

P15 – Induction et auto-induction

Le phénomène d'induction correspond à l'apparition dans un conducteur d'une force électromotrice lorsque celui-ci est soumis à un champ magnétique variable. Ceci peut alors conduire à l'apparition de courants électriques appelés courants de Foucault.

Dans ce montage, nous étudierons des cas montrant l'existence du phénomène d'induction et les courants de Foucault. Ensuite nous aborderons le phénomène d'auto-induction qui concerne tout particulièrement les bobines électriques.

1. INDUCTION

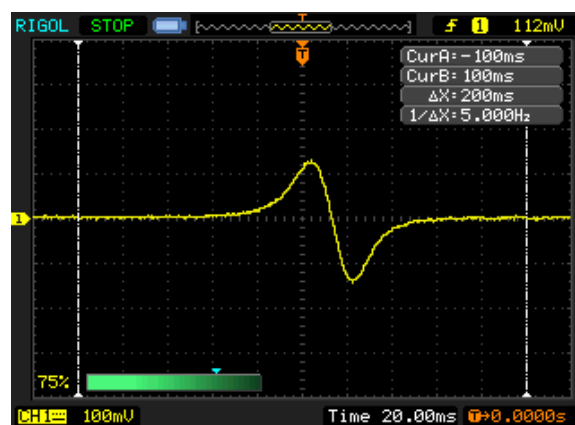
1.1. Chute d'un aimant et force électromotrice

La loi de Lenz-Faraday relie la force électromotrice e induite par un champ magnétique dans un conducteur au flux ϕ_B du champ magnétique traversant la surface délimitée par le conducteur :

$$e = - \frac{d\phi_B}{dt} \quad \text{où donc} \quad \phi_B = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

On peut mettre en évidence cette f.é.m. avec une bobine connectée à un oscilloscope réglé sur Single-Shot. On laisse tomber un aimant au travers de la bobine et on enregistre le signal ainsi obtenu.

Lorsque l'aimant est loin de la bobine, le flux du champ magnétique la traversant est constant et fluctue peu. Ceci explique qu'aucune tension n'est mesurée. Lorsque l'aimant se rapproche, le flux augmente. Ceci explique le premier pic positif enregistré. Lorsque l'aimant est au centre de la bobine, le flux est maximal et sa dérivée par rapport au temps est donc nulle. Après son passage, le flux diminue expliquant le pic négatif.



1.2. Mise en évidence des courants de Foucault

On utilise à nouveau un aimant que l'on laisse cette fois tomber dans un épais tube de cuivre (si besoin est, on peut utiliser deux tubes emboîtés l'un dans l'autre). On fixe ce tube perpendiculairement au sol. On y laisse tomber simultanément un aimant et un autre petit bout de cuivre. On observe alors que si le bout de cuivre ressort du tube rapidement (une à deux secondes), l'aimant met beaucoup plus de temps (on compte jusqu'à 9 secondes).

On explique cela par l'apparition de courants de Foucault au sein du tube au passage de l'aimant. Ces courants créent eux-mêmes un champ magnétique opposé à celui de l'aimant et qui tend donc à le ralentir.

Ce principe est communément utilisé pour freiner des appareils. Cette fois c'est un électroaimant (donc contrôlable) qui est fixé et va ralentir le reste de l'appareil. On retrouve ce système dans certains trains comme freinage principal ou d'urgence.



Ce genre de système ne demande en effet que très peu de réglages et, comme il n'y a aucun contact, il ne s'use pratiquement pas.

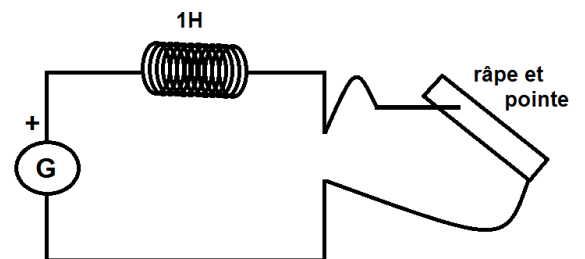
2. AUTO-INDUCTION

Le phénomène d'auto-induction concerne les solénoïdes. Lorsque l'on alimente une bobine par un courant électrique, un champ magnétique se forme. A l'intérieur, il est à peu près constant et suit l'axe des spires. Si le courant est alternatif, le champ ne change pas de direction mais devient variable.

D'après ce que l'on a pu voir un peu plus tôt, il en résulte la formation d'un courant induit dans les spires. Celui-ci s'oppose à la création du champ magnétique et est donc de sens opposé à celui fourni par le générateur à la bobine.

2.1. Mise en évidence avec l'étincelle de rupture

On réalise un circuit simple composé d'une bobine de forte inductance (environ 1H) et d'un générateur. A la place d'un interrupteur, on utilise une râpe (ici une lime) et une pointe pour fermer le circuit. Lorsque l'on déplace la pointe sur la lime, il y a donc de brusques ouvertures et fermetures du circuit électrique.



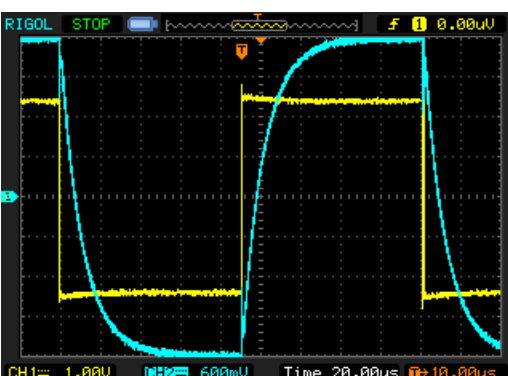
On observe l'apparition d'étincelles quand on déplace la pointe sur la lime. On peut expliquer ce phénomène par le fait que le phénomène d'auto-induction conduit à une accumulation d'énergie magnétique dans la bobine. Cette énergie est libérée quand le circuit est ouvert.

On peut aussi aborder une approche mathématique du phénomène. On sait que la tension aux bornes d'une bobine est donnée par $U_L = L \frac{di}{dt}$. Ainsi quand on ouvre brutalement le circuit, le courant chute instantanément et il en résulte une importante tension entre la pointe et la râpe. Ceci explique l'étincelle.

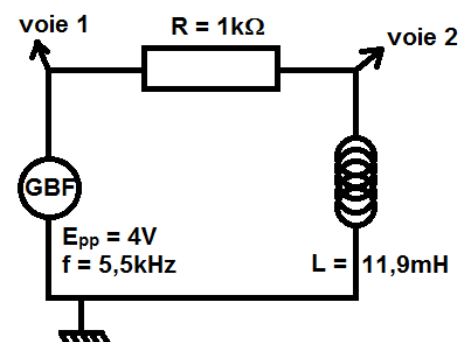
Cette expérience illustre pourquoi il est toujours nécessaire de couper le générateur avant de manipuler un circuit électrique. En effet dans le cas d'intensités et de tensions de l'ordre d'un courant de secteur, on s'expose à un danger considérable.

2.2. Retard à la charge d'une bobine

On souhaite étudier le comportement d'une bobine lorsqu'elle est soumise à un courant continu. On réalise le circuit RL ci-contre. Il est alimenté par un



GBF que l'on règle pour donner des signaux carrés de période suffisamment longue pour permettre l'étude. La résistance, d'une valeur relativement importante par rapport à celle de la bobine, est là pour s'assurer que le courant suit lui aussi des oscillations en créneaux.

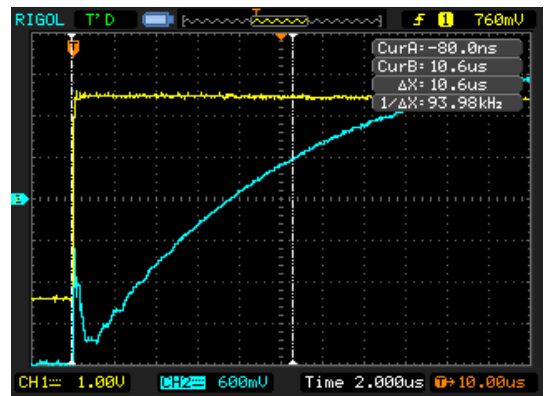


On suit à l'oscilloscope les tensions aux bornes de la bobine et du GBF. On constate qu'à chaque créneau, la tension aux bornes de la bobine

tend vers une valeur limite.

On centre l'oscilloscope sur une charge faisant en sorte que le maximum et le minimum de la charge coïncident avec les limites de l'écran. La durée nécessaire pour atteindre la cinquième des huit divisions (soit 62,5% de la charge) est le temps caractéristique τ de la charge.

On mesure $\tau = 10,6\mu\text{s}$.



On peut comparer cette valeur à la valeur théorique liée à l'inductance L de la bobine et à la résistance R :

$$\tau = \frac{R}{L} \quad \text{soit ici } \tau = 11,85\mu\text{s}.$$

3. APPLICATION AU PHENOMENE D'INDUCTION

3.1. Le moteur asynchrone

On place trois bobines de même type (500 spires et environ 4Ω) que l'on place formant des angles de 120° les uns par rapport aux autres. On ajoute des noyaux de fer doux aux bobines pour accroître leur inductance et donc l'intensité du champ magnétique induit par le courant.



Qui plus est, chacune est alimentée par une borne différente d'un générateur de courant triphasé. Ainsi il existe un déphasage de $\frac{\pi}{3}$ entre les intensités parcourant chacune des bobines.

Le champ magnétique produit par chacune des bobines est donné par

$$B = \frac{\mu_0 NI}{l}$$

où μ_0 est la perméabilité magnétique du vide ($4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m}\cdot\text{A}^{-1}$)
 N est le nombre de spires de la bobine
 I est l'intensité du courant
 l est la longueur de la bobine

Si on prend en compte le déphasage et que l'on somme les vecteurs des champs magnétiques induits, on obtient un champ magnétique tournant. On peut mettre en évidence un tel champ en utilisant une sonde à effet Hall adaptée pour mesurer les composantes d'un champ dans deux directions. On peut alors utiliser un oscilloscope en mode XY pour l'afficher.

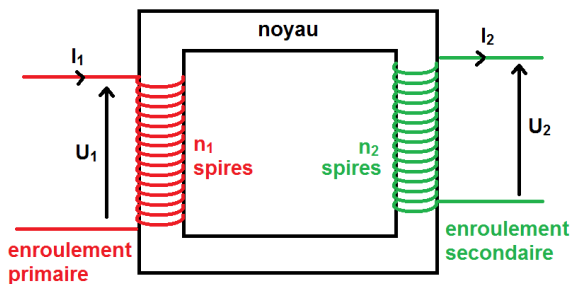
On place un cylindre métallique au centre des bobines. Il peut tourner librement selon un axe perpendiculaire à leur plan. On observe que le cylindre se met progressivement en mouvement de rotation. Ceci s'explique par le fait que le champ magnétique variable entraîne l'apparition de courants de Foucault dans le cylindre. De ces courants naissent une force de Laplace conduisant à un mouvement du cylindre. Ce mouvement s'oppose la cause de son existence. Pour ce faire, le cylindre tourne lui aussi dans le même sens.

NB : Il est important de travailler avec un générateur pouvant délivrer une intensité importante (de l'ordre de l'ampère) et des bobines d'inductance relativement importante pour avoir un champ magnétique suffisant.

On qualifie un tel moteur d'asynchrone. Le générateur délivre un courant à une centaine d'hertz et le champ magnétique tourne à la même fréquence. Cependant le cylindre va bien plus lentement. En effet, plus la vitesse de rotation est proche de celle du champ tournant et moins la variation du champ est importante dans le référentielle

du cylindre. En conséquence les forces diminuent et le cylindre ralentit. Inversement, si les deux vitesses s'éloignent trop, la force de Laplace s'intensifie. Au final, le cylindre adopte une vitesse inférieure à celle du champ.

3.2. Le transformateur



On trouve des transformateurs un peu partout. On peut citer transformateur de quartier qui connecte nos maisons aux lignes à haute tension ou encore celui qui permet de recharger nos téléphones portables. Un transformateur permet d'adapter la tension délivrée dans un circuit secondaire à partir d'un circuit primaire. L'appareil se compose de deux enroulements comprenant différents nombres de spires. Les deux enroulements sont reliés par un noyau de fer doux.

Ici les enroulements sont des bobines : la première comporte 500 spires et la seconde 250. On a fait en sorte de prendre une résistance à peu près égale ($r \approx 2,8\Omega$). Le circuit primaire est alimenté par un GBF (délivrant une tension alternative de 12V à 50Hz). Il en résulte un champ magnétique induit qui est canalisé par le noyau de fer.



$$B = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot N_1}{l}$$

Or l'inductance de la bobine est donnée par $L = \frac{\mu_0 \cdot N_1^2 S}{l}$ où S est la surface d'une spire. Alors $B = \frac{L \cdot I_1}{N_1 \cdot S}$

Transformateur à vide :

Dans un premier temps, on ne connecte rien en sortie de l'enroulement secondaire. Ainsi il ne circule pas de courant dans le secondaire et la résistance de l'enroulement n'influe pas sur la tension de sortie. On place un voltmètre aux bornes de chacun des enroulements.

$$U_1 = 12,0V$$

$$U_2 = 5,8V$$

Le courant du circuit primaire étant alternatif, l'enroulement secondaire est soumis à un champ magnétique variable. Une force électromotrice apparaît donc dans l'enroulement (loi de Lenz-Faraday).

$$\phi_B = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = N_1 \cdot S \cdot B \quad \text{d'où} \quad e = -\frac{d\phi_B}{dt} = -\frac{N_2 \cdot L}{N_1} \cdot \frac{dI_1}{dt}$$

Or la tension aux bornes de l'enroulement primaire est donnée par $U_1 = L \cdot \frac{dI_1}{dt}$. Et donc $e = -\frac{N_2}{N_1} \cdot U_1$

La tension aux bornes du second enroulement (dans une convention générateur) est alors $U_2 = -e = \frac{N_2}{N_1} \cdot U_1$.

On en déduit la relation
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Le rapport $\frac{N_1}{N_2}$ est ici égal à 2. Ceci est cohérent avec le rapport $\frac{U_1}{U_2} = 2,1$ que l'on a mesuré.

Transformateur en situation de court-circuit

Cette fois-ci on court-circuite l'enroulement secondaire avec un ampèremètre et on en place un second en entrée. Le courant circule alors librement dans le circuit secondaire. On mesure ainsi les deux intensités :

$$I_1 = 0,30\text{A}$$

$$I_2 = 0,57\text{A}$$

On applique le théorème d'Ampère à la circulation dans le noyau de fer (en violet sur le schéma). On aura alors

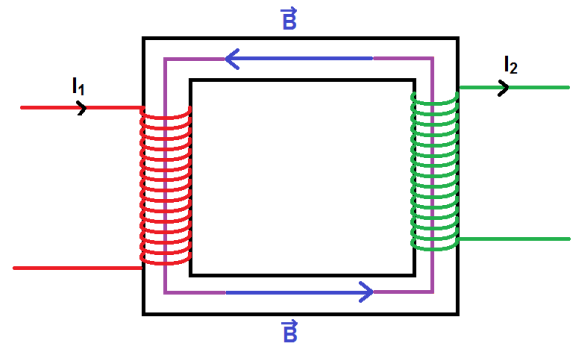
$$H \cdot d = N_1 I_1 + N_2 I_2$$

(où d est la longueur de la circulation)

Si l'on néglige les pertes fer dans le matériau ferromagnétique, ceci implique que l'on considère sa perméabilité magnétique μ comme étant infinie. Alors $H = \frac{B}{\mu} = 0$.

On en déduit la relation
$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

Le rapport $\frac{I_2}{I_1} = 1,9$ est cohérent avec celui des nombres de spires.



CONCLUSION

Comme on a pu le voir dans ce montage, il existe de nombreuses applications au phénomène d'induction. Les moteurs électriques ou les centrales électriques reposent sur ce principe. C'est aussi grâce au transformateur que l'EDF peut transporter un courant de faible intensité et de forte tension à moindre pertes jusqu'à nos foyers (un courant de forte intensité conduisant à des pertes Joules supérieures).

Les élèves connaissent déjà l'usage des bobines et leurs propriétés. Ce montage est aussi l'occasion d'expliquer leurs origines.