

Analyse dynamique des générateurs éoliens lors d'un creux de tension du réseau

Said Mekhtoub^{1*}, Rachid Ibtouen¹ et Seddik Bacha²

¹ Laboratoire de Recherche en Electrotechnique, 'LRE'
Ecole Nationale Supérieure Polytechnique,
10 Avenue Pasteur, B.P. 182, El Harrach, Alger, Algérie

² Grenoble Génie Electrique Laboratoire, 'G2Elab'
Domaine Universitaire, B.P. 45 St Martin d'Hères, Grenoble, France

(reçu le 9 Mai 2009 – accepté le 21 Juin 2009)

Résumé - *Le générateur asynchrone est de plus en plus utilisé dans les systèmes de production éoliens. Le générateur asynchrone à double alimentation est le mieux adapté pour les systèmes éoliens comparativement au générateur autonome qui sert à alimenter des endroits isolés. Dans notre étude, nous avons présenté le modèle du générateur en tenant compte de l'effet de saturation dans le système d'axes d-q. Nous avons appliqué ce modèle dans le cas d'une coupure du réseau électrique afin d'analyser la répercussion sur la dynamique des courants dans le générateur et ce pour les deux types de générateurs autonome et à double alimentation. Dans le cas du générateur autonome, des résultats expérimentaux sont présentés et comparés à ceux issus de la simulation.*

Abstract - *The asynchronous generator is increasingly used in wind power production systems. The asynchronous dual generator power is best suited for comparison to wind generator used to power remote locations. In our study we presented the model of generator taking into account the effect of saturation in the system of axes d-q. We applied this model in the case of a break from the grid to analyze the impact on the dynamics of the currents in the generator and for both types of machine. In the case of autonomous generator experimental results are presented and compared with those obtained from the simulation.*

Mots clés: Générateur asynchrone - Saturation - Modélisation - Machine à double alimentation - Systèmes éoliens.

1. INTRODUCTION

L'énergie électrique est un facteur essentiel pour le développement et l'évolution des sociétés humaines que cela soit sur le plan de l'amélioration des conditions de vie, ou sur le développement des activités industrielles. Elle est devenue une forme d'énergie indispensable par sa souplesse d'utilisation et par la multiplicité des domaines d'activité où elle est appelée à jouer un rôle plus important. Ces modes de production ainsi que les moyens de production associés sont amenés à subir de profonds changements au cours des prochaines décennies [7].

En effet, les modes de production reposant sur la transformation des énergies renouvelables (éolien, solaire...), sont appelés à être de plus en plus utilisés dans le cadre du développement durable.

* said.mekhtoub@enp.edu.dz, saidmekhtoub@yahoo.fr
225

Pour réaliser ceci, il est important de disposer de différentes technologies de générateurs, telles que les machines asynchrones.

Le choix d'un type de générateur asynchrone est motivé par des considérations techniques et économiques. Il appartient donc à l'exploitant du réseau, des centrales de génération d'énergie électrique de choisir le type de générateur asynchrone en connaissance des comportements de chaque type de générateur asynchrone et ce que ce soit en fonctionnement sain du réseau ou lors de phénomènes transitoires qui peuvent survenir lors de changement de la topologie du réseau.

Les machines électriques asynchrones à cage sont les plus simples à fabriquer et moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle de puissance. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé [2].

Les éoliennes à vitesse fixe sont couplées au réseau via les générateurs asynchrones (GAS). Le couplage entre l'aéroturbine et le générateur se fait aussi par le biais d'un multiplicateur mécanique de vitesse. Ce système à vitesse fixe, malgré sa simplicité n'exploite pas toute la puissance disponible pour des vitesses de vent élevées. Il est aussi bruyant à cause du système d'orientation des pales qui est souvent en action pour palier les variations de vitesses du vent.

Connue depuis 1899, la machine asynchrone à double alimentation MADA, '*Double Fed Induction Machine DFIM*' est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée à ses deux armatures: le stator et le rotor. Elle a été d'abord étudiée pour être utilisée en tant que moteur à grande vitesse. Les problèmes de stabilité rencontrés, ont induit l'abandon de son usage en tant que moteur pour un temps.

Le schéma de raccordement de cette machine consiste à connecter le stator directement au réseau, alors que le rotor est quant à lui alimenté à travers le convertisseur de puissance contrôlé. Cette solution est plus attractive pour toutes les applications où les variations de vitesse sont limitées autour de celle de synchronisme.

Dans ce travail, nous présentons quelques résultats obtenus lors de l'étude des comportements du générateur asynchrone en mode îloté ou en mode connecté au réseau, ainsi que des résultats concernant le comportement du générateur double alimenté connecté au réseau lors d'un défaut.

2. MODELISATION DU GENERATEUR ASYNCHRONE

Le modèle du générateur asynchrone [1] est basé sur la théorie des deux axes. Les principales hypothèses sont:

- Les forces magnétomotrices sont à répartition sinusoïdales;
- Les résistances sont considérées comme constantes;
- L'effet thermique et l'effet de peau sont négligés.

Les équations des tensions s'écrivent dans un référentiel d-q sous la forme générale suivante:

$$V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \theta_s \dot{\phi}_{qs} \quad (1)$$

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} - \theta_s \dot{\phi}_{ds} \quad (2)$$

$$V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \dot{\theta}_r \phi_{qr} \quad (3)$$

$$V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - \dot{\theta}_r \phi_{dr} \quad (4)$$

Les expressions des flux à leur tour s'expriment par:

$$\begin{aligned} \phi_{ds} &= L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \phi_{qs} &= L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \phi_{dr} &= L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \phi_{qr} &= L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{aligned} \quad (5)$$

Le couple mécanique et le couple électromagnétique sont donnés par les relations suivantes:

Couple mécanique

$$\Gamma_{mec} = \Gamma_r + f \Omega + j \frac{d\Omega}{dt} \quad (6)$$

Couple électromagnétique

$$\Gamma_{em} = -p \frac{M}{L_s} (I_{dr} \phi_{qs} - I_{qr} \phi_{ds}) \quad (7)$$

Equations d'auto excitation

L'autoamorçage du générateur asynchrone est assuré par la présence des condensateurs et de la saturation. Les condensateurs fournissent l'énergie réactive nécessaire et la saturation limite la tension du générateur. Ce processus est gouverné par la relation suivante, appelée équation d'amorçage du générateur.

$$\begin{cases} \frac{dV_{ds}}{dt} = \frac{1}{C} \cdot i_{ds} \\ \frac{dV_{qs}}{dt} = \frac{1}{C} \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (8)$$

2. VALIDATION DU MODELE NUMERIQUE DEVELOPPE

Sur les figures suivantes, nous présentons les résultats de simulation et ceux obtenus par expérience sur une machine de 3 kW à rotor bobiné, dont les caractéristiques techniques sont données en annexe.

2.1 Cas du générateur à vitesse fixe

La figure 1 suivante donne une configuration de la réalité du générateur ou éolienne à vitesse fixe. Ce type de générateur est moins utilisé que la machine à double alimentation où la vitesse est adaptée, grâce aux moyens rotoriques.

Sur la figure 2, nous reproduisons sur le banc d'essai suivant l'expérience menée au laboratoire. La turbine est remplacée par un moteur à courant continu et la connection par un interrupteur triphasé manuel.

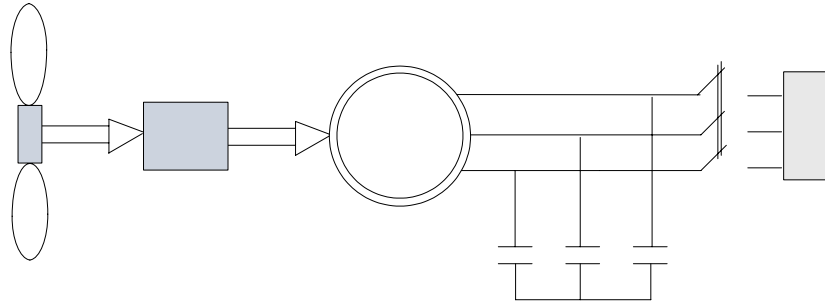


Fig. 1: Schéma d'une éolienne à vitesse fixe alimentant une charge

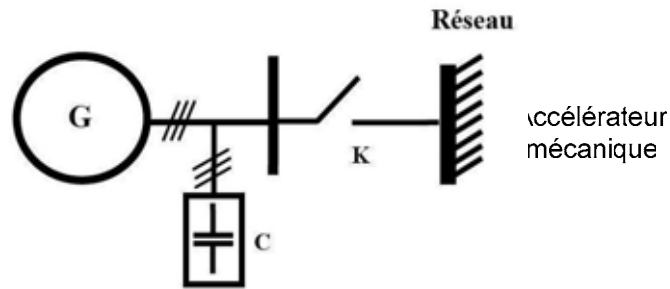


Fig. 2: Schéma du banc expérimental

Le générateur G est entraîné à la vitesse de synchronisme ($N = 1500 \text{ tr/mn}$) avec la batterie de condensateurs C à ses bornes.

L'interrupteur K nous servira à reproduire la coupure du réseau à l'ouverture et la réapparition du réseau à la fermeture.

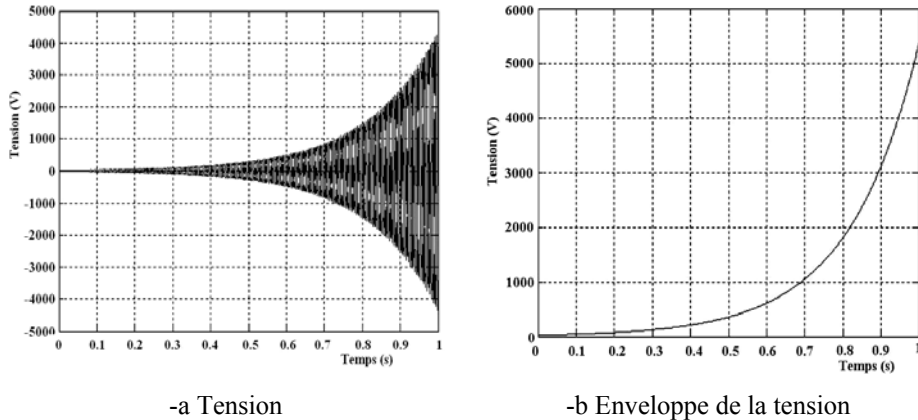
2.2 Résultats et interprétation

Nous avons testé le modèle développé en linéaire et nous avons obtenu les résultats suivants pour la tension et le courant. Dans ce cas, le flux magnétique est proportionnel au courant d'excitation et les différentes inductances utilisées dans le système d'équations (5) sont constantes.

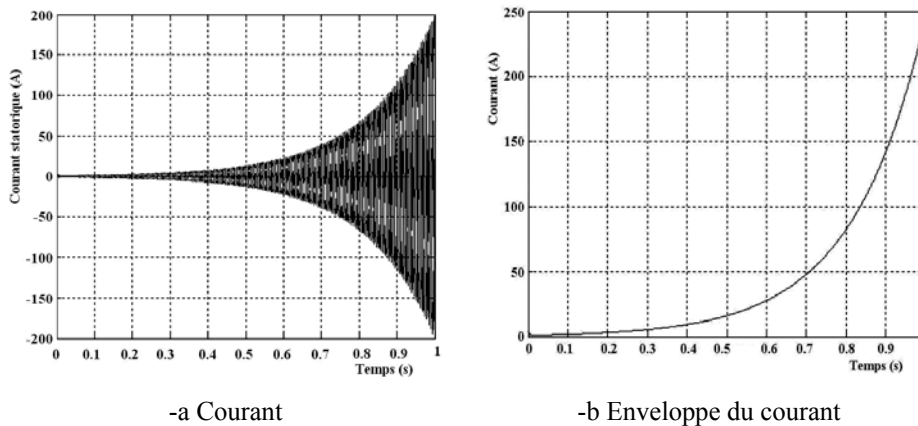
Les figures 3 et 4 présentent les résultats de simulation obtenus pour le courant et la tension.

Ces deux figures montrent que le fonctionnement en linéaire est pratiquement impossible du fait que le courant et la tension ne sont plus limités.

Dans la réalité physique, la machine est toujours saturée, les figures 5-a et 5-b, nous montrent comment la saturation limite le courant et la tension.



-a Tension
-b Enveloppe de la tension
Fig. 3: Tension monophasée simulée en linéaire aux bornes du stator



-a Courant
-b Enveloppe du courant
Fig. 4: Courant monophasé simulé en linéaire aux bornes du stator

Pour tenir compte de l'effet de saturation, nous présentons en annexe la caractéristique magnétique relevée à la vitesse synchrone à vide avec son approximation mathématique approchée.

Elle est introduite dans le système d'équations (1-4) pour tenir compte de la saturation. La simulation est menée de la façon suivante.

On résout numériquement le deux systèmes, équations (1-4) et équations (5) de l'instant initial jusqu'à la valeur finale, lorsque le générateur est à vide (K ouvert).

Les figures 5-a et 5-b présentent les résultats de la tension et du courant d'amorçage obtenus en simulation et par l'expérience.

Sur ces figures, on voit l'évolution du courant et de la tension jusqu'à la valeur finale, qui sera limitée par la saturation. Cette valeur dépend des paramètres de la machine mais surtout de la vitesse et de la capacité pour une machine donnée.

Ces figures montrent la concordance des résultats théoriques et ceux obtenus par l'expérience.

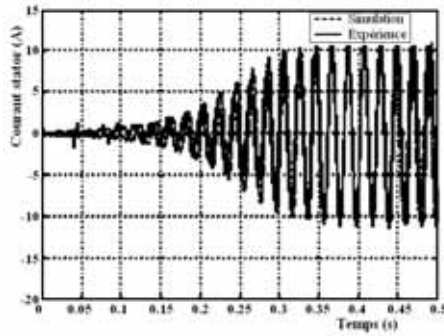


Fig. 5-a: Courant d'autoamorçage au stator, $N = 1500$ tr/mn, $C = 200 \mu\text{F}$

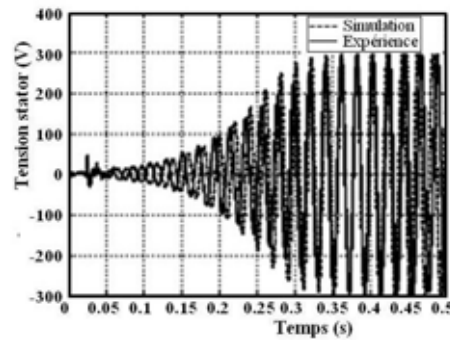


Fig. 5-b: Tension d'autoamorçage au stator, $N = 1500$ tr/mn, $C = 200 \mu\text{F}$

3. ANALYSE DE LA CONNEXION AU RESEAU PUISSANT DU GENERATEUR

3.1 Cas du générateur autonome

Le générateur autonome est destiné à alimenter des endroits isolés. Il peut être raccordé au réseau [5] pour fournir de la puissance active dans le cas des centrales hydrauliques de moyenne et de grande puissance.

Dans ce qui suit, nous montrerons l'impact d'un creux de tension sur la machine si certaines conditions sont remplies. Sur la figure 2 ci-dessus, nous présentons le banc d'essai utilisé pour reproduire le creux de tension.

Quelles sont les conséquences d'une telle manœuvre qui reproduit le creux de tension momentanée sur la machine ? Ce qui nous intéresse en premier lieu, est de voir l'évolution des courants au stator et quelle est sa valeur maximale et dans quelles conditions, elle peut se produire.

L'étude revient en fait à analyser le transitoire des courants, suite à la perturbation. Comme tout régime transitoire les courants et tensions vont dépendre de l'instant de la reconnection et du déphasage de la tension du réseau avec celle de la machine. Ils constituent les conditions initiales de la dynamique des courants.

La simulation est menée de la façon suivante. On fixe l'instant de la réapparition du réseau et on fait varier le déphasage de la tension réseau de 0 à 360° . Le maximum du courant est obtenu pour un déphasage de 180° , ce qui veut dire que les tensions sont en opposition de phase, un résultat auquel on s'attendait.

Pour l'expérience, on place un voltmètre aux bornes de l'interrupteur K, puis on le ferme, lorsque la différence de tension atteint sa valeur maximale.

Après quelques essais, on arrive à approcher le résultat théorique comme le montre respectivement les figures 6-a et 6-b, présentant une pointe négative, et les figures 6-c et 6-d, qui présentent une pointe positive.

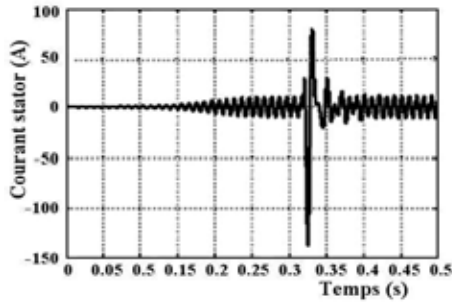


Fig. 6-a: Courant statorique expérimental
Pic négatif, $N = 1500$ tr/mn, $C = 200 \mu\text{F}$

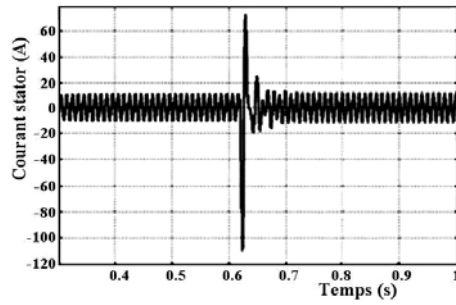


Fig. 6-b: Courant statorique simulé
Pic négatif, $N = 1500$ tr/mn, $C = 200 \mu\text{F}$

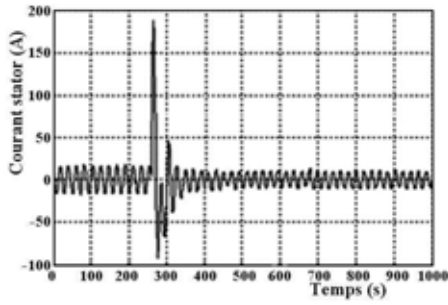


Fig. 6-c: Courant statorique expérimental
Pic positif, $N = 1500$ tr/mn, $C = 200 \mu\text{F}$

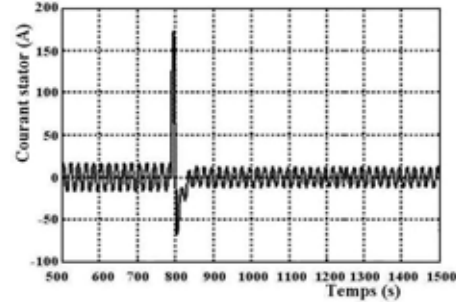


Fig. 6-d: Courant statorique simulé
Pic positif, $N = 1500$ tr/mn, $C = 200 \mu\text{F}$

On voit sur les figures 6 que le courant atteint une valeur qui dépasse 10 fois la valeur nominale (14 A) de la machine, ce qui est excessif.

Sur la figure 7, ci-après, nous avons généralisé en simulation le maximum de courant pour un instant de reconnexion fixé $t = 0.8$ s et une variation du déphasage de 0° à 360° . Nous avons représenté les enveloppes du courant au stator.

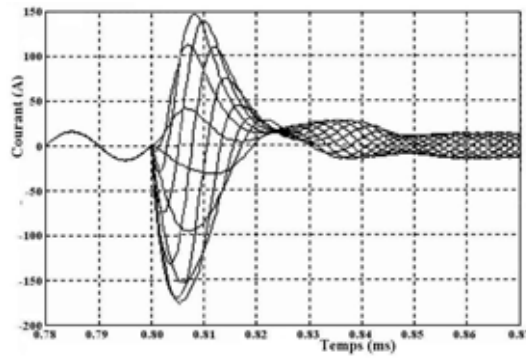


Fig. 7: Enveloppe du maximum de courant statorique
pour $t = 0.8$ s et φ variable de 0 à 360°

3.2 Cas de la machine à double alimentation

Nous avons procédé de la même façon que pour le générateur à double alimentation dont le schéma est représenté par la figure 8. Malheureusement, le banc d'essai n'existe pas, nous nous sommes contentés des résultats de simulation.

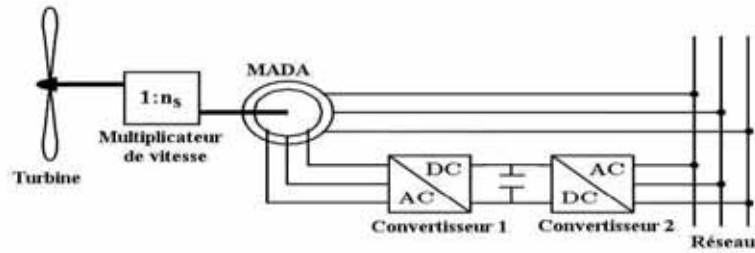


Fig. 8: Schéma d'une machine à double alimentation connectée au réseau

Nous représentons sur la figure 9, la forme et la valeur maximum du courant au stator et au rotor suite à la perturbation, en procédant de la même manière que précédemment.

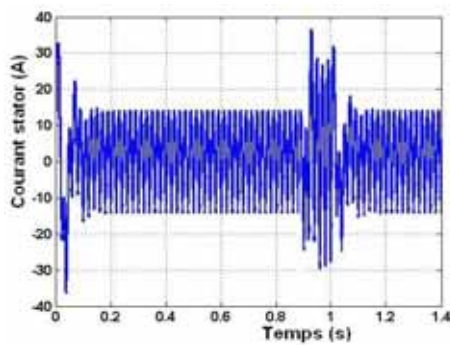


Fig. 9-a: Réponse du courant statorique, suite à une coupure de tension du réseau entre $t = 0.9$ s et $t = 1$ s

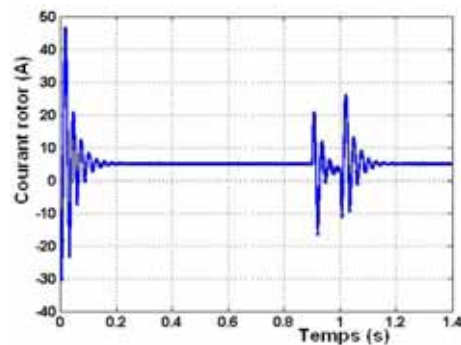


Fig. 9-b: Réponse du courant rotorique, suite à une coupure de tension du réseau entre $t = 0.9$ s et $t = 1$ s

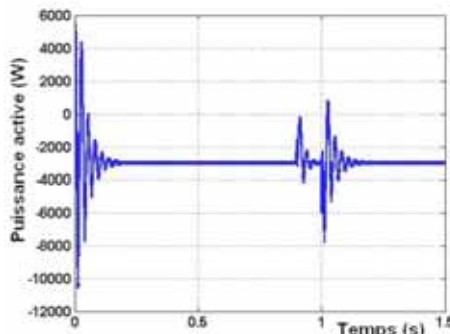


Fig. 10-a: Réponse de la puissance active, suite à une chute de tension du réseau entre $t = 0.9$ s et $t = 1$ s

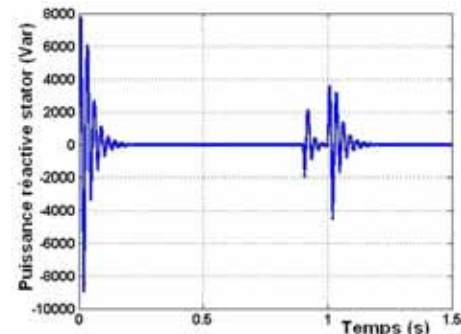


Fig. 10-b: Réponse de la puissance réactive, suite à une chute de tension du réseau entre $t = 0.9$ s et $t = 1$ s

Dans le cas de la machine à double alimentation, la valeur du courant est de trois fois la valeur nominale de la machine qui est de 14 A.

Sur les figures 10-a et 10-b, nous avons aussi simulé le comportement de la puissance active et la puissance réactive, suite à la perturbation. Ces résultats montrent que la machine à double alimentation supporte mieux la perturbation comparativement au générateur autonome.

4. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons considéré deux types de générateurs asynchrones autonome et à double alimentation. Nous nous sommes intéressés à la valeur maximale du courant et sous quelles conditions, ce maximum peut-il être obtenu, suite à la reconexion rapide du réseau après une coupure momentanée.

L'instant de reconexion et le déphasage des tensions, réseau -machine, déterminent l'amplitude du courant. La simulation et l'expérience montrent que le maximum du courant peut atteindre jusqu'à quinze fois la valeur nominale, ce qui est très excessif pour la machine, dans le cas du générateur autonome.

Par contre, pour une machine à double alimentation, sa valeur ne dépasse pas 4 fois la valeur nominale. On pourra dire que la machine à double alimentation supporte mieux la perturbation.

Du fait que les conditions initiales ne sont pas les mêmes en pratique et en simulation (la réapparition du réseau est un phénomène aléatoire). Le réseau réapparaît à n'importe quel moment et avec une phase de la tension quelconque, nous avons essayé d'approcher le résultat. Après plusieurs essais expérimentaux, nous pouvons faire une similitude avec les résultats de simulation.

La simulation montre que le maximum du courant a lieu pour une phase φ de la tension du réseau - machine de valeur 180° , et le minimum pour une phase de la tension de valeur 0° .

NOMENCLATURE

MADA : Machine Asynchrone à Double Alimentation	d, q : Indice des composantes orthogonales directs et en quadrature
s, r : Indice du stator, du rotor	R_s, R_r : Résistance statorique, rotorique
l_s, l_r : Inductance propre statorique, Rotorique	Φ_s, Φ_r : Respectivement flux statorique et rotorique
M : Inductance mutuelle stator- rotor	p : Nombre de paire de pole
ϕ_{ds}, Φ_{qs} : Flux statorique suivant les axes $d-q$	Φ_{dr}, Φ_{qr} : Flux rotorique suivant les axes $d-q$
V_s, V_r : Tension simple respectivement statorique et rotorique	θ_s, θ_r : Angle électrique statorique, rotorique
ω_s, ω_r : Pulsation statorique, rotorique	Γ_{em} : Couple électromagnétique
C : Capacité des condensateurs	Γ_r : Couple résistant
P_s : Puissance active statorique	Q_s : Puissance réactive statorique

REFERENCES

- [1] P. Kovacs, 'On the Theory of Cylindrical Rotor Machines, Including the Principal Saturation of Flux', IEEE Transactions on Power Apparatus System, Pas-103, Vol. 4, pp. 754 – 761, 1984.
- [2] Raul Robinovici, 'Autonomous Excitation of Induction Generator', IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 3, pp. 6664 – 6670, 1998.
- [3] Li Wang and Ching-Huei Lee, 'A Novel Analysis on the Performances of an Isolated Self Excited Induction Generator', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 12, N°2, pp. 109 – 115, 1997.
- [4] Li Wang, Ching-Chung Tsao, 'Performance Analyses of a Three-Phase Induction Generator Connected to a Utility Grid', Power Engineering Society Winter Meeting, 2001, IEEE, Vol. 3, pp. 1398 – 1402, 28 Jan. - 1 Feb. 2001
- [5] M. Orabi and T. Ninomiya, 'Operating Performance of Induction Generator Connected to Utility Grid during Grid Separation', IEEE, International Symposium on Industrial Electronics, 'ISIE2004', Vol. 2, pp. 1315 – 1320, Ajaccio, France, May 4 - 7, 2004.
- [6] T. Senjyu, N. Sueyoshi, K. Uezato and H. Fujita, 'Transient Current Analysis of Induction Generator for Wind Power Generating System', Electrical Engineering in Japon, Vol. 141, Part 1, pp. 38 – 45, 2004.
- [7] D. Joshi, K.S. Sandhu and M.K. Soni, 'Constant Voltage Constant Frequency operation for a self-excited Induction Generator', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 21, N°1, pp. 228 - 234, March 2006.
- [8] L. Mihet-Popa, V. Groza, G. Prostean, I. Filip and I. Szeidert, 'Variable Speed Wind Turbines Using Cage Rotor Induction Generators Connected to the Grid', Electrical Power Conference, 2007. EPC 2007. IEEE Canada, pp. 8 – 13, 25 - 26 Oct. 2007.

ANNEXE

Caractéristiques techniques de la machine asynchrone utilisée

Machine à rotor bobiné

La machine utilisée est à rotor bobiné avec les caractéristiques suivantes.

$$P_n = 3,5 \text{ kW}, N_n = 1410 \text{ t/mn}, U_n = 220/380 \text{ V}, 4 \text{ pôles}, f = 50 \text{ Hz},$$

$$\text{Courant} = 14/8 \text{ A}$$

$$\text{Résistance par phase du stator } R_1 = 0.76 \ \Omega.$$

$$\text{Résistance par phase du rotor ramenée au stator } R = 0.74 \ \Omega$$

$$\text{Mutuelle inductance de magnétisation } M = 0,074 \text{ H}$$

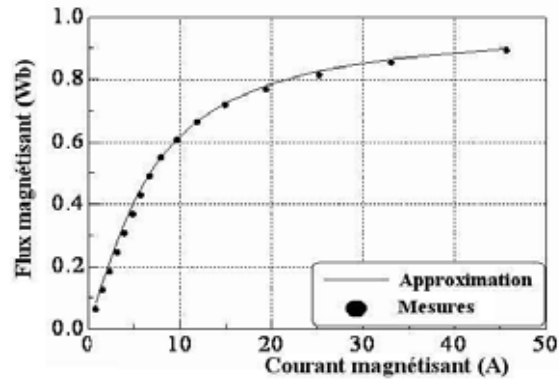
$$\text{Inductances de fuite stator et rotor } L_{\sigma_1} = L_{\sigma} = 0.003 \text{ H}$$

$$\text{Coefficient de dispersion } \sigma = 0.07$$

$$\text{Inductance cyclique stator et rotor } L_1 = L = 0.077 \text{ H}$$

Caractéristique magnétique utilisée

Cette caractéristique est relevée par un essai à vide au synchronisme, puis modélisée par une fonction mathématique pour introduire la saturation dans les équations de la machine.



Approximation mathématique

$$\Phi_m = 0.63 \operatorname{artg}(0.15 I_m)$$