



CONTRIBUTION A LA MODELISATION DES ARCS ELECTRIQUES DANS LES MACHINES A COURANT CONTINU A COLLECTEUR MECANIQUE

VAUQUELIN Aurélien^{1,2}, VILAIN Jean-Paul¹, VIVIER Stéphane¹, LABBE Nicolas², DUPEUX Benoit²

¹ Université de Technologie de Compiègne, Laboratoire d'Electromécanique de Compiègne
BP20529 – 60205 Compiègne – France

² Valeo Equipements Electriques Moteur
BP 71 – 38291 Saint-Quentin-Fallavier Cedex – France
aurelien.vauquelin@utc.fr

Résumé

Dans de nombreuses applications du génie électrique, les machines à commutation mécanique constituent encore à ce jour une solution pertinente à l'implantation d'un actionneur électromécanique. Leur grande fiabilité et leur coût de fabrication relativement limité restent des avantages indéniables malgré les progrès récents de l'électronique. Cependant, la commutation mécanique liée à un système balai/collecteur pose d'énormes problèmes sur des systèmes à faible tension. La modélisation de l'interface balai/collecteur reste le point critique dans l'élaboration du modèle de la machine complète. Cette interface peut être de deux types : soit un contact mécanique balai/collecteur, soit un contact électrique via un arc entre une lame et un balai. Cet article proposera deux modèles électriques du contact par arc. Ces modèles inclus dans une modélisation globale de la machine, permettront une meilleure connaissance des phénomènes présents dans la machine complète.

Mots Clés. : Modélisation, Arcs Electriques, Balais, Collecteur, Machine à Courant Continu

INTRODUCTION

Les machines à courant continu à balais font l'objet de moins en moins de recherches dans le monde de l'électrotechnique moderne. Cependant elles n'en restent pas moins les machines les plus fiables, les plus économiques à produire et les plus utilisées dans les applications grands publics. La commutation "mécanique" du courant dans les sections via un dispositif balais/collecteur à lames reste le point délicat dans beaucoup d'applications. L'usure par frottements mécaniques et par arcs électriques entre lames et balais fait de cette zone le réel talon d'Achille de la machine.

En effet, cette partie de la machine est soumise à de nombreuses contraintes. Les échauffements dus aux frottements balais/collecteur en font la zone la plus chaude de la machine. De plus, les densités de courant sont très importantes aux interfaces et créent des échauffements supplémentaires. La présence d'arcs électriques liés à une mauvaise commutation ne fait qu'aggraver le problème. La modélisation complète et réaliste de la machine n'est alors possible qu'en ayant un modèle précis des phénomènes présents dans cette zone. L'interface au collecteur peut être de deux types : soit un contact mécanique entre un balai et une lame, soit un contact par arc électrique en fin de commutation.

La modélisation des arcs électriques est un domaine relativement peu abordé. Néanmoins, certaines études existent sur la rupture des arcs dans les contacteurs haute puissance où ces phénomènes peuvent avoir une grande incidence sur la sécurité des installations électriques ([9]). Dans ces appareils, différents dispositifs existent et ont pour mission d'accélérer l'extinction de l'arc (notamment par soufflage). Beaucoup d'approches énergétiques (modèle de Cassie et de Mayr) [6] ont été étudiées au détriment d'une modélisation purement électrique des phénomènes. Dans cet article un dispositif original a été mis au point afin de trouver expérimentalement un modèle purement électrique du comportement dynamique de l'arc électrique présent entre un balai et une lame du collecteur d'une petite machine à courant continu.

MODELISATION ELECTRIQUE DE L'ARC

Certaines équipes de recherche anglo-saxonnes [11] ont ainsi modélisé l'arc lorsque la distance entre les deux électrodes est fixe. La relation entre la tension U_a entre ses deux électrodes et le courant d'arc I_a s'exprime comme présenté dans l'équation 1.

$$U_a(I_a) = U_0 + k \cdot I_a^n \quad (1)$$

D'autres approches permettent une modélisation dynamique de l'arc [8]. En effet, lorsque la distance entre les électrodes e_a augmente, la tension d'arc croît plus rapidement que dans le cas d'arc statique. Le modèle le plus répandu est le modèle d'Ayrton à 4 paramètres (équation 2).

$$U_a(I_a, e_a) = U_0 + k \cdot I_a + C \cdot e_a + D \cdot e_a / I_a \quad (2)$$

Une équipe canadienne [7] a également montré que la tension d'arc lorsque le courant était supérieur à 2A pouvait se modéliser de façon intéressante par un modèle d'Ayrton simplifié ne contenant que deux coefficients comme présenté dans l'équation 3:

$$U_a(e_a) = U_0 + C \cdot e_a \quad (3)$$

Cette dernière relation introduit une dépendance linéaire de la tension d'arc et de la distance entre les électrodes.

Dispositif Expérimental

Un dispositif expérimental original a donc été mis au point afin de caractériser électriquement les arcs de commutation présents à la surface du collecteur d'une petite machine à courant continu (Fig 1). Ce dispositif se compose d'une alimentation en courant asservie délivrant jusqu'à 160A. Une diode montée en anti-parallèle permet de protéger l'alimentation d'une éventuelle surcharge en courant. Quatre inductances à air (non saturables) ont tour à tour été ajoutées afin de simuler le circuit à couper. Enfin un contact glissant rotatif (voir Fig 2) permet d'ouvrir et de fermer le circuit deux fois par tour. Il se compose d'un collecteur à 25 lames monté sur un arbre et entraîné par un moteur auxiliaire. Deux groupes de lames ont été court-circuités par des fils poinçonnés sur le talon du collecteur. Deux balais diamétraux viennent frotter sur la périphérie de ce commutateur mécanique.

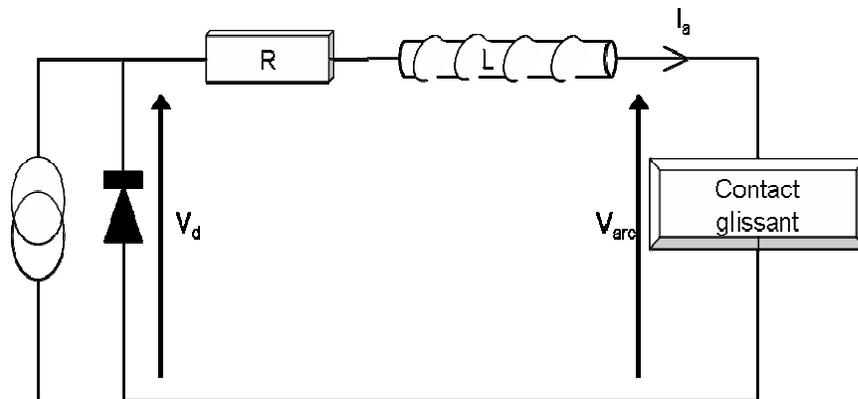


Figure 1 : Schéma du dispositif expérimental

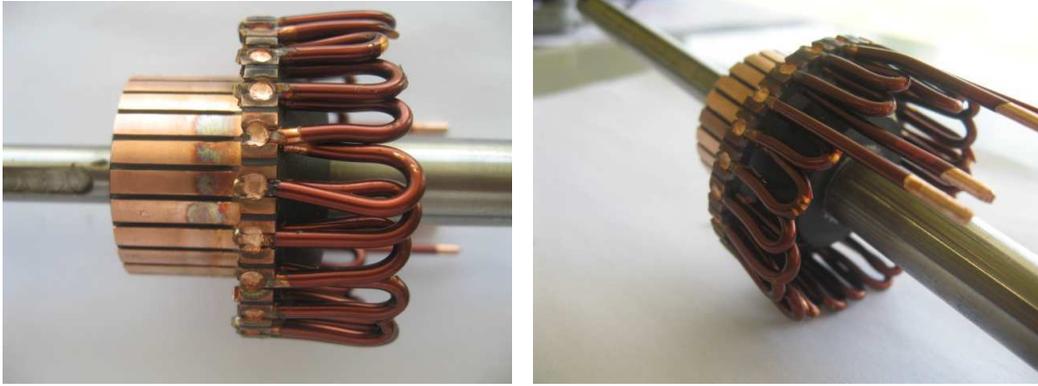


Figure 2 : Photos du contact glissant

Nous avons donc fait une campagne de mesure pour différentes vitesses d'ouverture du contact. Partant de différents courants de départ I_0 , nous avons ouvert le circuit et enregistré les grandeurs V_d , V_{arc} et I_{arc} (voir Fig 3). Pour chaque essai, nous avons identifié la résistance R et l'inductance L du circuit contact fermé. Ainsi, connaissant $I(t)$, $V_{arc}(t)$ et $V_d(t)$, nous pouvons rechercher numériquement le couple de paramètres (R,L) afin de minimiser l'erreur quadratique de l'équation 4 :

$$RI + L \frac{dI}{dt} = V_d - V_{arc} \quad (4)$$

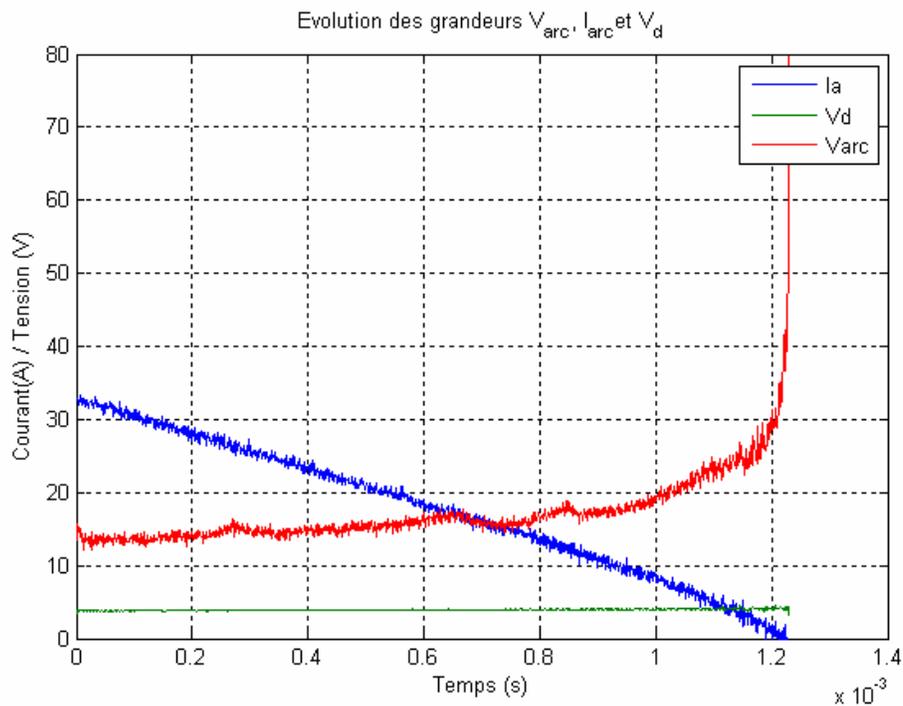


Figure 3 : Exemple des évolutions de V_{arc} et de I_{arc}

Une méthode d'intégration a dû être employée pour éviter toutes dérivations numériques toujours délicates. Les valeurs moyennes sont présentées dans le tableau 1.

	Inductance 1	Inductance 2	Inductance 3	Inductance 4
L(mH)	0.52	0.33	0.78	0.91
Ecart type (mH)	0.08	0.01	0.11	0.20
R(mΩ)	88.4	53.5	94.3	74.2
Ecart type (mΩ)	37.6	24.3	37.7	43.1

Tableau 1 : Résultats de l'identification des paramètres R et L pour trois inductances différentes

Une fois les paramètres du circuit déterminé, nous avons cherché à modéliser l'évolution de la tension d'arc suivant deux approches. La première consiste à remplacer l'arc par une source de tension ; la seconde par une source de courant. Ces modèles équivalents seront ensuite intégrés dans une modélisation plus complète de la machine.

Modélisation de l'arc par une source de tension

Dans cette partie, nous avons cherché une approximation de l'arc par une formule dérivée du modèle d'Ayrton. Ainsi, dans cette modélisation, la tension d'arc s'exprime comme une tension constante V_0 et un terme proportionnel à l'inverse du courant d'arc (voir équation 5). Cette modélisation offre une meilleure approximation de V_{arc} dans sa partie finale. C'est justement cette montée hyperbolique qui conditionne l'extinction de l'arc.

$$U_a(I_a) = V_0 + C/I_a \quad (5)$$

La figure 5 montre un exemple d'approximation avec $V_0=14.9V$ et $C=17.6 VA$. D'autres approximations plus complexes ont été également menées et ont montrées qu'un modèle plus élaboré n'apporte pas de précision supplémentaire sur l'approximation. En d'autres termes, la tension d'arc se décompose aisément en la somme d'un terme constant qui s'établit instantanément à l'ouverture du circuit et un terme hyperbolique qui conditionne l'extinction de l'arc.

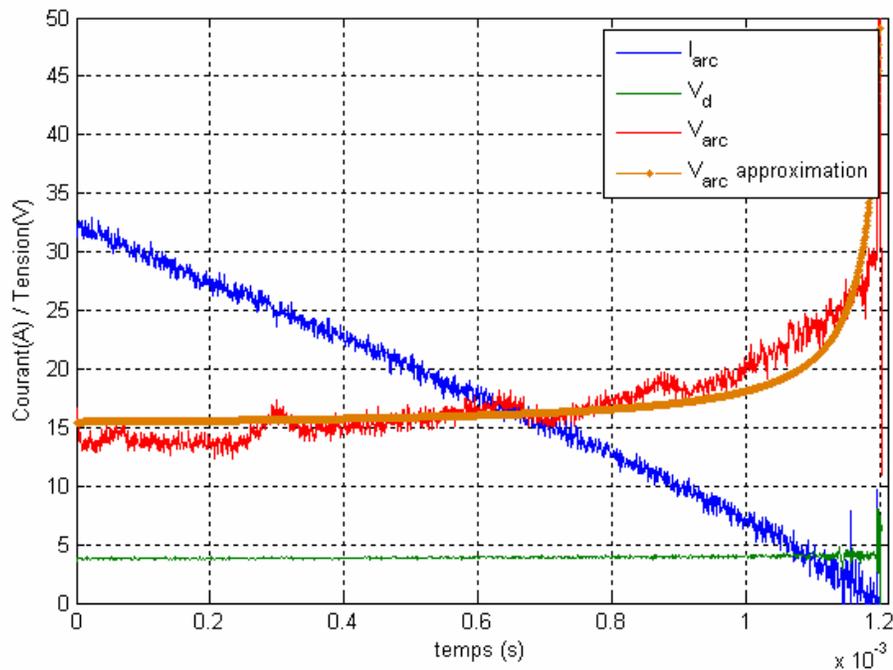


Figure 4 : Exemple d'approximation de la tension d'arc

Cette modélisation, satisfaisante aux premiers abords, n'a pas permis de trouver une loi générale régissant l'évolution des coefficients V_0 et C en fonction de l'inductance du circuit à couper, de la vitesse d'ouverture du contact et du courant à couper. Le plasma mis en jeu dans l'établissement et l'entretien de l'arc reste un phénomène complexe difficile à modéliser par une simple équation électrique. De plus, cela dépend de beaucoup de paramètres physiques comme la température, la composition intrinsèque des balais, leur géométrie et la qualité de surface du collecteur et des entre-lames.

Suite à ces observations, nous avons choisi de nous intéresser à la manière avec laquelle le courant décroît et ainsi considérer l'arc comme une source de courant.

Modélisation de l'arc par une source de courant

Ainsi, il est apparu de façon très reproductible, une décroissance du courant quasi linéaire au cours de l'arc avec une légère inflexion à l'extinction (voir figure 3).

Nous avons cherché à normaliser les essais afin de se ramener à un faisceau de courbes. Il est ainsi apparu que le temps de décroissance dépendait de trois facteurs : le courant de départ I_0 , l'inductance du circuit à couper noté L et de la vitesse linéaire d'ouverture du contact (v en m/s). La figure 5 présente cette normalisation. L'échelle colorée traduit l'échelle de vitesse d'ouverture du contact.

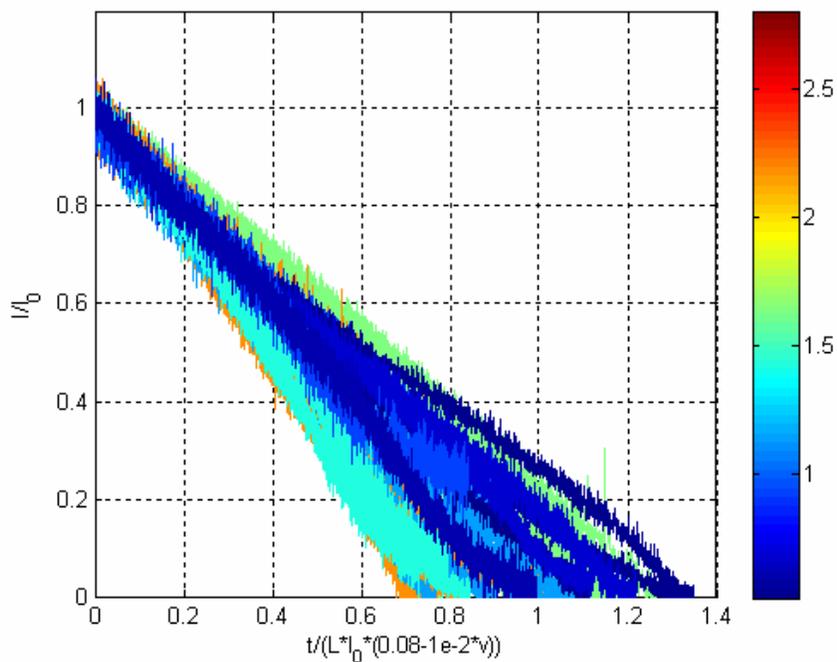


Figure 5 : Normalisation de la décroissance du courant d'arc en fonction de la vitesse d'ouverture (échelle colorée en m/s)

Connaissant l'inductance du circuit à couper et la vitesse linéaire d'ouverture de contact, l'évolution du courant s'exprime suivant l'équation 6 :

$$I/I_0 = 1 - t / (L \cdot I_0 \cdot (0,08 - 0,01 \cdot v)) \quad (5)$$

La figure 6 présente l'évolution de la dérivée moyenne des courants pour les différentes inductances du circuit à couper. L'échelle colorée traduit la vitesse d'ouverture du contact. Dans l'application considérée, la décroissance moyenne du courant est de -50A/ms. Ceci constitue une donnée importante pour l'évaluation des pertes par arcs électriques dans la machine.

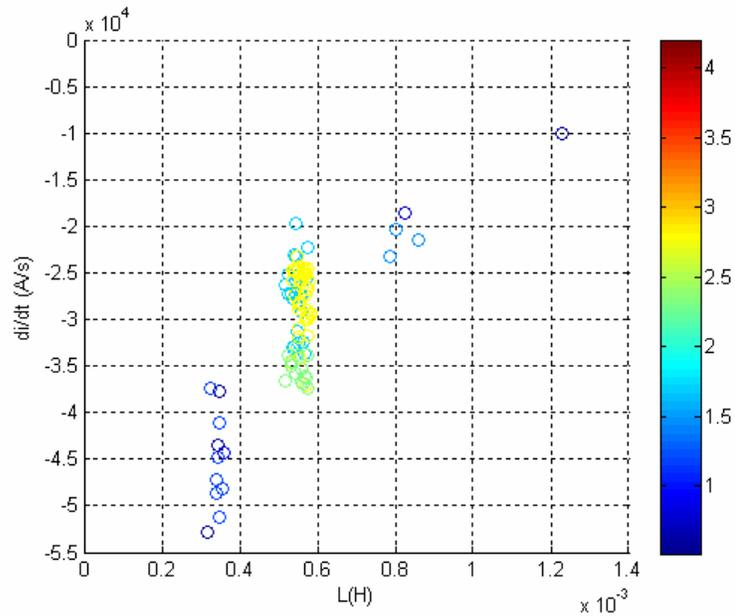


Figure 6 : Dérivée moyenne du courant en fonction de l'inductance du circuit à couper (échelle colorée : vitesse d'ouverture en m/s)

Cette approche par source de courant équivalente semble plus réaliste et apporte des résultats intéressants pour la modélisation globale d'une machine à courant continu à balais.

CONCLUSION

Dans cet article, les auteurs présentent plusieurs modélisations de l'arc électrique afin d'enrichir un modèle global de machine à courant continu à balais. L'arc électrique entre une lame et un balai est alors approximé par une source de tension équivalente ou par une source de courant équivalente. Il apparaît qu'une source de tension à deux paramètres suffit amplement pour approximer l'envolée de tension lors de l'ouverture du circuit. Dans le cas d'une source de courant, il apparaît une décroissance quasi linéaire du courant facilement modélisable par un coefficient constant représentant la dérivée temporelle moyenne du courant fonction du temps.

REFERENCES

- [1] M. Kostenko and L. Piotrovski, Machines électriques, 2nd ed, tome 1. Mir Moscou,1976, pp.224-255.
- [2] G. Segulier, F. Notelet, Electrotechnique Industrielle 2nd ed., Technique et Documentation,1980, pp.35-44.
- [3] L. Fechant, Le contact Electrique Tome 1 ed Hermes. 2003, pp 167-2
- [4] M. Fassenet, D. Chamagne, T. Pera, JM Kau_man, Modelling of Commutation and In_uences of Armature Winding Choice on Performances of Permanent Magnet DC Motor, ICEM 2000, pp. 1697-1701
- [5] M. Fassenet, D. Chamagne, T. Pera, JM Kauffman, EMF Computation with commutation phenomena effects for PM DC motor, EMDC 2001., pp. 692 – 699
- [6] J. Cros, N. Fontaine, V. Masson, J. Jevrey, M. Frenette, J. Figueroa, P. Viarouge Brush DC Motor Simulation with Cassie Arc Model International Conference on Electrical Machines (ICEM), Chania, Crete Island, Greece, September 2 . 5, 2006

- [7] Sincero Geraldo C.R. ; J. Cros, P. Viarouge Arc Models for Simulation of Brush Motor Commutations Magnetics, IEEE Transactions on Volume 44, Issue 6, June 2008 Page(s) :1518 – 1521
- [8] B. Kubicek, K.A. Berger Modeling Moving Electric Arcs : Veri_cation of a Coupled Fluid-Dynamics Magnetostatic Approach Magnetics, IEEE Transactions on Volume 44, Issue 6, Juin 2008 Pages :790 – 793
- [9] Y. Pelenc Interruption des circuits alimentés en courant continu Technique de l'ingénieur - D4700
- [10] P.F. Desesquelles About the commutation in DC Motors J. Physics France 5 (1995) pages :825 – 834
- [11] C.G. Suits Experiments with arcs at atmospheric pressure Amer. Phys. Soc., Phys. rev.,no. 4, pp 252-254, August 1934