

Nouvelle approche de la commande DTC modifié par les techniques de l'intelligence artificielle d'une machine asynchrone

Habib BENBOUHENNI^{1*}

¹ Département de Génie Électrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Oran, Algeria

Résumé : Cet article présente une amélioration de la commande directe du couple modifié (DTC-M) d'une machine asynchrone (1Mw) alimentée par onduleur de tension à deux niveaux, cependant cette commande a quelques inconvénients tels que: les forts ondulations du couple électromagnétique, et du flux statorique. Une solution à ce problème consiste à modifier la table de commutation de la commande DTC modifiée, et associer à la commande DTC modifiée, des techniques de commande modernes. J'ai proposé quatre stratégies de la commande DTC modifiée, basées sur des techniques de l'intelligence artificielle. En visualisation les résultats de simulation en utilisant le langage MATLAB pour les stratégies proposées. Les ondulations du flux, et du couple seront évaluées et comparées. Comme résultats la stratégie 2 proposée, basée sur les techniques de l'intelligence artificielle, est très performante par rapport à d'autres stratégies proposées.

Mots clés: Machine asynchrone, DTC Modifié, THD, Contrôleur PI-flou, Régulateurs à hystérésis neuronale

1. Introduction

La machine à induction connaît un succès croissant depuis deux décennies en remplaçant progressivement les machines à courant continu et synchrones dans de nombreuses applications industrielles et dans les transports. Ce succès acquis par la machine à induction s'explique par sa conception robuste réduisant les frais de maintenance, par son coût relativement moindre par rapport aux autres machines électriques et également par l'augmentation des capacités de calcul des microprocesseurs permettant de réaliser une commande performante [1].

Pour contourner les problèmes de sensibilité aux variations paramétriques vécu par la commande vectorielle, on a considéré d'autres méthodes de commande dans lesquelles le flux et le couple électromagnétique sont estimés à partir des seules grandeurs électriques accessibles au stator et ceci sans le recours à des capteurs mécaniques, parmi ces méthodes, la commande directe du couple, basée sur l'orientation du flux statorique et qui est introduite en 1985 par Takahashi et Depenbrock [2].

Le principe de base de DTC est qu'on doit choisir directement des vecteurs de tension statorique selon les différences entre les références du couple et du flux statorique et leurs valeurs réelles. Les contrôleurs du courant suivi d'un comparateur à MLI ne sont pas utilisés dans des systèmes de commande DTC et les paramètres de la machine ne sont pas utilisés également exception faite pour la résistance statorique du moteur. Ainsi la DTC possède l'avantage d'être moins dépendante des paramètres de la machine, de fournir une réponse du couple plus rapide en comparaison au contrôle du couple via des contrôleurs de courant à modulation de largeur d'impulsions, et une configuration plus simple [3].

* Corresponding author.

E-mail: habib0264@gmail.com (Benbouhenni H.).

Address: BP 50B Ouled Fares, Chlef, Algeria

Un des objectifs de la commande directe du couple est de réduire au maximum la fréquence de commutation de l'onduleur. Un autre est que le fonctionnement n'a pas besoin d'une tension continue constante à l'entrée de l'onduleur. D'autre part, cette loi de commande en couple s'adapte par nature à l'absence de capteur mécanique connecté à l'arbre du moteur (vitesse, position). Des travaux se sont donc multipliés sur ce sujet, initialement basés sur les principes de contrôle énoncés par I. Takahashi et donnant lieu à diverses évolutions des stratégies.

Aujourd'hui, plusieurs efforts sont employés pour améliorer la commande DTC pour réduire l'ondulation du couple et fixer la fréquence de commutation de l'onduleur [1]. De façon générale, l'absence de maîtrise des harmoniques de couple a généré de nombreux problèmes liés à la compatibilité électromagnétique de l'équipement. Tel que le niveau parfois excessif de bruit audible et l'excitation de certains modes mécaniques résonants (problème des couples pulsatoires) pouvant entraîner un vieillissement précoce du système. Certains travaux se sont donc consacrés à l'obtention d'une meilleure maîtrise des harmoniques et/ou de la fréquence de commutation des interrupteurs de l'onduleur [3].

La technique DTC classique implique un fonctionnement de l'onduleur 2 niveaux standard avec une fréquence de commutation variable, parfois élevée et incompatible avec des applications de forte puissance du fait du niveau des pertes par commutation. D'autre part, les récentes structures de convertisseurs continu - alternatif multiniveaux semblent bien adaptés pour des applications de forte puissance, du fait qu'elles permettent l'utilisation des semi-conducteurs rapides (IGBT) sans risque sur la sûreté de fonctionnement du système.

Les techniques de l'intelligence artificielle telles que les systèmes experts, la logique floue, les algorithmes génétiques et les réseaux de neurones artificiels (RNA) ont été largement utilisées dans le domaine de l'électronique de puissance et de la commande des machines électriques. L'objectif recherché dans l'utilisation des techniques de l'intelligence artificielle est d'arriver à l'émulation du raisonnement humain sur un DSP (Digital Signal Processor) (processeur de signal numérique) de telle sorte que le système complet commande - machine puisse penser et réagir intelligemment comme un être humain. Un système commande - machine équipé d'un algorithme développant un calcul par intelligence est appelé système intelligent. En effet, un système intelligent possède la caractéristique d'apprentissage, d'auto-organisation et d'auto-adaptation. Les techniques de l'intelligence artificielle ont été discutées pendant longtemps et le seront également à l'avenir.

La commande DTC modifiée présente plusieurs inconvénients, telque l'obtention d'une fréquence de commutation variable, les ondulations du couple et du flux, les fluctuations des puissances et les harmoniques des courants dans le régime transitoire et permanent, à cause de l'utilisation des comparateurs à hystérésis et les tables de commutation. Pour cela, nous avons proposé d'étudier dans cet article la commande DTC modifiée basés sur les réseaux de neurones et la logique floue, pour améliorer les performances de la commande DTC modifiée, ou les comparateurs classique remplacer par contrôleur neuronale, et le contrôleur PI classique de la vitesse remplacer par contrôleur flou, afin de bien conduire les grandeurs de sortie de la MAS vers leurs valeurs de référence durant une période de temps fixé. Des simulations numériques sont présentées pour tester les performances de méthode proposée.

2. modele de la machine asynchrone

On admet que la machine est symétrique, que son induction a une répartition sinusoïdale dans l'entrefer et qu'elle n'est pas soumise à la saturation. Dans le referential d'axe lié au stator ($\alpha\beta$), la représentation d'état de la machine asynchrone dans un repère lié au stator [4, 5].

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ Y = C.X \end{cases} \quad (1)$$

Avec:

$$X=[I_{\alpha s} \quad I_{\beta s} \quad \Phi_{\alpha s} \quad \Phi_{\beta s}]^T, U=[v_{\alpha s} \quad v_{\beta s} \quad 0 \quad 0]^T$$

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

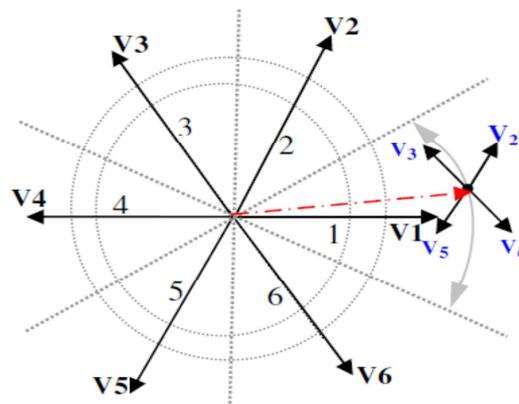
$$A = \begin{bmatrix} \frac{\lambda}{\sigma} & 0 & \frac{\sigma}{T_r} K & K w_r \\ 0 & \frac{\lambda}{\sigma} & -K w_r & \frac{\sigma K}{T_r} \\ \frac{M}{T_r} & 0 & -1 & -w_r \\ 0 & \frac{M}{T_r} & w_r & -1 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 &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

Le couple électromagnétique peut alors s'exprimer comme suit:

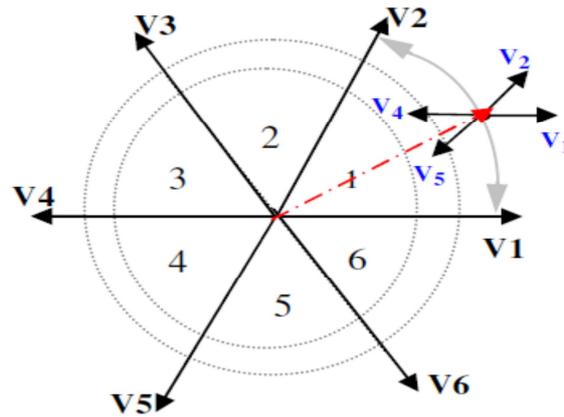
$$c_{em} = \frac{3}{2} p [\Phi_{\alpha s} i_{\beta s} - \Phi_{\beta s} i_{\alpha s}] \quad (2)$$

3. DTC modifié

Dans cette partie l'idée est de changer le tableau de vérité à partir d'une modification des secteurs de la DTC classique, tels qu'au lieu de prendre le premier secteur de -30° à 30° , il est pris de 0° à 60° . La Fig.1b montré cette nouvelle position des zones, dans ce cas-ci, les états non utilisés dans la première zone seront et au lieu de et de [6, 7].



a)



b)

Fig. 1 a) DTC classique, b) DTC Modifié

Le Tableau.1 illustre la comparaison entre les deux technique de contrôle DTC [6, 7]:

TABLEAU 1
COMPORTEMENT DE LA DTC CLASSIQUE ET LA DTC MODIFIE

	DTC classique	DTC modifiée
V₁	-30°→30° couple ambiguïté	-60°→0° (cem↑, Φ↑)
V₂	30°→90° (cem↑, Φ↑)	0°→60° (cem↑, Φ↑)
V₃	90°→180° (cem↑, Φ↓)	60°→120 flux ambiguïté
V₄	-180°→180° couple ambiguïté	120°→180° (cem↑, Φ↓)
V₅	-180°→90° (cem↓, Φ↓)	-120°→-180° (cem↓, Φ↓)
V₆	-90°→-30° (cem↓, Φ↑)	-60°→-120° couple ambiguïté

Il peut voir que les états V₁ et V₄, ne sont pas employés dans le DTC classique (DTC_C) parce qu'ils peuvent augmenter ou diminuer le couple au même secteur selon si la position est dans les premiers ou les deuxième 30°. Dans la DTC modifiée (DTC_M), V₃ et V₆ ne sont pas utilisés. Cependant, dans la DTC modifié l'ambiguïté se trouve dans le couple au lieu du flux comme dans la DTC classique [7].

Le synoptique de la commande DTC modifié est représenté dans la Fig. 2.

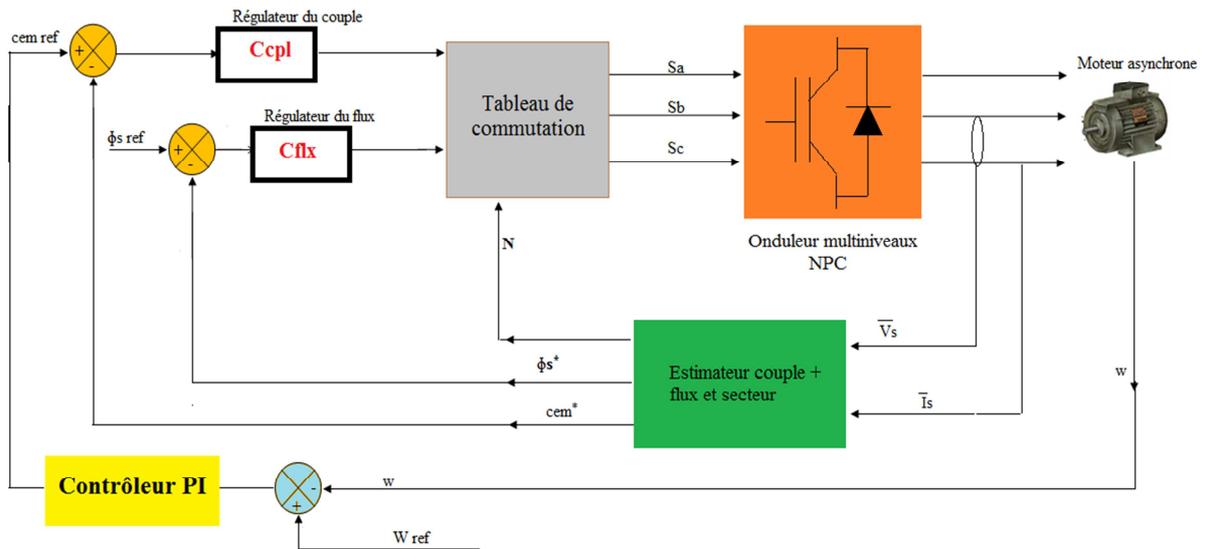


Fig. 2 Structure de base de la commande directe du couple modifié.

L'avantage principal de DTC modifié est d'avoir une fréquence de commutation constante. Par conséquent, il est préférable de perdre l'usage de deux états pour réduire et maîtriser la fréquence de commutation [6, 8]. Les stratégies proposées de la commande DTC modifié est donnée par les Tableaux 3- 6.

TABLEAU 2

TABLE DE VERITE DE LA DTC MODIFIE CLASSIQUE

N		1	2	3	4	5	6
		Cflx	CcpI				
1	1	2	3	4	5	6	1
	0	7	0	7	0	7	0
	-1	1	2	3	4	5	6
0	1	4	5	6	1	2	3
	0	7	0	7	0	7	0
	-1	5	6	1	2	3	4

TABLEAU 3

TABLE DE VERITE DE STRATEGIE 1 DE LA DTC MODIFIE

N		1	2	3	4	5	6
		Cflx	CcpI				
1	1	2	3	4	5	6	1
	0	7	0	7	0	7	0
	-1	7	0	7	0	7	0
0	1	4	5	6	1	2	3
	0	7	0	7	0	7	0
	-1	7	0	7	0	7	0

TABLEAU 4
TABLE DE VERITE DE STRATEGIE 2 DE LA DTC MODIFIE

N		1	2	3	4	5	6
Cflx	Ccpl						
1	1	2	3	4	5	6	1
	0	2	3	4	5	6	1
	-1	1	2	3	4	5	6
0	1	4	5	6	1	2	3
	0	4	5	6	1	2	3
	-1	5	6	1	2	3	4

TABLEAU 5
TABLE DE VERITE DE STRATEGIE 3 DE LA DTC MODIFIE

N		1	2	3	4	5	6
Cflx	Ccpl						
1	1	2	3	4	5	6	1
	0	1	2	3	4	5	6
	-1	1	2	3	4	5	6
0	1	4	5	6	1	2	3
	0	5	6	1	2	3	4
	-1	5	6	1	2	3	4

TABLEAU 6
TABLE DE VERITE DE STRATEGIE 4 DE LA DTC MODIFIE

N		1	2	3	4	5	6
Cflx	Ccpl						
1	1	2	3	4	5	6	1
	0	7	0	7	0	7	0
	-1	7	0	7	0	7	0
0	1	4	5	6	1	2	3
	0	5	6	1	2	3	4
	-1	5	6	1	2	3	4

3. DTC modifié basés sur les techniques de l’intelligence artificiels

3.1 Principe de base de réseau de neurone

L’origine des réseaux de neurones vient de l’essai de modélisation mathématique du cerveau humain les premiers travaux datent de 1943 et sont l’oeuvre de MM [9]. Mac Culloch et Pitts.

Ils supposent que l’impulsion nerveuse est le résultat d’un calcul simple effectué par chaque neurone et que la pensée née grâce à l’effet collectif d’un réseau de neurone interconnecté (voir la Fig.3). Ils ont connu des débuts prometteurs vers la fin des années 50, mais le manque d’approfondissement de la théorie a gelé ces travaux jusqu’aux années 80 [10].

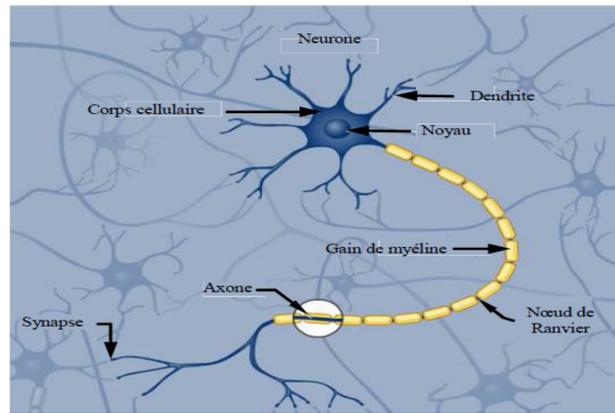


Fig. 3 Modèle d'un neurone biologique.

Les réseaux de neurones artificiels sont des structures organisées autour d'un ensemble de cellules (les neurones) interconnectées selon une certaine architecture par des liens pondérés et modifiables lors d'une procédure appelée apprentissage.

Le neurone formel (Fig. 4) est constitué de trois éléments de base [11]:

- un ensemble de liaisons, chacune caractérisée par un poids w_j (ou coefficient synaptique) correspondant à l'efficacité de la connexion, et une entrée x_0 particulière toujours égale à 1, qui permet d'ajouter de la flexibilité au réseau en faisant varier le seuil de déclenchement du neurone par l'ajustement de son poids, couramment appelé biais et noté b , lors de l'apprentissage et pour tel que: $w_0 = b$.
- un additionneur ou unité de sommation pour sommer les signaux pondérés.
- une fonction d'activation à seuil pour limiter l'amplitude de la valeur de sortie.

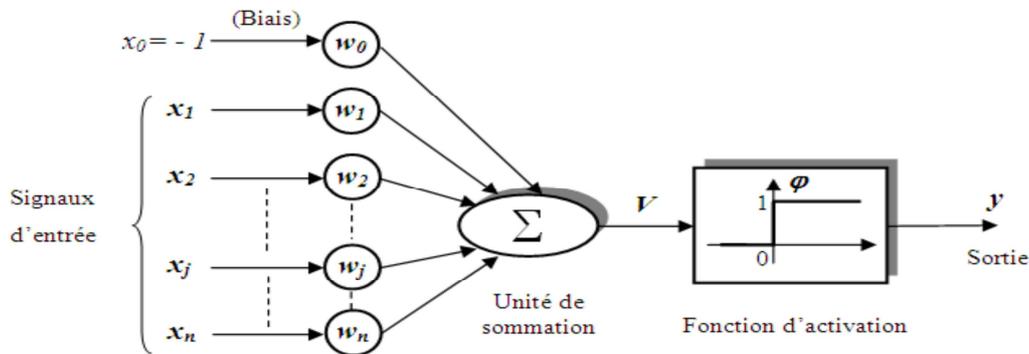


Fig. 4 Modèle du neurone formel de Mac Culloch et Pitts (avec biais)

Il s'agit de réaliser l'apprentissage d'un réseau de neurones identification RNI, à partir des séquences des entrées de commande appliquées et des sorties mesurées.

3.2 Principe de base de la logique floue

La logique floue repose sur la théorie des ensembles flous développée par Zadeh [12]. La logique floue est très populaire dans la commande des systèmes puis qu'elle offre des performances nettement supérieures aux méthodes classiques de commandes [13]. La logique floue permet la formalisation des imprécisions dues à une connaissance globale d'un système très complexe et l'expression du comportement d'un système par des mots. Elle permet donc la standardisation de la description d'un système et du traitement de données aussi bien numériques qu'exprimées symboliquement par des qualifications linguistiques. On conçoit l'intérêt de cette approche dans la régulation ou

l'asservissement des processus industriels, pour lesquelles les informations sont souvent imprécises incertaines, voire seulement quantitative [14].

Dans la logique floue, les algorithmes conventionnels sont remplacés par une série de règles linguistiques: Si, alors,...Elle se prête très bien au réglage et à la commande de processus. La logique floue est basée sur les éléments suivants [15]:

- Les variables linguistiques.
- Les inférences.
- Les opérateurs.

Par opposition à un régulateur classique, Le régulateur flou ne traite pas une relation mathématique bien définie (*Algorithme de réglage*), mais utilisé des inférences avec plusieurs règles, se basant sur des variables linguistiques, La majorité des régulateurs flous développées utilisant le schéma simple proposé par E. Mamdani. Ce schéma est illustré par la Fig.5 [16].

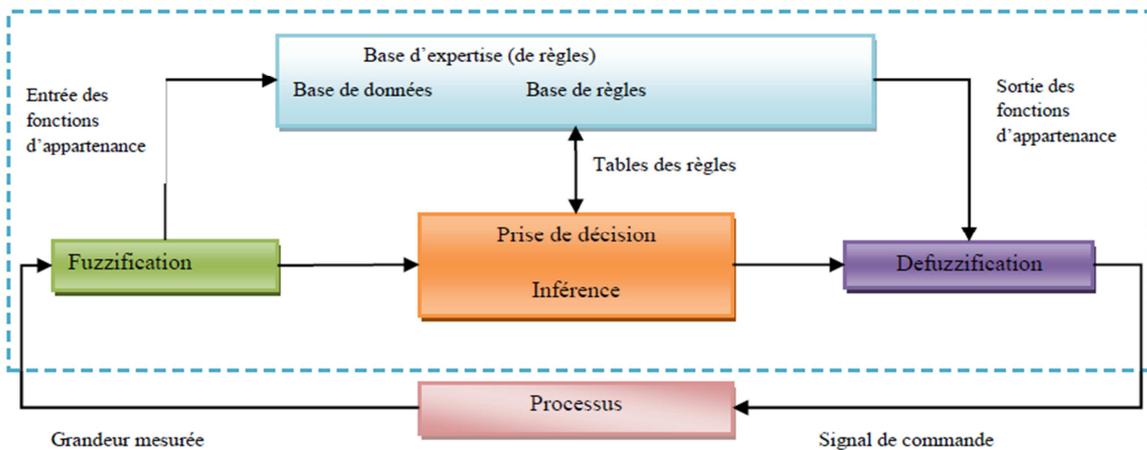


Fig. 5 Structure d'un régulateur flou.

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 ramené à un système asservi, voir figure suivante [15]:

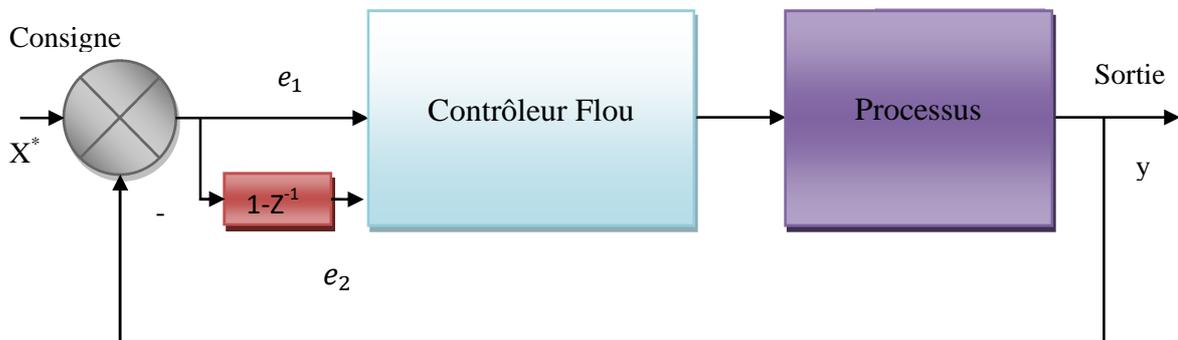


Fig. 6 Architecture d'une commande floue

A partir de la valeur de la variable de sortie s , le contrôleur flux permet de déterminer la commande approprié 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 floues [8].

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

$$e_1(k) = X^*(k) - Y(k) \tag{3}$$

$$e_2(k) = Y(k) - Y(k - 1) \tag{4}$$

Avec*: représenté les grandeurs de commande

La structure de la commande directe du couple modifiée basée sur les techniques de l'intelligence artificielle (logique floue, réseaux de neurones) de la machine asynchrone est représentée par la Fig.7. Dont les comparateurs à hystérésis remplacé par un contrôleur neuronal, et le régulateur PI classique de la vitesse remplacé par un contrôleur flou.

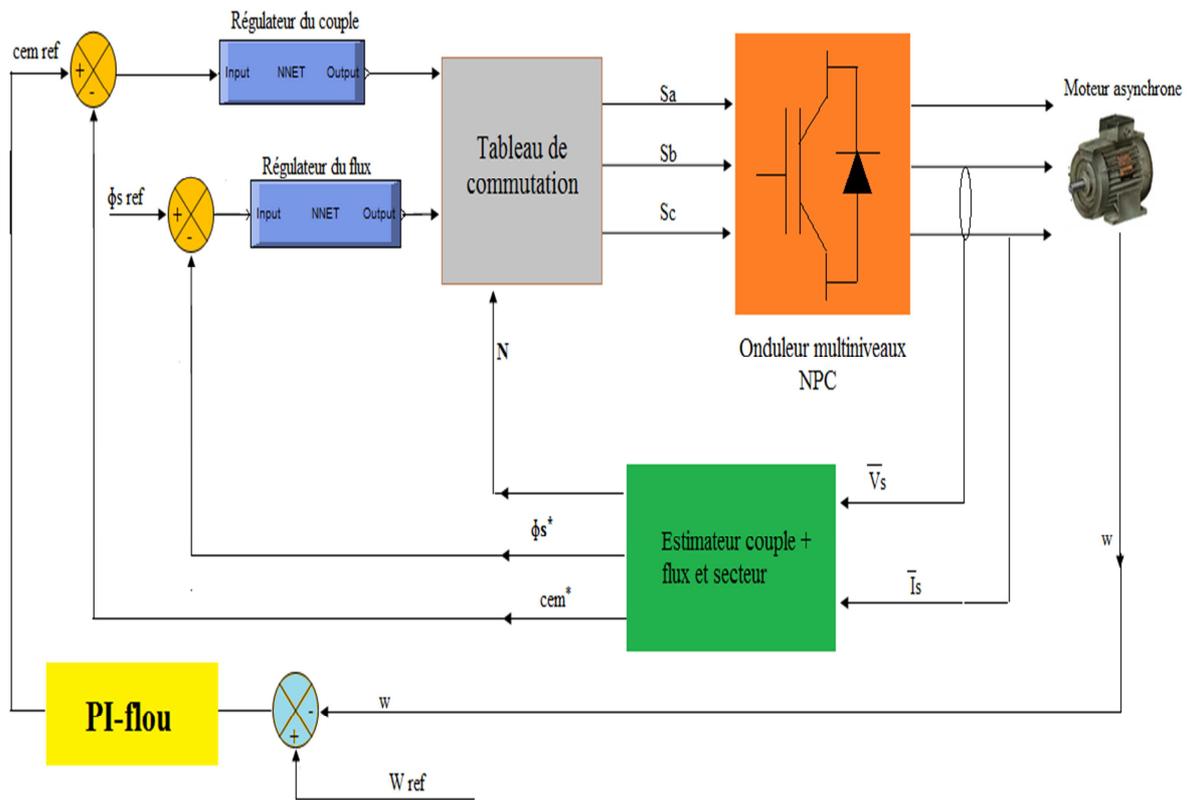


Fig. 7 commande DTC modifié basée sur les techniques de l'intelligence artificielle.

Pour générer le contrôleur RNA par Matlab/Simulink ou on à choisi 4 couches cachées et 1 couches de sorties avec les fonctions d'activation respectivement de type « tansig » et « purelin » pour le contrôleur du couple (voir tableau 7), et 3 couches cachées pour contrôleur du flux (voir tableau 8).

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 7
Propriétés du LM du contrôleur du couple

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

Tableau 8
Propriétés du LM du contrôleur 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)	500
Coef d'accélération de convergence (mc)	0.9
Erreur (goal)	0
Fonctions d'activation	Tansig, Purelin

La Fig. 8 illustre le schéma interne du contrôleur neuronale du couple de la commande DTC modifié

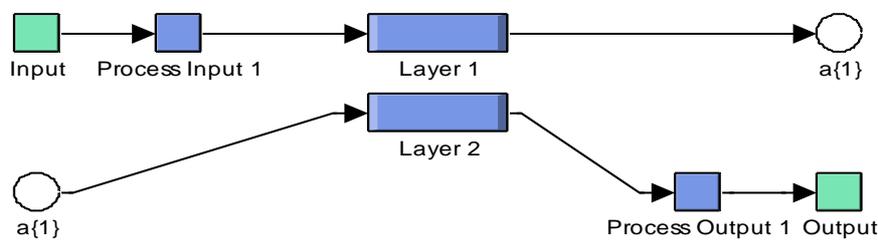


Fig. 8 Schéma interne du controleur neuronale du couple

La Fig. 9 illustre le schéma interne de layer 1

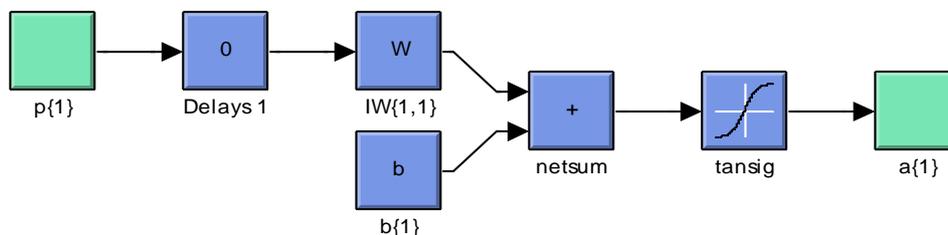


Fig. 9 Schéma interne de layer 1

La boucle pour le réglage de la vitesse mécanique de la machine Ω contient un régulateur flou dont les variables linguistiques sont en entrée, l'erreur et la variation de l'erreur (e et Δe) et en sortie, la variation de la commande ΔU , U représente la variation de T_e pour le régulateur de la vitesse [8].

Ou 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 (Fig.10). 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 Fig.11 [8].

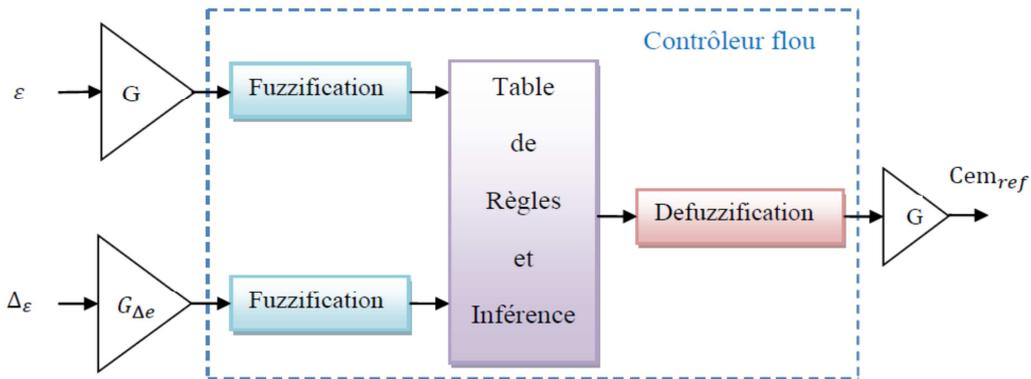
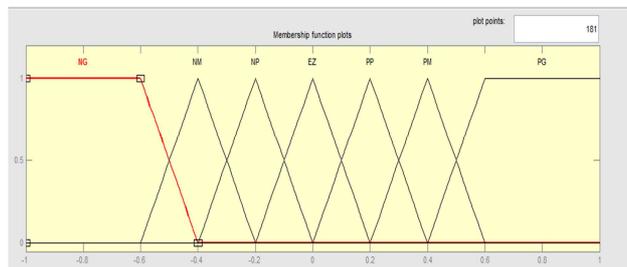
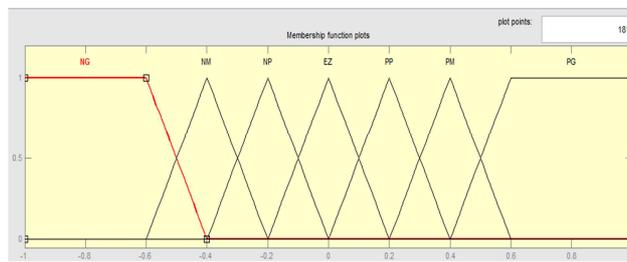


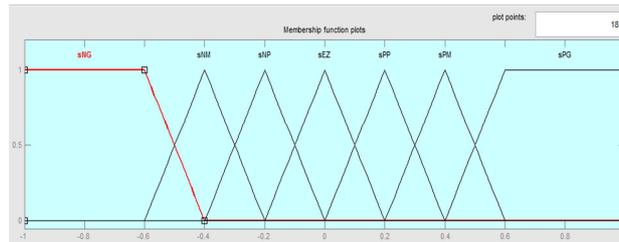
Fig. 10 Schéma bloc de régulation de la vitesse à contrôleur flou.



a) Erreur



b) Variation de l'erreur



c) Commande

Fig. 11 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'entrés 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 [8]. Ces considérations nous ont conduits à adapter un tableau qui résume les règles choisies.

Tableau 9

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

4. 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 $\pm 0.05 \text{ N.m}$ et celle du comparateur du flux à $\pm 0.001 \text{ wb}$.

Le couple de référence C_{ref} est récupère à la sortie d'un correcteur PI, et flux référence $\Phi_{\text{sref}} = 3.6 \text{ wb}$.

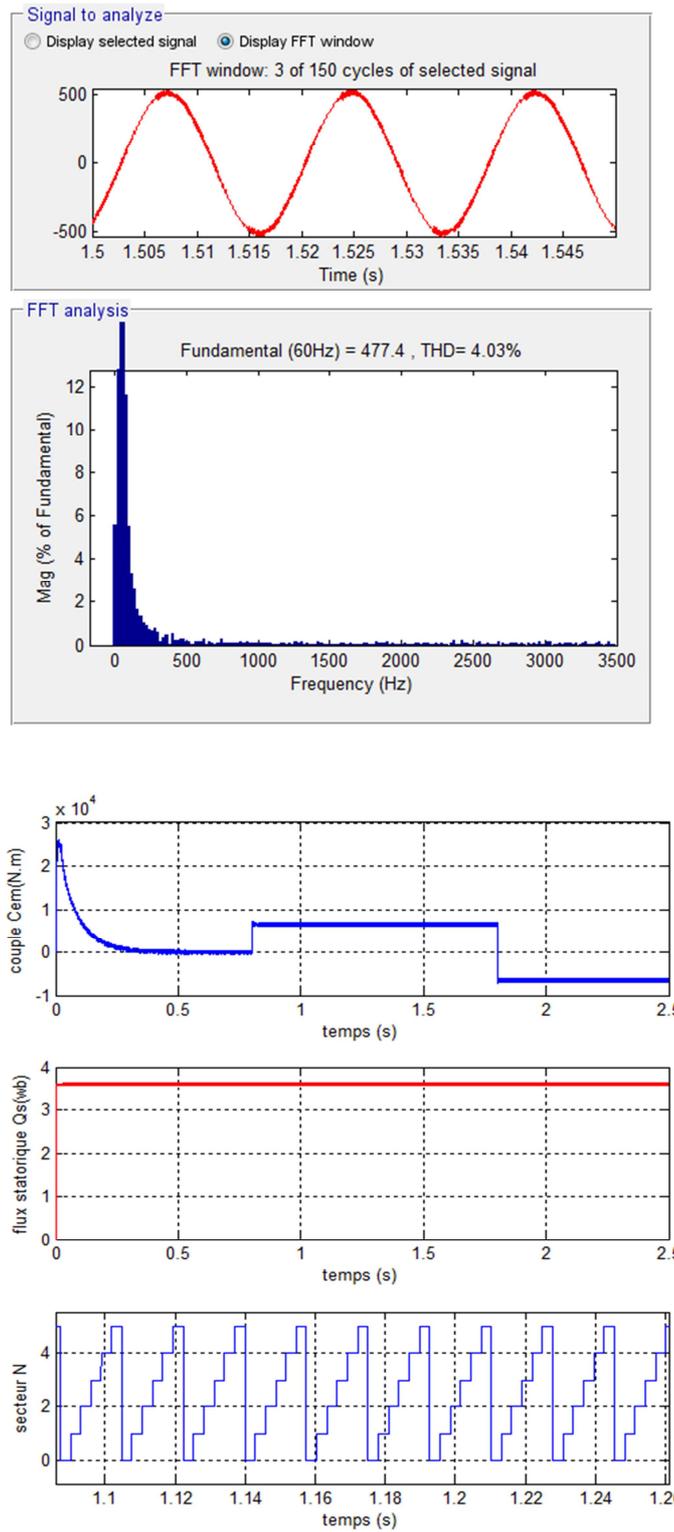


Fig. 12 Performances de la commande DTC modifié classique appliquée à la MAS

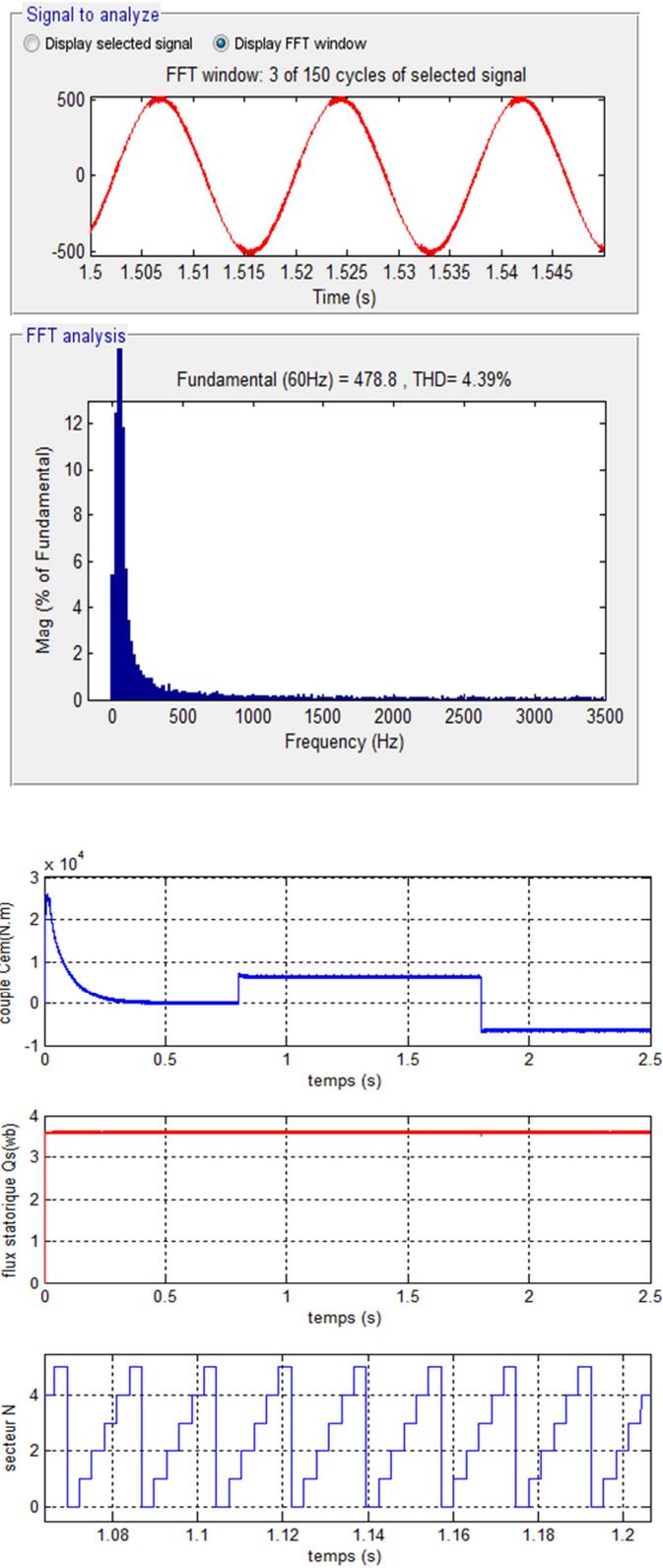


Fig. 13 Performances de stratégie 1 de la commande DTC modifié appliquée à la MAS

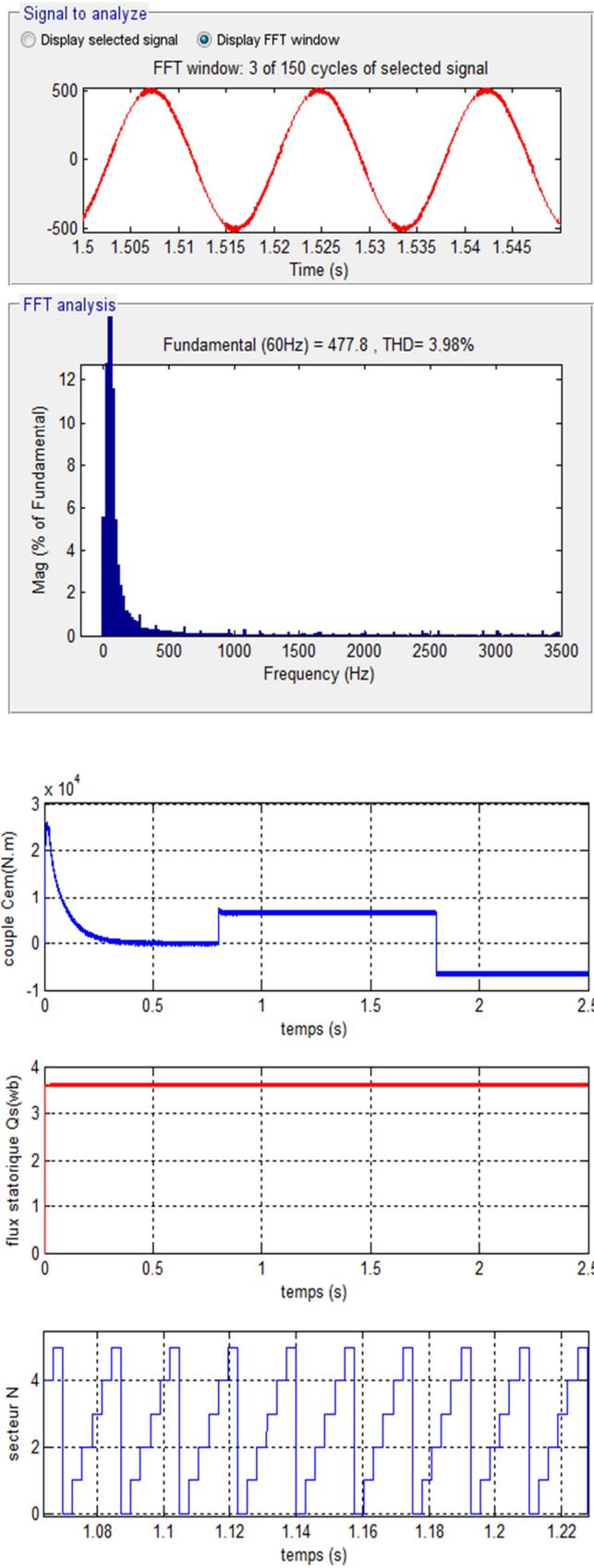


Fig. 14 Performances de stratégie 2 de la commande DTC modifié appliquée à la MAS

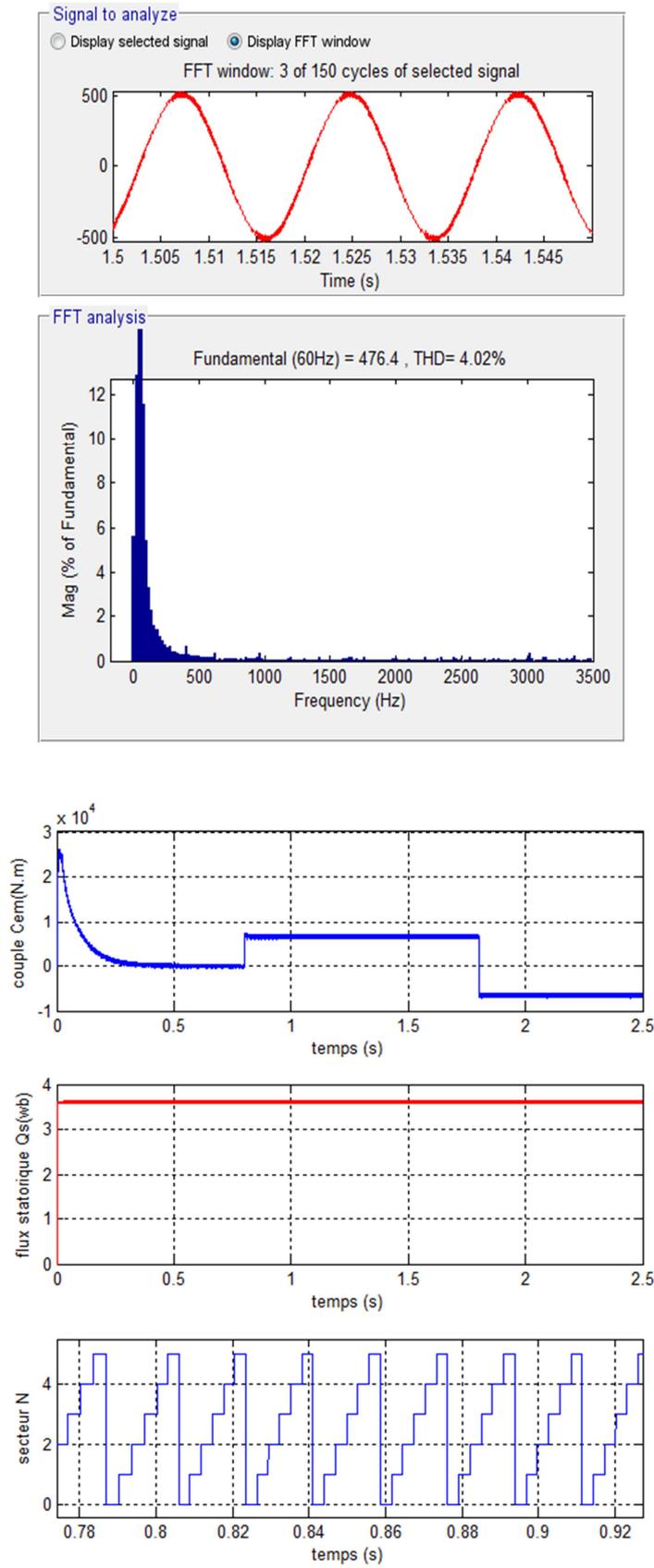


Fig. 15 Performances de stratégie 3 de la commande DTC modifié appliquée à la MAS

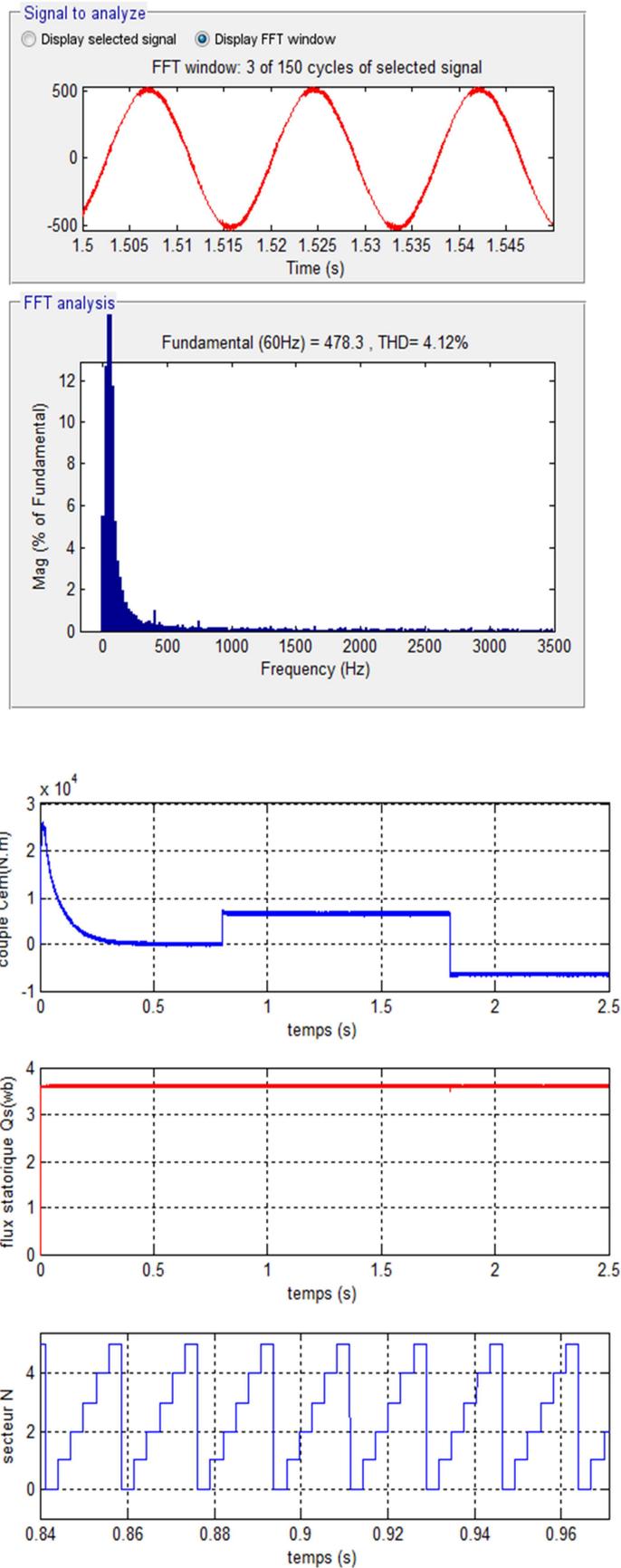
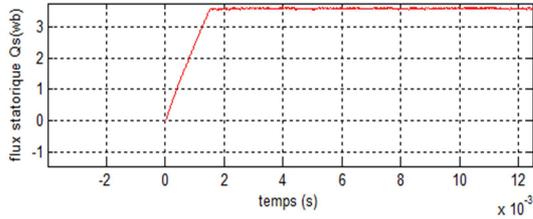
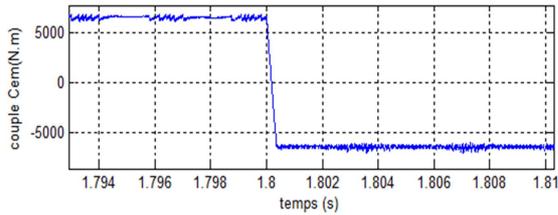


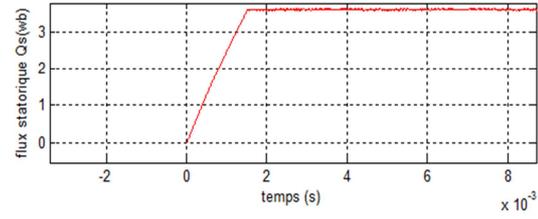
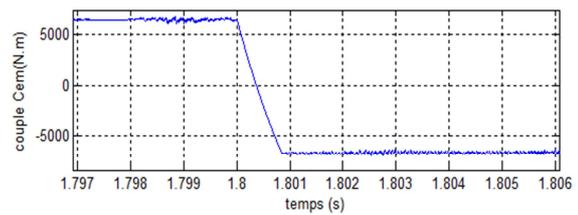
Fig. 16 Performances de stratégie 4 de la commande DTC modifié appliquée à la MAS

5. Etudes comparatives entre les stratégies proposées de la commande DTC modifié à base des techniques de l'intelligence artificielle

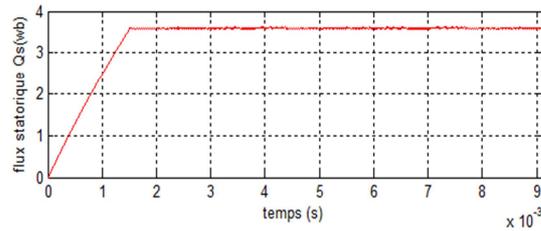
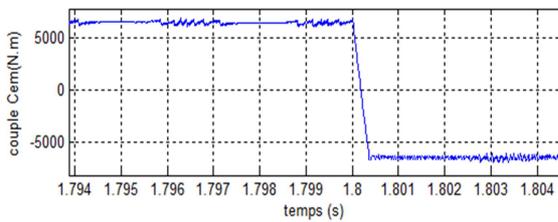
Dans le but de connaître la meilleure stratégie de la commande DTC modifié de la MAS, une étude comparative est indispensable entre les stratégies proposées. La figure 17 représente les zooms du couple électromagnétique, et flux statorique obtenues précédemment par simulation des stratégies proposées de la commande DTC modifié basée sur les techniques de l'intelligence artificielle stabilisante de la machine asynchrone de forte puissance.



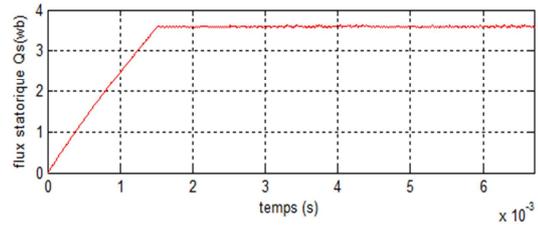
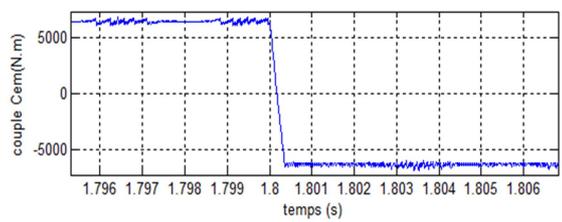
a) DTC modifié classique



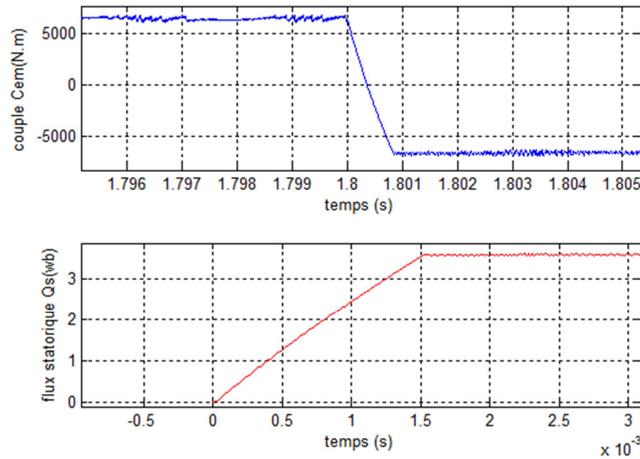
b) Stratégie 1



c) Stratégie 2



d) Stratégie 3



e) Stratégie 4

Fig. 17 Zooms obtenues par les stratégies proposés de la commande DTC modifié de la MAS

Le tableau suivant présenté le résumé de comparaison entre les stratégies proposées de la commande DTC modifié basée sur les techniques de l’intelligence artificielle.

TABLEAU 9

ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES STRATEGIES PROPOSES BASEE SUR LES TECHNIQUES DE L’INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

	I_{sa} THD (%)	Minimisation du ondulations du couple	Minimisation du ondulations du flux
DTC Modifié classique	4.02	Plus ondulations	Plus ondulations
Stratégie 1	4.39	bonne	bonne
Stratégie 2	3.98	Trés bonne	Trés bonne
Stratégie 3	4.02	bonne	bonne
Stratégie 4	4.12	bonne	bonne

On conclue d’après, la Fig. 17 et Tableau 9 que la stratégie 2 proposé de la commande DTC modifié basés sur les techniques de l’intelligence artificielle est plus performante que les autres stratégies proposée de la commande DTC modifié de la MAS (1 MW) alimentée par onduleur à deux niveaux.

D’un autre coté, une bonne poursuite de vitesse pour tous les stratégies de commandes. La stratégie 2 proposé de la commande DTC modifié basés sur techniques de l’intelligence artificielle garantit une meilleure qualité de la forme d’onde du courant statorique par rapport les autres stratégies,

5. Conclusion

Dans cet article, j’ai présenté déférentes stratégies de la commande DTC modifié d’une machine asynchrone de forte puissance (1MW) alimentée par onduleur de tension à deux niveaux basés sur les techniques d’intelligences artificiels. Dans le but d’améliorer les performances de la commande DTC modifié (réductions d’ondulations du couple et du flux, temps de réponse, THD du courant statorique), des testes de simulation de la commande par variation et inversement du couple de la charge, ont été présenté, les résultats obtenu montrent que la stratégie 2 proposé basés sur les techniques de l’intelligence artificielle est très performante par rapport a la commande DTC modifié classique et d’autre stratégies proposées.

6. Références

1. H. Chaikh, M. Khafallah, A. Saad, M. Es-Saadi, K. Chikh, "Evaluation des performances des commandes vectorielles de la machine à induction," *Revue de Génie Industriel*, ISSN: 1313-8871, 2011, 6, 23-32.
2. R. Zaiter, "Commande directe du couple DTC d'une machine asynchrone avec défaut," Mémoire de Magister, université Mohamed Khider, Biskra, 2013.
3. M. Nefsi, A. Massoum, A. Meroufel, P. Wira, "Contrôle directe du couple de la machine asynchrone basé sur MLI vectorielle discrétisée (DSVM-DTC)," *Acta Electrotehnica*, Vol. 53, Number 1, 2012.
4. B. Farid, "Etude des différents techniques de commande des onduleurs à MLI associés à une machine asynchrone," Mémoire de magister, université Badji Mokhtar, Annaba, 2006
5. B. Houria, "Application de la MLI vectorielle aux onduleurs multiniveaux à base de GTO et d'IGBT," Mémoire de Magister, université Badji Mokhtar, Annaba, 2010.
6. T. Riad, "Contribution à la commande directe de couple d'une machine asynchrone triphasée," Thèse de Doctorat, université Mentouri, Constantine, 2008.
7. D. Ahmed, "Etude des différentes stratégies de commande non linéaire de la machine asynchrone avec estimation du flux et de la vitesse," Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Oran, 2015.
8. 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
9. B. Sebti, "Commande par DTC d'un moteur asynchrone apport des réseaux de neurones," Mémoire de Magister, université de Batna, 2013.
10. 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 de Sidi Bel Abbés, 2015.
11. N. benharir, M. Zerikat, S. Chekroun, A. Mechernene, "Approche adaptative d'une commande neuronale sans capteur d'un moteur asynchrone associée à un observateur par mode glissant," *Communication Science & Technology (COST)*, N^o. 14, January 2014.
12. L. Bagli, "Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques," Thèse de Doctorat, université Henri Poincaré –Nancy 1, 1999.
13. N. Khalil, "Stratégie de commande et techniques Intelligentes appliquées aux machines de type synchrone," Thèse de Doctorat, université Mentouri, Constantine, 2010.
14. 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.
15. 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.
16. K. Mohamed, "Amélioration des performances de régulation d'une machine asynchrone à double alimentation par la technique Neuro-Flou," Mémoire Master Académique, université Kasdi Merbah Ouara, 2013.