

JOURNAL INTERNATIONAL DE TECHNOLOGIE, DE L'INNOVATION,
DE LA PHYSIQUE, DE L'ENERGIE ET DE L'ENVIRONNEMENT

Simulation de l'arc électrique à l'ouverture d'un contacteur

M. Buffo, J. Andrea, N. Dumoulin, E. Guillard,
J.-P. Martin, S. Saadate



ISSN : 2428-8500

DOI : 10.18145/jitipee.v3i1.149

Le sujet de cet article a été présenté oralement lors de la manifestation conjointe du colloque sur les arcs électriques et du workshop sur les arcs et contacts électriques (CAE-ACE) les 20 et 21 mars 2017 à Nancy (France).

L'article a fait l'objet d'une expertise indépendante par deux spécialistes du domaine.

Simulation de l'arc électrique à l'ouverture d'un contacteur

Marc Buffo^(1,2), Jonathan Andrea⁽¹⁾, Nicolas Dumoulin⁽¹⁾, Eric Guillard⁽¹⁾,
Jean-Philippe Martin⁽²⁾, Shahrokh Saadate⁽²⁾

⁽¹⁾ Leach International Europe, Département Recherche et Innovation, Esterline Power Systems, 57430 Sarralbe, France

⁽²⁾ Groupe de Recherche en Electronique et en Electrotechnique de Nancy, Université de Lorraine, 54516 Vandoeuvre Les Nancy, France
marc.buffo@univ-lorraine.fr

Résumé – Cet article présente une méthode qui permet de simuler le courant et la tension d'un arc électrique initié durant l'ouverture d'un contacteur. Basée sur un modèle simplifié de l'arc électrique et de la dynamique des contacts à l'ouverture, cette méthode permet de simuler l'apparition et l'extinction d'un arc, considéré comme une résistance non linéaire. Les paramètres liés à la mécanique et à l'arc sont approximés par des tests expérimentaux sur un contacteur. Les résultats de la simulation sont comparés aux données expérimentales afin de démontrer la validité de la méthode proposée.

Mots clés : contacteur, modèle d'arc électrique, courant d'arc, tension d'arc, longueur d'arc
DOI : 10.18145/jitipee.v3i1.149

Introduction

En aéronautique, dans le domaine de la distribution, les contacteurs électromécaniques restent majoritairement utilisés car, pour des puissances élevées, ils sont les seuls éléments assurant une isolation galvanique avec une chute de tension minimale entre les contacts de puissance par rapport aux technologies à semi-conducteur. Les futurs réseaux utiliseront une tension de 270 VDC ou 540 VDC. Le contacteur doit être capable d'éteindre un arc électrique durant son ouverture. L'utilisation de modèles de contacteurs permettra de s'assurer que l'allongement entre les contacts [1] ou que l'ajout d'une hybridation avec un circuit électronique [2] permet d'atteindre cet objectif.

La course du contacteur répond aux équations d'un système électromécanique [3]. La caractéristique de l'arc, étudiée depuis longtemps, est basée sur des équations empiriques qui décrivent l'arc de deux façons différentes. La première façon utilise une équation statique telle que l'équation de Nottingham [4], équation (1) utilisée pour la suite de l'article :

$$V_{arc} = \frac{P_0}{i_{arc}^n} + V_0 \quad (1)$$

La deuxième façon utilise une équation dynamique comme l'équation suivante :

$$V_{arc} + \tau \frac{dV_{arc}}{dt} = \frac{\alpha \cdot R_c \cdot i_{arc}}{R_c \cdot i_{arc} \cdot \arctan(\beta \cdot i_{arc}) + \alpha} \quad (2)$$

avec τ la dynamique de l'arc et α, β, R_c les paramètres de l'équation décrits dans [5].

La méthode proposée s'appuie sur les deux hypothèses suivantes. Premièrement, la dynamique de l'arc est négligeable par rapport à la vitesse d'ouverture du contacteur, ce qui permet une caractérisation statique de l'arc. Deuxièmement, la longueur de l'arc est égale à la distance entre les contacts.

Afin d'éprouver la validité du modèle proposé, celui-ci est comparé au cas pratique d'un contacteur aéronautique Leach qui est placé dans un circuit résistif alimenté par une tension réseau de 270 VDC. Le contacteur utilisé est choisi pour que l'arc ne s'éteigne pas lorsque le contacteur est ouvert. Les paramètres de l'équation de la course sont obtenus grâce à une analyse vidéo, à l'aide d'une caméra haute vitesse. Les paramètres de l'équation statique de l'arc sont obtenus par les mesures des tensions et du courant d'arc en fonction de la distance. Puis la simulation complète est réalisée avec Matlab et comparée à la mesure expérimentale. Nous étudierons d'abord le modèle mécanique, puis le modèle électrique et enfin nous réaliserons une vérification expérimentale.

1. Modèle mécanique

1.1. Descriptif du dispositif

Le contacteur étudié est un contacteur mono-polaire avec des contacts en $AgSnO_2$, décrit à la Figure 1. Il est composé de deux contacts principaux (a) et d'une palette mobile (f), contrôlée par un circuit magnétique (d). Afin de fermer le contacteur, une tension est appliquée au niveau de la bobine d'appel (b) pour rapprocher les deux parties du circuit magnétique, dont une partie mobile (g) est reliée à la palette de puissance (f). Pour le maintien des contacts et pour des raisons d'économie d'énergie, la bobine de maintien (c) et la bobine d'appel (b) sont alimentées en série. L'ouverture du contacteur est réalisée par l'arrêt de l'alimentation des bobines (b) (c), ce qui permet au ressort de rappel (e) de repousser la partie mobile.

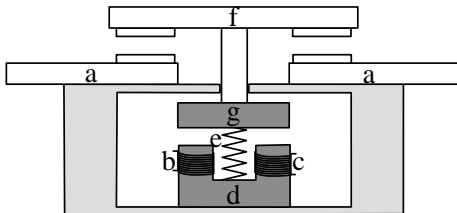


Figure 1. Description du contacteur.

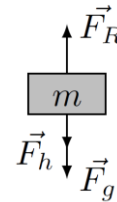


Figure 2. Forces appliquées à la palette mobile.

1.2. Description dynamique du modèle

Cette partie s'intéresse à l'ouverture du contacteur [3], la force magnétique n'est donc pas prise en compte. Pour déterminer la position l en fonction du temps t , on écrit l'équation

fondamentale de la dynamique projetée sur l'axe z , équation (3) correspondant aux forces décrites sur la Figure 2. Lors de l'ouverture, la longueur l a une condition initiale nulle. Les différentes forces qui s'appliquent à la partie mobile du contacteur sont, la force F_g créée par sa masse m , avec le coefficient de l'accélération de pesanteur terrestre g , la force F_R créée par le ressort de coefficient de raideur k_r et de longueur à l'équilibre l_{eq} ainsi que la force F_h créée par les frottements de coefficient k_h :

$$m \frac{d^2 l(t)}{dt^2} = F_R - F_g - F_h = k_r(l_{eq} - l) - mg - k_h \frac{dl}{dt} \quad (3)$$

Cette dernière équation est une équation différentielle du second ordre à coefficients constants. La course du contacteur répond à un régime pseudopériodique ayant pour solution la forme décrite dans l'équation (4).

$$l(t) = G \left(1 - \frac{e^{-\xi \omega_0 t}}{H} \cos(\omega t + \Phi) \right) \quad (4)$$

La période propre du système τ_0 , équation (5), du contacteur utilisé vaut $4,35 \cdot 10^{-3}$ s. Elle a été calculée en utilisant les paramètres de la solution mécanique approximés par rapport à la course réelle du contacteur. Cette valeur permet de négliger la dynamique de l'arc qui devrait être de l'ordre de 10^{-5} s.

$$\tau_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{2\pi\sqrt{1-\xi^2}}{\omega} \quad (5)$$

2. Modèle électrique

2.1. Circuit électrique

Le circuit électrique utilisé durant l'expérience est exposé Figure 3. Il est constitué d'une source 270 VDC en série avec deux contacts de puissance, décrit Figure 1, ainsi que d'une inductance de câblage et d'une charge variable. Sept charges différentes ont été utilisées pour l'expérience.

Chaque contact de puissance crée deux arcs en série, le circuit possède donc quatre arcs en série représentant les deux contacteurs. Chaque arc peut être représenté par un composant de circuit, noté R_T , composé de deux résistances en parallèle [5] R_{arc} et R_c , décrit par l'équation (6). La première varie en fonction de la distance, et la seconde permet de simuler l'extinction. L'équation du circuit nous donne l'équation (7).

$$R_T(l) = \frac{R_c R_{arc}(l)}{R_c + R_{arc}(l)} \quad (6)$$

$$\text{Avec } R_{arc} = \frac{V_{arc}(l)}{i_{arc}}$$

$$V_{DC} = (R_{T1}(l_1) + R_{T2}(l_2) + R_{T3}(l_3) + R_{T4}(l_4) + R_L)i + L_c \frac{di}{dt} \quad (7)$$

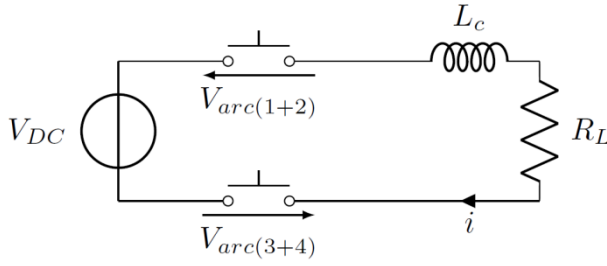


Figure 3. Circuit électrique

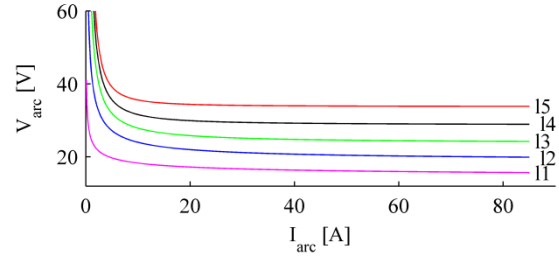


Figure 4. Caractéristique statique d'un arc pour différentes longueurs : $l_1 < l_2 < l_3 < l_4 < l_5$.

2.2. Equation statique de l'arc électrique

Lors de l'ouverture du contacteur, la surface de contact se réduit avec une très forte densité de courant. Cette forte densité crée un pont fondu. L'augmentation de l'écartement entre les contacts rompt ce pont et permet la création d'un arc électrique, puis son extinction lorsque sa longueur augmente.

Nottingham a décrit le comportement de l'arc électrique [4] et propose une formule bien connue, équation (8), pour décrire la tension d'arc V_{arc} en fonction du courant d'arc i_{arc} avec V_0 le seuil de tension d'arc et P_0 la puissance de l'arc, deux constantes dépendant du matériau de l'électrode et de la longueur d'arc et une constante n dépendant seulement du matériau de l'électrode.

$$V_{arc} = \frac{P_0}{i_{arc}^n} + V_0 \quad (8)$$

Il a aussi étudié la variation linéaire par rapport à la longueur de l'arc l [4] de la puissance de l'arc $P_0(l)$ de paramètres A et B , équation (9). et de la tension électromotrice $V_0(l)$ de paramètres C et D , équation (10).

$$P_0(l) = A l + B \quad (9)$$

$$V_0(l) = C l + D \quad (10)$$

Nous supposons également que le paramètre n varie aussi linéairement par rapport à la longueur, qui s'exprime par une fonction affine de paramètres E et F , équation (11).

$$n(l) = E l + F \quad (11)$$

La caractéristique de l'arc change donc pour chaque longueur. La représentation de cette caractéristique pour différentes longueurs est donnée en Figure 4.

Pour simuler l'ouverture, l'arc agit comme une résistance en fonction de la distance et du courant. Durant cette phase sa longueur, donc sa résistance, et sa tension augmentent, pour atteindre soit un point d'équilibre en fin de course, soit la tension permettant l'extinction.

3. Vérification expérimentale

3.1. Vérification du modèle mécanique

L'analyse image par image comme sur la Figure 5, grâce à une caméra haute vitesse à 10000 images par seconde, a permis d'analyser la course des contacts. La Figure 5 représente les deux arcs du contacteur pour deux temps différents à partir de l'ouverture du contacteur. La partie à gauche correspond au premier arc du contacteur après un temps de 0,6 ms en haut et 6,8 ms en bas. La partie à droite correspond au second arc du contacteur après un temps de 0,6 ms en haut et 6,8 ms en bas. Une approximation des paramètres de la solution de l'équation mécanique par rapport à la course est réalisée.

La course simulée Figure 6 est très proche de la courbe expérimentale. La valeur du premier dépassement est bien respectée. Le reste de la course est semblable avec la même valeur finale. La prise en compte de la force créée par l'arc peut améliorer le modèle mécanique.

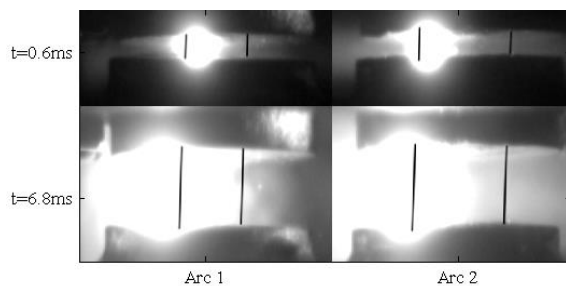


Figure 5. Image des contacts lors de l'analyse vidéo.

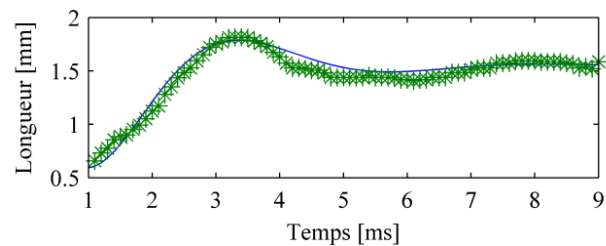


Figure 6. Course du contacteur, en vert l'expérimentation et en bleu la simulation.

3.2. Vérification du modèle électrique

Pour se rapprocher des réseaux avioniques, les mesures expérimentales ont été réalisées pour 7 courants d'arc de 5 à 70A. Une première approximation de l'équation (6) est réalisée afin de déterminer ses paramètres pour chaque longueur. Ces trois paramètres sont ensuite linéarisés en fonction de la longueur calculée par le modèle mécanique.

Les Figures 7 et 8 présentent la simulation et le résultat expérimental de l'évolution du courant et de la tension des quatre arcs créés lors de l'ouverture des contacteurs, pour un courant de charge de 105A. Le départ de chaque arc est différé, en pratique les ouvertures des contacts sont asynchrones. Les courants et tensions des deux figures évoluent de façon semblable et atteignent les mêmes minimums et maximums ainsi qu'une valeur finale très proche. L'erreur est calculée pour la tension des quatre arcs et le courant, entre l'expérimentation et la simulation pour toutes les mesures. Les erreurs moyennes sont de -3.42V et 0.8A avec des écarts types de 4V et 1A. L'erreur est faible au vu des hypothèses réalisées, la simulation est donc proche de l'expérimentation. L'ajout de la mobilité de l'arc entre les contacts pourrait encore réduire l'erreur.

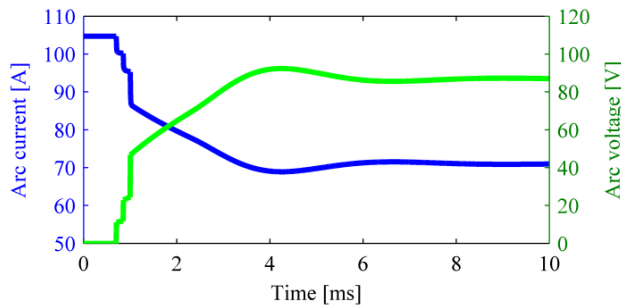


Figure 7. Résultat de la simulation du courant, en bleu, et de la tension de l'arc, en vert.

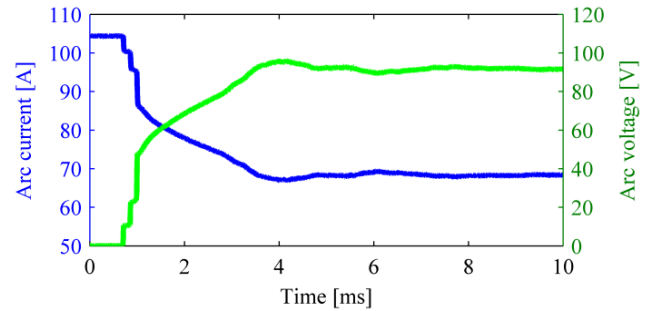


Figure 8. Résultat de l'expérimentation du courant, en bleu, et de la tension de l'arc, en vert

Conclusion

La méthode proposée dans cet article permet de caractériser la tension et le courant d'arc qui se produit à l'intérieur du contacteur durant son ouverture. Cette méthode est simple et générale, elle peut être reproduite pour tout autre modèle de contacteur. Le résultat donne une évolution de l'arc très proche de la pratique lors de l'ouverture avec des erreurs et des écarts types faibles, ce qui prouve la cohérence de la méthode. De plus, la méthode de modélisation permet d'atteindre la précision requise pour concevoir de nouveaux contacteurs ou des circuits électriques permettant l'hybridation. Cette méthode est prometteuse mais l'utilisation d'un modèle mécanique plus complet et d'un nombre plus important de mesure de la tension et du courant d'arc pour des puissances plus importantes réduirait l'erreur entre la simulation et la pratique.

Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leurs remerciements à la société Leach Internationale Europe pour avoir mis à disposition ses moyens de test et pour son soutien, ainsi que pour la collaboration dans le cadre du projet AEROCOTS (Advanced Electrical Reliable & Optimized Core Off The Shelf).

Références

- [1] Sawa, K., Tsuruoka, M., & Morii, M., (2014), Fundamental characteristics of arc extinction by magnetic blow-out at DC voltages (< 500V). In Electrical Contacts (Holm), 2014 IEEE 60th Holm Conference on (pp. 1-6), IEEE 2014. Doi : 10.1109/HOLM.2014.7031036.
- [2] Meyer, J. M., & Rufer, A. (2006), A DC hybrid circuit breaker with ultra-fast contact opening and integrated gate-commutated thyristors (IGCTs). IEEE Transactions on Power Delivery, volume 21(2) : pages 646-651. Doi : 10.1109/TPWRD.2006.870981.
- [3] Jiaxin, Y., Huimin, L., Guangcheng, M., Shuqing, C., & Zhaowen, C., (2015), Research on the dynamic calculation model for a dc solenoid electromagnetic contactor and its contact characteristics in break process. In Electrical Contacts (Holm), 2015 IEEE 61st Holm Conference on (pp. 191-194). IEEE, 2015. Doi : 10.1109/HOLM.2015.7355096.

- [4] Nottingham, W. B., (1923), A new equation for the static characteristic of the normal electric arc. Journal of the American Institute of Electrical Engineers, volume 42(1), pages 12-19. Doi : 10.1109/JoAIEE.1923.6591851.
- [5] Andrea, J., Besdel, P., Zirn, O., & Bournat, M., (2015), The electric arc as a circuit component. In Industrial Electronics Society, IECON 2015-41st Annual Conference of the IEEE (pp. 003027-003034). IEEE, 2015. Doi : 10.1109/IECON.2015.7392564.