

## COMMANDE VECTORIELLE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTÉ PAR DOUBLE ORIENTATION DES FLUX

Reçu le 06/01/2004 – Accepté le 31/12/2004

### Résumé

Dans ce papier, les auteurs proposent une commande vectorielle destinée pour un moteur asynchrone double alimenté. La double orientation des flux, respectivement du stator et du rotor, permet de disposer d'une commande linéaire et découplée offrant un couple optimal. Les résultats de simulation obtenus montrent la faisabilité et l'efficacité de la méthode proposée permettant d'outrepasser les problèmes de stabilité en boucle ouverte inhérents à ce mode d'alimentation de la machine asynchrone à rotor bobiné.

**Mots clés:** Machine asynchrone double alimentée (MADA), Rotor bobiné, Commande vectorielle, Orientation du flux.

### Abstract

In this paper, the authors propose a vector control intended for an induction motor in double fed. Double flux orientation, respectively of the stator and the rotor, allowing to have a linear and decoupled control with an optimal torque. The obtained simulation resulted show the feasibility and the effectiveness of the suggested method which may be avoid open loop stability problems inherent of this mode of power supplying of asynchronous wound rotor machine.

**Keywords:** Double fed induction machine (DFIM), Wound rotor, Vector control, Field orientation.

S. DRID

M.S. NAIT-SAID

Laboratory Electrical

Engineering Department

University of Batna (Algeria)

M. TADJINE

Process Control Laboratory

Electrical Engineering Department

ENP Alger, 10 Av. Hassen Badi

BP182, Alger (Algeria)

Dans certains pays industriels, les pompes et les ventilateurs peuvent consommer jusqu'à 50% de l'énergie électrique installée [1]. Les pompes sont employées dans le traitement des eaux usées pour l'approvisionnement en eau potable, dans les grands circuits de refroidissement industriels, dans les ventilateurs pour l'aération et l'extraction des vapeurs des tunnels, etc. Les puissances mises en jeu sont assez grandes et allant dans le sens de justifier l'emploi des entraînements à vitesse variable par le moteur asynchrone double alimenté (MADA). Ce qui permet de réaliser une meilleure maîtrise des transferts des puissances avec un rendement nettement amélioré [1-3]. Cette solution MADA semble être la plus indiquée pour les applications où le couple résistant est proportionnel au carré de la vitesse (pompes et ventilateurs) [1-5]. L'accessibilité au stator et au rotor permet plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance avec toutes les possibilités de récupération d'énergie [6-9].

Il est bien établi que la commande vectorielle par orientation du flux de la machine asynchrone rotor à cage présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable. Cette solution demeure aussi attractive pour le cas de la machine asynchrone double alimentée aussi bien en fonctionnement générateur que moteur. En fonctionnement générateur, elle convient mieux pour la génération de l'énergie à fréquence constante avec entraînement à vitesse variable (éoliennes). Un des avantages de la double alimentation est que le circuit du rotor peut être piloté par un convertisseur de fréquence de puissance relativement faible par rapport au stator. Ainsi, au niveau du rotor, un convertisseur de haute commutation pourra être employé afin de réaliser de hautes performances dynamiques en terme de temps de réponse, de minimisation harmonique et d'amélioration des rendements. La stabilité naturelle de la machine asynchrone conventionnelle (une seule excitation), en l'occurrence la machine à cage, est garantie par la relation fondamentale de l'autopilotage réalisant l'asservissement de la

### ملخص

في هذا المقال، يقترح المؤلفون تحكما شعاعيا لمحرك لامتزامن مضاعف التغذية.

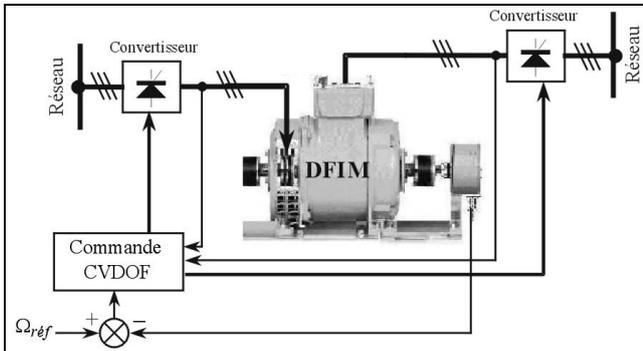
التوجيه المضاعف للتدفق، على التوالي للعضو الساكن والعضو الدوار، يسمح بالتحصل على تحكم خطي وغير مرتبط مانحا بذلك عزما أقصى.

نتائج المحاكات المتحصل عليها تبين إمكانية التطبيق وفعالية الطريقة المقترحة مما يسمح بتخطي مشاكل الاستقرار للحلقة المفتوحة تلازما مع هذا النوع من التغذية لآلة لامتزامن بعضو دوار ملفوف.

**الكلمات المفتاحية:** محرك لامتزامن مضاعف التغذية، دوار ملفوف، توجيه مضاعف للتدفق.

vitesse par la fréquence du stator. Par conséquent, les deux forces magnétomotrices (fmm's) du stator et du rotor deviennent synchronisées. En double excitation, la rotation des fmm's deviennent fonction des fréquences imposées par les deux sources d'alimentation externes; de ce fait, une certaine synchronisation entre eux est exigée afin de garantir une stabilité à la machine. Par analogie, on est donc en présence du problème de stabilité de la machine synchrone. En effet, les fréquences imposées par les deux sources externes confèrent à la machine asynchrone double alimentée une vitesse constante comme le cas de la machine synchrone. Par conséquent, sans le recours au contrôle strict de la position relative entre fmm's, le risque d'instabilité et de décrochage devient imminent [10].

Pour solutionner ce problème, plusieurs stratégies ont été proposées; parmi elles, celles établies sur le principe conventionnel de l'orientation du flux avec contrôle découplé des puissances active et réactive du côté du stator [1,8,9]. Dans le présent article, il sera proposé une loi de commande pour la MADA basée sur la double orientation des flux du stator et du rotor en leur imposant une orthogonalité entre eux pour disposer d'une commande linéaire et découplée du modèle de la machine, donné dans sa plus simple expression avec un couple optimal. Cette commande est appelée par nos soins *commande vectorielle par double orientation des flux*, ou CVDOF. Elle sera établie par le modèle de la machine exprimé par le vecteur d'état tout flux. L'accessibilité à la mesure des courants des deux armatures conduit à reconstituer un estimateur simple des flux suffisamment robuste du moment que la saturation de la machine est contrôlée à son niveau nominal. La figure 1 représente le schéma de l'ensemble convertisseurs machine commandé par la CVDOF.



**Figure 1:** Schéma de l'ensemble convertisseurs machine asynchrone commandé par la CVDOF.

## 1- MODELE DE LA MACHINE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTEE

Son modèle dynamique exprimé dans le référentiel synchrone est donné par :

\* Les équations des tensions :

$$\begin{cases} \bar{u}_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\phi}_s}{dt} + j\omega_s \bar{\phi}_s \\ \bar{u}_r = R_r \bar{i}_r + \frac{d\bar{\phi}_r}{dt} + j\omega_r \bar{\phi}_r \end{cases} \quad (1)$$

\* Les équations des flux :

$$\begin{cases} \bar{\phi}_s = L_s \bar{i}_s + M \bar{i}_r \\ \bar{\phi}_r = L_r \bar{i}_r + M \bar{i}_s \end{cases} \quad (2)$$

De (1) et (2), le modèle d'état tout flux s'écrit

$$\begin{cases} \bar{u}_s = \frac{1}{\sigma T_s} \bar{\phi}_s - \frac{M}{\sigma T_s L_r} \bar{\phi}_r + \frac{d\bar{\phi}_s}{dt} + j\omega_s \bar{\phi}_s \\ \bar{u}_r = -\frac{M}{\sigma T_r L_s} \bar{\phi}_s + \frac{1}{\sigma T_r} \bar{\phi}_r + \frac{d\bar{\phi}_r}{dt} + j\omega_r \bar{\phi}_r \end{cases} \quad (3)$$

Le couple électromagnétique sera donc,

$$C_{el} = \frac{PM}{\sigma L_s L_r} \Im m [\bar{\phi}_s \bar{\phi}_r^*] \quad (4)$$

L'équation de mouvement associé au couple électromagnétique est :

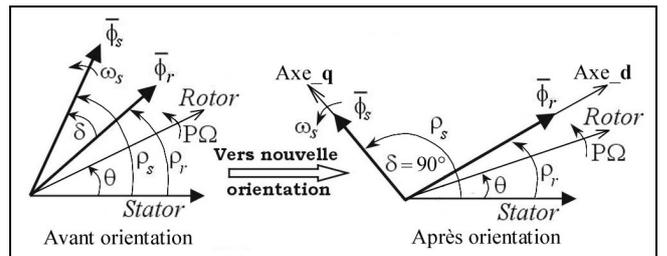
$$C_{el} - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (5)$$

## 2- COMMANDE VECTORIELLE PAR DOUBLE ORIENTATION DES FLUX

### 2.1- La double orientation du champ statorique et rotorique

Cette technique consiste à orienter en même temps le flux statorique et le flux rotorique comme indiqué dans la figure 2. Ainsi, il en découle les contraintes données par la formulation (6). Le flux rotorique sera porté sur l'axe direct,  $d$ , alors que le flux statorique sera porté sur l'axe en quadrature,  $q$ . L'angle  $\delta$ , signifiant l'angle de charge par analogie au cas de la machine synchrone, sera donc de  $90^\circ$  et par conséquent les deux flux deviennent orthogonaux.

$$\begin{cases} \phi_{sq} = \phi_s \\ \phi_{rd} = \phi_r \\ \phi_{sd} = \phi_{rq} = 0 \end{cases} \quad (6)$$



**Figure 2:** Diagramme vectoriel de la machine asynchrone double alimentée.

Par les contraintes (6), les équations (3) et (4) seront reformulées comme suit :

$$\begin{cases} u_{sd} = -\frac{M}{\sigma T_s L_r} \phi_r - \omega_s \phi_s \\ u_{sq} = \frac{1}{\sigma T_s} \phi_s + \frac{d\phi_s}{dt} \\ u_{rd} = \frac{1}{\sigma T_r} \phi_r + \frac{d\phi_r}{dt} \\ u_{rq} = -\frac{M}{\sigma T_r L_s} \phi_s + \omega_r \phi_r \end{cases} \quad (7)$$

L'expression du couple devient donc

$$C_{el} = k_c \phi_s \phi_r. \quad (8)$$

$$\text{avec, } k_c = \frac{PM}{\sigma L_s L_r}$$

## 2.2- Schéma bloc de la CVDOF

La seconde et la troisième équation du système (7) montrent que le modèle de la machine devient un modèle linéaire exprimé par un simple système du premier ordre où les flux du stator et du rotor sont respectivement contrôlés par les composantes des tensions en quadrature pour le stator et directe pour le rotor. Cela permet d'écrire les fonctions de transfert représentatives suivantes :

$$\begin{cases} \frac{\phi_s}{u_{sq}} = \frac{\sigma T_s}{(1 + \sigma T_s \cdot p)} \\ \frac{\phi_r}{u_{rd}} = \frac{\sigma T_r}{(1 + \sigma T_r \cdot p)} \end{cases} \quad (9)$$

avec  $p = \frac{d}{dt}$  (opérateur de Laplace).

La restriction au seul modèle donné par les expressions (9), laisse entendre que les relations rigides (non différentielles) de la première et de la quatrième du système (7) pourront constituer des estimateurs des fréquences statoriques et rotoriques, donc de la vitesse à partir des flux, si les composantes des tensions directe pour le stator et en quadrature pour le rotor seront mises à zéro.

$$u_{sd} = u_{rq} = 0 \quad (10)$$

En outre, la dynamique des flux sera référée à celle des fonctions de transferts (9) et, par la même, à leurs contrôles respectifs. Ainsi, le modèle linéaire équivalent de la machine asynchrone en mode double alimenté, selon la stratégie de la double orientation des flux, peut être représenté par le schéma fonctionnel donné dans le cadre en trait pointillé de la figure 3.

Dans cette même figure, des régulateurs PI sont utilisés pour pouvoir contrôler les flux  $\phi_s$ ,  $\phi_r$  et la vitesse  $\Omega$ . Dans la figure 4, un schéma d'implantation générale illustre la commande proposée.

## 2.3- Estimation de $\phi_s$ , $\phi_r$ et Contrôle de $\delta$

Du fait que les courants soient mesurables, l'estimation des flux devient plus simple d'après l'équation (2). La figure 5 illustre le schéma d'estimation des vecteurs flux

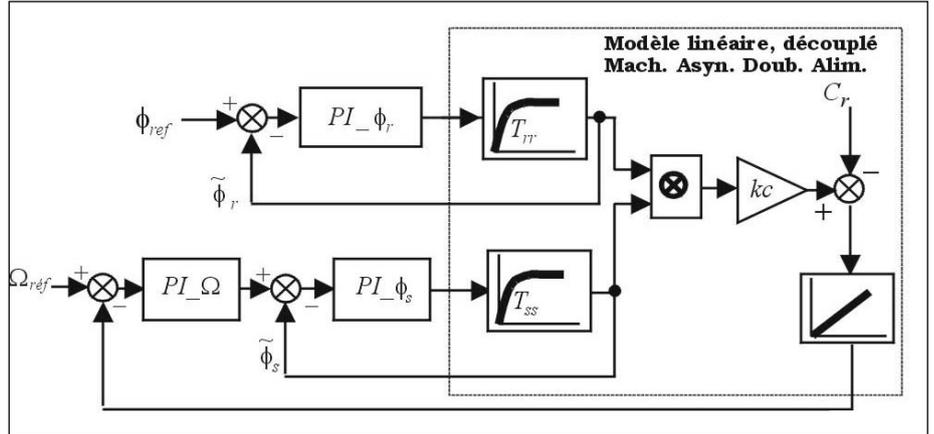


Figure 3: Schéma fonctionnel du modèle linéaire équivalent de la CVDOF.

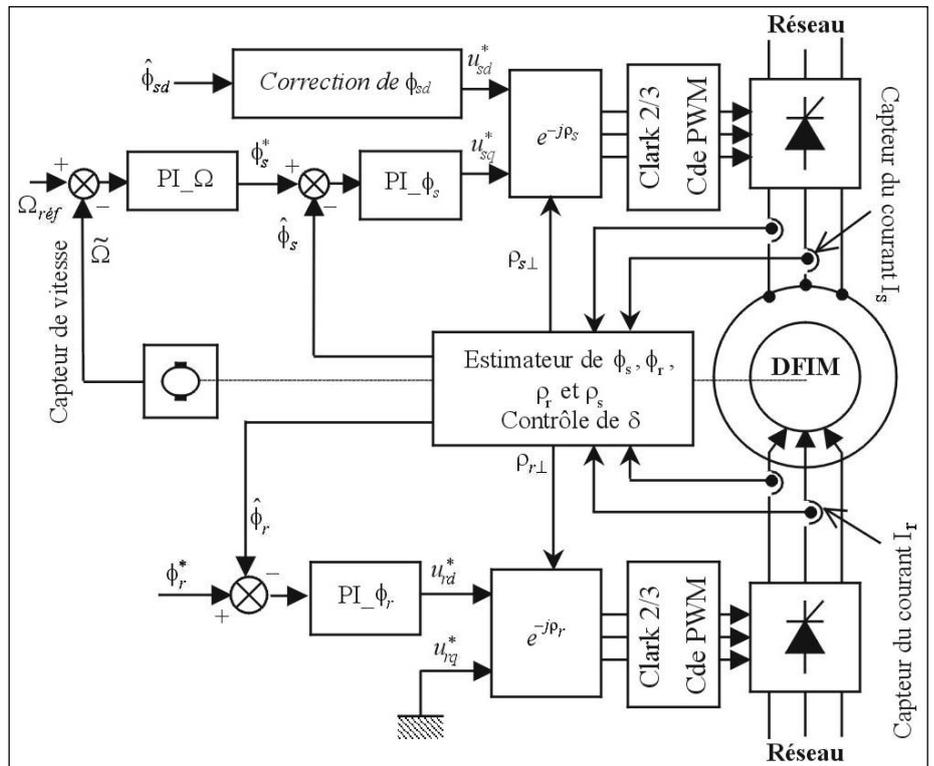
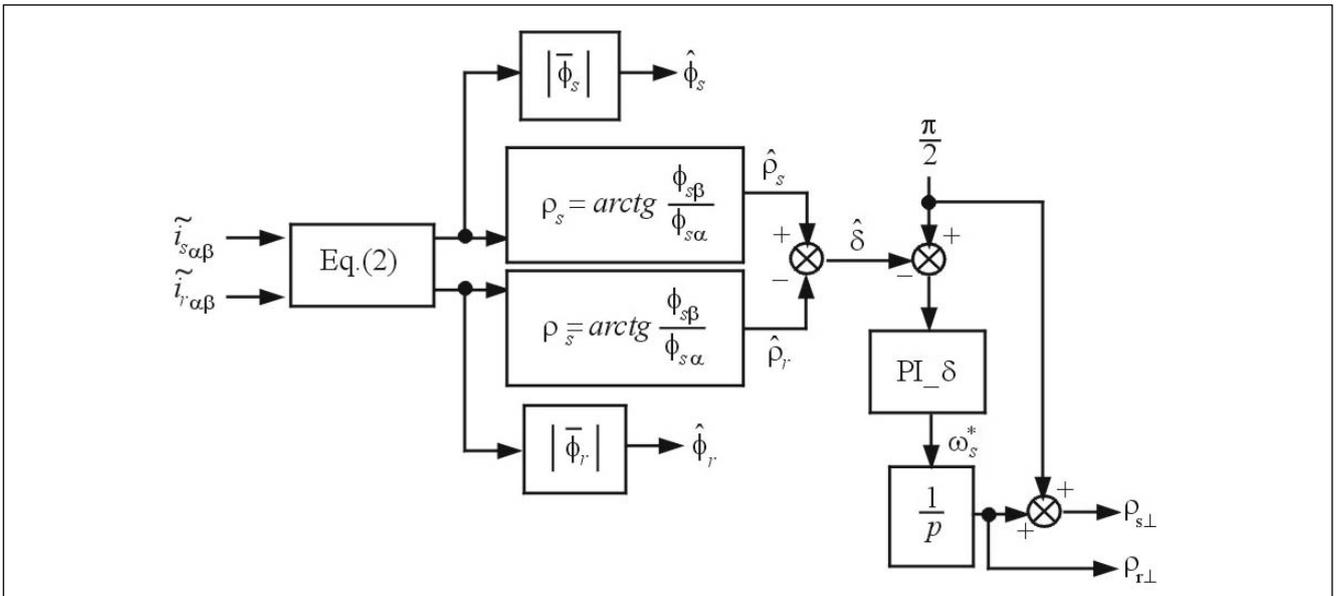
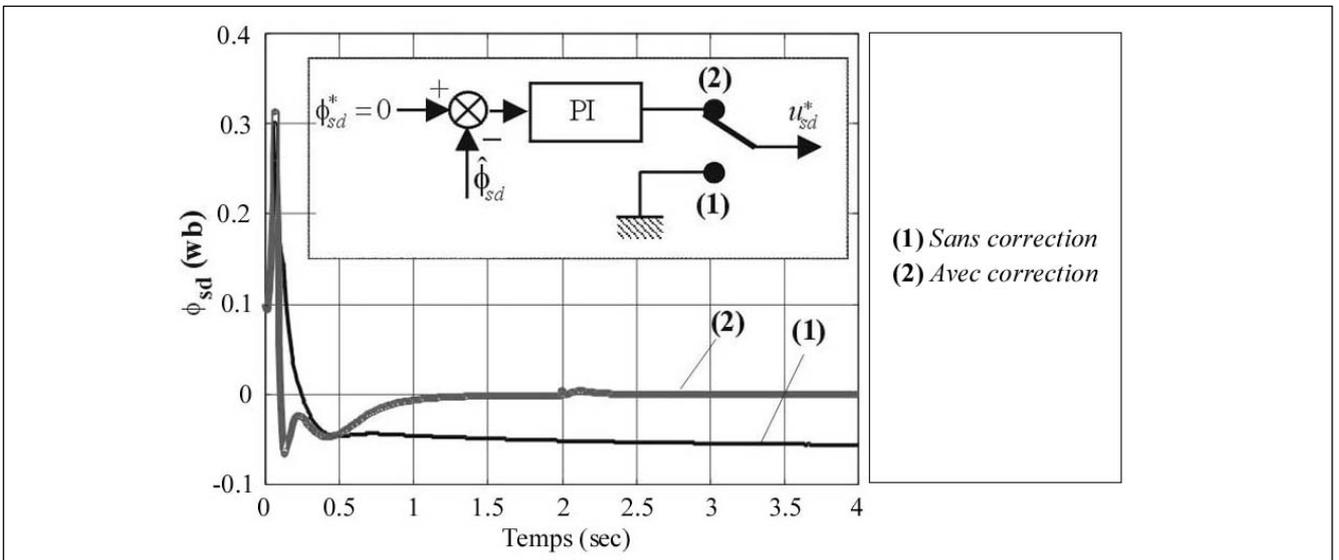


Figure 4: Schéma d'implantation générale de la CVDOF.

avec la détermination exacte de leur position, comme il sera expliqué dans ce qui suit. Pour avoir un découplage parfait, l'angle de charge doit être égale à  $\pi/2$ . Celui-ci pourra être déterminé sur la base de la connaissance des positions absolues des flux  $\rho_r$  et  $\rho_s$  déduites de la détermination des vecteurs flux selon l'équation (2), restant valable quel que soit le référentiel considéré. Dès lors, son évolution dans le temps pourra indiquer l'orthogonalité entre les deux flux. Nous avons constaté, par simulation, illustrée par la figure 6, que les contraintes imposées de la double orientation des flux en addition des contraintes de la nullité des composantes des tensions par la contrainte (10), ne permettent pas toutefois d'assurer une orthogonalité stricte des flux. En utilisant l'angle estimé  $\hat{\delta}$  comme variable de retour, il est possible de la forcer à suivre la valeur désirée  $\pi/2$ . Pour cette fin, on utilise un régulateur PI à très faible



**Figure 5:** Estimation de  $\phi_s$ ,  $\phi_r$  et contrôle de  $\delta$  par PI.



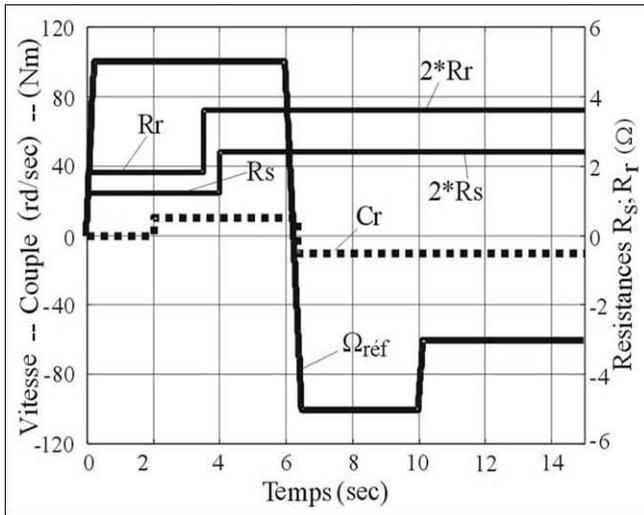
**Figure 6:** Illustration de la correction du flux  $\phi_{sd}$ .

dosage intégral dont la sortie produit la pulsation  $\omega_s$  qui, par une simple intégration, donne l'angle d'orientation  $\rho_{s\perp}$  du flux statorique  $\phi_s$ . L'angle absolu du rotor  $\rho_{r\perp}$  sera déterminé par simple addition de la valeur  $\pi/2$  comme illustré dans la figure 5. Une configuration similaire a été proposée dans [11] pour l'asservissement de l'angle  $\delta$  dans laquelle, à la place du PI, employé dans ce travail, un oscillateur commandé en tension ou VCO (*Voltage Controlled Oscillator*) avec un fort gain, a été utilisé. Après simulation de l'ensemble commande machine, on a été confronté au problème de perte du découplage du flux statorique ( $\phi_{sd} \neq 0$ ). Cependant, un simple régulateur PI a permis de solutionner ce problème comme illustré dans la figure 6. En effet, la composante du flux statorique directe est asservie à une référence nulle.

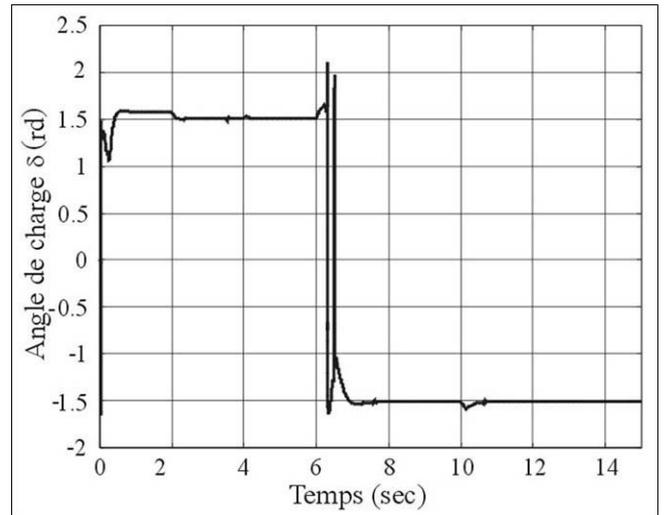
### 3- SIMULATION

Les paramètres de la machine asynchrone sous test ainsi que les coefficients des PI utilisés sont donnés en appendice. Par souci de valider notre approche, les simulations numériques seront à la fois réalisées sur le modèle linéaire équivalent, défini par la figure 3, et sur le modèle complet en modélisation plus exacte donné par la figure 4. Nous supposons avoir un cahier des charges pour réaliser les profils de références, comme illustrés par la figure 7. Ainsi, les résultats obtenus sont organisés respectivement selon le cahier des charges suivants : après 2 seconde du démarrage à vide du moteur, une charge de 10mN est appliquée; à 3.5 secondes et 4 secondes, une augmentation de 100%, respectivement sur les résistances rotorique et statorique, est appliquée. Un test d'inversion du sens de rotation est réalisé à la sixième seconde de 100rd/s à -100rd/s, et enfin une réduction à -50 (rd/s) à 10 seconde.

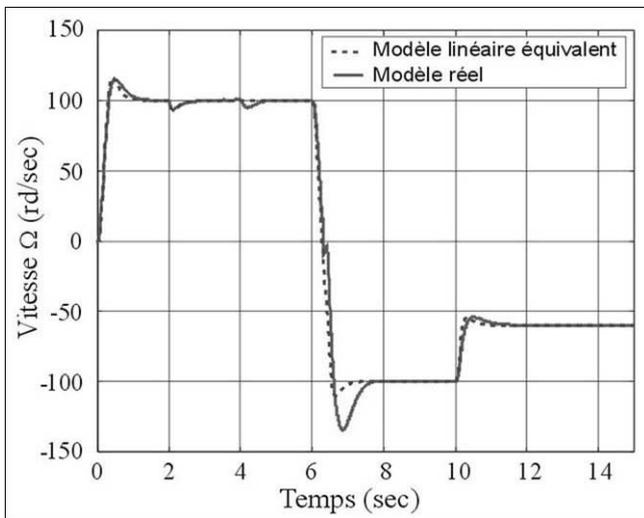
### 3.1- Tests



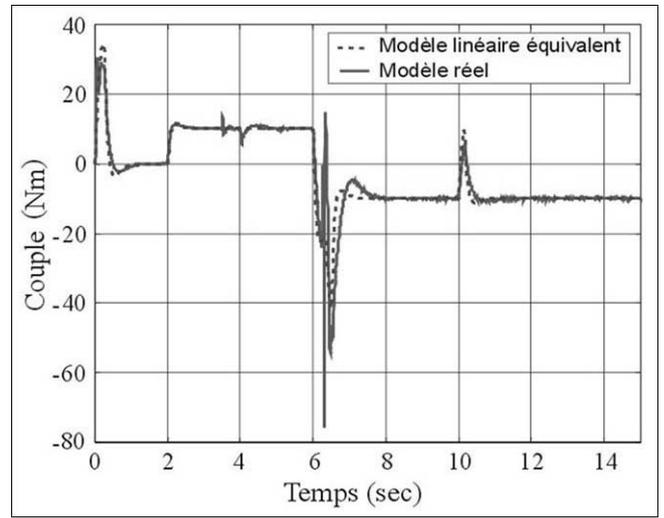
**Figure 7:** Tests, Profils des Réf.



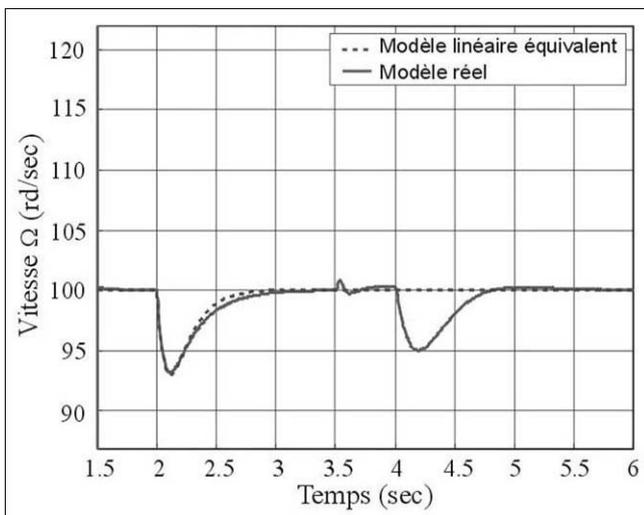
**Figure 8:** Angle de charge-temps.



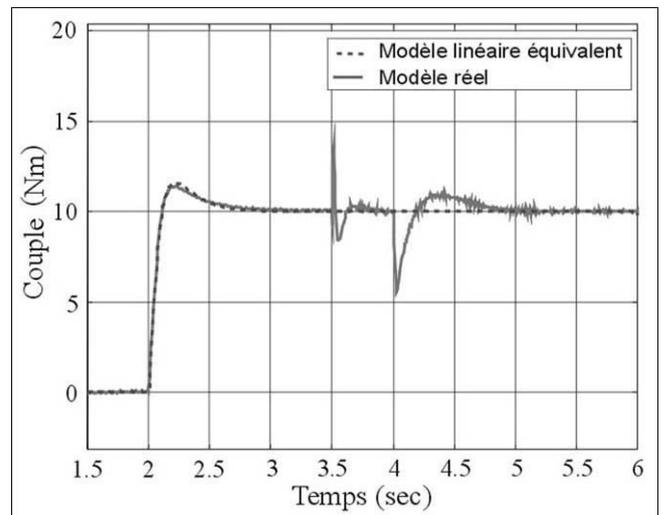
**Figure 9:** Vitesse de rotation-temps.



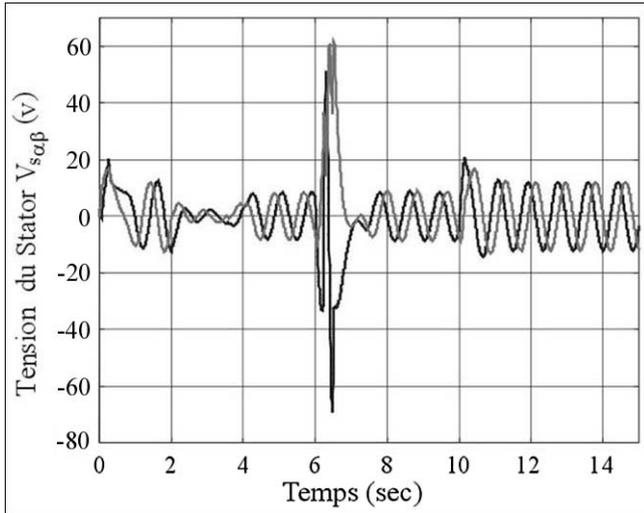
**Figure 10:** Couple-temps.



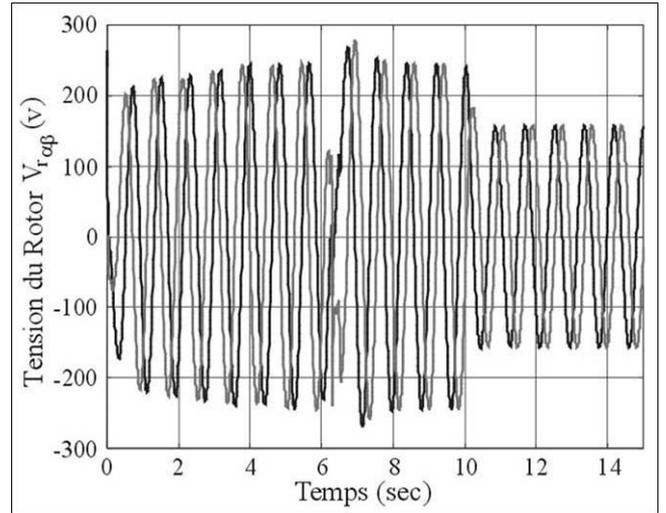
**Figure 11:** Zoom vitesse de rotation-temps (Effet des résistances  $R_s$ ,  $R_r$ ).



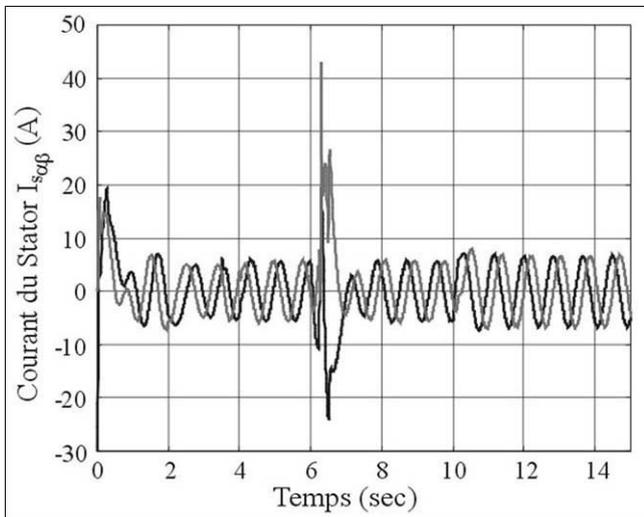
**Figure 12:** Zoom couple-temps (Effet des résistances  $R_s$ ,  $R_r$ ).



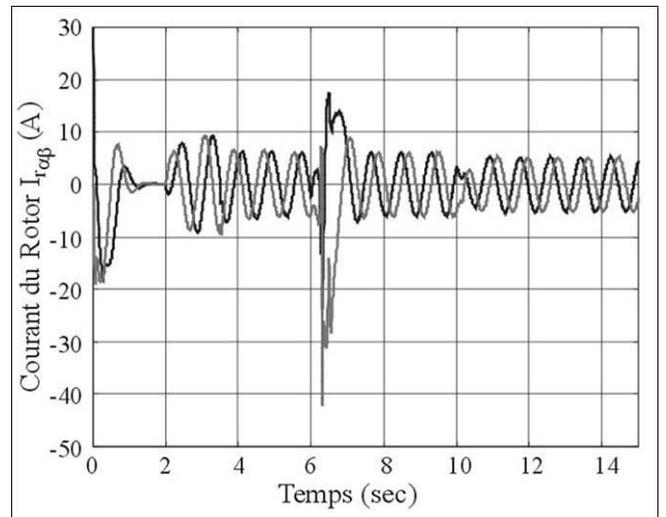
**Figure 13:** Tension de commande du stator–temps rapporté au réf ( $\alpha,\beta$ ).



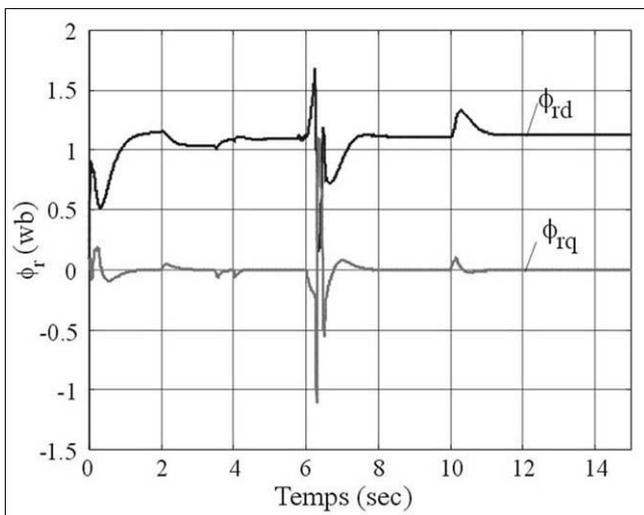
**Figure 14:** Tension de commande du rotor–temps rapporté au réf ( $\alpha,\beta$ ).



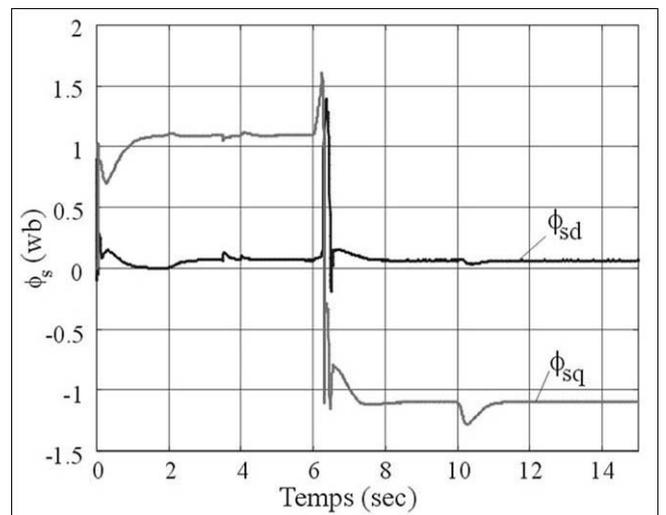
**Figure 15:** Courant du stator–temps rapporté au réf ( $\alpha,\beta$ ).



**Figure 16:** Courant du rotor–temps rapporté au réf ( $\alpha,\beta$ ).



**Figure 17:** Flux rotorique–temps.



**Figure 18:** Flux statorique–temps.

### 3.2- Interprétation

Les résultats de simulations de la commande proposée pour le pilotage d'un moteur asynchrone en mode double alimenté montrent clairement l'obtention des performances satisfaisantes exigées selon les profils des références du cahier des charges (Fig. 7). La figure 8 montrent bien la préservation de l'orthogonalité de l'angle de charge, et par la même celle des flux. Comme l'on remarque qu'il y a une nette convergence entre les modèles linéaires équivalents et celui donné en modélisation réelle, ce qui est illustré par la figure 9 pour la vitesse avec un bon rejet des perturbations dues à la variation de la charge, et par la figure 10 pour le couple. La variation des résistances n'a pas un effet notable sur la commande (voir les figures 11 et 12). Les tensions de commande illustrées par les figures 13 et 14 sont dans les limites tolérées par la machine (autour du nominal). De forts appels de courants apparaissant lors de l'inversion de la vitesse telles que montrées par les figures 15 et 16. Ces forts appels sont dus au passage du flux  $\phi_r$  par zéro, ce qui risque de déstabiliser le moteur; la quatrième équation du système (7) peut être écrite comme suit :

$$\omega_r = \frac{M \phi_s}{\sigma T_r L_s \phi_r} \quad (11)$$

Pour éviter cette situation à la machine, l'inversion du sens de rotation doit être assez douce, telle que indiquée sur la figure 7. Nous pensons toujours qu'un minimum de magnétisation sera assuré par le flux  $\phi_s$ . Les figures 17 et 18, représentant les composantes du flux dans le référentiel synchrone, montrent le maintien du découplage. Notons bien que cette commande ne fait pas saturer la machine, ce qui est bien indiqué par l'évolution des deux flux.

### CONCLUSION

Malgré la présence des contacts frottants (bagues-balais), l'accessibilité au rotor et au stator est l'un des avantages de la machine asynchrone en mode double alimenté, offrant plus de commodité pour l'identification des paramètres du rotor et pour la mesure directe du courant rotorique, et par conséquent, conduisant à une estimation simple des flux. L'application de la commande proposée a montré, à travers les différents résultats de simulation, des performances intéressantes. Le contrôle des flux a permis non seulement de commander la machine en couple dans sa plus simple expression (machine idéale), mais aussi de rester à un niveau de saturation acceptable. En regard d'une commande linéaire facilement implantable, l'inconvénient de la CVDOF reste l'usage de deux convertisseurs, ce qui pourrait être conventionnellement justifié par le coût de l'application et par les puissances mises en jeu.

### NOTATIONS

$s, r$  : Indice du rotor, du stator.  
 $d, q$  : Indice des composantes orthogonales directe, quadrature,  
 $\bar{x}$  : Grandeur complexe tel que :  $\bar{x} = x_d + jx_q$  où  $j = \sqrt{-1}$ ,  
 $\bar{x}$  : peut être tension  $\bar{u}$ , courant  $\bar{i}$  ou flux  $\bar{\phi}$ ,  
 $\bar{x}^*$  : Complexe conjugué,  
 $R_s, R_r$  : Résistance statorique, rotorique,

$L_s, L_r$  : Inductance cyclique propre statorique, rotorique,  
 $T_s, T_r$  : Constante de temps statorique, rotorique ( $T_s r = L_s, r / R_s, r$ ),  
 $\sigma$  : Coefficient de dispersion total,  
 $M$  : Inductance cyclique mutuelle stator-rotor,  
 $\theta$  : Position absolue du rotor,  
 $\delta$  : Angle de charge,  
 $\rho_s, \rho_r$  : Angle de repérage absolue du flux stator, rotor,  
 $\Omega$  : Vitesse du rotor,  
 $\omega_s$  : Pulsation des courants statoriques,  
 $\omega_r$  : Pulsation des courants rotoriques,  
 $P$  : Nombre de paires de pôles,  
 $J$  : Moment d'inertie,  
 $C_r$  : Couple résistant,  
 $C_{el}$  : Couple électromagnétique,  
 $réf$  : Indice indiquant la référence (la consigne),  
 $\sim$  : Symbole indiquant la mesure,  
 $\wedge$  : Symbole indiquant l'estimation,  
 $*$  : Symbole indiquant la commande,  
 $\perp$  : Symbole indiquant l'orthogonalité vraie entre les flux.

### APPENDICE

#### 1. Données du moteur à induction à rotor bobiné

Puissance nominale :	4 kW
Tension nominale:	( $\Delta/Y$ ) ; (220/380) V
Courant nominal:	( $\Delta/Y$ ) ; (15/8.6) A
Vitesse nominale:	1440 tr/min
Fréquence:	50 Hz

Résistance statorique:	$R_s = 1.2 \Omega$
Résistance rotorique:	$R_r = 1.8 \Omega$
Inductance statorique:	$L_s = 0.1554 H$
Inductance rotorique:	$L_r = 0.1568 H$
Inductance Mutuel:	$M = 0.15 H$
Inertie du rotor:	$J = 0.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
Coefficient de frottement :	$f = 0.00 \text{ I.S}$

#### 2. Paramètres des Régulateurs

$$PI_{-\phi_s} : \begin{cases} k_p = 3.75 \\ k_i = 0.1 \end{cases}$$

$$PI_{-\phi_r} : \begin{cases} k_p = 240 \\ k_i = 150 \end{cases}$$

$$PI_{-\Omega} : \begin{cases} k_p = 0.18 \\ k_i = 0.72 \end{cases}$$

### REFERENCES

- [1]- Leonhard W., "Control Electrical", Springer Verlag Berlin Heidelberg, Printed in Germany (1985).
- [2]- O'Kelly D., "Performance and Control Electrical Machines", Mc GRAW HILL Books Company, Printed in Great Britain, University Press, Cambridge (1991).
- [3]- Bose B.K., "Power Electronics and AC Drives", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey (1987).
- [4]- Hirofumi A. and Hikaru S., "Control and Performance of a Doubly-Fed Induction Machine Intended for a Flywheel

- Energy Storage System", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.17, N°1, January (2002), pp. 109-116.
- [5]- Michael S. Vicatos, and John A. Tegopoulos, "A Doubly-Fed Induction Machine Differential Drive Model for Automobiles", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol.18, N°2, June (2003), pp. 225-230.
- [6]- Wang S. and Ding Y., "Stability Analysis of Field Oriented doubly Fed induction Machine drive Based on Computed Simulation", *Electrical Machines and Power Systems* (Taylor & Francis), (1993).
- [7]- Djurovic M. *et al.*, "Double Fed Induction Generator with Two Pair of Poles", *Conferences of Electrical Machines and Drives*, (IEMDC ), 11-13 September 1995, *Conference Publication*, N°412 IEE (1995).
- [8]- Kelber C., Schumacher W., "Adjustable Speed Constant Frequency Energy Generation with Doubly Fed Induction Machines", European Conference of Variable Speed in Small Hydro (*VSSH<sub>y</sub>*), Grenoble (2000).
- [9]- Kelber C., Schumacher W., "Control of Doubly fed induction Machine as an Adjustable Motor/Generator", European Conference of Variable Speed in Small Hydro (*VSSH<sub>y</sub>*), Grenoble (2000).
- [10]- Drid S. Nait-Said M-S. and Tadjine M., "The Doubly Fed Induction Machine Modeling In The Separate Reference Frames", *Journal of Electrical Engineering, JEE*. Vol.4, N°1, (2004), pp. 11-16.
- [11]- Long ya Xu, Wei Cheng, "Torque and Reactive Power control of a Doubly Fed Induction Machine by Position Sensorless Scheme", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, N°3, May/June (1995), pp. 636-642. □