الفصل الثالث

الشحنة، والتيار، والجهد، والقدرة (الاستطاعة) والطاقة
Charge, Current, Voltage, Power and Energy

(٣.١) الشحنة
CHARGE

تحمل البروتونات و الإلكترونات نوعين من الشحنات موجبة وسالبة على الترتيب. إن الشحنة السالبة المحمولة من قبل إلكترون، q_e، هي أصغر مقدار موجود للشحنة ويتم قياسه بوحدات تدعى الكولومب (C).

$$q_e = -1.602 \; x \quad 10^{-19} \, C$$

يتم استخدام الرمز $q(t)$ لتمثيل الشحنة التي تتغير مع الزمن، و Q للشحنة السالبة. إن الشحنة المحمولة من قبل بروتون عكس شحنة الإلكترون.

مثال (٣.١):

ما هي شحنة ٣×١٠^١٥ غرام من الإلكترونات؟

الحل:

$$Q = 3x10^{-15} g \, x \frac{1 kg}{10^3 g} x \frac{1 \; electron}{9.1095x10^{-31} kg} x \frac{-1.60219x10^{-19} C}{electron} = -5.27643x10^{-7} \, C$$

(٣.٢) التيار
CURRENT

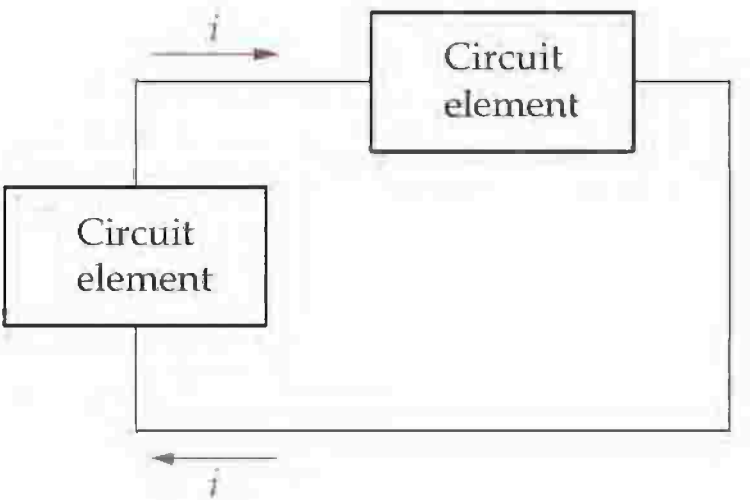
يتم تعريف التيار الكهربائي، $i(t)$، بأنه التغير في كمية الشحنة التي تمر خلال نقطة أو منطقة معينة في فترة زمنية محددة. ويتم قياس التيار بالأمبير (A). وحسب التعريف فإن أمبيراً واحداً يساوي كولومباً واحداً/الثانية (C/s).

$$i(t) = \frac{dq}{dt} \qquad (٣.١)$$

و

$$q(t) = \int_{t_0}^{t} i(\lambda)\, d\lambda + q(t_0) \qquad (٣.٢)$$

ويتعلق التيار المحدد بالمعادلة رقم (٣.١) باتجاه التدفق كما هو مبين في الدارة في الشكل رقم (٣.١).



الشكل رقم (٣.١). دارة كهربائية بسيطة تبين تياراً يتدفق في حلقة مغلقة.

مثال (٣.٢):

افترض أن التيار التالي يتدفق في الشكل رقم (٣.١):

$$i(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 3e^{-100t}\ A & t \geq 0 \end{cases}$$

أوجد الشحنة الإجمالية.

الحل:

$$Q = \int_{-\infty}^{\infty} i dt = \int_{0}^{\infty} e^{-100t}\, dt = -\frac{3}{100}\, e^{-100t}\ |_{t=0}^{\infty} = 0.03\ C$$

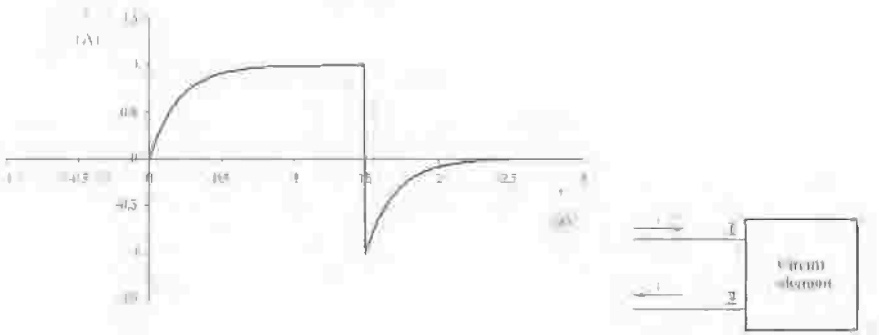
وبالنظر إلى الشكل رقم (٣.١) يكون التيار موجباً إذا:

(أ) تحركت شحنة موجبة في اتجاه السهم

(ب) تحركت شحنة سالبة في عكس اتجاه السهم

ونظراً لأن هذين الاحتمالين ينتجان نفس الخرج، فليس هناك حاجة للتفكير أيهما مسؤول عن التيار. يتم حمل التيار، في الدارات الكهربائية، من قبل الإلكترونات في النواقل المعدنية.

عادة ما يكون التيار تابعاً للزمن، كما هو مُعطى في المعادلة رقم (٣.١). خذ في الاعتبار الشكل رقم (٣.٢) حيث يدخل التيار الطرف (النهاية) ١ في الدارة بجهة اليمين. في الفترة الزمنية من ٠ - ١.٥ ثانية يكون التيار موجباً ويدخل الطرف ١. وفي الفترة الزمنية من ١.٥ - ٣ ثانية يكون التيار سالباً ويدخل الطرف ٢ بقيمة موجبة.نشير عادة إلى التيار المستمر بالتيار DC، ونرمز له بحرف كبير مثل I مشيراً إلى أنه لا يتغير مع الزمن. ونرمز للتيار المتغير بالزمن بحرف صغير مائل مثل *i(t)* أو مجرد *i*.



الشكل رقم (٣.٢). (يسار) عينة لشكل موجة تيار. (يمين) عنصر دارة مع تيار يدخل من الطرف ١ ويخرج من الطرف ٢. إن لدى عناصر الدارات غير الفعالة (الخاملة) طرفين مع علاقة معروفة للجهد–التيار. وتشمل أمثلة عناصر الدارات غير الفعالة على المقاومات، والمكثفات، والملفات.

(٣.٢.١) قانون كيرشوف للتيار Kirchhoff's Current Law

يمكن للتيار أن يتدفق في دارة مغلقة فقط، كما هو مبين في الشكل رقم (٣.١). ليس هناك ضياع للتيار عندما يتدفق في الدارة لأنه لا يمكن تراكم الشحنة النهائية في عنصر دارة ويجب المحافظة على هذه الشحنة وعدم فناؤها. ومهما يكن فإن التيار الذي يدخل أحد الأطراف يجب أن يخرج من الطرف الآخر. ونظراً لأنه لا يمكن توليد الشحنة فيجب المحافظة عليها؛ لأن مجموع التيارات عند أي عقدة، وهي النقطة التي يكون فيها لعناصر الدارة اتصالان مشتركان أو أكثر، يجب أن يساوي الصفر بحيث لا تتراكم شحنة نهائية. إن هذا المبدأ معروف بقانون كيرشوف للتيار (KCL) ويُعطى كما يلي:

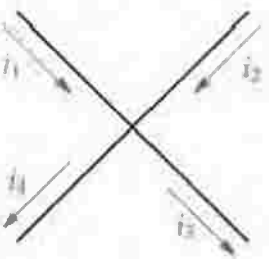
$$\sum_{n=1}^{N} i_n(t) = 0 \qquad (٣.٣)$$

حيث إن هناك N تياراً خارجاً من العقدة. وبالنظر إلى الشكل رقم (٣.٣) فإن استخدام المعادلة رقم (٣.٣) وتطبيق قانون كيرشوف للتيار (KCL) على التيارات الخارجة من العقدة يعطي:

$$-i_1 - i_2 + i_4 + i_3 = 0$$

تتم كتابة المعادلة السابقة بشكل مكافئ للتيارات الداخلة إلى العقدة كما يلي:

$$i_1 + i_2 - i_4 - i_3 = 0$$



الشكل رقم (٣.٣). عقدة بأربع تيارات.

ينبغي أن يكون واضحاً أن تطبيق KCL هو لجميع التيارات سواء كانت جميعها خارجة من العقدة أو جميعها داخلة إلى العقدة.

في وصف الدارة، فإننا نحدد خصائصها من خلال المصطلحات "عقدة"، و"فرع"، و "مسار"، و "مسار مغلق" و "شبكة" على النحو التالي.

- العقدة: نقطة يكون فيها لعنصرين أو أكثر من عناصر الدارة اتصال مشترك.
- الفرع: عنصر دارة أو مجموعة متصلة من عناصر الدارة. تقوم المجموعة المتصلة من عناصر الدارة عادة بوصل العقد معاً.
- المسار: مجموعة متصلة من عناصر الدارة التي لا يتم فيها تكرار شيء.

• المسار المغلق: المسار الذي يبدأ وينتهي في نفس العقدة.

• الشبكة: مسار مغلق لا يحتوي على أي مسارات أخرى مغلقة داخلها.

• العقدة الأساسية: نقطة يكون فيها لثلاث عناصر أو أكثر من عناصر الدارة اتصال مشترك.

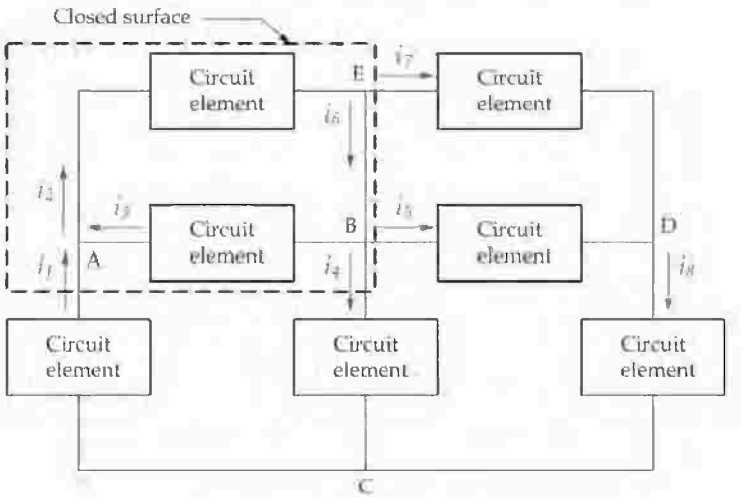
• الفرع الأساسي: فرع يربط عقدتين أساسيتين.

يوجد في الشكل رقم (٣.٤) خمسة عقد، A و B و C وD و E، وكلها عقد أساسية. يتم تطبيق قانون كيرشوف للتيار على كل عقدة من العقد على النحو التالي:

$$
\begin{aligned}
&Node\ A: -i_1 + i_2 - i_3 = 0\\
&Node\ B: i_3 + i_4 + i_5 - i_6 = 0\\
&Node\ C: i_1 - i_4 - i_8 = 0\\
&Node\ D: i_7 - i_5 - i_8 = 0\\
&Node\ E: -i_2 + i_6 + i_7 = 0
\end{aligned}
$$

ينطبق قانون كيرشوف للتيار أيضاً على أي سطح مغلق يحيط بجزء من الدارة. ومن المفهوم أن السطح المغلق لا يتقاطع مع أي عنصر من عناصر الدارة. وبالنظر إلى السطح المغلق المرسوم بخطوط متقطعة في الشكل رقم (٣.٤). يعطي قانون كيرشوف للتيار المُطبَّق على هذا السطح المغلق المعادلة التالية.

$$-i_1 + i_4 + i_5 + i_7 = 0$$

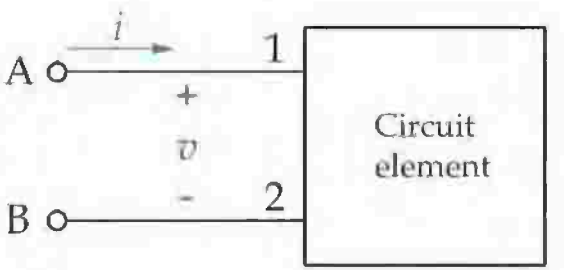


الشكل رقم (٣.٤). دارة ذات سطح مغلق.

(٣.٣) الجهد
VOLTAGE

يمثل الجهد العمل لكل وحدة شحنة والمرافق لتحريك شحنة بين نقطتين (A و B في الشكل رقم(٣.٥))، ويُعطى كما يلي:

$$v=\frac{dw}{dq} \qquad (٣.٤)$$



الشكل رقم (٣.٥). مبدأ الجهد والتيار.

إن وحدة قياس الجهد هي الفولت (V). ويُشار إلى منبع الجهد الثابت ذي التيار المستمر (DC) بـ V بينما يتم الإشارة إلى الجهد المتغير مع الزمن بـ $v(t)$، أو مجرد v. إن الجهد v في الشكل رقم (٣.٥) بين النقطتين (A و B) هو كمية الطاقة المطلوبة لتحريك الشحنة من النقطة A إلى النقطة B.

(٣.٣.١) قانون كيرشوف للجهد Kirchhoff 's Voltage Law

ينص قانون كيرشوف للجهد (KVL) على أن مجموع جميع الجهود في مسار مغلق يساوي الصفر، أو

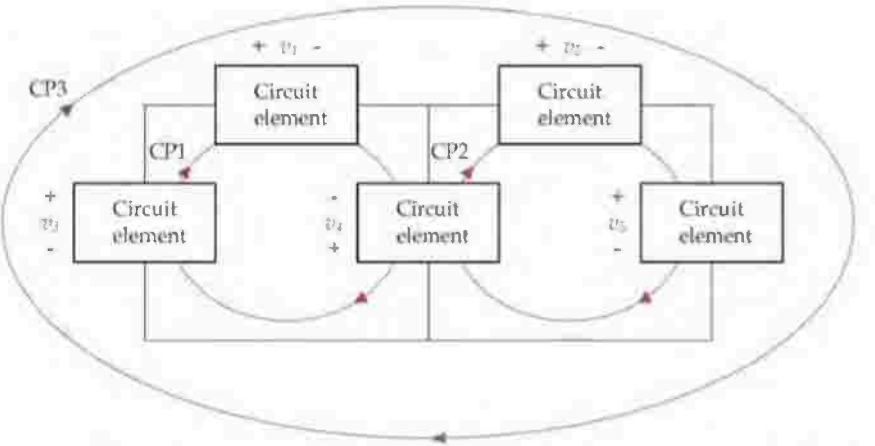
$$\sum_{n=1}^{N} v_n(t) = 0 \qquad (٣.٥)$$

حيث إن هناك N هبوطاً للجهد مُحدَّد حول المسار المغلق، فإن $v_n(t)$ تشير إلى هبوطات الجهد الفردية. إن الإشارة لكل هبوط جهد في المعادلة رقم (٣.٥) هي أول إشارة يتم مصادفتها عند التحرك حول المسار المغلق.

بالنظر إلى الدارة في الشكل رقم (٣.٦) مع جهد v محدد لكل عنصر دارة، ومع قطبية مُعطاة، وثلاث مسارات مغلقة CP1 و CP2 و CP3. يُعطى قانون كيرشوف للجهد لكل مسار مغلق من هذه المسارات كما يلي:

$$CP1: -v_3 + v_1 - v_4 = 0$$
$$CP2: v_4 + v_2 + v_5 = 0$$
$$CP3: -v_3 + v_1 + v_2 + v_5 = 0$$

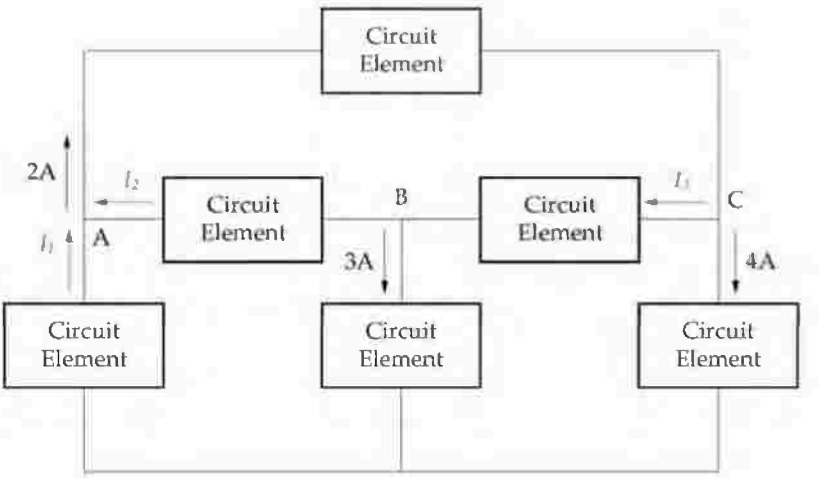
يتم تطبيق قوانين كيرشوف في تحليل الدارة الكهربائية لتحديد الجهود و التيارات غير المعروفة. إن لكل متغير غير معروف معادلته المستقلة. ولحل المجاهيل باستخدام برنامج MATLAB، فإننا نقوم بإنشاء تمثيل مصفوفي لمجموعة من المعادلات وحلها.ويتم عرض هذه الطريقة في العديد من الأمثلة في هذا الكتاب.



الشكل رقم (٣.٦). دارة توضح قانون كيرشوف للجهد. ويتم تحديد المسارات المغلقة بـ CP1 و CP2 و CP3

مثال (٣.٣):

المطلوب إيجاد I_1 و I_2 و I_3 للدارة التالية:



الحل: نقوم بتطبيق قانون كيرشوف للتيار (KCL) أولاً على العقدة C ثم على B وأخيراً على A.

$$Node\ C: -2 + I_3 + 4 = 0; \quad I_3 = -2A$$
$$Node\ B: I_2 + 3 - I_3 = 0; \quad I_2 = I_3 - 3 = -5A$$
$$Node\ A: -I_1 - I_2 + 2 = 0; \quad I_1 = 2 - I_2 = 7A$$

(٣.٤) القدرة (الاستطاعة) والطاقة
POWER AND ENERGY

إن القدرة هي معدل استهلاك الطاقة وتُعطى على النحو التالي:

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq}\frac{dq}{dt} = vi \qquad (٣.٦)$$

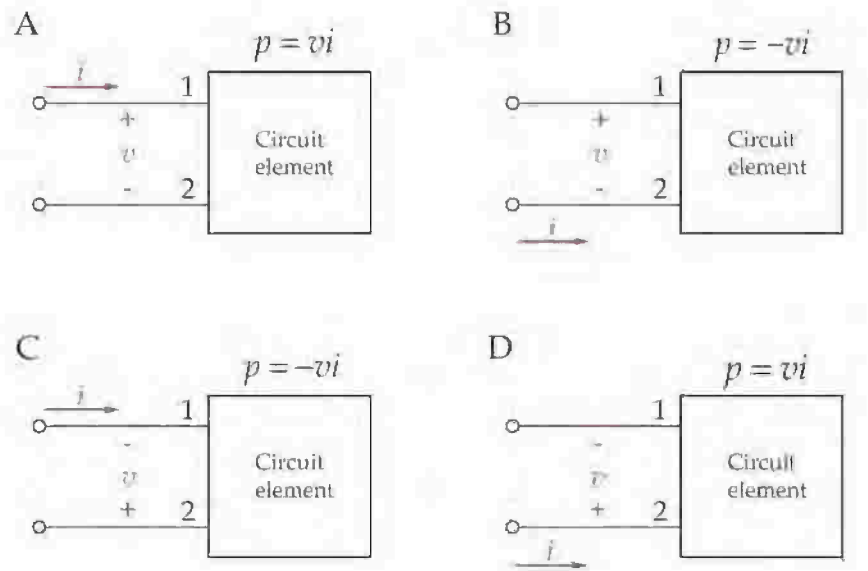
حيث p هي القدرة مُقاسة بالوات (W)، و w هي الطاقة مُقاسة بالجول (J). يتم تحديد القدرة عادة من خلال ضرب الجهد على طرفي عنصر دارة في التيار المار خلال هذا العنصر. وحسب المبدأ نفترض أن القيمة الموجبة للقدرة تشير إلى أنه يتم تقديم القدرة (أو يتم امتصاصها أو استهلاكها) من قبل عنصر الدارة. وتشير القيمة السالبة للقدرة إلى أنه يتم استخراج القدرة أو توليدها من قبل عنصر الدارة، أي بطارية.

يوضح الشكل رقم (٣.٧) الحالات الأربع الممكنة لتشكيل تيار وجهد عنصر الدارة. ووفقاً للمبدأ، إذا كان كل من i و v موجباً، مع السهم والقطبية المبينة في الشكل رقم (A.٣.٧)، فإنه يتم امتصاص الطاقة (إما ضياعها عن طريق الحرارة أو تخزينها). إذا كان سهم التيار أو قطبية الجهد معكوساً كما هو الحال في B و C، فإنه يتم تقديم الطاقة إلى الدارة. لاحظ أنه إذا كان اتجاه التيار وقطبية الجهد معكوسين معاً، كما في D، فإنه يتم امتصاص الطاقة.

يتم تعريف العنصر غير الفعال بأنه العنصر الذي تكون قدرته دائماً موجبة أو صفر، والتي قد يتم تبديدها كحرارة (مقاومة)، أو تخزينها في حقل كهربائي (مكثف) أو تخزينها في مجال مغناطيسي (عنصر تحريضي (ملف)). ونعرّف عنصر الدارة الفعال بأنه العنصر الذي تكون قدرته سالبة ويمكنه توليد الطاقة.

تُعطى الطاقة من خلال المعادلة التالية:

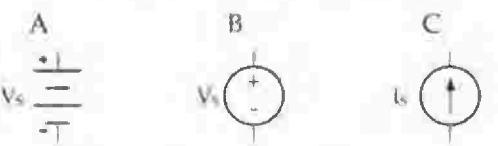
$$w(t) = \int_{-\infty}^{t} p\,dt \qquad (٣.٧)$$



الشكل رقم (٣.٧). إشارات القطبية لأربع حالات من التيار والجهد. ينتج عن الحالات A و D قدرة موجبة يجري استهلاكها من قبل عنصر الدارة. وينتج عن الحالات B و C قدرة سالبة يجري استخراجها من عنصر الدارة.

(٣.٥) المصادر
SOURCES

إن المصادر هي أجهزة ثنائية الطرف توفر الطاقة لدارة ما. ليس هناك علاقة مباشرة بين جهد وتيار المصدر، وعندما يتم إعطاء أحد المتغيرين، فإنه لا يمكن تحديد الآخر من دون معرفة بقية الدارة. إن المصادر المستقلة هي أجهزة يتم تقديم الجهد أو التيار لها ويحافظ الجهاز على قيمته بغض النظر عن بقية الدارة. إن الجهاز الذي يولّد جهداً مُفترضاً عند طرفيه، بغض النظر عن تدفق التيار، يُطلق عليه مصدر جهد مثالي. يبين الشكل رقم (٣.٨. A و B) الرموز العامة لمصدر جهد مثالي. يبين الشكل رقم (٣.٨. C) مصدر تيار مثالي يوفّر تياراً مُفترضاً إلى الدارة المرتبطة به. يعتمد الجهد الناتج عن مصدر تيار مثالي على العناصر في بقية الدارة.



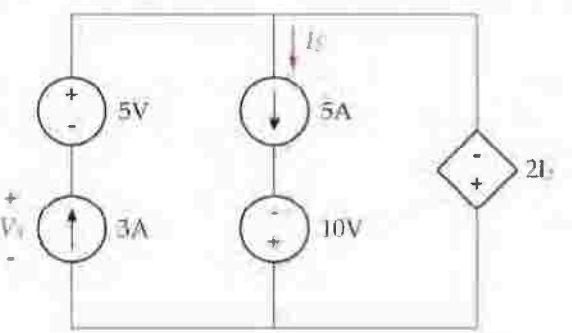
الشكل رقم (٣.٨). الرموز الأساسية المُستخدمة للمصادر مستقلة. (A) البطارية. (B) مصدر جهد مثالي. يمكن أن تكون v_s مصدر تيار مستمر ثابت (DC) (بطارية) أو مصدراً متغيراً بالزمن. (C) مصدر تيار مثالي.

يبين الشكل رقم (٣.٩) مصدر جهد ومصدر تيار تابعين (غير مستقلين). يبدأ المصدر التابع بقيمة تعادل تابع معروف لبعض قيم الجهد أو التيار الأخرى في الدارة. نحن نستخدم رمزاً على شكل شبه منحرف لتمثيل المصدر التابع. وفي كثير من الأحيان، يُسمى المصدر التابع المصدر المُتحكّم به. إن التيار الناتج عن مصدر جهد تابع و الجهد الناتج عن مصدر تيار تابع يعتمد على عناصر الدارة في بقية الدارة. إن المصادر التابعة مهمة جداً في مجال الإلكترونيات. وسوف نرى، في وقت لاحق، أن المضخم العملياتي يستخدم مصدر جهد تابع من أجل عمله.

الشكل رقم (٣.٩). الرموز الأساسية المستخدمة للمصادر التابعة أو المُتحكم بها. (اليسار) مصدر جهد تابع. إن الجهد v_x هو تابع معروف لبعض الجهود أو التيارات الأخرى في الدارة. (اليمين) مصدر تيار تابع. إن التيار i_x هو تابع معروف لبعض الجهود أو التيارات الأخرى في الدارة.

مثال (٣.٤):

المطلوب إيجاد الجهد V_3 من أجل الدارة المبينة في الشكل التالي:



الحل: إن التيار I_2 يساوي ٥ أمبير (5A) لأنه في نفس الفرع الموجود فيه مصدر التيار ٥ أمبير. إن الجهد على طرفي مصدر الجهد التابع على الجانب الأيمن من الدارة يساوي $2I_2 = 10\,V$. ويعطي تطبيق قانون كيرشوف للجهد (KVL) حول المسار الخارجي المغلق ما يلي:

$$-V_3 - 5 - 10 = 0$$

أو

$$V_3 = -15V$$