

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'enseignement supérieur
et de la recherche scientifique**

Université Hassiba Benbouali de Chlef



**Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénieur
Département d'Electrotechnique**

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

Magister en Electrotechnique (école doctorale)

Option : Réseaux électrique

Présenté par

YAMINA BELGAID

Ingénieur d'état en électrotechnique, Univ. HB Chlef

THEME

Dimensionnement d'un système Eolien à une Machine Asynchrone à Double Alimentation

Soutenu publiquement le 06 Avril 2011 devant le jury composé de :

Dr .TAHAR ABBES MILOUD	Docteur Univ. HB Chlef	Président
Pr. MAHMOUDI MOHAND OULHADJ	Professeur, ENP Alger	Examineur
Pr. TADJINE MOHAMED.	Professeur, ENP Alger	Examineur
Pr. BELMADANI BACHIR	Professeur, Univ. HB Chlef	Encadreur
M. KAIROUS DJILALI	Chargé de cours, Univ. HB Chlef	Co- Encadreur

Année : 2011

Remerciements

Qu'il me soit d'abord permis de remercier et d'exprimer ma gratitude envers ALLAH, qui m'a donné la patience et le courage pour que je puisse continuer ce travail.

Je suis particulièrement sensible à l'honneur que m'a fait Monsieur B. BELMADANI, professeur au département d'électrotechnique de l'Université HASSIBA BENBOUALI de CHLEF, d'accepter d'être rapporteur de ce mémoire et pour la confiance et l'intérêt qu'il m'a témoignés tout au long de la réalisation de ce travail.

Je tiens également à remercier Monsieur D. KAIROUS, maître assistant chargé de cours au département de mécanique de l'Université HASSIBA BENBOUALI de CHLEF, pour avoir co-dirigé ce travail et avec qui j'ai beaucoup appris dans le domaine théorique. Je le remercie de tout mon cœur pour le temps qu'il m'a consacré.

Qu'il me soit permis d'exprimer à Monsieur M. BENDARAR, maître assistant chargé de cours au département d'électrotechnique de l'Université HASSIBA BENBOUALI de Chlef, ma gratitude pour son importante participation dans l'élaboration de ce travail. Ses fructueuses connaissances et expériences ont été pour moi une source constante de savoir.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à Monsieur M.TAHAR Abbes, Maître de conférences à (U.CHLEF) d'avoir accepté de présider et d'honorer de sa présence le jury de soutenance du présent mémoire.

Je tiens ensuite à remercier ceux qui ont bien voulu s'atteler à la lourde tâche de la relecture de ce mémoire, Monsieur MO.MAHMOUDI , Professeur à l'ENP d'Alger et Monsieur M. TADJINE, Professeur à l'ENP d'Alger mes sincères et vifs remerciements d'avoir acceptés d'examiner ce travail avec intérêt et de participer au jury de soutenance.

Je tiens par ailleurs à remercier vivement tous les enseignants du département de l'électrotechnique de l'université HASSIBA BENBOUALI de CHLEF et en particulier le chef du département H. ALOUACHE.

A cette occasion, je témoigne ma reconnaissance à toute personne m'ayant aidé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail. Que ce mémoire soit pour vous tous une preuve de ma plus profonde et sincère reconnaissance.

Dédicaces

Je dédie ce modeste Travail en signe de respect et de reconnaissance :

A mes parents

A mes très chères sœurs et à ma grande famille.

A tous mes amis.

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

YAMINA BELGAID

Sommaire

Notations et symboles

Introduction générale 1

Chapitre I : Etat de l'art des aérogénérateurs

I Introduction 4

I.1 Définition de l'énergie éolienne 4

I.2 Développement de l'énergie éolienne..... 5

I.3 Emplacement des parcs éoliens 5

I.4 Descriptif d'une éolienne..... 5

I.4.1 Le Mât..... 6

I.4.2 La Nacelle..... 6

I.4.3 Le rotor éolien..... 7

I.4.3.1 Le rotor à axe vertical..... 7

I.4.3.1.2 Le rotor éolien de darrius..... 8

I.4.3.2 Le rotor à axe horizontal..... 9

I.4.3.2.1 Eolien sous le vent..... 9

I.4.3.2.2 Eolienne face au vent..... 9

I.5 Régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne..... 10

I.6 Les systèmes de sécurité par grand vent..... 11

I.6.1 Système à décrochage aérodynamique « stall »..... 11

I.6.2 Système d'orientation des pales « pitch »..... 11

I.6.2.1 Système de regulation de l'angle d'orientation 'pitch contrôle' 12

I.7 Le contrôle de la turbine 13

I.8 Modes opérationnels pour une turbine dans la production de l'énergie éolienne..... 14

I.8.1 Les éoliennes à vitesse fixe..... 14

I.8.2 Les éoliennes à vitesse variable..... 15

I.9 Contexte de la conversion d'énergie éolienne..... 16

I.9.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.....	16
I.9.1.1 Bilan des forces sur une pale.....	16
I.9.1.2 Loi de Betz.....	17
I.9.1.3 Production d'énergie mécanique.....	19
I.9.1.4 Production optimale d'énergie.....	20
I.9.2 Conversion d'énergie mécanique en énergie électrique.....	20
I.9.2.1 Machine synchrone.....	20
I.9.2.2 Machine asynchrone.....	21
I.9.2.3 Machine asynchrone à double alimentation	21
I.9.2.3.1 Machines à double stators.....	21
I.9.2.3.2 Double alimentation par le stator et le rotor.....	22
I.10 Nécessité de stockage.....	23
I.10.1 Stockage à court terme	23
I.10.2 Stockage à long terme.....	23
I.11 Modélisation d'une turbine éolienne.....	24
I.11.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine.....	24
I.11.2 Modèle du multiplicateur.....	26
I.11.3 Equation dynamique de l'arbre	26
I.12 Techniques d'extraction du maximum de la puissance	27
I.12.1 Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse.....	28
I.13 Résultats obtenus avec la structure de commande sans asservissement de vitesse....	29
I.14 Conclusion.....	31

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone doublement alimentée

II. Introduction.....	33
II.1 Les différentes structures d'alimentation et de commande de la MADA.....	33
II.1.1 Structure des machines asynchrones à double alimentation.....	33
II.1.2 Fonctionnement en génératrice à vitesse variable.....	34
II.2 Modélisation de la machine à double alimentation.....	36

II.2.1 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère triphasé abc.....	37
II.2.1.1 Mise en équations de la machine asynchrone à double alimentation.....	37
II.2.1.1.1 Equations électriques	37
II.2.1.1.2 Les équations magnétiques.....	38
II.2.1.1.3 Equation mécanique.....	39
II.2.1.2 Modèle de Park de la machine asynchrone à double alimentation.....	39
II.2.1.2.1 Modèle biphasé de MADA.....	41
II.3 Choix du référentiel	42
II.3.1 Référentiel lié au stator.....	42
II.3.2 Référentiel lié au rotor.....	43
II.3.3 Référentiel lié au champ tournant.....	43
II.4 Mise sous forme d'équations d'état.....	44
II.5 Conclusion.....	45

Chapitre III : Stratégie de commande de la génératrice asynchrone à double alimentation

III.Introduction.....	47
III.1 Stratégie de commande de la GADA.....	47
III.2 Etablissement du modèle dans le repère d, q.....	47
III.3 Relation entre puissances statoriques et courants rotoriques.....	48
III.4 structure de la commande	51
III.4.1 Type de régulateurs utilisés.....	52
III.5 Simulation de la commande vectorielle avec régulateur PI.....	52
III.5.1 Résultats des simulations.....	52
III.6 Commande à structure Variable de la MADA.....	56
III.6.1 Théorie de la commande par modes glissants.....	56
III.6.1.1 systèmes à structure variable.....	56
III.6.1.2 Conception de la commande par mode de glissement.....	57
III.6.1.2.1 Choix de la surface de glissement.....	57
III.6.1.2.2 Condition de convergence et d'existence.....	59
III.6.1.2.3 Détermination de la loi de commande.....	60

III.6.2 Élimination du phénomène de Chattering par la fonction de saturation.....	63
III.6.3 Application de la commande par modes glissants à la MADA.....	64
III.6.3.1 Rappel du modèle de la MADA.....	64
III.6.3.2 Résultats de simulation	68
III.6.4 Comparaison des structures de contrôle (PI Mode de glissement).....	70
III. 7 Conclusion.....	72

Chapitre IV: Modélisation et stratégie de commande de l'onduleur-Bus continu-Redresseur

IV. Introduction.....	74
IV.1 Description du montage.....	74
IV.2 Les convertisseurs de puissance.....	75
IV.2.1 Onduleur de tension.....	75
IV.2.1.1 Modèle mathématique de l'onduleur triphasé	76
IV.2.1.2 Stratégie de commande.....	77
IV.2.2 Schéma de connexion du convertisseur au réseau électrique	79
IV. 2.2.1 Contrôle du convertisseur coté réseau.....	80
IV.2.3 Dimensionnement des éléments du convertisseurs.....	80
IV.2.3.1 Le bus continu.....	80
IV.2.3.1.1 Modélisation du bus continu.....	80
IV.2.3.1.2 Calcul de la tension du bus continu.....	82
IV.2.3.1.3 Calcul de la capacité.....	83
IV.2.3.2 Le filtre R L.....	84
IV.3.3 Contrôle des courant.....	84
IV.3.4 Contrôle des puissances envoyées au réseau.....	85
IV.4 Résultats de simulation.....	87
IV.5 Résultats de simulation du système global.....	89
IV.5.1 Etude d'une ferme éolienne.....	89
VI.5.2 Simulation d'une GADA éolien	89
IV.6 Conclusion.....	93

Conclusion générale	95
Bibliographie	98

ANNEXES

ANNEXE A : Paramètres de la chaîne de conversion éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation

ANNEXE B : Calcul d'un régulateur PI avec compensation

ANNEXE C : Modèles simulink contruit pour les différentes simulations

Table des Figures

Notations et symbole

V : Vitesse du vent

\vec{F} : Vecteur force exercée sur les pales d'une éolienne à incidence variable

β : Angle de calage des pales d'une éolienne à axe horizontal

l : Angle d'incidence des pales d'une éolienne à axe horizontal

\vec{F}_{rot} : Vecteur force représentant la poussée en direction de la rotation sur la pale

\vec{F}_{ax} : Vecteur force représentant la poussée axiale sur une pale

\vec{F}_{rest} : Résultante de \vec{F}_{ax} et \vec{F}_{rot}

\vec{V}_{rot} : Composante de la vitesse du vent due à la rotation de la turbine

\vec{V}_{rest} : Résultante des vecteurs \vec{V} et \vec{V}_{rot}

V_2, V_1 : Vitesse du vent respectivement en amont et en aval de l'éolienne

ρ : Densité de l'air $1,225 \text{ Kg.m}^{-3}$

S : Surface balayée par le rotor de l'éolienne

m : Masse d'air traversant le rotor éolien en 1s

P_m : Puissance extraite par le rotor éolien

P_{max} : Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé

C_p : Coefficient de puissance de l'éolienne

λ : Vitesse relative de l'éolienne

R : Rayon de la pale

P_{mg} : Puissance mécanique disponible sur l'arbre de la génératrice

Ω_{mec} : Vitesse mécanique de la génératrice

Notations et symboles

Ω_{turbine} : Vitesse angulaire de la turbine

Ω_{opt} : Vitesse de rotation optimale

Tb_j , Avec $j \in \{1,2,3\}$: force de poussée appliquée à la pale j

$\dot{\beta}_j$, Avec $j \in \{1,2,3\}$: vitesse d'orientation de la pale

J_{pale} : Inertie de la pale

db : Coefficient de frottement de la pale par rapport à l'air

kb : Élasticité de la pale

F_{pale} : Coefficient de frottement de l'arbre par rapport au support

Jh : Inertie de l'arbre

Kh : Elasticité de l'arbre

Dh : Coefficient de frottement d'arbre par rapport de multiplicateur

G : Gain de multiplicateur

C_g : Couple entraînant de la génératrice

J_g : Inertie de la génératrice

D_g : Coefficient des frottements de la génératrice

C_{aer} : Couple aérodynamique de l'éolienne

f : Coefficient des frottements visqueux

J : Inertie total sur l'arbre

C_{em} : Couple électromagnétique

C_{vis} : Couple des frottements visqueux

Notations et symboles

V_s : Tension d'une phase statorique

V_r : Tension d'une phase rotorique

R_s : Résistance d'une phase statorique

R_r : Résistance d'une phase rotorique

I_s : Courant d'une phase statorique

I_r : Courant d'une phase rotorique

Φ_s : Flux d'une phase statorique

Φ_r : Flux d'une phase rotorique

L_s : Inductance de magnétisation d'une phase statorique

M_{sr} : Inductance mutuelle entre phases statoriques

L_r : Inductance de magnétisation d'une phase rotorique

M_{rs} : Inductance mutuelle entre phase rotoriques et statoriques

l_s : Inductance cyclique propre du stator

l_r : Inductance cyclique propre du rotor l_{sr} : Inductance cyclique mutuelle stator-rotor

M_D : Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase du rotor

MADA : Machine à double alimentation

GADA : Génératrice à double alimentation

g : Glissement

p : Nombre de paire de pôles

C_r : Couple résistant de la charge montée sur l'arbre du rotor

ω_m : Vitesse angulaire électrique du rotor

Notations et symboles

V_{ds} : Composante directe de la tension au stator dans le repère de Park.

V_{dr} : Composante directe de la tension au rotor dans le repère de park.

i_{ds} : Composante directe du courant au stator dans le repère de park.

i_{dr} : Composante direct du courant au rotor dans le repère de park.

Φ_{ds} : Composante direct du flux au stator dans le repère de park.

Φ_{dr} : Composante directe du flux au rotor dans le repère de park.

σ : Coefficient de dispersion.

T_r : Constante de temps rotorique.

V_{qs} : Composante en quadrature de la tension au stator dans le repère de park.

V_{qr} : Composante en quadrature de la tension au rotor dans le repère de park.

i_{qs} : Composante en quadrature du courant au stator dans le repère de Park.

i_{qr} : Composante en quadrature du courant au rotor dans le repère de park.

Φ_{qs} : Composante en quadrature du flux au stator dans le repère de park.

Φ_{qr} : Composante en quadrature de flux au rotor dans le repère de park.

C : La capacité des condensateurs

f : Coefficient de frottement

s : Opération de Laplace

K : La sensibilité du comparateur.

PI : Proportionnel Intégral

K_p : Composante proportionnelle du correcteur PI

Notations et symboles

K_i : Composante intégrale du correcteur PI.

$U(x, t)$: Loi de commande

$S(x, t)$: Surface de Lyapunov

u_{eq} : Grandeur de commande équivalente

u_d : Grandeur discontinue

u : Grandeur de commande globale.

Les autres symboles utilisés sont définis dans le texte.

Introduction générale

La production de l'énergie électrique dans le monde produit diverses pollutions. Les différentes centrales traditionnelles de production d'électricité (nucléaire, hydraulique, thermique) utilisant des sources fossiles et naturelles telles que : l'uranium, les hydrocarbures et l'eau. Ainsi, les centrales thermiques (charbon, pétrole) sont responsables des rejets atmosphériques. . Les centrales hydroélectriques nécessitent parfois la construction de retenues d'eau qui modifient considérablement l'équilibre de toute une région.

La crise du pétrole entraîna un développement important de l'énergie nucléaire. De nos jours, les craintes d'utiliser qu'une seule énergie, avec tous ses risques, on se trouve forcé d'utiliser des énergies dites renouvelables. L'ouverture du marché de la production d'énergie électrique redonne place à ces énergies (éolienne, biomasse, solaire). Ces dernières s'inscrivent parfaitement dans l'effort global de la réduction des émissions de CO₂. [Mer 07]

Bien que nous ne pouvons pas envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de Co₂. C'est une ressource propre, abondante et inépuisable qui peut produire l'électricité parfaitement sans l'émission des gaz polluants [Idj 06]. Plusieurs pays sont déjà résolument tournés vers l'énergie éolienne, c'est le cas de L'Allemagne, L'Espagne et le Danemark,...etc [5]. La multiplication des éoliennes dans le monde a conduit les recherches de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et à optimiser la qualité d'énergie produite.

Les premières machines électriques qui furent utilisées dans le domaine éolien étaient des machines asynchrones. En effet, ces machines présentent plusieurs avantages tels que leur moindre cout, la robustesse et un entretien réduit [Pin 04].

Le présent mémoire décrit une étude sur l'utilisation d'une machine asynchrone à double alimentation pilotée à travers les grandeurs rotoriques, intégrée dans un système éolien.

Ce mémoire est constitué d'une introduction générale, quatre chapitres, une conclusion générale et une bibliographie. Le premier chapitre est consacré à des généralités sur les éoliennes, et rappelle les différentes structures d'éoliennes existantes : éoliennes à vitesse fixe et éolienne à vitesse variable. Puis, pour une turbine particulière, sa modélisation et différentes stratégies de commande seront expliquées dans les différentes zones de fonctionnement.

Le deuxième chapitre présente la topologie et les domaines d'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation. Une modélisation dans un repère diphasé lié au champ tournant.

Le troisième consiste à l'application de la commande vectorielle et la commande à structure variable par le mode de glissement en puissance active et réactive statoriques de la machine asynchrone à double alimentation.

Le quatrième chapitre est un complément du chapitre précédent, on introduit le double convertisseur (onduleur, redresseur) coté rotor de la MADA. La somme de ces deux convertisseurs est assurée par l'application de la MLI.

Dans ce chapitre, on s'intéresse à la simulation d'un système de conversion d'énergie éolienne à base de machine asynchrone à double alimentation couplés au réseau à travers des convertisseurs statiques.

Ce travail sera clôturé par une conclusion générale à travers laquelle, on exposera les principaux résultats obtenus et on donnera les perspectives à envisager comme suite à ce travail.

Chapitre I

Conception par optimisation
des systèmes de conversion
d'énergie

Chapitre I

Contexte de la conception par optimisation des systèmes de Conversion d'énergie éolienne

I. Introduction

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs (aéromoteurs) éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse du vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes [Poi 03], [Ouf 06].

I.1 Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffusée, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [Poi 03], [Mam 05]

Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale :

- Eoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW ;
- Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW ;
- Eoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW.

I.2 Développement de l'énergie éolienne

Depuis ces dernières années, la production d'électricité par l'énergie éolienne s'est considérablement développée dans le monde entier figure (I-1), avec moins de 50000 MW installé jusqu'en 2006 alors que pour 2010 l'estimation est d'atteindre 90000 MW [Boy 06].

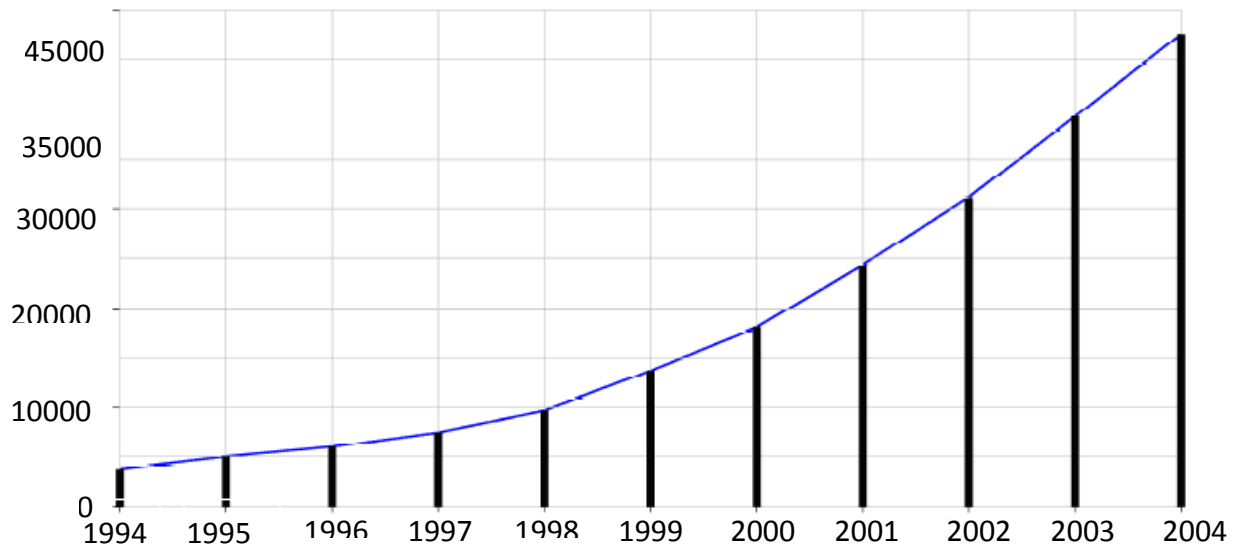


Figure (I-1): Evolution des puissances éoliennes installées dans le monde en MW [Boy 06]

I.3 Emplacement des parcs éoliens

Les parcs éoliens se situent naturellement là où il y a un niveau de vent suffisant tout au long de l'année pour permettre une production maximale. Les côtes, les bords de mers et les plateaux offrent des conditions intéressantes en termes de vent mais il faut aussi tenir compte de l'impact sur le paysage. Pour ces raisons, lorsque c'est possible, des parcs éoliens offshore sont construits [1].

I.4 Descriptif d'une 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. Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des distinctions importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux (voir la figure I-2).

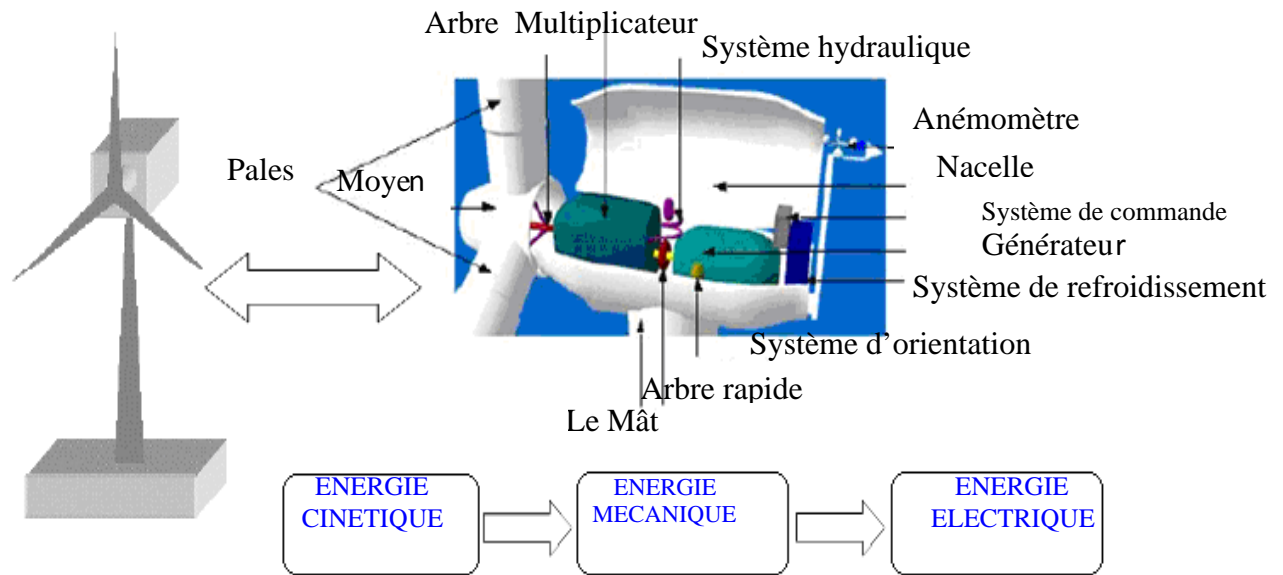


Figure (I-2):Eléments constitutifs d'un Aérogénérateur [Poi 03]

I.4.1 Le Mât

Le mât, est généralement un tube conique d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en oeuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW: diamètre de 90m, mât de 80 m de hauteur).

I.4.2.La Nacelle

La nacelle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique :

- Un arbre dit "lent" relie le moyeu au multiplicateur et contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.
- Un multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique .Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique a disque actionné en cas d'urgence lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne.
- La génératrice (ou l'alternateur) est généralement asynchrone, et sa puissance électrique peut varier entre 600kW et 2,5MW.

- Le système de refroidissement comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.
- un dispositif de freinage aérodynamique est utilisé permettant de dégrader le rendement de la turbine au delà d'une certaine vitesse (décrochage aérodynamique ou stall control). Sinon, un mécanisme d'orientation des pales permet la régulation de la puissance et un freinage (réglage aérodynamique) [Aim 04].

I.4.3 Le rotor éolien

Le rotor éolien, formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie généralement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.

I.4.3.1 Le rotor à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité, paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol, donc facilement accessibles. La figure (I-3) montre les principales technologies.

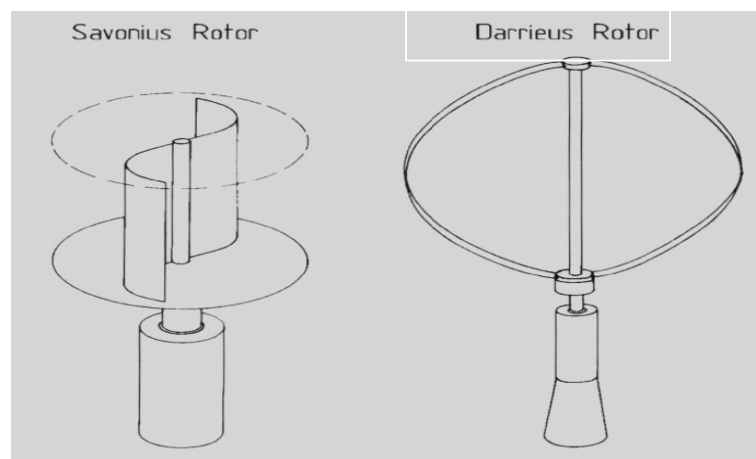


Figure (I-3): Technologies d'éoliennes à axe vertical [Poi 03].

I.4.3.1.1 rotor éolien de savonius

Le aéromoteur de Savonius (du nom de son inventeur, breveté en 1925) dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est, ici, renforcé par la circulation d'air entre deux demi cylindres, qui augmente le couple moteur voir la figure (I-4-a).

I.4.3.1.2 Le rotor éolien de darrius

Le rotor à variation cyclique d'incidence dont la structure la plus répandu est celle de Darrius (ingénieur français qui déposa le brevet au début des années 30). Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces de direction et d'intensité variables.

La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créés par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même (voir la figure (I-4-b)).

Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe.

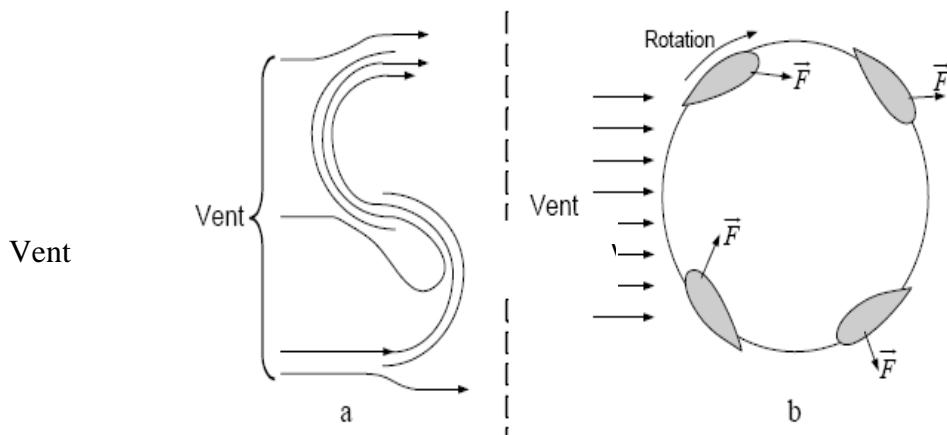


Figure (I-4):Principe du rotor de savonius et de l'incidence variable [Poi 03].

I.4.3.2 Le rotor à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale (ancienne) des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée comme dans un avion pour le maintenir en vol, mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation.

Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie, généralement, entre 1 et 3. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie (favorise) l'efficacité [Boy06].

I.4.3.2.1 éolienne sous le vent

Ce sont les plus simple car ici le positionnement du rotor est naturel et automatique en fonction de la direction du vent. Le rotor éolien se situe alors derrière le mât comme le montre la figure (I-5).

Un grand avantage de ce montage réside dans le fait que les pales du rotor peuvent être plus flexibles, ce qui allège donc leur construction et diminue aussi la taille du mât. Pour fort vent, la flexion des pales enlève (absorbe) une partie de l'effort de poussée sur le rotor. Une éolienne sous le vent a donc une construction plus légère qu'un modèle face au vent.



Figure (I-5):Eolienne sous le vent [3]

I.4.3.2.2 Eolienne face au vent

Ce sont les plus répandues. Le rotor éolien est orienté dans la direction du vent afin que le vent en amont ne soit pas perturbé par le mât, comme on le voit sur la figure (I-6).

A l'arrière du mât, il y a en effet de fortes perturbations du vent, son écoulement étant ralenti par l'obstacle que forme le mât.

Il en est de même devant le mât mais dans de moindres proportions. C'est pour cette raison que le rotor éolien se trouve à une certaine distance du mât. Cependant, chaque fois qu'une des pales passe devant le mât, la puissance instantanée de l'éolienne diminue brièvement.

Les pales des éoliennes face au vent doivent être rigides pour ne pas risquer de heurter le mât par un fort vent. Ceci est l'inconvénient majeur de ce type de structure. En plus, il est obligatoire de munir l'éolienne d'un mécanisme d'orientation afin que le rotor éolien soit toujours tourné face au vent.



Figure (I-6): Eolienne face de vent [Boy 06]

I.5 Régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne

Pour permettre une production d'électricité sur une large gamme de vitesse de vent, la plupart des éoliennes sont équipées de dispositifs de réglages de l'angle d'incidence des pales pour que le rotor éolien fonctionne à vitesse quasiment constante. Ainsi l'énergie produite est à une tension et fréquence constantes pour différentes vitesses de vents. Un tel éolien est directement connecté au réseau. Ceci permet de produire une puissance constante quelle que soit la force du vent, ce qui diminue les perturbations sur le réseau.

Le système de variation de pas est commandé de manière (des masselottes a efforts centrifuges diminuent le pas au fur et à mesure que la vitesse augmente), soit par une commande hydraulique avec un capteur de vitesse de rotation et un anémomètre qui

mesure la vitesse du vent et modifie l'angle de calage des pales afin de garder constante la vitesse de rotation de l'hélice [Boy 06].

I.6 les systèmes de sécurité par un grand vent

Pour éviter l'emballement du rotor éolien par un fort vent, les pales sont conçues pour décrocher progressivement à la vitesse critique. Ainsi le rotor éolien ne monte plus en vitesse lorsque le vent augmente à cause des turbulences qui se créent autour de la pale et font diminuer sa portance.

I.6.1 Système à décrochage aérodynamique " stall "

La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessitent une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau. Le système de limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux est un système de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "stall". Ce dernier utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence i devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale V_n , l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface extrados de la pale Figure (I-7) et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation.

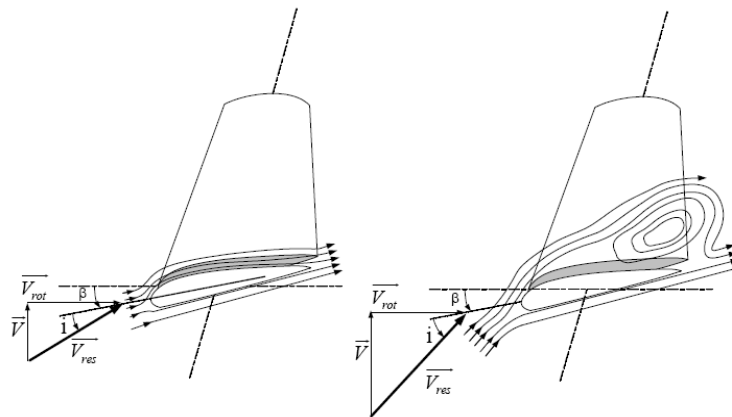


Figure (I-7): Flux d'air sur un profil de pale " stall "[[Poi 03].

I.6.2 système d'orientation des pales ' pitch '

L'orientation des pales est en fonction de la vitesse du vent, normalement il faudrait également prendre en compte les variations des caractéristiques de l'air et l'état de surface

des pales (givre éventuel, salissures...) qui influent sur le comportement aérodynamique. Les pales sont face au vent aux basses vitesses (de la vitesse minimale à la vitesse de basse) puis s'inclinent pour atteindre la position « drapeau » à la vitesse maximale du vent (voir la figure(I-8)) Mécaniquement, il s'agit d'un dispositif sophistiqué (commande par vérins hydrauliques dans les grosses machines), pour les petites machines il grèverait (chargerait) le coût et pour les très grandes puissances (au delà de 1 MW) il devient fragile [Poi 03].

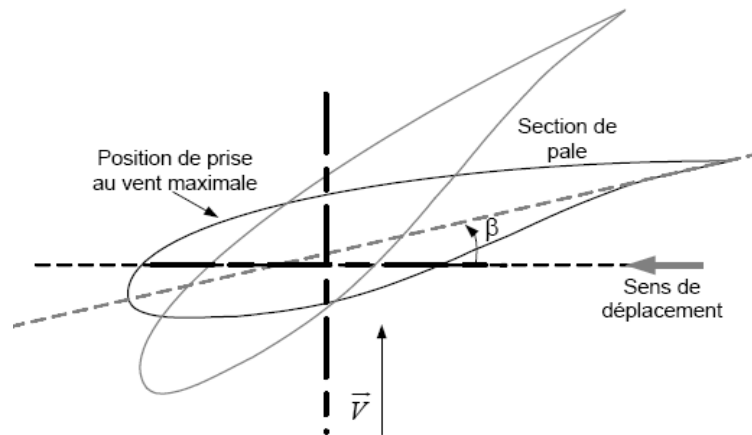


Figure (I-8) : Variation de l'angle de calage d'une pale [Poi 03].

I.6.2.1 Système de régulation de l'angle d'orientation' pitch contrôle'

Il existe divers types de système de régulation de l'angle de calage des pales. Le pas peut être variable tout le long de la pale, comme ici, ou simplement sur le bant des pales. L'angle de calage est commandé soit par des masses en rotation utilisant la force centrifuge, soit par un système hydraulique ou des moteurs électriques qui nécessitent une source d'énergie externe. Le transfert de cette énergie jusqu'aux pales en rotation augmente considérablement les coûts de fabrication. Le système hydraulique est néanmoins le plus utilisé dans les aérogénérateurs de petite et moyenne puissance alors que le système électrique est uniquement utilisé pour les très grandes éoliennes.

Le régulateur est conçu soit pour le calage de toutes les pales soit pour celui de chacune d'elles indépendamment. Cette régulation indépendante donne plus de degrés de liberté au système de commande. L'exploitation de ces degrés de liberté supplémentaires est en train d'être étudiée par certains chercheurs. Cette exploitation permettrait notamment de diminuer les efforts subis par les pales. La régulation indépendante du pas des pales est une innovation importante qui introduira plus d'intelligence dans le système de commande des aérogénérateurs cette indépendance est cependant dangereuse car elle peut entraîner un

déséquilibre aérodynamique dans la turbine, au risque d'augmenter considérablement les charges subies par certains éléments de l'éolienne. Un système précis de mesure de la position angulaire est par conséquent utilisé pour assurer que l'angle de calage chacune des pales soit le même. [Cam 03]

Le système d'orientation de l'angle des pales est approché par une fonction de transfert du 1^{er} ordre [Nes 08]. Cet actionneur est commandé en boucle fermée pour asservir l'angle de calage des pales β avec des contraintes sur, voir la figure suivant :

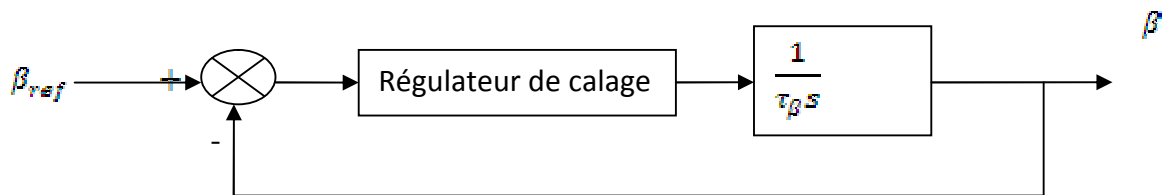


Figure (I-9):Modèle et commande du système de calage de pale [Nes 08]

Où :

τ_β : Constante de temps de l'actionneur(s)

s : Opérateur de Laplace

β_{ref} : Référence d'angle reçue du processus de la commande de la puissance électrique.

I.7 Le contrôle de la turbine

La variation de la puissance de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent est illustrée sur la Figure (I-10).

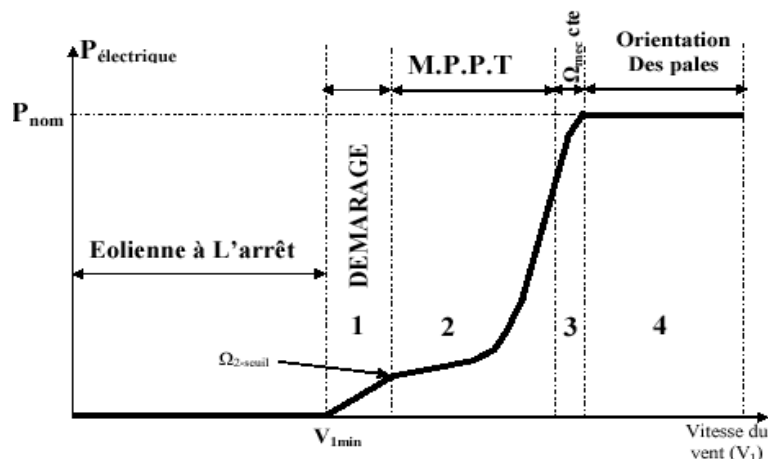


Figure (I-10) : Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable [Boy 06]

Quatres zones principales de fonctionnement peuvent être distinguées :

Zone 1 : C'est la zone de démarrage de la machine, elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieur à une certain vitesse.

Zone 2 : A partir d'une certaine vitesse de la génératrice seuil (correspondant à un glissement de 30%, un algorithme de commande permettant l'extraction du maximum de puissance du vent (MPPT) est appliqué. On maintient l'angle de calage à sa valeur minimale qui correspond au maximum du coefficient de puissance.

Zone 3 : Au-delà l'éolienne fonctionne à une vitesse constante. Dans cette zone la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale P_{nom} .

Zone 4 : arrivée à la puissance nominale, la vitesse doit être limitée, c'est la phase ou intervient la limitation de vitesse par orientation des pales (angle de calage).

I.8 Modes opérationnels pour une turbine dans la production de l'énergie éolienne

Parmi les systèmes de commande réalisés jusqu'à aujourd'hui il y a deux types de structures d'éoliennes différentes qui dépendent du générateur et du système d'électronique de puissance choisi. Ces Structures sont:

- L'éolienne à vitesse fixe
- L'éolienne à vitesse variable

I.8.1 Les éoliennes à vitesse fixe

Dans le cas des éoliennes à vitesse fixe, la puissance de la turbine est optimisée pour un seul point de fonctionnement, et le générateur est connecté directement au réseau. Le problème avec ce type d'installation est que les fluctuations sur la vitesse du vent mènent automatiquement à des fluctuations sur le couple, donc des fluctuations de tension à l'origine de stress mécanique pour le rotor [Bou 07].

Les principaux avantages de ce type d'installation peuvent être classés comme suit :

- système électrique plus simple, pas de convertisseur
- peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne
- pas besoin d'un système d'électronique de commande
- moins chère au niveau de l'installation.

I.8.2 les éoliennes à vitesse variable

En utilisant les systèmes à vitesse variable il est possible de faire fonctionner les éoliennes pour λ optimal qui donne le C_p maximal, donc un bon rendement pour l'éolienne. Le principe se base sur un fonctionnement en maximisant la puissance extraite du vent par un contrôle (MPPT) pour les basses vitesses. Ensuite une fois arrivée à de très grandes vitesses de vent, on passe à un fonctionnement à puissance nominale à vitesse variable. Les avantages de ce type d'éolienne sont:

- augmentation du rendement énergétique
- réduction du stress sur l'arbre mécanique
- l'amélioration de la qualité d'énergie
- réduction des oscillations du couple mécanique.

Il y a encore quelques années, pratiquement toutes les éoliennes fonctionnaient à vitesse fixe. Elles contenaient pour la plupart un générateur asynchrone à cage d'écureuil [Mer 07].

C'est en grande partie les progrès technologiques réalisés sur les composants d'électronique de puissance et la réduction des prix correspondant qui ont rendu leur utilisation dans les nouveaux aérogénérateurs possibles. L'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique.

Comme il est illustré sur la figure (I-11), ceci entraîne une amélioration du rendement énergétique du système, la vitesse variable permet également d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite, en introduisant de la souplesse dans la réaction du système face aux fluctuations brusques de la vitesse du vent. Ainsi, l'intérêt de la vitesse variable est de pouvoir garder le maximum de coefficient de puissance quel que soit la vitesse du vent et aussi optimiser le fonctionnement de la turbine [Lec 04]. L'inconvénient principal de ce genre de système est le sur coût introduit par l'incorporation des convertisseurs de puissance. Ce coût dépendant de la taille de ces convertisseurs, il devient relativement important pour les éoliennes de grande taille. De plus, les performances des transistors IGBT diminuent à partir d'une certaine puissance.

Avec l'utilisation des machines asynchrones à rotor bobiné, la plus grande partie de la puissance est directement distribuée au réseau par le stator et moins de 25% de la puissance totale passe par les convertisseurs de puissance à travers le rotor. Ceci donne l'occasion d'utiliser des convertisseurs plus petits et donc moins coûteux [Kru 03]

L'inconvénient de ce système est la présence de balais en rotor, ce qui demande un travail de maintenance plus important. [Cam 03].

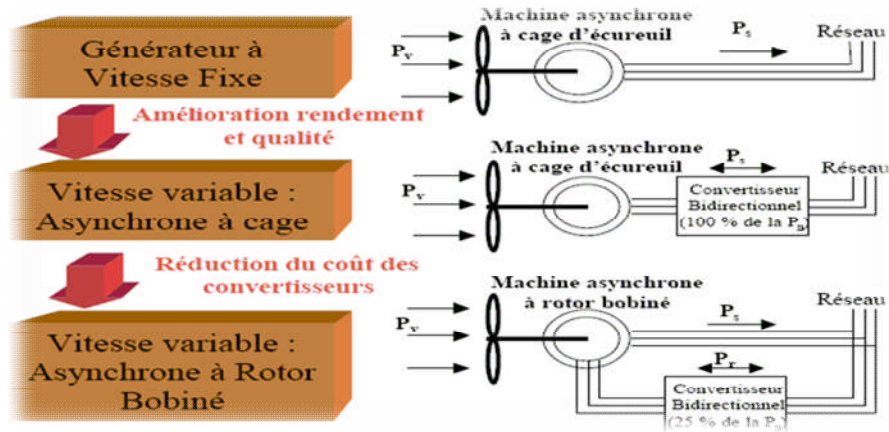


Figure (I-11): Evolution de la configuration électrique [Cam 03].

Aujourd'hui, 80% des nouveaux aérogénérateurs contiennent des machines asynchrones doublement alimenté (à rotor bobiné). C'est le type de machine choisi pour l'étude menée dans ce mémoire. [Mer 07]

I.9 Contexte de la conversion d'énergie éolienne

I.9.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

Nous nous intéressons ici à la modélisation d'une turbine éolienne tripale à axe horizontal à pas variable la plus répandue actuellement pour la production électrique de forte puissance. Pour l'élaboration d'une modélisation d'une turbine éolienne en calculant les efforts créent par le vent sur les pales et la puissance disponible sur l'axe de la turbine.

I.9.1.1 Bilan des forces sur une pale

La figure (I-12) représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur.

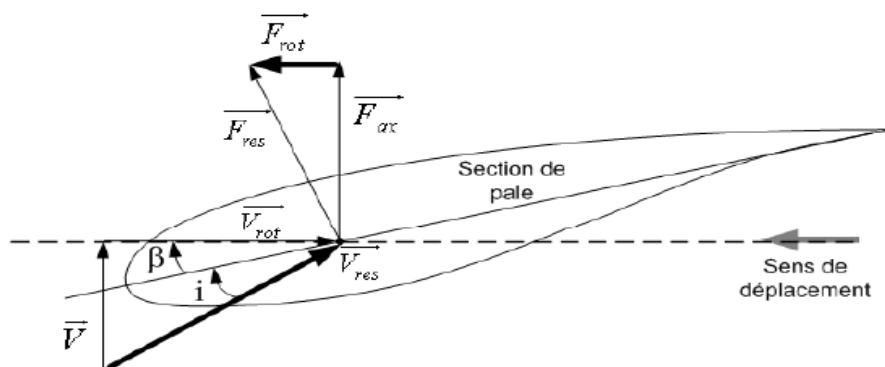


Figure (I-12): Bilan des forces sur une pale [Poi 03].

La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représentée par le vecteur \vec{V} . Le vecteur \vec{V}_{rot} Représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée $\vec{V}_{rés}$. L'action du vent sur la pale produit une force $\vec{F}_{rés}$ qui se décompose en une poussée axiale \vec{F}_{ax} directement compensée par la résistance mécanique du mat et une poussée en direction de la rotation \vec{F}_{rot} qui produit effectivement le déplacement. Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse de vent nominale donnée. Lorsque la vitesse de vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale [Poi 03].

I.9.1.2 Loi de Betz

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure (I-13) sur la quelle on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en ava

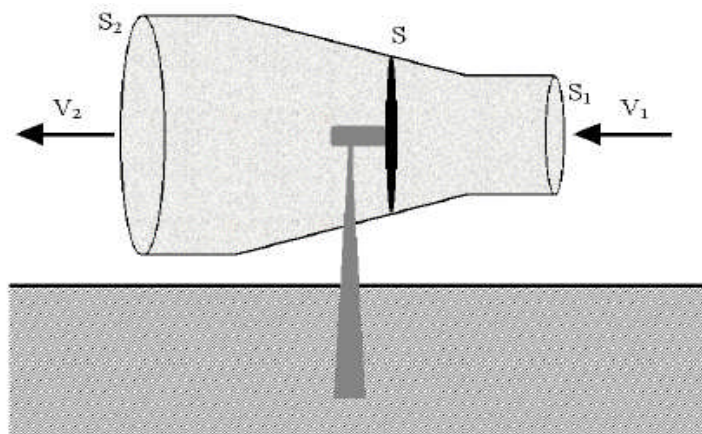


Figure (I-13): Tube de courant autour d'une éolienne [Cam 03].

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit $\frac{V_1+V_2}{2}$, alors, la masse d'air traversant la surface S décrite par les pales pendant une seconde est:

$$m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)}{2} \quad (I-1)$$

Avec:

ρ : Représente la densité de l'air

La puissance P_m extraite s'exprime alors par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_m = \frac{m(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{I-2})$$

En remplaçant m par son expression dans (I-1):

$$P_m = \frac{\rho S (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (\text{I-3})$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_{mt} correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (\text{I-4})$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \frac{V_2}{V_1}\right) \left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right)}{2} \quad (\text{I-5})$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus Figure (I-14), on s'aperçoit que le ratio $\frac{P_m}{P_{mt}}$ appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maximum de 16/27 soit 0,59 [Cam 03]. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

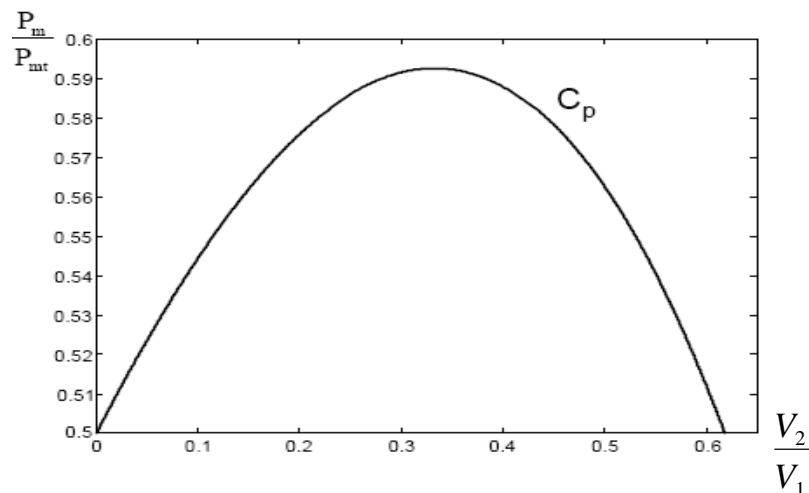


Figure (I-14): Coefficient de puissance [Cam 03]

La figure (I-13) représente le coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes. Cette figure permet de faire le choix de la turbine qu'il faut ; le choix est en fonction de la caractéristique de la turbine.

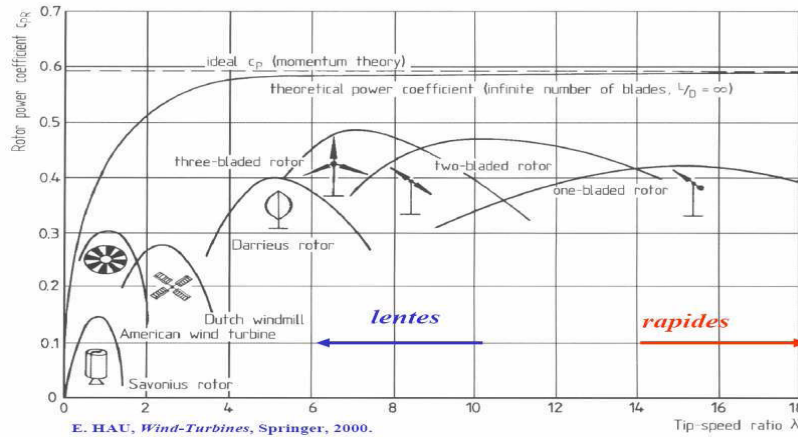


Figure (I-15): Coefficient de puissance aérodynamique en fonction λ et de l'angle de pas des pales [Abd 07].

I.9.1.3. Production d'énergie mécanique

En combinant les équations (I-1), (I-4) et (I-5), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} P_{mt} = C_p P_{mt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (I-6)$$

La vitesse spécifique est donnée par la formule suivante:

$$\lambda = \frac{\Omega_{\text{turbine}} R}{V_1} \quad (I-7)$$

Avec:

Ω_{turbine} : Vitesse angulaire de la turbine, R : le rayon de la turbine

C_p : Coefficient de puissance défini comme suit : [Mer 07]

$$C_p = (0.4 - 0.0167\beta) \sin\left(\frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0.3\beta}\right) - 0.00184(\lambda - 3)\beta \quad (I-8)$$

La figure (I-16) illustre les courbes de $C_p(\lambda)$ pour plusieurs valeurs de β (deg) obtenues par la relation (I-8).

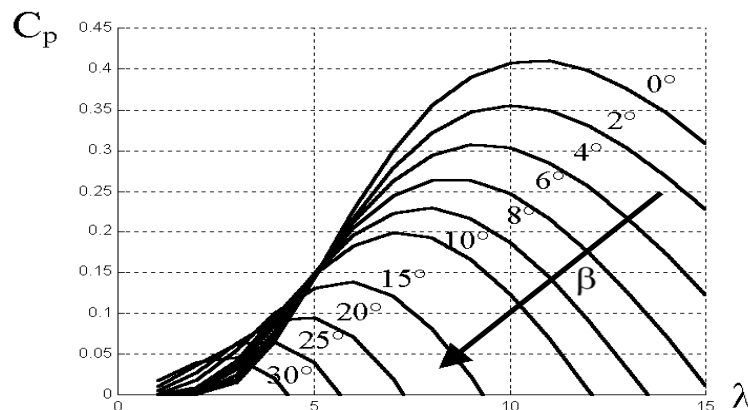


Figure (I-16): Influence de l'angle de calage sur le coefficient de couple [Poi 03]

Compte tenu du rapport G du multiplicateur de vitesse, la puissance mécanique $P_{m\text{g}}$ disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_{m\text{g}} = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\Omega_{m\text{g}} R}{G V_1} \right) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (\text{I-9})$$

Avec: $\Omega_{m\text{g}}$: vitesse mécanique de la génératrice.

I.9.1.4 Production optimale d'énergie

Dans un système de production d'énergie par éolienne fonctionnant à vitesse variable, on cherchera systématiquement le régime optimal en exploitant les maxima du réseau de courbes de la figure (I-17).

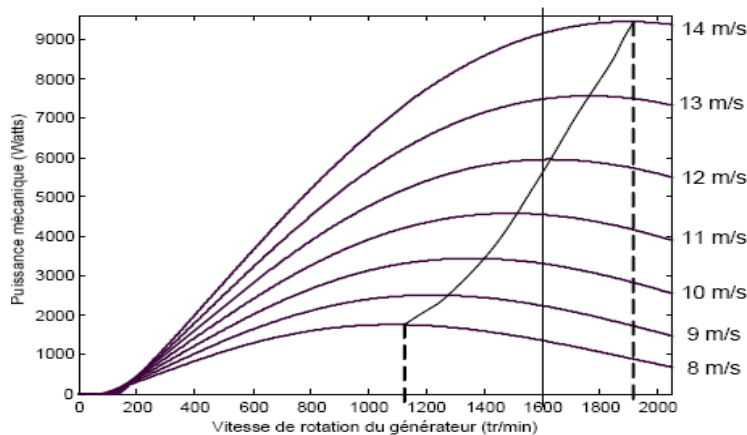


Figure (I-17): Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné [Poi 03].

Ce qui signifie que pour un régime de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe) on souhaite que la puissance fournie soit maximale ce qui correspond à une valeur de λ donnée appelée λ_{opt} . La vitesse de rotation optimale Ω_{opt} résultante est alors donnée par :

$$\Omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt}}{R} v \quad (\text{I-10})$$

I.9.2 Conversion d'énergie mécanique en énergie électrique

En fonction de la puissance d'éolienne et de l'utilisation souhaitée pour l'énergie produite, on rencontre dans la littérature de nombreuses chaînes de conversion. Elles permettent soit l'exploitation directe de l'énergie, soit le passage par un étage continu et éventuellement un stockage. On peut distinguer deux constructions différentes de la conversion selon que l'on utilise, ou pas, un multiplicateur de vitesse.

I.9.2.1 Machine synchrone

C'est ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales

thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 KW à 2 MW sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille. De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-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. Certaines variantes des machines synchrones peuvent fonctionner à de faibles vitesses de rotation et donc être directement couplées à l'aéroturbine. Elles permettent ainsi de se passer du multiplicateur, élément présent sur la plupart des aérogénérateurs et demandant un important travail de maintenance.

I.9.2.2 Machine asynchrone

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Dans les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grandes puissances 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.

L'introduction de convertisseurs de puissance entre la machine de découpler la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine.

I.9.2.3 Machine asynchrone à double alimentation

Plusieurs technologies de machines asynchrones à double alimentations ainsi que plusieurs dispositifs d'alimentation sont envisageables. On y distingue les classes suivantes : [Ain 04], [Poi 03].

I.9.2.3.1 Machines à double stators

Pour cette machine, elle est munie de deux bobinages statoriques distingue la Figure (I-18)

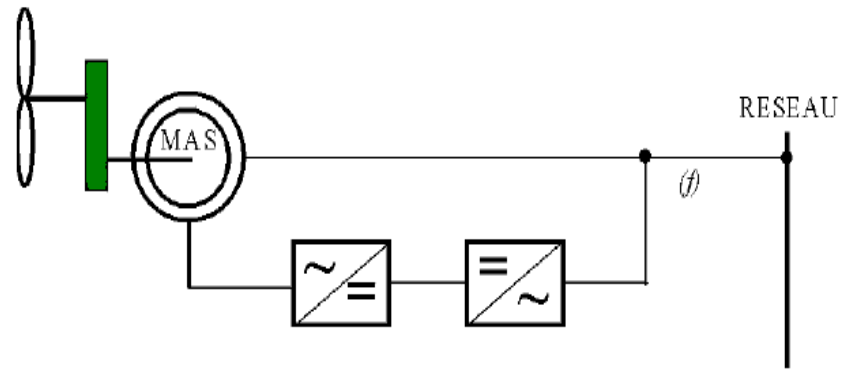


Figure (I-18): Machine asynchrone à double bobinages statorique [Mer 07].

La génératrice est directement connectée au réseau à travers un bobinage statorique qui constitue le support principal de transmission de l'énergie générée. On peut contrôler la vitesse de la génératrice autour d'un point de fonctionnement en agissant sur les tensions appliquées au second bobinage statorique qui sera appelé enroulement d'excitation. Cet enroulement possède un autre nombre de paire de pôles que celui du premier bobinage. Il est connecté à des convertisseurs d'électronique de puissance qui sont dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la turbine, le coût s'en trouve réduit. Il a été vérifié que cette structure génère des puissances fluctuantes sur le réseau [Aim 04].

I.9.2.3.2 Double alimentation par le stator et le rotor

La figure (I-19) montre le schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné pilotée par le rotor.

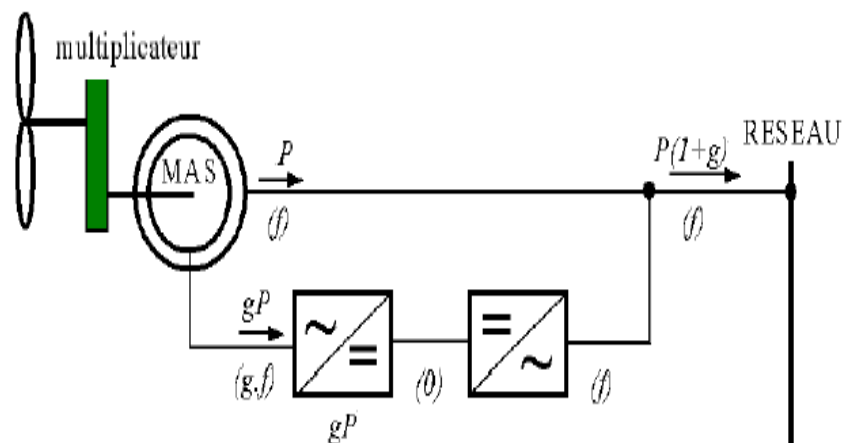


Figure (I-19) : Schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor [Mer 07].

En négligeant toutes les pertes, on peut expliquer son principe de fonctionnement. En prenant 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, gP , sort par les balais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence gf . Ces grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, au quelle est renvoyée, par l'intermédiaire du deuxième convertisseur, donc le réseau reçoit $(1 + g)P$. Les bobinages du rotor sont accessibles grâce à un système de balais et de collecteurs comme il est illustré sur la figure (I-20).

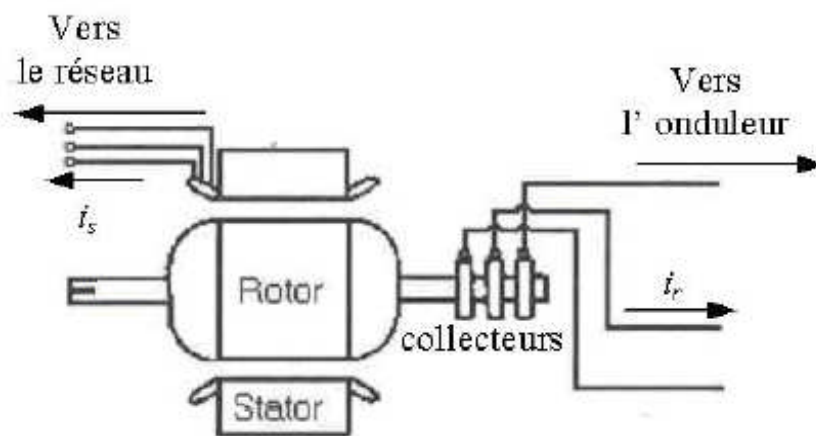


Figure (I-20): Machine asynchrone à rotor bobiné avec des bagues collectrices [Mer 07].

I.10 Nécessité de stockage

On a vu précédemment que le stockage d'énergie permettrait d'obtenir un service réseau appréciable. Il y a deux types de stockage à envisager : d'une part le stockage à court terme permettant de faire face aux bourrasques (tempête) de vent et aux turbulences, et d'autre part le stockage de longue durée qui permettrait de restituer l'énergie lorsqu'il n'y a plus de vent.

I.10.1 Stockage à court terme

Généralement dans l'inertie de l'hélice ou avec des accumulateurs cinétiques au pied de l'éolienne. Ces accumulateurs sont constitués de volants d'inerties entraînés par des machines asynchrones. On trouve aussi du stockage sous forme électrochimique dans des surcapacités. Ce stockage permet de lisser les fluctuations de puissance du vent.

I.10.2 Stockage à long terme

Plusieurs solutions sont envisagées, notamment les batteries d'accumulateurs chimiques, l'air comprimé, la production d'hydrogène par électrolyse et la restitution avec une pile à combustible. Ce stockage permet de compenser les périodes où le vent est insuffisant et contribue ainsi à maintenir constante la puissance fournie au réseau.

Ce stockage d'énergie associé à une gestion adéquate permettrait de garantir une production constante tout au long de l'année pour les parcs éoliens. Ceci faciliterait leur insertion dans les réseaux et soulagerait les gestionnaires des réseaux.

I.11 Modélisation d'une turbine éolienne

I.11.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine.

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée comprend trois pales orientables et de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse $\Omega_{turbine}$ qui est relié à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique figure (I-21).

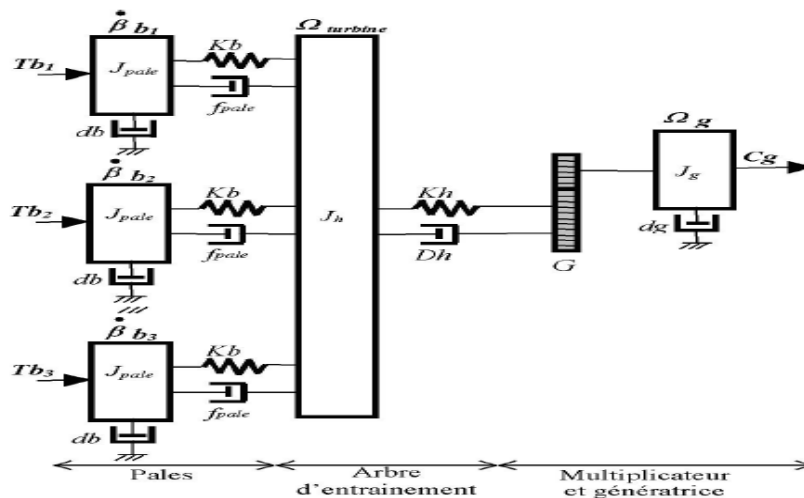


Figure (I-21): Système mécanique de l'éolienne [Ain 07].

Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc :

- la même inertie J_{pale}
- la même élasticité K_b
- le même coefficient de frottement par rapport à l'air db

Ces pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support f_{pale} .

Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées $\dot{\beta}_1, \dot{\beta}_2, \dot{\beta}_3$. Chaque pale reçoit une force Tb_1, Tb_2, Tb_3 qui dépend de la vitesse de vent qui lui est appliquée.

L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :

- son inertie J_k
- son élasticité Kh
- son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur Dh

Le rotor de la génératrice possède :

- une inertie J_g
- un coefficient de frottement d_g

Ce rotor transmet un couple entraînant (C_g) à la génératrice électrique et tourne à une vitesse notée Ω_{meca} .

Si l'on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée ($Tb_1 = Tb_2 = Tb_3$), alors on peut considérer l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques.

De part la conception aérodynamique des pales, leur coefficient de frottement par rapport à l'air (d_b) est très faible et peut être ignoré. De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes frottement du côté de la génératrice.

On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses figure (I-22) dont la validité par rapport au modèle complet est déjà vérifiée.

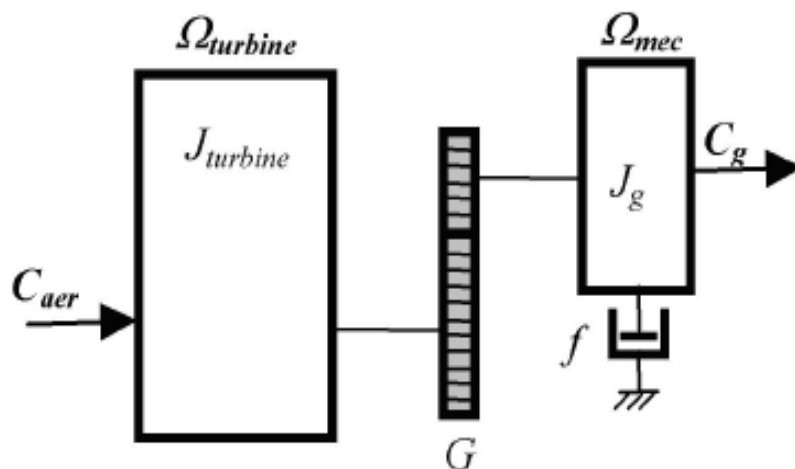


Figure (I-22): Modèle mécanique simplifié de la turbine [Ain 07].

La puissance du vent ou puissance éolienne est définie de la manière suivante :

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (\text{I-11})$$

Où

- ρ est la densité de l'air (approx. $1.22 \text{ Kg} / \text{m}^3$ à la pression atmosphérique à 15°C).
- S est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.
- V_1 est la vitesse du vent.

La puissance mécanique disponible apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors :

$$P_m = C_p P_{mt} = \frac{C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3}{2} \quad (\text{I-12})$$

Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent:

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} R}{V_1} \quad (\text{I-13})$$

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple mécanique est donc directement déterminé par :

$$C_{mec} = \frac{P_m}{\Omega_{turbine}} = C_p \frac{\rho S V_1^3}{2} \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (\text{I-14})$$

I.11.2 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice figure (I-22). Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes [Idj 06] :

$$C_g = \frac{C_{mec}}{C} \quad (\text{I-15})$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{I-16})$$

I.11.3 Equation dynamique de l'arbre

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie J turbine et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique propose considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (\text{I-17})$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total (C_{mec}) appliqué au rotor :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (I-18)$$

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_{vis} , et le couple issu du multiplicateur C_g

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (I-19)$$

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

$$C_{vis} = f\Omega_{mec} \quad (I-20)$$

La figure (I-23) montre le schéma bloc du modèle de la turbine.

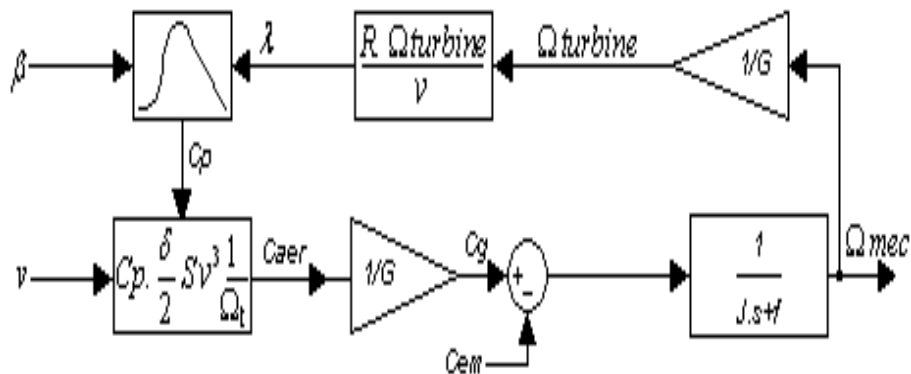


Figure (I-23) : schéma bloc du modèle de la turbine [Mer 07].

I.12 Techniques d'extraction du maximisation de la puissance

En pratique, la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique, de manière à maximiser la puissance électrique générée, c'est le principe de M.P.P.T.

On distingue deux structures de commande [Mer 07].

Le contrôle par asservissement de la vitesse mécanique ;

- Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.

Il est difficile de mesurer précisément la vitesse du vent qui est de nature une grandeur très fluctuante. Une mesure erronée de la vitesse conduit donc à une dégradation de la

puissance captée selon la technique MPPT. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse [Ain 04]

I.12.1 Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse

Cette structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas on obtient :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (I-21)$$

Si on néglige l'effet du couple des frottements visqueux, on obtient :

$$C_{em} = C_g \quad (I-22)$$

A partir de la mesure de la vitesse mécanique et de la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent, on obtient :

$$C_{aer} = C_p \frac{\rho S}{2} \frac{1}{\Omega_{turbine_estim}} v_{estim}^3 \quad (I-23)$$

$$v_{estim} = \frac{\Omega_{turbine_estim} R}{\lambda} \quad (I-24)$$

On fixe le ratio de vitesse à la valeur C_{pmax} , qui correspond au maximum du coefficient de puissance C_{pmax} et, en regroupant les équations précédentes, on aura l'expression du couple de référence proportionnelle au carré de la vitesse de la génératrice.

$$C_{em-ref} = \frac{C_p \rho \pi R^3 \Omega_{mec}^2}{\lambda^3 C_{pmax} 2G^2} \quad (I-25)$$

La figure (I-24) représente le schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.

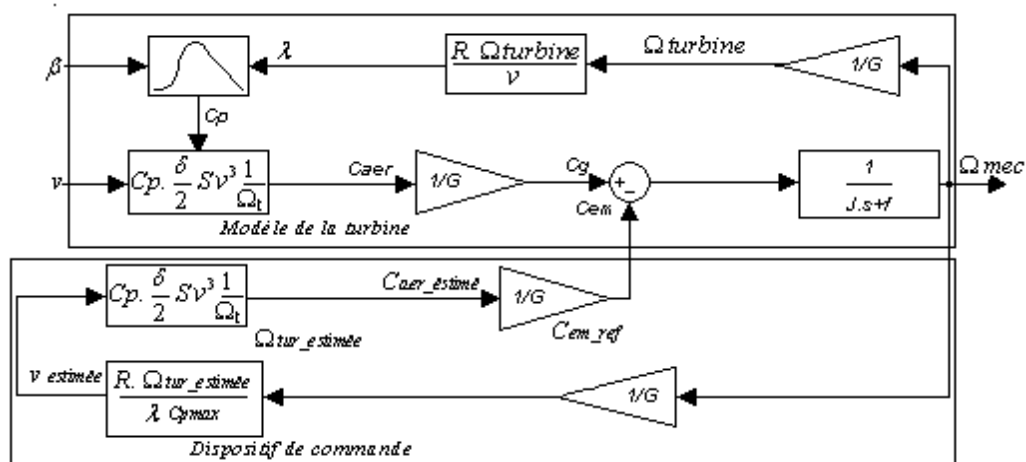
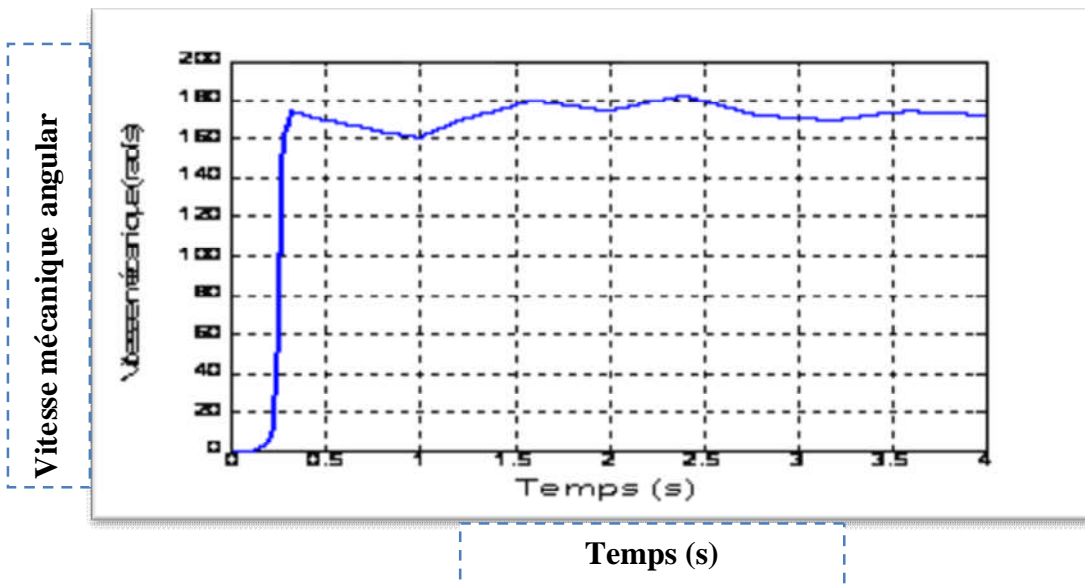
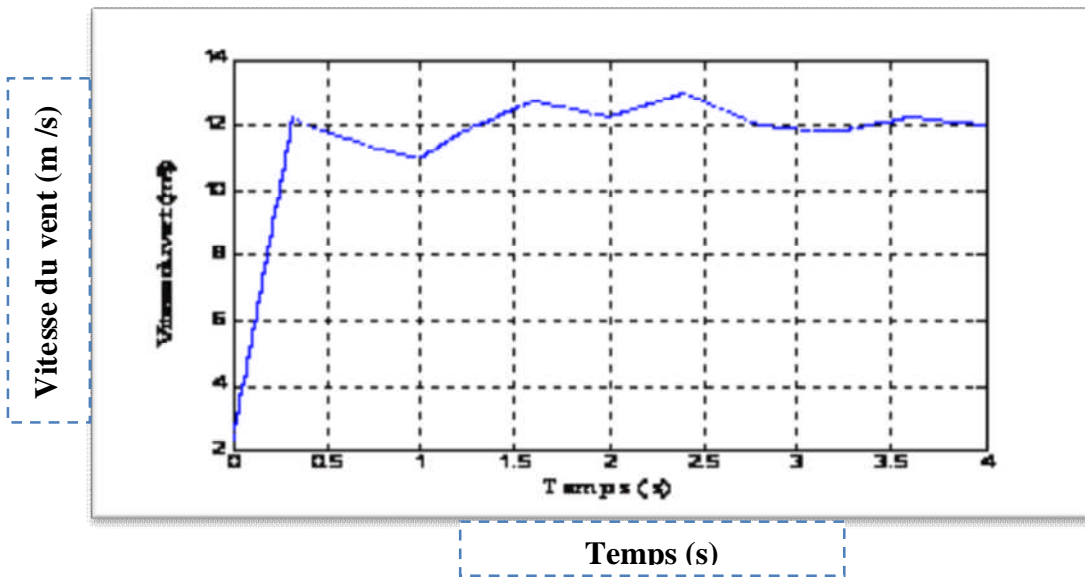


Figure (I-24): Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse [Ouf 06].

I.1.3 Résultats obtenus avec la structure de commande sans asservissement de vitesse

Les résultats de simulation avec un profil du vent moyen autour de (12.5 m/s).

- Ce coefficient de puissance (C_p) est obtenu pour un angle de calage β fixe ($\beta = 2^\circ$), qui nous donne un $\lambda_{optimal}$.
- On remarque que le C_p atteint une valeur moyenne de 0.4.



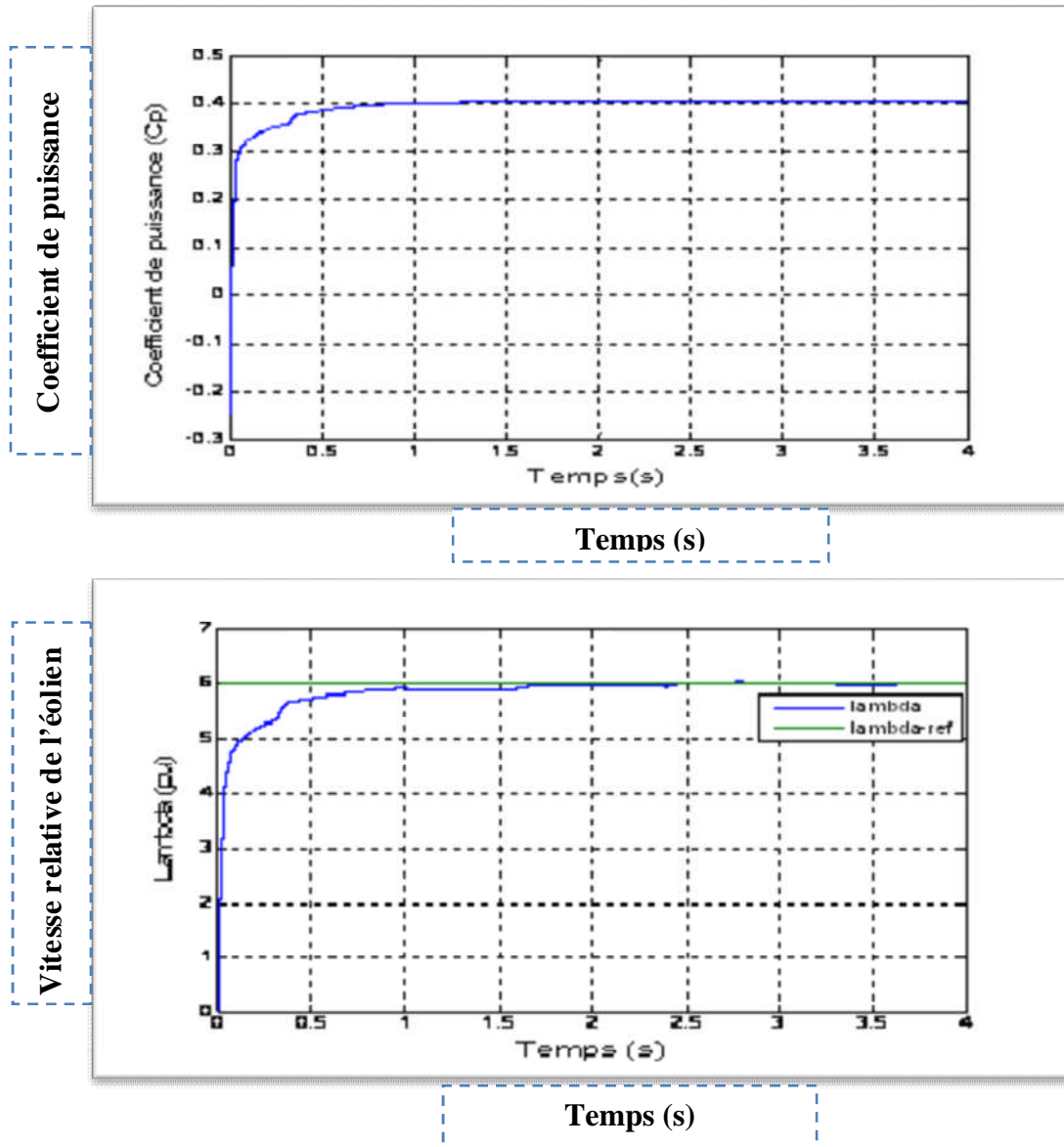


Figure (I-25) : Résultats de simulation d'une éolienne à vitesse variable de 1.5MW

I.14 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'étudier un panel de solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, les différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement (calage variable ou décrochage aérodynamique) ont été décrits. En ce qui concerne le fonctionnement autonome, la machine asynchrone à double alimentation apparaît comme une solution intéressante du point de vue du coût relativement faible et Production de puissance électrique quelle que soit sa vitesse de rotation (hypo en hyper) et la récupération de la puissance de glissement, La mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.

Pour le fonctionnement connecté sur un réseau, nous avons vu qu'il était important que la génératrice puisse fonctionner à vitesse variable et que la présence de convertisseurs entre la génératrice et le réseau nuisait au rendement global de l'installation.

Chapitre II

Modélisation de la machine
asynchrone double
alimentation

Chapitre II

Modélisation de la Machine Asynchrone

Doublement Alimentée

II. Introduction

Actuellement, même si, industriellement, le "grand éolien" (machines de quelques centaines de kW à quelques MW) semble en plein essor, le "petit et moyen éolien" (machines de quelques centaines de watts à quelques dizaines de kW) semble être une bonne solution lorsque le raccordement au réseau est impossible, trop cher ou trop complexe à réaliser. Dans ce cas des petites éoliennes peuvent constituer une bonne alternative à la présence du réseau soit par génération directe de ce réseau soit par l'intermédiaire d'un système de stockage et d'un onduleur. Dans ce dernier cas, l'éolienne n'est d'ailleurs pas complètement autonome puisque la présence du convertisseur nécessite un dispositif de stockage d'énergie ou une source externe afin d'assurer la commande de celui-ci. En cas de décharge totale du dispositif de stockage ou de défaillance de la source externe, il ne peut plus y avoir production d'énergie. [Poi 03]

Seul un dispositif basé sur une machine asynchrone à double alimentation, (MADA) est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures : le stator et le rotor.

Dans ce chapitre nous allons présenter une étude générale de la machine asynchrone à double alimentation. Une modélisation mathématique dans un repère diphasé lie au champ tournant.

Le modèle mathématique élaboré est implanté dans le logiciel MATLAB/ SUMILINK.

II.1 Les différentes structures d'alimentation et de commande de la MADA

II.1.1 Structure des machines asynchrones à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Intégrée dans un système éolien, la machine a généralement son stator connecté au réseau et l'énergie rotorique varie selon différents systèmes.

On peut voir sur la figure (II-1) que les enroulements rotoriques sont connectés en étoile et les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants [Mil 06]

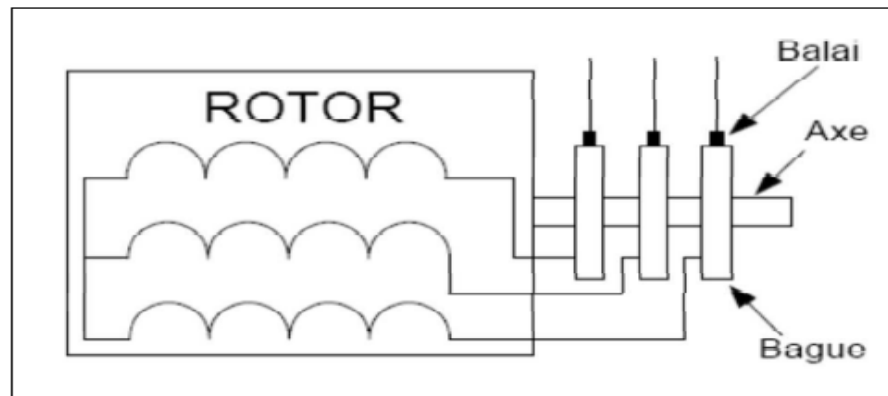


Figure (II-1) : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA [Poi 03].

II.1.2 Fonctionnement en génératrice à vitesse variable

La Figure (II-2) montre les différentes configurations de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation dont le stator est relié directement au réseau et dont le rotor est relié au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur (structure Scherbius PWM). P_{RES} est la puissance délivrée au réseau ou fournie par le réseau, P_s , la puissance transitant par le stator, P_R , la puissance transitant par le rotor, et P_{mec} , la puissance mécanique [Pam 04].

Lorsque la machine fonctionne en moteur, la puissance est fournie par le réseau. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, "la puissance de glissement" est renvoyée sur le réseau, c'est la cascade hypo synchrone. En mode moteur hyper synchrone, une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et est convertie en puissance mécanique.

En fonctionnement génératrice, le comportement est similaire, la puissance fournie à la machine par le dispositif qui l'entraîne est une puissance mécanique. En mode hypo synchrone, une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor. Dans ce mode, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à gP_{mec} est transmise par l'intermédiaire du rotor.

Pour une utilisation dans un système éolien, les quadrants 3 et 4 sont intéressants. En effet si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas $\pm 30\%$ en deçà ou au delà de la vitesse de synchronisme (ce qui représente un compromis entre la taille du convertisseur et la plage de variation de vitesse), la machine est capable de débiter une puissance allant de 0,7 à 1,3 fois la puissance nominale. Le convertisseur est alors dimensionné pour faire transiter uniquement la puissance de glissement c'est à dire au maximum 0,3 fois la puissance nominale de la machine. Il est alors moins volumineux, moins coûteux, nécessite un système de refroidissement moins lourd et génère moins de perturbations que s'il est placé entre le réseau et le stator d'une machine à cage.

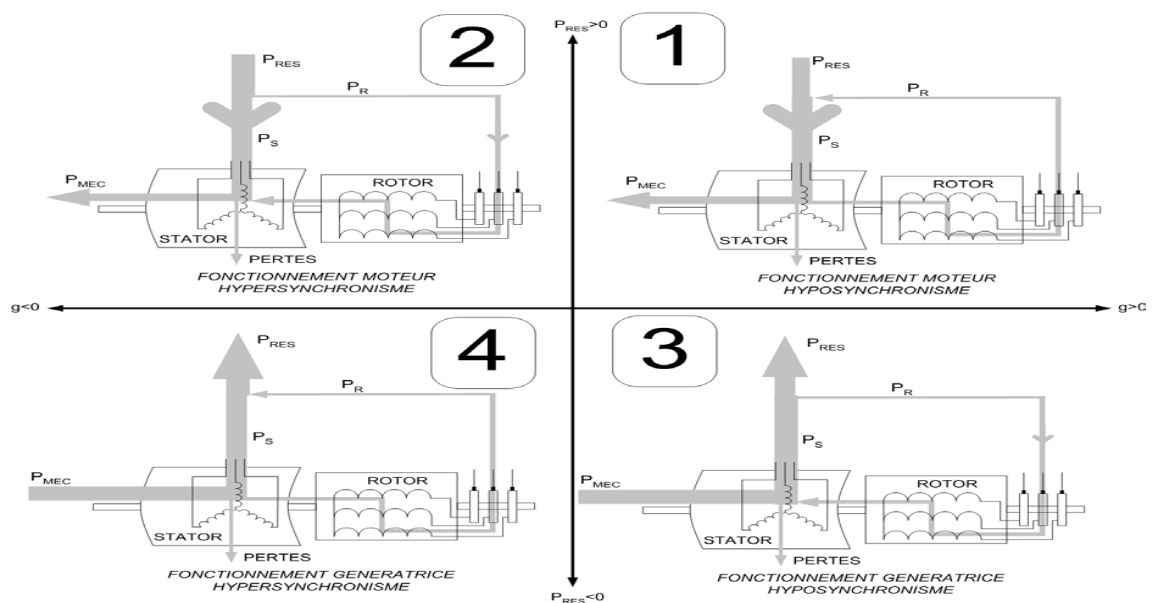


Figure (II-2) : Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation [Poi 03].

La Figure (II-4) montre la caractéristique de production optimale pour les deux types de machines (cage d'écuréuil avec convertisseur et MADA) dans un système éolien. La puissance totale produite par la MADA est la somme des puissances statorique et rotorique. Or, jusqu'au synchronisme, la puissance rotorique est négative, la MADA produit donc

Légèrement moins que la machine à cage. En revanche, au-delà du synchronisme, la figure montre que la MADA est capable de produire de l'énergie par l'intermédiaire du rotor

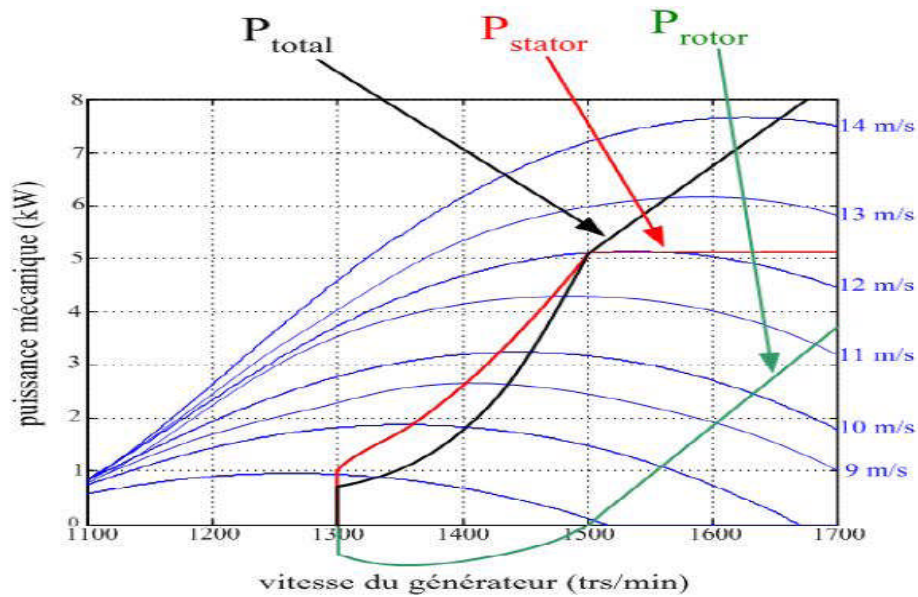


Figure (II-3): Puissance produite par la MADA en fonction de la vitesse du vent [Poi 03].

II.2 Modélisation de la machine à double alimentation

A fin d'établir la modélisation de la MADA, nous allons déterminer le modèle d'une machine asynchrone à rotor bobiné. Ce modèle sera établi de la même manière que le modèle de la machine asynchrone à cage avec comme différence l'existence de tension rotorique non nulles [Gre 97].

La théorie de la machine asynchrone à double alimentation est basée sur la transformation de Park qui rapporte les équations statoriques et rotoriques triphasé à deux axes perpendiculaires (biphasés) appelés l'axe direct d et axe quadratique q , pour des raisons d'implications ; nous concéderons les hypothèses simplicatrices suivantes :

- La machine sera supposée idéale, c'est-à-dire que les ampères-tours seront supposés distribués sinusoïdalement le long de l'entrefer de la machine et que les harmoniques d'espace seront négligés;
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau;
- Les pertes dans le fer (par hystérésis et courant de Foucault) seront négligées;
- La saturation du circuit magnétique sera négligée;
- Les grandeurs homopolaires seront considérées comme nulles.

II.2.1 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère triphasé abc

La machine asynchrone à double alimentation se compose principalement de deux parties, stator et rotor (figure (II-4)). Le rotor tourne à l'intérieur de la cavité de la machine et est séparé du stator par un entrefer. En principe les circuits électriques du stator et du rotor sont constitués de trois enroulements identiques couplés en étoile à la seule différence est que celui du rotor relié à trois ou quatre bagues sur lesquelles glissent des balais. [Khe 07]

Les trois enroulements du stator (A, B et C) sont parallèles aux enroulements du rotor et sont distribués sinusoïdalement, décalés de $\frac{2\pi}{3}$

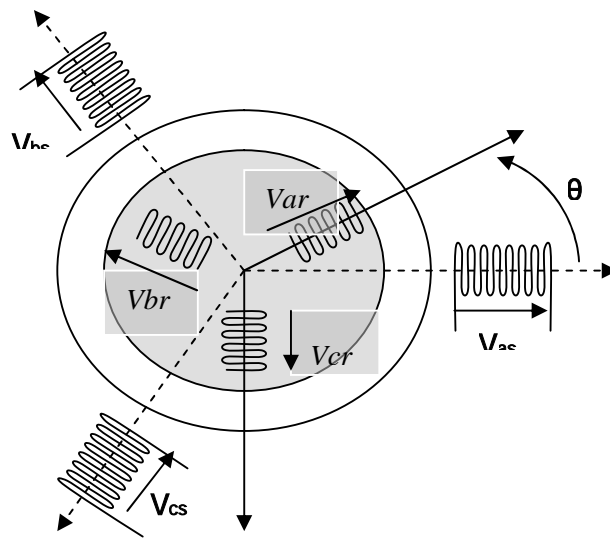


Figure (II-4) : représentation schématique d'une machine asynchrone à double alimentation

II.2.1.1 Mise en équations de la machine asynchrone à double alimentation

Le comportement de la machine asynchrone peut être traduit par trois types d'équations

Equations électriques, équations magnétiques, équations mécaniques.

II.2.1.1.1 Equations électriques [Aza 08]

En vertu de la loi de Faraday, nous pouvons écrire:

Pour les enroulements statoriques:

$$V_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d\Phi_{sa}}{dt}, \quad V_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d\Phi_{sb}}{dt}, \quad V_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d\Phi_{sc}}{dt} \quad (\text{II-1})$$

et pour les enroulements rotoriques :

$$V_{ra} = R_r i_{ra} + \frac{d\phi_{ra}}{dt}, V_{rb} = R_r i_{rb} + \frac{d\phi_{rb}}{dt}, V_{rc} = R_r i_{rc} + \frac{d\phi_{rc}}{dt} \quad (\text{II-2})$$

Ou sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II-3a})$$

D'où les formes matricielles condensées :

$$\begin{cases} V_s = R_s [i_s] + \frac{d}{dt} [\phi_s] \\ V_r = R_r [i_r] + \frac{d}{dt} [\phi_r] \end{cases} \quad (\text{II-3b})$$

$$[V_r] \neq 0$$

R_s, R_r : Résistances des enroulements statoriques et rotoriques.

II.2.1.1.2 Les équations magnétiques :

Les flux sont donnés par :

$$\begin{cases} \phi_s = [L_{ss}][i_s] + [M_{sr}][i_r] \\ \phi_r = [L_{rr}][i_r] + [M_{rs}][i_s] \end{cases} \quad (\text{II-4})$$

Avec :

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}; \quad L_{rr} = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

l_s, l_r : Inductances de fuites des statoriques et rotoriques.

M_s, M_r : inductances mutuelles.

La matrice des inductances mutuelles (matrice de couplage rotor-stator) s'écrit :

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{sr} \cos(\theta) & M_{sr} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & M_{sr} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ M_{sr} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & M_{sr} \cos(\theta) & M_{sr} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ M_{sr} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & M_{sr} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & M_{sr} \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II-5})$$

Avec :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t$$

En remplaçant (II-4) dans (II-3b), on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt}([L_{ss}][i_s]) + \frac{d}{dt}([M_{sr}][i_r]) \\ [V_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt}([L_{rr}][i_r]) + \frac{d}{dt}([M_{rs}][i_s]) \end{cases} \quad (\text{II-6})$$

II.2.1.1.3 Equation mécanique

Le fonctionnement d'une charge mécanique en rotation est régi par l'équation suivante :

$$C_{em} = p [I_s]^t \frac{d}{d\theta} ([M_{sr}][I_r]) \quad (\text{II-7})$$

Ω étant la vitesse mécanique de rotor, J moment d'inertie, C_e le couple moteur, C_r le couple résistant, f_c le coefficient de frottement.

Donc, l'équation mécanique de la machine s'écrit :

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f_c \Omega \quad (\text{II-8})$$

La résolution analytique dans ce repère est très difficile car le système

d'équations est à coefficients variables en fonction de θ (angle de rotation de la machine).

II.2.1.2 Modèle de Park de la machine asynchrone à double alimentation

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasé-diphasé suivie d'une rotation. Elle permet de passer des référentiels (A, B, C) vers $(\alpha, \beta, 0)$, puis (d,q,0). Le référentiel $(\alpha, \beta, 0)$ est toujours fixe, par rapport à (A, B, C), par contre le référentiel (d,q,0) est mobile. Il forme avec le repère fixe $(\alpha, \beta, 0)$ un angle qui est appelé angle de la transformation de Park, ou angle de Park. [Bag 99].

Elle consiste à appliquer aux courants, tensions et flux un changement de variable faisant intervenir l'angle entre l'axe des enroulements et les axes "d" et "q".

Ainsi, les enroulements statoriques S_a, S_b, S_c et les enroulements rotoriques R_a, R_b et R_c sont remplacés respectivement par deux enroulements statoriques d_s, q_s ,

et deux enroulements rotoriques d_r, q_r . La figure (II-5) permet de définir les divers référentiels et les relations spatiales qui les lient.

On désigne par (d : axe direct, q : axe en quadrature

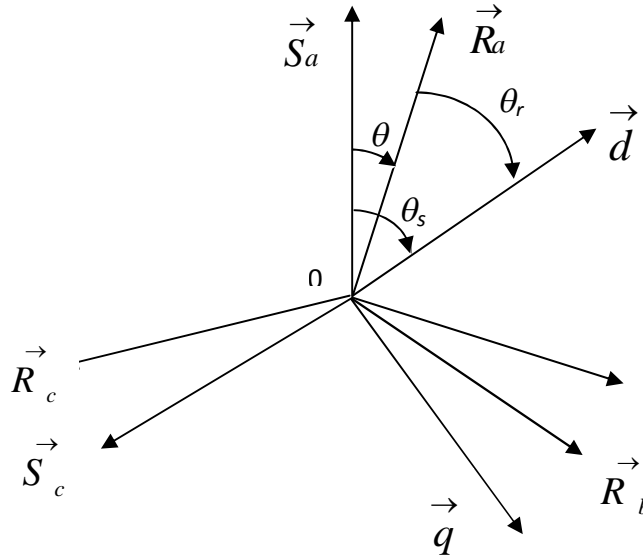


Figure (II-5) : Repérage angulaire des systèmes d'axes fictifs de la machine asynchrone.

On remarque sur la figure (II-9) que θ_s et θ_r sont liés par la relation :

$$\theta = \theta_s - \theta_r \quad (II-9)$$

et en dérivant par rapport au temps:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \quad (II-10)$$

Dans la transformée de Park, on définit une matrice unique de transformation qui est la suivante :

$$p(\alpha) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\alpha) & -\sin(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\alpha - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II-11)$$

L'angle α est au choix de l'utilisateur et peut dépendre du temps. Le fait que $[P(\alpha)]$ soit orthonormée implique que son inverse est égale à sa transposée.

$$[p(\alpha)]^{-1} = [p(\alpha)]^T$$

Cette dernière permet en général, le passage du système triphasé par a, b, c à un système diphasé d, q quelques soient les grandeurs électriques ou électromagnétiques (flux, courant et tension). La transformation des grandeurs statoriques est définie par :

$$[i_{dq}] = [p(\alpha)][i_{abc}] \quad (\text{II-12})$$

$$[V_{dq}] = [p(\alpha)][V_{abc}] \quad (\text{II-13})$$

$$[\Phi_{dq}] = [p(\alpha)][\Phi_{abc}] \quad (\text{II-14})$$

II.2.1.2.1 Modèle biphasé de la MADA

Nous allons maintenant décrire la modélisation dans un repère tournant diphasé (d, q) en utilisant les transformations de Park et de Concordia permettant la conservation des puissances, soit θ l'angle électrique entre l'axe et du repère diphasé et le repère fixe lié à la phase a du stator.

Les tensions statoriques et rotoriques sont données par les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (\omega_s - \omega) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (\omega_s - \omega) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II-15})$$

Avec :

$$\begin{cases} \omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \\ \omega = \frac{d\theta}{dt} \end{cases}$$

De plus, les équations des flux sont exprimées par :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II-16})$$

Avec:

$L_s = l_s - M_s$: Inductance cyclique statorique.

$L_r = l_r - M_r$: Inductance cyclique rotorique.

$M = 3/2 M_{sr}$: Mutuelle cyclique entre rotor-stator.

$$\text{Ou : } \begin{cases} i_{ds} = \frac{1}{\sigma L_s} \Phi_{ds} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} \Phi_{dr} \\ i_{qs} = \frac{1}{\sigma L_s} \Phi_{qs} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} \Phi_{qr} \\ i_{dr} = -\frac{M}{\sigma L_s L_r} \Phi_{ds} + \frac{1}{\sigma L_r} \Phi_{dr} \\ i_{qr} = -\frac{M}{\sigma L_s L_r} \Phi_{qs} + \frac{1}{\sigma L_r} \Phi_{qr} \end{cases} \quad (\text{II-17})$$

avec : $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$ coefficient de dispersio

D'autre part, l'équation du couple électromagnétique est donnée par [Mam 05] :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P \frac{M}{L_s} (\Phi_{ds} i_{qr} - \Phi_{qs} i_{dr}) \quad (\text{II-18})$$

II.3 Choix du référentiel

On dispose trois possibilités pour le choix du référentiel d'observation selon les objectifs de l'application envisagé, soit : le référentiel lié au stator, le référentiel lié au rotor ou le référentiel solidaire du champ tournant. C'est ce dernier que l'on considérera en vue de la commande vectorielle à flux rotorique orienté que nous étudierons au chapitre suivant.

Le glissement de vitesse ω_{gl} est défini par $\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r$, parmi les équations que nous avons exposées précédemment, les seules dont la formulation sont affectées par le choix du référentiel sont les équations du système.

II.3.1 Référentiel lié au stator

Ce référentiel est noté (α, β) , il se traduit par les conditions $\frac{d\theta_s}{dt} = 0; \frac{d\theta_r}{dt} = -\omega_r$

D'où les équations électriques suivantes :

$$\begin{cases} v_{\alpha s} = R_s i_{\alpha s} + \left(\frac{d\Phi_{\alpha s}}{dt} \right) \\ v_{\beta s} = R_s i_{\beta s} + \left(\frac{d\Phi_{\beta s}}{dt} \right) \\ v_{\alpha r} = R_r i_{\beta r} + \left(\frac{d\Phi_{\alpha r}}{dt} \right) + \omega_r \Phi_{\beta r} \\ v_{\beta r} = R_r i_{\beta r} + \left(\frac{d\Phi_{\beta r}}{dt} \right) - \omega_r \Phi_{\alpha r} \end{cases} \quad (\text{II-19})$$

Ce référentiel sera choisi de préférence en vue d'étudier des variations importantes de vitesse de rotation, associées ou non avec les variations de la fréquence d'alimentation.

II.3.2 Référentiel lié au rotor

Ce référentiel est noté (X, Y), il se traduit par les équations : $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_r$, $\frac{d\theta_r}{dt} = 0$.

D'où les équations électriques :

$$\begin{cases} v_{Xs} = R_s i_{Xs} + \left(\frac{d\Phi_{Xs}}{dt}\right) - \omega_r \Phi_{Ys} \\ v_{Ys} = R_s i_{Ys} + \left(\frac{d\Phi_{Ys}}{dt}\right) + \omega_r \Phi_{Xs} \\ v_{Xr} = R_r i_{Xr} + \left(\frac{d\Phi_{Xr}}{dt}\right) \\ v_{Yr} = R_r i_{Yr} + \left(\frac{d\Phi_{Yr}}{dt}\right) \end{cases} \quad (\text{II-20})$$

Ce référentiel peut être intéressant dans les problèmes de régimes transitoires ou la vitesse de rotation est considérée comme constante.

II.3.3 Référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel est noté (d, q), il se traduit par les conditions: $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s$,

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega_r = \omega_{gl}.$$

D'où les équations électriques :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \left(\frac{d\Phi_{ds}}{dt}\right) - \omega_s \Phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \left(\frac{d\Phi_{qs}}{dt}\right) + \omega_s \Phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \left(\frac{d\Phi_{dr}}{dt}\right) - \omega_{gl} \Phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \left(\frac{d\Phi_{qr}}{dt}\right) + \omega_{gl} \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II-21})$$

Ce référentiel est le seul qui n'introduit pas des simplifications dans la formulation des équations électriques. Cependant, il est avantageux dans les problèmes où la fréquence d'alimentation est constante.

Il est aussi très utilisé même dans l'étude de l'alimentation des moteurs asynchrones à fréquence variable, lorsqu'on veut étudier la transmittance du moteur relativement à des petites perturbations autour d'un régime donné.

Dans la suite de notre travail nous allons opter pour ce référentiel. La figure (II-6) montre les différents référentiels qu'on a définis auparavant

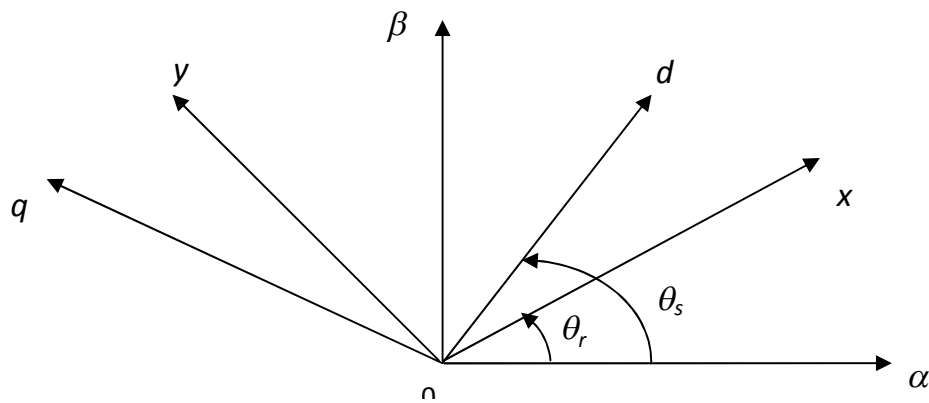


Figure (II-6): Représentation des différents référentiels.

II.4 Mise sous forme d'équations d'état :

Nous considérons le flux statorique et le courant rotorique comme étant les variables d'état et les tensions statoriques et rotoriques des variables de commandes.

D'après l'équation (II-15) on peut déduire le courant i_{sd} et i_{sq} en fonction du flux statorique Φ_{sd} et Φ_{sq} et le courant rotorique i_{rd} et i_{rq} :

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{1}{L_s} (\Phi_{ds} - M i_{dr}) \\ i_{sq} = \frac{1}{L_s} (\Phi_{qs} - M i_{qr}) \end{cases} \quad (\text{II-22})$$

En introduisant les équations (II-21) dans les équations (II-14) on trouve les deux équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{d(\Phi_{ds})}{dt} = V_{ds} - \frac{R_s}{L_s} \Phi_{ds} + \frac{R_s}{L_s} M i_{dr} + \omega_s \Phi_{qs} \\ \frac{d(\Phi_{qs})}{dt} = V_{qs} - \frac{R_s}{L_s} \Phi_{qs} + \frac{R_s}{L_s} M i_{qr} - \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II-23})$$

En exprimant le flux rotorique en fonction du flux statorique Φ_{sd} et Φ_{sq} et le courant rotorique i_{rd} et i_{rq} :

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = \sigma L_r i_{dr} + \frac{M}{L_s} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qr} = \sigma L_r i_{qr} + \frac{M}{L_s} \Phi_{qs} \end{cases} \quad (\text{II-24})$$

En introduisant les équations (II-24) dans les équations (II-21) on trouve les deux équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{di_{dr}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} V_{dr} - \frac{R_r}{\sigma L_r} i_{dr} - \frac{k^2}{\sigma M} \frac{d\Phi_{ds}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) i_{qr} + \frac{k^2}{\sigma M} (\omega_s - \omega_r) \Phi_{qs} \\ \frac{di_{qr}}{dt} = \frac{R_r}{\sigma L_r} V_{qr} - \frac{R_r}{\sigma L_r} i_{qr} - \frac{k^2}{\sigma M} \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) i_{dr} + \frac{k^2}{\sigma M} (\omega_s - \omega_r) \Phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II-25})$$

Avec :

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_r L_s}} \quad \text{Et} \quad \sigma = 1 - k^2$$

II.5 Conclusion

L'objectif de ce travail est de modéliser et caractériser le comportement de la machine asynchrone à double alimentation (MADA), utilisée comme génératrice. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique à été établi, dont la complexité à été réduite. Nous avons constaté que le modèle de la machine est un système d'équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous à permis de simplifier ce modèle. Dans la partie suivante on va présenter la commande des puissances, active et réactive, du générateur asynchrone à double alimentation.

Chapitre III

**Commande vectorielle et
commande à structure variable de
la machine asynchrone doublement
alimentée**

Chapitre III

Stratégie de commande de la génératrice asynchrone à double alimentation

III. Introduction

Ce chapitre présente le fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation en génératrice avec contrôle des puissances active et réactive statoriques. La première partie concerne la synthèse du régulateur Proportionnel – Intégral. Reste le plus communément utilisé pour la commande de la MADA en génératrice. Ainsi que des nombreux systèmes de régulation industriels. La seconde partie a utilisé le régulateur par mode glissant (RMG) afin de comparer les performances de ces deux régulateurs en termes de suivi de consigne.

III.1 Stratégie de commande de la GADA

Pour des raisons évidentes de simplifications, un référentiel d-q lié au champ tournant statorique et un flux statorique aligné sur l'axe d ont été adoptés. De plus, la résistance statorique peut être négligée étant donné que c'est une hypothèse réaliste pour les génératrices de forte puissance utilisées dans l'éolien. Partant de ces considérations, le couple électromagnétique de la machine asynchrone à double alimentation devient :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P \frac{M}{L_s} (\Phi_{qs} i_{dr} - \Phi_{ds} i_{qr}) \quad (III-1)$$

En se basant sur cette équation, on peut réaliser un découplage de telle façon que le couple sera commandé uniquement par le courant rotorique en quadrature i_{qr} (l'axe q doit être dépourvu du flux ($\Phi_{qs} = 0$), et le flux par le courant rotorique directs i_{dr} .

La relation finale du couple est:

$$C_{em} = \frac{3}{2} P \frac{M}{L_s} \Phi_{ds} i_{qr} \quad (III-2)$$

III.2 Etablissement du modèle dans le repère d,q :

Afin de simplifier le modèle statoriques établi dans le repère d,q ,on choisit un référentiel tel que le vecteur du flux statorique Φ_s soit colinéaire à l'axe d du repère d,q, d'où on écrit:

$$\Phi_{ds} = \Phi_s ; \quad \Phi_{qs} = 0$$

L'équation des flux (II-16) devient

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ 0 = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III-3})$$

Si l'on suppose le réseau électrique stable, ayant pour tension simple V_s , cela conduit à un flux statorique Φ_s constant. Cette considération associée à l'équation (III-2) montre que le couple électromagnétique C_{em} est directement proportionnel au courant rotorique en quadrature i_{qr} .

De plus, si l'on néglige la résistance des enroulements statorique, hypothèse réaliste pour les machines de forte puissance utilisées pour la production éolienne, les équations des tensions statorique de la machine se réduisent à :

$$\begin{cases} V_{ds} = \frac{d(\Phi_{ds})}{dt} \\ V_{qs} = \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{III-4})$$

Avec :

ω_s : La pulsation électrique des grandeurs statorique.

Avec l'hypothèse du flux statorique constant, on obtient :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s \end{cases} \quad (\text{III-5})$$

A l'aide de l'équation (III-3), on peut établir le lien entre les courants statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases} i_{ds} = -\frac{M}{L_s} i_{dr} + \frac{\Phi_s}{L_s} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_s} i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III-6})$$

III.3 Relation entre puissances statoriques et courants rotoriques

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

$$\begin{cases} P = V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs} \\ Q = V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs} \end{cases} \quad (\text{III-7})$$

Ou bien encore, d'après l'équation (III-6) par :

$$\begin{cases} P = V_s i_{qs} \\ Q = V_s i_{ds} \end{cases} \quad (\text{III-8})$$

Pour obtenir l'expression des puissances en fonction des courants rotoriques, on remplace dans l'équation précédente les courants par l'équation (III-6):

$$\begin{cases} P = -V_s \frac{M}{L_s} \Phi_{ds} \\ Q = -V_s \frac{M}{L_s} i_{dr} + V_s \frac{\Phi_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III-9})$$

A partir des équations (III-4) et (III-5), nous obtenons, pour le flux statorique, l'expression suivante:

$$\Phi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (\text{III-10})$$

L'expression des puissances (III-9) peut donc se simplifier de la manière suivante :

$$\begin{cases} P = -V_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q = -V_s \frac{M}{L_s} i_{dr} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (\text{III-11})$$

Si l'on considère l'inductance magnétisante M constante, on remarque que l'équation (III-9) fait apparaître que la puissance active P statorique est directement proportionnelle au courant rotorique en quadrature i_{qr} . De plus, la puissance réactive Q est proportionnelle au courant rotorique direct i_{dr} , une constante près $\frac{V_s^2}{L_s \omega_s}$

Afin de pouvoir contrôler correctement la machine, il nous faut alors établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui seront appliquées à la machine.

En remplaçant dans les expressions des composantes directes et quadratures des équations des flux rotoriques, on aura : [Boy 06]

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = L_r \sigma i_{dr} + \frac{M}{L_s} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r \sigma i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III-12})$$

Avec :

σ est le coefficient de dispersion entre les enroulements d et q.

Il est égal à :

$$\sigma = \left(1 - \frac{M^2}{L_r L_s}\right)$$

En remplaçant l'expression des flux rotoriques de l'équation précédente (III-12) par leurs expressions dans l'équation (II-38) on obtient :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{di_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{di_{qr}}{dt} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{dr} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III-13})$$

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

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{dr} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III-14})$$

Les équations (III-11) et (III-13) permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler (Figure (III-1)).

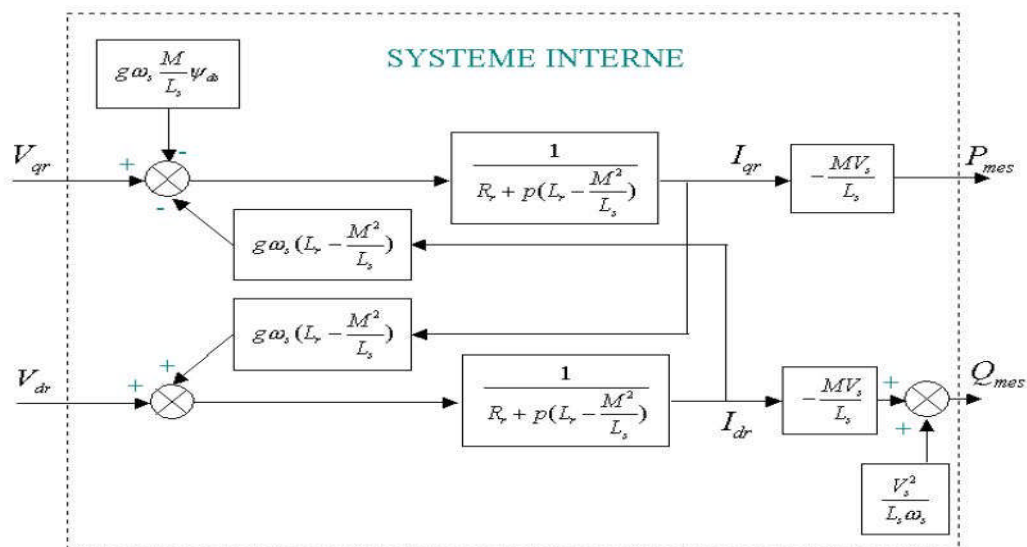


Figure (III-1) : Schéma bloc du système à réguler [Poi 03].

Les tensions rotoriques diphasées sont les grandeurs à imposer pour contrôler les courants rotoriques. V_{dr} et V_{qr} sont ainsi considérés comme des variables de commande qui sont générées par le bloc de contrôle à flux orienté (Figure III-2) et les courants rotoriques i_{dr}

et i_{qr} comme des variables d'état. Les tensions rotoriques sont ainsi fonction des grandeurs de consigne P_{ref} et Q_{ref} .



Figure (III-2) : Bloc de commande via les puissances.

III.4 Structure de la commande :

Elle est donnée par les équations suivantes :

$$\begin{cases} i_{qref} = -\frac{P_{ref}L_s}{V_s M} \\ i_{dref} = -\frac{Q_{ref}L_s}{V_s M} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (III-15)$$

Dans la figure (III-3), un schéma d'implantation général illustre la commande proposée, selon la stratégie de l'orientation du flux rotorique. Dans cette même figure, des régulateurs à gains élevés sont utilisés pour pouvoir contrôler les courants rotoriques i_{dr} et i_{qr} . Les deux courants de référence sont obtenus à partir du contrôle des puissances active et réactive.

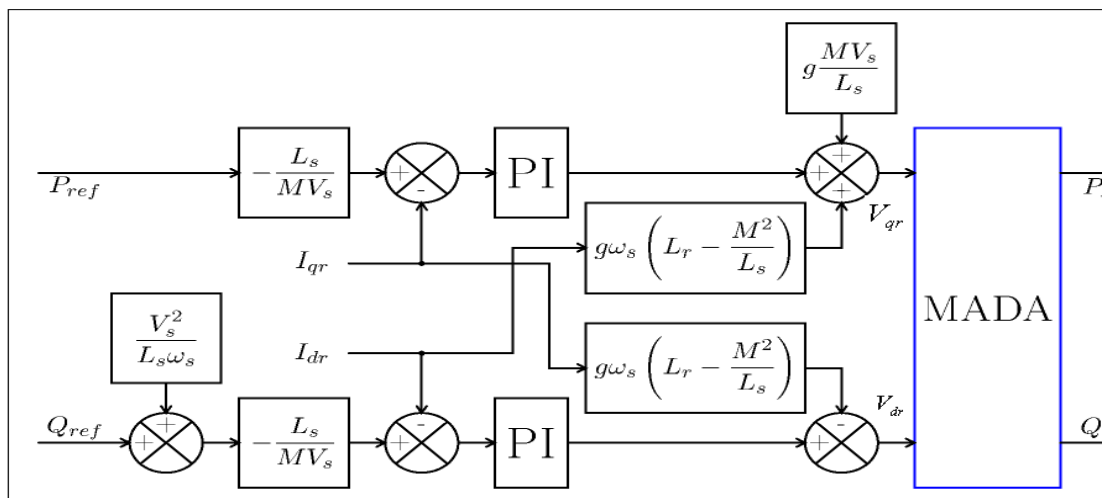


Figure (III-3) : Schéma bloc de la commande indirecte [Poi 03].

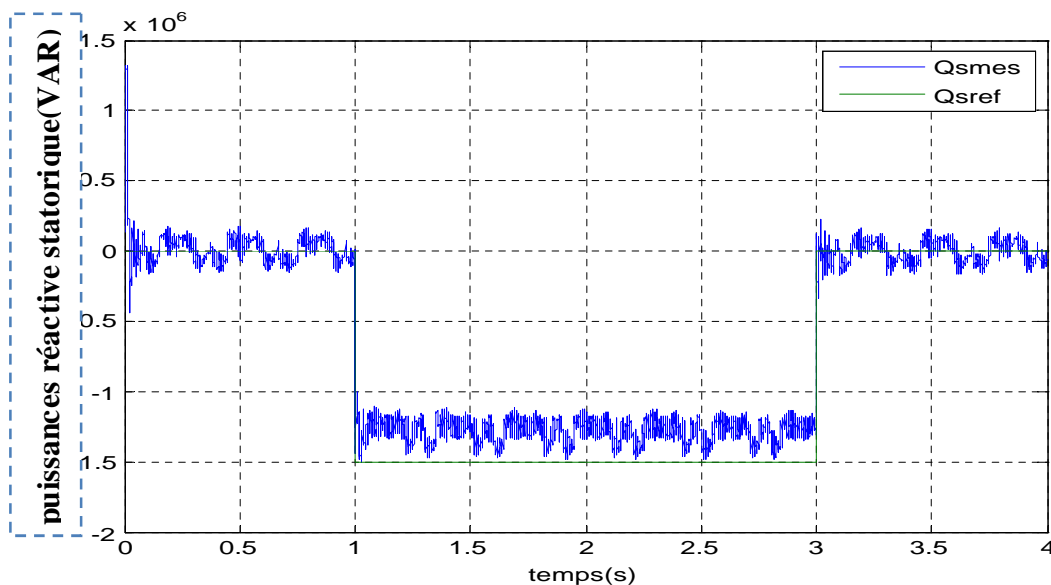
III.4.1 Type de régulateurs utilisés

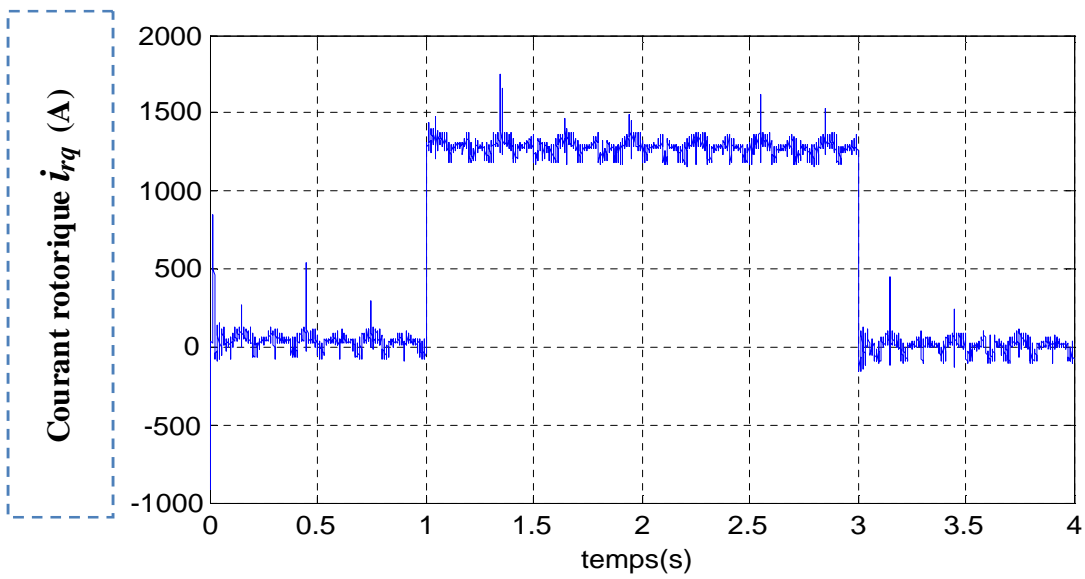
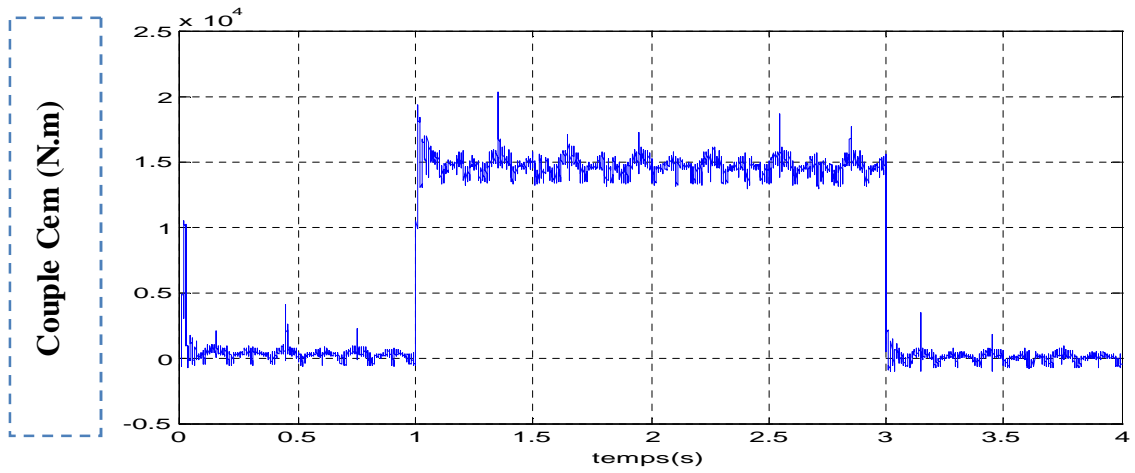
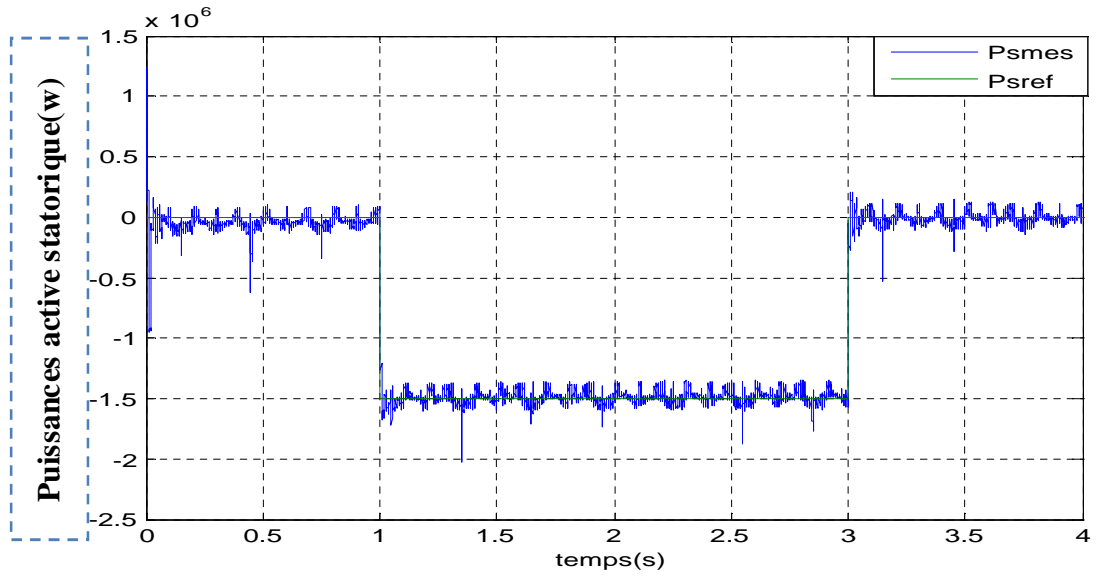
Nous allons maintenant procéder à la synthèse de régulateurs nécessaires à la réalisation de la commande en puissance active et réactive de la MADA. Le régulateur Proportionnel-Intégral (PI) reste le plus communément utilisé pour la commande de la MADA en génératrice, ainsi que dans de nombreux systèmes de régulation industrielle. Les régulateurs de chaque axe ont pour rôle d'annuler l'écart entre les puissances active et réactive de référence et mesurées. [Khe 07]

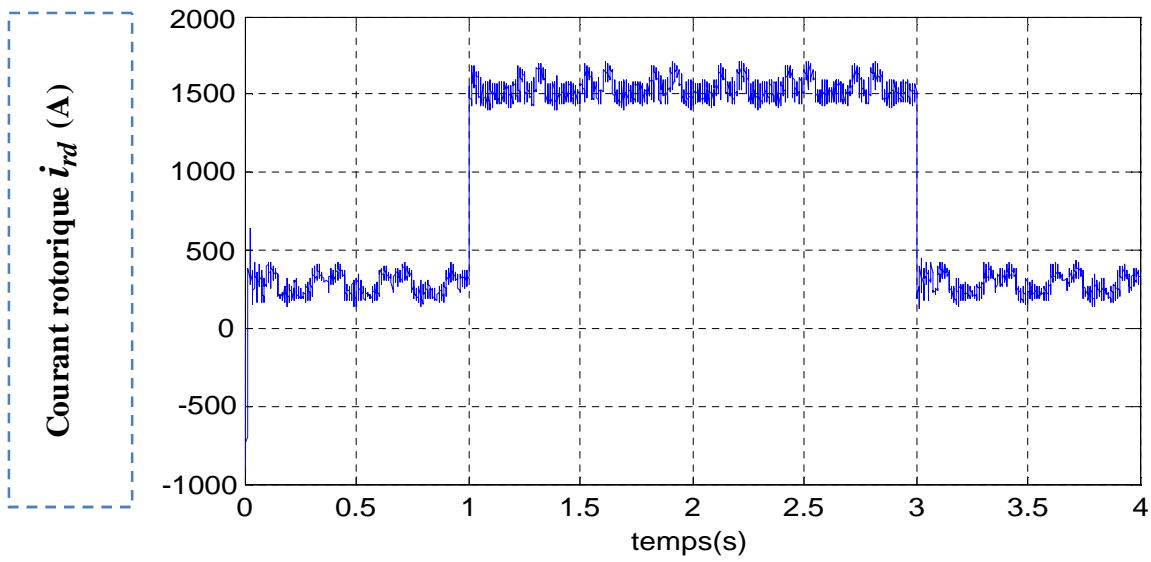
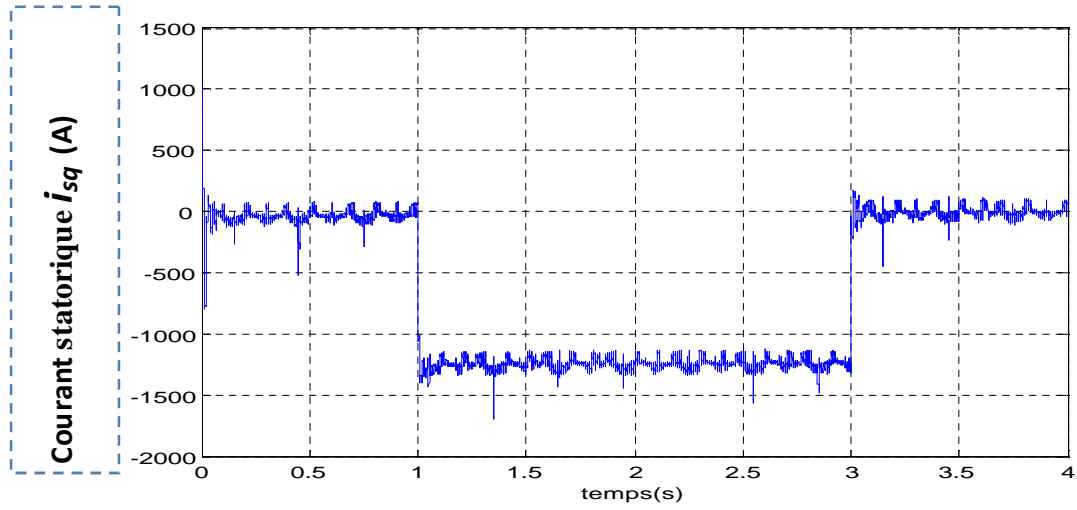
III.5 Simulation de la commande vectorielle avec le contrôleur de vitesse PI

III.5.1 Résultats des simulations

Nous avons procédé à une série de simulations afin de valider le modèle de la commande vectorielle envisagée et la synthèse des différents correcteurs de type PI (dans l'annexe B, nous avons détaillé ce correcteur). L'association [génératrice à double alimentation + alimentation] munie de la commande vectorielle indirecte à orientation du flux statorique a été soumise à une tension continue de 1200 Volts, nous avons fixé la fréquence de la porteuse à la valeur de 900 Hertz (d'où un indice de modulation $m = 18$) et ajusté son coefficient de réglage à $r = 0,75$. Les conditions de simulation étant les mêmes que précédemment et sont citées dans l'annexe A.







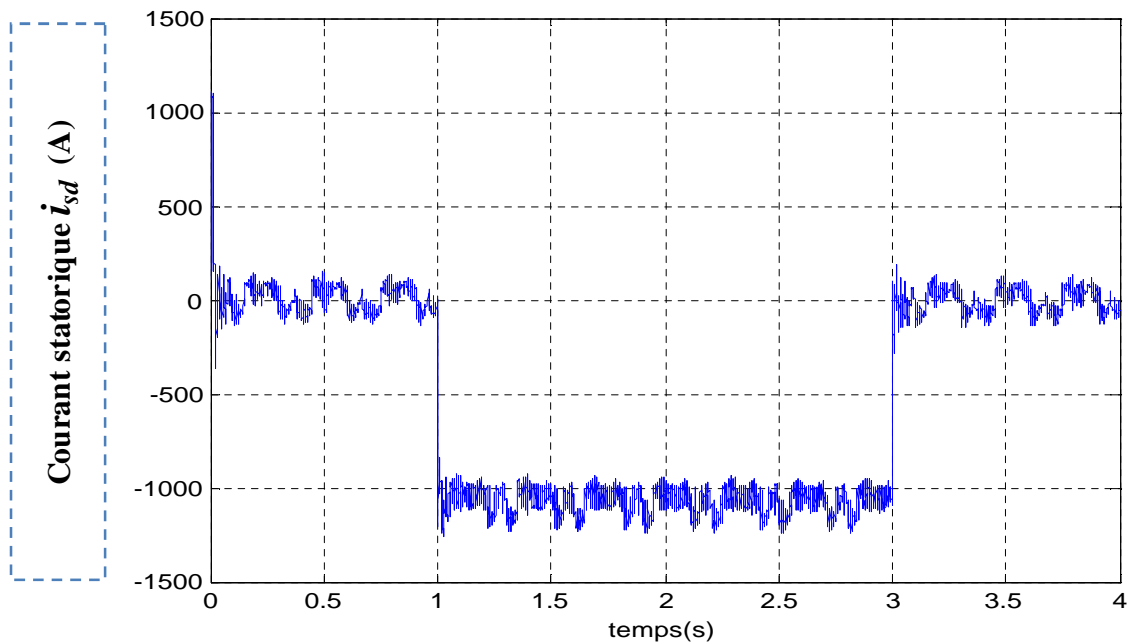


Figure (III-4) : Réponse du système [MADA +onduleur]: $E = 1200$ Volts, $f = 50$ Hz (fondamental), modulatrices d'amplitude : $690 * \sqrt{2}$, fréquence de la porteuse : 900 Hz, ($m = 18, r=0.75$).

Pour illustrer les performances des régulateurs appliqués, nous avons simulé notre modèle pour différentes valeurs de référence.

En cours de la simulation qui déroule dans (0-4s), nous pouvons constater de bons résultats en termes de réponse aux échelons pour les puissances active et réactive, les courants rotoriques i_{rq} , i_{rd} suivant le changement des puissances car ils seront liés directement avec ces derniers.

III.6 Commande à structure Variable de la MADA

Dans cette partie, on présente le concept général de la commande à structures variables dont le changement de la structure se fait par commutation au niveau de l'organe de commande, et l'application de cette commande sur la machine asynchrone à double alimentation. En premier lieu, introduisons les notions générales de la commande par modes glissants, ensuite nous présentons l'application de cette technique à la MADA.

III.6.1 Théorie de la commande par modes glissants

III.6.1.1 systèmes à structure variable:

Un système à structure variable est un système dont la structure change pendant le fonctionnement. Il est caractérisé par un choix d'une fonction et d'une logique de commutation. Ce permet de commuter à tout instant entre chaque structure, afin de combiner les propriétés utiles de chacune de ces structure. De plus, un tel système peut avoir des nouvelles propriétés qui n'existent pas dans les structures utilisées [Hun 93].

Dans les systèmes à structures variables avec modes glissants, la trajectoire d'état est amenée vers une surface (hyperplan). Puis, à l'aide de la loi de commutation, elle est obligée de rester au voisinage de cette surface. Cette dernière est dite surface de glissant et le mouvement long de la quelle se produit, est dite mouvement de glissant.

La trajectoire dans la phase (exemple système d'ordre deux) est constituée de trois parties distinctes (figure III-5) ;

- Le mode de convergence (MC) : durant lequel la variable à régler se déplace à partir de n'importe quelle point initiale dans le plan de phase et tend vers la surface de commutation $S(x_1, x_2) = 0$. Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence.
- Le mode de glissant (MG) : durant lequel la variable d'état a atteint la surface de glissement et tend vers l'origine de plan de phase. La dynamique dans ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement $S(x_1, x_2)$.
- Le mode de régime permanent (MRP) : il est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre (origine de plan de phase). Il est caractérisé par la qualité et la performance de la commande. [Ber 99]

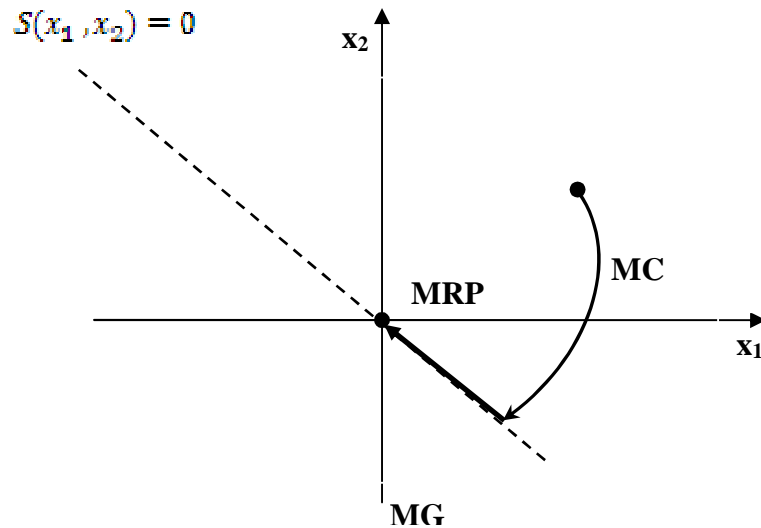


Figure (III-5): Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase.

III.6.1.2 Conception de la commande par mode de glissement:

Les avantages de la commande par mode glissants sont importants et multiples, comme la haute précision, la bonne stabilité, l'invariance et la robustesse. Ceux-ci lui permettent d'être particulièrement adaptée pour les systèmes ayant un modèle imprécis [Slo 34].

Souvent, il est préférable de spécifier la dynamique du système durant le mode de convergence. Dans ces cas, la structure d'un contrôleur comporte deux parties : une partie continue qui présente la dynamique du système durant le mode glissant et l'autre discontinue et concerne la dynamique du système durant le mode convergence. Cette deuxième est importante dans cette commande, car elle a pour rôle d'éliminer les effets d'imprécision et perturbations sur le modèle [Gao 93].

La conception de cette commande peut être divisée en trois étapes principales très dépendantes:

- Le choix de la surface ;
- L'établissement de condition d'existence ;
- Détermination de la loi de commande.

III.6.1.2.1 Choix de la surface de glissement

Le choix de surface de glissement concerne le nombre et la forme nécessaire. Ces deux facteurs sont en fonction de l'application et de l'objectif désiré.

Pour un système défini par l'équation (III-16), le vecteur de la surface est de même dimension que le vecteur de commande u .

$$\dot{x} = f(x, t) + g(x, t)u \quad (\text{III-16})$$

La surface de glissement est une fonction scalaire telle que l'erreur sur la variable à régler glisse sur cette surface et tend vers l'origine de plan de phase. Ainsi, la surface représente le comportement dynamique désiré. Nous trouvons dans la littérature de différentes définitions de surface, dont chacune donne de meilleures performances pour certaines utilisations.

La forme générale non-linéaire est en fonction de l'erreur sur la variable à régler x .

Elle est donnée par :

$$S(x, t) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda_x \right)^{r-1} e(x) \quad (\text{III-17})$$

Avec :

$e(x)$: L'écart sur les variables à régler ($e(x) = x^* - x$)

λ_x : Vecteur constante positive qui interprète la bande passante du contrôle désiré ;

r : Degré relatif, égale au nombre de fois qu'il fait dériver la sortie pour faire apparaître la commande, c'est-à-dire :

$$r = 1 \rightarrow S(x, t) = e(x)$$

$$\text{Pour } r = 2 \rightarrow S(x, t) = \lambda_x e(x) + \dot{e}(x)$$

$$\text{Pour } r = 3 \rightarrow S(x, t) = \lambda_x^2 e(x) + 2\lambda_x \dot{e}(x) + \ddot{e}(x)$$

La stratégie de commande consiste à garantir que les trajectoires du système déplacent vers la surface de glissement $S(x, t) = 0$. Cette dernière et avec une condition initiale $S(x, t) = 0$ devient une équation différentielle homogène, possède une solution $e(x) = 0$, pour un choix convenable du paramètre λ_x . Ceci revient à un problème de poursuite de trajectoire, ce qui est équivalent à une linéarisation exacte de l'écart, tout en respectant la condition de convergence.

III.6.1.2.2 Condition de convergence et d'existence

Les conditions de convergence et d'existence sont les critères qui garantissent les trajectoires du système vers la surface de glissement $S(x,t)=0$, et d'y rester indépendamment à la perturbation. Il ya deux considérations au mode de convergence de l'état du système :

a. Fonction directe de commutation

C'est la première condition de convergence, elle est proposée par Utkin et Emélyanov. Elle consiste à donner à la surface une trajectoire de convergence vers zéro.

Elle est donnée par :

$$\dot{S}(x,t) > 0 \text{ et } S(x,t) < 0 \quad (\text{III-18})$$

$$\dot{S}(x,t) < 0 \text{ et } S(x,t) > 0 \quad (\text{III-19})$$

Nous pouvons reformuler les équations (III-18) et (III-19)

$$S(x,t) \times \dot{S}(x,t) < 0 \quad (\text{III-20})$$

Dans cette condition, il faut introduire pour $S(x,t)$ et sa dérivée $\dot{S}(x,t)$, les valeurs justes à gauches et à droite de la droite de commutation.

b. Fonction de Lyapunov

Il s'agit de formuler une fonction scalaire positive $V(x,t) \geq 0$ pour les variables d'état du système, et de choisir la loi de commutation qui fera décroître cette fonction (i.e. $\dot{V}(x,t) < 0$). Cette fonction est, généralement, utilisée pour garantir la stabilité des systèmes non-linéaires [Car]

En définissant la fonction de Lyapunov par :

$$V(x,t) = \frac{1}{2} S^2(x,t) \quad (\text{III-21})$$

Et sa dérivée définit par :

$$\dot{V}(x,t) = S(x,t) \cdot \dot{S}(x,t) \quad (\text{III-22})$$

Pour que la fonction de Lyapunov décroisse, il suffit d'assurer que sa dérivée est négative. Ceci est vérifié si:

$$S(x,t) \cdot \dot{S}(x,t) < 0 \quad (\text{III-23})$$

L'équation (III-23) signifie que le carré de la distance vers la surface mesuré par $S^2(x,t)$ diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface dans les deux cotés. Cette condition suppose un régime glissant idéal ou la fréquence de commutation est infinie.

III.6.1.2.3 Détermination de la loi de commande

Lorsque le régime de glissement est atteint, la dynamique est indépendante de la loi de commande qui a pour but de garder les conditions de glissement (l'attractivité de la surface). Cependant, la surface peut être déterminée indépendamment de la commande, en se basant sur le système et les performances désirées. Il s'agit donc de trouver une commande nécessaire pour attirer la trajectoire d'état vers la surface de glissement et puis vers son point d'équilibre.

L'obtention d'un régime de glissement suppose une commande discontinue. La surface de glissement devrait être attractive des deux cotes. De ce fait, si cette constante discontinue est indispensable, elle n'empêche nullement qu'une partie continue lui soit ajoutée. La partie continue peut en effet amener à réduire autant qu'on veut l'amplitude de la partie discontinue [Fos 96].

En présence d'une perturbation, la partie discontinue a essentiellement pour but de vérifier les conditions d'attractivité. Dans ce cas, la structure d'un contrôleur par modes glissants se compose de deux parties, une partie de linéarisation exacte (u_{eq}) et l'autre de stabilisation (u_n).

$$u = u_{eq} + u_n \quad (\text{III-24})$$

La grandeur u_{eq} correspond à la commande équivalente proposée par FILIPOV. Elle sert à maintenir l'écart sur la surface de glissement $S(x,t) = 0$. La commande équivalente est déduite en connaissant que la dérivée de la surface est nulle ($\dot{S}(x,t) = 0$). Elle peut être interprétée comme étant un retour d'état particulier jouant le rôle de signal de commande

appliqué sur le système à commandé. Elle peut être interprétée autrement comme une valeur moyenne (Figure (III-6)) que prend la commande lors de la commutation rapide entre la valeurs u_{max} et u_{min} [Buh 86].

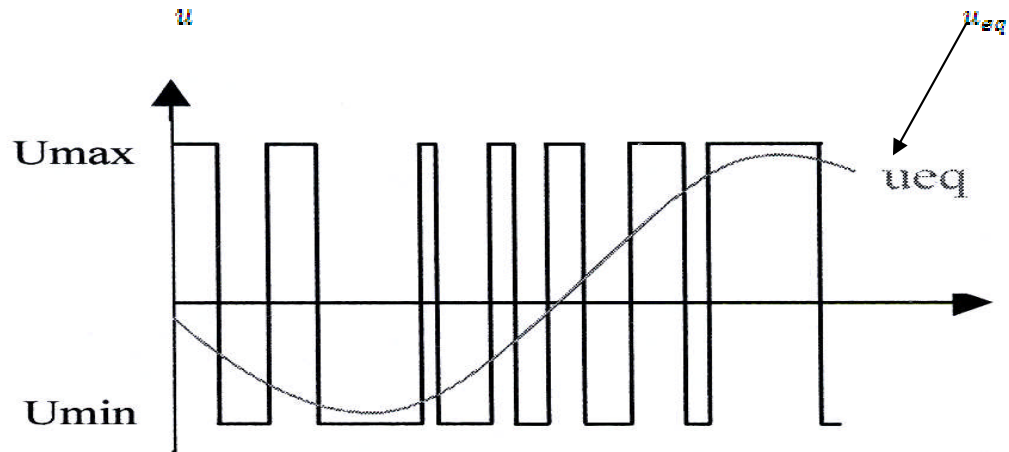


Figure (III- 6):Représentation de la commande équivalente.

La commande discrète u_n est déterminée pour vérifier la condition de convergence, en dépit de l'imprécision sur les paramètres et le modèle. Pour mettre en évidence le développement, nous considérons un système défini dans l'espace d'état par l'équation (III-17). Il s'agit de trouver l'expression analogique de la commande u .

La dérivée de la surface est :

$$\dot{S}(x, t) = \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} \quad (III-25)$$

Par substitution, nous trouvons l'expression suivante :

$$\dot{S}(x, t) = \frac{\partial S}{\partial t} [f(x, t) + g(x, t) \cdot u_{eq}] + \frac{\partial S}{\partial x} g(x, t) \cdot u_n \quad (III-26)$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent, la surface est nulle, par conséquent sa dérivée et la partie discontinue sont aussi nulles.

$$\begin{cases} u_n = 0 \\ \dot{S}(x, t) = 0 \end{cases} \quad (III-27)$$

D'où, nous déduisons l'expression de la commande équivalente :

$$u_{eq} = -\left[\frac{\partial S}{\partial x} g(x, t)\right]^{-1} \quad (III-28)$$

Afin que la commande équivalente existe, la surface doit remplir la condition suivante :

$$\frac{\partial S}{\partial x} g(x, t) \neq 0 \quad (\text{III-29})$$

Durant le mode de convergence, en remplaçant la commande équivalente par son expression (III-28) dans l'équation (III-26), nous trouvons la nouvelle expression de la dérivée de la surface.

$$\dot{S}(x, t) = \frac{\partial S}{\partial x} g(x, t) \cdot u_n \quad (\text{III-30})$$

Le problème revient à trouver u_n tel que :

$$\dot{S}(x, t) \cdot S(x, t) = S(x, t) \cdot \frac{\partial S}{\partial x} g(x, t) \cdot u_n < 0 \quad (\text{III-31})$$

Afin de satisfaire cette condition, nous choisissons le signe de u_n opposé du signe de $S(x, t) \cdot \frac{\partial S}{\partial x} g(x, t)$; la forme la plus simple que peut prendre la commande discrète est :

$$u_n = k \cdot \text{sing}(S(x, t)) \quad (\text{III-32})$$

Où $\text{sing}(S(x, t))$ est la fonction représentée sur la figure (III-7) et définie par :

$$\text{sing}(S(x, t)) = \begin{cases} -1 & \text{si } S(x, t) < 0 \\ 1 & \text{si } S(x, t) > 0 \end{cases} \quad (\text{III-33})$$

Le signe de k est choisi l'opposé du signe de $\frac{\partial S}{\partial x} \cdot g(x, t)$. Le temps de réponse est d'autant plus petit que le gain k est plus grand.

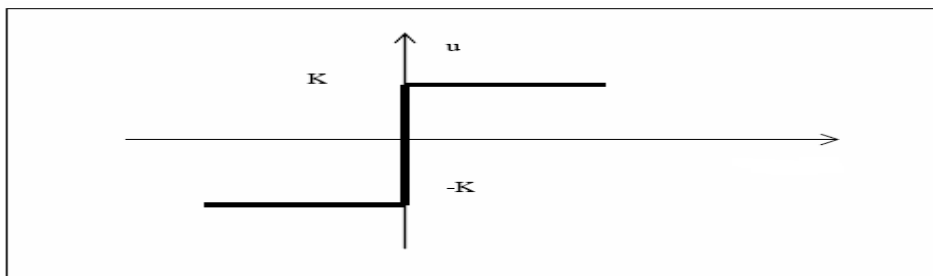


Figure (III-7):représentation de la commande en utilisant la fonction «sign».

L'utilisation de la forme ``sing`` signifie que la commande u_{ref} commute entre deux valeurs $\pm K$ avec une fréquence théoriquement infinie. Ce qui cause un phénomène dit « chattering ».

III.6.2 Élimination du phénomène de Chattering par la fonction de saturation

Dans la pratique, un régime glissant idéal n'existe pas étant donné que cela imposerait que la commande puisse commuter avec une fréquence théoriquement infinie.

Ceci est impossible à réaliser : d'une part, du fait de la présence d'un temps de retard pour le calcul de la commande ou la présence de petites constantes de temps au niveau des actionneurs et, d'autre part, du fait des limites technologiques et physiques (limite de la fréquence de commutation des interrupteurs). Par conséquent, des oscillations à hautes fréquences se produisent. Dans ce mode, la trajectoire d'état n'évolue plus exactement le long de la surface, mais elle tend à osciller au voisinage de celle-ci. En effet, c'est le caractère discontinu de la commande qui engendre ce comportement dynamique particulier au voisinage de la surface qui est communément appelé *Broutement* ou *Chattering* en Anglais.

Ce phénomène est néfaste pour le bon fonctionnement du système, car il ajoute au spectre de la commande des composantes hautes fréquences. Ces composantes peuvent détériorer le système en excitant les dynamiques négligées lors de la modélisation, ou encore endommager les actionneurs par des sollicitations trop fréquentes. Dans le but de réduire ou d'éliminer ce phénomène, de nombreuses études ont été effectuées. L'une d'entre elles consiste à remplacer la fonction *sign* par une approximation continue dans un voisinage de la surface. Il s'agit, donc, d'encadrer la surface par une bande avec un ou deux seuils. Le choix des seuils est directement lié à la précision en boucle fermée. [Mam 05]

Parmi les méthodes qui réduisent l'effet de la fonction *sign* dans une bande autour de la surface, nous trouvons la fonction *saturation* (*sat*) adéquate pour filtrer les hautes fréquences. Cette fonction est caractérisée par un ou deux seuils. Pour diminuer progressivement la valeur de u_{ref} en fonction de l'approche de l'état vers la surface dans la région qui encadre cette dernière, la commande varie entre les deux valeurs limites $\pm |K|$

$$u_{\alpha} = k \cdot \text{sat}(S(x, t)) \quad (\text{III-34})$$

Où *sat* est la fonction de saturation, dite commande douce à un seul seuil (figure (III-8)) et elle est définie par :

$$\text{sat}(S(x, t)) = \begin{cases} S(x, t) & \text{si } |S(x, t)| \leq \phi \\ \text{sign}(S(x, t)) & \text{si } |S(x, t)| > \phi \end{cases} \quad (\text{III-35})$$

Avec ϕ : paramètre de valeur petite et positive.

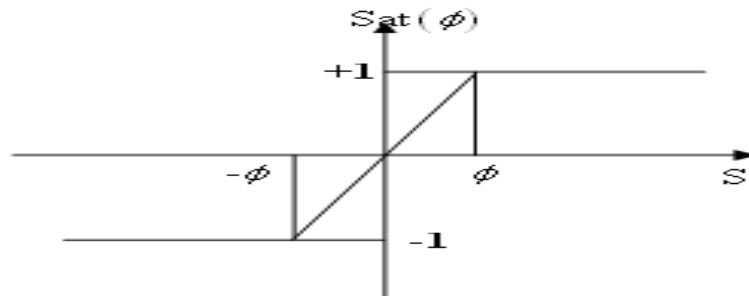


Figure (III-8): Représentation de la commande douce à un seul seuil « *sat* »

III.6.3 Application de la commande par mode glissant à la MADA

Nous allons utiliser cette technique pour contrôler les courants rotoriques de la machine asynchrone à double alimentation dont le modèle est fortement couplé.

III.6.3.1 Rappel du modèle de la MADA

Le modèle mathématique de la MADA est :

$$\begin{cases} V_{dq\alpha} = R_s i_{dq\alpha} + \frac{d\Phi_{dq\alpha}}{dt} \pm \omega_s \Phi_{dq\alpha} \\ V_{dq\gamma} = R_r i_{dq\gamma} + \frac{d\Phi_{dq\gamma}}{dt} \pm \omega_r \Phi_{dq\gamma} \end{cases} \quad (\text{III-36})$$

$$\begin{cases} \Phi_{dq\alpha} = L_s i_{dq\alpha} + M i_{dq\gamma} \\ \Phi_{dq\gamma} = L_r i_{dq\gamma} + M i_{dq\alpha} \end{cases} \quad (\text{III-37})$$

Le vecteur des variables d'état choisi pour la commande de la machine est donné par :

$$x = \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} \quad (III-38)$$

Dans le repère de Park les tensions du stator peuvent être notées de la manière suivante :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s \end{cases} \quad (III-39)$$

En négligeant la résistance du stator, la f.é.m. dans les enroulements de la machine est égale à la tension du réseau

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} \approx \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad (III-40)$$

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = L_r \sigma i_{dr} + \frac{M}{L_s \omega_s} V_{qs} \\ \Phi_{qr} = L_r \sigma i_{qr} + \frac{M}{L_s \omega_s} V_{ds} \end{cases} \quad (III-41)$$

Le modèle de la machine avec considération des variables d'état est donné par les équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s a \Phi_{ds} - R_s c (L_r \sigma i_{dr} + \frac{M}{L_s \omega_s} V_{qs}) - \omega_s \Phi_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} \\ R_s a \Phi_{qs} - R_s c (L_r \sigma i_{qr} + \frac{M}{L_s \omega_s} V_{ds}) + \omega_s \Phi_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} \\ R_r b (L_r \sigma i_{dr} + \frac{M}{L_s \omega_s} V_{qs}) - R_r c \Phi_{ds} - \omega_r (L_r \sigma i_{qr} + \frac{M}{L_s \omega_s} V_{ds}) + L_r \sigma \frac{d}{dt} i_{dr} \\ R_r b (L_r \sigma i_{qr} + \frac{M}{L_s \omega_s} V_{ds}) - R_r c \Phi_{qs} - \omega_r (L_r \sigma i_{dr} + \frac{M}{L_s \omega_s} V_{qs}) + L_r \sigma \frac{d}{dt} i_{qr} \end{bmatrix} \quad (III-42)$$

Avec :

$$a = \frac{1}{\sigma L_s}, \quad b = \frac{1}{\sigma L_r}, \quad c = \frac{M}{\sigma L_s L_r}.$$

Le modèle d'état de la machine est mis sous la forme suivante :

$$\dot{x} = f(x, t) + g(x, t) u_{dq} \quad (III-43)$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} \Phi_{ds} \\ \frac{d}{dt} \Phi_{qs} \\ \frac{d}{dt} i_{dr} \\ \frac{d}{dt} i_{qr} \end{bmatrix} \quad (III-44)$$

$$u_{dq} = [V_{ds} \quad V_{qs} \quad V_{dr} \quad V_{qr}], \quad g(x, t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} \end{bmatrix}$$

$$f(x, t) = \begin{bmatrix} -R_s \alpha \Phi_{ds} + R_s c (L_r \sigma i_{dr} + \frac{M}{L_s \omega_s} V_{qs}) + \omega_s \Phi_{qs} \\ -R_s \alpha \Phi_{qs} - R_s c (L_r \sigma i_{qr} + \frac{M}{L_s \omega_s} V_{ds}) - \omega_s \Phi_{ds} \\ \frac{1}{\sigma L_r} (-R_r b (L_r \sigma i_{dr} + \frac{M}{L_s \omega_s} V_{qs}) + R_r c \Phi_{ds} + \omega_r (L_r \sigma i_{qr} + \frac{M}{L_s \omega_s} V_{ds})) \\ \frac{1}{\sigma L_r} (-R_r b (L_r \sigma i_{qr} + \frac{M}{L_s \omega_s} V_{ds}) + R_r c \Phi_{qs} - \omega_r (L_r \sigma i_{dr} + \frac{M}{L_s \omega_s} V_{qs})) \end{bmatrix} \quad (III-45)$$

Les surfaces de glissement dans le repère de Park sont définies pour contrôler les courants rotoriques. Elles sont données par les équations suivantes :

$$\begin{cases} S_{\bar{d}} = \lambda (i_{drref} - i_{dr}) \\ S_{\bar{q}} = \lambda (i_{qrref} - i_{qr}) \end{cases} \quad (III-46)$$

Où V_{dr} et V_{qr} sont les deux vecteurs de contrôle, pour forcer la trajectoire du système à converger vers les surfaces $S_{dq} = 0$

Le vecteur de contrôle u_{dq} est obtenu en imposant $S_{dq} = 0$

$$f(x, t) + g(x, t) u_{dq} = 0 \quad (III-47)$$

$$u_{dq} = \begin{bmatrix} -(-R_r b (L_r \sigma i_{dr} + \frac{M}{L_s \omega_s} V_{qs}) + R_r c \Phi_{ds} + \omega_r (L_r \sigma i_{qr} + \frac{M}{L_s \omega_s} V_{ds})) \\ -(R_r b (L_r \sigma i_{qr} + \frac{M}{L_s \omega_s} V_{ds}) + R_r c \Phi_{qs} - \omega_r (L_r \sigma i_{dr} + \frac{M}{L_s \omega_s} V_{qs})) \end{bmatrix} \quad (III-48)$$

➤ La fonction Sign

Pour avoir de bonnes performances, une bonne dynamique et une bonne commutation autour des surfaces le vecteur de contrôle est imposé comme suit :

$$u_{dq} = u_{dqeq} + k \text{sign}(S_{dq}) \quad (\text{III-49})$$

Le mode de glissement existe seulement si la condition suivante est respectée

$$S_{dq} \dot{S}_{dq} < 0$$

Si on développe le calcul de cette condition nous aurons :

$$\dot{S}_d = \lambda(-i_{dr}) \text{ et } S_d = \lambda(i_{drref} - i_{dr})$$

$$S_d \dot{S}_d = (-f(x,t) - g(x,t)(u_{dq} + k \text{sign}(S_d))) S_d$$

$$\dot{S}_d S_d = -g(x,t) k \text{sign}(S_d) S_d$$

Le produit $\dot{S}_d S_d < 0$ doit être négatif, alors que $[g(x,t)]$ est une matrice définie positive et $\text{sign}(S_d) S_d$ est toujours positif.

D'après l'équation pour que le mode de glissement existe il faut que la valeur de K soit positive.

La figure (III-9) présente le schéma global de la simulation de la commande par mode glissant avec la fonction sign

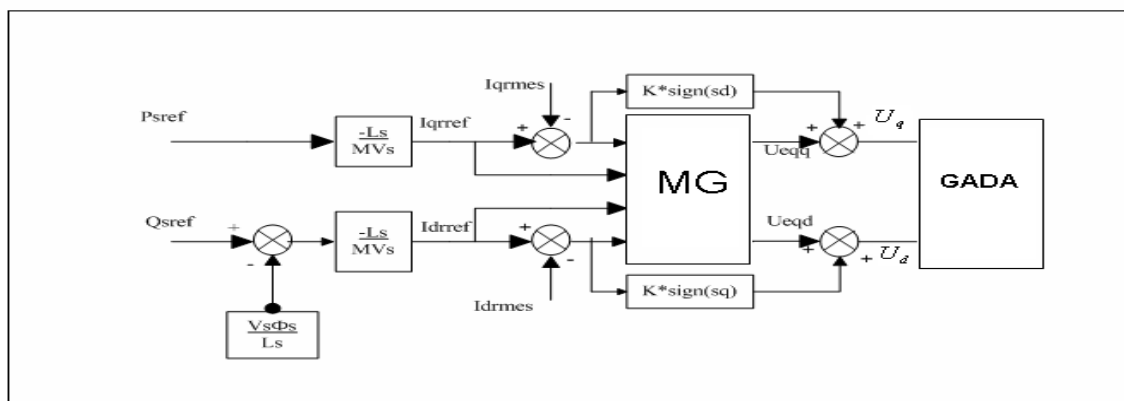
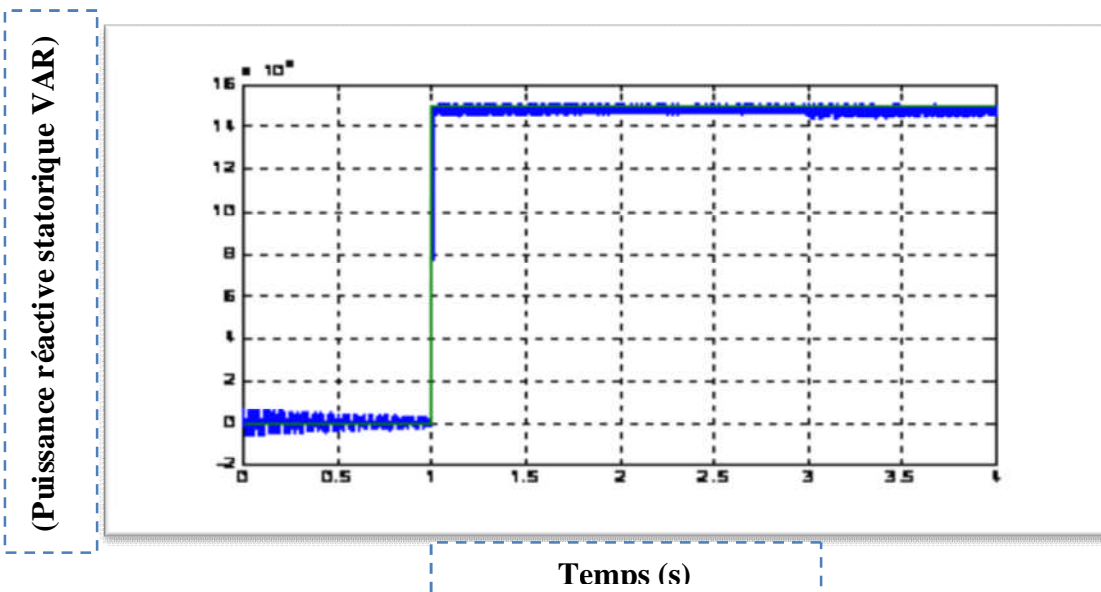
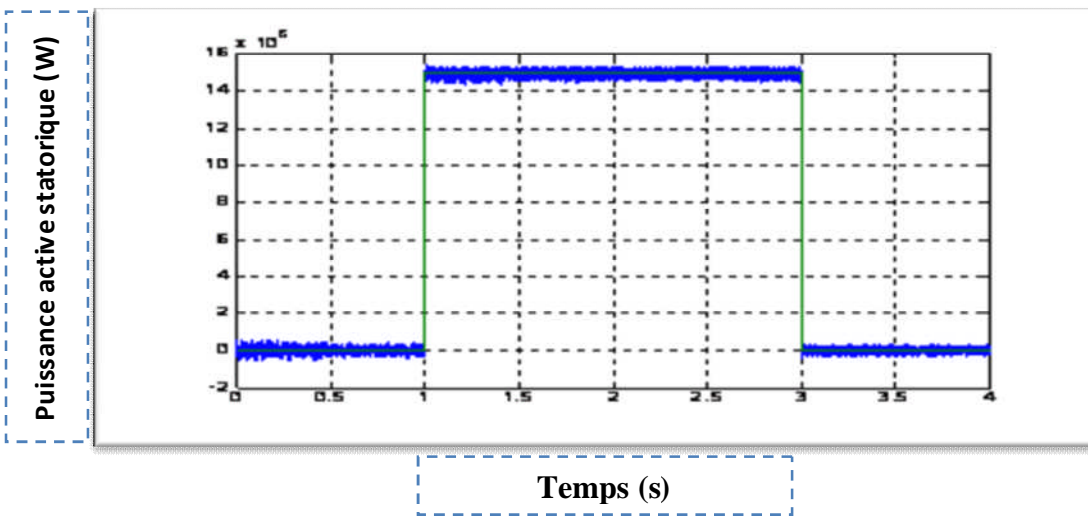


Figure (III-9) : Schéma global par mode glissant de la GADA.

III.6.3.2 Résultats de simulation

Pour illustrer les performances de commande du RGM (Régulateur par Mode Glissant) appliqué à une GADA, un bloc diagramme du système est présenté par la figure (III-8). Il simule les réponses en puissances, générées à des consignes ; la figure (III-9) montre la réponse du système avec le régulateur par mode glissant (RMG). Les puissances active et réactive poursuivent parfaitement les variables désirées. En commande par mode glissant les réponses sont sans dépassement, rapide en régime transitoire et l'erreur statique tend vers zéro.



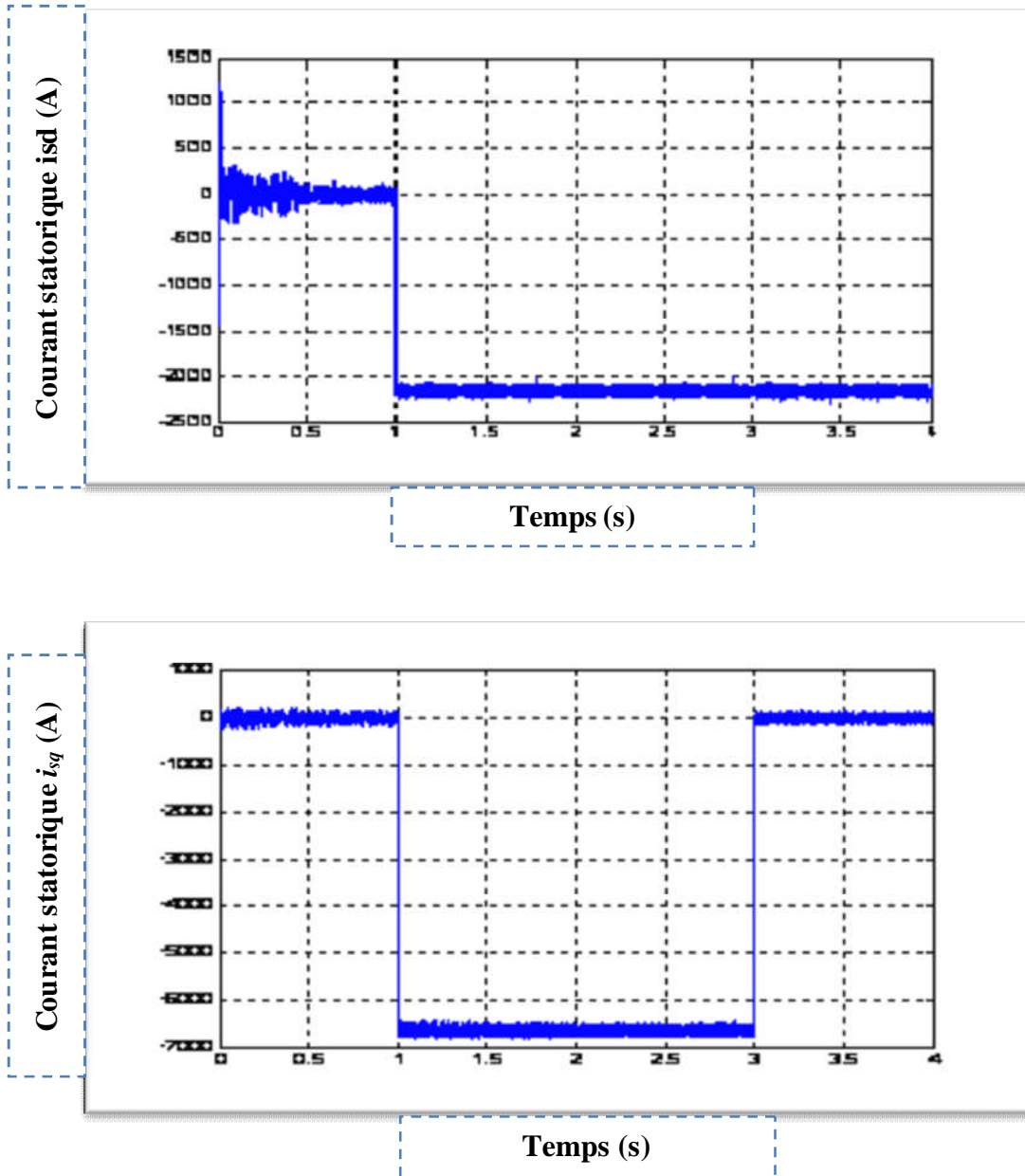


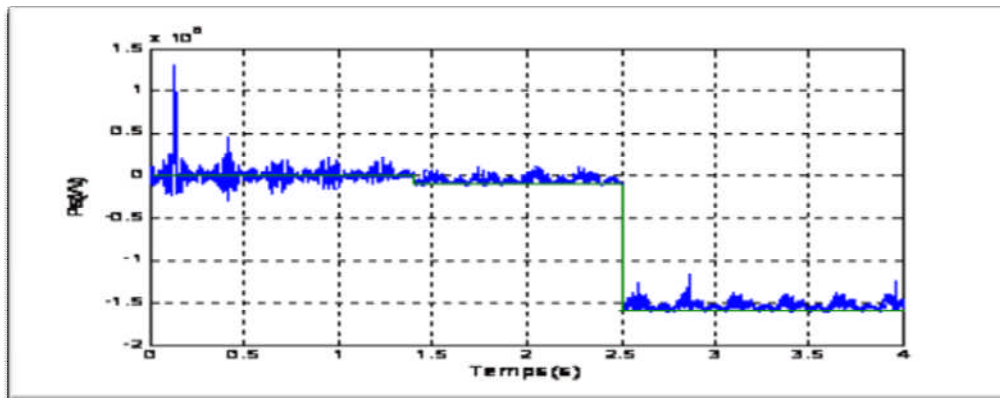
Figure (III-10) : Résultats de simulation du système avec la fonction sign de la GADA alimentée par onduleur de tension

III.6.4 Comparaison des structures de contrôle (PI-Mode de glissement)

Le but de cette partie est de réaliser une comparaison entre la commande à structure variable par mode glissant et la commande linéaire. Nous avons introduit un échelon de puissance active de 10^5 W à $t=1.4$ s et de 1.5MW à $t = 2.5$ s et un autre échelon de puissance réactive à $t = 2.8$ s de 1.5×10^5 VAR.

La figure (III-11) montre les résultats de simulation obtenus pour les deux régulateurs. Nous remarquons que pour l'échelon de puissance active réalisé à $t=1.4$ s à $t = 4$ s le temps de réponse des deux régulateurs est très proche et les allures sont comparables.

A $t = 0.2$ s on remarque un pic sur la puissance active ((figure a) cas du régulateur PI qui est du à la variation de la puissance réactive.



Figure(a) avec régulateur PI

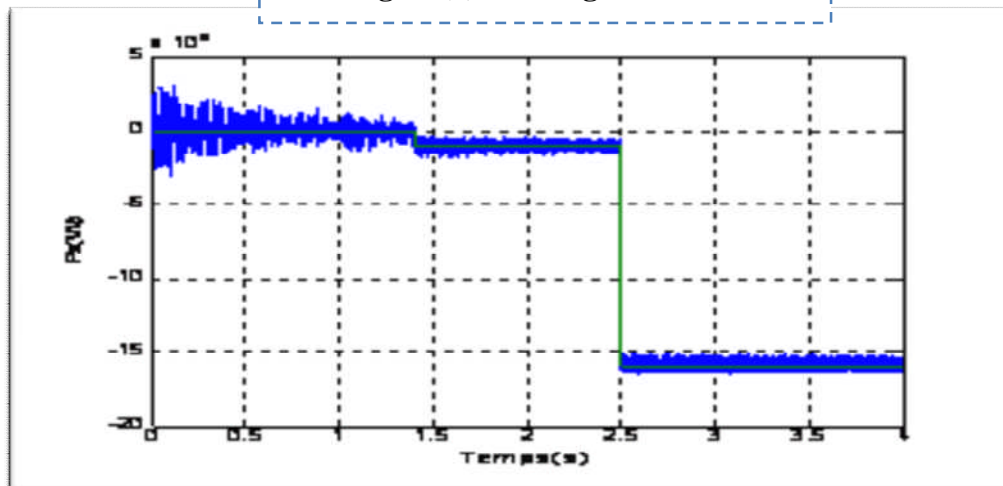
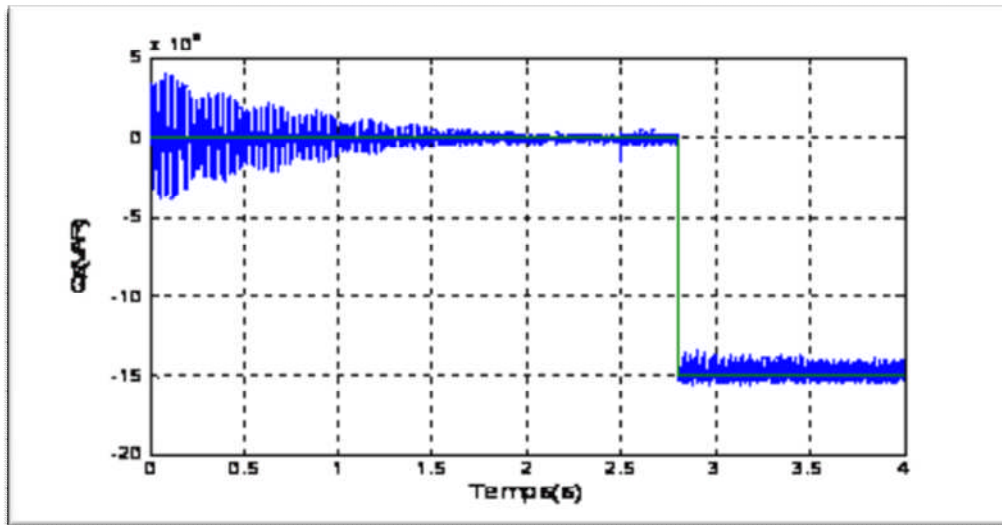


Figure (b) avec régulateur MG

Figure (III-11) : Effet des perturbations et des variations paramétriques sur la puissance active

La figure (III-12) montre les variations de la puissance réactive obtenues pour les deux régulateurs PI et mode de glissement.



Figure(a) avec régulateur PI

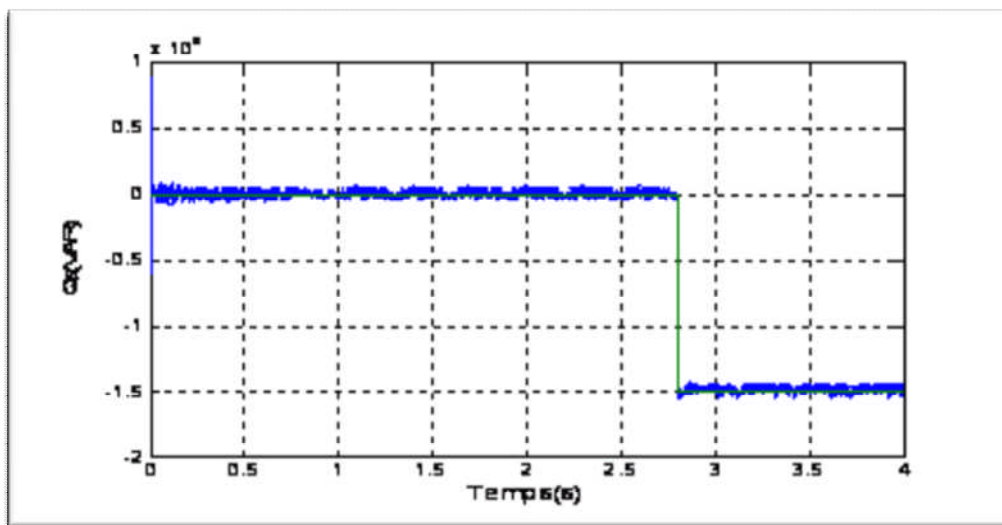


Figure (b) avec régulateur MG

Figure (III-12) : Effet des perturbations et des variations paramétriques sur la puissance réactive

III. 7 Conclusion

L'objectif de ce travail est de modéliser et caractériser le comportement de la machine asynchrone à double alimentation utilisée en génératrice. En basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi, dont la complexité a été réduite. Nous avons constaté que le modèle de la machine est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle, et d'appliquer la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la MADA.

La méthode indirecte nous permet, en association avec le bouclage des puissances, d'obtenir de bons résultats concernant le découplage entre les deux composantes de courant selon les deux axes d et q , ainsi le découplage entre les deux puissances statoriques active et réactive. Les résultats obtenus par simulation s'avèrent satisfaisants, vu la stabilité des différentes grandeurs qui constituent la machine.

Effectivement, en plus des résultats de simulation, elle offre un avantage majeur car elle intègre la boucle de régulation de courant rotorique.

Dans notre cas, le réglage des puissances active et réactive par le mode glissant apporte une amélioration remarquable par rapport aux régulateurs classique PI. Notamment, En ce qui concerne la poursuite des courants rotoriques à leurs références. De plus, cette technique a permis d'obtenir un découplage parfait entre la puissance active et réactive.

La commande par mode de glissement a montré de bonnes performances dynamiques et une grande capacité de poursuite de la consigne de courant.

Chapitre IV

**Modélisation et stratégie de
commande de l'onduleur - Bus
continu- Redresseur**

Chapitre IV

Modélisation et stratégie de commande de l'onduleur - Bus continu- Redresseur

IV. Introduction

Dans cette partie, l'interface de raccordement au réseau électrique constituée d'un bus continu, d'un convertisseur MLI et d'un filtre RL. Cette interface permettra de fonctionner connecté au réseau ou séparé par une commutation automatique. La variation de la vitesse de la machine asynchrone se fait alors par action sur le glissement, au moyen d'un rhéostat ou d'une association de machines (système de kramer ou de scherbius) [Cha 83].

De nos jours pour la récupération de la puissance disponible au rotor, on utilise un système statique de conversion d'énergie constitué d'un convertisseur de puissance ainsi d'un transformateur. Ce convertisseur sera donc dimensionné pour transiter seulement la puissance rotorique [Aim 04][Mer 07]. La variation de la caractéristique de la machine asynchrone par l'utilisation d'un rhéostat de glissement s'accompagne de pertes joule considérables qui affectent le rendement. Pour pallier à cet inconvénient, on fait appel à une cascade de convertisseurs qui permet d'améliorer le rendement du système et offre en même temps une plage de variation importante de la vitesse.

IV.1 Description du montage

La récupération de la puissance rotorique s'effectue d'une manière statique grâce au montage de la figure (IV-1).

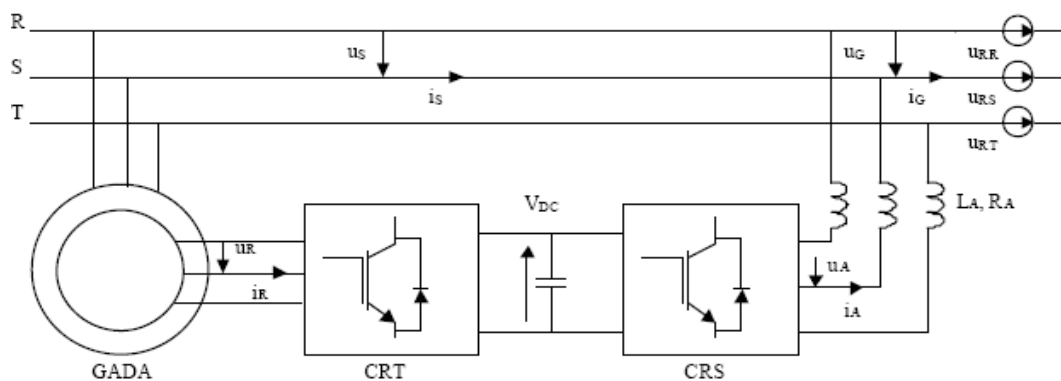


Figure (IV-1) : Principe de la cascade basé sur une machine asynchrone à double alimentation [Mer 07].

La structure de la cascade est celle représentée sur la figure (IV-1). Les deux convertisseurs interposés entre le rotor de la MADA et le réseau sont de type MLI. Le convertisseur coté réseau aura le même modèle que l'autre, sauf que les signaux de commande seront déterminés en faisant un asservissement de la tension du bus continu. Il est noté que le redresseur MLI a le même principe de fonctionnement qu'un hacheur élévateur. Sa tension de sortie est toujours supérieure à celle d'entrée, d'où la nécessité d'avoir une tension du bus continu supérieure à la valeur crête des tensions composées du réseau [17]. Après avoir repoussé les harmoniques générées par le redresseur vers un rang supérieur grâce à la technique MLI, celles-ci doivent être atténuées grâce à un filtre liant le réseau au redresseur. Ce filtre étant passe bas, la qualité du réseau sera améliorée en y atténuant les harmoniques supérieurs.

IV.2 Les convertisseurs de puissance

IV.2.1 Onduleur de tension

On connecte le rotor de la MADA à un onduleur de tension triphasé qui est alimenté par une tension continue considérée constante, égale à 1200V.

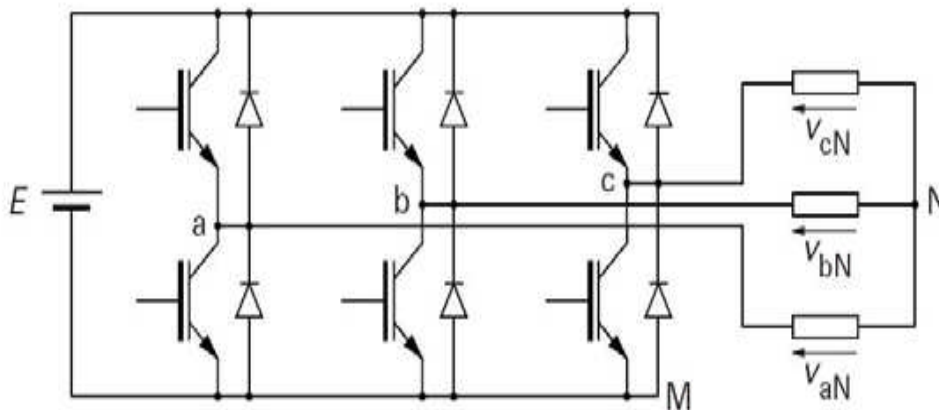


Figure (IV-2) : Onduleur à deux niveaux utilisant des transistors IGBT.

IV.2.1.1 Modèle mathématique de l'onduleur triphasé

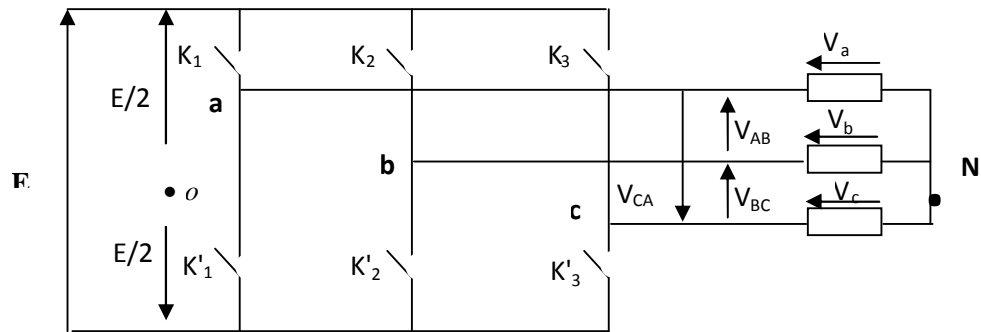


Figure (IV-3): Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux.

Les équations de tension simples appliquées aux trois phases statoriques sont :

$$\begin{cases} V_A = V_{AO} + V_{ON} \\ V_B = V_{BO} + V_{ON} \\ V_C = V_{CO} + V_{ON} \end{cases} \quad (IV-1)$$

Par addition on a :

$$V_A + V_B + V_C = V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3V_{ON} \quad (IV-2)$$

Sachant que le système des tensions triphasées statoriques est symétrique.

Donc : $V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3V_{ON}$

D'où : $V_{ON} = \frac{1}{3}(V_{AO} + V_{BO} + V_{CO})$ (IV-3)

On remplace (III-3) dans (III-2), on aura le système suivant :

$$\begin{cases} V_A = \frac{2}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_B = -\frac{1}{3}V_{AO} + \frac{2}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_C = -\frac{1}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} + \frac{2}{3}V_{CO} \end{cases} \quad (IV-4)$$

On peut écrire le système (IV-4) sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AO} \\ V_{BO} \\ V_{CO} \end{bmatrix} \quad (IV-5)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} V_{AO} = \frac{E}{2} S_1 \\ V_{BO} = \frac{E}{2} S_2 \\ V_{CO} = \frac{E}{2} S_3 \end{cases} \quad (\text{IV-6})$$

On remplace (III-5) dans (III-6), on aura le système suivant :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{E}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{IV-7})$$

Tel que :

$$\begin{cases} S_1 = 1 & \text{Si } k_1 \text{ fermé} & \text{Si non} & S_1 = -1 \\ S_2 = 1 & & \text{Si } k_2 \text{ fermé} & \text{Si non} & S_2 = -1 \\ S_3 = 1 & & & & S_3 = -1 \end{cases}$$

S_j , ($j=1, 2, 3$) l'état ouvert ou fermé des interrupteurs k_1, k_2, k_3 .

IV.2.1.2 Stratégie de commande

Nous nous intéresserons à une technique analogique « la commande sinus triangle ».

Cette technique consiste à comparer entre elles :

- une onde de référence u_m , la modulatrice, de forme sinusoïdale et de fréquence f ,
- une onde de modulation u_p , la porteuse, généralement triangulaire, de haute fréquence f_p , telle que : $f_p \gg f$

Deux paramètres caractérisent cette stratégie :

- l'indice de modulation m , égal au rapport des fréquences de modulation et de référence, $m = \frac{f_p}{f}$
- le coefficient de réglage r , égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence à la valeur crête de l'onde de modulation :

$$r = \frac{\overline{V}_m}{\overline{V}_p}$$

Les instants de fermeture des interrupteurs sont alors définis par les intersections entre les deux ondes, quand à la fréquence de commutation, elle est déterminée par celle de la porteuse.

La figure (IV-4) présente un exemple de chronogramme pour ce type de comparaison intersective.

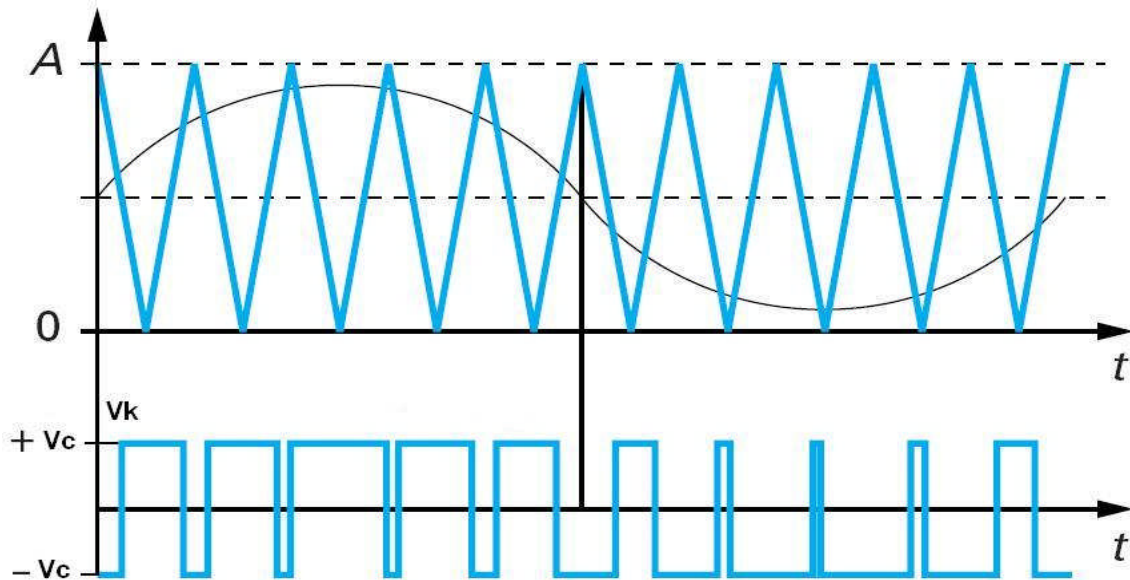


Figure (IV-4) : Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulosinusoidale à une porteuse.

Le modèle de cette commande nécessite la production de trois signaux S_A, S_B, S_C de type MLI sinus-triangle décalés de 120° l'un par rapport à l'autre. On emploie donc trois signaux sinusoïdaux de fréquence de référence f et d'amplitude \hat{V}_m et une porteuse commune.

- Equations des modultrices :

$$\begin{cases} v_{mA} = V_m \sin(2\pi ft) \\ v_{mB} = V_m \sin(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}) \\ v_{mC} = V_m \sin(2\pi ft - \frac{4\pi}{3}) \end{cases}$$

- Equation de la porteuse:

$$x_1(t) = V_p \left(-1 + 4 \frac{t}{T_p} \right) \quad \text{si } t \in \left[0, \frac{T_p}{2} \right]$$

$$x_2(t) = V_p \left(3 - 4 \frac{t}{T_p} \right) \quad \text{si } t \in \left[\frac{T_p}{2}, T_p \right]$$

- Etats des interrupteurs :

$$S_{A,B,C} = \begin{cases} +1 & \text{Si } \left\{ v_{m,ABC} - x(t) \geq 0 \right. \\ -1 & \text{Si } \left. v_{m,ABC} - x(t) < 0 \right. \end{cases}$$

IV.2.2 Schéma de connexion du convertisseur au réseau électrique

Dans cette partie, nous nous intéressons à la modélisation du convertisseur de puissance (constitué d'IGBT et de diodes antiparallèles). Le convertisseur considéré dans notre étude, est celui relié au réseau. La structure de l'ensemble de liaison au réseau est constituée d'un bus continu et d'un convertisseur MLI du filtre RL comme le montre la figure (IV-5)

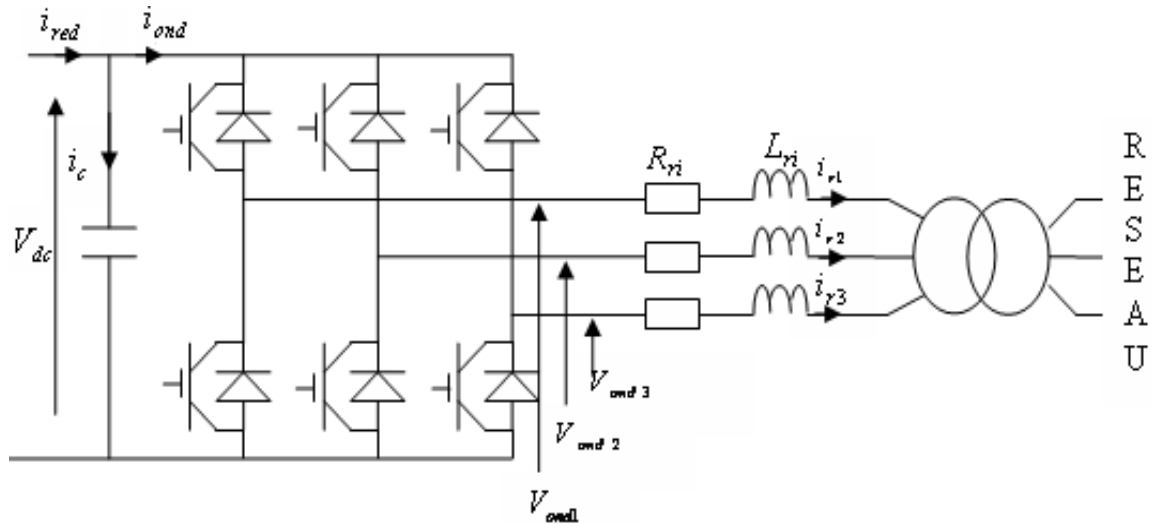


Figure (IV-5) : Etape continu d'un filtre à la sortie du convertisseur cote réseau.

Avec :

V_{dc} : Tension du bus continu ;

i_c : Le courant traversant le condensateur ;

i_{red} : Le courant de sortie du redresseur ;

i_{ond} : Courant ondulé ;

R_{ri}, L_{ri} : Résistance et inductance du filtre ;

$V_{ond,i}$: Avec $i = \{1,2,3\}$ sont les tensions simple à la sortie de l'onduleur ;

i_{r1}, i_{r2}, i_{r3} : sont les courants circulant dans le filtre et fourni au réseau.

III. 2.2.1 Contrôle du convertisseur coté réseau

La figure (IV-6) représente l'ensemble du modèle continu équivalent et de la commande de la liaison [Aim 04]

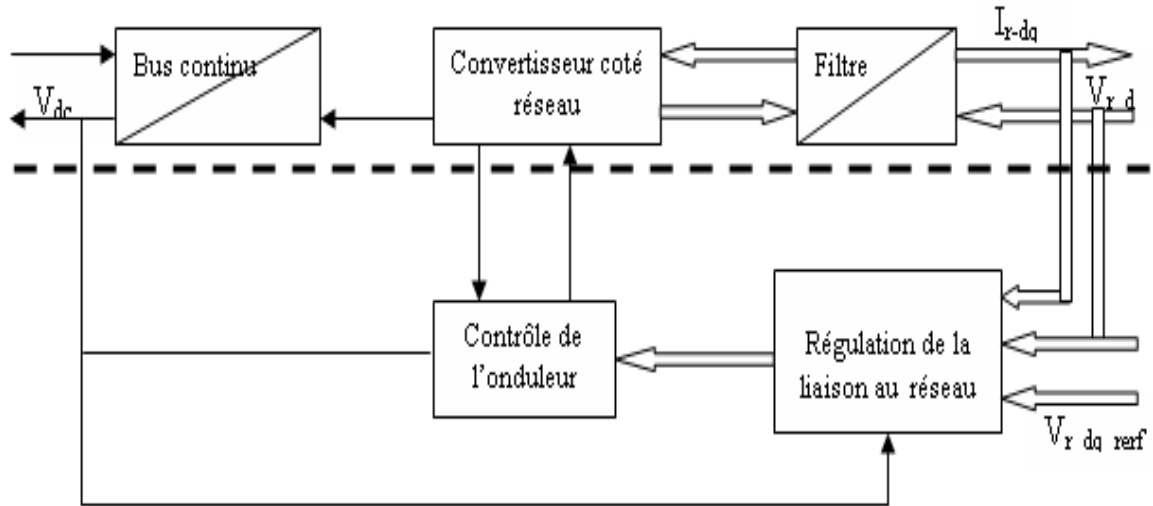


Figure (IV-6) : Système de commande du convertisseur coté réseau

L'objectif de ce convertisseur est de garder la tension du bus continu constante quelle que soit l'amplitude et le sens de l'écoulement de la puissance au rotor. Et d'assurer un contrôle indépendant du débit des puissances actives et réactives entre le bus continu et le réseau avec un facteur de puissance proche de 1. [Bou 07]

Le principe de fonctionnement de ce convertisseur consiste à mesurer la tension du bus continu et la comparée à une valeur de référence désirée. Après une correction par un régulateur PI (Proportionnel-Intégral), on obtient la puissance active de référence qui va nous fixer par la suite la valeur du courant de référence, et la puissance réactive, on la maintient nulle ($Q_{ref} = 0$) [Mer 07]

IV.2.3 Dimensionnement des éléments des convertisseurs

IV.2.3.1 Le bus continu

IV.2.3.1.1 Modélisation du bus continu:[Bou 07]

Jusqu'à présent on a supposé que la tension dans l'étape continue était constante, mais elle va réellement dépendre des puissances transférées dans les convertisseurs. En effet, comme

on le voit sur la figure (IV-5) on peut exprimer la variation du courant dans le condensateur C :

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = i_c = i_{red} - i_{ond} \quad (IV-8)$$

D'où en multipliant les deux membres l'équation par V_{dc}

$$V_{dc} C \frac{dV_{dc}}{dt} = V_{dc} i_{red} - V_{dc} i_{ond}$$

C'est à dire que l'on a un bilan de puissance

$$\frac{dW_c}{dt} = P - P_r \quad (IV-9)$$

La structure du régulateur du carré de la tension du bus continu est représentée sur la figure (IV - 7) ou P désigne la puissance à la sortie de l'onduleur et P_r la puissance au rotor de la machine. On en déduit que la variation d'énergie est contenue dans le condensateur C d'où il en résulte la valeur de l'énergie dans ce condensateur W_c .

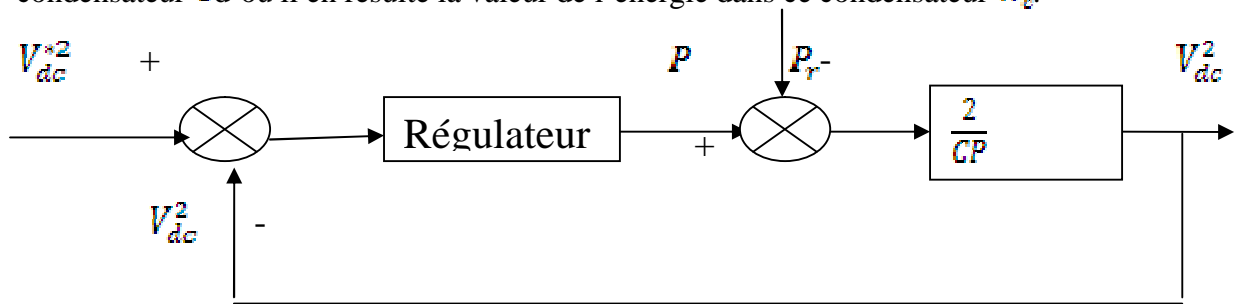


Figure (IV-7) : Structure du régulateur de tension du bus continu

La puissance que doit faire circuler le convertisseur rotorique AC/DC/AC dans le cas hyper ou hypo synchrone est donnée par :

$$P_r = g_{max} \times P_s \quad (IV-10)$$

Dans notre cas la puissance de la MADA est égale à 1.5MW et le glissement maximal accepté pour faire fonctionner le générateur est 0.25.

En considérant que le réseau est équilibré et sinusoïdal, et dont la valeur de la tension simple efficace est égale à V_s et en négligent les pertes dans l'onduleur, la puissance rotorique peut s'exprimer comme suit :

$$P_r = 3 \times I \times V_s = g_{max} \times P_s \quad (IV-11)$$

Le courant efficace côté alternatif est égal à : $I = \frac{g_{max} \times P_s}{3V_s}$ (IV-12)

IV .2.3.1.2 Calcul de la tension du bus continu

Afin de générer un courant au réseau, il faut que la tension du bus continu (Vdc) soit supérieure à la valeur crête des tensions composée du coté du filtre, la tension du bus continu doit vérifier l'équation suivante : [Dav 07]

$$u_{dco} = 2 \times \alpha \times V_s \times \sqrt{2} \tag{IV-13}$$

Avec

u_{dco} : Tension du bus continu en régime permanent [V] ;

α : Paramètre sans dimension ($\alpha \leq 1$) ;

V_s : Tension simple efficace du réseau [V].

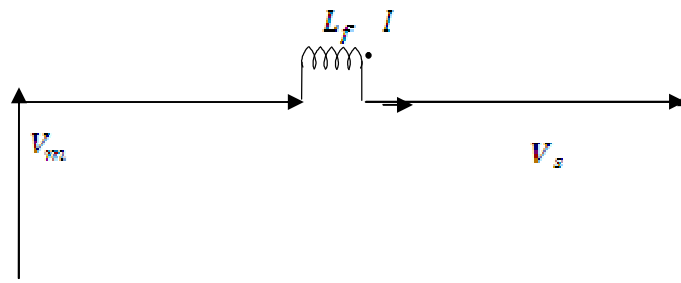


Figure (IV-8) : Model simplifié de la liaison au réseau

On définit le paramètre r ; appelé taux de modulation, qui permet de caractériser la valeur efficace du fondamental de la tension modulée par l'onduleur :

$$V_m = \frac{r V_{dco}}{2\sqrt{2}} = r \alpha V_s \tag{IV-14}$$

Avec

V_m : Tension simple efficace modulée en sortie du convertisseur, L_f impédance de sortie du convertisseur. On représente sur la figure (IV-9) diagramme vectoriel correspondant.

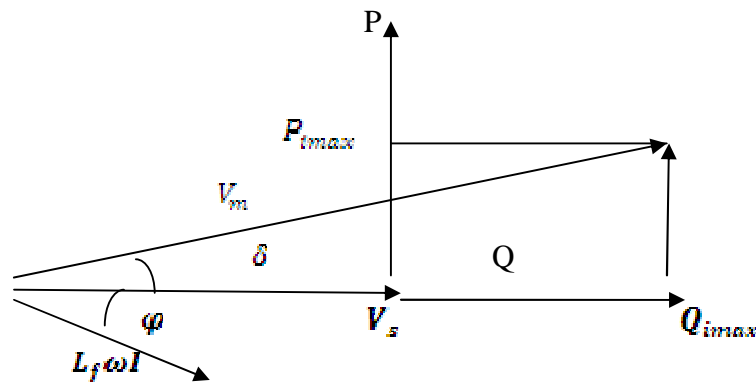


Figure (IV- 9) : Diagramme vectoriel des grandeurs électrique en valeur crête

Le paramètre α est calculé à l'aide des relations suivantes déterminées à l'aide du diagramme vectoriel en considérant que $V_m \approx V_s$ (δ faible).

La puissance réactive maximale envoyée sur le réseau, est :

$$Q_{imax} = \frac{3V_s^2(r \times \alpha \times \cos\delta - 1)}{X_f} \quad (IV-15)$$

La puissance active maximale s'exprime par :

$$P_{imax} = \frac{3V_s^2 \sin\delta \times r \times \alpha}{X_f} \quad (IV-16)$$

Avec

X_f : Réactance en sortie du convertisseur ($X_f = L_f \omega$)

ω : Pulsation du réseau [rad.s^{-1}].

Afin de transférer le maximum de puissance sur le réseau, le taux de modulation est supposé unitaire $r=1$. En élevant les équations (III-8) et (III-9) au carré et en les additionnant, on obtient l'équation qui donne le paramètre α :

$$\alpha^2 = \left(\frac{X_f}{3V_s^2}\right)^2 \left\{ (Q_{imax} + \frac{3V_s^2}{X_f})^2 + P_{imax}^2 \right\} \quad (IV-17)$$

Donc

$$\alpha = \sqrt{\left(\frac{X_f}{3V_s^2}\right)^2 \left\{ (Q_{imax} + \frac{3V_s^2}{X_f})^2 + P_{imax}^2 \right\}} \quad (IV-18)$$

En utilisant les équations (IV-6) et (IV-11), on obtient alors l'expression donnant la tension du bus continu

$$u_{bc0} = 2 \times V_s \times \sqrt{2} \sqrt{\left(\frac{X_f}{3V_s^2}\right)^2 \left\{ (Q_{imax} + \frac{3V_s^2}{X_f})^2 + P_{imax}^2 \right\}} \quad (IV-19)$$

IV .2.3.1.3 Calcul de la capacité

Pour simplifier, il est possible de réaliser le calcul de la valeur de la capacité sur le temps de décharge. On se fixera alors à une valeur Δu_{bc} qui ne devra pas être dépassée en admettant que sur ce court instant, la valeur du courant transitant vers l'interface réseau n'a pas le temps de varier. Nous ferons donc une approximation par excès de la valeur du condensateur.

$$\text{Pour le condensateur, } i = C \frac{du_{bc}}{dt} \quad (IV-20)$$

Donc

$$C = I \frac{dt}{du_{bc}} \quad (IV-21)$$

Si l'on considère un temps très court au niveau de la décharge, on peut approximer la courbe de décharge par une droite et en passant par les petites variations autour d'un point de fonctionnement on a :

$$C = I \frac{\Delta t}{\Delta u_{bc}} \quad (IV-22)$$

Et comme il est considéré que l'intensité i_{red} transitant vers l'interface réseau est constante durant le temps très court est égale à I , alors on a :

$$C = i_{red} \frac{\Delta t}{\Delta u_{bc}} \quad (IV-23)$$

IV.2.3.2 Le filtre R-L

En négligeant la chute de tension dans les résistances et en considèrent une ondulation $I_{ondulation} = \Delta I$ sur le courant côté réseau, l'inductance du filtre d'entrée de l'onduleur est donnée par [Ber 02]:

$$L = \frac{\sqrt{3} V_s}{6\sqrt{2} f_s I_{ondulation}} \quad (IV-24)$$

Avec :

f_s : Représente la fréquence de commutation de l'onduleur

$I_{ondulation}$: est l'ondulation acceptée sur le courant à l'entrée de l'onduleur (20%)

IV.3.3 Contrôle des courants

Un contrôle vectoriel dans le repère de Park des courants a été réalisé en utilisant un repère synchronisé avec les tensions du réseau. L'application de la loi des mailles sur le filtre connecté au réseau électrique donne les équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_{m1} \\ V_{m2} \\ V_{m3} \end{bmatrix} = R_t \begin{bmatrix} i_{t1} \\ i_{t2} \\ i_{t3} \end{bmatrix} + L_t \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{t1} \\ i_{t2} \\ i_{t3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{t1} \\ V_{t2} \\ V_{t3} \end{bmatrix} \quad (IV-25)$$

Le modèle dans le référentiel de Park du convertisseur est par conséquent donné du coté réseau

$$\begin{cases} V_{md} = R_c i_{td} + L_c \frac{di_{td}}{dt} - \omega_s L_c i_{tq} + V_{td} \\ V_{mq} = R_c i_{tq} + L_c \frac{di_{tq}}{dt} + \omega_s L_c i_{td} + V_{tq} \end{cases} \quad (IV-26)$$

On considère les tensions de couplage suivantes :

$$\begin{cases} e_q = -L_c \omega_s i_{tq} \\ e_d = L_c \omega_s i_{td} \end{cases} \quad (IV-27)$$

Les équations différentielles peuvent être simplifiées en :

$$\begin{cases} V_{bd} = R_c i_{td} + L_c \frac{di_{td}}{dt} \\ V_{bq} = R_c i_{tq} + L_c \frac{di_{tq}}{dt} \end{cases} \quad (IV-28)$$

Où les tensions aux bornes des bobines sont définies par :

$$\begin{cases} V_{bd} = V_{md} - e_q - V_{td} \\ V_{bq} = V_{mq} - e_d - V_{tq} \end{cases} \quad (IV-29)$$

En appliquant la transformée de Laplace aux équations (IV-21) et (IV-22), on fait apparaître deux fonctions de transfert identiques :

$$F(s) = \frac{i_{td}(s)}{V_{bd}(s)} = \frac{1}{R_c + L_c s} \quad (IV-30)$$

$$F(s) = \frac{i_{tq}(s)}{V_{bq}(s)} = \frac{1}{R_c + L_c s} \quad (IV-31)$$

IV.3.4 Contrôle des puissances envoyées au réseau

La figure (IV-10) montre le dispositif de commande des courants, dans le repère réel (a, b, c). Ce dispositif de commande permettra d'imposer les courants transités égaux à leurs références. Les puissances actives et réactives transitées sont données comme suit [6].

$$\begin{cases} P = V_{dr} i_{dr} + V_{qr} i_{qr} \\ Q = V_{qr} i_{dr} - V_{dr} i_{qr} \end{cases} \quad (IV-32)$$

A partir de ces relations, une possibilité de réguler les courants du côté réseau est envisagée en imposant des références pour la puissance active P_{ref} et réactive Q_{ref} (Une puissance réactive nulle ($Q_{ref} = 0$)).

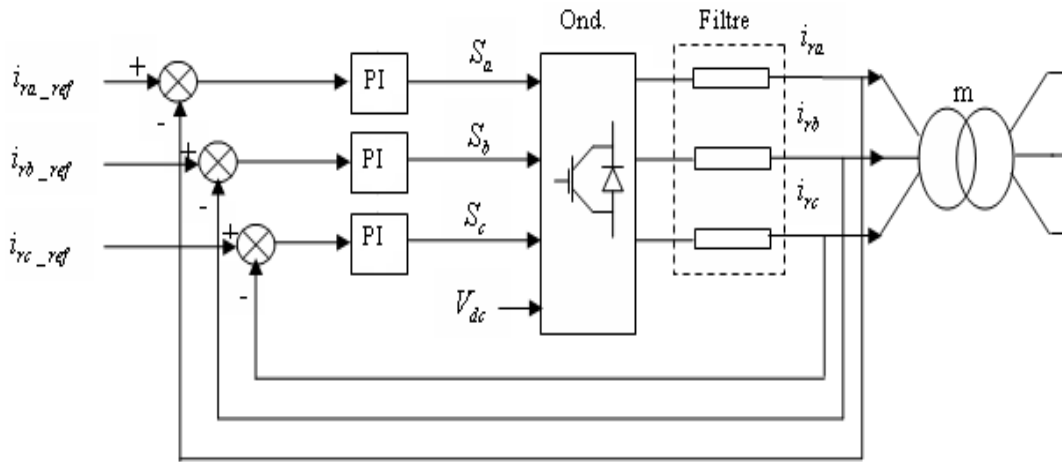


Figure (IV-10) : Schéma de principe de contrôle des courants coté réseau [Bou 07].

A partir du système d'équation précédent, on aura :

$$\begin{cases} V_{dr-mes} Q_{ref} = V_{qr-mes} V_{dr-mes} i_{dr-ref} - V_{dr-mes}^2 i_{qr-ref} \\ V_{qr-mes} P_{ref} = V_{dr-mes} V_{qr-mes} i_{dr-ref} + V_{qr-mes}^2 i_{qr-ref} \end{cases} \quad (IV-33)$$

$$\begin{cases} V_{dr-mes} P_{ref} = V_{dr-mes}^2 i_{dr-ref} + V_{dr-mes} V_{qr-mes} i_{qr-ref} \\ V_{qr-mes} Q_{ref} = V_{qr-mes}^2 i_{qr-ref} - V_{qr-mes} V_{dr-mes} i_{dr-ref} \end{cases} \quad (IV-34)$$

Ces deux systèmes d'équations nous permet d'avoir les courants de référence à imposer qui sont donnés par :

$$\begin{cases} i_{dr-ref} = \frac{P_{ref} V_{dr-mes} + Q_{ref} V_{qr-mes}}{V_{dr-mes}^2 + V_{qr-mes}^2} \\ i_{qr-ref} = \frac{P_{ref} V_{qr-mes} - Q_{ref} V_{dr-mes}}{V_{dr-mes}^2 + V_{qr-mes}^2} \end{cases} \quad (IV-35)$$

Les fluctuations de la tension du bus continu ont été atténuées en réglant la puissance modulée par un système de commande basé sur le contrôle des puissances. Il est composé :

- ✓ une tension du bus continu constante ($u_{bc} = 1200[V]$)
- ✓ une puissance réactive nulle peut alors être imposée ($Q_{ref} = 0$)

Pour déterminer la puissance de référence (P_{ref}) nécessaire [29][30].

$$P_{ref} = u i_c - P_{reg} \quad (IV-36)$$

D'une boucle de régulation, $P_{reg} = C_u(s) \cdot (u_{bc-ref} - u_{bc})$ avec un correcteur $C_u(s)$ proportionnel Intégral dont les éléments ont été calculés de manière à avoir une tension du bus continu constante.

La structure globale du contrôle du convertisseur côté réseau est donnée par la Figure (IV-11)

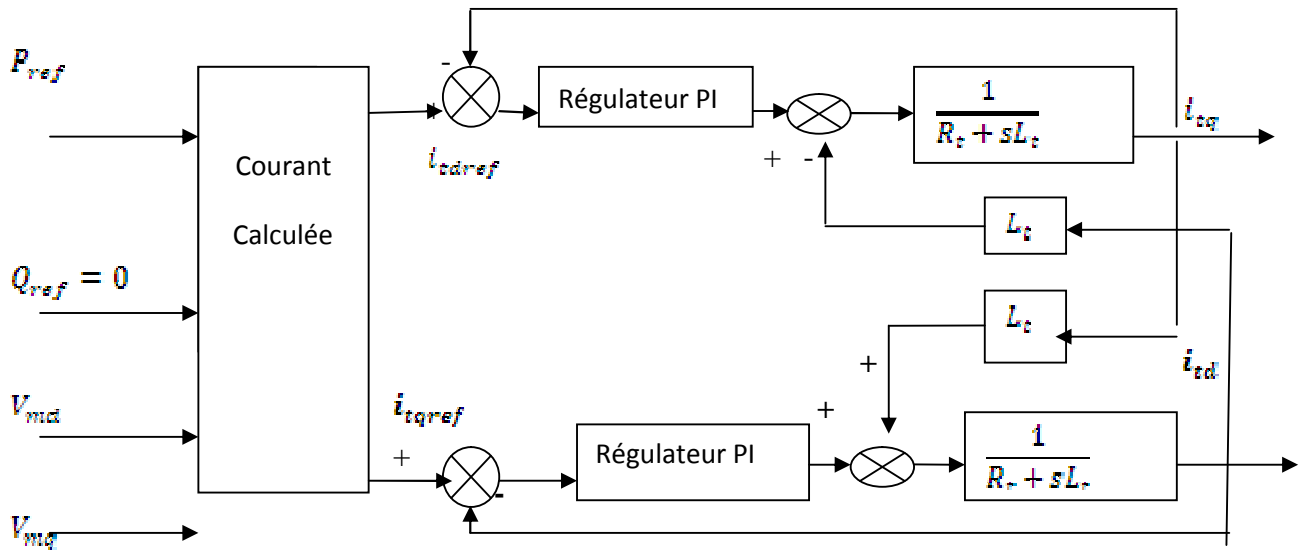
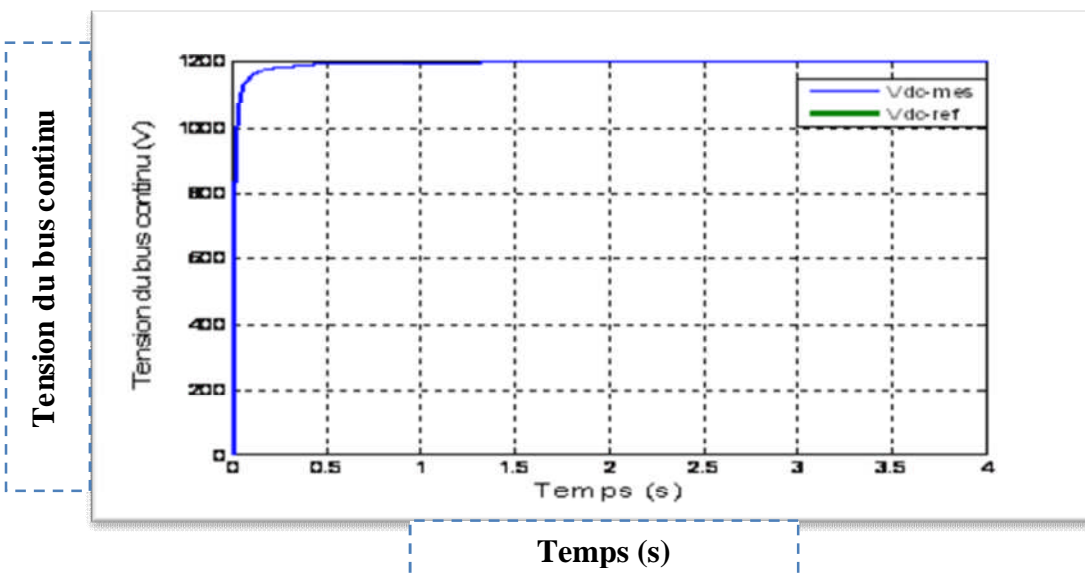


Figure (IV-11) : Schéma bloc de la régulation de la tension des courants réseaux.

IV.4 Résultats de simulation

Les figures ci dessus représentent les résultats obtenus de cascade basée sur deux convertisseurs commandés par la stratégie triangulo-sinusoidale et une Machine Asynchrone à Double Alimentation. La tension du bus continu suit bien sa référence qui est 1200V.



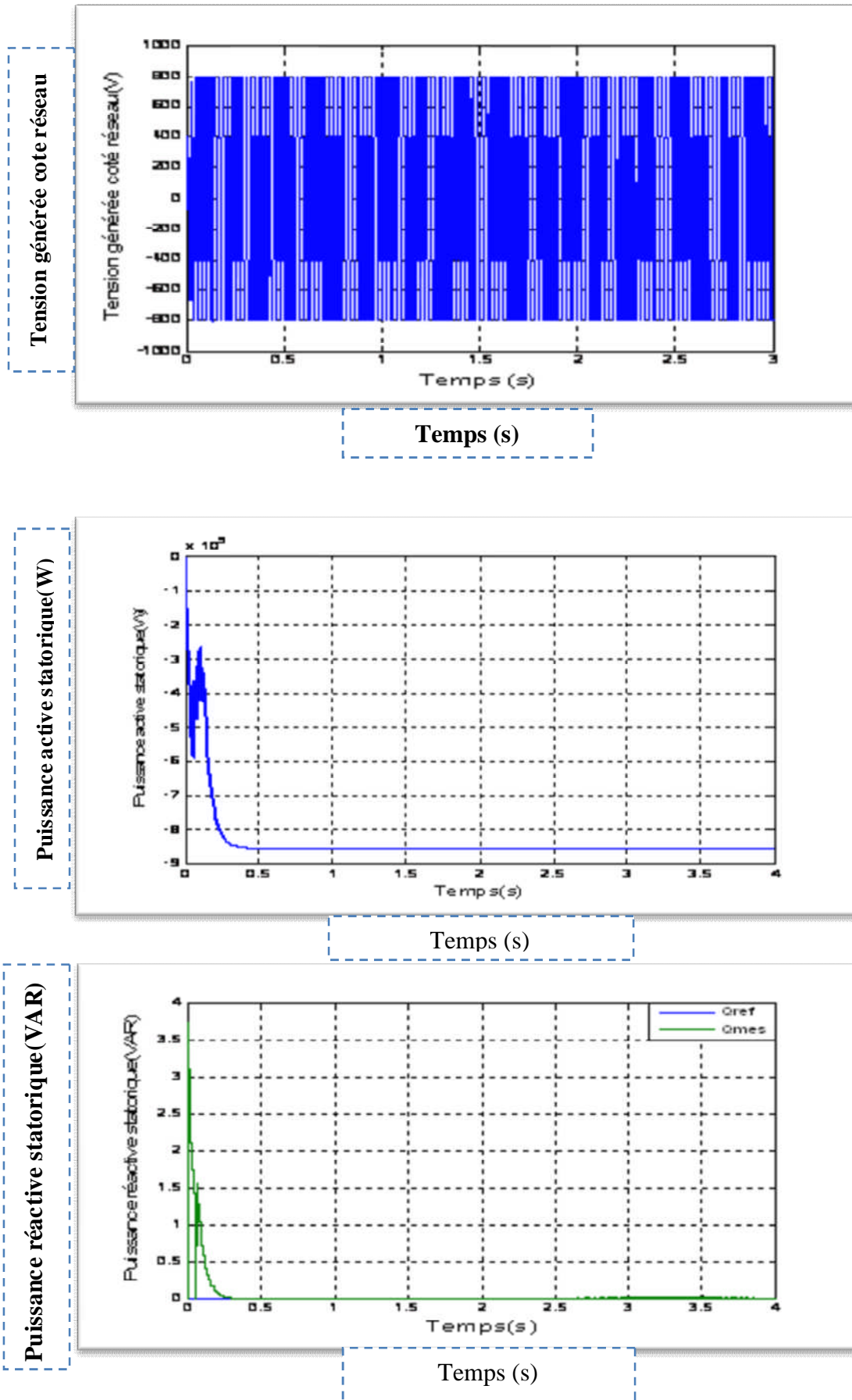


Figure (IV-12) : Réponse du système (tension du bus continu et puissances active et réactive statoriques et courant injecté par le redresseur dans le réseau)

Un bon suivi de consigne pour les puissances active et réactive statoriques est constaté. La tension à la sortie du convertisseur coté réseau est à deux niveaux ou son amplitude dépend de la valeur de la tension du bus continu. Cette dernière dépend du courant dans le condensateur. En la contrôlant il devient possible de commander la valeur de la tension. Ainsi il est constaté que cette dernière suit sa référence dès que le condensateur est chargé. Il est cependant utile à noter que le suivi de consigne ne commence que lorsque la tension du bus atteint un niveau suffisant, d'où notre choix de fixer celui-ci à 1200 V. Le courant injecté par le redresseur est sinusoïdal et en phase avec la tension du réseau.

IV.5 Résultats de simulation du système global

IV.5 .1Etude d'une ferme éolienne

La dernière étape consiste à placer la MADA dans des conditions de fonctionnement les plus proches possibles d'un système éolien. Le schéma complet de la chaîne de conversion éolienne à base de la MADA utilisée dans notre étude est présenté sur la Figure (VI-13) où on retrouve :

- La turbine dont les structures de contrôle ont fait l'objet du chapitre I.
- La boîte à vitesse (multiplicateur de vitesse), le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique
- La machine à double alimentation.
- Le convertisseur « C rotor » connecté au rotor de la machine, utilisé dans le but de contrôler les puissances active et réactive statorique de la machine.
- Le convertisseur « C réseau » utilisé pour contrôler la tension du bus continu et l'énergie réactive échanger entre le rotor de la machine et le réseau.

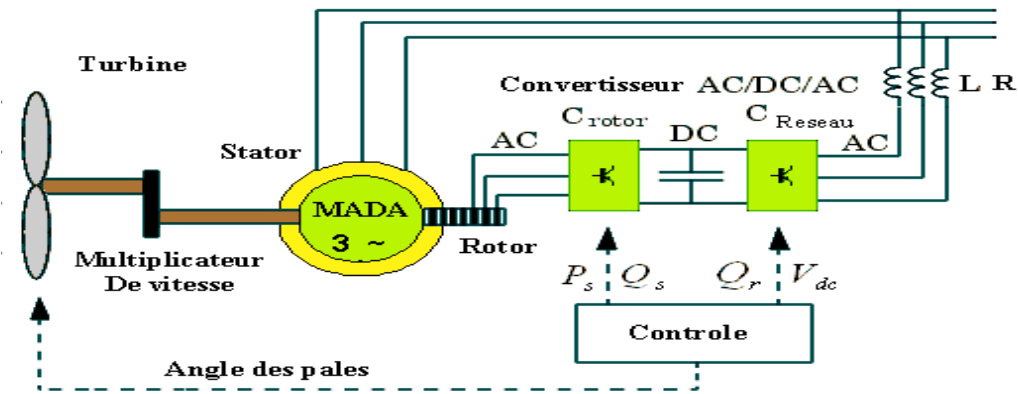
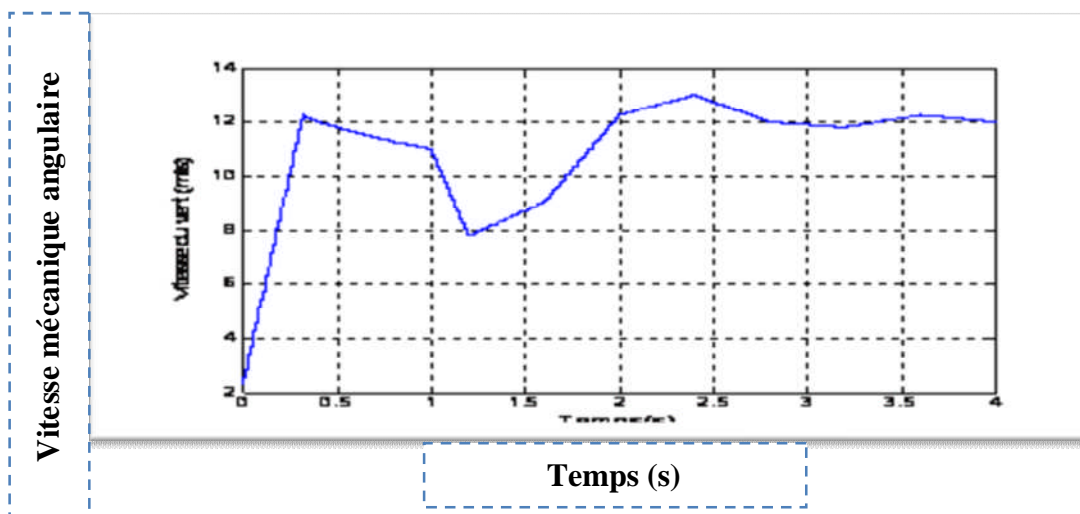


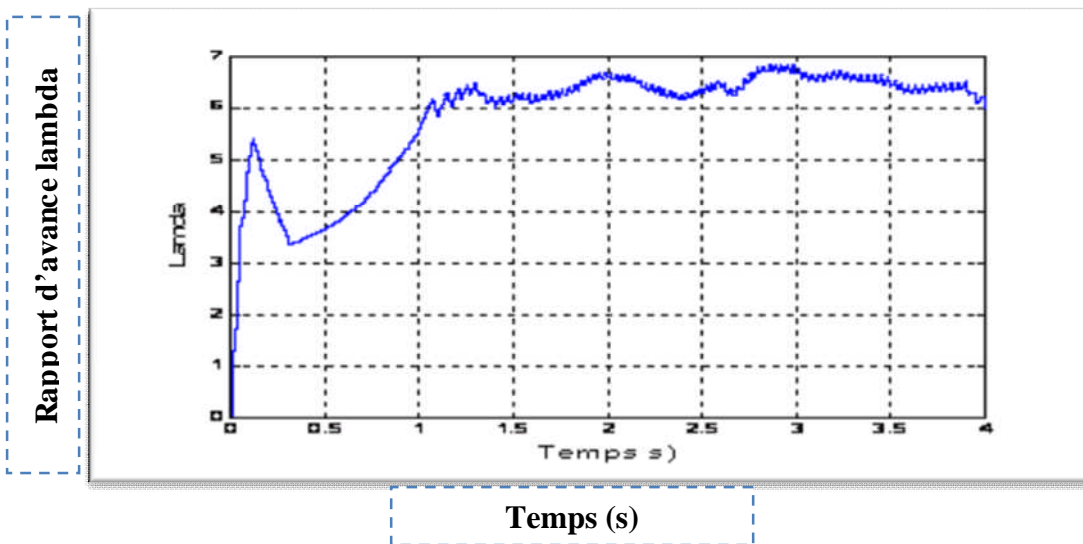
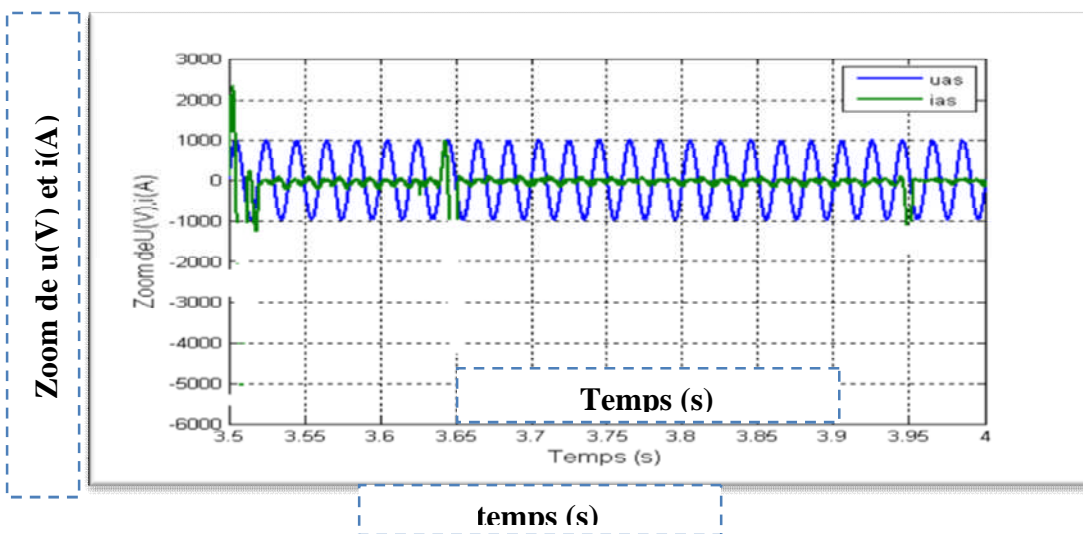
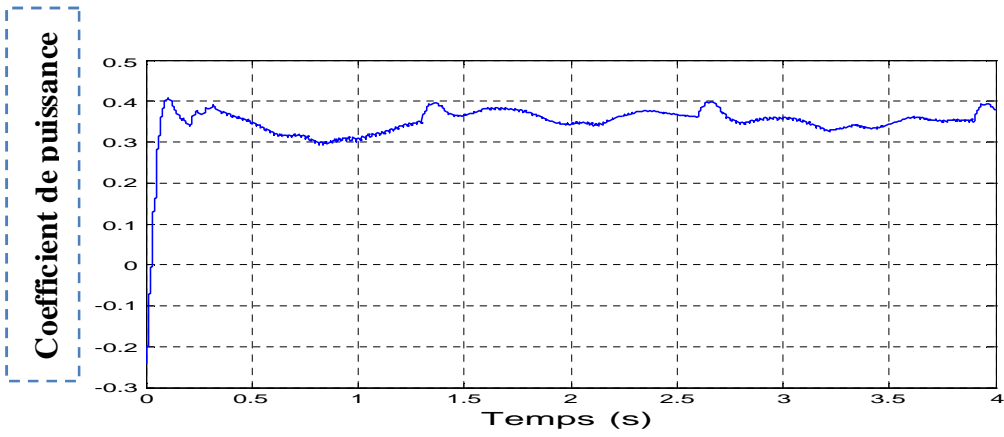
Figure (VI-13) : Architecture de la chaîne de conversion éolienne commandée par le rotor [Bou 07].

VI.5.2 Simulation d'une GADA éolien :

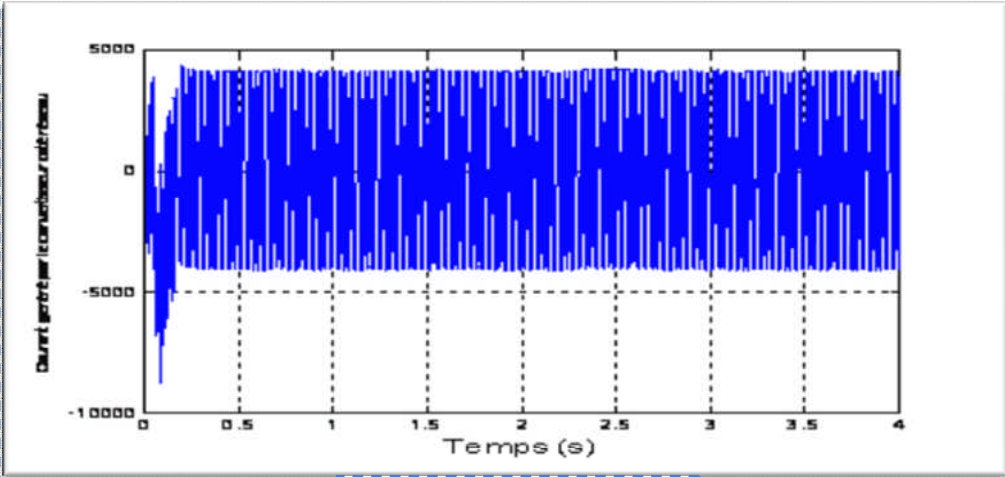
Dans cette partie le comportement du générateur éolien soumis au vent moyen, et à une puissance de référence, sera illustré à l'aide d'une simulation numérique réalisée sous un logiciel Matlab-simulink. Dans chaque cas il sera montré l'allure de la puissance générée, la vitesse de rotation de la turbine et le coefficient de puissance.

La figure (VI-14) illustre le fait que le vent moyen permet à un certain moment, de débiter la puissance de référence.



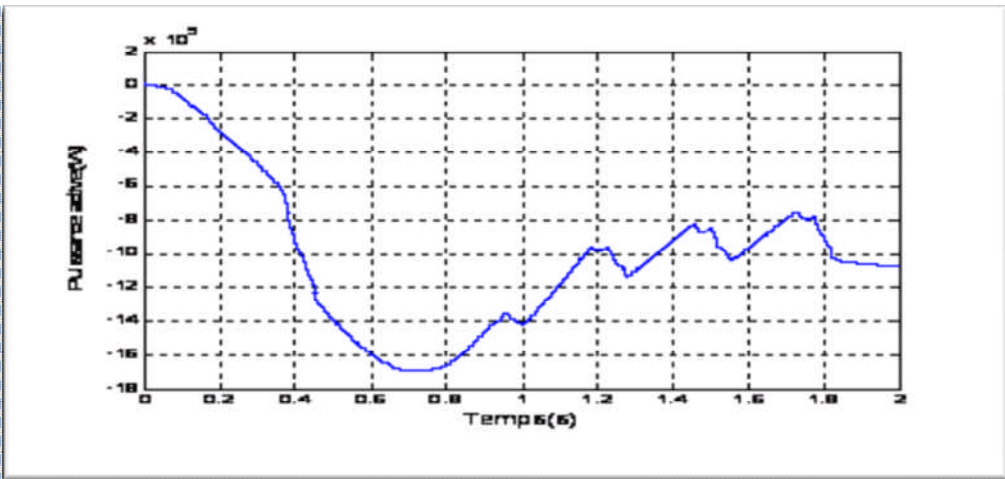


Courant généré par le convertisseur coté réseau



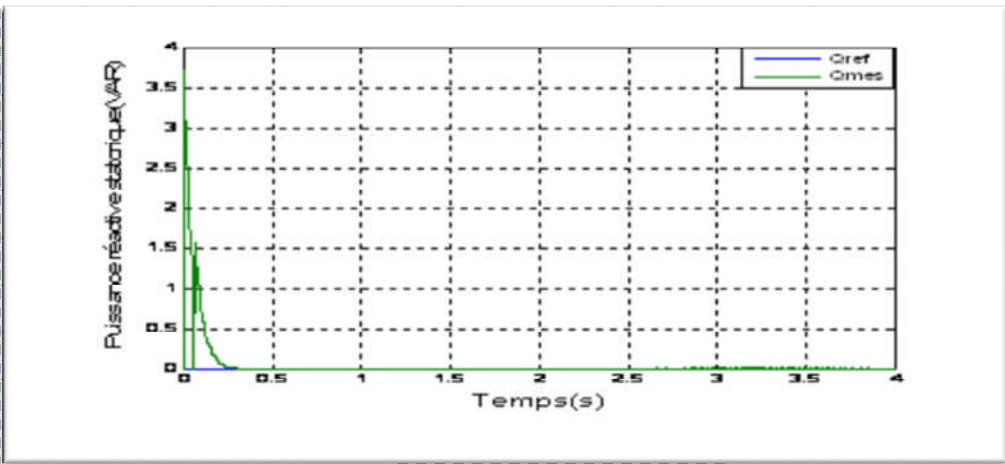
Temps (s)

Puissance active statorique (W)



Temps (s)

Puissance réactive statorique (VAR).



Temps (s)

Figure (VI-14) : Réponse du système pour un profil de vent aléatoire

On remarque que :

- ✓ Coefficient de puissance converge vers sa valeur optimale
- ✓ La puissance réactive est pratiquement nulle tandis que La puissance active est négative et augmente à sa valeur absolue en fonction de la vitesse du vent permettant ainsi l'extraction maximale de la puissance.
- ✓ La machine délivre de l'énergie électrique au réseau par le stator. En effet, d'après le zoom de la tension d'une phase statorique et le courant correspondant, la machine fonctionne comme génératrice avec un facteur de puissance unitaire au stator.

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre on a modélisé le système de conversion d'énergie éolienne à base de machine asynchrone à double alimentation couplés au réseau a travers de convertisseurs statiques (redresseur et onduleur triphasé) commandés par la stratégie triangulo-sinusoidale. La modélisation du redresseur MLI a été détaillée, son application nous a permis la régulation de la tension du bus continu à une valeur de référence désirée qui sera la source de tension pour le convertisseur coté rotor pendant le démarrage, et générer des courants vers le réseau. . La machine à double alimentation est contrôlée à l'aide d'un régulateur PI. Les résultats de la simulation ont montré qu'il est possible de réaliser ce genre de système mais avec une condition sur le dimensionnement du bus continu en fonction du courant transité.

Conclusion générale

Conclusion générale

En conclusion, dans ce mémoire, nous avons établi la modélisation complète d'un aérogénérateur à vitesse variable en adoptant le modèle continu équivalent, puis nous avons calculé les régulateurs proportionnel intégral permettant de contrôler la tension du bus continu et les échanges de puissances active et réactive.

Dans le premier chapitre on a présenté les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique et dressé un état de l'art sur les différentes associations des machines électriques, convertisseurs pouvant être accouplées à une éolienne, les différentes génératrices utilisées et le choix de la machine asynchrone à double alimentation. Après le choix de la génératrice et sa structure d'alimentation, la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation été l'objet du deuxième chapitre. La mise en équation des différentes grandeurs caractérisant la machine étudiées nous a permis d'établir un modèle mathématique équivalent dont la complexité a été réduite en se basant sur certaines hypothèses simplificatrices.

La génératrice asynchrone a été destinée pour la production d'énergie dans le domaine éolien, il est donc très utile de raisonner en terme de puissance. Pour cela, la stratégie de commande élaborée dans le troisième chapitre est en puissance active et réactive statoriques. Dans cette partie, on a présenté l'étude théorique de la stratégie de commande, ou on a exprimée les grandeurs statoriques de la Machine Asynchrone à double alimentation en fonction des grandeurs rotoriques ayant pour but le pilotage de la MADA par le rotor. Le bon suivi des consignes pour les deux puissances statoriques " active et réactive " par les puissances réelles débitées par le stator de la machine a montré l'efficacité de la commande appliquée à priori la stratégie de régulation à MLI par un onduleur à deux niveaux alimenté par une source continue supposée parfaite. Parmi plusieurs types de commande qui peuvent être appliqués sur la machine asynchrone, la commande par mode glissant, présente une commande alternative importante qui peut être appliquée la GADA. La théorie et l'application de la commande dite « à structure variable » est aussi présentée en détaille dans cette partie. En effet, Nous avons rappelé tout d'abord les éléments de cette théorie ensuite on les a appliqués sur la GADA.

Les résultats de simulation sur MATLAB nous ont permis de voir un bon découplage entre les puissances (active et réactive), il confirme la possibilité de doubles alimentations par la stabilité des différentes grandeurs de la machine étudiée.

- Dans le quatrième chapitre, on a présenté l'étude d'une cascade basée sur deux convertisseurs MLI (redresseur et onduleur triphasé) commandés par la stratégie triangulo-sinusoïdale associés à une Machine Asynchrone Doublement Alimentée. Dans le ce chapitre, on a présenté la simulation du système éolien.

Le travail effectué dans le cadre de ce mémoire de magistère peut être poursuivi et complété par des perspectives pouvant contribuer à son amélioration.

En perspectives, on propose les idées suivantes :

- L'étude et l'application d'autres convertisseurs de niveaux supérieurs tels que trois et cinq niveaux dans une chaîne de conversion éolienne ;
- L'intégration éventuelle d'un système de stockage inertiel ;
- L'étude des perturbations de la production de l'énergie éolienne vis à vis des déséquilibres du réseau ;
- Utilisation d'un algorithme de maximisation de la puissance captée par différentes techniques : logique floue, réseau de neurones ...etc. ;

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

[Abd 07] A. Abdelli, " Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive", Thèse de doctorat, Ecole doctorale de L'institut National Polytechnique de Toulouse ,2007.

[Aim 04] S. El Aimani, " modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension ", thèse doctorat, université des sciences et technologies de lile, 2004.

[Aza08]R.Azazia,"Etude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation alimenter par un convertisseur multi niveaux ", mémoire magister. Université Boumerdes, 2008.

[Bag 99] L. Baghli," Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques", Thèse doctorat, L'université Henry Poincaré, Nancy-I, 1999.

[Ber 02] S. Bernet, S. Ponnaluri, R. Teichmann, "Design and loss comparison of matrix converters and voltage-source converters for modern AC drives", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 49, N° 2, April 2002.

[Ber 99] P.Berlu, "calcul des effort subir par les éoliennes de moyenne et forte moyenne", thèse de doctorat, université des sciences et technologies de lile I, 1999.

[Bou 07] T.Bouaouiche, "Commande à structure variable et étude de l'intégration d'éolienne à base de machine asynchrone à double alimentation sur le réseau électrique ", thèse doctorat, Universités de Nantes, 2007.

[Boy 06]A. boyette, "contrôle commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne", thèse doctorat, université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.

[Buh 86] H.BUHLER,"Réglage par mode de glissement».Presses Polytechniques Romandes, 1986.

[Cam 03]H. camblong, "minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des Aérogénérateurs à vitesse variable", thèse doctorat, l'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2003.

[Car 02] **R.A.De CARLO, S.H ZAK and G.P.MATHIEWS**, "Sliding controller design for nonlinear multivariable systèmes ", proc. IEEE.Vol.76, N°3, pp.409-415.

[Cha 83] **J.Chatelin**, "Machines électriques", Tome2. Presse Polytechnique Romandes, 1983.

[Dav 07] **A. Davigny**, "Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie", thèse doctorat, université des sciences et technologies de lile I, 2007.

[Fos 96]**A.J.Fossard**,"Commande à structure variable. Système de régulation, collaboration Automatique ".ED.MASSON, 1996.

[Gao 93]**W.GAO,J.C.HUNG**,"Variable structure control system,"IEEETrans.Ind.Elec.ol°40. N°1,pp°55.February.1993.

[Gre 97]**G. Grellet-G. Clerc**," Actionneurs électriques Principes-Modèles-Commande", Editions Eyrolles, Paris 1997.

[Idj 06]**K. Idjdarene, D.rekioua et A.M. tounza**,"analyse du fonctionnement d'une éolienne basées sur une génératrice asynchrone en fonctionnement autonome", mémoire magister, université de Bejaia, 2006.

[Khe 07] **L.KHETACHE**,"Etude et commande d'un système éolienne à base d'une machine électrique à double alimentée", mémoire de magister, Université de Batna 2007.

[Kru 03] **J. Krukowski Wilson Xu Lili Bu, Chun Li and Xian Liu**,"A New Energy Recovery Double- Winding Cage-Rotor Induction Machine, IEEE Transactions on Energy Conversion", Vol.18, N°.2, pp. 315-320, June, 2003.

[Lag 05]**T.Lagotere**,"conceptions et modélisation d'oscillateurs et de leurs boucles à verrouillage de phase associées pour des applications de radio communications", thèse doctorat, université de Poitiers, 2005.

[Lec 04] **L.Leclercq**,"Apport du stockage inertiel associé `a des ´éoliennes dans un réseau ´électrique en vue d'assurer des services systèmes", Thèse de doctorat, Ecole doctorale sciences pour l'ingénieur, Université des Sciences et Technologie de Lille, 2004.

[Mam 05] **A. Mammeri, E.H.Terfaoui**, " étude et dimensionnement d'une éolienne", étude d'ingéniorat, université UHBC, 2005.

[Mer 07] **F. Merrahi**, " alimentation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation (application à L'énergie L'éolienne) », mémoire de magister, université d'Ecole Nationale Polytechnique, ENP 2007.

[Mil 06] **A.Miloudi**, "Etude et conception de régulateurs robustes dans différentes stratégies de commandes d'un moteur asynchrone", Thèse en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat es- sciences en électrotechnique, Université des sciences et de la technologie Oran ,2006.

[Min 06] **Y. Ming ,L. Ggengyin , Z.Ming , Guoping Liu, Chengyong Zhao**, "Study on the control of DFIG and its responses to grid disturbances" , IEEE 2006.

[Nes 08] **A. T.Nesmat**, "stabilité dynamique des systèmes électriques multi machines : modélisation, commande, observation et simulation", Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Lyon : Electrotechnique - Electronique, Automatique, 2008.

[Nou 01] **S.Noui**, "Etude et réalisation d'un redresseur à MLI commandé par DSP. Application à l'alimentation d'un onduleur à 3 niveaux", mémoire de magister. Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, 2001.

[Pan 04] **Y. Pankow**, "Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension ", thèse doctorat, Ecole nationale supérieure D'Arts et métiers, 2004.

[Pin 04] **M. Pinard**, "Commande Electronique des Moteurs Electriques", DUNOD, série EEA, 2004.

[Poi 03] **F. Poitiers**, "étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de énergie éolienne", thèse de doctorat, université Henri Poincaré, Nancy I, 2003.

[Ouf 03] **A. Oufa**, "calcul des caractéristiques et des performances d'une pale éolienne à axe horizontal ", étude d'ingénieur, université UHBC, 2006.

[Slo 84] **J.J.SLOTINE**, "Sliding controller design for nonlinear systems ".I.J.C.Vol.4.N°2.pp 421-434, 1984.

[Tab 06] **K.TABTI** , "Stratégie de commande de moteur synchrone à aimants permanents pour véhicule électrique ".mémoire de magister. Université d'oran, 2006.

[Tre 06] **E.Tremblay, A.Chan**, "Study of grid-side converter control for grid-connected DFIG wind turbines under unbalanced load condition ", 2006.

- [1] « <http://www.windpower.org/Fr/tour/wres/park.Htm>.
- [2] <http://www.windpower.org/fr/tour/wtrb/genpoles.htm>
- [3] «<http://www.windpower.org>
- [4] <http://www.windpower.org/fr/tour/design/index.htm>
- [5] <http://www.ewea.org>. Wind Energy. European Wind Energy Association.

ANNEXES

ANNEXE A

Paramètres de la chaîne de conversion éolienne basée sur une GADA

Les Paramètres mécaniques de la turbine éolienne de 1.5MW basée sur une machine asynchrone à double alimentation, sont illustrés dans le tableau suivant :

Tension nominale	U_N	400 / 690	Volts
Puissance nominale	P_N	1.5	MW
Fréquence nominale	f	50	Hertz
Nombre de paire de pôle	p	2	/
Vitesse nominale	n_N	1500	tr / mn
Résistance statorique	R_S	0.012	Ω
Résistance rotorique	R_R	0.021	Ω
Coefficient d'inductance statorique	L_S	0.01370372	Henry
Coefficient d'inductance rotorique	L_R	0.01367507	Henry
Coefficient d'inductance mutuelle	M_{SR}	0.0135	Henry
Moment d'inertie total	J	60	kg.m ²
Coefficient de frottement	f	0.0024	N.s/rad
Rayon de l'éolienne	R	60	m
Gain du multiplicateur de vitesse	G	90	/
Moment d'inertie de la GADA	J_G	0.1	kg.m ²
Résistance de la ligne	R_f	0.0004	Ω
inductance de la ligne	L_f	0.0084	Henry

ANNEXE B

Calcul d'un régulateur PI avec compensation

Le schéma bloc du correcteur PI (proportionnelle –intégrale) est illustré par la figure suivante :

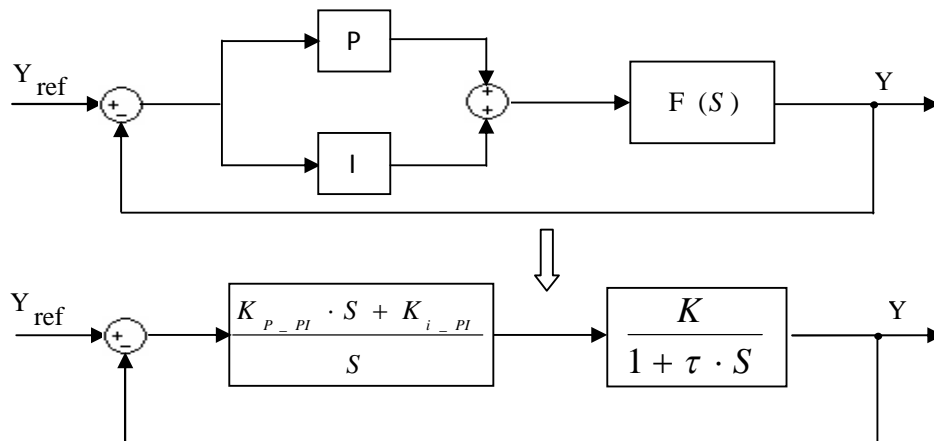


Schéma fonctionnel d'un correcteur PI

Tel que :

$F(s) = \frac{K}{1+\tau s}$: Représente la fonction de transfert du système à réguler.

K_{P-PI} : Gain proportionnel du correcteur PI.

K_{I-PI} : Gain d'intégrale du correcteur PI.

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) s'écrit :

$$F_{BO}(s) = K \frac{K_P + \left(\frac{K_I}{s}\right)}{1+\tau s} = \frac{K(K_P s + K_I)}{s(1+\tau s)} = K K_I \frac{1 + \frac{K_P s}{K_I}}{s(1+\tau s)}$$

Si on pose $\tau = \frac{K_P}{K_I}$

Alors : $F_{BO}(s) = \frac{K_I K}{s}$

En boucle fermée, la fonction de transfert s'écrit comme suit :

$$F_{BF}(s) = \frac{K_i K}{K_i K + \tau} = \frac{1}{1 + \frac{1}{K_i K} s}$$

Pour atteindre 95% de la consigne, le temps de réponse t_r du système bouclé vaut :

$$t_r = 3 \frac{1}{K_i K}$$

Or,
$$K_i = \frac{K_P}{\tau}$$

Alors :

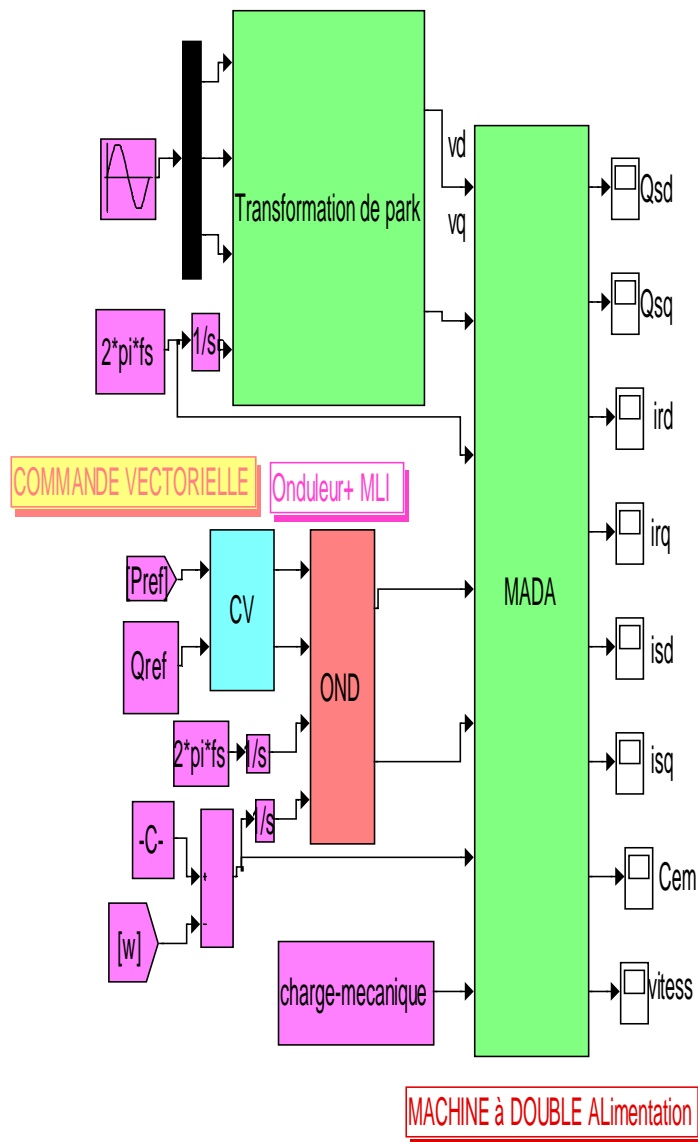
$$t_r = 3 \frac{1}{K_p K}$$

$$\text{D'où } \begin{cases} K_p = 3 \frac{\tau}{t_r K} \\ K_i = \frac{3}{t_r K} \end{cases}$$

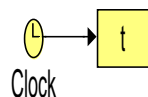
ANNEXE C

Modèles simulink contruit pour les différentes simulations

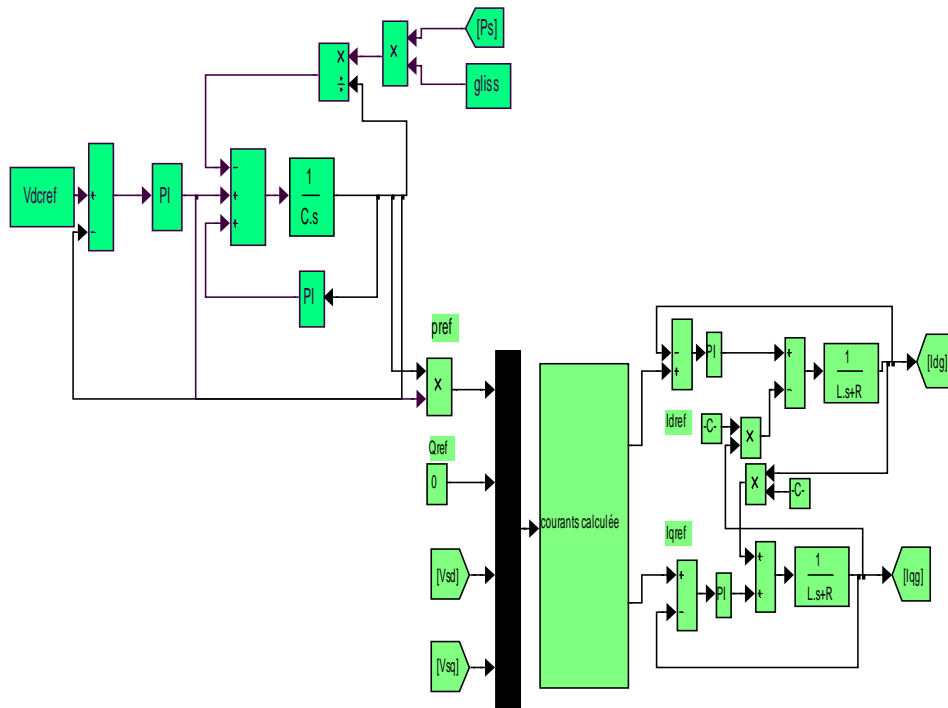
Machine asynchrone à double alimentation + stratégie de commande



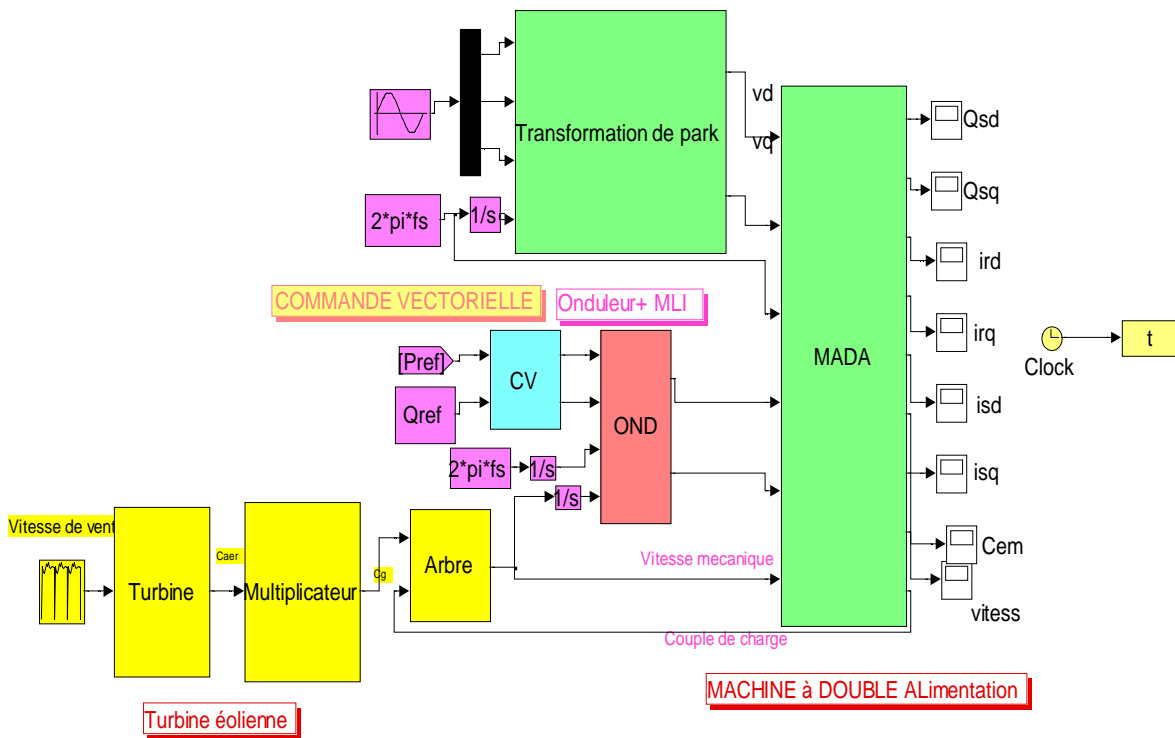
MACHINE à DOUBLE ALIMENTATION



Bus continu+ Contrôle des courants



Système globale (Turbine éolienne+MADA)



TABLEDES FIGURES

Table des figures

Figure I-1: evolution des puissances éoliennes installées dans le monde en MW.....	5
Figure I-2 : éléments constitutants d'un Aérogénérateur.....	6
Figure I-3 : technologies d'éoliennes à axe vertical.....	7
Figure I- 4 : principe du rotor de savounuis et de l'incidence variable.....	8
Figure I-5 : éolienne sous le vent.....	9
Figure I-6 : éolienne face de vent.....	10
Figure I-7 : flux d'air sur un profil de pale « stall ».....	11
Figure I-8 : variation de l'angle de calage d'une éolienne.....	12
Figure I-9 : modèle et commande du système de calage de pale.....	13
Figure I-10 : loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable.....	13
Figure I- 11 : évolution de la configuration électrique.....	16
Figure I-12 : bilan des forces sur une pale.....	16
Figure I-13 : tube de courant autour d'une éolienne.....	17
Figure I-14 : coefficient de puissance.....	18
Figure I-15 : coefficient de puissance aérodynamique en fonction λ et de l'angle de pas des pales.....	19
Figure I-16 : influence de l'angle de calage sur le coefficient de couple.....	19
Figure I-17 : puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné.....	20
Figure I-18 : machine asynchrone à double bobinages statoriques.....	22
Figure I-19 : schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor.....	22
Figure I-20 : machine asynchrone à rotor bobiné avec des bagues collectrices.....	23
Figure I-21 : système mécanique de l'éolienne.....	24
Figure I-22 : modèle mécanique simplifié de la turbine.....	25
Figure I-23 : schéma bloc du modèle de la turbine.....	27

Figure I-24: schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.....	28
Figure I-25: résultats de simulation d'une éolienne à vitesse variable émulée sur un banc d'essai de 1.5MW.....	30
Figure II-1 : structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.....	34
Figure II-2: quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation.....	35
FigureII-3 :puissance produite par la MADA en fonction de la vitesse du vent.....	36
Figure II-4 : représentation schématique d'une machine asynchrone à double alimentation.	37
FigureII-5 : repérage angulaire des systèmes d'axes fictifs de la machine.....	40
FigureII-6: représentation des différents référentiels.....	44
Figure III -1 : schéma bloc du système à réguler.....	50
Figure III -2 : bloc de commande via les puissance.....	51
Figure III -3:schéma bloc de la commande indirecte.....	52
Figure III-4:réponse du système[MADA+onduleur].....	55
Figure III-5: différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase.....	57
Figure III-6:représentation de la commande équivalente.....	61
Figure III-7:représentation de la commande en utilisant la fonction « sign »	62
Figure III-8:représentation de la commande douce à un seul seuil « <i>sat</i> ».....	64
FigureIII -9 : schéma global par mode glissant de la GADA.....	67
Figure III-10:résultats de simulation du système avec la fonction sign de la GADA.....	69
Figure III-11: effet des perturbations et des variations paramétriques sur la puissance active	70
Figure III-12 : effet des perturbations et des variations paramétriques sur la puissance réactive.....	71
Figure IV-1 :Principe de la cascade basée sur une machine asynchrone à double alimentation ...	74
Figure IV-2: onduleur à deux niveaux utilisant des transistors IGBT.....	75
Figure IV-3: modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux.....	76

FigureIV-4: Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulosinusoidale à une porteuse.	78
FigureIV-5 : etape continu et filtre à la sortie du convertisseur cote réseau.....	79
FigureIV-6 : système de commande du convertisseur coté réseau.....	80
Figure IV-7 : structure du régulateur de tension du bus continu.....	81
Figure IV-8 : model simplifié de la liaison au réseau.....	82
Figure IV- 9 : diagramme vectoriel des grandeurs électrique en valeur crête.....	82
FigureIV-10 : schéma de principe de contrôle des courants coté réseau.....	86
Figure IV-11 :schéma bloc de la régulation de la tension des courants réseaux.....	87
Figure IV-12: réponse du système (tension du bus continu et puissances active et réactives tatoriques et courant injecté par le redresseur dans le réseau).....	88
FigureVI-13 : architecture de la chaîne de conversion éolienne commandée par le rotor..	90
FigureV-14 : réponse du système pour un profil de vent aléatoire	92

Dimensionnement d'un système Eolien à une Machine Asynchrone à Double

Alimentation

Résumé – Dans ce travail, on s'intéresse l'étude, la modélisation et la simulation d'un système de conversion d'énergie éolienne à base de machine asynchrone à double alimentation couplés au réseau au travers de convertisseurs statiques. Tout d'abord, nous avons simulé la chaîne de conversion d'une seule éolienne en adoptant le modèle continu équivalent des convertisseurs. La modélisation de la partie mécanique de l'éolienne est particulièrement détaillée, une hélice à angle de calage variable est utilisée pour maximiser la puissance extraite. Pour contrôler la tension du bus continu et les échanges de puissances active et réactive, nous avons implanté des correcteurs de type proportionnel intégral. La dernière partie est consacrée à l'étude et application de la commande par mode glissant à la GADA.

Mots clés - Machine asynchrone à double alimentation, éolienne, modélisation, stratégie de commande, convertisseur, mode de glissement,

Seizing a wind system to a double - fed asynchronous machine

Abstract - In this work, we are interested in studying, modeling and simulation of a system of a wind energy conversion based on double- fed induction machine coupled to the grid through power converters. Firstly, we simulated the conversion of a string of wind alone in adopting the model equivalent continuous converters. The modeling of the mechanical part of the turbine is particularly detailed; a propeller blade angle variable is used to maximize the power Out. To control the DC bus voltage and the exchange of active and reactive power, we have implemented correctivie of proportional text. The last part is devoted to the study of application of sliding mode control for GADA.

Key words- doubly fed induction machine, wind turbine, modeling, control strategy, converter, siding mode

تقييم نظام هوائي لآلة لاتزامنية مضاعفة التغذية

ملخص- هذا العمل يتضمن إنتاج الطاقة الكهربائية من الرياح و حقنها في الشبكة الكهربائية. تحويل الطاقة يتم بواسطة آلة كهربائية لا تزامنية دوارة ثلاثية الأطوار تحريضية تعمل عمل منوية .

النظام يتكون أساسا من عنفات هوائية، آلة كهربائية تحريضية مضاعفة التغذية و شبكة.

العمل يتمحور حول النمذجة و المحاكاة باستعمال التحكم أشعاعي ثم التحكم انزلاق الوضع و المقارنة بينهما .

الكلمات المفتاحية - ، آلة كهربائية تحريضية مضاعفة التغذية، عنفات هوائية، النمذجة، استراجية التحكم، المحولات، انزلاق الوضع.