

Examen de structures à pas fractionnaire bobinées sur dent pour le dimensionnement de machines axiales synchrones à aimants permanents

Thomas BOUSSEY ^{1,2}, Lauric GARBUIO ¹, Afef KEDOUS-LEBOUC ¹, Laurent GERBAUD ¹,
Jean-Claude MIPO ², Philippe FARAH ², Olivier SAVINOIS ²

Univ. Grenoble Alpes, G2Elab, F-38000 Grenoble, France

CNRS, G2Elab, F-38000 Grenoble, France ¹

Valeo Powertrain Electric Systems, 94017 Créteil Cedex, France ²

RESUME – La machine axiale synchrone à aimants permanents (MAXSAP) est une candidate adéquate pour la traction hybride. Sa géométrie particulière lui confère une bonne densité de couple mais limite le nombre d'encoches. Les structures à pas fractionnaire bobinées sur dents deviennent intéressantes. Dans cet article, nous exposons la méthode de l'étoile des encoches et celle du calcul des coefficients de bobinage qui s'en suit. La démarche pour l'obtention de plusieurs configurations de bobinage est alors proposée

Mots-clés – structures à pas fractionnaire, bobinage sur dents, coefficients de bobinage, Star of Slots, machine axiale synchrone à aimants permanents

1. INTRODUCTION

Pour des applications de traction pour le véhicule hybride, la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) possède de multiples avantages : un bon rendement, une densité de couple élevée ainsi qu'une large plage de vitesse à puissance constante.

Les machines axiales, grâce à leur topologie discoïde, permettent une intégration facile ce qui est un avantage clé dans le cas des chaînes de tractions hybrides pour lesquelles l'encombrement alloué est restreint. De plus, le choix d'une machine axiale permet la production de densité de couple significative pour un nombre de paires de pôles (p) élevé [1]. La machine axiale synchrone à aimants permanents apparaît donc comme une candidate idéale pour la traction hybride.

1.1. Les structures à pas fractionnaire $q < 1$

Les structures à pas fractionnaire regroupent toutes les combinaisons pour lesquelles le nombre d'encoches par pôle et par phase q n'est pas un entier. Elles se différencient à ce niveau des structures à pas entier pour lesquelles q est entier. La dénomination conventionnelle de ces structures est $(N_{enc}, 2p)$. Dans un contexte de conception de machine, l'ouverture à ces structures à pas fractionnaire débride l'espace des combinaisons pouvant être étudiées, c'est-à-dire que de nombreuses nouvelles possibilités s'offrent au concepteur en plus des structures à pas entier. Plus particulièrement, les structures à pas fractionnaire $q < 1$ permettent l'association d'un rotor à nombre de pôles élevé à un stator avec un nombre d'encoches (N_{enc}) limité.

Un nombre d'encoches très grand est proscrit pour un gabarit de machine axiale donné où il faut tenir compte des contraintes sur les largeurs de dents minimales au rayon intérieur. De plus, un nombre de paires de pôles élevé ($8 < p < 12$) est permis pour ce type d'applications où les vitesses mécaniques mises en jeu ne dépassent pas 8000 tr.min^{-1} . Un onduleur de capacité nominale moyenne est capable de garantir les fréquences électriques maximales demandées. Par conséquent, ces

combinaisons à $q < 1$ s'imposent d'elles-mêmes dès le pré-dimensionnement de la machine.

Une différence structurelle existe entre les structures à pas entier et les structures à pas fractionnaire. Pour tout type de structure, le nombre des périodes spatiales de motifs encoches/pôles identiques est donné par la relation suivante :

$$w = PGCD(N_{enc}, p) \quad (1)$$

Pour les structures à pas entier, $w = p$. Par conséquent, la réduction par périodicité du modèle de la machine est immédiate puisque le nombre d'encoches et le nombre de paires de pôles à considérer pour le modèle réduit de la structure sont respectivement : $N'_{enc} = \frac{N_{enc}}{p}$ et $p' = 1$. Ainsi, ces structures à pas entier sont connues pour n'afficher qu'une seule fréquence spatiale structurelle, celle du rotor étant identique à celle de l'arrangement encoches/pôles.

Pour les structures à pas fractionnaire, à moins de considérer des sous-classes de combinaisons spécifiques comme par exemple celles à $q = 0.5$ pour lesquelles $w = p$, w varie en fonction de la combinaison considérée. Ce coefficient est souvent nettement plus petit que p , ce qui impose de prendre en compte plusieurs paires de pôles, voire la machine entière.

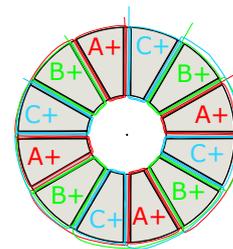


Fig. 1. Bobinage triphasé concentré sur dents double-couche pour la structure 12/8 ($q = 0.5$)

En revanche, le contenu harmonique des f.m.m. d'une structure à pas fractionnaire est généralement augmenté par rapport à celui d'une structure à pas entier. Par conséquent, il est fréquent d'observer des pertes rotoriques par courants de Foucault élevées pour ces structures. Ce facteur peut devenir problématique pour des applications à hautes vitesses si l'échauffement induit dans les aimants ne peut être évité ni dissipé et amène à leur désaimantation. Néanmoins, le contenu harmonique de la f.m.m. d'un bobinage pour une combinaison donnée va varier en fonction de la configuration choisie. Par configuration, nous entendons le positionnement relatif des bobines entre elles (comme cela sera expliqué en 4) et le choix du pas de bobinage.

Ici, l'étude se restreint aux bobinages concentrées sur dent où le pas de bobinage est d'une dent. Les éléments relatifs aux bobinages concentrés sur dent sont développés dans le paragraphe suivant. Toutefois, l'étude des configurations à pas fractionnaire ainsi que la méthode de *Star of Slots*, sont tout à fait extensibles aux configurations ayant des pas de bobinage chevauchant plus qu'une dent.

1.2. Le bobinage concentré sur dent

Les structures à pas fractionnaire $q < 1$ se prêtent bien à la réalisation d'un bobinage concentré sur dent aussi dit *non-overlapping* avec présence d'encoches et de dents ferromagnétiques. La figure 1 montre l'exemple du bobinage concentré sur dent de la structure statorique 12/8 ($q = 0.5$) de MAXSAP.

Les avantages de ce type de bobinage sont multiples. Cette configuration permet la mise en place de process de fabrication simplifiés par rapport à ce qui est fait usuellement pour les bobinages dits *overlapping* sur petites dents. Deuxièmement, les têtes de bobines au niveau des diamètres intérieurs et extérieurs de la machine sont moins volumineuses. L'espace ainsi libéré par l'utilisation de ces bobinages permet d'augmenter la surface de conversion électromécanique et donc d'obtenir potentiellement des densités de couple plus élevés. De plus, la réduction de la quantité de cuivre dans la machine diminue les pertes Joule dans le cuivre et aussi le coût de fabrication. Certains auteurs ont également mis en évidence des avantages nécessaires à la réalisation de machines ayant une forte tolérance aux défauts [2]. Premièrement, la séparation physique des bobines, déjà effective dans un bobinage double-couche (exactement deux côtés de bobines par encoches) et encore plus notable pour un bobinage simple couche (exactement un côté de bobine par encoche) réduisent les risques des défauts phase-phase. Deuxièmement, une faible inductance mutuelle entre les bobines évite que le flux produit par une bobine saine couple celui d'une bobine en défaut de court-circuit et génèrent des pertes Joule donc une augmentation de température et un couple de freinage. Les structures de machines synchrones à aimants à pas fractionnaire et à bobinage concentré sur dent pour ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche [7] [8].

Lors des premières phases de dimensionnement d'une MAXSAP pour la traction hybride, il convient d'étudier plusieurs combinaisons ($N_{enc}, 2p$) en vue de la réalisation de bobinage sur dents. Dans cet article, la méthode *Star of Slots* qui permet l'étude de structures statoriques et la détermination de configurations de bobinages sur dents est exposée. Nous abordons également l'étude des conditions d'équilibre et de symétrie d'une structure au regard de la méthode précédemment évoquée. Un éclairage est porté à la notion et au calcul des coefficients de bobinage, non seulement pour le fondamental mais aussi pour les harmoniques. Enfin, nous proposons une démarche pour la détermination de configurations de bobinage.

Nous considérons seulement dans ce papier les configurations de bobinage pour lesquelles la périodicité de bobinage s'ajoute à la périodicité structurelle (dents, encoches et pôles). Autrement dit, nous n'étudierons pas les configurations de bobinage pour lesquelles l'arrangement relatif des bobines change d'une période structurelle à l'autre. Ces configurations particulières sont abordées dans [6]. Ceci limite le champ d'étude des bobinages en écartant des possibilités mais permet de simplifier l'étude et l'exposition de la méthode de *Star of Slots* comme ceci sera précisé par la suite.

Enfin, le cas d'étude considéré est celui du bobinage triphasé double-couche.

2. LA MÉTHODE STAR OF SLOTS

2.1. Buts

Il existe plusieurs méthodes d'étude des combinaisons de nombre d'encoches et de nombre de paires de pôles. Ici, nous

étudions la méthode de *Star of Slots* aussi appelée étoile des encoches ou diagramme vectoriel de tension qui permet de déterminer les configurations de bobinage possibles et de choisir une configuration en fonction des objectifs retenus a priori (maximisation du couple, réduction du contenu harmonique) par le biais de calcul de coefficients de bobinages facilité par cette méthode (ce qui sera vu dans la section 3). Il existe d'autres méthodes d'étude équivalentes comme celle proposée par Cros [4] qui n'est pas développée dans ce papier.

2.2. Principe

Star of Slots a pour principe de représenter graphiquement toutes les encoches dans un repère électrique sous la forme de rayons. A chaque côté de bobine est associé un vecteur de f.é.m. qui est placé sur le rayon de l'encoche où se trouve le côté de bobine en question. L'étoile représente donc les vecteurs de f.é.m. de chaque phase et expose graphiquement les déphasages électriques qui existent entre chacun d'entre eux. La f.é.m. totale de chaque phase peut alors être facilement obtenue par la somme de chaque vecteur de la phase.

2.3. Construction de l'étoile des encoches

Dans notre étude, nous considérons les bobinages à double-couche. Plusieurs raisons font qu'il n'y a pas autant de vecteurs sur l'étoile des encoches que de côtés de bobines. Premièrement, les vecteurs représentant les conducteurs d'une même encoche sont confondus. Deuxièmement, la périodicité déterminée par la relation 1 permet de superposer les étoiles des encoches. Il y aura donc w encoches par rayons. Par conséquent, le nombre de rayons de l'étoile N_{ray} est égal au nombre d'encoches du modèle réduit de machine, i.e. de la période qu'il suffit d'étudier.

$$N_{ray} = \frac{N_{enc}}{w} \quad (2)$$

Une fois l'étoile construite avec le bon nombre de rayons, il convient de déterminer l'angle électrique entre deux encoches successives :

$$\alpha_e = \frac{2\pi}{N_{enc}}p \quad (3)$$

L'étoile des encoches dite "fondamentale", comme nous l'expliquerons par la suite, et propre à une combinaison ($N_{enc}, 2p$), est obtenue lorsque les encoches sont placées les unes à la suite des autres sur l'étoile en choisissant un sens de rotation. Ce sens de rotation devra d'ailleurs être conservé lors de la répartition des phases.

2.4. Étoiles des encoches et harmoniques

Les éléments donnés jusqu'à présent sur la méthode de l'étoile des encoches concernaient uniquement l'étude de l'harmonique fondamental de la f.é.m., autrement dit, l'harmonique de rang dans le repère électrique égal à $h_e = 1$ et de rang dans le repère mécanique égal à $h_m = p$. On caractérise aussi communément cet harmonique fondamental par sa longueur d'onde dans le repère mécanique qui vaut 2τ , où τ est le pas polaire (si on considère les angles, sa période vaut $\frac{2\pi}{p}$ radians dans le repère mécanique). Notons ici que cette nomenclature vaut pour ce papier. D'autres auteurs préfèrent parler de fondamental pour l'harmonique $h_m = 1$ de longueur d'onde la plus grande et d'harmonique principal pour celui de $h_e = 1$ [2].

Outre l'étude du fondamental de f.é.m., il est possible de redessiner les étoiles des encoches pour les harmoniques différents de $h_e = 1$. Tous les harmoniques n'ont pas un vecteur résultant de f.é.m. non nul et donc considérable. Ici, nous donnons la méthode pour construire l'étoile des encoches de chaque harmonique. Toutefois, nous expliquerons, dans la section 3.3 la règle qui permet de savoir quels rangs sont à prendre en

compte si l'on cherche à aller plus loin dans les calculs des coefficients de bobinage. D'autre part, nous nommerons par h_e l'ordre de l'harmonique en question dans le repère électrique et par $h_m = ph_e$ l'ordre de cet harmonique dans le repère mécanique. Les harmoniques d'ordre $h_e < 1$ sont nommés sous-harmoniques alors que ceux qui ont un ordre $h_e > 1$ mais non entier sont dit intermédiaires.

Soit un harmonique d'ordre $h_m = a \neq p$, le nombre de rayons spécifiques à cet harmonique se déduit de la périodicité qui lui est aussi particulière par les relations suivantes :

$$w_{h_m} = PGCD(N_{enc}, h_m) \quad (4)$$

$$N_{ray, h_m} = \frac{N_{enc}}{w_{h_m}} \quad (5)$$

Ensuite, on détermine l'angle électrique, pour cet harmonique, entre deux encoches consécutives, par la relation suivante, ce qui permet par la suite de répartir les encoches sur l'étoile spécifique à cet ordre précédemment créée :

$$\alpha_{e, h_m} = \frac{2\pi}{N_{enc}} h_m \quad (6)$$

Une fois les encoches à leur place, il suffit, dans un dernier temps, de distribuer les vecteurs propres à chaque côté de bobine sur leur encoches respectives, selon la configuration qui aura été déterminée par l'étude faite sur l'étoile des encoches pour l'harmonique fondamental. La détermination d'une configuration est expliquée dans la section 4.

En fait, l'étoile des encoches pour un harmonique différent du fondamental ne représente un intérêt que pour le calcul du coefficient de bobinage de cet harmonique. La considération de tous les vecteurs (1ère et 2ème couche) d'une seule phase est suffisante.

L'étoile des encoches pour le fondamental et les étoiles des encoches pour les harmoniques ainsi obtenues permettront par la suite de déterminer et classifier les configurations de bobinage possibles par le biais du calcul des coefficients de bobinage. Il sera ainsi possible de proposer des configurations peu connues et peu fabriquées dans l'industrie. Avant de passer à cette étape, nous exposons les conditions d'équilibre et de symétrie d'une structure tels qu'ils peuvent être étudiés avec la méthode de l'étoile des encoches.

2.5. Conditions d'équilibre et de symétrie

Pour toute combinaison ($N_{enc}, 2p$), il est possible de se demander si celle ci permettra d'obtenir une configuration valide en assurant que les grandeurs électriques (courants, tensions) et magnétiques (flux) alternatives de la machine soient symétriques et équilibrées si elles sont polyphasées. Si ces conditions n'étaient pas respectées, des problèmes de déséquilibre de natures thermiques (points chauds) et électro-magnéto-mécaniques (courants de circulations, saturations localisées, onduations de couple et vibrations) pourraient se poser.

Dans la suite, nous considérons l'étude des machines triphasées à double-couche tel que ceci a été défini en 1.2 et de bobines identiques entre elles (nombre de spires, diamètre de fil, etc.). De la même manière, les dents doivent évidemment être identiques entre elles et uniformément réparties sur le contour du stator.

Pour ces bobinages, il est naturel que le nombre de bobines soit multiple de 3 pour assurer une équi-répartition des bobines selon les 3 phases et qu'il soit égal au nombre de dents et donc d'encoches(double-couche). Par conséquent, le nombre de dents doit être multiple de 3.

Enfin, il est nécessaire que les bobines de deux phases successives soient physiquement décalées entre elles d'un angle "mécanique" équivalent à un angle électrique de $\frac{2\pi}{3}$. Il existe

donc une condition sur la position relative des bobines au sein du bobinage. Or une représentation graphique de la position électrique de chaque bobine est l'étoile des encoches. Pour qu'il soit possible d'espacer les bobines d'une ouverture de $\frac{2\pi}{3}$ entre elles, il faut qu'en passant de rayon en rayon sur de l'étoile des encoches, cet angle soit réalisable. Ceci se traduit donc par la relation suivante $\frac{2\pi}{3} = k \times \alpha_{ray}$, où k est un entier naturel et $\alpha_{ray} = \frac{2\pi}{N_{ray}}$ est l'angle entre deux rayons consécutifs.

Un simple développement de la relation précédente amène au résultat suivant qui dit que le nombre de rayons doit être un multiple de 3.

$$N_{ray} = \frac{N_{enc}}{w} = \frac{N_{enc}}{PGCD(N_{enc}, p)} = 3k \quad (7)$$

Il en résulte que ces conditions ne portent pas seulement sur le bobinage en lui-même (nombre de bobines, caractéristiques de chaque bobine identique), et sur le circuit magnétique statoriques (nombre de dents, arrangement) mais aussi sur le nombre de paires de pôles et donc la combinaison ($N_{enc}, 2p$). Cependant, il est à noter que le type de bobinage ici concentré sur dents n'intervient pas si l'on veut distinguer les différents éléments relatifs à la symétrie et à l'équilibre du bobinage. Autrement dit, les conditions énoncées dans cette section restent les mêmes pour une structure à bobinage dit *overlapping*.

Des combinaisons de structure à pas fractionnaire peuvent donc d'ores et déjà être écartées dans l'optique de la réalisation d'un bobinage triphasé dès cette étape comme la structure (12,12) dont le $N_{ray} = 2$.

Il en résulte que l'étoile des encoches est un outil utile à l'étude des conditions de symétrie et d'équilibre et à la détermination des combinaisons faisables de ce point de vue.

3. COEFFICIENTS DE BOBINAGE

3.1. Le bobinage de référence

La définition du coefficient de bobinage repose sur la prise en compte d'un bobinage de référence. Ce bobinage de référence doit être caractérisé par le fait que tous les vecteurs d'une de ses phases peuvent potentiellement être regroupés sur le même rayon.

Dans le but de visualiser concrètement ce bobinage de référence, d'une manière qui soit généralisable à toutes les configurations et à tous les harmoniques, il convient de le définir comme le bobinage où tous les $N_{vect} = 2\frac{N_{enc}}{3}$ côtés de bobines d'une phase, orientés dans le même sens, seraient physiquement dans la même encoche. Il est alors possible d'imaginer un bobinage toroïdal où simplement un côté des bobines enroulées sur le noyau statorique serait considéré.

Pour la combinaison (12, 10), triphasée, double-couche, nous donnons l'étoile des encoches qui lui serait associée.

Cette volonté de visualiser le bobinage de référence concrètement n'est pas nécessaire. Il pourrait être suffisant de se contenter de sa représentation graphique en étoile des encoches. Cependant, elle a le mérite de donner une signification concrète à la relation de calcul du coefficient de bobinage telle qu'elle sera vue dans la suite. L'étalon de calcul du coefficient de bobinage est alors bien identifié.

Dès à présent et sans relation aucune, nous pouvons définir le coefficient de bobinage comme l'amplitude du vecteur somme de f.é.m. du bobinage étudié sur l'amplitude du vecteur somme de f.é.m. du bobinage de référence pour les mêmes caractéristiques (nombre d'encoches, triphasé, double-couche)

3.2. Calcul du coefficient de bobinage pour le fondamental

Afin de calculer le coefficient de bobinage d'une topologie de bobinage double-couche concentré sur dents, nous utilisons l'étoile des encoches. Il convient dans un premier temps de faire apparaître tous les vecteurs i.e tous les côtés de bobines de cette

phase (première et deuxième couche). L'axe de symétrie de la distribution de vecteurs sur l'étoile des encoches est alors discernable. Il ne reste qu'à déterminer les angles $\alpha_{vect,i}$ qui séparent chaque vecteur i de l'axe de symétrie de la distribution de vecteurs de la phase considérée.

De manière à faciliter le calcul du coefficient de bobinage, on a souvent tendance à considérer un signe donné de conducteur d'une phase (par exemple, A+) et faire pivoter de π les vecteurs de la même phase de signe opposé. Dans la plupart des cas, ceci revient à ramener sur une seule moitié de l'étoile des encoches. On obtient finalement une distribution équivalente de vecteurs de la phase et du signe considérés que l'on compare à la distribution du bobinage de référence.

A l'aide de l'étoile des encoches de la configuration étudiée, il est possible de calculer le coefficient de bobinage pour le fondamental en appliquant la formule suivante [5] :

$$k_{b,fond} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{vect,ph}} \cos(\alpha_{vect,i})}{N_{vect,ph}} \quad (8)$$

$N_{vect,ph}$ au dénominateur est le nombre de vecteurs pour la phase en question. Ce nombre représente le bobinage de référence comme évoqué précédemment.

Il est à noter que du fait de l'axe de symétrie, l'étude graphique des angles n'est à mener que d'un seul côté de l'axe.

Sur la figure 2, il est montré le calcul du coefficient de bobinage pour le fondamental de la configuration qui sera expliqué plus loin dans la section 4 et sur le schéma de la figure 4.

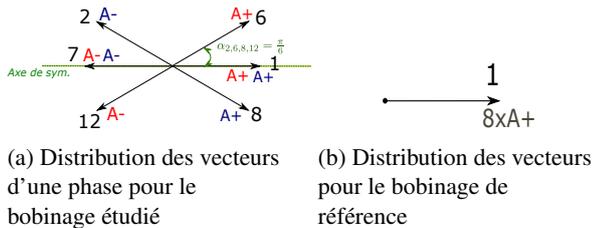


Fig. 2. Calcul du coefficient de bobinage pour la combinaison 12/10. Les vecteurs de la phase A (1ère et 2ème couche) sont représentés.

3.3. Calcul des coefficients de bobinage pour les harmoniques

De la même manière que pour le calcul du coefficient de bobinage pour le fondamental, un coefficient de bobinage pour un autre harmonique se calcule graphiquement en considérant l'étoile des encoches associée à cet harmonique (cf. section 2.4) et tous les vecteurs d'une phase. De la même manière, on cherchera à travailler seulement avec des vecteurs de même signe (par exemple positif) en appliquant une rotation de π aux vecteurs de signe opposé (dans ce cas négatif).

L'étape suivante passe par la détermination des angles α_{vect,i,h_m} souvent différents des $\alpha_{vect,i}$ déterminés pour le fondamental puisque la configuration géométrique de l'étoile des encoches aura changé.

En revanche, contrairement à l'étoile des encoches pour le fondamental où les vecteurs de même signe peuvent souvent être ramenés sur la même moitié d'étoile, les vecteurs de même signe peuvent figurer sur les deux côtés. La somme amenant au calcul du coefficient de bobinage devient donc algébrique et certains termes de cette somme peuvent être négatifs si le vecteur est de sens opposé au groupe principal de vecteur souvent le plus proche de l'axe de symétrie.

$$k_{b,h_m} = \frac{|\sum_{i=1}^{N_{vect,ph}} \pm \cos(\alpha_{vect,i,h_m})|}{N_{vect,ph}} \quad (9)$$

De plus, la symétrie, ici, inclut la phase des vecteurs et leur position et direction vis à vis de l'axe. Cependant, elle n'inclut pas le signe du vecteur.

Avant de s'intéresser aux différentes stratégies de détermination de configurations de bobinages, notons qu'il n'est pas nécessaire de calculer les coefficients de bobinage pour tous les harmoniques. Certains harmoniques ont un vecteur résultant de f.é.m. nul et donc un coefficient de bobinage égal à zéro.

Les harmoniques qui auront des vecteurs résultants de f.é.m. non nuls et donc des coefficients de bobinage à prendre en compte sont d'ordre dans le repère mécanique [2] :

$$- h_m = (2n - 1)w \text{ si } N_{ray} = \frac{N_{enc}}{w} \text{ est pair}$$

$$- h_m = nw \text{ si } N_{ray} = \frac{N_{enc}}{w} \text{ est impair}$$

avec n un entier naturel dans les deux cas.

4. CONFIGURATIONS DE BOBINAGES

Puisque nous avons fixé le pas de bobinage à une dent par le choix des bobinages concentrés sur dent, un paramètre de configuration qui reste variable est celui du positionnement relatif des bobines entre elles. Pour la plupart des combinaisons, il existe plusieurs possibilités d'arrangement spatiale des bobines dont l'étude permet de dégager avantages et inconvénients.

Nous rappelons que nous faisons l'hypothèse de considérer des bobinages identiques pour toutes les périodes structurelles de la machine si $w > 1$. L'étude peut donc être limitée à une période structurelle. Le développement qui suit n'est valable que dans le cadre de cette hypothèse.

4.1. Secteurs de placement

Puisque le pas de bobinage est déjà fixé, la mission consiste à trouver sur quels rayons et donc quelles encoches distribuer les vecteurs de première couche de chaque phase.

Afin de réaliser cette tâche, on utilise des secteurs qui doivent être de nombre multiples du nombre de phases soit 3. Le nombre de secteurs et donc leur ouverture va varier en fonction de la stratégie ce qui sera vu dans les paragraphes suivants.

Néanmoins, il existe deux contraintes qui sont que les secteurs doivent s'enchaîner dans l'ordre A+, B+, C+ s'ils sont au nombre de 3 et dans l'ordre A+, C-, B+, A-, C+, B- etc. s'ils sont de nombre supérieur ou égal à 6 et être répartis dans le même sens que celui des encoches sur les rayons lors de la construction de l'étoile des encoches. De plus, pour un même signe de phase, les secteurs doivent être de même ouverture angulaire.

Il est à noter que, selon nos hypothèses, toutes les combinaisons ne présentent pas des configurations multiples. En guise d'exemple, citons les combinaisons à $q = 0.5$ qui ne présentent que 3 rayons sur leurs étoiles des encoches qui afficheront toujours la même configuration de bobinage. Ainsi, on peut avoir plus d'une configuration possible à partir du moment où $N_{ray} \geq 6$ et ce qui suit n'est intéressant que pour les combinaisons ayant cette caractéristique.

La manière de dénommer les configurations varie en fonction des auteurs. Ici, nous avons choisi de les nommer en fonction du nombre et de l'ouverture angulaire des secteurs.

Nous allons expliquer deux stratégies différentes de recherche de configurations parmi d'autres.

4.2. Maximisation du fondamental de f.é.m.

Cette configuration a pour but d'amener au couple le plus important dans la mesure où le produit du fondamental de la f.é.m. avec le fondamental du courant d'alimentation sera principal contributeur au fondamental du couple.

Pour obtenir une configuration qui maximise le vecteur résultant de fondamental de la f.é.m., on utilise 6 secteurs d'ouverture $\frac{\pi}{3}$. Il suffit ensuite d'affecter aux encoches les vecteurs de phase selon le secteur dans lesquels se situent ces encoches.

Cette disposition des secteurs permet de rapprocher les vecteurs au plus près de l'axe de symétrie et de réduire l'épanouissement angulaire de la distribution des vecteurs d'une phase ce qui aura pour conséquence de maximiser le vecteur résultant et donc le coefficient de bobinage pour le fondamental de la f.é.m.

Une autre indication pour savoir si la combinaison va être à même d'aboutir à un vecteur résultant de fondamental élevé est de voir si si l'angle entre les rayons α_{ray} est petit. Plus l'angle sera petit, plus les vecteurs vont pouvoir être proches entre eux. A N_{enc} donné, ceci sera d'autant plus possible que la périodicité w sera petite.

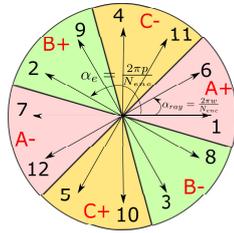


Fig. 3. Étoile des encoches pour la combinaison 12/10, triphasée, double-couche - Stratégie de maximisation du fondamental de f.é.m. - 6 secteurs de $\frac{\pi}{3}$

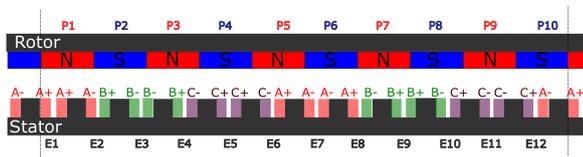


Fig. 4. Représentation du bobinage 12/10, triphasé, double-couche, bobinage concentré sur dent - Stratégie de maximisation du fondamental de f.é.m.

4.3. Réduction du contenu harmonique

En choisissant des distributions différentes de secteurs mais respectant toujours les contraintes énoncées, il est possible de déterminer des configurations de bobinage pouvant réduire certains harmoniques de f.m.m. Ceci est profitable dans le sens où les pertes fer rotoriques vont être diminuées. Simultanément, la f.é.m. induites dans les bobinages auraient un contenu harmonique réduit. Par conséquent, les pertes dans le circuit électrique seraient réduites ainsi que les ondulations de couple.

Nous pouvons citer les distributions de secteurs :

- 3 secteurs d'ouverture $\frac{2\pi}{3}$ comme montré sur la figure 5.
- 6 secteurs d'ouvertures $\frac{\pi}{2}$ pour un signe et $\frac{\pi}{6}$ pour le signe opposé.

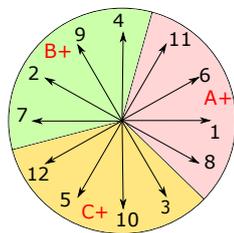


Fig. 5. Étoile des encoches pour la combinaison 12/10, triphasée, double-couche - Stratégie de réduction du contenu harmonique de f.é.m. - 3 secteurs de $\frac{2\pi}{3}$

Il ne semble pas qu'il y ait de moyen de savoir a priori i.e. avant de faire le calcul des coefficients de bobinage par *Star of Slots* si une configuration va permettre de réduire le contenu harmonique de la f.é.m. plus qu'une autre. Cette recherche passe donc par l'essai même s'il semble que les configurations à 3 secteurs amènent souvent à un $k_{w,h_e=3} = 0$. Il faut donc calculer les coefficients de bobinage pour chaque configuration et les mettre en comparaison pour pouvoir classer les bobinages.

Sur le tableau ci-dessous 1, nous comparons en guise d'exemple, les coefficients de bobinage pour les deux configurations 12/10 considérées. Nous pouvons voir que la configuration obtenue avec les 3 secteurs permet de diminuer les amplitudes des sous-harmoniques. En revanche, le coefficient de bobinage pour le fondamental est diminué ce qui est représenté le compromis à faire dans la plupart des cas.

Tableau 1. Coefficients de bobinage sous-harmoniques et fondamental pour les deux configurations de combinaison 12/10 étudiées

h_m	h_e	12-10 - 6 sect. $\frac{\pi}{3}$	12-10 - 3 sect. $\frac{2\pi}{3}$
1	1/5	0.067	0.058
2	2/5	0	0
3	3/5	1	0
4	4/5	0	0
5 (fond)	1	0.933	0.808

5. CONCLUSIONS

Cet article reprend la méthode *Star of Slots* pour les bobinages triphasés double-couche à pas fractionnaire et à bobinage concentré sur dents. Les étapes principales de la construction de l'étoile des encoches sont expliquées clairement. Un éclairage est aussi porté sur la prise en compte des harmoniques. Ensuite, il est donné une explication physique des coefficients de bobinage que ce soit pour le fondamental ou les harmoniques. Enfin, nous expliquons plusieurs stratégies de détermination de configurations de bobinage et des calculs de coefficients sont réalisés à titre d'exemple pour ces bobinages afin de mettre en évidence la méthode et les résultats que l'on peut obtenir.

De futures études pourraient porter sur l'étude de configurations encore plus originales. Citons par exemple celles où le nombre de couches par encoches dépasse 2, ou bien celles pour lesquelles la configuration varie suivant d'autres critères que ceux retenus ici (pas de bobinage supérieur à une dent, non périodicité du bobinage). Par ailleurs, l'examen de ces configurations originales au regard d'études de pertes rotoriques et de vibrations d'origine magnétiques constitueraient un apport substantiel.

6. RÉFÉRENCES

- [1] A. Cavagnino, M. Lazzari, F. Profumo, A. Tenconi, « A comparison between the axial flux and the radial flux structures for PM synchronous motors », IEEE Trans. on Industry Appl., vol. 38, no. 6, pp. 1517-1524, 2002.
- [2] N. Bianchi, S. Bolognani, M. Dai Pré, G. Grezzani « Design Considerations for Fractional-Slot Winding Configurations of Synchronous Machines », IEEE Trans. on Industry Appl., vol. 42, no. 4, pp. 997-1006, 2006.
- [3] G. De Donato, F.G. Capponi, G.A. Rivellini, F. Caricchi « Integral-Slot Versus Fractional-Slot Concentrated-Winding Axial-Flux Permanent-Magnet Machines : Comparative Design, FEA, and Experimental Tests », IEEE Trans. on Industry Appl., vol. 48, no. 8, pp. 1487-1495, 2012.
- [4] J. Cros, P. Viarouge « Synthesis of high performance PM motors with concentrated windings », IEEE Trans. on Energy Convers., vol. 17, no. 2, pp. 248-253, 2002.
- [5] B. Aslan, « Conception de machines polyphasées à aimants et bobinage concentré à pas fractionnaire avec large plage de vitesse », Thèse de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Lille, 2013
- [6] H. Dogan, F. Wurtz, A. Foggia, L. Garbuio, « Performance Analysis of Windings Configurations on Fractional-Slots PMSM Performance », EPE 2013
- [7] F. Meier « Permanent-Magnet Synchronous Machines with Non-Overlapping Concentrated Windings for Low-Speed Direct Drive Applications », Thesis, KTH Stockholm, 2008
- [8] N. Bianchi, S. Bolognani, M. Dai Pré « Magnetic Loading of Fractional-Slot Three Phase PM Motors With Nonoverlapped Coils », IEEE Trans. on Industry Appl., vol. 44, no. 5, pp. 1513-1522, 2008.