Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 71 (1980)

Heft: 13

Artikel: Optimisation des paramètres de systèmes de compensation statiques en vue de renforcer la stabilité d'un réseau

Autor: El-Sadek, M.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-905264

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: 08.08.2025

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

Optimisation des paramètres de systèmes de compensation statiques en vue de renforcer la stabilité d'un réseau

Par M. El-Sadek

621.316.761.2:621.3.011.7

L'insertion de compensateurs statiques, placés et commandés de manière optimale, est un moyen efficace d'améliorer la stabilité des réseaux électriques en régime stationnaire et en régime transitoire. Une méthode est proposée pour déterminer l'emplacement et la taille de ces compensateurs, les paramètres optimaux de leurs régulateurs et l'effet stabilisant qu'ils ont dans un réseau. Une représentation des charges sensibles aux variations de la tension est inclue dans le modèle. Le système est linéarisé en ne considérant que des perturbations de faible amplitude autour de l'état d'équilibre. On a développé un programme pour résoudre des réseaux à plusieurs machines; les résultats d'une étude sur un réseau existant sont également présentés.

Statische Kompensatoren, die optimal angeordnet und geregelt werden, sind ein geeignetes Mittel, die Stabilität elektrischer Netze im stationären sowie transienten Zustand zu verbessern. Es wird eine Methode zur Bestimmung des Standortes und der Grösse dieser Kompensatoren, der optimalen Parameter ihrer Regler sowie ihrer stabilisierenden Wirkung im Netz vorgeschlagen. Im Modell werden auch die auf Spannungsschwankungen empfindlichen Lasten berücksichtigt. Das System wird linearisiert, indem nur Störungen des Gleichgewichtszustandes geringer Amplitude in Betracht gezogen werden. Es wurde ein Programm zur Berechnung von Netzen mit mehreren Maschinen entwickelt. Die Resultate einer Studie an einem bestehenden Netz werden angegeben.

1. Introduction

Les réseaux faiblement maillés, tels qu'on les rencontre fréquemment dans des pays où les centres de production sont très éloignés des centres de consommation, de même que les réseaux interconnectés comportant deux ou plusieurs régions reliées par de longues lignes d'interconnexion présentent, en général, de sérieux problèmes de stabilité. On peut y remédier par des installations produisant ou consommant de la puissance réactive (telles que compensateurs synchrones et compensateurs statiques). Celles-ci maintiennent la tension en certains nœuds en régime stationnaire et améliorent la stabilité dynamique du réseau.

Les moyens apportant une amélioration de la stabilité des réseaux peuvent être classés selon qu'ils s'appliquent:

– aux groupes tournants (dispositions constructives ou mode d'exploitations),

– aux réseaux (mise en parallèle de plusieurs lignes, installation de condensateurs en série, installation de compensateurs statiques ou synchrones, etc.).

A l'heure actuelle, on utilise de plus en plus des types divers de compensateurs statiques [1]. Tous sont munis de systèmes de réglage qui permettent une commande très rapide de la puissance réactive consommée dans le réseau en régime perturbé. Par conséquent, ils peuvent à la fois augmenter la stabilité et participer au maintien de la tension. Il est donc nécessaire, pour les planificateurs de réseaux utilisant de tels dispositifs, de déterminer la taille et l'emplacement des compensateurs, et les paramètres de leur système de réglage de manière optimale pour un réseau donné.

Jusqu'à maintenant, deux études [2; 3; 4] ont été faites afin d'évaluer l'effet stabilisant du système de compensation statique dans un réseau électrique simple, contenant une machine synchrone reliée à un réseau de puissance infinie, avec des méthodes linéaires. Une méthode [5] a également été proposée pour déterminer l'emplacement d'un compensateur statique dans un réseau en régime stationnaire et en régime dynamique, en utilisant les techniques courantes de répartition optimale de la puissance réactive.

On a étudié l'influence des paramètres du compensateur statique, ainsi que son emplacement optimal par l'observation de l'oscillation éventuelle consécutive à un faible écart par rapport à la solution d'équilibre initiale. Pour ces petits mouvements, le système peut être linéarisé. Le problème se ramène alors à la détermination des valeurs propres du système linéaire. Une condition nécessaire et suffisante de stabilité est que toutes les valeurs propres aient une partie réelle négative. Les effets stabilisants du compensateur statique dans un réseau sont illustrés par les variations des lieux de la valeur propre dominante du système dans le plan complexe en fonction des variations des paramètres de ce compensateur. Son emplacement optimal peut être déterminé par les variations du facteur d'amortissement de cette valeur propre dominante pour les différents nœuds du réseau.

Pour le compensateur statique, on utilise un modèle universel qui peut représenter tous les types connus à l'heure actuelle [6]. Pour les charges, la représentation à impédance constante, utilisée couramment pour simplifier les calculs, est assez loin de la réalité. C'est pourquoi on a utilisé des modèles tenant compte des caractéristiques statiques et dynamiques; on peut ainsi étudier leurs effets sur le comportement oscillatoire des réseaux. Pour cette représentation il est indispensable que les axes des tensions du réseau soient considérés comme axes de référence du système. Cette contrainte avait toujours été évitée auparavant à cause des problèmes mathématiques inhérents à la linéarisation des équations du système et à la formation de la matrice de coefficients.

2. Modèles des éléments du système

2.1 Compensateur statique

Le compensateur est représenté comme une machine synchrone dépourvue d'inertie. Cette machine est constituée par une force électromotrice E_s, de module commandé par un système de réglage et de même phase que la tension du nœud auquel le compensateur est relié, en série avec une réactance X_s. Cette réactance correspond à l'inverse de la valeur, en p.u, de la taille du compensateur statique. Le système de réglage est regroupé dans une fonction de transfert équivalente. La partie

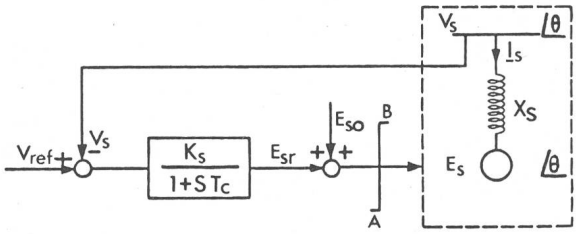

Fig. 1 Modèle du compensateur statique

essentielle de celui-ci est un régulateur intégrateur, dont la fonction de transfert a la forme $K/(1+sT)$. Le schéma bloc de ce compensateur est illustré à la figure 1. Son comportement dynamique est décrit par l'équation différentielle:

$$\frac{dE_{sr}}{dt} = \frac{K_s}{T_c}(V_{réf} - V_s) - \frac{E_{sr}}{T_c} \tag{1}$$

et l'équation algébrique:

$$\underline{I}_s = \frac{[V_s]-[E_s]}{X_s} \underline{|\theta - 90} \tag{2}$$

Toutes les grandeurs utilisées dans ces équations sont indiquées à la figure 1.

Le modèle linéarisé, adapté pour s'intégrer à la matrice de coefficients du système, est donné dans l'appendice A. Il permet de représenter tous les types de compensateurs statiques connus à l'heure actuelle, et de varier la taille du compensateur et les paramètres de son régulateur [6].

2.2 Charges dépendantes de la tension

Il est nécessaire, dans les études de réseaux de transport d'énergie électrique de modéliser les charges de façon aussi réaliste que possible. On les représente par des éléments à puissance constante, à courant constant ou à impédance constante. Pour chacun de ces types, on a développé un modèle linéarisé sous la forme:

$$[\Delta I] = [A_c]\,[\Delta U] \tag{3}$$

Les matrices de coefficients $[A_c]$ sont données dans les appendices B et C. Les charges tournantes, telles que les moteurs asynchrones, sont représentées par un modèle linéarisé, développé et rapporté aux axes du réseau [7] de façon à s'introduire facilement dans la matrice de coefficients du système.

2.3 Réseau

La réponse des éléments passifs et linéaires du réseau est considérée comme instantanée avec des relations algébriques entre les tensions et les courants à la fréquence fondamentale sous la forme:

$$[\Delta I] = [Y]\,[\Delta U] \tag{4}$$

où Y est une matrice d'admittance nodale réelle, où l'on a séparé les parties réelles et imaginaires (dimension $2n \times 2n$).

2.4 Machines synchrones

La machine synchrone peut être représentée par une force électromotrice de module constant derrière une réactance transitoire (modèle classique). Un second modèle, plus détaillé, fait appel à la théorie à deux axes en régime transitoire ou subtransitoire; il inclut des modèles simples pour le régulateur de tension, le régulateur de vitesse et la turbine.

Les problèmes rencontrés lors de la linéarisation des modèles et les solutions proposées sont décrits dans un rapport interne [7].

3. Méthodologie

3.1 Structure des équations du système

Il s'agit d'abord d'établir pour chaque élément du système (générateur, réseau, compensateur statique, régulateur) un modèle d'état, c'est-à-dire qu'il faut le représenter sous forme d'un système d'équations différentielles du premier ordre et d'un groupe d'équations algébriques auxiliaires liant les variables d'état $[x]$ et les variables algébriques auxiliaires $[y]$. Ce modèle a la forme générale suivante:

$$[\dot{x}] = f(x, y) \tag{5}$$

$$0 = h(x, y) \tag{6}$$

3.2 Linéarisation

Le système est ensuite linéarisé. La procédure de linéarisation est obtenue en développant $f(x, y)$, $h(x, y)$ en séries de Taylor autour du point de fonctionnement en régime stationnaire. Le système peut alors être écrit sous la forme linéaire suivante:

$$\Delta\dot{x} = M_1\,\Delta x + M_2\,\Delta y \tag{7}$$

$$0 = M_3\,\Delta x + M_4\,\Delta y \tag{8}$$

ou, en forme matricielle:

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 \\ M_3 & M_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \tag{9}$$

M_1, M_2, M_3, M_4 sont des matrices groupant les paramètres du système. Elles décrivent les liaisons internes entre les variables d'états et les variables algébriques auxiliaires.

3.3 Elimination des variables algébriques auxiliaires

Afin d'appliquer les méthodes des systèmes linéaires, les équations linéarisées du système doivent être mises sous la forme

$$[\Delta\dot{x}] = [A]\,[\Delta x] \tag{10}$$

Il s'agit alors d'éliminer les variables algébriques auxiliaires Δy de l'équation (5). A partir de (9), on peut le faire sous la forme:

$$[\Delta\dot{x}] = (M_1 - M_2\,M_4^{-1}\,M_3)\,[\Delta x] \tag{11}$$

La matrice résultant du terme $(M_1 - M_2\,M_4^{-1}\,M_3)$ correspond à la matrice de coefficients $[A]$ du système. Vu que le temps nécessaire pour inverser la matrice M_4 (de dimension $2n \times 2n$, où n est le nombre de nœuds du réseau) est considérable, on a utilisé une méthode d'élimination progressive selon un algorithme modifié de «Gauss» pour calculer directement la matrice $[A]$.

En fait, la formation de cette matrice $[A]$ par la technique d'élimination des variables algébriques auxiliaires $[\Delta y]$, est plus simple que les autres techniques d'opérations matricielles successives offertes dans la littérature [8; 9], mais elle présente l'inconvénient de nécessiter une grande mémoire et des opérations inutiles pour une matrice de coefficients très creuse. Cependant, la formation de la matrice par cette technique semble inévitable lorsque les caractéristiques des charges statiques doivent être prises en considération dans les études d'un réseau à plusieurs machines. On a pallié ces inconvénients en calculant analytiquement les formules finales pour chaque élément, rapportées aux axes de référence des tensions du réseau. On peut alors utiliser directement ces formules pour le calcul numérique et on économise ainsi le calcul matriciel intermédiaire, les tableaux de travail nécessaires à ce calcul, la matrice très creuse de transformation entre les axes de référence des machines synchrones et les axes de référence des tensions, et sa transposée. Toutes deux sont des matrices de dimension

$(2n \times 2n)$, n étant le nombre des nœuds du réseau. Pour les grands réseaux, on a prévu l'élimination en utilisant une technique de factorisation avec ordre d'élimination optimal.

En utilisant les mouvements absolus des rotors, on obtient une matrice de coefficients du système singulière, si l'on n'a pas un accès représentant un réseau infini. On doit donc prendre une machine comme référence des angles rotoriques, et l'on fait l'étude avec le mouvement relatif des rotors.

3.4 Recherche des paramètres optimaux du compensateur

Les propriétés de stabilité d'un système linéaire sont essentiellement liées à la position des valeurs propres de sa matrice de coefficients dans le plan complexe. Pour un système stable, ces valeurs propres doivent se trouver à gauche de l'axe imaginaire. En effet, un tel système n'admet dans son mouvement propre – dans ses régimes transitoires – que des composantes amorties (oscillatoires ou non). Toutefois, dans la pratique, il s'agit encore d'avoir un bon amortissement de ces oscillations. Les conditions d'amortissement des régimes transitoires sont liées à l'éloignement des valeurs propres de l'axe imaginaire. Elles peuvent être observées directement dans le plan complexe et sont exprimées par un facteur associé à chaque valeur propre. Pour une valeur propre complexe de la forme $\lambda_i = a_i \pm j\omega_i$, le facteur d'amortissement est donné par

$$\xi = -a_i / \sqrt{a_i^2 + \omega_i^2} \qquad (12)$$

La valeur propre dominante correspond au mouvement qui s'atténue le plus tard, c'est donc elle qui est à considérer pour étudier le comportement oscillatoire d'un système. Son facteur d'amortissement donne une indication sur le degré de stabilité du système.

Les paramètres essentiels du compensateur statique sont le gain K de son régulateur, la constante de temps T et la réactance X_s qui correspond à sa taille. Le principe de l'évaluation du degré de stabilité des systèmes linéaires, décrit ci-dessus, permet la recherche des valeurs optimales de ces paramètres qui s'effectue comme suit:

– On fixe la constante de temps T du compensateur statique à une valeur minimum.

– On choisit une valeur initiale pour le gain K, plus petite que les valeurs typiques connues actuellement.

– On choisit une valeur initiale très petite pour la réactance du compensateur, correspondant à une taille et donc à une puissance supérieure ou égale à la puissance réactive totale de ce réseau.

– En utilisant ces paramètres initiaux, on calcule le facteur d'amortissement du réseau avec ce compensateur relié à un nœud spécifié.

– On augmente régulièrement la réactance X_s jusqu'à ce qu'on constate que le facteur d'amortissement de la valeur propre dominante du système linéarisé commence à diminuer; on trouve ainsi la valeur optimale de la réactance (et la taille optimale) correspondant à cette valeur de gain K et à cette valeur de la constante de temps T.

– On augmente régulièrement le gain K, en laissant toujours la constante de temps à une valeur fixe, et on calcule comme auparavant les réactances optimales correspondantes; en effet, on obtient la valeur du plus grand degré de stabilité, soit avec une taille plus grande et un gain plus petit, soit inversément. A partir de certaines valeurs du gain K, ces valeurs ne conviennent plus pour maintenir la tension en régime stationnaire et leur réalisation pratique est difficile, le courant appelé étant excessif.

– En variant la constante de temps T, on obtient une série de courbes, chacune d'elles représentant la valeur de la taille correspondant aux différents gains K. Ces courbes ont les limites inférieures et supérieures pour rester dans des valeurs raisonnables du point de vue pratique.

3.5 Emplacement optimal d'un compensateur statique dans un réseau donné

Le réseau étudié contient une ligne longue sur laquelle quelques nœuds intermédiaires doivent être créés. Un calcul de répartition de puissances (load-flow) est nécessaire pour trouver l'état initial des nœuds. Puis on calcule les coefficients de la matrice $[A]$ du système sans compensateur. L'étude détaillée des paramètres optimaux d'un compensateur statique, relié successivement à un nœud intermédiaire et aux deux nœuds extrêmes de la ligne longue, donne une valeur moyenne pour le gain K de son régulateur et pour sa taille $(1/X_s)$. On fixe la constante de temps T à une valeur minimum et on choisit quelques valeurs de K et X_s autour de la valeur moyenne. Avec ces valeurs de paramètres, le compensateur est relié successivement à tous les nœuds originaux et intermédiaires de la ligne. Pour chaque couple (K, X_s) choisi, on trace, dans le plan complexe, le lieu des valeurs propres dominantes du système, le compensateur statique étant relié successivement à chaque nœud.

En fonction de l'emplacement du compensateur, on trace également le facteur d'amortissement de ces valeurs propres dominantes qui présente un maximum à l'emplacement optimal.

Si un seul compensateur statique ne s'avère pas assez efficace dans un réseau pour tous les paramètres possibles, deux compensateurs pourront être reliés simultanément à deux nœuds différents. La recherche de l'emplacement optimal sera effectuée de la même façon que pour un seul compensateur, en essayant toutes les combinaisons de nœuds possibles.

4. Programmation

La méthode décrite ci-dessus a été mise sous forme de programme de calcul. Celui-ci permet de rechercher l'emplacement optimal ainsi que les paramètres optimaux d'un ou de plusieurs compensateurs statiques dans un réseau à plusieurs machines. L'organigramme de ce programme (ALSVS) est illustré à la figure 2. Actuellement, ses dimensions permettent de traiter un réseau avec 11 machines synchrones, 50 nœuds, 1 moteur et 2 compensateurs statiques. Les valeurs propres sont calculées au moyen du programme «EISPACK» du centre de calcul de l'EPFL. Le programme est rédigé en Fortran 4 et est exécuté sur CDC Cyber 7328 avec système d'exploitation NOS/BE 1.3.

5. Réseau étudié

Le réseau égyptien simplifié a été utilisé pour évaluer la méthode et pour tester le programme. Il comprend une ligne de 800 km à 500 kV, deux générateurs, un compensateur synchrone, 5 transformateurs et 5 charges. La ligne longue a trois tronçons. Un nœud intermédiaire étant créé au milieu de chaque tronçon, le réseau a pour finir 14 nœuds. La figure 3 illustre un schéma de ce réseau, ainsi que les données utilisées.

Validité du Programme

Premièrement, on a étudié la stabilité de ce réseau, sans compensateur, au moyen d'un programme de stabilité transitoire, en faisant un défaut triphasé au nœud 10. Les angles rotoriques et les vitesses angulaires relatives de chacune des deux machines oscillent à une fréquence de 0,7 Hz approximativement. Pour le même réseau, la solution par le programme décrit ci-dessus montre trois modes oscillatoires représentés par les

valeurs propres (− 0,07), (− 0,38 ± j2,2) et (− 0,045 ± j0,7) et la fréquence du mode dominant du réseau est égale à 0,7 Hz, valeur égale à celle trouvée avec le programme de stabilité transitoire.

Résultats

Une étude détaillée pour déterminer les paramètres qui donnent le plus grand degré de stabilité au réseau muni d'un compensateur statique, relié respectivement aux nœuds 8, 9 et 11, a indiqué que K varie entre 2,5 et 50 et X_s entre 0,05 et 1 p.u., avec une constante de temps de 0,05 s. Ainsi, un rapport K/X_s de 50 est satisfaisant. En utilisant ce rapport de K/X_s, on a recherché l'emplacement optimal de ce compensateur en le reliant successivement aux différents nœuds. La figure 4 illustre les lieux dans le plan complexe des valeurs propres dominantes correspondant à ces nœuds, tandis que la figure 5 montre leurs facteurs d'amortissement, avec trois paires de paramètres. D'après ces figures, il est clair qu'un compensateur relié entre les nœuds 9 et 12 présente l'effet stabilisant le plus grand pour ce réseau en régime dynamique. Toutefois, un compensateur de grande taille (20 p.u.) avec une amplification faible de son régulateur ($K = 2{,}5$) présente le degré de stabilité le meilleur lorsqu'il est relié très près du milieu de la ligne. En effet, en régime stationnaire le compensateur doit être relié au milieu de la ligne longue pour maintenir la tension et pour régler la puissance réactive. Avec un compensateur de grande taille, les oscillations sont très faibles et on est très proche du régime stationnaire.

On a ensuite déterminé les paramètres optimaux d'un compensateur relié au nœud 9. La figure 6 montre les lieux des va-

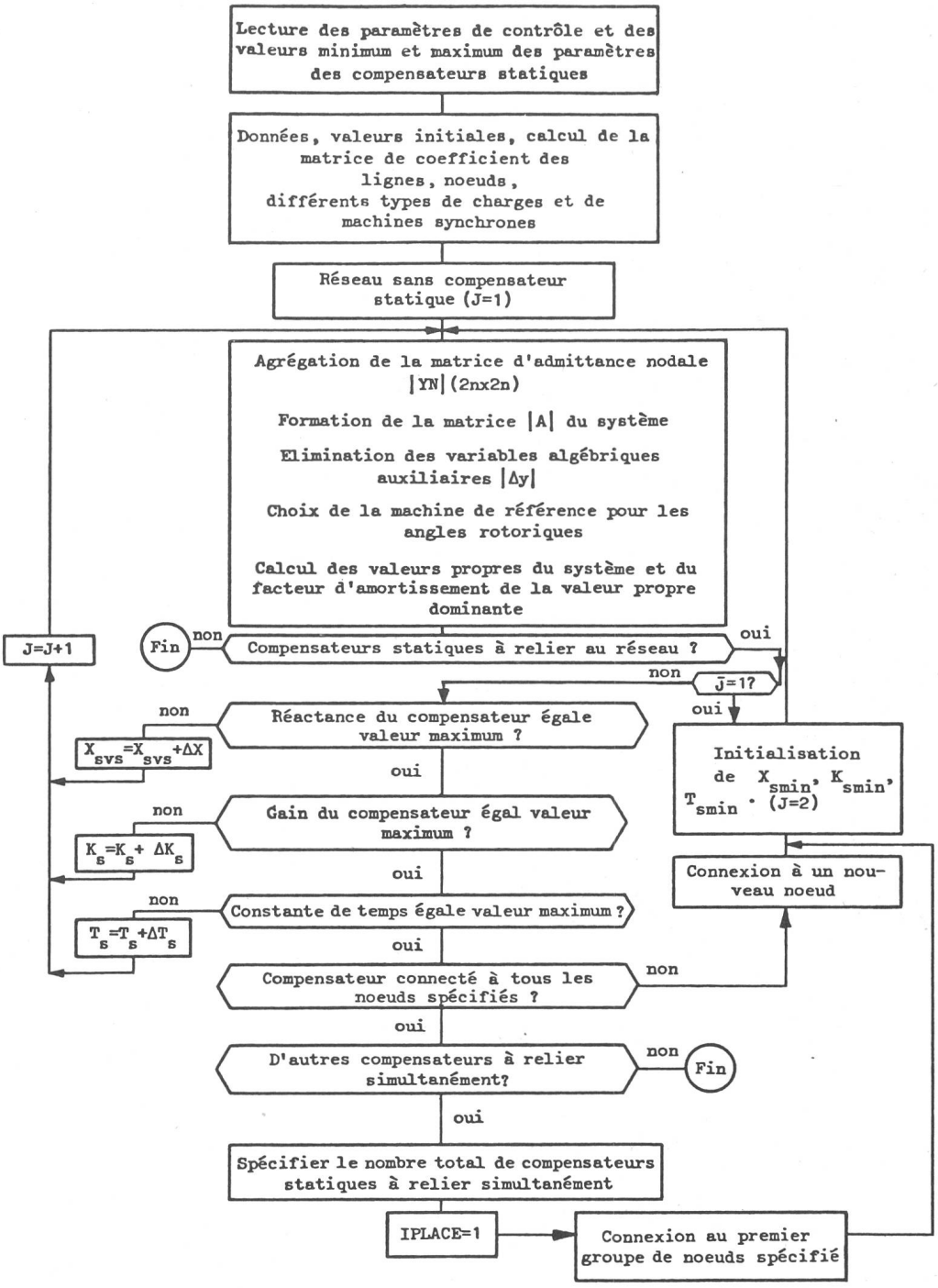

Fig. 2
Organigramme du programme pour le calcul de l'emplacement, de la taille et des paramètres optimaux des compensateurs statiques

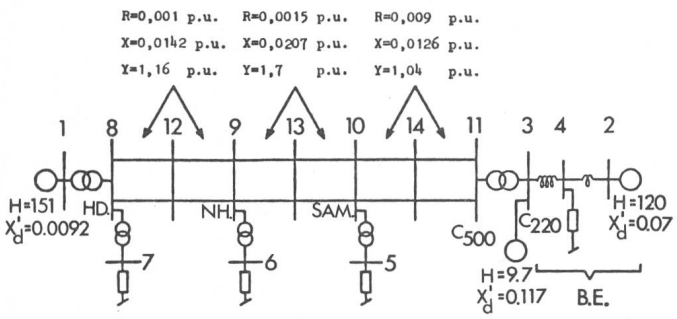

Fig. 3 Réseau simplifié de l'Egypte
Puissance de base: 100 MVA
B.E.: Réseau équivalent de la région de la basse Egypte
H: Constante d'inertie
X_d': Réactance transitoire d'axe «directe»
NH: Sous-station de Naga Hammadi
SAM: Sous-station de Samalout
C: Sous-station du Caire (500 kV et 220 kV)
HD: Centrale hydraulique d'Assouan

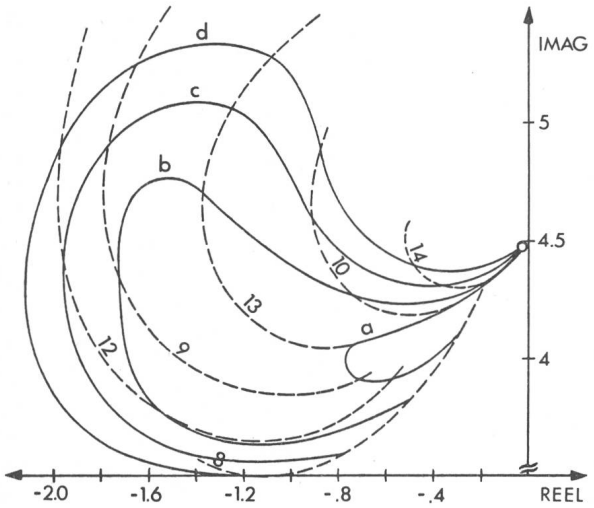

Fig. 4 Lieux des valeurs propres dominantes du réseau avec compensateur statique relié aux différents nœuds
a $K_s = 2{,}5$ et $X_s = 0{,}05$
b $K_s = 5$ et $X_s = 0{,}1$
c $K_s = 10$ et $X_s = 0{,}2$
d $K_s = 50$ et $X_s = 1{,}0$
° Sans compensateur statique
Constante de temps $T_s = 0{,}05$ pour tous les cas

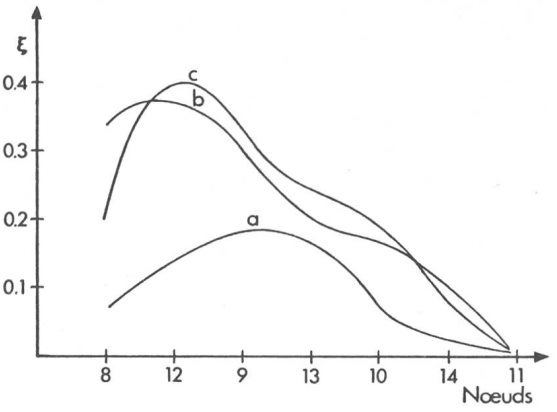

Fig. 5 Facteur d'amortissement ξ de la valeur propre du réseau avec compensateur statique relié aux différents nœuds
a $K_s = 2{,}5$ et $X_s = 0{,}05$
b $K_s = 10$ et $X_s = 0{,}2$
c $K_s = 50$ et $X_s = 1{,}0$
Constante de temps $T_s = 0{,}05$ pour tous les cas

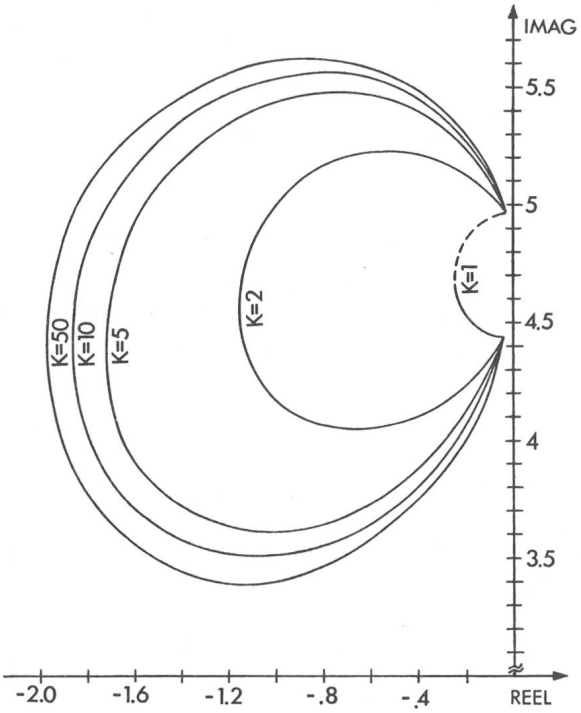

Fig. 6 Lieux des valeurs propres dominantes du réseau avec compensateur statique relié au nœud 9
X_s varie de 0,001 à 4 p.u.
Constante de temps $T_s = 0{,}05$ pour tous les cas

leurs propres dominantes pour différentes valeurs du gain, la réactance du compensateur variant dans chaque cas de 0,001 à 4 p.u., ce qui correspond à des tailles respectives de 1000 p.u. et 0,25 p.u. calculées sur une base de 100 MVA. Ainsi, la taille optimale sera comprise entre 100 et 150 MVar avec un gain du régulateur de 50, et entre 40 et 50 MVar avec un gain de 1.

Pour un réseau test constitué d'une machine synchrone reliée à un réseau infini par une ligne sur laquelle on a branché une charge, on a calculé la valeur propre dominante du système avec différentes représentations de la charge:

- pour la charge à impédance constante $(-0{,}22 \pm j6{,}84)$;
- pour la même charge à courant constant $(-0{,}24 \pm j6{,}80)$;
- pour la charge à puissance constante
  enfin $(-0{,}25 \pm j6{,}75)$.

Ainsi, la charge représentée comme un élément à puissance constante, présente un effet stabilisant plus grand que les deux autres types de représentations. Ceci confirme les résultats des études précédentes [10]. Les quatre types de charges proposés dans [10] permettent de simuler simplement toutes les charges connues actuellement.

Appendice A: Modèle linéarisé du compensateur statique

$$\frac{d}{dt}(\Delta E_{sr}) = -\frac{K_s}{T_c V_{so}}[V_{Do} V_{Qo}]\begin{bmatrix}\Delta V_D\\ \Delta V_Q\end{bmatrix} + \left[-\frac{1}{T_c}\right][\Delta E_{sr}] \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix}\Delta I_{sD}\\ \Delta I_{sQ}\end{bmatrix} = \frac{1}{X_s V_{so}}\begin{bmatrix}-V_{Qo}\\ V_{Do}\end{bmatrix}[\Delta E_s] + \begin{bmatrix}a & -b(d-e)+c\\ b(d-f)-c & a\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\Delta V_D\\ \Delta V_Q\end{bmatrix} \quad (2)$$

où $a = (E_{sro} + E_{so})(V_{Do} V_{Qo})/X_s (V_{so})^3$ $\quad d = 1/V_{so}$

$b = (E_{sro} + E_{so})/X_s$ $\quad e = V_{Qo}^2/V_{so}^3$

$c = 1/X_s$ $\quad f = V_{Do}^2/V_{so}^3$

Appendice B: Modèle linéarisé d'une charge comme élément à puissance constante

$$\begin{bmatrix}\Delta I_D\\ \Delta I_Q\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}aP_o + cQ_o & bQ_o + cP_o\\ -aQ_o + cP_o & bP_o - cQ_o\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\Delta V_D\\ \Delta V_Q\end{bmatrix} \quad (3)$$

où $a = (1/V_{to}^2) - 2\,V_{Do}^2/V_{to}^4$ $\quad c = -V_{Do} V_{Qo}/V_{to}^4$

$b = (1/V_{to}^2) - 2\,VQ_o^2/V_{to}^4$

P_o, Q_o puissances active et réactive constantes de la charge

V_{to} valeur initiale de la tension

Appendice C: Modèle linéarisé d'une charge comme élément à courant constant

$$\begin{bmatrix}\Delta I_D\\ \Delta I_Q\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}G_o + aI_a + cI_b & -B_o + cI_a - bI_b\\ -B_o + cI_a + aI_b & G_o + bI_a - cI_b\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\Delta V_D\\ \Delta V_Q\end{bmatrix}$$

où $a = -V_{Do}^2/V_{to}^3$ $\quad c = -V_{Do} V_{Qo}/V_{to}^3$

$b = -V_{Qo}^2/V_{to}^3$

$I_a = P_o/V_{to}$ $\quad I_b = Q_o/V_{to}$

V_{to} valeur initiale de la tension

P_o, Q_o valeurs initiales des puissances active et réactive

Bibliographie

[1] Modélisation des systèmes de compensation statique shunt (SVS) pour l'analyse des réseaux. Electric –(1977)51, p. 45...74.

[2] *R.M. Mathur* and *A.E. Hammad:* Transient and small signal stability of a super conducting turbogenerators operating with thyristor controlled static compensator. IEEE Trans. PAS 98(1979)6, p. 1937...1946.

[3] *R.M. Mathur, P.K. Dash* and *A.E. Hammad:* Improvement of performance of a superconducting turbogenerator through use of a controllable reactive power compensator. Electrical Machines and Electromechanics 2(1977)1, p. 73...86.

[4] *S.C. Kapoor:* Dynamic stability of long transmission systems with static compensators and synchronous machines. IEEE Trans. PAS 98(1979)1, p. 124...134.

[5] *H.H. Happ* and *K.A. Wirgau:* Static and dynamic VAR compensation in system planning. IEEE Trans. PAS 97(1978)5, p. 1564...1578.

[6] *A.E. Hammad:* A fast stability programm for power systems with multi-terminal HVDC and static VAR compensator. Proceedings of the IEEE Power Industry Computer Application Conference, Cleveland/Ohio, May 15...18 1979; report CH 1381–3–PWR, p. 290...297.

[7] *M. El-Sadek:* Modélisation des éléments d'un réseau électrique pour les études des systèmes linéaires. Compensateur statique. Rapport interne nº 1–80. Lausanne, Ecole Polytechnique Fédérale, Centre d'Etude des Réseaux Electriques (CERE), 1980.

[8] *J.M. Undrill:* Dynamic stability calculations for an arbitrary number of interconnected synchronous machines. IEEE Trans. PAS 87(1968)3, p. 835...844.

[9] *M.K. Pal:* State space representation of multi-machine power systems. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting and Energy Resources Conference, Anaheim/California, July 14...19, 1974, paper C74396–8.

[10] *G.R. Gabrielle:* Power system loads their effects and representation during transient stability. Thesis of the Moore School of Electrical Engineering, University of Pennsylvania, Philadelphia, 1967.

[11] *P. Kundur* and *P.L. Dandeno:* Practical application of eigenvalue techniques in the analysis of power system dynamic stability problems. Proceedings of the Fifth Power System Computation Conference (PSCC) Cambridge, September 1...5, 1975, vol. II, paper 3.3/7.

[12] *A.E. Hammad* and *R.M. Mathur:* A new generalized concept for the design of thyristor phase-controlled VAr compensators. Part I: Steady state performance. Part II: Transient performance. IEEE Trans. PAS 98(1979)1, p. 219...231.

Adresse de l'auteur

M. El-Sadek, Chaire d'installations Electriques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 16, chemin de Bellerive, 1007 Lausanne.