

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 62 (1971)

Heft: 4

Artikel: Nouvelle méthode pour la linéarisation de l'échelle des voltmètres électrostatiques à aiguille

Autor: Antoniu, M.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-915804>

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: 16.01.2026

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

Nouvelle méthode pour la linéarisation de l'échelle des voltmètres electrostatiques à aiguille

Par M. Antoniu, Jassy

621.317.725: 53.082.72

On examine d'abord l'influence de la linéarisation de l'échelle du voltmètre electrostatique par la méthode classique, sur les paramètres de qualité de ce voltmètre. On présente ensuite une nouvelle méthode pour modifier l'équation de fonctionnement du voltmètre electrostatique, fondée sur la variation de la tension d'entrée aux électrodes actives, à l'aide d'un diviseur de tension capacitif, constitué et commandé par le mécanisme voltmétrique même. On décrit deux variantes du voltmètre à variation de tension à un seul et à deux couples électriques.

Par rapport au voltmètre classique, le nouveau type de voltmètre assure un facteur de qualité de Keinath en quelque sorte meilleur, une limite supérieure du domaine de fréquence plus élevés et une géométrie des électrodes actives plus simple, mais exige en échange une isolation électrique de meilleure qualité.

1. Introduction

Le voltmètre electrostatique à aiguille [1, 2]¹⁾ présente de nouveau de l'importance en vertu de son utilisation en tant qu'appareil de tableau pour des tensions et des fréquences élevées [3, 4] et, surtout, à cause de son inclusion en divers appareils électroniques de mesure [5; 6].

Lorsqu'on construit un pareil voltmètre il existe la nécessité de la linéarisation (uniformisation) de l'échelle graduée qui est, normalement, quadratique. Cette linéarisation est obtenue, d'une manière classique, par la modification adéquate du terme $dC/d\alpha$ de l'expression du couple actif, c'est-à-dire en modifiant la géométrie des électrodes actives. Cette méthode présente le désavantage de provoquer une certaine complication de la géométrie des électrodes actives et une réduction importante du facteur de qualité de Keinath. Un autre désavantage du voltmètre electrostatique classique est constitué par la présence du ressort antagoniste dans le circuit électrique propre, présence qui devient gênante lorsqu'on doit effectuer des mesures en hautes fréquences.

Dans ce travail-ci on présente une nouvelle méthode de linéarisation de l'échelle du voltmètre electrostatique en gardant $dC/d\alpha = \text{constant}$ (donc la géométrie la plus simple), on varie la tension d'entrée aux électrodes actives à l'aide d'un diviseur de tension capacitif, variable, constitué et commandé par le mécanisme même du voltmètre. Cette méthode s'appellera méthode de la variation de la tension et le voltmètre dont la construction repose sur cette méthode voltmètre à variation de la tension. Par rapport à la méthode classique on a les avantages suivants: on garde le caractère simple de la géométrie des électrodes du voltmètre quadratique, on améliore en quelque sorte le facteur de qualité de Keinath et on aboutit à une augmentation considérable du domaine de fréquences.

Nous décrivons, en tant que l'application de la nouvelle méthode, deux voltmètres à variation de tension qui, pour

Der Einfluss der Linearisierung der Skala des elektrostatischen Voltmeters nach der klassischen Methode wird im Hinblick auf die Qualitätsparameter des Voltmeters untersucht. In der Folge wird eine neue Methode für die Modifikation der Funktionsgleichung des elektrostatischen Voltmeters gezeigt, welche auf der Variation der Eingangsspannung der aktiven Elektroden beruht. Das wird mit Hilfe eines kapazitiven Spannungsteilers, der aus dem Voltmetermechanismus selbst besteht und durch diesen gesteuert wird, erreicht. Zwei Varianten des Voltmeters mit Spannungsvariation werden beschrieben, mit einem oder zwei elektrischen Drehmomenten.

Im Vergleich mit dem klassischen Voltmeter bietet der neue Typ einen verbesserten Qualitätsfaktor nach Keinath, eine höhere obere Frequenzgrenze und eine einfache Geometrie der aktiven Elektroden, aber verlangt dafür eine bessere Qualität der elektrischen Isolation.

simplifier, seront notés par V_1 et, respectivement, V_2 ; le voltmètre electrostatique linéaire (échelle uniforme) classique et celui quadratique seront notés par V_k , respectivement, V_q .

L'idée de la modification de la caractéristique de l'échelle aux appareils de mesure par d'autres voies que la modification de la géométrie du mécanisme de l'appareil respectif est connue et a été déjà appliquée aux appareils magnétoélectriques [7], mais on n'a pas essayé, à ce que nous connaissons, de le faire aux voltmètres électrostatiques.

2. Critique de la méthode classique de linéarisation

2.1 Points de départ

Dans ce travail-ci la notion de linéarisation se rapporte à la modification de l'équation de fonctionnement du voltmètre electrostatique à aiguille de manière que la succession des divisions sur l'échelle suive une loi aussi rapprochée que possible de la loi linéaire.

On rencontre une multitude de variantes constructives de V_q et V_k , mais nous n'en prendrons en considération que les types monocellulaires à électrodes planes parallèles (fig. 1 et 2), qui sont plus souvent utilisés aux tensions de 1...3 kV.

Puisque dans le cas des voltmètres électrostatiques à aiguille la classe de précision est décidée principalement par l'erreur due au frottement des pivots, on prend comme base des discussions le facteur de qualité de Keinath [8]. Vu que celui-ci a la plus grande valeur dans le cas de V_q et qu'il est d'autant meilleur que la dimension radiale (R) de l'électrode mobile est plus petite [9], la comparaison des voltmètres se fera au même R en prenant comme terme de comparaison le facteur de qualité de Keinath du voltmètre V_q .

2.2 Le voltmètre quadratique (V_q) (Fig. 1)

Pour V_q le facteur de qualité de Keinath est

$$\Gamma_q = \frac{10 \alpha_n W_q}{G_q^{1,5}} \quad (1)$$

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

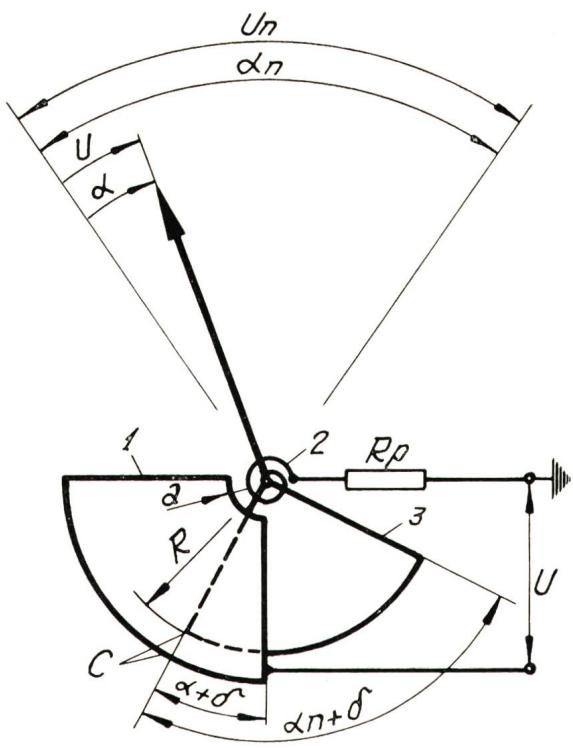


Fig. 1

Voltmètre quadratique (V_q)

1 l'électrode fixe; 2 ressort antagoniste; 3 électrode mobile; C capacité entre les électrodes actives; α_n angle total d'échelle; δ angle d'avance de l'électrode 3 entre les parois de l'électrode 1 lorsque $\alpha = 0$; U_n tension nominale du voltmètre; R dimension radiale; R_p résistance de protection nécessaire pour limiter le courant dans le ressort antagoniste s'il y a court-circuit entre les électrodes actives

où G_q est le poids de l'organe mobile et

$$W_q = \frac{\epsilon E_L U_n R^2}{2 \alpha_n} \quad (a^2 \ll R^2) \quad (2)$$

est le couple stabilisant spécifique minimum (égal, numériquement, à la constante du ressort antagoniste 2) et où ϵ représente la permittivité du diélectrique (air) entre les électrodes actives et

$$E_L = \frac{U_n}{e} \quad (3)$$

l'intensité admissible du champ électrique de travail, où e est la distance entre les électrodes actives.

2.3 Le voltmètre linéaire classique (V_K)

On le représente dans la fig. 2, où r est le rayon variable définissant le contour de l'électrode mobile 3, tandis que les autres notations ont la même signification que dans la fig. 1.

Pour obtenir l'échelle linéaire (uniforme) il faut que C satisfasse la condition:

$$\frac{dC}{d\alpha} = \frac{\text{const.}}{\eta_0 + \eta} \quad (4)$$

ce qui conduit à la relation

$$\left(\frac{r}{R}\right)^2 \approx \frac{\eta_0}{\eta_0 + \eta} \quad (5)$$

où η_0 est un paramètre ($0 < \eta_0 < 1$), et

$$\eta = \frac{\alpha}{\alpha_n} \quad (6)$$

la déviation rapportée.

L'influence du paramètre η_0 sur la distribution des divisions sur l'échelle graduée est indiquée dans la fig. 3; on observe que l'échelle n'est pas parfaitement linéaire et que sa linéarité s'améliore lorsque η_0 baisse.

L'éloignement d'une échelle de la linéarité parfaite est évaluée par le coefficient de non-linéarité:

$$\nu = \frac{D_M}{D_m} \quad (7)$$

où D_M et D_m (fig. 3) représentent la division maxima et respectivement minima sur l'échelle (ou portion d'échelle) considérée. L'échelle est considérée pratiquement linéaire si $\nu \leq 1,3$. C'est dans ce sens que les échelles représentées dans la fig. 3 sont linéaires sur 85...95 % de leur longueur.

Enfin, si l'on note par W_K et Γ_K le couple stabilisant spécifique minimum et respectivement le facteur de qualité de Keinath, on a les relations:

$$W_K = \frac{\epsilon E_L U_n R^2}{2 \alpha_n \left(1 + \frac{1}{\eta_0}\right)} \quad (8)$$

$$\Gamma_K = \frac{10 \alpha_n W_K}{G_K^{1,5}} \quad (9)$$

On observe qu'à l'abaissement de η_0 — c'est-à-dire à l'amélioration de la linéarité de l'échelle — Γ_K baisse.

Dans la relation (9) G_K représente le poids de l'organe mobile constitué, de même que G_q , par l'addition des poids des pièces composantes: l'axe à pivots, l'aiguille, les contrepoids, la palette de l'amortisseur à air, l'électrode mobile; ces pièces sont identiques dans les deux cas, sauf les électrodes mobiles.

Comme pour équilibrer l'organe mobile de V_K on a besoin d'un contrepoids supplémentaire approximativement égal au poids de la portion découpée (hachurée sur la fig. 2) de e.m., il résulte que $G_q \approx G_K$. Dans cette hypothèse, en divisant (9) par (1) on obtient l'expression

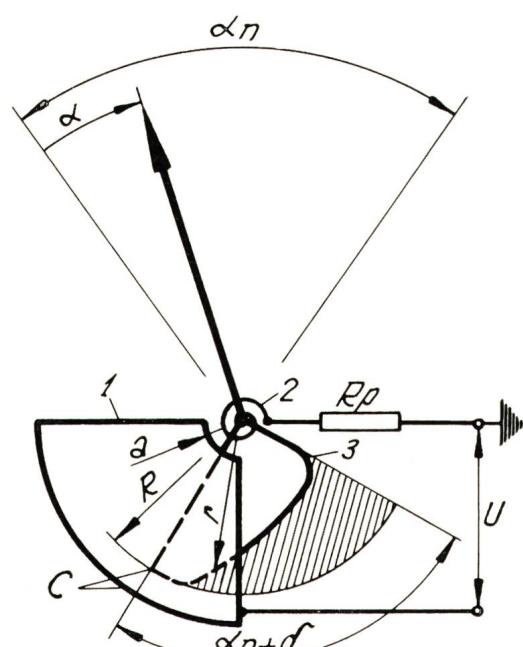


Fig. 2
Voltmètre à échelle linéaire selon la méthode classique (V_K)
Désignations voir fig. 1

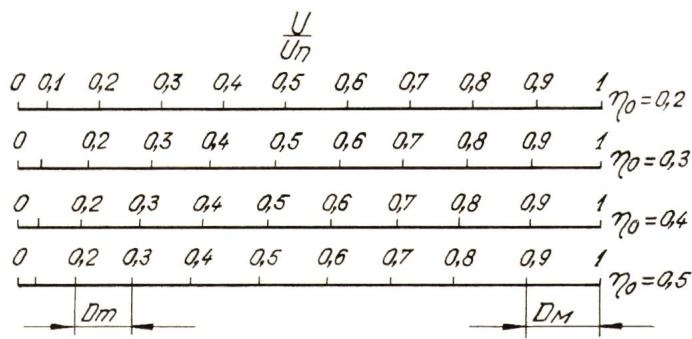


Fig. 3

La forme de l'échelle du voltmètre V_K
 U tension à mesurer; U_n tension nominale du voltmètre; η_0 paramètre géométrique du voltmètre

$$\frac{\Gamma_K}{\Gamma_q} \approx \frac{1}{1 + \frac{1}{\eta_0}} \quad (10)$$

qui est représentée graphiquement dans la fig. 4.

On a représenté sur la même figure la courbe $v(\eta_0)$ déduite graphiquement de la fig. 3. On observe qu'aux mêmes dimensions radiales de l'électrode mobile et dans les limites $v \leq 1,3$, V_K assure un facteur de qualité de Keinath d'un tiers, tout au plus, de la valeur de celui obtenu à V_q .

2.4 Influence du ressort spiral antagoniste

L'erreur supplémentaire introduite par le ressort antagoniste à des fréquences élevées présente deux composantes: γ_L — déterminée par l'inductivité propre et

$$\gamma_R \approx -2\pi^2 f^2 C_i^2 R_p^2 \quad (11)$$

déterminée par la chute de tension sur la résistance de protection R_p où f est la fréquence de la tension à mesurer et C_i la capacité d'entrée du voltmètre. Vu que pour des constructions normales et $f < 1\text{MHz}$, $\gamma_L \ll \gamma_R$, il résulte que la limite supérieure du domaine des fréquences est décidée par R_p .

Quant à la grandeur de R_p , la littérature indique comme valeurs minima (en fonction de la section du ressort antagoniste) 15...25 kΩ pour chaque kilovolt de la tension nominale du voltmètre.

3. Voltmètre électrostatique à variation de tension et un seul couple électrique

On le représente dans la fig. 5 où C_1 est la capacité active et C_2 la capacité constante servant à varier la tension (U_1) d'entrée à C_1 et, en même temps, au couplage capacitif entre une borne fixe extérieure et l'électrode mobile 3, en éliminant le ressort antagoniste du circuit électrique du voltmètre. L'électrode 3 est isolée électriquement par rapport à l'axe 4 à l'aide d'un manchon électroisolant de bonne qualité 5. Les autres notations ont les mêmes significations que ci-dessus.

3.1 Equation de fonctionnement

Conformément à la fig. 5 on écrit les relations

$$C_1 = C_{10} + K\alpha \quad (12)$$

$$U_1 = U \frac{C_2}{C_1 + C_2} = \frac{U}{\psi} \quad (13)$$

$$U_2 = U \left(1 - \frac{1}{\psi}\right) \quad (14)$$

$$\psi = 1 + b [1 - \beta (1 - \eta)] \quad (14)$$

$$K = \frac{C_{1n} - C_{10}}{\alpha_n} = \varepsilon R^2, \quad (a^2 \ll R^2) \quad (15)$$

$$\beta = \frac{C_{1n} - C_{10}}{C_{1n}} = \frac{\alpha_n}{\alpha_n + \delta} \quad (16)$$

$$b = \frac{C_{1n}}{C_2} = \frac{\alpha_n + \delta}{\Theta_2} \quad (17)$$

C_{10} et C_{1n} représentant les valeurs de C_1 pour $\alpha = 0$ et respectivement $\alpha = \alpha_n$, Θ_2 — l'angle au centre de l'électrode fixe 2, tandis que δ a la même signification que dans la fig. 1.

Sur l'organe mobile du voltmètre agit le couple direct

$$M_1 = \frac{1}{2} U_1^2 \frac{d C_1}{d \alpha} = \frac{K U^2}{2 \psi^2}$$

et respectivement opposant:

$$M_2 = W_1 \alpha$$

d'où, en écrivant la condition d'équilibre ($M_1 + M_2 = 0$), on obtient l'équation de fonctionnement recherchée:

$$\eta [1 - m(1 - \eta)]^2 = \mu^2 \quad (18)$$

de même que la constante du ressort antagoniste:

$$W_1 = \frac{\varepsilon U_n^2 R^2}{2 e \alpha_n (1 + b)^2} \quad (19)$$

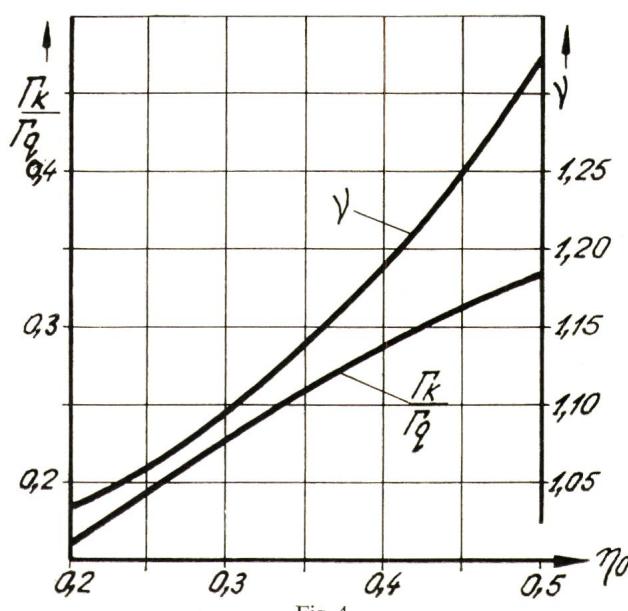
qui représente aussi le couple stabilisant spécifique minimum, puisque M_1 baisse lorsque α croît. On a utilisé dans ces relations les substitutions:

$$\mu = \frac{U}{U_n} \quad (20)$$

$$m = \frac{\beta b}{1 + b} = \frac{\alpha_n}{\Theta_2 + \alpha_n + \delta} \quad (21)$$

et e représente la distance entre les électrodes, laquelle, calculée conformément aux relations (13), est

$$\begin{aligned} b \leq 1 \rightarrow e &= \frac{U_n}{(1 + b) E_L} \\ b \geq 1 \rightarrow e &= \frac{b U_n}{(1 + b) E_L} \end{aligned} \quad (22)$$



Corrélations entre les paramètres du voltmètre V_K
 Γ_K facteur de qualité de Keinath du V_K ; Γ_q facteur de qualité de Keinath du V_q ; η_0 paramètre géométrique du voltmètre; V coefficient de non-linéarité de l'échelle

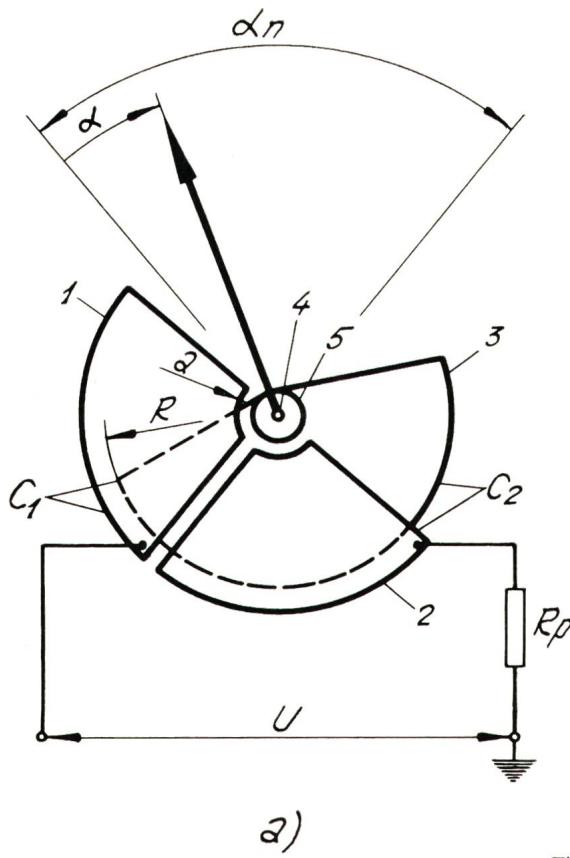


Fig. 5
Voltmètre à variation de tension et un seul couple électrique (V_1)

- a) schéma de l'ensemble
- b) position des électrodes actives
- c) schéma électrique

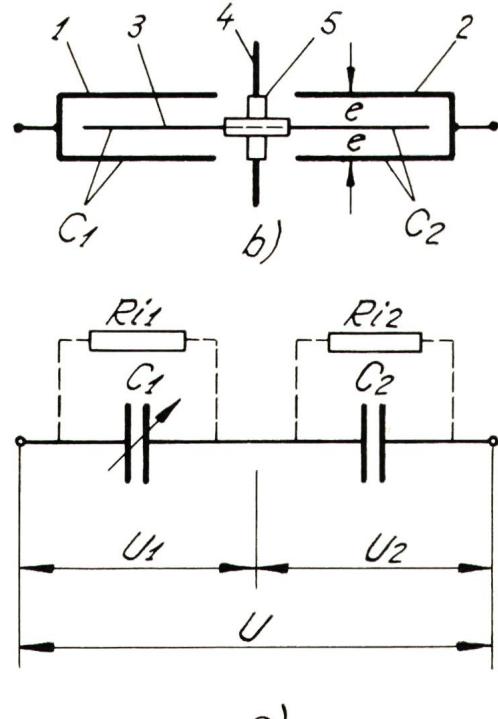


Fig. 5

Voltmètre à variation de tension et un seul couple électrique (V_1)

- e distance entre les électrodes actives
- C_1, C_2 capacités entre les électrodes actives
- U_1, U_2 tensions d'entrée à C_1 et C_2
- 4, 5 axe à pivots et le manchon électroisolant
- U tension à mesurer

Dans la fig. 6 on indique la forme de l'échelle graduée tracée d'après (18) pour $\beta = 0,75$. On observe que pour $m = 0,3 \dots 0,5$ l'échelle est pratiquement linéaire sur 80...90 % de sa longueur puisque sur ces conditions $v \leq 1,3$.

Il résulte des relations (12) et (13) que $dC_1/d\alpha = \text{const}$ et que U_1 dépend de α ; ce sont ces deux aspects qui constituent le trait principal de la méthode de la variation de la tension. La différence essentielle entre la méthode classique et celle de la variation de la tension consiste dans le fait que, premièrement, la linéarisation de l'échelle graduée se fait en imposant une condition de forme (4), et, deuxièmement, en réalisant des conditions simultanées (12) et (13).

Tandis que pour V_K des modifications géométriques exigées par (5) sont nécessaires, on utilise pour V_1 une géométrie des électrodes plus simple, constituée uniquement par des arcs de cercle et lignes droites; la modification de la caractéristique de l'échelle se fait, comme il résulte de (21), par la simple modification de l'angle au centre (Θ_2) de l'électrode fixe 2, opération technologiquement plus facile que la modification de la courbure de l'électrode mobile de V_K selon la relation (5).

3.2 Le facteur de qualité de Keinath (Γ_1)

est donné par l'expression:

$$\Gamma_1 = \frac{10 \alpha_n W_1}{G_1^{1,5}} \quad (23)$$

où W_1 est défini par (19) et G_1 est le poids de l'organe mobile.

Les poids des parties composantes de l'organe mobile de V_1 et V_q étant identiques, à l'exception des électrodes mobiles, on peut écrire les relations:

où g_q et g_1 représentent le poids de l'électrode mobile de V_q , respectivement V_1 . Comme ces derniers sont proportionnels aux angles au centre des électrodes mobiles respectifs et que ces angles pour V_q et V_1 sont $(\alpha_n + \delta)$ et respectivement $(\alpha_n + \delta) \cdot (1+b)$, il en résulte que $g_1 = g_q (1+b)$. Quant à g_q , il résulte des données de construction existantes dans la littérature que pour les voltmètres monocellulaires à amortisseur à air et $U_n = 0,75 \dots 3 \text{ kV}$, $g_q = 0,4 \dots 0,2 G_q$. En considérant la moyenne $g_q = 0,3 G_q$, on obtient:

$$G_1 \approx (1 + 0,3 b) G_q \quad (24)$$

Si l'on tient compte à présent des relations (19), (22), (24) et en divisant (23) par (1) on obtient la relation:

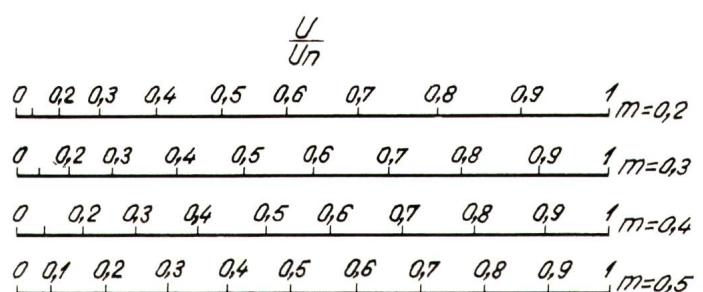


Fig. 6
La forme de l'échelle du voltmètre V_1
 m paramètre géométrique du voltmètre
Autres désignations voir fig. 3

$$\begin{aligned} b \leq 1 &\rightarrow \frac{\Gamma_1}{\Gamma_q} \approx \frac{1}{(1+b)(1+0,3b)^{1,5}} \\ b \geq 1 &\rightarrow \frac{\Gamma_1}{\Gamma_q} \approx \frac{1}{b(1+b)(1+0,3b)^{1,5}} \end{aligned} \quad (25)$$

qu'on a représentée graphiquement dans la fig. 7.

On a représenté aussi dans la même figure la courbe $v(b)$, déduite graphiquement de la fig. 6. En comparant la fig. 4 à la fig. 7 il résulte que pour V_1 l'abaissement du facteur de qualité de Keinath est moindre que pour V_k .

3.3 Influence de la résistance de protection

Dans le cas de V_1 la résistance de protection R_p est destinée à éliminer les effets destructifs de l'arc électrique sur l'électrode mobile s'il y a percement de l'espace entre celui-ci et les électrodes fixes. En ce qui concerne la grandeur de R_p les essais indiquent que $5 \text{ k}\Omega$ pour chaque kilovolt de la tension nominale du voltmètre est suffisant.

De même que pour V_k l'erreur:

$$\gamma_R \approx -2\pi^2 f^2 C_{i1}^2 R_p^2 \quad (26)$$

est introduite par R_p aux fréquences élevées.

En attribuant maintenant aux grandeurs de (11) l'indice k et à celles de (26) l'indice 1 et en divisant ces relations entre elles ($C_{ik} \approx C_{ii}$) on obtient:

$$\frac{\gamma_{R1}}{\gamma_{RK}} = \frac{R_{p1}^2}{R_{pk}^2} \quad (27)$$

Comme $R_{pk} \geq 3 \dots 5 R_{p1}$ il résulte que $\gamma_{R1} = 1/9 \dots 1/25 \gamma_{RK}$, par conséquent, la limite supérieure du domaine des fréquences est considérablement plus élevée pour V_1 que pour V_k , et la consommation de puissance aux fréquences élevées sur la résistance de protection du premier beaucoup plus réduite.

3.4 Influence de la résistance d'isolation

Les relations (13) sont rigoureusement exactes uniquement pour le diviseur de tension capacitif idéal.

Si les résistances d'isolation R_{i1} et R_{i2} (fig. 5c) ne sont pas suffisamment grandes et f descend sous une certaine limite, la tension d'entrée de C_1 est:

$$U_1' = U \frac{C_2}{C_2 + h C_1}$$

et de ce fait dans l'indication du voltmètre apparaît l'erreur:

$$\gamma_{Ri} = \frac{U_1 - U_1'}{U_1} = \frac{h-1}{h + \frac{1}{\psi} - 1} \quad (28)$$

où ψ est donné par (14) et

$$h = \sqrt{\frac{1 + 1/(\omega^2 R_{i1}^2 C_1^2)}{1 + 1/(\omega^2 R_{i2}^2 + C_2^2)}}$$

En développant en série et en considérant $R_{i1} \approx R_{i2} = R_i/2$ après certains calculs où l'on admet que $1/(\psi - 1) \geq 2$, on obtient

$$\gamma_{Ri} \geq \frac{1}{1 + 4\pi^2 f^2 C_2^2 R_i^2} \quad (29)$$

où R_i est la résistance d'isolation mesurée aux bornes du voltmètre.

Pour V_1 , $C_2 \geq 3 \dots 5 \text{ pF}$ et $f \geq 30 \text{ Hz}$ (pour des raisons liées à l'inertie de l'organe mobile). Dans cette situation il

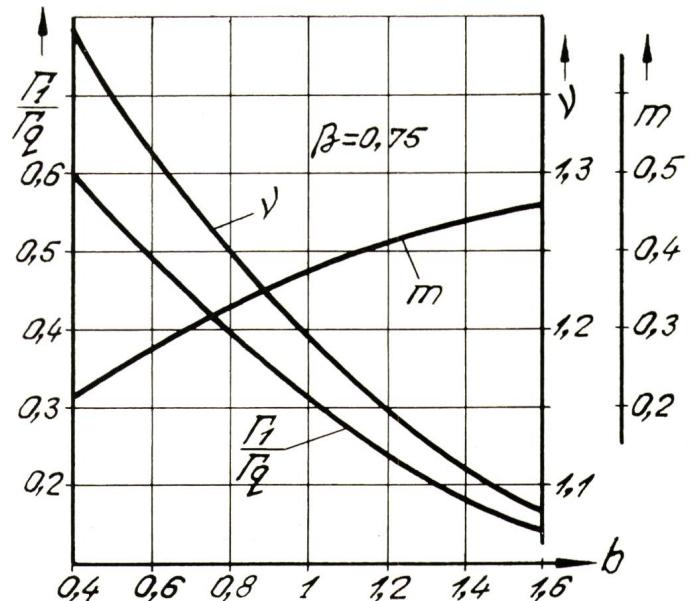


Fig. 7

Corrélations entre les paramètres du voltmètre V_1
b paramètre défini par (17); m paramètre défini par (21); β coefficient d'utilisation electrostatique; v coefficient de non linéarité de l'échelle; Γ_1, Γ_q facteur Keinath du V_1 et V_q

résulte de (29) que pour avoir une erreur négligeablement petite, par exemple $\gamma_{Ri} \leq 0,2\%$, il faut que $R_i \geq 10^{11} \Omega$. Cet ordre de grandeur pour R_i peut être facilement réalisé en utilisant des électroisolants synthétiques tels le téflon, le polystyrène et le polyéthylène [10; 11].

4. Voltmètre à variation de tension ayant deux couples électriques (V_2)

Le voltmètre V_2 est représenté dans la fig. 8. On observe qu'il a les mêmes parties composantes que V_1 , à l'exception de la capacité C_2 qui est variable; il y a donc les relations:

$$C_1 = C_{10} + K\alpha$$

$$C_2 = C_{20} - K\alpha$$

Il résulte de la fig. 8a que l'angle au centre de l'électrode mobile est constant $\approx \pi$ et par conséquent les expressions des tensions d'entrée aux électrodes actives (fig. 8 c) peuvent être écrrites sous la forme:

$$U_1 \approx \frac{(\pi - \alpha) U}{\pi + \delta}$$

$$U_2 \approx \frac{(\delta + \alpha) U}{\pi + \delta}$$

Vu que sur l'organe mobile agissent les couples

$$M_1 = \frac{1}{2} U_1^2 \frac{d C_1}{d \alpha} + \frac{1}{2} U_2^2 \frac{d C_2}{d \alpha} = \frac{K(\pi - 2\alpha - \delta) U^2}{2(\pi + \delta)}$$

$$M_2 = -W_2 \alpha$$

on obtient de la condition $M_1 + M_2 = 0$, à la suite des calculs très simples, l'équation de fonctionnement

$$\eta = \frac{\mu^2}{1 + \lambda(1 - \mu^2)} \quad (30)$$

de même que les relations de base pour le calcul des électrodes actives

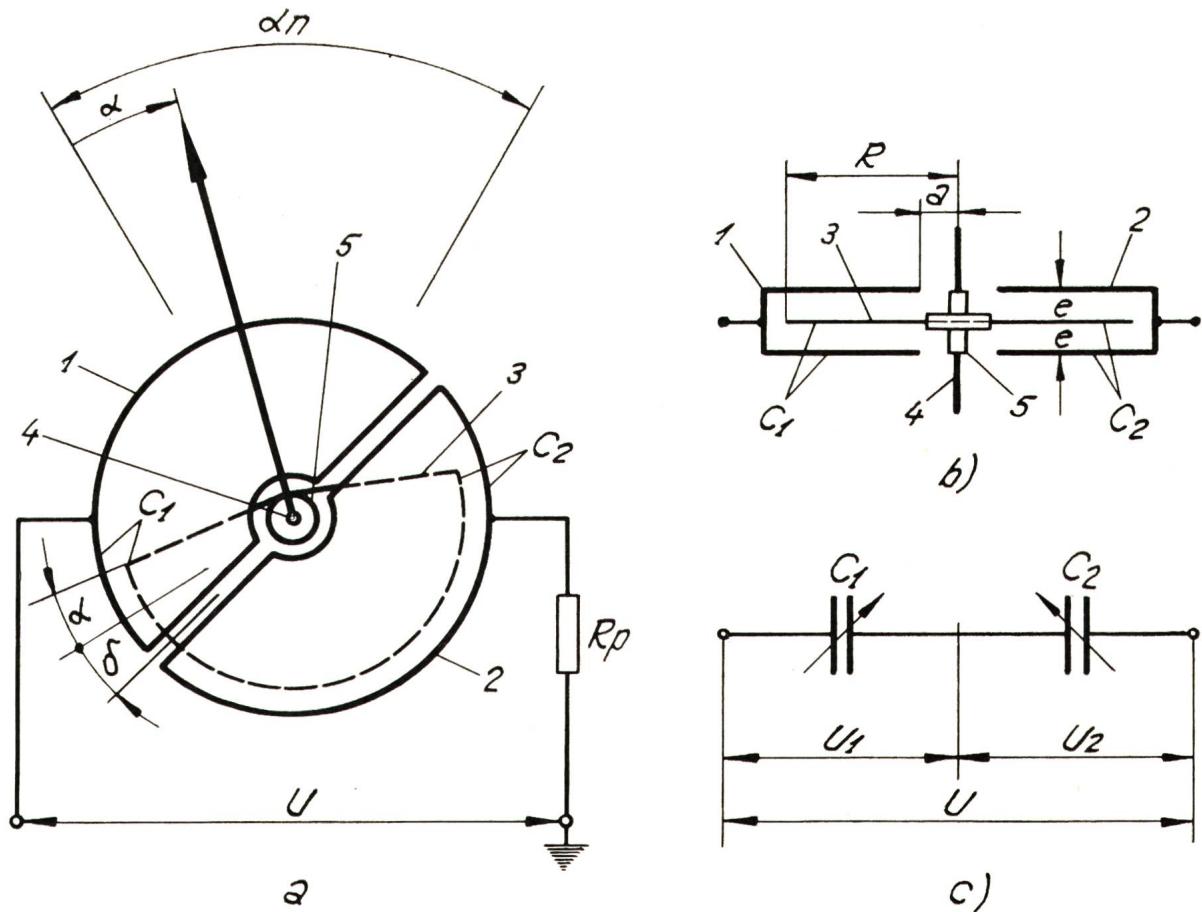


Fig. 8
Voltmètre à variation de tension ayant deux couples électriques (V_2)
Désignations voir fig. 1 et 5

$$W_2 = \frac{\varepsilon E_L U_n R^2 (\pi - 2\alpha_n - \delta)}{2\alpha_n (\pi - \alpha_n)} \quad (31)$$

$$e = \frac{(\pi - \alpha_n) U_n}{(\pi + \delta) E_L}$$

où

$$\lambda = \frac{2\alpha_n}{\pi - \delta} \quad (32)$$

et les autres termes ont la même signification que ci-dessus.

Dans la fig. 9 on a représenté la forme de l'échelle graduée définie par (30). On observe que pour $\lambda = 0,4 \dots 0,6$ l'échelle est pratiquement linéaire sur 70...80 % de sa longueur, puisque sur les portions respectives $v \leq 1,3$.

Le facteur de qualité de Keinath est donné par l'expression

$$\Gamma_2 = \frac{10\alpha_n W_2}{G_2^{1,5}} \quad (33)$$

où

$$G_2 = g + g_2$$

et où g_2 représente le poids de l'électrode mobile. Vu que son angle au centre est π il résulte que

$$g_2 = g_q \frac{\pi}{\alpha_n + \delta}$$

et par la suite, compte tenant de ce qui on a spécifié à (24) on obtient:

$$G_2 = G_q \left(0,7 + \frac{0,3\pi}{\alpha_n + \delta} \right)$$

En divisant (33) par (1) on obtient l'expression:

$$\frac{\Gamma_2}{\Gamma_q} \approx \frac{\pi - 2\alpha_n - \delta}{(\pi - \alpha_n) \left(0,7 + \frac{0,3\pi}{\alpha_n + \delta} \right)^{1,5}} \quad (34)$$

qu'on a représentée graphiquement dans la fig. 10.

On a représenté sur la même figure la courbe $v(\lambda)$ déduite graphiquement de la fig. 9, de même que la courbe $\alpha_n(\lambda)$ d'après (32). On observe que la possibilité de linéarisation de l'échelle est plus réduite pour V_2 que pour V_1 et, surtout, que α_n disponible est petit. Aussi V_2 est-il plus convenable en boîtier type profil.

En échange le mécanisme de mesure utilisé pour V_2 s'avère très avantageuse à la construction des voltmètres électrostatisques portables à indicateur optique.

En ce qui concerne l'influence de la résistance de protection R_p et de la résistance d'isolation, il en est de même que pour 3.3 resp. 3.4.

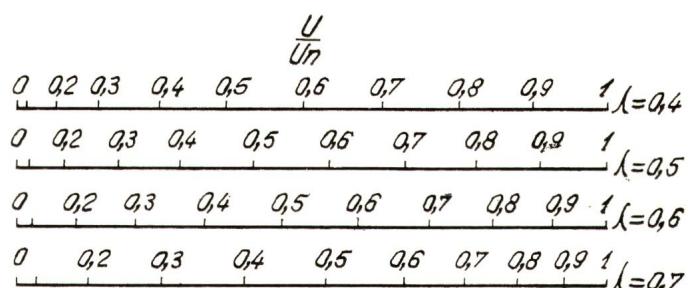


Fig. 9
La forme de l'échelle du voltmètre V_2
 λ paramètre géométrique du voltmètre
Autres désignations voir fig. 3

5. Comparaison entre la méthode classique et la méthode de la variation de la tension

En comparant les fig. 3, 6 et 9 il résulte que pour V_1 existent approximativement les mêmes possibilités de linéarisation de l'échelle que pour V_k tandis que pour V_2 elles sont plus réduites. Mais dans le cas de V_1 et V_2 , le ressort antagoniste étant éliminé du circuit électrique, la limite supérieure du domaine des fréquences est approximativement un ordre de grandeur plus élevée que pour V_k et, de plus, les premières ont une géométrie des électrodes en quelque sorte plus simple.

En échange V_1 et V_2 , fonctionnant sur le principe du diviseur capacitif de tension, exigent une isolation électrique de meilleure qualité.

En ce qui concerne le facteur de qualité de *Keinath*, comme on peut remarquer de la fig. 11 (où l'on a reproduit les courbes de la fig. 4, 7 et 10 en considérant v variable) pour $v \leq 1,3$ il y a approximativement la relation

$$\Gamma_K \approx \Gamma_2 < \Gamma_1 < \Gamma_q$$

Les conclusions théoriques relevées ci-dessus sont confirmées avec une bonne approximation par les données expéri-

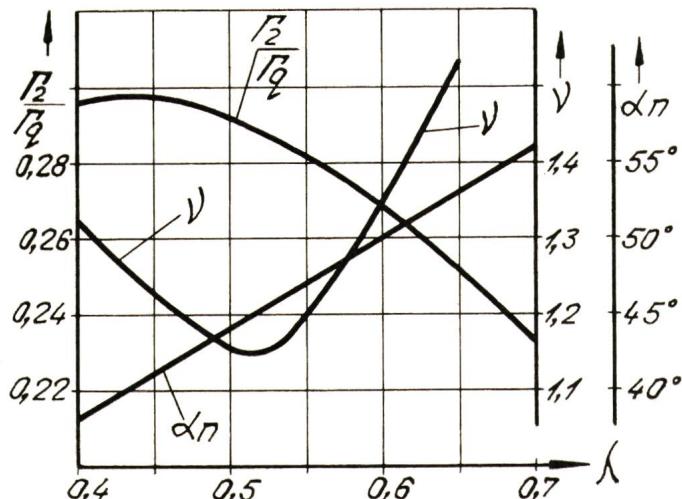


Fig. 10
Correlations entre les paramètres du voltmètre V_2

Désignations voir fig. 4, 8a et 9

mentales du tableau I où Cl. est la classe de précision [12], F la limite supérieure du domaine des fréquences et les autres notations ont la signification qu'on retrouve dans le texte.

L'expérimentation des voltmètres $V_1 \dots V_q$ a été faite en conditions identiques; on a utilisé chaque fois la même partie mécanique et le même boîtier en ne changeant que les électrodes actives. Tous les voltmètres ont été dimensionnés pour $U_n = 3 \text{ kV}$, $R = 30 \text{ mm}$ et $v = 1,2$; l'isolation des parties sous tension a été réalisée en polystyrène.

On a réalisé le couple antagoniste du dispositif expérimental non pas avec un ressort spiral mécanique, mais avec un dispositif électrique original — «ressort électrostatique» — où la

Tableau I

Voltmètre	G	Γ	v	R_p kΩ	F kHz	Cl.
V_1	1,2	0,60	1,25	12	250	1,5
V_2	1,15	0,45	1,3	12	250	1,5
V_k	1,05	0,36	1,2	50	50	1,5
V_q	0,95	0,90	—	50	50	1,5

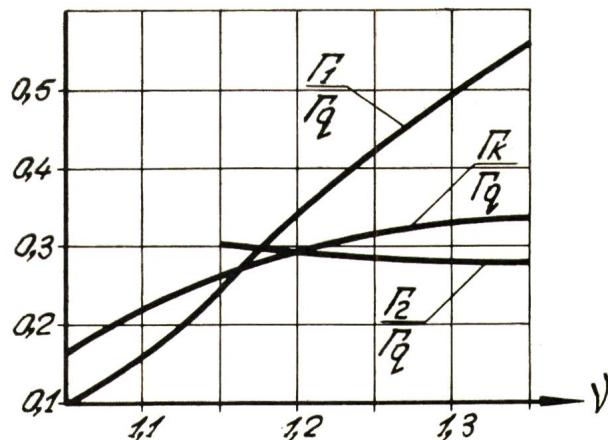


Fig. 11
Corrélations entre les facteurs Keinath des voltmètres V_K , V_1 et V_2
Désignations voir fig. 4, 7 et 10

constante (W) peut être réglée à la valeur exigée, par la simple modification de la tension d'alimentation.

En notant par R_1 , R_2 , R_k et R_q les dimensions radiales des électrodes mobiles pour V_1 , V_2 , V_k et V_q et en comparant ces dimensions par l'intermédiaire des relations (2), (8), (19) et (31) et dans l'hypothèse $W_1 = W_2 = W_k = W_q$ on obtient la relation:

$$R_q < R_1 < R_2 < R_k$$

qui est en accord parfait avec les résultats expérimentaux.

Des deux voltmètres V_1 et V_2 c'est le premier qui donne des résultats meilleurs en tant qu'appareil où laboratoire lorsqu'on exige une échelle linéaire, tandis que V_2 s'avère avantageux comme appareil de tableau uniquement si l'on exige une échelle contractée à la portion finale (logarithmique).

Les recherches théoriques et les essais expérimentaux indiquent enfin qu'en utilisant les boîtiers normalisés pour les instruments de tableau [13] on peut construire V_1 et V_2 pour des tensions 0,75...15 kV et des fréquences jusqu'à 1,5...0,3 MHz, dans les classes de précision 1,5...1. On peut utiliser ces voltmètres, avec bons résultats, aux installations de courants forts d'audio et radiofréquence (fig. 12).

6. Conclusions

a) La linéarisation (uniformisation) de l'échelle du voltmètre électrostatique à aiguille par la méthode classique (modification de la géométrie des électrodes actives), influence d'autant plus négativement sur les dimensions et les performances de l'appareil que la linéarisation requise est meilleure.

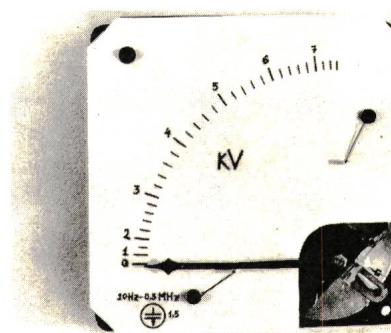


Fig. 12
Voltmètre de tableau du type V_1 construit pour $U_n = 7,5 \text{ kV}$
En comparant la forme de l'échelle de ce voltmètre à la forme théorique de la fig. 6 ($m \approx 0,4$) on remarque une bonne concordance

b) A l'aide d'un artifice extrêmement simple: la variation de la tension des électrodes actives, le voltmètre électrostatique naturel (quadratique) peut être linéarisé sans pourtant en modifier la géométrie des électrodes actives.

c) Par rapport à la méthode classique, la méthode de la variation de la tension présente les avantages suivants: un facteur de qualité en quelque sorte meilleur, limite supérieure du domaine des fréquences sensiblement plus élevée et géométrie des électrodes actives plus simples, en gardant toutefois le désavantage d'exiger une isolation électrique de meilleure qualité.

Bibliographie

- [1] A. Palm: Elektrostatische Messgeräte, Karlsruhe, Verlag G. Braun, 1951.
- [2] C. V. Drysdale and A. C. Jolley: Electrical measuring instruments. London, Chapman and Hall, 1952.
- [3] E. H. W. Banner: Instruments électroniques de mesure. Paris, Dunod, 1959.
- [4] P. M. Pflier und H. Jahn: Elektrische Messgeräte und Messverfahren. 3. Auflage. Berlin/Heidelberg/New York, Springer, 1965.
- [5] J. Stanek: Technik elektrischer Messgeräte. Berlin, VEB Verlag Technik, 1957.
- [6] A. Schwab: Hochspannungsmesstechnik. Messgeräte und Messverfahren. Berlin/Heidelberg/New York, Springer, 1969.
- [7] W. Niegel: Die Zenerdiode und ihre Anwendung in der Messtechnik. ATM - (1962)321, S. 231...234.
- [8] L. Merz: Grundkurs der Messtechnik. Teil 2: Das elektrische Messen nichtelektrischer Größen. München/Wien, Oldenbourg, 1968.
- [9] A. Täuber-Gretler: Über ein tragbares elektrostatisches Voltmeter. Bull. ASE 25(1934)21, p. 556...561.
- [10] C. G. Garton: The properties of insulating materials used in instruments. Proc. IEE Part II Power Engineering 98(1951)66, p. 728...737.
- [11] P. F. Bruins: Plastics for electrical insulation. New York/London/Sidney/Toronto, Interscience Publishers, 1968.
- [12] Recommandations pour les appareils de mesure électriques indicateurs et leurs accessoires. Deuxième édition. Publication No. 51 de la CEI. Genève, Bureau central de la Commission Electrotechnique Internationale, 1960.
- [13] A. Palm: Elektrische Messgeräte und Messeinrichtungen. 4. Auflage. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer, 1963.

Adresse de l'auteur:

Dr. ing. Mihai Antoniu, Calea «23 August» nr. 40, bloc B 2, ap. 43, Jassy, Roumanie.

Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

Elektrische Maschinen — Machines électriques

Schutzeinrichtungen für grosse Elektromotoren

621.313:621.316.92

[Nach H. F. Bean und D. D. Stephen: Protection of large a. c. and d. c. drives. Electrical Times 158(1970)11, S. 73...76]

Fehler in Elektromotoren lassen sich in vier Kategorien einteilen, nämlich in Fehler im Versorgungssystem, in Fehler auf der Lastseite, in Fehler des Steuersystems und in Fehler der Hilfseinrichtungen.

Ein wirksamer Schutz für Wechselstrommotoren muss vor allem die Wicklungsisolation vor anhaltend hohen Temperaturen schützen und den Schaden durch einen Isolationsfehler kleinhalten. Diesen Anforderungen entspricht das sehr gebräuchliche Thermorelais, das von der Tatsache Gebrauch macht, dass die Wicklungstemperatur in starkem Masse vom durchfliessenden Strom abhängig ist. Durch Messung des Stromes in Abhängigkeit von der Zeit werden mit diesem Relais kritische Temperaturen in der Wicklung erfasst.

Ferner muss bei Wechselstrommotoren der Synchronismus überwacht werden, um beim Austrittfallen auftretende hohe Stromstöße in den Wicklungen zu vermeiden. Dazu dienen Relais, welche die Erregung abschalten oder den Motor vom Versorgungssystem abtrennen.

Bei einem Fehler in einer Wicklung muss der Strom so schnell wie möglich abgeschaltet werden. Die Abschaltbedingungen sind dabei weitgehend von der Art des jeweiligen Fehlers abhängig. Fehler in der Isolation zwischen den Phasen oder zwischen einer Phase und Erde werden beispielsweise mit dem sog. Merz-Price-Schutz erfasst.

Grosse Gleichstrommotoren werden in bezug auf Überströme und Fehler im Kühlsystem durch Thermorelais und Temperaturfühler überwacht oder sind mit statischen Überwachungseinrichtungen zur Ermittlung unzulässiger Stromwerte oder kritischer Laufgeschwindigkeiten versehen.

D. Krause

Gleichspannungsmotor mit Thyristorkommutierung durch induzierte EMK

621.313.2

[Nach C. St. J. Lamb: Analysis and testing of a direct-voltage induced-e.m.f.-commutated thyristor motor. Proceedings IEE 117(1970)10, S. 1975...1985]

Die Nachteile der bisherigen Typen der Thyristorkommutierung bei kommutatorlosen Motoren, und zwar die Kommu-

tierung mit Hilfe von Kondensatoren (forced commutation of thyristors) sowie mit Hilfe der Wechselspannung (natural commutation of thyristors) haben bewirkt, dass ein relativ neuer Typ eines kommutatorlosen Motors mit ortsfestem, eine Anzahl von unabhängigen Spulen aufweisendem Anker, konstruiert wurde. Dieser Typ ermöglicht die Steuerung von grossen kommutatorlosen Motoren mit Hilfe von Thyristoren.

Der Motor weist 24 Serienspulenpaare auf, die parallel zu einer Speisequelle geschaltet werden. Diese parallele Schaltungsmöglichkeit bildet den Hauptunterschied zwischen diesem Motor und den bisher üblichen, bei denen entweder alle Spulen oder mindestens der vorwiegende Teil in Serie geschaltet werden. Der Stator des Motors ist nutlos; die Spulen sind so gewickelt, dass sie eine Ringwicklung bilden.

Während den Prüfungen wurde der Motor beim Start und bei niedrigen Geschwindigkeiten mit Wechselspannung, beim normalen Betrieb im Bereich von 600...3550 U./min mit Gleichspannung gespeist, wobei im zweiten Fall die Kommutation der Thyristoren über zugehörige Spulen durch die induzierte EMK erfolgte. Die Belastungs- und Geschwindigkeitsprüfungen sowie der voraussehbare Wirkungsgrad von 81 % bei 2,8 HP und 1800 U./min lassen erkennen, dass dieser Motor in einem grossen Geschwindigkeitsbereich befriedigend arbeiten kann. Durch die Erhöhung des magnetischen Flusses über 1,0 Wb/m² wird der Wirkungsgrad noch erhöht.

Die beschriebene Konstruktion kann mit Vorteil bei Motoren für grosse Ausgangsbelastungen verwendet werden, wobei aber noch weitere Probleme, wie z. B. die Beseitigung der Anker-Rückwirkung u. dgl. zu lösen sind.

S. Zdarek

Elektrische Messtechnik, elektrische Messgeräte Métrologie, appareils de mesure

Elektronisches Flüssigkeitsstand-Messgerät

532.217.3

[Nach K. Lindström u. a.: A New Instrument for the Measurement of Liquid Level. Rev. Sci. Instr. 41(1970)7, S. 1083...1087]

Eine genaue Bestimmung des Flüssigkeitsstandes ist beispielsweise in der chemischen Industrie häufig erforderlich, so dass Bedarf an einem Flüssigkeitsstand-Messgerät besteht, das in seiner Funktionsweise von Temperatur- und Druckverhältnissen sowie von der Dielektrizitätskonstanten und der elektrischen Leitfähigkeit der Flüssigkeiten weitgehend unabhängig ist.