

Performance de la commande des puissances active et réactive dans une éolienne basée sur une MADA

A. Tamaarat * et A. Benakcha

Laboratoire LGEB, Université Mohamed Khider, B.P 145 Biskra, Algérie

(reçu le 20 Décembre 2017 - accepté le 25 Décembre 2017)

Résumé - Le développement de la technologie éolienne à vitesse variable et à fréquence constante est devenu un domaine d'intérêt majeur aujourd'hui pour la production de l'énergie électrique. Ce travail est une contribution à l'étude de la génération de ce type d'énergie. Le système présenté ici est basé sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA) relié au réseau de fréquence constante. Une commande vectorielle basée sur l'orientation du flux statorique de la machine est appliquée pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive entre le stator et le réseau. Le contrôleur proposé génère les tensions de référence rotoriques nécessaires pour garantir leurs valeurs souhaitées. Dans cet article, afin de contrôler les deux puissances active et réactive, une étude comparative a été faite entre trois types de régulateurs (PI classique, flou et PI adaptatif par la logique floue) pour évaluer leurs performances en régimes dynamique et statique. L'ensemble du système éolien et sa commande ont été modélisés et simulés par Matlab. Les résultats montrent que, la commande PI adaptative proposée permet d'obtenir des performances de contrôle nettement améliorées, surtout par rapport à la commande PI conventionnelle.

Abstract - With the development of wind power technology, variable speed constant frequency wind turbine has become the mainstream today. This work is a contribution to the study of this type of energy. A study analysis of a complete wind energy conversion system is presented, the system based on a doubly fed induction generator (DFIG) and connected to the fixed grid frequency. A vector control with stator flux orientation of the DFIG is also used to control independently the active and reactive powers between the stator and the grid. The proposed controller generates the references rotor voltages required to guarantee their desired reference values. The complete system is modeled and simulated in the Matlab. Comparison studies have been performed between the conventional PI controller, fuzzy logic and fuzzy self-tuning PI controller to investigate its dynamic and static performances. The results show that, the fuzzy self-tuning PI controller which has been proposed. Therefore, compared with conventional controller this type has more advantages and the control performance is greatly improved by using this type of control.

Mots clés: Eolienne - Machine asynchrone à double alimentation, MADA - Puissance active - Puissance réactive - Commande vectorielle - Extraction de la puissance maximale, MPPT - Logique floue - PI adaptatif.

1. INTRODUCTION

L'énergie éolienne est produite par des aérogénérateurs qui captent à travers leurs pales l'énergie cinétique du vent et entraînent elles mêmes un générateur produit de l'électricité. Parmi les convertisseurs électromécaniques, la machine asynchrone à double alimentation (MADA) constitué une meilleur solution pour l'extraction de maximum de puissance dans les turbines éoliennes [1-3].

Le système étudié ici est constitué d'un aérogénérateur tripales, à axe horizontal, connecté au réseau par une MADA. Les enroulements du stator sont connectés directement au réseau triphasé, alors que les enroulements du rotor sont reliés à des convertisseurs de puissance AC-AC bidirectionnels en courant. Ce type de machines

* a.tamaarat@yahoo.fr

peut présenter quelques avantages dans le domaine de production de l'énergie éolienne à vitesse variable par rapport à d'autres types de machines à induction [4]. La possibilité de fournir la puissance électrique pour les deux régimes de fonctionnement (hypo et hyper synchronisme). Les convertisseurs ne sont pas sur le flux de la puissance (moins de 25 à 30 % de la puissance nominale) [5].

Un système de commande de haute performance demande en général une bonne réponse en régulation et en poursuite, qui doit être insensible aux variations des conditions d'opération et des paramètres du procédé. Les techniques de commande classique de type PI couvrent une large gamme dans les applications industrielles [6].

Cette technique de commande présente l'intérêt de la simplicité de mise en œuvre et son efficacité est relativement satisfaisante (pour certaines applications), la facilité d'exploitation de ce type de régulateur et son coût un peu réduit sont les principales raisons de son succès. Au cours du temps et avec des gains des régulateurs fixes, cette méthode conventionnelle est montrée leur limite en termes de stabilisation et performances et ces applications sont devenues moins efficaces face aux variations des conditions d'opération et des paramètres du procédé [7].

Trouver le remplaçant de ces techniques classiques est le souci constant de plusieurs chercheurs car cela implique un compromis entre la robustesse d'un côté et le coût d'un autre côté. Les techniques intelligentes de la commande ont la une forte capacité de contrôler les systèmes non linéaires, de prendre en charge le traitement des variables imprécises et de déduire des décisions objectives par une connaissance approximative, même avec le changement de point de fonctionnement de processus [8].

La logique floue est l'une des branches importantes de l'intelligence artificielle. Parmi toutes les techniques intelligentes la logique floue est la technique de commande la plus simple à implanter en pratique.

Afin d'améliorer leurs performances, la technologie des contrôleurs PI incorpore des éléments d'intelligence artificielle. Cela est motivé par le développement d'algorithmes de commande adaptative très performants mis en application grâce à la disponibilité de moyens de calcul très rapides et de capacité de mémoire plus élevée. L'intégration de la logique floue dans la commande adaptative classique est aussi une solution forte intéressante pour assurer une régulation optimale qui répond aux exigences de l'utilisateur. Même dans un environnement difficile et variable, ce type de commande permet d'exploiter les avantages présentés par des contrôleurs PI est ceux de la logique floue.

Le travail présenté dans cet article concerne l'application de quelques stratégies de commandes à un système de conversion de l'énergie éolienne équipé d'une MADA. Pour cela, on a utilisé trois types de régulateurs des puissances active et réactive à travers le stator de cette machine et le réseau: un régulateur PI conventionnel, un régulateur à base de la logique floue et un régulateur PI adaptatif par la logique floue.

2. ETUDE THEORIQUE

2.1 Notions théoriques

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, (figure 1).

La puissance de la masse d'air P_v qui traverse la surface équivalente à la surface active S de l'éolienne est donnée par:

$$p_v = 1/2 \rho \cdot S \cdot V_v^2 \quad (1)$$

où ρ est la densité de l'air, égale à 1.225 kg/m^3 , V_v est la vitesse du vent en m/s.

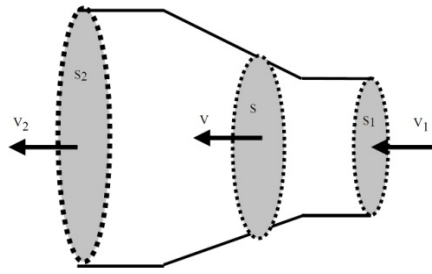


Fig. 1: Tube de courant autour d'une éolienne

La puissance de la masse d'air P_v qui traverse la surface équivalente à la surface active S de l'éolienne est donnée par:

$$p_v = 1/2 \rho \cdot S \cdot V_v^2 \quad (2)$$

où ρ est la densité de l'air, égale à 1.225 kg/m^3 , V_v est la vitesse du vent en m/s.

La théorie de Betz est une approche simplificatrice découverte en 1920 par le physicien allemand Albert Betz. Elle donne la quantité maximale d'énergie cinétique pouvant être recueillie par une éolienne.

Cette quantité est définie par la limite de Betz:

$$P_m = P_{\max} = 16/27 \cdot p_v = 0.59 \cdot p_v \quad (3)$$

De cette façon, le coefficient de puissance maximal théorique est défini par:

$$C_p^{\max} = \frac{P_{\max}}{P_v} = \frac{2p_{\max}}{\rho \cdot S \cdot V_v^3} \leq 0.59 \quad (4)$$

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne, une grandeur spécifique est utilisée:

$$\{ \lambda = R \cdot \Omega_1 / V_v \}$$

avec, λ : Rapport de vitesse {vitesse de l'extrémité des pales sur la vitesse du vent}; Ω_1 : Vitesse de rotation avant le multiplicateur; R : Rayon des pales de l'aérogénérateur.

On pratique chaque turbine éolienne est caractérisé par son propre coefficient de puissance C_p , ce dernier est en fonction de λ et β , où β est l'angle de calage des pales.

2.2 Optimisation de la conversion énergétique

Le schéma de la figure 2 illustre les courbes caractéristiques de l'éolienne dans le plan {puissance/vitesse de rotation de la turbine}. Nous nous intéressons dans cet article au contrôle de la chaîne de conversion éolienne dans la première partie de fonctionnement à pleine charge {tronçon [AB]}. A partir de la vitesse minimale (le point A) en suivant la courbe de la puissance maximale, l'éolienne tourne à la vitesse de rotation liée à la vitesse spécifique optimale λ_{opt} pour laquelle le coefficient de puissance C_p est maximal.

Les travaux de recherche montrent que les éoliennes qui fonctionnent à vitesse variable fournissent un rendement énergétique plus élevé comparés aux éoliennes qui fonctionnent à vitesse constante avec un moindre effort mécanique et moins de fluctuations de puissance.

Différentes méthodes MPPT ont été utilisées afin d'obtenir un fonctionnement optimal. Dans ce travail, la technique utilisée est relative à la vitesse spécifique optimale ou un rapport de vitesse optimal {Tip Speed Ratio-TSR}. Ce type de commande règle la vitesse de rotation de l'éolienne pour maintenir le rapport de vitesse à son optimum λ_{opt} .

Une boucle de régulation de vitesse est alors mise en œuvre et sa vitesse de référence Ω_{ref} est déduite de la relation de λ_{opt} :

$$\Omega_{ref} = \frac{\lambda_{opt} \cdot V_v}{R} \tag{5}$$

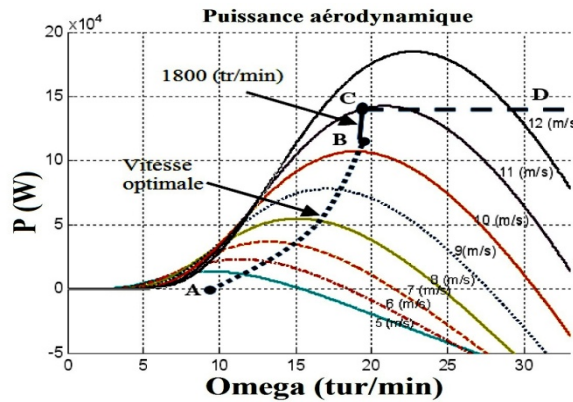


Fig. 2: Caractéristique aérodynamique d'une éolienne à vitesse variable (par rapport à la vitesse de l'axe lent)

Le contrôle de la vitesse de rotation peut être réalisé en agissant sur le couple C_{em} et le schéma blocs se déduit donc comme suit:

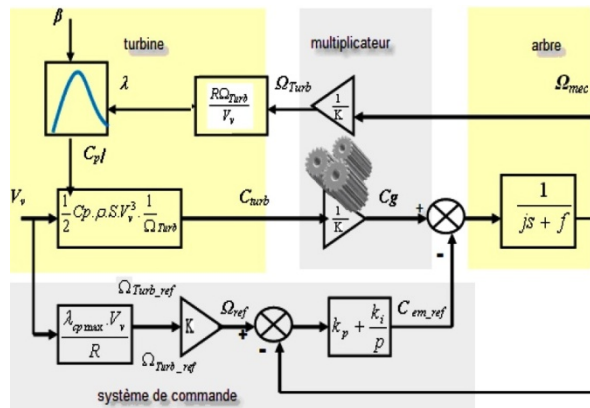


Fig. 3: Schéma fonctionnel de commande

La vitesse de vent et la vitesse de rotation de la turbine sont mesurées pour calculer λ .

2.3 Modélisation déphasée de la MADA

Les relations électriques et magnétiques régissant le fonctionnement de la MADA sont:

$$\begin{aligned}
 V_{sd} &= R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{sq} \\
 V_{sq} &= R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \phi_{sd} \\
 V_{rd} &= R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \cdot \phi_{rq} \\
 V_{rq} &= R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \omega_r \cdot \phi_{rd}
 \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
 \phi_{sd} &= L_s \cdot i_{sd} + M \cdot i_{rd} \\
 \phi_{sq} &= L_s \cdot i_{sq} + M \cdot i_{rq} \\
 \phi_{rd} &= L_r \cdot i_{rd} + M \cdot i_{sd} \\
 \phi_{rq} &= L_r \cdot i_{rq} + M \cdot i_{sq}
 \end{aligned} \tag{7}$$

où R_s , R_r , L_s , et L_r la résistance et l'inductance propre d'une phase statorique et rotorique; M est l'inductance mutuelle entre le stator et le rotor; v_{sd} , v_{sq} , v_{rd} , v_{rq} , i_{sd} , i_{sq} , i_{rd} , i_{rq} , ϕ_{sd} , ϕ_{sq} , ϕ_{rd} et ϕ_{rq} sont les composants d et q de tension, courant et flux statoriques et rotoriques dans le repère de Park. ω_s et ω_r sont les vitesses angulaires des grandeurs électriques statoriques et rotoriques de la machine.

2.4 Commande vectorielle

Le principe de la commande vectorielle réside dans l'orientation du flux dans la machine au stator, au rotor ou dans l'entrefer suivant l'un des deux axes d ou q. Par conséquent, on peut commander indépendamment les deux puissances active et réactive au stator de la machine à induction. Sur cette base, nous allons donc déterminer les équations qui les lient aux grandeurs rotoriques sur lesquelles nous agissons pour commander la machine.

Dans ce travail, la résistance du bobinage statorique R_s est négligeable, ce qui constitue une hypothèse réaliste pour les génératrices de moyenne et fortes puissances utilisées dans les systèmes éoliens [9, 10].

De plus, si l'on suppose que le réseau électrique est stable, ayant pour tension simple V_s , cela conduit à un flux statorique ϕ_s constant. Dans ces conditions, on peut alors arriver à un schéma bloc simple du système électrique de la MADA représenté sur la figure suivante.

Après la compensation de quelques termes, la commande permet de découpler les expressions des puissances active et réactive.

Par conséquent, la composante quadratique du rotor V_{qr} contrôle la puissance active (le couple électromagnétique) et la composante directe V_{dr} contrôle la puissance réactive échangée entre le stator et le réseau (figure 5).

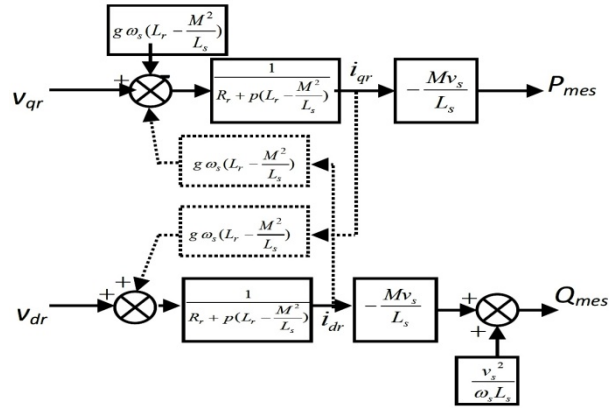


Fig. 4: Schéma-bloc de la MADA

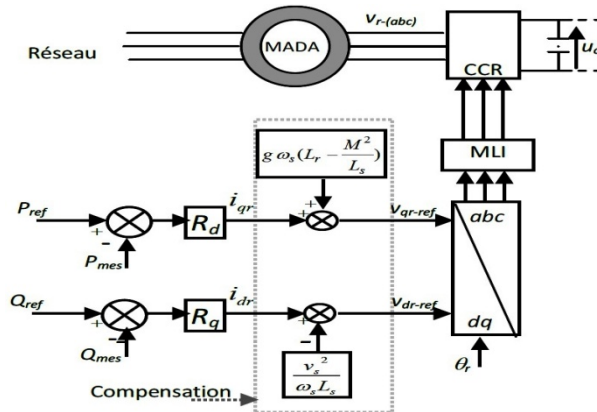


Fig. 5: Schéma bloc de la commande vectorielle de la MADA

Dans la suite de cet article, nous analysons les différentes possibilités de commande des puissances active et réactive par logique floue, PI adaptative par logique floue et les comparer avec la régulation PI classique.

2.5 Commande par logique floue

Dans le système présenté dans cette étude, deux régulateurs indépendants à base de la logique floue sont utilisés pour produire les tensions de référence souhaitées à la commande des puissances active et réactive dans le stator de la MADA (P_S, Q_S).

Comme il est représenté sur la figure 6. Dans le contrôleur floue (CF), la valeur de référence $r(t)$ est comparée à la valeur réelle (mesurée) $y(t)$ pour obtenir l'erreur $e(t)$. De plus, cette erreur est comparée avec l'erreur précédente $e(t-1)$ pour obtenir la variation de l'erreur $\Delta e(t)$.

Les deux entrées du (CF) sont l'erreur de la puissance et sa variation. La sortie du régulateur correspond à la commande. Ces trois grandeurs sont normalisées comme suit: $E = G_e e$, $\Delta E = G_{\Delta e} \Delta e$, $U = G_u u$; Où, G_e , $G_{\Delta e}$ et G_u sont des facteurs d'échelle ou des gains de normalisation associés à $e(t)$, $\Delta e(t)$, $u(t)$ respectivement. Ils permettent de changer la sensibilité du régulateur flou sans en changer la structure.

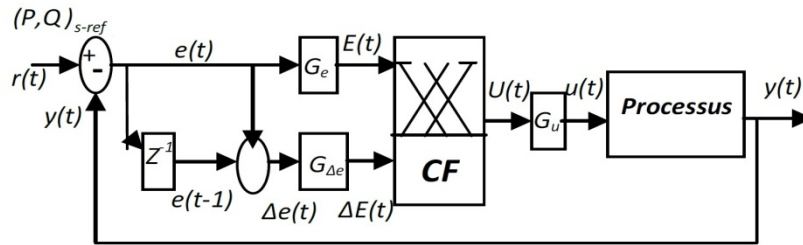


Fig. 6: Schéma synoptique d'un régulateur flou des puissances active et réactive

Les grandeurs [$E(t), \Delta E(t), U(t)$] indicées sont donc les grandeurs normalisées à l'entrée et à la sortie du CF. L'erreur et sa variation est donné par l'expression suivante.

$$\begin{aligned} E(t) &= G_e (r(t) - y(t)) \\ \Delta E(t) &= G_{\Delta e} (e(t) - e(t-1)) \end{aligned} \quad (8)$$

Pour les fonctions d'appartenance, on a choisi pour chaque variable les formes triangulaires et trapézoïdales comme le montre la figure suivante:

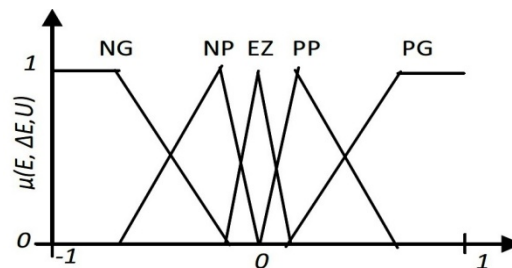


Fig. 7: Ensembles flous de l'erreur, la variation d'erreur et de la commande

Chacune des deux entrées linguistiques et la sortie du CF possède cinq ensembles flous qui sont définis sur l'intervalle $[-1, 1]$. Les variables linguistiques sont notées comme suit: **NG** pour négatif grand, **NP** pour négatif petit, **EZ** pour environ zéro, **PP** pour positif petit, et **PG** pour positif grand.

2.5.1 Inférence floue

Les règles floues permettent de déterminer le signal de sortie du régulateur en fonction des signaux d'entrée. Elles relient le signal de sortie aux signaux d'entrée par des conditions linguistiques. Le module d'inférence est constitué de deux blocs, le moteur d'inférence et la base des règles, ce dernier est de type « Si...Alors ».

Une méthode, proposée par King *et al.*, pour élaborer les règles d'inférence du contrôleur flou, consiste à se servir des connaissances pragmatiques du réglage d'un contrôleur PI classique.

Pour choisir les règles, il suffit d'observer la réponse d'un système en boucle fermée à la suite d'un changement de charge de consigne (figure 8).

Le signe de la commande ΔU dépend de la position du point de fonctionnement dans les régions décrites précédemment (**Tableau 1**), que l'on peut définir par les relations suivantes [11]:

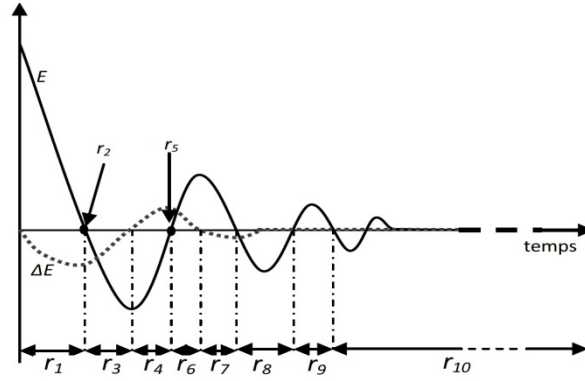


Fig. 7: Ensembles flous de l'erreur, la variation d'erreur et de la commande

Si E est zéro Alors ΔU prend le signe de ΔE , Sinon ΔU prend le signe de E .

Si E et ΔE sont nulles Alors $\Delta U(k) = \Delta U(k-1)$.

Tableau 1: Variation de la commande en fonction d'erreur et sa variation

	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7	r_8	r_9	r_{10}
E	+	0	-	-	0	+	+	-	+	0
ΔE	-	-	-	+	+	+	-	0	0	0
ΔU	+	-	-	-	+	+	+	-	+	0

Les règles d'inférences conduisent à adopter une table de décision anti-diagonale (**Tableau 2**).

Tableau 2: Matrice d'inférence du régulateur flou

ΔE --- E	NG	NP	EZ	PP	PG
NG	NG	NG	NG	NP	ZE
NP	NG	NP	NP	ZE	PP
EZ	NP	NP	ZE	PP	PP
PP	NP	ZE	PP	PP	PG
PG	ZE	PP	PP	PG	PG

2.5.2 Defuzzification

C'est la dernière étape pour ce mode de contrôle, elle s'effectue à l'aide de la méthode de calcul du centre de gravité. Cette dernière est caractérisée par sa simplicité de calcul et sa sortie est unique.

2.6 Mécanismes d'adaptation d'un régulateur PI par la logique floue

Les méthodes conventionnelles sont largement appliquées pour la régulation industrielle [12]. Mais, ces régulateurs ne peuvent pas assurer les objectifs optimaux de régulation pour un système complexe et non linéaire. En effet, le réglage d'un système perturbé et dans un environnement variable rend ce type de commande moins performant.

La nature complexe des procédés industriels et la nécessité de maintenir de bonnes performances exigent un réglage en ligne des gains de correction du régulateur PI. Il est nécessaire donc de développer un mécanisme d'adaptation de ces gains permettant

d'incorporer un certain degré d'intelligence dans la régulation. Cette opération peut être réalisée par des régulateurs numériques autos ajustables. La supervision floue des paramètres du régulateur PI est une solution adéquate qui se justifie par les arguments suivants:

- Parmi toutes les techniques intelligentes, la logique floue est la technique de commande la plus simple à implanter en pratique.
- Les critères de performance des deux régulateurs PI classique et à logique floue sont complémentaires (pour les inconvénients et les avantages).
- Un vaste champ d'applications est possédé par les régulateurs PI classiques dans le milieu de l'industrie.
- Cette approche offre la possibilité d'utiliser la précision mathématique de l'algorithme du PI avec l'adaptabilité, la souplesse et la simplicité du formalisme linguistique flou [13].

Dans notre cas on se base sur l'erreur et sa dérivée pour générer les signaux qui seront à appliquer à chaque gain du PI (k_p , k_i), les paramètres de régulateur PI donc changent au cours de fonctionnement. La figure 9 présente le diagramme de cette configuration.

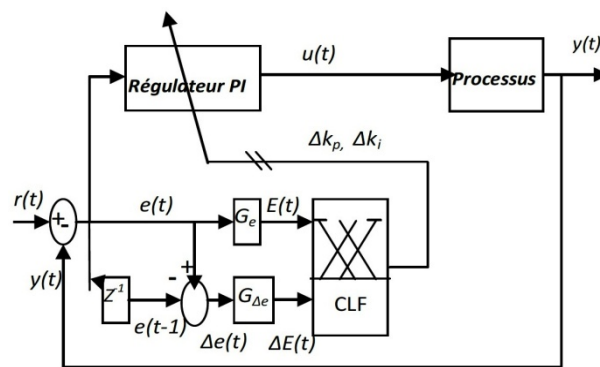


Fig. 9: Principe d'adaptation du PI par la logique floue

Le système flou est utilisé pour modifier les paramètres selon le comportement du procédé. Dans notre cas, les gains de commande seront adaptés en temps réel. Ils sont calculés par:

$$\begin{aligned} k_p &= k_{p0} + G_p \cdot \Delta k_p (E, \Delta E) \\ k_i &= k_{i0} + G_i \cdot \Delta k_i (E, \Delta E) \end{aligned} \quad (9)$$

Les entrées du contrôleur flou sont: l'erreur et la dérivée de l'erreur. Les sorties sont: la valeur normalisée de l'action proportionnelle Δk_p et la valeur normalisée de l'action intégrale Δk_i .

Ces grandeurs de la commande sont normalisées dans l'intervalle $[-1, 1]$ (figure 10). k_{p0} et k_{i0} sont les paramètres de régulation à l'état initial. Ils sont déterminés par la méthode de Ziegler *et al.*

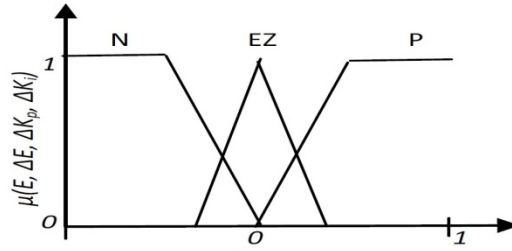


Fig. 10: Forme de la fonction d'appartenance pour les grandeurs suivantes: E , ΔE , Δk_p , Δk_i

On ajuste les paramètres du PI de façon à obtenir une réponse plus rapide, avec un dépassement réduit et un amortissement pendant un temps court. Quand l'erreur est grande, k_p devrait être grand et k_i petit et quand l'erreur est petite, k_p devrait être petit et k_i grand, parce que k_p fournit une réponse dynamique rapide et k_i élimine l'erreur statique et assure la stabilité du système [14]. A Partir de ces règles on peut arriver à la table de l'inférence représenté sur le **Tableau 3**:

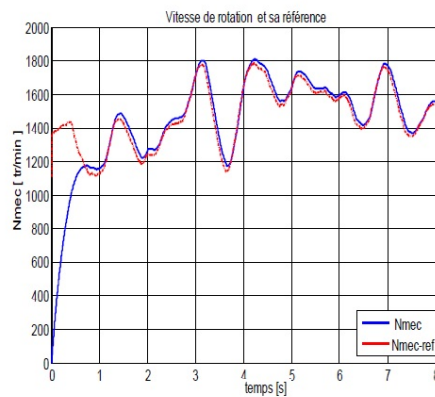
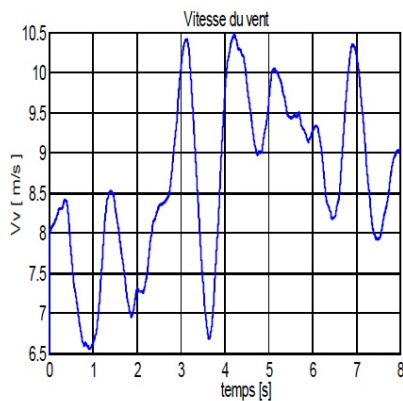
Tableau 3: Règles d'inférence pour ajuster les paramètres proportionnel et intégral

ΔE ---- E	NG	NP	EZ	PP	PG	P
	Δk_p	Δk_i	Δk_p	Δk_i	Δk_p	Δk_i
N	N	P	P	N	N	P
EZ	P	N	EZ	EZ	N	P
P	P	N	N	P	P	N

3. RESULTATS DE SIMULATION ET INTERPRETATION

Ces trois structures de commande (PI, flou et PI adaptatif par logique floue) ont été simulées en considérant un profil de vent moyen autour de 8.5 m/s appliqué à la turbine pendant 8 s.

L'échelon de puissance réactive est changé comme suit: à $t = 3$ s; Q_s passe de 0 kVar à 500 kVar, puis Q_s passe de 500 kVar à -500 kVar à $t = 6$ s .



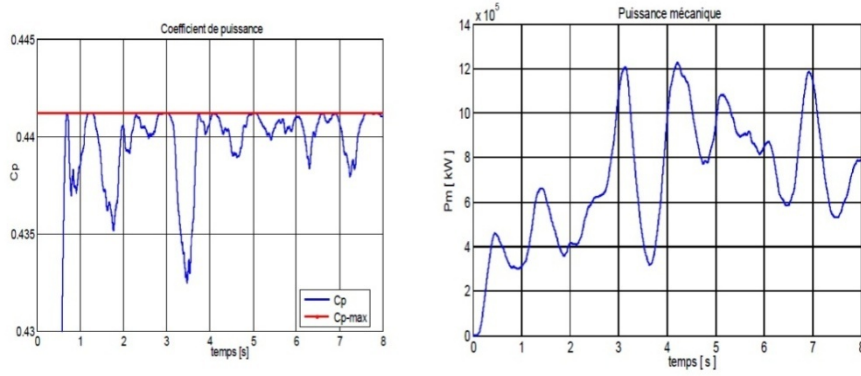


Fig. 11: Evaluation des grandeurs mécaniques de la chaîne de conversion éolienne

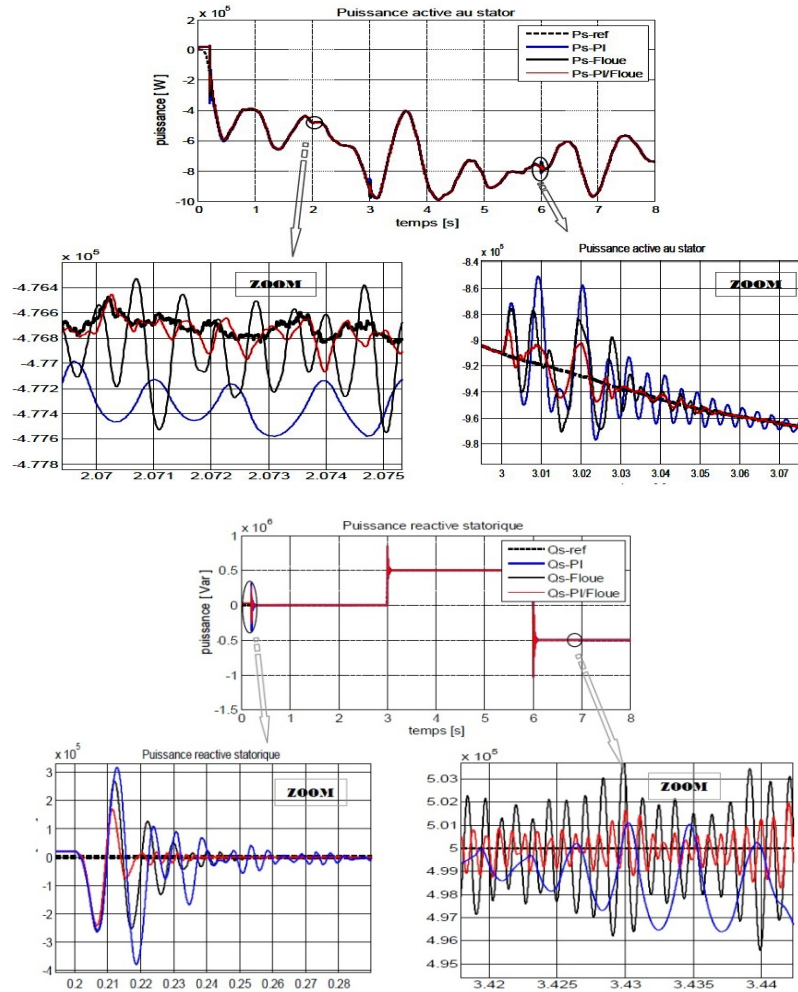


Fig. 12: Evaluation des puissances active et réactive dans le stator de la MADA pour les trois types de régulateurs

D'une manière générale, les résultats présentés sur la figure 12 montrent que les performances de poursuite des puissances statorique sont satisfaisantes et le temps du rejet de perturbation est acceptable pour les trois types de commande.

Cependant, on remarque des réponses moins d'oscillations notamment au démarrage et lors des changements de consigne dans le cas où les régulateurs PI adaptatifs ont été utilisés (les pics des perturbations et le temps de réponse sont moins importants avec ce type de régulateurs).

On constate aussi que l'erreur de stisme est importante avec les régulateurs PI classiques. On peut constater également que, malgré l'amélioration apportée par le contrôleur flou en régime transitoire, ce type présente beaucoup d'oscillations en régime permanent, mais de faible amplitude.

La puissance active statorique suit donc sa référence pour permettre à l'éolienne de fonctionner dans des conditions d'optimisation (figure 11). Cette manière de fonctionnement qui est jugé par des valeurs maximales du coefficient de puissance ($C_p = 0.44$).

Notons que les oscillations de la puissance réactive en régime statique viennent de la variation continue de la puissance active, cette dernière qui change avec la vitesse du vent et selon la fonction (MPPT).

4. CONCLUSION

Dans cette étude nous avons simulé tous les éléments intervenant dans le système de conversion éolienne. Nous avons testé les régulateurs se basant sur la logique floue (flou, PI adaptatif par logique floue). Ainsi nous avons comparé leurs performances avec celles d'un régulateur PI classique.

Sous les mêmes conditions, (poursuite de trajectoire, sensibilité aux perturbations et robustesse vis-à-vis des variations de la vitesse du vent), nous avons analysé les réponses de ces régulateurs équipés pour la commande des puissances active et réactive au stator de la MADA. Les résultats de simulation confirment l'efficacité du système de commande PI adaptative par logique floue. Sa supériorité est évidente, surtout, par rapport aux performances d'un système de commande conventionnelle.

Néanmoins, on peut noter l'apparition d'une petite erreur au niveau de la réponse du système commandé par ce type de régulateur. La cause de cette erreur réside dans le fait que, la loi d'adaptation n'est pas assez rapide pour détecter des changements brusques de la vitesse du vent. On peut limiter cet inconvénient avec un temps d'échantillonnage plus court. Ce choix peut cependant augmenter le temps de calcul.

REFERENCES

- [1] L. Zhang, X. Jin, and L. Zhan, *A Novel LVRT Control Strategy of DFIG based Rotor Active Crowba*, Asia-Pacific on Power and Energy Engineering Conference, China, 25-28 March 2011.
- [2] S. Zhang, C. Zhu, J.K.O. Sin and P.K.T. Mok, *A novel ultra thin elevated channel low-temperature poly-Si TFT*, IEEE Electronics Device Letters, Vol. 20, N°11, pp. 569 – 571, 1999.
- [3] K. Belmokhtar, M.L. Doumbia and K. Agbossou, *Modeling and Fuzzy Logic Control of DFIG Based Wind Energy Conversion Systems*, International Symposium on Industrial Electronics, China, 2012.

- [4] S. Yang, T. Zhou, D. Sun, Zhen Xie and X. Zhang, *A SCR Crowbar Commutated with Power Converter for DFIG-Based Wind Turbines*, *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 81, pp, 87 – 103, 2016.
- [5] C. Carunaiselvane and T. R. Chelliah, *Present trends and Future Prospects of Asynchronous Machines in Renewable Energy Systems*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 74, pp, 1028 – 1041, 2011).
- [6] H.-L. Fu and H.T. Thien, *Modeling a Wind Turbine System Using DFIG and Realization of Current Control on the Model with Fuzzy Logic Controller*, *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Springer, Vol. 282, pp, 8 – 92, 2014.
- [7] B. Ferdi, S. Dib, B. Barbaoui and R. Dehini, *Statcom DC-bus Voltage Fuzzy Controller Design using ANFIS*, *Acta Electrotechnica*. Vol. 55, pp. 32 – 3, 2014.
- [8] P. Ponce, H. Ponce and A. Molina, *Doubly Fed Induction Generator (DFIG) Wind Turbine Controlled by Artificial Organic Networks*, *Soft Computing, Methodologies and Application*, Springer, Vol. 21, pp. 1 – 13, 2017.
- [9] S. Abdeddaim and A. Betka, *Optimal Tracking and Robust Power Control of the DFIG Wind Turbine*, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 39, pp, 25 - 44, 2013.
- [10] F. Poitiers, T. Bouaouiche and M. Machmoum, *Advanced Control of a Doubly-Fed Induction Generator for Wind Energy Conversion*, *Electric Power Systems Research*, Vol. 79, pp, 1085 – 1096, 2009.
- [11] P.S. Londhe, S. Mohan, B.M. Patre and L.M. Waghmare, *Robust Task-Space Control of an Autonomous Underwater Vehicle-Manipulator System by PID-Like Fuzzy Control Scheme with Disturbance Estimator*, *Ocean Engineering*, Vol. 139, pp. 1 - 13, 2017.
- [12] H. Cheng, D. Zhang and L. Cheng, *Comparative Study on Fuzzy PID Controller and Conventional PID Controller*, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 328, pp. 112 - 116, 2013.
- [13] K. Laroussi and M. Zelmat, *Optimisation Floue des Paramètres du Régulateur PI Appliquée à un Moteur à Induction*, 3rd International Conference: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications, Tunisia, 2005.
- [14] Yueming Dai and Shuyun Qiao, *The Design of Mine Hoist Speed Regulation System Based on Ziegler-Nichols PID Control*, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 651-653, pp. 996 - 999, 2014.