



HAL
open science

Couplage d'un modèle d'arc électrique avec la méthode des éléments finis pour le dimensionnement des cellules de coupure à technologie vide

Julien Fontchastagner, Olivier Chadebec, Hans Schellekens, Gérard Meunier

► To cite this version:

Julien Fontchastagner, Olivier Chadebec, Hans Schellekens, Gérard Meunier. Couplage d'un modèle d'arc électrique avec la méthode des éléments finis pour le dimensionnement des cellules de coupure à technologie vide. 4ème Conférence Européenne sur les Méthodes Numériques en électromagnétisme - NUMELEC'03, 2003, Toulouse, France. hal-02945841

HAL Id: hal-02945841

<https://hal.science/hal-02945841v1>

Submitted on 22 Sep 2020

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.

Couplage d'un modèle d'arc électrique avec la méthode des éléments finis pour le dimensionnement des cellules de coupure à technologie vide

J. Fontchastagner¹ – O. Chadebec² – H. Schellekens¹ – G. Meunier²
Schneider Electric¹ – Usine 38V, ZAC Champ Saint-Ange, Varcès, 28050 Grenoble cedex 9, France
Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble² – LEG / ENSIEG, BP 46, 38402 Saint Martin d'Hères cedex, France

Résumé - Cet article propose un couplage entre la méthode des éléments finis et un modèle d'arc électrique dans le vide pour le dimensionnement des disjoncteurs. La méthode des éléments finis permet de calculer le champ magnétique dans l'espace inter-électrode. Un modèle dépendant de ce champ permet de trouver une nouvelle position d'arc.

Abstract - This paper proposes a coupling between finite element method and an electrical arc model for sizing vacuum circuit breakers. FEM allows to calculate magnetic field between electrodes. A model depending on this field is then applied to find the new arc position.

I. INTRODUCTION

Le marché des disjoncteurs équipés de cellules de coupure à vide est actuellement en constante progression. Avec une maintenance limitée, des temps d'interruption du courant très court, un faible poids et un intérêt écologique certain, les ampoules à technologie vide remplacent progressivement leur homologue à SF6.

Dans un disjoncteur, la coupure du courant n'est jamais instantanée. En effet, après la phase d'écartement des électrodes, il se forme un arc électrique qui doit être éteint le plus rapidement possible. Le champ magnétique présent dans la chambre de coupure est une grandeur qui influence fortement le comportement de l'arc électrique. En effet, celui-ci interagit fortement avec les courants parcourant l'arc (force de Laplace). Les constructeurs d'ampoule s'attachent donc à créer des géométries favorisant ce champ magnétique. Ces géométries se regroupent autour de deux familles. La première est constituée par les ampoules à champ radial (RMF). Ce champ est créé par une géométrie d'électrode spécifique (fig.1.). L'arc est alors concentré (forte densité de courant) mais tourne (effet orthoradial de la force) ce qui permet d'éviter la dégradation des électrodes. L'autre type de géométrie d'ampoule est celle à champ axial (AMF). Le champ est créé soit par une spire externe soit par une autre géométrie d'électrode spécifique (Fig.1.). L'arc est alors en mode diffus i.e. avec faible densité de courant le parcourant mais statique. Cette faible densité de courant évite l'échauffement excessif des électrodes.

Le développement de ce nouveau type d'ampoule nécessite la mise au point d'outils de modélisation adaptés. D'une part, pour comprendre les phénomènes intervenant pendant la coupure (déplacement de l'arc électrique) et d'autre part pour mettre au point de nouvelles géométries de

chambres de coupure favorisant son extinction. Cet article propose de répondre à cette problématique en introduisant une approche originale couplant une méthode de calcul de champ efficace (la méthode des éléments finis) avec un modèle d'arc reposant sur des considérations expérimentales.

La première étape consiste à partir d'une position d'arc initiale (au centre des électrodes, par exemple) et avec l'aide d'un calcul éléments finis, de déterminer le champ magnétique dans l'espace inter-électrodes. Une fois la carte de champ obtenue, par application d'un modèle d'arc approprié, on détermine la nouvelle position de l'arc électrique. Une nouvelle carte du champ est alors calculée et ainsi de suite (Fig.2.). Ce travail a été implanté dans le logiciel Flux3D.

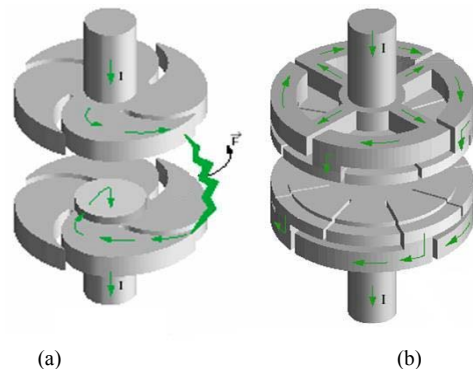


Fig.1 : Les deux différents types d'ampoules à vide – (a) champ radial et (b) champ axial.

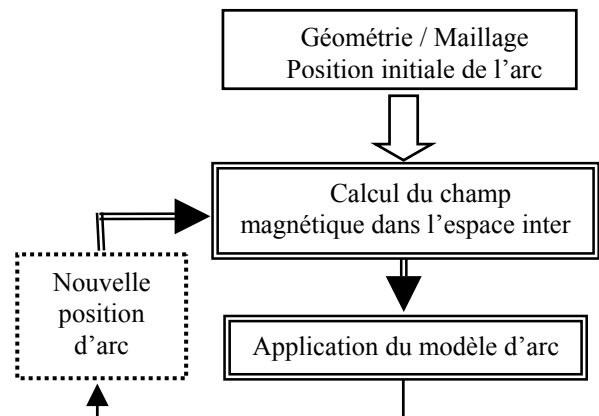


Fig.2 : Principe du couplage

II. CALCUL DU CHAMP MAGNETIQUE

A. Calcul des répartitions des courants

Le courant \mathbf{J}_0 dans les deux électrodes est calculé par résolution éléments finis électrocinétique pour 1A. Pour chaque électrode, un potentiel est fixé sur la face d'amené du courant (condition de Dirichlet). Un autre potentiel est fixé sur le nœud de la pastille où se situe le pied d'arc. Cette approche est contestable car en toute rigueur, le courant ne peut circuler à travers une surface nulle. Il serait alors nécessaire d'imposer le potentiel sur une petite face représentative du pied d'arc et en particulier sur les nœuds qui lui sont associés. Ceci implique la nécessité de raffiner le maillage au voisinage de celle-ci, ce qui conduit généralement à l'explosion des tailles de maillage. La solution serait donc de remailler le pied d'arc à chaque nouvelle position. Cette solution étant difficile à mettre en œuvre, nous nous sommes contentés de fixer le potentiel à un nœud, approche qui nous paraît satisfaisante dans un premier temps.

La position de l'arc étant connue, celui-ci est modélisé par un inducteur filaire constitué de lignes brisées parcouru par un courant de 1A.

B. Calcul du champ magnétique par formulation $T_0\Phi$ [1]

Tout d'abord, le champ \mathbf{T}_{0i} créé par les répartitions \mathbf{J}_{0i} de chaque électrode est calculé sur tout le domaine par éléments finis par résolution de :

$$\text{rot}\mathbf{T}_{0i} - \mathbf{J}_{0i} = 0 \quad (1)$$

Le champ créé par l'arc $\mathbf{T}_{0\text{arc}}$ est calculé par l'intégration analytique de la formule de Biot et Savart sur le trajet de l'arc. Cette approche possède l'avantage d'être indépendante du maillage de l'espace inter-électrodes. En particulier, il n'est pas nécessaire de remailler à chaque déplacement de l'arc.

Si des pièces ferromagnétiques sont présentes, l'induction finale est obtenue après une troisième résolution élément finis de :

$$\text{div}(\mu(\sum_{i,\text{arc}} \mathbf{T}_{0i,\text{arc}} \mathbf{I}_{i,\text{arc}} - \text{grad}\Phi)) = 0 \quad (2)$$

qui est associée aux équations de circuit de notre problème, à savoir la mise en série d'une source de courant constante, d'une première électrode massive, d'un inducteur filaire puis d'une deuxième électrode massive.

III. COUPLAGE AVEC LE MODELE D'ARC ELECTRIQUE

Le modèle que nous nous proposons d'appliquer est basé sur les considérations suivantes.

1 – Un arc suit les lignes d'induction magnétique \mathbf{B} . Nous considérons donc tous les nœuds voisins au pied d'arc de l'électrode inférieure. A partir de ceux-ci, nous déterminons chacune des lignes d'induction ; les lignes se rebouclant ou n'atteignant pas l'électrode supérieure sont éliminées.

2 – La nouvelle position d'arc se trouve sur la ligne de champ minimisant la tension d'arc. A chaque ligne de champ admissible, nous associons une tension d'arc calculée grâce à une version simplifiée de la formule de Gundlach [3]:

$$U_i = \sqrt{B} \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (3)$$

Où d représente la longueur de la ligne de champ joignant les deux électrodes, d_0 la distance entre les électrodes et B la valeur moyenne de l'induction sur la ligne de champ.

L'inducteur filaire représentant l'arc est alors déplacé suivant la ligne de champ de tension minimale. De plus, les conditions en potentiel scalaire électrique sur les pastilles sont modifiées pour être localisées aux nouvelles positions des pieds d'arc. Un nouveau calcul de champ est alors effectué pour une deuxième itération et ainsi de suite.

IV. RESULTATS

Cette approche a été testée sur une géométrie d'ampoule à vide champ axial simplifiée. Remarquons que notre problème est ici dépourvu de pièce ferromagnétique ($\Phi=0$). Les différentes positions de l'arc pour les itérations 1,2, 5 et 10 sont les suivantes :

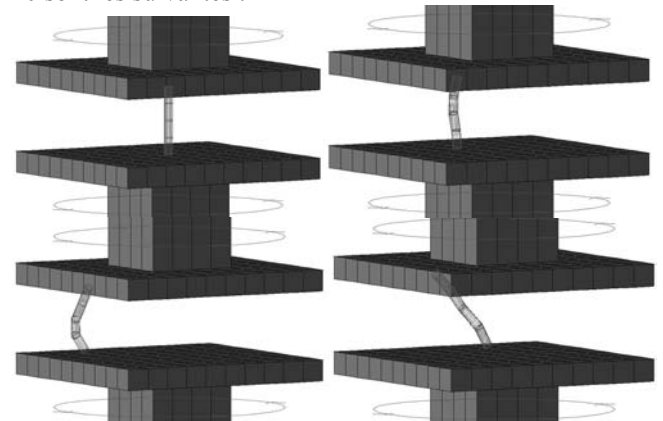


Fig. 3. Déplacement de l'arc sur une géométrie d'ampoule champ axial itérations 1, 2, 5 et 10

CONCLUSIONS

Nous avons développé une approche originale couplant une méthode éléments finis de calcul de champ magnétique et un modèle d'arc électrique. Celle-ci va prochainement être testée sur une géométrie réelle de disjoncteur. Les prochains travaux vont consister à adapter le modèle à une formulation $T_0T\Phi$ [1] pour la prise en compte des courants induits par le mouvement de l'arc.

REFERENCES

- [1] H.T. Luong, « Amélioration de la formulation en potentiel scalaire et généralisation au couplage entre équations de champ et de circuit électrique », Thèse de doctorat INPG, 1997
- [2] A. Slama, V. Mazauric, Y. Maréchal, G. Meunier and P. Wendling, 'Electric Railgun 3D Modeling: Computation of Eddy Currents and Lorentz Force', IEEE Transactions on Magnetics, 37, 1 (2001) pp. 139-142
- [3] H. Schellekens, 'Arc behaviour in axial magnetic field vacuum interrupters equipped with an external coil', 18th Int. Conf. on Discharges and Electrical Insulation, Eindhoven, 1998