

Effet Maxwell-Wagner dans des multicouches: mesure et modèle de la charge d'interface

Thi Thu Nga VU^{1,2}, Gilbert TEYSSÉDRE¹, Sèverine LE ROY¹, Christian LAURENT¹

¹Laplace, Université de Toulouse et CNRS; ²Electric Power University, Hanoi, Vietnam

RESUME –Avec l'expansion des technologies HVDC, il devient nécessaire d'étudier la conduction des isolants non plus seulement pour la compréhension des phénomènes disruptifs, mais également pour prédire la distribution des contraintes. Dans ce travail, l'effet Maxwell-Wagner dans des associations d'isolants est revisité, en considérant d'une part un modèle avec une conductivité non linéaire en champ, et des mesures de charge d'espace donnant un accès direct à cette charge d'interface.

Mots-clés—Charge d'interface – Effet Maxwell-Wagner – Charge d'espace – HVDC – XLPE

1. INTRODUCTION

Le développement de technologies haute tension continue – HVDC- amène un ensemble de problématiques liées au dimensionnement et à la caractérisation comportementale des isolants. Alors que sous contrainte AC, les distributions de champ sont décrites essentiellement par la permittivité des matériaux, sous contrainte DC, cette distribution est résistive. Or, la permittivité est peu sensible à la température ou au champ électrique, de sorte que la contrainte est relativement bien maîtrisée. Il n'en est pas de même de la résistivité des isolants, qui présente une dépendance en température très importante, de même qu'un caractère non linéaire en champ pour des contraintes d'usage. La coexistence de matériaux de différente nature, entre autres dans les accessoires de câbles, couplée à ces effets non linéaires et thermiques, complexifie la prédiction des distributions de champ en service. Pour pallier ces difficultés, des techniques de mesure spécifiques donnent désormais accès aux distributions de densité de charges et de champ en volume de l'isolant et s'avèrent pertinentes pour le dimensionnement des isolations. Dans ce travail, nous présentons une étude sur les phénomènes de charge d'interface entre deux natures d'isolants: La charge d'interface, régie par les équations de Maxwell, est calculée dans un domaine non linéaire de champ à partir de données expérimentales sur la conductivité. Des mesures de charges d'espace sont réalisées et comparées au modèle.

2. SYSTEME ANALYSE

Le système étudié est schématisé sur la Fig. 1. Il est constitué d'un assemblage d'un isolant de câble en polyéthylène réticulé (XLPE) associé à un matériau de raccordement (EPDM), avec des épaisseurs $d_1 = d_2 = 250\mu\text{m}$. Les données d'entrée sont des mesures de conductivité réalisées pour chacun des matériaux en fonction de la température (20 à 90°C) et du champ (2 à 30kV/mm) [1] et ajustées selon une loi du type:

$$\sigma(T, E) = A \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{k_B T}\right) \cdot \sinh(B(T) \cdot E) \cdot E^\alpha$$

où E est le champ, T la température, k_B la constante de Boltzmann et les autres symboles sont des coefficients.

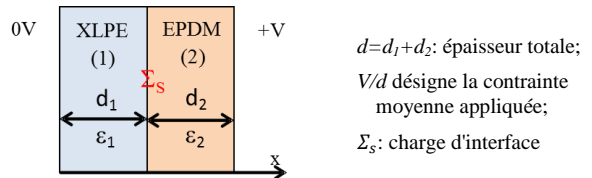


Fig. 1 Système étudié et conventions adoptées.

D'après la théorie de Maxwell-Wagner, la distribution de champ, en stationnaire, se déduit des équations suivantes:

• Conservation du courant: $\sigma_1(E_1) \cdot E_1 = \sigma_2(E_2) \cdot E_2$ (2)

• Continuité sur D: $\epsilon_1 \cdot E_1 = \epsilon_2 \cdot E_2 + \Sigma_s$ (3)

• Condition aux limites: $d_1 \cdot E_1 + d_2 \cdot E_2 = -V$ (4)

où ϵ_i est la permittivité, σ_i la conductivité, Σ_s la charge d'interface. D'après la Fig. 2, la conductivité est maximale dans l'un ou l'autre matériau, selon la température. La température de croisement (40°C sous 10kV/mm) est dépendante du champ. Dans ces conditions, la charge d'interface, avec les conventions de la Fig. 1, est positive ou négative. Les équations la régissant en conditions instationnaires sont [2]:

$$\Sigma_s(t) = \frac{\epsilon_1 \cdot \sigma_2 - \epsilon_2 \cdot \sigma_1}{\sigma_2 \cdot d_1 + \sigma_1 \cdot d_2} \cdot V (1 - e^{-t/\tau_{MW}}) \quad (5)$$

avec
$$\tau_{MW} = \frac{\epsilon_2 \cdot d_1 + \epsilon_1 \cdot d_2}{\sigma_2 \cdot d_1 + \sigma_1 \cdot d_2} \quad (6)$$

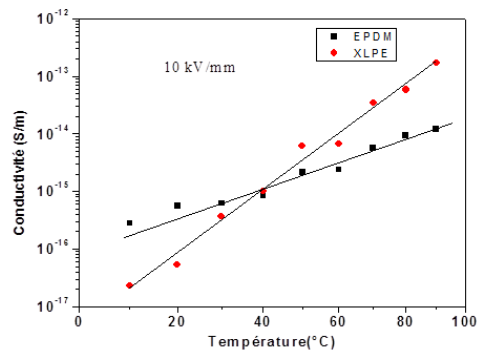


Fig. 2 Conductivité fonction de la température pour le XLPE et l'EPDM.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Simulation de la charge d'interface

Du fait du caractère non-linéaire de la conductivité, les Eq. 5-6 ne peuvent être appliquées directement: la constante de temps varie en même temps que le champ se redistribue dans l'isolant. Aussi, une résolution numérique a été appliquée. La Fig. 3 montre un exemple de dépendance temporelle de la charge d'interface obtenue pour une température de 40°C. On remarque notamment que le temps d'établissement d'un régime stationnaire varie de 27h à 2h lorsque la contrainte appliquée (V/d) varie de 2 à 30kV/mm. Le signe de la charge est positif à faible contrainte et négatif ensuite, dû au fait que le champ est reporté du XLPE vers l'EPDM en augmentant la contrainte.

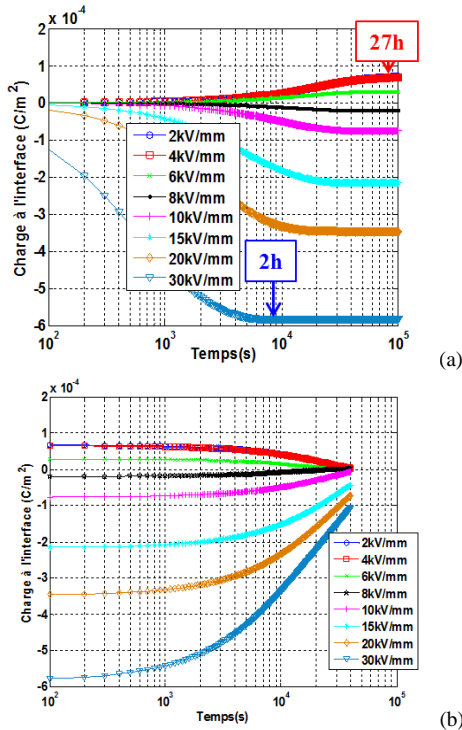


Fig.3 Etablissement (a) et relaxation (b) de la charge d'interface à 40°C selon le modèle pour différentes contraintes V/d.

3.2. Mesure directe de la charge d'interface

Une mesure directe de la charge d'interface a été réalisée par mesure de charge d'espace au moyen de la méthode PEA – Pulsed Electro-Acoustic, qui offre l'avantage de donner des profils de champ/charge sous contrainte ou en court-circuit avec une bonne dynamique temporelle (1 profil/100s pour des cycles de polarisation d'1h/1h). Les détails des mesures sont donnés par ailleurs [1] ainsi que des cartographies spatiotemporelles de charges. Des exemples de profils sont donnés Fig.4 après 1h de polarisation par niveau de contrainte.

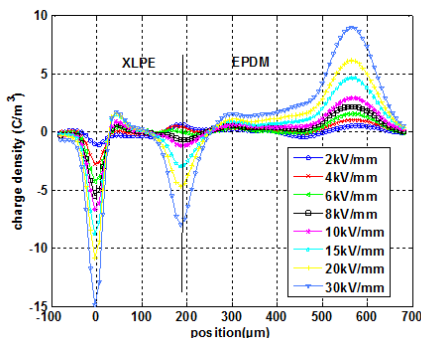


Fig.4 Profils de charges d'espace à 50°C pour différentes contraintes (V/d) appliquées pendant 1h.

On remarque notamment que le signe de la charge à l'interface passe de positif à négatif en augmentant la contrainte. De plus des charges sont décelées en volume de l'isolant en particulier sous champ élevé. La Fig. 5 illustre les résultats obtenus sur les transitoires de charge d'interface en intégrant les profils de densité de charges d'espace expérimentaux sur une région d'environ 100µm autour de l'interface. Même s'il n'a pas été possible de poursuivre l'analyse sur des temps de charge/décharge aussi longs que dans le modèle, plusieurs observations peuvent être relevées, comme la tendance à une charge d'interface positive à faible champ, une cinétique d'établissement de la charge plus rapide en augmentant la contrainte et une cinétique de relaxation plus lente que l'établissement de la charge.

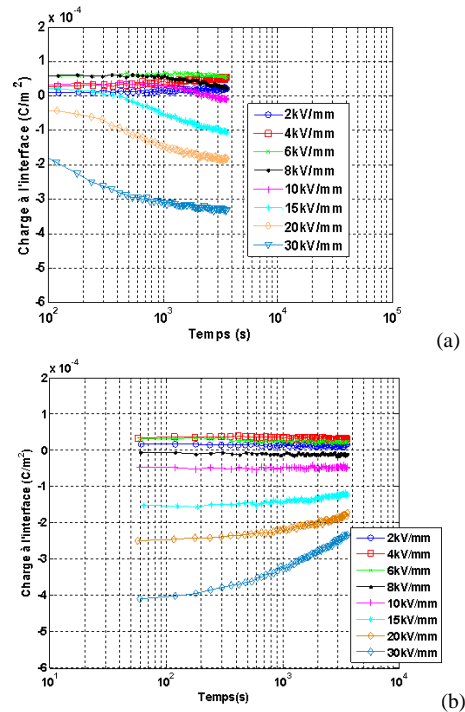


Fig.5 Etablissement (a) et relaxation (b) de la charge d'interface à 40°C d'après les mesures de charge d'espace pour différentes contraintes V/d.

Les écarts au modèle ont plusieurs origines; d'une part le fait que le modèle s'appuie sur des données de conduction obtenues sur des échantillons isolés; ensuite nous avons supposé que seul l'effet Maxwell-Wagner contribue au contrôle de la distribution du champ, ce qui n'est pas le cas compte tenu du fait que ces isolants font apparaître des phénomènes d'accumulation de charges. Des résultats de distribution de champ et une analyse temporelle plus précise sont présentés et analysés dans la suite de ce travail.

4. CONCLUSIONS

Nous avons montré que des mesures de charge d'espace permettent d'estimer la charge d'interface produite par effet Maxwell-Wagner entre deux diélectriques de nature différente. Si les quantités mesurées sont globalement en adéquation avec celles prédites par un modèle de conduction, des écarts sont observés liés à l'accumulation de charges au sein des isolants.

5. REFERENCES

- [1] T.T.N. Vu, G. Teysse, B. Vissouvanadin, S. Le Roy, C. Laurent, "Correlating Conductivity and Space Charge Measurements in Multi-dielectrics under Various Electrical and Thermal Stresses" IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 22, pp. 117-127, 2015
- [2] P.H.F. Morshuis, R. Bodega, D. Fabiani, G.C. Montanari, L.A. Dissado, J.J. Smit, "Dielectric Interfaces in DC Constructions: Space Charge and Polarization Phenomena", Proc. IEEE-ICSD, pp. 450-453, 2007