

# Implémentation Expérimentale de la Commande sans Capteur de la GADA basée sur le Filtre de Kalman Etendu Complexe

A.Chibah<sup>1</sup>, M.Menaa<sup>1</sup>, F.Auger<sup>2</sup>, K.Yazid<sup>1</sup>

1.Laboratoire des Systèmes Electriques et Industriels (LSEI), Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene, Algérie.

2.Institut de Recherche en Électrotechnique et Électronique de Nantes Atlantique (IREENA), Saint-Nazaire, France.

**RESUME**– Dans cet article, un nouveau contrôle sans capteur de vitesse de la génératrice asynchrone à double alimentation basé sur le Filtre de Kalman Etendu Complexe est proposé. La conception de ce contrôle sans capteur dans le domaine complexe a permis une diminution substantielle de 35% du temps de calcul par rapport au Filtre de Kalman Etendu et cette diminution est obtenue car toutes les matrices impliquées ont des dimensions inférieures à celles obtenues à partir des modèles réels correspondants et aucune inversion matricielle n'est nécessaire dès lors que la sortie du système est une variable scalaire. La commande proposée a été testée expérimentalement pour plusieurs points de fonctionnement. Les résultats expérimentaux montrent que l'ECKF donne une grande précision d'estimation de la vitesse du rotor et peut être intégré dans la commande vectorielle sans capteur de la GADA avec de bonnes performances en régime permanent et en régime transitoire.

**Mots-clés**— Génératrices Asynchrones à Double Alimentation (GADA), Filtre de Kalman Etendu Complexe (ECKF).

## 1. INTRODUCTION

Les systèmes de conversion éolienne reposent généralement sur les GADA en raison des nombreux avantages qu'elles présentent [1], [2]. La mise en œuvre du contrôle de ce type de machine nécessite la connaissance précise de leur vitesse de rotation, ce qui requiert alors l'utilisation de capteur de vitesse placé sur l'arbre de la machine. Toutefois, ces résolveurs présentent plusieurs inconvénients qui influent négativement sur les performances de la machine [1] - [6]. Afin de remédier à cela, de nombreuses études ont été faites pour supprimer ces capteurs tout en conservant le bon fonctionnement de la machine. Ces études ont fait apparaître plusieurs méthodes de commande sans capteur. En effet, trois techniques sont régulièrement utilisées pour l'estimation de la vitesse de la GADA. La première est basée sur des observateurs de type MRAS [5]-[10]. Malgré leurs simplicités, ces observateurs, sont très sensibles à la variation des paramètres de la machine [5]-[10]. La deuxième approche, elle exploite la variation de l'inductance, produite par la présence des saillances structurelles des machines, en fonction de la position du rotor pour estimer la vitesse de la machine [1]. Cette famille de méthodes permet l'estimation de la vitesse du rotor de la machine d'une façon exacte et précise, cependant, ce type d'approches nécessite un processus de filtrage complexe, pour l'extraction de la position ou de la vitesse de la machine, ce qui induit un temps de calcul prohibitif en plus de l'introduction d'un décalage ou d'un retard dans l'estimation de la vitesse [1]. Afin de surmonter les différents problèmes précités une

troisième approche basée sur le Filtre de Kalman Etendu est fréquemment utilisée [11] - [17]. Cette approche donne une estimation précise des variables et des paramètres de la machine, mais sa mise en œuvre nécessite une inversion de matrice, ce qui demande un temps de calcul considérable. Afin de s'affranchir de ce problème, l'ECKF est utilisé comme solution pour estimer la vitesse de la GADA.

Dans cet article, on s'intéressera à l'étude de la stratégie de contrôle sans capteur de la GADA basée sur l'ECKF.

## 2. MISE EN EQUATION DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION DANS LE DOMAINE COMPLEXE

### A. Modèle d'état de la GADA dans le domaine complexe

Le modèle de la GADA dans le domaine complexe est donné par le système d'équation ci-dessous :

$$\begin{cases} \bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + \frac{d\bar{\varphi}_s}{dt} + j\omega_s \bar{\varphi}_s \\ \bar{V}_r = R_r \bar{I}_r + \frac{d\bar{\varphi}_r}{dt} + j\omega_{sl} \bar{\varphi}_r \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \bar{\varphi}_s = L_s \bar{I}_s + L_m \bar{I}_r \\ \bar{\varphi}_r = L_r \bar{I}_r + L_m \bar{I}_s \end{cases} \quad (2)$$

Avec :

$$\begin{cases} \bar{V}_s = V_{ds} + jV_{qs} \\ \bar{V}_r = V_{dr} + jV_{qr} \end{cases} \quad (3)$$

Tel que :  $R_s$  : résistance statorique,  $R_r$  : résistance rotorique,  $L_s$  : inductance statorique,  $L_r$  : inductance rotorique,  $L_m$  : inductance mutuelle,  $\bar{I}_s$  : courant statorique dans le domaine complexe,  $\bar{I}_r$  : courant rotorique dans le domaine complexe,  $\bar{V}_s$  : tension statorique dans le domaine complexe,  $\bar{V}_r$  : tension rotorique dans le domaine complexe,  $\omega_s$  : Pulsation statorique and  $\omega_{sl}$  : Pulsation rotorique.

En substituant l'équation (2) dans (1), on obtient le modèle d'état complexe de la GADA dans le repère d-q :

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_s \\ \bar{V}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{c11} & \bar{A}_{c12} \\ \bar{A}_{c21} & \bar{A}_{c22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_s \\ \bar{I}_r \end{bmatrix} \quad (4)$$

Avec :

$$\bar{A}_{c11} = R_s + L_s \frac{d}{dt} + jL_s \omega_s, \quad \bar{A}_{c12} = L_m \frac{d}{dt} + jL_m \omega_s$$

$$\bar{A}_{c21} = L_r \frac{d}{dt} + jL_r \omega_{sl}, \quad \bar{A}_{c22} = L_m \frac{d}{dt} + jL_m \omega_{sl}$$

De plus, les puissances active et réactive du stator sont données par les équations (5) et (6) :

$$P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \quad (5)$$

$$Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \quad (6)$$

### B. Modèle d'état discret de la GADA dans le domaine complexe

La représentation d'état de la génératrice asynchrone à double alimentation consiste à exprimer le modèle de la machine sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}_c(t) = \bar{A}_c \bar{x}_c(t) + \bar{B}_c \bar{u}_c(t) \\ \bar{y}_c(t) = \bar{C}_c \bar{x}_c(t) \end{cases} \quad (7)$$

Avec :

$\bar{x}_c$ : Vecteur d'état sous sa forme complexe,

$\bar{u}_c$ : Vecteur de commande sous sa forme complexe,

$\bar{y}_c$ : Vecteur de sortie sous sa forme complexe

Différentes possibilités peuvent être envisageables pour le choix du vecteur d'état ; dans notre étude de cas, nous considérons les courants statoriques et rotoriques sous leurs formes complexes, comme variables d'état. Ainsi, en se basant sur les équations (4) et (7), le modèle d'état complexe de la génératrice asynchrone à double alimentation peut s'écrire comme suit :

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{I}}_s \\ \dot{\bar{I}}_r \\ \dot{\omega_r} \end{bmatrix} = [\bar{A}_c] \begin{bmatrix} \bar{I}_s \\ \bar{I}_r \\ \omega_r \end{bmatrix} + [\bar{B}_c] \begin{bmatrix} \bar{V}_s \\ \bar{V}_r \end{bmatrix} \quad (8)$$

Tel que :

$$\bar{A}_c = \begin{bmatrix} -a_1 - j(a\omega_{sl} + \omega_s) & a_3 - ja_5\omega_{sl} & 0 \\ a_4 + ja_6\omega_{sl} & -a_2 - j\left(\omega_s - \frac{\omega_{sl}}{\sigma}\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{B}_c = \begin{bmatrix} b_1 & -b_3 \\ -b_3 & b_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Avec :

$$a = \frac{1 - \sigma}{\sigma} ; a_1 = \frac{R_s}{\sigma L_s} ; a_2 = \frac{R_r}{\sigma L_r} ; a_3 = \frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r} ;$$

$$a_4 = \frac{R_s L_m}{\sigma L_s L_r} ; a_5 = \frac{L_m}{\sigma L_s} ; a_6 = \frac{1}{\sigma L_r}$$

$$b_1 = \frac{1}{\sigma L_s} ; b_2 = \frac{1}{\sigma L_r} ; b_3 = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} ; \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$$

Le modèle complexe discret de la génératrice asynchrone à double alimentation est déduit de son modèle d'état complexe continu défini par l'équation (8), en appliquant le développement d'Euler de premier ordre. Il est donné par :

$$\begin{cases} \bar{x}_c(k+1) = \bar{A}_{cd} \bar{x}_c(k) + \bar{B}_{cd} \bar{u}_c(k) \\ \bar{y}_c(k) = \bar{C}_{cd} \bar{x}_c(k) \end{cases} \quad (9)$$

Avec :

$$\begin{aligned} [\bar{A}_{cd}] &= [I] + T_e [\bar{A}_c] \\ [\bar{B}_{cd}] &= T_e [\bar{B}_c] \end{aligned}$$

$$[C_{cd}] = [C_c]$$

Et  $T_e$  : Temps d'échantillonnage.

### 3. PRINCIPE DE LA COMMANDE VECTORIELLE EN PUISSANCE DE LA GADA

À partir des expressions des tensions statoriques et rotoriques et des puissances statoriques active et réactive dans le repère d-q données respectivement par les systèmes d'équations (4), (5) et (6), on observe l'existence d'un couplage étroit entre les courants et les tensions de la GADA. Cela rend la commande de la puissance statorique active et réactive de la GADA très complexe. Afin de surmonter cette difficulté et d'obtenir la même situation qu'une machine à courant continu, un contrôle vectoriel est appliqué. Ce contrôle consiste à représenter les variables électriques de la génératrice asynchrone à double alimentation dans un référentiel qui tourne avec le vecteur du flux statorique. Afin de simplifier la commande, on se place donc dans un référentiel (d-q) lié au champ tournant tel que l'axe « d » coïncide avec la direction désirée du flux statorique.

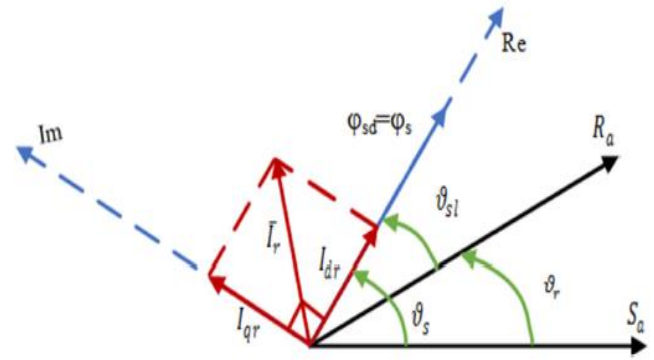


Fig.1. Orientation du Flux Statorique.

Cette orientation conduit aux conséquences suivantes [1,17] :

$$\varphi_{ds} = \varphi_s, \varphi_{qs} = 0 \quad (10)$$

Compte tenu de cette condition, les équations de la GADA peuvent être réécrites suivant l'équation (11).

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = -R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_{sl} \varphi_{qr} \\ V_{qr} = -R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_{sl} \varphi_{dr} \end{cases} \quad (11)$$

Compte tenu de la condition que le vecteur de flux statorique est aligné avec l'axe « d » dans un référentiel (d-q) lié au champ tournant ( $\varphi_{sd} = \varphi_s, \varphi_{sq} = 0$ ), les courants statoriques suivant l'axe d et q peuvent être déterminés de la manière suivante :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\varphi_{ds}}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{L_m}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (12)$$

Si nous supposons que le réseau électrique est stable et équilibré, ayant pour tension simple  $V_s$ , cela conduit à un flux statorique suivant l'axe d ( $\varphi_{sd}$ ) constant. De plus, si nous

négligeons la résistance des enroulements statoriques, hypothèse réaliste pour les machines de fortes puissances, les équations des tensions statoriques de la machine se réduisent à :

$$\begin{cases} V_{ds} = \frac{d\varphi_s}{dt} = 0 \\ V_{qs} = \omega_s \varphi_s = V_s \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{L_m}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (14)$$

En remplaçant l'expression des courants  $I_{sd}$  et  $I_{sq}$  dans les équations (5) et (6), les puissances statoriques active et réactive peuvent être réécrites comme suit :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} = V_s I_{qs} = -V_s \frac{L_m}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} = V_s I_{ds} = -V_s \frac{L_m}{L_s} I_{dr} + V_s \frac{\varphi_s}{L_s} \end{cases} \quad (15)$$

En approximant  $\varphi_s$  par  $\frac{V_s}{\omega_s}$ , les expressions des puissances statoriques active et réactive deviennent :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{L_m}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = -V_s \frac{L_m}{L_s} I_{dr} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (16)$$

Si nous considérons la mutuelle  $L_m$  constante, nous notons que l'équation (16) fait apparaître que la puissance active statorique  $P_s$  est directement proportionnelle au courant rotorique en quadrature  $I_{rq}$  et que la puissance réactive statorique  $Q_s$  est proportionnelle au courant rotorique direct  $I_{rd}$ , à une constante près  $\frac{V_s^2}{L_s \omega_s}$  [1,17].

Afin de contrôler correctement la GADA, il nous faut alors établir une relation entre les courants et les tensions rotoriques qui vont alimenter le rotor de la machine.

En remplaçant les courants statoriques donnés par l'équation (14) dans l'équation des flux rotoriques, nous obtenons :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) I_{dr} + \frac{L_m V_s}{L_s \omega_s} \\ \varphi_{qr} = \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) I_{qr} \end{cases} \quad (17)$$

En remplaçant l'équation (17) dans l'expression des tensions rotoriques nous obtenons :

$$\begin{cases} V_{dr} = V_{1rdc} + e_q \\ V_{qr} = V_{1rqc} + e_d + e_\varphi \end{cases} \quad (18)$$

Avec:

$$\begin{cases} V_{1rdc} = R_r \left( 1 + T_r \sigma \frac{d}{dt} \right) I_{rd} \\ V_{1rqc} = R_r \left( 1 + T_r \sigma \frac{d}{dt} \right) I_{rq} \end{cases} \quad (19)$$

Et

$$\begin{cases} e_q = -\frac{M_{sr}}{L_s} \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_{sl} L_r \sigma I_{qr} \\ e_d = \omega_{sl} L_r \sigma I_{dr} \\ e_\varphi = \omega_{sl} \frac{L_m}{L_s} \varphi_{ds} \end{cases} \quad (20)$$

A partir des équations (15) et (19), nous pouvons établir les relations entre les tensions appliquées au rotor de la machine, les courants rotoriques et les puissances statoriques engendrées par cette dernière. Ainsi, un contrôle vectoriel en puissance de la machine peut être réalisé et cela de deux manières différentes à savoir :

- ❖ La première consiste à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment la puissance statorique active et réactive. Cette méthode contrôle directement les tensions rotoriques de la machine, sans passer par une régulation des courants rotoriques. Cette stratégie de contrôle est simple à mettre en œuvre, cependant, l'absence d'une régulation des courants rotoriques constitue un inconvénient majeur. En effet, ce mode de régulation ne permet pas de limiter les courants importants, qui peuvent constituer un danger pour la machine.
- ❖ La deuxième consiste à mettre en place une régulation des puissances statoriques à travers la régulation des courants rotoriques au moyen d'un régulateur indépendant sur chaque axe. Ce mode de contrôle est simple à mettre en œuvre. En plus, il permet de protéger la machine contre les forts courants.

Dans notre étude, on s'intéresse à la deuxième méthode. Et ce choix est dicté par la nécessité de simplifier la mise en œuvre de la régulation et de protéger la machine contre les forts courants. En effet, cette méthode permet le contrôle des courants rotoriques, ce qui favorise ainsi la protection de la machine en limitant ces courants. De plus, elle est plus simple à mettre en œuvre que la troisième méthode.

Le schéma global présentant la régulation en puissance d'une génératrice asynchrone à double alimentation, alimentée en tension et commandée par orientation de flux est représenté par la figure.2.

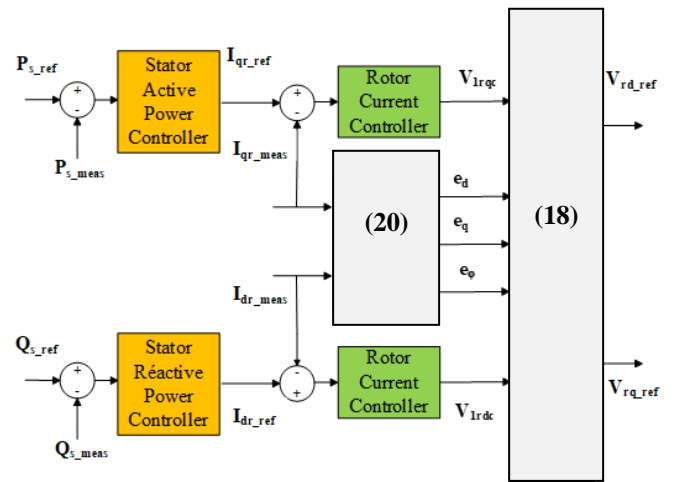


Fig.2.Schéma de contrôle en puissance de la GADA.

#### 4. FILTRE DE KALMAN ETENDU COMPLEXE POUR L'ESTIMATION DE LA VITESSE

Afin d'estimer la vitesse du rotor de la GADA le filtre de Kalman Etendu Complexe (ECKF) est proposé. A l'instar du Filtre de Kalman Etendu standard, le principe du Filtre de Kalman Etendu Complexe est basé sur deux phases principales, à savoir la phase de prédiction et correction, à la seule

différence que dans ce dernier, l'ensemble des grandeurs d'état sont exprimées dans l'ensemble complexe «C».

L'estimation de la vitesse de la GADA à l'aide de l'ECKF nécessite la connaissance, au préalable, du modèle discret de la GADA. En effet, la première étape dans le processus d'estimation est de déterminer le modèle mathématique discret de la machine, qui est donnée par l'équation (21). Puis appliquer l'algorithme d'estimation du filtre.

$$\begin{cases} \bar{x}_c(k+1) = \bar{g}(\bar{x}_c(k), \bar{u}_c(k), k) + \bar{w}(k) \\ \bar{y}_c(k) = \bar{h}(\bar{x}_c(k), k) + \bar{v}(k) \end{cases} \quad (21)$$

Tel que :

$$\bar{g}(\bar{x}_c(k), \bar{u}_c(k), k) = \bar{A}_{ceD} \bar{x}_c(k) + \bar{B}_{ceD} \bar{u}_c(k) = \begin{bmatrix} \bar{g}_1 \\ \bar{g}_2 \\ \bar{g}_3 \end{bmatrix}$$

Avec :

$$\begin{aligned} \bar{g}_1 &= (1 + (-a_1 - j(a\omega_{sl} + \omega_s))T_e) \bar{I}_s + ((a_3 - ja_5\omega_{sl})T_e) \bar{I}_r \\ &\quad + T_e b_1 u_1 - T_e b_2 u_2 \\ \bar{g}_2 &= ((a_4 + ja_6\omega_{sl})T_e) \bar{I}_s + \left(1 + \left(-a_2 - j\left(\omega_s - \frac{\omega_{sl}}{\sigma}\right)\right)T_e\right) \bar{I}_r - \\ &\quad T_e b_3 u_1 + T_e b_2 u_2, \quad \bar{g}_3 = 1. \end{aligned}$$

Le principe du Filtre de Kalman Etendu Complexe est réalisé en deux étapes principales à savoir :

#### ❖ Etape de prédiction :

Prédiction de l'état à l'instant k+1 :

$$\bar{x}_c(k+1) = f(\bar{x}_c(k), \bar{u}_c(k), k) \quad (22)$$

Estimation de la matrice de covariance de l'erreur :

$$\bar{P}(k+1) = \bar{F}(k) \bar{P}(k) \bar{F}^{*t}(k) + \bar{Q} \quad (23)$$

#### ❖ Etape de correction :

Calcul du Gain de Kalman :

$$\bar{K} = \bar{P}(k+1) \bar{H}^{*t}(k) [\bar{H}(k) \bar{P}(k+1) \bar{H}^{*t}(k) + \bar{R}]^{-1} \quad (24)$$

Estimation du nouvel état :

$$\bar{x}_c(k+1) = \bar{x}_c(k+1) + \bar{K} \cdot (\bar{y}_c(k) - \bar{H}(k) \cdot \bar{x}_c(k)) \quad (25)$$

Mise à jour de la matrice de covariance de l'erreur :

$$\bar{P}(k+1) = \bar{P}(k+1) - \bar{K} \bar{H}(k) \bar{P}(k+1) \quad (26)$$

Avec:

$$\bar{H} = \frac{\partial \bar{h}(\bar{x}_c, k)}{\partial \bar{x}_c} \bigg|_{\bar{x}_c} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \bar{F} &= \frac{\partial f(\xi, k)}{\partial \xi} \bigg|_{\bar{x}_c} \\ &= \begin{bmatrix} 1 + (-a_1 - j(a\omega_{sl} + \omega_s))T_e & (a_3 - ja_5\omega_{sl})T_e & (-ja\bar{I}_s - ja_5\bar{I}_r)T_e \\ (a_4 + ja_6\omega_{sl})T_e & 1 + \left(-a_2 - j\left(\omega_s - \frac{\omega_{sl}}{\sigma}\right)\right)T_e & \left(-ja_6\bar{I}_s + j\frac{\bar{I}_r}{\sigma}\right)T_e \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

## 5. BANC D'ESSAI EXPERIMENTAL

Afin de valider expérimentalement la commande sans capteur proposée, un essai expérimental a été réalisé sur un banc d'essai (Fig.3) qui a été mis en œuvre au niveau de notre laboratoire sis à l'Université Houari Boumedienne en Algérie.

Ce banc d'essai est principalement composé :

1. D'une machine à courant continu d'une puissance de 3kW, qui est utilisée pour émuler le comportement de la turbine éolienne.
2. D'une génératrice asynchrone à double alimentation d'une puissance de 3kW.
3. D'un onduleur à deux niveaux à IGBT, de chez Semikron, qui est utilisé pour l'alimentation de la génératrice asynchrone à double alimentation et dont la commande est réalisée par modulation de largeur d'impulsion (MLI) avec une fréquence de découpage de 15kHz.
4. D'un hacheur quatre quadrants à IGBT, qui est utilisé pour l'alimentation du moteur à courant continu émulant le comportement de la turbine éolienne et qui est commandé par modulation de largeur d'impulsion (MLI) avec une fréquence de découpage de 15kHz.
5. D'une Carte Dspace DS1104 où le contrôle vectoriel sans capteur est implémenté.
6. D'une Carte Dsp TMS320C335 où l'émulateur d'éolienne est implémenté.
7. D'un capteur de vitesse qui est utilisé afin de comparer la vitesse estimée à la vitesse mesurée.

Les paramètres de la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation sont représentés dans les tableaux ci-dessous.

Table.1. Paramètres de la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation.

Paramètres	Valeur
Puissance nominale	3 kW
Vitesse nominale	1450 rpm
Couple nominale	20N.m
Resistance Statorique	1.04 Ω
Resistance Rotorique	2.2 Ω
Inductance statorique	196 mH
Inductance rotorique	196 mH
Inductance mutuelle	195 mH
Moment d'inertie	0.052 kg.m2
Coefficient de frottement	0.0035 N.m.s

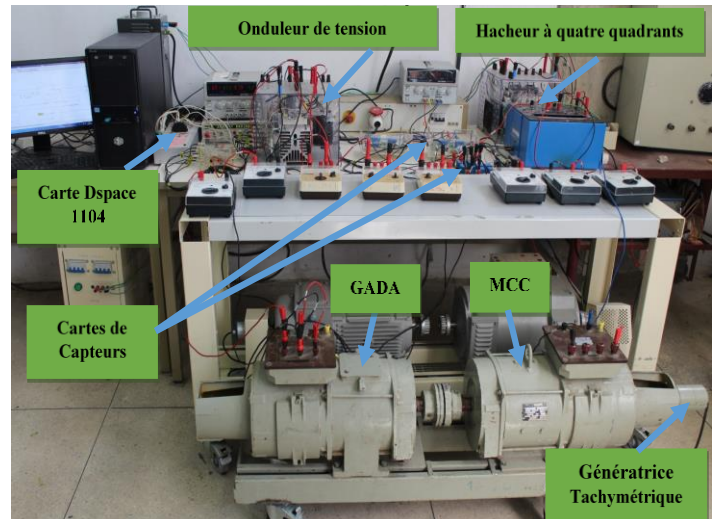


Fig.3. Photo du banc d'essai.

## 6. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Afin de valider l'algorithme de contrôle proposé, un test expérimental a été réalisé. Cet essai consiste, en premier lieu, à imposer un profil de vent réel à l'émulateur de la turbine éolienne, comme il est illustré sur la figure (4). Puis, en deuxième lieu, à tester les performances de l'algorithme sans capteur proposé en imposant une trajectoire des puissances statoriques active et réactive. En effet, la puissance statorique active de référence est prise égale à la puissance maximale délivrée par la stratégie de contrôle MPPT et la puissance statorique réactive de référence est prise égale à 0 VAR. Les résultats obtenus sont illustrés par les figures ci-dessous.

Les figure (5) et (6) montrent que la vitesse estimée de la GADA suit parfaitement la vitesse mesurée de l'émulateur de la turbine éolienne dans toutes les régions de fonctionnement (vitesse hypo-synchrone et hyper-synchrone) avec une très petite erreur. L'évolution des puissances active et réactive du stator de la GADA est présentée sur les figures (7) et (8). A partir de ces deux figures on peut constater que les puissances statoriques active et réactive suivent leurs références et on note un bon découplage entre elles.

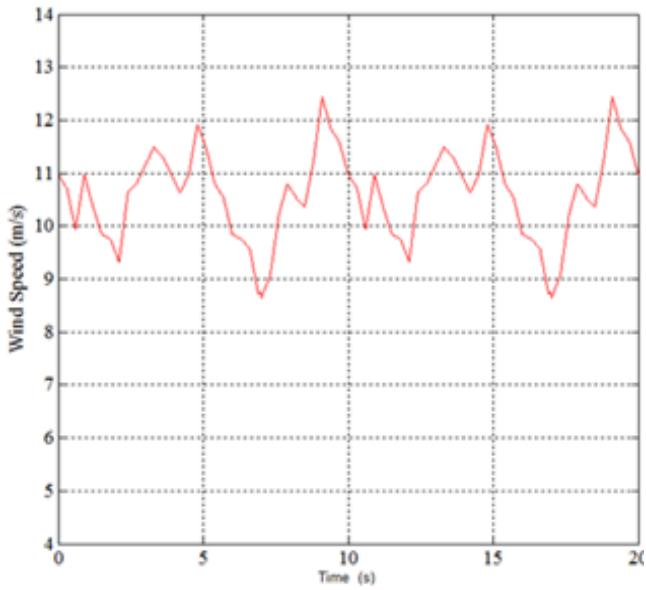


Fig.4. Profil de vitesse du vent utilisé.

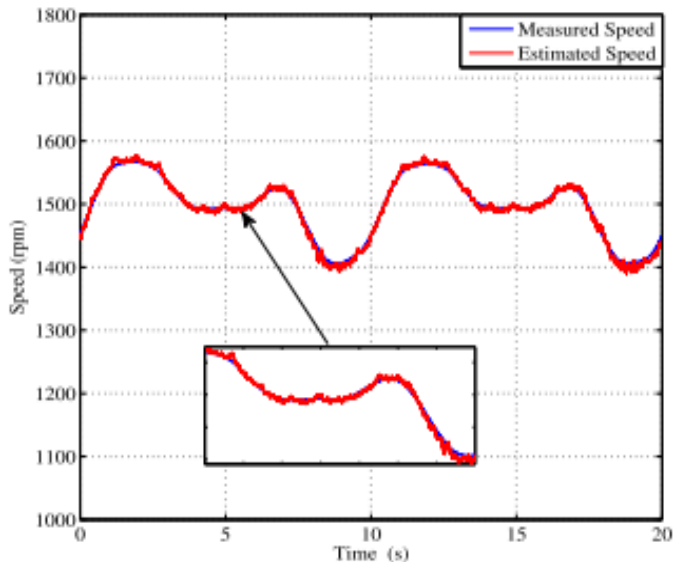


Fig.5. Evolution de la vitesse mesurée et estimée.

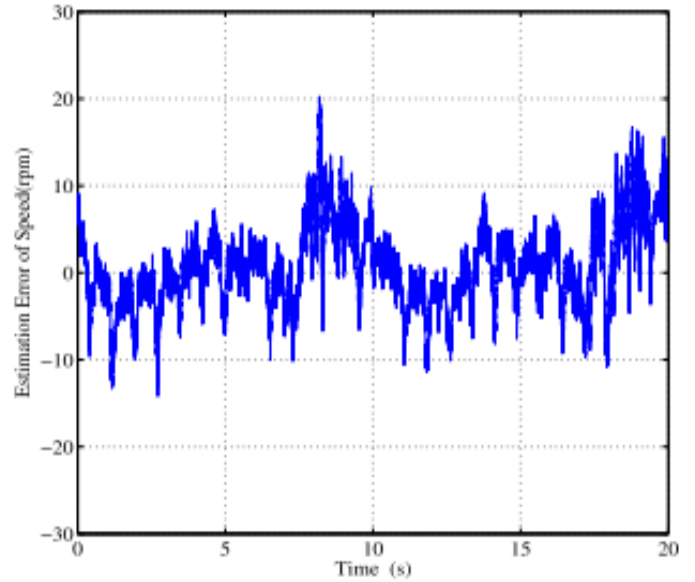


Fig.6. Variation de l'erreur d'estimation de la vitesse

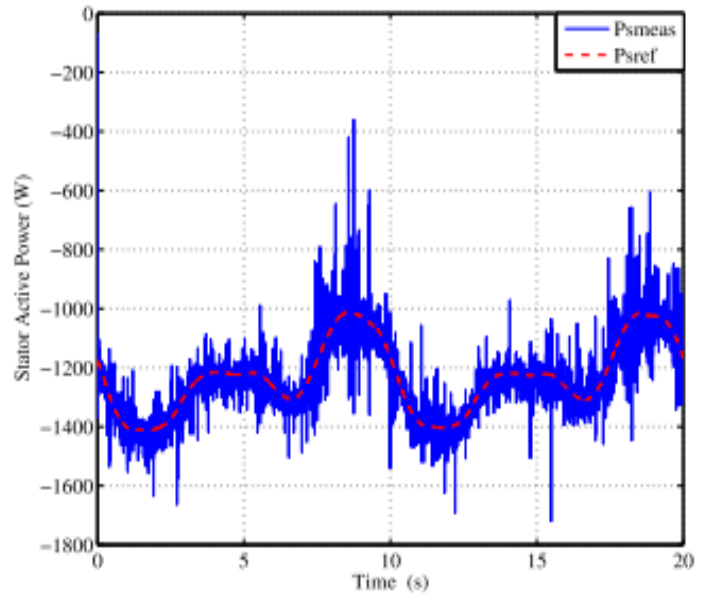


Fig.7. Puissance statorique active mesurée et de référence,

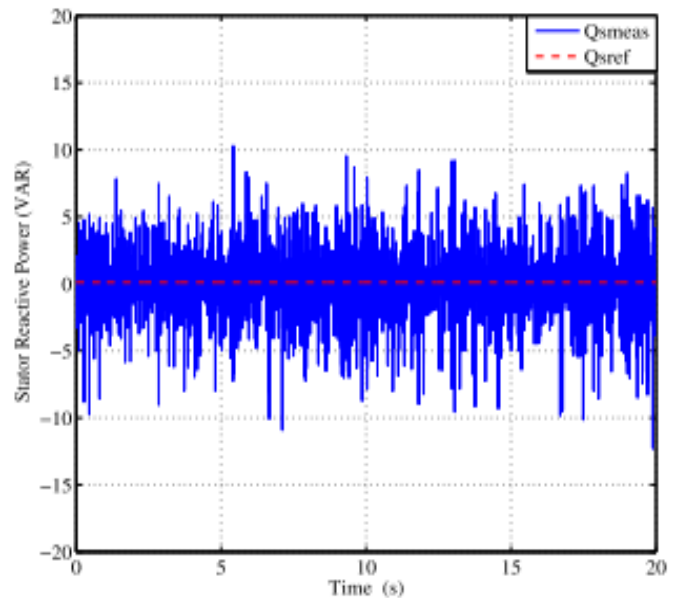


Fig.8. Puissance statorique réactive mesurée et de référence,

## 7. CONCLUSIONS

Dans cet article, un contrôle sans capteur de vitesse de la GADA basé sur l'ECKF a été réalisé expérimentalement. Les performances de l'estimateur et du contrôle des puissances de la GADA ont été testées pour différents points de fonctionnement. A partir des différents essais réalisés, il ressort que le contrôle sans capteur proposé, défini dans le domaine complexe, permet d'obtenir un bon contrôle des puissances de la GADA et une bonne estimation de sa vitesse de rotation. En résumé, nous pouvons dire que l'ECKF est capable de détecter efficacement la vitesse de rotation de la GADA dans diverses conditions de fonctionnement et peut être intégré dans la commande vectorielle sans capteur de la GADA avec de bonnes performances en régime permanent et en régime transitoire.

## 8. REFERENCES

- [1] A. Chibah, M. Menaa, K.Yazid, "Rotor Speed estimation of doubly fed induction motor using high frequency carrier signal injection," Proc. IEEE-PEMC'14, Istanbul, Turkey, pp.751-756,2014.
- [2] Chibah, H.Djadi , M.Menaa, K.Yazid, A. Boufertella, and M. Boudour. "Sensorless Control of Doubly Fed Induction Motor based on Extended Kalman Filter," Proc.ICATS'17, Batna, Algeria, pp.751-756, 2017.
- [3] Pena, R., Clare, J.C., Asher, G.M., « Doubly fed induction generator using back-to back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation », IEE Proc., Electr. Power Appl., 1996, 143, (3), pp. 231–241
- [4] Kanellos, F.D., Hatziaargyriou, N.D , « Control of variable speed wind turbines equipped with synchronous or doubly fed induction generators supplying islanded power systems », IET Renew. Power Gener., 2009, 3, (1), pp. 96–108.
- [5] Cardenas R., Pena R., Proboste J., Asher G., Clare J., « MRAS Observer for Sensorless Control of Standalone Doubly Fed Induction Generators », IEEE Transactions on Energy Conversion, 20(4): 710-718, 2005.
- [6] Pena.R, Cárdenas.R,Proboste.J, Asher.G, Clare.J, « Sensorless Control of Doubly-Fed Induction Generators Using a Rotor-Current-Based MRAS Observer », IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol:55, January 2008.
- [7] S. Bayhan, H. Abu-Rub , « Performance Comparison of two Sensorless Control Methods for Standalone Doubly-Fed Induction Generator », Proc.PEMC'14,pp.996-1000,Turkey,2014.
- [8] Rogério Vani Jacomini; Edson Bim, « Sensorless rotor position based on MRAS observer for doubly fed induction generator », Proc. COBEP/SPEC'15, pp.1-6, Brazil ,2015.
- [9] B. Touaiti, H. BenAzza ,M. Jemli, "A MRAS observer for sensorless control of wind drive doubly fed induction generator in remote areas," Proc. International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), pp.526-531.2016.
- [10]A. Mehdi; A. Reama; H. Benalla, "MRAS observer for sensorless direct active and reactive power control of DFIG based WECS with constant switching frequency," Proc EVER'16, Monaco France, pp.1-7, 2016.
- [11]I. Ricardo Pérez; J. César Silva; E. Juan Yuz; R. Gonzalo Carrasco, Experimental sensorless vector control performance of a DFIG based on an extended Kalman filter, IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp. 1786 – 1792, 2012.
- [12]M. Abdelrahem; C. Hackl; R. Kennel, "Sensorless control of doubly fed induction generators in variable-speed wind turbine system," Proc. International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), pp.406-413, 2015.
- [13]M. Menaa, O.Touhami, R.Ibtiouen, M.Fadel, "Speed sensorless vector control of an induction motor using spiral vector model-ECKF and ANN controller", In IEEE international electric machines & drives conference, IEMDC'07, Vol. 2, pp. 1165–1170, 2007.
- [14]M. Menaa, O. Touhami, R. Ibtouen, M. Fadel, "Sensorless direct vector of an induction motor", Control Engineering Practice, Volume 27,pp 67-77, 2008.
- [15]F. Alonge, F. D'Ippolito, A. Fagiolini, A. Sferlazza, "Extended complex Kalman filter for sensorless control of an induction motor", Control Engineering Practice, Volume 27, pp.1-10, 2014.
- [16]A. Chibah, M. Menaa, K. Yazid, A. Boufertella, H. Djadi, M. Boudour, "A New Sensorless Control of Doubly Fed Induction Motor Based on Extended Complex Kalman Filter", Proc. Inter. Conf. on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM), pp. 641-646 , Alger, Algérie, 28-31 Oct.2018. DOI: 10.1109/CISTEM.2018.8613614
- [17]. A. Chibah, M. Mohamed, K. Yazid, A. Boufertella, H. Djadi, M. Boudour, "Experimental Design of a New Fast Sensorless Control of DFIG in Complex Domain", IET Electric Power Applications, Vol.13, n°5, pp. 581 – 593, 2019, DOI: 10.1049/ietepa.2018.5008.