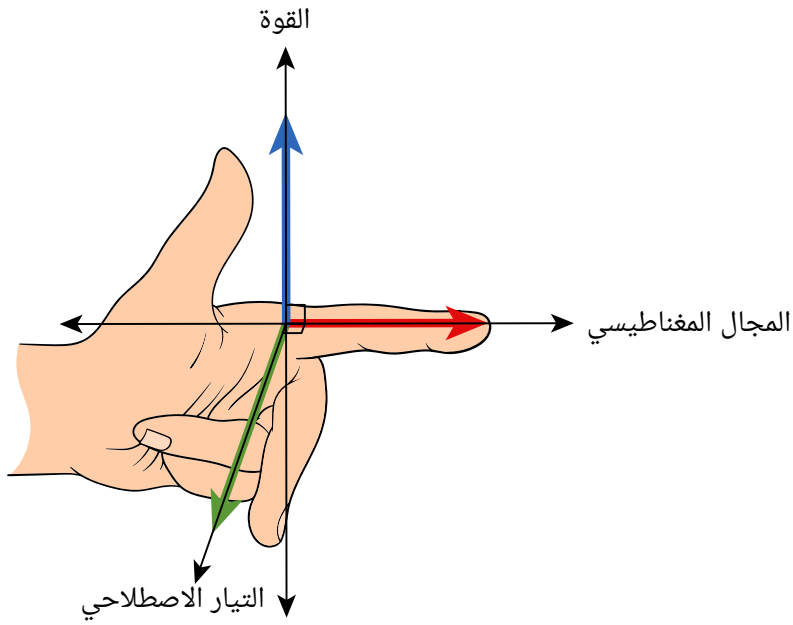
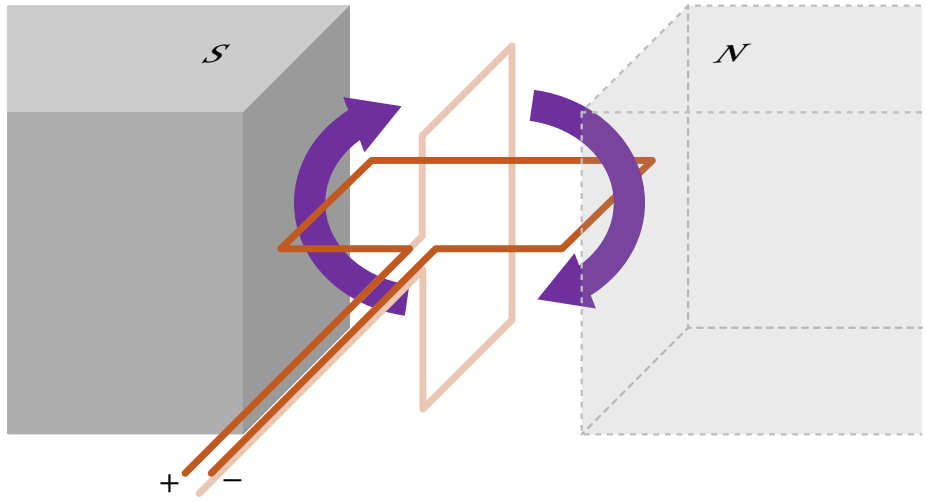
شارح: الجلفانومتر ذو الملف المتحرِّك

في هذا الشارح، سوف نتعلم كيف نَصِف استخدام العزم المؤثر على ملف يمر به تيار كهربي موضوع في مجال مغناطيسي لقياس شدة التيار بواسطة جلفانومتر ذي ملف متحرك.

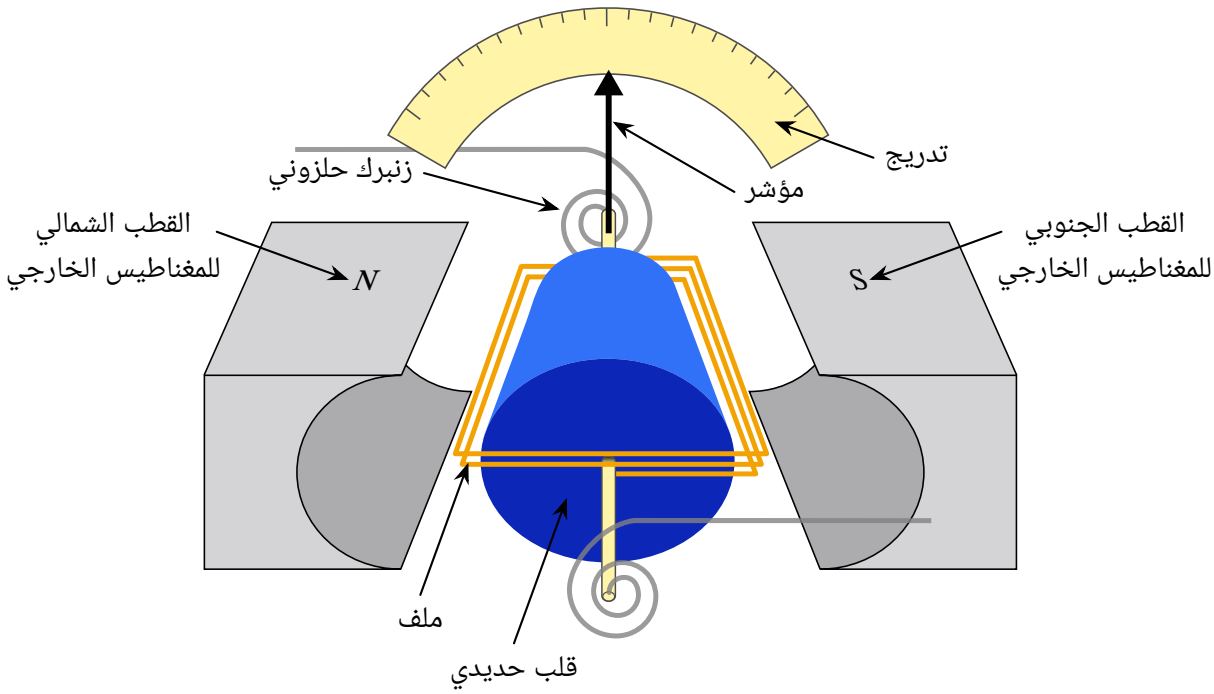
عندما يمر تيار كهربي في سلك، يَنتُج مجال مغناطيسي حول السلك. وعندما يُوضَع هذا السلك في مجال مغناطيسي خارجي، يتفاعل المجالان، وتنتج عن ذلك قوة تؤثر على السلك. إذا كان المجال المغناطيسي والتيار المار في السلك متعامدان، يُعطى مقدار هذه القوة من خلال العلاقة $F = BIL$؛ حيث B كثافة الفيض المغناطيسي للمجال الخارجي، وI شدة التيار المار في السلك، وL طول السلك الواقع في المجال المغناطيسي. يمكن تحديد اتجاه هذه القوة باستخدام قاعدة اليد اليسرى لفلمنج، كما هو موضَّح في الشكل الآتي.



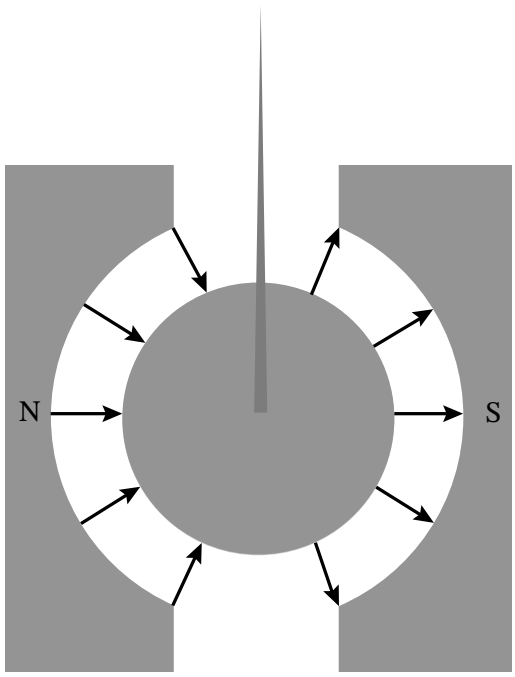
إذا كان لدينا ملف مستطيل يمر به تيار موضوع في مجال مغناطيسي، سيتأثر الملف بعزم دوران؛ مما يتسبب في دوران الملف. وهذا لأن الشحنة تتدفق في اتجاهين متعاكسين على جانبيه. ومن ثَمَّ، يؤثر على طرفي الملف قوتان في اتجاهين متعاكسين. وهذا مشابه لطريقة عمل المحرك، كما هو موضَّح في الشكل الآتي.



يستخدم **الجلفانومتر** التأثير الناتج عن وجود ملف يمر به تيار في مجال مغناطيسي لرصد شدة التيار وقياسها في الدوائر الكهربية. يتكون الجلفانومتر من قلب حديدي موضوع داخل ملف مستطيل. وهذا الملف والقلب الحديدي موضوع داخل مجال مغناطيسي دائم. يمكن توليد المجال المغناطيسي بواسطة مغناطيس على شكل حدوة حصان؛ حيث يُوضَع القطبان الشمالي والجنوبي على جانبي المكونات. ويجب أن يتخذ القطبان الشمالي والجنوبي شكلًا مقعرًا ونصف دائري. يتصل الملف **بزنبركين حلزونيين** عن طريق قضيبين موصلين. ويُصنَع الزنبركين الحلزونيين كذلك من مادة موصلة. فهما بمثابة «طرفي» الجلفانومتر؛ فمن خلالهما يتصل بالدائرة الكهربية الخارجية. كما يتصل الملف بمؤشر يمكن أن يتحرك على امتداد تدريج. يوضِّح الشكل الآتي تركيب الجلفانومتر.



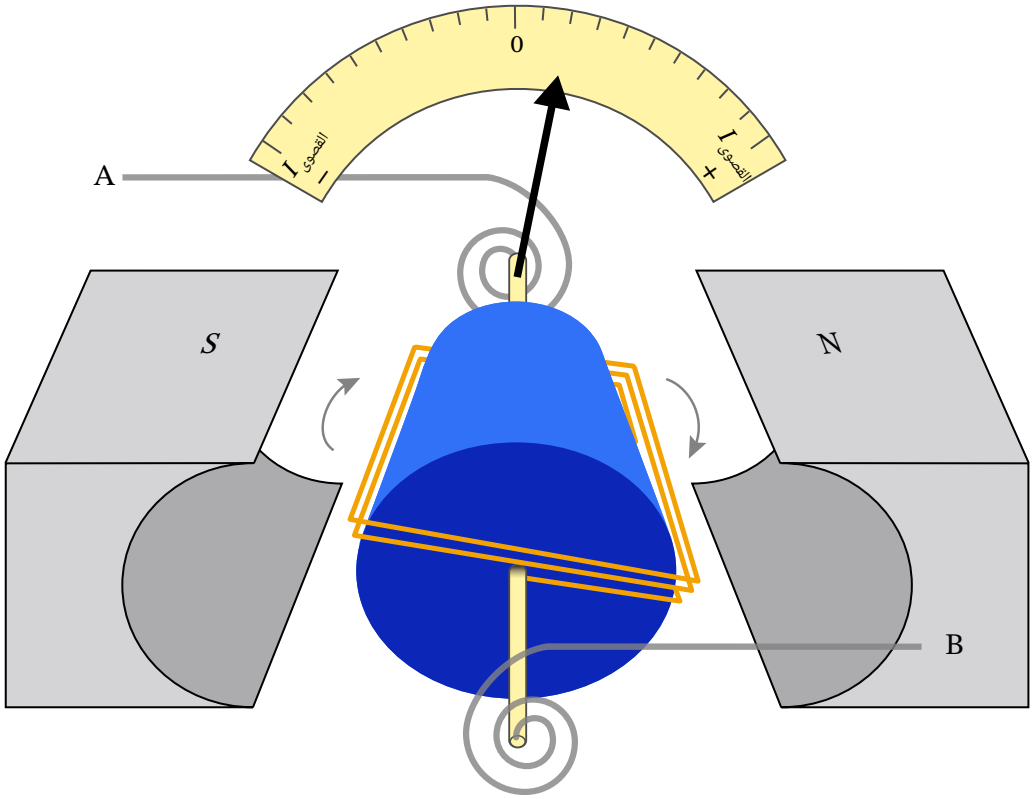
يُغيِّر القلب الحديدي مجال المغناطيس الخارجي. تنتقل خطوط المجال المغناطيسي دائمًا من القطب الشمالي إلى القطب الجنوبي، إلا أنه من الأسهل لخطوط المجال المغناطيسي الخارجي أن تمر عبر القلب الحديدي؛ نظرًا لسهولة مغنطة الحديد. وهذا يُكثِّف خطوط المجال؛ مما يجعلها تمر عبر الملف. يعمل هذا، بالإضافة إلى الشكل المقعر للأقطاب المغناطيسية، على توليد مجال مغناطيسي قُطري، كما هو موضَّح في الشكل الآتي. وهذا يعني أن ضلعي الملف اللذين يشيران إلى داخل الشاشة وخارجها يكونان عموديين على المجال دائمًا. ومن ثَمَّ، يتأثران بقوة منتظمة تُعطى دائمًا بالعلاقة $F = BIL$.



عند مرور تيار في الملف، يتأثر الملف بعزم دوران، وهو ما يتسبب في دوران الملف. ومع ذلك، لا يدور الملف بحرية. إذ يُقاوم الزنبركان الحلزونيان دورانه عن طريق التأثير بعزم دوران في الاتجاه المعاكس. وكلما دار الملف، زاد مقدار عزم الدوران المضاد من الزنبركين الحلزونيين. فكلما زادت زاوية دوران الملف، زاد عزم الدوران الناتج من الزنبركين الحلزونيين. ويظل مقدار عزم الدوران المؤثر على الملف من المجال المغناطيسي ثابتًا. وفي نهاية المطاف، يصبح مقدار عزم الدوران من الزنبركين الحلزونيين مساويًا لمقدار عزم الدوران الناتج عن المجال المغناطيسي على الملف. وعندما يحدث ذلك، يصل الملف إلى وضع الاتزان، ويتوقف عن الدوران. وإذا زادت شدة التيار المار عبر الملف، فسيزداد أيضًا مقدار عزم الدوران الناتج عن المجال المغناطيسي. وهذا يعني أن الملف سيدور بدرجة أكبر قبل أن يوقف الزنبركان الحلزونيان حركته تمامًا.

مثال ١: تأثير المجال المغناطيسي على ملف الجلفانومتر

يوضِّح الشكل جلفانومترًا ذا ملف متحرِّك. يتَّصِل طرفا الجلفانومتر بمصدر تيار مستمر. أيٌّ من الطرفين A، B يتَّصِل بالخرج الموجب للمصدر؟



الحل

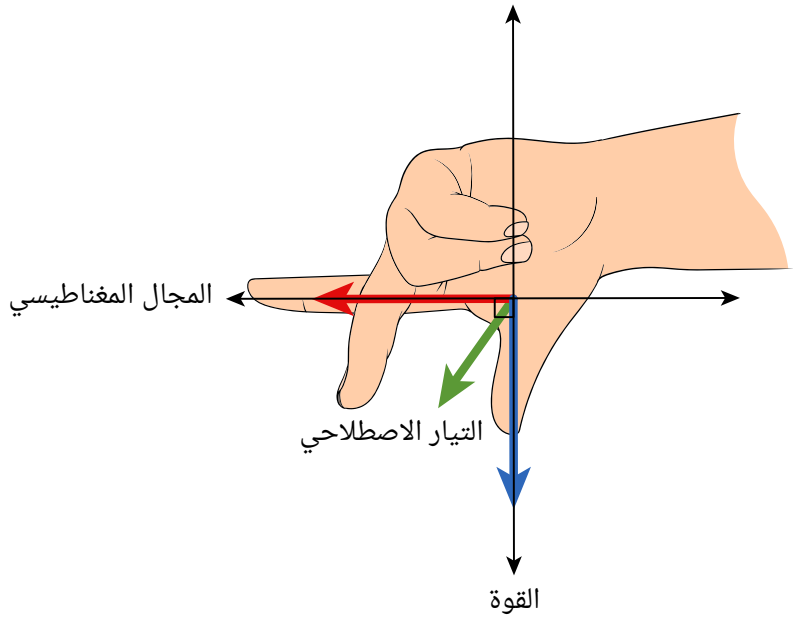
يمكننا إيجاد اتجاه التيار الاصطلاحي (اتجاه تدفق الشحنة الموجبة) باستخدام قاعدة اليد اليسرى لفلمنج.

يقع الملف داخل مجال مغناطيسي لقطبين مغناطسيين؛ الجنوبي على اليسار، والشمالي على اليمين. تتجه خطوط المجال المغناطيسي دائمًا من القطب الشمالي إلى القطب الجنوبي. وهذا يعني أنه عند استخدام قاعدة اليد اليسرى لفلمنج، يتجه المجال المغناطيسي، الذي تمثله السبابة، من اليمين إلى اليسار عبر الشاشة.

لننظر إلى ضلع الملف الأيمن. يتأثر ضلع الملف هذا بقوة تتجه لأسفل. ووفقًا لقاعدة اليد اليسرى لفلمنج، تناظر القوة إصبع الإبهام. إذن، يجب أن يُشير الإبهام لأسفل.

إذا وضعنا اليد اليسرى بهذا الشكل؛ بحيث يشير إصبع السبابة من اليمين إلى اليسار ويشير الإبهام لأسفل، سنجد أن الإصبع الوسطى يشير نحونا؛ أي خارج الشاشة. يُمثِّل الإصبع الوسطى اتجاه تدفُّق الشحنة الموجبة.

وهذا موضَّح في الشكل الآتي.



هذا يوضِّح لنا أن الشحنة الموجبة تتدفق من الطرف A إلى الطرف B. إذن، يجب أن يتَّصِل الطرف A بالخرْج الموجب للمصدر.

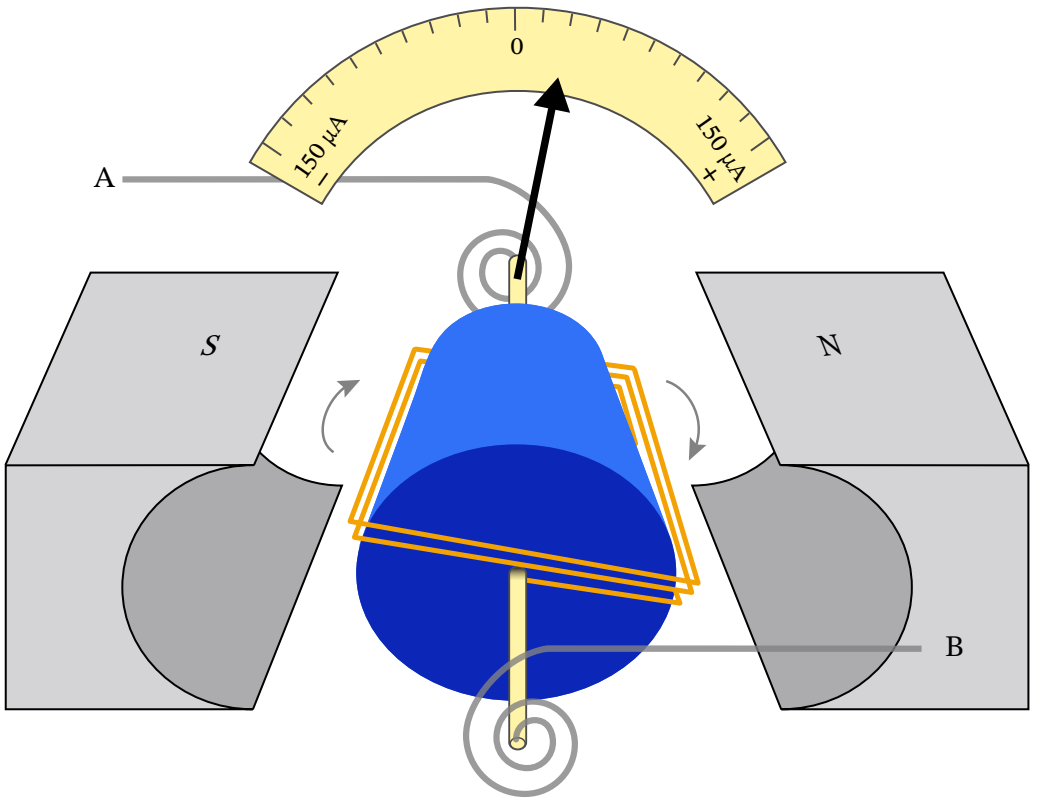
يتصل الملف بمؤشر يتحرك على امتداد تدريج أثناء دوران الملف. وهذا يتيح لنا قياس شدة التيار المار عبر الملف. في حالة عدم مرور تيار في الملف، فإن المؤشر يتخذ وضعًا رأسيًّا، مشيرًا إلى أن شدة تيار تساوي 0 A. أما عند مرور تيار عبر الملف، فإنه يدور حتى يصل إلى حالة الاتزان مع الزنبركين الحلزونيين. وهذا يجعل المؤشر يتحرك بزاوية معينة، θ. ونسمي هذه الحركة «انحرافًا». وإذا زادت شدة التيار المار في الملف، سيدور الملف بدرجة أكبر قبل وصوله إلى الاتزان؛ الأمر الذي يتسبب في انحراف المؤشر بزاوية أكبر.

وإذا انعكس اتجاه التيار، فسوف ينعكس اتجاه عزم الدوران الناتج عن المجال المغناطيسي أيضًا وفقًا لقاعدة اليد اليسرى لفلمنج. وهذا يعني أن اتجاه دوران الملف سينعكس، وسينحرف المؤشر في الاتجاه المعاكس. وهكذا، إذا كان المؤشر عند الزاوية θ جهة اليمين في البداية، وعكسنا اتجاه التيار، فسيتحرك المؤشر إلى الموضع عند الزاوية θ جهة اليسار. وهذا يعني أن الجلفانومتر يشير إلى كل من مقدار التيار واتجاهه. يتعين علينا معايرة الجلفانومتر قبل استخدامه. ويتضمن ذلك تمرير تيار ذي مقدار واتجاه معلومين عبر الجلفانومتر وقياس انحرافه.

لاحظ أن الجلفانومتر لا يمكن استخدامه إلا لقياس التيارات الصغيرة جدًّا التي تكون شدتها في نطاق الميكروأمبير أو الملّي أمبير. أما إن مر تيار ذو شدة كبيرة عبر الجلفانومتر، فسينحرف المؤشر بدرجة كبيرة للغاية. وسيؤدي هذا إلى تمدُّد الزنبركين الحلزونيين تمددًا زائدًا؛ ما قد يؤدي إلى تشوُّههما وفقدان مرونتهما. وهذا سيؤدِّي إلى تلف الجلفانومتر ممَّا يجعله غير صالح لقياس شدة التيار بعد ذلك. كما قد يؤدي مرور تيار ذي شدة كبيرة إلى أن تصبح الأسلاك في الجلفانومتر ساخنة للغاية. الأمر الذي قد يؤدي إلى تلف الجلفانومتر أيضًا.

مثال ٢: شدة التيار في جلفانومتر ذي ملف متحرك

يوضِّح الشكل جلفانومترًا ذا ملف مُتحرِّك. ينحرف مؤشِّر الجلفانومتر لأقصى التدريج عندما يمر في ملف الجلفانومتر تيار شدته 150 μA. أيٌّ من الآتي يجب أن يكون صحيحًا عن التيار I المار من الطرف A إلى الطرف B؟



أ. $I = 0\ \mu A$

ب. $(-150 < I < 0)\ \mu A$

جـ. $I = -150\ \mu A$

د. $(150 > I > 0)\ \mu A$

هـ. $I = 150\ \mu A$

الحل

عندما تكون شدة التيار المار في الملف 0 μA، يكون المؤشر عند منتصف التدريج، مشيرًا رأسيًا لأعلى.

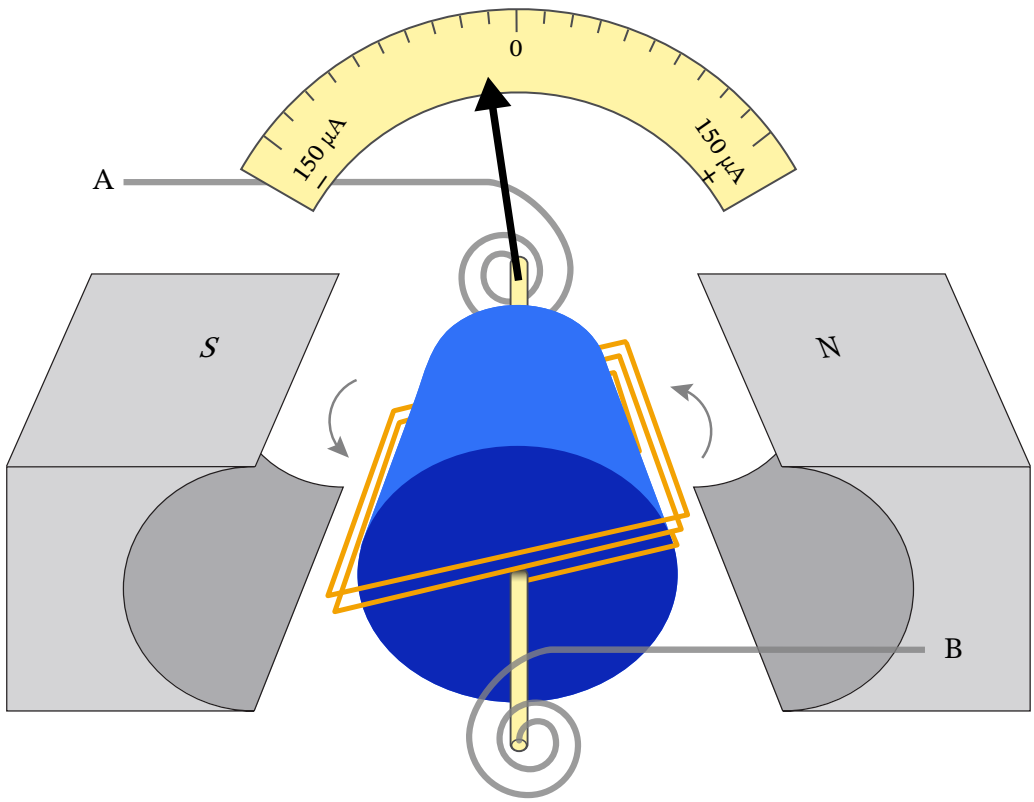
نعلم من المعطيات أن مؤشر الجلفانومتر ينحرف لأقصى التدريج عندما يمر في ملف الجلفانومتر تيار شدته 150 μA. وهذا يعني أنه عندما يمر في ملف الجلفانومتر تيار شدته 150 μA، سينحرف المؤشر إلى أقصى يمين التدريج. وبالمثل، عندما يمر في ملف الجلفانومتر تيار شدته −150 μA، سينحرف المؤشر إلى أقصى يسار التدريج.

المؤشر في الشكل منحرف إلى يمين نقطة الصفر قليلًا. وهذا يعني أن التيار المار في الملف لا بد أن يكون موجبًا وشدته أكبر من 0 μA، لكن أصغر من 150 μA.

إذن، الإجابة هي (د)، $(150 > I > 0)\ \mu A$.

مثال ٣: شدة التيار في جلفانومتر ذي ملف متحرك

يوضِّح الشكل جلفانومترًا ذا ملف متحرِّك. ينحرف مؤشر الجلفانومتر لأقصى التدريج عندما يمر في ملفات الجلفانومتر تيار شدته 150 µA. أيٌّ من الآتي يجب أن يكون صحيحًا عن التيار I المار من الطرف A إلى الطرف B؟



أ. $I = -150\ \mu A$

ب. $(-150 < I < 0)\ \mu A$

جـ. $I = 0\ \mu A$

د. $I = 150\ \mu A$

هـ. $(150 > I > 0)\ \mu A$

الحل

عندما تكون شدة التيار المار في الملف 0 µA، يكون المؤشر عند منتصف التدريج، مشيرًا رأسيًّا لأعلى.

نعلم من المعطيات أن مؤشر الجلفانومتر ينحرف لأقصى التدريج عندما يمر في ملف الجلفانومتر تيار شدته 150 µA. وهذا يعني أنه عندما يمر في ملف الجلفانومتر تيار شدته 150 µA، سينحرف المؤشر إلى أقصى يمين التدريج. وبالمثل، عندما يمر في ملف الجلفانومتر تيار شدته −150 µA، سينحرف المؤشر إلى أقصى يسار التدريج.

المؤشر في الشكل منحرف إلى يسار نقطة الصفر قليلًا. وهذا يعني أن التيار المار في الملف لا بد أن يكون سالبًا وشدته أكبر من 0 μA لكن أصغر من 150 μA.

إذن، الإجابة هي (ب)، $-150 < I < 0$ μA.

تُصمَّم الجلفانومترات بحيث تتناسب زاوية انحراف المؤشر، θ، طرديًّا مع شدة التيار، I، المار في الملف، $\theta \propto I$. ويمكننا كتابة ذلك على صورة معادلة عن طريق تقديم ثابت تناسب، سنسميه S، ليمثِّل «الحساسية»: $\theta = SI$، ونُعيد ترتيب هذه المعادلة لتصبح $S = \frac{\theta}{I}$.

وحدة الحساسية هي درجة لكل أمبير (°/A) أو راديان لكل أمبير (rad/A). تُشير الحساسية إلى استجابة الجلفانومتر لمقادير شدة التيار المختلفة. فإذا كانت حساسية الجلفانومتر كبيرة، يمكن أن يحدث انحراف زاوي كبير للمؤشر عند مرور شدة تيار صغيرة نسبيًّا. وإذا كانت الحساسية صغيرة، فحتى شدة التيار الكبيرة لن تُحدِث إلا انحرافًا زاويًّا صغيرًا للمؤشر.

مثال ٤: حساسية الجلفانومتر ذي الملف المتحرك

ينحرف مؤشر جلفانومتر ذي ملف متحرِّك بزاوية قياسها 33° عندما تكون شدة التيار المار في الجلفانومتر 180 μA. ما حساسية الجلفانومتر؟ قرِّب إجابتك لأقرب منزلتين عشريتين.

الحل

تُعرَّف حساسية الجلفانومتر بأنها ثابت التناسب بين شدة التيار المار في الملفات وزاوية انحراف المؤشر، $\theta = SI$. نُعيد ترتيب هذه المعادلة لتصبح $S = \frac{\theta}{I}$.

لدينا هنا $\theta = 33°$، $I = 180$ μA. ومن ثَمَّ:

$$\begin{aligned} S &= \frac{\theta}{I} \\ &= \frac{33°}{180\ \mu A} \\ &= 0.18°/\mu A. \end{aligned}$$

لاحظ الوحدات هنا: نظرًا لأن شدة التيار صغيرة للغاية، فقد اخترنا قياس الحساسية بوحدة درجة لكل ميكروأمبير (°/μA) بدلًا من درجة لكل أمبير (°/A).

مثال ٥: حساسية الجلفانومتر ذي الملف المتحرك

ينحرف مؤشر جلفانومتر ذي ملف متحرك بزاوية قياسها 22° عندما تكون شدة التيار المار في الجلفانومتر 360 μA. تبلغ زاوية أقصى انحراف لمؤشر الجلفانومتر 45°. ما أقصى قيمة لشدة التيار يمكن للجلفانومتر قياسها؟ اكتب إجابتك لأقرب ميكروأمبير.

الحل

لكي نحسب أقصى قيمة لشدة التيار يمكن للجلفانومتر قياسها، علينا أولًا حساب حساسية الجلفانومتر.

نعلم أن المؤشر ينحرف بزاوية قياسها 22° عندما تكون شدة التيار المار في الجلفانومتر 360 µA، يمكننا إذن استخدام هذه القيم لحساب الحساسية:

$$\begin{aligned} S &= \frac{\theta}{I} \\ &= \frac{22^\circ}{360\ \mu\text{A}} \\ &= 0.061^\circ/\mu\text{A}. \end{aligned}$$

نعلم أيضًا أن زاوية أقصى انحراف لمؤشر الجلفانومتر تبلغ 45°. ويمكننا استخدام الحساسية لحساب شدة التيار الذي يناظر انحراف هذه الزاوية:

$$\begin{aligned} S &= \frac{\theta}{I} \\ I &= \frac{\theta}{S} \\ &= \frac{45}{0.061} \\ &= 736\ \mu\text{A}. \end{aligned}$$

وعليه، فإن أقصى شدة للتيار يمكن أن تمر عبر ملف الجلفانومتر، والتي تناظر أقصى انحراف للمؤشر، تساوي 736 µA.

النقاط الرئيسية

- يَستخدم الجلفانومتر التأثير الناتج عن وجود ملف يمر به تيار في مجال مغناطيسي لرصد شدة التيار وقياسها في الدوائر الكهربية.
- عندما يمر تيار عبر ملف موضوع في مجال مغناطيسي، يدور هذا الملف. وفي الجلفانومتر، يؤدي هذا الدوران إلى انحراف المؤشر على التدريج.
- دوران الملف يعارضه عزم دوران ناتج عن زنبركين حلزونيين. وتشير النقطة التي يصل عندها النظام للاتزان إلى مقدار التيار المار في الملف واتجاهه.
- تُعرَّف حساسية الجلفانومتر من خلال المعادلة $S = \frac{\theta}{I}$، وتُقاس بوحدة درجة لكل أمبير (°/A).
- تشير حساسية الجلفانومتر إلى مدى شدة التيار اللازمة لإحداث تغير معين في الانحراف الزاوي للمؤشر.
- لا يمكن استخدام الجلفانومترات إلا لقياس التيارات الصغيرة للغاية. إذ يمكن أن يؤدي مرور تيار كبير إلى تلف الجلفانومتر.