



Commande DTC-RNA à 36 secteurs de la MAS par régulateur PI-flou de la vitesse

DTC-RNA Control with 36 sectors of Induction Motor by PI-fuzzy Speed Regulator

Habib BENBOUHENNI

Ecole Nationale Polytechnique d'Oran Maurice Audin (ENPO-MA), BP1523 El M'nouer, Oran, Algeria

ARTICLE INFO

Article history :

Received 11 January 18

Received in revised form 15 February 18

Accepted 15 February 18

Keywords:

DTC; Induction machine; Intelligent controllers; THD; 36 sectors.

Mots clés:

DTC; Machine asynchrone; THD; Contrôleurs intelligents; 36 secteurs

ABSTRACT

Direct Torque Control (DTC) is the direct control of the electromagnetic torque of the machine. This article presents a 36-sectors DTC command of an induction machine based on intelligent controllers. A classical PI controller has been replaced with a PI-fuzzy controller. Moreover, hysteresis regulators have been also replaced with two neuronal controllers. Matlab software has been used to visualize the results of simulation. The ripple of the electromagnetic torque, the stator flux, and the value of THD (Total Harmonic Distortion) of the stator current will be evaluated and compared by the classical DTC command with 36 sectors.

RÉSUMÉ

La commande directe du couple (DTC) a pour objectif la régulation directe du couple électromagnétique de la machine. Cet article présente une commande DTC à 36 secteurs d'une machine asynchrone à base de contrôleurs intelligents. En outre, un contrôleur PI classique a été remplacé par un contrôleur PI-flou. Les régulateurs à hystérésis ont été également remplacés par deux contrôleurs neuronaux. Les résultats de la simulation ont été visualisés par Matlab. Les ondulations du couple électromagnétique, du flux statorique, et la valeur de THD (Total Harmonic Distortion) du courant statorique seront évaluées et comparées per la commande DTC à 36 secteurs conventional.

1 Introduction

Le contrôle de la vitesse ou de la position des machines asynchrones nécessite l'utilisation d'un convertisseur statique de puissance appelé conventionnellement onduleur de tension [1]. Généralement la machine asynchrone est alimentée par deux convertisseurs en cascade. Le premier convertisseur côté machine est un onduleur de tension contrôlé par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI). Alors que le deuxième coté réseau est un redresseur triphasé double alternance à diodes, séparés par un filtre passe-bas (LC) [2].

Depuis une trentaine d'années, plusieurs stratégies de commande ont été développées pour pouvoir réaliser un contrôle découplé de la machine asynchrone. Ces méthodes appelées «Commandes vectorielles» assurent des performances dynamiques équivalentes à celles obtenues par la machine à courant continu. Au cours des dernières années, le développement de nouvelles techniques de traitement des signaux ont permis la réalisation des structures de commande beaucoup plus évoluées. Les plus récentes démarches dans cette direction sont celles regroupées sous le terme de commande directe du couple (DTC) [3].

* Corresponding author. Tel.: +213663956329.

E-mail address: habib0264@gmail.com

La conception de l'intelligence artificielle a été développée dans le début des années 60. Elle comprend des méthodes, des outils et des systèmes pour résoudre les problèmes qui exigent normalement l'intelligence de l'homme. Le terme intelligence est toujours défini comme la capacité d'apprendre d'une façon efficace, de réagir d'une façon adaptative, pour prendre les bonnes décisions d'une manière sophistiquée et comprendre des phénomènes [4].

Les commandes de vitesse basées sur l'intelligence artificielle (Réseau de neurones et la logique floue) qui n'exigent pas la connaissance d'un modèle mathématique sont récemment proposées. Les contrôleurs à logique floue sont des candidats idéaux pour la commande de tels systèmes, malheureusement, il n'existe pas de méthodes précises pour la détermination de la stratégie de réglage. Cette dernière doit être construite par tâtonnement à l'aide des tests sur le système à régler [5]. D'un autre côté, ces approches présentent une bonne robustesse aux variations paramétriques et aux bruits de mesure, leurs conditions informatiques, le temps d'élaboration et le besoin de la connaissance expert du système, limitent les applications actuelles à une gamme limitée et parfois bien spécifique [5].

Cet article a pour objectif d'appliquer les techniques intelligentes à la commande DTC à 36 secteurs d'une machine asynchrone alimentée par onduleur multiniveaux de type NPC. Nous allons comparer la DTC cinq niveaux à 36 secteurs avec la DTC à 36 secteurs basés sur les contrôleurs intelligents. Les résultats de simulations obtenus ont montré un comportement très satisfaisant de la machine.

2 Commande DTC à cinq niveaux

L'objectif d'une commande DTC est de maintenir le couple électromagnétique et le module du flux statorique à l'intérieur des bandes d'hystérésis par le choix de la tension de sortie de l'onduleur. Lorsque le couple ou le module du flux statorique atteint la limite supérieure ou inférieure de l'hystérésis, un vecteur de tension approprié est appliqué pour ramener la grandeur concernée de sa bande d'hystérésis [6, 7]. 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 [8]. La structure de base du contrôle direct du couple est présentée sur la Fig. 1. La commande de l'onduleur est instantanée, ce qui nécessite une période d'échantillonnage très faible.

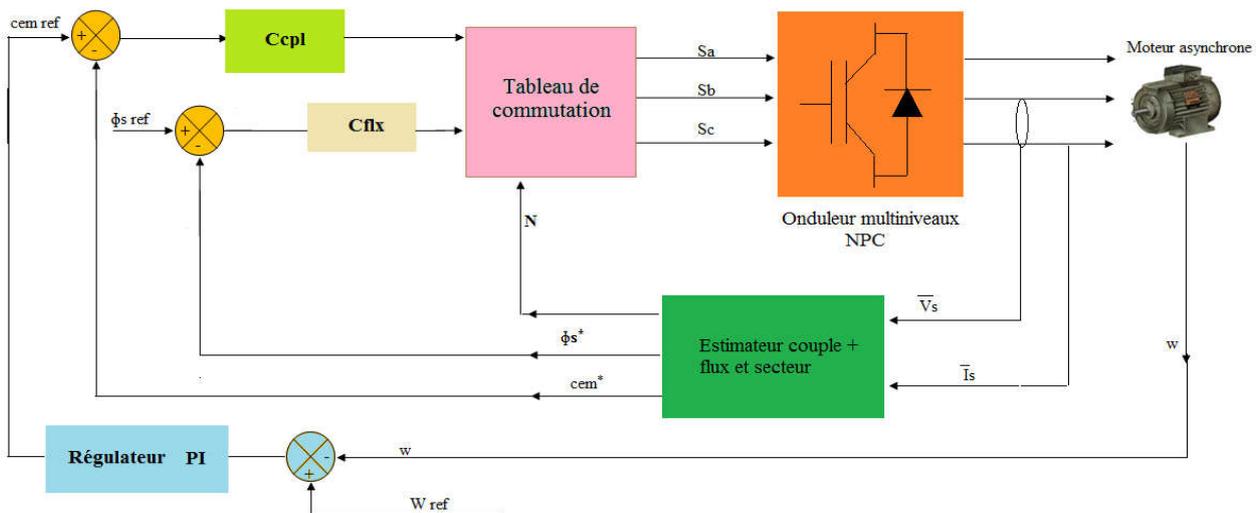


Fig. 1- Structure de base de la commande directe du couple.

Un onduleur NPC à cinq niveaux (Fig. 2) permet d'atteindre 60 positions (Fig. 3) distinctes dans le plan de phase, correspondant aux 65 séquences du vecteur de tension à la sortie de l'onduleur NPC à cinq niveaux.

Toutefois, un comparateur à hystérésis à deux niveaux est nécessaire pour le flux statorique. Au même terme qu'un comparateur à hystérésis à trois niveaux est nécessaire pour le couple électromagnétique.

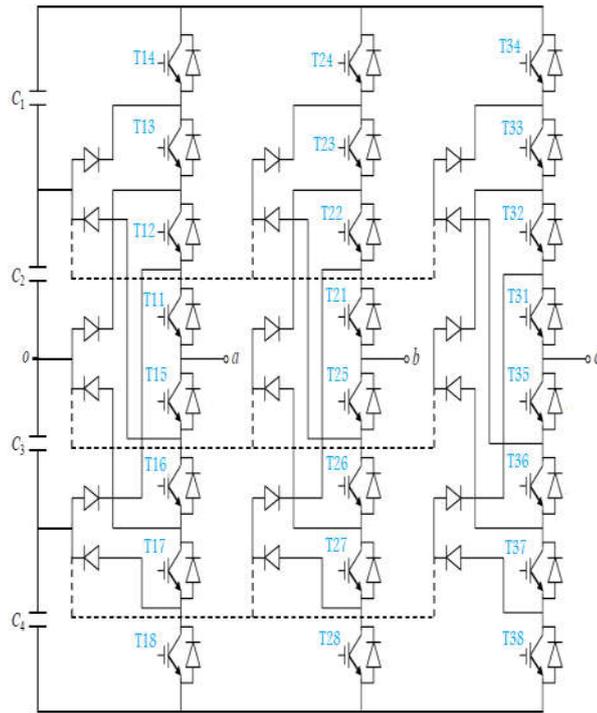


Fig. 2- Schéma d'un onduleur NPC à cinq niveaux.

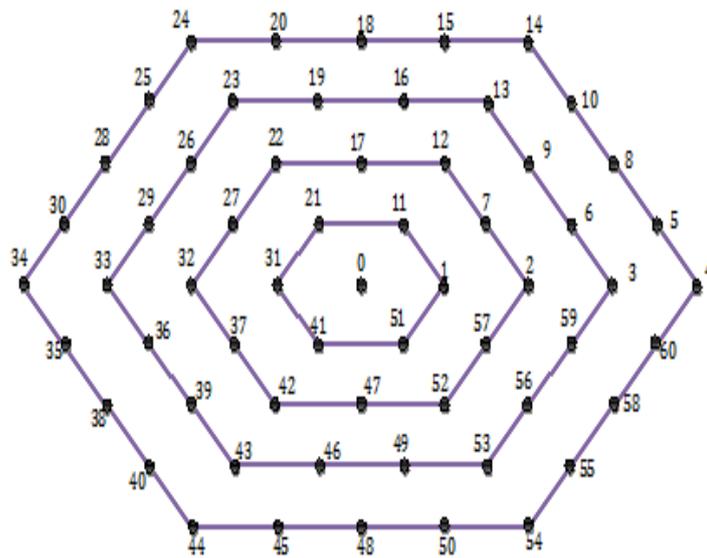


Fig. 3- Représentation vectorielle des tensions de l'onduleur NPC à cinq niveaux

La construction de la table de commutation (Tableau 1), 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 1- Table de vérité de l'onduleur NPC à 5 niveaux

| N | Cflx | | | | | |
|----|------|----|----|----|----|----|
| | 1 | | | 0 | | |
| | Ccp1 | | | | | |
| | 1 | 0 | -1 | 1 | 0 | -1 |
| 1 | 14 | 2 | 54 | 24 | 32 | 44 |
| 2 | 15 | 2 | 55 | 25 | 32 | 45 |
| 3 | 18 | 2 | 58 | 28 | 32 | 48 |
| 4 | 18 | 7 | 58 | 28 | 37 | 48 |
| 5 | 20 | 7 | 60 | 30 | 37 | 50 |
| 6 | 24 | 7 | 4 | 34 | 37 | 54 |
| 7 | 24 | 12 | 4 | 34 | 42 | 54 |
| 8 | 25 | 12 | 5 | 35 | 42 | 55 |
| 9 | 28 | 12 | 8 | 38 | 42 | 58 |
| 10 | 28 | 17 | 8 | 38 | 47 | 58 |
| 11 | 30 | 17 | 10 | 40 | 47 | 60 |
| 12 | 34 | 17 | 14 | 44 | 47 | 4 |
| 13 | 34 | 22 | 14 | 44 | 52 | 4 |
| 14 | 35 | 22 | 15 | 45 | 52 | 5 |
| 15 | 38 | 22 | 18 | 48 | 52 | 8 |
| 16 | 38 | 27 | 18 | 48 | 57 | 8 |
| 17 | 40 | 27 | 20 | 50 | 57 | 10 |
| 18 | 44 | 27 | 24 | 54 | 57 | 14 |
| 19 | 44 | 32 | 24 | 54 | 2 | 14 |
| 20 | 45 | 32 | 25 | 55 | 2 | 15 |
| 21 | 48 | 32 | 28 | 58 | 2 | 18 |
| 22 | 48 | 37 | 28 | 58 | 7 | 18 |
| 23 | 50 | 37 | 30 | 60 | 7 | 20 |
| 24 | 54 | 37 | 34 | 4 | 7 | 24 |
| 25 | 54 | 42 | 34 | 4 | 12 | 24 |
| 26 | 55 | 42 | 35 | 5 | 12 | 25 |
| 27 | 58 | 42 | 38 | 8 | 12 | 28 |
| 28 | 58 | 47 | 38 | 8 | 17 | 28 |
| 29 | 60 | 47 | 40 | 10 | 17 | 30 |
| 30 | 4 | 47 | 44 | 14 | 17 | 34 |
| 31 | 4 | 52 | 44 | 14 | 22 | 34 |
| 32 | 5 | 52 | 45 | 15 | 22 | 35 |
| 33 | 8 | 52 | 48 | 18 | 22 | 38 |
| 34 | 8 | 57 | 48 | 18 | 27 | 38 |
| 35 | 10 | 57 | 50 | 20 | 27 | 40 |
| 36 | 14 | 57 | 54 | 24 | 27 | 44 |

3 Commande DTC à cinq niveaux basés sur les contrôleurs intelligents

L'application de la technique des réseaux de neurones dans la commande des machines est simple. Elle a permis la résolution de plusieurs problèmes liés au contrôle de ces systèmes [9]. La logique floue est très populaire dans la commande des systèmes puisqu'elle offre des performances nettement supérieures aux méthodes classiques de commandes [10]. Il est facile d'utiliser des techniques intelligentes dans la commande DTC à 36 secteurs avec le remplacement des régulateurs à hystérésis par deux contrôleurs neuronaux et le contrôleur PI classique de la vitesse par un contrôleur flou (PI-flou). Ceci est illustré sur la Fig. 4.

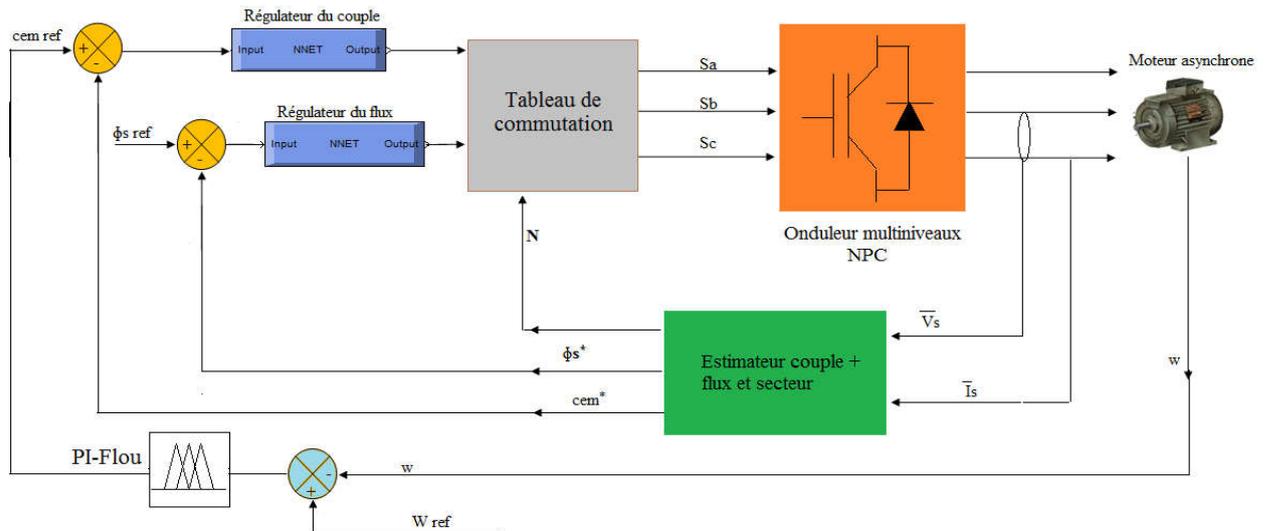


Fig. 4- Commande DTC basée sur les contrôleurs intelligents

A. Hystérésis neuronale

Pour générer le contrôleur RNA par Matlab/Simulink ont été choisies 4 couches cachées pour le correcteur du couple (Tableau 2) et 3 couches cachées pour le correcteur du flux (Tableau 3) 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 rétropropagation nommé l'algorithme de Levenberg-Marquardt (LM) [11].

Tableau 2 - Propriétés LM du correcteur de 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 |
| Coefficient d'accélération de convergence (mc) | 0.9 |
| Erreur (goal) | 0.0001 |
| Fonctions d'activation | Tansig, Purelin |

Tableau 3 - Propriétés du LM du correcteur du flux

| Paramètres du LM | valeurs |
|--|-----------------|
| Nombre de couche cachée | 3 |
| Pas d'apprentissage | 0.002 |
| Pas d'affichage (affichage de l'erreur par morceaux) | 50 |
| Nombre d'itération (epochs) | 400 |
| Coefficient d'accélération de convergence (mc) | 0.9 |
| Erreur (goal) | 0.0001 |
| Fonctions d'activation | Tansig, Purelin |

B. Contrôleur PI-flou

On parle de la commande floue lorsque la partie d'un automatisme est réalisée en logique floue. Sa mission est la même que celle d'un contrôleur classique à savoir: gérer les données de commande et de contrôle du processus. La structure de l'automatisme peut donc être ramenée à un système asservi (Fig. 5) [12].

A partir de la valeur de la variable de sortie Y, le contrôleur flou permet de déterminer la commande appropriée à appliquer au processus. Celle-ci est calculée généralement pour les systèmes automatiques grâce aux deux entrées e_1 et e_2 et l'inférence des règles flou [13].

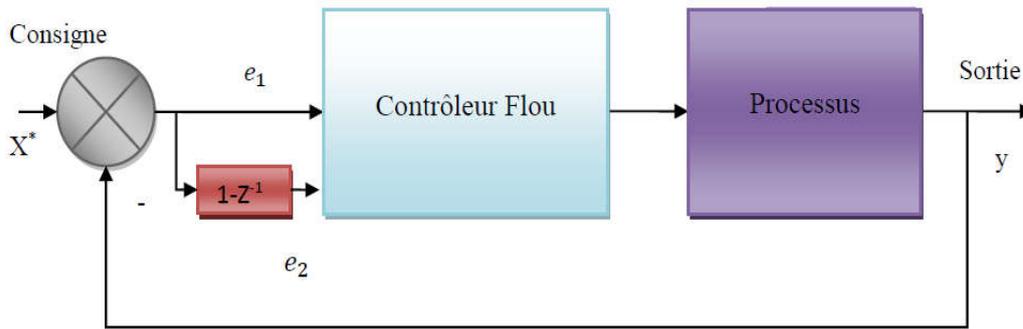


Fig. 5- Architecture d'une commande floue.

En général, e_1 représente l'écart entre le signal de sortie du processus et la consigne e_2 qui est l'accroissement de l'écart entre le signal de sortie du processus et la consigne.

$$e_1(k) = X^*(k) - y(k) \tag{1}$$

$$e_2(k) = y(k) - y(k - 1) \tag{2}$$

Avec: * représente les grandeurs de commande.

La Fig. 6, montre le schéma bloc d'un contrôleur PI-flou, qui peut être utilisé pour l'asservissement de vitesse du moteur asynchrone. L'entrée du bloc PI-flou est la valeur de l'erreur de vitesse ($w_{ref} - w$). Sa sortie est le couple de référence ($C_{em ref}$).

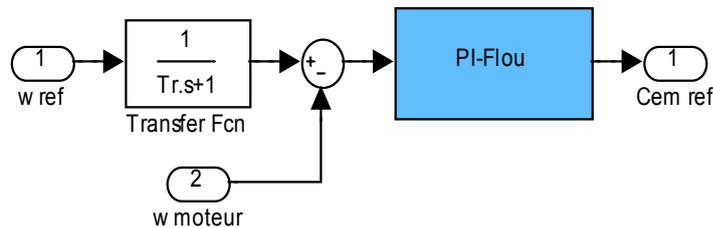


Fig. 6 - Structure du contrôleur PI-flou de la vitesse.

La structure interne du contrôleur PI-flou est donnée dans la Fig. 7.

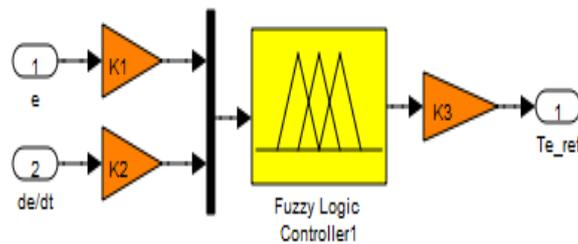


Fig. 7- Schéma synoptique du régulateur PI-flou avec réglage.

Le jeu de règles du contrôleur PI-flou à 7 ensembles est représenté dans le Tableau 4 [14, 15].

Tableau 4 - Tableau des règles de commandes à sept classes

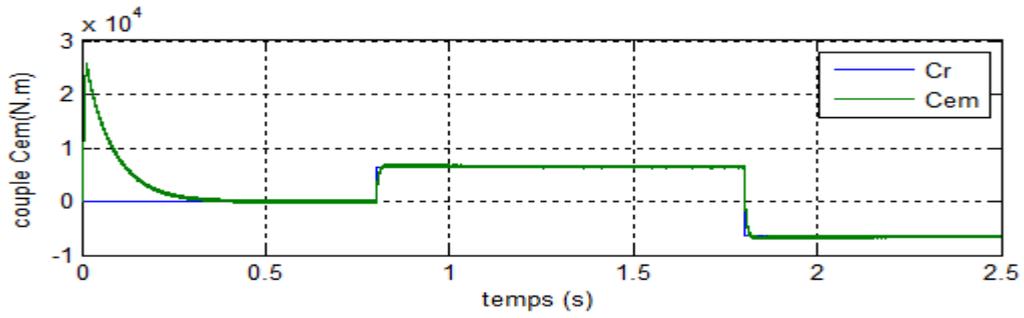
| e | | | | | | | |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Δe | NL | NM | NP | EZ | PS | PM | PL |
| NL | NL | NL | NL | NL | NM | NP | EZ |
| NM | NL | NL | NL | NM | NP | EZ | PS |
| NP | NL | NL | NM | NP | EZ | PS | PM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

Avec: $e = w_{ref} - w$ $\Delta e = \Delta (w_{ref} - w)$

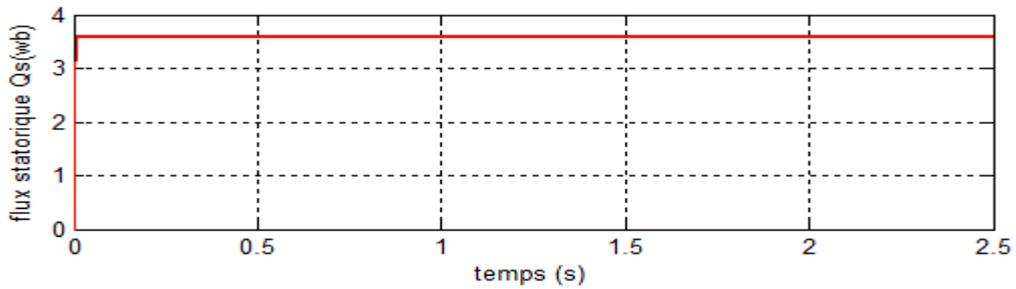
4 Résultats et discussions

La commande de paramètres de contrôle utilisée est composée de: 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 $T_e = 50\mu s$, $\phi_{sref} = 3.6wb$.

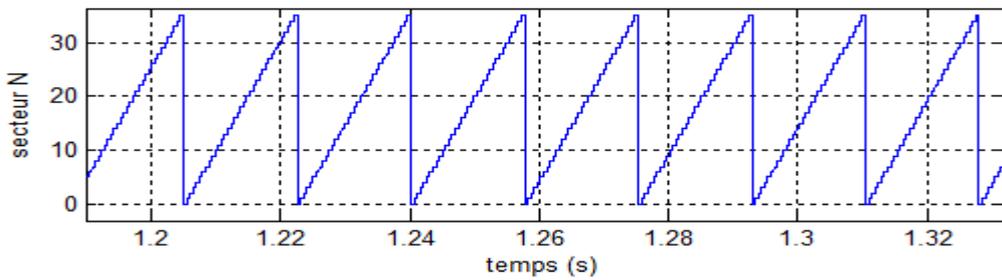
Les résultats de simulation de la commande DTC à 36 secteurs avec et sans contrôleurs intelligentes de la MAS alimentée par onduleur de tension à sept niveaux sont illustrés sur les Figs. 8 et 9.



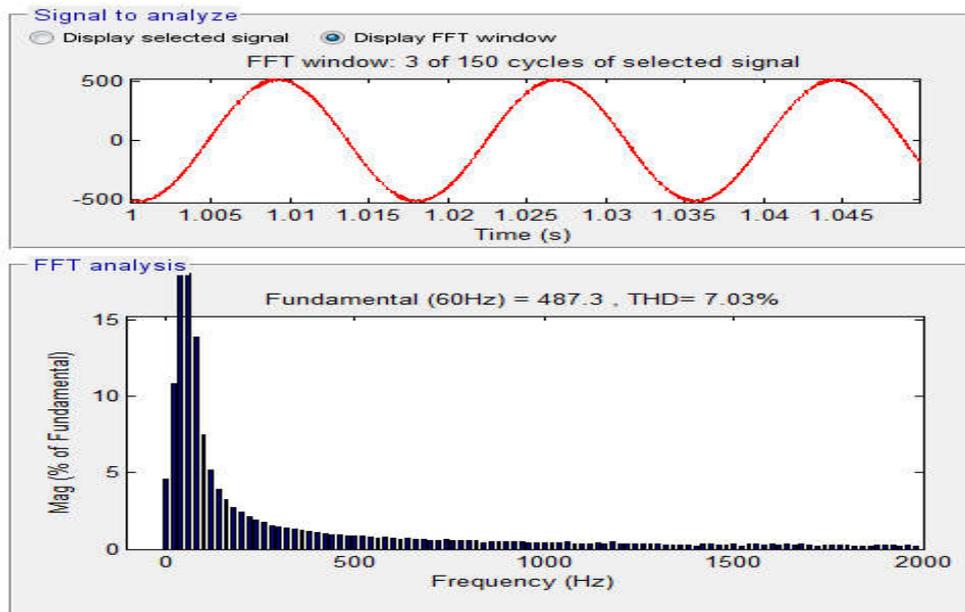
a) Couple



b) Flux statorique

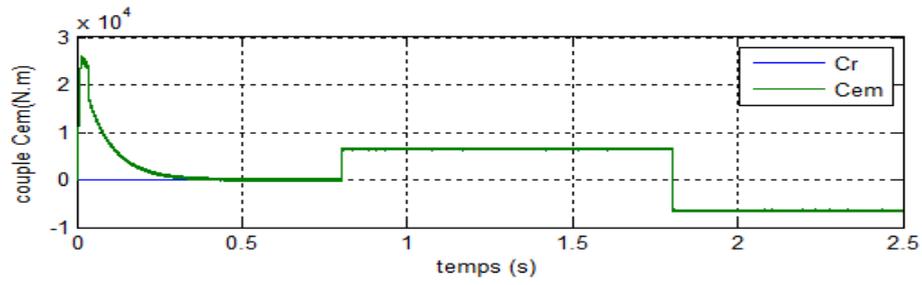


c) Secteur N

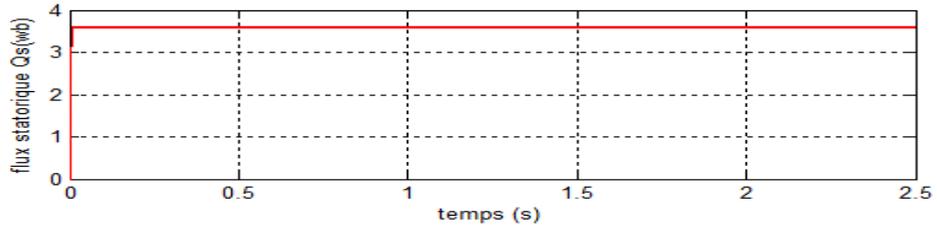


d) THD de courant statorique (I_{as}).

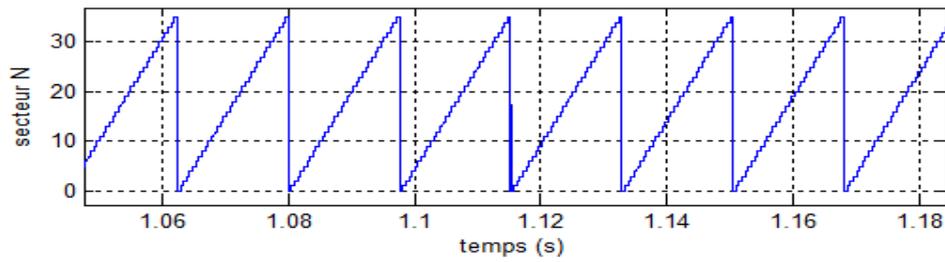
Fig. 8- Performance de DTC à 36 secteurs appliquée à la MAS.



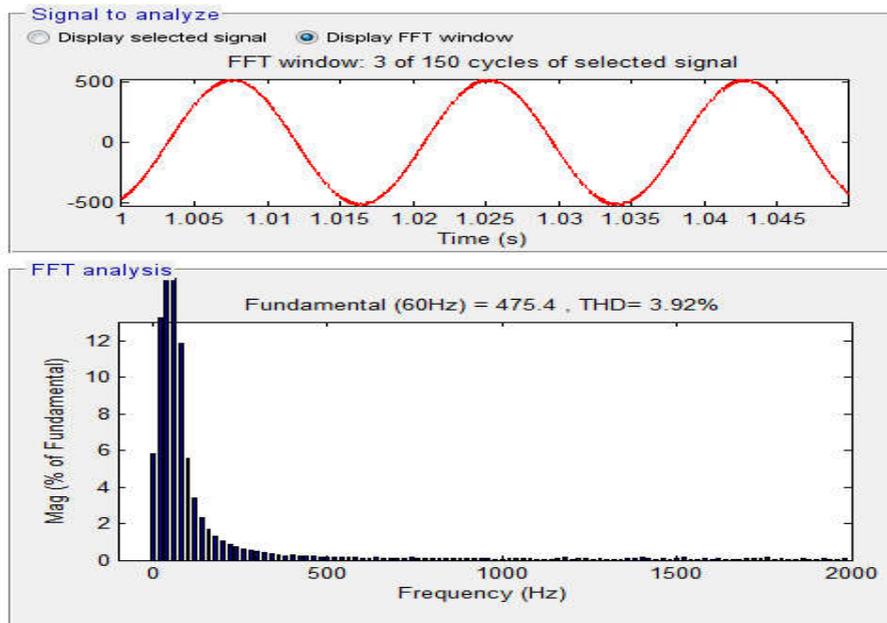
a)



b)



c)



d)

Fig. 9- Performance de DTC à 36 secteurs avec contrôleurs intelligents appliquée à la MAS. a) Couple ; b) Flux statorique ; c) Secteur N ; d) THD du courant statorique (Ias).

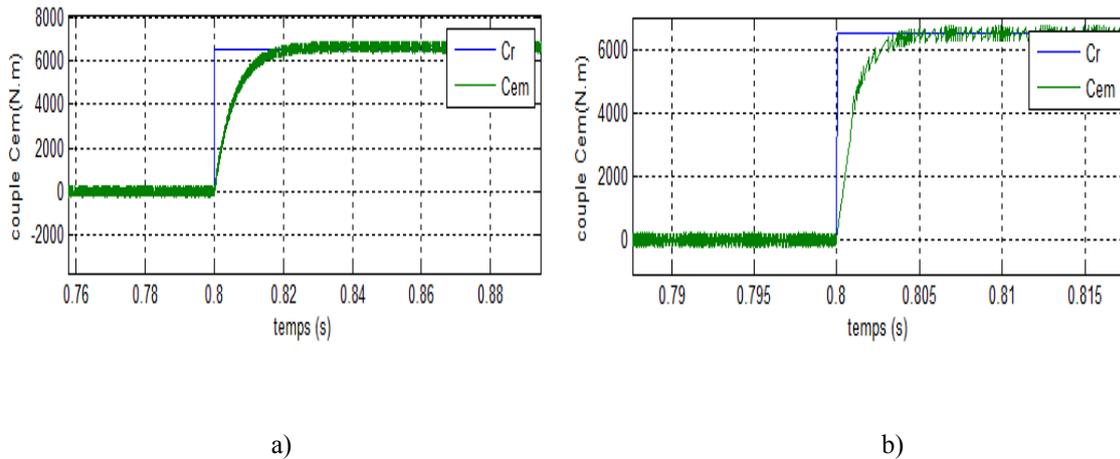


Fig. 10- Zoom sur le couple : a) Commande DTC à 36 secteurs;
 b) Commande DTC à 36 secteurs basés sur les contrôleurs intelligents

Dans le but de connaître la meilleure commande de la MAS, une étude comparative est indispensable entre les deux commandes traitées précédemment. La comparaison entre les deux commandes est représentée dans le tableau 5.

Tableau 5- Etude comparative

| Les commandes | Ias THD (%) | Réponse dynamique du couple |
|---|-------------|-----------------------------|
| Commande DTC à 36 secteurs | 7.03 | Rapide |
| Commande DTC à 36 secteurs basés sur les contrôleurs intelligents | 3.92 | Très rapide |

Le Tableau 5 montre que la commande DTC à 36 secteurs basée sur les régulateurs intelligents réduit considérablement la valeur de THD du courant statorique (Ias) par rapport à celle de la commande DTC à 36 secteurs sans régulateurs intelligents. D'un autre coté, on remarque que la dynamique des composantes du flux statorique n'est pas affectée par l'application de ces consignes de la charge.

Le couple électromagnétique agit rapidement pour suivre les consignes de charges introduites pour la commande DTC à 36 secteurs avec contrôleurs intelligents par rapport à la commande DTC à 36 secteurs. Par ailleurs, le module du flux s'établit à sa valeur de référence de 3.6 Wb.

5 Conclusion

Le présent travail est consacré à la commande DTC à 36 secteurs basée sur les contrôleurs intelligents (hystérésis neuronale et contrôleur PI-flou de la vitesse) d'une machine asynchrone alimentée par onduleur de type NPC à cinq niveaux. Les résultats obtenus pour l'arrangement de DTC à 36 secteurs avec contrôleurs intelligents illustrent une réduction considérable dans l'ondulation du couple et du flux et de la valeur de THD du courant statorique par rapport aux résultats obtenus dans la DTC à 36 secteurs. Ce qui montre l'efficacité de la méthode proposée.

REFERENCES

[1] Y. Hadji, Y. Gadi, Détection de défauts dans le convertisseur à MLI d'une machine asynchrone. Mémoire de Master académique, université kasdi Merbah, Ouargla, 2014.
 [2] G. Yousef, Régulation des onduleurs multi niveaux par un régulateur à logique floue. Mémoire de Magister, université Badji Mokhtar, Annaba, 2009.
 [3] A. Khoudri, Techniques de commande avancées appliquées aux machines de type asynchrone. Thèse de Doctorat, université Mentouri de Constantine, 2010.
 [4] S. Ali, Commande sans capteur de vitesse d'un moteur à induction. Apport des techniques de l'intelligence artificielle. Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Oran, 2015.
 [5] N. Khalil, Stratégie de commande et techniques intelligentes appliquées aux machines de type synchrone. Thèse de Doctorat, université Mentouri Constantine, 2010.

- [6] A. Tlemcani, Contribution à l'application des commandes adaptatives par les systèmes flous à une machine synchrone à aimants permanents alimentée par un convertisseur multicellulaire série. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2007.
- [7] 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(2018) pp. 680-696.
- [8] A. Manuel, 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) pp.4471-4478.
- [9] K. Yahia, Etude d'une nouvelle approche MLI (PWM) en temps réel basée sur le principe des réseaux de neurones destinée aux véhicules électriques. Mémoire de Magister, université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou, 2015.
- [10] M. Bouzaine, Application des techniques intelligentes à la commande d'une machine asynchrone double étoile associée à un convertisseur matricielle. Thèse de Doctorat en Sciences, université Djillali liabes de Sidi Bel Abbes, 2014.
- [11] H. Benbouhenni, Étude 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
- [12] H. Koura, Contribution au contrôle d'un filtre actif parallèle triphasé à quatre fils dans un milieu perturbé. Thèse de Doctorat en Sciences, université de Batna, 2015.
- [13] M. Abdelhafidh, Stratégies de commande DTC-SVM et DPC appliquées à une MADA utilisée pour la production d'énergie éolienne. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2014.
- [14] H. Benbouhenni, 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(2017) pp.50-56.
- [15] H. Benbouhenni, 36 Sectors DTC Based on Fuzzy Logic of Sensorless Induction Motor Drives. Research & Reviews: Journal of Engineering and Technology. Vol. 7 N°1(2018) pp.24-32.