Revue des Energies Renouvelables Vol. 22 N°1 (2019) 113 - 121
DOI: https://doi.org/10.54966/jreen.v22i1.731

Correcteur du couple à cinq niveaux pour la commande DTC douze secteurs basés sur la logique floue et les réseaux de neurones de la MAS de forte puissance

Habib Benbouhenni *

Ecole Nationale Polytechnique d'Oran - Maurice Audin, Oran, Algeria

(reçu le 20 Mars 2019 - accepté le 26 Mars 2019)

Résumé - *Dans cet article, j'ai mis en place une approche de la commande directe du couple (DTC) douze secteurs de la machine asynchrone (MAS) basés sur la théorie de la logique floue (FL) et les réseaux de neurones (RNA). La stratégie de contrôle directe du couple est un moyen efficace et simple pour piloter une machine asynchrone. L'association de ces deux théories à la commande DTC douze secteurs a permis de donner de grandes performances avec une réponse dynamique très rapide sans dépassement. En visualisation les résultats de simulation en utilisant le langage Matlab, ces résultats de simulation montrent que la stratégie proposée de la commande DTC douze secteurs réduit considérablement les ondulations du couple et du flux statorique par rapport à la commande DTC douze secteurs conventionnels.*

Abstract - *In this article, I have implemented an approach to direct torque control (DTC) twelve sectors of the asynchronous machine (MAS) based on fuzzy logic theory (FL) and neural networks (RNA). The direct torque control strategy is an effective and simple way to control an asynchronous machine. The combination of these two theories with the twelve-sector DTC control system has enabled us to give high performance with a very fast dynamic response without exceeding it. By visualizing the simulation results using Matlab language, these simulation results show that the proposed strategy of the twelve-sector DTC control significantly reduces the undulations of torque and stator flux compared to the twelve-sector conventional DTC control.*

Mots Clés: DTC - Douze secteurs - Machine asynchrone - Logique floue - Réseaux de neurones.

1. INTRODUCTION

Dans cet article, j'ai présenté une nouvelle approche de la commande DTC douze secteurs d'une machine asynchrone à base des techniques modernes: la logique floue et les réseaux de neurones. Ainsi, on commencera par présenter son principe de la commande DTC douze secteurs classiques. Aussi, j'ai présenté la stratégie proposée de la commande DTC douze secteurs en utilisant le contrôleur du flux à trois niveaux.

Ensuite, j'ai appliqué les techniques intelligentes (RNA et FL) à la commande DTC douze secteurs proposée. Les performances de cette stratégie proposée sont analysées sur la base de la stratégie classique. De même, on étudie pour cette stratégie les performances de la commande DTC douze secteurs de la MAS. Les résultats obtenus sont très prometteurs, quant à l'utilisation de cet stratégie proposée dans les domaines de la commande de la machine asynchrone.

2. COMMANDE DTC DOUZE SECTEURS CLASSIQUES

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 [1]. La commande directe du couple d'une MAS repose principalement sur l'estimation des grandeurs à contrôler que sont; le couple électromagnétique et le flux statorique à partir

* habib_benbouhenni@yahoo.com

des seules grandeurs liées au stator, sans utilisation du capteur mécanique jugé peu fiable [2].

Ce type de commande a été présenté comme une alternative à la commande vectorielle par orientation du flux rotorique, qui présente l'inconvénient majeur d'être relativement sensible aux variations des paramètres de la machine [3].

Le principe de base de la commande directe du couple repose sur l'application d'une séquence particulière de tension via un onduleur de tension, dont les ondes sont générées à travers des comparateurs à hystérésis par lesquelles le flux et le couple sont piégés à suivre des références [4].

La structure entière de la commande DTC douze secteurs pour une machine asynchrone est représentée dans la figure 1.

L'estimation du flux statorique et du couple électromagnétique se fait à partir de vecteurs tension et du courant statorique [5]. L'expression du flux statorique s'écrit [6, 7],

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

et le module de Φ_s s'écrit;

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

avec,

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

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

L'angle θ_s détermine la position du vecteur Φ_s est égal à;

$$\theta_s = \text{arctg}\left(\frac{\Phi_{\beta s}}{\Phi_{\alpha s}}\right) \tag{5}$$

L'expression du flux statorique s'écrit;

$$C_{em} = p\left(\Phi_{\alpha s}.i_{\beta s} - \Phi_{\beta s}.i_{\alpha s}\right) \tag{6}$$

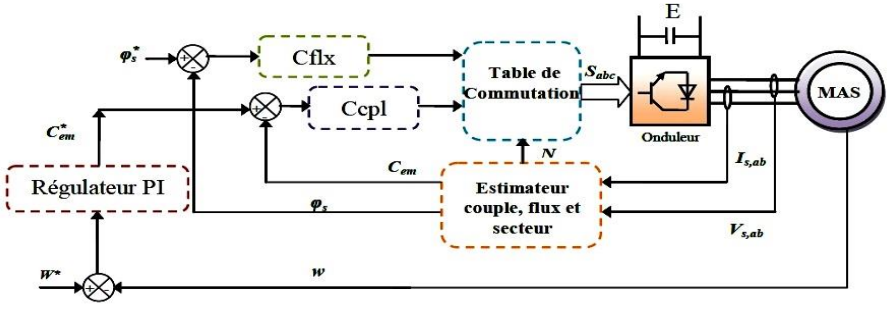
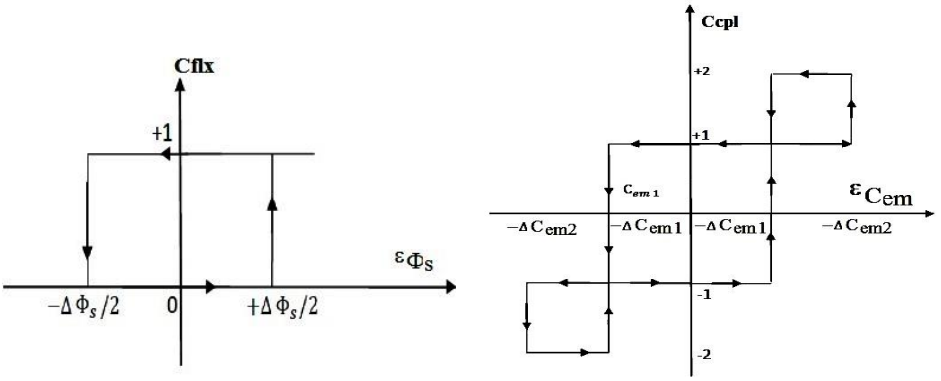


Fig. 1: Structure de DTC douze secteurs

Un correcteur à hystérésis à quatre niveaux pour le couple et un correcteur à hystérésis à deux niveaux pour le flux statorique, (figure 2).



a- Pour flux statorique **b**- Pour couple électromagnétique

Fig. 2: Comparateurs à hystérésis pour la DTC douze secteurs classique

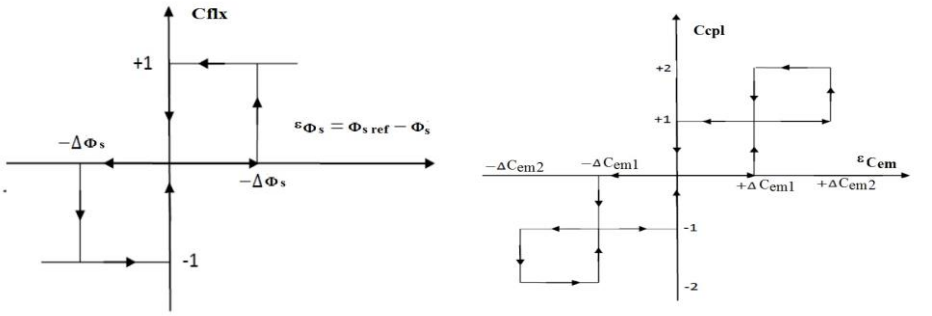
La table de sélection des tensions utilisées pour cette technique est donnée par le **Tableau 1**.

Tableau 1: Table de vérité de DTC douze secteurs classique

N		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Cflx	Ccpl												
1	**2**	2	3	3	4	4	5	5	6	6	1	1	2
	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	1	1
	-1	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6
	-2	6	6	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5
0	**2**	3	4	4	5	5	6	6	1	1	2	2	3
	1	4	4	5	5	6	6	1	1	2	2	3	3
	-1	7	5	0	6	7	1	0	2	7	3	0	4
	-2	5	6	6	1	1	2	2	3	3	4	4	5

3. COMMANDE DTC DOUZE SECTEURS PROPOSEE

Pour résoudre le problème d'ondulations dans le couple et le flux statorique, on va augmenter le niveau des correcteurs à hystérésis du flux statorique et du couple. Pour notre cas, un contrôleur à hystérésis à trois niveaux pour le flux (figure 3**a**) et un correcteur à cinq niveaux pour le couple (figure 3**b**).



a- Pour le flux statorique **b**- Pour le couple électromagnétique

Fig. 3: Comparateurs à hystérésis pour la DTC douze secteurs proposée

La table de sélection pour la stratégie proposée de DTC à 12 secteurs est donnée par le **Tableau 2**.

Tableau 2: Table de vérité de DTC douze secteurs proposée

N		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Cflx	Ccpl												
1	2	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	1	1
	1	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1	6	6	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5
	-2	6	6	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5
0	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	1	1	2
	1	2	3	3	4	4	5	5	6	6	1	1	2
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-2	5	6	6	1	1	2	2	3	3	4	4	5
-1	2	3	3	4	4	5	5	6	6	1	1	2	2
	1	3	4	4	5	5	6	6	1	1	2	2	3
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1	4	5	5	6	6	1	1	2	2	3	3	4
	-2	4	5	5	6	6	1	1	2	2	3	3	4

4. CONTROLEUR PI-FLOU DE LA COMMANDE DTC-RNA A DOUZE SECTEURS

Les techniques de l'intelligence artificielle sont connues actuellement par leur grande potentialité à résoudre les problèmes liés aux processus industriels, notamment le contrôle, l'estimation et l'identification des paramètres des systèmes complexes [8]. Parmi ces techniques, on trouve la logique floue et les réseaux de neurones.

Un réseau de neurones artificiels (RNA) peut être considéré comme un modèle mathématique de traitement réparti, composé de plusieurs éléments de calcul non linéaire (neurones), opérant en parallèle et connectés entre eux par des poids [9].

La structure de la commande directe du couple basés sur les réseaux de neurones et la logique floue de la machine asynchrone est représentée par la figure 4. Dont la table de vérité est remplacée par un contrôleur neuronal, et le contrôleur PI classique de la vitesse est remplacé par un contrôleur flou.

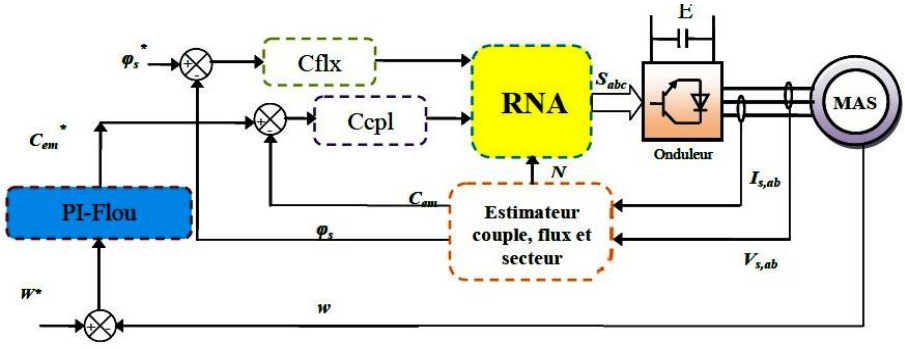


Fig. 4: Commande DTC douze secteurs basée sur les RNA et la FL

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 [11]. Dans notre travail, il est facile d'utiliser la technique neuronale dont on va garder le même travail qu'au DTC douze secteurs classique, mais je change 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 4.

Dans la table de vérité est remplacé par un contrôleur neuronal, dont les entrées sont les sorties des Ccpl et Cflx, et le secteur N, et la sortie sont les impulsions permettant la commande des interrupteurs de l'onduleur, pour générer ce contrôleur neuronal par

Matlab/Simulink où on a choisi 30 couches cachées et 3 couches de sorties avec les fonctions d'activation respectivement de type 'tansig' et 'purelin'.

Le choix de l'architecture des réseaux de neurone se fait selon l'erreur quadratique moyenne (EQM) obtenue au cours de l'apprentissage. La mise à jour des poids et des biais de ce réseau est réalisée par un algorithme de retro-propagation nommé l'algorithme de Levenberg-Marquardt (LM) [12]. La figure 5 illustre le schéma interne du contrôleur neuronale de la commande DTC douze secteurs (stratégie proposé). La figure 6 illustre le schéma interne de layer 1.

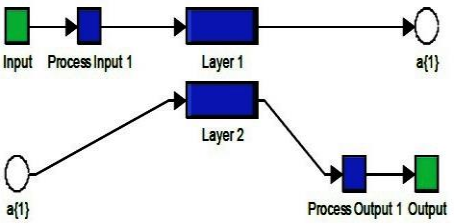


Fig. 5: Schéma interne du contrôleur neuronale du couche

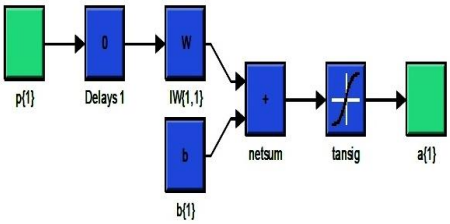


Fig. 6: Schéma interne de la couche 1

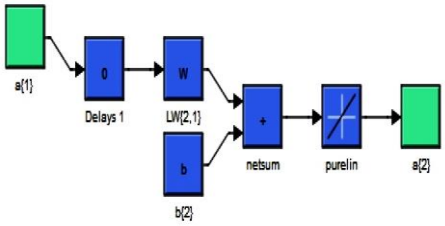


Fig. 7: Schéma interne de la couche 2

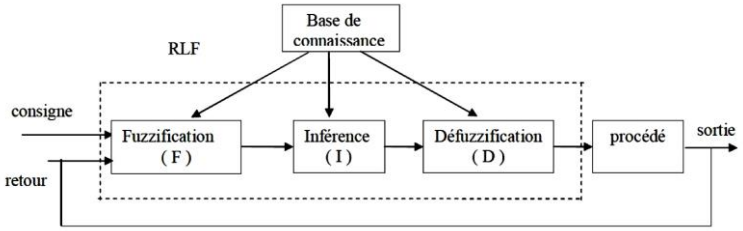


Fig. 8: Configuration de base d'un régulateur par logique floue RLF

La figure 9, montre le schéma bloc d'un contrôleur PI-flou, qui peut être utilisé pour l'asservissement de vitesse.

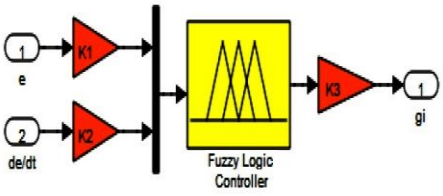


Fig. 9: Schéma bloc d'un contrôleur PI-flou

Dans ce travail, nous avons mené pour les variables d'entrées et la variable de sortie un régulateur flou sept ensembles, dans le but de trouver les bonnes performances souhaitées pour le réglage, représenté ainsi par des fonctions d'appartenance comme le montre la figure 10 [14].

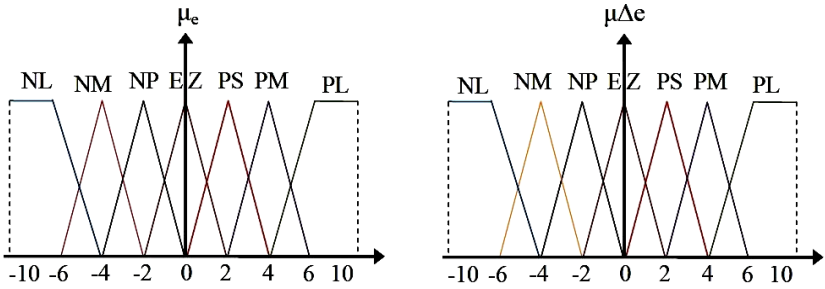


Fig. 10: Fonctions d'appartenance des différentes variables linguistiques

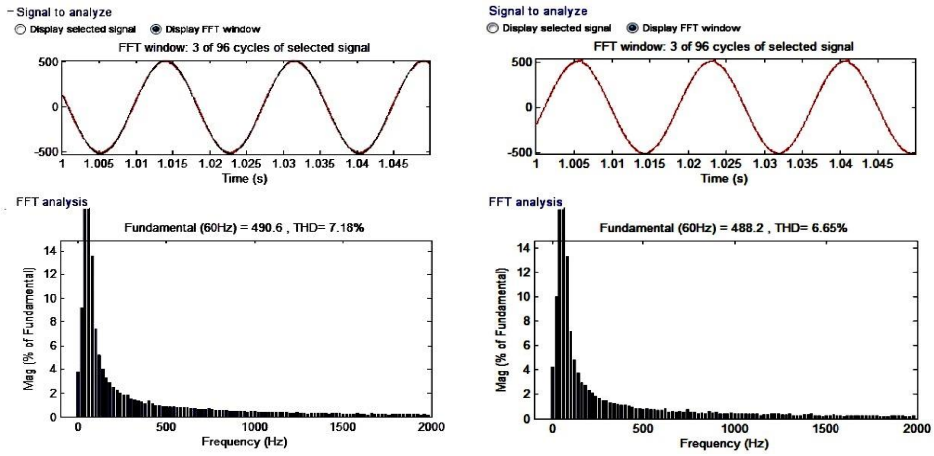
Le jeu de règles du régulateur flou à sept ensembles est représenté sur le **Tableau 3** [15].

Tableau 3. Table des règles de commandes à sept classes

e	NL	NM	NP	EZ	PS	PM	PL
Δe							
NL	NL	NL	NL	NL	NM	NP	EZ
NM	NL	NL	NL	NM	NP	EZ	PS
NP	NL	NL	NM	NP	EZ	PS	PM
EZ	NL	NM	NP	EZ	PS	PM	PL
PS	NM	NP	EZ	PS	PM	PL	PL
PM	NP	EZ	PS	PM	PL	PL	PL
PL	EZ	PS	PM	PL	PL	PL	PL

5. RESULTATS DE SIMULATION

Les résultats de simulation de la commande DTC douze secteurs et la stratégie proposée à base des techniques de l'intelligence artificielle de la MAS sont illustrés dans les figures 11 et 12.



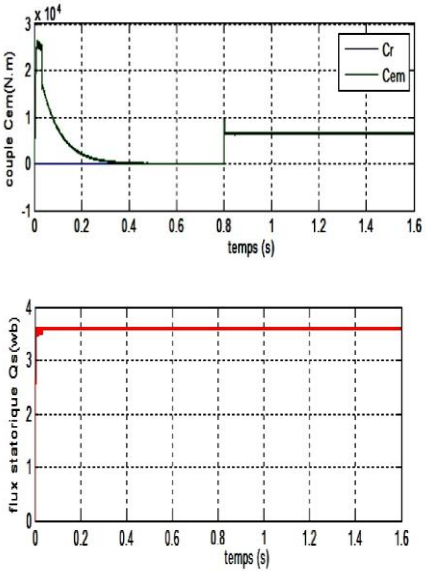


Fig. 11: Performances de la commande DTC douze secteurs classique basés sur les RNA et FL appliquée à la MAS

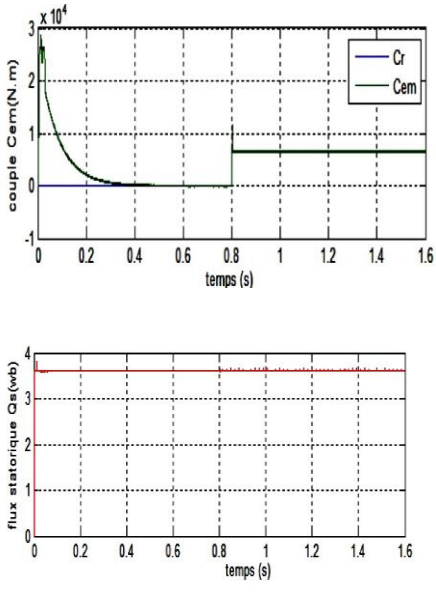


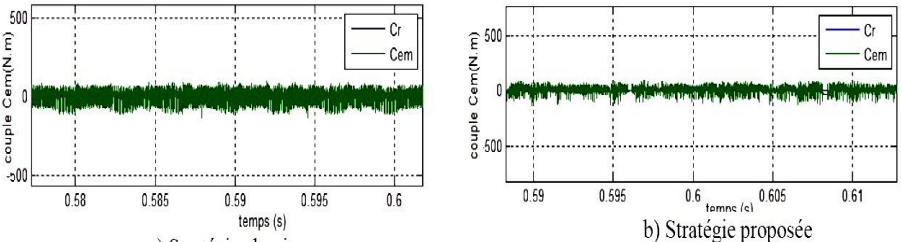
Fig. 12: Performances de la commande DTC douze secteurs proposée basés sur les RNA et FL appliquée à la MAS

Les figures 11 et 12 montré que la stratégie proposée réduit considérablement la valeur de THD (Total Harmonic Distortion) du courant statorique comparativement à celle de la stratégie classique de DTC douze secteurs d'une machine asynchrone.

D'un autre coté, on remarque que le couple suivre le couple de charge. Et la dynamique des composantes du flux statorique n'est pas affectée par l'application de ces consignes de charges.

Dans le but de connaitre la meilleure stratégie de la commande DTC douze secteurs d'une MAS, une étude comparative est indispensable entre les deux stratégies traitées précédemment (stratégie classique, stratégie proposée).

La figure 13 représente le zoom sur le couple obtenu précédemment par simulation des stratégies de DTC douze secteurs avec techniques d'intelligence artificiels stabilisante de la machine asynchrone de forte puissance. On remarque que la stratégie proposée réduit considérablement les ondulations du couple électromagnétique.



a) Stratégie classique

b) Stratégie proposée

Fig. 12: Zooms sur le couple

La figure 14 représente le zoom sur le flux statorique obtenu par simulation. On remarque que la stratégie proposée réduit considérablement les ondulations du flux statorique par rapport à la stratégie classique.

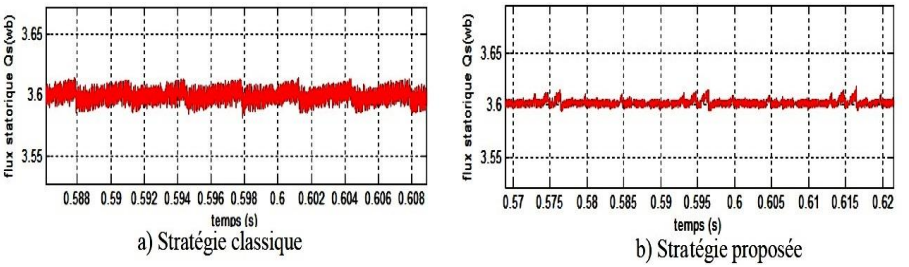


Fig. 14: Zooms sur le couple

La figure 15 représente la réponse dynamique du flux statorique. On remarque que la stratégie proposée donne meilleur réponse dynamique du flux par rapport à la stratégie classique.

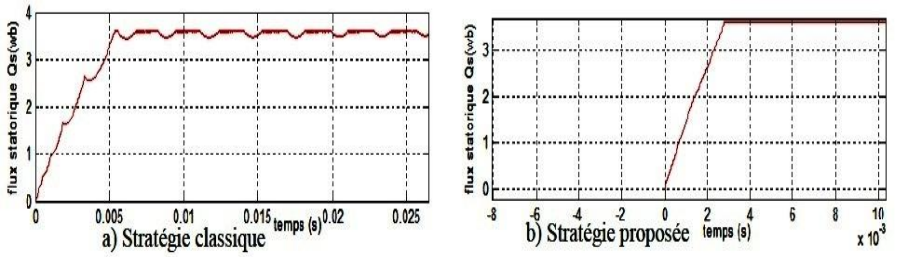


Fig. 14: Réponse dynamique du flux statorique

6. CONCLUSION

Dans cet article, on a présenté une nouvelle stratégie de la commande DTC douze secteurs d'une machine asynchrone, et les techniques modernes ont été appliquées à la stratégie proposée et la stratégie classique.

La comparaison entre les deux stratégies nous a montré les avantages apportés par l'utilisation de la stratégie proposée basés sur les réseaux de neurones et la logique floue (contrôleur du couple à 5 niveaux et contrôleur du flux à 3 niveaux avec 12 secteurs): la minimisation des oscillations des grandeurs contrôlées, telles que le couple, le flux et la valeur de THD du courant statorique, ce qui est confirmé par les résultats de simulation.

REFERENCES

[1] H. Chaikhy, M. Khafallah, A. Saad, M. Es-Saadi et K. Chikh, '*Evaluation des performances des commandes vectorielles de la machine à induction*', Revue de Génie Industriel, Vol. 6, pp. 23 - 32, 2011.

[2] H. Benbouhenni et R. Taleb, '*Etude comparative de deux stratégies de commande DTC neuronale d'une MAS alimentée par onduleur à sept niveaux*', Journal Acta Electrotehnica, Vol. 57, N°5, pp. 570 - 578, 2016.

[3] H. Benbouhenni et R. Taleb, '*Amélioration de DTC classique par DTC-2 niveaux avec vecteurs nuls à 12 secteurs basée sur les réseaux de neurones de la MAS*',

Revue Proceedings of Engineering and Technology (PET), Vol. 14, pp. 129 - 136, 2017.

[4] L. Youb et A. Craciunescu, '*Etude comparative entre la commande vectorielle à flux orienté et la commande directe du couple de la machine asynchrone*', U.P.B. Scientific Bulletin, Series C, Vol. 69, N°2, 2007.

[5] H. Benbouhenni, R. Taleb et F. Chabni, '*Etude comparative entre la commande DTC trois niveaux et la commande DTC cinq niveaux de la machine asynchrone*', Revue Proceedings of Engineering and Technology (PET), Vol. 14, pp. 143 - 149, 2017.

[6] 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.

[7] H. Benbouhenni, '*Etude comparative entre la commande DTC neuronale et la commande DTC basée sur le contrôleur PI-neuronale de la machine asynchrone*', Revue Ivoirienne des Sciences et de la Technologie, Vol. 29, pp. 30 - 43, 2017.

[8] H. Benbouhenni and Z. Boudjema, '*Speed regulator and hysteresis based on artificial intelligence techniques of three-level DTC for induction motor'*, Acta Electrotechnica et Informatica, Vol. 17 , N°4, pp. 48 - 54, 2017.

[9] H. Benbouhenni, '*Improved switching selection for DTC of induction motor drive using artificial neural networks*', Acta Electrotechnica et Informatica, Vol. 18, N°1, pp. 26 - 34, 2018.

[10] 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.

[11] 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, N°2, pp. 553 - 569, 2017.

[12] H. Benbouhenni, '*Différentes 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, N°2, pp. 754 - 769, 2018.

[13] 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, N°1, pp. 680 - 696, 2018.

[14] H. Benbouhenni, '*Hysteresis based on artificial intelligence techniques of six sectors DTC with voltage zero for induction machine*', Algerian Journal of Research and Technology, Vol. 2, N°1, pp. 20 - 31, 2017.

[15] H. Benbouhenni, '*Commande DTC-RNA à 36 secteurs de la MAS par régulateur PI-flou de la vitesse*', Revue de Recueil de Mécanique, Vol. 2, N°2, pp. 181 - 190, 2017.