

Analyse d'un générateur autonome alimentant une charge isolée variable reliée à un redresseur commandé

M. Imadouchene ^{1*}, A. Nesba ^{2†}, S. Mekhtoub ^{1‡} et R. Ibtouen ¹

¹ Ecole Nationale Polytechnique, B.P. 182, El Harrach, Alger, Algérie

² Ecole Normale Supérieure, B.P. 92, Kouba, Alger, Algérie

(reçu le 15 Août 2015 - accepté le 20 Septembre 2015)

Résumé - Les systèmes d'énergie renouvelable sont de plus en plus utilisés dans la production de l'énergie électrique. L'intérêt porté à cette solution alternative est dû particulièrement à l'augmentation du prix de l'énergie conventionnelle et le problème de la pollution engendré par les combustibles fossiles. Dans notre étude, on s'intéresse à un système pouvant utiliser plusieurs sources d'énergies renouvelables (photovoltaïque, éolienne,...). Les tensions générées par ces différentes sources servent à alimenter moyennant des convertisseurs adaptés, un bus continu commun. Dans cet article, nous avons considéré uniquement le système éolien alimentant une charge variable via un redresseur commandé redressé. Nous avons élaboré les modèles du générateur asynchrone autonome et du redresseur à thyristor. Les modèles développés sont validés ensuite par des tests expérimentaux.

Abstract - Renewable energy systems are increasingly used in the production of electrical energy. This particular interest is especially due to the up rising price of conventional energy and the pollution problem caused by fossil fuels. In our study, we are interested in a system that can use many renewable energy sources (solar, wind..). The voltage generated by these different sources is used to feed through converters an adapted DC bus. In this study, we have only considered the wind system supplying a variable load via a controlled rectifier. We have developed models of the autonomous induction generator and the thyristor rectifier. The developed models are then validated by experimental tests.

Key words: Wind energy – Generator – Saturation - Modelisation - Command.

1. INTRODUCTION

L'augmentation du coût de production de l'énergie électrique conventionnelle et le problème de l'environnement dû au gaz à effet de serre sont des facteurs importants ayant favorisés le développement des systèmes de l'énergie renouvelable. Bien qu'ils ne puissent pas remplacer les systèmes conventionnels ou nucléaires, ils sont écologiques et fiables, de plus qu'ils permettent de prolonger la longévité des combustibles fossiles.

Des études de plus en plus nombreuses cherchent continuellement à améliorer leurs performances [1-5, 9]. Parmi ces systèmes à énergies renouvelables, on trouve les groupes hybrides constitués de systèmes de conversion de l'énergie éolienne associés aux systèmes photovoltaïques et parfois même à un générateur diesel. Dans le système que nous présentons dans ce papier les différents générateurs à énergies renouvelables (éolien et photovoltaïque) alimentent, via des convertisseurs statiques adéquats, un bus continu.

L'énergie disponible sur ce dernier est soit utilisée directement (en continue) soit transformée en alternatif via un onduleur. L'excès de puissance disponible sur le bus

* malika. Imadouchene @g.enp.edu.dz

† nesba_ali@yahoo.com

‡ said.mekhtoub@g.enp.edu.dz

continu est stocké dans des batteries d'accumulateurs pour l'utilisation durant les périodes de pointes et/ou quand l'apport des générateurs éolien et photovoltaïque devient insuffisant.

Nous nous intéressons, dans le présent papier, uniquement à la partie éolienne, c'est-à-dire le générateur asynchrone, ainsi que le convertisseur statique servant à le lier au bus continu.

L'utilisation du générateur asynchrone dans l'industrie éolienne est très attractive grâce à leur simplicité de fabrication et à leur fonctionnement à des vitesses variables ainsi qu'à leur capacité de surcharge. De plus que le développement actuel de l'électronique de puissance, permet d'associer à ces machines des convertisseurs statiques pour la transformation et l'adaptation de l'énergie.

La figure ci-après représente le dispositif du système étudié, Il comporte un générateur asynchrone triphasé auto-excité. Le convertisseur statique reliant le générateur au bus continu est un redresseur triphasé contrôlé en pont mixte. Une charge variable est connectée à la sortie du redresseur.

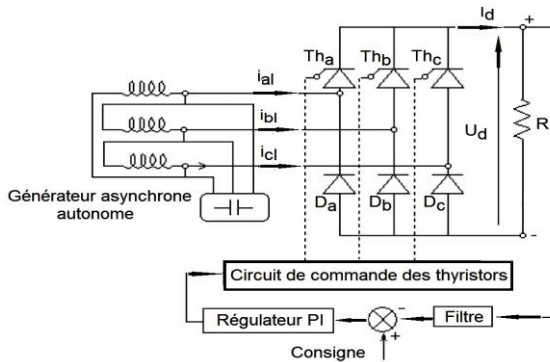


Fig. 1: Ensemble générateur – redresseur régulé en tension

Ce dispositif proposé ci-dessus permet d'obtenir une tension continue fixe à partir du système générateur asynchrone – redresseur, pour une large plage de variation de la vitesse d'entraînement du générateur (vitesse du vent) et de la charge. Ce fonctionnement à tension fixe, malgré les variations de la charge et la vitesse d'entraînement, est assuré par un régulateur qui permet de contrôler la tension à chaque instant, à la sortie de redresseur. La tension alternative à la sortie du générateur asynchrone auto-excité étant très influencée par les variations de la vitesse et de la charge.

Pour étudier ce système, nous avons commencé par l'établissement d'un modèle dynamique du générateur asynchrone. Dans une deuxième étape, nous avons modélisé le redresseur et nous avons associé son modèle à celui du générateur pour un fonctionnement en charge.

Pour confirmer la validité des résultats obtenus par simulation, nous avons réalisé un redresseur contrôlé en pont mixte thyristors – diodes, que nous avons alimenté par les tensions produites par un générateur asynchrone auto-excité. L'ensemble générateur redresseur a été testé pour différentes valeurs de la charge et de la vitesse d'entraînement.

2. MODELE DYNAMIQUE DU GENERATEUR ASYNCHRONE

Le fonctionnement du générateur asynchrone autonome est régi par le système d'équations (1) exprimé dans le référentiel arbitraire de vitesse ω_a .

$$\begin{aligned}
 p\varphi_{qs} &= v_{qs} - r_s \cdot i_{qs} + \omega_a \cdot \varphi_{ds} \\
 p\varphi_{ds} &= v_{ds} - r_s \cdot i_{ds} - \omega_a \cdot \varphi_{qs} \\
 p\varphi_{qr} &= v_{qr} - r_r \cdot i_{qr} + (\omega_a - \omega_r) \cdot \varphi_{dr} \\
 p\varphi_{dr} &= v_{dr} - r_r \cdot i_{dr} - (\omega_a - \omega_r) \cdot \varphi_{qr}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

r_s et r_r représentent respectivement les résistances par phase statorique et rotorique ramenée au rotor, p est l'opérateur dérivé par rapport au temps.

Les équations d'auto excitation sont données comme suit:

$$\begin{aligned}
 pv_{qs} &= \frac{1}{C_{ex}} i_{qs} - \omega_a v_{ds} \\
 pv_{ds} &= \frac{1}{C_{ex}} i_{ds} + \omega_a v_{qs}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

C_{ex} est la capacité des condensateurs d'excitation.

Les courants statoriques et rotoriques vus du stator s'expriment dans le référentiel arbitraire par:

$$\begin{aligned}
 i_{qs} &= \frac{1}{L_{ls}} (\varphi_{qs} - \varphi_{qml}) \\
 i_{ds} &= \frac{1}{L_{ls}} (\varphi_{ds} - \varphi_{dml}) \\
 i_{qr} &= \frac{1}{L_{lr}} (\varphi_{qr} - \varphi_{qml}) \\
 i_{dr} &= \frac{1}{L_{lr}} (\varphi_{dr} - \varphi_{dml})
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

L_{ls} , est l'inductance de fuite statorique et L_{lr} , l'inductance de fuite rotorique vue du stator.

Les flux magnétisants linéaires d'axes q et d sont définis par:

$$\begin{aligned}
 \varphi_{qml} &= L_m (i_{qs} + i_{qr}) \\
 \varphi_{dml} &= L_m (i_{ds} + i_{dr})
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

avec,

$$L_m = 3/2 L_{ms}
 \tag{5}$$

L_{ms} représente l'inductance magnétisante du stator en régime linéaire.

2.1 Introduction de la saturation

Définissons pour tout point de fonctionnement, l'écart $\Delta\varphi_m$ entre les flux magnétisants linéaire φ_{ml} et saturé φ_{ms} ,

$$\begin{aligned}
 \Delta\varphi_{mq} &= \varphi_{mq1} - \varphi_{mqs} \\
 \Delta\varphi_{md} &= \varphi_{mdl} - \varphi_{mds}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

La fonction 'degré de saturation' est définie par l'expression suivante:

$$F_s = \frac{\Delta\varphi_m}{\varphi_{ml}}
 \tag{7}$$

$$\varphi_{mqs} = (1 - F_s) \varphi_{mq1}
 \tag{8}$$

$$\varphi_{mds} = (1 - F_s) \varphi_{mdl}$$

Par ailleurs, F_s est défini par une série d'exponentielles, dont les coefficients sont déterminés en utilisant la méthode d'optimisation par les moindres carrés.

$$F_s = \begin{cases} 0 & \text{si } \phi_{ml} \leq \phi_{m0} \\ S & \text{si } \phi_{ml} > \phi_{m0} \end{cases} \quad (9)$$

ϕ_{m0} est la valeur du flux magnétisant à la limite de la région linéaire.

L'expression de S est donnée par:

$$S = S_a + S_b \quad (10)$$

Où

$$\begin{aligned} S_a &= a - a \exp(-\alpha \cdot (\phi_{ml} - \phi_{m0})) \\ S_b &= b \left(\exp\left(\beta \frac{\phi_{ml} - \phi_{m0}}{\phi_{ml} + \phi_{m0}}\right) - 1 \right) \end{aligned} \quad (11)$$

Sur la figure 2 suivante est représentée la fonction degré de saturation en fonction du flux magnétisant linéaire.

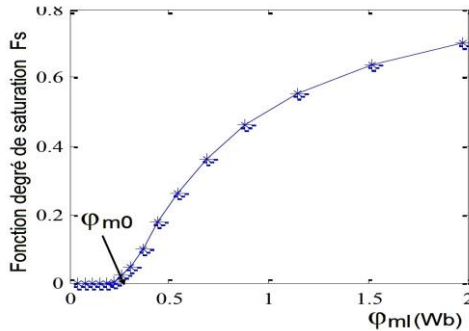


Fig. 2: Variation de la fonction degré de saturation en fonction du flux linéaire

En injectant les équations des courants dans les relations (2), on aboutit après calcul au système suivant:

$$\begin{aligned} \phi_{mq_s} &= \frac{L_q}{L_{ls}} \phi_{qs} + \frac{L_q}{L_{lr}} \phi_{qr} \\ \phi_{md_s} &= \frac{L_q}{L_{ls}} \phi_{ds} + \frac{L_d}{L_{lr}} \phi_{dr} \end{aligned} \quad (12)$$

avec,

$$L_q = L_d = \left(\frac{1}{L_m} + \frac{1}{L_{ls}} + \frac{1}{L'_{lr}} \right)^{-1} \quad (13)$$

Le modèle du générateur asynchrone autonome en saturé, est obtenu en remplaçant les flux magnétisants par les flux ϕ_{qms} , ϕ_{dms} dans les équations des courants.

2.2 Résultats obtenus en simulation et par expérience

L'application du modèle saturé à l'auto-amorçage du générateur asynchrone donne les résultats des figures 3 et 4, pour une vitesse du rotor de 1500 tr/min et une capacité $C_{ex} = 90\mu F$.

La figure 3 montre les tensions statoriques simulées et expérimentales et la figure 4 représente les courants statoriques simulés et expérimentaux. On remarque que ces grandeurs sont concordantes. Les résultats obtenus confirment la validité du modèle développé.

Dans ce qui suit, nous associons le modèle du générateur auto-amorcé, à une charge non linéaire constituée du redresseur et de sa charge résistive.

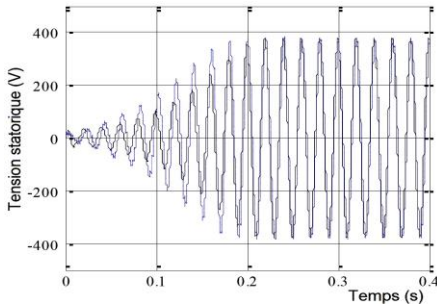


Fig. 3: Tension d'auto-amorçage du générateur à vide
 $N = 1500 \text{tr/min}$ et $C_{ex} = 90 \mu\text{F}$

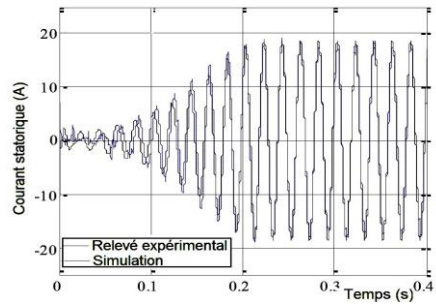


Fig. 4: Courant d'auto-amorçage du générateur à vide
 $N = 1500 \text{tr/min}$ et $C_{ex} = 90 \mu\text{F}$

3. MODELISATION DE L'ENSEMBLE GENERATEUR ASYNCHRONE – REDRESSEUR

Le système générateur asynchrone – redresseur (GAR) est largement utilisé dans les systèmes hybrides à énergies renouvelables [8, 9]. Dans cette partie, il s'agit d'obtenir une tension continue insensible à la variation de la charge et de la vitesse d'entraînement. La figure 1 représente le système étudié. Le redresseur est constitué de trois thyristors (commutateur négatif) et trois diodes (commutateur positif).

Le modèle idéal du redresseur –que nous adoptons dans ce travail– assimile les semi-conducteurs à des interrupteurs parfaits. La tension à la sortie du redresseur est donnée par l'équation suivante:

$$U_d = v_{cp} - v_{cn} \tag{14}$$

Où, v_{cp} et v_{cn} représentent respectivement les tensions des commutateurs positifs et négatifs.

$$v_{cp} = \sum_{i,j} \begin{cases} \max(v_{js}) & \text{si } Th_i \text{ amorcé} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{15}$$

$$v_{cn} = \sum_i \min(v_{is}) \tag{16}$$

i et j représentent les trois phases a , b et c .

Le redresseur impose au générateur asynchrone, un courant de charge triphasé donné par,

$$i_{abcl} = \begin{cases} I_d \text{ si } Th_{bca} \text{ et } (D_{bca} \text{ ou } D_{cab}) \text{ conduisent} \\ I_d \text{ si } D_{bca} \text{ et } (Th_{bca} \text{ ou } Th_{cab}) \text{ conduisent} \\ 0 \text{ si non} \end{cases} \tag{17}$$

Le modèle proposé tient compte de la forme, généralement non sinusoïdale, de ces courants dans les équations d'auto-excitation,

$$\begin{aligned} p v_{qs} &= \frac{1}{C_{ex}} (i_{qs} - i_{ql}) + \omega_a \cdot v_{ds} \\ p v_{ds} &= \frac{1}{C_{ex}} (i_{ds} - i_{dl}) - \omega_a \cdot v_{qs} \end{aligned} \tag{18}$$

I_d est le courant absorbé par la charge R du redresseur et est donné par:

$$I_d = U_d / R \quad (19)$$

Le système générateur asynchrone redresseur (GAR) est appelé à fonctionner dans un environnement susceptible de présenter des perturbations, qui sont généralement imprévisibles, tout en maintenant constante la tension continue à sa sortie.

Or la tension délivrée par le générateur asynchrone est étroitement liée à l'excitation, mais aussi à la charge et à la vitesse du rotor. Les figures 5 et 6 donnent le transitoire de la tension statorique lors de la connexion d'une charge $R_2 = 87.75 \Omega$. Nous remarquons que la tension de sortie du générateur asynchrone est largement influencée par la connexion de la charge.

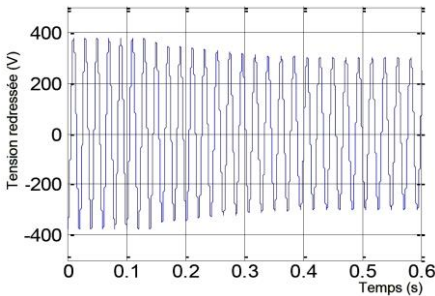


Fig. 5: Tension statorique simulée, connexion d'une charge de 87.75Ω

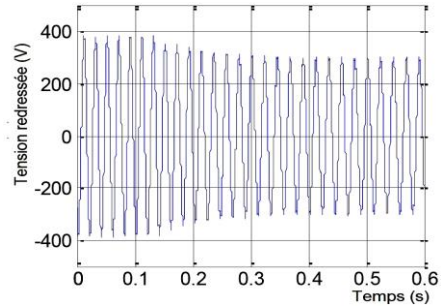


Fig. 6: Tension statorique expérimentale, connexion d'une charge de 87.75Ω

Le générateur asynchrone redresseur (GAR) présenté nous permet de remédier à cet inconvénient du générateur asynchrone et délivre à sa sortie une tension continue constante sur une large plage de variation de la tension de sortie du générateur asynchrone.

Ce type de fonctionnement en auto régulé est assuré par un régulateur proportionnel intégral permettant de maintenir la tension de sortie du redresseur à sa valeur de consigne et de corriger les écarts qu'engendreraient les variations de la charge et/ou de la vitesse d'entraînement du générateur.

En effet, le régulateur agit sur la tension de commande du redresseur de façon à ajuster l'angle d'amorçage des thyristors à une valeur telle que la tension de sortie du redresseur reste égale à sa valeur de consigne.

Résultats expérimentaux et simulés

Sur la figure 7, sont représentés la tension redressée obtenue par simulation, ainsi que celle obtenue expérimentalement pour un fonctionnement du GAR sur une charge résistive $R_1 = 175.5 \Omega$, la vitesse d'entraînement étant de 1500 tr/min. Il est également représenté sur cette même figure l'image filtrée de la tension redressée ; cette image est obtenue à partir de l'acquisition (expérimentale) de la tension redressée à travers un filtre passe-bas.

Sur la figure 8, sont représentés des résultats similaires à ceux de la figure 7 obtenus pour un fonctionnement du GAR sur une charge résistive $R_2 = 58.5 \Omega$, la vitesse étant de 1427 tr/min. Nous remarquons que la tension redressée ne présente pas la même amplitude sur les figures 7 et 8. (Variation avec la charge). Cependant, l'image filtrée de celle-ci montre qu'elle garde pratiquement la même valeur moyenne (200 V).

Les figures 9 à 11 représentent la réponse du système en boucle fermée suite à des variations brusques de la charge. Les résultats de la simulation et de l'expérience

montrent que la variation de la charge et de la vitesse d'entraînement du rotor affecte sensiblement l'amplitude ainsi que la fréquence de la composante alternative de la tension redressée (figure 9a- et 9b-).

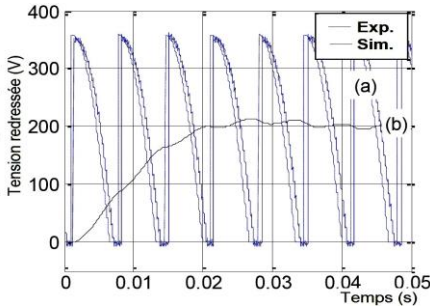


Fig. 7: Tensions redressées, simulée a- et expérimentale b-, Image de la tension redressée pour $R=175.5\Omega$

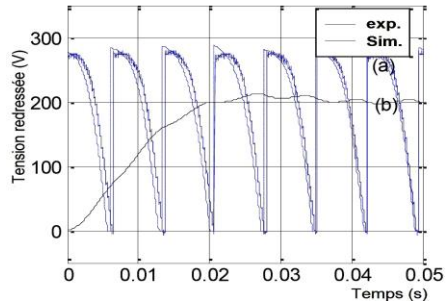


Fig. 8: Tensions redressées, simulée a- et expérimentale b-, Image de la tension redressée à travers un filtre passe-bas

Cependant, nous remarquons que la valeur moyenne de la tension redressée est pratiquement insensible à ces perturbations et reste constante sur une large plage de variation de la charge et de la vitesse (figure 10).

La vitesse passe de 1500 tr/min lorsque la résistance de charge est égale à $R_2 = 87.75 \Omega$, à 1410 tr/min lorsque la charge devient 175Ω .

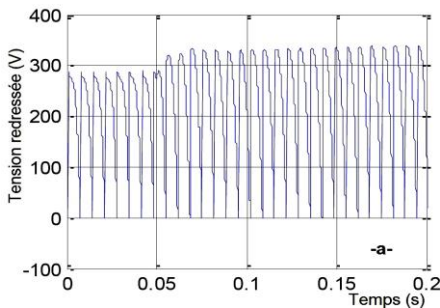


Fig. 9a-. Tension redressée simulée, pour R variant de 87.75Ω à 175.5Ω

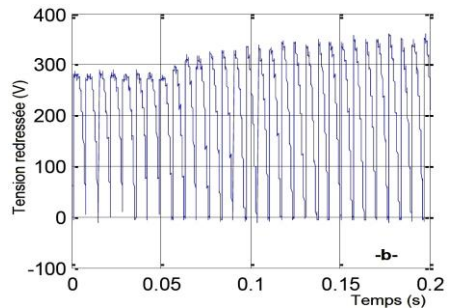


Fig. 9b-. Tension redressée expérimentale, pour R variant de 87.75Ω à 175.5Ω

Nous avons représenté sur la figure 10, la courbe de variation de la valeur moyenne de la tension redressée. Nous remarquons que cette courbe présente un transitoire à l'instant $t=0.1$ s correspondant au moment de la diminution de la charge, mais que le régulateur ramène rapidement cette tension à sa valeur de consigne (200V).

Le régulateur effectue cette régulation en agissant sur l'angle d'amorçage des thyristors.

La figure 11 montre que ce dernier augmente d'environ 7° pour assurer la régulation de la tension.

Lorsque la charge passe de $R_1 = 175.5 \Omega$ à $R_3 = 58.5 \Omega$, l'amplitude de la tension redressée diminue et la vitesse du rotor passe de 1458 tr/min à 1387 t r/min. toutefois la valeur moyenne reste invariable (figures 12a- et 12b-).

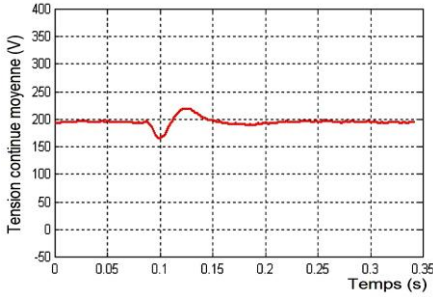


Fig. 10: Tension redressée moyenne reconstituée à partir des données, pour R variant de 87.75 Ω à 175.5 Ω

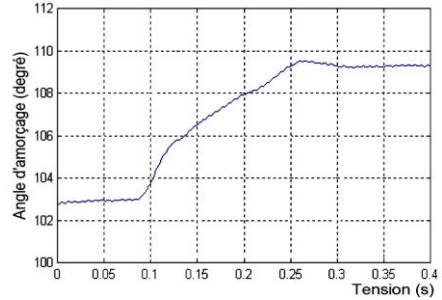


Fig. 11: Angle d'amorçage des thyristors obtenu par simulation suite à une variation de R de 87.75 Ω à 175.5 Ω

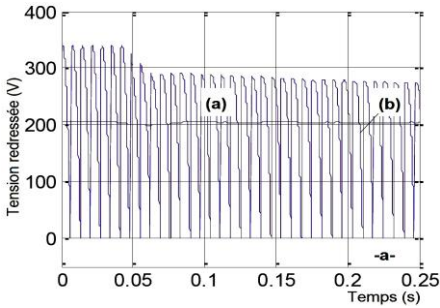


Fig. 12a- Tensions redressées expérimentales instantanée **a-**, moyenne **b-** pour R variant de 175.5 Ω à 58.5 Ω

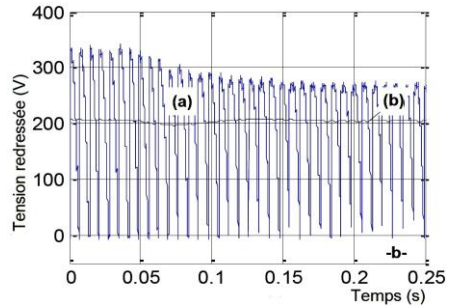


Fig. 12b- Tensions redressées instantanée **a-** et moyenne **b-**, simulées pour R variant de 175.5 Ω à 58.5 Ω

ANNEXE

Caractéristiques techniques de la machine asynchrone utilisée.

Machine à rotor bobiné: $U_n = 220/380$ V, $I_n = 14/8$ A, $P_n = 3.5$ kW, $N_n = 1410$ tr/min, $\cos = 0.8$, $f = 50$ Hz.

4. CONCLUSION

Notre étude porte essentiellement sur le système constitué du générateur asynchrone et du redresseur alimentant une charge variable. Nous avons présenté la simulation de l'ensemble générateur asynchrone autonome - redresseur et le dispositif de régulation avec une application à une charge résistive.

Nous avons validé le modèle dynamique non linéaire du générateur asynchrone. La tension obtenue aux bornes de la charge est restée constante, grâce à un régulateur proportionnel – intégral, lequel agit sur les instants d'amorçage des thyristors pour ramener la tension à une référence désirée à chaque variation de la charge ou de la vitesse.

Néanmoins, ce type de régulation n'agit pas directement sur la tension redressée. Les résultats de la simulation obtenus sont concordants avec ceux de l'expérience.

REFERENCES

- [1] S.M. Alghuwainem, 'Speed Control of Powered DC Motor Driving a Self- Excited Induction Generator for Maximum Utilization Efficiency', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 11, N°4, pp. 155 -161, 1996.
- [2] W.D. Kellog, M.H. Nehrir, G. Venkataramanan and V. Gerez, 'Generation Unit Sizing and Cost Analysis for Stand-Alone Wind, Photovoltaic, and Hybrid Wind/PV Systems', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 13, N°1, pp. 70 – 75, 1998.
- [3] S.S. Murthy, B.P. Sing, C. Nagamani and K.V.V. Satyanaryana, 'Studies of the Use of Conventional Induction Motors as Self-Excited Induction Generators', IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 3, N°4, pp. 842 – 844, 1988,.
- [4] J.O. Ojo, A. Consoli and T.A. Lipo, 'An Improved Model of Saturated Induction Machines', IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 26, N°2, pp. 212 – 221, 1990.
- [5] M. Naid J. Walters, 'A 4 kW - 42 V Induction - Machine - Based Automotive Power Generation System with a Diode Bridge Rectifier and a PWM Inverter', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 39, N°5, pp. 1287 – 1293, 2003.
- [6] M.H. Haque, 'Comparison of Steady State Characteristic of Shunt, Short-Shunt and Long-Shunt Induction Generators', Electric Power System Research, Vol. 79, pp. 1446 – 1453, 2009.
- [7] M.H. Haque, 'A Novel Method of Evaluating Performance Characteristics of a Self-Excited Induction Generator', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 24, N°2, pp. 358 – 365, 2009.
- [8] J.L.B. Agustin and R.D. Lopez, 'Multi-Objective Design and Control of Hybrid Systems Minimizing Costs and Unmet Load', Electric Power Systems Research, Vol. 79, pp. 170 – 180, 2009.
- [9] M. Azzam and A.A. Mousa, 'Using Genetic Algorithm and Topsis Technique for Multi-Objective Reactive Power Compensation', Electric Power Systems Research, Vol. 80, pp. 675 – 681, 2010.
- [10] A.A.A. El Ela and S.R. Spea, 'Optimal Corrective Actions for Power Systems using Multi-Objective Genetic Algorithms', Electric Power Systems Research, Vol. 79, pp. 722 – 733, 2009.
- [11] K. Harish and K. Neel, 'Steady-State Analysis of Self-Excited Induction Generator', International Journal of Soft Computing and Engineering, Vol. 1, N°5, pp. 248 – 253, 2011.
- [12] S. Sasikumar, and S. Singaravelu, 'Modelling and Analysis of Six-Phase Self-Excited Induction Generator for Wind Energy Conversion', International Journal of Recent Trends in Electrical & Electronics Engg., Vol. 2, N°1, pp. 1 – 12, 2012.
- [13] Shani khandelwal- K.G Sharma –Vipul aini, 'Performance Analysis of 3-Ø Self-Excited Induction Generator with Rectifier Load'; International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 2, N°1, 2013.
- [14] European Wind Energy Association. (2007, Jan./Feb.). 'How a Wind Turbine Comes Together?', Wind Directions, pp. 32 – 33. [Online]. Available:<http://www.ewea.org/>
- [15] Z. Chen, J.M. Guerrero and F. Blaabjerg, 'A Review of the State of the Art of Power Electronics for Wind Turbines', IEEE Transactions. Power Electronic, Vol. 24, N°8, pp. 1859 – 1875, 2009.
- [16] I.D. Margaris, A.D. Hansen, P. Sørensen and N.D. Hatziargyriou, 'Dynamic Security Issues in Autonomous Power Systems with Increasing Wind Power Penetration', Electric Power System Research, Vol. 81, pp. 880 – 887, 2011.