

ÉTUDE COMPARATIVE ENTRE LA COMMANDE DTC NEURONALE ET LA COMMANDE DTC BASÉE SUR LE CONTRÔLEUR PI-NEURONALE DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Habib BENBOUHENNI

Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Oran (ENPO), BP1523 El M'nouer, Oran, Algérie

*Correspondance, e-mail : habib0264@gmail.com

RÉSUMÉ

Dans cet article, nous allons procéder une comparaison des performances de deux structure de la commande directe du couple (DTC) de la machine asynchrone de forte puissance (1MW) alimentée par onduleur de tension à deux niveaux. La commande DTC neuronale (DTC-RNA), et la DTC basée sur le contrôleur PI-neuronale (PIN), les résultats de simulation sont présentés. Les ondulations du flux, et du couple seront évaluées puis comparées. L'objectif est déterminé la commande qui donne le meilleur résultat.

Mots-clés : *machine asynchrone, commande DTC, THD, réseaux de neurones, contrôleur PI-neuronale DTC neuronale.*

ABSTRACT

Comparative study between the neuronal DTC command and the DTC command based on the PI-neuronal controller of the asynchronous machine

In this paper, we will compare the performances of two structures of the direct torque control (DTC) of the high power (1MW) asynchronous machine powered by two-level voltage inverters. The neuronal DTC control (DTC-RNA), and the PI-neuronal controller-based (PIN) DTC, simulation results are presented. The flux and torque ripples will be evaluated and then compared. The goal is determined the command that gives the best result.

Keywords : *Asynchronous machine, DTC control, THD, neural networks, PI neuronal DTC neuronal controller.*

Habib BENBOUHENNI

I - INTRODUCTION

Les machines à courant alternatif possèdent de nombreux avantages. L'absence de collecteur leur permet d'avoir un encombrement minimal, une fiabilité accrue, un coût de construction plus réduit et une vitesse de fonctionnement élevée. Parmi ces machines, La machine asynchrone s'impose dans les applications nécessitent des performances dynamiques et statiques très élevées [1]. La commande vectorielle par orientation du flux rotorique, présente l'inconvénient majeur d'être relativement sensible aux variations des paramètres de la machine c'est pourquoi on a développé les méthodes de contrôle directe du couple (DTC) des machines asynchrones durant les années 80, dans ces méthodes de contrôle le flux statorique et le couple électromagnétique sont estimés à partir des seules grandeurs électriques accessibles au stator, et ceci sans recours à des capteurs mécaniques.

Cette loi de contrôle présente des performances dynamiques remarquables de même qu'une bonne robustesse vis-à-vis des écarts de paramètres du moteur [2]. La technique DTC classique applique un fonctionnement de l'onduleur à deux niveaux standard avec une fréquence de commande variable parfois élevée et incompatible avec des applications forte puissance du fait du niveau des pertes par commutation [3]. Les régulateurs conventionnels type PI largement utilisés dans ces structures de commande, sont insuffisants pour répondre aux performances exigées. Ils sont sujets à une détérioration des performances en présence des perturbations de charge et des variations paramétriques. Pour palier à ces dégradations, l'utilisation d'une commande intelligente est plus que nécessaire. Un certain nombre de commandes intelligentes ont été déjà appliquées à la machine asynchrone tel que la commande adaptative, la commande floue, les réseaux de neurones, etc.

Les travaux publiés dans la littérature ont montré l'efficacité de ces méthodes à conduire les systèmes particulièrement complexes et maintenir les performances exigées. L'emploi des réseaux de neurones plutôt que des techniques classiques pour commander des systèmes complexes peut se justifier par la simplicité de mise en œuvre (peu d'analyse mathématique préliminaire), par la capacité d'approximation universelle prouvée, par la possibilité de considérer le processus comme une boîte noire et par la possibilité de débiter la conduite avec un minimum d'informations sur le processus. L'utilisation alors des réseaux de neurones pour l'asservissement du moteur asynchrone est largement justifiée [4]. Cet Article a pour objectif d'étudier, comparer, et d'appliquer la technique des réseaux de neurones à la commande directe du couple de la machine asynchrone de forte puissance (1Mw) alimentée par l'onduleur de tension à deux niveaux.

II - MÉTHODOLOGIE

II-1. Principe de contrôle directe du couple

Le principe de base de la commande directe du couple (**Figure 1**) 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 [5]. Le flux et le couple d'induction sont donnés par :

$$\Phi_s = \int_0^t (v_s - R_s i_s) dt \tag{1}$$

$$c_{em} = p [\Phi_{\alpha s} i_{\beta s} - \Phi_{\beta s} i_{\alpha s}] \tag{2}$$

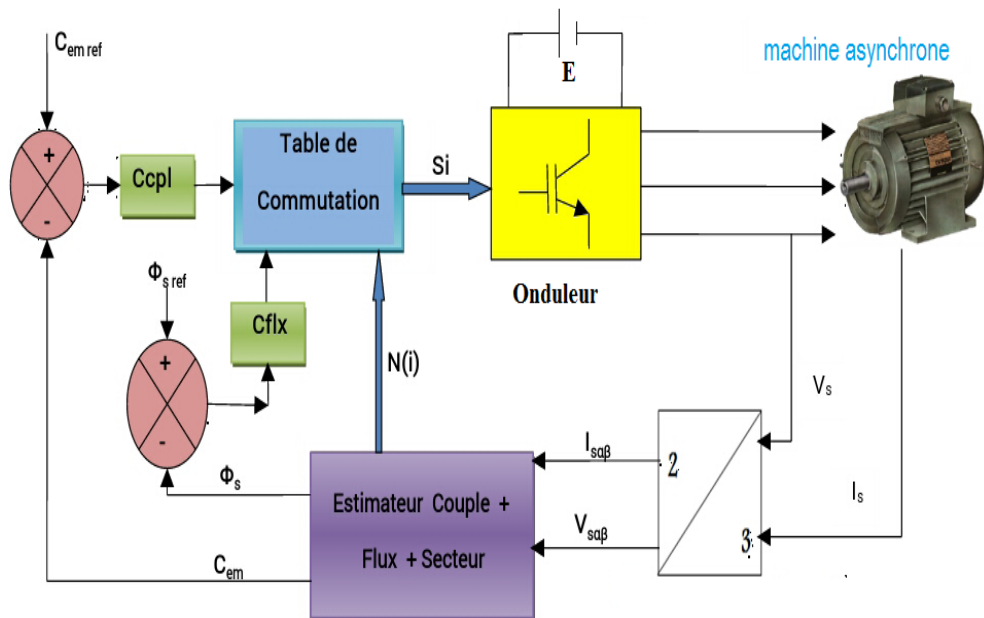


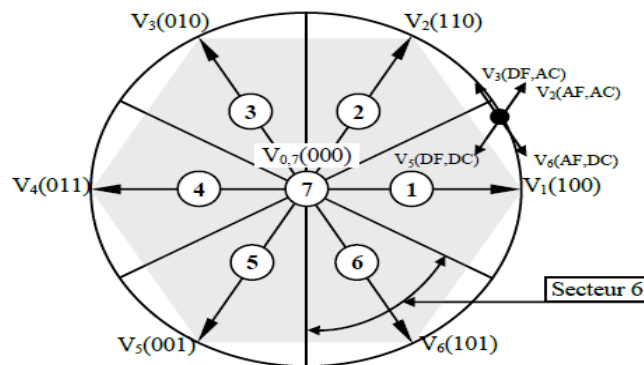
Figure 1 : Structure de base de la commande directe du couple

Les valeurs estimées du flux et du couple sont comparées à leurs valeurs prescrites Φ_{sref} , C_{eref} respectivement. Des états de commutation sont choisis selon le sélecteur de table de commutation, où C_{flx} est le module de flux après le bloc d'hystérésis et C_{cpl} est l'erreur de couple après le bloc d'hystérésis (**Tableau 1**) :

Tableau 1 : Table de vérité du l'onduleur à deux niveaux

N		1	2	3	4	5	6
Cflx = 1	Ccpl = 1	2	3	4	5	6	1
	Ccpl = 0	1	2	3	4	5	6
	Ccpl = -1	6	1	2	3	4	5
Cflx = 0	Ccpl = 1	3	4	5	6	1	2
	Ccpl = 0	4	5	6	1	2	3
	Ccpl = -1	5	6	1	2	3	4

L'utilisation des trois états pour régler le couple a été proposée pour essayer de minimiser la fréquence de commutation moyenne, car la dynamique du couple est, en général, plus rapide que celle du flux [6]. 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 [7]. 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 de tension par la largeur d'impulsion (MLI) [8]. 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) [9]. Ce raisonnement c'est depuis nettement affiné et repose désormais sur des fondements mathématiques de plus en plus solides [6]. Un onduleur de tension triphasé à MLI permet d'atteindre sept positions distinctes dans le plan de phase, correspondant aux huit séquences de tension de l'onduleur. Ces positions sont illustrés dans la **Figure 2** [10].

**Figure 2** : Différents vecteurs de tensions statoriques délivrés par un onduleur de tension à deux niveaux

AF : Augmenter le Flux
 AC : Augmenter le Couple

DF : Diminuer le Flux.
 DC : Diminuer le Couple.

II-2. Commande DTC neuronale (DTC-RNA)

La commande DTC classique présentent plusieurs inconvénients, tel que l’obtention d’une fréquence de commutation variable, les ondulations du couple et de flux, les fluctuations des puissances et les harmonique des courants dans le régime transitoire et permanent, à cause de l’utilisation des comparateurs à hystérésis et les tables de commutation. Pour cela, nous avons proposé d’étudier dans ce partie la commande directe du couple basée sur les réseaux de neurones artificiels, pour améliorer les performances des commandes DTC, où les comparateurs classiques et la table de commutation sont remplacés par un contrôleur neuronal, afin de bien conduire les grandeurs de sortie de la MAS vers leurs valeurs de référence durant une période de temps fixe. Des simulations numériques sont présentées pour tester les performances des méthodes proposées (DTC-RNA) [11]. La structure de la commande neuronale directe du couple (DTC-RNA-2 niveaux), de la machine asynchrone alimentée par onduleur à deux niveaux, est représentée par la **Figure 3**. Pour générer le contrôleur RNA par Matlab / Simulink ou on à choisi 64 couches cachées, 3 couches de sorties, et une couche d’entrée contenant 3 neurones, avec les fonctions d’activation respectivement de type ‘tansig’, ‘purelin’ et ‘logsig’. La mise à jour des poids et des biais de ce réseau est réalisés par un algorithme de retro-propagation nommé l’algorithme de Levenberg-Marquardt (LM).

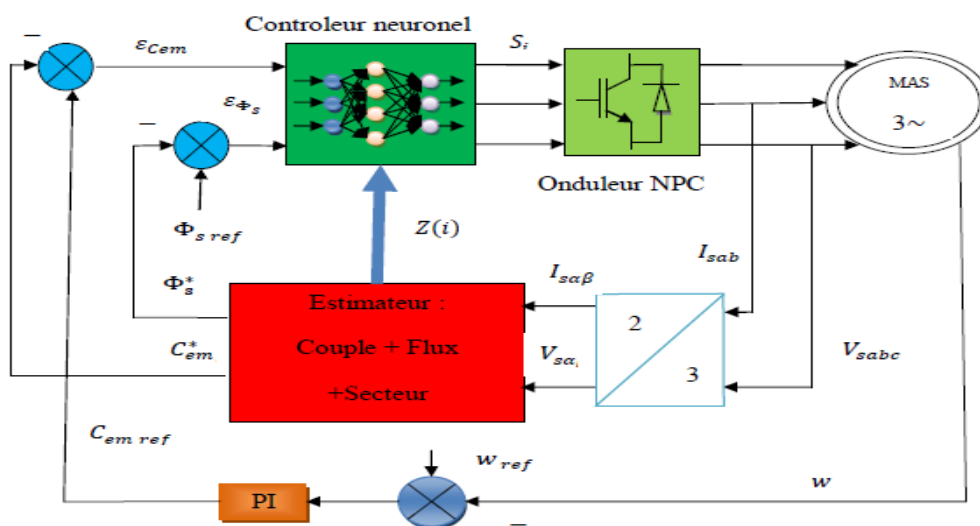
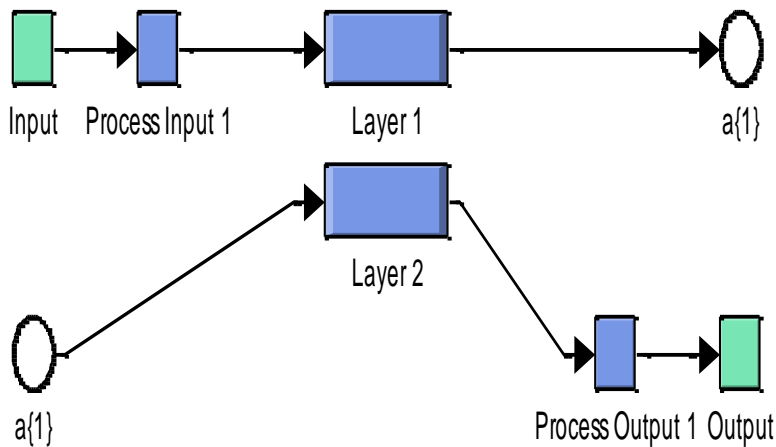


Figure 3 : Commande directe du couple de la MAS basée sur les RNA

Tableau 2 : Propriétés du LM pour DTC neuronale

Paramètres du LM	valeurs
Nombre de couche cachée	64
Pas d'apprentissage	0.002
Pas d'affichage (affichage de l'erreur par morceaux)	50
Nombre d'itération (epochs)	5000
Coef d'accélération de convergence (mc)	0.9
Erreur (goal)	0
Fonctions d'activation	logsig, Tansig, Purelin

Le choix de l'architecture des réseaux de neurone se fait selon l'erreur quadratique moyenne (EQM) obtenue au court de l'apprentissage [11]. La **Figure** suivante présentée la structure de réseaux de neurones pour DTC à deux niveaux.

**Figure 4 :** Structure interne du contrôleur neuronale

II-3. Commande DTC basée sur le contrôleur PI-neuronale (DTC-PIN)

La structure de la commande directe du couple avec PI-Neuronale (DTC-PIN), de la machine asynchrone alimentée par l'onduleur à 2 niveaux est représentée par la **Figure 5**. Le régulateur PI classique de la vitesse est remplacé par un contrôleur neuronal (PI-neuronale). Et dont le entrée sont l'erreur de la vitesse ($w_{réf}-w$) et le sortie sont le couple référence.

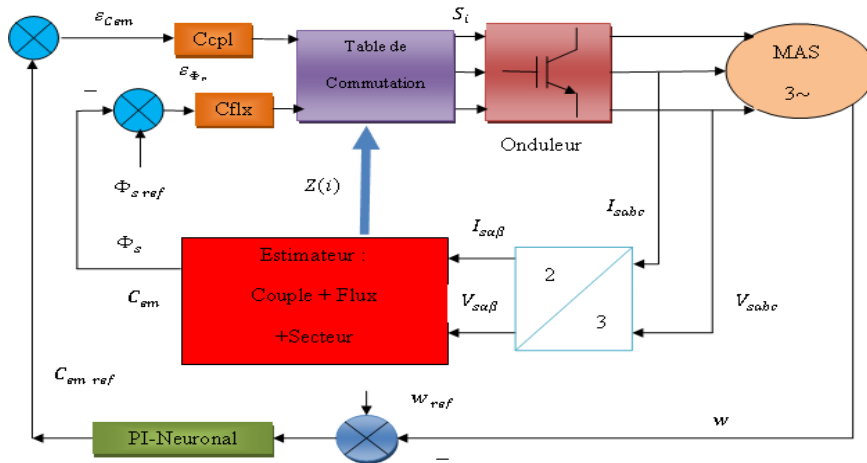


Figure 5 : Structure de commande DTC basée sur le contrôleur PI-neuronale de la vitesse

La convergence du réseau à été obtenue en utilisant les valeurs des paramètres regroupées dans le **Tableau 3**.

Tableau 3 : Propriétés du LM du contrôleur PI-neuronale

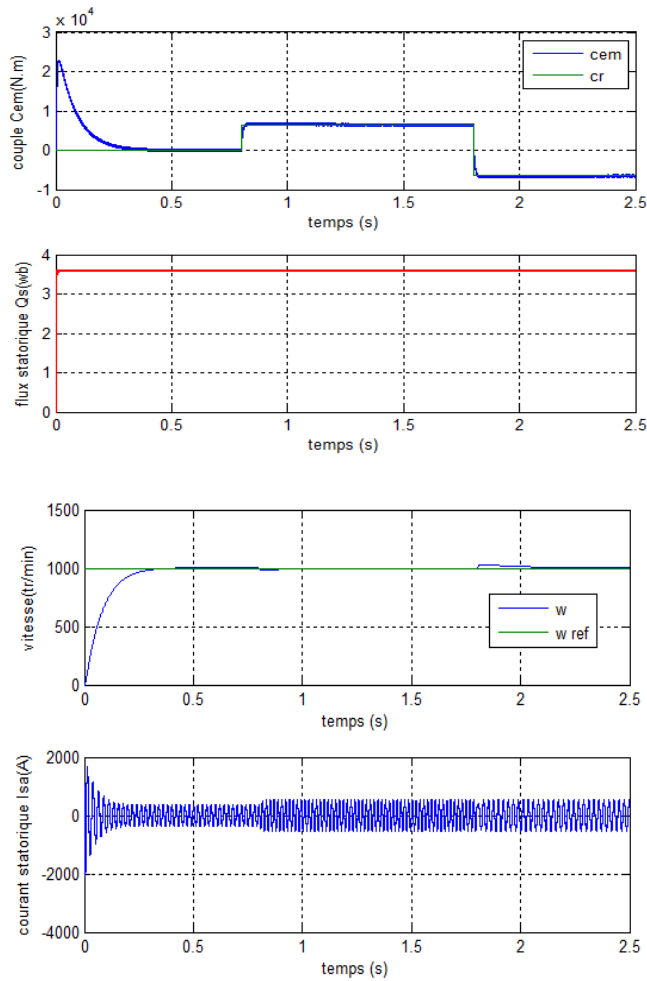
Paramètres du LM	valeurs
Nombre de couche cachée	5
Pas d'apprentissage	0.002
Pas d'affichage (affichage de l'erreur par morceaux)	50
Nombre d'itération (epochs)	2000
Coef d'accélération de convergence (mc)	0.8
Erreur (goal)	0
Fonctions d'activation	Tansig, Purelin

D'après les essais effectués avec différentes structures, j'ai constaté que le choix le plus judicieux était de prendre, une structure de réseau de neurones à une seule couche cachée contenant 5 neurones. La convergence du réseau à conduit à un apprentissage qui nécessite un grand nombre d'itérations (2000) pour ramener l'erreur à 0. Pour illustrer le fonctionnement de la commande et réaliser les études prospective, un modèle de simulation développée dans l'environnement fourni par Matlab / Simulink, une application développée dans l'environnement fourni par Matlab / Simulink. Nous avons utilisés dans la commande les parameters de contrôle suivante : C_r = echelon variable de 6500 à -6500N.m à l'instant $t = 0.8s$, $\Delta c_e = 0.05N.m$, $\Delta \Phi_s = 0.001wb$, la vitesse référence $w_{ref} = 1000tr / min$, une période d'échantionnage $T_e = 50\mu s$,

$\Phi_{sref} = 3.6 \text{wb}$. Parametre de moteur asynchrone à forte puissance sont : puissance nominale $P_n = 1 \text{ Mw}$, Résistance statorique $R_s = 0.228 \Omega$, résistance rotorique $R_r = 0.332 \Omega$, inductance statorique $L_s = 0.0084 \text{ H}$, inductance rotorique $L_r = 0.0082 \text{ H}$, inductance mutuelle $L_m = 0.0078 \text{ H}$, number de paire de pole $p = 3$, moment d'inertie $J = 20 \text{ kg.m}^2$, coefficient de frottement $K_f = 0.008 \text{ Nm.s.rad}^{-1}$.

III - RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats de simulation des commandes proposées de la MAS alimentée par onduleur de tension à deux niveaux sont illustrés dans les *Figures 6, 7, et 8*.



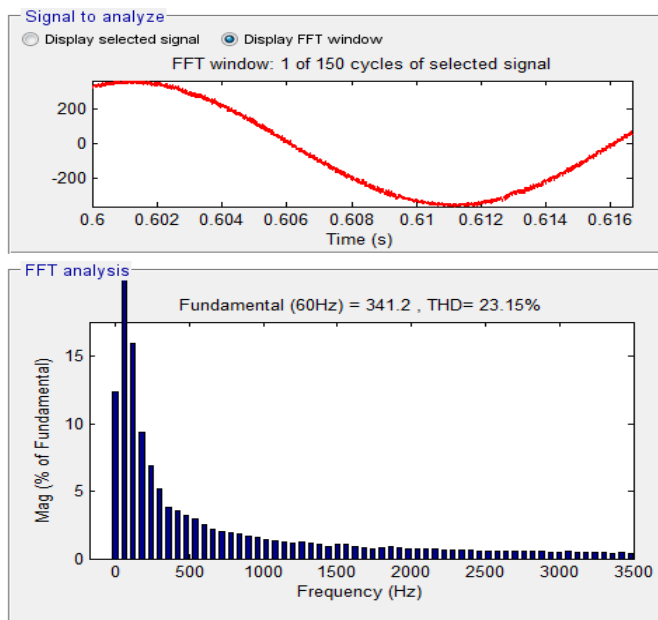
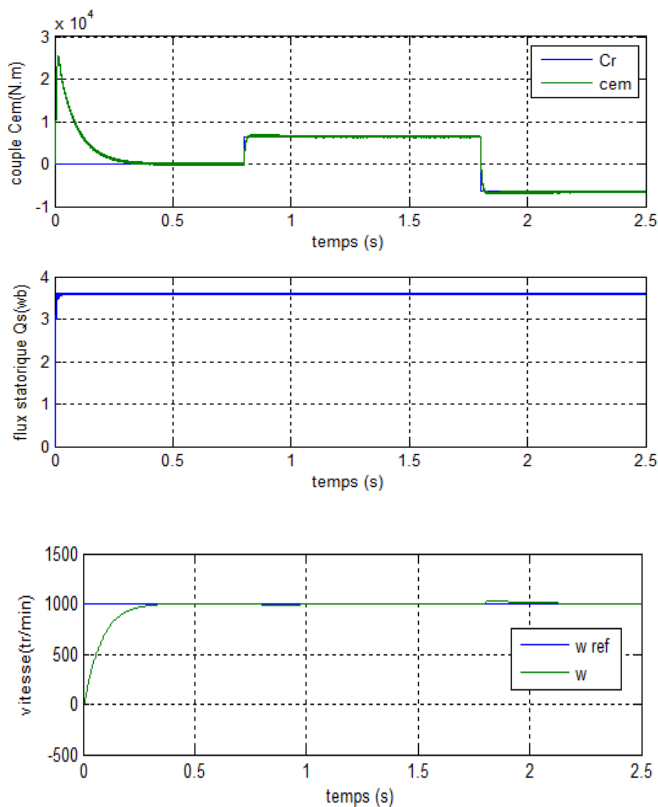


Figure 6 : Performances de DTC classique appliquée à la MAS



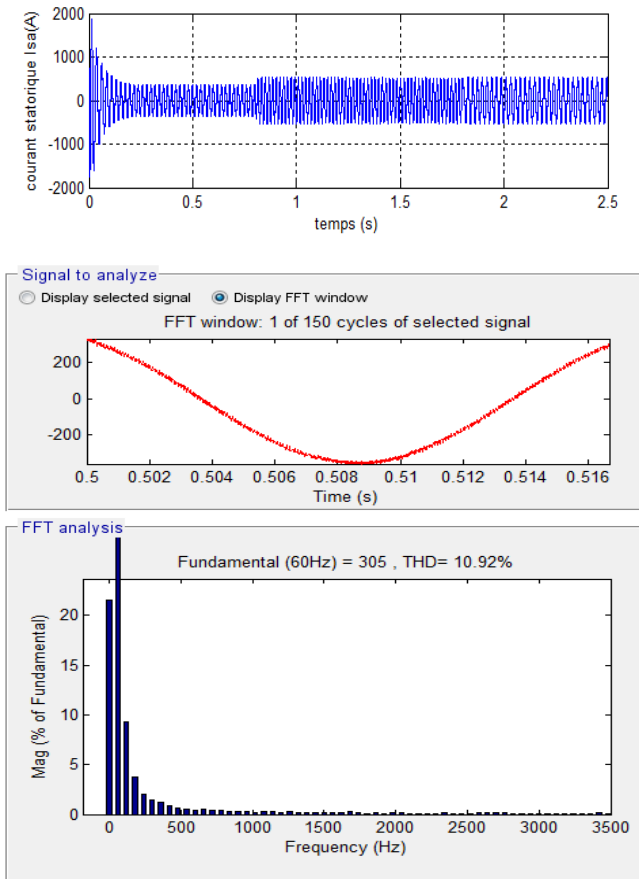
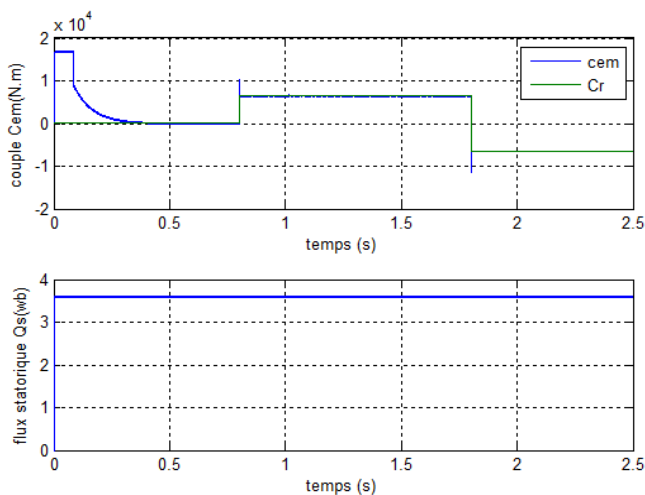


Figure 7 : Performances de DTC-RNA-2 niveaux appliqués à la MAS



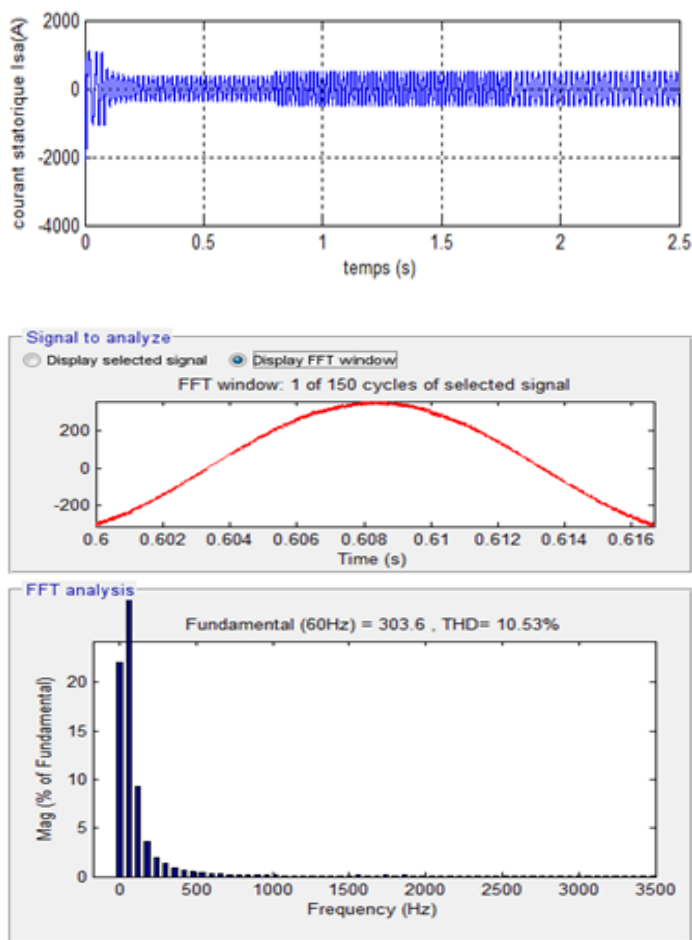
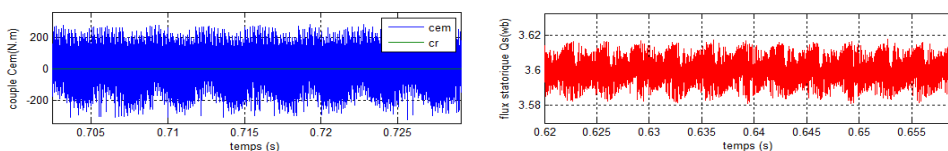


Figure 8 : Performances de DTC classique basée sur le contrôleur PI-neuronale de la MAS

Dans le but de connaître la meilleure structures de la commande DTC d’une MAS, une étude comparative est indispensable entre les trois structures traitées précédemment (DTC classique, DTC-RNA-2 niveaux et DTC-PI-neuronale). La figure suivante présenté la comparaison entre les trois stratégies.



a)

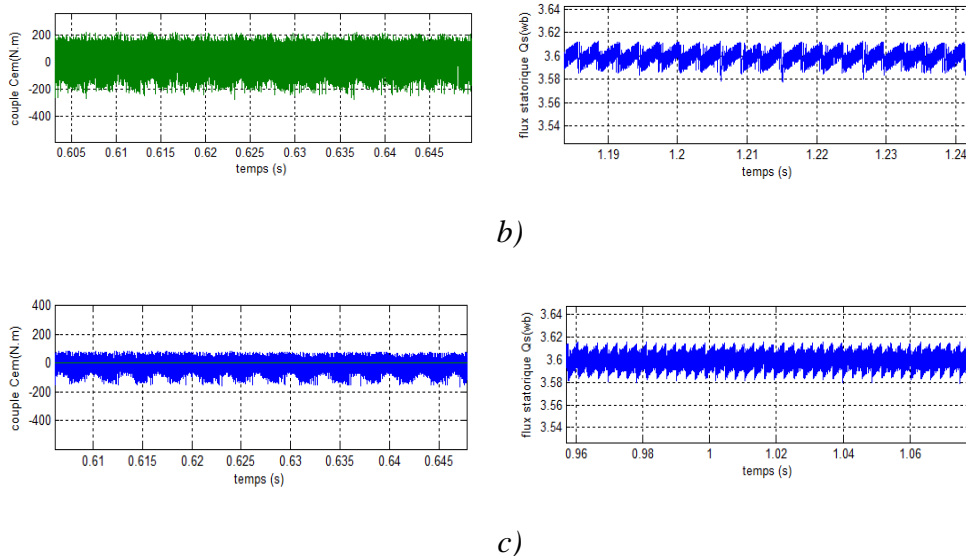


Figure 9 : ZOOMS du flux et du couple : a) Commande DTC classique, b) Commande DTC-RNA-2 niveaux, c) Commande DTC-PIN

Dans le **Tableau 4**, nous résumons les résultats de simulation obtenus par les commandes DTC proposés avec et sans réseaux de neurones de la MAS.

Tableau 4 : Étude comparative entre DTC-2 niveaux, DTC-RNA-2 niveaux, et DTC-PI-neuronale

	I_{sa} THD (%)	Minimisations des ondulations du couple	Minimisations des ondulations du flux
DTC-2 NIVEAUX	23.15	Assez bonne	Assez bonne
DTC-RNA-2NIVEAUX	10.92	bonne	bonne
DTC-PI-NEURONALE	10.53	Trés bonne	bonne

Ce **Tableau** montre que la commande DTC-2 niveaux basée sur le contrôleur PI-neuronale réduit considérablement les ondulations du couple électromagnétique, et la valeur de THD du courant statorique comparativement à celle des DTC-2 niveaux, DTC-RNA-2 niveaux. D'un autre coté, la vitesse atteint sa référence sans dépassement au démarrage à vide pour les toutes commandes. La dynamique des composantes du flux statorique n'est pas affectée par l'application des ces consignes de charge, qui justifié la robustesse de ce commande.

IV - CONCLUSION

Nous avons présenté deux structure de la commande DTC a base des réseaux de neurones, d'abord la DTC neuronale, la seconde DTC-PI-neuronale. Les résultats de simulation obtenue respectivement telque la DTC-PI-neuronale illustre une réduction considérablement les ondulations du couple, du flux, et la valeur de THD du courant statorique, par rapport aux résultats obtenus dans la DTC classique, et la DTC neuronale (DTC-RNA-2 niveaux). Ce qui montré l'efficacité de la structure proposée.

RÉFÉRENCES

- [1] - A. HAMMOUMI, A. MASSOUM, A. MEROUFEL, P. WIRA, « Application des réseaux de neurones pour la commande de la machine asynchrone sans capteur mécanique, » Acta Electrotehnica, Medimira Science Publisher, Vol. 53, N° 2 (2012)
- [2] - B. SEBTI, « Commande par DTC d'un moteur asynchrone apport des réseaux de neurones », Mémoire de Magister, université de Batna, (2013)
- [3] - H. BENBOUHENNI, R. TALEB, H. MELLAH, « Nouvelle approche pour la DTC modifié. Application à un actionneur électrique », Proceedings of Engineering and Technology (PET), Vol. 24 (2017) 5 - 12 p.
- [4] - L.YOUB, A. CRACUNESCU, « Etude comparative entre la commande vectorielle a flux oriente et la commande directe du couple de la machine asynchrone, » U.P.B.SCI. Bull, Series C, Vol. 69, N° 2 (2007)
- [5] - B. ELAKHDAR, « Commande directe du couple floue et neuronale d'un moteur synchrone à double étoile sans capteur mécanique alimenté par onduleurs Multiniveaux », Thèse Doctorat en Sciences, université Djillali Liabes-Sidi Bel Abbés, (2015)
- [6] - M. BIRAME, B. MOKHTARI, L. MOKRANI, B. AZOUI, A. NAAMANE, N. M'SIRDI, « Co-mpensateur PI flou de la variation de la résistance statorique d'un moteur à reluctance variable commande par DTC », Acta Electrotehnica, Medimira Science Publisher, Vol. 53, N° 4 (2012)
- [7] - S. MEZIANE, R. TOUFOUTI, H. BENALLA, « Etude comparative entre la DTC deux niveaux et la DTC trois niveaux de la machine asynchrone, », Communication Science et Technologie (COST), N°. 7 (janvier 2009)
- [8] - B. ELAKHDAR, « Commande directe du couple floue et neuronale d'un moteur synchrone à double étoile sans capteur mécanique alimenté par onduleurs multiniveaux », Thèse Doctorat en Sciences, université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, (2015)

- [9] - M. ABDELHAFIDH, « Stratégies de commande DTC-SVM et DPC appliquées à une MADA utilisée pour la production d'énergie éolienne », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, (2014)
- [10] - H. BENBOUHENNI, R. TALEB, « Amélioration de DTC classique par DTC-2 niveaux avec vecteurs nuls à 12 secteurs basée sur les réseaux de neurones de la MAS », Proceedings of Engineering and Technology (PET), Vol. 14, (2016) 129 - 136 p.
- [11] - D. YOUSEF, « Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle, » These Doctroat en Science, université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, (2015)