

Contrôle robuste d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la Machine Asynchrone à Double Alimentation

M. Allam *

IRECOM-laboratory (Interaction REseau
CONvertisseur Machines)
University Djillali Liabes of Sidi Bel-Abbes, Algeria
* allam2010@live.fr

H. Mesai Ahmed

ICEPS- Laboratory (Intelligent Control & Electrical Power
Systems)
University Djillali Liabes of Sidi Bel-Abbes, Algeria
hamzamesai2@gmail.com

Y. Djeriri

ICEPS- Laboratory (Intelligent Control & Electrical Power
Systems)
University Djillali Liabes of Sidi Bel-Abbes, Algeria
ydjeriri@yahoo.fr

M.A. Dejhaif

APELEC-laboratory (Applications of Plasma, Electrostatics
& Electromagnetic Compatibility)
University Djillali Liabes of Sidi Bel-Abbes, Algeria
med_djehaif@yahoo.com

Résumé — Ce travail présente une stratégie de commande robuste par logique floue à vitesse variable appliquée au système de conversion d'énergie éolienne équipée d'une machine asynchrone à double alimentation de 10 kW. Le stator de la MADA est directement relié au réseau, par contre son rotor est connecté à ce dernier via une cascade (Redresseur, Filtre, Onduleur). Le but est d'appliquer cette technique pour contrôler indépendamment des puissances active et réactive générées par la MADA découplée par la technique d'orientation du flux. Enfin, les performances du système à étudier sont testées et comparées par simulation en termes de robustesse face aux variations paramétriques de la machine à base du logiciel Matlab/Simulink™.

Mots Clés — *Commande robuste, Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA), Régulateur (PI), Régulateur Flou (RF), énergie éolienne, convertisseur statique, facteur de puissance.*

I. INTRODUCTION

L'électricité est devenue de plus en plus primordiale pour l'humanité. En effet, l'accès à l'électricité, est la garantie de meilleures conditions de vie (hygiène, santé, éducation) et un facteur essentiel pour un développement économique et industriel.

Face à la demande en électricité, toujours croissante de nos jours, et loin de l'utilisation des énergies fossiles polluantes (pétrole et gaz), plusieurs pays se sont tournés vers les énergies renouvelables ou les énergies vertes.

Parmi ces sources d'énergies, l'éolienne représente un potentiel assez important non pas pour remplacer les énergies existantes, mais pour palier à l'amortissement de la demande de plus en plus galopante [1]. Il existe une nouvelle solution

utilisant la machine alternative fonctionnant dans un mode un peu particulier, il s'agit de la machine asynchrone à double alimentation (MADA). Cette génératrice permet une production d'électricité à vitesse variable, ceci permet alors de mieux exploiter les ressources éoliennes pour différentes conditions de vent [2].

Plusieurs méthodes de commande de la MADA sont apparues, parmi elles, la commande vectorielle par flux orienté. Son principe de base est de rendre cette machine semblable du point de vue commande à une machine à courant continu à excitation séparée [3]. Cette commande basée sur les régulateurs classiques (réglage à action proportionnelle, intégrale et dérivée), ne permet pas dans tous les cas de maîtriser les régimes transitoires, et en général, les variations paramétriques de la machine [4]. Cependant, il existe des commandes modernes et robustes telle que la commande floue qui a fait l'objet d'études détaillées au cours de ces dernières années et elle est en pleine expansion.

Cette technique de commande a été introduite en 1965 par le Professeur L. Zadeh. Ses principes ont été appliqués en 1974 par E.H. Mamdani à la construction d'un premier contrôleur flou [6], [5].

Notre contribution, dans cet article, est de d'appliquer une commande robuste par logique floue pour contrôler indépendamment des puissances active et réactive générées par la MADA intégrée à un système éolien.

Pour cela, dans la seconde et la troisième partie sont présentées respectivement la modélisation de la turbine éolienne et la MADA. La quatrième partie traite le principe de la technique d'orientation du flux. La commande par logique floue sera l'objet de la cinquième partie. Tandis que

dans la partie sixième, Les résultats de simulation et teste de robustesse avec leurs interprétations sont présentés. Enfin, Nous terminons par une conclusion générale sur l'ensemble de cette étude.

II. MODÉLISATION DE LA TURBINE ÉOLIENNE

La puissance cinétique totale disponible sur la turbine d'une éolienne est donnée par : [3]

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \cdot s \cdot v_v^3 = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot r^2 v_v^3. \quad (1)$$

La puissance aérodynamique sur l'arbre est donnée par :

$$P_{turb} = C_p P_v = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho s v_v^3}{2}. \quad (2)$$

D'après Betz, le coefficient de puissance C_p ne peut être supérieur à 16/27 soit 0.59 [7], [9].

Avec :

ρ : Masse volumique de l'air (1.225 Kg/m³) ; s : Surface balayée par l'éolienne ; r : Longueur de la pale en (m) ; v_v : Vitesse du vent en (m/s) ; β : Angle d'orientation des pales.
 λ : est le ratio de vitesse défini comme étant le rapport entre la vitesse linéaire des pales ($\Omega_{turb} \cdot r$) et la vitesse du vent v_v .

$$\lambda = \Omega_{turb} \cdot r / v_v. \quad (3)$$

Les caractéristiques de C_p en fonction de λ pour différentes valeurs de l'angle de calage β sont illustrées sur la "Fig. 1".

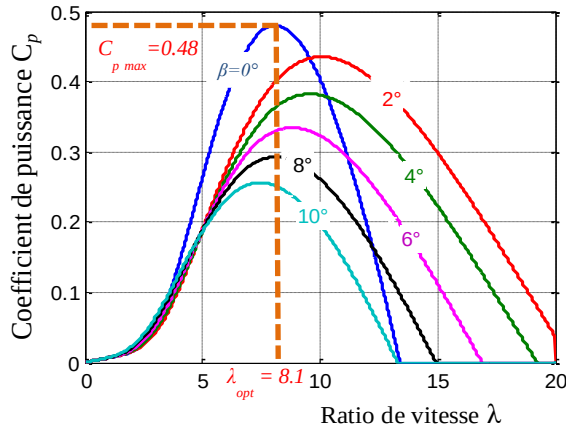


Fig.1. Coefficient de puissance C_p en fonction de λ et β .

D'après la "Fig.1", on constate que pour la valeur maximale de C_p ($C_{p-max} = 0.48$) est atteinte pour un angle de calage ($\beta = 0^\circ$) et ($\lambda = 8.1$). Cette valeur particulière de λ est définie comme la valeur optimale λ_{opt} . [9]

La "Fig.2" représente la réponse de la puissance de la turbine de 10kW en fonction de la vitesse de rotation de la génératrice pour les différentes vitesses du vent.

Les résultats de simulations obtenus par la "Fig.2" montrent clairement l'intérêt du fonctionnement à vitesse variable d'un aérogénérateur.

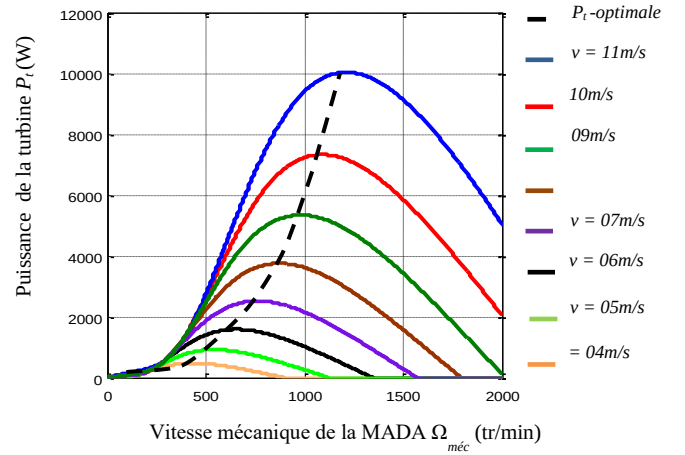


Fig. 2. Puissance de la turbine en fonction de la vitesse de rotation.

III. MODÉLISATION DE LA MADA

La modélisation de la MADA est décrite dans le référentiel de Park. Le système d'équation suivant décrit la modélisation globale de la machine : [2], [4].

A. Equations électriques:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_s + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (4)$$

B. Equations magnétiques:

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (5)$$

C. Equation du couple électromagnétique:

$$\Gamma_{em} = P \frac{M}{L_s} (I_{qr} \varphi_{ds} - I_{dr} \varphi_{qs}) \quad (6)$$

IV. TECHNIQUE D'ORIENTATION DU FLUX

La commande par orientation du flux, consiste à aligner le flux statorique suivant l'axe d du référentiel tournant, "Fig. 3", [3],[7], [10]. On a donc: $\varphi_{sd} = \varphi_s$ et par suite $\varphi_{sq} = 0$

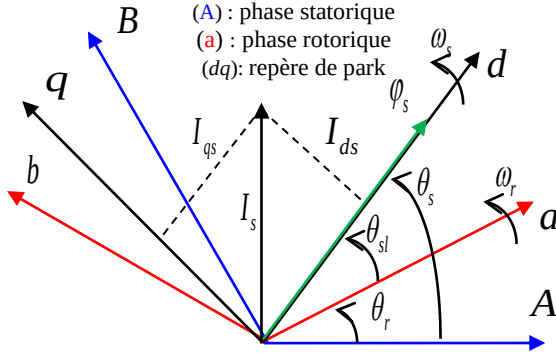


Fig.3. Orientation de l'axe d sur le flux statorique.

Le couple électromagnétique de “(6)” s’écrit alors :

$$\Gamma_{em} = p \frac{M}{L_s} I_{qr} \varphi_{ds} \quad (7)$$

Les puissances active et réactive statorique s’écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (8)$$

L’adaptation de ces équations aux hypothèses simplificatrices donne :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (9)$$

Pour le contrôle de la génératrice, des expressions sont établies montrant la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui lui seront appliquées :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{qr}}{dt} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (10)$$

Les équations précédentes permettent d’établir un schéma bloc du système électrique à réguler donné par la “Fig.4”.

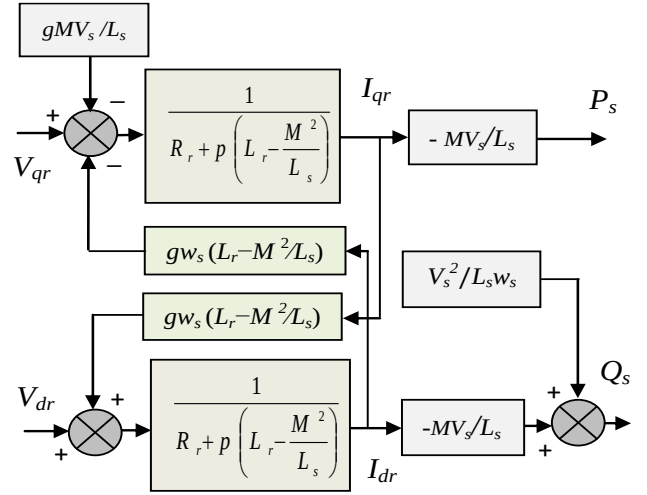


Fig.4. Schéma bloc de la MADA.

V. APPLICATION DE LA COMMANDE PAR LOGIQUE FLOUE

La commande par la logique floue permet d’obtenir une loi de réglage souvent très efficace sans devoir faire des modélisations approfondies. Par opposition à un régulateur standard ou à un régulateur à contre-réaction d’état, le régulateur par logique floue ne traite pas une relation mathématique bien définie, mais utilise des inférences avec plusieurs règles, se basant sur des variables linguistiques. [5],[6],[8]

La “Fig. 5” représente le schéma global d’un régulateur flou.

Avec : $R(t)$, $u(t)$, $y(t)$: est le signal de référence, commande est la sortie du système à commander.

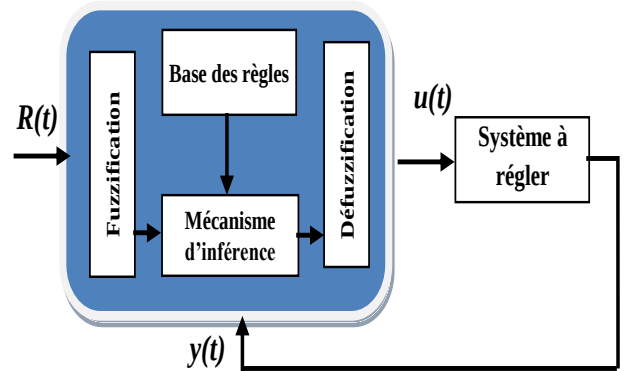


Fig.5. Schéma général d’un régulateur flou (RF)

La “Fig. 6” représente la technique de commande appliquée pour contrôler indépendamment des puissances active et réactive générées par la MADA découplée par orientation du flux.

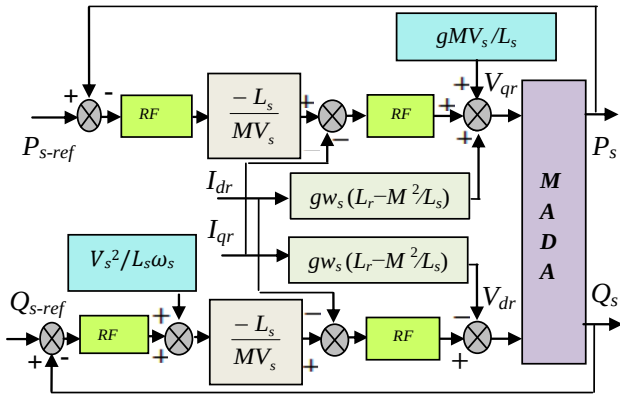


Fig. 6. Schéma bloc de la MADA avec contrôleur flou.

Pour les contrôleurs flous proposé dans la “Fig. 6”, les univers de discours sont d'abord partitionné dans le sept variables linguistiques avec les désignations standards suivantes : NG(négatif grand), NM(négatif moyen), NP(négatif petit), EZ(environ zéro), PP(positif petit), PM(positif moyen), PG(positif grand), des fonctions d'appartenance triangulaires sont choisis pour représenter les variables linguistiques. Les règles floues qui produisent ces actions de contrôle sont indiquées dans le tableau 1.

Tableau 1. Matrice d'inférence

e	NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
Δe	NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
NG	NG	NG	NG	NG	NM	NP	EZ
NM	NG	NG	NG	NM	NP	EZ	PP
NP	NG	NG	NM	NP	EZ	PP	PM
EZ	NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
PP	NM	NP	EZ	PP	PM	PG	PG
PM	NP	EZ	PP	PM	PG	PG	PG
PG	EZ	PP	PM	PG	PG	PG	PG

La “Fig.7”, représente les fonctions d'appartenance utilisées par le contrôleur. Avec : e : l'erreur ; Δe : Variation de l'erreur ; Δu : la variation de la commande.

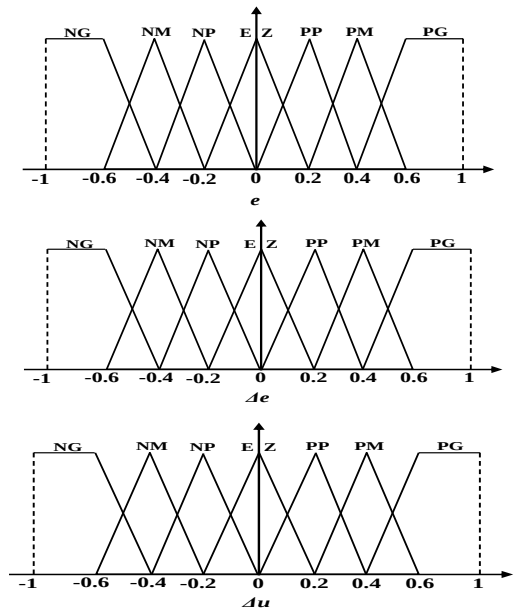


Fig.7. Fonctions d'appartenance utilisées par le RF

VI. SIMULATION ET TESTS DE ROBUSTESSE

Pour illustrer les performances de la commande floue appliquée à une MADA à 10 kW reliés à un réseau 400V / 50Hz, un bloc diagramme du système est proposé dans la “Fig. 8”.

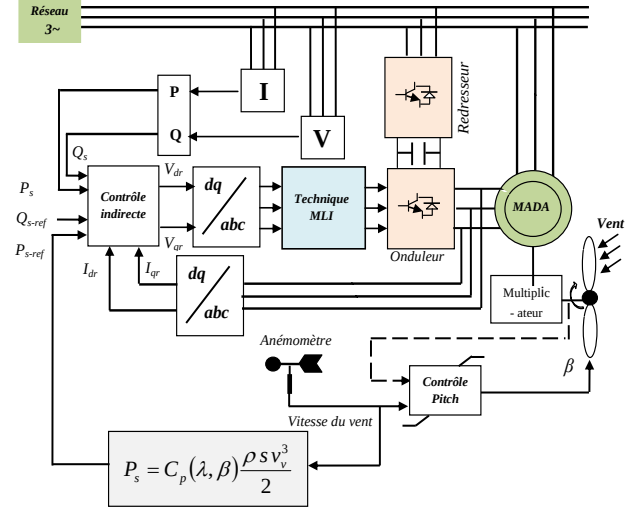


Fig. 8. Schéma de l'ensemble du système étudié.

Les deux techniques de commande étudiées précédemment ont été simulées par logiciel Matlab/SimulinkTM, en considérant un profil du vent illustré par la “Fig.9”.

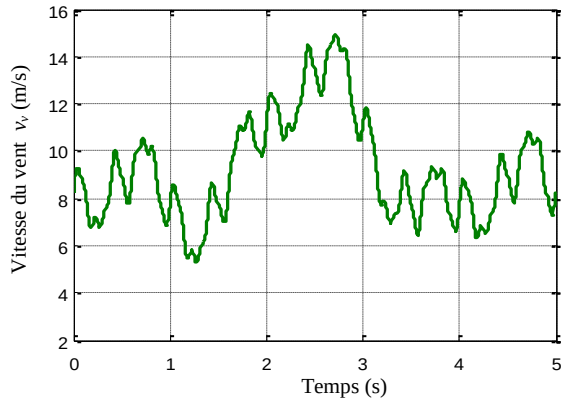


Fig. 9. Profil du vent appliqué au système étudié.

Les résultats tracés dans les figures suivantes montrent les pouvoirs générés lorsque les signaux de référence sont appliqués. “Fig.10” montre les réponses du système avec le régulateur classique (PI), alors que “Fig.11” montre les réponses avec régulateur flou (RF), et puis la “Fig.12” représente une comparaison entre la robustesse des régulateurs: PI et RF avec variations paramétriques (L_s), (L_r) et (M) de 20 % de leur valeur nominale.

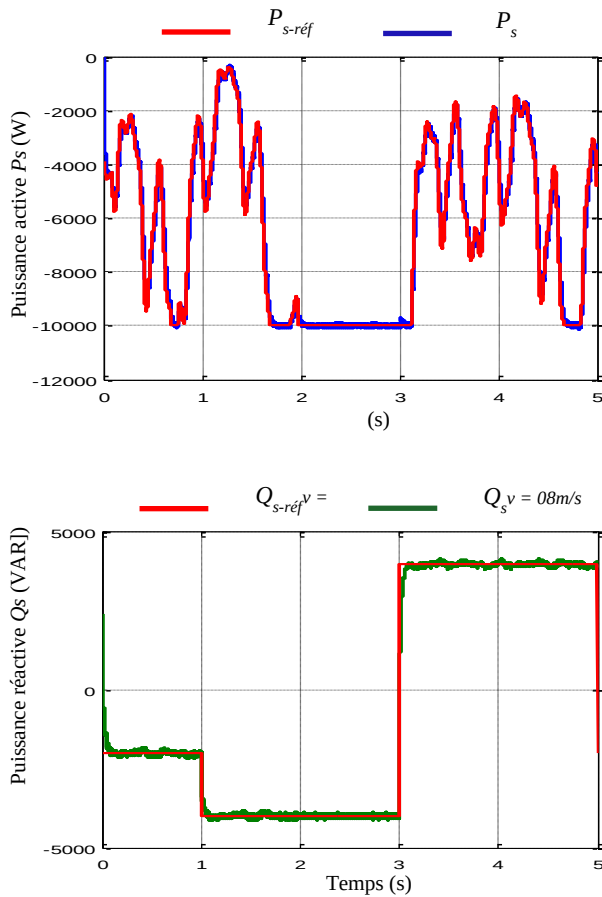


Fig.10. Résultats de simulation avec régulateur PI.

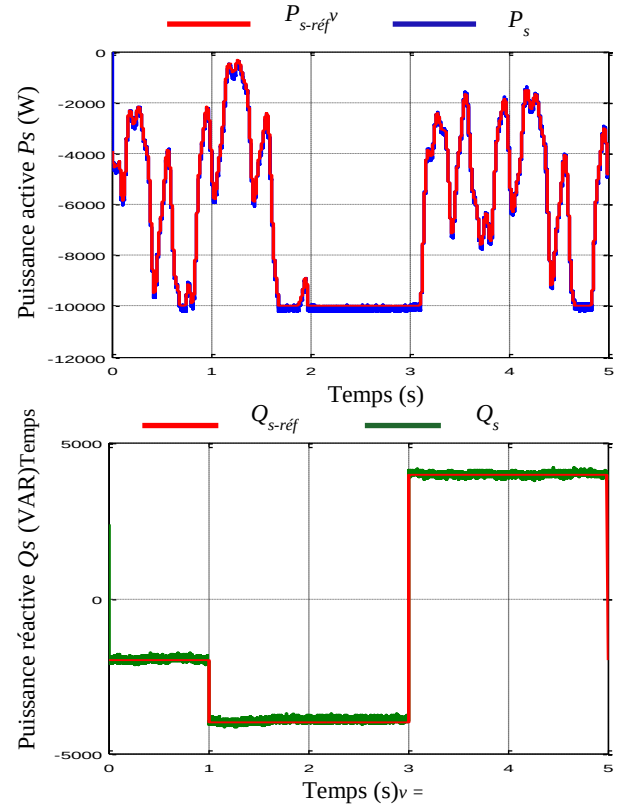


Fig.11. Résultats de simulation avec régulateur flou RF.

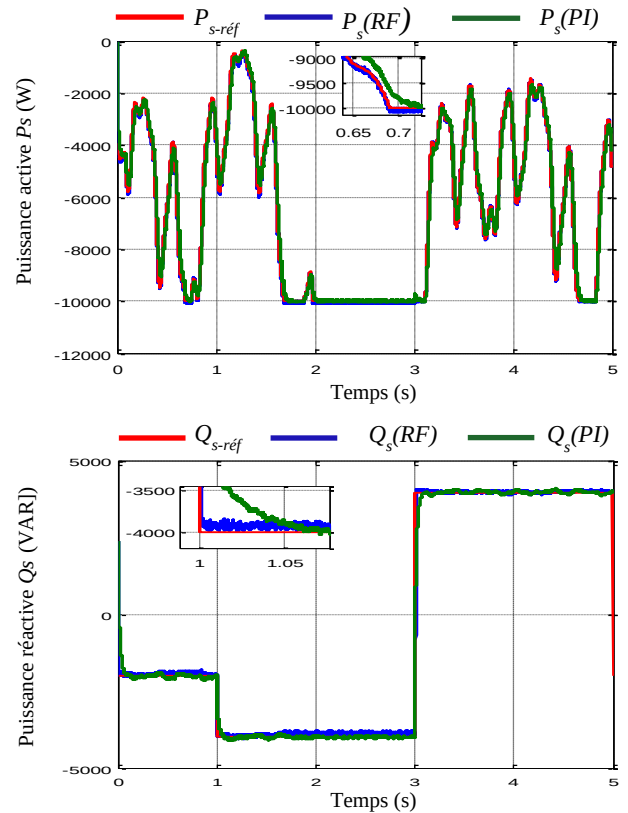


Fig.12. Comparaison entre la robustesse des régulateurs: PI et RF.

D'après les résultats obtenus on constate que le réglage des puissances active et réactive par des régulateurs flous apporte des performances et robustesse remarquables en termes de temps de réponse et suivi de consigne par rapport aux régulateurs classiques PI.

VII. CONTROLE DE FACTEUR DE PUISSANCE

Dans cette partie la consigne de puissance réactive statorique sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. "Fig.13"

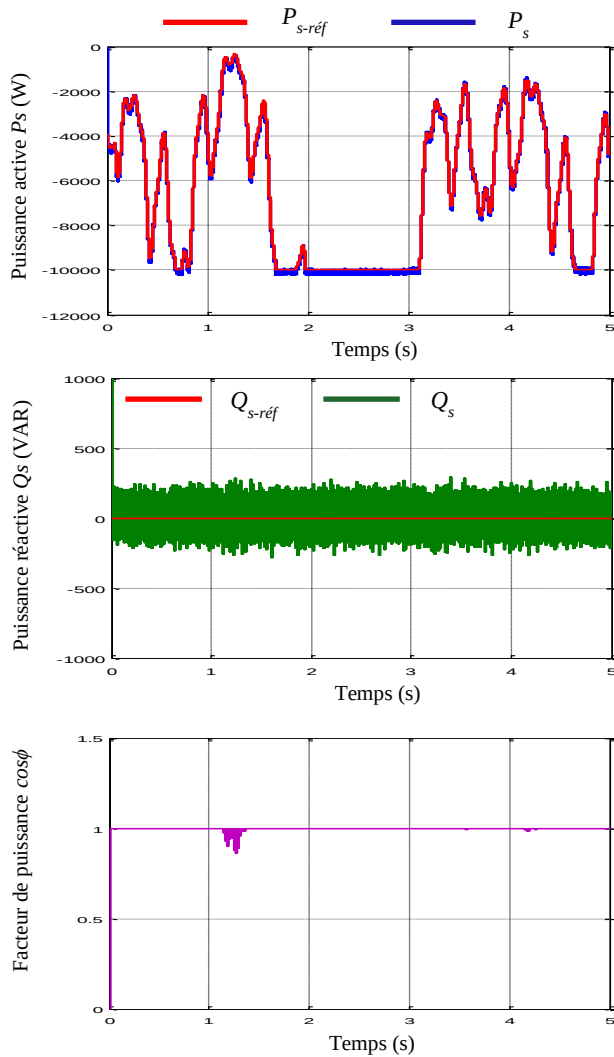


Fig.13. Contrôle du facteur de puissance.

D'après les résultats de simulation obtenus on peut dire que le contrôle de la puissance active pour la génératrice éolienne est parfaitement réalisé à un facteur de puissance unitaire ($\cos \phi = 1$).

VIII. CONCLUSION

Cet article a été consacré à la modélisation et la commande floue d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) fonctionnant à vitesse variable intégrée à un

système éolien. Le fonctionnement global du système d'aérogénérateur et sa commande ont été illustrés par les réponses à la commande en puissance. La génératrice éolienne ainsi modélisée a été testée avec un fonctionnement à vitesse variable pour une puissance de 10 kW. Les résultats de simulation montrent que le système avec régulateurs flous apporte des bonnes performances en termes de temps de réponse et suivi de consigne, et robustesse vis-à-vis les variations paramétriques de la MADA par rapport aux régulateurs classiques PI.

APPENDIX

Tableau 2. Paramètres de la Machine Asynchrone à Double Alimentation

Rated power, P_n	10 kW
Stator rated voltage, V_s	230/400 V
Rated current, I_n	20/30A
Stator rated frequency, f	50 Hz
Stator resistance, R_s	0.455 Ω
Rotor resistance, R_r	0.19 Ω
Rotor inductance, L_s	0.07 H
Inductance rotorique, L_r	0.0213 H
Mutual inductance, M	0.034 H
Number of pair of poles, p	2
Moment of inertia, J	0.031 kg.m ²
viscous friction, f_r	0.00114 kg.m ² /s

REFERENCES

- [1] Rapport, "Le Baromètre Eolien; Systèmes Solaires, Journal des Energies Renouvelables", n°183, Union Européen, Février 2008.
- [2] S. Müller, "Doubly fed induction generator systems", IEEE Industry Applications Magazine, vol. 8, n°3, pp. 26-33, 2002.
- [3] A.Boyette, P.Poure and S.Saadate, "Direct and indirect control of a Doubly Fed Induction Generator wind turbine including a storage unit", In: 32th edition of Industrial Electronics Conference IECON'2006, IEEE, pp. 2517-2522, 2006, France.
- [4] F.oitiers, B.Toufik and A. Machmoum, "Advanced control of a doubly-fed induction generator for wind energy conversion", Electric Power Systems Research, p. 1085-1096, 2009.
- [5] E. H. Mamdani, S. Assilian, "An experimental in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller", Int. J. Man-Machine Studies, vol.7., pp. 1-13, 1975.
- [6] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets", Information and Control, vol 8, pp. 338-353, 1965.
- [7] A. Djoudi, "Exploitation robuste d'une éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation", vol.15, n°4, pp.20-29, 2012.
- [8] A. Kerboua and M. Abid, " hybrid fuzzy sliding mode control of a doubly-fed induction generator in wind turbines", Rev. Roum. Sci. Techn. - Électrotechn. Et Énerg, Vol.4, pp. 412-421, 2012, Bucharest.
- [9] 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, de l'université de Sidi Bel-Abbes, Alger, 2015.
- [10] M. Allam, B. Dehiba, M. Abid, Y. Djeriri, et R.Adjoudj, " Étude comparative entre la commande vectorielle directe et indirecte de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) dédiée à une application éolienne ", Journal of Advanced Research in Science and Technology, ISSN: 2352-9989, Vol.1, No.2, pp. 88-100, 2014