

## Etude comparative entre la commande DPC, DPC-HYN et DPC-RNA de la GSAP

Amina Ghouizil<sup>1\*</sup>, Dalila Achour<sup>1</sup> and Habib Benbouhenni<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université Hassiba Ben Bouali, Chlef, Algeria

<sup>2</sup> Ecole Nationale Polytechnique d'Oran Maurice Audin, Oran, Algeria

**Résumé.** Le travail présenté dans cet article concerne l'étude comparative et l'application de la commande par commande directe de puissance (DPC) à base de la technique des réseaux de neurones artificiels (RNA) afin d'aboutir à un système de contrôle de bonnes performances de la génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP).

Les résultats de simulation numérique sous l'environnement MATLAB/Simulink, des différentes méthodes de commande que nous avons élaborées dans cet article, appliquées à la GSAP, à savoir ; DPC classique, DPC-HYN et DPC-RNA ont permis d'évaluer les performances de chacune des techniques de commandes proposées et de voir les performances apportées par les techniques proposées.

**Mots clés:** *Génératrice synchrone à aimant permanent, réseaux de neurones artificiels, commande directe de puissance, DPC-HYN, DPC-RNA.*

### 1. Introduction

Ces dernières années, la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) est devenue la machine la plus utilisée dans beaucoup de domaines industriels et grâce aux progrès de l'électronique de puissance et l'informatique, la MSAP a pu s'imposer dans les systèmes d'entraînement [1]. Les MSAPs sont de plus en plus utilisées dans l'industrie parce qu'ils offrent beaucoup d'avantages par rapport aux autres types de machines avec un couple massique élevé, un excellent rendement, une maintenance réduite, un faible moment d'inertie et une grande capacité de surcharge sur toute la plage de vitesse. C'est ainsi que les MSAPs ont apparu et sont de plus en plus utilisées de nos jours dans plusieurs applications industrielles tel que les équipements domestiques (machine à laver le linge), les équipements de technologie de l'information (DVD drives), les équipements de soins médicaux et de santé, la propulsion des sous marins et des véhicules électriques ainsi que les machines-outils et les applications de l'énergie de l'éolienne.

Actuellement, l'étude des machines synchrones à aimants permanents comme génératrice constitue un vaste thème de recherche dans les laboratoires d'électrotechnique. Une génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP) qui obtient de l'énergie à partir du l'énergie mécanique pour générer un courant électrique.

---

\* Corresponding author.  
E-mail: [ghouizilamina25@gmail.com](mailto:ghouizilamina25@gmail.com) (Amina Ghouizil).  
Address: Ouled Fares.

L'avantage du GSAP est l'absence de courant réactif de magnétisation, le champ magnétique est obtenu par des aimants permanents. Si l'on utilise une machine synchrone usuelle, le rotor est censé tourner à la même vitesse que le stator.

Plusieurs stratégies de contrôle appliquée à la GSAP, par exemple ; la commande vectorielle [2, 3], la commande directe du couple (DTC) [4, 5], la commande directe de puissance (DPC) [6, 7] et la commande par mode glissant [8, 9]. Dans [10], l'auteur a proposé une étude comparative entre la commande DTC, DPC et la commande vectorielle de la génératrice synchrone. Dans [11] et [12], les auteurs ont proposé un contrôle appliqué à la GSAP basée sur la technique de modulation vectorielle (SVM). Dans [13] et [14], les auteurs ont proposé une commande DTC basée sur la SVM de la GSAP.

Dans cet article, nous proposons une commande directe de puissance (DPC) basée sur la moderne technique (réseaux de neurones) pour minimiser les ondulations des puissances active et reactive et réduire la valeur de THD (Total Harmonic Distortion) du courant statorique de la GSAP. D'un autre coté, la table de commutation de la commande DPC est remplacée par un contrôleur neuronal (DPC-RNA) et les contrôleurs à hystérésis sont remplacés par deux contrôleurs neuronaux (DPC-HYN).

L'objectif principal donc de cet article est d'étude comparative des performances de deux algorithmes de commande DPC appliquée à la GSAP en utilisant une des techniques de l'intelligence artificielle, à savoir : réseaux de neurones.

Cet article est divisé en quatre parties:

Dans la première partie, nous allons commencer par la modélisation mathématique de la GSAP en se basant sur des hypothèses classiques de simplification. Pour la deuxième partie, on s'intéresse à la commande DPC de la GSAP, nous présentons le principe de fonctionnement de cette commande appliquée à notre machine. La troisième partie est consacrée à l'amélioration de la commande en question par l'hystérésis neuronale (DPC-HYN).

La quatrième partie est consacrée au développement d'une méthode basée sur les réseaux neurones artificiels (RNA) pour améliorer les performances de la commande DPC de la GSAP. Cette méthode consiste à remplacer la table de commutation de la DPC classique par un contrôleur neuronal. Donc trois stratégies intelligentes de contrôle (DPC, DPC-HYN, DPC-RNA) seront présentées et évaluées par des résultats de simulation.

## 2. Modèle mathématique de la GSAP

Le modèle mathématique de la GSAP obéit à certaines hypothèses essentielles simplificatrices [15]:

- L'absence de saturation dans le circuit magnétique.
- La distribution sinusoïdale de le FMM créée par les enroulements du stator.
- L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau.
- L'effet d'encoche est négligeable.
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

La structure de la GSAP comporte un enroulement triphasé au stator. L'excitation rotorique est créée par des aimants permanents au rotor. Ces aimants sont supposés rigides et de perméabilité voisine de celle de l'air.

- **Equations électriques** **Les**

$$\begin{cases} V_d = R_s I_d + \frac{d}{dt} \Psi_d - \omega \Psi_q \\ V_q = R_s I_q + \frac{d}{dt} \Psi_q + \omega \Psi_d \end{cases} \quad (1)$$

- **Equations magnétiques** **Les**

$$\Psi_d = L_d I_d + \Psi_f \quad (2)$$

$$\Psi_q = L_q I_q \quad (3)$$

- **Expression du couple électromagnétique**

$$C_e = \frac{3}{2} p [(L_d - L_q)] I_d I_q + I_q \Psi_f \quad (4)$$

Si le rotor est lisse ( $L_d = L_q$ ), cette équation se simplifie en:

$$C_e = \frac{3}{2} p I_q \Psi_f \quad (5)$$

- **Equation du mouvement**

La dynamique de la machine est donnée par l'équation du mouvement suivante:

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_r - C_e - f\Omega \quad (6)$$

$\Omega$  : La vitesse de rotation mécanique de la GSAP.

$J$  : Le moment d'inertie.

$f$  : Le coefficient de frottement visqueux.

$C_e$  : Le couple électromagnétique.

$C_r$  : Le couple résistant ou de charge.

### 3. Commande directe de puissance

Le contrôle direct de puissance (DPC : Direct Power Control en anglais) est apparu comme concurrentiel à la technique de commande vectorielle. Cette méthode de commande à été proposée par T. Neghouchi en 1998 [16]. La commande DPC est basée sur la sélection d'un vecteur de tension de telle manière que les erreurs entre les grandeurs mesurées et de référence sont réduites et maintenues entre les limites des bandes d'hystérésis [17, 18]. Deux techniques des commandes ont été utilisées pour mettre en application des commandes de la DPC [19-22]:

- DPC utilisant le vecteur de tension: basée sur la position du vecteur de tension dans le repère stationnaire  $\alpha$ - $\beta$ .
- DPC utilisant le flux virtuel : basée sur le calcul d'un flux virtuel.

D'un autre coté, la commande DPC est une technique de contrôle basée sur les puissances active et reactive avec les avantages de la robustesse et du contrôle rapide (voir Figure 1) [23].

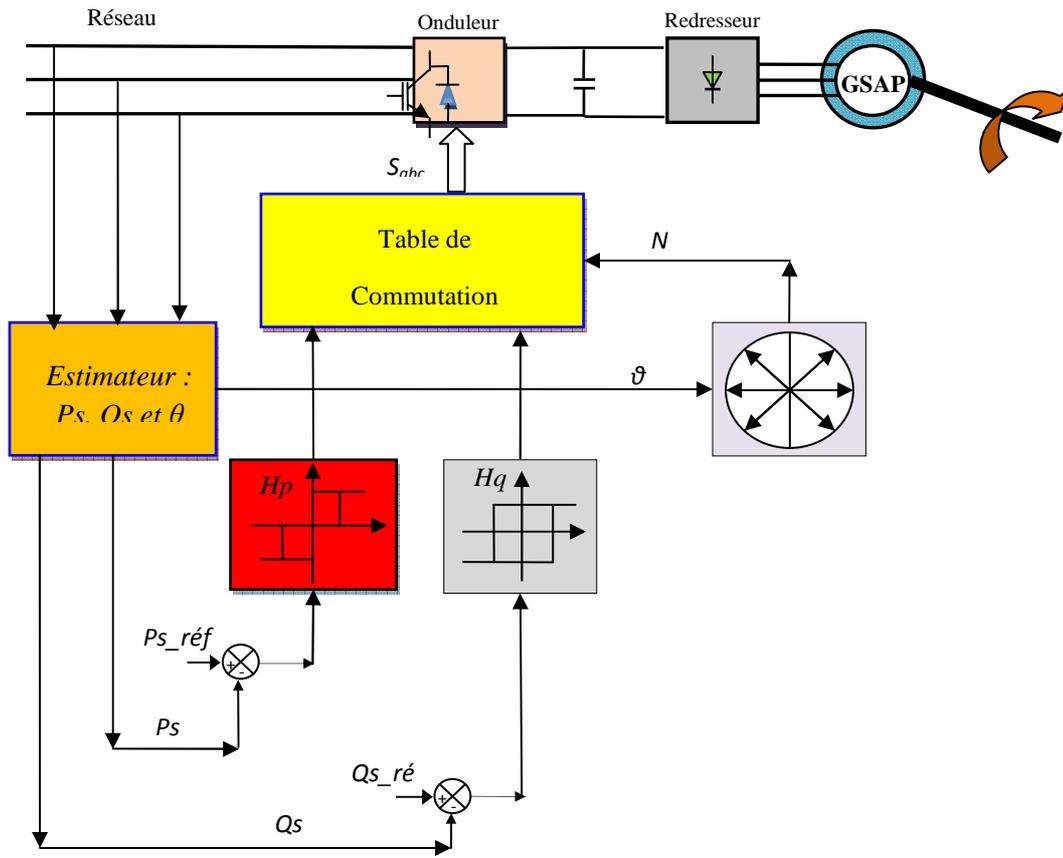


Figure 1 : Schéma de la commande générale du contrôle direct de puissance.

Le but était d'éliminer le bloc de modulation et les boucles internes en les remplaçant par une table de commutation dont les entrées sont les erreurs entre les valeurs de référence et les mesures effectuées [24].

Le principe de la DPC consiste à sélectionner une séquence des ordres de commutation ( $S_a, S_b, S_c$ ) des semi conducteurs constituant, à partir d'une table de commutation (voir Tableau 1). La sélection s'effectue sur la base des erreurs ( $\varepsilon P_s$  et  $\varepsilon Q_s$ ) entre les références des puissances active et réactive ( $P_s^*$  et  $Q_s^*$ ) et les valeurs réelles ( $P_s$  et  $Q_s$ ), fournies par deux comparateurs à hystérésis de sorties numérisées  $H_p$  et  $H_q$  respectivement, ainsi que sur le secteur (zone) dans lequel le vecteur de tension [16].

Tableau 1 : Table de sélection des vecteurs optimaux (puissance active et réactive).

Secteurs (N)		1	2	3	4	5	6
$H_q$	$H_p$						
1	1	5	6	1	2	3	4
	0	7	0	7	0	7	0
	-1	3	4	5	6	1	2
0	1	6	1	2	3	4	5
	0	0	7	0	7	0	7
	-1	2	3	4	5	6	1

Dans notre cas on utilisé un comparateur à hystérésis à trois niveaux pour la puissance active (Figure. 2) et à deux niveaux pour la régulation du flux (Figure. 3).

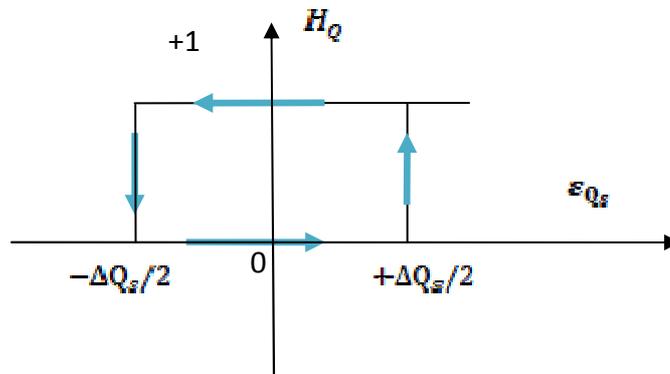


Figure 2 : Comparateur à hystérésis pour la puissance active.

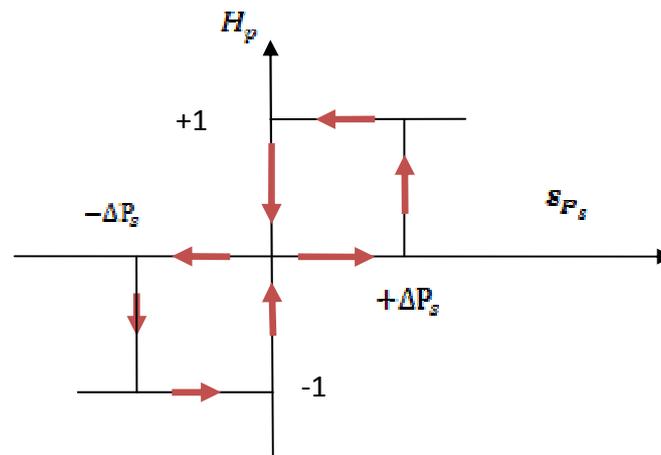


Figure 3 : Comparateur à hystérésis pour la puissance réactive.

Les puissances instantanées sont calculées de la façon suivante :

$$\begin{cases} P_s = \omega (\Psi_\alpha i_\beta - \Psi_\beta i_\alpha) \\ Q_s = \omega (\Psi_\alpha i_\alpha + \Psi_\beta i_\beta) \end{cases} \quad (7)$$

#### 4. Commande DPC-HYN de la GSAP

Les réseaux de neurones possèdent des propriétés d'apprentissage, d'approximation et de généralisation, aussi se révèlent-ils intéressants pour la synthèse d'une telle commande [25]. D'autre part les RNA suscitent de plus en plus d'intérêt dans le domaine de la commande des machines électriques. On peut en juger par la diversité et le nombre croissant de publications récentes traitant de l'utilisation de ces réseaux en machines électriques.

La structure de la commande DPC à base des comparateurs à hystérésis neuronale (DPC-HYN) de la GSAP est représentée par la Figure 4.

Les régulateurs à hystérésis de la DPC classique sont remplacés par des contrôleurs neuronaux, dont les entrées sont l'erreur de la puissance active ( $P_{s\_ref} - P_s$ ) et celle de la puissance réactive ( $Q_{s\_ref} - Q_s$ ). La convergence du réseau a été obtenue en utilisant les valeurs des paramètres regroupées dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Propriétés du LM pour les régulateurs à hystérésis.

Paramètres du LM	valeurs	
	Hp	Hq
Nombre de couche cachée	3	4
Pas d'apprentissage	0.002	0.002
Pas d'affichage (affichage de l'erreur par morceaux)	50	50
Nombre d'itération (epochs)	200	200
Coef d'accélération de convergence (mc)	0.8	0.8
Erreur (goal)	0	0
Fonctions d'activation	Tansig, Purelin	Tansig, Purelin

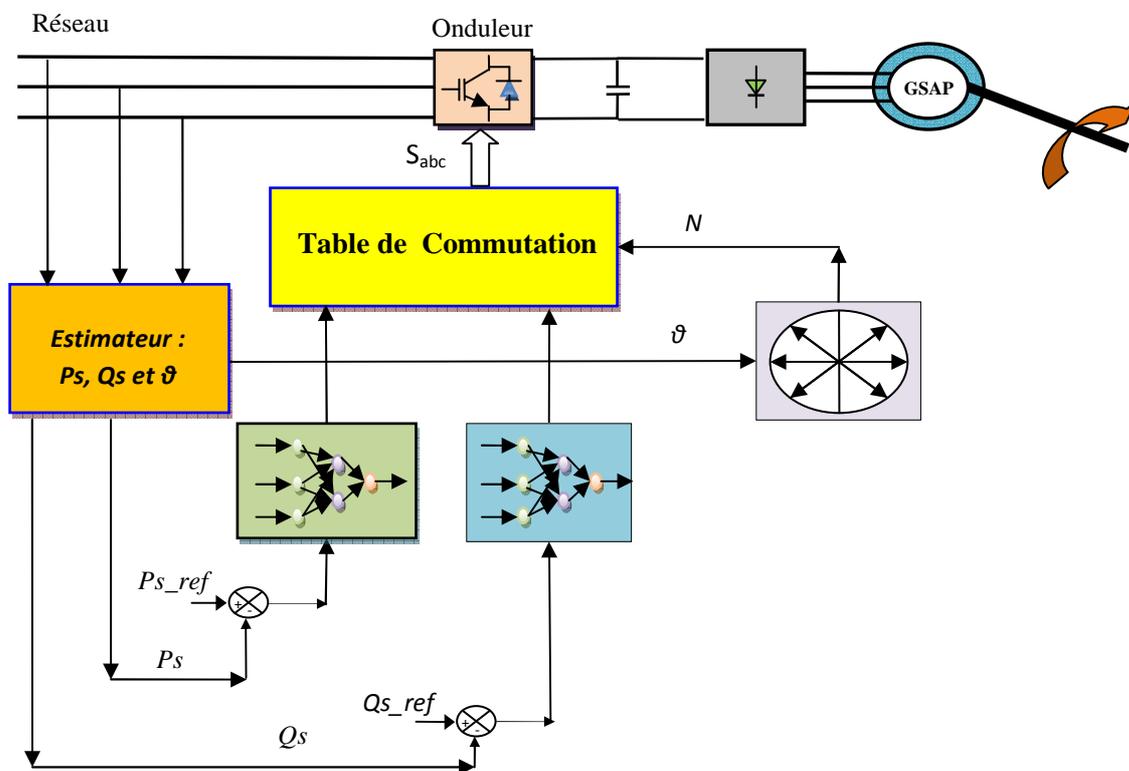


Figure 4 : Commande DPC de la GSAP basée sur les régulateurs à hystérésis neuronale.

## 5. Commande DPC neuronale (DPC-RNA) de la GSAP

La structure de la commande neuronale directe de puissance (DPC-RNA), de la GSAP est représentée par la Figure 5. Dont le tableau de commutation sont remplacé par un contrôleur neuronal, et dont les entrées sont l'erreur de la puissance active  $\epsilon_{P_s}$ , de puissance réactive  $\epsilon_{Q_s}$ , 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 à deux niveaux.

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 » (voir Tableau 3).

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 du LM.

Paramètres du LM	valeurs
Nombre de couche cachée	30
Pas d'apprentissage	0.005
Pas d'affichage (affichage de l'erreur par morceaux)	50
Nombre d'itération (epochs)	2000
Coef d'accélération de convergence (mc)	0.9
Erreur (goal)	0
Fonctions d'activation	Tansig, Purelin

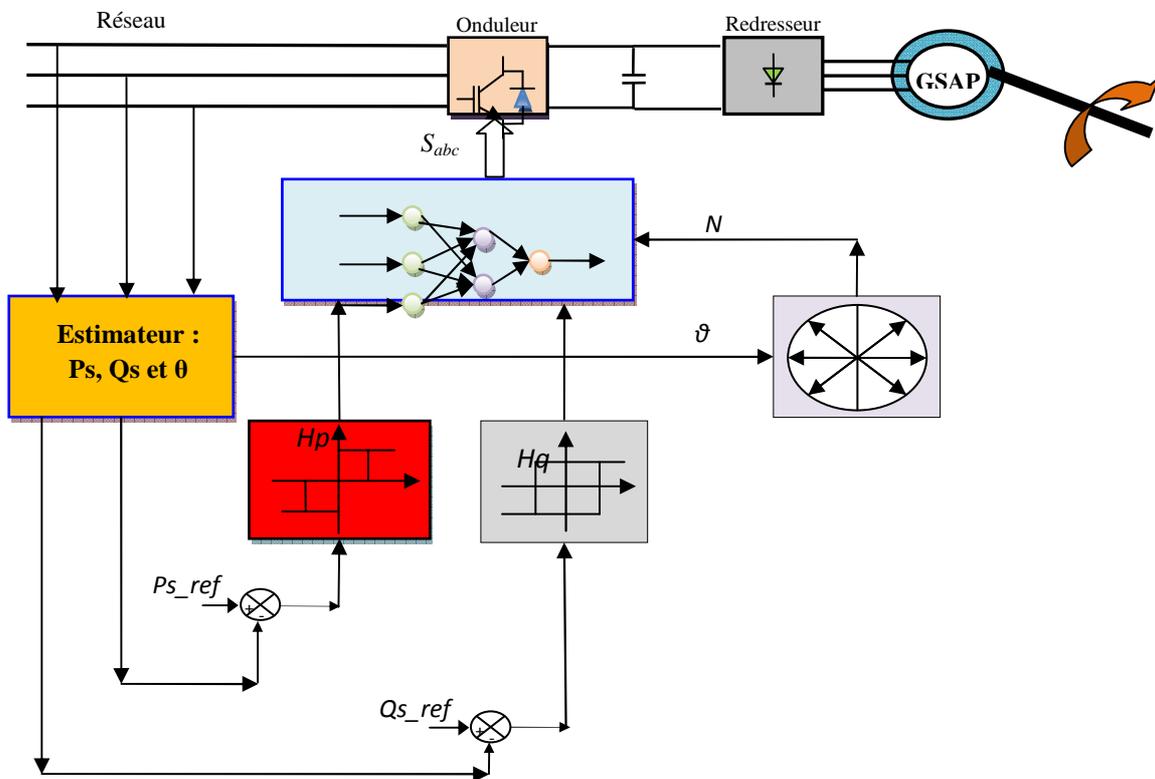


Figure 5 : Commande directe de puissance de la GSAP basée sur les RNA.

Sur la Figure 6 nous illustrons le contrôleur à base de réseau de neurones de la commande DPC-RNA d'une GSAP.

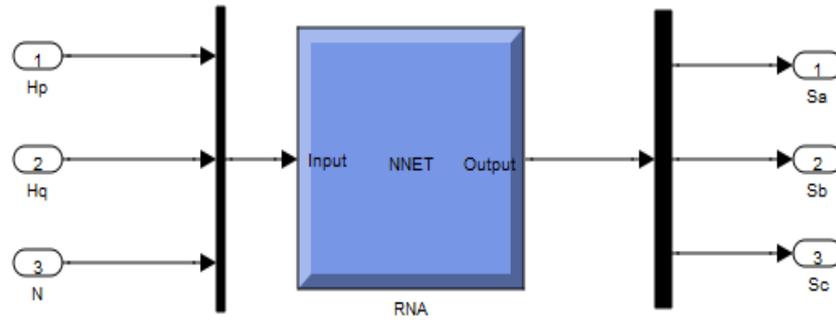


Figure 6 : Structure de réseaux de neurones de la DPC-RNA.

La représentation de la structure interne du contrôleur neuronale est illustrée par Figure 7.

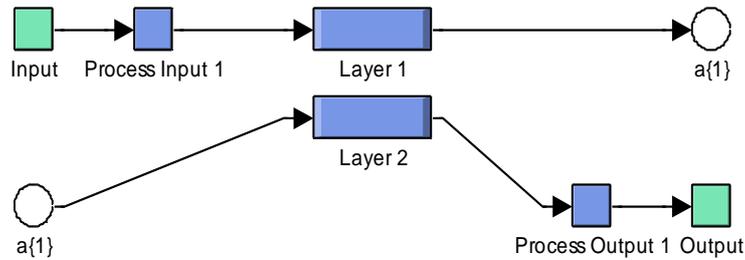


Figure 7 : Structure interne du contrôleur neuronale.

La Figure 8, illustre la structure interne de layer 1 du contrôleur neuronale.

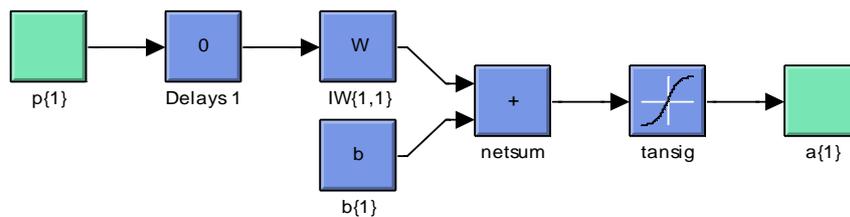


Figure 8 : Structure interne de layer 1.

La Figure 9, illustre la structure interne de layer 2 du contrôleur neuronale.

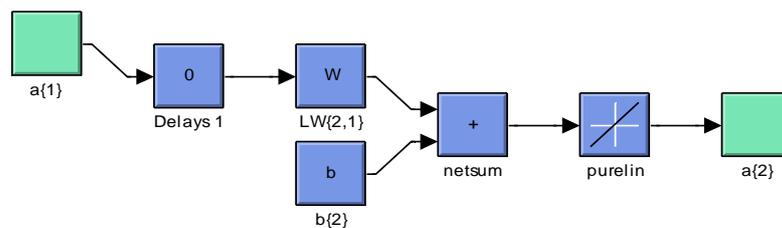
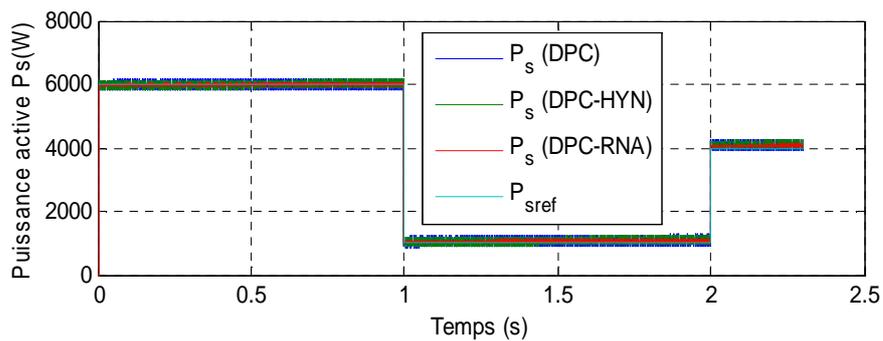


Figure 9 : Structure interne de layer 2.

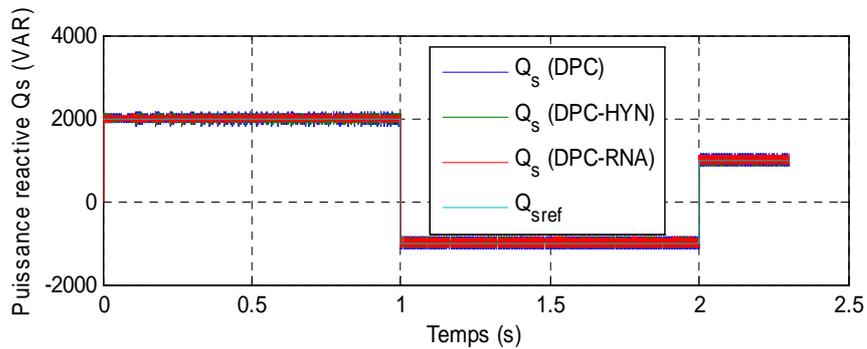
## 6. Résultat de simulation

### 6.1 Test de suivi de consigne

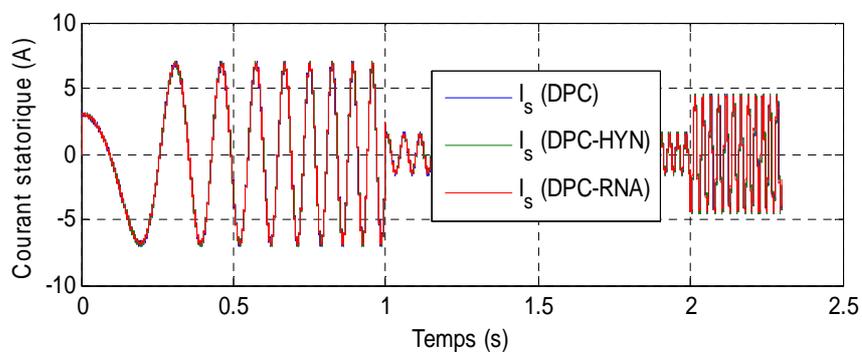
Pour tester le fonctionnement de la commande DPC classique avec RNA, et réaliser les études prospectives, un modèle de simulation développée dans l'environnement Matlab/Simulink a été établi. Les résultats de simulation obtenus sont montrés par les Figures 10-15. On remarque pour les trois types de commandes (DPC, DPC-RNA et DPC-HYN) que les puissances actives et réactives mesurées suivent parfaitement leurs références.



**Figure 10 :** Puissance active (Test de suivi de consigne)



**Figure 11 :** Puissance reactive (Test de suivi de consigne).



**Figure 12 :** Courant statorique (Test de suivi de consigne).

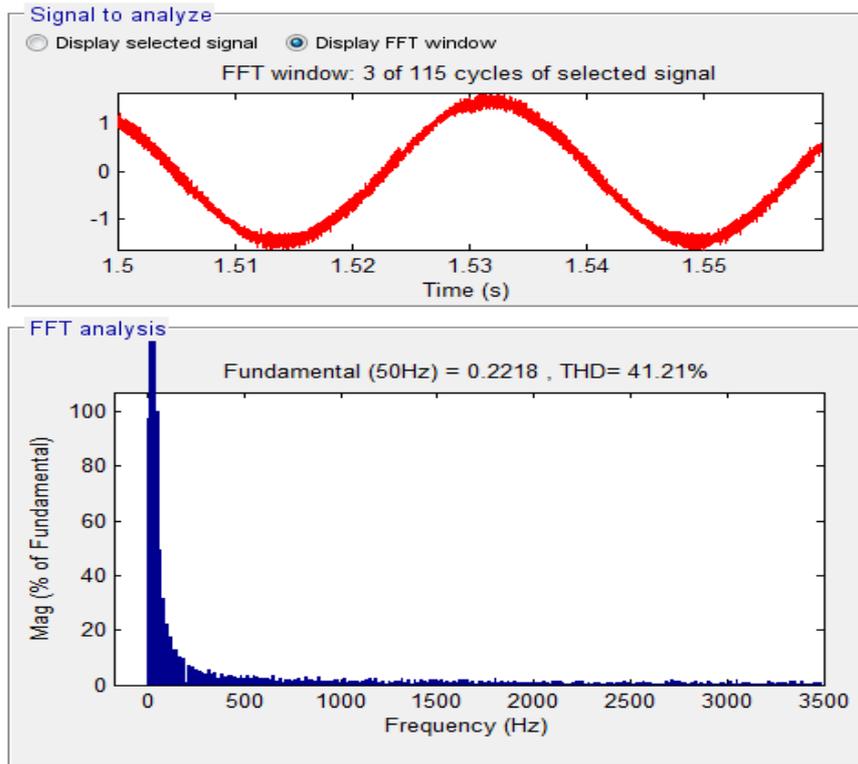


Figure 13 : Spectre d'harmonique d'une phase du courant statorique pour la DPC

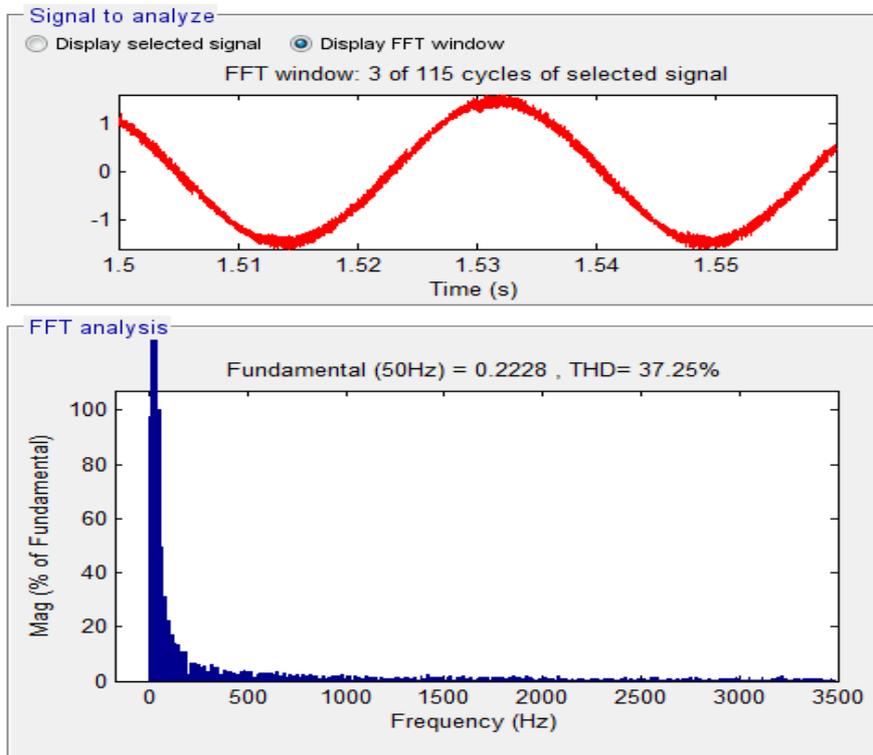


Figure 14 : Spectre d'harmonique d'une phase du courant statorique pour la DPC-HYN.

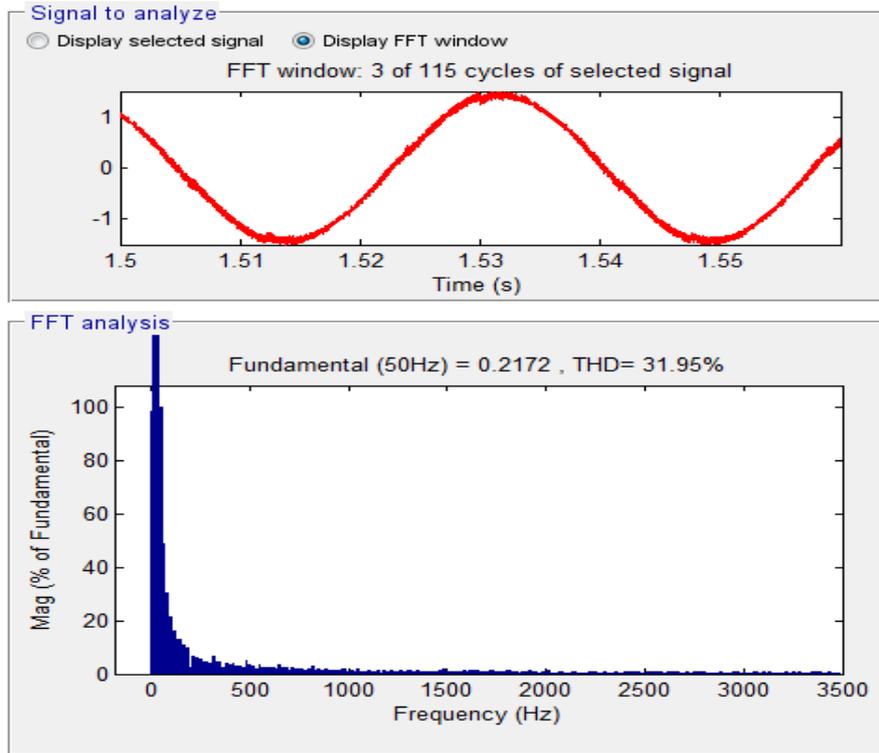


Figure 15 : Spectre d'harmonique d'une phase du courant statorique pour DPC-RNA.

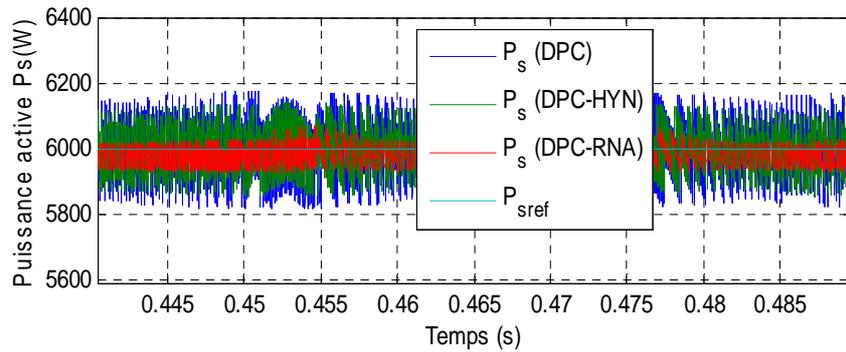


Figure 16 : Zoom sur la puissance active (Test de suivi de consigne).

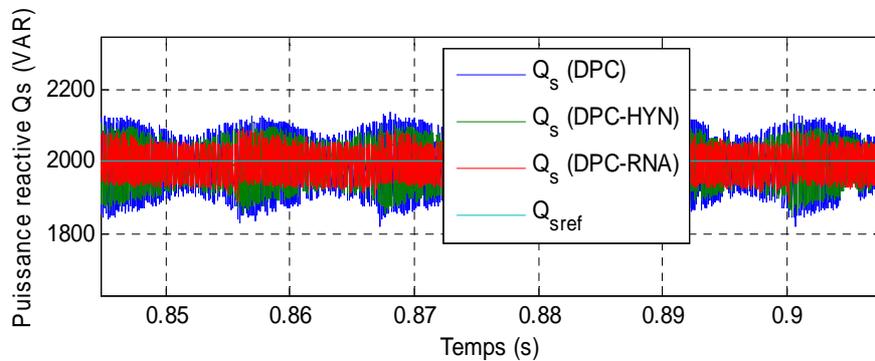


Figure 17 : Zoom sur la puissance reactive (Test de suivi de consigne).

## 6.2 Test de robustesse

L'essai de robustesse consiste à faire varier les paramètres du modèle de la GSAP utilisée. La robustesse des trois algorithmes de commandes utilisés (DPC, DPC-RNA et DPC-HYN) a été testée par les conditions suivantes :

- Résistances  $R_s$  multiplié par 2
- Inductances  $L_d$  et  $L_q$  multiplié par 0.5.

Les Figures 18-23, représentent les résultats de simulation obtenus.

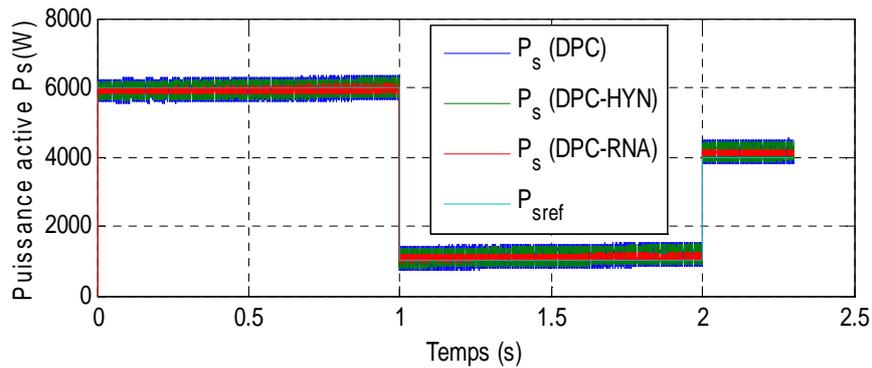


Figure 18 : Puissance active (Test de robustesse).

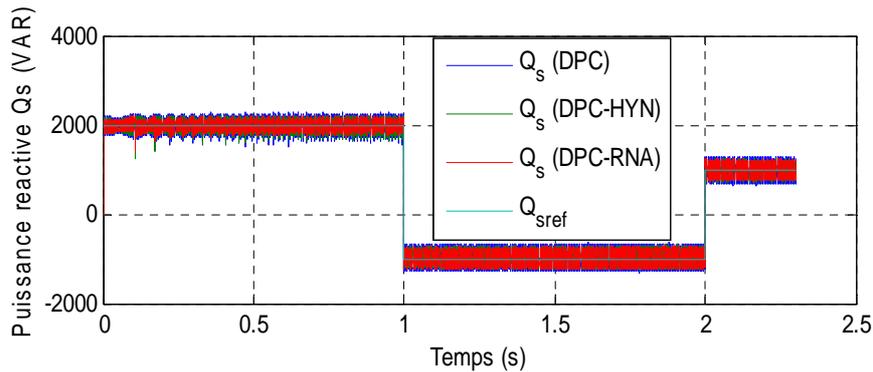


Figure 19 : Puissance reactive (Test de robustesse).

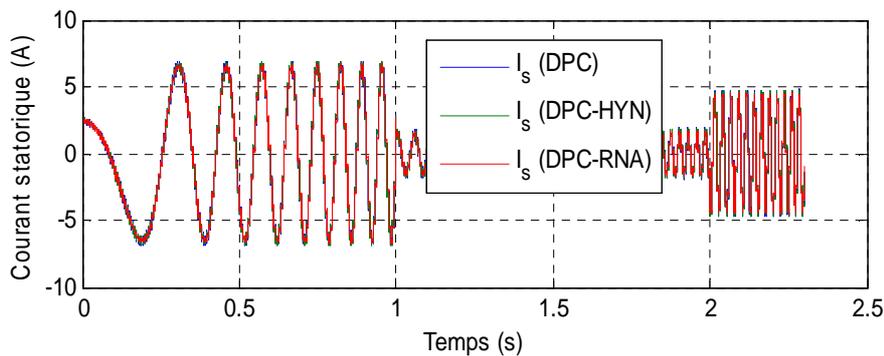


Figure 20 : Courant statorique (Test de suivi de consigne).

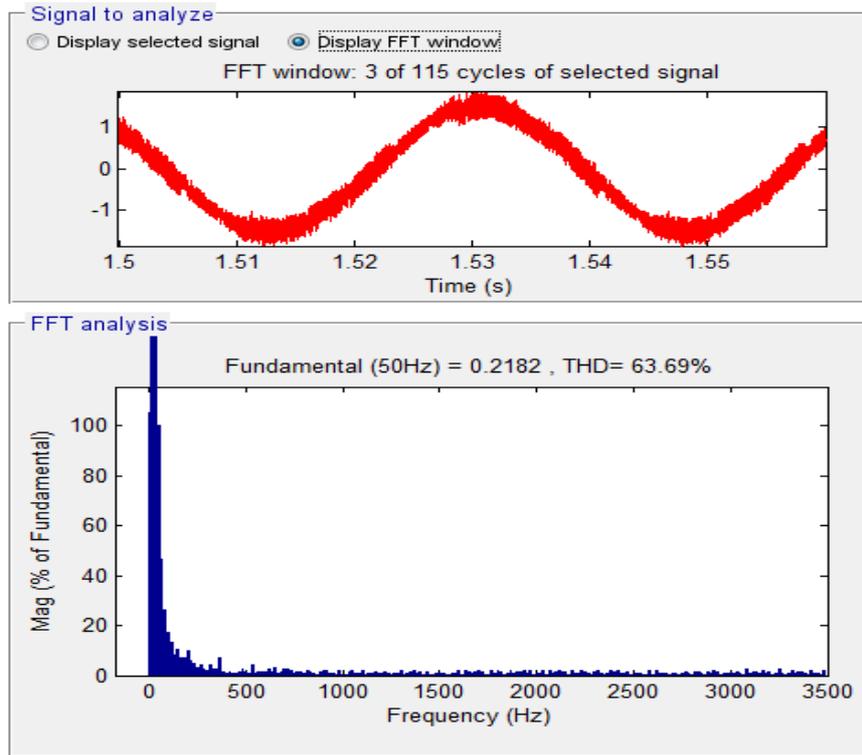


Figure 21 : Spectre d'harmonique d'une phase du courant statorique pour la DPC.

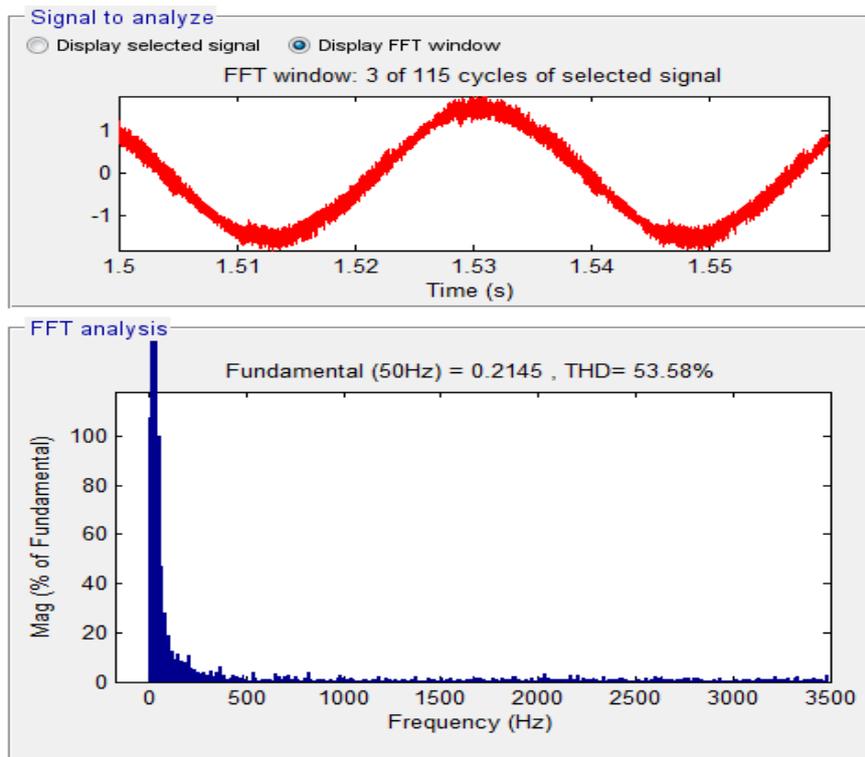


Figure 22 : Spectre d'harmonique d'une phase du courant statorique pour la DPC-HYN.

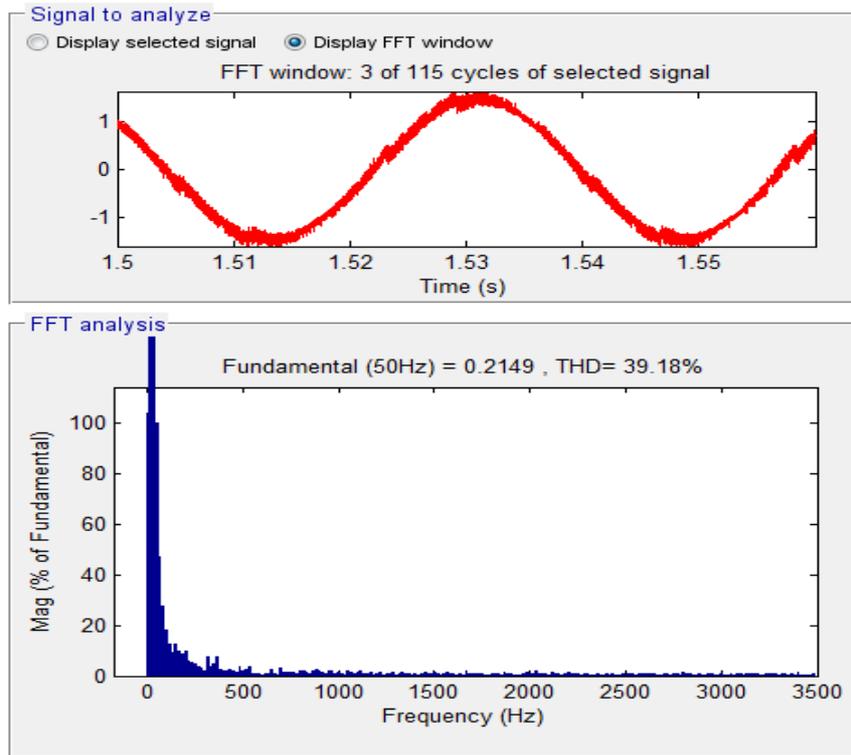


Figure 23 : Spectre d'harmonique d'une phase du courant statorique pour la DPC-RNA.

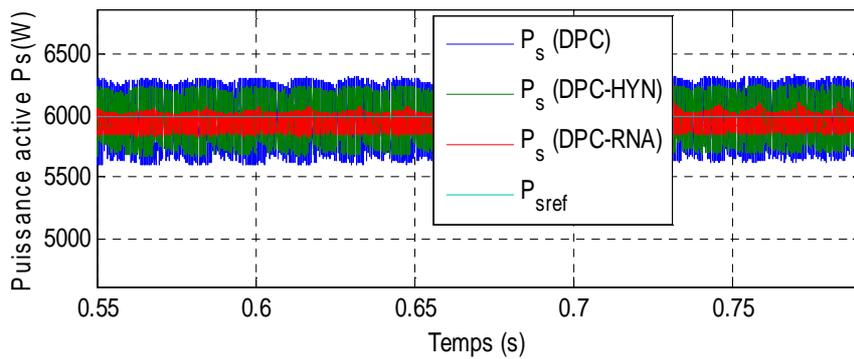


Figure 24 : Zoom sur la puissance active (Test de robustesse).

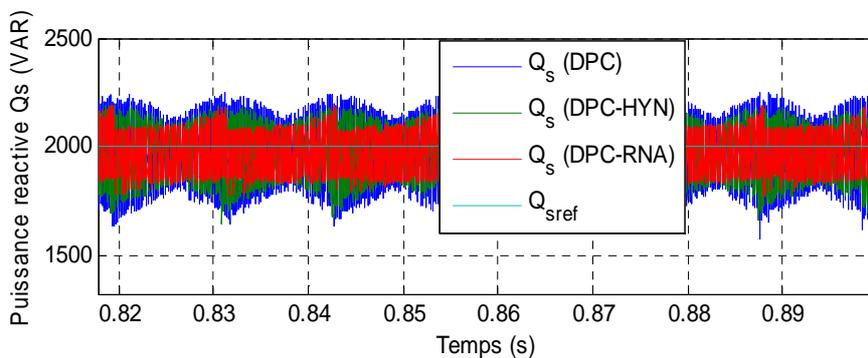
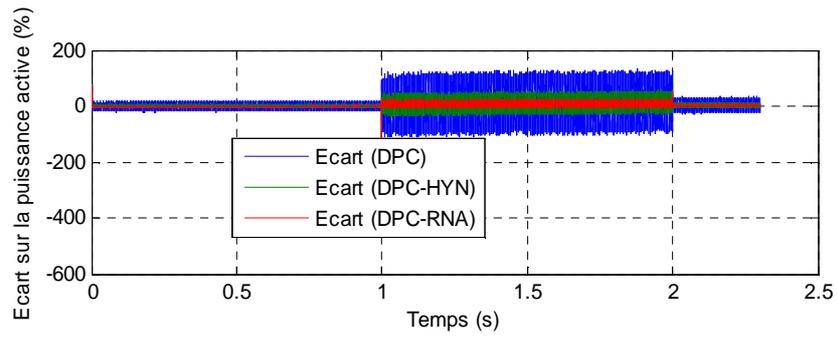
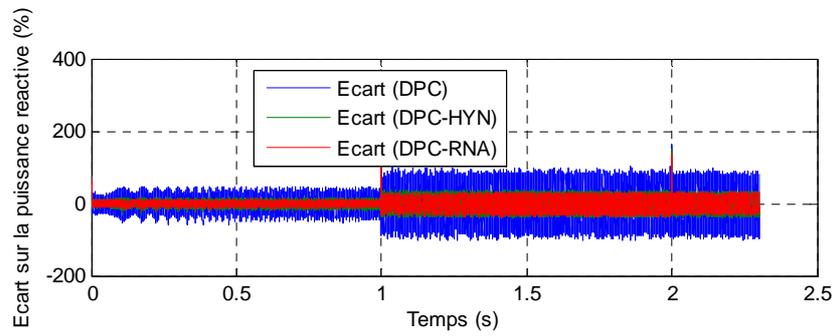


Figure 25 : Zoom sur la puissance reactive (Test de robustesse).

La Figure 25, illustre l'écart sur la puissance reactive et active de trois commandes proposées de la GSAP.



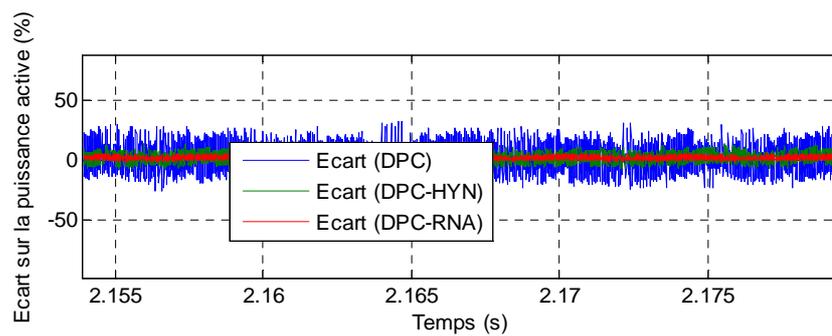
a) Puissance active



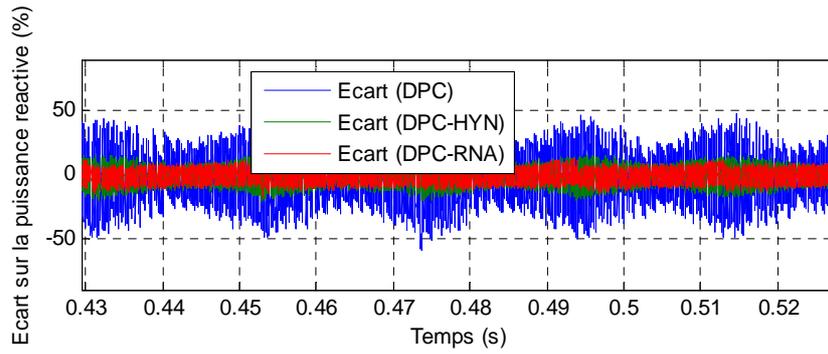
a) Puissance réactive

**Figure 25 :** Comparaison des écarts sur les puissances réactives et actives des deux méthodes de commande (DPC-HYN et DPC-RNA) de la GSAP (test de robustesse).

La Figure 26, illustre le zoom des l'écart sur les puissances de la GSAP.



a) Puissance active



a) Puissance réactive

Figure 26 : Zoom sur l'écart.

Dans le Tableau 4, nous résumons les résultats de simulation obtenus par DPC, DPC-RNA et DPC-HYN à deux niveaux.

Tableau 4 : Etude comparative entre la DPC-RNA, DPC-HYN.

		$I_{sa}$ THD (%)	Minimisations des ondulations de puissance active	Minimisations des ondulations de puissance réactive
Test de suivi de consigne	DPC	41.21	Plus ondulations	Assez bonne
	DPC-HYN	37.25	bonne	bonne
	DPC-RNA	<b>31.95</b>	Très bonne	bonne
Test de robustesse	DPC	63.69	Plus ondulations	Plus ondulations
	DPC-HYN	53.58	bonne	Plus ondulations
	DPC-RNA	<b>39.18</b>	Très bonne	Très bonne

Les résultats de simulation et le Tableau 4 montrent sans doute, que la commande DPC-RNA c'est la plus performante au niveau de la minimisation des pulsations de puissance active et de puissance réactive ainsi que les harmoniques de courant statorique par rapport à la commande DPC-HYN et DPC classique.

D'un autre côté, on remarque d'après le Figure 26 qui illustre la comparaison des écarts sur les puissances réactives et actives des trois types de commande (DPC, DPC-HYN et DPC-RNA) de la GSAP, que le écart sur les puissances est réduit pour la commande DPC-RNA comparé au commande DPC et DPC-HYN. Ces résultats nous permettent de conclure que la commande DPC-RNA est la plus efficace vis-à-vis la réduction les ondulations des puissances actives et réactives par rapport au commande DPC classique et DPC-HYN.

## 7. Conclusion

Dans cet article, nous avons améliorons les performances de la commande DPC classique par les RNA, Les RNA ont rencontré un grand intérêt de part des chercheurs grâce à leur aptitude d'apprentissage du comportement d'un système à partir de ses données d'entrée-sortie. Ces capacités d'apprentissage et de généralisation permettent aux RNA de traiter plus efficacement les problèmes complexes et/ou non linéaires qui varient dans le temps. Jusqu'à présent, les RNA de type MLP restent les plus populaires dans les applications de contrôle. La commande DPC-RNA a donnée des résultats satisfaits.

## 8. References

1. S. Nawal, C. Ammaria, « Commande du moteur synchrone à aimants permanents par backstepping, » Mémoire de Master, université Abou Bekr Belkaid, 2015.
2. A. M. Hemeida, W. A. Farag, O. A. Mahgoub, « Modeling and control of direct driven PMSG for ultra large wind turbines, » World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 59, pp. 918-924, 2011.
3. M. Allagui, O. Hasnaoui, J. Belhadj, « A 2MW direct drive wind turbine ; vector control and direct torque control techniques comparison, » Journal of Energy in Southern Africa, Vol. 25, No. 2, pp. 117-126, 2014.
4. Y. Errami, M. Ouassaid, M. Cherkaoui, M. Maaroufi, « Variable structure sliding mode control and direct torque control of wind power generation system based on the PM synchronous generator, » Journal of Electrical Engineering, Vol. 66, No. 3, pp. 121-131, 2015.
5. N. Freire, J. Estime, A. Cardoso, « A comparative analysis of PMSG drives based on vector control and direct control techniques for wind turbine applications, » Przegląd Elektrotechniczny, Vol. 88, No. 1, pp. 184-187, 2012.
6. I. Gnanambal, G. Balaji, M. Abinaya, « Adaptive controller for drive system PMSG in wind turbine, » Middle-East Journal of Scientific Research, Vol. 21, No. 7, pp. 1119-1129, 2014.
7. P. Gajewski, K. Pienkowski, « Direct torque control and direct power control of wind turbine system with PMSG, » Przegląd Elektrotechniczny, Vol. 92, No. 10, pp. 249-253, 2016.
8. M. S. Merzoug, H. Benalla, L. Louze, « Sliding mode control (SMC) of permanent magnet synchronous generators (PMSG), » Energy Procedia, Vol. 18, pp. 43-52, 2012.
9. M. Nasiri, J. Milimonfared, S. H. Fathi, « Robust control of PMSG-based wind turbine under grid fault conditions, » Indian Journal of Science and Technology, Vol. 8, pp. 1-13, 2015.
10. O. B. K. Hasnaoui, M. Allagui, J. Belhadj, « PMSG gear-less wind turbine equipped with an active and reactive power supervisory, » International Journal of Renewable Energy Research, Vol. 4, No. 2, pp. 435-444, 2014.
11. M. M. Kumar, R. Sundareswaran, « PMSG based wind energy conversion with space vector modulation, » International Journal of Energy and Power Engineering, Vol. 4, No. 3, pp. 146-152, 2015.
12. A. Mudholker, P. M. Menghal, A. J. Laxmi, « SVPWM based converter for PMSG based wind energy conversion system, » Procedia Computer Science, Vol. 70, pp. 676-682, 2015.
13. V. Meenakshi, S. Paramasivam, « Control strategy used in DFIG and PMSG based wind turbines an overview, » International Journal of Power Electronics and Drive System, Vol. 8, No. 3, pp. 1160-1167, 2017.

14. E. Youness, D. Aziz, E. Abdelaziz, E. Najib, Z. Othmane, « DTC-SVM control for permanent magnet synchronous generator based variable speed wind turbine, » *International Journal of Power Electronics and Drive System*, Vol. 8, No. 4, pp. 1732-1743, 2017.
15. M. Messaoud, « Etude comparative des architectures et stratégies de contrôle d'un aérogénérateur synchrone a aimants permanents, » Thèse de Doctorat, université Hadj Lakhader Batna, 2014.
16. Y. Djeriri, « Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle, » Thèse de Doctorat, université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, 2015.
17. E. Tremblay, « Contribution à la commande de l'éolienne a MADA en permettant l'amélioration de la qualité de l'onde du réseau électrique, » M. ING, ETS (QS), Montréal, Canada, 2009.
18. Y. Djeriri, A. Meroufel, A. Massoum, Z. Boudjema, « Direct power control of a doubly fed induction generator based wind energy conversion systems including a storage unit, » *Journal of Electrical Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 196-204, 2014.
19. M. Malinowski, « Sensorless control strategies for three-phase PWM rectifiers, » Phd Thesis, University of Technology, Warsaw, 2001.
20. R. Datta, V. T. Ranganathan, « Direct power control of grid-connected wound rotor induction machine without rotor position sensors, » *IEEE Trans. Power Electron*, Vol. 16, No. 3, pp. 390-399, 2001.
21. P. Antoniewicz, M. P. Kazmierkowski, « Virtual-flux-based predictive direct power control of AC/DC converters with online inductance estimation, » *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 12, pp. 4381-4390, 2008.
22. T. Nogouchi, H. Tomiki, S. Kondo, I. Takahashi, « Direct power control of PWM converter without power-source voltage sensors, » *IEEE Trans. Ind. Applications*, Vol. 34, pp. 473-479, 1998.
23. M. Zolfaghari, S. Taher, D. Munuz, « Neural network-based sensorless direct power control of permanent magnet synchronous motor, » *Ain Shams Engineering Journal*, Vol 7, pp.729-740, 2016.
24. A. Boulahia, « Etude des convertisseurs statiques destinés à la qualité de l'énergie électrique, » Mémoire de Magister, université de Constantine, 2009.
25. F. Lahouazi, « Mise en œuvre d'une stratégie de commande neuro floue: Application à un pendule inverse, » Mémoire de Magister, université Mouloud Mammeri-Tizi-Ouzou, 2011.