

# Comparaison de performances de différentes structures de machines polyphasées en mode normal et en modes dégradés en vitesse variable avec défluxage pour des applications hydroliennes

Ousmane FALL<sup>(1,2,3)</sup>, Jean-Frédéric CHARPENTIER<sup>(2)</sup>, Ngac-Ky NGUYEN<sup>(3)</sup> et Paul LETELLIER<sup>(1)</sup>

(1) Jeumont-Electric, 367 Rue de l'industrie 59460 Jeumont

(2) Ecole navale, BCRM Brest 29240 Brest

(3) Arts et Métiers ParisTech, Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille (L2EP), 8 Bd Louis XIV, 59046 Lille

**RESUME** - Cet article s'intéresse au dimensionnement de génératrices synchrones polyphasées à aimants permanents destinées à être associées à un multiplicateur de vitesse de faible rapport (qui ne nécessite que très peu d'entretien contrairement au multiplicateurs de rapports élevés) et une turbine à pas fixe. L'objectif est de comparer les structures à bobinage concentré à 5 phases régulièrement réparties et les structures à 2\*3 phases, à une structure de référence à 2\*3 phases à bobinage distribué classique. L'idée est de voir l'influence du bobinage et de la structure polyphasées choisies, en termes de capacité de fonctionnement en défluxage en mode normal et dégradé pour un même cahier des charges relatif à une génératrice hydrolienne.

**Mots-clés**—*génératrice synchrone, aimants permanents, génératrice polyphasée, fonctionnement en défaut, stratégie de commande, défluxage, applications hydroliennes, turbine à pas fixe, bobinage concentré.*

## 1. INTRODUCTION

Le choix de l'utilisation de génératrices polyphasées (au lieu de structures à 3 phases) peut être lié à des exigences en termes de tolérance aux défauts, de qualité du couple à basse fréquence, et à la possibilité de fractionner la puissance et de diminuer ainsi les contraintes sur le dimensionnement des composants électroniques [1, 2]. L'aspect « tolérance aux défauts » qui est traité dans cet article en considérant des défauts liés au convertisseur (ouverture d'une phase) est fondamental dans le secteur des énergies marines où l'accès aux systèmes est très difficile.

Notre étude est consacrée à des structures à bobinage concentré. Ce type de bobinage présente des avantages [3-5] tels que la réduction des têtes de bobines et la possibilité d'obtenir un faible couplage entre les phases. Une autre particularité des machines à bobinage concentré est la possibilité d'atteindre des valeurs d'inductances assez élevées (d'où la forte capacité de défluxage de ces types de machines) [6].

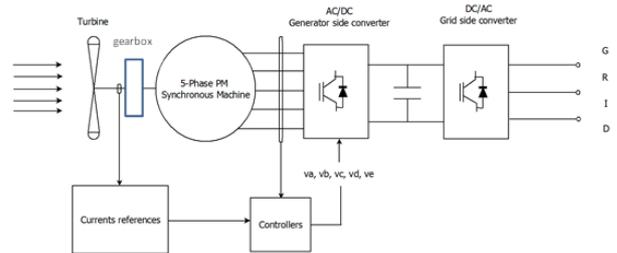


Figure 1: Structure de commande de l'ensemble turbine/générateur/convertisseur

Le schéma général de l'association turbine/générateur/convertisseur est montré sur la figure 1. Dans ce type de système, la stratégie de contrôle à limitation de la puissance qui se fait de manière classique en utilisant le contrôle de pas pour les éoliennes de grande puissance, peut être alors fait par accélération de la turbine [7, 8]. Cette stratégie implique qu'au-delà d'une certaine vitesse la génératrice va fonctionner à puissance constante pour écrêter la puissance de la turbine. Cette stratégie peut être étendue au cas où le convertisseur présente des défauts d'ouverture de phase, dans le cas d'une génératrice polyphasée, ce qui permet une tolérance aux défauts. Dans [9] une stratégie de commande en vitesse variable avec défluxage d'une génératrice synchrone à 5-phases à aimants permanents en modes sain et dégradés, est présentée.

Les travaux présentés dans cet article vont faire le lien entre les stratégies de contrôle d'une machine polyphasée en mode normal et en mode de défaut en vitesse variable et les choix en termes de dimensionnement de la structure de la machine. En effet, une première partie de l'article sera consacrée à une brève présentation de la méthode de détermination des caractéristiques couple-vitesse des machines polyphasées étudiées, en mode sain et en modes dégradés en vitesse variable. Dans la deuxième partie les critères de choix des combinaisons encoche/pôle possibles

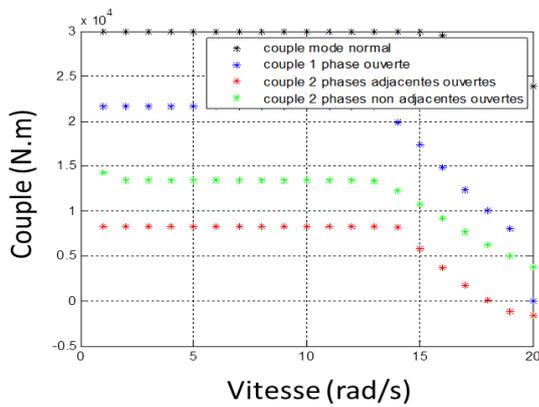


Figure 2: Caractéristiques couple-vitesse en mode sain et en modes dégradés d'une machine synchrone à aimants permanents 5-phases

seront examinés. Dans la troisième partie une méthodologie de calcul analytique des inductances et des forces électromotrices qui permet d'établir les caractéristiques couple/vitesse en modes sain et dégradés sera présentée. Enfin dans la quatrième partie les résultats, en termes de caractéristiques couple-vitesse, obtenus pour différentes machines sur un même cahier des charges seront comparées avec ceux d'une machine de référence 2\*3 phases à bobinage distribué classique. Le cahier des charges choisi correspond à une machine dont le point nominal est d'environ 500kW en mode sain. Cette machine est prévue pour être associée à un multiplicateur de rapport inférieur à 10 et à une turbine hydrolienne d'environ 13 m de diamètre.

## 2. STRATEGIES DE COMMANDE

Les stratégies de commande étudiées sont basées sur la théorie multi machine qui consiste à affecter à chaque harmonique de FEM à une machine fictive. Dans cette partie, une étude des stratégies de commande qui permettent de fonctionner en vitesse variable avec défluxage en mode sain et en modes dégradés sera présentée. Cette stratégie prend en compte les limitations en termes de valeur de courant et de tension au niveau du convertisseur MLI associé à la machine. La figure 2 montre une étude de la caractéristique couple-vitesse d'une machine à 5 phases de 500kW en mode sain et pour différents défauts de type ouverture de phase.

La stratégie de commande à adopter impose un certain nombre de contraintes sur le dimensionnement de la machine (notamment au niveau du contenu harmonique de FEM et ses valeurs d'inductances liées aux systèmes multi-machines).

## 3. CHOIX DE LA COMBINAISON ENCOCHE/POLE

Les choix des combinaisons encoches/pôles d'une machine correspondant au cahier des charges et à un bobinage concentré sont discutés en tenant compte des performances globales du bobinage (coefficients de bobinage), de la qualité du couple, du niveau de vibration liées aux forces radiales, et du niveau des pertes par courants induits dans les aimants.

## 4. METHODE DE CALCUL DES CARACTERISTIQUES COUPLE VITESSE

Cette partie décrit une méthode analytique de calcul d'inductance et des forces électromotrices en fonction des dimensions de la machine. Le calcul de ces caractéristiques électriques permet l'estimation des caractéristiques couple vitesse en modes sain et dégradés qui correspondent aux stratégies de commande définies précédemment.

## 5. COMPARAISON DES RESULTATS AVEC UNE 2\*3 PHASES DE REFERENCE

Dans cette partie, une comparaison en termes de caractéristique couple-vitesse sera faite. Cette étude consiste à déterminer les caractéristiques en mode sain et en modes dégradés de différentes structures de génératrices à bobinage concentrés à 5 phases régulièrement réparties ou à 2\*3 phases, et les comparer à la structure double triphasée de référence à 216 encoches et 60 pôles. Afin de pouvoir comparer les structures, les nombres de pôles des structures à comparer seront choisis proches de 60 pôles dans le but de garder des fréquences électriques proches. Les caractéristiques du rotor, les densités de courant et les charges linéiques des différentes machines ainsi que les contraintes liées au convertisseur (valeurs maximales du courant et de la tension) sont, pour la même raison, maintenues identiques.

## 6. REFERENCES

- [1] H. Jin, K. Min, Y. Jia-qiang, J. Hai-bo, and L. Dong, "Multiphase machine theory and its applications," in *International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS*, 2008, pp. 1-7.
- [2] E. Levi, "Multiphase Electric Machines for Variable-Speed Applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, pp. 1893-1909, 2008.
- [3] J. Cros and P. Viarouge, "Synthesis of high performance PM motors with concentrated windings," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 17, pp. 248-253, 2002.
- [4] A. M. El-Refai, "Fractional-Slot Concentrated-Windings Synchronous Permanent Magnet Machines: Opportunities and Challenges," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 57, pp. 107-121, 2010.
- [5] A. M. El-Refai, T. M. Jahns, and D. W. Novotny, "Analysis of surface permanent magnet machines with fractional-slot concentrated windings," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 21, pp. 34-43, 2006.
- [6] F. Scuiller and E. Semail, "Inductances and Back-emf Harmonics Influence on the Torque/Speed Characteristic of Five-Phase SPM Machine," in *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2014 IEEE*, 2014, pp. 1-6.
- [7] Z. Zhibin, F. Scuiller, J. F. Charpentier, M. El Hachemi Benbouzid, and T. Tianhao, "Power Control of a Nonpitchable PMSG-Based Marine Current Turbine at Overrated Current Speed With Flux-Weakening Strategy," *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, vol. 40, pp. 536-545, 2015.
- [8] S. Djebarri, J. F. Charpentier, F. Scuiller, and M. Benbouzid, "A systemic design methodology of PM generators for fixed-pitch marine current turbines," in *Green Energy, 2014 International Conference on*, 2014, pp. 32-37.
- [9] O. Fall, J. F. Charpentier, N. Ngac-Ky, and P. Letellier, "Maximum torque per ampere control strategy of a 5-phase PM generator in healthy and faulty modes for tidal marine turbine application," in *Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC), 2014 International*, 2014, pp. 468-473.