

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 64 (1973)
Heft: 20

Artikel: Le maintien des tensions dans les réseaux mailles à l'aide des transformateurs à gradins
Autor: Püttgen, H.B.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-915607>

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: 18.02.2026

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

Le maintien des tensions dans les réseaux mailles à l'aide des transformateurs à gradins

Par H. B. Püttgen

621.316.722.1 : 621.311.1 : 621.314.214.332

Le but de cet article est de présenter certaines méthodes qui permettent d'inclure le réglage des transformateurs à gradins dans un programme de «Load-Flow». Après avoir exposé des méthodes connues et après avoir mis en évidence les limites de ces méthodes, on développera un nouvel algorithme de réglage que nous avons intitulé «Les chemins réactifs».

Es werden gewisse Methoden beschrieben, die gestatten, die Regelung von Stufentransformatoren in ein «Last-Fluss»-Programm einzubeziehen. Nach einer Beschreibung bekannter Methoden und nach Aufzeigung ihrer Grenzen wird ein neuer Algorithmus der Regelung entwickelt, der als «Reaktive Wege» bezeichnet wird.

1. Introduction

Le problème désormais classique du «Load-Flow» peut s'énoncer comme suit:

Etant donné:

- La topologie du réseau.
- Les paramètres des lignes et transformateurs (R, L, C , rapport de transformation).
- L'état de charge du réseau: puissances active et réactive consommées ou produites en chaque nœud, sauf au nœud bilan.
- La tension et la phase de référence au nœud bilan.

Calculer:

- La tension et son déphasage, par rapport au nœud bilan, en chaque nœud, sauf au nœud bilan.
- Les courants et les puissances transitant dans les lignes et transformateurs.
- La puissance consommée ou produite au nœud bilan.

On constate que le problème ainsi posé ne permet pas de tenir compte du réglage des tensions par les transformateurs à gradins. Or ceci est une limitation gênante car l'un des buts du «Load-Flow» est de savoir si le réseau étudié est exploitable étant donné une certaine configuration et un certain état de charge du dit réseau. On veut donc savoir, entre autres, si les tensions qui apparaissent aux nœuds sont comprises entre des

limites acceptables du point de vue exploitation. Il faut pouvoir tenir compte du réglage des transformateurs à gradins implantés dans le réseau si l'on veut répondre à ce genre de questions.

Le but de cet article est de présenter certaines méthodes qui permettent d'inclure le réglage des transformateurs à gradins dans un programme de «Load-Flow». Après avoir exposé des méthodes connues et après avoir mis en évidence les limites de ces méthodes, on développera un nouvel algorithme de réglage que nous avons intitulé «les chemins réactifs».

Afin de ne pas alourdir cet article, nous supposons connu le calcul du «Load-Flow» selon la méthode de Newton-Raphson [1]¹.

NN :	nombre de nœuds du réseau.
NL :	nombre d'éléments (lignes, transformateurs...) du réseau.
NO :	numéro du nœud d'origine d'un élément.
NE :	numéro du nœud d'extrémité d'un élément.
$U(N)$:	tension au nœud N .
$U_{\max}(N)$:	limite supérieure de la tension au nœud N .
$U_{\min}(N)$:	limite inférieure de la tension au nœud N .
$DU(N)$:	correction de la tension $U(N)$ calculée par rapport à $U_{\max}(N)$ ou $U_{\min}(N)$ suivant que $U(N) > U_{\max}(N)$ ou $U(N) < U_{\min}(N)$.
$DUT(J)$:	correction maximum, en V, associée à la borne J d'un transformateur à gradins $J-K$.
$SNO(J-K)/SNE(J-K)$:	rapport de transformation à vide d'un transformateur $J-K$.
$SNO(J-K)$:	tension à vide du côté NO d'un transformateur si la tension côté NE est à sa valeur nominale.
$G(J-K)$:	valeur en V de chaque gradin mesurée à vide lorsque la tension nominale est appliquée de l'autre côté.
$SNO_{\min}(J-K)$:	tension à vide minimale du côté NO si la tension est maintenue à sa valeur nominale du côté NE .
$SNO_{\max}(J-K)$:	tension à vide maximale du côté NO si la tension est maintenue à sa valeur nominale du côté NE .

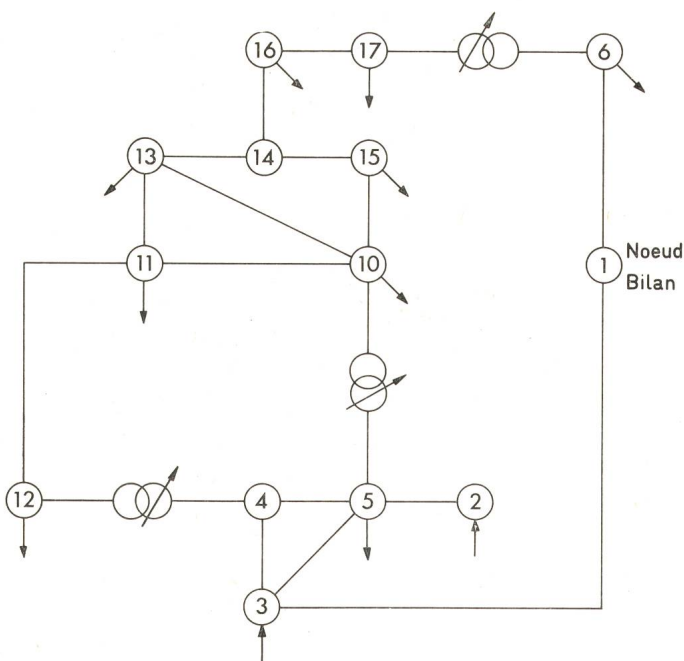


Fig. 1
Exemple du réseau



2. Méthodes de réglage direct

Afin de pouvoir expliquer les concepts de base de ces méthodes, considérons le réseau très simple suivant (fig. 1):

Le nœud 1 est le nœud bilan où l'on impose la tension et la phase de référence.

Les nœuds 2 et 3 sont des nœuds producteurs où l'on impose les puissances actives et réactives produites.

Les nœuds 4 et 14 sont des piquages.

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

Les autres nœuds sont consommateurs et l'on y impose les puissances actives et réactives consommées.

Dans notre exemple, supposons que les trois transformateurs à gradins 4-12, 5-10 et 6-17 ont les rôles suivants:

le transformateur 4-12 règle la tension au nœud 12,
le transformateur 5-10 règle la tension au nœud 10,
le transformateur 6-17 règle la tension au nœud 17,

on règle donc les tensions aux nœuds 10, 12 et 17 à des valeurs: U_{10} , U_{12} et U_{17} .

Le «Load-Flow» selon la méthode de *Newton-Raphson* consiste donc à résoudre le système linéaire suivant:

$$\begin{bmatrix} P_2 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta P_{17} \\ \Delta Q_{17} \end{bmatrix} = [M] \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \Delta U_2/U_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta U_3/U_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta \theta_{17} \\ \Delta U_{17}/U_{17} \end{bmatrix}$$

$$[M] = \begin{bmatrix} a_{2-2} & b_{2-2} & - & - & - & - & a_{2-17} & b_{2-17} \\ c_{2-2} & d_{2-2} & - & - & - & - & c_{2-17} & d_{2-17} \\ \cdot & \cdot & & & & & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & & & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & & & \cdot & \cdot \\ a_{17-2} & b_{17-2} & & & & & a_{17-17} & b_{17-17} \\ c_{17-2} & d_{17-2} & & & & & c_{17-17} & d_{17-17} \end{bmatrix}$$

La matrice M est la matrice Jacobienne qui comprend les termes:

$$a_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j}; b_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial U_j} U_j$$

$$c_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j}; d_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial U_j} U_j$$

ces termes étant calculés pour une certaine impédance et une position donnée des transformateurs à gradins, ces derniers étant donc considérés comme non réglables.

2.1 Méthode utilisant une loi de réglage par récurrence

Cette méthode consiste à modifier la position des gradins des transformateurs après chaque solution du «Load-Flow» ceci afin de satisfaire les contraintes imposées sur certaines tensions.

Revenons au réseau de la fig. 1. Dans ce réseau on veut régler les tensions U_{10} , U_{12} et U_{17} .

Donnons les noms T_{4-12} , T_{5-10} et T_{6-17} aux positions des régulateurs des transformateurs 4-12, 5-10 et 6-17.

Le réglage se fait selon une loi de *Gauss-Seidel*, par exemple:

$$T_{\text{nouveau}} = T_{\text{ancien}} + C(U_0 - U)$$

où C est un facteur qui permet d'améliorer la convergence du problème. C contient également le rapport de transformation s'il y a lieu. (Peut être assimilé à un facteur d'accélération.)

Pour le transformateur 4-12, par exemple, on aurait:

$$T_{4-12\text{nouveau}} = T_{4-12\text{ancien}} + C_{4-12}(U_{120} - U_{12})$$

L'organigramme du programme de calcul contenant cet algorithme se présente comme suit, en prenant le réseau de la fig. 1 comme exemple (fig. 2).

2.2 Méthode par changement de variables

En vue de la première méthode, exposée dans le paragraphe 2.1, on peut faire le raisonnement suivant:

«On a considéré que les tensions aux nœuds 'régles' étaient des variables. Le Load-Flow est alors recommencé plusieurs fois jusqu'à la satisfaction des contraintes, c'est-à-dire que les tensions réglées soient égales à des valeurs fixées d'avance. Les tensions en ces nœuds ne sont donc pas de vraies variables et l'on peut considérer ces tensions comme étant constantes. Toutefois si l'on considère les tensions aux nœuds 'régles' comme des constantes données, il faut introduire d'autres variables, sinon le problème deviendrait surdéterminé. On aboutit donc à une deuxième méthode qui utilise un changement de variables.»

Cette deuxième méthode consiste à remplacer, en tant que variables, les tensions «régles» par les positions des régulateurs des transformateurs à gradins qui règlent ces tensions. En effet, si l'on veut régler la tension U_i à une valeur U_{10} on peut considérer que U_i n'est plus une variable et on peut alors la remplacer comme telle par la nouvelle variable T_{ji} qui représente la position du régulateur du transformateur à gradins réglant la tension au nœud i .

Dans le cas de notre exemple, cela reviendrait à remplacer les variables U_{12} , U_{10} et U_{17} respectivement par T_{4-12} , T_{5-10} et T_{6-17} .

Ecrivons, sous forme matricielle, le nouveau système linéaire qui résulte de ces modifications:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta P_6 \\ \Delta Q_6 \\ \Delta P_{10} \\ \Delta Q_{10} \\ \Delta P_{11} \\ \Delta Q_{11} \\ \Delta P_{12} \\ \Delta Q_{12} \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta P_{17} \\ \Delta Q_{17} \end{bmatrix} = [M'] \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \Delta U_2/U_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta \theta_6 \\ \Delta U_6/U_6 \\ \Delta \theta_{10} \\ \Delta T_{5-10}/T_{5-10} \\ \Delta \theta_{11} \\ \Delta U_{11}/U_{11} \\ \Delta \theta_{12} \\ \Delta T_{4-12}/T_{4-12} \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta \theta_{17} \\ \Delta T_{6-17}/T_{6-17} \end{bmatrix}$$

La matrice M' est la matrice *Jacobienne* qui a la même forme que la matrice M , vue dans le paragraphe 2.1. Certains termes de la matrice M sont modifiés comme suit et l'on obtient ainsi la matrice M' :

Si le nœud j voit sa tension U_j réglée par le transformateur à gradins T_{ij} alors:

$$\text{les termes } b_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial U_j} U_j \text{ et } d_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial U_j} U_j$$

sont remplacés par:

$$e_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial T_{ij}} T_{ij} \text{ et } f_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial T_{ij}} T_{ij}$$

Il faut remarquer ici que contrairement aux termes b_{ij} et d_{ij} , les termes e_{ij} et f_{ij} ne sont pas seulement nuls quand aucune branche ne lie i à j , en effet e_{ij} et f_{ij} sont aussi nuls quand la branche $i-j$ ne représente pas un transformateur à gradins réglant la tension au nœud j .

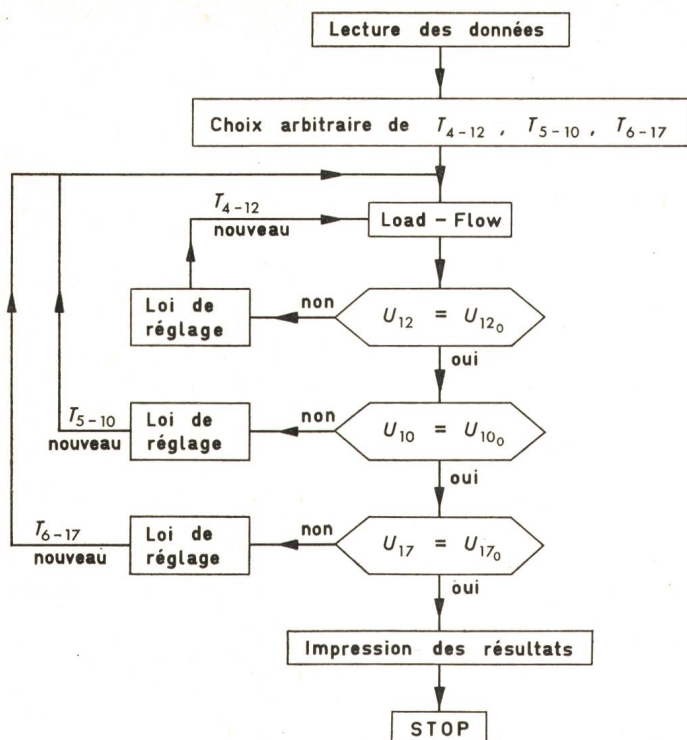


Fig. 2

Organigramme de la méthode de réglage direct par une loi de récurrence

Le programme employant cette méthode de réglage se présente donc comme un Load-Flow classique dont on a échangé une partie des variables. En effet les tensions «réglées» sont données comme constantes et les positions des régulateurs des transformateurs à gradins sont obtenues comme résultats du calcul.

Le grand avantage de la méthode par changement de variables par rapport à la méthode utilisant une loi de réglage par récurrence est la rapidité du calcul. La méthode par changement de variables converge aussi rapidement qu'un «Load-Flow» classique car on fait le même calcul avec des variables différentes. Pour atteindre une précision de l'ordre de 10^{-2} sur les puissances, il faut environ 3-5 itérations de Newton par la deuxième méthode et environ 13-15 par la première [2].

3. Limites des méthodes de réglage direct

Lorsque l'on veut appliquer les programmes de calcul employant les méthodes de réglage direct vues plus haut, on se heurte à certaines difficultés que nous allons mettre en évidence.

Les deux méthodes vues plus haut partent de la même considération: chaque transformateur à gradins règle une seule tension uniquement. Ceci signifie que si l'on a N transformateurs à gradins implantés dans le réseau étudié, on ne pourra régler la tension qu'en N nœuds au plus. Or ce que l'on désire dans l'exploitation réelle d'un réseau, c'est régler l'ensemble des transformateurs à gradins implantés dans le réseau de manière à ce que toutes les tensions aux différents jeux de barres soient comprises entre des limites d'exploitation acceptables, si toutefois ceci est possible. On constate que l'on ne répond pas au problème réellement posé en «attribuant» à chaque transformateur à gradins une seule tension à régler. Il faut tenir compte du fait que lorsqu'un transformateur à gradins voit son réglage modifié, toutes les tensions du réseau vont changer, du moins théoriquement. En réalité chaque transformateur à gradins a,

du point de vue réglage, une certaine zone d'influence plus ou moins grande suivant les cas.

Une autre difficulté entraînée par les méthodes de réglage direct est le choix du transformateur à gradins devant régler telle ou telle tension. Prenons un exemple pour illustrer ceci et revenons au réseau de la fig. 1. Supposons que l'on veuille maintenir la tension au nœud 13 à une tension U_{130} , ceci avant d'imposer toute autre contrainte sur les autres tensions du réseau, quel transformateur à gradins doit régler U_{13} , le 4-12 ou le 5-10 ou encore le 6-17? Le but de la méthode des «chemins réactifs» est de pallier aux difficultés vues dans ce chapitre.

4. Méthodes des chemins réactifs

4.1 Causes des chutes de tension en ligne

Dans ce premier paragraphe nous allons établir une expression simplifiée donnant les chutes de tension en ligne. Assimilons pour ce faire chaque élément (ou ligne) du réseau à une impédance Z

$$Z = R + jX$$

pour les câbles la capacité peut être simulée par une impédance transversale aux nœuds d'origine et d'extrémité du câble.

Exprimons la puissance complexe transmise par un élément du réseau triphasé:

$$P + jQ = \sqrt{3} UI^*$$

où U est la tension simple à l'extrémité de l'impédance multipliée par $\sqrt{3}$. Cette tension sera considérée comme étant l'origine des déphasages, elle sera donc une grandeur réelle.

I^* est la quantité conjuguée complexe du courant de ligne.

d'où

$$I = \frac{P - jQ}{\sqrt{3} U}$$

L'écart entre les tensions complexes en début et en fin de ligne vaut donc:

$$\Delta U = \sqrt{3} Z \cdot I = \frac{(R + jX) \cdot (P - jQ)}{U} = \Delta U$$

La tension complexe en début de ligne vaut: $[U + \Delta U]$

Le déphasage entre les deux tensions ($U + \Delta U$) de début de ligne et U de fin de ligne est généralement petit. Dessinons alors le diagramme complexe (fig. 3).

$$\Delta U = \frac{RP + XQ}{U} + j \frac{XP - RQ}{U}$$

D'après la fig. 3, on voit que l'on peut exprimer l'écart entre les modules des deux tensions $[U + \Delta U]$ et U comme suit.

$$|U + \Delta U| - |U| \approx \text{Re} \{ \Delta U \} =$$

$$= \frac{RP + XQ}{U} = \text{écart entre les modules des tensions de début et de fin de ligne.}$$

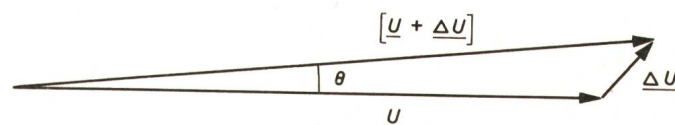


Fig. 3

D'après la fig. 3, on voit que l'on peut exprimer le déphasage entre les deux tensions $[U + \Delta U]$ et U comme suit:

$$\sin \theta \approx \frac{XP - RQ}{l^2}$$

mais comme on l'a vu plus haut θ est généralement petit et l'on peut donc écrire $\sin \theta \approx \theta$.

$$\theta \approx \frac{XP - RQ}{U^2}$$

A l'exception des lignes à basse tension, la résistance R est généralement petite vis-à-vis de l'inductance X

$$R \ll X$$

On peut donc écrire

Ecart entre les modules des tensions de début et de fin de ligne $= \frac{XQ}{U}$ sauf si $\frac{R}{X} > \frac{Q}{P}$

et

Déphasage entre les tensions de début et de fin de ligne

en introduisant certaines simplifications on a donc pu établir la proportionnalité entre:

- les déphasages et les puissances actives P transitées;
- les chutes de tension et les puissances réactives Q transitées.

4.2 Détermination des zones d'influence des transformateurs à gradins

Vu la liaison (proportionnalité si l'on introduit certaines simplifications) qui existe entre les puissances réactives transitées dans le réseau et les chutes de tension qui apparaissent

dans ce réseau, on va baser l'algorithme des «chemins réactifs» sur cette liaison et déterminer ainsi pour chaque transformateur à gradins quelle est la partie du réseau sur laquelle son réglage est prépondérant par rapport aux autres transformateurs à gradins. C'est ce que nous appellerons la zone d'influence de chaque transformateur à gradins.

Pour chaque nœud i du réseau on va déterminer par quelle ligne $j-i$ transite la plus forte puissance réactive Q_{j-i} . Pour le nœud j ainsi trouvé, on recommence le même raisonnement qui est repris tant que la ligne $x-y$ trouvée n'est pas un transformateur à gradins.

Remarques:

1. La puissance réactive Q_{j-1} est positive si elle est transitée de j vers i et négative si elle est transitée de i vers j . Quand on parle de la plus forte puissance réactive transitée Q_{j-1} on entend Q_{j-1} avec son signe.
2. De par les hypothèses faites au paragraphe 4.1, la marche à vide est exclue.

Donnons l'organigramme de la détermination des zones d'influence dans le cas d'un réseau à NN nœuds (fig. 4).

Une fois cette première phase de l'algorithme achevée, on connaît pour chaque nœud du réseau le transformateur à gradins qui a la plus grosse influence sur la tension du dit nœud. Autrement dit, on connaît la zone d'influence de chaque transformateur à gradins implanté dans le réseau.

4.3 Calcul et allocation des corrections de tension

Pour chaque nœud du réseau on impose deux valeurs, en Volt, entre lesquelles on désire voir maintenue la tension du dit nœud. On aura donc pour chaque nœud N du réseau les contraintes suivantes :

$$U_{\min}(N) < U(N) < U_{\max}(N)$$

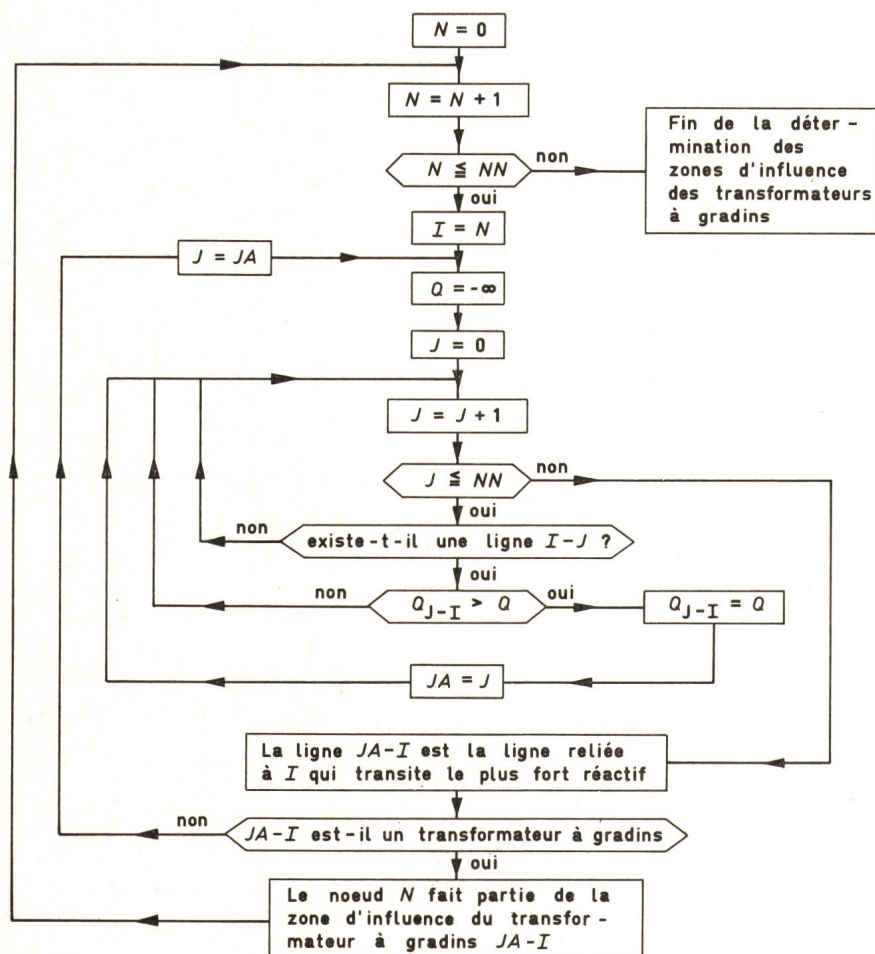


Fig. 4
Organigramme de la détermination des zones d'influence

En certains nœuds du réseau on n'attache pas d'importance à la valeur de la tension, on impose alors $U_{\min} = 0$ et $U_{\max} = \infty$.

Pour chaque nœud N du réseau on commence par poser la question:

$$U_{\min}(N) < U(N) < U_{\max}(N) ?$$

— oui: On peut dire que le transformateur à gradins qui a la zone d'influence comprenant le nœud N est correctement réglé pour satisfaire les contraintes imposées sur la tension $U(N)$.

— non: Il faut modifier le réglage du transformateur à gradins qui a la zone d'influence comprenant le nœud N :

on calcule la correction:

$$DU(N) = U_{\max}(N) - U(N) \quad DU(N) < 0$$

ou

$$DU(N) = U_{\min}(N) - U(N) \quad DU(N) > 0$$

suivant que

$$U(N) > U_{\max}(N)$$

ou que

$$U(N) < U_{\min}(N)$$

On associe alors la valeur de la correction calculée pour N à l'une des deux bornes (celle qui est au même étage de tension que $U(N)$) du transformateur à gradins qui a la zone d'influence comprenant le nœud N .

Supposons que ce soit le transformateur à gradins $J-K$ qui ait la zone d'influence comprenant N et que $U(J)$ appartienne au même étage de tension que $U(N)$, on associe alors à J une valeur: $DUT(J) = DU(N)$.

A ce stade du raisonnement il faut énoncer la première incompatibilité:

Si un transformateur à gradins $J-K$ a une zone d'influence comprenant plusieurs nœuds, il se peut alors que dans cette même zone il y ait un nœud I tel que $U(I) < U_{\min}(I)$ $DU(I) > 0$ et un autre nœud N tel que $U(N) > U_{\max}(N)$ $DU(N) < 0$. On constate que pour ce transformateur à gradins $J-K$ toute modification de son réglage n'aurait pour effet que d'améliorer la situation dans une partie de sa zone d'influence et de la détériorer dans une autre partie de cette même zone. Le réglage du transformateur $J-K$ ne doit donc pas être modifié.

Première incompatibilité: Si on aboutit, par les chemins réactifs, sur une même borne d'un transformateur à gradins avec des corrections DU de signes différents, le réglage de ce transformateur à gradins ne doit pas être modifié.

Donnons l'organigramme de cette deuxième phase de l'algorithme qui est la phase de calcul et d'allocation des cor-

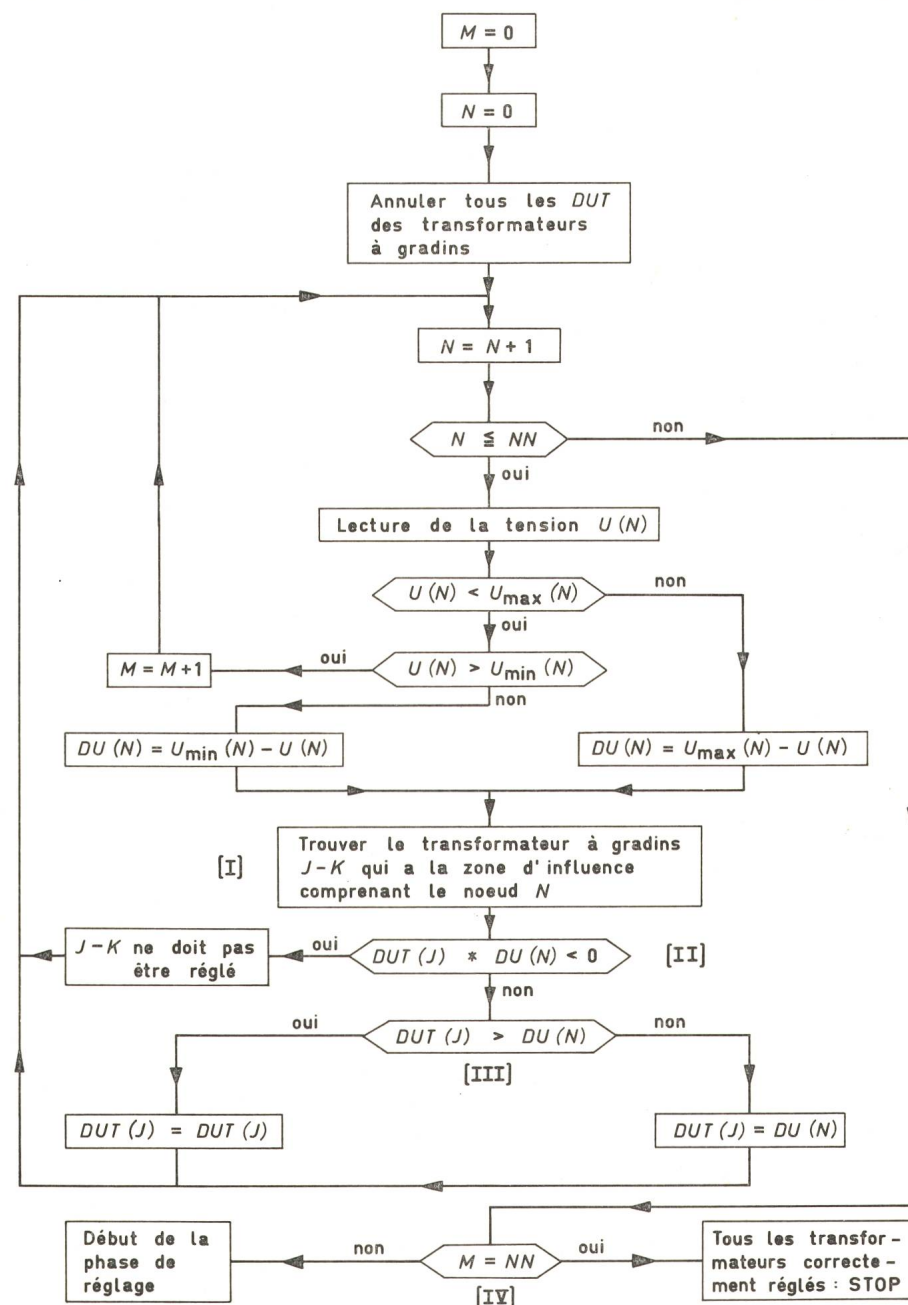


Fig. 5
Organigramme du calcul et de l'allocation des corrections de tension

rections. Nous donnerons après des explications relatives à cet organigramme. L'organigramme dans le cas d'un réseau à NN nœuds voir fig. 5.

Remarques relatives à l'organigramme de la fig. 5.

- (I) Cette phase est celle qui résulte de l'organigramme de la fig. 4, paragraphe 4.2.
- (II) Ceci est le test de la première incompatibilité.
- (III) Afin d'effectuer la modification du réglage, si nécessaire, des transformateurs à gradins, on désire connaître la correction maximum associée à chaque borne de chaque transformateur à gradins. Par cette question et les égalités qui la suivent, on mémorise la correction DUT maximum associée à chaque borne.
- (IV) Ceci est le premier arrêt possible de l'algorithme si toutefois au moins une tension ne satisfait pas les contraintes qui lui sont imposées, on entame la phase de réglage décrite dans le paragraphe suivant.

Cette deuxième phase de l'algorithme nous a permis d'éliminer, par le test de la première incompatibilité, certaines possibilités de réglage. Pour les transformateurs à gradins encore réglables, on a mémorisé l'écart maximum associé à chaque borne.

4.4 Phase de réglage des transformateurs à gradins

4.4.1 Schémas équivalents des transformateurs

Dans le programme de calcul utilisant la méthode des chemins réactifs, les lignes sont données comme ayant leur origine en NO et leur extrémité en NE . Pour les transformateurs il en sera de même, il faut toutefois faire les remarques suivantes:

- a) Les transformateurs sont considérés comme étant constitués d'une résistance et d'une inductance suivies d'un transformateur idéal.
- b) La résistance de l'inductance seront données vues du côté NO .

Lorsqu'il s'agit de transformateurs à gradins, on gardera les mêmes conventions que précédemment en ajoutant la suivante:

- a) Les gradins seront toujours donnés du côté NO du transformateur à gradins.

Nous aboutissons donc au schéma équivalent suivant (fig. 6).

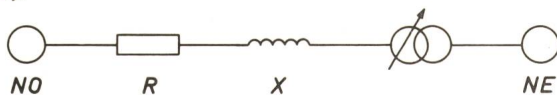


Fig. 6

Schéma équivalent unifilaire d'un transformateur à gradins

Pour les transformateurs fixes, on donne les nœuds d'origine et d'extrémité, l'impédance de court-circuit (par phase), le rapport de transformation à vide et le déphasage à vide s'il s'agit d'un transformateur en quadrature.

Pour les transformateurs à gradins, on donne la même chose avec en plus le rapport de transformation médian à vide, le nombre de gradins de part et d'autre de cette position médiane et la valeur en Volt de chaque gradin mesurée à vide lorsque la tension nominale est appliquée de l'autre «côté».

En employant ce schéma équivalent on introduit deux simplifications:

- a) Nous négligeons le courant magnétisant, mais cette simplification peut être aisément levée en ajoutant au nœud NO , par exemple, une impédance simulant ce phénomène.
- b) Nous ne tenons pas compte de la variation de l'impédance de court-circuit avec les gradins. Cette simplification a été introduite pour deux raisons: premièrement la variation de l'impédance de court-circuit est faible devant l'impédance de court-circuit elle-même; deuxièmement l'impédance de court-circuit ne représente qu'une fraction de l'impédance totale de la boucle dans laquelle est inséré le transformateur à gradins en question.

4.4.2 Réglage des transformateurs à gradins

À l'issue de la phase de calcul et d'allocation des corrections de tensions (voir paragraphe 4.3), on a éliminé, par le test de la première incompatibilité, un certain nombre de possibilités de réglage et pour les transformateurs à gradins encore réglables, on a mémorisé la correction maximum associée à chaque borne. Afin d'expliquer la phase de réglage, prenons comme exemple un transformateur à gradins $J-K$, encore réglable et tel que les gradins se trouvent du côté J . On peut alors distinguer 2 cas différents.

$$a) DUT(J) = DUT(K) = 0$$

Le transformateur à gradins $J-K$ est correctement réglé pour satisfaire les contraintes imposées sur les tensions de tous les nœuds appartenant à sa zone d'influence.

$$b) DUT(J) = 0 \quad DUT(K) \neq 0$$

Malgré que dans ce cas le premier test d'incompatibilité donne $J-K$ réglable, il faut, ici, faire un deuxième test d'incompatibilité. Prenons un exemple (fig. 7) et supposons:

$$\begin{aligned} U(A) &< U_{\min}(A) & DU(A) &> 0 \\ U(J) &< U_{\min}(J) & DU(J) &> 0 \\ U(K) &< U_{\min}(K) & DU(K) &> 0 \\ U(B) &< U_{\min}(B) & DU(B) &> 0 \\ U(C) &> U_{\min}(C) \end{aligned}$$

La puissance réactive transite de C vers A .

Avant le début du réglage on aurait donc la situation suivante:

$J-K$ réglable $B-C$ réglable

$$\text{et } DUT(J) = DU(A) \\ DUT(K) = 0$$

$$\text{et } DUT(B) = DU(K) \\ DUT(C) = 0$$

K appartient à la zone d'influence de $B-C$.

Le fait de modifier le réglage de $J-K$ n'arrange rien car les tensions à ses deux bornes sont inférieures à leurs limites inférieures respectives. C'est le transformateur $B-C$ seul qui doit avoir son réglage modifié. D'où:

Deuxième incompatibilité: Si pour un transformateur à gradins $J-K$, la borne J se voit attribuer une correction $DUT(J) \neq 0$ et si la borne K se voit attribuer une correction $DUT(K) = 0$, le réglage de $J-K$ ne doit pas être modifié si: $DUT(J) \times DU(K) > 0$, c'est-à-dire si ces deux corrections sont de même signe. Idem si l'on intervertit J et K .

Si, à la suite de ce deuxième test d'incompatibilité, $J-K$ est réglable, on calcule la nouvelle position des gradins qui sont, rappelons le, du côté J .

$$- DUT(J) \neq 0 \quad \text{et} \quad DUT(K) = 0$$

$$S(J-K) = SNO(J-K) + ENT[DUT(J)/G(J-K)] \cdot G(J-K)$$

$$- DUT(J) = 0 \quad \text{et} \quad DUT(K) \neq 0$$

$$\begin{aligned} S(J-K) &= SNO(J-K) + \\ &+ ENT[-DUT(K) \times SNO(J-K) / SNE(J-K) / G(J-K)] \times \\ &\times G(J-K) \end{aligned}$$

Remarque: $ENT[X] \triangleq$ partie entière de X .

Il faut encore savoir si la valeur de $S(J-K)$ ainsi obtenue se situe à l'intérieur de la plage de réglage, c'est pourquoi on compare $S(J-K)$ avec les valeurs extrêmes $SNO_{\min}(J-K)$ et $SNO_{\max}(J-K)$. Si $S(J-K)$ est compris entre ces valeurs, on donne à $SNO(J-K)$ la nouvelle valeur $S(J-K)$, sinon on donne

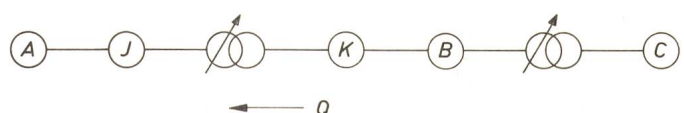
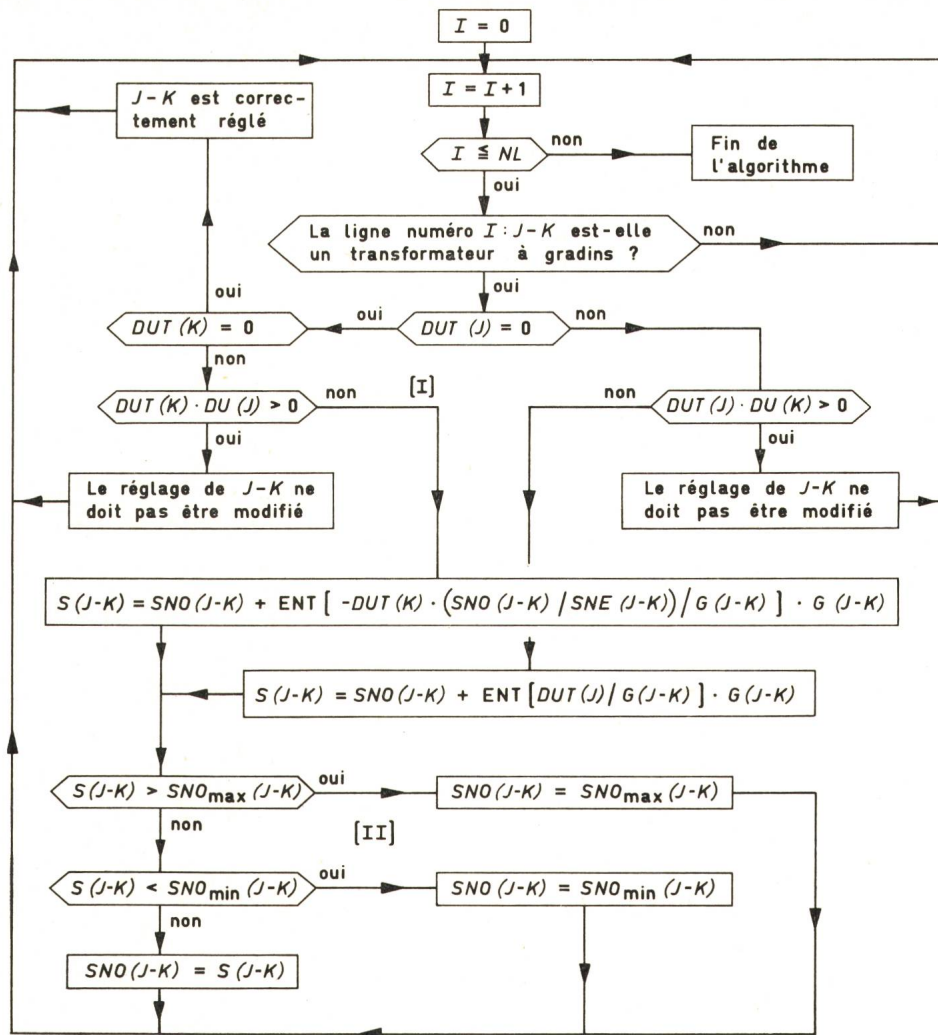


Fig. 7

Fig. 8
Organigramme de la phase de réglage



à $SNO(J-K)$ la valeur $SNO_{\min}(J-K)$ ou $SNO_{\max}(J-K)$ suivant que $S(J-K) < SNO_{\min}(J-K)$ ou que $S(J-K) > SNO_{\max}(J-K)$.

A l'issue de cette troisième phase de l'algorithme, on a obtenu ce que l'on désirait, c'est-à-dire les modifications à apporter au réglage des transformateurs à gradins de manière à satisfaire les contraintes imposées sur les tensions du réseau. Contrairement à ce que nous avons vu aux chapitres 2 et 3, on n'a pas seulement imposé des contraintes sur des tensions en un nombre de nœuds égal au nombre de transformateurs à gradins implantés dans le réseau, en effet dans la «méthode des chemins réactifs», on tient compte des contraintes de tension imposées sur tous les nœuds du réseau et on répond ainsi d'une manière plus fidèle au problème réel posé. (Voir fig. 8, l'organigramme de la phase de réglage.)

Remarques relatives à l'organigramme de la fig. 8.

- (I) Test de la deuxième incompatibilité.
- (II) Vérification que les plages extrêmes des gradins ne soient pas dépassées.

5. Programme de calcul octave

Le programme «Octave» comprend 3 routines principales:

- a) «Oracle» qui est un «Load-Flow».
- b) «Gradin» qui est la routine de réglage utilisant la méthode des «chemins réactifs».
- c) «Impres» qui est la routine d'impression des résultats.

5.1 Oracle

Le programme «Oracle» est un «Load-Flow» écrit et mis au point par la Chaire d'Installations Electriques de l'EPFL. Le programme calcule les tensions et la répartition des puissances actives et réactives dans un réseau triphasé symétrique en régime permanent. La méthode employée est celle de *Newton-Raphson*.

Comme nous l'avons dit au début de cet article, le but n'est pas la description du Load-Flow en lui-même, car en ce qui concerne «Octave» ce n'est qu'un outil; c'est pourquoi on se contentera de décrire «Oracle» tel qu'il sera employé, par son mode d'entrée-sortie.

Entrées:

- a) Précision exigée pour le calcul des puissances actives et réactives.
- b) Pour le nœud bilan: la tension et la phase de référence imposée.
- c) Pour les autres nœuds, il faut distinguer 2 catégories.
 - cat.1: Les puissances active et réactive produites ou consommées sont imposées. P et Q donnés.
 - cat.2: La puissance active produite ou consommée et la tension sont imposées. P et U donnés.
- d) Pour les lignes: les nœuds d'origine et d'extrémité, l'impédance longitudinale et la capacité transversale s'il y a lieu.
- e) Pour les transformateurs: les nœuds d'origine et d'extrémité, l'impédance de court-circuit, le rapport de transformation à vide et le déphasage à vide s'il s'agit d'un transformateur en quadrature.

Sorties:

- a) Pour le nœud bilan: les puissances active et réactive produites ou consommées.

- b) Pour les autres nœuds:
 cat.1: La tension et le déphasage par rapport au nœud bilan.
 cat.2: La puissance réactive produite ou consommée et le déphasage par rapport au nœud bilan.
 c) Pour les lignes et transformateurs: le courant par phase, les pertes, les puissances active et réactive transitées.
 d) Les pertes totales dans le réseau.

Remarques:

- Si le réseau comprend NN nœuds, il est nécessaire d'avoir $2 NN$ inconnues et $2 NN$ données, dont la tension et la phase au nœud bilan, car pour chaque nœud on peut définir 4 variables: P, Q, U, θ . L'introduction des deux catégories de nœuds permet de simuler des centrales fonctionnant à puissance réactive constante ou des centrales fonctionnant à tension constante. Les autres catégories possibles telles $Q, U; P, Q, U$, entre autres, n'ont pas d'intérêt pratique.
- Les transformateurs sont non réglables en cours d'exécution du programme «Oracle».
- La résolution du système linéarisé par la méthode de Newton peut être faite, soit par inversion matricielle, soit par triangularisation, soit encore par la méthode de Gauss-Seidel.

5.2 Gradin

«Gradin» est la routine qui effectue le réglage des transformateurs à gradins en utilisant la méthode des «chemins réactifs» décrite dans le chapitre 4. On passe donc par les phases de «détermination des zones d'influence», de «calcul et allocations des corrections» et de «réglage des transformateurs à gradins».

Les données de «Gradin» sont des résultats partiels d'un «Load-Flow», à savoir les tensions aux nœuds et les puissances réactives transitées dans les lignes et transformateurs et enfin les limites inférieures et supérieures entre lesquelles on désire voir maintenues les tensions.

Les sorties de «Gradin» sont les modifications éventuelles à apporter au réglage des transformateurs à gradins afin de satisfaire les contraintes sur les tensions.

5.3 Oracle-Gradin

Dans ce paragraphe nous allons décrire le fonctionnement de l'ensemble «Oracle-Gradin» et plus spécifiquement les échanges d'information nécessaires entre «Oracle» et «Gradin».

Par rapport aux entrées de «Oracle», les données supplémentaires suivantes sont nécessaires afin de pouvoir exécuter l'ensemble «Oracle-Gradin».

Entrées supplémentaires

- Pour chaque nœud: la valeur en volts des limites inférieures et supérieures entre lesquelles on désire voir maintenue la tension du dit nœud.
- Pour chaque transformateur à gradins: les nœuds d'origine et d'extrémité, l'impédance de court-circuit pour le rapport de transformation médian, le rapport de transformation médian à vide, le nombre de gradins de part et d'autre de cette position et la valeur en volts de chaque gradin mesurée à vide lorsque la tension nominale est appliquée de l'autre côté.

La structure de l'ensemble «Oracle-Gradin» est alors dans la fig. 9.

Remarque:

Les trois cas dans lesquels on doit arrêter l'échange «Oracle-Gradin» sont les suivants:

- Pour tous les nœuds on a:

$$U_{\min}(N) < U(N) < U_{\max}(N)$$

c'est-à-dire que toutes les tensions sont comprises entre les limites que l'on a fixées.

- Le problème tel que nous l'avons posé a une solution.

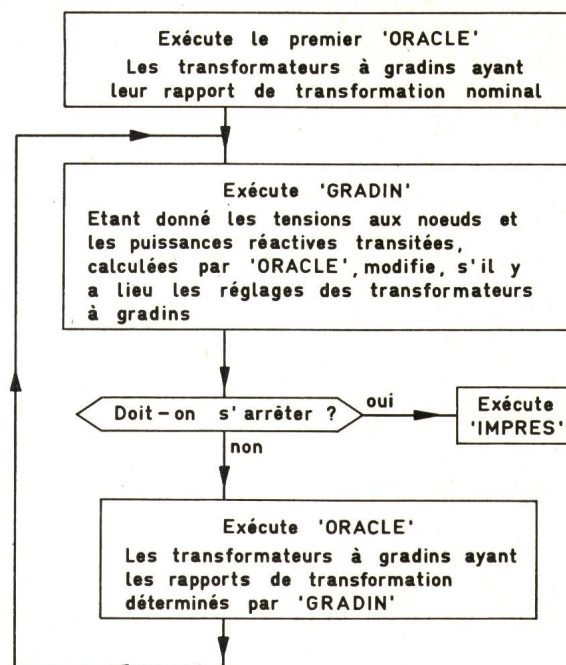


Fig. 9
Organigramme d'ORACLE-GRADIN

- Au moins une tension est hors des limites qu'on lui a imposées, mais aucun transformateur à gradins ne peut plus être réglé, ceci pour l'une des deux raisons suivantes:

ba) les tests d'incompatibilité ont éliminé toutes les possibilités de réglage des transformateurs à gradins,

bb) le transformateur à gradins qui a la zone d'influence comprenant le ou les nœuds en question est au bout de sa plage de réglage.

Le problème tel que nous l'avons posé n'a pas de solution.

- Un ou plusieurs transformateurs à gradins oscillent. Donnons un exemple pour expliquer ceci (fig. 10).

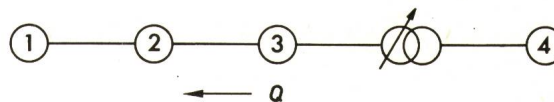


Fig. 10

Supposons que lorsque le gradin du transformateur est en position S1 on ait

$$U(1) < U_{\min}(1)$$

et tous les autres nœuds tels que

$$U_{\min} < U < U_{\max}$$

on modifie alors le réglage et on aboutit à la position S2 qui est telle que

$$U(3) > U_{\max}(3)$$

et tous les autres nœuds tels que

$$U_{\min} < U < U_{\max}$$

Dans ce cas on va avoir une oscillation entre les positions S1 et S2 du gradin, car les limites que l'on s'est fixées sur les tensions aux nœuds 1 et 3 ne sont pas compatibles.

Le problème tel que nous l'avons posé n'a pas de solution.

5.4 Impres

La tâche essentielle d'«Impres» est l'impression des résultats. «Impres» a également comme tâche de vérifier si le réseau est exploitable vu la solution proposée, c'est-à-dire vérifier si aucune ligne ou transformateur (fixe ou réglable) n'est surchargé. Enfin, «Impres» est chargé de la préparation en vue d'une étude prospective du réseau.

Par rapport à l'ensemble «Oracle-Gradin» une donnée supplémentaire est nécessaire: pour chaque ligne et pour

Comme vu au paragraphe 5.3, «Impres» peut être exécuté dans 2 cas différents suivant que le problème posé a ou n'a pas de solution.

Impression:

ac) De messages signalant pourquoi le problème n'a pas de solution, signalant, s'il y a lieu, les lignes ou transformateurs (fixes ou réglables) surchargés et signalant la ligne ou le transformateur (fixe ou réglable) le plus chargé.

Même impression que sous a).

Cette étude prospective peut être supprimée si on le désire.

Pour chaque nœud consommateur l'accroissement annuel de la charge.

Le programme «Octave» est le programme complet faisant appel à un Load-Flow et utilisant la méthode des «chemins réactifs» pour le réglage des transformateurs à gradins.

A la fig. 11, on montre un organigramme de la structure d'«Octave» qui comprend deux boucles principales numérotées ici (I) et (II).

La boucle (II) est la boucle qui permet la simulation du réseau au cours des années. Elle est reprise tant que les contraintes de tension peuvent être satisfaites et tant qu'aucun élément n'est surchargé.

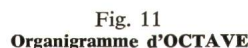
Le programme «Octave» est écrit en Fortran IV, il est actuellement opérationnel sur la CDC CYBER 7326 de l'EPFL. Avec une capacité de mémoire de 32 k mots de 60 bit, on peut traiter avec «Octave» un réseau de 350 nœuds et 650 lignes, dont 150 transformateurs (fixes ou réglables) au maximum.

Prenons le réseau montré à la fig. 12 comme exemple.

4 transformateurs à gradins.

$$\left. \begin{array}{l} U_{\min} = 38 \text{ kV} \\ U_{\max} = 42 \text{ kV} \end{array} \right\} \text{ pour le niveau } 40 \text{ kV}$$

tous les courants nominaux des lignes étaient donnés; toutes les puissances admissibles des transformateurs étaient données.



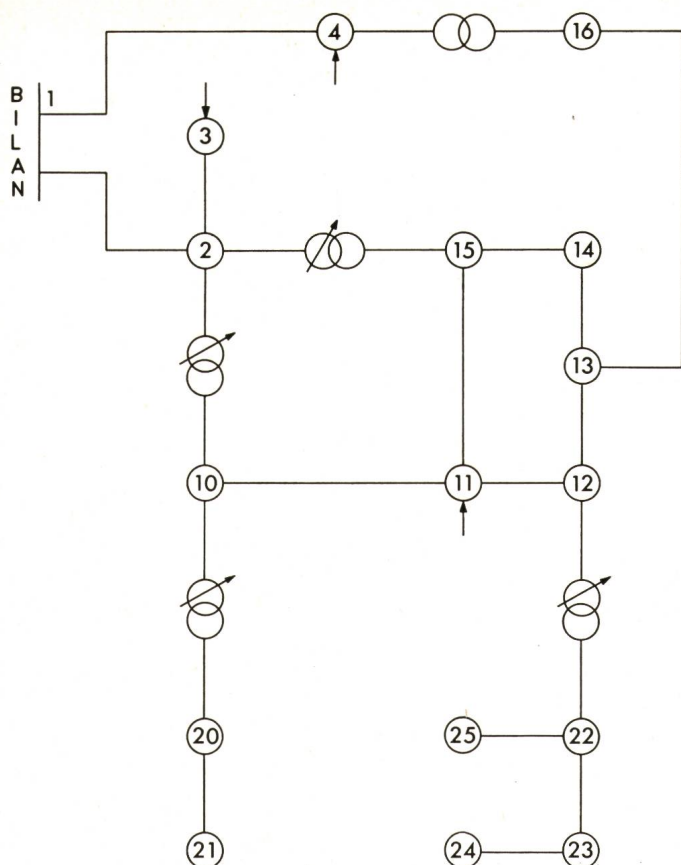


Fig. 12
Schéma du réseau servant à l'exemple de calcul

La précision de calcul demandée sur les puissances était de 5%.

Le calcul a été mené sur 4 années: 1972, 1973, 1974, 1975 avec des taux d'accroissement annuel des charges variant de 1 à 14 % selon les consommateurs.

En l'année 1975 un transformateur oscillait et le problème n'avait donc pas de solution en 1975.

Le nombre de phases de réglage nécessaire par année était de 1 à 2. Donc en regardant la fig. 11, on a exécuté la boucle (I) de 2 à 3 fois selon les années. Toujours selon la fig. 11, on a exécuté la boucle (II) 3 fois.

Sur l'ordinateur CYBER 7326 de l'EPFL, le temps de calcul nécessaire était d'environ 16,5 s (temps de processeur central, exécution seule, compilation non comprise).

Conclusions

Dans cet article, on a traité un certain nombre d'algorithmes qui permettent l'introduction du réglage des transformateurs à gradins dans les programmes de «Load-Flow» utilisant la méthode de *Newton*.

Les méthodes que l'on peut appeler de «réglage direct» ont l'avantage de ne pas nécessiter des modifications importantes des programmes de calcul. Elles ont, par contre, le grand inconvénient de ne pas pouvoir tenir compte des contraintes imposées sur les tensions de tous les nœuds du réseau étudié. En effet chaque transformateur à gradins règle une seule tension. On particularise ainsi trop le problème et l'on ne tient pas compte du fait que chaque transformateur influence directement les tensions des nœuds faisant partie de sa zone d'influence.

La méthode des «chemins réactifs» permet de tenir compte des contraintes imposées sur les tensions de tous les nœuds du réseau et permet ainsi la satisfaction, si le problème posé a une solution, de ces contraintes au moyen des transformateurs à gradins implantés dans le réseau, qui peut être maillé ou non.

Le programme de calcul «Octave» qui emploie la méthode des «chemins réactifs» permet de faire des calculs sur des réseaux de grande taille, tout en tenant compte des limites réelles d'exploitation telles que: chutes de tension, surcharges des éléments, possibilités de réglage, possibilités des centrales. Par sa capacité de pouvoir contrôler ces conditions d'exploitation et de pouvoir simuler, si on le désire, l'accroissement annuel des charges, «Octave» est un outil d'élaboration et de contrôle de plans directeurs de réseaux et permet ainsi une planification plus élaborée des réseaux d'énergie électrique.

Bibliographie

- [1] W. F. Tinney and C. E. Hart: Power flow solution by Newton's method. Trans. IEEE PAS 86(1967)11, p. 1449...1460.
- [2] N. M. Peterson and W. S. Meyer: Automatic adjustment of transformer and phasestifter taps in the Newton power flow. Trans. IEEE PAS 90(1971)1/2, p. 103...108.

Adresse de l'auteur:

H. B. Püttgen, ingénieur dipl. EPFL, Centre d'Etude des Réseaux Electriques, Chaire d'Installations Electriques EPFL, 16, chemin de Bellerive, 1007 Lausanne.