

Lissage d'une production houlogénérée: gestion et dimensionnement d'un système de stockage par supercondensateurs sous contrainte de flicker

Thibaut KOVALTCHOUK¹, Kévin AUDOUX², Simon ROULAND²,
Judicaël AUBRY³, Hamid BEN AHMED¹, Bernard MULTON¹

¹SATIE CNRS UMR8029

²ENS Rennes, département mécatronique

³Équipe mécatronique, ESTACA

RÉSUMÉ – Cet article examine le problème du dimensionnement et de la gestion d'un système de stockage électrique composé de supercapacités pour un houlogénérateur direct avec comme exemple le projet SEAREV. L'objectif principal consiste à permettre l'intégration au réseau en respectant les contraintes de flicker. Nous introduisons une gestion dépendant à la fois de l'état d'énergie du système de stockage, mais aussi de la puissance produite par le houlogénérateur. Cette gestion est optimisée pour chaque dimensionnement afin de réduire les pertes électriques, tout en respectant strictement le critère de flicker. Le dimensionnement final doit minimiser le coût total du système, en prenant en compte à la fois l'investissement (coût des supercondensateurs) et l'exploitation (pertes dans les supercondensateurs).

MOTS-CLÉS – Système de stockage d'énergie électrique, lissage de puissance, houlogénérateur direct, supercondensateurs, qualité de l'énergie, flicker, intégration réseau.

1. Introduction

L'intégration au réseau est une des clés pour le développement des houlogénérateurs directs. En effet, ces houlogénérateurs, qui possèdent un haut potentiel de fiabilité, produisent une puissance qui fluctue au rythme de la houle. Si aucune action compensatoire n'est menée, cette production, même s'il y a foisonnement d'une ferme, peut entraîner des problèmes de qualité au niveau du réseau de distribution où il vient se raccorder. Le lissage de la production constitue l'une des voies pour résoudre le problème de l'intégration au réseau.

Le houlogénérateur considéré dans cette étude est le SEAREV (cf. Figure 1) dont les caractéristiques de la version considérées seront fournies dans la version finale. Il s'agit d'une bouée complètement close associée à un volant pendulaire interne. Les efforts d'excitation de la houle sur la bouée génèrent un mouvement relatif oscillant du volant, dont le mouvement est amorti par une génératrice électrique (Power Take-Off, PTO). Par rapport à un PTO hydraulique, le choix d'une chaîne électrique directe offre de nombreux avantages (comme un meilleur contrôle de la récupération et la réduction du nombre de pièces d'usure notamment) mais en perdant la possibilité d'un lissage intrinsèque de la puissance récupérée.

Le flicker a été identifié comme un problème important, en particulier pour l'éolien [1] et le houlomoteur [2][3]. En effet, l'association de la faiblesse d'un réseau et des fluctuations de la production peut entraîner un non-respect significatif des contraintes de flicker.

Le potentiel des supercondensateurs en matière de tenue à un grand nombre de cycles ainsi que de coût ramené à la puissance nous a conduit à étudier cette solution [4]. Le prix élevé de ces systèmes de stockage d'énergie électrique pousse à un dimensionnement et une gestion qui minimisera le coût afin d'impacter le plus faiblement possible le prix de revient au MWh du système complet. Le but de cette étude est donc de minimiser le coût du système de stockage en étudiant la gestion et le dimensionnement sous une contrainte non-linéaire (flicker) sur la puissance au niveau du réseau. Ce type de problème avec une contrainte sur la puissance lissée est, à notre connaissance, peu traité dans la littérature.

2. Modélisations

2.1 Flicker et flickermètre

Pour l'intégration au réseau, un respect de la qualité de l'énergie injectée est exigé, en particulier par une contrainte au niveau des fluctuations de tension (flicker). Le flicker correspond à une fluctuation de tension électrique causée par des variations de puissance active ou réactive sur le réseau. Au-delà d'une certaines amplitudes, ces fluctuations rapides de tension (de 50 mHz à 33 Hz) peuvent provoquer des variations de luminosité inacceptables sur les sources lumineuses. Elles sont donc encadrées par des normes sur le flicker (papillotement) qui doit être limité (cf. Figure 2).

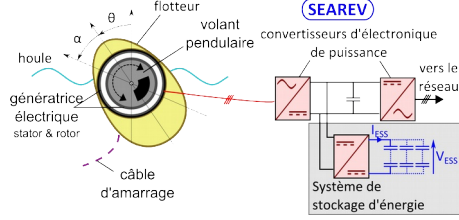


Figure 1 : Schéma de principe du houlogénérateur direct SEAREV avec lissage par supercondensateurs

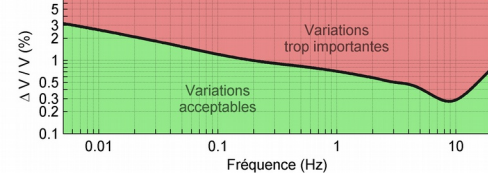


Figure 2 : Flicker : courbe limite $P_{st} = 1$ pour des variations de tension en créneaux : la zone rouge correspond à une gêne au niveau du consommateur.

Pour les réseaux français, l'article 15 de l'arrêté du 23 avril 2008 [5] précise que le niveau de flicker doit être limité au point de livraison à 0,35 en P_{st} (sévérité court terme -short-term-) et 0,25 en P_{lt} (sévérité long terme -long-term-) avec une puissance de court-circuit minimale de référence de 40 MVA.

La mesure du flicker est définie dans la norme CEI 61000-4-15 [6] autour de différents blocs. La constitution d'un flickermètre sera plus amplement expliqué dans l'article final. Ce flickermètre peut être implémenté matériellement, mais aussi de manière logicielle, comme c'est le cas ici avec l'utilisation pour ce travail d'un flickermètre implémenté sur Matlab [7]. Le calcul des fluctuations relatives de la tension au point de livraison s'effectue grâce à la formule, classique et approximée, suivante :

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{-P_{Grid} \cos(\Psi) - Q_{Grid} \sin(\Psi)}{S_{cc}} \quad (1)$$

Avec P_{Grid} et Q_{Grid} respectivement les puissances active et réactive fournies par le système houlogénérateur au point de livraison (PDL), Ψ l'angle d'impédance du réseau (ici de 60°) et S_{cc} la puissance de court-circuit du réseau (ici de 50 MVA).

Le système de production ne sera pas seul sur son point de livraison, nous allons faire l'hypothèse suivante sur le foisonnement de la pollution (qui sera justifiée dans le papier final) : la pollution totale de la ferme, si l'on suppose que toutes les unités de production sont identiques et pilotées de la même façon, correspondra à :

$$P_{lt\ ferme} = \sqrt[2]{\sum_{i=1}^{N_{individus}} P_{lt\ i}^2} = \sqrt[2]{N_{individus}} P_{lt} \quad (2)$$

Avec $N_{individus}$ le nombre de systèmes de production de la ferme. Ce dernier sera de 10 dans notre cas. Si la sévérité est limitée à 0,25 pour la ferme, la sévérité maximale pour un système de production est alors de 0,079.

2.2 Modélisation pour la gestion du stockage

On considère négligeable l'effet des pertes sur le comportement dynamique du système. Le système de stockage est considéré comme un intégrateur pur. Cet ensemble d'hypothèses est très souvent utilisés pour ce type de problèmes, et peuvent se résumer par la relation suivante :

$$\frac{dE_{Sto}}{dt} = P_{Sto}(t) = P_{Prod}(t) - P_{Grid}(t) \quad (3)$$

Avec P_{Prod} et P_{Sto} , respectivement la puissance produite par l'ensemble convertisseur-machine et celle absorbée par le système de stockage, et E_{Sto} , l'énergie stockée dans les supercondensateurs.

On a dans notre cas une puissance produite par le système houlogénérateur bornée (ici entre 0 et 1,1 MW) que l'on peut donc encadrer : $P_{Min} \leq P_{Prod}(t) \leq P_{Max}$, avec P_{Min} et P_{Max} , respectivement la puissance minimale et maximale de la production. L'énergie dans un système de stockage est aussi bornée : $E_{Min} \leq E_{Sto}(t) \leq E_{Max}$, avec E_{Min} et E_{Max} , respectivement l'énergie minimale et maximale de l'énergie stockée.

2.3 Modélisation électrique du stockage

La modélisation du stockage se fait sur la base d'un élément de référence Maxwell [8] de capacité $C_{Ref} = 3000$ F, de tension nominale $V_{Element\ Rated} = 2,70$ V et de résistance équivalente série $R_{Ref} = 0,29$ mΩ. La mise en série et en parallèle de ces éléments permet de régler à la fois la taille du stockage (nombre total d'éléments) et la tension nominale de l'ensemble (nombre de modules en série sur un bras).

$$E_{Sto}(t) = \frac{1}{2} C_{Eq} V_{ESS}^2(t) = N_{Tot} \frac{1}{2} C_{Ref} V_{Element}^2(t) \quad (4)$$

Avec N_{Tot} le nombre total de supercondensateurs mis en parallèle et en série, V_{ESS} la tension aux bornes du système de stockage complet, C_{Eq} la capacité équivalente du système de stockage complet. L'énergie nominale E_{Rated} du système de stockage se calcule à partir de la tension nominale du système. Ainsi l'énergie nominale de l'élément de référence est de 10,9 kJ soit 3 Wh. Les pertes dans le système de stockage ne sont pas prises en compte, au premier ordre, dans la modélisation du système mais sont calculées a posteriori pour le dimensionnement. Les pertes sont calculées ainsi :

$$P_{Loss}(t) = R_{Eq} I_{ESS}^2(t) = R_{Eq} \left(\frac{P_{Sto}(t)}{V_{ESS}(t)} \right)^2 = R_{Ref} C_{Ref} \frac{P_{Sto}^2(t)}{2 E_{Sto}(t)} \quad (5)$$

Avec I_{ESS} le courant passant dans le système de stockage complet. Grâce à cette relation, on voit qu'à puissance donnée, l'énergie dans le système de stockage doit être la plus grande possible pour minimiser les pertes.

3. Gestion du stockage

3.1 Choix d'une forme paramétrique de loi de gestion

La stratégie de gestion étudiée ici est paramétrée. La puissance appelée dans le système de stockage dépend linéairement de la puissance produite et de l'état de stockage du système. Ce type de loi s'inspire en particulier de la logique floue :

$$P_{Sto}(t) = \alpha \left[(P_{Prod}(t) - P_{Min}) - (P_{Max} - P_{Min}) \frac{E_{Sto}(t) - E_{Min}}{E_{Max} - E_{Min}} \right] \quad (6)$$

Avec α un paramètre, compris entre 0 et 1, qui permet de moduler la part de la puissance lissée grâce au système de stockage (cela sera plus amplement expliqué dans la version finale). Le cas particulier $\alpha = 1$ est étudié dans [3]. Cette loi de gestion est illustrée sur la Figure 3. Des profils temporels feront apparaître P_{prod} , P_{grid} et E_{sto} pour poursuivre l'illustration.

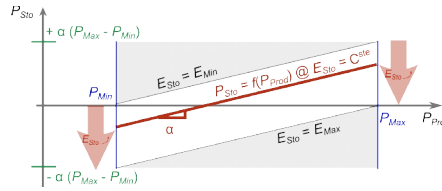


Figure 3 : Illustration de la loi de gestion : puissance de consigne de stockage en fonction de la puissance houlogénérée et paramétrée en état d'énergie du système de stockage

Cette loi de gestion est extrêmement simple à implémenter si l'on possède des mesures ou des approximations pour la puissance produite et l'état d'énergie du système du stockage. Elle est beaucoup plus simple à mettre en œuvre et nécessite moins de paramètre que les contrôles par logique floue [9], par programmation dynamique [10] ou pseudo-programmation dynamique [11].

3.2 Limitations de l'état d'énergie et de la puissance du système de stockage

On peut remarquer que lorsque le système de stockage est vide ($E_{Sto} = E_{Min}$), il ne peut que se remplir et quand il est plein ($E_{Sto} = E_{Max}$), il ne peut que se vider, ce qui évite intrinsèquement sa saturation. De plus, la limitation de la puissance P_{Sto} est naturellement symétrique :

$$-\alpha (P_{Max} - P_{Min}) \leq P_{Stockage}(t) \leq \alpha (P_{Max} - P_{Min}) \quad (7)$$

On peut donc définir une constante de temps du stockage, qui est le temps minimum pour faire une charge ou une décharge complète. Elle se définit donc par le ratio entre l'énergie utilisable et la puissance maximale dans le stockage :

$$\tau = \frac{\Delta E}{P_{StoMax}} = \frac{E_{Max} - E_{Min}}{\alpha (P_{Max} - P_{Min})} \quad (8)$$

3.3 Fonction de transfert du filtre équivalent

On prouvera dans le papier final que ce type de gestion d'énergie correspond en fait à un filtrage passe-bas du premier ordre. L'un des avantages de cette gestion est ainsi d'assurer une linéarité entre l'entrée et la sortie, ce qui permet une résolution rapide des équations dynamiques, avantage particulièrement apprécié lors de la conception et du dimensionnement du système, qui nécessitent toujours beaucoup de résolutions successives. En effet, la puissance au niveau du réseau peut s'écrire dans le domaine de Laplace comme la somme de deux termes : une partie de la puissance n'est pas modifiée tandis que l'autre subit un lissage :

$$\frac{P_{Grid}(s)}{P_{Prod}(s)} = (1-\alpha) + \frac{\alpha}{1+\tau s} = \frac{1+(1-\alpha)\tau s}{1+\tau s} \quad (9)$$

Au final, la fonction de transfert entre la puissance au niveau du réseau et la puissance houllogénérée est bien une fonction de transfert du premier ordre. On voit ici que la loi de gestion n'utilise que deux paramètres (α et τ) que nous proposons de déterminer pour respecter la contrainte de qualité au niveau du réseau et minimiser le coût du système de stockage. Une infinité de couples (α ; τ) permettent le respect du critère de flicker pour un profil donné. Les paramètres de gestion étant liés par définition à ceux dimensionnant le système de stockage, leur choix en dépendra comme nous allons le voir.

4. Dimensionnement

4.1 Modèle de coût

Le coût est calculé ici en prenant en compte l'investissement et le coût des pertes dans le système de stockage. La nécessité d'éventuellement remplacer le système à cause de son vieillissement n'est pas étudié ici :

$$C = c_{Energy} E_{rated} + c_{Feed-in} <P_{Loss}> \Delta t \quad (10)$$

Avec C qui est le coût du système de stockage, c_{Energy} le coût relatif du système de stockage par supercondensateurs, pris à 20 k€/kWh dans cette étude, $c_{Feed-in}$, le tarif de rachat de l'énergie houllogénérée, pris à 150 €/MWh et Δt , la durée de vie de référence du système. Pour simplifier l'étude, deux états de mer seront considérés, soit deux profils de production différents : un premier état de mer avec une hauteur significative des vagues $H_s = 3$ m et une période pic des vagues $T_p = 9$ s produisant en moyenne 230 kW et un second état de mer avec $H_s = 6$ m, $T_p = 10$ s et une production moyenne de 570 kW. Ceci sera détaillé dans le papier final, en particulier, la notion d'état de mer sera plus approfondie.

4.2 Choix des paramètres de la loi de gestion

Pour minimiser le coût, il faut donc minimiser les pertes. Pour cela, on choisit d'abord pour chaque valeur de τ les valeurs de E_{Min} et E_{Max} qui minimisent les pertes. Les contraintes techniques évidentes sont : $E_{Min} \geq 0$ et $E_{Max} \leq E_{Rated}$. Pour minimiser les pertes, d'après l'équation (5), il faut maximiser l'état d'énergie E_{Stos} , donc on choisit :

$$E_{Max} = E_{Rated} \quad (11)$$

$$E_{Min} = E_{Max} - \Delta E = E_{Rated} - \alpha \tau (P_{Max} - P_{Min}) \quad (12)$$

Si, après ce calcul, E_{min} était négatif, cela voudrait dire que le système de stockage est trop petit pour permettre le lissage prévu. Pour chaque dimensionnement, on recherche le couple de valeurs (α ; τ) qui minimise les pertes énergétiques sur le cycle considéré (cf. Figure 4).

4.3 Minimisation du coût

Pour différentes valeurs de la capacité du système de stockage allant de 0 à 5 kWh, la loi de gestion a été optimisée pour minimiser le coût (cf. Figure 5) et respecter la contrainte de flicker. La durée de vie a été choisie pour avoir dans les deux cas une production énergétique totale de 20 GWh, correspondant à la production énergétique totale d'un individu sur 20 ans, soit une durée de vie de 4 ans pour l'état de mer 1 et de 10 ans pour l'état de mer 2.

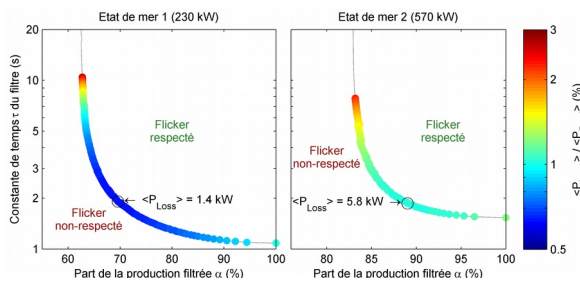


Figure 4 : Puissance moyenne des pertes ramenée à la production pour un système de stockage de 2 kWh dans le plan des paramètres de la loi de gestion (τ ; α). La courbe grise correspond aux couples de valeurs qui respectent exactement la contrainte. Pour les deux états de mer sont indiqués le point de pertes minimales

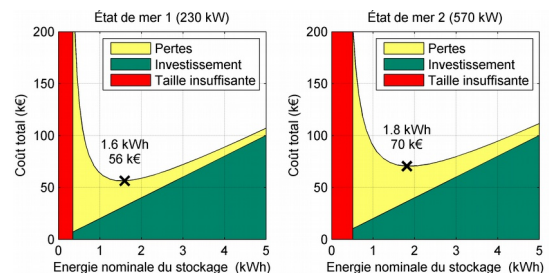


Figure 5 : Coût total en fonction de la taille du stockage pour deux états de mer prenant en compte l'investissement et les pertes dans le système de stockage. L'optimum est marqué par une croix. La zone rouge correspond à une impossibilité de filtrer suffisamment pour respecter la contrainte de flicker quand le système est trop petit.

5. Conclusion

Une loi de gestion paramétrée a été présentée, elle permet le respect de la contrainte flicker par un filtrage de la puissance électrique produite par un houlogénérateur. Les paramètres de cette loi ont ensuite été optimisés pour réduire un coût prenant en compte l'investissement et la perte de productible due aux pertes par effet Joule dans le système de stockage d'énergie par supercondensateurs. La méthodologie a été utilisée pour deux états de mer différents. Malgré des comportements très différents sur ces deux états de mer, la capacité de stockage optimale et l'estimation du surcoût du lissage sont très proches. Dans cet exemple, le coût du système de stockage nécessaire serait alors d'environ 70 k€, soit un impact de 4 €/MWh, ce qui serait acceptable.

Pour confirmer ces résultats, des modèles de vieillissement devront être utilisés afin d'effectuer une véritable étude sur cycle de vie pour vérifier en particulier que les remplacements ne joueront pas un rôle trop important sur le coût sur cycle.

6. Références

- [1] B. Barahona and P. Sørensen, "Validation of the standard method for assessing flicker from wind turbines," *Energy Conversion*, ..., vol. 26, no. 1, pp. 373–378, 2011.
- [2] A. Blavette, D. L. O'Sullivan, T. W. Lewis, and M. G. Egan, "Dimensioning the equipment of a wave farm: Energy storage and cables," in *2013 Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2013, pp. 1–9.
- [3] J. Aubry, "Optimisation du dimensionnement d'une chaîne de conversion électrique directe incluant un système de lissage de production par supercondensateurs. Application au houlogénérateur SEAREV." thèse de doctorat de l'École Normale Supérieure de Cachan, 2011.
- [4] J. Aubry, P. Bydlowski, B. Multon, H. Ben Ahmed, and B. Borgarino, "Energy Storage System Sizing for Smoothing Power Generation of Direct Wave Energy Converters," in *3rd International Conference on Ocean Energy*, 2010, pp. 1–7.
- [5] République Française, "Arrêté du 23 avril 2008 relatif aux prescriptions techniques de conception et de fonctionnement pour le raccordement à un réseau public de distribution d'électricité en basse tension ou en moyenne tension d'une installation de production d'énergie électrique" *JORF*, vol. 0098, 2008.
- [6] International Electrotechnical Commission, "CEI 61000-4-15: Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4: Techniques d'essai et de mesure – Section 15: Flickermètre – Spécifications fonctionnelles et de conception." 2003.
- [7] P. Jourdan, "Flickermeter Simulator," *Matlab central*, 2009.
- [8] Maxwell Technologies, "Datasheet K2 Series Ultracapacitors." pp. 1–4, 2007.
- [9] S. Caux, J. Lachaize, M. Fadel, P. Shott, and L. Nicod, "Modelling and control of a Fuel Cell System and Storage Elements in transport applications," *J. Process Control*, vol. 15, no. 4, pp. 481–491, Jun. 2005.
- [10] P. Haessig, T. Kovaltchouk, B. Multon, H. Ben Ahmed, and S. Lascaud, "Computing an Optimal Control Policy for an Energy Storage," in *EuroScyPy 2013*, pp. 1–8.
- [11] M.-J. Kim and H. Peng, "Power management and design optimization of fuel cell/battery hybrid vehicles," *J. Power Sources*, vol. 165, no. 2, pp. 819–832, Mar. 2007.