



Régulateurs PI-flou pour la Commande DTC neuronale sans vecteurs nuls à 12 secteurs d'une MAS de forte puissance

BENBOUHENNI Habib

Département de Génie électrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Oran, Algeria

Résumé

Ce travail présente une stratégie de commande directe du couple (DTC) par l'intelligence artificielle (Réseaux de neurones (RNA) et la logique floue (FL)) appliquée au système du contrôle d'une machine asynchrone de forte puissance. L'application de la DTC apporte un résultat très intéressant aux obstacles de robustesse et de dynamique. Une comparaison des performances de la commande DTC proposée avec la commande DTC classique sans vecteur nuls à 12 secteurs sera présentée. Les résultats de simulation ont été visualisés et présentés par Matlab/Simulink. Les ondulations du courant, du flux, et du couple seront jugées et comparées pour les deux commandes proposées. Comme résultats, le comportement de la DTC basés sur les RNA et FL est plus performant par rapport à la commande DTC conventionnelle.

Mots Clés: Machine asynchrone, DTC, Logique floue, Réseaux de neurones, 12 secteurs

Abstract

This work presents a direct torque control (DTC) strategy by artificial intelligence (Neural Networks (ANN) and Fuzzy Logic (FL)) applied to the control system of an induction high power machine. The application of the DTC brings a very interesting result to the obstacles of robustness and dynamics. A comparison of the performance of the proposed DTC control with the conventional 12-sectors vector-free DTC control will be presented. The simulation results were visualized and presented by Matlab / Simulink. The current, flux and torque ripples will be judged and compared for the two proposed controls. As a result, the behavior of DTC based on RNA and FL is more efficient compared to conventional DTC control.

Keywords: induction machine, DTC, fuzzy logic, neural networks, 12 sectors

1. Introduction

Le contrôle direct du couple (DTC) proposé par Depenbrock et Takahashi est un résultat pour les problèmes du contrôle vectoriel. En effet, dans cette dernière les grandeurs de commande que sont le flux statorique et le couple électromagnétique, sont calculées à partir des seules grandeurs liées au stator et ceci sans l'intervention du capteur mécanique [1].

Les méthodes de commande directe du couple consistent à commander directement la fermeture ou l'ouverture des interrupteurs de l'onduleur à partir des valeurs pré calculées du flux statorique et du couple. Les changements d'états des interrupteurs sont liés à l'évolution des états électromagnétiques du moteur. Ils ne sont plus commandés à partir des consignes de tension et de

fréquence donnée à la commande rapprochée d'un onduleur à modulation de la largeur d'impulsion.

La commande des interrupteurs a pour but de donner au vecteur représentant le flux statorique la direction déterminée par les valeurs de consigne [2]. Dans ce travail, on présentera la nouvelle table de commutation du contrôle direct du couple sans vecteur nulles pour une MAS. D'un autre coté une comparaison entre la commande DTC classique neuronale et la commande DTC neuronale proposée, et les résultats de simulation obtenus.

D'un autre coté, plusieurs stratégies modernes appliquée à la machines asynchrones par exemple la commande par les réseaux de neurones, la commande par la logique floue, la commande par neuro-flou et la modulation vectorielle. Dans [3], l'auteur a proposé une étude comparative entre la commande DTC neuronale et la commande DTC basée sur PI-neuronale de la vitesse d'un moteur asynchrone. Dans

[4] et [5], l'auteur a proposé un régulateur PI de la vitesse basée sur la logique floue de la machine asynchrone contrôler par la commande DTC. Dans [6], l'auteur a proposé un régulateur PI-flou de la commande DTC-RNA à sept niveaux.

Cet article décrit les techniques d'intelligences artificielles, la logique floue et les réseaux de neurones qui seront introduites dans la commande DTC classique sans vecteurs nuls à 12 secteurs de la machine asynchrone. Le principe général et la théorie de base de la commande DTC sera présenté en premier lieu. Ensuite, on va appliquer les techniques d'intelligences artificielles à la commande DTC classique sans vecteurs nuls à 12 secteurs.

2. Principe de la commande DTC classique

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 la sélection 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 diminuer la grandeur concernée à l'intérieur de sa bande d'hystérésis. Pour choisir le vecteur de tension, il est obligatoire de connaître les règles d'évolution du couple et du module du flux statorique.

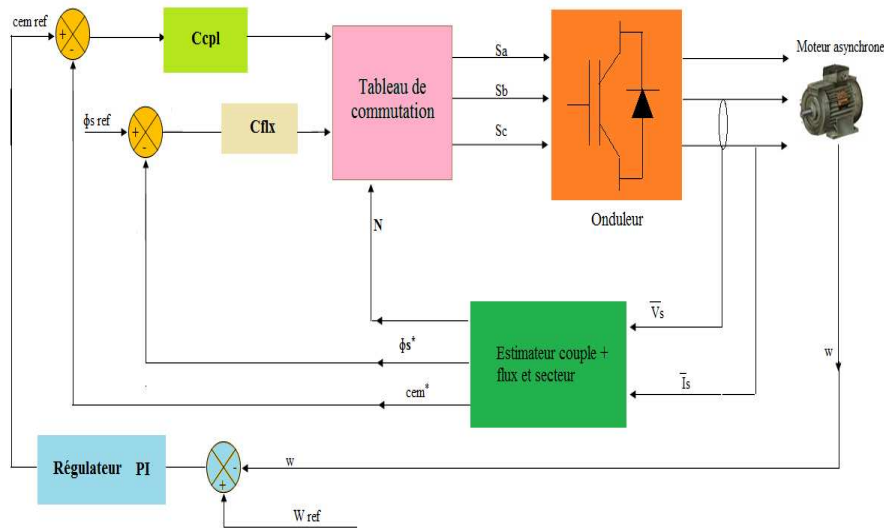


Figure 1 Structure de base de la commande directe du couple

L'estimation du flux peut être déterminée à partir des mesures des grandeurs statoriques courant et tension de la machine par [7]:

$$\phi_s = \int_0^t (v_s - R_s i_s) dt \quad (1)$$

Le module du flux statorique s'écrit:

Dans une commande DTC, il est mieux de travailler avec une fréquence de calcul grande afin de diminuer les alternances du couple provoquées par les contrôleurs à hystérésis. Les spécificités générales d'une commande directe du couple sont [1]:

- La commande directe du couple et du flux, à partir de choix des vecteurs optimaux de commutation de l'onduleur.
- La commande indirecte des intensités et tensions du stator de la machine.
- L'obtention des flux et des courants statoriques proches de formes sinusoïdales.
- Une réponse dynamique de la machine très rapide.
- L'existence des oscillations du couple qui dépend, entre autres, des facteurs de la largeur des bandes des régulateurs à hystérésis.
- La fréquence de commutation de l'onduleur dépend de l'amplitude des bandes à hystérésis.

La structure de base du contrôle direct du couple est présentée sur la figure 1, La commande de l'onduleur est instantanée, ce qui nécessite une période d'échantillonnage très faible.

$$\phi_s = \sqrt{\phi_{s\beta}^2 - \phi_{s\alpha}^2} \quad (2)$$

La zone N_i dans laquelle se situe le vecteur ϕ_s est déterminée à partir des composantes $\phi_{s\alpha}$ et $\phi_{s\beta}$. L'angle θ_s entre le référentiel (s) est le vecteur ϕ_s , est égal à [8]:

$$\phi_{\beta s} = \arctg\left(\frac{\phi_{\beta s}}{\phi_{\alpha s}}\right) \quad (3)$$

Ces équations représentent les étapes de calcul nécessaires à l'estimation de l'amplitude et la position du vecteur flux statorique. Cet estimateur exige seulement la connaissance de la résistance statorique, ou l'effet de l'erreur sur ce dernier est négligeable.

Une fois les deux composantes du flux sont obtenues, le couple électromagnétique peut être estimé d'après sa formule rappelée ci-dessous [9]:

$$c_{em} = \frac{3}{2} p [\phi_{as} i_{\beta s} - \phi_{\beta s} i_{as}] \quad (4)$$

On peut voir que l'exactitude de l'expression du couple dépend de la qualité d'estimation du flux et de la précision de la mesure des courants. L'avantage d'utiliser le vecteur nul est grâce aux changements moins rapides du couple, on diminue le nombre de commutations [10].

- $V_{i+1} \Leftrightarrow V_{i-1}$: deux commutations
- $V_{i+2} \Leftrightarrow V_{i-2}$: deux commutations.
- V_1, V_3, V_5 : une commutation.
- $V_1, V_3, V_5 \Leftrightarrow V_7$: une commutation.

3. Elaboration du tableau de commutation sans vecteurs nuls

Dans ce cas on n'exploite que les séquences actives. Cette stratégie à l'avantage de la facilité et permet d'éviter les réductions indésirables du flux à basse vitesse. Le tableau 1 illustre la table de vérité de commande DTC classique à 6 secteurs.

Tableau 1
Table de vérité de commande DTC classique (comparateur à hystérésis à trois niveaux)

N		1	2	3	4	5	6
$d\phi_s$	dC_{em}						
1	1	V2	V3	V4	V5	V6	V1
	0	V1	V2	V3	V4	V5	V6
	-1	V6	V1	V2	V3	V4	V5
0	1	V3	V4	V5	V6	V1	V2
	0	V4	V5	V6	V1	V2	V3
	-1	V5	V6	V1	V2	V3	V4

Avec :

$dC_{em} = 1$ pour augmenter le couple, $dC_{em} = 0$ pour le réduire et $dC_{em} = -1$ pour son maintient. Le couple $d\phi_s = 0$ réduire le flux alors que $d\phi_s = -1$ l'augmente.

Le tableau 2 illustre la table de vérité de la commande DTC proposé à 12 secteurs sans vecteur nuls.

Tableau 2

Table de vérité de la commande DTC classique sans vecteurs nuls à 12 secteurs (comparateur à hystérésis à trois niveaux)

N	d $\emptyset_s$					
	1			0		
	d c_{em}					
	1	0	-1	1	0	-1
1	V2	V1	V6	V3	V4	V5
2	V3	V2	V1	V4	V5	V6
3	V3	V2	V1	V4	V5	V6
4	V4	V3	V2	V5	V6	V1
5	V4	V3	V2	V5	V6	V1
6	V5	V4	V3	V6	V1	V2
7	V5	V4	V3	V6	V1	V2
8	V6	V5	V4	V1	V2	V3
9	V6	V5	V4	V1	V2	V3
10	V1	V6	V5	V2	V3	V4
11	V1	V6	V5	V2	V3	V4
12	V2	V1	V6	V3	V4	V5

Par analogie a une machine à courant continu avec boucle de limitation du courant, la machine asynchrone et sa commande DTC peut être modélisée par un système linéaire (autour d'un point de fonctionnement) ayant comme entrée la référence du couple et comme sortie la vitesse [11].

Dans l'objectif d'annuler l'erreur statique et diminuer le temps de réponse tout en gardant la stabilité du système, un régulateur proportionnel intégral est utilisé. Les performances obtenues (stabilité, précision, temps de réponse) sont convenables pour un tel système électromécanique [11].

Le contrôle de la vitesse donne lieu à un couple qui va être un couple d'origine. Dans un contrôle en cascade, avec un contrôleur PI sur la vitesse, et en considérant le couple de charge comme perturbation, le schéma bloc réduit du système de commande est représenté par la figure 2 [12].

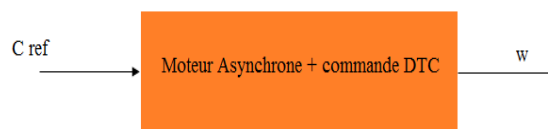


Figure 2 Moteur asynchrone avec commande DTC

Pour éloigner le dépassement, on a ajouté un filtre basse bande en contrôleur PI comme indiqué la figure 3.

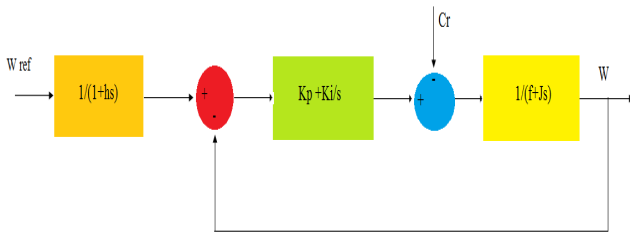


Figure 3 Bloc de régulation de vitesse avec filtre.

4. Commande DTC neuronale (DTC-RNA)

Les Réseaux de Neurones Artificiels (RNA) sont apparus dans les années 40 lors d'essais de modélisation du neurone biologique [13]. 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 [14]. Ils infèrent des propriétés émergentes permettant de solutionner les problèmes jadis qualifiés de complexe.

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 au réseau 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 [15].

L'utilisation des réseaux de neurones artificiels 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 [16]. 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 (Haykin, 1994). 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 [17].

Les réseaux de neurones sont des originaux mathématiques et informatiques, des assemblages d'unités de calcul appelés neurones formels, et dont l'inspiration originale était le fonctionnement cérébral de l'être humain [18].

La structure de commande neuronale directe du couple (DTC-RNA), de la machine asynchrone est représentée par la figure 4. Dont la table de commutation sont remplacé par un régulateur neuronal, et dont les entrées sont l'erreur du couple ε_{Cem} , du flux ε_{Φ_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.

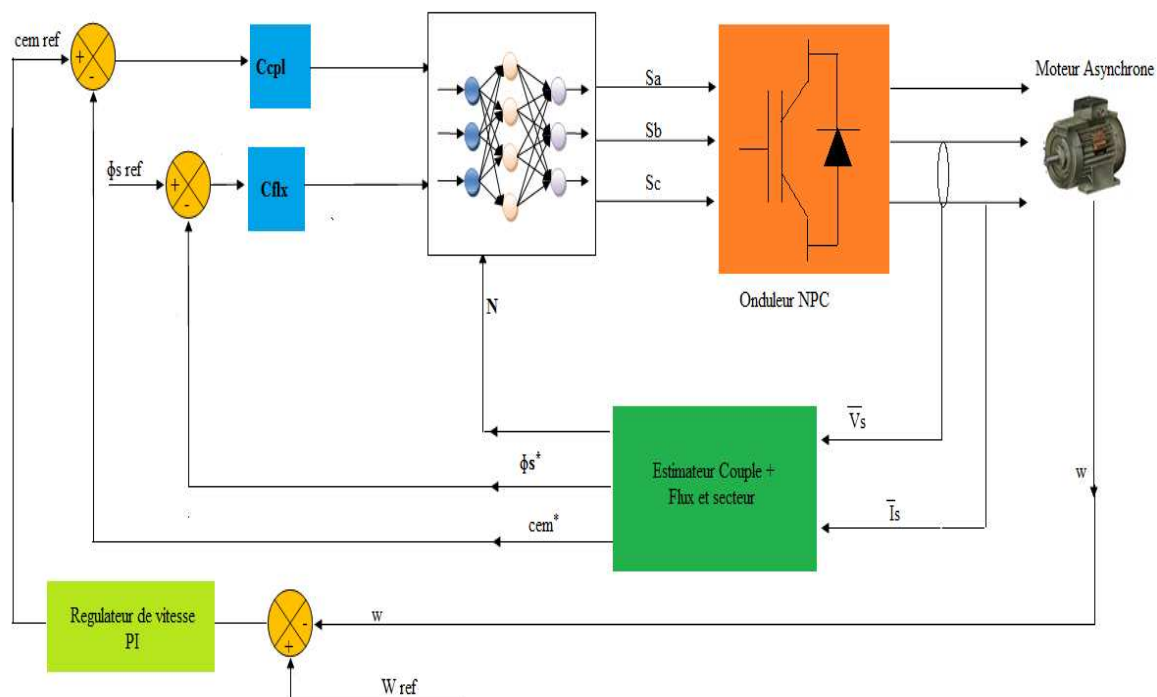


Figure 4 Commande directe du couple de la MAS basée sur les RNA.

Pour générer le régulateur RNA par Matlab/Simulink ou on a choisi 30 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).

Tableau 3
Propriétés de l'algorithme LM

Paramètres du LM	valeurs
Nombre de couche cachée	30
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

La figure 5 illustre le schéma de régulateur neuronal de la commande DTC sans vecteurs nuls à 12 secteurs.

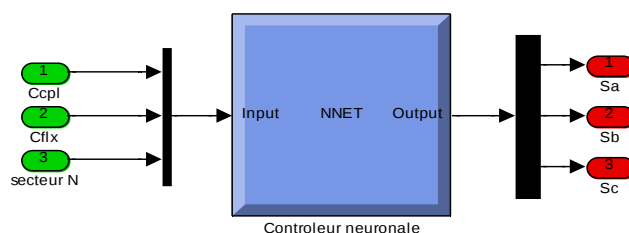


Figure 5 Schéma du contrôleur neuronal

La figure 6 illustre l'architecture interne du régulateur neuronal.

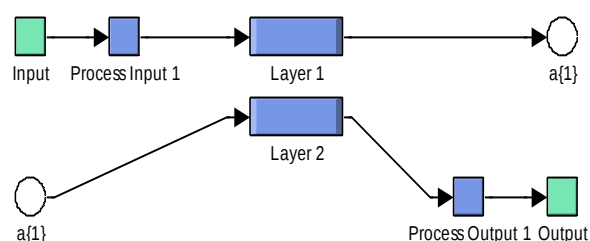


Figure 6 Architecture interne du contrôleur neuronal

5. Commande DTC neuronale avec contrôleur PI-flou de la vitesse

La figure 7, illustre la structure de la stratégie globale de la commande DTC et du contrôleur PI-flou de la vitesse utilisée. Le système de contrôle est composé du contrôleur

PI-flou, le contrôleur neuronal, le bloc d'estimation du couple, du flux et l'onduleur de tension à deux niveaux.

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. 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 [18].

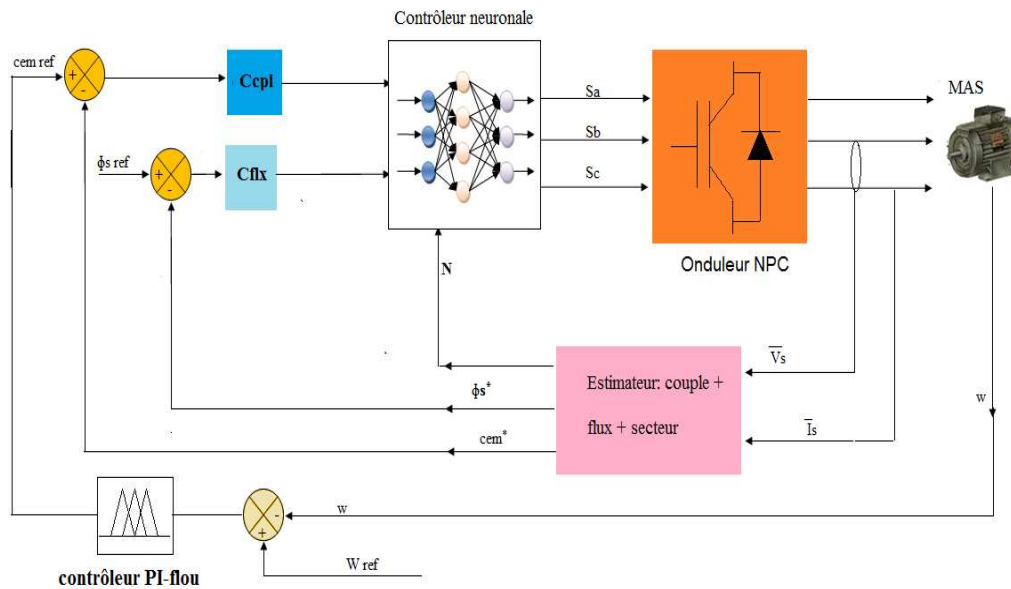


Figure 7 Commande DTC neuronale avec contrôleur PI-flou

La logique floue est largement populaire dans le contrôle des systèmes puisqu'elle offre des performances nettement supérieures aux méthodes classiques de commandes [19].

La boucle pour le réglage de la vitesse mécanique de la machine Ω contient un contrôleur flou dont les variables linguistiques en entrée sont l'erreur et la variation de l'erreur (e et Δe), et dans la sortie, la variation de la commande ΔU , U représentant la variation de T_e pour le régulateur de la vitesse [20]. G_e , $G_{\Delta e}$ et G_U sont des gains associés à e , Δe et u respectivement. En jouant sur ces gains pour assurer la stabilité et établir les performances dynamiques et statiques désirées (Figure 8). L'intervalle d'intérêt de chaque variable linguistique en entrée et en sortie est subdivisé en trois, cinq et sept classes pour obtenir respectivement neuf, vingt-cinq et quarante-neuf règles. Dans ce travail nous avons mené pour les variables

d'entrées et la variable de sortie un régulateur flou à 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 9 [20].

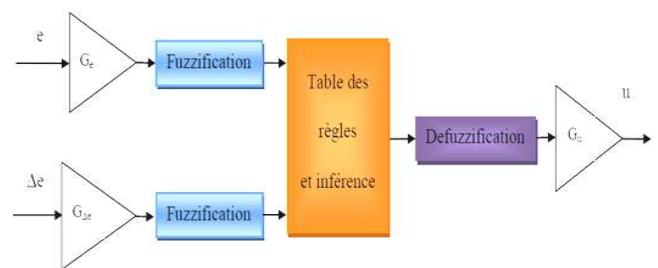
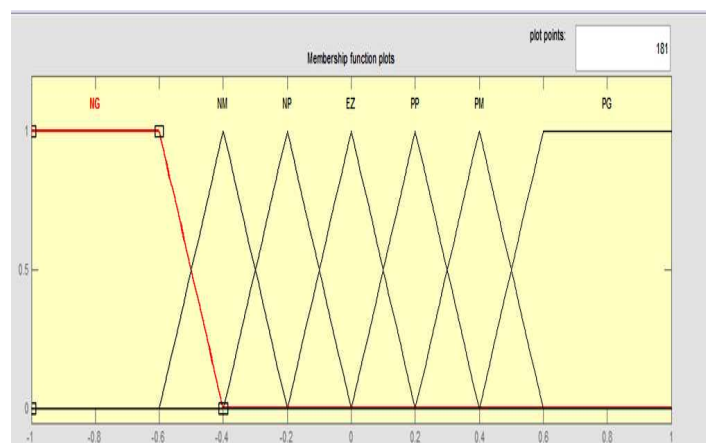
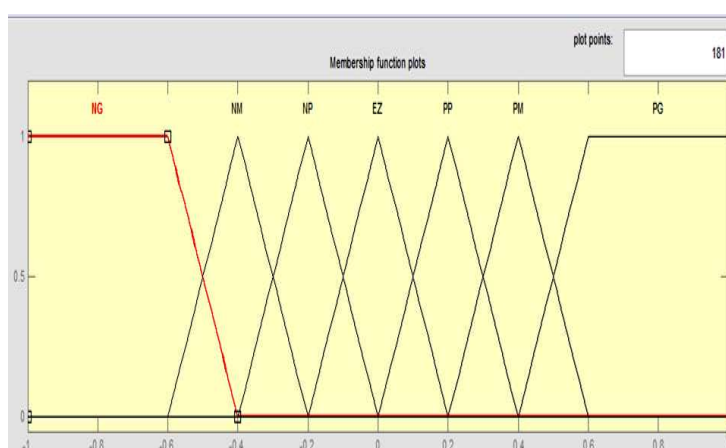


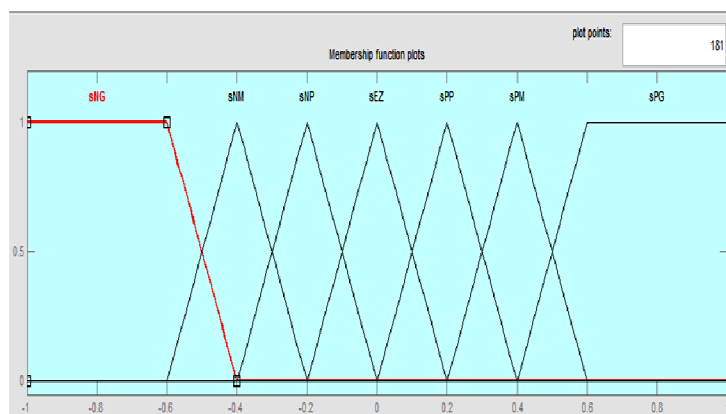
Figure 8 Schéma bloc de régulation de la vitesse à contrôleur flou.



a) Erreur



b) Variation de l'erreur



c) Commande

Figure 9 Fonctions d'appartenance des différentes variables linguistiques.

Les règles floues permettent de déterminer le signal de sortie du régulateur en fonction des signaux d'entrées. Elles relient les signaux de sorties aux signaux d'entrées par des conditions linguistiques prenant en compte l'expérience acquise par un opérateur humain. Par exemple, si l'erreur et

sa variation sont fortement négatives, alors, le signal de sortie doit être également fortement négatif. Au contraire, si l'erreur et sa variation sont environ zéro, alors, il sera de même pour la commande [21]. Ces considérations nous ont conduits à adapter un tableau qui résume les règles choisies.

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

6. Résultats de simulation

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 du comparateur du couple est, dans ce cas, fixée à $\pm 0,05$ N.m et celle du comparateur du flux à $\pm 0,001$ wb. Le couple de référence C_{ref} est récupéré à la sortie d'un correcteur PI, et le flux référence $\Phi_{sref} = 3,6$ wb.

La figure 10 illustre les performances de la commande DTC classique appliquée à la MAS.

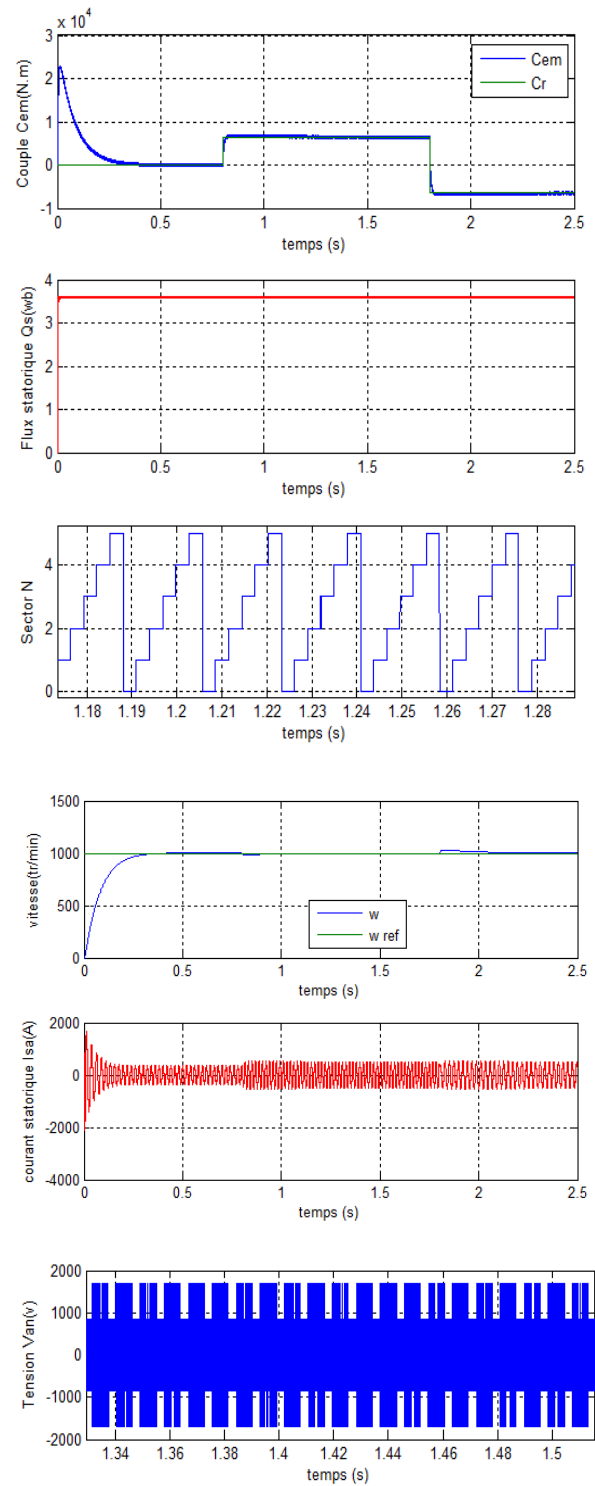
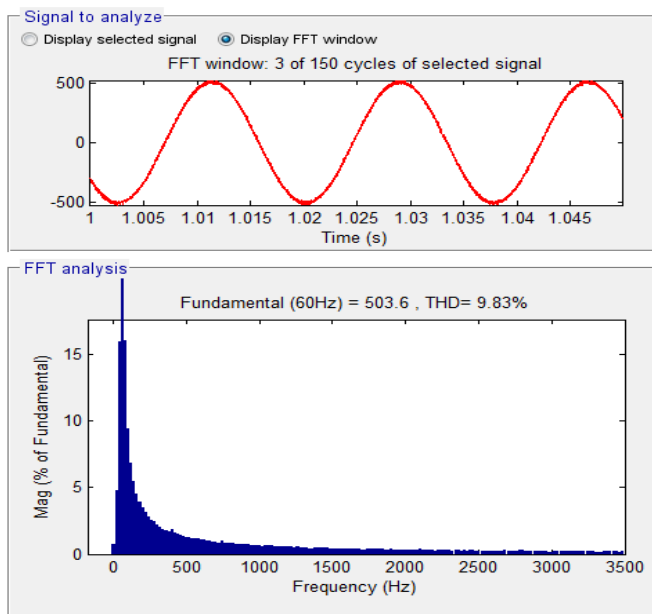


Figure 10 Performances de la commande DTC classique à 6 secteurs appliquée à la MAS

La figure 11 représente les performances de la commande DTC classique sans vecteurs nuls à 06 secteurs appliquée à la MAS.

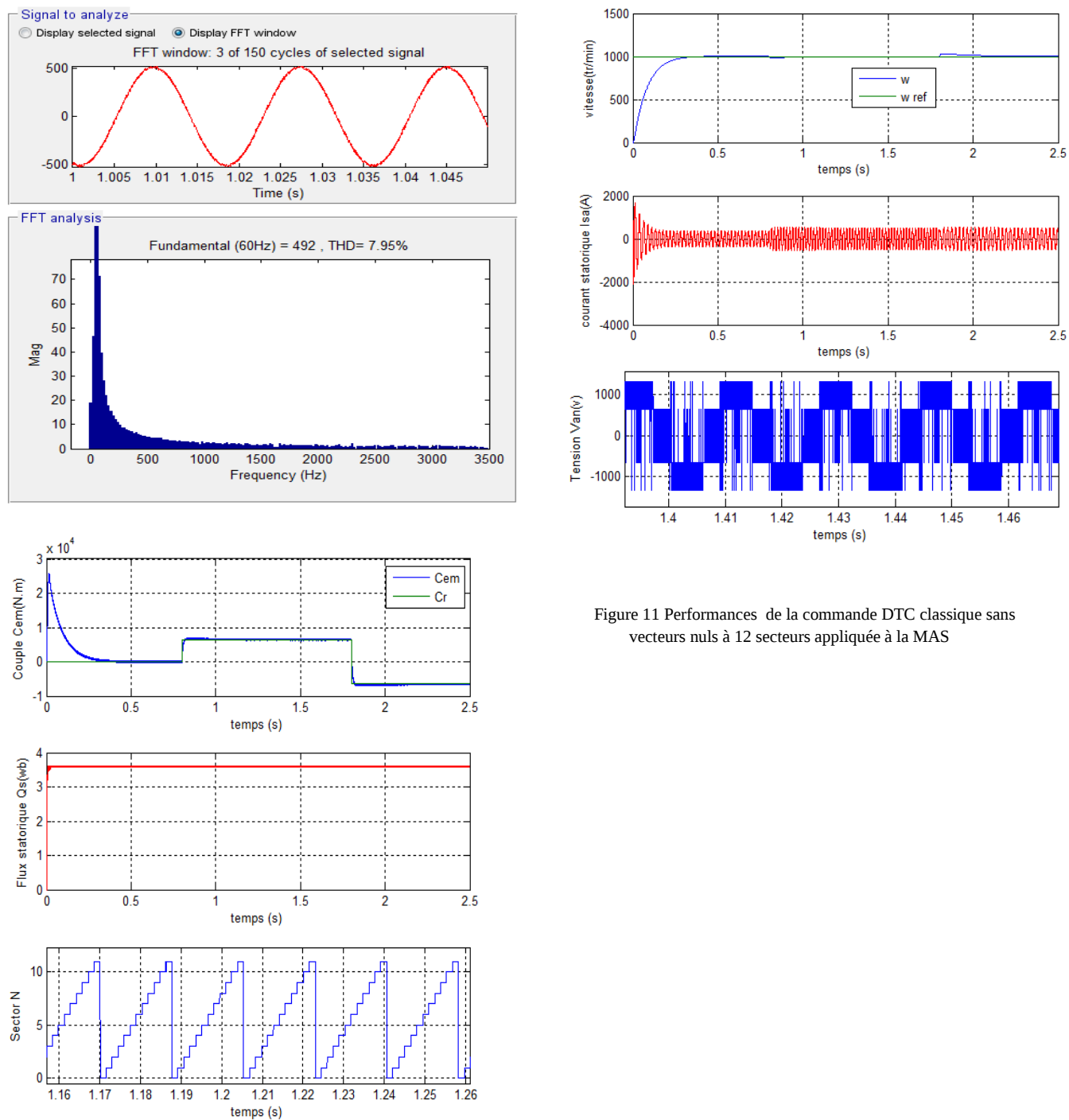


Figure 11 Performances de la commande DTC classique sans vecteurs nuls à 12 secteurs appliquée à la MAS

La figure 12 représente les performances de la commande DTC classique sans vecteurs nuls à 12 secteurs basés sur les RNA et PI-flou appliquée à la MAS.

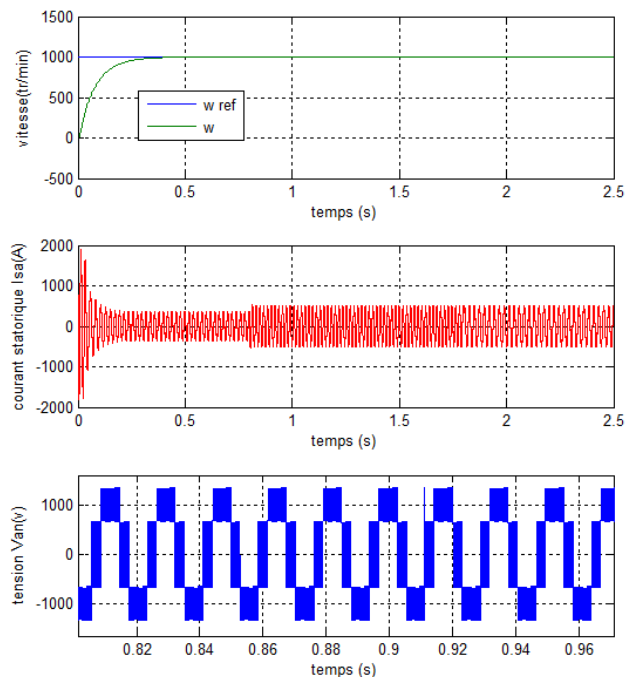
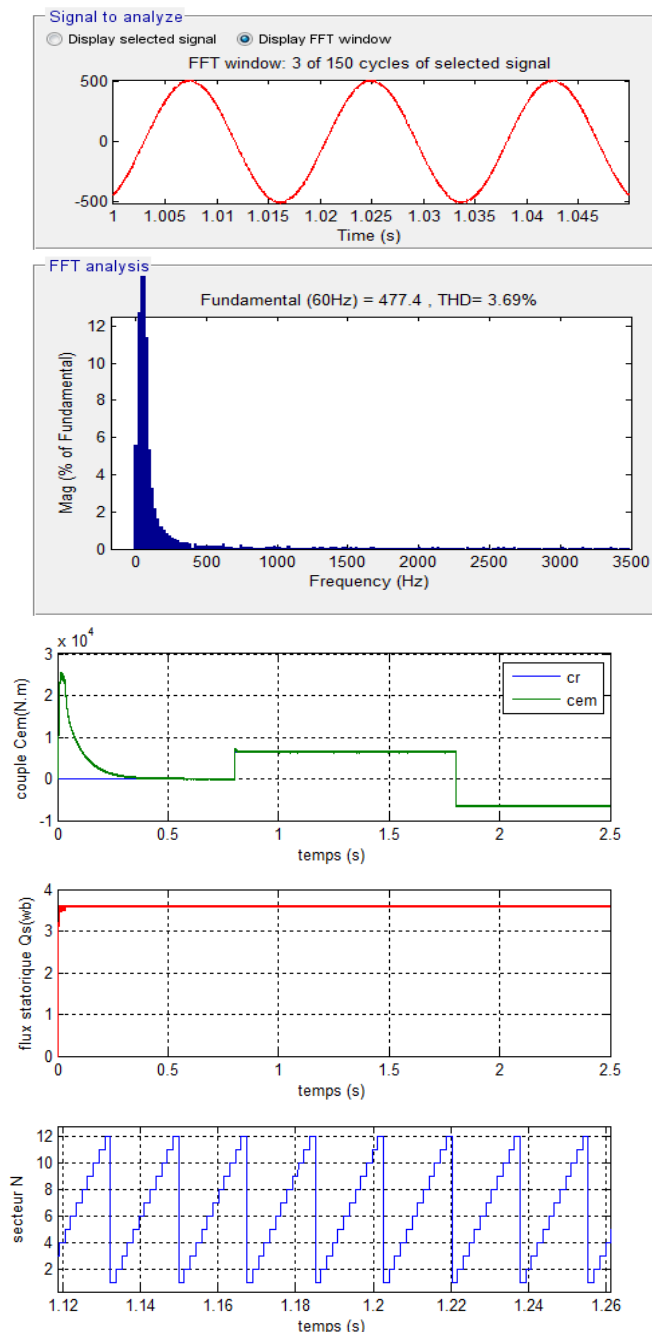


Figure 12 Performances de la commande DTC sans vecteurs nuls à 12 secteurs basés sur RNA et un PI-flou appliquée à la MA

Dans le but de connaître la meilleure commande de la MAS, une étude comparative est indispensable entre les trois commandes traitées précédemment (la DTC classique sans vecteurs nuls à 6 secteurs, la DTC classique sans vecteurs nuls à 12 secteurs, et la DTC sans vecteurs nuls à 12 secteurs basés sur les réseaux de neurones et le contrôleur PI-flou). La figure 13 représente les zooms du flux statorique, et le couple électromagnétique obtenues précédemment par simulation de la commande DTC classique sans vecteurs nuls à 6 secteurs, DTC classique sans vecteurs nuls à 12 secteurs et la DTC sans vecteurs nuls à 12 secteurs basés sur les réseaux de neurones et le contrôleur PI-flou stabilisante de la machine asynchrone de forte puissance (1 MW).

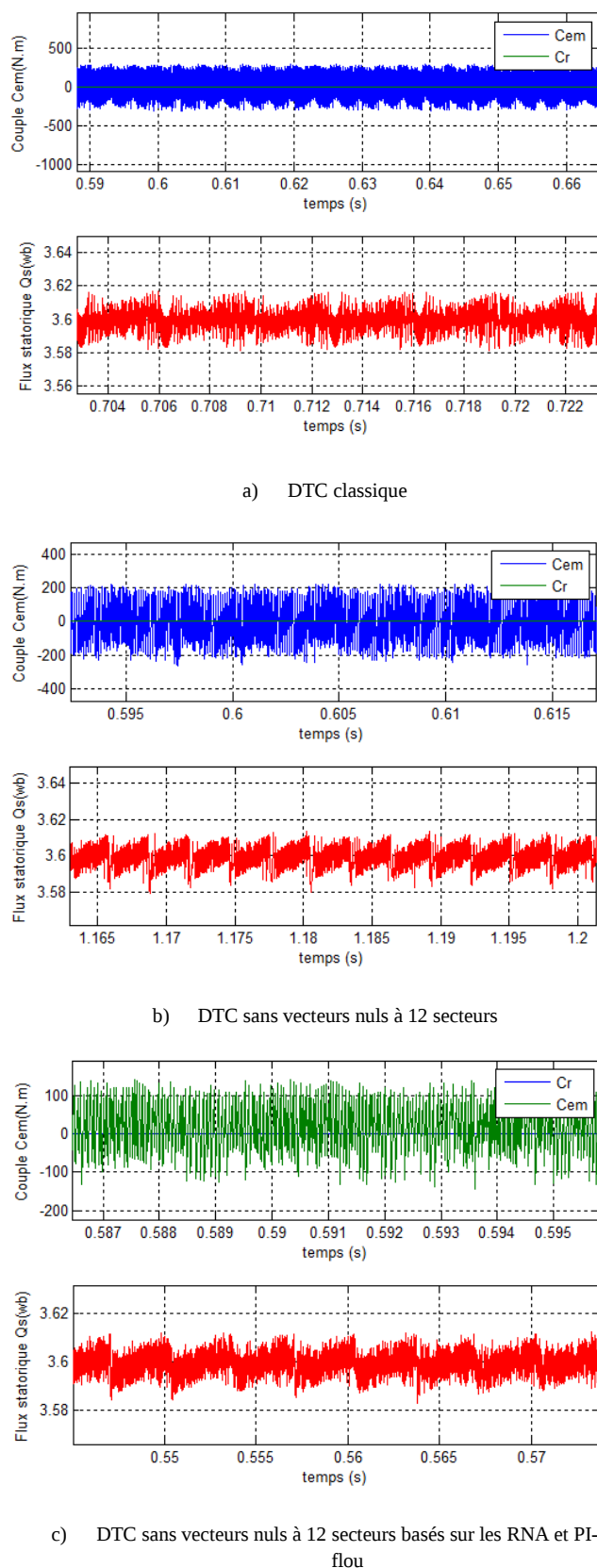


Figure 13 Zooms obtenues par les commandes proposées.

Le tableau 5 donne les caractéristiques des différentes commandes. On remarque que le plus faible taux d'harmonique est donné par la commande DTC neuronale sans vecteurs nuls à 12 secteurs avec PI-flou de la vitesse.

Tableau 5
Etude comparative

	I_{sa} THD (%)	Minimisations des ondulations du couple	Minimisations des ondulations du flux
DTC classique sans vecteurs nuls à 6 secteurs	9,83	Assez bonne	Assez bonne
DTC proposée	7,95	Bonne	Bonne
DTC proposé basés sur les RNA et contrôleur PI-flou	3,69	Très bonne	Très bonne

Les résultats de simulation montrent sans doute, que la commande DTC classique neuronale sans vecteurs nuls à 12 secteurs avec PI-flou, a de meilleures performances que celles obtenues par la commande directe du couple classique au niveau de la minimisation des pulsations du couple et du flux statorique ainsi que sa fréquence de commutation de l'onduleur. D'un autre côté, on constate que le module du flux s'établit à sa valeur de référence de 3,6 Wb. Et la vitesse atteint sa référence sans dépassement au démarrage à vide.

Le couple électromagnétique agit rapidement pour suivre les références de la charge introduite. Il présente une réduction remarquable des oscillations pour la DTC neuronale sans vecteurs nuls à 12 secteurs par rapport à la commande DTC classique sans vecteurs nuls à 6 secteurs. La dynamique des composantes du flux statorique n'est pas affectée par l'application de ces consignes de charges.

7. Conclusion

Dans cet article, on a présenté une nouvelle stratégie de commande directe du couple neuronale sans vecteurs nuls à 12 secteurs d'une machine asynchrone de forte puissance (1 MW). L'avantage essentiel de cette commande est de permettre le contrôle du flux statorique et du couple de la machine sans avoir nécessité à utiliser un capteur mécanique. La stratégie de commande directe du couple est une méthode efficace et simple pour conduire une machine asynchrone. Les résultats de simulation obtenue pour l'arrangement de la DTC proposé basés sur les réseaux de neurones et régulateur PI-flou de la vitesse illustrent une diminution considérable dans l'ondulation du couple, l'ondulation du flux statorique, et la valeur de la THD du

courant statorique par rapport aux résultats obtenus dans la DTC classique, DTC sans vecteurs nuls à 12 secteurs. Ce qui présenté l'efficacité de la commande proposée.

Références

- [1] NEFSI M., MASSOUM A., MEROUFEL, A., WIRA P., Contrôle direct du couple de la machine asynchrone basé sur MLI vectorielle discrétisée (DSVM-DTC), Acta Electrotehnica, 53(1) (2012) 35-40.
- [2] OMER Fethi, B., " *Application des techniques de l'intelligence artificielle (LF-RN) pour le contrôle direct du couple d'une MAS alimentée par des onduleurs multiniveaux* ", Mémoire de Magister, université des Sciences et de la Technologie d'Oran (2013).
- [3] BENBOUHENNI H., 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., 29 (2017) 30-43.
- [4] BENBOUHENNI H., 36 Sectors DTC Based on Fuzzy Logic of Sensorless Induction Motor Drives, Research & Reviews: Journal of Engineering and Technology. 7(1) (2018) 24-32.
- [5] BENBOUHENNI H., BOUDJEMA Z., Speed regulator and hysteresis based on artificial intelligence techniques of three-level DTC for induction motor, Acta Electrotechnica et Informatica, 17(4) (2017) 50-56.
- [6] BENBOUHENNI H., 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, 5(1) (2018) 680-696.
- [7] YOUB L., CRACIUNESCU A., Etude comparative entre la commande vectorielle à flux orienté et la commande directe du couple de la machine asynchrone, U.P.B. Sci. Bull., Séries C, 69(2) (2007).
- [8] DAILI Y., " *Contrôle de la fréquence de commutation des l'hystérésis utilisées dans les commandes d'une machine à induction* ", Mémoire de Magister, université de Batna, (2007).
- [9] BENALIA L., " *Commande en tension des moteurs à induction double alimentés*, Mémoire de Magister, université de Batna, (2010).
- [10] ZEGUEB B., " *Commande d'une machine synchrone à aimants permanents sans capteur de vitesse utilisation d'un observateur non linéaire* ", Mémoire de Magister, université de Batna, (2008).
- [11] AMEUR A., " *Commande sans capteur de vitesse par DTC d'une machine synchrone à aimants permanents dotée d'un observateur d'ordre complet à modes glissants* ", Mémoire de Magister, université de Batna, (2005).
- [12] KERRACH A. et KORICHI A., " *Commande DTC-SVM prédictive d'un moteur asynchrone à cage sans capteur mécanique* ", Mémoire Master Académique, université Kasdi Merbah Ouargla, (2013).
- [13] NGUYEN Ngac-Ky, " *Approche neuromimétique pour l'identification et la commande des systèmes électriques: application au filtrage actif et aux actionneurs synchrones* ", Thèse Doctorat, université de haute -Alsace, Ecole Doctorate Jean-Henri Lambert, (2010).
- [14] ChaIBA A., " *Commande de la machine asynchrone à double alimentation par des techniques de l'intelligence artificielle* ", Thèse de Doctorat en Sciences, université de Batna, (2010).
- [15] CHENNAI S., " *Etude, modélisation et commande des filtres actifs: Apport des techniques de l'intelligence artificielle* ", Thèse de Doctorat en Science, université Mohamed Khider, Biskra, (2013).
- [16] KABACHE N., " *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 Doctorat, université de Boumerdes, (2007).
- [17] BA-RAZZOUK A., " *Estimation par réseaux de neurones de la constante de temps rotorique de machines asynchrones* ", Thèse Doctorat, université de Montréal, (1998).
- [18] BERKANI A., " *Metaheuristiques hybride réseaux de neurones artificielle -PSO du recuit simulé pour la commande d'un procédé industriel non-linéaire* ", Mémoire de Magister, université de Batna, (2013).
- [19] NABTI K., " *Stratégie de commande et techniques intelligentes appliquées aux machines de type synchrone* ", Thèse de Doctorat, université Mentouri Constantine, (2010).
- [20] MELIANI B., " *Application des techniques intelligentes à la commande d'une machine asynchrone double étoile associée à un convertisseur matriciel* ", Thèse de Doctorat en Sciences, université Djillali liabes de Sidi Bel Abbes, (2014).
- [21] MOUALDIA A., " *Stratégies de commande DTC-SVM et DPC appliquées à une MADA utilisée pour la production d'énergie éolienne*", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, (2014).