

Etude comparative entre la DTC neuronale et la DTC basée sur les régulateurs à hystérésis neuronale de la MAS alimentée par onduleur NPC à cinq niveaux

H. Benbouhenni *

Ecole Nationale Polytechnique d'Oran Maurice Audin, ENPO-MA
B.P. 1523 El M'nouer, Oran, Algérie

(reçu le 20 Janvier 2018 - accepté le 30 Juin 2016)

Résumé - Ce travail présente la comparaison entre deux types de la commande DTC d'une machine asynchrone alimentée par onduleur NPC à cinq niveaux, la commande DTC neuronale à cinq niveaux (DTC-RNA-5N) et la commande DTC cinq niveaux (DTC-5N) basée sur les régulateurs à hystérésis neuronale. En utilisant le logiciel Matlab-Simulink, comme résultats les ondulations du couple électromagnétique, et du flux statorique de la commande DTC-RNA-5N réduit considérablement par rapport aux ondulations de la commande DTC-5N basée sur les régulateurs à hystérésis neuronale.

Abstract - This work presents the comparison between two types of DTC control of a five-level NPC inverter-powered induction machine, such as the five-level neuronal DTC (DTC-RNA-5N) and the five-level DTC (DTC-5N) command based on neuronal hysteresis comparators. Using Matlab/Simulink software, the ondulations of the electromagnetic torque, and the stator flux of the DTC-RNA-5N command considerably reduced compared to the ondulations of the DTC-5N command based on the neuronal hysteresis regulators.

Keywords: Induction machine - Five-level NPC inverter - DTC - Neuronal DTC - Neuronal hysteresis controllers

1. INTRODUCTION

Toujours en quête de meilleures solutions de contrôle, nous abordons maintenant les techniques de commande directes avec comme objectif de surpasser certaines des difficultés rencontrées avec la commande vectorielle [1].

Au milieu des années 80, exactement en 1986 [2], une stratégie de contrôle direct du couple de la machine asynchrone (MAS) apparue dans la littérature sous le nom de DTC (Direct Torque Control), a été proposée par Takahashi. Le principe de la commande DTC est la régulation directe du couple électromagnétique de la machine, par l'application des différents vecteurs de tension à l'onduleur, qui détermine son état. Les deux variables contrôlées sont: le flux et le couple électromagnétique qui sont habituellement commandés par des comparateurs à hystérésis [3].

Il s'agit de maintenir les grandeurs du flux et le couple à l'intérieur de ces bandes d'hystérésis. La sortie de ces régulateurs détermine le vecteur de tension optimal à appliquer à chaque instant de commutation [4].

Dans cet article, nous sommes intéressés à la commande DTC de la MAS alimentée par l'onduleur multi niveaux. Ce type de commande considère l'onduleur multi niveaux associé à la commande DTC comme un ensemble où le vecteur de commande est constitué par les états de commutation. Ses principaux avantages sont la rapidité de la réponse dynamique du couple et la faible dépendance vis-à-vis des paramètres de la machine.

Cependant, deux inconvénients majeurs se présentent. D'une part la détermination des états de commutation se base sur des informations des tendances d'évolution du flux

* habib_benbouhenni@yahoo.com

et du couple issues des éléments non linéaires de type hystérésis, d'autre part, comme la durée des commutations est variable, cela conduit à des oscillations du couple et du flux [1].

Dans ces conditions, il est préférable de travailler avec une fréquence de calcul élevée afin de réduire les oscillations du couple provoquées par les régulateurs à hystérésis. 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.

Donc, les avantages déterminants attribués aux techniques DTC classiques (dynamique, robustesse, facilité d'implémentation, performances aux faibles vitesses) sont néanmoins contre balancés par l'utilisation d'un comparateur à hystérésis échantillonné et un faible nombre des vecteurs des tensions à appliquer.

Nous allons proposer d'alimenter la MAS par un onduleur NPC de tension à cinq niveaux pour but de minimiser les ondulations du couple et du flux dans le régime transitoire et permanent, avec une maîtrise de la fréquence de commutation de l'onduleur.

Des simulations sont présentées, d'une part pour illustrer les performances apportées par les DTC-5 niveaux, d'autre part pour affirmer les améliorations apportés par la méthode proposée (DTC-RNA-5 niveaux) par rapport aux DTC-5 niveaux avec régulateurs à hystérésis neuronale.

2. METHODOLOGIE

2.1 Modèle de la machine asynchrone

On admet que la machine est symétrique, que son induction a une répartition sinusoïdale dans l'entrefer et qu'elle n'est pas soumise à la saturation. Dans le référentiel d'axe lié au stator ($\alpha\beta$), la représentation d'état de la machine asynchrone dans un repère lié au stator [5, 6].

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{U} \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{X} \end{cases} \quad (1)$$

avec

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} I_{s\alpha} & I_{s\beta} & \Phi_{s\alpha} & \Phi_{s\beta} \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{U} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & v_{s\beta} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_r}; \quad \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s \cdot L_r}; \quad K = \frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r}; \quad \lambda = \left[\frac{1}{T_s} + \frac{M^2}{T_r \cdot L_s \cdot L_r} \right]$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\lambda/\sigma & 0 & \sigma K/T_r & K\omega_r \\ 0 & -\lambda/\sigma & -K\omega_r & \sigma K/T_r \\ M/T_r & 0 & -1/T_r & -\omega_r \\ 0 & M/T_r & -\omega_r & -1/T_r \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1/\sigma L_s & 0 \\ 0 & 1/\sigma L_s \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{U} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Le couple électromagnétique peut alors s'exprimer comme suit:

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \times (\Phi_{c\alpha i_s \beta} - \Phi_{c\beta i_s \alpha}) \quad (2)$$

2.2 Principe de la commande DTC

La commande DTC 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 basé généralement sur l’utilisation de comparateurs à hystérésis dont la fonction est de contrôler l’état du système, à savoir, l’amplitude du flux statorique et du couple électromagnétique [7].

Cette technique possède généralement d’excellentes caractéristiques dynamiques qui s’étendent à des larges plages de fonctionnement couple/vitesse, en plus [1],

- La stratégie de contrôle par DTC est insensible, dans sa version de base, aux variations des paramètres du stator de la machine.
- L’estimation du flux statorique ne dépend que de la résistance du stator (intégration en boucle ouverte de la force électromotrice du stator).
- Le découplage entre les grandeurs de contrôle étant naturellement assuré par la commande directe, et le fonctionnement à flux variable n’affecte pas le réglage du couple.
- La mise en œuvre des commandes de type DTC se démarque sensiblement des commandes à flux orienté classiques, elles ne nécessitent généralement pas de transformation de coordonnées (Park) dans des axes tournants.
- La DTC peut être classifiée parmi les stratégies de contrôle simples à faibles coûts de calcul.

Le synoptique de la commande DTC est représenté dans la figure 1.

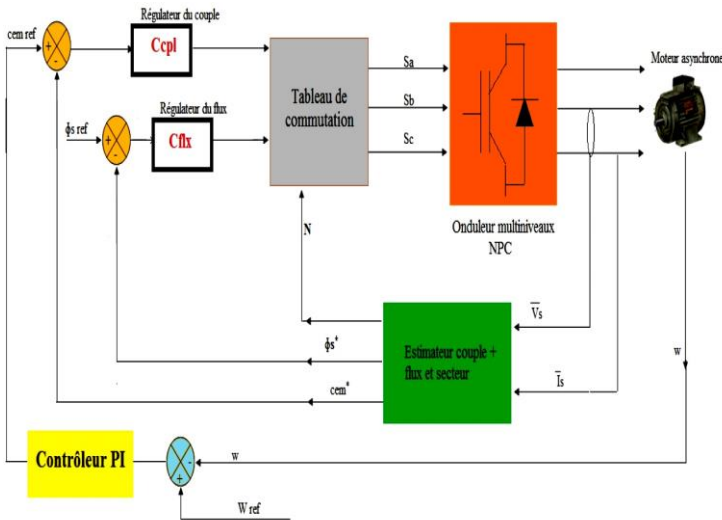


Fig. 1: Structure de base de la commande directe du couple

Le flux statorique et le couple électromagnétique sont calculés à partir des équations suivantes [8, 9],

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

Avec,

$$\Phi_s = \sqrt{\Phi_{s\alpha}^2 + \Phi_{s\beta}^2} \quad (4)$$

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot p [\Phi_{s\alpha i s \beta} - \Phi_{s\beta i s \alpha}] \quad (5)$$

L'angle θ_s est calculé à partir de l'expression suivante,

$$\theta_s = \arctg(\Phi_{s\beta} / \Phi_{s\alpha}) \quad (6)$$

Les valeurs estimés du couple et du flux statorique sont comparés respectivement à leurs valeurs de la références C_{em}^* et ϕ_s estimés, les résultats de la comparaison forment les entrées des comparateurs à cycle d'hystérésis. Les entrées sont le numéro du secteur du flux et les sorties des deux comparateurs à hystérésis [10].

Un onduleur à cinq niveaux triphasé à MLI permet d'atteindre 60 positions distinctes dans le plan de phase, correspondant aux 65 séquences de tension de l'onduleur. Ces positions sont illustrées dans la figure 2.

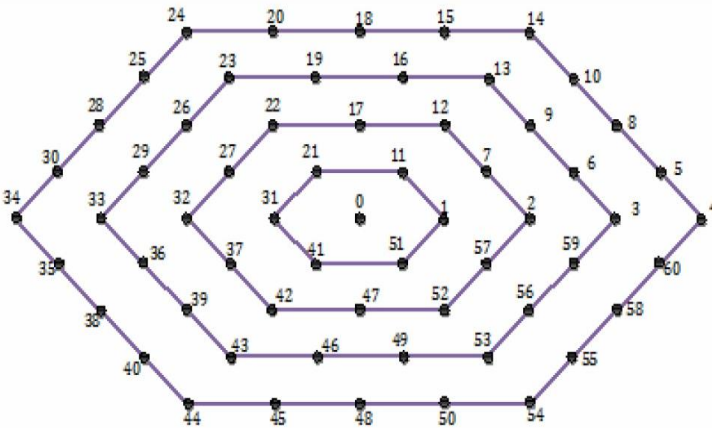


Fig. 2: Différents vecteurs de tensions statorique délivrées par l'onduleur de tension à cinq niveaux

Dans la figure 2, certaines positions sont créées par plusieurs états redondants. De l'hexagone extérieur vers l'hexagone interne, les positions du vecteur V_s 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 créée par cinq états

redondants. 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 65 positions du vecteur de tension de sortie divise le diagramme vectoriel en six (06) secteurs triangulaires [11]. On répartit les 65 vecteurs de tensions et les vecteurs de tensions nuls en cinq groupes (**Tableau 1**).

Tableau 1: Répartition en cinq groupes des vecteurs de tension de sortie de l’onduleur NPC à cinq niveaux

Vecteurs tensions nulles	(000); (111); (222); (333); (444)
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) (031); (032) (033); (023); (013); (003); (103); (203); (303); (302); (301)
Vecteurs 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)

Afin de réaliser le contrôle direct du flux statorique et du couple électromagnétique de la machine asynchrone (1 MW) pilotée par un onduleur à cinq niveaux de tension à structure NPC. La construction du tableau de commutation (**Tableau 2**), 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 2: Table de vérité de l’onduleur 5 niveaux cas du correcteur du flux à 2 niveaux et correcteur de couple à 03 niveaux avec 12 secteurs

secteur	Cflx					
	1			0		
	Ccpl					
	1	0	-1	1	0	-1
1	14	2	54	24	32	44
2	18	7	58	28	37	48
3	24	12	4	34	42	54
4	28	17	8	38	47	58
5	34	22	14	44	52	4
6	38	27	18	48	57	8
7	44	32	24	54	2	14
8	48	37	28	58	7	18
9	54	42	34	4	12	24
10	58	47	38	8	17	28
11	4	52	44	14	22	34
12	8	57	48	18	27	38

2.3 Commande DTC cinq niveaux neuronale (DTC-RNA-5 niveaux)

L’application de la technique des réseaux de neurones dans la commande des machines est simple et a permis la résolution de plusieurs problèmes liés au contrôle de ces systèmes [12].

Dans notre article sur la DTC-RNA à cinq niveaux, il est facile d’utiliser cette technique dont on va garder le même travail que la DTC cinq niveaux, mais nous avons changé 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 3 [13].

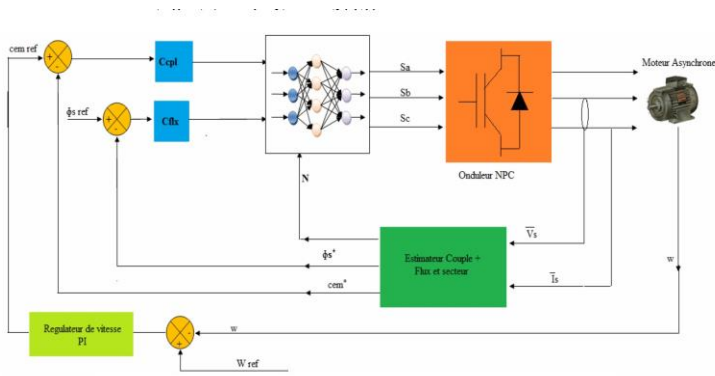


Fig. 3: Commande directe du couple basée sur les RNA de la MAS

Pour générer le contrôleur RNA par Matlab/Simulink où l'on a choisi 18 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 réalisée par un algorithme de rétro propagation nommé l'algorithme de Levenberg-Marquardt (LM) [14].

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

Tableau 3: Paramètres du LV

Parameters du LM	valeurs
Number de couche cachée	18
Pas d'apprentissage	0.002
Pas d'affichage (affichage de l'erreur par morceaux)	50
Number d'itération (epochs)	1000
Coef d'accélération de convergence (mc)	0.9
Erreur (goal)	0
Fonctions d'activation	Tansig, Purelin

Le tableau de commutation de la commande DTC à cinq niveaux de la MAS est utilisé comme le tableau de matrice dans la commande DTC-RNA à cinq niveaux. La figure 4 illustre le block simulation du réseau de neurones de la commande DTC.

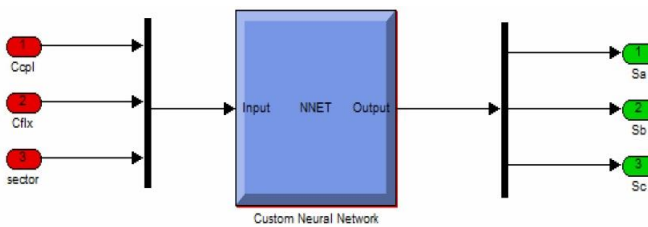


Fig. 4: Block simulation des RNA

La figure 5 illustre l'architecture interne du contrôleur neuronale de la commande DTC cinq niveaux à 12 secteurs.

2.4 Commande DTC cinq niveaux avec régulateurs à hystérésis neuronale

Pour la commande DTC avec régulateurs à hystérésis neuronale, on va effectuer le même travail qu'avec la commande e DTC cinq niveaux, mais nous changeons que les

régulateurs à hystérésis (correcteur du couple et du flux) par deux régulateurs à base des réseaux de neurones comme est illustré sur la figure 6.

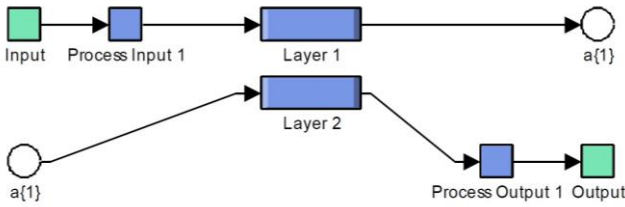


Fig. 5: Structure interne du contrôleur neuronale pour DTC

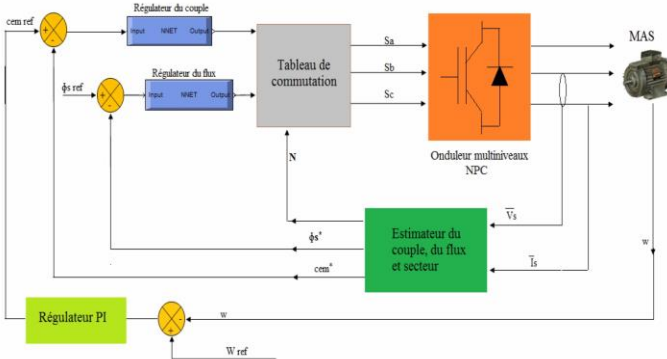


Fig. 6: Commande directe du couple de la MAS avec régulateurs à hystérésis basée sur les RNA.

Pour générer le contrôleur RNA par Matlab/Simulink, on a choisi trois (03) couches cachées pour régulateur du flux, et quatre (04) couches cachées pour régulateur du couple comme exemple, les fonctions d'activation respectivement de type 'tansig' et 'purelin'. La convergence du réseau a été obtenue en utilisant les valeurs des paramètres regroupées dans les **Tableaux 4 et 5**.

Tableau 4: Propriétés du LM du correcteur du couple

Paramètres du LM	valeurs
Nombre de couche cachée	4
Pas d'apprentissage	0.002
Pas d'affichage (affichage de l'erreur par morceaux)	50
Nombre d'itération (epochs)	500
Coef d'accélération de convergence (mc)	0.9
Erreur (goal)	0
Fonctions d'activation	Tansig, Purelin

Tableau 5: Propriétés du LM du correcteur du flux

Paramètres du LM	valeurs
Number de couche cachée	3
Pas d'apprentissage	0.002
Pas d'affichage (affichage de l'erreur par morceaux)	50
Number d'itération (epochs)	500
Coef d'accélération de convergence (mc)	0.9
Erreur (goal)	0
Fonctions d'activation	Tansig, Purelin

3. RESULTATS ET DISCUSSION

Le comportement de la structure de la commande directe du couple, appliquée à une machine asynchrone de forte puissance (1 MW), est simulé sous l'environnement Matlab/Simulink. La simulation est effectuée dans les conditions suivantes.

La bande d'hystérésis de comparateur du couple est, dans ce cas, fixée à ± 0.05 N.m, et celle de comparateur du flux à ± 0.001 Wb.

Le couple de référence $C_{em,ref}$ est récupéré à la sortie d'un correcteur PI, et le flux de référence $\Phi_{s,ref} = 3.6$ Wb.

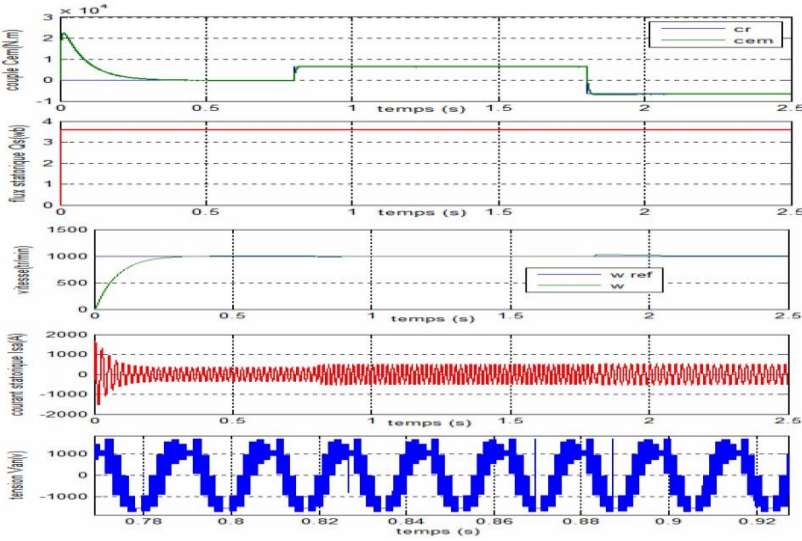


Fig. 7: Performances de la commande DTC neuronale à cinq niveaux appliquée à la MAS

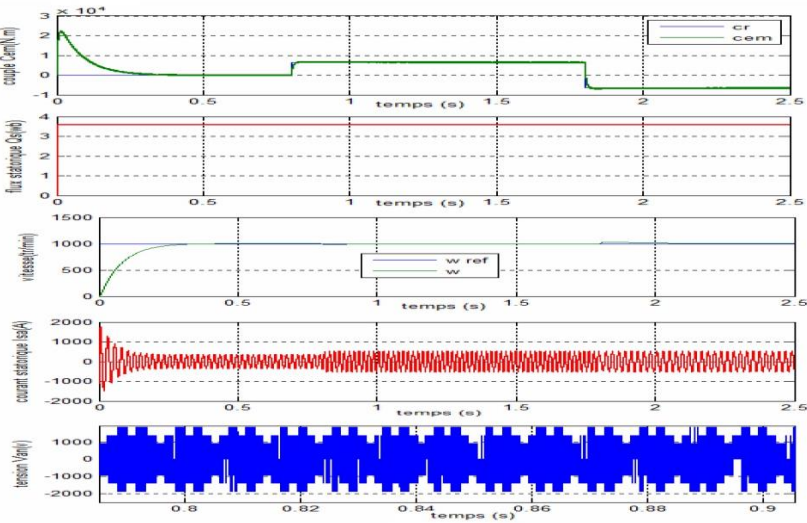
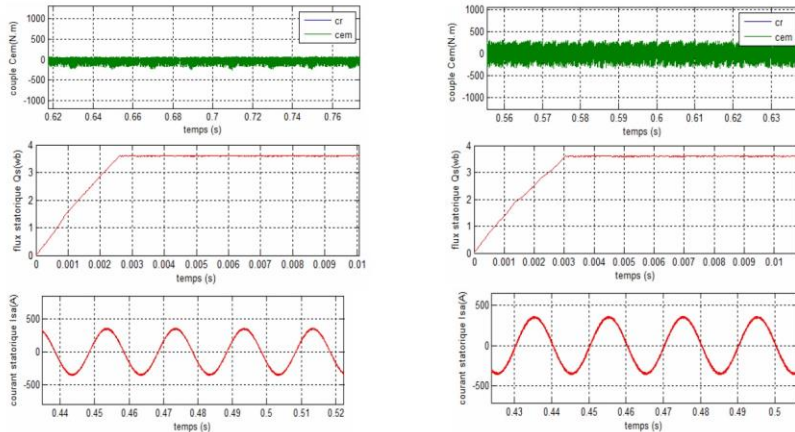


Fig. 8: Performances de la commande DTC cinq niveaux basée sur les régulateurs à hystérésis neuronale appliquée à la MAS

Dans le but de connaître la meilleure commande de la MAS, une étude comparative est indispensable entre les deux commandes traitées précédemment.

La figure 9 représente les zooms du couple électromagnétique, du courant statorique, et du flux statorique obtenues précédemment par simulation de la commande DTC cinq niveaux (DTC-RNA-5 niveaux, DTC-5 niveaux basée sur les régulateurs à hystérésis neuronale) stabilisante de la machine asynchrone de forte puissance.



a- DTC neuronale à cinq niveaux

b- DTC cinq niveaux basés sur les régulateurs à hystérésis neuronale

Fig. 9: Zooms obtenues par les commandes proposées

A partir des résultats de simulation, on constate qu'il y a :

Les résultats de simulation montrent sans doute, que la commande DTC-RNA-5 niveaux, est la plus performante au niveau de la minimisation des pulsations du couple, du courant statorique, et la réponse dynamique du flux statorique.

On constate que le module du flux s'établit à sa valeur de la référence de 3.6 Wb.

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-RNA-5 niveaux par rapport DTC-5 niveaux avec régulateurs à hystérésis neuronale.

Les composantes du courant statorique présentent moins d'ondulations pour la commande DTC-RNA-5 niveaux comparativement aux DTC-5 niveaux avec régulateurs hystérésis neuronale.

La dynamique des composantes du flux statorique n'est pas affectée par l'application de ces consignes de charges

3. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté deux types de commande directe du couple d'une machine asynchrone alimentée par onduleur NPC à cinq niveaux, la commande DTC neuronale à cinq niveaux, et la commande DTC cinq niveaux basée sur les régulateurs à hystérésis neuronale.

Les résultats de simulation obtenus pour l'arrangement de DTC-RNA-5 niveaux illustrent une réduction considérable dans l'ondulation du couple, et l'ondulation du flux

statorique par rapport aux résultats obtenus dans les DTC-5 niveaux basés sur les régulateurs à hystérésis neuronale.

REFERENCES

- [1] D. Youcef, '*Commande Directe du Couple et des Puissances d'une MADA Associée à un Système Eolienne par les Techniques de l'Intelligence Artificielle*', Thèse de Doctorat en Science, Université Djillali Liabès, Sidi Bel Abbès, 2015.
- [2] A. Manuel and J. Francis, '*Simulation of Direct Torque Controlled Induction Motor Drive by Using Space Vector Pulse width Modulation for Torque Ripple Reduction*', International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Vol. 2, N°9, 2013.
- [3] A. Benzaïoua, '*Contribution à la Commande Directe de Couple d'une Machine Asynchrone Triphasée*', Thèse de Doctorat, Université du Québec, Chicoutimi, 2004.
- [4] B. Messaoudi, '*Utilisation du Contrôle Directe du Flux Statorique et du Filtre de Kalman en vue du Contrôle Direct du Couple d'un Moteur Asynchrone*', Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider, Biskra, 2007.
- [5] B. Farid, '*Etude des Différents Techniques de Commande des Onduleurs à MLI Associés à une Machine Asynchrone*', Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2006.
- [6] B. Houria, '*Application de la MLI Vectorielle aux Onduleurs Multi niveaux à Base de GTO et d'IGBT*', Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2010.
- [7] A. Khoudri, '*Technique de Commande Avancées Appliquées aux Machines de Type Asynchrone*', Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2010.
- [8] L. Youb et A. Craciunescu, '*Etude Comparative entre la Commande Vectorielle à Flux Orienté et la Commande Directe du Couple de la Machine Asynchrone*', University Politehnica of Bucharest, Scientific Bulletin, Séries C, Vol. 69, N°2, 2007.
- [9] D. Yacine, '*Contrôle de la Fréquence de Commutation des Hystérésis Utilisés dans les Commandes d'une Machine à Induction*', Mémoire de Magister, Université de Batna, 2007.
- [10] 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 & Technologie (COST), N°7, 2009.
- [11] H. Yantour, J. Saadi et A. Khoumri, '*Modélisation 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, 2006.
- [12] B. Elakhdar, '*Commande Directe du Couple Floue et Neuronale d'un Moteur Synchrone à Double Etoile sans Capteur Mécanique Alimenté par Onduleurs Multi Niveaux*', Thèse de Doctorat en Sciences, Université Djillali Liabès, Sidi Bel Abbès, 2015.
- [13] B. Sebti, '*Commande par DTC d'un Moteur Asynchrone Apport des Réseaux de Neurones*', Mémoire de Magister, Université de Batna, 2013.
- [14] H. Benbouhenni, '*Nouvelle Approche de la Commande DTC Modifié par les Techniques de l'Intelligence Artificielle d'une Machine Asynchrone*', Journal of Advanced Research in Science and Technology, Vol. 4, N°2, pp. 509 - 528, 2017.