LA BOBINE D'INDUCTANCE

1. Présentation

La bobine d'inductance est un composant de base de l'électronique et de l'électrotechnique, elle est constituée d'un enroulement, d'un fil conducteur, formant plusieurs spires. Elle peut entourer un circuit magnétique, dans ce cas les propriétés magnétiques sont multipliées.

Une bobine traversée par un courant produit un champ magnétique, elle se comporte, avec son circuit magnétique éventuel, alors comme un aimant.

L'étude de la bobine trouvera ses applications dans les domaines

de l'électrotechnique :

- Le filtrage pour la réalisation de convertisseurs
- Le relais et le contacteur
- Le moteur pas à pas
- Le transformateur d'alimentation
- Le principe du hacheur

De l'électronique

- Le transformateur d'impulsion
- Le filtrage par exemple pour les haut-parleurs
- Les circuits oscillants

2. Les grandeurs magnétiques

Un aimant produit une déformation de l'espace qui l'entoure que l'on peut mettre en évidence par de la limaille de fer. La limaille permet de voir le **champ magnétique** qui existe autour de l'aimant.

Le champ magnétique a des propriétés importantes, il est à la base du fonctionnement de tous les appareils de l'électrotechnique tels que les moteurs, les transformateurs, les contacteurs.

Pour quantifier le champ magnétique, on introduit un certain nombre de grandeurs

Le flux : c'est la partie du champ magnétique qui traverse une ligne fermée, une spire par exemple. Son unité est le Weber

L'induction du champ est la densité de flux par unité de surface dans la spire, son unité est le Tesla

L'excitation du champ : une bobine de N spires traversées par le courant I donne l'excitation H = N.I

La **force magnétomotrice** est la densité d'excitation par unité de longueur F = N.I/L

3. Interprétation énergétique

Les grandeurs décrites ci-dessus ne vous sont pas habituelles, je vais donc utiliser une interprétation énergétique du magnétisme pour décrire les phénomènes.

Le champ magnétique est une manifestation de l'énergie. La bobine reçoit de l'énergie électrique et la transforme en énergie magnétique. À cause de cette transformation, la bobine possède un certain nombre de propriétés.

3.1. L'inductance

Le flux produit par une bobine est proportionnel[1] au courant qui la traverse, le coefficient de proportionnalité se nomme **inductance** (dont le symbole est L) $\varphi = L.I$

Son unité est le Henry et son symbole est H

On dira : *la bobine a une inductance de 0,5 H*

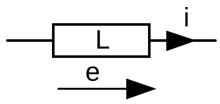
3.2. La bobine et la tension

Une bobine alimentée par un générateur de tension produit un champ magnétique. Si je plonge une bobine dans le champ magnétique d'un aimant rien ne se produit sauf lorsqu'on approche ou qu'on éloigne l'aimant de la bobine. À ce moment, la bobine présente à ses bornes une tension.

[1] Ce n'est pas toujours vrai. Dans un souci de simplification on accepte la proportionnalité pour l'instant.

Une bobine, comportant n spires, soumise à un flux variable produit une tension. La tension est proportionnelle à la rapidité de variation du flux. La formule qui traduit ce phénomène est : $e = -n.\frac{d\varphi}{dt}$. Le signe moins est nécessaire pour la cohérence car la bobine est considérée comme un générateur.

Des deux remarques précédentes on tire : $e = -L.\frac{di}{dt}$.



Il est nécessaire de préciser les orientations par un schéma. *On est en présence d'une convention générateur.*

3.3. L'énergie emmagasinée dans la bobine

Soit une inductance sans résistance. Son coefficient d'auto-inductance est L (on le suppose constant). Elle est traversée par le courant d'intensité **i** alors qu'elle présente à ses bornes la f.e.m. **e**. A l'instant 0 l'intensité qui traverse la bobine est nulle, en t_1 l'intensité du courant est I_1.
Calculons l'énergie reçue par la bobine entre ces deux instants.

Les grandeurs sont orientées selon la convention générateur. Si le calcul donne une valeur négative, la bobine reçoit de l'énergie.

Calculons l'énergie, dW, reçue par la bobine pendant dt, suffisamment court pour que **e** et **i** soient constants.

$$dW = e.i.dt$$

L'énergie reçue par la bobine entre les instants 0 et t_1 sera donnée par

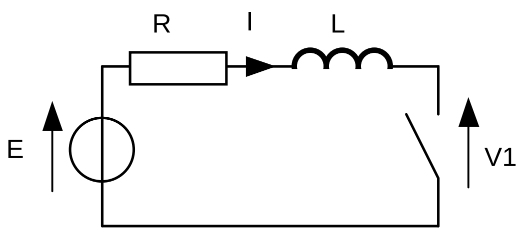
$$W = \int_0^{t_1} e.i.dt \quad \text{or} \quad e = -L.\frac{di}{dt} \quad \text{donc W peut s'écrire}$$

$$\boxed{W = -\int_0^{I1} L.\frac{di}{dt}.i.dt = -L\int_0^{I1} i.di = -\frac{1}{2}.L.I_1^2}$$

La bobine reçoit[2] bien de l'énergie. Cette énergie est indépendante du temps, elle ne dépend que de l'intensité au temps t1. *(Cette formule n'est valable que si l'inductance est constante c'est à dire en dehors de la saturation).*
Nous avons supposé que la bobine était sans résistance. L'énergie reçue n'est donc pas transformée en chaleur. Par conséquent elle reste à l'intérieur de la bobine tant que celle-ci est traversée par l'intensité I1.
La bobine utilise cette énergie pour produire son champ magnétique.

3.4. Libération de l'énergie emmagasinée

Les problèmes surviennent à l'établissement et à la coupure du courant traversant la bobine. La simulation va nous permettre de voir les conséquences grâce au schéma suivant :

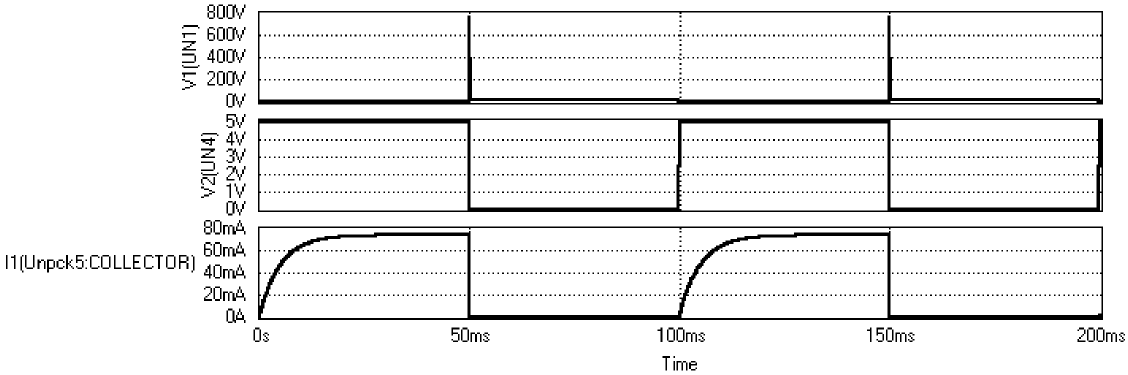


R et L modélisent la bobine avec sa résistance et son inductance. E est la tension continue d'alimentation, ici elle est de 15 V. I est le courant traversant le circuit. V1 est la tension aux bornes de l'interrupteur.

[2] L est toujours positif

La tension V2 présente sur le chronogramme indique la commande de l'interrupteur.

On constate, ci-dessous, que l'interrupteur est soumis à une tension très élevée lors de son ouverture. Cette tension peut être à l'origine de la destruction des composants surtout si l'interrupteur est réalisé par un transistor.
On peut voir également que le courant s'établit lentement.



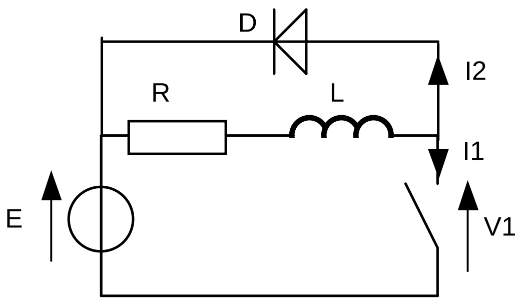
3.5. Interprétation du phénomène : la loi de Lentz

Cette loi traduit le fait que la bobine tente d'éviter la variation du courant qui la traverse. La variation du courant entraîne une variation de l'énergie emmagasinée, or l'énergie ne peut varier de manière discontinue[3].
Lorsque le courant traversant la bobine tend à varier, cette dernière réagit en créant une force électromotrice qui s'oppose à la variation du courant. C'est l'origine du signe moins de la formule. La tension est d'autant plus élevée que la variation du courant veut être rapide.

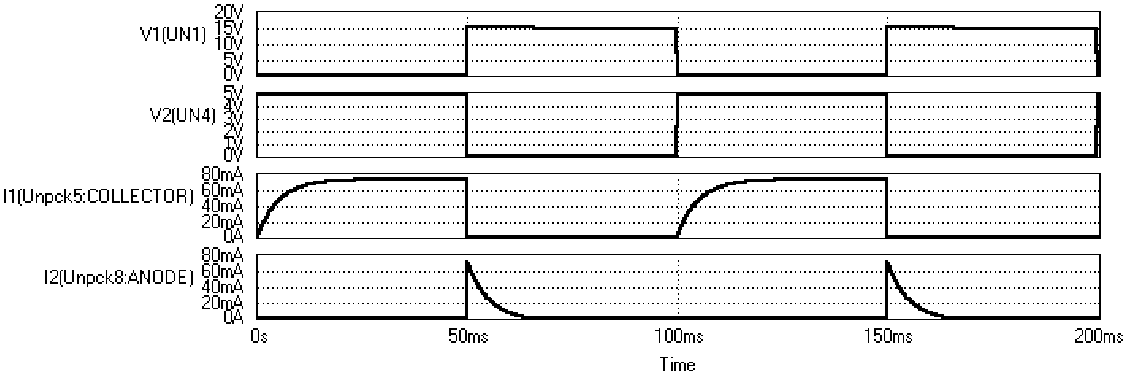
La formule qui traduit ce phénomène est : $e = -L.\frac{di}{dt}$ comme nous l'avons vu plus haut.

3.6. Le remède

Le remède est une simple diode placée en parallèle sur la bobine. Bien sûr, ce remède n'est possible que si la tension d'alimentation est continue.



I2 est le courant qui passe dans la diode.
On constate que la surtension a disparu, elle a été "gommée" par la diode.
On peut voir que la somme I1 + I2 montre une allure symétrique de l'évolution du courant dans la bobine. Nous obtenons ainsi une évolution plus "rassurante"



[3] c'est-à-dire par bonds

Questions :

- Donnez une explication énergétique de la disparition de la surtension.
- Vous pouvez remarquer que durant la conduction de la diode, la tension aux bornes de l'interrupteur est légèrement supérieure à la tension d'alimentation. Comment cela est-il possible ? À combien le dépassement est-il égal ?
- Expliquez l'entrée en conduction de la diode.

4. La bobine soumise à une tension sinusoïdale

Pour des renseignements supplémentaires voir les feuilles sur le régime sinusoïdal.

4.1. La tension sinusoïdale

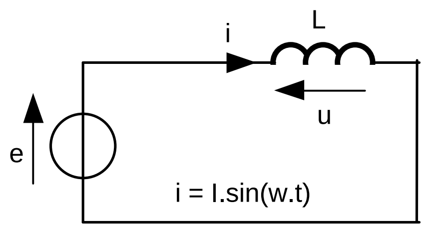
Le régime sinusoïdal jouit d'une place particulière et très importante en électricité. La tension sinusoïdale est décrite par une équation de la forme $e = E.\sin(\omega.t)$

- e est la valeur instantanée
- E l'amplitude
- ω.t la phase
- ω la pulsation

Bien sûr, **ω.t** est un angle. La mesure de cet angle est proportionnelle au temps. Le coefficient de proportionnalité est ω, la pulsation.

4.2. Relation entre la tension aux bornes d'une bobine et le courant la traversant

La bobine est maintenant considérée comme un récepteur, le schéma ci-dessous montre les conventions de signes.



Le générateur de tension sinusoïdale **e** produit le courant **i** dont l'expression est : i = I.sin(ω.t)

La force électromotrice du générateur et la tension aux bornes de la bobine sont ici égales.

Déterminons la relation liant le courant dans la bobine à la tension à ses bornes.

Nous avons vu plus haut que la tension aux bornes d'une bobine est liée au courant par : $e = -L.\dfrac{di}{dt}$. Nous étions en convention générateur. En convention récepteur, cette même expression devient : $u = L.\dfrac{di}{dt}$

4.3. Calcul de l'expression de la tension aux bornes de la bobine

De $i = I.\sin(\omega.t)$ et de $u = L\dfrac{di}{dt}$ on tire

$$u = L.\omega.I.\cos(\omega.t) \quad \text{or} \quad \cos(x) = \sin\left(x + \frac{\pi}{2}\right)$$

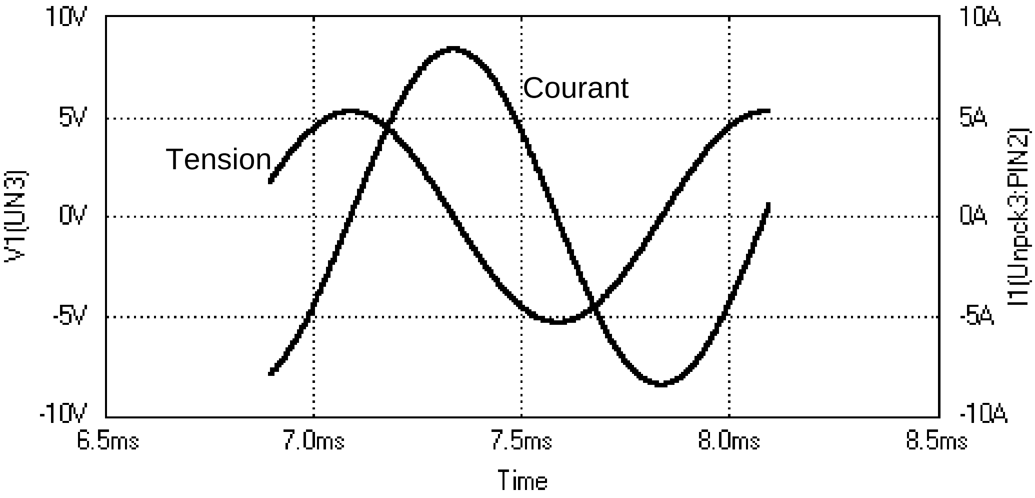
donc $u = L.\omega.I.\sin\left(\omega.t + \dfrac{\pi}{2}\right)$

La transformation de la fonction **cos** en fonction **sin** permet de comparer la phase de la tension à celle du courant. La tension est en avance de $\pi/2$ sur le courant. Bien sûr on peut également voir le courant en retard sur la tension.

On dit que le courant est en quadrature arrière sur la tension.

4.4. Simulation

La simulation nous donne la relation entre les deux grandeurs.



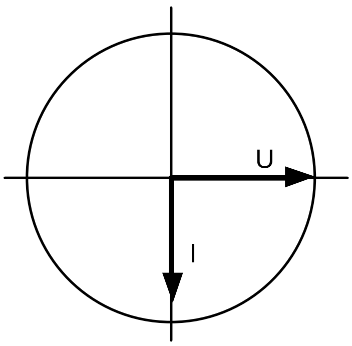
4.5. Interprétation graphique

Lorsque le courant tend à augmenter, la tension aux bornes de la bobine s'oppose à cette variation en augmentant aussi. C'est bien ce qu'indique la convention du schéma.

Nous avons vu que la tension d'opposition est d'autant plus grande que la variation de courant est rapide. Cela permet d'avoir une idée des allures respectives des sinusoïdes courant et tension.

Vous pouvez constater, sur la simulation, que la tension est la plus grande quand le courant varie le plus vite c'est-à-dire autour du zéro de courant.

4.6. Diagramme de Fresnel associé



Les grandeurs sinusoïdales peuvent être représentées par des vecteurs tournants. Fresnel, ne s'intéressant qu'au déphasage, stoppe la rotation des vecteurs.

Avec la convention récepteur, le déphasage est l'angle orienté

$$\varphi = \left(\overrightarrow{I} \; ; \; \overrightarrow{U} \right)$$

4.7. Représentation par les nombres complexes

Une grandeur sinusoïdale peut également être représentée par un nombre complexe.

$$u = L.\omega.I.\sin\left(\omega.t + \frac{\pi}{2}\right) \text{ peut être représenté par } \underline{U} = \left[L.\omega.I \; ; \frac{\pi}{2} \right]$$

5. Impédance complexe

Par définition, l'impédance complexe est donnée par le rapport $\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}}$

Questions :

- Écrivez l'expression de l'impédance complexe de la bobine décrite par les équations vues dans les § précédents.

On tient compte, maintenant, de la résistance R du fil constituant l'enroulement de la bobine.

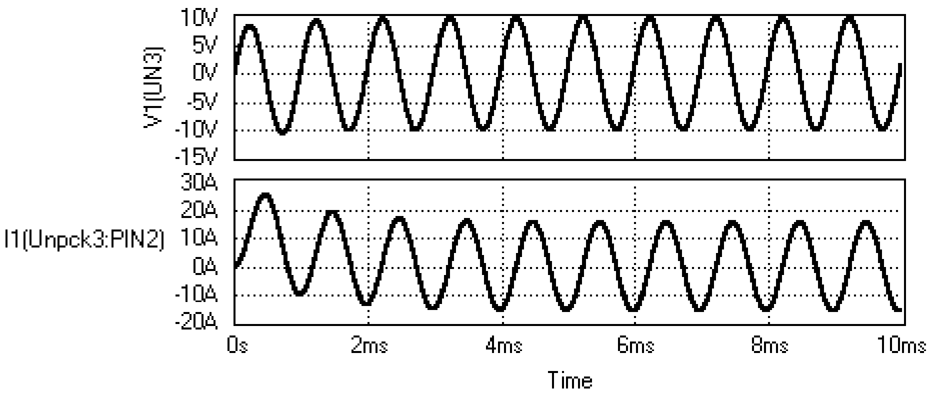
- Dessinez le schéma équivalent de la bobine, orientez les grandeurs
- Écrivez l'expression liant la tension totale aux bornes de la bobine au courant qui le traverse.
- Écrivez l'expression de l'impédance complexe.
- Tracez le diagramme de Fresnel correspondant.
- Donnez le module et l'argument du nombre complexe associé à la tension totale.

(dans cet exercice, la phase du courant est prise comme origine)

6. Établissement du régime sinusoïdal

La simulation nous permet de voir, sans grands discours, la manière dont le courant s'établit à partir de la mise sous tension.

Le schéma est celui du § 4.2



On constate, sur cet exemple, que le courant ne s'établit qu'au bout de 4 périodes. Le courant peut présenter une pointe très élevée lors de la première période.

Le régime permanent est celui qui existe à partir de 4 ms, c'est le régime sinusoïdal habituel. Avant, il y a superposition du régime sinusoïdal et d'une partie exponentielle[4], c'est le régime transitoire.

[4] pour voir cette exponentielle, joignez le "centre" des alternances.