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: 68 (1977)

Heft: 4

Artikel: Le Calcul des Paramètres de Sensitivité d'un Réseau de Transport d'Energie Electrique

Autor: Püttgen, H. B.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-914999

Le Calcul des Paramètres de Sensitivité d'un Réseau de Transport d'Energie Electrique

Par H. B. Püttgen

621.316.1

L'article présente un nouvel algorithme de calcul des paramètres de sensitivité pour réseaux de transport d'énergie électrique, se basant sur le théorème de Tellegen et les équations non linéaires complexes de Load-Flow.

Der Aufsatz stellt einen neuen Algorithmus zur Berechnung der Sensitivitätsparameter für elektrische Energienetze vor, der auf dem Satz von Tellegen und den nichtlinearen komplexen Gleichungen des Lastflusses beruht.

1. Introduction

Le but des études de planification des réseaux de transport d'énergie électrique est de déterminer la topologie future qui permettra d'acheminer l'énergie des centres de production vers les centres de consommation dans des conditions de charge de ligne, de niveau de tension et de continuité du service satisfaisantes et à des coûts financiers et écologiques acceptables. Cette détermination de topologie implique essentiellement l'implantation de nouveaux axes de transport, le remplacement des axes existants et la compensation des énergies réactives. L'évaluation de la continuité de service implique la simulation du système pour différents états perturbés (une ou plusieurs lignes ou éléments shunt hors service). Il est donc clair que les problèmes de synthèse et d'analyse cités touchent à la sensitivité de l'état du réseau par rapport au changement des impédances ou des admittances, des éléments série et shunt du réseau. L'état du réseau est déterminé par les tensions complexes des nœuds et, secondairement, par les courants complexes des lignes. Le but de cet article est de présenter une méthode de calcul des paramètres de sensitivité en partant des équations complexes du flux de charge du réseau (Load-Flow) et en utilisant le théorème de Tellegen.

La discussion traitera des paramètres de sensitivité $\partial \underline{V}_i / \partial \underline{Y}_\alpha$ où $\underline{V}_i$ est la tension complexe du nœud i, et $\underline{Y}_\alpha$ l'admittance complexe (série ou shunt) de la branche α. Il ne faut pas les confondre avec les paramètres $\partial \underline{V}_i / \partial \underline{S}_j$ où $\underline{S}_j$ est la puissance complexe injectée au nœud j.

La première catégorie de sensitivités, $\partial \underline{V}_i / \partial \underline{Y}_\alpha$, est classiquement déterminée par une étude indirecte et incrémentale à l'aide d'un programme de Load-Flow où chaque ligne est enlevée ou ajoutée à la topologie de base. Cette méthode est très lourde pour la simulation de grands réseaux. Certaines méthodes existent pour l'évaluation directe de ces paramètres, mais elles impliquent toutes des simplifications grossières des équations de base du réseau. En général, les équations dites à courant continu, $\underline{P} = \underline{B}\delta$, sont employées où seules les puissances actives et les angles de phase des tensions sont simulées, alors que les puissances réactives et les modules des tensions sont ignorées [1; 2][1]). Dans la théorie présentée ici, les équations complètes du réseau sont utilisées.

Le second genre de sensitivités, $\partial \underline{V}_i / \partial \underline{S}_j$, sont extraites de la matrice Jacobienne du réseau, mais sont de peu d'utilité pour la détermination de la meilleure topologie. En effet, ces sensitivités ne sont utiles que pour la détermination de la contrôlabilité du réseau.

[1]) Voir la bibliographie à la fin de l'article.

2. Equation fondamentale de sensitivité

Le théorème de Tellegen est énoncé comme suit [3]

$$\sum_{\alpha=1}^{n} \underline{V}_\alpha \underline{I}_\alpha = 0 \tag{1}$$

où $\underline{V}_\alpha$ est la tension complexe de la branche α et
$\underline{I}_\alpha$ le courant complexe dans la branche α dans le même réseau ou dans tout autre réseau ayant le même graphe que le premier.
n exprime le nombre de branches du graphe du ou des réseaux concernés.

Les tensions et courants de branche doivent être choisis de manière à satisfaire les lois de Kirchhoff.

Il est très important de remarquer le fait qu'ils peuvent être mesurés dans deux réseaux différents et/ou à des temps différents, pourvu que les deux réseaux aient le même graphe. Le théorème n'implique pas que les réseaux aient les mêmes éléments et/ou les mêmes sources, seules les graphes doivent être identiques. Pour une discussion plus détaillée du théorème, les références [3...6] peuvent être consultées.

Parmi tous les réseaux satisfaisant le théorème de Tellegen, on peut en choisir un, appelé «Réseau Adjoint» qui, avec le réseau original, permettra l'évaluation des paramètres de sensitivité:

$$\sum_{\alpha=1}^{n} \underline{V}_\alpha \underline{I}_\alpha' = 0; \quad \sum_{\alpha=1}^{n} \underline{V}_\alpha' \underline{I}_\alpha = 0 \tag{2}$$

où $\underline{V}_\alpha'$, $\underline{I}_\alpha'$ sont les tensions et courants de la branche α dans le réseau adjoint.

Si les équations (2) sont vraies, alors

$$\sum_{\alpha=1}^{n} \underline{V}_\alpha^* \underline{I}_\alpha'^* = 0; \quad \sum_{\alpha=1}^{n} \underline{V}_\alpha'^* \underline{I}_\alpha^* = 0 \tag{3}$$

où $\underline{V}_\alpha^*$ est le conjugué complexe de $\underline{V}_\alpha$.

Les paramètres de sensitivité seront déterminés pour un état légèrement perturbé du réseau original. Si l'on perturbe un élément du réseau original, les tensions et les courants de branche seront perturbés de quantités $\Delta\underline{V}$ respectivement $\Delta\underline{I}$. Le théorème de Tellegen est toujours valable pour l'état perturbé du réseau, donc en utilisant l'équation (2) on a

$$\sum_{\alpha=1}^{n} (\underline{V}_\alpha + \Delta\underline{V}_\alpha)\, \underline{I}_\alpha' = 0;$$

Donc, en impliquant l'équation (2), on obtient:

$$\sum_{\alpha=1}^{n} \Delta\underline{V}_\alpha \underline{I}_\alpha' = 0 \tag{4}$$

Similairement, en utilisant les trois autres équations (2) et (3) on obtient

$$\sum_{\alpha=1}^{n} \underline{V}_\alpha' \, \Delta \underline{I}_\alpha = 0 \tag{5}$$

$$\text{et} \sum_{\alpha=1}^{n} \Delta \underline{V}_\alpha^* \, \underline{I}_\alpha'^* = 0; \quad \sum_{\alpha=1}^{n} \underline{V}_\alpha'^* \, \Delta \underline{I}_\alpha^* = 0 \tag{6}$$

L'équation fondamentale de sensitivité est obtenue en utilisant une combinaison linéaire des équations (4), (5) et (6) comme suit:

$$\sum_{\alpha=1}^{n} \left[(\Delta \underline{V}_\alpha \underline{I}_\alpha' - \underline{V}_\alpha' \, \Delta \underline{I}_\alpha) + (\Delta \underline{V}_\alpha^* \, \underline{I}_\alpha'^* - \underline{V}_\alpha'^* \, \Delta \underline{I}_\alpha^*) \right] = 0 \tag{7}$$

Il est clair que l'équation (7) n'est pas la seule que l'on puisse obtenir, et en fait, une autre combinaison linéaire des mêmes équations sera également employée. L'équation (7) contient clairement l'information concernant le changement des tensions de branche par rapport au changement des admittances de branche. En effet, les courants de branche sont une fonction implicite des admittances des branches. Finalement, il est important de noter que seule la topologie du réseau adjoint a été définie à ce point (elle doit être identique à celle du réseau original), tandis que le modèle de chaque branche du réseau adjoint est encore non défini.

3. Modèle du réseau adjoint

Il s'agit maintenant d'établir le modèle du réseau adjoint, donc de définir le contenu de chaque branche de manière à pouvoir extraire l'information $\Delta \underline{V}_p = f(\Delta \underline{Y}_\beta)$, pour $\beta = 1 \ldots m$, de l'équation (7). m est le nombre d'éléments du réseau, série ou shunt.

3.1 Nœud bilan

Le nœud bilan est simulé dans le réseau original par $\underline{V}_1 = \underline{V}_1^* =$ constante. Vu que la sensitivité de ce nœud par rapport aux changements d'admittances est clairement nulle, on voudrait éliminer le terme lui correspondant dans l'équation (7):

$$(\Delta \underline{V}_1 \underline{I}_1' - \underline{V}_1' \, \Delta \underline{I}_1) + (\Delta \underline{V}_1^* \, \underline{I}_1'^* - \underline{V}_1'^* \, \Delta \underline{I}_1^*) \tag{8}$$

On sait que $\Delta \underline{V}_1 = \Delta \underline{V}_1^* = 0$. De manière à annuler le terme correspondant au nœud bilan, on impose:

$$\underline{V}_1' = \underline{V}_1'^* = 0 \tag{9}$$

Le modèle du nœud bilan dans le réseau adjoint est donc un court-circuit. Ce modèle annule la contribution du nœud bilan à l'équation (7); ce résultat est voulu vu que la sensitivité du nœud bilan est nulle.

3.2 Sources et consommations de puissance

Dans le réseau original les sources et consommations de puissance sont simulées comme suit au nœud i:

$$\underline{V}_i \cdot \underline{I}_i^* = S_i = \text{constante} \tag{10}$$

Si la tension du nœud i est perturbée d'une quantité $\Delta \underline{V}_i$, l'équation (10) s'écrit

$$(\underline{V}_i + \Delta \underline{V}_i)\,(\underline{I}_i^* + \Delta \underline{I}_i^*) = S_i$$

Avec l'équation (10), et en négligeant le terme du second ordre, $\Delta \underline{V}_i \cdot \Delta \underline{I}_i^*$, on obtient

$$\Delta \underline{I}_i^* = -\underline{I}_i^* / \underline{V}_i \cdot \Delta \underline{V}_i \tag{11}$$

$$\text{et } \Delta \underline{I}_i = -\underline{I}_i / \underline{V}_i^* \cdot \Delta \underline{V}_i^* \tag{12}$$

La contribution de toutes les injections et consommations de puissance aux nœuds 2...k, k étant le nombre de nœuds, à l'équation (7) s'écrit

$$\sum_{i=2}^{k} \left[(\Delta \underline{V}_i \underline{I}_i' - \underline{V}_i' \, \Delta \underline{I}_i) + (\Delta \underline{V}_i^* \, \underline{I}_i'^* - \underline{V}_i'^* \, \Delta \underline{I}_i^*) \right] \tag{13}$$

En utilisant les équations (11) et (12), l'expression (13) s'écrit

$$\sum_{i=2}^{k} \left[\Delta \underline{V}_i \, (\underline{I}_i' + \underline{V}_i'^* \, \underline{I}_i^* / \underline{V}_i) + \Delta \underline{V}_i^* \, (\underline{I}_i'^* + \underline{V}_i' \, \underline{I}_i / \underline{V}_i^*) \right] \tag{14}$$

En fait on ne désire étudier que le changement d'une tension de nœud, disons $\underline{V}_p$, en fonction de tous les éléments du réseau, $\underline{Y}_\beta$. Afin de conserver le terme de l'expression (14) contenant $\Delta \underline{V}_p$ tout en annulant les termes contenant $\Delta \underline{V}_q$ pour $q = 2 \ldots k$ et $q \neq p$, on impose

$$\underline{I}_p' + \underline{V}_p'^* \cdot \underline{I}_p^* / \underline{V}_p = 1; \; \underline{I}_p'^* + \underline{V}_p' \cdot \underline{I}_p / \underline{V}_p^* = 1 \tag{15}$$

$$\text{et } \underline{I}_q' + \underline{V}_q'^* \cdot \underline{I}_q^* / \underline{V}_q = 0; \; \underline{I}_q'^* + \underline{V}_q' \cdot \underline{I}_q / \underline{V}_q^* = 0 \tag{16}$$

En utilisant les équations (15) et (16), on constate que l'expression (14) est réduite à

$$\Delta \underline{V}_p + \Delta \underline{V}_p^* \tag{17}$$

Ainsi la contribution totale de toutes les injections de puissance aux nœuds à l'équation (7) est réduite à $\Delta \underline{V}_p + \Delta \underline{V}_p^*$.

3.3 Eléments d'admittance série ou shunt

Il reste à discuter la contribution de tous les éléments série et shunt du réseau original à l'équation (7). Dans le réseau original, ces éléments ont comme modèle

$$\underline{I}_\alpha = \underline{Y}_\alpha \underline{V}_\alpha \quad \alpha = 1 \ldots m \tag{18}$$

L'équation de perturbation pour chaque élément α s'écrit

$$(\underline{I}_\alpha + \Delta \underline{I}_\alpha) = (\underline{Y}_\alpha + \Delta \underline{Y}_\alpha)\,(\underline{V}_\alpha + \Delta \underline{V}_\alpha) \tag{19}$$

En utilisant l'équation (18) et en négligeant le terme du second ordre $\Delta \underline{I}_\alpha \, \Delta \underline{Y}_\alpha$, on obtient

$$\Delta \underline{I}_\alpha = \Delta \underline{V}_\alpha \, \underline{Y}_\alpha + \underline{V}_\alpha \, \Delta \underline{Y}_\alpha \tag{20}$$

$$\text{et } \Delta \underline{I}_\alpha^* = \Delta \underline{V}_\alpha^* \, \underline{Y}_\alpha^* + \underline{V}_\alpha^* \, \Delta \underline{Y}_\alpha^* \tag{21}$$

La contribution de tous les éléments d'admittance à l'équation (7) peut s'écrire:

$$\sum_{\alpha=1}^{m} \left[(\Delta \underline{V}_\alpha \underline{I}_\alpha' - \underline{V}_\alpha' \, \Delta \underline{I}_\alpha) + (\Delta \underline{V}_\alpha^* \, \underline{I}_\alpha'^* - \underline{V}_\alpha'^* \, \Delta \underline{I}_\alpha^*) \right] \tag{22}$$

En utilisant les équations (20) et (21) l'expression (22) devient

$$\sum_{\alpha=1}^{m} \left[\Delta \underline{V}_\alpha \, (\underline{I}_\alpha' - \underline{V}_\alpha' \, \underline{Y}_\alpha) + \Delta \underline{V}_\alpha^* \, (\underline{I}_\alpha'^* - \underline{V}_\alpha'^* \, \underline{Y}_\alpha^*) - \right.$$
$$\left. - \underline{V}_\alpha' \, \underline{V}_\alpha \, \Delta \underline{Y}_\alpha - \underline{V}_\alpha'^* \, \underline{V}_\alpha^* \, \Delta \underline{Y}_\alpha^* \right] \tag{23}$$

On désirerait éliminer les termes contenant $\Delta \underline{V}_\alpha$ et $\Delta \underline{V}_\alpha^*$ qui sont les changements des tensions des éléments d'admittances (seules les perturbations des tensions de nœud sont à conserver). Afin d'éliminer ces termes, on impose dans le réseau adjoint:

$$\underline{I}_\alpha' - \underline{V}_\alpha' \, \underline{Y}_\alpha = 0; \; \underline{I}_\alpha'^* - \underline{V}_\alpha'^* \cdot \underline{Y}_\alpha^* = 0 \tag{24}$$

L'expression (23) donne alors

$$\sum_{\alpha=1}^{m} \left[-\underline{V}_\alpha' \underline{V}_\alpha \Delta \underline{Y}_\alpha - \underline{V}_\alpha'^* \underline{V}_\alpha^* \Delta \underline{Y}_\alpha^* \right] \tag{25}$$

Le modèle de la branche α dans le réseau adjoint est donc

$$\underline{Y}_\alpha = \underline{Y}_\alpha' \tag{26}$$

En supposant que l'on veuille déterminer la relation $\Delta \underline{V}_p = f(\Delta \underline{Y}_\beta)$, on doit perturber l'admittance de l'élément β d'une quantité $\Delta \underline{Y}_\beta$, alors que $\Delta \underline{Y}_\gamma = 0$ pour $\gamma = 1 ... m$ et $\gamma \neq \beta$. La contribution totale de tous les éléments série et shunt est alors réduite à

$$-\underline{V}_\beta' \underline{V}_\beta \Delta \underline{Y}_\beta - \underline{V}_\beta'^* \underline{V}_\beta^* \Delta \underline{Y}_\beta^* \tag{27}$$

3.4 *Réduction finale du théorème de Tellegen*

En utilisant les modèles du nœud bilan, des sources et consommations de puissance ainsi que des branches d'admittance dans le réseau adjoint, on constate que l'équation (7) est réduite à

$$\Delta \underline{V}_p + \Delta \underline{V}_p^* = \underline{V}_\beta' \underline{V}_\beta \Delta \underline{Y}_\beta + \underline{V}_\beta'^* \underline{V}_\beta^* \Delta \underline{Y}_\beta \tag{28}$$

A ce point il est nécessaire de formuler quelques remarques:

– L'équation (28) permet d'évaluer l'influence de toute admittance série ou shunt, $\underline{Y}_\beta$, sur la tension du nœud p, $\underline{V}_p$. En effet, ni le modèle du réseau original ni le modèle du réseau adjoint ne dépendent de la branche β. Cette branche perturbée peut être réélle ou fictive. En effet, en supposant que la branche β soit fictive (entre deux nœuds non directement connectés), on peut quand même définir sa tension de branche dans les réseaux original et adjoint. Donc l'équation (28) permet de calculer

$$\Delta \underline{V}_p = f(\Delta \underline{Y}_\beta) \quad \beta = 1 ... m'$$

où m' est l'ensemble des éléments série ou shunt existants et fictifs. La méthode proposée permet donc la simulation des états perturbés du réseau (en perturbant des branches existantes) et la synthèse du réseau (en perturbant des branches fictives).

– La résolution de l'équation (28) nécessite la solution du réseau original (en utilisant un programme de Load-Flow) et la solution du réseau adjoint qui a été complètement défini plus haut. Donc, la solution supplémentaire du réseau adjoint (soit d'un seul réseau) permet l'évaluation de l'information $\Delta \underline{V}_p = f(\Delta \underline{Y}_\beta)$, $\beta = 1 ... m'$. Si l'on désire calculer $\Delta \underline{V}_q = f(\Delta \underline{Y}_\beta)$ au lieu de $\Delta \underline{V}_p = f(\Delta \underline{Y}_\beta)$, la seule opération supplémentaire requise est une nouvelle solution du réseau adjoint, vu que le modèle adjoint des sources dépend de la tension analysée selon les équations (15) et (16).

Finalement, l'équation (28) ne donne que l'information de la partie réelle de $\Delta \underline{V}_p$. Cette remarque est évidente dès que l'équation (7) a été établie; en effet elle ne contient que les parties réelles des quantités impliquées. Afin de corriger ce fait un deuxième réseau adjoint, appelé «Réseau Adjoint Secondaire» sera introduit.

4. Réseau adjoint secondaire

Afin d'extraire la partie imaginaire de $\Delta \underline{V}_p$ le réseau adjoint secondaire sera utilisé. Ce réseau correspond à une seconde combinaison linéaire des équations (4), (5) et (6):

$$\sum_{\alpha=1}^{n} \left[(\Delta \underline{V}_\alpha \underline{I}_\alpha'' + \underline{V}_\alpha'' \Delta \underline{I}_\alpha) - (\Delta \underline{V}_\alpha^* \underline{I}_\alpha''^* + \underline{V}_\alpha''^* \Delta \underline{I}_\alpha^*) \right] = 0 \tag{29}$$

où $\underline{V}_\alpha''$ et $\underline{I}_\alpha''$ sont les tensions respectivement courants de la branche α dans le réseau adjoint secondaire. En comparant les équations (7) et (29) on constate qu'en effet elles correspondent à deux différentes combinaisons linéaires des mêmes relations de base. Clairement, le réseau adjoint secondaire doit satisfaire le théorème de Tellegen, il a donc le même graphe que le réseau original et, par conséquent, que le réseau adjoint.

En employant le même processus et la même logique que pour le modèle du réseau adjoint, on établit les modèles suivants pour le réseau adjoint secondaire:

$$\underline{V}_1'' = \underline{V}_1''^* = 0 \tag{30}$$

$$\underline{I}_p'' + \underline{V}_p''^* \underline{I}_p^* / \underline{V}_p = 1; \; \underline{I}_p''^* + \underline{V}_p'' \underline{I}_p / \underline{V}_p^* = 1 \tag{31}$$

$$\underline{I}_q'' + \underline{V}_q''^* \underline{I}_q^* / \underline{V}_q = 0; \; \underline{I}_q''^* + \underline{V}_q'' \underline{I}_q / \underline{V}_q^* = 0 \tag{32}$$

$$\underline{Y}_\alpha'' = -\underline{Y}_\alpha = -\underline{Y}_\alpha' \tag{33}$$

où les changements de la tension du nœud p sont analysés. On constate donc que la seule différence entre les deux réseaux adjoints consiste en leurs matrices d'admittances de signes opposés.

En utilisant les modèles (30) à (33) on peut facilement montrer que l'équation (29) se réduit à:

$$\Delta \underline{V}_p - \Delta \underline{V}_p^* = -\underline{V}_\beta'' \underline{V}_\beta \Delta \underline{Y}_\beta + \underline{V}_\beta''^* \underline{V}_\beta^* \Delta \underline{Y}_\beta^* \tag{34}$$

Les mêmes remarques que celles formulées pour l'équation (28) sont vraies pour l'équation (34), sauf que l'équation (34) donne la partie imaginaire de $\Delta \underline{V}_p$.

5. Résultat final des coefficients de sensitivité

En combinant les résultats obtenus en utilisant le réseau adjoint (28) et le réseau adjoint secondaire (34) on obtient:

$$\begin{array}{l} \Delta \underline{V}_p + \Delta \underline{V}_p^* = \underline{V}_\beta' \underline{V}_\beta \Delta \underline{Y}_\beta + \underline{V}_\beta'^* \underline{V}_\beta^* \Delta \underline{Y}_\beta^* \\ + \; \Delta \underline{V}_p - \Delta \underline{V}_p^* = -\underline{V}_\beta'' \underline{V}_\beta \Delta \underline{Y}_\beta + \underline{V}_\beta''^* \underline{V}_\beta^* \Delta \underline{Y}_\beta^* \\ \hline 2 \Delta \underline{V}_p = \underline{V}_\beta \Delta \underline{Y}_\beta (\underline{V}_\beta' - \underline{V}_\beta'') + \underline{V}_\beta^* \Delta \underline{Y}_\beta^* (\underline{V}_\beta' + \underline{V}_\beta'')^* \end{array} \tag{35}$$

L'équation (35) est le résultat cherché pour évaluer le changement de la tension du nœud p, $\Delta \underline{V}_p$, en fonction du changement de l'admittance de n'importe quelle branche β, qu'elle soit fictive ou non. Le résultat suggère toutefois que, pour l'analyse des paramètres de sensitivité de chaque nœud, l'on doive résoudre deux réseaux: l'adjoint et l'adjoint secondaire. On peut cependant montrer que les deux solutions des deux réseaux adjoints peuvent être élégamment combinées en une seule solution d'un système d'équations linéaires [6]. On constate donc que l'obtention de l'information $\Delta \underline{V}_p = f(\Delta \underline{Y}_\beta)$, $\beta = 1 ... m'$, ne nécessite que la solution d'un système d'équations linéaires, d'une complexité analogue à la matrice Jacobienne, une fois que la solution du réseau original a été obtenue. Ceci représente clairement un avantage appréciable en comparant avec la méthode incrémentale.

6. Conclusion

La méthode présentée est nouvelle en ce qu'elle se base sur le Théorème de Tellegen et qu'elle utilise les équations non linéaires complexes du flux de charge (Load-Flow) du réseau. Il a été montré que l'on peut obtenir tous les coefficients de sensitivité pour un nœud donné vis-à-vis de l'admittance de toutes les branches existantes ou fictives par la solution d'une seule matrice (donc d'un système d'équations linéaires) d'une complexité analogue à la matrice Jacobienne du réseau.

Par manque de place il n'a pas été possible d'inclure ici une discussion plus complète de l'implémentation numérique de l'algorithme ni de ses performances de vitesse et précision. On peut toutefois dire que l'algorithme ne requiert pratiquement aucune mémoire supplémentaire s'il est implémenté en mode «overlay» avec le Load-Flow du type Newton Raphson. La méthode a été testée d'une manière approfondie en utilisant notamment un réseau ayant 17 nœuds et 21 lignes, transformateurs et capacités shunt. On a simulé la suppression d'un élément (ligne, transformateur ou capacité shunt) en employant le Load-Flow (méthode incrémentale) et la méthode des paramètres de sensitivité (en faisant $\Delta \underline{Y}_\beta = -\underline{Y}_\beta$, de manière à annuler l'admittance de la branche perturbée, ce qui correspond à supprimer la branche en question). Les essais ont montré que la méthode de sensitivité est de l'ordre de 4 à 5 fois plus rapide que la méthode incrémentale pour la simulation de la suppression de tous les éléments un à un (sécurité $n-1$). D'autre part la précision de la méthode des paramètres de sensitivité est de l'ordre de 1 à 5% en comparant les résultats (tensions des nœuds) avec ceux obtenus par la méthode incrémentale (un Load-Flow complet pour chaque topologie considérée), ceci pour la suppression et l'adjonction d'éléments.

La nouvelle méthode de sensitivité est donc très attrayante en ce qu'elle est à la fois très rapide et précise tout en ne demandant que très peu de mémoire supplémentaire. Elle permet la simulation des tensions en module et phase ainsi que des puissances actives et réactives. Les paramètres de sensitivité sont employés dans un programme de planification optimale [6] pour simuler les sécurités (n − 1) et pour la phase de synthèse, vu que les coefficients peuvent être obtenus aussi bien pour les éléments réels que fictifs. On peut donc intégrer le problème de la compensation réactive au problème général de planification du réseau de transport, et non pas séparer ces deux problèmes, comme on le fait généralement. Il n'est pas vain de penser que ces coefficients de sensitivité permettront une planification intégrée des réseaux de transport d'énergie électrique.

Bibliographie

[1] *R. Fischl* and *W. R. Puntel:* Computer-aided design of electric power transmission networks. IEEE Winter Power Meeting, New York, January 30...February 4, 1972, Paper C 72 168-8.

[2] *W. R. Puntel* a. o.: An automated method for long-range planning of transmission networks. IEEE Power Industry Computer Applications Conference 1973, p. 38...46.

[3] *B. D. H. Tellegen:* A general network theorem, with applications. Philips Research Reports 7(1952)4, p. 259...269.

[4] *S. W. Director* and *R. A. Rohrer:* The generalized adjoint network and network sensitivities. Trans. IEEE CT 16(1969)3, p. 318...323.

[5] *S. W. Director* and *R. A. Rohrer:* Automated network design – The frequency-domain case. Trans. IEEE CT 16(1969)3, p. 330...337.

[6] *H. B. Püttgen:* A user oriented method for transmission system planning using interactive graphics. PhD dissertation, University of Florida, Gainesville, June 1976.

Adresse de l'auteur

Dr. *Hans-Björn Püttgen,* Professeur à la California State University, Fresno; Modulator-Inelco (Industrial and Electro Consult), Fischerweg 11-13, CH-3000 Bern 9.