

Optimisation des Paramètres Dimensionnels des Machines à Courant Continu par l'étude des Phénomènes de Commutation

Aurélien VAUQUELIN^{1,2}

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

² Valeo Equipement Electrique Moteur
BP 71 – 38291 Saint-Quentin-Fallavier Cedex – France
E-mail : 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 faibles tensions. Dans ce cas précis, l'amplitude des courants dans les conducteurs rend la commutation. L'énergie perdue par arcs électriques est alors loin d'être négligeable. Cet article présentera une méthode originale de modélisation de la machine à courant continu qui prend en compte tous les aspects du contact balai/collecteur à savoir le contact électrique glissant et le contact électrique par arc. Le but de ces modélisations est de connaître avec précision la répartition des tensions et des courants dans les conducteurs du rotor mais également de déterminer les paramètres géométriques de la machine qui minimiseront les pertes. Un plan d'expériences complet montrera l'influence de différents paramètres sur les grandeurs caractéristiques de la machine.

I. INTRODUCTION

Cet article propose une modélisation originale des machines à courant continu principalement tournée vers les phénomènes de commutation. En effet, le comportement électrique des contacts glissants entre le balai et le collecteur y est étudié car il influence grandement les caractéristiques de la machine (puissance électromagnétique, durée de vie des balais, température du collecteur...).

De nos jours, l'analyse des problèmes électromagnétiques par Eléments Finis (EF) est largement répandue pour l'optimisation des machines électriques. L'objectif de cette approche numérique est de déterminer les paramètres optimaux (dimensions, caractéristiques magnétiques...) qui permettront à l'actionneur d'atteindre les performances décrites dans un cahier des charges.

Contrairement aux machines synchrones alimentées en courant, il est très difficile de déterminer – à priori – la répartition du courant dans les bobinages de la machine. Dans certains cas, la commutation influence grandement la répartition théorique. Cette distribution est néanmoins une donnée d'entrée indispensable à toute simulations EF. Aucune optimisation pré-

cise de la machine n'est possible sans cette donnée. De plus, il est très difficile de mesurer expérimentalement cette répartition du courant surtout en basse tension où les phénomènes de commutation sont prédominants.

Cet article montre à l'aide d'un algorithme simple comment les contacts glissants entre les balais et le collecteur influencent la distribution du courant dans les conducteurs du rotor. Les chutes de tension liées aux contacts mécaniques et aux arcs électriques seront pris en compte. Ce programme permet également de faire varier un certain nombre de paramètres comme le nombre et l'ouverture angulaire des balais. Couplé à un solveur Eléments Finis, cet outil permettra des simulations plus fidèles. Une solution optimale qui minimisera les pertes par commutation et augmentera la durée de vie de la machine pourra alors être recherchée.

II. PRINCIPE DE LA MODÉLISATION

Dans une machine à courant continu, le rotor est fait d'un bobinage périodique en court-circuit qui peut être imbriqué ou ondulé, simple ou multiple (voir Figure 1).

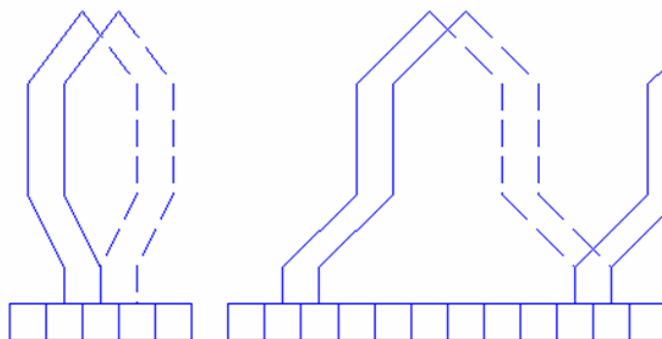


FIGURE 1. Schéma développé des bobinages imbriqués et ondulés simples

Une "section" constitue la partie élémentaire de fil connectée entre deux lames du collecteur. Pour chaque position angulaire du rotor, cette topologie fermée constituée de N_s sections est modifiée par les différentes connexions établies

par les balais. Ces connexions peuvent être mécaniques ou électriques. Ainsi, un balai a deux fonctions principales : premièrement, transmettre l'énergie électrique du stator vers le rotor ; deuxièmement, court-circuiter au moins deux lames consécutives du collecteur afin d'inverser le sens du courant dans les sections considérées.

Pour chaque position du rotor, l'ensemble des N_c contacts au collecteur transforme la topologie entière à N_s inconnues en une topologie équivalente à N_c inconnues. L'algorithme est capable de regrouper les sections aux vues de ces différents contacts et de simplifier la topologie initiale à l'aide d'un formalisme matriciel spécifique. Les N_c équations sont ensuite résolues et les caractéristiques électriques telles que courants et tensions des N_s sections peuvent être facilement retrouvées. De l'évolution de ces variables, on peut évaluer la qualité des processus de commutation pour une machine spécifique. En outre, l'algorithme établit un bilan de toutes les sources de pertes dans la machine.

III. FORMALISME MATHÉMATIQUE

L'ensemble des sections du rotor est modélisé par le système d'équations suivant :

$$U_{sec} = R_{sec} \cdot I_{sec} + \frac{dL_{sec} \cdot I_{sec}}{dt} + E_{sec} \quad (1)$$

avec

- U_{sec} : le vecteur des tensions de section
- I_{sec} : le vecteur des courants de section
- E_{sec} : le vecteur des Forces électromotrices sur chaque section
- R_{sec} et L_{sec} sont des matrices carrées ($N_s \cdot N_s$) regroupant les résistances et les inductances propres et mutuelles de chaque section.

En tenant compte de la succession de N_c contacts (mécaniques ou électriques) entre balais et collecteur, l'algorithme regroupe l'ensemble des N_s sections en N_c groupes (voir exemple Figures 7 et 8 pour une machine à bobinage ondulé). Chaque groupe comprend des sections connectées en série entre deux contacts consécutifs.

Afin d'opérer cette transformation, une matrice A nommée "matrice de connexion" est nécessaire. Cette matrice de taille $N_c \cdot N_s$ est remplie de "0" sauf en $A_{i,j}$ quand la section j appartient au groupe i . Dans ce cas, $A_{i,j} = 1$.

Cette matrice nous permet d'effectuer la transformation de la topologie initiale vers la topologie réduite à chaque pas de calcul. Le système 1 devient alors :

$$U_g = R_g \cdot I_g + \frac{dL_g \cdot I_g}{dt} + E_g \quad (2)$$

avec

$$\begin{aligned} R_g &= A \cdot R_{sec} \cdot A^T \\ L_g &= A \cdot L_{sec} \cdot A^T \\ E_g &= A \cdot E_{sec} \end{aligned}$$

où

- U_g : le vecteur des tensions de groupe

- I_g : le vecteur des courants de groupe
- E_g : le vecteur des Forces électromotrices sur chaque groupe
- R_g et L_g sont des matrices carrées ($N_c \cdot N_c$) regroupant les résistances et les inductances propres et mutuelles de chaque groupe

A partir de ce système réduit, un solveur de type Runge-Kutta d'ordre 4 résout le système 2 et évalue le courant circulant dans chacun des N_c groupes au pas de temps suivant. L'équation 3 permet de remonter aux courants dans chacune des sections.

$$I_{sec} = A^T \cdot I_g \quad (3)$$

Pour finir, une matrice C appelée "matrice de transformation inverse" permet de regrouper les sections en groupes au pas de temps suivant grâce à l'équation 4. Cette matrice est égale en tout point à la matrice A excepté qu'il n'y a qu'un seul "1" sur chacune des lignes.

$$I_g = C \cdot I_{sec} \quad (4)$$

Il est important de prendre garde à l'égalité des courants des sections mises en série et plus particulièrement lors de l'apparition et de l'extinction des arcs électriques.

IV. MODÉLISATION DU CONTACT GLISSANT

Afin de modéliser les chutes de tension aux bornes de chacun des contacts, l'algorithme évalue l'angle de contact (défini à la Figure 2) entre chaque lame et chaque balai. Lorsqu'une lame arrive sous un balai, l'angle de contact croît jusqu'à un maximum θ_b (qui est le minimum entre l'ouverture angulaire d'un balai et d'une lame). Ensuite, l'angle de contact reste constant et décroît jusqu'à zéro. Si la commutation n'est pas terminée, le contact se poursuit par un arc électrique ; l'angle de contact devient virtuellement négatif jusqu'à l'extinction de l'arc en θ_a . Cette évolution est présentée à la Figure 3.

Si l'angle de contact entre le balai et la lame considérée est positif, il y a contact mécanique entre la lame et le balai. La chute de tension est alors petite. Elle augmente lorsque l'angle de contact décroît pour atteindre un maximum compris entre 0.2 et 1V (voir [1], [2], [3]).

Si l'angle de contact est négatif, le balai est en contact avec la lame par un arc électrique. La chute de tension croît exponentiellement jusqu'à l'extinction de l'arc. L'évolution de cette chute de tension est proposée en Figure 4.

V. CALCUL DES MATRICES R_{sec} ET L_{sec}

Pour résoudre les équations du modèle, il est nécessaire de connaître avec précision les matrices des résistances et des inductances (propres et mutuelles).

La matrice des résistances R_{sec} s'exprime comme

$$R_{sec} = r \cdot I_d \quad (5)$$

où r est la résistance d'une section isolée et I_d est la matrice identité de taille N_s

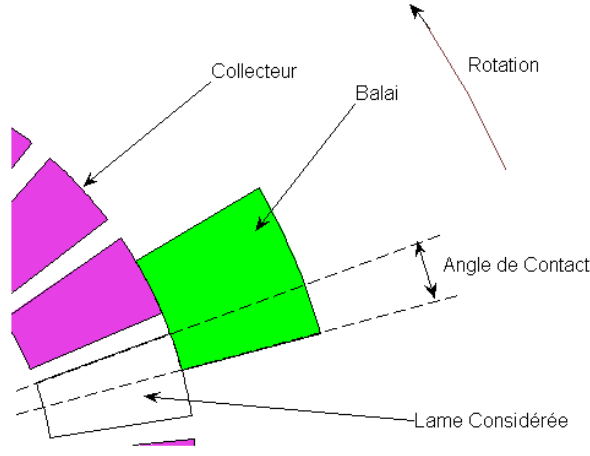


FIGURE 2. Définition de l'angle de contact entre un balai et une lame considérée

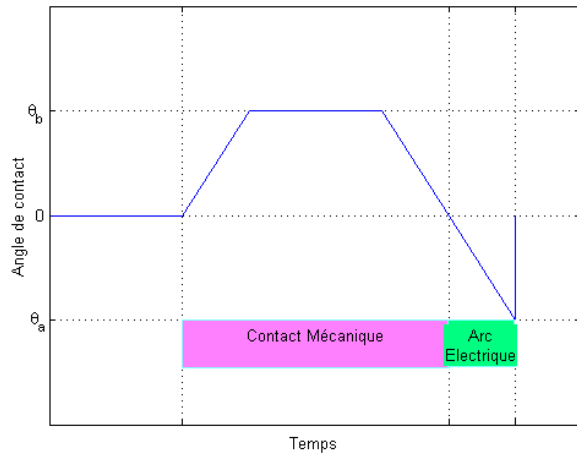


FIGURE 3. Evolution de l'angle de contact en fonction du temps

En ce qui concerne la matrice des inductances, une analyse Eléments Finis est nécessaire afin de déterminer les couplages magnétiques entre les différentes sections.

Avec une seule section alimentée par un courant connu, le flux traversant chacune des sections du moteur peut être calculée et les coefficients de self et mutuelles inductances déduits.

Cette méthode, uniquement valable pour des machines à pôles lisses, permet la détermination de tous les coefficients de la première ligne de la matrice L_{sec} . Les lignes suivantes sont déduites par simple permutation circulaire de la première ligne (voir Equation 6).

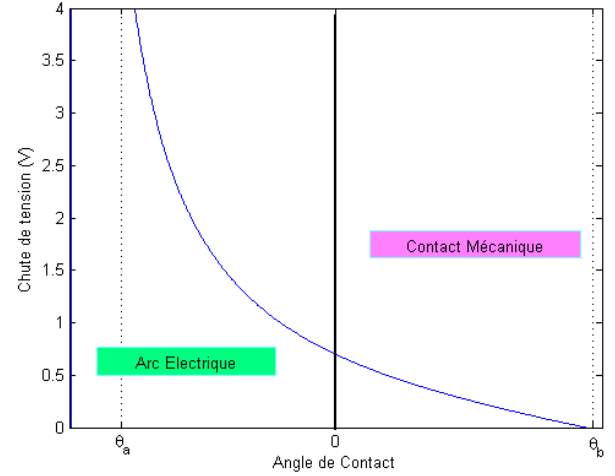


FIGURE 4. Evolution de la chute de tension aux bornes d'un contact en fonction de l'angle de contact

$$M_{1,1} = M_{2,2} = L_1 = L_2 \quad (6)$$

$$M_{1,2} = M_{2,3} = \dots$$

$$\mathbf{L}_{sec} = \begin{pmatrix} L_1 & M_{1,2} & \dots \\ M_{1,25} & L_2 & M_{1,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}$$

VI. OPTIMISATION D'UNE STRUCTURE PARTICULIÈRE

Dans cette partie, une machine à enroulement ondulé sera étudiée. Les paramètres principaux de la machine sont repris dans le Tableau I. La géométrie de la machine et l'évolution des coefficients sont présentés sur les Figures 5 et 6.

Symbole	Valeur	Description
N_p	3	Nombre de paires de pôle
N_s	25	Nombre de sections
N_{seg}	25	Nombre de lames
W_p	4	Pas de bobinage
C_p	8	Pas au collecteur
θ_{seg}	11.3°	Ouverture angulaire d'une lame
θ_{bal}	17.54°	Ouverture angulaire d'un balai
θ_p	14.4°	Pas lamaire
Ω	7200	Vitesse de rotation de l'induit (tr/min)
B_r	0.4	Induction rémanente des aimants (T)
r	$5 \cdot 10^{-4} \Omega$	Résistance d'une section isolée

TABLE I
CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DE LA MACHINE ÉTUDIÉE

La Figure 7 propose deux représentations différentes du bobinage de la machine. Sur ces figures, les lames en contact avec les balais sont en trait fort. Cette machine comporte donc 4 balais.

Contrairement à un bobinage imbriqué, le bobinage ondulé n'offre que deux voies d'enroulement c'est-à-dire deux chemins distincts entre les balais positifs et les balais négatifs.

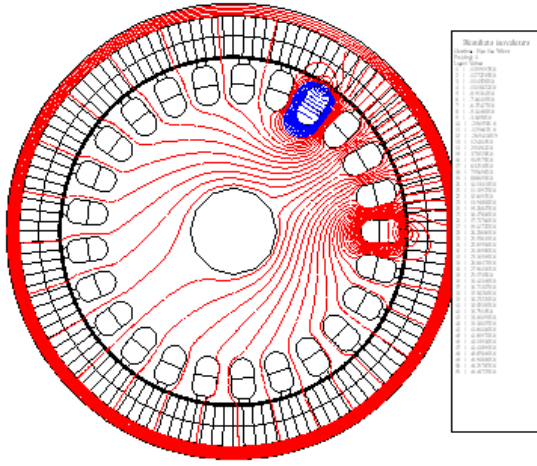


FIGURE 5. Géométrie de la machine et lignes de champ magnétique avec une section alimentée

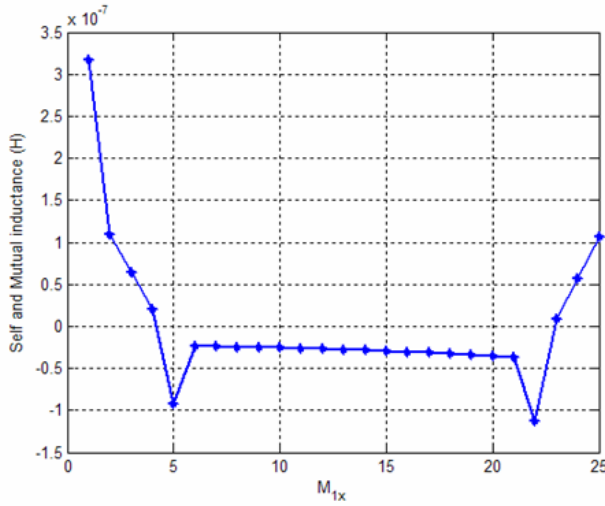


FIGURE 6. Evolution des coefficients de la première ligne de la matrice L_{sec}

Le schéma électrique fait également apparaître un nombre différent de sections entre les deux voies d'enroulement.

A chaque instant, un certain nombre de contacts (mécaniques et électriques) sont identifiés. Une topologie réduite est alors établie. Pour ce type de machine à bobinage ondulé, la topologie (voir Figure 8) se décompose en deux groupes de sections sous les balais positifs et négatifs et deux voies d'enroulement constituées des sections reliant directement les balais positifs aux balais négatifs (groupes U_{gN1+1} et $U_{gN1+N2+2}$). Les vecteurs de connexion (V_p et V_n) représentent les chutes de tension par contacts mécaniques et par arcs électriques. A chaque pas de calcul, les équations matricielles liées à la topologie considérée sont résolues.

Le but de cette étude est de dégager la configuration qui maximise le couple électromagnétique d'une part, et celle qui minimise les pertes par arcs électriques d'autre part. Pour ce faire, les paramètres suivants seront variables :

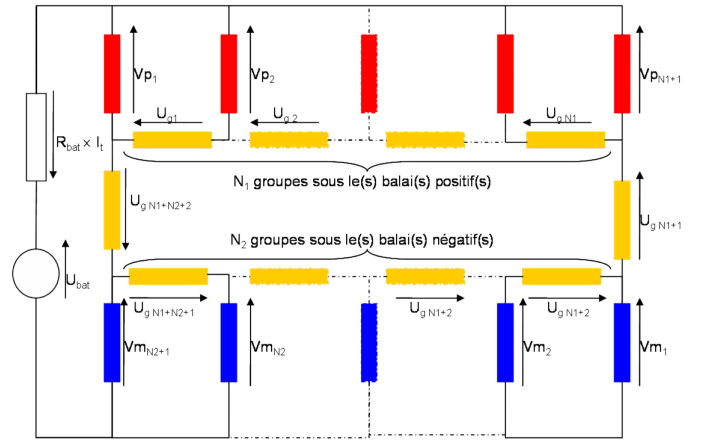


FIGURE 8. Forme générale de la topologie pour la machine considérée

- Paramètre 1 : Le nombre de paires de balais N_b
- Paramètre 2 : L'ouverture angulaire des balais θ_{bal}
- Paramètre 3 : Le décalage des balais par rapport à la ligne neutre α

Une série de 75 calculs a été menée. Dans ces simulations, les paramètres évoluent comme présenté dans le tableau II.

Paramètre	Symbole	Valeurs
1	N_b	1 — 2 — 3
2	θ_{bal}	12.28° — 14.91° — 17.54° — 20.17° — 22.80°
3	α	-6° — -4° — -2° — 0° — +2°

TABLE II
DOMAINE DE VARIATION DES PARAMÈTRES

Pour chacune des configurations, les balais s'arrangent autour du collecteur comme présenté sur la Figure 9.

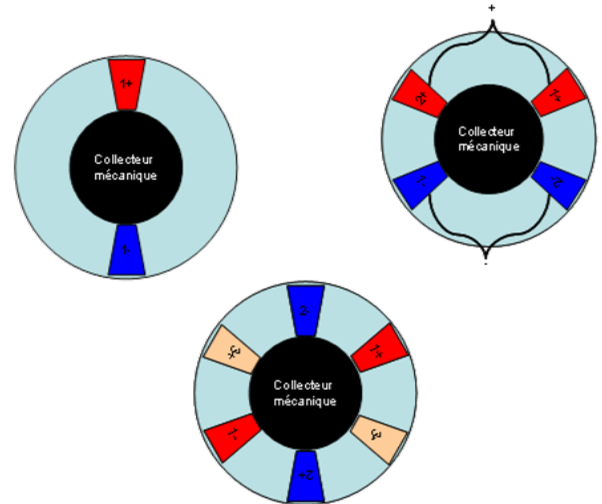


FIGURE 9. Les différents arrangements des balais autour du collecteur

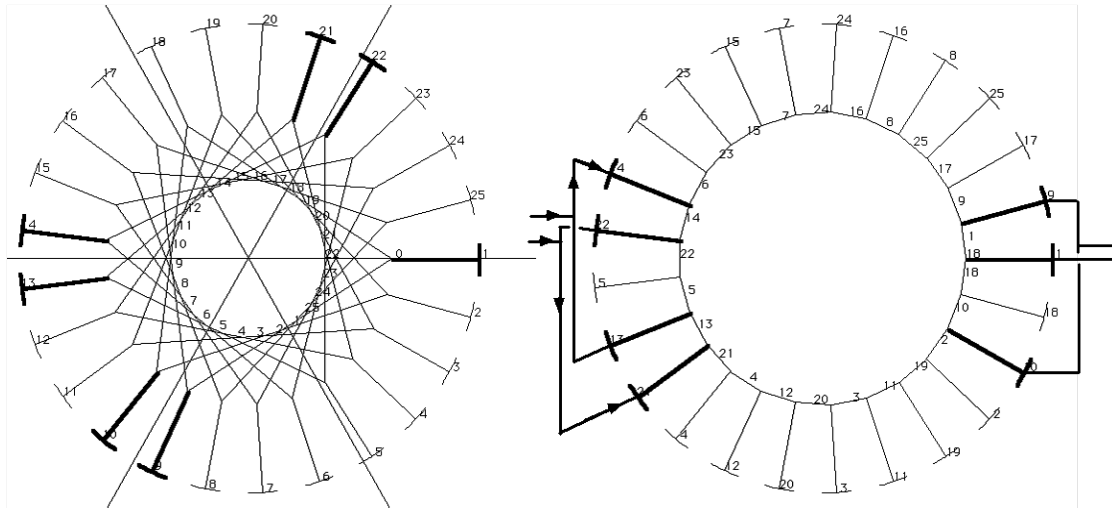


FIGURE 7. Représentation Mécanique (à gauche) et Electrique (à droite) de la machine considérée (2 paires de balais)

Coefficients	Couple Electromagnétique	Pertes par Arcs Electriques
a_0	3.13	887.58
a_1	-0.05	37.88
a_2	-0.08	121.52
a_3	-0.64	263.88
a_{12}	-0.05	25.03
a_{13}	-0.09	37.11
a_{23}	-0.23	101.04

TABLE III
COEFFICIENTS a_i POUR CHACUNE DES VARIABLES DE SORTIE

VII. RESULTATS

A. Résultats du plan d'expériences complet

Le but de l'étude est de montrer le niveau d'influence des différents facteurs sur le couple électromagnétique et sur les pertes par arcs électriques. Dans cette approche ces grandeurs seront appelées "variables de sortie". L'algorithme approxime l'évolution de chacune des variables de sortie y comme la combinaison linéaire des paramètres de l'étude (voir Equation 7). Dans cette équation, les paramètres N_b , θ_{bal} et α sont centrés et réduits et seront notés $\bar{N}_b$, $\bar{\theta}_{bal}$ et $\bar{\alpha}$

$$y = a_0 + a_1 \cdot \bar{N}_b + a_2 \cdot \bar{\theta}_{bal} + a_3 \cdot \bar{\alpha} + a_{12} \cdot \bar{N}_b \cdot \bar{\theta}_{bal} + a_{13} \cdot \bar{N}_b \cdot \bar{\alpha} + a_{23} \cdot \bar{\theta}_{bal} \cdot \bar{\alpha} \quad (7)$$

L'ensemble des coefficients a_i est regroupé dans le tableau III et leurs évolutions sont présentées sur les Figures 10 et 11.

Aux vues des simulations précédentes, il apparaît que parmi les 3 paramètres étudiés, le décalage angulaire de l'ensemble des balais (noté α) influence majoritairement le couple et les pertes par arcs électriques. Une augmentation du paramètre α de sa valeur moyenne à sa valeur maximale engendre une diminution du couple électromagnétique de 0.64Nm mais aussi une augmentation des pertes par arcs électriques de 263W. Il

apparaît donc qu'un décalage arrière des balais par rapport au centre du pôle favorise le couple et diminue les pertes par arcs.

Cette étude montre également qu'avec les hypothèses utilisées, une augmentation de l'ouverture angulaire des balais θ_{bal} engendre une diminution du couple magnétique mais aussi une augmentation non négligeable des pertes par arcs électriques. La diminution du couple magnétique s'explique par l'accroissement du nombre de sections en commutation lorsque θ_{bal} augmente. Ces sections sont traversées par des courants plus faibles et ne contribuent pas directement à la création du couple.

Les autres paramètres ont des effets de mêmes signes mais d'amplitudes plus réduites. Les effets croisés a_{12} , a_{13} et a_{23} sont également faibles.

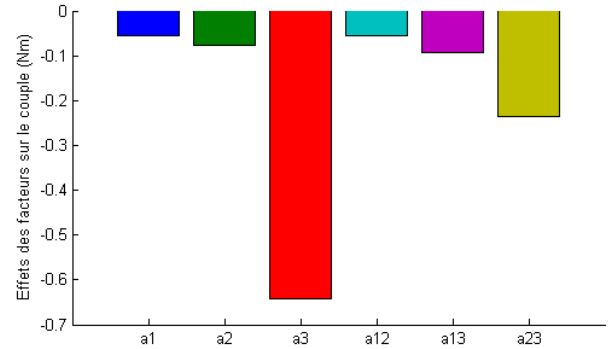


FIGURE 10. Effets des facteurs sur le couple Electromagnétique au rotor

B. Configuration qui maximise le couple

Le couple maximal est obtenu pour les valeurs suivantes $N_p = 1$, $\theta_{bal} = 22,80^\circ$ et $\alpha = -6^\circ$. Le couple électromagnétique développé est de 3,81Nm et les pertes par arcs sont de 670W.

La Figure 12 présente sur un même graphique l'évolution du courant dans une section sur 3 pôles consécutifs ainsi

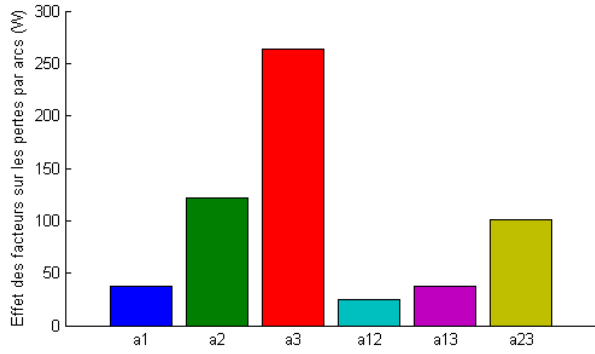


FIGURE 11. Effets des facteurs sur les pertes par arcs électriques

que la puissance électromécanique (proportionnelle au couple) fournie par la section considérée.

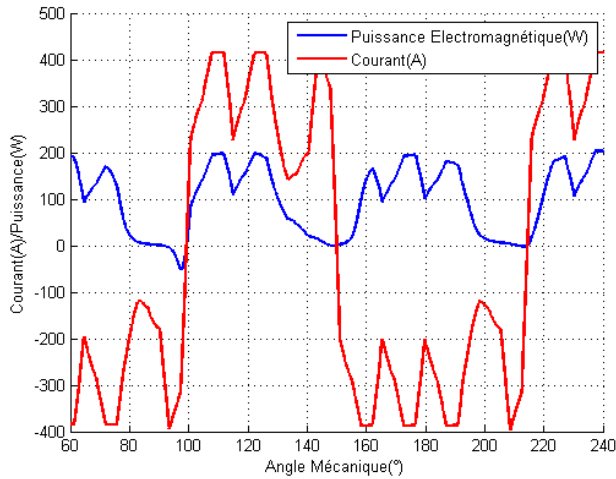


FIGURE 12. Evolution du courant et de la puissance électromagnétique d'une section pour la configuration qui offre le couple maximal

Dans cette configuration à une paire de balais, le courant subit de fortes variations. Il apparaît également que la puissance électromagnétique délivrée par une section peut être négative dans certaines phases de commutation. Dans ce cas, la section génère un couple antagoniste au couple moteur ce qui est très dommageable. Néanmoins, la configuration à deux balais permet une maximisation des sections en conduction (i.e. qui produisent du couple) même si la commutation n'est pas parfaite (présence notable d'arcs électriques).

C. Configuration qui minimise les pertes par arcs électriques

Les pertes par arcs électriques minimales sont obtenues pour les valeurs suivantes $N_p = 2$, $\theta_{bal} = 17.54^\circ$ et $\alpha = -6^\circ$. Le couple électromagnétique développé est de 3.75Nm et les pertes par arcs s'élèvent de 632W.

Comme précédemment, la Figure 13 présente sur un même graphique l'évolution du courant dans une section sur 3 pôles

consécutifs ainsi que la puissance électromécanique (proportionnelle au couple) fournie par la section considérée.

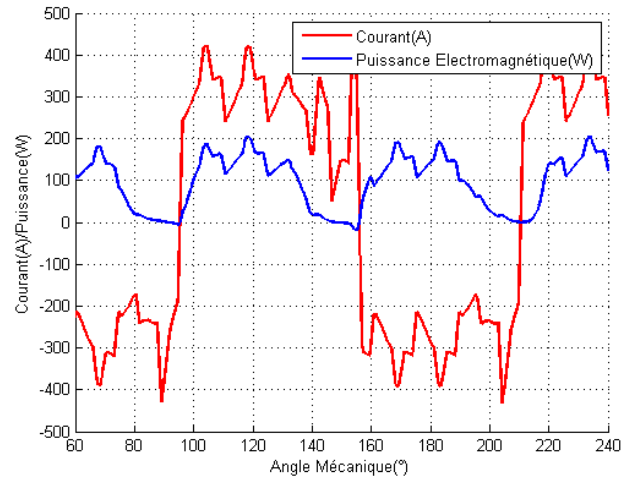


FIGURE 13. Evolution du courant et de la puissance électromagnétique d'une section pour la configuration qui offre les pertes par arcs minimales

Les commutations étant plus fréquentes en deux paires de balais, les variations de courant sont plus fréquentes mais moins marquées. De plus, durant les phases de commutation, la puissance électromagnétique reste quasi nulle et ne génère pas le couple antagoniste présenté dans le cas précédent. La commutation prend moins de temps et les arcs sont plus rares.

VIII. CONCLUSION

Cet article présente une nouvelle technique de modélisation complète de la machine à courant continu. Cette technique prend en compte les chutes de tension liées aux contacts mécaniques glissants mais également aux contacts par arcs électriques qui sont très importants dans les applications à basse tension et hauts niveaux de courant.

Une approche par plan d'expériences a été menée et a permis de mettre en évidence l'importance du calage angulaire des balais par rapport aux centres des pôles inducteurs sur le couple et les pertes par commutation. Il a été aussi souligné que dans certaines conditions, les sections en cours de commutation génèrent des couples antagonistes au couple moteur. Cela montre l'importance des commutations dans ces machines à collecteur mécanique encore largement utilisées.

RÉFÉRENCES

- [1] M. Kostenko and L. Piotrovski, *Machines électriques*, 2nd ed, tome 1. Mir Moscou, 1976, pp.224-255.
- [2] G. Seguiet, 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 Kauffman, *Modelling of Commutation and Influences 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