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: 72 (1981)

Heft: 1

Artikel: Sur le système informatique pour l'exploitation optimale des réseaux de distribution

Autor: Cârtina, G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-905053

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: 09.12.2025

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

Sur le système informatique pour l'exploitation optimale des réseaux de distribution

Par G. Cârtina

621.315:519.24;

L'utilisation des grandeurs statistiques dans la solution de nombreux problèmes rencontrés dans l'exploitation optimale des réseaux de distribution diminue beaucoup le volume de calcul. De plus, pour la détermination de ces grandeurs, on peut utiliser les énergies compteurisées. Le travail introduit la notion de l'énergie informationnelle pour la répartition normale des puissances actives et réactives, considérées comme variables aléatoires.

Mittels statistischer Grössen kann der Rechenaufwand zur Lösung von zahlreichen Problemen der optimalen Betriebsführung von Verteilnetzen stark verringert werden. Dazu kommt, dass man zur Bestimmung dieser Grössen die Zähler-Ablesewerte verwenden kann. In der Arbeit wird für die als Zufallsvariable betrachteten Wirk- und Blindleistungen der Begriff der Informatik-Energie eingeführt.

1. Introduction

Le calcul rigoureux des pertes d'énergie, de compensation optimale de l'énergie réactive et du réglage de la tension dans un réseau de distribution suppose la considération d'un grand nombre de données caractérisant les courbes de charge active et réactive et la variation de la tension en temps pour tous les nœuds du réseau. On rencontre les mêmes difficultés dans le cas des réseaux à moyenne tension à la détermination des points de débouclage optimaux du point de vue de la réduction des pertes. Il faut, d'abord, relever les variations $P(t)$, $Q(t)$, $U(t)$ de tous les nœuds et les utiliser ensuite, après la discrétisation, dans des relations adéquates, ce qui représente un travail laborieux.

En considérant $P(t)$, $Q(t)$ et $U(t)$ comme variables de temps aléatoires $X(t)$, on peut les caractériser numériquement par la valeur moyenne $M(X)$ et la variance $D^2(X)$ [1],

$$M(X) = \sum_{t=1}^{m} X_t f(X_t) \tag{1}$$

$$D^2(X) = M\left[X - M(X)\right] = M(X^2) - M^2(X) \tag{2}$$

où $f(X)$ est la probabilité de l'apparition de X_t. La valeur $\sigma_X = D(X) = \sqrt{D^2(X)}$ est appelée l'écart moyen quadratique de la variable aléatoire X ou l'écart type.

Les principales propriétés de ces grandeurs statistiques, qui permettent la simplification du calcul, sont [1]:

$$M(aX + b) = aM(X) + b \tag{3}$$

$$M(X + Y) = M(X) + M(Y) \tag{4}$$

$$D^2(aX + b) = a^2 D^2(X) \tag{5}$$

$$D^2(aX + bY) = a^2 D^2(X) + b^2 D^2(Y) \tag{6}$$

où a, b sont des constantes et X, Y des variables aléatoires indépendantes. Pour la variable aléatoire X on connaît encore la relation [1]

$$\sum_{i=1}^{m} X_i^2 = m\left[M^2(X) + D^2(X)\right] \tag{7}$$

Dans des buts purement statistiques on peut garder comme information la probabilité même [2]:

$$E = \sum_{j=1}^{m} f^2(X_j) \tag{8}$$

ou pour une répartition avec une densité de répartition continue $f(X)$:

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} f^2(X)\,\mathrm{d}X \tag{9}$$

appelée l'énergie informationnelle. Il est intéressant de remarquer que les propriétés de l'énergie informationnelle sont caractéristiques pour le niveau de l'organisation du système des composantes. Dans une certaine mesure, l'énergie informationnelle est plus sensible aux modifications du système des composantes que l'entropie $\left(= \sum_{j=1}^{m} f(X_j) \log f(X_j)\right)$.

Pour la répartition normale $N(\mu, \sigma_X^2)$, avec les paramètres μ et $\sigma_X^2 = D^2(X)$, et la densité de probabilité

$$f(X, \mu, \sigma_X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_X}\, \mathrm{e}^{-\frac{1}{2}\left(\frac{X-\mu}{\sigma_X}\right)^2} \tag{10}$$

on obtient l'expression de l'énergie informationnelle à partir de la relation (9),

$$E(\mu, \sigma_X) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\,\sigma_X} \tag{11}$$

On peut définir encore le coefficient de corrélation informationnelle des deux répartitions normales, $N(\mu, \sigma_{Xi})$, $i = 1, 2$ [2]:

$$\mathrm{Cor}(\mu, \sigma_{Xi}) = \frac{\sqrt{2\,\sigma_{X1}\,\sigma_{X2}}}{\sqrt{\sigma_{X1}^2 + \sigma_{X2}^2}} \tag{12}$$

En se basant sur les grandeurs statistiques ci-dessus pour les puissances actives, réactives et les tensions, comme variables aléatoires, l'article met en évidence la manière dont on les utilise dans le système informatique pour l'exploitation optimale des réseaux de distribution.

Tableau I

Eléments du réseau	U_n (kV)	Pertes relatives (%)	
		1976	1977
1 autotransformateurs	330/110	0,5	1,4
2 lignes	110	33,2	29,5
3 transformateurs	110	6,0	8,9
4 lignes	35	16,2	16,3
5 transformateurs	35	5,4	6,1
6 lignes de distribution	10	1,9	2,2
7 transformateurs	10	2,9	4,6
8 lignes de distribution	6	2,8	2,6
9 transformateurs	6	2,6	3,5
10 réseaux à basse tension	0,4	27,2	23,0
11 transformateurs de mesure	–	0,2	0,3
12 transformateurs auxiliaires des postes	–	1,1	1,6

2. Calcul des pertes d'énergie active

L'analyse de la structure des pertes d'énergie active dans un réseau électrique (tableau I) [3], indique que les lignes de transmission de toutes les tensions contribuent pour plus de 65 % aux pertes totales et les pertes dans les transformateurs de couplage font près de 20 %, dont 70 % sont des pertes de fer. De nombreuses lignes de 6...10 kV ont des pertes assez importantes à cause de leurs longeurs et surcharges. De même, les pertes dans les réseaux à basse tension sont extrêmement grandes, plus de 23 %.

La structure des pertes montre les directions dans lesquelles il faut concentrer les efforts pour la réduction des pertes de l'ensemble du réseau. Une économie d'énergie continue, tant soit peu en pourcentage, peut signifier des gains assez importants. Il est donc nécessaire qu'on puisse évaluer le plus exactement possible les pertes des différents types de réseau.

2.1 Pertes d'énergie active dans les réseaux radiaux

On considère un réseau radial quelconque dans lequel les paramètres des transformateurs du réseau (s'il y a plusieurs niveaux de tension) sont inclus dans ceux des lignes (fig. 1). Les nœuds sont numérotés de 0 à n ($n = 15$ dans la figure 1), dans une succession convenable; l'étiquette de chaque ligne est celle du nœud du côté droit. En utilisant la relation (7), les pertes d'énergie en T jours ont pour expression

$$\Delta W = T \cdot \Delta P = T \sum_{t=1}^{m=24} \sum_{i}^{n} R_i \frac{P^2{}_i + Q_i{}^2}{U_n{}^2} = \tag{13}$$

$$= \frac{mT}{U_n{}^2} \sum_{i=1}^{n} R_i \left[M^2(P_i) + M^2(Q_i) + D^2(P_i) + D^2(Q_i)\right]$$

$$\text{où } P_i = \sum_{j \in M_i} P_j; \quad Q_i = \sum_{j \in M_i} Q_j \tag{14}$$

Avec les relations (4) et (6) on déduit

$$M(P_i) = \sum_{j \in M_i} M(P_j); \quad M(Q_i) = \sum_{j \in M_i} M(Q_j) \tag{15}$$

$$D^2(P_i) = \sum_{j \in M_i} D^2(P_j); \quad D^2(Q_i) = \sum_{j \in M_i} D^2(Q_j) \tag{16}$$

Finalement, les pertes d'énergie ont pour expression

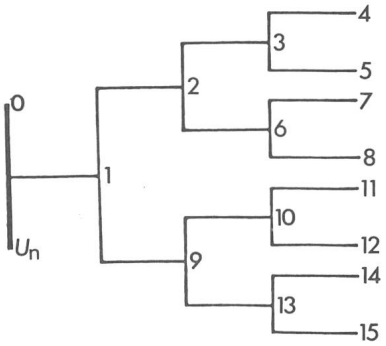

Fig. 1 Schéma du réseau radial

$M(P_j)$, $M(Q_j)$ peuvent être déterminées à partir des énergies correspondantes, compteurisées dans la période respective. Pour les valeurs $D^2(P_j)$, $D^2(Q_j)$, soit qu'on fait des calculs à partir des enregistrements des P_j, Q_j pendant une journée caractéristique, soit qu'on prend des valeurs connues pour des cas similaires, calculées auparavant ou données dans la littérature. Par la suite, la détermination des autres termes des matrices (17) revient à une simple addition.

2.2 Pertes d'énergie dans les réseaux alimentés par plusieurs sources

Le problème du calcul des pertes d'énergie active dans les réseaux alimentés par plusieurs sources en parallèle est un peu plus compliqué en raison du changement du sens des circulations des puissances actives et réactives dans le temps, parce que, dans le cas le plus général, les coefficients de simultanéité des consommateurs sont assez faibles.

En considérant les distributeurs ayant la même section, avec les notations de la fig. 2, par le tronçon i, il résulte les circulations des puissances

$$P_i = \sum_{j=1}^{i-1} (K_j - 1)\, p_j - \sum_{j=i}^{n} K_j p_j; \quad K_j = l_{iB}/l_{AB} \tag{18}$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^{i-1} (K_j - 1)\, q_j - \sum_{j=i}^{n} K_j q_j; \quad K_j = l_{iB}/l_{AB} \tag{19}$$

$$\Delta W = T \cdot \Delta P = \frac{mT}{U_n{}^2} \left[R_1 \ldots R_n\right] \left[\begin{bmatrix} \left[\sum_{j \in M_1} M(P_j)\right]^2 \\ \left[\sum_{j \in M_2} M(P_j)\right]^2 \\ \ldots \\ \left[\sum_{j \in M_{n-1}} M(P_j)\right]^2 \\ \left[\sum_{j \in M_n} M(P_j)\right]^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \left[\sum_{j \in M_1} M(Q_j)\right]^2 \\ \left[\sum_{j \in M_2} M(Q_j)\right]^2 \\ \ldots \\ \left[\sum_{j \in M_{n-1}} M(Q_j)\right]^2 \\ \left[\sum_{j \in M_n} M(Q_j)\right]^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_{j \in M_1} D^2(P_j) \\ \sum_{j \in M_2} D^2(P_j) \\ \ldots \\ \sum_{j \in M_{n-1}} D^2(P_j) \\ \sum_{j \in M_n} D^2(P_j) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_{j \in M_1} D^2(Q_j) \\ \sum_{j \in M_2} D^2(Q_j) \\ \ldots \\ \sum_{j \in M_{n-1}} D^2(Q_j) \\ \sum_{j \in M_n} D^2(Q_j) \end{bmatrix} \right] \tag{17}$$

Dans la relation (17), M_1, M_2, ..., M_n représentent les ensembles des nœuds qui sont alimentés directement à partir des nœuds 1...n. Quant au calcul des $M(P_j)$, $M(Q_j)$, $D^2(P_j)$, $D^2(Q_j)$ de l'élément de ligne j ($j = 1 \ldots n$), il faut le commencer aux extrémités (termes 4, 5, 7, 8, 11, 12, 14, 15, pour le réseau considéré). Il est nécessaire de souligner que les valeurs des

La relation générale (13) reste valable dans ce cas, avec la modification de l'indice n qui devient $(n + 1)$, et les expressions pour $M(P_i)$, $M(Q_i)$, $D^2(P_i)$, $D^2(Q_i)$, qui, déduites à partir des relations (4), (6), (18), (19), deviennent

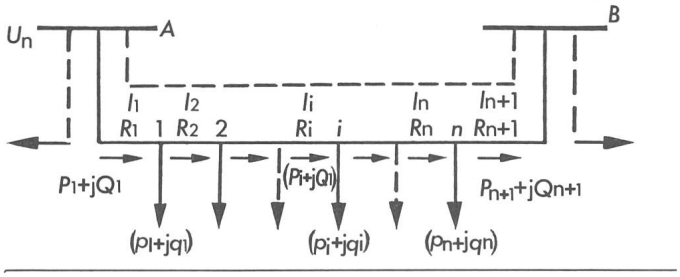

Fig. 2 Schéma du réseau alimenté de deux côtés

$$M(P_i) = \sum_{j=1}^{i-1} (K_j - 1)\, M(p_j) + \sum_{j=i}^{n} K_j M(p_j) \tag{20}$$

$$M(Q_i) = \sum_{j=1}^{i-1} (K_j - 1)\, M(q_j) + \sum_{j=i}^{n} K_j M(q_j) \tag{21}$$

$$D^2(P_i) = \sum_{j=1}^{i-1} (K_j - 1)^2\, D^2(p_j) + \sum_{j=i}^{n} K_j^2 D^2(p_j) \tag{22}$$

$$D^2(Q_i) = \sum_{j=1}^{i-1} (K_j - 1)^2\, D^2(q_j) + \sum_{j=i}^{n} K_j^2 D^2(q_j) \tag{23}$$

3. La compensation de l'énergie réactive

Le transit réactif a une contribution importante aux pertes totales d'énergie d'un réseau (fig. 3, dans laquelle la structure des pertes donnée en [3] est gardée constante). La situation actuelle de l'énergie dans le monde, caractérisée par des prix de pétrole augmentant sans cesse, impose la réexamination sévère de la compensation de l'énergie réactive du point de vue des pertes actives provoquées dans les réseaux électriques. Certainement, la conclusion sera de réduire au minimum les circulations des puissances réactives, par la compensation. La réalisation de cet objectif est possible, parce que les condensateurs représentent des sources réactives économiques dans les réseaux à moyenne et même à basse tension.

On va donc compenser dans le réseau radial (fig. 1) chaque usager jusqu'au niveau de la charge réactive minimale Q_j^{min}. Dans la plupart des cas, on peut considérer dans les calculs avec une précision suffisante:

$$Q_j^c = Q_j^{min} = M(Q_j) - 2\sqrt{D^2(Q_j)} \tag{24}$$

En conséquence, l'expression des pertes d'énergie active après la compensation devient

$$\Delta W' = T \cdot \Delta P' = \frac{mT}{U_n^2} \sum_{i=1}^{n} R_i \left[M^2(P_i) + D^2(P_i) + 5\, D^2(Q_i)\right] \tag{25}$$

et l'économie d'énergie sera

$$d(\Delta W) = T \cdot (\Delta P - \Delta P') = \frac{mT}{U_n^2} \sum_{i=1}^{n} R_i \left[M^2(Q_i) - 4\, D^2(Q_i)\right] \tag{26}$$

Dans le cas des réseaux alimentés de deux côtés, l'indice n devra être remplacé par (n + 1) dans les relations (25) et (26).

4. Le schéma d'exploitation optimal d'un réseau de distribution

Assez souvent les points de débouclage du réseau à moyenne tension sont déterminés par l'intuition de l'ingénieur [4]. Cette méthode ne permet pas de résoudre le problème d'une façon satisfaisante dans les réseaux complexes à 6, 10 et 20 kV. Par l'introduction des points de débouclage optimaux, le réseau à moyenne tension est transformé en schéma arborescent à pertes minimales:

$$\min_{\{i\}} \frac{mT}{U_n^2} \left\{ \sum_{j=1}^{i-1} R_j \left[M^2(P_j) + M^2(Q_j) + D^2(P_j) + D^2(Q_j)\right] + \sum_{j=i+2}^{n+1} R_j \left[M^2(P_j) + M^2(Q_j) + D^2(P_j) + D^2(Q_j)\right] \right\} \tag{27}$$

en cas du débouclage du tronçon i, fig. 2; dans le cas de la compensation réactive (relation 24):

$$\min_{\{i\}} \frac{mT}{U_n^2} \left\{ \sum_{j=1}^{i-1} R_j \left[M^2(P_j) + D^2(P_j) + 5\, D^2(Q_j)\right] + \sum_{j=i+1}^{n+1} R_j \left[M^2(P_j) + D^2(P_j) + 5\, D^2(Q_j)\right] \right\} \tag{28}$$

Généralement, les mesures de surcharge sont effectuées deux fois par année et de nouveaux points de débouclage sont introduits pendant la pointe de charge d'automne et pendant les faibles surcharges d'été [4].

5. Réglage optimal de la tension dans les réseaux de distribution

A côté d'autres problèmes importants rencontrés dans la mise en projet, dans l'exploitation des réseaux électriques, le réglage optimal de la tension est d'un intérêt économique considérable. La réduction des variations de tension constitue le problème du réglage de la tension. Pour le résoudre on utilise les grandeurs statistiques $M(P)$, $M(Q)$, $M(u)$, $M(PQ)$, $M(Pu)$, $M(Qu)$, $D(P)$, $D(Q)$, $D(u)$, où u représente l'écart relatif de tension [5]. L'optimum est acquis lorsque simultanément la valeur moyenne des écarts relatifs de tension $M(u)$, et l'écart type $\sqrt{D^2(u)}$, sont aussi réduits que possible.

$$u_t = (U_t - U_n)/U_n \cdot 100\,\% \tag{29}$$

$$M(u) = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{m=24} u_t\,(\%) = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{m=24} \frac{U_t - U_n}{U_n}\, 100\,(\%) \tag{30}$$

$$\sqrt{D^2(u)} = \sqrt{\frac{1}{24} \sum_{t=1}^{m=24} \left[u_t - M(u)\right]^2} = \left[M(u^2) - M^2(u)\right] \quad (\%) \tag{31}$$

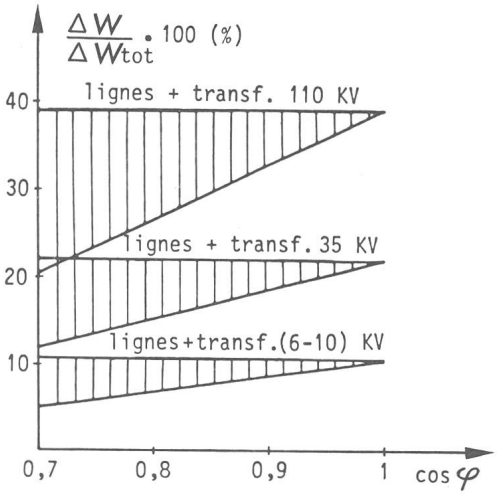

Fig. 3 Contribution du transport de l'énergie réactive aux pertes d'énergie totales

Tableau II

	σ_P (%)	σ_Q (%)	$E(\mu, \sigma_P)$	$E(\mu, \sigma_Q)$	Cor $(\mu, \sigma_P, \sigma_Q)$
1 jeu de barres 6 kV du poste 110/6	17	10	0,0164	0,0280	0,93
2 distributeurs 6 kV – l'été	15,7	10,2	0,0178	0,0274	0,96
3 distributeurs 6 kV – l'hiver	25	13	0,0112	0,0215	0,90
4 départ à 0,4 kV du poste 6/0,4	27	7	0,0103	0,0400	0,70
5 four à arc électrique	28,6	24	0,0099	0,0118	0,99

Afin de déterminer le point fictif dont la tension représente la tension de l'ensemble du réseau, il suffit de connaître la répartition statistique de la tension en ce point, appelée tension fictive, U_{ft},

$$U_{ft} = \sum_{i=1}^{n} W_i U_{it} \Big/ \sum_{i=1}^{n} W_i \tag{32}$$

où W_i est l'énergie annuelle absorbée par les usagers regroupés au point i.

Pour rendre minimales les variations de tension à l'extrémité de la ligne fictive, on utilise un dispositif approprié, capable de créer à tout moment une image de la chute de tension fictive, qui agit sur une balance voltmétrique, chargée de commander les corrections de la tension.

A l'aide des grandeurs statistiques il est possible de déterminer la valeur moyenne de la tension fictive, après la compensation de l'énergie réactive, par exemple, $M(U_f)$, au niveau $Q_i^c = M(Q_i) - 2\sqrt{D^2(Q_i)}$:

$$M(U_f) = M(U) - \frac{1}{U_n} \sum_{i=1}^{n} \left[\alpha_i r_i M(P_i) + 2\,\alpha_i x_i \sqrt{D^2(Q_i)}\right] \tag{33}$$

La tension du point fictif s'améliorera donc par la compensation avec la moyenne

$$M(U_f) = 200 \sum_{i=1}^{n} \frac{\alpha_i x_i}{U_n^2} \sqrt{D^2(Q_i)} \quad (\%) \tag{34}$$

où: $\alpha_i = W_i \Big/ \sum_{i=1}^{n} W_i$

$(P_i + jQ_i)$ charge de départ i
$(r_i + jx_i)$ impédance de départ i
U tension du jeu de barres alimentant le réseau.

L'estimation économique de la compensation du point de vue réglage de la tension est beaucoup plus facile en utilisant les grandeurs statistiques.

6. Energie informationnelle des distributions

A titre d'exemple, les courbes de charge des figures 4 à 7 [6] ont été analysées. Dans le tableau II sont présentées les valeurs des écarts type, les énergies informationnelles pour les puissances actives et réactives (comme variables aléatoires) et les coefficients de corrélation de celles-ci, calculées avec les relations (11) et 12). On constate que les énergies informationnelles des répartitions normales des puissances réactives sont toujours plus grandes que celles des puissances actives. Dans le réseau à 0,4 kV, la différence est encore plus importante et le coefficient de corrélation informationnelle plus faible.

Il faut souligner que les valeurs des énergies informationnelles donnent une information supplémentaire sur la répartition statistique des puissances actives, réactives, etc.

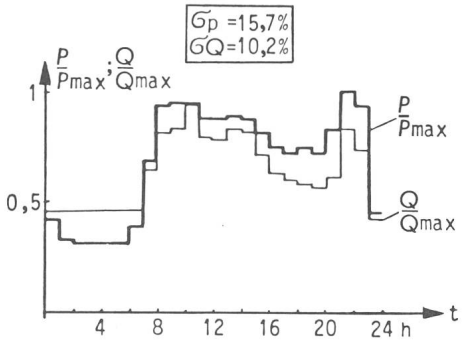

Fig. 4 Courbes de charge d'un distributeur 6 kV, en été

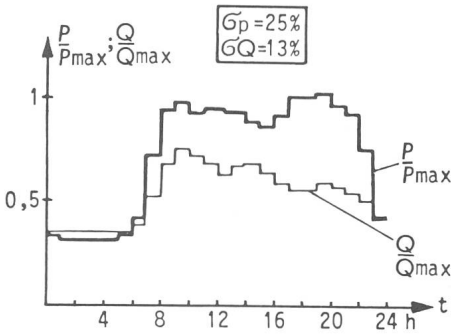

Fig. 5 Courbes de charge d'un distributeur 6 kV, en hiver

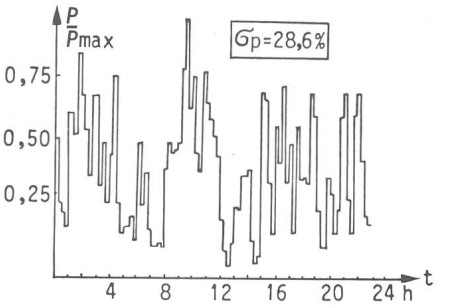

Fig. 6 Courbe de charge active d'un four à arc électrique

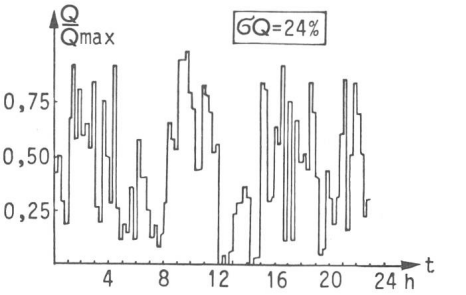

Fig. 7 Courbe de charge réactive d'un four à arc électrique

7. Conclusions

L'utilisation des grandeurs statistiques pour les variables qui sont fonction du temps (puissances actives, réactives, tensions, etc.) présente un grand avantage pour le système informatique pour l'exploitation optimale des réseaux de distribution. Elles permettent la réalisation d'un calcul beaucoup plus simple et plus exact des pertes d'énergie, de l'optimisation de la circulation des puissances réactives, de l'optimisation du réglage de la tension et du schéma d'exploitation. Sur la base des formules utilisant les grandeurs statistiques, les programmes de calcul deviennent, en effet, plus simples et l'organisation du système informatique plus facile. Les grandeurs statistiques donnent, de plus, une bonne image sur les variations des variables correspondantes.

Bibliographie

[1] *G. Ciuci, V. Craiu* si *A. Stefanescu:* Statistica matematica si cercetari operationale. Bucuresti, Editura Didactica si Pedagogica, 1974.

[2] *O. Onicescu* si *V. Stefanescu:* Elemente di statistica matematica informationala cu aplicatii. Bucuresti, Editura Tehnica, 1979.

[3] *A. Iurina:* Metoda de determinare a structurii pierderilor de energie electrica în retele. Energetica INID –(1980)1, p. 31...36.

[4] *S. Kujszczyk:* Système informatique pour la recherche du schéma d'exploitation optimal d'un réseau de distribution. Rev. Gén. Electr. 89(1980)2, p. 149...152.

[5] *R. Pelissier:* Les réseaux d'énergie électrique. 4 volumes. Paris, Dunod, 1971/1976.

[6] *G. Cartina:* Asupra variatiei conforme a puterilor active si reactive in retelele electrice. Energetica 28(1980)3, p. 135...138.

Adresse de l'auteur

Dr.-Ing. *G. Cârtina,* Faculté d'électrotechnique, Institut polytechnique de Jassy, Jassy, Roumanie.