

Zeitschrift:	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber:	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band:	50 (1959)
Heft:	26
Artikel:	Réglage des fluctuations aléatoires de tension dans les réseaux électriques
Autor:	Gaussens, P.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-1059496

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: 14.01.2026

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

nen Spannungen stets die kleinere herausgibt. Nehme man an, der Tisch komme mit der Geschwindigkeit v_T gefahren (Fig. 10). Beim Punkt P wird das Wendekommando erteilt. Gleichzeitig beginnt der Zähler zu laufen und die parabolische Spannung kommt auf den Diskriminator. Trotzdem läuft der Tisch ruhig mit der Geschwindigkeit v_T weiter, bis die parabolische Spannung $v < v_T$ geworden ist. Von dem Moment an gehorcht der Antrieb dem Verlauf von v . Auf diese Art erreicht man, dass der Tisch unabhängig von der gefahrenen Geschwindigkeit stets eine ganz bestimmte Strecke nach dem Wendekommando zurücklegt und dann zum Stillstand kommt. Im beschriebenen Fall beträgt diese Strecke 512 mm entsprechend dem 9stufigen Zähler. Das Wiederhochlaufen des Tisches in entgegengesetzter Richtung erfolgt durch Anlegen der entsprechenden Referenzspannung mittels eines Umschaltrelais. Würde dieses Relais erst betätigt, wenn der Zähler 512 Impulse gezählt hat und somit wieder auf Null steht, so würde der Wendevorgang unbrauchbar sein. Dies deshalb, weil die Nullstellung des Zählers der maximalen Führungsspannung zu Beginn des Wendevorganges entspricht. Die Spannung würde also im ersten Moment wieder hochschnellen und einen Stoss auf die Maschine geben; dabei würde der Wendepunkt selbstverständlich überfahren. Um dies zu verhindern, muss das Umschaltrelais schon vor dem Nullstand des Zählers anziehen. Dies wird erreicht durch eine spezielle Koinzidenzschaltung, welche den Zähler abtastet und bei einer Zählerstellung anspricht, die einige Impulse vor der Nullstellung liegt. Im Moment des Spannungssprungs ist dann das Relais schon umgelegt und die Referenzspannung für die umgekehrte Richtung liegt am Antrieb. Der Beschleunigungsvorgang des Tisches wird im Gegensatz zur Abbremsung nicht genau überwacht. Es sind die Strombegrenzung und die Filterzeitkonstanten, welche diesen Vorgang bestimmen.

Die Steuerung enthält noch eine Reihe von weiteren Einrichtungen, die der Vollständigkeit halber erwähnt seien, ohne aber näher darauf einzugehen.

So besteht neben der Koinzidenzschaltung für die Einleitung des Wendevorganges, welche bei gleichzeitigem Auftreten des Meter-, Dezimeter- und Zentimeterimpulses anspricht, noch eine Zusatz-Koinzidenzeinrichtung, die schon bei Gleichzeitigkeit von Meter- und Dezimeterimpuls reagiert und sämtliche für den Wendevorgang notwendigen vorbereitenden Operationen auslöst.

Eine Verriegelung ermöglicht das Verstellen der Wendepunkte im Lauf, ohne dass der Wendevorgang gestört wird. Dabei können die Motörchen für den Wendepunkt Schnitt-Rücklauf erst dann zu laufen anfangen, wenn der Tisch im Rücklauf ist. Konnte der Verstellvorgang während des Rücklaufes nicht beendet werden, so wartet der Tisch am Ende des Rücklaufes so lange, bis die Schlitzscheiben in der gewählten Lage angelangt sind. Für die andere Tischrichtung gilt das entsprechende.

Die Steuerung erzeugt auch die Impulse zur Be-tätigung der Meissel-Lüftung und -Senkung. Diese Impulse erscheinen in einem ganz bestimmten Zeit-intervall, bevor der Tisch am Wendepunkt angelangt ist. Eingeleitet wird dieser Vorgang ebenfalls durch den Wendebefehl, der hiefür eine geschwindigkeits-abhängige Zeitschaltung in Betrieb setzt.

Eine weitere Eigenart der Steuerung ist der sog. Stopp-Betrieb. Darunter versteht man einen Bewe-gungsablauf, wie er zum Hobeln von Nuten erforderlich ist. Der Meissel wird erst dann abgehoben, wenn der Tisch beim Wendepunkt zum Stillstand gekommen ist. Dort wartet der Tisch, bis die Meisselbewe-gung vollzogen ist. Die gegenseitige Verriegelung dieser Bewegungen erfolgt durch Thyratronkreise.

Adresse des Autors:

F. Bolliger, dipl. Ingenieur ETH, Aufzüge- und Elektromotoren-fabrik Schindler & Cie, Ebikon (LU).

Réglage des fluctuations aléatoires de tension dans les réseaux électriques¹⁾

Oar P. Gaussens, Paris

621.316.7 : 621.3.015.2

Le contrôle des fluctuations de tension sur les réseaux de distribution d'énergie électrique peut être étudié par des méthodes statistiques. La mise en œuvre de ces méthodes a nécessité une définition quantitative de la tenue de la tension et la mise au point d'appareils de mesure. L'article ci-dessous passe en revue les différents aspects de ce problème. L'expérience de l'Electricité de France montre que les réglages en charge permettent d'obtenir en matière de régulation de la tension des résultats intéressants. Il est apparu que les valeurs optimales des gradins étaient de 1,5 % et que dans l'état actuel des réseaux 17 prises, soit une amplitude de réglage de $\pm 12 \%$, convenaient.

1. Introduction

Les réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique sont le siège de fluctuations de tension dues aux variations des puissances actives et réactives qui y circulent. Ces fluctuations présentent pour les appareils d'utilisation raccordés aux ré-

¹⁾ Conférence présentée aux 4^{es} journées d'information de l'Association Suisse pour l'Automatique, du 2 au 5 décembre 1958 à Zurich.

Die Regelung von Spannungsschwankungen in elektrischen Verteilnetzen kann mittels statistischen Methoden untersucht werden. Die Anwendung dieser Methoden bedingt eine quantitative Definition der Spannungskonstanthaltung und den Einsatz von Messgeräten. Der Artikel behandelt die verschiedenen Aspekte dieses Problems. Die Erfahrung der Electricité de France mit Spannungsregelung zeigt interessante Ergebnisse. Es hat sich gezeigt, dass der Optimalwert Spannungsstufen 1,5 % beträgt und dass beim heutigen Zustand der Netze 17 Stufen, entsprechend einem Regelbereich von $\pm 12 \%$, zweckmäßig sind.

seaux des inconvénients d'autant plus sensibles qu'elles sont plus importantes et l'on doit donc s'attacher à les réduire dans toute la mesure du possible ou tout au moins dans toute la mesure où cela est économiquement justifié.

Ce n'est pas l'objet de cet exposé de traiter l'aspect économique du réglage de tension, mais il faut néanmoins y faire une rapide allusion, d'autant

plus que comme cela sera signalé plus loin le critère suivant lequel sera jugée la tenue de la tension ou plus précisément la «mesure» de l'irrégularité de tension a une signification économique précise. Cette incursion dans le domaine économique se bornera d'ailleurs à faire remarquer qu'il est pratiquement toujours possible de donner au problème de réglage de la tension une solution techniquement presque parfaite en multipliant dans les réseaux les moyens de régulation, mais qu'il est vraisemblable que les investissements ainsi effectués ne seront pas rentés par les avantages qu'en tireront les usagers.

Une solution optimale existe donc qui n'est certainement ni celle qui consiste à ne rien faire du tout ni celle qui consiste à rechercher la perfection. Les études économiques ont pour but de la définir.

Ceci étant dit nous ne nous occuperons plus maintenant que de l'aspect technique du réglage de la tension et nous commencerons par définir la mesure de l'irrégularité de tension.

2. La mesure de l'irrégularité de tension

L'inconvénient économique qui résulte de ce que la tension V appliquée à un appareil n'est pas égale à celle pour laquelle son constructeur l'a conçu, c'est-à-dire sa tension nominale, est une fonction de l'écart relatif v entre la tension V et la tension nominale V_n :

$$v = \frac{V - V_n}{V_n} \quad (1)$$

P. Ailleret a montré que pourvu que l'écart relatif Δv ne soit pas trop grand, la valeur de cet inconvénient était proportionnel à $Av + Bv^2$; A et B dépendant de l'appareil considéré et A étant nul si l'appareil a été conçu par son constructeur de façon optimale.

Si l'on considère maintenant différents appareils de même type mais de puissances différentes, on peut admettre en désignant par p la puissance d'un quelconque d'entre eux, que l'inconvénient économique est proportionnel à p , donc de la forme: $Apv + Bpv^2$.

Imaginons maintenant qu'un même appareil puisse être utilisé avec différentes puissances (positions de chauffage d'un radiateur par exemple). La puissance utilisée devient une fonction du temps $p(t)$. Comme l'écart relatif de tension v est lui-même une fonction $v(t)$, l'inconvénient économique pour une période T devient:

$$A \int_0^T p(t) \cdot v(t) dt + B \int_0^T p(t) \cdot v^2(t) dt$$

A et B étant exprimés en fr./kWh si $p(t)$ est compté en kW.

Considérons enfin non plus un appareil de puissance variable mais les variations $p(t)$, relatives à l'ensemble des appareils d'un usager, soumis à une même tension; nous pouvons, à la condition que les différents appareils ne soient pas de nature trop différente, admettre qu'il existe des sortes de valeurs moyennes de A et B valables pour l'ensemble des installations de catégories données d'usagers: domestiques, ruraux, artisanaux, etc.

Dans ces conditions et sans nous préoccuper désormais davantage de la destination de l'énergie consommée, nous dirons que l'inconvénient économique de l'irrégularité de tension est pour un usager d'une catégorie « i » donnée ayant une courbe de consommation $p(t)$:

$$J = A_i \int_0^T p(t) \cdot v(t) dt + B_i \int_0^T p(t) \cdot v^2(t) dt \quad (1)$$

A_i et B_i dépendant de la catégorie dans laquelle l'abonné peut être classé et A_i étant vraisemblablement peu différent de zéro. A_i et B_i s'expriment en fr./(% $)$ kWh et fr./(% $)^2$ kWh respectivement

$$\int_0^T p(t) \cdot v(t) dt \text{ en } (%\text{)} \text{ kWh, et } \int_0^T p(t) \cdot v^2(t) dt \text{ en } (%\text{)}^2 \text{ kWh, } J \text{ étant compté en francs.}$$

On peut remarquer que $p(t)dt$ étant la différentielle d'une énergie l'expression s'écrit encore:

$$J = A_i \int_0^W v(w) dw + B_i \int_0^W v^2(w) dw \quad (2)$$

W étant l'énergie consommée par l'usager pendant la période T à laquelle on s'intéresse et $v(w)$, la valeur de l'écart relatif de tension au moment où l'énergie qui a été déjà consommée depuis l'instant initial est w ($0 \leq w \leq W$).

Si l'on note encore que $W^{-1} \int_0^W v(w) dw$ et

$W^{-1} \int_0^W v^2(w) dw$ sont les valeurs moyennes linéaires et quadratiques de $v(w)$ lorsque w varie de 0 à W , on peut en posant:

$$\bar{v}_w = \frac{1}{W} \int_0^W v(w) dw \text{ et } \bar{v}^2_w = \frac{1}{W} \int_0^W v^2(w) dw \quad (3)$$

transformer la formule qui devient alors:

$$J = (A_i \bar{v}_w + B_i \bar{v}^2_w) W \quad (4)$$

\bar{v}_w étant exprimé en (%), \bar{v}^2_w en (% $)^2$ et W en kWh.

Cette analyse nous a permis de mettre en évidence l'importance des moyennes linéaires et quadratiques des écarts relatifs d'une tension par rapport à sa valeur nominale; en notant compte tenu de ce que les coefficients A étaient le plus souvent nuls, que l'évaluation économique de l'irrégularité de tension était proportionnelle au moment du second ordre de cet écart dans l'espace de l'énergie distribuée sous la tension étudiée.

Mais d'autres raisons font encore que ces moyennes revêtent un grand intérêt.

La tension en un point d'un réseau est en effet une grandeur physique dont les variations présentent sans doute certains caractères périodiques prévisibles liés aux fluctuations des charges (nuit et jour, semaine et dimanche, été et hiver, etc.) mais qui sont également pour une part non négligeable dues au hasard, c'est-à-dire à des circonstances inconnues du distributeur.

La tension nous apparaît donc dans une certaine mesure comme une grandeur «aléatoire» et il

paraît alors naturel de lui appliquer les procédés classiques d'étude de telles grandeurs. On cherchera, dans ces conditions, à en déterminer, pour des périodes de temps données, les valeurs moyennes linéaires et quadratiques. Eventuellement on en construira la courbe classée, c'est-à-dire la probabilité qu'il y a de voir la tension prendre telle ou telle valeur.

Pour rendre les mesures plus précises on pourra d'ailleurs, s'intéresser non pas aux valeurs mêmes de la tension mais à l'écart relatif de ces valeurs par une tension de référence qui sera par exemple la tension nominale. On étudiera ainsi le comportement de la grandeur aléatoire $v = (V - V_n) / V_n$ dont on a vu qu'elle intervenait de façon fondamentale dans l'évaluation économique de l'irrégularité de tension.

Les moyennes temporelles que l'on pourra calculer seront donc:

$$\bar{v}_\tau = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad \text{et} \quad v_\tau^2 = \frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt \quad (5)$$

Enfin si l'on a affaire non plus à une seule tension V mais à trois tensions triphasées V_1, V_2, V_3 , il est évident que l'on devra considérer les écarts relatifs v_1, v_2, v_3 définis à partir de V_1, V_2, V_3 comme v à partir de V . Comme d'autre part, du point de vue de l'usager il n'y a aucune raison de donner un rôle privilégié à l'une des trois tensions dont il dispose on devra admettre que les éléments statistiques définissant le comportement global des trois tensions seront:

$$\bar{v}_\tau = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{v_1(t) + v_2(t) + v_3(t)}{3} dt \quad (6)$$

et

$$\bar{v}_\tau^2 = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{v_1^2(t) + v_2^2(t) + v_3^2(t)}{3} dt$$

On vient de montrer qu'une tension, considérée comme une grandeur aléatoire était suffisamment définie par les moyennes linéaire et quadratique de ces écarts relatifs par rapport à sa valeur nominale et qu'en conséquence il était très souvent inutile de chercher à connaître le détail de ses variations. On peut cependant remarquer que ces moyennes, par l'intégration même qu'elles impliquent, nous laissent dans l'ignorance des époques auxquelles la tension a pris telle ou telle valeur et qu'il nous importe davantage que les écarts de tension soient faibles lorsque la puissance consommée est forte que lorsque cette puissance est peu importante. L'idée vient alors de pondérer les écarts de la tension par la puissance soumise à ces écarts. On obtient ainsi les moyennes pondérées:

$$\frac{\int_0^T p(t) \cdot v(t) dt}{\int_0^T p(t) dt} \quad \text{et} \quad \frac{\int_0^T p(t) \cdot v^2(t) dt}{\int_0^T p(t) dt} \quad (7)$$

et en remarquant que $\int_0^T p(t) dt = W$, énergie dis-

tribuée pendant le temps T , on retrouve précisément les moyennes \bar{v}_w et \bar{v}_w^2 intervenant comme on l'a vu plus haut dans la détermination de l'inconvénient économique de l'irrégularité de tension.

La démarche logique qui vient de nous conduire à mettre à nouveau en évidence l'intérêt de ces moyennes pondérées est certainement moins rigoureuse que celle qui nous a guidés dans l'étude de l'aspect économique de l'irrégularité de tension. Elle a cependant le mérite non seulement de confirmer les résultats déjà obtenus mais en les présentant d'un point de vue différent, de nous permettre encore de résoudre les quelques difficultés pratiques.

Ce que l'on cherche, en effet, en pondérant les écarts de tension par des puissances — quand bien entendu ce n'est pas l'évaluation exacte d'un certain inconvénient économique relatif à une charge déterminée soumise à la tension étudiée — c'est à donner plus de poids aux écarts de tension survenant pendant les périodes où l'on présume que la charge générale du réseau est importante et moins de poids aux mesures faites en période de faible charge.

La fonction $p(t)$ dans les intégrales $\int_0^T p(t) \cdot v(t) dt$ et $\int_0^T p(t) \cdot v^2(t) dt$ perd alors sa signification précise de charge soumise à l'écart de tension $v(t)$ pour acquérir celle d'un coefficient pondérateur variant dans le «bon sens»¹⁾.

Dans ces conditions lorsqu'on étudie les variations de trois tensions triphasées il n'est pas — sauf pour une étude économique précise — indispensable de pondérer les écarts de tension $v_1(t), v_2(t)$ et $v_3(t)$ de chaque phase respectivement par les puissances $p_1(t), p_2(t)$ et $p_3(t)$; on peut sans inconvénient, se contenter d'une pondération par la puissance triphasée totale:

$$p(t) = p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) \quad (8)$$

A la place des moyennes non pondérées de la formule on peut alors adopter pour critères techniques de l'irrégularité des trois tensions triphasées:

$$\frac{\int_0^T p(t) \frac{v_1(t) + v_2(t) + v_3(t)}{3} dt}{\int_0^T p(t) dt}$$

et

$$\frac{\int_0^T p(t) \frac{v_1^2(t) + v_2^2(t) + v_3^2(t)}{3} dt}{\int_0^T p(t) dt}$$

ou encore W étant l'énergie triphasée $\int_0^T p(t) dt$ consommée pendant la période;

¹⁾ $p(t)$ n'est donc plus forcément la puissance soumise précisément aux écarts de tension $v(t)$; ce peut être la puissance traversant le réseau au point de mesure, la puissance d'une dérivation ou encore toute autre puissance variant dans le «bon sens», c'est-à-dire en général croissant aux heures de pointe et décroissant aux heures creuses.

T et $v_1(w)$, $v_2(w)$, $v_3(w)$ les écarts relatifs de tension au moment où l'énergie qui a déjà été consommée depuis l'intant initial est w ($0 \leq w \leq W$):

$$\bar{v}_w = \frac{1}{W} \int_0^W \frac{v_1(w) + v_2(w) + v_3(w)}{3} dw$$

et

$$\bar{v}^2_w = \frac{1}{W} \int_0^W \frac{v_1^2(w) + v_2^2(w) + v_3^2(w)}{3} dw \quad (9)$$

Nous pensons avoir tout au long de ce qui précède mis en évidence l'intérêt d'une conception statistique de l'irrégularité de tension. Elle seule en effet nous a permis de définir des critères objectifs et mesurables \bar{v}_w et \bar{v}^2_w de cette irrégularité tant au point de vue économique que du point de vue technique, le but de tout réglage étant de minimiser \bar{v}^2_w .

Un appareil de mesure, dit voltmètre statistique dont la description a été donné dans quelques revues permet d'ailleurs d'évaluer commodément ces critères.

3. L'utilisation dans les réseaux des régulateurs de tension

Tous les moyens destinés au réglage de la tension de réseaux se classent en trois catégories:

1^{re} ceux qui consistent à modifier les impédances des éléments constitutifs du réseau, p. ex. condensateurs séries;

2^{re} ceux qui consistent à modifier les puissances circulant sur les réseaux, p. ex. condensateurs shunt, compensateurs synchrones;

3^{re} ceux enfin qui modifient directement le niveau des tensions, p. ex. alternateurs, changeurs de prise en charge des transformateurs, régulateurs à armatures tournantes ou à noyaux mobiles, etc. et que l'on rassemblera sous le nom général de régulateurs de tension.

Pour rendre plus concret ce qui va être dit dans la suite nous supposerons que le régulateur utilisé est associé à un transformateur alimentant à partir d'un réseau de transport ou de répartition un réseau de distribution à moyenne tension (fig. 1). Cet appareil peut être considéré comme un transformateur (ou autotransformateur) dont le rapport de transformation peut prendre soit un nombre fini, soit un nombre infini de valeurs. Dans le premier cas l'on a affaire à des changeurs de prise en charge (régleurs discontinus), dans le second à des régulateurs à armatures tournantes ou noyaux mobiles (régleurs continus).

Quel que soit le régulateur utilisé le problème est de rendre minimale l'expression

$$\sum_{\lambda} \bar{v}^2_{\lambda w} W_{\lambda}$$

la sommation s'étendant à toutes les charges λ situées en aval du régulateur.

Nous rappelant que

$$\bar{v}^2_{\lambda w} W_{\lambda} = \int_T v_{\lambda}^2(t) \cdot p_{\lambda}(t) dt \quad (10)$$

ce résultat sera évidemment atteint si l'on rend grâce au régulateur, minimale à tout instant l'expression $\sum_{\lambda} v_{\lambda}^2 p_{\lambda}$.

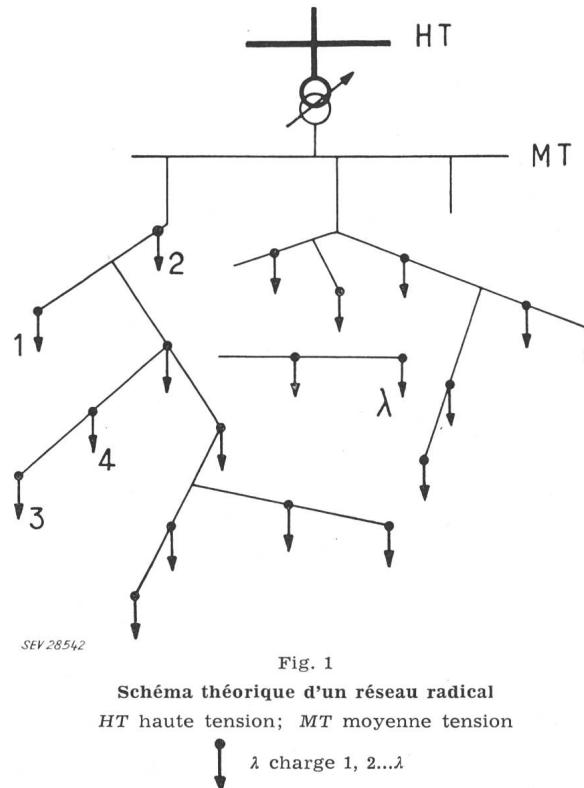


Fig. 1
Schéma théorique d'un réseau radical
HT haute tension; MT moyenne tension

Mais en remarquant qu'un régulateur ne peut modifier les différences entre les v_{λ} , lesquelles traduisent des chutes de tension, mais seulement modifier tous les v_{λ} simultanément d'une même quantité, l'on en déduit immédiatement que $\sum_{\lambda} v_{\lambda}^2 p_{\lambda}$ sera minimale si $\sum_{\lambda} v_{\lambda} p_{\lambda}$ est nulle. Le rôle du régulateur devrait donc être d'annuler cette expression. L'idéal pour ce faire serait de mesurer en permanence aux différents points « λ » du réseau l'écart de tension v_{λ} ainsi que la puissance p_{λ} consommée sous la tension affectée de cet écart, et de transmettre, par télémesure par exemple les indications obtenues à un poste central qui effectuerait le calcul de $\sum_{\lambda} v_{\lambda} p_{\lambda}$. Le régulateur modifierait la tension à ses bornes d'une quantité qui exprimée en fraction de V_n serait

$$v_r = - \sum_{\lambda} \frac{v_{\lambda} p_{\lambda}}{\sum_{\lambda} p_{\lambda}}$$

Les écarts relatifs v_{λ} deviendraient $v'_{\lambda} = v_{\lambda} + v_r$ et l'on voit bien que $\sum_{\lambda} v'_{\lambda} p_{\lambda} = 0$. La consigne du régulateur, agissant alors comme un servomécanisme très simple serait de maintenir égale à zéro l'expression ainsi calculée.

En fait, et fort heureusement pour le coût des dispositifs de réglage de la tension, une telle opération est pratiquement irréalisable.

L'idée qui vient alors est de constituer à l'aide des seuls éléments d'information dont on dispose à l'emplacement du régulateur c'est-à-dire les puissances actives et réactives qui le traversent P et Q (P égale

d'ailleurs aux pertes près à Σp_λ) et l'écart relatif de la tension à ses barres aval $v'_0 = v_0 + v_r$ un écart relatif de tension «image» v'_i ($v'_i = v_i + v_r$). Il suffit alors d'annuler à tout instant v'_i tout au moins si l'on dispose d'un régulateur continu ou d'en réduire au minimum les fluctuations si le régulateur dont on dispose est discontinu.

Le premier problème qui se pose celui de la forme à donner à l'écart relatif image. Nous l'étudierons donc puis nous examinerons ensuite ce que devient avec un régulateur continu ou un régulateur discontinu l'expression $\sum_\lambda \tilde{v}^2 \lambda W_\lambda$ lorsque ces régulateurs reçoivent respectivement comme consigne de rendre nulles ou minimales les fluctuations de l'écart relatif image v'_i .

3.1 Forme de l'écart relatif image

Compte tenu de ce que les chutes de tension dans les réseaux sont des fonctions linéaires de courant qui y circulent il paraît naturel de donner à v_i (ou v'_i) la forme:

$$v_i \text{ (ou } v'_i) = v_0 \text{ (ou } v'_0) - e_0 - \frac{1}{V_n} (\varrho I_W + \chi I_D) \quad (11)$$

où I_W et I_D sont les courants watté et déwatté traversant le régulateur.

Comme l'on a approximativement:

$I_W = \frac{P}{3V_n}$ et $I_D = \frac{Q}{3V_n}$, P et Q puissance active et réactive triphasée traversant le régulateur l'expression précédente peut encore s'écrire:

$$v_i = v_0 - e_0 - \frac{1}{3V_n^2} (\varrho P + \chi Q) \quad (12)$$

On admet ainsi que l'écart relatif image est égal à celui existant immédiatement à l'aval du régulateur diminué d'une chute de tension relative $e_0 - (3V_n^2)^{-1} (\varrho P + \chi Q)$, fonction linéaire la plus générale de P et Q .

Le problème est évidemment de déterminer e_0 , ϱ et χ et cela par des mesures préalables des diffé-

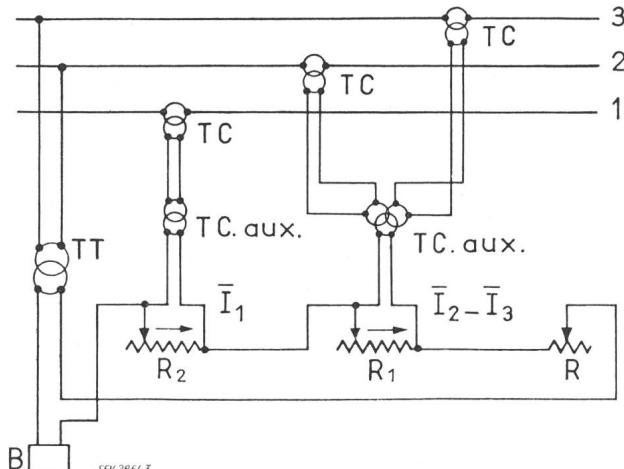


Fig. 2

Dispositif de correction de la tension en fonction de la charge
1, 2, 3 Arrivée des régulateurs; B Balance voltmétrique; TC transformateur de courant; TT transformateur de tension;
 R , R_1 , R_2 résistances

rents v_λ , de P et de Q , mesures qui n'acquièrent de signification que comme échantillonages de grandeurs aléatoires. On retrouve là un problème bien connu des statisticiens qui est celui de l'évaluation d'une grandeur aléatoire à l'aide de certains éléments connus et cela par un schéma linéaire.

Cette identification nous conduit évidemment à penser que d'autres schémas seraient possibles, en particulier des fonctions polynomiales de degré quelconque de P et Q . Mais l'expérience nous a montré que le schéma linéaire conduisait à des résultats satisfaisants et d'autre part il se trouve comme on peut le voir sur la fig. 2 que la réalisation pratique de ce schéma linéaire est particulièrement simple. C'est donc celui que nous retiendrons pour la suite de cet exposé.

3.2 Etude de l'influence d'un régulateur continu

Dans un tel régulateur l'écart relatif image corrigé $v'_i = v_i + v_r$ peut être maintenu égal à zéro; cela n'est vrai d'ailleurs qu'en théorie puisque la balance voltmétrique qui détecte l'écart v'_i et donne l'ordre au régulateur d'agir pour annuler celui-ci comporte une plage d'indifférence.

Nous supposerons en outre que l'amortissement du dispositif est convenable, ce qui vu la fréquence des fluctuations de la grandeur v'_i peut être assez facilement réalisé.

L'intervention du régulateur transforme l'écart relatif de tension v_λ en un point du réseau en $v'_\lambda = v_\lambda + v_r$ ou $v'_\lambda = v_\lambda - v_i$ puisque la condition $v'_i = 0$ donne $v_r = -v_i$.

L'expression $E \left[\sum_\lambda v_\lambda^2 p_\lambda \right]$ ou $\sum_\lambda \tilde{v}^2 w_\lambda W_\lambda$ dont la réduction est le but du réglage devient $E \left[\sum_\lambda (v_\lambda - v_i)^2 p_\lambda \right]$ fonction de e_0 , ϱ et χ .

Il suffit alors d'en annuler les dérivées partielles par rapport à e_0 , ϱ et χ pour déterminer les valeurs de ces inconnues et par là la loi de réglage. Il est facile de montrer que ces conditions correspondent, en posant $\sum_\lambda p_\lambda v_\lambda = VP$ à la minimisation de $E \left[(V - v_i)^2 P \right]$, c'est-à-dire de $E \left(V - v_i \right)^2 w$.

Or on constate que V n'est autre que la moyenne pondérée par les puissances des écarts relatifs de tension et que la condition trouvée signifie que l'écart relatif image doit «ressembler» le plus possible à cette écart relatif moyen. La conséquence étant évidemment que l'écart quadratique corrigé $V^2 w$ devient minimal (avec $V' = V + v_r$).

D'où l'idée de définir dans le réseau — par des règles empiriques — un point témoin où l'écart relatif puisse être considéré comme bien représentatif de l'écart relatif moyen et de déterminer le réglage pour rendre minimal l'écart relatif de ce point témoin.

Afin d'illustrer ceci on a montré sur la fig. 3 dans le cas d'une ligne en antenne le long de laquelle des charges statistiquement identiques sont réparties uniformément les variations de l'irrégularité de tension depuis son origine jusqu'à son extrémité, lorsque l'on s'astreint à réduire le plus possible l'irrégularité de tension de points situés à 20%, 60%, 80% ou 100% de la longueur de la ligne à partir de son origine.

Le résultat le plus favorable est obtenu lorsque le point réglé se trouve à 42% de la longueur de la ligne à partir de son origine: c'est comme on peut le vérifier le point où l'écart relatif de tension avant réglage est égal à la moyenne des écarts de tous les points de la ligne.

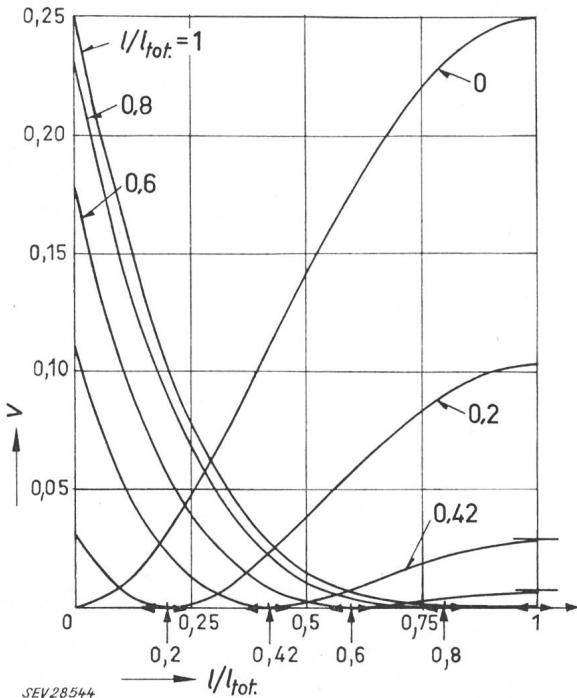


Fig. 3

Variations de l'irrégularité de tension v le long d'une ligne
On a pris pour irrégularité de tension celle que l'on obtiendrait si toute la charge distribuée par la ligne était concentrée à son extrémité
 l/l_{tot} , rapport de la distance entre l'origine de la ligne et le point de réglage et de la longueur totale de la ligne

Si l'on en revient au cas général il est facile de montrer que l'irrégularité de tension corrigée $I' = \sum_{\lambda} \bar{v}_{\lambda}^2 W_{\lambda}$ est quelque soit v_i :

$$I' = I - \left[(\bar{V}_w^2 - \bar{V}'_w^2) + (\sigma_{v_w}^2 - \sigma_{v'_w}^2) \right] W \quad (13)$$

où $W = \sum_{\lambda} W_{\lambda}$.

En choisissant convenablement e_0 , ϱ et χ , \bar{V}' peut devenir nulle; $\sigma_{v'_w}^2$ égal pour v_i quelconque à $\sigma_{v_w}^2 - 2 \Gamma_w (V, v_i) + \sigma_{v_{i_w}}^2$ devient alors

$$\sigma_{v_w}^2 (1 - r_{v_{i_w}}^2)$$

Compte tenue de la définition de v_i en fonction de P et Q on trouve alors

$$I' = I - W \left[\bar{V}_w^2 + \sigma_{v_w}^2 \parallel r_{vP_w} r_{vQ_w} \parallel \right. \\ \left. \parallel \frac{1}{R_{PQ_w}} R_{PQ_w} \parallel \parallel r_{vP_w} r_{vQ_w} \parallel_t \right] \quad (14)$$

Quant à la nouvelle valeur de l'écart type des fluctuations de tension en un point λ il est donné à partir de l'ancienne par la formule:

$$\sigma_{v'_{\lambda_w}}^2 = \sigma_{v_{\lambda_w}}^2 - 2 \Gamma_{w_{\lambda}} (v_{\lambda}, v_i) + \sigma_{v_{i_w}}^2 \quad (15)$$

3.3 Etude de l'influence d'un régleur discontinu

Un tel régleur est comme dans le cas précédent assujetti à maintenir le plus constant possible l'écart relatif image v_i .

Nous supposerons que la valeur E de gradin de ce régleur est en valeur relative égale à $e \cdot E/V_n$ et que le nombre des gradins est égal à n , c'est-à-dire que le régleur comporte $n + 1$ prises. La balance voltmetrique qui mesure v_i est supposée telle qu'elle ordonne au régleur de charger de prise dans un sens ou dans l'autre dès que v_i atteint en croissant ou décroissant la valeur $e/2$ où $-e/2$.

Dans ces conditions la valeur corrigée de V_{λ} soit $v'_{\lambda} = v_{\lambda} + v_r$ est liée à v_i de la façon suivante:

$$\left. \begin{aligned} v'_{\lambda} &= v_{\lambda} + \frac{ne}{2}; & \text{si } v_i &\leq -\frac{n-1}{2} e \\ v'_{\lambda} &= v_{\lambda} + e; & \text{si } -\frac{3e}{2} &< v_i \leq -\frac{e}{2} \\ v'_{\lambda} &= v_{\lambda}; & \text{si } -\frac{e}{2} &< v_i \leq \frac{e}{2} \\ v'_{\lambda} &= v_{\lambda} - e; & \text{si } \frac{e}{2} &< v_i \leq \frac{3e}{2} \\ v'_{\lambda} &= v_{\lambda} - \frac{ne}{2}; & \frac{n-1}{2} e &< v_i \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Nous supposerons ici n pair, les calculs pouvant être fait de façon analogue pour n impair.

D'autre part, l'on a admis que le nombre de prises «moins» était égal au nombre de prises «plus» ce qui est effectivement réalisé en pratique. En théorie il pourrait en être autrement si la loi de probabilité de v_i était dissymétrique.

Comme dans le cas des régleurs continus on pourra montrer que l'irrégularité de tension $I' = \sum_{\lambda} v'_{\lambda_w}^2 W_{\lambda}$ est réduite au minimum lorsque la moyenne de $(V + v_r)^2$ P est minimal V , étant telle que $PV = \sum_{\lambda} p_{\lambda} v_{\lambda}$.

Dans ces conditions

$$I' = I - \left[\bar{V}_w^2 - \bar{V}'_w^2 + \sigma_{v_w}^2 - \sigma_{v'_w}^2 \right] W \quad (17)$$

Le seul problème qui se pose est donc, le nombre de gradins n étant donné de déterminer l'amplitude e du gradin et les termes e_0 , ϱ et χ entrant dans la détermination de $v_i = v_0 - e_0 - (3 V^2 n)^{-1} (\varrho P + \chi Q)$ de telle sorte que \bar{V}' soit nul et que $\sigma_{v'_w}^2$ soit minimal.

Cette question présente un intérêt plus étendu que la simple résolution du problème posé. Aussi l'avons nous formulée en termes généraux. Soit trois variables aléatoires X , Y , Z liées par une loi de probabilité de Laplace-Gauss, les probabilités étant évaluées dans un espace quelconque. Dans l'exemple qui nous occupe ici, X est v_i , Y est V et Z représente un v_{λ} quelconque, l'espace de référence étant celui w de l'énergie active traversant le régleur. Y et Z sont changées en Y' et Z' en fonction des valeurs prises par X et suivant le schéma présenté précédemment et qui liait v'_{λ} à v_i .

On peut montrer que:

$$\sigma^2_{Y'w} = \sigma^2_{Yw} - 2 \Gamma_w(X, Y) \alpha A_n(\alpha) + \sigma^2_{Xw} \alpha B_n(\alpha) \quad (18)$$

et

$$\sigma^2_{Z'w} = \sigma^2_{Zw} - 2 \Gamma_w(X, Z) \alpha A_n(\alpha) + \sigma^2_{Xw} \alpha B_n(\alpha) \quad (19)$$

où $\alpha = E/\sigma_X$ (valeur du gradin rapportée à σ_X) et $A_n(\alpha)$ et $B_n(\alpha)$ des fonctions dont la forme dépend du nombre de gradins n . $\alpha A_n(\alpha)$ et $\alpha^2 B_n(\alpha)$ tendent vers 1 si $n \rightarrow \infty$ et l'on retrouve alors les formules obtenues pour un régleur continu.

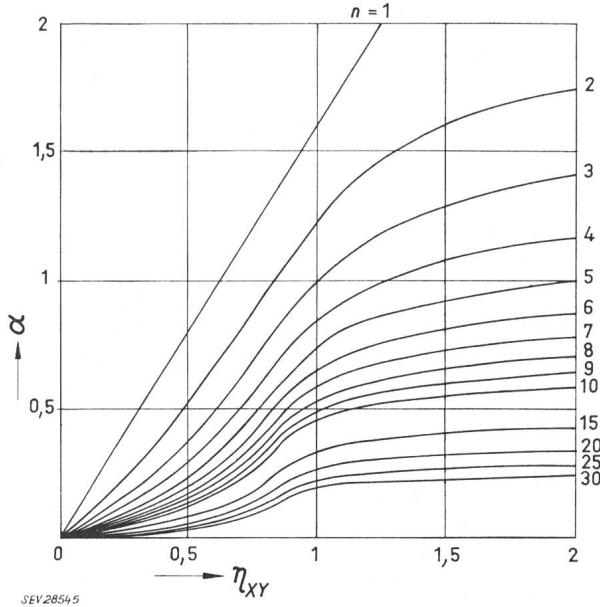


Fig. 4
Variations de α en fonction de n et η_{XY}

Si l'on désire alors déterminer α pour que $\sigma_{Y'}$ par exemple soit minimal (tension V dans le cas du réglage) il faut que α soit solution de:

$$(1 - \eta_{XY}) \alpha^2 C_n(\alpha) - \alpha B_n(\alpha) + \eta_{XY} A_n(\alpha) = 0 \quad (20)$$

$$\text{où } \eta_{XY} = r_{XY} \frac{\sigma_Y}{\sigma_X}$$

Pour n pair et en désignant par $f(x)$ la loi de probabilité de la variable réduite de X (loi de *Gauss*) et $\Pi(x)$ la loi des fréquences cumulées $A_n(\alpha)$, $B_n(\alpha)$ et $C_n(\alpha)$ ont les valeurs suivantes:

$$\begin{aligned} A_n(\alpha) &= f\left(-\frac{\alpha}{2}\right) + f\left(-\frac{3\alpha}{2}\right) + \dots + f\left(-\frac{n-1}{2}\alpha\right) \\ B_n(\alpha) &= 2 \left[\frac{1}{2} \Pi\left(-\frac{\alpha}{2}\right) + \frac{3}{2} \Pi\left(-\frac{3\alpha}{2}\right) + \dots + \frac{n-1}{2} \Pi\left(-\frac{n-1}{2}\alpha\right) \right] \\ C_n(\alpha) &= \frac{1}{4} f\left(-\frac{\alpha}{2}\right) + \frac{9}{4} f\left(-\frac{3\alpha}{2}\right) + \dots + \left(\frac{n-1}{2}\right)^2 f\left(-\frac{n-1}{2}\alpha\right) \end{aligned} \quad (21)$$

Si l'on pose $k_n(\eta) = \alpha_0 A(\alpha_0)$ où α_0 est solution de l'équation précédente

$$\text{et } \Psi_n(\eta) = \frac{1}{\eta^2} \left[\frac{2 \alpha_0 A(\alpha_0) \eta - \alpha_0^2 B(\alpha_0)}{k_n(1)} \right] \quad (22)$$

l'on trouve:

$$\sigma^2_{Y'w} = \sigma^2_{Yw} [1 - k_n(1) r^2_{XYw} \Psi_n(\eta)] \quad (23)$$

et

$$\begin{aligned} \sigma^2_{Z'w} &= \sigma^2_{Zw} - k_n(1) \cdot r^2_{XYw} \cdot \Psi_n(\eta) \cdot \sigma^2_{Yw} + \\ &+ 2 k_n(\eta) \cdot [\Gamma_w(XY) - \Gamma_w(XZ)] \end{aligned} \quad (24)$$

En revenant aux tension V , v_i et v_λ l'on a alors

$$\sigma^2_{V'w} = \sigma^2_{Vw} \left[1 - k_n(1) \cdot r^2_{Vv_{iw}} \Psi_n \left(r_{Vv_{iw}} \cdot \frac{\sigma_{Vw}}{\sigma_{v_{iw}}} \right) \right] \quad (25)$$

analogue à $\sigma^2_{V'w} = \sigma^2_{Vw} (1 - r^2_{Vv_{iw}})$ dans le cas du réglage continu.

D'ailleurs $k_\infty(1) = 1$ et $\Psi_\infty(\eta) \equiv 1$

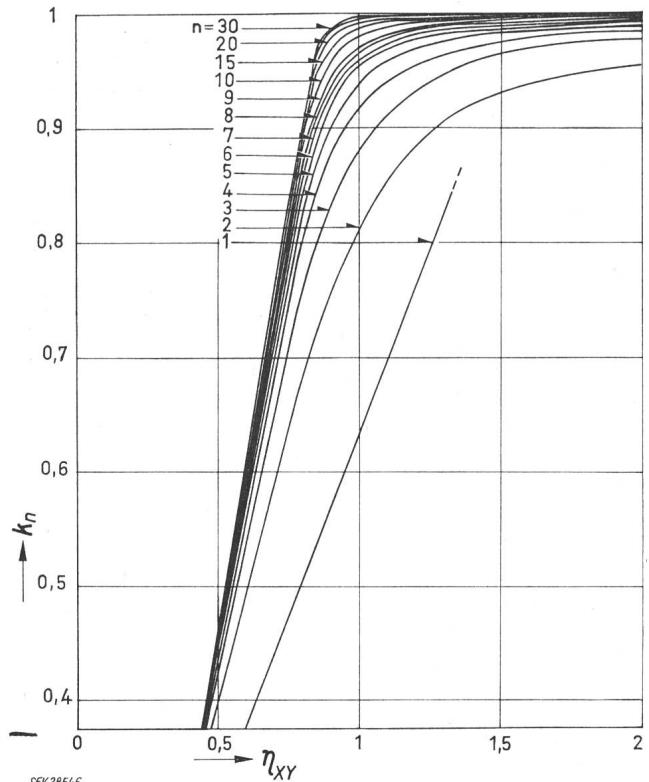


Fig. 5
Variations de $k_n(\eta_{XY})$

Sur les figures 4, 5 et 6 on voit (pour différentes valeurs de n) respectivement les valeurs optimales de α , la forme des fonctions $\Psi_n(\eta)$ et $k_n(\eta)$.

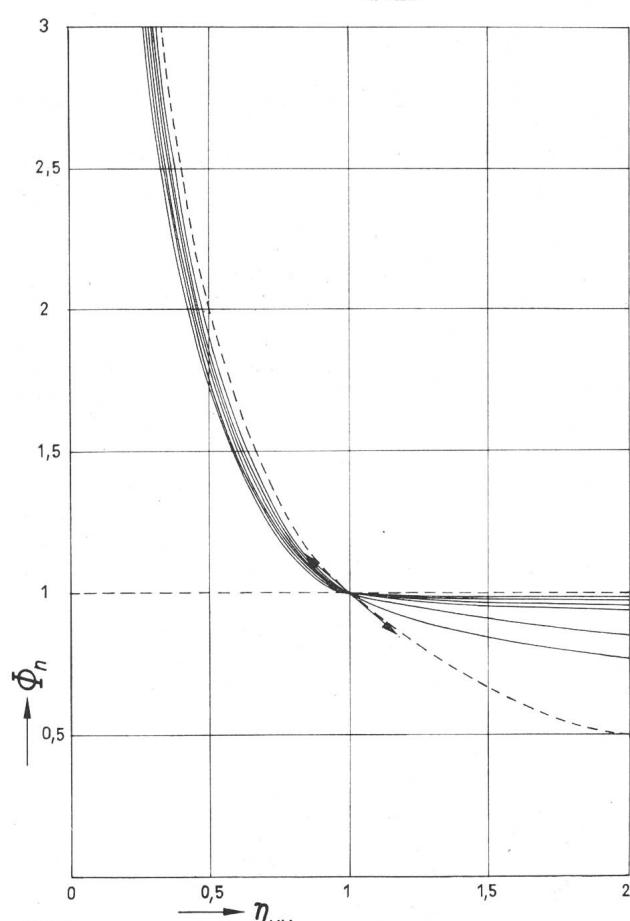
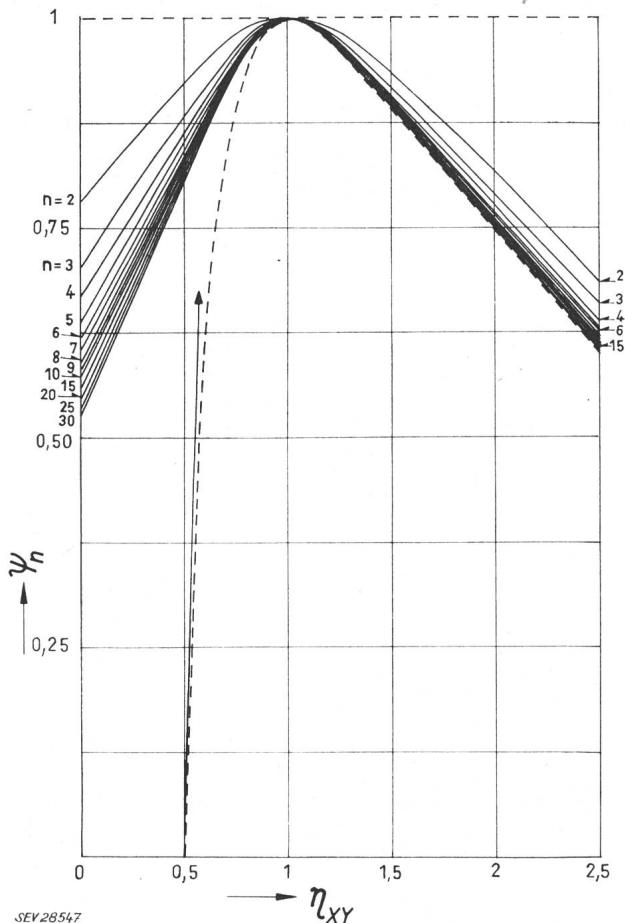
α étant fixé il reste bien entendu à déterminer ϱ et χ pour rendre $\sigma^2_{V'}$ minimale. L'on dira seulement que ϱ et χ sont solution de

$$\Gamma_{v_0P} + (3V^2n)^{-1} (\varrho \sigma^2_P + \chi \mu_{PQ}) = \Gamma_{VP} \cdot \Phi_n(\eta) \quad (26)$$

$$\Gamma_{v_0Q} + (3V^2n)^{-1} (\varrho \mu_{PQ} + \chi \sigma^2_Q) = \Gamma_{VQ} \cdot \Phi_n(\eta) \quad (26)$$

$$\text{où } \Phi_n(\eta) = \frac{2 \Psi_n(\eta) + \eta \Psi'_n(\eta)}{2 \eta [\Psi_n(\eta) + \eta \Psi'_n(\eta)]} \quad (27)$$

voir figure 7.

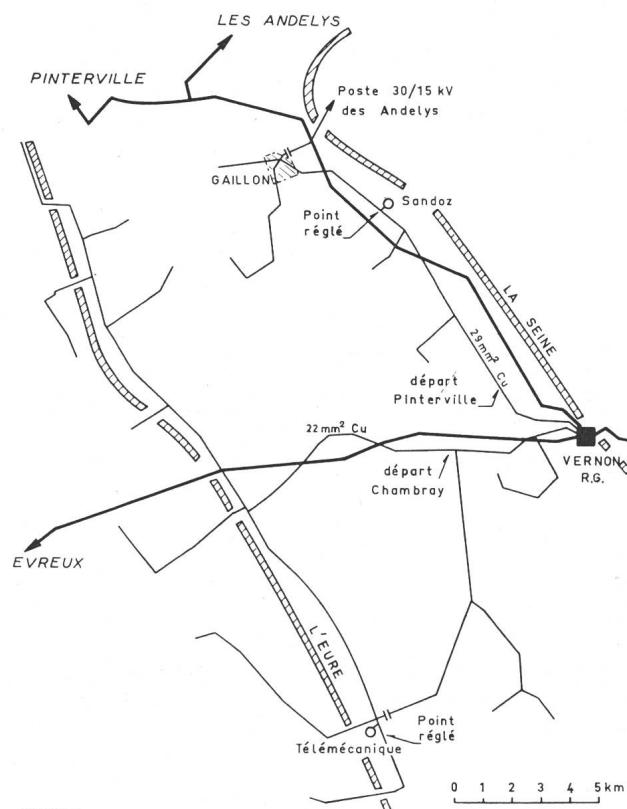


L'on peut par des approximations successives calculer ϱ et χ en prenant comme termes initiaux de l'itération celui obtenu pour $n = \infty$, c'est-à-dire, en remplaçant $\Phi_n(\eta)$ par 1 dans les formules précédentes.

Les valeurs initiales sont d'ailleurs celles à utiliser lorsque l'on dispose de régleurs continus.

3.4 Résultats expérimentaux

L'expérience que l'on peut avoir des réseaux montre que les régleurs en charge permettent d'obtenir en matière de régulation de la tension des résultats très intéressants. Ils sont malheureusement

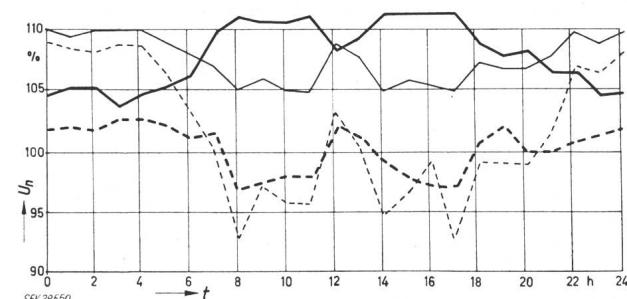


Elément de correction de U en fonction de la charge

$\varrho_0 = 4,9 \Omega/15 \text{ kV}$; $\chi_0 = 2,8 \Omega/15 \text{ kV}$

— ligne 30 kV

— ligne 15 kV



Point réglé: Poste télémécanique

Régulation de la tension U_n des départs ruraux

Tension barres 15 kV:

— sans correction de U

— avec correction de U

Tension point réglé:

— sans correction $\sigma_v = 5,6 \%$

— avec correction $\sigma_v = 1,76 \%$

assez souvent mal utilisés, les éléments de la loi de réglage étant fixés arbitrairement.

Depuis quelques années l'Electricité de France poursuit des recherches pour un meilleur emploi de ces appareils.

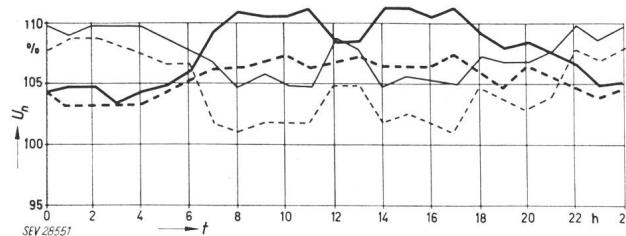


Fig. 10
Poste 30/15 kV de Vernon
Point réglé: Poste Sandoz

Régulation de la tension U_n des départs ruraux
Tension barres 15 kV au poste Vernon:

— sans correction de la tension $\sigma_v = 1,181 \%$
— avec correction de la tension $\sigma_v = 2,70 \%$

Tension au point réglé Sandoz:

— sans correction de la tension $\sigma_v = 2,89 \%$
— avec correction de la tension $\sigma_v = 1,59 \%$

Il est apparu que les valeurs optimales des gradins étaient de 1,5 % et que dans l'état actuel des réseaux 17 prises soit une amplitude de réglage de $\pm 12\%$ convenaient.

Dans un certain nombre de cas les éléments de la loi de réglage ont été déterminés suivant les méthodes exposées plus haut.

Bien entendu pour faciliter les calculs les éléments ont été déterminés comme s'il s'agissait des régleurs continus.

Les résultats se sont trouvés en très bon accord avec la théorie.

Sur la figure 8 sont représentés des réseaux sur lesquels des essais ont eu lieu.

Sur la figure 9 et 10 l'on montre l'aspect des fluctuations actives de tension sur deux départs.

Adresse de l'auteur:

P. Gaussens, ingénieur, Chef du service des études de réseaux à la Direction des Etudes et recherches d'Electricité de France, 12, place des Etats Unis, Paris 16^e.

Möglichkeiten der Verbesserung elektrischer Verteil- und Zähleranlagen in Hausinstallationen

Von J. Stieger, Genf

621.316.923 : 621.316.34

Der Autor verweist auf die etwas verzögerte Entwicklung im Bau von Verteil- und Zähleranlagen in Hausinstallationen während der letzten 20 Jahre. Er erwähnt die herkömmlichen Bauarten und ihre Nachteile, und leitet daraus die Forderungen ab, die an moderne Anlagen zu stellen sind. Schliesslich beschreibt er zwei neue Bauarten, welche die gestellten Ansprüche erfüllen.

L'auteur critique le développement lent, au cours de ces 20 dernières années, de la construction des «Tableaux de répartition» et des «Tableaux porte-compteurs» destinés aux installations des maisons locatives. Il fait mention des anciennes constructions avec leurs désavantages et cite les exigences dictées pour les installations modernes. Finalement il décrit deux nouveaux types de constructions qui répondent aux exigences énumérées.

1. Einleitung

Während die industrielle Entwicklung auf den meisten Gebieten der Technik in den letzten Jahrzehnten beispiellose Fortschritte machte, hat sie in einigen nicht unbedeutenden Bereichen mit Schwierigkeiten zu kämpfen, die auf den ersten Blick schwer zu erklären sind. Ein solches Gebiet ist das der elektrischen Verteil- und Zähleranlagen in Hausinstallationen. Mit dieser Feststellung will nicht etwa gesagt sein, dass in der Verteilung und Messung elektrischer Energie in Hausinstallationen in den letzten 20 Jahren keine Fortschritte erzielt worden seien, und dass sich die Industrie nicht stets bemüht hätte, neue Lösungen zu finden. Wenn die Entwicklung hier mit dem allgemeinen Tempo des technischen Aufstieges nicht Schritt hielt, dürfte ein wesentlicher Grund in der Tatsache zu suchen sein, dass es sich bei elektrischen Verteil- und Zähleranlagen in Hausinstallationen um ein Fachgebiet handelt, in welchem von der Industrie gebaute Einzelteile vom Gewerbe in individueller Vielfalt einzusetzen sind. Der mit der Erstellung einer Anlage betraute Installateur war aus der Vergangenheit gewohnt, diese nach handwerklichen Gesichtspunkten aufzubauen und die benötigten Bauelemente nach eigenem Gutdünken zusammenzustellen.

Wenn auch die so erhaltenen Lösungen technisch in den meisten Fällen durchaus befriedigten, vermochten sie zumindest wegen der arbeitsintensiven gewerblichen Bauweise wirtschaftlich und oft auch ästhetisch den zunehmenden Ansprüchen nicht mehr voll zu genügen. Dies wurde von verschiedenen Fachleuten frühzeitig erkannt. So hat z. B. A. Bernardsgrütter in einer im Jahre 1952 im Bulletin SEV veröffentlichten Arbeit [1]¹⁾ auf das Ungenügen der in Hausinstallationen bestehenden Verhältnisse hingewiesen und Verbesserungsvorschläge gemacht. Solche von der Industrie aufgegriffene und weiterentwickelte Anregungen führten in den letzten Jahren zu fortschrittlichen Lösungen, über die im folgenden berichtet wird.

2. Die herkömmliche Bauart

Die in den Anfängen der Hausinstallation verwendete Bauart, Sicherungen und Zähler in Hausinstallationen direkt auf Wände oder auf Holzbretter zu montieren, wurde aus begreiflichen Gründen sehr bald abgelöst durch den Aufbau der Bauelemente auf Marmor- und später Eternittafeln. Das Typische an der Entwicklung bestand darin, dass

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.