentiel entre deux points d'un circuit électrique)

يمثل الشكل 13.3 جزءا من دارة كهربائية يجتازها تيار شدته I ، يجريه منبع غير ظاهر في الشكل، و الذي يزود هذا الجزء AB باستطاعة $P = UI$ ، حيث U يمثل فرق الكمون بين النقطتين A و B .



الشكل 13.3 : فرق الكمون بين نقطتين

$R = \sum R_i$ ترمز إلى **المقاومة الكلية** للجزء AB (نواقل أومية ، أسلاك توصيل ، المقاومات الداخلية للمولدات أو الآخذات....).

$e = \sum e_i$ ترمز إلى **المجموع الجبري** لكل القوى المحركة الكهربائية و القوى المحركة الكهربائية العكسية.

الاستطاعة الناتجة بين النقطتين A و B تساوي :

$$UI + (\sum e_i).I$$

في المقاومات الاستطاعة المستهلكة هي:

$$(\sum R_i).I^2$$

إذا ساوينا بين الاستطاعتين الناتجة و المستهلكة وفق انحفاظ الطاقة فإن:

$$UI + (\sum e_i).I = (\sum R_i).I^2$$

و في الأخير نحصل على ما يسمى بالقانون المعمم لأوم:

$$(23.3) \quad V_A - V_B = U = (\sum R_i).I - \sum e_i$$

اصطلاح: إذا اخترنا الاتجاه من A نحو B موجبا، و كانت التيارات و القوى المحركة الكهربائية بنفس الاتجاه فإن إشاراتها تكون موجبة، أما إذا كانت بعكسه فإشاراتها سالبة.

إذا كانت النقطة A منطبقة على النقطة B فإن:

$$(24.3) \quad (\sum R).I - \sum e = 0$$

فرق الكمون بين طرفي مولد التوتر:

(différence de potentiel aux bornes d'un générateur de tension)

يمثل الشكل 14.3 مولدا للتوتر باحتمالين:

أ/ اتجاه التيار باتجاه القوة المحركة الكهربائية، أي أن التيار يخرج من القطب الموجب للمولد.

ب/ اتجاه التيار بعكس اتجاه القوة المحركة الكهربائية، أي أن التيار يخرج من القطب السالب للمولد.

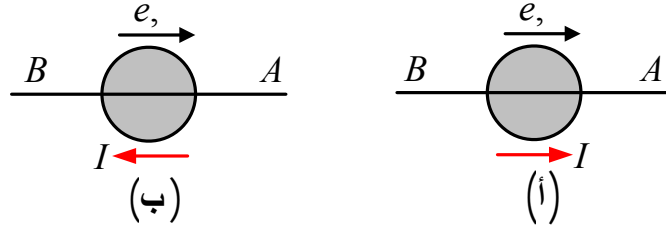
نستخدم على الجزء من الدارة العلاقة العامة: $U_{AB} = \sum R_i I - \sum e_i$ ، و نختار الاتجاه الموجب من A نحو B :

الشكل 14.3 (أ): e و I معاكستان للاتجاه الموجب المختار، إذن هما سالبان:

$$U_{AB} = \sum R_i I - \sum e_i = -rI - (-e)$$

$$(25.3) \quad U_{AB} = e - rI$$

هذه العبارة تمثل فرق الكمون بين طرفي مولد.



الشكل 14.3: فرق الكمون بين طرفي مولد

الشكل 14.3 (ب): e تعاكس الاتجاه الموجب المختار ، إذن هي سالبة ، بينما I يوافق الاتجاه الموجب المختار و عليه فهو موجب:

$$U_{AB} = \sum R_i I - \sum e_i = rI - (-e)$$

(26.3)

$$U_{AB} = rI + e$$

هذه العبارة الأخيرة تتناسب أيضا فرق الكمون بين طرفي آخذه حيث e هي قوتها المحركة الكهربائية العكسية. هذا ليس غريبا لأن المولد الذي يدخل التيار من قطبه الموجب يسلك سلوك آخذه.

3/ ربط المولدات: (groupement de générateurs)

يمكن لدارة كهربائية أن تضم أكثر من مولد.

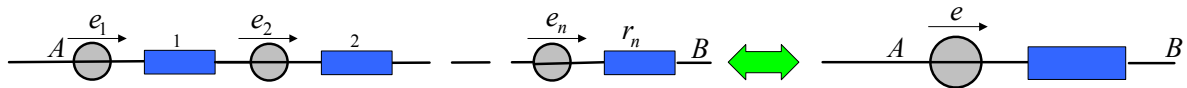
1/ مولدات التوتر: كل مولد يتميز بقوة محرركة كهربائية e_i و مقاومة داخلية r_i .

الربط على التسلسل: الشكل 15.3

في هذه الحالة القوة المحركة الكهربائية للمولد المكافئ تساوي المجموع الجبري للقوى المحركة الكهربائية للمولدات المربوطة، و مقاومته الداخلية تساوي المجموع الحسابي لكل المقاومات الداخلية.

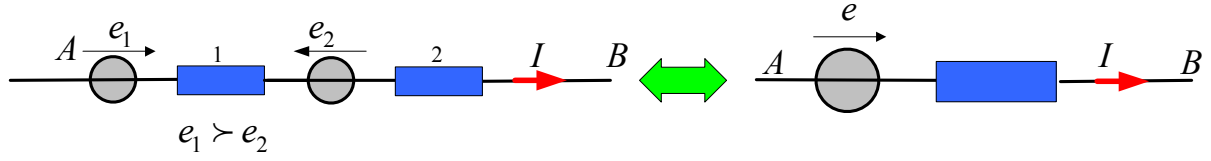
(27.3)

$$r = \sum_i r_i \quad e = \sum_i e_i$$



الشكل 15.3: ربط مولدات توتر على التسلسل

الشكل 16.3: الربط على التضاد:



الشكل 16.3: ربط مولدات توتر على التضاد

نعتبر الآخذة (محرك مثلاً) كمولد مربوط على التضاد مع المولد الفعلي، و بالعكس المولد مربوط على التضاد يقوم بدور محرك. المولد ذو القوة المحركة الكهربائية الأكبر هو الذي يفرض نفسه كمولد:

$$(28.3) \quad e_1 > e_2 \Rightarrow e = e_1 - e_2$$

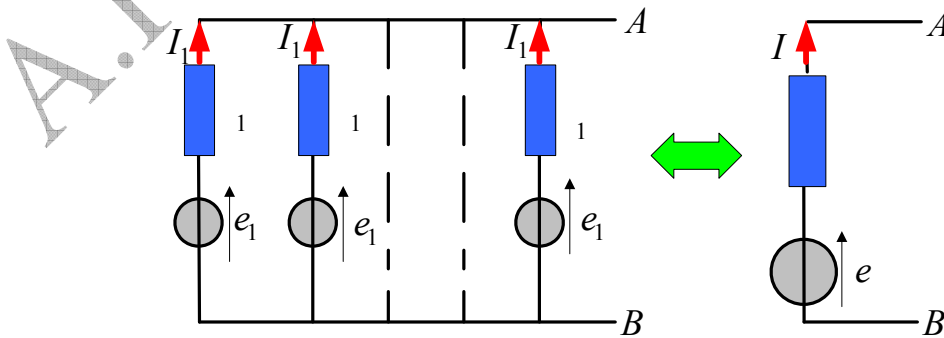
$$(29.3) \quad r = r_1 + r_2$$

الشكل 17.3: الربط على التفرع:

يمنع ربط منبعين للتوتر مختلفي التوتر على التفرع. لا بد أن تكون كل المولدات في هذه الحالة متماثلة.

في هذه الحالة القوة المحركة الكهربائية للمولد المكافئ تساوي القوة المحركة الكهربائية لمولد واحد، و مقلوب مقاومته الداخلية يساوي مجموع المقالب لكل المقاومات الداخلية.

$$(30.3) \quad I = nI_1 \quad e = e_1 \quad \frac{1}{r} = \sum_i \frac{1}{r_i} = \frac{n}{r_1}$$

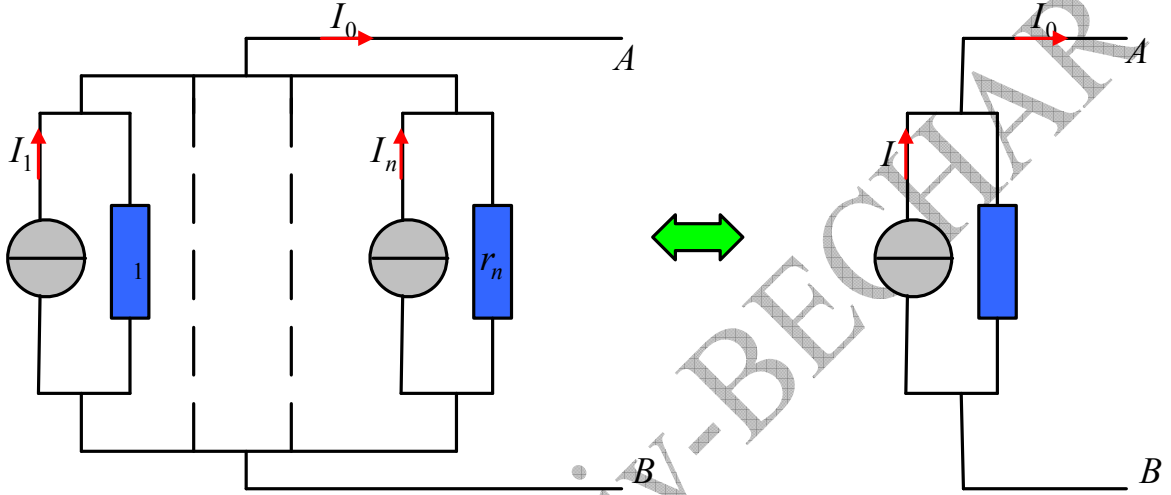


الشكل 17.3: ربط مولدات توتر على التفرع

ب/ مولدات التيار:**الرابط على التفرع: الشكل 18.3**

$$(31.3) \quad \frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots + \frac{1}{r_n}$$

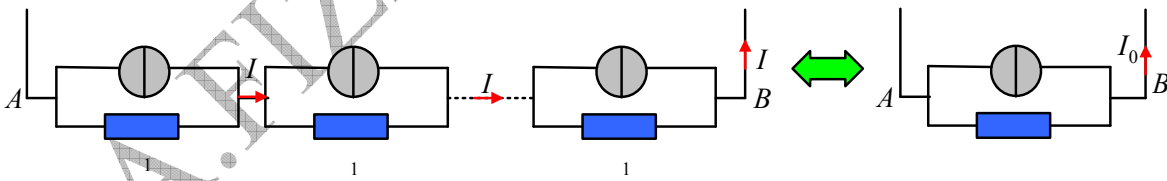
$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$



الشكل 18.3: ربط مولدات تيار على التفرع

الرابط على التسلسل: الشكل 19.3

كل المصادر يجب أن تكون متماثلة. يمنع ربط منبعين للتيار يجريان تيارين مختلفي الشدة.



الشكل 19.3: ربط مولدات التيار على التسلسل

$$(32.3) \quad \frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots + \frac{1}{r_n}$$

$$I_0 = I$$

$$V_A - V_B = V_1 + V_2 + \dots + V_n$$

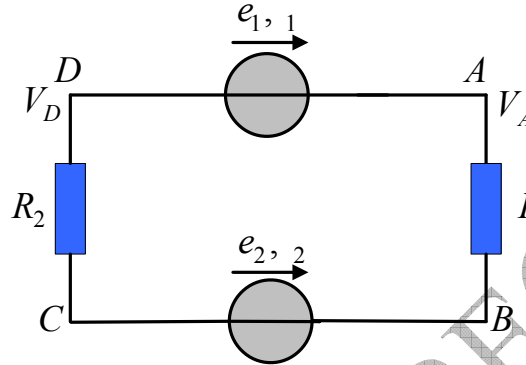
لتوضيح كيفية تطبيق هذه القوانين نورد في ما يلي بعض الأمثلة التطبيقية:

المثال 2.3: نعتبر الدارة المبينة على الشكل 20.3

$e_1 = 12V$, $r_1 = 0,2\Omega$, $e_2 = 6V$, $r_2 = 0,1\Omega$, $R_1 = 1,4\Omega$, $R_2 = 2,3\Omega$
أوجد:

ا/ اتجاه و شدة التيار في الدارة الكهربائية،

ب/ فرق الكمون بين النقطتين A و C .



الشكل 20.3

الحل:

ا/ بما أن $e_1 > e_2$ نستنتج أن اتجاه التيار باتجاه عقارب الساعة.

بما أن المولد الثاني مركب على التضاد مع المولد الأول، فإن قوته المحركة الكهربائية

سالبة. نحسب الشدة باستعمال العلاقة: $I = \frac{\sum e}{\sum r}$

$$I = \frac{12 - 6}{0,1 + 0,2 + 1,4 + 2,3} \Rightarrow \boxed{I = 1,5A}$$

ب/ لإيجاد فرق الكمون بين النقطتين A و C نستعمل العلاقة:

$$V_A - V_C = U_{AC} = (\sum R_i) \cdot I - \sum e_i$$

و يتم هذا باختيار أحد المسلكين ABC أو ADC :

$$V_A - V_C = U_{AC} = \underbrace{(0,1 + 1,4) \times 1,5}_{\sum R_i \cdot I} - \underbrace{(-6)}_{\sum e_i} \Rightarrow \boxed{U_{AC} = 8,25V} \quad \text{وفق المسلك } ABC$$

$$V_A - V_C = U_{AC} = \underbrace{(0,2 + 2,3) \times -1,5}_{\sum R_i \cdot I} - \underbrace{(-12)}_{\sum e_i} \Rightarrow \boxed{U_{AC} = 8,25V} \quad \text{وفق المسلك } ADC$$

المثال 3.3:

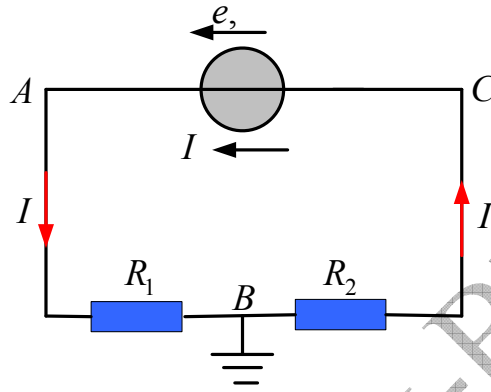
إن جميع الدارات الكهربائية المستعملة في حياتنا اليومية ، مثل دارات الأجهزة

الإلكترونية ، تحتوي على نقطة واحدة أو عدة نقاط موصلة بالأرض يكون الكمون فيها

صفرا. و ذلك لأن الأرض جسم ناقل كبير جدا لا يتأثر كمونها بتوصيلها بالنواقل المشحونة المعتادة. لذلك يعتبر كمون الأرض صفرا دائما. وكمون أية نقطة أخرى في الدارة يحسب بالنسبة لهذه النقاط و التي تعتبر كمرجع للكمون.

في الدارة المبينة على الشكل 21.3 وصلت النقطة B بالأرض. المطلوب حساب الكمون في النقطتين A و C .

تطبيق عددي: $e = 10V$, $r = 1\Omega$, $R_1 = 3\Omega$, $R_2 = 1\Omega$



الشكل 21.3

الحل:

نحسب أولا الشدة باستعمال العلاقة : $I = \frac{\sum e}{\sum R}$

$$I = \frac{10}{5} \Rightarrow \boxed{I = 2A}$$

حساب V_{AB} و V_{BC} :

$$V_{AB} = R_1 \cdot I \Rightarrow V_{AB} = 3 \cdot 2 = 6V$$

$$V_{BC} = R_2 \cdot I \Rightarrow V_{BC} = 1 \cdot 2 = 2V$$

و بما أن $V_B = 0$ فإن :

$$V_{BC} = V_B - V_C = 2 \Rightarrow \boxed{V_C = -2V} \quad \text{و} \quad V_{AB} = V_A - V_B = 6 \Rightarrow \boxed{V_A = 6V}$$

يمكننا التأكد من هذه النتيجة بحساب فرق الكمون بين طرفي المولد بالذهاب من A إلى C عبر المولد:

$$V_A - V_C = U_{AC} = r \cdot I - \sum e_i \Rightarrow V_A - V_C = 1 \cdot (-2) - (-10) \Rightarrow \boxed{V_A - V_C = 8V}$$

4/ قانونا كيرشوف: (lois de Kirchhoff)

ا/ انحفاظ الشحنة: (قانون العقد) (conservation de la charge ou loi des noeuds)

في عقدة من دائرة كهربائية مجموع شدّات التيارات الداخلة يساوي مجموع شدّات التيارات الخارجة:

$$(33.3) \quad \boxed{\sum I_s = \sum I_e}$$

هذا يعني أن الشحنات لا تتراكم ، و تتسرب عند عقدة في الشبكة أي أنها تخضع لقانون انحفاظ الشحنة.

ب/ انحفاظ الطاقة: (قانون العروات) (conservation de l'énergie ou loi des mailles)

في عروة k من دائرة كهربائية، المجموع الجبري لحاصل جداء المقاومة في التيار يساوي المجموع الجبري للقوى المحركة الكهربائية $(\sum_{k=1}^n R_k \cdot I_k)$.

$$(34.3) \quad \boxed{\sum_{k=1}^n e_k = \sum_{k=1}^n R_k \cdot I_k}$$

و هذه القاعدة ترجمة لقانون انحفاظ الطاقة و هي مطابقة للعلاقة (24.3):

نصيحة عملية: عند استعمال قانوني كيرشوف ينصح إتباع الخطوات التالية:

✍ عند استعمال القانون الأول المجموع الحسابي لشدّات التيارات الداخلة للعقدة يساوي المجموع الحسابي لشدّات التيارات الخارجة منها.

✍ عند استعمال القانون الثاني اختر اتجاهها موجبا حول العروة. إن جميع التيارات و القوى المحركة الكهربائية، إذا كانت في هذا الاتجاه تكون موجبة، و التي بعكسه سالبة. نعتبر اتجاه e موجبا عندما ندخل من القطب السالب للمولد و نخرج من قطبه الموجب و سالبا بالعكس.

في حالة الشبكات المعقدة ، من الصعب معرفة عدد المعادلات المستقلة ، لاستنتاج جميع المجاهيل. لذلك ينصح استخدام القاعدتين التاليتين:

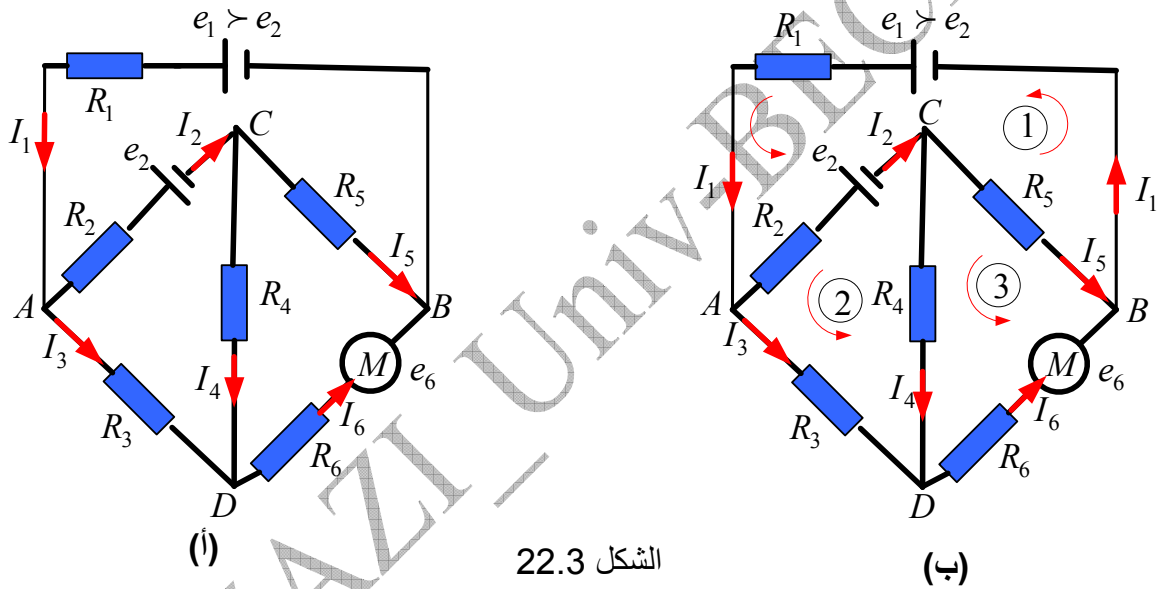
✍ إذا كان عدد العقد في الشبكة الكهربائية يساوي m ، فقانون العقد ينطبق على $m-1$ عقدة. و لنا كامل الحرية في اختيار العقد.

✍️ افصل الشبكة إلى مكوناتها من العروات المستقلة ، أي لها على الأقل فرع غير مشترك مع عروة أخرى ، و اعتبر كل عروة و كأنها قائمة بذاتها و طبق عليها القانون الثاني لكيرشوف.

نوضح هذه الخطوات في الأمثلة التالية.

المثال 4.3:

يمثل الشكل 22.3 (أ) دائرة كهربائية مغلقة. نقترح تطبيق قانوني كيرشوف بكتابة المعادلات المناسبة. المقاومات الداخلية للمولدات و كذا للمحرك M مهمة.



الشكل 22.3

الحل:

تطبيق القانون الأول: هناك 4 عقد تقابلها 4 معادلات:

$$I_1 = I_2 + I_3 : \text{في العقدة } A$$

$$I_1 = I_5 + I_6 : \text{في العقدة } B$$

$$I_2 = I_5 + I_4 : \text{في العقدة } C$$

$$I_6 = I_4 + I_3 : \text{في العقدة } D$$

تطبيق القانون الثاني: هناك 3 عروات مستقلة. بعد اختيار الاتجاهات كما هو مبين

على الشكل 23.3 (ب)، يمكن كتابة مختلف المعادلات:

$$\text{العروة 1: } e_1 - e_2 = R_1 I_1 + R_2 I_2 + R_5 I_5$$

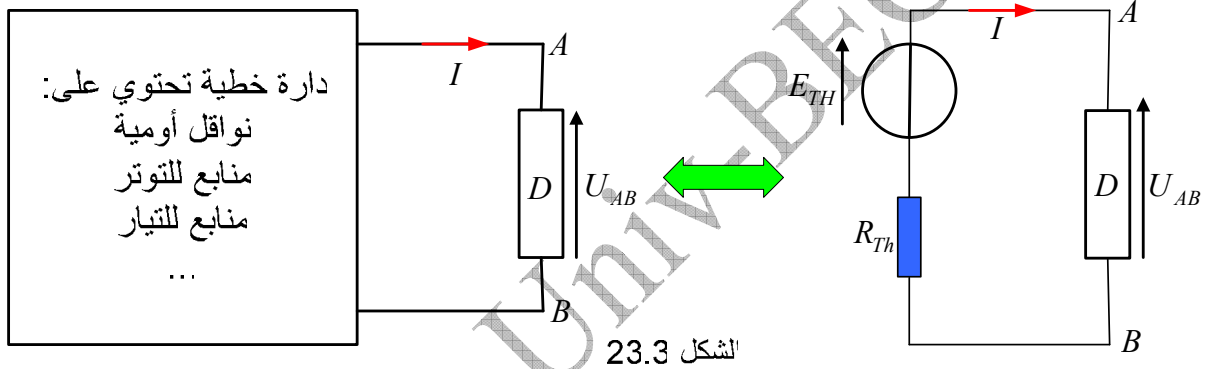
$$\text{العروة 2: } e_2 = R_3 I_3 - R_4 I_4 - R_2 I_2$$

$$\text{العروة 3: } -e_6 = R_6 I_6 + R_4 I_4 - R_5 I_5$$

ملاحظة: العروتان $(e_1 \rightarrow A \rightarrow D \rightarrow B \rightarrow e_1)$ و $(A \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow A)$ لا فائدة من اعتبارهما لأنهما غير مستقلتين.

5/ نظرية تيفنا: (Théorème de Thévenin)

النص: كل شبكة خطية محصورة بين طرفين A و B ، مهما كانت معقدة، تكافئ مولدا وحيدا قوته المحركة الكهربائية (E_{Th}) و مقاومته الداخلية (R_{Th}) ، الشكل 23.3



الشكل 23.3

بحيث:

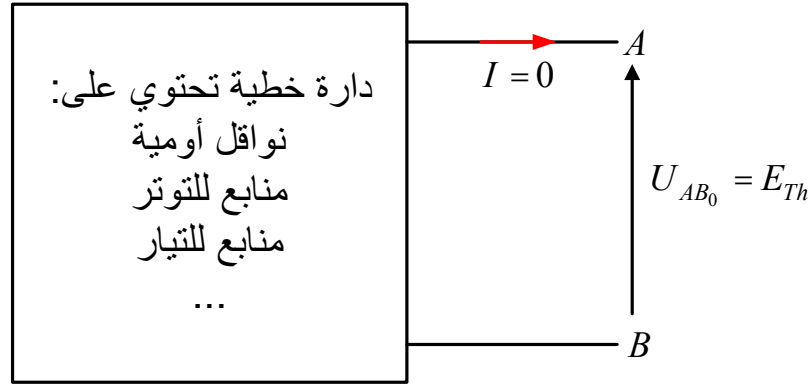
$U_{AB_0} = E_{Th}$: تمثل القوة المحركة الكهربائية للمولد المكافئ (نسميه مولد تيفنا) و تساوي فرق الكمون الموجود بين الطرفين A و B حينما تكون الدارة مفتوحة، أي التوصيل بين A و B مقطوعا.

$R_{Th} = R_{eq}$: تمثل المقاومة المكافئة للدائرة حين ننظر إليها من الطرفين A و B (التوصيل بين A و B محذوف) و نطفي كل منابع التوتر و التيار الكهربائيين.

👉 **كيفية حساب مميزتي مولد تيفنا:**

👉 **حساب E_{Th} :** نفتح الدارة بين A و B بحذف ثنائي القطب D ثم نحسب

$$U_{AB_0} = E_{Th} \text{ كما في الشكل 24.3.}$$



الشكل 24.3

👉 **حساب R_{Th} :** نحذف ثنائي القطب D و نطفي كل منابع التوتر و التيار و نرسم شكلا جديدا للدائرة لا يحتوي إلا على المقاومات ، ثم نحسب المقاومة المكافئة R_{Th} لكل الدارة الواقعة بين A و B .

👉 إذا كان ثنائي القطب D عبارة عن مقاومة R فإن شدة التيار العابر لثنائي القطب

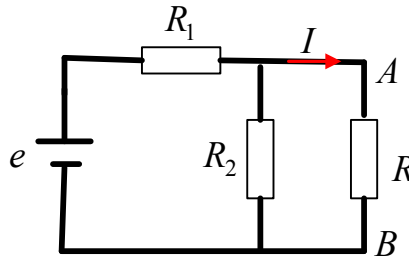
$$I = \frac{E_{Th}}{R + R_{Th}} \quad \text{تساوي:}$$

👉 **ملاحظة:** يمكن أن يحتوي الفرع AB على أكثر من ثنائي قطب.

نوضح كيفية تطبيق هذه النظرية في الأمثلة التالية:

المثال 5.3:

لتكن الدارة المبينة على الشكل 25.3. نقترح إيجاد R_{Th} ، E_{Th} ثم استنتاج شدة التيار I الكهربائي الذي يغذي المقاومة R و كذا فرق الكمون بين طرفيها.

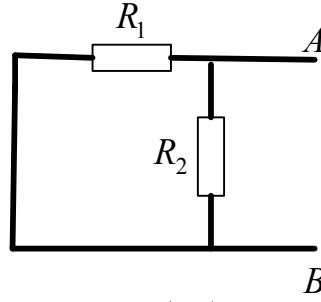


الشكل 25.3

الحل:

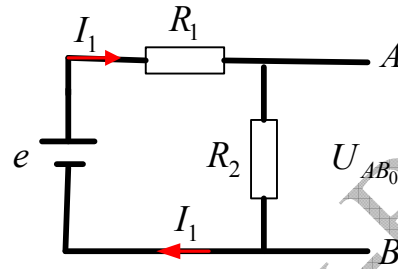
نطفي منابع التوتر و نحسب المقاومة المكافئة R_{Th} ، بحذف الفرع AB (الشكل 26.3):
 R_1 و R_2 مركبتان على التفرع:

$$R_{Th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$



الشكل 26.3

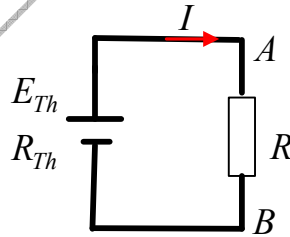
لحساب E_{Th} نعتبر الدارة مفتوحة و نحذف المقاومة بين A و B (الشكل 27.3):



الشكل 27.3

$$\left. \begin{aligned} E_{Th} = U_{AB_0} = V_A - V_B = e - R_1 I_1 \\ V_A - V_B = R_2 I_1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow E_{Th} = U_{AB_0} = R_2 \frac{e}{R_1 + R_2}$$

لحساب شدة التيار I ، نعتبر مولد تيفنا المكافئ مغذيا الفرع AB (الشكل 28.3)



الشكل 28.3

$$U_{AB} = RI = E_{Th} - R_{Th} I \Rightarrow I = \frac{E_{Th}}{R + R_{Th}}$$

و بتعويض E_{Th} و R_{Th} نجد عبارة الشدة:

$$I = \frac{R_2 e}{R_1 R_2 + R R_1 + R R_2}$$

تعيين فرق الكمون بين النقطتين A و B :

$$U_{AB} = RI \Rightarrow U_{AB} = \frac{RR_2}{R_1R_2 + RR_1 + RR_2} e$$

المثال 6.3:

بين حرفيا و عدديا أنه يمكن تحويل مولد تيار إلى مولد توتر.

الحل:

يبين الشكل 29.3 تركيبين متكافئين، أي أن شدة التيار المنتج في كل من الدارتين هي نفسها و التوتر بين طرفي كل من الدارتين هو نفسه أيضا. النتيجة هي أنه يمكن تحويل مولد للتيار إلى مولد توتر.

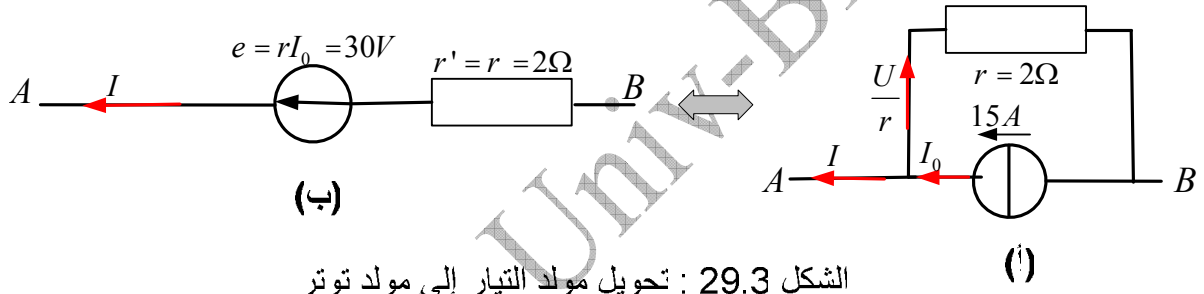
$$\text{من الشكل (أ) يمكن استنتاج: (1) } I = I_0 - \frac{U}{r}$$

$$\text{من الشكل يمكن استنتاج: (2) } U = V_A - V_B = e - r'I \Rightarrow I = \frac{e}{r'} - \frac{U}{r'}$$

بمطابقة المعادلتين (1) و (2) نتوصل إلى مميزتي مولد التوتر بدلالة مميزتي مولد التيار:

$$r' = r, \quad r' = 2\Omega$$

$$e = rI_0, \quad e = 2 \times 15 = 30V$$



الشكل 29.3 : تحويل مولد التيار إلى مولد توتر