INITIATION A L'ELECTRICITE

BOBINAGES ET CONDENSATEURS EN COURANT ALTERNATIF

(Suite voir N° 1548 et N° 1553)

UN PETIT RAPPEL

RAPPELONS très brièvement ce que nous avons vu sur le sujet.

Nous considérons une tension alternative sinusoïdale, exprimée par :

$$e = e_M \sin(\omega t)$$

où e_M est la tension de crête, qui est 1,41 fois plus grande que la tension dite « efficace » (tension continue qui, dans un même résisteur, dissipe une puissance constante égale à la puissance moyenne dissipée dans ce résisteur par la tension alternative). Le terme ω est là pour que le sinus porte sur un angle en radians, il s'exprime en radians par seconde, il vaut le produit de la fréquence par 2π, soit 314 radians/seconde pour le 50 Hz du secteur.

Sous l'influence de cette tension, un bobinage dont le coefficient de self-induction est L (en Henrys) est traversé par un courant alternatif sinusoïdal, dont l'amplitude est proportionnelle à celle de la tension aux bornes du bobinage. Il est en retard d'un quart de période sur la tension, passant par son maximum quand la tension repasse par zéro en redescendant. Le rapport constant de la tension efficace aux bornes du bobinage à l'intensité efficace qui traverse ce bobinage est analogue à une résistance, on l'appelle l'« impédance » ; elle vaut $L\omega$ (variable avec la fréquence).

Sous l'influence de cette même tension alternative, un condensateur de capacité C est traversé par un courant alternatif sinusoïdal, en avance de phase d'un quart de période par rapport à la tension aux bornes. Le rapport constant entre la tension efficace aux bornes du condensateur et l'intensité efficace passant dans ce condensateur du fait de cette tension est analogue à une résistance. On le nomme « impédance » du condensateur, il vaut $1/C\omega$.

SI L'ON PASSE DE L'INTENSITÉ À LA TENSION

On peut tout aussi bien considérer que l'on fixe la valeur de l'intensité efficace qui passe dans un bobinage ou dans un condensateur et chercher la valeur de la tension efficace aux bornes de l'élément.

Partons du cas du résisteur, nettement plus simple.

Un résisteur de résistance R, parcouru par une intensité alternative sinusoïdale exprimée par :

$$i = i_M \sin(\omega t)$$

fait apparaître à ses bornes une tension qui vaut :

$$R\, i = R\, i_M \sin(\omega t)$$

parfaitement en phase avec la tension, passant par son maximum en même temps qu'elle, par zéro en même temps que la tension.

On se souvient qu'une façon simple de représenter visuellement la chose, était d'utiliser un tourne-disque dont on projette sur le mur l'ombre de son plateau.

Sur ce plateau (fig. 1), nous avons posé deux objets A et B, alignés avec le centre 0.

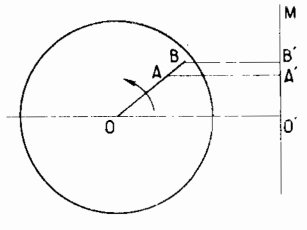

Fig. 1. – Nous utilisons ici la méthode de l'ombre des objets posés sur un tourne-disque (qui tourne à l'envers !) pour figurer la variation dans le temps d'une tension sinusoïdale O'B' et de l'intensité correspondante O'A' dans un résisteur, car la tension et l'intensité sont alors en phase.

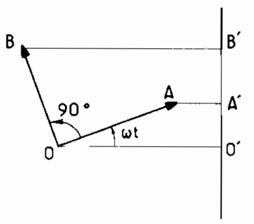

Fig. 2. – Il s'agit maintenant du passage d'un courant dans un bobinage, la tension aux bornes de L est en avance de 90° par rapport à l'intensité, on la représente par la projection (l'« ombre ») O'B' de OB, perpendiculaire à OA dont l'ombre O'A' figure la variation de l'intensité.

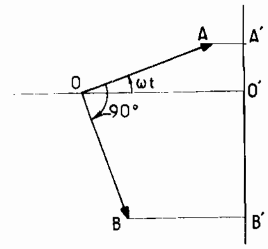

Fig. 3. – Dans le cas où l'on envoie un courant sinusoïdal dans un condensateur, la tension aux bornes de ce dernier est en retard de 90° sur la tension : nous la représenterons par l'ombre O'B' de OB, perpendiculaire à OA dont l'ombre O'A' figure la variation de l'intensité dans le condensateur.

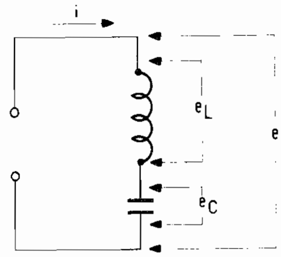

Fig. 4. – L'intensité alternative i passe maintenant dans un bobinage L, aux bornes duquel il y a une tension e_L et dans un condensateur C, aux bornes duquel la tension est e_C.

Leurs ombres, A' et B', se projettent sur le mur M, comme l'ombre O' de O. Lorsque le plateau tourne, on voit bien les deux ombres décrire deux mouvements sinusoïdaux de part et d'autre de O', qui reste fixe. Les mouvements sont en phase et les deux ombres A' et B' passent en même temps par O'.

On peut dire, par exemple, que l'ombre A' représente, par son mouvement, la variation de l'intensité en fonction du temps, le mouvement de l'ombre B' représentant la variation de la tension en fonction du temps.

Si cette même intensité passe dans un bobinage, la tension aux bornes de ce dernier sera en avance de phase d'un quart de période par rapport à l'intensité (puisque l'intensité est en retard par rapport à la tension). Sa valeur de crête sera égale à la valeur de crête de l'intensité multipliée par $L\omega$.

Nous pourrons donc représenter les variations de l'intensité et de la tension par les mouvements des ombres des points A pour l'intensité et B (fig. 2) pour la tension aux bornes du bobinage.

Il faut donc considérer que toute la figure formée par les segments OA et OB, qui restent perpendiculaires l'un à l'autre, tourne autour de O avec la vitesse angulaire ω. Cette figure est, en quelque sorte, posée sur le plateau du tourne-disque, ce dernier tournant régulièrement (mais dans un sens un peu anormal puisque, vu d'en haut, il tourne dans le sens inverse des aiguilles d'une montre).

Si c'est dans un condensateur que passe le courant, la tension sera en retard sur l'intensité, puisque, quand on a étudié le condensateur, on a trouvé une intensité en avance sur la tension.

On voit alors (fig. 3) que, par rapport au segment OA dont la projection symbolise l'intensité, le segment OB est en retard, décalé de – 90°. Sa longueur est celle de OA multipliée par l'impédance du condensateur, soit :

$$1/C\omega$$

UN BOBINAGE ET UN CONDENSATEUR

Nous supposons maintenant que nous plaçons en série un bobinage dont le coefficient de self-induction est L et un condensateur, dont la capacité est C, et que nous faisons passer dans le tout (fig. 4) une intensité alternative :

$$i = i_M \sin(\omega t)$$

Nous allons utiliser nos constructions de tout à l'heure pour savoir ce qui se passera. Précisons tout d'abord que, sur la figure 4, les flèches utilisées pour noter l'intensité i, la tension e_L aux bornes du bobinage et e_C aux bornes du condensateur ne signifient nullement qu'il s'agit des sens des tensions et courants. Non : comme nous avons affaire à des courants et tensions alternatifs, ils sont tantôt positifs, tantôt négatifs : il faut bien définir un sens arbitraire qui sera, par exemple, celui du courant, quand le nombre qui l'exprimera aura une valeur positive. Quand une tension, par exemple e_L, sera exprimée, à un instant donné, par un nombre négatif, elle sera en sens opposé de la flèche qui la représente sur la figure 4.

Comment les choses vont-elles se passer maintenant ? Le mieux, pour en avoir une idée, est de faire, sur un même diagramme (de Fresnel, pour lui donner son vrai nom) la construction des segments orientés dont les projections vont représenter les différentes tensions et intensités : ce sera celui de la figure 5.

Nous avons donc tracé le segment OA qui symbolise l'intensité. Le segment OB, en avance de 90° dans sa rotation autour de O, symbolise la tension e_L aux bornes du bobinage, sa longueur étant le produit de celle de OA par $L\omega$. Le segment OC symbolise, par la variation de sa projection O'C' au cours du temps dans la rotation de l'ensemble, la tension aux bornes du condensateur. Sa longueur est celle de OA multipliée par $1/C\omega$.

Ce qui frappe, quand on regarde le diagramme de la figure 5, c'est que les tensions e_L et e_C semblent, à chaque instant, se retrancher l'une de

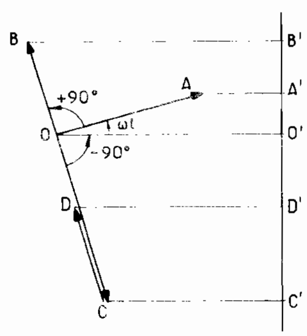

Fig. 5. – Nous devons maintenant tenir compte du fait que, en représentation vectorielle, il faut considérer la tension aux bornes de L comme la projection de $\vec{OB}$ et celle aux bornes de C comme la projection de $\vec{OC}$, qui est en sens opposé. La somme des projections sera la projection de la somme géométrique de $\vec{OB}$ et de $\vec{OC}$, ce qui fait, en réalité, du point de vue arithmétique, leur différence $\vec{OD}$ dont la projection O'D' donne la tension totale.

l'autre, comme si le bobinage et le condensateur avaient des effets inverses. Or, il s'agit de bien plus qu'une illusion : les tensions e_L et e_C sont exactement en opposition de phase. On les symbolisera très bien, sur le plateau du tourne-disque, comme le montre la figure 6. Nous conseillons vivement aux lecteurs de faire ce petit essai, pour voir comment varient, au cours du temps, les positions des ombres B' de B et C' de C. Notons bien que les objets B et C posés sur le plateau sont alignés avec O, centre du plateau, mais pas du même côté de O, comme c'était le cas sur la figure 1 : B et C sont de part et d'autre de O.

Mais alors, que se passe-t-il pour la somme des tensions e_L et e_C ? Comme nous l'avons vu précédemment, on va examiner la somme des projections sur le mur (ou des ombres, si vous préférez) des deux segments OB et OC (fig. 5). Or, la projection de la somme des segments est égale à la projection de la somme **algébrique** des deux segments, autrement dit de leur différence, en termes de longueur arithmétique, puisque ces segments sont de sens opposés. La somme des projections O'B' de OB et O'C' de OC est donc égale à la projection O'D' de la somme algébrique des segments OB et OC.

Eh oui ! Si bizarre que cela paraisse, si l'on trouve une tension e_L de 6 V eff et une tension e_C de 8 V eff, il n'y aura, aux bornes de l'ensemble L-C, que 8 - 6 = 2 Veff.

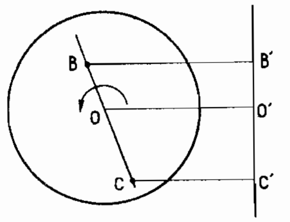

Fig. 6. – En posant sur le plateau du tourne-disque deux objets B et C, dans des directions diamétralement opposées, on trouve deux ombres B' et C' dont les mouvements sont en opposition de phase. Si on veut ajouter algèbriquement les longueurs de ces ombres, on est amené à les retrancher du point de vue arithmétique.

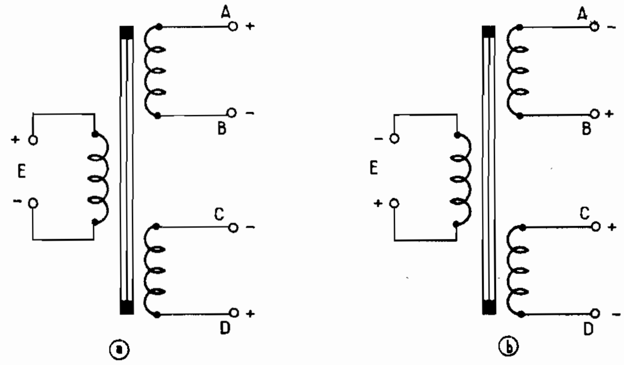

Fig. 7. – Dans un transformateur à deux secondaires (AB et CD), bien que l'alternatif « n'ait pas de sens », il ne faut pas oublier que les tensions aux bornes de ces secondaires varient ensemble : à un instant donné (a), A est positif par rapport à B tandis que D est positif par rapport à C. Une demi-période plus tard (b), les polarités se sont inversées dans les deux secondaires à la fois.

L'ALTERNATIF... ÇA N'A PAS DE SENS !

Il est bien évident qu'une telle constatation choque nettement celui qui la fait. Il éprouve certainement le même effarement que celui qui saisit l'auteur, il y a bien des années, quand il voulut mettre en série deux enroulements de transformateur.

Se fondant sur l'idée bien conçue que : « L'alternatif, ça n'a pas de sens ! » (comme un bérêt...), il se dit que, pour avoir une tension de 10 V, il suffisait de mettre en série, n'importe comment, deux secondaires d'un transformateur, ayant respectivement des tensions de 6 V et 4 V. L'ayant fait, il obtint, oh horreur !, une tension de 2 V et non de 10.

Pourquoi ? Il ne comprit que beaucoup plus tard que, si l'alternatif n'a pas de sens immuable, il en a un à chaque instant. Donc, les deux enroulements AB et CD (fig. 7) de ce transformateur fournissent, à l'instant d'un des maxima de tension, deux valeurs (a) qui rendent, par exemple, le point A positif par rapport au point B et le point D positif par rapport au point C. Un centième de seconde plus tard (b), c'est le contraire, B est positif par rapport à A et C est positif par rapport à D.

Donc, si nous branchons les deux enroulements en série comme sur la figure 8 (a), il est normal que l'on obtienne une tension alternative plus faible que celle AB et que celle de CD : puisque, à chaque instant, la tension aux bornes de CD se retranche de celle qui apparaît aux bornes de AB.

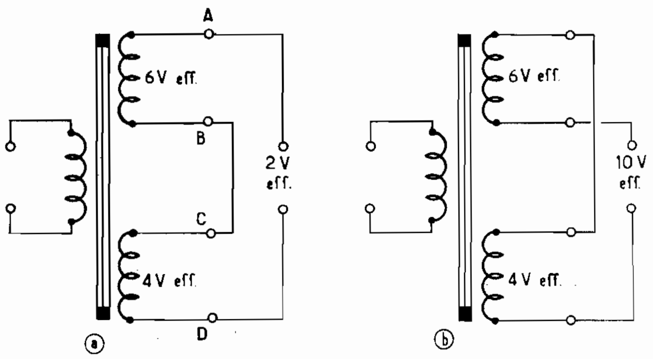

Fig. 8. – Si nous mettons en série les deux secondaires du transformateur de la figure 7 comme en (a), nous aurons la différence des tensions. Si nous les connectons comme en (b), nous aurons la somme.

Si l'on veut que les tensions s'ajoutent, il faut que ce soit vrai à chaque instant. En se reportant à la figure 7, on voit que l'on doit, pour cela, connecter les enroulements comme le montre la figure 8 (b). On aura, alors, la somme des 6 V eff et des 4 V eff, soit 10 V eff.

Donc, si l'on ne peut définir d'une façon immuable le « sens » du courant alternatif, il n'en reste pas moins que cet alternatif peut s'ajouter à un autre courant alternatif, ou s'en retrancher, suivant le sens du branchement.

Oui, l'alternatif n'a pas de sens, mais il a une **phase,** qui permet de repérer, par rapport à une autre tension alternative de même fréquence, servant de référence, s'il est « en phase » ou « en opposition de phase » avec cette dernière.

Si nous prenons le sens de la tension aux bornes de l'enroulement AB de la figure 7 comme référence, nous dirons que le sens de la tension alternative aux bornes de CD est opposé : cette tension est en opposition de phase avec la tension aux bornes de AB.

Si l'on met en série deux tensions alternatives en opposition de phase, elles se retranchent l'une de l'autre.

REVENONS À NOTRE CIRCUIT

Donc, si bizarre que cela paraisse, nous aurons, aux bornes de L + C, une tension alternative qui peut être plus petite que celle que l'on trouve aux bornes de L, ou aux bornes de C, ou même plus petite que la plus petite des deux.

Mais, si l'on y réfléchit bien, nous avons déjà vu quelque chose d'un peu équivalent. Souvenez-vous : nous avions envisagé un bobinage L en série avec un résisteur R ; on trouvait une tension e_R aux bornes du résisteur, une tension e_L aux bornes du bobinage, et la tension aux bornes de l'ensemble R + L était inférieure à la somme $e_L + e_R$.

Faites l'expérience ; on la fait d'ailleurs mieux avec un condensateur : vour prendrez un condensateur de 4,7 μF au papier, en série avec un résisteur de 680 Ω et vous ferez passer dans tout cela l'alternatif fourni par un secondaire de transformateur à 50 Hz (de 4 à 25 V eff). Mesurez maintenant (fig. 9) la tension e_R aux bornes du résisteur, la tension e_C aux bornes du condensateur et la tension u totale aux bornes de l'ensemble (celle-là même de votre secondaire de transformateur). Vous verrez bien que u n'est pas la somme de e_R et de e_C (ces deux tensions sont d'ailleurs égales entre elles), mais nettement plus petite. Par exemple, pour $e_R = 2{,}8$ V et $e_C = 2{,}8$ V, vous trouverez u = 4 V (remarquons que, dans la figure 9, nous avons supposé trois voltmètres alternatifs pour mesurer simultanément e_R, e_C et u ; un seul suffit, en le branchant successivement aux points adéquats, les valeurs choisies dans notre exemple sont telles que le voltmètre alternatif le plus « miteux » ne perturbera rien).

Cette somme « insuffisante » tient au fait que e_R et e_C sont, comme nous l'avons vu, en quadrature (déphasées de 1/4 de période l'une par rapport à l'autre) : il y en a une qui passe par son maximum quand l'autre s'annule.

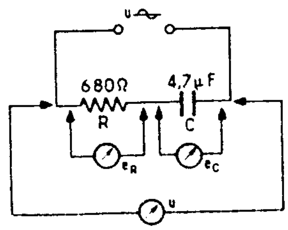

Fig. 9. – Encore un cas où la tension totale u n'est pas la somme arithmétique des tensions e_R et e_C ; cela en raison du déphasage entre e_R et e_C : l'expérience est facile à faire avec un voltmètre des plus classiques.

Dans le cas de la figure 4, c'est encore plus net : la tension aux bornes de C se retranche totalement de celle que l'on peut trouver aux bornes de L.

Nous entendons d'ici les lecteurs dire : « C'est purement théorique, cela, si on essaye, cela ne marchera pas ! ». Mais si. Il y aura peut-être un tout petit peu de désaccord avec ce que nous venons de dire, parce que nous avons supposé, dans la figure 4, que l'on avait uniquement un bobinage L et un condensateur C, le tout sans résistance. Or, si l'on peut faire un fort bon condensateur, très voisin de ce qu'il devrait être en théorie, on ne peut guère réaliser un bobinage « pur » : il est toujours entaché de résistance. Mais, tant que nous ne cherchons pas à annuler totalement la tension e_L par une tension e_C qui lui serait égale, tout est assez conforme à la théorie.

LA RÉSONANCE

Nous venons d'évoquer un cas particulier, celui où, les impédances $L\omega$ et $1/C\omega$ étant égales entre elles, les tensions e_L et e_C ont la même valeur et leur somme « algébrique » (soit leur différence ici) doit donc donner zéro.

Cela semble tenir du paradoxe. Comment ! Voici un bobinage qui gêne le passage du courant ; en série avec lui, un condensateur, qui le gêne tout autant et l'ensemble des deux ne gêne plus rien : il faut bien qu'il en soit ainsi pour que la tension aux bornes de l'ensemble soit nulle. Comment cela se peut-il ?

En réalité, le caractère imparfait des bobinages, dont nous avons parlé plus haut, gênera nettement pour avoir un résultat très spectaculaire, surtout à la fréquence du secteur alternatif à 50 Hz, mais on pourra déjà s'en approcher assez nettement.

Malgré l'imperfection des bobinages, surtout à 50 Hz, on pourra tout de même, à cette fréquence, arriver à trouver, par exemple :
40 V aux bornes du bobinage,
40 V aux bornes du condensateur,
1 V aux bornes de l'ensemble.

En d'autres termes, on n'aura qu'à appliquer 1 V aux bornes de l'ensemble bobinage + condensateur pour avoir 40 V aux bornes de chacun d'entre eux. Quel phénomène bizarre !

Ce phénomène s'appelle la « résonance » (attention, un petit détail orthographique, quoi qu'on en pense, résonance s'écrit avec un seul n, alors que l'on écrit « circuit résonnant »).

Cette idée de « résonance » évoque certainement des analogies mécaniques dans l'esprit des lecteurs : la sinistre histoire du pont suspendu qui s'est brisé quand une troupe en marche au pas cadencé passait sur lui, par suite d'une coïncidence malheureuse entre la période propre d'oscillation du pont et le rythme de la marche des soldats.

On citera probablement aussi l'histoire, aussi impressionnante qu'inexacte, de la « goutte d'eau qui brise le rail de chemin de fer », ce dernier étant tenu à une de ses extrémités, l'autre, libre, recevant des gouttes d'eau, exactement espacées d'une période d'oscillation propre du rail. Il est probable que le rail peut, dans ces conditions, se mettre à osciller avec une amplitude assez notable (ce qui est déjà un beau résultat), mais des quantités de phénomènes annexes interviendront pour limiter cette amplitude bien en dessous de la valeur capable de briser le rail.

Dans ces deux exemples, il y a un élément qui est susceptible d'entrer en oscillation avec une fréquence F, et que l'on sollicite par des impulsions dont, justement, la fréquence est F.

Or, dans le cas d'un circuit comportant une bobine et un condensateur, on ne voit pas encore très bien ce qui pourrait osciller (évidemment, les lecteurs diront : « Et le circuit oscillant L–C, alors ? », mais nous n'avons pas encore parlé de circuit oscillant, nous sommes donc supposés ne pas le connaître).

J.-P. DEHMICHEN
Ingénieur E.P.C.I.

(à suivre)