



**HAL**  
open science

## Paramètres clés pour la conception d'une machine pentaphasée à aimants à double polarité

Hussein Zahr, Franck Scuiller, Eric Semail

### ► To cite this version:

Hussein Zahr, Franck Scuiller, Eric Semail. Paramètres clés pour la conception d'une machine pentaphasée à aimants à double polarité. Symposium de Génie Électrique 2014, Jul 2014, Cachan, France. hal-01064773v1

**HAL Id: hal-01064773**

**<https://hal.science/hal-01064773v1>**

Submitted on 18 Sep 2014 (v1), last revised 6 Sep 2017 (v2)

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Paramètres clés pour la conception d'une machine pentaphasée à aimants à double polarité

Hussein ZAHR<sup>1,2</sup>, Franck SCUILLER<sup>2</sup>, Eric SEMAIL<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance, Arts et Metiers Paristech, Lille, 8 Bd Louis XIV 59043

<sup>2</sup>Institut de Recherche de l'Ecole Navale, Ecole Navale, CC600, 29240 BREST Cedex 9

**RESUME** – Les systèmes de propulsion automobile ou navale nécessitent des entraînements électromécaniques compacts. Lorsque le diamètre alloué à la machine est faible, la mise en œuvre d'une solution à grand nombre de pôles est difficile, ce qui interdit l'entraînement direct. Concevoir une machine intrinsèquement apte à fonctionner tant en basse vitesse qu'à haute vitesse permettrait de supprimer le réducteur mécanique généralement mis en œuvre. Dans le cadre de cette problématique, cet article analyse les propriétés d'une machine synchrone pentaphasée à aimants déposées équipée d'un bobinage concentré générant à la fois  $p$  paires et  $3p$  paires de pôles. Conçue pour être pilotée en commutation électronique de pôles, cette machine à cinq phases, équivalente à un ensemble de deux machines diphasées équivalentes (de type machine dq), présente la particularité suivante : les deux machines diphasées décrivant son comportement électromagnétique ont la même constante de temps et tout particulièrement la même amplitude de force électromotrice.

**MOTS-CLES** – Machine polyphasée, machine à aimants permanents, matrice d'inductance, concept multi machine, force électromotrice.

## 1. Introduction

Les machines polyphasées sont très utilisées dans le domaine de la propulsion navale ou automobile du fait de leurs avantages en comparaison avec la machine triphasée [2] [4]: tolérance aux fautes, réduction des ondulations de couple même avec des forces électromotrices non-sinusoïdales, fractionnement de la puissance [1] et aptitude à mettre à profit les harmoniques de force électromotrice pour présenter une densité de couple élevé. Pour la commande et la conception de ces machines, une décomposition multimachine permet de considérer une machine polyphasée comme un ensemble de machines fictives magnétiquement découplées et mécaniquement couplées tournant à la même vitesse [3], les harmoniques d'espace se distribuant sur les différentes machines fictives. Appliquée à une machine à cinq phases couplées en étoile comportant  $p$  paires de pôles, la décomposition multimachine fait apparaître deux machines fictives diphasées : l'une, appelée machine principale, est sensible à une famille d'harmoniques d'espace contenant l'harmonique  $p$ , l'autre, appelée machine secondaire, est sensible à une famille d'harmoniques d'espace contenant l'harmonique  $3p$ . Le couple total de la machine est la somme des couples produits par la machine principale et la machine secondaire. Chacune de deux machines fictives peut produire un couple électromagnétique élevé et non fluctuant si leurs forces électromotrices sont sinusoïdales d'amplitude élevée [5][6]. Afin de pouvoir mettre à profit ces propriétés, on se propose de concevoir une machine facile à commander et à alimenter telle que les deux machines fictives aient des potentialités équivalentes en termes de production du couple. Pour ce dernier point, on choisit un bobinage statorique particulier et on adapte les propriétés magnétiques et géométriques de la couche d'aimants permettent d'obtenir un spectre de force électromotrice bien défini [2]. Pour le premier point, relatif à la commande et à l'alimentation, on cherchera que les constantes de temps des machines fictives diphasées soient du même ordre afin de limiter les courants haute fréquences parasites qui peuvent apparaître dans le cas d'une alimentation par onduleur de tension en Modulation de Largeur d'Impulsions [2] [5][11][12]. La machine considérée dans cet article doit donc tendre à satisfaire les deux critères suivants : égalité des constantes de temps électriques des machines principales et secondaires et forces électromotrices sinusoïdales (amplitude comparables à quelques pourcents) pour les deux machines fictives. Les deux paramètres de conception exploités sont la distribution de bobinage et la géométrie de la couche d'aimants.

## 2. Calcul des inductances

En comparaison avec les bobinages distribués, les bobinages concentrés à pas dentaires (ou encore autour de dent) permettent en général de réduire les coûts de fabrication et de réalisation (volume de tête de bobines faible). Cependant, l'induction magnétique de l'entrefer est très riche en harmonique, ce qui rend ce type de bobinage rarement utilisée pour des machines triphasées produisant un couple peu fluctuant [7-9]. Dans cette partie, on calculera la matrice d'inductance de la machine pentaphasée avec bobinage concentré à pas dentaires. Cette matrice est la somme de la matrice d'inductance statorique d'entrefer et de la matrice d'inductance de fuite :

$$M_n = M_n^e + M_n^f \quad (1)$$

La transformation de Concordia permet de calculer les inductances des machines fictives qui ne sont rien d'autre que les valeurs propres de la matrice inductance. Ces inductances doivent être de même ordre de grandeur pour satisfaire le critère déjà défini pour le choix du bobinage. Le calcul de ces inductances est réalisé avec une modélisation matricielle du bobinage. Cette modélisation tient compte de la distribution des conducteurs de chaque phase dans les encoches et la forme de la force magnétomotrice produite par chaque phase.

### 2.1 Modélisation matricielle de bobinage

Si l'induction d'entrefer peut être supposée radiale et si l'entrefer est magnétique lisse, [6] [9] proposent une approche pour calculer la matrice d'inductance basée sur l'utilisation d'une matrice de fonction de bobinage  $W$  et d'une matrice de distribution  $D$ . La matrice  $D$  exprime la distribution des conducteurs de phase dans les encoches et la matrice  $W$  représente l'échantillonnage de la fonction de bobinage qui n'est autre que la force magnétomotrice produite par chaque phase parcourue par un courant continu de un Ampère.  $W$  est donc l'intégration discrète de la matrice  $D$ .

Selon [6] [9], un nombre d'encoches réduits  $N'_s$  et un nombre de pôles réduits  $p'$  permet la définition complète du motif de bobinage (celui-ci étant de période  $N'_s$  encoches):

$$N'_s = \frac{N_s}{pgcd(N_s, p)} \quad (2)$$

$$p' = \frac{N_s}{pgcd(N_s, p)} \quad (3)$$

Les matrices  $D$  et  $W$  sont donc de dimension  $N'_s \times N$ . Pour une machine pentaphasée à 20 encoches, le Tableau 1 illustre les deux distributions de bobinage considérée, celle à pas fractionnaire étant choisie pour sa propriété d'amplification de l'harmonique 3 et celle à pas diamétral constituant la solution de référence.

**Tableau 1. Bobinage des deux machines considérées**

Bobinage	Distribution [7]	Matrice de distribution	Matrice de bobinage
Bobinage concentré à pas diamétral, 2 paires de pôles (1 encoche par pôle et par phase)		$D = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$B = \begin{pmatrix} -0.5 & -0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ -0.5 & -0.5 & -0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & -0.5 & -0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & -0.5 & -0.5 & -0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & -0.5 & -0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & -0.5 & -0.5 & -0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & -0.5 & -0.5 \\ -0.5 & 0.5 & 0.5 & -0.5 & -0.5 \\ -0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & -0.5 \\ -0.5 & -0.5 & 0.5 & 0.5 & -0.5 \end{pmatrix}$
Bobinage concentré à pas dentaire, fractionnaire, 4 paires de pôles (0.5 encoche par pôle et par phase)		$D = \begin{pmatrix} 0.5 & 0 & 0 & 0 & -0.5 \\ 0 & 0 & 0 & -0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & -0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & -0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ -0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$B = \begin{pmatrix} 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & -0.4 \\ 0.1 & 0.1 & 0.1 & -0.4 & 0.1 \\ 0.1 & 0.1 & -0.4 & 0.1 & 0.1 \\ 0.1 & -0.4 & 0.1 & 0.1 & 0.1 \\ -0.4 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 \end{pmatrix}$

### 2.2 Calcul des inductances mutuelles et des inductances cycliques

Les inductances mutuelles sont les composantes de la matrice d'inductance définie par (1) (qui ne dépendent pas de la position mécanique du rotor si la saillance peut être négligée) :

$$M_n = \begin{pmatrix} L & M_1 & M_2 & M_2 & M_1 \\ M_1 & L & M_1 & M_2 & M_2 \\ M_2 & M_1 & L & M_1 & M_2 \\ M_2 & M_2 & M_1 & L & M_1 \\ M_1 & M_2 & M_2 & M_1 & L \end{pmatrix} \quad (4)$$

Selon [6] [10], la matrice d'inductance de l'entrefer est donnée en fonction de la matrice de fonction de bobinage  $W$  et la matrice d'inductance de fuite est fonction de la matrice de distribution  $D$  :

$$M_n = M_n^e + M_n^f = \frac{\mu_0}{g + g_m} L R_s n_{cd}^2 \frac{2\pi}{N_s} W^t W + \frac{\mu_0 n_{cd}^2 p_s}{3\delta_s (R_s + p_s)} D^t D \quad (5)$$

Les inductances mutuelles sont directement calculées à partir de (5). Pour obtenir les inductances cycliques caractérisant des machines fictives ( $L_h$  machine homopolaire,  $L_p$ , machine principale et  $L_s$ , machine secondaire), il suffit de diagonaliser la matrice d'inductance  $M_n$  à l'aide de la matrice de Concordia :

$$M = C_N^t M_n C_N = \text{diag}(L_h, L_p, L_s, L_s, L_p) \quad (6)$$

Le tableau 2 reporte les estimations obtenues pour les deux machines considérées. Les résistances des machines fictives sont égales par définition. Pour la machine à bobinage fractionnaire, il apparaît que l'objectif consistant à égaliser les constantes de temps des deux machines fictives est atteint :  $L_p$  et  $L_s$  sont très proches (ce qui n'est pas le cas avec le bobinage diamétral). La valeur nulle pour l'inductance homopolaire  $L_h$  ne pose pas de problème si la machine est couplée en étoile afin d'interdire le développement de courants homopolaires.

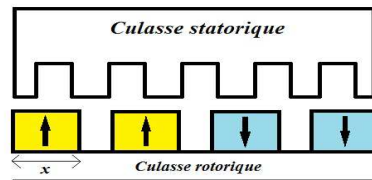
**Tableau 2. Calcul analytique des éléments des matrices  $M_n$  et  $M$  pour les deux types de bobinage**

Bobinage	$L$ (mH)	$M_1$ (mH)	$M_2$ (mH)	$L_h$ (mH)	$L_p$ (mH)	$L_s$ (mH)
Concentré à pas diamétral	5.61	1.07	-3.21	1.33	11.472	1.894
Concentré à pas fractionnaire	0.986	-0.278	-0.214	$\approx 0$	1.16	1.304

### 3. Optimisation de la couche d'aimants

Le passage du bobinage distribué à pas diamétral au bobinage concentré à pas fractionnaire en conservant la couche d'aimants pleins radiaux ne permet pas d'augmenter suffisamment la contribution de la machine secondaire dans le couple relativement à la machine principale ; même si, avec le bobinage fractionnaire choisi, le facteur de bobinage de l'harmonique 3 est supérieure à celui de l'harmonique 1. Pour augmenter le rapport d'amplitude entre la force électromotrice secondaire et la force électromotrice principale, il faut modifier la couche d'aimants, en conservant la direction radiale de l'aimantation et en insérant des lacunes (trous) selon le motif visible en Figure 1. Le seul paramètre à modifier est donc la largeur d'aimants. On dispose deux aimants par pôle :  $k$  est le rapport entre la largeur d'aimants, notée  $x$  (en degré) et le demi-pas polaire. Un compromis consiste à prendre  $k = 0.6$  pour le bobinage concentré à pas dentaire.

$$k = \frac{x}{360/(2N_p)} \quad (7)$$



**Figure 1 : Représentation d'une paire de pôle de la machine.**

La Figure 2 montre les forces contre-électromotrices (normalisées et pour un rad/s) obtenues pour la configuration à pas diamétral et aimants pleins et la configuration à pas fractionnaire et aimants adaptés. Pour cette dernière configuration, comme souhaité, il apparaît que les forces contre-électromotrices principales et secondaires ont la même amplitude et sont quasiment sinusoïdales.

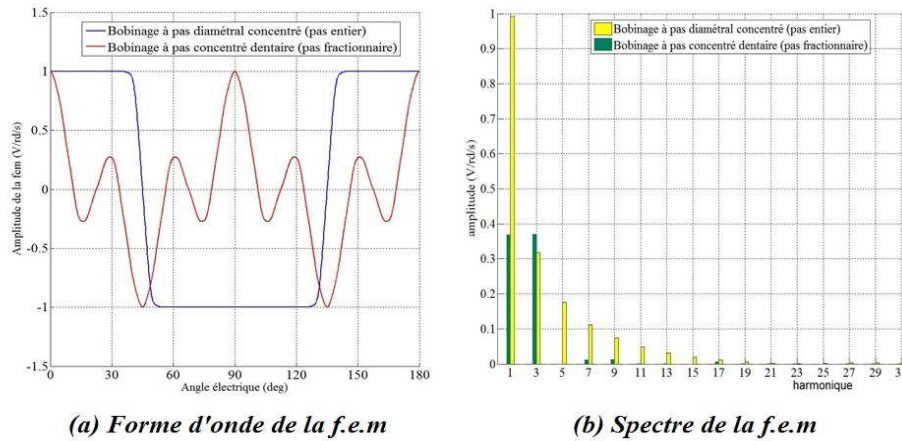


Figure 2 : Comparaison au niveau des harmoniques de la force électromotrice pour les deux configurations

## 4. Conclusion

Cet article examine les propriétés électromagnétiques d'une machine à cinq phases conçue pour être pilotée en commutation électronique de pôles : pour les deux machines fictives diphasées composant la machine réelle, l'objectif est d'obtenir deux inductances cycliques égales et deux forces électromotrices sinusoïdales de même amplitude. Il est montré que l'association du bobinage fractionnaire concentré choisi avec une couche d'aimants présentant une lacune de largeur particulière au centre du pôle permet d'atteindre ce double objectif. Dans ce résumé, cette évaluation préliminaire est menée à l'aide de code de calcul analytique du champ et la solution est discutée en référence à une machine équivalente existante à bobinage pentaphasé distribué et aimants déposés. L'article final confirmera les résultats à l'aide de code de calculs numériques et montrera le bénéfice de la solution envisagée en termes de production de couple à basse vitesse.

## 5. Références

- [1] E. Levi, « Multiphase electric machines for variable-speed applications », Industrial electronics, IEEE Transactions on, vol.55, no.5, pp.1893-1909, 2008.
- [2] F. Scuiller, E. Semail, J. F. Charpentier, « Multi-criteria-based design approach of multi-phase permanent magnet low-speed synchronous machines ». IET Electr. Power appl., 2009, Vol.3, Iss.2, pp.102-110.
- [3] X. Kestelyn, E. Semail, « Modélisation vectorielle et commande de machines polyphasées à pôles lisses alimentées par onduleur de tension » Chapitre 5 de l'ouvrage « Commandes d'actionneurs électriques synchrones et spéciaux », Traité EGEM, série génie électrique, éditions Hermes
- [4] L. Parsa, « On advantage of multi-phase machines », Proc. IEEE-ICON 2005 annual meeting, 6-10 November 2005.
- [5] X. Kestelyn, « Modélisation vectorielle multimachine pour la commande des ensembles convertisseurs-machines polyphasées ». Thèse de l'Université de Lille 1, Décembre 2003.
- [6] F. Scuiller, « Développement d'outils de conception de machines polyphasées à aimants utilisant l'approche multimachine ». Thèse de Doctorat, Ecole Nationale supérieure d'Arts et métiers, Décembre 2006.
- [7] B. Aslan. « Conception de Machines Polyphasées à Aimants et Bobinage concentré à Pas Fractionnaire avec Large Plage de Vitesse ». Thèse de Doctorat, Ecole Nationale supérieure d'Arts et métiers, Octobre 2013.
- [8] H. Hakam, M. Hecquet, V. Lanfranchi, P. Brochet, A. Randria. « Etude Vibro-acoustique de machines synchrones à aimants permanents ». Conférence EF'2011, Belfort, Décembre 2011.
- [9] F. Scuiller, E. Semail, J. F. Charpentier, « General modeling of the windings for multi-phase ac machines ». The European Physical Journal, Applied Physics 50, 31102, 2010.
- [10] A. Foggia, Techniques de l'ingénieur D3440, 1 (1999)
- [11] X. Kestelyn, E. Semail, « Vectorial Modeling and Control of Multiphase Machines with Non-salient Poles Supplied by an Inverter », Chap7 in book "Control of Non-conventional Synchronous Motors", ISTE Ltd and John Wiley & Sons.
- [12] X. Kestelyn, E. Semail, « Alimentation polyphasée par onduleur de tension », chapitre 8 du traité « Commande rapprochée de convertisseurs statiques » aux éditions Hermes, Traité EGEM, Série Génie Electrique, 33 pages, septembre 2009.