

COMMANDE DIRECTE DU COUPLE ET COMMANDE VECTORIELLE DE LA MACHINE ASYNCHRONE

LAMIA YOUB¹, AURELIAN CRĂCIUNESCU²

Mots-clé: Machine asynchrone, Commande vectorielle directe, Commande directe du couple.

Dans cet article, nous allons procéder à une comparaison entre les performances des deux techniques de commande: la commande directe du couple (DTC) et la commande à flux orienté (DFOC) en régimes dynamiques et statiques. En régime permanent, et pour des grandeurs de références, les ondulations du courant et du couple seront évaluées et comparées pour différentes valeurs de la vitesse et de la charge. En régime transitoire, le but attendu est d'évaluer la méthode qui donne la meilleure réponse dynamique (rapidité sans dépassement). Cette étude est faite pour des critères imposés, c'est-à-dire pour une même fréquence de commutation, même capteur de vitesse, donc la commande directe du couple est en boucle de vitesse fermée. La charge et la vitesse sont à valeurs nominales.

1. INTRODUCTION

La commande vectorielle a été introduite il y a longtemps, certaines polémiques donnent la paternité de cette théorie à Blondel. Les premiers développements théoriques de la méthode du flux orienté ont été réalisés au début des années 70 par Blaschke et ses applications effectives ont vu le jour grâce à Léonard dix ans plus tard [1]. Cependant, elle n'a pu être implantée et utilisée réellement qu'avec les avancées en micro-électronique. En effet, elle nécessite des calculs de transformé de Park, évaluation de fonctions trigonométriques, des intégrations, des régulations. Ce qui ne pouvait pas se faire en pure analogique, par ailleurs la commande vectorielle a pour objectif d'égaliser les performances qu'offre la commande d'une machine à courant continu à excitation séparée où le couple et le courant pour imposer un couple sont d'une façon indépendante. Les méthodes de contrôle direct de couple DTC (direct torque control) des machines asynchrones sont initiées dans la deuxième moitié des années 1980 par Takahashi et Depenbrock comme concurrentielles des méthodes classiques, basées sur une alimentation par modulation de largeur d'impulsions (MLI) et sur un découplage du

¹ "Politehnica" University of Bucharest, Electrical Engineering Faculty, youblamia@yahoo.fr

² "Politehnica" University of Bucharest, Electrical Engineering Faculty, aureliancraciunescu@yahoo.com

flux et du couple moteur par orientation du champ magnétique. Par opposition, ces deux stratégies de commande (commande vectorielle à flux orienté et la commande directe du couple) ont le même objectif que les machines à courant continu à excitation séparés où le courant et le flux sont naturellement découplés et peuvent être commandés indépendamment. La comparaison de ces deux techniques de contrôle est basée sur des divers critères comprenant les performances statiques et dynamiques de la caractéristique de contrôle de base. L'étude est faite par simulation en utilisant le Matlab/Simulink.

2. PRINCIPE DE LA COMMANDE À FLUX ROTORIQUE ORIENTÉ

Le principe de la commande vectorielle est d'arriver à commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu à excitation indépendante où il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux et celle commandant le courant. Notre objectif est d'orienter le flux. Donc on souhaite qu'il n'ait qu'une composante suivant l'axe d par exemple, il faut alors annuler la composante du flux Φ_{rq} suivant l'axe q . C'est bien le rôle de la commande par flux orienté, le couple électromagnétique se réduit à :

$$\Gamma_{em} = p \frac{M}{L_r} \Phi_{rd} i_{sq} \quad (1)$$

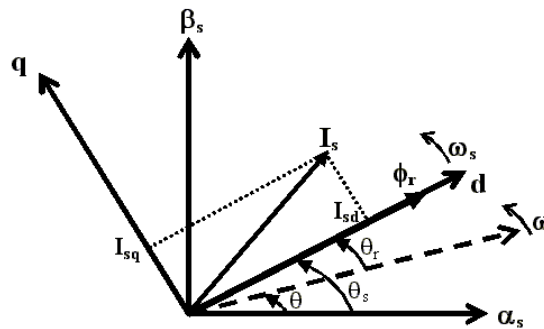


Fig. 1 – Flux rotorique orienté sur l'axe d .

D'après l'expression (1), la stratégie consiste à contrôler de façon indépendante le flux et le courant statorique pour imposer le couple. On a alors deux variables d'action comme dans le cas d'une machine à courant continu. Dans cette condition nous avons: $\Phi_{rd} = \Phi$ et $\Phi_{rq} = 0$. Seules les grandeurs statoriques sont accessibles, les grandeurs rotoriques, elles ne le sont pas, il faut donc pouvoir les estimer à partir des grandeurs statoriques. En conséquence, le

modèle de moteur à induction établi dans le domaine de flux rotorique orienté est alors donné comme suit :

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \Phi_{sd} - \omega_s \Phi_{sq}; \quad (2)$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \Phi_{sq} + \omega_s \Phi_{sd}; \quad (3)$$

$$0 = R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_r}{dt}; \quad (4)$$

$$0 = R_r i_{rq} + \omega_r \Phi_r. \quad (5)$$

En tenant compte de la condition : $\Phi_{rd} = \Phi$ et $\Phi_{rq} = 0$, la position du flux, sera instantanément donné par θ_s qui est la position instantanée (Fig.. 1) du référentiel (d,q) [1] par rapport au référentiel (α,β) . Elle est déterminée par :

$$\theta_s = \int_0^t \omega_s dt, \text{ with } \omega_s = p\omega + \hat{\omega}_r. \quad (6)$$

De ce fait, le flux Φ_{rd} peut être estimé ($\hat{\Phi}$) à partir du courant statorique mesuré i_{sd}

$$\hat{\Phi}_{rd} = \frac{M}{1 + T_r s} i_{sd}. \quad (7)$$

$\tilde{\omega}_r$, représente la valeur de la vitesse relative estimée, elle peut être déterminée à partir de l'équations (2) d'où :

$$\hat{\omega}_r = \frac{M}{T_r \hat{\Phi}_{rd}} i_{sq}. \quad (8)$$

3. DESCRIPTION DE LA COMMANDE VECTORIELLE DIRECTE

Pour la commande vectorielle directe elle nécessite une bonne connaissance du module du flux et de sa phase, [4]. Le vecteur flux est mesuré rarement directement par des capteurs. La réalisation pratique des capteurs est délicate (précision médiocre, filtrage du signal mesuré, coût élevé, ...). On a recours à des techniques d'estimations ou d'observations du flux à partir des grandeurs mesurables.

Dans la Fig. 2 se présente le schéma de principe de la commande vectorielle directe de la machine asynchrone. Elle comprend un onduleur de tension régulé en courant. La régulation des courants peut être par un régulateur linéaire ou par un régulateur non linéaire avec hysteresis. Il convient de rappeler que les trois courants de phase i_a , i_b , i_c ne sont pas indépendants dans la mesure où leur composante homopolaire est nulle.

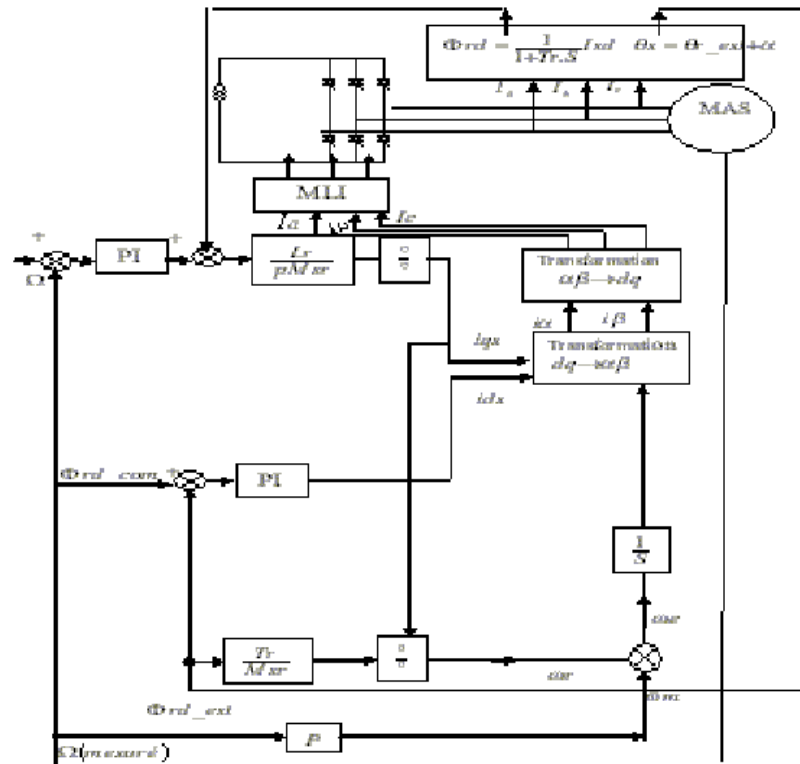


Fig 2 – Commande vectorielle directe d'une machine asynchrone.

Si les transformations du système d'axe fixes liés au stator $\alpha\beta$ au système d'axes dq lié au flux rotorique est parfait, le découplage entre le flux et le couple est également parfait et le flux ne subit aucune perturbation lors des variations du couple de charge de la machine.

On peut ainsi définir deux chaînes de régulation dans les axes d , q .

- l'une concernant le flux et le courant dans l'axe d ,
- l'autre concernant le couple et le courant dans l'axe q .

Le schéma de la Fig. 2 donne le principe de cette commande. Dans ce schéma de commande par orientation du flux rotorique, ce dernier peut être régulé. Il faut alors estimer ou plus rarement mesurer sa valeur. La précision et la robustesse (vis-à-vis des variations de paramètres) de l'estimateur de flux influent sensiblement sur les performances de cette méthode.

4. LA COMMANDE DIRECTE DU COUPLE DE LA MAS

Le principe de base de la commande directe du couple repose sur l'application d'un séquençement particulier des tensions via un onduleur dont les ondes sont générées à travers des comparateurs à hystérésis par lesquelles le flux et le couple sont piégés [3]

$$\dot{X} = AX + BV_s, \quad (9)$$

avec:

$$X = \begin{bmatrix} i_s \\ \phi_s \end{bmatrix}; \quad (10)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{L_r\sigma} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r} & \frac{1-\sigma}{M\sigma} - j\frac{1-\sigma}{M\sigma} \\ \frac{M}{T_r} & \frac{-1}{T_r} + j\omega \end{bmatrix}; \quad (11)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s L_r \sigma} & \frac{1}{L_r \sigma} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (12)$$

$$T_s = \frac{L_s}{L_r}; \quad T_r = \frac{L_r}{R_r}. \quad (13)$$

Le flux et le couple d'induction sont donnés par :

$$\phi_s = \int (v_s - R_s i_s) dt; \quad (14)$$

$$T_e = p(\phi_{s\alpha} i_{s\beta} - \phi_{s\beta} i_{s\alpha}). \quad (15)$$

Les valeurs estimées du flux et du couple sont comparées à leurs valeurs prescrites Φ_{sref} , T_{eref} respectivement. Des états de commutation sont choisis selon le sélecteur de table de commutation, où S_Φ est le module de flux après le bloc d'hystérésis et S_T est l'erreur de couple après le bloc d'hystérésis.

Tableau 1

Table de commutation de la commande directe du couple

Flux	Couple	1	2	3	4	5	6
$S_{\Phi=1}$	$S_T=1$	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1
	$S_T=0$	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0
	$S_T=-1$	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
$S_{\Phi=-1}$	$S_T=1$	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2
	$S_T=0$	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7
	$S_T=-1$	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4

La commande directe de couple d'une machine asynchrone est basée sur la détermination «directe» de la séquence de commande appliquée aux interrupteurs d'un onduleur de tension. Ce choix est généralement basé sur l'utilisation des régulateurs à hystérésis dont la fonction est contrôler l'état du système, à savoir ici l'amplitude du flux statorique et du couple électromagnétique. Ce type de stratégie se classe donc dans la catégorie des commandes en amplitude par opposition aux lois de commande en durée plus classiques et basées sur un réglage de la valeur moyenne du vecteur tension par la largeur d'impulsion (MLI). À l'origine, les commandes DTC étaient fortement basées sur le «sens physique» et sur une approche relativement empirique de la variation des états (couple, flux) sur un intervalle de temps très court (intervalle entre deux commutations, Fig. 3). Ce raisonnement s'est depuis nettement affiné et repose désormais sur des fondements mathématiques de plus en plus solide [1-4].

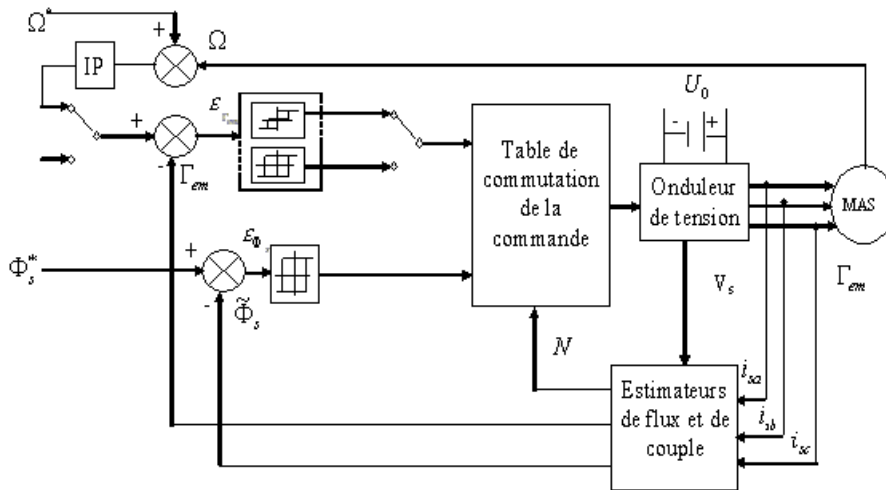


Fig. 3 – La structure du contrôle direct du couple d'une machine asynchrone.

5. COMPARAISON DES PERFORMANCES STATIQUES ET DYNAMIQUES

Dans ce paragraphe, nous allons procéder à une comparaison entre les performances des deux techniques de commande : la commande directe du couple et la commande à flux orienté directe en régimes dynamiques et statiques. En régime permanent, et pour des grandeurs de références, les ondulations du courant et du couple seront évaluées et comparées pour différentes valeurs de la vitesse et de la charge. En régime transitoire, le but attendu est d'évaluer la méthode qui donne la meilleure réponse dynamique (rapidité sans dépassement).

5.1. PERFORMANCE TRANSITOIRE

La comparaison en régime transitoire concerne dans notre cas le temps d'établissement du couple dans le cas d'une transition de charge et ce pour différentes valeurs de vitesse (Tableau 2).

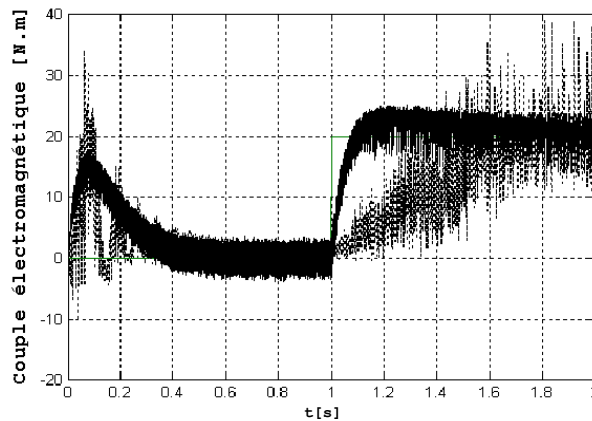
Tableau 2

Réponses du couple pour la commande vectorielle directe et la commande directe du couple

	Commande vectorielle directe	Commande directe du couple
100 rad/s	1,5 s	1,2 s
80 rad/s	1,77 s	1,1 s
20 rad/s	1,6 s	1,6 s

La validation est faite pour la commande avec boucle de vitesse. Le but est de choisir la meilleure réponse qui nous donne une meilleure qualité d'établissement du couple dans les deux cas de contrôles, D'après les résultats obtenus Fig. 4 (a, b, c), on remarque que pour un temps ($t=1$ s et $T_l=20$ [Nm]) et pour diverses valeurs de vitesse ($\omega = 100, 80, 20$ rad/s), le temps d'établissement du couple dans le cas de la commande directe du couple est beaucoup plus rapide par rapport à la commande vectorielle directe. Notre choix s'est porté sur les résultats de la commande directe du couple étant donné qu'elle fournit la meilleure réponse.

6. RÉSULTATS DE SIMULATION



a) $\omega=100$ rad/s

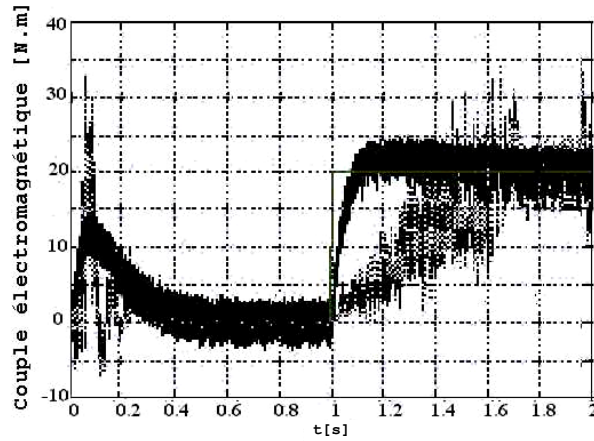
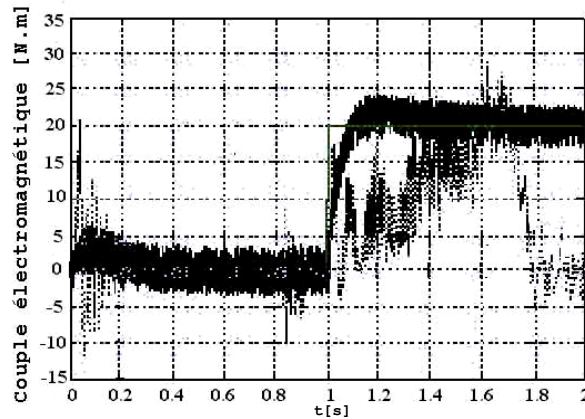
b) $\omega=80$ rad/sc) $\omega=20$ rad/s

Fig. 4 – Réponse du couple électromagnétique à l'instant ($t=1$ s et $T_L=20$ Nm) pour plusieurs valeurs de vitesse respectivement pour la commande vectorielle directe et la commande directe du couple.

Les résultats sont groupés dans le Tableau 2. On constate que le temps d'établissement du couple dans la commande directe du couple est inférieur à celui donné par la commande vectorielle directe. Ceci peut être expliqué par la présence des régulateurs PI (commande à flux orienté) qui provoquent un retard dans la réponse du couple.

6.1. PERFORMANCE EN REGIME PERMANENT

Pour une comparaison raisonnable, les deux commandes doivent avoir la même fréquence de commutation de l'onduleur, chose qui est un peu difficile pour

la commande directe du couple puisque la fréquence de l'onduleur dans cette technique est variable. Un moyen simple mais qui ne résout pas vraiment ce problème, consiste à moduler les largeurs de bandes des régulateurs à hystérésis du couple et flux. La fréquence de commutation de l'onduleur est fixée: pour le contrôle à la commande vectorielle à flux orienté directe elle est égale à 5 kHz et pour la commande directe du couple elle est presque égale à 5 kHz. La charge et la vitesse sont prises égales respectivement à 25 Nm et 157 rad/s. La comparaison est faite au niveau des pulsations des ondulations des courants statoriques par rapport à la grandeur de référence, les résultats pour différentes valeurs de charge et de vitesse sont regroupées dans les Tableau 3.

Tableau 3

Ondulations du courant statorique de la commande directe du couple et la commande vectorielle directe

ω (rad/s)	100		80		20	
	Commande vectorielle directe	Commande directe du couple	Commande vectorielle directe	Commande directe du couple	Commande vectorielle directe	Commande directe du couple
25	28,53	15,5	27,63	15	16,5	11,09
12,25	10,66	14,3	17,91	10,86	18,6055	9,86
0	14,95	6,17	14,25	6,18	19,5	9,32

D'après les résultats obtenus (Figs. 5, 6), on remarque que le taux d'ondulation du couple pour la commande vectorielle directe en l'occurrence le couple et le courant statorique dans la commande directe du couple diffère pour les différentes applications de la charge et de la vitesse. Si on prend la Fig. 6 pour une vitesse de $\omega=100$ rad/s, et $T_L=12,25$ Nm, on peut dire que notre choix s'est porté sur la commande directe du couple étant donné qu'elle fournit une légère réduction sur le taux d'ondulation des deux grandeurs couple et courant statorique qui sont considérés comme un indicateur pour une meilleure précision à l'établissement des grandeurs. Les résultats obtenus en général pour la commande vectorielle directe et la commande directe du couple sont nettement plus proches les uns des autres. On notera pourtant que la convergence est sensiblement plus rapide dans le cas de la commande directe du couple. On remarque aussi que les oscillations en couple, obtenu dans le cas de la commande vectorielle par orientation du flux rotorique sont sensiblement plus grandes par rapport au cas du contrôle directe du couple.

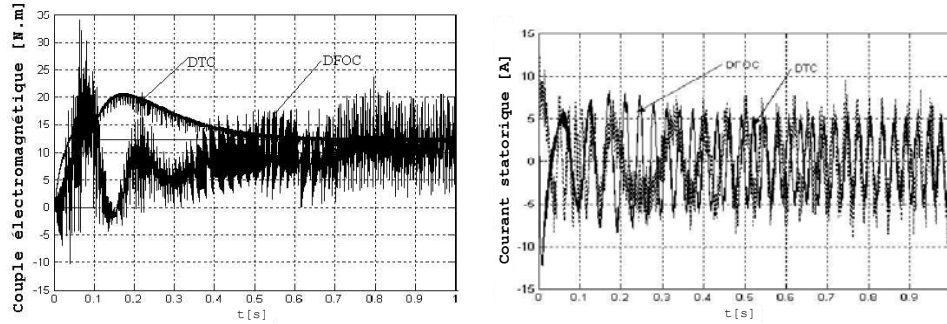


Fig. 5 – Couple électromagnétique et courant statorique pour la commande vectorielle directe et la commande directe du couple pour une charge $T_L = 12,25$ Nm et une vitesse $\omega = 100$ rad/s.

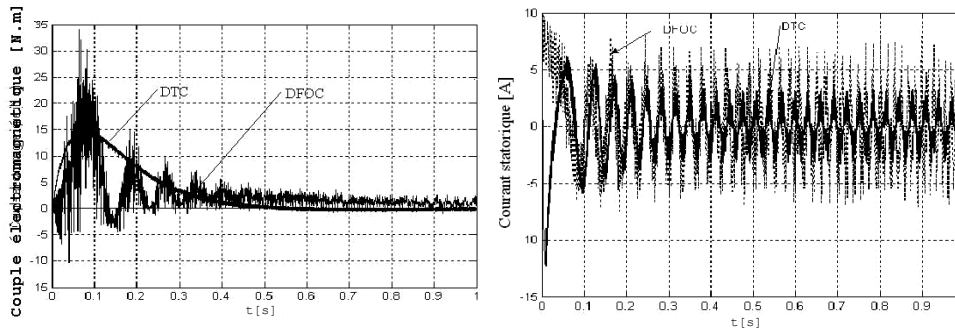


Fig. 6 – Couple électromagnétique et courant statorique pour la commande vectorielle directe et la commande directe du couple pour une charge $T_L = 0$ Nm et une vitesse $\omega = 100$ rad/s.

Par essence, la DTC est une commande sans ou avec boucle de vitesse. La faisabilité de la commande directe du couple est montrée par des résultats de simulation qui sont déjà démontrés. Dans le même ordre d'idée ces résultats seront présentés en comparatif avec la commande vectorielle à flux rotorique orienté comme précédemment, la Fig. 4 montrent les résultats de simulation obtenus par application d'une charge de 20 Nm à l'instant $t = 1$ s. Dans cet ordre, elles sont présentées les réponses du couple et du courant statorique. On peut noter les remarques suivantes:

- la comparaison entre les deux réponses montre que la DTC offre une meilleure dynamique, et une meilleure précision à l'établissement des grandeurs;
- la dynamique du couple de la commande vectorielle à flux orienté reste toujours tributaire du correcteur PID courant. Le tableau ci-dessous résume une étude comparative entre les schémas utilisés des performances de la commande directe du couple et la commande vectorielle à flux orienté directe, les résultats obtenus sont regroupés dans le Tableau 4:

Tableau 4

Comparaison entre les schémas utilisées

	Commande vectorielle à flux orienté	Commande directe du couple
Variables commandées	Couple Flux rotorique	Couple Flux statorique
Variables senties	Vitesse mecanique Courant statorique	Tension statorique Courant statorique
Variables estimées	Fréquence Flux rotorique de position	Couple Flux statorique
Régulateurs	Trois courants statoriques Régulateurs (hysteresis)	Régulateurs de couple (hysteresis) Régulateurs du flux statorique (hysteresis)
Contrôle du couple	Directement contrôlé par le courant statorique Haute dynamique Ondulations du couple	Contrôlé directement Haute dynamique Contrôlées les ondulations du couple
Contrôle du flux	Indirectement contrôlé par le courant statorique Dynamique lente	Contrôle directement Dynamique rapide
Complexité d'implémentation	Complexité élevée	Complexité moyenne
Référence	<i>d-q</i> Tournant	<i>d-q</i> Stationnaire

7. CONCLUSION

La commande directe du couple et la commande vectorielle à flux orienté sont les deux commandes les plus connues dans les commandes des machines alternatifs et la comparaison est un peu délicate. D'après la comparaison faite, on peut bien remarquer que chaque commande a ces propres performances que ce soit acceptables ou non, puisque chaque commande est différente de l'autre que ce soit au niveau de l'orientation du flux, le type de modulation de largeur d'impulsion utilisé pour l'alimentation de l'onduleur de tension et la nature des correcteurs. Ces distinctions ont amenées à repérer les différences, dans le temps de réponse, le taux d'ondulation. Selon la comparaison faite en cet article, la période d'établissement de couple de la commande directe du couple est inférieure comme période correspondante à la commande vectorielle à flux orienté, par exemple pour $\omega=100$ rad/s, dans la commande vectorielle directe le temps d'établissement de couple est 1,4 s, et pour le contrôle direct du couple ce temps est seulement 1,2 s (Tableau 2). Cette différence est provoquée par l'inertie des régulateurs de PI utilisés dans la stratégie à flux orienté directe qui causent un retard dans la réponse de couple. Pour ce qui concerne le régime permanent, l'ondulation du courant statorique dans le cas de la commande vectorielle directe est supérieur par rapport au contrôle directe du couple, dont on peut remarquer dans les Tableaux 2 et 3. Par exemple, pour un couple de charge de 25 Nm, et une vitesse de 80 rad/s, le taux d'ondulation est 17,91 dans le cas de la commande vectorielle directe et 10,86 dans le cas du

contrôle directe du couple. En conclusion, en tenant compte des composants utilisés dans les deux arrangements analysés de commande, nous pouvons conclure que le temps d'établissement de la stratégie du contrôle directe du couple est inférieur par rapport à ceux de la commande vectorielle directe. Pour une conception spécifique d'application, la stratégie appropriée peut être employée en tenant compte du résultat des comparaisons faites en cet article, la recherche expérimentale sont en cours et constitueront le sujet d'un futur papier.

Reçu le 25 Janvier 2007

REFERENCES

1. G. Grellet, G. Clerc, *Actionneurs Electriques, Principe – Modèles – Commande*, Collection Electrotechnique, Éditions Eyrolles, Paris, 1997.
2. J.P. Caron, J.P. Hautier, *Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone*, Éditions Technip, 1995, Paris, 3.
3. J. R G Schonfield, *Direct torque control-DTC*, ABB Industrial Systems Ltd.
4. Patrick Brunet, *Introduction à la Commande Vectorielle des Machines asynchrones*, LTEG Henri Brisson, 1999/2000.

DIRECT CONTROL OF TORQUE AND VECTOR CONTROL OF THE INDUCTION MOTOR

Key words: Induction motor, Direct vector control, Direct control of torque.

This paper presents a comparative study on most powerful control strategies for induction motor drives: direct field-oriented control (DFOC) and direct torque control (DTC). The comparison is based on various criteria including basic control characteristics, and dynamic performance. The ripples of the current and the torque are evaluated and compared for various speed values and load. In transient state, the awaited goal is to evaluate the method which gives the best dynamic response (speed without going beyond). The study is made for the same frequency of commutation, taking into account the presence of speed control in the case of DTC. The comparisons are made for rated values of asynchronous machine.