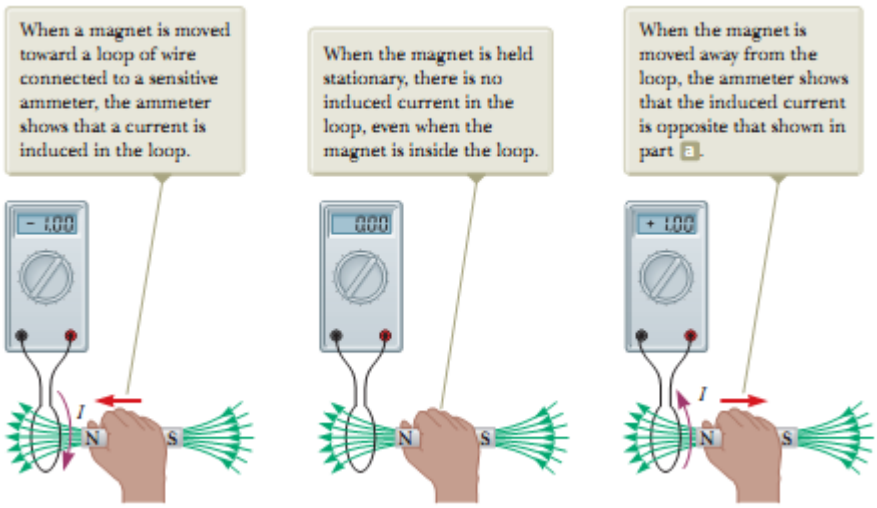
الفصل الثالث (Chapter Three)

الحث الكهرومغناطيسي Electromagnetic Induction

1-3 قانون فارادي للحث Faraday's Law of Induction

درسنا في الفقرة (3-1) المحاضرة رقم 2 كيفية الحصول على مجال مغناطيسي من تيار يمر في اشكال مختلفة من السلك، وتجدر الاشارة هنا إلى التساؤل هل يمكن الحصول على تيار كهربائي من المجال المغناطيسي. وهذا ما تم الإجابة عنه كل من العالمين مايكل فارادي وجوزيف هنري حيث اكتشف قانون فارادي عام 1831 بعد أن قام كل من العالمين بعدة تجارب ادت إلى نتائج متشابهة وهي ما تعرف بقانون فارادي للحث (Faraday's law of induction). والتي من خلالها يمكن الحصول على تيار كهربائي من المجال المغناطيسي.

لوحظ أنه عند اقتراب مغناطيس من الدائرة المبينة في الشكل 1 يتحرك مؤشر الكلفانوميتر وعند ثبوت المغناطيس يعود مؤشر الكلفانوميتر إلى الصفر، أما عند سحب المغناطيس في الاتجاه المعاكس ينحرف مؤشر الكلفانوميتر في الاتجاه الأخر مما يشر إلى مرور تيار كهربائي في الدائرة عند حركة المغناطيس، يعرف هذا التيار بالتيار الحثي (Induced current) وهو ناشئ من قوة دافعة كهربائية محتثة (Induced Electromotive Force).

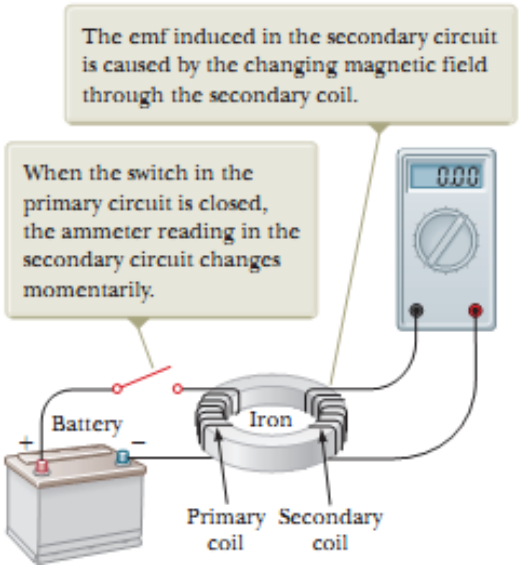


الشكل (1):تجربة بسيطة توضح مرور تيار كهربائي في الدائرة عند حركة المغناطيس[3].

في تجربة أخرى مبينة في الشكل 2 نلاحظ عند لحظة اغلاق مفتاح الدائرة الكهربائية ولحظة فتح الدائرة الكهربائية مرور تيار في الدائرة الثانوية، وهذا يعود إلى انه في حالة فتح الدائرة الكهربائية أو اغلاقها فإن التيار يتغير بين القيمة صفر واقصى قيمة مما يؤدي إلى تغيير في المجال المغناطيسي المتولد في الملف على الجانب الأيسر للدائرة وهذا يؤدي إلى تيار كهربائي يمر في الدائرة الثانوية.

من الملاحظات العملية على التجارب سابقة الذكر نستنتج أن القوة الدافعة الكهربائية (ε) في الدائرة تتناسب طردياً مع المعدل الزمني للتغير في الفيض المغناطيسي خلال الدائرة، أي أن:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \qquad \text{قانون فارادي للحث} \qquad (1)$$



الشكل (2): تجربة فاراداي[3].

حيث أن Φ هي الفيض المغناطيسي المار خلال الدائرة الكهربائية. والتي تحسب من المعادلة الآتية:

$$\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{s} \qquad (2)$$

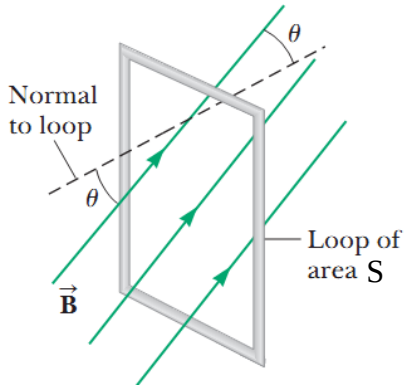
في حالة تكون الدائرة الكهربائية من عدة لفات N فإن قانون فارادي للحث يصبح في الصيغة الآتية:

$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi}{dt} \qquad (3)$$

على فرض حلقة محيطة بالمساحة S موضوعة في مجال مغناطيسي منتظم كما موضح في الشكل 3، فان الفيض المغناطيسي خلال الحلقة يساوي BScosθ ، ولهذا يمكن التعبير عن القوه الدافعة الكهربائية كالتالي:

$$\varepsilon = -\frac{d}{dt}(BS\cos\theta) \qquad (4)$$

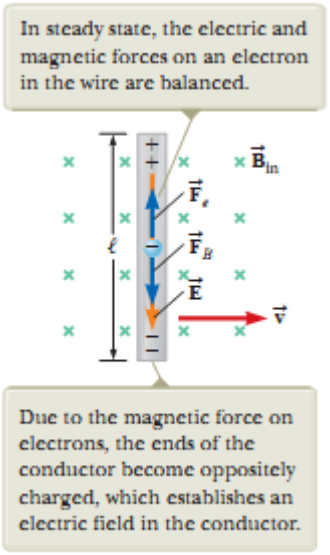
من المعادلة 4 ينتج انه لتغيير الفيض المغناطيسي يمكن استعمال عدة طرق وهي: تغيير المجال المغناطيسي $\vec{B}$، او تغيير مساحة الدائرة الكهربائية مع الزمن، او تغير الزاوية θ بين متجه العمودي على المساحة ومتجه المجال المغناطيسي $\vec{B}$ مع الزمن.



الشكل (3)

2-3 القوة الدافعة الكهربائية الحثية The Induced emf

عند تحريك قطعة مستقيمة من موصل طولها l بسرعة منتظمة v في مجال مغناطيسي B داخل على الصفحة كما في الشكل 4 يحدث التسلسل التالي:



الشكل (4)[3]

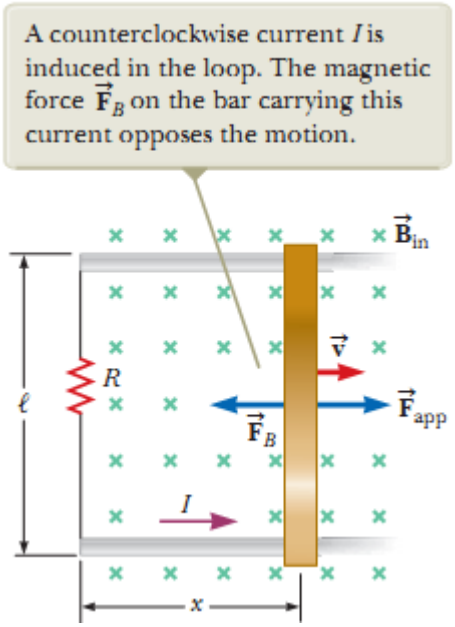
تتولد قوة مغناطيسية $\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$ داخل مادة الموصل، تعمل القوة المغناطيسية المتولدة على تحريك الشحنات بحيث تتراكم الشحنات الموجبة في طرف (العلوي) والشحنات السالبة في الطرف الآخر (السفلي)، ينشأ مجال كهربائي شدته $\vec{E}$ نتيجة تراكم الشحنات، ينشأ عن المجال الكهربائي قوة كهربائية تعمل في عكس اتجاه القوة المغناطيسية، واخيرا تتوقف الشحنات عن الحركة إلى اطراف الموصل نتيجة لتساوي القوة الكهربائية (qE) مع القوة المغناطيسية (qvB)، أي أن:

$$qE = qvB \qquad \text{or} \qquad E = vB \tag{4}$$

المجال الكهربائي الناتج في الموصل يتعلق بفرق الجهد خلال نهايتي الموصل طبقا للعلاقة $\Delta V = El$، وبتعويض المجال الكهربائي من المعادلة 4 في معادلة فرق الجهد، ينتج أن:

$$\Delta V = El = B\,l\,v \tag{5}$$

حيث يكون الطرف العلوي للموصل اعلى جهداً من الطرف السفلي، يبقى فرق الجهد بين طرفي الموصل طالما هناك حركة للموصل في المجال المغناطيسي المنتظم.



الشكل (5): ينزلق موصل طوله *l* *على موصل اخر يتخذ شكل الحرف* *U* *في مجال مغناطيسي*[3].

إذا افترضنا ان الموصل ضمن دائرة كهربائية كالموضحة في الشكل 5، فإن حركة الموصل تؤدي إلى تغير في الفيض المغناطيسي مع الزمن، لأن المساحة المحصورة بالدائرة الكهربائية تتغير مع حركة الموصل.

تحت تأثير قوة خارجية $\vec{F}_{app}$ يتحرك الموصل بسرعة $\vec{v}$، ومرة أخرى تتأثر الشحنات الحرة داخل مادة الموصل بالقوة المغناطيسية ولكن في هذه الحالة سوف لا تتراكم على طرفي الموصل بل ستتحرك خلال الدائرة الكهربائية. وحركة الشحنة تعني تيار كهربائي يسري في الدائرة ناتج عن تغيير الفيض المغناطيسي بتغيير المساحة (xl)، حيث x هو موقع الموصل، اما الفيض المغناطيسي خلال تلك المساحة فيعطى كالتالي:

$$\Phi = Blx$$

وباستعمال قانون فارداي، وبملاحظة ان x تتغير مع الزمن بمعدل $dx/dt=v$، نجد ان القوة الدافعة الكهربائية الحثية تعطى بالعلاقة الآتية:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(Blx) = -Bl\frac{dx}{dt}$$

$$\varepsilon = -Bl\,v \qquad \text{القوة الدافعة الكهربائية الحثية} \qquad (6)$$

واذا كانت R مقاومة الدائرة فإنه ينشأ عن هذه القوة الدافعة تيار تأثيري (Induced current) قيمته:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = -\frac{1}{R}\frac{d\Phi}{dt} = \frac{Bl\,v}{R} \qquad (7)$$

كما يمكن ايجاد القدرة (Power) المبذولة بواسطة القوة الخارجية، كما يلي:

$$P = F_{app}v = (IlB)v = \frac{B^2 l^2 v^2}{R} = \frac{\varepsilon^2}{R} \qquad (8)$$

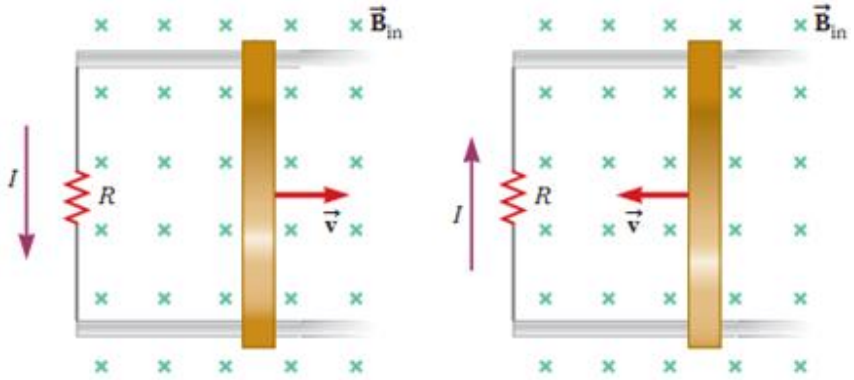
وتقاس القوة الدافعة الكهربائية بوحدات (جول/كولوم... J/C أو الفولت... V)

3-3 قانون لينز Lenz's Law

تدل الاشارة السالبة في قانون فارادي على اتجاه التيار الحثي الذي يتولد في الدائرة الكهربائية نتيجة للتغير في الفيض المغناطيسي بالنسبة للزمن. وباستعمال قانون لينز يمكن تحديد اتجاه التيار الحثي، ينص قانون لينز على ما يلي: القوة الدافعة الكهربائية المحتثه تتخذ اتجاهاً بحيث تعرقل السبب المنتج لها. أي أن التيار المحتث سيتخذ اتجاهاً بحيث أن الفيض الناتج عنه يعرقل التغير في الفيض الذي أنتج التيار المحتث.

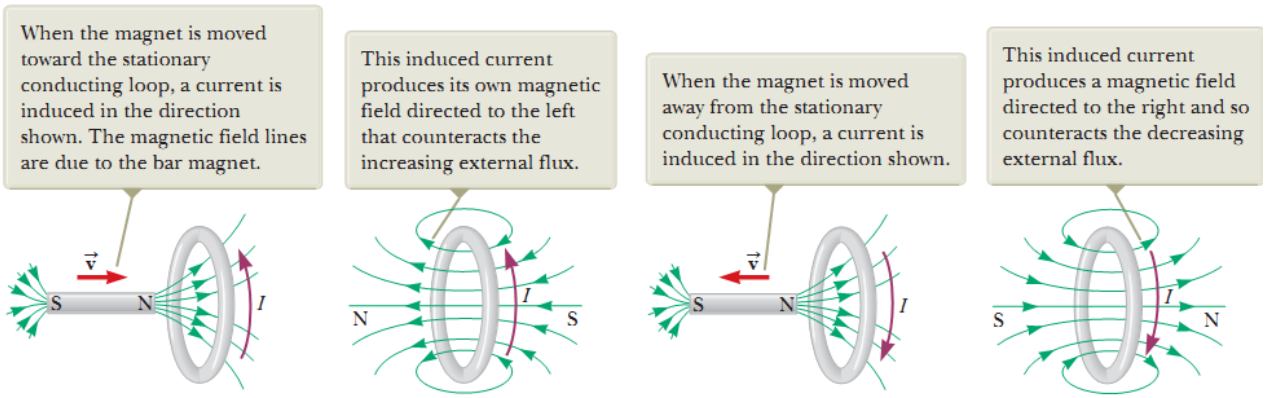
الحالة التوضيحية (1) شكل 6: نفترض مجالا مغناطيسيا خارجيا في اتجاه الصفحة للداخل كما هو موضح في الشكل بعلامة x. عند تحريك الساق المعدنية إلى اليمين يزداد الفيض المغناطيسي داخل الدائرة مع الزمن لأن المساحة تزداد. من قانون لينز ينشئ تيار حثي بحيث ينشئ قوة تقاوم حركة الساق إلى اليمين لتمنع الزيادة في الفيض المغناطيسي في الدائرة وعليه يكون اتجاه التيار الحثي عكس عقارب الساعة. لهذا التيار الحثي مجال مغناطيسي (في اتجاه خارج من الصفحة عكس المجال الخارجي) ليقاوم الزيادة في الفيض المغناطيسي.

إذا تحركت الساق المعدنية إلى اليسار بحيث يقل الفيض المغناطيسي مع الزمن فإن التيار الحثي الناتج يكون مع عقارب الساعة بحيث يكون المجال المغناطيسي الناشئ عنه في اتجاه داخل على الصفحة (مع المجال المغناطيسي الخارجي) وذلك ليقاوم النقصان في الفيض المغناطيسي.



الشكل (6)

الحالة التوضيحية (2) شكل 7: عند اقتراب المغناطيس من الملف فإن التيار الحثي المتولد سوف يعطي مجالا مغناطيسياً، معاكساً للزيادة في المجال المغناطيسي ولهذا فإن التيار الحثي المتولد الحلقة سيكون في اتجاه عكس عقارب الساعة ليكون اتجاه المجال المغناطيسي الناشئ عنه في عكس الزيادة في التدفق الناتج من المغناطيس الخارجي. كما يلاحظ ان التيار الحثي المتولد في الحلقة نتيجة لاقتراب المغناطيس من الحلقة ينشئ مجالا مغناطيسيا له قطب جنوبي وقطب شمالي ليتنافر مع المغناطيس المتحرك.



الشكل (7): اقتراب مغناطيس من حلقة معدنية.

مثال 1: ملف عدد لفاته 6 ومساحته $10cm^2$ موجود في مجال مغناطيسي منتظم B=0.1T، أزيل المجال خلال فترة زمنية مقدارها $1\times10^{-3}\sec$. جد مقدار القوة الدافعة الكهربائية المحتثه المتولدة في الملف إذا كان المجال المغناطيسي يؤثر، 1- بصورة عمودية على سطح الملف، 2- باتجاه 30^o مع اتجاه سطح الملف.

الحل:

-1
$$\varepsilon=-N\frac{d\Phi}{dt}=-N\frac{d}{dt}(BA\cos\theta)=-NA\cos\theta\frac{dB}{dt}$$

$$\therefore\varepsilon=-6\times10\times10^{-4}\times\cos(0)\times\frac{0.1}{10^{-3}}=-0.6V$$

-2
$$\varepsilon=-6\times10\times10^{-4}\cos(30)\times\frac{0.1}{10^{-3}}=-0.3\sqrt{3}V$$

مثال 2: ملف عدد لفاته 100 ومساحته $5cm^2$ موجود في مجال مغناطيسي منتظم B=0.25T يؤثر باتجاه عمودي على السطح، سحب الملف بسرعة فأصبح خلال 0.01sec خارج المجال المغناطيسي، جد القوة الدافعة الكهربائية المحتثه والشحنة الكهربائية المارة خلال الملف علماً بان مقاومة الملف تساوي 20Ω.

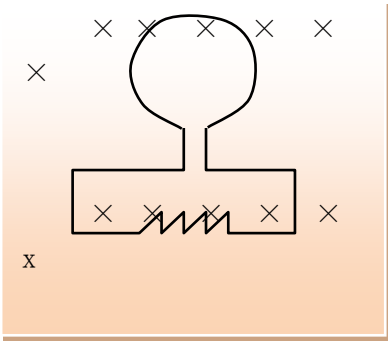
الحل:

$$\varepsilon=-N\frac{d\Phi}{dt}=-N\frac{d}{dt}(BA\cos\theta)=-NA\cos\theta\frac{dB}{dt}$$
$$=-100\times5\times10^{-4}\times1\times\frac{0.25}{0.01}=-1.25V$$

$$I=\frac{\varepsilon}{R}=\frac{1.25}{20}=0.0625A$$

$$q=It\quad\Rightarrow\quad q=0.0625\times0.01=0.000625C=625\mu C$$

مثال3: الملف في الشكل الآتي يتألف من 40 لفة ومقاومته 16Ω يخترقه مجال مغناطيسي بصورة عمودية على سطحه. فإذا كان الفيض المخترق للملف يتغير وفق المعادلة $\Phi = (0.02t^2 + 0.06t + 12)$. جد مقدار واتجاه التيار المحتث عند $t = 20\sec$.



الحل:

$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi}{dt}$$

$$\therefore \varepsilon = -N\frac{d}{dt}(0.02t^2 + 0.06t + 12)$$

$$\varepsilon = -40(0.04t + 0.06)$$

عندما $t=2sec$

$$\varepsilon = -40(0.04\times 2 + 0.06) = -5.6V$$

$$\therefore I = 5.6/16 = 0.35A$$

الإشارة السالبة تدل على أن اتجاه المجال المغناطيسي للتيار المحتث بعكس اتجاه المجال المسلط على الملف.

مثال 4: ملف حلزوني طويل عدد لفاته200 لفة في السنتميتر. يحمل تيارا شدته 1.5 A وقطر الملف 2cm وضع عند مركزه ملف مكون من عشر لفات بحيث يكون المجال المغناطيسي موازياً لمحور الملف الأخير ، فاذا أنقص التيار في الملف الحلزوني الى الصفر ثم زيد في الاتجاه المضاد ليصل الى 1.5 A بمعدل مرة كل 0.05 من الثانية، فما مقدار القوة الدافعة الكهربائية التأثيرية في الملف الصغير أثناء تغير التيار؟