

# 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 bobinage dentaire sont de plus en plus envisagées dans les systèmes embarqués grâce à leurs simplicité de construction, tolérance aux défaillances et fort couple massique. Leur force magnétomotrice (FMM) présente un spectre riche en harmoniques pouvant conduire à des pertes rotoriques et des vibrations importantes. Dans l'objectif d'atténuer ces harmoniques, nous utilisons un algorithme couplé à un modèle analytique de la FMM pour optimiser les paramètres intrinsèques du bobinage. Cette méthode est utilisée pour déterminer des bobinages dentaires dont l'harmonique dominant est le cinquième harmonique de la FMM. Un ensemble de bobinages optimaux est alors présenté.

**MOTS-CLES** – Machine à 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 proposé 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. 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 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 Optimisation de la force magnétomotrice

Nous menons ici une démarche de conception par optimisation à l'aide d'un algorithme génétique multicritère, poursuivant comme premier objectif la maximisation du coefficient de bobinage ( $k_w$ ) de l'harmonique de travail ( $h=5$ ) pour maximiser le couple électromagnétique. Nous intégrons aussi comme deuxième objectif, la minimisation du taux de distorsion (**THD**) de la FMM, pour réduire les pertes et les vibrations de la machine.

Le processus d'optimisation de la FMM montré sur la Figure 1 peut s'expliquer comme suit: dans un premier temps l'algorithme génétique adapte les paramètres de l'armature statorique tels que le nombre de bobines par phase, les ouvertures de bobines  $\beta_i$ , le décalage spatial  $\delta_i$  entre les bobines ainsi que le nombre de spires  $N_i$  de chaque bobine de façon à respecter les critères d'optimisation. Des contraintes ont été appliquées sur ces paramètres pour assurer la faisabilité du bobinage (triphase équilibré, distribution symétrique le long de l'entrefer pour éliminer les harmoniques pairs, nombre de couches inférieur ou égal à deux, nombre d'encoches total inférieur à ceux de la machine à couplage polaire ayant un même nombre de paires de pôles).

Pour évaluer la pertinence des paramètres générés, on évalue les fonctions objectives ( $k_w$ -**THD**) qui sont déterminées à partir de la FMM calculée par un modèle analytique basé sur les fonctions de bobinage définies dans [10]. Ceci est répété jusqu'à ce qu'un critère de convergence soit satisfait (par exemple le nombre de générations).

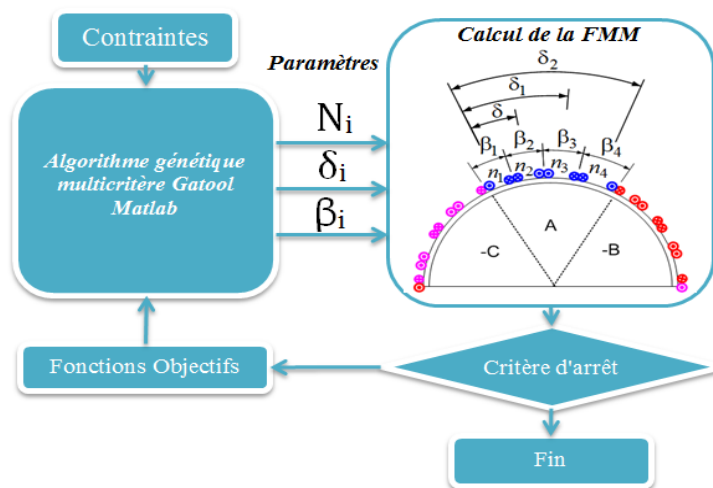


Figure 1: Processus d'optimisation de la FMM

## 3 Résultats d'optimisation

La Figure 2 montre, dans le plan des critères à optimiser ( $k_w$ -**THD**), le front de Pareto optimal qui correspond à l'ensemble des solutions (bobinages) non-dominées, caractérisées par le principe suivant; il est impossible de trouver une solution meilleure sur un critère sans qu'elle soit plus mauvaise sur au moins un autre critère.

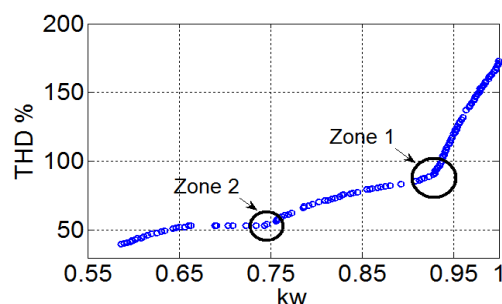
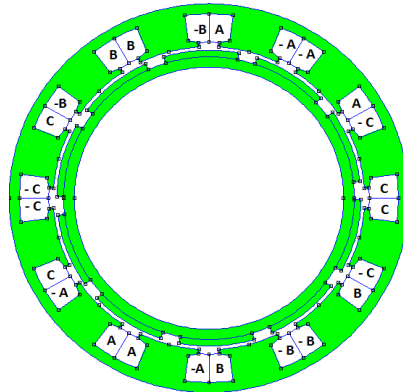


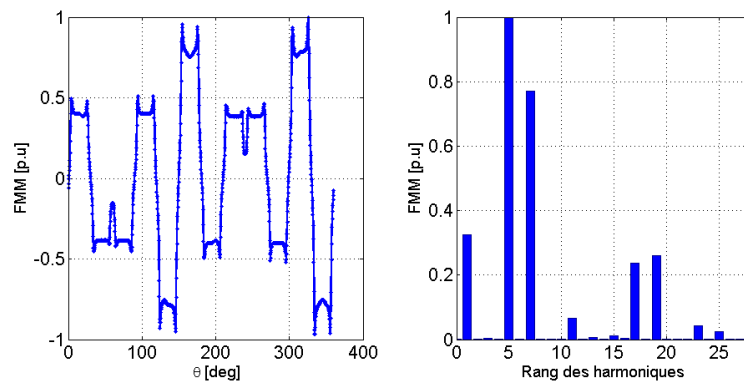
Figure 2: Configurations optimales du bobinage

Parmi les différentes solutions Pareto-optimales, on peut ressortir deux zones pour lesquelles les solutions sont particulièrement intéressantes. Dans la première zone de la Figure 2, on observe une réduction significative du THD pour une diminution inférieure à 7% du coefficient de bobinage. Un bobinage remarquable correspondant à cette zone est représenté sur la Figure 3.



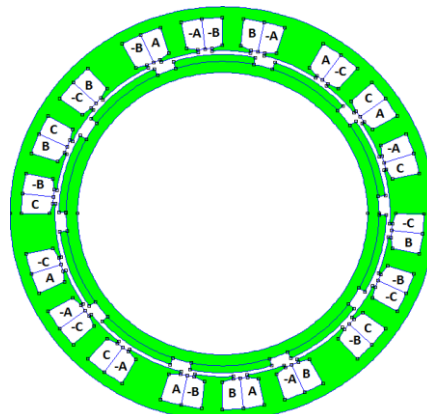
**Figure 3: Bobinage correspondant à la zone 1**

On constate qu'il correspond au bobinage conventionnel de la machine à 12 encoches-10 pôles en double couche. L'analyse par éléments finis de la FMM développée par cette armature statorique (Figure 4) montre que les harmoniques de rang 1 et 7 sont relativement élevés.



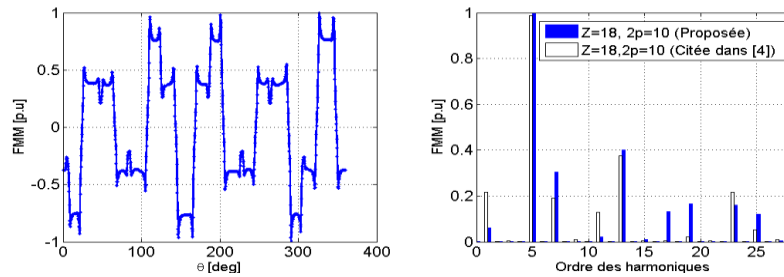
**Figure 4: Distribution et spectre de la FMM de la machine à 12 encoches-10 pôles double couche**

La deuxième zone de la Figure 2 correspond à des machines présentant moins d'harmoniques mais ayant un coefficient de bobinage réduit d'environ 18% par rapport à la configuration présentée sur la Figure 3.



**Figure 5: Bobinage correspondant à la zone 2**

Nous proposons un bobinage original correspondant à la deuxième zone de la Figure 4. La machine résultante (Figure 5) présente 18 encoches avec une distribution irrégulière (pas dentaire variable).



**Figure 6: Distribution et spectre de la FMM du nouveau bobinage**

L'analyse par éléments finis de la FMM développée par ce nouveau bobinage est présentée dans la Figure 6, on constate une diminution significative des harmoniques de rang 1 et 7 par rapport à la machine à 12 encoches 10 pôles double couche mais en contrepartie le coefficient de bobinage est 19% plus faible. Et par rapport à la machine à 18 encoches-10 pôles bobinée selon [4] [11], ce nouveau bobinage présente moins de sous harmonique et un coefficient de bobinage légèrement plus élevé (de l'ordre de 1%).

## 4 Conclusion

Dans cet article, nous avons mené une étude d'optimisation de la force magnétomotrice de machines à bobinage dentaire travaillant sur le cinquième harmonique d'espace. Nous avons montré les limites, en termes de coefficient de bobinage et de taux de distorsion, pouvant être atteintes par des machines triphasées possédant un bobinage à simple ou à double couche. Nous avons également ressorti parmi les différentes configurations optimales deux machines remarquables. La première correspond à la machine 12 encoches-10 pôles conventionnelle qui présente un coefficient de bobinage élevé mais des harmoniques d'espace non négligeables. La seconde machine est originale, son coefficient de bobinage est réduit d'environ 19% par rapport à la première machine, mais elle permet une réduction significative des harmoniques d'espace (THD 37% plus faible). Sa modélisation et son dimensionnement constitueront la suite de ce travail.

## 5 Références

- [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 », US20120025634 A102-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] J. Cros et P. Viarouge, « Synthesis of high performance PM motors with concentrated windings », *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 17, n° 2, p. 248–253, 2002.