

CORRECTION D'ONDULATIONS DU COUPLE ET DE FLUX DE LA DTC D'UNE MACHINE ASYNCHRONE

R.Toufouti S.Meziane & Benalla.Hocine

Laboratoire D'électrotechnique Université Mentouri Constantine Algérie

E-mail (toufoutidz@yahoo.fr,meziane_elc@yahoo.fr,benalladz@yahoo.fr)

Reçu le : 06/10/2005

Reçu sous forme révisée le : 04/07/2006

Accepté le : 19/02/2007

Résumé

Dans ce travail on va étudier une technique pour l'amélioration des performances dans le régime transitoire magnétique pour les faibles vitesses, de la commande directe du couple appelée (DTC), par l'élaboration d'une correction sur les phénomènes d'ondulations qui apparaissent à basse et moyenne vitesse. Par la suite, on a abordé le fonctionnement en régime magnétique établi et corrigé les défauts de progression du couple.

Mots-clés- machine asynchrone, contrôle direct du couple, onduleur de tension.

Abstract

in this work one will study a technique for the improvement of the performances in the magnetic transient state for low speeds, of the direct torque control called (DTC), by the development of a correction on the phenomena of undulations which appear with low and average speed. Thereafter, one approached operation in magnetic mode established and corrected the defects of progression of the torque

Keywords- induction motor, direct torque control, Voltage source inverter

2 LA COMMANDE DIRECTE DU COUPLE

1 INTRODUCTION

for Sustainable Development: Technology Advances and Environmental Issues, Pyramisa Hotel Cairo - Egypt, 6 - 9 December 2004. Les principes du contrôle direct ont été établis en supposant la vitesse de la machine suffisamment élevée, pour négliger l'influence du terme résistif. Ces hypothèses ne sont plus vérifiées, si l'on se place dans des conditions de fonctionnement à très basse fréquence et à moyenne fréquence.

Cet article permettra d'étudier la structure de commande DTC, [1]-[4]. En tenant compte de ces nouvelles contraintes de fonctionnement. Dans une première partie, on étudiera le fonctionnement en régime transitoire magnétique. On analysera les programmes liés à l'établissement des grandeurs flux et couple par la suite, on développera une étude du fonctionnement en régime magnétique établi, [2]. Plus particulièrement, on analysera l'influence du terme résistif sur le contrôle du couple, [2] [5]. On étudiera également l'évolution du couple instantané et moyen. On pourra ainsi relever les défauts de progression du couple, [2] [4]. Qui apparaissent aussi bien à basses fréquences qu'à moyennes fréquences. On s'appliquera ensuite à corriger l'influence du Terme résistif. On présentera pour cela, une méthode de décalage des zones de position du flux statorique.

Le principe de base de la commande directe du couple Fig.1 repose sur l'estimation du flux et du

couple du moteur à partir de l'état des commandes (S_a, S_b, S_c), de la mesure de la tension continue à l'entrée de l'onduleur et des trois courants statoriques du moteur [2][4].

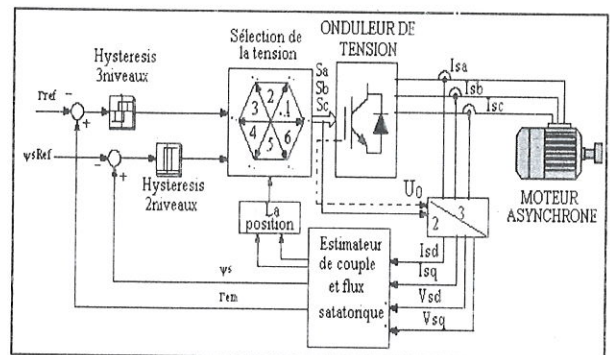


Fig.1- Structure de la commande DTC

2.1 Présentation vectorielle de la tension de l'onduleur

Le vecteur tension V_s est délivré par un onduleur de tension triphasé Fig.2, dont l'état des interrupteurs, supposés parfaits, est représenté par trois grandeurs booléennes de commande S_j ($j=a,b,c$) [1] :

- $S_j=1$: Interrupteur Haut Fermé et Interrupteur Bas Ouvert.

• $S_j=0$: Interrupteur Haut Ouvert et Interrupteur Bas Fermé.

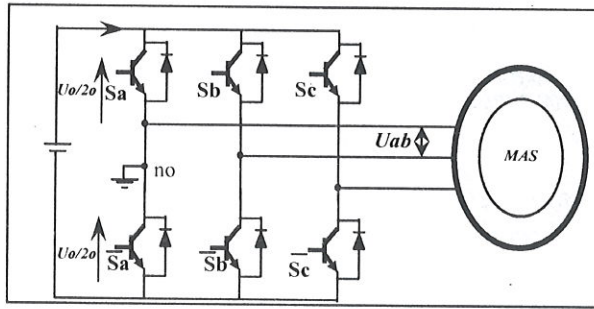


Fig.2-Présentation de l'onduleur de tension

En utilisant ces trois variables booléennes, le vecteur tension V_s peut s'écrire sous la forme:

$$\bar{V}_s = \sqrt{\frac{2}{3}} U_0 \left[S_a + S_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + S_c e^{j\frac{4\pi}{3}} \right] \quad (1)$$

Les vecteurs tensions V_s est délivrés par un onduleur en fonction des états logique des interrupteurs, [2], sont représentés par la Fig.3.

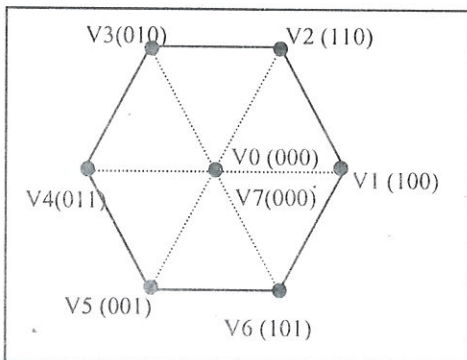


Fig.3-Vecteurs tension de l'onduleur

2.2 Contrôle Du Flux Statorique

A partir du modèle de la machine asynchrone dans un repère lié au stator et de l'expression de la tension statorique, Le flux statorique est estimé à partir de la relation suivant, [1]-[4];

$$\bar{\varphi}_s = \int_0^t (\bar{V}_s - R_s \bar{I}_s) dt \quad (2)$$

Sur un intervalle de temps $[0, T_e]$, correspondant à une période d'échantillonnage T_e , les commandes (S_a, S_b, S_c) sont fixes, et si on considère le terme « $R_s I_s$ »

comme négligeable par rapport à la tension V_s , on peut écrire [1]:

$$\bar{\varphi}_s(t) \approx \bar{\varphi}_{s0} + \bar{V}_s T_e \quad (3)$$

Où φ_{s0} est le vecteur flux à l'instant $t = 0$. Cette relation montre que si on applique un vecteur tension non nul, l'extrémité du vecteur flux statorique se déplace sur une droite dont la direction est donnée par le vecteur tension appliquée. La Fig.4, [1] [2], illustre ce principe, en prenant comme exemple le vecteur tension « $V_s = V_3$ » [1].

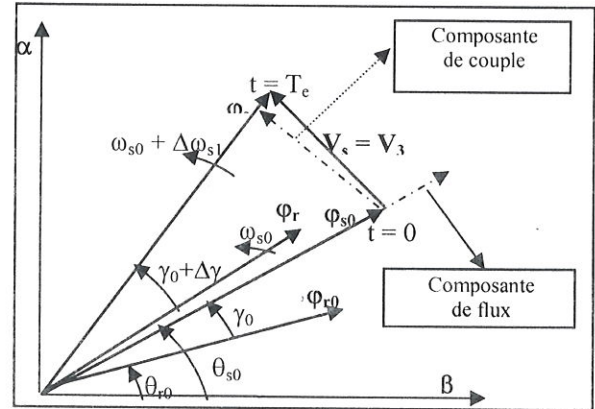


Fig.4-Exemple de l'évolution de l'extrémité

La composante radiale (composante du flux) du vecteur de tension agit sur l'amplitude du vecteur flux et sa composante tangentielle (composante du couple) sur la position du vecteur flux. En choisissant une séquence appropriée des vecteurs de tension, on peut imposer à l'extrémité du vecteur flux de suivre une trajectoire désirée. Pour fonctionner avec un module du flux φ_s pratiquement constant, il suffit de choisir une trajectoire presque circulaire pour l'extrémité du vecteur flux. Cela n'est possible que si la période de contrôle T_e est très faible devant la période de rotation du flux [1] [2].

2.3 Estimation Du Flux Et Du Couple Electromagnétique

L'amplitude du flux statorique est estimée à partir de ses composantes φ_{sa} et $\varphi_{s\beta}$, soit, [1] [6]:

$$\varphi_s = \sqrt{\varphi_{sa}^2 + \varphi_{s\beta}^2} \quad (4)$$

L'équation (2) peut être utilisée pour l'estimation des composantes du flux statorique.

Les composantes du courant, I_{sa} et $I_{s\beta}$ sont obtenues par l'application de la transformation de Concordai aux courants mesurés (I_a, I_b, I_c), [2] [5]:

$$\begin{cases} I_{s\alpha} = \sqrt{\frac{3}{2}} I_0 \\ I_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} (I_b - I_c) \end{cases} \quad (5)$$

On reconstruit les composantes du vecteur tension à partir de la mesure de la tension d'entrée de l'onduleur, des états des interrupteurs et en appliquant la transformation de Concordai [1][2]:

$$\begin{cases} V_{s\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_0 \left(S_a - \frac{1}{2} (S_b + S_c) \right) \\ V_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_0 (S_b - S_c) \end{cases} \quad (6)$$

En comparant le signe des composantes $\varphi_{s\alpha}$ et $\varphi_{s\beta}$, le rapport entre ces composantes et l'amplitude du flux, le numéro (N) de la zone dans laquelle se trouve le flux peut être obtenu, [2]. Le couple électromagnétique peut être obtenu à partir des grandeurs estimées du flux, $\varphi_{s\alpha}$ et $\varphi_{s\beta}$ et les grandeurs calculées du courant, $I_{s\alpha}$ et $I_{s\beta}$:

$$\Gamma_{em} = p(\varphi_{s\alpha} I_{s\beta} - \varphi_{s\beta} I_{s\alpha}) \quad (7)$$

3 ELABORATION DU CORRECTEUR DE FLUX

Lorsque le flux se trouve dans la zone i, les vecteurs V_{i+1} ou V_{i-1} sont choisis pour augmenter l'amplitude du flux, et V_{i+2} ou V_{i-2} pour la diminuer voir Fig.5. Ce qui montre que le choix du vecteur tension dépend du signe de l'erreur du flux, indépendamment de son amplitude [1]. Ceci explique que la sortie du correcteur de flux peut être une variable booléenne

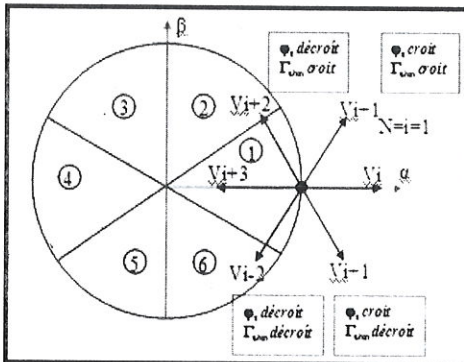


Fig.5- Sélection du vecteur tension selon la zone N=i.

On ajoute une bande d'hystérésis autour de zéro pour éviter les commutations inutiles lorsque l'erreur de flux est très petite, [1][2]. En effet, avec ce type de

correcteur malgré sa simplicité, on peut facilement contrôler et maintenir l'extrémité du vecteur flux, dans une couronne circulaire [1].

4 CORRECTEUR DE COUPLE

Deux types de comparateurs à hystérésis peuvent être envisagés pour obtenir la dynamique souhaitée sur le couple, [1] [2] Soit:

- Un comparateur à hystérésis à deux niveaux
- Un comparateur à hystérésis à trois niveaux

Le comparateur à trois niveaux permet de contrôler le moteur dans les deux sens de rotation, soit pour un couple positif, soit pour un couple négatif, [1].

Le comparateur à deux niveaux diffère du précédent par la simplicité de son application. Il se réduit au contrôle du couple sur un seul sens de rotation du moteur [1] [4].

5 TABLE DE VERITE ET STRUCTURE DU CONTROLE DIRECT DU COUPLE

On élabore la table de vérité de la structure de contrôle, en fonction des sorties des contrôleurs à hystérésis du flux (cflx), et du couple (ccpl) et des zones N de position du vecteur flux statorique φ_s . Comme le montre le Tableau I. on retrouve bien avec la table de vérité, la formulation de la sélection des vecteurs tensions V_{i-1} , V_{i+1} , V_{i-2} , V_{i+2} , correspondant à une zone $N=i$, et ceci pour un comparateur à hystérésis à deux ou à trois niveaux, [1] [2].

Position		1	2	3	4	5	6
Flux	Couple						
cflx = 1	ccpl = 1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1
	ccpl = 0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0
	ccpl = -1	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
cflx = 0	ccpl = 1	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2
	ccpl = 0	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7
	ccpl = -1	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4

Tableau I : table de vérité

6 ETUDE EN REGIME TRANSITOIRE MAGNETIQUE

6.1 Principe D'établissement du Flux et du Couple

Les principes du contrôle direct du couple ont été présentés avec un fonctionnement en régime magnétique établi. Il est nécessaire d'étudier le comportement du flux et du couple, lors de leur établissement respectif, [1] [3], à la mise en route du système.

6.2 Phénomène D'ondulation Du Flux Statorique

Dans les conditions d'établissement des grandeurs flux et couple, les équations de la machine élaborées dans le référentiel (S) doivent tenir compte de l'évolution de l'amplitude du flux statorique [2][6]. Ainsi, à partir de l'expression de la tension statorique $V_s(T)$ en fonction de la force électromotrice.

$$\bar{V}_s(T) = R_s \bar{I}_s(T) + \frac{d\bar{\varphi}_s(T)}{dt} e^{j\theta_s} + j \frac{d\theta_s(T)}{dt} \bar{\varphi}_s(T) \quad (8)$$

La force électromotrice est donnée par $E_s = \frac{d\varphi_s}{dt}$ et du terme résistif $R_s I_s$, on peut écrire l'équation suivante :

$$\bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + \frac{d\bar{\varphi}_s}{dt} e^{j\theta_s} + j \frac{d\theta_s}{dt} \bar{\varphi}_s \quad (9)$$

Au démarrage de la machine, l'amplitude du flux et le couple électromagnétique sont nuls. Durant toute la phase de progression de ces deux grandeurs φ_s et Γ_{elm} , [2][4], seul le vecteur tension statorique V_{i+1} est sélectionné en sortie de l'onduleur, voir Fig.6.

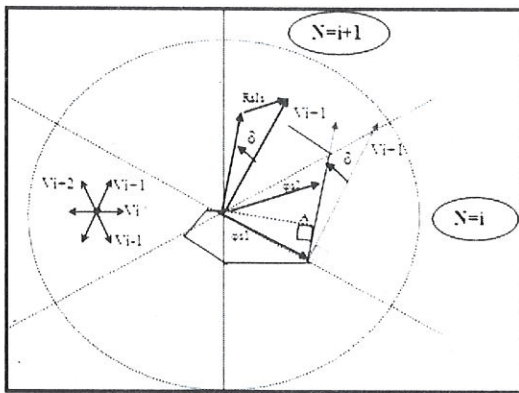


Fig.6. Trajectoire de φ_s , lors de l'établissement simultané du flux et du couple électromagnétique Γ_{elm}

Sur la Fig.6, on peut observer un décalage δ , entre la force électromotrice E_s et la tension appliquée V_{i+1} , [2]. On montre que l'évolution du vecteur flux φ_s dépend de l'influence du terme résistif « $R_s I_s$ », [4] [5]. Par conséquent, en début de zone $N=i$, l'extrémité du vecteur flux φ_s , noté φ_{s1} sur la Fig.6, suit la direction de E_s . On note alors, que l'amplitude de φ_s du flux statorique va décroître au lieu de croître, [2], comme le prévoit la sélection du vecteur V_{i+1} . De plus, cette décroissance est fonction de la grandeur dérivée angulaire $\frac{d\theta_s}{dt}$ qui atteint son

maximum au passage du point A, comme le représente la Fig.6. A partir de ce point, la variation

du module de φ_s (noté φ_{s2}) s'inverse et commence à augmenter. On relève que cette progression est plus lente que précédemment, car l'extrémité de φ_{s2} s'éloigne de l'origine et parallèlement la dérivée angulaire $\frac{d\theta_s}{dt}$ diminue progressivement, [2][5]. Le phénomène

décrit précédemment va se traduire, lors de l'établissement simultané du flux et couple, par une progression sous forme d'ondulation de l'amplitude du flux statorique voir la Fig.6, [2] [5]. De plus, les variations de la dérivée angulaire qui en résulte, entraînent de légères oscillations du flux entre le début et la fin de la zone N.

6.3 Résultats De Simulation

Ces phénomènes d'ondulation et d'oscillation relevés sur la progression du flux statorique, peuvent être mis en évidence par la simulation de la Fig.7. On note que le couple durant toute la phase d'établissement du couple, l'amplitude du flux φ_s progresse en ondulant. Chacune de ces oscillations correspond à une zone de position N du vecteur flux φ_s . Les effets d'oscillation sont bien marqués en début de zone, où l'on relève une décroissance légèrement accélérée. En fin de zone, ce phénomène s'inverse et l'on relève que la croissance du flux est moins rapide, [2] [3]. L'ensemble des défauts de progression du flux statorique, entraîne un retard dans l'établissement du flux statorique. Par contre, le couple ne semble pas très affecté par les variations du flux. On relève en effet, [5]. Qu'il s'établit sans contrainte de progression, ce qui lui permet de s'établir plus vite que le flux statorique.

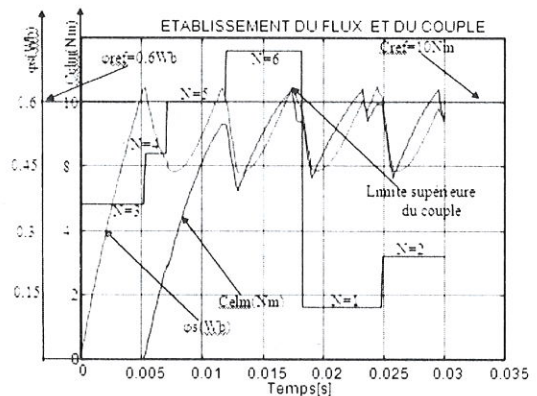


Fig.7. Etablissement simultané de l'amplitude du flux φ_s Et du couple Γ_{elm} ($\varphi_{ref}=0,6Wb$, $\Gamma_{ref}=10Nm$, $\Delta\varphi_{ref}=0,005$, $\Delta\Gamma_{elm}=1Nm$, $T_c=1\mu s$, $f_s=19Hz$)

7 L'INFLUENCE DU TERME RESISTIF

Lorsque le couple dépasse sa valeur de contrôle, la commande lui impose un vecteur tension nul (V_0 et

V₇) pour le faire décroître et le ramener à sa consigne. Sous l'influence du terme résistif [3][6], la sélection d'une tension nulle modifie le sens et la direction dévolution du vecteur flux φ_s , comme le montre l'expression (10) obtenue à partir de l'équation (9) [2] soit :

$$\frac{d\bar{\varphi}_s}{dt} e^{j\theta_s} + j \frac{d\theta_s}{dt} \bar{\varphi}_s = -R_s \bar{I}_s \quad (10)$$

Ainsi, pendant la durée d'application du vecteur nul, on observe une rotation en arrière du vecteur flux φ_s . Ce déplacement arrière entraîne un ralentissement du vecteur flux φ_s , de même qu'une décroissance du module de flux φ_s . Par conséquent, les phénomènes d'ondulation décrits lors de l'établissement simultané du flux et du couple va s'accroître, [5] [4]. Les Fig. (8 et 9) montrent l'orientation et la trajectoire de l'extrémité de φ_s pendant la phase de fin d'établissement du flux pour un couple établi ou non.

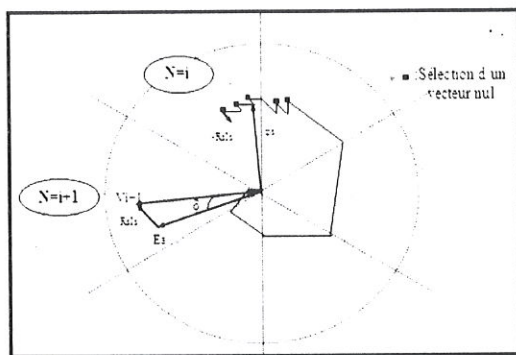


Fig. 8. Trajectoire de l'extrémité de φ_s , lors de l'établissement du flux

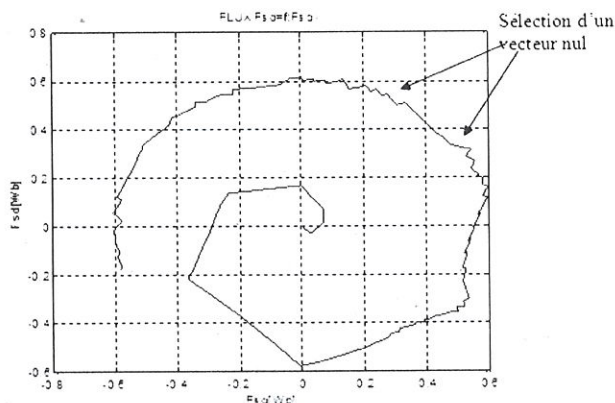


Fig. 9. Simulation de la Trajectoire de l'extrémité de φ_s , lors de l'établissement du flux

On retrouve bien sur les résultats de simulation de la Fig. 9, les phases de progression du flux statorique, [2], selon que le couple est établi ou non autour de sa référence Γ_{ref} . Les conditions de fonctionnement

choisies pour les résultats de la Fig. 9, sont les mêmes que celles appliquées pour la simulation de la Fig. 10. Elles sont également reprises lors des simulations des Fig. 10. (a) et (b) [2] [6]. Sur la Fig. 10. (a), on observe dans la phase d'établissement du flux à couple établi, la forte ondulation de l'amplitude du flux. Ces ondulations sont bien délimitées par les zones de position du flux statorique. On montre également que le flux statorique décrit une forme d'ondulation en dents de scies. Ces phénomènes de progression du flux s'expliquent par la sélection du vecteur nul, lors de la décroissance du couple [5] [6]. Le flux est arrêté et décroît suivant la variation de l'intégrale du terme résistif. Lorsque le couple atteint sa limite inférieure de contrôle, on sélectionne alors de nouveau un vecteur non nul, et le flux va reprendre sa croissance. Ces phénomènes de progression de l'amplitude du flux entraînent un retard dans l'établissement du flux [2][3], alors que dans le même temps le couple s'établit beaucoup plus rapidement, comme le montre la Fig. 10. (b). En comparant les Fig. 10. (a) et 10. (b), obtenues pour les mêmes temps de la simulation, on relève que le couple est contrôlé alors que le flux n'est pas complètement établi. Le retard dans l'établissement du flux ne semble pas perturber la forme oscillante du couple électromagnétique.

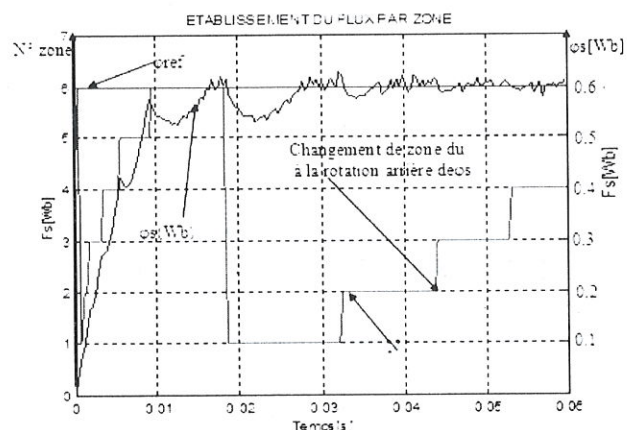


Fig. 10 (a). Simulation de la phase d'établissement du flux en fonction de la zone N

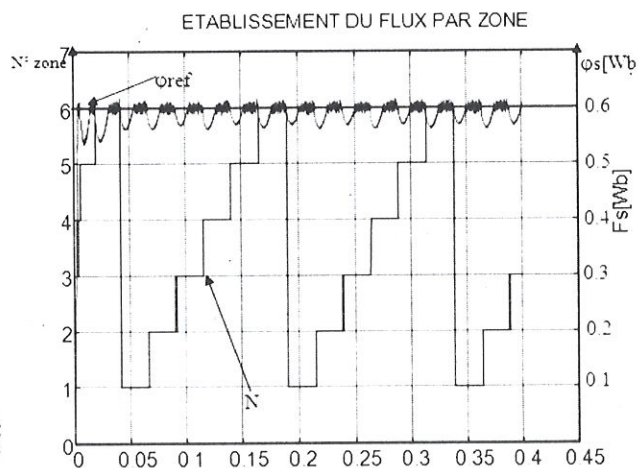


Fig. 10 (b)

Lorsqu'on applique un vecteur tension nul, le flux statorique est ramené très légèrement en arrière. Ainsi, lors d'un changement de zone, la détection de la zone de position du vecteur flux statorique n'est pas immédiate, comme le montre la Fig.10. Ceci peut entraîner quelques perturbations des grandeurs de contrôle de flux et de couple [6].

8 CORRECTION DES ONDULATIONS DU FLUX

Comme on l'a relevé précédemment, l'influence du terme résistif entraîne une modification de l'orientation du flux φ_s , telle qu'elle était prévue par la table de vérité [2]. On cherchera donc à ramener le déplacement du flux dans la direction désiré [4][5].

8.1 Le Mode De Décalage Des Zones

La décroissance de l'amplitude de φ_s , que l'on observe en début de zones $N=i$, peut être atténuée si l'on peut maintenir la sélection du vecteur tension V_i , au-delà de la zone $N=i-1$. En effet, dans ce cas, on peut conserver la croissance du flux statorique [2], et ceci sans modifier la table de vérité. Pour cela, on applique un décalage d'angle θ sur les zones N de position du flux φ_s . Ce déplacement des zones n'est effectif que pour la détection de la position du flux statorique φ_s . L'estimation du couple électromagnétique n'est affectée par le décalage.

Pour une valeur suffisamment élevée de ω_s [4], l'influence du terme résistif devient négligeable et l'angle de décalage θ peut ainsi être diminué et annulé suivant la valeur de la pulsation ω_s , [4] [5].

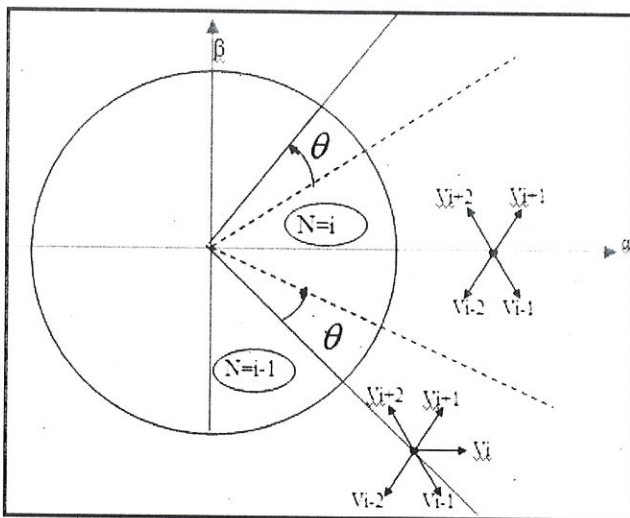


Fig. 11. Décalage des zones et modification de la sélection de V_s

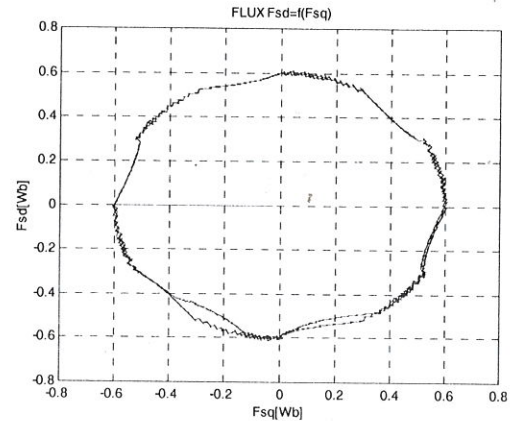


Fig.11. (a). La trajectoire de φ_s décalage de $\theta=-0,4\text{rad}$

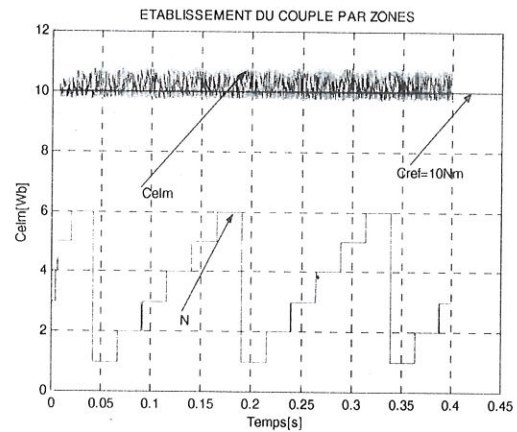


Fig.11. (b). l'établissement du module de φ_s , décalage de $\theta=-0,4\text{rad}$

8.2 Résultats De Simulation

Les Fig.11 reprennent les conditions de simulation précédentes Fig. (8 et 9), avec l'application de la méthode de décalage des zones. On note une diminution importante des ondulations de l'amplitude du flux. L'établissement du flux s'effectue plus rapidement, avec un élargissement de la trajectoire de son extrémité.

Si on fait varier cet angle de décalage en remarque d'après la Fig.12 que la trajectoire de flux se commence à déformer en régime permanent, est cela avec la variation de l'angle de décalage est l'angle qui réalise l'optimum est la bonne trajectoire c'est l'angle ($\theta=-0,4\text{rad}$) par ce que c'est l'angle qui est proche des changements de zones.

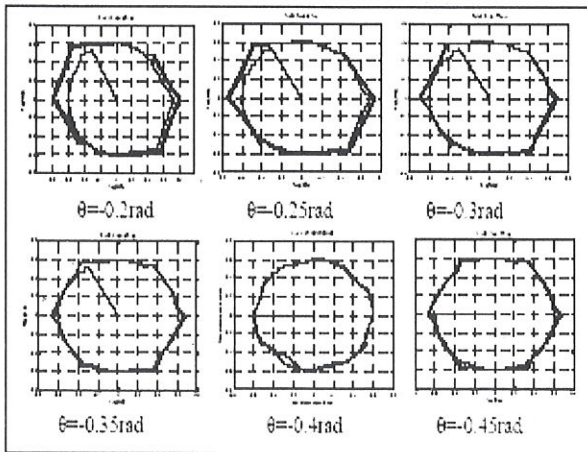


Fig.12 Simulation pour quelque valeur de l'angle de décalage θ

9 COMPARAISON DES RESULTATS

Donc cette étude nous a permis de démontrer l'importance du mode de décalage zonal. Et cela est bien montré par les deux contours de Park du flux, avant et après décalage zonal ou on voit bien que après le décalage, qu'une diminution importante des ondulations de l'amplitude du flux. L'établissement du flux s'effectue plus rapidement Fig.13.(b) par rapport au mode normale (avant décalage zonal). Fig.13. (a). Contour de Park Fig.13. (b). Contour de Park du flux Avant décalage zonal du flux après décalage zonal.

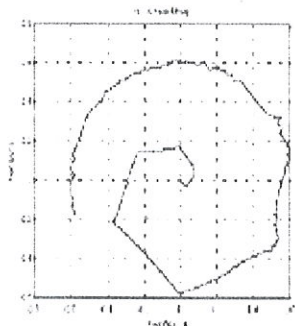


Fig.13. (a). Contour de Park du flux Avant décalage zonal

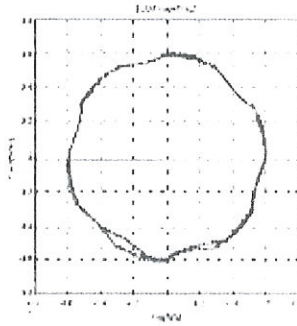


Fig.13. (b). Contour de Park du flux après décalage zonal

10 CONCLUSION

Dans cette étude, on a présenté les différents aspects du contrôle direct du couple, pour des conditions de fonctionnement allant du démarrage à des vitesses plus élevées, à flux statorique constant. On a ainsi pu relever, que les principes de bases de la structure de commande DTC ne sont pas toujours respectés. On a montré en effet, que pour des fréquences relativement faibles, l'influence du terme doit être prise en compte. Dans la première partie de cette étude, on a étudié le régime transitoire magnétique de la

commande. On a pu rendre compte des bonnes performances d'établissement du flux et du couple électromagnétique. On a pu corriger les ondulations observées sur le flux statorique, par une méthode de décalage des zones de position du flux.

11 NOTATION

La machine asynchrone utilisée a les paramètres suivantes $P_n=3\text{kW}$, $U_n=230\text{V}$, $R_s=2,89\Omega$, $R_r=2,39\Omega$, $L_s=L_r=0,225\text{H}$, $L_m=0,214\text{H}$, $P=2$.

P_n : Puissance nominale de la machine

R_s, R_r : Résistance statorique et rotorique.

L_s, L_r : Inductance cyclique statorique et rotorique.

L_m : Inductance mutuelle cyclique.

p : Nombre de paires de pôles.

α, β : Axes du repère de Concordia lié au stator.

$\vec{V}_s$: Vecteur tournant tension statorique.

T_e : Période d'échantillonnage.

U_0 : Tension continue à l'entrée de l'onduleur.

ϕ_{sref} : Référence de flux statorique.

Γ_{emref} : Référence de couple électromagnétique.

θ : L'angle de décalage des zones

$\Delta\phi, \Delta\Gamma$: Bande d'hystérésis de flux et de couple.

c_{flx}, c_{cpl} : Sortie du contrôleur de flux et de couple.

N : Numéro de zone de position du flux statorique.

12 REFERENCES

- [1] I. Takahashi, T. Noguchi, "A new quick-response and high-efficiency control strategy of induction motor", *IEEE Trans. On IA*, Vol.22, N°5, Sept/Oct 1986, PP.820-827.
- [2] M. Depenbrock, "Direct self - control (DSC) of inverter-fed induction machine", *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol.3, N°4, Oct 1988, PP.420-429.
- [3] D.Casadei, F.Profumo, G.Serra, A.Tani "FOC and DTC: Two Viable Schemes for induction Motors Torque Control", *IEEE Trans. Power Electronics. On PE*, Vol.17, N°5, Sept2002,
- [4] D.Casadei, G.Serra, "Implementation of direct Torque control Algorithm for Induction Motors Based On Discrete Space Vector Modulation", *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol.15, N°4, JULY2002,
- [5] Y. A. Chapuis, "Contrôle direct du couple d'une machine asynchrone par l'orientation de son flux statorique", *Thèse Doctorat INP, Grenoble 1996*.
- [6] R.Toufouti, H.Benalla, and S.Meziiane "Three-Level Inverter With Direct Torque Control For Induction Motor", *World Conference on Energy*