

Paramètres électriques des diélectriques destinés aux condensateurs à moyenne et à haute tension

Autor(en): **Aguet, M. / Blech, P. / Ianovici, M.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **71 (1980)**

Heft 23

PDF erstellt am: **08.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-905319>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Paramètres électriques des diélectriques destinés aux condensateurs à moyenne et à haute tension

Par M. Aguet, Ph. Blech et M. Ianovici

621.319.4:621.317.335.3

Cet article rappelle les contraintes électriques extrêmes auxquelles sont soumis les diélectriques destinés au condensateur à haute tension. L'analyse et la synthèse des relations fondamentales des associations de diélectriques sont présentées dans le but de permettre la recherche d'un optimum technique.

Zuerst wird an die extremen elektrischen Beanspruchungen erinnert, denen das Dielektrikum von Hochspannungskondensatoren unterliegt. Dann werden die grundlegenden Beziehungen in zusammengesetzten Dielektrika aufgezeigt, mit denen eine technisch optimale Lösung gefunden werden kann.

1. Introduction

Les condensateurs de puissance à moyenne et à haute tension sont destinés à des applications très diverses:

- la compensation permanente, à gradin, ou instantanée de l'énergie réactive ($\cos \phi$)
- la compensation des chutes de tension (condensateurs série)
- l'accumulation d'énergie (condensateurs de décharges)
- le filtrage des harmoniques
- la commutation dans les onduleurs
- la stabilisation de la tension en bout de ligne (condensateurs tampons dans l'électronique de puissance en traction à courant continu)
- le lissage de tension côté continu des redresseurs statiques (filtres continus)
- la protection contre les surtensions internes de manœuvre et externes de foudre
- la répartition de tension sur les chambres de coupure de disjoncteurs (condensateurs pilotes)
- l'amélioration des pouvoirs de coupure des disjoncteurs (condensateurs phase-terre)
- la mesure de tension dans les réseaux électriques et les laboratoires au moyen de diviseurs capacitifs
- l'injection de télécommunications à haute fréquence sur les lignes haute tension par circuit accordé à fréquence élevée

Pour remplir toutes ces fonctions, les condensateurs sont développés selon un concept de base (chap. 2 à 4), et des dispositions particulières sont prises de cas en cas pour des applications précises. Citons par exemple les mesures prises pour diminuer l'inductivité parasite due aux connexions de bobines, de sortie et de bornes de traversées (qui doit être inférieure à quelques nH), dans les applications en régime de décharge et dans la protection contre les surtensions.

2. Paramètres électriques des isolations de condensateurs

Les paramètres de dimensionnement des isolations de condensateurs en régime assigné (à fréquence industrielle) à l'exclusion des comportements en régime temporaire (surtensions internes temporaires) et transitoire (surtensions internes de manœuvre et externes de foudre) sont essentiellement [1]:

- la permittivité relative ϵ_r (-)
- la rigidité diélectrique E_d (V/m)
- le facteur de pertes diélectriques $\text{tg} \delta$ (-)
- le taux de décharges partielles

3. Dimensionnement des condensateurs

3.1 Puissance réactive, capacité et volume diélectrique

La puissance réactive d'un condensateur en régime sinusoïdal est donnée par l'équation

$$P_q = \omega C U^2 \text{ var} \quad (1)$$

La capacité d'une bobine de condensateur est donnée par l'équation

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot S/d \quad (\text{F}) \quad (2)$$

où:

- ω pulsation du réseau d'alimentation (s^{-1})
- C capacité du condensateur (F)
- U tension efficace aux bornes du condensateur (V)
- ϵ_0 permittivité absolue du vide: $8,854 \cdot 10^{-12}$ (As/Vm)
- ϵ_r permittivité relative du diélectrique (-)
- S surface active d'une armature de condensateur (m^2)
- d distance entre armatures du condensateur (10-100 μm)

En combinant ces équation et en définissant le volume diélectrique actif $V = S \cdot d$ (m^3) et le champ électrique moyen dans le diélectrique actif $E_m = U/d$ (V/m) le volume diélectrique vaut [2]

$$V = \frac{C U^2}{\epsilon_0 \epsilon_r E_m^2} \quad (\text{m}^3) \quad (3)$$

Le volume diélectrique nécessaire par unité de puissance réactive vaut

$$V_q = \frac{1}{\omega \epsilon_0 \epsilon_r E_m^2} \quad (\text{m}^3/\text{var}) \quad (4)$$

3.2 Champ électrique maximum

La notion de champ électrique moyen n'est pas suffisante pour mettre en évidence les problèmes liés à l'apparition des décharges partielles (ionisation). Il est nécessaire d'étudier le gradient maximum (E_{max}) qui apparaît aux bords des armatures (électrodes). Ce dernier est fonction de la position relative des armatures, de l'épaisseur des armatures e et de la distance entre armatures d . Il a été montré [2] que dans le cas d'un diélectrique homogène et pour un rapport $< 0,2$ on obtient

$$E_{\text{max}} = E_m d/2e \quad (\text{V/m}) \quad (5)$$

Exemple numérique: si la distance entre armatures est $d = 72 \mu\text{m}$ et l'épaisseur $e = 5,5 \mu\text{m}$, $E_{\text{max}} \approx 6,5 E_m$.

3.3 Analyse de sensibilité volumique

L'équation (3) montre comment le volume diélectrique d'un condensateur dépend de la capacité C , de la tension efficace appliquée U , du champ électrique moyen dans l'isolant E_m et de la permittivité relative ϵ_r . Elle permet de voir que pour diminuer le volume diélectrique, donc les prix de revient des matières et de la mise en œuvre d'un condensateur, on a tout in-

térêt à utiliser des diélectriques supportant en régime assigné et sur la durée de vie prévue un champ électrique moyen le plus élevé possible ($E_m = 20...50 \text{ V/m}$). On a également intérêt, mais à un moindre niveau, à recourir à des diélectriques dont la permittivité est élevée ($\epsilon_r = 2...6$).

3.6 Pertes électriques

En ce qui concerne les pertes électriques actives, elles sont dues soit au phénomène de conduction dans le diélectrique à 50 Hz, soit au phénomène d'hystérèse ou de relaxation dû au retard d'orientation des dipôles électriques, soit encore aux décharges partielles qui peuvent apparaître dans les inclusions gazeuses ou aux résistances des fils d'amenées, des contacts et des électrodes.

Les deux premiers éléments dépendent des caractéristiques propres aux matériaux utilisés, les deux derniers de la technologie de mise en forme du condensateur. L'ensemble de ces éléments provoquant les pertes électriques actives est mis en évidence par le facteur de pertes diélectriques ($\text{tg} \delta = 0,0003$ à $0,005$ à $1,2 U_n$) et la mesure des décharges partielles (quelques pC à $1,2 U_n$).

Signalons que les trois premiers éléments constituant les pertes sont fonction de la tension aux bornes du condensateur alors que le quatrième élément est fonction du courant traversant le condensateur. Ceci a une grande importance dans le dimensionnement des condensateurs destinés à travailler en régime non sinusoïdal ou d'harmoniques supérieurs, comme dans le cas des filtres de puissance ou en moyenne fréquence.

4. Diélectrique composite

Si l'on se reporte aux paramètres introduits précédemment, on est très vite amené à constater qu'il n'existe aucun diélectrique simple « miracle » qui remplisse toutes les caractéristiques suivantes simultanément (si ce n'est au zéro absolu [$-273 \text{ }^\circ\text{C}$], où l'on obtiendrait l'état de « supradiélectrique » [3]):

- une rigidité diélectrique très élevée,
- un niveau de décharges partielles très bas,
- une permittivité élevée,
- des pertes électriques les plus faibles possibles.

En conséquence on recourt à des associations de diélectriques (isolants solide, liquide et gazeux) formant des isolations composites où chaque élément est chargé d'assurer un rôle particulier. On utilise par exemple des films de polypropylène pour leurs pertes diélectriques faibles ($\text{tg} \delta = 0,0003$). On recourt également à un imprégnant diélectrique très fluide pour combler les espaces et les vacuoles gazeuses du film diélectrique afin d'élever la rigidité diélectrique ainsi que la tension d'apparition des décharges partielles du système diélectrique.

Il est donc nécessaire d'étudier le comportement des caractéristiques électriques des diélectriques composites tant homogènes qu'hétérogènes (imprégnation).

4.1 Répartitions des champs électriques en tension alternative à l'intérieur d'une isolation à deux composants homogènes

Pour calculer cette répartition dans une isolation à deux composants homogènes supposés sans pertes et non ionisés on peut recourir au schéma de la figure 1. Si l'on néglige les pertes diélectriques, donc la conductivité, on est conduit à utiliser un schéma équivalent du diélectrique purement capacitif, ce qui

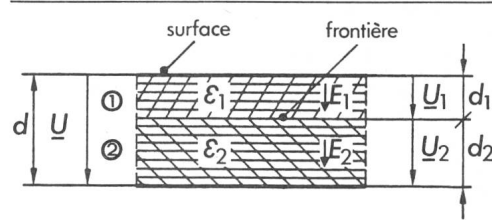


Fig. 1 Schéma équivalent d'une isolation à deux composants homogènes

permet de passer des tensions complexes aux valeurs efficaces des tensions. Comme le milieu est également supposé non ionisé (pas de décharges partielles ni de charges résiduelles) on peut postuler à partir de l'hypothèse de continuité du vecteur déplacement électrique orthogonal à la surface diélectrique, que les vecteurs de déplacement électrique dans les isolants sont égaux:

$$\vec{D} = \vec{D}_1 = \vec{D}_2 \quad (\text{As/m}^2) \quad (6)$$

En tenant compte de l'égalité des charges sur les frontières des diélectriques, on peut écrire

$$CU = C_1 U_1 = C_2 U_2 \text{ resp. } U_1/U_2 = C_2/C_1 \quad (7)$$

En utilisant l'équation (2) et en définissant $\epsilon_1 = \epsilon_0 \cdot \epsilon_{r1}$ on trouve les champs électriques dans chaque isolant:

$$E_1 = \frac{U_1}{d_1} = U \frac{\epsilon_2}{d_1 \epsilon_2 + d_2 \epsilon_1} = \frac{U}{d} \cdot \frac{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}{\frac{d_1}{d} \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1 \right) + 1} \quad \left(\frac{\text{V}}{\text{m}} \right) \quad (8)$$

$$E_2 = \frac{U_2}{d_2} = U \frac{\epsilon_1}{d_1 \epsilon_2 + d_2 \epsilon_1} = \frac{U}{d} \cdot \frac{1}{\frac{d_1}{d} \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1 \right) + 1} \quad \left(\frac{\text{V}}{\text{m}} \right) \quad (9)$$

La représentation graphique de la variation relative des champs électriques E_i , par rapport au champ nominal homogène $E_h = U/d$ est donné à la figure 2.

Pour illustrer le phénomène, prenons l'exemple particulier d'une association de diélectriques homogènes du type solide-gazeux, correspondant par exemple à une mince couche d'air subsistant dans un diélectrique. En admettant pour la permit-

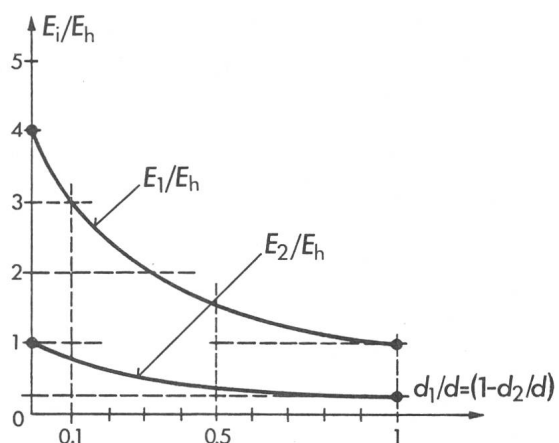


Fig. 2 Variation relative des champs électriques en fonction de l'épaisseur des isolants

$$\epsilon_2/\epsilon_1 = 4$$

tivité relative du gaz $\epsilon_{r1} = 1$ et l'épaisseur $d_1 \rightarrow 0$, pour l'isolant solide $\epsilon_{r2} = 4$ et $d_2 \rightarrow d$, on obtient d'après (8) et (9)

$$E_1 = E_2 \cdot \epsilon_2 / \epsilon_1 = E_2 \cdot \epsilon_{r2} / \epsilon_{r1} \quad (\text{V/m}) \quad (10)$$

Dans l'exemple choisi, on trouve alors $E_1 \approx 4 \cdot E_2$ avec $E_2 \approx U/d$.

La relation (10) est importante en rapport avec les décharges partielles possibles. Il est indispensable d'éviter des lames de gaz dans les matériaux solides isolants et les ensembles isolés, par exemple par une imprégnation sous vide des isolations solides.

4.2 Sollicitation d'une inclusion de forme sphérique

Supposons qu'un diélectrique de permittivité relative ϵ_{r2} contienne une cavité sphérique de permittivité relative ϵ_{r1} (fig. 3). Si l'on fait coïncider le centre de cette sphère l'origine d'un système de coordonnées sphériques, et en supposant que l'axe du champ à l'infini coïncide avec l'axe x on trouve l'expression du potentiel en l'absence de charges:

$$\Delta V = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) = 0 \quad (\text{V/m}^2) \quad (11)$$

On peut montrer qu'une solution particulière du type

$$V = \left(k_1 r + \frac{k_2}{r^2} \right) \cos \theta \quad (\text{V}) \quad (12)$$

où k_1 et k_2 sont des constantes à déterminer, satisfait à l'équation (11). Le potentiel étant a priori différent à l'intérieur et à l'extérieur de la sphère, on obtient un système de deux équations analogues à (12) avec 4 constantes k_{11} , k_{12} , k_{21} et k_{22} qui doivent permettre de satisfaire les 4 conditions aux limites suivantes:

- la valeur du potentiel n'est pas infinie pour $r = 0$,
- la composante tangentielle du champ électrique à la surface de la sphère est continue,
- la composante normale du vecteur de déplacement électrique est continue à la surface de la sphère,
- le champ électrique à l'infini est égal au champ homogène \vec{E}_2 .

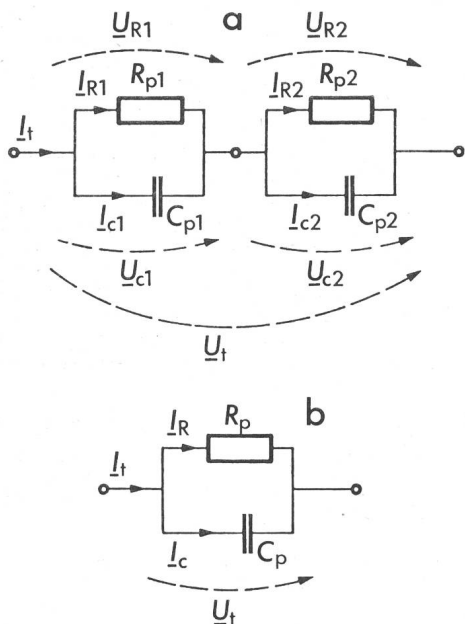


Fig. 3 Inclusion sphérique isolante dans un diélectrique

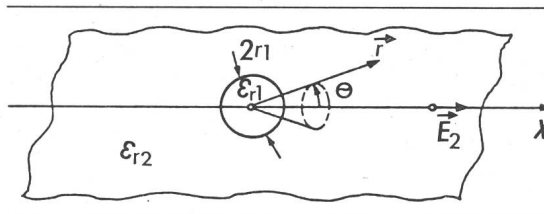


Fig. 4 Isolation inhomogène imprégnée (a) et son schéma équivalent (b)

On obtient finalement pour le potentiel à l'intérieur de la sphère:

$$V_1 = -E_0 \frac{3 \epsilon_{r2}}{2 \epsilon_{r2} + \epsilon_{r1}} r \cos \theta \quad (\text{V/m}) \quad (13)$$

d'où l'on tire

$$E_1 = -\frac{\partial V_1}{\partial x} = E_2 \cdot \frac{3 \epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1} + 2 \epsilon_{r2}} \quad (\text{V/m}) \quad (14)$$

Avec:

E_1 module du champ à l'intérieur de la sphère

E_2 module du champ homogène à l'infini

ϵ_{r1} permittivité relative de la sphère

ϵ_{r2} permittivité relative du matériel contenant la sphère.

En prenant le même cas d'application numérique que dans le paragraphe 4.1 ($\epsilon_{r2} = 4$ et $\epsilon_{r1} = 1$), on trouve $E_1 = 1.33 E_2$.

4.3 Permittivité relative équivalente d'une isolation à deux composants homogènes

Lorsqu'une isolation est composée de deux isolants homogènes, on peut calculer la permittivité relative résultante ϵ_r en faisant les mêmes hypothèses de travail qu'au § 4.1 à partir du schéma de la figure 1. En utilisant les équations 2 et 7 on obtient après quelques transformations

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_{r1} \frac{d}{d_1}}{1 + \frac{\epsilon_{r1} \cdot d_2}{\epsilon_{r2} \cdot d_1}} \quad (15)$$

On constate donc que la permittivité résultante d'une association de diélectrique homogènes est située entre les permittivités supérieure et inférieure.

4.4 Permittivité relative équivalente d'une isolation inhomogène imprégnée

Si l'on prend l'exemple particulier de diélectriques inhomogènes, on peut recourir au passage du schéma de la figure 4a (isolation inhomogène) au schéma de la figure 4b (association de deux isolants homogènes).

En l'absence d'ionisation (équ. 6) et compte tenu du fait que la surface S est constante, la permittivité relative équivalente du diélectrique inhomogène ϵ_r peut être calculée au moyen de l'équation 15.

Exprimons d_1 , d_2 et d en fonction de la porosité p du papier. Si l'on définit la porosité comme:

$$p = 1 - \frac{\gamma_{\text{papier}}}{\gamma_{\text{cellulose}}} \quad (16)$$

où γ est la densité, on a

$$p = d_1/d \quad (17)$$

et la permittivité relative équivalente de l'isolation inhomogène devient :

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_{r1} (1/p)}{1 + \frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}} \left(\frac{1}{p} - 1 \right)} \quad (18)$$

Un Exemple: avec une permittivité relative de l'huile isolante $\epsilon_{r1} = 2,2$ et une permittivité relative de la cellulose $\epsilon_{r2} = 6$, avec γ papier 1,2 et γ cellulose 1,6, on obtient une porosité $p = 0,25$ et $\epsilon_r = 4,2$

4.6 Facteur de pertes diélectriques équivalent, en tension alternative, d'une isolation à deux composants

Dans le cas de deux composants homogènes distincts les schémas équivalents des deux diélectriques sont connectés en série. En choisissant le schéma parallèle pour chaque isolant on obtient le schéma général de la figure 5a. Ce schéma doit être remplacé par un seul schéma parallèle (fig. 5b) qui représente l'isolation équivalente. Pour ce schéma parallèle la tangente de l'angle de pertes diélectriques de chaque composant est donnée par :

$$\text{tg } \delta_i = 1/\omega R_{pi} C_{pi} \quad (i = 1,2) \quad (-) \quad (19)$$

Les calculs présentés dans l'annexe I montrent que le facteur de pertes diélectriques équivalent de l'isolation à deux composants homogènes est égal à

$$\text{tg } \delta_e = \frac{\epsilon_{r1} d_2 \text{tg } \delta_2 + \epsilon_{r2} d_1 \text{tg } \delta_1}{\epsilon_{r1} d_2 + \epsilon_{r2} d_1} \quad (-) \quad (20)$$

où ϵ_{r1} , ϵ_{r2} sont les permittivités relatives et d_1 , d_2 les épaisseurs des deux diélectriques.

On voit par l'équation (20) que si l'un des composants, par exemple le premier, a une forte permittivité relative $\epsilon_{r1} \gg \epsilon_{r2}$, les pertes du condensateur sont surtout conditionnées par le facteur de pertes du second composant et vice-versa.

Une isolation inhomogène à deux composants est une association de deux diélectriques l'un liquide et l'autre solide le premier constituant un imprégnant pour le second. Dans ce cas d_1 étant l'épaisseur du diélectrique liquide et d l'épaisseur totale de l'isolation on définit la porosité du composant solide d'après la relation (17). A l'aide de cette définition la formule (20) du facteur de pertes équivalent devient pour une isolation inhomogène :

$$\text{tg } \delta_2 = \frac{\text{tg } \delta_1}{1 + \frac{1-p}{p} \cdot \frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}}} + \frac{\text{tg } \delta_2}{1 + \frac{p}{1-p} \cdot \frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}}} \quad (-) \quad (21)$$

Le même commentaire que sur la formule (20) peut être fait, c'est-à-dire que si l'imprégnant a une forte permittivité relative ϵ_{r1} les pertes du condensateur sont surtout conditionnées par le facteur de pertes du diélectrique sec $\text{tg } \delta_2$, alors que si l'imprégnant a une faible permittivité relative, la tangente de pertes de celui-ci $\text{tg } \delta_1$ devient prépondérante.

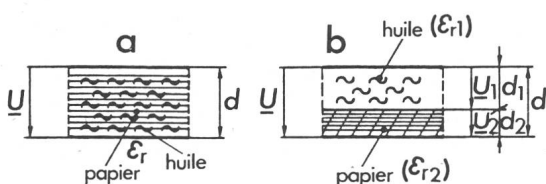


Fig. 5 Schéma équivalent d'une isolation à deux composants homogènes avec pertes (a) et schéma en résultant (b)

5. Conclusion

Le diélectrique destiné aux condensateurs doit réunir simultanément des caractéristiques poussées en tenue diélectrique et aux décharges partielles, en permittivité et en pertes. Aucun diélectrique simple ne satisfait à ces exigences. En conséquence on recourt à des associations de diélectriques dont chacun participe à une part des caractéristiques à satisfaire. En résumé, les équations 8, 9, 15, 20 contiennent les paramètres essentiels d'association de deux diélectriques homogènes, les équations 19, 21 ceux de deux diélectriques inhomogènes (imprégnés). Si l'on est en présence de plus de deux diélectriques il est toujours possible par des combinaisons successives de se ramener au cas de deux diélectriques.

Les paramètres de dimensionnement électrique exposés permettent, en complément aux propriétés physiques et chimiques des matériaux diélectriques, de trouver un optimum technico-économique. Des tests de durée accélérés permettent de comparer les nouveaux diélectriques entre eux et de les comparer avec les diélectriques classiques [4].

Annexe 1:

Calcul du facteur de pertes équivalent d'une isolation homogène à deux composants

Les relations de Kirchhoff en complexe relatives au schéma équivalent de la figure 5a permettent d'écrire

$$\underline{I}_t = \underline{I}_{R1} + \underline{I}_{c1} \quad (A) \quad (I.1)$$

$$\underline{I}_t = \underline{I}_{R2} + \underline{I}_{c2} \quad (A) \quad (I.2)$$

$$\underline{U}_{R1} = R_{p1} \underline{I}_{R1} \quad (V) \quad (I.3)$$

$$\underline{I}_{c1} = j\omega C_{p1} \underline{U}_{c1} \quad (A) \quad (I.4)$$

$$\underline{U}_{R2} = R_{p2} \underline{I}_{R2} \quad (V) \quad (I.5)$$

$$\underline{I}_{c2} = j\omega C_{p2} \underline{U}_{c2} \quad (A) \quad (I.6)$$

$$\underline{U}_t = \underline{U}_{R1} + \underline{U}_{R2} \quad (V) \quad (I.7)$$

tandis que pour le schéma équivalent de la figure 5b on a

$$\underline{U}_t = \underline{I}_R \cdot R_p \quad (V) \quad (I.8)$$

$$\underline{I}_c = j\omega C_p \underline{U}_t \quad (A) \quad (I.9)$$

$$\underline{I}_t = \underline{I}_R + \underline{I}_c \quad (A) \quad (I.10)$$

En introduisant les équations (I.8) et (I.9) dans (I.10), les équations (I.3) et (I.4) dans (I.1) et respectivement (I.5) et (I.6) dans (I.2) il vient :

$$\underline{I}_t = \underline{U}_t \left(\frac{1}{R_p} + j\omega C_p \right) \quad (A) \quad (I.11)$$

$$\underline{I}_t = \underline{U}_{R1} \left(\frac{1}{R_{p1}} + j\omega C_{p1} \right) \quad (A) \quad (I.12)$$

$$\underline{I}_t = \underline{U}_{R2} \left(\frac{1}{R_{p2}} + j\omega C_{p2} \right) \quad (A) \quad (I.13)$$

En utilisant (I.7), (I.11), (I.12) et (I.13) on peut alors trouver

$$\frac{1}{R_p} + j\omega C_p = \frac{(1/R_{p1}) + j\omega C_{p1}}{1 + \frac{(1/R_{p1}) + j\omega C_{p1}}{(1/R_{p2}) + j\omega C_{p2}}} \quad (S) \quad (I.14)$$

En rendant réel le dénominateur et en séparant les parties réelle et imaginaire, il vient :

$$\frac{1}{R_p} = \frac{[(1/R_{p1} R_{p2}) - \omega^2 C_{p1} C_{p2}] [(1/R_{p1}) + (1/R_{p2})] + \omega^2 (C_{p1} + C_{p2}) [(C_{p1}/R_{p2}) + (C_{p2}/R_{p1})]}{[(1/R_{p1}) + (1/R_{p2})]^2 - \omega^2 (C_{p1} + C_{p2})^2} \quad (S) \quad (I.15)$$

$$C_p = \frac{[(1/R_{p1}) + (1/R_{p2})] [(C_{p1}/R_{p2}) + (C_{p2}/R_{p1})] - (C_{p1} + C_{p2}) [(1/R_{p1} R_{p2}) - \omega^2 C_{p1} C_{p2}]}{[(1/R_{p1}) + (1/R_{p2})]^2 - \omega^2 (C_{p1} + C_{p2})^2} \quad (F) \quad (I.16)$$

En introduisant la relation (19) qui donne la valeur du facteur de pertes pour les deux correspondants $\text{tg } \delta_i$ avec $i = 1, 2$, en arrangeant et en négligeant les termes de deuxième ordre on trouve finalement la formule (20).

Bibliographie

- [1] *J.C. Anderson*: Diélectriques. Paris, Dunod, 1966.
- [2] *J. Dormont*: Technique et construction des condensateurs statiques. Bull. Soc. Franç. Electr. Serie 7, 2(1952)9, p. 492...500.
- [3] *S. Goudet*: Traité d'électricité. Tome III: L'électricité et la matière. Paris, Masson, 1975.
- [4] *V. Mehta*: Les condensateurs. Paris, Dunod, 1971.

Adresse des auteurs

Michel Aguet, Ingénieur EPFL-SIA, Chargé de cours EPFL; *Philippe Blech*, Ingénieur EPFL, Laboratoire à Haute Tension et à Haute Puissance EPFL; *Dr. Mircea Ianovici*, 1^{er} assistant, Chaire d'Installations Electriques de l'EPFL; 16, chemin de Bellerive, 1007 Lausanne.