

REVUE DES SOCIÉTÉS SAVANTES ET DES PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

ACADÉMIE DES SCIENCES

ÉLECTRICITÉ

Sur la détermination expérimentale et les applications du vecteur représentant les effets de la réaction directe d'armature et des fuites dans les alternateurs.

Note de M. André BLONDEL
(Séance du 28 janvier 1918).

J'ai déjà signalé à diverses reprises (1) l'utilité des caractéristiques expérimentales obtenues en relevant, sous un voltage aux bornes constant U la courbe des ampères-tours d'excitation (ni) en fonction des ampères du courant déwatté I_d débité par un alternateur sur circuit purement inductif. En relevant une série de ces courbes pour divers voltages U_1, U_2, U_3 , etc., plus petits que le voltage normal, on peut obtenir (fig. 1) un réseau de lignes, entre lesquelles on pourra facilement tracer des courbes intermédiaires par simple interpolation graphique. Chacune de ces courbes représente en abscisses l'excitation nécessaire pour :

1° Produire dans le fer de l'induit et suivant l'axe des pôles un flux qui correspond au voltage indiqué ;

2° Compenser en outre les effets des courants induits, savoir :

a. Les contre-ampères-tours induits ;

b. L'augmentation de chute de potentiel magnétique dans l'entrefer par suites des fuites de l'induit f_3 et f_2 , qui exigent un flux supplémentaire dans l'entrefer ;

c. La chute de potentiel magnétique supplémentaire dans la carcasse inductrice par suite de l'augmentation des fuites f_1 et f_2 .

Je me propose d'abord d'indiquer les corrections que comporte l'emploi de ces courbes.

Une fois l'épure de la figure 1 obtenue par expériences, supposons que l'alternateur débite son courant sur un circuit extérieur produisant un décalage de phase quelconque $\varphi \neq \frac{\pi}{2}$, et appliquons le diagramme de la figure de ma précédente Note (2) à la détermination des ampères-tours de l'inducteur, d'après la connaissance de la force électromotrice induite ou intérieure $U_1 = \overline{ON}$ et du courant déwatté $I_d = \overline{QP}$. Les ampères-tours correspondant à ON se lisent en $\overline{N'P'}$ et les ampères-tours correspondant à la composante déwattée du courant se lisent en $\overline{P'Q'}$, et c'est aux ampères-tours totaux $\overline{N'Q'}$ qu'on applique la construction des fuites et des flux, etc.

Or, quand on a construit les courbes en débit déwatté à tension constante, le point P' a été remplacé par le point P'' qui se trouve à la rencontre de la même horizontale avec la caractéristique ordinaire de l'induit seul OX (p. 1093) ; les ampères-tours indiqués par la courbe à potentiel constant pour vaincre la réluctance de l'induit sont seulement $\overline{N'P''}$ au lieu de $\overline{N'P'}$. Quand donc on a mesuré sur la courbe à potentiel constant ($U = \overline{ON}$) la valeur des ampères-tours d'excitation $\overline{N'P''}$ correspondant au courant déwatté \overline{PQ} , il faut ajouter les ampères-tours du segment $\overline{P''P'}$.

L'épure de la figure 1 permet de faire très facilement cette addition quand on connaît $\overline{P''P'}$ et $\overline{P'Q'}$. Il suffit en effet de remonter l'axe horizontal des ampères-tours en $O'X'$, en prenant

$$OO' = I_d = \frac{\overline{P''P'}}{\overline{P'Q'}} I_d$$

et de compter à partir de $O'X'$ les ampères-tours déwattés réellement débités dans le circuit extérieur. Cette correction exige seulement qu'on ait déterminé par un calcul préalable la caractéristique

(1) Cf. A. BLONDEL, *Théorie empirique des alternateurs* (*L'Industrie électrique*, novembre 1899). Voir aussi ma Note *On the Tests of alternators* (*International Electrical Congress, Saint-Louis, 1904*, vol. 1, p. 620-634), reproduite dans mon livre *Synchronous Motors and converters*, Mac Graw Hill Book Company, New-York, 1913, p. 270

(2) *Comptes rendus*, t. 165. 1917, p. 4092.

lique de l'induit seul et le coefficient K d'ampères-tours du bobinage de l'induit.

Au lieu de tracer le réseau de courbes en faisant débiter l'alternateur sur self-inductances pures, on peut le tracer également en faisant fonctionner à vide l'alternateur comme *moteur* synchrone, alimenté à potentiel constant, sous différents voltages constants, U_1, U_2, U_3 , et en traçant une série de courbes en V réduites aux branches du V correspondant à des surexcitations (fig. 1) Mais il convient de remarquer que les courbes en V sont

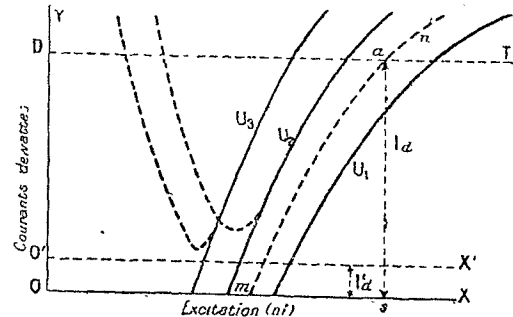


Fig. 1 - Réseau des courbes d'excitation en débit déwatté sous potentiels constants.

perturbées par une certaine composante de courant watté qui fournit l'énergie nécessaire pour compenser les frottements et les pertes ; il en résulte que la courbe U , par exemple, ne descend pas jusqu'à l'axe OX , mais se relève au-dessus de OX comme l'indique le tracé pointillé. Mais on peut toujours par une correction facile (1) en déduire la courbe U_3 théorique, c'est-à-dire sans dépense d'énergie, ou même obtenir directement son tracé en entraînant l'alternateur par un petit moteur à courant continu fournissant le travail nécessaire pour vaincre les pertes à vide, et préalablement réglé dans ce but. Le réseau électrique d'alimentation n'a plus alors à fournir qu'une énergie négligeable répondant seulement à l'augmentation des pertes ohmiques et autres sous l'action du débit déwatté.

L'emploi des courbes en V suppose encore qu'on néglige dans le petit triangle ABC de la figure (t. 165, 1917, p. 1093), le segment Ab qui représente la chute de tension rI_d due à la résistance d'induit (2) et qu'on ajoute le flux des fuites f_3 au flux des fuites f_2 , au lieu de le porter en BC (3).

Dans le cas particulier où l'induit sera utilisé sensiblement au-dessous du conde, le segment $P'P''$ sera négligeable ou nul, et il n'y aura alors pas lieu de faire la correction remontant l'axe OX du réseau des courbes de courant déwatté de la figure 2 ; l'emploi de ces dernières se trouvera donc encore simplifié.

Applications. — La connaissance expérimentale des courbes de la figure 1 donne la solution immédiate des problèmes pratiques suivants (fig. 2, 3, 4) :

1° *Calcul de l'excitation nécessaire pour un débit I donné.* — Une fois qu'on a obtenu sur le diagramme fondamental la force électromotrice intérieure On et le courant déwatté PQ , on aura par interpolation sur la figure 1 une courbe mn à potentiel constant correspondant au potentiel ON . On trace l'axe horizontal $O'X'$ à la distance I_d représentant les contre-ampères-tours égaux à $P''P'$, puis on tracera une droite horizontale DT à une hauteur

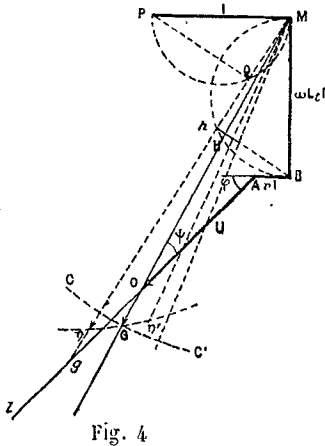
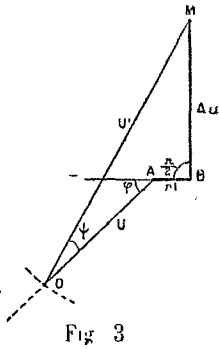
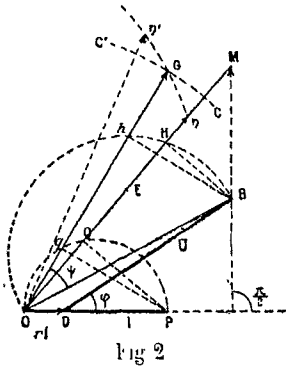
(1) Cf. *On the Tests of alternators* (loco citato ante).

(2) Il convient d'ailleurs de remarquer que : 1° la chute ohmique rI_d , très faible relativement, se trouve en quadrature avec la force électromotrice correspondant à la réaction du courant déwatté ; 2° la présence du vecteur rI_d , qu'on néglige, se traduit physiquement par un léger décalage transversal du courant d'induit qu'on est censé mesurer en opposition complète par rapport au flux inducteur ; ce décalage est très faible quand on fait l'expérience sous le voltage normal aux bornes ; elle n'est à prendre en considération que dans les mesures en court circuit dont il n'est pas question ici.

(3) Etant donné que les fuites f_3 sont, en pratique, extrêmement faibles (de l'ordre de 1 à 3 pour 100 du flux utile dans l'induit), cette simplification, très commode pour le calcul, n'entraîne aucune erreur appréciable, au degré d'approximation utile.

supplémentaire $O'D = I_a = PQ$; le point de rencontre a de cette ligne droite avec mn déterminera par son abscisse les ampères-tours totaux d'excitation nécessaire O_s .

2° Détermination de l'angle de décalage interne ψ . — On peut opérer graphiquement de la manière qu'indique le schéma de la figure 2 déduite du diagramme ; soient OP le vecteur représentant l'intensité I ; OD le vecteur de la chute de tension ohmique rI ; DB le vecteur de la tension aux bornes quand le courant I est débité sous l'angle de décalage φ ; OB représente la résultante de rI et de U .



Traçons deux demi-cercles ayant respectivement comme diamètre OP et OB , et supposons que l'on trace, suivant OM , la direction du vecteur de la force électromotrice joubertique inconnue $E = OM$; le point Q où ce vecteur rencontre le premier cercle détermine immédiatement la composante déwattée PQ du courant, tandis que le point H de rencontre avec le second cercle donne en OH la force électromotrice interne réelle e (en supposant, pour simplifier, comme on l'a dit plus haut, que le flux f_3 des fuites du bobinage hors des encoches est ajouté aux fuites f_2 subies par le flux inducteur à l'entrée de l'induit (1) ; Portons suivant $O\eta$, à une échelle quelconque choisie arbitrairement, les ampères-tours totaux nécessaires pour produire cette force électromotrice OH et pour compenser les contre-ampères-tours déwattés PQ d'après les résultats obtenus par expérience au moyen d'une épure telle que celle de la figure 1 ; et soit CGC' un cercle décrit autour de O avec un rayon égal aux ampères-tours réellement mesurés, lorsque l'alternateur débite le régime considéré.

La grandeur $O\eta$ obtenue sera, en général, différente de OG ; si l'on fait varier la direction OM de la force électromotrice joubertique, on trouvera pour chaque position une valeur calculée différente pour ces ampères-tours totaux, et l'on pourra, en portant sur chaque rayon vecteur la valeur de ces ampères-tours, tracer une courbe polaire telle que $\eta\eta'$. Le point de rencontre de cette courbe avec le cercle CC' déterminera la position réelle OG du vecteur joubertique cherché et, par conséquent, l'angle de décalage interne $\psi = BOG$.

La connaissance de cet angle donne accessoirement comme on l'a vu dans ma Note précédente la valeur à attribuer au coefficient de réaction transversale. On peut avoir plus de précision dans l'emploi de l'épure en joignant les points Bh et obtenir L_t , en remarquant que $Bh = \omega L_t I_w$ et en appelant I_w la composante wattée du courant PQ .

3° Détermination de la chute de tension en partant d'une excitation donnée. — Le même graphique de la figure 2 pourrait servir à déterminer la chute de tension en partant de l'excitation OG pour un courant I , débité dans un décalage φ ; il suffirait de remplacer, pour la détermination des points H , le demi-cercle BH par une droite parallèle à OB , et dont la distance à celle-ci mesurée perpendiculairement à OB serait égale à $\omega L_t I$.

Mais la construction pourra se faire sur une forme plus pratique et encore au moyen de cercles sous la forme représentée par la figure 3, dans laquelle AB représente la chute ohmique rI ,

(1) Dans le cas contraire, on pourrait, comme dans le diagramme, représenter la force électromotrice des fuites f_3 par un vecteur BC et tracer le cercle sur OC comme diamètre, au lieu de OB .

parallèle au vecteur du courant PM ; dans laquelle on a porté, d'autre part, $MB = \omega L_t I$, en supposant L connue par des mesures préalables.

Le décalage extérieur φ étant une donnée ainsi que rI , on trace, suivant AZ , la direction du vecteur de la tension aux bornes cherchée U ; sur PM et sur MB comme diamètres on construit deux cercles et par M on trace de nouveau des rayons vecteurs représentant en direction le vecteur de la force électromotrice joubertique, MO par exemple, et en grandeur les ampères-tours d'excitation totaux.

Pour toute direction du vecteur joubertique $M\eta$, la composante déwattée du courant est représentée par PQ et la force électromotrice interne définie plus haut par gh ; on connaît donc par l'épure du genre de la figure 1 l'excitation nécessaire totale, qu'on porte (à une échelle qui est peut-être différente) suivant Mg . En recommençant le calcul pour différentes positions angulaires, on obtient encore une courbe telle que $\eta G \eta'$; le point de rencontre avec un cercle CC' , dont le rayon MG représente l'excitation de l'alternateur, détermine l'orientation réelle de la force électromotrice joubertique.

L'intersection O de GM avec AZ donne, d'autre part, la valeur MO de la force électromotrice joubertique et le segment OA représente la différence de potentiel aux bornes de la machine. Ces constructions des figures 2 et 3 pourraient se faire d'ailleurs aussi bien en coordonnées rectangulaires, si l'on portait sur une épure séparée les valeurs des courants déwattés PQ et en ordonnées les valeurs des excitations déduites de l'épure de la figure 1 (1) ; une fois la courbe des excitations tracée pour différentes valeurs du courant déwatté, on peut toujours déterminer sur cette courbe l'excitation qui correspond à l'excitation existante.

Comparaison avec la méthode américaine. — L'épure de la figure 3 permet de déterminer, dans la méthode des deux réactions, la chute de tension d'un alternateur fonctionnant sous un régime quelconque. Il est intéressant de la comparer à la méthode préconisée par l'Institut américain des Ingénieurs américains dans ses Règles normales récemment publiées (2).

Comme le montre la figure 3, la méthode américaine, qui est un perfectionnement très notable de l'ancienne méthode de M. Behn-Fschenburg, consiste dans une simple composition de vecteurs de forces électromotrices. Ayant tracé le vecteur $rI = AB$ et la direction AO du vecteur U sous l'angle de décalage φ donné, on porte suivant BM la chute de force électromotrice constatée sur l'alternateur quand il débite le même courant I en régime purement déwatté ; on connaît d'autre part la force électromotrice à circuit ouvert U' correspondant à l'excitation totale. Du point M on trace un cercle ayant comme rayon $MO = U'$. Par son intersection avec la droite AO , on obtient la longueur cherchée AO représentant la tension aux bornes inconnue.

Cette méthode, qui peut être souvent suffisante pour la pratique et qui est d'un emploi commode, a l'inconvénient qu'elle ne distingue pas entre la réaction directe et la réaction transversale. Comme elle exige un tracé des caractéristiques en courant déwatté pur pour différents débits, elle a besoin des mêmes données que la méthode représentée par la figure 3 à l'exception de la fluxance, mais comme le tracé de la figure 2 nous permet de déterminer au besoin la fluxance, et que nous pouvons connaître celle-ci plus complètement par la méthode stroboscopique exposée dans la précédente Note, on voit qu'il n'y a pas besoin d'un grand effort supplémentaire pour appliquer la méthode plus rigoureuse représentée par le schéma de la figure 3 (3).

(1) Dans les figures 2 et 3 qui ne sont que des schémas, on ne s'est pas astreint à faire coïncider les échelles et les dimensions avec celles de la figure 1 qui est également schématique.

(2) Standardization Rules, Edition of october 1916, art. 585.

(3) Au lieu de tracer les courbes en v ou les courbes d'excitation à potentiel constant, l'Institut des Ingénieurs américains préconise le tracé des courbes de voltage à intensité déwattée constante, courbes qui ont été considérées aussi autrefois par Potier et par moi-même ; mais il est très facile de passer de l'un des réseaux à l'autre.

Le réseau que nous proposons dans la figure 1 a l'avantage qu'il peut se déduire directement des courbes en v des moteurs et que le tracé en est toujours limité au voltage utile ; tandis que les courbes à intensité déwattée constante sont complètement inutiles, en général, dans leur partie inférieure, au-dessous d'un certain voltage.