

ETUDE COMPARATIVE ENTRE LA COMMANDE VECTORIELLE A FLUX ORIENTE ET LA COMMANDE DIRECTE DU COUPLE DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Lamia YOUB¹, A. CRĂCIUNESCU²

În articol se prezintă un studiu comparativ ale celor mai performante strategii de comandă în acționările electrice cu motoare asincrone: comanda cu orientare după câmp și comanda directă a cuplului. Comparația are la bază mai multe criterii care includ atât caracteristicile statice cât și cele dinamice. Ondulațiile de curent și de cuplu sunt evaluate și comparate pentru diverse valori ale vitezei și ale sarcinii. În regim tranzitoriu se evaluează vitezele de răspuns în lipsa suprarreglajului. În cazul DTC studiul se efectuează pentru aceleași valori ale frecvenței de comutație, în prezența buclei de comandă a vitezei. Comparațiile sunt făcute pentru regimul nominal de funcționare al mașinii asincrone.

This paper presents a comparative study of the most powerful control strategies for induction motor drives: field-oriented control (FOC) 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.

Dans cet article, 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 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.

Mots clés : Machine asynchrone, Commande à flux orienté, Commande directe du couple.

¹ Phd Student., Dept. of Electrical Engineering, University POLITEHNICA of Bucharest, Romania, e-mail: youblamia@yahoo.fr

² , Prof., Dept. of Electrical Engineering, University POLITEHNICA of Bucharest, Romania,

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 pas 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 démarche 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 il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux et celle commandant le couple.

Les méthodes de contrôle direct du 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 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 séparées 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 par orientation du flux rotorique

Le principe de la commande vectorielle c'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. Reprenons l'expression du couple électromagnétique en fonction du courant statorique et le flux rotorique:

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

Notre objectif c'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:

$$\Gamma_{em} = p \frac{M}{L_r} \Phi_{rd} i_{sq} \quad (2)$$

D'après l'expression (2), 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.

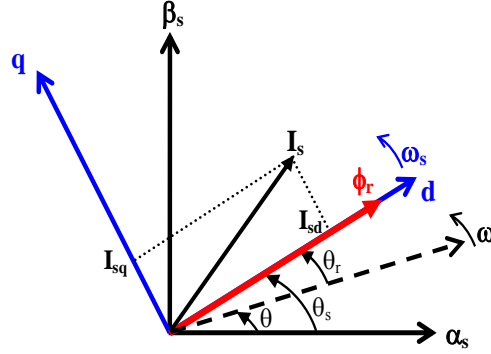


Fig.1 Flux rotorique orienté sur l'axe d

Dans cette condition nous avons : $\Phi_{rd} = \Phi$ et $\Phi_{rq} = 0$. Seules les grandeurs statoriques sont accessibles, les grandeurs rotoriques, ne le sont pas, il faut donc pouvoir les estimer à partir des grandeurs statoriques. Par conséquent le modèle du moteur à induction, établi dans le domaine du flux rotorique orienté, est alors donné comme il suit:

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

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \Phi_{sq} + \omega_s \Phi_{sd} \quad (4)$$

$$0 = R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_r}{dt} \quad (5)$$

$$0 = R_r i_{rq} + \omega_r \Phi_r \quad (6)$$

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 (Figure. 1) du référentiel (d, q) par rapport au référentiel (α, β) , [1]. Elle est déterminée par :

$$\theta_s = \int_0^t \omega_s dt \quad (7)$$

Avec:

$$\omega_s = p\omega + \hat{\omega}_r \quad (8)$$

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

La grandeur $\tilde{\omega}_r$ représente la valeur de la vitesse relative estimée. Elle peut être déterminée à partir de l'équation (2) d'où il découle:

$$\hat{\Phi}_{rd} = \frac{M}{1 + T_r s} i_{sd} \quad (9)$$

$$\hat{\omega}_r = \frac{M}{T_r \hat{\Phi}_{rd}} i_{sq} \quad (10)$$

En bref, l'importance de la position du flux rotorique peut être évaluée à partir de l'équation (4), qui constitue les observateurs simples ; elles fonctionnent naturellement dans la boucle ouverte (estimateurs). D'une part, l'inconvénient d'estimer indirectement le flux rotorique c'est la variation par rapport à la température de la résistance, aussi bien que l'influence magnétique de la saturation en mode transitoire. Il apparaît dès le début, cette n'importe quelle erreur relative sur la valeur de la constante de temps rotorique T_r qui est réfléchié directement sur les valeurs estimées.

3. Description de la commande vectorielle indirect et directe

La commande vectorielle à flux rotorique orienté, est dite directe ou indirecte selon la méthode d'estimation du vecteur flux rotorique.

3.1 Commande indirecte

Dans cette méthode, le flux n'est ni mesuré, ni reconstruit. Son orientation est réalisée par la position déduite par intégration de la pulsation d'auto pilotage, en se référant à la deuxième équation du système (3), [1].

En revanche, l'inconvénient de l'estimation indirecte du flux, c'est que sa précision est affectée par la variation de la résistance rotorique due à la variation de la température, ainsi qu'à la saturation dans le régime transitoire. Il apparaît d'emblée, que toute erreur relative sur la valeur de la constante de temps rotorique T_r se répercute directement sur les grandeurs estimées, [4]. Dans ce qui suit, on se limite à l'étude de la commande vectorielle indirecte et directe.

Sur le schéma de la Figure 2, il s'agit tout d'abord d'exposer les mécanismes de la commande vectorielle à flux rotorique orienté, associée à la machine asynchrone pour une alimentation en courant, issue des principes précédemment évoqués.

On retrouve, tout d'abord, le bloc de transformation (modulation), qui permet le passage des référentiels $(\alpha, \beta) \rightarrow (d, q)$ après une rotation θ_s .

Ensuite, un sommateur algébrique qui réalise la loi d'autopilotage et le processus d'orientation sur l'axe d est donné par l'intégration de la pulsation statorique ω_s ainsi obtenue donne l'angle θ_s , [5].

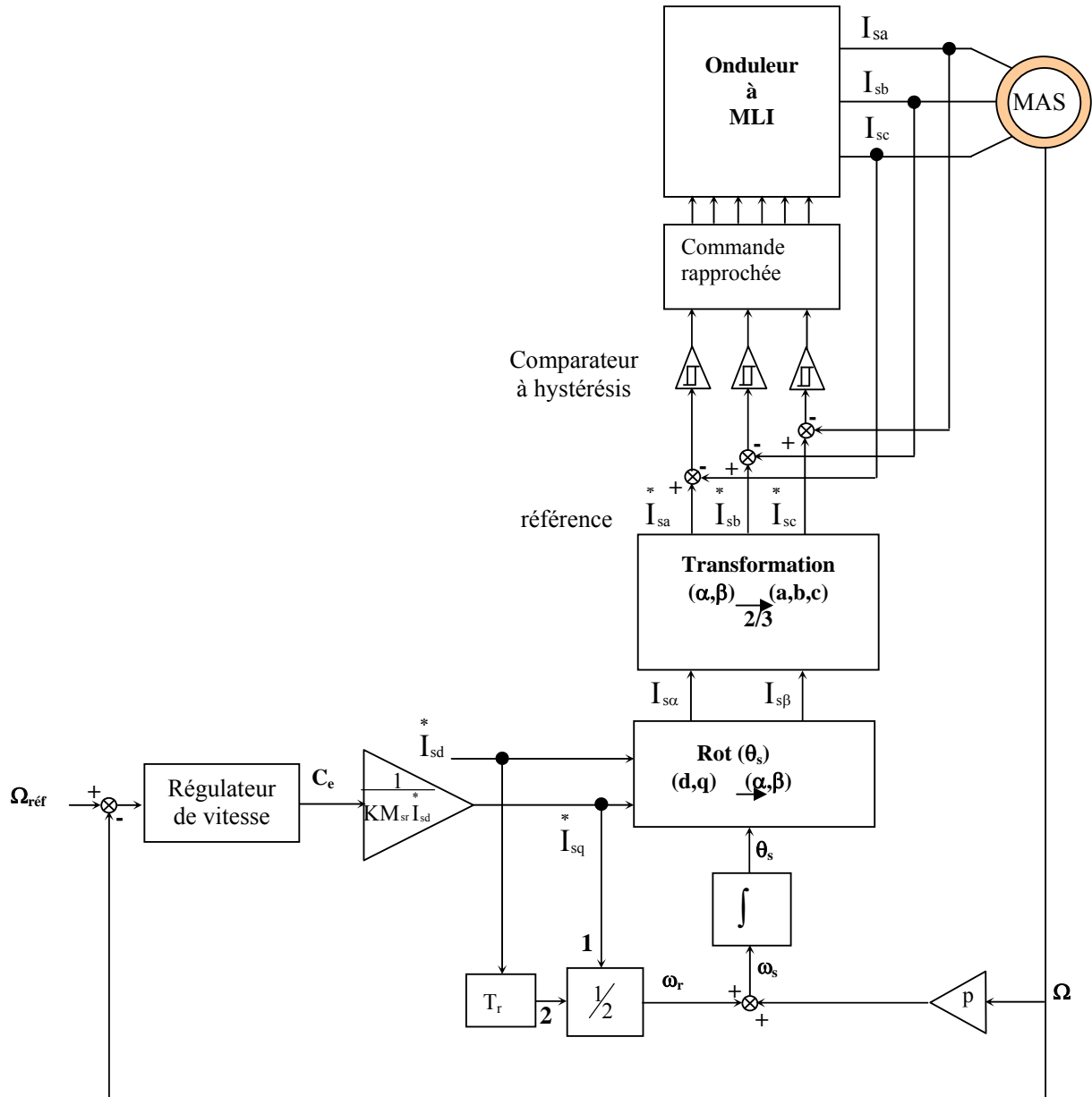


Fig.2 Schéma de principe de la commande pour une alimentation en courant (flux orienté non contrôlé)

3.2 Commande directe

La commande vectorielle directe nécessite une bonne connaissance du module du flux et de sa phase, [3]. Le vecteur flux est mesuré directement par des capteurs (rarement), dont la réalisation pratique est délicate (précision médiocre, filtrage du signal mesuré, coût élevé, ...). Ces capteurs sont donc proscrits et on a recours à des techniques d'estimations ou d'observations du flux à partir des grandeurs mesurables (modèle de la machine).

Le schéma de principe de la Figure 3 comprend un onduleur de tension régulé en courant:

- soit par une régulation linéaire sur les trois courants de phase i_a, i_b et i_c ou plutôt sur les deux composantes diphasées i_α, i_β ;
- soit par une régulation non linéaire, du type par fourchette avec hystérésis et portant aussi soit sur les courants triphasés, soit sur les courants diphasés. 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. Si la transformation du système d'axe fixes, liés au stator, $\alpha\beta$, au système d'axes dq liés 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 dq :
 - 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 figure 3 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.

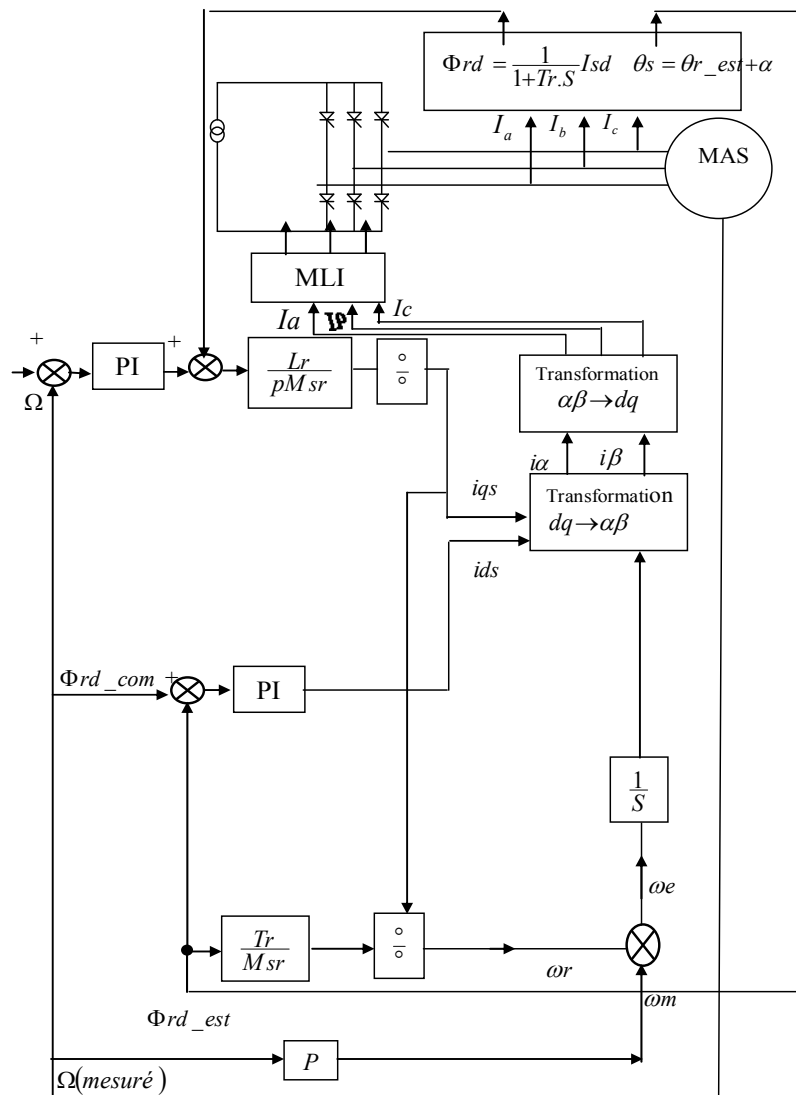


Fig. 3 Commande vectorielle directe d'une machine alimentée en courant avec régulation du flux

4. La commande directe du couple de la MAS

Le principe de base de la commande directe du couple repose sur l'application d'une séquence particulière de tension via un onduleur de tension, dont les ondes sont générées à travers des comparateurs à hystérésis par lesquelles le flux et le couple sont piégés à suivre des références [3].

$$\dot{X} = A.X + B.V_s \quad (11)$$

ou:

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{i}_s \\ \dot{\phi}_s \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} i_s \\ \phi_s \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{L_r \cdot \sigma} + \frac{1-\sigma}{\sigma \cdot T_r} & \frac{1-\sigma}{M \cdot \sigma} - j \frac{1-\sigma}{M \cdot \sigma} \\ \frac{M}{T_r} & \frac{-1}{T_r} + j \cdot \omega \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s \cdot L_r \cdot \sigma} & \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$j = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, T_s = \frac{L_s}{R_s}, T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (15)$$

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

$$\phi_s = \int (v_s - R_s i_s) dt \quad (16)$$

$$T_e = p \cdot (\phi_{s\alpha} i_{s\beta} - \phi_{s\beta} i_{s\alpha}) \quad (17)$$

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_T est le module de flux après le bloc d'hystérésis et S_ϕ est l'erreur de couple après le bloc d'hystérésis (Table I).

Table 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 du 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 de 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 amplitudes, 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). A 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). Ce raisonnement s'est depuis nettement affiné et repose désormais sur des fondements mathématiques de plus en plus solide [3].

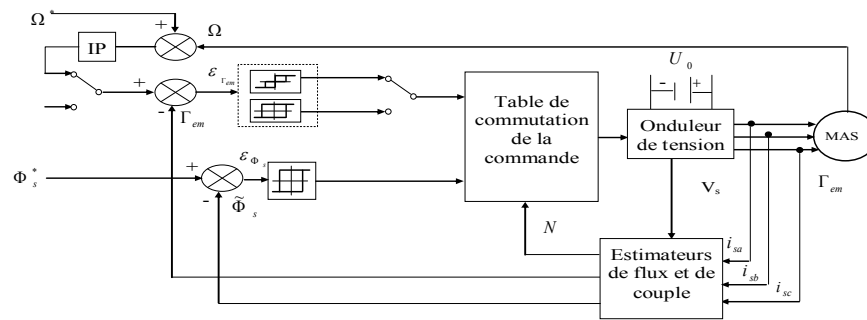


Fig.4 La structure du contrôle direct du couple d'une machine asynchrone

5. Comparaison entre les performances statique et dynamique

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 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 c'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 pour les deux cas: commande à flux orienté directe et indirecte et la commande directe du couple. (voir table II, et III).

Table 2

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

	Commande vectorielle indirecte	Commande directe du couple
100 rad/sec	1.4 s	1.2 s
80 rad/sec	1.3 s	1.1 s
20 rad/sec	1.2 s	1.6 s

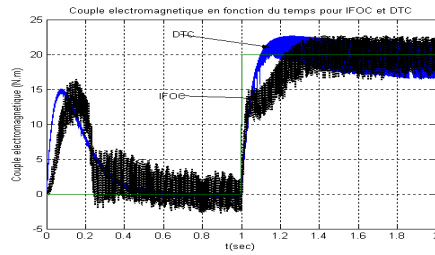
Table 3

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

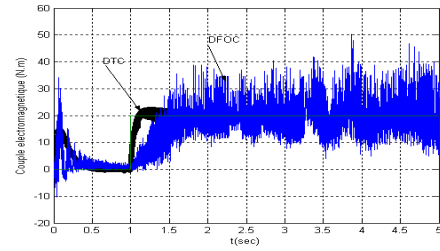
	Commande vectorielle directe	Commande directe du couple
100 rad/sec	1.5 s	1.2 s
80 rad/sec	1.77 s	1.1 s
20 rad/sec	1.6 s	1.6 s

L'implantation de la commande est réalisée en utilisant le logiciel Matlab/Simulink. Deux cas sont à réaliser: la commande directe du couple et la commande vectorielle indirecte et directe. 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, les figures 5 (a-b-c) et figures 6 (a-b-c), on remarque que pour un temps ($t=1s$ et $T_l=20N.m$) et pour diverses valeurs de

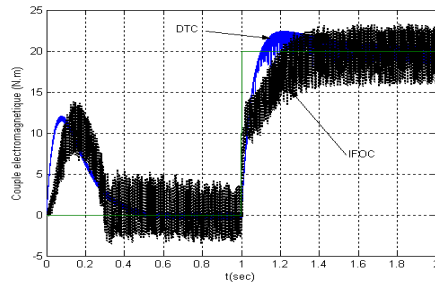
vitesse ($\omega = 100, 80, 20$ rad/sec), le temps d'établissement du couple, dans le cas de la commande directe du couple, est beaucoup plus rapide par rapport à la commande vectorielle indirecte et directe. Notre choix s'est porté sur les résultats de la commande directe du couple étant donné qu'elle fournit la meilleure réponse.



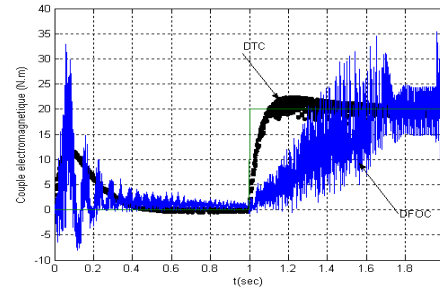
(a)



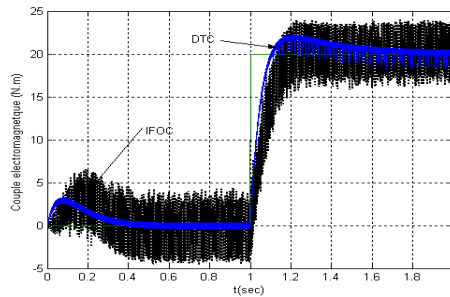
(a)



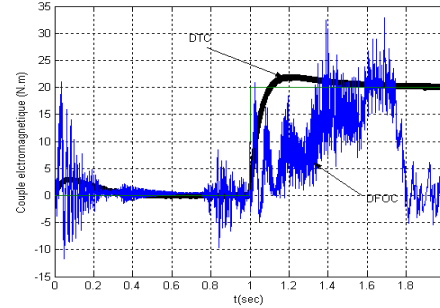
(b)



(b)



(c)



(c)

Figure 5. Réponse du couple électromagnétique à l'instant $t=1s$ et $T_L=20$ N.m pour plusieurs valeurs de vitesse pour la commande vectorielle indirecte et la commande directe du couple

Figure 6. Réponse du couple électromagnétique à l'instant $t=1s$ et $T_L=20$ N.m pour plusieurs valeurs de vitesse pour la commande vectorielle directe et la commande directe du couple

Les résultats sont groupés dans le Tableau II, III respectivement. 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 et indirecte. Ceci peut être expliqué par la présence des régulateurs PI (commande à flux orienté) qui provoquent un retard dans la réponse du couple.

5.2. Performance en régime 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, 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 N.m 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 regroupés dans les tableaux IV et V.

Table 4

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

ω (rad/sec) T_L (N.m)	100		80		20	
	Commande vectorielle indirecte	Commande directe du couple	Commande vectorielle indirecte	Commande directe du couple	Commande vectorielle indirecte	Commande directe du couple
25	11.24	28.53	11.88	27.63	11.09	27.89
12.25	10.04	10.66	9.93	10.86	9.86	10.65
0	9.6	6.17	9.44	6.18	9.32	6.19

Table 5

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

ω (rad/sec) T_L (N.m)	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	15.5	28.53	15	27.63	11.09	16.5
12.25	14.3	10.66	17.91	10.86	9.86	18.6055
0	14.95	6.17	14.25	6.18	9.32	19.5

D'après les résultats obtenus, voir les figures (7 et 8), on remarque que le taux d'ondulation du couple pour la commande vectorielle directe et indirecte, 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, par exemple si on prend la figure 7 pour une vitesse de $\omega=100$ (rad/sec), et $T_L=12.25$ (N.m), 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.

Pour les résultats obtenus dans les figures (9 et 10), pour une vitesse de $\omega=100$ (rad/sec) et une charge $T_L=12.25$ (N.m), on observe bien les performances de la commande directe du couple particulièrement au niveau du courant statorique et du couple électromagnétique, 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 indirecte et la commande directe du couple sont nettement plus proches les uns aux 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 direct du couple.

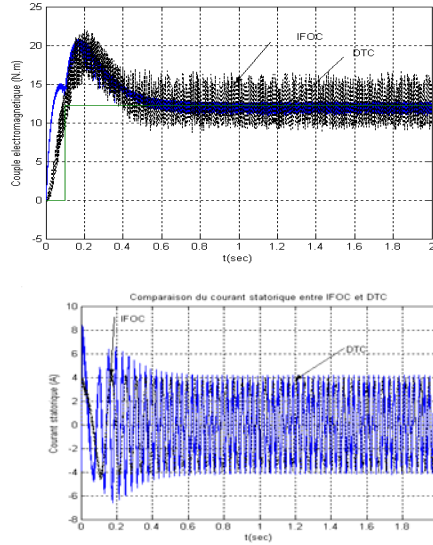


Figure.7. Couple électromagnétique et courant statorique pour la commande vectorielle indirecte et la commande directe du couple pour une charge $T_L=12.25$ (N.m) et vitesse $\omega=100$ (rad/sec)

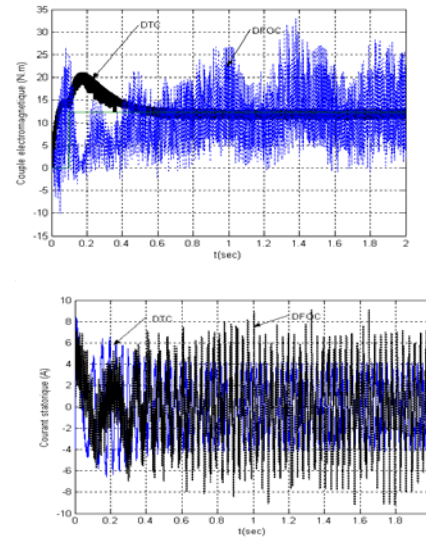


Figure 8. Couple électromagnétique et courant statorique pour la commande vectorielle directe et la commande directe du couple pour une charge $T_L=12.25$ (N.m) et vitesse $\omega=100$ (rad/sec)

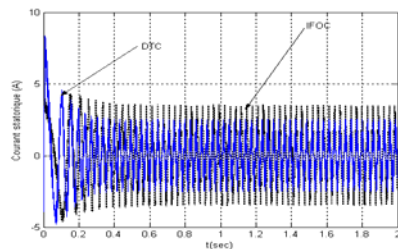
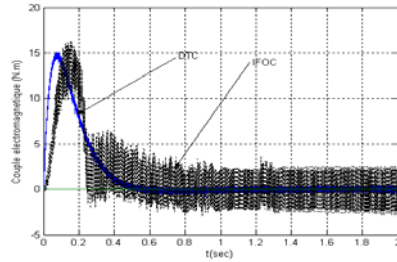


Figure 9. Couple électromagnétique et courant statorique pour la commande vectorielle indirecte et la commande directe du couple pour une charge $T_L = 0$ (N.m) et vitesse $\omega = 100$ (rad/sec)

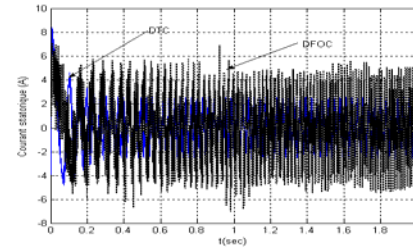
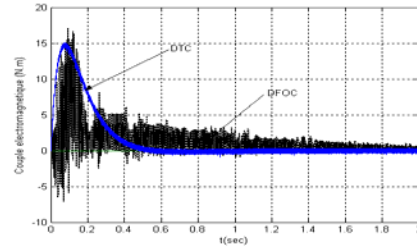


Figure 10. Couple électromagnétique et courant statorique pour la commande vectorielle directe et la commande directe du couple pour une charge $T_L = 0$ (N.m) et vitesse $\omega = 100$ (rad/sec)

En effet, 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 la simulation qui sont déjà démontrées. Dans le même ordre d'idée ces résultats seront présentés en comparaison avec la commande vectorielle à flux rotorique orienté comme précédemment. Les figures (5-10) montrent les résultats de simulation obtenus par application d'une charge de 20 N.m à l'instant $t=1$ s. Dans cet ordre sont présentées les réponses du couple et du courant statorique.

Le tableau ci-dessous (table VI) résume une étude comparative entre les schémas utilisés des performances de la commande directe du couple et la commande vectorielle à flux rotorique orienté directe et indirecte. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant:

Table 6

Etude comparative entre les schémas de la commande vectorielle à flux orienté et la commande directe du couple

	Commande vectorielle a flux orienté	Commande directe du couple
Variables commandées	-Couple -Flux rotorique	-Couple -Flux statorique
Variables essentielles	-Vitesse mécanique -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 contrôle par le courant statorique -Haute dynamique -Ondulations du couple	-contrôle directement -Haute dynamique -contrôlées les ondulations du couple
Contrôle du flux	-Indirectement contrôle par le courant statorique -dynamique lente	-contrôle directement -Dynamique rapide
Complexité d'implémentation	-Complexité élevée	- Complexité moyenne
Référence	d-q tournant	d-q stationnaire

6. 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. On peut noter les remarques suivantes : la comparaison entre les deux réponses montre que la commande directe du couple offre une meilleure dynamique et une meilleures précision a l'établissement des grandeurs, ainsi que la dynamique du couple de la commande vectorielle a flux oriente reste toujours tributaire du correcteur PID courant. 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 indirecte le temps d'établissement de couple est 1.4s, pour la commande vectorielle directe est 1.5s et pour le contrôle direct du couple ce temps est seulement 1.2s (tableaux II, III). Cette différence est provoquée par l'inertie des régulateurs de PI utilisés dans la stratégie à flux orienté directe et indirecte 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 et indirecte, est inférieure par rapport au contrôle direct du couple, dont on peut remarquer dans les tableaux V et VI. Par exemple, pour un couple de charge de 25 N.m et une vitesse de 80 rad/s, le taux d'ondulation est 11.88 dans le cas de la commande vectorielle indirecte et, dans la commande vectorielle directe, est 27.63, dans le cas du contrôle direct du couple le taux est 17.91. En conclusion, en tenant compte des composants utilisés dans les deux arrangements analysés de commande, nous pouvons conclure que les temps d'établissement de la stratégie du contrôle direct du couple sont inférieurs par rapport à ceux de la commande vectorielle directe et indirecte. Pour une conception spécifique d'application, la stratégie appropriée peut être employée en tenant compte du résultat des comparaisons faites en cet article. Des recherches expérimentales sont en cours et constitueront le sujet d'un futur papier.

REFERENCES

- [1] *G. GRELLET, G. CLERC*, «Actionneurs Electriques, Principe –Modèles –Commande», collection Electrotechnique, éditions Eyrolles, 1997 Paris.
- [2] *J.P. CARON, J.P. HAUTIER*, «Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone», éditions Technip, 1995 Paris.
- [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.

PARAMETRES DE LA MACHINE ASYNCHRONE UTILISES

Puissance	4 kW
Tension d'alimentation	220/380 V
Résistance statorique	10 Ω
Inductance propre d'une phase statorique	0.6550 H
Résistance rotorique	6.3 Ω
Inductance propre d'une phase rotorique	0.6520 H
Inductance mutuelle	0.612 H
Moment d'inertie	0.03kg.m ²
Nombre de paires de pôles de la machine	2
Couple de charge	25 N.m