يُعدّ قانون فارادي في الحثّ أحد القوانين العظيمة في الفيزياء وينصّ على أنّ التغير في التدفق ينتج قوة دافعة تأثيرية. ترينا هذه الصورة قضيبًا مغناطيسيًا يتحرك داخل ملف، فيسجل الجلفانوميتر تيارًا تأثيريًّا. إنّ هذه الظاهرة في الحثّ الكهرومغناطيسي هي أساس عمل عدد كبير من الأجهزة العملية كالمولدات، والمحوّلات، وذاكرة الحاسوب وغيرها.

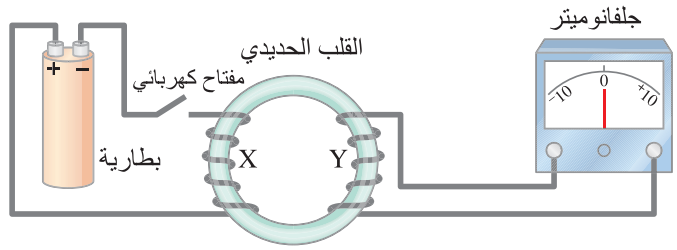
الفصل 21

الحثّ الكهرومغناطيسيّ وقانون فارادي

في (الفصل 20)، ناقشنا طريقتين ترتبط من خلالهما الكهرباء بالمغناطيسيّة هما: 1- التيّار الكهربائيُّ ينتج مجالاً مغناطيسيًّا. 2- المجالُ المغناطيسيُّ يؤثّر بقوّةٍ في التيّار الكهربائيِّ والشحناتِ المتحركة. وعندما اكتشفت هذه الظواهر في 1820-1821، بدأ العلماء يتساءلون: إذا كان التيار الكهربائي ينتج مجالا مغناطيسيًّا، فهل من الممكن للمجال المغناطيسي أن ينتج تيارًا كهربائيًّا؟ بعد عشر سنوات من ذلك التاريخ، وجد الأمريكي جوزيف هنري (1797-1878) والإنجليزي ميشيل فارادي (1791-1867)، كلٌّ منهما على حدة أنّ ذلك ممكنًا. استطاع هنري اكتشاف ذلك أولًا، ولكن فارادي نشر نتائجه بشكل أكثر تفصيلًا قبل هنري. سنناقش في هذا الفصل هذه الظاهرة، وبعض تطبيقاتها، التي غيرت العالم، كالمولدات الكهربائية.

1-21 القوة الدافعة التأثيرية

في محاولته لإنتاج تيار كهربائي من المجال المغناطيسي، استخدم فارادي أدوات كتلك الموضحة في (الشكل 1-21). الملف X موصول ببطارية. التيار الذي يمر في الملف X ينتج مجالا مغناطيسيًّا يزداد عن طريق القلب الحديدي الذي لفّ عليه الملفّ. كان فارادي يأمل أنّ التيار المستمر القوي في الملف X سينتج مجالاً مغناطيسيًّا قويًّا يكفي لإنتاج تيار في الملف الثاني Y الذي يشترك بالقلب الحديدي نفسه. تحتوي الدارة الثانية Y على جلفانوميتر للكشف عن أيّ تيار، ولكنّها لا تحوي أيّ بطارية.



الشكل 21-1 تجربة فارادي لإنتاج قوة دافعة تأثيرية

لم ينجح فارادي باستخدام تيّارٍ ثابت، ولكنّه لاحظ في النهاية أنّ الجلفانوميتر في الدارة Y ينحرف بقوة عند لحظة إغلاق المفتاح في الدارة X. ينتج التيار الثابت في X مجالا مغناطيسيًّا ثابتًا، ولا ينتج أيّ تيار في الدارة Y، إلا عندما يبدأ التيار في الدارة X أو يتوقف، عندها ينتج تيارًا في هذه الدارة.

استنتج فارادي بأنّه مع أنّ المجال المغناطيسي الثابت لا ينتج تيارًا في الموصل، إلّا أنّ التغيّر في المجال المغناطيسي يستطيع إنتاج تيار كهربائيّ، سُمِّي التّيّارَ التّأثيريَّ. عندما يتغير المجال المغناطيسي خلال الملف Y، فإنّ تيارًا يظهر في Y حتى دون وجود بطارية أو أيّ مصدر للتيار فيها. لذا، نستطيع القول إنّ:

"التغير في المجال المغناطيسي ينتج قوة دافعة تأثيرية"

أجرى فارادي تجارب أخرى في **الحثّ الكهرومغناطيسي** (كما سميت هذه الظاهرة). على سبيل المثال (الشكل 21-2) يرينا أنّ المغناطيس إذا تحرك بسرعة في ملف، فإنّ تيارًا تأثيريًّا ينتج في الأسلاك. وإذا أزيل المغناطيس بقوة (خارج الملف)، فإنّ تيارًا تأثيريًّا ينتج بالاتجاه المعاكس (يقلّ $\vec{B}$ خلال الملف). بالإضافة إلى ذلك، لو بقي المغناطيس ساكنًا وتحرك الملفّ مبتعدًا أو مقتربًا من المغناطيس، فإنّه سينتج مرّةً أخرى قوّة دافعة تأثيرية، ومن ثمَّ تيارًا تأثيريًّا في الملف. إنّ التحريك والتغير يؤديان إلى إنتاج قوة دافعة تأثيرية، ولا يهم أيّ من الملف أو المغناطيس سيتحرك، بل إنّ المهم هنا هو الحركة النسبية بينهما.

تنويه:

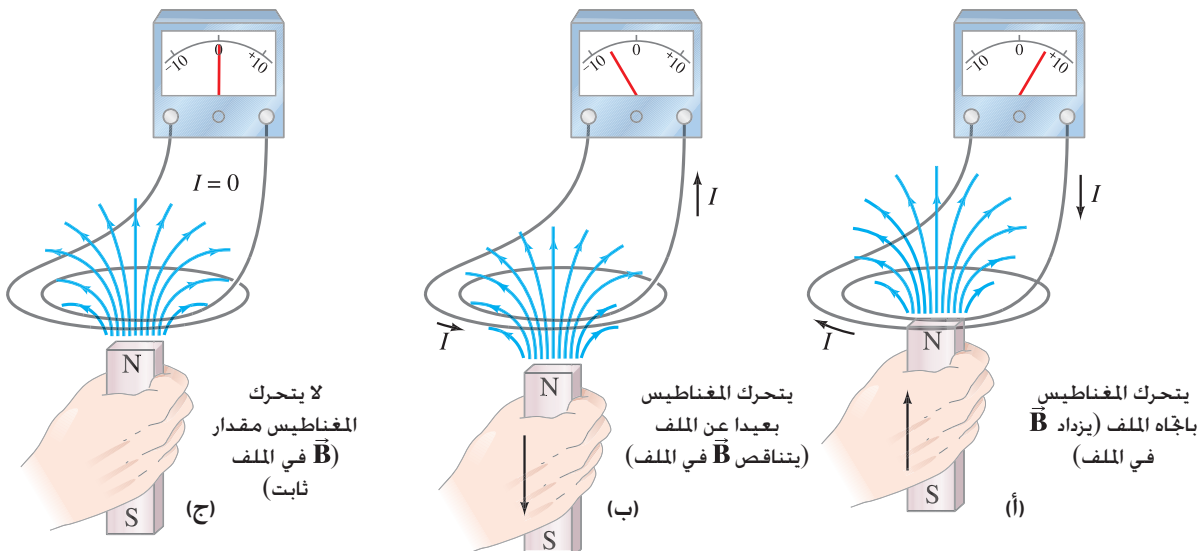
التغيّر في $\vec{B}$ وليس $\vec{B}$ نفسه هو الذي ينتج تيارًا تأثيريًا.

التغير في $\vec{B}$ ينتج emf

الشكل 21-2 (أ) ينتج تيار تأثيري عندما يتحرك المغناطيس باتجاه الملف، لحظيًّا يزداد المجال المغناطيسي في الملف. (ب) يكون التيار التأثيريّ بالاتجاه المعاكس عندما يتحرك المغناطيس بعيدًا عن الملف (B يتناقص). لاحظ أنّ صفر الجلفانوميتر يقع في منتصف التدريج، وينحرف المؤشر نحو اليمين أو اليسار اعتمادًا على اتجاه التيار. وفي (جـ) لا ينتج أيّ تيار تأثيريّ إذا لم يتحرك المغناطيس بالنسبة إلى الملف. الحركة النسبية هي التي تعتمد هنا. فمن الممكن أن يبقى المغناطيس ساكنًا، في حين يتحرك الملف. وفي هذه الحالة أيضًا تنتج قوة دافعة تأثيرية.

تنويه:

الحركة النسبية للمغناطيس أو الملف تنتج تيارًا تأثيريًا.



2-21 قانون فارادي في الحثّ وقانون لنز

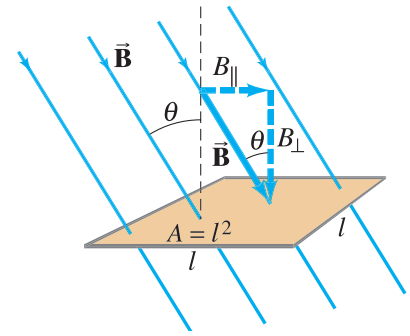
تحقَّقَ فارادي كميًّا من العوامل التي تؤثّر في مقدار القوّة الدافعة الكهربائيّة التأثيريّة. ووجد أوّلًا أنّه كلّما ازداد التغيّر في المجال المغناطيسي زادت القوة الدافعة التأثيرية المتولدة في الملف. ولكن القوة الدافعة التأثيريّة لا تتناسب ببساطة مع معدّل التغيّر في المجال المغناطيسي $\vec{\mathbf{B}}$. ولكنّها تعتمد أيضًا على كلٍّ من مساحة الملفّ والزاوية؛ أي أنّ القوة الدافعة التأثيرية تتناسب مع معدّل تغيّر التدفق المغناطيسي Φ_B خلال الملف. التدفق المغناطيسي الناتج من مجال مغناطيسي منتظم خلال عروة مساحتها A يعطى حسب العلاقة الآتية:

$$\Phi_B = B_\perp A = BA\cos\theta \qquad [B \text{ uniform}] \qquad \textbf{(1-21)}$$

هنا، $B_\perp$ هي مركبة المجال المغناطيسيّ العموديّةِ على سطح العروة. أمّا θ فهي الزاوية بين $\vec{\mathbf{B}}$ والعموديّ على سطح العروة. هذه الكميّات موضحة في (الشكل 21-3) لعروة مربعة طول ضلعها l ومساحتها $A = l^2$. عندما يكون سطح العروة موازيًا لـ $\vec{\mathbf{B}}$، فإنّ $\theta = 90°$. وعليه، فإنّ $\Phi_B = 0$. وعندما يكون $\vec{\mathbf{B}}$ عموديًّا على العروة، فإنّ $\theta = 0°$. لذا يكون:

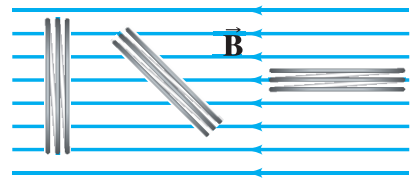
$$\Phi_B = BA \qquad [\vec{\mathbf{B}} \text{ منتظم وعموديّ على سطح العروة}]$$

كما رأينا في (الفصل 20)، فإنّ خطوط المجال المغناطيسي $\vec{\mathbf{B}}$ (مثل خطوط المجال الكهربائي $\vec{\mathbf{E}}$) نستطيع رسمها بحيث يكون عدد الخطوط في وحدة المساحة يتناسب مع شدة المجال. ولهذا، فإنّ التدفق Φ_B يتناسب مع العدد الكلي للخطوط التي تخترق المساحة التي تشكلها العروة. وهذا موضّحٌ في (الشكل 21 - 4) حيث نشاهد مقطعًا جانبيًّا للعروة. عند $\theta = 90°$ فإنه لا يمرّ أيّ من خطوط المجال خلال العروة. ومن هنا، يكون $\Phi_B = 0$. أما Φ_B فتعطينا قيمة قصوى عندما تكون $\theta = 0°$. وحدة التدفق المغناطيسيّ هي تسلا. م^2 (tesla.m^2) وهذه تُسَمّى بالويبر (weber) حيث $1\ \text{Wb} = 1\ \text{T}\cdot\text{m}^2$.



الشكل 21-3 إيجاد التدفق خلال عروة مربعة $A = l^2$ ومساحتها 1 طول ضلعها ومساحتها $A = l^2$

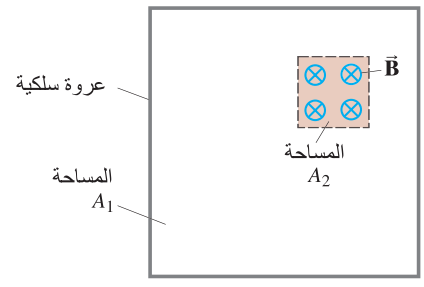
الشكل 21-4 يتناسب التدفق المغناطيسي مع عدد خطوط المجال $\vec{\mathbf{B}}$ التي تمر خلال العروة.



المثال المفاهيمي 21-1 إيجاد التدفق

عروةٌ مربّعةٌ، مساحتها A_1 كما هو موضّحٌ في (الشكل 21-5). إذا أثّر مجالٌ مغناطيسيٌّ منتظم عمودي فيها خلال مساحة مقدارها A_2، فما هو التدفق المغناطيسي خلال العروة A_1؟

الإجابة: نفترض أنّ المجال المغناطيسي خارج المساحة A_2 يساوي صفرًا. التدفق الكلي خلال A_1 يساوي التدفق خلال A_2، ويكون من (المعادلة 21-1) مساويًا لـ BA_2 بالإضافة للتدفق خلال المساحة المتبقية $(= A_1 - A_2)$ الذي يساوي صفرًا؛ لأنّ $B = 0$. إذن، التدفق الكلي يساوي $\Phi_B = BA_2 + 0(A_1 - A_2) = BA_2$ ولا يساوي BA_1؛ لأنّ $\vec{\mathbf{B}}$ ليس منتظمًا خلال A_1.



الشكل 21-5
(المثال 21-1)

المثال 21-3 حساب التدفق

عروةٌ سلكيّةٌ مربّعةٌ، طول ضلعها 10.0 cm، موضوعة في مجال مغناطيسي شدته 1.25-T. ما أقصى وأقلّ قيمة للتدفق خلال هذه العروة؟

النّهج: يُعطى التدفق (بالعلاقة 21-1)، وتكون له قيمة قصوى عند $\theta = 0°$. وتظهر عندما يكون مستوى العروة عموديًّا على المجال $\vec{\mathbf{B}}$. أما أقلّ قيمة للتدفق فتكون عند $\theta = 90°$. وتظهر عندما يكون مستوى العروة موازيًا للمجال $\vec{\mathbf{B}}$.

الحلّ: من (المعادلة 21-1)، القيمة القصوى للتدفق تساوي

$$\Phi_B = BA\cos\theta = (1.25\ \text{T})(0.100\ \text{m})(0.100\ \text{m})\cos 0° = 0.0125\ \text{Wb}$$

أقلّ قيمة للتدفق تساوي صفرًا عندما $\theta = 90°$ و $\cos 90° = 0$.

تمرين A : أوجد التدفق في (المثال 21-2) عندما يصنع العمودي على العروة زاوية مقدارها 35^o مع $\vec{\mathbf{B}}$.

من خلال تعريف التدفق في (المعادلة 21-1)، نستطيع الآن كتابة نتائج أبحاث فارادي. إذا تغير التدفق خلال عروة سلكية بالمقدار $\Delta\Phi_B$ خلال فترة زمنية قصيرة Δt، فإنّ القوة الدافعة التأثيرية المتولدة من هذه اللحظة تعطى بالعلاقة

قانون فارادي في الحث

$$\mathscr{E} = -\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}. \qquad [\text{عروة واحدة}] \qquad \textbf{(2-21أ)}$$

وهذه النتيجة الأساسية تُسَمّى **قانون فارادي في الحثّ** وهو أحد القوانين الأساسية في الكهرومغناطيسية

قانون فارادي في الحثّ

قانون لنز

إذا كانت الدارة تتكون من عدد من العُرى مقداره N، فإنّ القوة الدافعة التأثيرية لكلِّ عروةٍ تضاف إلى بعضها بعضا لتكون

$$\mathscr{E} = -N\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}. \qquad [N \text{ عروة}] \qquad \textbf{(21-2ب)}$$

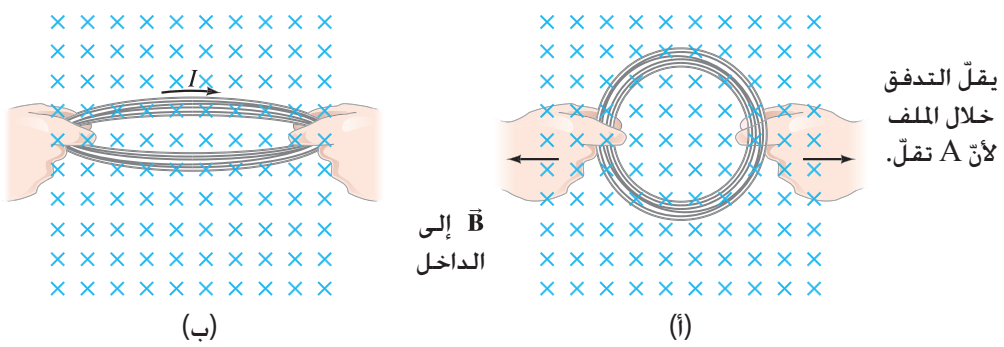
تذكّرنا الإشارة السالبة في (المعادلات 21-2) باتجاه القوة الدافعة التأثيرية المتولدة. وقد بيّنت التجارب أنّ:
التيار الناتج من القوّة الدافعة التأثيريّة يتحرّك بحيث يكون مجاله المغناطيسي معاكسًا للتغيّر الأصليّ في التدفّق.

هذا القانون يُعرف بقانون لنز. لاحظ أننا نناقش الآن مجالين مغناطيسيين مختلفين هما: 1 - المجال المغناطيسي المتغيّر، أو التدفق الذي ينتج تيارًا تأثيريًّا. 2 - المجال المغناطيسي الناتج من التيار التأثيري (التيارات كلها تنتج مجالات مغناطيسية). ويكون المجال الثاني معاكسًا للتغير في المجال الأول.

دعنا الآن نطبق قانون لنز على الحركة النسبية بين المغناطيس والملف في (الشكل 21 - 2). ينتج التغيرُ في التدفّق خلال الملفّ قوّةً دافعة تأثيريّة في الملفّ نفسه ممّا يؤدّي إلى إنتاج تيّارٍ تأثيري. وهذا التيّار التأثيريّ ينتج مجاله المغناطيسي الخاص به. في (الشكل 21 - 2أ)، المسافة بين الملف والمغناطيس تقلّ، لذا، فإنّ المجال المغناطيسي للمغناطيس (وعدد خطوط المجال) خلال الملف يزداد. ومن ثمَّ يزداد التدفق. يشير اتجاه المجال المغناطيسي إلى الأعلى. ولمعاكسة الزيادة نحو الأعلى؛ فإنّ المجال المغناطيسي داخل الملف الناتج من التيار التأثيري يجب أن يكون نحو الأسفل. وعليه، فإنّ قانون لنز يشير إلى أنّ التيار يتحرك كما هو مبيّن بالشكل (باستخدام قاعدة اليد اليمنى). في (الشكل 21-2ب)، يقل التدفق (لأنّ المغناطيس يتحرك بعيدًا فيقل B) بحيث إنّ التيّارَ التأثيريَّ في الملفِّ ينتج مجالًا مغناطيسيًّا نحو الأعلى خلال الملفّ لتعديل الوضع السائد. ومن هنا، فإنّ التيار في (الشكل21-2ب) بالاتجاه المعاكس لما هو عليه في (الشكل 21-2أ).

من المهمّ ملاحظة أنّ القوّة الدافعة التأثيرية تتولد عندما يكون هنالك تغيّر في التدفّق خلال الملفّ. وهنا سنأخذ بالحسبان حالات أخرى.

تنويه:
ميّز بين مجالين مغناطيسيين مختلفين.

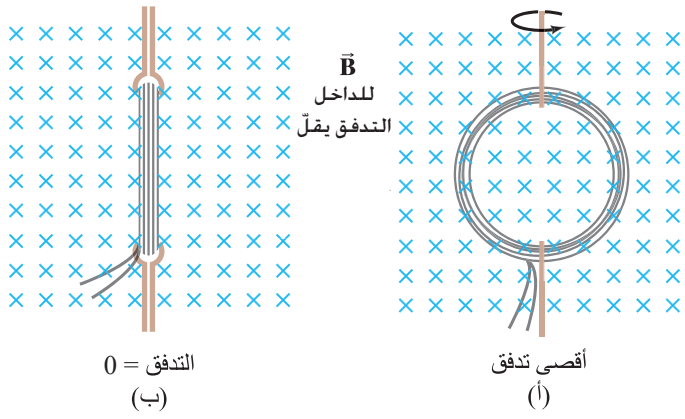


الشكل 21-6 التيار التأثيري ينتج من تغير مساحة الملف حتى لو لم يتغير B. في (الشكل 21-7)، يقلّ التدفق خلال الملف عندما نذهب من (a) إلى (b).

هنا، يؤثر التيار البسيط الناتج بالاتجاه الموضح بحيث يحاول معادلة التدفق الأصلي ($\Phi = BA$) بإنتاج مجاله المغناطيسي الخاص به داخل الورقة؛ أي أنه كلما قلت A، فإنّ التيار يؤثر بحيث يزيد B بالاتجاه الأصلي (إلى الداخل).

ثلاث طرق لتغيير التدفق: تغيير B أو A، أو θ

حيث إنّ التدفّق المغناطيسي يساوي $\Phi_B = BA\cos\theta$، فإنّنا نرى أنّ القوّة الدافعة التأثيريّة يمكن تولدها بثلاث طرق هي: 1 - تغيير المجال المغناطيسي B. 2 - تغيير مساحة العروة A في منطقة المجال. 3 - تغيير الزاوية بالنسبة إلى المجال. (الشكلان 21 - 1 و 21 - 2) يلخصان الحالة الأولى. وهناك أمثلة على الحالتين الثانية و الثالثة موضحة في الشكلين 21-6 و 21-7 على الترتيب.



الشكل 21 - 7 نستطيع توليد التيار التأثيري بإدارة الملف في المجال المغناطيسي. يتغير التدفق في الملف من (a) إلى (b) لأنّ θ (في المعادلة 21-1) تتغير من $0°\ (\cos\theta = 1)$ إلى $90°\ (\cos\theta = 0)$

الشكل 21-8 (المثال 21-3): موقد التدفق

المثال المفاهيمي 21-3 موقد التدفّق في موقد التدفّق الموضّح في (الشكل 21-8)، يمرُّ تيّارٌ متناوب ac حول الملف في الحارقة (الحارقة لا تسخن). لماذا يُسَخِّن المقلاة الفلزيّة ولا يُسَخِّن الوعاءَ الزجاجيَّ؟

الإجابة: لأنّ التيّار المتردّد يعمل تغييرًا في المجال المغناطيسي الذي يمرُّ في قاعدة المقلاة، وهذا يؤدّي إلى إنتاج تيار تأثيري في القاعدة. وبما أنّ المقلاة تحتوي مقاومة، فإنّ الطاقة الكهربائية تتحوَّل إلى طاقةٍ حراريّةٍ تؤدّي إلى تسخين القدر ومحتوياته. ولأنّ مقاومة الوعاء الزجاجيِّ عاليةٌ جدًّا، فإنّ التيار التأثيري المتولّد فيه قليلٌ جدًّا. ولهذا، فإنّ طاقةً قليلةً تتحوّل فيه إلى حرارة $(P = V^2/R)$.

طريقة حلّ الأسئلة — قانون لنز

يُستخدم قانون لنز لتحديد الاتجاه المفترض للتيار التأثيري المتولّد في عروة بسبب التغير في التدفق خلال العروة. لإنتاج تيار تأثيري: ستحتاج إلى ما يلي:

(أ) عروة موصلة مغلقة.

(ب) تدفق مغناطيس خارجي خلال العروة يتغير مع الزمن.

1. حدّد ما إذا كان التدفق المغناطيسي $(\Phi = BA\cos\theta)$ خلال العروة يقلّ، أم يزداد، أم يبقى ثابتًا.

2. المجال المغناطيسي الناتج من التيار التأثيري:

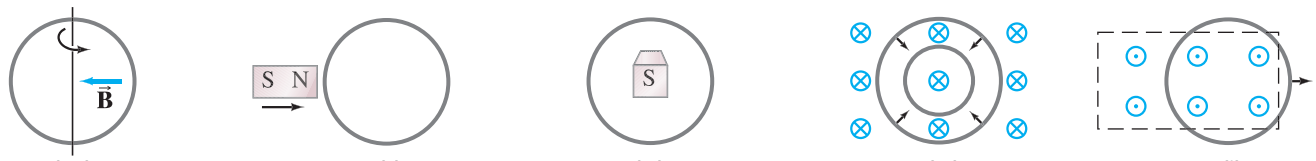
(أ) يشير إلى اتجاه المجال الخارجي نفسه إذا تناقص التدفق.

(ب) يشير إلى الاتجاه المعاكس للمجال الخارجي إذا ازداد التدفق.

(جـ) يساوي صفرًا إن لم يتغيّر التدفق.

3. عندما تحدد اتجاه المجال المغناطيسي التأثيري، فإنّك تستطيع إيجاد اتجاه التيار التأثيري باستخدام قاعدة اليد اليمنى 1- (ص 562).

4. تذكّر دائمًا أنّ لدينا مجالين مغناطيسيين هما: 1 - مجال مغناطيسي خارجي يتغير تدفقه فيولد تيارًا تأثيريًّا. 2 - مجال مغناطيسي ينتج من التيار التأثيري.



(أ) دفع العروة نحو اليمين خارج المجال المغناطيسي الذي يشير إلى داخل الصفحة.

(ب) تقليص عروة في مجال مغناطيسي إلى خارج الصفحة.

(ج) قطب مغناطيسي شمالي يتحرك باتجاه العروة (عمودي على الصفحة)

(د) قطب مغناطيسي شمالي يتحرك باتجاه العروة (مواز للصفحة)

(هـ) إدارة العروة بدفع الجهة اليسرى باتجاهنا واليمنى نحو الداخل. يشير المجال المغناطيسي من اليمين إلى اليسار.

الشكل 21-9 (المثال 21-4)

المثال المفاهيمي 21-4 التعامل مع قانون لنز عمليًّا

ما اتجاهُ التيّار التأثيري المتولّد في كلّ حالة من الحالات الموضّحة في (الشكل 21 - 9)؟

الإجابة: (أ) بدايةً، يشير المجال المغناطيسي إلى خارج الصفحة بحيث يمرُّ في العروة. إذا سحبت العروة خارج المجال، فإنّ التدفق المغناطيسي خلالها سيتناقص أي أنّ التيار التأثيري الناتج يجب أن يكون بالاتجاه الذي يعوّض تناقص التدفق خلال العروة، وبذلك يكون التيار عكس اتجاه عقارب الساعة لإنتاج مجال مغناطيسي للخارج (باتجاه القارئ).

(ب) يشير المجال المغناطيسي إلى داخل الصفحة. تقلّ مساحة الملف فيقلّ التدفق. وهنا، فإنّ التيار التأثيري المتولد يجب أن يكون مع اتجاه عقارب الساعة، بحيث ينتج مجالا مغناطيسيًّا داخل الصفحة لجعل التدفق يتناقص.

(جـ) تشير خطوط المجال المغناطيسي مبتعدة عن القطب الشمالي للمغناطيس. ولأنّ المغناطيس يتحرك باتجاه العروة، فإنّ المجال المغناطيسي يكون داخلا في الصفحة ويزداد مع تقريب المغناطيس. يجب أن يكون التيار في العروة عكس اتجاه عقارب الساعة لتوليد مجال مغناطيسي $\vec{\mathbf{B}}$ خارج الصفحة.

(د) المجال المغناطيسي في مستوى العروة نفسه؛ أي، لا توجد خطوط مجال مغناطيسي تخترق العروة، ويساوي التدفق خلال العروة صفرا خلال العملية، ولا يكون هنالك أيّ تغيير في التدفق المغناطيسي الخارجي مع الزمن. وهنا، لا تتولد قوة دافعة تأثيرية، ولا تيار تأثيري في العروة.

(هـ) في البداية، لا يكون هنالك أيُّ تدفّقٍ خلال العروة، وعندما نبدأ بإدارة العروة، يبدأ المجال الخارجي بالازدياد خلال العروة لليسار، ولتعويض هذا التغيّر في التدفّق؛ يتكون تيّار عكس اتجاه عقارب الساعة في العروة لإنتاج مجال مغناطيسي خاص به لليمين.

تنويه:

يعاكس المجالُ المغناطيسي الناتج من التيار التأثيري يعاكس التّغيّر في التدفق الخارجي، وليس شرطا أن يكون معاكسًا للمجال الخارجي.

المثال 5-21 دفع ملفّ بعيدًا عن مجال مغناطيسي

ملفٌّ مربَّعٌ مصنوعٌ من سلكٍ موصِلٍ، طول ضلعه $l = 5.00\ \text{cm}$ ويحوي 100 لفّةٍ موضوعٌ عموديًّا على مجال مغناطيسي منتظم شدته 0.600-T كما هو موضح في (الشكل 21 - 10). إذا سحب الملف بسرعة (بحيث يتحرك عموديًّا على $\vec{\mathbf{B}}$) إلى المنطقة التي يصبح فيها B مساويًا للصفر. عند $t = 0$، فستكون الحافة اليمنى للملفِّ على حافَّة المجال. وعندما يتحرّك الملفُّ، فإنّه يحتاج إلى زمن مقداره 0.100 s حتى يصبح بأكمله خارج منطقة المجال. إذا كانت المقاومة الكلية للملف 100 Ω فاحسب ما يلي (أ) معدّل تغيّر التدفق مع الزمن خلال الملف. (ب) القوّة الدافعة التأثيرية والتيار التأثيري في الملف. (جـ) الطاقة المستنفدة خلال الملف. (د) متوسط القوة اللازمة لتحريك الملف.

النّهج: نبدأ بإيجاد كيفيّة تغيُّر التدفّق المغناطيسي $\Phi_B = BA$ خلال الفترة الزمنيّة $\Delta t = 0.100\ \text{s}$. يعطينا قانون فارادي بعد ذلك القوّة الدافعة التأثيرية المتولّدة. أمّا قانون Φ_B أوم فيعطينا التيار التأثيري المتولّد.

الحلّ: (أ) مساحة الملف تساوي

$$A = l^2 = (5.00 \times 10^{-2}\ \text{m})^2 = 2.50 \times 10^{-3}\ \text{m}^2$$

والتدفق في البداية يساوي

$$\Phi_B = BA = (0.600\ \text{T})(2.50 \times 10^{-3}\ \text{m}^2) = 1.50 \times 10^{-3}\ \text{Wb}$$

معدّل تغيّر التدفّق ثابت (لأنّ الملف مربع الشكل) ويساوي

$$\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} = \frac{0 - (1.50 \times 10^{-3}\ \text{Wb})}{0.100\ \text{s}} = -1.50 \times 10^{-2}\ \text{Wb/s}$$

(ب)القوّة الدافعة التأثيرية المتولدة (المعادلة 21-2) في 100 لفة خلال الفترة 0.100-s تساوي

$$\mathscr{E} = -N\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} = -(100)(-1.50 \times 10^{-2}\ \text{Wb/s}) = 1.50 \times 10^{-2}\ \text{A} = 1.50\ \text{V}$$

ويمكن إيجاد التيار التأثيري المتولّد بتطبيق قانون أوم على الملفّ الذي مقاومته 100-Ω.

$$I = \frac{\mathscr{E}}{R} = \frac{1.50\ \text{V}}{100\ \Omega} = 15.0\ \text{mA}$$

من قانون لنز، يجب أن يكون التيار مع اتجاه عقارب الساعة لإنتاج مجال مغناطيسي $\vec{\mathbf{B}}$ يزداد باتجاه الصفحة، ويعاكس النقصان في التدفق المغناطيسي باتجاه الصفحة.

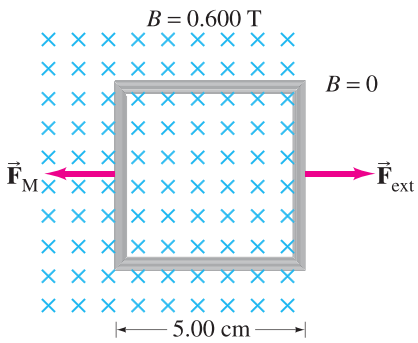
(جـ) الطاقة الكليّة المستنفدة في الملف هي حاصل ضرب القدرة $(= I^2R)$ في الزمن

$$E = Pt = I^2Rt = (1.50 \times 10^{-2}\ \text{A})^2(100\ \Omega)(0.100\ \text{s}) = 2.25 \times 10^{-3}\ \text{J}$$

(د) نستطيع استخدام النتيجة في الفرع (جـ) وتطبيق نظرية الشغل والطاقة: الطاقة المستنفدة E تساوي الشغل W الناتج لسحب الملف خارج المجال (الفصل 6). ولأنّ $W = \bar{F}d$، حيث d =5.00 cm وتكون

$$\bar{F} = \frac{W}{d} = \frac{2.25 \times 10^{-3}\ \text{J}}{5.00 \times 10^{-2}\ \text{m}} = 0.0450\ \text{N}$$

حلّ آخر للفرع (د): نستطيع أيضًا حساب القوة مباشرة من القانون $F = IlB$ (المعادلة 20-2) للمجال المغناطيسي الثابت $\vec{\mathbf{B}}$. القوتان المؤثرتان في الجزأين العلوي والسفلي متساويتان في المقدار ومتعاكستان في الاتجاه. لذا، يلغيان بعضهما بعضا. القوة المؤثرة في الضلع الأيسر للملف تؤثر إلى اليسار كما هو موضح؛ لأنّ التيار يكون إلى الأعلى (مع اتجاه عقارب الساعة). أمّا الضلع الأيمن للعروة فلا يتأثر بأيّ قوة؛ لأنّ $\vec{\mathbf{B}}=0$. وهنا، تلغي القوةُ الخارجيةُ إلى اليمين القوةَ إلى اليسار وتساوي $F_{\text{ext}} = NIlB = (100)(0.0150\ \text{A})(0.0500\ \text{m})(0.600\ \text{T}) = 0.0450\ \text{N}$ وهو الجواب نفسه الذي حصلنا عليه سابقًا بتطبيق قانون حفظ الطاقة.



الشكل 10-21 المثال 5-21 يدفع الملف المربع الموجود في مجال مغناطيسي شدته $B = 0.600\ \text{T}$ بعيدًا نحو اليمين إلى المنطقة التي يكون فيها $B = 0$

تمرين (ب): ما اتجاه التيار التأثيري المتولّد في العروة الدائريّة الناتج من التيّار الموضّح في كلّ جزءٍ من (الشكل 21-11)؟

الشكل 21-11: (تمرين B).

3-21 القوّة الدافعة المتولّدة في موصل متحرّك

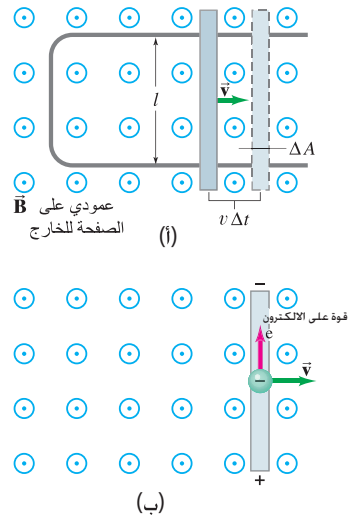
هنالك طريقةٌ أخرى لإنتاج قوّةٍ دافعةٍ تأثيريّةٍ موضّحة في (الشكل 21-12أ) وهذا الوضع يساهم في توضيح طبيعة القوة الدافعة التأثيرية. افرض أنّ المجال المغناطيسي $\vec{\mathbf{B}}$ عموديٌّ على المساحة المحصورة بالموصل الذي على شكل الحرف U والقضيب المتحرك موضوع عليه. إذا كان القضيب مُصَمَّمًا بحيث يتحرّك بسرعة v فإنّه يتحرّك مسافة $\Delta x = v\,\Delta t$ في زمن مقداره Δt، ومن خلال قانون فارادي، تتولّد قوّةٌ دافعةٌ تأثيريّةٌ، يُعطى مقدارها كما يلي:

$$\mathscr{E} = \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t} = \frac{B\,\Delta A}{\Delta t} = \frac{Blv\,\Delta t}{\Delta t} = Blv \qquad \textbf{(3 - 21)}$$

(المعادلة 21-3) مناسبة في حالة كون B, l, v متعامدة على بعضها بعضًا (إنْ لم تكن متعامدة فسنستخدم المركبات العموديّة فقط لكلٍّ منها). تُسَمّى القوّةُ الدافعة التأثيريّة المتولّدة من الموصل الذي يتحرّك في مجال مغناطيسي أحيانًا القوةَ الدافعة التأثيرية المتبادلة.

ومن جهةٍ أخرى، نستطيع إيجاد (المعادلة 21-3) دون استخدام قانون فارادي. رأينا في (الفصل 20) أنّ الجُسيمات المشحونة التي تتحرّك عموديًّا على المجال المغناطيسي B بسرعة v تتأثّر بقوّةٍ مقدارها (المعالة 20-4) $F = qvB$ إذا كان القضيب في (الشكل 21-12أ) يتحرك إلى اليمين بسرعة v، فإنّ إلكترونات هذا القضيب تتحرك بهذه السرعة. لذا، وحيث إنّ $\vec{\mathbf{v}} \perp \vec{\mathbf{B}}$، فإنّ كلّ إلكترون يتأثر بقوة مقدارها $F = qvB$ ، والتي تؤثّر بشكلٍ عموديٍّ خارج الصفحة، كما هو موضّح (بالشكل 21-12ب). إذا كان القضيب غير متصل مع الموصل الذي على شكل حرف U، فإنّ الإلكترونات ستتجمّع على النهاية العلويّة للقضيب تاركةً النهاية السفلية موجبة (انظر الإشارات في الشكل 21-12 ب).

أخيرًا، تتشكّل قوّة محرّكة تأثيريّة. إذا وُضِعَ القضيب على الموصل الذي على شكل حرف U (شكل 21-12أ)، فإنّ الإلكترونات ستتحرك في هذا الموصل مشكلة تيارًا يتحرك مع اتجاه عقارب الساعة في العروة. ولحساب القوة الدافعة التأثيرية المتولدة؛ نحسب الشغل اللازم لتحريك الشحنة q من أحد طرفي القضيب إلى الطرف الآخر $W = \text{force} \times \text{distance} = (qvB)(l)$. القوة الدافعة التأثيرية المتولدة تساوي الشغل المبذول لوحدة الشحنة، وعليه، تكون $\mathscr{E} = W/q = qvBl/q = Blv$، وهي النتيجة نفسها التي حصلنا عليها باستخدام قانون فارادي، (معادلة 21-3).



الشكل 21-12
(أ) قضيب موصل يتحرك نحو اليمين على موصل على شكل حرف U في مجال مغناطيسي منتظم $\vec{\mathbf{B}}$ عمودي على الصفحة للخارج.
(ب) القوة المؤثرة إلى الأعلى على الإلكترون في القضيب الفلزي (المتحرك نحو اليمين) بسبب المجال المغناطيسي الذي يؤثر عموديًّا في الصفحة للخارج.

تمرين (جـ): بأيّ اتجاه تتحرك الإلكترونات في (الشكل 21-12) إذا تحرك القضيب نحو اليسار بحيث يقلل مساحة العروة؟

المثال 21-6 هل الطائرةُ المتحرّكةُ تولّدُ قوّةً دافعةً تأثيريّةً كبيرة؟ تتحرك طائرة بسرعة 1000 km/h في منطقة تكون فيها شدّة المجال المغناطيسي الأرضي $5.0 \times 10^{-5}\ \text{T}$ بشكلٍ عموديٍّ تقريبًا. (الشكل 21-13). ما فرق الجهد المتولد بين طرفي جناحي الطائرة إذا كانت المسافة بينهما 70 m؟

النّهج: يُعدّ الجناحان موصلًا طوله 70-m يتحرك في المجال المغناطيسي الأرضي. وباستخدام (المعادلة 21-3). نحصل على القوة الدافعة التأثيرية المتولدة.

الحلّ: لأنّ $v = 1000\ \text{km/h} = 280\ \text{m/s}$ و $\vec{\mathbf{v}} \perp \vec{\mathbf{B}}$ فإنّ

$$\mathscr{E} = Blv = (5.0 \times 10^{-5}\ \text{T})(70\ \text{m})(280\ \text{m/s}) = 1.0\ \text{V}$$

ملحوظة: فرق الجهد المتولد ليس كبيرًا حتى نأخذه بالحسبان.

الشكل 21 - 13 (المثال 21 - 6)

تطبيق الفيزياء
قياس سرعة تدفق الدم

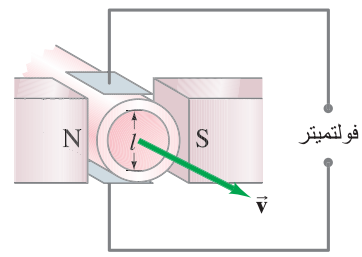
المثال 21-7 **قياس تدفق الدم بطريقة كهرومغناطيسية** يمكن قياس معدّل تدفّق الدّم في أحد الأوعية الدمويّة في جسمنا باستخدام الجهاز الموضح في (الشكل 21 - 14) حيث إنّ الدم يحوي أيونات مشحونة. افرض أنّ قطر الوعاء الدموي 2.0 mm، وشدة المجال المغناطيسي 0.080 T، والقوة الدافعة التأثيرية المقيسة تساوي 0.10 mV. ما سرعة تدفق الدم؟

النّهج: يتجه المجال المغناطيسي $\vec{\mathbf{B}}$ أفقيًّا من اليسار إلى اليمين (من القطب الشمالي N إلى القطب الجنوبي S). القوة الدافعة التأثيرية مؤثرة في الطول $l = 2.0\ \text{mm}$ من الوعاء الدموي (الشكل 21-14) العمودي على كلٍّ من $\vec{\mathbf{B}}$ و $\vec{\mathbf{v}}$ كما هو مبيّن في (الشكل 21-12). نستطيع استخدام (المعادلة 21-3) لإيجاد v.

الحلّ: نحسب v من (المعادلة 21-3) فنحصل على

$$v = \frac{\mathscr{E}}{Bl} = \frac{(1.0 \times 10^{-4}\ \text{V})}{(0.080\ \text{T})(2.0 \times 10^{-3}\ \text{m})} = 0.63\ \text{m/s}$$

ملحوظة: في التطبيقات العمليّة الحقيقيّة، يُستخدم تيار كهربائي متردّد لإنتاج مجال مغناطيسي متردّد، وتكون القوّة الدافعة التأثيريّة المتولّدة متردّدة.



الشكل 21-14 قياس سرعة الدم من القوة الدافعة التأثيرية المتولدة، (المثال 21-7).

مثال إضافي

المثال 21-8 القوّةُ على قضيب: لجعل القضيب في (الشكل 21-12أ) يتحرك نحو اليمين بسرعة v، فإنّك بحاجة إلى تطبيق قوة خارجية على القضيب الفلزي لليمين.
(أ) فسِّر القوة اللازمة وأوجد مقدارها. (ب) ما القدرة الخارجية اللازمة لتحريك القضيب؟ (لا تخلط بين هذه القوة الخارجية على القضيب من جهة، والقوة إلى الأعلى المؤثرة في الإلكترونات الموضحة في (الشكل 21-12ب) من جهة أخرى.

النّهج: عندما يتحرك القضيب إلى اليمين، فإنّ الإلكترونات تتحرك إلى الأعلى في القضيب اعتمادًا على قاعدة اليد اليمنى -3 (ص 562). ويكون التيار التأثيري المتولد في القضيب نحو الأسفل. نستطيع أن نرى أيضًا من قانون لنز أنّ التدفق المغناطيسي إلى الخارج خلال العروة يزداد، والتيار التأثيري الناتج يجب أن يعاكس هذه الزيادة. لذلك، يكون التيار مع اتجاه عقارب الساعة لإنتاج مجال مغناطيسي إلى الداخل (قاعدة اليد اليمنى -1). القوة المغناطيسية المؤثرة في القضيب المتحرك $F = IlB$ لمجال مغناطيسي ثابت (المعادلة 20-2). وتدلّ قاعدة اليد اليمنى -2 على أنَّ القوة المغناطيسية المؤثرة تكون نحو اليسار، والقوة الساحبة يجب أن تعاكسها لتحريك القضيب باتجاه اليمين.

الحلّ: (أ) القوة الخارجية نحو اليمين يجب أن توازن القوة المغناطيسية $F = IlB$. التيار $I = \mathscr{E}/R = Blv/R$ (انظر المعادلة 21-3) والمقاومة R هي المقاومة الكهربائية للدارة ككل، وتشمل القضيب والموصل الذي على شكل حرف U، وتكون القوة اللازمة لتحريك القضيب

$$F = IlB = \left(\frac{Blv}{R}\right)lB = \frac{B^2l^2}{R}v$$

إذا كانت B، l، R ثوابت، فإنّ السرعة الثابتة v تنتج من قوة ثابتة (ثبات R يعني أنّ السكتين المتوازيتين عديمتا المقاومة). والقدرة الخارجية اللازمة لتحريك القضيب ذي المقاومة الثابتة R هي

$$P_{\text{ext}} = Fv = \frac{B^2l^2v^2}{R}$$

القدرة المستنفدة في المقاومة هي $P = I^2R$ حيث $I = \mathscr{E}/R = Blv/R$:

$$P_{\text{R}} = I^2R = \frac{B^2l^2v^2}{R}$$

وتكون القدرة الداخلة مساوية للقدرة المستنفدة عند أيّ لحظة.

4-21 التغيّر في التدفّق المغناطيسيِّ ينتج مجالاً كهربائيًّا

وجدنا أنّ التغيّر في التدفّق المغناطيسيّ ينتج قوّةً دافعةً تأثيريّةً، وتيارًا تأثيريًّا أيضًا. وهذا يقتضي وجود مجالٍ كهربائيٍّ في السلك بسبب حركة الإلكترونات فيه. وهذه النتيجة وغيرها تؤدّي إلى الاستنتاج التالي:

التغيّر في التدفّق المغناطيسيِّ ينتج مجالاً كهربائيًّا

وتطبّق هذه النتيجة العامة على أيّ حيّز في الفضاء يكون فيه تغيّر في المجال المغناطيسي، وليس فقط على الأسلاك وباقي الموصلات.

نستطيع الحصول على صيغة مبسَّطة للمجال E بدلالة B في حالة الإلكترونات في الموصل المتحرك كما هو مبين في (الشكل 21 - 12). تتأثر الإلكترونات بقوة نحو الأعلى (الشكل 21 - 12ب)، وإذا وضعنا أنفسنا في محور إسناد الموصل فإنّ هذه القوة التي تسارع الإلكترونات تقتضي وجود مجال كهربائيّ في الموصل. يعرف المجال الكهربائي بأنّه القوة المؤثرة في وحدة الشحنات؛ أي $E = F/q$. وهنا تكون $F = qvB$ (المعادلة 4-20) والمجال الكهربائي المؤثر خلال القضيب يساوي:

$$E = \frac{F}{q} = \frac{qvB}{q} = vB \qquad \textbf{(4-21)}$$

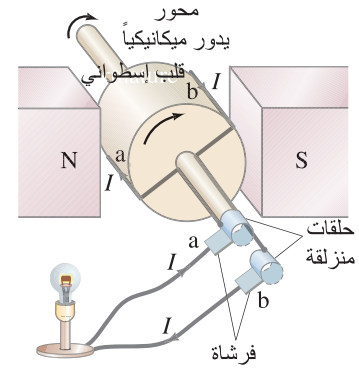
5-21 المولّدات الكهربائيّة

ناقشنا التيّار المتردّد في (البند 18-7). والآن سنناقش كيفيَّةَ توليد التيّار المتردّد (ac) بواسطة (**المولّد الكهربائي**) أو **الدينامو**، وهو واحد من أهمّ النتائج العمليّة لاكتشاف فارادي الكبير. إنّ المولّد الكهربائيّ يحوّل الطاقة الميكانيكيّة إلى طاقةٍ كهربائيّةٍ على عكس ما يحدث في المحرّك الكهربائيّ. وهناك مخطّطٌ مبسَّطٌ لمولّد التيّار المتردّد موضّح في (الشكل 21-15). يتكوّن المولّد من عدّة لفّات من الأسلاك (واحدة فقط موضّحة في الشكل) ملفوفة على قلب أسطواني يستطيع الدوران في المجال المغناطيسيّ مع محورٍ مثبتٍ في مركزه. يدور المحور بطريقة ميكانيكيّة (سقوط ماء، هواء متحرك، توربين بخار، حزام المولد في السيارة) وبالتالي تتولّد قوّة دافعة تأثيرية في الملفّ الدوّار ممّا يولّد تيّارًا كهربائيًّا. لو افترضنا أنّ القلب الأسطواني في (الشكل 21-15) يدور مع اتجاه عقارب الساعة. وعليه، فإنّ قاعدة اليد اليمنى -3 تطبق على الجسيمات المشحونة في السلك (أو من قانون لنز)، وتخبرنا إنّ التيار المتولد في فرع السلك الذي رمز إليه بالرمز b والملفوف على القلب الأسطواني يكون نحو الخارج، في حين يكون التيار في الفرع a نحو الداخل (كلّ فرع ثابت يشكل شريحة تدور مع القلب الأسطواني). بعد نصف دورة، يصبح الفرع b مكان الفرع a، لذا يصبح التيار المار في الفرع b نحو الداخل، ويكون التيار الناتج مترددًا.

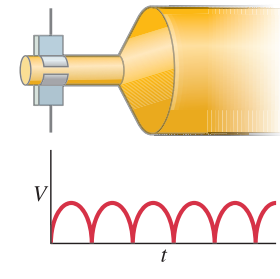
إنّ التردد f يساوي 60 Hz في كثير من بلدان العالم، كأمريكا وكندا وغيرها، في حين يساوي 50 Hz في بلدان أخرى كدول الخليج، في حين تكون بين المقدارين 50-60 Hz في كثير من الدول. وتُستخدم معظمُ المولّدات في العالم البخارَ ذا الضغط العالي الناتج من التسخين بواسطة الفحم، أو النفط، أو الغاز الطبيعي لإدارة التوربينات الموصولة بمحور المولّد. ويمكن استخدام الطاقة النووية أيضًا لإنتاج الطاقة الكهربائية. ويجب المحافظة على الترددين 50 Hz أو 60 Hz بدقة من قبل مصانع إنتاج الطاقة الكهربائية.

إنّ مولّد التيّار المستمر (dc) يشبه مولّد التيّار المتردّد (ac) باستثناء أنّ الحلقات الشريحية على القلب الأسطواني تُستبدل بعواكس للتيار ذات حلقة مشقوقة، (الشكل 21-16أ). كما هو مبيّن في محرّك التيّار المستمر. يمكن جعل الجهد الناتج متناسق الشكل بتوصيل مواسع على التوازي مع مخرج المولد (البند 16-9). أما الأكثر شيوعًا فهو استخدام عدد أكبر من اللفات على المحور كما في (الشكل 21-16 ب) مما ينتج جهدًا ثابتًا تقريبًا.

لقد استخدمت السيارات المولدات التي تنتج تيّارًا مستمرًّا (dc) في السابق، أمّا في هذه الأيام، فإنّها تستخدم مولدات للتيار المتناوب ممّا يجنّب مشاكل التلف أو الشرر الناتج حول الحلقات المشقوقة في عاكس التيار في مولد التيار المستمر. وتختلف مولدات التيار المتردد عن مولد التيار المستمر من حيث وجود مغناطيس كهربائي يدعى الدوّار، يغذّى من تيار بطارية، ويصنع بحيث يدور بواسطة حزام موصول مع الآلة البخارية. يمرُّ المجال المغناطيسي الناتج من الدوار خلال مجموعة من الملفّات الثابتة المحيطة به، منتجًا تيارًا في هذه الملفّات. يتحوّل هذا التيّار المتردّد الناتج إلى تيّارٍ مستمرٍّ لشحن البطاريّة باستخدام ديود من مادّةٍ شبه موصلة ممّا يسمح للتيار بالتدفق باتجاه واحد فقط.



الشكل 21-15 مولّد للتيار المتردد



الشكل 21-16 (أ) مولد تيار مستمر مع عاكس واحد للتيار. (ب) مولد تيار مستمر مع عدة عواكس للتيار وعدة لفات.

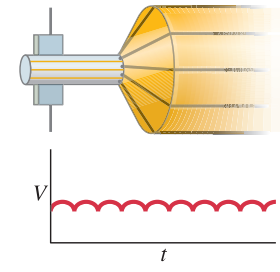
اشتقاق معادلة المولد

يرينا (الشكل 21-17) سلكٌ من لفّةٍ واحدةٍ على دوّار. العروة مصنوعة بحيث تدور مع اتجاه عقارب الساعة في مجال مغناطيسي منتظم $\vec{\mathbf{B}}$. وسرعة الضلعين ab، و bc عند لحظة معينة موضحة في الشكل. بالإضافة إلى ذلك، فإنّ ضلعي السلك bd، و da يتحركان بحيث تكون القوة المؤثرة في الإلكترونات فيهما باتجاه أطراف السلك وليس مع طوله، وتكون القوة الدافعة التأثيرية المتولدة بسبب القوة المؤثرة على الشحنات في الجزأينab ، و cd، من قاعدة اليد اليمنى -3 ، نرى أنّ التيار التأثيري المتولد في ab يكون من a باتجاه b، أمّا في الجزء السفلي، فيكون من c باتجاه d، ويستمر التدفق في العروة. ويعطَى مقدارُ القوة الدافعة التأثيرية المتولدة في ab من (المعادلة 21-3) باستثناء أنه علينا أخذ مركبة السرعة العمودية على B:

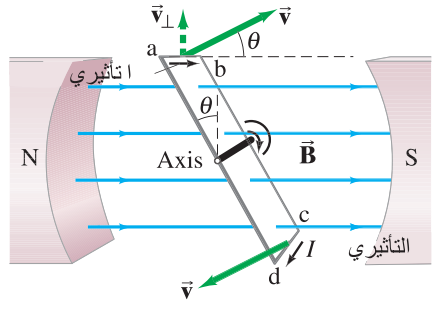
$$\mathscr{E} = Blv_{\perp}$$

حيث l هو طول الضلع ab. ونلاحظ من (الشكل 21-17) أنّ $v_{\perp} = v \sin\theta$؛ حيث θ هي الزاوية التي يصنعها وجه العروة مع الاتجاه الرأسي. إنّ القوة الدافعة التأثيرية المتولدة في cd لها المقدار نفسه وبالاتجاه ذاته، وتكون القوة الدافعة التأثيرية الكلية المتولدة هي حاصل جمع الاثنتين وتساوي

$$\mathscr{E} = 2NBlv \sin\theta$$



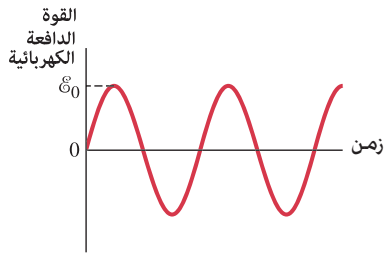
الشكل 21-17 القوة الدافعة التأثيرية تتولد في الضلعين ab، و cd حيث إن مركبات السرعة لهما عمودية على المجال B وتساوي $v \sin\theta$



إذا كان الملفُّ يدور بسرعة زاوية ثابتة ω، فإنّ الزاوية $\theta = \omega t$. بالإضافة إلى ذلك، فإنّ لدينا المعادلات الزاوية (معادلة 8 - 4) وهي $v = \omega r = \omega(h/2)$ حيث h هي طول bc، و ad. وتكون $\mathscr{E} = 2NB\omega l(h/2)\sin\omega t$ أو

$$\mathscr{E} = NB\omega A \sin\omega t \qquad \textbf{(5-21)}$$

حيث $A = lh$ هي مساحة العروة. إنّ هذه المعادلة صالحة لأيّ شكل من الملفّات وليس فقط الملفات المستطيلة كما في الاشتقاق السابق. لذا، تكون القوة الدافعة التأثيرية الناتجة على شكل موجة جيبية مترددة (انظر الشكل 18-21 والبند 18 - 7). ولأنّ ω تكون بوحدة الراديان لكلّ ثانية ($radians/s$) نستطيع أن نكتب $\omega = 2\pi f$، حيث f هو التردد.



الشكل 18-21 مولد كهربائي للتيار المتردد: القوة الدافعة التأثيرية الناتجة هي $\mathscr{E} = \mathscr{E}_0 \sin\omega t$ حيث $\mathscr{E}_0 = NA\omega B$ (معادلة 5-21)

6-21 القوّة الدافعة التأثيريّة الراجعة، والعزم المعاكس، والتيّارات الدواميّة

*القوّة الدافعة التأثيريّة الراجعة

يدور المحرّك الكهربائي، ويولّد طاقةً ميكانيكية عندما يمرّ فيه تيارٌ كهربائي. من وصفنا في (البند 20 - 10) لمحرك التيّار المستمرّ البسيط، تستطيع التّوقّع بأنّ الدوار داخل المحرك يتسارع بسبب عزم الازدواج المؤثر فيه. ومن جهة أخرى، يؤدي دوران الدوّار إلى تغيّر التدفق المغناطيسي خلال الملف، وبذلك تتولد قوة دافعة تأثيرية. تؤثر هذه القوة الدافعة التأثيرية بحيث تعاكس الحركة (**قانون لنز**) وتُسَمّى القوّة الدافعة التأثيرية الراجعة أو القوة الدافعة التأثيرية المعاكسة. كلّما كانت سرعة المحرك أكبر، كانت القوة الدافعة التأثيرية الراجعة أكبر أيضًا. يدور المحرك ويبذل شغلًا على شيءٍ ما. ولكن إذا لم يكن هنالك أيّ حمل، فإنّ سرعة المحرك تزداد إلى أن تصبح القوة الدافعة التأثيرية الراجعة مساوية لفرق الجهد الداخل. وعندما يكون هنالك حمل ميكانيكي، فإنّ سرعة المحرك تكون محدودة بواسطة الحمل، وتكون القوة الدافعة التأثيرية الراجعة أقلّ من فرق الجهد الخارجي المطبق. وكلما كان الحمل الميكانيكي أكبر، كانت سرعة دوّار المحرك أقلّ، وتكون القوة الدافعة التأثيرية الراجعة أقلّ ($\mathscr{E} \propto \omega$). المعادلة 21 - 5).

المثال 21-9 القوة الدافعة التأثيرية الراجعة في محرك كهربائي

إذا كانت مقاومة لفّات الدوار لمحرك تيار مستمر تساوي $5.0\ \Omega$ ووصل المحرك بجهد مقداره $120\ V$. عندما يصل المحرك إلى أقصى سرعة ضد حمله العادي، فإنّ القوة الدافعة التأثيرية الراجعة تساوي $108\ V$. احسب ما يلي:
(أ) التيار المار في المولد عند لحظة تشغيله.
(ب) التيار عندما يصل المحرك أقصى سرعة.

النّهج: عندما يبدأ المحرك بالدوران، تكون سرعته بطيئة. ولذلك، لا تكون هنالك قوة دافعة تأثيرية راجعة، ويكون فرق الجهد الوحيد هنا 120-V، ويعطى التيار من قانون أوم حيث $R = 5.0\ \Omega$. وعند السرعة القصوى، نأخذ القوة الدافعة التأثيرية الراجعة بالحسبان مع الجهد المطبق الذي يساوي 120-V.

الحلّ: (أ) عند لحظة التشغيل، فإنّ التيار ينتج من تطبيق جهد مقداره $120\ V$ على الملف الذي مقاومته $5.0\ \Omega$ ومن قانون أوم يكون

$$I = \frac{V}{R} = \frac{120\ \text{V}}{5.0\ \Omega} = 24\ \text{A}$$

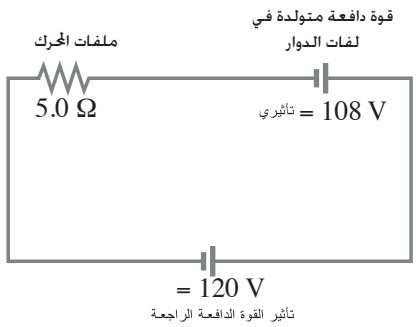
(ب) عندما يصل المحرك أقصى سرعة، فإنّ القوة الدافعة التأثيرية الراجعة تؤخذ بالحسبان في الدارة المكافئة كما هو موضح في (الشكل 21 - 19). في هذه الحالة ومن قانون أوم (أو قاعدة كيرتشوف) تكون

$$120\ \text{V} - 108\ \text{V} = I(5.0\ \Omega)$$

ولذلك يكون

$$I = \frac{12\ \text{V}}{5.0\ \Omega} = 2.4\ \text{A}$$

ملحوظة: توضّح هذه النتيجة أنّ التيار يكون كبيرًا جدًّا عندما يبدأ المحرك بالدوران، وهذا يبيّن خفوت الضوء في منزلك بعد فترة وجيزة من تشغيل المولد الكهربائي. إنّ التيار الابتدائي الكبير يجعل فرق الجهد الخارج يتناقص؛ حيث إنّ أسلاك المنزل لها مقاومة، وهنالك تناقص في الجهد حولها عندما تسري فيها تيارات كبيرة.



الشكل 19-21 تحتوي دارة محرك كهربائي على قوة دافعة تأثيرية راجعة. (المثال 21-9)).

تأثير القوة الدافعة التأثيرية الراجعة في التيار.

المثال المفاهيمي 21-10 **الحملُ الزائد للمحرّك الكهربائيّ**

عند استخدام أداةٍ مثل الخلاط، أو المثقاب الكهربائي، أو مكنة الخياطة، فإنّه عندما يصبح الحمل زائدًا على الأداة، فإنّ الأداة تتباطأ بشكل واضح أو تتوقف، وإذا بقي مصدر القدرة موصولًا، فإنّ الأداة ستحترق أو تتلف. فسّر سبب ذلك.

تطبيق الفيزياء
احتراق المحرك

الجواب: تصمم المحركات الكهربائية لتعمل بسرعة معينة عند فرق جهدٍ معيّنٍ. لذا، فالمصمّمون يأخذون بالحسبان القوة الدافعة التأثيرية الراجعة أو المعاكسة. عندما تقل سرعة الدوران، فإنّ قيمة القوة الدافعة التأثيرية الراجعة لا تصبح كبيرة كما هو متوقع ($\mathscr{E} \propto \omega$، المعادلة 21 - 5). وعليه، سيزداد التيار، وقد يصبح كبيرًا بما فيه الكفاية بحيث تزداد حرارة لفات المحرك إلى الدرجة التي تؤدي إلى إتلاف المحرك.

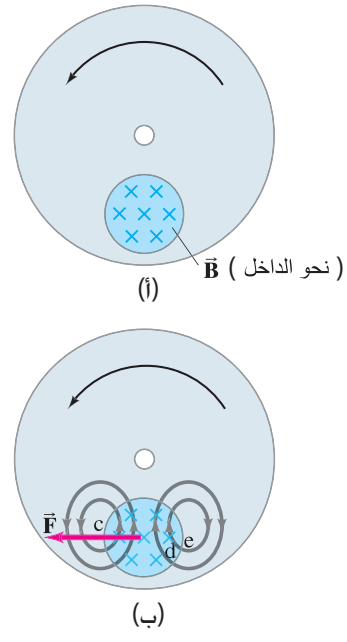
*العزم المعاكس

العزم المعاكس

في المولّدات، يكون الوضع عكس ما هو عليه في المحركات. كما رأينا، فإنّ الدوران الميكانيكي لقلب المولد (الدوّار) يولد قوة دافعة تأثيرية في العُرى. فإذا كان المولد غير موصول بدارة خارجية، فإنّ القوة الدافعة المتولدة تؤثر في أطراف المولد، ولكن دون وجود تيار. في هذه الحالة، تبذل جهود قليلة لإدارة القلب الدوّار. ولكن إذا وصل المولد بأداة تستهلك تيارًا، فإنّ التيار يمر في الملف الدوار. ولأنّ هذا الملف الذي يحمل تيارًا موجود في مجال مغناطيسي خارجي، فإنه سيتأثر بعزم ازدواج (مثل المحرك) وهذا العزم يعاكس الحركة (استخدم قاعدة اليد اليمنى- 2 لتحديد اتجاه القوة في السلك في الشكلين 21-15 و 21-17). يُسَمّى هذا العزمُ العزمَ المعاكس (*Counter torque*). كلما كان الحمل الكهربائي أكبر(أي كلّما كان التيار المستهلك أكبر) كان العزم المعاكس أكبر أيضا. وهنا يجب أن يكون العزم الخارجي المطبق (المؤثر) أكبر حتى يستمر المولد في الدوران. ويمكن فهم هذا منطقيًا من قانون حفظ الطاقة. إذن، نحتاج إلى بذل طاقة ميكانيكة أكبر لإنتاج طاقة كهربائية أكبر.

* التيارات الدوّامية

الشكل 21-20
إنتاج التيارات الدوامية في عجلة دوارة



إنّ التيّارات التأثيريّة لا تقتصر على مسارٍ محدّدٍ دائمًا كما في الأسلاك. خذ مثلًا عجلةً فلزيةً دوارة كما هو مبيّن في (الشكل 21-20أ). إذا طُبّق مجال مغناطيسي خارجي لداخل الورقة على مساحة محدودة من العجلة كما هو موضّح، فإنّ الجزء من العجلة الذي يكون في المجال المغناطيسي يمتلك قوة دافعة تأثيرية بسبب دوران الموصل الذي يحمل إلكترونات داخله. إنّ تدفق التيار المقترح في العجلة يكون نحو الأعلى في حيّز المجال المغناطيسي (الشكل 21-20ب)، والتيار يتدفق بمسار سفلي معاكس خارج هذا الحيّز. لماذا؟ اعتمادًا على قانون لنز، فإنّ التيارات التأثيرية تعاكس التغير الذي يسببها. خذ الجزء من العجلة الذي رمزنا إليه بالرمز c في (الشكل 21-20ب) حيث المجال المغناطيسي فيه يساوي صفرًا، ولكنه قريب من الوصول إلى الحيز الموجود فيه المجال $\vec{\mathbf{B}}$ لداخل الورقة. ولمعاكسة هذه الزيادة في المجال المغناطيسي للداخل؛ فإنّ التيار التأثيري المتولد يجب أن يكون عكس اتجاه عقارب الساعة لإنتاج مجال مغناطيسي يشير إلى خارج الورقة (قاعدة اليد اليمنى -1). وبالكيفية نفسها، فإنّ الحيز d على وشك الحركة لـe حيث يساوي صفرًا. وهنا، فإنّ التيار يكون مع اتجاه عقارب الساعة لإنتاج مجال مغناطيسي للداخل لمعاكسة النقصان في التدفق للداخل. هذه التيارات تُسَمّى **التيارات الدوامية** (*eddy currents*) ويمكن أن تظهر في أيّ موصلٍ يتحرّك خلال مجال مغناطيسي بحيث يتغير التدفق.

في (الشكل 21-20 ب)، يؤثّر المجال المغناطيسي بقوة $\vec{\mathbf{F}}$ في التيار التأثيري المتولّد. وهذه القوة تعاكس الحركة الدورانية. ويمكن استعمال التيارات الدوامية بهذه الطريقة كأداة إيقاف للسيارات. لإيقاف السيارة؛ نشغّل مغناطيسًا كهربائيًّا بحيث يطبق مجاله على العجلات أو على القضبان الحديدية المتحركة في الأسفل.

كما يمكن استعمال التيارات الدوامية أيضًا لتقليل ذبذبات نظام معين. وقد تكون التيارات الدوامية من جهة أخرى مشكلة، فمثلا: التيارات المتولدة في القلب الدوار في المحرك أو المولد ينتج حرارة ($P = I\mathscr{E}$) وتضيع طاقة. ولتقليل التيارات الدوامية؛ فإنّ الدوّار يصنع من شرائح فلزية من الحديد مفصولة بعضها عن بعض. الطول الكلي لمسار التيارات الدوامية مقيد لكلّ شريحة مما يزيد المقاومة الكليّة، وبالتالي يقلّ التيار، فتقلّ الطاقة الضائعة.

في المطارات (الشكل 21-21) تكشف الأجسام الفلزية باستخدام الحثّ الكهرومغناطيسي والتيارات الدواميّة. توضع عدة ملفات في الجدران التي يمرّ من خلالها الأشخاص بإيقاعات مختلفة. وبتقنية تُسَمّى (حث النبضة)، حيث تعطى الملفات نبضات متكررة من التيار (بحدود المايكرو ثانية) مئات أو آلاف المرات في الثانية الواحدة. تنتج كلّ نبضة في الملف مجالا مغناطيسيًّا لفترةٍ زمنيةٍ قصيرة جدًّا. عندما يمرّ المسافر خلال الجهاز، فإنّ أيّ جسم فلزي محمول سوف يحوي تيارات دوامية تتكون فيه. وتظهر هذه التيارات الدوامية بعد كلّ نبضة مدخلة، ومن ثمّ يتكون مجال مغناطيسي بسيط نتيجة هذه التيارات (قبل النبضة التالية) يمكن كشفه باستخدام جهاز إنذار؛ كما تستخدم المخازن والمكتبات أيضا أنظمة مشابهة للقبض على اللصوص.

7-21 المحوّلات ونقل القدرة

المحوّل أداةٌ تُستخدم لزيادة فرق الجهد المتردّد أو إنقاصه. وهذه المحوّلات موجودةٌ في كلّ مكان؛ في التلفاز لإعطاء فرق جهدٍ كبيرٍ في أنبوبة الصورة، وفي أجهزة تضخيم الصوت المحمولة (الستيريو)، وعلى أعمدة الكهرباء (الشكل 21-22) لخفض فرق الجهد العالي الناتج من المولدات في شركات الكهرباء إلى الجهد المستخدم في المنازل(120 V أو 240 V) وهناك العديد من التطبيقات الأخرى. يتكون المحول من ملفين؛ أحدهما يُسَمّى الملف الابتدائي، والآخر يُسَمّى الملفَّ الثانوي. ويشترك الملفّان بقلبٍ من الحديد مُصَمَّمٌ بحيث يقلّل من تأثير التيارات الدوامية (البند 21-6) كما هو موضح في (الشكل 21-23). تصمم المحولات بحيث يمرّ التدفق المغناطيسي جميعه (تقريبًا) الناتج من التيار في الملف الابتدائي خلا ل الملف الثانوي، وسنفترض أنّ هذا صحيح فيما سيمر معنا لاحقًا. كذلك فإننا سنفترض أنّ الطاقة المفقودة يمكن إهمالها (في المقاومة والتخلف). تقريب جيد للمحوّلات الحقيقية يعطينا كفاءة أفضل من 99%.

عندما يطبق فرق جهد متردد على الملف الابتدائي، فإنّ التغير في المجال المغناطيسي ينتج فرق جهد تأثيري بالتردد نفسه في الملف الثانوي. ومن ناحية أخرى، فإنّ فرق الجهد المتولد سوف يكون مختلفًا اعتمادًا على عدد اللفات في كلّ ملف. ومن قانون فارادي، فإنّ فرق الجهد أو القوة الدافعة التأثيرية المتولدة في الملف الثانوي هي

$$V_S = N_S \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t}$$

حيث N_S هي عدد لفّات الملفّ الثانوي، أمّا $\Delta \Phi_B / \Delta t$ فهي المعدّل الذي يتغيّر فيه التدفق المغناطيسي. يتناسب فرق الجهد المدخل للملف الابتدائي V_P مع معدل تغيّر التدفق خلاله حسب المعادلة

$$V_P = N_P \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t}$$

حيث N_P هي عدد لفّات الملفّ الابتدائي. وإذا قسمنا هاتين المعادلتين على بعضهما بعضًا بفرض عدم ضياع في التدفق، فسنحصل على:

$$\frac{V_S}{V_P} = \frac{N_S}{N_P} \qquad \textbf{(6-21)}$$

تخبرنا *معادلة المحوّل* هذه كيفية ارتباط فرق جهد الملف الثانوي (الخارج) مع فرق جهد الملف الابتدائي (الداخل)، V_S و V_P في (المعادلة 21-6) يمكن أن تكون قيمة جذر متوسط المربعات rms لكلا الجهدين V_S أو V_P (البند 21-7) أو القيمة القصوى (peak value) لكليهما. إنّ فرق الجهد المستمر DC لا يعمل في المحولات الكهربائية؛ بسبب عدم وجود تغيّر في التدفق المغناطيسي.

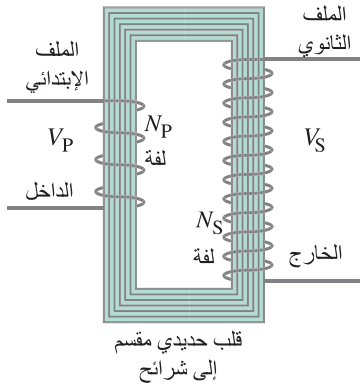
تطبيق الفيزياء

كواشف الفلزات في المطارات

الشكل 21-12 كواشف الفلزات في المطارات

الشكل 21-22 إصلاح محوّل كهربائي على عمود للكهرباء

الشكل 21-23 محوّل كهربائي رافع للجهد $(N_P = 4, N_S = 12)$



Transformer equation

إذا كان عدد لفّات الملفّ الثانوي أكبر من عدد لفّات الملفّ الابتدائي ($N_S > N_P$)، فسيكون لدينا **محوّل رافع للجهد (step – up)**. ويكون فرق جهد الملفّ الثانوي أكبر من فرق جهد الملف الابتدائي. فمثلًا: إذا كان عدد لفّات الملفّ الثانوي ضعف عدد لفّات الملفّ الابتدائي، فإنّ فرق جهد الملفّ الثانوي يكون ضعف فرق جهد الملف الابتدائي. وإذا كانت N_s أقلّ من N_p، فسيكون لدينا **محوّل خافض للجهد (step – down)**. وعليه، فإنّ فرق الجهد المتردّد يمكن أن يزداد (أو ينقص) باستخدام المحوّلات، وهذا لا يحصل بلا مقابل. فقانون حفظ الطاقة يشير إلى أنّ القدرة الناتجة لا يمكن أن تكون أكبر من القدرة الداخلة. وتكون كفاءة المحوّل المصمّم جيدًا أكبر من 99%، أي أنَّ طاقة قليلة جدًّا تضيع على شكل حرارة، والقدرة الخارجة تساوي القدرة الداخلة تقريبا، حيث إنّ $P=IV$ (معادلة 18-5) يكون

$$I_P V_P = I_S V_S$$

أو:

$$\frac{I_S}{I_P} = \frac{N_P}{N_S} \qquad \textbf{(7 - 21)}$$

معادلة المحول الثانية

المثال 11-21 محوّل الراديو (المذياع) المنزلي

يستخدم محوّل في المذياع المنزلي لتحويل فرق الجهد المتردّد من 120-V إلى 9.0-V (هذه الأداة تحوي أيضًا ديود يحوّل 9.0-V من فرق جهد متردّد إلى ثابت ليصبح مثل بطارية فرق جهدها 9.0-V). إذا كان الملفُّ الثانوي يحوي 30 لفةً، وكان الراديو يستهلك تيارًا مقداره 400 mA، فاحسب ما يلي: (أ) عدد لفّاتِ الملفِّ الابتدائي. (ب) التيار في الملف الابتدائي. (جـ) القدرة المحوّلة.

النّهج: نفترض أنّ المحوّل هنا هو محـــوّلٌ مثاليٌّ دون ضياع في التدفق. وعليه، نستطيع تطبيق (المعادلة 21-6) ثم (المعادلة 21-7).

الحلّ: (أ) المحول هنا هو محوّل خافض للجهد. ومن (المعادلة 21-6) نحصل على

$$N_P = N_S \frac{V_P}{V_S} = \frac{(30)(120\ \text{V})}{(9.0\ \text{V})} = 400\ \text{turns}$$

(أ) من (المعادلة 21-7) نحصل على

$$I_P = I_S \frac{N_S}{N_P} = (0.40\ \text{A})\left(\frac{30}{400}\right) = 0.030\ \text{A}$$

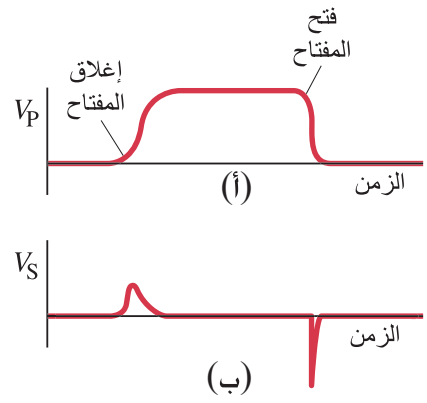
(جـ) القدرة المحوّلة هي

$$P = I_S V_S = (0.40\ \text{A})(9.0\ \text{V}) = 3.6\ \text{W}$$

ملحوظة: القدرة في الملفِّ الابتدائي هي $P = (0.030\ \text{A})(120\ \text{V}) = 3.6\ \text{W}$ وهي القدرة نفسها في الملف الثانوي. لذا، تكون كفاءة المحوّل في نقل القدرة الكهربائيّة لهذا المحوّل المثالي 100%.

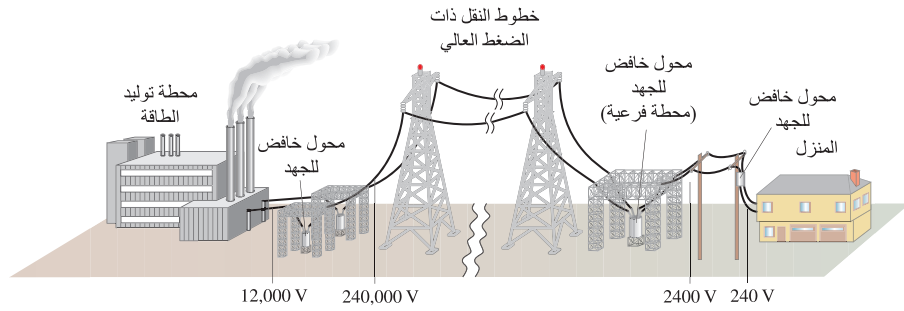
تمرين د: كم عدد اللفّات التي يجب أن يحتويها الملفّ الثانوي في (المثال 21-11) ($N_P = 400$ turns) إذا كان الملفُّ يعمل على تقليل فرق الجهد من 120-V ac إلى 3.0-V ac؟

الشكل 21 - 24 عند تطبيق فرق جهد مستمر يفتح ويغلق كما هو مبين في (أ) ينتج نبضات جهد في الثانوي (ب) تدريج الجهد في (أ) و (ب) غير متساوي.



تطبيق الفيزياء
نظام الاشتعال في السيارة

يعمل المحوّل على فرق جهدٍ متردّد فقط. وتطبيق فرق جهد ثابت على الملف الابتدائي لا ينتج تغيّرًا في التدفق، أي، لا تتولّد قوّة دافعة تأثيرية في الملف الثانوي. ومن جهة أخرى، إذا قمنا بتطبيق جهد ثابت للحظة معيّنة عن طريق فتح المفتاح وإغلاقه، فسيتكون تيار تأثيري في الملفّ الثانوي. على سبيل المثال، عند تطبيق جهد ثابت وإغلاقه في دارة الملف الابتدائي كما هو موضّح في (الشكل 21-24أ)، فإنّ الجهد التأثيري الناتج في الملفّ الثانوي يكون كما هو موضّح في (الشكل 21-24 ب). لاحظ أنّ جهد الملفِّ الثانويِّ يصبح صفرًا عند تطبيق فرق الجهد المستمرّ لفترةٍ طويلة. هذا هو أساس عمل نظام الاشتعال في السيارة. إنّ فرق الجهد العالي يطبق لإنتاج شرارة في التجويف الذي توضع فيه شمعة الاشتعال (البوجيّة) التي تشعل مزيج البنزين والهواء. ويعمل المحوّل المستخدم هنا كملفِّ إشعال، حيث يحول الـ 12 V الناتجة من البطاريّة (عند غلق دارة الملف الابتدائي) إلى مسمار (spike) يصل جهده إلى 30 kV يؤخذ من الملفّ الثانوي.



الشكل 21 - 25 عملية نقل القدرة الكهربائية من مولدات القدرة للبيوت تستخدم خلالها المحولات الكهربائية على مراحل مختلفة.

تطبيق الفيزياء
تساعد المحولات في نقل القدرة الكهربائية

تؤدّي المحوّلات دورًا مهمًّا في نقل الكهرباء. تقع مولّدات الكهرباء عادةً على مسافةٍ معيَّنةٍ من قاطني المدن والقرى. لذا، يجب نقل الكهرباء إلى مسافاتٍ بعيدةٍ (الشكل 21-25). هنالك دائمًا فقدان للقدرة في خطوط النقل، وهذا الفقدان يمكن تقليله إذا كانت القدرة تنتقل من جهد مرتفع باستخدام المحوّلات كما يرينا المثال التالي:

المثال 12-21 خطوط نقل القدرة

ينقل في المتوسط 120 kW من القدرة الكهربائيّة إلى قريةٍ صغيرةٍ تبعد 10 km عن مولّد القدرة. إذا كانت المقاومة الكلية لخطوط النقل 0.40 Ω، فاحسب القدرة الضائعة إذا نقلت القدرة من مصدر يعطي: (أ) 240 V . (ب) 24,000 V.

النّهج: لا نستطيع استخدام $P = V^2/R$؛ لأنّه إذا كانت R هي مقاومة خطوط النقل، فإنّنا نعرف الجهد الذي يتناقص خلالها، حيث إنّ فرق الجهد المُعطى يطبّق على الخطوط والحمل (القرية) مع بعضها بعضًا. ولكن نستطيع تحديد التيار I في الخطوط $(= P/V)$ وبالتالي، فإنّ القدرة تضيع من $P_L = I^2R$ لكلتا الحالتين (أ)، و (ب).

الحلّ: (أ) إذا أرسلت 120 kW على فرق جهد 240 V، فإنّ التيار الكلي سيكون

$$I = \frac{P}{V} = \frac{1.2 \times 10^5\ \text{W}}{2.4 \times 10^2\ \text{V}} = 500\ \text{A}$$

وتساوي القدرة الضائعة P_L في خطوط النقل

$$P_L = I^2R = (500\ \text{A})^2(0.40\ \Omega) = 100\ \text{kW}$$

وهناك أكثر من 80% من القدرة سوف يضيع في خطوط النقل على شكل حرارة.

(ب) إذا أرسلت 120 kW على فرق جهد 24.000 V، فسيكون التيار الكلي

$$I = \frac{P}{V} = \frac{1.2 \times 10^5\ \text{W}}{2.4 \times 10^4\ \text{V}} = 5.0\ \text{A}$$

وتساوي القدرة الضائعة في خطوط النقل

$$P_L = I^2R = (5.0\ \text{A})^2(0.40\ \Omega) = 10\ \text{W}$$

وهي أقلّ من $\frac{1}{100}$ لـ 1%

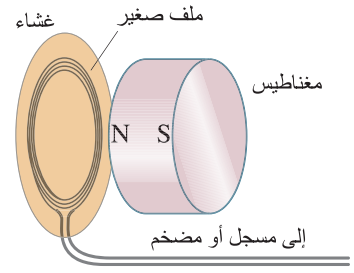
ملحوظة: لاحظنا أنّه كلّما كان فرق الجهد أكبر كان التيار أقلّ. ولهذا، تكون الطاقة الضائعة على شكل حرارة في خطوط النقل أقلّ. ولهذا السبب، فإنّ القدرة الكهربائيّة تنقل على جهدٍ عالٍ جدًّا مثل 700 kV.

إنّ الخاصية الكبيرة للجهود المتردّدة، والتي هي سبب استخدامها الواسع هي أنّ الجهد يتغيّر بسهولة زيادة أو نقصانًا بواسطة المحوّل. الجهد الخارج من المولّدات يرفع لنقله، وعند وصوله إلى المدن، يخفض على عدّة مراحل عند محطّات كهربائيّة قبل توزيعه على البيوت. إنّ الجهد على الخطوط الموجودة في شوارع المدن يكون عادةً 2400 V ويخفض إلى 240 V أو 120 V للاستخدامات المنزلية بواسطة المحوّلات (انظر الشكلين 21 - 22، و 21 - 25).

8-21 تطبيقات على الحث: أنظمة الصوت، ذاكرة الحاسوب، جهاز الرصد الزلزالي (السيزموجراف)، دارة قطع التيار (GFCI).

الميكروفون

هنالك أنواعٌ مختلفةٌ من الميكروفونات التي يعمل كثيرٌ منها على مبدأ الحث. أحد أشكال الميكروفونات يعمل عكس عمل سمّاعة الصوت (البند 20-10). يوصل ملفٌّ صغيرٌ بغشاء، ثمّ يُوضع قريبًا من مغناطيس طبيعيٍّ كما هو موضّح في (الشكل 21-26). يتحرّك الملفّ في المجال المغناطيسي عندما تصطدم موجات الصوت بالغشاء، وهذه الحركة تولّد قوّة دافعة تأثيرية. إنّ تردّد القوّة الدافعة التأثيريّة المتولّدة هو تردّد الأمواج الصوتيّة الصادرة نفسه. وهذه القوّة الدافعة التأثيريّة تولّد إشارة يمكن تضخيمها وإرسالها إلى السمّاعة أو أيّ مُسْتَقْبِل.



الشكل 21-26 مخطط للميكرفون الذي يعمل بواسطة الحث

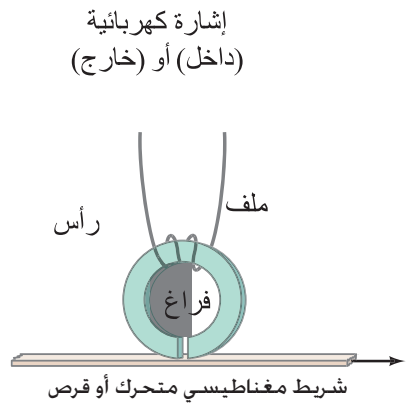
تطبيق الفيزياء
الحواسيب والمعلومات الرقمية

القراءة والكتابة على الشريط والأقراص

إنّ التسجيل والقراءة من الأشرطة أو الأقراص يكون باستخدام رؤوس مغناطيسية. تحوي أشرطة التسجيل المرئية أو المسموعة طبقة رقيقة من أكسيد مغناطيسي على شريط بلاستيكي رفيع. عند التسجيل، ترسل إشارة الأوديو أو الفيديو (المسموعة أو المرئية) إلى رأس التسجيل الذي يؤثر كمغناطيس كهربائي رفيع (الشكل 21-17) فيُمغنط الأجزاء الرقيقة من الشريط الذي يمرُّ على فتحة ضيقة على الرأس في كلّ لحظة. وعند تشغيل الشريط، فإنّ التغيرات المغناطيسية للشريط المتحرك خلال الفتحة تسبب تغيرات مصاحبة، تغيّر المجال المغناطيسي خلال الرأس الفلزي، وهذا يولّد قوّة دافعة تأثيريّة في الملف (قانون فارادي). هذه القوّة الدافعة التأثيرية المتولدة هي الإشارة الخارجة التي يمكن تضخيمها وإرسالها إلى السمّاعة (أوديو) أو الشاشة (فيديو). في مسجلات الصوت (الأوديو) والصورة (الفيديو) تكون الإشارات متشابهة. وتتغيّر سعتها بشكلٍ مستمرٍّ مع الزمن. التغيّر في درجة تمغنط الشريط عند أيّ نقطة يعكس التغيّر في السعة والتردّد للإشارتين الصوتيّة أو المرئيّة.

إنّ المعلومات الرقمية كالمستخدمة في أقراص الحاسوب (القرص الصلب أو الأقراص المرنة) أو في أشرطة الحاسوب المغناطيسية، وبعض أنواع أشرطة التسجيل الرقمية تُكتب وتُقرأ بواسطة رؤوس كالمشروحة مسبقًا (الشكل 21-27). الفرق الجوهري في الإشارات التي لا تكون تناظرية ولكنّها رقميّة، وبشكلٍ جزئيٍّ ثنائية، وتعني أنّ هنالك قيمتين ممكنتين فقط للعدد الكبير من المساحات الموجودة على الشريط أو القرص التي سبق تحديدها. القيمتان الممكنتان هما 0، و1. إنّ فرق جهد الإشارة لا يتغيّر بشكل مستمر، ولكنه يأخذ قيمتين 5 V+ أو 0 V فقط، على سبيل المثال تعود لـ1 أو 0. ولذلك، فإنّ المعلومات تحمل كسلسلة من القطع الصغيرة (*bits*)، كلّ منها يمكن أن يمتلك قيمتين فقط 1 أو 0.

(ب)



(أ)

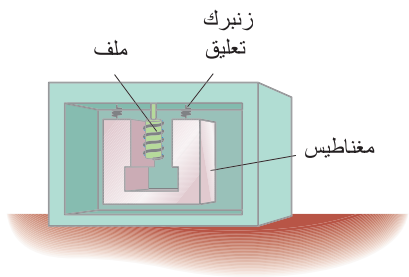
الشكل 21-27 (أ) الرأس المستخدم في القراءة والتسجيل على الشريط أو القرص. في الكتابة أو التسجيل، الإشارة الكهربائية الداخلة للرأس الذي يؤثر كمغناطيس كهربائي تمغنط المكان الذي تمر عليه على الشريط أو القرص. في القراءة، يولد تغيرُ المجال المغناطيسي على الشريط المتحرك تغيراتٍ في المجال المغناطيسي للرأس، مما يولد بدوره قوة دافعة تأثيرية في الملف وهي الإشارة الخارجة.
(ب)صورة لأداة صلبة ترينا عدة أقراص ورؤوس تستخدم للقراءة والكتابة، وتستطيع التحرك بسرعة من حافة القرص إلى مركزه.

بطاقة الصراف الآلي

عندَ وضعِ بطاقةِ الصرّافِ في محلٍّ تجاريٍّ أو محطَّةِ وقود، فإنّ الشريط المغناطيسي الموجود على ظهر البطاقة يمرُّ على رأس قاريء كالموجود في المسجل أو الحاسوب. يحتوي الشريط المغناطيسي على معلومات شخصية عن الرصيد، ويكون متصلًا مع خط هاتف لإثبات أنّ الرصيد قابل للاستخدام.

جهاز الرصد الزلزالي (السيزموجراف)

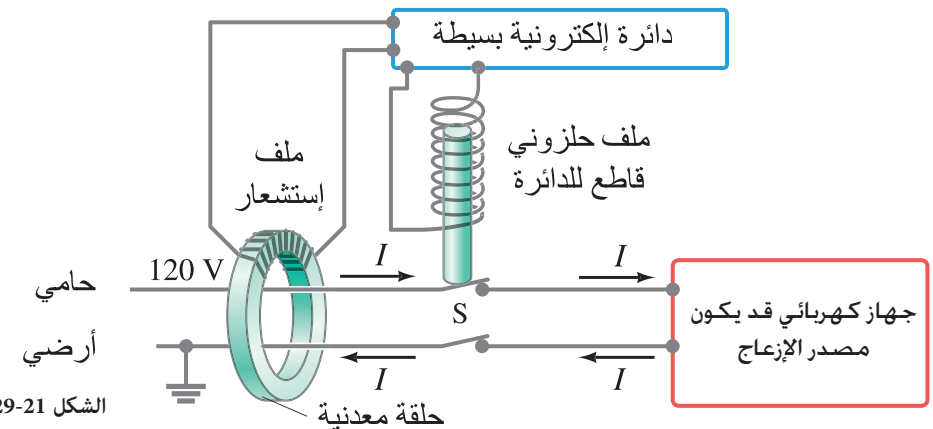
يُستخدم جهاز الرصد الزلزالي في الجيوفيزياء لقياس شدّة موجات الهزّات الأرضيّة باستخدام مغناطيس وملف، أحدهما ثابت، والآخر متحرك (معلق بواسطة زنبرك، الشكل 21-28). تولّد الحركة النسبية للمغناطيس والملف عندما تحدث هزّة أرضيّة قوّة دافعة تأثيريّة



الشكل 21-28 أحد أنواع أجهزة الرصد الزلزالي.

دارة قطع التيار

قواطع التيار (الفيوزات) (البندان 18-16، و20-7) تحمي المباني من الحرائق والأجهزة من التلف عند مرور تيارات عالية غير متوقعة، ولكنّها لا تقطع التيار إلا إذا كان كبيرًا بحيث يسبب هلاك الإنسان وتتوافر الحماية إذا كانت سرعة قطع التيار كافية. تستخدم دارة قطع التيار للحماية، ويمكن أن تتفاعل مع تيارات أصغر من 5m A.



الشكل 21-29 دارة قطع التيار (GFCI)

يُعدّ الحثّ الكهرومغناطيسي الأساس الفيزيائي لعمل دارة قطع التيار. كما هو موضّح في (الشكل 21-29)، فإنّ خطّي القدرة الكهربائية الموصولين بجهاز معيّن (بالأحمر) يمرّان خلال حلقة فلزية صغيرة. وحول الحلقة، هنالك لفات من سلك رفيع يعمل كملف حساس. في الظروف العادية، يوازَن التيار المار في السلك حامي تمامًا بواسطة التيار الراجع في السلك المتعادل. إذا حدث خطأ ما، فإنّ السلك حامي يلامس الفلز غير الموصول بالأرضي في الجهاز المستخدم، بعض التيار يمكن أن يمر بجسم الشخص الذي يلامس الجهاز مرورًا بالأرض، والتيار العائد في السلك المتعادل سيصبح أقلّ من التيار المار في السلك الساخن، وسيكون هنالك تيار صافٍ مار خلال الحلقة الحديدية في دارة قطع التيار. ولأنّ التيار هو تيار متردد، فإنّه يتغيّر وينتج مجالًا مغناطيسيًّا متغيرًا في الحديد ممّا يولّد قوّةً دافعةً تأثيرية في الملفّ الحسّاس الملفوف حول العروة الحديدية في دائرة قطع التيار، على سبيل المثال، إذا كان الجهاز يعمل على 8.0 A، ويمر خلال الشخص تيارًا مقداره 100 mA (= 0.1 A)، فإنّ 7.9 A سوف تظهر في السلك المتعادل. القوة الدافعة التأثيرية الناتجة في الملفّ الحسّاس من فرق 100-mA هذا سوف يضخم بواسطة دارة ترانزستور بسيطة ترسل إلى دارة ملفٍّ حلزونيٍّ قاطعة، فتؤدي إلى فتح الدارة بواسطة القاطع S. وفي حالة كون الجهاز الذي يحدث فيه الخطأ موصولا بالأرض، فإنّ فرق التيار يكون عندئذٍ عاليًا عندما يكون هنالك خطأ ما وتعمل دارة قطع التيار مباشرة.

ويمكن أن تكون دارة قطع التيار (GFCI) حساسة لتيارات أقلّ من 5 mA، وتتفاعل خلال 1m sec مما ينقذ أرواح الأفراد. وقد تكون ذا حجم صغير بحيث توضع داخل الجدران (الشكل 21-30) على شكل قابس كالذي يوصل به مجفف الشعر أو أداة تحميص الخبز. وبشكل خاص، من المهم أن توصل قواطع التيار في المطابخ، وغرف النوم، والحمامات، والمخارج، وبالقرب من برك السباحة حيث يكون الناس أكثر تعرضًا لخطر ملامسة الأسلاك الكهربائية. تحتوي دارة قطع التيار دائمًا على مفتاح اختبار (للتأكد من عملها) ومفتاح إغلاق (بعد أن تعمل الدارة على قطع التيار).

الشكل 21-30
دارة قطع التيار على شكل قابس يوضع في الجدار وتميز بأنّ لها مفتاحي اختبار وإغلاق.

(أ)

(ب)

9-21 الحث *

الحث المتبادل *

إذا وُضِعَ ملفّان بالقرب من بعضهما كما في (الشكل 21 - 31)، فإنّ تغيّر التيار في أحدهما سيولّد قوّة دافعة تأثيرية في الآخر. وعند تطبيق قانون فارادي على الملف الثاني، ستكون القوة الدافعة التأثيرية $\mathscr{E}_2$ المتولدة فيه تتناسب مع معدل تغير التدفق الذي يمر خلاله. ينتج التغيّرُ في التدفّق في الملفّ الثاني من تغيّرِ التيار في الملفّ الأول. لذا، تتناسب $\mathscr{E}_2$ مع معدل تغير التيار في الملفّ الأول

$$\mathscr{E}_2 = -M\frac{\Delta I_1}{\Delta t} \qquad \textbf{(21-8أ)}$$

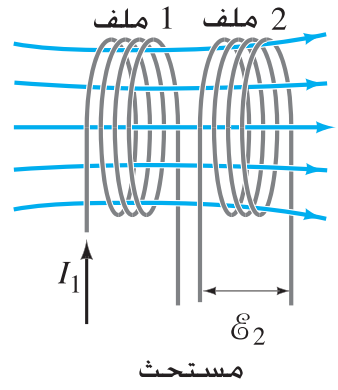
حيث افترضنا أنّ الفترة الزمنية Δt صغيرة جدًّا، وثابت التناسب M يُسَمّى معامل الحثّ المتبادل (الإشارة السالبة بسبب قانون لنز). إنّ وحدة معامل الحث المتبادل هي $\Omega\cdot s = V\cdot s/A$، وتُسَمّى الهنري (H) نسبة إلى جوزيف هنري حيث $1\,H = 1\,\Omega\cdot s$.

معامل الحثّ المتبادل M هو ثابت لا يعتمد على التيار I_1، بل على الأبعاد الهندسية كالحجم، والشكل، وعدد اللفّات، والموقع النسبي لكلا الملفين، بالإضافة إلى أنّ الحديد (أو أيّ مادة فرومغناطيسية) موجود داخل الملفين أم لا. وعلى سبيل المثال، كلما كان الملفان في (الشكل 21-31) أبعد عن بعضهما بعضا ، قلت خطوط التدفق التي تمرّ خلال الملف الثاني، و كانت قيمة M أقلّ. إذا افترضنا الوضع المعاكس: تغير التيار في الملف الثاني يولد قوة دافعة تأثيرية في الملف الأول، فإنّ ثابت التناسب M تبقى له القيمة نفسها، وهنا تكون

$$\mathscr{E}_1 = -M\frac{\Delta I_2}{\Delta t} \qquad \textbf{(21-8ب)}$$

المحوّل هو أحد الأمثلة على الحث المتبادل الذي يكون فيه الترابط أكبر ما يمكن عندما تمرّ خطوط التدفق كلّها خلال الملفين تقريبًا. وهنالك تطبيق آخر للحثّ المتبادل، وهو بعض أنواع أجهزة تنظيم نبضات القلب التي تحافظ على تدفق الدم في قلب المصاب (البند 19-6) حيث تمر القدرة الكهربائية في ملف خارجي إلى ملفٍّ ثانٍ في الجهاز المثبت في القلب عن طريق الحث المتبادل. وهذا النوع ذو أفضلية على الأنواع الأخرى التي تستخدم البطاريات؛ لأنّ الجراحين لا يحتاجون إلى تبديل البطارية عند نفادها.

الحث المتبادل



الشكل 21-31 يولد تغيرُ التيار في أحد الملفين قوةً دافعة تأثيرية في الملف الثاني.

تطبيق الفيزياء

جهاز تنظيم نبضات القلب

الحثّ الذّاتيّ *

يُطَبَّقُ مبدأُ الحثّ أيضًا في حالة وجود ملفٍّ واحدٍ معزول. عندما يتغيّر التيار المار في الملفّ، فإنّ تغيّرًا في التدفّق ينتج داخله . وهذا بدوره يولّد قوّةً دافعةً تأثيريّة، تعاكس التغيّر في التدفّق (قانون لنز)، وهي تشبه القوة الدافعة التأثيرية الراجعة المتولّدة في المحرك الكهربائي (على سبيل المثال، إذا ازداد التيار المار في الملف، فإنّ زيادة التدفق المغناطيسي تولّد قوّةً دافعةً تأثيريّةً تعاكس التيار الأصلي وتؤدي إلى تأخير زيادته). وتتناسب القوّة الدافعة التأثيريّة ε مع معدّل تغيّر التيّار (وتكون باتجاه يعاكس هذا التغير):

الحث الذاتي
(القوة الدافعة التأثيرية المتولدة في محث)

$$\mathscr{E} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t} \qquad \textbf{(9 – 21)}$$

يُسَمّى ثابتُ التناسب L معاملَ الحثّ - للملف، ويقاس أيضًا بوحدة الهنري (H). ويعتمد مقدار L على حجم الملفّ وشكله، كما يعتمد على وجود قلب حديدي أو عدم وجوده.

إنّ الدارات المترددة (*ac-circuit*) (البند 18-7) تحوي دائمًا بعض المحاثّ، ولكنها تكون عادة صغيرة إلى حدٍّ بعيد إلا إذا احتوت الدارة على ملف يتكون من عدة لفات. يُسَمّى الملفُ الذي يكون له معامل حثّ ذاتيّ L محثًّا، ويرمز إليه في مخططات الدارات الكهربائية بالرمز:

المحثات

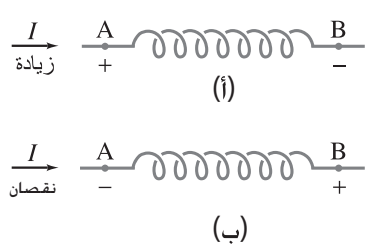
[رمز المحث]

المثال المفاهيمي 21-13 اتجاه القوّة الدافعة التأثيريّة المتولّدة في محثّ

يمرّ التيار خلال الملفّ في (الشكل 21-32) من اليسار إلى اليمين.
(أ) إذا كان التيار يزداد مع الزمن، فبأيّ اتجاه تكون القوة الدافعة التأثيرية المتولدة؟
(ب) إذا كان التيار يقلّ مع الزمن، فبأيّ اتجاه تكون القوة الدافعة التأثيرية المتولدة؟

الجواب: (أ) نعلم من قانون لنز أنّ القوة الدافعة التأثيرية المتولدة يجب أن تعاكس التغير في التدفق المغناطيسي. إذا ازداد التيار، فإنّ التدفق المغناطيسي سيزداد أيضًا. إنّ القوة الدافعة التأثيرية المتولدة تؤثر بحيث تعاكس الزيادة في التدفق، مما يعني أنّها كمصدر للقوة الدافعة يعاكس المصدر الخارجي للقوة الدافعة التي تولد التيار. تؤثر القوة الدافعة التأثيرية المتولدة في الملف بحيث تعاكس التيار I في (الشكل 21-32 أ). وبكلمات أخرى، يمكن اعتبار المحثّ كبطارية يكون قطبها الموجب عند النقطة A، في حين يكون قطبها السالب عند النقطة B.

(ب) من قانون لنز، إذا تناقص التيار، فإنّ القوة الدافعة التأثيرية المتولدة، والتي تزيد التدفق تعمل كمصدر للقوة الدافعة يدعم القوة الدافعة الخارجية. وتؤثر القوة الدافعة التأثيرية المتولدة لزيادة التيار I في (الشكل 21 - 32 ب). وفي هذا الوضع، تستطيع تخيل القوة الدافعة التأثيرية كبطارية يكون قطبها السالب عند النقطة A، وقطبها الموجب عند B ليزداد مرور التيار إلى اليمين.



الشكل 21-32
الإشارتان الموجبة (+) والسالبة (-) تشيران للقوة الدافعة التأثيرية المتولدة بسبب تغير التيار كما لو كانت A و B قطبي بطارية والملف داخل هذه البطارية.

المثال 21-14 معامل الحثّ الذاتيّ للملف الحلزونيّ

(أ) أوجد صيغة لمعامل الحثّ الذاتيّ L لملف حلزوني رفيع طوله l، ومساحة مقطعة A، ويحوي على عدد لفات مقداره N.
(ب) احسب معامل الحثّ الذاتيّ L لملف حلزونيّ إذا كانت $N = 100$, $l = 5.0\,\text{cm}$, $A = 0.30\,\text{cm}^2$، وقلب الملف من الهواء.

النّهج: يمكن إيجاد القوة الدافعة التأثيرية المتولدة من قانون فارادي $\left(\mathscr{E} = -N\,\Delta\Phi_B/\Delta t\right)$، أو من خلال قانون الحثّ الذاتيّ $\left(\mathscr{E} = -L\,\Delta I/\Delta t\right)$ وبمساواة هاتين الصيغتين، نستطيع إيجاد معامل الحث الذاتي L حيث نعلم كيفية حساب التدفق Φ_B خلال الملف الحلزوني باستخدام (المعادلة 20-8).

الحلّ: (أ) نساوي قانون فارادي (المعادلة 21-2 ب) مع معادلة الحث (المعادلة 21-9)

$$\mathscr{E} = -N\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

حساب معامل الحث الذاتي لملف حلزوني

ومن هذه المعادلة تكون قيمة L

$$L = N\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta I}$$

نعلم أنّ $\Phi_B = BA$ (المعادلة 21-1). (والمعادلة 20-8) تعطينا المجال المغناطيسي B المتولد في الملف الحلزوني $B = \mu_0 NI/l$. ويكون التدفق المغناطيسي المتولد خلال الملف الحلزوني

$$\Phi_B = \frac{\mu_0 NIA}{l}$$

وأيّ تغير في التيار ΔI يسبب تغيرًا في التدفق كما يلي:

$$\Delta\Phi_B = \frac{\mu_0 N\,\Delta I\,A}{l}$$

وبتعويض هذه في معادلتنا السابقة لحساب L نحصل على

$$L = N\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta I} = \frac{\mu_0 N^2 A}{l}$$

(ب) باستخدام $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\,\text{T}\cdot\text{m/A}$، وبتعويض القيم المعطاة نحصل على

$$L = \frac{(4\pi \times 10^{-7}\,\text{T}\cdot\text{m/A})(100)^2(3.0 \times 10^{-5}\,\text{m}^2)}{(5.0 \times 10^{-2}\,\text{m})} = 7.5\,\mu\text{H}$$

* 10-21 الطاقة المُختزنة في المجال المغناطيسيّ

رأينا في (البند 17-9) أنّ الطاقة المختزنة في مواسع تساوي $\frac{1}{2}CV^2$. وباستخدام طريقة مشابهة، يمكن إيجاد الطاقة U المختزنة في محثّ L يحمل تيارًا I:

$$U = \text{طاقة} = \tfrac{1}{2}LI^2$$

مثل الطاقة المختزنة في مواسع التي يمكن اعتبارها طاقة مختزنة في المجال الكهربائي بين اللوحين، يمكن أيضًا اعتبار أنّ الطاقةَ في المحثّ طاقةٌ مختزنة في مجاله المغناطيسي.

ولكتابة الطاقة بدلالة المجال المغناطيسي؛ نستطيع استخدام النتيجة التي حصلنا عليها في (المثال 21-14) وهي أنّ معامل الحثّ الذاتيّ لملف حلزوني $L = \mu_0 N^2 A/l$. والآن، فإنّ المجال المغناطيسي B في الملف يرتبط بالتيار حسب العلاقة (المعادلة 20-8) $B = \mu_0 NI/l$ أي أنّ $I = Bl/\mu_0 N$. وتكون

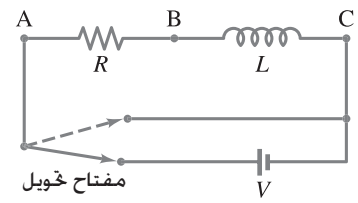
$$U = \text{طاقة} = \tfrac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2}\left(\frac{\mu_0 N^2 A}{l}\right)\left(\frac{Bl}{\mu_0 N}\right)^2 = \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu_0}Al$$

يمكن عدّ هذه الطاقة مختزنة في الحجم المحصور بين اللفات الذي يساوي Al. الطاقة المختزنة لوحدة الحجوم أو كثافة الطاقة تساوي

$$u = \text{كثافة الطاقة} = \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu_0} \qquad \textbf{(10-21)}$$

كثافة الطاقة في المجال المغناطيسي

ويمكن إثبات صلاحية هذه الصيغة، والتي اشتقت من خلال حالة خاصة للملف الحلزوني لأيّ حيّز في الفضاء يوجد فيه مجال مغناطيسي. إذا وجدت مادة فرومغناطسيسة، فسنضعها محل μ_0. هذا المعادلة تماثل المعادلة المشتقة في حالة المجال الكهربائي: $\frac{1}{2}\epsilon_0 E^2$ في (البند 17-9).



* 11-21 دارة المحث والمقاومة LR Circuit

الشكل 21-33 دائرة محث ومقاومة (دائرة LR)

يمتلك أيّ محثّ مقاومة كهربائية، ونمثّل هذا الوضع برسم مُحث L ومقاومة R بشكل منفصل عن بعضهما كما في (الشكل 21-33). يمكن أن تحوي المقاومة R مقاومة أخرى منفصلة موصولة على التوالي. والسؤال الآن هو: ماذا يحدث عند توصيل مصدر تيار ثابت (dc) مع هذه الدارة التي تتكون من محث ومقاومة؟ عند لحظة إغلاق الموصل مع البطارية، فإنّ التيار يبدأ بالمرور، ويعاكس بقوة دافعية تأثيرية في الملف بسبب تغيّر التيار. ومن جهة أخرى، فإنه عند مرور التيار، يتكون فرق جهد $(V = IR)$ حول المقاومة، وسيقلّ فرق الجهد حول المحث، وتكون هناك إعاقة أقلّ للتيار المار من المحث. يبدأ التيار بالازدياد تدريجيًّا كما هو موضح في (الشكل 21 - 34أ)، ويصل إلى قيمة ثابتة $I_{\max} = V/R$ عندما يكون الجهد كلّه حول المقاومة. شكل منحنى التيار كدالة في الزمن يعطي من خلاله العلاقة

$$I = \left(\frac{V}{R}\right)(1 - e^{-t/\tau})$$

حيث يُسَمّى e العددَ النيبري ... $e = 2.718$ (انظر البند 19-6)، في حين تُسَمّى $\tau = L/R$ الثابتَ الزمني للدارة. عندما يكون $t = \tau$، فإنّ $(1 - e^{-1}) = 0.63$. ولهذا، فإنّ τ هو الزمن اللازم لوصول التيار إلى $0.63I_{\max}$.

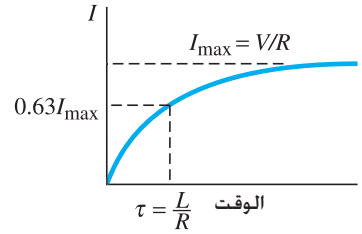
إذا أزيلت البطارية فجأة من الدارة (توصيل الدائرة بالخطوط المقطعة في (الشكل 21-33)، فإنّ التيار يتناقص كما في (الشكل 21-34 ب). هذا هو منحنى انحلال أسّيّ ويعطى من خلاله العلاقة

$$I = I_{\max} e^{-t/\tau} \qquad [\text{دارة } LR \text{ بغياب قوة دافعة}]$$

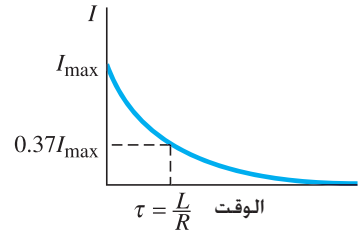
الثابت الزمني τ هو الزمن اللازم حتى يقلّ التيار إلى 37 % من قيمته الأصلية، ويساوي L/R.

ترينا هذه المنحنيات أنّ هنالك زمنا تفاعليّا عند فتح مغناطيس كهربائي أو غلقه . ونستطيع أن نرى أيضًا أنّ الدارة التي تتكون من محثّ ومقاومة تشبه الدارة التي تتكون من مواسع ومقاومة RC (البند 19-6). وعلى العكس من دارة المكثف، فإنّ الثابت الزمني هنا يتناسب عكسيًّا مع المقاومة R.

الشكل 21-34
(أ) نمو التيار في دارة المحث والمقاومة عند وصله ببطارية.
(ب) انحلال التيار عند فصل دارة المحث والمقاومة عن البطارية.



(أ)



(ب)

المثال 21-15 الثّابت الزّمنيّ للملفّ الحلزونيّ

ومقاومته 0.250 Ω. أوجد: (أ) الثابت الزمني لهذه mH ملف حلزونيّ معامل حثّه الذاتيّ 87.5 الدارة . (ب) ما الوقت اللازم لوصول التيار من الصفر إلى 63% من قيمته النهائية (العظمى) V؟ عندما يوصل ببطارية فرق جهدها

النّهج: الثابت الزمني هو $\tau = L/R$ ، ثم نستخدم المعادلة التي تعطينا التيار، ونعوّض $I=0.63I_{max}$، ونحلّ لإيجاد الزمن.

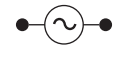
الحلّ: (أ) من التعريف $\tau = L/R = (87.5 \times 10^{-3}\,\text{H})/(0.250\,\Omega) = 0.350\,\text{s}$

(ب) رأينا سابقًا أنّ $I = (V/R)(1 - e^{-t/\tau})$، ونريد أن نجد t بحيث يكون $I = (0.63)(V/R)$ حيث $V/R = I_{\max}$، وهذا يحدث عندما يكون $t = \tau = L/R$. وعليه، يكون $t = 0.350\,\text{s}$

12-21 دارات التيّار المتردّد (AC) والمفاعلة

ناقشنا سابقًا الدارات التي تحتوي على مقاومة، ومواسع، ومحثّ عندما تكون متصلة بمصدر مستمر (dc) للقوة الدافعة، أو دون مصدر (كما في تفريغ المكثف في الدارة التي تتكون من مقاومة ومواسع). والآن، سنناقش توصيل هذه العناصر في دارة تتصل بمصدر متردد لفرق الجهد الذي يعطي تيارًا مترددًا (ac).

في البداية، سنختبر كيفية تصرّف كلّ عنصر عند توصيله على انفراد مع مصدر الجهد المتردد الذي يرمز إليه بالرمز



[جهد متردد]

وينتج موجة جيبيّة ترددها f، وسنفترض في الحالات جميعها أنّ القوة الدافعة التأثيرية تعطي تيارًا

$$I = I_0 \cos 2\pi f t$$

حيث t الزمن، و I_0 تيار الذروة. تذكر (البند 18-7) أنّ $V_{\text{rms}} = V_0/\sqrt{2}$، وأنّ $I_{\text{rms}} = I_0/\sqrt{2}$ (معادلة 18-8).

المقاومة

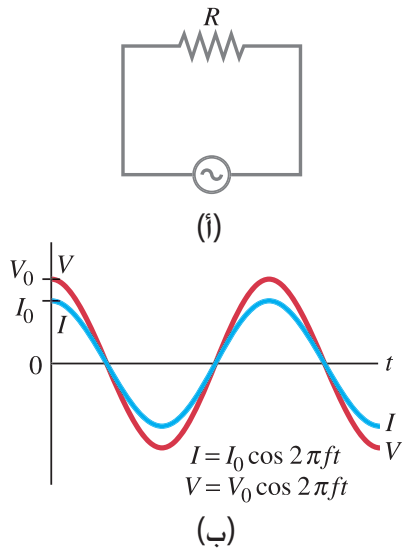
عندما يوصل مصدر متردد مع مقاومة كما في (الشكل 21-35أ)، يزداد التيار وينقص مع القوة الدافعة المترددة حسب قانون أوم، $I = V/R$. ويرينا (الشكل 21-35ب) الجهد (المنحنى الأحمر) والتيار (المنحنى الأزرق). ولأنّ التيار صفر عندما يكون الجهد صفرًا، فإنّ التيار يصل الذروة عندما يكون الجهد كذلك. ونقول إنّ التيار والجهد لهما الطور نفسه (*in Phase*). تتحول الطاقة إلى حرارة (البند 18-7) بمعدل $\overline{P} = \overline{IV} = I_{\text{rms}}^2 R = V_{\text{rms}}^2/R$

المحث

يرينا (الشكل 21-36أ) محثًّا معامل حثّه الذاتيّ L (⏦) موصولًا مع مصدر متردد. نهمل مقاومة المحث (التي تكون في العادة صغيرة جدًّا) يساوي الجهدُ المطبق على المحث القوةَ الدافعة التأثيرية المعاكسة المتولدة فيه بسبب تغير التيار كما تعطى من (المعادلة 21-9). وبسبب أنّ مجموع القوى الدافعة (الجهود) لأيّ دارة مغلقة يجب أن يكون صفرًا كما تخبرنا قاعدة كيرشوف. فإن

$$V - L\frac{\Delta I}{\Delta t} = 0 \quad \text{أو} \quad V = L\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

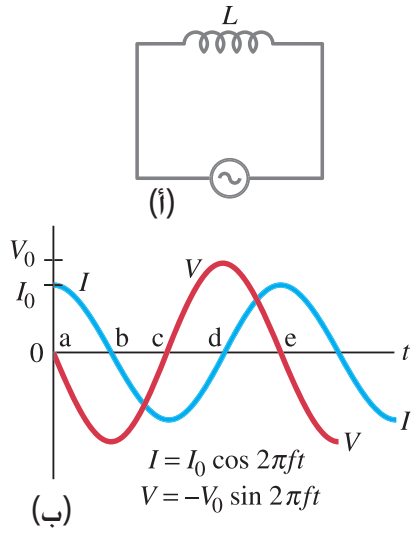
حيث V هي جهد المصدر المتغير بشكل جيبي، و $L\,\Delta I/\Delta t$ هي الجهد التأثيري المتولد في المحث. واستنادًا إلى هذه المعادلة، فإنّ التيار I سوف يزداد بسرعة أكبر عندما تأخذ V قيمتها القصوى، $V = -V_0$. أمّا I فستقلّ بسرعة أكبر عندما $V = -V_0$. هاتان اللحظتان تعودان للنقطتين d، و b على المنحنى المرسوم للجهد مع الزمن في (الشكل 21-36 ب). لاحظ أنّ التيار يجتاز قيمته القصوى بعد ربع دورة من اجتياز الجهد لقيمته القصوى. وهنا نقول إنّ التيار يتخلف عن الجهد في المحث بمقدار 90° . ولأنّ التيار والجهد في المحث مختلفان في الطور بزاوية 90°، فإنّ ناتج IV الذي يساوي القدرة، يكون موجبًا أو يكون سالبًا بالتساوي، أي، لا تتبدد طاقة على شكل طاقة حرارية.



الشكل 21-35
(أ) مقاومة موصولة مع مصدر متردد.
(ب) التيار (المنحنى الأزرق) والجهد (الأحمر) حول المقاومة لهما الطور نفسه.

في المقاومة: التيار والجهد يكونان بنفس الحوار

الشكل 21-36
(أ)محث موصول مع مصدر جهده متردد
(ب)التيار (المنحنى الأزرق) يتخلف عن الجهد (المنحنى الأحمر) بربع دورة أو 90°.



المحث: الجهد يسبق التيار

وكما تعيق المقاومة تدفق الشحنات، فإنّ المحث يعيق تدفق الشحنات أيضًا في حالة التيار المتردد بسبب القوة الدافعة التأثيرية المعاكسة المتولدة. لمقاومة R، يرتبط كلّ من التيار والجهد بالعلاقة $V=IR$. ونستطيع أن نكتب معادلة مشابهة للمحث كما يلي:

$$V = IX_L$$

[قيم rms او القصوى وليست لحظية] **(21-11أ)**

المفاعلة

حيث X_L تُسَمّى المفاعلة الحثيّة (***inductive reactance***)، ولها وحدات المقاومة (***units of ohms***). الكميات V، و I في (المعادلة 21-11أ) يمكن أن تكون جذر متوسط المربعات rms للاثنتين، أو قيمة الذروة لهما (انظر البند 18-7). بالإضافة إلى ذلك، فإنّ هذه المعادلة يمكن أن تربط قيم الذروة مع بعضها بعضا. إنّ قيمة الذروة لكلّ من التيار والجهد لا تكونان عند اللحظة نفسها. لذا، فإنّ (المعادلة 21 – 11أ) لا تصلح للتطبيق عند لحظة معينة كما هي الحال بالنسبة إلى المقاومة ($V=IR$).وباستخدام بعض الاشتقاقات الرياضية (وأيضًا نتيجة لبعض التجارب) يمكن إثبات أنّ

المفاعلة الحثية

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \qquad \textbf{(21-11ب)}$$

حيث $\omega = 2\pi f$ و f هو تردد المصدر المتردد

المثال 21-16 مفاعلة ملف

ملف مقاومته $R = 1.00\ \Omega$، ومعامل حثة الذاتي 0.300 H. احسب التيار في الملف عند: (أ) تطبيق فرق جهد مستمر (dc) مقداره 120-V. (ب) تطبيق فرق جهد متردد (ac) له 120-V ac (rms) عند تردد مقداره 60.0 Hz.

النّهج: عندما يكون الجهد مستمرًا،لا تكون هنا مفاعلة حثية ($X_L = 2\pi fL = 0$ حيث $f = 0$). لذلك سنطبق قانون أوم على المقاومة. وعندما يكون التيار مترددًا، نحسب المفاعلة X_L، ثم نستخدم (المعادلة 21-11أ)

الحلّ: (أ) بوجود فرق جهد مستمر لا يكون لدينا X_L. وببساطة نطبق قانون أوم

$$I = \frac{V}{R} = \frac{120\ \text{V}}{1.00\ \Omega} = 120\ \text{A}$$

(ب)المفاعلة الحثية تساوي

$$X_L = 2\pi fL = (6.28)(60.0\ \text{s}^{-1})(0.300\ \text{H}) = 113\ \Omega$$

وبالتالي، يمكن إهمال قيمة المقاومة مقارنة بهذه القيمة، لذلك

$$I_{\text{rms}} = \frac{V_{\text{rms}}}{X_L} = \frac{120\ \text{V}}{113\ \Omega} = 1.06\ \text{A}$$

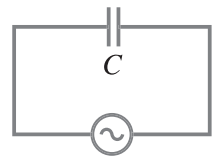
ملحوظة: يمكن القول هنا إنّ الممانعة الكلية هي $114\ \Omega = 1\ \Omega + 113\ \Omega$، وهذا يعني أنّ حوالي 1% من الجهد يكون حول المقاومة، أو حوالي 1 V. وحول المحث يكون 119 V. الـ 1 V حول المقاومة صحيحًا، فإنّ بقية الجمل لا تكون صحيحة بسبب تفاوت الطور في المحث. وهذا ما سنناقشه في البند القادم.

*(المكثف)

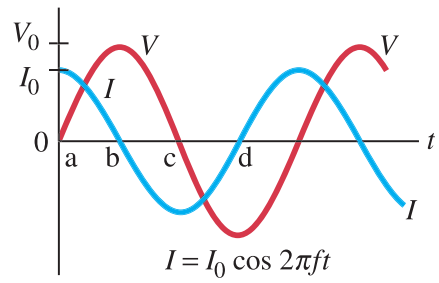
عندما يوصل مواسع ببطارية، فإنّ لوحي المكثف – وبسرعة- سوف يمتلكان شحنتين متساويتين ومتعاكستين في الإشارة، دون مرور تيار في الدارة. إنّ المكثف يمنع مرور التيار المستمر، ولكن عند وصله بمصدر جهد متردد كما في (الشكل 21-37أ)، فإنّ تيارًا سيمر بشكل مستمر، ويمكن أن يحدث هذا؛ لأنه عند تطبيق فرق الجهد المتردد، تبدأ الشحنات بالتدفق على أحد اللوحين فتكسبه شحنة سالبة، في حين تكسب الآخر شحنة موجبة. ولكن عندما يعكس الجهد نفسه، تتدفق الشحنات بالاتجاه المعاكس. لذا، عند تطبيق جهد متردد، فإنّ تيارًا مترددًا سوف يظهر في الدارة بشكل مستمر.

الجهد المطبق يجب أن يساوي الجهد حول المكثف: $V = Q/C$، حيث C هي السعة، و Q هي الشحنة على اللوحين. لذا، فإنّ الشحنة على اللوحين تتبع الجهد. ولكن ماذا عن التيار؟ عند النقطة a في (الشكل 21-37 ب)، وعندما يكون الجهد صفرًا ويبدأ بالازدياد، فإنّ الشحنة على اللوحين تكون صفرًا أيضًا. وعندما يصل الجهد قيمته القصوى V_0 (عند النقطة b)، فإنّ الشحنات المتجمعة على اللوحين تؤدي إلى منع شحنات أخرى من السريان، ويقلّ التيار إلى الصفر عند النقطة b. ويتبع التيار المنحنى الأزرق في (الشكل 21-37 ب).

الشكل **21-37**
(أ) مواسع موصول مع مصدر متردد.
(ب) تيار متردد يسبق الجهد بربع دورة أو 90°.



(أ)



$I = I_0 \cos 2\pi ft$

$V = V_0 \sin 2\pi ft$

(ب)

كما في المحثّ، فإن الجهد والتيار يكون بينهما فرق في الطور مقداره 90°. ولكن في حالة المكثّف فإنّ التيار يصل قيمته القصوى قبل ربع دورة من وصول الجهد قيمته القصوى. ولذلك، نقول إنّ التيار يسبق الجهد بـ 90° في حالة المكثف.

المكثف: التيار يسبق الجهد.

وبسبب الاختلاف في الطور بين التيار وفرق الجهد، فإنّ معدّل الطاقة المبددة يساوي صفرًا كما هو الحال في المحث. لذا، فإنّ المقاومة فقط هي التي تبدد طاقة على شكل حرارة في دارة التيار المتردد.

R فقط (وليس C أو L) هي التي تبدد طاقة.

العلاقة بين الجهد المطبق والتيار في المكثف يمكن كتابتها كما في حالة المحث كما يلي:

[لقيم جذور متوسط المربعات أو الذروة]

$$V = IX_C \qquad \textbf{(21 - 12أ)}$$

حيث Xc المفاعلة السعوية (*capacitance reactance*) ولها وحدات المقاومة (ohms). فرق الجهد V والتيار I يمكن أن يكون كلاهما جذور متوسط المربعات (rms)، أو كلاهما قيمة الذروة (V_o و I_o)؛ يعتمد X_C على كلّ من السعة C والتردد f كما يلي:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \qquad \textbf{(21 – 12ب)}$$

حيث $\omega = 2\pi f$. وفي حالة المصدر المستمر، تكون $f = 0$، و X_C تصبح قيمة لا نهائية كما يجب أن تكون لأنّ المكثف لا يمرر تيارًا مستمرًا.

المفاعلة السعوية

المثال 21-17 المفاعلة السّعويّة

ما هو تيار جذر متوسط المربعات V_{rms} في الدارة الموضحة في (الشكل 21-37أ) إذا كانت $C = 1.0\,\mu\text{F}$، $V_{\text{rms}} = 120\text{ V}$، وإذا كان (أ) $f = 60\text{ Hz}$ (ب) $f = 6.0 \times 10^5\text{ Hz}$.

النّهج: نجد المفاعلة باستخدام (المعادلة 21-12 ب). ثم نحلّ لإيجاد التيار من الصيغة المكافئة لقانون أوم، (المعادلة 21-12أ).

الحلّ: (أ) $X_C = 1/2\pi fC = 1/(6.28)(60\text{ s}^{-1})(1.0 \times 10^{-6}\text{ F}) = 2.7\text{ k}\Omega$

جذر متوسط المربعات للتيار هو (معادلة 21-12أ):

$$I_{\text{rms}} = \frac{V_{\text{rms}}}{X_C} = \frac{120\text{ V}}{2.7 \times 10^3\,\Omega} = 44\text{ mA}$$

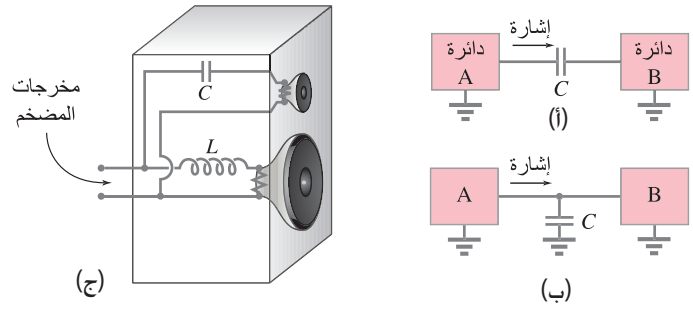
(ب) عندما يكون X_C $f = 6.0 \times 10^5\text{ Hz}$، سوف تكون $X_C = 0.27\,\Omega$، و $I_{\text{rms}} = 440\text{ A}$، وهذه القيمة أكبر من الأولى.

ملحوظة: إنّ الاعتماد على التردد f مثير؛ فعندما يكون التردد كبيرًا، تكون المفاعلة السعوية صغيرة جدًّا.

هنالك تطبيقان شائعان للمواسعات موضّحان في (الشكل 21-38أ و ب). ففي (الشكل 21-38أ)، يمكن القول إنّ الدارة A من ناحية السعة مماثلة للدارة B. الهدف من المكثف هو إعاقة مرور التيار المستمر (dc) من A إلى B، ولكنه يسمح بمرور إشارة تيار متردد (ac). أما في (الشكل 21-38ب)، فإنّ المكثف أيضًا يمرر ac ولكنه لايمرّر dc. في هذه الحالة، فإنّ فرق جهد مستمر يمكن تطبيقه بين الدارتين A و B، ولكن الإشارة المترددة تترك A وتمر باتجاه الأرض بدلا من المرور إلى الدارة B.

تطبيق الفيزياء
المكثفات تستخدم كمرشحات

وهكذا فإن المكثف في (الشكل 21 - 38ب) يعمل كمرشح عندما يكون الجهد المستمر مطلوبًا؛ أي تغيّر حاد في الجهد سوف

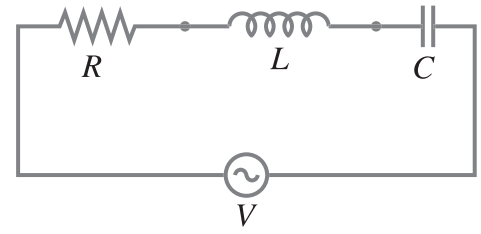


الشكل 21 - 38(أ) و(ب) استخدامان شائعان للمواسع (جـ) الدارة البسيطة لمكبر الصوت

تطبيق الفيزياء
طريقة توصيل السماعات

مكبرات الصوت لها سماعتان منفصلتان: إحداهما تعمل على تردد منخفض، في حين تعمل الأخرى على تردد مرتفع، وتحتوي على وصلة تحويل تتكون من مكثف في دارة التردد العالي لمنع الإشارات منخفضة التردد، وكذلك على محثّ في دارة التردد المنخفض لمنع الإشارات عالية التردد. $X_L = 2\pi fL$ وعليه، فإنّ الأصوات ذات الترددات المنخفضة تمر من خلال السماعة التي تعمل على هذه الترددات. انظر (الشكل 21-38 جـ).

13-21 * دارة تيّار متردّد تتكوّن من محثّ، ومقاومة، ومواسع على التوالي



الشكل 21-39 دارة محث ومقاومة ومواسع (LRC)

لنختبر الآن دارة تحتوي العناصر الثلاثة معًا على التوالي وهي: مقاومة R، ومحث L، ومواسع C. (الشكل 21 - 39) إذا كان لدينا دارة تحتوي على عنصرين فقط، فإنّنا نستطيع استخدام نتائج هذا الجزء بوضع $R = 0$، أو $X_L = 0$، أو $X_C = 0$ حسب الحاجة. و إذا كان V_R، و V_L، و V_C تمثل فرق الجهد حول كلّ عنصر عند لحظة معينة من الزمن، و V_{R0}، و V_{L0} و V_{C0} تمثل القيمة القصوى (قيمة الذروة) لهذه الجهود، فإنّ الجهد حول كلّ عنصر سوف يتبع علاقات الطور التي ناقشناها في البند السابق. وعند أيّ لحظة، فإنّ الجهد V الذي يعطى من المصدر سوف يكون باستخدام قانون كيرتشوف الثاني (قانون العروة)

$$V = V_R + V_L + V_C \tag{13-21}$$

ولأنّ الجهود المختلفة ليست مُتَّفِقَةً في الطور فإنّها لن تصل جميعها لقيمة الذروة في الوقت نفسه. وقيمة الذروة لجهد المصدر V_0 لن تساوي $V_{R0} + V_{L0} + V_{C0}$

تنويه !

لا نستطيع إضافة جهود الذروة لإيجاد جهد المصدر

مخططات الطوار

لنختبر الآن دارة LRC بالتفصيل. التيار عند أيّ لحظة يجب أن يكون متساويًا عند أيّ نقطة في الدارة. لذا، فإنّ التيار للعناصر كلّها يكون متفقًا بالطور، في حين لا يكون الجهد كذلك. نختار نقطة البداية عند $(t = 0)$، حيث يكون التيار عند أيّ لحظة يساوي

$$I = I_0 \cos 2\pi ft$$

نحلل دارة LRC باستخدام **مخططات الطوار**. ونرسم أسهمًا (مثل المتجهات) في المستوى xy لتمثيل كلّ جهد، بحيث يمثل طول كلّ سهم مقدار جهد الذروة حول كلّ عنصر

$$V_{R0} = I_0 R, \qquad V_{L0} = I_0 X_L, \; V_{C0} = I_0 X_C$$

V_{R0} تكون متفقة بالطور مع التيار، ويرسم بداية $(t = 0)$ باتجاه محور السّينات الموجب، وكذلك الحال بالنسبة إلى التيار. يسبق V_{L0} التيار بزاوية $90°$، ويسبق V_{R0} بزاوية $90°$ أيضًا، ويرسم بداية باتجاه محور الصّادات الموجب. يتخلف V_{C0} عن التيار بزاوية $90°$، و V_{C0} يرسم بداية محور الصّادات السالب. انظر (الشكل 21-40i). إذا تركنا مخطّط المتجهات يدور عكس اتجاه عقارب الساعة بتردد مقداره f، فإننا نحصل على المخطّط الموضّح في (الشكل 21-40 ب)؛ بعد زمن t، يدور كلّ سهم بزاوية مقدارها $2\pi ft$. ومسقط كلّ سهم على محور السّينات يمثل فرق الجهد حول كلّ عنصر عند اللحظة t (الشكل 21-40جـ). على سبيل المثال

$$I = I_0 \cos 2\pi ft.$$

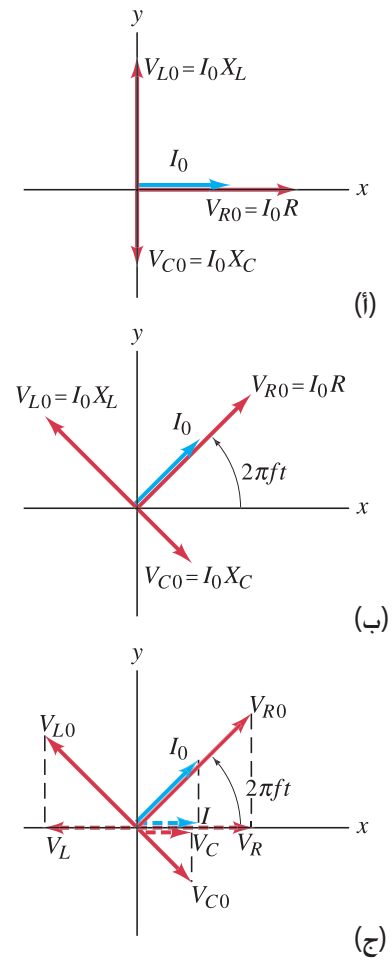
إنّ مجموع مساقط متجهات الجهد الثلاثة تمثل الجهد اللحظي حول الدارة الكلية (V). لذلك، فإنّ الجمع المتجه لهذه المتجهات سوف يكون المتجه الذي يمثل جهد الذروة للمصدر (V_0) كما هو موضح في الشكل (21-41). حيث نرى أنّ V_0 يصنع زاوية ϕ مع I_0 و V_{R0}. وبمرور الزمن، فإنّ V_0 تدور مع المتجهات الأخرى بحيث يصبح الجهد اللحظي V (مسقط V_0 على محور السّينات) مساويًا لـ (انظر الشكل 21-41):

$$V = V_0 \cos(2\pi ft + \phi)$$

ومن المؤكد أنّ فرق الجهد V حول عناصر الدارة ككل يجب أن يساوي جهد المصدر (الشكل 21-39). لذلك، فإنّ الجهد من المصدر يختلف في الطور مع التيار بزاوية ϕ.

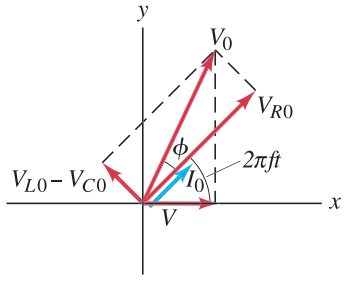
ومن التحليلات السابقة، يمكن الآن إيجاد الممانعة الكلية للدارة Z وتعريفها من العلاقة $V_{\text{rms}} = I_{\text{rms}} Z$ أو $V_0 = I_0 Z$.

من (الشكل 21 - 41) باستخدام نظرية المضلع في المتجهات (V_0 هو وتر المثلث قائم الزاوية)



الشكل 21-40 مخططات المطوار لدارة LRC

مقاومة



الشكل 21-41 مخطط المطوار لدارة LRC ترينا حاصل الجمع الاتجاهي لـ V_0

نرى أنّ

$$V_0 = \sqrt{V_{R0}^2 + (V_{L0} - V_{C0})^2}$$
$$= I_0\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

ومن (المعادلة 21-14) فإنّ الممانعة الكلية Z هي

الممانعة الكلية

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \qquad \textbf{(15-21)}$$

ومن خلال (الشكل 21-14) نستطيع أيضًا إيجاد زاوية الطور ϕ بين الجهد والتيار كما يلي:

$$\tan\phi = \frac{V_{L0} - V_{C0}}{V_{R0}} = \frac{I_0(X_L - X_C)}{I_0 R} = \frac{X_L - X_C}{R} \qquad \textbf{(16-21أ)}$$

و

$$\cos\phi = \frac{V_{R0}}{V_0} = \frac{I_0 R}{I_0 Z} = \frac{R}{Z} \qquad \textbf{(16-21ب)}$$

(الشكل 21-41) رسم في حالة $X_L > X_C$. ولهذا، فإنّ التيار يتخلف عن جهد المصدر بزاوية ϕ. عندما يكون العكس صحيحًا ($X_L < X_C$)، فإنّ ϕ في المعادلة 21-16 تكون أقلّ من الصفر، والتيار يسبق جهد المصدر.

رأينا سابقًا أنّ القدرة تستنفد فقط في المقاومة، ولا يستنفد أيّ شيء في المحثّ أو المكثّف. ولذلك، يكون متوسط القدرة $\overline{P} = I_{\text{rms}}^2 R$ ولكن من (العلاقة 21-16 ب) $R = Z\cos\phi$، ولذلك تكون:

معامل القدرة

$$\overline{P} = I_{\text{rms}}^2 Z\cos\phi = I_{\text{rms}} V_{\text{rms}}\cos\phi \qquad \textbf{(17-21)}$$

المعامل $\cos\phi$ يُسَمّى معامل القدرة للدارة.

المثال 21-18 دائرة LRC (محث، ومقاومة، ومواسع)

في (الشكل 21-39)، افرض أنّ $R = 25.0\ \Omega$، $L = 30.0\ \text{mH}$، و $C = 12.0\ \mu\text{F}$ وموصولة بمصدر جهد متردد مقداره 90.0-V (V_{rms})، وتردده 500-Hz. احسب: (أ) التيار في الدارة. (ب) قراءة الفولتميتر (rms) حول كلّ عنصر.

النّهج: لإيجاد التيار: نحتاج إلى إيجاد الممانعة (المعادلات 21-15، 21-11ب، 21-12ب) ثم نستخدم $I_{\text{rms}} = V_{\text{rms}}/Z$. ويمكن إيجاد فرق الجهد حول كلّ عنصر من قانون أوم والصيغ المكافئة له: $V_L = IX_L$، $V_R = IR$ و $V_C = IX_C$

الحلّ: (أ) في البداية، نجد المفاعلة لكلٍّ من المحثّ والمكثّف عند $f = 500\ \text{Hz} = 500\ \text{s}^{-1}$

$$X_L = 2\pi fL = 94.2\ \Omega, \qquad X_C = \frac{1}{2\pi fC} = 26.5\ \Omega$$

ومن هنا، فإنّ الممانعة الكلية تساوي

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(25.0\ \Omega)^2 + (94.2\ \Omega - 26.5\ \Omega)^2} = 72.2\ \Omega$$

ومن نسخة الممانعة لقانون أوم، (المعادلة 21 - 14) نجد أنّ

$$I_{\text{rms}} = \frac{V_{\text{rms}}}{Z} = \frac{90.0\ \text{V}}{72.2\ \Omega} = 1.25\ \text{A}$$

(ب)جهد متوسط المربعات ($rm\ s$) لكلّ عنصر هو

$$(V_R)_{\text{rms}} = I_{\text{rms}} R = (1.25\ \text{A})(25.0\ \Omega) = 31.2\ \text{V}$$
$$(V_L)_{\text{rms}} = I_{\text{rms}} X_L = (1.25\ \text{A})(94.2\ \Omega) = 118\ \text{V}$$
$$(V_C)_{\text{rms}} = I_{\text{rms}} X_C = (1.25\ \text{A})(26.5\ \Omega) = 33.1\ \text{V}$$

ملحوظة: لا تجمع هذه الجهود مع بعضها بعضًا لتساوي جهد المصدر، 90.0 V (rms). في الواقع، فإنّ $(V_L)_{\text{rms}}$ يتجاوز جهد المصدر، ويمكن أن يحدث هذا لأنّ الجهود المختلفة تكون مختلفة في أطوارها. وعند أيّ لحظة، يمكن أن يكون أحد الجهود سالبًا لتعويض الجهد الموجب الكبير للجهدين الآخرين. إنّ جهد متوسط المربعات rms يكون من التعريف موجبًا دائمًا. وبالإضافة إلى ذلك، فإنّه يجب عدم جمع جهود متوسط المربعات للحصول على جهد المصدر، بل يجب جمع الجهد اللحظي للعناصر كلّها عند زمن معين للحصول على جهد المصدر عند تلك اللحظة.

* 14-21 الرنين في دارات التيّار المتردّد

تُعطى قيمة جذر متوسط المربعات للتيار في دارة المحث والمتسع والمقاومة الموصولة على التوالي كما يلي: (انظر المعادلات 21-14، و21-15، و21-11ب، و21-12ب):

$$I_{\text{rms}} = \frac{V_{\text{rms}}}{Z} = \frac{V_{\text{rms}}}{\sqrt{R^2 + \left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right)^2}} \qquad \textbf{(18 – 21)}$$

وبسبب أنّ المفاعلة لكلٍّ من الملفّ والمتسع تعتمد على تردد المصدر f، فإنّ التيار في دارة LRC يعتمد على التردد. من (المعادلة21-18) نرى أنّ القيمة القصوى للتيار تكون عندما يحقق التردد العلاقة التالية:

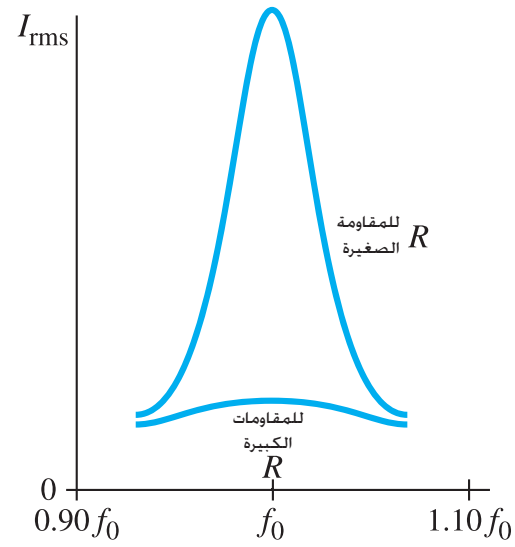
$$2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC} = 0$$

وبحلّ هذه المعادلة للحصول على f، فإنّنا ندعو الحلّ f_0 كما يلي:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}} \qquad \textbf{(19 – 21)}$$

وعندما $f = f_0$، فإنّ الدارة تكون في حالة رنين، و f_0 يُسَمّى تردّد الرنين للدائرة. عند هذا التردّد، تكون $X_C = X_L$، وتكون الممانعة معتمدة على المقاومة فقط. الشكل الذي يمثل I_{rms} كدالة في التردد f موضح في (الشكل 21 – 42) لقيم محددة لكلّ من R، و L، و C. إذا كانت R صغيرة مقارنة بكلّ من X_L، و X_C، فإنّ منحنى الرنين يكون أعلى وأرفع. وعندما تكون R صغيرة جدًّا، فإننا نتكلم عن دارة LC. الطاقة في دارة LC تتذبذب بتردد f_0 بين المحث والمكثف مع ضياع جزء قليل جدًّا منها في المقاومة R (بعض المقاومات لا يمكن تجنبها). ويُسَمّى هذا تذبذب المتسع والمحث، أو تذبذبا كهرومغناطيسيًّا. ليست الشحنة فقط هي التي تتذبذب ذهابًا وإيابًا، ولكن الطاقة أيضًا تتذبذب بحيث تختزن تارةً في المجال الكهربائي للمتسع، وتارةً أخرى في المجال المغناطيسي للمحث.

يُستخدم الرنين الكهربائي في كثيرٍ من الدارات الكهربائيّة؛ ففي المذياع والتلفزيون تُستخدم دارات الرنين لتحديد موقع محطّة البثّ وتردّدها. عدّة تردّدات تصل دارة الهوائي، ولكنَّ تيّارًا محدّدًا يمرّ فقط عند التردّدات التي تكون قريبةً من تردّد الرنين. وكلّ من L، و C متغيّران بحيث نستطيع استقبال أكثر من محطّة. (المزيد عن الموضوع سيناقش في الفصل 22).



الشكل 21-42
التيار في دارة LRC كدالة في التردد ترينا أقصى قيمة لمنحنى الرنين عند $f = f_0 = (1/2\pi)\sqrt{1/LC}$ تردد الرنين

ملخّص

يساوي التدفقُ المغناطيسيُّ المارُّ خلالَ عروةٍ حاصلَ ضربِ مساحةِ العروةِ في المركبةِ العموديّةِ للمجالِ المغناطيسيِّ

$$\Phi_B = B_\perp A = BA\cos\theta \qquad \textbf{(1 – 21)}$$

إذا تغيّر التدفق المغناطيسيُّ خلال ملف مع الزمن، فستتولّد قوّةٌ دافعةٌ تأثيريّةٌ في الملفّ. ويساوي مقدارُ القوّة الدافعة التأثيريّة المتولّدة المعدّلَ الزمنيَّ لتغيّر التدفق المغناطيسيّ خلال الملفّ مضروبًا في عدد لفّات الملفّ N

$$\mathscr{E} = -N\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} \qquad \textbf{(2 – 21ب)}$$

وهذا هو قانون فارادي في الحث.

تنتج القوة الدافعة التأثيرية تيّارًا، بحيث يكون مجالُهُ المغناطيسيُّ معاكسًا للتغيّر الأصليّ في التدفّق المغناطيسيّ (**قانون لنز**).

يشير قانون فارادي أيضًا إلى أنّ تغيّر المجال المغناطيسيّ ينتج مجالًا كهربائيًّا، والسلك المستقيم الذي طوله l ويتحرّك بسرعة v عموديًّا على مجالٍ مغناطيسيٍّ شدّته B تتولّد بين نهايتيه قوّة دافعة تأثيريّة تساوي

$$\mathscr{E} = Blv \qquad \textbf{(3 - 21)}$$

يحوّل المولّدُ الكهربائيّ الطاقةَ الميكانيكيّة إلى طاقةٍ كهربائيّة. ويستند عمله إلى قانون فارادي: عند دوران ملفٍّ بفعلٍ ميكانيكيٍّ بانتظام خلال مجالٍ مغناطيسي، فإنّ تغيّرَ التدفّق خلال الملفّ سينتج تيّارًا تأثيريًّا جيبيًّا، وهو ما نستفيده من المولّد الكهربائي.

[* المحرّكُ الكهربائيُّ الذي يعمل بعكس المولّد يؤثّر كالمولّد من حيث إنتاجُ قوّةٍ دافعةٍ تأثيريّةٍ راجعةٍ أو عكسيّة، والتي تنتج في ملفّه الدوّار. ولأنّ هذه القوة الدافعة التأثيرية الراجعة تؤثّر عكس الفولتيّة الداخلة، فإنّها تؤدّي إلى تقليل التيار المار في ملفّ المحرك. وبالكيفية نفسها فإنّ المولد يؤثر كالمحرك من حيث وجود عزم معاكس يؤثر في دوران الملف].

المحوّلُ الكهربائيُّ هو أداةٌ تُستخدم لتغيير قيمة فرق الجهد المتردّد (ac)، ويتكون من ملفٍّ ابتدائيٍّ وآخر ثانوي. إنّ التغيّر في التدفق الناتج من جهد متردد في الملف الابتدائي يولد جهدًا تأثيريًّا مترددًا في الملفّ الثانوي. في الملفّ الذي تكون كفاءته 100%، فإنّ نسبة الجهد الخارج إلى الجهد الداخل (V_S/V_P) تساوي نسبة عدد لفات الملفّ الثانوي N_S إلى عدد لفّاتِ الملفّ الابتدائيّ N_P كما يلي:

$$\frac{V_S}{V_P} = \frac{N_S}{N_P} \qquad \textbf{(6 - 21)}$$

نسبة تيّار الملفّ الثانويّ إلى تيّارِ الملفّ الابتدائيّ تساوي عكس نسبة عدد اللفات كما يلي:

$$\frac{I_S}{I_P} = \frac{N_P}{N_S} \qquad \textbf{(7 – 21)}$$

هناك بعض التطبيقات على الحثّ المغناطيسيّ مثل: الميكروفونات، ودارات قطع التيّار، وأجهزة الرصد الزلزالي، ورؤوس التسجيل والقراءة في الحاسوب، وأشرطة التسجيل الصوتيّة والمرئيّة.

[* التيار المتغيّر في الملفّ سوف ينتج تغيّرًا في المجال المغناطيسي، ممّا يؤدّي إلى توليد قوّةٍ دافعةٍ تأثيريّةٍ في ملفٍّ ثانٍ يقع بالقرب منه. معامل الحثّ المتبادل M يعرّف من العلاقة:

$$\mathscr{E}_2 = -M\frac{\Delta I_1}{\Delta t} \qquad \textbf{(8 - 21)}$$

[* في الملفّ المنفرد، ينتج تغيّرُ B نتيجة تغيّر التيّار قوّةً دافعةً تأثيرية معاكسة ε . وعليه، يكون للملفّ حثّ ذاتي L يُعطى من العلاقة]

$$\mathscr{E} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t} \qquad \textbf{(9 – 21)}$$

[* الطاقة المختزنة في الملفّ L الذي يحمل تيارًا I تُعطى بالعلاقة $U = \frac{1}{2}LI^2$. هذه الطاقة يمكن تخيّلها بأنّها طاقة مُختزنة في المجال المغناطيسي للملف. وتُعطى كثافة الطاقة u لأيّ مجال مغناطيسي B بالعلاقة]

$$u = \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu_0} \qquad \textbf{(10 – 21)}$$

[* عندما يوصل محث L مع مقاومة R على التوالي مع مصدر للقوة الدافعة V، فإنّ التيار ينمو في الدارة حسب العلاقة

$$I = \frac{V}{R}\left(1 - e^{-t/\tau}\right)$$

حيث $\tau = L/R$، وتُسَمّى الثابت الزمني للدارة. إذا أُزيلت البطارية فجأةً من دارة المحث والمقاومة، فإنّ التيار يتناقص حسب العلاقة

$$I = I_{\max}e^{-t/\tau}]$$

[* المفاعلة الحثية والسّعويّة (X) تُعرّف كما في المقاومة بأنّها النسبة بين الجهد والتيار (إما قيمة جذر متوسط المربعات rms أو قيمة الذروة ($Peak$))، حول المحث كما يلي:

$$V = IX_L \qquad \textbf{(أ11 – 21)}$$

وحول المكثف كالآتي:

$$V = IX_C \qquad \textbf{(21 -12 ب)}$$

تزداد مفاعلة المحث مع التردد حسب العلاقة

$$X_L = 2\pi fL \qquad \textbf{(21 – 11 ب)}$$

أمّا مفاعلة المكثف فتتناقص مع التردد f حسب العلاقة

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \qquad \textbf{(21 – 12 ب)}$$

يكون التيار في المقاومة دائمًا متفقًا بالطور مع فرق الجهد حولها. ولكن بالنسبة إلى المحث، فإنّ التيار يتخلف عن الجهد بزاوية $90°$. بعكس ما في المكثف حيث يسبق التيار الجهد بزاوية $90°$.]

[* في دارة المحث والمقاومة والمكثف (LRC) الموصولة على التوالي، فإنّ **الممانعة** الكلية Z تعرف من المعادلة المكافئة لقانون أوم للمقاومة $V = IR$ كما يلي:

$$V_{\text{rms}} = I_{\text{rms}}Z \quad \text{أو} \quad V_0 = I_0 Z \qquad \textbf{(14 – 21)}$$

وتُعطى Z بالعلاقة الآتية:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \qquad \textbf{(أ15 – 21)}$$

[* دارة المحث والمقاومة والمتسع (LRC) على التوالي يظهر فيها رنين عند تردد يعطى على الصورة الآتية:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}} \qquad \textbf{(19 – 21)}$$

قيمة جذر متوسط المربعات (rms) للتيار في الدائرة تكون أكبر ما يمكن عند تطبيق جهد تردده يساوي f_0.]

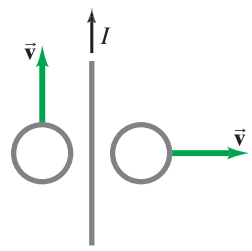
أسئلة

1. ماذا ستكون الميّزات في تجارب فارادي (الشكل 21 – 1) باستخدام ملفات لها عدة لفات؟

2. ما الفرق بين التدفق المغناطيسي والمجال المغناطيسي؟

3. لو افترضنا أنّك أمسكت حلقة دائرية من سلك، ثمّ دفعت قطبًا جنوبيًّا لمغناطيس أولًا بعيدًا عنك باتجاه مركز الدائرة فجأة. فهل سيتولّد تيار تأثيري في السلك؟ هل سيتولّد تيار تأثيري عند إمساك المغناطيس ساكنًا داخل الحلقة؟ هل سيتولد تيار تأثيري إذا سحبت المغناطيس؟ في كلّ حالة، إذا كانت إجابتك نعم، فحدّد اتجاه التيار.

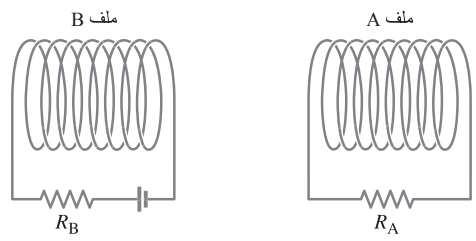
4. عروتان من سلك (فلزيتان) تتحركان في المنطقة المجاورة لسلك مستقيم طويل جدًّا يحمل تيارًا مستمرًا كما هو موضح في (الشكل 21 – 23). أوجد اتجاه التيار التأثيري المتولد في كلّ عروة.



الشكل 21 - 43
(السؤال 4)

5. لو افترضنا أنّك تنظر مع الخط الواصل خلال مركز عروتين فلزيتين منفصلتين إحداهما خلف الأخرى. إذا وصلت بطارية فجأة في العروة الأمامية بحيث تعطي تيارًا مع اتجاه عقارب الساعة: (أ) هل سيتولّد تيار تأثيري في العروة الثانية؟(ب) إذا كان كذلك، فمتى يبدأ هذا التيار؟ (جـ) متى يتوقف هذا التيار؟(د) بأيّ اتجاه يكون هذا التيار؟(هـ) هل هنالك قوة بين العروتين؟ (و) إذا كان كذلك، فما اتجاه هذه القوة؟

6. في (الشكل 21-44)، حدد اتجاه التيار التأثيري المتولد في المقاومة R_A عندما: (أ) يتحرك الملف B باتجاه الملف A. (ب) يتحرك الملف B بعيدًا عن الملف A . جـ) عندما تزداد المقاومة RB.



الشكل 21 – 44
(السؤال 6)

7. في الأوضاع التي تنتقل فيها إشارة صغيرة مسافة معينة فإنّنا نستخدم الكيبل المحوري الذي يتكوّن من سلك محاط بعازل، ثم يحاط بموصل أسطواني يحمل تيارًا راجعًا. ما ضرورة هذا؟

8. ما ميزات وضع سلكين كهربائيين يحملان تيارًا مترددًا في غلاف عازل مع بعضهما بعضا؟

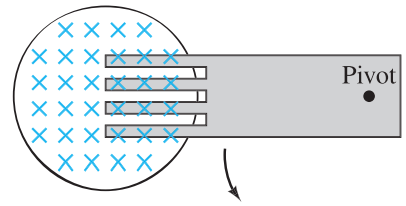
9. * فسّر سبب خفوت الضّوء عند تشغيل المحرك الكهربائي. وعند تشغيل سخان كهربائي، فإنّ الضوء يبقى خافتا ما دام السخان شغّالا. وضّح الفرق.

* **10.** استخدم (الشكلين 21 – 15، و 21 - 17) إضافة إلى قاعدة اليد اليمنى لتوضيح سبب كون العزم المعاكس في المولد معاكسًا للحركة.

* **11.** هل يعمل التيار الدوّامي على كبح الشغل على العجلة النحاسية أو المصنوعة من الألمنيوم؟ وهل يجب أن تكون العجلة مصنوعة من مادة فرّومغناطيسية؟ فسّر ذلك (انظر الشكل 21 – 20).

* **12.** من المقترح أنّ التيارات الدوّامية تستخدم للمساعدة في فصل النُّفايات الصلبة لإعادة إدارتها. في البداية، نفصل القطع الدقيقة والفلزية باستخدام مغناطيس يعمل على التيار المستمر. ومن ثَمَّ تدفع النُّفايات للانزلاق نحو الأسفل على سطح مائل على مغناطيس طبيعي. كيف يساعد هذا على فصل المواد غير الحديدية (Al، Cu، Pb، brass) عن المواد غير الفلزية؟

* **13.** القضيب الفلزي الذي يدور حول محور، و ينتهي بشقوق في (الشكل 21 – 45) يسقط بسرعة أكبر خلال المجال المغناطيسي مقارنة بالقضيب المصمت. فسّر ذلك.



الشكل 21 – 45
(السؤال 13)

* **14.** إذا وضعت شريحة من الألمنيوم بين قطبي مغناطيس طبيعي كبير. فإنّها تحتاج إلى قوّة معينة لسحبها خارج المجال المغناطيسي حتى لو كانت الشريحة مصنوعة من مادة ليست فرومغناطيسية ولا تلامس الأقطاب. فسّر ذلك.

* **15.** القضيب المغناطيسي الذي يسقط داخل إطار فلزي رأسي يصل إلى سرعةٍ حدّيّةٍ حتى لو كان الإطار مفرغًا بحيث لا تكون هنالك مقاومة هواء. فسّر ذلك.

* **16.** يدور القضيب الفلزي حول إحدى نهايتيه بحرية في حالة عدم وجود مجال مغناطيسي، ولكن في المجال المغناطيسي، فإنّ ذبذباته تتخامد بسرعة. فسّر ذلك. (هذا التخامد المغناطيسي يستخدم في عدد من الأجهزة العملية).

* **17.** محوّل مغلق يخرج منه أربعة أسلاك. كيف تستطيع إيجاد عدد لفات ملفيه دون الحاجة إلى فتح المحوّل؟ كيف تستطيع معرفة زوجي الأسلاك المترابطين مع بعضهما بعضا؟

* **18.** استخدام خطوط الجهد العالي مثل 600 V أو 1200 V تقلل من ضياع الطاقة في البيوت. لماذا لا تستخدم هذه الخطوط؟

* **19.** يحترق المحوّل المصمم ليأخذ تيّارًا متردّدًا مقداره 120-V إذا وُصِلَ به تيّارٌ مستمرٌّ مقداره 120-V. فسّر ذلك [مساعدة: مقاومة الملف الابتدائي تكون في العادة صغيرة جدًّا].

* **20.** كيف ترتب ملفّين دائريين مستويين بحيث يكون معامل الحث المتبادل بينهما: (أ) أكبر ما يمكن؟ (ب) أقلّ ما يمكن؟ (دون إبعاد الملفين عن بعضهما مسافة كبيرة)؟

* **21.** هل القوة الدافعة للبطارية في (الشكل 21 - 33) تؤثر في الزمن الذي تحتاج إليه دارة الحث والمقاومة لتجتاز: (أ) نسبة معينة من القيمة القصوى المتوقعة للتيار؟ (ب) قيمة معينة للتيار؟ فسّر ذلك.

* **22.** في دارة محث، ومقاومة، ومتسع (LRC) هل يمكن لقيمة جذر متوسط المربعات (rms) للجهد حول (أ) المحث (ب) المتسع، أن تكون أكبر من قيمة جذر متوسط المربعات لجهد المصدر؟ فسّر ذلك.

* **23.** باختصار، صف كيفية تأثير تردد مصدر القوة الدافعة التأثيرية في ممانعة كلّ من: (أ) المقاومة الخالصة. (ب) المتسع الخالص. (ج) المحث الخالص. (د) دارة LRC بالقرب من الرنين (قيمة R صغيرة). (هـ) دارة LRC بعيدًا عن الرنين (قيمة R صغيرة).

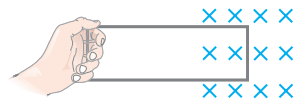
* **24.** صف كيفية جعل الممانعة في دارة LRC قيمة صغرى.

مسائل

1-21 إلى 21 – 4 قانون فارادي في الحث

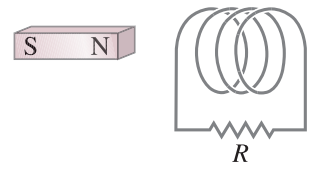
1. (I) التدفق المغناطيسي خلال ملفٍّ يتكوّن من لفّتين يتغيّر من 50 Wb- إلى 38 Wb+ في 0.42 s. ما القوّة الدافعة التأثيريّة المتولّدة في الملف؟

2. (I) الملفّ المستطيل الموضّح في (الشكل 21 – 46) يدفع باتجاه مجال مغناطيسي يشير عموديًّا إلى الداخل. ما اتجاه التيار التأثيري المتولد؟



الشكل 21 – 46
(مسألة 2)

3. (I) القطب الشمالي للمغناطيس الموضّح في (الشكل 21 – 47) يدفع خلال الملف. بأيّ اتجاهٍ سيكون التيّارُ التأثيريُّ المتولّد في المقاومة R؟



الشكل 21 - 47
(مسألة 3)

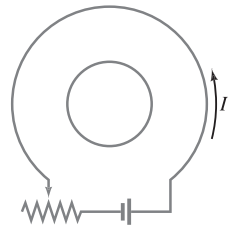
4. (I) عروةٌ دائريّةٌ (حلقة) قطرها 9.6-cm موضوعة في مجال مغناطيسي شدته 1.10-T. إذا أُزيلت العروة من المجال في 0.15 s. فما متوسط القوّة الدافعة التأثيرية المتولّدة؟

5. (I) عروة قطرها 12.0 cm تقع بداية عموديّة على مجال مغناطيسي شدته 1.5-T. إذا دارت العروة بحيث أصبح مستواها موازيًا لاتجاه المجال في 0.20 s. فما هو متوسط القوة الدافعة التأثيرية المتولدة في العروة؟

6. (II) ملف قطره 10.2-cm يقع بداية بحيث يكون مستواه معامدًا لمجال مغناطيسي شدته 0.63 T ويتجه إلى الأعلى. خلال 0.15 s. تغير المجال بحيث أصبحت شدته 0.25 T ويشير إلى الأسفل. ما متوسط القوة الدافعة التأثيرية المتولدة في الملف؟

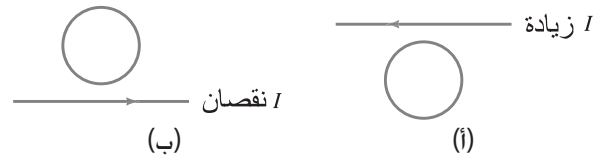
7. (II) عروة دائرية قطرها 15-cm تقع في مجال مغناطيسي شدته 0.50-T. (أ) عندما يكون مستوى العروة عموديًّا على خطوط المجال، ما هو التدفق خلال العروة؟ (ب) إذا دار مستوى العروة بحيث يصنع زاوية مقدارها 35° مع خطوط المجال، ما هي الزاوية θ في (المعادلة 21-1) لهذا الوضع؟ (ج) ما هو التدفق المغناطيسي خلال العروة عند هذه الزاوية؟

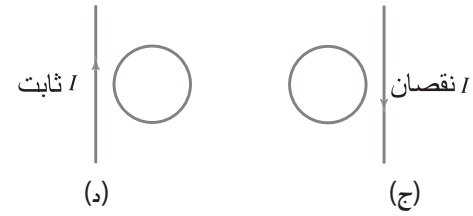
8. (II) (أ) إذا ازدادت المقاومة الموضّحة في (الشكل 21 – 48) ببطء. فما اتجاه التيار التأثيري المتولد في العروة الصغيرة التي تقع داخل العروة الكبيرة؟ (ب) ماذا سيكون اتجاه التيار التأثيري المتولّد في العروة الصغيرة إذا كانت خارج العروة الكبيرة إلى اليسار؟



الشكل 21 – 48
(مسألة 8)

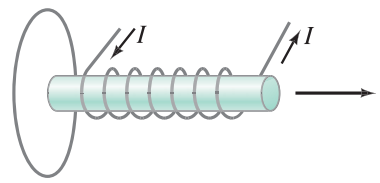
9. (II) ما اتجاه التيار التأثيري المتولّد في العروة الدائرية نتيجة للتيار الموضّح في كلّ جزءٍ من (الشكل 21 - 49)؟





الشكل 21 – 49 (مسألة 9)

10. (II) إذا دُفع الملفُّ الحلزونيُّ الموضّح في (الشكل 21 – 50) بعيدًا على العروة المبيّنة، بأي اتجاه سيكون التيار التأثيري المتولد في العروة؟



الشكل 21 – 50 (مسألة 10)

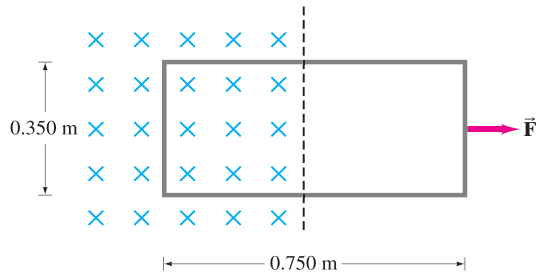
11. يؤثّر مجال مغناطيسي عموديًّا على سلك على شكل خلقة دائرية قطرها 12.0 cm بمقدار يتغير من +0.52 T إلى −0.45 T، خلال 180 ms، حيث تعني أن المجال يتجه بعيداً عن المراقب وتعني أنّ المجال يتجه نحو المراقب. (أ) احسب القوة الدافعة التأثيرية (emf). (ب) بأي اتجاه سيتدفق التيار التأثيري؟

12. إذا كان طول القضيب المتحرك في (الشكل 21-12)، 12.0 cm، ويتحرك بسرعة 15.0 cm/s. وكان المجال المغناطيسي 0.800 T، إحسب (أ) القوة الدافعة التأثيرية النائمة. (ب) المجال المغناطيسي المؤثر في الالكترونيات في القضيب.

13. (II) عروةٌ دائريّةٌ في مستوى الورقة تقع في مجالٍ مغناطيسيٍّ شدته 0.75 T ويشير إلى داخل الورقة. إذا تغيّر قطر العروة من 20.0 cm إلى 6.0 cm في 0.50 s (أ) ما اتجاه التيار التأثيري المتولد؟ (ب) ما مقدار متوسط القوّة الدافعة التأثيرية المتولدة؟ (ج) إذا كانت مقاومة العروة 2.5 Ω؟

14. (II) إذا كان طول القضيب المتحرك في (الشكل 21 – 12) هو 13.2 cm، وتتولّد فيه قوّةٌ دافعةٌ تأثيريّةٌ مقدارها 120 mV عندما يتحرك في مجال مغناطيسي شدته 0.90-T. (أ) ما سرعته؟ (ب) ما المجال الكهربائي المتولد في القضيب؟

15. (II) جزءٌ من العروة المفردة الموضّحة في (الشكل21 – 51) موضوع داخل منطقة مجال مغناطيسي شدته 0.550 T. المقاومة الكلية للعروة 0.230 Ω. احسب القوة اللازمة لدفع العروة من المجال (إلى اليمين) بسرعة ثابتة مقدارها 3.40 m/s. أهمل الجاذبية الأرضية.



الشكل 21 – 51 (مسألة 15)

16. (II) ملفٌّ حلزونيٌّ عدد لفّاته 500 لفة . وطوله 25 cm ، وقطره 2.5 cm. لف ملف من 10 لفات حول مركز الملف الحلزوني. إذا تغير التيار في الملف الحلزوني من 0 إلى 5.0 A في زمن مقداره 0.60 s. ما القوة الدافعة التأثيرية المتولدة في الملف القصير خلال هذا الزمن؟

17. (II) في (الشكل 21 – 12)، إذا كان طول القضيب 30.0 cm، ومقاومته 2.5 Ω، ويتحرك بسرعة 1.6 m/s. وإذا كانت شدة المجال المغناطيسي 0.35 T ومقاومة الموصل الذي على شكل حرف U هي 25.0 Ω فاحسب: (أ) القوة الدافعة التأثيرية المتولدة. (ب) التيار في الموصل الذي على شكل حرف U. (ج) القوة الخارجية اللازمة لجعل سرعة القضيب ثابتة عند تلك اللحظة.

18. (III) ملفٌّ قطره 22.0-cm مصنوعٌ من 20 لفّةً من سلك نحاسي قطره 2.6 mm. إذا كان هنالك مجالٌ مغناطيسيٌّ منتظمٌ عموديٌّ على مستوى الملفّ يتغيّر بمعدّل 8.65×10^{-3} T/s. فاحسب: (أ) التيّارَ المتولّدَ في الملف. (ب) المعدّل الذي تنتج فيه الطاقة الحرارية.

19. (III) يؤثر المجال المغناطيسي عموديًّا في عروة نحاسية دائرية قطرها 13.2-cm، ويتناقص بانتظام من 0.750 T إلى الصفر. إذا كان قطر السلك المصنوع منه العروة 2.25 mm. فما مقدار الشحنات التي تتحرك بحيث تتجاوز نقطة معينة من الملف خلال هذه العملية؟

21 - 5 المولدات الكهربائية

*** 20.** (I) مولّدٌ بسيطٌ يُستخدم لإنتاج جهد قيمة الذروة له 24.0 V . إذا كان الدوار المربّع له يتكوّن من لفائف مربّعة طول ضلعها 6.0 cm على الجوانب، وتدور في مجال مغناطيسيٍّ شدّته 0.420 T بمعدّل 60.0 rev/s. كم عدد اللفّات الملفوفة على الدوّار المربّع؟

*** 21.** (II) يتحرّك مولّدُ سيارة بمعدّل 1100 rpm فينتج 12.4 V. ما هو الجهد الناتج إذا تحرك بسرعة دوران مقدارها 2500 rpm بافتراض عدم تغير أيّ شيء آخر؟

* **22.** (II) أثبت أنّ جهد متوسط المربعات لمولد جهد متردد (الجزء 18 – 7) هو $V_{\text{rms}} = NAB\omega/\sqrt{2}$ حيث $\omega = 2\pi f$.

* **23.** (II) يتكون مولد بسيط من 320 لفة مربعة، طول ضلعها 21.0 cm. كم يجب أن تكون سرعته في مجال مغناطيسي شدته 0.650-T حتى يعطي جهدًا قيمة الذروة له 120-V؟

* **24.** (II) ملفٌّ دوّارٌ قطره 8.0 cm، وعدد لفاته 450 لفة يدور بمعدل 120 rev/s في مجال مغناطيسي شدته 0.55 T. (أ) ما قيمةُ جهدٍ متوسّطِ المربّعات (V_{rms}) الناتج من هذا المولد؟ (ب) ماذا يجب أن يكون تردد الدوران لمضاعفة قيمة V_{rms}؟

* **25.** (II) مولّدٌ يدور بتردّدٍ 85 Hz في مجالٍ مغناطيسيٍّ شدّته 0.030 T. إذا كان عدد لفاته 1000 لفة، وينتج جهدًا قيمة جذر متوسط المربعات (rms) له 150 V، وتيارًا قيمة جذر متوسط المربعات له 70.0 A (أ) ما قيمة الذروة للتيار المتولد؟(ب) ما مساحة كلّ لفة في الملف؟

* 21 – 6 القوة الدافعة التأثيرية الراجعة والعزم

* **26.** (I) محرّكٌ كهربائيٌّ مقاومةُ الدوّار له 3.25 Ω. إذا كان يسحب 8.20 A عندما يدور بالسرعة القصوى ويوصل بجهد مقداره 120-V، فكم يكون مقدار القوة الدافعة التأثيريّة الراجعة؟

* **27.** (I) القوّةُ الدافعةُ التأثيريّةُ الراجعة في محرّكٍ تساوي 72 V عندما يعمل بمعدل 1800 rpm. ماذا ستكون القوة الدافعة التأثيرية الراجعة إذا تحرك بمعدل 2500 rpm إن لم يتغير المجال المغناطيسي؟

* **28.** (II) القوة الدافعة التأثيرية الراجعة في محرك تساوي 95 V عندما يعمل بمعدل 1000 rpm. كيف تُغير المجال المغناطيسي للمحرك إذا أردت أن تقلل القوة الدافعة التأثيرية الراجعة إلى 65 V عندما يعمل المحرك بمعدل 2500 rpm؟

* **29.** (II) كم سيكون التيار في المحرك في (المثال 21 - 9) إذا تسبب الحمل بدوران المحرك بنصف سرعته؟

21 – 7 المحوّلات

[افرض أنّ كفاءة المحوّل 100% إلا إذا ذكر غير ذلك].

30. (I) محوّل مصمم للتحويل من 120 V إلى 10,000 V. إذا كان عدد لفات ملفه الابتدائي 164 لفة، فكم عدد لفات الملف الثانوي؟

31. (I) محوّل عدد لفات ملفه الابتدائي 320 لفة، والثانوي 120 لفة. ما نوع هذا المحوّل؟ بأيّ نسبة يغير الجهد؟ وبأيّ نسبة يغيّر التيار؟

32. (I) محوّل رافع يزيد الجهد من 25 V إلى 120 V. ما هو التيار في الملف الثانوي مقارنة بالملف الابتدائي؟

33. (I) إشارة النيون تحتاج إلى 12 kV لكي تعمل. لتشغيلها من خط جهد مقداره 240 V، ماذا يجب أن تكون نسبة لفات الملف الثانوي إلى الملف الابتدائي للمحوّل المستخدم؟ ماذا ستكون الفوليتة الخارجة إذا استخدم المحوّل بشكل معاكس؟

34. (II) محوّلٌ يُستخدم في القطارات يعمل على فرق جهد متردد مقداره 120 V يسحب 0.35 A، في حين يزود القطار بتيار مقداره 7.5 A. (أ) ما هو الجهد الذي يظهر على السكك؟ (ب) هل المحوّل رافع أم خافض للجهد؟

35. (II) الجهدُ الخارجُ من محوّلٍ قدرته 95-W يساوي 12 V والتيار الداخل يساوي 22 A. (أ) هل هذا محوّل رافع أم خافض للجهد؟ (ب) بأيّ نسبة سوف يزداد الجهد؟

36. (II) محوّلٌ عدد لفّاتِ ملفّهِ الابتدائي 330 لفة، وعدد ملفات الملف الثانوي 1340 لفة. الجهد الداخل يساوي 120 V والتيار الخارج يساوي 15.0 A. ما هو الجهد الخارج؟ وما هو التيار الداخل؟

37. (II) إذا وصلت الكهرباء مدينة بقدرة 30 MW، وعلى جهد 45 kV (rms) من مولد كهرباء خلال خطوط نقل مقاومتها 4.0-Ω. احسب كلا من: (أ) القوة الدافعة الكهربائية عند نهاية خطوط المولّد. (ب) نسبة القدرة الضائعة في الخطوط.

38. (II) وصلت الكهرباء مدينة بقدرة 65 kW من خلال خطين مقاومتهما 0.100-Ω. احسب كمية القدرة التي توفّر إذا ازداد الجهد من V 120 إلى 1200 V ثم يخفض مرة أخرى بدلا من توصيله مباشرة على جهد مقداره 120 V. افرض أنّ كفاءة المحوّلات تساوي 99%.

* 21 - 9 الحثّ

* **39.** (I) إذا تغيّر التيّار في ملفٍّ معامل حثه الذاتي 180-mH من 25.0 A إلى 10.0 A في زمن مقداره 350 ms. ما مقدار القوة الدافعة التأثيرية المتولدة؟

* **40.** (I) ما معامل الحثّ الذاتيّ لملفٍّ ينتج قوّةً دافعةً تأثيرية مقدارها 2.50 V عند تغير التيار فيه من −28.0 mA إلى +31.0 mA في زمن مقداره 12.0 ms؟

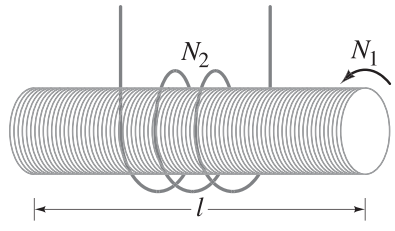
* **41.** (I) ما معامل الحثّ L لملفٍّ هوائيٍّ طوله 0.60-m وقطره 2.9 cm وعدد لفاته 10,000 لفة؟

* **42.** (I) كم عدد اللفات اللازمة لعمل ملف هوائي معامل حثه الذاتي 2.5 cm إذا كان طوله 30.0-cm وقطره 5.2 cm؟

* **43.** (II) محث أسطواني مملوء بالهواء عدد لفاته 2800 لفة وقطره 2.5 cm وطوله 28.2 cm. (أ) ما معامل حثه الذاتي؟ (ب) كم عدد اللفات التي تحتاج إليها ليكون له معامل الحث نفسه إذا كان قلب الملف مصنوعا من الحديد؟ افرض أنّ نفاذية الحديد المغناطيسية 1200 مرة أكبر من نفاذية الفراغ.

* **44.** (III) ملف مقاومته 2.25-Ω ومعامل حثه الذاتي 440-mH. إذا كان التيار 3.00 A ويزداد بمعدل 3.50 A/s. فما فرق الجهد بين طرفي الملف عند هذه اللحظة؟

* **45.** (III) ملف حلزوني طويل طوله l ومساحة مقطعه A ويحتوي على N_1 لفة متراصة. لُفَّ عليه ملفٌّ آخر عدد لفاته N_2 بشكل معزول كما في (الشكل 21-25). على افتراض أنّ التدفق الناتج من الملف 1 جميعه (الحلزوني) يمر خلال الملف 2، احسب معامل الحث المتبادل.



الشكل 21 - 52 (مسألة 45)

* **46.** (III) إذا قمنا بفكّ اللفات المتراصة على ملف لعمل لفات متراصة على ملف آخر له ضعف القطر. ما النسبة التي يتغير فيها معامل الحث؟

21 – 10 الطاقة المغناطيسية المختزنة

* **47.** (I) المجال المغناطيسي داخل ملف حلزوني هوائي طوله 36 cm وقطره 2.0 cm يساوي 0.80 T. ما مقدار الطاقة المختزنة في هذا المجال تقريبًا ؟

* **48.** (II) عند لحظةٍ معيّنة، كان التيار المار في محثّ 50.0 mA ويزداد بمعدّل 115 mA/s. ما الطاقة الابتدائية المختزنة في هذا المحثّ على افتراض أنّ معامل حثه يساوي 60.0 mH؟ وكم هو الوقت اللازم حتى تزداد الطاقة إلى عشرة أضعاف قيمتها الابتدائيّة؟

* **49.** (II) افرض أنّ متوسط المجال المغناطيسي للأرض هو $0.50 \times 10^{-4}\ \text{T}$ بالقرب من السطح. احسب الطاقة الكلية المختزنة في هذا المجال في أول 10 km فوق سطح الأرض.

* 21 – 11 دائرة محثّ ومقاومة (LR)

* **50.** (II) أوجد $\Delta I/\Delta t$ عند $t = 0$ (عند وصل البطارية) في دائرة المحث والمقاومة الموضحة في (الشكل 21 – 33). وبيّن أنه إذا استمر I بالزيادة في هذا المعدّل، فإنه سيصل قيمته القصوى خلال فترة تساوي الثابت الزمني.
* **51.** (III) بعد كم ثابت زمني τ يصل التيار في (الشكل 21 – 33) إلى: (أ) 10% ؟ (ب) 1.0% ؟ (ج) 0.1% من قيمته القصوى؟
* **52.** (III) ملفان حلزونيان متراصّان لهما الطول نفسه ومساحة المقطع نفسها، إلا أنّ الملف 1 يستخدم سلكًا سماكته نصف سماكة السلك في الملف 2. ما النسبة بين: (أ) معاملي حثيهما؟ (ب) الثابت الزمني الحثي لهما (افترض عدم وجود مقاومات أخرى في الدائرة)؟

* 21 – 12 دارات التيار المتردد والمفاعلة

* **53.** (I) ما مفاعلة مواسع سعته 7.20-μF عند تردد (أ) 60.0 Hz ؟ (ب) 1.00 MHz؟
* **54.** (I) عند أيّ تردد تكون مفاعلة محث معامل حثه 22.0-mH مساوية لـ 660 Ω؟
* **55.** (I) عند أيّ تردد تكون مفاعلة مواسع سعته $2.40\mu F$ مساوية لـ 6.70 kΩ؟
* **56.** (II) ارسم شكلا يوضح مفاعلة مواسع سعته 1.0-μF كدالة في التردد من 10 إلى 1000 Hz.
* **57.** (II) ارسم شكلًا يوضح مفاعلة محث معامل حثه 1.0-mH كدالة في التردد من 100 إلى 10,000 Hz.
* **58.** (II) احسب المفاعلة و I_{rms} في ملف مذياع معامل حثه 160-mH، وموصل بجهد (rms) 240-V، ويعمل على خط متردد تردده 10.0-kHz أهمل المقاومة.
* **59.** (II) ملف حثي يعمل على 240 V، و 60.0 Hz يسحب 12.8 A. ما معامل حثه؟
* **60.** (II) (أ) ما مفاعلة متسع معزول تمامًا سعته 0.030-μF وموصول بجهد مقداره (rms) 2.0-kV وتردده 720-Hz؟ (ب) ما قيمة تيار الذروة؟

* 21-13 دارات المحث والمقاومة والمتسع (LRC)

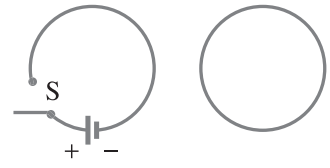
* **61.** (I) مقاومة مقدارها 30-kΩ موصولة على التوالي مع محث معامل حثه 45-mH، ومصدر تيار متردد. احسب ممانعة الدائرة إذا كان تردد المصدر: (أ) 50 Hz. (ب) 3.0×10^4 Hz.
* **62.** (I) مقاومة مقدارها 3.5k Ω موصولة على التوالي مع متسع سعته 4.0-μF، ومصدر تيار متردد. احسب ممانعة الدائرة إذا كان تردد المصدر: (أ) 60 Hz. (ب) 60,000 Hz.
* **63.** (I) لمصدر جهد مقداره 120-V rms، وتردده 60-Hz، فإنّ تيارًا مقداره 70m A، ويمر خلال 1.0 s في جسم الإنسان يكون ميتًا. ماذا يجب أن تكون ممانعة جسم الإنسان حتى يحدث هذا؟
* **64.** (II) ما مقاومة ملف إذا كانت ممانعته 235 Ω ومفاعلته 135 Ω؟
* **65.** (II) ما الممانعة الكلية، زاوية الطور و Irms في دائرة LRC موصولة بجهد مقداره (rms) 725-V وتردده 10.0-kHz. إذا كانت L=22.0 mH, R= 8.70k Ω و C= 6250 pF؟
* **66.** (III) مقاومة مقدارها 2.5-kΩ موصولة على التوالي مع محث معامل حثه 420-mH ومع مصدر متردد. عند أيّ تردد تكون الممانعة ضعف قيمتها عند 60 Hz؟
* **67.** (III) (أ) ما هو Irms في دائرة RL عند تطبيق جهد مقداره 120-V rms، وتردده 60.0-Hz حيث $R = 1.80\ \text{k}\Omega$ و $L = 350\ \text{mH}$؟ (ب) ما زاوية الطور بين الجهد والتيار؟ (ج) ما هي $Vrms$ حول كلّ من R و L؟
* **68.** (III) ما هو rms في دائرة RC إذا كانت $R = 8.80\ \text{k}\Omega$ و $C = 1.80\ \mu\text{F}$. والجهد المطبق يساوي 120 V عند تردد 60.0 Hz؟ (ب) ما زاوية الطور بين الجهد والتيار؟ (ج) ما قراءة الفولتميتر حول كلّ من R، و C؟

21 – 14 الرنين في الدارات المتردد

* **69.** (I) مواسع سعته 3500-pF موصول مع محث معامل حثه 55.0-μH ومقاومته 3.00 Ω. ما تردد الرنين لهذه الدائرة؟
* **70.** (I) المكثف المتغير في منقي الموجات في المذياع له سعة تساوي 2800 pF عندما يوضع على محطة ترددها 580 kHz. (أ) ماذا يجب أن تكون سعته عند محطة تعمل على تردد مقداره 1600 kHz؟ (ب) ما هو معامل الحث (على افتراض أنه ثابت)؟
* **71.** (II) في دائرة (LRC) إذا كان L=14.8 mH و R= 4.40 Ω. (أ) ما قيمة C اللازمة لإنتاج رنين عند 3600 Hz؟ (ب) ما أقصى تيار عند الرنين إذا كان جهد الذروة للمصدر الخارجي يساوي 150 V؟

مسائل عامة

* **72.** لو افترضنا أنّك تنظر إلى حلقتين معدنيتين في مستوى الورقة كما هو موضح في (الشكل 21-53). عند فتح المفتاح S في الملف الأيسر. (أ) ما اتجاه التيار التأثيري المتولد في العروة الثانية؟ (ب) ما الوضع بعد زمن طويل؟ (ج) ما اتجاه التيار في العروة اليمنى إذا تحركت بسرعة، وبشكل أفقي إلى اليمين؟



الشكل 21 - 53 (مسألة 72)

* **73.** عروةٌ مربّعةٌ طولُ ضلعِها 24.0 cm، ومقاومتها 5.20 Ω تقع في البداية في مجال مغناطيسي شدته 0.665-T بحيث يكون مستواها عموديًّا على $\vec{\mathbf{B}}$، ثم أزيلت من المجال في 40.0 ms. احسب الطاقة الكهربائية المستنفدة في هذه العملية.
* **74.** مصباح مكتب قدرته 45 W ويحتاج إلى 12 V فقط. يحتوي المصباح على محوّل يحوّل من الجهد المنزلي الذي قيمته 120-V (أ) هل المحوّل رافع للجهد أم خافض له؟ (ب) ما هو التيار في الملف الثانوي عندما يكون المصباح مضاءً؟ (ج) ما هو التيار في الملف الابتدائي؟ (د) ما هي مقاومة المصباح عندما يكون مضاءً؟

75. تنتج القدرة الكهربائيّةُ من مولّدٍ على 24 kV في مكانٍ يبعد 118 km عن المدينة التي تحتاج إلى 50 MW من القدرة الكهربائية على جهد 12 kV. هنالك خطان لنقل القدرة من المصدر إلى المدينة، مقاومة كلّ منهما 0.10 Ω/km. ماذا يجب أن يكون الجهد الخارج من المحوّل الموجود عند المصدر حتى تكون الكفاءة الكلية لنقل القدرة 98.5% على افتراض أنّ المحوّل جيّد.

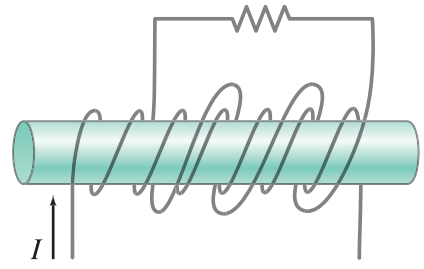
76. إذا كانت لفّات الملفّ الابتدائيّ لمحوّلٍ كفاءته 80% موصولة بجهد متردد مقداره 110-V. لفات الملف الثانوي موصولة حول مصباح مقاومته 2.4 Ω وقدرته 75 W. احسب كلًّا من: (أ) التيار المار في لفات الملّف الابتدائي للمحوّل. (ب) نسبة عدد لفّاتِ الملفِّ الابتدائيّ إلى عدد لفّاتِ الملفِّ الثانويّ للمحوّل.

77. زوجٌ من خطوط نقل القدرة مقاومةُ كلٍّ منها 0.80-Ω، ويحمل تيارًا مقداره 740 A على مسافة 9.0 km. إذا كانت قيمة جذر متوسط المربعات (rms) للجهد الداخل 42 kV فاحسب: (أ) الجهد الخارج. (ب) القدرة المدخلة. (ج) القدرة المفقودة في الخطين. (د) القدرة الخارجة.

78. سكتّان عديمتا المقاومة تبعدان عن بعضهما 32 cm موضوعتان على منحدر يميل بزاوية 6.0°، وموصولتان من القاع بمقاومة مقدارها 0.60-Ω. في القمّة هنالك قضيب نحاسي كتلته 0.040 kg (مهمل المقاومة) يقع على السكتين. إذا كانت هذه الأدوات موجودة في مجال مغناطيسي عمودي شدته 0.55-T. فما السرعة الحدية (الثابتة) للقضيب عندما ينزلق دون احتكاك نحو أسفل السكتين؟

79. أثبت أنّ القدرة المفقودة في خطوط النقل تعطى بالعلاقة $P_L = (P_T)^2 R_L/V^2$، حيث P_T هي القدرة المنقولة للمستخدم، V هو الجهد المعطى، و R_L هي مقاومة الخط الناقل.

80. ملفٌّ عدد لفّاته 150 لفَّةً، ونصف قطره 5.0 cm ومقاومته 12 Ω. ملفوف حول ملف حلزوني عدد لفاته 230 turns/cm ونصف قطره 4.5 cm، انظر (الشكل 21 – 54). إذا تغيّر تيّار الملفِّ الحلزونيّ من 0 A إلى 2.0 A في زمن مقداره 0.10 s، فاحسب مقدار التيّارِ التأثيريّ المتولّد في الملفّ واتجاهه.



الشكل 21 – 54 (مسألة 80)

81. جهازٌ إلكترونيٌّ نريد حمايته من الزيادة المفاجئة في التيار. عمليًّا، عند تشغيل مصدر القدرة يجب ألا يتجاوز التيار 7.5 mA في أول 120 μs. إذا كانت مقاومة الجهاز ومُصَمَّمٌ ليعمل على 55 mA، كيف تحمي هذا الجهاز؟

82. ملفٌّ عدد لفّاته 25، وقطره 12.5-cm موضوع بين قطبي مغناطيس. عندما يعمل المغناطيس، يتغيّر التدفق خلال الملفِّ بحيث يولّد قوّةً دافعةً تأثيريّةً. بأيّ معدّل (بوحدة T/ s) يجب أن يتغيّر المجال المغناطيسي إذا كانت القوة الدافعة التأثيرية المتولّدة 120 V.

83. * احسب جهد الذروة الناتج من مولّدٍ بسيطٍ يتكوّن من دوّار مربّع طول ضلعه 6.60 cm. إذا كان الدوّار يحتوي 155 لفّةً ويدور في مجال مغناطيسي شدته 0.200 T وبمعدل 120 rev/s.

84. * القيمة الكبرى النموذجية للمجالين الكهربائي والمغناطيسي في أحد المختبرات تبلغ 1.0×10^4 V/m و 2.0 T (أ) احسب كثافة الطاقة لكلا المجالين. (ب) ما مقدار المجال الكهربائي اللازم لإنتاج كثافة الطاقة نفسها للمجال المغناطيسي الذي شدته 2.0-T؟

85. * ما معامل الحثّ L لملفٍّ ابتدائي في محوّل جهده الداخل 220 V عند 60.0 Hz إذا كان التيار الذي يسحبه 5.8 A؟ افرض أنّ الملفَّ الثانوي لا يحتوي أيّ تيار.

86. * ملفٌّ معامل حثّه 130-mH ومقاومته 18.5 Ω، موصولٌ مع مواسع C ومصدر جهد تردده 1360-Hz. إذا كان التيار والجهد متفقين في الطور، فماذا يجب أن تكون قيمة C؟

87. * ملفٌّ حثّيٌّ يسحب تيّارًا مستمرًّا مقداره 2.5-A عند توصيله ببطارية جهدها 36-V. وعند توصيله بمصدر جهد متردّد قيمته 120-V (rms) وتردده 60-Hz، فإنه يسحب تيّارًا مقداره 3.8 A(rms). احسب معامل حثّ هذا الملف ومقاومته.

88. * محثّ، معامل حثّه 135-mH ومقاومته 2.0-Ω، وصل بمواسع سعته 20-μF، ومصدر جهد مقداره 45-V، وتردده 60-Hz. احسب كلًّا من: (أ) I_{rms} . (ب) زاوية الطور.

89. * يعرف **المعامل** Q لدائرة الرنين بأنّه النسبة بين الجهد حول المكثف (أو الحث) والجهد حول المقاومة عند الرنين. كلّما كانت Q أكبر كان منحنى الرنين أكثر حدّةً. (أ) أثبت أنّ المعامل Q يُعطى بالعلاقة $Q = (1/R)\sqrt{L/C}$. (ب) عند تردد رنين $f_0 = 1.0$ MHz ، ماذا يجب أن تكون قيمة L و R حتى يكون المعامل Q يساوي 550؟ افرض أنّ $C = 0.010\ \mu$F.

إجابات التمارين

أ: 0.0102 Wb

ب: (أ) عكس اتجاه عقارب الساعة. (ب) مع اتجاه عقارب الساعة. (ج) صفر (د) عكس اتجاه عقارب الساعة.

ج: عكس اتجاه عقارب الساعة

د: لفات 10