

Calcul du champ électromagnétique transitoire dans un poste électrique

THT/HT

AH. Bendakir, H. Belila, T. Ruibah, S. Bensiammar
 Laboratoire d'Etude et de Modélisation en Electrotechnique
 Département de l'Electrotechnique, Université de Jijel
 BP 98- Ouled Aissa 18000 Jijel, Algérie
 Email: Bendakir_ah@yahoo.fr

Abstract— the development of the electrical supply networks of power reveals problems involved in the electromagnetic field; it is essential to take it into account in the installations design in order to avoid or decrease a few effects obstructing or dangerous on the agglomeration. In this paper we proposes to expose to the designer and the owner of these works a calculation code based on the dipoles method for the representation of the electromagnetic fields in the switching station.

Résumé—le développement des réseaux électriques de puissance à H.T fait apparaître des problèmes liés au champ électromagnétique ; il est essentiel d'en tenir compte dans la conception des installations afin d'éviter ou atténuer certains effets gênant ou dangereux sur l'agglomération. Dans cet article on se propose d'exposer au concepteur et à l'exploitant de ces ouvrages un code de calcul basé sur la méthode des dipôles destinée au calcul des champs électromagnétiques dans un poste électriques THT/HT.

Mots Clés— poste électrique, Champs Electromagnétiques, Méthode des dipôles, jeux de barres.

I. INTRODUCTION

L'environnement électromagnétique transitoire apparaît dans les postes de transformation aériens et blindés. Les manœuvres de fermeture et ouverture des disjoncteurs créent des ondes mobiles de surtensions transitoires très rapides à l'intérieur des postes.

Nous présentons dans cet article une méthode analytique pour la quantification par calcul du rayonnement électromagnétique transitoire suite à une manoeuvre.

Cette méthode repose sur le concept de calcul des courants transitoires, puis celui du champ électromagnétique en utilisant les équations générales de Maxwell dans l'air. Notons que leurs formalismes sont établis à partir du même modèle pour le potentiel vecteur magnétique (approximation des fils minces). Aussi elles peuvent utiliser des fonctions de courant arbitrairement choisies (courant de foudre, courant de manoeuvre...) ou calculées.

II- Propagation des surtensions de manoeuvre

Lorsqu'on ferme des interrupteurs, par exemple, on

relie subitement entre eux deux extrémités de conducteurs qui, avant la fermeture, n'avaient pas la même tension à la terre. Cette fermeture provoque des ondes de tension non sinusoïdales qui se propagent le long de la ligne, se réfléchissent et se réfractent aux endroits où deux lignes de caractéristiques différentes sont reliées, où plusieurs lignes sont raccordées à un même jeu de barres ou encore aux endroits où la ligne s'arrête. Le calcul de la propagation de ces surtensions de manoeuvre est important pour le choix des isolements nécessaires. L'étude de ces phénomènes recourt au modèle à constantes réparties. Le terme surtension est justifié par le fait qu'il s'agit d'un supplément de tension qui vient s'ajouter localement et temporairement à la tension correspondant au fonctionnement normal [1].

III- Approches analytiques pour le calcul du champ électromagnétique transitoire émis par le réseau de transport d'énergie

Pour le calcul du champ électromagnétique transitoire émis par les postes THT et HT aériens, avec des structures rayonnantes (jeu de barres) courtes deux approches sont indiquées dans la littérature [2] :

- le formalisme des dipôles,
- le formalisme des antennes.

Ce dernier formalisme purement numérique, dédié à un calcul en fréquentiel nécessite l'utilisation de la transformée de Fourier.

III-1. Aperçu théorique sur les formalismes analytiques

Ces différents formalismes sont proposés dans l'approximation des fils minces (le rayon de l'antenne est considéré comme très faible par rapport à sa longueur).

En se basant sur un élément de courant tel que présenté en figure.1, il est possible de déduire trois approches pour le calcul du champ électromagnétique dans un espace libre. Dans ces conditions le potentiel vecteur magnétique est à composante unique parallèle au courant.

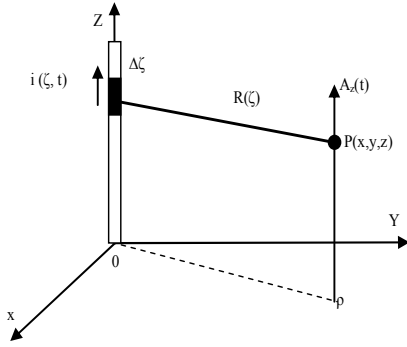


Figure. 1. Configuration de base pour le calcul du champ électromagnétique.

III-2. Méthode des dipôles

Le principe de base de cette méthode consiste à discrétiser le support physique, i.e. la structure filaire, en petites cellules communément appelées « dipôles ». La taille de ces cellules est fonction de critères topologiques et électriques [3]. Parmi ces critères on peut citer : la longueur d'onde du signal transmis et la distance du point d'observation.

En règle générale, le dipôle doit être choisi de façon à ce que le courant traversant puisse être considéré constant vu de point d'observation. En pratique il faut observer les deux conditions suivantes :

$$L_d \leq \frac{\lambda}{20} \tag{1}$$

$$L_d \leq \frac{R}{10} \tag{2}$$

Où, λ est la longueur d'onde du signal, R est la distance du point d'observation, et L_d la longueur du dipôle.

La condition (1) permet de masquer la propagation et la condition (2) permet de rendre compte des petites variations du courant vues d'un point très proche de la structure filaire.

Pour un dipôle, dans l'espace libre, l'expression du potentiel vecteur magnétique est la suivante :

$$\Delta A_z^i(t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i(\xi, t - R(\xi)/c)}{R(\xi)} \Delta \xi \tag{3}$$

Posons :

$$i(\xi, t - R(\xi)/c) = i(t - R(\xi)/c) \tag{4}$$

Nous aurons :

$$\Delta A_z^i(t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i(t - R(\xi)/c)}{R(\xi)} \Delta \xi \tag{5}$$

III-3 Formulation du calcul du champ pour un dipôle

A partir de la relation :

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A} \tag{6}$$

Nous avons :

$$\vec{H} = \left[\frac{\partial A_z}{\partial y} \vec{i} - \frac{\partial A_z}{\partial z} \vec{j} \right] \tag{7}$$

$$\Delta H_x^i(t) = \frac{-y}{4\pi} \left[\frac{i(t - R(\xi)/c)}{R^3(\xi)} + \frac{1}{cR^2(\xi)} + \frac{\partial i(t - R(\xi)/c)}{\partial(t - R(\xi)/c)} \right] \Delta \xi \tag{8}$$

$$\Delta H_y^i(t) = \frac{x}{4\pi} \left[\frac{i(t - R(\xi)/c)}{R^3(\xi)} + \frac{1}{cR^2(\xi)} + \frac{\partial i(t - R(\xi)/c)}{\partial(t - R(\xi)/c)} \right] \Delta \xi \tag{9}$$

$$\Delta H_z^i(t) = 0 \tag{10}$$

Les composantes du champ électrique sont obtenues à partir des équations :

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \tag{11}$$

et

$$\text{div } \vec{A} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = 0 \tag{12}$$

Nous aurons alors :

$$\Delta E_x^i(t) = \frac{xz}{4\pi\epsilon_0 R^2(\xi)} \left[\frac{3i(t - R(\xi)/c)}{cR^2(\xi)} + \frac{3 \int_0^t i(\tau - R(\xi)/c) d\tau}{R^3(\xi)} + \frac{1}{c^2 R(\xi)} \frac{\partial i(t - R(\xi)/c)}{\partial(t - R(\xi)/c)} \right] \Delta \xi \tag{13}$$

$$\Delta E_z^i(t) = \frac{z^2}{4\pi\epsilon_0 R^2(\xi)} \left[\frac{3i(t - R(\xi)/c)}{cR^2(\xi)} + \frac{3 \int_0^t i(\tau - R(\xi)/c) d\tau}{R^3(\xi)} + \frac{1}{c^2 R(\xi)} \frac{\partial i(t - R(\xi)/c)}{\partial(t - R(\xi)/c)} \right] \Delta \xi - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{i(t - R(\xi)/c)}{cR^2(\xi)} + \frac{\int_0^t i(\tau - R(\xi)/c) d\tau}{R^3(\xi)} + \frac{1}{c^2 R(\xi)} \frac{\partial i(t - R(\xi)/c)}{\partial(t - R(\xi)/c)} \right] \Delta \xi \tag{14}$$

IV- Environnement électromagnétique transitoire des postes aériens

L'enclenchement et le réenclenchement d'une ligne de transport d'énergie s'opère à vide est à partir d'un poste aérien ; une séquence classique qui consiste à manœuvrer un sectionneur puis un disjoncteur est généralement utilisée.

Les manœuvres à vide sont donc à l'origine d'un sévère transitoire circonscrit au poste aérien. Ces transitoires sont à l'origine de surtensions et de surintensités qui occasionnent un important rayonnement électromagnétique.

Vu la faible longueur des tronçons de jeux de barres, il nous paraît plus approprié de calculer le champ électromagnétique transitoire en utilisant le formalisme des dipôles Hertiens [3].

IV-1. Prise en compte de la conductivité finie du sol

Dans le réseau de transport d'énergie, le sol constitue le conducteur de retour ; il devient alors nécessaire de tenir compte de sa présence vu la faible hauteur des jeux de barres. Dans le cas d'un sol parfaitement conducteur la méthode des images classiques est utilisée pour tenir compte du sol.

Dans notre travail, pour éviter la notion d'onde plane, nous utilisons la méthode dite des images introduite par Takashima [4]. Il propose une étude générale où il déduit les courants images selon la position de la source et de point d'observation.

Dans le cas où la source et le point d'observation sont dans l'air, le champ électromagnétique peut être évalué comme étant la somme du champ dû au courant de source (I) et celui dû à son image (I').

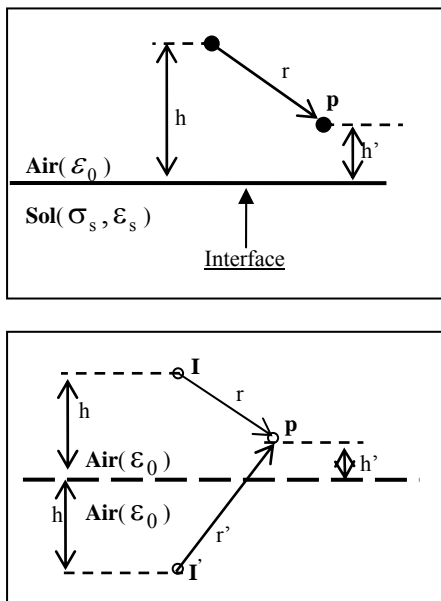


Figure 2. Configuration pour le calcul du champ dans le milieu 1 (air).

$$I' = \frac{\epsilon_0 - \epsilon_s}{\epsilon_s + \epsilon_0} I \tag{15}$$

Avec : $\underline{\epsilon}_s = \epsilon_s + \frac{\sigma_s}{j\omega}$

Pour tenir compte de l'interface sol-air nous utilisons la procédure suivante :

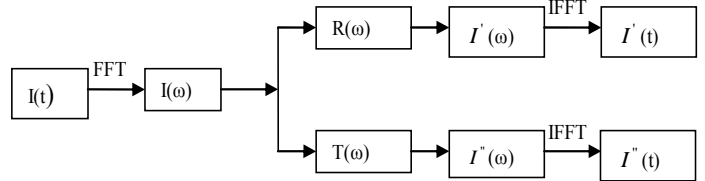


Figure 3. L'organigramme pour le calcul le courant dans le milieu 1 (air).

FFT, IFFT : sont la transformée et la transformée inverse de Fourier.

Les composantes du champ produit sont obtenues par superposition de l'ensemble des contributions dipolaires (réelles et images).

$$E = \sum_{i=1}^n (E_{réel}^i + E_{image}^i) \tag{16}$$

$$H = \sum_{i=1}^n (H_{réel}^i + H_{image}^i) \tag{17}$$

Où n : est le nombre des dipôles.

V- Applications

Afin de valider notre travail théorique, nous considérons comme application le cas de la manœuvre d'un disjoncteur dans un poste aérien. Le poste aérien comporte uniquement une partie de 410 kV (tension efficace entre phases). Il est schématiquement représenté en figure.4.

Dans un poste, bien que triphasé, généralement la manœuvre s'opère phase après phase. Les transitoires ne co-existent pas en même temps sur les trois phases. Pour notre simulation nous procédons à la fermeture du bras central du disjoncteur D0 et nous calculons le champ au point P. Généralement sous un poste aérien se trouve une grille de mise à la terre, qui se traduit par un sol parfaitement conducteur. Pour nous applications nous avons examiné le cas d'un sol parfaitement conducteur et celui d'un sol de conductivité moyenne ($\sigma_s = 0.01 S / m$).

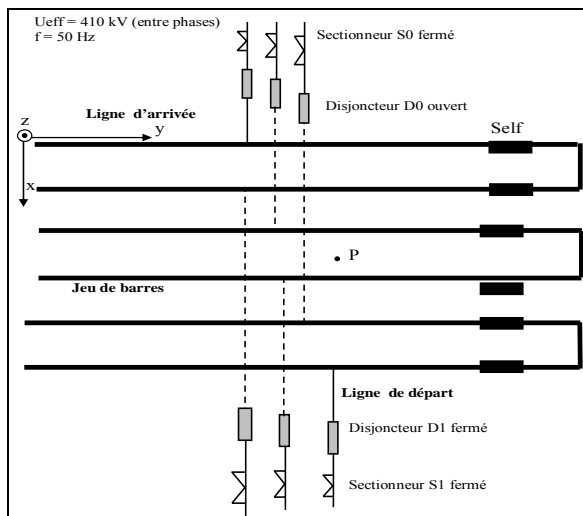


Figure 4. Schéma descriptif du poste aérien.

Pour le calcul de la répartition des courants nous utilisons l'utilitaire SIMULINK sous environnement Matlab [5]. En figure.5, nous présentons le schéma électrique permettant l'étude du transitoire avec SUMILINK.

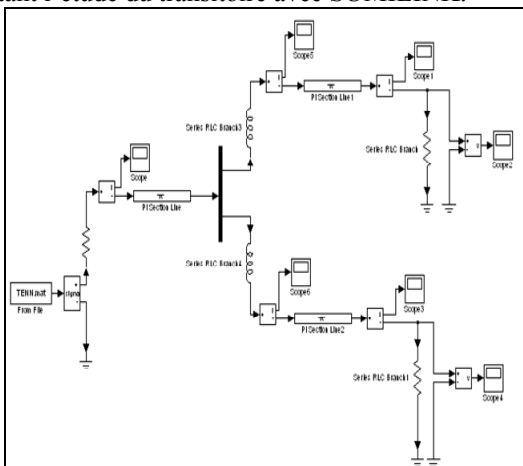


Figure 5. Schéma électrique pour le calcul des courants transitoire sous SIMULINK

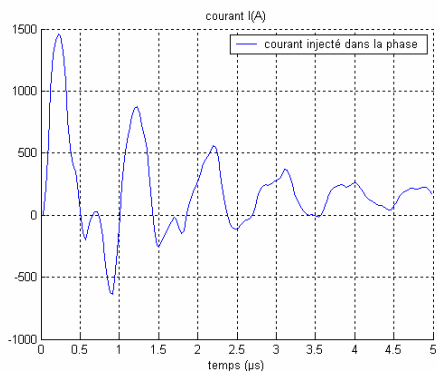


Figure 6. Variation du courant injecté à dans le jeu de barre.

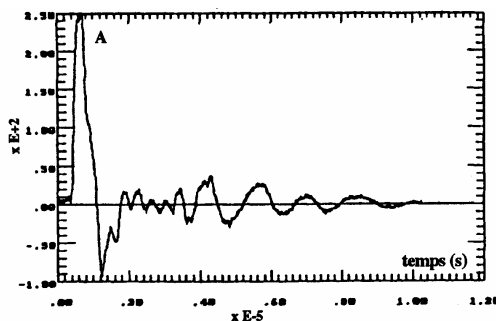


Figure 7. Variation du courant injecté dans le jeu de barre (résultat publié en [6] pour un poste aérien THT lors de la fermeture à vide d'un disjoncteur.

En figure 6, nous présentons le courant injecté à l'entrée du jeu de barre suite à la fermeture à vide du disjoncteur D0. La figure.7 présente le courant injecté mesuré [6] à l'entrée du jeu de barre pour le même type de poste aérien ; les auteurs publient uniquement les résultats de mesure sans donner des détails sur le poste de mesure. Notons que la valeur de la self limitatrice de courant va énormément influencer l'amplitude et l'allure du courant transitoire.

De ces résultats (figures.6 et 7) nous pouvons affirmer que la modélisation que nous avons réalisée avec SIMULINK (sous Matlab) est acceptable qualitativement.

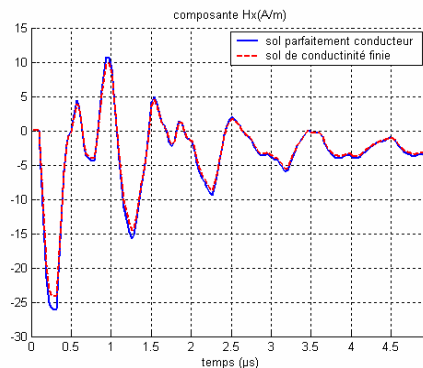


Figure 8. Variation de la composante Hx au point P

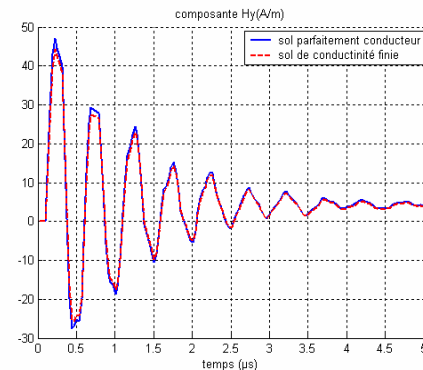


Figure 9. Variation de la composante Hy au point P

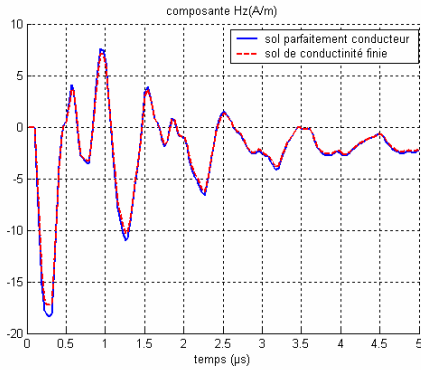


Figure.10. Variation de la composante Hz au point P

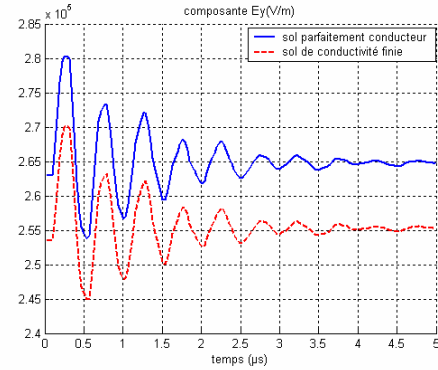


Figure13. Variation de la composante Ey au point P

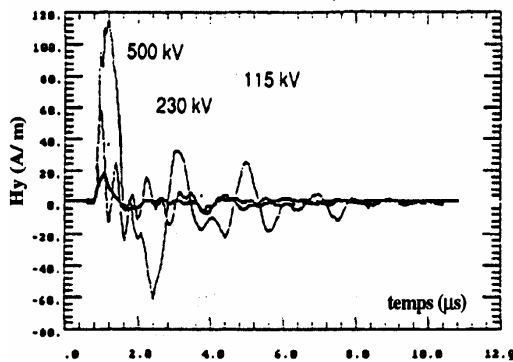


Figure.11. Variation de la composante Hy au point à l'intérieur du poste aérien à différentes tensions (mesure publiée en [7]).

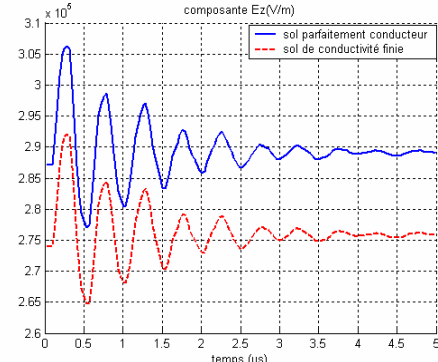


Figure.14. Variation de la composante Ez au point P

L'allure générale du champ magnétique pour les trois composantes en zone proche, calculé directement sous le jeu de barre mis sous tension, que nous obtenons est aussi confirmée par la mesure publiée en [7] (figure.11). Nous ne pouvons comparer directement l'ordre de grandeurs car les auteurs [7] n'indiquent pas les point de calcul ainsi que la longueur ainsi que la hauteur des jeux de barres par rapport au sol. Notons cependant que l'ordre de grandeur est bien respecté.

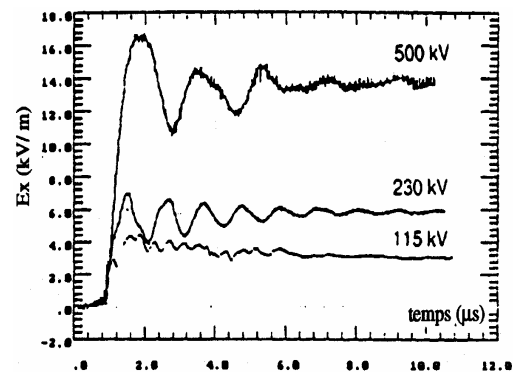


Figure.15. Variation de la composante Ex au point à l'intérieur du poste aérien à différentes tensions (mesure publiée en [7]).

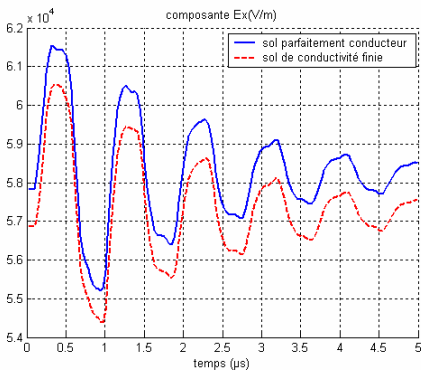


Figure.12. Variation de la composante Ex au point P

L'allure générale du champ électrique pour les trois composantes en zone proche, calculé directement sous le jeu de barre mis sous tension, que nous obtenons est aussi confirmée par la mesure publiée en [7] (figure 14). Le champ électrique (ses trois composantes) est bien unipolaire contrairement au champ magnétique qui est bipolaire.

VI. CONCLUSION

Pour l'intégrité du poste électrique, il est alors nécessaire de caractériser son propre environnement électromagnétique. La mesure sur site est possible, mais reste coûteuse et parfois même insuffisante. La modélisation, quand elle est bien appropriée, est un moyen efficace pour relayer et compléter la mesure.

Dans cet article, nous avons utilisés un modèle analytique pour le calcul du champ électromagnétique émis en régime transitoire basé sur la méthode des dipôles Hertiens [3].

Nos résultats de calcul mettent en évidence la nature bipolaire pour le champ magnétique et unipolaire pour le champ électrique (figures.8 à 15) ; ce résultat est bien confirmé par la mesure réalisée par Electric Power Research Institute [7]. Aussi l'allure générale est bien présente dans nos résultats bien que nous n'ayons pas la bonne valeur de la self limitatrice de courant présente sur le jeu de barres ; cette self influence l'amplitude et la pseudo-période du transitoire. Enfin il faut noter qu'un important élément n'est pas pris en compte lors de notre modélisation, il s'agit du caractère non linéaire de la manœuvre de fermeture qui implique une résistance de l'arc électrique non linéaire. Notons que notre simulation consiste à représenter la manœuvre par le tout ou rien de la résistance de contact du disjoncteur. Cet élément très important apparaît sur les résultats de mesures réalisés par l'EPRI [7].

REFERENCES

- [1] Michel Pays, "Câbles de Transport d'Energie : Technologies. Caractéristiques", Technique de l'ingénieur, Vol. D4520, pp.1-35.
- [2] R. S. Shi, "Rayonnement Electromagnétique des Réseaux Electriques à Topologie Complexe", Thèse de Doctorat de l'INPG. Grenoble 1992.
- [3] N. Ari, W. Blumer, "transient electromagnetic fields due to Switching Operations in Electric Power Systems", IEEE Trans. On EMC, Vol. EMC-29, No.3, pp. 233-237, Aug., 1987.
- [4] T. Takashima, T. Nakac, R. Ishibashi, « Calculation of Complex Fields in Conducting Media », IEEE Trans on electrical insulation Vol EI-15, N° 1, February 1980.
- [5] Toolbox, Matlab 6.5, Simulink
- [6] C.M.Wiggins, and al, "Measurement of switching Transients in a 115kVSubstation", IEEE Trans. On PWRD, Vol. 4, No.1, pp.756-769, January, 1989.
- [7] C.M.Wiggins, S. E. Wright, "Switching Transient Fields in a 115 kV Substation", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 4, No. 2, pp. 791-769, January, 1989.