

CALCUL DU CHAMP MAGNÉTIQUE D'UNE LIGNE ÉLECTRIQUE AÉRIENNE À HAUTE TENSION

Saul PASARE

*Université de Craiova, Faculté d'électrotechnique
Blv. Decebal 107, 200440 Craiova- Romania; E-mail: spasare@ elth.ucv.r*

Résumé – Ce travail présente un procédé d'analyse aux éléments finis du champ magnétique produit par une ligne électrique aérienne à haute tension. Le domaine infini du champ magnétique est transformé en deux domaines circulaires finis, en appliquant la transformation de Kelvin. Pour un exemple de calcul numérique, les valeurs de l'induction magnétique obtenues par modélisation numérique sont comparées avec les valeurs obtenues dans le travail [1] par une méthode analytique.

Mots clefs: ligne électrique aérienne à haute tension, champ magnétique, éléments finis, transformation de Kelvin.

1. INTRODUCTION

Les influences du champ magnétique des lignes électriques aériennes sur l'environnement sont bien connues et analysées dans plusieurs travaux de spécialité, [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Les méthodes comportent, en principal, de calcul analytique et expérimental, ainsi que de calcul numérique [7]. Un intérêt particulier présente les effets négatifs du champ magnétique engendré par les réseaux électriques à haute tension sur la santé humaine. Pour diminuer les effets négatifs on minimise les valeurs du champ magnétique au voisinage des lignes par l'optimisation de leur structure [8, 9, 10]. À la recommandation du CIGRE [2] et du Conseil de l'Union Européenne, les valeurs de l'induction magnétique sont limitées à 100 T - pour l'exposition publique et de 500 T - pour l'exposition professionnelle.

Dans ce travail on présente un procédé d'analyse aux éléments finis du champ magnétique engendré par une ligne électrique aérienne. Le procédé s'applique aussi à une configuration complexe des lignes électriques voisines qui présentent un intérêt particulier. Pour la modélisation du champ magnétique on applique le logiciel FEMM [12] qui possède la variante de la transformation de Kelvin pour conditions de frontière. L'objectif du travail est le calcul de l'induction magnétique en voisinage de la ligne au niveau de la terre et à 2 m au dessus du sol. Les valeurs déterminées par la méthode des éléments finis sont comparées, pour la même ligne, avec les valeurs déterminées dans le travail [1] par la formule de Biot

et Savart.

2. PROCÉDÉ DE CALCUL AUX ÉLÉMENTS FINIS

Le champ magnétique produit par une ligne électrique est étendu vers l'infini. Mais, il a de valeurs significatives en voisinage de la ligne. Le domaine du champ doit être fini pour l'analyse numérique. En conséquence, la limitation du domaine par une frontière finie est nécessaire. Afin d'accomplir cet objectif, la littérature technique présente plusieurs méthodes [11, 12,13]. Un de ces procédés, que nous le considérons le plus efficace, est la transformation de Kelvin appliquée au domaine initial infini. Par ce procédé, le domaine infini du champ est transformé en deux régions finies circulaires de rayon fini, r_0 . La transformation géométrique permet au potentiel magnétique de vérifier une condition de continuité sur les deux frontières circulaires. De cette manière, on obtient les valeurs réelles pour le potentiel sur la frontière, par calcul numérique basé sur la construction et la résolution des équations aux éléments finis. Pour ces considérations, le procédé de Kelvin, présenté dans les travaux [11, 12, 13], est le plus efficace pour le calcul numérique des champs avec de frontières ouvertes.

Le domaine d'analyse du champ magnétique. L'approximation de la frontière avec la transformation de Kelvin. La plupart des ouvrages techniques analyse le champ magnétique en l'hypothèse qui néglige les courants induits en sol et dans les conducteurs de la ligne. Cette hypothèse est justifiée par les valeurs très minces des courants induits, en comparaison avec les valeurs des courants de charge des lignes électriques aériennes, et aussi par la difficulté d'évaluation de ces courants. En cette hypothèse, les erreurs de calcul de l'induction magnétique sont estimées sous 8 % par rapport aux valeurs réelles qui s'obtiennent par mesure directe [8]. La transformation de Kelvin s'applique au domaine du voisinage de la ligne électrique qui est étendu vers l'infini en toutes les directions. Dans la figure 1 on montre, dans un plan perpendiculaire par rapport à la ligne électrique, les deux régions circulaires finis, de

rayon r_0 , où le champ magnétique est analysé après l'application de la transformation de Kelvin.

Les diamètres AB et A'B' aux régions circulaires sont choisis au niveau du sol. Le rayon r_0 est choisi tel que la ligne électrique soit enveloppée à l'intérieur de la première région qui est, en fait, la région d'intérêt pour la détermination du champ magnétique. Sur les deux frontières on choisit de conditions périodiques (CP1 et CP2) qui assurent la continuité du potentiel magnétique.

La transformation de Kelvin, nommée inversion géométrique, est définie par l'expression:

$$R = r_0^2 / r \quad (1)$$

qui transforme un domaine de champ infini, ($r_0 \leq r < \infty$), dans une région finie circulaire de rayon égal à r_0 .

Le procédé d'approximation de la frontière circulaire consiste en les opérations suivantes:

(1) Le domaine du champ infini est divisé en deux régions: une première région \mathcal{D}_i , délimité par la frontière circulaire \mathcal{C}_0 de rayon r_0 qui inclue les sources de champ et présente intérêt en ce voisinage; la deuxième région sans sources, \mathcal{D}_e , à l'extérieur de la première, est étendue vers l'infini ($r \rightarrow \infty$). Partout dans cette région, le potentiel vérifie l'équation de Laplace.

(2) La région extérieure infinie, \mathcal{D}_e , est transformée, par la transformation de Kelvin, dans une région finie circulaire, \mathcal{D}'_e , de rayon r_0 égal au rayon de la première région circulaire contenant les sources du champ. Dans le domaine entier du champ, le potentiel magnétique vecteur a une seule la composante après l'axe Oz: $A_z(r, \theta) = A(r, \theta)$, ($r_0 \leq r < \infty$), ($0 \leq \theta \leq 2\pi$)

et vérifie l'équation de Laplace écrite en coordonnées polaires:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial A}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 A}{\partial \theta^2} = 0. \quad (2)$$

Lorsqu'on applique la transformation de Kelvin, il en résulte le changement de la variable par la relation (1). Par conséquent, dans le domaine \mathcal{D}'_e , le nouveau potentiel, $A(R, \theta)$, ($0 < R \leq r_0$), ($0 \leq \theta \leq 2\pi$), après certaines opérations simples, vérifie l'équation de Laplace:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial A}{\partial R} \right) + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 A}{\partial \theta^2} = 0. \quad (3)$$

Puisque les équations (2) et (3) ont des formes identiques, le potentiel magnétique est une fonction continue le long des deux frontières circulaires des domaines, \mathcal{D}_i et \mathcal{D}'_e . Il vient que sur les deux frontières circulaires s'impose une condition périodique:

$$A(r = r_0, \theta) = A(R = r_0, \theta). \quad (4)$$

qui demande la continuité du potentiel sur les frontières de deux domaines.

Dans la deuxième région circulaire, \mathcal{D}'_e , pour assurer l'unicité de la solution s'impose la valeur nulle du potentiel du point central, $A(R=0)=0$ qui correspond au potentiel nul à l'infini, ($A = 0$), dans le domaine initial.

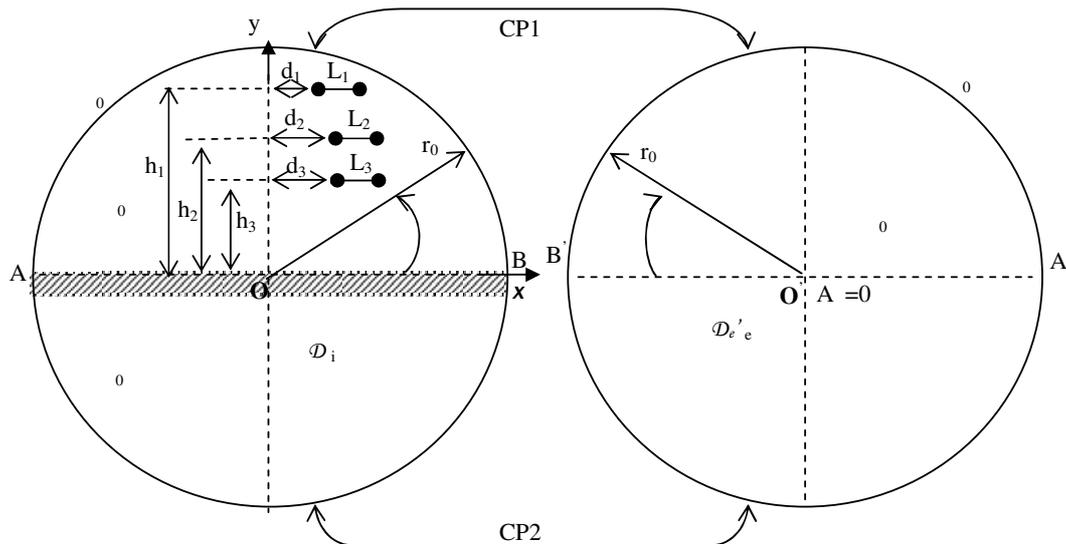


Fig.1. Les frontières circulaires du champ magnétique de la ligne électrique

4. RÉSULTATS DU CALCUL

On considère une ligne électrique aérienne triphasée à haute tension ayant l'arrangement et les coordonnées géométriques, rapportées au pylône de suspension, montrés à la fig. 2 (l'exemple est présenté dans [1]).

Chaque phase de la ligne (L_1, L_2, L_3) est constituée d'un faisceau de deux conducteurs séparés par 45 cm. Le rayon d'un conducteur est de 1,58 cm. On peut supposer que les conducteurs soient parallèles au sol et passent par le centre de gravité de la parabole formée entre deux pylônes de suspension. Les distances de calcul entre les conducteurs de phase, le câble de garde et sol sont indiquées sur la figure 2. La tension de ligne (phase-phase) est de 380 V et la tension de phase (phase-terre) est de 220 kV, de fréquence égale à 50 Hz. Le système de tensions de phase est considéré symétrique et de succession directe (positive). On considère que la puissance électrique est $P = 750$ MW sous un $\cos(\varphi) = 0,85$.

On analyse le champ magnétique de la ligne, en considérant qu'il est un invariant pour n'importe quelle section transversale (arbitrairement choisie) de la ligne, en utilisant le logiciel de calcul numérique aux éléments finis, FEMM, conformément au procédé présenté dans cet ouvrage. D'abord on calcule l'induction du champ magnétique à 2 m au dessus du sol et dans l'origine des axes. Les valeurs obtenues sont comparées avec les valeurs calculées en [1].

Le calcul des courants à travers les conducteurs de la ligne. La valeur efficace (le module) du courant électrique de la ligne se calcule à l'aide de l'expression:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi} = 1340,6 \text{ A.}$$

Le système de courants de ligne est considéré symétrique et de succession directe (positive), ayant les valeurs:

$$I_1 = I; \quad I_2 = \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot I; \quad I_3 = \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot I$$

En considérant la symétrie du système des courants de ligne, le courant à travers le fil de garde est nul, $I_n = 0$.

Chaque phase de la ligne (L_1, L_2, L_3) étant constituée d'un faisceau de deux conducteurs identiques en parallèle, les courants d'un faisceau de phases sont:

$$I_1/2, \quad I_2/2, \quad \text{respectivement } I_3/2.$$

On résout un problème de champ magnétique harmonique qui suppose la répartition des courants non uniformément sur les sections des conducteurs. Par conséquent, l'analyse doit tenir compte des effets de peau et de proximité.

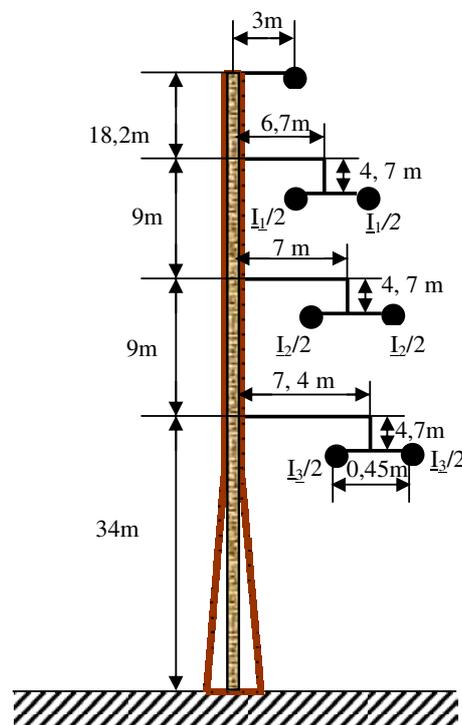


Fig.2. Le pylône et les positions des conducteurs de la ligne électrique

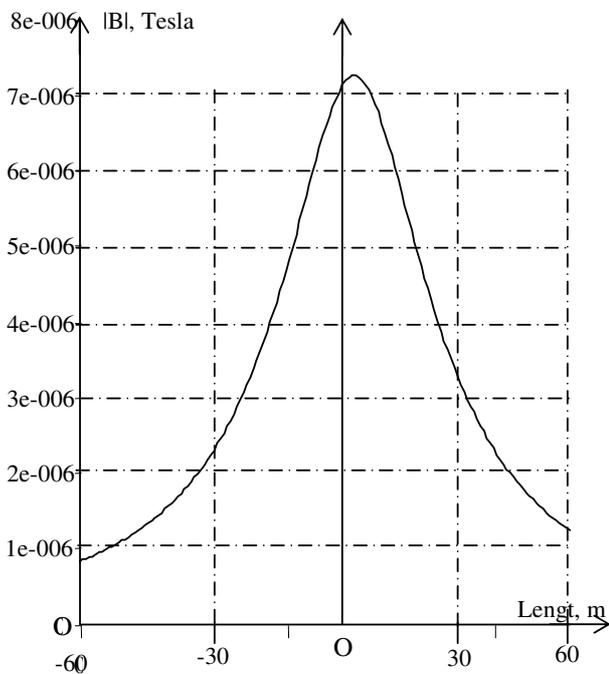


Fig. 3. L'induction magnétique en voisinage du pylône à 2 m au dessus du sol

Après le calcul avec le logiciel FEMM, on obtient la valeur de l'induction magnétique, près de pylône au niveau de la terre, de module $B(0,0) = 5,66$ T, plus grande par rapport à la valeur obtenue dans le travail [1], $B(0,0) = 4,039$ T. La figure 3 montre l'induction magnétique à 2 m au dessus du sol, en voisinage du pylône de suspension. La valeur maximum de $B(7,2) = 7,36$ T est obtenue à la distance de 7 m de pylône. On observe que les valeurs de l'induction magnétique en voisinage de pylône de suspension se trouvent sous la valeur maximum admissible de 100 T.

4. CONCLUSIONS

4.1. L'analyse aux éléments finis du champ magnétique de la ligne électrique de transport prend en considération la structure réelle des lignes électriques aériennes à haute tension ayant les phases constituées d'un faisceau de deux conducteurs séparés. Par comparaison, la méthode des images électriques (la méthode CIGRÉ) réalise l'analyse en remplaçant les conducteurs en parallèle de la ligne par un seul conducteur équivalent, ce qui génère d'erreurs supplémentaires de calcul. L'analyse numérique bénéficie du logiciel FEMM qui possède la variante munie à limiter le domaine infini du champ magnétique, à l'aide de la transformation de Kelvin. Ce procédé introduit des conditions périodiques sur la frontière, qui diminuent les erreurs de calcul.

4.2. De l'analyse de l'exemple de calcul on observe que les valeurs de l'intensité du champ magnétique déterminé numériquement, sont comparables avec les grandeurs déterminées par le calcul analytique qui utilise des hypothèses simplificatrices. En conséquence, l'analyse aux éléments finis en utilisant la transformation de Kelvin pour les domaines de champ ayant les frontières ouvertes, comme est le cas d'une ligne électrique aérienne, est un procédé numérique qui peut être recommandé pour l'analyse des lignes aux configurations complexes.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] CIGRÉ, Group de travail, 36.01 (Interférences et champs), *Champs électriques et magnétiques engendrés par les réseaux de transport. Exemple de calcul des perturbations électromagnétiques par la méthode CIGRÉ*, Travail 21-43, 1980, Paris.
- [2] CIGRÉ, *Guide pour l'établissement délimités d'exposition aux champs électriques, magnétiques et électromagnétiques*, International Congres on Large High Voltage Electric, 1-9 sept. 2001, Paper 30.01, Paris
- [3] W.T. Kaune, L. E. Zaffanella, *Analysis of magnetic fields produced far from electric power lines*, IEEE Trans. on Power Delivery, vol.7, 4, pp. 2082-2091, oct.1992
- [4] C. Garrido, A.F. Otero, J. Cidras, *Low-frequency magnetic fields from electrical appliances and power lines*, IEEE trans. on Power Delivery, vol.18, 4., pp. 1310-1319, oct. 2003
- [5] P.S.P. Sarma Muruvada, A. Turgeon, *An experimental study of residential magnetic fields in the vicinity of transmission lines*, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 13, pp.1328-1334, oct. 1998
- [6] R. G. Olsen, P. S. Wong, *Characteristics of low-frequency electric and magnetic fields on the vicinity of electric power lines*, IEEE Trans. on Power Delivery, vol.7, 4, pp.2046-2055, oct.1992
- [7] K. J. Satsios, D. P. Labridis and P. S. Dokopoulos, *Finite element computation of field and eddy currents of a system consisting of a power transmission line above conductors buried in nonhomogeneous earth*, IEEE Trans. on Power Delivery, vol.13, pp. 876-882, July 1998
- [8] P. Cruz, C. Izquierdo, M. Burgos, *Optimum passive shields for mitigation of power lines magnetic field*, IEEE Trans. on Power Delivery, vol.18, 4, pp.1357-1362, oct. 2003
- [9] A. R. Memari and W. Janischewskj, *Mitigation of magnetic field near power lines*, IEEE Trans. on Power Delivery, vol.11, pp. 1577-1586, July 1996
- [10] K. Yamazaki, T. Kawamoto and H. Fujinami, *Requirements for power line magnetic field mitigation using a passive loop conductor*, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 15, pp. 646-651, April.2000
- [11] D. A. Lowther and E. M. Freeman, *Further aspect of the Kelvin transformation method for dealing with open boundaries*, IEEE Trans. Magn., vol. 28, pp. 1667-1670, Mar. 1992
- [12] D.C. Meeker, *Finite Element Method Magnetics (FEMM 4.0)*, User's Manual, 2004
- [13] Q. Chen, A. Konrad, *A review of finite element open boundary techniques for static and quasi-static electromagnetic field problems*, IEEE Trans. on Magn., vol.33, 1, Jan. 1997.