

Optimisation de la FMM de machines à bobinage dentaire

N. Bekka, M.E. Zaïm, N. Bernard, D. Trichet

IREENA, Université de Nantes, Boulevard de l'Université, 44602 Saint-Nazaire, France

RESUME –Les machines à aimants permanents, équipées d'un bobinage dentaire sont de plus en plus envisagées dans les systèmes embarqués grâce à leurs fortes performances spécifiques et à leur simplicité de fabrication. Néanmoins, elles sont caractérisées par une force magnétomotrice (FMM) riche en harmonique pouvant conduire à des pertes rotoriques, vibrations et des nuisances sonores non négligeables. Dans ce papier, une nouvelle méthode basée sur l'utilisation d'un algorithme génétique couplée à un modèle analytique de la FMM du bobinage statorique est proposée pour optimiser les paramètres intrinsèques du bobinage et ainsi réduire le contenu harmonique de la FMM. Cette méthode est utilisée pour déterminer des bobinages dentaires dont l'harmonique dominant est le cinquième harmonique. Un ensemble de bobinages optimaux est alors présenté.

Mots-clés—Bobinage dentaire, harmoniques de FMM, algorithme génétique multicritère

1. INTRODUCTION

La tendance actuelle pour la propulsion des systèmes de transport (véhicules terrestres, bâtiments de la marine) est tournée vers le mode électrique pour ses nombreux avantages (énergie propre, souplesse d'utilisation,...). Néanmoins dans ces applications, les machines électriques subissent de fortes contraintes (masse, encombrement, fiabilité, rendement...) que les structures conventionnelles ont peine à satisfaire. Pour cela plusieurs architectures d'actionneurs (polyentrefers, à flux transverse, à effet vernier,...etc.) ont été proposées pour accroître les performances spécifiques des actionnements électriques.

Dans ce travail, nous nous intéressons plus spécifiquement aux machines à bobinage dentaire qui produisent un couple à partir de l'interaction d'un harmonique du champ statorique d'ordre supérieur au fondamental avec le champ produit par les aimants permanents déposés à la surface du rotor. On accroît ainsi le nombre de pôles apparents tout en gardant un nombre d'encoches restreint [1]. De plus, comme le bobinage est concentré autour d'une dent, les têtes de bobines deviennent très courtes, ce qui permet de réduire les pertes joules et d'améliorer le couple massique grâce à l'augmentation du coefficient de remplissage et à la diminution de la longueur axiale de la machine [2]. De telles machines sont aussi caractérisées par un couple de détente plus faible et par une meilleure tolérance aux défaillances grâce à la séparation physique et magnétique entre les bobines [3], [4]. Néanmoins, comme la périodicité du motif de bobinage se fait sur plusieurs

pôles au lieu d'un seul, des sous harmoniques tournants à des vitesses plus grandes que celle de l'harmonique de travail apparaissent, et comme le niveau des autres harmoniques augmentent, les pertes rotoriques peuvent devenir considérables ce qui peut conduire à une désaimantation irréversible des aimants. Par ailleurs, le niveau du bruit et des vibrations de la machine peut devenir très élevé [5]. Différentes techniques ont été ainsi proposées pour atténuer les harmoniques créés par le bobinage des machines à couplage harmonique. Dans la référence [6], l'utilisation d'un bobinage multicouche a permis une atténuation significative des sous harmoniques; néanmoins, le coefficient de bobinage et le coefficient de remplissage en cuivre diminuent et les harmoniques de denture sont peu influencés. Une autre manière d'atténuer les sous harmoniques tout en maintenant un bon coefficient de bobinage et un bon coefficient de remplissage consiste soit à utiliser un bobinage de compensation [7] ou des barrières de flux [8]. La machine devient plus complexe et par ailleurs les harmoniques de denture restent peu influencés. Dans [9] est proposée une méthode qui permet d'atténuer à la fois les sous harmoniques et les harmoniques de denture, néanmoins la réalisation de la machine devient très complexe.

Dans cet article, nous proposons d'utiliser un algorithme génétique couplé à un modèle analytique de la FMM dans l'objectif d'atténuer le contenu harmonique des machines à bobinage dentaire ayant un harmonique de travail de rang 5. L'intérêt de cette approche est qu'elle permet d'ajouter de nouveaux degrés de liberté (variation de l'ouverture et du décalage spatial des bobines, répartition variable du nombre de spires pour les bobines de la même phase...) susceptibles d'améliorer la distribution de la FMM. Dans un premier temps, nous présenterons un modèle analytique de la FMM créé par les enroulements statoriques, nous détaillons le processus et les critères d'optimisation de la FMM pour une machine travaillant sur le cinquième rang harmonique d'espace. Nous présentons ensuite les résultats d'optimisation pour dégager enfin des bobinages remarquables en termes de coefficient de bobinage et de taux de distorsion.

2. MODELISATION DE LA FMM

Pour minimiser le contenu harmonique de la FMM, il est nécessaire de développer dans un premier temps un modèle qui permettra d'évaluer chaque composante harmonique du champ créé par le bobinage statorique. Dans cet article un modèle analytique basé sur les fonctions de bobinage a été retenu. En effet, ce modèle dans une procédure d'optimisation permet de

réduire considérablement le temps de calcul tout en gardant une bonne précision.

Dans le cas d'une armature triphasée où chaque phase comporte un ensemble de m bobines en séries caractérisées chacune par son ouverture angulaire β_i , son nombre de spires N_i et son décalage spatial δ_i entre l'axe magnétique de la bobine considérée par rapport au faisceau aller de la première bobine (voir Figure 1).

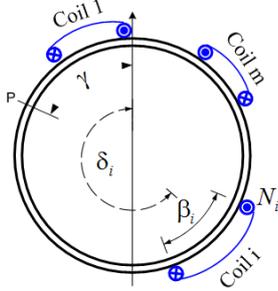


Figure 1: Disposition générale des bobines d'une phase dans l'armature statorique

En faisant l'hypothèse que le stator est lisse (effets d'encoches négligeables) et que les ampères tours consommés dans le fer sont négligeables devant ceux consommés dans l'entrefer. En utilisant les fonctions de bobinage [10], la FMM développée par une phase en un point P dans l'entrefer est donnée par l'expression (1).

$$MMF_A(\gamma, t) = \sum_{v=1}^{+\infty} \frac{2N_T \cdot i_1(t)}{\pi v} \cdot k_{wv} \cdot \cos(v(\gamma - \varphi_v)) \quad (1)$$

Où: N_T représente le nombre de spires par phase, k_{wv} et φ_v représentent respectivement le coefficient du bobinage et le déphasage spatial du $v^{\text{ème}}$ harmonique de la FMM, $i_1(t)$ est le courant traversant les m bobines. L'expression du coefficient de bobinage et du déphasage spatial est donnée dans (2).

$$k_{wv} = \left| \sum_{i=1}^m N_i \cdot \sin\left(\frac{v \cdot \beta_i}{2}\right) \cdot e^{j(v\delta_i)} \right| / N_T \quad (2)$$

$$\varphi_v = \text{Arg} \left(\sum_{i=1}^m N_i \cdot \sin\left(\frac{v \cdot \beta_i}{2}\right) \cdot e^{j(v\delta_i)} \right)$$

Les deux autres phases de l'armature statorique présentent un bobinage identique à celui de la première phase mais sont décalées spatialement de 120° et 240° électrique respectivement par rapport à la première phase. Dans ce cas lorsque le stator est alimenté par des courants triphasés sinusoïdaux et équilibrés, l'expression de la FMM résultante est donnée par l'expression (3).

$$MMF_T(\gamma, t) = \sum_{v=3k+1} \frac{3N_T \hat{I}}{\pi v} \cdot k_{wv} \cdot \cos(v(\gamma - \varphi_v) - \omega t) + \sum_{v=3k-1} \frac{3N_T \hat{I}}{\pi v} \cdot k_{wv} \cdot \cos(v(\gamma - \varphi_v) + \omega t) \quad (3)$$

3. OPTIMISATION DE LA FMM

Dans cette section nous présenterons une méthodologie basée sur l'utilisation des techniques d'optimisation dont l'objectif est de minimiser le contenu harmonique de machines à bobinage dentaire ayant comme harmonique de travail (c.-à-d. le plus dominant) non plus le fondamental, mais un harmonique d'ordre élevé qui est dans cette étude fixé à $v=5$. Nous détaillerons ainsi dans un premier temps les critères et les contraintes d'optimisation, nous présenterons, ensuite, les paramètres d'optimisation et enfin la procédure globale d'optimisation du bobinage.

3.1. Les critères d'optimisation

Le premier critère d'optimisation consiste à la maximisation de l'harmonique de travail de la FMM dont l'ordre est égal au nombre de paires de pôles au rotor ($v = p = 5$) pour maximiser le couple électromagnétique. D'après l'équation (3), on constate que chaque harmonique de la FMM est d'autant plus élevé que son coefficient de bobinage est élevé. Ce dernier, peut ainsi être utilisé comme critère pour la maximisation de l'harmonique de travail

$$F_{obj1} = \max(k_{w(v=p=5)}) \quad (4)$$

Le second objectif de cette optimisation consiste en la minimisation de sous harmoniques et des harmoniques de la FMM dont l'ordre est supérieur à l'harmonique de travail ($v = p$) pour réduire les pertes dans les aimants, le niveau de bruit et des vibrations de la machine. Comme le taux de distorsion harmonique (THD) mesure le niveau de distorsion d'un signal donné, il peut alors être utilisé comme une fonction objective pour minimiser le contenu harmonique.

$$F_{obj2} = \min(THD) \quad (5)$$

3.2. Les contraintes d'optimisation

Quelques contraintes concernant la disposition du bobinage le long de l'entrefer sont fixées pour éviter l'apparition de certains phénomènes parasites.

3.2.1. Disposition symétrique du bobinage

Le bobinage doit arranger d'une manière symétrique le long de l'entrefer, c'est-à-dire à chaque encoche doit correspondre une autre encoche diamétralement opposée et qui présente le même nombre de conducteurs. Ceci, permet d'annuler les efforts radiaux sur le rotor et aussi d'éliminer les harmoniques pairs de la FMM.

3.2.2. Bobinage équilibré

Pour produire une FMM tournante, les enroulements des trois phases de la machine doivent être identiques et décalés spatialement les uns par rapport aux autres d'un angle de 120° électrique. Cependant dans le cas des machines à bobinage dentaire où l'harmonique principal est un harmonique dont l'ordre est supérieur au fondamental, l'angle entre chaque phase doit être de 120° mécanique. En effet, lorsque les phases sont décalées spatialement de $120^\circ/p$ mécanique, l'angle entre les différents axes magnétiques des phases n'est pas de 120° électrique (Figure 2) pour tous les harmoniques comme c'est le

cas des machines avec un nombre d'encoches par pôle et par phase entier.

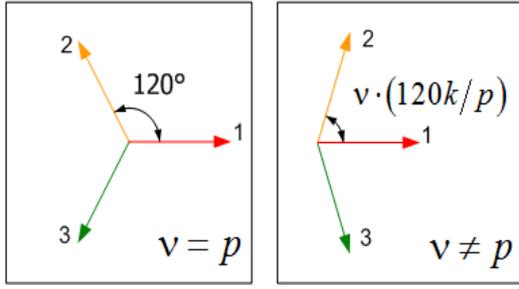


Figure 2: Position relative des axes magnétiques des trois phases en fonction du rang harmonique

Dans ce cas, les harmoniques multiples de 3 ne sont plus nuls. Par ailleurs, les sous harmoniques et les harmoniques dont l'ordre est supérieur à celui de l'harmonique de travail présenteront à la fois des FMM tournantes dans le sens direct et dans le sens inverse. Pour cela, nous considérerons que toutes les phases seront décalées les unes par rapport aux autres d'un angle de 120° mécaniques.

3.2.3. Contraintes sur le nombre d'encoches

Un des avantages de l'utilisation de bobinages dentaires est qu'ils présentent un nombre d'encoches par pôle et par phase $q < 1$ ce qui permet de réduire le nombre d'encoches Z de la machine et ainsi le temps et le coût de fabrication. Pour garantir que une armature triphasée présentant toujours $q < 1$ un nombre maximum d'encoches au stator a été défini. A partir, des contraintes définies ci-dessus le nombre d'encoches doit être un entier pair multiple du nombre de phases, ainsi les nombre d'encoches au stator possibles sont $Z = \{6, 12, \dots, 6k\}$ et le nombre maximum d'encoches pour lequel $q < 1$ est donné dans l'expression (6).

$$Z_{\max} = 24 \text{ encoches} \quad (6)$$

3.2.4. Contraintes sur le nombre de couches du bobinage

Pour réduire le coût de fabrication du bobinage et avoir un bon coefficient de remplissage en cuivre, seulement les bobinages en simple ou en double couche sont considérés dans cette étude. Ainsi, chaque encoche peut avoir au maximum deux faisceaux appartenant à deux bobines différentes.

3.3. Schéma du bobinage et paramètres d'optimisation

À partir des contraintes définies dans la section précédente, le schéma du bobinage à optimiser est donné dans la Figure 3.

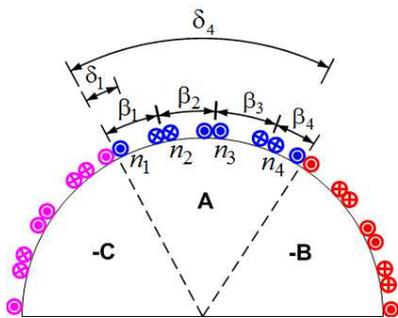


Figure 3: Disposition générale du bobinage

L'armature statorique (Figure 3) est étudiée uniquement sur l'intervalle $[0-\pi]$. En effet, les bobines contenues dans l'intervalle $[\pi-2\pi]$ sont disposées d'une manière diamétrale opposée aux bobines du premier intervalle afin d'éliminer les harmoniques de rang pairs de la FMM. L'intervalle $[0-\pi]$ est divisé en trois secteurs, appartenant chacun à une phase et présentant une ouverture angulaire de $\pi/3$ mécanique. Chaque secteur comporte un nombre $Z_{\max}/3$ bobines qui sont disposées de manière à éviter le chevauchement entre les têtes de bobines d'une part et d'autre part pour garantir un bobinage avec un nombre d'encoches par pôle et par phase q inférieur à un.

Comme le bobinage du stator est équilibré, la connaissance des paramètres d'une phase suffit amplement à décrire l'armature triphasée. Ces paramètres présentés dans le tableau sont choisies comme variables d'optimisation du bobinage.

TABEAU 1: VARIABLES D'OPTIMISATION

Variable	Formule	Nature	Bornes
Pas de la bobine	$\beta_j = k_j \cdot \left(\pi/3 - \sum_{i=1}^{j-1} \beta_i \right)$	Continue	$k_j \in [0, 1]$
Axis angle	$\delta_j = \left(\beta_j / 2 + \sum_{i=1}^{j-1} \beta_i \right) + k_j \cdot \pi/3$	Discrète	$k_j = \{0, 1, 2\}$
Nombre de spires normalisé	N_j	Continue	$N_j \in [-1, 1]$

Remarque: Le nombre de spires d'une bobine est toujours un entier positif or dans le TABLEAU 1 nous avons défini le nombre de spires N_j comme étant une variable évoluant entre $[-1, 1]$. Ceci peut être expliqué comme suit, supposons qu'après optimisation, le nombre de spires optimal pour les m bobines soit $n = (n_1, n_2, \dots, n_m)$. Il est clair que l'armature constituée par un bobinage avec m bobines présentant un nombre de spires de $n' = (n_1, n_2, \dots, n_m) / \max(n)$ générera le même contenu harmonique que celui du premier bobinage. Ainsi le nombre de spire peut être considéré comme une variable continue variant de $[0-1]$. Les valeurs négatives de N_j quant à elles permettent d'avoir des bobines avec un sens de bobinage différent.

3.4. Approche d'optimisation:

Pour réduire le contenu harmonique de la FMM, les paramètres du bobinage doivent être optimisés. L'utilisation d'une approche analytique directe n'est pas envisagée pour ce problème dû à la présence de non linéarité, nombre de paramètres élevés, ...etc. Dans cet article, nous avons retenu un algorithme d'optimisation du type génétique, en effet, ce dernier présente l'avantage d'être peu sensible aux discontinuités de la fonction objectif, se piège moins facilement par les optimums locaux et permet aussi de traiter un grand nombre de variables [11]. Comme le problème est de type multiobjectif, il n'existe alors pas une seule solution optimale mais un ensemble de solutions optimales (connues sous le nom

de solutions Pareto-optimales). L'algorithme génétique multicritère de la boîte à outils Matlab Global Optimization Toolbox est utilisé. Les paramètres de réglage de l'algorithme génétique sont présentés dans le Tableau 2.

TABLEAU 2: PARAMETRES DE L'ALGORITHME GENETIQUE

Paramètre	Valeur
Taille de la population	1500
Nombre de générations	2000
Taux de croisement	0.8

Cet algorithme d'optimisation est couplé avec le modèle analytique de la FMM comme montré dans la Figure 4. D'une manière simplifiée, cet algorithme génétique devra adapter les paramètres du bobinage décrits dans le tableau 1 pour minimiser le contenu harmonique tout en maximisant le coefficient de bobinage de l'harmonique de travail.

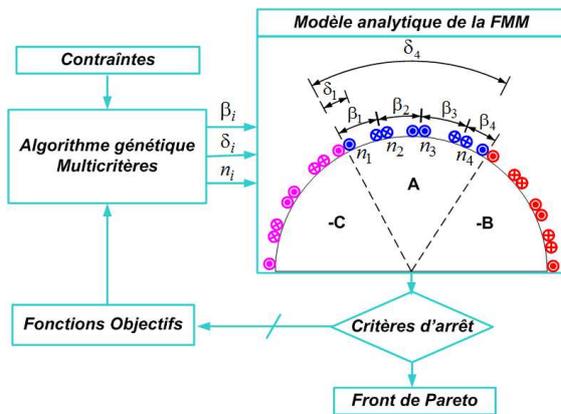


Figure 4: Processus d'optimisation de la FMM

4. RESULTATS

Dans la Figure 5 est montré dans le plan des critères à optimiser (k_w -THD), le front de Pareto qui représente l'ensemble des bobinages pour lesquels on ne peut pas trouver de bobinage qui présentent à la fois un meilleur coefficient de bobinage et un plus faible THD.

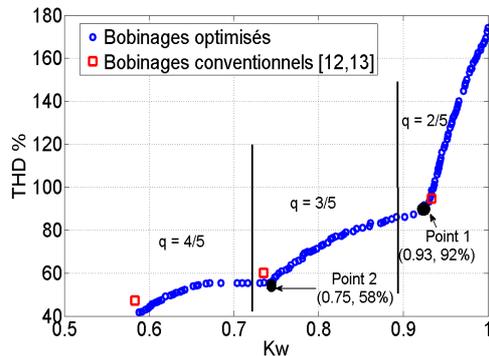


Figure 5: configurations optimales du bobinage

Comme dans notre optimisation, le nombre de bobines par phase est une variable, le nombre d'encoches varie aussi. C'est

ce qui justifie la variation du nombre d'encoches par pôle et par phase q pour les solutions appartenant au front de Pareto. On peut noter aussi que plus q augmente plus la forme de la FMM s'approche de son cas idéal mais en contrepartie le coefficient de bobinage diminue considérablement.

On constate aussi que les bobinages optimisés présentent un coefficient de bobinage et un taux de distorsion presque identique à ceux déterminés par les méthodes définies dans [12, 13]. Ainsi, l'action sur les paramètres géométriques (ouverture et décalage spatial des bobines) et électriques (nombre de spires) ne permet pas d'obtenir des bobinages ayant à la fois un meilleur coefficient de bobinage ainsi qu'un faible taux de distorsion harmonique. Néanmoins, de nouveaux bobinages dentaires triphasés équilibrés sont ressortis via cette méthode. Ces nouveaux bobinages présentent soit un coefficient de bobinage plus élevé, soit un taux de distorsion plus faible que celui des bobinages déterminés par les méthodes [12, 13].

Parmi les différentes solutions Pareto-optimales, deux configurations (point 1 et 2 de la Figure 5) présentent un fort potentiel. Les caractéristiques correspondantes à ces deux solutions sont présentées dans le TABLE 3.

TABLE 3 : PARAMETRES DES SOLUTIONS PARTICULIERES DE LA FIGURE 5

	Solution 1	Solution 2
k_w	$\approx 93\%$	$\approx 75\%$
THD	$\approx 92\%$	$\approx 58\%$
β	$[30^\circ, 30^\circ]$	$[18^\circ, 18^\circ, 24^\circ]$
δ	$[15^\circ, 45^\circ]$	$[9^\circ, 87^\circ, 48^\circ]$
N	$[1, -1]$	$[1, -1, 1]$

La première solution (point 1) présente un bon compromis entre le coefficient de bobinage et le taux de distorsion de la FMM. En effet, par rapport à la configuration avec un coefficient de bobinage unitaire, cette solution présente un taux de distorsion 80% plus faible pour une diminution du coefficient de bobinage inférieure à 7%. Le bobinage correspondant à cette solution est représenté sur la Figure 6.

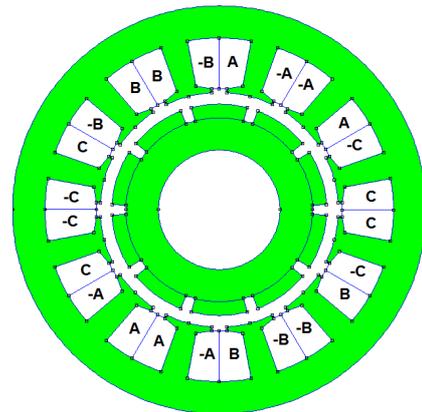


Figure 6: Bobinage correspondant au point 1

6. REFERENCES

- [1] A. Rezzoug, M. E. Zaïm, *Machines électriques non conventionnelles*, 1 vol. Paris, France: Hermes science publ. : Lavoisier, impr. 2011, 2011.
- [2] F. Magnussen et C. Sadarangani, « Winding factors and Joule losses of permanent magnet machines with concentrated windings », in *Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03. IEEE International*, 2003, vol. 1, p. 333–339.
- [3] Z.-Q. Zhu, « Fractional slot permanent magnet brushless machines and drives for electric and hybrid propulsion systems », *COMPEL Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng.*, vol. 30, n° 1, p. 9–31, 2011.
- [4] N. Bianchi et M. Dai Prè, « Use of the star of slots in designing fractional-slot single-layer synchronous motors », in *Electric Power Applications, IEE Proceedings-*, 2006, vol. 153, p. 459–466.
- [5] J. Wang, Z. P. Xia, D. Howe, et S. A. Long, « Vibration characteristics of modular permanent magnet brushless AC machines », in *Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE*, 2006, vol. 3, p. 1501–1506.
- [6] M. V. Cistelecan, F. J. T. E. Ferreira, et M. Popescu, « Three phase tooth-concentrated multiple-layer fractional windings with low space harmonic content », in *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2010, p. 1399–1405.
- [7] G. Dajaku, « Electric Machine », US Patent 20120025634 A1 02-févr-2012.
- [8] G. Dajaku et D. Gerling, « A novel 12-teeth/10-poles PM machine with flux barriers in stator yoke », in *2012 XXth International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2012, p. 36–40.
- [9] G. Dajaku et D. Gerling, « A Novel 24-Slots/10-Poles Winding Topology for Electric Machines », in *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International*, 2011, p. 65–70.
- [10] F. Scuiller, « Développement d'outils de conception de machines polyphasées à aimants utilisant l'approche multimachine », Thèse de doctorat, Arts et Métiers ParisTech, France, 2006.
- [11] S. L. Avila, « Optimisation multiobjectif et analyse de sensibilité appliquées à la conception de dispositifs. Application : Synthèse d'antennes à réflecteur embarquées dans un satellite », Ecole Centrale de Lyon, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2006.
- [12] J. Cros et P. Viarouge, « Synthesis of high performance PM motors with concentrated windings », *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 17, n° 2, p. 248–253, 2002.
- [13] N. Bianchi et M. Dai Pre, « Use of the star of slots in designing fractional-slot single-layer synchronous motors », *IEE Proc. - Electr. Power Appl.*, vol. 153, n° 3, p. 459, 2006.