

une manette et chacun d'eux est muni d'une forte bobine magnétique pour souffler les arcs. On a aussi prévu deux interrupteurs à soufflage magnétique coupant automatiquement le courant en cas de surcharge et réglés respectivement à 500 et 2 000 ampères. Le contrôleur comporte aussi une manette de renversement qui, au moyen d'une disposition spéciale, actionne l'inverseur de chacun des huit moteurs.

Les moteurs sont disposés en quatre groupes marchant toujours en parallèle et chaque groupe comporte deux moteurs, en série aux démarrages, avec un interrupteur automatique coupant le courant amené à ce groupe en cas de trop forte surcharge ou de court circuit. Cet interrupteur est commandé par un électro-aimant disposé sur le circuit de ce groupe. Lorsque le courant est coupé, c'est-à-dire que le circuit du groupe correspondant est ouvert, une petite plaque, disposée sur le côté extérieur du bogie, tombe et montre le mot « ouvert » peint en grosses lettres blanches sur un fond écarlate, ce qui attire immédiatement l'attention. Ces interrupteurs peuvent aussi être manœuvrés à la main et isoler le groupe correspondant.

Les deux automotrices de tête et de queue sont commandées à volonté de l'un ou de l'autre bout du train, de telle sorte qu'au terminus le mécanicien n'a qu'à changer de poste pour repartir en sens inverse. Les connexions entre les sabots frotteurs, les contrôleurs et les moteurs se font au moyen de quatre câbles dont l'un est triple et sert pour l'éclairage, le chauffage et l'inverseur des moteurs.

Aux démarrages le courant atteint jusqu'à 2 000 ampères, mais il tombe ensuite à 500/450 ampères lorsque la vitesse normale est atteinte, les huit moteurs étant alors en parallèle. Les résistances de réglage sont disposées sous la voiture. En marche normale le contrôleur et les résistances arrières sont hors circuit, mais chaque automotrice est prévue de telle façon que ses résistances permettent de contrôler tout l'ensemble du train.

La transformation de la traction à vapeur par la traction électrique, sur la ligne Liverpool-Southport, a réalisé toutes les espérances qui avaient conduit à adopter cette solution. Nul doute que cet exemple ne soit suivi dans bien d'autres endroits, autour des grands centres industriels ou commerciaux, surtout lorsque ceux-ci peuvent être économiquement alimentés par des transports d'énergie provenant de puissantes usines hydro-électriques comme il s'en trouve déjà dans les Alpes. En cas d'insuffisance d'eau au moment de l'étiage, une partie de l'énergie pourrait être fournie par des machines à vapeur de secours, régularisant ainsi le débit électrique absorbé par les chemins de fer que le débit insuffisant de l'eau ne permettrait pas de fournir.

Une pareille transformation est également intéressante pour les lignes de montagnes traversant des régions pittoresques très fréquentées des touristes. L'emploi d'automotrices électriques permet de supprimer la locomotive à vapeur, qui doit être d'autant plus lourde que la rampe est plus forte et le nombre des voyageurs plus considérable, et de diminuer en conséquence le poids mort du train et par suite l'effort de traction à la jante des roues motrices.

Ce sont ces diverses considérations qui nous ont engagé à essayer de décrire la précédente transformation.

H. BELLET.

Dans le prochain numéro nous publierons une note de M. Ribourt sur des jaugeages effectués, par divers procédés, à Brides-les-Bains (Savoie).

INFLUENCE DE L'HYSTÉRÉSIS

SUR LA

MARCHE DES ALTERNATEURS EN PARALLÈLE

Communication de M. BOUCHEROT au Congrès de Saint-Louis.

Dans une communication faite il y a quelques mois par M. H.-H. Barnes, à l'*American Institute of Electrical Engineers*, cet ingénieur a signalé un fait très curieux qu'il a appelé « cumulative surging » se produisant dans certains cas avec des alternateurs volants couplés en parallèle (1).

On supprime les régulateurs de deux groupes électrogènes en les bloquant pour que l'admission soit constante. On les amène à la même vitesse autant que l'on peut, on couple. Alors les machines, au lieu de se mettre en concordance de phase après quelques oscillations, oscillent au contraire de plus en plus avec leur période propre d'oscillation T et l'amplitude de ces oscillations croît assez rapidement jusqu'au décrochage. Ce phénomène ne saurait être attribué à la résonance, car dans les cas spéciaux où il s'est produit, la période propre T était deux à trois fois plus longue que la période de rotation. Il ne saurait être non plus attribué aux régulateurs de vitesse, puisque ceux-ci étaient supprimés. Il semble donc y avoir une cause encore inconnue de perturbations lors de la marche en parallèle de deux alternateurs.

Je crois que l'on peut dès maintenant proposer deux explications de ces faits. Il peut y avoir au moins deux causes de perturbations ; il y en a peut-être encore d'autres.

On trouvera dans une autre communication au Congrès, sur « La variation cinétique de tension », une première explication que je résumerai ici en quelques mots (2) :

Lorsqu'un alternateur a une variation de vitesse périodique, si son excitatrice est conduite par lui-même, soit qu'elle soit placée en bout de l'arbre, soit qu'elle soit conduite par engrenages ou courroie, les variations de tension de l'alternateur sont un peu en retard sur les variations de vitesse. Le décalage φ_k des variations de tension sur les variations de vitesse qui est toujours compris entre 0 et $\frac{\pi}{2}$ peut, sans que les circonstances soient très anormales, être voisin de $\frac{\pi}{4}$. Si l'on réunit alors deux tels alternateurs en parallèle, il y a dans chacun, du fait même des oscillations, de quelque nature qu'elles soient, un couple amplificateur, de signe contraire à l'amortissement, qui a pour valeur approchée :

$$\frac{E_{\text{eff}} I_{\text{cc}}}{\Omega_m} \frac{\omega \varepsilon}{\alpha} \frac{\varepsilon_k}{4} \sin 2 \varphi_k \sin \alpha t$$

lorsque la vitesse de l'un d'eux est :

$$\Omega_2 (1 + \varepsilon \sin \alpha t)$$

Ω_m vitesse angulaire moyenne,

ε variation relative de cette vitesse,

ε_k variation relative correspondante de la tension,

(1) Voir *La Houille Blanche*, août 1904.

(2) Nous donnerons cette étude dans un prochain numéro.

α pulsation de ces variations,
 ω pulsation du courant,
 E_{eff} tension efficace moyenne,
 I_{cc} courant de court-circuit correspondant à la tension E_{eff} .
 Ce couple amplificateur peut être parfois supérieur à l'amortissement et alors le « cumulative surging » peut se produire.

Je n'insisterai pas plus, renvoyant le lecteur que cela intéresse à la communication citée plus haut.

L'autre explication de ce phénomène repose sur l'influence de l'hystérésis du fer des induits des alternateurs, et c'est celle que j'ai l'intention de développer ci-dessous.

Si l'on examine en détail ce qui se passe dans un alternateur, on reconnaît aisément que la force électromotrice est légèrement en retard sur ce qu'elle serait s'il n'y avait pas d'hystérésis dans les tubes d'induit. Ceci est trop simple à démontrer pour que je m'attarde à le faire.

Mais les efforts électrodynamiques résultent de l'action du courant induit non pas sur le champ magnétique de l'induit, mais sur le champ magnétique des inducteurs ; ce n'est pas sur le fer induit, mais sur le fer inducteur que les courants induits exercent leur action. En sorte que la puissance n'est pas exactement le produit de la force électromotrice par le courant, mais le produit de ce que serait la force électromotrice sans retard hystérétique par le courant tel qu'il est.

Soient alors les vitesses des deux alternateurs couplés en régime oscillatoire :

$$\Omega_m (1 \pm \varepsilon \sin \alpha t)$$

le signe $+$ se rapportant à l'un des alternateurs, le signe $-$ à l'autre. Comme l'écart angulaire est à chaque instant (intégrales des vitesses) :

$$\mp \Omega_m \frac{\varepsilon}{\alpha} \cos \alpha t$$

les forces électromotrices sans hystérésis seraient :

$$E_1 [1 \pm \varepsilon \sin \alpha t] \sin \omega [t \mp \frac{\varepsilon}{\alpha} \cos \alpha t]$$

ce qui peut encore s'écrire sans grande erreur :

$$E_1 [1 \pm \varepsilon \sin \alpha t] [\sin \omega t \mp \frac{\omega \varepsilon}{\alpha} \cos \alpha t \cos \omega t]$$

A cause du retard hystérétique, elles sont en réalité :

$$E_1 [1 \pm \varepsilon \sin \alpha t] [\sin (\omega t - X) \mp \frac{\omega \varepsilon}{\alpha} \cos \alpha t \cos (\omega t - X)]$$

Négligeons provisoirement la résistance intérieure ρ des alternateurs ; si λ est la self-induction de chacun, le courant de circulation est alors :

$$\frac{E_1}{\omega \lambda} \left[\frac{\omega \varepsilon}{\alpha} \cos \alpha t \sin (\omega t - X) + \varepsilon \sin \alpha t \cos (\omega t - X) \right]$$

D'après la remarque faite précédemment, les puissances sont le produit de ce courant par les forces électromotrices (sans hystérésis). En laissant de côté les termes en $2\omega t$ pour n'avoir que les puissances moyennes, et en négligeant quelques termes sans importance, celles-ci sont alors :

$$\left. \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \end{matrix} \right\} = \pm \frac{E_1}{2\omega \lambda} \left[\frac{\omega \varepsilon}{\alpha} \cos X \cos \alpha t + \varepsilon \sin X \sin \alpha t \right]$$

or, il est facile de voir que $\sin X$ est justement la perte η par

l'hystérésis dans l'induit rapportée à la puissance totale de la machine (0,02 à 0,06 suivant les cas). On peut dès lors confondre $\cos X$ avec l'unité, et les puissances deviennent plus simplement :

$$\left. \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \end{matrix} \right\} = \pm E_{\text{eff}} I_{\text{cc}} \left[\frac{\omega \varepsilon}{\alpha} \cos \alpha t + \varepsilon \eta \sin \alpha t \right]$$

le premier terme du second membre :

$$E_{\text{eff}} I_{\text{cc}} \frac{\omega \varepsilon}{\alpha} \cos \alpha t$$

est la puissance synchronisante, celle qui fournit le couple élastique et la période propre d'oscillation ; le second terme divisé par la vitesse moyenne Ω_m :

$$\frac{E_{\text{eff}} I_{\text{cc}}}{\Omega_m} \varepsilon \eta \sin \alpha t$$

est un couple perturbateur de signe contraire à l'amortissement, qui amplifie indéfiniment les oscillations quand il est plus grand que celui ci :

On peut définir l'amortissement C_a par l'égalité :

$$\text{Couple amortisseur} = C_a \frac{\Omega - \Omega_m}{\Omega}$$

où Ω est la vitesse instantanée : $\Omega_m (1 \pm \varepsilon \sin \alpha t)$ dans notre cas. Le couple amortisseur est donc :

$$\mp C_a \varepsilon \sin \alpha t$$

Et le « cumulative surging » peut se produire quand

$$\frac{E_{\text{eff}} I_{\text{cc}}}{\Omega_m} \eta > C_a$$

En général, C_a est une fraction $\frac{1}{g}$ du couple normal, en charge, de l'alternateur ; si, d'autre part, on appelle K le rapport du courant de court-circuit I_{cc} au courant normal, l'inégalité ci-dessus devient : $K \eta g > 1$.

Dans les alternateurs à pôles feuilletés, g est très grand, 10 et peut-être plus. On voit alors qu'en général pour $K = 4$ (alternateurs à faible réaction), pour $\eta = 0,05$ et pour $g = 10$, on a :

$$K \eta g = 2$$

et le phénomène se produit. Il se produit d'autant plus facilement que la réaction est faible, la perte par hystérésis forte et l'amortissement faible.

Dans tout ceci, l'excitation des alternateurs est supposée absolument constante, faite par des accumulateurs par exemple. Lorsque les alternateurs ont des excitatrices, l'influence dont nous avons parlé au début s'ajoute à celle de l'hystérésis : elle est aussi d'autant plus grande que la réaction est plus petite, mais, de plus, comme elle contient α en dénominateur elle est d'autant plus grande que le volant est plus lourd. Ceci peut expliquer que le phénomène ait été observé surtout avec des volants lourds. Il disparaît dès que l'on réunit en parallèle les excitations ; ceci a en effet un double résultat :

1° Celui d'annuler φ_4 et de supprimer par conséquent le premier effet ;

2° Celui d'introduire un amortissement supplémentaire par l'échange de courant entre les excitatrices.

M. H.-H. Barnes a observé de même que le balancement est supprimé lorsque, les alternateurs, étant excités par accumulateurs, on charge leurs excitatrices sur des résistances. C'est encore une augmentation de l'amortissement, puisque dans ce cas le couple résistant des excitatrices est proportionnel à la vitesse. Et qu'on ne soit pas surpris qu'une si petite cause ait un pareil effet, car le couple perturbateur dû à l'hystérésis est petit, puisqu'il contient $\eta \varepsilon$; il est de l'ordre de grandeur de l'amortissement quand celui-ci est très faible : le « cumulative surging » ne se produit pas quand l'amortissement est un peu fort.

On peut très bien comprendre physiquement cette influence de l'hystérésis :

Lorsque deux alternateurs couplés ont un décalage, sans osciller, si les forces électromotrices sont égales, le courant de circulation est watté; s'ils oscillent, la différence périodique de leurs forces électromotrices donne lieu à un petit courant de circulation supplémentaire qui est *déwatté*, périodique, maximum au milieu de l'oscillation, et nul aux extrémités. Sans hystérésis ce courant déwatté n'a aucun effet. Avec l'hystérésis il se trouve retardé légèrement et devient donc partiellement watté (négativement); cette composante wattée est *motrice* et comme elle est maxima au milieu de l'oscillation, c'est-à-dire quand la vitesse périodique est maxima elle produit un amortissement négatif.

Le retard des forces électromotrices sur les vitesses quand il y a des excitatrices produit le même résultat.

Dès lors on peut prévoir que toute cause de retard du petit courant déwatté dû aux oscillations des forces électromotrices produira le même effet.

Par contre, toute cause d'avance s'opposera à la production du phénomène. Et dans ce cas se trouve la résistance intérieure des alternateurs qui, comme toute résistance, a pour effet de provoquer une avance du courant quand elle est introduite dans un circuit réactif.

Si l'on recommence en effet les calculs précédents en ne négligeant plus ρ devant $\omega \lambda$, mais en négligeant encore ρ^2 devant $\omega^2 \lambda^2$ pour simplifier, on trouve pour le couple perturbateur :

$$\frac{E_{\text{eff}} I_{\text{cc}}}{\Omega_m} \varepsilon \left[\eta - \frac{\rho}{\omega \lambda} \right] \sin \alpha t$$

Le couple perturbateur dû à l'hystérésis seule peut devenir nul, voir même amortisseur, en augmentant la résistance intérieure ρ .

Il serait intéressant de vérifier la chose expérimentalement.

P. BOUCHFROT.

FLEXIONS DES PAROIS

dans les tuyaux de conduite de grand diamètre

— (SUITE) —

REPRÉSENTATION GRAPHIQUE

Dans la formule générale $M = \left(p R^2 + \frac{1}{2} \delta R^3 \right) Z$, le premier facteur est un coefficient constant, qui se calcule immédiatement dès que l'on connaît le rayon, le poids des parois et la densité du liquide contenu ($\delta = 1000$ pour l'eau).

On obtient les moments, par unité de longueur des parois, en multipliant par ce coefficient le terme Z qui ne contient plus que des fonctions trigonométriques de la variable α et de la constante définissant la position des appuis ou la largeur de la zone appuyée.

Pour un mode d'appui déterminé et une valeur définie de l'angle φ , nous pourrions étudier les variations du terme Z en fonction de α , en traçant la courbe représentative des valeurs successives de Z , rapportée à deux axes de coordonnées rectangulaires.

Nous porterons en abscisses les valeurs de α , mesurées en longueurs d'arc, l'axe des X représentant la circonférence développée d'une section de conduite. En ordonnées nous porterons les valeurs de Z .

Nous obtenons ainsi des courbes que l'on peut tracer une fois pour toutes, à une échelle commode, et que l'on peut ensuite utiliser dans toutes les études de canalisations, quels que soient leur diamètre et le poids des parois.

En comparant entre elles les courbes correspondant à une même disposition d'appuis, pour diverses valeurs de φ , on pourra se rendre compte de l'influence des variations de l'angle φ (variations de l'espacement transversal des appuis isolés, ou de la longueur d'une zone appuyée). Ces comparaisons se feront très simplement en superposant les courbes, et l'on en déduira la meilleure valeur de φ à adopter, suivant les conditions à remplir.

En superposant au contraire des courbes correspondant à des dispositions d'appuis différentes, pour une même valeur de φ , on aura l'influence propre du mode d'appui sur la répartition des flexions dans les parois.

TUYAU REPOSANT SUR DEUX APPUIS.

Considérons par exemple les quatre courbes correspondant à l'angle $\varphi = 30^\circ$, dans le cas d'un tuyau reposant sur deux appuis symétriques :

Courbe n° 1. Appuis simples fixes.

Courbe n° 2. Appuis simples mobiles horizontalement.

Courbe n° 3. Appuis simples à réaction radiale.

Courbe n° 4. Encastrement sur les appuis.

Nous avons inscrit sur ces courbes les valeurs des ordonnées Z pour des valeurs de α variant de 15° en 15° . L'origine des coordonnées est le point inférieur A de la section du tuyau.

Entre les appuis P P la courbe n° 4 se confond sensiblement avec l'axe des abscisses, les ordonnées des moments dans cette région étant extrêmement faibles à l'échelle du dessin.

Nous voyons que ces courbes présentent des points anguleux sur les appuis, qui sont les régions des plus grands moments, pour cette valeur de φ .

Avec les conventions de signes adoptées pour les moments, les valeurs négatives de Z sont celles qui correspondent aux flexions tendant à aplatir le tuyau. Elles ont été portées au-dessus de l'axe des X . On voit par l'aspect des courbes que les régions du tuyau qui seront aplaties sont celles des appuis et du sommet de la circonférence en B. Les autres parties sont au contraire renflées.

Les courbes indiquent la position des maxima et mini-