

Commande directe du couple neuronale à 6 secteurs de la machine asynchrone alimentée par onduleur NPC à sept niveaux

Habib BENBOUHENNI¹, Rachid TALEB²

¹Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Oran (ENPO)

BP1523 El M'nouer, Oran, Algérie

habib0264@gmail.com

²Département d'Electrotechnique, université Hassiba Benbouali de Chlef (UHBC), Laboratoire LGEER

Hay Salam, Route Nationale N° :19, 02000 Chlef, Algérie

r.talbe@univ-chlef.dz

Résumé— L'article est consacré à la présentation et la Comparaison entre deux Algorithmes de la commande DTC neuronale de la machine asynchrone de forte puissance (1MW) alimentée par l'onduleur à 2 et 7 niveaux. En visualisant les résultats de simulation en utilisant le langage MATLAB pour la commande DTC neuronale (le couple, flux, vitesse et le courant statorique), ce qui permet d'avoir un signal le plus sinusoïdale et avoir moins d'harmoniques pour la commande DTC-7 niveaux neuronale.

Mots Clés— Machine Asynchrone; Onduleur NPC à 7 niveaux; Commande DTC; Commande DTC neuronale

I. INTRODUCTION

Les onduleurs multiniveaux, de plus en plus utilisés dans les applications d'entraînement à vitesse variable, s'avèrent très utiles pour la commande des machines électriques. En effet, l'amélioration en termes de contenu harmonique des tensions de sortie de l'onduleur améliore considérablement les performances de la machine. En outre, les formes d'onde en échelon des onduleurs multiniveaux vont réduire d'une façon notable la contrainte liée à la très haute rapidité de montée des impulsions de tension appliquées à la machine, ce qui augmente la sûreté de fonctionnement et réduit les radiations électromagnétiques [1].

Pour contourner les problèmes de sensibilité aux variations paramétriques, on a développé des méthodes de commande dans lesquelles le flux et le couple électromagnétique sont estimés à partir des seules grandeurs électriques accessibles au stator, et ceci sans le recours à des capteurs mécaniques. Parmi ces méthodes, la commande directe du couple, basée sur l'orientation du flux statorique, introduite en 1985 par TAKAHASHI et DEPENDROCK [2].

La commande DTC (Direct Torque Control) est un type de commande vectorielle pour un onduleur de tension alimentant une machine asynchrone. Son objectif est de réguler le flux statorique et le couple électromagnétique sans disposer de mesures de vitesse, du flux ou du couple. Les seules mesures utilisées sont les tensions et les courants alimentant le stator de la machine. Le flux et le couple sont entièrement estimés à partir de ces mesures. En ce qui concerne la connaissance de

la machine, la valeur de la résistance statorique est nécessaire pour calculer le flux. Cette résistance est amenée à varier dans le temps, et ce paramètre doit donc être parfaitement connue pour une telle commande.

Dans cet article, on présentera une stratégie de commande DTC de la machine asynchrone alimentée par onduleur multiniveau (NPC) à sept niveaux à l'aide de réseaux de neurones artificiels (RNA), afin d'obtenir une commande robuste augmentant alors la fiabilité, améliorant le rendement énergétique. Une première partie est consacrée à la présentation de l'onduleur NPC à sept niveaux, ensuite la commande DTC, nous décrivons les bases essentielles de la commande DTC ainsi que le tableau de commutation pour l'onduleur à sept niveaux. La troisième partie de cet article sera consacrée aux applications des réseaux de neurones sur la commande DTC à onduleur NPC à sept niveaux.

II. STRUCTURE DE L'ONDULEUR NPC A SEPT NIVEAUX

L'onduleur triphasé à sept niveaux à structure NPC (Neutral Point Clamping) étudié est constitué de trois bras et de six sources de tension continue. Chaque bras comporte douze interrupteurs dont huit en série et quatre en parallèle, ainsi que de deux diodes. Chaque interrupteur est composé d'un transistor et d'une diode montée en tête bêche. La Fig.1 donne une représentation schématique de cet onduleur [3].

La modélisation permet d'étudier l'évolution des différentes grandeurs régissant le fonctionnement de l'onduleur à sept niveaux à diodes flottantes tout en considérant les commutations des interrupteurs [1]. Chaque interrupteur TD_{ks} introduit une fonction de connexion F_{ks}, qui décrit son état ouvert ou fermé, tel que :

$$F_{ks} = \begin{cases} 1 & \text{si l'interrupteur } TD_{ks} \text{ est fermé} \\ 0 & \text{dans le cas contraire} \end{cases} \quad (1)$$

Pour l'onduleur à sept niveaux, on définit en plus, une fonction de connexion du demi-bras, qu'on notera F_{k_{mb}} avec: k: numéro du bras, m=1 pour le demi-bras du haut, et m=0 pour le demi-bras du bas. Pour un bras k, les fonctions de connexion des demi-bras s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} F_{k1}^b = F_{k1}F_{k2}F_{k3}F_{k4} \\ F_{k0}^b = F_{k5}F_{k6}F_{k7}F_{k8} \end{cases} \quad (2)$$

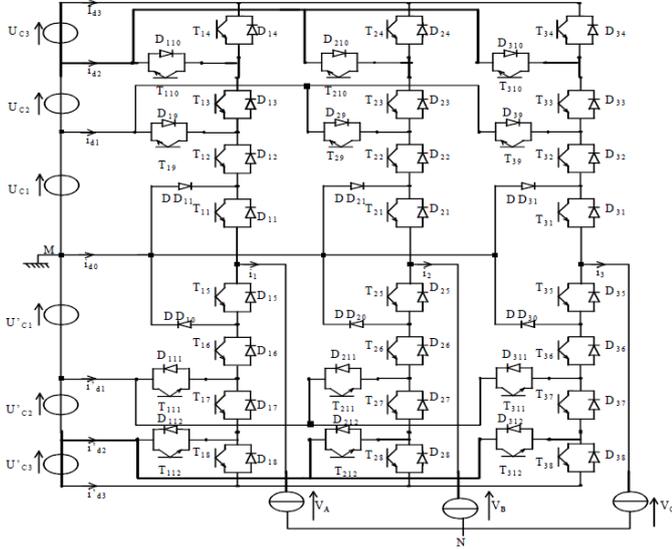


Fig.1 Onduleur triphasé à sept niveaux à structure NPC (VSI)

F_{k1}^b est associée au demi-bras du haut ($TD_{k1}, TD_{k2}, TD_{k3}, TD_{k4}$), F_{k0}^b est associée au demi-bras du bas ($TD_{k5}, TD_{k6}, TD_{k7}, TD_{k8}$).

A. Modélisation aux Valeurs Instantanées

Cette modélisation sera effectuée en considérant l'association de l'onduleur de tension triphasé à sept niveaux avec une charge triphasée couplée en étoile avec neutre isolé. Dans notre cas particulier, cette charge sera constituée par la machine asynchrone (MAS). Sous forme matricielle, les potentiels des noeuds A, B, et C de l'onduleur triphasé à sept niveaux par rapport au point milieu M sont donnés par le système suivant [1, 3]:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{b0} \\ V_{c0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{111} + F_{112} + F_{11}^b \\ F_{211} + F_{212} + F_{21}^b \\ F_{311} + F_{312} + F_{31}^b \end{bmatrix} V_{c1} + \begin{bmatrix} F_{112} + F_{11}^b \\ F_{212} + F_{21}^b \\ F_{312} + F_{31}^b \end{bmatrix} V_{c2} + \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} V_{c3} - \begin{bmatrix} F_{113} + F_{114} + F_{10}^b \\ F_{213} + F_{214} + F_{20}^b \\ F_{313} + F_{314} + F_{30}^b \end{bmatrix} V_{c4} - \begin{bmatrix} F_{114} + F_{10}^b \\ F_{214} + F_{20}^b \\ F_{314} + F_{30}^b \end{bmatrix} V_{c5} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} V_{c6} \quad (3)$$

Ce système montré qu'un onduleur à sept niveaux est une mise en série de six onduleurs à deux niveaux ou de trois onduleurs à trois niveaux ou deux onduleurs à cinq niveaux. Pour les tensions simples, on a:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{111} + 2F_{112} + 3F_{11}^b - F_{113} - 2F_{114} - 3F_{10}^b \\ F_{211} + 2F_{212} + 3F_{21}^b - F_{213} - 2F_{214} - 3F_{20}^b \\ F_{311} + 2F_{312} + 3F_{31}^b - F_{313} - 2F_{314} - 3F_{30}^b \end{bmatrix} \frac{E}{6} \quad (4)$$

III. PRINCIPE DE COMMANDE DTC

Depuis que M. Depenbrock et I. Takahashi ont proposé la commande DTC de la machine asynchrone dans la moitié des années 80, elle est devenue de plus en plus populaire. La commande DTC permet de calculer les grandeurs de contrôle que sont le flux statorique et le couple électromagnétique à partir des seules grandeurs liées au stator et ceci sans l'intervention de capteurs mécaniques.

Le principe de commande consiste à maintenir le flux statorique dans une fourchette. Le synoptique de la commande DTC est représenté dans la Fig. 2 [4].

La commande DTC d'un moteur asynchrone est basée sur la détermination directe de la séquence de commandes appliquées aux interrupteurs d'un onduleur de tension. Cette stratégie est basée généralement sur l'utilisation des comparateurs à hystérésis dont le rôle est de contrôler les amplitudes du flux statorique et du couple électromagnétique.

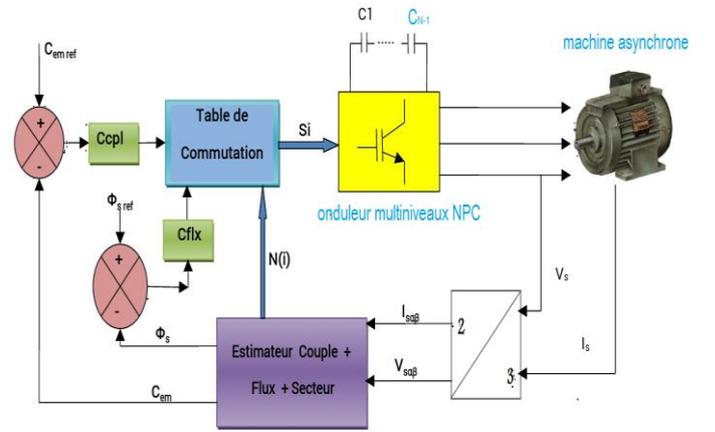


Fig. 2 Structure de base de la commande directe du couple.

$$\begin{cases} \Phi_{s\alpha} = \begin{cases} t & \text{si } C_{\text{em}} > C_{\text{em}}^* \\ 0 & \text{si } C_{\text{em}} = C_{\text{em}}^* \\ -t & \text{si } C_{\text{em}} < C_{\text{em}}^* \end{cases} \\ \Phi_{s\beta} = \begin{cases} t & \text{si } \Phi_s > \Phi_s^* \\ 0 & \text{si } \Phi_s = \Phi_s^* \\ -t & \text{si } \Phi_s < \Phi_s^* \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

La DTC est déduit en se basant sur les deux approximations décrites par les formules (6) et (7):

$$\Phi_{s\alpha}(k+1) \approx \Phi_{s\alpha}(k) + v_{s\alpha} T_e \rightarrow \Delta \Phi_{s\alpha}(k) = v_{s\alpha} T_e \quad (6)$$

Le module du flux statorique s'écrit:

$$\Phi_s = \sqrt{\Phi_{\alpha s}^2 + \Phi_{\beta s}^2} \quad (7)$$

La zone N_i dans laquelle se situe le vecteur Φ_s est déterminée à partir des composantes $\Phi_{s\alpha}$ et $\Phi_{s\beta}$. L'angle θ_s , est égal à :

$$\theta_s = \arctg\left(\frac{\Phi_{\beta s}}{\Phi_{\alpha s}}\right) \quad (8)$$

Le couple électromagnétique C_{em} est calculé à partir de :

$$c_{em} = \frac{3}{2} P \left[\Phi_{\alpha s} i_{\beta s} - \Phi_{\beta s} i_{\alpha s} \right] \quad (9)$$

Selon la formule (5), on peut négliger la chute de tension statorique due à la résistance du stator (cas des vitesses élevées par exemple). Avec cette supposition, la variation du flux est proportionnelle à la tension statorique appliquée. Une tension appliquée dans la même direction que le vecteur flux fait augmenter le module de celui-ci et vice versa [5].

La sélection de vecteur tension approprié est basée sur le tableau de commande (Tableau.1). Les entrées sont le numéro du secteur, du flux, du couple, et les sorties des deux comparateurs à hystérésis.

TABLEAU I
TABLEAU DE VERITE DE L'ONDULEUR NPC A DEUX NIVEAUX

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

IV. COMMANDE DTC-7 NIVEAUX

Le nombre du vecteurs de tension disponibles en sortie de l'onduleur NPC à sept niveaux est supérieur au nombre des vecteurs délivrés par un onduleur à deux niveaux. Le nombre des vecteurs de tension pour un onduleur NPC triphasé à sept niveaux est $N_{vt} = 7^3 = 343$ vecteurs. Mais dans ces 343 vecteurs il y a des vecteurs redondants, c'est-à-dire similaires, parmi les 343 vecteurs on trouve $3 \times 7 \times (7 - 1) + 1 = 127$ vecteurs différents. Ces 127 vecteurs conduisent à six hexagones concentriques. Le schéma spatial de tension dans le plan $(\alpha - \beta)$ est représenté par la Fig. 3.

Sur la Fig.3, les chiffres (ijk) correspondent aux niveaux de tension des trois bras a, b, et c respectivement. Le centre correspond aux sept configurations (000, 111, 222, 333, 444, 555, 666). La redondance des vecteurs de tension n'est pas

montrée sur cette figure. L'augmentation du nombre des vecteurs de tension nous offre la possibilité d'avoir un contrôle du flux et du couple plus précis que lorsque l'on utilise un onduleur à deux niveaux.

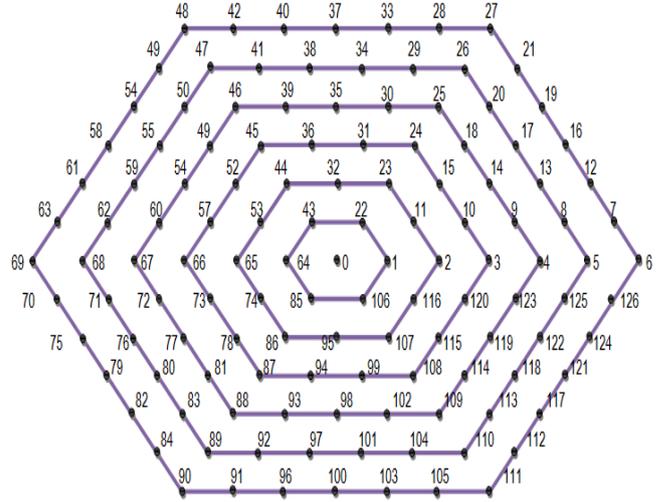


Fig.3 Distribution des séquences des niveaux de phase par les différents vecteurs fournis par un onduleur NPC à sept niveaux.

On répartit les 127 vecteurs de tension et les vecteurs des tensions nulles en sept groupes (Tableau 3)

TABLEAU II
REPARTITION EN SEPT GROUPES DES VECTEURS DE TENSION DE SORTIE DE L'ONDULEUR A SEPT NIVEAUX

Vecteurs tensions nulles	(000); (111); (222); (333); (444); (555); (666)
Vecteurs tensions du premier hexagone	(100); (110); (010); (011); (001); (101)
Vecteurs tensions du deuxième hexagone	(200); (210); (220); (120); (020); (021) (022); (012); (002); (102); (202); (201)
Vecteurs tensions du troisième hexagone	(300); (310); (320); (330); (230); (130); (030) (032); (033); (023); (013); (003); (103); (203) (303); (302); (301); (031)
Vecteurs tensions du quatrième hexagone	(400); (410); (420); (430); (440); (340); (240) (040); (041); (042); (043); (044); (034); (024) (014); (004); (104); (204); (304); (404); (403) (402); (401); (140)
Vecteurs tensions du cinquième hexagone	(505); (510); (520); (530); (540); (550); (450) (350); (250); (150); (050); (051); (052); (053) (054); (055); (045); (035); (025); (005); (105) (205); (305); (405); (505); (504); (503); (502); (501)
Vecteurs tensions du sixième hexagone	(600); (610); (620); (630); (640); (650); (660) (460); (360); (260); (160); (060); (061); (062) (064); (065); (066); (056); (046); (036); (026) (016); (006); (106); (206); (306); (406); (506) (606); (605); (604); (603); (602); (601); (063) (560)

Dans notre cas on utilise un comparateur hystérésis à 7 niveaux pour le couple, et comparateur à 3 niveaux pour la régulation du flux. Le tableau de vérité et donnée par tableau 3

TABLEAU III
TABLEAU DE VERITE DE L'ONDULEUR NPC A SEPT NIVEAUX

Cflx	N	Ccpl					
		1	2	3	4	5	6
1	3	27	48	69	90	111	6
	2	21	42	63	84	105	126
	1	19	40	61	82	103	124
	0	16	37	58	79	100	121
	-1	12	33	54	75	96	117
	-2	7	28	49	70	91	112
	-3	6	27	48	69	90	111
0	3	37	58	79	100	121	16
	2	37	58	79	100	121	16
	1	33	54	75	96	117	12
	0	33	54	75	96	117	12
	-1	0	0	0	0	0	0
	-2	100	121	16	37	58	79
	-3	100	121	16	37	58	79
-1	3	48	69	90	111	6	27
	2	47	68	89	110	5	26
	1	46	67	88	109	4	25
	0	5	26	47	68	89	110
	-1	26	47	68	89	110	5
	-2	89	110	5	26	47	68
	-3	90	111	6	27	48	69

V. COMMANDE DTC NEURONALE

La structure de la commande directe du couple neuronale (DTC-RNA), de la machine asynchrone est représentée par la Fig.4. Dont les comparateurs à hystérésis et le tableau de commutation sont remplacés par un contrôleur neuronal, et dont les entrées sont l'erreur du couple ϵ_{Cem} , du flux ϵ_{ϕ_s} , et la position (zone) du flux statorique $Z(i)$, et les sorties sont les impulsions Sa, Sb, Sc permettant la commande des interrupteurs de l'onduleur [6].

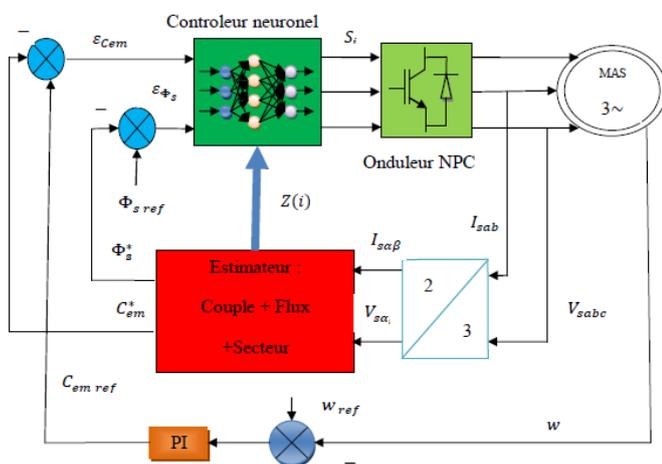


Fig. 4 Commande directe du couple de la MAS basée sur les RNA

Pour générer le contrôleur RNA par Matlab/Simulink ou on à choisi 30 couches cachées et 3 couches de sorties avec les fonctions d'activation respectivement de type « tansig » et « purelin ».

La mise à jour des poids et des biais de ce réseau est réalisés par un algorithme de retropropagation nommé l'algorithme de Levenberg-Marquardt (LM).

TABLEAU IV
PROPRIÉTÉS DU LM

Paramètres du LM	valeurs
Nombre de couche cachée	30
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	Tansig, Purelin

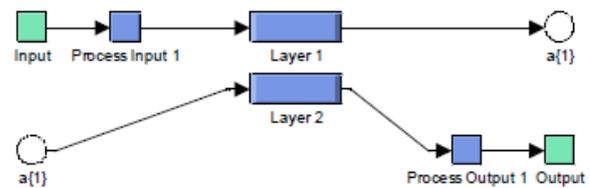


Fig. 5 Structure de réseaux de neurones

Nous avons utilisés dans la commande les paramètres de contrôle suivante: C_r =échelon 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'échantonnage $T_e = 50\mu s$, $\phi_{sref} = 3.6wb$.

TABLEAU V
MODEL PARAMETERS

Paramètres	Value
Puissance nominale	$P_n = 1MW$
Résistance statorique	$R_s = 0.228\Omega$
Résistance rotorique	$R_r = 0.332\Omega$
Inductance statorique	$L_s = 0.0084H$
Inductance rotorique	$L_r = 0.0082H$
Inductance mutuelle L_m	$L_m = 0.0078H$
Nombre de paire de pôle	$p = 3$
Moment d'inertie	$J = 20kg.m^2$
Coefficient de frottement	$K_f = 0.008Nm.s.rad^{-1}$
Tension nominale	$V_n = 791v$

VI. RESULTAT DE SIMULATION

Les résultats de simulation de la commande DTC avec RNA de la MAS alimentée par onduleur de tension à deux et à sept niveaux sont illustrés dans les Figures 6, 7, et 8.

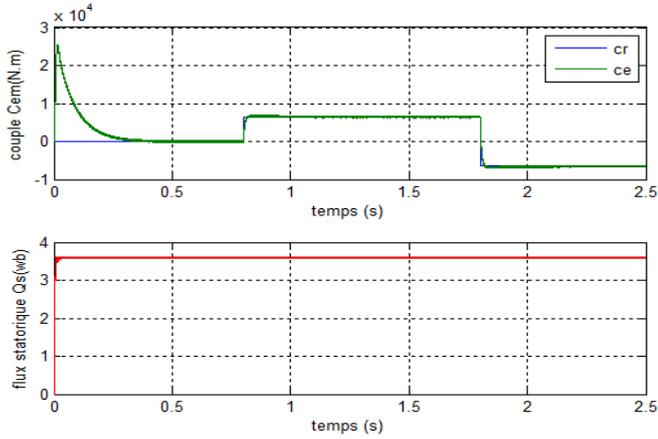


Fig . 6 Performances de la commande DTC-RNA à 2 niveaux appliquée à la MAS.

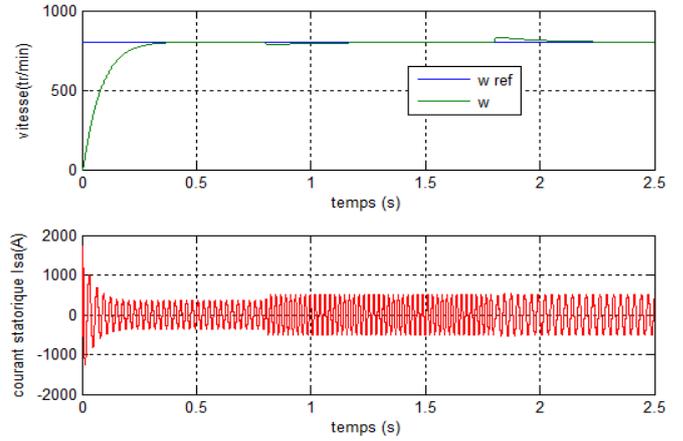
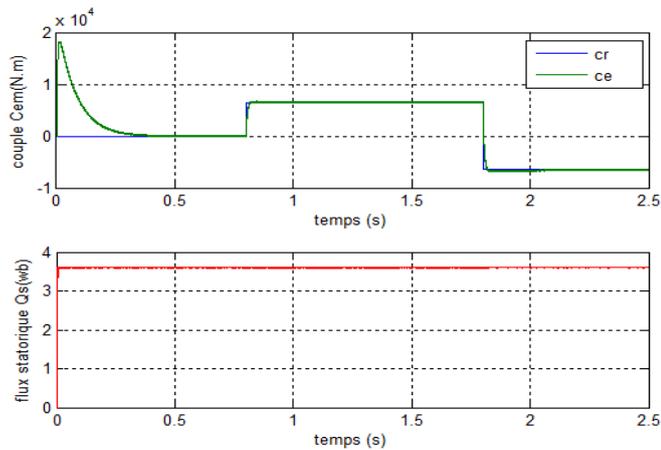


Fig. 7 Performances de la commande DTC-RNA à 7 niveaux appliquée à la MAS.

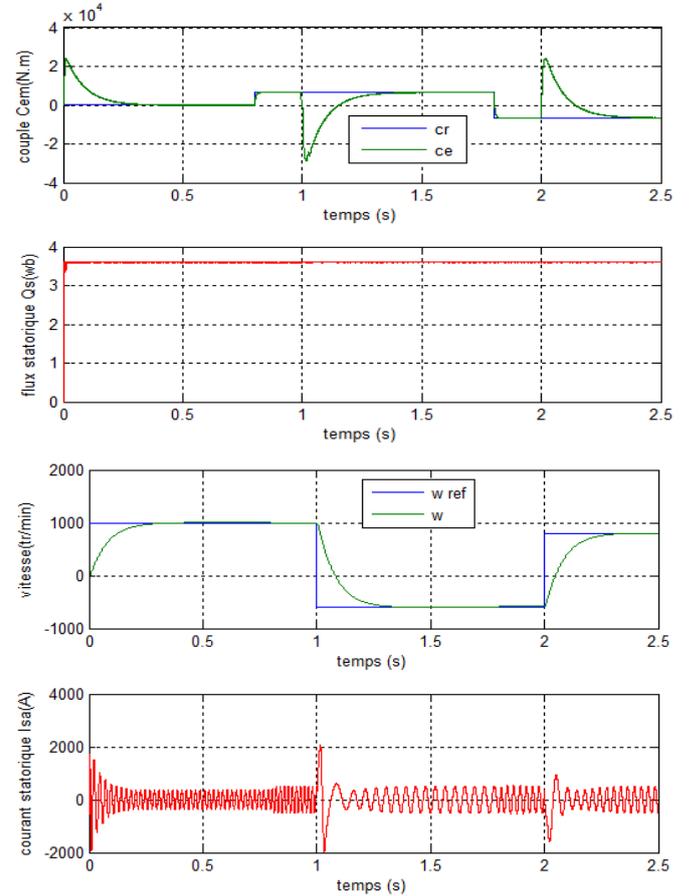
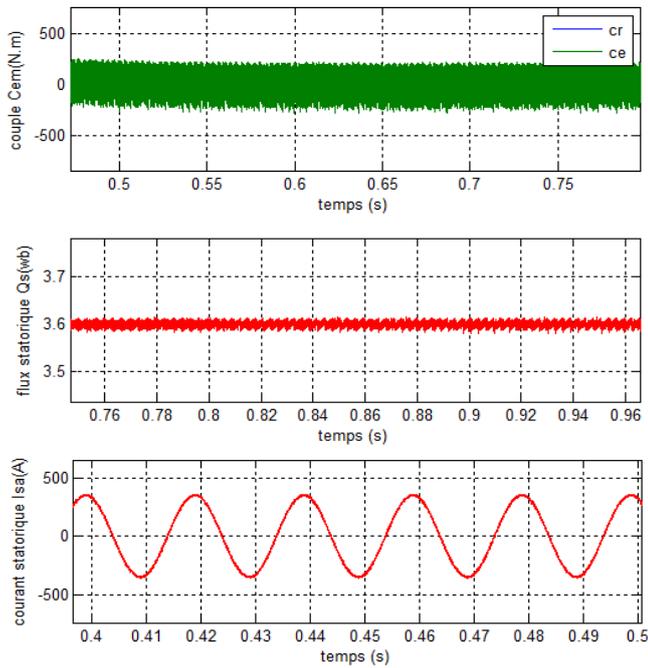
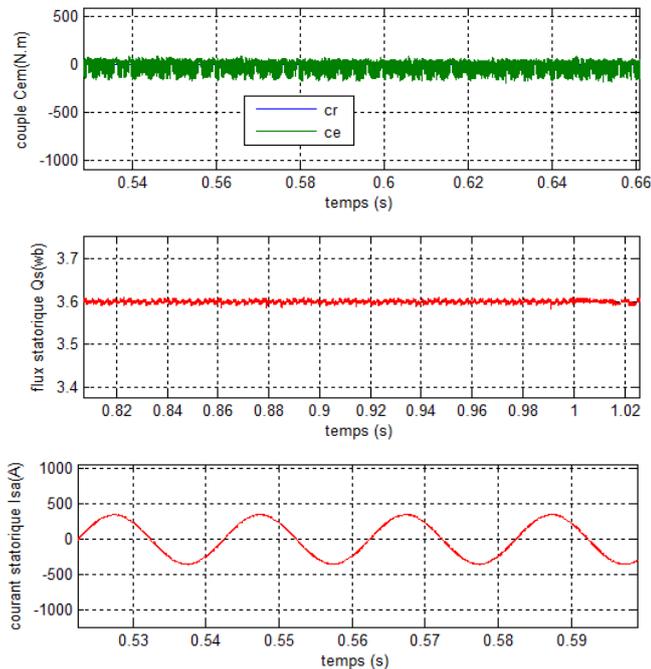


Fig. 8 Performances de la commande DTC-RNA à 7 niveaux appliquée à la MAS en inversion de vitesse.

Dans le but de connaître la meilleure commande de la MAS, une étude comparative est indispensable entre les deux commandes traitées précédemment (DTC-RNA-2N et DTC-RNA-7N). La figure suivante présente la comparaison entre deux commandes.



a) Commande DTC-2 niveaux neuronale



b) command DTC-7 niveaux neuronale.

Fig. 9 Zooms obtenues par les commandes DTC-RNA à sept niveaux et DTC-RNA à deux niveaux

La Fig.9 montré que la commande DTC-7 niveaux neuronale réduit considérablement les ondulations du couple et du flux statorique comparativement à celle de la commande DTC-2 niveaux neuronale. D'un autre coté, on remarque que la dynamique des composantes du flux statorique n'est pas affectée par l'application de ces consignes de la charge.

La vitesse atteint sa référence sans dépassement au démarrage à vide pour les toutes commandes. Et le couple suivre le couple de charge.

VII. CONCLUSIONS

Dans cet Article on à présenté un commande DTC neuronale d'un moteur asynchrone de forte puissance (1Mw) alimentée par onduleur NPC à sept niveaux. La comparaison entre la DTC-RNA proposé et DTC-2 niveaux neuronale, nous à montré les avantages apportés par l'utilisation de la commande DTC-7 niveaux neuronale: la minimisation des oscillations des grandeurs contrôlées tel que le couple et le flux, ce qui est confirmé par les résultats de simulation.

REFERENCES

- [1] B. Said, "Modélisation et commande d'un onduleur à sept niveaux à diodes flottantes: Application à la conduite d'une machine asynchrone," These Doctorat, Ecole National Polytechnique, Alger, 2008.
- [2] Z. Rabah, "Contrôle Direct du Couple d'une Machine Asynchrone Alimentée par des Onduleurs Multiniveaux," These de Doctorat, Ecole National Polytechnique, Alger, 2007.
- [3] G. Hakim, "Etude de différentes structures de cascade à onduleur NPC à sept niveaux. Application à la conduite de la machine asynchrone triphasée," These de Doctorat, Ecole National Polytechnique, Alger, 2008.
- [4] H. Chaikhy, M. Khafallah, A. Saad, M. Essaadi, K. Chikh, "Evaluation des performances des commandes vectorielles de la machine à induction," Revue de génie industriel, 2011, 6, 23-32, ISSN 1313-8871.
- [5] M. Birame, B. Mokhtari, L. Mokrani, B. Azoui, A. Naamane, N. M'sirdi, "Compensateur PI flou de la variation de la résistance statorique d'un moteur à reluctance variable commande par DTC," Acta Electrotehnica, Médiamaire science Publisher, volume 53, number 4, 2012.
- [6] D. Youcef, "Commande Directe du Couple et des Puissances d'une MADA Associée à un Système éolienne par les Techniques de L'intelligence Artificielle," Thèse de Doctorat en Science, université Djillali Liabes, Sidi- Bel-Abbes, 2015.