

Apport des onduleurs multiniveaux dans la commande DTC basée sur l'intelligence artificielle de la machine asynchrone de forte puissance

Habib BENBOUHENNI*

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

Résumé. Cet article a pour objectif, de comparer des performances de deux commandes directes du couple (DTC) à 36 secteurs d'un moteur asynchrone (MAS) de forte puissance (1MW) à base des techniques de l'intelligence artificielle (La logique floue et les réseaux de neurones). Le MAS alimentée par deux types de l'onduleur NPC de tension, onduleur NPC à 5 niveaux et onduleur NPC à 7 niveaux. L'association de ces deux techniques a permis de donner de grandes performances avec une réponse dynamique rapide sans dépassement et moins d'ondulations du couple électromagnétique. Les éléments théoriques et les résultats de simulation sont présentes et discutés. Comme résultats les ondulations du flux et du couple de la commande DTC-7 niveaux à base des techniques de l'intelligence artificielle réduit considérablement l'ondulations du couple et du flux par rapport à l'ondulations du couple et du flux de la commande DTC-5 niveaux à base des techniques de l'intelligence artificielle.

Mots clés: Moteur asynchrone; Commande directe du couple; Réseaux de neurones; Logique floue; Onduleur NPC à 5 niveaux; Onduleur NPC à 7 niveaux; 36 secteurs.

1. Introduction

Actuellement, les machines asynchrones (MAS) sont considérées comme l'outil de conversion électromécanique le plus utilisé dans le milieu industriel. Cet engouement pour ce type de machine est justifié par sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et sa robustesse mécanique. Des applications de la MAS à vitesse variable, ont vu le jour dans divers domaine en l'occurrence l'aéronautique, la robotique et dans certains mécanismes industriels à haute précision [1].

Depuis une trentaine d'années, plusieurs stratégies de commande ont été développées pour pouvoir réaliser un contrôle découplé de la machine à induction. 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 évoluée.

Les plus récentes démarches dans cette direction sont celles regroupées sous le terme de commande directe du couple (DTC) [2].

Les structures de contrôle DTC des machines sont apparues dans la deuxième moitié des années 1980, exactement en 1986, par les deux chercheurs Takahashi et Depenbrock comme concurrentielle des méthodes classiques.

* Corresponding author.

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

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

Ces derniers sont basés sur une alimentation par modulation de largeur d'impulsions, et sur un découplage du flux statorique et du couple moteur. Le but était d'éliminer le bloc de modulation et les boucles internes en les remplaçant par un tableau de commutation dont les entrées sont les erreurs entre les valeurs de référence et les mesures effectuées [3].

Le principe de la commande DTC est la régulation directe du couple électromagnétique de la MAS, par l'application des différents vecteurs de tension à l'onduleur, qui détermine son état. Les deux variables contrôlées sont: le flux statorique et le couple électromagnétique qui sont habituellement commandés par des comparateurs à hystérésis. Il s'agit de maintenir les grandeurs de flux et le couple à l'intérieur de ces bandes d'hystérésis. La sortie de ces régulateurs détermine le vecteur de tension optimal à appliqué à chaque instant de commutation [3]. Cette technique appliqué un fonctionnement de l'onduleur à deux niveaux standard avec une fréquence de commande variable parfois élevée et incompatible avec des applications forte puissance du fait du niveau des pertes par commutation [4].

L'application de la commande DTC apporte une solution très intéressante aux problèmes de robustesse et de dynamique. Cependant cette commande à quelques inconvénients tels que: la non maîtrise de la fréquence de commutation, taille et complexité des tables de commutation et les forts ondulations du couple et du flux statorique. Une solution à ce problème consiste à associer à la commande DTC des techniques de commande basées sur l'intelligence artificielle.

Les techniques d'intelligence artificielle (IA) ont une importance évidente pour traiter les systèmes non linéaires incertains, non modélisables ou mal identifiés. Etant donné, que le MAS fait partie de ces systèmes, il a constitué, durant les dernières années, un domaine très fertile pour tester et appliquer ces techniques. Parmi les techniques de l'intelligence artificielle qui ont été largement utilisées dans la commande du moteur asynchrone on trouve la logique floue et les réseaux de neurones artificiels [5].

Les commandes de vitesse basées sur l'intelligence artificielle qui n'exigent pas la connaissance d'un modèle mathématique sont récemment proposées [6]. L'emploi des réseaux de neurones plutôt que des techniques classiques pour commander des systèmes complexes peut se justifier par la simplicité de mise en œuvre (peu d'analyse mathématique préliminaire), par la capacité d'approximation universelle prouvée, par la possibilité de considérer le processus comme une boîte noire et par la possibilité de débiter la conduite avec un minimum d'informations sur le processus. L'utilisation alors des réseaux de neurones pour l'asservissement du moteur asynchrone est largement justifiée [7].

La logique floue est très populaire dans la commande des systèmes puis qu'elle offre des performances nettement supérieures aux méthodes classiques de commandes [8]. 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 [6].

Cet Article présente deux commandes DTC à 36 secteurs d'un moteur asynchrone à base des techniques de l'intelligence artificielle. La commande DTC-5 niveaux et DTC-7 niveaux à base des réseaux de neurones et la logique floue. Le but attendu est d'évaluer la commande qui donne la meilleure réponse dynamique de la machine asynchrone.

2. Onduleur NPC à cinq niveaux

Un onduleur NPC de tension triphasé à cinq niveaux, est composée de huit interrupteurs commandés, qui sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant, et de six diodes de maintien connectées tout au long du bus continu [9].

La structure triphasée de l'onduleur NPC à Cinq niveaux de tensions est présentée sur la figure 1.

L'onduleur est alimenté par une source continue E , que quatre condensateurs de valeurs égales se partagent pour donner quatre sources distinctes de tension $E/4$ [10]. Dans la figure 2, on distingue 60 positions discrètes, distribuées sur quatre hexagones, en plus d'une position au centre de l'hexagone. Les 61 positions du vecteur de tension de sortie divise le diagramme vectoriel en six secteurs triangulaires.

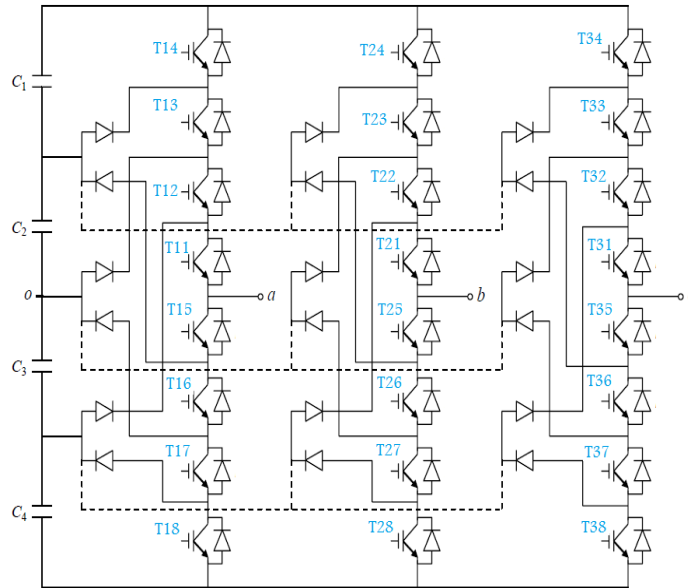


Fig. 1 – Schéma d’un onduleur NPC à cinq niveaux

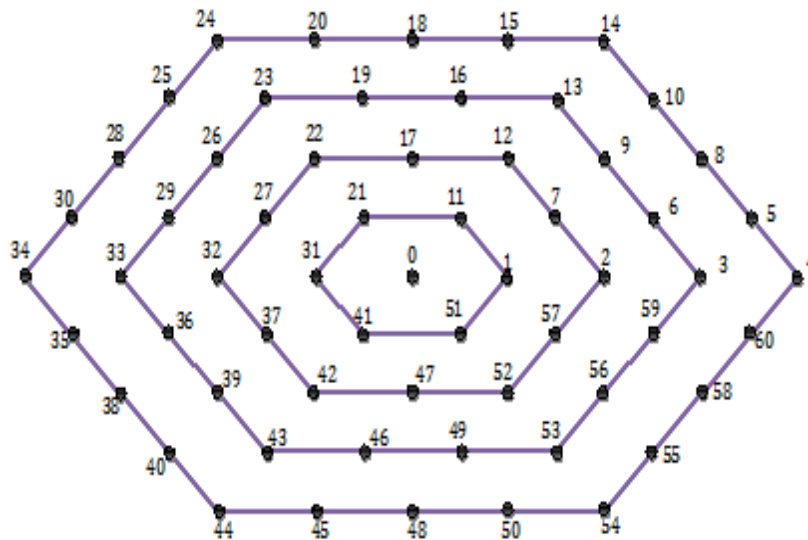


Fig. 2 – Représentation vectorielle des tensions de l’onduleur à cinq niveaux.

3. Onduleur NPC à sept niveaux

La Fig.3 donne une représentation schématique de l’onduleur NPC de tension à sept niveaux. L’onduleur NPC à 7 niveaux est composé de 12 interrupteurs (bras A), et de 6 diodes de maintien. Cet onduleur alimenté par 6 condensateurs.

Le nombre du vecteurs de tension disponibles en sortie de l'onduleur NPC à sept niveaux est supérieur au nombre des vecteurs délivrés par un onduleur à cinq niveaux. Le schéma spatial de tension dans le plan ($\alpha - \beta$) est représenté par la Fig. 4.

Le centre correspond aux sept configurations (000, 111, 222, 333, 444, 555, 666). L'augmentation du nombre des vecteurs de tension nous offre la possibilité d'avoir un contrôle du flux et du couple plus précis que lorsque l'on utilise un onduleur à cinq niveaux [11, 12].

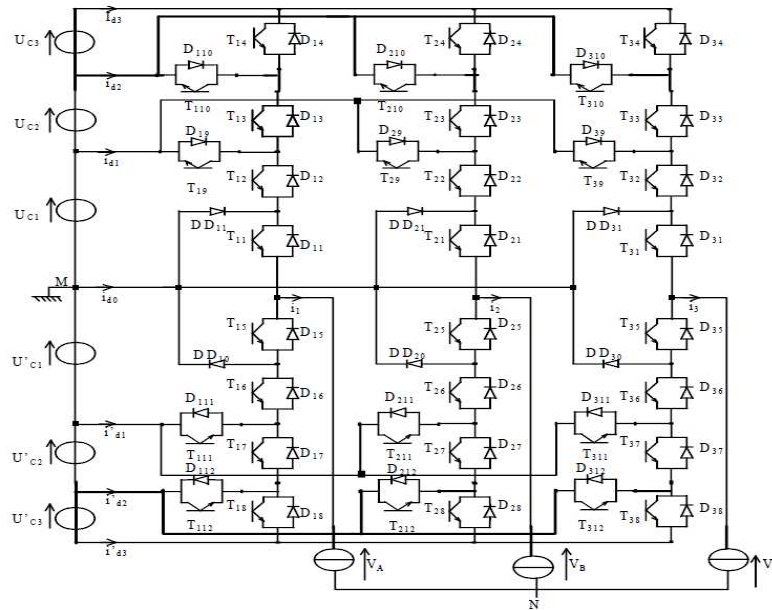


Fig. 3 – Onduleur triphasé à sept niveaux à structure NPC

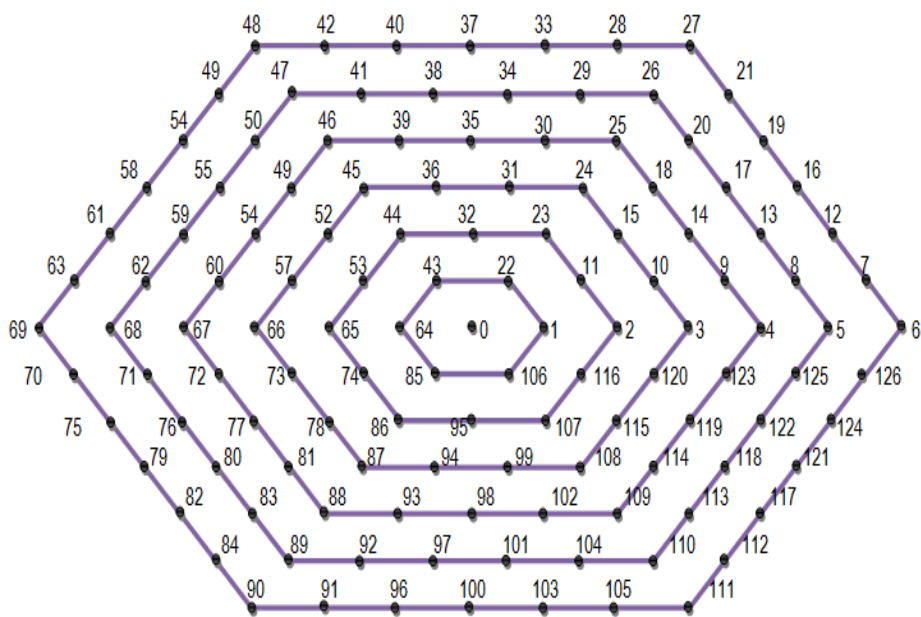


Fig. 4 – Distribution des séquences des niveaux de phase par les différents vecteurs fournis par un onduleur NPC à sept niveaux

4. Commande DTC

La commande DTC permet de calculer les grandeurs de contrôle que sont le flux statorique et le couple électromagnétique à partir des seules grandeurs liées au stator et ceci sans l'intervention de capteurs mécaniques.

Le principe de la commande consiste à maintenir le flux statorique dans une fourchette. Le synoptique de la commande DTC est représenté dans la Fig. 5 [9, 13].

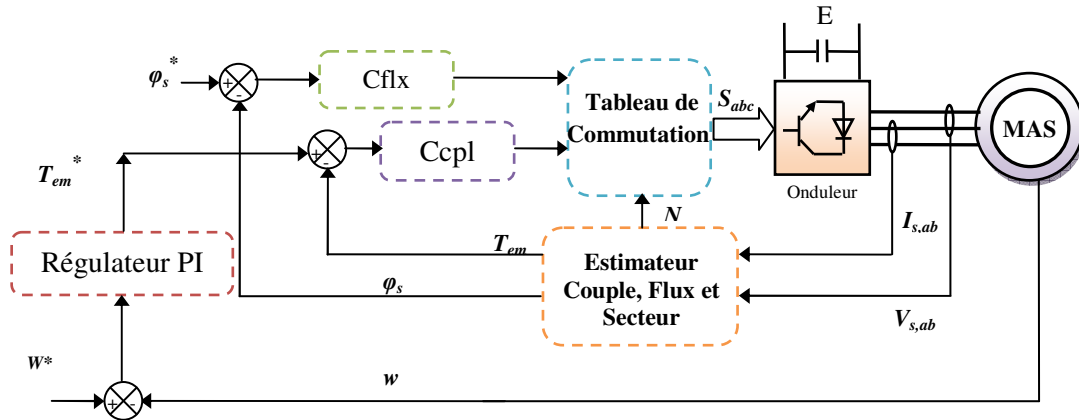


Fig. 5 – Structure de base de la commande directe du couple

Les valeurs estimés du couple C_{em} et du flux statorique ϕ_s sont comparés respectivement à leurs valeurs de références C_{em}^* et ϕ_s^* , les résultats de la comparaison forment les entrées des comparateurs à cycle d’hystérésis.

Le flux statorique ϕ_s sont calculés à partir des équations suivantes [14, 15]:

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

Ou:

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

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

L’angle θ_s est calculé à partir de:

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

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

$$c_{em} = \frac{3}{2} p \left[\Phi_{\alpha s} i_{\beta s} - \Phi_{\beta s} i_{\alpha s} \right] \tag{6}$$

Afin de réaliser le contrôle direct du flux et du couple de la MAS alimentée par deux types de l’onduleur NPC de tension à cinq et sept niveaux, la construction des tables de commutation est basée sur le tableau de commutation de l’onduleur à deux niveaux.

Les tableaux des vérités proposées et donnée par le Tableau 1 pour l’onduleur NPC à cinq niveaux, et le Tableau 2 pour l’onduleur NPC à sept niveaux.

TABLEAU 1
TABLE DE VERITE DE L'ONDULEUR NPC A CINQ NIVEAUX

N	Cflx					
	1			0		
	Ccpl					
	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

5. Commande DTC à base des techniques de l'intelligence artificielle

La commande DTC à base des techniques de l'intelligence artificielle, pour améliorer les performances des commandes DTC, où la table de commutation sont remplacé par un contrôleur neuronale, et le contrôleur classique de vitesse (PI) sont remplacé par un contrôleur flou, afin de bien conduire les grandeurs de sortie de la MAS vers leurs valeurs de référence durant une période de temps fixe [16].

TABLEAU 2
TABLE DE VERITE DE L'ONDULEUR NPC A SEPT NIVEAUX

N		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Cflx	Ccpl																		
1	3	27	28	33	37	40	42	48	49	54	58	61	63	69	70	75	79	82	84
	2	21	27	28	33	37	40	42	48	49	54	58	61	63	69	70	75	79	82
	1	19	21	27	28	33	37	40	42	48	49	54	58	61	63	69	70	75	79
	0	16	19	21	27	28	33	37	40	42	48	49	54	58	61	63	69	70	75
	-1	12	16	19	21	27	28	33	37	40	42	48	49	54	58	61	63	69	70
	-2	7	12	16	19	21	27	28	33	37	40	42	48	49	54	58	61	63	69
	-3	6	7	12	16	19	21	27	28	33	37	40	42	48	49	54	58	61	63
0	3	37	40	42	48	49	54	58	61	63	69	70	75	79	82	84	90	91	96
	2	37	40	42	48	49	54	58	61	63	69	70	75	79	82	84	90	91	96
	1	33	37	40	42	48	49	54	58	61	63	69	70	75	79	82	84	90	91
	0	33	37	40	42	48	49	54	58	61	63	69	70	75	79	82	84	90	91
	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-2	100	103	105	111	112	117	121	124	126	6	7	12	16	19	21	27	28	33
	-3	100	103	105	111	112	117	121	124	126	6	7	12	16	19	21	27	28	33
-1	3	48	49	54	58	61	63	69	70	75	79	82	84	90	91	96	100	103	105
	2	47	50	55	59	62	68	68	71	76	80	83	89	89	92	97	101	104	110
	1	46	46	51	56	56	60	67	67	72	77	77	81	88	88	93	98	98	102
	0	5	8	13	17	20	26	26	29	34	38	41	47	47	50	55	59	62	68
	-1	26	26	29	34	38	41	47	47	50	55	59	62	68	68	71	76	80	83
	-2	89	92	97	101	104	110	110	113	118	122	125	5	5	8	13	17	20	26
	-3	90	91	96	100	103	105	111	112	117	121	124	126	6	7	12	16	19	21

19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
90	91	96	100	103	105	111	112	117	121	124	126	6	7	12	16	19	21
84	90	91	96	100	103	105	111	112	117	121	124	126	6	7	12	16	19
82	84	90	91	96	100	103	105	111	112	117	121	124	126	6	7	12	16
79	82	84	90	91	96	100	103	105	111	112	117	121	124	126	6	7	12
75	79	82	84	90	91	96	100	103	105	111	112	117	121	124	126	6	7
70	75	79	82	84	90	91	96	100	103	105	111	112	117	121	124	126	6
96	70	75	79	82	84	90	91	96	100	103	105	111	112	117	121	124	126
100	103	105	111	112	117	121	124	126	6	7	12	16	19	21	27	28	33
100	103	105	111	112	117	121	124	126	6	7	12	16	19	21	27	28	33
96	100	103	105	111	112	117	121	124	126	6	7	12	16	19	21	27	28
96	100	103	105	111	112	117	121	124	126	6	7	12	16	19	21	27	28
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	40	42	48	49	54	58	61	63	69	70	75	79	82	84	90	91	96
37	40	42	48	49	54	58	61	63	69	70	75	79	82	84	90	91	96
111	112	117	121	124	126	6	7	12	16	19	21	27	28	33	37	37	40
110	113	118	122	125	5	5	8	13	17	20	26	26	29	34	38	41	42
109	109	114	119	119	123	4	4	9	14	14	18	25	25	30	35	35	39
68	71	76	80	83	89	89	92	97	101	104	110	110	113	118	122	125	5
89	89	92	97	101	104	110	110	113	118	122	125	5	5	8	13	17	20
26	29	34	38	41	47	47	50	55	59	62	68	68	71	76	80	83	89
27	28	33	37	40	42	48	49	54	58	61	63	69	70	75	79	82	84

La structure de la commande DTC à base des techniques de l'intelligence artificielle de la machine asynchrone alimentée par deux types de l'onduleur NPC à cinq et à sept niveaux, est représentée par la Fig. 6.

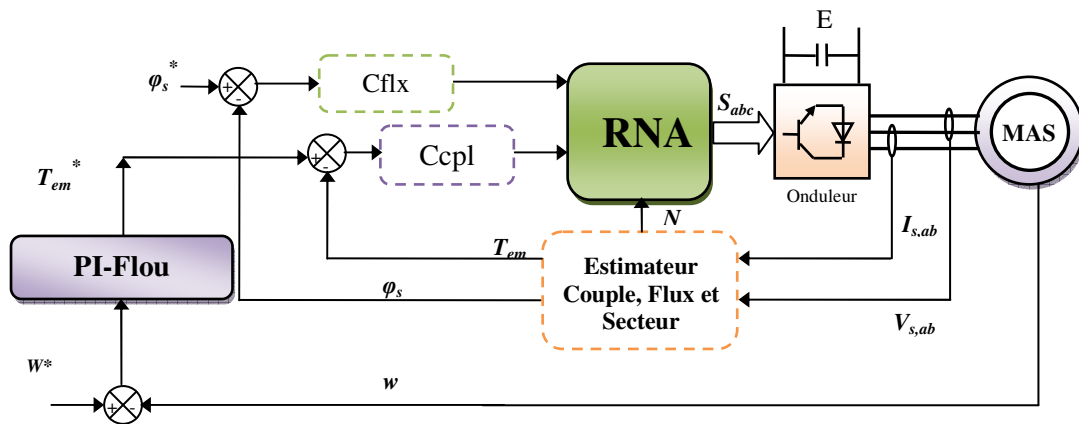


Fig. 6 – Commande DTC à base des techniques de l’intelligence artificielle

5.1 Contrôleur neuronale

Pour générer le contrôleur RNA par Matlab/Simulink ou on à choisi 30 couches cachées et 3 couches de sorties avec les fonctions d’activation respectivement de type « tansig » et « purelin » pour les deux commandes DTC proposées.

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).

Le tableau 3 résumé les propriétés du l’algorithme du LM pour les deux commandes proposées.

TABLEAU 3
PROPRIETES DU 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)	5000
Coef d’accélération de convergence (mc)	0.9
Erreur (goal)	0
Fonctions d’activation	Tansig, Purelin

Le choix de l’architecture des réseaux de neurone se fait selon l’erreur quadratique moyenne (EQM) obtenue au court de l’apprentissage [11].

La figure suivante présentée la structure du réseau de neurones pour la DTC à sept niveaux et cinq niveaux.

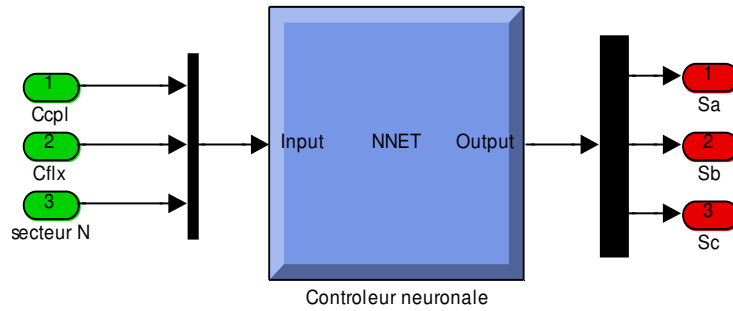


Fig. 7 – Structure des réseaux de neurones

La Fig. 8 représenté la structure interne du contrôleur neuronale de la commande DTC.

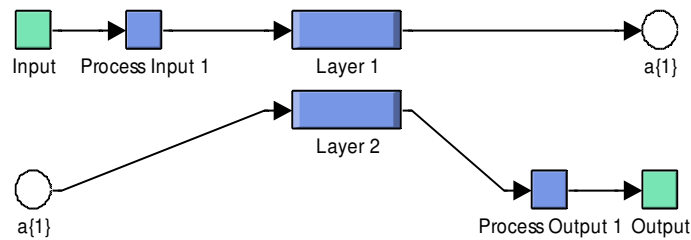


Fig. 8 – Structure interne du contrôleur neuronale

Les layers sont donnés dans les Figures. 9-10.

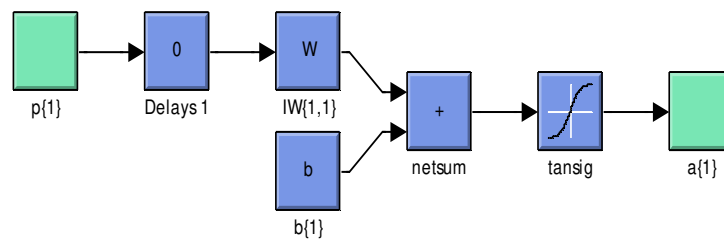


Fig. 9 – Structure interne de layer 1

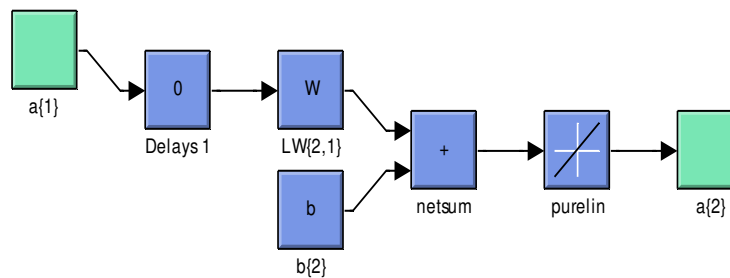


Fig. 10 – Structure interne de layer 2

5.2 Contrôleur flou

Le régulateur flou utilisé est de type Mamdani, qui est construit autour d'un organe de décision manipulant des règles subjectives et imprécises. La première étape pour la réalisation d'un régulateur flou est de choisir ses variables d'entrées et de sorties, savoir avec quels paramètres on peut obtenir la commande, et définir les univers de discours de ses variables [17].

La Fig. 11, 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 ($w_{ref} - w$), est sa sortie est le couple de référence ($C_{em ref}$).

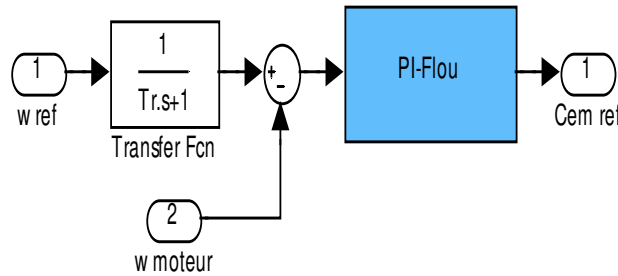


Fig. 11 – Structure du contrôleur PI-flou de la vitesse

La architecture interne du contrôleur PI-flou est donnée dans la Fig. 12.

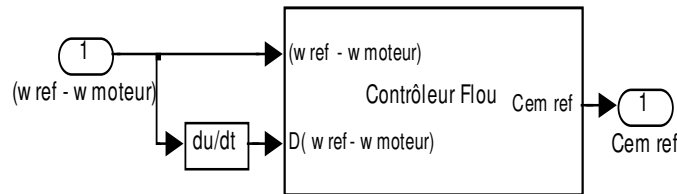


Fig. 12 – Structure interne du contrôleur PI-flou

La structure interne du contrôleur flou est donnée dans la Fig. 13.

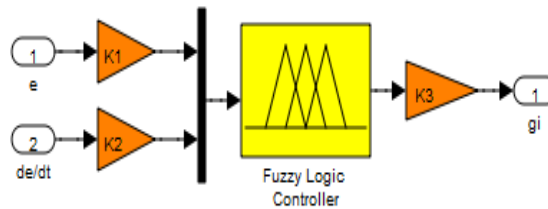


Fig. 13 – Schéma synoptique du régulateur PI-flou avec réglage

Les fonctions d'appartenance sont représentées dans la Fig. 14 [18, 19].

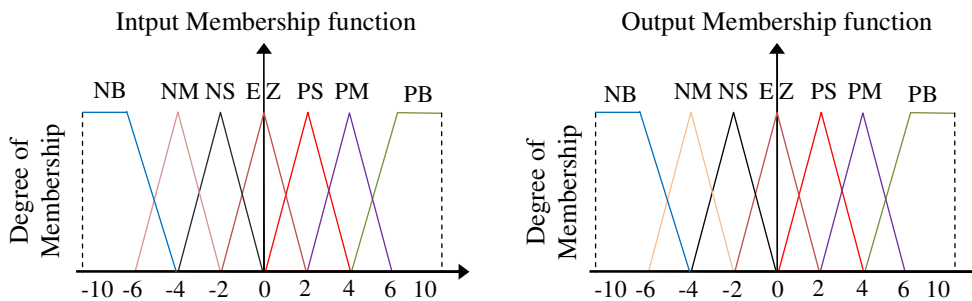


Fig. 14 – Fonctions d'appartenance à 7 ensembles

Le jeu de règles du contrôleur PI-flou à 7 ensembles est représenté dans le Tableau 4 [20, 21].

TABLEAU 4
TABLEAU DES REGLES DE COMMANDES A 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

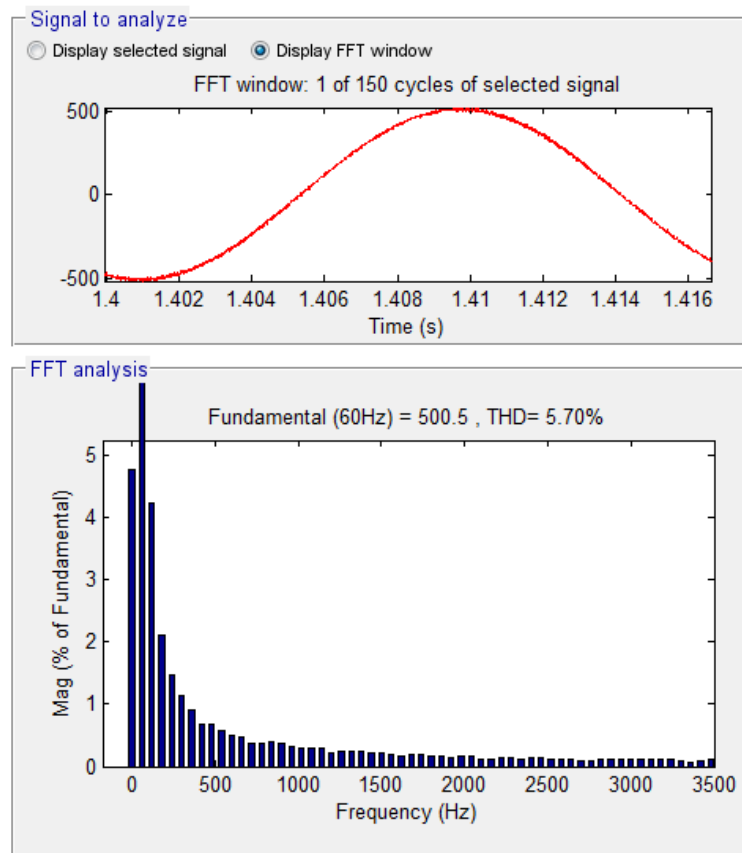
Avec: $e = w_{ref} - w$ $\Delta e = \Delta (w_{ref} - w)$

6. Résultats de simulation

Pour illustrer le fonctionnement de la commande et réaliser les études prospective, un modèle de simulation développée dans l’environnement fourni par Matlab/Simulink, une application développée dans l’environnement fourni par Matlab /Simulink.

Nous avons utilisés dans les commandes proposées les paramètres de contrôle suivante: $C_r =$ échelon variable de 6500 à -6500N.m à l’instant $t=0.8s$, $\Delta c_e = 0.05N.m$, $\Delta \phi_s = 0.001wb$, la vitesse référence $w_{ref}=1000tr/min$, une période d’échantillonnage $T_e = 50\mu s$, $\phi_{sref}=3.6wb$.

Les résultats de simulation des deux commandes proposées de la MAS sont illustrés dans les Figures 15, et 16.



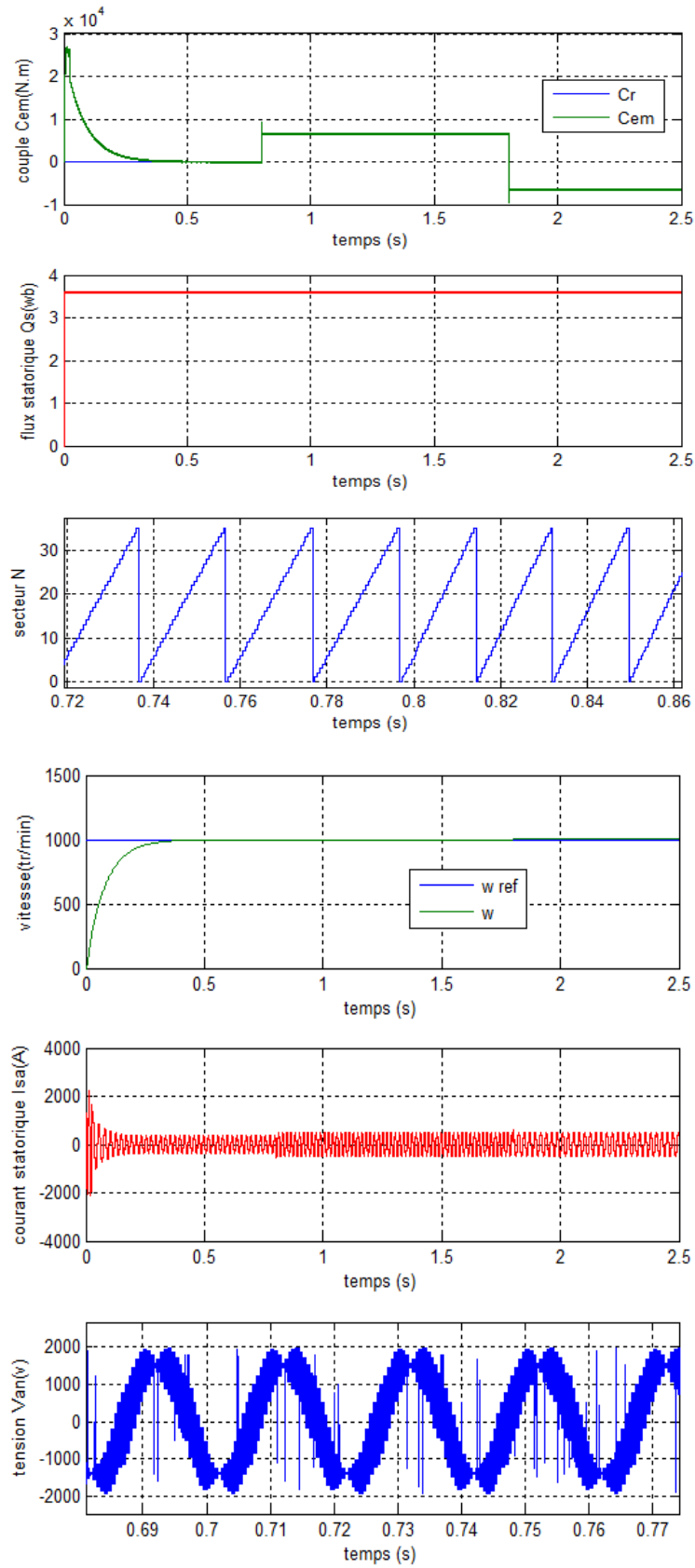
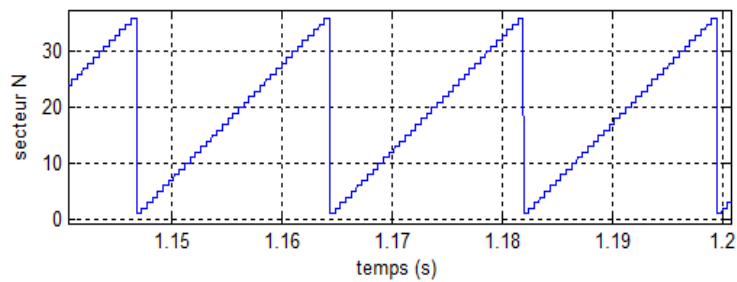
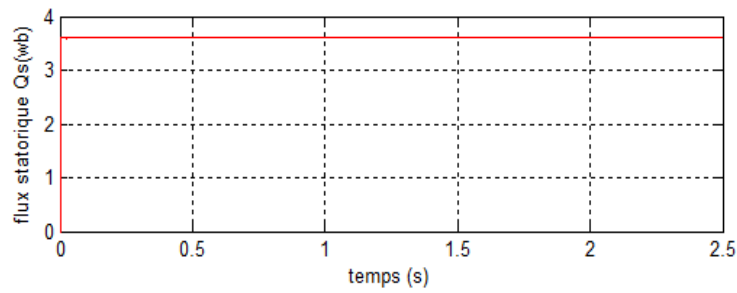
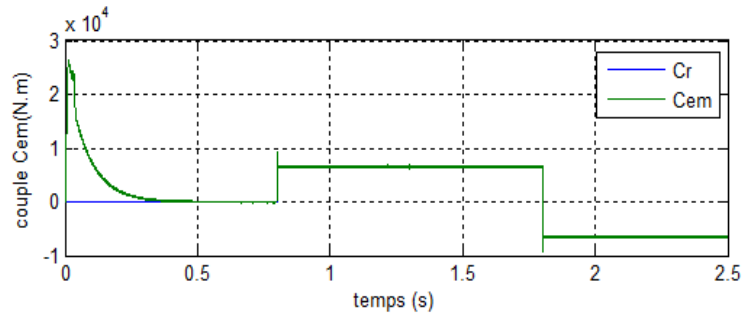
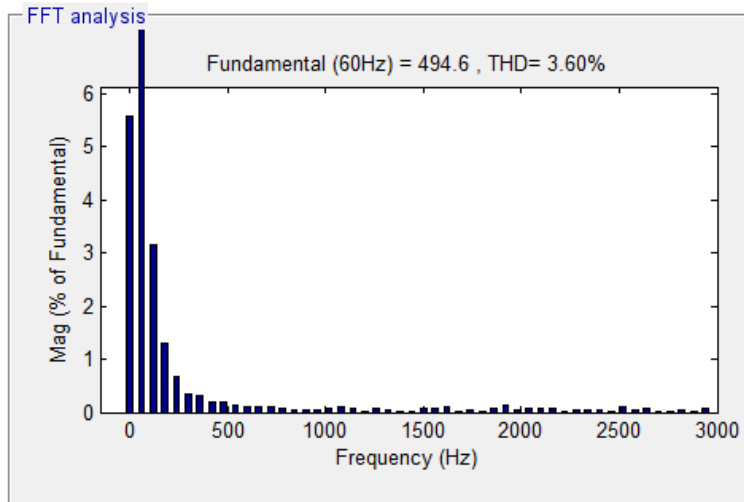
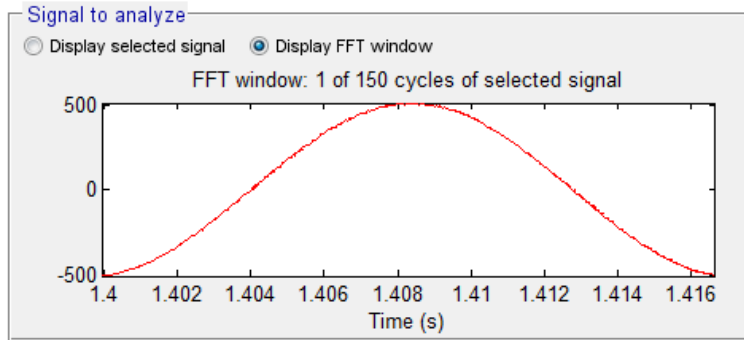


Fig. 15 – Performances de la MAS commandé par de la DTC à cinq niveaux à base des techniques de l’intelligence artificielles



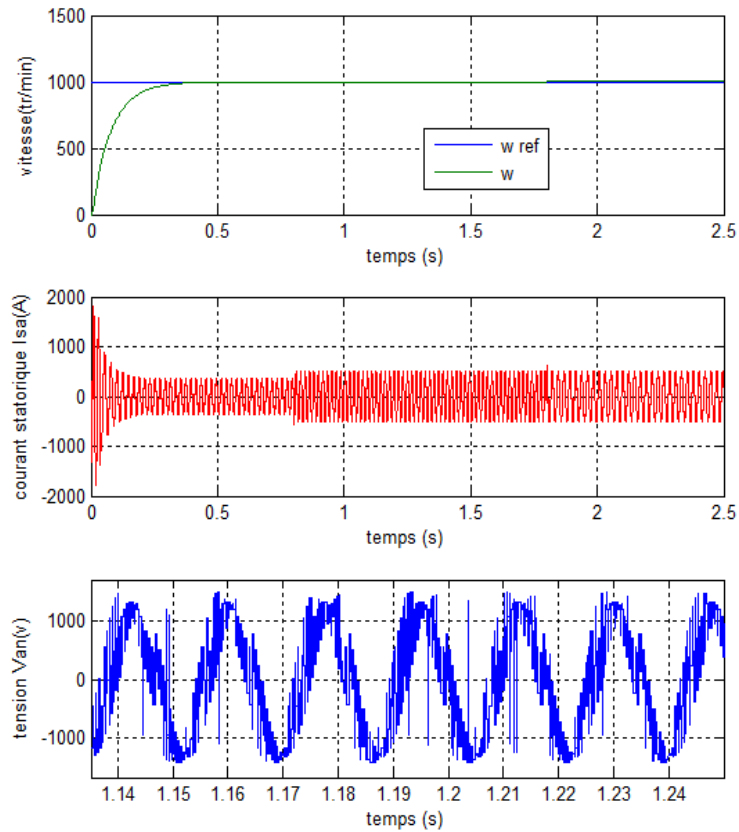
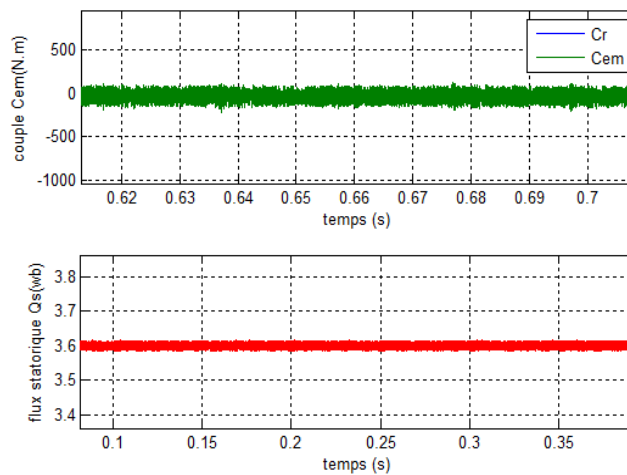
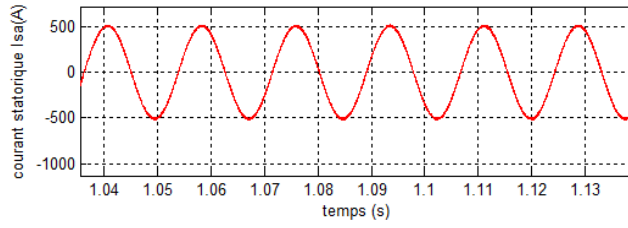


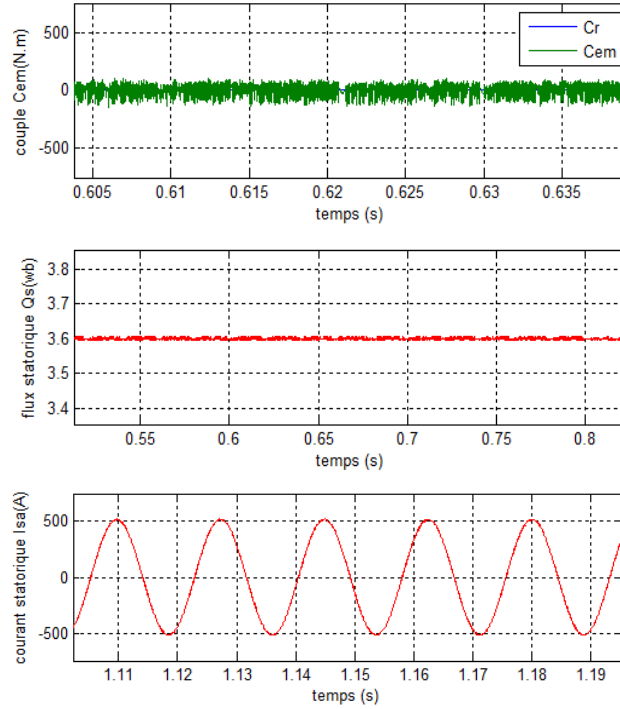
Fig. 16 – Performances de la MAS commandé par de la DTC à sept niveaux à base des techniques de l’intelligence artificielle

Dans le but de connaître la meilleure commande de la MAS, une étude comparative est indispensable entre les deux commandes traitées précédemment. La figure suivante présentée la comparaison entre les deux commandes proposées.





a) DTC-5 niveaux à base des techniques de l'intelligence artificielle



b) DTC-7 niveaux à base des techniques de l'intelligence artificielle

Fig. 17 – Zoom du flux et du couple

Le tableau 5 montré l'étude comparative entre les résultats de simulation obtenus par les deux commandes proposées à base des techniques de l'intelligence artificielle.

TABLEAU 5
ETUDE COMPARATIVE

	Commande DTC à base des techniques de l'intelligence artificielle	
	Cas à 5 niveaux	Cas à 7 niveaux
$I_{s\alpha}$ THD (%)	5.70	3.60
Minimisations des ondulations du couple	bonne	Trés bonne
Minimisations des ondulations du couple	bonne	Trés bonne
Dynamique du couple	Rapide	Rapide

De l'analyse des Figures, ainsi que du tableau 5, il ressort que pour la commande directe du couple à 36 secteurs d'un moteur asynchrone à base des techniques de l'intelligence artificielle :

- Les composants du courant statorique présentent un taux d'harmonique faible pour DTC-7 niveaux comparativement aux DTC-5 niveaux.
- La dynamique des composantes du flux statorique n'est pas affectée par l'application de ces consignes de charges pour les deux commandes.
- Le couple électromagnétique agit rapidement pour suivre les consignes de charges introduites. Il présente une diminution remarquable des oscillations pour les DTC-7 niveaux par rapport à DTC-5 niveaux.
- On constate que le module du flux statorique s'établit à sa valeur de référence pour les deux commandes proposées.
- La vitesse atteint sa référence sans dépassement au démarrage à vide pour les deux commandes proposées.
- Les performances de la commande DTC est proportionnelles au nombre de niveaux de l'onduleur de tension.

7. Conclusion

Dans cet Article on a présenté la commande DTC à 36 secteurs d'un moteur asynchrone à base des techniques de l'intelligence artificielle, la commande DTC-5 niveaux et les DTC-7 niveaux. La comparaison entre les deux commandes proposées j' à montré les avantages apportés par l'utilisation de commande DTC-7 niveaux (cas du correcteur du couple à 7 niveaux et correcteur du flux à 3 niveaux avec 36 secteurs) à base des techniques de l'intelligence artificielle: la minimisation des oscillations des grandeurs contrôlées tel que le couple, et le flux statorique, ce qui est confirmé par les résultats de simulation.

REFERENCES

1. M. Ammer, «Surveillance et diagnostic des defaults des machines électriques: applications aux moteur asynchrones, » Thèse de Doctorat en Sciences, Université du 20 Aout 1955, Skikda, 2012.
2. A. Khoudri, « Technique de commande avances appliquées aux machines de type asynchrone, » Thèse de Doctorat, université Mentouri de Constantine, 2010.
3. 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, Issue 9, September 2013.
4. B. Elakhdar, «Commande directe du couple floue et neuronale d'un moteur synchrone à double étoile sans capteur mécanique alimenté par onduleurs multiniveaux, » Thèse de Doctorat en Sciences, université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, 2015.
5. K. Nadir, « Amélioration des performances de la commande d'un moteur asynchrone à cage et élaboration d'un estimateur universel de ses paramètres en utilisant les réseaux de neurones artificielle, » These de Doctorat, Université de Boumerdes, 2007.
6. N. Khalil, « Stratégie de commande et techniques intelligentes appliquées aux machines de type synchrone, » Thèse de Doctorat, Université Mentouri, 2010.
7. A. Hammoumi, A. Massoum, A. Meroufel, P. Wira, «Application des réseaux de neurones pour la commande de la machine asynchrone sans capteur mécanique, » Acta Electrotehnica, Vol. 53, No. 2, 2012.
8. 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, Algeria, 2014.
9. H. Benbouhenni, R. Taleb, F. Chabni, « Etude comparative entre la commande DTC trois niveaux et commande DTC cinq niveaux de la machine asynchrone, » 4 ème Conférence Internationale des Energies Renouvelables (CIER-2016), Hammamet-Tunisie, Décembre 20-22, 2016.
10. M. Nadhir, « Contribution à l'étude des performances des onduleurs multiniveaux sur les réseaux de distribution, » Thèse de Doctorat en Sciences, université Badji Mokhtar-Annaba, 2014.
11. H. Benbouhenni, R. Taleb, F. Chabni, « Etudes comparative de deux stratégies de commande DTC neuronale d'une MAS alimentée par onduleur à sept niveaux, » Acta Electrotehnica, Vol. 57, No. 5, 2016, pp. 570-578.

12. H. Benbouhenni, "Seven-level direct torque control of induction motor based on artificial neural networks with regulation speed using fuzzy PI controller, » Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering, Vol.14, No.1, 2018, pp.85-94 .
13. H. Chaikhy, M. Khafallah, A. Saad, M. Essaadi, K. Chikh, «Evaluation des performances des commandes vectorielles de la machine à induction, » Revue de Génie Industriel, ISSN: 1313-8871, 2011, 6, pp. 23-32.
14. S. Meziane, R. Toufouti, H. Benalla, «Etude Comparative entre la DTC deux niveaux et la DTC Trois Niveaux de la Machine Asynchrone, » Communication Science et Technologie, No. 7, janvier 2009.
15. M. Birame, B. Mokhtari, L. Mokrani, B. Azoui, A. Naamane, N. M'sirdi, «Compensateur PI flou de la variation de la résistance statorique d'un moteur à reluctance variable commande par DTC, » Acta Electrotehnica, Vol. 53, No. 4, 2012.
16. D. Yousef, «Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle, » Thèse Doctorat en Sciences, université Djillali Liabes de Sidi –Bel-Abbes, 2015.
17. W. Benzaoui, B. Doufene, A. Medkour, « Développement d'un régulateur flou en vue de la commande d'un héliostat, » Revue des Energies Renouvelables (SIENR'14), Ghardaia, 2014, pp. 27-34.
18. H. Benbouhenni, Z. Boudjema, A. Belaidi, « Using three-level Fuzzy space vector modulation method to improve indirect vector control strategy of a DFIG based wind energy conversion systems, » International Journal Of Smart Grid, Vol.2, No.3 , 2018, pp.155-171.
19. H. Benbouhenni, Z. Boudjema, A. Belaidi, «DFIG-based WT system using FPWM inverter,» International Journal Of Smart Grid, Vol. 2, No. 3, 2018, pp.142-154.
20. H. Benbouhenni, « Nouvelle approche de la commande DTC modifié par les techniques de l'intelligence artificielle d'une machine asynchrone, » Journal of Advanced Research in Science and Technology, Vol. 4, No. 2, 2017, pp. 509-528.
21. H. Benbouhenni, « Comparateur à hysteresis à sept niveaux pour la commande DTC basée sur les techniques de l'intelligence artificielle de la MAS, » Journal of Advanced Research in Science and Technology, Vol. 4, No. 2, 2017, pp. 553-569.