Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 43 (1952)

Heft: 5

Artikel: Amélioration de la stabilité des machines synchrones par le réglage de leur excitation

Autor: Lavanchy, C.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1057849

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

43e année N° 5 Samedi, le 8 Mars 1952

BULLETIN

DE L'ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS

Amélioration de la stabilité des machines synchrones par le réglage de leur excitation[1])

Par *Ch. Lavanchy*, Wettingen

621.3.016.35 : 621.313.32.013.8

Les circuits modernes d'excitation des machines synchrones contrôlés par des régulateurs rapides contribuent à améliorer la stabilité de ces machines en marche en parallèle. L'auteur présente un exposé systématique de la question. Il précise tout d'abord la notion des divers genres de stabilité à considérer et les conditions à remplir pour les réaliser; il montre ensuite l'influence des imperfections des divers éléments des circuits de réglage; enfin, il attire l'attention sur les avantages que l'on pourrait obtenir par un réglage basé sur les variations de vitesse de la machine par rapport à la fréquence du réseau.

Die neuzeitlichen Erregerkreise der mit Schnellreglern regulierten Synchronmaschinen tragen dazu bei, die Stabilität dieser Maschinen im Parallelbetrieb zu verbessern. Der Autor gibt eine systematische Übersicht über das Problem. Er legt zunächst die verschiedenen in Betracht fallenden Stabilitätsarten und die Bedingungen, die zu deren Verwirklichung zu erfüllen sind, fest. Hierauf zeigt er den Einfluss der Unvollkommenheiten der verschiedenen Elemente der Regulierkreise. Schlussendlich legt er die Vorteile dar, die mit einer Regulierung, die auf die Abweichungen der Maschinengeschwindigkeit von der Netzfrequenz anspricht, zu erzielen sind.

I. Introduction

Le problème du réglage de l'excitation d'une machine synchrone en vue d'améliorer sa stabilité est déjà ancien. J'ai, par exemple, trouvé dernièrement dans un cours de Boucherot, professeur à l'Ecole Supérieure d'Electricité de Paris, l'énoncé de l'idée qu'une machine synchrone serait «indécrochable» si le réglage de son excitation était tel que la tension puisse être maintenue constante à ses bornes quelle que soit sa charge. Cet énoncé naturellement trop sommaire contient cependant en germe le principe du renforcement de la stabilité d'une machine synchrone par le renforcement de son excitation.

Depuis lors, les électriciens ont retourné le problème sous toutes ses faces, favorisés d'ailleurs par les améliorations qui furent apportées aux appareils de réglage et aux circuits d'excitation, notamment au point de vue de leur rapidité, de sorte qu'actuellement on dispose pour chaque application de la solution la mieux adaptée au but poursuivi.

Dans une première partie, je considérerai le cas où le circuit de réglage serait idéal, ce qui me permettra de préciser la notion des diverses stabilités à considérer et d'en fixer les limites théoriques.

Dans une seconde partie, j'examinerai l'influence des imperfections du circuit de réglage et notamment l'influence de son temps de transfert sur les résultats théoriques résumés dans la première partie.

Dans toute cette étude, je me placerai dans le cas le plus simple d'une seule machine synchrone raccordée par une ligne à un réseau de puissance suffisante pour que les perturbations appliquées à la machine soient sans effet sur lui, c'est-à-dire pour que ce réseau conserve toujours même fréquence et même tension, quelle que soit la perturbation considérée.

II. Première Partie

Cas d'un circuit de réglage idéal

D'une façon générale, une machine synchrone raccordée à un réseau est dite stable si elle conserve sa marche synchrone quel que soit le genre de perturbation qu'elle a pu subir. La perturbation passée, la machine doit donc avoir maintenu son synchronisme et après quelques oscillations amorties repris sa marche calme et tranquille, qui se constate par la suppression quasi totale des variations des indications des appareils de mesure du tableau.

On dit que la *stabilité est statique* si la machine reste stable pour des perturbations suffisamment lentes pour que le circuit inducteur ne soit pas influencé d'une façon appréciable, donc pour que le courant de ce circuit ne subisse pas de variations; les déplacements de la machine se font ainsi à courant d'excitation constant.

Le maintien de la stabilité statique est assuré par une puissance synchronisante P_s qui a pour effet de rappeler constamment la machine à sa position d'équilibre qui correspond à la puissance débitée et caractérisée par un angle ϑ mesuré entre le vecteur de la f. é. m. d'excitation et celui de la tension du réseau. Soit P la puissance débitée, on a

$$P_s = \frac{\Delta P}{\Delta \vartheta} \qquad (1)$$

Naturellement, cette expression doit être positive, et la limite de stabilité correspond aux régimes pour lesquels P_s devient nulle.

La stabilité statique est naturelle si elle est réalisée sans que l'on effectue de réglage de l'excitation;

[1]) Le texte de cet article a fait l'objet d'une Conférence présentée par l'auteur au Colloque du 21 mai 1951 à l'Institut Electrotechnique de l'Ecole Polytechnique Fédérale (Professeur Docteur M. Strutt).

elle est au contraire *artificielle* si elle est obtenue par un réglage convenable de l'excitation.

Dès que les déplacements du rotor s'effectuent à une vitesse suffisante il se produit une réaction du circuit rotorique tendant à s'opposer à ces déplacements, réaction qui se manifeste par des variations du courant d'excitation. La machine est dans un état dit *transitoire*.

Supposons donc qu'elle soit stable statiquement pour un régime caractérisé par une puissance P_0 et un angle ϑ_0 et qu'on l'écarte à une vitesse suffisante de sa position première d'un angle $\Delta\vartheta$. Elle s'opposera à ce mouvement en développant une puissance synchronisante P_s' supérieure à P_s. Tant que cette puissance synchronisante P_s' sera positive, la machine sera stable; cette nouvelle stabilité est dite *transitoire*. Elle est encore *naturelle* si aucun réglage de l'excitation n'intervient, et *artificielle* dans le cas contraire. La réaction propre de la machine se manifeste sous forme d'une tentative, transitoire du reste, pour conserver constant le flux résultant dans son circuit inducteur, en vertu de la loi de Lenz; et l'intervention extérieure réalisée par le réglage de l'excitation a pour but d'apporter à la machine une aide efficace pour maintenir son flux et, si possible même, pour le renforcer.

La machine peut être soumise à un troisième genre de perturbations qui se présente sous forme d'oscillations entretenues. Ces oscillations ont principalement pour origine soit les caractéristiques du moteur, soit celles de la charge, soit les dispositions particulières des circuits de réglage.

Les Américains ont désigné sous le nom de «hunting» ces perturbations particulières d'origines diverses qui peuvent être atténuées ou même supprimées par des dispositifs d'asservissement du réglage dit dispositifs «anti-hunting». La stabilité correspondante sera désignée ici sous le nom de *stabilité aux oscillations entretenues*.

Nous réservons enfin le terme de *stabilité dynamique* à la stabilité qui correspond à des perturbations violentes et de grande amplitude, qui peuvent provenir soit de surcharges brusques, soit de changements subits dans la constitution du réseau, tels que changements brusques d'impédance ou de courts-circuits accidentels entre un pôle et la terre ou entre pôles.

Les *limites de stabilité dynamique* sont beaucoup plus difficiles à déterminer que celle de la stabilité transitoire correspondant à de petits déplacements à partir d'un régime stable statiquement. Ces limites dépendent, en effet, non seulement du régime initial et de la nature de la perturbation, mais aussi des caractéristiques mécaniques des machines, de l'inertie du groupe, de l'influence du régulateur hydraulique, etc., obligeant, par conséquent, à introduire ces diverses variables dans les calculs. Nous laisserons de côté ce problème général.

Les cas compliqués peuvent d'ailleurs toujours être traités par l'une des méthodes suivantes:

a) Calculs algébriques par différences finies, dits «calculs pas à pas» appliqués à des exemples particuliers,

b) Calculs au moyen de machines à intégrer,

c) Mesures au moyen de réseaux réduits ou «micro-réseaux» constitués par des machines de très petites dimensions, reproduisant les caractéristiques du réseau réel.

Nous résumerons ici simplement les résultats de l'étude de la stabilité pour un cas particulier auquel on se limite le plus souvent, en raison de sa simplicité.

Il s'agit d'une machine unique, idéale, c'est-à-dire exempte d'hystérésis et de courants de Foucault, sans circuits amortisseurs autres que celui qui est utilisé pour l'excitation, raccordée à un réseau de grande puissance. Elle est soumise à des oscillations de faible amplitude (pour pouvoir dans les calculs assimiler le sinus à l'arc et le cosinus à l'unité), et l'on se propose de déterminer dans ces conditions les limites de stabilité statique et transitoire, naturelles et artificielles.

La discussion complète de ce cas très particulier permet de se faire une idée plus claire de ce qui se passe dans les cas plus compliqués en s'aidant du raisonnement et d'une certaine intuition.

L'équation caractéristique à laquelle aboutit l'étude simple ainsi limitée peut s'écrire comme suit, dans le système «per unit» [p. u.[2])] introduit avec succès par les Américains pour l'étude de ces questions:

$$2\,\omega_0 H p^2 + \frac{u_0^2}{x_d}\left[\frac{x_d}{x_d(p)} - 1\right]\sin^2\vartheta + \frac{U_0\,u_0}{x_d}\cos\vartheta_0 + \frac{u_0^2}{x_d}\left(\frac{x_d}{x_q} - 1\right)\cos 2\,\vartheta_0 = 0 \qquad (2)$$

Dans cette formule,

p est le symbole opérationnel $\frac{d}{dt}$

ω_0 la pulsation du réseau

u_0 sa tension

U_0 la tension aux bagues du rotor

$x_d(p)$ une réactance directe opérationnelle qui, en l'absence de circuits amortisseurs, a pour expression

$$x_d(p) = \frac{1 + p\,\frac{x_d'}{x_d}\,T_{d0}'}{1 + p\,T_{d0}'} \qquad (3)$$

x_d la réactance synchrone directe pour la machine et la réactance de la ligne de liaison au réseau

x_q la réactance synchrone transversale pour la machine et la réactance de la ligne

x_d' la réactance de fuites pour la machine et la ligne

T_{d0}' la constante de temps de la machine dans l'hypothèse où son circuit induit est ouvert

H la constante de temps de démarrage de la machine à *puissance constante*, soit la moitié de la constante de temps de démarrage à couple constant (p. u.)

Le développement de (2), en tenant compte de (3), conduit donc à une équation caractéristique du 3e degré de la forme générale:

$$a_0\,p^3 + a_1\,p^2 + a_2\,p + a_3 = 0 \qquad (4)$$

avec

[2]) Dans ce système de notations, les différentes grandeurs (réactances, tensions, etc.) sont exprimées en valeurs relatives rapportées aux grandeurs nominales correspondantes de la machine utilisée.

$$\left.\begin{aligned}
a_0 &= 2\,\omega_0\,H\,\frac{x_d'}{x_d}\,T_{d0}' \\
a_1 &= 2\,\omega_0 H \\
a_2 &= \frac{x_d'}{x_d}\,T_{d0}'\left[\frac{u_0^2}{x_d}\,\frac{x_d - x_d'}{x_d'}\sin^2\vartheta_0 + \right. \\
&\quad \left. + \frac{U_0\,u_0}{x_d}\cos\vartheta_0 + \frac{u_0}{x_d}\left(\frac{x_d}{x_q} - 1\right)\cos 2\,\vartheta_0\right] \\
a_3 &= \frac{U_0\,u_0}{x_d}\cos\vartheta_0 + \frac{u_0^2}{x_d}\left(\frac{x_d}{x_q} - 1\right)\cos 2\,\vartheta_0
\end{aligned}\right\} \quad (5)$$

En appliquant à ces coefficients les conditions de stabilité bien connues de Hurwitz, la machine sera stable si l'on a *simultanément* les conditions

$$a_3 > 0 \quad (6)$$

$$a_2 > 0 \quad (7)$$

$$a_1\,a_2 - a_0\,a_3 > 0 \quad (8)$$

Il est facile de voir que le coefficient a_3 représente la puissance synchronisante statique P_s de la machine, et que le coefficient a_2 est proportionnel à la puissance synchronisante transitoire P_s', enfin que la combinaison (8) des coefficients de (4) exprime que l'on doit avoir $P_s' > P_s$.

Il en résulte donc que pour que la stabilité soit assurée:

la condition (6) exprime que la puissance synchronisante statique P_s doit être positive; c'est la condition de stabilité statique naturelle;

la condition (7) exprime que la puissance synchronisante transitoire P_s' doit être positive; c'est la condition de stabilité transitoire naturelle;

la condition (8) exprime que la puissance synchronisante transitoire P_s' doit être supérieure à la puissance synchronisante statique P_s si l'on veut éviter l'apparition d'oscillations entretenues.

Deux cas particuliers sont utiles à considérer:

Premier cas particulier. Les petits déplacements du rotor à partir de sa position ϑ_0 sont très lents, de sorte que p T_{d0}' devient négligeable devant l'unité, d'où pour (3): $x_d\,(\mathrm{p}) = x_d$. Cette simplification ramène alors l'équation caractéristique à sa forme simple suivante

$$a_1\,\mathrm{p}^2 + a_3 = 0 \quad (9)$$

correspondant à une oscillation sinusoïdale non amortie de pulsation Ω (p. u.) avec

$$\Omega = \sqrt{\frac{P_s}{2\,\omega_0\,H}} \quad (10)$$

Cette oscillation se produit donc à *courant d'excitation constant.*

Deuxième cas particulier. Si la résistance du circuit d'excitation est très petite, ou la vitesse de déplacement du rotor relativement grande, de telle sorte que p T_{d0}' soit grand devant l'unité, dans (3); $x_d\,(\mathrm{p})$ devient égal à x_d', et l'équation caractéristique (4) se ramène à la forme simple:

$$a_0\,\mathrm{p}^2 + a_2 = 0 \quad (11)$$

correspondant à une oscillation sinusoïdale non amortie de pulsation Ω' (p. u.), avec

$$\Omega' = \sqrt{\frac{P_s'}{2\,\omega_0\,H}} \quad (12)$$

Cette oscillation se produit donc *à flux constant dans la roue polaire.*

Dans le cas général, les petites oscillations réelles suivent une loi intermédiaire entre ces deux lois simples; mais pour les constantes habituelles des machines, elles suivent d'assez près la loi de la conservation du flux exprimée par la relation (11).

Nous voulons préciser ces notions tirées de formules algébriques en ayant recours à une représentation graphique simple qui, à mon avis, devrait être utilisée plus souvent, et que je ne fais que rappeler ici.

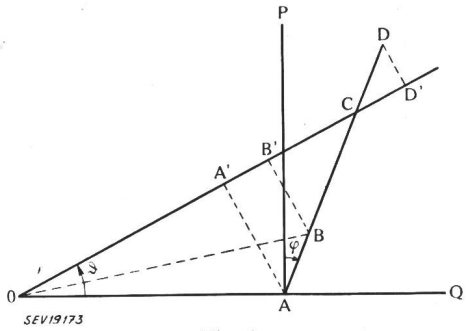


Fig. 1
Diagramme général d'une machine synchrone à deux réactions

La fig. 1 représente le diagramme général bien connu des machines synchrones à deux réactions. Dans cette figure,

OA représente la tension du réseau u_0 que nous prenons comme origine des phases;
OD' la f. é. m. d'excitation qui apparaîtrait à vide pour un courant d'excitation donné;
ϑ l'angle d'avance de OD' sur OA;
AD la réaction d'induit $x_d i$ pour le courant débité i;
AB la chute inductive due aux fuites $x_d' i$;
AC une chute inductive fictive égale à $x_q i$.

La projection D' de D sur OC donne donc en OD' un vecteur de grandeur proportionnelle à l'excitation, et la projection B' de B sur OC le vecteur OB' qui représente la f. é. m. proportionnelle au flux résultant dans le rotor. Dans ce diagramme, on a négligé dans un but de simplification les résistances du circuit induit et de la ligne de liaison au réseau.

Au lieu de caractériser les régimes à courant d'excitation constant et à flux constant respectivement par les vecteurs OD' et OB', on ramène ces deux régimes au point C, qui, par ses coordonnées multiples jouit de propriétés particulières.

Après avoir multiplié par $\frac{u_0}{x_q}$ tous les vecteurs du diagramme de la fig. 1 pour en faire un diagramme des puissances, les puissances actives étant reportées suivant l'axe vertical AP et les puissances réactives suivant l'axe horizontal AQ, on voit que:

AC représente la puissance apparente de la machine $u_0\,i$ (p. u.);
la projection de AC sur l'axe vertical sa puissance active $u_0\,i\cos\varphi$;
la projection de AC sur l'axe horizontal sa puissance réactive $u_0\,i\sin\varphi$;
l'angle PAC le déphasage φ de la charge;
l'angle AOC le déphasage ϑ du rotor.

A cette échelle, on a aussi sur le diagramme $OA = \frac{u_0^2}{x_q}$.

Le courant d'excitation qui correspond au point C peut être lu par l'interpolation d'un réseau de courbes topographiques qui sont des limaçons de Pascal, cotées chacune pour une valeur particulière de l'excitation et dont la fig. 2 représente quelques

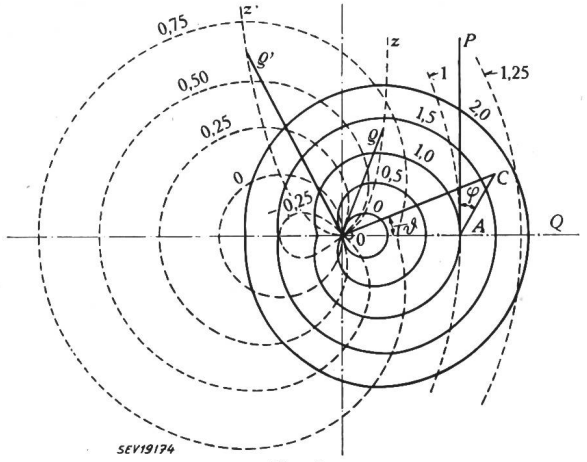


Fig. 2
Allure générale des courbes topographiques à courant d'excitation constant (courbes en traits-pleins) et des courbes topographiques à flux résultant constant (courbes en traits interrompus)

courbes tracées en traits-pleins, ces courbes étant cotées en prenant comme unité le courant d'excitation qui correspond à une marche synchrone à courant débité nul [1][3]).

La stabilité statique naturelle est réalisée tant que la puissance synchronisante P_s est positive, c'est-à-dire tant que la variation relative $\frac{\Delta P}{\Delta \vartheta}$ est elle-même positive, pour un déplacement du point C sur une courbe à courant constant de ce réseau topographique. Pour une excitation donnée, cette puissance synchronisante P_s diminue à mesure que la puissance P croît pour s'annuler quand la courbe d'excitation correspondante a atteint son point à tangente horizontale. Le lieu de ces points de tangence Oz représente la limite des régimes à stabilité statique naturelle. Il répond à l'équation suivante[4]), en coordonnées polaires pour le diagramme des puissances:

$$\bar{\varrho} = \frac{u^2{}_0}{x_d}\left(\frac{x_d}{x_q} - 1\right)\frac{\sin^2\vartheta}{\cos\vartheta}\,\underline{/\vartheta} \qquad (13)$$

On arrive ainsi à une première constatation que la stabilité statique naturelle est assurée pour tous les points C situés à droite de la courbe limite Oz, ainsi d'ailleurs qu'à droite de la courbe symétrique de Oz par rapport à l'axe horizontal. Pour un point C donné, on pourra obtenir par des mesures simples la puissance synchronisante P_s, en déterminant le rapport $\frac{\Delta P}{\Delta \vartheta}$.

Pour l'hypothèse où les oscillations sont telles qu'elles s'effectuent à flux constant, il faut utiliser un second réseau topographique de courbes à flux constant qui est encore constitué par une famille de limaçons de Pascal dont on a tracé quelques courbes en pointillés, sur la même figure la courbe cotée 1 étant celle qui passe par le point A qui correspond au courant statorique nul. En ce point, le flux est donc entièrement fourni par le rotor lui-même.

La stabilité transitoire est assurée tant que la puissance synchronisante P_s' est positive, c'est-à-dire tant que la variation pour un point C qui suit ces nouvelles courbes reste positive. La limite des régimes stables est le lieu des points à tangente

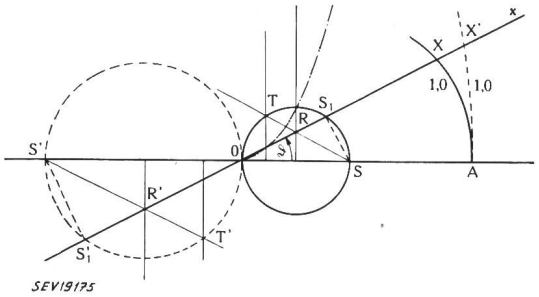


Fig. 3
Données de base pour le tracé des limaçons à courant d'excitation constant et des limaçons à flux constant, et pour le tracé des limites de stabilité statique Oz et transitoire Oz'

horizontale Oz' à ces nouvelles courbes, ayant pour équation en coordonnées polaires encore pour le diagramme des puissances:

$$\bar{\varrho}' = \frac{u^2{}_0}{x_d}\left(\frac{x_d}{x_q} - \frac{x_d}{x_d'}\right)\frac{\sin^2\vartheta}{\cos\vartheta}\,\underline{/\vartheta} \qquad (14)$$

Cette courbe a encore naturellement une symétrique par rapport à l'axe horinzontal.

Tous les points C stables pour le régime transitoire seront situés à droite de ces lignes frontières Oz', surfaces pour lesquelles on aura $a_2 > 0$. On pourra calculer encore la puissance synchronisante transitoire P_s' en déterminant pour un déplacement $\Delta\vartheta$ donné le rapport $\frac{\Delta P'}{\Delta \vartheta}$.

Si nous avons insisté sur cette représentation graphique, c'est en raison de la simplification qu'elle apporte dans les discussions[5]). La fig. 4 donne en

[3]) Voir la biographie à la fin du travail.

[4]) Dans cette équation le symbole $\underline{/\vartheta}$ représente l'argument du vecteur exprimé en degrés.

[5]) La construction de ces courbes topographiques en limaçons de Pascal est très rapide, comme on s'en rend compte, en se référant à la fig. 3.

On porte à partir de l'axe horizontal OA les grandeurs suivantes:

$$AO = -\frac{u_0{}^2}{x_q};\ AS = -\frac{u_0{}^2}{x_d};\ AS' = -\frac{u_0{}^2}{x_d'}$$

On trace les cercles de diamètres OS et OS'.

Le limaçon de la famille à courant d'excitation constante passant par A donc coté 1 se construit par points. Par exemple pour l'angle ϑ, on mène Ox qui coupe le cercle OS en S_1. On porte S_1x égal à SA, d'où le point x du limaçon. Les autres limaçons de la famille s'obtiennent en reportant à partir de S_1 une fraction de SA: 1/10, 2/10, ...9/10, ou un nombre fractionnaire: 1,1 1,2, ...2, etc.

La famille des limaçons à flux constant s'obtient d'une manière analogue, mais en remplaçant S par S' et S_1 par S_1'. Par exemple pour le limaçon coté 1, on reporte $S'A$ à partir de S_1', d'où un point X' de ce limaçon.

Les courbes limites Oz et Oz' s'obtiennent par les équations en coordonnées polaires suivantes:

$$\bar{\varrho} = OS\,\frac{\sin^2\vartheta}{\cos\vartheta}\,\underline{/\vartheta};\quad \bar{\varrho}' = OS'\,\frac{\sin^2\vartheta}{\cos\vartheta}\,\underline{/\vartheta}$$

ou très simplement par la construction suivante appliquée sur la fig. 3 à la détermination d'un point de Oz:

On élève la verticale passant par le centre du cercle de diamètre OS, coupée par Ox au point R; on mène RS qui coupe le cercle en T; on trace de T la verticale dont l'intersection avec Ox donne un point de Oz. La construction d'un point de Oz' est identique, mais à partir du cercle de diamètre OS', d'où R' et T'; la verticale menée par T' coupe Ox en un point de Oz'.

réduction un diagramme complet pour un cas particulier d'une machine raccordée à un réseau par une ligne d'une certaine importance dont la réactance a été supposée égale à 0,3 p. u. On a admis les réactances *totales* suivantes pour la machine et la ligne en p. u.:

$$x_d = 1{,}5 + 0{,}3 = 1{,}8$$
$$x_q = 0{,}875 + 0{,}3 = 1{,}175$$
$$x_d' = 0{,}3 + 0{,}3 = 0{,}6$$

Pour un fonctionnement à vide les deux familles de courbes à courant d'excitation constant et à flux résultant constant sont tangentes, de sorte qu'on se trouve à la limite d'apparition d'oscillations entretenues. Il suffit, par conséquent, d'un couple perturbateur à amortissement négatif même de peu d'importance relative pour provoquer l'entretien d'oscillations. En fait, ce phénomène se constate

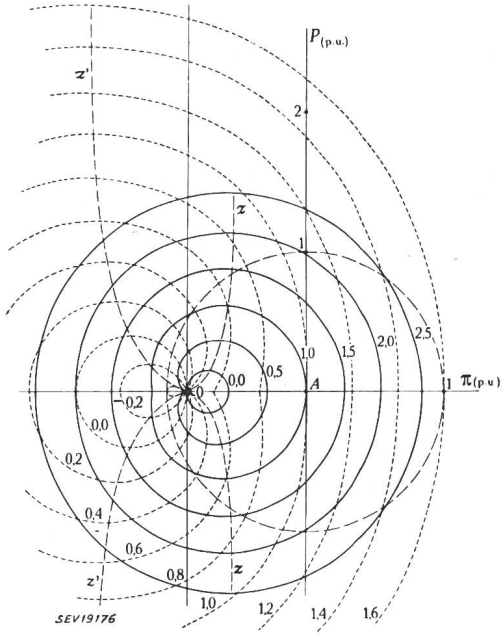


Fig. 4
Partie utile du diagramme général de fonctionnement pour une machine synchrone ayant les caractéristiques suivantes, y compris la ligne de liaison:
$x_d = 1{,}8$ (p. u.), $x_q = 1{,}175$ (p. u.), $x_d' = 0{,}6$ (p. u.)

dans certains cas heureusement exceptionnels; il disparaît d'ailleurs dès que la machine prend une charge même réduite. Il est d'autant moins à craindre que l'amortissement transversal de la machine est plus élevé.

Supposons que nous ayons amené la génératrice à débiter sa pleine puissance sous un facteur de puissance unité. Le point C correspondant sera donc situé en 1 sur la verticale AP; le courant d'excitation sera le double du courant à puissance nulle, et le flux résultant sera égal à 1,10 fois le flux à puissance nulle.

Si l'on ne réglait pas l'excitation, une surcharge lente de la génératrice de 15 % provoquerait son décrochage. Au contraire, un réglage de l'excitation qui suivrait les courbes à flux constant permettrait de réaliser des surcharges avant décrochage de l'ordre de 100 %. L'excitatrice série idéale, qui compenserait constamment et exactement la résistance des inducteurs, ce qui est d'ailleurs assez difficile à obtenir, permettrait au point C de suivre le tracé à flux constant quelle que soit la valeur de p et sans nouveau réglage, l'enroulement d'excitation séparée n'ayant alors à jouer qu'un rôle de stabilisation.

Mais on arrive à un résultat équivalent, en réglant l'excitation suivant certains paramètres, comme nous allons le voir.

Le premier de ces paramètres qui se présente à l'esprit est la *variation de l'angle* ϑ lui-même. A un accroissement $\Delta\vartheta$ de cet angle correspondra une variation de tension aux bagues du rotor égale à ΔU par rapport à l'excitation U_0 et qui, pour une variation linéaire et instantanée, s'écrit:

$$\Delta U = K_1 \Delta \vartheta \tag{15}$$

où K_1 est un coefficient de proportionnalité.

Frey a démontré que cette loi d'accroissement d'excitation à partir d'un angle ϑ_0 équivaut à ajouter à la puissance synchronisante P_s statique naturelle un terme de la forme $K_1 \frac{U_0 u_0}{x_d} \sin \vartheta_0$ tout en ne modifiant pas les autres coefficients de l'équation caractéristique. On a donc simplement la nouvelle valeur de a_3 suivante donc aussi de la puissance synchronisante, pour la stabilité statique artificielle:

$$a_3 = K_1 \frac{U_0 u_0}{x_d} \sin \vartheta_0 + \frac{U_0 u_0}{x_d} \cos \vartheta_0 + \frac{u_0^2}{x_d}\left(\frac{x_d}{x_q} - 1\right) \cos 2\,\vartheta_0 \tag{16}$$

Le coefficient de proportionnalité K_1 ne peut pas être pris aussi grand qu'on le voudrait, car il arriverait un moment où la condition (8) ne serait plus satisfaite. La limite de cette condition (8) donne comme limite supérieure de K_1:

$$K_1 \leqq \frac{u_0}{U_0} \frac{x_d - x_d'}{x_d'} \sin \vartheta_0 \tag{17}$$

L'excitation pourra donc être d'autant plus renforcée que la réactance transitoire x_d' sera plus petite par rapport à x_d, sans qu'apparaissent des oscillations entretenues.

Si l'on voulait accroître encore plus la puissance synchronisante en stabilité statique artificielle, on devrait introduire une nouvelle composante d'excitation de la forme $p\, K_2 \Delta \vartheta$, afin d'accroître le coefficient a_2 de l'équation caractéristique générale. La puissance synchronisante transitoire P_s' serait alors accrue d'un terme de la forme $\frac{K_2}{T_{d0}'} \frac{U_0 u_0}{x_d} \sin \vartheta_0$ qui contribuerait à renforcer le flux résultant du rotor. Le coefficient K_1 pourrait alors être augmenté mais à la condition cependant que la relation (8) reste satisfaite, autrement dit que la nouvelle puissance synchronisante en régime transitoire reste plus grande que la nouvelle puissance synchronisante en régime stationnaire. La ligne frontière Oz' des régimes transitoires stables serait alors reportée

plus à gauche que le tracé de nos diagrammes qui correspondent à la limite de stabilité transitoire naturelle. Effectivement, nous sommes parvenus au cours d'essais spéciaux à réaliser quelques régimes stables au delà de la frontière Oz' à flux constant. Il y a là, nous semble-t-il, surtout une observation intéressante au point de vue théorique, mais de portée pratique assez limitée. Il est en effet préférable de rechercher l'amélioration de la stabilité dans une zone du plan des diagrammes comprise dans des limites pratiques des courants normaux.

En général, cependant, le réglage pour améliorer la stabilité n'est pas réalisé en fonction des variations de l'angle de déphasage ϑ, mais plutôt généralement en fonction *des variations de la tension mesurée en un point de la transmission.* Partant d'un point facilement accessible, comme, par exemple, les bornes de la machine synchrone, on introduit une compensation simple fonction du courant débité qui a pour but de reporter fictivement la tension à maintenir constante au point le plus favorable de la transmission.

En particulier, on peut ainsi s'imposer que soit maintenue constante la tension interne de la génératrice, soit la tension aux bornes à laquelle on aura ajouté vectoriellement les chutes réactives dues aux fuites. On parvient par ce moyen à faire suivre au point C une courbe très voisine de celle qui correspond à la conservation du flux, et cela d'autant mieux que p est plus petit.

A titre d'application de ce qui précède, nous examinerons le fonctionnement à excitation réglée de la génératrice dont on a tracé les limaçons de Pascal sur le diagramme de la fig. 4, et que nous reprenons sur la fig. 5.

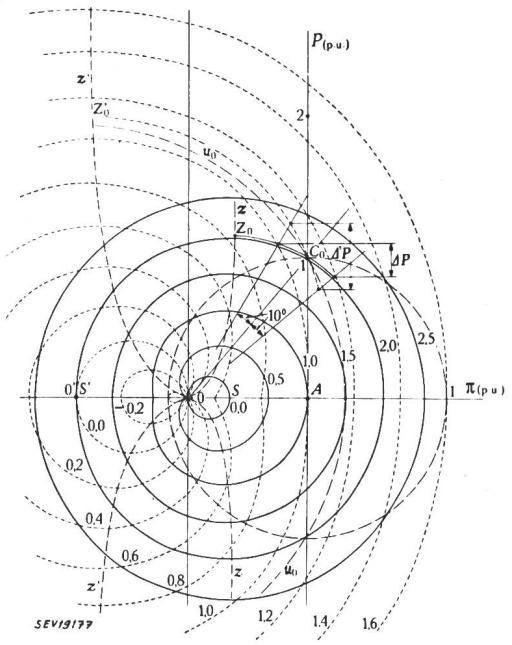


Fig. 5

Partie utile du diagramme général de fonctionnement pour le même exemple que celui de la fig. 4

Détermination de la réserve de puissance et des puissances synchronisantes statiques pour machine non réglée et pour machine réglée

Nous supposons que le point de fonctionnement de la génératrice soit encore caractérisé par le point C_0 correspondant à la puissance active nominale et à un déphasage φ nul. La tension qui est supposée maintenue constante n'est pas la tension aux bornes de la génératrice elle-même, mais, par compensation, la tension aux bornes OA plus la chute inductive de tension dans la réactance de fuites de la machine et dans la réactance de la ligne. Une construction simple montre que si cette tension maintenue constante est représentée sur la fig. 1 par OB, le point C doit se déplacer sur un cercle de centre O' situé à gauche de A, et tel que

$$O'A = OA \frac{AC}{AB} = OA \frac{x_q}{x_d'} \qquad (18)$$

soit, pour notre cas,

$$O'A = OA \frac{1{,}175}{0{,}6} = 1{,}96$$

Le point O' est donc pratiquement confondu avec S'. Nous traçons ainsi le cercle u_0 passant par C_0 qui, comme cela était à prévoir, suit sensiblement les courbes en limaçons à flux constant pour toute la zone utilisée normalement.

Le réglage de l'excitation tel qu'il est réalisé par régulateur de tension permet donc *pour les variations lentes de charge* de régler l'excitation pour maintenir le flux constant dans la roue polaire, soit de réaliser une réserve de puissance avant décrochage de l'ordre de 100 %, comme d'ailleurs le permettrait aussi le réglage en fonction de ϑ. On parvient ainsi à caractériser la stabilité statique artificielle pour un régime donné par un nombre qui indique la réserve de puissance avant décrochage.

On peut calculer également sur le diagramme pour le point C_0 les puissances synchronisantes statique P_s et transitoire P_s', en les calculant, par exemple, pour une variation $\Delta\vartheta$ de $+10°$ à $-10°$, que l'on rapportera ensuite au radian; on a ainsi pour le point C_0:

$$P_s = 0{,}66; \quad P_s' = 1{,}32; \quad \frac{P_s'}{P_s} = 2$$

Les réglages permettent ainsi de doubler la puissance synchronisante statique par rapport à sa valeur sans réglage.

Nous signalerons encore que le cercle de centre A et de rayon unité contient tous les régimes à charge nominale ou au-dessous. On voit combien est pratique ce diagramme général pour discuter les avantages d'un réglage particulier.

Nous résumerons comme suit les résultats acquis dans cette première partie par l'examen assez détaillé du cas particulier des oscillations de faible amplitude.

a) On a pu fixer sur le diagramme général des puissances d'une machine synchrone les *zones correspondant aux divers types de stabilité*, permettant ainsi de discuter son fonctionnement et de déterminer les avantages du réglage de l'excitation.

b) En l'absence de tout réglage, *la réserve de puissance* pour une surcharge lente est assez faible; cette réserve s'accroît considérablement avec le réglage de l'excitation. Pour l'exemple traité, ces réserves *sans* et *avec* réglage sont respectivement de 15 % et de 100 %.

c) L'avantage du réglage de l'excitation au point de vue de *l'accroissement de la puissance synchronisante* statique est tout aussi net, le réglage tendant à rapprocher cette puissance synchronisante statique artificielle de la puissance synchronisante transitoire. Pour l'exemple traité le réglage a doublé la puissance synchronisante statique.

d) Au point de vue *du choix du paramètre de réglage*, on doit considérer que l'idéal est d'obtenir par réglage une puissance synchronisante se confondant pratiquement avec la puissance synchronisante transitoire à la condition d'éviter les oscillations par un dispositif anti-hunting.

e) Si l'excitatrice série parfaitement réglée se rapproche le plus de ce cas idéal, on obtient des résultats pratiquement équivalents par l'emploi d'autres dispositifs de réglage, et notamment par l'emploi d'un régulateur maintenant constante la tension en un point fictif ou réel de la transmission. Nous avons montré que si ce point à tension constante est convenablement choisi le réglage permet de suivre de très près les limaçons à flux constant pour tous les régimes normaux de la génératrice.

f) L'augmentation de la réserve de puissance, et l'accroissement de la puissance synchronisante par réglage sont d'autant plus importants que la réactance de fuites x_d' (comprenant les fuites de la machine et la réactance de la ligne) est plus faible.

g) En principe, la puissance synchronisante statique renforcée artificiellement par réglage ne peut pas être supérieure à la puissance synchronisante transitoire, ce qui résulte de la troisième condition de Hurwitz. Si l'on veut accroître d'avantage P_s, il faut accroître parallèlement P_s', et pour cela, appliquer un réglage basé sur la variation du glissement du groupe par rapport au réseau, afin de renforcer le flux dans la roue polaire, renforcement auquel la machine tendrait d'ailleurs à s'opposer en vertu de la loi de Lenz. Ce réglage est surtout efficace quand il s'agit de stabilité dynamique pour des perturbations de grande importance.

Les imperfections des circuits de réglage tendent à atténuer les avantages que nous avons reconnus; il faut donc examiner maintenant l'influence de ces imperfections. Ce sera l'objet de la seconde partie de cette conférence.

III. Seconde partie

Cas d'un circuit de réglage non idéal

La fonction du circuit d'excitation est, d'une part, de détecter le paramètre de réglage choisi (variation d'angle, variation de tension, etc.), d'autre part, de transférer en l'amplifiant l'effet de ce paramètre aux bagues du rotor de la machine sous forme d'une tension d'excitation de grandeur suffisante.

Les appareils détecteurs et amplificateurs devraient être fidèles et rapides afin de transférer sans déformation ni retard les variations reçues à l'entrée. En pratique, il n'en est jamais ainsi; mais l'on s'est efforcé de réduire ces défauts à mesure que l'on se rendait compte des avantages d'un transfert rapide. A la fig. 6 quelques schémas types sont reproduits qui résument cette évolution, en considérant l'exemple particulièrement simple de réglage destiné à maintenir constante la tension aux bornes de la génératrice *1*. Le réglage doit réduire l'excitation quand cette tension dépasse la *valeur de consigne* et réciproquement l'augmenter dans le cas contraire.

Sur le schéma *A*, la génératrice *1* reçoit son excitation moyenne de l'excitatrice *4* à excitation shunt. Les variations de tension au secondaire des transformateurs *2* sont détectées par l'appareil *3* qui agit sur la résistance *5* en série dans le circuit d'excitation de *4*. Chacun sait que ce mode de réglage est très lent, aussi l'a-t-on complètement abandonné pour adopter une excitatrice à excitation séparée, de trois à quatre fois plus rapide que l'excitation shunt précédente.

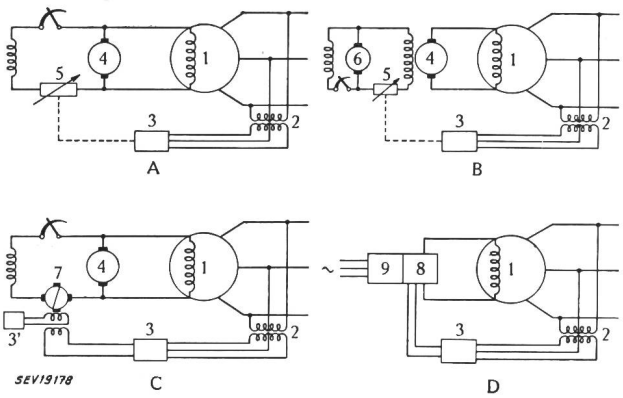


Fig. 6
Schémas types de circuits d'excitation

Sur le schéma *B*, l'excitation séparée est obtenue par l'intermédiaire de l'excitatrice pilote *6*, dont le courant principal est réglé par le régulateur *3* qui agit sur la résistance *5*. En fait, ce système d'excitation satisfait encore à la grande majorité des applications. Depuis quelques années seulement, on a proposé de remplacer l'excitatrice pilote par une excitatrice spéciale *7* disposée en survolteur comme on l'a indiqué dans le schéma *C*. Cette excitatrice pourrait être du genre amplidyne donc à coefficient d'amplification très élevé, ce qui permettrait de l'exciter avec des puissances très faibles telles que celles que l'on obtient par des circuits à tubes électroniques, agissant de *3* ou de *3'*.

Le coefficient d'amplification *A* d'une amplidyne varie avec les applications, mais il peut atteindre facilement pour une amplidyne ordinaire 11 000, avec une constante de temps *T* de 0,08 s, d'où un coefficient dynamique *Q* défini par le rapport $\frac{A}{T}$ de 138 000. Des amplidynes de précision peuvent avoir des caractéristiques atteignant les valeurs suivantes [3]:

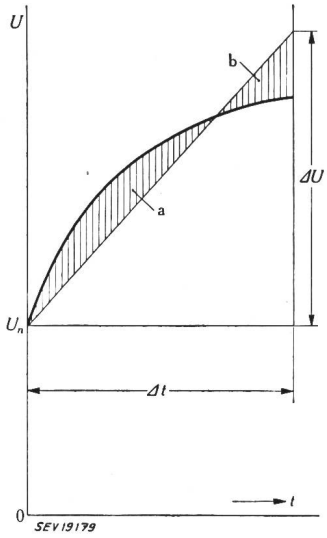
$$A = 100\,000; \qquad T = 0{,}05 \text{ s}; \qquad Q = 2\,000\,000$$

Enfin, le schéma type *D* ne contient que des dispositifs à tubes à l'exclusion de toute machine tournante. L'appareil de détection *3* transforme les variations du paramètre réglant en variations de tensions ou de phases pour l'attaque des thyratrons *8* alimentés par le transformateur à courants alternatifs *9*. Le transfert au travers de ce circuit est pratiquement instantané. Malheureusement le prix élevé de tels équipements oblige à les réserver à des applications bien définies.

Arrêtons-nous un instant sur les propriétés des machines tournantes utilisées dans les circuits d'excitation habituels, et qui conditionnent la qualité de ces circuits aux points de vue de la rapidité de réponse et de l'amplification.

Une dynamo est tout d'abord caractérisée par sa *vitesse de réponse* dont les Américains ont donné une définition universellement adoptée aujourd'hui. La

dynamo étant à circuit ouvert, et réglée pour son «régime normal» (vitesse normale et tension normale U_n), voir fig. 7, on court-circuite brusquement la résistance de réglage de son circuit d'excitation. Le relevé oscillographique de l'accroissement de la tension à ses balais permet de donner une valeur à cette vitesse de réponse.



A cet effet, on trace sur ce relevé oscillographique une droite passant par U_n et qui coupe la courbe $U = f(t)$ de telle sorte que les deux surfaces *a* et *b* situées de part et d'autre de la droite, la surface *b* étant limitée au temps $\Delta t = \frac{1}{2}$ seconde, soient égales. On lit l'accroissement de la tension ΔU de l'ordonnée de la droite ainsi tracée.

Fig. 7
Détermination de la vitesse de réponse nominale d'une excitatrice

La vitesse de réponse nominale de la dynamo est le rapport $\frac{\Delta U}{\Delta t}$ exprimé donc en volts par seconde.

La vitesse de réponse nominale relative est donnée par le rapport précédent divisé par la tension nominale U_n; elle caractérise la rapidité de réponse de la dynamo:

pour une vitesse de réponse de 2, l'excitatrice est *rapide*,
pour une vitesse de 0,5 à 2, l'excitatrice est *moyennement rapide*,
pour une vitesse inférieure à 0,5, l'excitatrice est *lente*.

Il est pratique surtout pour des discussions théoriques de caractériser une excitatrice non par sa vitesse de réponse, mais par une *constante de temps* qui variera suivant la vitesse de réponse de 0,1 à 1 s, la première valeur correspondant à une excitatrice à grande vitesse de réponse, la seconde à une excitatrice à faible vitesse de réponse.

Le constructeur dispose de divers moyens pour accroître les vitesses de réponse des excitatrices, tels que le fractionnement des circuits inducteurs de l'excitatrice et l'augmentation corrélative de leur

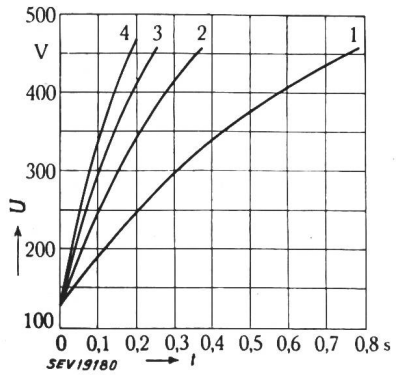


Fig. 8
Influence du fractionnement des enroulements d'une excitatrice sur sa vitesse de réponse

résistance, l'utilisation de circuits magnétiques feuilletés. La fig. 8 donne, par exemple, quelques courbes $U = f(t)$ obtenues par le fractionnement des circuits d'excitation en 2, 3 et 4 circuits séparés; les vitesses de réponse obtenues croissent en raison directe de ce fractionnement.

L'excitatrice est encore caractérisée par son «*plafond*», défini comme la valeur relative maximum obtenue lors du relevé oscillographique destiné à calculer la vitesse de réponse. Le plafond est donc donné par le rapport U_{max}/U_n; il ne dépasse généralement pas 2, mais peut atteindre des valeurs plus élevées.

Quand on se préoccupe surtout d'obtenir une excitation rapide, comme cela est nécessaire pour sauver le synchronisme, on doit rechercher en outre une vitesse de *réponse initiale* $\left(\frac{dU}{dt}\right)_{t=0}$ aussi grande que possible. Celle-ci dépend naturellement d'une vitesse de réponse nominale élevée et d'un haut plafond; mais pour augmenter cette vitesse de réponse initiale, on peut être conduit à prévoir, à cet effet, un enroulement supplémentaire dit *enroulement d'impulsion*, à réponse très rapide et agissant seulement dans les premiers instants.

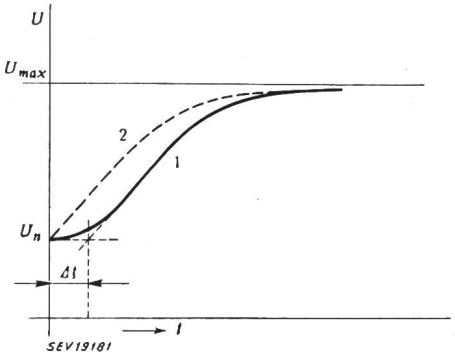


Fig. 9
Courbe de réponse d'un groupe de deux excitatrices en cascade

La vitesse de réponse initiale dépend du nombre de dynamos en cascade dans le circuit d'excitation. Déjà pour deux excitatrices en série, la courbe de réponse affecte la forme représentée à la fig. 9, par *1*, alors qu'une seule excitatrice donnerait une courbe du genre *2*. L'accroissement de la tension suivant *1* est à peu près négligeable pendant le temps Δt pour, ensuite, suivre un accroissement pratiquement le même que *2*.

Il serait donc intéressant de disposer de machines rapides du genre métadyne, amplidyne, isodyne ou rototrol[6]) ayant une puissance suffisante pour remplacer la chaîne formée par l'excitatrice pilote et l'excitatrice principale. A notre connaissance, les limites de puissance atteintes actuellement sont pour l'amplidyne 40 à 50 kW, et pour le rototrol 200 kW environ. L'accroissement de leur puissance permettrait de profiter alors complètement de leurs qualités de grande amplification et de rapidité de réponse moyenne et initiale.

Les ressources des circuits d'excitation à tubes électroniques sont pratiquement illimitées en ce qui concerne la rapidité de réponse et le plafond. A ce point de vue de tels circuits résoudraient entièrement

[6]) siehe *Tschappu, F.*: Der Rototrol, eine neue elektrische Gleichstrommaschine. Bull. SEV Bd. 42(1951), Nr. 20, S. 796...805.

le problème s'ils pouvaient être réalisés économiquement.

Examinons maintenant rapidement les *caractéristiques des détecteurs* des paramètres de réglage. Ces détecteurs peuvent être groupés comme suit:

détecteurs *mécaniques directs*
détecteurs *mécaniques indirects*
détecteurs *sans inertie*

Les détecteurs mécaniques directs comprennent les appareils régulateurs à déplacement d'un curseur ou d'un secteur roulant sur les plots d'une résistance. Ils jouent donc le rôle de détecteur grâce au mouvement imprimé par les variations du paramètre choisi, et le rôle de régulateur grâce aux variations de résistance qui résultent de leur mouvement. Nous considérons, à titre d'exemple, le régulateur à secteurs roulants Brown Boveri, dont la fig. 10

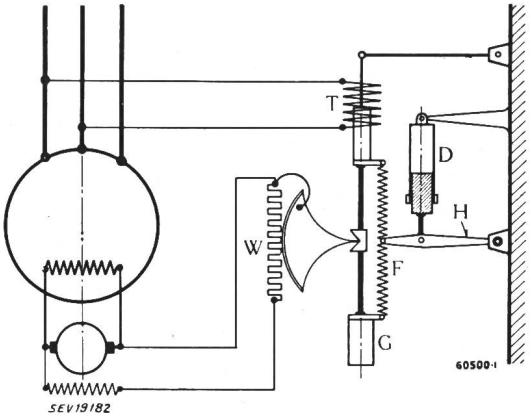


Fig. 10
Représentation schématique du réglage par un régulateur à secteurs roulants Brown Boveri

donne l'application au réglage de la constance de la tension aux bornes d'une génératrice. Cette figure est assez schématique pour en faire mieux comprendre le fonctionnement. Le solénoïde T exerce sur son armature une attraction qui, pour la tension de consigne donnée, est équilibrée par le poids G. Tout changement de la tension aux bornes de la génératrice provoque un déplacement de cette armature, d'où une modification de la résistance de réglage W par l'effet du roulement sur W du secteur roulant. On sait qu'un régulateur aussi simplement constitué n'assurerait pas la stabilité du réglage mais favoriserait l'entretien d'oscillations. On l'a stabilisé en le complétant par un dispositif amortisseur D accouplé aux déplacements de l'armature T par le levier H et le système élastique F. Ce ressort F modifie temporairement le statisme du régulateur jusqu'au moment où l'amortisseur D et le levier H auront pris leur nouvelle position équilibrant les deux branches de F.

Supposons que la génératrice tout d'abord assez faiblement chargée passe brusquement à une charge supérieure; la tension à ses bornes s'abaisse et le régulateur doit réduire la valeur de la résistance W, afin de relever la tension en passant, par exemple, du repère 3 au repère 2 sur la fig. 11. Ce passage s'effectue suivant des oscillations rapidement amorties, telles que celles que l'on a représentées sur cette figure, où M représente en fonction du temps le déplacement de l'armature T et D le déplacement du point F. La variation correspondante de la tension aux bornes de la génératrice est représentée

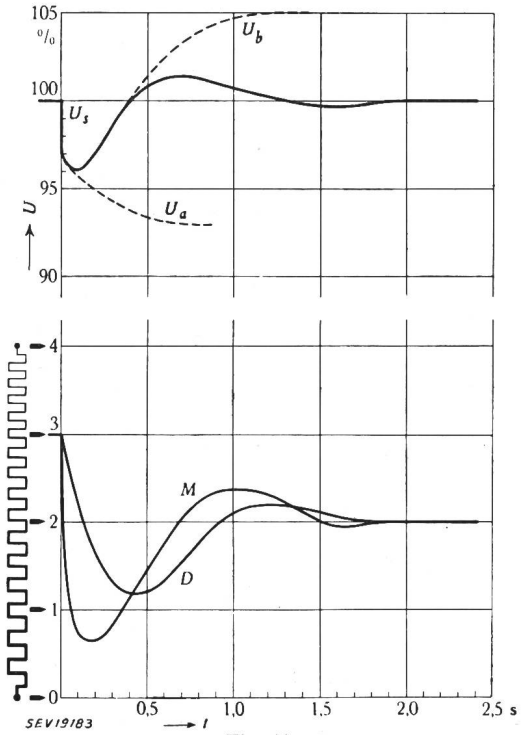


Fig. 11
Développement en fonction du temps du réglage pour le cas prévu à la fig. 10

sur la même figure. Après une chute rapide et momentanée de tension de 4 % environ, la courbe se relève pour se stabiliser rapidement à sa valeur normale U_s. Sans réglage, elle aurait suivi la courbe pointillée U_a, et le premier surréglage s'il n'avait été atténué par la suite eût provoqué un accroissement de tension suivant U_b.

Le régulateur qui stabilise ainsi rapidement les variations de la tension U_s, joue donc en même temps le rôle de stabilisateur dispensant ainsi de prévoir des dispositifs «anti-hunt», comme la plupart des autres détecteurs.

Un détecteur mécanique indirect fonctionne comme le précédent, mais le réglage est transmis par un système amplificateur complémentaire par servomoteur électrique ou hydraulique, permettant la commande d'organes massifs nécessaires au contrôle de courants de fortes intensités.

La précision des bons détecteurs mécaniques est de l'ordre de 0,3 %; elle est d'ailleurs indépendante de la tension de référence. La vitesse de réponse est telle que la constante de temps correspondante est de l'ordre de $^1/_{10}$ de seconde pour les régulateurs directs et de $^2/_{10}$ de seconde pour les régulateurs indirects. L'expérience a montré que, malgré ces constantes de temps des excitatrices et des régulateurs, la stabilisation des machines par réglage de leur excitation est très efficace quand il s'agit de variations de charge relativement lentes: la stabilité statique artificielle est alors assurée jusqu'à proximité de sa limite théorique qui se confond, comme on l'a vu, avec la limite de stabilité transitoire.

La fig. 12 donne, à titre d'exemple, les résultats obtenus par un réglage de l'excitation dépendant de l'angle de déphasage ϑ. Il s'agit d'une génératrice raccordée directement au réseau, pour laquelle la limite théorique de stabilité statique naturelle, sans réglage, est représentée par Oz et la limite théorique de stabilité statique artificielle, donc avec réglage, est représentée par Oz' se confondant avec la limite

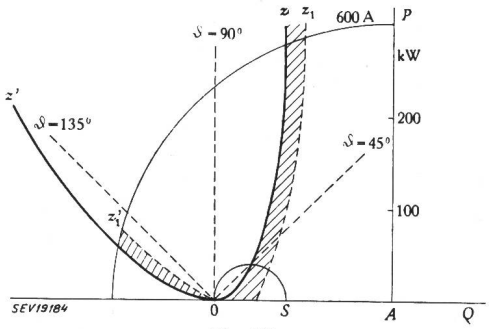


Fig. 12
Limites de stabilité statiques naturelle Oz_1 et artificielle Oz_1' obtenues expérimentalement, et comparées avec les limites correspondantes théoriques Oz et Oz'
Cas d'une machine synchrone raccordée directement au réseau de grande puissance

de stabilité transitoire naturelle. Les limites pratiques sont représentées respectivement par Oz_1 et Oz'_1 et les surfaces couvertes de hachures font apparaître les surfaces perdues, par la nécessité de conserver une puissance synchronisante suffisante pour parer aux petites variations de charge au cours des essais. La branche Oz'_2 a dû être interrompue non à cause d'un manque de stabilité, mais à cause d'une surcharge en ampères de la machine prévue pour un courant nominal de 500 A.

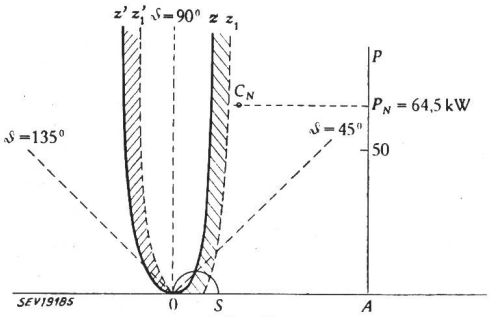


Fig. 13
Limites de stabilité statiques naturelle Oz_1 et artificielle Oz_1' obtenues expérimentalement, et comparées avec les limites correspondantes théoriques Oz et Oz'
Cas d'une machine synchrone raccordée au réseau de grande puissance par l'intermédiaire d'un modèle de ligne représentant une longueur de ligne réelle de 866 km

La fig. 13 donne les mêmes résultats, mais pour le cas d'un raccordement de la génératrice au réseau de grande puissance par l'intermédiaire d'un modèle de ligne correspondant à une ligne réelle de 866 km. Les parties couvertes de hachures représentent encore les écarts entre les courbes limites de stabilité théoriques et les valeurs limites mesurées au cours des essais.

Les résultats ont été trouvés pratiquement identiques si le réglage est effectué en se basant sur les variations de la tension en un point de la transmission au lieu de la variation de l'angle ϑ et si l'on compounde plus ou moins les excitatrices.

Des essais de stabilisation d'une machine pour des variations importantes et brusques de charge du réseau utilisant ces réglages simples n'ont pas été couronnés du même succès, ce qui se comprend aisément, car il est nécessaire alors que l'excitation puisse agir dans un temps extrêmement court si l'on veut pouvoir sauver le synchronisme. Il faut alors avoir recours aux détecteurs sans inertie agissant sur des circuits amplificateurs dénués de retard.

Il existe une grande variété de types de *détecteurs sans inertie* parmi lesquels nous citons:

les détecteurs à tubes électroniques
les détecteurs à redresseur sec
les détecteurs à résistances non linéaires
les détecteurs à réactances saturées
les détecteurs magnétiques ou «transducteurs»

En général, les circuits constitués par ce type de détecteurs doivent être complétés par des dispositifs «anti-hunt», à moins que l'on adopte, comme nous l'avons réalisé, un paramètre de réglage fonction du glissement dont nous avons dans la première partie de ce travail indiqué les avantages pour éviter les oscillations entretenues.

Des circuits d'excitation entièrement constitués par des tubes électroniques, ou mixtes, avec détecteurs sans inertie attaquant des amplificateurs rotatifs ont été réalisés surtout pour le réglage des compensateurs synchrones pour lesquels la rapidité de réglage revêt une grande importance. Les prix d'installation élevés ont empêché jusqu'ici la généralisation de semblables dispositifs.

Quoique j'aie laissé de côté le problème de la stabilité dynamique des machines synchrones, je voudrais, en terminant, présenter ici quelques résultats obtenus aux Usines Brown Boveri & Cie au cours de la recherche de l'influence sur la stabilité dynamique d'un réglage de l'excitation à deux paramètres dont l'un est une variation de tension ou d'angle, et dont l'autre est une variation du glissement du groupe par rapport au réseau.

Le schéma d'excitation utilisé pour ces essais est représenté sur la fig. 14. La génératrice synchrone *1* entraînée par un moteur à courant continu, non

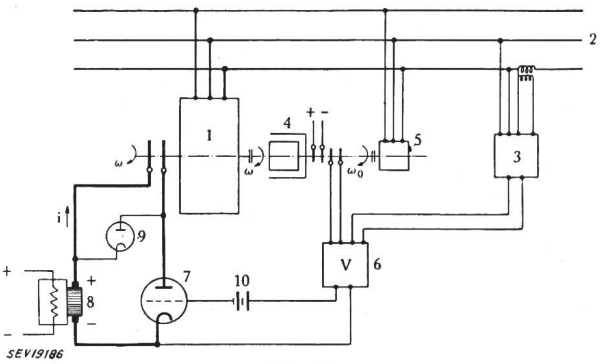


Fig. 14
Schéma utilisé pour étudier l'influence du réglage de l'excitation en fonction du glissement

représenté, est raccordée au réseau de grande puissance par l'intermédiaire d'un modèle de ligne *2*, qui représente une ligne réelle de 866 km pour la

fréquence de 50 Hz. Le régulateur à secteurs roulants *3* est actionné par les écarts des variations de la tension en un point de la transmission par rapport à une valeur de consigne; il donne donc à sa sortie une variation de tension reproduisant la variation de la tension d'entrée aux déformations près introduites par le régulateur, dont on a déjà parlé.

Le réglage fonction du glissement du rotor de la génératrice par rapport au réseau a été obtenu, en utilisant un «différentiel» électrique *4* formé de deux rotors, le rotor intérieur tournant à la vitesse de la génératrice, le rotor extérieur tournant à la vitesse du réseau. Ces deux rotors portent des bobinages analogues respectivement au rotor et au stator d'une génératrice synchrone monophasée. On excite le rotor extérieur par du courant continu, et obtient aux bagues du rotor intérieur une petite f. é. m. proportionnelle à la différence des vitesses.

Les deux paramètres réglants agissent ainsi simultanément sur l'amplificateur à tubes *6* dans des proportions que l'on peut ajuster. Aux bornes de sortie de *6*, on obtient des variations de tensions suffisantes pour permettre l'excitation de la grille des tubes électroniques travaillant en parallèle et représentés par une triode unique *7*. La pile *10* permet le réglage du point moyen de fonctionnement de *7*.

Le circuit principal d'excitation est constitué:

par la petite génératrice tournante *8* de construction ordinaire produisant la tension de plaque, ainsi que le courant de plaque qui, en même temps, est le courant principal d'excitation;

par une résistance de décharge polarisée *9* destinée à réduire rapidement les surtensions dues à la self-induction du circuit inducteur en cas de diminution brusque de la tension d'excitation.

Ce circuit n'a pas été étudié pour soutenir la comparaison industrielle et économique avec les dispositifs ordinaires; son but était d'une part de faire la preuve que l'excitation fonction du glissement pouvait être réalisée pratiquement, et, d'autre part, de contrôler l'efficacité de ce réglage pour le maintien de la stabilité des machines.

Nous avons réalisé ainsi un système de réglage possédant des propriétés totalement différentes des réglages habituels. En principe, sous l'influence d'une variation brusque et violente de régime, la machine n'oscille plus, mais passe simplement d'un régime à l'autre sous forme d'un déplacement voisin de l'apériodicité. L'acroissement d'excitation qui est proportionnée à la violence de la perturbation provoque un très fort amortissement *dont l'effet se produit déjà au cours de la première élongation*, imposant à la génératrice une lenteur relative de déplacement qui donne au régulateur normal le temps de compléter son réglage en fonction des paramètres habituels.

Les fig. 15 et 16 donnent à titre d'exemple et respectivement *avec* et *sans* réglage sous la dépendance du glissement l'amortissement des oscillations provoquées par le passage brusque de la marche synchrone à vide à la marche à une puissance de 63 kW pour la fig. 15 et de 40 kW pour la fig. 16. Sur ces figures, les courbes *1* représentent les oscillations de la puissance en fonction du temps et les courbes *2* celles de l'angle ϑ.

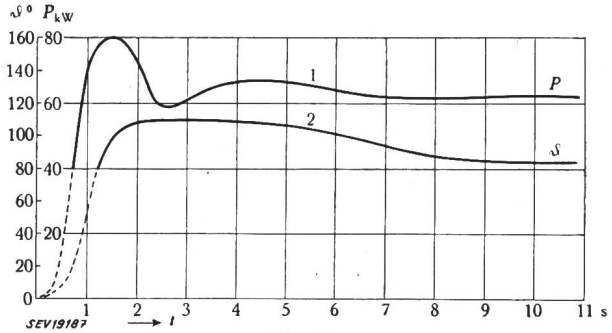


Fig. 15

Stabilité dynamique artificielle (avec réglage en fonction du glissement) pour une charge brusque de la machine synchrone entre 0 et 63 kW

Remarquer l'amortissement considérable de la perturbation

Alors que sur la fig. 15 l'amortissement est remarquable, sur la fig. 16 il est au contraire extrêmement faible, cela malgré la réduction de la puissance de 63 à 40 kW; cette dernière puissance n'aurait pu être dépassée sans décrochage. Naturellement ce résultat nécessite un plafond du système d'excitation élevé comme le montre l'oscillogramme de la

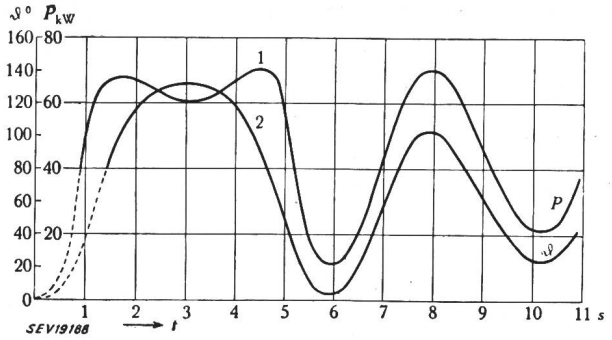


Fig. 16

Stabilité dynamique naturelle (sans réglage en fonction du glissement) pour une charge brusque de la machine synchrone entre 0 et 40 kW

Remarquer le faible amortissement par rapport à celui obtenu sur la fig. 15

fig. 17 qui donne en fonction du temps le relevé simultané: d'un top appliqué sur le circuit de grille de la triode *7* (enregistrement *1*), de la variation de tension aux bagues de la génératrice (enregistrement *2*), de la variation correspondante du courant d'excitation (enregistrement *3*). Au premier instant,

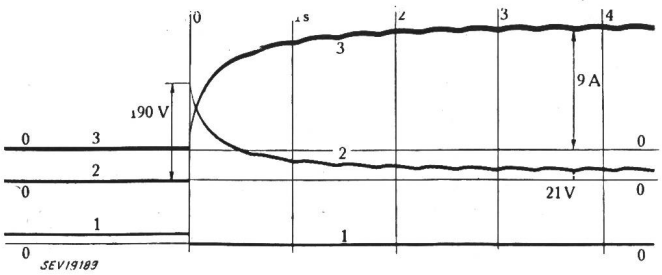


Fig. 17

Constante de temps réduite obtenue par le réglage en fonction du glissement pour l'application d'un top sur le circuit de grille des triodes de réglage

1 indicateur du top; *2* variation correspondante de la tension aux bagues du rotor; *3* variation correspondante du courant d'excitation

Le courant d'excitation atteint le 50 % de sa valeur finale après 0,12 s

et sans retard décelable, la tension d'excitation atteint une tension plafond de 190 V pour se stabiliser finalement à 21 V. Le courant d'excitation est à croissance initiale très rapide et atteint déjà la moitié de sa valeur finale au bout de 0,12 s. On se rend compte ainsi de la rapidité d'action de ce circuit de réglage.

En résumé, nous avons ainsi montré que la modification très rapide de l'excitation d'une génératrice synchrone, raccordée à un réseau de grande puissance, en faisant appel à deux paramètres réglants, dont l'un est choisi parmi les paramètres habituels (variation d'une tension, ou variation d'un angle) et dont l'autre est obligatoirement le glissement permet donc de réaliser un fonctionnement de cette machine totalement différent des fonctionnements habituels. La génératrice ainsi réglée ne réagit plus aux perturbations importantes que par des déplacements relativement très lents, qui donnent aux régulateurs normaux le temps d'agir à leur tour.

Ces résultats nous paraissent ouvrir des horizons nouveaux sur les modes de réglage des machines synchrones en marche en parallèle, en permettant d'assurer une stabilité artificielle aux fortes perturbations pour une plus grande étendue de leurs régimes, donc en définitive en permettant d'utiliser ces machines pour des conditions plus sévères, telles qu'elles se présentent, par exemple, dans le cas des longues lignes de transmission, où l'on doit fonctionner relativement près des limites de stabilité.

IV. Conclusion

En résumé, j'ai cherché dans cette Conférence à apporter un peu de clarté dans la notion, en général, assez vague de la stabilité des machines synchrones; j'ai montré ensuite les avantages que donne le réglage de leur excitation pour améliorer leurs conditions de fonctionnement tant au point de vue de l'accroissement de la réserve de puissance avant décrochage qu'à celui de l'accroissement de leur stabilité. Cette discussion a été facilitée par une représentation graphique relativement simple.

Les réglages utilisant des circuits normaux d'excitation constitués par des régulateurs et par des machines tournantes suffisent entièrement à l'obtention du renforcement de la stabilité statique, malgré l'imperfection naturelle de ces circuits.

Par contre, l'amélioration de la stabilité transitoire et de la stabilité dynamique nécessite l'emploi de circuits d'excitation plus rapides faisant appel à des tubes électroniques, et l'utilisation du glissement comme paramètre de réglage.

Bibliographie rappellée dans le texte

[1] *Lavanchy, C.:* La stabilité des génératrices synchrones. Rev. Brown Boveri t. 36(1949), n° 7/8, p. 264...270.
[2] *Frey, W.:* Stabilisierung von Synchrongeneratoren durch rasche Regelung der Erregung bei der Energieübertragung auf grosse Entfernung. Brown Boveri Mitt., t. 33(1946), n° 11, p. 335...347.
[3] *Jung, R.:* Perfectionnements au couplage Ward-Leonard pour machines d'extraction par l'emploi d'une excitation amplidyne. Bull. Soc. franç. Electr. 6e série, t. 8(1948), n° 77, p. 35...43.

Adresse de l'auteur:
Dr. *Ch. Lavanchy*, Ingénieur, A.-G. Brown, Boveri & Cie., Baden (AG).

Erfahrungen mit der Schnellwiedereinschaltung auf der 150-kV-Leitung Gösgen—Lavorgo

Von *F. Schär*, Olten

621.316.57.064.22 : 621.316.92

Es wird über das Verhalten der Schnellwiedereinschaltung im 150-kV-Netz der Aare-Tessin A.-G. bei einigen besonders interessanten Störungen berichtet.

Comportement des dispositifs de réenclenchement ultrarapide dans le réseau à 150 kV de la S. A. Aaar-Tessin, lors de quelques perturbations intéressantes.

Zu Beginn des Sommers 1950 wurde die Schnellwiedereinschaltung auf der Freileitung Gösgen–Lavorgo des gelöschten 150-kV-Netzes der Aare-Tessin A.-G. für Elektrizität (Atel) in Betrieb genommen. Die 146 km lange Leitung verbindet über den Lukmanierpass die Kraftwerkgruppen nördlich und südlich der Alpen. Die Schutzausrüstung, bestehend aus Drehfeld-Schnelldistanzschutz mit Hochfrequenzkupplung und Druckluftschalter, wurde von Brown Boveri geliefert. In der bisherigen Betriebszeit von ca. 1¼ Jahr traten an dieser Leitung einige durch ihren Verlauf bemerkenswerte Störungen auf, worüber berichtet werden soll.

Prinzipielle Wirkungsweise der Einrichtung

Die Strecke Gösgen–Lavorgo (*A* in Fig. 2) ist an beiden Enden mit Distanzrelais ausgerüstet, die über einen Hochfrequenzkanal miteinander gekoppelt sind. Da jedes Relais 85 % der ganzen Strecke mit seiner Grundzeit schützt (siehe Fig. 1), oder anders ausgedrückt, Fehler innerhalb derselben nach rund 0,1 s abschaltet, so liegen die Störherde entweder in der Grundzeitstufe beider oder mindestens in der Grundzeitstufe eines der Relais. Erteilt nun ein Di-

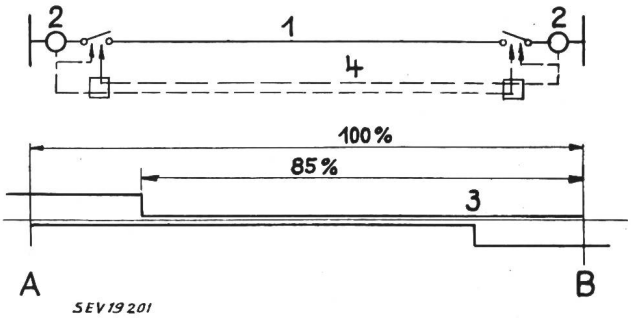


Fig. 1
Auslösecharakteristiken der Distanzrelais und Prinzipschema der Auslösekupplung über einen HF-Kanal
1 Zu schützende Leitung
2 Distanzrelais
3 Auslösecharakteristik des Distanzrelais in Station B
4 HF-Kanal

stanzrelais dem zugehörigen Schalter den Auslösebefehl, so wird dieser über den Hochfrequenzkanal gleichzeitig auch dem Schalter am andern Leitungs-