



République Algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université A.MIRA de Bejaïa

Faculté de la Technologie
Département de Génie Electrique

MÉMOIRE DE FIN DE CYCLE

En Vue de l'Obtention du Diplôme master 2 en
Electrotechnique
Option : Electromécanique et Commande Electrique

Thème

**Contribution A La Commande En Puissance D'une
Machine Asynchrone A Double Alimentation Dediée
A Une Eolienne, Alimentant Une Charge Autonome.**

Présenté par :

M^R : AKIF Karim
M^R : KENTOUCHE Salah

Encadré par :

M^R: S.TAMALOUZT

PROMOTION 2011/2012

Remerciements

Remerciements

Avant tout nous remercies Dieu Le tout puissant de m'avoir donné le courage, la volonté, la patience, et la santé durant toutes ces années et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Nous tiens à exprimer mes remerciements et ma gratitude à monsieur S. TAMALOUZT, pour avoir assumé la responsabilité de m'encadrer, m'orienter et de me conseiller tout au long de la réalisation de ce travail.

Nos remerciements vont également aux membres de jury qui ont accepté d'évaluer notre travail. Nous sommes particulièrement sensibles au grand honneur qu'ils nous ont accordé en acceptant cette tâche.

Nous remercies vivement tous les enseignants et tous ceux à qui nous devons notre formation.

Des remerciements vont également à tous ceux qui, d'une quelconque façon, ont contribué à l'élaboration de ce modeste travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents qui m'ont soutenu durant toute la durée de mes études.

A mes très chers frères et à ma grande famille.

A tous mes amis.

A tous ceux qui m'aiment et que j'aime.

A vous.

Karim.

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents qui m'ont soutenu durant toute la durée de mes études.

A mes très chères sœurs et à ma grande famille.

A tous mes amis.

A tous ceux qui m'aiment et que j'aime.

A vous.

Salah

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I: Généralités sur les systèmes de conversion éoliens	
I.1 Introduction.....	2
I.2 Historique de l'éolien.....	3
I.3 Définition et principe de fonctionnement de l'éolienne.....	4
I.4 Avantage et inconvénients.....	4
I.4.1 Avantages.....	4
I.4.2 Inconvénients.....	4
I.5 Classification des éoliennes.....	5
I.5.1 Les différents types d'éoliennes.....	5
I.5.1.1 Les éoliennes à axe vertical.....	5
I.5.1.2 Les éoliennes à axe horizontal.....	6
I.5.2 Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal.....	6
I.5.3 Nombre de pales.....	8
I.5.4 Le multiplicateur mécanique de vitesse.....	8
I.5.5 Mode de régulation.....	8
I.5.5.1 Régulation 'STALL'.....	9
I.5.5.2 Régulation 'PITCH'.....	9
I.5.6 Le mode de fonctionnement des éoliennes.....	9
I.5.6.1 Fonctionnement a vitesse fixe.....	9
I.5.6.2 Fonctionnement a vitesse variable.....	10
I.6 Zone de fonctionnement d'une éolienne.....	10
I.7 Etude comparative des machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne.....	11
I.7.1 Types des machines électriques.....	11
I.7.1.1 Générateur synchrone.....	11

I.7.1.2 Générateur asynchrone.....	13
I.7.1.2.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil.....	13
I.7.1.2.2 Machine asynchrone à double alimentation.....	15
I.8 Mode de fonctionnement de la MADA.....	18
I.8.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.....	18
I.8.2 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.....	18
I.8.3 Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone.....	18
I.8.4 Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone.....	18
I.8.5 Fonctionnement en mode synchrone.....	19
I.9 Intérêt de la MADA.....	20
I.10 Aérogénérateur étudier.....	20
I.11 Conclusion.....	22
 Chapitre II: Modélisation de la chaine de conversion	
II.1 Introduction.....	24
II.2 Modélisation de la partie mécanique	24
II.2.1 Modèle du vent.....	24
II.2.2 Modélisation de la turbine.....	24
II.2.2.1. Loi de Betz.....	24
II.2.3 Le multiplicateur.....	27
II.2.4 Equation dynamique de l'arbre.....	28
II.3 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA).....	30
II.3.1 Hypothèses simplificatrices.....	30
II.3.2 Modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation.....	30
II.3.3 Transformation de Park.....	33
II.3.4 Application de la transformation de Park à la MADA.....	34
II.3.5 Choix du référentiel.....	36
II.4 Modélisation du convertisseur de fréquence.....	37

II. 4.1 L'onduleur.....	37
II.4.2 Le redresseur.....	39
II.4.3 Modélisation du bus continu.....	39
II.5 Conclusion.....	40
Chapitre III: Commande vectorielle du système proposé	
III.1 Introduction.....	41
III.2 Stratégie de commande de la Machine Asynchrone à Double Alimentation...	41
III.3 Schéma de commande.....	41
III.4 Choix du référentiel pour le modèle de Park.....	42
III.5 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques.....	44
III.6 Relations entre tension rotoriques et courants rotoriques.....	45
III.7 convertisseur côté charge.....	47
III.7.1 commande du courant.....	48
Conclusion.....	50
Chapitre IV: Simulation et interprétation	
IV.1 introduction	
IV.2 Résultats de simulation	51
Conclusion.....	66
Conclusion générale.....	67

Nomenclature

Notations

Indices

P_t	Puissance de la turbine éolienne (W)
P_{me}	La puissance mécanique du rotor de la turbine (W)
ρ	Masse volumique de l'air (kg/m^3)
S	Surface circulaire balayée par la turbine (m^2)
R_t	Rayon de la turbine éolienne (m)
V_v	La vitesse du vent (m/s)
Ω_t	Vitesse de rotation de la turbine avant le multiplicateur (rad/s)
C_p	Le coefficient de puissance
C_c	Le coefficient du couple
λ	Le rapport de la vitesse en bout des pales
T_t	Le couple développé par la turbine sous l'action du vent (N.m)
β	L'angle de calage des pales (rad)
G	Le gain du multiplicateur
Ω_{me}	La vitesse mécanique de la génératrice (rad/s)
C_g	Le couple de la génératrice (N.m)
C_f	Le couple issu du frottement (N.m)
F	Le coefficient de frottement visqueux
C_{em}	Couple électromagnétique du générateur (N.m)
J	Inertie totale de l'arbre de transmission (kg. m^2)
J_t	L'inertie de la génératrice
J_g	L'inertie de la turbine
λ_{opt}	Le rapport optimal de la vitesse en bout des pales
C_{p-max}	Le coefficient de puissance maximale
Ω_{t-opt}	Vitesse de rotation optimale de la turbine avant le multiplicateur (rad/s)
$C_{em-réf}$	Couple électromagnétique référentiel du générateur (N.m)
a_s, b_s et c_s	Axes statorique

a_r, b_r et c_r	Axes rotorique
V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}	Tensions d'alimentation des enroulements statoriques (a, b, c) (V)
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	Courants statoriques (A)
R_s	Resistance d'une phase statorique (Ohm)
L_s	Inductance propre d'une phase statorique (H)
ω_s	Pulsation du champ statorique (rad/s)
$[V_{sabc}]$	Matrice des tensions statorique (V)
$[i_{sabc}]$	Matrice des courants statoriques
$[\Phi_{sabc}]$	Matrice des flux statoriques
$[R_s]$	Matrice des résistances statoriques
V_{sd}, V_{sq}	Tensions statoriques dans le repère de Park (d, q) (V)
I_{sd}, I_{sq}	Courants statoriques dans le repère de Park (d, q) (A)
Φ_{sd}, Φ_{sq}	Flux statoriques dans le repère de Park (d, q) (Wb).
θ_s	Angle relatif entre la première phase statorique de la machine et l'axe « d » du repère de Park (rad)
$[V_{sdqo}]$	Matrice des tensions statoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park
$[I_{sdqo}]$	Matrice des courants statoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park
$[\Phi_{sdqo}]$	Matrice des flux statoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park
V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}	Tensions d'alimentation des enroulements rotoriques (a, b, c) (V)
I_{ra}, I_{rb}, I_{rc}	Courants rotoriques (A)
R_r	Resistance d'une phase rotorique (Ohm).
L_r	Inductance propre d'une phase rotorique (H).
ω_r	Pulsation du champ rotorique (rad/s).
$[V_{rabc}]$	Matrice des tensions rotorique
$[I_{rabc}]$	Matrice des courants rotorique
$[\Phi_{rabc}]$	Matrice des flux rotoriques
$[R_r]$	Matrice des résistances rotoriques
V_{rd}, V_{rq}	Tensions rotoriques dans le repère de Park (d, q) (V)
I_{rd}, I_{rq}	Courants rotoriques dans le repère de Park (d, q) (A)
Φ_{rd}, Φ_{rq}	Flux rotoriques dans le repère de Park (d, q) (Wb)

θ_r	Angle relatif entre la première phase rotorique de la machine et l'axe « d » du repère de Park (rad/s)
[M]	Matrice inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique
M	Inductance mutuelle entre stator et rotor (H)
Ω	Vitesse électrique de la machine (rad/s)
P	Nombre de paires de pôles de la machine
θ	Angle électrique de position de la machine (rad)
Ω_m	Vitesse mécanique de la génératrice (rad/s)
ω_m	La pulsation mécanique (rad/s)
P_a	La puissance active (W)
Q_{rea}	La puissance réactive (VAR)
P_{em}	La puissance électromagnétique (W)
V_a, V_b, V_c	Tensions de référence (V)
I_a, I_b, I_c	Courants de référence (A)
I_{dc}	Courant modulé par le redresseur (A)
F_a, F_b, F_c	Fonctions logiques correspondantes à l'état de l'interrupteur de redresseur
V_{dc}	Tension du bus continu (V)
I_c	Courant capacitif (A)
C	Capacité du bus continu (F)
$V_{on1}, V_{on2}, V_{on3}$	Tensions à la sortie de l'onduleur (V)
I_{on}	Courant modulé par l'onduleur (A)
F_a', F_b', F_c'	Fonctions logiques correspondantes à l'état de l'interrupteur de l'onduleur
σ	Le coefficient de dispersion
T_r	Constante de temps rotorique (s)
S	Opérateur de Laplace
Mr	Indice de modulation de la MLI
R	Taux de modulation de la MLI

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I

Fig. I.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.....	3
Fig. I.2 Représentation d'Eoliennes à axe vertical.....	4
Fig. I.3 Eolienne à axe horizontal.....	6
Fig. I.4 Les composantes de l'aérogénérateur.....	7
Fig. I.5 Allure du $C_p = f(\lambda)$ pour différents angles de calage.....	9
Fig. I.6 Zone de fonctionnement d'une éolienne.....	11
Fig. I.7 Machine synchrone connectée directement au réseau.....	12
Fig. I.8 Machine synchrone connectée au réseau via un convertisseur de fréquence.....	13
Fig. I.9 Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau.....	13
Fig. I.10 Eolienne connectée au réseau via un convertisseur de fréquence.....	16
Fig. I.11 Cascade hypo synchrone.....	17
Fig.1.12 Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné pilotée par le rotor..	18
Fig.1.13 Schéma de la machine asynchrone à rotor bobiné avec des bagues collectrices.....	18
Fig. 1.14 Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation....	20
Fig. .I.15 Aérogénérateur autonome basé sur une GADA.....	22
Fig. I.16 Système hybride de génération d'énergie (générateur hydraulique-solaire).....	23

Chapitre II

Fig. II.1 Eolienne simplifiée.....	25
Fig. II.2 Coefficient de puissance C_p	26
Fig. II.3 Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné.....	27

Fig. II.4	Schéma explicatif du multiplicateur.....	28
Fig. II.5	Modèle mécanique simplifié du multiplicateur.....	29
Fig. II. 6	Schéma du modèle de la turbine.....	30
Fig. II.7	Représentation schématique de la MADA.....	31
Fig. II.8	Modèle de PARK de la MADA.....	33
Fig. II. 9	Redresseur et onduleur MLI.....	37
Fig. II. 10	Interrupteur équivalent.....	37
Fig. II.11	Onduleur MLI.....	38
Fig. II.12	Redresseur MLI.....	39
Fig.II .15	Courants circulant dans le bus continu.....	41
 Chapitre III		
Fig. III-1	Schéma de principe de la commande en puissance de la MADA.....	42
Fig. III-2	Schéma bloc du système à réguler.....	46
Fig.III.3	Schéma du Convertisseur GSC et du filtre.....	47
Fig.III.4	Schéma de principe du bus cc.....	48
Fig.III.5	Schéma de principe du contrôle du courant.....	49
 Chapitre IV		
Fig. IV.1	Le profil de vitesse d'entraînement.....	52
Fig. IV.2	Vitesse du vent.....	53
Fig. IV.3	L'allure du glissement.....	53
Fig. IV.4	L'allure de la puissance active statorique.....	53
Fig. IV.5	L'allure de la puissance réactive statorique.....	54
Fig. IV.6	L'allure de la puissance active rotorique.....	54
Fig. IV.7	L'allure de la puissance réactive rotorique.....	55

Fig. IV.8 L'allure du courant et de la tension statorique.....	55
Fig. IV.9 Zoom de l'allure du courant et de la tension d'une phase statorique.....	56
Fig.III.10 L'allure de la tension du bus continu	56
Fig. IV.11 L'allure de la puissance active de la charge.....	57
Fig. IV.12 L'allure de la puissance réactive de la charge.....	57
Fig. IV.13 L'allure de la tension et de courant d'une phase de la charge avec un zoom	58
Fig. IV.14 L'allure de la puissance active de la charge.....	59
Fig. IV.15 L'allure de la puissance active statorique.....	60
Fig. IV.16 L'allure de la puissance réactive statorique	60
Fig. IV.17 L'allure de la puissance active rotorique	61
Fig.III.18 Zoom de la tension et de courant d'une phase de la charge.....	61
Fig.IV.19 l'allure de la tension du bus continu.....	62
Fig.III.20 L'allure du courant rotorique.....	62
Fig. IV.21 L'allure de la tension du bus continu.....	63
Fig. IV.22 L'allure de la puissance active statorique.....	63
Fig. IV.23 L'allure de la puissance réactive statorique.....	63
Fig. IV.24 Zoom l'allure de courant et de tension d'une phase de la charge.....	64
Fig.III.25 L'allure de la puissance active rotorique.....	64
Fig. IV.26 L'allure de la puissance active statorique.....	65
Fig. IV.27 L'allure de la puissance réactive statorique.....	65
Fig. IV.28 L'allure de la tension du bus continu.....	66

Introduction générale

Introduction générale

La consommation d'énergie, toujours en augmentation, fait réduire les réserves en énergies fossiles et rapproche l'échéance de leur épuisement, ou du moins leur extraction à moindre frais. En effet, pour prendre l'exemple du pétrole, les puits sont désormais beaucoup plus profonds et les gisements plus difficiles d'accès ce qui nécessite plus d'infrastructures et de transformation avant de pouvoir être utilisé comme combustible pour être transformé sous une autre forme d'énergie. Cet exemple montre qu'un jour viendra où les solutions à base d'énergies renouvelables et alternatives qui sont en ce moment trop coûteuses et peu rentables, se révéleront moins chères que les énergies fossiles. Espérons toutefois que nous saurons développer ces énergies renouvelables avant ce jour.

C'est dans cet objectif que vient s'insérer notre étude qui porte sur une des énergies renouvelables en développement en ce moment qui est l'énergie éolienne. Nous allons nous intéresser à l'état actuel des avancées technologiques qui ont permis la construction et le fonctionnement de ces aérogénérateurs.

La conversion d'énergie éolienne en énergie électrique peut être réalisée par divers types de machines. A l'origine, c'était la génératrice asynchrone classique, sans convertisseur d'électronique de puissance associé, qui était la plus largement répandue. Cependant, l'évolution technologique des convertisseurs a progressivement permis de se tourner vers des dispositifs plus complexes.

Notre objectif dans ce travail consiste à l'étude d'une éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation, débitant sur une charge autonome, ainsi que l'apport que pourrait apporter l'emploi de cette dernière associée à un convertisseur « onduleur MLI – redresseur MLI » et les éventuels désavantages qui pourraient surgir. Ce mémoire est alors divisé en trois grands chapitres :

Le premier chapitre sera consacré à la présentation des généralités sur les systèmes de production d'énergie éolienne. Ce qui nous permettra de faire le choix de la structure à étudier.

Nous présenterons dans le second chapitre la modélisation de l'ensemble de la chaîne de conversion éolienne ainsi que ces constituants, de la MADA et celle des convertisseurs associés, notamment, l'ensemble « redresseur MLI – onduleur MLI ».

Au troisième chapitre, nous aborderons la commande de cette chaîne d'une manière à assurer le bon fonctionnement de la charge.

Dans le dernier chapitre, nous discuterons les résultats de simulation concernant la dynamique de la réponse et la qualité des signaux électriques.

Enfin, nous présenterons une conclusion générale résumant les principales conclusions de ce travail ainsi que les perspectives.

Chapitre I
Généralités sur le système
de production d'énergie
éolienne

I.1 Introduction

Ce travail permet de présenter le contexte dans lequel s'insère notre étude qui est principalement devisée en deux grandes parties. La première partie s'étalera les notions élémentaires du fonctionnement d'un système éolien. La seconde présentera les dispositifs électrotechniques permettant de transformer l'énergie mécanique présente sur l'arbre de l'éolienne en énergie électrique.

Cette partie permet également d'annoncer les orientations des parties qui suivent notamment sur les configurations électrotechniques qui y seront étudiées.

I.2 Historique de l'éolien [MIR 05] :

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poul La Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pu être « redécouverte » et de nouveau utilisée (dans les années 40 au Danemark 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnait dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. La crise pétrolière de 1973 a relancé de nouveau la recherche et les réalisations éoliennes dans le monde.

I.3 Définition et principe de fonctionnement de l'éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Fig. I.1) [Has 10], [Mok 09].

Le principe de fonctionnement de l'éolienne se résume donc en un système qui, à partir d'une énergie extrêmement variable (le vent), devra produire une énergie électrique présentant des caractéristiques constantes.

Tout en profitant de l'énergie gratuite de l'air qui fait tourner des pales qui sont solidaires à un rotor d'un générateur électrique qui a comme rôle de convertir cette énergie cinétique de l'air en énergie électrique prête à utiliser [Che 10].

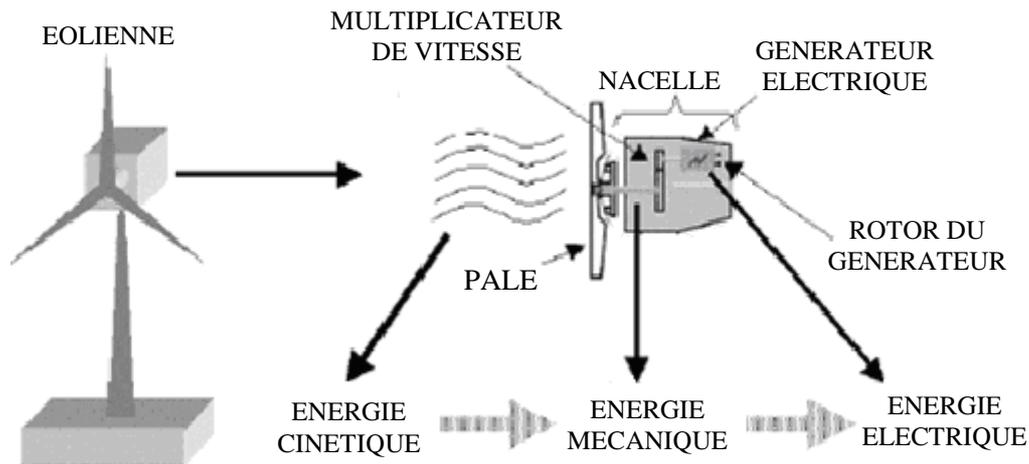


Fig. I.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

I.4 Avantage et inconvénients

Le fait que l'énergie éolienne soit attrayante et de plus en plus utilisée comme alternative revient sans aucun doute au fait qu'elle ait des avantages. Cependant, elle en possède aussi des inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux – ci ne deviennent pas un frein à son développement.

I.4.1 Avantages [Gou 06], [Ket 10]

- Aucune rejection de CO₂ ni d'aucun autre gaz polluant ou toxique ;
- Renouvelable et abondante, elle constitue l'une des énergies du futur, lorsque les réserves mondiales en énergies fossiles seront épuisées ;
- Contrairement au nucléaire, l'exploitation de l'énergie éolienne ne présente pas de risque ;
- C'est une source d'énergie locale qui peut répondre aux besoins locaux des zones éloignés ;
- En termes de coût de revient, elle est la moins chère parmi toutes les énergies renouvelables ;

I.4.2 Inconvénients [Gou 06], [Ket 10]

- Le bruit, certes il est nuisible, mais il a fortement diminué du fait des progrès réalisés au niveau du multiplicateur mécanique ;

- La qualité de l'énergie électrique n'est toujours pas bonne, en effet c'est le caractère aléatoire qui en est à l'origine ;

I.5 Classification des éoliennes

On peut classer les générateurs éoliens selon des différentes catégories. Ces derniers peuvent alors être classés selon [Idj 05], [POI 03], [Ket 10]:

- Le type du capteur (à axe horizontal ou vertical) ;
- La nature du convertisseur électromécanique (machine asynchrone, synchrone, etc....) ;
- Le mode de régulation (Pitch ou Stall régulation) ;
- La nature de l'accouplement mécanique (présence de multiplicateur de vitesse ou attaque directe) ;
- Le mode de fonctionnement (vitesse fixe ou variable) ;

1.5.1 Les différents types d'éoliennes

Selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice, on classe les éoliennes en deux types [Has 10] :

I.5.1.1 Les éoliennes à axe vertical

Pour ces capteurs, l'axe de rotation est vertical et perpendiculaire à la direction du vent, sont les premières structures développées. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol, donc elles sont facilement accessibles. Elles sont adaptées à tous les vents et ne nécessitent pas de dispositif d'orientation [Ham 08], [Abd 07].

Deux d'entre elles sont particulièrement remarquables : Savonius et Darrieus

- L'éolienne Savonius comporte principalement deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. Comme les machines à aubes, elle utilise essentiellement la traînée pour tourner .elle présente deux avantages la simplicité de fabrication ainsi qu'elle démarre avec des vitesses de l'ordre de 2 m/s.
- L'éolienne inventée par le Français Darrieus est un rotor dont la forme la plus courante rappelle vaguement un fouet à battre les œufs. Cette machine est bien adaptée à fournir des puissances plus élevée, son inconvénient majeure, c'est de ne pas pouvoir démarré seule.

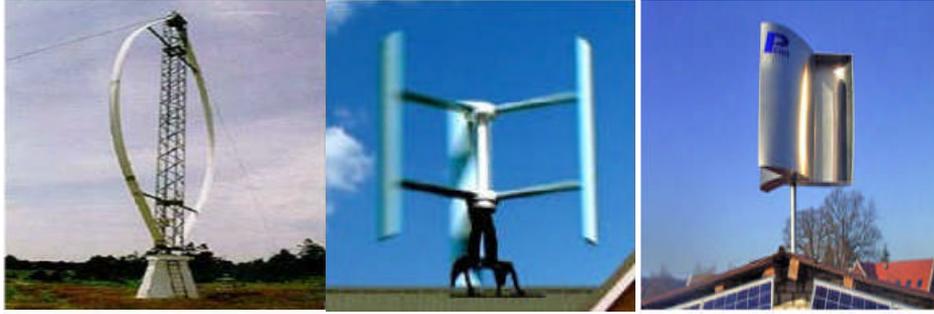


Fig. I.2 Représentation d'Eoliennes à axe vertical

I.5.1.2 Les éoliennes à axe horizontal [Mir 05], [Mok 09]

Ce sont les machines les plus répandues actuellement du fait de leur rendement qui est supérieur à celui de toutes les autres machines. Elles sont appelées éoliennes à axe horizontal car l'axe de rotation du rotor est horizontal, parallèle à la direction de vent. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales [Dra 09].

- Elles ont un rendement élevé ;
- Les éoliennes à axe horizontal (ou à hélice) sont de conception simple ;



Fig. I. 3 Eolienne à axe horizontal

I.5.2 Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal

L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : cette énergie cinétique est convertie en énergie mécanique qui est elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique solidaire au rotor. L'électricité peut être envoyée dans le réseau de distribution, stockée ou utilisée par des charges isolées [Has 10], [Mok 09].

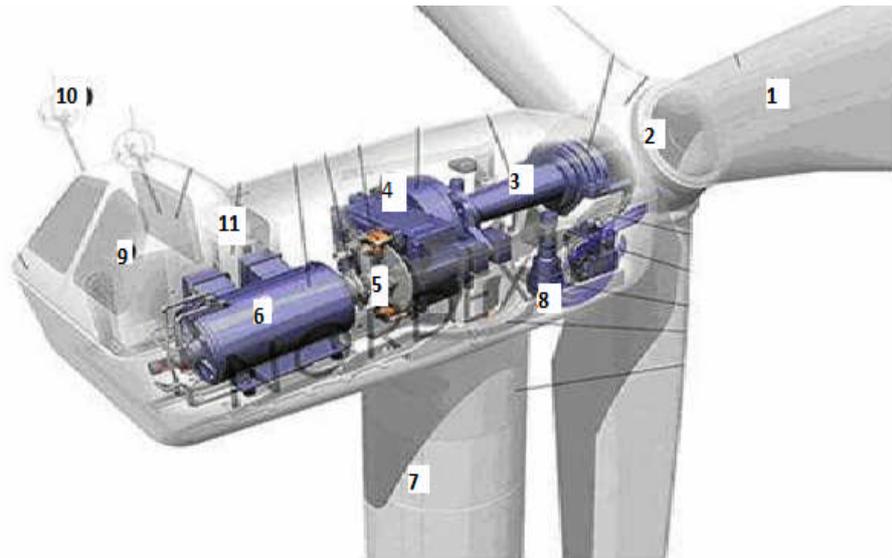


Fig. I.4 Les composantes de l'aérogénérateur

Les composantes de l'aérogénérateur

1. Les pales : sont les capteurs de l'énergie cinétique qui transmettent l'énergie au rotor ;
2. Le moyeu : il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation ;
3. L'arbre primaire (ou arbre lent) : relie les pales au multiplicateur ;
4. Le multiplicateur : il permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse. C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire ;
5. L'arbre secondaire : il transmet l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents ;
6. Le générateur électrique : il assure la production de l'énergie électrique. Il peut être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif) ; L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement ;
7. Le mât : c'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante : plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente mais en même temps le coût de la structure augmente. En général, le mât a une taille légèrement supérieure au diamètre des pales ;
8. Le système d'orientation de la nacelle : c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein ;
9. Le système de refroidissement : il est à air, à eau ou à l'huile et destiné au multiplicateur et à la génératrice ;

10. Les outils de mesure du vent : girouette pour la direction et anémomètres pour la Vitesse ;
11. Le système de contrôle électronique : il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation ;
12. Au pied du mât se trouve un transformateur ;

I.5.3 Nombre de pales

Plus le nombre de pales est élevé plus le couple au démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera faible. Les aérogénérateurs modernes ont 1, 2 ou 3 pales. Les machines uni et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuations mécaniques, elles ont un rendement énergétique moindre, elles font plus de bruit dans la mesure où elles vont plus vite et elles provoquent un impact visuel plus important. Ce qui explique que 80% des fabricants produisent des aérogénérateurs tri-pales [Gou 06], [POI 03].

I.5.4 Le multiplicateur mécanique de vitesse [Idj 10]

La vitesse de la turbine est inférieure à la vitesse de la génératrice. Par conséquent, la transmission mécanique se fait par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse dont le rôle principal est d'adapter la vitesse de rotation de la turbine à celle de la génératrice. Il permet de transformer une puissance à couple élevé et à vitesse lente en une puissance à couple faible et vitesse rapide. La présence de ces multiplicateurs induit des problèmes de vibrations, de bruits et de coûts de maintenance

Il existe des possibilités d'entraînement direct sans multiplicateur. Les éoliennes à attaque directe sont constituées d'une génératrice directement connectée à l'axe de la turbine. Cela permet alors de réduire le coût de l'énergie électrique produite et le bruit du multiplicateur de vitesse.

I.5.5 Mode de régulation [Mok 09]

La vitesse du vent est variable dans le temps, au delà d'une certaine valeur, la puissance captée par le système dépasse sa valeur limite d'où la nécessité de réduire la vitesse de la turbine. Deux types de régulation le permettent.

I.5.5.1 Régulation 'STALL'

Ce système de limitation de vitesse est lié à la forme de la pale dit « STALL ». Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale, l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale [Mok 09].

I.5.5.2 Régulation 'PITCH'

Ce type de régulateur consiste à incliner la surface des pales d'un angle (β) de façon à dégrader le coefficient de puissance C_p . La figure I.5 nous montre que le C_p est optimal pour un β égal à deux et diminue avec l'augmentation de l'angle de calage.

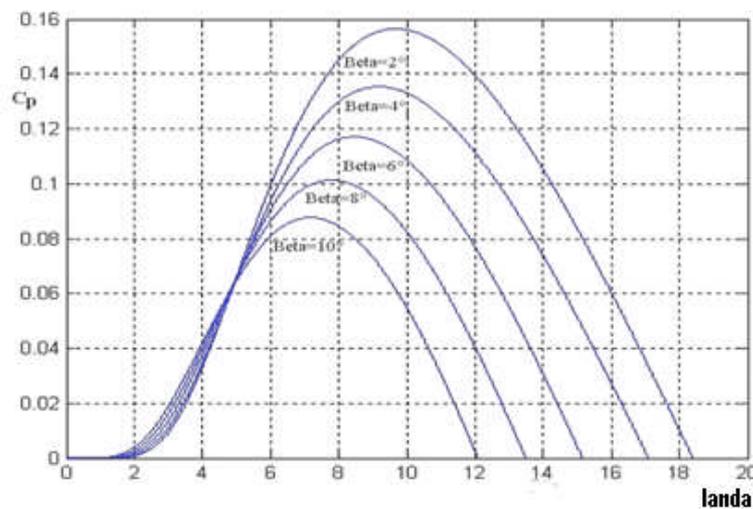


Fig. I.5 Allure du $C_p = f(\lambda)$ pour différents angles de calage [Tar 08]

I.5.6 Le mode de fonctionnement des éoliennes

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration. Les principaux critères des deux types de fonctionnement sont les suivants [Gou 06], [ket 10]:

I.5.6.1 Fonctionnement à vitesse fixe

- Système électrique plus simple ;
- Plus grande fiabilité ;
- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne ;

- Pas besoin de système électronique de commande ;
- Moins cher ;

I.5.6.2 Fonctionnement à vitesse variable

- Augmentation du rendement énergétique ;
- Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance ;
- Réduction des efforts subits par le train de puissance ;
- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité ;

Les deux types de machines électriques les plus utilisés dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et asynchrones sous leurs diverses variantes. On donne par la suite les principales caractéristiques de chacun de ces types de machine [Abd 06], [Poi 03].

I.6 Zone de fonctionnement d'une éolienne [IVA 04]

Les objectifs de la régulation de l'éolienne sont d'assurer sa sécurité pour les vents forts et de limiter sa puissance.

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.

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

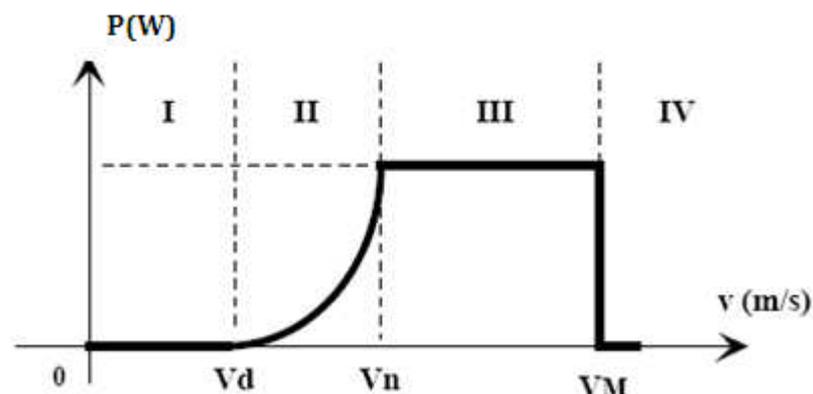


Fig. I.6 Zone de fonctionnement d'une éolienne

Avec :

- V_d : la vitesse de démarrage, à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de la puissance.
- V_M : la 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_n ; V_d et V_M définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent :

- **Zone I** : la puissance est nulle (la turbine ne fonctionne pas).
- **Zone II** : dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent V ,
- **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.

I.7 Etude comparative des machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne

Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques [Ham 08].

On décrit dans cette étude, les principales caractéristiques technologiques et concepts liés aux aérogénérateurs.

I.7.1 Types de machines électriques

Les deux types de machines électriques les plus utilisées dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et asynchrones.

I.7.1.1 Générateur synchrone

C'est le type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grandes puissances (centrales thermiques, ou nucléaires). Les générateurs synchrones de 500 kW à 2 MW utilisés dans le

domaine éolien, sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille [Mir 05].

De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau Fig. I.6, sa vitesse de rotation fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion génératrice - réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéroturbine se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau ; elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance, Fig. I.7.

Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplés. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple dans le train de puissance.

Certaines variantes de machines synchrones peuvent fonctionner à de faibles vitesses de rotation et donc être directement couplées à l'aéroturbine. Elles permettent ainsi de s'en passer du multiplicateur, élément présent sur la plupart des aérogénérateurs et demandant un important travail de maintenance [Poi 03].

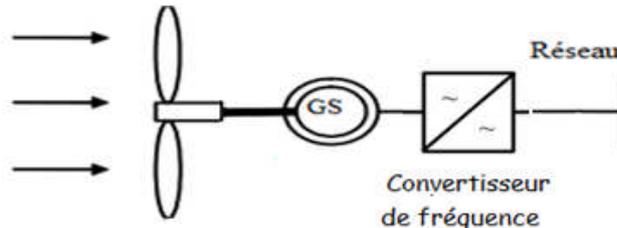


Fig. I.7 Machine synchrone connectée directement au réseau

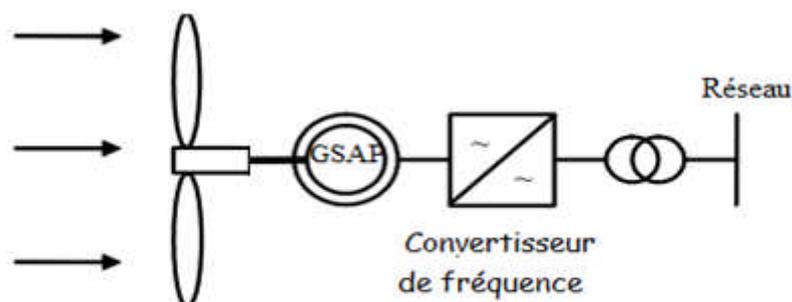


Fig. I.8 Machine synchrone connectée au réseau via un convertisseur de fréquence [Lop 06]

I.7.1.2 Générateur asynchrone

La connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor.

Ceci explique, pourquoi pratiquement toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines à induction [Ham 08].

Il existe deux catégories de machine asynchrone: les machines asynchrones à cage d'écureuil et les machines asynchrones à rotor bobiné.

I.7.1.2.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil [Che 10]

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde.

Ainsi pour les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Or, il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct.

Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse.

La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais et collecteur ou de contacts glissants sur des bagues, la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne.

Le dispositif, le plus simple et le plus couramment utilisé, consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau Fig. I.11.

La machine à un nombre de paire de pôles fixe doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau ; si le glissement devient trop important, les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs.

La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance de la machine.

Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau, celui-ci peut être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la Fig. I.9, qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne.

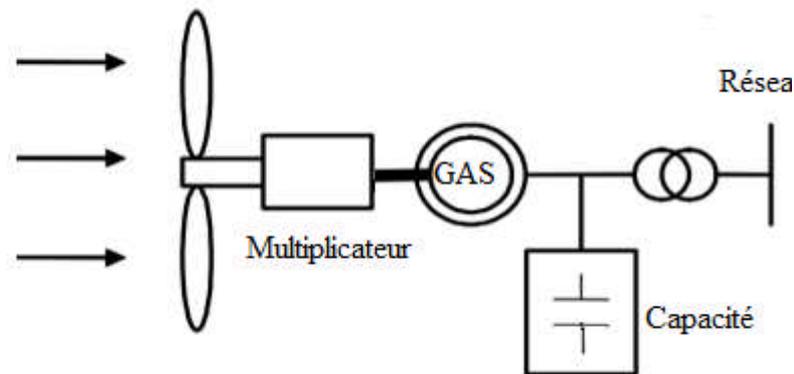


Fig. I.9 Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau [Lop 06]

Une autre solution consiste à utiliser la génératrice asynchrone connectée aux réseaux par l'intermédiaire d'un dispositif d'électronique de puissance Fig. I.10

L'éolienne fonctionne à vitesse variable, le générateur produit un courant alternatif de fréquence variable. L'emploi de deux convertisseurs de puissance permet de découpler la fréquence du réseau de la fréquence variable des courants de la machine par création d'un bus continu intermédiaire.

Avec une telle structure, les fluctuations rapides de la puissance générée peuvent être filtrées par le condensateur en autorisant une variation de la tension du bus continu sur une plage donnée.

Les différents inconvénients de ce système sont le coût, la fiabilité de l'électronique de puissance et les pertes dans les convertisseurs de puissance. Ces convertisseurs sont dimensionnés à 100% de la puissance nominale de la génératrice, ceci augmente significativement le coût de l'installation et les pertes. Une étude économique approfondie est nécessaire avant d'adopter ce type d'installation.

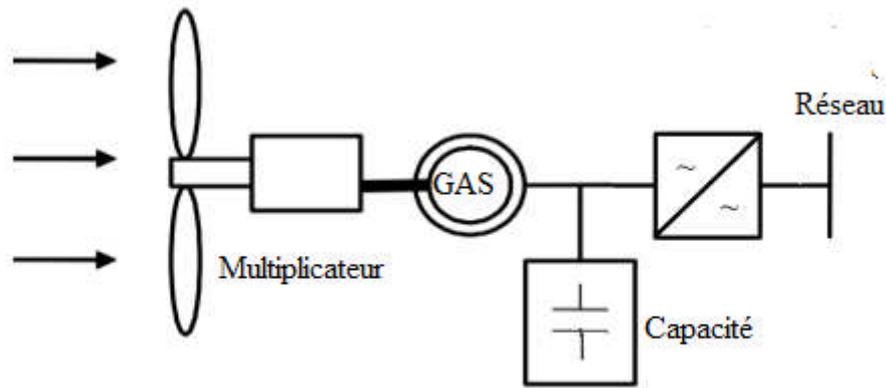


Fig. I.10 Eolienne connectée au réseau via un convertisseur de fréquence [Abd 07]

Malgré sa simplicité et ses qualités de robustesse ainsi que son coût, la machine asynchrone à cage est utilisée dans un système éolien lorsqu'elle est directement connectée au réseau, la vitesse de rotation doit rester pratiquement constante de façon à ce que la vitesse de la machine reste proche du synchronisme. Cette restriction entraîne une efficacité réduite de l'éolienne aux vitesses de vent élevées.

Partant de ce constat, nous pouvons utiliser la machine asynchrone à double alimentation (MADA) comme alternative à la machine à cage.

I.7.1.2.2 Machine asynchrone à double alimentation

Avec les générateurs synchrones, c'est actuellement l'une des deux solutions concurrentes en éolien à vitesse variable [Abd 07].

Le stator de la génératrice est directement couplé au réseau, à la place du rotor à cage d'écureuil, ces machines ont un rotor bobiné dont le réglage électrique assure la variation du glissement.

Actuellement, la majorité des projets éoliens supérieurs à 1 MW repose sur l'utilisation de la machine asynchrone pilotée par le rotor. Son circuit statorique est connecté directement au réseau électrique. Un second circuit placé au rotor est également relié au réseau mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance.

Etant donné que la puissance rotorique qui transite est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance. C'est la raison principale pour

laquelle on trouve cette génératrice dans la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion où est injectée cette génératrice.

a/ Structure des machines asynchrones à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasés classiques (asynchrone à cage ou synchrone).

L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne.

En fonctionnement moteur, le premier intérêt de la machine asynchrone à rotor bobiné a été de pouvoir modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine, notamment en y connectant des rhéostats afin de limiter le courant et d'augmenter le couple durant le démarrage, ainsi que de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse.

Plutôt que de dissiper l'énergie rotorique dans des résistances, l'adjonction d'un convertisseur entre le bobinage rotorique et le réseau permet de renvoyer cette énergie sur le réseau, le rendement de la machine est ainsi amélioré, c'est le principe de la cascade hypo synchrone [Ket 10].

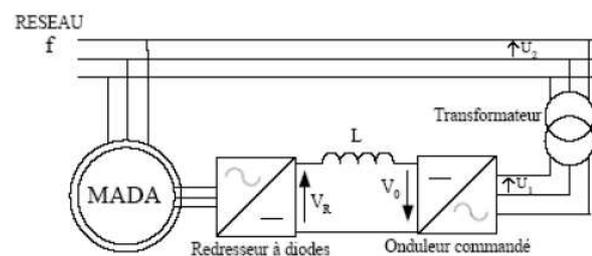


Fig. I.11 Cascade hypo synchrone [Ham 08]

Il existe plusieurs technologies de la machine asynchrone à double alimentation et plusieurs dispositifs d'alimentation sont envisageables. Chaque structure a ses inconvénients et ses avantages.

Pour expliquer le principe de fonctionnement, Fig. I.14 on néglige toutes les pertes. En prenant le cas d'un moteur, en compte cette hypothèse, la puissance P est fournie au stator et traverse l'entrefer : une partie de cette puissance fournie $(1-g).P$, est retrouvée sous forme de puissance mécanique, le reste $g.P$ sort par les balais sous forme de grandeurs alternatives

de fréquence g.f. Ces grandeurs de fréquence variable sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elle est renvoyée par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Ce réseau reçoit donc $(1+g).P$ les bobinages du rotor sont donc accessibles grâce à un système de balais et de collecteurs, Fig. I.13. Une fois connecté au réseau, un flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la reluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et donc du courant statorique.

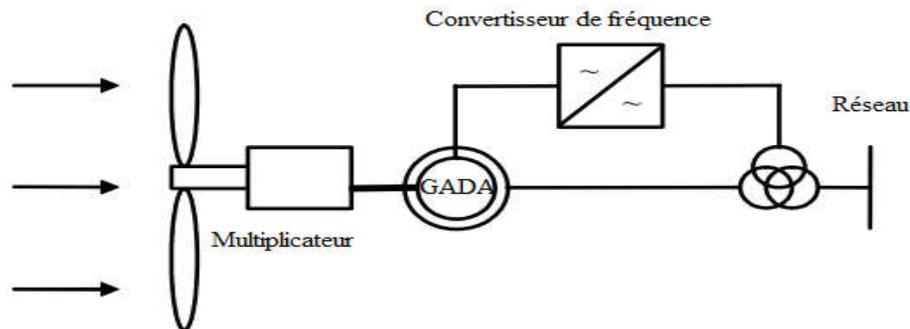


Fig.1.12 Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné pilotée par le rotor [Lop 06]

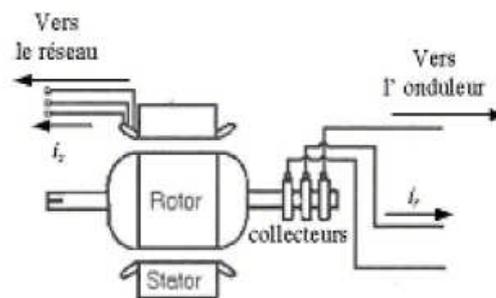


Fig.1.13 Schéma de la machine asynchrone à rotor bobiné avec des bagues collectrices [Che 10]

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement.

Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend de cette configuration.

b/Applications des machines asynchrones à double alimentation

La première application de la MADA est le fonctionnement moteur sur une grande plage de variation de vitesse.

Dans les machines synchrones classiques et asynchrones à cage, la vitesse de rotation est directement dépendante de la fréquence des courants des bobinages statoriques. La solution classique permettant alors le fonctionnement à vitesse variable consiste à faire varier la

fréquence d'alimentation de la machine. Ceci est généralement réalisé par l'intermédiaire d'un convertisseur de fréquence, sera alors dimensionné pour faire transiter la puissance nominale de la machine.

L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille de ces convertisseurs d'environ 70% selon la puissance utilisée en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques.

Ce dispositif est par conséquent économique, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur.

La même philosophie peut être appliquée au fonctionnement en génératrice dans lequel l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse.

I.8 Mode de fonctionnement de la MADA

I.8.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

Dans ce cas la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjecté dans le réseau. On a donc un fonctionnement moteur au dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone classique peut fonctionner en ce mode mais la puissance de glissement est dissipée en pertes Joules dans le rotor.

I.8.2 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

Dans ce cas la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a donc un fonctionnement moteur au dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone classique ne peut pas assurer ce mode de fonctionnement.

I.8.3 Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone

Dans ce cas la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est aussi fournie par le stator. On a donc un fonctionnement générateur au dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone classique ne peut pas assurer ce mode de fonctionnement.

I.8.4 Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone

Dans ce cas la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être injectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au dessus de la vitesse de synchronisme. La machine

asynchrone classique peut assurer ce mode de fonctionnement, mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes Joules dans le rotor.

Remarque : on peut donc constater que la MADA a deux principaux avantages sur la machine asynchrone classique : la production de puissance ce fait quelle que soit sa vitesse de rotation (hypo ou hyper synchronisme) et la récupération de la puissance de glissement est possible en hyper synchronisme.

I.8.5 Fonctionnement en mode synchrone ($g=0$)

Dans ce cas la vitesse mécanique du rotor est égale à celle du champ tournant. Par conséquent la fréquence f_r du rotor est nulle.

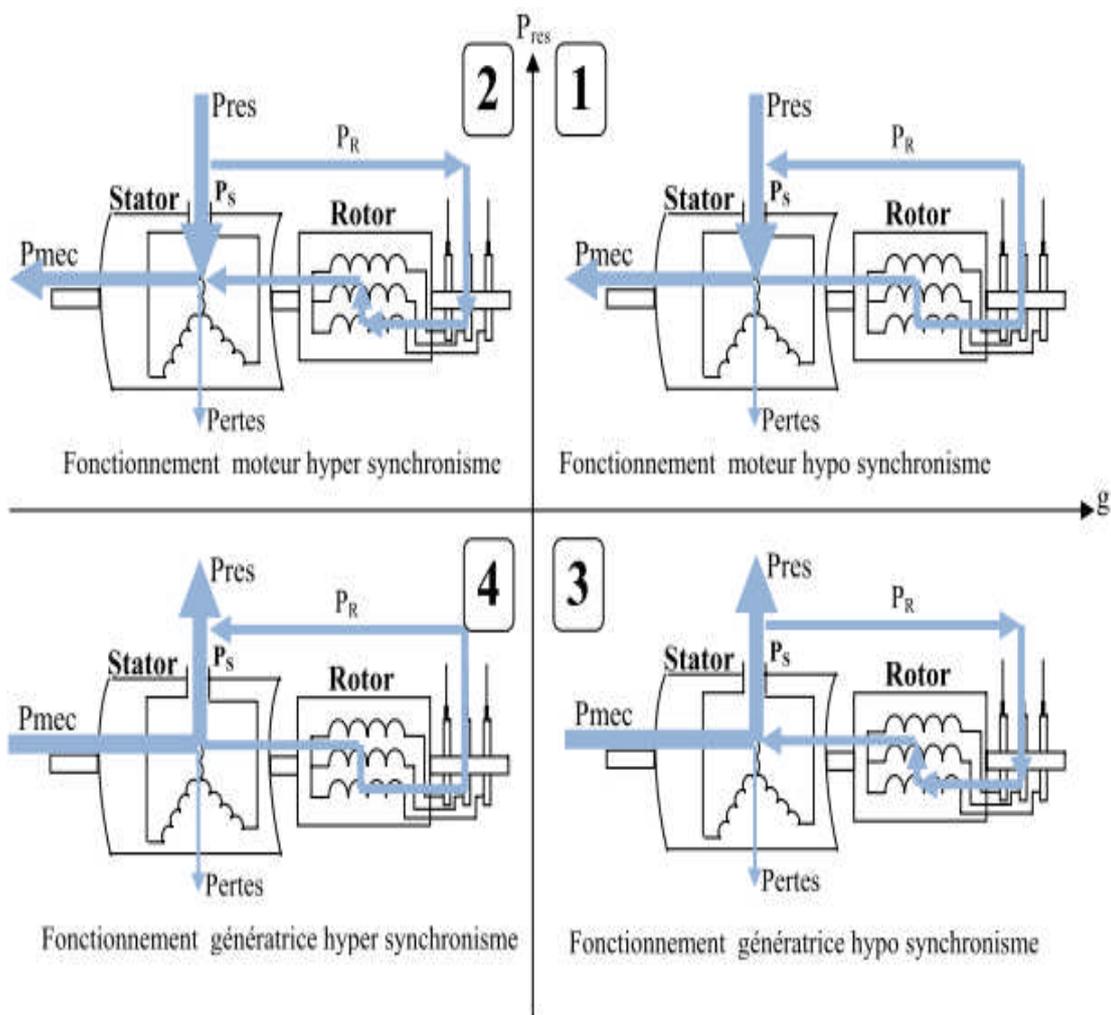


Fig. 1.14 Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation.

I.9 Intérêt de la MADA

Le principal avantage de la MADA est la possibilité de la faire fonctionner à vitesse variable. Les machines asynchrones à vitesse fixe doivent fonctionner au voisinage de la vitesse de synchronisme car la fréquence est imposée par le réseau. La vitesse du rotor est quasi constante.

Le système basé sur la MADA permet de régler la vitesse du rotor en fonction de celle du vent. En effet, la MADA permet un fonctionnement en génératrice hypo synchrone et hyper synchrone même au synchronisme. On arrive ainsi à extraire le maximum de puissance possible, [Che 10].

Comme on peut citer sa capacité de découplée la commande des puissances actives et réactives ainsi sa magnétisation se fait par le rotor sans prélevée au réseau de l'énergie réactive ainsi elle est capable d'échanger de l'énergie réactive avec le réseau dont l'objectif est de commander la tension ou de contrôler le facteur puissance coté réseau.

I.10 Aérogénérateur à étudier

La technologie des aérogénérateurs, s'est diversifiée en même temps qu'elle progressait ainsi, de nos jours, il existe de nombreuses sortes d'aérogénérateur, dans cette partie on présentera quelque type d'éolienne citée dans la littérature

On peut distinguer deux famille de systèmes de génération d'énergie d'une part, en majorité, les systèmes connectés aux réseaux électrique et les systèmes autonomes destinés aux cotes isolés où l'énergie produite est consommée sur place ou à proximité du générateur.

Concernant le premier cas, on cite par exemple le cas de [Ghe 09], qui a traité le cas d'une génératrice asynchrone à double alimentation GADA connectée au réseau par un convertisseur indirect (redresseur, filtre, onduleur) équipé d'un système de stockage dans l'objectif est de contrôler les puissances injectées au réseau (P,Q). Comme on peut cité, le cas de [Ghe 10] et [Ghe 08], il a présenté des aérogénérateurs basés sur une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) dont l'interface d'électronique de puissance est un convertisseur matriciel, associée à un système de stockage inertiel, son objectif est de commander les puissances (active et réactive) injectées au réseau.

Notre cas, concerne un système éolien autonome basé sur une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) alimentant une charge équilibrée. Cette génératrice fonctionnant à vitesse variable a été traité dans plusieurs références, dont on cite ; [Rob 08] et [Gal 06], Fig. I.6. La référence [Rob 08] a traité la commande vectorielle appliquée à la

génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) sans capteur de vitesse ou de position du rotor, où il a utilisé un estimateur. La méthode proposée est la commande adaptative avec modèle de référence, dont il estime la vitesse de rotation et la position du rotor en fonction des courants rotorique. Pour la référence [Gal 06] a proposé une commande en mode glissant appliquée à une génératrice asynchrone à double alimentation dédiée à une éolienne à vitesse variable, alimentant une charge RL isolée (autonome) qui fonction à fréquence constante.

Pour [Den 06] a étudié un système hybride (hydroélectrique à vitesse variable - solaire) autonome destiné à alimenter une charge (R, L, C), Fig. I.16, son principe est d'extraire le maximum d'énergie (puissance) en appliquant la MPPT et de contrôler le système, en se basant sur la commande de bus continu. Notre système est basé sur le schéma représenté sur la Fig. I.15, qui se résume en un générateur asynchrone à double alimentation connecté à une charge équilibrée, caractérisée par une tension et une fréquence de fonctionnement fixes, ce qui nous orientera sur la commande à utiliser pour le contrôle de l'énergie débitée par l'éolienne, en agissant sur les deux convertisseurs connectés au rotor de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA).

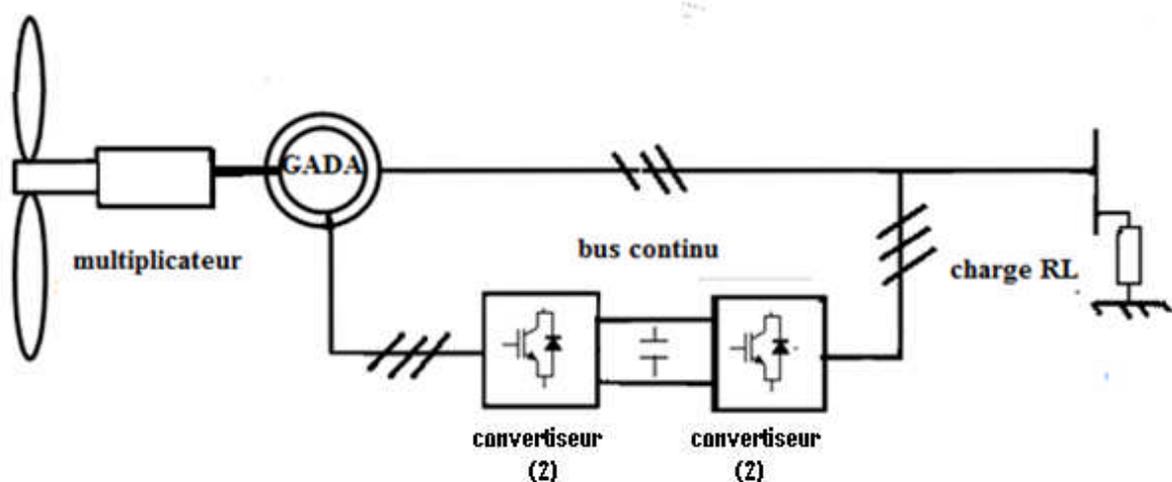


Fig. I.15 Aérogénérateur autonome basé sur une GADA.

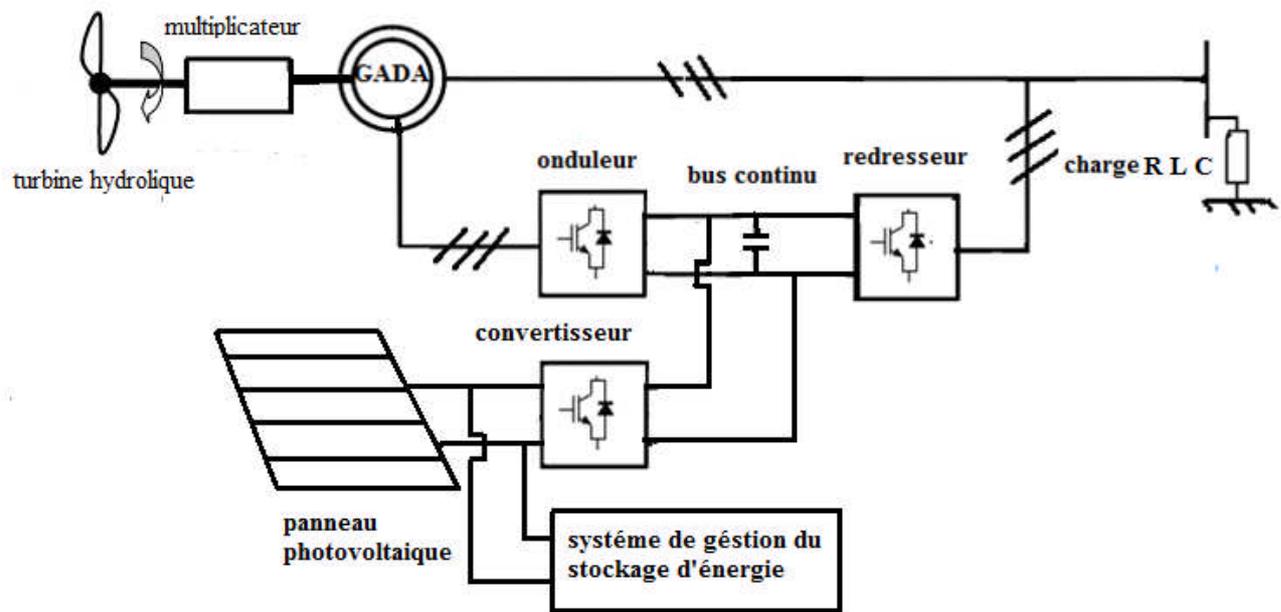


Fig. I.16 Système hybride de génération d'énergie (générateur hydraulique-solaire).

I.11 CONCLUSION

Dans cette partie, une synthèse bibliographique concernant les différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnements a été présentée. Après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, une description des machines électriques et leurs applications ainsi que leurs adaptations aux aérogénérateurs a été fait. A la fin de ce travail, quelques exemples sur l'application de la GADA dans les systèmes de génération de l'énergie électrique cités dans la littérature ont été présentés. En particulier, le cas d'un fonctionnement autonome qui va être la suite de notre travail.

Chapitre II
Modélisation de la
MADA

II.1 introduction

Après avoir présenté les différentes structures d'une chaîne de conversion électromécanique au chapitre I, nous avons choisi la machine asynchrone à double alimentation associée à deux convertisseurs statiques commandés en MLI, afin de permettre une production optimale d'électricité à vitesse de vent variable.

Ce chapitre sera consacré à la modélisation des différents éléments de la structure de la chaîne de conversion éolienne choisie à la figure (I.15) on commencera par la modélisation de la partie mécanique. Après on fera la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA), on terminera par la modélisation des convertisseurs statique ainsi que le bus continu.

II.2 Modélisation de la partie mécanique

II. 2. 1 Modèle du vent

Le choix géographique d'un site éolien est primordial dans un projet de production d'énergie. Les caractéristiques du vent vont déterminer la quantité de l'énergie qui pourra être effectivement extraite du gisement éolien. Pour connaître les propriétés d'un site, des mesures de la vitesse du vent ainsi que de sa direction, sur une grande période du temps, sont nécessaires [Lou 10].

II.2.2 Modélisation de la turbine

Le dispositif, qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de rayon R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G Fig. I.10.

Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site [Red 09].

II.2.2.1 Loi de Betz

Etudions l'éolienne présentée sur la figure II.1. D'après la théorie de Betz, la puissance du vent est [Mes 09] :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot S_{éolienne} \cdot \rho \cdot V^3 \quad II.1$$

Avec :

$S_{éolienne}$: la surface balayée par l'éolienne ;

ρ : la masse volumique de l'air (1.25 kg / m^3) ;

V : la vitesse du vent;

L'éolienne ne peut récupérer qu'une partie de la puissance du vent P_{vent}

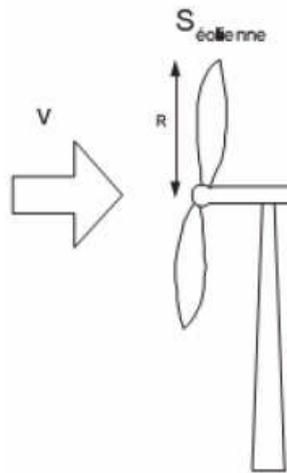


Fig. II.1 Eolienne simplifiée [Red 09]

La puissance du vent et la puissance extraite par l'éolienne $P_{éolienne}$ peuvent s'exprimer en fonction du coefficient de puissance C_p :

$$P_{éolienne} = C_p \cdot P_{vent} \quad II.2$$

D'après Betz, le coefficient de puissance C_p ne peut être supérieur à $16/27$ [Lou 10].

Le coefficient C_p , diffère pour chaque éolienne, dépend de l'angle d'inclinaison des pales β_i et du rapport de vitesse λ :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{V} \quad II.3$$

Avec :

R : le rayon de la turbine éolienn ;

Ω : la vitesse de rotation de l'éolienne ;

V : la vitesse du vent ;

Le coefficient de puissance C_p est souvent issu de mesures pratiques ;

L'étude d'une éolienne particulière a permis de déduire la formule empirique [Red 09] :

$$C_p = (0,44 - 0,0167\beta_i) \cdot \sin\left(\pi \frac{\lambda - 3}{15 - 0,3\beta_i}\right) - 0,00184(\lambda - 3)\beta_i \quad II.4$$

Avec

β_i exprimé en degrés

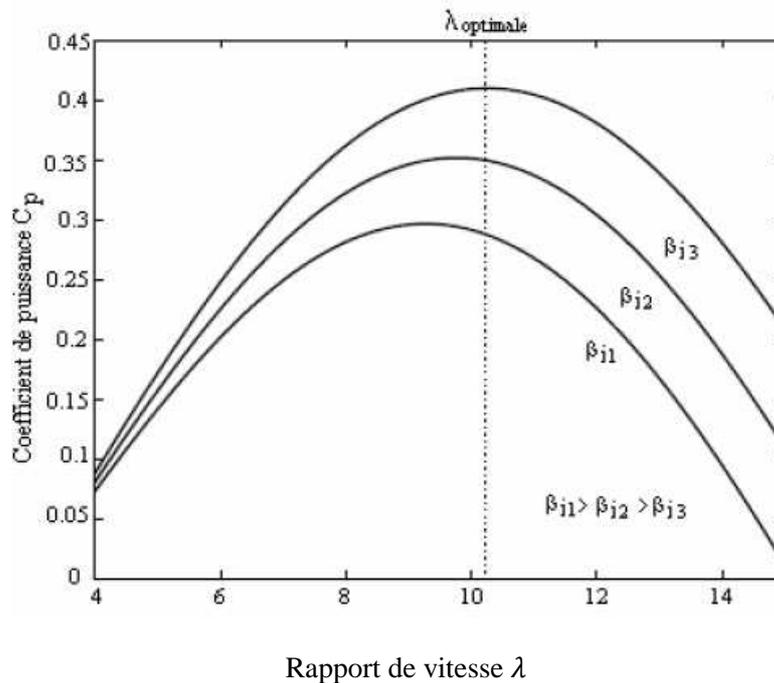


Fig. II.2 Coefficient de puissance C_p

La figure (II.2) représente le coefficient de puissance C_p , calculé à partir de l'équation (II.4), en fonction du rapport de vitesse λ pour différents angles d'inclinaison des pales β_i . On remarque que, si pour un angle constant β_i , on pouvait maintenir le coefficient de vitesse λ constant et égal à λ optimal à chaque instant, la puissance captée par l'éolienne serait maximale [Mes 09]. La figure (II.2) montre le λ optimal correspondant à un angle d'inclinaison des pales β_i . Cette condition ne peut être vérifiée qu'avec l'utilisation de la vitesse variable. En effet, afin de maintenir $\lambda = \lambda_{\text{optimal}}$, il est nécessaire de faire varier la vitesse de rotation du générateur (et de l'éolienne) avec les variations de vitesse du vent, selon l'équation (II.3).

Pour un fonctionnement à vitesse de rotation fixe, le coefficient λ varie avec la vitesse du vent : la puissance captée est maximale seulement pour une vitesse du vent donnée.

Le fonctionnement à vitesse de rotation variable permet d'optimiser l'énergie captée par l'éolienne mais demande la mise en œuvre d'un convertisseur avec sa commande, ce qui entraîne un surcoût par rapport à la vitesse fixe. La littérature donne un gain de puissance extraite variant entre 2% et 38% [Red 09].

Au vu de la caractéristique suivante (Figure II.3), il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe, les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités [Ken 11], [mou 07], [Red 09].

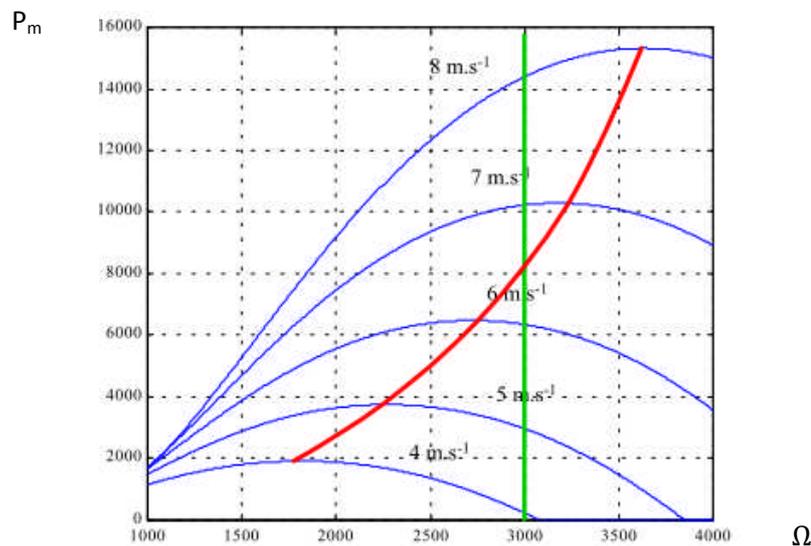


Fig. II.3 Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné.

En vitesse fixe : le maximum théorique n'est pas atteint

En vitesse variable : La puissance maximale est exploitée pour toutes les vitesses du vent (régulation de $\lambda_{optimal}$ pour avoir C_p maximum).

II.2.3 Le multiplicateur

Le multiplicateur a pour but de transférer la puissance aérodynamique portée sur l'arbre lent (l'arbre de la turbine) vers l'arbre rapide (l'arbre de la génératrice asynchrone). Il peut être représenté par deux cercles C_1 et C_2 de Rayon R_1 et R_2 , Fig.II.4

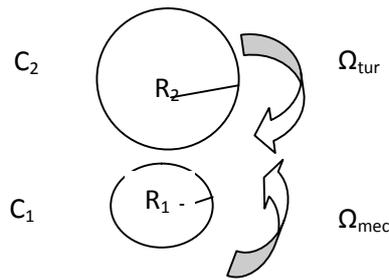


Fig. II.4 Schéma explicatif du multiplicateur

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par un Gain de vitesse G tel que :

$$G = \frac{R_2}{R_1} = \frac{\Omega_{mec}}{\Omega_{tur}} \quad II.5$$

Le couple aérodynamique est défini comme le rapport entre la puissance aérodynamique et la vitesse angulaire de la turbine :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{tur}} \quad II.6$$

Le couple sur l'arbre de la machine est donné par :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad II.7$$

II.2.4 Equation dynamique de l'arbre

Les masses des différentes parties de la turbine sont représentées par l'inertie J_t le modèle mécanique proposé considère l'inertie total J constituée de l'inertie de la turbine ramenée sur l'axe rapide et celle de la machine J_m et on suppose que le multiplicateur de vitesse soit idéal, l'inertie total J est donnée alors par l'expression suivante [Kha 10].

$$J_{t(coté\ machine)} = \frac{J_t}{G^2} \quad II.8$$

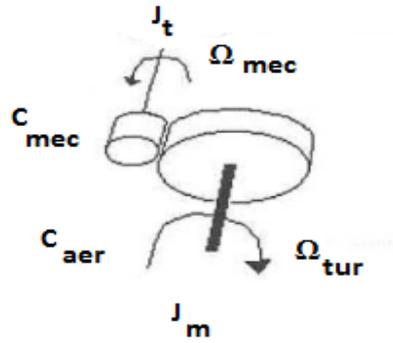


Fig. II.5 Modèle mécanique simplifié du multiplicateur

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total C_{me} appliqué au rotor :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad II.9$$

Où J est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vi} et le couple issu du multiplicateur C_g

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vi} \quad II.10$$

Le couple résistant du aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f :

$$C_{vi} = f \cdot \Omega_{mec} \quad II.11$$

Donc :

$$C_{mec} = J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_g - C_{em} - f \cdot \Omega_{mec} \quad II.12$$

Si on applique la transformée de Laplace sur l'équation (II.12), $\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = P$ on peut écrire :

$$C_g - C_{em} = (J \cdot P + f) \cdot \Omega_{mec} \quad II.13$$

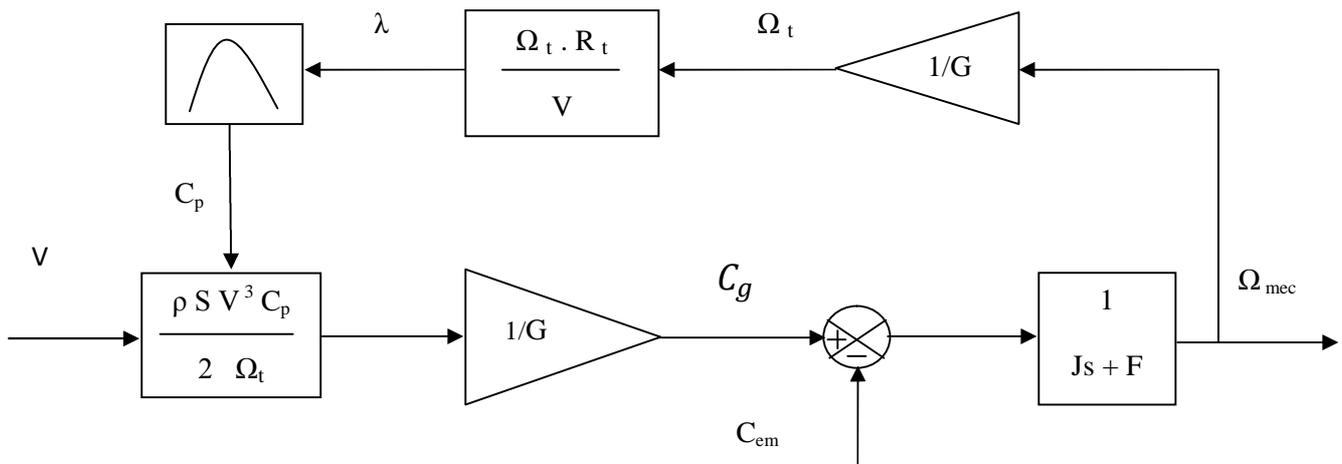


Fig II. 6 Schéma du modèle de la turbine.

II.3. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

II.3.1. 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.

II.3.2 Modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation [Abo 08] [Arm 06], [Joi 03], [Phi 06]

Le stator de la machine est constitué de trois enroulements 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 de pulsation $(\omega_r = 2\pi f_r)$, et séparés d'un angle électrique de $(2\pi/3)$. la figure II.7 représente la schématisation des enroulements du stator et rotor.

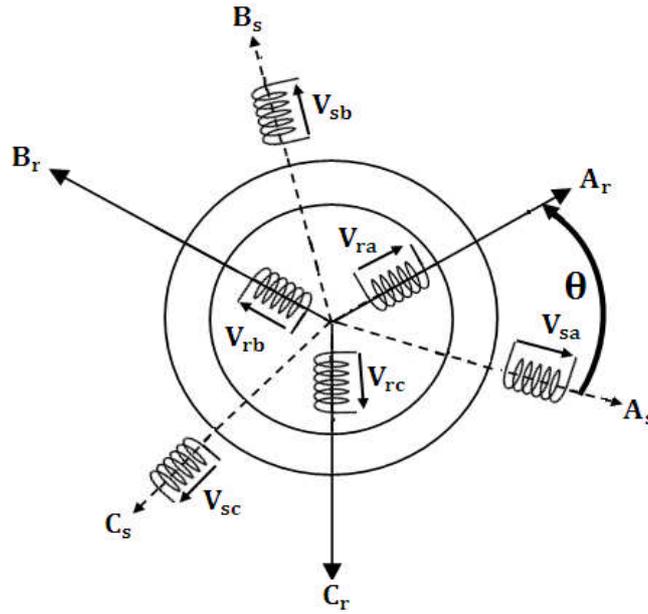


Fig. II.7 Représentation schématique de la MADA.

a / Les équations électriques :

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

$$V = RI + \frac{d\varphi}{dt} \quad (II.14)$$

Pour les phases statoriques, on a :

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s I_{sa} + \frac{d\varphi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} = R_s I_{sb} + \frac{d\varphi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} = R_s I_{sc} + \frac{d\varphi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (II.15)$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + d/dt \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad (II.16)$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} ; \quad [I_s] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} ; \quad [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} ; \quad [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

Donc l'équation générale du stator est :

$$[V_s]=[R_s][I_s] + d/dt[\varphi_s] \quad (II .17)$$

Pour les phases rotoriques

$$\begin{cases} V_{ra} = R_r I_{ra} + \frac{d\varphi_{ra}}{dt} \\ V_{rb} = R_r I_{rb} + \frac{d\varphi_{rb}}{dt} \\ V_{rc} = R_r I_{rc} + \frac{d\varphi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad (II. 18)$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + d/dt \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} \quad (II .19)$$

Avec :

$$[V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} ; [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} ; [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} ; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Donc l'équation générale du rotor est :

$$[V_r]=[R_r][I_r] + d/dt[\varphi_r] \quad (II .20)$$

b/Les équations magnétiques :

Les équations magnétiques de la MADA sont données par :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s] \end{cases} \quad (II .21)$$

Avec :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} ; [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}]^t = [M_{rs}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$[M_{sr}]$: matrice d'inductances mutuelles du couplage stator – rotor

D'après les relations précédentes, on aura :

$$\begin{bmatrix} [\varphi_s] \\ [\varphi_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad (\text{II .22})$$

Finalement :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + d/dt[[L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r]] \\ [V_r] = [R_r][I_r] + d/dt[[L_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s]] \end{cases} \quad (\text{II .23})$$

c/Equation mécanique :

L'équation mécanique est donnée par l'expression suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f\Omega \quad (\text{II.24})$$

II.3.3 Transformation de Park [Kha 09] [Che 10]

La transformation de Park consiste à transformer le système triphasé équilibré (abc) en un système d'axes biphasé tournant (d-q) orthogonaux équivalents, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système.

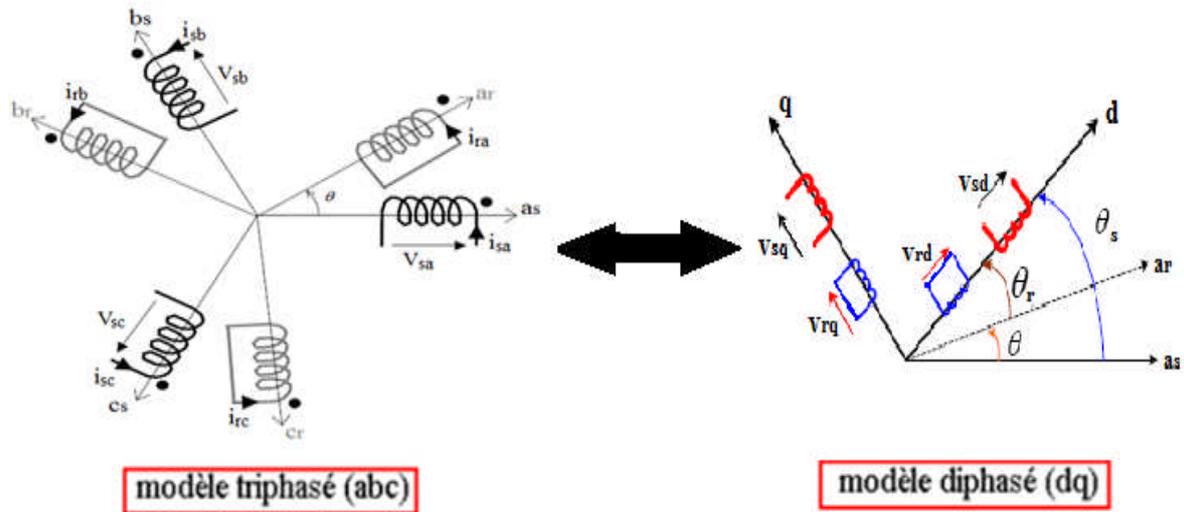


Fig. II.8 Modèle de PARK de la MADA.

La matrice de Park est définie come suite

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{II.25}$$

Et la matrice inverse de Park

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{II.26}$$

II.3.4 Application de la transformation de Park à la MADA

- **Equation électrique de la MADA dans le repère (d-q)**

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

$$\begin{cases} V_d = RI + \frac{d\varphi_d}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \varphi_q \\ V_q = RI_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \varphi_d \\ V_0 = RI_0 + \frac{d\varphi_0}{dt} \end{cases} \quad \text{II.27}$$

La composante homopolaire du système (II.27) est nulle car on a un système équilibré.

Le système d'équation pour le stator et le rotor et de forme suivante :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{rd} \end{cases} \quad \text{II.28}$$

- **Equation magnétique de la MADA dans le repère (d-q)**

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad \text{II.29}$$

Avec :

$L_s = l_s - M_s$: Inductance cyclique statoriques de la machine ;

$L_r = l_r - M_r$: Inductance cyclique rotorique de la machine ;

$M = \frac{3}{2} M_{sr}$: Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor de la machine ;

A partir des équations des flux (II.29), on tire les expressions des courants :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\varphi_{ds}}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = \frac{\varphi_{qs}}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ I_{dr} = \frac{\varphi_{dr}}{L_r} - \frac{M}{L_r} I_{ds} \\ I_{qr} = \frac{\varphi_{qr}}{L_r} - \frac{M}{L_r} I_{qs} \end{cases} \quad \text{II.30}$$

Les puissances statoriques active et réactive sont données par :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad \text{II.31}$$

• **Équation de couple**

$$C_{em} = P \frac{M}{L_s} (\varphi_{qs} I_{dr} - \varphi_{ds} I_{qr}) \quad \text{II.32}$$

Avec :

P : nombre de paires de pôles

II.3.5 Choix du référentiel [Bag 09], [Aza 08]

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.

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

1- Référentiel lié au stator

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

$$\begin{cases} \frac{d\theta_s}{dt} = 0 \\ \frac{d\theta_r}{dt} = -\omega_m \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} + \omega_m \varphi_{dr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} - \omega_m \varphi_{dr} \end{cases} \quad \text{II.33}$$

2- Référentiel lié au rotor

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

$$\begin{cases} \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \\ \frac{d\theta_r}{dt} = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad \text{II.34}$$

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.

$$\begin{cases} \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \\ \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega_m \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_m) \phi_{dr} \end{cases} \quad \text{II.35}$$

II.4 Modélisation du convertisseur de puissance [Lar 05], [Bag 09]

Dans cette partie, on modélisera les convertisseurs qui interviennent dans la chaîne de conversion éolienne (le redresseur et l'onduleur MLI).

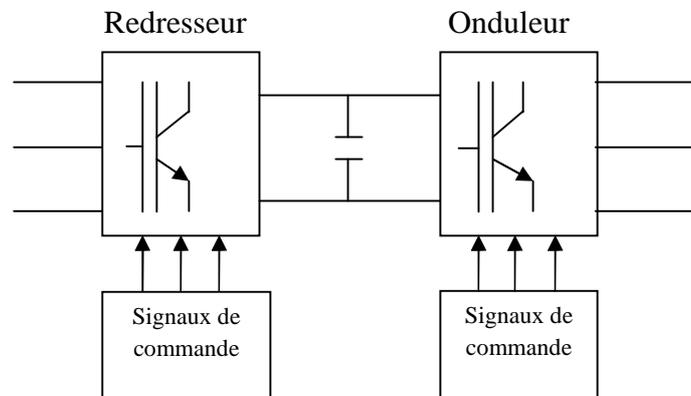


Fig. II. 9 Redresseur et onduleur MLI.

Le redresseur et l'onduleur sont tous les deux formés de trois bras composés chacun de deux cellules de commutation. Chaque cellule de commutation est composée d'un élément semi-conducteur commandé et d'une diode antiparallèle.

Du fait que les constantes de temps des machines et des régulateurs sont très grandes devant le temps de transition d'un état à l'autre des composants semi-conducteurs, on peut faciliter la tâche et réduire le temps de simulation en modélisant les convertisseurs par un ensemble d'interrupteurs idéaux : les durées de commutation sont négligeables, la chute de tension produite est supposée nulle lorsqu'ils conduisent et les courants qui les traversent sont nuls lorsqu'ils sont bloqués.

II.4.1 L'onduleur

L'onduleur de tension réalise l'interface entre deux types de source : la première est une source de courant (coté alternatif), la deuxième est une source de tension (coté continu).

L'onduleur de tension utilisé, est composé de six interrupteurs, répartis d'une façon symétrique sur trois bras commandés à la fermeture et à l'ouverture, avec des diodes en antiparallèle comme le montre la figure II.10

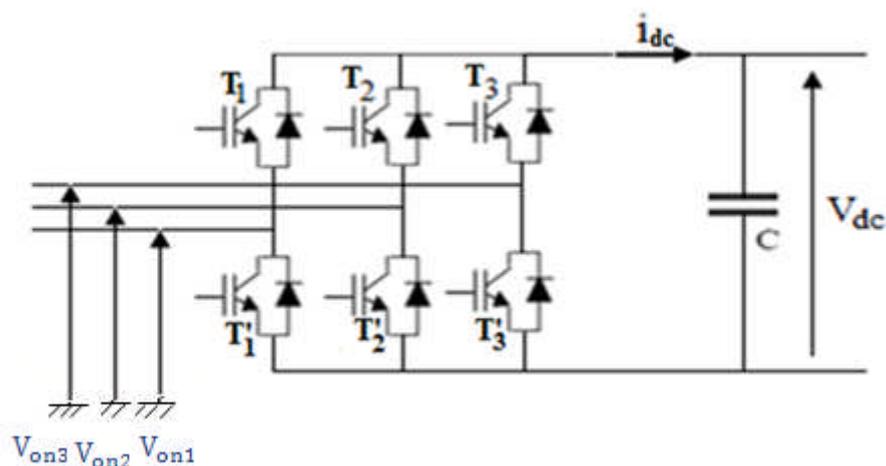


Fig. II.10 Onduleur MLI

On pose les fonctions logiques suivantes :

$$S_i = \begin{cases} 1 & \text{si } T_i \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si } T_i \text{ est ouvert} \end{cases}$$

$$S'_i = \begin{cases} 1 & \text{si } T'_i \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si } T'_i \text{ est ouvert} \end{cases}$$

L'onduleur est modélisé en associant à chaque bras une fonction F_i avec ($i=1, 2,3$) tel que :

$$F_i = (S_i - S'_i) = \begin{cases} +1 & \text{si } S_i = 1 (S'_i = 0) \\ -1 & \text{si } S_i = 0 (S'_i = 1) \end{cases}$$

Les tensions simples v_{on1} , v_{on2} et v_{on3} sont exprimées par la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{on1} \\ V_{on2} \\ V_{on3} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \tag{II. 36}$$

F_1, F_2, F_3 :Sont les fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur ;

II.4.2 Le Redresseur

Les redresseurs MLI sont des onduleurs utilisés "à l'envers" qui permettent de produire une tension continue à partir d'un réseau alternatif.

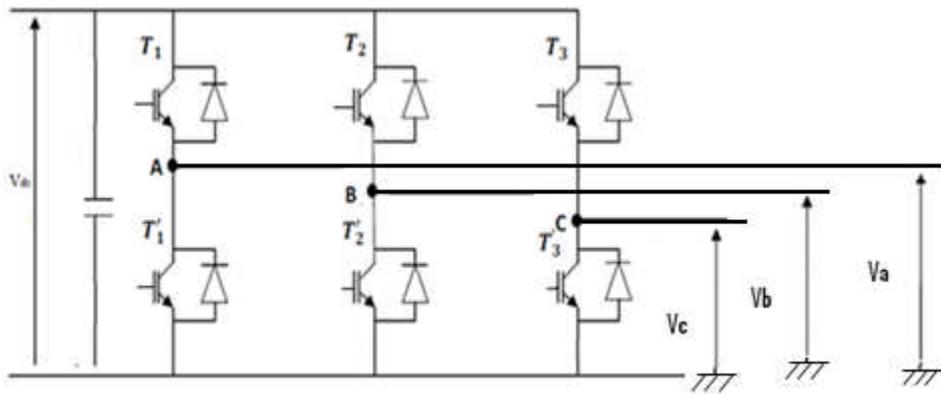


Fig. II.11 Redresseur MLI

Le redresseur MLI est modélisé par la matrice de connexion suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \cdot \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F'_1 \\ F'_2 \\ F'_3 \end{bmatrix} \tag{II. 38}$$

$$I_{dc} = F'_1 \cdot I_a + F'_2 \cdot I_b + F'_3 \cdot I_c$$

II. 39

Avec :

- v_{dc} : Tension redressée.
- I_{dc} : Courant redressé.
- F'_1, F'_2, F'_3 : fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur.

II.4.4 Modélisation du bus continu

L'évolution temporelle de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif :

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} I_c$$

II. 40

Donc la tension du bus continue est égale à l'intégration du courant capacitif sur la capacité du bus continu, ainsi son expression s'écrira comme suit :

$$V_{dc} = \int \frac{1}{C} I_c dt$$

II. 41

Le courant du condensateur est issu d'un nœud où circulent deux courants modulés par chaque convertisseur comme le montre la figure ci-dessous :

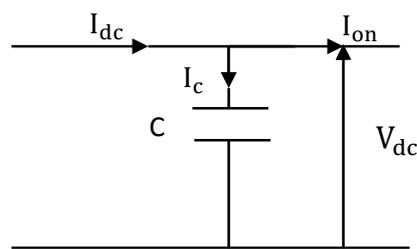


Fig.II .15 Courants circulant dans le bus continu

$$I_c = I_{dc} - I_{on}$$

II. 42

avec

$$I_{dc} = F'_1 I_a + F'_2 I_b + F'_3 I_c$$

- I_a, I_b, I_c : sont les courants du coté génératrice.

II.5 Modélisation de la batterie

$$V_{\text{déch}} = E_0 - R_b \frac{Q}{Q - it} + \text{Laplace}^{-1} \frac{\text{Exp}(s)}{\text{Sel}(s)} \quad \text{II. 43}$$

La tension de charge est donnée par l'équation suivante :

$$V_{\text{char}} = E_0 - R_b \frac{Q}{Q - it} + \text{Laplace}^{-1} \left(\frac{\text{Exp}(s)}{\text{Sel}(s)} \cdot \frac{1}{s} \right) \quad \text{II. 44}$$

Avec :

$$\frac{\text{Exp}(s)}{\text{Sel}(s)} = \frac{a}{\frac{1}{(b \cdot i(t))^{s+1}}} \quad \text{II. 45}$$

L'état de charge (Soc) est donné par l'équation suivante :

$$\text{Soc} = \left(1 - \frac{\int i \cdot dt}{Q} \right) \cdot 100 \quad \text{II. 46}$$

$V_{\text{char}}, V_{\text{déch}}$: représentent la tension instantanée de la batterie respectivement lorsque la batterie se charge ou se décharge (V).

E_0 : f.e.m de la batterie (V).

R_b : représente la résistance interne (Ω).

a et b : sont des paramètres qui dépendent de la batterie

Q : Capacité de batterie (Ah).

Soc : l'état de charge de la batterie.

II.6 Conclusion

Nous avons donné dans ce chapitre une modélisation de la partie mécanique de l'éolienne prenant en compte les caractéristiques du profil de pales utilisées et l'angle de calage de celle-ci. par la suite nous avons modélisé l'ensemble de la partie mécanique incluant le multiplicateur, permettant l'interconnexion avec une génératrice (GADA) vers la fin nous avons modélisé la batterie de stockage ces accessoire est fait la modélisation de partie générateur et nous allons maintenant nous intéresser à l'étude du fonctionnement global du

système de conversion d'énergie éolienne dans le cas d'un aérogénérateur autonome, ce qui fera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre III
Commande du système
proposé

III.1 Introduction

Dans les applications industrielles des entraînements à vitesse variable, la machine à induction est utilisée, vue sa robustesse et son faible coût de fabrication, mais sa commande reste plus complexe, car son modèle mathématique est non linéaire et fortement couplé.

Ce chapitre présente le principe du fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation dans une éolienne à vitesse variable, avec le contrôle des puissances active et réactive statoriques tout en alimentant les enroulements rotoriques via un convertisseur d'électronique de puissance indirecte.

III.2 Stratégie de commande de la machine asynchrone à double alimentation

Pour pouvoir tourner à une vitesse optimale, pour une vitesse de vent donnée, la turbine doit avoir un couple mécanique résistant donné, c'est-à-dire une puissance active débitée par la MADA. C'est en utilisant cette référence de puissances active et réactive que la machine peut être alors commandée. Le modèle de la turbine associé au modèle de la MADA nous a permis de déterminer, pour chaque vitesse de vent la puissance que devait générer la MADA pour permettre à l'éolienne de tourner à vitesse optimale. Les différentes stratégies de commande de la MADA reposent sur une commande de puissance en boucle fermée cette approche est nécessaire lorsque la machine est reliée à la charge.

III.3 Schéma de commande

La figure (III-1) représente le schéma de principe de la commande en puissance proposée de la machine asynchrone à double alimentation. La consigne de puissance active correspond à la puissance maximale extraite du vent.

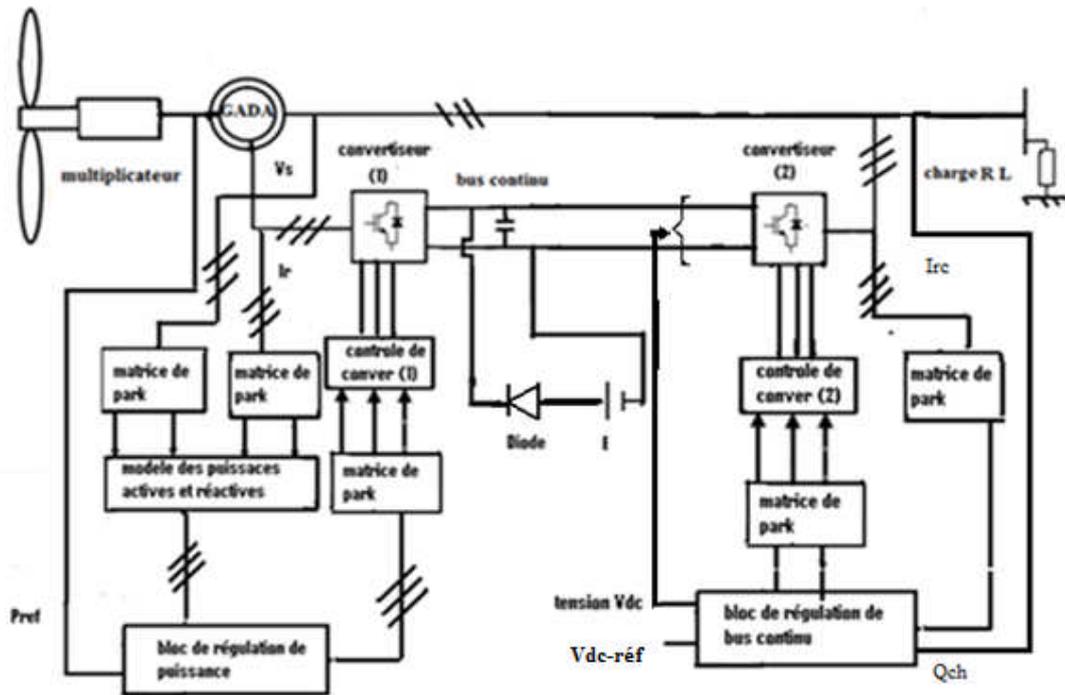


Fig. III-1 Schéma de principe de la commande en puissance de la MADA.

III.4 Choix du référentiel pour le modèle de Park [Cha10]

En considérant les équations électriques de la machine asynchrone à double alimentation suivantes :

a- Equations électriques

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_r \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad \text{III.1}$$

b- Equations magnétiques

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad \text{III.2}$$

c-Equation mécanique

D'après la loi fondamentale de la dynamique nous écrire

$$C_{em} = C_r + f\Omega_{mé} + J \frac{d\Omega_{mé}}{dt} \quad \text{III.3}$$

Avec l'expression du couple électromagnétique en fonction des flux statoriques et courant rotoriques

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (\varphi_{qs} I_{dr} - \varphi_{ds} I_{qr}) \quad \text{III.4}$$

P : nombre de paire de pôles.

En choisissant un référentiel diphasé 'd-q' lié au champ tournant, et en alignant le vecteur flux statoriques φ_s avec l'axe 'q', nous pouvons écrire :

$$\varphi_{ds} = 0 : \varphi_{qs} = \varphi_s$$

Dans l'hypothèse où le flux φ_{qs} est maintenu constant le choix de ce repère rend le couple électromagnétique produit par la machine, par conséquent la puissance active, uniquement dépendants du courant rotorique d'axe d.

Dans le repère triphasé (a, b, c) la tension aux bornes d'une phase 'n' du stator s'exprime par la relation générale :

$$v_{sn} = R_s I_{sn} + \frac{d\varphi_{sn}}{dt} \quad \text{III.5}$$

Si l'on néglige la résistance du bobinage statoriques R_s . Ce qui est une hypothèse assez réaliste pour les machines de moyenne et forte puissance utilisées dans les systèmes éoliens, cette relation devient :

$$v_{sn} = \frac{d\varphi_{sn}}{dt} \quad \text{III.6}$$

La relation III.6 montre qu'un repère lié au flux statoriques tourne alors à la même vitesse angulaire que le vecteur tension statoriques et qu'il est en avance de $\pi/2$ sur ce même vecteur.

On peut alors écrire (toujours dans l'hypothèse d'un flux statoriques constant) :

$$v_{ds} = v_s \text{ et } v_{qs} = 0 \quad \text{III. 7}$$

En s'alignant sur le repère choisi et en utilisant les simplifications ci-dessus inhérentes à ce repère, nous pouvons simplifier les équations des tensions et des flux statoriques comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds} = V_s = -\omega_s \varphi_s \\ V_{qs} = 0 \end{cases} \quad \text{III. 8}$$

$$\begin{cases} 0 = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_r I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad \text{III. 9}$$

A partir de l'équation III.10, nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{cases} I_{ds} = -\frac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad \text{III. 10}$$

III.5 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques

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

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \\ P_r = V_{dr} I_{dr} + V_{qr} I_{qr} \\ Q_r = V_{qr} I_{dr} - V_{dr} I_{qr} \end{cases} \quad \text{III. 11}$$

L'adaptation de ces équations au système d'axes choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas ($V_{qs} = 0$), nous conduit à :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} \\ Q_s = -V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad \text{III. 12}$$

En remplaçant i_{ds} et i_{qs} par leurs expressions données par l'équation III.10, nous obtenons celles des puissances active et réactive :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ Q_s = -V_s \frac{\varphi_s}{L_s} + \frac{V_s M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad \text{III. 13}$$

En approximant φ_s par $\frac{V_s}{\omega_s}$, l'expression de la puissance réactive Q_s devient alors :

$$Q_s = -\frac{V_s^2}{L_s \omega_s} + \frac{V_s}{L_s} I_{qr} \quad \text{III. 14}$$

Compte tenu du repère choisi, des approximations faites et si l'on considère l'inductance magnétique M comme constante, le système ainsi obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe 'd' à une constante $\frac{V_s^2}{L_s \omega_s}$

III.6 Relations entre tension rotoriques et courants rotoriques

Exprimons d'abord les flux rotoriques d'après les équations III.2 en remplaçant les courants statoriques par leur expression dans l'équation III.11 :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} \\ \varphi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad \text{III.15}$$

Ces expressions des flux rotorique d'axe d et q sont alors intégrées aux expressions des tensions rotoriques diphasées de l'équation III.1, nous obtenons alors :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{qr}}{dt} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} \end{cases} \quad \text{III. 16}$$

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

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} + g\omega_s \frac{MV_s}{\omega_s L_s} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} \end{cases} \quad \text{III.17}$$

V_{dr} et V_{qr} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques désirés. L'influence des termes de couplage entre les deux axes en $\left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$ est minime. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser.

En revanche, le terme $g\omega_s \frac{MV_s}{\omega_s L_s}$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car elle entraîne une erreur de traînage.

Les équations III.13, III.15 et III.16 permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler Fig.III.2

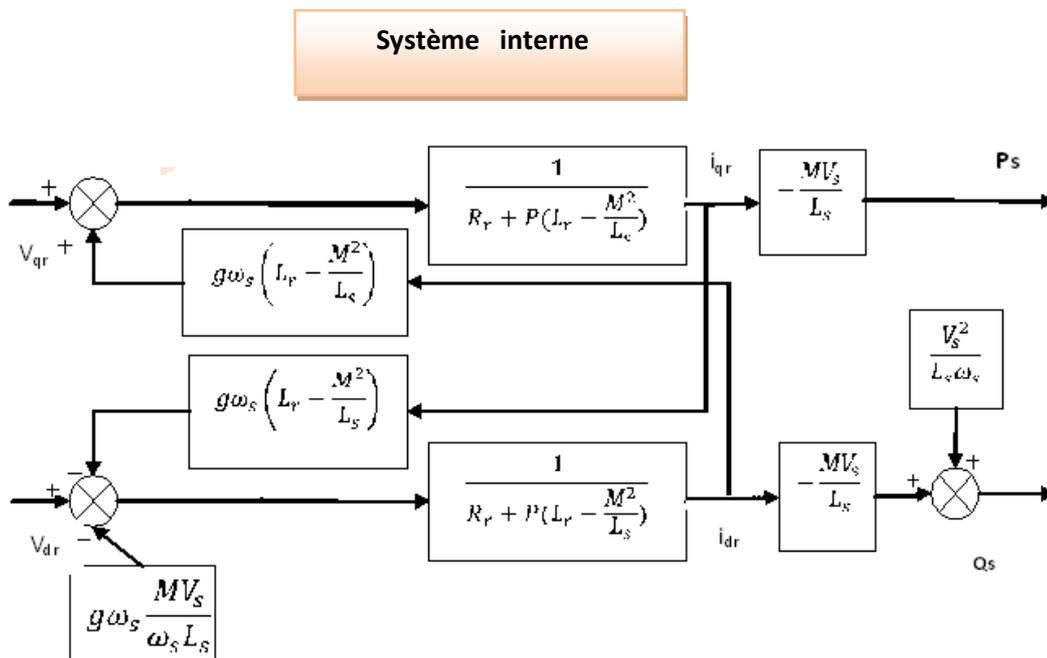


Fig. III.2 Schéma bloc du système à réguler.

Ce schéma fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactive statoriques. Il montre également que nous pouvons mettre en place une commande vectorielle étant donné

qu'à l'influence des couplages près, chaque axe peut être commandé indépendamment, avec chacun son propre régulateur. Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe q rotorique et la puissance active 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 la charge. La consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal.

III.7 Convertisseurs côté charge

Ce convertisseur permet d'assurer une régulation de la tension du bus continu, et le réglage de puissance réactive.

L'objectif de sa commande est de maintenir la tension du bus continu constante tout en absorbant un courant qui doit être le plus sinusoïdal possible, avec la possibilité de réglage du facteur de puissance côté charge.

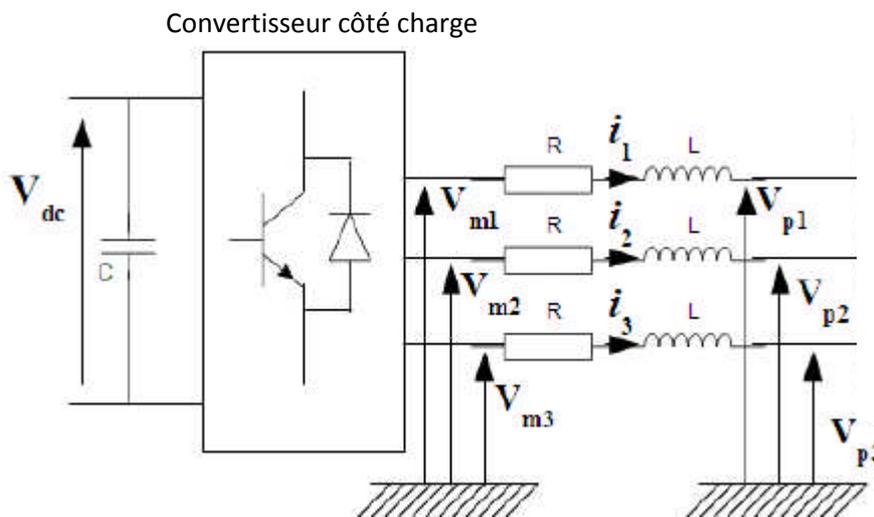


Fig.III.3 Schéma du Convertisseur côté la charge et du filtre

Le convertisseur côté la charge est bidirectionnel. Il fonctionne en redresseur lorsque le glissement (g) est positif (mode hyposynchrone) et en onduleur lorsque le glissement est négatif (mode hypersynchrone). Le convertisseur côté la charge est commandé tel que la puissance active et la puissance réactive côté charge s'écrivent comme suit [bel.10]

$$\begin{cases} P = 1.5 U_m I_d \\ Q = -1.5 U_m I_q \end{cases} \quad \text{III.18}$$

Avec U_m : L'amplitude de la tension de phase.

Le contrôle de la tension du bus cc permet d'avoir la référence de la puissance active. Aussi, le facteur de puissance côté la charge peut être réglé par l'intermédiaire de la puissance réactive. La figure(III.4) représente le schéma bloc de régulation du bus continu.

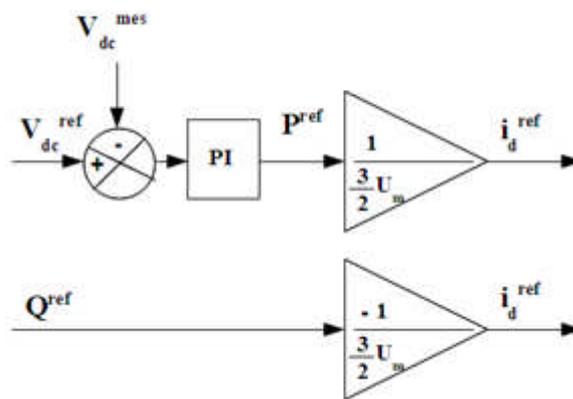


Fig.III.4 Schéma de principe du bus cc

III.7.1 COMMANDE DU COURANT

En appliquant la loi des mailles, la tension du filtre s'écrit sous forme matricielle [bel.10]

$$\begin{pmatrix} V_{m1} \\ V_{m2} \\ V_{m3} \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{p1} \\ V_{p2} \\ V_{p3} \end{pmatrix} \quad \text{III.19}$$

En appliquant la transformation de Park à l'équation (III.19), on obtient la relation (III.20)

$$\begin{cases} V_{md} = RI_d + L \frac{dI_d}{dt} - L \omega_s I_q + V_{pd} \\ V_{mq} = RI_q + L \frac{dI_q}{dt} + L \omega_s I_d + V_{pq} \end{cases} \quad \text{III.20}$$

Avec :

Les tensions de couplage e_d et e_q s'écrivent comme suit :

$$\begin{pmatrix} V_{pd} \\ V_{pq} \end{pmatrix} = [P(\theta)] \begin{pmatrix} V_{p1} \\ V_{p2} \\ V_{p3} \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} V_{md} \\ V_{mq} \end{pmatrix} = [P(\theta)] \begin{pmatrix} V_{m1} \\ V_{m2} \\ V_{m3} \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} I_d \\ I_q \end{pmatrix} = [P(\theta)] \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix}$$

$[P(\theta)]$: Matrice de park.

$$\begin{cases} e_d = L\omega_s I_d \\ e_q = L\omega_s I_q \end{cases} \quad \text{III. 21}$$

En posant:

$$\begin{cases} V_{bd} = V_{md} - e_q - V_{pd} \\ V_{bq} = V_{md} - e_d - V_{pd} \end{cases} \quad \text{III. 22}$$

Les relations (III.20), (III.21) et (III.22) nous permettent d'écrire :

La fonction de transfert du filtre est alors

$$\begin{cases} V_{bd} = RI_d + L \frac{dI_d}{dt} \\ V_{bq} = RI_q + L \frac{dI_q}{dt} \end{cases} \quad \text{III. 23}$$

$$\begin{cases} F(S) = \frac{I_d(S)}{V_{bd}(S)} = \frac{1}{R + sL} \\ F(S) = \frac{I_q(S)}{V_{bq}(S)} = \frac{1}{R + sL} \end{cases} \quad \text{III. 24}$$

Le schéma de contrôle du courant est illustré à la figure (III.5):

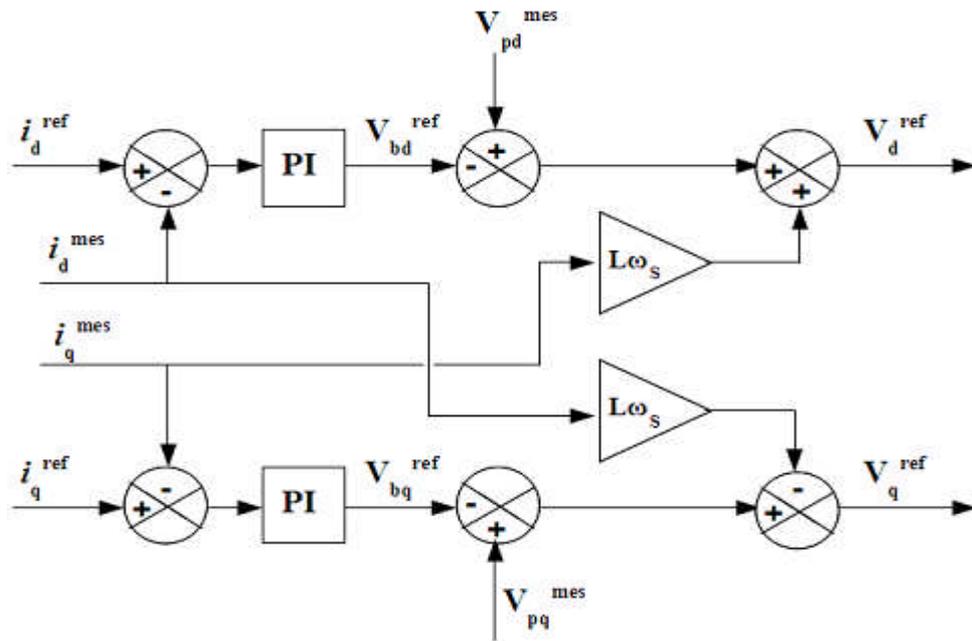


Fig.III.5 Schéma de principe du contrôle du courant

Conclusion

Dans le but d'établir une commande en puissance, de la génératrice et de maîtriser le fonctionnement du système à la sortie pour mieux alimenter les charges exigées un modèle adéquat à été établi, ce lui ci permettant le contrôle des puissances active et réactive statorique ainsi que de maintenir l'amplitude et la fréquence de la tension alimentant la charge.

Le modèle élaboré dans cette partie sera exploité et dans le prochaine chapitre

Chapitre IV

Simulation et interprétation

IV.1 introduction

Dans ce chapitre, les résultats de simulation de système de conversion déjà présenté et modélisé sont présentés et interprétés en vue de montrer l'efficacité et les performances de la commande appliquée.

IV.2 Résultats de simulation

Notre système est constitué d'une machine asynchrone à double alimentation fonctionnant en autonome (le générateur débite sur une charge triphasée équilibrée), alors que le rotor est alimenté par l'intermédiaire d'un convertisseur statique (redresseur MLI, filtre, onduleur MLI), et ce dispositif d'électronique de puissance qui permet la réversibilité du transfert de l'énergie entre le nœud charge, stator et le rotor.

Les résultats de simulation sous MATLAB SIMULINK du modèle du système proposé sont montrés sur les figures ci-dessous. Ces résultats sont obtenus pour le modèle d'une machine asynchrone à double alimentation, de puissance 1,5 MW, commandée en puissance, l'éolienne est représentée comme source de vitesse variable.

Pour récapituler le fonctionnement du système, la simulation est répartie en deux phases :

A / Influence du régime de fonctionnement

En faisant varier le profil du vent d'une manière à faire fonctionner notre génératrice dans ces trois modes, hyposynchrone, synchronisme et l'hypersynchrone.

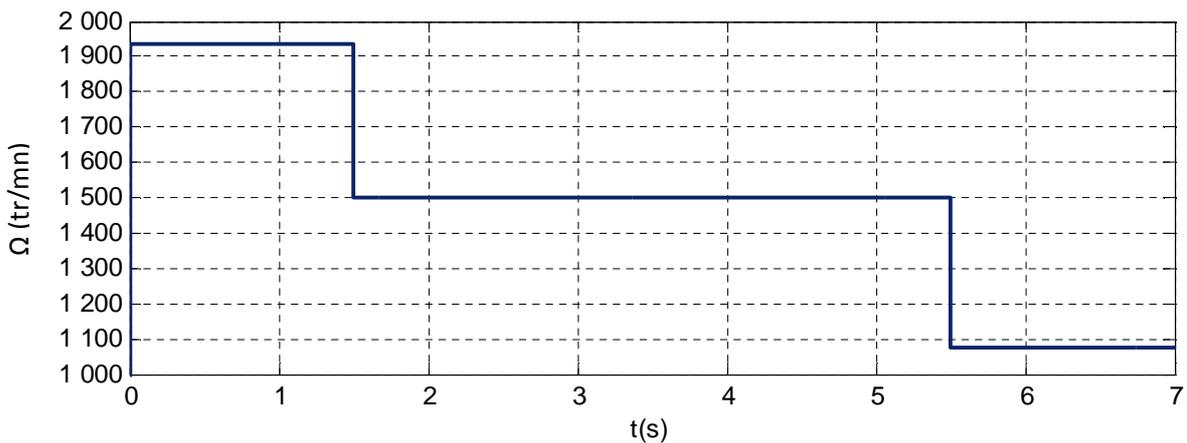


Fig.IV.1 Le profil de vitesse d'entraînement.

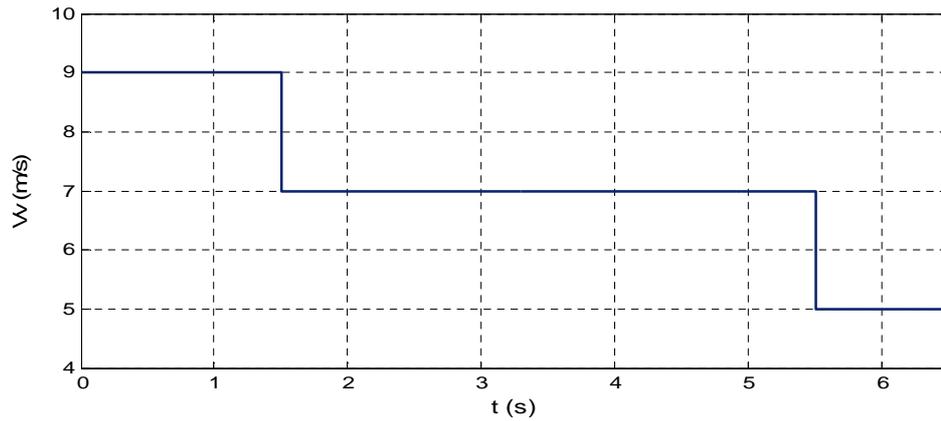


Fig.IV.2 Vitesse du vent.

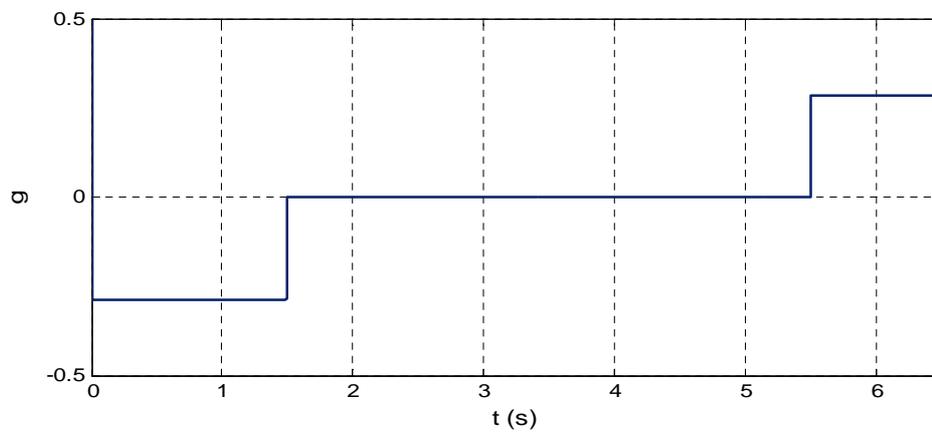


Fig.IV.3 L'allure du glissement.

Le profil du vent imposé, Fig. IV.2, nous permet de balayer les trois régimes de fonctionnement de la MADA comme l'indique la forme de la vitesse de rotation ou du glissement de la génératrice, Fig. IV.1 et Fig. IV.3.

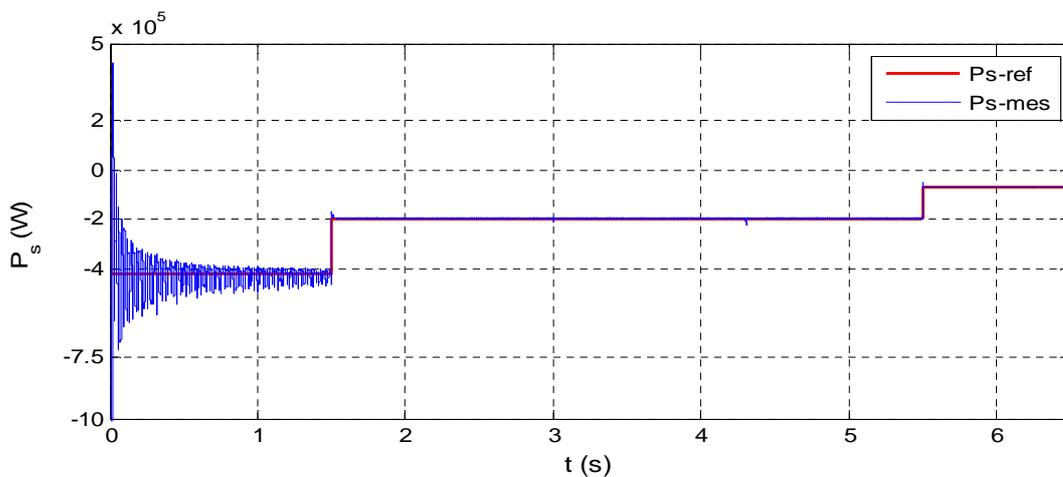


Fig.IV.4 L'allure de la puissance active statorique

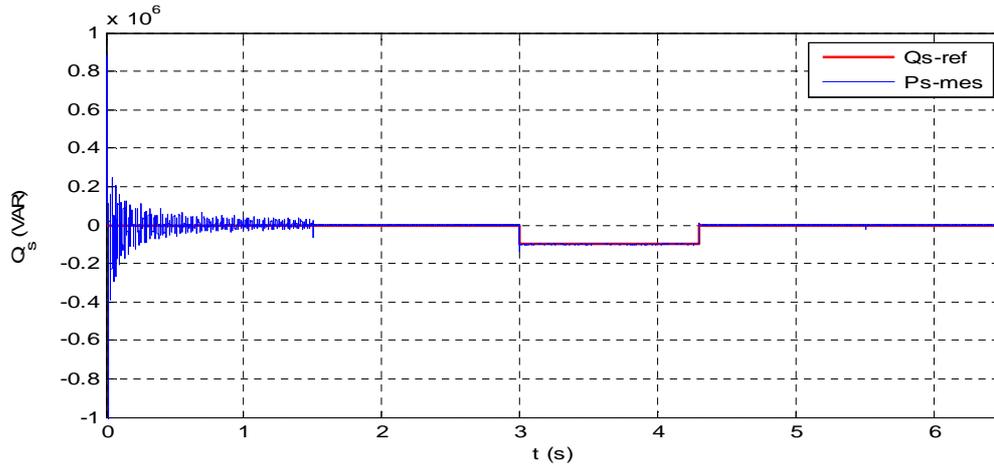


Fig.IV.5 L'allure de la puissance réactive statorique

Les figures (IV.4) et (IV.5) montrent la poursuite de référence pour les deux puissances active et réactive statoriques de la MADA, la puissance active et de signe négatif, cela justifie que le stator génère de la puissance active quelque soit la valeur ou le signe du glissement, comme on peut remarquer que Q_s est choisie d'une manière à justifier la poursuite de sa consigne, sinon on peut fixer le facteur de puissance statorique à l'unité ($Q_s = 0$).

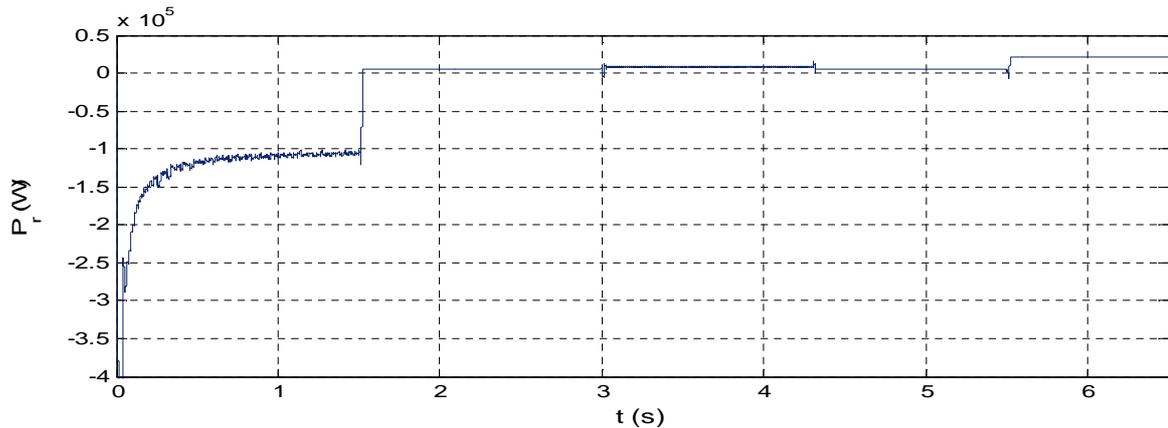


Fig.IV.6 L'allure de la puissance active rotorique

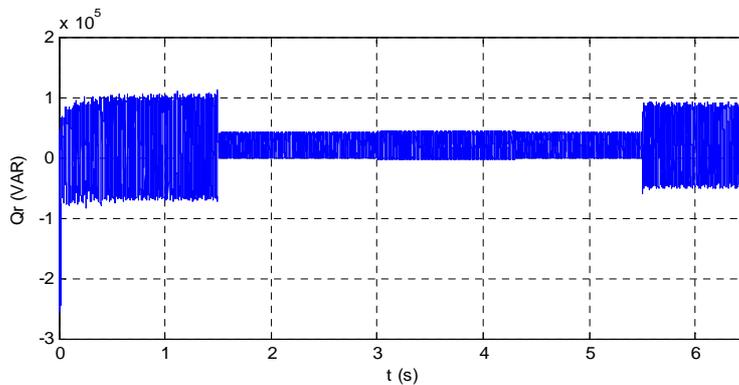


Fig.IV.7 L'allure de la puissance réactive rotorique

Les puissances active et réactive rotoriques sont données sur les figures (IV.6) et (IV.7), respectivement. Le signe de la puissance active dépend du glissement, ce qui représente les deux régimes (hyposynchrone et hypersynchrone) par contre la puissance réactive qui est nul pour le cas ou ($g = 0$) explique que les grandeurs rotoriques sont continues (régime synchrone, $f = 0$).

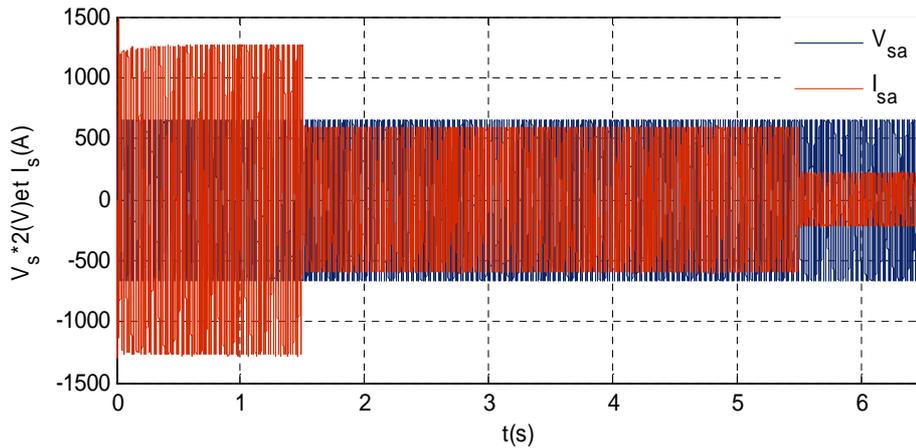


Fig.IV.8 L'allure du courant et de la tension statorique

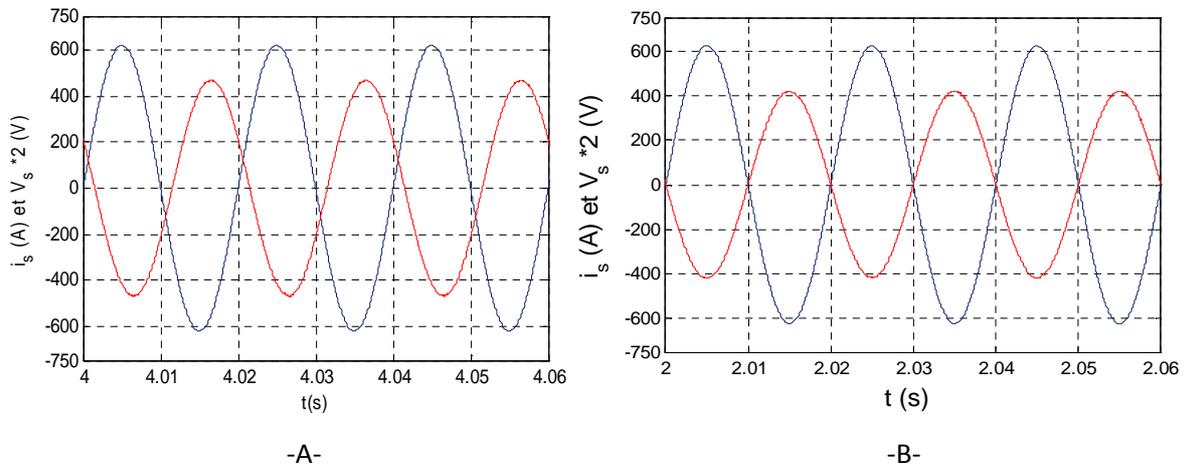


Fig.IV.9 Zoom de l'allure du courant et de la tension d'une phase statorique

La variation de la puissance réactive statorique influe directement sur le facteur de puissance statorique comme l'indique le zoom de la figure (IV.9)-A.

La figure (IV.10) représente l'allure de la tension de bus continu qui suit parfaitement sa consigne, pour les différents régimes de fonctionnement de la machine (n'est pas affectée par la variation de la vitesse) ce qui justifie l'importance de la commande de deuxième convertisseur, dont l'objectif est d'imposer la tension de la charge à une valeur constante, $V=220V$.

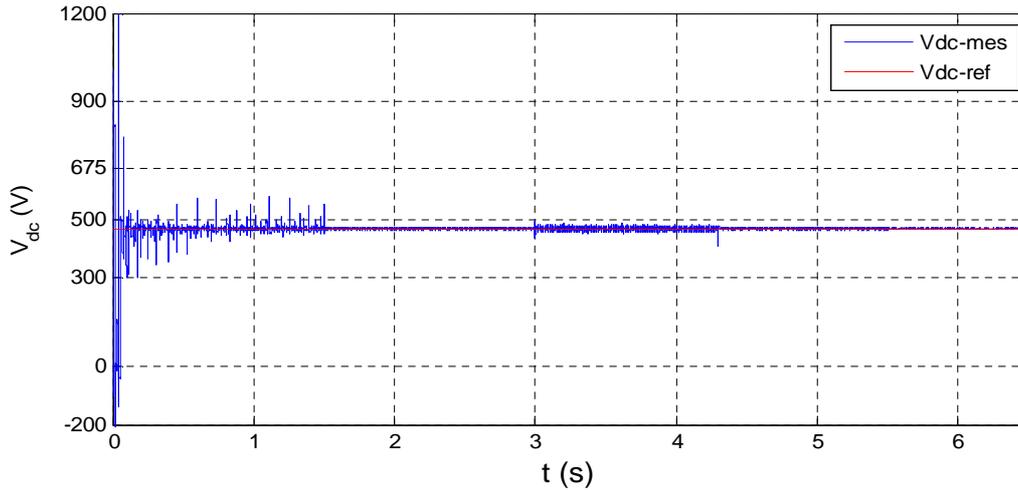


Fig.III.10 L'allure de la tension du bus continu

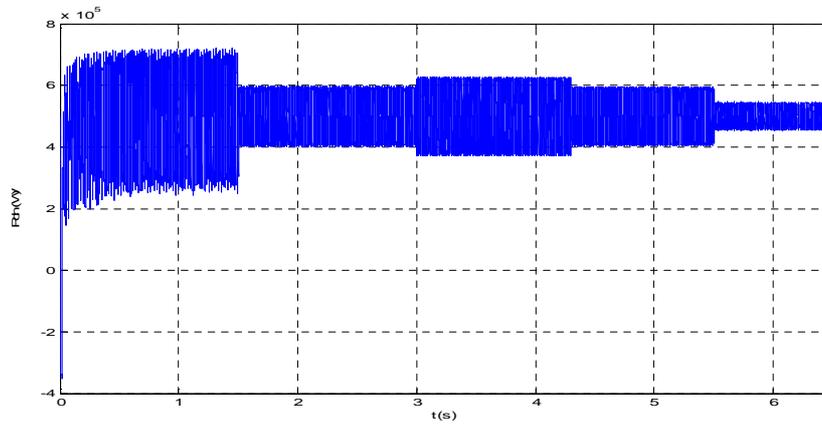


Fig.IV.11 L'allure de la puissance active de la charge

Les puissances active et réactive (P_{ch} et Q_{ch}) mises en jeu dans la charge sont données par les figures suivantes ; Fig (IV.11) et (IV.12), justifiant ainsi ce qui est annoncé par les allures de la tension et du courant de charge (V_{ch} et I_{ch}), Fig (IV.13)-A et (IV.13)-B, de plus l'amplitude de la tension ainsi que sa fréquence restent constantes ce qui montre que ne sont pas affectés par la variation de la vitesse.

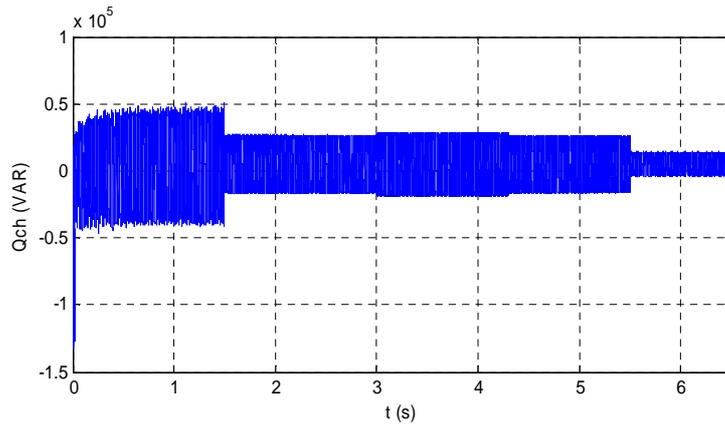
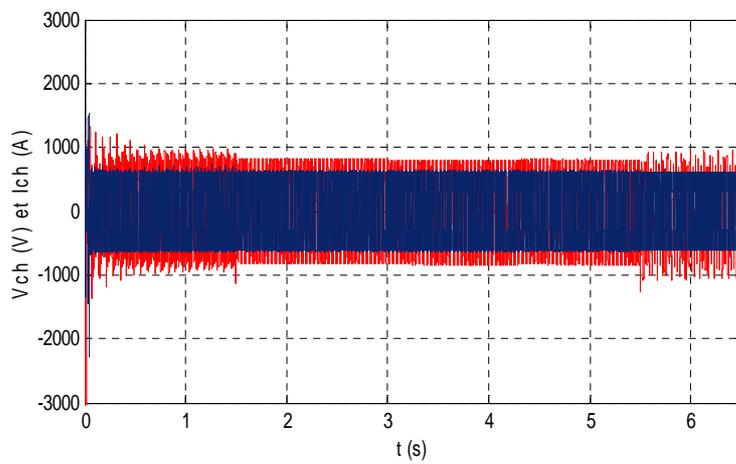
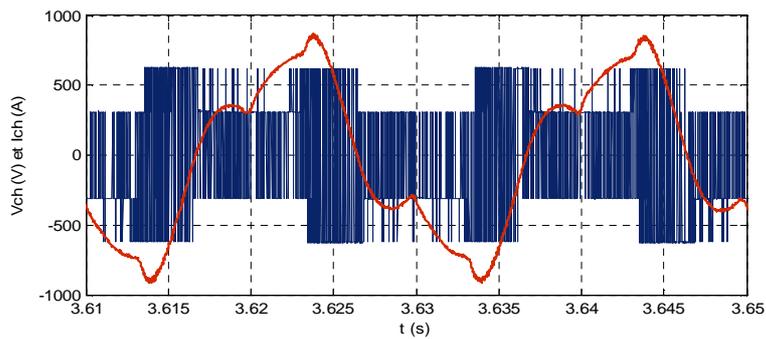


Fig.IV.12 L'allure de la puissance réactive de la charge



-A-



-B-

Fig.IV.13 L'allure de la tension et de courant d'une phase de la charge avec un zoom

B / Influence de variation de la charge

Pour déterminer les performance de notre système, en faisant varier la charge sous les différents modes de fonctionnement de la génératrice, en se basant sur l'application de la

commande en puissance, pour chaque palier de vitesse (régime de fonctionnement) on applique trois charges, initialement la valeur de la charge est [R=10 Ω et L=50 mH] puis [R=1 Ω et L=10mH] et enfin [R=0.5 L=5mH]. La valeur de la tension de bus continu est fixé à $V_{dc-ref} = 480$ V.

B.1 Régime hypersynchrone

Commençant par un entraînement en régime hypersynchrone. Les différents résultats sont présentés ci-dessous. Les puissances actives statorique et rotorique sont fournées à la charge, où la puissance rotorique qui a un signe négatif justifiant ainsi qu'elle est débitée par la génératrice, de plus leurs amplitudes dépendent de la variation de cette charge ; c'est-à-dire, que l'augmentation de la charge, Fig. IV.14, engendre la variation des deux puissances comme le montre les figure (IV.14) et (IV.15), respectivement. Le régime hypersynchrone est confirmé par $Pr < 0$.

Pour les puissances active et réactive statoriques, Fig (IV.15) et (IV.16), illustrent une poursuite parfaite de la consigne.

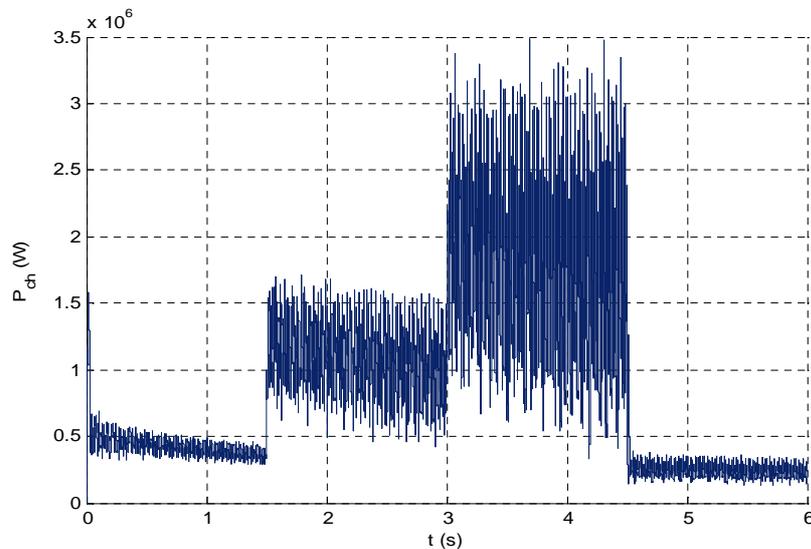


Fig.IV.14 L'allure de la puissance active de la charge

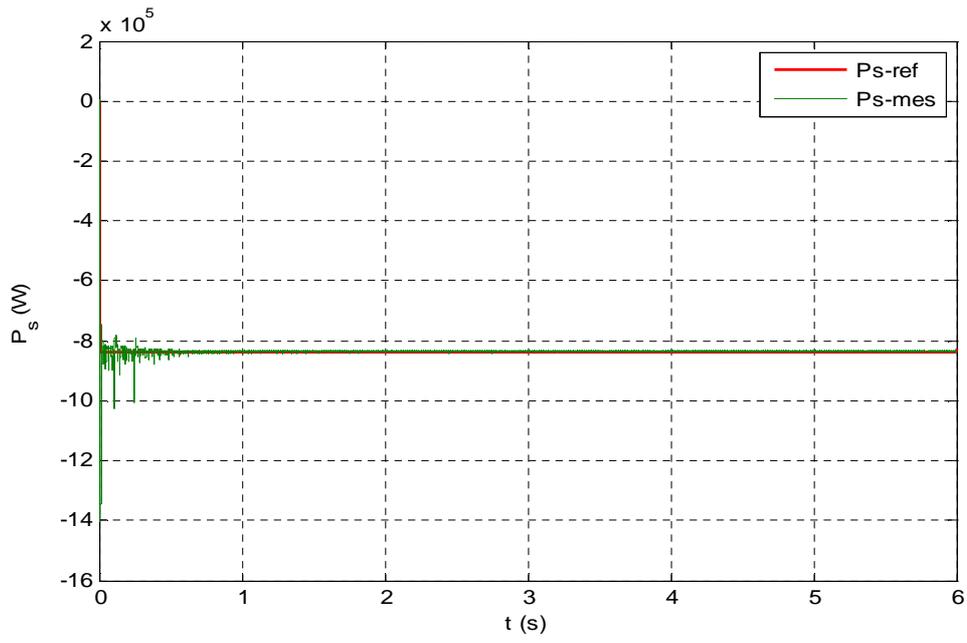


Fig.IV.15 L'allure de la puissance active statorique

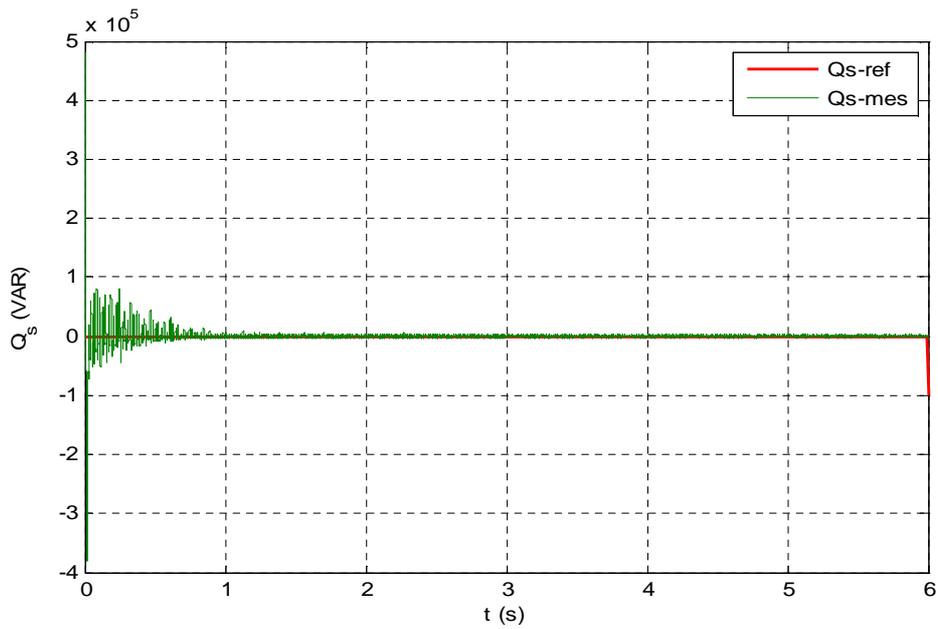


Fig.IV.16 L'allure de la puissance réactive statorique

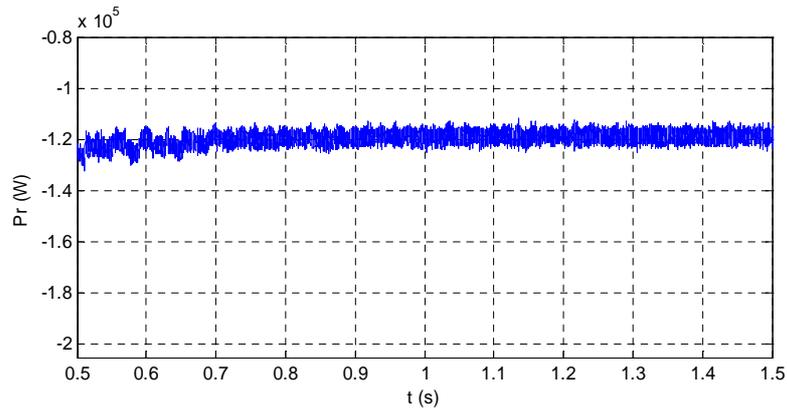


Fig.IV.17 Zoom de la Puissance active rotorique

Sur la figure (IV.18), les allures du courant et de la tension de la charge sont illustrés, ce qui montrent que l'amplitude du courant de charge dépend de la variation de la charge, mais la fréquence ne subit pas de variation (reste constante) quelque soit la valeur de cette dernière. Ce qui est vérifié pour les différents modes de fonctionnement de la génératrice.

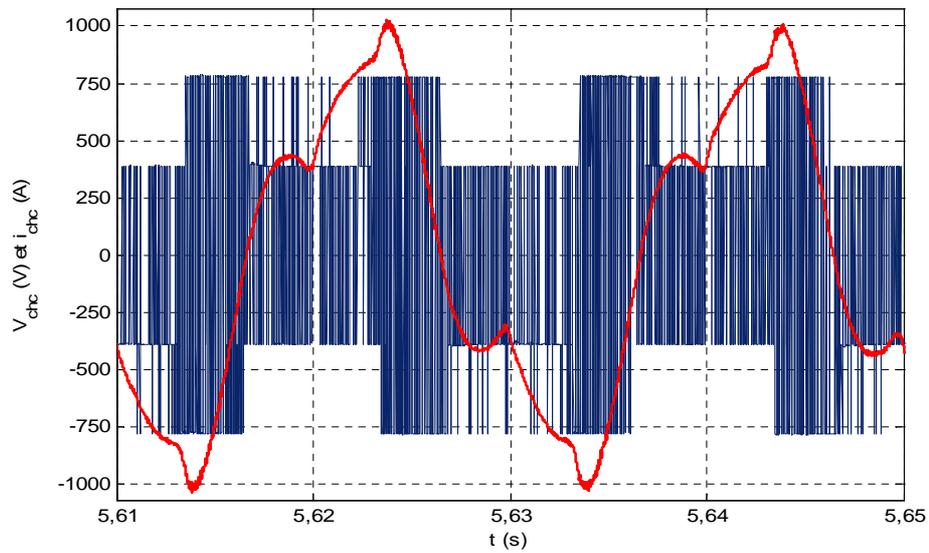


Fig.III.18 Zoom de la tension et de courant d'une phase de la charge

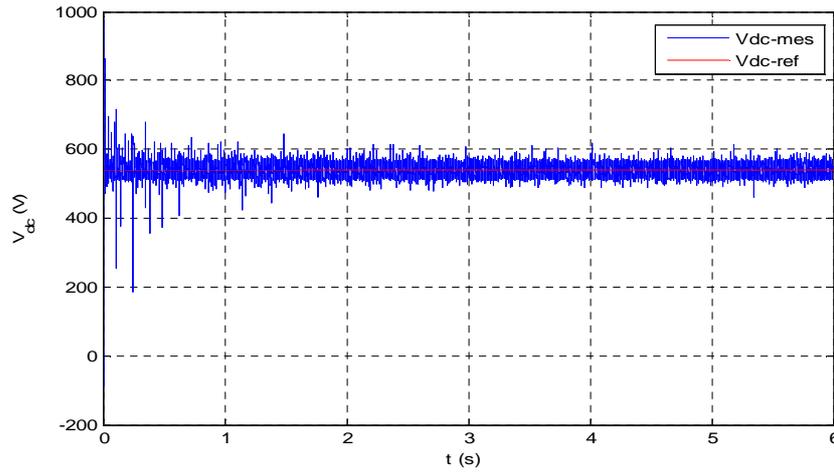


Fig.IV.19 l'allure de la tension du bus continu

La figure (IV.19). Illustre l'allure de la tension du bus continu, qui reste inchangée quelque soit la valeur de la charge.

B.2 Régime synchronisme

Afin de confirmer le régime de fonctionnement synchrone de la génératrice, nous représentons l'allure du courant rotorique qui a une fréquence nulle ce qui justifié la nature continue de ce courant, Fig. IV.20.

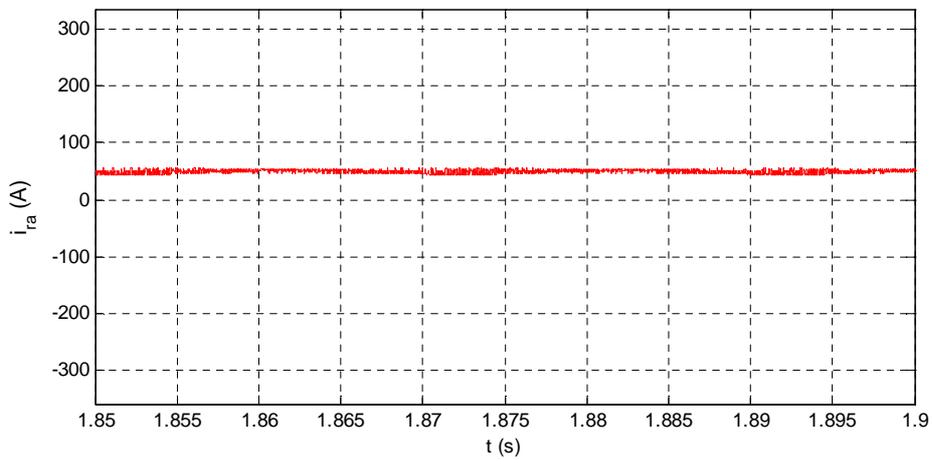


Fig.III.20 L'allure du courant rotorique

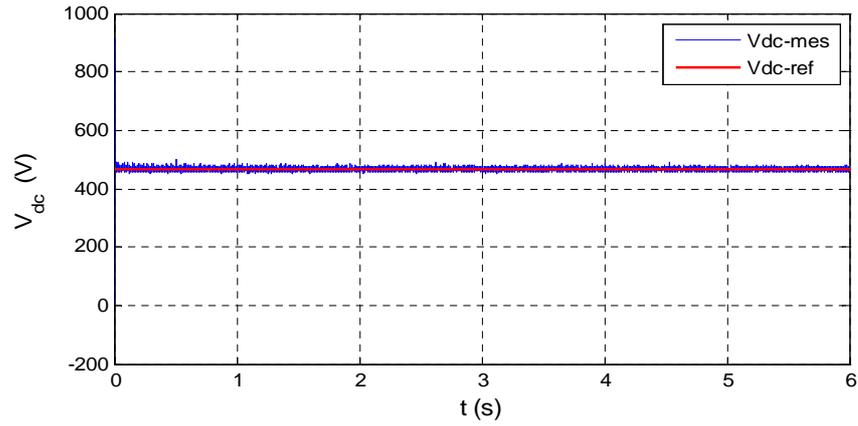


Fig.IV.21 L'allure de la tension du bus continu

L'évolution de la tension du bus continu est représentée par la figure (IV.21).

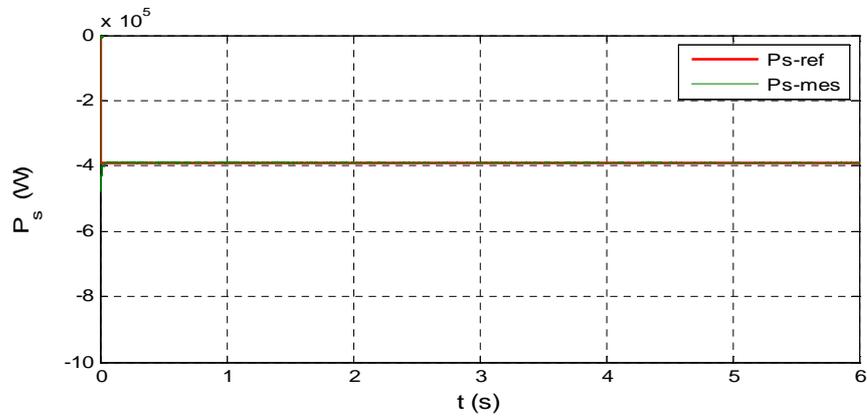


Fig.IV.22 L'allure de la puissance active statorique

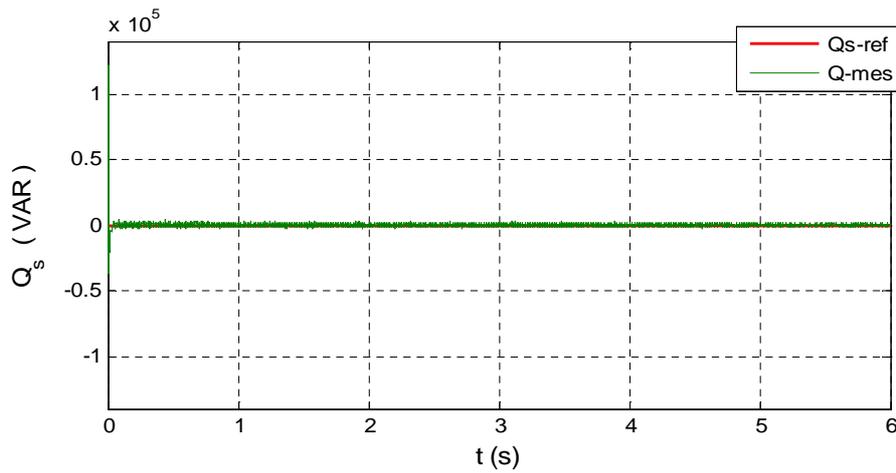


Fig.IV.23 L'allure de la puissance réactive statorique

La poursuite de la consigne pour les puissances statoriques est illustrée par les figures (IV.22) et (IV.23).

Sur la figure (IV.24), le zoom des allures du courant et de la tension d'une phase de la charge est illustré.

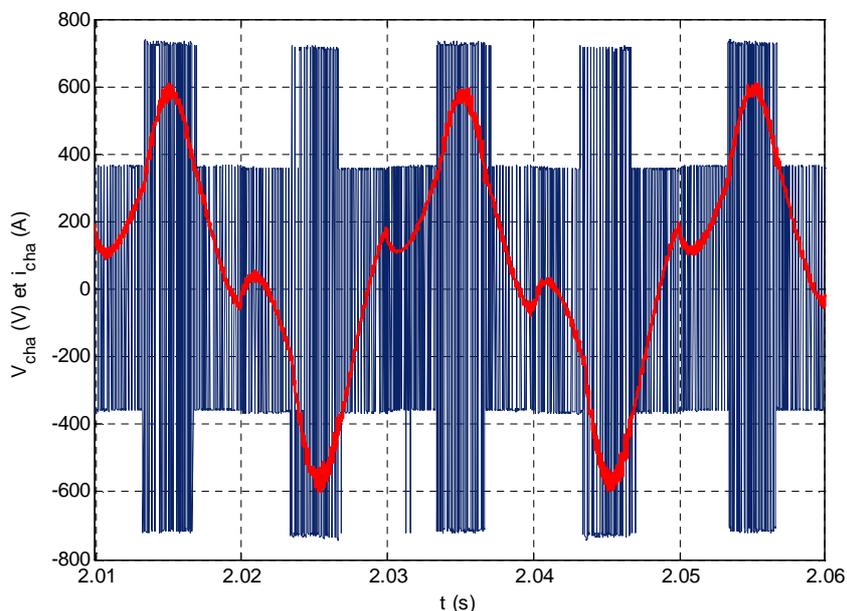


Fig.IV.24 Zoom l'allure de courant et de tension d'une phase de la charge

B. 3 Régime hyposynchrone

Le régime de fonctionnement hyposynchrone est confirmé par le signe positif de la puissance active rotorique $P_r > 0$, Fig. IV.25.

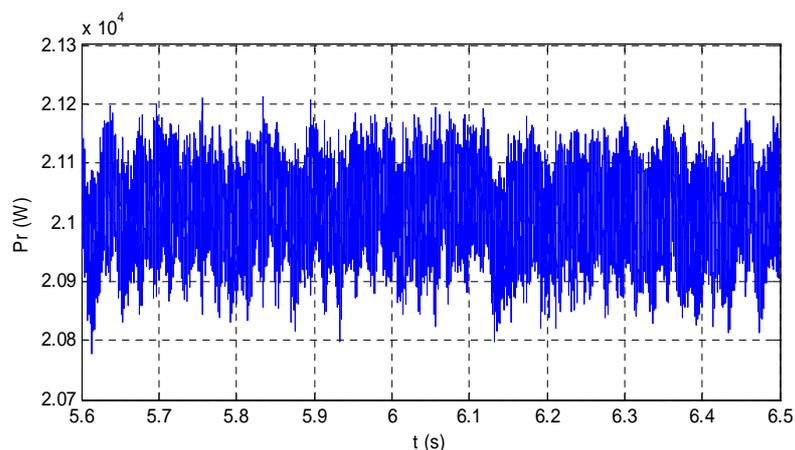


Fig.III.25 Zoom de la Puissance réactive rotorique

Sur les figures (IV.26) et (IV.27), respectivement, les puissances actives réactives statoriques sont représentées. Ainsi que l'évolution de la tension du bus continu est montré sur la figure (IV.28)

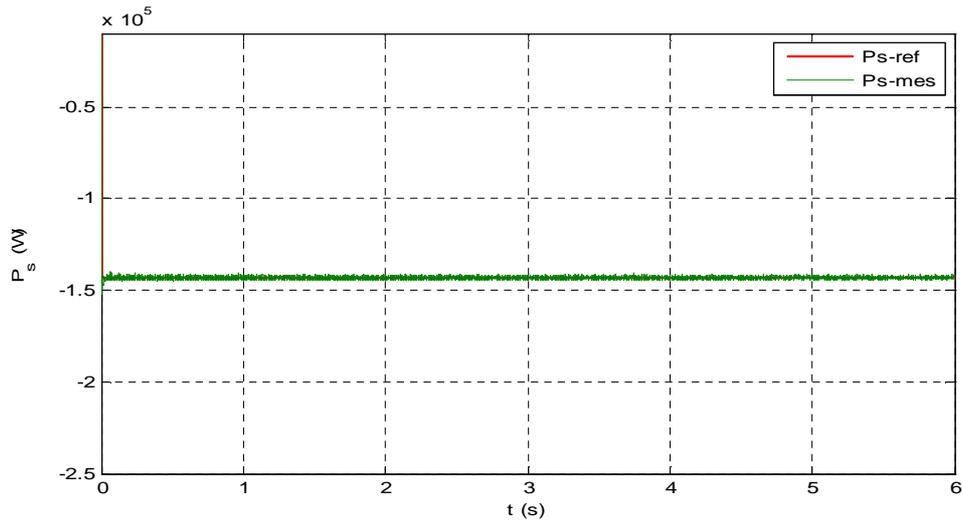


Fig.IV.26 L'allure de la puissance active statorique

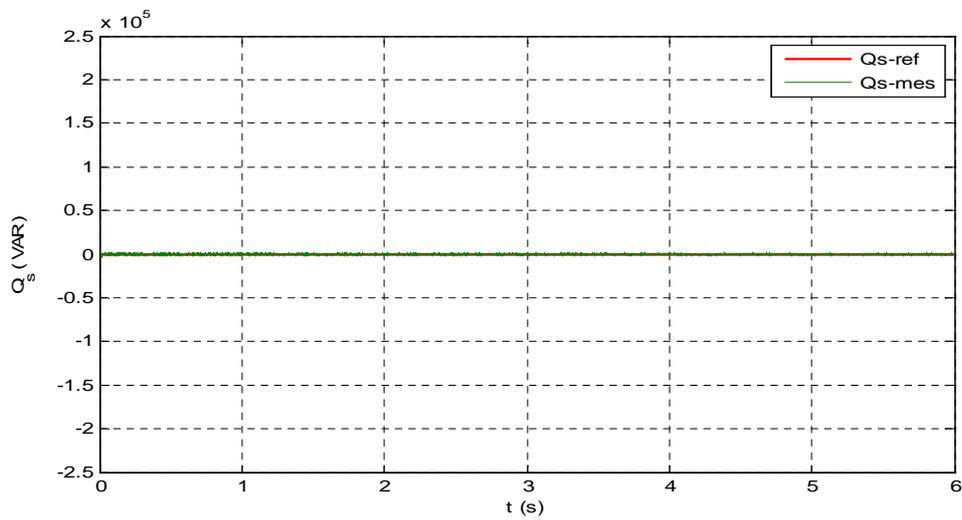


Fig.IV.27 L'allure de la puissance réactive statorique

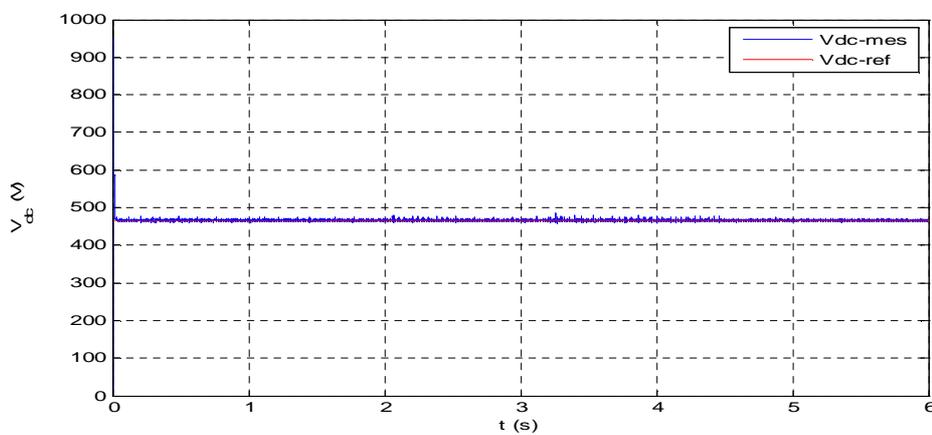


Fig.IV.28 L'allure de la tension du bus continu

C. L'aérogénérateur avec son système de stockage

Le système proposé est illustré sur la figure (IV.29) ; dont, on a un générateur autonome basé sur une GADA associé à une batterie de stockage. Les paramètres de la batterie sont donnés par l'annexe (I).

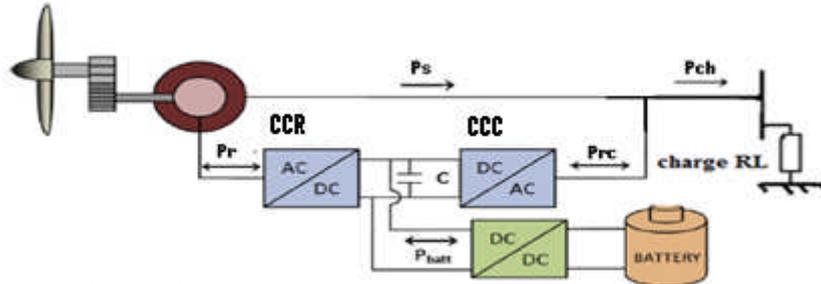


Fig.IV.29 système proposé avec une batterie de stockage

La simulation est effectuée d'une manière à faire illustrer le fonctionnement de l'ensemble selon l'algorithme proposé.

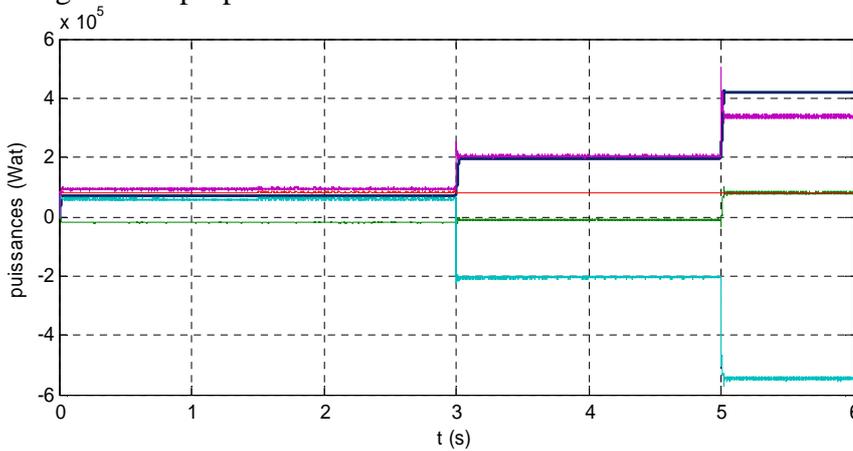


Fig.IV.30 les puissances actives du système

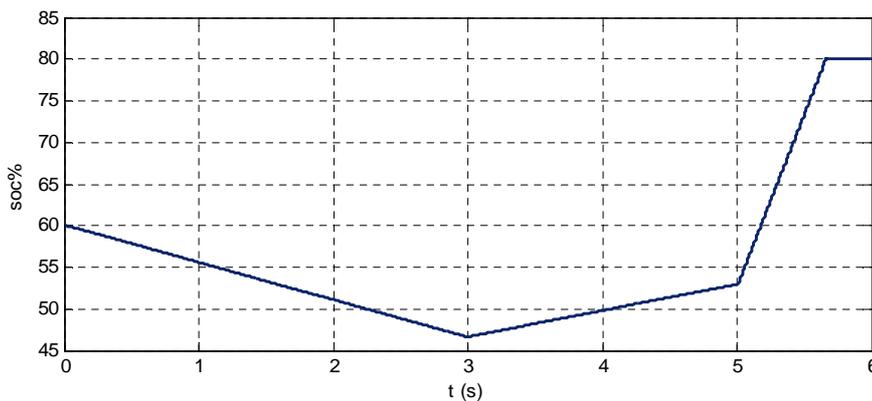


Fig.IV.31 Soc de la batterie

Dans cette partie nous avons proposée deux cas de fonctionnement selon l'état de charge de la batterie ainsi que les puissances disponible par rapport à la puissance de la charge. Tout en respectant l'algorithme imposé pour le contrôle du système (la gestion de la puissance disponible, comparée à celle demandée). Les résultats trouvés confirment le bon

fonctionnement du système. La puissance demandée par la charge est satisfaite par le générateur ou par la batterie ($P_s \mp P_{rc}$), qui est au même temps absorbe le surplus dans le cas où P_{ch} est faible devant la puissance produit, tout en surveillant l'état de charge de la batterie (le soc).

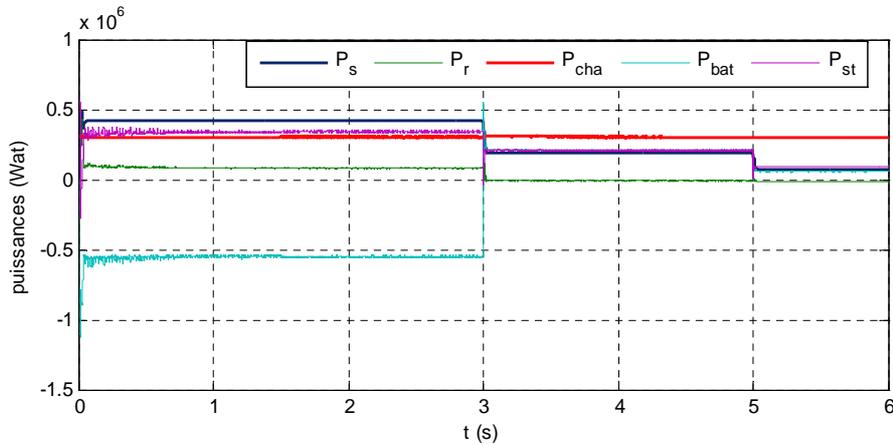


Fig.IV.32 les puissances actives du systeme

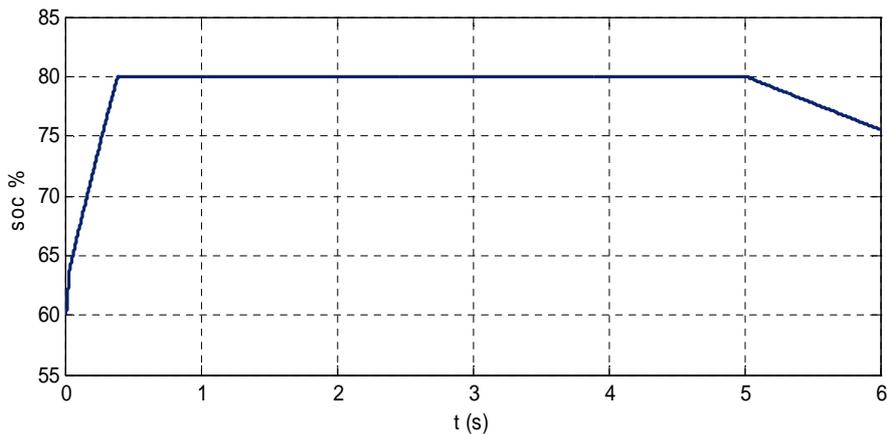


Fig.IV.33 Soc de la batterie

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la commande en puissance d'un aérogénérateur équipé d'un système de stockage, basé sur une génératrice asynchrone à double alimentation. Les différents modes de fonctionnement de cette dernière (hypersynchrone, synchrone et hyposynchrone) dépendent de la valeur et de signe du glissement ce qui est reflété par le signe de la puissance active rotorique pour (l'hypo et l'hyper) synchrone par contre le synchronisme est justifié par la fréquence nulle des courants rotorique.

Les résultats obtenus montrent une bonne poursuite des consignes pour les différentes grandeurs ainsi que des meilleures performances des résultats surtout de point de vue robustesse.

Conclusion

L'objectif de ce travail est l'étude de la chaîne de conversion basée sur une machine asynchrone à double alimentation à vitesse variable connectée directement à la charge à travers le stator et via une interface d'électronique de puissances à travers le rotor. Cette dernière est associée à un système de stockage (Batterie de stockage).

Pour se placer dans le contexte générale du travail et de choisir le système global à commander, il était important d'élaborer un document de synthèse illustrant les concepts fondamentaux d'une chaîne de conversion éolienne. Pour cela, le premier chapitre a été consacré à la présentation de l'état de l'art des différents modes de production éolienne, type de générateurs ainsi que l'intérêt que peut apporter la machine asynchrone à double alimentation par rapport aux autres machines utilisées.

Bien évidemment toute implantation d'algorithme de commande nécessite la connaissance des modèles mathématique des différentes parties du système à commander. La modélisation complète du système de production et de stockage a été abordée dans le deuxième chapitre.

Le troisième chapitre a été consacré à la commande de la chaîne de conversion éolienne proposée par une technique linéaire basée sur des régulateurs (PI). La génératrice asynchrone (GADA) connectée via un convertisseur de fréquence indirect (onduleur et redresseur) afin d'imposer par le premier convertisseur la puissance active statorique à la valeur désirée et de fixer le facteur de puissance, en évitant la dégradation de l'énergie. Ainsi que de maintenir l'amplitude de la tension et la fréquence d'alimentation de la charge fixe quelque soit la valeur de la vitesse du vent ou la valeur et la nature de la charge.

La technique de commande est alors introduite et l'algorithme établit pour le fonctionnement en générateur autonome visé. Par ailleurs, dans un but de prospection et de tests, deux perturbations sont appliquées (fonctionnement sous trois régimes de la machine ainsi que pour des charges différentes). L'intervention de la batterie pour débiter de la puissance dans le cas du besoin ou l'absorption si on est dans le cas contraire (surplus), tout en surveillant l'état de charge de la batterie (le soc). Tout en respectant l'algorithme imposé pour le contrôle du système (la gestion de la puissance disponible, comparée à celle demandée). Les résultats ont montré, d'une manière générale, une poursuite parfaite de la consigne pour les différentes grandeurs imposée tout en gardant une meilleur précision du contrôle des bonnes performances, ce qui est reflété par une très bonne régulation des

puissances, statoriques (active et réactive) ainsi que de l'amplitude et de la fréquence de la tension aux bornes de la charges connectée. La gestion de la puissance disponible, comparée à celle demandée est assurée par un algorithme qui surveille l'état de chage de la batterie et le sens d'écoulement de la puissance (de ou vers la batterie).

Enfin en analysant les différents résultats obtenus, la commande linéaire par les (PI) aboutit, globalement, à des meilleures performances.

Suite aux résultats obtenus dans cette étude, des perspectives intéressantes pouvant contribuées à l'amélioration du fonctionnement de la MADA sont envisageables :

- Etablissement d'un modèle de la MADA prenant en compte la résistance de phase statorique et la saturation magnétique.
- Utilisation d'autres types de régulateurs plus performants dans la commande du dispositif.
- L'intégration d'un système de stockage inertiel.

Une conclusion générale clos notre mémoire

Conclusion générale

Bibliographie

Bibliographie

[Ham 08] : N. Hamdi, (Modélisation et commande des génératrices éoliennes), Mémoire de magister en électrotechnique de l'université de Bejaia, 2006.

[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, 2008.

[Poi 03] :F. Poitiers, (étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne), Thèse de Doctorat de l'Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.

[Che 10] : N. Cherfia, (Conversion d'énergie produit par des générateurs éoliens), Mémoire de magister en électrotechnique en Electrotechnique l'université de Constantine, 2010.

[Idj 10] :K. Idjdarene, (Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes), thèse de Doctorat de l'Université Abderrahmane MIRA – Bejaia, 2010.

[Dra 09] :R. Drareni. (Commande d'un aérogénérateur à base d'une machine asynchrone à cage connectée au réseau à travers un convertisseur AC-DC-AC) mémoire d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique Ecole Nationale Supérieure Polytechnique 2009.

[bel.10] : K. belmakhtar ;l .mamadou ,(modélisation et commande d'un système éolienne a base de MADA pour fourniture de puissance ou réseaux électrique),article de département de génie électrique et de génie informatique université du Québec a trois-rivières,Canada,2010

[Ket 10] : I. Ketam. (Commande non linéaire d'un aérogénérateur basé sur une machine asynchrone à double alimentation MADA), mémoire d'ingénieur d'état, université A.MIRA de Bejaia, 2010.

[Mok 09] :Y. Mokhtari, (étude de la machine asynchrone à double alimentation MADA dédiée à l'éolien), mémoire de magister, université A.MIRA de Bejaia, 2009.

[Has 10] : B. Dassini , (modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque), MEMOIRE De Magister de l'université Abou-bakr belkaid de Tlemcen, 2010.

[Mir 05] : A. Mirecki, (Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance), Thèse de docteur de l'institut national polytechnique de Toulouse, 2005.

[Gal 06]: R. Galindo, (Two Families of Sliding Mode Controllers for a Doubly – Fed Induction Generator in an Generation System), Proceedings IEEE Conference, 2006.

- [Bou 09] :A. Boulahia,** (Etude des convertisseurs statiques destinés à la qualité de l'énergie électrique). Mémoire de magister en électrotechnique de l'université de Constantine, 2009.
- [Rob 08]:C. Roberto,** (Sensorless Control of Doubly – Fed Induction Generators Using a Rotor – Current – Based MRAS Observer), 2006.
- [IDJ 05] :K. Idjdarene,** (Analyse et contrôle d'une chaîne de conversion électrique par énergie éolienne). Mémoire de magister en électrotechnique de l'université de Bejaia, 2005.
- [Den 06]: R. Denis,** (Simulation of a Doubly Fed Induction Generator used in an Autonomous Variable Speed Hydro Turbin with Maximum Power Point Tracking Control), Portoroz, Slovenia EPE – PEMC ,2006.
- [Ghe 09]: K. Ghedamsi, D. Aouzellag, E.M.Berkouk,** (Network power flux control of a wind generator), Renewable energy, 2009
- [Ghe 10]:K. Ghedamsi, D. Aouzellag,** (Improvement of the performances for wind energy conversions systems) Electrical power and energy systems, 2010.
- [Ghe 08]:K. Ghedamsi, D. Aouzellag, E.M.Berkouk,** (Control of wind generator associated to a flywheel energy storage system) Renewable energy, 2008.
- [Abd 07] :A. Abdelli,** (Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive), Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse, 2007.
- [Lop 06] : M. Lopez,** (contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée), Thèse doctorat l'université paris – sud 11,2006.
- [Gou 06] : D.Gjamel,** (éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation), mémoire de fin d'étude, 2006.
- [Joi 03]: S. Joi, L. Driesen,R.Belmans,**(A comprehensive model of a doubly fed induction generator for dynamic simulations and power system studies) esat/electa ku . leuven. belgium inrep 03,2003.
- [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.

[IVA 04] : M. IVAN (Modélisation et réalisation d'une chaîne de conversion éolienne petite puissance), journées des doctorants, université de Montpellier, France 2004.

[Lar 05] : J. Laroche (électronique de puissance), Dunod, France 2005.

[CHA 10] : A. CHABIBA (Commande de la machine asynchrone a double alimentation par des techniques de l'intelligence artificielle), Thèse doctorat l'université de Batna 2010.

[Phi 06] :P. Philippe, A. Boyette, and S. Saadate (Directe and indirecte control of a doubly fed induction generator winde turbine including a storage unit), iecon 06 november 2006 paris (cd rom isbn 1-4244-0136-4).

[TOU 10] : B. TOUAL (Modalisation et commande floue optimisée d'une génératrice à double alimentation, application à un système éolienne à vitesse variable), mémoire de magister en électrotechnique, université de Batna 2010.

[Bag 09] : 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.

[Aza 08] :R. Azaizia (étude et commande d'une machine asynchrone a double alimentation alimente par un convertisseur multiniveaux) mémoire de magister en génie électrique de l'université de boumerdes, 2008.

Annexe

Paramètres de la turbine :

$$\mathbf{G} = 90$$

$$\boldsymbol{\rho} = 1.225 \text{ kg /m}$$

$$\mathbf{R} = 36 \text{ m}$$

$$\mathbf{J} = 50 \text{ kg .m}^2$$

Paramètres de la MADA:

$$\mathbf{P} = 1.5 \text{ (MW)}$$

$$\mathbf{V} = 690 \text{ (V)}$$

$$\mathbf{R}_s = 0.012(\Omega) ;$$

$$\mathbf{R}_r = 0.021(\Omega) ;$$

$$\mathbf{L}_s = \mathbf{L}_r = 0.0137 \text{ (H)} ;$$

$$\mathbf{M} = 0.0135 \text{ (H)} ;$$

$$\mathbf{P} = 2 ;$$

$$\mathbf{f} = 0.071 \text{ (N.m.s/rd)} ;$$

Les paramètres de convertisseur côté la charge

$$\mathbf{L}_f = 0.01 \text{ (H)}$$

$$\mathbf{R}_f = 1(\Omega)$$

RESUME

Ce travail présente l'étude et la commande de la machine asynchrone à double alimentation alimentant une charge autonome pour la production de l'énergie éolienne. Pour cela, un modèle est établi pour chaque composant de l'éolienne (Turbine, MADA et redresseur – onduleur) et une commande vectorielle de la machine est effectuée. La technique de commande par MLI triangulo-sinusoidale est appliquée à l'onduleur et le redresseur est commandé par la technique de la MLI vectoriel pour la dégradation du réseau. Cette étude est conclue par la simulation de l'ensemble de l'éolienne. Nous pouvons ainsi constater la capacité de la MADA à intégrer ce genre d'application.

Mots clés : Machine asynchrone à double alimentation, éolienne, modélisation, onduleur, redresseur, commande vectorielle.