
CHAPITRE III :

Commande vectorielle de la GADA

III. Commande vectorielle de la GADA

III.1.Introduction

La commande vectorielle de la machine à double alimentation est une solution plus attractive pour des applications à haute performance comme l'entraînement à vitesse variable et les systèmes de génération de l'énergie.

Cette solution convient à toutes les applications où les variations de la vitesse sont limitées autour de la vitesse de synchronisme. Puisque la puissance traitée par le côté rotorique (puissance de glissement) est proportionnelle au glissement, une conversion d'énergie est possible en utilisant un convertisseur de puissance du côté du rotorique, celui-ci ne traite qu'une petite fraction de puissance du système global, dans les entraînements à vitesses variables [31].

Dans ce chapitre, nous avons proposé une loi de commande pour la MADA à rotor bobiné alimenté par un onduleur de tension basée sur l'orientation du flux statorique, utilisée pour la faire fonctionner en génératrice. Cette dernière met en évidence les relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques. Ces relations vont permettre d'agir sur les signaux rotoriques en vue de contrôler l'échange de puissance active et réactive entre le stator de la machine et le réseau [9,32].

Cette commande se décompose en deux parties :

- Le contrôle des courants rotoriques.
- Le découplage ou compensation.

Pour établir la commande vectorielle de la génératrice, on considère l'hypothèse simplificatrice que les enroulements statoriques ou rotoriques de la machine sont supposés triphasés équilibrés, donc toutes les composantes homopolaire sont nulles.

Ensuite, on calcule le régulateur nécessaire pour la commande, et enfin on termine par les résultats de la simulation qui signifient la validation de commande.

III.2.Le principe de la commande vectorielle de la GADA

La commande vectorielle est un terme générique désignant l'ensemble des commandes tenant compte en temps réel des équations du système qu'elle commande. Le nom de ces commandes vient du fait que les relations finales sont vectorielles à la différence des commandes scalaires. Les relations ainsi obtenues sont bien plus complexes que celles des commandes scalaires, mais en contrepartie elles permettent d'obtenir de meilleures performances lors des régimes transitoires. Il existe des commandes vectorielles pour tous les moteurs à courant alternatif.

Par construction, la machine à courant continu produit un champ magnétique statorique toujours perpendiculaire au rotor, c'est ce comportement que l'on va chercher à obtenir pour les machines alternatives. Le calculateur qui va agir sur la commande des interrupteurs se doit d'avoir quelques informations pour effectuer les calculs et particulièrement [8]:

- La position du rotor pour les machines synchrones
- La vitesse du rotor pour les machines asynchrones

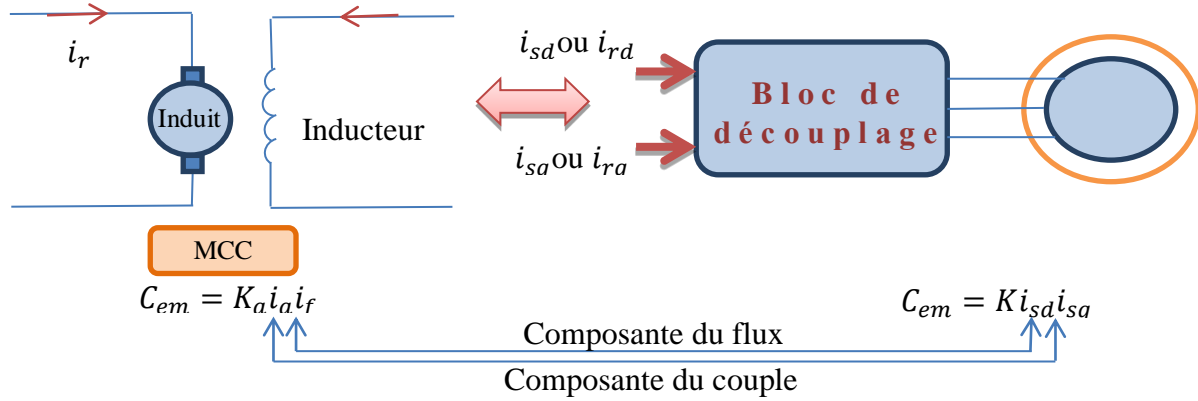


Fig.III.1 : Analogie entre MCC à excitation séparée et MADA.

III.3.Établissement du modèle de la GADA

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions rotoriques, générées par un onduleur, aux puissances actives et réactives statoriques [9].

$$\begin{cases} V_{sd} = -R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - W_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = -R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + W_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - W_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + W_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (3.1)$$

III .4.Choix du référentiel pour le modèle diphasé

III.4.1.Suivant l'orientation du repère

- Le flux rotorique : $\phi_{rd} = \phi_r$
- Le flux statorique : $\phi_{sd} = \phi_s$

- Le flux d'entrefer : $\phi_{gd} = \phi_g$

Dans le cadre de cette partie, nous développons la commande vectorielle de la génératrice asynchrone à double alimentation (MADA) avec orientation du repère (d-q) suivant le flux statorique. Cette commande se décompose de deux parties :

- Le contrôle des courants rotoriques.
- Le découplage ou compensation.

Avec un flux statorique constant et orienté $\varphi_{sd} = \varphi_s$, $\varphi_{sq} = 0$, $R_s = 0$, ces équations peuvent se simplifier sous la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \varphi_s \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt}(\varphi_{rd}) - \omega_r \varphi_{rd} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt}(\varphi_{rq}) + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (3.2)$$

De la même manière que pour les tensions, les équations des flux deviennent :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \varphi_s = -L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = 0 = -L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} - M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} - M I_{sq} \end{cases} \quad (3.3)$$

✚ Relation entre le courant statorique et le courant rotorique

A partir de l'équation de flux, nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques:

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{M}{L_s} I_{rd} - \frac{\varphi_s}{L_s} \\ I_{sq} = \frac{M}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad (3.4)$$

✚ Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques:

Dans un repère diphasé, les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent:

$$\begin{cases} p_s = -V_{sd} I_{sd} - V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = -V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (3.5)$$

Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, Et remplaçant les courants statoriques direct et quadrature par leurs expressions dans les équations des puissances active et réactive, on trouve :

$$\begin{cases} p_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (3.6)$$

$$V_{sq} = V_s = \omega_s Q_s \rightarrow Q_s = \frac{V_s}{\omega_s}$$

En considérant la mutuelle constante, le système obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe q et la puissance réactive au courant rotorique d'axe d à la constante.

$\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$ Prés imposée par le réseau.

Afin de montrer que la commande par orientation du flux statorique permet d'avoir un découplage effectif des grandeurs réelles (couple, vitesse) de la MADA, on considère les tensions rotoriques V_{dr}, V_{qr} comme variable de commande qui sont générées par le bloc de contrôle à flux orienté et les courants rotoriques I_{dr}, I_{qr} comme variable d'état. Ces grandeurs sont fonction des grandeurs de consigne P_{ref} et Q_{ref} .



Fig.III.2: Bloc de contrôle à flux orienté.

$$\begin{cases} P_{s-ref} = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq-ref} \\ Q_{s-ref} = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{rd-ref} \end{cases}$$

Compte tenu du repère choisi et des approximations faites, et si l'on considère l'inductance magnétisante \mathbf{M} comme constante, le système obtenu liée de façon proportionnelle à la puissance active au courant rotorique d'axe \mathbf{q} et la puissance réactive au courant rotorique d'axe \mathbf{d} .

✚ Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques

A partir du système d'équation (III.3) et on en remplaçant les courants statoriques par leurs expressions, les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante:

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = (L_r - \frac{M^2}{L_s})I_{rd} + \frac{M.V_s}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{rq} = (L_r - \frac{M^2}{L_s})I_{rq} \end{cases} \quad (3.7)$$

Ces expressions des flux rotoriques d'axe \mathbf{d} et \mathbf{q} sont alors intégrées aux expressions tensions rotoriques diphasées de l'équation (III.1). Nous obtenons alors :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{rd}}{dt} - g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{rq}}{dt} + g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (3.8)$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (3.9)$$

En appliquant la transformation de Laplace à ces deux équations (2.17), on obtient :

$$\begin{cases} V_{rd} = [R_r + (L_r - \frac{M^2}{L_s})P] I_{rd} - g W_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} \\ V_{rq} = [R_r + (L_r - \frac{M^2}{L_s})P] I_{rq} - g W_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} + g \frac{V_s M}{L_s} \end{cases} \quad (3.10)$$

V_{rd} et V_{rq} : Sont les composantes déphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques désirés.

$(L_r - \frac{M^2}{L_s})$: est le terme de couplage entre les deux axes.une synthèse adéquate des régulateur dans la boucle de commande permettra de les compenser.

$g \frac{V_s M}{L_s}$: représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation.

A partir des systèmes d'équations (3.6) et (3.10), nous pouvons élaborer le modèle pour le contrôle des puissances tel qu'il est présenté par le schéma bloc ci-dessous.

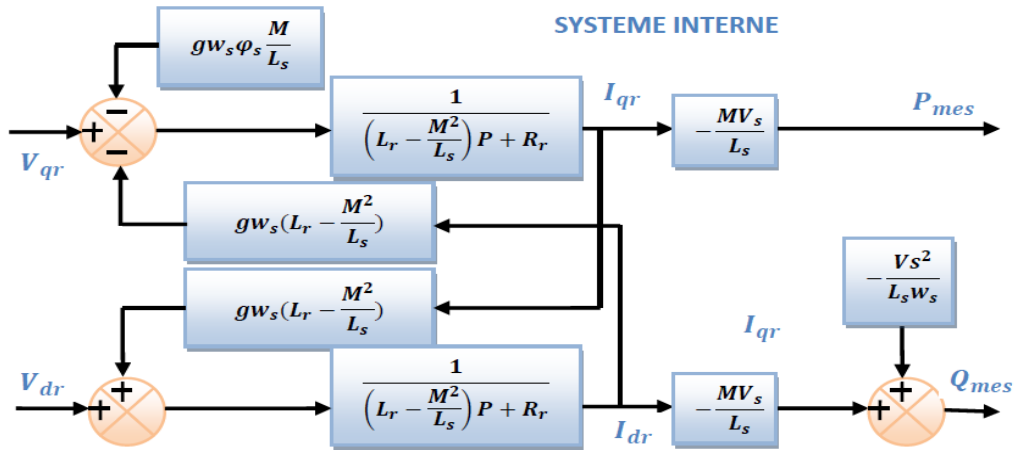


Fig.III.3: Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.

Dans ce schéma, nous avons fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactive statoriques.Ce qui nous permet de mettre en place une commande vectorielle, étant donné que l'influence du couplage est minime, chaque axe peut être commandé indépendamment avec son propre régulateur. Les grandeurs de référence pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe **q** rotorique et la puissance réactive pour l'axe **d** rotorique. La consigne de puissance réactive 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. La consigne de puissance active devra permettre de garder un transfert de puissance de l'éolienne optimal.

III.4.1.1.Commande vectorielle directe

La commande directe consiste à agir directement sur les puissances de la machines dont on part de ces dernières en fonction des tensions rotoriques directement comme on peut incorporer une boucle permettant de contrôler les courants rotoriques donc à partir des puissances en fonction des courants rotoriques et des courants en fonction des tensions rotoriques.

La méthode directe a l'avantage de prendre beaucoup moins les variations des paramètres de la machine [13].

III.4.1.1.a. Commande directe sans boucle de courant

Le schéma explicatif de cette méthode est illustré à la figure 3.4.

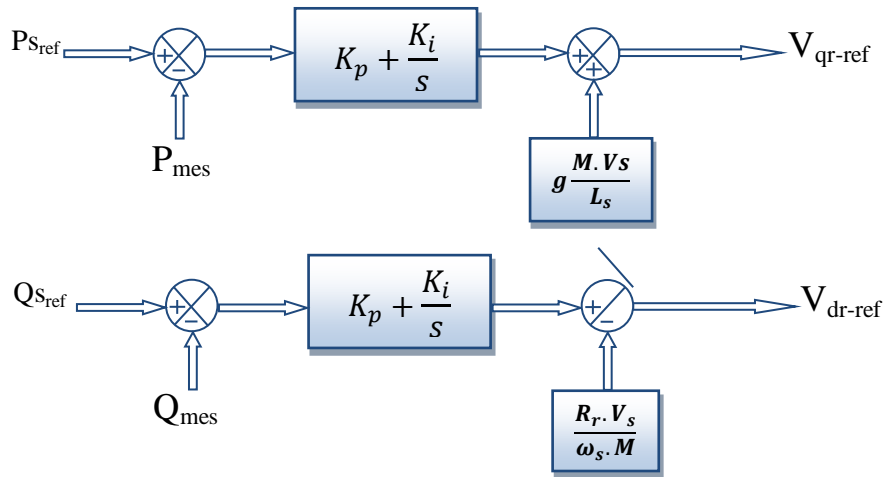


Figure. III.4: Commande en puissance sans boucle de courant

III.4.1.1.b. Commande directe avec boucle de courant

Nous allons ajouter une boucle de régulation au niveau des courants rotoriques, on a donc deux régulateurs sur chaque axe du repère de Park.

Nous aboutissons au schéma illustré à la figure (3.5).

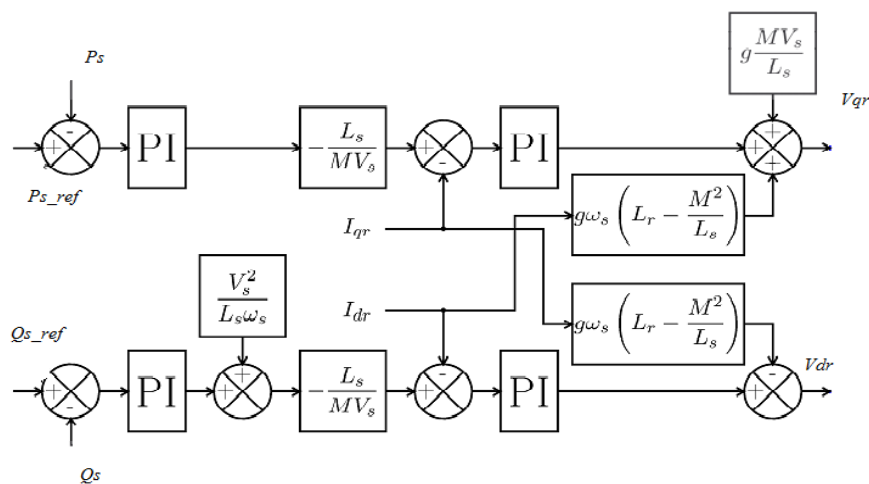


Figure. III.5 Commande en puissance avec boucle de courant

III.4.1.2. Commande vectorielle indirecte

Cette méthode consiste à estimer les valeurs des tensions rotoriques à partir des valeurs des puissances actives et réactives. Ainsi, les courants rotoriques seront régulés indirectement [17].

III.4.1.2.a. Commande en boucle ouverte

La commande en boucle ouverte est essentiellement basée sur l'hypothèse d'un réseau stable en tension et en fréquence, elle consiste à asservir non plus les puissances mais plutôt indirectement les courants rotoriques en n'utilisant non plus les puissances mesurées comme retour sur le comparateur mais les courants rotoriques d'axe d et q [16].

A partir des expressions de la puissance active et réactive statoriques du système(III.6) on déduit les références des courants rotoriques direct et quadrature suivant les relations.

$$\begin{cases} I_{rq-ref} = -\frac{L_s}{M.V_s} \cdot P_{s-ref} \\ I_{rq-ref} = -\frac{L_s}{M.V_s} \cdot Q_{s-ref} + \frac{V_s}{M.\omega_s} \end{cases} \quad (III.11)$$

Ces courants seront utilisés comme références à la place des références sur les puissances active et réactive, on aboutit alors au schéma bloc ci-dessous.

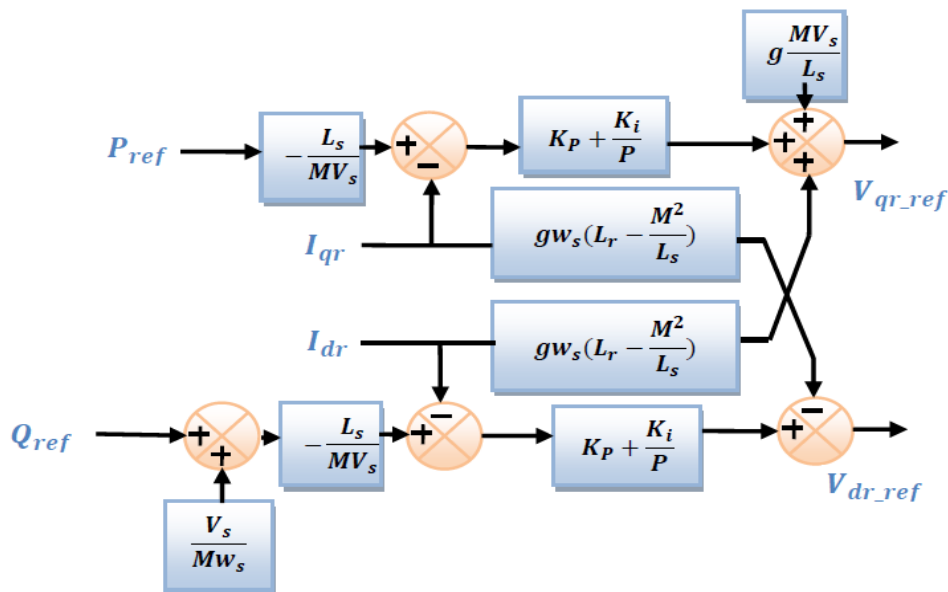


Fig.III.6 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouverte.

Cette configuration reste fiable tant que le réseau électrique reste stable en tension et en fréquence. Une instabilité du réseau va donc provoquer une erreur sur le suivi des consignes des puissances active et réactive.

III.4.1.2.b. Commande en boucle fermée

Pour réguler les puissances de manière optimale, nous allons mettre en place deux boucles de régulation sur chaque axe avec un régulateur proportionnel intégral pour chacune, une boucle sur la puissance et l'autre sur le courant correspondant tout en compensant les termes de perturbations et de couplages apparaissant sur le schéma bloc du modèle de la MADA. Nous obtenons ainsi la structure de commande présentée sur la figure suivante :

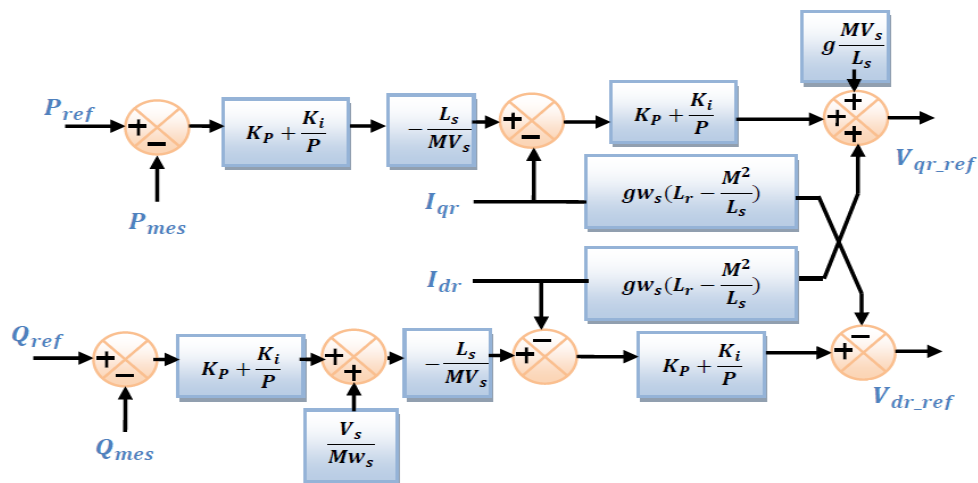


Fig .III.7 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermée.

Cette commande est donc plus performante que la commande directe qui présente plus de perturbations entre les deux puissances. La commande indirecte avec bouclage des puissances nécessite six capteurs de courant, trois pour contrôler les courants rotoriques et trois associés à trois capteurs de tension pour mesurer les puissances statoriques. Ces puissances seront aussi utilisées pour le contrôle général de l'éolienne afin de déterminer les références de puissance.

Cette structure aboutit à un système de régulation plus complexe. Toutefois, elle offre une meilleure robustesse face aux éventuelles instabilités sur le réseau électrique.

III.5 Résultats de simulation

Les résultats présentés ci-dessous sont obtenus en appliquant les lois de commande en puissance active et réactive que nous venons de présenter sur le modèle de la machine asynchrone à double alimentation, sans réglage de vitesse avec un démarrage à vide puis avec application d'une puissance active $P = -3000\text{W}$ entre $t=1\text{s}$ et $t=3\text{s}$, et une puissance réactive $Q=1000\text{VAR}$ entre $t=2\text{s}$ et $t=4\text{s}$.

Les figures ci-dessous montrent les performances de la commande vectorielle en puissance actives et réactives statorique appliquée à la MADA et entraînée à une vitesse fixe : 1440tr/min .

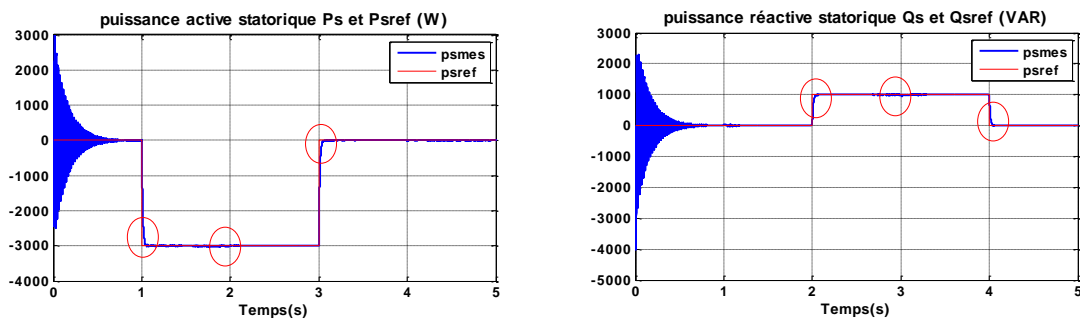


Fig.III.8 : La puissance active et réactive statorique et sont reference avec boucle de puissance.

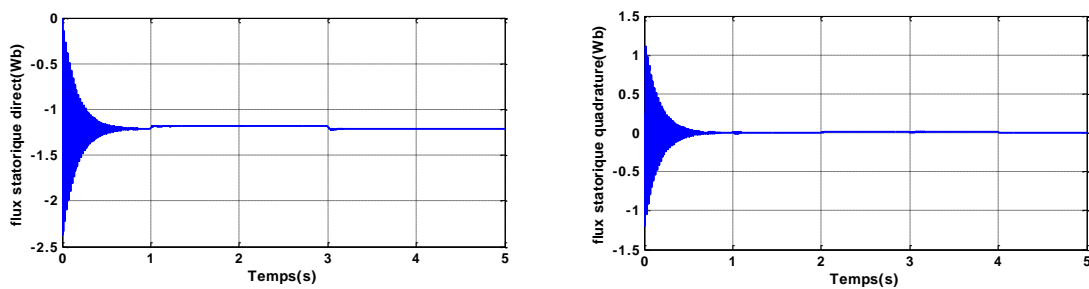


Fig.III.9 : Le flux statorique selon l'axe d et q avec boucle de puissance.

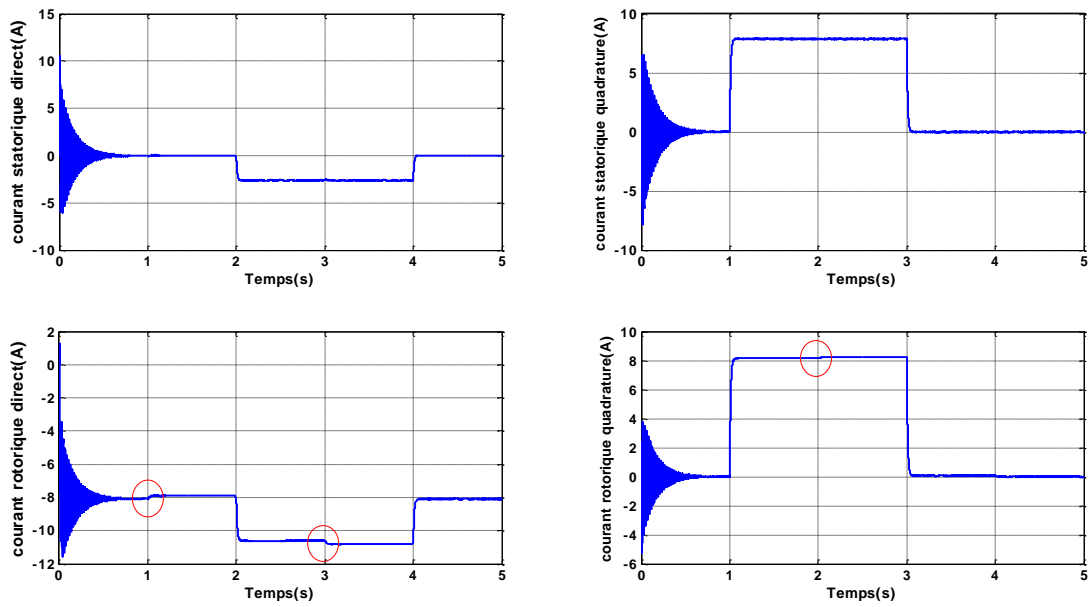


Fig.III.10: Le courant statorique et rotorique selon l'axe d et q avec boucle de puissance.

III.5.1 Résultats de Simulation du système avec turbine

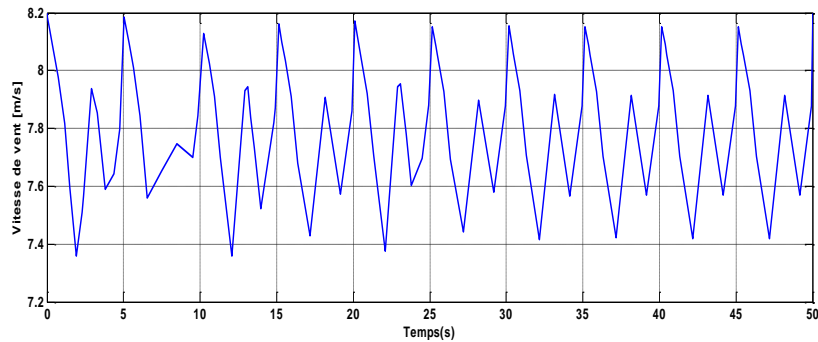


Fig.III.11 : Profil du vent appliqué.

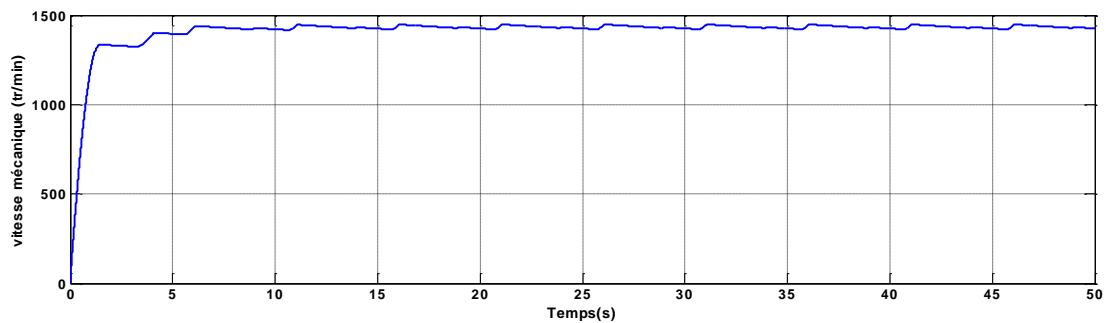


Fig.III.12 : La vitesse mécanique.

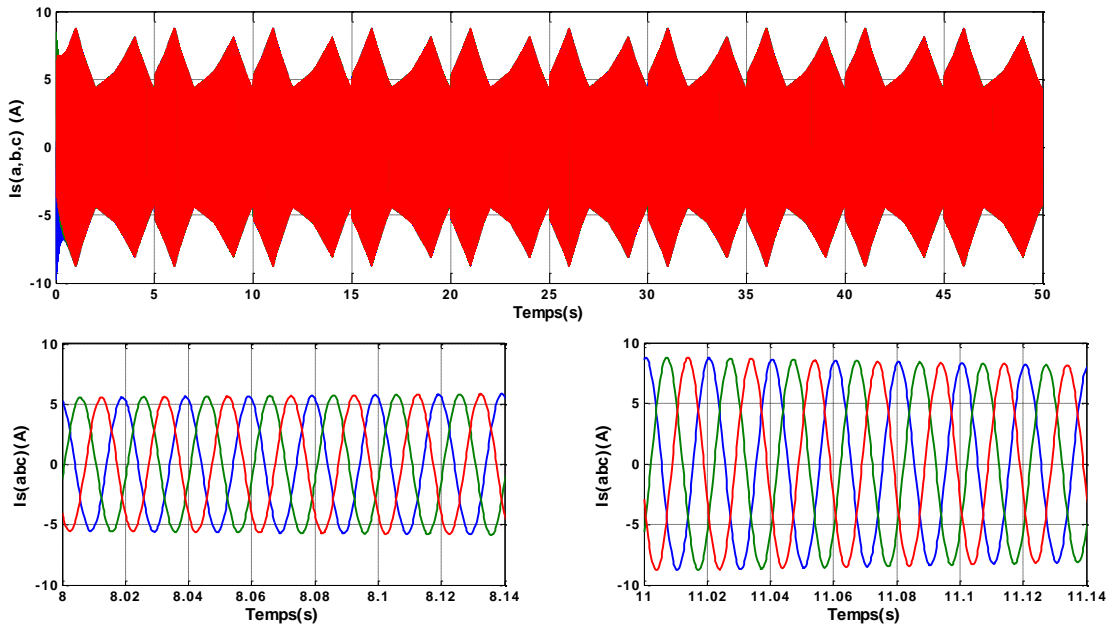


Fig.III.13 : Les composantes du courant statoriques avec un zoom entre les différents instants.

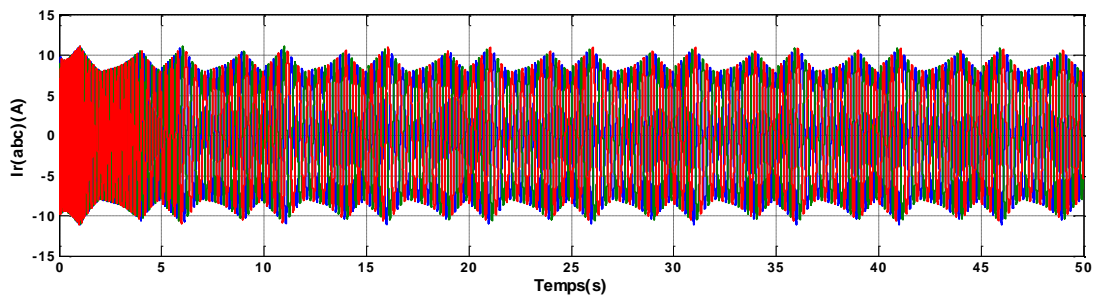


Fig.III.14 : Les composantes du courant rotoriques I_r (A).

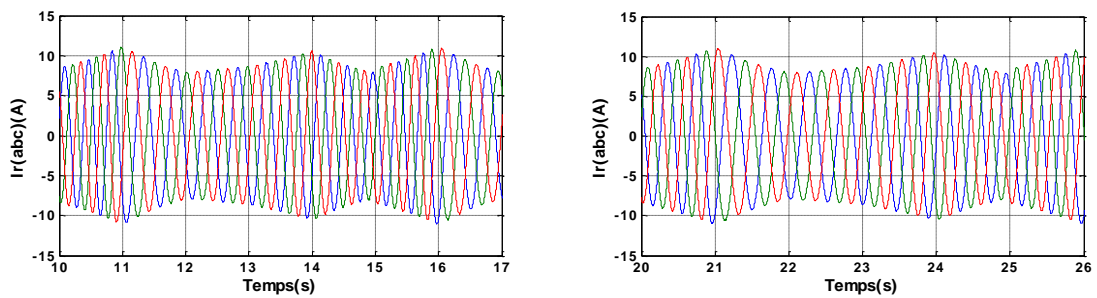


Fig.III.15 : Zoom les composantes du courant rotoriques I_r (A).

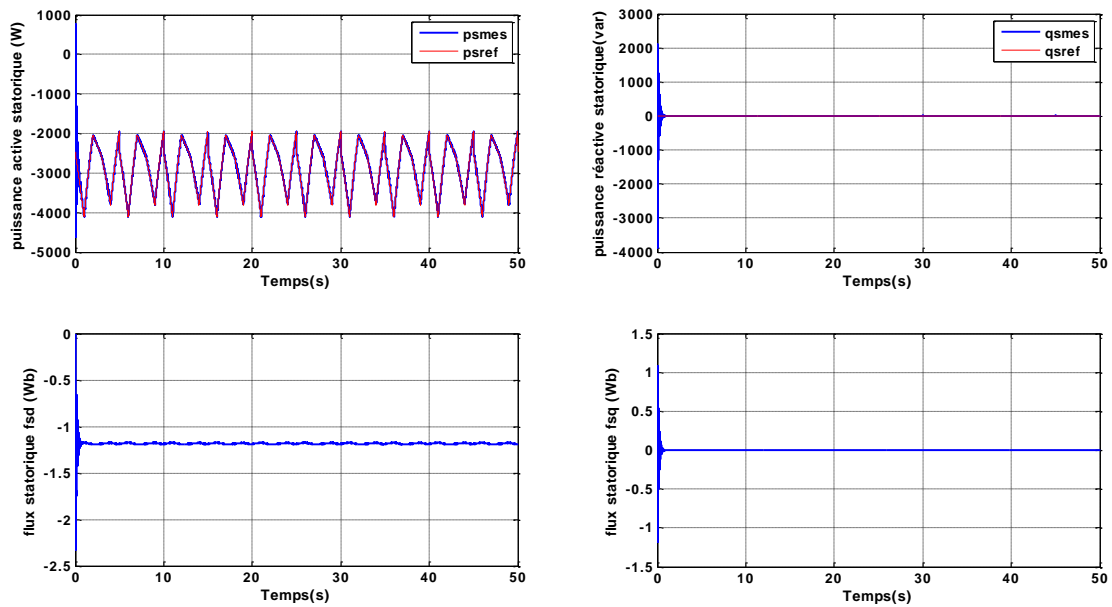


Fig.III.16 : La puissance active et réactive et flux statorique.

III.5.2 Interprétation des résultats

Pour les faibles vents, d'une vitesse égale à 8m/s, le système de commande assure l'optimisation de la puissance extraite en maintenant le coefficient de puissance de la turbine à sa valeur maximale. Les résultats de simulations sont effectués sans onduleur. La consigne de puissance active est fonction de la vitesse du vent (déterminée à partir de la puissance de la turbine). La consigne de puissance réactive est maintenue à zéro de manière à garder le facteur de puissance unitaire côté stator.

III.6.Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'étudier et d'appliquer la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la génératrice asynchrone à double alimentation. Le choix de l'orientation du flux a été pris en orientant le flux statorique selon l'axe d. La méthode du flux orienté est appliquée depuis quelques années à la MADA reste la méthode la plus répandue. En effet, celle-ci nous permet non seulement de simplifier le modèle de la machine mais aussi de découpler la régulation du couple et celle du flux. A partir de la simulation numérique, on a constaté qu'effectivement la technique d'orientation du flux statorique permet de découpler le flux et les puissances de sorte que la composante directe du courant rotorique contrôle la puissance réactive, et la composante en quadrature contrôle la puissance active. Ceci nous permet d'obtenir des performances dynamiques élevées similaires à celle de la MCC.