

Evaluation de la fiabilité de la propulsion électrique d'un véhicule autonome sous-marin intégrant un ensemble convertisseur statique/machine polyphasé

Christophe OLMI

Institut de Recherche de l'école navale (IRENav)

Franck SCULLER

IRENav

Jean-Frédéric CHARPENTIER

IRENav

RESUME – En environnement naval, la fiabilité du système de propulsion est fondamentale. Dans le cas d'un véhicule autonome sous-marin, la perte de la propulsion peut entraîner la perte du véhicule. 3 configurations d'entraînement électrique de l'hélice sont étudiées en termes de fiabilité du convertisseur associé à la machine de propulsion. Le taux de défaillance du convertisseur statique pour des machines à 3 phases, 2×3 phases et 5 phases est estimé en fonction du profil de mission et du mode de fonctionnement sain ou dégradé. Les modèles de Markov permettent de quantifier l'amélioration de la fiabilité fonctionnelle des configurations à 5 phases et à 2×3 phases par rapport à celle à 3 phases grâce à leurs possibilités de reconfigurations. Cette amélioration est obtenue au détriment de la performance. Un indicateur de fiabilité-performance est développé afin d'intégrer la dégradation de celle-ci dans les résultats.

Mots-clés – Fiabilité, modèles de Markov, Entraînements électriques polyphasés

1. INTRODUCTION

En propulsion navale, l'utilisation de machines électriques polyphasées apparaît comme une solution séduisante en termes d'ondulations de couple, de densité de puissance et de fiabilité [1]. En ce qui concerne cette dernière, un nombre de phases élevé améliore la tolérance aux défauts [2] dans le sens où, certaines phases peuvent être perçues comme des composants assurant une redondance active partielle [3]. Ainsi, l'objectif est de fournir au concepteur une quantification de la fiabilité de différentes configurations envisagées afin de guider son choix. Dans ce contexte, la propulsion électrique d'un AUV (Autonomous Underwater Vehicle) est étudiée. 3 configurations sont retenues : un ensemble convertisseur statique/machine triphasé classique faisant office de référence, un système double étoile de 3 phases et une configuration pentaphasée. La figure 1 montre l'architecture de la chaîne de propulsion de l'AUV. L'énergie électrique est fournie à la machine couplée en étoile par une batterie au travers d'un onduleur en demi-pont. La liaison mécanique entre l'arbre de la machine et l'hélice est à accouplement direct. La machine est synchrone, équipée d'aimants permanents montés en surface et sa force contre-électromotrice (FCEM) est supposée sinusoïdale, ce qui autorise une commande par des courants sinusoïdaux [4].

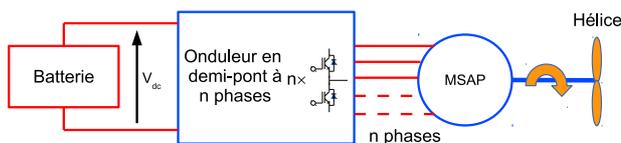


Fig. 1. Schéma de principe de la chaîne propulsive de l'AUV

De précédentes études, notamment concernant les éoliennes [5] ont montré que le convertisseur statique était for-

tement impliqué dans la défaillance de la chaîne de conversion électromécanique. Dans ce convertisseur, ce sont les semi-conducteurs (SC) qui sont les principaux responsables de la défaillance [6]. Parmi les facteurs de stress des SC, c'est la contrainte thermique qui est prépondérante sur leur détérioration [7]. Ainsi dans cette étude de fiabilité, seule cette contrainte thermique sur les SC du convertisseur statique est prise en considération, les autres éléments de la chaîne de conversion sont supposés toujours disponibles.

La première partie présente la méthode d'évaluation du taux de défaillance de l'onduleur en mode sain comme en mode dégradé en fonction du point de fonctionnement. Dans un second temps, les 3 configurations sont étudiées. Les diagrammes d'états-transitions permettent de souligner les capacités de reconfiguration et les modèles de Markov [8] associés conduisent à l'estimation quantifiée de la fiabilité de chaque solution par le biais de la fonction de fiabilité. Les résultats sont ensuite présentés et analysés sur un profil de mission et un indicateur fiabilité-performance est introduit afin de prendre en compte la dégradation des performances de la propulsion. Enfin, les limites de l'étude sont rappelées et les perspectives de travaux futurs évoquées.

2. MÉTHODE

2.1. Evaluation du taux de défaillance d'un semi-conducteur

Le taux de défaillance λ d'un composant ou d'un système est une donnée statistique représentant le nombre de défauts par unité de temps. L'estimation du taux de défaillance d'un SC est conduite à l'aide de la méthodologie *FIDES* [9]. Dans le cas prenant uniquement en compte le facteur d'accélération dû au stress thermique, la connaissance de la température de jonction du SC est indispensable à la détermination de son taux de défaillance. Celle-ci est évaluée à l'aide d'un modèle thermique à base de résistances thermiques et du calcul des pertes par relations analytiques.

2.2. Evaluation du taux de défaillance de l'onduleur

La défaillance d'un SC est supposée conduire à une ouverture de la phase associée au bras d'onduleur comportant le SC en défaut. Ainsi, la perte d'un SC entraîne la perte du bras d'onduleur dans lequel il est placé. Ce cas constitue en termes de modélisation de la fiabilité une structure série [8] conduisant à l'addition des taux de défaillance. Du fait de la symétrie de fonctionnement entre les 2 interrupteurs du bras d'onduleur, le taux de défaillance de celui-ci s'exprime par (1) :

$$\lambda_{bras} = 2 \times (\lambda_{IGBT} + \lambda_{Diode}) \quad (1)$$

Dans chaque mode de fonctionnement, les r bras sains parmi les n initialement disponibles de l'onduleur sont sollicités pour assurer la fonction de propulsion. Le taux de défaillance de l'onduleur se détermine par la somme des taux de défaillances des bras sains.

3. ESTIMATION DE LA FIABILITÉ DE CHAQUE CONFIGURATION

3.1. Ensemble convertisseur/machine triphasé

Du fait de l'incapacité de reconfiguration de cette structure, la fonction de fiabilité $R(t)$ correspondant à la probabilité du système de ne pas être défaillant dans l'intervalle de temps $[0,t]$ est décrite par (2) :

$$R_3(t) = \exp(-\lambda_3.t) \quad (2)$$

λ_3 est le taux de défaillance de l'onduleur triphasé.

3.2. Ensemble convertisseur/machine double étoile

L'unique possibilité de reconfiguration de cette structure réside dans la conservation d'un onduleur lorsque l'autre est défaillant. Cette capacité de reconfiguration peut être modélisée par un diagramme états-transitions [8] représenté sur la figure 2.

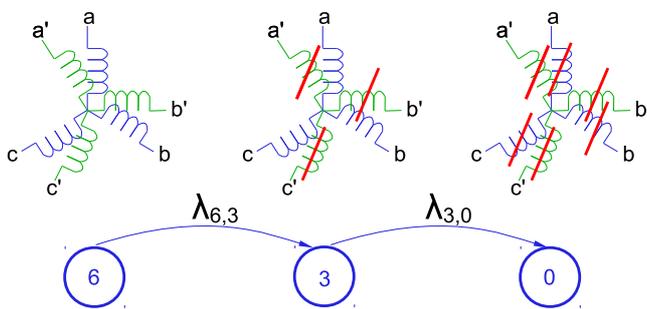


Fig. 2. Diagramme états-transitions de l'ensemble convertisseur/machine double étoile

Sur la figure 2, l'état 6 correspond au mode sain où la totalité des phases est alimentée. L'état 3 caractérise le mode dégradé où seul un onduleur est opérationnel suite à la défaillance de l'autre. L'état 0 correspond à l'arrêt de la propulsion. Les taux de défaillance $\lambda_{6,3}$ et $\lambda_{3,0}$ sont respectivement ceux des deux onduleurs et d'un onduleur en fonctionnement. Les modèles de Markov permettent de déterminer l'évolution au cours du temps de la probabilité du système d'être dans l'état 6, 3 ou 0 et de la fonction de fiabilité qui correspond à la somme des probabilités (3) des états 6 (mode sain) et 3 (mode dégradé).

$$R_{2 \times 3}(t) = P_6(t) + P_3(t) = 1 - P_0(t) \quad (3)$$

3.3. Ensemble convertisseur/machine pentaphasée

Cette architecture possède 2 possibilités de reconfiguration. La perte d'un premier bras d'onduleur est compensée par la modification de la commande des 4 phases restantes. Dans ce mode dégradé, il reste encore un degré de liberté pour reconfigurer le système à 3 phases dans le cas de la défaillance d'un second bras d'onduleur. Une méthode analogue à celle utilisée pour l'étude de la structure double étoile est conduite pour obtenir la fonction de fiabilité $R_5(t)$ de l'ensemble pentaphasé.

4. RÉSULTATS

La figure 3 montre l'évolution au cours du temps de la fonction de fiabilité dans les 3 configurations retenues. La supériorité en termes de fiabilité des structures à nombre de phases supérieure à 3 par rapport à une architecture triphasée y est démontrée quantitativement. Cependant, cet accroissement de la fiabilité se traduit par une dégradation des performances dans le cas de cette étude. Ainsi, un indicateur fiabilité-performance sera proposé dans l'article final afin de pondérer les possibilités de reconfigurations.

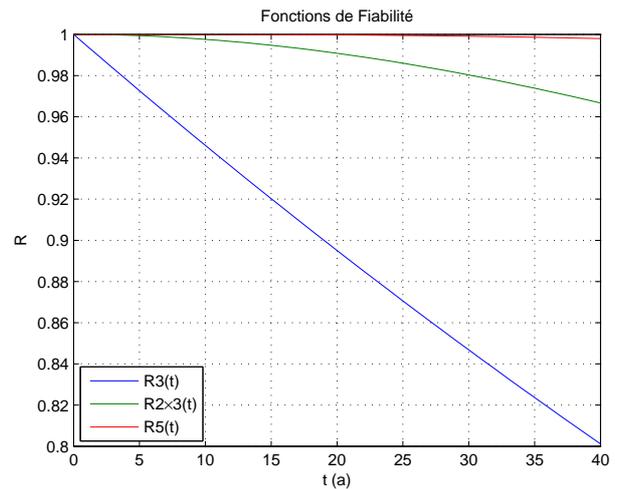


Fig. 3. Fonctions de fiabilité de l'onduleur pour les 3 configurations polyphasées

5. CONCLUSIONS

Les modèles de Markov permettent de prendre en considération les possibilités de reconfigurations des systèmes polyphasés et fournissent une estimation quantifiée de leur fiabilité. Cet aspect quantitatif exprimé au travers de la fonction de fiabilité, intègre les modifications du taux de défaillance en fonction du point de fonctionnement et du mode sain ou dégradé du système. Ainsi, la supériorité en termes de fiabilité fonctionnelle des ensembles convertisseur/machine à nombre de phases élevé est démontrée. Cependant, dans le cas de l'AUV, seules les contraintes thermiques sur les SC du convertisseur statique ont été prises en compte. Lors de travaux futurs, cette méthodologie de calcul de fiabilité doit s'étendre à tous les éléments de la chaîne de conversion et intégrer d'autres contraintes (cycles thermiques, vibrations). Ceux-ci doivent aider le concepteur à guider son choix lorsque la fiabilité devient un critère prioritaire pour la sélection et le dimensionnement du système de conversion électromécanique.

6. 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] B.C. Mecrow, A.G. Jack, J.A. Haylock and J. Coles, « Fault-tolerant permanent magnet machine drives », Electric Power Applications, IEEE Proceedings, vol.143, no.6, pp.437,442, 1996.
- [3] P. Chapouille, « Fiabilité. Maintenabilité », Techniques de l'ingénieur, t4300, 1980.
- [4] E. Semail, « A. Bouscayrol, J.P. Hautier, « Vectorial formalism for analysis and design of polyphase synchronous machines », The European Physical Journal Applied Physics, vol. 22, no 03, p. 207-220, 2003.
- [5] C. Busca « Modeling lifetime of high power IGBTs in wind power applications - an overview », Industrial Electronics (ISIE), 2011 IEEE International Symposium, pp. 1408-1413, 2011.
- [6] H. Wang, M. Liserre, F. Blaabjerg, « Toward reliable power electronics : challenges, design tools, and opportunities, » Industrial Electronics Magazine, IEEE, vol.7, no.2, pp.17,26, 2013.
- [7] M. Ikonen « Power cycling lifetime estimation of IGBT power modules based on chip emperature modeling », thèse de doctorat, Lappeenranta University of Technology, 2012.
- [8] M. Rausand, A.Hoyland, « System reliability theory - Models, statistical methods and applications », Second Edition, Wiley-Blackwell, 2004.
- [9] « Guide FIDES 2009, édition A, méthodologie de fiabilité pour les systèmes électroniques », FIDES, Rapport technique, 2009, téléchargé en octobre 2014 sur le site <http://fides-reliability.org>