# Amélioration des performances de la commande direct du couple pour les machines à induction avec une fréquence de commutation constante et une réduction des ondulations du couple

Saad Khadar, Abdellah Kouzou

Laboratoire LAADI, Faculté de la Technologie, Université Ziane Achour, 17000 Djelfa, Algérie

saadkhadar@yahoo.com, kouzouabdellah@ieee.org.

Résumé—Commande directe du couple (DTC) est une méthode de contrôle avancée et simple dans des systèmes d'entraînement à courant alternatif (AC) pour obtenir la commande de couple de haute performance. Le DTC classique utilise un contrôleur de bande d'hystérésis dont l'action de commande n'a pas de différence entre une erreur de couple importante et une erreur de couple faible. Ceci a comme conséquence l'ondulation élevée de couple et la fréquence variable de commutation. Cet article propose deux techniques pour améliorer les performances du DTC conventionnel en utilisant la MLI vectorielle et la technique du réseau neuronal artificiel (RNA) pour minimiser l'erreur de couple et pour obtenir une fréquence de commutation constante et meilleure performance du moteur. Les techniques proposées peuvent réduire considérablement l'ondulation du couple et d'améliorer la réponse dynamique en comparaison avec DTC classique. La validité des techniques proposées est confirmée par les résultats de simulation.

Mots-Clés—commande directe du couple (DTC), onduleur de tension à deux niveaux, régulateur proportionnel intégral (PI), MLI vectorielle, réseau neuronal artificiel (RNA).

## I. INTRODUCTION

En général, les actionneurs électriques les plus utilisés dans la majorité des applications industrielles sont construits autour de la machine asynchrone (MAS). Cette dernière se distingue en particulier par sa robustesse, sa fiabilité, son faible coût et la simplicité de sa structure [1-3]. Cependant, son comportement dynamique est souvent très complexe, vu que sa modélisation aboutit à un système d'équations non linéaire, fortement couple et multi variables. De plus, certaines de ses variables d'état, comme les flux ne sont pas mesurables. Ces contraintes exigent des algorithmes de commande plus avancés pour contrôler en temps réel le couple et le flux de ces machines. Plusieurs stratégies de commande ont été proposées dans la littérature pour atteindre cet objectif.

Au cours des dernières décennies, une stratégie de contrôle de la machine asynchrone, connue sous le nom de Commande Directe de Couple ou DTC (Direct Torque Control) est apparue pour concurrencer les commandes conventionnelles. Cette commande a été proposée par DEPENBROCK et TAKAHASHI [4,5] utilise une approche séduisante de par son efficacité et sa simplicité de mise en œuvre. Cette technique permet de calculer les grandeurs de contrôle qui sont le flux statorique et le couple électromagnétique à partir des mesures des courants statoriques sans utilisation de capteur mécanique [6]. De plus cette commande ne nécessite pas l'application d'une commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI) sur l'onduleur, ce qui améliore nettement les performances dynamiques des grandeurs contrôlées. De même, il n'est pas nécessaire de connaître la position angulaire du rotor car seule la position du flux statorique est utilisée pour changer le vecteur tension à appliquer à la machine [7]. Cependant, cette stratégie présente deux inconvénients majeurs : d'une part, la fréquence de commutation est fortement variable et d'autre part, l'amplitude des ondulations du couple et du flux statorique restent mal maitrisée dans toute la gamme de vitesse du fonctionnement envisagée. Il faut souligner que les ondulations du couple engendrent des bruits et des vibrations supplémentaires et par conséquent causent la fatigue au niveau de l'arbre en rotation.

Cependant, cette stratégie présente deux inconvénients majeurs : d'une part, la fréquence de commutation est fortement variable et d'autre part, l'amplitude des ondulations du couple et du flux statorique restent mal maitrisée dans toute la gamme de vitesse du fonctionnement envisagée, dus à l'utilisation des contrôleurs à hystérésis et les tables de commutation [8]. Il faut souligner que les ondulations du couple engendrent des bruits et des vibrations supplémentaires et par conséquent causent la fatigue au niveau de l'arbre en rotation. Pour surmonter ces problèmes, a nombreux travaux de recherche ont été développés dans ce domaine pour améliorer les performances de cette technique, on cite des contrôleurs PI (proportional-integral) [9, 10], des régulateurs à hystérésis à bandes variables [11] et des techniques de logique floue [12]. Ces techniques de controle donnent généralement des configurations complexes. Dans [13] et [14] l'instant de commutation optimisé est calculé suivant une loi de minimisation des oscillations du couple, mais la réalisation est plus compliquée et nécessite beaucoup de commutations. Afin de s'affranchir des contraintes sévères de temps de calcul et d'améliorer les défauts de la commande DTC classique, nous avons développé deux techniques qui réduisent les oscillations de couple et de flux en imposant une fréquence de modulation constante, les blocs d'hystérésis ont été remplacés par des contrôleurs proportionnel-intégral (PI) et les pulsations du couple ont été réduites par la modulation vectorielle (SVM) des commutations de l'onduleur. Cette méthode, permet de générer le vecteur tension dont la position et le module sont

choisis de telle manière à conduire le vecteur flux statorique et le couple électromagnétique vers leur référence d'une manière optimale. Une autre technique a été aussi proposée en utilisant que les techniques intelligentes. Le réseau de neurones artificiel (RNA) est un modèle de calcul dont la est très schématiquement conception inspirée du fonctionnement de vrais neurones. Ces techniques ont permis d'améliorer les performances de la méthode DTC et les oscillations de couple sont considérablement réduites. L'article est organisé comme suit, nous commençons par exposer dans la section 2 un rappel du principe de la DTC. Dans la section 3, nous exposons la DTC-SVM. La section 4 est consacrée à la DTC à base d'un réseau de neurones. L'efficacité des approches sont examinée par des simulations obtenus ont été à l'aide de Matlab/Simulink, et une étude comparative entre les résultats de simulation sont présentés

dans la section 5. Enfin, une conclusion est tirée dans la section 6.

## II. PRINCIPE GENERAUX DE LA COMMANDE DTC

La DTC d'une MAS est basée sur la détermination directe de la séquence de commande appliquée aux interrupteurs d'un onduleur de tension [4]. Ceci afin de maintenir le couple électromagnétique et le flux statorique à l'intérieur de deux bandes à hystérésis prédéfinies. Une telle application de cette technique permet d'assurer un découplage entre le contrôle du couple et du flux. Le schéma bloc de la Fig. 1, représente la structure de la DTC appliquée à la MAS. L'objectif cible de DTC est de réguler le flux statorique et le couple électromagnétique sans disposer de mesures, de flux ou de couple. Les seules mesures utilisées sont les courants du stator de la machine.



Fig. 1. Schéma bloc de la commande DTC d'une MAS.

Les composant  $(I_{s\beta} et I_{s\beta})$  du vecteur courant statorique sont obtenus par l'application de la transformation de Concordia aux courant mesurés  $(I_{s\alpha}, I_{sb} et I_{sc})$  soit :

$$I_{s\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{s\alpha} \tag{1}$$

$$I_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} \, (I_{sb} - I_{sc}) \tag{2}$$

A partir de la mesure de la tension du bus continu d'entrée de l'onduleur et en tenant compte des états de des interrupteur ( $S_a$ ,  $S_b$  et  $S_c$ ) issus du circuit de commande du convertisseur, les tensions statoriques peuvent être déterminées par :

$$V_{s} = V_{s\alpha} + j V_{s\beta} \tag{3}$$

$$\begin{cases} V_{s\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} [S_a - \frac{1}{2} (S_b + S_c)] \\ V_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_{dc} (S_b - S_c) \end{cases}$$
(4)

$$\vec{V}_{s} = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} \left[ S_{a} + S_{b} \exp\left(j\frac{2\pi}{3}\right) + S_{c} \exp\left(j\frac{4\pi}{3}\right) \right]$$
(5)

L'ensemble des vecteurs tensions délivrées par un onduleur à deux niveaux ainsi que les séquences de niveaux de phase correspondantes sont représentées dans le Fig. 2.



Fig. 2. Représentation vectorielle des tensions.

Les principaux éléments constitutifs de la commande DTC sont énumérés ainsi :

### A. E stimation du couple et du flux statorique

L'estimation du flux statorique se fait à partir de vecteurs tension et courant statorique, le flux statorique est donc donné par [15] :

$$\overline{\phi}_{s\alpha} = \int_0^t (\overline{V}_{s\alpha} - R_s \overline{I}_{s\alpha}) dt \tag{6}$$

$$\overline{\varphi}_{s\beta} = \int_{0}^{t} (\overline{V}_{s\beta} - R_{s}\overline{I}_{s\beta}) dt \tag{7}$$

Le flux estimé statorique est défini par son module et sa position donnés par la relation suivante :

$$\widehat{\varphi}_{s=}\sqrt{\varphi_{s\alpha}^2 + \varphi_{s\beta}^2}$$
(8)

$$\theta_s = \arctan g \frac{\phi_{s\beta}}{\phi_{s\alpha}} \tag{9}$$

Le couple électromagnétique peut être estimé à partir des grandeurs estimées du flux ( $\mathcal{O}_{s\alpha}, \mathcal{O}_{s\beta}$ ) et des grandeurs calculées du courant ( $I_{s\alpha}, I_{s\beta}$ ):

$$C_{em=p}(\varphi_{s\alpha}, I_{s\beta}, \varphi_{s\beta}, I_{s\alpha})$$
(10)

Avec:  $R_s$ : Résistance statorique par phase, p: Nombre de paires de pôles,  $V_{dc}$ : Tension d'alimentation de l'onduleur,  $\alpha,\beta$ : Axes correspondants au référentiels fixe par rapport au stator,  $C_r$ : Couple de référence,  $I_{s\alpha}$ ,  $I_{s\beta}$ : Courant statorique dans le repère  $\alpha,\beta$ .

#### B. Elaboration des correcteurs du couple et du flux

Afin d'obtenir de bonnes performances dynamiques, le correcteur à hystérésis à deux niveaux est la solution la plus simple et la mieux adaptée à la commande directe du couple. En effet, avec ce type de correcteur on peut facilement contrôler et maintenir l'extrémité du vecteur flux dans une zone de correction circulaire. Ainsi, le correcteur à hystérésis à deux niveaux, permet de détecter les dépassements de la bande de contrôle par la relation:

$$\left|\overline{\phi}_{ref} - \overline{\phi}_{s}\right| \leq \Delta \overline{\phi}_{s}$$
 (11)

Où  $\Delta \overline{\phi}_s$  est la bande d'hystérésis du correcteur.

La bande d'hystérésis permet d'évaluer l'erreur du flux ou la sortie du correcteur de flux donnée par la variable logique (0,1), ceci explique que la sortie du correcteur du flux peut être une variable booléenne : Cf = 1 : lorsque l'erreur du flux est positif ; Cf = 0 : lorsque l'erreur du flux est négatif.

De la même façon, la correcteur du couple électromagnétique est possible grâce à deux types de correcteurs à hystérésis, un correcteur à hystérésis à deux niveaux ou trois niveaux. Le correcteur à deux niveaux présente l'avantage de la simplicité de contrôle mais dans un seul sens de rotation de la machine, alors que le correcteur à trois niveaux assure le contrôle du moteur dans les deux sens de rotation. La fonction de sortie du correcteur du couple est définie de telle sorte qu'elle respecte la condition suivante :

$$\left|\overline{C}_{ref} - \overline{C}_{em}\right| \leq \Delta \overline{C}_{em} \tag{12}$$

En introduisant l'écart **Ccp** entre le couple électromagnétique de référence et celui estimé dans un comparateur à hystérésis à trois niveaux, celui-ci génère la valeur **Ccp** =1 lorsque le couple est inférieur à la limite inférieure de la bande. Ce qui nécessite son augmentation. **Ccp** = -1si le couple est supérieur à la limite supérieure de la bande, il faut alors le réduire. **Ccp** = 0 si le couple est à l'intérieur de la bande et il faut le maintenir constant autour de sa référence.

# C. Elaboration de la table de commutation

L'objectif est de réaliser un contrôle performant aussi bien en régime permanent qu'en régime transitoire [15], et ceci en fonction du secteur et de l'évolution du flux et du couple on peut choisir le vecteur tension  $V_a$  à appliquer de manière à respecter la consigne de flux et de couple. La Table de vérité permettant de choisir le vecteur adéquat est représentée dans la Table. I. Ce dernier est élaboré en se basant sur les erreurs de flux Cf et de couple Ccp et selon la position du vecteur de flux statorique  $N_i$ (i=1,...,6).

**TABLE I.** LA TABLE DE COMMUTATION

Flux	Couple	1	2	3	4	5	6
Cf=1	Ccp=1	<b>V</b> <sub>2</sub>	<b>V</b> <sub>3</sub>	$V_4$	<b>V</b> <sub>5</sub>	$V_6$	$V_1$
	Ccp=0	$V_7$	$V_0$	$V_7$	$V_0$	$V_7$	$\mathbf{V}_0$
	Ccp= -1	$V_6$	$V_1$	$V_2$	<b>V</b> <sub>3</sub>	$V_4$	$V_5$
Cf=0	Ccp=1	<b>V</b> <sub>3</sub>	$V_4$	<b>V</b> <sub>5</sub>	$V_6$	$V_1$	$V_2$
	Ccp=0	$V_0$	$V_7$	$V_0$	$V_7$	$V_0$	$V_7$
	Ccp= -1	<b>V</b> <sub>5</sub>	$V_6$	$V_1$	<b>V</b> <sub>2</sub>	<b>V</b> <sub>3</sub>	$V_4$

#### III. LA DTC PAR LA TECHNIQUE MLI VECTORIELLE

Cette partie est consacrée pour l'implantation de la commande directe du couple de la machine asynchrone par la technique de MLI vectorielle. Cette technique est beaucoup sollicitée dans le domaine de la commande, ses effets sur les ondulations du courant et couple sont remarquables, c'est pourquoi elle est la plus utilisée par les chercheurs, elle permet de déterminer les séquences des allumages et extinctions des composants du convertisseur et de minimiser ainsi les harmoniques des tensions et réduire les ondulations du flux et du couple électromagnétique. Le schéma bloc de la Fig. 3, représente la structure générale de la DTC basée sur la technique de modulation vectorielle appliquée à la MAS, ce système de contrôle est similaire au contrôle classique, mais on a utilisé un régulateur proportionnel intégral après les comparateurs de flux et du couple respectivement, à la sortie de chaque contrôleur on génère les deux tensions  $V_{sd}$  l'image de la composante flux et  $V_{sq}$  l'image électromagnétique. de la composante du couple

Le principe de MLI vectorielle, consiste à projeter le vecteur  $V_s$  de tension statorique désiré sur les deux vecteurs de tension adjacents correspondant à deux états de commutation de l'onduleur les valeurs de ces projections assurant le calcul des temps de commutation désirées



Fig. 3. Schéma bloc de la DTC basée sur la MLI vectorielle

correspondant à deux états non nuls de commutation de l'onduleur, si nous notons  $T_i$  et  $T_{i+1}$ . Ces deux temps, leur somme doit être inférieurs à la période  $T_m$ , de commutation de l'onduleur. Pour maintenir le fréquence de commutation constante, un état nul de l'onduleur est appliqué durant une durée complémentaire à  $T_m$ . Avec la technique de MLI vectorielle, la tension de commande est créée par modulation des rapports cycliques des interrupteurs du convertisseur dans un des six secteurs illustrés sur la Fig. 2. Par conséquent, la MLI vectorielle peut être mis en application par les étapes suivantes :

- Etape 1 : détermination des tension de références .
- **Etape 2 :** détermination des secteur.
- Etape 3 : calcule les temps d'application des états de l'onduleur.
- Etape 4 : calcul des rapports cycliques de commutation pour chaque secteur .
- Etape 5 : création des impulsion de commutation de chaque transistor

## IV. LA DTC PAR LA RESEAU NEURONAL ARTIFICIEL

Le role d'une loi de contrôle est de maintenir certains états d'un système à des valeurs désirées malgré les effets d'éventuelles perturbations [16]. Des principes de contrôle très simples, parfois même mécaniques, sont employés depuis des années. Certains concepts sont toujours encore utilisés de nos jours, mais les lois de commande modernes reposent sur la techniques intelligence artificielle par exemple la technique de Réseau Neuronal Artificiel (RNA). L'application de la technique des réseaux de neurones dans la commande des machines est permis la resolution de plusieurs problèmes liées au contrôle de ces systèmes et de les rendre intelligent, c'est-à-dire plus automatisés, plus plus autonomes, plus performants, plus rapide. Dans notre travail sur la DTC, il est facile d'utiliser cette technique dont on va grader le même travail qu'au DTC conventionnel, mais nous changeons que le bloc qui donner les impulsions aux interrupteurs l'onduleur par un contrôleur à base de RNA. La Fig. 4. montre le schéma de principe de L'application de la technique de RNA dans la DTC.



Fig. 4. Schéma bloc de la DTC basée sur la RNA

Pour réaliser un réseau de neurone il faut faire trois études principales:

- Choix des variables d'entrées des RNA.
- Choix des variables de sortie des RNA.
- Construction de la base d'apprentissage.

L'architecture comprend un réseau de neurones permettant de remplacer la table de sélection. Ce réseau de neurones est composé d'une couche d'entrée, deux couches cachées et une couche de sortie. La couche d'entrée est composée de trois neurones, désignés respectivement par l'erreur de couple, l'erreur de flux et l'angle de flux. Les deux couches cachées sont constituées chacune de dix neurones. La couche de sortie se compose de trois neurones qui produisent la tension de référence à appliquer aux bornes de la machine asynchrone à travers l'onduleur de tension. Une fonction d'activation de type linéaire sur les couches d'entrée et de sortie et une autre fonction d'activation non linéaire de type tangentes hyperboliques est utilisée pour les couches cachées.

### V. RESULTATS DE SIMULATION ET INTERPRETATIONS

Dans cette section, les résultats de simulation de la commande DTC appliquée à la MAS alimentée par un onduleur de tension triphasé sont illustrés dans la Fig. 5 (a: DTC-Classique, b: DTC-SVM, c: DTC-RNA). Ces résultats sont obtenus avec le logiciel MATLAB/Simulink. Les résultats de simulation lors de l'introduction d'un couple de charge après un démarrage à vide. A l'instant t=0.5s, on applique un couple de 25 N.m. Pour des consignes du flux et vitesse égaux respectivement à 1.2 Wb et 100 rad/s. Le Table II donne les paramètres nominales d'une MAS. La Fig. 5 illustre l'évolution de la vitesse, de couple, de flux statorique de la trajectoire de l'extrémité du vecteur flux statorique et des courants statoriques, respectivement.



Fig. 5. les résultats de simulation de la DTC appliquée à la MAS

$P_n$	4 KW
$R_s$	1.2
$R_r$	1.8
$L_s$	0.1554 H
$L_r$	0.1568 H
М	0.15 H
J	0.07 Kg. m <sup>2</sup>
f	0.001 SI

TABLE II. LES PARAMETRES NOMINALES D'UNE MAS

A travers les résultats de simulation obtenus la validité des stratégies proposées peut être prouvée Ils se résument comme suit :

**DTC-Classique:** On constate d'après la Fig.a5 a que le couple électromagnétique présente un régime transitoire rapide et des oscillations importantes. Le flux statorique illustré atteint immédiatement sa valeur de référence de 1.2 Wb avec un léger dépassement oscillatoire de 0.017Wb d'amplitude autour de sa valeur de référence. La trajectoire de l'extrémité du flux statorique prend une forme presque circulaire. Bien que la DTC-Classique offre une réponse précise et rapide du couple électromagnétique et du flux statorique, Cependant, les inconvénients majeurs de cette commande sont liés à l'existence des ondulations importantes dans le couple et la variation de la fréquence de commutation.

**DTC-SVM:** En ce qui concerne le deuxième cas (DTC-SVM), on remarque une réduction considérable des ondulations du couple et du flux avec moins distorsion du courant par l'utilisation de la MLI vectorielle. D'autre part, la DTC-SVM présente une fréquence de commutation constante tandis que la trajectoire du flux statorique a une nette et fine forme circulaire par rapport à celle obtenue par la DTC-Classique

**DTC-RNA:** Les résultats de la DTC-RNA montrent des améliorations remarquables au niveau des ondulations de couple et de flux. Ces améliorations sont marquées par une diminution des ondulations et une rapidité au niveau de la dynamique de couple et de flux pendant la phase de démarrage de la machine ce qui entraîne la diminution de vibrations mécanique, par conséquent la réduction du bruit acoustique. La trajectoire du flux est d'une allure circulaire par rapport la DTC-Classique. Il faut retenir que la commande DTC-RNA a apporté plus d'amélioration que la commande DTC-SVM. Cela est confirmé par la diminution des harmoniques de couple électromagnétique et du courant statorique.

Pour comparer les performances dynamiques de la commande DTC des machines asynchrones à base des techniques MLI vectorielle et réseau de neurones. Le Table III récapitule les principales améliorations de la DTC-Classique.

 
 TABLE III.
 ETUDE COMPARATIVE ENTRE (DTC-CLASSIQUE, DTC-SVM et DTC-RNA)

Performances		DTC- Classique	DTC- SVM	DTC- RNA
Couple	Ondulations (N.m)	1.4	1	0.9
Flux	Ondulations (Wb)	0.017	0.004	0.009

## VI. CONCLUSIONS

Dans cet article, on a instauré de nouvelles solutions technologiques dans la commande des machines électriques. Plus particulièrement, on a intégré les techniques de commande, tels que la MLI vectorielle et le réseau de neurones, afin d'améliorer performances de la DTC de la MAS alimentée par un onduleur de tension multi niveaux. Le réseau de neurones utilisé permet de surmonter en partie les inconvénients liés à la commande conventionnelle toute en réservant de bonne dynamique du couple et du flux statorique. Les fluctuation du couple et du flux sont réduites surtout dans la DTC-RNA ce qui se traduit par une réduction des harmoniques et par conséquent moins de problèmes pour le moteur (échauffement, vibration, vieillissement,...). D'autre part, présente une alternative de contrôle direct du couple cette stratégie combine les avantages du contrôle vectoriel et DTC. Les régulateurs PI et la technique MLI vectorielle ont été utilisés afin de fixer la fréquence de commutation et pour réduire les ondulations du couple. Suivant les résultats obtenus, la stratégie de commande proposée fournissent une solution en évitant les inconvénients du DTC classique. La comparaison entre la DTC classique et la DTC-MLI vectorielle, cette dernière est simple et facilement réglable, les tables de vérité de sélection de vecteur optimaux et les régulateurs d'hystérésis on été éliminées, ainsi cet algorithme à l'avantage de réduire les harmoniques, ce qui réduit largement les pertes de commutation dans l'onduleur.

#### REFERENCES

- M. Rangarajan, G. Habetler et G. Harley, "Stator Winding Turn-Fault Detection for Closed-Loop Induction Motor Drives," IEEE Trans Industry Applications., vol. 39, no. 3, pp.720-724, 2003.
- [2] M. Rafik, "Outils de Diagnostic Appliques a la Machine Asynchrone triphasee a cage d'ecureuil", Mémoire de Magister, Université de Constantine., 2005.
- [3] S. Gdaim, "Commande directe de couple d'un moteur asynchrone à base de techniques intelligentes," Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir., Tunisia, 2013.
- [4] M. Depenbrock, "Direct self control DSC of divert fed induction machine, "IEEE Trans. Power electronics., vol 3, no 4, pp. 420-429, 1988.
- [5] Takahashi et Y. Ohmori, "High performance direct torque control of an induction motors," IEEE Trans, Ind Application, vol 25, no 2, pp. 257-264, 1989.
- [6] A. Chebabhi, M. Abdelkader et N. Rouabah, "Commande directe du couple d'une MAS alimentée par un onduleur de tension à trois niveaux à base de la logique floue, " 2émes journées Internationales d'Electrotechnique, de maintenance et de Compatibilité Electromagnétique, Oran-Algerie. 2010.
- [7] H. Yantour, J.Saadi et A.Khoumsi, "Modelisation Et Simulation D'une Commande Directe Du Couple Appliquee A La Machine Asynchrone (DTC), " Conf Francophone de Modélisation et Simulation, Rabat, Maroc, 2006.
- [8] G.S. Buja et M.P. Kazmierkowski, "Direct torque control of PWM inverter fed AC motors-A survey," IEEE Trans. on Ind. Electron., vol. 51, pp. 744-757, 2004.
- [9] Y.S. Lai, "A new approach to direct torque control of induction motor drives for constant switching frequency and torque ripple reduction," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 16, no. 3, pp. 220–227, 2001.
- [10] N. R. N. Idris, C. L. Toh et M. E. Elbuluk, "A new torque and flux controller for direct torque control of induction machines, "IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 42, no. 6, pp. 1358–1366, 2006.
- [11] J.K. Kang, D.W. Chung et S.K. Sul, "Direct torque control of induction machine with variable amplitude control of flux and torque hysteresis, "Proc. Int. Conf. Electric Machines and Drives (IEMDC), pp. 640–642, 1999.

- [12] M. Jin, J. Qiu, C. Shi et R. Lin, "A fuzzy DTC method with a SVM defuzzification to permanent magnet synchronous machine, "Proc. 30th Ann. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc., Busan, Corée du Sud, pp. 3196–3199, 2004.
- [13] C. ElMoucary, E. Mendes, T. Raithel et R. Ortega," A new strategy for direct torque and flux control of induction motor drives, " Proc. Int. Conf. Electrical Machines (ICEM), Helsinki, Finlande, pp. 923– 927, 2000.
- [14] J.K. Kang et S.K. Sul, " New direct torque control of induction motor for minimum torque ripple and constant switching frequency," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 35, no. 5, pp. 1076–1082, 1999.
- [15] F. Boumaraf, R Abdessemed, M.L. Bendaas et S. Belkacem, "La double DTC d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation, " Revue des Sciences et de la Technologie., vol. 5, no. 1, pp. 60-70, 2014.
- [16] W. Miroslaw, K. Zbigniew, G. Jarosław, H. Abu-Rub et H. A. Toliyat, "Artificial-Neural- Network-Based Sensorless Nonlinear Control of Induction Motors," IEEE Transactions On Energy Conversion., vol. 20, no. 3, 2005.