

Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) en vue d'une Application pour la Conversion de l'Energie Eolienne.

A. Khirennas, E.M. Berkouk, T. Ghennam, T. Mesbahi

Résumé— Cet article étudie les structures de commande de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) qui permettent de contrôler indépendamment les puissances active et réactive statoriques lorsque la MADA est connectée au réseau ou sur une charge isolée. Dans cet article, on détaille la modélisation de la MADA nécessaire pour appliquer la commande indépendante des puissances dans les deux cas. Puis, à partir de cette modélisation, on dégage les stratégies de commande. Ces dernières sont simulées en utilisant MATLAB®/Simulink®. Dans la partie expérimentale, on a implémenté sur une carte DSP un algorithme qui permet de fixer la fréquence des tensions statoriques à 50Hz quelque soit la vitesse d'entraînement de la MADA. Les résultats expérimentaux obtenus sont ainsi montrés.

Mots Clés— Commande indépendante des puissances active et réactive, Énergie Éolienne, eZdsp F2812, MADA, mode connecté au réseau, mode floté.

I. INTRODUCTION

Parmi les énergies renouvelables non conventionnelles connues actuellement, l'énergie éolienne est celle la plus compétitive et qui a le taux de croissance le plus élevé[1]. Différentes configurations sont proposées afin de convertir cette énergie en électricité. Parmi ces dernière, celle à base de la MADA avec stator lié directement au réseau et rotor alimenté à travers deux convertisseurs MLI est la plus intéressante du point de vue coût et performance ([2]) car, dans cette configuration, la MADA peut travailler à vitesse variable dans une large plage de variation de vitesse ; de plus le convertisseur côté rotor n'est dimensionné qu'au tiers de la puissance nominale de la machine.

A. Khirennas, Laboratoire d'Electronique de Puissance, U.E.R. Electrotechnique, E.M.P, Alger, Algérie,
e_mail: khaaa24@yahoo.fr

E.M. Berkouk, Laboratoire de commande des Processus, ENP El-Harrach, Alger (Algérie)

e_mail: emberkouk@yahoo.fr

T. Ghennam, Laboratoire d'Electronique de Puissance, U.E.R. Electrotechnique, E.M.P, Alger, Algérie,
e_mail: t_ghennam@yahoo.fr

T. Mesbahi, Laboratoire d'Electronique de Puissance, U.E.R. Electrotechnique, E.M.P, Alger, Algérie,
e_mail: najjib8507@yahoo.fr

II. MODELISATION DE LA MADA EN VUE DE LA COMMANDE INDEPENDANTE DES PUISSANCES

A. Principe:

La commande vectorielle de la MADA est souvent associée à la commande indépendante de ses puissances statoriques, rotoriques ou celles du réseau [3]. Dans notre étude, ce sont les puissances statoriques qui seront commandées.

Pour ce faire, l'approche consiste à établir un modèle qui met en évidence la possibilité d'agir sur les signaux rotoriques en vue de contrôler, et d'une façon découplée, l'échange des puissances active et réactive entre le stator de la machine et le réseau (ou la charge) sur lequel elle débite. Il y a deux cas à distinguer :

- le cas où la MADA est connectée sur une charge isolée. La stratégie de commande doit assurer la régulation de la valeur efficace et de la fréquence des tensions statoriques que débite la MADA sur la charge;
- et le cas où elle est connectée sur un réseau de puissance supposée infinie donc la valeur efficace et la fréquence des tensions statoriques sont dictées par le réseau ; on s'intéresse plutôt au contrôle des puissances active et réactive débitées par la MADA sur le réseau.

B. Orientation du repère d,q :

Pour aboutir à un modèle permettant la commande découplée des puissances, on choisit pour les deux cas d'orienter le repère de Park (d,q) de telle sorte que l'axe d soit aligné sur le flux statorique Φ_s (Fig. 1).

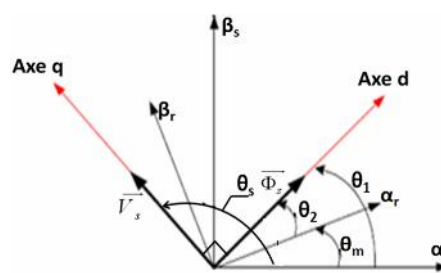


Fig. 1. Orientation du repère diphasé d,q

$$\text{Ce qui donne : } \begin{cases} \Phi_{ds} = \Phi_s \\ \Phi_{qs} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

La tension d'une phase statorique i est donnée par:

$$v_{si} = R_s i_{si} + \frac{d\Phi_{si}}{dt} \quad (2)$$

Si l'on néglige R_s , hypothèse réaliste pour les machines de

$$\text{forte puissance, on peut écrire : } v_{si} \approx \frac{d\Phi_{si}}{dt} \quad (3)$$

avec Φ_{si} : le flux totalisé sous la phase i .

III. LA COMMANDE INDEPENDANTE DES PUISSANCES ACTIVE ET REACTIVE STATORIQUES DE LA MADA DANS LE MODE CONNECTE AU RESEAU

A. Modélisation :

Si la MADA est connectée sur un réseau électrique que l'on suppose stable et ayant pour tension simple V_s , cela conduit à un flux statorique constant et le modèle de la MADA se simplifie donc comme suit [4] :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + L_r \sigma \cdot \frac{di_{dr}}{dt} - g \omega_s L_r \sigma \cdot i_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + L_r \sigma \cdot \frac{di_{qr}}{dt} + g \omega_s L_r \sigma \cdot i_{dr} + g \frac{L_m V_s}{L_s} \end{cases} \quad (4)$$

Avec σ : le coefficient de dispersion de la machine.

Quant aux puissances statoriques, elles sont exprimées comme suit :

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} (-V_s \frac{L_m}{L_s} i_{qr}) \\ Q_s = \frac{3}{2} (-V_s \frac{L_m}{L_s} i_{dr} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s}) \end{cases} \quad (5)$$

D'où le modèle interne de la MADA représenté par le schéma bloc suivant (Fig. 2.):

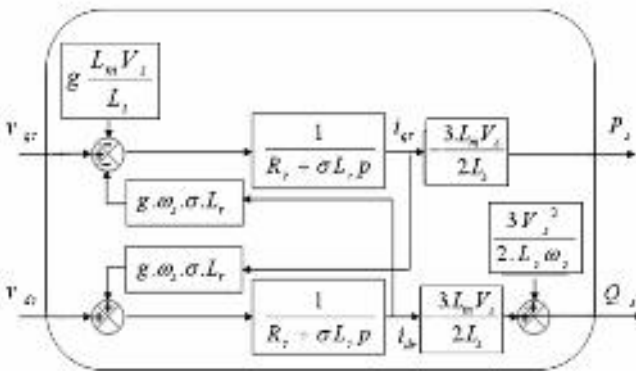


Fig. 2. Modèle interne de la MADA

B. Structure de la commande :

À la base du modèle établi et afin de commander les puissances statoriques, on peut utiliser une commande directe avec boucles de courant. Cette structure consiste, en plus des boucles de régulation des puissances, à des boucles internes de régulation de courant (Fig. 3.).

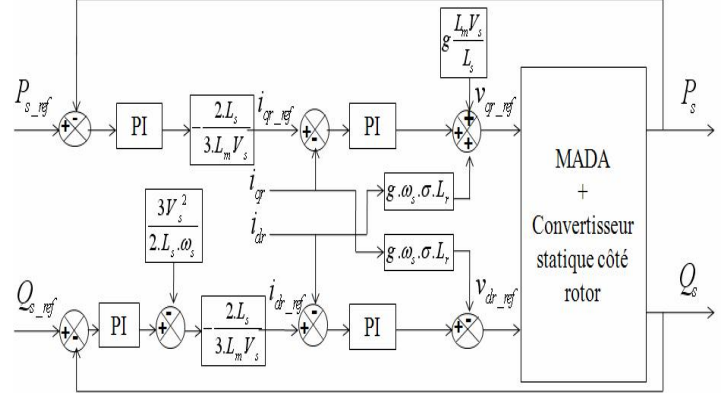


Fig. 3. Commande directe avec boucles de courant

C. Simulation numérique:

La structure décrite ci-dessus est simulée en choisissant d'alimenter le rotor par un onduleur à deux niveaux alimenté à son tour par une source de tension continue supposée parfaite.

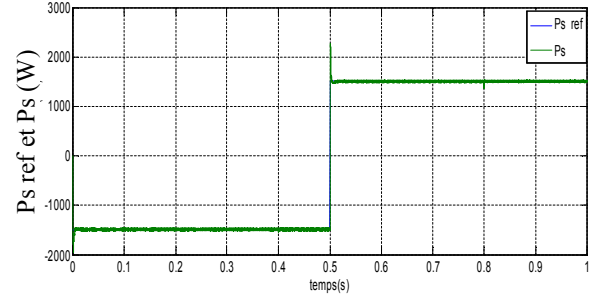
La vitesse passe à l'instant $t=0.4s$ de la vitesse nominale (1410 tr/mn) à la vitesse 1000 tr/mn.

On applique les échelons des puissances suivants:

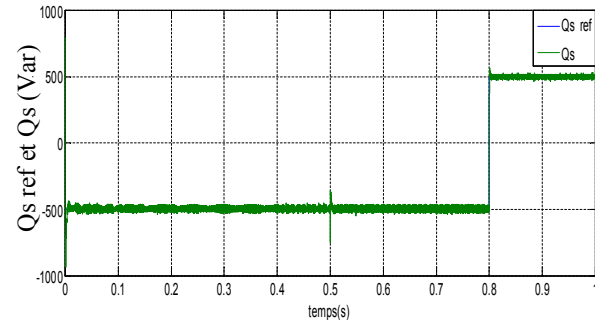
P_{s_ref} passe à l'instant $t=0.5 s$ de $-1500 W$ à $+1500 W$

Q_{s_ref} passe à l'instant $t=0.8 s$ de $-500 Var$ à $+500 Var$.

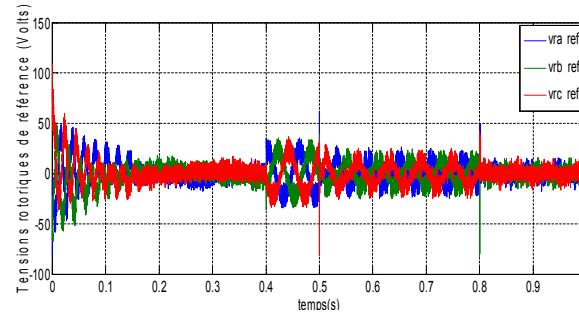
Les résultats obtenus sont montrés ci-dessous :



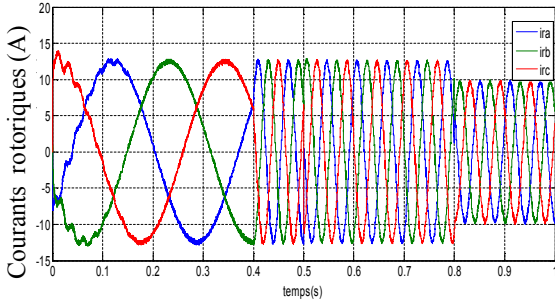
(a) La puissance active



(b) La puissance réactive



(c) Les tensions rotoriques



(d) Les courants rotoriques

Fig. 4. Résultats de simulation de la structure de commande directe avec boucles de courant

D. Interprétation des résultats:

Les résultats obtenus montrent que les puissances active et réactive suivent bien leurs références imposées. De plus on peut constater que la puissance active est directement commandée par v_{qr} et celle réactive par v_{dr} ce qui signifie que le pilotage de la MADA par son rotor permet de commander indépendamment les puissances à son stator (Fig. 2.). De plus, la MADA peut générer aussi bien de la puissance réactive que de la puissance active.

IV. LA COMMANDE INDEPENDANTE DES PUISSANCES ACTIVE ET REACTIVE STATORIQUES DE LA MADA DANS LE MODE ILOTE

A. Modélisation :

Dans ce mode, la MADA doit assurer en sortie des tensions à fréquence et amplitude fixes même en variant la charge sur la quelle elle débite et quelque soit la vitesse avec la quelle elle est entraînée.

Pour ce faire on établit un modèle diphasé de la MADA pour le quel les tensions statoriques sont des vecteurs en sortie et pour le quel le repère (d,q) est orienté de la même façon que pour le premier cas c.à.d. en orientant l'axe d suivant le flux statorique. On aboutit au modèle représenté par les équations liant les flux rotoriques avec les tensions rotoriques suivantes:

$$\begin{cases} \frac{d\Phi_{dr}}{dt} = -\frac{1}{T_r} \cdot \Phi_{dr} + v_{rd} + E_d \\ \frac{d\Phi_{qr}}{dt} = -\frac{1}{T_r} \cdot \Phi_{qr} + v_{rq} + E_q \end{cases} \quad (6)$$

Avec :

$$\begin{cases} E_d = \frac{L_m}{T_r} i_{ds} + (\omega_s - \omega) \Phi_{qr} \\ E_q = \frac{L_m}{T_r} i_{qs} - (\omega_s - \omega) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (7)$$

et par les équations liant les flux rotoriques avec les tensions statoriques suivantes:

$$\begin{cases} v_{ds} = -\omega_s \frac{L_m}{L_r} (\Phi_{qr} + A_d) \\ v_{qs} = +\omega_s \frac{L_m}{L_r} (\Phi_{dr} + A_q) \end{cases} \quad (8)$$

Avec :

$$\begin{cases} A_d = \frac{L_r}{L_m} \left(-\frac{R_s}{\omega_s} i_{ds} + \sigma L_s i_{qs} \right) \\ A_q = \frac{L_r}{L_m} \left(\frac{R_s}{\omega_s} i_{qs} + \sigma L_s i_{ds} \right) \end{cases} \quad (9)$$

D'où le modèle interne globale de la MADA représenté comme suit :

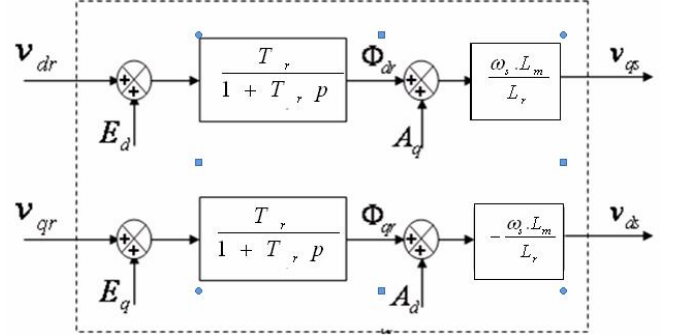


Fig. 5. Modèle interne de la MADA dans le mode îloté

B. Structure de commande :

A partir de ce modèle, la stratégie de commande consiste à des boucles internes de régulation des flux rotoriques direct et en quadrature, et une boucle externe de régulation de la tension statorique [5] (Fig. 6.).

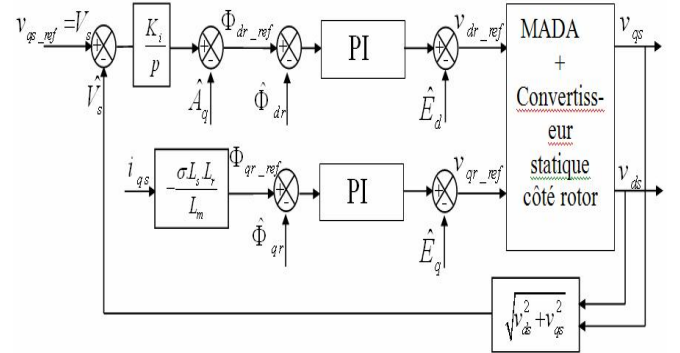


Fig. 6. Structure de commande de la MADA dans le mode îloté

C. Simulation numérique:

La structure de commande décrite ci-dessus est simulée en imposant l'allure de vitesse de la MADA suivante :

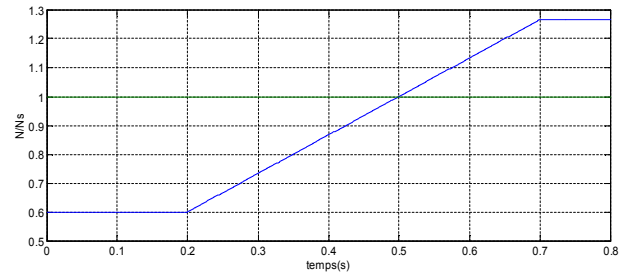
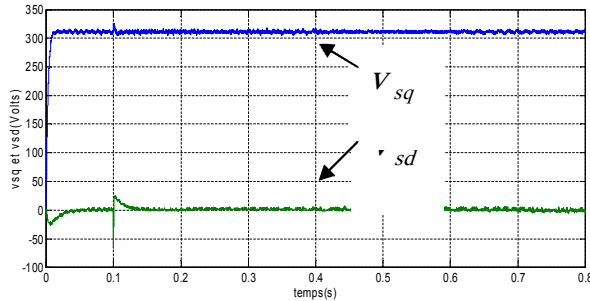


Fig. 7. Allure de la vitesse d'entraînement de la MADA

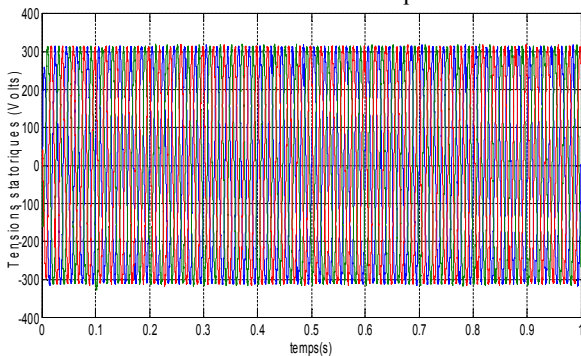
On impose une valeur efficace de la tension statorique simple de 220 volts et une fréquence de 50Hz. Le rotor de la MADA

est alimenté, comme pour le 1^{er} cas, par un onduleur à 2 niveaux.

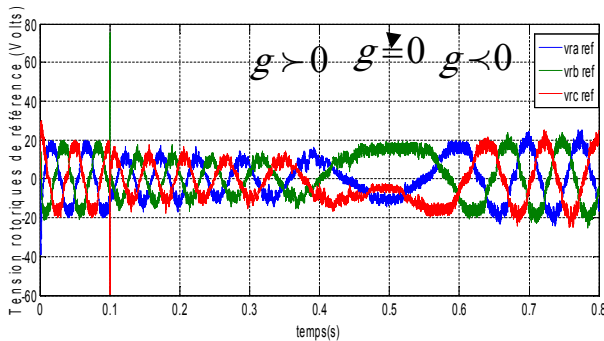
La MADA démarre à vide (sans charge) puis à l'instant $t=0.1s$ on lui associe une charge triphasée purement résistive de 1KW c.à.d., avec $V_{seff} = 220 Volts$, une résistance $R=145.2 \Omega$ par phase. Les résultats obtenus sont montrés ci-dessous :



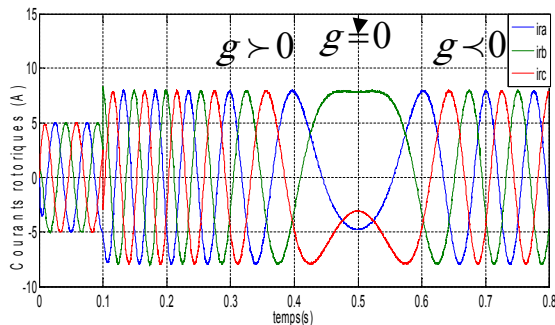
(a) Les composantes directe V_{sd} et en quadrature V_{sq} de la tension statorique



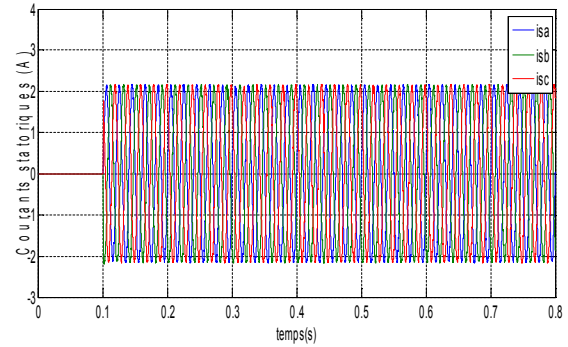
(b) Les tensions statoriques



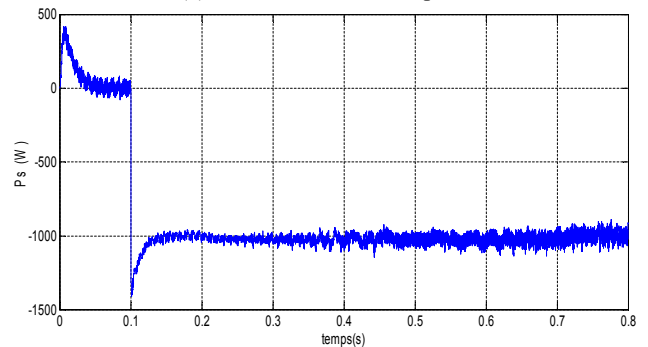
(c) Les tensions rotoriques



(d) Les courants rotoriques



(e) Les courants statoriques



(f) La puissance active statorique

Fig. 8. Résultats de simulation de la structure de commande de la MADA dans le mode iloté

D. Interprétation des résultats:

- On remarque l'aptitude de la régulation à garder la tension statorique à une valeur efficace de 220 Volts et une fréquence de 50Hz même lors de la variation de la charge ou de la vitesse d'entraînement.

- L'application de la charge se traduit par une brusque variation de la tension statorique puis cette dernière revient à sa valeur de référence imposée.

- L'amplitude des tensions rotoriques diminue avec la diminution de la valeur absolue du glissement selon la relation $Vr = m.g.Vs$ avec m : rapport de transformation de la machine

- La fréquence des tensions et des courants rotoriques change selon la relation $f_r = g.f_s$.

- L'application de la charge est accompagnée par une augmentation de l'amplitude des courants statoriques et, par conséquence, ceux rotoriques.

- L'amplitude des courants rotoriques ne dépend pas de la vitesse d'entraînement de la machine mais seulement de la charge.

V. LA REALISATION EXPERIMENTALE

Le banc d'essai réalisé consiste en une chaîne expérimentale de conversion de l'énergie éolienne. L'émulateur de la turbine éolienne est réalisé puis, sur cet émulateur est associée une machine asynchrone à rotor bobiné (MADA).

En utilisant la carte d'évaluation eZdsp F2812 ([6], [7]), on implémente un algorithme qui permet de fixer la fréquence des tensions au stator de la MADA à 50Hz quelque soit sa vitesse d'entraînement.

En effet, l'algorithme est établi sous forme d'un modèle Simulink ; La compilation de ce modèle génère le code C correspondant .Ce dernier est en suite chargé et exécuté sur la carte DSP.

La carte DSP délivre les signaux PWM qu'on applique sur l'onduleur à 2 niveaux alimentant le rotor de la MADA. Cette dernière est entraînée par l'émulateur à une vitesse variable selon un profil de vent donné [8]. On relève ainsi les tensions au stator de la MADA branchée sur une charge isolée.

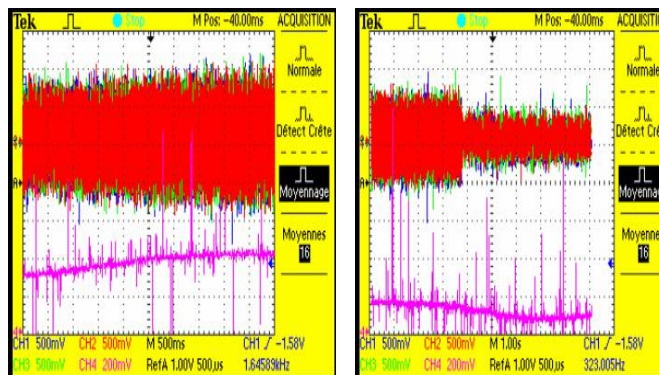


Fig. 9. Les tensions statoriques et la vitesse de rotation de la MADA entraînée par l'émulateur

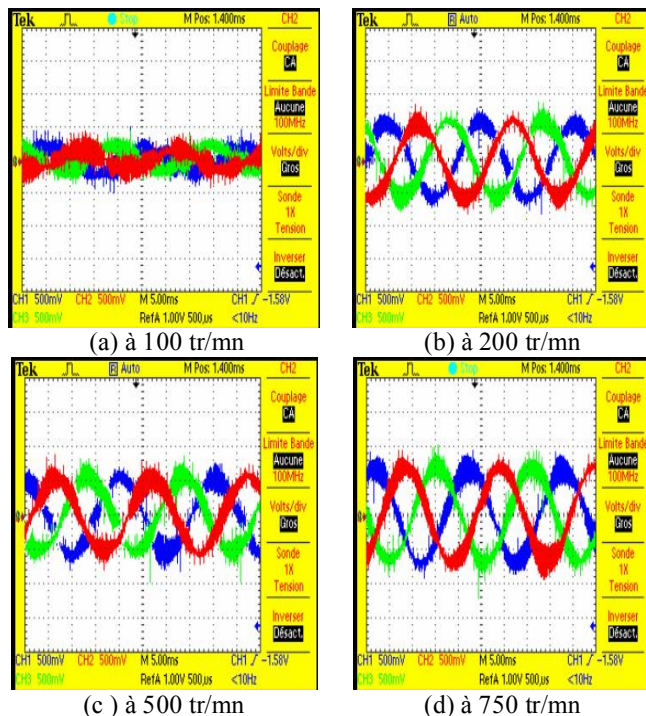


Fig. 10. Les tensions statoriques de la MADA pour différentes vitesses de rotation de l'ensemble « MADA – Emulateur ».

Les allures des tensions statoriques obtenues indiquent que la fréquence de ces dernières est égale à 50 Hz quelque soit la vitesse d'entraînement ; ce qui permet de valider l'algorithme utilisé et le modèle Simulink établi.

On remarque que l'amplitude des tensions statoriques augmente avec l'augmentation de la vitesse de rotation et vis versa.

VI. CONCLUSION

Dans cet article, on a étudié les structures de commande permettant de contrôler indépendamment les puissances active et réactive statoriques de la MADA dans le cas où elle est connectée au réseau ou sur une charge isolée.

Les résultats de simulation obtenus permettent de valider les stratégies de commande étudiées et mettent en évidence la possibilité de piloter la MADA par son rotor afin de contrôler les puissances à son stator.

Les résultats de l'implémentation de l'algorithme permettant de fixer la fréquence des tensions au stator de la MADA nous ont permis de valider le modèle Simulink établi.

REFERENCES

- [1] <http://www.worldenergy.org>
- [2] S. EL AIMANI, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension. », Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille et Université de sciences et technologies de Lille, Décembre 2004.
- [3] P. E. VIDAL, « Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation », Thèse doctorat, L'Institut National Polytechnique de Toulouse, Décembre 2004.
- [4] A. BOYETTE, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I, Décembre 2006.
- [5] F. KHATOUNIAN' et al, « Control of a Doubly Fed Induction Generator for Aircraft Application », *Records of IEEE IECON 2003*, Roanoke, USA, 2003, pp. 20711-2016.
- [6] The MathWorks, Inc., « Link for Code Composer Studio™ 3, User's Guide », 2007.
- [7] The MathWorks, Inc., « Embedded Target for the TI TMS320C2000™ DSP Platform For Use with Simulink, User's Guide », 2003.
- [8] F. AKEL, « Etude et réalisation d'un émulateur de turbine éolienne », Mémoire de Magister, Ecole Militaire Polytechnique, Mars 2009.