

Contrôle Direct du Couple d'une Machine Asynchrone Présentant un Défaut Rotorique

Ridha Kechida*, Arezki Menacer**

* Centre universitaire EL Oued, Algérie, ridha.k84@gmail.com

** LGEB Laboratoire de génie électrique de Biskra, Algérie, menacer_arezki@hotmail.com

Résumé— La commande directe du couple représente une bonne solution liée aux problèmes de robustesse et de la dynamique rencontrés dans le contrôle vectoriel à flux rotorique orienté. Dans cet article, on présente le modèle réduit simplifié de la machine asynchrone tenant compte des effets des cassures partielles ou totales des barres rotoriques et des portions d'anneau de court-circuit contrôlée par la technique de commande directe du couple (DTC). L'analyse et la détection du défaut rotorique est réalisée par l'analyse spectrale des grandeurs électriques et mécaniques.

Mots clés — Machine asynchrone, Modèle réduit, rupture de barre, Commande direct de couple, DTC.

I. INTRODUCTION

La robustesse, le faible coût et la facilité d'entretien font l'intérêt du moteur asynchrone dans les nombreuses applications industrielles. Pour avoir un fonctionnement et un contrôle précis, les régulations de flux et de vitesse sont indispensables [1, 2].

Les méthodes de contrôle direct du couple de la machine asynchrone basées sur une alimentation par modulation de largeur d'impulsion (MLI) et sur un découpage de flux et de couple moteur par orientation du champ magnétique [3].

Cette technique de contrôle présente des performances dynamiques remarquables pour des variations paramétriques qui peuvent être dues aux problèmes liés aux défauts dans la machine (défaut rotorique).

II. MODELE DE LA MACHINE ASYNCHRONE [4, 5].

L'objectif de la représentation du modèle la machine asynchrone de type multi-enroulement (figure 1) est de mettre en évidence l'influence des défauts étudiés sur les grandeurs mesurables de la machine, principalement les courants statoriques.

En considérant les hypothèses simplificatrices dans l'élaboration du modèle de la machine :

- Perméabilité relative du fer très grande,
- Entrefer lisse et constant – effets d'excentricité négligeables – champ radial,
- Distribution sinusoïdale de la force magnétomotrice statorique
- Effets pelliculaires nuls – courants de Foucault négligeables hors des barres rotoriques.

En plus de ces hypothèses, en supposant que le stator est sain de constitution symétrique, ce qui permet de calculer les différents paramètres du modèle de la machine [6].

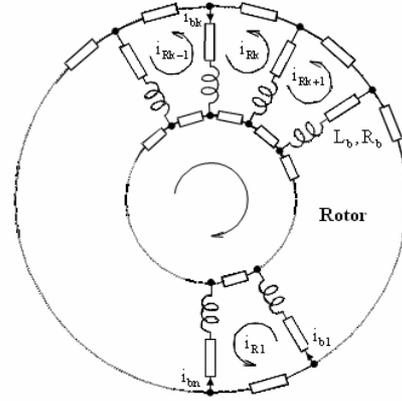


Fig.1. Circuit équivalent du rotor de la machine asynchrone à cage

III. CALCUL DES INDUCTANCES DU MODELE DE LA MACHINE ASYNCHRONE A CAGE [4, 5]

A. Inductances statoriques

L'expression de la F.m.m d'une phase "a" est donnée par la relation suivante :

$$F_m(\theta) = \frac{2N_s i_a}{p\pi} \cos(\theta) \quad (1)$$

L'induction créée dans l'entrefer s'écrit comme :

$$B_s(\theta) = \frac{2\mu_0 N_s i_a}{e p \pi} \cos(\theta) \quad (2)$$

Le flux principal est ainsi écrit comme :

$$\phi_{sp} = \frac{4\mu_0 N_s^2 R L}{\pi e p^2} i_a \quad (3)$$

L'inductance principale (magnétisante) de la phase "a" statorique est donc donnée par :

$$L_{sp} = \frac{\phi_{sp}}{i_a} = \frac{4\mu_0 N_s^2 R L}{\pi e p^2} \quad (4)$$

L'inductance totale (propre) de la phase "a", est donnée par la somme de l'inductance de magnétisation et l'inductance de fuite :

$$L_s = L_{sp} + L_{sf} \quad (5)$$

L'inductance mutuelle entre les phases statoriques est définie par la relation suivante :

$$M_s = -\frac{L_s}{2} \quad (6)$$

B. Inductances rotoriques

L'inductance principale d'une maille du rotor peut être calculée à partir de la distribution de l'induction magnétique.

La forme d'onde de l'induction produite par la $k^{\text{ème}}$ maille rotorique est représentée par la figure 2.

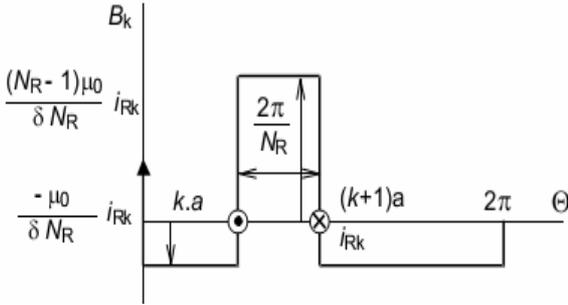


Fig.2. Inductions magnétiques produites par une maille rotoriques

L'inductance principale rotorique s'écrit :

$$L_{rp} = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi}{e} RL \quad (7)$$

L'inductance de la $k^{\text{ème}}$ maille rotorique est donnée par la somme de son inductance principale, des inductances de fuite des deux barres et des inductances de fuite des deux portions d'anneaux de court circuit fermant la maille "k" (figure 3) [4, 5] :

$$L_{rr} = L_{rp} + 2L_b + 2L_e \quad (8)$$

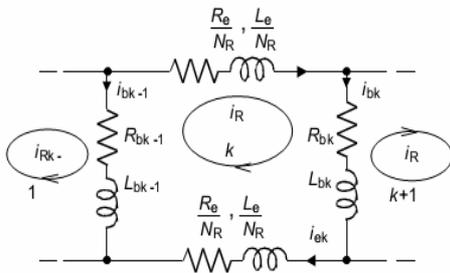


Fig.3. Schéma équivalent de la maille rotorique

L'inductance mutuelle entre les mailles rotoriques non adjacentes est exprimée par la relation :

$$M_{rr} = -\frac{1}{N_r^2} \frac{2\pi\mu_0}{e} RL \quad (9)$$

Par contre, l'inductance mutuelle entre la $k^{\text{ème}}$ maille et les mailles adjacentes est donnée par :

$$M_{rk(k-1)} = M_{rk(k+1)} = M_{rr} - L_b \quad (10)$$

L'expression de l'inductance mutuelle entre le stator et le rotor est déduite de l'expression du flux :

$$M_{snrk} = -M_{sr} \cos(p\theta_r - n \frac{2\pi}{3} + ka) \quad (11)$$

où :

$$a = p \frac{2\pi}{N_r}, \quad M_{sr} = \frac{4\mu_0 N_s R l}{e p^2 \pi} \sin\left(\frac{a}{2}\right)$$

IV. MODELE REDUIT DE LA MACHINE ASYNCHRONE A CAGE

La représentation d'état du modèle de la machine fait apparaître un système d'ordre très élevé [4-8], ce qui complique sa résolution. L'application de la transformation de Park étendue au système rotorique de manière à transformer le système à N_r phases en un système (d, q) équivalent biphasé permet de faciliter la résolution [4, 5].

Le système peut être mis sous la forme canonique suivante:

$$[L] \frac{d[I]}{dt} = [V] - [R][I] \quad (12)$$

avec :

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{sc} & 0 & -\frac{N_r}{2} M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{sc} & 0 & -\frac{N_r}{2} M_{sr} & 0 \\ -\frac{3}{2} M_{sr} & 0 & L_{rc} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{3}{2} M_{sr} & 0 & L_{rc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_e \end{bmatrix},$$

$$[R] = \begin{bmatrix} R_s & -L_{sc}\omega_r & 0 & \frac{N_r}{2} M_{sr}\omega_r & 0 \\ L_{sc}\omega_r & R_s & -\frac{N_r}{2} M_{sr}\omega_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_e \end{bmatrix},$$

$$L_{rc} = L_{rp} - M_{rr} + \frac{2L_e}{N_r} + 2L_b (1 - \cos(a)),$$

et

$$R_r = 2 \frac{R_e}{N_r} + 2R_b (1 - \cos(a))$$

Dans le cas où la machine présente un défaut rotorique, la matrice $[R_r]$ doit être modifiée, la nouvelle matrice des résistances rotoriques après transformations s'écrit [4, 5]:

$$\begin{bmatrix} R_{rfdq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{rdd} & R_{rdq} \\ R_{rqd} & R_{rqq} \end{bmatrix}$$

où les quatre termes de cette matrice sont :

$$R_{rdq} = -\frac{2}{N_r}(1-\cos(a)) \sum_k R_{bfk} \sin(2k-1)a$$

$$R_{rqd} = -\frac{2}{N_r}(1-\cos(a)) \sum_k R_{bfk} \sin(2k-1)a$$

$$R_{rdd} = 2R_b(1-\cos(a)) + 2\frac{R_e}{N_R} + \frac{2}{N_R}(1-\cos(a)) \sum_k R_{bfk} (1-\cos(2k-1)a)$$

$$R_{rqq} = 2R_b(1-\cos(a)) + 2\frac{R_e}{N_r} - \frac{2}{N_r}(1-\cos(a)) \sum_k R_{bfk} (1-\cos(2k-1)a)$$

L'indice "k" caractérise la barre cassée.

La matrice régissant le fonctionnement de la machine asynchrone avec ou sans défauts au rotor devient:

$$[R'] = \begin{bmatrix} R_s & -L_{sc}\omega_r & 0 & (N_r/2)M_{sr}\omega_r & 0 \\ L_{sc}\omega_r & R_s & -(N_r/2)M_{sr}\omega_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \begin{bmatrix} R_{rdd} & R_{rdq} \end{bmatrix} & 0 \\ 0 & 0 & \begin{bmatrix} R_{rqd} & R_{rqq} \end{bmatrix} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_e \end{bmatrix}$$

Pour la partie mécanique, après l'application de la transformation généralisée sur l'expression du couple, on obtient :

$$C_e = \frac{3}{2}p.N_r.M_{sr} (I_{ds}.I_{qr} - I_{qs}.I_{dr}) \quad (13)$$

V. COMMANDE DIRECTE DE COUPLE (DTC) DE LA MACHINE ASYNCHRONE A CAGE

La commande directe du couple d'une machine asynchrone (DTC) est basée sur la détermination directe de la séquence de commande appliquée aux interrupteurs d'un onduleur de tension. Le choix de cette commande est basé généralement sur l'utilisation de régulateurs à hystérésis dont la fonction est de contrôler l'état du système, l'amplitude du flux statorique et du couple électromagnétique. Ce type de stratégie se classe 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 modulation de la largeur d'impulsion (MLI) [8, 9].

A. Commande par action sur le flux statorique

Le flux statorique dans un repère lié au stator est donné par l'équation suivante :

$$\phi_s = \int_0^t (V_s - R_s.i_s) dt \quad (14)$$

Sur un intervalle de période de contrôle $[0, T_e]$, correspondant à une période d'échantillonnage T_e , l'expression (14) peut s'écrire comme suit :

$$\phi_s = \phi_{s0} + V_s.T_e - \int_0^t R_s.i_s dt \quad (15)$$

où

ϕ_{s0} : vecteur flux à $t=0$

Pour des raisons simplificatrices, on considère le terme $R_s.i_s$ comme négligeable par rapport à la tension V_s , ce qui se vérifie lorsque la vitesse de rotation est suffisamment élevée.

A partir de l'équation (15) on trouve :

$$\frac{d\phi_s}{dt} = V_s \quad (16)$$

donc :

$$\Delta\phi_s = \phi_s - \phi_{s0} = V_s.T_e \quad (17)$$

B. Commande par action sur le couple

Le couple électromagnétique est proportionnel au produit vectoriel entre les vecteurs flux stator et rotor.

$$C_e = k(\bar{\phi}_s \cdot \bar{\phi}_r) = |\phi_s||\phi_r|\sin\theta_{sr} \quad (18)$$

C. Description de la structure du contrôle

La figure (4) présente la sélection de vecteur tension V_s selon la zone N_i .

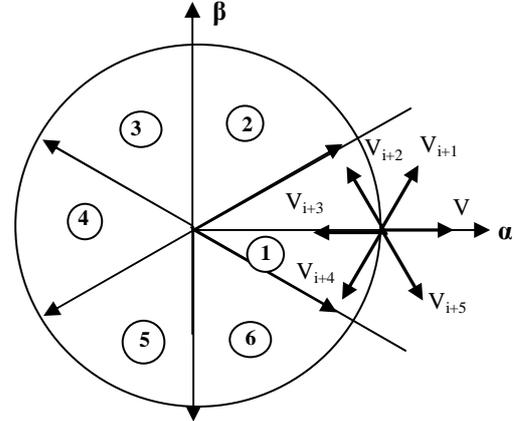


Fig.4. Sélection du vecteur tension V_s selon la zone $N=i$

Quelque soit le sens d'évolution du couple ou du flux, dans une zone de position $N=i$, les deux vecteurs tensions V ne sont jamais utilisés puisque ils peuvent augmenter V_i et V_{i+3} ou diminuer le couple selon la position du flux ϕ_s dans le secteur i [7]. La table de commande est construite en fonction de l'état

des variables $\Delta\phi_s$, ΔC_e et de la zone Ni de la position de ϕ_s [8,9].

TABLE I
Table de commutation de la structure DTC

Cflx	1	1	1	0	0	0
Cclp	1	0	-1	1	0	-1
S ₁	V ₂	V ₇	V ₆	V ₃	V ₀	V ₅
S ₂	V ₃	V ₀	V ₁	V ₄	V ₇	V ₆
S ₃	V ₄	V ₇	V ₂	V ₅	V ₀	V ₁
S ₄	V ₅	V ₀	V ₃	V ₆	V ₇	V ₂
S ₅	V ₆	V ₇	V ₄	V ₇	V ₀	V ₃
S ₆	V ₁	V ₀	V ₅	V ₂	V ₇	V ₄

VI. RESULTATS DE SIMULATION

A. Fonctionnement à vide et en charge de la machine à l'état sain

Les réponses de vitesse, du flux, du courant statorique et du couple sont représentées sur la figure 5. On note que lors du démarrage, la vitesse atteint rapidement sa valeur de référence sans dépassement. La réponse de la vitesse présente une légère variation lors de l'application du couple de charge. Le couple suit correctement sa référence mais avec des petites ondulations et le flux est maintenu à sa valeur de référence.

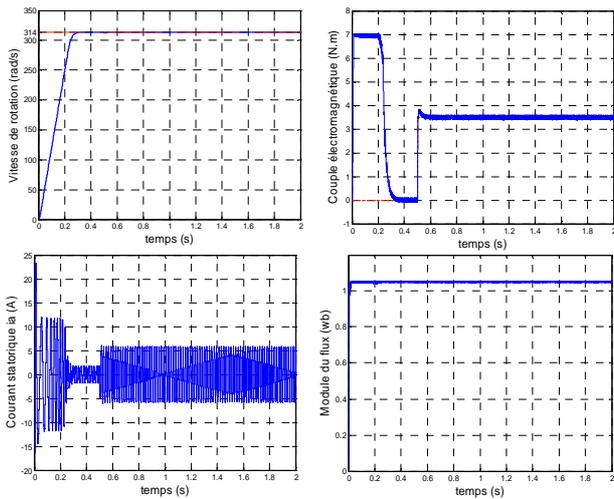


Fig.5. Démarrage à vide suivi de l'application d'un couple de charge nominale

B. Inversion du sens de rotation et variation du couple de charge

Pour réaliser ce test, la machine est considérée en fonctionnement en charge de 3.5 Nm à $t=0.5s$, on inverse le sens de rotation de la vitesse à $t=1s$. Une variation du couple de charge est effectuée à l'instant $t=1s$ (figure 6).

Lors de l'inversion de la vitesse, on remarque que la poursuite en vitesse s'effectue mais avec un léger dépassement, le couple présente aussi un dépassement avant de se stabiliser. Les courants statoriques présentent des

ondulations au moment de l'inversion comparable au pic lors du démarrage.

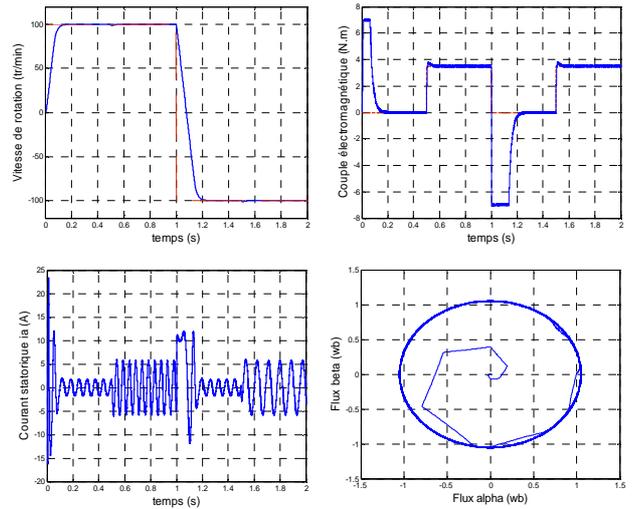


Fig.6. Inversion du sens de rotation et variation du couple charge

C. Réponse aux basses vitesses

Des tests de robustesses sont effectués pour un fonctionnement à basses vitesses (30 rd/s à -30 rd/s) à $t=0.8s$ (figure 7) où la commande s'adapte à ces variations.

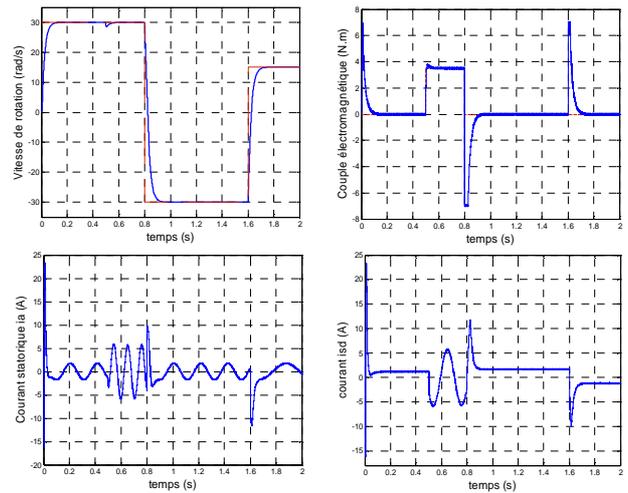


Fig.7. Réponse aux basses vitesses

D. Spectre du courant statorique et de la vitesse dans le cas d'une machine saine

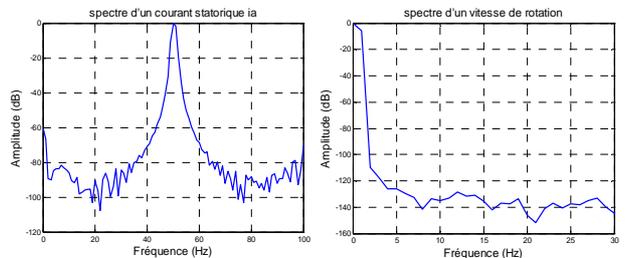


Fig.8. Spectre du courant statorique et de la vitesse de rotation : machine saine en charge

La figure.8 représente le spectre du courant statorique et de la vitesse pour un moteur à l'état sain ($g=6.66\%$). Les spectres ne présentent aucune raie de défaut, un certain degré d'asymétrie naturelle dans le rotor est observé, ce engendre des raies, mais avec des amplitudes faibles.

E. Machine avec défaut rotorique:

Pour une machine présentant un défaut rotorique de type cassure d'une barre, les réponses de vitesse, du couple et du courant statorique sont représentées sur la figure 9. Des ondulations sur le courant et le couple sont observés provoquées par le défaut de type cassure de barre.

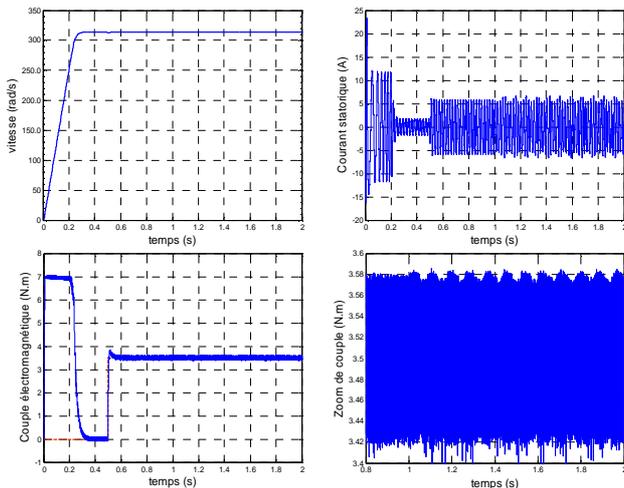


Fig.9. Caractéristique électrique et mécanique pour une machine avec une barre cassée ($g=6.66\%$)

L'analyse spectrale par le biais de la transformée de Fourier Rapide (FFT) du courant statorique et du couple électromagnétique (figure 10) mis en évidence d'après le critère l'apparition de raies de fréquences $(1\pm 2k)g.f_s$ à proximité du fondamental

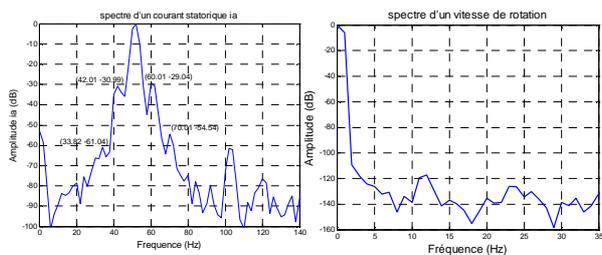


Fig.10. Spectre du courant statorique et vitesse pour une machine avec une cassure de barre rotorique ($g=6.66\%$)

V. CONCLUSION

Dans cet article, l'étude est réalisée sur l'influence d'un défaut rotorique (rupture de barre) sur la forme du courant statorique. L'utilisation du modèle réduit nous a permis de réaliser la simulation et le contrôle de la machine en présence (ou non) d'un défaut. Les principaux concepts de base du

contrôle direct du couple DTC ont été présentés. Ce contrôle s'effectue en utilisant un choix convenable des vecteurs tensions de l'onduleur. Les résultats de simulation ont démontrés la robustesse et les avantages de ce type de commande.

PARAMETRES DE LA MACHINE

$P=1.1\text{kW}$, $R_r=6.3\Omega$, $R_s=7.828\Omega$, $J=0.006\text{kgm}$, $R=0.03575$, $L=0.065\text{m}$, $e=0.00025\text{m}$, $N_s=160$, $N_r=16$, $L_{sf}=0.018\text{H}$, $R_b=150\cdot 10^{-6}\Omega$, $R_e=7210^{-6}\Omega$, $L_b=10^{-6}\text{H}$, $L_e=10^{-6}\text{H}$, $2p=2$.

Nomenclature

P: Puissance nominale
 R_r : Résistance rotorique
 R_s : Résistance statorique
 p : Nombre de paires de pôles
 J : Moment d'inertie
 R : Rayon du rotor
 L : Longueur du rotor
 e : Entrefer moyen
 N_s : Nombre de spires statoriques par phase
 N_r : Nombre de barres au rotor
 L_{sf} : Inductance de fuite statorique
 R_b : Résistance d'une barre rotoriques
 R_e : Résistance d'anneau de court circuit
 L_b : Inductance de fuite d'une barre rotoriques
 L_e : Inductance de fuite d'anneau de court-circuit

REFERENCES

- [1] Takahashi, Youhichi Ohmori, "High-performance direct torque control of an induction motor ".IEEE Transactions on industry applications, vol 25 N°2, pp1603-1611. March/April 1989.
- [2] S. Kaboli, M.R. Zolghadri, S. Hahbin, A. Honifar, "Effects of the flux value on torque ripple of the direct torque controlled induction motors drives determination", IEEE, pp 439- 444, 2003.
- [3] A. Abed," Contribution à l'étude et au diagnostic de la Machine asynchrone", thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, mars 2002.
- [4] A. Menacer, M.S. Naït Saïd, A. Benakcha and S. Drid, "Stator Current Analysis of Incipient Fault Into Asynchronous Motor Rotor Bars Using Fourier Fast Transform", Journal of Electrical Engineering Elektrotechnický časopis, JEEEC, Volume 55, N°:05-06, 2004, pp:122-130, ISSN 1335-3632© 2004 FEI STU Slovakia.
- [5] A. Menacer, "Contribution à l'identification des paramètres et des états d'une machine à induction pour diagnostic et développement de commande robuste", thèse doctorat, université de Batnan Algerie, LAII Poitiers, France, Déc. 2007.
- [6] R. Casimir, "Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des Formes", thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, 2003.
- [7] C. Carlos, "Modélisation Contrôle Vectoriel et DTC, Commande des Moteurs Asynchrone", Edition Hermes Science Europe, 2000.
- [8] C. Elmoucary, "Contribution à l'étude de la commande directe de couple et du flux de la machine à induction", thèse de doctorat, Université Paris IX 2000
- [9] A. Menacer, A. Benakcha et B. Messaouidi, "Utilisation du Contrôle directe du flux statorique et du filtre de Kalman en vue du contrôle direct du couple d'une machine à induction", 3rd International Conference on Electrical Engineering, ICEE 09 May 19-21, 2009. Algeria Algeria, pp : 325-329