

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA – BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie électrique



Mémoire de Fin de cycle
En vue de l'obtention du diplôme de Master
Filière : Electrotechnique
Option : Commande électrique et Electrotechnique industrielle

Thème

*Amélioration des performances de la
commande de puissance d'une
centrale éolienne à base d'une MADA*

Présenter par :

HIHAT IDIR

CHABANE MASSY

Encadrer par :

Mr TAMALOUZT SALAH

Mr SAHRI YOUNES

Année universitaire 2019-2020

Remerciements

Remerciements

*Nous tenons à remercier tout d'abord Dieu
Tout Puissant pour la volonté, la santé et le courage
Pour accomplir ce modeste travail.*

Nous exprimons notre respect et notre gratitude à

***Mr Tamalouzt et Mr Sahri**, pour avoir accepté de*

Nous encadrer et pour avoir suivi notre travail avec

Une extrême bienveillance.

Sans oublier de remercier tous les membres du jury

Pour leur évaluation. Nous tenons à remercier

Également tous ceux qui ont attribué de près ou de loin

À la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à mes chers
parents, mes frères et sœurs, et à toutes les
personnes qui me sont proche et que j'aime.*

À mon ami et mon binôme C. Massy

H. Idir

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à

Mes chers parents

Mes frères et sœurs

Toute ma famille

Tous mes amis

Et tous ceux qui me sont chers
Sans oublier mon cher binôme et ami H.IDIR.

C.Massy

Sommaire

Sommaire

| | |
|-----------------------------|----|
| Introduction générale | 01 |
|-----------------------------|----|

Chapitre 01 : Généralités sur la conversion éolienne

| | |
|--|----|
| 1 - Introduction | 04 |
| 2 - Description d'une éolienne à axe horizontal | 04 |
| 3 - Types des turbines éoliennes | 05 |
| 3.1- Eoliennes à axe vertical | 05 |
| a)- Avantages | 06 |
| b)- Inconvénients | 06 |
| 3.2 - Eoliennes à axe horizontal | 06 |
| a)- Avantage | 06 |
| b)- Inconvénient | 06 |
| 4 - Eolienne à vitesse fixe | 06 |
| 5 - Eoliennes à vitesse variable | 07 |
| 5.1- Intérêt du fonctionnement vitesse variable | 07 |
| 6 - Machine asynchrone à double alimentation (MADA)..... | 08 |
| 6.1 - Constitution de la MADA..... | 08 |
| 6.2 - Modes de fonctionnement..... | 08 |
| 6.2.1 - Fonctionnement en moteur hypo synchrone (quadrant 1)..... | 08 |
| 6.2.2 - Fonctionnement en moteur hyper synchrone (quadrant 2) | 09 |
| 6.2.3 - Fonctionnement en génératrice hypo synchrone (quadrant 3) | 09 |
| 6.2.4 - Fonctionnement en génératrice hyper synchrone (quadrant 4) | 09 |
| 6.3 - Zone de fonctionnement..... | 10 |
| 4 - Conclusion..... | 11 |

Chapitre 2 : Modélisation de la chaîne de conversion du système proposé MADA-Eolienne

| | |
|--|----|
| 1-Introduction | 13 |
| 2- Modélisation du système éolien à vitesse variable basé sur une MADA | 13 |
| 2.1- Description du système éolien | 13 |

| | |
|--|----|
| 2.2 - Modélisation du système éolien | 14 |
| 2.3 - Modèle de la turbine éolienne | 14 |
| 2.3.1-Modèle aérodynamique | 14 |
| 2.3.2- Modèle de la partie mécanique | 16 |
| 3- Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation | 17 |
| 3.2 - Hypothèses simplificatrices | 18 |
| 3.3.1- Equations électriques..... | 18 |
| 3.3.2- Equations magnétiques | 19 |
| 4- Transformation de Park | 20 |
| 4.1- Equations électriques | 21 |
| 4.2- Equations magnétiques | 22 |
| 4.3 -Choix du référentiel | 23 |
| 4.3.1- Référentiel lié au stator | 23 |
| 4.3.2 - Référentiel lié au rotor | 23 |
| 4.3.3 - Référentiel lie au champ tournant | 24 |
| 5- Conclusion | 24 |

Chapitre 03 : Commande Direct en Puissance (DPC) de la MADA

| | |
|---|----|
| 1-Introduction | 26 |
| 2- Principe générale de la DPC-C..... | 26 |
| 3-Application de la DPC à la MADA | 27 |
| 3.1-Estimation de la puissance active et réactive | 27 |
| 3.2-Choix des comparateurs à hystérésis..... | 29 |
| 3.3-Elaboration de la table de commutation..... | 30 |
| 4-Résultats de simulation | 31 |
| A)- Performances de poursuite dans des conditions de fonctionnement normales du système | 31 |
| B)- Performances de poursuite sous l'effet de variation aléatoire du vent et de la puissance réactive à compenser | 36 |
| 5-Conclusion..... | 40 |
| Conclusion générale..... | 41 |

*Liste des symboles et
Acronymes*

Liste des symboles

| | |
|-----------------|--|
| P_v | : La puissance éolienne du vent (W); |
| P_t | : Puissance mécanique sur l'arbre de la turbine (W); |
| V_v | : La vitesse du vent ; |
| ρ | : Densité de l'air (kg/ m ³) ; |
| R | : Rayon des pales (m) ; |
| S | : Surface balayée par l'hélice (m ²) ; |
| C_p | : Le coefficient de puissance ; |
| λ | : Vitesse réduite ou rapport de vitesse ; |
| λ_{opt} | : Vitesse réduite optimale ; |
| β | : Angle de calage des pales de la turbine (°) ; |
| C_t | : Le couple mécanique disponible sur l'arbre lent de la turbine (N.m) ; |
| C_m | : Le couple mécanique sur l'arbre de la MADA (N.m) ; |
| Ω_t | : La vitesse de rotation de la turbine (tr/min) ; |
| Ω_m | : La vitesse de rotation de la MADA (tr/min) ; |
| C_{em} | : Le couple électromagnétique de la MADA (N.m) ; |
| J_t | : Le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne (Kg.m ²) ; |
| J_m | : Le moment d'inertie de la MADA (Kg.m ²) ; |
| f_v | : Le coefficient dû aux frottements visqueux de la MADA (m.s/rd) ; |
| G | : Le gain du multiplicateur ; |
| g | : Le glissement ; |
| R_s | : Résistance d'une phase statorique (Ω) |
| l_s | : Inductance propre d'une phase statorique (H) ; |
| R_r | : Résistance d'une phase rotorique (Ω); |
| l_r | : Inductance propre d'une phase rotorique (H) ; |
| M | : Inductance magnétisante (H) ; |
| M_s | : L'inductance mutuelle entre deux phases statoriques (H) ; |
| M_r | : L'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques (H) ; |
| M_{sr} | : Inductance mutuelle stator par apport au rotor(H) ; |
| M_{rs} | : L'inductance mutuelle rotor par apport au stator (H) ; |

| | |
|---------------------------------|--|
| V_{sabc}, V_{rabc} | : Les tensions triphasées statoriques et rotoriques (V) ; |
| i_{sabc}, i_{rabc} | : Les courants triphasés statoriques et rotoriques (A) ; |
| Φ_{sabc}, Φ_{rabc} | : Les flux triphasés à travers les enroulements statoriques et rotoriques (wb); |
| p | : Nombre de pair de pôles. |
| θ_s, θ_r | : Position respectivement de l'axe statorique et rotorique par rapport au référentiel synchrone ($^\circ$) ; |
| θ_e | : Angle de Park ($^\circ$) ; |
| ω_r | : Pulsation des courants rotorique (rd/s) ; |
| ω_s | : Pulsation des courants statorique (rd/s) ; |
| ω_m | : Pulsation du rotor de la MADA (rd/s) ; |
| f_r et f_s | : Fréquence des courant rotorique et statorique (Hz) ; |
| V_s et V_r | : Tension simple statorique et rotorique (V) ; |
| V_{sd}, V_{sq} | : Les tensions triphasées statoriques exprimée dans le repère de Park respectivement sur les axes d et q (V) ; |
| V_{rd}, V_{rq} | : Les tensions triphasées rotorique exprimée dans le repère de Park respectivement sur les axes d et q (V) ; |
| i_{sd}, i_{sq} | : Les courants triphasés statoriques exprimé dans le repère de Park respectivement sur les axes d et q (A) ; |
| i_{rd}, i_{rq} | : Les courants triphasés rotorique exprimée dans le repère de Park respectivement sur les axes d et q (A) ; |
| Φ_{sd}, Φ_{sq} | : Flux statorique dans le repère de Park sur les axes d et q (wb); |
| Φ_{rd}, Φ_{rq} | : Flux rotorique dans le repère de Park sur les axes d et q (wb); |
| $\Phi_{r\alpha}, \Phi_{r\beta}$ | : Flux rotorique diphasé dans le repère (α, β) (wb); |
| $\Phi_{s\alpha}, \Phi_{s\beta}$ | : Flux statorique diphasé dans le repère (α, β) (wb); |
| σ | : Coefficient de dispersion de Blondel ; |
| P_s | : La puissance active statorique (W); |
| P_r | : La puissance active rotorique (W); |
| Q_s | : La puissance réactive statorique (VAR) ; |
| P_{s_ref} | : La puissance active statorique de référence (W) ; |
| Q_{s_ref} | : La puissance réactive statorique de référence (VAR) ; |
| H_p | : Hystérisis de la puissance active ; |
| H_Q | : Hystérisis de la puissance réactive ; |

Acronymes

MADA : Machine asynchrone à double alimentation ;

MPPT : Maximum power point tracking, Algorithme d'extraction du maximum de puissance;

CCM : Convertisseur coté MADA ;

CCR : Convertisseur coté réseau ;

DPC : Direct Power Control, Commande direct en puissance ;

DTC : Direct Torque Control, Commande directe du couple ;

DC : Réseau à courant continue ;

THD : Total Harmonic Distortion ;

SVM : Spase vector modulation : Commande par la technique de modulation vectorielle ;

Introduction générale

Introduction générale

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,... etc.) et un facteur essentiel pour un développement économique. L'industrialisation très forte des dernières décennies et la prolifération des appareils domestiques électriques (chauffage, climatisation, lavage, médicale, informatique, ...etc.) ont mené à des besoins planétaires immenses en énergie électrique [Dje 15]. Face à cette demande, toujours croissante de nos jours, les pays industrialisés ont massivement fait appel aux centrales nucléaires. Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques, mais le risque d'accident nucléaire, le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures. Pour faire face à ces différents problèmes, les pays se tournent de plus en plus vers l'utilisation de sources d'énergies propres et renouvelables. En effet, ces pays se sont engagés, à moyen terme, à augmenter dans leur production d'énergie électrique, la part d'énergie d'origine renouvelable [Gai 10].

Parmi ces sources d'énergies renouvelables, l'énergie éolienne est celle qui a le potentiel énergétique le plus important. La puissance des éoliennes installées dans le monde augmentant de plus en plus tous les ans [Gai 10].

Actuellement, le système éolien à vitesse variable basé sur la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) est le plus utilisé dans les fermes éoliennes terrestres. Son principal avantage, et non des moindres, est d'avoir ses convertisseurs statiques triphasés dimensionnés pour une partie de la puissance nominale de la MADA, ce qui en fait un bénéfice économique important par rapport à d'autres solutions possibles de conversion électromécanique (machine synchrone à aimants permanents par exemple). Dans la chaîne de conversion électromécanique d'un système éolien, les convertisseurs statiques triphasés à structure tension sont des éléments essentiels car ils permettent de contrôler les puissances active et réactive injectées au réseau électrique en fonction de la vitesse du vent appliqué sur les pales de l'éolienne. La sécurité, la fiabilité, les performances, la qualité de l'énergie et la continuité de service des systèmes éoliens constituent aujourd'hui des préoccupations majeures pour l'insertion de ces sources d'énergie dans le réseau électrique [Gai 10].

Notre mémoire est dédié à l'étude d'une technique de commande de la machine asynchrone à double alimentation en conversion d'énergie éolienne. Il s'agit de la commande directe en puissance DPC « Direct Power Contrôle » afin de contrôler la puissance active et de compenser localement la puissance réactive. La présentation de ce travail sera organisé en trois chapitres détaillés ci-après.

Dans le premier chapitre nous décrivons les différents composants constituant l'aérogénérateur ainsi que les différents types d'éoliennes existantes en détaillant leurs avantages et leurs inconvénients. La deuxième partie sera consacrée à la MADA.

Au deuxième chapitre, nous présenterons la chaîne de conversion du système éolien basé sur une MADA à partir de laquelle sont basés les travaux de ce mémoire. Nous expliquerons pourquoi ce système éolien est aujourd'hui le plus utilisé pour la production d'énergie éolienne. Ensuite, nous rappellerons les modélisations des différents éléments constituant le système éolien basé sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA-Eolienne).

Le troisième chapitre sera consacré à la technique de commande DPC (Direct Power Control). Elle est basée sur le concept du contrôle direct du couple. Le but est de contrôler directement la puissance active et réactive de la MADA à travers le convertisseur côté machine. Les états de commutation de ce convertisseur sont sélectionnés à partir d'une table de commutation. Cette dernière est alimentée par deux comparateurs à hystérésis dont les entrées sont les erreurs instantanées obtenues de la différence entre la valeur de référence et estimée de la puissance active et réactive ce qui représente la commande DPC. La référence de la puissance réactive peut être maintenue nulle pour assurer un fonctionnement à facteur de puissance unitaire ou bien variable selon la demande du réseau électrique afin de compenser localement la puissance réactif.

Nous terminerons ce travail par une conclusion générale et quelques perspectives.

CHAPITRE 1 :

Généralités sur la conversion

1- Introduction

Bien que les aérogénérateurs aient atteint une certaine maturité technique, la technologie des aérogénérateurs continue d'évoluer. Les éoliennes de dernière génération fonctionnent à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de diminuer les efforts mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe. C'est le développement des variateurs d'électroniques de puissance qui permet de contrôler la vitesse de rotation des éoliennes à chaque instant. Le vent est une grandeur aléatoire, de nature très fluctuante. Les variations de la puissance résultante des fluctuations du vent constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne [Dje 15].

2- Description d'une éolienne a axe horizontal

Une éolienne est constituée par une tour au sommet de laquelle se trouve la nacelle. Etant donné que la vitesse du vent augmente lorsque l'on s'éloigne du sol, une tour peut mesurer entre 80 et 150m de haut. Typiquement une éolienne de 1 MW a une hauteur de 80 mètres de haut, ce qui correspond à la hauteur d'un immeuble de 32 étages. La tour a la forme d'un tronc en cône où, à l'intérieur, sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, Les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'échelle d'accès à la nacelle. La nacelle regroupe tout le système de transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique et divers actionneurs de commande. Tous ces éléments sont représentés sur la figure 1.1 [Ela 04].

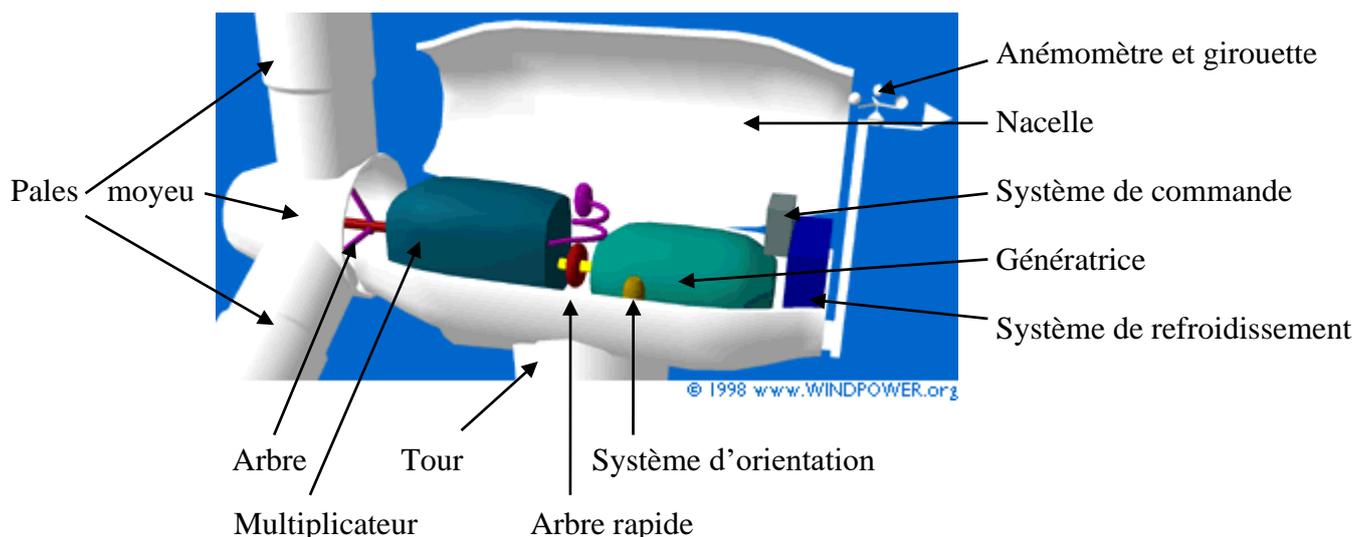


Fig.1.1- Eléments constituant une éolienne à axe horizontal [Ela 04].

Un dispositif oriente automatiquement la nacelle face au vent grâce à une mesure de la direction du vent effectuée par une girouette située à l'arrière de la nacelle.

Un arbre dit « lent » relie le moyeu au multiplicateur et contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.

Un multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique.

Le système de refroidissement comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à huile pour le multiplicateur. Il existe certaines éoliennes comportant un refroidissement à l'eau.

Les signaux électriques émis par l'anémomètre sont utilisés par le système de contrôle-commande de l'éolienne pour démarrer l'éolienne lorsque la vitesse du vent atteint la vitesse de démarrage. De même, le système de commande électronique arrête automatiquement l'éolienne si la vitesse du vent est supérieur à la vitesse maximale afin d'assurer la protection de l'éolienne.

Le système de contrôle-commande comporte un ordinateur qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation.

3- Types des turbines éoliennes

Il existe deux types d'éoliennes modernes ; celle à axe horizontal dont le rotor ressemble à une hélice d'avion et celles à axe vertical, dont la forme s'apparente à celle d'un batteur à œuf à l'envers. Dans les deux cas, les éoliennes captent l'énergie du vent et l'a transforment en énergie électrique (aérogénérateur) ou mécanique (éolienne de pompage, de sciage, etc.). On peut comparer les différents types de turbines en comparant leurs coefficients aérodynamiques de puissance en fonction de la vitesse normalisée λ [Mel 11].

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales, leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente, sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation [Ham 08], [Mek 04].

3.1- Éoliennes à axe vertical

Elles ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologies ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Savonius et le rotor de Darrieus. A nos jours, ce type d'éolienne est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue. Elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme suit [Ham 08] [Mek 04] :

➤ **Avantages**

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

➤ **Inconvénients**

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- La conception verticale impose qu'elles fonctionnent avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.

3.2- Éoliennes à axe horizontal

Ce sont les éoliennes actuellement les plus répandues, sans doute à cause de leurs avantages remarquables, elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent [Hau 06], [Ham 08].

➤ **Avantage**

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.

➤ **Inconvénient**

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour, ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

Il existe essentiellement deux technologies d'éoliennes, celles à vitesse fixe et celle à vitesse variable.

4. Éolienne à vitesse fixe

Ce mode de fonctionnement concerne principalement les éoliennes dont la vitesse de rotation est régulée par orientation des pales. Généralement, ces éoliennes reposent sur l'utilisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil directement connecté au réseau, une batterie de condensateurs est souvent associée pour compenser la puissance réactive nécessaire à sa magnétisation [Dav 07], [Ghe 11].

Les avantages de ces éoliennes peuvent se résumer comme suit [Ghe 11], [Tou 10] :

- Système électrique simple.
- Grande fiabilité.

- Prix modéré.

Leurs inconvénients majeurs résident dans [Ghe 11], [Tou 10] :

- Une puissance extraite non optimale : ce type d'éolienne n'offre quasiment pas de possibilité de réglage de la puissance générée.
- Bruyant, à cause de la modification du système d'orientation des pales fortement sollicité.
- Variations fréquentes du couple mécanique à cause du mouvement des pales pour garder la vitesse fixe, ce qui entraîne des variations rapides du courant dans le réseau.

5- Eoliennes à vitesse variable

Le fonctionnement à vitesse variable des éoliennes, permet de maximiser la puissance extraite du vent, pour cela une connexion directe au réseau n'est plus possible à cause de caractère variable de la fréquence des tensions, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau est alors nécessaire [Dav 07].

5.1 - Intérêt du fonctionnement à vitesse variable

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la Fig.1.2 [Ela 04].

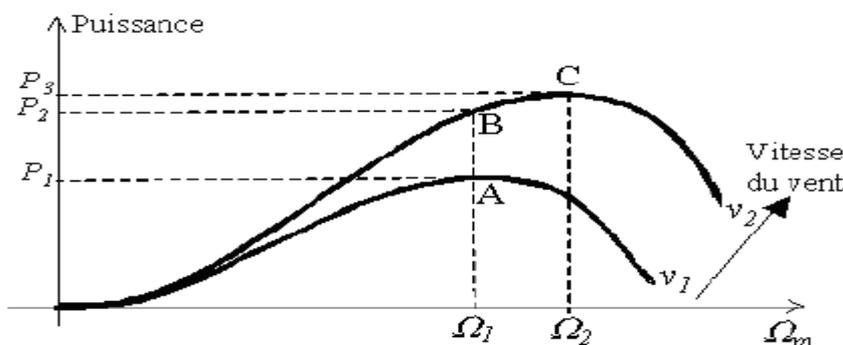


Fig.1.2 - Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse Mécanique et la vitesse du vent [Ela 04].

Pour une vitesse de vent v_1 et une vitesse de la génératrice Ω_1 ; on obtient une puissance nominale P_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de v_1 à v_2 , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance P_2 se trouve sur la 2^{ème} caractéristique (point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire une puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure Ω_2 . Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée [Ela 04].

6 - Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)

6.1- Constitution de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation est un générateur à rotor bobiné. Les enroulements du stator sont connectés directement au réseau triphasé (figure 1.3). Les enroulements du rotor sont reliés à des convertisseurs de puissance bidirectionnels en courant: la puissance traversant ces convertisseurs peut alors être absorbée ou produite par la machine, le condensateur entre ces deux convertisseurs représente le bus continu. Le transformateur élévateur de tension permet le raccordement au réseau de distribution [Vid 04].

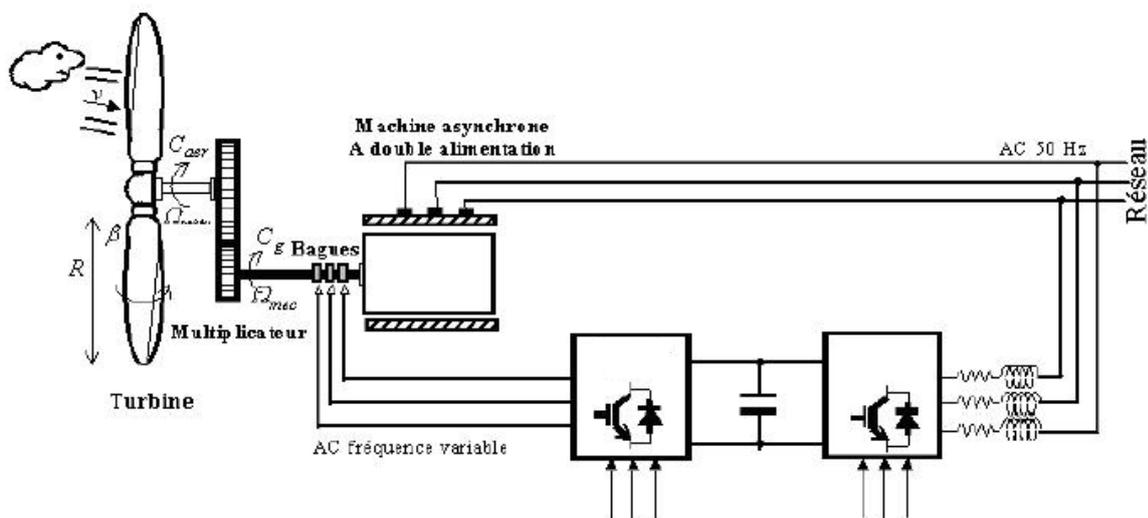


Fig. 1.3-schéma général d'un système utilisant une MADA.

6.2 - Modes de fonctionnement

Le fonctionnement d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans les quatre quadrants est schématisé dans la Fig.1.4, tel que P_s , P_r désignent les puissances absorbées ou fournies par le stator et le rotor de la machine [Boy 06].

6.2.1- Fonctionnement en moteur hypo synchrone (quadrant 1)

La puissance de stator est constante et la puissance du glissement transitée par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est dissipée en perte joule dans le rotor.

6.2.2- Fonctionnement en moteur hyper synchrone (quadrant 2)

Le glissement devient négatif lorsqu'on augmente la vitesse, la puissance est fournie par le réseau au stator et au rotor. Pour réaliser ce mode on inverse l'ordre de phase de sorte que le champ tournant induit par la fréquence du glissement soit en opposition de phase avec celui du stator.

6.2.3- Fonctionnement en génératrice hypo synchrone (quadrant 3)

Le stator fournit de l'énergie électrique au réseau dans le mode hypo synchrone de vitesse. Le rotor absorbe la puissance du glissement et la direction du champ magnétique est identique à celle du champ tournant au stator on a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme.

6.2.4- Fonctionnement en génératrice hyper synchrone (quadrant 4)

La puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau on a donc un fonctionnement au-dessus de la vitesse de synchronisme la Fig.1.4 représente le fonctionnement de la MADA dans les quatre quadrants.

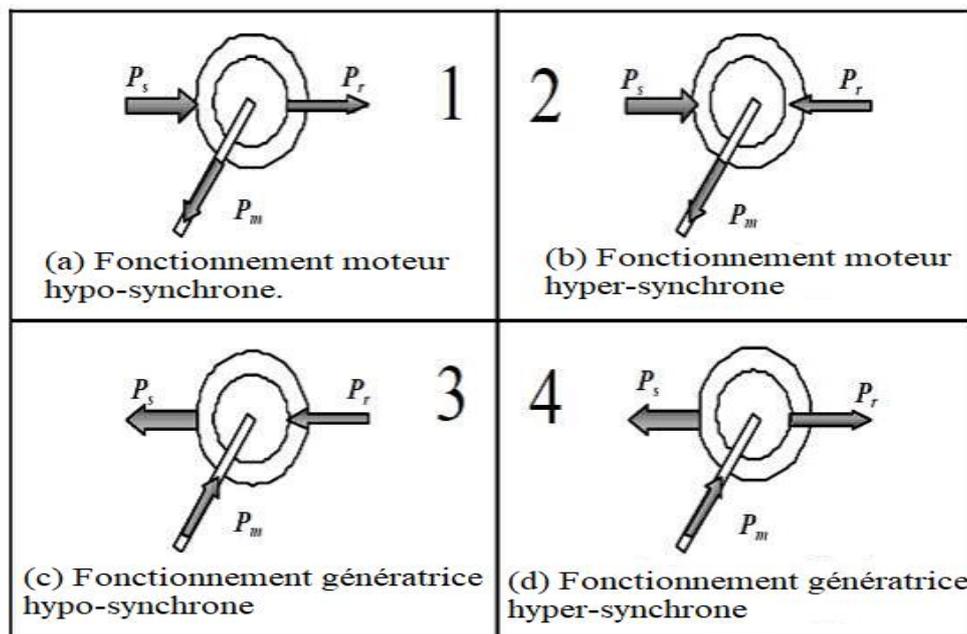


Fig. 1.4- Modes de fonctionnement de la MADA

La MADA offre un autre mode de fonctionnement pour une fréquence rotorique nulle, appelé le fonctionnement en mode synchrone, dans les deux régimes que ce soit en moteur ou en génératrice.

6.3 - Zone de fonctionnement d'une éolienne

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance nominale P_n qui est obtenue à partir d'une vitesse du vent V_n . Lorsque la vitesse du vent est supérieure à V_n , un système de freinage se met en marche afin d'éviter la destruction mécanique, de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante [Iva 04].

La figure suivante illustre les différentes zones de fonctionnement de l'éolienne :

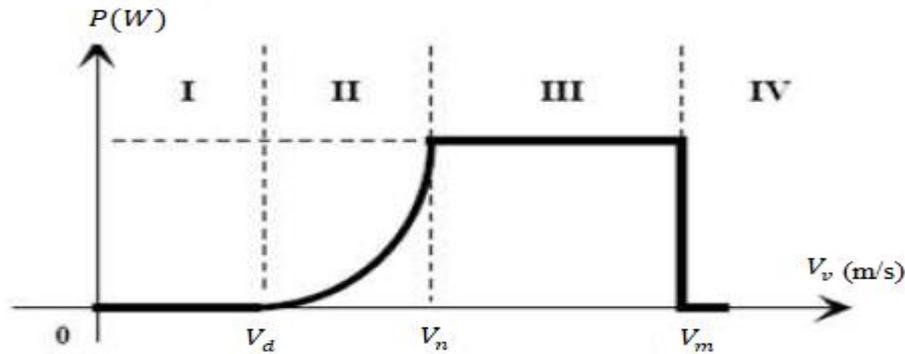


Fig.1.5 - Zone de fonctionnement d'une éolienne.

Avec :

V_d : Vitesse de démarrage, à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de la puissance.

V_m : Vitesse maximale du vent, pour laquelle la turbine doit s'arrêter, pour des raisons de sécurité.

V_n : La vitesse nominale à partir de laquelle l'éolienne est en pleine production. Les vitesses

V_d , V_m , V_n définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent :

- **Zone I** : la puissance générée est nulle (la turbine ne fonctionne pas).
- **Zone II** : La phase d'extraction de la puissance maximale (phase M.P.P.T). Dans cette zone, la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale de la génératrice. La puissance électrique augmente rapidement. Dans cette zone, l'angle de calage des pales β est maintenu constant à sa valeur minimale afin d'obtenir un C_p (maximal). La puissance maximale est ainsi obtenue pour chaque valeur de vitesse mécanique et pour des vitesses de vent moyennes.
- **Zone III** : la vitesse de rotation est maintenue constante et la puissance fournie reste égale à P_n .
- **Zone IV** : dans laquelle le système de sûreté de fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.

4 - Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté dans la première partie, une description d'une éolienne, essentiellement la constitution de la nacelle, puis on a abordé les deux types d'éolienne qui existe, on a vu que les éoliennes à axe horizontale sont les plus utilisés, dont nous avons deux modes de fonctionnement, à vitesse fixe et à vitesse variable. La deuxième partie de ce chapitre est consacré à la MADA (Machine Asynchrone à Double Alimentation). Le prochain chapitre sera consacré à la modélisation de la chaîne de conversion choisie, constituant l'éolienne à base d'une MADA.

CHAPITRE 2

*Modélisation de la chaîne
de conversion du système
proposé MADA-Eolienne*

1. Introduction

La modélisation de la chaîne de conversion MADA-éolienne est une étape primordiale dans la compréhension du système. Cette étape nous permet d'abord de comprendre le comportement dynamique et l'interaction électromécanique de la génératrice avec le modèle approprié.

Ce chapitre a pour objectif de présenter la modélisation de la chaîne de conversion du système éolien basé sur une MADA.

2. Modélisation du système éolien à vitesse variable basé sur une MADA

2.1 Description du système éolien

Le système éolien à vitesse variable étudié dans ce mémoire, basé sur une MADA, est illustré sur la Figure 2.1. La turbine, via un multiplicateur, entraîne la MADA, laquelle est raccordée au réseau électrique directement par son stator mais également à travers de convertisseurs statiques triphasés, par son rotor.

Celui-ci est muni de systèmes bagues/balais. Ces Convertisseurs Côtés MADA et Réseau, notés respectivement CCM et CCR [Mir 05], [Bar 07], [Gai 10].

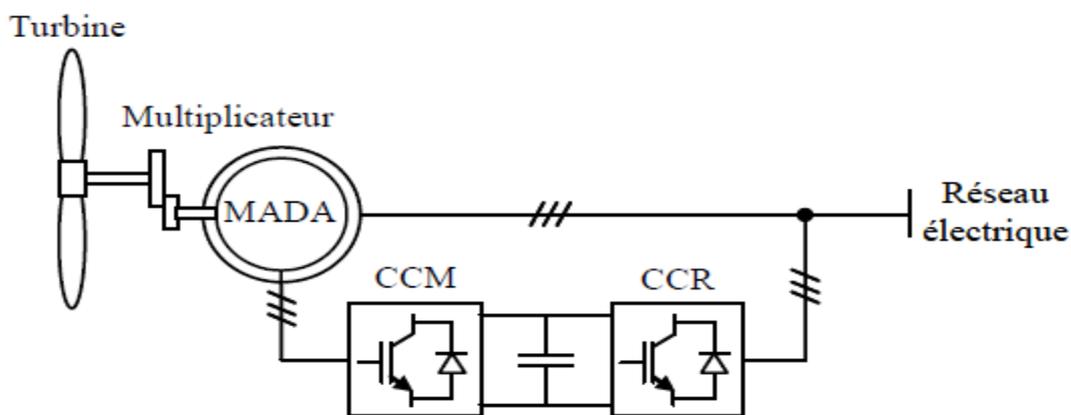


Fig. 2.1- Système éolien à vitesse variable basé sur une MADA.

Un fonctionnement en mode hypo ou hyper-synchrone est même synchrone est possible grâce à la bidirectionnalité des convertisseurs [Mul 02]. Le fonctionnement en mode Hyper-synchrone permet de transférer de l'énergie électrique du stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau, ce qui confère au système éolien un rendement élevé. De plus, le facteur de puissance au point de raccordement de l'éolienne avec le réseau électrique peut également être imposé via le contrôle des puissances réactives dans les différentes commandes des convertisseurs.

L'intérêt majeur de ce système éolien réside dans le fait que le CCM et le CCR, transférant la puissance de glissement et l'acheminant vers le réseau électrique, ne sont dimensionnés que pour une fraction de la puissance nominale de la MADA [Mult 04], [Gai 10].

Le surcoût engendré par la maintenance due à l'emploi d'un multiplicateur de vitesse et du système bagues/balais de la MADA est alors compensé par l'économie réalisée sur les convertisseurs comparé à un système éolien pour lequel les convertisseurs seraient dimensionnés pour la totalité de la puissance nominale de la génératrice [Gai 10].

2.2 Modélisation du système éolien

Le schéma de l'éolienne basée sur une MADA connectée au réseau, incluant les différentes grandeurs mécaniques et électriques servant à la modélisation de la chaîne de conversion électromécanique est illustré sur la Figure 2-1.

Dans un premier temps, nous présentons le modèle aérodynamique de la turbine, puis le modèle mécanique de l'éolienne. Ensuite, nous présentons la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique. Puis la MADA sera modélisée dans le repère de Park en vue de sa commande.

2.3 Modèle de la turbine éolienne

2.3.1 Modèle aérodynamique

La puissance éolienne du vent est exprimée par la relation suivante :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S V_v^3 \quad 2.1$$

Le vent de vitesse V_v , appliqué sur les pales de l'éolienne, entraîne sa mise en rotation et crée une puissance mécanique sur l'arbre de la turbine, notée P_t , s'exprimant par [Hei 98] :

$$P_t = C_p(\lambda, \beta) \cdot P_v \quad 2.2$$

D'où :

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad 2.3$$

Où λ est défini par :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R}{V_v} \quad 2.4$$

Avec :

- λ : La vitesse relative représentant le rapport entre la vitesse linéaire à l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent,
- ρ : La masse volumique de l'air (approximativement $1,225 \text{ kg/m}^3$ à la pression atmosphérique et à 15°C),
- S : La surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle décrit étant défini par la longueur d'une pale,
- Ω_t : La vitesse de rotation de la turbine,
- R : rayon des pales.

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne et dépend également de la caractéristique de la turbine. Ce coefficient présente une limite théorique, appelée limite de Betz, égale à 0,593 et qui n'est jamais atteinte en pratique [Hei 98]. Dans le cadre de ce mémoire, nous utiliserons une expression approchée du coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative λ et de l'angle de calage des pales β .

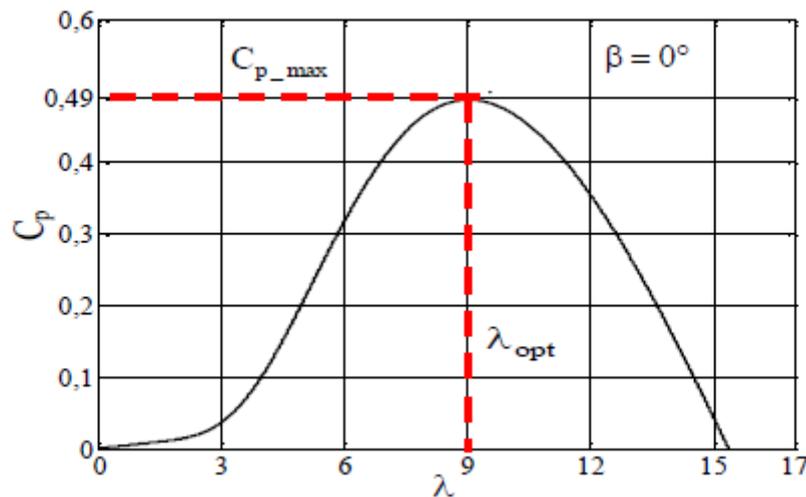


Fig.2.2- Caractéristique $C_p(\lambda)$ pour un angle de calage $\beta = 0^\circ$ de la turbine choisie [Tam 17].

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.35 - 0.00167) \cdot (\beta - 2) \cdot \sin \left[\frac{\pi \cdot (\lambda + 0.1)}{14.34 - 0.3 \cdot (\beta - 2)} \right] - 0.00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad 2.5$$

Connaissant la vitesse de rotation de la turbine, le couple mécanique C_t disponible sur l'arbre lent de la turbine peut donc s'exprimer par :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{\pi}{2 \cdot \lambda} \rho \cdot R^3 \cdot V_v^2 \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad 2.6$$

2.3.2. Modèle de la partie mécanique

La partie mécanique de la turbine comprend trois pales orientables et de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse de rotation Ω_t , relié à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraîne la génératrice électrique. Les trois pales sont considérées identiques. De plus, on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée. Ainsi, on peut modéliser l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De part la conception aérodynamique des pales, nous considérons que leur coefficient de frottement par rapport à l'air est très faible et peut être négligé. De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement seront négligeables devant les pertes par frottement du côté de la génératrice. Sur la base de ces hypothèses, on obtient alors un modèle mécanique constitué de deux masses comme l'illustre la Figure 2.3 [Usa 03], [Gai 10].

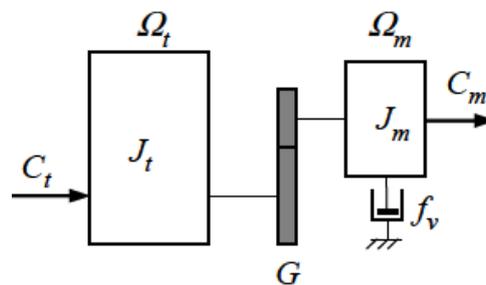


Fig.2.3 : Modèle mécanique de la turbine éolienne.

Avec :

- J_t : le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne,
- J_m : le moment d'inertie de la MADA.
- f_v : le coefficient dû aux frottements visqueux de la MADA.
- C_m : le couple mécanique sur l'arbre de la MADA.
- Ω_m : la vitesse de rotation de la MADA.

Le multiplicateur adapte la vitesse de rotation de la turbine (arbre lent) à la vitesse de rotation de la MADA (arbre rapide) (Figure 2-3). En considérant que le multiplicateur est idéal, il est alors modélisé par les deux équations suivantes :

$$C_m = \frac{C_t}{G} \quad 2.7$$

$$\Omega_m = G \cdot \Omega_t \quad 2.8$$

D'après la figure 2.3 nous pouvons écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la MADA par :

$$\left(\frac{J_t}{G^2} + J_m \right) \frac{d\Omega_m}{dt} + f_v \cdot \Omega_m = C_m - C_{em} \quad 2.9$$

Avec :

- C_{em} : le couple électromagnétique de la MADA.

Le schéma bloc de la Figure 2-4 correspond aux modélisations aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne. Ce schéma bloc montre que la vitesse de rotation Ω_m de la MADA, donc de la turbine, peut être contrôlée par action soit sur l'angle de calage des pales β , soit sur le couple électromagnétique C_{em} de la MADA. La vitesse du vent v est considérée comme une entrée perturbatrice au système [Gai 10].

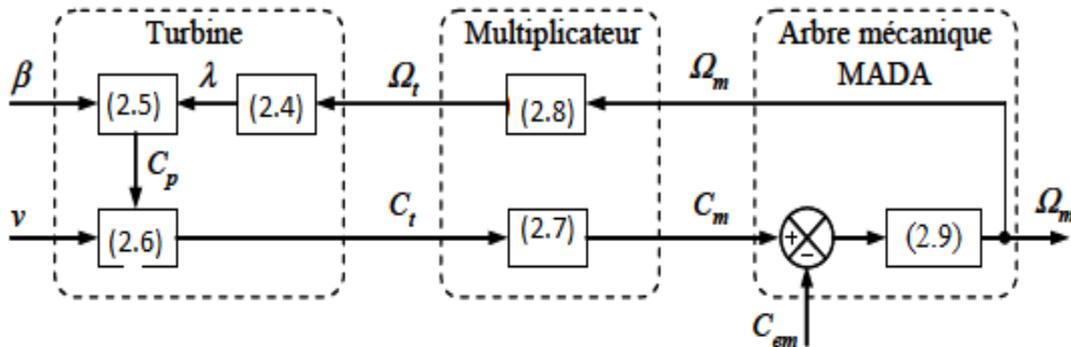


Fig.2.4 : Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne.

3- Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

Afin d'établir la modélisation de la MADA, nous allons déterminer le modèle d'une machine asynchrone à rotor bobiné. Ce modèle sera établi de la même manière que le modèle de la machine à cage avec comme différence l'existence de tensions rotoriques non nulles.

Le stator de la machine est constitué de trois enroulements (a_s, b_s, c_s) répartis dans l'espace et séparés d'un angle électrique de $(2\pi/3)$ et de pulsation ($\omega_s = 2\pi f_s$). Le rotor est aussi formé de trois enroulements (a_r, b_r, c_r) de pulsation ($\omega_r = 2\pi f_r$) est séparés d'un angle électrique de $(2\pi/3)$ [Teb 18].

La représentation schématique de la MADA dans le repère triphasé est donnée par la figure 2-5, θ est l'angle électrique entre l'axe de la phase «a_s» statorique et la phase «a_r» rotorique.

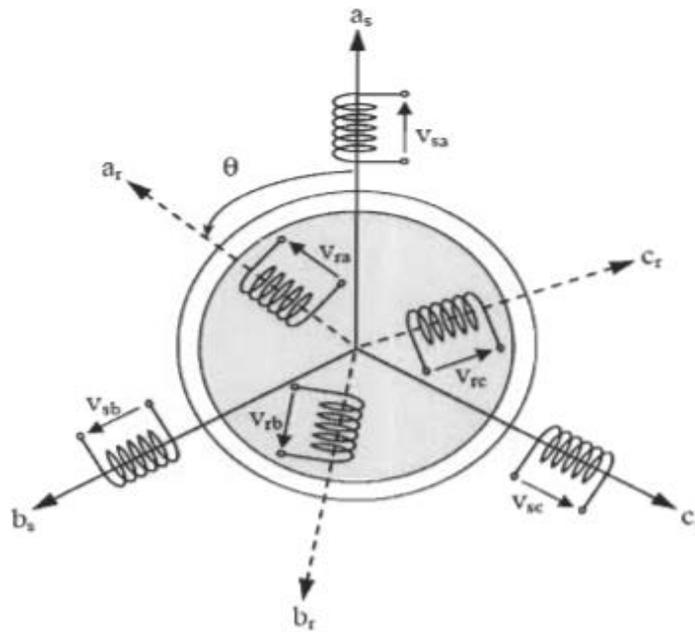


Fig.2.5 : Représentation schématique de la MADA.

3.2 - Hypothèses simplificatrices

Lors de la modélisation de la MADA, on a supposé que [Tar 08] :

- Le circuit magnétique de la machine n'est pas saturé ;
- Les pertes par courant de Foucault et par hystérésis sont négligées ;
- Les forces magnétomotrices créées par chacune des phases des deux armatures sont à répartition sinusoïdale ;
- Les résistances ne varient pas avec la température ;
- Entre fer constant ;
- L'influence de l'effet de peau n'est pas prise en compte ;

De ce fait tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductances mutuelles ne dépendent que de la position des enroulements.

3.3.1 - Equations électriques

Les équations des tensions électriques des enroulements statoriques et rotoriques, peuvent être exprimées par la loi de Faraday permettant d'écrire [Hau 95] :

$$\frac{d\Phi}{dt} = V - Ri \quad 2.10$$

On applique cette relation sur l'enroulement triphasé du stator et de rotor on trouve :

$$\bullet \text{ Au stator : } \begin{cases} V_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d\Phi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d\Phi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d\Phi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad 2.11$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad 2.12$$

$$\text{Avec : } [V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} ; [i_s] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} ; [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} ; [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix}$$

$$\bullet \text{ Au rotor : } \begin{cases} V_{ra} = R_r i_{ra} + \frac{d\Phi_{ra}}{dt} \\ V_{rb} = R_r i_{rb} + \frac{d\Phi_{rb}}{dt} \\ V_{rc} = R_r i_{rc} + \frac{d\Phi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad 2.13$$

$$\text{Sous forme matricielle : } \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad 2.14$$

$$\text{Avec : } [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} ; [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} ; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} ; [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix}$$

3.3.2 - Equations magnétiques

Les équations magnétiques de la MADA sont données par [Hau 95] :

$$\text{Au stator : } [\Phi_{sabc}] = [L_s] [i_{sabc}] + [M_{sr}] [i_{rabc}] \quad 2.15$$

$$\text{Au rotor : } [\Phi_{rabc}] = [L_r] [i_{rabc}] + [M_{sr}]^T [i_{sabc}] \quad 2.16$$

$$\text{La matrice des inductances statorique } [L_s] : [L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}$$

La matrice des inductances rotorique $[L_r] : [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$

La matrice de l'inductance mutuelle entre le stator et le rotor $[M_{sr}] :$

$$[M_{sr}] = M_0 \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta \end{bmatrix}$$

Par raison de réciprocité mutuelle $[M_{rs}] = [M_{sr}]^T$

4- Transformation de Park :

La complexité et la non linéarité des équations précédentes rendent leur résolution difficile, alors il est indispensable d'appliquer la transformation de Park afin d'avoir un système d'équations différentielles à coefficients constants ce qui va faciliter sa résolution. La transformation de Park consiste à transformer les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système [Ham 08].

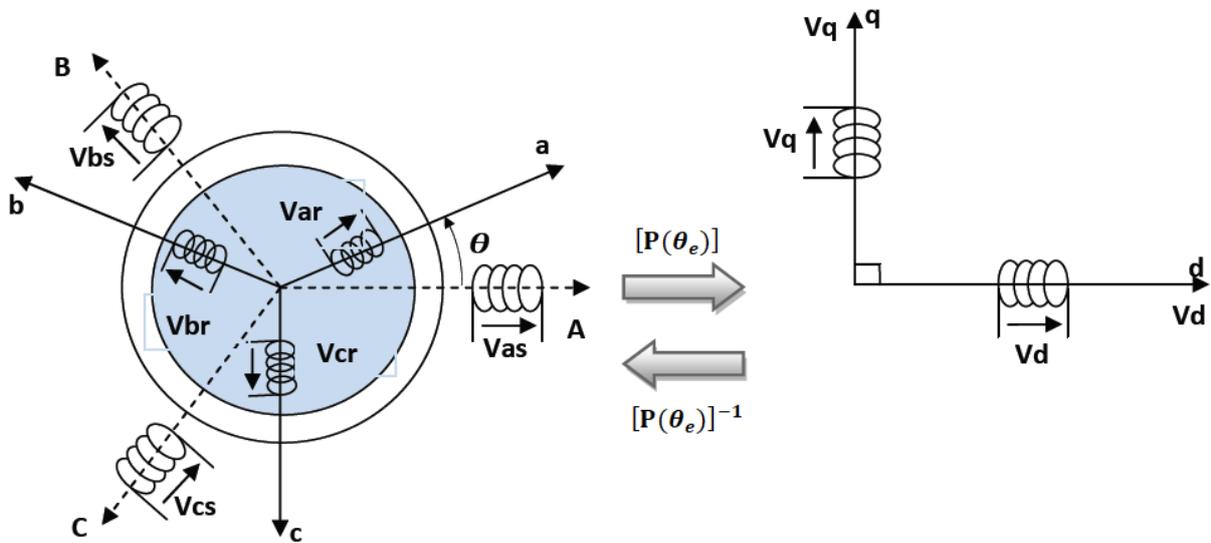


Fig.2.6 - Passage du triphasé au biphasé et l'inverse.

Si X est une grandeur qui peut désigner un courant, un flux ou une tension, On a alors :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = [P(\theta_e)] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad 2.17$$

La matrice de transformation de Park est définie comme suit :

$$[P(\theta_e)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \cos(\theta_e - 2\pi/3) & \cos(\theta_e + 2\pi/3) \\ -\sin \theta_e & -\sin(\theta_e - 2\pi/3) & -\sin(\theta_e + 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Et inversement, pour passer des équations dans le plan de Park aux équations dans le plan (a,b,c), on utilise la transformation de Park inverse qui est donnée par :

$$[P(\theta_e)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_e & -\sin \theta_e & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_e - 2\pi/3) & -\sin(\theta_e - 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_e + 2\pi/3) & -\sin(\theta_e + 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Le passage du modèle triphasé au modèle biphasé de Park s'effectue par l'application des transformées de Park $[P(\theta_s)]$ et $[P(\theta_r)]$ respectivement aux grandeurs statoriques et rotoriques.

4.1 - Equations électriques

L'application de la transformation de Park aux équations électriques de la MADA, nous donne :

Au stator:

$$[V_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt}([\Phi_{sabc}]) \quad 2.18$$

$$\text{Et : } [V_{sabc}] = [P(\theta_s)]^{-1}[V_{sdqo}] \quad 2.19$$

$$\text{Sachant que : } [i_{sabc}] = [P(\theta_s)]^{-1}[i_{sdqo}]$$

$$\text{Et : } [i_{rabc}] = [P(\theta_r)]^{-1}[i_{rdqo}]$$

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{so} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{so} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{so} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d\theta_s}{dt} & 0 \\ \frac{d\theta_s}{dt} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{so} \end{bmatrix} \quad 2.20$$

Au rotor :

$$\begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \\ V_{ro} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \\ i_{ro} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \\ \Phi_{ro} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d\theta_r}{dt} & 0 \\ \frac{d\theta_r}{dt} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \\ \Phi_{ro} \end{bmatrix} \quad 2.21$$

Ces équations 2.20 et 2.21 s'écrivent finalement :

$$\text{Au stator : } \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \end{bmatrix} + \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} -\Phi_{sq} \\ \Phi_{sd} \end{bmatrix} \quad 2.22$$

$$\text{Au rotor : } \begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} + \left(\frac{d\theta_s}{dt} - p\Omega \right) \begin{bmatrix} -\Phi_{rq} \\ \Phi_{rd} \end{bmatrix} \quad 2.23$$

4.2 - Equations magnétiques

En appliquant la transformée de Park aux flux à travers le stator :

$$[\Phi_{sdqo}] = [P(\theta_s)][\Phi_{sabc}] \quad 2.24$$

Donc on a :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{so} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s - M_s & 0 & 0 \\ 0 & l_s - M_s & 0 \\ 0 & 0 & l_s + 2M_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{so} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3/2 M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & 3/2 M_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \\ i_{ro} \end{bmatrix}$$

Au rotor on a:

$$[\Phi_{rdqo}] = [P(\theta_r)][\Phi_{rabc}] \quad 2.25$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \\ \Phi_{ro} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_r - M_r & 0 & 0 \\ 0 & l_r - M_r & 0 \\ 0 & 0 & l_r + 2M_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \\ i_{ro} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3/2 M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & 3/2 M_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{so} \end{bmatrix} \quad 2.26$$

$L_s = l_s - M_s$: Inductance cyclique du stator.

$L_r = l_r - M_r$: Inductance cyclique du rotor.

$L_{so} = l_s + 2M_s$: Inductance cyclique homo polaire du stator.

$L_{ro} = l_r + 2M_r$: Inductance cyclique homo polaire du rotor.

$M = 3/2M_{sr}$: Inductance mutuelle cyclique du stator par apport au rotor.

Compte-tenu des valeurs nulles des composantes homopolaires des courants statoriques et rotoriques car la machine dont les enroulements sont symétriques est alimentée par un système de tensions triphasées équilibrées, les équations des flux s'écrivent finalement sous cette forme :

$$\text{Au stator : } \begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad 2.27$$

$$\text{Au rotor : } \begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Lr & 0 \\ 0 & Lr \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad 2.28$$

Les puissances actives et réactives statoriques et rotoriques s'expriment par :

$$P_s = v_{sd} \cdot i_{sd} + v_{sq} \cdot i_{sq} \quad 2.29$$

$$Q_s = v_{sq} \cdot i_{sd} - v_{sd} \cdot i_{sq} \quad 2.30$$

$$P_r = v_{rd} \cdot i_{rd} + v_{rq} \cdot i_{rq} \quad 2.31$$

$$Q_r = v_{rq} \cdot i_{rd} - v_{rd} \cdot i_{rq} \quad 2.32$$

Le couple électromagnétique C_{em} peut être exprimé, à partir des flux et des courants statoriques, par :

$$C_{em} = p \times (\Phi_{sd} \times i_{sq} - \Phi_{sq} \times i_{sd}) \quad 2.33$$

4.3 Choix du référentiel

Les équations de la machine utilisée peuvent être exprimées dans trois référentiels selon le positionnement de ses axes par rapport aux axes de la machine [Bag 09] [Aza 08].

- Référentiel lié au stator ;
- Référentiel lié au rotor ;
- Référentiel lié au champ tournant ;

4.3.1- Référentiel lié au stator

Ce référentiel est choisi dans le cas où la variation de vitesse de rotation est importante :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{d\theta_r}{dt} = -\omega_m \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} + \omega_m \Phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} - \omega_m \Phi_{rd} \end{cases} \quad 2.34$$

4.3.2 - Référentiel lié au rotor

Ce référentiel est choisi dans les problèmes des régimes transitoires ou la vitesse de rotation est constante :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_m \quad \text{et} \quad \frac{d\theta_r}{dt} = 0 \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_m \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_m \Phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} \end{cases} \quad 2.35$$

4.3.3 - Référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel est souvent utilisé dans le cas où la fréquence d'alimentation est constante sur cette base que nous avons fait ce choix.

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \quad \text{et} \quad \frac{d\theta_r}{dt} = (\omega_s - \omega_m) \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \Phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \Phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega_m) \Phi_{rd} \end{cases} \quad 2.36$$

5. Conclusion

Ce chapitre a traité la modélisation de la chaîne de conversion du système éolien basé sur une MADA, nous avons vu que la partie mécanique est un élément très important dans les systèmes de conversion éoliens. Ce système éolien est le plus utilisé actuellement, notamment en raison des économies réalisées grâce au faible dimensionnement des convertisseurs statiques triphasés mis en œuvre.

Pour la partie électrique du système éolien, on a présenté la modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation. Afin de pouvoir la représenter dans le repère (d-q), nous avons fait appel à la transformation de Park, tout en tenant compte des hypothèses simplificatrices. Le chapitre suivant sera consacré à la Commande Directe en Puissances DPC appliquée au système proposé éolienne-MADA.

Chapitre 3 :

Commande Direct en

Puissance (DPC) de la MADA

1- Introduction

Dans ce chapitre la technique DPC sera traité pour le contrôle de la puissance active et réactive statoriques. Cette stratégie est basée sur la sélection d'un vecteur de tension de telle manière que les erreurs entre les grandeurs mesurées et de références seront réduites et maintenues entre les limites des bandes d'hystérésis [Tre 09]. Ses principaux avantages sont la rapidité de la réponse dynamique de couple et la robustesse vis-à-vis des paramètres de la machine.

2 - Principe générale de la DPC

La structure globale de la DPC, utilisant une table de commutation prédéfinie, appliqué au convertisseur triphasé coté machine « CCM » est illustrée sur la figure 3.1. Elle est analogue à celle du contrôle direct de couple (DTC). Au lieu du couple et du flux rotorique, c'est la puissance active et réactive statoriques qui sont les grandeurs contrôlées. Le principe de la DPC consiste à sélectionner une séquence des ordres de commutation (S_a, S_b, S_c) des semi-conducteurs constituant le CCM, à partir d'une table de commutation. La sélection s'effectue sur la base des erreurs (εP_s et εQ_s) entre les références des puissances active et réactive (P_{s_ref} et Q_{s_ref}) et les valeurs réelles (P_s et Q_s) fournies par deux comparateurs à hystérésis de sorties numérisées H_p et H_Q respectivement, ainsi que sur le secteur (zone) dans lequel le vecteur flux rotorique se trouve [Ham 13].

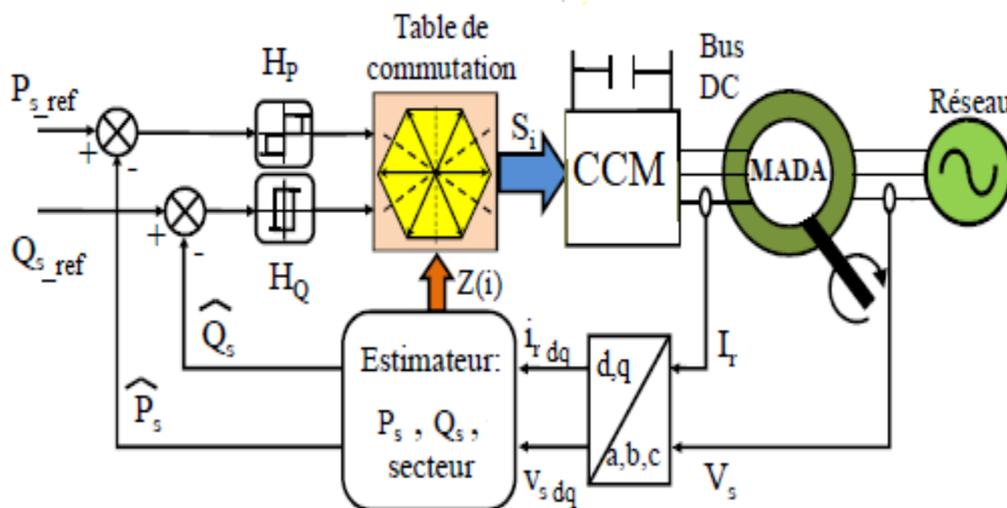


Fig.3.1 - Configuration de la DPC-C de la MADA

3 - Application de la DPC à la MADA

Afin d'aboutir à une table de commutation assurant un contrôle simultané des puissances active et réactive, durant tous les secteurs, il est indispensable d'étudier les variations provoquées par l'application de chacun des vecteurs de commande sur ces dernières, cela au cours d'une période complète de la tension rotorique. Les vecteurs de commande sélectionnés dans cette table de commutation doivent assurer la restriction de l'erreur de suivi de référence des deux puissances active et réactive, simultanément [Dje 15].

3.1 - Estimation de la puissance active et réactive

Il y a trois méthodes pour estimer puissance active et réactive :

- a) Par la mesure des courants et des tensions ;
- b) Par estimation des tensions du réseau et mesure des courants ;
- c) Par estimation du flux virtuel et mesure des courants.

Au lieu de mesurer les puissances de ligne, en capturant les courants rotoriques et en estimons P_s et Q_s . Cette approche donne un contrôle anticipé des puissances dans les enroulements statoriques. Nous pouvons retrouver les relations de P_s et Q_s en fonction des deux composantes du flux rotorique dans le référentiel (d_r - q_r). Ce référentiel tourne solidairement avec le rotor de la MADA [Tre 09]. Les puissances active et réactive sont contrôlées par deux comparateurs à hystérésis, les valeurs mesurées des puissances étant estimées à partir des relations suivantes:

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3}{2} \frac{M}{\sigma L_s L_r} V_s \phi_{rq} \\ Q_s = -\frac{3}{2} \left(\frac{V_s}{\sigma L_s} \phi_s - \frac{V_s M}{\sigma L_s L_r} \phi_{rd} \right) \end{cases} \quad 3.1$$

D'où :

$$\begin{cases} \phi_{rd} = \sigma L_r i_{rd} + \frac{M}{L_s} \phi_s \\ \phi_{rq} = \sigma L_r i_{rq} \\ |\phi_s| = \frac{|V_s|}{\omega_s} \\ \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \end{cases} \quad 3.2$$

Si, en introduisant l'angle δ qui se trouve entre le vecteur flux statorique et rotorique, P_s et Q_s deviennent :

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3}{2} \frac{M}{\sigma L_s L_r} \omega_s |\phi_s| |\phi_r| \sin \delta \\ Q_s = \frac{3}{2} \frac{\omega_s}{\sigma L_s} |\phi_s| \left(\frac{M}{L_r} |\phi_r| \cos \delta - |\phi_s| \right) \end{cases} \quad 3.3$$

La dérivée des deux équations donne :

$$\begin{cases} \frac{dP_s}{dt} = -\frac{3}{2} \frac{M \omega_s}{2 \sigma L_s L_r} |\phi_s| d \left(\frac{|\phi_r| \sin \delta}{dt} \right) \\ \frac{dQ_s}{dt} = \frac{3}{2} \frac{M \omega_s}{2 \sigma L_s L_r} |\phi_s| d \left(\frac{|\phi_r| \cos \delta}{dt} \right) \end{cases} \quad 3.4$$

Comme on le voit dans (3.4), ces deux dernières expressions montrent que les puissances active et réactive statoriques peuvent être contrôlées par la modification de l'angle relatif δ entre les vecteurs flux statorique et rotorique et de leur amplitudes (figure 3.2).

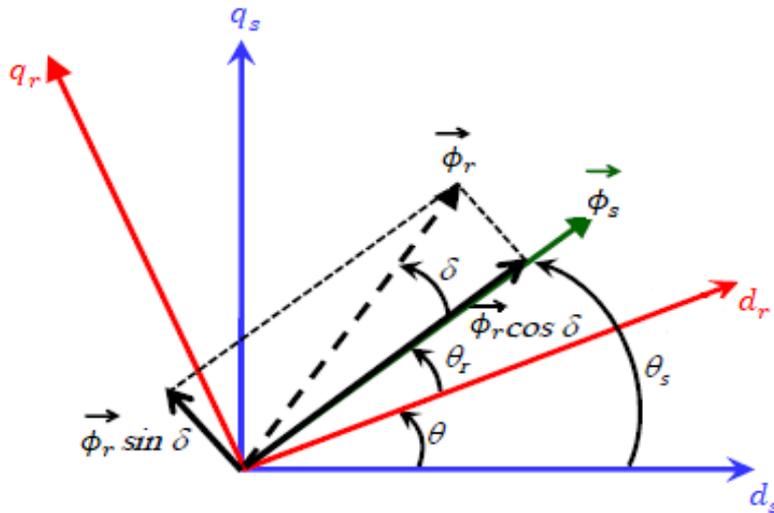


Fig.3.2 – La décomposition du vecteur flux rotorique dans le plan (d-q).

3.2. Choix des comparateurs à hystérésis

De manière à obtenir de très bonnes performances dynamiques, le choix d'un correcteur à hystérésis à trois niveaux semble être la solution la plus simple et la mieux adaptée à la commande de la puissance active et réactive. Ces comparateurs (figure 3.3) doivent permettre de contrôler l'échange de la puissance active et réactive entre la MADA et le réseau électrique avec les trois modes de fonctionnement hyposynchrone, hypersynchrone et synchrone de la MADA. Similairement à la DTC, la DPC pour la MADA est basée sur la sélection d'un vecteur de tension rotorique de telle manière que les erreurs entre les grandeurs mesurées et de référence soient réduites et maintenues entre les limites des bandes à hystérésis [Dje 15].

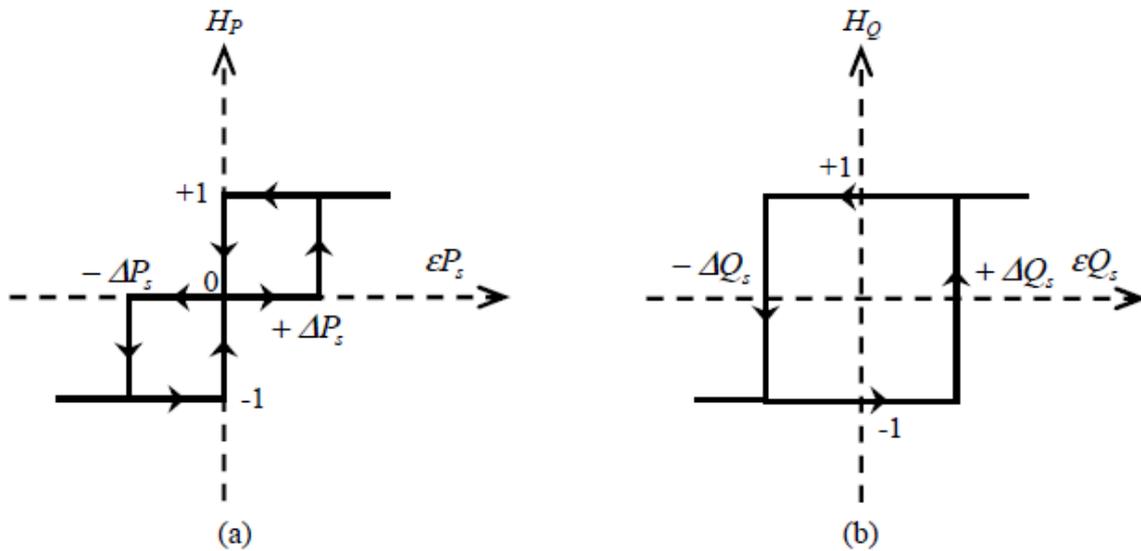


Fig.3.3 - Comparateurs à hystérésis : (a) puissance active, (b) puissance réactive

Ces comparateurs à hystérésis, appliqués sur la puissance active et réactive, permettent de détecter les dépassements de la zone de contrôle et de respecter :

$$\text{Si } \varepsilon Q_s \geq \Delta Q_s \rightarrow H_Q = +1$$

$$\text{Si } \varepsilon Q_s \leq -\Delta Q_s \rightarrow H_Q = -1$$

$$\text{Si } \varepsilon P_s \geq \Delta P_s \rightarrow H_P = +1$$

$$\text{Si } -\Delta P_s \leq \varepsilon P_s \leq \Delta P_s \rightarrow H_P = 0$$

$$\text{Si } \varepsilon P_s \leq -\Delta P_s \rightarrow H_P = -1$$

3.5

Les comparateurs analogiques ont un désavantage notable : la fréquence d'échantillonnage est variable. Mais, ce problème peut être éliminé, si on utilise des comparateurs discrets.

3.3 - Elaboration de la table de commutation

Il est mentionné précédemment que le traitement de la puissance active et réactive est identique en tous points à celui du couple et de flux dans la commande DTC. Donc, un apport en flux rotorique contribue au redressement du facteur de puissance au stator, c'est-à-dire à une diminution de la puissance réactive consommée (positive) par la machine. Cette relation est toujours vraie, quelque soit le mode d'opération de la machine. Pour sélectionner le vecteur de tension rotorique optimum, il faut connaître la position relative du flux rotorique dans les six sextants (figure 3.3). Un onduleur triphasé à deux niveaux de tension peut produire huit combinaisons différentes, ces huit combinaisons engendrent huit vecteurs de tension qui peuvent être appliqués aux bornes rotoriques de la MADA. Il y a six vecteurs actifs et deux vecteurs nuls. Les positions spatiales dans le plan (d-q) des vecteurs actifs de tensions sont montrées dans la figure 3.4.

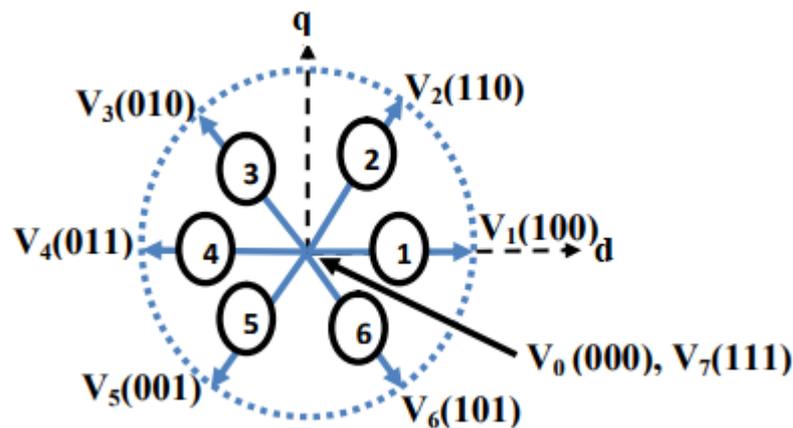


Fig.3.4 : Présentation des vecteurs de commutation.

Le partage du plan complexe en six zones angulaires Z_i ($i=1,\dots,6$) peut être déterminé par la relation suivante :

$$-\frac{\pi}{6} + (i-1)\frac{\pi}{3} \leq Z(i) < \frac{\pi}{6} + (i-1)\frac{\pi}{3}$$

Il en découle que le tableau 3.1 des vecteurs optimaux est dérivé de la même manière en donnant priorité au contrôle de la puissance active sur la puissance réactive. Les signaux de H_P et H_Q ainsi la position de vecteur flux rotorique δ , représentent les entrées de cette table de vérité, alors que les états de commutation S_a, S_b, S_c , représentent sa sortie.

| | | H_Q | 1 | | | -1 | | |
|--|---|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | H_P | 1 | 0 | -1 | 1 | 0 | -1 |
| Secteur vis-à-vis de l'angle δ | 1 | (330°,30°) | V_5 | V_7 | V_3 | V_6 | V_0 | V_2 |
| | 2 | (30°,90°) | V_6 | V_0 | V_4 | V_1 | V_7 | V_3 |
| | 3 | (90°,150°) | V_1 | V_7 | V_5 | V_2 | V_0 | V_4 |
| | 4 | (150°,210°) | V_2 | V_0 | V_6 | V_3 | V_7 | V_5 |
| | 5 | (210°,270°) | V_3 | V_7 | V_1 | V_4 | V_0 | V_6 |
| | 6 | (270°,330°) | V_4 | V_0 | V_2 | V_5 | V_7 | V_1 |
| | | $V_0=[0,0,0]$; $V_1=[1,0,0]$; $V_2=[1,1,0]$; $V_3=[0,1,0]$; $V_4=[0,1,1]$; $V_5=[0,0,1]$; $V_6=[1,0,1]$; $V_7=[1,1,1]$ | | | | | | |

Tab.3.1 – Table de sélection des vecteurs optimaux (puissance active et réactive [DAT01]).

En fait, cette table de commutation (Tab. 3.1) n'est pas la seule table utilisée pour la DPC. Néanmoins, la réalité fondamentale sur laquelle s'appuie la commande DPC est que le déplacement du flux rotorique dans la machine suit une progression continue dans le temps et qu'il semblera traverser chaque secteur un à un s'il est échantillonné suffisamment. L'étude du tableau 3.1 nous indique que si le flux rotorique était par exemple dans le secteur 2 et que le vecteur V_3 venait tout juste d'être appliqué, la variation de la puissance réactive mesurée au stator doit inévitablement être négative puisque le vecteur V_4 diminue la puissance réactive au stator. S'il n'en avait pas été ainsi, nous serions contraints d'admettre que notre estimation du secteur n'est plus juste et que le flux serait plutôt dans le secteur 1 ou 5. Compte tenu qu'il était précédemment dans le secteur 2, il serait peu probable qu'il soit maintenant dans le secteur 5, puisqu'il aurait « sauté » par-dessus deux autres secteurs [Ouch 17].

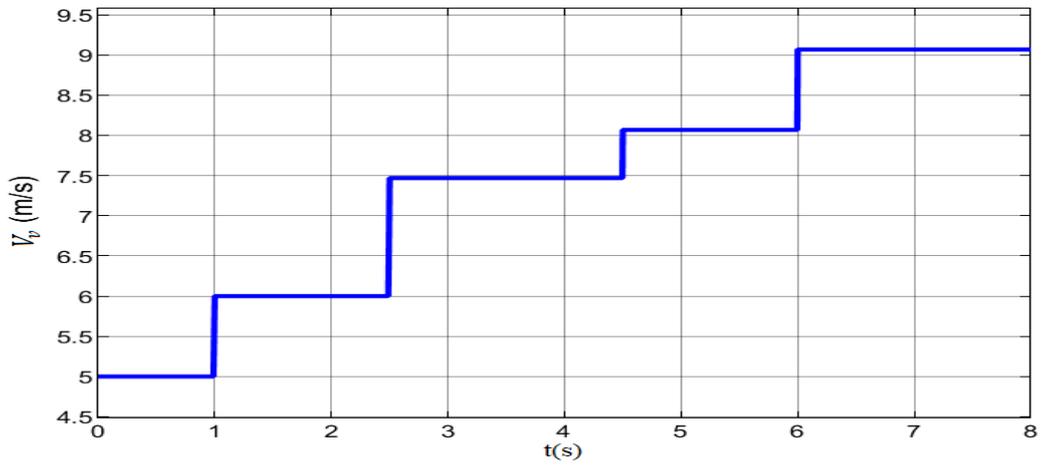
4 - Résultats de simulation

Dans cette section la commande DPC sera appliquée au système proposé. L'étude sera présentée sous l'environnement MATLAB/Simulink.

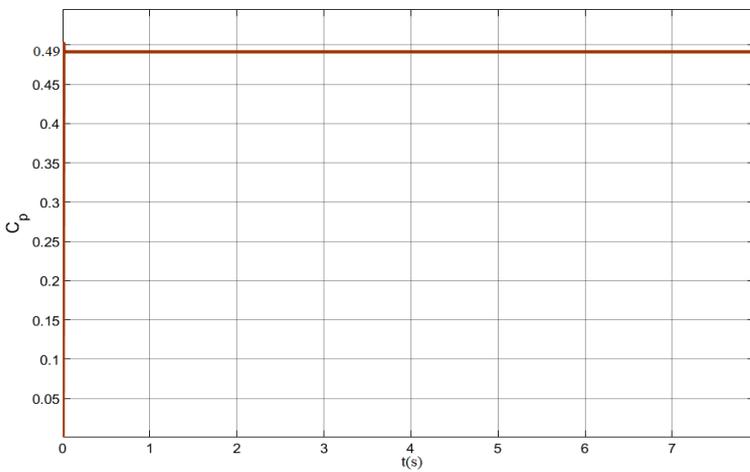
A - Performances de poursuite dans des conditions de fonctionnement normales du système

Pour faire fonctionner la machine dans les trois modes de fonctionnement (hypo, hyper et synchronisme), nous avons choisi un profil du vent variable de cinq paliers, **Fig. 3.5-(a)**.

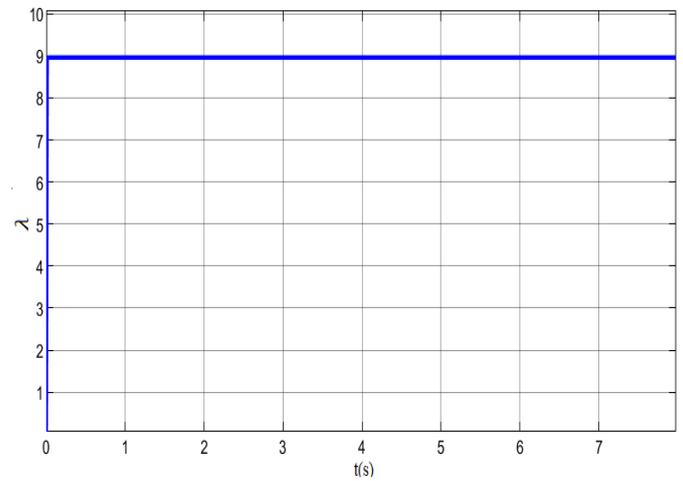
L'algorithme MPPT appliqué permet de fixer le rapport de vitesse (λ) à sa valeur optimale ($\lambda_{opt}=9$) avec un coefficient de puissance maximal ($C_{p-max} = 0.49$) comme l'indique la **Fig.3.5**, et ce quel que soit la vitesse du vent.



(a) : Profil de la vitesse du vent



(b) : Coefficient de puissance



(c) : Vitesse réduite

Fig.3.5 – Allure de caractéristiques de la turbine sous des conditions normales de fonctionnement.

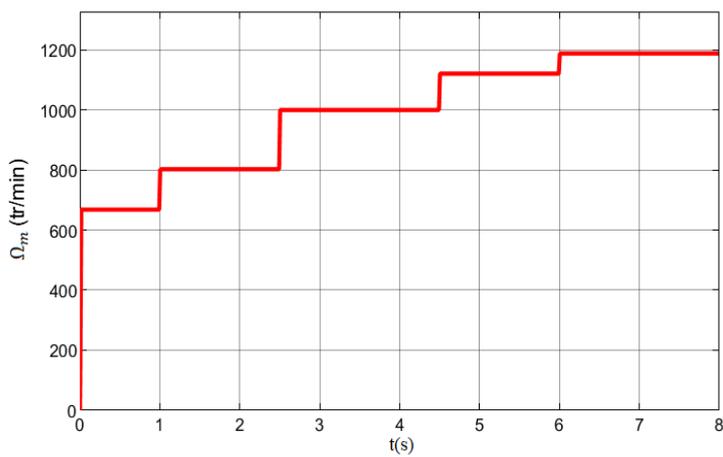


Fig.3.6 – Vitesse mécanique de la MADA.

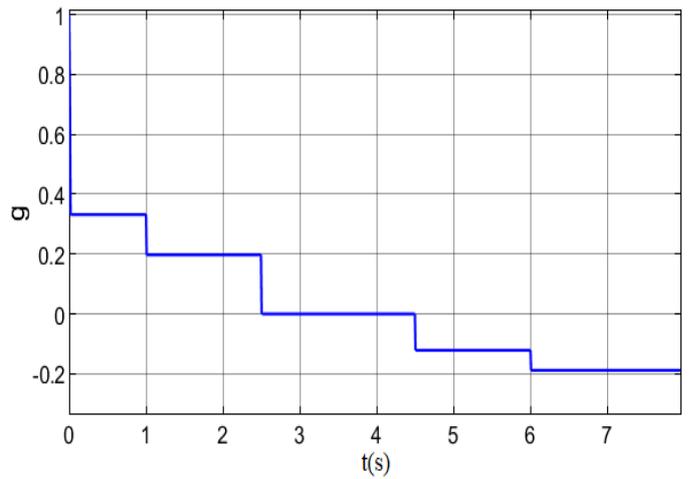


Fig.3.7- Allure du glissement.

L'entraînement de la MADA, est assuré par une vitesse, décrivant ses trois modes de fonctionnement en cinq paliers, **Fig.3.6**. Partant du mode hyposynchrone de [0 s, 2.5 s[, alors que le deuxième palier, [2.5 s, 4.5 s[, représente le mode synchrone. Le dernier intervalle [4.5 s, 8 s] décrit le mode hypersynchrone. Ces trois modes sont clairement illustrés par la courbe du glissement (**Fig.3.7**).

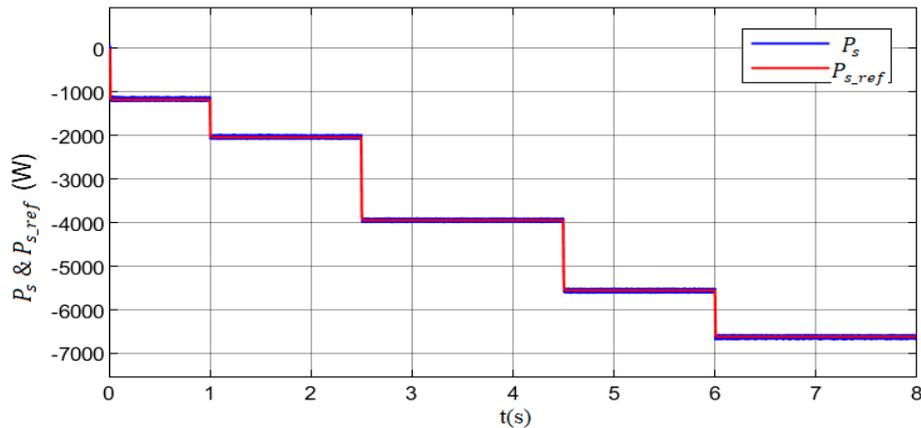


Fig.3.8 : Allure de la puissance active statorique avec sa référence.

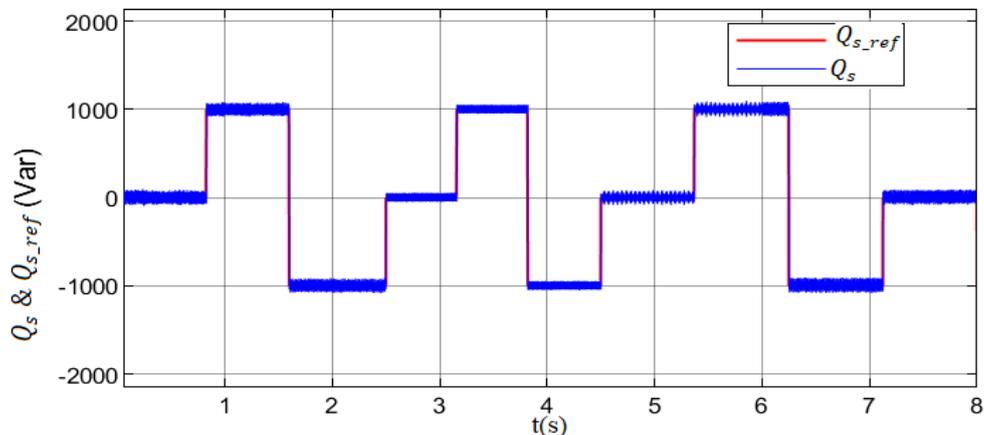
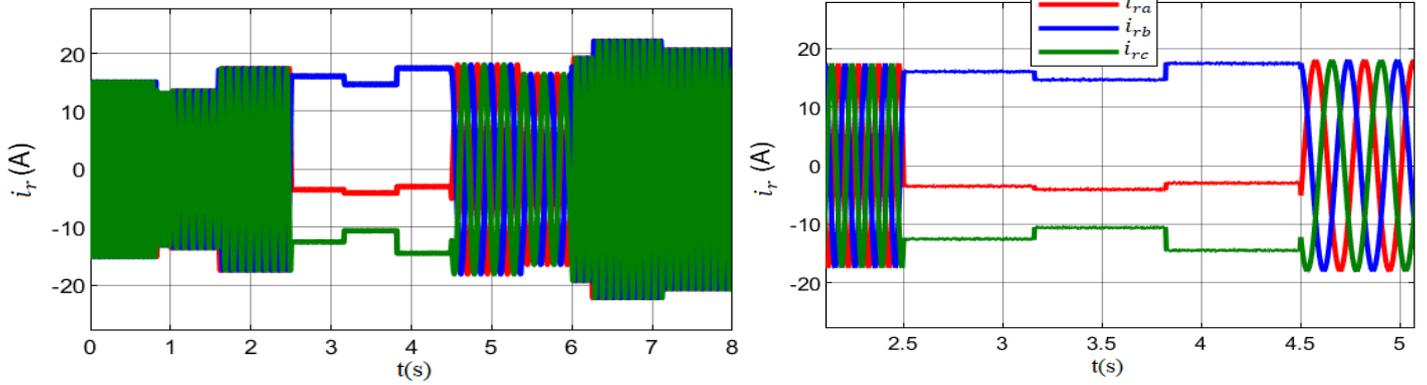


Fig.3.9 : Allure de la puissance réactive statorique avec sa référence.

Les figures **3.8** et **3.9**, montrent que la poursuite des références des deux puissances active et réactive est très bien assurée. Le fonctionnement en générateurs est illustré sur la **Fig. 3.8**, par le signe négatif de la puissance active transitée au réseau, qui évolue suivant la vitesse mécanique, qui est l'image exacte de la puissance mécanique ; alors que, la **Fig. 3.9** représente la deuxième tâche de cette machine, qui est la compensation locale de la puissance réactive, au point de connexion de la MADA au réseau. L'excès de la puissance réactive en ce point incite la MADA à la consommer, ce

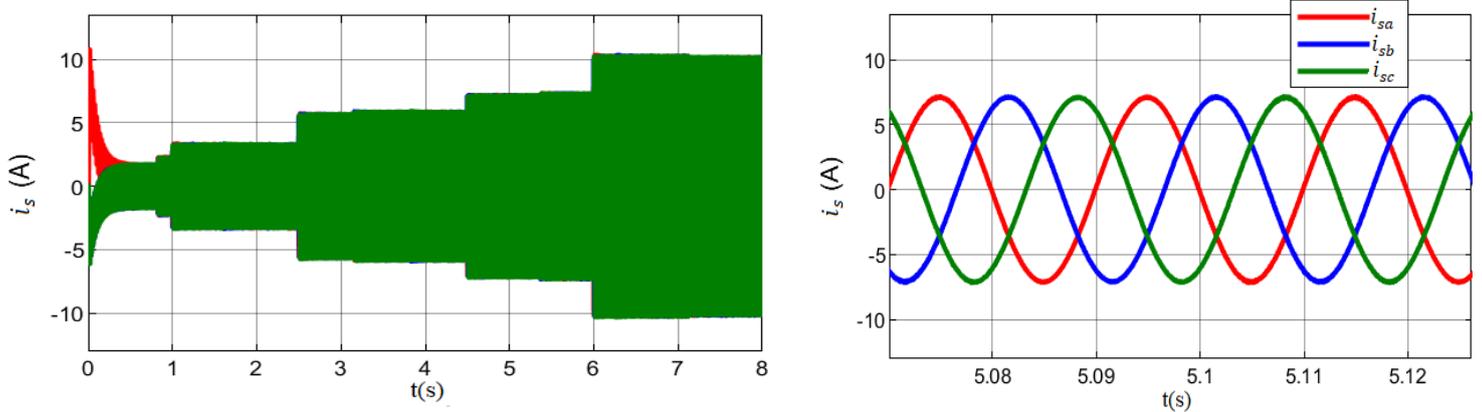
qui est illustré par le signe positif de Q_s . Tandis que, le manque de cette puissance engendre sa production par la machine, $Q_s < 0$, (Fig. 3.9).



(a): Allure des courants des trois phases rotoriques.

(b) : Zoom des courants rotorique dans les trois zones de fonctionnements.

Fig.3.10- Allure des courants rotorique.



(a): Allure des courants des trois phases statorique.

(b) : Zoom sur les courants statorique.

Fig.3.11- Allure des courants statorique.

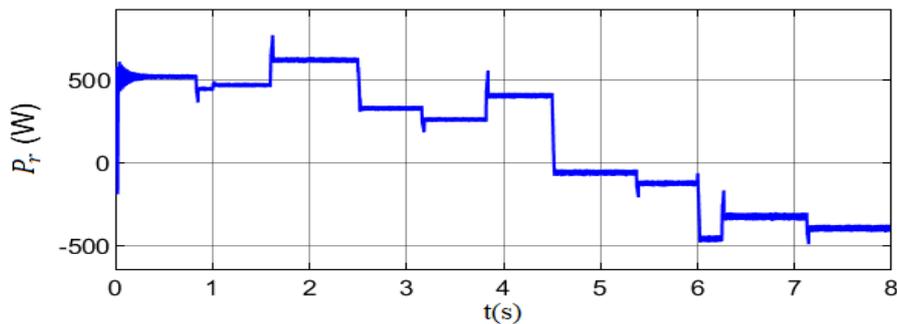
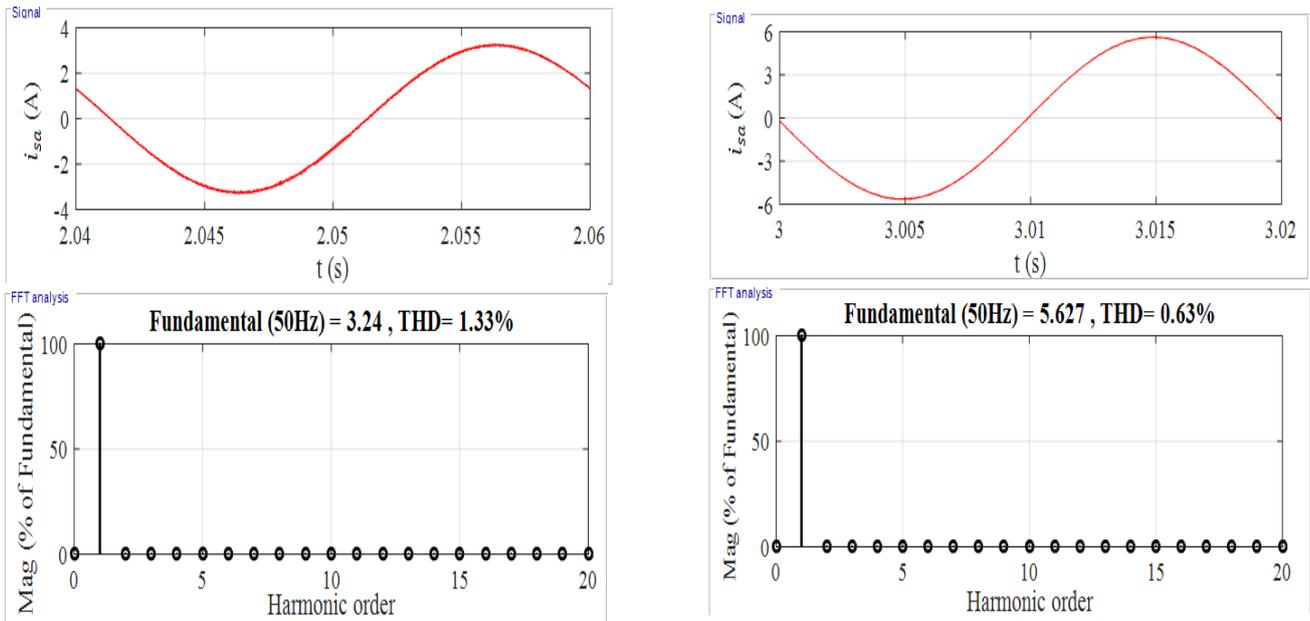


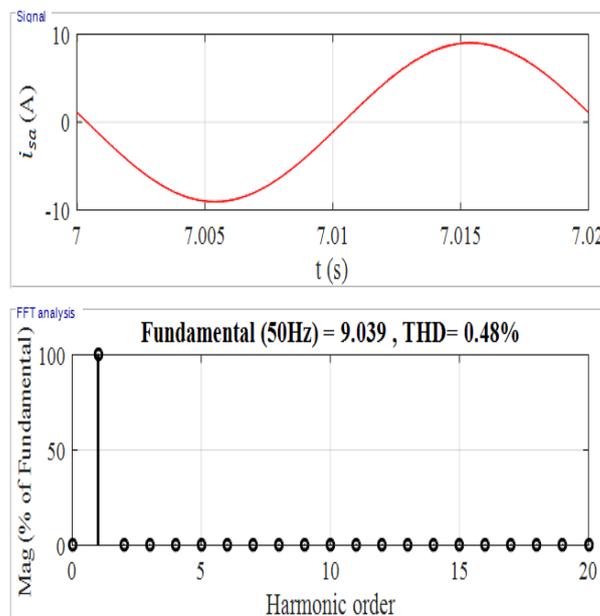
Fig.3.12- Allure de la puissance rotorique.

Les figures (3.11 (a) et (b)) montrent que les courants statoriques évoluent en fonction de la puissance active, la nature des courants est sinusoïdale sans perturbation, avec une fréquence de 50Hz. La figure 3.12 représente l'allure de la puissance rotorique, quand la MADA passe en fonctionnement hypersynchrone le rotor permet de délivrer de l'énergie au réseau, ce qui est l'un des avantages de la MADA.



(a) : Fonctionnement hyposynchrone.

(b) : Fonctionnement synchrone.



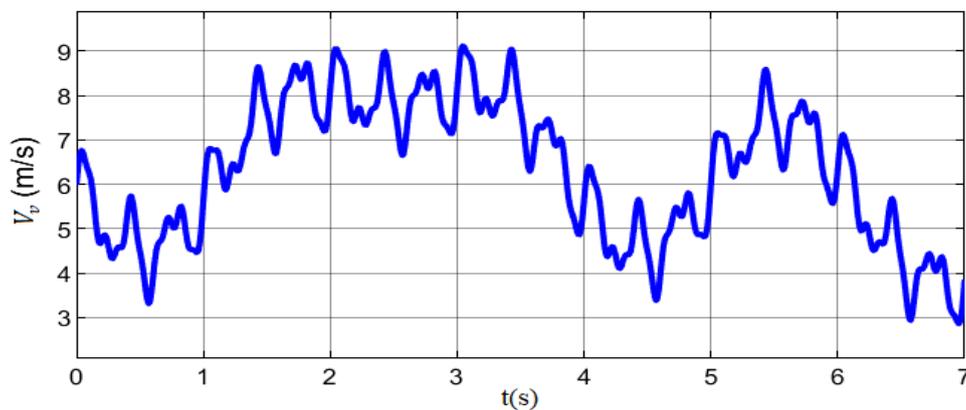
(c) : Fonctionnement hypersynchrone.

Fig.3.13 - Analyse FFT de spectre de courant statorique phase (a).

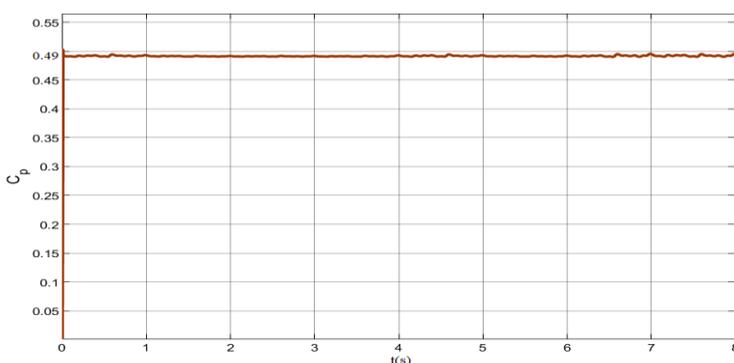
Afin de mieux illustrer l'utilité de la commande DPC sur la qualité du signal fourni par la MADA, une analyse spectrale des courants statorique a été réalisée. Notons que cette mesure a été effectuée dans le cas du fonctionnement de l'éolienne à vitesse du vent variable en palliés et $Q_{ref} = [0, 1000, -1000]$. Pour le cycle de fonctionnement en hyposynchrone commençant par 2.04s, la figure 3.13-a montre le courant de la phase « a » statorique envoyé par la MADA au réseau de distribution, on voit que le THD (Total Harmonique Distortion) de ce courant est de 1.33 %. La figure 3.13-b, représente le THD de la phase « a » statorique en fonctionnement synchrone qui est de 0.63%. La figure 3.13-c, dont le cycle de fonctionnement en hypersynchrone commence par 7s, le THD est de 0.48%. Ces résultats confirment l'utilité et l'intérêt de la commande DPC sur la qualité de l'énergie fournit au réseau électrique.

B - Performances de poursuite sous l'effet de variation aléatoire du vent et de la puissance réactive à compenser

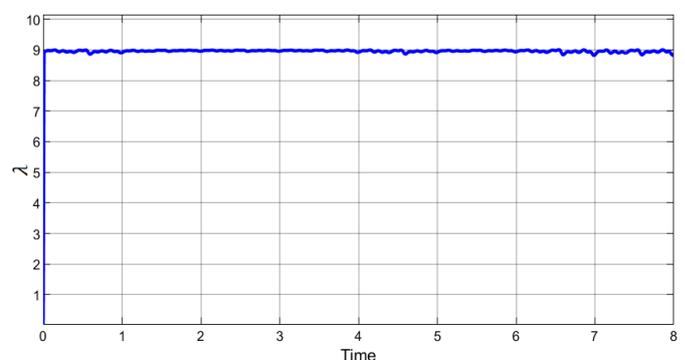
Dans ce deuxième essai, pour se rapprocher du fonctionnement réel d'un aérogénérateur, un profil de vitesse du vent variable est appliqué sur les pales de la turbine éolienne. On met en évidence les trois fonctionnements hyposynchrone, hypersynchrone et synchrone. Tout en considérant un profil de puissance réactive locale à compenser aléatoire.



(a) : Vitesse du vent.



(b) : Coefficient de puissance



(c) : Vitesse réduite

Fig.3.14 – Allures de caractéristiques de la turbine sous la variation du vent aléatoire.

L'algorithme MPPT appliqué permet d'avoir le rapport de vitesse égale à sa valeur optimale ($\lambda_{opt}=9$) avec un coefficient de puissance maximal ($C_{p-max} = 0.49$), comme l'indique la **Fig.3.14**. Ces dernières grandeurs sont quasi-constantes malgré les fluctuations engendrées par les variations de la vitesse du vent. Ces variations sont illustrées par les **Fig.15** et **16**, qui regroupent la vitesse de la MADA ainsi que son glissement.

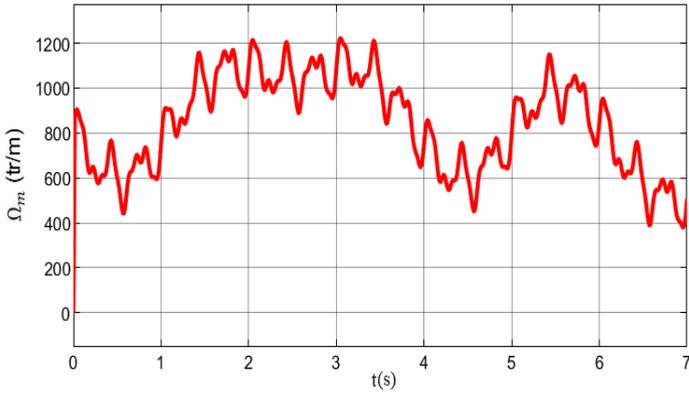


Fig.15 – Vitesse mécanique.

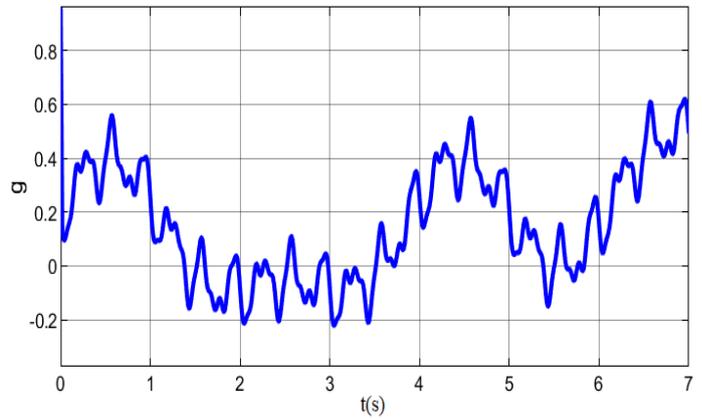


Fig.16 – Allure du glissement.

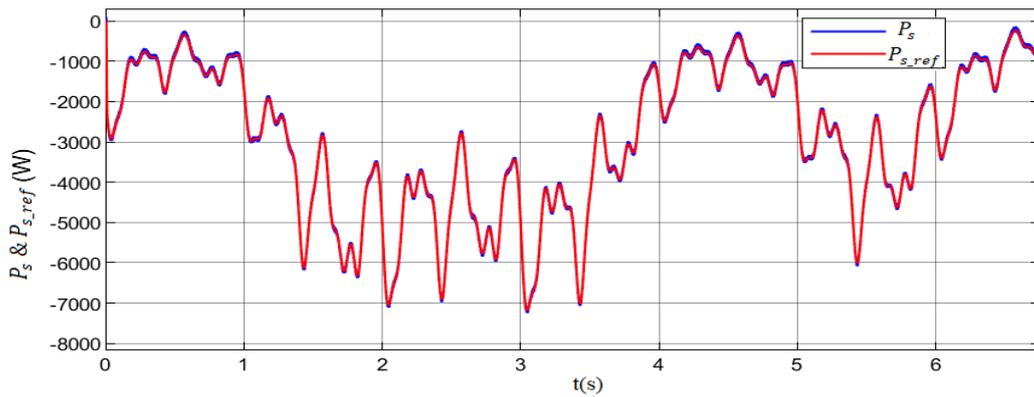


Fig.3.17 - Allure de la puissance active statorique avec sa référence

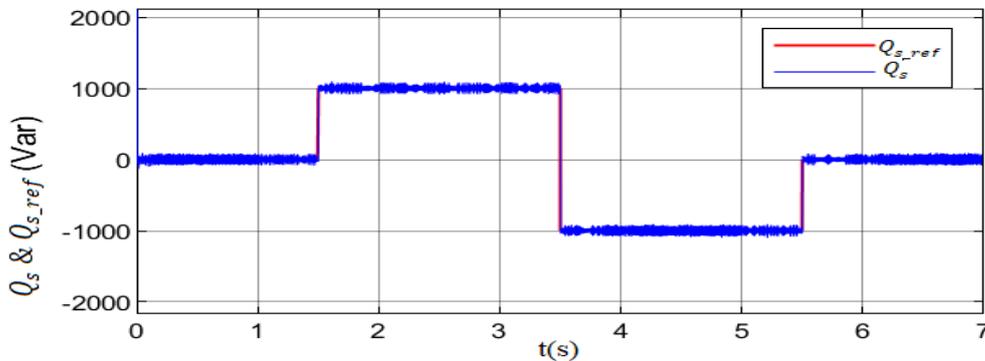
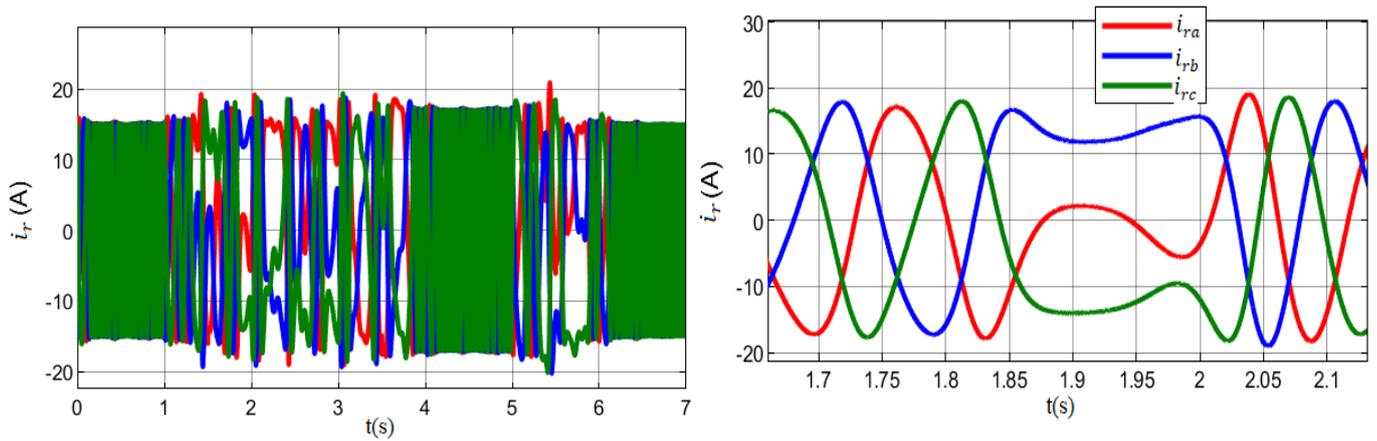
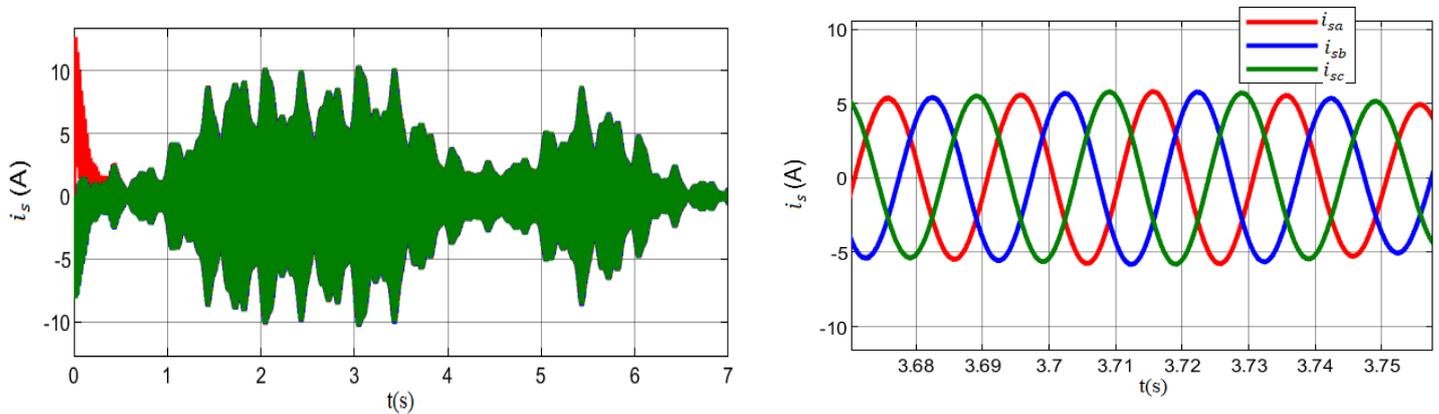


Fig.3.18 - Allure de la puissance réactive statorique avec sa référence.



(a): Courants des trois phases rotoriques.

(b) : Zoom sur les trois régimes de fonctionnement de la MADA.

Fig.3.19- Allure des courants rotorique.

(a): Courants des trois phases statorique.

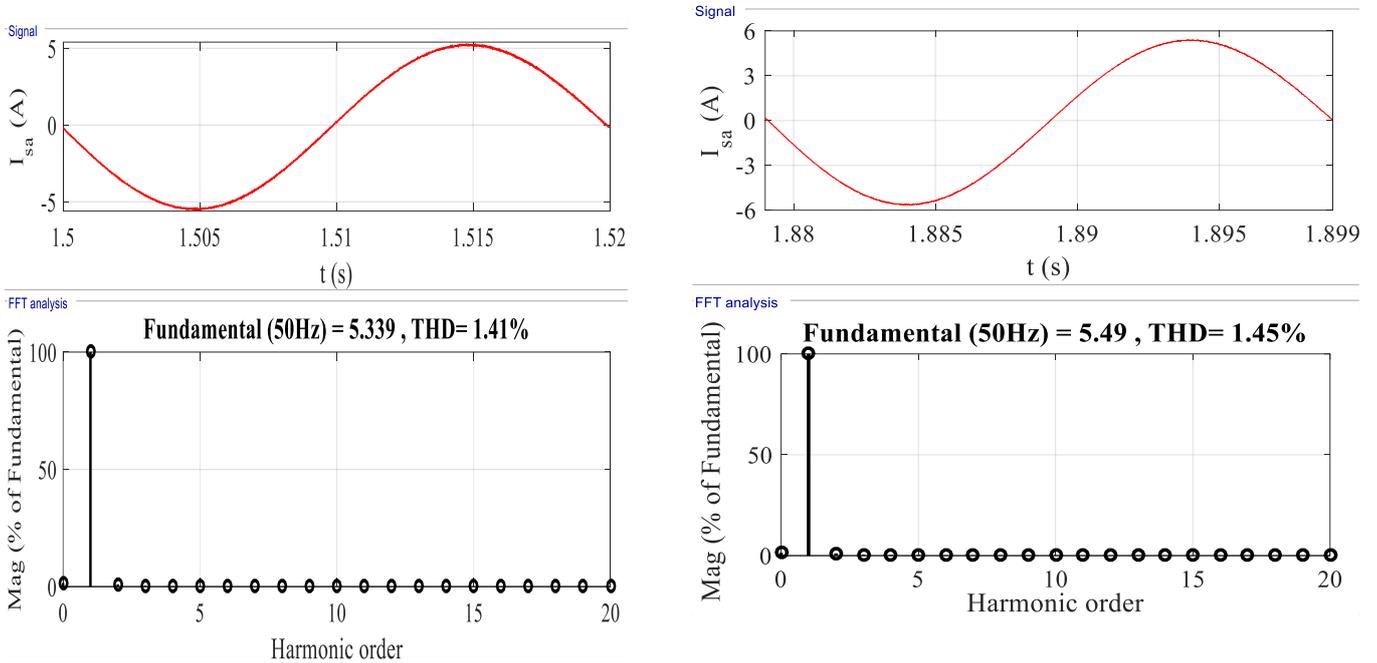
(b) : Zoom sur les courants statorique.

Fig.3.20- Allure des courants statorique.

Dans les résultats de ce deuxième test dont la vitesse du vent est variable (figure 3.14-a), La consigne de la puissance réactive qui est de $Q_{ref} = [0, 1000, -1000, 0]$, est parfaitement suivie, ce qui confirme la bonne compensation locale de l'énergie réactive dans notre système (figure 3.18).

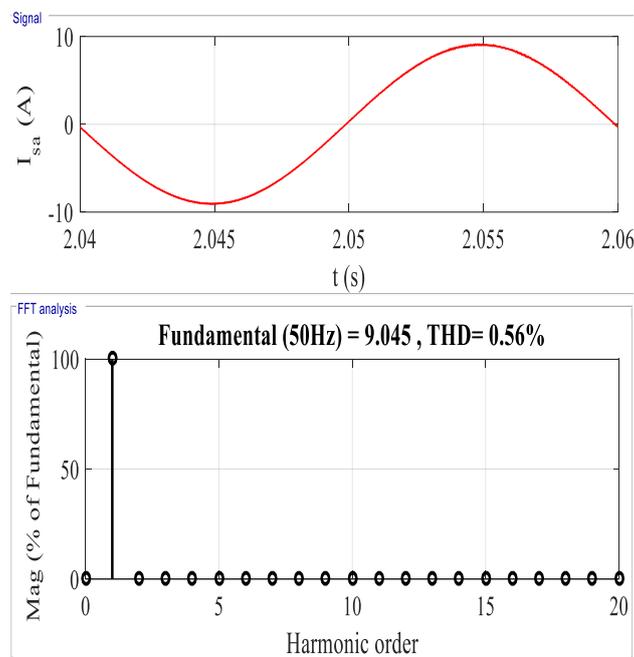
Les caractéristiques de la puissance active rotorique et statorique, (figure 3.17_3.18), ainsi que des courants rotorique (Fig.3.19-a-b) témoignent sur les trois régimes de fonctionnement de la MADA ainsi que de son mode en tant que générateur. Le passage du hypo-synchronisme en hyper-synchronisme est très clair autour de l'instant 1.85s. Cependant, pour un glissement nul ($g = 0$), on a un courant continu (DC).

La figure 3.21, expose les résultats obtenus de l'analyse spectrale du courant statorique pour la phase « a » du stator.



(a) : En régime hyposynchrone

(b) : En régime synchrone



(c) : En régime hypersynchrone

Fig.3.21- Analyse FFT de spectre de courant statorique phase « a ».

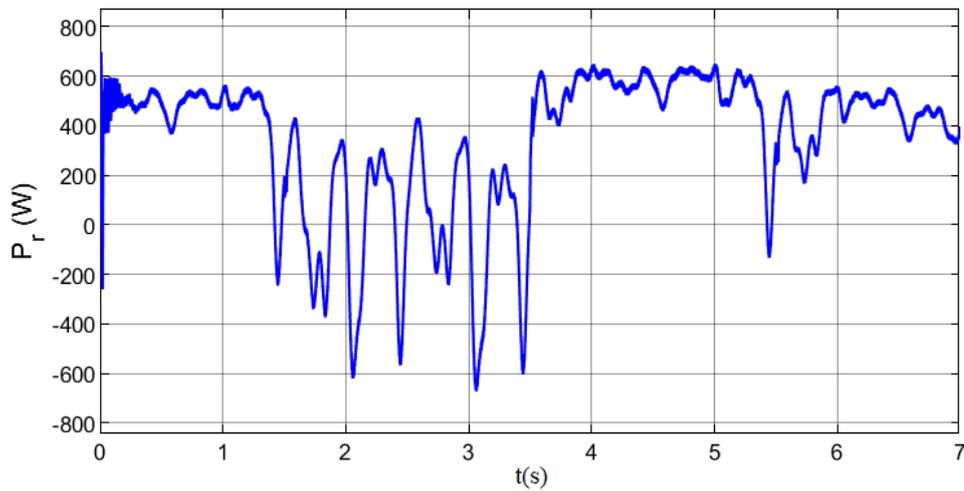


Fig.3.22- Allure de la puissance rotorique.

Pour un cycle de fonctionnement en régime Hyposynchrone le THD du courant statorique est de 1.41%. En régime synchrone le THD indique 1.45%. Et pour un régime Hypersynchrone il est de 0.56%, pour les trois régimes le THD est inférieur à 5%, (Figures 3.21-a-b-c). Ces résultats ont confirmés l'utilité de la commande DPC sur la qualité de l'énergie fournit au réseau électrique.

5 - Conclusion

Nous avons montré dans ce chapitre l'apport de la loi de commande DPC pour le découplage entre la puissance active et réactive de la MADA dédiée aux turbines éoliennes. Dans les deux essais on a vu que la puissance active de la MADA varie selon la puissance mécanique fournie par la turbine éolienne. La puissance réactive suit parfaitement la consigne de référence, on constate l'utilité de la commande DPC appliqué au système MADA-Eolienne dans la compensation local de l'énergie réactive. Les résultats de THD des courants statorique ont confirmés l'apport de la commande DPC sur la qualité d'énergie fournit par le système proposé au réseau électrique. La commande DPC permet d'obtenir de hautes performances dynamiques avec une structure simple.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire avait comme objectif principal la modélisation et la commande en puissance (DPC) d'un système éolien à base de la machine asynchrone à double alimentation pilotée par son convertisseur côté rotor CCM, en utilisant l'algorithme MPPT afin de maximiser la puissance extraite du vent.

Nous avons tout d'abord décrit les différents composants constituant l'aérogénérateur ainsi que les différents types d'éoliennes existantes. La suite était consacrée à la MADA (Machine Asynchrone à Double Alimentation).

Par la suite nous avons abordé la modélisation complète et globale du système de conversion d'énergie éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation.

Au troisième chapitre, nous avons élaboré la stratégie de contrôle direct des puissances DPC (direct power control). Cette stratégie propose de contrôler directement la puissance active et réactive de la MADA à l'aide d'une table de commutation, la sélection des vecteurs de tension optimaux pour l'onduleur assure le contrôle direct des puissances actives et réactives. Les résultats de simulation ont montré un fonctionnement très stable du système, en régime permanent et transitoire, avec une très bonne poursuite des références imposées par la commande appliquée à la turbine. Elle est aussi caractérisée par une excellente réponse dynamique. De plus, nous pouvons affirmer, à partir de ces résultats que la MADA assure la compensation locale de l'énergie réactive.

En perspectives nous pouvons envisager à utiliser :

- Les techniques de modulation plus adéquate (DPC-SVM), permettant d'éliminer le problème de fréquences de commutation variable.
- Les techniques d'intelligence artificielle (IA) pour l'amélioration des performances des stratégies de contrôle classiques DPC, tels que : la logique floue, les réseaux neuronaux et neuro-floue.

Annexe

Paramètres de la MADA et de la Turbine Eolienne :

➤ *La MADA*

- Tension d'alimentation : $V_s = 440 \text{ V}$
- Puissance nominale : $P_n = 7.5 \text{ KW}$
- Résistance d'enroulement statorique : $R_s = 1.02 \Omega$
- Résistance d'enroulement rotorique : $R_r = 0.8 \Omega$
- Inductance cyclique statorique : $L_s = 0.0930 \text{ H}$
- Inductance cyclique rotorique: $L_r = 0.0810 \text{ H}$
- Inductance magnétisante: $M = 0.0664 \text{ H}$
- Nombre de paires de pôles : $p = 3$

➤ *La turbine éolienne*

- Rayon des pales : $R = 3.24 \text{ m}$
- Gain de multiplicateur de vitesse : $G = 5.065$
- Coefficient de frottement visqueux : $f_v = 0.006 \text{ (N.ms)/rd}$
- Masse volumique de l'air : $\rho = 1.225 \text{ Kg/m}^3$

*Références
bibliographiques*

Références bibliographiques

- [Aza 08] R. Azaizia « étude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation alimentée par un convertisseur multi niveaux » mémoire de magister en génie électrique, université de boumerdes, 2008.
- [Bar 07] J. A. Baroudi, V. Dinavahi, A. M. Knight, "A review of power converter Topologies for Wind generators", *Renewable Energy*, Vol. 32, No. 14, pp. 2369-2385, Novembre 2007.
- [Bag 99] L. Baghli « Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques » Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 1999.
- [Ccw00] C.Canudas de Wit « Modélisation contrôle vectoriel et DTC » tome 1, Editions Sciences Hermès, France, 2000.
- [Che 10] N. Cherfia « Conversion d'énergie produit par des générateurs éoliens », Mémoire de magister en électrotechnique, université de Constantine, Algérie, 2010.
- [Dje 15] Y, Djeriri « Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle », thèse de doctorat, université djillalialia de sidi-bel-abbes, Algérie, 2015.
- [Ela 04] S.Elaimani « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension » ; thèse doctorat université des sciences et technologie de Lille, France, 2004.
- [GHE11] T.Ghennam, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation » ; Thèse de Doctorat de l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, Algérie, Septembre 2011.
- [Gai 10] A.Gaillard « Système éolien basé sur une MADA contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service » thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2010.
- [Ham 08] I.Hamzout « Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur » mémoire de Magister, ENP D'Alger, Algérie, 2008.
- [Hau 06] E.Hau, « Wind turbines, Fundamentals, Technologies, Applications, Economics » ; Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006.
- [Ham 13] N.Hamadi, « étude et commande d'une éolienne à base d'une machine asynchrone à aimant permanent », thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 2013.
- [Hei b98] S.Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", *Publications John Wiley & Sons*, USA, 1998.
- [Hau 95] J.Hautier, « Modélisation et commande de la machine asynchrone », collection ; 7 électrotechniques ; éditions technique, France, 1995.

- [Mal 01] Malinowski, « Sensorless control Strategies for Three- Phase PWM Rectifiers »; PhD Thesis, University of Technology, Warsaw, pologne,2001.
- [Mek 04] N.Mekkaoui « Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée » Thèses de Magister, université de batna, Algerie, 2004.
- [Vid 04] P. Vidal. « Commande non linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation ».Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse, France, 2004.
- [Teb 18] A.Tebaa, « Commande direct du couple d'un moteur asynchrone à double alimentation ».Mémoire master, université de bejaia, algerie, 2018.
- [Tam 17] S.Tamalouzt, « Contribution à l'Etude, Conception et la Commande des Convertisseurs Electromagnétiques Double Alimentés ». Thèsedoctorat, université de bejaia, Algérie, 2017.
- [Mir 05] A. Mirecki, “ Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance ”, Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2005.
- [Mul 02] S. Muller, M. Deicke, R. W. De Doncker, “Doubly fed induction generator Systems for wind turbines”, *IEEE Industry Applications Magazine*, pp. 26-33, May-June 2002.
- [Ghe 11] T.Ghennam « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation ». Thèse de doctorat, délivré conjointement par l'Ecole Centrale de Lille, France et l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, Algérie, 2011.
- [Dav 07] A.Davigny « Participation aux services système de fermes d'éolienne à vitessevariable intégrant du stockage inertiel d'énergie ». Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Franc, 2007.
- [Tou 10] B.Toual « Modélisation et commande floue optimisée d'une génératrice à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable ». Mémoire magister,Université de Batna, Algérie,2010.
- [Boy 06] A.Boyette « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne ». Thèse de doctorat, Université de Nancy, France, 2006.
- [Iva 04] M.Ivan, « Modélisation et réalisation d'une chaîne de conversion éolienne petite puissance », journées des doctorants, université de Montpellier, France, 2004.
- [Mul 04] B. Multon ; X. Roboam ; B Dakyo ; C. Nichita ; O Gergaud ; H. BenAhmed, “Aérogénérateurs électriques”, *Techniques de l'Ingénieur*, Traités de génie électrique, D3960, Novembre 2004.
- [Nog 98] T. Noguchi, H. Tomiki, S. Kondo, I. Takahashi, « Direct power control of PWM converter without power-source voltage sensors »; In: *IEEE Trans. Ind. Applications*, 34 (1998), pp.473-479, May/June 1998.
- [Ouch 17] S.Ouchen, « contribution à la commande directe de puissance dédiée au filtrage actif, associé à une source photovoltaïque », thèse de doctorat, université Mouhemed KHIDER Beskra, 2017.

- [Puj 00] A. A. Pujol, « Improvements in Direct Torque Control of Induction Motors », Thèse de doctorat de l'Université Polytechnique de Catalogne, Espagne, 2000.
- [Tar 08] S. Taraft, « Etude du stockage inertiel d'énergie dans une chaîne de conversion éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation », Mémoire de magister en électrotechnique de l'université de Bejaia, Algérie, 2008.
- [Tre 09] E. Tremblay, « Contribution à la commande de l'éolienne a MADA en permettant l'amélioration de la qualité de l'onde du réseau électrique »; thèse de doctorat, Montréal, Canada, Janvier 2009.
- [Usa 03] J. Usaola, P. Ledesma, J. M. Rodriguez, J. L. Fernandez, D. Beato, R. Iturbe, J. R. Wihelmi, "Transient stability studies in grids with great windpowerPenetration. Modeling issues and operation requirements", *Proceedings of theIEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Dallas (USA), September 7-12, 2003.