



**HAL**  
open science

## Génératrice Synchrones à Aimants multi-étoile pour améliorer le facteur de charge d'une hydrolienne

Franck Scuiller

► **To cite this version:**

Franck Scuiller. Génératrice Synchrones à Aimants multi-étoile pour améliorer le facteur de charge d'une hydrolienne. Symposium de Genie Electrique, Jun 2016, Grenoble, France. hal-01361604

**HAL Id: hal-01361604**

**<https://hal.science/hal-01361604v1>**

Submitted on 7 Sep 2016

**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.

# Génératrice Synchrones à Aimants multi-étoile pour améliorer le facteur de charge d'une hydrolienne

Franck SCULLER

Institut de Recherche de l'Ecole Navale

**RESUME** – Pour les hydroliennes, les Génératrices Synchrones à Aimants Permanents (GSAP) à grand nombre de phases permettent de satisfaire les objectifs de rendement et de tolérance aux défauts. Cette dernière propriété peut être plus facilement exploitée si le bobinage statorique est constitué de plusieurs étoiles triphasés, rendant ainsi possible leurs alimentations par des convertisseurs standards modulaires. Cette étude propose une évaluation de l'influence du nombre d'étoiles de la machine sur l'énergie extraite par la turbine. Une méthode permettant d'estimer la puissance extraite par la turbine pour un nombre donné d'étoiles à différents régimes dégradés est détaillée. L'impact du nombre d'étoiles sur la résilience de la génératrice est alors estimé en évaluant le facteur de charge moyen probable sur une période de cinq ans (c'est-à-dire sans réparation). Selon l'approche probabiliste introduite, le facteur de charge est amélioré par l'augmentation du nombre d'étoiles et la configuration à trois étoiles apparaît comme un compromis en termes d'accroissement de complexité et de gain en énergie extraite.

**Mots-clés** – Machine polyphasée, Multi-étoile, Energie Marine, Hydrolienne, Résilience, Fiabilité, Modes dégradés.

## 1. INTRODUCTION

Par principe, les génératrices hydroliennes sont placés dans des environnements sous-marins à fort courant, rendant leur maintenance particulièrement difficile. Une estimation de la fiabilité dès la phase d'avant-projets apparaît donc nécessaire, notamment pour évaluer la rentabilité. Le choix d'un générateur synchrone à aimants directement entraîné par une turbine à pas fixe s'inscrit dans cette recherche de solutions supposées robustes si les retours d'expérience des grands générateurs éoliens sont extrapolés aux hydroliennes [1].

Une génératrice polyphasée (c'est-à-dire à nombre de phases supérieure à trois) est intrinsèquement apte à fonctionner en régime dégradé, c'est-à-dire avec des phases indisponibles [2, 3]. Cette amélioration de la fiabilité fonctionnelle peut être contrebalancée par la réduction de la fiabilité structurelle induite par un convertisseur de puissance et un contrôle associé plus élaborés. Le choix d'un bobinage multi-étoile permet d'alimenter la machine par des convertisseurs triphasés standards modulaires au bénéfice du coût et de la maintenabilité, ce qui limite la dégradation de la fiabilité structurelle. Cependant, pour le concepteur, quantifier l'influence du nombre d'étoiles sur la disponibilité de l'énergie reste une tâche difficile. L'objectif de cette étude est de contribuer à évaluer cette influence sur l'énergie extraite, en estimant le facteur de charge probable.

## 2. ADAPTATION TURBINE-GÉNÉRATRICE

Comme une éolienne, l'hydrolienne fonctionne en extraction de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking, MPPT) entre la vitesse de démarrage (0.7m/s) et la vitesse nominale (2.7m/s,  $z = 1$  vitesse de courant normalisée). Entre la vitesse nominale et la vitesse de fin d'exploitation (3.6m/s,  $z = 1.33$ ), la turbine fonctionne à puissance constante : en raison de l'absence de système de calage, ce mode est obtenu par mise en survitesse de rotation de la turbine [4]. Convertisseurs

de puissance et circuit magnétique de la génératrice doivent être spécifiés avec cette contrainte. Dans un tel contexte, la conception d'une turbine dont le rendement baisse significativement passé le point de rendement maximal doit être ciblée. La figure 1 illustre la mise en survitesse de rotation de la turbine lors du fonctionnement à puissance constante (dans la plage de vitesse de courant réduite  $z \in [1; 1.33]$ ) : pour le profil de rendement considéré (caractérisé par une courbe de coefficient de puissance de turbine  $C_p$ ), un calcul analytique simple (présenté dans l'article final) montre que ce fonctionnement est tenu si la machine possède une réaction magnétique d'induit de l'ordre de 0.49pu et une force électromotrice de l'ordre de 0.87pu.

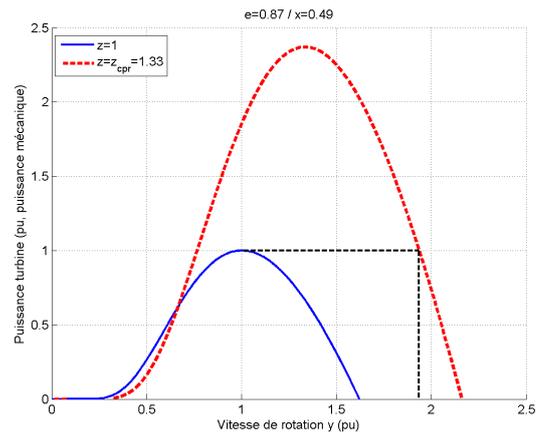


Fig. 1. Adaptation de la génératrice à la turbine pour le fonctionnement à puissance constante

Entraînée directement par la turbine, la GSAP basse vitesse (1MW à 15tr/min) envisagée possède 72 paires de pôles et peut être bobinée de sorte à présenter 1, 2, 3 ou 4 étoiles triphasées magnétiquement superposées. Cette solution présente plusieurs avantages en comparaison à des structures à étoiles magnétiquement décalées :

- réduction des courants de circulation entre étoiles,
- couplages magnétiques entre étoile réduits,
- fréquences des couples pulsatoires inchangées en cas de pertes d'étoiles.

En pratique, le contrôle du couple fourni par une étoile ne dépend pas du nombre d'étoiles disponibles : en d'autres termes, il n'est pas nécessaire de reconfigurer la commande en régime dégradé (étant admis que les régimes dégradés considérés aboutissent à des déconnexions d'étoiles). Chaque étoile est connectée au réseau par son propre convertisseur modulaire triphasé comme illustré par la figure 2 (représentant la solution à 4 étoiles). Dans la suite, le nombre total d'étoiles est noté  $S$  et le nombre d'étoiles disponibles  $s$ .

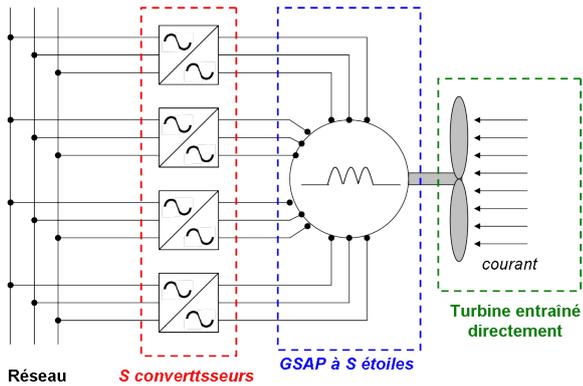


Fig. 2. Génératrice hydrolienne multi-étoile (cas  $S = 4$  étoiles)

### 3. EXTRACTION DE PUISSANCE EN RÉGIME DÉGRADÉ

Pour le site considéré (Raz de Sein en Bretagne), le profil de vitesse de courant de marée en fonction du temps est traduit en histogramme de vitesse de courant normalisée  $z$ ,  $f_Z(z)$  (ce qui donne une grandeur analogue à une densité de probabilité de vitesse de vent sur une éolienne). Des modèles d'estimation des pertes cuivre, fer et convertisseurs en fonction du point de fonctionnement de la génératrice et de sa configuration en termes de nombre d'étoiles disponibles sont construits. Il est alors possible de calculer la puissance extraite en fonction de la vitesse de courant, en régime nominal (toutes étoiles disponibles,  $s = S$ ) et en régimes dégradés (pertes d'étoiles,  $s < S$ ). La figure 3 illustre le résultat obtenu pour une hydrolienne à 4 étoiles ( $S = 4$ ) dans les 4 régimes de fonctionnement possibles : normal ( $s = 4$ ) et dégradés ( $s \in [1; 3]$ ). Il convient de préciser que la vitesse de rotation maximale en régimes dégradés augmente dans une proportion acceptable (compte tenu du coefficient de puissance de turbine  $C_p$  choisi) lorsque le nombre d'étoiles disponibles est réduit : 1.93pu en régime nominal ( $s/S = 4/4$ ) jusque 2.11pu au régime le plus dégradé ( $s/S = 1/4$ ).

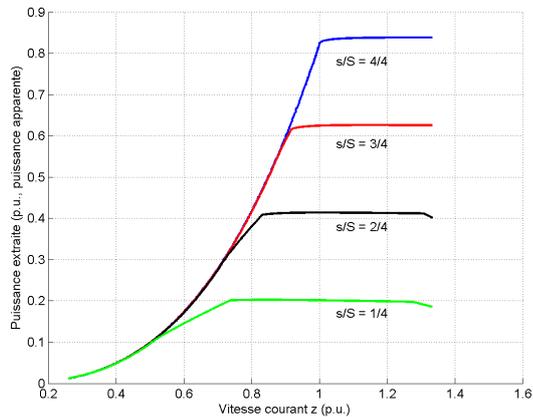


Fig. 3. Puissance extraite en fonction de la vitesse de courant pour différents nombres d'étoiles disponibles  $s$  (cas  $S = 4$ )

### 4. INFLUENCE DU NOMBRE D'ÉTOILES SUR LE FACTEUR DE CHARGE

Il est rappelé que l'objectif de l'étude consiste à déterminer l'influence du nombre d'étoiles  $S$  sur le facteur de charge en admettant le fonctionnement en régime dégradé (pertes d'étoiles) sur une certaine durée. Pour cette évaluation préliminaire, la disponibilité de la génératrice (aptitude à injecter de la puissance sur le réseau) est calculée en considérant exclusivement la fiabilité des convertisseurs triphasés réputés comme les éléments les plus défaillants de la chaîne de conversion. Il est supposé

que la probabilité d'avoir  $s$  convertisseurs disponibles parmi  $S$  suit une loi binomiale avec une probabilité de succès  $p$ . Cette approche signifie que la fiabilité d'un convertisseur ne dépend pas de la fiabilité des autres. De plus, il est supposé que le taux de défaillance  $\lambda$  d'un convertisseur d'étoile ne dépend pas du temps et conserve la même valeur quelque soit le nombre total d'étoiles  $S$  et le nombre d'étoiles disponibles  $s$ . La valeur numérique du taux de défaillance  $\lambda$  est estimée à l'aide des retours d'expérience publiés sur les génératrices éoliennes. Sur la base de ces hypothèses, un procédé de calcul visant à estimer le facteur de charge d'une hydrolienne à  $S$  étoiles sur une période de 5 ans peut être développé. La méthode sera détaillée dans l'article final. Les résultats obtenus sont résumés par la figure 4. Le gain en facteur de charge est significatif en passant d'une étoile ( $S = 1$ ) à deux étoiles ( $S = 2$ ) puis la progression est moins forte. Le choix d'un bobinage à trois étoiles ( $S = 3$ ) apparaît alors comme un compromis intéressant entre augmentation de la complexité et amélioration de la disponibilité.

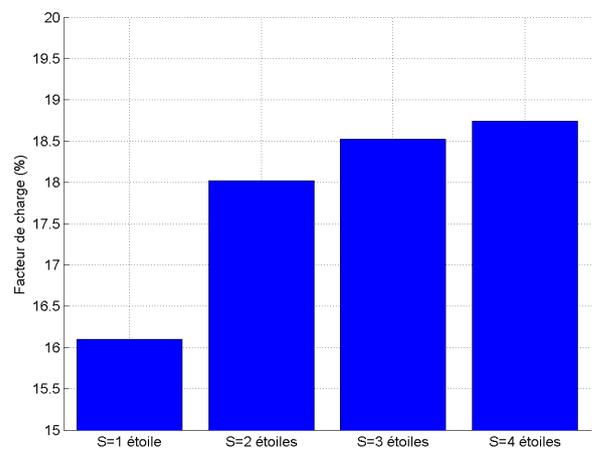


Fig. 4. Influence du nombre d'étoiles  $S$  sur le facteur de charge

### 5. CONCLUSION

L'estimation de la disponibilité de l'hydrolienne en fonction du nombre d'étoiles de la génératrice repose sur un modèle probabiliste simple : le nombre d'étoiles disponibles est supposé suivre une loi binomiale impliquant une indépendance des défaillances des convertisseurs. Le taux de défaillance du convertisseur est par ailleurs considéré indépendant de sa puissance. Cette approche préliminaire permet de quantifier le gain en facteur de charge sur une période de cinq ans si le nombre d'étoiles augmente.

### 6. RÉFÉRENCES

- [1] J. RIBRANT et L. BERGLING, « Survey of failures in wind power systems with focus on swedish wind power plants during 1997 ndash ;2005 », *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 22, p. 167–173, March 2007.
- [2] T. JAHNS, « Improved reliability in solid-state ac drives by means of multiple independent phase drive units », *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. IA-16, p. 321–331, May 1980.
- [3] F. MEKRI, S. BEN ELGHALI et M. BENBOUZID, « Fault-tolerant control performance comparison of three- and five-phase pmsg for marine current turbine applications », *Sustainable Energy, IEEE Transactions on*, vol. 4, p. 425–433, April 2013.
- [4] Z. ZHOU, F. SCULLER, J. CHARPENTIER, M. BENBOUZID et T. TANG, « 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, p. 536–545, July 2015.