

Méthodologie de conception systémique de génératrices à aimants permanents associées avec une hélice à pas fixe : Application aux hydroliennes

Sofiane Djebbari^{1,2}, Jean Frédéric Charpentier¹, Franck Scuiller¹, Mohamed Benbouzid²

¹Ecole Navale, EA 3634, IRENav, Brest, France

²Université de Brest, EA 4325 LBMS, Rue de Kergoat, Brest, France

sofiane.djebbari@ecole-navale.fr, jean-frédéric.charpentier@ecole-navale.fr, franck.scuiller@ecole-navale.fr,
Mohamed.Benbouzid@univ-brest.fr

RESUME – Ce travail traite de la conception systémique de génératrices électriques à aimants permanents associées à des hélices marines. La conception systémique consiste à concevoir un composant de la chaîne de conversion tout en tenant compte des caractéristiques des autres composants du système. Cet article décrit une méthodologie de conception optimale spécifique pour les machines électriques à entraînement direct associées à une turbine marine à pas fixe. L'originalité de cette démarche met en évidence les critères et les contraintes de conception de la génératrice afin d'assurer son pilotage (écrêtage de la puissance à vitesse de courant élevée) sans recours au système d'orientation des pales. Le système d'orientation des pales et le multiplicateur mécanique de vitesse sont des composants coûteux, encombrants, peu fiables et très exigeants en termes de maintenance. Ces inconvénients rendent ces éléments indésirables dans une chaîne d'entraînement pour hydrolienne, car la réduction de la maintenance est un facteur prédominant. Les résultats montrent que la génératrice dimensionnée selon la méthodologie proposée est capable d'être commandée sur tout un cycle de fonctionnement. Ceci permet alors l'écrtage de la puissance uniquement par le contrôle électrique de la génératrice.

MOTS-CLES – Hydrolienne, association machine/hélice, hélice à pas fixe, machine électrique, entraînement direct, défluxage.

1. Introduction et contexte

L'énergie des marées est une source d'énergie renouvelable dont le potentiel est totalement prévisible des années à l'avance. Cette énergie est engendrée par le courant marin qui est lui-même l'effet de la contribution des forces gravitationnelles de la lune et du soleil sur les océans [1]. Le potentiel énergétique mondial de cette ressource est estimé à 450 TWh/an dont environ 24 TWh/an sur les côtes européennes. Cette ressource se répartie principalement entre l'Angleterre qui dispose de 48%, la France 42% et l'Irlande 8% du potentiel européen [2]. De ce fait, elle constitue une bonne alternative pour compléter le panel des moyens de production d'énergie renouvelable. De plus, le caractère prédictible de cette ressource d'énergie constitue un atout pour son raccordement au réseau électrique, ce qui facilite la gestion et la commercialisation de l'électricité produite. Il est possible de trouver d'autres intérêts qui peuvent rendre cette ressource intéressante, comme la réduction de l'impact environnemental, une pollution visuelle réduite et l'absence d'exposition au bruit pour les populations [3].

Les hydroliennes sont des machines immergées sous l'eau de mer et destinées à récupérer l'énergie des courants de marées [1]. Ces systèmes sont comparables dans leur principe aux systèmes utilisés dans les éoliennes et ils peuvent comporter :

- Une turbine (hélice), les turbines à axe horizontal sont en émergence dans les premiers prototypes d'hydroliennes pré industrielles. Elle peut inclure des pales à pas variable ou à pas fixe. Le mécanisme d'orientation des pales permet un contrôle de la puissance de l'hydrolienne par la variation du pas. Cependant il augmente la complexité de la turbine et la probabilité de défaillance de l'hydrolienne. Il est à noter que, pour une application offshore et particulièrement pour l'hydrolien, la fiabilité et la réduction de la maintenance sont des facteurs clés pour assurer une exploitation rentable de l'énergie des courants de marée [2].

- Un multiplicateur mécanique de vitesse, cet élément peut comporter plusieurs étages qui peuvent être une source importante de pannes et de maintenance. Dans le cas d'un système à entraînement direct « direct-drive », la génératrice est directement entraînée par l'hélice, le multiplicateur est alors supprimé.
- La génératrice, c'est un élément important dans la chaîne d'entraînement car elle est le lieu de la conversion d'énergie. En entraînement direct, des machines à aimants permanents entraînées à faible vitesse sont principalement utilisées. Dans ce dernier cas de figure, les vitesses de rotation de la machine sont typiquement en dessous de 50 tr/min pour les hydroliennes de grande puissance.
- Le convertisseur permet le pilotage de l'hydrolienne et la régulation de la puissance avant son injection dans le réseau électrique. Plusieurs architectures sont possibles [4]. Un onduleur Back-to-Back à double pont à IGBT sera considéré dans cet article.
- Un système de stockage, il peut éventuellement être utilisé pour le lissage de la puissance avant son injection dans le réseau électrique[5].

D'après les retours d'expérience sur les chaînes d'entraînement des éoliennes, le multiplicateur de vitesse et le mécanisme d'orientation des pales sont parmi les principales sources de défaillance et de maintenance. Pour les applications hydroliennes la maintenance est une opération très difficile car l'hydrolienne est immergée sous l'eau de mer à une certaine distance des côtes. Un état de mer et des conditions météorologiques défavorables peuvent rendre l'hydrolienne inaccessible et donc la maintenance impossible pendant de longues durées. D'autre part, on peut imaginer qu'il n'est pas très aisé de sortir une machine de plusieurs tonnes de l'eau et de la déplacer vers un port pour réparations. En effet ce type d'opérations demande du matériel spécifique important et des équipes spécialisées. Les opérations de maintenance et de réparation vont rajouter des surcoûts élevés et des temps d'arrêts importants qui peuvent rendre économiquement non rentable la production d'énergie par les hydroliennes. Pour ces objectifs de réduction de la maintenance nous proposons d'étudier une architecture de chaîne d'entraînement simplifiée, elle ne contient ni multiplicateur de vitesse ni mécanisme de contrôle du pas d'hélice. Nous proposons donc l'étude d'une turbine à pas fixe associée en entraînement direct avec une génératrice à flux radial à aimants permanents. Il est à noter que les machines synchrones à aimants permanents sont robustes et adaptées pour l'entraînement direct. Cette chaîne de conversion est détaillée sur la figure 1 :

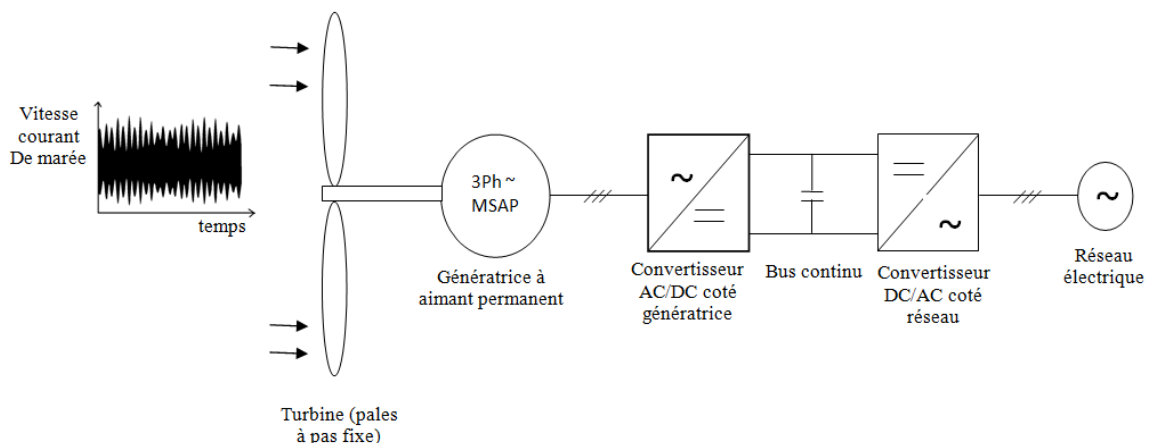


Figure 1 : Chaîne de conversion étudiée, hydrolienne sans multiplicateur de vitesse et hélice à pas fixe.

Utiliser une stratégie de limitation de puissance est intéressante au niveau technico-économique car elle permet d'éviter un surdimensionnement important de la chaîne de conversion électrique. Etant donné que la turbine est à pas fixe, la mise en œuvre de ce type de stratégie d'écrtage de la puissance ne pourra pas se faire par le contrôle mécanique. Cette stratégie de limitation de puissance doit alors se faire électriquement via le contrôle du couple et de la vitesse de la génératrice. Par conséquent nous proposons d'agir sur la conception de la génératrice pour atteindre cet objectif qui consiste à réaliser la limitation de puissance via le contrôle de la génératrice. Dans cet article, une démarche globale de conception systémique de la génératrice est proposée. Elle tient compte de la stratégie de pilotage, des spécifications de la génératrice, de la caractéristique énergétique de la ressource, de la loi de C_p (coefficient de puissance) de la turbine et des contraintes convertisseur. Cette méthodologie sera décrite dans la version complète de l'article.

2. Quelques résultats et discussion

2.1 Modélisation de la ressource du courant de marée et de la turbine

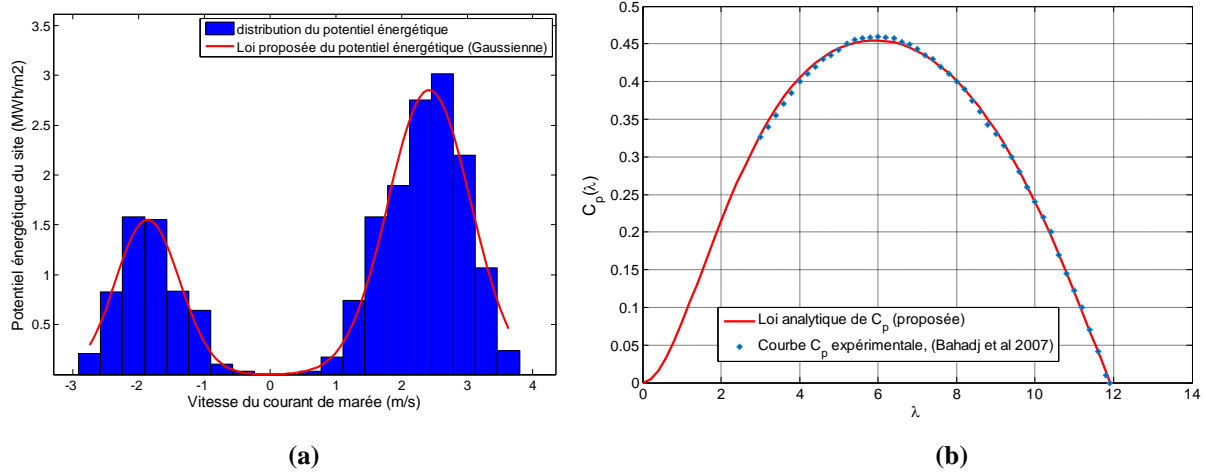


Figure 2 : Modélisation du potentiel énergétique de la ressource (a), modélisation de la loi d'hélice (b).

2.2 Stratégie de fonctionnement sur cycle et définition du cahier des charges pour le dimensionnement de la génératrice

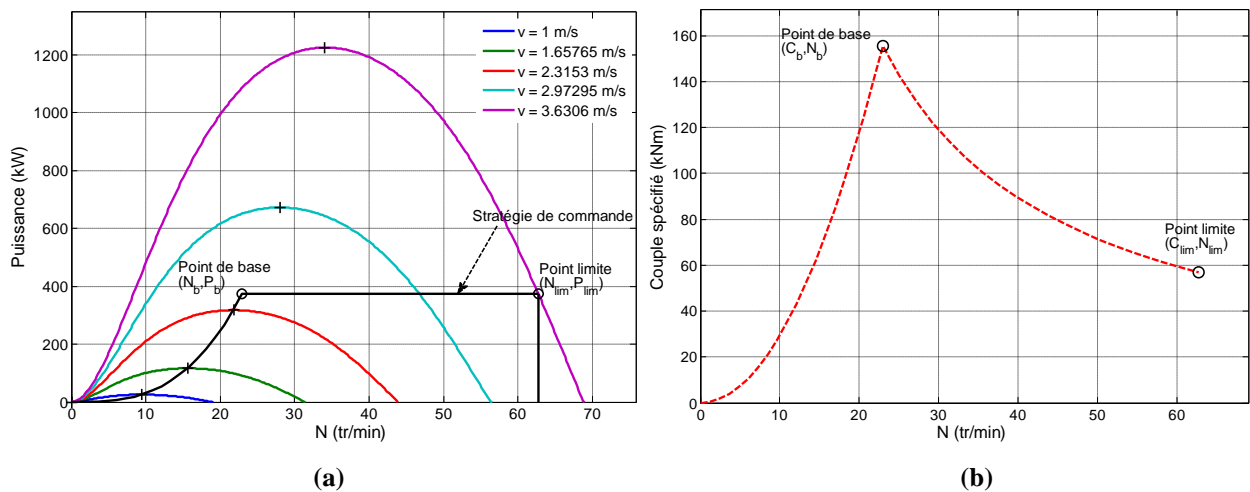


Figure 3 : Puissance développée par la turbine et stratégie de commande (a), caractéristique couple/vitesse à atteindre par l'ensemble convertisseur-machine sur le cycle de fonctionnement (b).

2.3 Résultats obtenus sur le dimensionnement de la génératrice

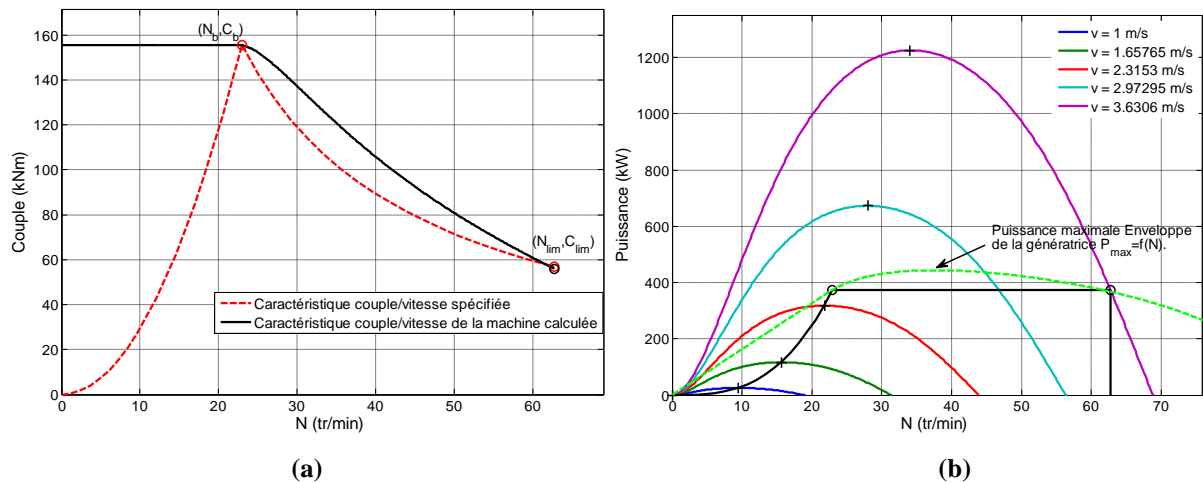


Figure 4 : Caractéristiques couple/vitesse de la génératrice et de spécification à atteindre (a), caractéristique puissance/vitesse de la génératrice et stratégie de commande (b).

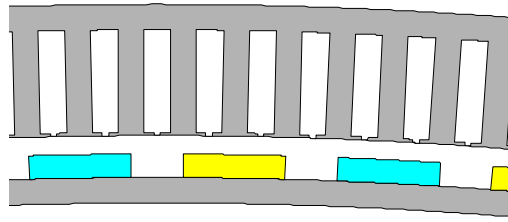


Figure 5 : Vue partielle du circuit magnétique de la génératrice à AP calculée (dessin à l'échelle).

2.4 Interprétation des résultats

La figure 2a montre la distribution de la densité énergétique en fonction de la vitesse des courants de marée pour le site du Raz de sein, France. Les données des vitesses de courants de marées sont établies sur une période de référence pour ce site. Elles ont été utilisées pour calculer une loi de distribution du potentiel énergétique, cette loi s'exprime sous forme d'une fonction Gaussienne qui sera donnée dans la version complète de l'article. Une loi analytique comportementale donnant le coefficient de puissance de la turbine utilisée est déduite de mesures expérimentales effectuées sur une turbine réelle (figure 2b). Son expression analytique sera donnée dans la version finale de l'article.

La combinaison des spécifications de la turbine et de la caractéristique de la ressource permet de définir une stratégie de pilotage de l'ensemble machine/hélice (figure 3a). En connaissance de la stratégie de commande, il est possible de déduire la spécification sur la caractéristique couple vitesse que la génératrice électrique devra être capable de développer (figure 3b).

La figure 4a et la figure 4b dénotent clairement que la caractéristique de la génératrice dimensionnée domine les caractéristiques spécifiées par la stratégie de pilotage sur toute la plage de vitesse de fonctionnement. Ceci implique que l'écrêtage de la puissance pourra se faire uniquement par le contrôle de la génératrice électrique. La figure 5 montre une vue à l'échelle sur le circuit magnétique de la génératrice obtenue selon la méthodologie de calcul systémique que nous proposons dans cet article.

3. Conclusion

Dans ce travail nous avons proposé une méthodologie de conception systémique d'une génératrice électrique à aimant permanent à entraînement direct associée avec une hélice à pas fixe. Cette méthodologie a été utilisée sur une application hydrolienne pour la récupération de l'énergie des courants de marées. La stratégie de pilotage utilisée repose sur la limitation de puissance lors des forts courants sans recours à un mécanisme d'orientation des pales. Cette stratégie est basée uniquement sur la commande de l'ensemble convertisseur-génératrice. La démarche mise au point prend en compte les principaux éléments de la chaîne de conversion, à savoir : la ressource, l'hélice, la génératrice, la stratégie de pilotage et les contraintes liées au convertisseur. Elle permet de définir une caractéristique couple/vitesse que l'ensemble convertisseur machine doit être capable de suivre. Une génératrice est ainsi dimensionnée à partir de cette caractéristique couple/vitesse établie selon la méthodologie définie. Les résultats obtenus montrent qu'il est possible de dimensionner une génératrice capable de développer le couple requis sur tout le cycle. Par conséquent la limitation de puissance lors des forts courants peut se faire via la commande de la génératrice sans recours à un mécanisme d'orientation des pales. Dans la version finale de l'article nous proposons une description détaillée de la méthodologie employée ainsi qu'une analyse des caractéristiques des éléments pris en compte dans la chaîne de conversion.

4. Références

- [1] S. Benelghali, R. Balme, K. Le Saux, M.E.H. Benbouzid, J. F. Charpentier and F. Hauville, « A simulation model for the evaluation of the electrical power potential harnessed by a marine current turbine », *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 32, no 4, p. 786-797, 2007.
- [2] S. Djebbari, J. F. Charpentier, F. Scuiller et M.E.H. Benbouzid, « Générateur à aimants permanents à flux axial à grand diamètre avec entrefer immergé: Eléments de conception et analyse des performances pour un cahier des charges d'hydrolienne », *Eur. J. Electr. Eng.*, vol. 16, n° 2, pp. 145-176, 2013.
- [3] M. Leijon, H. Bernhoff, M. Berg and O. Agren, "Economical considerations of renewable electric energy production - especially development of wave energy", *Renewable Energy*, vol. 28, n°8, pp. 1201-1209, 2003
- [4] J. A. Baroudi, V. Dinavahi and A. M. Knight, « A review of power converter topologies for wind generators », *Renew. Energy*, vol. 32, n° 14, pp. 2369-2385, 2007.
- [5] Z. Zhou, M. Benbouzid, J. Frédéric Charpentier, F. Scuiller, et T. Tang, « A review of energy storage technologies for marine current energy systems », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 18, pp. 390-400, 2013.