

Techniques neuromimétiques pour la correction d'ondulations du couple et du flux de la DTC sept niveaux à 6 secteurs d'une machine asynchrone

Habib BENBOUHENNI¹, Rachid TALEB², Hacene MELLAH²
¹Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Oran (ENPO)
BP1523 El M'nouer, Oran, Algeria
habib0264@gmail.com

²Département d'Electrotechnique, université Hassiba Benbouali de Chlef (UHBC), Laboratoire LGEER
Hay Salam, Route Nationale N° :19, 02000 Chlef, Algeria

Résumé — Cet article présenté une étude comparative entre trois stratégies de la commande DTC à 6 secteurs basée sur les réseaux de neurones artificiels de la machine asynchrone (IMW) alimentée par onduleur NPC de tension à sept niveaux. Cette commande est robuste et simple d'implémentation. La DTC-ANN à 6 secteurs avec une nouvelle table de commutation réduit considérablement les ondulations du couple et du flux.

Mots Clés — Machine asynchrone; Commande DTC; Onduleur à sept niveaux; Réseaux de neurones; Table de commutation.

I. INTRODUCTION

Depuis de nombreuses années, nous assistons à une évolution sans cesse croissante des convertisseurs de l'électronique de puissance, grâce notamment aux énormes progrès effectués dans le domaine des semiconducteurs. Ce développement rapide a considérablement amélioré la qualité de la vie moderne en offrant aux applications domestiques et industrielles des équipements à rendement optimum et des commandes sophistiquées. Dans ce contexte et afin de répondre aux besoins grandissant de l'industrie, les puissances convertibles par les convertisseurs statiques sont de plus en plus élevées. Pour satisfaire cette exigence, sans affecté le rendement du convertisseur, l'augmentation de la tension est souvent privilégiée. Cependant, l'augmentation de la tenue en tension d'un composant semi-conducteur entraîne une dégradation de ses performances statiques et dynamiques. Cette contrainte, a conduit à l'émergence de nouvelles structures, dites multiniveaux, basées sur l'idée de répartir la contrainte en tension, sur plusieurs composants semiconducteurs. Ces basses tensions connectés en série [1].

La conduite des actionneurs électriques à moteur asynchrone (MAS) triphasé avec des performances élevées est beaucoup plus demandée dans les domaines d'applications industriels de forte puissance, au lieu de la solution à courant continue [2]. Le moteur asynchrone est robuste, de construction facile et peut être utilisé dans des atmosphères difficiles. Cependant, la variation de sa vitesse nécessite dans le cas de la commande statorique, une source d'alimentation alternative variable en amplitude et en fréquence.

Pour un fonctionnement optimal de la machine asynchrone, les performances requises de ces convertisseurs statiques sont de plus en plus élevées : tant de point de vue de la puissance délivrée que de la qualité de la tension générée. Néanmoins, l'alimentation en créneaux par l'onduleur à deux niveaux utilisé à ce jour présenté des inconvénients tels que: la limitation en puissance et le taux d'harmoniques élevé, qui limite considérablement le développement du domaine des entraînements alternatifs. Actuellement, l'étude des machines asynchrones alimentées par des convertisseurs statiques constitue un vaste thème de recherche dans les laboratoires d'électrotechnique. Ces travaux de recherche ont conduit à l'apparition de nouveaux composants de puissance plus performants commandable à l'ouverture et à la fermeture tels que les GTO et IGBT, et qui ont permis la conception de nouveaux convertisseurs fiables, rapides et puissants [3].

Dans les dernières années, on a vécu à la naissance de nouvelles structures de convertisseurs de puissance destinées pour les applications de haute tension appelées convertisseurs multiniveaux. On peut citer: les onduleurs multiniveaux à cellules imbriquées, à diodes flottantes, et à structure NPC [2].

De ce fait, dans les applications de commande des machines électriques, la technique de commande DTC semble la plus adaptée pour commander les machines [1]. Cette stratégie basée sur l'orientation du flux statorique, introduite en 1985 par TAKAHASHI et DEPENBROCK. Le contrôle direct du couple trouve ses racines dans le contrôle par flux orienté et dans la technique du « direct self control (DSC) ». La théorie du « DSC » a été développée en Allemagne par Depenbrock. Le principe de ce contrôle consiste à appliquer un niveau spécifique de tension continue (U_0) et du flux statorique Φ_{sref} , c'est un contrôle avec un tableau de commutation figée. Ainsi, une fréquence unique de fonctionnement de l'onduleur f_s est déduite directement sans référence externe. Elle est auto-déterminée [3].

II. STRUCTURE DE L'ONDULEUR TRIPHASÉ À SEPT NIVEAUX À DIODES FLOTTANTES

L'onduleur triphasé à sept niveaux à structure NPC (Neutral Point Clamping) étudié est constitué de trois bras et

de six sources de tension continue. Chaque bras comporte douze interrupteurs dont huit en série et quatre en parallèle, ainsi que de deux diodes. Chaque interrupteur est composé d'un transistor et d'une diode montés en tête bêche. La Fig.1 donne une représentation schématique de cet onduleur [2].



Fig. 1 Onduleur triphasé à sept niveaux à structure NPC (VSI)

La modélisation permet d'étudier l'évolution des différentes grandeurs régissant le fonctionnement de l'onduleur à sept niveaux à diodes flottantes tout en considérant les commutations des interrupteurs [1]. Chaque interrupteur TD_k introduit une fonction de connexion F_{ks}, qui décrit son état ouvert ou fermé, tel que:

$$F_{ks} = \begin{cases} 1 & \text{si l'interrupteur } TD_{ks} \text{ est fermé} \\ 0 & \text{dans le cas contraire} \end{cases} \quad (1)$$

Pour l'onduleur à sept niveaux, on définit en plus, une fonction de connexion du demi-bras, qu'on notera F_{k_mb} avec: k: numéro du bras, m=1 pour le demi-bras du haut, et m=0 pour le demi-bras du bas. Pour un bras k, les fonctions de connexion des demi-bras s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs comme suit:

$$\begin{cases} F_{k1}^b = F_{k1}F_{k2}F_{k3}F_{k4} \\ F_{k0}^b = F_{k5}F_{k6}F_{k7}F_{k8} \end{cases} \quad (2)$$

F_{k1}^b est associée au demi-bras du haut (TD_{k1}, TD_{k2}, TD_{k3}, TD_{k4}), F_{k0}^b est associée au demi-bras du bas (TD_{k5}, TD_{k6}, TD_{k7}, TD_{k8}).

A. Modélisation aux Valeurs Instantanées

Cette modélisation sera effectuée en considérant l'association de l'onduleur de tension triphasé à sept niveaux avec une charge triphasée couplée en étoile avec neutre isolé.

Dans notre cas particulier, cette charge sera constituée par la machine asynchrone (MAS). Sous forme matricielle, les potentiels des noeuds A, B, et C de l'onduleur triphasé à sept niveaux par rapport au point milieu M sont donnés par le système suivant :

$$\begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{111} + F_{112} + F_{11}^b \\ F_{211} + F_{212} + F_{21}^b \\ F_{311} + F_{312} + F_{31}^b \end{bmatrix} V_{c1} + \begin{bmatrix} F_{112} + F_{11}^b \\ F_{212} + F_{21}^b \\ F_{312} + F_{31}^b \end{bmatrix} V_{c2} + \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} V_{c3} - \begin{bmatrix} F_{113} + F_{114} + F_{10}^b \\ F_{213} + F_{214} + F_{20}^b \\ F_{313} + F_{314} + F_{30}^b \end{bmatrix} V_{c4} - \begin{bmatrix} F_{114} + F_{10}^b \\ F_{214} + F_{20}^b \\ F_{314} + F_{30}^b \end{bmatrix} V_{c5} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} V_{c6} \quad (3)$$

Ce système montre qu'un onduleur à sept niveaux est une mise en série de six onduleurs à deux niveaux ou de trois onduleurs à trois niveaux ou deux onduleurs à cinq niveaux.

Pour les tensions simples, on a:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{111} + 2F_{112} + 3F_{11}^b - F_{113} - 2F_{114} - 3F_{10}^b \\ F_{211} + 2F_{212} + 3F_{21}^b - F_{213} - 2F_{214} - 3F_{20}^b \\ F_{311} + 2F_{312} + 3F_{31}^b - F_{313} - 2F_{314} - 3F_{30}^b \end{bmatrix} \frac{E}{6} \quad (4)$$

III. PRINCIPE DE LA COMMANDE DTC

Les associations onduleur de tension- machine à courant alternatif constituent un enjeu essentiel dans le milieu industriel, les stratégies de commande de ces associations n'ont cessé de se développer au fil des années. Parmi elles, après l'émergence vers les années 70 de la commande vectorielle, les techniques basées sur la commande directe du couple ont suscité l'intérêt de plusieurs équipes scientifiques et du secteur industriel dès le milieu des années 80 [4].

Dans la majorité des stratégies de la commande, les grandeurs de référence sont le flux et le couple et les variables de contrôle sont les courants. Le convertisseur de puissance est ainsi commandé de manière à imposer dans les enroulements de la machine des courants d'amplitude et de fréquence définies par les régulateurs du flux et du couple. Ces derniers sont donc contrôlés indirectement, via les courants d'alimentation. Par contre, dans la méthode DTC, le couple et le flux sont directement imposés par un choix judicieux du vecteur de tension imposé par le convertisseur d'alimentation [3].

La commande directe du couple (DTC) d'une machine asynchrone est basée sur la détermination directe de la séquence de commande appliquée aux interrupteurs du convertisseur statique d'alimentation en vue d'imposer les niveaux du couple et du flux désirés. La séquence de la commande des interrupteurs est donc directement issue des régulateurs du flux et du couple qui sont généralement des régulateurs à hystérésis. Ce type de stratégie se classe donc dans la catégorie des commandes en amplitude, par opposition aux lois de commandes en durée qui sont basées sur un réglage de la valeur moyenne de la tension par modulation de largeur d'impulsion [4].

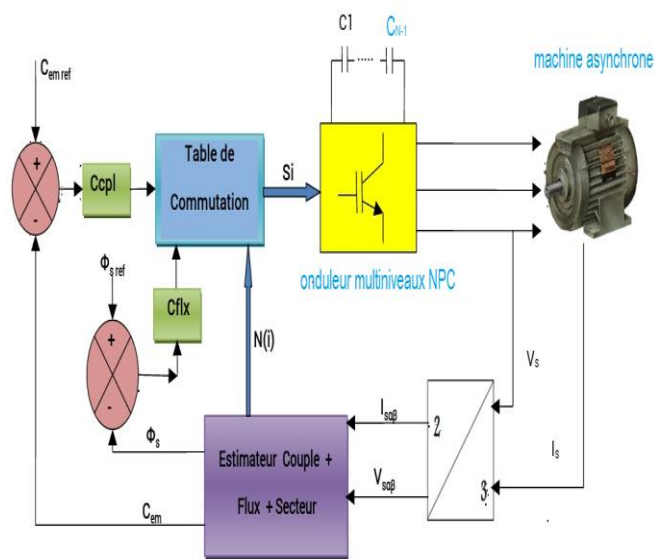


Fig. 2 structure générale de contrôle direct du couple

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 appliquée pour ramener la grandeur concernée de sa bande d'hystérésis. Afin d'étudier le principe de base des principales stratégies de contrôle directe de la machine asynchrone, il est indispensable de pouvoir caractériser le comportement des principales variables qui régissent l'état électromagnétique de la machine, à savoir le couple électromagnétique et le flux.

A. Commande DTC avec un onduleur NPC à sept niveaux

Afin de réaliser le contrôle direct du flux statorique et du couple électromagnétique de la machine Asynchrone par un onduleur NPC à sept niveaux, nous devons élaborer de nouvelles tables de commutation mettant en oeuvre au mieux les possibilités de l'onduleur. Certains points, redondant avec l'étude de contrôle appliqué à la machine asynchrone alimentée par un onduleur à deux niveaux de tension, ne seront pas repris si les conclusions sont identiques. Ainsi seuls l'apport de l'utilisation d'un onduleur NPC à sept niveaux de tension sera traité. La technique de la DTC-7N (DTC avec convertisseur NPC à 7 Niveaux) est une généralisation de la commande DTC avec un onduleur à deux niveaux. Cette généralisation se fait à l'aide des sources de tensions reroutes dans chaque bras.

Par combinaison des douze interrupteurs d'un même bras, on peut imposer à la phase sept niveaux de tension différents. Donc, le nombre de vecteurs de tension disponibles en sortie de l'onduleur NPC à sept niveaux est supérieur au nombre de vecteurs délivrés par un onduleur à deux niveaux. Le nombre des vecteurs de tension pour un onduleur NPC triphasé à sept niveaux est $N_{vt} = 7^3 = 343$ vecteurs. Mais dans ces 343 vecteurs il y a des vecteurs redondants, c'est-à-dire similaires,

parmi les 343 vecteurs on trouve $3 \times 7 \times (7 - 1) + 1 = 127$ vecteurs différents. Ces 127 vecteurs conduisent à six hexagones concentriques. Le schéma spatial de tension dans le plan $(\alpha - \beta)$ est représenté par la Fig. 3.

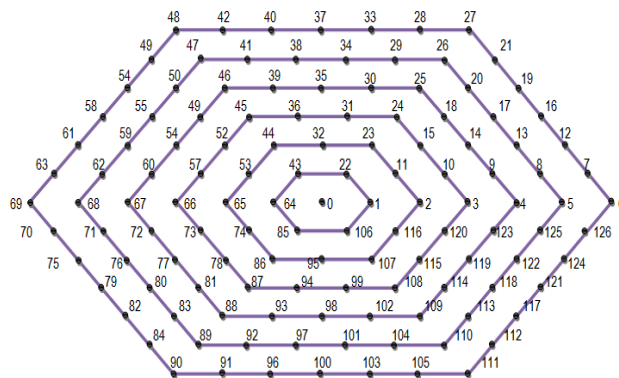


Fig. 3 Distribution des séquences de niveaux de phase par les différents vecteurs tensions fournis par onduleur NPC à sept niveaux.

Sur la Fig.3, les chiffres (ijk) correspondent aux niveaux de tension des trois bras a, b, et c respectivement. Le centre correspond aux sept configurations (000, 111, 222, 333, 444,555, 666). La redondance des vecteurs de tension n'est pas montrée sur cette figure. L'augmentation du nombre de 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 deux niveaux.

B. Tables de commutation

Dans le but d'utiliser tous les vecteurs de tension disponibles en sortie d'un onduleur NPC à sept niveaux pour contrôler le couple, le flux statorique, et par conséquent minimiser les ondulations du couple et du flux, nous allons apporter des modifications dans les tableaux de commutation en choisissant un nombre six des secteurs pour connaître la position du vecteur flux statorique. Pour cela, nous allons diviser le plan $\alpha - \beta$ en six secteurs de $\pi/3$ radians.

TABLEAU I
TABLE DE VERITE DE STRATEGIE 1 DE LA COMMANDE DTC-7 NIVEAUX

| N | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------|------|-----|-----|----|-----|-----|-----|
| Cflx | Ccpl | | | | | | |
| 1 | 2 | 27 | 48 | 69 | 90 | 111 | 6 |
| | 1 | 21 | 42 | 63 | 84 | 105 | 126 |
| | 0 | 19 | 40 | 61 | 82 | 103 | 124 |
| | -1 | 16 | 37 | 58 | 79 | 100 | 121 |
| | -2 | 12 | 33 | 54 | 75 | 96 | 117 |
| 0 | 2 | 37 | 58 | 79 | 100 | 121 | 16 |
| | 1 | 37 | 58 | 79 | 100 | 121 | 16 |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | -1 | 100 | 121 | 16 | 37 | 58 | 79 |
| | -2 | 100 | 121 | 16 | 37 | 58 | 79 |
| -1 | 2 | 48 | 69 | 90 | 111 | 6 | 27 |
| | 1 | 47 | 68 | 89 | 110 | 5 | 26 |
| | 0 | 5 | 26 | 47 | 68 | 89 | 110 |
| | -1 | 89 | 110 | 5 | 26 | 47 | 68 |
| | -2 | 90 | 111 | 6 | 27 | 48 | 69 |

TABLEAU II

TABLE DE VERITE DE STRATEGIE 2 DE LA COMMANDE DTC-7 NIVEAUX

| N | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Cflx | Ccpl | | | | | | |
| 1 | 2 | 27 | 48 | 69 | 90 | 111 | 6 |
| | 1 | 6 | 27 | 48 | 69 | 90 | 111 |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | -1 | 111 | 6 | 27 | 48 | 69 | 90 |
| | -2 | 90 | 111 | 6 | 27 | 48 | 69 |
| 0 | 2 | 37 | 58 | 79 | 100 | 121 | 16 |
| | 1 | 16 | 37 | 58 | 79 | 100 | 121 |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | -1 | 121 | 16 | 37 | 58 | 79 | 100 |
| | -2 | 100 | 121 | 16 | 37 | 58 | 79 |
| -1 | 2 | 48 | 69 | 90 | 111 | 6 | 27 |
| | 1 | 27 | 48 | 69 | 90 | 111 | 6 |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | -1 | 90 | 111 | 6 | 27 | 48 | 69 |
| | -2 | 69 | 90 | 111 | 6 | 27 | 48 |

TABLEAU III

TABLE DE VERITE DE STRATEGIE 3 DE LA COMMANDE DTC-7 NIVEAUX

| N | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------|------|-----|-----|----|-----|-----|-----|
| Cflx | Ccpl | | | | | | |
| 1 | 2 | 27 | 48 | 69 | 90 | 111 | 6 |
| | 1 | 21 | 42 | 63 | 84 | 105 | 126 |
| | 0 | 7 | 28 | 49 | 70 | 91 | 112 |
| | -1 | 7 | 28 | 49 | 70 | 91 | 112 |
| | -2 | 6 | 27 | 48 | 69 | 90 | 111 |
| 0 | 2 | 37 | 58 | 79 | 100 | 121 | 16 |
| | 1 | 37 | 58 | 79 | 100 | 121 | 16 |
| | 0 | 7 | 28 | 49 | 70 | 91 | 112 |
| | -1 | 100 | 121 | 16 | 37 | 58 | 79 |
| | -2 | 100 | 121 | 16 | 37 | 58 | 79 |
| -1 | 2 | 48 | 69 | 90 | 111 | 6 | 27 |
| | 1 | 46 | 67 | 88 | 109 | 4 | 25 |
| | 0 | 92 | 113 | 8 | 29 | 50 | 71 |
| | -1 | 88 | 109 | 4 | 25 | 46 | 67 |
| | -2 | 90 | 111 | 6 | 27 | 48 | 69 |

IV. COMMANDE DTC SEPT NIVEAUX NEURONAL

Les réseaux de neurones artificiels (en anglais: Artificial Neural Networks (ANN)) constituent une approche fondamentalement nouvelle dans le traitement de l'information. Ce sont des systèmes parallèles, adaptatifs et distribués dont le fonctionnement imite celui des réseaux de neurones biologiques tout en reproduisant leurs caractéristiques de base. Du point de vue structurel, un réseau de neurones est d'un certain nombre d'unités de traitement simples appelées neurones formels ou artificiels. Ces derniers sont connectés entre eux de façon à produire la réponse correspondant aux entrées reçues par le réseau [5].

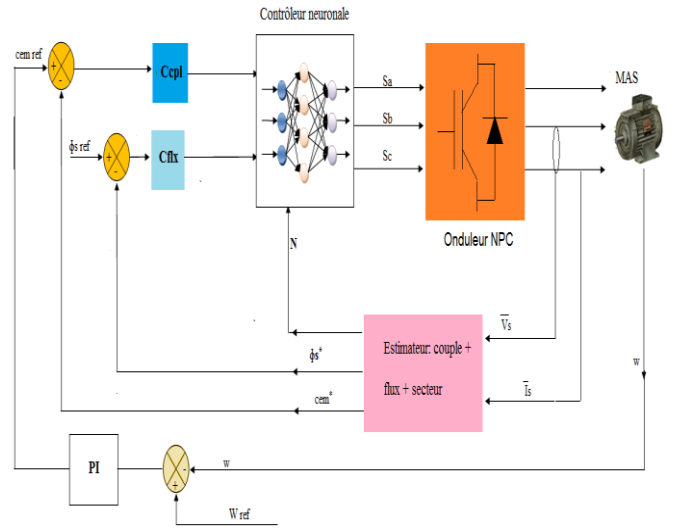


Fig. 4 Commande directe du couple de la MAS basée sur les RNA

Le choix de l'architecture des réseaux de neurone se fait selon l'erreur quadratique moyenne (EQM) obtenue au court de l'apprentissage [5]. Nous avons prendre une architecture de réseau de neurones multicouches à structure: 3-30-3, c'est à dire un MLP à 3 couches, une couche d'entrée contenant 3 neurones, une seule couche cachée contenant 30 neurones et une couche de sortie contenant 3 neurones aussi, utilisant respectivement les fonctions d'activations: 'logsig', 'tansig' et 'purelin'. Pour les toutes simulations du commande DTC neuronale, on prendre les propriétés suivante (Tableau 5):

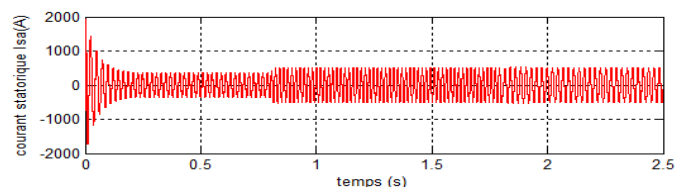
TABLEAU IV

PROPRIÉTÉE DU LM DE LA DTC-7 NIVEAUX NEURONALE

| 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 | logsig, Tansig, Purelin |

V. RÉSULTATS DE SIMULATIONS

Les résultats de simulation du DTC avec et sans RNA de la MAS alimentée par un onduleur de tension à sept niveaux sont illustrés dans les figures 5, 6, et 7.



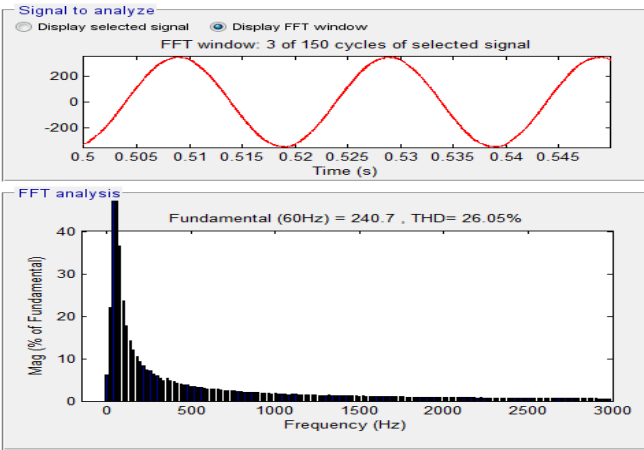
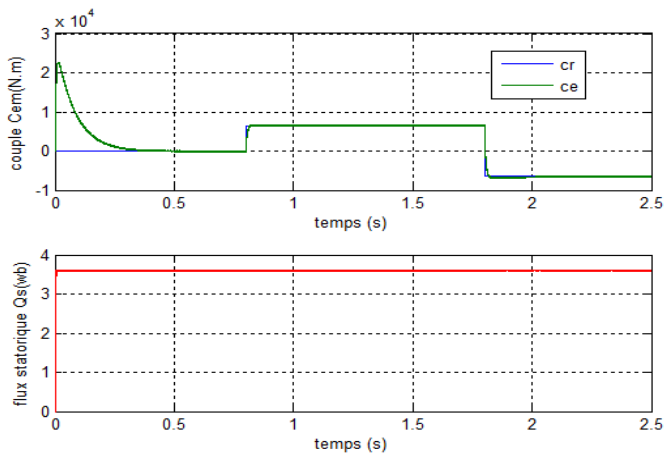


Fig. 5 Performances de stratégie 1 de la commande DTC neuronale à sept niveaux appliquée à la MAS.

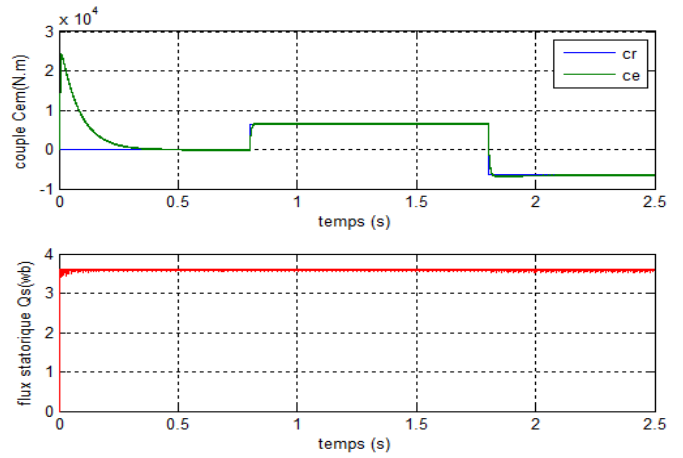
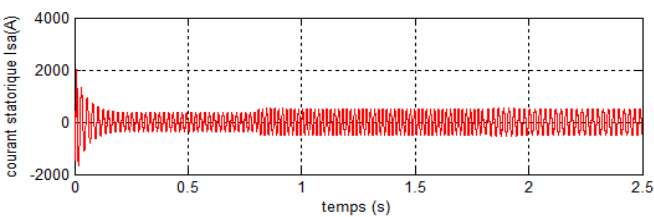
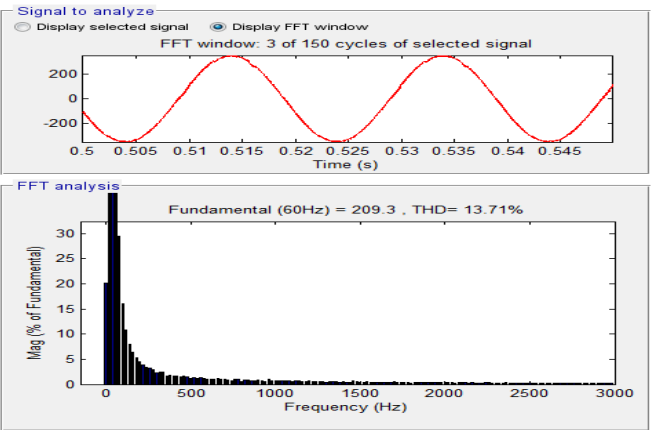


Fig. 6 Performances de stratégie 2 de la commande DTC neuronale à sept niveaux appliquée à la MAS.

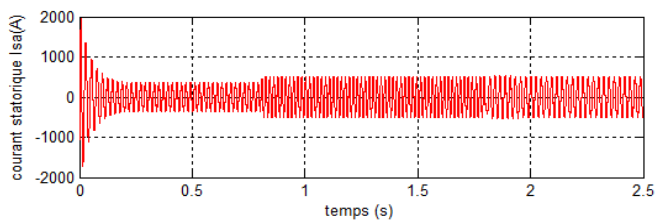
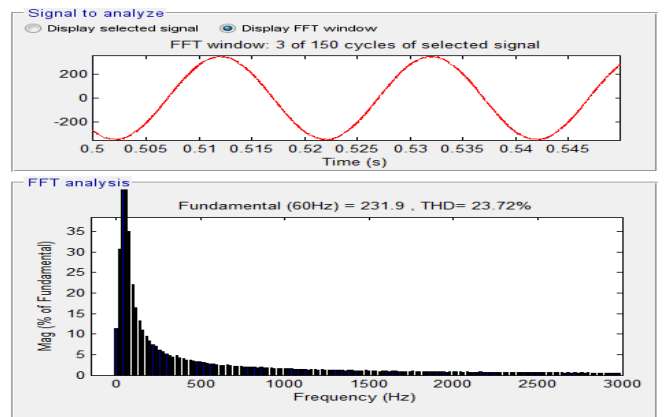
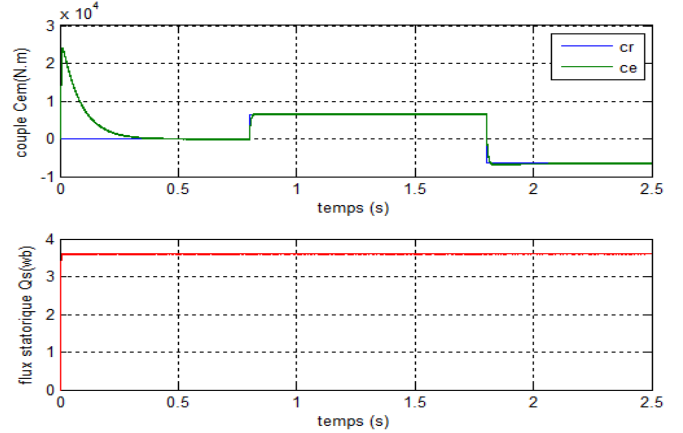
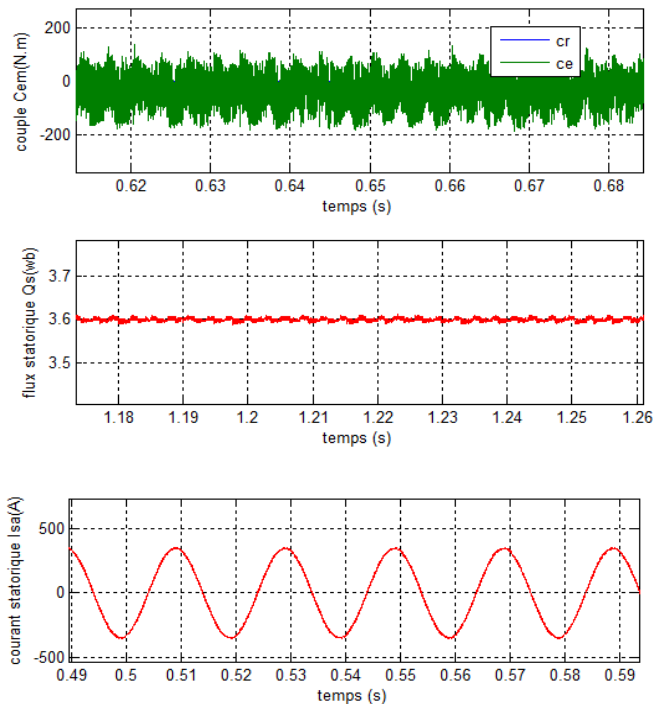
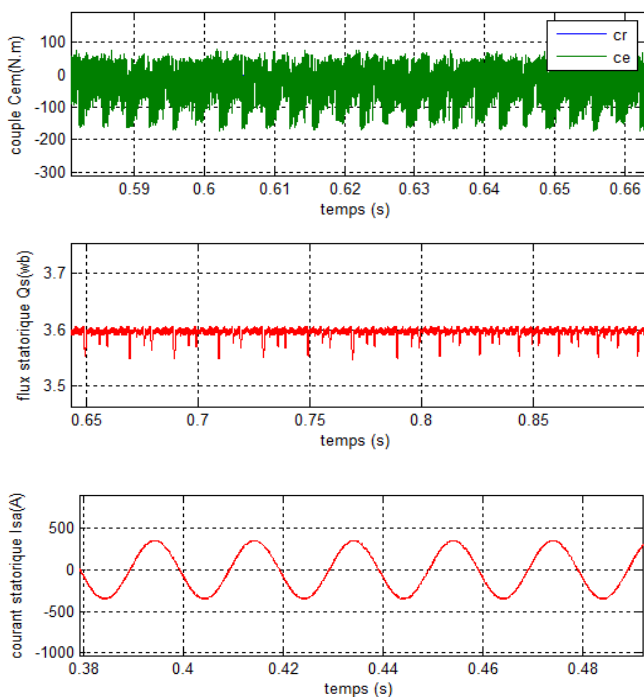


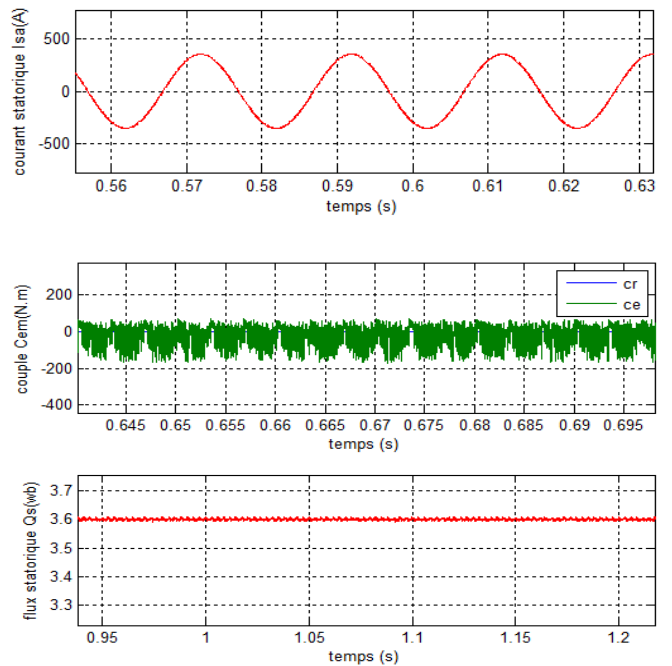
Fig. 7 Performances de stratégie 3 de la commande DTC neuronale à sept niveaux appliquée à la MAS.



a) Stratégie 1



b) Stratégie 2



c) Stratégie 3

Fig. 8 Zooms obtenues par la commande DTC neuronale à sept niveaux

La Fig. 8 montré que stratégie 2 de la commande DTC-RNA-7 niveaux réduit considérablement la valeur de THD du courant statorique comparativement à celle de la stratégies 1et 3 de DTC-RNA-7 niveaux. D'un autre coté, on remarque que la stratégie 3 réduit les ondulations du couple et du flux mieux comparativement à la stratégies 2 et 1 de la commande DTC-RNA-7 niveaux.

La vitesse atteint sa référence sans dépassement au demurrage à vide pour les toutes stratégies. Et le couple suivre le couple de charge. La dynamique des composantes du flux statorique n'est pas affectée par l'application de ces consignes de charges

VI. CONCLUSIONS

Dans cet Article on à présenté trois stratégies de la commande DTC d'un moteur asynchrone de forte puissance (1Mw) alimentée par un onduleur NPC de tension à sept niveaux, et le technique des réseaux de neurones ont été appliquées à la commande DTC-7 niveaux. La comparaison entre les trois stratégies proposées, nous à montré les avantages apportés par l'utilisation de stratégie 3 de la commande DTC à sept niveaux à base des réseaux de neurones: 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] B. Said, "Modélisation et commande d'un onduleur à sept niveaux à diodes Flottantes: Application à la conduite d'une machine asynchrone," These Doctorat, Ecole National Polytechnique, Alger, 2008.
- [2] G. Hakim, "Etude de différentes structures de cascade à onduleur NPC à sept niveaux. Application à la conduite de la machine asynchrone

- triphasée,” These Doctorat, Ecole National Polytechnique, Alger, 2008.
- [3] Z. Rabah, “Contrôle Direct du Couple d’une Machine Asynchrone Alimentée par des Onduleurs Multi-niveaux,” These Doctorat , Ecole National Polytechnique, Alger, 2007.
- [4] T. Abdelhalim, “Contribution à l’application des commandes adaptatives par les systèmes flous à une machine synchrone à aimants permanents alimentée par un convertisseur multicellulaire série,” These Doctorat, Ecole National Polytechnique, Alger, 2007.
- [5] B. Elakhdar, “Commande directe du couple floue et neuronale d’un moteur synchrone à double étoile sans capteur mécanique alimenté par onduleurs multiniveaux,” Thèse Doctorat en sciences, université Djillali Liabes-Sidi Bel Abbés, 2015.