Détermination des densités de charge d'espace dans un câble haute tension à forte épaisseur d'isolant par la méthode de l'onde thermique

A. Toureille, A. Sabir, J.P. Reboul, J. Berdala, P. Merle

► To cite this version:

A. Toureille, A. Sabir, J.P. Reboul, J. Berdala, P. Merle. Détermination des densités de charge d'espace dans un câble haute tension à forte épaisseur d'isolant par la méthode de l'onde thermique. *Revue de Physique Appliquée*, 1990, 25 (4), pp.405-408. 10.1051/rphysap:01990002504040500 . jpa-00246199

HAL Id: jpa-00246199

<https://hal.science/jpa-00246199>

Submitted on 1 Jan 1990

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Classification

Physics Abstracts

61.40K — 77.50 — 72.20J — 66.70

Détermination des densités de charge d'espace dans un câble haute tension à forte épaisseur d'isolant par la méthode de l'onde thermique

A. Toureille ⁽¹⁾, A. Sabir ⁽¹⁾, J. P. Reboul ⁽¹⁾, J. Berdala ⁽²⁾ et P. Merle ⁽¹⁾⁽¹⁾ Laboratoire d'Electrotechnique de Montpellier, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, place E. Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 5, France⁽²⁾ Tréficâble-Pirelli, 1 rue des usines, 94410 Saint-Maurice, France

(Reçu le 19 décembre 1989, révisé le 8 janvier 1990, accepté le 19 janvier 1990)

Résumé. — Pour la première fois, les densités de charge d'espace ont été mesurées dans un câble haute tension à forte épaisseur d'isolant en utilisant la méthode de l'onde thermique.

Abstract. — For the first time, the space charge densities have been measured in a thick-insulated high voltage cable by using the thermal step technique.

Introduction.

La présence de charges d'espace dans l'isolant des câbles haute tension pose un réel problème de fiabilité. Jusqu'à ce jour, aucune méthode ne permettait la mesure et la localisation directe de ces charges dans un câble à forte épaisseur d'isolant. Notre Laboratoire qui s'est spécialisé dans ce domaine, est capable aujourd'hui d'effectuer ce genre d'investigation.

En effet, dans un travail précédent [1], nous avons indiqué le principe de la méthode de l'onde thermique pour la détermination des charges d'espace et des champs résiduels dans les isolants épais. Par la suite, nous avons appliqué cette méthode à un câble ayant une épaisseur d'isolant de 7 mm et nous avons donné pour la première fois les distributions de charge d'espace qui subsistent à l'intérieur d'un câble haute tension [2]. Aujourd'hui, après avoir perfectionné l'appareillage expérimental et la technique de traitement numérique des données, nous venons de déterminer les densités de charge d'espace dans un câble de 90 kV ayant une épaisseur d'isolant de 16 mm, ce qui à notre connaissance n'a jamais été fait.

La méthode de l'onde thermique et les autres méthodes.

Dans le cas des isolants ayant une structure plane, comme les feuilles ou les plaques, les premières

tentatives concernant la localisation des charges d'espace sont dues à Collins [3]. Sa méthode consistait à appliquer une impulsion de lumière sur la face métallisée d'un échantillon, de façon à obtenir une courte impulsion de chaleur. La propagation de cette impulsion de chaleur déplaçait la charge d'espace et entraînait des variations de potentiel entre les faces de « l'électret ». Le calcul des densités de charge d'espace à partir des variations de potentiel conduit, dans ce cas là, à de grandes imprécisions [4].

D'autres méthodes, basées sur un principe analogue et utilisant la propagation d'une onde de compression, ont été développées par la suite. Plusieurs variantes ont été proposées. Elles se distinguent surtout par la façon de produire l'onde de compression. Initialement, on a utilisé un tube à onde de choc [5], puis plus tard, des impulsions laser [6-8]. On s'est servi également des impulsions laser pour produire des échauffements de courte durée [9] ou des échauffements modulés [10].

A la différence des méthodes précédentes, la méthode de l'onde thermique, comme nous l'avons déjà décrit [1], consiste à appliquer *un échelon de température* ΔT_0 (et non *une impulsion de chaleur*) sur une des faces de l'éprouvette, pendant que l'autre face est maintenue à la température constante T_0 . La diffusion de la chaleur dans le matériau s'accompagne d'une dilatation non uniforme qui va faire « remuer » de façon différente, dans le temps et

dans l'espace, les charges contenues dans l'isolant, modifiant ainsi l'équilibre des charges images et donnant lieu à un courant dans le circuit extérieur. Ce courant peut conserver une valeur significative pendant environ 12 s pour un échelon de température de 30 °C appliqué à un échantillon de polyéthylène de 2 mm d'épaisseur. Ce temps passe à 6 min pour le câble étudié et pour le même échelon de température. La précision de cette méthode n'est donc pas limitée par le temps de réponse des appareils ou par des problèmes de largeur et de déformation des impulsions. Par ailleurs, les mesures étant effectuées entre - 10 °C et + 20 °C, les éprouvettes ne sont pas soumises à des échauffements incontrôlés ou excessifs qui risquent de les décharger ou de les détériorer.

Dans la méthode de l'onde thermique, le courant qui apparaît dans le circuit extérieur est donné par une équation intégrale de la forme :

$$I(t) = \int_0^L \rho(x) \cdot f(x, t) \cdot dx.$$

L est l'épaisseur de l'isolant ; $\rho(x)$ est l'inconnue ; $f(x, t)$ est une fonction faisant intervenir la vitesse de déplacement de l'onde thermique [11].

La température doit vérifier l'équation de la chaleur. Dans le cas d'une structure plane, la solution est donnée par une série de Fourier. Nous utilisons donc aussi une décomposition en série de Fourier pour déconvoluer l'équation intégrale.

La méthode de l'onde thermique appliquée à un câble.

Dans le cas d'un câble haute tension ayant une structure cylindrique, la méthode de l'onde thermique consiste à appliquer un échelon de température ΔT_0 sur la surface du conducteur externe, alors que le câble est initialement à la température T_0 .

Dans la pratique, on refroidit le câble à $T_0 = -10$ °C, puis on fait circuler un fluide à 20 °C, dans une jaquette enveloppant le câble.

De la même façon que pour une plaque, l'onde de dilatation va faire remuer les charges d'espace et modifier les charges images induites sur les conducteurs interne et externe.

Supposons une charge q contenue dans une couche cylindrique d'isolant de rayon r , d'épaisseur dr et de longueur L . Les charges images induites sur les conducteurs interne et externe sont respectivement :

$$q_i = -q \cdot A/D \text{ et } q_e = -q \cdot B/D$$

avec

$$A = \int_r^{r_e} du/u\epsilon, \quad B = \int_{r_i}^r du/u\epsilon, \quad D = \int_{r_i}^{r_e} du/u\epsilon$$

où r_i et r_e sont les rayons interne et externe de l'isolant ; ϵ la permittivité qui dépend de la tempéra-

ture ; u , la variable d'espace qui dépend aussi de la température.

La propagation de l'onde de dilatation va modifier les valeurs de q_i et de q_e et provoquer un courant dans le circuit extérieur :

$$i = -dq_i/dt.$$

Dans le cas général d'une distribution de charge d'espace de densité volumique $\rho(r)$, le courant dans le circuit extérieur est donné, au premier ordre, par une équation intégrale de la forme :

$$I(t) = \int_{r_i}^{r_e} \rho(r) \cdot g(r, t) \cdot dr$$

avec

$$g(r, t) = \alpha 2 \pi r L ((E/F) - G \cdot H/F^2)$$

$$E = \int_r^{r_e} (\partial T/\partial t)(du_0/u_0), \quad F = \text{Log}(r_e/r_i)$$

$$G = \text{Log}(r_e/r), \quad H = \int_{r_i}^{r_e} (\partial T/\partial t)(du_0/u_0)$$

α , la différence entre le coefficient de dilatation linéaire et le coefficient de variation de la permittivité avec la température.

u_0 , la variable d'espace (avant la variation de la température).

La température T doit vérifier l'équation de la chaleur en géométrie cylindrique :

$$\partial^2 T/\partial u^2 + (1/u) \partial T/\partial u = w \partial T/\partial t$$

où $w = \mu C/\lambda$, μ étant la masse volumique, C la chaleur massique et λ la conductivité thermique.

Les conditions aux limites théoriques qui correspondent à la réalité sont les suivantes :

Pour $r = R_i$, $T = T_0$ quel que soit t (source froide).

Pour $r = R_e$, $T = T_0$ pour $t < 0$ et $T = T_0 + \Delta T_0$ pour $t > 0$ (source chaude).

R_i et R_e sont des rayons équivalents correspondant à la position théorique des sources froide et chaude ; ils sont différents des rayons r_i et r_e de l'isolant. Leur détermination nécessite un étalonnage préliminaire de la cellule qui permet, en même temps, de calculer α et w .

L'équation de la chaleur, dans le cas d'une géométrie cylindrique, admet pour solution une série de Bessel-Fourier. Donc, pour déconvoluer l'équation intégrale, nous avons utilisé aussi une décomposition en série de Bessel-Fourier et nous avons élaboré un logiciel en conséquence.

Les détails de ces calculs seront donnés dans une prochaine publication. La validité de la méthode et la précision des résultats sont confirmées par le calcul en sens inverse du courant « théorique » ou « simulé » que donnerait une distribution de charge

d'espace identique à celle trouvée. Cette simulation a montré une concordance parfaite entre le courant simulé et le courant expérimental.

Résultats.

Rappelons que la méthode consiste à appliquer un échelon de température à la périphérie du câble et à mesurer le courant $I(t)$ qui en résulte, au moyen d'un picoampèremètre à faible bruit.

La figure 1 donne la densité de charge d'espace $\rho(r)$ dans l'isolant, obtenue par traitement numérique de $I(t)$, en prenant 30 termes dans la série de Bessel-Fourier.

Les valeurs de r varient de $r_i = 24,5$ mm à $r_c = 40,5$ mm.

La mesure a été faite sur un câble de 90 kV isolé au polyéthylène réticulé chimiquement (PRC), fourni par Tréficable-Pirelli, et que nous avons préalablement polarisé.

Les conditions de polarisation que nous avons choisies sont les suivantes :

- Température 70 °C ;
- Tension appliquée + 65 kilovolts continus sur le conducteur interne ;
- Temps de polarisation 90 heures ;
- Refroidissement sous tension jusqu'à la température ambiante ;
- Temps de conservation en court-circuit avant la mesure $t_{cc} = 2$ jours.

Fig. 1. — Densité de charge d'espace dans l'isolant en fonction de r ($t_{cc} = 2$ jours).

[Space charge density in the insulating material as a function of r ($t_{cc} = 2$ days).]

La figure 2 donne les densités de charge d'espace qui restent dans le câble au bout de 10 jours ($t_{cc} = 10$ jours). Les autres conditions sont inchangées.

On constate une atténuation et une redistribution de la charge d'espace avec le temps.

Fig. 2. — Densité de charge d'espace dans l'isolant en fonction de r ($t_{cc} = 10$ jours).

[Space charge density in the insulating material as a function of r ($t_{cc} = 10$ days).]

Conclusion.

La méthode de l'onde thermique permet donc de suivre en vraie grandeur et sur modèle réel, l'évolution, au cours du temps, des charges d'espace dans les câbles haute tension. Elle n'est pas limitée par l'épaisseur de l'isolant et son application peut être envisagée sans restriction à des câbles de dimensions supérieures.

Cette méthode permettra d'étudier la qualité d'un câble et de mettre en évidence les principaux paramètres qui régissent l'installation de la charge d'espace.

Elle pourra ainsi contribuer à l'optimisation des procédés de fabrication, des structures et des épaisseurs d'isolant.

Enfin, la simplicité de sa mise en œuvre rend son utilisation tout à fait envisageable pour du contrôle de fabrication et éventuellement pour du contrôle sur site.

Bibliographie

- [1] TOUREILLE A., REBOUL J. P., Communication 6th Symp. on Electrets (ISE 6) Oxford, septembre 1988.
- [2] TOUREILLE A., REBOUL J. P., SIMON C., Communication Conf. Intern. Grands Réseaux Electr. à H.T. (CIGRE), groupe 21, Paris, septembre 1988.
- [3] COLLINS R. E., *Appl. Phys. Lett.* **26** (1975) 675.
- [4] VON SEGGERN H., *Appl. Phys. Lett.* **33** (1978) 134.
- [5] LAURENCEAU P., BALL J., DREYFUS G., LEWINER J., *C. R. B* **283** (1976) 135.
- [6] ROSNO A. G., GROMOV V. V., *Pis'ma V Zh T Ph (USSR)* **5** (1979) 648.
- [7] ALQUIE C., DREYFUS G., LEWINER J., *Phys. Rev. Lett.* **47** (1981) 1483.
- [8] SESSLER G. M., WEST J. E., GERHARD R., *Polym. Bull.* **6** (1981) 109.
- [9] DE REGGI A. S., GUTTMAN C. M., MOPSIK F. I., DAVIS G. T., BROADHURST M. G., *Phys. Rev. Lett.* **40** (1978) 413.
- [10] LANG S. B., DAS-GUPTA D. K., *Ferroelectrics* **60** (1984) 23.
- [11] TOUREILLE A., Communication, Jicable 87, Session B1 (câbles à courant continu) Versailles, septembre 1987, p. 98.