

Comment choisir un Régulateur automatique

(SUITE ET FIN)

Par E. JUILLARD, Ingénieur E. P. Z.

VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE

Nous avons enregistré expérimentalement, sur un régulateur des Ateliers Cuénod, les mouvements de l'organe de réglage (curseur du rhéostat) et l'allure de la tension.

Le régulateur utilisé est un appareil du type « Rex » semblable à l'appareil représenté par la fig. 13. Ses caractéristiques sont les suivantes :

- Durée spécifique de parcours..... $T_s = 0,02''$
- Décroissement de l'asservissement..... $\hat{\epsilon} = 0,6$
- Insensibilité..... $\epsilon = \pm 0,2 \%$

La machine réglée est une génératrice courant continu à excitation shunt, dont la constante de temps est de..... $T = 0,5''$

Le coefficient de répartition des résistances sur l'appareil à touches était de..... $\gamma = 0,65$

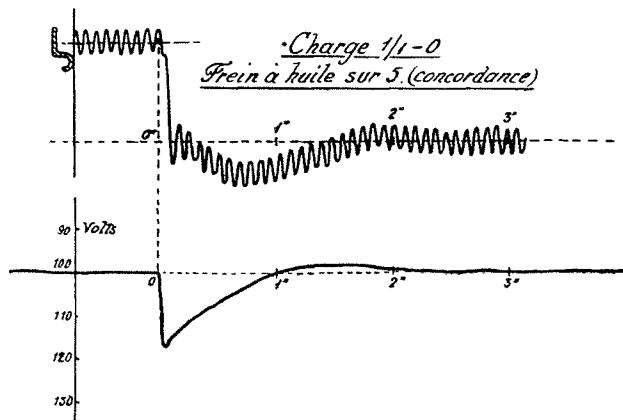


Fig. 22.

Les mouvements du curseur sont enregistrés mécaniquement par une commande rappelant celle des indicateurs des machines à vapeur, sur un tambour actionné à vitesse uniforme. La tension est prise par un enregistreur à plume dont la fréquence propre est suffisamment élevée pour que la courbe de tension soit reproduite fidèlement.

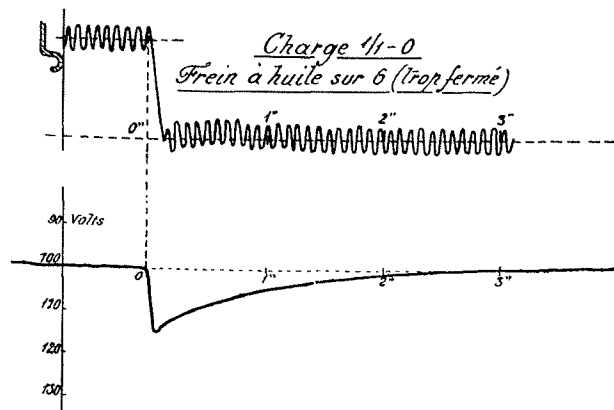


Fig. 23.

une résistance, et la charge est coupée instantanément par un interrupteur à rupture brusque.

Les diagrammes qui suivent montrent l'allure de la tension.

La ligne ondulée du curseur traduit la vibration propre, vibration dont nous avons parlé dans la description de l'appareil. Les positions moyennes (centre d'oscillations du curseur) avant et après la correction sont indiqués par le trait pointillé porté sur le diagramme.

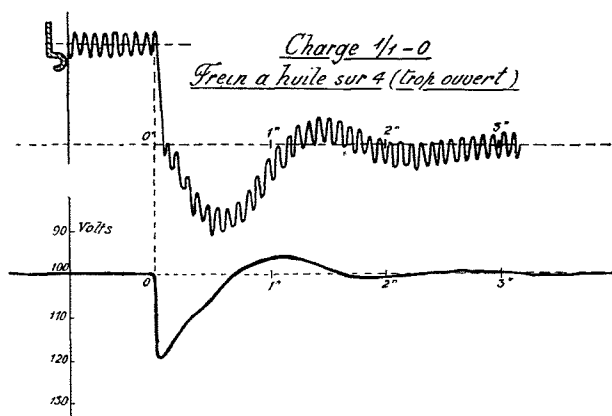


Fig. 24.

Le diagramme (fig. 22) donne le fonctionnement de l'appareil dans le cas de l'asservissement concordant. On remarquera l'accord entre le résultat expérimental et la forme calculée des courbes de fig. 18 et 19. La durée de la correction est d'environ 1,5'', c'est-à-dire trois fois la constante de temps de la machine.

Le diagramme (fig. 23) est pris avec le frein à huile trop fermé, donc $T_a > T$. La correction est ralentie.

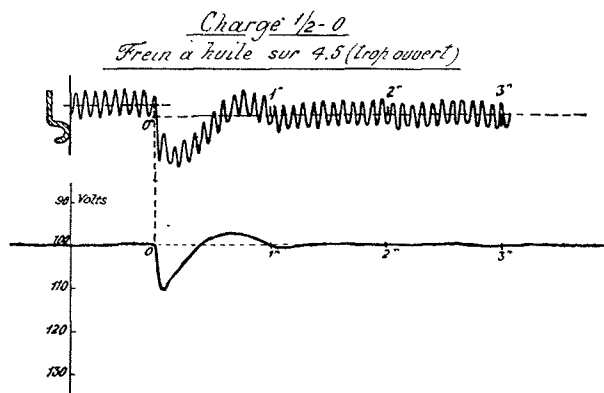


Fig. 25.

Les diagrammes (fig. 24 et 25) représentent la correction dans le cas du frein trop ouvert. $T_a < T$. On voit l'apparition d'oscillations plus nombreuses qui restent toutefois amorties.

Enfin le diagramme (fig. 26) donne l'enregistrement de la tension par voltmètre enregistreur industriel. Dans ce dernier cas, la génératrice en question fait le service force motrice d'un

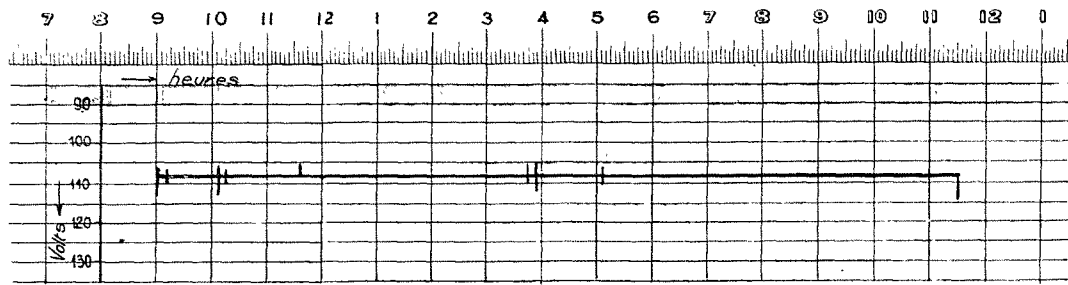


Fig. 26.

Deuxième cas. — Réglage par l'excitation d'une excitatrice.

ETABLISSEMENT DE L'EQUATION DE LA MACHINE

Envisageons encore le cas plus fréquent du réglage par l'excitation de l'excitatrice. Le courant i_e d'excitation produit dans l'induit de l'excitatrice une force électromotrice dont nous avons à soustraire la chute de tension d'induit pour obtenir la tension aux balais, c'est-à-dire aux bornes des inducteurs de l'alternateur. Comme l'excitation débite en somme sur un circuit à résistance constante, la tension aux balais est, en régime stationnaire, uniquement fonction de la force électromotrice, c'est-à-dire du courant d'excitation lui-même.

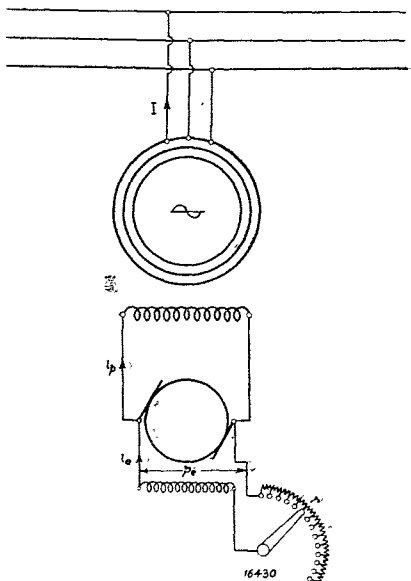


Fig. 27.

Nous pouvons donc assimiler la caractéristique externe de l'excitation, à résistance extérieure constante, à une sorte de caractéristique à vide, indépendante du temps. Cette assimilation est en défaut pendant les instants pendant lesquels le courant d'excitation principal varie avec le temps d'une manière rapide ; mais comme la chute de tension est toujours assez petite par rapport à la tension aux balais, l'écart reste négligeable et l'approximation est pratiquement toujours suffisante.

Enfin nous négligerons l'intensité d'excitation de l'excitatrice à côté du courant d'excitation des inducteurs de l'alternateur.

Lorsqu'on déplace le rhéostat d'excitation, le courant d'excitation de l'excitatrice est lié à la tension aux bornes par

$$(28) \quad L_e \frac{di_e}{dt} + i_e r_e = p_e$$

Cette même tension d'excitation existe aux bornes des inducteurs de l'alternateur et produit une variation du courant d'excitation principal.

$$(29) \quad L_p \frac{di_p}{dt} + i_p r_p = p_e$$

Le courant d'excitation principal crée la force électromotrice dans l'alternateur.

$$(30) \quad E = F(i_p)$$

Et de même le courant d'excitation de l'excitatrice crée la force électromotrice de l'excitation, ou sa tension aux balais d'après l'approximation faite :

$$(31) \quad p_e = f(i_e)$$

Les équations 30 et 31 sont donc les caractéristiques à vide de l'alternateur et externe de l'excitatrice. La tension aux balais de l'excitatrice varie évidemment dans des limites trop étendues pour que nous puissions assimiler sa caractéristique à une droite ; nous la représenterons dans les limites dans lesquelles elle est utilisée pratiquement par un arc de parabole et poserons :

$$(32) \quad p_e^2 = A^2 i_e$$

où A est une constante indépendante du courant d'excitation.

Nous avons à éliminer le courant d'excitation i_e et à exprimer le courant d'excitation principal i_p en fonction des résistances d'excitation.

Représentons par J tout le membre de gauche de l'éq.30.

$$(33) \quad J = L_p \frac{di_p}{dt} + i_p r_p$$

Et éliminons le courant i_e , entre les équations 28, 29 et 32.

Le résultat de cette élimination s'obtient aisément et donne :

$$(34) \quad \frac{2 L_e}{r_e} \frac{dJ}{dt} + J = \frac{A^2}{r_e}$$

Introduisons maintenant la valeur représentée par J et nous aurons

$$\frac{2 L_e}{r_e} \left[L_p \frac{d^2 i_p}{dt^2} + r_p \frac{di_p}{dt} \right] + L_p \frac{di_p}{dt} + i_p r_p = \frac{A^2}{r_e}$$

ou

$$(35) \quad \frac{2 L_e}{r_e} \frac{L_p}{r_p} \frac{d^2 i_p}{dt^2} + \left(\frac{2 L_e}{r_e} + \frac{L_p}{r_p} \right) \frac{di_p}{dt} + i_p = \frac{A^2}{r_e r_p}$$

Les quotients $\frac{L_e}{r_e} = T_e$ et $\frac{L_p}{r_p} = T_p$ représentent de nouveau les constantes de temps de l'excitatrice et de l'alternateur, et pour les mêmes raisons que précédemment, nous considérerons ces valeurs comme invariables et calculerons avec leurs moyennes.

Quant au terme $\frac{A^2}{r_e r_p}$, sa signification est simple. Si nous multiplions numérateur et dénominateur par le courant i_s stationnaire de l'excitatrice, courant qu'on obtient lorsqu'on séjourne assez longtemps sur la position du rhéostat d'excitation correspondant à la valeur r_e , le produit $A^2 i_s$ n'est autre chose que le carré de la tension aux balais, conformément à l'équation 32. Et le produit $i_s r_p$ au dénominateur est également égal à cette tension, puisque c'est

le produit du courant que produit cette tension dans la résistance r_e par la résistance elle-même. Donc ;

$$(36) \quad \frac{\Lambda^2}{r_e r_p} = \frac{\Lambda^2 i_s}{r_e i_s \cdot r_p} = \frac{p_e^2}{p_e r_p} = i_{ps}$$

qui n'est autre chose que le courant stationnaire produit par l'excitatrice dans les inducteurs de l'alternateur lorsque le rhéostat de réglage de celle-ci est maintenu à une valeur fixe assez longtemps pour que le courant ait le temps de se développer. i_{ps} détermine donc sans ambiguïté la position du rhéostat d'excitation. Et notre équation s'écrit enfin :

$$(37) \quad \frac{d^2 i_p}{dt^2} + \left(\frac{1}{2 T_e} + \frac{1}{T_p} \right) \frac{d i_p}{dt} + \frac{i_p}{2 T_e T_p} = \frac{i_{ps}}{2 T_e T_p}$$

Si, à titre de contrôle, on maintient i_{ps} invariable c'est-à-dire constant, l'équation s'intègre et donne le courant d'excitation principal i_p . Le résultat est une somme d'exponentielles. Au bout d'un temps assez long ces exponentielles disparaissent ; donc également leurs dérivés et il reste le résultat évident $i_p = i_{ps}$, qui signifie que le courant d'excitation a pris sa valeur stationnaire i_{ps} .

Tension de l'alternateur. — Comme précédemment, et pour les mêmes raisons, nous pouvons ici aussi admettre la dépendance linéaire de l'écart de tension Δ avec le courant d'excitation principal, et nous poserons :

$$\Delta = m (i_p - i_{po})$$

i_{po} étant le courant d'excitation principal de référence, c'est-à-dire pour lequel l'écart est nul et la tension a sa valeur normale de consigne. L'équation 37 s'écrit donc aussi

$$\frac{d^2 (i_p - i_{po})}{dt^2} + \left(\frac{1}{2 T_e} + \frac{1}{T_p} \right) \frac{d (i_p - i_{po})}{dt} + \frac{i_p - i_{po}}{2 T_e T_p} = \frac{i_{ps} - i_{po}}{2 T_e T_p}$$

et devient donc :

$$(38) \quad \frac{d^2 \Delta}{dt^2} + \left(\frac{1}{2 T_e} + \frac{1}{T_p} \right) \frac{d \Delta}{dt} + \frac{\Delta}{2 T_e T_p} = \frac{\Delta_s}{2 T_e T_p}$$

équation caractéristique de l'alternateur, c'est-à-dire de l'écart relatif Δ d'avec la tension de consigne, dans laquelle Δ_s est le paramètre de réglage et représente l'écart stationnaire correspondant à la position du rhéostat de champ.

On remarquera l'apparition du double de la constante de temps de l'excitatrice, due à la forme parabolique de la caractéristique.

EQUATION DE LA CORRECTION

Comme précédemment, nous avons à calculer au moyen de l'équation de l'alternateur (38) et de l'équation du régulateur (5) la valeur de l'écart Δ en fonction du temps et la valeur du déplacement ψ de l'organe de réglage. La résistance d'excitation étant commandée par le régulateur, nous avons ici aussi la liaison :

$$(39) \quad \Delta_s = -\gamma (\psi - \psi_0) = -\gamma x$$

en représentant par x la distance (exprimée en fraction de la course totale) qui sépare la position actuelle du frotteur de la position qu'il occupera une fois l'opération de réglage terminée. Nos deux équations s'écrivent donc :

$$(40) \quad \frac{d^2 \Delta}{dt^2} + \left(\frac{1}{2 T_e} + \frac{1}{T_p} \right) \frac{d \Delta}{dt} + \frac{\Delta}{2 T_e T_p} = \frac{-\gamma x}{2 T_e T_p}$$

et

$$(41) \quad \frac{d \Delta}{dt} + \frac{\Delta}{T_a} = T_s \frac{d^2 x}{dt^2} + \left(\varepsilon + \frac{T_s}{T_a} \right) \frac{dx}{dt}$$

Dérivons la deuxième équation par rapport au temps et additionnons cette nouvelle équation à l'équation (41) que nous multiplierons par un facteur constant λ dont nous disposerons ensuite :

$$(42) \quad \frac{d^2 \Delta}{dt^2} + \left(\lambda + \frac{1}{T_a} \right) \frac{d \Delta}{dt} + \frac{\lambda}{T_a} \Delta = T_s \frac{d^3 x}{dt^3} + \left(\frac{T_s}{T_a} + \varepsilon + \lambda T_s \right) \frac{d^2 x}{dt^2} + \lambda \left(\frac{T_s}{T_a} + \varepsilon \right) \frac{dx}{dt}$$

Le membre de gauche de l'équation (42) contient la même fonction de Δ que l'équation de l'alternateur (40) ; en égalant les coefficients des mêmes dérivées, nous conservons l'ordre 3 du terme de droite. Comme nous n'avons pas encore disposé de λ , ni de la constante de temps T_a de l'asservissement, nous pouvons donc poser :

$$(43) \quad \begin{array}{l} 1^{\text{er}} \text{ cas } T_a = T_p \quad \text{et } \lambda = \frac{1}{2 T_p} \\ 2^{\text{e}} \text{ cas } T_a = 2 T_p \quad \text{et } \lambda = \frac{1}{T_p} \end{array}$$

En rendant donc la constante de temps T_a de l'asservissement égale soit à celle de l'alternateur T_p , soit au double de celle de l'excitatrice $2 T_p$, nous réduisons l'ordre de l'équation de la correction, ce qui revient à opérer la correction suivant une loi plus simple. Comme précédemment nous désignerons ce cas spécial sous le nom de : *Asservissement concordant*, et résoudrons les équations dans cette hypothèse. Il est facile de montrer que ce choix correspond à la loi optima.

En effet, supposons d'abord un asservissement trop fermé, c'est-à-dire T_a très grand ; nous retompons dans le cas de l'asservissement quasi rigide, qui ralentit évidemment la correction. Supposons d'autre part T_a , la constante de temps de l'asservissement trop petite et poussons à l'extrême en faisant $T_a = 0$. L'équation du régulateur se réduit alors à :

$$\Delta = T_s \frac{dx}{dt}$$

et en introduisant cette valeur et ses dérivées dans l'équation de l'alternateur :

$$(44) \quad \frac{d^3 x}{dt^3} + \left(\frac{1}{T_p} + \frac{1}{2 T_e} \right) \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{1}{2 T_e T_p} \frac{dx}{dt} + \frac{\gamma x}{2 T_e T_p T_s} = 0$$

équation dont l'intégrale est une somme de 3 exponentielles. Les coefficients du temps t figurant à l'exposant sont donnés par l'équation caractéristique

$$r^3 + \left(\frac{1}{T_p} + \frac{1}{2 T_e} \right) r^2 + \frac{1}{2 T_e T_p} r + \frac{\gamma}{2 T_e T_p T_s} = 0$$

Tous les coefficients de cette équation étant positifs, l'équation admet une racine réelle et 2 racines conjuguées imaginaires. La solution comporte donc une exponentielle, dont l'exposant est certainement négatif puisque le terme indépendant est positif et une fonction sinusoidale dont l'amplitude est multipliée par l'exponentielle. Il importe de savoir si ce dernier exposant est positif ou négatif, en d'autres termes si l'oscillation est amortie ou pas. Le signe est celui du produit $C - AB$, en représentant l'équation par

$$r^3 + Ar^2 + Br + C = 0$$

$$C - AB = \frac{1}{2T_e T_p} \left[\frac{\gamma}{T_s} - \left(\frac{1}{T_p} + \frac{1}{2T_e} \right) \right]$$

Le résultat est immédiat et montre que si le régulateur est suffisamment rapide (T_s petit) et la répartition des résistances suffisamment concentrée (γ grand), la différence est positive et l'oscillation, d'amplitude *croissante*, ce qui évidemment est inadmissible pratiquement.

L'ordre de grandeur des coefficients est :

pour la durée spécifique de parcours	$T_s = 0,02''$
pour le coefficient de répartition	$\gamma = 0,5$
constante de temps d'un alternateur	$T_p = 2''$
— — — d'une excitatrice.....	$T_e = 0,5''$

et

$$\frac{0,5}{0,02} - \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{1} \right) = \text{positif.}$$

RÉSOLUTION DES EQUATIONS DANS LE CAS DE L'ASSERVISSEMENT CONCORDANT ET DANS L'HYPOTHESE D'UNE DURÉE SPECIFIQUE DE PARCOURS TRÈS PETITE.

Nous avons donc à intégrer les deux équations correspondant à chacun des cas $T_a = T_p$ ou $T_a = 2 T_e$.

$$(45) \frac{d^3x}{dt^3} + \left(\frac{1}{T_p} + \frac{1}{2T_e} + \frac{\delta}{T_s} \right) \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{1}{2T_e} \left(\frac{1}{T_p} + \frac{\delta}{T_s} \right) \frac{dx}{dt} + \frac{\gamma x}{2T_e T_p T_s} = 0$$

$$\frac{d^3x}{dt^3} + \left(\frac{1}{T_p} + \frac{1}{2T_e} + \frac{\gamma}{T_p} \right) \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{1}{T_p} \left(\frac{1}{2T_e} + \frac{\delta}{T_s} \right) \frac{dx}{dt} + \frac{\gamma x}{2T_e T_p T_s} = 0$$

L'intégration de ces équations est ramenée au calcul des racines d'une équation de troisième degré. En exprimant ces racines et en simplifiant le résultat en laissant de côté les puissances supérieures de T_s en regard de la plus basse, on arrive à la solution générale suivante qui s'applique aux deux équations ci-dessus

$$(46) \quad x = C e^{-\frac{\delta}{T_s} t} + (C_1 + C_2 t) e^{-\frac{1}{3} \left(\frac{1}{T_p} + \frac{1}{2T_e} \right) t}$$

Les constantes d'intégration s'évaluent par les conditions aux limites suivantes :

Pour $t = 0$, $x = x_i =$ position initiale du curseur qu'il occupait au moment où la perturbation s'est produite; et

$$\frac{dx}{dt} = - \frac{\gamma x_i}{T_s}$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{\gamma^2 x_i}{T_s^2}$$

qui se déduisent des équations du régulateur en traduisant le fait qu'au départ, le régulateur était immobile et la lame d'asservissement occupait sa position complètement détendue. On obtient alors :

$$(47) \quad x = x_i \left[\frac{\gamma}{\delta} e^{-\frac{\delta}{T_s} t} - \left(\frac{\gamma}{\delta} - 1 \right) \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{1}{T_p} + \frac{1}{2T_e} \right) t \right] e^{-\frac{1}{3} \left(\frac{1}{T_p} + \frac{1}{2T_e} \right) t} \right]$$

Cette forme rappelle le résultat obtenu dans le cas du réglage direct. Le curseur part également au début avec toute sa vitesse, pour revenir lentement en arrière, au prorata de la variation des courants d'excitation dans les inducteurs de l'excitatrice et de

l'alternateur. La fig. 28 donne ce mouvement pour différentes valeurs de l'asservissement δ .

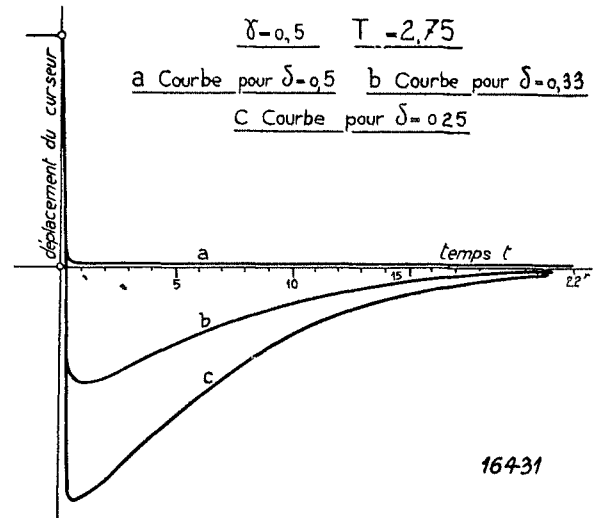


Fig. 28.

Cette formule est importante parce qu'elle permet de dimensionner l'étendue des résistances de champ. Si l'on envisage une décharge totale de pleine charge à zéro, la partie A — O représente la marge nécessaire pour couvrir les états stationnaires de pleine charge (A) à marche à vide O et le dépassement O B est la marge nécessaire pour le surrégime. — La valeur O B est très sensiblement égale à

$$OB = \left(\frac{\gamma}{\delta} - 1 \right)$$

dépendant donc du coefficient de répartition sur le cadran et surtout du décrement d'asservissement.

Il est évident que si cette marge est insuffisante, le curseur du rhéostat stationnera à fin de course et le réglage sera ralenti. C'est assez fréquemment le cas, surtout dans le sens de la charge, parce qu'on est alors limité par la résistance propre des bobines inductrices.

ALLURE DE LA TENSION PENDANT L'OPÉRATION DE RÉGLAGE

Pour l'établir, il nous suffit de porter la valeur de x ainsi calculée dans l'équation 40) et de l'intégrer. La solution générale, eu égard aux approximations faites, donne :

$$(48) \quad \Delta = C_1 e^{-\frac{it}{T_p}} + C_2 e^{-\frac{t}{2T_e}} + (A + Bt) e^{-nt}$$

expression dans laquelle C_1 et C_2 sont des constantes d'intégration ; A, B et n des valeurs fonctions des coefficients de l'équation différentielle.

En exprimant par les conditions limites que l'alternateur était, à l'instant précédant immédiatement la perturbation, en régime stationnaire, on obtient :

pour $t = 0 \quad \Delta = \Delta_i =$ valeur initiale de l'écart, et

$$\frac{d\Delta}{dt} = 0$$

Enfin, en introduisant la moyenne arithmétique des deux constantes de temps

$$T = \frac{1}{2} (T_p + 2 T_2)$$

et en posant

$$(49) \quad T_p = T (1 + K) \quad 2 T_2 = T (1 - K)$$

et en supposant, ce qui est généralement le cas, que K est assez petit, le résultat prend la forme simple suivante, plus claire :

$$(50) \quad \Delta = \Delta_1 \left(\frac{\gamma}{\delta} - 1 \right) \left(27 - \frac{6t}{T} \right) e^{-\frac{2t}{3T}} - \left[\left(27 \frac{\gamma}{\delta} - 28 \right) + \left(\frac{3\gamma}{\delta} - 1 \right) \frac{t}{T} \right] e^{-\frac{t}{T}}$$

résultat remarquable en ce sens qu'il ne dépend plus de la durée spécifique de parcours T_s du régulateur. Ici également la durée de la correction, mesurée sur l'allure de la tension aux bornes, ne dépend plus du régulateur, pourvu que celui-ci soit assez rapide. On voit en particulier l'influence énorme qu'ont les constantes de temps de deux machines et l'intérêt qu'il y a à les réduire le plus possible.

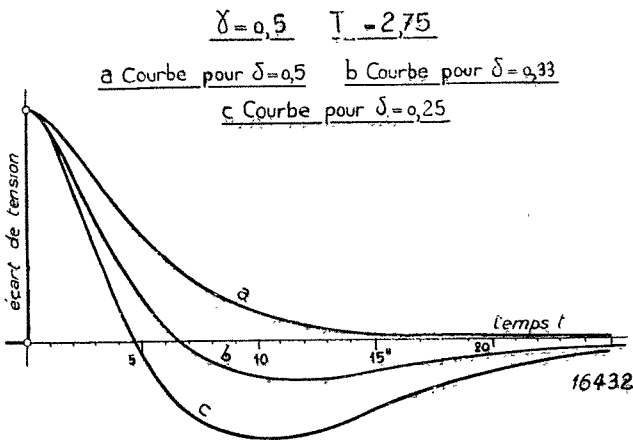


Fig. 28.

TRADUCTION GRAPHIQUE

Les courbes de fig. 29 donnent les valeurs calculées du déplacement x et de l'écart γ pour un alternateur de 10.000 KVA et une excitatrice de 100 KVA dans lesquels les constantes moyennes de temps sont respectivement :

$$T_p = 2,5'' \quad \gamma \quad T_v = 1,5''$$

La constante moyenne T se trouve égale à $\frac{1}{2} (2,5 + 3) = 2,75''$.

Les courbes sont établies pour différentes valeurs du décroissement d'asservissement δ et un coefficient de répartition. $\gamma = 0,5$.

Si on limite la durée de la correction au temps qu'il faut pour que l'écart initial soit réduit à une valeur donnée égale par exemple à $\pm 1\%$ de la tension normale, il est évident que ce temps sera

d'autant plus long que l'écart initial sera plus grand. Il faut donc au régulateur (il serait plus exact de dire à l'alternateur) un temps de correction d'autant plus grand que la variation de charge est plus forte. Si par contre on demande que l'écart initial soit réduit dans une proportion donnée, par exemple au 1/10, il faudra pour cela toujours le même temps, dépendant uniquement des machines

RÉSUMÉ ET CONCLUSION

Après avoir rappelé les principes fondamentaux du réglage, nous a vons établi quelles étaient les grandeurs intéressantes dans l'appréciation d'un régulateur automatique, à savoir :

- 1° Son insensibilité ;
- 2° Sa durée spécifique de parcours ;
- 3° Son asservissement, c'est-à-dire sa constante de temps et son décrément.

Nous avons ensuite appliqué ces principes à l'étude d'un régulateur et avons choisi comme exemple le régulateur à pression d'huile type « Rex », des Ateliers H. Cuénod à Genève (Suisse).

Nous avons appliqué ce régulateur au réglage de la tension d'une machine électrique par variation des résistances de champ et cela dans le cas du réglage de l'excitation directe et dans le cas du réglage de l'excitation de l'excitatrice.

Nous avons établi suivant quelle loi se déplace l'organe de réglage et comment on pouvait évaluer l'étendue de la marge nécessaire des résistances de champ.

Enfin nous avons établi la loi suivant laquelle la tension reprend sa valeur de régime ou de consigne, et avons montré que la durée de cette correction ne dépend essentiellement que des constantes de temps des machines, pourvu que le régulateur soit du type rapide, ce qui est le cas du régulateur « Rex ». Nous en avons conclu que la durée de la correction serait exactement la même pour tout autre type d'appareil à action rapide. Les relevés pris avec un appareil « Rex » confirment les résultats du calcul.

Restent donc à prendre en considération, puisque la seule durée spécifique de parcours n'a pas l'importance qu'on aurait pu croire, les considérations de construction, de robustesse et de sécurité de fonctionnement. Un régulateur automatique ne peut pas être assimilé à un appareil de mesure quelconque; l'avarie d'un voltmètre ne gêne nullement une exploitation, tandis que la mise hors service d'un régulateur automatique peut amener des perturbations particulièrement graves.

La question du réglage automatique est évidemment loin d'être épuisée. Nous espérons cependant avoir montré quels sont les points à prendre en considération dans l'appréciation d'un appareil, et de quelle façon le fonctionnement de cet appareil pouvait être étudié en corrélation avec le système auquel il est appliqué. Nous espérons par là aussi avoir donné au constructeur de régulateurs, aussi bien qu'à celui qui les utilise une méthode d'investigation qui leur permettra de perfectionner ces engins et les résultats qu'on est en droit d'en attendre.

ERRATUM

Par suite d'un accident qui s'est produit au cours du tirage du précédent numéro, il manque sur certains exemplaires le cliché fig. 20, que nous reproduisons ci-contre.

