

Commande DTC cinq niveaux à 24 secteurs basée sur les réseaux de neurones de la MAS de forte puissance

Habib Benbouhenni ¹

Département de Génie Électrique, Ecole Nationale
Polytechnique Maurice Audin d'Oran (ENPO-MA), Oran, Algeria

(reçu le 10 Septembre 2018 - accepté le 30 Septembre 2018)

Résumé - Dans cet article, nous présentons une commande de type contrôle direct du couple (DTC) basée sur les réseaux de neurones de la machine asynchrone de forte puissance (1 MW) alimentée par onduleur NPC de tension à cinq niveaux (DTC-5N). La commande DTC classique présente plusieurs inconvénients, tels que l'obtention d'une fréquence de commutation variable, les ondulations du couple et du flux, les fluctuations des puissances et les harmoniques des courants dans le régime transitoire et permanent, à cause de l'utilisation des comparateurs à hystérésis et les tableaux de commutation. Pour cela, nous avons proposé d'étudier dans cet article la commande directe du couple à cinq niveaux (DTC-5N) basée sur les réseaux de neurones artificiels (DTC-RNA-5N), pour améliorer les performances de la commandes DTC cinq niveaux, où 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 comparer les performances des méthodes proposées (DTC-RNA-5N).

Abstract - In this article, we present a direct torque control (DTC) type command based on the neural networks of the high power asynchronous machine (1 MW) powered by a five-stage NPC voltage inverter (DTC-5N). The conventional DTC control has several disadvantages, such as obtaining a variable switching frequency, torque and flux ripples, power fluctuations and current harmonics in the transient and steady state, due to the use of hysteresis comparators and switchboards. To this end, we have proposed to study in this paper the five-stage direct torque control (DTC-5N) based on artificial neural networks (DTC-RNA-5N), to improve the performance of the five-stage DTC control, where the switching table is replaced by a neural controller, in order to properly conduct the output quantities of the MAS to their reference values during a fixed period of time. Numerical simulations are presented to compare the performance of the proposed methods (DTC-RNA-5N).

Mots Clés: Moteur Asynchrone - Onduleur NPC - DTC - Table de Commutation
- THD - Réseaux de Neurones Artificiels (RNA)

1. INTRODUCTION

La machine asynchrone (induction) connaît un succès croissant depuis des décennies en remplaçant progressivement les machines à courant continu et machine synchrones dans de nombreuses applications industrielles et dans les transports. Ce succès acquis par la machine à induction s'explique par sa conception robuste réduisant les frais de maintenance, par son coût relativement moindre par rapport aux autres machines

¹ habib0264@gmail.com

électriques et également par l'augmentation des capacités de calcul des microprocesseurs permettant de réaliser une commande performante [1].

La commande directe du couple (DTC, Direct Torque Control) appliquée aux machines asynchrones est apparue dans la moitié des années 80 [2]. C'était une alternative aux méthodes classiques de contrôle par modulation de largeur d'impulsions, (PWM, Pulse Width Modulation) et à la commande par orientation du flux rotorique (FOC, Field Oriented Control) [3].

Le principe de la commande DTC est différent. L'objectif est la régulation directe du couple de la machine, par l'application des différents vecteurs de tension de l'onduleur, qui détermine son état. Les deux variables contrôlées sont: le flux statorique et le couple électromagnétique qui sont habituellement commandées par des régulateurs à hystérésis [4]. Il s'agit de maintenir les grandeurs du flux statorique et le couple électromagnétique à l'intérieur de ces bandes d'hystérésis. La sortie de ces régulateurs détermine le vecteur de tension de l'onduleur optimal à appliquer à chaque instant de commutation. L'utilisation de ce type de régulateurs suppose l'existence d'une fréquence de commutation dans le convertisseur variable nécessitant un pas de calcul très faible [5].

Dans une commande DTC, il est préférable de travailler avec une fréquence de calcul élevée afin de réduire les oscillations du couple provoquées par les régulateurs à hystérésis. A niveau physique, cette condition se traduit par la nécessité de travailler avec des systèmes informatiques de haute performance, afin de satisfaire aux contraintes de calcul en temps réel [6].

Dans cet article, on présentera un tableau de commutation à 24 secteurs de contrôle direct du couple à cinq niveaux de la MAS. D'un autre côté, une comparaison entre la commande DTC cinq niveaux (DTC-5N) et la commande DTC cinq niveaux neuronale (DTC-RNA-5N), et les résultats de simulation obtenus.

2. ONDULEUR NPC A CINQ NIVEAUX

Chaque phase de l'onduleur triphasé NPC à cinq niveaux de tensions est composée de huit interrupteurs commandés qui sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant (il s'agit d'associations classiques d'un transistor et d'une diode en antiparallèle) et de six diodes de maintien connectées tout au long du bus continu.

L'onduleur est alimenté par une source continue E , que quatre condensateurs de valeurs égales se partagent pour donner quatre sources distinctes de tension $E/4$ [7].

La structure triphasée de l'onduleur NPC à cinq niveaux de tensions est présentée sur la figure 1.

Les tensions simples fournies par l'onduleur sont exprimées par le système matriciel suivant [8, 9]:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \times \left(\begin{bmatrix} F_{11}^{b'} + 2F_{11}^b \\ F_{21}^{b'} + 2F_{22}^b \\ F_{31}^{b'} + 2F_{33}^b \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{10}^{b'} + 2F_{10}^b \\ F_{20}^{b'} + 2F_{20}^b \\ F_{30}^{b'} + 2F_{30}^b \end{bmatrix} \right) \frac{E}{4} \quad (1)$$

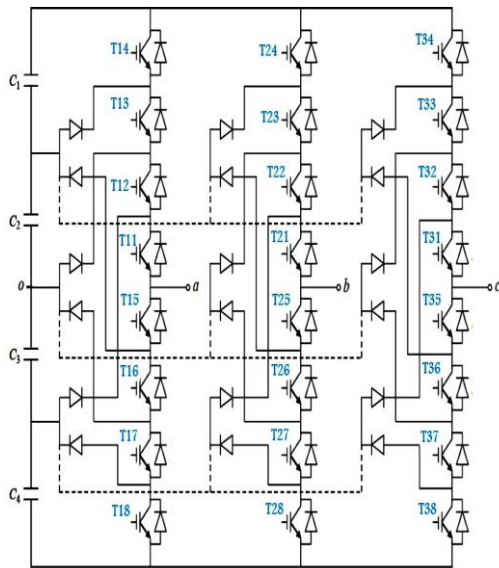


Fig. 1: Schéma d'un onduleur NPC à cinq niveaux

Avec F , fonction de connexion du demi-bras, est donnée comme suit:

$$\begin{cases} F_{K1}^b = F_{K1} F_{K2} \\ F_{K1}^b = F_{K1} F_{K2} \end{cases} \quad (1)$$

On désigne par:

$$\begin{cases} 1 - \text{le demi-bras du haut} \\ 0 - \text{le demi-bras du bas} \end{cases}$$

3. COMMANDE DTC

Depuis que Depenbrock et Takahashi ont proposé la commande DTC de la machine à induction 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.

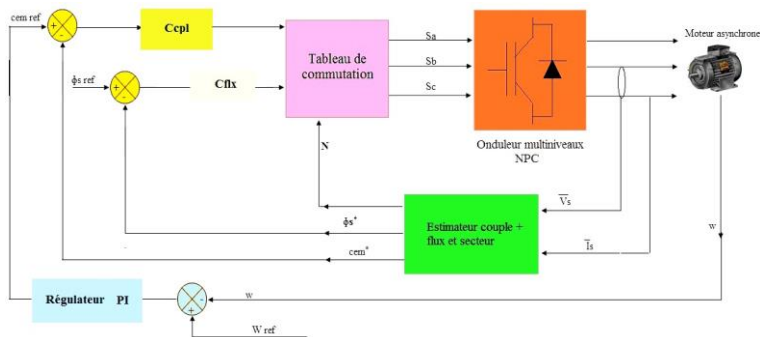


Fig. 2: Structure de base de la commande directe du couple

Le principe de la commande DTC consiste à maintenir le flux statorique dans une fourchette [1]. Le synoptique de la commande DTC est représenté dans la figure 2.

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

avec

$$\Phi_{\alpha s} = \int_0^t (v_{\alpha s} - R_s i_{\alpha s}) dt \quad (3)$$

$$\Phi_{\beta s} = \int_0^t (v_{\beta s} - R_s i_{\beta s}) dt \quad (4)$$

L'angle θ_s et C_{em} sont calculés à partir de:

$$\theta_s = \arctg(\Phi_{s\beta} / \Phi_{s\alpha}) \quad (5)$$

$$C_{em} = 1/2p(\Phi_{\alpha s} i_{\beta s} - \Phi_{\beta s} i_{\alpha s}) \quad (6)$$

Un onduleur deux niveaux 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 illustrées dans la figure 3.

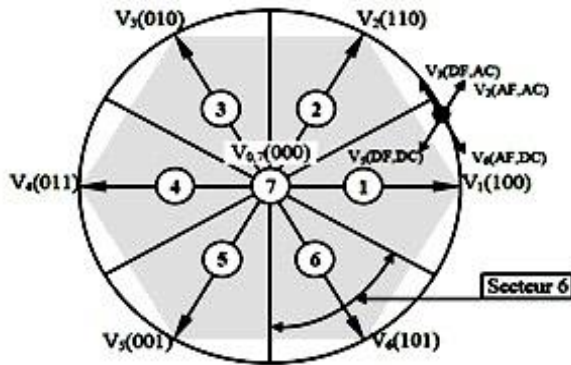


Fig. 3: Différents vecteurs de tensions statoriques délivrées par l'onduleur de tension à deux niveaux.

AF: Augmenter le Flux, **DF:** Diminuer le Flux, **AC:** Augmenter le Couple, **DC:** Diminuer le Couple.

Les valeurs estimés du couple et du flux statorique sont comparés respectivement à leurs valeurs de références C_{em}^* et Φ_s estimés, les résultats de la comparaison forment les entrées des comparateurs à cycle d'hystérésis. La sélection de vecteur de tension approprié est basée sur le tableau de commande (**Tableau1**).

Les entrées sont le numéro du secteur (N), du flux, du couple et les sorties des deux comparateurs à hystérésis [11].

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

Cflx	N Ccp1	1	2	3	4	5	6
		1	2	3	4	5	6
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

4. COMMANDE DTC A CINQ NIVEAUX

Dans la figure 4, on distingue 60 positions discrètes, distribuées sur quatre hexagones, en plus d'une position au centre de l'hexagone. Certaines positions sont créées par plusieurs états redondants. De l'hexagone externe vers l'hexagone interne, les positions du vecteur vs sont créées respectivement par un, deux, trois ou quatre états redondants. La position du centre de l'hexagone, qui correspond a une tension de sortie nulle, est crée par cinq états redondants (000, 111, 222, 333, 444).

On distingue ainsi 24 positions à une seule redondance, 18 positions à deux redondances, 12 positions à trois redondances et 6 positions à quatre redondances. Les 61 positions du vecteur de tension de sortie divise le diagramme vectoriel en six secteurs triangulaires [12].

On répartit les 61 vecteurs de tensions et les vecteurs des tensions nuls en cinq groupes (Tableau 2).

Tableau 2: Répartition en cinq groupes des vecteurs de tension de sortie de l'onduleur NPC à cinq niveaux

Vecteurs des tensions nulles	(000); (111); (222); (333); (444)
Vecteurs des tensions du premier hexagone	(100); (110); (010); (011); (001); (101)
Vecteurs des tensions du deuxième hexagones	(200); (210); (220); (120); (020); (021) (022); (012); (002); (102); (202); (201)
Vecteurs des tensions du troisième hexagone	(300); (310); (320); (330); (230); (130) (030); (031); (032); (033); (023); (013) (003); (103); (203); (303); (302); (301)
Vecteurs des tensions du quatrième hexagone	(400); (410); (420); (430); (440); (340) (240); (140); (040); (041); (042); (043) (044); (034); (024); (014); (004); (104) (204); (304); (404); (403); (402); (401)

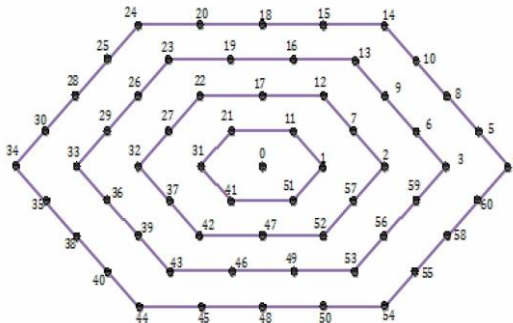


Fig. 4: Représentation vectorielle des tensions de l'onduleur à cinq niveaux

Afin de réaliser le contrôle direct du flux statorique et du couple électromagnétique de la machine asynchrone (induction) pilotée par un onduleur à cinq niveaux de tension à structure NPC, nous devons élaborer un tableau de commutation mettant en œuvre au mieux la possibilité de l'onduleur.

La construction de table de commutation (**Tableau 3**), se base effectivement sur le choix du vecteur de tension statorique appliqué pour permettre d'augmenter ou de diminuer le module du flux statorique ainsi que la valeur du couple électromagnétique.

Tableau 3: Table de vérité de l'onduleur NPC à cinq niveaux

N		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Cflx	Cepl																								
1	4	14	14	18	18	24	24	28	28	34	34	38	38	44	44	48	48	54	54	58	58	4	4	8	8
	3	10	10	15	15	20	20	25	25	30	30	35	35	40	40	45	45	50	50	55	55	60	60	5	5
	2	8	8	8	8	18	18	18	18	28	28	28	28	38	38	38	38	48	48	48	48	58	58	58	58
	1	5	5	5	5	15	15	15	15	25	25	25	25	35	35	35	35	45	45	45	45	55	55	55	55
	0	4	4	8	8	14	14	18	18	24	24	28	28	34	34	38	38	44	44	48	48	54	54	58	58
	-1	60	60	60	60	10	10	10	10	20	20	20	20	30	30	30	30	40	40	40	40	50	50	50	50
	-2	58	58	4	4	8	8	14	14	18	18	24	24	28	28	34	34	38	38	44	44	48	48	54	54
	-3	55	55	55	55	5	5	5	5	15	15	15	15	25	25	25	25	35	35	35	35	45	45	45	45
	-4	54	54	58	58	4	4	8	8	14	14	18	18	24	24	28	28	34	34	38	38	44	44	48	48
	4	18	18	24	24	28	28	34	34	38	38	44	44	48	48	54	54	58	58	4	4	8	8	14	14
0	3	18	18	24	24	28	28	34	34	38	38	44	44	48	48	54	54	58	58	4	4	8	8	14	14
	2	15	15	15	15	25	25	25	25	35	35	35	35	45	45	45	45	55	55	55	55	5	5	5	5
	1	15	15	15	15	25	25	25	25	35	35	35	35	45	45	45	45	55	55	55	55	5	5	5	5
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1	48	48	54	54	58	58	4	4	8	8	14	14	18	18	24	24	28	28	34	34	38	38	44	44
	-2	48	48	54	54	58	58	4	4	8	8	14	14	18	18	24	24	28	28	34	34	38	38	44	44
	-3	45	45	45	45	55	55	55	55	5	5	5	5	15	15	15	15	25	25	25	25	35	35	35	35
	-4	45	45	45	45	55	55	55	55	5	5	5	5	15	15	15	15	25	25	25	25	35	35	35	35
	4	24	24	28	28	34	34	38	38	44	44	48	48	54	54	58	58	4	4	8	8	14	14	18	18
	3	23	23	23	23	33	33	33	33	43	43	43	43	53	53	53	53	3	3	3	3	13	13	13	13
-1	2	3	3	3	3	13	13	13	13	23	23	23	23	33	33	33	33	43	43	43	43	53	53	53	53
	1	33	33	33	33	43	43	43	43	53	53	53	53	3	3	3	3	13	13	13	13	23	23	23	23
	0	13	13	13	13	23	23	23	23	33	33	33	33	43	43	43	43	53	53	53	53	3	3	3	3
	-1	43	43	43	43	53	53	53	53	3	3	3	3	13	13	13	13	23	23	23	23	33	33	33	33
	-2	44	44	48	48	54	54	58	58	4	4	8	8	14	14	18	18	24	24	28	28	34	34	38	38
	-3	40	40	40	40	50	50	50	50	60	60	60	60	10	10	10	10	20	20	20	20	30	30	30	30
	-4	38	38	44	44	48	48	54	54	58	58	4	4	8	8	14	14	18	18	24	24	28	28	34	34

5. COMMANDE DTC NEURONALE A CINQ NIVEAUX

Le développement des réseaux de neurones est relativement récent. L'origine des réseaux de neurones vient de l'essai de modélisation du neurone biologique par Warren Mac Culloch et Walter Pitts. Mais il faut attendre les années 80 pour voir émerger véritablement les réseaux de neurones dans le domaine du traitement de l'information, et ceci grâce à la mise au point d'un algorithme d'apprentissage pour les réseaux de neurones à plusieurs couches (utilisant le calcul du gradient par rétropropagation) [13].

Les réseaux de neurones forment une famille de fonctions non linéaires, permettant de construire, par apprentissage, une très large classe de modèles et de contrôleurs. Un réseau de neurone est un système d'opérateurs non linéaires interconnectés, recevant des signaux de l'extérieur par ses entrées, et délivrant des signaux de sortie, qui sont en fait les activités de certains neurones [14].

Les réseaux de neurones artificiels sont des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit.

5.1 Principe du contrôleur neuronale

Le rôle d'une loi de contrôle est de maintenir certains états d'un système à des valeurs désirées malgré les effets d'éventuelles perturbations. 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 des variables formalismes et sur une théorie de contrôle.

Aujourd'hui, on veut contrôler des systèmes complexes. Il s'agit également de les rendre plus intelligents, c'est-à-dire plus automatisés, plus autonomes, plus performants, plus rapides, tout en réduisant au maximum l'énergie. Ces exigences complexes sont utilisées largement pour les systèmes et leurs modèles [14].

5.2 Commande neuronale directe du couple

L'application de la technique des réseaux de neurones dans la commande des machines est simple et a permis la résolution de plusieurs problèmes liées au contrôle de ces systèmes [13]. Dans notre article sur la DTC-RNA, il est facile d'utiliser cette technique dont on va garder le même travail qu'au DTC classique, mais nous changeons que le bloc qui donnera les impulsions aux interrupteurs d'onduleur par un contrôleur à base de réseaux de neurones comme est illustré sur la figure 5 [15].

Pour réaliser un réseau de neurone il faut faire trois études principales [13]:

Choix des variables d'entrée des RNA

La première variable d'entrée est la position du flux dans le référentiel lié au stator. La deuxième variable d'entrée, nous avons utilisée la variable d'état d'erreur du flux. La troisième variable d'entrée, nous avons utilisée la variable d'état d'erreur du couple.

Choix des variables de sortie des RNA

La sortie est représentée par les impulsions des interrupteurs d'onduleur qui représentent des valeurs zéro ou un.

Construction de la base d'apprentissage

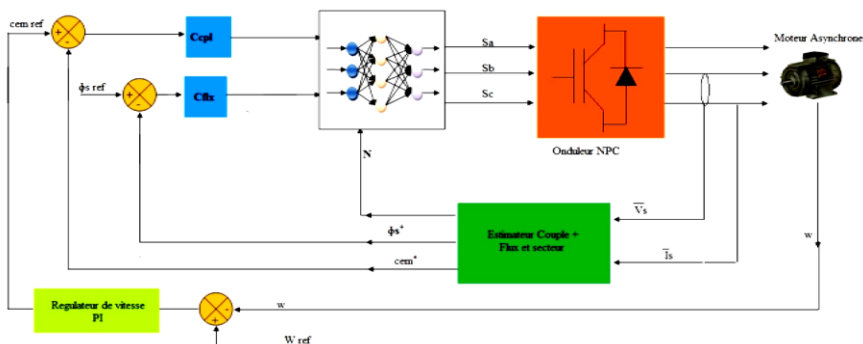


Fig. 5: Commande directe du couple de la MAS basée sur les RNA.

La base d'apprentissage de RNA est mise sous forme de fichier ou du tableau matrice. Le réseau de neurones que nous avons utilisé est un réseau multicouche à connexion local qui utilise l'algorithme de rétro-propagation pour leurs apprentissages [15].

Pour générer le contrôleur RNA par Matlab/Simulink où on a choisi 64 couches cachées et 03 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 réalisé par un algorithme de rétro-propagation nommé l'algorithme de Levenberg-Marquardt (LM).

La convergence du réseau a été obtenue en utilisant les valeurs des paramètres regroupées dans le **tableau 4**.

Tableau 4: Propriétés du LM

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

Sur la figure 6, nous illustrons le contrôleur à base de réseau de neurone de la commande DTC-RNA-5N.

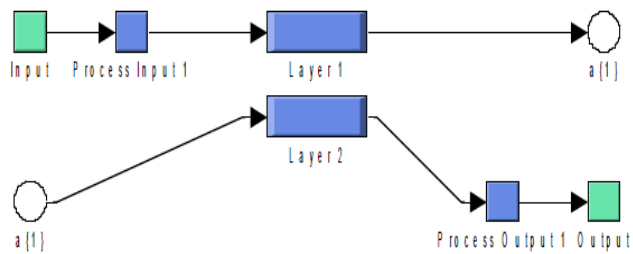
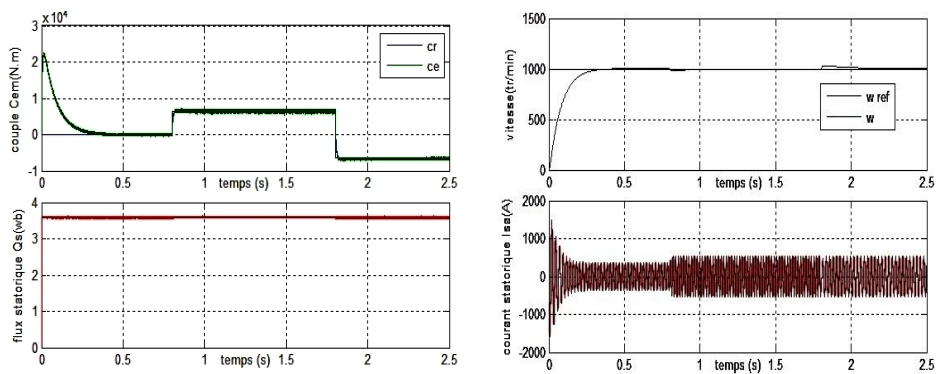


Fig. 6: Structure interne du contrôleur neuronale de DTC

Pour illustrer le fonctionnement de la commande DTC 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 utilisé dans la commande les paramètres de contrôle suivante: C_r = échelon variable de 6500 à -6500 N.m à l’instant $t=0.8s$, $\Delta C_e=0.05 N.m.$, $\Delta \Phi_s=0.001 Wb$, la vitesse de référence ω_{ref} 1000 tr/min, une période d’échantonnage $T_e = 50\mu s$, $\Phi_{sref} = 3.6 Wb$.



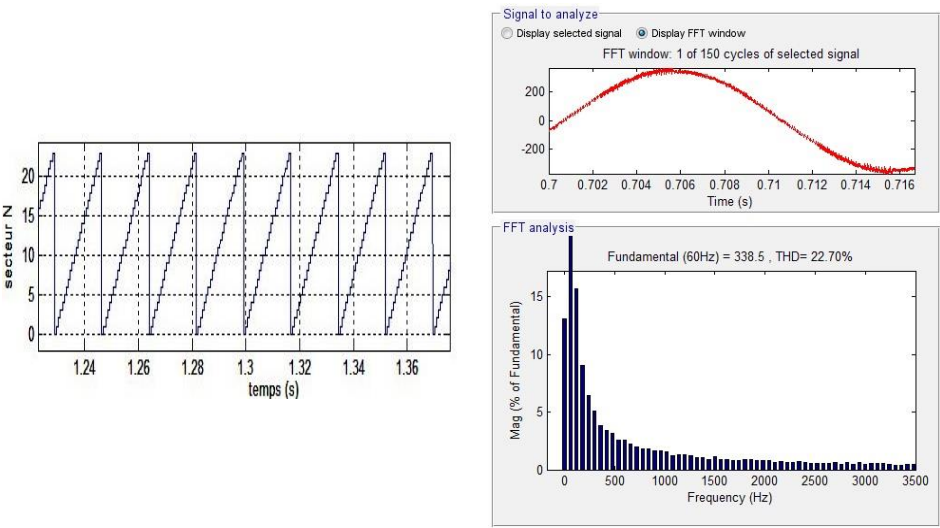


Fig. 7: Performances de la commande DTC à cinq niveaux avec 24 secteurs appliquée à la MAS

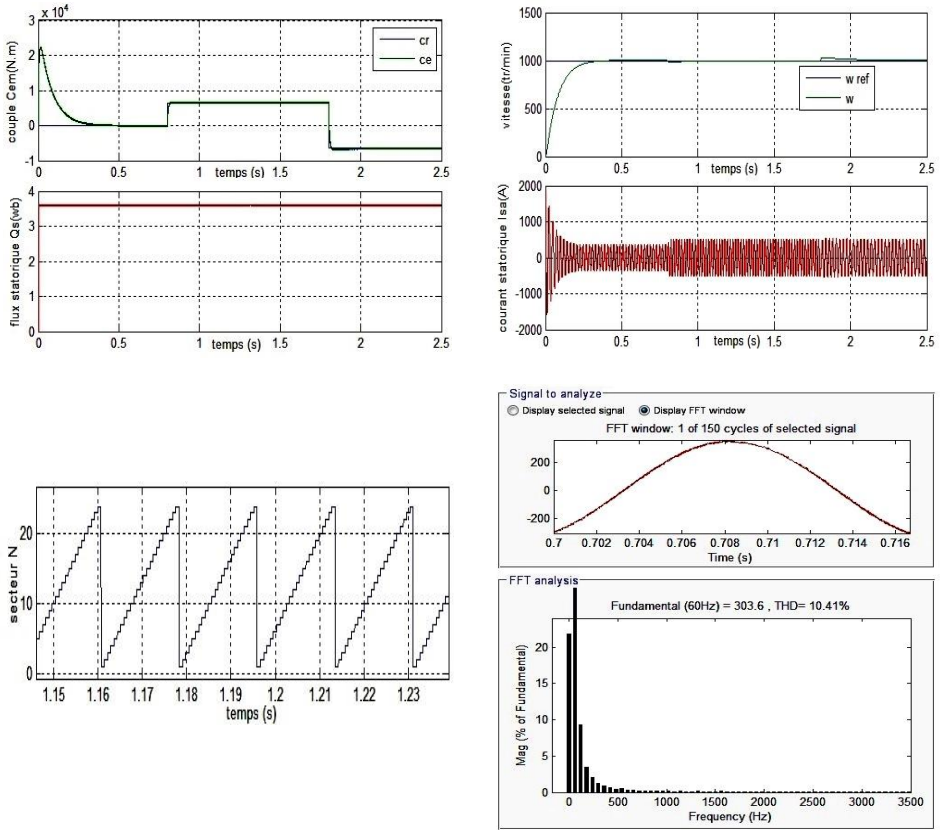


Fig. 8: Performances de la commande DTC neuronale à cinq niveaux avec 24 secteurs appliquée à la MAS

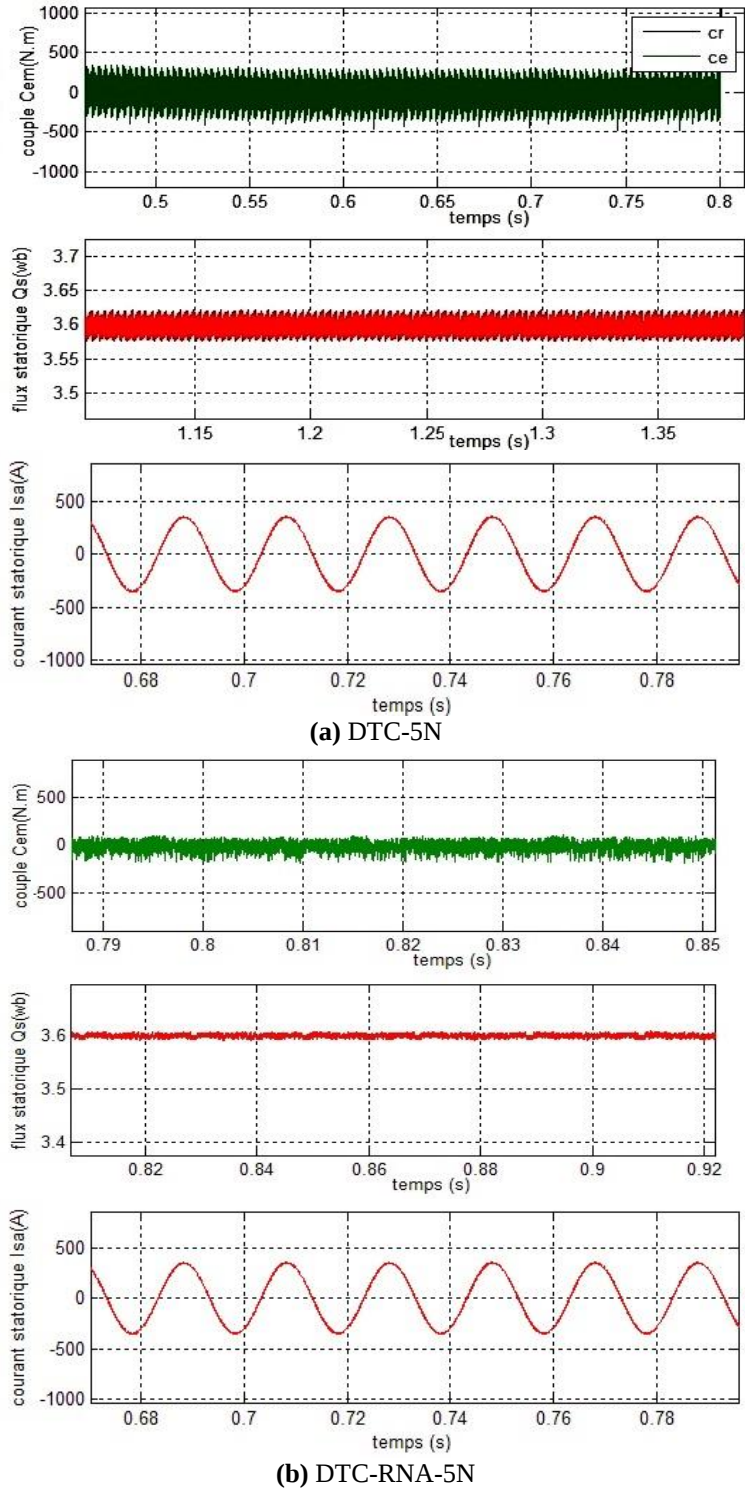


Fig. 9: Zooms obtenues par la commande DTC à cinq niveaux à 24 secteurs de la MAS: **a)** DTC-5N, **b)** DTC-RNA-5N

Dans le **Tableau 5**, nous résumons les résultats de simulation obtenus par DTC-5 niveaux à 24 secteurs avec et sans réseaux de neurones.

Tableau 5: Etude comparative entre les DTC-5 niveaux sans et avec réseaux de neurones

	I_{sa} THD (%)	Minimisations des ondulations du couple	Minimisations des ondulations du flux
DTC-5 niveaux	22.70	Assez bonne	Assez bonne
DTC-5 niv. neuronale	10.41	meilleure	meilleure

Les résultats de simulation et le **Tableau 5** montrent sans doute, que la commande DTC-5 niveaux à 24 secteurs neuronaux proposés, est la plus performante au niveau de la minimisation des pulsations du couple et du flux, ainsi que sa fréquence de commutation de l'onduleur par rapport à la commande DTC-5 niveaux.

D'un autre côté, on constate que le module du flux s'établit à sa valeur de référence de 3.6 Wb. Et la vitesse atteint sa référence sans dépassement au démarrage à vide.

Le couple électromagnétique agit rapidement pour suivre les consignes de charges introduites. Il présente une diminution remarquable des oscillations pour DTC-5 niveaux à 24 secteurs neuronale proposé par rapport à la DTC-5 niveaux. La dynamique des composantes du flux statorique n'est pas affectée par l'application de ces consignes de charges.

6. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté une stratégie de la commande directe du couple (DTC) à 24 secteurs d'une machine asynchrone de forte puissance (1MW) avec et sans réseaux de neurone. L'avantage principal de cette technique est de permettre le contrôle du flux et du couple de la machine sans avoir besoin à utiliser un capteur mécanique.

Les résultats de simulation obtenue pour l'arrangement de DTC neuronale à cinq niveaux avec 24 secteurs, illustrent une réduction considérable dans l'ondulation du couple, et l'ondulation du flux, et la valeur de THD du courant statorique par rapport aux résultats obtenus dans la DTC-5 niveaux à 24 secteurs.

REFERENCES

- [1] 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, Vol. 6, pp. 23 - 32, 2011. ISSN 1313-8871.
- [2] A. Benzaïoua, 'Contribution à la Commande Directe de Couple d'une Machine Asynchrone Triphasée', Thèse de Doctorat, Université du Québec, Chicoutimi, 2014.
- [3] B. Messaoud, 'Commande Par DTC de la Machine à Induction sans Capteur de Vitesse. Utilisation du filtre de Kalman pour l'estimation de la Vitesse', Mémoire de Magister, Université de Batna, 2012.
- [4] K. Akkouchi, 'Commande directe du couple (DTC) d'une machine asynchrone', Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2007.

- [5] A. Seddiki, '*Contribution au contrôle direct du couple (DTC) d'une machine asynchrone à cage alimentée par un onduleur multi niveaux*', Mémoire de Magister, Université M'Hamed Bougera, Boumerdes, 2009.
- [6] A. Chikhi, '*Commande Directe du Couple du Moteur Asynchrone –Apport de la Logique Floue*', Mémoire de Magister, Université de Batna, 2008.
- [7] H. Tédjini, M. Moudjahed, Y. Meslem et M. Tadjine, '*Commande non linéaire adaptative par backstepping et observateur d'une machine synchrone à aimant permanent alimentée par un onduleur à trois niveaux*', 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing, CIP'2007, 03-04 November 2007.
- [8] H. Benzemamouche, '*Application de la MLI Vectorielle aux onduleurs Multiniveaux à base de GTO et d'IGBT*', Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2010.
- [9] N. Lourci, E.M. Berkouk et DJ. Lalili, '*Cascade d'un redresseur à deux Niveaux-onduleur à cinq Niveaux à diodes Flottantes-machines asynchrone*', Revue des Sciences et de la Technologie-RST-, Vol. 1, N°1, Janvier 2009.
- [10] M. Nadhir, '*Contribution à l'étude des Performances des Onduleurs Multi niveaux sur les Réseaux de Distribution*', Thèse de Doctorat en Sciences, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2014.
- [11] S. Meziane, R. Toufouti et H. Benalla, '*Etude Comparative entre la DTC deux niveaux et la DTC Trois Niveaux de la Machine Asynchrone*', Communication Science et Technologie, N° 7, Janvier 2009.
- [12] H. Yantour, J. Saadi et A. Khoumri, '*Modilisation et Simulation d'une Commande Directe du Couple Appliquée à la Machine Asynchrone (DTC)*', 6^{ème} Conférence Francophone de Modélisation et Simulation-MOSIM'06, Rabat, Maroc, du 3 au 5 avril 2006.
- [13] B. Elakhdar, '*Commande directe du couple floue et neuronale d'un moteur synchrone à double étoile sans capteur mécanique alimenté par onduleurs multi niveaux*', Thèse de Doctorat en Sciences, Université Djillali Liabes, Sidi- Bel-Abbés, 2015.
- [14] B. Omer Fethi, '*Application des techniques de l'intelligence Artificielle (LF-RN) pour le Contrôle Directe du Couple d'une MAS Alimentée par des Onduleurs Multi niveaux*', Mémoire de Magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, Oran, 2013.
- [15] B. Sebti, '*Commande par DTC d'un Moteur Asynchrone apport des Réseaux de Neurones*', Mémoire de Magister, Université de Batna, 2013.
- [16] 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-Abbés, 2015.