n'est pas toujours titulaire d'un titre merveilleux et hors pair. En Allemagne comme en France, le brevet n'est pas constitutif du droit de l'inventeur : il est déclaratif et non attributif. Comme le brevet français, le brevet allemand n'a de valeur que par l'invention qu'il renferme.

(A suivre).

Amédée BUGAND.
Avocat à la Cour d'Appel de Lyon.

ÉLECTROTECHNIQUE

ÉTUDE SUR LES MOTEURS A COLLECTEUR

Fonctionnant à courants alternatifs monophasés

MOTEURS A RÉPULSION SIMPLES ET MOTEURS SÉRIE

Moteurs à répulsion

Les moteurs alternatifs à collecteur se divisent en deux classes principales :

1° Ceux du type à *répulsion*, dans lesquels l'induit est fermé sur un circuit, souvent faiblement résistant (induit en court-circuit) ; 2° Ceux du type *série*, dans lesquels le courant d'armature est le même que le courant de stator ; 3° Enfin, les propriétés caractéristiques de ces deux classes de moteurs peuvent être combinées dans des moteurs de type *mixte*.

Les moteurs à collecteur, dits à répulsion, sont constitués par un stator de moteur asynchrone ordinaire, à pôles bobinés (et non à pôles saillants, cette dernière disposition ne constituant qu'une exception), et par un induit analogue aux induits des machines à courant continu.

Leur propriété caractéristique est de permettre des variations de couple mécanique, en fonction de la vitesse, dans des limites beaucoup plus larges que celles correspondant aux moteurs asynchrones ordinaires, qui, comme l'on sait, sous peine de travailler en régime avec des résistances insérées sur le rotor (procédé de régulation coûteux au point de vue de l'énergie dépensée, car il entraîne un rendement très inférieur), ne donneraient que des vitesses très voisines de celle du synchronisme.

Pour que le moteur à collecteur puisse fournir un couple moyen différent de zéro (ce couple étant évidemment lié à l'action de l'induction B , due au stator, sur le courant I circulant dans les conducteurs du rotor), il faut que la pulsation du courant exciteur et celle du courant induit circulant dans une section comprise entre balais, soient les mêmes, que les balais soient fermés sur eux-mêmes (court-circuit) ou sur une résistance convenable.

Cette condition est indispensable pour que la série d'intégrales, égale, à des constantes près, aux termes :

$$B_0 I_0 \cos \Omega t \cos (\Omega t - \varphi)$$

B_0 , I_0 , φ étant des constantes convenables, soit différente de zéro.

Cette propriété peut être établie simplement dans le cas du moteur asynchrone pris sous sa forme la plus générale. En effet, dans un tel moteur, pour un observateur lié au rotor, la pulsation du régime suivant lequel se déforme l'induction dans l'entrefer est $\Omega - \Omega'$; pour ce même observateur, la pulsation du courant induit est $\gamma \Omega = \gamma (\Omega - \Omega')$.

De même, pour un observateur se déplaçant avec la vi-

tesse du synchronisme, la première pulsation est nulle, et la seconde est : $\gamma \Omega = \Omega - \Omega' = 0$.

Les deux pulsations sont donc les mêmes et un couple moyen peut exister.

LEMME GÉNÉRAL. — Nous allons démontrer que, dans le cas d'un moteur asynchrone à collecteur et à balais, il naît, dans la section du rotor comprise entre balais, une f. e. m. d'induction, de pulsation Ω égale à celle du courant exciteur du stator.

Dans ces conditions, si l'on ferme cette f. e. m. sur un circuit plus ou moins résistant, le courant qui naîtra dans ce circuit aura la même pulsation. Calculons donc la f. e. m. développée, le courant induit et le couple du moteur à collecteur.

1° CALCUL DE LA F. E. M. — Soit le développement d'un stator de moteur asynchrone à collecteur avec induit en anneau, cas très général. Bien que les pôles soient généralement bobinés, nous les représenterons comme saillants, pour simplifier (fig. 1). Ils donneront, à un instant donné, naissance dans l'entrefer à des inductions représentées par la courbe dont nous avons fait un fréquent usage et dans laquelle nous pourrions admettre que les ordonnées, en un même point, varient sinusoidalement en fonction du temps.

Le flux embrassé par la spire S faisant l'angle δ avec l'axe polaire (fig. 1) est donné par l'expression :

$$\Psi = \Psi_{\max} \sin p\delta \quad \text{avec} \quad \Psi_{\max} = \frac{\Phi_p}{2}$$

Φ_p étant la valeur du flux s'échappant du pôle à l'instant considéré ; donc :

$$(\Psi_{\max})_{\text{espace}} = \frac{\Phi_{p \max}}{2} \cos \Omega t,$$

$\Phi_{p \max}$ étant la valeur maxima dans le temps du flux qui s'échappe d'un pôle. On remarquera que l'on peut prendre

FIG. 1. — Constitution schématique d'un anneau à collecteur.
Calcul de la force électromotrice.

des origines distinctes pour le temps et pour les espaces, qui sont des variables indépendantes. Il vient donc :

$$\Psi = \frac{\Phi_{p \max}}{2} \sin p\delta \cos \Omega t$$

et, pour la f. e. m. développée par induction dans la spire :

$$e = - \frac{d\Psi}{dt} = - \frac{\Phi_{p \max}}{2} \left[\Omega \sin p\delta \cos \left(\Omega t - \frac{\pi}{2} \right) - p\omega' \cos p\delta \cos \Omega t \right]$$

en désignant par ω' la vitesse angulaire du rotor.

La f. e. m. totale de la section, à n_2 conducteurs, aura évidemment pour valeur, δ variant de :

$$-\left(\frac{\pi}{2p} - \alpha\right) \dot{a}_L \left(\frac{\pi}{2p} + \alpha\right) :$$

$$\Sigma e = E = \frac{\Phi_{p \max}}{2} \left[\Omega \cos \left(\Omega t - \frac{\pi}{2} \right) \frac{n_2}{2\pi} \int_{-\left(\frac{\pi}{2p} - \alpha\right)}^{+\left(\frac{\pi}{2p} + \alpha\right)} \sin p\delta \, d\delta \right. \\ \left. - p\omega' \cos \Omega t \frac{n_2}{2\pi} \int_{-\left(\frac{\pi}{2p} - \alpha\right)}^{+\left(\frac{\pi}{2p} + \alpha\right)} \cos p\delta \, d\delta \right]$$

$$\Sigma e = E = \frac{\Phi_{p \max}}{2p} \frac{n_2}{2\pi} \left\{ \Omega \cos \left(\Omega t - \frac{\pi}{2} \right) \left[-\cos p\delta \right]_{-\left(\frac{\pi}{2p} - \alpha\right)}^{+\left(\frac{\pi}{2p} + \alpha\right)} \right. \\ \left. - p\omega' \cos \Omega t \left[\sin p\delta \right]_{-\left(\frac{\pi}{2p} - \alpha\right)}^{+\left(\frac{\pi}{2p} + \alpha\right)} \right\}$$

$$\Sigma e = E = \frac{\Phi_{p \max}}{2p} \frac{n_2}{2\pi} \left[\Omega \cos \left(\Omega t - \frac{\pi}{2} \right) 2 \sin p\alpha \right. \\ \left. - p\omega' \cos \Omega t 2 \cos p\alpha \right]$$

$$\Sigma e = E = \frac{n_2 \Phi_{p \max}}{2\pi p} \left[\Omega \cos \left(\Omega t - \frac{\pi}{2} \right) \sin p\alpha \right. \\ \left. - p\omega' \cos p\alpha \cos \Omega t \right]$$

REPRÉSENTATION GRAPHIQUE. — Nous pourrions représenter très simplement cette f. e. m. d'induction. En désignant par OA la direction du courant du stator, donc l'induction génératrice (fig. 2), les composantes de la f. e. m. seront respectivement représentées par les vecteurs OB et OC. On

FIG. 2. — Représentation graphique des composantes de la f. e. m. développée dans l'anneau d'une machine électrique alternative à collecteur.

voit que l'une est une véritable f. e. m. d'induction de transformateur statique, l'autre une force contre-électromotrice de moteur. On peut remarquer enfin que, suivant qu'on calera les balais en avant ou en arrière des lignes neutres, la composante $\Phi_{p \max} \sin p\alpha$ passant par zéro et changeant de sens, la f. e. m. induite sera située au-dessus ou au-dessous de CA, mais en tous cas à gauche de OB.

On peut donc expliquer physiquement, et simplement, le fonctionnement des moteurs à répulsion en admettant que les deux circuits (primaire et secondaire) du transformateur à balais tendent à se repousser électrodynamiquement et

peuvent le faire grâce à la mobilité du rotor ; le mouvement ainsi produit détermine l'apparition d'un couple moteur à l'arbre de la machine. Quant à la fourniture de la puissance électrique nécessaire à cette transformation de puissance, elle est assurée par le primaire qui emprunte au réseau la puissance nécessaire à la création de la puissance motrice affectée au rotor. On établira donc un parallèle intéressant et aisé entre les moteurs asynchrones ordinaires, qui ne sont que des transformateurs également ordinaires, et les moteurs court-circuités à collecteur, qui ne sont pas autre chose que des transformateurs statiques à balais, dans lesquels ce mouvement relatif de l'un des systèmes par rapport à l'autre est encore possible.

La transformation d'énergie électrique en énergie électrique, seule possible dans les transformateurs ayant deux circuits fixes, est remplacée dans les moteurs asynchrones par la transformation de cette énergie électrique primaire en énergie mécanique secondaire, au moins pour la majeure partie de la première.

2° COURANT DANS LA SECTION. — Une remarque préliminaire s'impose. Le fer du rotor tourne avec la vitesse ω' de la machine ; donc il est le siège de deux flux y circulant avec les vitesses relatives $(\Omega + \Omega')$ et $(\Omega - \Omega')$. Si le fer était fixe, il serait soumis seulement au flux de pulsation $\Omega = p\omega$. Il y aura donc lieu de tenir compte de ces flux dans le calcul des pertes par hystérésis et courants de Foucault. L'onde

FIG. 3. — Constitution des circuits magnétiques d'un moteur asynchrone.

magnétique qui va se développer dans le fer du rotor, et en particulier traverser une tranche bien déterminée de ce rotor, aura donc une pulsation bien déterminée $p\omega'$, même si le flux engendré était dû à des ampères-tours continus et fixes de stator.

Il y a ici un cas d'hystérésis tournante signalée par

maints auteurs à propos des machines à courant continu.

Le flux émis par le stator, et passant par le rotor, ayant la pulsation électrique propre Ω , il en résulte dans le fer du rotor deux trains d'ondes, de pulsations respectives $(\Omega + \Omega')$ et $(\Omega - \Omega')$.

Comme dans tous les cas analogues de machines monophasées, on négligera le flux de pulsation $(\Omega + \Omega')$ qui ne fera qu'onduler les résultats ; souvent même, on le supprimera, car il pourra être étouffé par des dispositifs dits amortisseurs. D'ailleurs, il donnerait naissance à des courants d'induction de pulsation $(\Omega + \Omega')$, donc travaillant sur une réactance fictive proportionnelle à $(\Omega + \Omega')$, par conséquent beaucoup plus forte que la réactance correspondant à la pulsation $(\Omega - \Omega')$.

En résumé, le flux de pulsation Ω dû au stator engendre une f. e. m. d'induction de même pulsation Ω entre les balais du rotor, cette f. e. m. (que nous avons calculée précédemment) travaillant sur un circuit de réactance fictive $L_2 (\Omega - \Omega')$.

Revenons au calcul du courant dans la section. Nous venons de voir que tout se passe à l'intérieur de cette section comme si la f. e. m. d'induction travaillait sur un circuit d'impédance :

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + L_2^2 (\Omega - \Omega')^2}$$

Nous aurons ainsi, en appelant φ_2 l'angle de décalage du

courant secondaire I_2 par rapport à la f. e. m. secondaire E_2 développée entre balais :

$$I_2 = \frac{\Phi_{p \max}}{pZ_2} \frac{n_2}{2\pi} \left[\Omega \cos \left(\Omega t - \frac{\pi}{2} - \varphi_2 \right) \sin p\alpha - p\omega' \cos p\alpha \cos (\Omega t - \varphi_2) \right]$$

Ce qui précède s'applique au cas du moteur en marche, étant bien entendu que le circuit secondaire, compris entre balais, est constitué par des éléments géométriquement variables ; dans le cas où ce circuit secondaire (fer et spires) est fixe (par exemple au démarrage), le courant est donné par une valeur différente :

$$I'_2 = \frac{\Phi_{p \max}}{pZ'_2} \frac{n_2}{2\pi} \left[\Omega \cos \left(\Omega t - \frac{\pi}{2} - \varphi'_2 \right) \sin p\alpha \right]$$

avec :

$$Z'_2 = \sqrt{R_2^2 + L_2^2 \Omega^2}$$

et :

$$\tan \varphi'_2 = \frac{L_2 \Omega}{R_2}$$

3° COUPLE SUR UN CONDUCTEUR. — Il a évidemment pour expression :

$$C = BIL \frac{D}{2}$$

avec :

$$B = B_{\max} \cos \Omega t \cos p\delta$$

(en adoptant comme origine des espaces l'ordonnée correspondant à un axe interpolaire). Or, en supposant l'induction répartie sinusoidalement dans l'espace, en considérant pour simplifier la répartition de cette induction pour $t=0$, nous avons :

$$B_{\max} = \frac{\pi}{2} B_{\text{moy}},$$

et :

$$B_{\max} = \frac{\pi}{2} \frac{\Phi_{p \max}}{\pi DL} = \frac{p \Phi_{p \max}}{DL}$$

$\Phi_{p \max}$ étant la valeur maxima (dans le temps) du flux s'échappant d'un pôle.

Donc :

$$C = \frac{p \Phi_{p \max}}{DL} \cos \Omega t \cos p\delta \frac{DL}{2} I$$

ou :

$$C = \frac{p \Phi_{p \max}}{DL} \frac{DL}{2} \frac{\Phi_{p \max}}{pZ_2} \frac{n_2}{2\pi} \cos p\delta \cos \Omega t \left\{ \begin{aligned} & \left[\Omega \cos \left(\Omega t - \varphi_2 - \frac{\pi}{2} \right) \sin p\alpha \right. \\ & \left. - p\omega' \cos p\alpha \cos (\Omega t - \varphi_2) \right] \end{aligned} \right\}$$

ou enfin :

$$C = \frac{\Phi_{p \max}^2}{2Z_2} \frac{n_2}{2\pi} \cos \Omega t \cos p\delta \left[\Omega \cos \left(\Omega t - \varphi_2 - \frac{\pi}{2} \right) \sin p\alpha - p\omega' \cos p\alpha \cos (\Omega t - \varphi_2) \right]$$

Remarquons encore qu'il y a $\frac{n_2}{2\pi} d\delta$ conducteurs compris dans la différentielle $d\delta$ de l'angle δ . Il vient ainsi, pour le couple total, l'intégrale :

$$\frac{n_2}{2\pi} \int \cos p\delta d\delta$$

étant prise de :

$$-\left(\frac{\pi}{2p} - \alpha\right) \text{ à } +\left(\frac{\pi}{2p} + \alpha\right)$$

et ayant donc pour valeur :

$$\frac{n_2}{2\pi} \frac{1}{p} \left[\sin p\delta \right]_{-\left(\frac{\pi}{2p} - \alpha\right)}^{+\left(\frac{\pi}{2p} + \alpha\right)} = \frac{n_2}{2\pi} \frac{2 \cos p\alpha}{p}$$

$$C_{\text{total}} = \frac{\Phi_{p \max}^2}{pZ_2} \left(\frac{n_2}{2\pi} \right)^2 \cos p\alpha \cos \Omega t \left\{ \begin{aligned} & \left[\Omega \sin p\alpha \right. \\ & \left. \cos \left(\Omega t - \varphi_2 - \frac{\pi}{2} \right) - p\omega' \cos p\alpha \cos (\Omega t - \varphi_2) \right] \end{aligned} \right\}$$

ou enfin :

$$C_{\text{total}} = \left(\frac{n_2}{2\pi} \right)^2 \frac{\Phi_{p \max}^2}{2pZ_2} \left\{ \begin{aligned} & \left[\Omega \sin 2p\alpha \cos \Omega t \cos \left(\Omega t - \varphi_2 - \frac{\pi}{2} \right) \right. \\ & \left. - p\omega' (1 + \cos 2p\alpha) \cos \Omega t \cos (\Omega t - \varphi_2) \right] \end{aligned} \right\}$$

Or :

$$\cos \Omega t \cos \left(\Omega t - \varphi_2 - \frac{\pi}{2} \right) = \frac{1}{2} \left[\cos \left(\frac{\pi}{2} + \varphi_2 \right) + \cos \left(2\Omega t - \varphi_2 - \frac{\pi}{2} \right) \right]$$

$$\cos \Omega t \cos (\Omega t - \varphi_2) = \frac{1}{2} \left[\cos \varphi_2 + \cos (2\Omega t - \varphi_2) \right]$$

Donc :

$$C_{\text{total}} = \left(\frac{n_2}{2\pi} \right)^2 \frac{\Phi_{p \max}^2}{4pZ_2} \left\{ \begin{aligned} & -\Omega \sin 2p\alpha \sin \varphi_2 \\ & -p\omega' \left(\cos 2p\alpha + 1 \right) \cos \varphi_2 + \cos \left(2\Omega t - \varphi_2 - \frac{\pi}{2} \right) \Omega \sin 2p\alpha \\ & - \cos (2\Omega t - \varphi_2) p\omega' \left(\cos 2p\alpha + 1 \right) \end{aligned} \right\}$$

Nous aurons donc un couple moyen donné par :

$$(C_{\text{total}})_{\text{moy}} = -\left(\frac{n_2}{2\pi} \right)^2 \frac{\Phi_{p \max}^2}{4pZ_2^2} \left\{ \begin{aligned} & \Omega \sin 2p\alpha \sin \varphi_2 \\ & + p\omega' \cos \varphi_2 (1 + \cos 2p\alpha) \end{aligned} \right\}$$

la deuxième partie du couple étant pulsatoire et périodique (pulsation 2Ω).

On remarquera de même que le couple total Γ a pour valeur ($2p$ sections) :

$$\Gamma = -\left(\frac{n_2}{2\pi} \right)^2 \frac{\Phi_{p \max}^2}{2Z_2} \left\{ \begin{aligned} & \Omega \sin 2p\alpha \sin \varphi_2 \\ & + p\omega' \cos \varphi_2 (1 + \cos 2p\alpha) \end{aligned} \right\}$$

On pourrait concevoir quelque inquiétude de voir le couple total Γ constitué par deux termes précédés du signe —. Cette apparente inégalité signifie simplement que les balais doivent être, dans les hypothèses qui ont servi de base dans notre analyse, calés à gauche de la ligne neutre au lieu de l'être à droite, le mouvement de l'induit ayant lieu de gauche à droite. Faisons en effet $\alpha' = -\alpha$. Nous avons immédiatement :

$$\Gamma = \left(\frac{n_2}{2\pi} \right)^2 \frac{\Phi_{p \max}^2}{2Z_2} \left\{ \begin{aligned} & +\Omega \sin 2p\alpha' \sin \varphi_2 \\ & -p\omega' \cos \varphi_2 (1 + \cos 2p\alpha') \end{aligned} \right\}$$

Dire que la composante proportionnelle à $\Omega \sin 2p\alpha'$ doit

être prise en signe contraire, c'est dire qu'elle doit être à 180° de la précédente. D'où le graphique ci-dessous pour la f. e. m. résultante (fig. 4).

Nous aurons aussi et directement la valeur cherchée pour le couple en remarquant que, pour un décalage φ_2 de rotor correspondant à une vitesse ω' , le couple est constitué par les deux composantes :

$$\Phi_{p \max} \left(\frac{n_2}{2\pi} \right) \cos p\alpha' \frac{E_0}{Z_2} \cos (\pi + \varphi_2)$$

et :

$$\Phi_{p \max} \left(\frac{n_2}{2\pi} \right) \cos p\alpha' \frac{E_0}{Z_2} \cos \left(\frac{3\pi}{2} + \varphi_2 \right)$$

car le flux d'entrefer agissant sur une section dont les balais

FIG. 4. — Constitution de la f. e. m. résultante d'un moteur asynchrone à collecteur à répulsion. Situations géométriques respectives de la f. e. m., de ses composantes et du courant.

sont décalés d'un angle $p\alpha'$ par rapport aux axes interpolaires est réduit dans le rapport $\cos p\alpha'$.

Or :

$$\begin{aligned} \cos (\pi + \varphi_2) &= -\cos \varphi_2 \\ \cos \left(\frac{3\pi}{2} + \varphi_2 \right) &= \cos \left(2\pi - \frac{\pi}{2} + \varphi_2 \right) = \cos \left(\varphi_2 - \frac{\pi}{2} \right) \\ &= \cos \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_2 \right) = \sin \varphi_2 \end{aligned}$$

Nous aurons donc pour l'expression de ce couple :

$$C_{\text{total}} = \cos p\alpha' \frac{\Phi_{p \max}^2}{Z_2} \left(\frac{n_2}{2\pi} \right) \left[\Omega \sin \varphi_2 \sin p\alpha' - p\omega' \cos p\alpha' \cos \varphi_2 \right]$$

c'est-à-dire :

$$C_{\text{total}} = \frac{\Phi_{p \max}^2}{2Z_2} \left(\frac{n_2}{2\pi} \right)^2 \left[\Omega \sin \varphi_2 \sin 2p\alpha' - p\omega' \cos \varphi_2 (1 + \cos 2p\alpha') \right]$$

Nous retompons bien sur les mêmes expressions.

En résumé, nous avons donc pour notre couple une valeur essentiellement positive depuis l'instant du démarrage ($\omega' = 0$) jusqu'à la vitesse ω' donnée par :

$$\omega' = \frac{\Omega \sin 2p\alpha' \operatorname{tg} \varphi_2}{p(1 + \cos 2p\alpha')} = \frac{\Omega}{p} \operatorname{tg} p\alpha' \operatorname{tg} \varphi_2$$

valeur de ω' qui va annuler ledit couple, si l'on suppose Z_2 constant.

CARACTÉRISTIQUE MÉCANIQUE (approchée). — On voit que cette caractéristique est une droite donnée par la formule :

$$C_m(\omega') = \Gamma = \left(\frac{n_2}{2\pi} \right)^2 \frac{\Phi_{p \max}^2}{2Z_2} \left[\Omega \sin 2p\alpha' \sin \varphi_2 - p\omega' \cos \varphi_2 (1 + \cos 2p\alpha') \right];$$

elle dépend du paramètre φ_2 et aussi du calage des balais $p\alpha'$.

Pour $2p\alpha' = \frac{\pi}{2}$, on a la caractéristique mécanique A_0B_0 (fig. 5). Le coefficient angulaire (φ) φ de cette caractéristique a pour valeur absolue :

$$\left(\frac{n_2}{2\pi} \right)^2 \frac{\Phi_{p \max}^2}{2Z_2} \left[\cos \varphi_2 (1 + \cos 2p\alpha') \right]$$

Pour $2p\alpha' < \frac{\pi}{2}$, deux valeurs de $p\alpha'$ existent, qui peuvent

FIG. 5. — Caractéristique mécanique du moteur asynchrone à collecteur à répulsion.

répondre à la condition fixée par l'inégalité précédente.

L'une $p\alpha'_1 > \frac{\pi}{4}$, l'autre $p\alpha'_2 < \frac{\pi}{4}$.

Pour $p\alpha'_1 > \frac{\pi}{4}$ on a la caractéristique A_1B_1 .

Pour la deuxième valeur $p\alpha'_2 < \frac{\pi}{4}$, on a la deuxième caractéristique A_2B_2 . L'une coupe en un point la caractéristique A_0B_0 (optima au point de vue des couples de démarrage) ; l'autre ne la coupe pas.

FIG. 6. — Détermination graphique des conditions correspondant au couple optimum de démarrage.

On voit comme conclusion que, partant d'un même couple de démarrage, on peut réaliser deux calages des balais, l'un $p\alpha'_1 > \frac{\pi}{4}$, l'autre $p\alpha'_2 < \frac{\pi}{4}$, permettant d'avoir des caractéristiques plus ou moins tombantes, donc correspondant à des applications différentes.

COUPLE DE DÉMARRAGE. — Il est maximum pour :

$$\sin 2p\alpha' = 1 \text{ c'est-à-dire } p\alpha' = \pm \frac{\pi}{4}$$

Ce qui revient à dire que les positions des balais et celles des axes polaires doivent être décalées de $1/8$ de période.

On pouvait pressentir cette remarque, car, pour $\alpha' = 0$,

on a une f. e. m. nulle ; pour $\alpha' = \frac{\pi}{2p}$, f. e. m. maxima, mais inductions égales et de signes contraires agissant sur les conducteurs pris deux à deux, symétriquement par rapport à l'axe de la section ; donc impossibilité de démarrage.

REMARQUE SUR LA VALEUR DU COUPLE DE DÉMARRAGE. — Rappelons que ce couple a pour valeur, ($\omega' = 0$) :

$$C_{\text{moy}} = \left(\frac{n_2}{2\pi}\right)^2 \frac{\Phi_p^2 \max}{2Z_2} \left(\Omega \sin 2p\alpha' \sin \varphi_2\right)$$

On voit que ce couple a une valeur liée à $\sin \varphi_2$. Il est d'autant plus considérable que l'angle φ_2 sera plus voisin de 90° , donc que le moteur sera plus réactant par rapport à sa résistance.

En d'autres termes, pour une impédance donnée, nous aurons intérêt à amplifier le rapport de la réactance à la résistance (choix d'un anneau, pour le rotor, de préférence à un tambour. On démontre, en effet, que, toutes choses égales, la réactance des induits du premier type est supérieure à celle des induits du second).

Au point de vue des réactances, tout se passe comme si l'on avait affaire à une pulsation Ω , celle du courant du rotor, de même que, dans une machine à courant continu, tout se passe, au point de vue des courants dans l'induit, comme si le fer restait immobile.

EQUILIBRE DYNAMIQUE. — A un couple C_r donné, correspond un couple moteur égal, donc à tension primaire et à calage des balais fixes, une vitesse donnée.

Pour substituer à cette caractéristique une autre caractéristique, c'est-à-dire, pour régler le moteur, il faudra agir sur les balais, la tension primaire restant constante.

MARCHE EN GÉNÉRATRICE. — On voit que dès que la vitesse a dépassé la valeur afférente à la nullité du couple, la machine ne donne plus de couple moteur, mais bien un

FIG. 7. — Diagramme général de la marche en génératrice d'une machine asynchrone à collecteur et à rotor court-circuité

couple générateur, à condition naturellement qu'on lui fournisse une puissance motrice sur son arbre. La phase de la f. e. m. par rapport au courant reste naturellement la même, mais pour :

$$\omega' > \frac{\Omega \sin p\alpha \sin \varphi_2}{p \cos p\alpha \cos \varphi_2}$$

il y aura création d'une f. e. m. de plus en plus grande, donc d'un courant de génératrice en court-circuit de plus en plus considérable. Dans le cas où les balais (comme il arrive dans les moteurs dits mixtes) seraient fermés non par un court-circuit, mais par un réseau, par exemple, plus ou moins lié au réseau d'alimentation du stator, on pourrait donc faire débiter sur ce réseau, par la génératrice asynchrone à collecteur ainsi constituée, une puissance plus ou

moins importante. On connaît, pour ce qui est du compounding des alternateurs, une application de cette propriété.

Il est à remarquer que pour cette valeur critique de ω' , le couple change de signe en passant par zéro. Donc, l'angle de I_1 et I_2 , d'abord inférieur à $\frac{\pi}{2}$, doit être ensuite plus grand que $\frac{\pi}{2}$.

Si l'on pousse au-delà de cette vitesse critique (le synchronisme, si $p\alpha = \frac{\pi}{4}$), on aura une véritable f. e. m. de génératrice et si l'on fournit une puissance convenable à l'arbre, on aura une tension entre balais plus ou moins en phase avec l'intensité débitée.

Le potentiel des points du stator n'étant défini, en cas de bon isolement, qu'au zéro près, on pourra même, comme le proposent certains auteurs, combiner la tension secondaire à la tension primaire avec croisement convenable de connexions, pour avoir une tension résultante survoltée, sousvoltée ou déphasée par rapport à ce qu'elle serait sans cette addition.

Nous laisserons au lecteur le soin de développer ces conclusions.

REMARQUE. — On peut réaliser, ainsi que nous l'avons vu, des conditions de marche différentes par un calage con-

FIG. 8. — Répartition de l'induction dans l'entrefer d'un moteur à courants alternatifs.

venable des balais, ce qui revient à modifier les deux composantes de la f. e. m. On peut arriver au même résultat par l'emploi de deux champs en quadrature, et c'est ce que l'on fait en pratique.

Nous bornerons là notre étude sommaire des propriétés des anneaux à collecteur, et en particulier, de leur application aux moteurs à répulsion en renvoyant le lecteur, pour plus amples détails, et en particulier pour la description des dispositifs pratiques ainsi que pour l'étude détaillée des moteurs série et mixtes, à l'étude que l'un de nous a faite de la question (1).

Moteurs série à courants alternatifs

Considérons un moteur analogue à ceux que nous avons examinés jusqu'ici, mais avec l'induit parcouru par le courant de stator, ce qui constitue par conséquent une machine série à courants alternatifs.

La force électromotrice ne sera pas évidemment différente

(1) « Les Machines Electriques alternatives à collecteur » par L. BARBILLION. (Encyclopédie Electrotechnique, fascicule n° 25).

de celle que nous avons étudiée et calculée graphiquement à propos des moteurs à répulsion, mais le courant ne sera autre que le courant de stator.

Nous savons que le moteur sera le siège d'une chute de tension :

$$\overline{RI_{\text{eff}}} + \overline{L\Omega I_{\text{eff}}} = \overline{ZI_{\text{eff}}}$$

R , L , Ω et z désignant respectivement sa résistance, sa réactance, son impédance.

FIG. 9. — Diagramme général de fonctionnement du moteur série à courants alternatifs sous tension constante.

Dans ces conditions, on voit qu'il y aura intérêt à avoir une composante statique de la f. e. m. la plus faible possible, de manière à ce que U et I soient le plus possible en phase. On y arrivera à peu près en ne conservant que la compo-

FIG. 10. — Diagramme de fonctionnement du moteur série à courants alternatifs sous tension constante.

sante dynamique, et tout à fait en décalant les balais d'un petit angle α' à droite de la ligne interpolaire, si, dans le cas du même moteur fonctionnant en moteur à répulsion, ils étaient calés à gauche. On pourra avoir I et U tout à fait

FIG. 11. — Diagramme de fonctionnement du moteur série sous tension constante.

en phase pour une certaine vitesse et un certain calage des balais α' . Plus généralement et plus simplement, on laissera les balais calés sur les axes interpolaires. On aura alors le diagramme suivant (fig. 12). Pour un couple résistant donné C_r , on connaît le couple moteur :

$$C_m = BI_{\text{eff}}^2,$$

car il n'y a alors pas de décalage entre Φ et I , et l'on peut

presque toujours, avec ce moteur, supposer que l'on fonctionne en utilisant la première région de la courbe du magnétisme. Il viendra donc :

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{C_r}{B}}$$

donc I_{eff} est fixé et le diagramme aussi, quand on marche à tension constante. Le point B est donné par l'intersection du cercle de rayon U_{eff} avec la parallèle AB à OX (fig. 13).

On voit que :

$$AB = E'_{\text{eff}} = KI_{\text{eff}} N$$

N étant la vitesse pour chaque valeur du couple (fig. 13).

CARACTÉRISTIQUE MÉCANIQUE. — Appelons N_0 la vitesse de marche à vide, ou de synchronisme, à laquelle fonctionne

FIG. 12. — Recherche graphique des conditions d'équilibre dynamique du moteur série à courants alternatifs.

le moteur quand il fournit un couple nul (ou pratiquement très faible).

Nous aurons ainsi une proportionnalité à I_{eff} des deux vecteurs :

$$\begin{aligned} OA &= ZI_{\text{eff}} \\ AD &= N_0 KI_{\text{eff}} \end{aligned}$$

f. e. m. fictive que l'on obtiendrait si la vitesse restait la même (N_0).

Dans ces conditions, le point D se déplacera sur une droite passant par l'origine, quand le point A se déplace sur la droite AU.

FIG. 13. — Etablissement de la caractéristique mécanique du moteur série à courants alternatifs, sous tension constante.

Décrivons un cercle de rayon $OM = U_{\text{eff}}$; le point G d'intersection avec AD nous donne :

$$AG = NKI_{\text{eff}}$$

et les rapports :

$$\frac{AG}{AD} = \frac{N}{N_0}$$

ou encore :

$$\frac{DG}{AD} = \frac{N_0 - N}{N_0}$$

On peut donc construire la caractéristique :

$$\left(\frac{DG}{AD}\right) \left(OA\right)$$

c'est-à-dire celle des vitesses en fonction de l'intensité à partir de la marche à vide (D_0 et G_0 confondues).

On voit que c'est une courbe tombant très vite comme dans tous les moteurs série.

On pourra construire également avec la plus grande facilité la courbe du facteur de puissance en fonction de l'intensité, soit $\cos \varphi$ (I_{eff}).

On voit que le $\cos \varphi$ ne cesse de décroître au fur et à mesure que l'intensité augmente ; c'est tout naturel, car la f. e. m. a été supposée en phase avec le courant, et la chute de tension zI_{eff} croît directement avec l'intensité, tandis que si la f. e. m. croît avec l'intensité, elle décroît aussi quand la vitesse décroît, ces deux effets se compensant plus ou moins.

FIG. 14. — Caractéristique électromécanique de vitesse du moteur série à courants alternatifs sous tension constante.

D'où la nécessité de pôles de compensation en quadrature avec les pôles principaux et destinés, par le choix d'une intensité convenable, à annuler les pôles d'induit. Les pôles de ces moteurs étant le plus généralement non saillants mais

FIG. 15. — Nécessité de la compensation dans un moteur série à courants alternatifs sous tension constante.

bobinés, rien n'est plus simple que de combiner les enroulements des pôles de compensation avec les enroulements des pôles principaux.

Les pôles de compensation seront donc avantageusement excités par le courant principal d'armature, ou de tout autre façon avec un courant quelconque, mais de même phase que le courant principal, pour réaliser une compensation rigoureuse.

Si donc, en outre des pôles de compensation, on adopte un feuilletage extrêmement poussé des tôles de l'induit et de l'inducteur, on aura supprimé à peu près toutes les difficultés inhérentes à l'emploi des courants alternatifs. On remarquera néanmoins que le couple :

$$C_m = KI_{\text{eff}}^2$$

est forcément pulsatoire, comme dans tout moteur monophasé de quelque système qu'il soit.

Caractéristique mécanique exacte du moteur à répulsion

Nous avons construit une caractéristique mécanique *approchée* en prenant une valeur *approchée*, également, de $\sin \varphi_2$, de $\cos \varphi_2$, donc de $(\Omega - \Omega')$. Cette valeur *approchée* peut être celle correspondant à la moyenne de $(\Omega - \Omega')$ dans les conditions de marche où l'on opère. Nous pouvons aussi, les conclusions générales de l'étude de la variation du couple en fonction de la vitesse établies, reprendre la question d'un peu plus loin et construire la forme réelle de la caractéristique mécanique. Reraprenons l'expression du couple :

$$C = \frac{\Phi_p^2 \max}{2Z_2} \left(\frac{n_2}{2\pi} \right)^2 \left[\Omega \sin \varphi_2 \sin 2px' - p\omega' \cos \varphi_2 (1 + \cos 2px') \right]$$

ou :

$$C = \cos px' \frac{\Phi_p^2 \max}{Z_2} \left(\frac{n_2}{2\pi} \right)^2 \left[\Omega \sin \varphi_2 \sin px' - p\omega' \cos px' \cos \varphi_2 \right]$$

Posons :

$$\begin{cases} A = \Phi_p^2 \max \left(\frac{n_2}{2\pi} \right)^2 \\ p\omega' = \Omega' \\ \Omega - \Omega' = \Omega_r \\ \frac{R_2}{L_2} = a \end{cases}$$

Il vient :

$$\begin{aligned} C &= \frac{\cos px' A}{Z_2^2} \left[\Omega L_2 \Omega_r \sin px' - p\omega' \cos px' R_2 \right] \\ C &= \frac{L_2}{Z_2^2} A \cos px' \left[\Omega \Omega_r \sin px' - a \Omega' \cos px' \right] \\ C &= \frac{L_2}{Z_2^2} A \cos px' \left[\Omega \Omega_r \sin px' + a (\Omega - \Omega' - \Omega) \cos px' \right] \\ C &= \frac{L_2}{Z_2^2} A \cos px' \left[\Omega (\Omega \sin px') + a \Omega_r \cos px' - a \Omega \cos px' \right] \\ C &= \frac{L_2}{Z_2^2} A \cos px' \left[\Omega_r (\Omega \sin px' + a \cos px') - a \Omega \cos px' \right] \end{aligned}$$

Or, comme :

$$Z_2^2 = R_2^2 + L_2^2 (\Omega_r)^2 = L_2^2 (a^2 + \Omega_r^2)$$

il en résulte :

$$\begin{aligned} L_2^2 C [a^2 + \Omega_r^2] &= L_2 A \cos px' \Omega_r (\Omega \sin px' + a \cos px') \\ &\quad - L_2 A a \Omega \cos^2 px' \\ C [a^2 + \Omega_r^2] &= \frac{A}{L_2} \cos px' \Omega_r (\Omega \sin px' + a \cos px') \\ &\quad - \Omega \frac{A}{L_2} a \cos^2 px' \end{aligned}$$

Posons :

$$\begin{aligned} \frac{A}{L_2} &= A'. \text{ Il vient l'équation du troisième degré :} \\ C (\Omega_r)^2 - \Omega_r A' \cos px' (\Omega \sin px' + a \cos px') + C a^2 \\ &\quad + \Omega A' a \cos^2 px' = 0 \end{aligned}$$

Posons :

$$\begin{cases} C = Y \\ \Omega_r = X \end{cases}$$

il vient :

$$YX^2 - XA' \cos px' (\Omega \sin px' + a \cos px') + Ya^2 + \Omega A' a \cos^2 px' = 0$$

En particulier, pour :

$$X = 0, Y = -\frac{\Omega A' \cos^2 px'}{a} \text{ (point A); et pour :}$$

$$Y = 0, X = \frac{\Omega a \cos px'}{\Omega \sin px' + a \cos px'} \text{ (point B).}$$

Cherchons la valeur du couple de démarrage à titre de vérification.

Dans l'équation précédente :

$$YX^2 - XA' \cos px' [\Omega \sin px' + a \cos px'] + Ya^2 + \Omega A' a \cos^2 px' = 0,$$

Faisons :

$$Y = C_{\text{démarrage}} \\ \Omega_r = X = \Omega \text{ car } \Omega' = 0$$

FIG. 16. — Caractéristique mécanique d'un moteur asynchrone à collecteur.

Il vient :

$$Y [\Omega^2 + a^2] - \Omega A' \cos px' [\Omega \sin px' + a \cos px'] + \Omega A' a \cos^2 px' = 0;$$

on retrouve bien, en remplaçant A' par sa valeur :

$$C_{\text{démarrage}} = \left(\frac{n_2}{2\pi} \right)^2 \frac{\Phi_p^2 \max}{2Z_2} \Omega \sin \varphi_2^0 \sin 2px'$$

avec φ_2^0 décalage à l'origine ($\Omega' = 0$).

Conclusion

La caractéristique mécanique a l'allure suivante (fig. 16) :

REMARQUES. — I. Recherche du couple maximum. — L'étude algébrique de l'équation du couple met en évidence deux maxima pour le couple. Si, en effet, nous posons :

$$\mu = A' \cos px' (\Omega \sin px' + a \cos px')$$

$$\lambda = \Omega A' \cos^2 px'$$

l'équation du couple devient :

$$Y (X^2 + a^2) - X\mu + \lambda = 0, \text{ ou}$$

$$Y = \frac{X\mu - \lambda}{X^2 + a^2}$$

Cherchons les racines de la dérivée :

$$Y' = \frac{-\mu X^2 + 2\lambda X + \mu a^2}{(X^2 + a^2)^2}$$

Ce sont les valeurs de X données par l'équation :

$$\mu X^2 - 2\lambda X - \mu a^2 = 0$$

c'est-à-dire :

$$X = \frac{\lambda}{\mu} \pm \sqrt{\left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^2 + a^2}$$

Le signe — correspond à une valeur négative de X , donc au fonctionnement en génératrice asynchrone. C'est le point D. L'autre racine n'aura d'intérêt qu'autant qu'elle sera inférieure à la valeur $\Omega_r = \Omega$ (démarrage). Voyons quelle condition doit être réalisée pour qu'il en soit ainsi, donc pour que le couple maximum soit réellement utilisable. Nous devons avoir :

FIG. 17. — Caractéristique mécanique d'un moteur asynchrone à collecteur.

$$\frac{\lambda}{\mu} + \sqrt{\left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^2 + a^2} < \Omega \text{ ou :} \\ a^2 < \Omega^2 - 2 \frac{\lambda}{\mu} \Omega.$$

Comme, d'autre part :

$$\frac{\lambda}{\mu} = \frac{\Omega A' a \cos^2 px'}{A' \cos pa' [\Omega \sin px' + a \cos px']} = \frac{a\Omega}{\Omega \tan px' + a}$$

la condition cherchée sera :

$$a^2 < \Omega^2 - 2 \frac{a\Omega^2}{\Omega \tan px' + a}$$

ou :

$$a^2 < \Omega^2 \frac{\Omega \tan px' - a}{\Omega \tan px' + a}$$

ou encore, en posant :

$$\frac{a}{\Omega} = b$$

$$b^2 < \frac{\Omega \tan px' - a}{\Omega \tan px' + a}$$

ou, enfin :

$$\tan px' < \frac{b^3 + b}{1 - b^2}$$

ou :

$$\tan px' < b \frac{1 + b^2}{1 - b^2}.$$

Telle est la condition à réaliser pour que le couple maximum soit utilisable.

Remarquons que :

$$b = \frac{a}{\Omega} = \frac{R_2}{L_2 \Omega}$$

II. *Caractéristique mécanique rapportée à ω' .* — Un changement intuitif d'axes donne cette nouvelle caractéristique mécanique.

(A suivre.)

L. BARBILLION et F. CLARET.

ÉCONOMIE INDUSTRIELLE

LES TURBINES A VAPEUR

DESCRIPTION ET CLASSIFICATION

A la fin de l'année 1910, on pouvait compter comme turbines à vapeur en fonctionnement : près de 1 000 turbines Rateau ou du genre Rateau, telles que les turbines Oerlikon et les turbines Zoelly ; presque autant de turbines de la Société d'électricité A. E. G. de Berlin ; et un nombre un peu plus grand de turbines Brown-Boveri-Parsons.

Le nombre total des turbines, établies suivant le système Parsons, dépassait à cette date 2 500 unités.

Sans compter les turbines de Laval, très répandues actuellement mais ne représentant que des machines d'assez faible puissance, on peut dire qu'il est déjà sorti des usines de construction de l'Europe seulement plus de 5 000 turbines à vapeur.

A ce chiffre, il faudrait ajouter les turbines marines qui sont déjà très répandues puisque, pour le système Parsons seulement, la puissance des turbines, employées à la propulsion des navires, dépasse actuellement 4 300 000 HP.

Ces chiffres sont assez éloquentes par eux-mêmes et montrent suffisamment le développement considérable pris ces dernières années par les turbines à vapeur.

Presque toutes ces machines sont de grande puissance et la plupart peuvent donner plusieurs milliers de chevaux. Les turbines de 10 000 HP sont actuellement de construction courante et celles de 20 000 HP ne sont pas rares. Nous avons eu l'occasion, l'année passée, d'en voir quelques-unes en montage dans les ateliers de la Société A. E. G., à Berlin. Elles étaient destinées à une grande Centrale du Sud de l'Afrique qui devait recevoir sept unités de 20 000 HP pour fournir la force motrice à toutes les mines du Transvaal. Au moment de notre visite, les Ateliers de l'A. E. G. avaient à l'étude une turbine de 30 000 HP pour une puissante Centrale de Berlin.

Cependant, toutes les turbines Rateau, Zoelly, Brown-Boveri, A. E. G., Curtis, etc., sont postérieures à 1900. Avant cette date, on ne connaissait guère que les turbines Parsons et celles de Laval.

La Maison Sautter Harlé a commencé la construction des turbines Rateau vers 1897-1898 et les premières turbines essayées ont été des machines marines. Mais ce n'est qu'en 1902 que M. Rateau a mis en marche, aux Mines de Bruay, sa première turbine à terre, qui est restée célèbre parce qu'elle était également la première utilisant la vapeur d'échappement d'une machine à piston. Le fonctionnement de cette turbine fut d'ailleurs des plus satisfaisants.

Au commencement de 1905 seulement, sortirent des Ateliers Escher Wyss, à Zurich, les premières turbines étudiées par M. Zoelly, directeur de ces Ateliers. Ces turbines, qui

sont en principe semblables à celles de M. Rateau, se sont répandues rapidement grâce à leur excellente fabrication. Elles sont actuellement construites en France par MM. Schneider et C^o, au Creusot, la Société Alsacienne de Constructions Mécaniques et la Société de l'Horme et de la Buire.

MM. Brown-Boveri et C^o n'ont obtenu la licence, pour la construction des turbines Parsons, qu'en 1900, et les premières turbines construites à Baden datent du début de 1901.

Enfin, la Société d'Electricité A. E. G., de Berlin, ne commença à s'occuper des turbines à vapeur que vers 1902-1903 et construisit d'abord les turbines des professeurs Riedler et Stumpf qu'elle ne tarda pas à abandonner pour adopter exclusivement son type actuel qui date de 1904. C'est pendant cette même année qu'elle acheva, à Berlin, l'aménagement de sa grande fabrique de turbines qui occupe actuellement plus de 3 500 ouvriers travaillant jour et nuit en trois équipes.

Depuis longtemps, les inventeurs ont étudié les turbines à vapeur, et en particulier, dès 1853, l'ingénieur français Tournaire donnait d'une façon très précise les règles à suivre pour établir une turbine à réaction ; mais ce sont surtout quatre ingénieurs, dont il est à peine besoin de rappeler ici les noms : PARSONS, DE LAVAL, RATEAU et CURTIS, qui ont contribué à rendre ces machines vraiment industrielles.

Les difficultés à surmonter ont été considérables et, malgré tout le talent et la ténacité des inventeurs précédents, il n'aurait pas été possible de parvenir aux résultats actuels sans les progrès récents de la mécanique et surtout de la métallurgie.

Il est bon d'observer aussi que le succès des turbines à vapeur est dû en grande partie à l'électricité et que, sans elle, les applications des turbines auraient été assez restreintes, surtout pour les grandes puissances. Il est juste de remarquer également que les électriciens ont eu à résoudre alors des problèmes au moins aussi difficiles que ceux que les constructeurs de turbines sont parvenus à solutionner.

Pour les turbo-alternateurs et surtout pour les turbodynamos, les électriciens, en effet, ont eu bien souvent, c'est le cas de le dire, du fil à retordre. Cela se conçoit facilement. Les machines électriques sont composées des matières les plus diverses : acier, cuivre, isolant, et leur manque d'homogénéité donne lieu à des difficultés certainement beaucoup plus grandes, à cause de la force centrifuge, que dans le cas des turbines à vapeur. Si l'on ajoute à cela que ces machines, devant fournir une très grande puissance sous un faible volume, chauffent souvent beaucoup plus qu'on ne le voudrait et que les échauffements successifs déterminent des déformations que rendent difficiles à éviter le manque d'homogénéité de l'ensemble et surtout la présence des isolants, on s'explique alors facilement pourquoi les éclatements des machines électriques ont été plus fréquents que ceux des turbines et pourquoi ces éclatements sont actuellement encore plus à redouter pour les alternateurs et les dynamos que pour les turbines. Aussi, ne peut-on que trouver très justifiée la sage précaution, prise par certains constructeurs comme la société A. E. G. et la Maison Siemens Schuckert, d'installer des locaux spéciaux, ordinairement souterrains et garnis de solides madriers, dans lesquels les machines essayées à l'emballement peuvent éclater tout à leur aise sans gêner personne.

Actuellement, les turbo-alternateurs sont construits d'une façon courante par un grand nombre de maisons et l'on parvient normalement à établir des machines très puissantes tournant à très grande vitesse. Il est possible, par exemple, de faire des turbo-alternateurs de 3 000 et même 3 500 kilo-