

DÉMARRAGE AUTOMATIQUE D'UN GROUPE AUXILIAIRE D'ALIMENTATION

Par

F. CSÁKI et T. KELEMEN

Chaire de Machines Électriques Spéciales
et d'Automatique de l'Université Technique de Budapest

(Reçu le 6 janvier 1961)

Une exigence qui s'impose dans maints domaines de l'industrie, du transport et des télécommunications est qu'en cas d'interruption du réseau d'alimentation, l'installation en fonctionnement, ou du moins les parties les plus importantes de cette installation, soient alimentées par le groupe auxiliaire d'alimentation de l'établissement. Suivant la nature de celui-ci, des exigences différentes se présentent pour la durée de la mise en circuit du groupe. Au cas où il peut y avoir une interruption de quelques minutes, le groupe auxiliaire d'alimentation peut être entraîné par une machine à combustion.

Les installations de sûreté des chemins de fer prescrivent des règles très rigoureuses; après l'interruption du réseau d'alimentation, la source auxiliaire de courant doit être mise en circuit en quelques secondes. Dans le cas contraire, les installations de signalisation et de sûreté sont sujettes à des perturbations pouvant entraîner la paralysie du trafic, et même, par un concours de circonstances défavorables, des collisions et des accidents graves. Par suite de la brièveté du temps prévu pour la mise en circuit, on choisit d'ordinaire la solution qui consiste à charger constamment une batterie d'accumulateurs à partir du réseau d'alimentation à courant alternatif, à l'aide d'un groupe formé d'un moteur synchrone et d'une génératrice à courant continu, ou au moyen d'une commutatrice. Ainsi, lors de l'interruption du réseau d'alimentation, le groupe fonctionnant à la vitesse normale peut être utilisé pour ainsi dire sans retard, car le groupe convertit l'énergie du courant continu de la batterie d'accumulateurs en énergie de courant alternatif: la machine (ou côté) à courant continu fonctionne comme moteur, et la machine (ou côté) à courant alternatif comme alternateur.

L'avantage incontestable de la solution indiquée réside dans la brièveté du temps nécessaire à la mise en circuit. Mais elle présente aussi un grave inconvénient, du fait qu'il faut faire marcher sans arrêt la commutatrice ou le groupe convertisseur, ce qui entraîne l'usure et une perte constante d'énergie. Du point de vue technique autant qu'économique, il est donc à désirer que le groupe convertisseur ne soit mis en marche qu'au moment voulu, c'est-à-dire lorsque le réseau d'alimentation est interrompu. Cependant, dans ce cas, il doit faire très rapidement la relève de ce dernier.

C'est dans ce sens que la Chaire de Machines Électriques Spéciales et d'Automatique de l'Université Technique de Budapest, sollicitée par une firme industrielle, a tenté la solution du problème.

1. But des recherches

L'industrie hongroise s'est chargée de la construction et de la mise au point de l'installation de sûreté complète des stations de chemin de fer chinoises de Sian et de You-Ko. C'était dans le cadre de cette importante tâche d'exportation qu'il fallait trouver une solution moderne et sûre pour la source auxiliaire de courant. La batterie d'accumulateurs en plomb de l'installation se composant de 77 éléments, avait une tension d'environ 150 V, et pouvait supporter des chocs de courant de 600 A au maximum. La puissance de courant alternatif requise par l'installation de sûreté est d'environ 18 kVA, la variation de tension permise de $\pm 10\%$ au maximum.

Le but des recherches était de déterminer si, dans les conditions indiquées, on pouvait assurer — et si oui, de quelle manière — le démarrage rapide du groupe auxiliaire d'alimentation composé d'un moteur à courant continu et d'un alternateur. Le groupe démarre à vide, et lorsque l'alternateur atteint les 80% de sa tension nominale, la charge se fait automatiquement. Cet état de charge doit être obtenu par le groupe en deux secondes tout au plus, car pendant cette durée comptée à partir de l'interruption du réseau d'alimentation, les relais à temps restent en position de «circuit fermé», c'est-à-dire que le branchement sur la source auxiliaire de courant assure la continuité du fonctionnement sans à-coups. Si le groupe auxiliaire d'alimentation n'atteint pas cet état de charge pendant le temps requis, les relais ouvrent le circuit et le trafic ferroviaire se trouve interrompu.

2. Données des machines choisies et points de vue spéciaux de leur construction

Le but indiqué à l'article 1. pose des exigences accrues à l'égard des machines du groupe. En ce qui concerne les machines requises pour cette tâche, le choix s'est porté sur les produits de la Fabrique de Machines Électriques Spéciales. Le fait que les machines choisies et transformées ont pleinement satisfait aux exigences, témoigne incontestablement de leur bonne qualité.

Voici les données du groupe de machines en question:

Moteur à courant continu: type EMH 56L4, tension nominale $U = 150$ V, puissance $P_n = 18$ kW, nombre de tours $n_n = 1500$ t/mn.

Alternateur: type CA₂G/4, tension $3 \times 380/220$ V, à point neutre accessible, puissance 18 kVA, facteur de puissance $\cos \varphi = 0,8$, fréquence 50 p/s.

2.1. Exécution des enroulements inducteurs

Pour obtenir un démarrage et une excitation rapides, les enroulements inducteurs des machines doivent être exécutés d'une manière spéciale.

L'enroulement d'excitation shunt du *moteur à courant continu* — même lorsque celui-ci est hors service — est branché en permanence à travers une résistance en série, ce qui assure la constance du flux inducteur de la machine. La valeur de la résistance (court-circuitée au moment du démarrage) est telle que les 75 % environ du courant inducteur nominal parcourent l'enroulement. De cette manière, l'échauffement pendant l'état d'inexploitation est réduit à peu près de moitié, en même temps que le flux inducteur de la machine atteint les 85 % environ de sa valeur nominale. Au moment du démarrage, l'enroulement inducteur reçoit la tension complète, et ainsi le flux inducteur s'élève également à sa valeur nominale. Le démarrage est encore facilité par l'enroulement inducteur en série du moteur à courant continu.

L'*alternateur* est à autoexcitation, avec induit mobile. A l'origine, le collecteur est pourvu de 4 balais, dont deux reliés à l'enroulement inducteur de base, et les deux autres à l'enroulement compound. C'est l'enroulement compound qui assure en premier lieu le réglage de l'excitation pour que la tension aux bornes de la machine soit constante.

Selon le but de la recherche, le groupe doit être en état de charge en 2 secondes, ce qui signifie naturellement que l'alternateur doit s'exciter pendant ce laps de temps. Étant donné qu'il s'agit d'un alternateur à autoexcitation, le processus d'excitation ne pourrait s'engager qu'après le démarrage, ce qui amènerait une nouvelle perte de temps. Pour pouvoir l'éviter, le système d'excitation de l'alternateur a été modifié de telle façon que le réglage de l'excitation normale assurant une tension constante continue à fonctionner d'une manière satisfaisante. A ces fins, les balais de l'excitation de base ont été enlevés du collecteur, et l'enroulement inducteur a été modifié de manière qu'il puisse être branché immédiatement sur l'accumulateur fournissant la tension d'alimentation du système. Au moment du démarrage du groupe, on met en circuit l'enroulement qui assure l'excitation de base de l'alternateur, de sorte que le processus d'excitation est achevé pendant la durée du démarrage. De cette manière, l'état de charge du groupe est déterminé uniquement par la durée de démarrage. Malgré la modification indiquée, la tension de l'alternateur ne diffère tout au plus que de $\pm 5\%$ de la tension nominale, indépendamment de la mesure de la charge.

2.2. Calcul approximatif des conditions de démarrage

Pour que l'alternateur soit en état de charge en 2 secondes, il est à désirer que le groupe atteigne le nombre de tours nominal en un temps plus court, par exemple en 1,8 s.

La vitesse angulaire au nombre de tours nominal est:

$$\omega_n = \frac{2\pi 1500}{60} = 157 \text{ s}^{-1}.$$

Si l'on suppose en première approximation une accélération uniforme, l'accélération angulaire est:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{157}{1,8} = 87,2 \text{ s}^{-2}.$$

Le moment d'inertie du groupe est, d'après les données de construction précédentes:

$$\Theta = 0,085 \text{ kgms}^2.$$

Ainsi, le couple nécessaire est:

$$M = \Theta\varepsilon = 0,085 \cdot 87,2 = 7,4 \text{ mkg}.$$

La valeur obtenue est sensiblement inférieure à celle du couple nominal du moteur

$$\left(M_n = 975 \left[\frac{\text{mkg}}{\text{kWmin}} \right] \frac{18 [\text{kW}]}{1500 [\text{min}^{-1}]} = 11,7 \text{ mkg} \right),$$

il paraît donc probable que le démarrage se termine en temps voulu.

3. Examen des conditions de démarrage et détermination détaillée de la résistance en série

En examinant les conditions de démarrage, nous nous étions proposé d'établir s'il fallait avoir une résistance de démarrage ou une bobine d'inductance — et si oui, de quelle grandeur — pour réduire la pointe du courant de démarrage à la valeur prescrite, et si, par l'utilisation de cette résistance de démarrage (ou de cette bobine d'inductance), le processus de démarrage se terminerait en temps voulu.

3.1. Equations différentielles et leur solution

Le démarrage du groupe se fait en branchant, au moment $t = 0$, la tension U du réseau (de l'accumulateur), sur les bornes de l'induit du moteur au préalable nominalelement excité. De la sorte, nous avons les *équations différentielles suivantes* (avec les notations de la fig. 1):

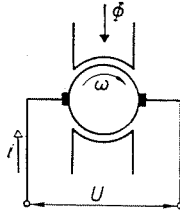


Fig. 1. Schéma général du moteur

A) Equation cinétique mécanique:

$$M_a = M_r + \Theta \frac{d\omega}{dt}, \quad (1)$$

c'est-à-dire que le couple M_a de l'induit du moteur est en équilibre avec le couple résistant M_r et le couple exigé par suite de l'inertie $\Theta \frac{d\omega}{dt}$.

B) Équation de tension électrique:

$$U = Ri + L \frac{di}{dt} + E, \quad (2)$$

c'est-à-dire que l'équilibre avec la tension aux bornes du réseau U est maintenu par la chute de tension ohmique Ri et inductive $L \frac{di}{dt}$, ainsi que par la force contre-électromotrice E .

L'expression de la force contre-électromotrice est, comme on sait:

$$E = \frac{z}{a} pn \Phi, \quad (3)$$

- z — étant le nombre des conducteurs sur la surface externe de l'induit
- $2a$ — le nombre de voies d'enroulement,
- $2p$ — le nombre de pôles de la machine,
- n — la vitesse de rotation, et
- Φ — le flux inducteur émanant d'un pôle.

Si à présent nous remplaçons la vitesse de rotation par la vitesse angulaire, nous avons

$$E = \frac{z}{a} \frac{p}{2\pi} \omega \Phi = K\omega, \quad (4)$$

où $K = \frac{z}{a} \frac{p}{2\pi} \Phi$ est constant, car pour plus de simplicité nous pouvons considérer le flux comme constant pendant le processus de démarrage.

La puissance intérieure du moteur est

$$P = Ei = M_a \omega ,$$

qui donne selon l'équation (4), le couple

$$M_a = \frac{Ei}{\omega} = Ki . \quad (5)$$

Étant donné que la charge est connectée sur l'alternateur lorsque le démarrage est presque entièrement terminé, nous pourrions négliger dans nos calculs ultérieurs le couple résistant M_r ; ainsi, pendant le démarrage

$$M_r = 0 . \quad (6)$$

Compte tenu des relations (4) à (6), nos équations de base se présentent sous la forme suivante:

$$Ki = \Theta \frac{d\omega}{dt} , \quad (7)$$

$$U = Ri + L \frac{di}{dt} + K\omega . \quad (8)$$

Le meilleur moyen de résoudre le système d'équations différentielles (7)–(8) nous est donné par l'application de la transformation Laplace. Nous omettrons ici les détails de la déduction.*

Introduisons les notations suivantes:

$$\varrho = \frac{R}{2L} \text{ (coefficient d'amortissement),}$$

$$\Omega_0 = \frac{K}{\sqrt{L\Theta}} \text{ (fréquence circulaire propre du groupe),}$$

$$\Omega = \sqrt{\Omega_0^2 - \varrho^2}, \text{ si } \varrho < \Omega_0 \text{ (cas périodique),}$$

$$A = \sqrt{\varrho^2 - \Omega_0^2}, \text{ si } \varrho > \Omega_0 \text{ (cas a périodique).}$$

Étant donné qu'avant le moment du démarrage (de la mise en circuit), le groupe est arrêté et l'induit n'est pas parcouru par le courant, on a

$$\omega_0 = 0 \quad \text{et} \quad i_0 = 0 .$$

* Pour plus de détails, v. K. W. WAGNER: Operatorenrechnung und Laplacesche Transformation, J. A. Barth Verlag, Leipzig, 2^e édition, 1950, p. 80.

Supposons que la tension de la batterie d'accumulateurs est constante pendant tout le processus du démarrage:

$$U = \text{const.} = U_0.$$

Ce qui donne, comme *solution du système d'équations différentielles* (solution pouvant être facilement contrôlée par différenciation et substitution):

a) *Pour le cas périodique*

vitesse angulaire:

$$\omega = \frac{U_0}{K} \left[1 - e^{-\rho t} \left(\frac{\rho}{\Omega} \sin \Omega t + \cos \Omega t \right) \right], \quad (9)$$

courant:

$$i = \frac{U_0}{L\Omega} e^{-\rho t} \sin \Omega t. \quad (10)$$

b) *Pour le cas apériodique*

vitesse angulaire:

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{U_0}{K} \left[1 - e^{-\rho t} \left(\frac{\rho}{A} \text{sh } At + \text{ch } At \right) \right] = \\ &= \frac{U_0}{K} \left\{ 1 - \left[\frac{\rho + A}{2A} e^{-(\rho-A)t} - \frac{\rho - A}{2A} e^{-(\rho+A)t} \right] \right\}, \end{aligned} \quad (11)$$

courant:

$$i = \frac{U_0}{LA} e^{-\rho t} \text{sh } At = \frac{U_0}{2LA} [e^{-(\rho-A)t} - e^{-(\rho+A)t}]. \quad (12)$$

3.2. Détermination de la pointe de courant

La solution étant connue, déterminons en premier lieu la valeur maximum du courant. D'après la loi des valeurs extrêmes, la valeur du courant atteint son maximum là où $\frac{di}{dt} = 0$.

Ainsi on a

a) *Pour le cas périodique*, par différenciation de l'équation (10) selon le temps:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_0}{L\Omega} (-\rho e^{-\rho t} \sin \Omega t + \Omega e^{-\rho t} \cos \Omega t) = 0,$$

d'où

$$\text{tg } \Omega t = \frac{\Omega}{\rho},$$

donc

$$t = \frac{1}{\Omega} \text{arc tg } \frac{\Omega}{\rho} = t_m. \quad (13)$$

Nous avons désigné par t_m le moment où se présente la pointe de courant i_m . Ainsi, d'après l'équation (10), la valeur maximum du courant est

$$i_m = \frac{U_0}{L\Omega} e^{-\rho t_m} \sin \Omega t_m, \quad (14)$$

où la valeur de t_m est donnée par l'équation (13).

b) *Pour le cas apériodique*, par différenciation de l'équation (12) selon le temps:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_0}{2LA} [-(\rho - A) e^{-(\rho - A)t} + (\rho + A) e^{-(\rho + A)t}] = 0,$$

d'où

$$t_m = \frac{1}{2A} \ln \frac{\rho + A}{\rho - A}. \quad (15)$$

La pointe de courant est donc, d'après (12)

$$i_m = \frac{U_0}{2LA} [e^{-(\rho - A)t_m} - e^{-(\rho + A)t_m}], \quad (16)$$

où la valeur de t_m est donnée par l'équation (15).

3.3. *Calculs numériques*

Déterminons à présent les données concrètes nécessaires pour le calcul: Tension de la batterie d'accumulateurs

$$U_0 = 150 \text{ V.}$$

Courant d'induit nominal du moteur

$$I_n = \frac{18000}{150} = 120 \text{ A.}$$

La résistance du circuit d'induit du moteur, d'après des données de construction de la fabrique

$$R_a = 0,0225 \text{ ohm.}$$

Supposons que la longueur de la ligne de connexion extérieure est de 20 m, sa section transversale de 50 mm², et la matière utilisée du cuivre. Sa résistance sera donc

$$R_l = \rho_{cu} \frac{l}{q} = \frac{1}{56} \frac{20}{50} \cong 0,0072 \text{ ohm} .$$

La résistance du circuit principal complet

$$R'_a = R_a + R_l = 0,0225 + 0,0072 \cong 0,03 \text{ ohm} .$$

La réactance de l'induit sera, d'après les données de construction de la fabrique

$$X_a = 0,095 \text{ ohm},$$

d'où

$$L_a = \frac{0,095}{314} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ H} .$$

La réactance de la ligne de connexion extérieure, calculée avec la valeur prise habituellement pour les câbles (0,1 ohm/km)

$$X_l = 0,1 \cdot 0,02 = 0,002 \text{ ohm}.$$

Par rapport à la réactance de l'induit, cette valeur est négligeable. Ainsi, l'inductance du circuit principal complet est:

$$L \cong L_a = 3 \cdot 10^{-4} \text{ H} .$$

La vitesse angulaire nominale:

$$\omega_n = 157 \text{ s}^{-1},$$

d'où la valeur de la constante K

$$K = \frac{U_0}{\omega_n} = \frac{150}{157} \left[\frac{\text{V}}{\text{s}^{-1}} \right] = 0,995 \text{ Vs} .$$

Enfin le moment d'inertie du groupe

$$\theta = 0,085 \text{ kgms}^2 \cong 0,85 \text{ Ws}^3.$$

Calculons tout d'abord la valeur qu'aura la pointe de courant si nous branchons directement l'armature du moteur sur la tension de l'accumulateur, sans résistance en série (ou sans bobine d'inductance).

On aura

$$R = 0,03 \text{ ohm},$$

$$L = 3 \cdot 10^{-4} \text{ H},$$

donc

$$\Omega_0 = \frac{K}{\sqrt{L\theta}} = \frac{0,955[\text{Vs}]}{\sqrt{3 \cdot 10^{-4}[\text{H}] \cdot 0,85[\text{Ws}^3]}} = 59,7 \text{ s}^{-1}.$$

$$\varrho = \frac{R}{2L} = \frac{0,03[\text{ohm}]}{2 \cdot 3 \cdot 10^{-4}[\text{H}]} = 50 \text{ s}^{-1}.$$

Puisque $\varrho < \Omega_0$, nous avons à faire à un cas périodique, et ainsi

$$\Omega = \sqrt{\Omega_0^2 - \varrho^2} = \sqrt{59,7^2 - 50^2} = 32,7 \text{ s}^{-1},$$

et

$$\frac{U_0}{L\Omega} = \frac{150[\text{V}]}{3 \cdot 10^{-4}[\text{H}] \cdot 32,7[\text{s}^{-1}]} = 15300 \text{ A}.$$

L'expression du courant sera d'après l'équation (10)

$$i = \frac{U_0}{L\Omega} e^{-\varrho t} \sin \Omega t = 15300 e^{-50t} \sin 32,7t.$$

Le moment de la pointe de courant sera, d'après l'équation (13):

$$t_m = \frac{1}{\Omega} \arctg \frac{\Omega}{\varrho} = \frac{1}{32,7[\text{s}^{-1}]} \arctg \frac{32,7}{50} = 0,01775 \text{ s}.$$

Et la valeur de la pointe de courant, d'après l'équation (14):

$$i_m = \frac{U_0}{L\Omega} e^{-\varrho t_m} \sin \Omega t_m = 15300 e^{-0,888} \sin 0,58 = 3460 \text{ A}.$$

La pointe de courant atteint une valeur inadmissible. Pour la réduire, la solution la plus conforme serait l'utilisation d'une bobine d'inductance de valeur suffisante. En effet, celle-ci pourrait être connectée d'une façon permanente dans le circuit d'induit, de sorte qu'il ne faudrait pas se servir d'un contacteur électromagnétique pour court-circuiter la résistance de démarrage.

Les calculs que nous venons de décrire en détail ont été répétés, avec une même valeur de R , pour quatre valeurs différentes de L .

Dans le tableau 1, nous avons résumé les résultats obtenus, en omettant les détails. Dans la dernière ligne du tableau nous avons également indiqué la durée de démarrage T_d qui, avec une bonne approximation, est le quadruple de la constante de temps

$$T_d \cong 4 T. \quad (17)$$

Tableau 1

R, ohm	0,03				
L, H	$3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$
Ω_0 , s	59,7	32,7	18,9	10,35	5,97
ϱ , s	50,0	15,0	5,0	1,5	0,5
Ω , s	32,7	29,1	18,2	10,25	5,94
A, s	—	—	—	—	—
$\frac{U_0}{L\Omega}$, A	15300	5150	2750	1465	842
$\frac{U_0}{LA}$, A	—	—	—	—	—
t_m , s	0,01775	0,0379	0,071	0,139	0,25
i_m , A	3460	2590	1857	1173	741
T_d , s	0,08	0,267	0,8	2,67	8,0

La valeur de la constante de temps est, dans le cas périodique

$$T = \frac{1}{\varrho} , \quad (18)$$

tandis que dans le cas apériodique, elle est, avec une bonne approximation

$$T = \frac{1}{\varrho - A} \quad (19)$$

(la plus grande des deux constantes de temps).

Ainsi la durée du démarrage sera, dans le cas périodique

$$T_d \cong \frac{4}{\varrho} , \quad (20)$$

et dans le cas apériodique

$$T_d \cong \frac{4}{\varrho - A} . \quad (21)$$

Dans les rubriques du tableau 1 encadrées d'un trait plein, nous voyons que la pointe de courant n'a pas pu être réduite aux 600 A prescrits, même

avec une bobine d'inductance de $3 \cdot 10^{-2}$ H, alors que la durée du démarrage s'élèverait à 8 s avec cette bobine. Examinons donc les résultats pouvant être obtenus en augmentant la résistance du circuit d'induit par la mise en circuit d'une résistance en série.

Prenons $R = 0,1$ ohm comme valeur totale de la résistance du circuit obtenue par adjonction d'une résistance en série. Les résultats du calcul répété avec cette valeur sont donnés par le tableau 2.

Tableau 2

R , ohm	0,1				
L , H	$3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$
Ω_0 , s	59,7	32,7	18,9	10,35	5,97
q , s	166,0	50,0	16,6	5,0	1,66
Ω , s	—	—	8,9	9,05	5,72
A , s	154,9	37,75	—	—	—
$\frac{U_0}{L\Omega}$, A	—	—	5620	1660	874
$\frac{U_0}{LA}$, A	3220	3970	—	—	—
t_m , s	0,011	0,0261	0,0553	0,118	0,225
i_m , A	1385	1240	1055	806	578
T_d , s	0,3603	0,327	0,24	0,8	2,41

L'évaluation des rubriques encadrées d'un trait plein montre qu'avec une bobine d'inductance de $3 \cdot 10^{-2}$ H, la pointe de courant a déjà une valeur admissible, mais que la durée du démarrage est toujours trop longue.

C'est pourquoi nous répétons les calculs en prenant un circuit d'induit ayant une résistance totale de $R = 0,3$ ohm. Les résultats figurent au tableau 3.

Selon la partie encadrée d'un trait plein du tableau 3, on constate que, pour une résistance totale de $R = 0,3$ ohm du circuit d'induit, le maximum du courant est inférieur à la valeur prescrite dans le cas de toutes les inductivités examinées, et que la durée du démarrage reste au-dessous de 2 s. Il en résulte que l'emploi de la bobine d'inductance est inutile, puisque nous pouvons satisfaire aux exigences par le seul emploi de la résistance en série (v. la 1^e colonne).

Tableau 3

R , ohm	0,3				
L , H	$3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$
Ω_0 , s	59,7	32,7	18,9	10,35	5,97
q , s	500,0	150,0	50,0	15,0	5,0
Ω , s	—	—	—	—	3,25
A , s	496,4	146,4	46,2	10,85	—
$\frac{U_0}{L\Omega}$, A	—	—	—	—	1540
$\frac{U_0}{LA}$, A	1010	1025	1080	1382	—
t_m , s	0,00556	0,015	0,0351	0,0846	0,178
i_m , A	495	479	454	409	346
T_d , s	1,1115	1,1115	1,052	0,965	0,8

D'après les calculs, la valeur de la résistance en série sera donc

$$R_s = R - R'_a = 0,27 \text{ ohm} .$$

Afin de supprimer l'incertitude due à la résistance inconnue de la ligne extérieure et pour plus de facilité, nous prendrons comme valeur de la résistance en série

$$R_s = 0,3 \text{ ohm} .$$

Pour résumer les résultats de nos calculs: nous faisons démarrer le moteur à courant continu en intercalant une résistance de démarrage d'un étage, d'une valeur de 0,3 ohm. La résistance de démarrage peut être court-circuitée une seconde environ après le début du démarrage à l'aide d'un contacteur, la durée du démarrage étant d'environ une seconde.

3.4. Remarques supplémentaires

Les figures 2 à 9 ont pour but de fixer et de compléter les résultats des calculs, sous une forme plus nette. Les figures 2 à 7 ont été construites sur la base des trois dernières lignes des *tableaux 1 à 3*, notamment:

Sur la figure 2, nous avons pris en échelle deux fois logarithmique la valeur de la pointe de courant i_m en fonction de L , au cas de différentes valeurs

de R comme paramètres. Nous avons encore marqué sur la figure la valeur limite permise, 600 A, par une ligne horizontale.

La fig. 3 est semblable à la figure 2, à la différence près qu'ici nous avons indiqué les valeurs i_m en fonction de R , et que ce sont les différentes valeurs de L qui y figurent comme paramètres.

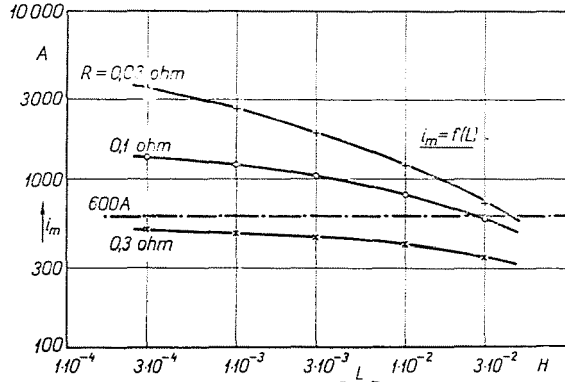


Fig. 2. Pointe du courant de démarrage en fonction de l'inductance du circuit d'induit

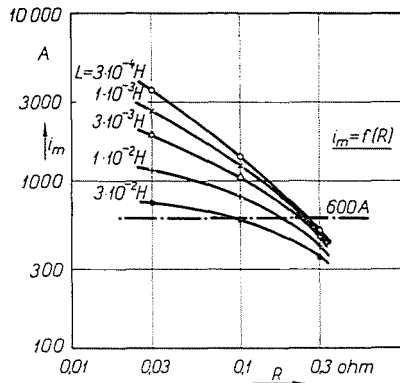


Fig. 3. Pointe du courant de démarrage en fonction de la résistance du circuit d'induit

Sur la fig. 4, les durées de démarrage sont indiquées en fonction de L , pour différents paramètres R . Nous avons encore indiqué 2 s comme temps limite.

La fig. 5 correspond à la fig. 4, avec la différence que, dans celle-là, nous avons reproduit les durées de démarrage pour divers paramètres L en fonction de R . (Sur les figures 4 et 5, nous avons relié au pointillé les durées de démarrage minimum dépendant des différentes valeurs des paramètres, et correspondant au cas $\rho = \Omega_0$.)

La figure 6 représente le moment où le courant atteint son maximum, la valeur t_m , en fonction de L , tandis que la figure 7 indique la même valeur en fonction de R .

Pour assurer l'intégralité de nos calculs pour l'installation exécutée (c'est-à-dire pour une valeur de résistance $R = 0,3 \text{ ohm}$), nous avons déterminé

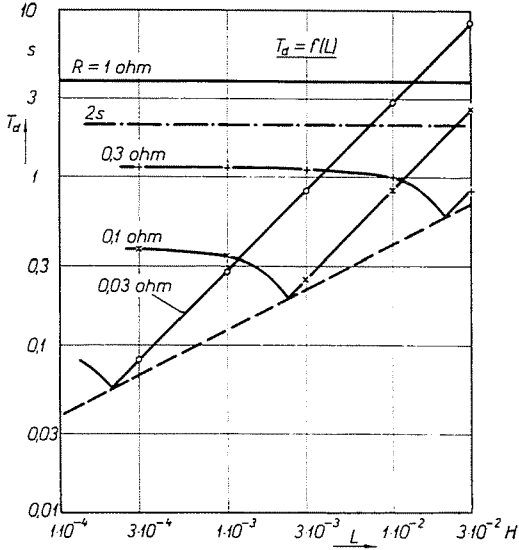


Fig. 4. Durée de démarrage en fonction de l'inductance du circuit d'induit

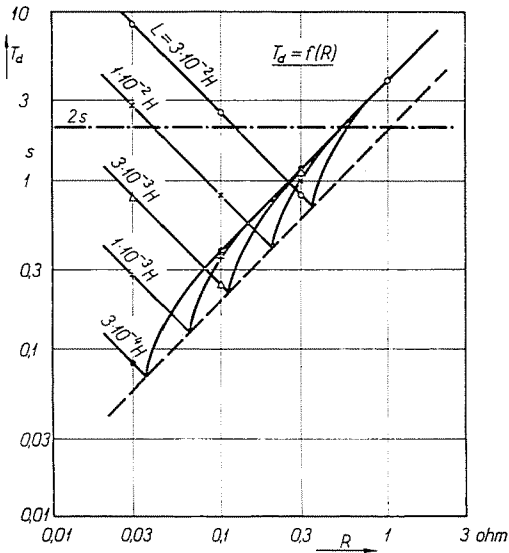


Fig. 5. Durée de démarrage en fonction de la résistance du circuit d'induit

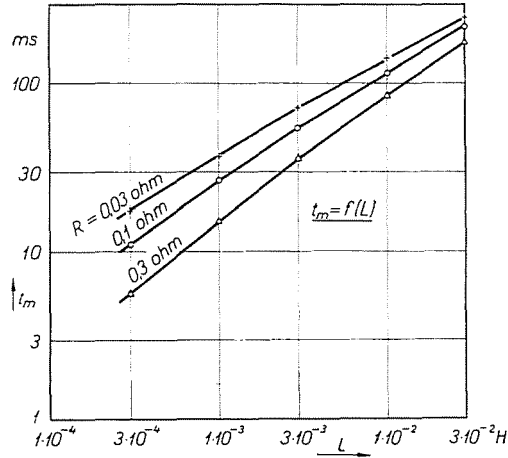


Fig. 6. Moment d'apparition de la pointe de courant en fonction de l'inductance du circuit d'induit

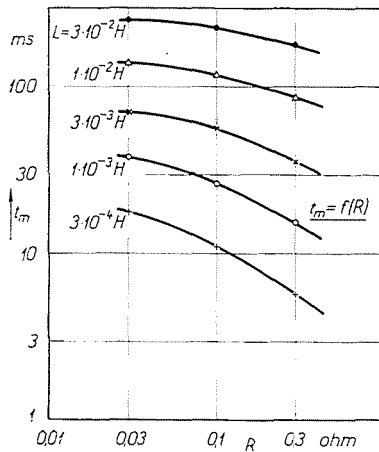


Fig. 7. Moment d'apparition de la pointe de courant en fonction de la résistance du circuit d'induit

quelques points de la courbe de démarrage [$n = f(t)$], et de la courbe représentant l'expression du courant en fonction du temps [$i = f(t)$].

Nous avons effectué les calculs sur la base des équations suivantes:

a) Équation de la courbe de démarrage d'après la formule (11) et avec l'utilisation des données figurant dans la première colonne du tableau 3:

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{150}{0,955} \left[1 - \left(\frac{996}{2 \cdot 496} e^{-4t} - \frac{4}{2 \cdot 496} e^{-996t} \right) \right] = \\ &= 157 [1 - (1,0040325 e^{-4t} - 0,0040325 e^{-996t})] . \end{aligned}$$

En négligeant le deuxième membre de l'expression mise entre parenthèses, ainsi que la partie qui suit la virgule décimale du premier membre, on a

$$\omega \cong 157(1 - e^{-4t}) \text{ s}^{-1},$$

ou, exprimé en nombres de tours par minute:

$$n \cong 1500(1 - e^{-4t}) \text{ t/mn}, \quad (22)$$

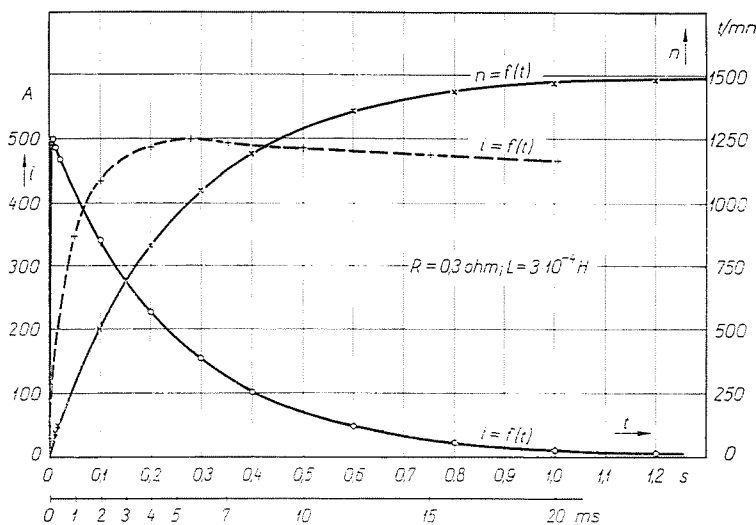


Fig. 8. La courbe de démarrage [$n = f(t)$] et celle du courant en fonction du temps [$i = f(t)$]. (Nous avons indiqué au pointillé la portion initiale de la courbe du courant, à une échelle plus étendue. C'est l'échelle de temps du bas, graduée en millisecondes, qui se rapporte à cette courbe)

b) L'expression du courant en fonction du temps sera, à la base de l'équation (12) et par substitution des données numériques

$$i = \frac{150 \cdot 10^4}{2 \cdot 3 \cdot 496} (e^{-4t} - e^{-996t}) = 504,5 (e^{-4t} - e^{-996t}) \text{ A}. \quad (23)$$

D'après les valeurs calculées à partir des équations (22) et (23) nous avons tracé, sur la figure 8, la courbe de démarrage [$n = f(t)$], ainsi que celle du courant en fonction du temps [$i = f(t)$]. Sur la figure nous avons encore indiqué au pointillé la portion initiale de la courbe du courant, à une échelle plus étendue, de façon que le développement du choc de courant soit bien visible.

4. L'installation de démarrage automatique proposée

D'après les résultats résumés dans le chapitre précédent, nous avons élaboré le système automatique du démarrage et de la commande. Dans ce qui suit, nous en faisons connaître les parties principales.

4.1. Schéma de principe des connexions du circuit principal (fig. 9)

La tension de la batterie d'accumulateurs de 150 V apparaît aux points AB à travers les coupe-circuit principaux à fusibles MF.

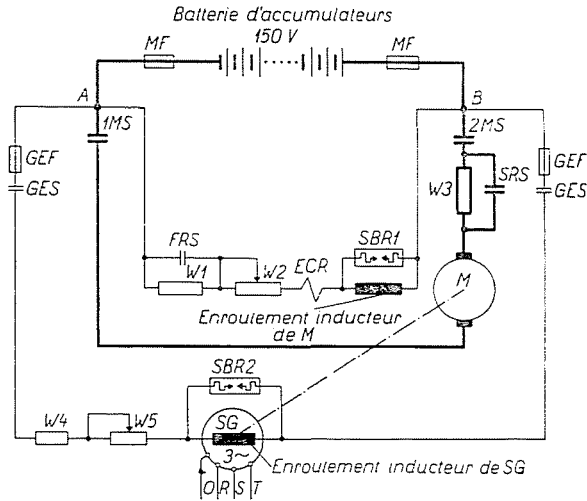


Fig. 9. Schéma de principe des connexions du circuit principal du dispositif automatique de démarrage

C'est sur ces deux points que se branche le circuit d'alimentation de l'enroulement inducteur du moteur à courant continu M. L'enroulement inducteur est branché d'une façon constante, mais le courant d'excitation qui le traverse est inférieur au courant normal — lorsque le moteur est hors service — à cause de la résistance en série limitative W1; il n'en représente que les 75% environ. (Lorsque le moteur tourne, le contact de fermeture du contacteur FRS court-circuite W1, et l'enroulement est traversé par le courant inducteur nominal). Le relais de contrôle ECR perçoit si l'enroulement inducteur est traversé par le courant. ECR fonctionne déjà dans le cas du courant d'excitation réduit à 75%. Le rhéostat W2 sert à mettre au point le courant inducteur nominal. SBR1 est un parafoudre semi-conducteur qui, en cas d'interruption du circuit de l'enroulement inducteur, empêche la production d'une surtension dangereuse aux bornes de l'enroulement. Lorsque l'installation est en service, le courant s'écoulant à travers le parafoudre est d'une quantité négligeable.

C'est aussi aux points AB que se branche le circuit d'induit du moteur M. L'induit est connecté à la source du courant par les contacteurs électromagnétiques unipolaires à courant continu 1MS et 2MS. Le choc du courant de démarrage est réduit par la résistance en série W3. Après le démarrage du moteur, le contacteur SRS court-circuite W3, et l'induit reçoit la tension entière.

L'enroulement inducteur de l'alternateur SG est également alimenté par les points AB à travers les coupe-circuit à fusibles GEF et les contacts de fermeture du contacteur GES. W4 est une résistance en série, et W5 un rhéostat qui sert à mettre au point exactement le courant inducteur. SBR2 est un parafoudre, dont le rôle correspond à celui de SBRI.

4.2. Commande (fig. 10)

Le réseau de commande se branche également aux points AB, à travers les coupe-circuit à fusibles CCF.

L'installation est *mise en état de service* par la pression du bouton poussoir ON. A ce moment, si le moteur M est excité (ECR a déjà fonctionné), le contacteur auxiliaire AS fonctionne et reste fermé par son contact d'attraction propre. En même temps, les relais à temps SRTR et CTR fonctionnent aussi et, de cette façon, l'installation est prête à démarrer automatiquement.

La commande de *démarrage* est donnée au moteur par l'installation de sûreté du chemin de fer. (Sur la figure, nous n'avons indiqué ceci que symboliquement par le contact de fermeture encadré d'un pointillé.) Actionné par la commande de démarrage, FRS fonctionne et court-circuite, avec un de ses contacts de fermeture, la résistance en série du circuit d'enroulement inducteur W1 (le moteur reçoit donc une excitation complète), tandis qu'avec l'autre contact de fermeture, il branche les contacteurs principaux 1MS et 2MS. L'induit du moteur M reçoit la tension à travers les contacts de fermeture de 1MS et 2MS, et le moteur démarre. A travers les contacts auxiliaires de fermeture, reliés en série, des contacteurs 1MS et 2MS, GES fonctionne (ce qui amène l'excitation de l'alternateur), et ses contacts d'ouverture reliés en parallèle interrompent le circuit de maintien du relais à temps SRTR. SRTR est un relais à temps à réduction de flux, dont le retard maximum est de 2 secondes. Au terme de la temporisation, SRTR déclenche, et son contact d'ouverture branche le contacteur SRS, qui court-circuite la résistance de démarrage W3. L'induit du moteur reçoit la tension complète, le démarrage est terminé.

Au terme du démarrage automatique s'établit l'état de *fonctionnement normal*, l'alternateur produit la tension nécessaire.

Les résistances des circuits d'excitation du moteur M et de l'alternateur SG sont mises au point de manière qu'en cas de charge nominale la valeur et la fréquence de la tension alternative soient nominales. Pour pouvoir maintenir la valeur de la tension entre les limites prescrites en cas de charges différentes,

nous avons intercalé dans le circuit inducteur du moteur le rhéostat à volant de commande W2 et dans celui de l'alternateur le rhéostat W5.

Le dispositif permet aussi la *marche d'essai* de l'installation. A ces fins, on a un bouton poussoir désigné par P, qui par son contact P/1 donne, sur pression, une commande identique à la commande de démarrage, donc le

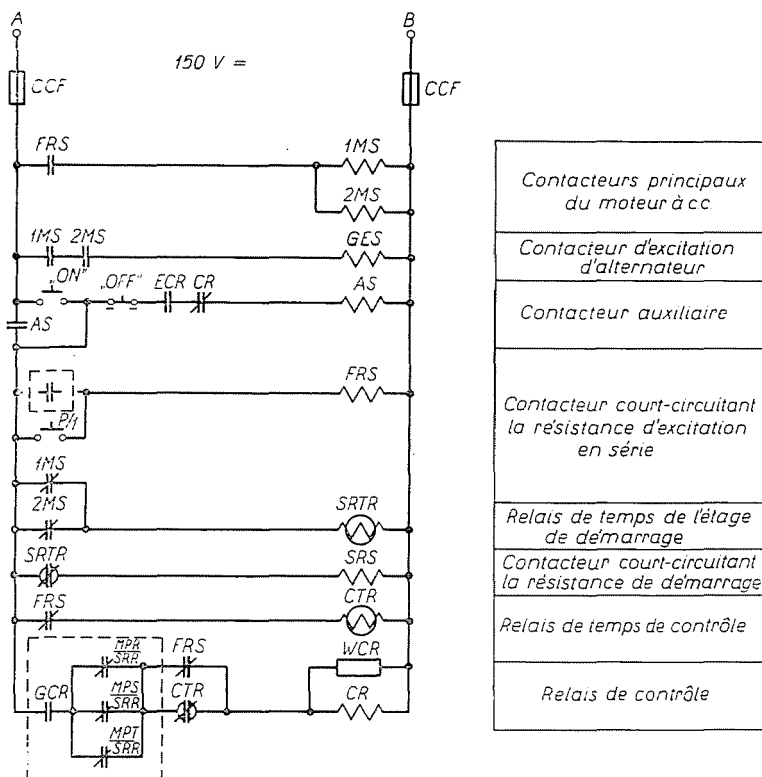


Fig. 10. Commande du dispositif automatique de démarrage: une partie du schéma des connexions. Les relais et les contacteurs sont désignés à la base du plan original, de langue anglaise. Ainsi par exemple: MS — main switch (contacteur principal); GES — synchronous generator excitation switch (contacteur d'excitation d'alternateur); AS — auxiliary switch (contacteur auxiliaire); SRTR — starting rheostat timing relay (relais de temps de l'étage de démarrage); CTR — control timing relay (relais de temps de contrôle); etc.

processus est le même que celui du démarrage automatique. La marche d'essai dure seulement le temps que nous appuyons sur le bouton poussoir P. La marche d'essai ne gêne pas le service automatique, c'est pourquoi elle peut être effectuée à n'importe quel moment. En effet, si nous faisons démarrer le dispositif à titre d'essai, la tension de l'alternateur ne se branche pas sur le réseau, à cause d'un verrouillage qui n'est pas indiqué sur la figure. Si par

ailleurs la commande de démarrage se produit pendant la marche d'essai, le verrouillage mentionné cesse, et la tension de l'alternateur mis en état de service se transmet immédiatement sur le réseau.

4.3. Protection

En dehors des coupe-circuit à fusibles pour la protection contre les *courts-circuits*, nous avons projeté les protections suivantes:

1) La protection à *manques de tension* est assurée par un contacteur auxiliaire AS (fig. 10) qui, en retombant, transmet au manipulateur un signal avertisseur (fig. 11, 1^e ligne).

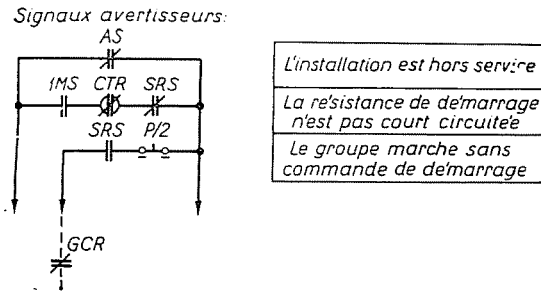


Fig. 11. Une partie du schéma des connexions de la protection

2) La protection à *manque d'excitation* du moteur M est assurée par le relais ECR (fig. 9) qui, en retombant, débranche le contacteur auxiliaire AS, met l'installation hors service et transmet un signal avertisseur au manipulateur.

3) La protection *en cas de troubles dans le processus de démarrage* a été résolue à l'aide du relais de contrôle CTR (fig. 10). Lorsque se produit la commande de démarrage et que FRS fonctionne, il coupe par son contact d'ouverture le circuit de CTR, relais à temps à réduction du flux, qui déclenche au bout de 4 s. Si au bout de ce temps la tension alternative n'a pas atteint, pour une raison ou une autre, la valeur à laquelle fonctionnent les relais $\frac{MPR}{SRR}$, $\frac{MPS}{SRR}$ et $\frac{MPT}{SRR}$, le relais de contrôle CR s'enclenche (étant donné que le contact de GCR est fermé). Ceci provoque la coupure du circuit de maintien du relais AS, AS déclenche et donne le signal avertisseur.

La condition première du fonctionnement de la protection est l'attraction de FRS à l'arrivée de la commande de démarrage. Si ce mouvement ne se produit pas (par exemple à cause d'un défaut de la bobine), au moment de l'attraction de GCR, CR fonctionne immédiatement à travers le contact d'ouver-

ture de FRS, et débranche AS. (GCR fonctionne un peu après l'arrivée de la commande de démarrage).

Il peut arriver encore que le moteur démarre, mais que le contacteur SRS ne fonctionne pas et ne court-circuite pas la résistance de démarrage W3. Ici deux cas peuvent se présenter:

a) La charge est tellement grande qu'à cause de la chute de tension se produisant à W3, le nombre de tours du moteur est trop petit et la tension de l'alternateur n'atteint pas la valeur nécessaire à l'attraction des relais $\frac{MPR}{SRR}$, $\frac{MPS}{SRR}$ et $\frac{MPT}{SRR}$. Dans ce cas, la protection débranche à travers le relais CR.

b) La charge n'est pas grande, le nombre de tours du moteur, et par suite la tension de l'alternateur sont assez élevés pour que les relais indiqués plus haut fonctionnent. Dans ce cas l'installation reste en service, mais le manipulateur reçoit un signal avertisseur (fig. 11, 2^e ligne).

4) Si le dispositif *démarre sans commande* (par exemple en cas de court-circuit de la ligne du circuit de commande de démarrage, ou sous l'effet d'un courant externe), le manipulateur reçoit à la fin du processus de démarrage un signal avertisseur (fig. 11, 3^e ligne. En cas de marche d'essai, il n'y a pas de signal avertisseur à cause du contact d'ouverture de P/2).

5) L'interruption de sûreté (ou la mise hors service) de l'installation se fait par pression du bouton poussoir OFF. AS se déclenche et donne en même temps un signal avertisseur.

5. Résultats des mesures

L'essai de l'ensemble formé par le groupe moteur-alternateur et le dispositif de commande, ainsi que les mesures nécessaires ont eu lieu en octobre 1959.

Nous avons effectué les mesures de trois groupes de machines. Tous les trois étaient commandés par le même dispositif de commande. Les mesures ont été faites conformément aux schémas de connexion indiqués sur les fig. 9 à 11. Le démarrage du groupe a eu lieu à l'aide du bouton poussoir «d'essai» P monté dans le dispositif de commande (fig. 11). L'alternateur a été chargé de résistance.

Avec des instruments à aiguille, nous avons mesuré les quantités suivantes (à l'état stationnaire):

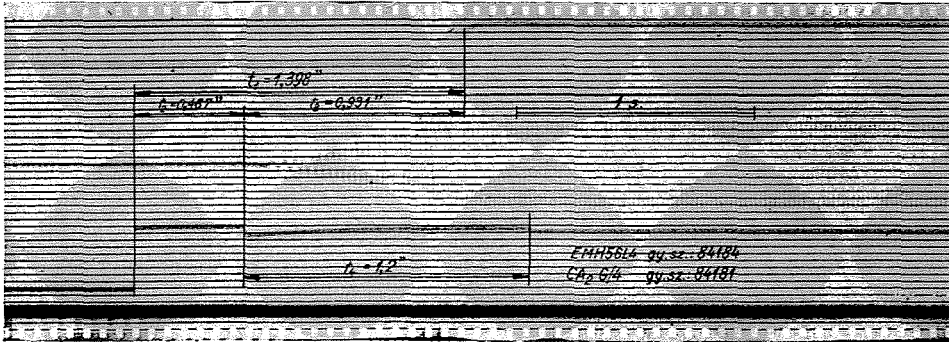
U_{-} — la tension continue aux bornes de la batterie d'accumulateurs (entre les points A et B, voir fig. 9) à l'état de charge;

U_{\sim} — la tension de phase de l'alternateur avec l'instrument monté dans le dispositif de commande;

- I_{\sim} — le courant de phase de charge de l'alternateur;
 f — la fréquence de la tension de l'alternateur, avec l'instrument monté dans le dispositif de commande.

5.1. Les oscillogrammes relevés

Pour fixer les phénomènes transitoires du démarrage, nous avons utilisé un oscillographe bifilaire. L'un des enregistrements relevés est visible sur la fig. 12. Des trois boucles, la supérieure indique l'attraction du relais qui fonctionne dès l'obtention des 80% de la tension nominale de l'alternateur. (La



[Fig. 12. Oscillogramme représentant les conditions de démarrage de l'un des groupes

boucle reçoit la tension à travers l'un des contacts du relais.) La boucle du milieu a été reliée en parallèle avec le voltmètre mesurant la tension de phase de l'alternateur; elle trace donc le développement de la tension de l'alternateur. La boucle inférieure a été reliée en parallèle avec la bobine d'attraction du relais FRS (fig. 10). Cette boucle fixe donc le moment de la commande du démarrage du groupe (celui de la pression du bouton poussoir P. C'est à partir de ce moment qu'il faut compter la durée de démarrage du groupe, car pendant le service, la commande de démarrage est donnée, conformément à la fig. 10, par le contact du relais branché en parallèle avec le contact P/1 du bouton poussoir P.)

5.2. Evaluation

Les résultats des mesures indiqués par les instruments à aiguille et obtenus par l'évaluation des oscillogrammes sont reproduits sur le tableau 4.

L'évaluation des enregistrements a été effectuée selon le raisonnement suivant. Prenons comme exemple l'oscillogramme de la fig. 12. Sur le tracé

dessiné par la boucle inférieure, nous voyons le moment du branchement. A la suite du branchement, c'est d'abord le relais FRS qui fonctionne, puis, à travers son contact de fermeture, les contacteurs principaux à courant continu 1MS et 2MS. Le moteur à courant continu ne se branche sur l'accumulateur qu'après l'enclenchement des précédents. Le temps écoulé jusqu'à présent est la somme des temps propres du relais et des contacteurs. Cette durée, que nous indiquerons par t_2 , est lisible sur l'oscillogramme. En effet, au moment du branchement du moteur, la tension aux bornes de l'accumulateur décroît par suite du choc du courant de démarrage. Or, comme la boucle inférieure est branchée sur la tension de l'accumulateur à travers le bouton poussoir P, on perçoit sur le tracé une diminution de la tension. (Dans notre cas $t_2 = 0,467 \approx 0,5$ s.)

C'est au moment de l'attraction des contacteurs principaux à courant continu que commence le démarrage du groupe même. Les contacts auxiliaires des contacteurs principaux à courant continu ferment le circuit de l'excitation de l'alternateur (contacteur GES, fig. 10), et la tension de l'alternateur commence à augmenter, comme l'indique le tracé du milieu. Lorsque la tension aux bornes atteint la valeur d'attraction du relais qui perçoit la tension (et n'est pas indiqué sur les figures), soit les 80% de la tension nominale aux bornes, conformément aux exigences, et que le relais fonctionne, le groupe est mis en état de service. Comme prévu, c'était là le moment que nous devions fixer. C'est à ces fins que nous avons utilisé — comme nous l'avons déjà dit — la boucle supérieure, dont le tracé indique le branchement du relais percevant la tension. Nous avons marqué le temps écoulé à partir du début du démarrage du groupe jusqu'à ce moment par t_3 . (Dans notre cas, $t_3 = 0,931$ sec.)

La somme des temps t_2 et t_3 donne le temps écoulé depuis l'arrivée de la commande de démarrage jusqu'à l'état de charge, c'est-à-dire le temps que notre tâche avait prescrit comme étant de «2 secondes au maximum». Cette durée a été marquée par t_1 . (Dans notre cas, $t_1 = 1,398 \approx 1,4$ s.)

Le tracé dessiné par la boucle inférieure nous indique encore un moment, à savoir celui où l'on court-circuite la résistance en série du démarrage. Au moment de leur attraction, les contacteurs principaux à courant continu font fonctionner le relais à temps du plot de démarrage, SRTR, qui, après sa temporisation, branche le contacteur SRS qui court-circuite la résistance W3 (fig. 10). Lorsque la résistance en série est court-circuitée, il se produit de nouveau un choc de courant, à la suite duquel la tension aux bornes de la batterie d'accumulateurs décroît. La diminution de tension est visible sur le tracé de la boucle inférieure. Nous avons désigné la temporisation du relais à temps du plot de démarrage par t_4 . Au cours des mesures, cette valeur était de 1,2 s.

Nous avons encore pu lire, sur les oscillogrammes, la valeur de la tension de l'alternateur au moment du branchement du relais percevant la tension.

Nous avons calculé pour les trois groupes le rapport de cette tension avec la tension nominale aux bornes (au cours des mesures, nous avons fait varier les valeurs de ce rapport !), et l'avons indiqué au tableau 4 $\left(\frac{U_b}{U_n}\right)$. Comme on peut voir sur le tableau, dans les trois cas, la valeur du rapport était supérieure à 80 %, donc elle représentait pour l'installation des conditions *plus graves* que celles prescrites par le but de notre recherche.

Tableau 4

Sigae de la mesure	Numéro de fabrication	Valeurs lues sur les instruments à aiguille				Valeurs obtenues à la base d'oscillogrammes				
		$U_{=}$ V	U_{\sim} V	I_{\sim} A	f p/s	t_1 s	t_2 s	t_3 s	$\frac{U_b}{U_n}$ %	f p/s
1.	mot. 84182 alt. 84179	145	255	27,5	53,5	1,74	0,46	1,28	81,5	54,2
2.	mot. 84183 alt. 84180	144	234	27,25	47,5	1,526	0,458	1,068	86,0	48,2
3.	mot. 84184 alt. 84181	142	236	29,25	48,0	1,398	0,467	0,931	98,5	48,7

6. Conclusions

En résumant les résultats des mesures d'après le tableau 4, nous pouvons constater que, pour les trois groupes, les machines et le dispositif de commande ont réalisé les exigences prescrites.

(Observons en passant que le moteur à courant continu du groupe formé des machines aux numéros de fabrication 84 179 et 84 182, et qui a eu la durée de démarrage la plus longue, a été sans doute fabriqué, par suite d'un défaut de fabrication, avec un entrefer plus grand que les deux autres moteurs. Il s'ensuit que son flux — et par suite son couple — était plus petit, et sa vitesse plus grande que ceux des deux autres moteurs.

Bien que — nous le répétons — l'installation ait répondu aux exigences, il se présente une possibilité de réduire encore la durée du démarrage. En effet, il semble de toute manière préférable de réduire la temporisation du relais à temps SRTR (le temps t_1), car avec une temporisation de 1,2 s — comme le montre par exemple l'oscillogramme de la fig. 12 — le groupe était déjà en état de service pendant la durée du branchement de la résistance de démarrage. Donc en court-circuitant celle-ci plus tôt, on peut réduire la durée du processus. La temporisation que nous pouvons recommander d'après les oscillogrammes, est de 0,8 ~ 0,9 s.

En fin de compte, les mesures effectuées ont pleinement prouvé la justesse du fonctionnement du dispositif automatique de démarrage de notre groupe auxiliaire d'alimentation. Grâce au dispositif automatique, le groupe en question peut assurer, en un temps inférieur aux 2 secondes prescrites, l'alimentation de l'installation de sûreté des chemins de fer.

Résumé

La durée de la mise en circuit des groupes auxiliaires d'alimentation des installations de sûreté de chemin de fer est déterminée par des exigences rigoureuses. Dans le cas donné, le groupe auxiliaire d'alimentation formé d'un alternateur à autoexcitation d'une puissance de 18 kVA et d'un moteur à courant continu alimenté par une batterie d'accumulateurs, doit être mis en état de service en deux secondes à compter de l'interruption du réseau d'alimentation. En partant de bases théoriques connues, les auteurs analysent en détail les conditions de démarrage, en particulier l'intensité du choc de courant à prévoir et la vitesse en fonction du temps. À la base des résultats obtenus, ils proposent une résistance de démarrage à un étage, ainsi qu'une commande automatique. Les résultats des mesures effectuées sur l'installation montrent que le groupe auxiliaire d'alimentation répond aux conditions prescrites.

Prof. F. CSÁKI et T. KELEMEN, Budapest, XI, Egry József u. 18. Hongrie.