



HAL
open science

Prise en compte des pertes dans un modèle MTL de câbles de transmission d'énergie

Yvan Lefèvre, Carole Hénaux, Eric Duhayon

► **To cite this version:**

Yvan Lefèvre, Carole Hénaux, Eric Duhayon. Prise en compte des pertes dans un modèle MTL de câbles de transmission d'énergie. 9th European Conference on Numerical Methods in Electromagnetics - NUMELEC 2017, Nov 2017, Paris, France. pp.0. hal-02360431

HAL Id: hal-02360431

<https://hal.science/hal-02360431>

Submitted on 12 Nov 2019

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.



Open Archive Toulouse Archive Ouverte

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible

This is an author's version published in: <https://oatao.univ-toulouse.fr/24565>

To cite this version:

Lefèvre, Yvan and Henaux, Carole and Duhayon, Eric Prise en compte des pertes dans un modèle MTL de câbles de transmission d'énergie. In: 9th European Conference on Numerical Methods in Electromagnetics - NUMELEC 2017, 15-17 November 2017 (Paris, France).

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: tech-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr

Prise en compte des pertes dans un modèle MTL de câbles de transmission d'énergie

Y. Lefevre, C. Hénaux and E. Duhayon

Université de Toulouse, CNRS, LAPLACE site INP-ENSEEIH, Toulouse, France
E-mail: yvan.lefevre@laplace.univ-tlse.fr

Résumé — Le travail présenté concerne la modélisation des câbles de transmission d'énergie par le modèle MTL en vue du dimensionnement. Un modèle simplifié des pertes a été développé.

I. INTRODUCTION

L'augmentation des fréquences des convertisseurs statiques a permis de favoriser l'intégration des systèmes électromécaniques performants avec l'accroissement de la puissance massique. Cette augmentation des fréquences engendre des effets secondaires néfastes comme les surtensions qui se propagent via le câble entre le convertisseur et la machine [1]. L'impact de cette augmentation doit donc être appréhendé dès la phase de conception afin de proposer des solutions appropriées.

L'élaboration de modèles analytiques prédictifs constitue un préalable à la conception optimale des systèmes électromécaniques. Notre contribution concerne la modélisation analytique du comportement électromagnétique des câbles en fonction de la fréquence en vue de leur dimensionnement. Le modèle présenté ici s'inspire du modèle MTL, Multi-conductors Transmission Line en anglais, exposé dans la référence [2]. Ce modèle a été choisi car il est aisément paramétrable à partir des paramètres physiques et géométriques d'un câble. Le modèle présenté permet en outre de prendre en compte les pertes diélectriques et par courants de Foucault.

II. MODELE TLM

Le modèle MTL est basé sur l'hypothèse fondamentale du champ électromagnétique transverse (TEM). Dans le modèle MTL initial les conducteurs sont supposés parfaits et leur axe parallèle à l'axe \mathbf{O}_z du repère de travail. Leur section et leurs paramètres physiques sont invariants suivant \mathbf{O}_z . Dans le mode TEM, les champs électrique \mathbf{E} et magnétique \mathbf{B} , le long du câble, sont transverses i.e. perpendiculaires à l'axe \mathbf{O}_z du câble. Supposons que le câble comporte n_c conducteurs, dans le modèle MTL un des conducteurs est pris comme la référence des tensions. La d.d.p entre le câble numéro k et le conducteur 0 pris comme référence varie en fonction de la position z du point de mesure et le temps t : $V_k(z, t)$. De même, pour le courant entre deux points voisins, z et $z+dz$, du conducteur k : $I_k(z, t)$. On forme les vecteurs colonne $\mathbf{V}(z, t)$ et $\mathbf{I}(z, t)$ des courants et des tensions. D'après le modèle MTL initial ces vecteurs sont liés par la relation :

$$\frac{\partial}{\partial z} \mathbf{V}(z, t) = -\mathbf{R}\mathbf{I}(z, t) - \mathbf{L} \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{I}(z, t) \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \mathbf{I}(z, t) = -\mathbf{G}\mathbf{V}(z, t) - \mathbf{C} \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{V}(z, t) \quad (2)$$

Dans (1) et (2), \mathbf{R} , \mathbf{L} , \mathbf{C} et \mathbf{G} sont les matrices respectivement des résistances linéiques, des inductances linéiques, des capacités linéiques et des conductances linéiques. Dans le modèle MTL initial, le milieu environnant le câble est supposé isotrope et homogène avec une conductivité, σ , une permittivité, ϵ , et une perméabilité, μ . Sous ces conditions, les matrices du modèle MTL jouissent des propriétés fondamentales suivantes :

$$\mathbf{C} = \mu\epsilon\mathbf{L}^{-1} \quad (4)$$

$$\epsilon\mathbf{G} = \sigma\mathbf{C} \quad (5)$$

III. PRISE EN COMPTE DES PERTES

Le modèle MTL initial a été développé pour un câble sans pertes. Pour rendre compte du comportement réel d'un câble de transmission d'énergie en fonction de la fréquence, il faut prendre en compte les pertes dans les diélectriques et les pertes par courants de Foucault.

A. Pertes dans les diélectriques

Cette partie sera détaillée dans l'article final. Dans un modèle réaliste les diélectriques sont caractérisés par une conductivité et une permittivité complexes. Ceci permet de définir le facteur de dissipation diélectrique $tg(\delta)$. Ainsi dans le modèle MTL, la relation (5) est remplacée par :

$$\mathbf{G} = \omega tg(\delta) \mathbf{C} \quad (6)$$

B. Pertes dans les conducteurs

Les pertes dans les conducteurs sont dues à l'effet Joule. Lorsque la fréquence augmente les courants de Foucault deviennent non négligeables. Le calcul des pertes devient alors très difficile et nécessite pour avoir des résultats très précis l'utilisation de modèles numériques. Dans le cas d'un câble avec un seul conducteur, il est possible de modéliser le câble à l'aide de la notion d'impédance interne linéique :

$$\overline{z_{int}}(\omega) = -\frac{k^2}{2\pi r \sigma} \frac{J_0(k.r)}{\frac{dJ_0}{dr}(k.r)} \quad (7)$$

où $J_0(x)$ est la fonction de Bessel de première espèce, r le rayon du conducteur, σ sa conductivité et $k^2 = -j\omega\mu_0\sigma$. Pour un câble multiconducteur, ce modèle ne suffit pas, car il ne prend en compte que l'effet de peau produit par le courant qui circule dans le conducteur. Un modèle prenant en compte l'effet de tous les conducteurs sur le courant dans un conducteur a été développé. Ce modèle a été appliqué à un câble comportant trois conducteurs. Ce câble a été alimenté en mode différentiel et mis en court-circuit.

Les résultats du modèle analytique ont été comparés avec les résultats d'un code de calcul par éléments finis (Fig. 1).

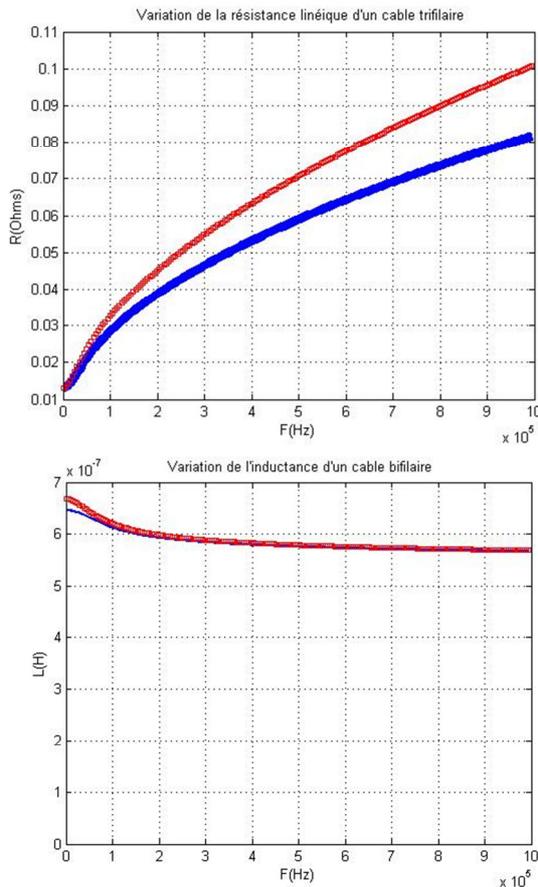


Fig. 1 : Résistance (en haut) et inductance (en bas) linéiques d'un câble tri filaire en mode différentielle et en court-circuit calculé analytiquement en bleu et numériquement en rouge

Comme on le voit sur la figure 1, ce modèle permet de calculer les résistances et les inductances linéiques du câble. Les impédances sont ainsi calculées analytiquement avec des expressions qui ne dépendent que de la fréquence, des propriétés physiques et géométriques des conducteurs. Ces expressions sont reportées dans le modèle MTL pour avoir un modèle électromagnétique comportemental des câbles.

IV. VALIDATION DU MODELE

Pour valider le modèle ainsi développé, le comportement fréquentiel d'un câble tri filaire non blindé en mode différentiel a été étudié.

Le câble est un câble triphasé de 40m de long. Chaque conducteur est composé d'une âme conductrice constituée de 19 brins de 0.23mm. L'épaisseur totale de l'isolant est de 0.187mm. Cet isolant est constitué d'un isolant interne d'épaisseur 0.132mm avec une permittivité relative de 3 et d'un isolant externe d'épaisseur 0.055m avec une permittivité relative de 2.1. Le câble étant hétérogène, pour pouvoir utiliser le modèle développé, il faut homogénéiser les propriétés du câble pour estimer : le rayon équivalent d'un conducteur, sa résistivité équivalente et la distance entre les axes des conducteurs.

Les impédances calculées en court-circuit et en circuit ouvert ont été comparées avec des résultats de mesure. La

figure 2 montre les résultats en court-circuit et la figure 3 les résultats en circuit ouvert

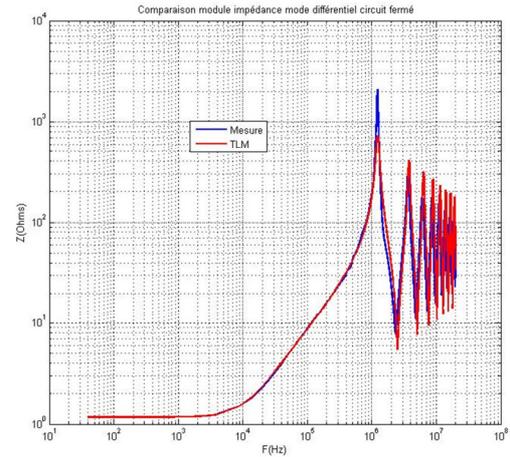


Fig. 2 : Impédance en mode différentiel et en court-circuit d'un câble tri filaire non-blindée calculée analytiquement (TLM) et mesurée expérimentalement

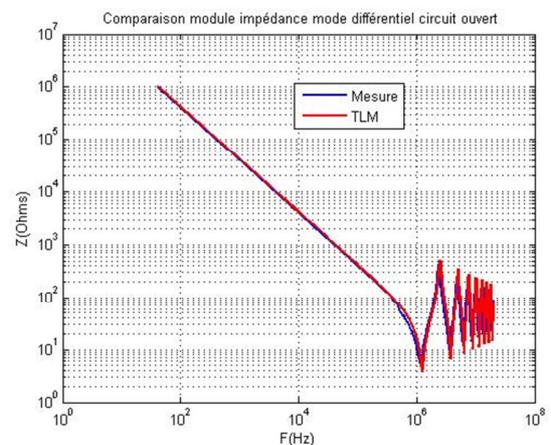


Fig. 3 : Impédance en mode différentiel et en circuit ouvert d'un câble tri filaire non-blindée calculée analytiquement (TLM) et mesurée expérimentalement

Les figures 2 et 3 montrent que les premières fréquences de résonance et d'antirésonance sont assez bien approchées par le modèle. Les erreurs sont tolérables dans une procédure de dimensionnement.

V. CONCLUSION

L'avantage du modèle MTL est que tous les paramètres du modèle peuvent être calculés de manière analytique en fonction des paramètres géométriques et physiques du câble. Un calcul simplifié des pertes a été développé et validé d'abord par un code numérique ensuite expérimentalement. Dans l'article final une évaluation du modèle en mode commun sera effectuée.

REFERENCES

- [1] S. Zhang, S. Jiang, X. Lu, B. Ge, and F. Z. Peng, " Resonance issues and damping techniques for grid-connected inverters with long transmission cable, ", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 1, pp. 110–120, Jan. 2014.
- [2] C. R. Paul, *Analysis of Multiconductor Transmission Line*, 2008, John Wiley & Sons, IEEE Press.