

# Etude comparative entre la commande DTC-RNA à 6 secteurs et la commande DTC-RNA à 24 secteurs d'une machine asynchrone

Habib BENBOUHENNI\*

Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systèmes (LAAS), Département de Génie Électrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Oran Maurice Audin, Oran, Algeria.

**Résumé.** Dans cet article nous présentons deux stratégies de la commande directe du couple (DTC) basée sur les réseaux de neurones (DTC-RNA) de la machine asynchrone (MAS), compatible avec de l'onduleur NPC de tension à cinq niveaux. Ayant un nombre de niveaux plus élevée par rapport à l'onduleur classique à deux niveaux. On vise à cet étage uniquement à assurer la stabilité de la régulation de principales grandeurs de la machine qui sont bien améliorées par l'utilisation de cette commande (DTC-RNA à cinq niveaux). Comme des résultats la DTC à 24 secteurs avec RNA réduit considérablement les ondulations du couple et du flux statoriques par rapport à l'ondulation du couple et du flux de la commande DTC à cinq niveaux avec 6 secteurs.

**Mots clés:** Machine asynchrone; Onduleur NPC à cinq niveaux, Onduleur à deux niveaux, DTC, Réseaux de neurones, Ondulation du couple et du flux.

## 1. Introduction

Les Réseaux de Neurones Artificiels (RNA) sont apparus dans les années 40 lors d'essais de modélisation du neurone biologique [1]. Les RNA 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. Ils infèrent des propriétés émergentes permettant de solutionner les problèmes jadis qualifiés de complexe [2].

Dans un réseau, chaque sous-groupe fait un traitement indépendant des autres et transmet le résultat de son analyse au sous-groupe suivant. L'information donnée aux réseaux va donc se propager de la couche d'entrée à la couche de sortie, en passant soit par aucune une ou plusieurs couches intermédiaires. Il est à noter qu'en fonction de l'algorithme d'apprentissage, il est aussi possible d'avoir une propagation de l'information à reculons [3].

L'utilisation des RNA dans la commande des systèmes électroniques de puissance est à l'ordre du jour. Cette technique a démontré sa puissance dans plusieurs autres disciplines telles que la reconnaissance des formes, le filtrage de signaux et le traitement d'images et la commande des machines électriques et des convertisseurs de puissance [4]. Les EWA sont des approximateurs universels de fonctions non linéaires arbitraires. Ils sont capables d'émuler des systèmes dynamiques non linéaires à l'aide de structures multicouches. Les RNA suscitent de plus en plus d'intérêt dans le domaine de la commande des systèmes électroniques de puissance. On peut en juger par la diversité et le nombre croissant de publications récentes traitant de l'utilisation de ces réseaux en électronique de puissance [5]. D'un autre côté, plusieurs articles montrent un bon rendement des RNA lors qu'il est utilisé dans la commande directe du couple du moteur asynchrone [6, 7, 8], dans [9], l'auteur applique les RNA dans les comparateurs à hysteresis.

\* Corresponding author.

E-mail: [habib0264@gmail.com](mailto:habib0264@gmail.com) (BENBOUHENNI H.).

Address: BP: 50B Ouled Fares, Chlef, Algeria



$$\Phi_s = \sqrt{\Phi_{\alpha s}^2 + \Phi_{\beta s}^2} \tag{3}$$

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

$$\theta_s = \arctg\left(\frac{\Phi_{\beta s}}{\Phi_{\alpha s}}\right) \tag{4}$$

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

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \cdot (\Phi_{\alpha s} i_{\beta s} - \Phi_{\beta s} i_{\alpha s}) \tag{5}$$

Selon la formule (1), on peut négliger la chute de tension statorique due à la résistance statorique (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 [13].

Un onduleur NPC de tension triphasé à cinq niveaux, 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  $E/4$  [14].

La structure triphasée de l'onduleur NPC à cinq niveaux de tensions est présentée sur la Fig. 2 [15]. Les tensions simples fournies par l'onduleur sont exprimées par le système matriciel suivant [16]:

$$\begin{bmatrix} va \\ vb \\ vc \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} F_{11}^{b'} + 2F_{11}^b \\ F_{21}^{b'} + 2F_{22}^b \\ F_{31}^{b'} + 2F_{33}^b \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{10}^{b'} + 2F_{10}^b \\ F_{20}^{b'} + 2F_{20}^b \\ F_{30}^{b'} + 2F_{30}^b \end{bmatrix} \right) \frac{E}{4} \tag{6}$$

Avec:  $F$ : fonction de connexion du demi-bras.

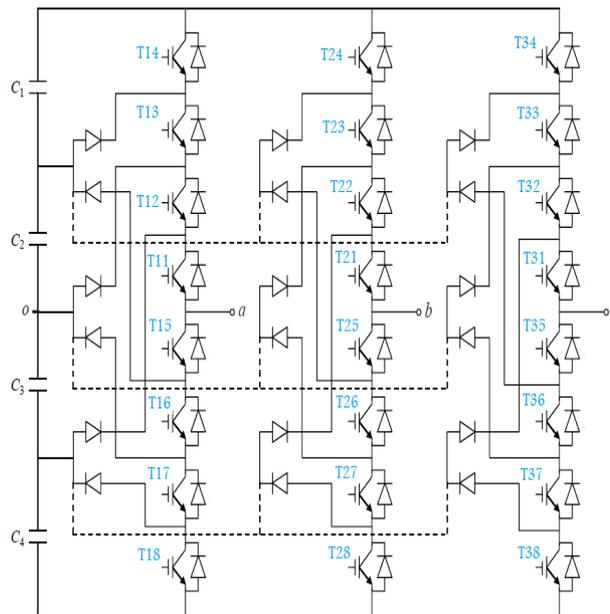


Fig. 2 Schéma d'un onduleur NPC à cinq niveaux

Dans la Fig. 3, 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  $v_s$  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 crée par cinq états redondants [17]. 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 de vecteur de tension de sortie divise le diagramme vectoriel en six secteurs triangulaires [18, 19].

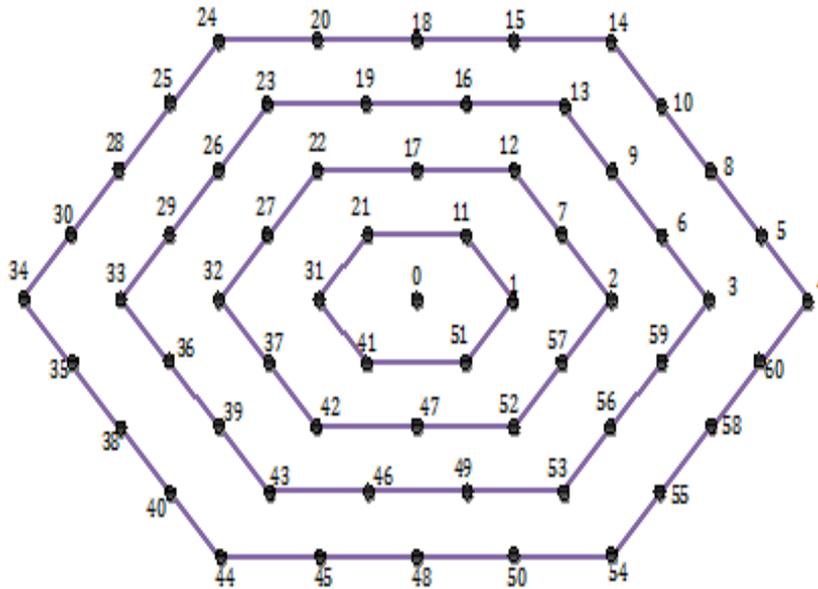


Fig. 3 Représentation vectorielle de tensions de l'onduleur à cinq niveaux.

On répartit les 61 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

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

### 3. Tableaux de commutation

Afin de réaliser le contrôle direct du couple de la MAS alimentée par onduleur à cinq niveaux de tension à structure NPC, nous devons élaborer deux stratégies de commutation mettant en œuvre au mieux les possibilités de l'onduleur. La construction des tableaux de commutation (Tableau 2-3), 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 2** Table de vérité de DTC à cinq niveaux avec 6 secteurs

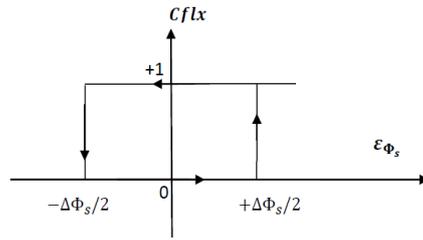
N		1	2	3	4	5	6
Cflx	Ccpl						
1	2	14	24	34	44	54	4
	1	10	20	30	40	50	60
	0	8	18	28	38	48	58
	-1	5	15	25	35	45	55
	-2	4	14	24	34	44	54
0	2	18	28	38	48	58	8
	1	18	28	38	48	58	8
	0	0	0	0	0	0	0
	-1	48	58	8	18	28	38
	-2	48	58	8	18	28	38
-1	2	24	34	44	54	4	14
	1	23	33	43	53	3	13
	0	3	13	23	33	43	53
	-1	43	53	3	13	23	33
	-2	44	54	4	14	24	34

**Tableau 3** Table de vérité de DTC à cinq niveaux avec 24 secteurs

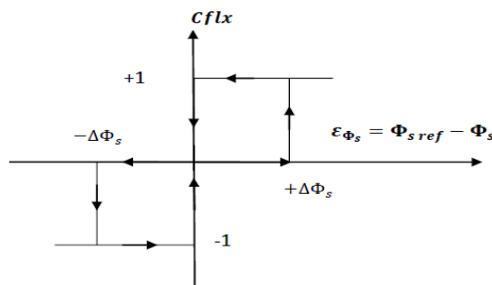
N	Cflx					
	1			0		
	Ccpl					
	1	0	-1	1	0	-1
1	14	2	54	24	32	44
2	15	7	55	25	37	45
3	18	7	58	28	37	48
4	20	12	60	30	42	50
5	24	12	4	34	42	54
6	25	17	5	35	47	55
7	28	17	8	38	47	58
8	30	22	10	40	52	60
9	34	22	14	44	52	4
10	35	27	15	45	57	5
11	38	27	18	48	57	8
12	40	32	20	50	2	10
13	44	32	24	54	2	14
14	45	37	25	55	7	15
15	48	37	28	58	7	18
16	50	42	30	60	12	20
17	54	42	34	4	12	24
18	55	47	35	5	17	25
19	58	47	38	8	17	28
20	60	52	40	10	22	30
21	4	52	44	14	22	34
22	5	57	45	15	27	35
23	8	57	48	18	27	38
24	10	2	50	20	32	40

### 4. Compérateurs à hystérésis multiniveaux

Dans la commande DTC à 6 secteurs on utilisé un compérateur à hystérésis à cinq niveaux pour le couple (Fig. 5b) et à trois niveaux pour la compérateur à hystérésis du flux (Fig. 4b).



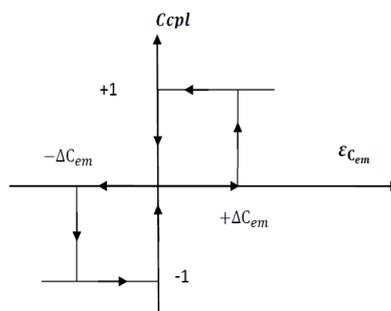
a) Deux niveaux



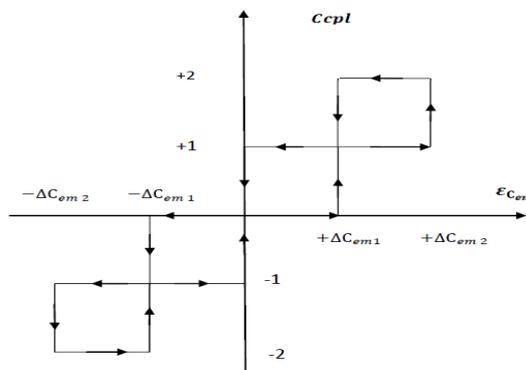
b) Trois niveaux

Fig. 4 Compérateur à hystérésis pour le flux statorique.

Dans notre coté pour la commande DTC à 24 secteurs on utilisé un contrôleur à hysteresis à trois niveaux pour le couple électromagnétique (Fig. 5a) et contrôleur à hystérésis à deux niveaux pour le flux statorique (Fig. 4a).



a) Trois niveaux



b) Cinq niveaux

Fig. 5 Compérateur à hystérésis pour le couple.

### 5. DTC neuronale à cinq niveaux

La structure de la commande directe du couple neuronale (DTC-RNA), de la MAS est représentée par la Fig. 6. Dont le tableau de commutation sont remplacés par un contrôleur neuronal, et dont les entrées sont l'erreur du couple  $\epsilon_{cem}$ , du flux  $\epsilon_{\phi_s}$ , et la position (zone) du flux statorique  $Z(i)$ , et les sorties sont les impulsions  $S_a, S_b, S_c$  permettant la commande des interrupteurs de l'onduleur [20, 21].

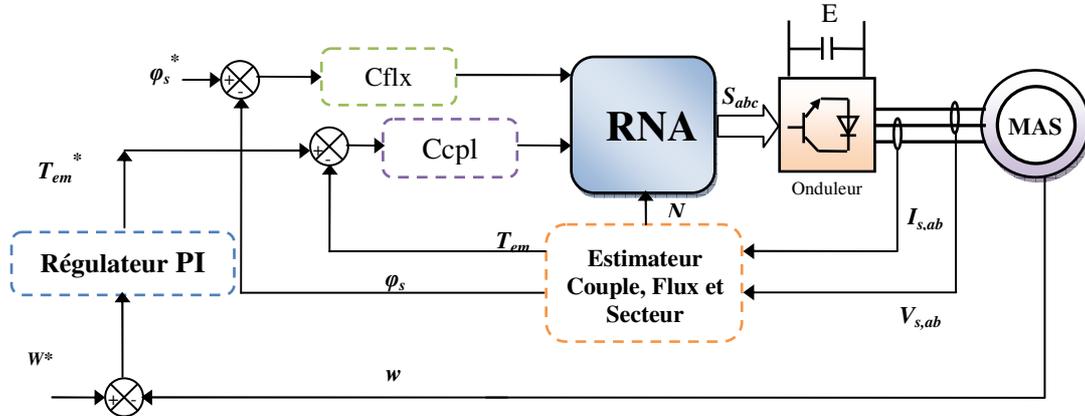


Fig. 6 Commande DTC à basée sur les RNA

Pour générer le contrôleur RNA par Matlab/Simulink ou on à choisi 64 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) [22].

Tableau 4 Propriétés du LM

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)	018
Fonctions d'activation	Tansig, Purelin

La Fig. 7, montre la structure interne du contrôleur neuronale de la commande DTC cinq niveaux (stratégie 1).

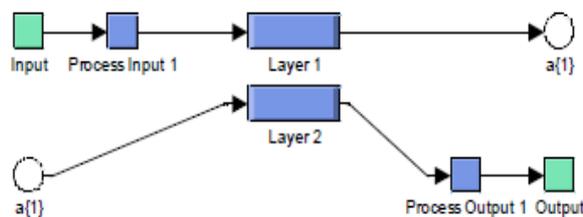


Fig. 5 Structure du contrôleur neuronale.

Les layers sont donnés dans les Fig. 8 et Fig. 9.

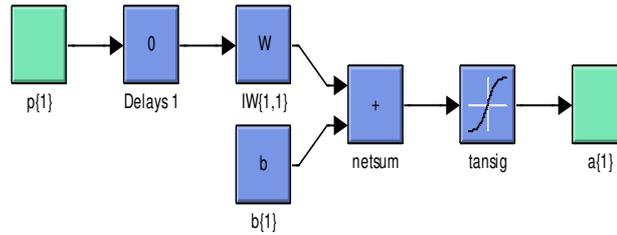


Fig. 8 Structure interne de layer 1.

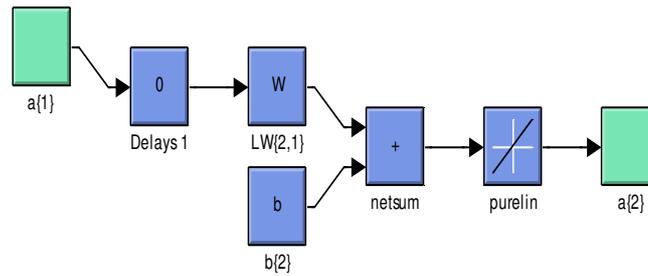


Fig. 9 Structure interne de layer 2.

J'ai utilisé dans les deux commandes 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 5 Model parameters

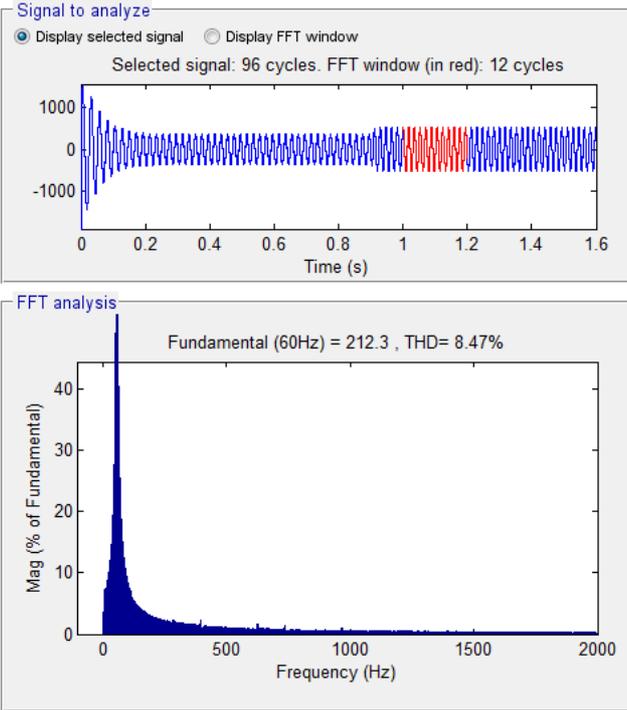
Parameter	Value
Puissance nominale	$P_n = 1MW$
Résistance statorique	$R_s = 0.228\Omega$
Résistance rotorique	$R_r = 0.332\Omega$
Inductance statorique	$L_s = 0.0084H$
Inductance rotorique	$L_r = 0.0082H$ ,
Inductance mutuelle $L_m$	$L_m = 0.0078H$
Number de paire de pole	$p = 3$
Moment d'inertie	$J = 20kg.m^2$
Coefficient de frottement	$K_f = 0.008Nm.s.rad^{-1}$
Fréquence	$F_s = 60Hz$

## 6. Résultats de simulation

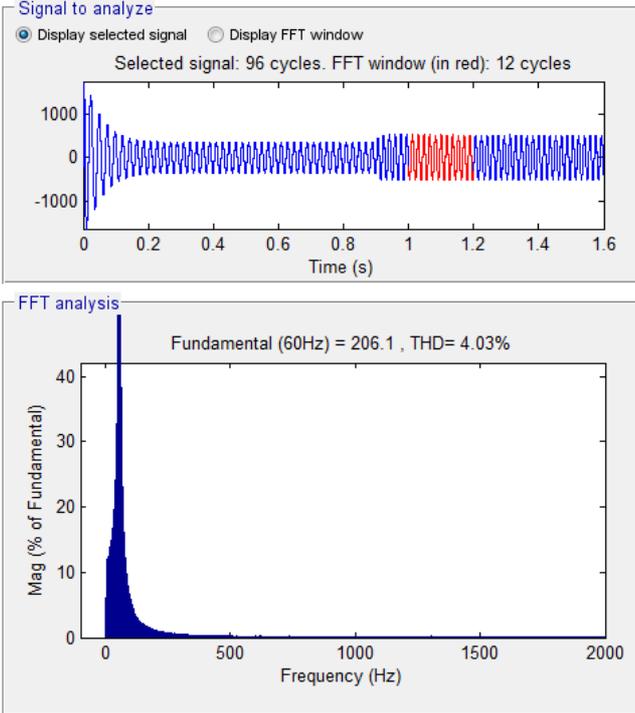
Les résultats de simulation pour les deux commandes avec des RNA de la MAS alimentée par un onduleur NPC de tension à cinq niveaux sont présentés dans différents tests: tests de robustesse, tests de fonctionnement en basse vitesse et tests concernant les variations paramétriques de la machine asynchrone de forte puissance.

### 6.1 Test en régulation

Durant toutes les tests de simulations, le flux égale à 3.6 wb, on a gardé la vitesse constante à 1000 tr/min et en applique un échelon de couple de 6500 N.m à  $t = 0.9s$ .



a) DTC-RNA à 6 secteurs



b) DTC-RNA à 24 secteurs

Fig. 10 THD de courant statorique (Ias).

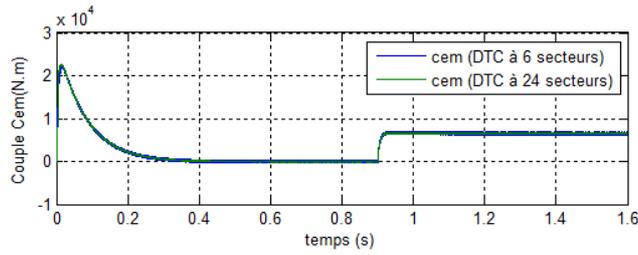


Fig. 11 Couple reponse.

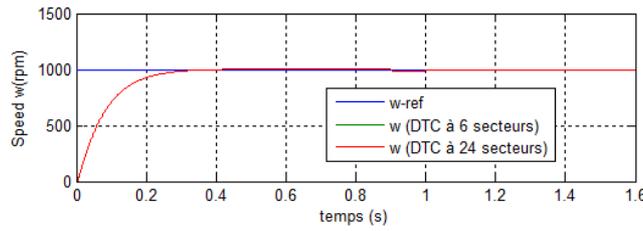


Fig. 12 Vitesse reponse.

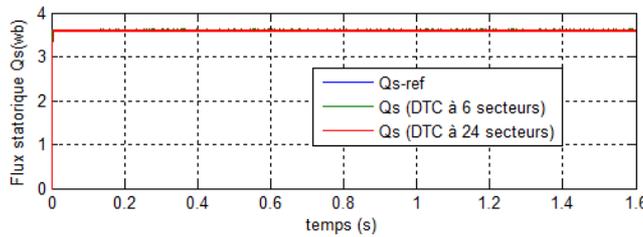


Fig. 13 Flux statorique reponse.

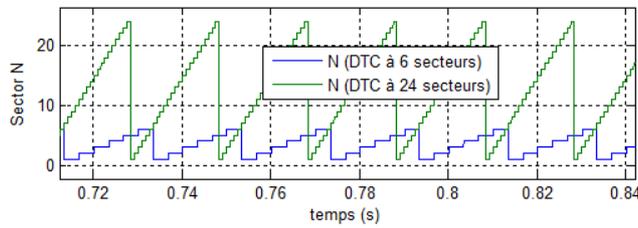


Fig. 14 Secteur.

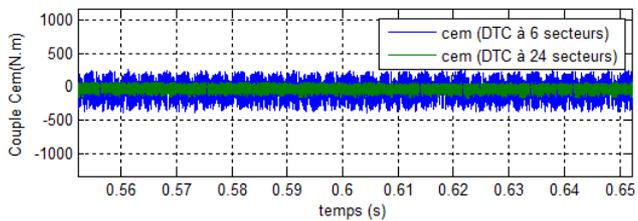


Fig. 15 Zoom de couple.

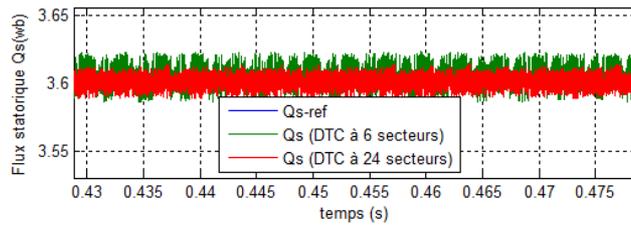


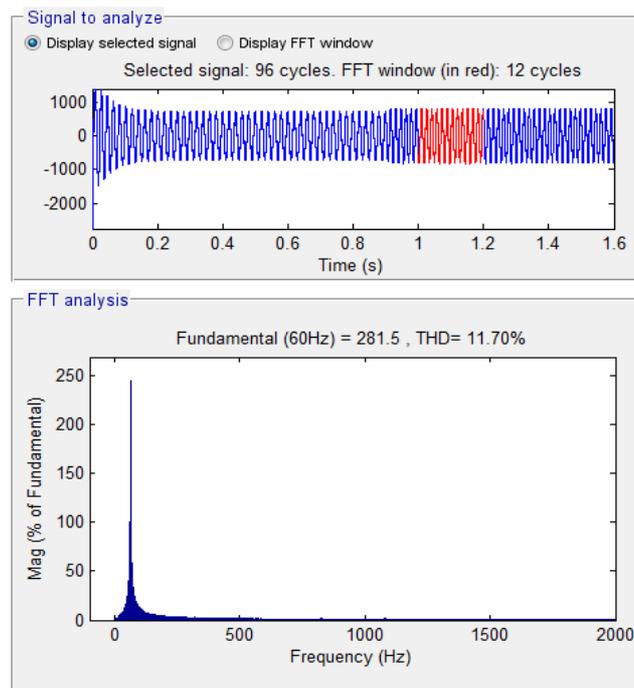
Fig. 16 Zoom de flux statorique.

Les résultats obtenus présentent la simulation de la commande DTC à 6 secteurs et DTC-RNA à 24 secteurs appliqués sur un MAS alimenté par onduleur NPC à cinq niveaux.

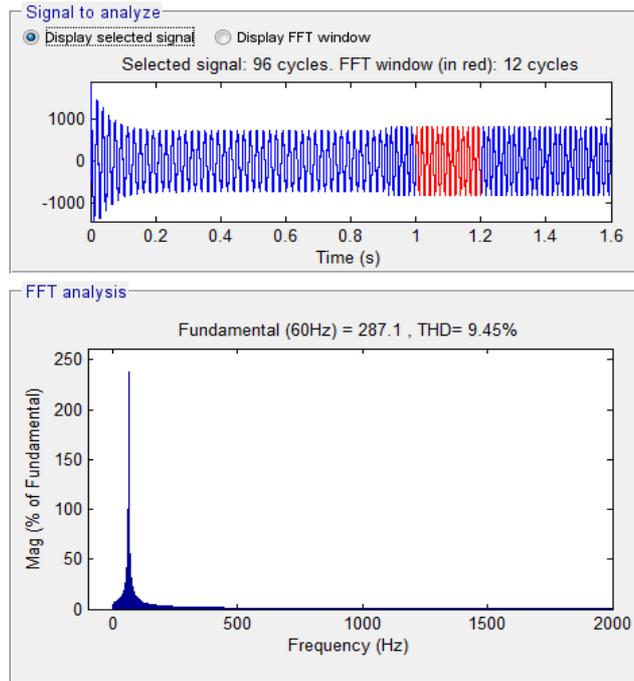
- Le couple suit ses valeurs de référence d’une façon immédiate pour les deux commandes. D’un autre coté la commande DTC-RNA à 24 secteurs réduit les ondulations du couple électromagnétique par rapport à la commande DTC-RNA à 6 secteurs.
- Le flux statorique présente une réponse rapide au régime transitoire afin de se fixer dans sa valeur de référence avec des petites ondulations autour de la consigne pour la DTC-RNA à 24 secteurs par rapport à la DTC-RNA à 6 secteurs (Fig. 16).
- La Fig. 10 montré que la commande DTC-RNA à 24 secteurs réduit considérablement la valeur de THD du courant statorique comparativement à celle de la DTC-RNA à 6 secteurs.
- Une bonne poursuite de vitesse pour les deux commandes.

## 6.2 Tests concernant les variations paramétriques de la machine

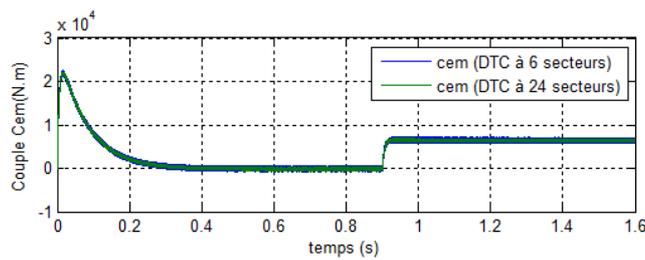
Afin de tester la robustesse des commandes proposées, Les Figs. 17-23 présentent les résultats de simulations lors de la variation de la  $R_s$ ,  $R_r$ ,  $L_s$ ,  $L_r$  et  $L_m$ . on remarque que la commande DTC-RNA à 24 secteurs réduit considérablement les ondulations du flux, du couple électromagnétique et la valeur de THD du courant statorique, comparativement à celle de la commande DTC-RNA à secteurs (voir les Figs 17-23). D’un autre coté, on remarque que le module du flux reste constant pendant la période de simulation et il est totalement indépendant du couple, ce qui montre la nature découplé des commandes proposes. Nous avons pu conclure que la commande DTC-RNA à 24 secteurs présentés des bonnes performances dans tests les de variation paramétriques.



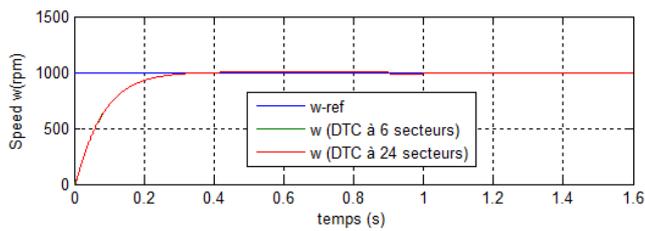
a) DTC-RNA à 6 secteurs.



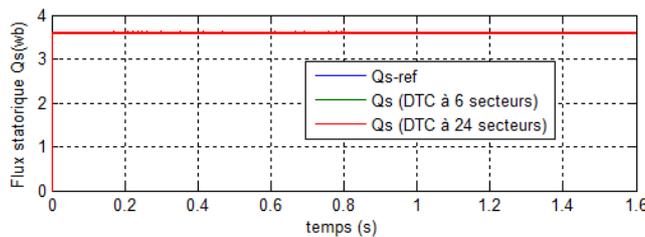
b) DTC-RNA à 24 secteurs  
**Fig.17** THD de courant statorique ( $I_{as}$ ).



**Fig. 18** Le couple électromagnétique.



**Fig. 19** La vitesse de rotation.



**Fig. 20** Le flux statorique.

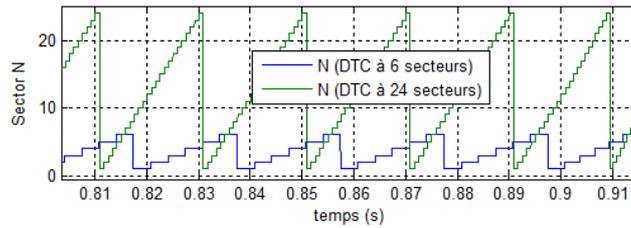


Fig. 21 Le secteur.

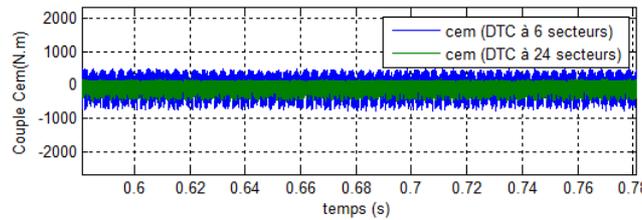


Fig. 22 Zoom de couple électromagnétique.

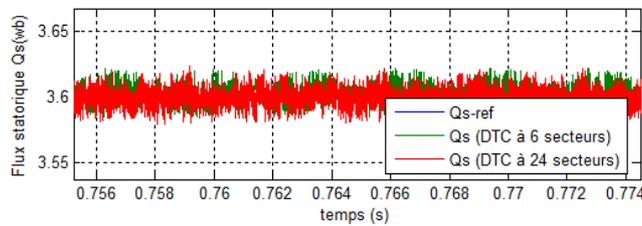


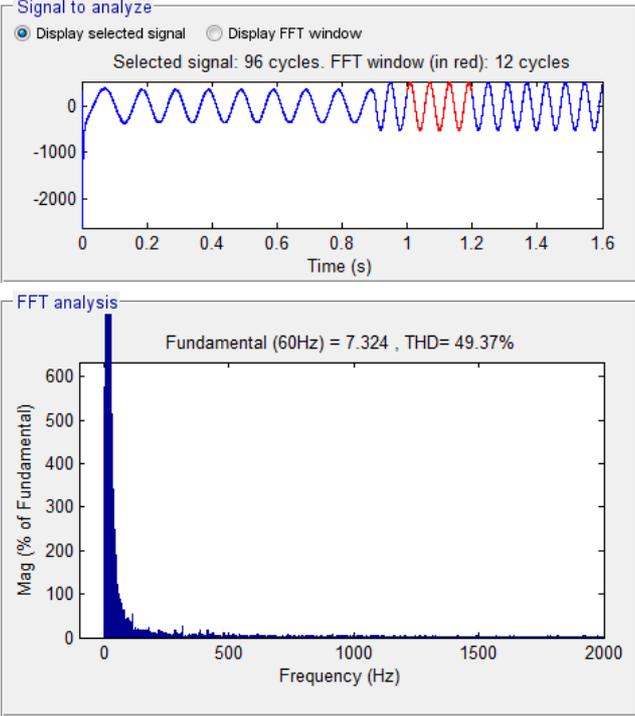
Fig. 23 Zoom de flux statorique.

### 6.3 Tests de fonctionnement en basse vitesse

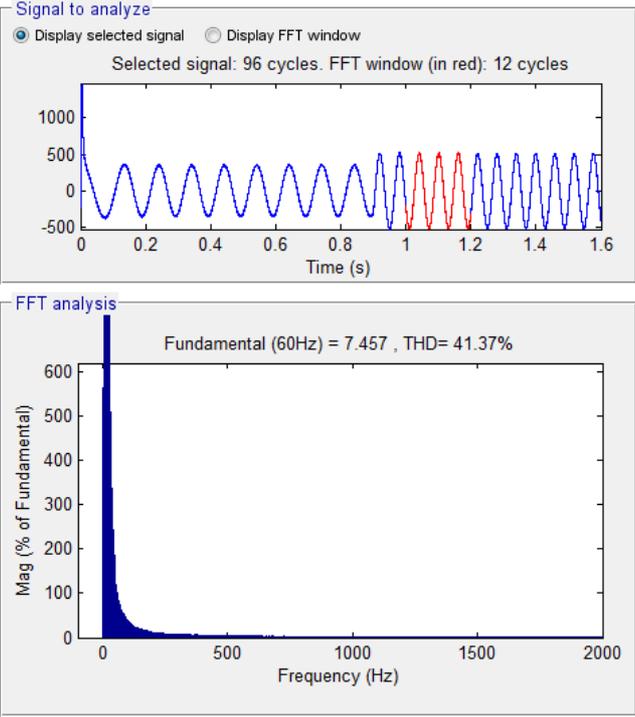
Les Figs. 24-30 représentent les résultats de simulation des commandes proposées basé sur les techniques neuromimétiques à base vitesse d'un MAS de forte puissance (1MW), l'étude des résultats met clairement en évidence que la commande DTC-RNA à 24 secteurs présentée, des performances très satisfaisantes, par rapport au DTC-RNA à 6 secteurs, la vitesse suit la vitesse réelle sans dépassement. Le couple électromagnétique agit rapidement pour suivre les consignes de charges introduites.

La dynamique des composantes du flux statorique n'est pas affectée par l'application de ces consignes de charges pour les deux commandes.

Les composantes du courant statorique présentent moins THD pour la commande DTC-RNA à 24 secteurs (THD=41.37%). comparativement aux DTC-RNA à 6 secteurs (THD=49.37%).



a) DTC à 6 secteurs



a) DTC à 24 secteurs

Fig. 24 THD de courant statorique (Ias).

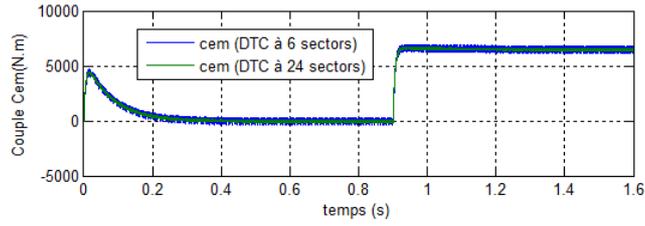


Fig. 25 le couple électromagnétique.

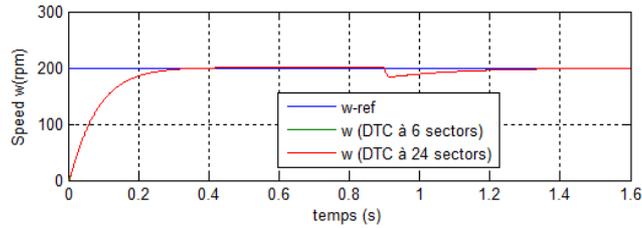


Fig. 26 La vitesse de rotation.

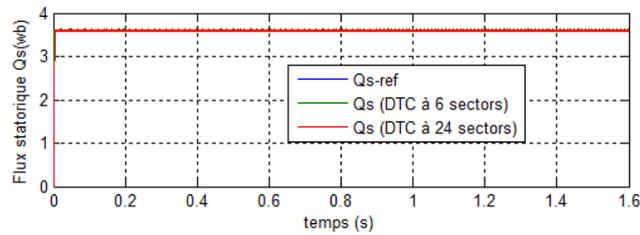


Fig. 27 Le flux statorique.

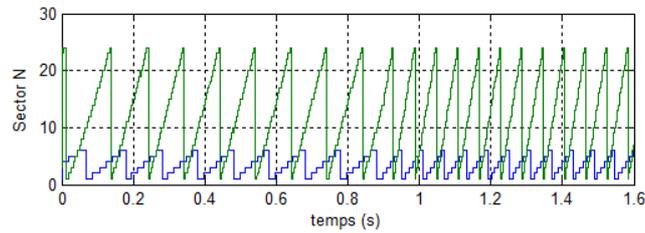


Fig. 28 Le secteur.

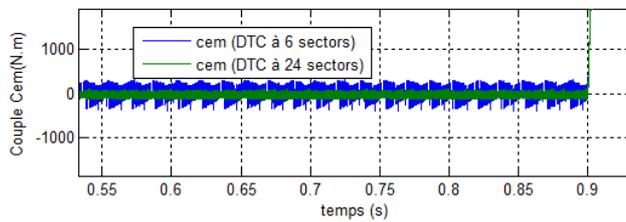


Fig. 29 Zoom de couple électromagnétique.

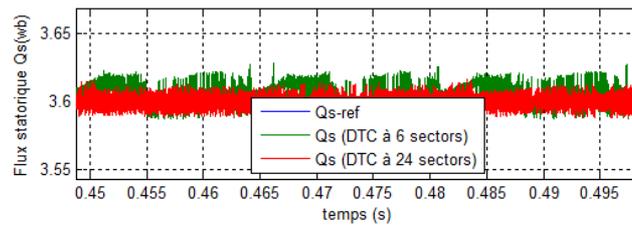


Fig. 30 Zoom de flux statorique.

## 7. Conclusion

Dans cet article on a présenté deux stratégies de la commande DTC d'un MAS de forte puissance (1Mw) alimentée par onduleur NPC à cinq niveaux, et les techniques des réseaux de neurones ont été appliquées à la commande DTC à cinq niveaux. La comparaison entre les deux stratégies a montré les avantages apportés par l'utilisation de commande DTC-RNA à 24 secteurs: la minimisation des oscillations des grandeurs contrôlées tel que le couple, flux et le THD du courant statorique, ce qui est confirmé par les résultats de simulation.

## REFERENCES

- [1] N. Nguyen, « Approche neuromimétique pour l'identification et la commande des systèmes électriques: application au filtrage actif et aux actionneurs synchrones, » Thèse de Doctorat, université de Haute – Alsace, Ecole Doctorate Jean-Henri Lambert, 2010.
- [2] A. Chaiba, « Commande de la machine asynchrone à double alimentation par des techniques de l'intelligence artificielle, » Thèse de Doctorat en Sciences, université de Batna, 2010.
- [3] C. Salim, « Etude, modélisation et commande des filtres actifs: Apport des techniques de l'intelligence artificielle, » Thèse de Doctorat en Science, université Mohamed Khider, Biskra, 2013.
- [4] K. Nadir, « Amélioration des performances de la commande d'un moteur asynchrone à cage et élaboration d'un estimateur universel de ses paramètres en utilisant les réseaux de neurones artificiels, » Thèse de Doctorat, université de Boumerdes, 2007.
- [5] A. Barazzouk, « Estimation par réseaux de neurones de la constant de temps rotorique de machines asynchrones, » Thèse de Doctorat, université de Montréal, 1998.
- [6] B. Habib, T. Rachid, C. Faycal, « Etude comparative de deux stratégie de commande DTC neuronale d'une MAS alimentée par onduleur à sept niveaux, » Acta Electrotehnica, Vol. 57, No. 5, 2016, pp. 570-578.
- [7] H. Benbouhenni, « Comparateur à hysteresis à sept niveaux pour la commande DTC basée sur les techniques de l'intelligence artificielle de la MAS, » Journal of Advanced Research in Science and Technology, Vol. 4, No. 2, 2017, pp. 553-569.
- [8] H. Benbouhenni, « Commande directe du couple par les techniques de l'intelligence artificielle d'un moteur asynchrone (1MW) alimentée par onduleur NPC de tension à sept niveaux, » Journal of Advanced Research in Science and Technology, Vol. 5, No. 1, 2018, pp: 680-696.
- [9] 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, No. 2, 2017, pp. 509-528.
- [10] H. Benbouhenni, « Etude comparative entre la commande DTC neuronale et la commande DTC basée sur le contrôleur pi-neuronale de la machine asynchrone, » Rev. Ivoir. Sci. Technol., Vol. 29, 2017, pp: 30-43.
- [11] H. Benbouhenni, Z. Boudjema, « Speed regulator and hysteresis based on artificial intelligence techniques of three-level dtc for induction motor, » Acta Electrotehnica Et Informatica, Vol. 17, No. 4, 2017, pp. 48-54.
- [12] 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, 2011, pp. 23-32.
- [13] 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, Vol. 53, No. 4, 2012.
- [14] N. Lourci, E. M. Berkouk, 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, Vol. 1, No.1, 2009.

- [15]H. Benbouhenni, « Torque ripples minimization in five-level DTC based IM drive using ANFIS controller, » Journal of Advanced Research in Science and Technology, Vol. 5, No. 1, 2018, pp. 583-591.
- [16]M. Nadhir, « Contribution à l'étude des performances des onduleurs multiniveaux sur les réseaux de distribution, » Thèse de Doctorat en Sciences, université Badji Mokhtar-Annaba, 2014.
- [17]B. Elakhdar, « Commande directe du couple floue et neuronale d'un moteur synchrone à double étoile sans capteur mécanique alimenté par onduleurs multiniveaux, » Thèse de Doctorat en Sciences, université Djillali Liabes, Sidi Bel Abbès, 2015.
- [18]H. Benbouhenni, « Torque ripples minimization in five-level DTC based IM drive using ANFIS controller, » Journal of Advanced Research in Science and Technology, Vol. 5, No. 1, 2018, pp: 583-591.
- [19]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 Abbès, 2015.
- [20]B. Habib, T. Rachid, C. Fayçal, « Etude Comparative de deux Stratégies de Commande DTC Neuronale d'une MAS Alimentée par Onduleur à Sept Niveaux, » Acta Electrotehnica, Vol. 57, No. 5, 2016, pp. 570-578.
- [21]H. Benbouhenni, « Seven-level direct torque control of induction motor based on artificial neural networks with regulation speed using fuzzy PI controller, » Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering, Vol.14, No.1, 2018, pp.85-94 .
- [22]H. Benbouhenni, « Différent stratégies de commande DTC à trois niveaux avec 24 secteurs basée sur les réseaux de neurones artificielle d'un moteur asynchrone de forte puissance, » Journal of Advanced Research in Science and Technology, Vol. 5, No. 2, 2018, pp. 754-769.