



Connexion de la génératrice à réluctance variable au réseau alternatif monophasé

Abdoulaye Sarr, Demba Diallo, Imen Bahri, Antoni Arias

► To cite this version:

Abdoulaye Sarr, Demba Diallo, Imen Bahri, Antoni Arias. Connexion de la génératrice à réluctance variable au réseau alternatif monophasé. 3ème Symposium de Génie Electrique (SGE 2018), Université de Lorraine [UL], Jul 2018, Nancy, France. hal-02981834

HAL Id: hal-02981834

<https://hal.science/hal-02981834>

Submitted on 28 Oct 2020

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 à réluctance variable connectée au réseau alternatif monophasé pour une application éolienne

Abdoulaye Sarr, Imen Bahri, Demba Diallo, Antoni Arias*

GeePs : Laboratoire Génie Electrique et Electronique de Paris (CNRS, CentraleSupélec, Univ. Paris Sud) 91192 Gif sur yvette

* IOC Universitat Politècnica de Catalunya. Av. Diagonal 647. Barcelona. Spain

RESUME – Nous avons présenté dans ce travail le contrôle de la Génératrice à Réluctance Variable (GRV) connectée au réseau alternatif monophasé pour une application éolienne. La régulation de la vitesse de rotation est assurée par le convertisseur coté génératrice et le couple est imposé par la machine à courant continu utilisée ici pour simuler la turbine éolienne. La connexion de la génératrice au réseau est réalisée par un convertisseur DC-AC qui assure le maintien de la tension du bus DC par un correcteur PI. Un correcteur résonant est utilisé pour suivre la consigne de courant sinusoïdale.

Mots-clés – GRV, Connexion au réseau, Correcteur résonant.

1. INTRODUCTION

A cause de la raréfaction des ressources naturelles et de l'épuisement avancé des réserves d'énergies primaires fossiles telles que le pétrole, le gaz, le charbon et l'uranium, et en raison de la pollution de l'environnement due à l'émission de gaz à effet de serre, une attention particulière est portée ces dernières années au développement des énergies renouvelables afin de limiter le réchauffement climatique et de baisser la facture énergétique. Parmi les filières renouvelables, la priorité semble se concentrer sur l'énergie éolienne dont la puissance mondiale installée est estimée à 817 GW en 2025 soit les prévisions du GWEC (Global Wind Energy Council), selon une augmentation de 67.8% par rapport à 2016.

Pour produire l'énergie électrique, la turbine de éolienne est couplée à une génératrice pour convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Traditionnellement, la Machine Asynchrone (MA) ou machine à induction était utilisée simplement en mode moteur. Mais avec le développement de la microélectronique et des variateurs de fréquence qui permettent de régler la vitesse, elle est aujourd'hui largement utilisée en mode génératrice dans les applications éoliennes. Actuellement la Machine Synchrone à Aimants Permanents (MSAP) est la plus répandue. Elle est utilisée dans la production d'électricité où les centrales utilisent des machines de forte puissance de l'ordre de 1500 MW. Elle présente des performances intéressantes telles qu'un couple massif et une puissance massive élevés et un bon rendement. Elle présente donc un avantage sur le plan performance/volume. Mais cet avantage de la MSAP est limité par le coût des aimants qui a considérablement augmenté ces dernières années et le fait que la MSAP supporte mal les températures élevées.

Depuis quelques années, la Génératrice à Réluctance Variable (GRV) se positionne comme une vraie alternative dans les unités de conversion de l'énergie éolienne [2] [6] [7]. Comme toutes les machines électriques tournantes, la GRV est constituée d'une partie fixe (le stator) et d'une partie mobile (le rotor). Son fonctionnement est basé sur l'interaction du stator et du rotor pour maximiser le flux qui les traverse. Cette machine présente un réel intérêt du côté des chercheurs et des industriels. Ses principaux atouts sont : sa structure simple due

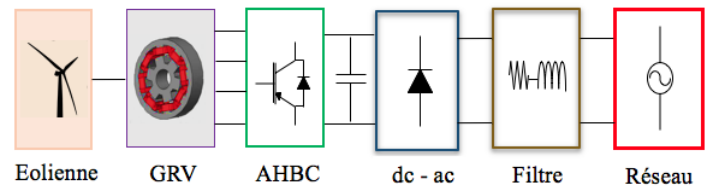


Fig. 1. Mode de fonctionnement de la GRV

à son rotor passif, son coût et sa robustesse [3] [8]. En effet l'absence du système balais-collecteur lui confère une certaine robustesse et une maintenance relativement facile par rapport à la Machine à Courant Continu (MCC). L'absence d'aimants au rotor réduit considérablement le coût de la machine et lui permet de fonctionner dans des environnements sévères sous des températures élevées contrairement à la MSAP. Malgré ses nombreux avantages, l'utilisation de la GRV reste encore marginale dans le milieu industriel. Elle est handicapée par un bruit acoustique important et une forte ondulation du couple due à l'alimentation successive des phases du stator [13] [14].

La structure générale du système de conversion est représentée à la Figure 1. Elle comporte une GRV de type 8/6 comportant 4 phases, excitées par un convertisseur à demi pont asymétrique (AHBC). Une Machine à Courant Continu sera utilisée dans les simulations pour jouer le rôle de la turbine. Un convertisseur DC-AC permet la connexion et la synchronisation de la génératrice au réseau électrique monophasé. La commande occupe une partie essentielle du système de conversion. Elle doit assurer :

- La conversion et le transfert de l'énergie au réseau
- Le maintien de la tension du bus continu à sa référence
- La minimisation du Taux Harmonique de distorsion
- Le contrôle de la qualité de la puissance et du courant
- Le contrôle de la puissance réactive injectée au réseau
- La synchronisation de la génératrice au réseau
- La maximisation du rendement de conversion
- La minimisation des ondulations du couple de la GRV

Depuis quelques années, plusieurs publications s'intéressent au contrôle de la GRV. Une grande attention est portée à l'optimisation de la commande. Généralement les angles de commutation des interrupteurs et le courant de référence des phases sont choisis comme paramètres de commande. Une GRV est utilisée dans [11] pour un micro-grid DC basé sur l'énergie éolienne. Les auteurs utilisent un convertisseur DC-DC entrelacé pour élever la tension de sortie de la génératrice. Dans [10], les angles d'ouverture et de fermeture des interrupteurs (θ_{on} et θ_{off}) sont identifiés comme paramètres de commande. Dans ce papier, les auteurs adoptent deux stratégies de commande : à basse et moyenne vitesse, les angles sont fixés, on contrôle le rapport cyclique ; tandis qu'en haute vitesse, le rapport cyclique est fixé et les angles sont contrôlés.

Tableau 1. Caractéristiques de la machine à réductance variable

Grandeur	Symbole	Valeur	Unité
Nombre de dents au stator	N_s	8	--
Nombre de dents au rotor	N_r	6	--
Nombre de phases	q	4	--
Resistance de phase	r	0.05	Ω
Puissance nominale	P_n	1200	W
Vitesse nominale	ω_n	3000	tr/mn
Couple Nominal	T_n	3.82	Nm
Courant maximal	I_{max}	100	A
Facteur d'inertie	J	0.0068	$Kg.m^2$
Coef. de Frottement	F	0.005	$Nm/rad s^{-1}$

POSITIONNEMENT DU PAPIER

Dans ce papier on s'intéresse à l'optimisation de la commande de la génératrice à réductance variable pour une application éolienne. Deux configurations sont possibles - Soit la GRV est utilisée comme une source de tension continue si sa sortie est connectée à une charge continue ou à une batterie - Soit la GRV est utilisée comme une source de tension alternative si l'énergie électrique produite permet d'alimenter une charge AC ou si la génératrice est connectée à un réseau AC isolé. Dans ce cas un onduleur est utilisé pour convertir la tension continue à la sortie de la génératrice en une tension alternative semblable à celle du réseau. L'objectif de ce papier est le contrôle optimal de la GRV. L'optimisation du rendement de la GRV associée à son convertisseur est présenté dans un précédent papier [15]. Les angles de commande et le courant de référence de la GRV sont identifiés comme paramètres de commande. Ils sont calculés par une méthode de calcul par éléments finis pour garantir un rendement de conversion maximal. Le premier objectif de ce papier est d'assurer le maintien de la tension du bus à sa valeur nominale malgré les fluctuations de la vitesse du vent et de la charge. Le second objectif est le contrôle de la qualité du courant par l'intermédiaire d'un correcteur résonant à cause de la référence sinusoïdale du courant. On comparera l'effet d'un correcteur résonant et d'un correcteur PI sur la qualité du courant injecté au réseau.

La suite du papier s'organise comme suit. Dans la partie 2 nous présentons le principe de fonctionnement de la génératrice à réductance variable. La partie 3 est consacrée à la commande de la GRV connectée au réseau monophasé. Quelques résultats de simulation sont présentés dans la partie 4. Le papier se termine par une conclusion et des perspectives sur les travaux futurs.

2. FONCTIONNEMENT ET MODÉLISATION DE LA GRV

2.1. Caractéristiques de la machine

La machine à réductance variable est un convertisseur électromécanique dont le fonctionnement est basé sur le principe du flux maximal. L'alimentation à tour de rôle des différentes phases crée un flux magnétique au stator. Le rotor s'oriente suivant les lignes de champ de telle sorte que le flux qui le traverse soit maximal. Un mouvement de rotation continu peut être entrepris en synchronisant parfaitement l'alimentation des phases et la position du rotor. Dans ce papier on s'intéresse à une machine tétraphasée à double saillance, ses caractéristiques sont données dans le Tableau 1. Elle est composée d'un rotor complètement passif, constitué d'un empilement de tôles ferromagnétiques comportant $N_r = 6$ dents et d'un stator lui aussi en fer doux comportant $N_s = 8$ dents, autour desquelles sont enroulés des conducteurs. Le nombre de phases de la machine est $q = 4$. Chaque phase est constituée de deux enroulements concentrés diamétralement opposés. Les enroulements statoriques sont excités par un convertisseur asymétrique à demi pont (ou Asymmetric Half Bridge Converter - AHBC), choisi pour sa robustesse et le découplage des phases. Le couple maximal est $T_{max} = 25 Nm$, il peut être atteint jusqu'à la vitesse de base de la machine $\omega_b = 1300 tr/mn$. La machine a une puissance nominale $P_n = 1.2 kW$ et un couple nominal $T_n = 4.5 Nm$. La vitesse nominale est la vitesse de rotation de la machine lorsqu'elle délivre sa puissance nominale, on a $\omega_n = 3000 tr/mn$.

2.2. Principe de fonctionnement de la génératrice

Contrairement aux machines électriques conventionnelles, la Machine à Réductance Variable (MRV) présente l'avantage d'un découplage des phases (absence de couplage magnétique et absence de couplage électrique entre les enroulements de deux phases différentes de la machine). Une étude comparative

entre une MRV classique et une MRV Mutuellement Couplée (MRVMC) est présentée dans [12]. Les résultats de simulation montrent que pour des courants faibles, les deux machines présentent le même couple moyen. En revanche, la MRV classique présente un couple légèrement inférieur à celui de la MRVMC pour des courants plus élevés. Dans la suite du papier, nous considérons que les quatre phases de la machine sont indépendantes et la machine fonctionne en régime linéaire (on néglige la saturation magnétique). Sous ces hypothèses, l'équation de la tension d'une phase de la machine est donnée par Eq. (1)

$$u_j = r i_j + \frac{d\varphi_j(\theta, i_j)}{dt}, \quad j \in \{1, 2, 3, 4\} \quad (1)$$

$$u_j = r i_j + L_j(\theta, i_j) \frac{di_j}{dt} + e_j, \quad e_j = i\omega \frac{dL_j(\theta, i_j)}{d\theta} \quad (2)$$

u_j , i_j , φ_j , L_j et r , représentent respectivement la tension, le courant, le flux, l'inductance et la résistance de la phase j . e_j est la force électromotrice (fem), elle dépend du courant, de la vitesse de rotation ω de la machine et de la variation de l'inductance en fonction de la position θ du rotor. Le schéma électrique équivalent de la MRV est donc identique à celui d'une machine à courant continu dont l'inductance est variable et la fem varie selon le point de fonctionnement. L'équation mécanique de la MRV est donnée par Eq. (3)

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e(\theta, i_1, i_2, i_3, i_4) - T_L - F\omega \quad (3)$$

J est l'inertie de la machine, F représente le coefficient de frottement visqueux, T_L est le couple de charge. $T_e(\theta, i_1, i_2, i_3, i_4)$ est le couple électromagnétique de la machine. En supposant un découplage complet des quatre phases, le couple électromagnétique total est la somme des couples élémentaires $T_e(\theta, i_j)$ développés par chaque phase.

$$T_e(\theta, i_1, i_2, i_3, i_4) = \sum_{j=1}^4 T_e(\theta, i_j) \quad (4)$$

Par définition, le couple élémentaire de la MRV est la variation de la co-énergie en fonction de la position du rotor. En supposant un fonctionnement linéaire de la machine, une expression simplifiée du couple élémentaire est donnée par l'Eq. (5) :

$$T_e(\theta, i_j) = \frac{1}{2} i_j^2 \frac{dL_j(\theta, i_j)}{d\theta} \quad (5)$$

A partir de l'équation (5) on voit que la création de couple par une machine à réductance variable est due à la variation de

l'inductance de phase en fonction de la position du rotor. La valeur du couple dépend du carré du courant, la MRV est donc alimentée par des impulsions de courant positives. Une autre remarque importante est que le signe du couple dépend uniquement du sens de variation de l'inductance en fonction de la position. La MRV est une machine réversible capable de fonctionner en mode moteur si on applique l'impulsion de courant dans la région croissante de l'inductance et en mode générateur si on l'applique dans la région décroissante de l'inductance pour créer un couple négatif. La Figure (2) représente la variation de l'inductance en fonction de la position électrique et le réseau de couple en fonction du courant et de la position. Deux grandeurs de commande ψ et θ_p sont représentées sur cette figure. ψ est appelé angle d'amorçage ou début de magnétisation. Il correspond à l'instant où les interrupteurs sont fermés. θ_p est appelé angle de conduction. Il correspond à l'intervalle de temps pendant laquelle la phase est magnétisée. Pour le mode générateur les angles ψ et θ_p sont réglés de telle sorte que l'alimentation se fasse quand l'inductance décroît. Pour garantir un fonctionnement efficace de la génératrice, un contrôle optimal des angles de commande (ψ, θ_p) est nécessaire [15].

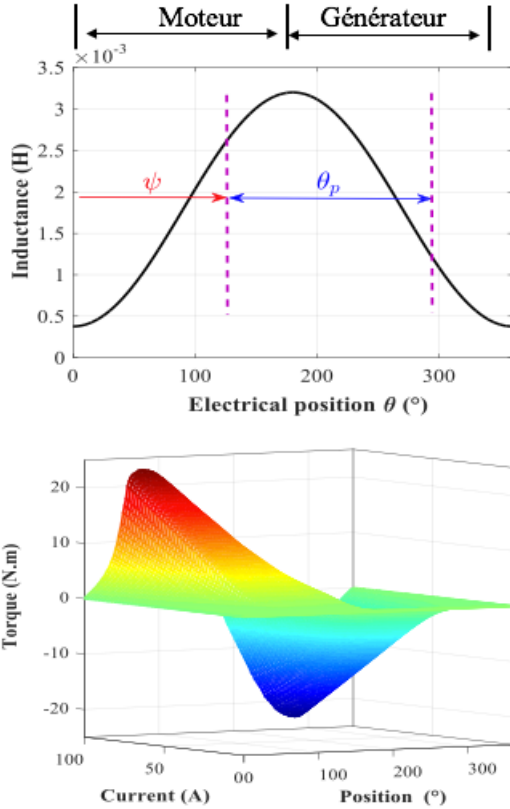


Fig. 2. Variation de l'inductance en fonction de la position

2.3. Mode Excitation - Mode Génération

Le fonctionnement de la GRV comprend deux étapes :

1. D'abord, une phase d'excitation : $\psi < \theta < \psi + \theta_p$
Lorsque l'inductance décroît, on ferme les interrupteurs du convertisseur AHBC. Les enroulements statoriques sont magnétisés par la source. L'énergie mécanique de la source d'entrée est convertie en énergie magnétique puis stockée dans les enroulements. Le courant croît dans cette phase à cause de la tension u et de la force électromotrice e (Figure 3-a).

$$L_j \frac{di_j}{dt} \approx u_j - e_j > 0 \quad (6)$$

2. Puis, une phase de génération : $\psi + \theta_p < \theta < 2\psi + \theta_p$
Après l'excitation les interrupteurs sont ouverts. Le courant circule à travers les diodes de roue libre. L'énergie magnétique stockée dans les enroulements statoriques est transformée en énergie électrique et transférée au réseau. Le courant décroît durant cette phase à cause de la force électromotrice négative (Figure 3-b).

$$L_j \frac{di_j}{dt} \approx -u_j - e_j < 0 \quad (7)$$

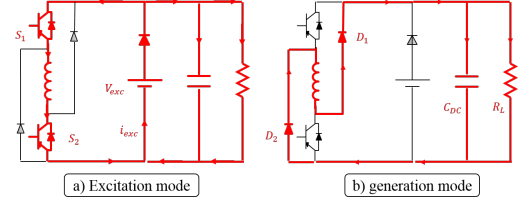


Fig. 3. Modes de fonctionnement de la GRV

3. STRUCTURE GENERALE DE LA COMMANDE

La Figure 4 représente la structure de la génératrice connectée au réseau électrique alternatif monophasé. Une MCC est utilisée pour simuler la turbine éolienne. Le connexion de la génératrice au réseau est assurée par un convertisseur DC-AC monophasé. Le contrôle de l'ensemble du système de conversion électromécanique peut être divisé en deux parties :

3.1. Contrôle de la partie mécanique : Entrée du système

La MCC est commandée en couple par un correcteur PI $C_T(s)$. Elle impose un couple de charge à la génératrice (T_{MCC}). Ce couple est l'image de la force développée par l'éolienne sur l'arbre de la génératrice.

$$C_T(s) = K_{PT} + K_{IT}/s \quad (8)$$

La génératrice quant à elle impose la vitesse de rotation à la MCC pour satisfaire le couple de charge demandé. La GRV est commandée par une boucle interne rapide de régulation du courant par des correcteurs à hystérésis $C_I(s)$ dont la sortie donne les signaux de commande des interrupteurs du convertisseur et une boucle externe de régulation de la vitesse par un correcteur PI $C_\omega(s)$.

$$C_\omega(s) = K_{P\omega} + K_{I\omega}/s \quad (9)$$

Il s'agit de réguler la vitesse de rotation de la génératrice à une valeur de référence. En considérant que le courant suit sa consigne rapidement (boucle interne de courant suffisamment rapide), la fonction de transfert en boucle fermée de la vitesse est donnée par :

$$H_\omega(s) = \frac{(K_{I\omega}/J) (s K_{P\omega}/K_{I\omega} + 1)}{s^2 + s (F + K_{P\omega})/J + K_{I\omega}/J} \quad (10)$$

Pour améliorer la dynamique du système en boucle fermée, le zéro stable de $H_\omega(s)$ est compensé par un pré-filtre $PF = 1/(s K_{P\omega}/K_{I\omega} + 1)$ calculé à partir des coefficients du correcteur.

$$H_\omega(s) = \frac{K_{I\omega}/J}{s^2 + s (F + K_{P\omega})/J + K_{I\omega}/J} \quad (11)$$

On obtient une fonction de transfert du second ordre. L'identification de $H_\omega(s)$ avec la forme canonique de la fonction second degré, d'amortissement ξ et de pulsation naturelle ω_n , permet de calculer les coefficients du correcteur.

$$K_{P\omega} = 2\xi\omega_n J - F \quad ; \quad K_{I\omega} = J\omega_n^2 \quad (12)$$

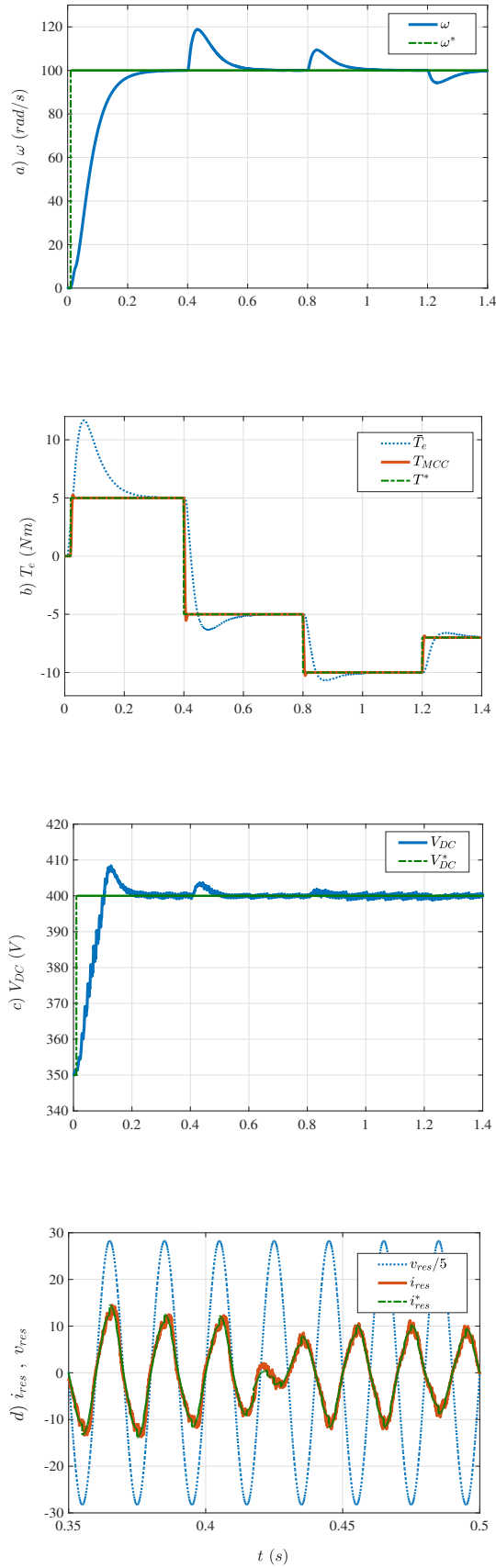


Fig. 6. Simulation de la robustesse de la connexion de la GRV au réseau

4. RESULTATS DE SIMULATION

4.1. Contrôle de la génératrice avec un correcteur résonant

Le système est simulé sous Matlab-Simulink. Les résultats de simulation sont représentés sur la Figure 6. Sur les Figures 6-a) et 6-b), on évalue les performances des contrôleurs mécaniques. Une consigne de vitesse de 1000 tr/mn est appliquée à la génératrice, La MCC impose une variation de charge entre -10 Nm et 5 Nm. Ces premiers résultats montrent la robustesse de la régulation de vitesse et de couple. Coté réseau, nous avons évalué les performances de la régulation de la tension du bus DC à une référence de 400V (Figure 6-c)), et les performances de la régulation de courant injecté au réseau avec une consigne sinusoïdale (Figure 6-d)) . Les résultats montrent un bon asservissement de la tension du bus DC et du courant réseau quel que soit le point de fonctionnement de la génératrice.

4.2. Correcteur résonant vs correcteur PI

La figure 7 montre une comparaison entre le correcteur résonant et le correcteur proportionnel intégral. Pour le correcteur résonant, le courant réseau suit rapidement sa référence sinusoïdale sans retard de phase. Il existe une petite erreur sur l'amplitude de l'ordre de 0.3 A. Si on utilise le correcteur PI, il existe un déphasage permanent et une erreur d'amplitude 0.5A entre le courant de réseau et sa référence. Pour améliorer les performances du système, il est donc nécessaire d'utiliser un correcteur résonant si les grandeurs de commande sont sinusoïdales. Par contre, l'ordre du correcteur peut être élevé, ce qui rend plus difficile son implémentation.

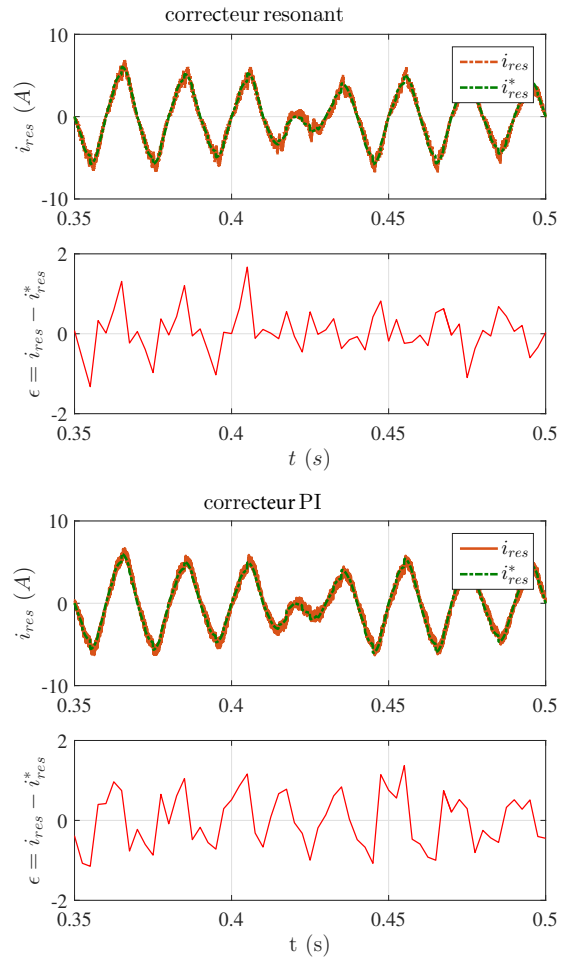


Fig. 7. Comparaison des deux correcteurs

5. CONCLUSIONS

Nous avons présenté ici le travail sur la connexion de la génératrice à réluctance variable au réseau monophasé. L'onduleur doit respecter certaines normes : la qualité du courant injecté dans le réseau, la tension et la fréquence nominales du réseau, le maintien de la tension du bus continu. Pour une utilisation optimale de la génératrice, le contrôleur des grandeurs d'entrée doit assurer une extraction maximale de la puissance mécanique disponible à l'entrée et garantir un rendement de conversion maximal. Ce point ainsi que la validation expérimentale seront abordés dans des travaux futurs.

6. RÉFÉRENCES

- [1] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre et A. V. Timbus, "Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems", IEEE TIE, vol. 53, pp. 1398-1409, octobre 2006.
- [2] H. Yahia, N. Liouane et R. Dhifaoui, "Differential evolution method-based output power optimisation of switched reluctance generator for wind turbine applications", IET Renewable Power Generation, vol. 8, pp. 795-806, septembre 2014.
- [3] A. Sarr, I. Bahri, D. Diallo et E. Berthelot, "Sensorless control of Switched Reluctance Machine", in 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 6693-6698, Florence, Italie, octobre 2016.
- [4] G. P. Viajante, D. A. Andrade, E. N. Chaves, V. R. Bernadelli, C. A. Queiroz, M. A. A. Freitas, J. A. Santos et L. C. Gomes, "A grid connection scheme of a switched reluctance generator using P-Resonant controller ", Electric Power Systems Research, vol. 141, pp. 572-579, décembre 2014.
- [5] A. Yazdani et R. Iravani, "Voltage sourced converters in power systems", John Wiley & Sons, 2010.
- [6] Bernardeli, D. A. Andrade, L. C. Gomes, G. P. Viajante, M. A. A. Freitas et J. A. S., " Voltage and current control of self-excited Switched Reluctance Generator for variable speed drive ", in IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (CO-BEP/SPEC), pp. 1-7, Fortaleza, Brazil, nombre 2015.
- [7] M. R. C. Reis, W. P. Calixto, W. R. H. Araújo et C. A. Matias, " Increasing efficiency of the switched reluctance generator using parametric regression and optimization methods ", in 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), pp. 1-6, Kouty nad Desnou, Czech Republic, mai 2017.
- [8] H. Hannoun, M. Hilair et C. Marchand " Design of an switched reluctance machine speed control strategy for a wide range of operating speeds ", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, pp. 2911-2921, septembre 2010.
- [9] D. A. Torrey "Switched reluctance generator and their control ", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 49, pp. 3-14, février 2002.
- [10] G. Yu, L. Ma, H. Cheng et H. Yingjie "Research on the control strategy of switched reluctance generator system", International Power Electronics and Application Conference and Exposition, pp. 1242-1247, Shanghai, 2014
- [11] K. W. Hu, J. C. Wang, T. S. Lin and C. M. Liaw "A Switched-Reluctance Generator with Interleaved Interface DC/DC Converter", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 30, n° 1, pp. 273-284, 2015
- [12] X. Liang, G. Li, J. Ojeda, M. Gabsi and Z. Ren "Comparative Study of Classical and Mutually Coupled Switched Reluctance Motors Using Multiphysics Finite-Element Modelling", in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 9, pp. 5066-5074, Sept. 2014
- [13] Chouaib Labiod, Kamel Srairi, Belkacem Mahdad, Mohamed Toufik Benchouia and M.E.H. Benbouzid "Speed Control of 8/6 Switched Reluctance Motor with Torque Ripple Reduction Taking into Account Magnetic Saturation Effects", Energy Procedia , vol 74, pp. 112 - 121, 2016
- [14] M.N Anwar, I. Husain "Radial force calculation and acoustic noise prediction in switched reluctance machine", IEEE Transactions on Industry Application, vol. , no. 6 , pp. 1586 - 1597 , Nov-Dec 2000
- [15] Abdoulaye Sarr , Duy-Minh Nguyen , Imen Bahri , Demba Diallo "Optimal control strategy of switched reluctance generator", conference Electrimacs, Février 2017, Toulouse, France