

Amélioration de la qualité de l'énergie d'une éolienne à vitesse fixe en utilisant un STATCOM associé à des supercondensateurs

Fayçal BENSMINE^{a,b}, Slim TNANI^a, Gérard CHAMPENOIS^a, Olivier BACHELIER^a, Emile MOUNT^b

^aUniversité de Poitiers, Laboratoire d'Informatique et d'Automatique pour les Systèmes (LIAS)

^bMoteurs Leroy-Somer (MLS), Bd Marcellin Leroy, 16000 Angoulême, France.

RESUME - L'utilisation d'éoliennes à vitesse fixe dans un réseau électrique entraîne des problèmes de fluctuations de puissance lors de variations de la vitesse du vent à travers le couple. Les perturbations affectent la qualité de la puissance active et la puissance réactive du réseau. Le principe du système proposé dans cet article concerne l'association d'une éolienne et d'un STATCOM avec un supercondensateur sur le bus continu. L'objectif est de filtrer les variations de la puissance active et de compenser de puissance réactive nécessaire à la magnétisation de la génératrice asynchrone. La stratégie de contrôle du STATCOM est basée sur une commande par retour d'état qui utilise la technique des LMIs (Linear Matrix Inequalities) pour la synthèse des régulateurs des différentes boucles. Ces régulateurs prennent en compte la variation de la tension du bus continu. Le système a été simulé avec le logiciel Matlab/Simulink. Les résultats de simulation sont présentés et commentés.

Mots-clés — *Supercondensateurs, Convertisseur DC-AC bidirectionnel, Machine à induction, Éolienne, Stockage d'énergie, Commande par retour d'état.*

1. INTRODUCTION

Pendant des siècles, l'énergie éolienne a été utilisée pour déplacer les navires, moudre du grain ou pomper de l'eau. Cette source d'énergie nous sert maintenant à produire de l'électricité. Au cours de ces dernières années, l'importance de la production d'énergie éolienne n'a pas cessé d'augmenter. Elle présente un certain nombre d'avantages : elle est tout d'abord une énergie renouvelable non polluante qui contribue à une meilleure qualité de l'air et à la lutte contre l'effet de serre. Elle est aussi une énergie qui s'additionne aux ressources nationales et concourt donc à l'indépendance énergétique et à la sécurité des approvisionnements [1].

Dans une éolienne à vitesse fixe, la variation de la vitesse du vent a un impact rapide sur le courant du réseau. Ces variations peuvent conduire à une détérioration de la qualité de l'énergie (flickers) [2], voir à une déstabilisation du réseau et des systèmes connectés sur celui-ci. Pour cette raison, nous proposons dans cet article d'ajouter en parallèle à la génératrice asynchrone un système de régulation d'énergie (STATCOM-supercondensateurs). Les supercondensateurs sont bien adaptés pour les systèmes de stockage temporaire. Ils sont généralement utilisés pour compenser les fluctuations de

puissance produite par une éolienne [3]. L'objectif des travaux présentés est double. Le premier est d'améliorer les performances dynamiques et la qualité de l'énergie du réseau. Par ailleurs, les machines à induction nécessitent de la puissance réactive pour leur magnétisation [4]. Ainsi, le second sera la compensation de cette puissance réactive. Le pack de supercondensateurs est connecté au réseau via un convertisseur bidirectionnel DC-AC à IGBT et des inductances de filtrage d'harmonique HF.

Dans les systèmes classiques, la commande est effectuée de manière à compenser l'énergie réactive avec une tension fixe sur le bus continu. Dans notre cas, la tension aux bornes des supercondensateurs est variable à cause des fluctuations de puissance active prise en charge par le STATCOM. Dans les systèmes STATCOM-Supercondensateur, les contrôleurs proposés sont généralement de type PI [5,6]. Ce type de contrôleur n'est pas synthétisé pour prendre en compte la variation de la tension aux bornes des supercondensateurs. Dans [7], la plage de la variation de tension est d'ordre de 200V, il est bien entendu que cette variation peut affecter les performances dynamiques qui peut également conduire à l'instabilité du système. Dans cet article nous proposons une commande robuste qui assure la stabilité du système dans un intervalle de variation de la tension continue. Dans la section III, le système de commande se fait en deux étapes. La première étape présente la stratégie de commande de courants du convertisseur en utilisant un retour de sortie avec un intégrateur de l'erreur. Pour la régulation de la tension du bus continu, un régulateur proportionnel simple en cascade avec la boucle de courant est utilisé. Cette deuxième commande permet de maintenir la tension du supercondensateur à sa référence. La synthèse des correcteurs des boucles de courants dans le convertisseur tient compte de la variation de la tension du bus continu en utilisant l'approche LMI. L'objectif de l'approche LMI est de trouver une matrice de gain constant qui assure la stabilité du système pour une gamme de tension DC connue.

2. STRUCTURE PROPOSÉE

Le modèle d'éolienne proposé dans cet article est représenté sur la Fig. 1. Dans ce système, l'éolienne est à vitesse presque fixe. La structure est composée d'une génératrice asynchrone

connectée au réseau en parallèle avec un convertisseur DC/AC bidirectionnel et un pack de supercondensateurs.

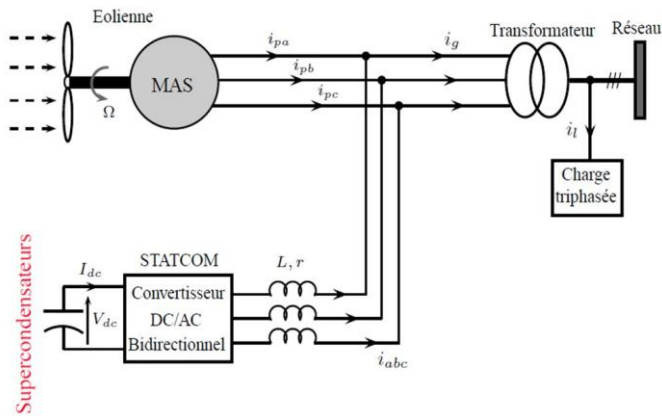


Fig.1 Système d'énergie éolienne proposé avec STATCOM et supercondensateurs

Le convertisseur associé dans la Fig. 1 est un convertisseur à IGBT triphasée. Ce dernier permet l'échange de puissances active et réactive entre le pack de supercondensateurs et le réseau.

Dans notre étude, nous n'avons pas tenu compte de la partie mécanique de l'éolienne.

2.1. Stratégie de commande

Le schéma de la stratégie de pilotage du courant injecté ou absorbé par l'onduleur via le bloc de supercondensateur selon les variations de la vitesse du vent est illustré sur la Fig. 2. La commande est développée dans le repère $d-q$ tel que l'axe d représente la puissance active et q la puissance réactive. Une première étape de commande des courants i_d et i_q est effectuée. Ces courants doivent suivre les références i_d^* et i_q^* dans le but de contrôler la puissance active (pour i_d) et réactive (pour i_q) échangée entre le STATCOM et le réseau.

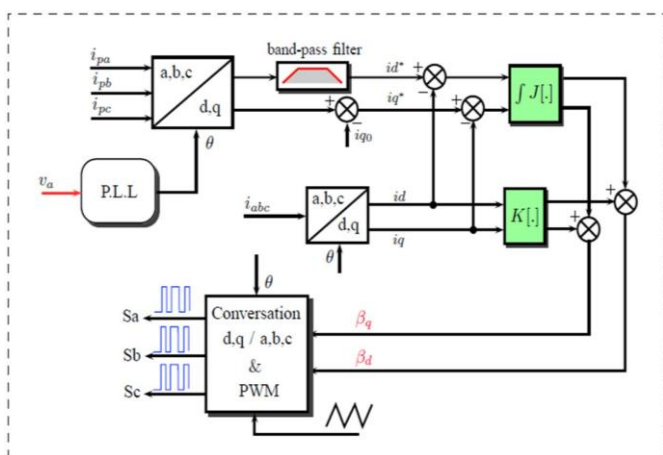


Fig.2 Schéma bloc de la stratégie de commande

Les composantes directe et en quadrature des courants de référence sont obtenus à partir des courants mesurés en sortie de la génératrice asynchrone. (i_{pd} et i_{pq}). Le filtre passe-bande est utilisé pour supprimer la composante continue du courant direct i_d^* . Par conséquent, en régime permanent, cette référence de courant sera à nulle. Pour le courant de référence i_q^* , il dépend du courant i_{pq} consommé par la machine asynchrone et du courant de consigne i_{q0} qui permet de régler la puissance réactive qu'échange le STATCOM avec le réseau. Les lois de commande sont calculées pour obtenir une certaine robustesse du système bouclé par rapport à la tension du supercondensateur. La sortie des régulateurs donne les tensions de référence β_{abc} en utilisant une PLL. Enfin, ces tensions sont comparées avec un signal triangulaire pour générer le signal PWM. La fréquence de commutation est choisie à 5 kHz. Dans cet article, nous avons utilisé une commande par retour d'état avec action intégrale.

2.2. Modèle du convertisseur

Les signaux de modulation de phases a , b et c sont respectivement m_a , m_b et m_c . En considérant le modèle moyen du convertisseur, la relation entre les composantes fondamentales des tensions triphasées v_{abc} et la tension aux bornes du supercondensateur V_{dc} est :

$$v_{abc} = \frac{1}{2} m_{abc} V_{dc} \quad (1)$$

Le modèle d'état du convertisseur du circuit de puissance dans le plan abc est défini par les équations suivantes :

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} = -ri_a + \frac{1}{2} m_a V_{dc} - e_a \\ L \frac{di_b}{dt} = -ri_b + \frac{1}{2} m_b V_{dc} - e_b \\ L \frac{di_c}{dt} = -ri_c + \frac{1}{2} m_c V_{dc} - e_c \\ C_0 \frac{dV_{dc}}{dt} = m_a i_a + m_b i_b + m_c i_c \end{cases} \quad (2)$$

où e_{abc} et i_{abc} sont respectivement les tensions du réseau et les courants du convertisseur sur les axes abc ; r et L sont la résistance et l'inductance propres du filtre ; C_0 est la capacité du bus continu. En partant de (1), le modèle du convertisseur peut être représenté dans le repère dq sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{r}{L} i_d + w i_q + \frac{V_{dc}}{2L} \beta_d - \frac{1}{L} E_d \\ \frac{di_q}{dt} = -w i_d - \frac{r}{L} i_q + \frac{V_{dc}}{2L} \beta_q \\ \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_0} \beta_d i_d + \frac{1}{C_0} \beta_q i_q \end{cases} \quad (3)$$

où i_d et i_q sont des variables d'état et de sortie considérées dans la première étape de la procédure de commande ; β_d et β_q sont des entrées de commande ; V_{dc} est une tension variable dans l'intervalle $[U_{min}, U_{max}]$ (U_{min} et U_{max} : sont respectivement les tensions minimale et maximale du supercondensateur durant la phase de décharge/charge) ; et E_d est une tension constante sur l'axe d .

3. SYNTHÈSE DE LOIS DE COMMANDE PAR APPROCHE LMI

3.1. Commande par retour d'état avec action intégrale

En considérant $x = [i_d, i_q]^T$ comme vecteur d'état, $u = [\beta_d, \beta_q]^T$ comme vecteur d'entrée et $e = E_d$ comme une entrée de perturbation. Les deux premières équations différentielles de (3) peuvent être exprimées dans l'espace d'état, sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Fe \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (4)$$

avec :

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{r}{L} & w \\ L & -r \\ -w & \frac{r}{L} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} \frac{V_{dc}}{2L} & 0 \\ 0 & \frac{V_{dc}}{2L} \end{bmatrix}; \quad F = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Le schéma bloc donné sur la figure 3 résume la structure d'un retour d'état classique avec une commande intégrale du système.

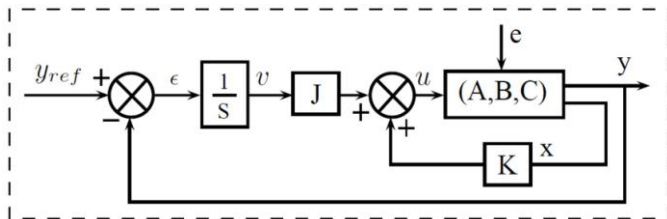


Fig.3 Retour d'état avec intégration de l'écart

La loi de commande s'exprime :

$$u(t) = Kx(t) + Jv(t) = Kx(t) + J \int_0^t \varepsilon(\theta) d\theta \quad (6)$$

Où $K \in \mathbb{R}^{2 \times n}$ est une matrice constante appelée gain de retour d'état, $J \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ est un scalaire et l'écart ε est tout simplement, défini par $\varepsilon = y_{ref} - y$, ce qui signifie que y_{ref} représente la

référence des courants. L'équation (6) peut également se récrire sous la forme suivante :

$$u = \underbrace{\begin{bmatrix} K & J \end{bmatrix}}_{\bar{K}} \bar{x} \quad (7)$$

Où $\bar{x} = [x, v]^T$. En injectant (7) dans (4), il vient

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}(t) = (\bar{A} + \bar{B}_1 \bar{K}) \bar{x}(t) + \bar{B}_2 y_{ref} + \bar{B}_3 e \\ y(t) = \bar{C} \bar{x}(t) \end{cases} \quad (8)$$

avec :

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix}; \quad \bar{B}_1 = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \bar{B}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\bar{B}_3 = \begin{bmatrix} F \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \bar{C} = [C \quad 0]$$

Il est ici proposé de calculer \bar{K} de manière à placer les pôles du modèle linéaire (8) dans une région spécifiée du plan complexe quelle que soit la valeur de V_{dc} dans $[U_{min}, U_{max}]$. En effet, en assignant les valeurs propres de $(\bar{A} + \bar{B}_1 \bar{K})$, dans le demi-plan complexe ouvert, la stabilité asymptotique est assurée. Il serait illusoire d'essayer de placer les pôles à des endroits stricts pour deux raisons :

- Dans un premier temps, $(\bar{A} + \bar{B}_1 \bar{K})$ est affectée par l'incertitude sur V_{dc} de sorte que les valeurs propres seront nécessaire déviées quand V_{dc} variera.
- Il est difficile de caractériser les performances souhaitées en termes de pôles strictes. Une région Δ (région de stabilité) dans laquelle les valeurs propres devraient se situer est plus appropriée.

Par conséquent, Δ est ici choisi comme un disque de centre c et de rayon r . Par un choix judicieux de c et r , un certain temps de réponse et un coefficient d'amortissement minimum peuvent être garantis.

Notez cependant que, d'un point de vue strict et rigoureux, (8) est un modèle variant dans le temps pour lequel la relation entre les performances transitoires et les valeurs propres de la matrice dynamique est théoriquement quelque peu discutable. Néanmoins, il est ici raisonnablement de supposer que V_{dc} varie lentement par rapport à x et donc le placement de pôles prend du sens.

En déplaçant c vers la gauche, on cherche la rapidité de la réponse. En réduisant r , la performance est plus rigoureusement spécifiée. En l'augmentant, nous offrons la flexibilité pour la robustesse par rapport à V_{dc} . Ainsi, ces paramètres permettent au concepteur de gérer le compromis entre la robustesse et les performances. En outre, la présence de l'intégrateur dans la loi de commande assure que les erreurs en régime permanent sont réduites à zéro. Le calcul de \bar{K} repose sur un résultat fondamental qui stipule qu'une matrice A est Δ -stable (c'est-à-dire a toutes ses valeurs propres dans Δ) si et

seulement s'il existe une matrice symétrique définie positive X telle que [8,9] :

$$X > 0, (c^2 - r^2)X - c(AX + XA^T) + AXA^T < 0 \quad (10)$$

En appliquant (10) au cas présent c'est-à-dire en remplaçant A par $(\bar{A} + \bar{B}_1 \bar{K})$, en désignant par L le produit $\bar{K}X$ et en utilisant l'argument du complément de Schur [10], il vient :

$$\begin{cases} \left(\begin{array}{cc} (c^2 - r^2)X - c(\bar{A}X + X\bar{A}^T + \bar{B}_1 L + L^T \bar{B}_1^T) & \bar{A}X + \bar{B}_1 L \\ X\bar{A}^T + L^T \bar{B}_1^T & -X \end{array} \right) \\ X > 0 \end{cases} \quad (11)$$

Les contraintes (11) constituent un système de LMI dont les variables inconnues sont X et L . Mais ce système est paramétré par $V_{dc} \in [U_{min}, U_{max}]$, d'où une infinité de contraintes à satisfaire. Une solution conservative consiste à résoudre (11) pour les deux valeurs extrêmes de V_{dc} (c'est-à-dire U_{min} et U_{max}) tout en préservant les mêmes matrices X et L . Il peut être facilement prouvé par une combinaison convexe simple que la solution (X, L) est valable pour toute la gamme $[U_{min}, U_{max}]$. La matrice $\bar{A} + \bar{B}_1 \bar{K}$ est alors dite « quadratiquement » Δ -stable. Ce système peut être résolu grâce aux diverses boîtes-à-outils de résolution de LMI. Étant donné une solution (X, L) de ce problème, le gain de retour d'état est obtenu par :

$$\bar{K} = L X^{-1} \quad (12)$$

On note que puisque X est définie positive, elle peut être inversée et donc \bar{K} peut toujours être calculé à partir de (X, L) .

3.2. Régulation de la tension du bus continu

Comme mentionné précédemment, il est considéré que la réponse de la boucle de courant (i_d, i_q) est très rapide par rapport à la régulation de la tension du bus continu. L'équation de la tension continue du modèle (3) peut alors être approximée comme suit :

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_0} \beta_d i_d^* + \frac{1}{C_0} \beta_q i_q^* \quad (13)$$

Il est naturel de choisir $y = V_{dc}$ comme des sorties et $u_l = [i_d^*, i_q^*]^T$ comme des entrées puisque l'objectif est de maintenir la source de la tension continue à la référence V_{dc}^* avec $i_q^* = 0$. L'équation de la tension du bus continu est maintenant devenue :

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_0} \beta_d i_d^* \quad (14)$$

Dans cette section, un régulateur de type proportionnel simple est utilisé afin de régler la tension aux bornes du supercondensateur. La figure 4 montre les deux boucles de

commande en cascade. La boucle extérieure est réalisée pour contrôler la tension continue en ajustant la boucle de courant i_d . Il sera démontré qu'il suffit de stabiliser la tension pour induire des comportements satisfaisants.

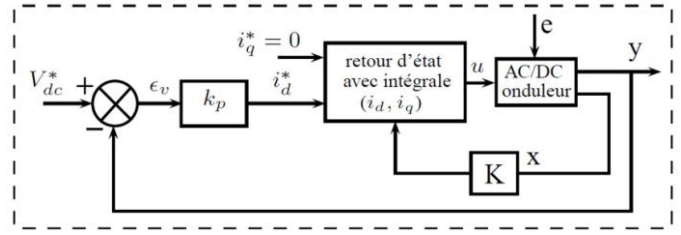


Fig.4 Schéma bloc d'une régulation en cascade pour la tension V_{dc}

La loi de commande représentée sur Fig. 4 est telle que :

$$i_d^* = k_p (V_{dc}^* - V_{dc}) \quad (15)$$

En appliquant la commande (15), le modèle en boucle fermée devient :

$$\dot{z}(t) = A_t z(t) + B_t V_{dc}^* + F_t e \quad (16)$$

avec :

$$\begin{aligned} z &= [\bar{x} \quad V_{dc}]^T ; \quad B_t = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & k_p \frac{\beta_d}{C_0} \end{bmatrix}^T ; \\ F_t &= \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T ; \\ A_t &= \begin{bmatrix} [\bar{A} + \bar{B}_1 \bar{K}] & [0] \\ [0 & 0 & 0 & 0] & \begin{bmatrix} -\beta_d \\ C_0 \end{bmatrix} k_p \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (17)$$

La matrice dynamique A_t montre clairement que les pôles du système en boucle fermée sont les valeurs propres de la matrice $A_f = \bar{A} + \bar{B}_1 \bar{K}$ (déjà placés lors de la première étape de la procédure de commande) et le terme $\frac{-\beta_d}{C_0} k_p$. Par conséquent, un choix judicieux de k_p permet de placer le cinquième pôle correspondant à la dynamique de la tension. Le modèle en boucle fermée est alors asymptotiquement stable. En outre, étant donné que (14) correspond un comportement intégral, alors cet intégrateur en boucle ouverte assure un gain statique unité en boucle fermée ainsi qu'un rejet en régime permanent des perturbations constantes (telle que la tension E_d).

4. RESULTATS DE SIMULATION

La stratégie de commande proposée et le système complet sont simulés en utilisant Matlab/SimPowerSystems. Les figures suivantes montrent la comparaison des performances du

système en prenant comme entrée une forme modélisée du couple (Fig. 5) pour faciliter la mise en valeur des capacités de la structure proposée. C'est-à-dire le couple est formé d'une constante et de deux fréquences (0,6 Hz et 4Hz) pour pouvoir connaître les effets de la stratégie de commande proposée en fonction de la fréquence. Pour comparer facilement l'efficacité de la structure, plusieurs résultats sont superposés (figures 6, 9 et 10) avec ou sans système de stockage d'énergie, c'est-à-dire avec ou sans l'utilisation du STATCOM. Les principaux paramètres de la simulation sont donnés dans le tableau 1.

Tableau 1. Paramètres du système simulé

Elément	Symbole	Paramètre
Transformateur	P_{cc}	15 MVA
	$V_{rms} (ph-ph)$	400 V
	X/R	2
Filtre	L	3 mH
	r	11.8 mΩ
Supercondensateurs	C_0	2 F
	U_0	1000 V
Machine à induction	P_n	160 kVA
	V_n	400 V
	f_n	50 Hz
Charge	P	5 kW

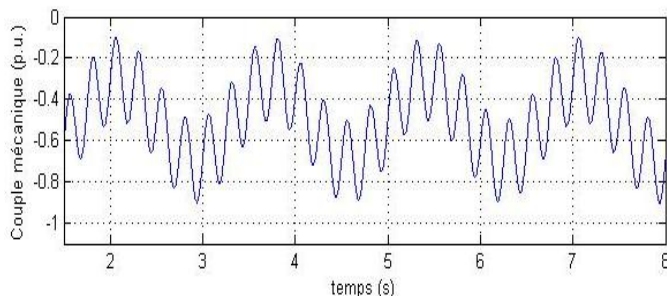


Fig.5 Couple mécanique (per unit)

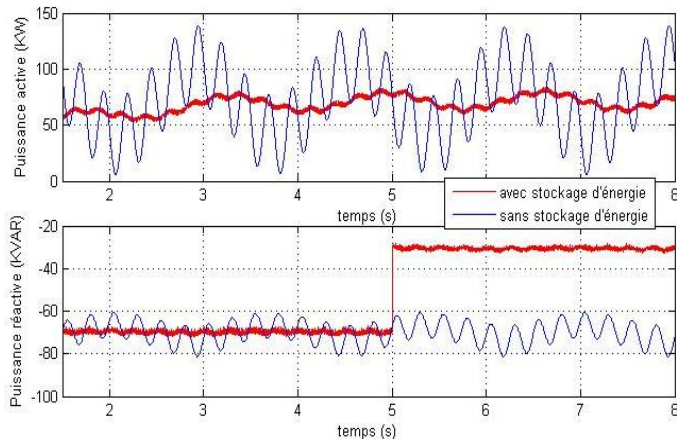


Fig.6 Puissances active et réactive du réseau

La Fig. 6 montre les fluctuations des puissances active et réactive du réseau avec et sans l'utilisation du STATCOM. Pour la puissance active, on remarque une forte réduction des composantes alternatives qui sont chiffrées sur le spectre de la

Fig. 9. En outre, la réponse est en retard d'une demi-période causée par la présence du filtre passe-bande sur la première voie de commande i_d (voir la Fig. 2). Pour la puissance réactive, avant l'instant $t=5s$, la structure est réglée pour compenser uniquement les fluctuations de la puissance réactive apportée par les variations de la puissance active. On a une quasi-parfaite compensation des variations. Après l'instant $t=5s$, la consigne de la puissance réactive est modifiée pour réduire la puissance réactive fournie par le réseau. La réponse est quasi immédiate, et les fluctuations sont aussi bien compensées. Ainsi, il est montré que la puissance réactive peut être régulée indépendamment de la puissance active.

La Fig. 7 présente les puissances active et réactive échangées par le STATCOM avec le réseau. Avant l'instant $t=5s$, La valeur moyenne des deux puissances est bien autour de zéro, par contre après $t=5s$, la puissance active reste bien autour d'une valeur moyenne nulle et la puissance réactive se décale bien de la valeur donnée à la consigne désirée et correspondant au décalage visible sur la Fig. 6.

La Fig. 8 présente la tension mesurée aux bornes du supercondensateur. On remarque bien que les variations d'amplitude sont essentiellement liées aux variations de la puissance active. Par contre, on remarque après l'instant $t=5s$ une augmentation du bruit qui est dû à l'augmentation de la fourniture de puissance réactive au réseau.

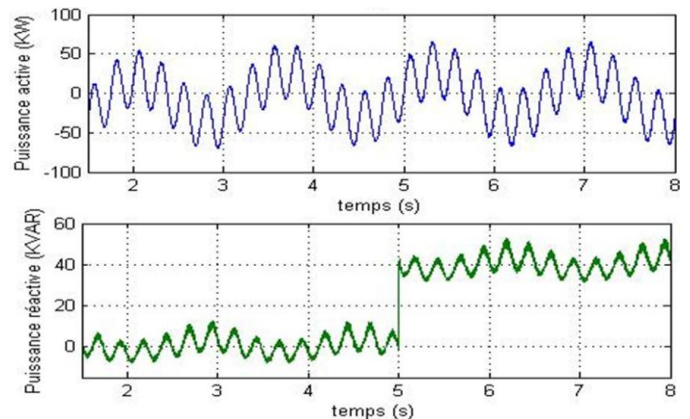


Fig.7 Puissances active et réactive du STATCOM

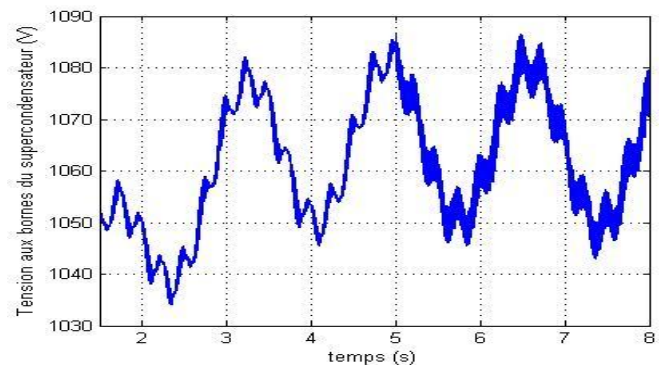


Fig.8 Tension mesurée aux bornes des supercondensateurs

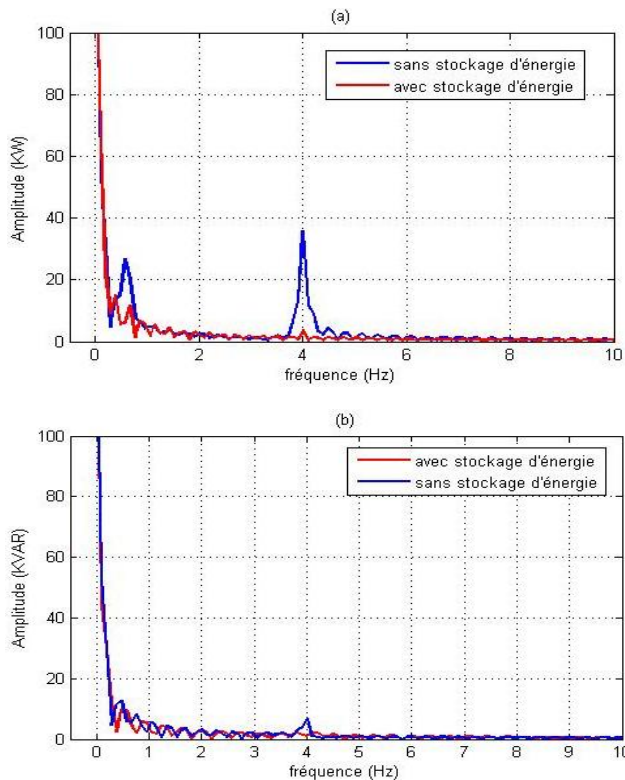


Fig.9 : (a) Spectre de la puissance active, (b) Spectre de la puissance réactive

Les résultats obtenus en régime transitoire (figures 5 à 9) montrent l'efficacité de la stratégie de commande pour un couple fortement variable. La Fig. 8 montre que le système fonctionne avec succès pour une variation de tension du bus continu de 50V. Par conséquent, la première boucle de commande développée dans cet article est valable pour toute la gamme $[U_{min}, U_{max}]$.

Dans le cas du contrôle de la tension continue avec la structure de la figure 4, la figure 10 montre que la tension aux bornes du supercondensateur suit bien sa référence. Ceci prouve la stabilité de la boucle de commande de la tension en boucle fermée.

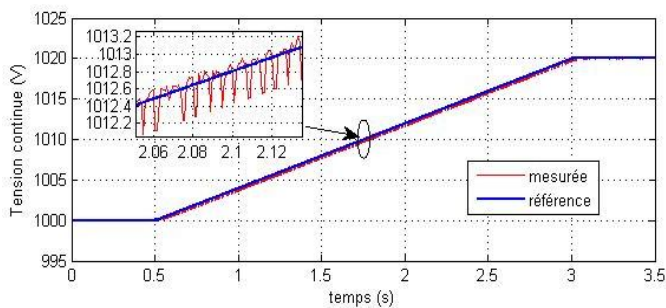


Fig.10 Tension du bus continu

5. CONCLUSIONS

Cet article propose une structure et une commande associée permettant de compenser, vis-à-vis du réseau, les fluctuations semi-lentes de la puissance active apportée par une éolienne et de corriger le $\cos \varphi$ de l'installation indépendamment de la puissance active qui transite dans la machine asynchrone. Les résultats présentés montrent la stabilité de la commande et les bonnes performances dynamiques des puissances échangées par le STATCOM. La synthèse du correcteur utilisé prend en compte les variations de la tension du côté du bus continu (aux bornes du supercondensateur). Par ailleurs, la structure montre aussi une bonne efficacité à filtrer les variations lentes des puissances actives et réactives et limite ainsi l'effet « flicker » sur le réseau.

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier la collaboration, ainsi que le soutien financier et technique fourni par la société Moteurs Leroy-Somer.

7. REFERENCES

- [1] C. Jauch, J. Matevosyan, T. Ackermann, and S. Bolik, « International comparison of requirements for connection of wind turbines to power systems », *Wind Energy*, vol. 8, no. 3, pp. 295-306, Jul./Sep. 2005.
- [2] M. S. Javadi, « Flicker Mitigation Approach Based on Three-Level STATCOM », *International journal of multidisciplinary sciences and engineering*, vol. 2, no. 4, JULY 2011.
- [3] J. P. Barton and D. G. Infield, « Energy storage and its use with intermittent renewable energy », *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 19, no. 2, pp. 441-448, Jun. 2004.
- [4] S. W. Mohod and M.V. Aware, « A STATCOM-Control Scheme for Grid Connected Wind Energy System for Power Quality Improvement », *IEEE, Systems Journal*, vol. 4, no. 3, pp. 346-352. 2010.
- [5] A.H.M.A. Rahim and E.P. Nowicki, « Supercapacitor energy storage system for fault ride-through of a DFIG wind generation system », *Energy Conversion and Management*, vol. 59, pp. 96-102, 2012.
- [6] A. Etxeberria, I. Vechiu, H. Camblong and J.M. Vinassa, « Comparison of three topologies and controls of a hybrid energy storage system for microgrids », *Energy Conversion and Management*, vol. 54, no. 1, pp. 113-121, February 2012.
- [7] Nicu Bizon, « Load-following mode control of a standalone renewable/fuel cell hybrid power source », *Energy Conversion and Management*, vol. 77, pp. 763-772, January 2014.
- [8] M. Chilali and P. Gahinet, « H_1 design with pole placement constraints: an LMI approach », *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 41, no. 3, pp. 358-367, Mars 1996.
- [9] S. Gutman and E. I. Jury, « A general theory for matrix root clustering in subregions of the complex plan », *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 26, no. 4, pp. 853-863, August 1981.
- [10] S. Boyd, L. El Ghaoui, E. Féron and V. Balakrishnan, « Linear Matrix inequalities in System and Control Theory », *Studies in Applied Mathematics (SIAM)*, vol. 15, USA 1994.