شارح: الحث الكهرومغناطيسي

في هذا الشارح، سوف نتعلَّم كيف نحسب مُعامِل الحث الذاتي لملف موصِّل ومُعامِل الحث المُتبادَل لزوج من الملفات الموصِّلة.

تولِّد الأسلاك التي يمر بها تيار كهربي مجالات مغناطيسية حولها. وإذا تغيرت شدة التيار المار في السلك مع الزمن، فإن المجال المغناطيسي الذي يولده السلك يتغير أيضًا.

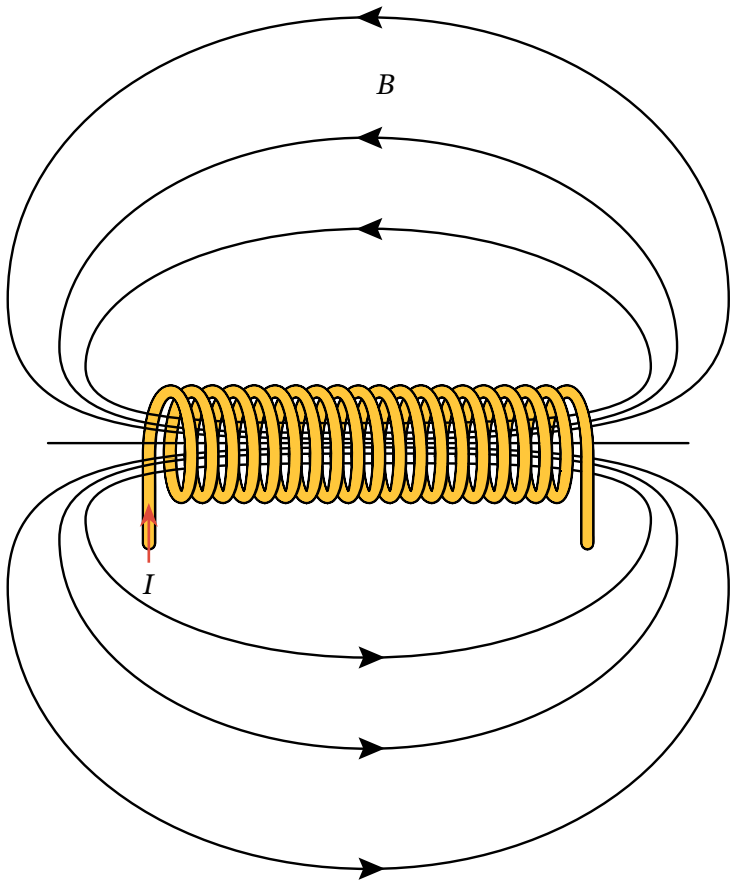
وعندما يتغير المجال المغناطيسي المتولد حول الملف الموصل، يُستحث فرق جهد في الملف. تعرف هذه العملية باسم الحث الكهرومغناطيسي، أو الحث.

تعريف: الحث

الحث هو قدرة الموصل على التعرض لتغيُّر في شدة التيار بسبب تغيُّر المجال المغناطيسي. فكلما زادت هذه القدرة، زاد الحث في الموصل.

افترض أن لدينا ملفًّا لولبيًّا يمر به تيار.

عندما تكون شدة التيار ثابتة، يتولد مجال مغناطيسي ثابت داخل حلقات الملف اللولبي، كما هو موضح في الأسفل.



افترض أن فرق الجهد عبر الملف اللولبي يزيد بمقدار ثابت.

سيؤدي ذلك إلى حدوث سلسلة من التغيُّرات الآتية في الملف اللولبي.

تؤدي زيادة فرق الجهد عبر الملف اللولبي إلى زيادة شدة التيار في الملف اللولبي. وهذا التغيُّر في شدة التيار يؤدي إلى زيادة شدة المجال المغناطيسي حول الملف اللولبي.

تعمل الزيادة في شدة المجال المغناطيسي على حث تيار في الاتجاه المعاكس للتيار الأصلي المار في الملف اللولبي. لكن شدة هذا التيار المعاكس أقل من شدة التيار الأصلي.

يؤدي هذا التيار المعاكس الأقل شدة إلى تغيُّر المجال المغناطيسي حول الملف اللولبي، ما يقلل من المعدل الذي يزيد به المجال المغناطيسي المتزايد.

لكن المجال المغناطيسي يواصل التغيُّر بهذا المعدل المنخفض. ويستمر هذا المجال المغناطيسي المتغير في توليد تيار. ويصبح التيار المستحَث أقل شدة من التيار المستحَث قبل ذلك.

وينشأ عن هذا التيار ذي الشدة الأقل مجال مغناطيسي ذو شدة أقل من شدة المجال المغناطيسي الذي تَسبَّب في تولُّده. ويعمل هذا المجال المغناطيسي على الاستمرار في تقليل المعدل الذي يزيد به المجال المغناطيسي.

وتستمر هذه العملية؛ حيث تكون قيمة كل تيار مستحَث تالٍ أقل من القيمة السابقة. وبتكرار هذه العملية عدة مرات، يصبح التغيُّر في شدة التيار مُهمَلًا، كما تصبح الزيادة في شدة المجال المغناطيسي مُهمَلة أيضًا.

وعند هذه اللحظة، يصبح التغيُّر في كلٍّ من شدة التيار وشدة المجال المغناطيسي صفرًا. يمكننا إذن التفكير في وجود قيمة ثابتة جديدة لشدة التيار في الملف اللولبي، وقيمة ثابتة جديدة لأقصى شدة مجال مغناطيسي لهذا الملف اللولبي.

ثمة أمر مهم علينا إدراكه فيما يتعلق بهذه السلسلة من التغيُّرات، وهو أنها تقلل من معدل التغيُّر في شدة التيار وشدة المجال المغناطيسي إلى أن يصلا إلى الصفر، لكنها لا تجعل قيمتيهما سالبتين. وهذا يعني أن زيادة فرق الجهد عبر الملف اللولبي:

- لا تؤدي إلى زيادة شدة التيار في الملف اللولبي دون حد.
- لا تؤدي إلى انخفاض شدة التيار في الملف اللولبي إلى أقل من قيمته الابتدائية.
- لا تؤدي إلى اهتزاز التيار في الملف اللولبي.

بدلًا من ذلك، تزيد شدة التيار بمعدل يقل تدريجيًا إلى أن يتوقف عن الزيادة في النهاية. وهذا التغيُّر في شدة التيار يحدث خلال فترة زمنية معينة. وينطبق هذا أيضًا على شدة المجال المغناطيسي حول الملف اللولبي.

تُعرَف هذه الظاهرة باسم الحث الذاتي، وهو التغيُّر في شدة التيار المار في الموصل نتيجة تغيُّر شدة المجال المغناطيسي مع الزمن، والناشئ أيضًا عن تغيُّر شدة التيار المار في الموصل.

معادلة: الحث

إذا كان ε فرق الجهد المستحَث عبر الموصل، و$\frac{\Delta I}{\Delta T}$ معدل تغير شدة التيار المار في الموصل مع الزمن، وL معامل حث الموصل، فإن:

$$\varepsilon = -L \times \left(\frac{\Delta I}{\Delta T}\right).$$

ورياضيًّا، يعبِّر عن حث الموصل بأنه ثابت التناسب بين فرق الجهد المستحَث عبر الموصل والمعدل الذي تتغير به شدة التيار المار في الموصل مع الزمن.

تشير إشارة السالب في المعادلة إلى قطبية فرق الجهد المستحَث. ويولد هذا الجهد تيارًا يعاكس التغيُّر في شدة التيار مع الزمن، $\frac{\Delta I}{\Delta T}$.

مثال ١: استخدام معامل الحث الذاتي لتحديد الزمن الذي يستغرقه التيار ليتغير بمقدار محدد

ملفٌ فرقُ الجهد بين طرفَيه يساوي $1.2\ \text{V}$. معامل الحث الذاتي للملف $125\ \text{mH}$. ما الزمن اللازم ليزيد الملف من شدة التيار المار عبره بمقدار $0.25\ \text{A}$؟ أوجد الإجابة لأقرب منزلتين عشريتين.

الحل

تربط العلاقة الآتية فرق الجهد بين طرفَي الملف ومعامل الحث الذاتي له والتغيُّر في شدة التيار مع الزمن:

$$\varepsilon = -L \times \left(\frac{\Delta I}{\Delta T}\right).$$

نريد حساب التغير في الزمن، ΔT. وبإعادة ترتيب المعادلة:

$$\Delta T = \frac{(-L \times \Delta I)}{\varepsilon}.$$

بما أن قيمة ΔT ليست سالبة، يمكننا أن نفترض أن فرق الجهد له قطبية سالبة، ما يعني أنه يساوي $-1.2\ \text{V}$.

معامل الحث الذاتي للملف، L، يساوي $125\ \text{mH}$؛ والتغيُّر في شدة التيار، ΔI، يساوي $0.25\ \text{A}$:

$$\begin{aligned}\Delta T &= \frac{\left(-\left(125 \times 10^{-3}\ \text{H}\right) \times (0.25\ \text{A})\right)}{(-1.2\ \text{V})} \\ &= \frac{((0.125\ \text{H}) \times (0.25\ \text{A}))}{(1.2\ \text{V})} \\ &= 0.0260416\dot{}\ \text{s}.\end{aligned}$$

بتقريب هذا الناتج لأقرب منزلتين عشريتين، نجد أن الزمن اللازم لزيادة شدة التيار في الملف بمقدار $0.25\ \text{A}$ يساوي $0.03\ \text{s}$.

يمكننا دمج معادلة الحث وقانون فاراداي، الذي ينص على أن الجهد المستحَث عبر الموصل يتناسب طرديًّا مع التغيُّر في الفيض المغناطيسي الذي يتعرض له الموصل مع الزمن. وتحديدًا:

$$\varepsilon = -N \times \left(\frac{\Delta \Phi_B}{\Delta T}\right)$$

حيث N عدد لفات الموصل، و$\Delta \Phi_B$ التغيُّر في الفيض المغناطيسي عبر الموصل خلال الفترة الزمنية ΔT.

بمساواة قانون فاراداي بمعادلة الحث السابقة:

$$\varepsilon = -N \times \left(\frac{\Delta \Phi_B}{\Delta T}\right) = -L \times \left(\frac{\Delta I}{\Delta T}\right).$$

إذن:

$$N \times \Delta \Phi_B = L \times \Delta I.$$

بصورة مكافئة:

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

من ذلك يمكننا استنتاج أن معامل الحث يساوي عدد لفات الموصل مضروبًا في التغيُّر في الفيض المغناطيسي الذي يتعرض له الموصل، مقسومًا على التغيُّر في شدة التيار المار في الموصل.

مثال ٢: حساب معامل الحث الذاتي بمعلومية التغيُّر في التيار والفيض المغناطيسي

تزداد شدة التيار المار في ملف بمقدار 180 mA. الفيض المغناطيسي الناتج عن التغيُّر في شدة التيار 0.77 Wb. ما معامل الحث الذاتي للملف؟ أوجد الإجابة لأقرب منزلة عشرية.

الحل

يُحسب معامل الحث الذاتي L للملف من المعادلة:

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

حيث N عدد لفات الملف، و$\Delta\Phi_B$ التغيُّر في الفيض المغناطيسي، وΔI التغير في شدة التيار المار في الملف.

وفي هذه الحالة، يتكون الملف من لفة واحدة؛ وعليه N يساوي واحدًا.

الفيض المغناطيسي وشدة التيار معطيان بوحدتَي وبر (Wb) وملي أمبير (mA) على الترتيب.

وبر هي وحدة الفيض المغناطيسي في النظام الدولي للوحدات. ولاستخدام وحدة شدة التيار التي تتناسب مع الوبر، علينا أن نحول وحدة شدة التيار إلى أمبير.

1 000 ملي أمبير يساوي أمبير واحدًا؛ ومن ثَمَّ إذا كان Y هو عدد الملي أمبير، فإن:

$$Y \text{ mA} = Y \times 10^{-3} \text{ A}.$$

إذن، 180 ملي أمبير يساوي 0.180 أمبير.

بالتعويض بهذه القيمة عن التغيُّر في شدة التيار وبالقيمة المعطاة للتغيُّر في الفيض المغناطيسي في معادلة حساب L، نحصل على:

$$L = (1) \times \frac{(0.77 \text{ Wb})}{(0.180 \text{ A})}$$
$$= 4.2\dot{7} \text{ H}.$$

بتقريب الناتج لأقرب منزلة عشرية، فإن معامل الحث الذاتي للملف يساوي 4.3 هنري.

من الممكن أن يولِّد الموصل مجالًا مغناطيسيًّا متغيرًا يَستحث تيارًا يمر به، ومن الممكن أيضًا أن يَستحث تيارًا يمر بموصل آخر. وعندما يتفاعل موصلان بهذه الطريقة، فإنهما يُبديان ما يسمى الحث المتبادل.

افترض أن لدينا موصلين؛ الموصل واحد والموصل اثنين. يمر بالموصل واحد تيار شدته I_1 ويولِّد فيضًا مغناطيسيًّا متغيرًا عبر الموصل اثنين، فيستحث الجهد ε_2.

كما في معادلة الحث السابقة، ترتبط هاتان الكميتان من خلال المعادلة الآتية:

$$\varepsilon_2 = -M_{12} \times \left(\frac{\Delta I_1}{\Delta T}\right).$$

يعتمد الجهد المستحَث في الموصل اثنين، والناشئ عن التيار المار في الموصل واحد، على معامل الحث المتبادل من الموصل واحد إلى الموصل اثنين (M_{12}).

بوجه عام، الحث المتبادل من الموصل واحد إلى الموصل اثنين لا يساوي الحث المتبادل من الموصل اثنين إلى الموصل واحد. أي إن:

$$M_{12} \neq M_{21}.$$

ومع ذلك، من الطبيعي أن توجد معادلة تربط الجهد، ومعامل الحث المتبادل، وشدة التيار كما يلي:

$$\varepsilon = -M \times \left(\frac{\Delta I}{\Delta T}\right).$$

حتى على هذه الصورة غير المحددة، ما زلنا نعتبر أن التيار يتغير في أحد الموصلين ليستحث جهدًا في الموصل الآخر عن طريق الحث المتبادل بينهما.

مثال ٣: تحديد فرق الجهد بمعلومية معامل الحث المتبادل

محوِّل ذو قلب حديدي به ملف ابتدائي يتكون من 75 لفة، وملف ثانوي يتكون من 75 لفة أيضًا. معامل الحث المتبادل بين الملفين 15 H. التيار في الملف الابتدائي يزيد من التيار في الملف الثانوي بمعدل 1.25 A/s. ما فرق الجهد بين الملفين؟ أوجد الإجابة لأقرب منزلة عشرية.

الحل

تتغير شدة التيار المار في الملف الثانوي للمحول بسبب تغيُّر شدة التيار المار في الملف الابتدائي.

نعلم أن:

$$\varepsilon = -M \times \left(\frac{\Delta I}{\Delta T}\right)$$

حيث ε الجهد المستحَث بسبب تغيُّر شدة التيار مع الزمن $\frac{\Delta I}{\Delta T}$.

يمكننا إيجاد قيمة هذا الجهد بمعلومية معدل تغيُّر شدة التيار (1.25 A/s) ومعامل الحث المتبادل بين الملفين (15 H). بالتعويض بهاتين القيمتين:

$$\varepsilon = -(15\ \text{H}) \times (1.25\ \text{A/s}).$$

تشير إشارة السالب في هذه المعادلة إلى أن التيار المستحَث يولد مجالًا مغناطيسيًّا يعاكس المجال المغناطيسي الذي استحث هذا التيار في البداية. وبالنسبة إلى الجهد، تشير هذه الإشارة إلى حدوث تغيُّر في القطبية، وليس في المقدار، فيمكننا إهمال الإشارة السالبة عند إيجاد الجهد:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= (15\ \text{H}) \times (1.25\ \text{A/s}) \\ &= 18.75\ \text{V}.\end{aligned}$$

بتقريب هذا الناتج لأقرب منزلة عشرية، نجد أن فرق الجهد بين الملفين يساوي 18.8 فولت.

مثال ٤: حساب عدد اللفات في ملف محول

يتكوَّن محوِّل من ملف ابتدائي وملف ثانوي، كلٌّ منهما له نفس عدد اللفات، وملفوف حول قلب حديدي. معامل الحث المتبادل للملفين يساوي $32\ \text{mH}$. يزيد التيار في الملف الابتدائي من الفيض المغناطيسي في القلب بمقدار $4.48\ \text{mWb}$. أما التيار المستحَث في الملف الثانوي فيساوي $1.4\ \text{A}$. كم لفة في الملف؟

الحل

يربط قانون فاراداي بين الجهد المستحَث عبر موصل والتغيُّر في الفيض المغناطيسي مع الزمن من خلال المعادلة:

$$\varepsilon = -N \times \left(\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta T}\right)$$

حيث ε فرق الجهد المستحث، وN عدد اللفات في الموصل، و$\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta T}$ التغيُّر في الفيض المغناطيسي الذي يتعرض له الموصل مع الزمن.

ثمة معادلة أخرى للجهد المستحَث تتضمن معامل الحث المتبادل بين موصلين مثل ملفَّي المحول:

$$\varepsilon = -M \times \left(\frac{\Delta I}{\Delta T}\right).$$

يمكن دمج هاتين المعادلتين للحصول على معادلة ثالثة:

$$-N \times \left(\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta T}\right) = -M \times \left(\frac{\Delta I}{\Delta T}\right).$$

لاحظ أن الإشارتين السالبتين والكسرين $\frac{1}{\Delta T}$ يظهران في كلا الطرفين؛ ومن ثَمَّ يمكن حذفهما:

$$N \times (\Delta\Phi_B) = M \times (\Delta I).$$

بقسمة الطرفين على $\Delta\Phi_B$:

$$N = M \times \frac{(\Delta I)}{(\Delta\Phi_B)}.$$

يمكننا الآن إيجاد عدد اللفات في ملف المحول الثانوي بالتعويض بالقيم المعطاة لمعامل الحث المتبادل (32 mH)، والتغيُّر في شدة التيار (1.4 A)، والتغيُّر في الفيض المغناطيسي (4.48 mWb).

لكن علينا أولًا تحويل معامل الحث المتبادل إلى وحدة الهنري، وتحويل التغيُّر في الفيض المغناطيسي إلى وحدة الوبر:

$$1\,000\ \text{mH} = 1\ \text{H},$$

$$1\,000\ \text{mWb} = 1\ \text{Wb}.$$

إذن:

$$\begin{aligned} 32\ \text{mH} &= 32 \times 10^{-3}\ \text{H} \\ &= 0.032\ \text{H}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 4.48\ \text{mWb} &= 4.48 \times 10^{-3}\ \text{Wb} \\ &= 0.00448\ \text{Wb}. \end{aligned}$$

وبهذا:

$$\begin{aligned} N &= (0.032\ \text{H}) \times \frac{(1.4\ \text{A})}{(0.00448\ \text{Wb})} \\ &= 10. \end{aligned}$$

الملف الثاني في المحول له 10 لفات.

هيا نلخص الآن ما تعلمناه في هذا الشارح.

النقاط الرئيسية

- يحدد معامل الحث الذاتي لملف المعدل الذي يمكن أن تتغير به شدة التيار المار في هذا الملف.
- $\varepsilon = -L \times \left(\frac{\Delta I}{\Delta T}\right)$؛ حيث ε فرق الجهد عبر الموصل، و$\frac{\Delta I}{\Delta T}$ التغيُّر في شدة التيار مع الزمن، وL معامل حث الموصل.
- قد يَستحث التيار المتغير الشدة في موصلٍ تيارًا في موصل آخر، وهذه الظاهرة تُعرف بالحث المتبادل.

- $\varepsilon = -M \times \left(\frac{\Delta I}{\Delta T}\right)$؛ حيث ε فرق الجهد عبر طرفَي أحد الموصلين، وM معامل الحث المتبادل بين الموصلين، و$\frac{\Delta I}{\Delta T}$ التغيُّر في شدة التيار مع الزمن.
- يمكن دمج معادلتَي معامل الحث وقانون فاراداي للحصول على معادلتين جديدتين: $L = N \times \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta I}$، $M = N \times \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta I}$. وهنا؛ L، M هما معامل الحث الذاتي ومعامل الحث المتبادل على الترتيب، وN عدد لفات الموصل، و$\frac{\Delta \Phi_B}{\Delta I}$ التغيُّر في الفيض المغناطيسي مقسومًا على التغيُّر في شدة التيار.