

Etude du fonctionnement dégradé d'une machine synchrone à aimants permanents double étoile pour un inverseur de poussée

A.BELLARA⁽¹⁾, F. CHABOUR⁽¹⁾, G. BARAKAT⁽¹⁾, Y. AMARA⁽¹⁾, H. MAALIOUNE⁽²⁾, A. NOURISSON⁽²⁾ and J. CORBIN⁽²⁾

⁽¹⁾Groupe de Recherche en Electrotechnique et Automatique du Havre

⁽²⁾Safran Paris-Saclay

RESUME – Dans cet article, nous procéderons à l'étude d'une machine synchrone à aimants permanents double étoile (MSAP-DE) tolérante à certains défauts en fonctionnement pour un inverseur de poussée. Tout d'abord, nous présentons le dimensionnement contraint d'une machine tolérante au court-circuit d'un IGBT dans le cadre d'une stratégie de court-circuit triphasée de l'étoile défectueuse. Suit le calcul des performances de la MSAP-DE dimensionnée issues de simulations par éléments finis aussi bien dans le cas sain que dans le cas défectueux. L'analyse des résultats permet d'évaluer la pertinence de la stratégie adoptée ainsi que ses limites.

Mots-clés—Machine synchrone à aimants permanents, Tolérance aux défauts, Double étoile, Mode sain, Mode dégradé.

1. INTRODUCTION

L'utilisation des actionneurs électriques dans l'aéronautique s'est accentuée lors de cette dernière décade. On les retrouve dans de nombreuses applications telles que : les pompes à carburant des avions, les flaps, les spoilers et les systèmes de direction du train avant. Ce choix est motivé par de nombreux avantages: réduction de masse, maintenance plus aisée et une technologie plus propre (avec les suppressions des fluides toxiques)[1]. Pour améliorer davantage la sûreté de fonctionnement, un choix adapté de l'architecture des chaînes de conversion d'énergie électrique et de leurs composants s'avère indispensable. Plusieurs architectures tolérantes aux défauts utilisant des machines synchrones à aimants permanents double étoile (MSAP-DE) ont été étudiées dans la littérature [2]. Très souvent, les pannes des actionneurs résultent d'un défaut de l'électronique de puissance. Ainsi, plusieurs études statistiques ont été menées pour déterminer la répartition des pannes dans les convertisseurs [3]. Dans [3], l'auteur indique que les défauts des convertisseurs de puissance et de la commande sont parmi les probabilités de défaillances les plus élevées de l'entraînement avec respectivement 5.4×10^{-5} et 8.5×10^{-5} . Deux défauts majeurs peuvent survenir dans un des convertisseurs alimentant les étoiles : court-circuit ou ouverture d'un interrupteur. Le court-circuit d'un transistor est considéré comme le cas le plus critique. Dans [4], l'auteur propose une stratégie d'alimentation et de commande en mode dégradé lors d'un court-circuit d'un IGBT. Cela consiste à mettre en court-circuit triphasé l'étoile défectueuse et de poursuivre le contrôle du couple avec l'onduleur sain en prenant en compte la

composante en quadrature des courants de l'étoile court-circuitée. Dans cet article, nous présentons le dimensionnement d'une MSAP-DE tolérante au défaut de court-circuit d'un IGBT. Plus précisément, chacune des deux étoiles de la machine doit avoir un courant de court-circuit triphasé acceptable pour tout le cycle de fonctionnement et la machine doit assurer la continuité du service dans le cas défectueux. Afin de réduire les hypothèses sur la géométrie de la structure et sur les propriétés des matériaux utilisés lors de la phase de conception, les calculs relatifs au dimensionnement ont été effectués par la méthode des éléments finis.

2. MODELISATION D'UNE MSAP-DE TOLERANTE AUX DEFAUTS

L'amplitude du courant de court-circuit triphasé d'une machine synchrone à aimants à dépend, dans une première approximation, du flux récolté par phase à vide et du nombre de spires en série par phase. Ainsi, plusieurs paramètres géométriques et physiques impactent l'amplitude du courant de court-circuit comme l'ouverture angulaire des aimants, l'épaisseur des aimants, le nombre de paires de pôles, le rayon du rotor, la section des encoches, l'induction rémanente, etc. Cependant, compte tenu de l'application "inverseur de poussée" (plage de vitesse, couple, encombrement, etc.), plusieurs paramètres géométriques sont imposés et sont résumés dans le tableau 1.

Tableau 1. Paramètres imposés de la machine

Nombre d'encoches	24
Nombres de paires de pôles	2
Type d'aimants	SmCo ($B_R=1.06T$)
Entrefer minimal (mm)	1
Diamètre du rotor (mm)	34
Diamètre externe maximal (mm)	70
Vitesse de rotation (tr/mn)	12000
Couple (N.m)	10

L'analyse des paramètres imposés du tableau 1 montre que le nombre de spires en série par phase et le déphasage spatial des deux étoiles jouent un rôle primordial dans la limitation du courant de court-circuit triphasé. La variation du nombre de spires doit se faire, par ailleurs, en garantissant la contrainte sur le couple électromécanique ainsi qu'une contrainte sur les

perles Joules. Ces aspects seront développés théoriquement dans la version finale de l'article. La figure 1 montre la structure de la machine et la configuration du bobinage statorique où les deux étoiles sont décalées de 30° mécanique de façon à réduire le couplage entre les deux étoiles, le nombre d'encoques étant imposés. La figure 2 montre l'évolution du court-circuit en fonction du nombre de spires en série par phase, le calcul étant fait avec une caractéristique B(H) non linéaire des tôles du circuit magnétique.

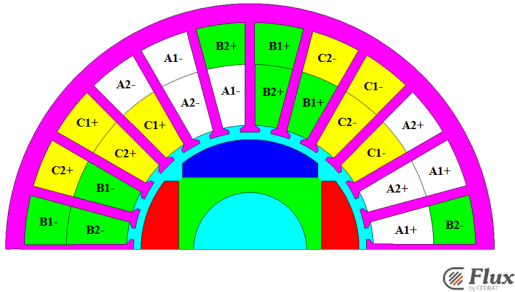


Figure 1. Topologie et configuration du bobinage de la MSAP-DE

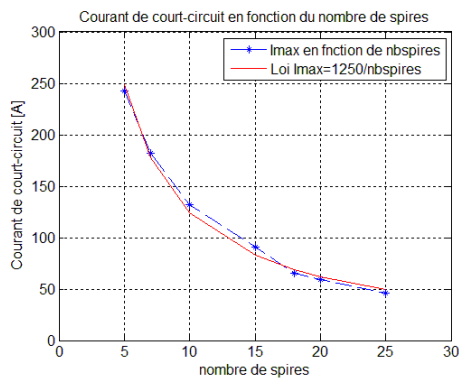


Figure 2. Evolution du courant de court-circuit en fonction du nombre de spires en série par phase

3. PERFORMANCES EN MODE DEGRADE

Après l'occurrence d'un défaut de court-circuit d'un IGBT, on applique une stratégie de reconfiguration qui consiste à mettre l'étoile connectée au convertisseur défectueux en court-circuit triphasé. Les figures 3 et 4 présentent les courants, respectivement, dans l'étoile 1 et 2 en fonctionnement dégradé pour une vitesse imposée de 1500tr/mn et une tension V_{max} de 27.5 volts. On remarque que, pour ce fonctionnement, le courant de court-circuit triphasé garde une amplitude proche de celle de l'étoile saine.

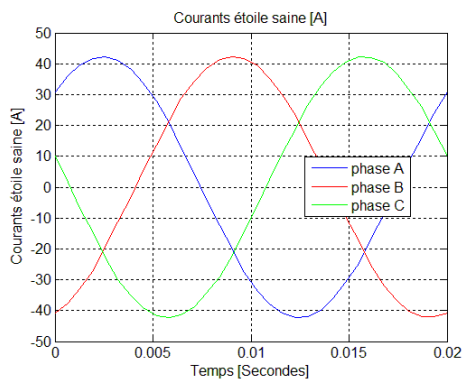


Figure 3 Courants dans l'étoile saine

La figure 5 montre le couple développé en mode générateur lors du fonctionnement dégradé, en fonction du déphasage entre la force électromotrice (E) et la tension d'alimentation (V), pour différentes valeurs de la tension d'alimentation.

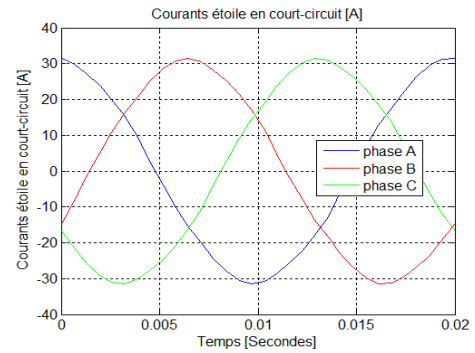


Figure 4 Courants dans l'étoile en court-circuit

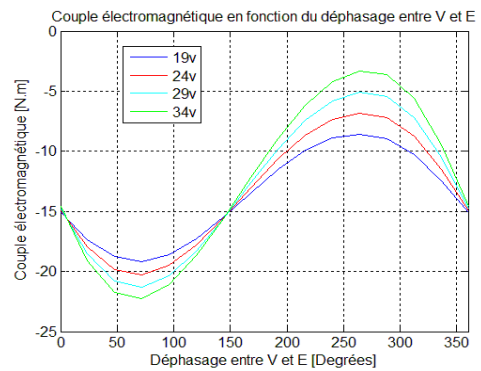


Figure 5 Couple en fonction du déphasage

Le niveau du courant de court-circuit n'empêche pas le contrôle du couple et permet d'assurer ainsi la continuité de service. La présentation des différentes grandeurs et l'analyse des performances en mode dégradé seront explicitées dans l'article final.

4. CONCLUSIONS

Dans cet article, le dimensionnement contraint d'une MSAP-DE tolérante aux défauts pour un inverseur de poussée a été brièvement présenté. La stratégie d'alimentation et reconfiguration adoptée lors de l'occurrence d'un défaut est la mise en court-circuit de l'étoile associée au convertisseur défectueux. Les résultats présentés montrent que la machine dimensionnée permet de limiter les courants de court-circuit et d'assurer continuité du service. Des développements plus fournis seront exposés dans l'article final.

5. REFERENCES

- [1] D. Mami, "Définition, conception et expérimentation de structures d'actionneurs électromécaniques innovants incluant par conception des fonctionnalités de sûreté et de sécurité de fonctionnement", *Thèse de Doctorat*, Institut National Polytechnique de Toulouse, 22 Janvier. 2010.
- [2] N. Velly, N. Takorabet, F. Meibody-Tabar, P. Y. Liegeois, F. Nierlich, F. N. Leynaert and G. Humbert, "Double channel PM motor for avionic applications : impact of winding topologies", *Proc. IEEE ECCE*, pp. 2387-2394. 2009.
- [3] W. Cao, B. C. Mecrow, G. J. Atkinson, J. W. Benett and D. J. Atkinson, "Overview of electric motor technologies used for more electric aircraft (MEA)", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 59, N° 9, September 2012, pp. 3523-3531.
- [4] M. A. Shamsi-Nejad, "Architectures d'alimentation et de commande d'actionneurs tolérants aux défauts. Régulateur de courant non linéaire à large bande passante", *Thèse de Doctorat*, Institut National Polytechnique de Lorraine, 11 Juillet. 2007.