

République Algérienne Démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D'ORAN

MOHAMED BOUDIAF
USTOMB

FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE
DEPARTEMENT: D'ELECTROTECHNIQUE



Mémoire en vue l'obtention du Diplôme de Magister en Electrotechnique

Option: Réseaux Electriques

THEME

**ETUDE ET COMMANDE D'UNE EOLIENNE A VITESSE
VARIABLE INTEGREE AU RESEAU MT.**

Présenté et soutenu Par: Mr. TELLI Abderrahim

Soutenu le 2012 (salle) - Devant le jury :

Président :	Prof. RAHLI Mostefa	Professeur à USTOMB
Encadreur:	Prof. BOUTHIBA Tahar	Professeur à USTOMB
Examineur:	Dr. KOTNI Lahouari	Maître de Conférences à USTOMB
Examineur:	Prof. BOURAHLA Mohamed	Professeur à USTOMB
Examineur:	Dr. BOUZEBODJA Hamid	Maître de Conférences à USTOMB

Remerciements

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

*Je tiens à remercier mon Directeur de Recherche le **Prof. BOUTHIBA TAHAR**, pour le soutien technique et moral qu'il m'a accordé tout au long de ce travail.*

*J'exprime mes sincères remerciements à monsieur, **Prof. RAHLI Mostefa** Professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf « USTOMB », d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse.*

*Je voudrais remercier sincèrement Monsieur, le Professeur **Prof. BOURAHLA MOHAMED** à L'USTOMB et Monsieur **Dr. BOUZEBODJA Hamid** à L'USTOMB, Monsieur **Dr. KOTNI Lahouari** qui ont accepté de participer à ce Jury, en tant qu'examineurs et qui ont pris la peine de lire ce manuscrit avec attention.*

A toutes les personnes dont le nombre est très élevé pour les citer ici, qui ont contribué de près ou de loin directement ou indirectement à notre modeste travail.

Enfin, nous ne pourrions terminer ce remerciement sans une pensée à l'ensemble de mes enseignants qui sont à l'origine de tout mon savoir.

Dédicace

Je dédie ce travail, à mes parents, à mes frères, à tous mes amis, à tous mes collègues, et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.

TELLI ABDERRAHIM

Sommaire

INTRODUCTION GENERAL.....	1
---------------------------	---

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES SYSTEMES EOLIENS

I. Introduction.....	4
I.1 Etat de l'art sur l'énergie éolienne.....	4
I.1.1 Définition de l'énergie éolienne.....	4
I.1.2 Types d'aérogénérateurs.....	4
I.1.3 Aérogénérateurs à axe horizontal.....	6
I.2 Principales composantes des aérogénérateurs à axe horizontal.....	7
I.3 Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.....	7
I.3.1 Loi de BETZ.....	7
I.3.2 Utilité de la vitesse variable.....	10
I.4 Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.....	10
I.4.1 Fonctionnement à vitesse fixe.....	10
I.4.2 Fonctionnement à vitesse variable.....	11
I.5 Aperçu sur les systèmes de conversion électromécanique.....	12
I.5.1 Systèmes utilisant la machine synchrone.....	12
I.5.2 Systèmes utilisant la machine asynchrone.....	13
I.6 Conclusion.....	14

CHAPITRE II : ANALYSE DE FONCTIONNEMENT DE LA MADA POUR LA PRODUCTION DE L'ENERGIE EOLIENNE

II. INTRODUCTION.....	16
II.1 Structure de la MADA.....	16
II.1.1 MADA à rotor bobiné.....	16
II.1.2 MADA en cascade.....	17
II.1.3 MADA cascadée à un repère(d,q).....	17
II.1.4 MADA sans balais.....	17
II.2 Aperçu sur les configurations de la MADA à rotor bobiné.....	18

II.2.1 Configuration pour application moteur.....	18
II.2.1.1 Stator alimenté par le réseau, rotor alimenté par un onduleur.....	18
II.2.1.2 Stator relié au réseau, rotor alimenté par un Cycloconvertisseur.....	19
II.2.1.3 MADA alimenté par deux convertisseurs indépendants.....	20
II.2.2 Configuration pour application génératrice.....	20
II.2.2.1 MADA à énergie rotorique dissipée	20
II.2.2.2 Structure de Kramer.....	21
II.2.2.3 Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur	22
II.2.2.4 Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI	22
II.3 Mode de fonctionnement.....	23
II.3.1 Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone.....	23
II.3.2 Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone.....	24
II.3.3 Fonctionnement en mode génératrice hyposynchrone.....	25
II.3.4 Fonctionnement en mode génératrice hypersynchrone.....	25
II.4 Avantages et inconvénients de la MADA.....	26
II.4.1 Avantages de la MADA.....	27
II.4.2 Inconvénients de la MADA.....	28
II.5 Application des machines asynchrones à double alimentation.....	28
II.5.1 Application moteur.....	28
II.5.2 Application génératrice.....	29
II.6 Principe de fonctionnement de la MADA en génératrice à vitesse variable.....	29
II.7 Conclusion.....	31

CHAPITRE III : MODELISATION ET CONTROL INDEPENDANT DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION

III.INTRODUCTION.....	33
III.1 Modele de la machine asynchrone a double alimentation (MADA).....	33
III.1.1 Mise sous forme d'équation d'état.....	34
III.1.2 Couple électromagnétique et puissance.....	35

III.1.3 Validation du Modèle.....	36
III.2 Contrôle indépendant des puissances active et réactive de la MADA.....	38
III.2.1 Principe de la commande vectorielle de la MADA.....	38
III.2.2 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique.....	39
III.2.3 Expressions des puissances actives et réactive statoriques.....	41
III.2.4 Expressions des tensions rotoriques.....	42
III.3 Contrôle indépendant des puissances active et réactive.....	43
III.3.1 Commande directe.....	44
III.3.2. Commande indirecte.....	45
III.3.2.1. Commande en boucle ouvert.....	45
III.3.2.2 Commande en boucle fermé.....	46
III.3.3 Etablissement des angles des transformations.....	47
III.4 Model de l'onduleur de tension a deux niveaux.....	47
III.4.1 Modélisation de l'onduleur.....	47
III.5 Résultat de simulation.....	50
III.6 Conclusion.....	52

CHAPITRE IV : CASCADE REDRESSEUR-ONDULEUR-MADA

IV. Introduction.....	54
IV.1 Cascade redresseur a deux niveaux- onduleur a deux niveau- MADA.....	54
IV.2. Modelisation du redresseur a MLI.....	54
IV.2.1 La source d'alimentation.....	55
IV.2.2 L'étage convertisseur.....	56
IV.2.3 La charge.....	56
IV.2.4 Régulation en cascade du redresseur à MLI dans le repère (d,q)	57
IV.2.4.1 Modélisation dans le repère (d,q)	58
IV.2.4.2 Commande à MLI.....	59
IV.2.5. Résultats de simulation.....	60
IV.3. Conclusion.....	62

CHAPITRE V : ASSERVISSEMENT D'UNE CHAÎNE ÉOLIENNE

V. Introduction.....	64
V.1 Modélisation de la turbine éolienne.....	64
V.1.1 Modélisation de la turbine.....	64
V.1.2 Modèle du multiplicateur.....	65
V.1.3 Equation dynamique de l'arbre.....	66
V.2 les Différentes zones de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable.....	67
V.3 Maximisation de la puissance extraite	68
V.3.1 Profil du vent.....	70
V.4.2 Le coefficient de puissance.....	71
V.4 Conclusion.....	72

CHAPITRE VI : IMPACT DE L'ÉOLIEN SUR LE RÉSEAU DE TRANSPORT MT

VI. Introduction.....	74
VI.1 Raccordement au réseau de distribution.....	76
VI.1.1 tension de raccordement.....	77
VI.2.1 Réglage de la tension.....	78
VI.2.2 Réglage de la fréquence.....	79
VI.2.3 Couplage et perturbations.....	80
VI.3 Problèmes induits par l'intégration de l'éolien dans le réseau MT.....	80
VI.3.1 Prévision de la production.....	80
VI.3.2 Capacité d'accueil du réseau.....	80
VI.3.3 Déconnexions intempestives.....	81
VI.3.4 Qualité de l'électricité.....	81
VI.3.4.1 La tension.....	81
VI.3.4.2 La fréquence.....	82
VI.4 Les principaux types de défauts dans le réseau électriques.....	83
VI.5 Types de réseaux.....	85
VI.5.1 Les réseaux de transport et de répartition en régime "bouclé.....	85

VI.5.2 Les réseaux de distribution radial.....	86
VI.6 Application.....	87
VI.6.1 Résultats de simulation.....	87
VI.7 Etude des défauts.....	90
VI.7.1 Présentation du réseau étudié.....	90
VI.7.2 Résultat de simulation.....	91
VI.8 Conclusion.....	93
Conclusion générale et perspectives.....	94
Annexe	
Références bibliographiques	

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES SYSTEMES EOLIENS .

Figure I.1 : Structure de savonius.....	05
Figure I.2 : Structure de darrieus	05
Figure I.3 : Aerogenerateur à axe horizontal	06
Figure I.4 : Schéma interne d'un aérogénérateur à axe horizontal	07
Figure I.5 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne	07
Figure I.6 : Coefficient de puissance	09
Figure I.7 : Coefficient de puissance pour les différents types d'aérogénérateurs	09
Figure I.8 : Caractéristique puissance en fonction des vitesses.....	10
Figure I.9 : Aerogénérateur à vitesse fixe	11
Figure I.10 : Aerogénérateur à vitesse variable	12
Figure I.11 : Alternateur dans une chaine de conversion éolienne	13
Figure I.12 : Machine asynchrone dans une chaine de conversion éolienne	13
Figure I.13 : MADA dans une chaine de conversion éolienne	14

CHAPITRE II : ANALYSE DU FONCTIONNEMENT DE LA MADA POUR LA PRODUCTION DE L'ENERGIE EOLIENNE

Figure II.1 : Schéma du rotor de la MADA à rotor bobine	16
Figure II.2 : Structure en cascade de deux machines asynchrones	17
Figure II.3 : Structure de la MADA sans balais	17
Figure II.4 : Schéma de la MADA dont le rotor est alimenté par un onduleur	18
Figure II.5 : Schéma de la MADA dont le rotor alimenté par un cycloconvertisseur	19
Figure II.6 : Principe de fonctionnement du cycloconvertisseur	19
Figure II.7 : Schéma synoptique pour l'alimentation par deux cycloconvertisseurs	20
Figure II.8 : MADA énergie rotorique dissipée	21
Figure II.9 : Effet de la variation de la resistance rotorique sur le couple électromagnetique .	21

Figure II.10 : MADA a structure de kramer	22
Figure II.11 : Structure de scherbius avec cycloconvertisseur	22
Figure II.12 : Structure de scherbius avec convertisseurs MII	23
Figure II.13 : Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone.	24
Figure II.14 : Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone	24
Figure II.15 : Fonctionnement en mode génératrice hyposynchrone	25
Figure II.16 : Fonctionnement en mode génératrice hypersynchrone	25
Figure II.17 : Modes de fonctionnement de la MADA	26
Figure II.18 : Enroulements et les flux dans une machine synchrone et dans une MADA	26
Figure II.19 : Comparaison de zone de fonctionnement en survitesse entre la machine à cage et la MADA	28
Figure II.20 : Schéma de principe d'une MADA à rotor bobine pilotée par le rotor	29
CHAPITRE III : MODELISATION ET CONTROL INDEPENDANT DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION .	
Figure III.1 : Couple electromagnetique et la vitesse.....	36
Figure III.2 : Les courants statoriques direct et en quadrature dans le repere de park.....	36
Figure III.3 : Les courants statoriques triphasées.....	37
Figure III.4 : Les courants rotoriques directe et en quadrature dans le repère de PARK.....	37
Figure III.5 : Les courants rotoriques triphasees.....	37
Figure III.6 : Commande d'une machine à courant continu et commande vectorielle d'une mada	38
Figure III.7 : Modèle de la MADA pour le controle des puissances.....	42
Figure III.8 : Schéma bloc de la commande direct	44
Figure III.9 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouvert.	45
Figure III.10 : schema bloc de la commande indirecte en boucle fermé.....	46
Figure III.11 : Calcul des angles de transformations.....	47
Figure III.12 : Schéma d'un convertisseur DC/AC à deux niveaux.....	48

Figure III.13: Structure matricielle du convertisseur.	48
Figure III.14: Tension statorique avec zoom et tension rotorique	50
Figure III.15 : Puissances active et réactive statoriques en commande direct	51
Figure III.16 : Puissances active et réactive statoriques en commande indirect sans boucle de puissance.....	51
Figure III.17 : Puissances active et réactive statoriques en commande indirect avec boucle de puissance.....	51

CHAPITRE IV : CASCADE REDRESSEUR- ONDULEUR-MADA

Figure IV.1 : Structure de la cascade du redresseur du courant à mli à deux niveaux-onduleurs de tension à deux niveaux –mada.....	55
Figure IV. 2 : Structure du redresseur à MLI.	55
Figure IV. 3 : Schéma fonctionnel du redresseur à MLI.....	57
Figure IV.4 : Schéma bloc de la commande en cascade du redresseur à MLI.....	59
Figure IV.5 : Bloc de régulation des courants avec compensation de la tension réseau.....	59
Figure IV.6 : Tension de bus continue	60
Figure IV.7 : Courant de ligne.....	61
Figure IV.8 : Puissances active et réactive statoriques en commande direct.	61
Figure IV.9 : Puissances active et réactive statoriques en commande indirect sans boucle de puissance.....	61
Figure IV.10 : Puissances active et réactive statoriques en commande indirect avec boucle de puissance.....	62

CHAPITRE V : ASSERVISSEMENT D'UNE CHAINE EOLIENNE

Figure V.1 : Schéma d'une turbine eolienne.	64
Figure V.2 : Schéma bloc du modèle de la turbine.....	66
Figure V.3 : Caractéristique puissance vitesse d'une éolienne de grande puissance	67
Figure V.4 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.	69

Figure V.5 : Schéma structurel du système éolien global.	70
Figure V.6 : Vitesse de vent (m/s).....	70
Figure V.7 : La vitesse mécanique.	71
Figure V.8 : La coefficient de puissance.	71
Figure V.9 : Courant statorique avec zoom.....	71
Figure V.10 : La puissance active et réactive statorique.	72

CHAPITRE VI : IMPACT DE EOLIEN SUE LE RESEAU DE TRANSPORT MT

Figure VI.1 : Exemple d'architecture d'une ferme d'éoliennes à vitesse variable avec des liaisons en tensions alternatives.....	74
Figure VI.2 : Exemple d'architecture d'une ferme d'éoliennes a vitesse variable avec des liaisons en tensions continues.....	75
Figure VI.3 : Exemple de puissance générée par une éolienne à vitesse fixe de 300KW.....	75
Figure VI.4 : Puissance totale générée par une ferme de trois éoliennes de 300 KW.....	76
Figure VI.5 : Puissance totale générée par une ferme de dix éoliennes de 300 KW.....	76
Figure VI.6 : Exemple de domaine normal de fonctionnement d'une installation de production.....	79
Figure VI.7: Schéma équivalent simplifié d'une ligne.....	81
Figure VI.8 : Réglage primaire de fréquence	83
Figure VI.9 : Caractérisation du creux de tension.....	84
Figure VI.10 : Classification des creux de tension.....	84
Figure VI.11 : Exemple d'un réseau maillé (HTB >50 KV).....	85
Figure VI.12 : Exemple d'un réseau radial (HTA à 50 KV).....	86
Figure VI.13 : Intégration de la génératrice asynchrone à double alimentation dans le réseau de distribution.....	87
Figure VI.14 : Profil du vent appliqué à l'éolienne	87
Figure VI.15 : Vitesse mécanique de la génératrice.....	88
Figure VI.16 : Tension et courant au niveau de bus A.....	88

Figure VI.17 : Tension et courant au niveau de bus B	88
Figure VI.18 : Tension et courant au niveau de bus C	89
Figure VI.19 : Puissance active dans le réseau de distribution.....	89
Figure VI.20 : Schéma synoptique du réseau étudié	90
Figure VI.21 : Tension au bus B et A.....	91
Figure VI.22 : Tension au bus C	91
Figure VI.23 : Tensions triphasées aux bornes de la MADA.....	91
Figure VI.24 : Tension de bus continue	92
Figure VI.24 : Puissance active et réactive au bus B	92

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III.1 : Fonctions des connexions et les vecteurs de tensions correspondantes	49
Tableau IV.1 : Paramètres de simulation du redresseur à MLI	60
Tableau VI.1 : Niveaux de tension de raccordement des installations en fonction de leur puissance.....	77

LISTE DES SYMBOLES

θ : L'abscisse angulaire entre la phase statorique (A) et la phase rotorique (a).

γ : Le facteur d'affaiblissement sur le rotor de la turbine.

V_1 : vitesse de vent

p : Le nombre de paires de pôles.

g : glissement.

f : Le coefficient des frottements visqueux totaux de l'éolienne.

V : La vitesse moyenne du vent.

P_θ : La matrice de la transformation de PARK.

P : La puissance de l'éolienne.

J : L'inertie totale de l'éolienne.

G : Le rapport du multiplicateur de vitesse.

ρ : La densité de l'air.

λ : La vitesse spécifique de la turbine.

β : L'angle de calage des pales.

ω_s : La pulsation statorique.

ω_r : La pulsation rotorique.

ω : La pulsation mécanique.

φ_s, φ_r : Les flux statorique et rotorique respectivement.

$\varphi_{ds}, \varphi_{qs}$: Les flux statoriques direct et en quadrature.

$\varphi_{dr}, \varphi_{qr}$: Les flux rotoriques direct et en quadrature.

λ_{opt} : La vitesse spécifique optimale de la turbine.

θ_s : L'abscisse angulaire du référentiel de Park par rapport à l'axe de la phase statorique (A).

C_{em} : Couple électromagnétique.

C_r : Couple résistant.

C_{aer} : Couple aérodynamique.

Q_s : Puissance réactive statorique.

V_{vent} : Vitesse du vent.

ρ : Masse volumique du vent.

C_p : Coefficient de puissance.

β : Angle de calage.

R : Rayon de la turbine.

C_{vis} : Couple des frottements visqueux.

R : Résistance de chaque enroulement du stator.

R_r : Résistance de chaque enroulement du rotor.

L_s : Inductance propre de chaque enroulement du stator.

L_r : Inductance propre de chaque enroulement du rotor.

$v_{s1}; v_{s2}; v_{s3}$: les tensions des réseau .

r : Resistance total de la ligne.

l : inductance total de la ligne.

v_{dc} : tension de bus continue.

i_{ch} : Courant de charge.

R_{ch} : Resistance de charge.

P_{ref} : Puissance active de référence.

Q_{ref} : Puissance réactive de référence.

N_s : Nombre des spires des enroulements statorique.

N_r : Nombre des spires des enroulements rotorique.

Acronymes

MLI : Modulation de largeur d'impulsion .

MADA : Machine asynchrone à double alimentation.

MPPT : Maximum Power Point tracking.

MAS : Machine Asynchrone .

DC : Direct courant (courant continu) .

CRT : Convertisseur cote Rotor .

CRS : Convertisseur cote Reseau .

IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor (transistor bipolaire a grille isolee).

Introduction général

L'énergie électrique est un facteur essentiel pour le développement et l'évolution des sociétés humaines que ce soit sur le plan de l'amélioration des conditions de vie, ou sur le développement des activités industrielles. Elle est devenue une forme d'énergie indispensable par sa souplesse d'utilisation et par la multiplicité des domaines d'activité où elle est appelée à jouer un rôle plus important. Ces modes de production ainsi que les moyens de production associés sont amenés à subir de profonds changements au cours des prochaines décennies [1].

En effet, les modes de production reposant sur la transformation d'énergie renouvelable (éolien, solaire...), sont appelés à être de plus en plus utilisés dans le cadre du développement durable. Pour réaliser ceci, il est important de disposer de différentes technologies de générateurs telles que les machines synchrones et les machines à aimant permanent. La machine à induction à cage est la plus utilisée, car elle est peu coûteuse, robuste et sa maintenance est très facile et simple. Mais si elle est connectée directement au réseau, ce dernier impose la fréquence et dans ce cas la vitesse d'entraînement doit être constante. De plus si on utilise un convertisseur à son stator, on trouve que la plage de variation de vitesse est limitée. Si on utilise une machine synchrone triphasée entraînée à vitesse variable, dans ce cas le système est composé d'un convertisseur statique de fréquence situé entre le stator et le réseau et qui permet de transformer la fréquence variable de l'alternateur. Il faut ajouter un compensateur synchrone afin de fournir la puissance réactive consommée par le convertisseur statique, ce qui augmente le coût du système. Tout ceci explique pourquoi on recherche à remplacer ce système.

La génération d'électricité à partir de l'énergie éolienne, a fait de la MADA la machine la plus attractive et spécialement à bord des éoliennes à vitesse variable et fréquence fixe (VSCF : variable speed constant frequency). En effet, le caractère très aléatoire du vent a imposé cette configuration à la plupart des constructeurs d'éoliennes.

L'originalité de la commande de l'éolienne à vitesse variable est qu'elle permet d'extraire le maximum de puissance tel que le vent le permet. Le progrès des chercheurs en génie électrique qui a été fait dans ces dernières décennies, a conduit aux investigations afin d'améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité d'énergie fournie[9].

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à des rappels sur les systèmes éoliens et à la définition de l'énergie éolienne et ces composants de façon générale. Par la suite, les modes de fonctionnement en vitesse fixe et variable et les différents générateurs utilisés sont présentés.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons la topologie et les configurations de la machine asynchrone à double alimentation en fonctionnement moteur et en fonctionnement générateur (hypo et hyper-synchrone).

Dans le troisième chapitre, nous abordons la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation. Des hypothèses simplificatrices nous faciliteront sa mise en équation pour ensuite valider son modèle par la simulation sous l'environnement Simulink du logiciel MATLAB. Une fois validé, le modèle de la MADA sera soumis aux lois de commande vectorielle en puissance active et réactive statoriques. Le stator de la MADA sera alimenté par une source de tension triphasée parfaite et le rotor par un onduleur de tension à deux niveaux commandé par la stratégie de modulation de largeur d'impulsion triangulosinusoidale.

Le quatrième chapitre on a étudié le système complet : machine asynchrone double alimentation –convertisseur. On se met dans le cas le plus pratique ou l'alimentation de l'onduleur connectée au niveau du rotor est fournie par un convertisseur triphasé à MLI fonctionnant en redresseur. On aura donc, une cascade basée sur deux convertisseurs à deux niveaux.

Dans Le cinquième chapitre, on a étudié l'asservissement de la chaine turbine-MADA-convertisseurs pour assurer un rendement optimal et La modélisation de la turbine et l'élaboration d'une commande adéquate pour le captage du maximum de puissance possible seront faite.

Dans le dernier chapitre, on a étudié l'impact des éoliennes sur un réseau de distribution de moyenne tension. En effet la puissance générée par ces éoliennes étant de plus en plus importante, une connexion sur le réseau de distribution en moyenne tension est maintenant couramment exigée par les gestionnaires de réseau.

Chapitre I

Généralités sur les systèmes éoliens

I. Introduction

L'énergie éolienne est devenue aujourd'hui une réalité. Les chiffres de son évolution montrent jour après jour l'ampleur de son intégrité dans le domaine de la production de l'énergie électrique (20 % de la production mondiale en 2000[2]).

Bien que connue et exploitée depuis l'antiquité, on a tourné le dos à cette énergie pendant l'ère industrielle au profit des énergies fossiles mais avec les chocs pétroliers successifs et l'évolution rapide des technologies de conversion électromécanique, l'énergie éolienne est devenue économiquement compétitive et elle est en train de jouer un rôle de premier plan.

Ce chapitre présente les deux structures d'éoliennes existantes : éoliennes à vitesse fixe et éoliennes à vitesse variable. Puis, les différentes génératrices associées à chacun de ces types, leurs stratégies de commande seront expliquées dans les différentes zones de fonctionnement.

I.1 Etat de l'art sur l'énergie éolienne

I.1.1 Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent. Cette énergie est « renouvelable » c'est-à-dire non dégradé. De plus, c'est une énergie verte car elle produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif.

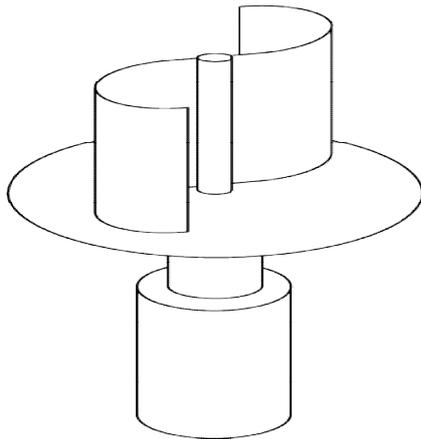
Un aérogénérateur, appelé souvent éolienne, est un dispositif qui convertit une portion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. D'un premier regard, le processus paraît simple mais si on se concentre plus, on peut immédiatement découvrir qu'il s'agit d'un domaine très vaste qui représente un champ d'interaction de nombreuse discipline scientifique et du savoir faire de la météorologie à l'écologie.

I.1.2 Types d'aérogénérateurs

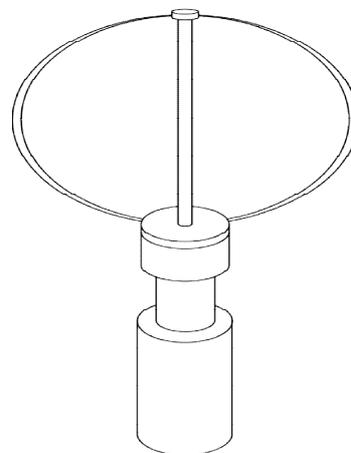
Aérogénérateurs à axe vertical

Ce type représente la première structure des aérogénérateurs. L'adjectif vertical signifie que son arbre est vertical au sol, plusieurs structures ont vu le jour mais seulement deux structures ont été industrialisées :

- a) *Structure Savonius* (conformément à son inventeur) : Son principe de fonctionnement est basé sur le principe de la "traînée différentielle " qui illustre que le mouvement de rotation est dû au fait que l'air en mouvement exerce des pressions très différentes sur les différents corps constituant l'éolienne, et que la force du vent agissant sur la partie concave est très différente de la force s'exerçant sur la partie convexe, créant ainsi un couple moteur sur l'axe[30].

Savonius-Rotor**Figure I.1 : Structure de Savonius**

- b) *Structure Darrieus* : Son 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.

**Darrieus-Rotor****Figure I.2 : Structure de Darrieus**

Les aérogénérateurs à axe vertical ont l'avantage d'avoir la génératrice et les organes de commande au niveau du sol ce qui facilite les interventions de la maintenance. De plus, il n'est pas nécessaire d'installer un système d'orientation des pales mais la présence du capteur d'énergie près du sol l'expose aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité. Ils sont de plus exposés à des problèmes d'aéroélasticité dus aux fortes contraintes qu'elles subissent. Enfin la surface qu'elles occupent au sol est très importante pour les puissances élevées.

I.1.3 Aérogénérateurs à axe horizontal

Ce type d'aérogénérateur est le plus répandu dans l'industrie des éoliennes à cause du positionnement du capteur éolien à quelques dizaines de mètres au dessus du sol, ce qui réduit les contraintes mécaniques et augmente l'efficacité.

Les aérogénérateurs à axe horizontale utilisés généralement pour la production de l'énergie électrique sont à trois pales [28][9] [7] , mais il existe d'autres structures à une ou deux pales.



Figure I.3 : Aérogénérateur à axe horizontal

I.2 Principales composantes des aérogénérateurs à axe horizontal

Comme l'aérogénérateur à axe horizontal est le plus utilisé, on s'intéresse à la structure interne de cet aérogénérateur. Les trois principaux constituants d'un aérogénérateur à axe horizontal sont : La tour (mat), la nacelle et les pales qui sont supportées par le moyeu [12] [2].

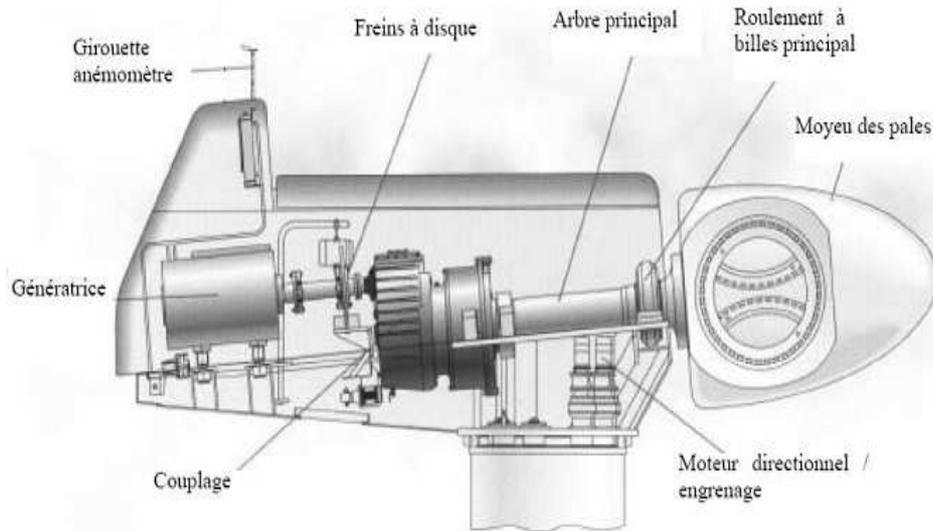


Figure I.4 : Schéma interne d'un aérogénérateur à axe horizontal[33].

I.3 Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

I.3.1 Loi de BETZ

La théorie du éolien à axe horizontal a été établie par BETZ. Il suppose que « le turbine éolien est placé dans un air animé à l'infini amont d'une vitesse V_1 et à l'infini aval d'une vitesse V_2 » [7], [14].

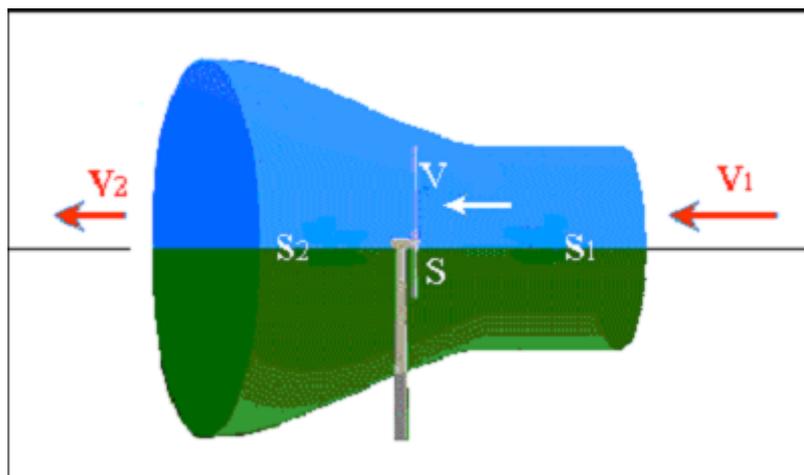


Figure I.5 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne

De la figure (I-5) on peut écrire le principe de l'incompressibilité de l'air et la continuité de l'écoulement :

$$S_1 V_1 = SV = S_2 V_2 \quad (I.1)$$

D'après le théorème d'EULER, La force exercée par l'air sur l'aérogénérateur est donnée par:

$$F = \rho \cdot SV \cdot (V_1 - V_2) \quad (I.2)$$

D'où la puissance absorbée par l'aérogénérateur:

$$P_{aero} = F \cdot V = \rho \cdot SV^2 (V_1 - V_2) \quad (I.3)$$

La puissance absorbée par l'aérogénérateur est aussi égale à la variation de l'énergie cinétique E_c de la masse d'air qui le traverse d'où :

$$\frac{\Delta E_c}{\Delta t} = P_{aero} = \frac{1}{2} \rho \cdot SV \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (I.4)$$

On en déduit :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (I.5)$$

En remplaçant l'expression de V dans les relations (1.2) et (1.3) on obtient :

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S (V_1^2 - V_2^2) \quad (I.6)$$

$$P_{aero} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S (V_1^2 - V_2^2) \cdot (V_1 + V_2) \quad (I.7)$$

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

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_1^3 \quad (I.8)$$

On définit le rapport entre les deux puissances C_p (puissance extraite du vent et celle qui est théoriquement disponible) qui est appelé le coefficient de puissance :

$$C_p = \frac{P_{aero}}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \frac{V_2}{V_1}\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right)}{2} \quad (I.9)$$

Ce coefficient présente un maximum de $16/27$ soit $0,59$. 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 [25]. C_p est le coefficient qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine, Il dépend des caractéristiques de la turbine (les dimensions de la pale, le ratio de la vitesse λ et l'angle d'orientation de la pale β).

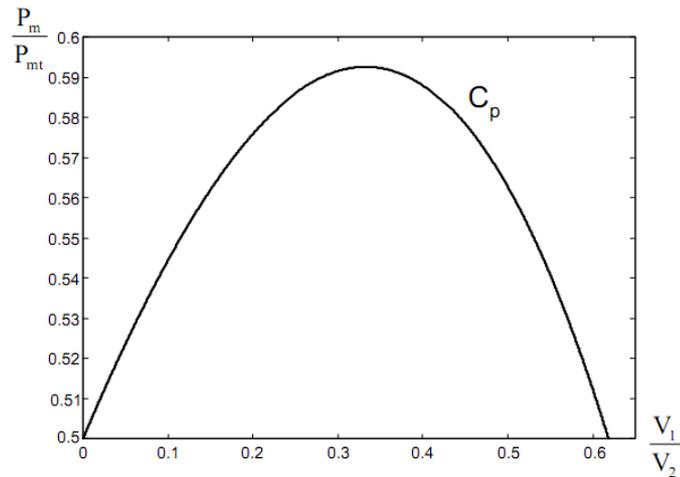


Figure I.6 : Coefficient de puissance.

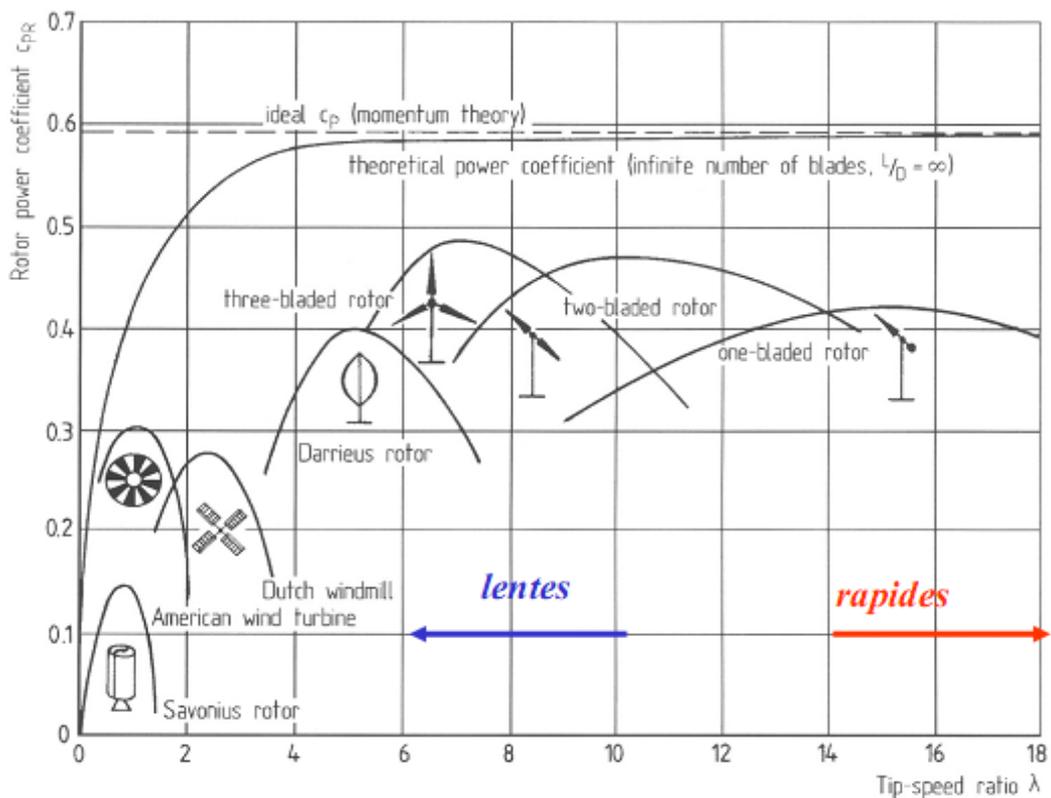


Figure I.7 : Coefficient de puissance pour les différents types d'aérogénérateurs

En combinant les équations (1.8) et (1.9), la puissance mécanique P_{aero} disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_{aero} = \left(\frac{P_{aero}}{P_{mt}} \right) P_{mt} = C_p(\lambda) P_{mt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3 \quad (I.10)$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{V_1} \quad (I.11)$$

$\Omega_{turbine}$: vitesse de rotation de la turbine .

R : la longueur (rayon) de la pale .

I.3.2 Utilité de la vitesse variable

Pour une vitesse du vent V_1 et une vitesse mécanique de la génératrice Ω_1 , on obtient une puissance nominale P_1 (point A) (Figure I-8). Si la vitesse du vent passe de V_1 à V_2 et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance P_2 se trouve sur la 2ème caractéristique (point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure Ω_2 , il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée [2].

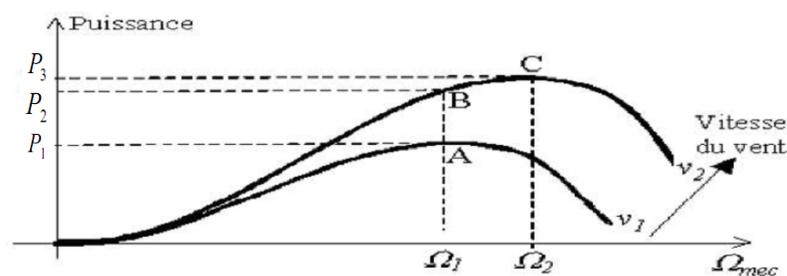


Figure I.8 : Caractéristique puissance en fonction des vitesses.

I.4 Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique

I.4.1 Fonctionnement à vitesse fixe

Dans cette technologie, la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écuriel) est reliée directement au réseau sans convertisseur de puissance (Figure I.9), sa

vitesse mécanique est fixe et imposée par la fréquence de travail du réseau et/ou par le nombre de paire de pôles de la génératrice.

Il nous faut alors un système d'orientation des pales de l'aérogénérateur pour avoir un fonctionnement au voisinage de synchronisme et aussi un multiplicateur de vitesse pour adapter la vitesse de la turbine à celle de la génératrice.

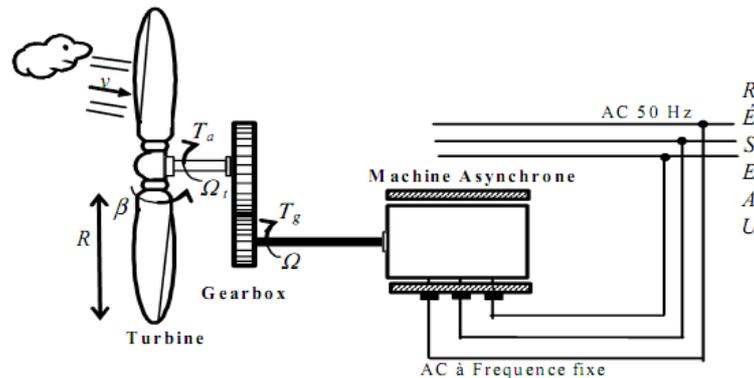


Figure I.9 : Aérogénérateur à vitesse fixe

- **Avantage du fonctionnement à vitesse fixe**

Les principaux avantages de ce mode de fonctionnement sont :

- Structure simple.
- Absence des convertisseurs de puissance.
- Moins cher.

- **Inconvénients du fonctionnement à vitesse fixe**

Cette stratégie pose beaucoup de problèmes au niveau de l'exploitation de l'énergie extraite :

- Puissance extraite non optimisée (On rate les maxima théoriques) .
- Rendement très faible pour les moyens et faibles vents.
- Nécessité de la maintenance périodique de la boîte de vitesse.
- Perte de control de la puissance réactive.
- Magnétisation de la génératrice non contrôlée.

I.4.2 Fonctionnement à vitesse variable

Vu les problèmes causés par un fonctionnement à vitesse variable (Systèmes d'orientation, maintenance périodique, rendement médiocre,...), on a cherché l'exploitation

optimale de la puissance extraite de l'énergie cinétique du vent. Pour cela, il faut ajuster en permanence la vitesse de la génératrice à la vitesse du vent. Cette optimisation de la production voulue peut s'effectuer par des commandes sur la turbine, sur la partie électrotechnique (générateur électrique lui-même et/ou paramètres de commande du convertisseur d'électronique de puissance) (figure I.10) [4].

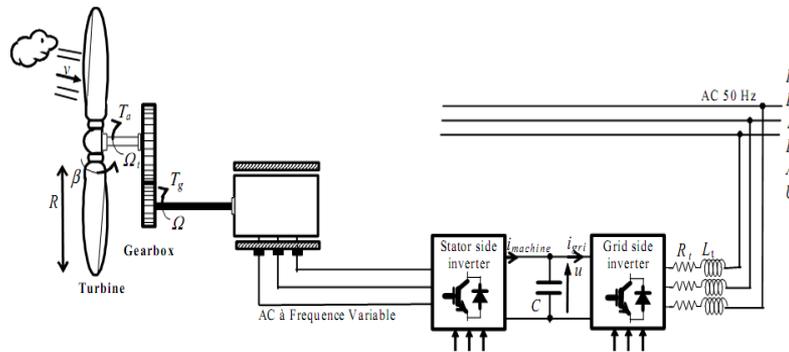


Figure I.10 : Aérogénérateur à vitesse variable

Le convertisseur statique a pour mission de découpler la fréquence du réseau de distribution électrique à la vitesse de rotation de la génératrice, c'est à lui de jouer le rôle d'une interface électronique de régulation de la fréquence et de l'amplitude.

I.5 Aperçu sur les systèmes de conversion électromécanique

I.5.1 Systèmes utilisant la machine synchrone

La caractéristique (couple-vitesse) d'une machine synchrone utilisée en alternateur exige la maîtrise du synchronisme entre les deux forces électromotrices rotorique et statorique, elles doivent tourner à la même vitesse, ce qui pose un problème dans l'intégration de cette machine dans un système de production d'énergie éolienne. Une interface électronique entre le stator de la machine et le réseau est systématiquement insérée.

Dans la plupart des cas, le stator de l'alternateur est à base des aimants permanents qui sont plutôt coûteux, surtout ceux qui sont à base des terres rares, et risquent de perdre ses caractéristiques magnétiques à cause des fortes variations des couples électromagnétiques.

De plus, le convertisseur statique est conçu pour supporter la totalité de la puissance envoyée au réseau (Figure I.11). Donc il nous faut des composants de puissances plus performants voire spéciaux.

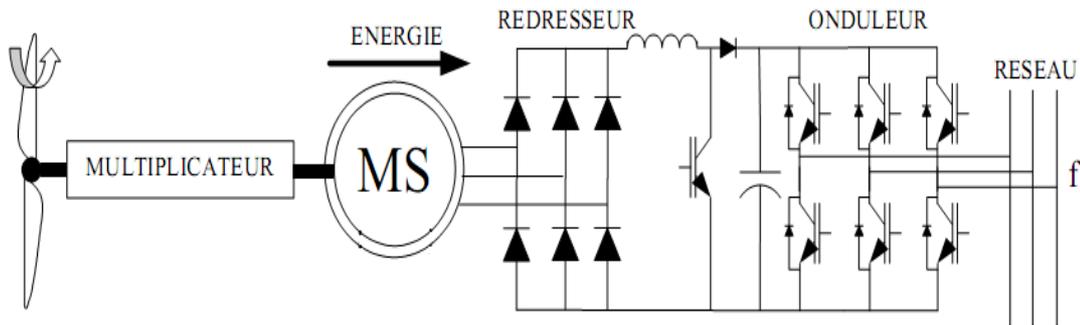


Figure I.11 : Alternateur dans une chaîne de conversion éolienne

I.5.2 Systèmes utilisant la machine asynchrone

Les génératrices asynchrones, à cage d'écureuil ou à double alimentation, équipent actuellement la majorité des éoliennes dans le monde. Contrairement à l'habitude d'utiliser la machine asynchrone à cage d'écureuil comme moteur, cette machine est toute à fait réversible et peut répondre aux exigences extrêmes que présente l'énergie éolienne à cause de sa robustesse, son faible coût ainsi que l'absence du système collecteur-balais ou les systèmes de contact glissant.

Par contre, pour s'assurer qu'on est dans la zone stable de fonctionnement de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil on doit travailler aux faibles glissements (autour de synchronisme (point $g=0$)). Le nombre des paires de pôles de la machine est fixe, donc on doit fonctionner sur une plage très serrée (glissements inférieur à 2%).

Si le glissement devient important, les courants statoriques augmentent en présentant des pics qui peuvent être destructifs car le stator de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil est connecté directement au réseau (éolienne à vitesse fixe) (Figure I.12). De plus, ce type de convertisseur électromécanique est consommateur de l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance du réseau.

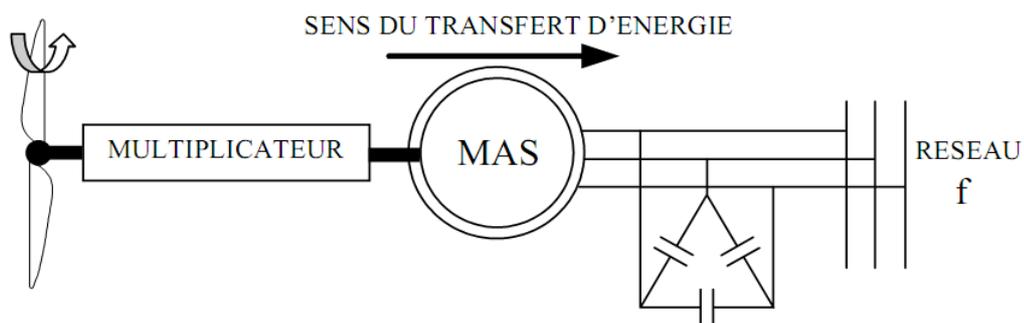


Figure I.12 : Machine asynchrone dans une chaîne de conversion éolienne

Par conséquent, la MADA a trouvée la voie libre pour s'émerger en puissance dans le domaine de la production de l'énergie éolienne. Cette machine possède la caractéristique primordiale pour un bon fonctionnement d'un système éolien : travailler sur une grande plage de variation de vitesse, en s'appuyant sur sa structure en double alimentation. La configuration la plus simple est de connecter le stator de la MADA directement au réseau (Avec un système de protection évidemment) et le rotor au réseau aussi mais à travers un convertisseur statique.

Dans cette configuration, le convertisseur statique est dimensionné (à une fraction de la puissance nominale de l'éolienne) uniquement pour faire transiter la puissance destinée à la magnétisation de la machine et il est donc moins coûteux (Figure I.13).

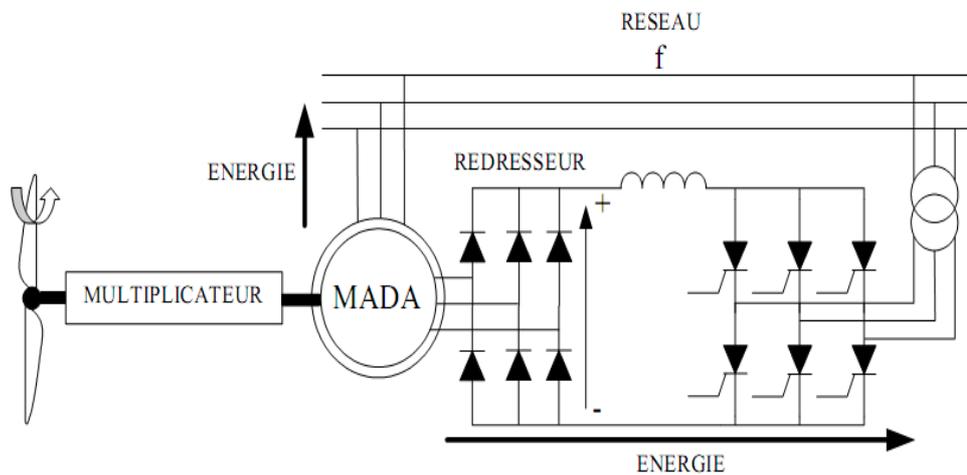


Figure I.13 : MADA dans une chaîne de conversion éolienne

I.6 Conclusion

Ce chapitre représente un état de l'art sur les systèmes de conversion éolien qu'on a essayé de les présenter d'une façon générale les différentes structures existantes : les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal, et leurs avantages et inconvénients les uns par rapport aux autres.

Nous avons utilisé le développement théorique des systèmes éoliens connu par la théorie de BETZ qui donne les performances d'un système éolien avec un coefficient théorique de 0.59 maximum qui reste inatteignable pour les éoliennes industrielles actuelles.

A la fin de ce chapitre, on a donné un aperçu sur les systèmes de conversion électromécanique et les différentes génératrices utilisées dans les éoliennes récentes tout en mettant en valeur l'intérêt de l'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation dans les aérogénérateurs.

Chapitre II

Analyse du fonctionnement de la MADA pour la production de l'énergie éolienne

II. Introduction

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation d'énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne. Le développement de la technologie des aérogénérateurs a permis à celle-ci de devenir une alternative aux sources traditionnelles. L'énergie éolienne est véhiculée par le vent, celle-ci est due indirectement à l'énergie solaire qui, en créant des différences de température entre les régions chaudes et les régions froides, provoque des vents. Un aérogénérateur (couramment appelé "éolienne") est une machine qui utilise l'énergie éolienne (l'énergie cinétique du vent) pour produire de l'énergie électrique. Le vent est une ressource propre et inépuisable qui peut produire d'électricité pratiquement sans l'émission des gaz polluants [5].

Dans ce chapitre, on présente les éoliennes de manière générale ainsi que le choix de la MADA en fonctionnement génératrice.

II.1 Structure de la MADA

Selon la conception du rotor, plusieurs types de MADA ont été envisagés. On va décrire les plus utilisés dans l'industrie.

II.1.1 MADA à rotor bobiné

La machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné est composée, comme toute machine à courant alternatif, d'un stator et d'un rotor. Le stator est identique à celui d'une machine asynchrone classique. Le rotor est constitué d'enroulements triphasés connectés en étoiles dont les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants (Figure II.1) [8].

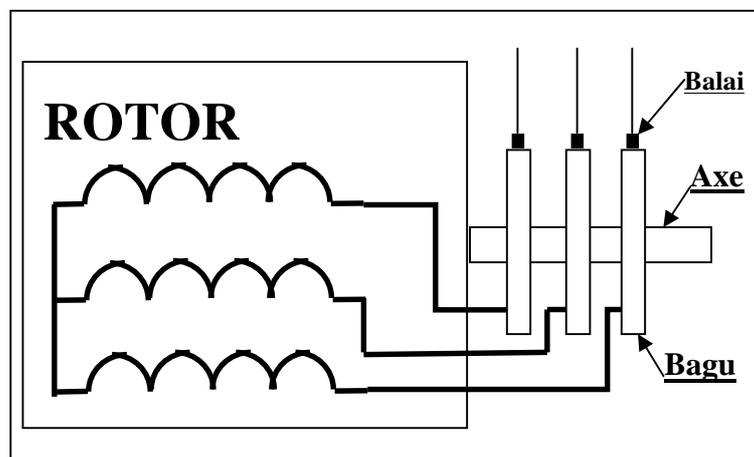


Figure II.1 : Schéma du rotor de la MADA à rotor bobiné.

II.1.2 I.2.2 MADA en cascade

La structure de la MADA en cascade est définie par deux machines asynchrones dont les rotors sont couplés électriquement et mécaniquement. Cette structure permet d'avoir un système à double alimentation coté stator. Les enroulements statoriques sont reliés à deux sources de tension triphasées (Figure II.2) [13].

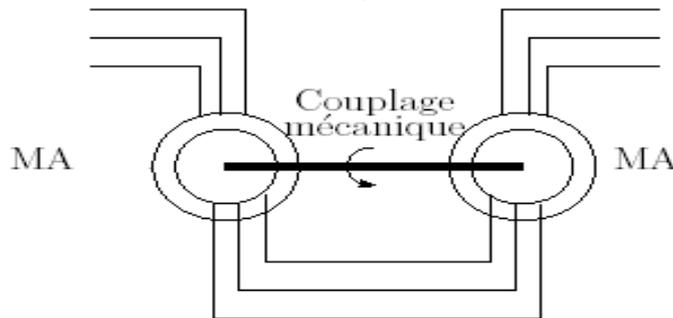


Figure II.2 : Structure en cascade de deux machines asynchrones.

II.1.2 MADA cascadée à un repère

Il s'agit de deux machines à cage dont l'axe rotorique des deux machines est identique. Les barres rotoriques sont croisées entre les deux machines. Une machine a son stator relié au réseau, l'autre à un onduleur (Single Frame Cascaded Doubly Fed Induction Machine) [13].

II.1.3 MADA sans balais

Cette machine est très proche à la précédente, sauf que cette fois-ci les deux enroulements statoriques appartiennent à un circuit magnétique commun. Le rotor est commun et à cage d'écureuil (Figure II.3).

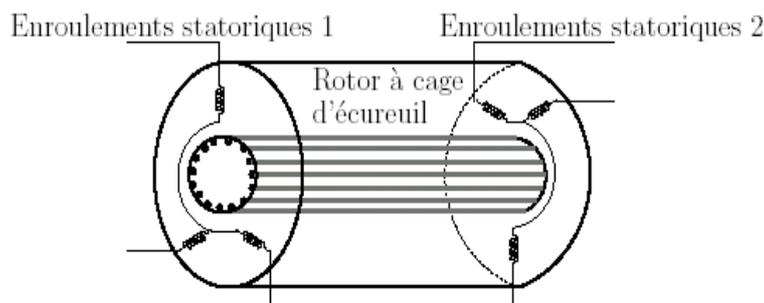


Figure II.3 : Structure de la MADA sans balais.

Il existe d'autres types comme la MADA à réluctance qui utilise le principe d'un moteur à réluctance variable ainsi que la MADA "tandem" qui possède un rotor à cage et deux enroulements statoriques, l'un est fixe tandis que l'autre peut être tournant.

II.2 Aperçu sur les configurations de la MADA à rotor bobiné

Comme toutes les autres machines électriques à courant alternatif, la MADA peut fonctionner en moteur comme en génératrice. Chaque mode de fonctionnement est caractérisé par une configuration qui répond à un critère choisis. Dans cette partie du chapitre, on va citer les configurations les plus utilisées, selon la littérature, pour chaque mode de fonctionnement.

II.2.1 Configuration pour application moteur

Pour le cas de l'application moteur de la MADA les principales études ont été dédiées aux stratégies de commande linéaire ou non linéaire avec ou sans capteur de vitesse ou de position de la MADA. Les convertisseurs utilisés pour alimenter la MADA peuvent être des cycloconvertisseurs ou des onduleurs à base d'IGBTs. Les quatre configurations existantes sont décrites ci dessous :

II.2.1.1 Stator alimenté par le réseau, rotor alimenté par un onduleur

Cette classe est dite MADA simple. Les enroulements statoriques sont connectés au réseau triphasé fixe, tandis que le rotor est relié à son propre onduleur (Single Doubly Fed Induction Machine) (Figure II.4).

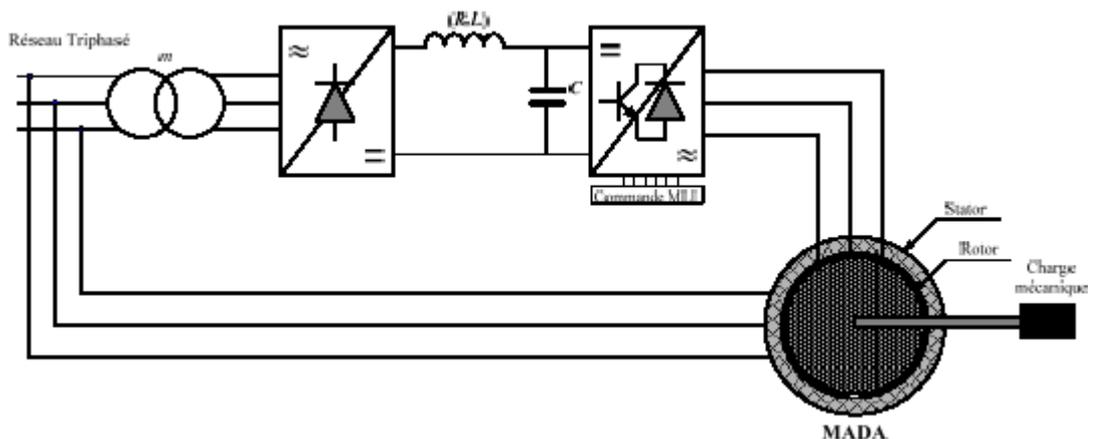


Figure II.4 : Schéma de la MADA dont le rotor est alimenté par un onduleur.

Ce mode d'alimentation n'est pas adapté au fonctionnement à faibles fréquences rotoriques mais le fait de relier le stator au réseau et d'alimenter le rotor à travers un onduleur

permet de dimensionner le convertisseur coté rotor à 30% de la puissance mécanique maximale [15].

II.2.1.2 Stator relié au réseau, rotor alimenté par un Cycloconvertisseur

Le remplacement de l'association redresseur-onduleur par un cycloconvertisseur autorise un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau (Figure II.5).

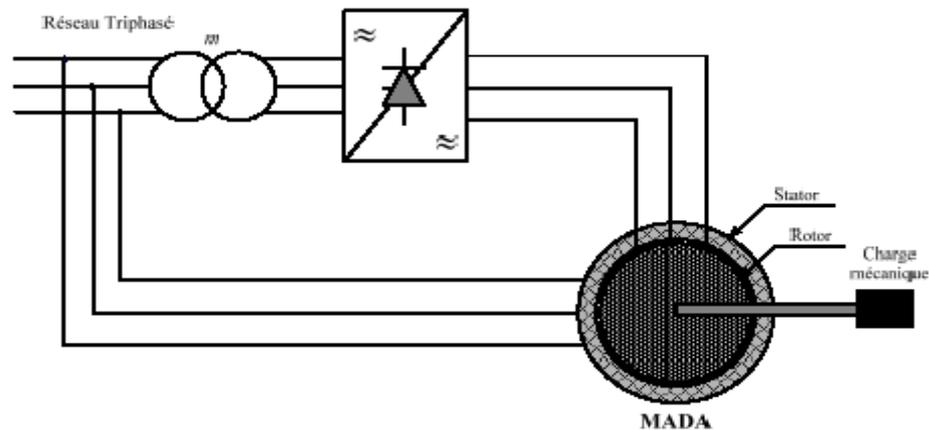


Figure II.5 : Schéma de la MADA dont le rotor alimenté par un cycloconvertisseur.

Le principe du cycloconvertisseur est de prendre des fractions des tensions sinusoïdales du réseau afin de reproduire une onde de fréquence inférieure (Figure II.6). Son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif. Les progrès de l'électronique de puissance ont conduit au remplacement du cycloconvertisseur par une structure à deux convertisseurs à IGBT commandés [34].

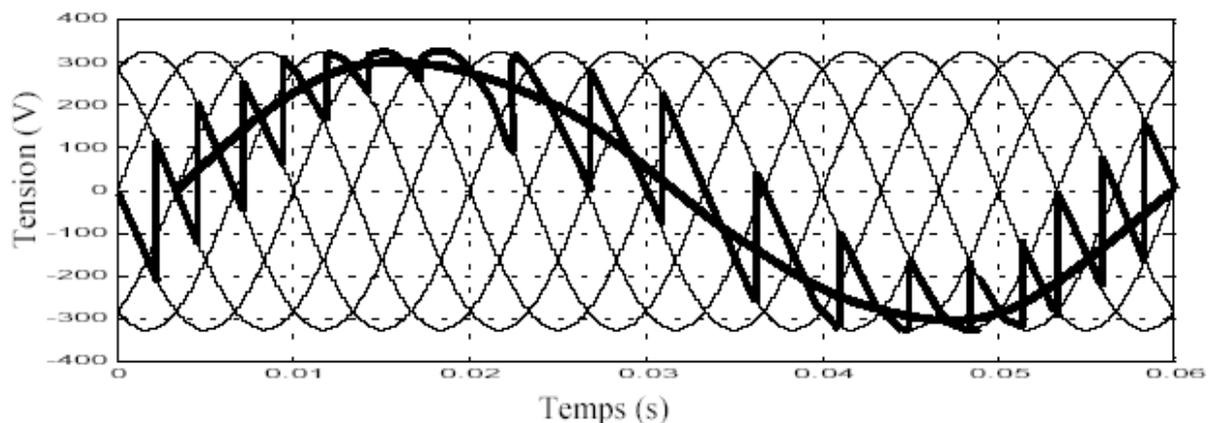


Figure II.6 : Principe de fonctionnement du cycloconvertisseur.

II.2.1.3 MADA alimenté par deux convertisseurs indépendants (Figure II.7):

Dans cette structure on trouve plusieurs configurations possibles. Le stator et le rotor sont alimentés soit :

- Deux cycloconvertisseurs.
- Deux onduleurs alimentés par leurs propres redresseurs.
- Deux onduleurs alimentés en parallèle par un redresseur commun.

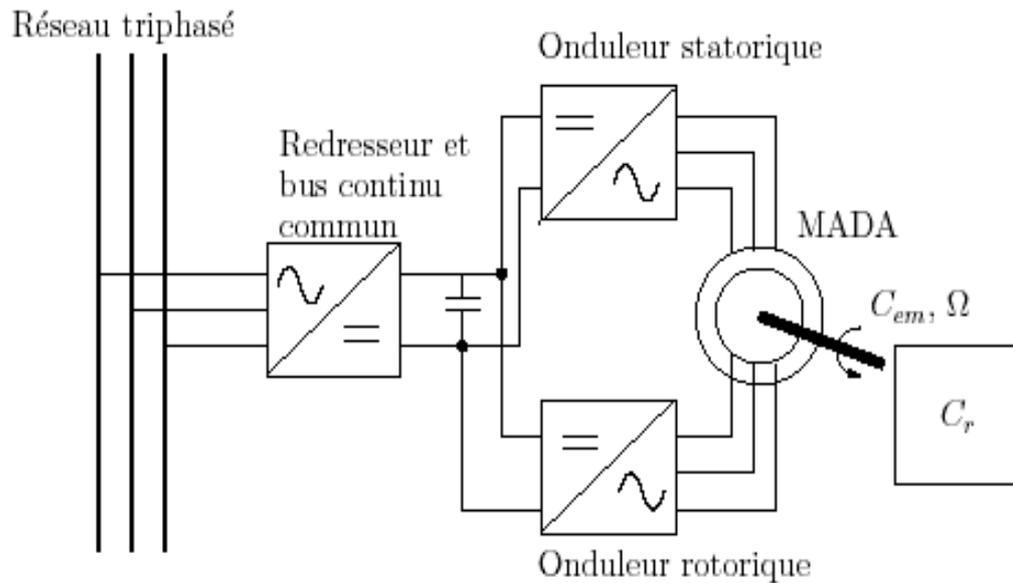


Figure II.7 : Schéma synoptique pour l'alimentation par deux cycloconvertisseurs.

Grâce à ce type d'alimentation, la MADA possède quatre degrés de libertés ce qui rend son contrôle très souple. On peut donc réguler la vitesse (ou le couple), le flux (statorique, rotorique et d'entrefer), le glissement et le facteur de puissance [11].

II.2.2 Configuration pour application génératrice

Dans cette partie, on s'intéresse à la MADA à rotor bobiné et son utilisation pour la production de l'énergie électrique à partir de l'énergie éolienne.

II.2.2.1 MADA à énergie rotorique dissipée

Le stator est connecté directement au réseau tandis que le rotor est connecté à un redresseur (Figure II.8). Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur. L'ajout d'un hacheur à base d'IGBT permet de varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique

couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur (Figure II.9).

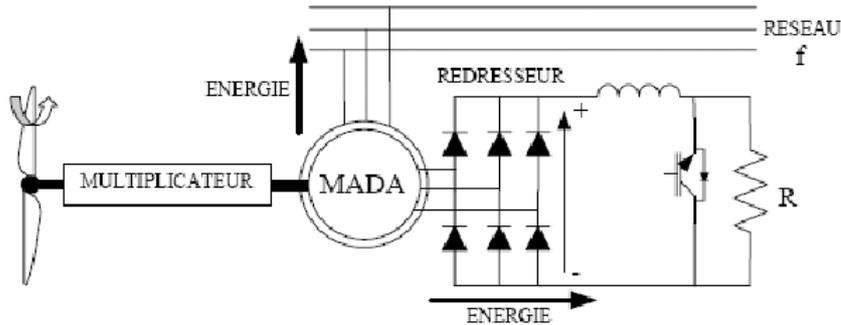


Figure II.8 : MADA à énergie rotorique dissipée.

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R, ce qui nuit au rendement du système.

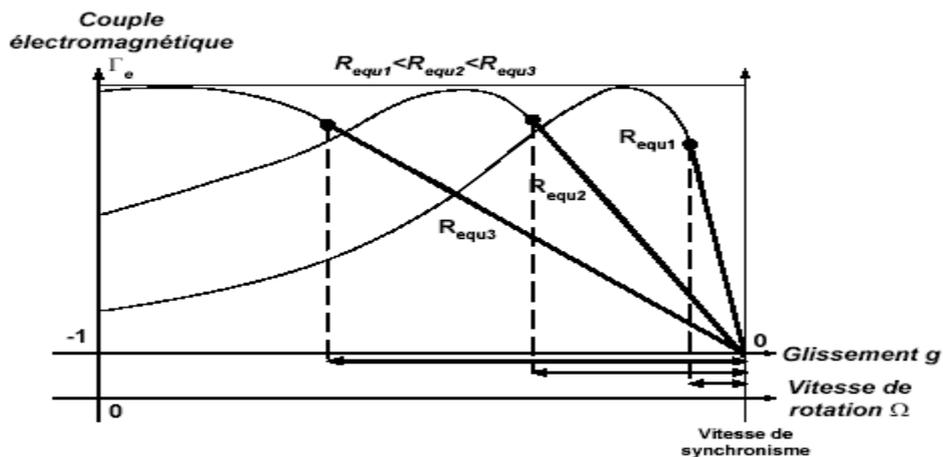


Figure II.9 : Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique [2].

II.2.2.2 Structure de Kramer

Pour améliorer la structure du système précédent, tout en réduisant les pertes d'énergie, l'hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau (Figure II.10).

Ce système permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. L'utilisation de thyristor pour l'onduleur nuit au facteur de puissance, de plus le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau). Le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures à celle du synchronisme (hyper-synchrone).

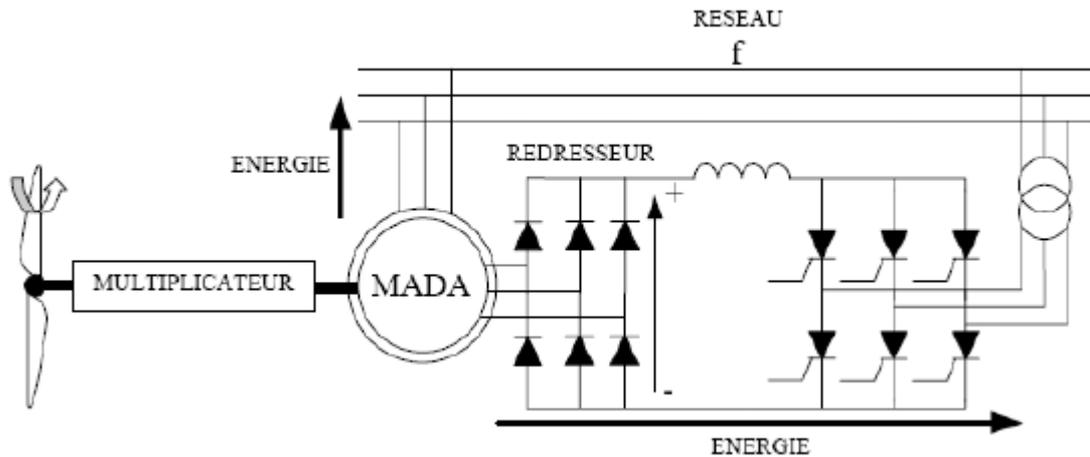


Figure II.10 : MADA à structure de Kramer.

II.2.2.3 Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

Pour rendre la structure précédente réversible, en échange d'énergie entre le rotor et le réseau, on remplace le redresseur et l'onduleur par un cycloconvertisseur (Figure II.11).

L'utilisation de cycloconvertisseur permet d'avoir une plage de la vitesse de rotation variant de $\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme [1]. L'inconvénient de cette structure est la génération des perturbations harmoniques importantes qui diminue le facteur de puissance du dispositif.

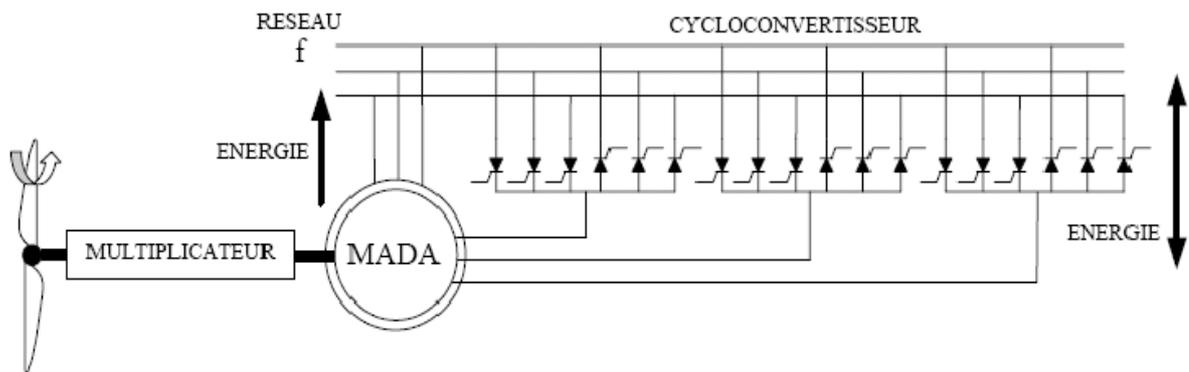


Figure II.11 : Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.

II.2.2.4 Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Le progrès de l'électronique de puissance permet d'avoir des interrupteurs qui peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture comme les IGBT's avec une fréquence de commutation importante. L'utilisation des convertisseurs à base de ce type d'interrupteurs

permet le rejet des premiers harmoniques vers les fréquences élevées ce qui limite les perturbations harmoniques et facilite le filtrage (Figure II.12) [2] [34].

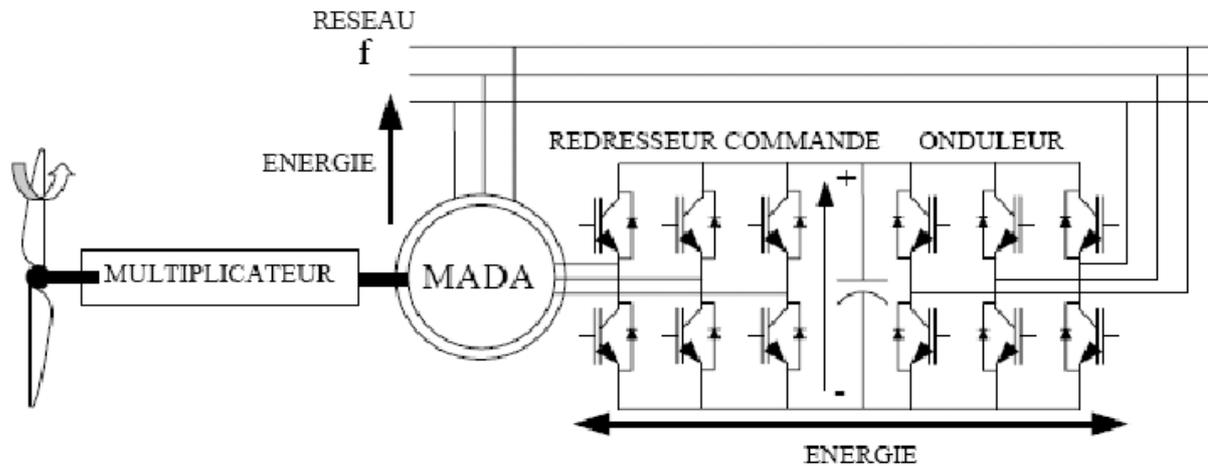


Figure II.12 : Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.

La réversibilité de puissance du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hyposynchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau. Si le glissement reste inférieur à $\pm 30\%$ autour du synchronisme, les convertisseurs sont alors dimensionnés pour un tiers de la puissance nominale de la machine et ses pertes représentent moins de 1% de cette puissance [2] [13] [18]. De plus, le fonctionnement hypersynchrone permet de produire de l'énergie du stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau. La puissance totale ainsi produite peut alors dépasser la puissance nominale de la machine et le facteur de puissance de l'ensemble peut être maintenu unitaire.

II.3 Mode de fonctionnement

Contrairement à la machine asynchrone classique, qui ne peut fonctionner en moteur qu'en dessous de sa vitesse de synchronisme et ne peut être en générateur qu'au dessus de cette vitesse. Dans la MADA c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hypersynchronisme ou en hyposynchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. On a donc quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine.

II.3.1 Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone

Dans ce mode de fonctionnement le stator est connecté au réseau et la puissance de glissement transite par le rotor pour la réinjecter au réseau (Figure II-13). Cette puissance est

dissipée en pertes Joule dans le cas des machines asynchrones à cage . Le champ tournant créé par les enroulements rotoriques est dans le même sens que le champ statorique [34] [3].

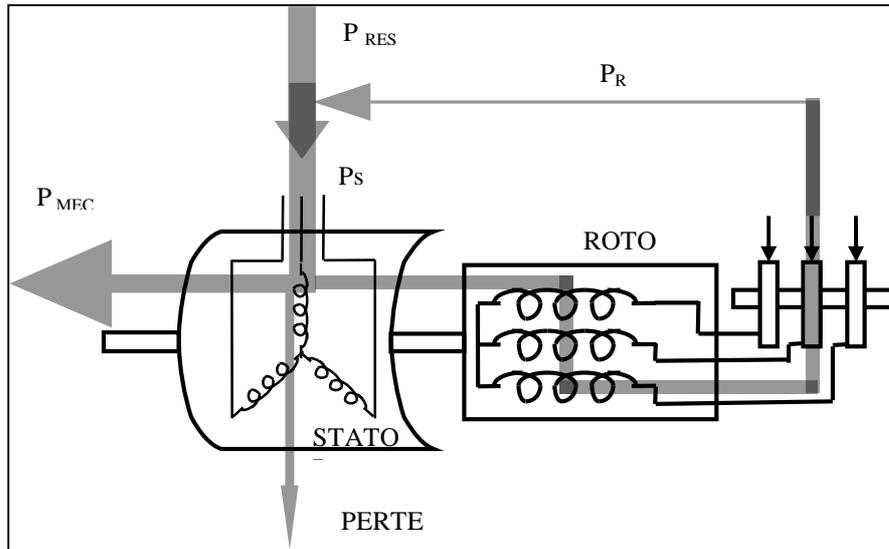


Figure II.13 : Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone.

II.3.2 Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone

Dans ce mode de fonctionnement le stator est alimenté par le réseau et la puissance de glissement est fournie par le réseau au rotor via les convertisseurs statiques afin de la convertir en puissance mécanique (Figure II.14). Le champ tournant induit par les enroulements rotoriques est en opposition de phase avec celui du stator [34] [3] car la vitesse devient plus grande que la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.

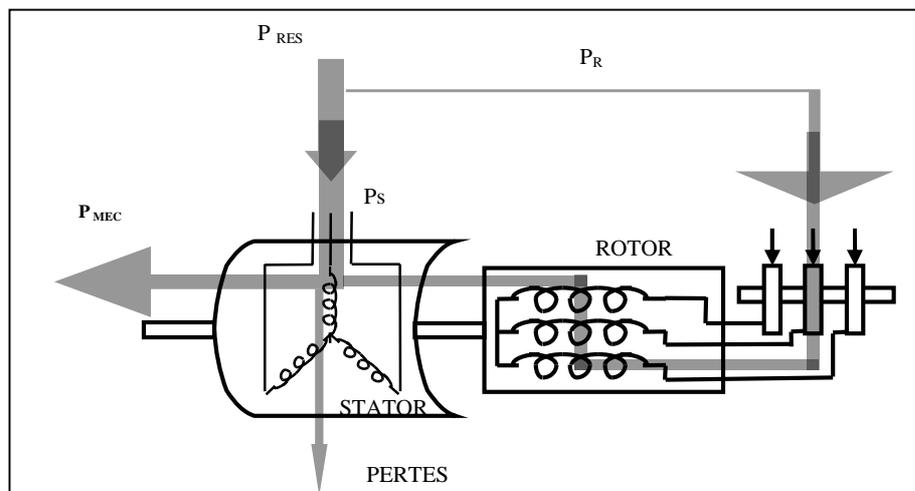


Figure II.14 : Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone.

II.3.3 Fonctionnement en mode génératrice hyposynchrone

Dans ce mode de fonctionnement, la puissance est fournie au réseau par le stator tout comme et la puissance de glissement est aussi fournie par le stator (Figure II.15). La machine asynchrone classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.

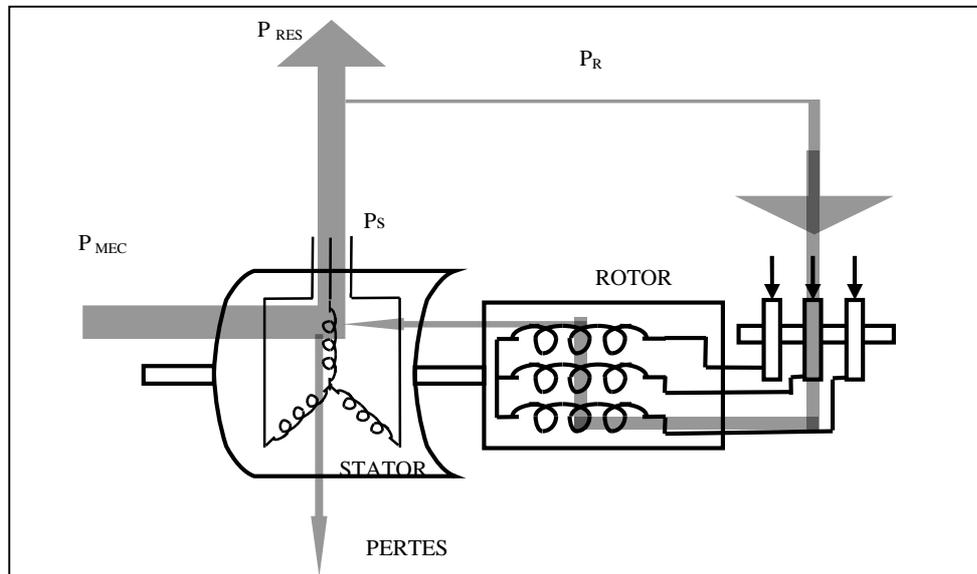


Figure II.15 : Fonctionnement en mode génératrice hyposynchrone.

II.3.4 Fonctionnement en mode génératrice hypersynchrone

Dans ce mode de fonctionnement la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près, comme le montre la figure (II-16), la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est réinjectée par le rotor.

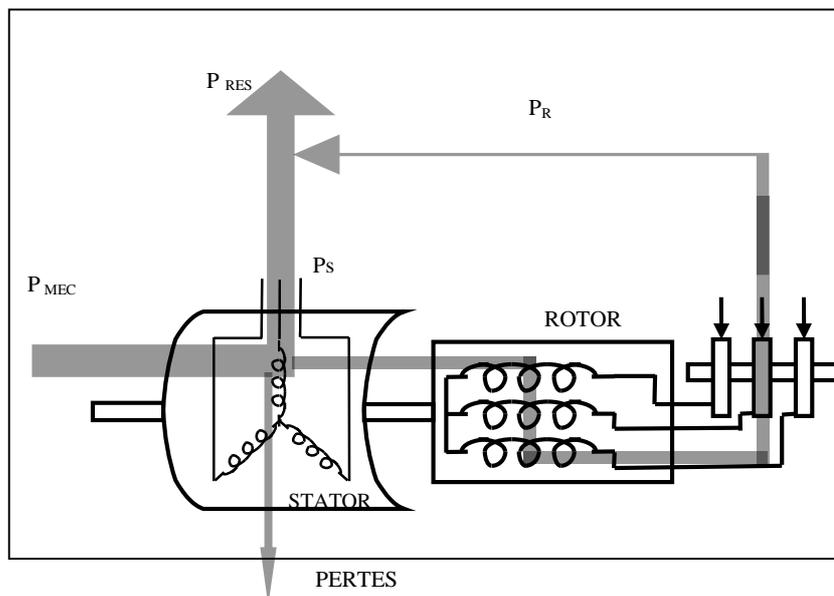


Figure II.16 : Fonctionnement en mode génératrice hypersynchrone.

On peut résumer ces différents modes dans le tableau suivant :

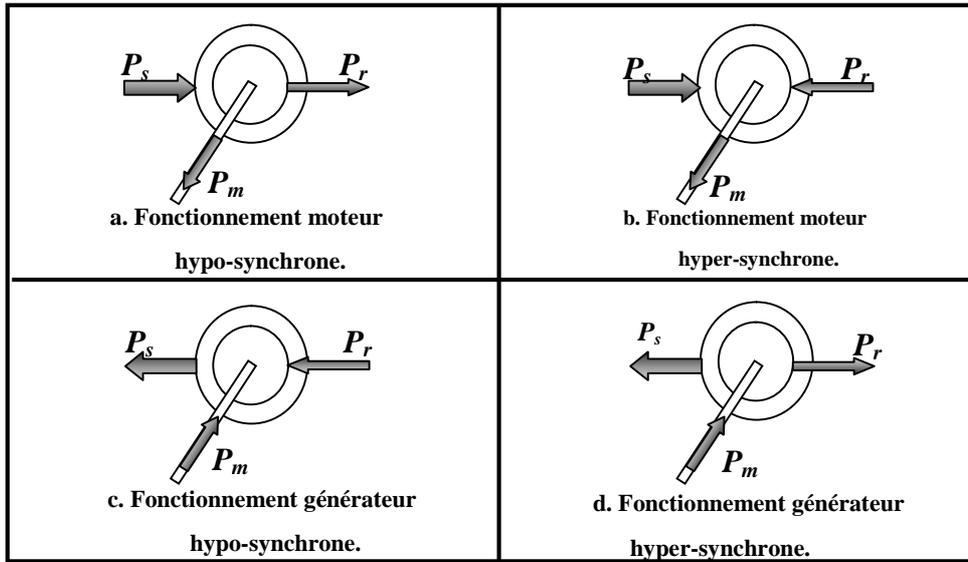


Figure II.17 : Modes de fonctionnement de la MADA.

II.4 Avantages et inconvénients de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation est couramment appelée machine généralisée. Sa structure permet de considérer son comportement physique de façon analogue soit à une machine asynchrone classique en court-circuitant les enroulements rotoriques, soit à une machine synchrone à la différence près que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent mais il est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de : "machine synchrone à excitation alternative".

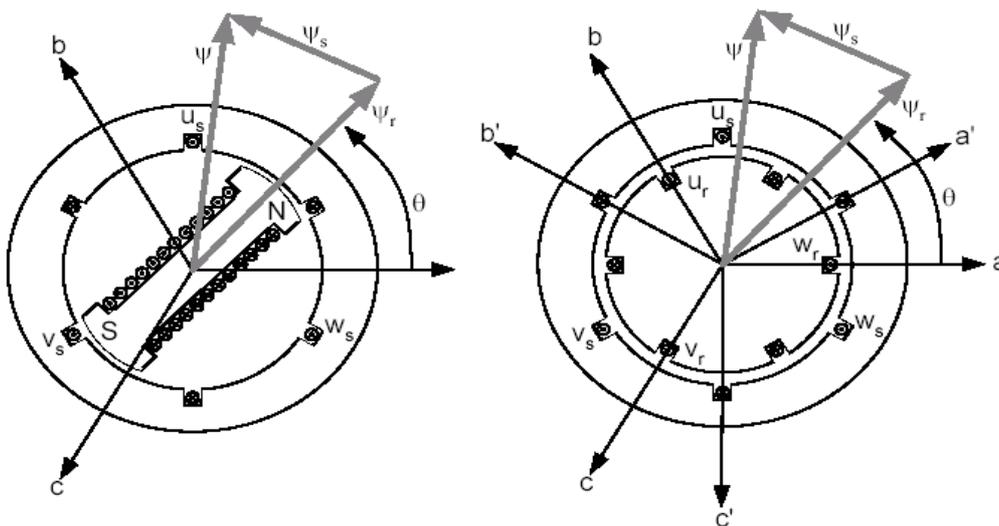


Figure II.18 : Enroulements et les flux dans une machine synchrone et dans une MADA.

Le vecteur flux φ (Figure II.18) présent dans l'entrefer de la machine représente la résultante des flux créés par les bobinages statoriques φ_s et du flux rotorique φ_r qui est créé soit par la rotation de la roue polaire alimentée en continu (MS) soit par l'alimentation alternative des bobinages rotoriques triphasés (MADA). Le remplacement de la roue polaire par le circuit triphasé alimenté en alternatif permet d'avoir un vecteur du flux rotorique φ_r qui a une amplitude et une phase totalement contrôlable par l'alimentation du circuit. Ainsi, la dynamique du flux dépend uniquement de la constante du temps électrique du système [2].

Dans ce contexte, il est clair que la machine asynchrone à double alimentation réunit les avantages de la machine synchrone et de la machine asynchrone en plus les avantages envisagés grâce à sa double alimentation. D'autre part, comme toutes les autres machines électriques, la MADA a des inconvénients qu'on va les citer ci-dessous.

II.4.1 Avantages de la MADA [2,15]

- L'accès au rotor offre la possibilité de contrôler les grandeurs électriques du rotor (courant et tension), ce qui donne une grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- La possibilité de fonctionner à couple constant au delà de la vitesse de synchronisme (Figure II.19).
- La configuration dont les deux convertisseurs alimentant la machine permettent de fonctionner en régime dégradé (l'un des deux onduleurs tombe en panne).
- En fonctionnement moteur, la solution avec deux convertisseurs alimentant la machine nous permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge.
- La double alimentation permet de réduire les dimensions des convertisseurs statiques, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement.
- Transfert bidirectionnel de la puissance rotorique.
- Le fonctionnement en hypo ou hypersynchronisme offre une large plage de variation de la vitesse.
- La MADA réunit les avantages de la machine synchrone et de la machine asynchrone, à savoir :
 - Fonctionnement à vitesse de rotation variable.
 - Régulation découplée des puissances active et réactive.

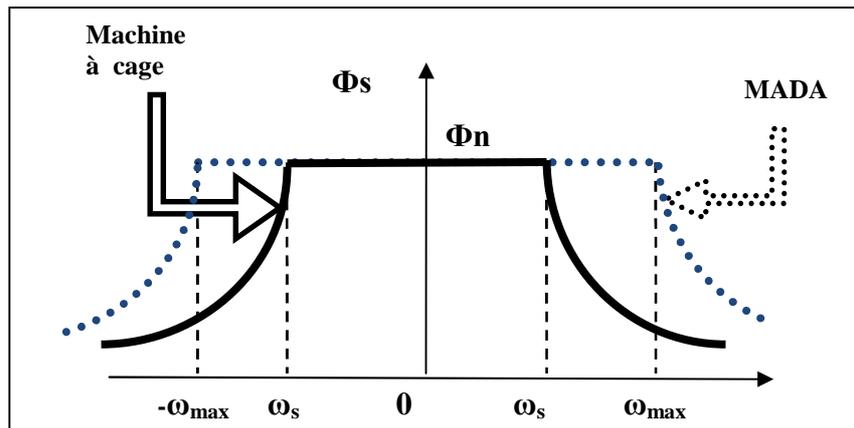


Figure I.19 : Comparaison de zone de fonctionnement en survitesse entre la machine à cage et la MADA [34].

II.4.2 Inconvénients de la MADA

- Machine plus volumineuse que celle de la machine asynchrone classique, généralement elle est plus longue à cause des balais ;
- Utilisation d'un nombre de convertisseurs statiques plus que celle de la machine classique ;
- Le coût total de la machine est plus important par rapport aux autres machines électriques.

II.5 Application des machines asynchrones à double alimentation

La machine asynchrone doublement alimentée est utilisée dans diverses applications soit en mode moteur ou en mode générateur. Nous citerons, dans ce qui suit, les applications plus envisagées dans l'industrie.

II.5.1 Application moteur

La MADA représente une nouvelle solution dans le domaine des entraînements de forte puissance, notamment ceux exigeant un large domaine de fonctionnement étendu à puissance constante et une grande plage de variation de la vitesse comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime [11].

II.5.2 Application génératrice

Grâce à sa capacité de fonctionner dans une large gamme de vitesses, la MADA est devenue la solution adaptée pour l'énergie éolienne. L'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet d'avoir des tensions statoriques à fréquence et amplitude fixes quelque soit la vitesse de rotation de son arbre. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée [17]:

- Génération des réseaux de bord des navires ou des avions.
- Centrales hydrauliques à débit et vitesse variable.
- Eoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable.
- Groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

II.6 Principe de fonctionnement de la MADA en génératrice à vitesse variable

Afin d'expliquer le principe de fonctionnement de la MADA, il est préférable de négliger toutes les pertes. En tenant compte de cette hypothèse, la puissance P (Figure II.20) qui est fournie au stator traverse l'entrefer : une partie de cette puissance fournie égale à $(1 - g)P$ 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, par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance composée de deux convertisseurs statiques séparés par un bus continu. Ce réseau reçoit donc $(1 + g)P$. Une fois le rotor est connecté au réseau, un flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique, le nombre de spires de bobinage et le courant statorique [4].

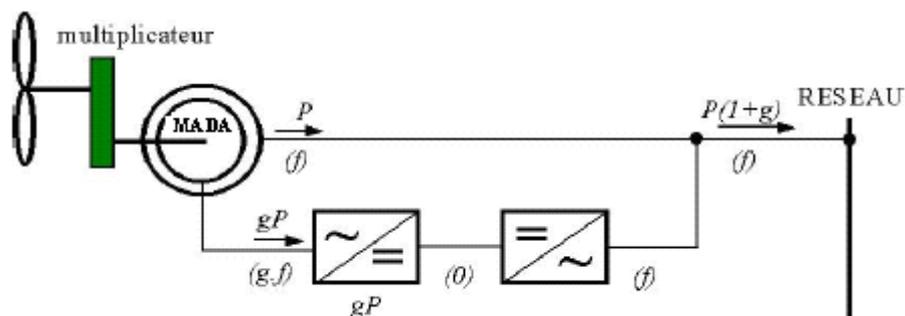


Figure II.20 : Schéma de principe d'une MADA à rotor bobiné pilotée par le rotor.

Pendant la rotation, le flux magnétique généré par le stator crée des forces électromotrices dans le bobinage du rotor. Le rapport entre les fem's créés au rotor (E_r) et au stator (E_s) est donné par la relation suivante :

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r w_s - w_m}{N_s w_s} \quad (\text{II. 1})$$

Ou :

N_r : Nombre de spire rotorique.

N_s : Nombre de spire statorique.

w_s : Pulsation statorique.

w_m : Pulsation mécanique.

On remplace le glissement, classique, par son expression dans (2.1):

$$\frac{E_r}{E_s} = g \frac{N_r}{N_s} \quad (\text{II. 2})$$

g : glissement.

Les courants au stator (i_s) et au rotor (i_r) sont définis comme dans le cas d'un transformateur parfait :

$$\frac{i_r}{i_s} = \frac{N_r}{N_s} \quad (\text{II. 3})$$

Donc, le rapport entre la puissance P_r au rotor et la puissance P_s au stator devient :

$$\frac{P_r}{P_s} = \frac{i_r E_r}{i_s E_s} = g \quad (\text{II. 4})$$

Cette équation montre que pour une puissance constante transmise au stator, plus on transmet de la puissance par le rotor, plus on augmente le glissement. La pulsation au stator (imposée par le réseau) étant supposée constante, il est donc possible de contrôler la vitesse de la génératrice (équation II.4) en agissant simplement sur la puissance transmise au rotor via le glissement g [5].

II.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes structures de la machine asynchrone à double alimentation que envisagées dans l'industrie.

Afin de mieux comprendre les avantages que peut procurer cette machine par rapport aux structures classiques, nous avons étudié les possibilités qu'elle offre en fonctionnement moteur et génératrice dans les quatre quadrants.

Après avoir illustré les avantages et les inconvénients de la MADA, nous avons cité les domaines d'application, où cette machine représente la solution la plus convenable, pour les deux modes de fonctionnement (moteur et génératrice).

En suite nous avons détaillé le mode génératrice qui fait l'objet de notre travail. En premier lieu, nous avons analysé le principe de fonctionnement de la machine tout en basant sur le bilan d'énergie d'une machine à induction. Dans ce même contexte, nous avons établi une méthode pour dimensionner le convertisseur statique lié au rotor et choisir la plage de réglage de la vitesse sans détruire le principal avantage de la MADA.

Chapitre III

Modélisation et contrôle indépendant de la machine asynchrone à double alimentation

III. Introduction

La modélisation d'une machine asynchrone était basée sur l'élaboration de schémas équivalents dérivés de la théorie du champ tournant. La simplicité de conception et d'entretien de cette machine à la faveur des industries, s'accompagne toutefois d'une grande complexité physique, liée aux interactions électromagnétiques entre le stator et le rotor. Les méthodes matricielles sont développées et sont devenues les bases pour une approche de modélisation, de simulation, d'identification et de commande. Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la modélisation et à la simulation de la machine asynchrone à double alimentation.

III.1 Modèle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA)

Le modèle de la MADA est équivalent au modèle de la machine asynchrone à cage exposé dans le chapitre I. En effet lors de cette modélisation, on assimile la cage d'écureuil à un bobinage triphasé. La seule différence réside dans le fait que ces enroulements ne sont plus systématiquement en court-circuit par conséquent les tensions diphasées rotoriques du modèle que l'on rappelle ci-après ne sont pas nulles.

Par raison de simplicité, nous considérons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- La répartition de l'induction dans l'entrefer est sinusoïdale.
 - Les paramètres de la machine sont considérés indépendants de la température.
 - On néglige le phénomène de la saturation.
 - Entrefer constant.
 - Effet des encoches est négligé.
 - L'inductance de l'effet de peau et de l'échauffement n'est pas prise en compte
- Sous les hypothèses précédentes et dans un repère d-q tournant à la vitesse de synchronisme ou les composantes (X_d, X_q) sont liées aux grandeurs réelles (X_a, X_b, X_c) par la transformation de park, comme suit [3,8,29] :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (\text{III. 1})$$

La variable X peut être une tension, un courant ou un flux, les équations de la MADA sont les Suivantes

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \theta_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \theta_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \theta_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \theta_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III. 2})$$

Avec

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{III. 3})$$

III.1.1 Mise sous forme d'équation d'état

Ces équations peuvent être disposées sous la forme de représentation d'état. On choisit pour vecteur d'état le vecteur de courant $[i_{ds} i_{qs} i_{dr} i_{qr}]$, on trouve les équations d'état sous forme matricielle :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} R_s & -w_s L_s & 0 & -M w_s \\ w_s L_s & R_s & w_s M & 0 \\ 0 & -M(w_s - w_r) & R_r & -L_r(w_s - w_r) \\ M(w_s - w_r) & 0 & L_r(w_s - w_r) & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{III. 4})$$

$$[L]^{-1} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} \quad (\text{III. 5});$$

$$[K1]^{-1} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (\text{III. 6})$$

$$[K2] = \begin{bmatrix} 0 & -L_s & 0 & -M \\ L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -M & R_r & -L_r \\ M & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III. 7});$$

$$[K3] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III. 8})$$

En considérant les composantes en (d, q) l'équation d'état prend la forme :

$$\begin{aligned} [V] &= [A] \cdot [X] + [L] \cdot [\dot{X}] \\ \frac{d}{dt}[X] &= [L]^{-1}[v] - [L]^{-1}[A] \cdot [X] \\ [A] &= [K1] + [K2]w_s + [K3]w \end{aligned} \quad (\text{III. 9})$$

III.1.2 Couple électromagnétique et puissance

L'expression générale du couple électromagnétique résulte de la dérivée de l'énergie par rapport à l'angle mécanique de rotation. Dans le repère d-q l'équation du couple devient :

$$C_e = P \frac{M}{L_s} (\varphi_{qs} \cdot i_{dr} - \varphi_{ds} \cdot i_{qr}) \quad (\text{III. 10})$$

P : Nombre de paire du pole.

L_s : Inductance propre statorique.

C_e : Couple électromagnétique.

$\varphi_{qs}, \varphi_{ds}$: Flux statorique .

Pour la vitesse on remarque qu'on a deux cas :

- Cas moteur :

L'équation du mouvement s'écrit sous la forme :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega = C_e - C_r \quad (\text{III. 11})$$

- Cas générateur :

La vitesse d'entraînement de la MADA est fixe.

Les puissances active et réactive du stator et du rotor sont respectivement données par :

$$\text{Pour le stator : } \begin{cases} P_s = R_e(u_s \cdot i_s^*) \\ Q_s = I_m(u_s \cdot i_s^*) \end{cases} \quad (\text{III. 12})$$

$$\begin{cases} P_s = (v_{ds} \cdot i_{ds} + v_{qs} \cdot i_{qs}) \\ Q_s = (v_{qs} \cdot i_{ds} - v_{ds} \cdot i_{qs}) \end{cases} \quad (\text{III. 13})$$

$$\text{Pour le rotor : } \begin{cases} P_r = R_e(u_r \cdot i_r^*) \\ Q_r = I_m(u_r \cdot i_r^*) \end{cases} \quad (\text{III. 14})$$

$$\begin{cases} P_r = (v_{dr} \cdot i_{dr} + v_{qr} \cdot i_{qr}) \\ Q_r = (v_{qr} \cdot i_{dr} - v_{dr} \cdot i_{qr}) \end{cases} \quad (\text{III. 15})$$

III.1.3 Validation du Modèle

L'utilisation du logiciel MATLAB, conçu pour la manipulation des matrices, pour la simulation de la MADA en fonctionnement moteur permet d'utiliser le modèle décrit par l'équation (III.9) sous sa forme matricielle.

Les figures ci-dessous présentent les résultats de simulation d'une MADA de 4KW. La machine est alimentée directement par deux sources de tension triphasées parfaites, l'une au niveau du stator avec une fréquence de 50Hz et d'amplitude $V = 220$ V (annexe).

les figure (III.1), (III.2), (III.3), (III.4), (III.5) concernant respectivement le couple et la vitesse, les composante du courant statoriques et rotoriques et son résultante.

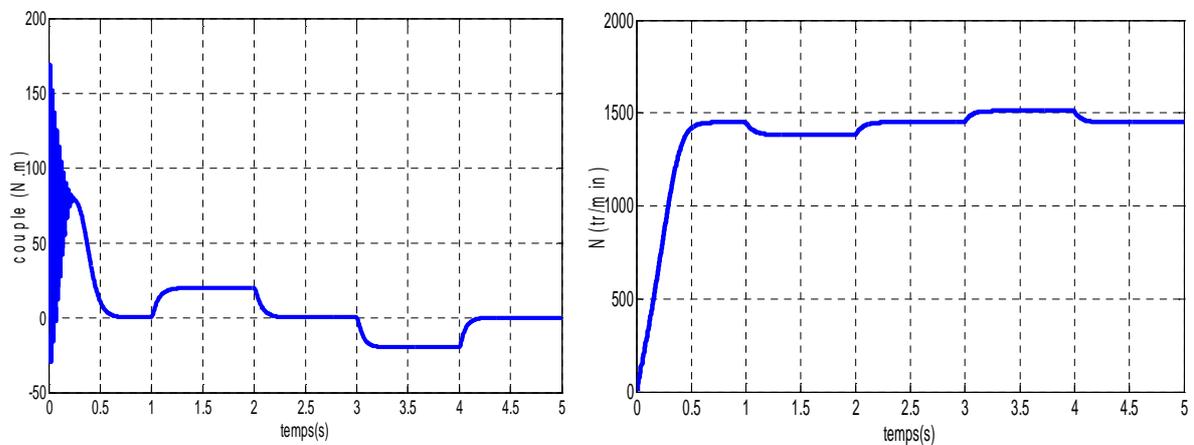


Figure III.1 : le couple électromagnétique et la vitesse

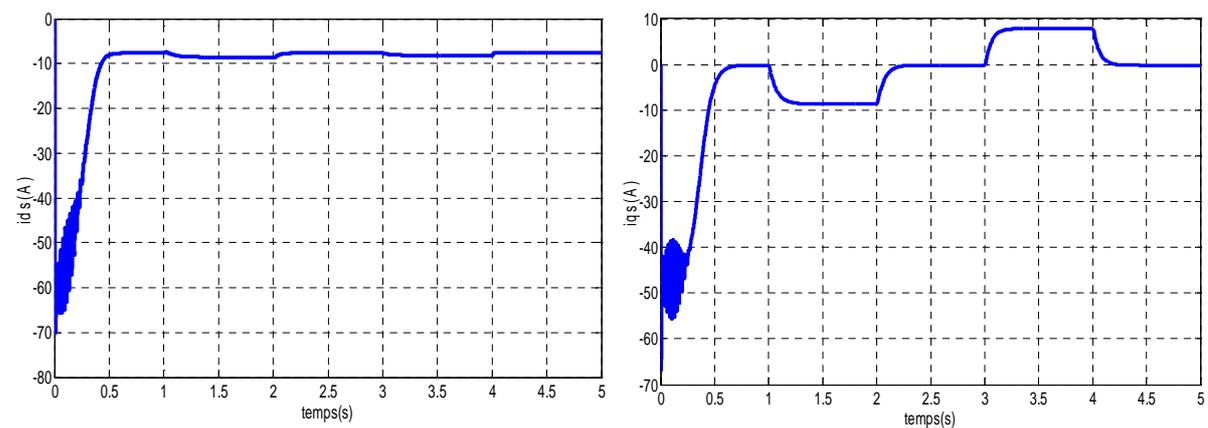


Figure III.2 : Les courants statoriques directe et en quadrature dans le repère de PARK

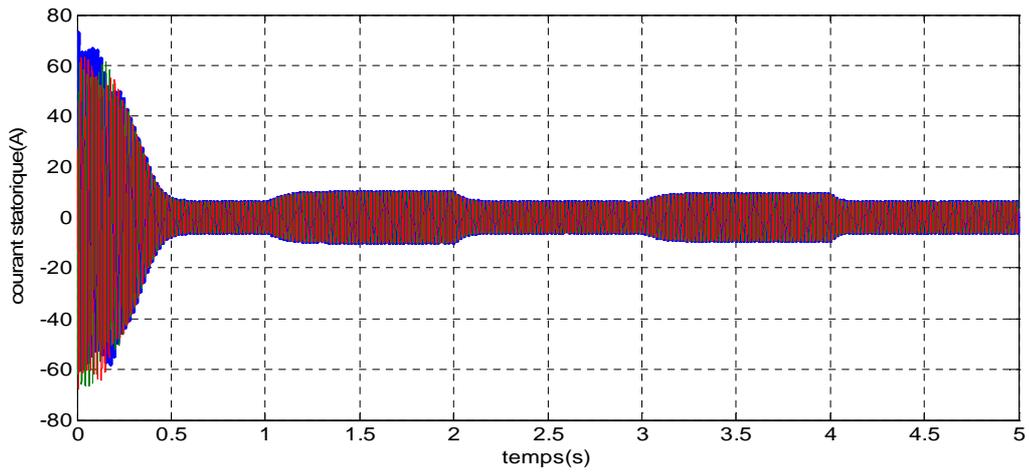


Figure III.3: Les courants statoriques triphasées

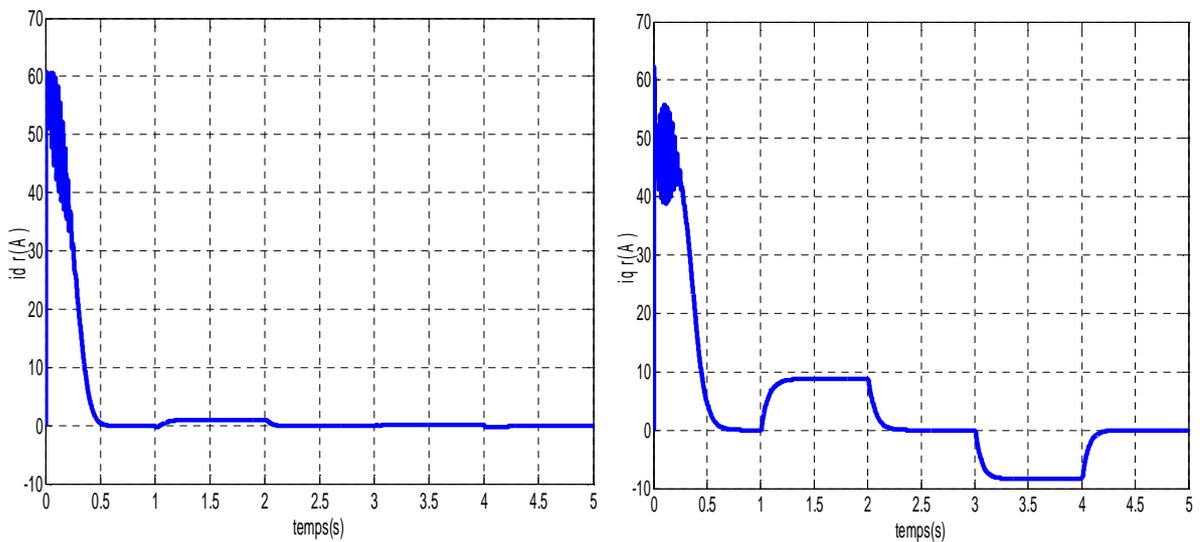


Figure III.4: Les courants rotoriques directe et en quadrature dans le repère de PARK

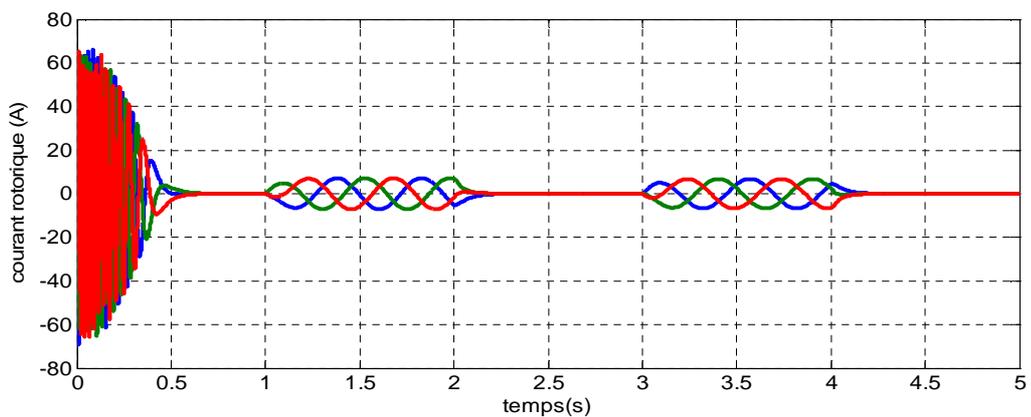


Figure III.5 : Les courants rotoriques triphasées

III.1.4 Interprétation des résultats

La simulation s'effectue au départ d'un démarrage à vide. On remarque que le régime transitoire est oscillatoire pour toutes les grandeurs de la machine, après que le régime permanents' est établi, on applique un couple de charge à la machine $C_r=+20\text{Nm}$ dans un intervalle limité, par la suite on applique un couple $C_r=-20\text{ N.m}$, après l'application de cette perturbation, nous observons une bonne stabilité de la machine. Notons qu'à vide la vitesse du rotor est proche de la vitesse de synchronisme, au moment où on applique un couple résistant $C_r=+20\text{N.m}$, la vitesse diminue et pour $C_r=-20\text{N.m}$, la vitesse augmente le couple électromagnétique répond au couple résistant ainsi que les courants de phase.

III.2 Principe de la commande vectorielle de la MADA

Dans la commande vectorielle, la MADA est contrôlée d'une façon analogue à la machine à courant continu à excitation séparée. Cette analogie est représentée par la Figure (III.6):

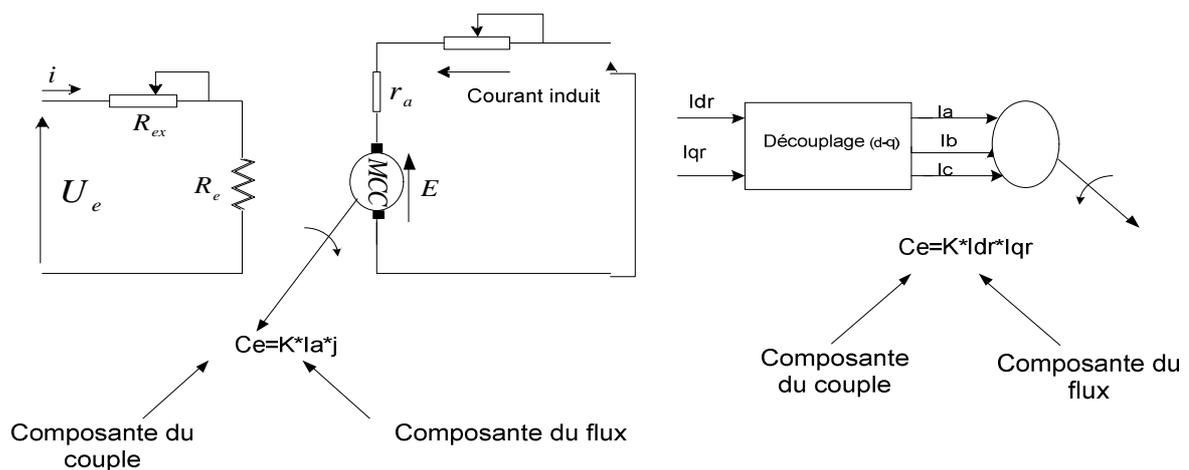


Figure III.6: Commande d'une Machine à courant continu et commande vectorielle d'une MADA

La commande par flux orienté est une expression qui apparaît de nos jours dans la littérature traitant les techniques de contrôle des moteurs électriques, et dont l'étymologie nous ramène à une notion élémentaire, mais très importante de l'électromagnétisme. La force exercée sur un conducteur parcouru par un courant et placé dans une région où règne un champ magnétique est égale au produit vectoriel du vecteur courant par le vecteur champ. Il en résulte évidemment que l'amplitude de cette force sera maximale pour des intensités du courant et du champ donnés quand le vecteur courant sera perpendiculaire au vecteur champ. Appliquée aux moteurs électriques, cette propriété est utilisée pour obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courant et les vecteurs flux résultants. Si le principe est naturellement appliqué pour les Machine à courant continu, ce n'est pas le cas pour les machines à courant alternatif; par conséquent, le contrôle

par flux orienté des machines à courant alternatif est une commande par orientation de ces deux grandeurs.

De nombreuses variétés ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer, suivant la source d'énergie [5,6]:

- Commande en tension.
- Commande en courant.

Suivant l'orientation du repère :

- Le flux rotorique.
- Le flux statorique.
- Le flux d'entrefer.

Suivant la détermination de la position du flux :

- Directe par mesure ou observation de vecteur flux (module, phase).
- Indirecte par contrôle de la fréquence du glissement.

III.2.1 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

On rappelle d'abord le système équations différentielles de la machine.

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - w_s \varphi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + w_s \varphi_{ds} \end{cases} \quad (\text{III. 16})$$

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (w_s - w) \varphi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (w_s - w) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III. 17})$$

Ou

v_{dr} , v_{qr} : La tension rotorique directe et en quadrature.

v_{ds} , v_{qs} : La tension statorique directe et en quadrature.

Avec un flux statorique constant et orienté, $\varphi_s = \varphi_{ds}$ et $\varphi_{qs} = 0$, ces équations peuvent se simplifier sous la forme suivante [8]:

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + w_s \varphi_s \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (w_s - w) \varphi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (w_s - w) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III. 18})$$

Si on néglige la résistance des enroulements statoriques , hypothèse souvent acceptée pour les machines de grande puissance utilisée pour la Production d'énergie éolienne, les équations des tensions de la machine se réduisent à la forme suivante [35]:

$$\begin{cases} v_{ds} = 0 \\ v_{qs} = v_s = \omega_s \varphi_s \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III. 19})$$

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

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \varphi_s = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ 0 = L_s \cdot i_{qs} + M i_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{III. 20})$$

L'expression du couple électromagnétique devienne alors :

$$C_e = P \frac{v_s}{\omega_s} \cdot i_{qs} \quad (\text{III. 21})$$

C_e : Le couple électromagnétique.

P : Le nombre de paires de pôles.

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'énergie par la MADA, il est pratique d'élaborer un modèle pour le contrôle indépendant des puissances active et réactive. Un tel modèle peut être élaboré en établissant les relations qui lient les puissances active et réactive aux courants et tension rotoriques imposés par l'onduleur.

III.2.2 Expressions des puissances active et réactive statoriques

Les puissances active et réactive statorique, dans le repère orthogonal, s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \\ Q_s = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} \end{cases} \quad (\text{III. 22})$$

Les puissances active P_s et réactive Q_s sont donc respectivement en fonction des courants statoriques I_{qs} et I_{ds} , sur les quels nous avons au qu'une action directe. Nous devons donc chercher une relation entre les courants rotoriques et les courants statoriques.

A partir des expressions des flux statoriques, nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{v_s}{\omega_s \cdot L_s} - \frac{M}{L_s} \cdot i_{dr} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_s} \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III. 23})$$

En remplaçant les courants statoriques direct et quadrature par leurs expressions dans les équations des puissances active et réactive, on trouve.

$$\begin{cases} P_s = -\frac{v_s \cdot M}{L_s} \cdot i_{qr} \\ Q_s = \frac{v_s^2}{\omega_s \cdot L_s} - \frac{v_s M}{L_s} \cdot i_{dr} \end{cases} \quad (\text{III. 24})$$

Il ressort de l'expression (III.24) que le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. En effet, avec une inductance magnétisante constante et un réseau électrique puissant, la puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe q , et la puissance réactive proportionnelle au courant rotorique d'axe d à une constante Près $\frac{v_s^2}{\omega_s \cdot L_s}$ imposée par le réseau.

III.2.3 Expressions des tensions rotoriques

A partir du système d'équation (III.24), les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{dr} + \frac{M v_s}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III. 25})$$

En introduisant ces expressions dans les équations des tensions rotoriques du système (III.19), on trouve :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{di_{dr}}{dt} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{di_{qr}}{dt} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} \\ \quad \quad \quad + g\omega_s \frac{Mv_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (III.26)$$

A partir des systèmes d'équations (III.26) et (III.25), nous pouvons élaborer le modèle pour le contrôle des puissances tel qu'il est présenté par le schéma bloc figure (III.7) [8] [26].

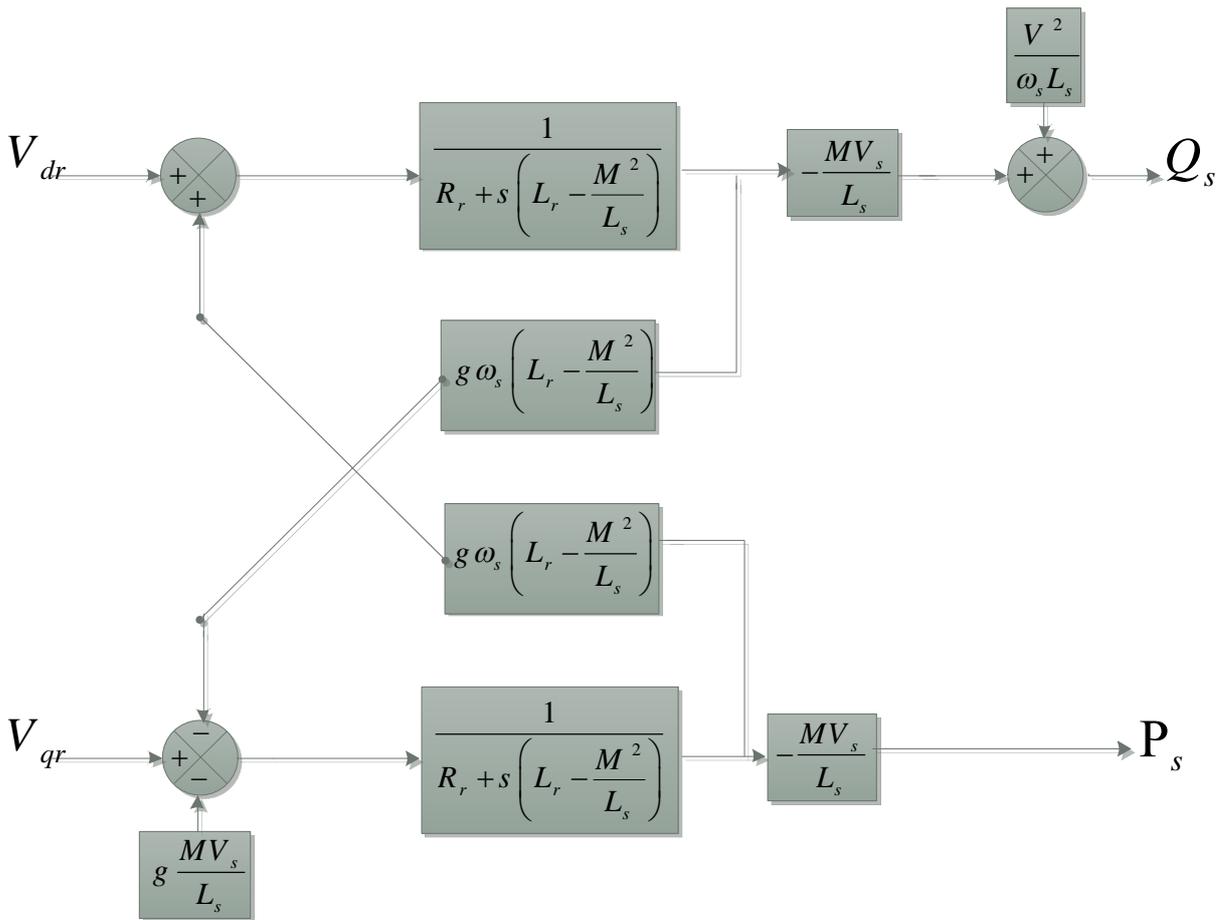


Figure III.7: Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.

L'expression $g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$ représente le terme de couplage entre l'axe direct et l'axe quadrature. Pour des faibles glissements, ce terme de couplage peut être négligé pour avoir un découplage parfait entre les deux axes. Cependant, pour certaines applications de la MADA, la variation de la vitesse de rotation peut être importante et le glissement ne peut être négligé ; Dans ce cas, il est nécessaire d'envisager des termes de compensation pour avoir le contrôle de chaque axe indépendamment de l'autre.

III.3 Contrôle indépendant des puissances active et réactive

Après avoir élaboré le modèle pour le contrôle indépendant des puissances de la MADA, il suffit maintenant d'inverser ses blocs pour déduire les tensions de référence de l'onduleur à partir des puissances active et réactive de références [8,35].

III.3.1 Commande directe

Si l'on observe les équations (III.25), on s'aperçoit que les courants rotoriques sont liés aux puissances actives et réactives par le terme $\frac{Mv_s}{L_s}$. De plus, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés dans le système (III.26), disparaissent en régime permanent.

Nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} - g w_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + g w_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + g \frac{M v_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III.27})$$

V_{dr} et V_{qr} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus. L'effet du terme de couplage $g w_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$ est minime pour des faibles glissements et peut être compensé par une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande.

En revanche, le terme $g \frac{M v_s}{L_s}$ représente une force électromotrice dont l'influence n'est pas négligeable, le système de contrôle devra donc compenser cette perturbation. Ainsi, on obtient un modèle plus simple permettant le contrôle direct et indépendant des puissances active et réactive en utilisant un seul régulateur sur chaque axe (Figure III.8).

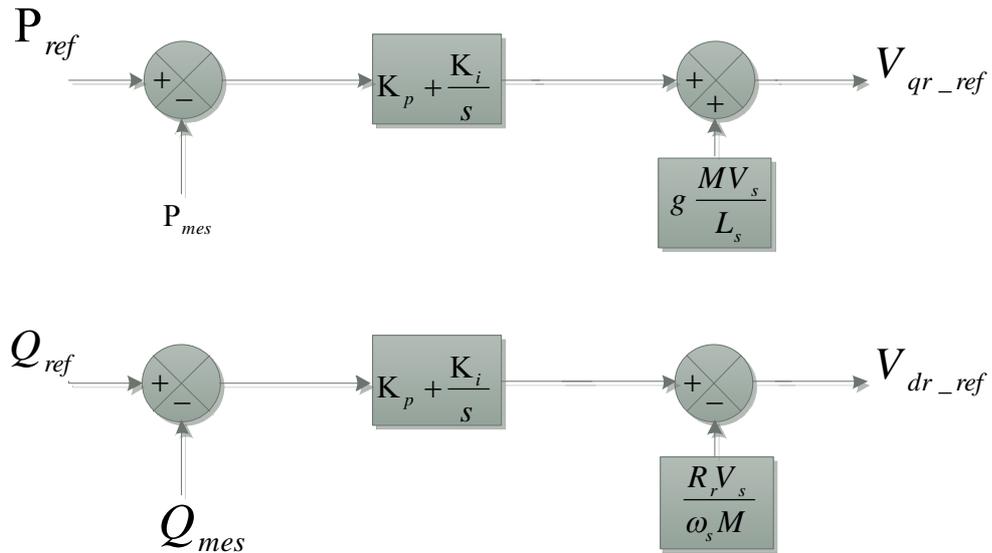


Figure III.8: Schéma bloc de la commande directe

III.3.2. Commande indirecte

III.3.2.1. Commande en boucle ouvert

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

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

$$\begin{cases} i_{qr_ref} = \frac{L_s}{Mv_s} \cdot P_{s_ref} \\ i_{dr_ref} = -\frac{L_s}{Mv_s} \cdot Q_{s_ref} + \frac{v_s}{M\omega_s} \end{cases} \quad (\text{III. 28})$$

Ces courants seront utilisés comme références à la place des références sur les puissances active et réactive, on aboutit alors au schéma bloc figure (III.9).

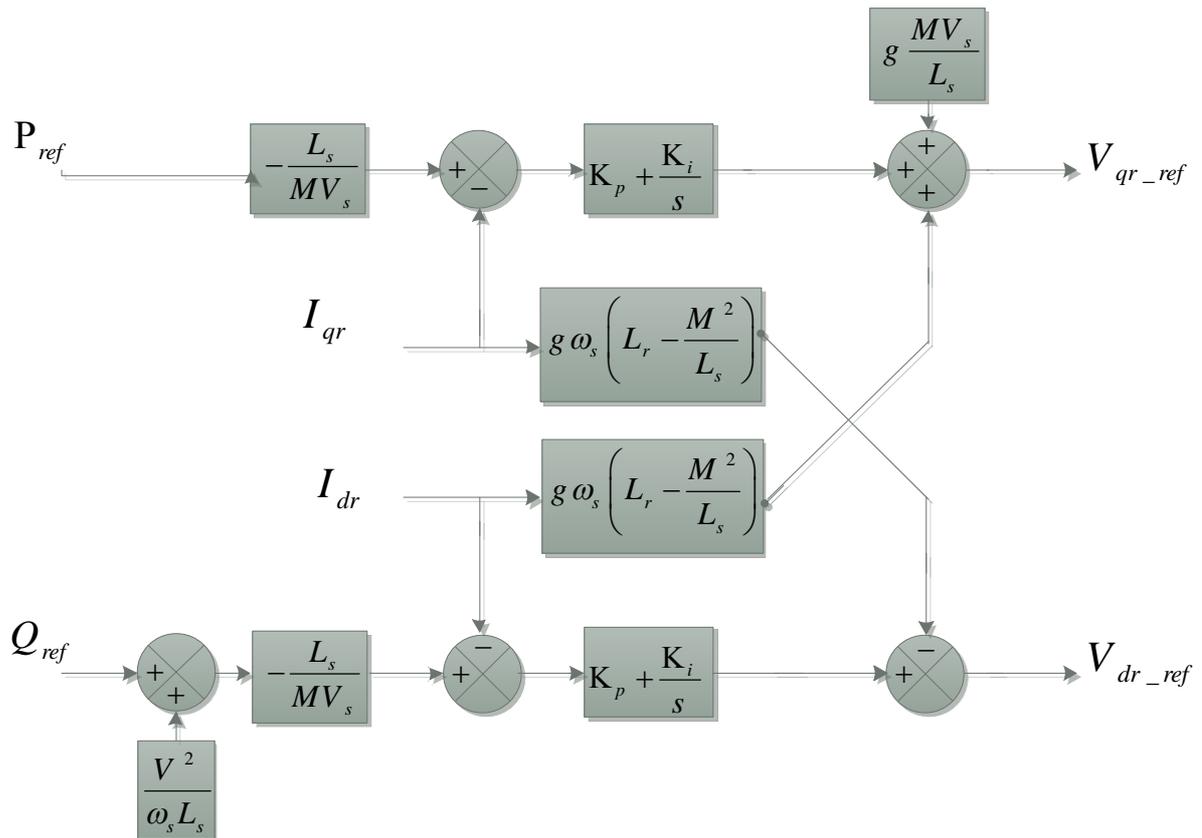


Figure III.9 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouverte.

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

III.3.2.2 Commande en boucle fermé

Pour réguler les puissances de manière optimale, nous allons mettre en place deux boucles de régulation sur chaque axe avec un régulateur proportionnel intégral pour chacune, une boucle sur la puissance et l'autre sur le courant correspondant tout en compensant les termes de perturbations et de couplages apparaissant sur le schéma bloc du modèle de la MADA. Nous obtenons ainsi la structure de commande présentée sur la figure (III.10).

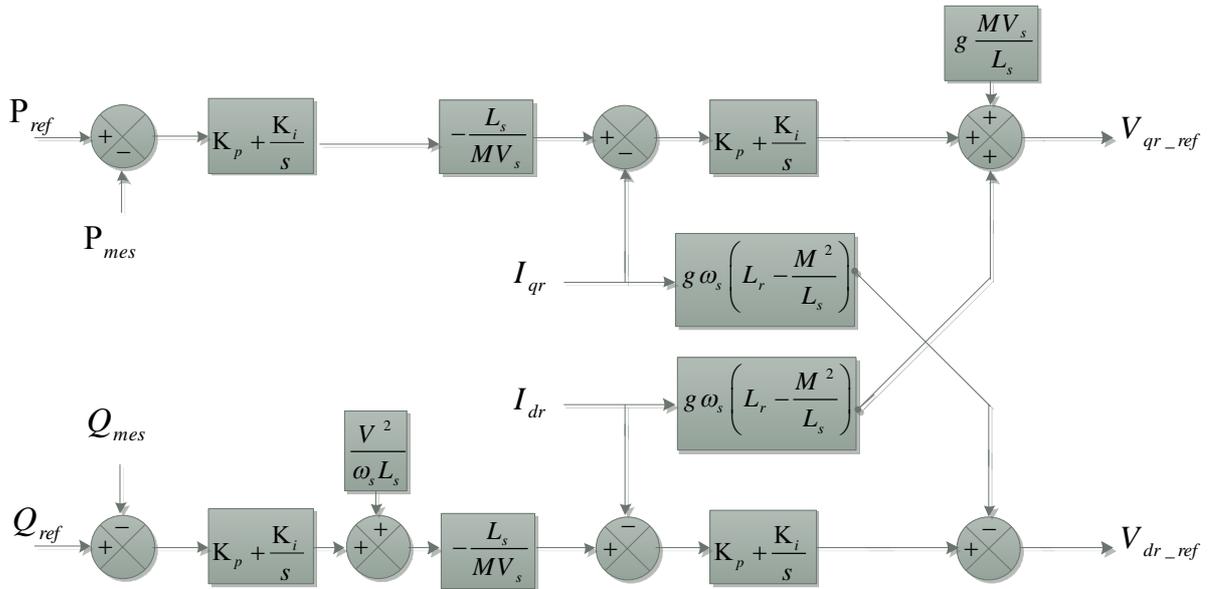


Figure III.10 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermée.

Cette structure aboutit à un système de régulation plus complexe. Toutefois, elle offre une meilleure robustesse face aux éventuelles instabilités sur le réseau électrique. Le régulateur proportionnel intégral utilisé pour l’asservissement des courants et des puissances est simple et facile à mettre en place tout en offrant des performances acceptables pour l’utilisation en génératrice de la MADA. De plus, la symétrie du système après compensation mène à calculer les régulateurs pour un seul axe, les deux autres seront identiques aux premiers. La synthèse de ces régulateurs est détaillée dans l’annexe.

III.3.3 Etablissement des angles des transformations

Pour déterminer l’angle de transformation de Park pour les grandeurs statoriques, une méthode simple consiste à appliquer la matrice de Concordia aux tensions statoriques pour extraire la phase θ_s que forme le vecteur de tension avec l’axe de la première phase du stator. Afin d’aligner le flux statorique avec l’axe d, nous retranchons $\frac{\pi}{2}$ à cet angle. Cette méthode est fiable à condition que les tensions statoriques soient stables en fréquence avec peu de fluctuations pour pouvoir effectuer une mesure précise [2].

Le rotor forme lui, un angle θ_m avec la phase A du stator, l’angle θ_r nécessaire aux transformations des grandeurs rotoriques est donc donné par $\theta_1 - \theta_m$.

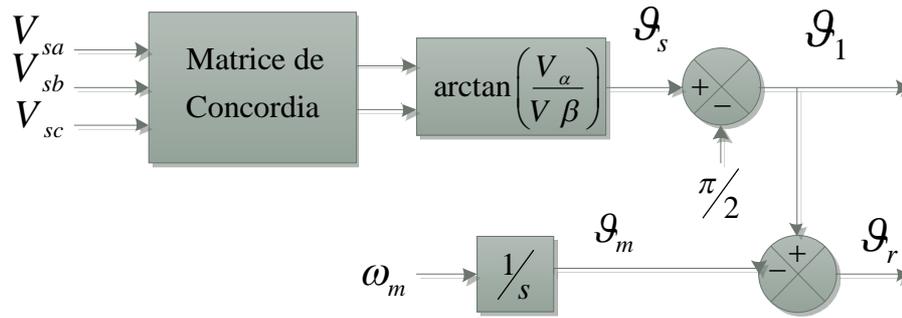


Figure III.11: Calcul des angles de transformations

III.4 Model de l'onduleur de tension à deux niveaux

Le rotor de la MADA est alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux équipé avec des dispositifs semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. Pour faciliter la modélisation du convertisseur de puissance, on suppose que les interrupteurs semi-conducteurs sont parfaits.

III.4.1 Modélisation de l'onduleur

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques qui transforment une puissance électrique d'une forme continue en une puissance en forme alternative. La tension de sortie d'un onduleur a une forme d'onde périodique qui n'est pas sinusoïdale, mais qui peut être très proche de la forme d'onde souhaitée avec une fréquence désirée.

Le réglage de l'amplitude et de fréquence de la tension statorique de la MADA se réalise logiquement par action simultanée sur la fréquence de la tension rotorique.

Le convertisseur DC/AC présenté ci-dessus est constitué de trois circuits de commutation qui sont alimentés par une source de courant continue. Cette tension est obtenue à partir d'un redresseur à diode (figure III.12) [34,37].

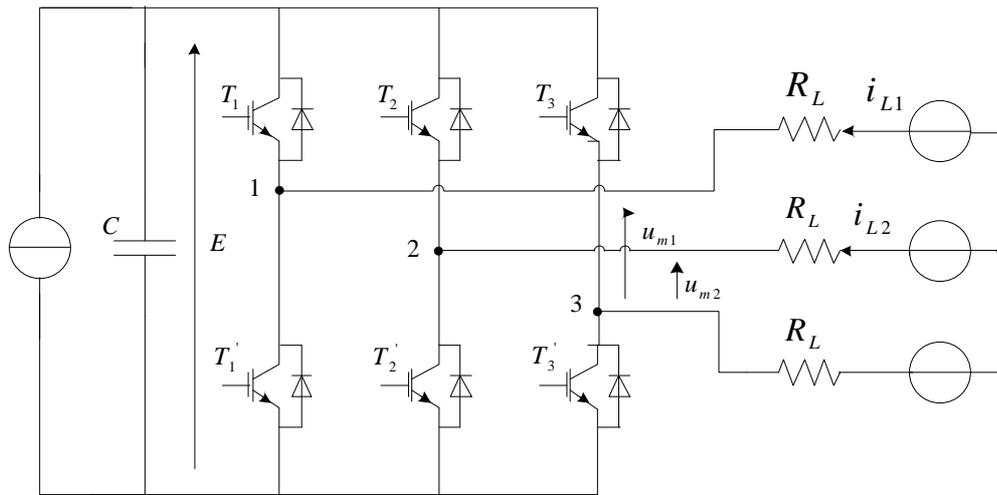


Figure III.12 : schéma d'un convertisseur DC/AC à deux niveaux.

Pour simplifier l'étude du fonctionnement du convertisseur, on utilise un modèle mathématique qu'on va l'établir par la suite, figure(III.13)[10].

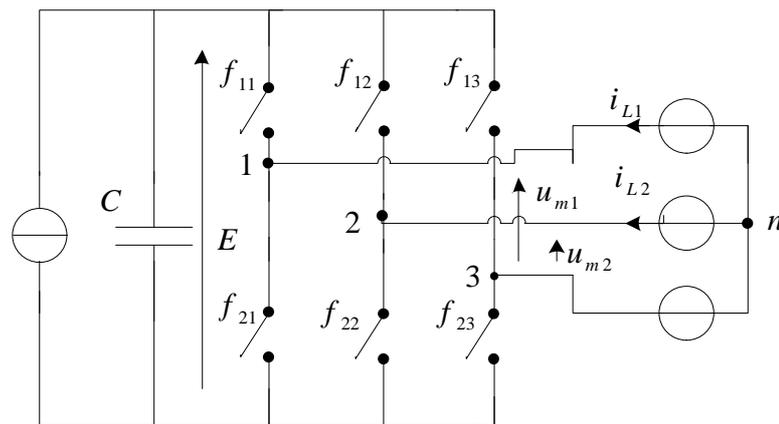


Figure III.13 : Structure matricielle du convertisseur.

Afin d'éviter le court-circuit du générateur de la tension, les fonctions de connexions f_{ij} ou f_{rc} doivent satisfaire les conditions suivantes :

$$f_{1c} = f_{2c} + 1 \tag{III. 29}$$

Les tensions modulées U_{m1} et U_{m2} sont obtenues à partir des relations suivantes :

$$U_{m1} = U_{31} = (f_{11} - f_{13})E \tag{III. 30}$$

$$U_{m2} = U_{23} = (f_{12} - f_{13})E \tag{III. 31}$$

On définit les fonctions de conversions m par :

$$m_1 = f_{11} - f_{13} \quad (\text{III. 32})$$

$$m_2 = f_{12} - f_{13} \quad (\text{III. 33})$$

L'expression des tensions modulées devient :

$$U_{m1} = U_{31} = m_1 E \quad (\text{III. 34})$$

$$U_{m2} = U_{23} = m_2 E \quad (\text{III. 35})$$

Les tensions simples sont déduites à partir des tensions modulées comme suit :

$$U_{1n} = \frac{2}{3} U_{m1} - \frac{1}{3} U_{m2} \quad (\text{III. 36})$$

$$U_{2n} = \frac{2}{3} U_{m2} - \frac{1}{3} U_{m1} \quad (\text{III. 37})$$

Les huit états de commutation des interrupteurs du convertisseur et les tensions modulées correspondantes sont illustrés dans le tableau suivant :

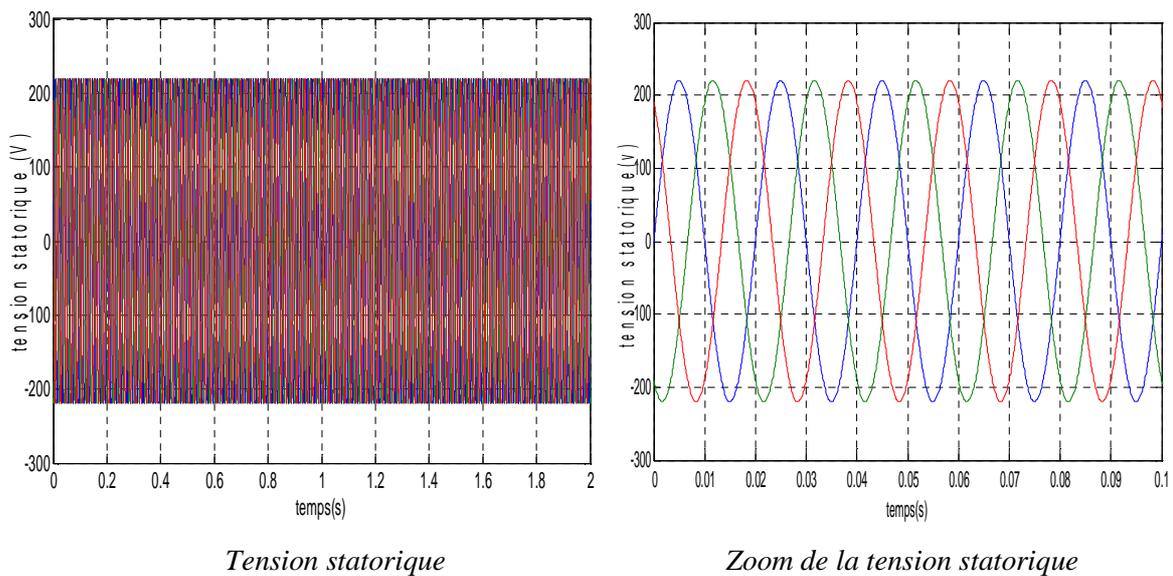
f_{11}	f_{12}	f_{13}	m_1	m_2	U_{m1}	U_{m2}	\vec{U}
0	0	0	0	0	0	0	\vec{U}_0
0	1	0	0	1	0	E	\vec{U}_1
1	1	0	1	1	E	E	\vec{U}_2
1	0	0	1	0	E	0	\vec{U}_3
1	0	1	0	-1	0	-E	\vec{U}_4
0	0	1	-1	-1	-E	-E	\vec{U}_5
0	1	1	-1	0	-E	0	\vec{U}_6
1	1	1	0	0	0	0	\vec{U}_7

Tableau III-1 : Fonctions des connexions et les vecteurs de tensions correspondantes.

III.5 Résultats de simulation

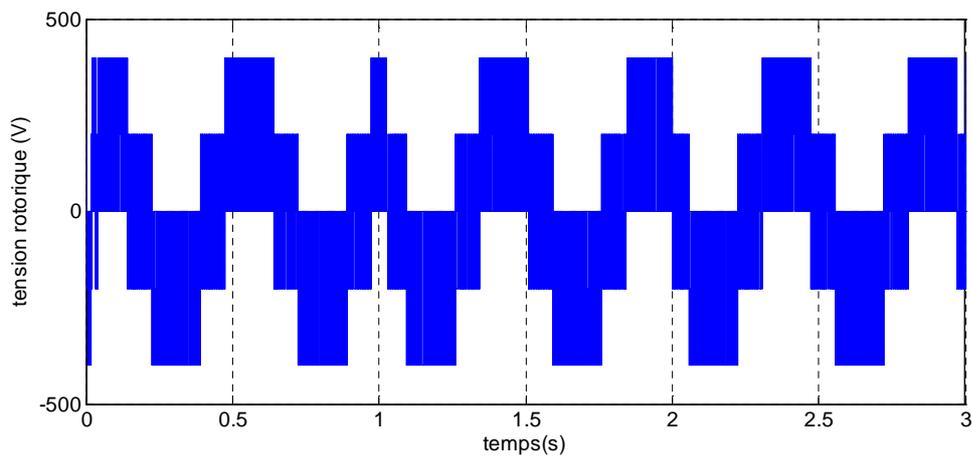
Les résultats de simulation présentés sur les figures ci-dessous, nous permettent de présenter les performances de la conduite de la MADA alimentée par un onduleur à deux niveaux commandée par la stratégie triangulo-sinusoidal, avec un démarrage à vide puis avec application d'une puissance active $P = -3000\text{W}$ entre $t=1\text{s}$ et $t=3\text{s}$, et une puissance réactive entre $t=2\text{s}$ et $t=4\text{s}$ pour deux fréquences de porteuse $f_p=1000\text{Hz}$.

La figure (III.12), (III.13) La tension triphasée appliquée au stator et celle appliquée au rotor de la MADA.



Tension statorique

Zoom de la tension statorique



Tension rotorique

Figure III.14: Tension statorique avec zoom et tension rotorique.

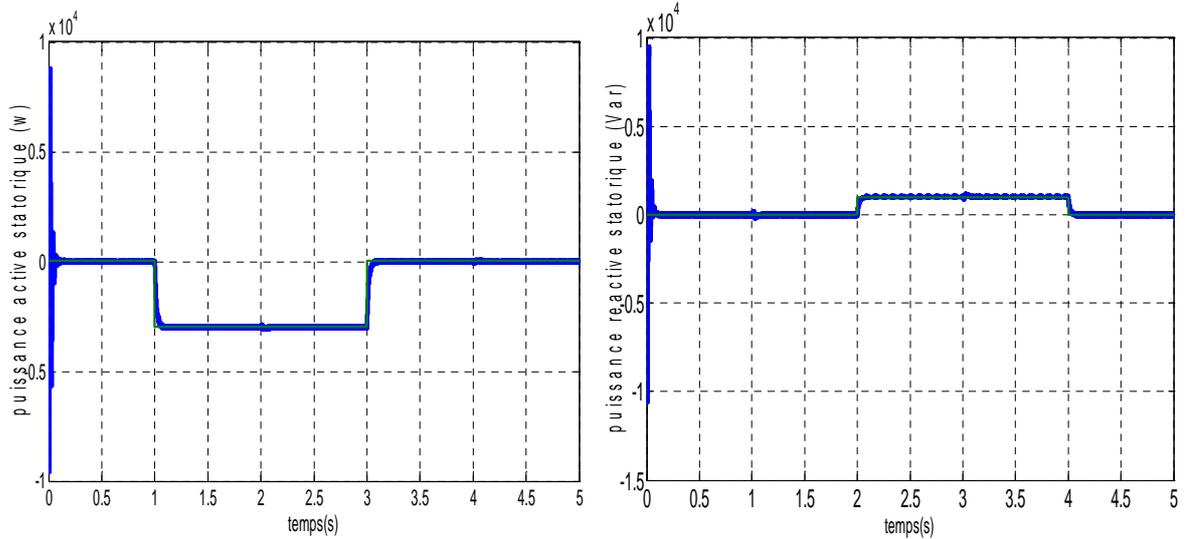


Figure III.15: Puissances active et réactive statoriques en commande direct

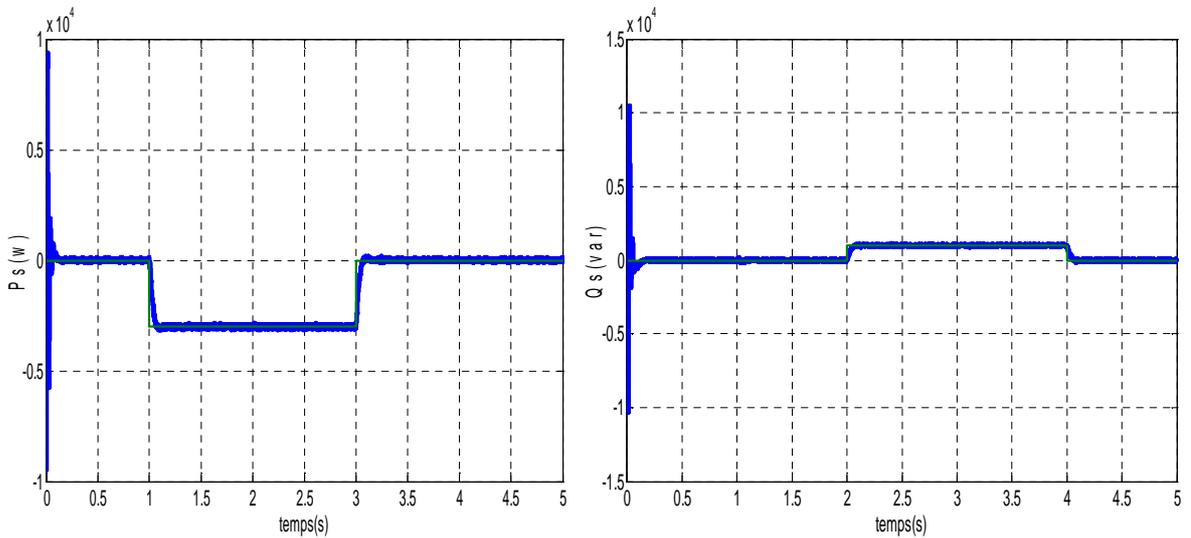


Figure III.16: Puissances active et réactive statoriques en commande indirect sans boucle de puissance

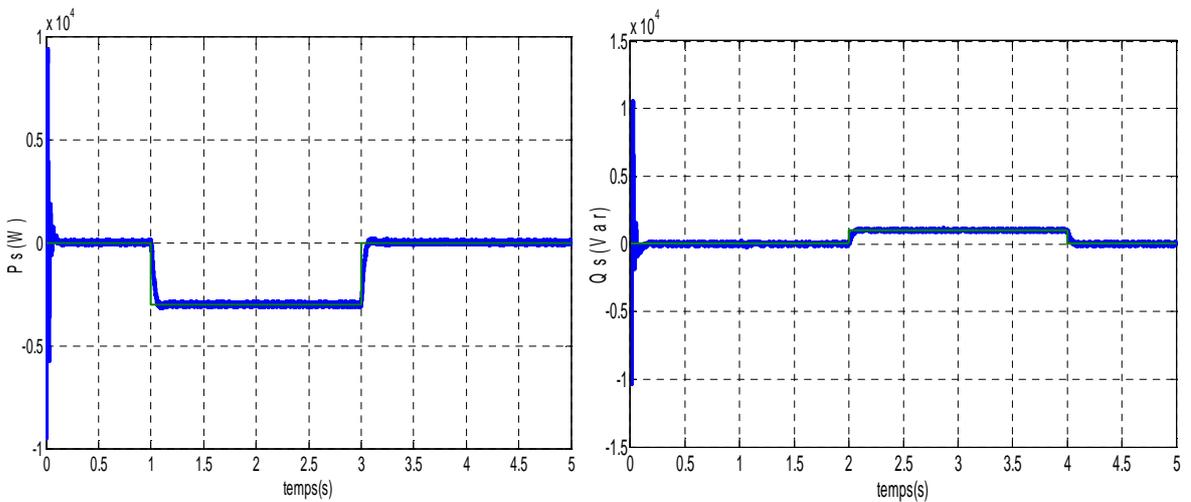


Figure III.17: Puissances active et réactive statoriques en commande indirect avec boucle de puissance

III.5 .1 Interprétation des résultats

Les résultats de simulation ci-dessus montrent l'efficacité de la commande en puissances de la MADA pour les trois méthodes étudiées. En effet, les échelons de puissance active sont bien suivis par la génératrice surtout la commande indirecte en boucle fermée (sans dépassement ou perturbation) (Figure III.17), et la puissance active et réactive suivant la référence (Figure (III.15), (III.16), (III.17)).

Cependant, on remarque des oscillations aux instants d'application des échelons de puissance dues au couplage entre les deux axes de la machine et des fluctuations de puissance pour la méthode en boucle ouverte, particulièrement la puissance active et réactive (Figure III.9) dues à l'absence d'une boucle de régulation sur les puissances pour cette méthode, ces oscillations et ces fluctuations de puissances sont bien compensées pour les méthodes en boucle fermée (directe et indirecte en boucle fermée) (Figure III.15,III.17).

III.6 CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis d'établir la synthèse de la commande vectorielle en puissance active et réactive statoriques de la machine asynchrone à double alimentation. Trois modes de contrôles ont été détaillés en utilisant un régulateur proportionnel intégral. La commande directe, basé sur l'hypothèse d'un découplage parfait entre les deux axes direct et en quadrature, et la commande indirecte, avec et sans boucle de puissance, qui tiens compte du couplage entre les axes et utilise des termes de compensation pour le corriger.

Bien que la commande directe nous ait donné des résultats satisfaisants avec une simplicité de mise en œuvre, la commande indirecte en boucle fermé sur la puissance, certes plus complexe, nous permettait d'obtenir un système plus performant et plus robuste. La présence d'une boucle des courants dans la commande indirecte lui offre un avantage, par rapport à la commande directe, permettant la limitation des courants rotoriques pour protéger la machine et aussi la possibilité de superposer des références de courants harmoniques pour une éventuelle application de la MADA en un filtre actif.

Chapitre IV

Cascade Redresseur-Onduleur-MADA

IV. Introduction

Avant la naissance de l'électronique de puissance, les convertisseurs de tension ou de fréquence étaient quasiment inexistantes. La variation de la vitesse de la machine asynchrone se faisait alors par action sur le glissement, au moyen d'un rhéostat ou d'une association de machines (système de kramer ou de scherbius).

De nos jours, pour la récupération de la puissance disponible au rotor, on utilise un système statique de conversion d'énergie constitué de convertisseur de puissance ainsi qu'un transformateur. Ce convertisseur qui sera donc dimensionné pour transiter seulement la puissance rotorique [5].

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 Cascade redresseur à deux niveaux- onduleur à deux niveau- MADA

La cascade présentée à la figure (IV.1), comporte deux convertisseurs à MLI, chaque convertisseur à six interrupteurs (transistors IGBT) qui peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture. L'utilisation de ce type de convertisseurs permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'Impulsion dont la modularité permet de limiter les perturbations.

Plusieurs études récentes montrent la viabilité de ce dispositif dans un système éolien à vitesse variable. La bidirectionnalité du convertisseur rotorique autorise le fonctionnement en hypo synchrone et le contrôle du facteur de puissance coté réseau. Le convertisseur est alors dimensionné pour un tiers de la puissance nominale de la machine si le glissement reste inférieur à +30% autour du synchronisme [1], [2], [5].

De plus, le fonctionnement hyper synchrone permet de produire de l'énergie de stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau. On trouve ainsi la puissance totale produite alors dépasser la puissance nominale de la machine et le facteur de puissance de l'ensemble peut être maintenu unitaire [3],[21].

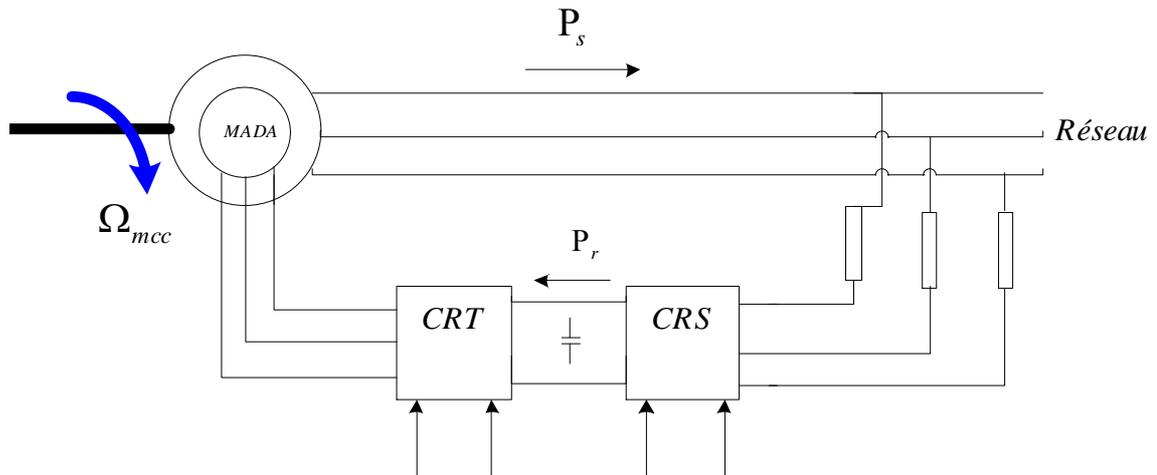


Figure IV.1 : Structure de la cascade du redresseur du courant à MLI à deux niveaux-
Onduleurs de tension à deux niveaux –MADA

IV.2. Modélisation du redresseur à MLI

Les redresseurs à MLI utilisent des composants à commutation forcée réversibles qui permettent non seulement de réduire les harmoniques en prélevant des courants d’allure sinusoïdale mais aussi d’autoriser un flux bidirectionnel de l’énergie. Le convertisseur peut alors travailler en redresseur ou en onduleur et garder une tension continue régulée aux bornes du condensateur.

La figure(IV.2), présente la structure d’un redresseur à MLI triphasé, qui peut être décomposé en trois étages : La source, le convertisseur et la charge.

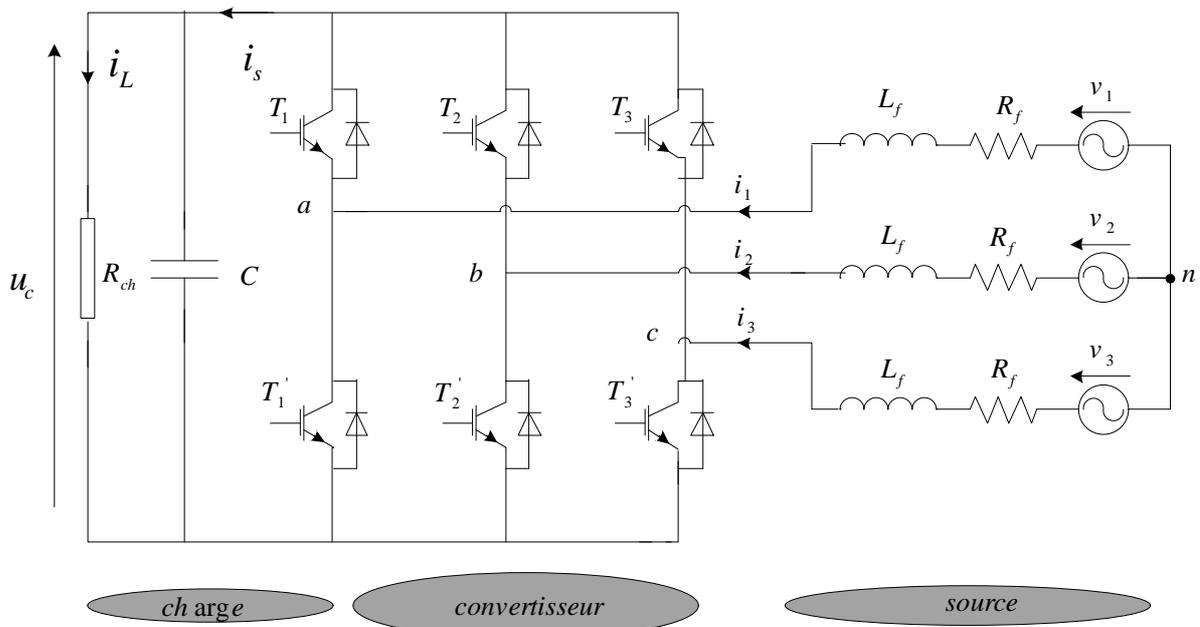


Figure IV.2: Structure du redresseur à MLI

IV.2.1 La source d'alimentation

C'est une tension triphasée supposée parfaitement sinusoïdale et équilibrée en série avec une résistance r et une inductance l représentant respectivement la résistance et l'inductance totales de la ligne.

Les tensions de la ligne sont données par :

$$\begin{cases} V_1 = ri_1 + l \frac{di_1}{dt} + V_{an} \\ V_2 = ri_2 + l \frac{di_2}{dt} + V_{bn} \\ V_3 = ri_3 + l \frac{di_3}{dt} + V_{cn} \end{cases} \quad (\text{IV. 1})$$

Où V_{an} , V_{bn} et V_{cn} sont les tensions simples par rapport au neutre de la source à l'entrée du convertisseur. Et les courants de chaque phase sont alors donnés par le système d'équations différentielles suivant :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r}{l} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{r}{l} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{r}{l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} + \frac{1}{l} \begin{bmatrix} V_1 - V_{an} \\ V_2 - V_{bn} \\ V_3 - V_{cn} \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 2})$$

IV.2.2 L'étage convertisseur

Sachant que la structure du redresseur est identique à celle de l'onduleur déjà modélisé dans la section précédente la matrice de connexion du pont est similaire à (IV. 3)

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{U_c}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{21} \\ F_{31} \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 3})$$

En plus le courant redressé est donné par :

$$i_s = [F_{11} \quad F_{21} \quad F_{31}] \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 4})$$

En rappelant que

$F_{i1}=1$ si Ti est fermé et Ti' est ouvert

$F_{i1}=0$ si Ti est ouvert et Ti' est fermé

IV.2.3 La charge

Cet étage est constitué d'une capacité C en parallèle avec une résistance R modélisant la charge continue. Et il est régi par les deux équations électriques :

$$\begin{cases} \frac{dU_c}{dt} = \frac{1}{C} (i_s - i_L) \\ U_c = R_{ch} i_L \end{cases} \quad (IV.5)$$

Ce qui permet d'obtenir la fonction de transfert entre tension et courant redressés :

$$\frac{U_c}{i_s} = \frac{R_{ch}}{1 + R_{ch}c p} \quad (IV.6)$$

A partir des relations (IV.1), (IV.2), (IV.3) et (IV.4), on peut établir le schéma fonctionnel global du redresseur à MLI figure (IV.3) ayant comme entrées la commande des gâchettes des interrupteurs du haut (F_{11}, F_{21}, F_{31}) et comme sortie la tension redressée U_c .

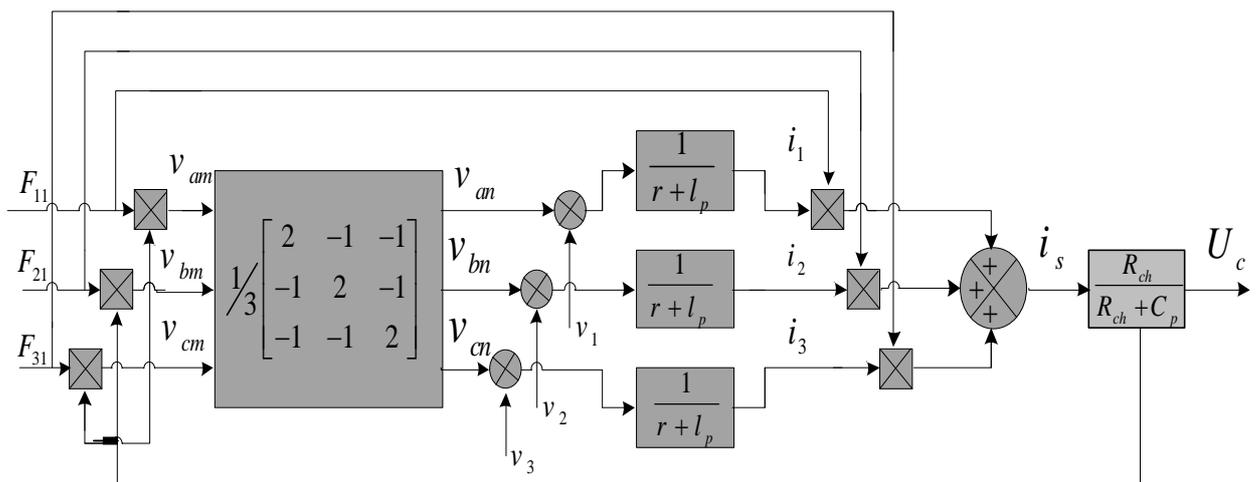


Figure IV.3: Schéma fonctionnel du redresseur à MLI

IV.2.4 Régulation en cascade du redresseur à MLI dans le repère (d,q)

Il existe plusieurs techniques de commande des redresseurs à MLI, qui varient de la simplicité et la médiocrité de performances à la complexité et la robustesse (contrôle de l'angle de puissance du redresseur, commande à hystérésis de courant, commande par comparaison de rampe...).

Grâce à ses trois régulateurs (Deux pour les composantes du courant et un pour la tension continue), la régulation en cascade dans le repère (d,q) , est une technique suffisamment performante pour notre application.

IV.2.4.1 Modélisation dans le repère (d,q)

Les équations régissant le système sont :

$$\begin{cases} V_{pd} = V_d - r i_d - l \frac{di_d}{dt} + l \omega i_q \\ V_{pq} = V_q - r i_q - l \frac{di_q}{dt} - l \omega i_d \end{cases} \quad (\text{IV. 7})$$

Où

V_{pd} et V_{pq} : sont les composantes de Park des tensions à l'entrée du convertisseur.

V_d et V_q : Les composantes de Park des tensions du réseau.

i_d et i_q : Les composantes de Park des courants du réseau.

ω : La pulsation du réseau. Et les expressions des puissances active et réactive sont données par :

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} [V_d i_d + V_q i_q] \\ Q = \frac{3}{2} [V_q i_d - V_d i_q] \end{cases} \quad (\text{IV. 8})$$

Ce système peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} V_d & V_q \\ V_q & -V_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 9})$$

Ce qui implique que les courants de ligne peuvent être obtenus par:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \frac{1}{(V_d^2 + V_q^2)} \begin{bmatrix} V_d & V_q \\ V_q & -V_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 10})$$

Et on pose $P = U_c i_s$ et $Q = 0$

Le schéma bloc de la régulation est alors représenté dans la figure ci-dessous.

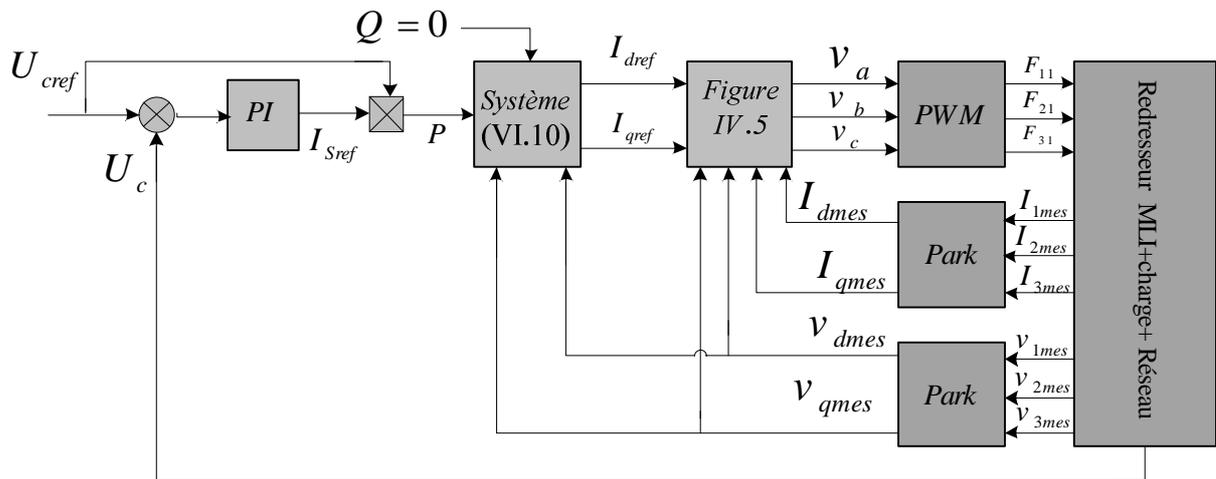


Figure VI.4: Schéma bloc de la commande en cascade du redresseur à MLI

Avec le sous bloc de la figure(VI.5), qui permet la régulation des courants et l'obtention de courants découplés selon les axes d et q , avec compensation de la tension réseau.

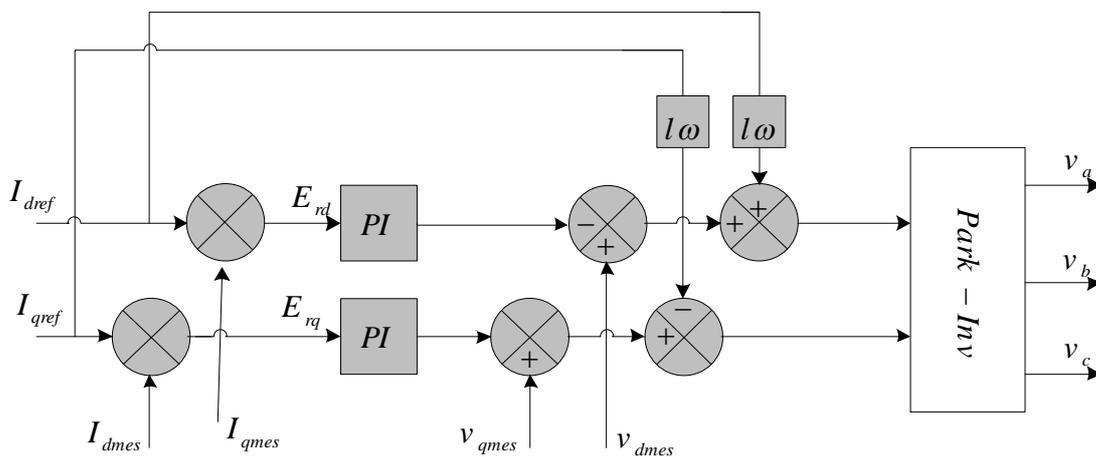


Figure IV .5: Bloc de régulation des courants avec compensation de la tension réseau

IV.2.4.2 Commande à MLI

La méthode de la MLI à porteuse triangulaire utilisée dans cette commande, basée sur la comparaison des tensions de références avec une onde triangulaire (porteuse) d'une amplitude et d'une fréquence fixes. Les signaux de commande des interrupteurs du redresseur MLI sont obtenus à partir des intersections des tensions de références avec la porteuse.

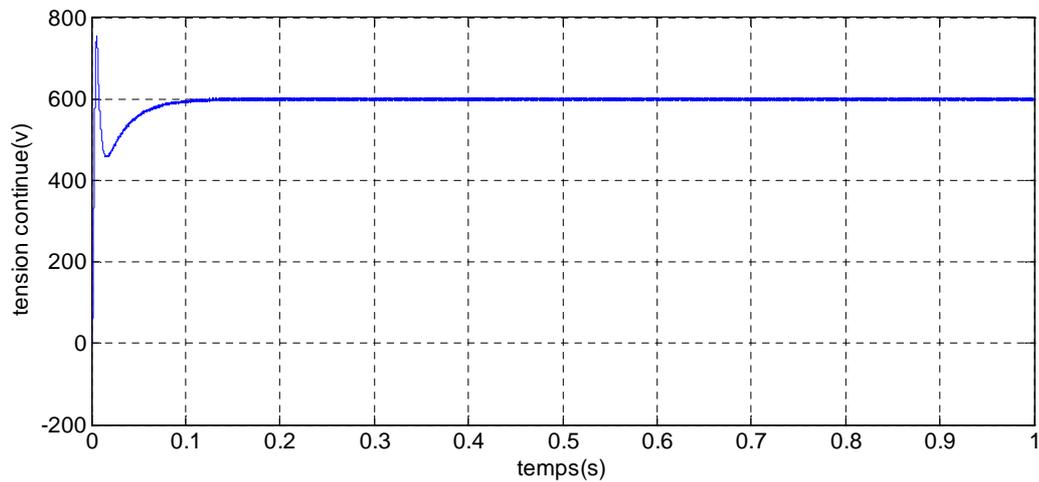
IV.2.5 Résultats de simulation

Les paramètres de simulation utilisés sont représentés dans le tableau suivant:

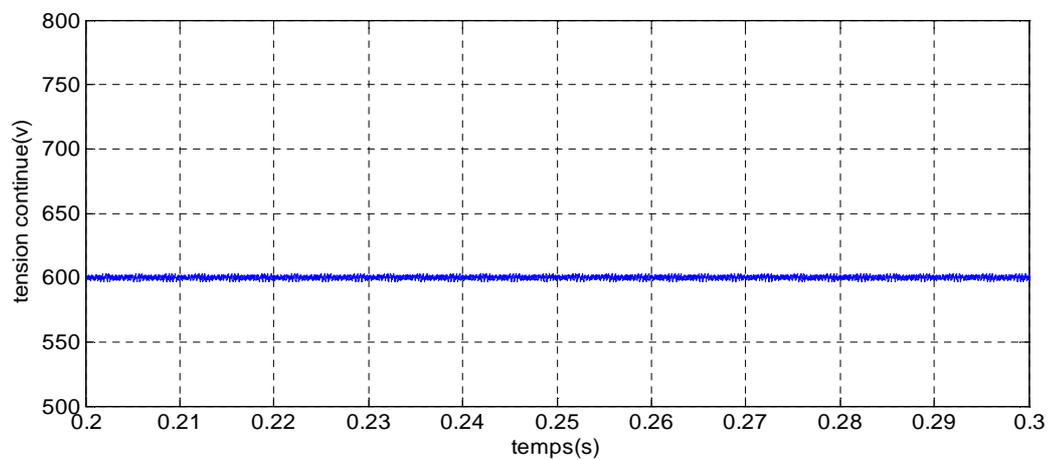
Résistance totale de la ligne	0.3Ω
Inductance totale de la ligne	0.012H
Résistance de charge	100Ω
Capacité de charge	0.0047F
Fréquence de la porteuse MLI	5000H

Tableau IV.1: Paramètres de simulation du redresseur à MLI

La figure (IV.6) montre la réponse du redresseur commandé par régulation des courants dans le repère dq tournant lors d'un changement de la référence de la tension de sortie.



Tension de bus continu



Tension de bus continue avec zoom

Figure IV .6: Tension de bus continu

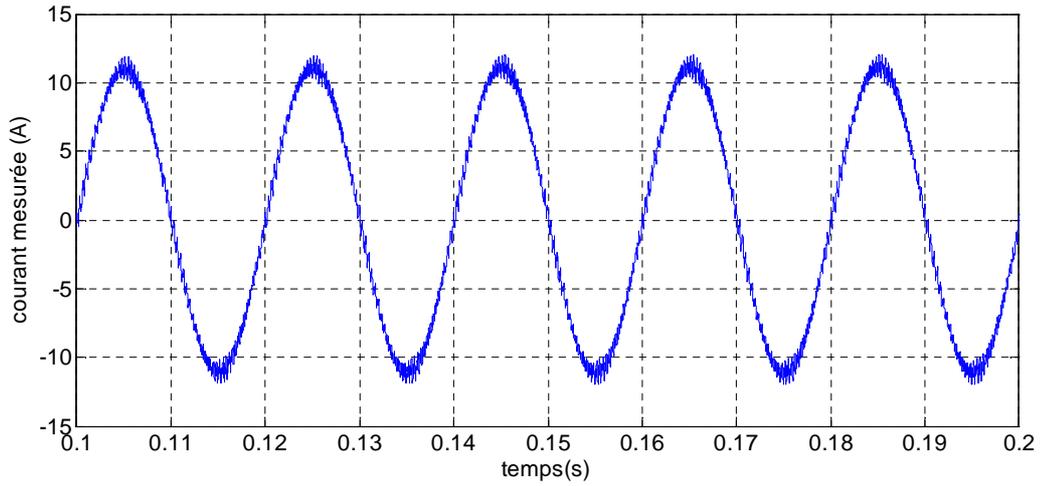


Figure IV .7: Courant de ligne

Les figures (IV.8, 9,10) représentent les puissances actives et réactives avec leurs références

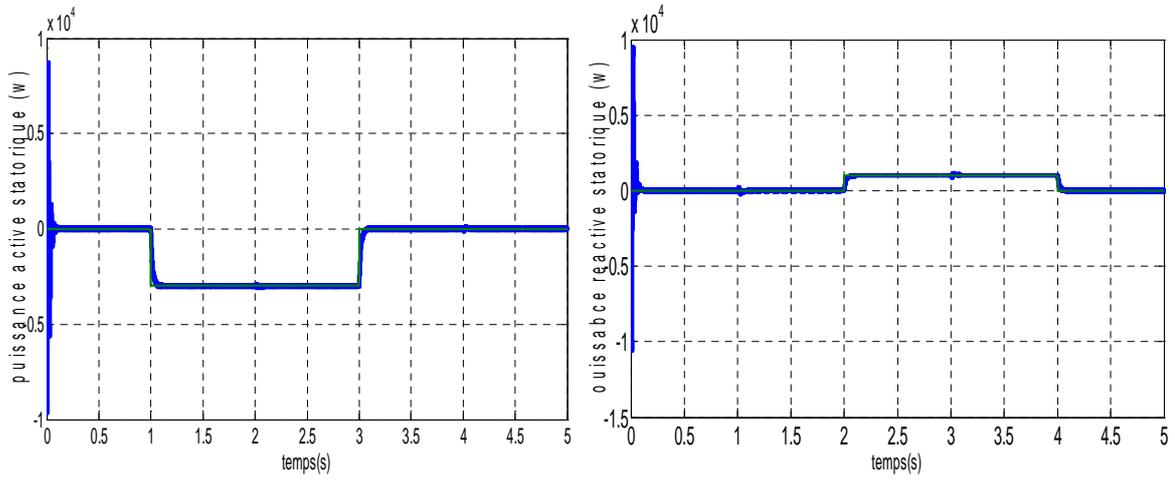


Figure IV .8: Puissances active et réactive statoriques en commande direct

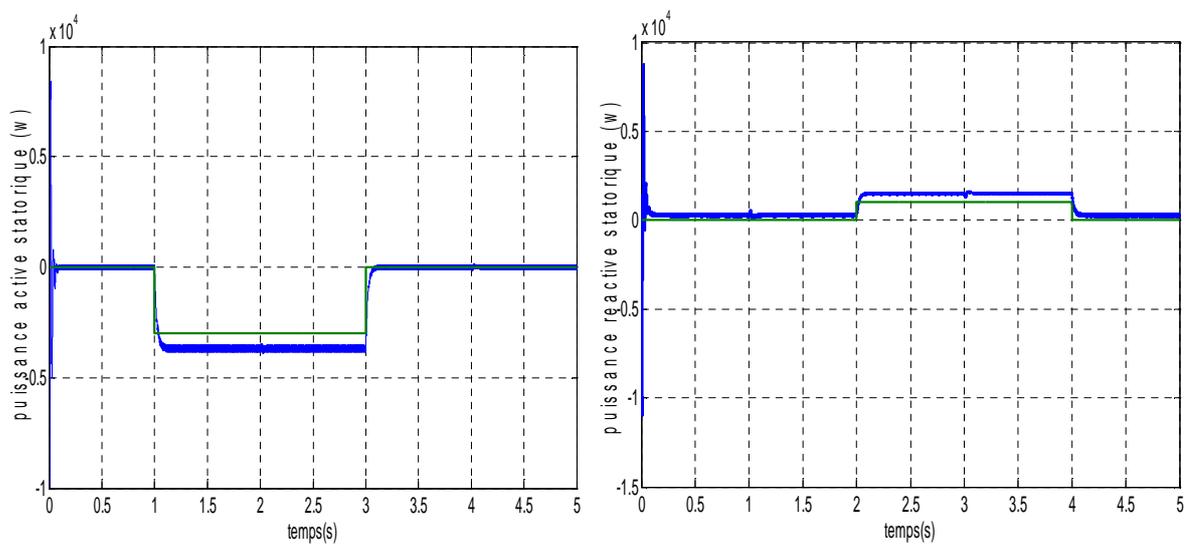


Figure IV .9: Puissances active et réactive statoriques en commande indirect sans boucle de puissance

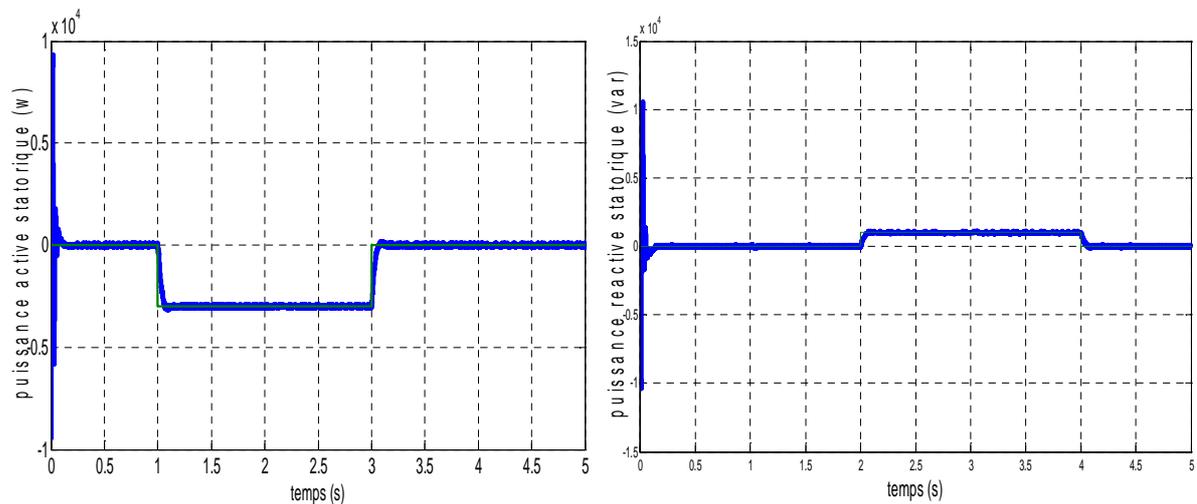


Figure IV .10: Puissances active et réactive statoriques en commande indirect avec boucle de puissance

Interprétation des résultats

Les résultats de simulation montre que toutes les grandeurs et similaires à ceux trouvés avec une alimentation continu parfaite. Un bon suivi de consigne pour les puissances actives et réactives statorique est constaté. Les courants du réseau suit parfaitement leurs références. 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 qui est 600V.

IV.3. Conclusion

On a présenté dans ce chapitre, l'étude d'une cascade basée sur deux convertisseurs MLI à deux niveaux (redresseur à deux niveaux et onduleur à deux niveaux) associés à une génératrice asynchrone à double alimentation. La modélisation et l'application du redresseur à MLI nous a permis la régulation de la tension du bus continu qui est utilisée pour alimenter l'onduleur connecté au rotor de la MADA. D'après les résultats de simulation on à constaté que cette méthode de commande nous permet de fixer la tension du bus continu d'une part, et d'autre part elle nous permettre de bien contrôler le facteur de puissance coté réseau.

Chapitre V

Asservissement d'une chaîne éolienne

V. Introduction

La turbine éolienne permet la conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique transmise à l'ordre de la génératrice. Les différents éléments constituant une éolienne sont conçus pour maximiser la conversion énergétique. L'objectif est d'avoir un bon compromis entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice. Pour satisfaire cela, l'éolienne doit comporter deux systèmes qui permettent de la contrôler mécaniquement et électriquement. On s'intéresse dans ce chapitre à la modélisation de la turbine éolienne ainsi qu'à son contrôle. Puis, à l'asservissement de toute la chaîne de conversion éolienne.

V.1 Modélisation de la turbine éolienne :

La turbine qui sera modélisée comporte trois pales de longueur R , fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse *turbine* Ω , qui entraînera une génératrice (MADA) à travers un multiplicateur de vitesse de gain G [24].

V.1.1 Modélisation de la turbine :

La figure (V.1) montre le schéma d'une turbine éolienne.

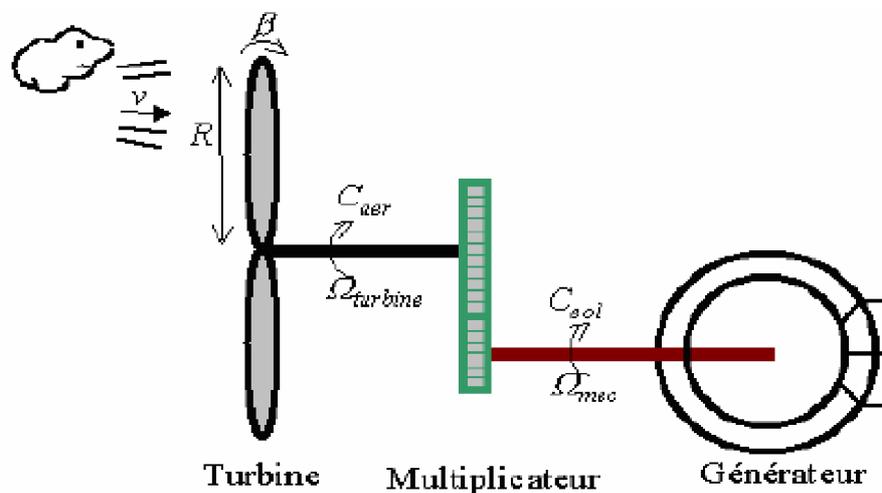


Figure (V.1): Schéma d'une turbine éolienne

La puissance du vent est définie comme suit :

$$P_v = \frac{\rho S v^3}{2} \quad (V.1)$$

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors [19]:

$$P_{aer} = C_p P_v = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho S v^3}{2} \quad (V.2)$$

Avec :

C_p : est le coefficient de performance ou coefficient de puissance.

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.44 - 0.0167\beta) \sin\left(\frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0.3\beta}\right) - 0.00184(\lambda - 3)\beta \quad (V.3)$$

β : est l'angle d'orientation des pales.

λ : est le rapport de vitesse défini par :

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} R}{V_{vent}} \quad (V.4)$$

$\Omega_{turbine}$: vitesse de la turbine.

Le couple aérodynamique est donné par :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \frac{\rho S V^3}{2} \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (V.5)$$

V.1.2 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur est modélisé mathématiquement comme suit :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (V.6)$$

Avec :

C_g : Couple issu du multiplicateur.

C_{aer} : Couple aérodynamique.

G : gain du multiplicateur.

Pour la vitesse, on aura :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (V.7)$$

V.1.3 Equation dynamique de l'arbre

La modélisation de la transmission mécanique se résume donc comme suit :

$$J_t \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \sum \text{des couples} = C_{mec} \tag{V.8}$$

J_t : C'est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice

C_{mec} : C'est le couple mécanique, ce dernier prend en compte :

- Le couple électromagnétique produit par la génératrice C_{em} ;
- Le couple de frottement visqueux C_{vis} ;

Et le couple issu du multiplicateur C_g .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \tag{V.9}$$

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

$$C_{vis} = f\Omega_{mec} \tag{V.10}$$

V.1.4 Schéma bloc du modèle de la turbine

La figure (V.2) montre le schéma bloc du modèle de la turbine [16].

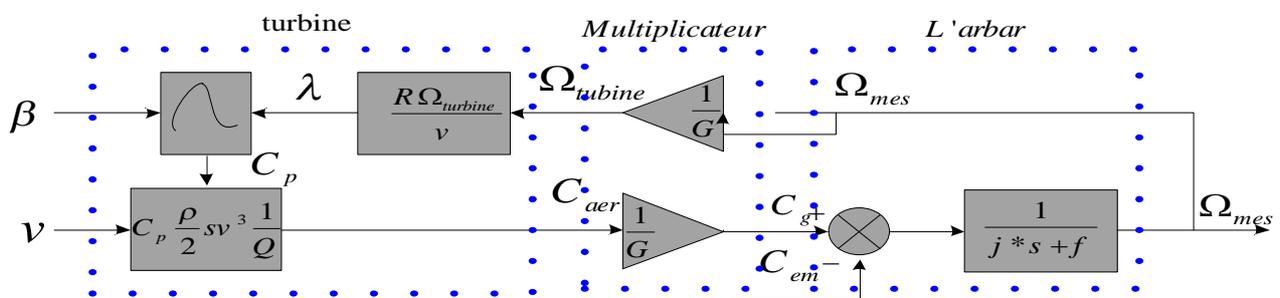


Figure V.2 : Schéma bloc du modèle de la turbine

La turbine génère le couple aérodynamique (équation (V.5)) qui est appliquée au multiplicateur.

Les entrées de la turbine sont :

v : La vitesse du vent.

β : L'angle d'orientation des pales.

$\Omega_{turbine}$: La vitesse de rotation de la turbine.

Le multiplicateur transforme la vitesse mécanique et le couple aérodynamique respectivement en vitesse de la turbine et en couple de multiplicateur équation (V.6),(V.7).

Le modèle de l'arbre d'écrit la dynamique de la vitesse mécanique il a donc deux entrées :

- Le couple du multiplicateur
- Le couple électromagnétique fourni par la génératrice.

La vitesse de la turbine peut être contrôlée par action sur deux entrées :

- L'angle de la pale
- Le couple électromagnétique de la génératrice

La vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système.

V.2 Les différentes zones de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable

Il y a quatre zones de fonctionnement pour une éolienne figure (V.3) :

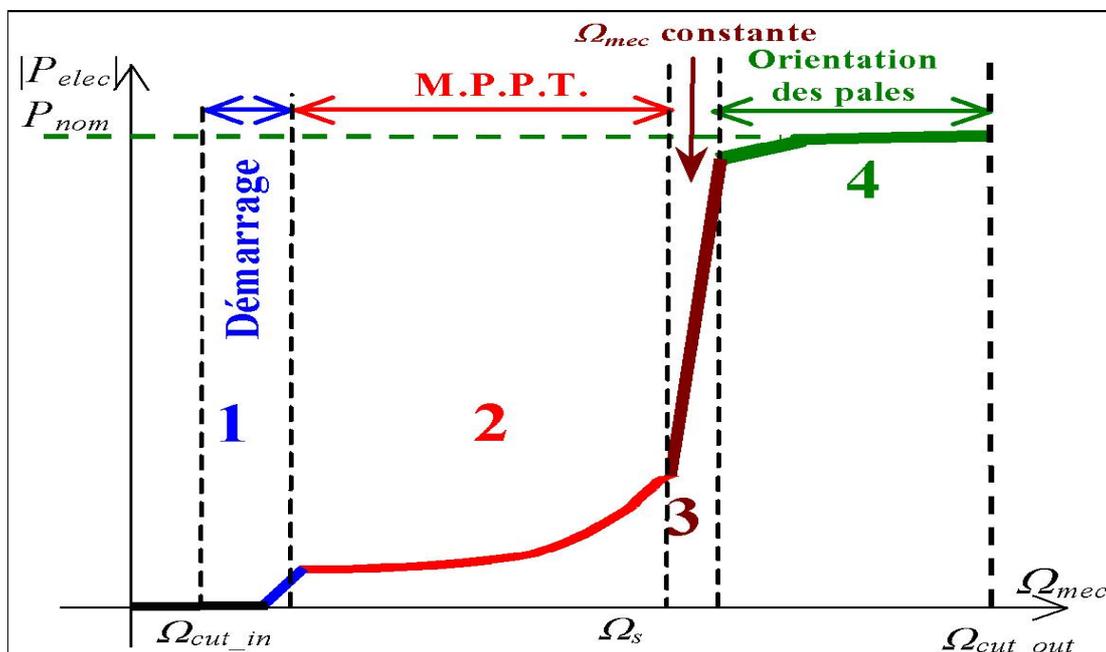


Figure V.3 : Caractéristique puissance vitesse d'une éolienne de grande puissance

Zone1 : C'est la zone de démarrage de la machine, elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieure à une certaine vitesse Ω dé. (C'est la vitesse mécanique de la génératrice pour la quelle éolienne a démarré).

Zone2 : Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale MPPT (Maximum Power Point Tracking). Pour extraire le maximum de puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale afin d'obtenir un C_p maximal (Coefficient de puissance). Dans cette zone, la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale, la puissance électrique augmente rapidement.

Zone3 : Dans cette zone l'éolienne fonctionne à vitesse constante, et la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale P_{nom} .

Zone4 : Arrivée à la puissance nominale P_{nom} , une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales.

Par sécurité, si la vitesse du vent devient trop importante et risque d'endommager l'éolienne, l'angle de calage des pales se fixe à 90° . C'est la mise en drapeau qui met fin au fonctionnement de l'éolienne jusqu'à ce que la vitesse du vent devienne moins importante.

En pratique le passage de la zone 2 à la zone 4 est un peu particulier. En effet la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique C_{em} en zone 2 et, en zone 4 c'est la puissance qui doit être contrôlée par le dispositif d'orientation des pales.

Dans ce qui suit nous sommes intéressés à la zone 2 où la maximisation de l'énergie électrique extraite (MPPT), cette opération est réalisée par le contrôle du couple électromagnétique générer.

V.3 Maximisation de la puissance extraite :

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

$$J_t \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (V.11)$$

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

$$C_g = C_{em} \quad (V.12)$$

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

$$C_{aer} = C_p \frac{\rho S}{2} \frac{1}{\Omega_{turbine-estimée}} v_{estimée}^3 \quad (V.13)$$

Avec :

$$v_{estimée} = \frac{\Omega_{turbine-estimée} R}{\lambda} \quad (V.14)$$

On fixe le rapport de vitesse à la valeur $\lambda_{cp_{max}}$, qui correspond au maximum du coefficient de puissance $C_{p_{max}}$ et, en regroupant les équations précédentes, on aura l'expression du couple de référence qui est proportionnel au carré de la vitesse de la génératrice.

$$C_{em-ref} = \frac{C_p}{\lambda_{cp_{max}}^3} \frac{\rho \pi R^5}{2G^3} \Omega_{mec}^2 \quad (V.15)$$

La figure (VI.4) représente le schéma bloc de maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.

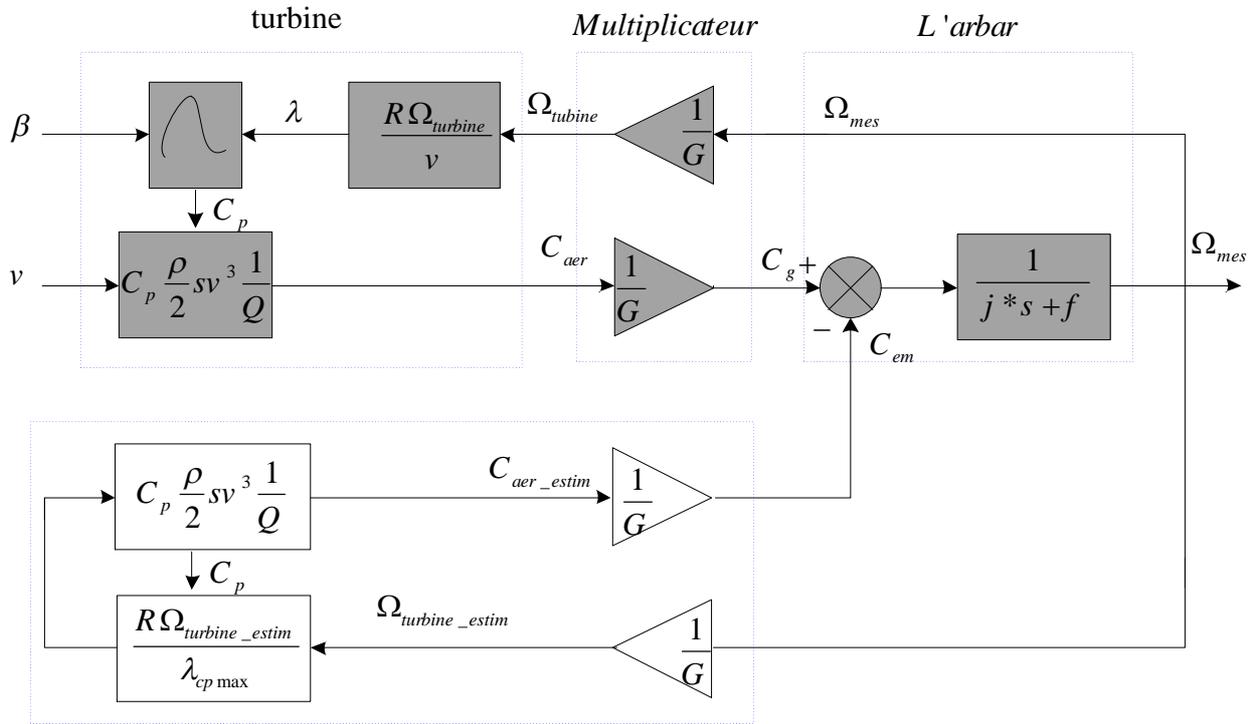


Figure V.4: Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse

La structure globale du système constituée d'une MADA entraînée par une turbine éolienne et présente sur la figure (V.5) :

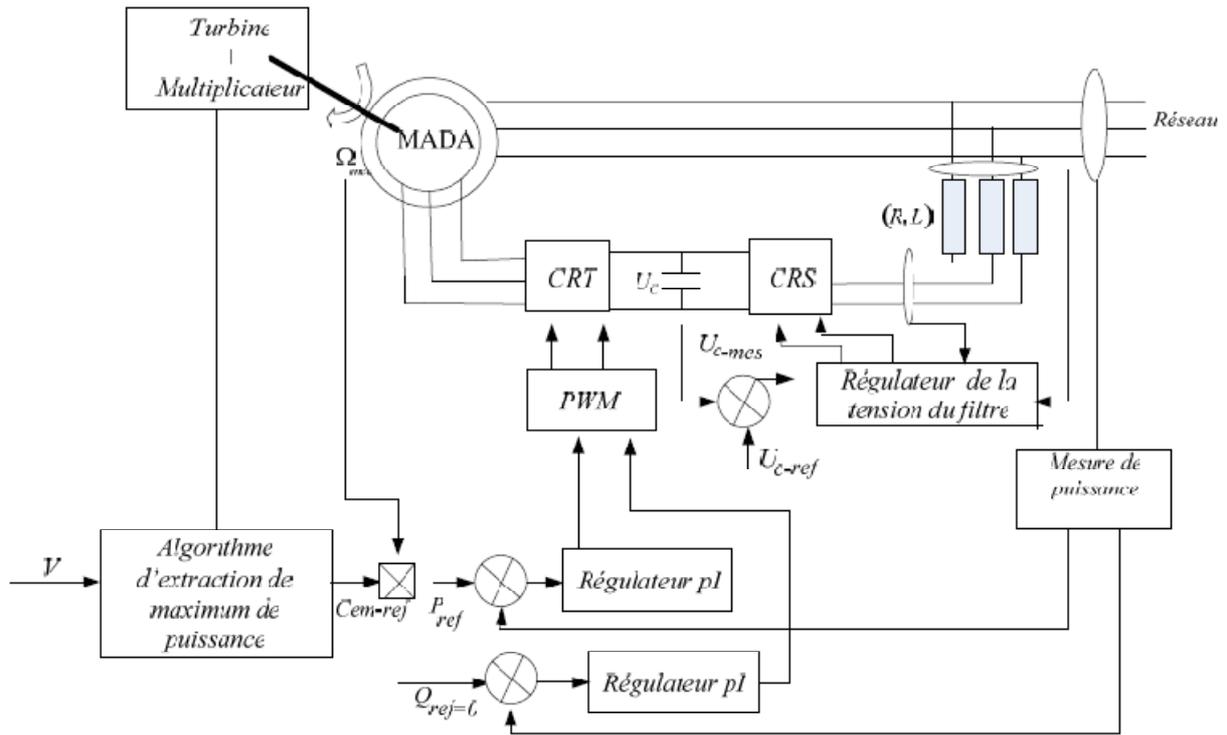


Figure V.5: Schéma structurel du système éolien global

La figure (V.6) présente le profil du vent qui sera appliqué pour la turbine éolienne ainsi que l'allure de la vitesse du rotor figure (V.7). On suppose qu'à $t=0,03s$, la vitesse du vent atteint une valeur seuil $4m/s$ pour laquelle la MADA commence à produire de l'énergie. A partir de $t=0, 5s$, la vitesse du vent aura une valeur moyenne de $12m/s$.

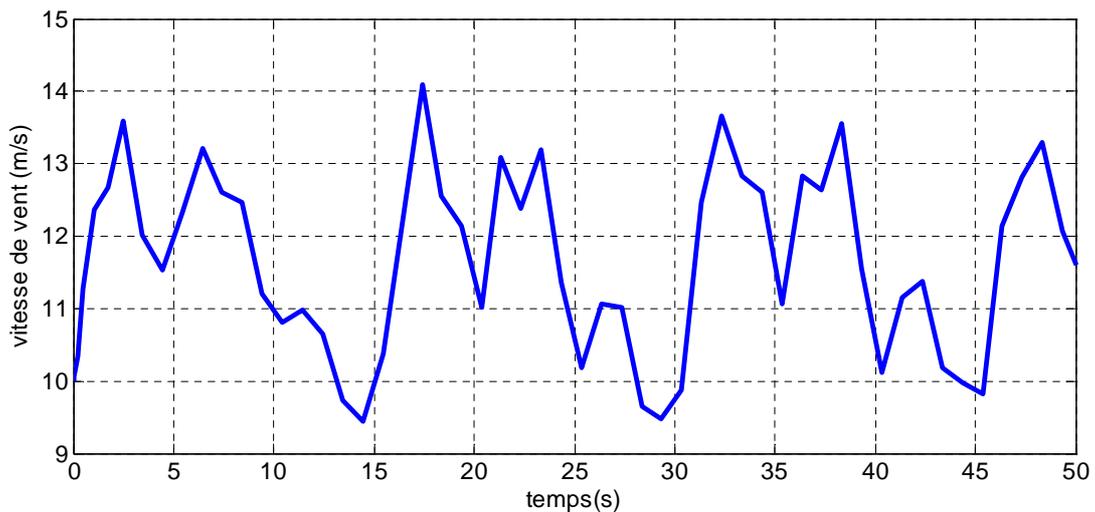


Figure V.6: Vitesse de vent (m/s)

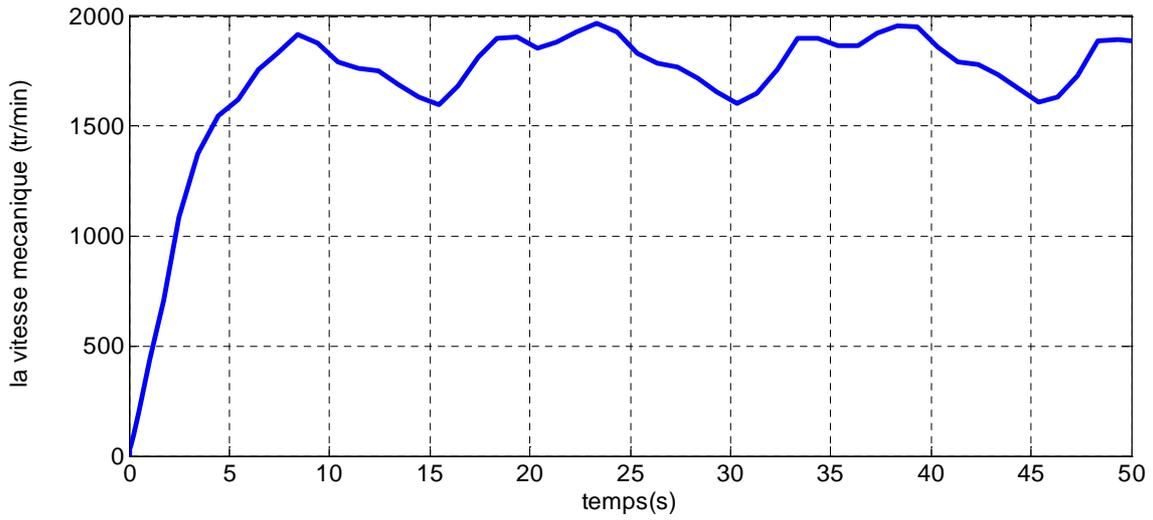


Figure V.7: La vitesse mécanique

La figure (VI.8) montre le coefficient de puissance obtenu par le profil du vent.

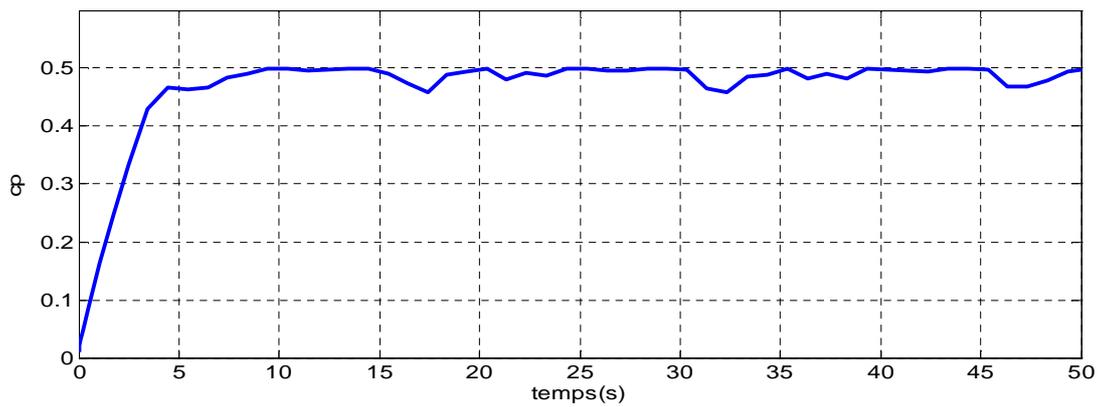


Figure V.8: La coefficient de puissance

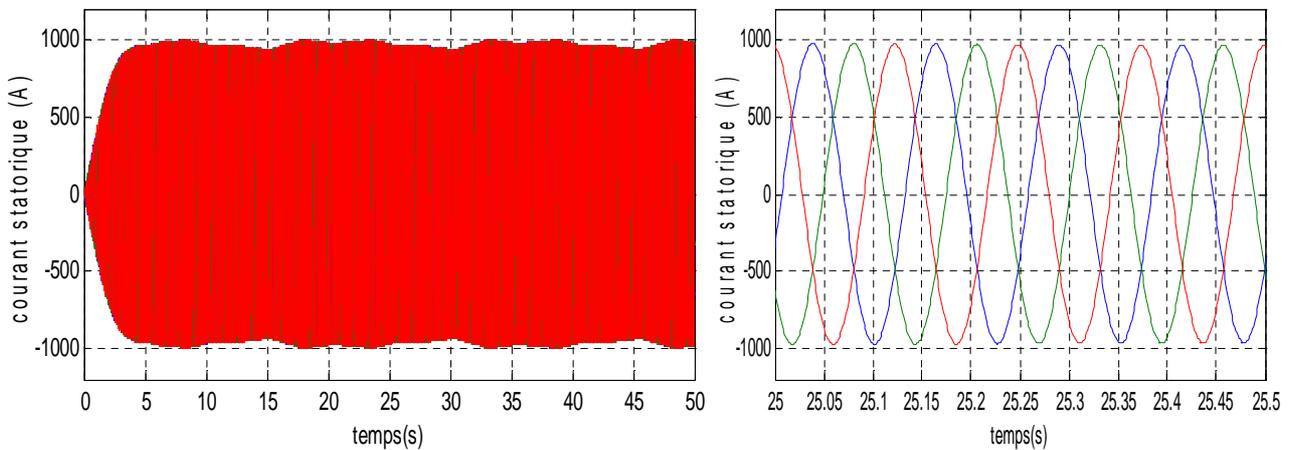


Figure V.9: courant statorique avec zoom

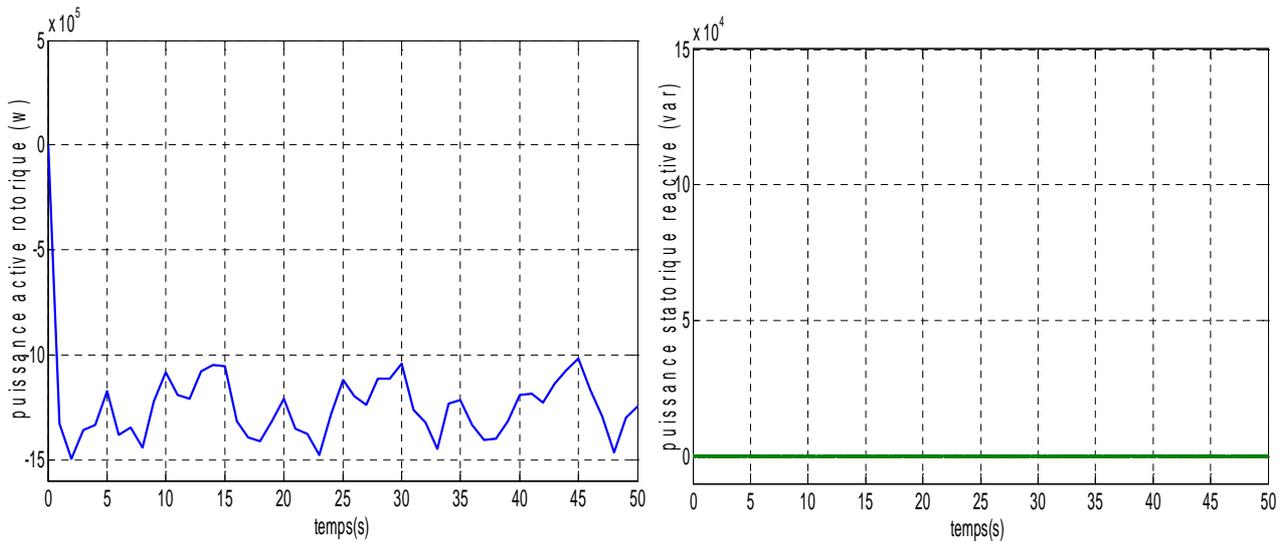


Figure V.10 : La puissance active et réactive statorique

Les résultats de simulation montrent que la variation de la puissance électrique figure (V.10) est adaptée à la variation de la vitesse de la génératrice figure (V.7), et cette dernière est adaptée à la variation de la vitesse du vent. Ceci montre l'influence de la variation de la vitesse mécanique en fonction de la vitesse du vent sur la puissance électrique produite.

On constate aussi sur les résultats de simulation une bonne suivi de consigne pour puissance active ainsi que la puissance réactive statorique qui est maintenue nulle par les puissances réelles débitées par la MADA. La fréquence rotorique dépend de la vitesse de rotation de l'éolienne.

V.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons d'écrit en premier lieu les différents éléments d'une éolienne utilisant un multiplicateur, ainsi que son principe de fonctionnement. Nous avons modélisé la turbine, par la suite nous l'avons associée à un système de conversion d'énergie constitué d'une machine asynchrone à double alimentation. Après avoir présenté les différentes zones de fonctionnement d'une éolienne, nous avons détaillé la zone particulière, où la maximisation de l'énergie extraite du vent est effectuée.

Chapitre VI

Impact d'éolien sur le réseau de distribution MT

VI. Introduction

Les éoliennes sont regroupées en ferme. Les éoliennes à vitesse variable et celles basées sur une machine asynchrone à double alimentation sont reliées au réseau au moyen d'une liaison à courant alternatif. Les éoliennes basées sur une machine synchrone peuvent être reliées de la même façon (Figure (VI.1)) ; la présence d'un bus continu dimensionné pour la tension nominale de la génératrice permet également d'envisager une connexion des éoliennes entre elles via une liaison à courant continu (Figure (VI.2)). Cette architecture, imaginée pour les fermes éoliennes off-shore interfacées avec le réseau via un seul convertisseur continu - alternatif, permet d'envisager, par exemple, une meilleure participation de la ferme éolienne au réglage de la tension au point de connexion [31].

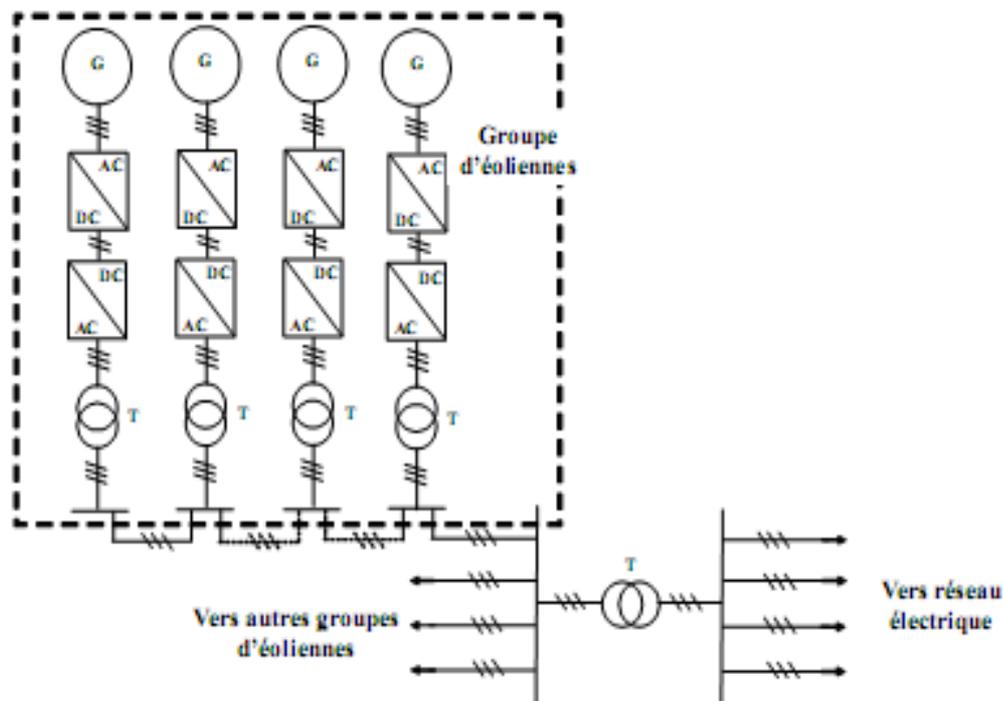


Figure VI.1: Exemple d'architecture d'une ferme d'éoliennes à vitesse variable avec des liaisons en tensions alternatives.

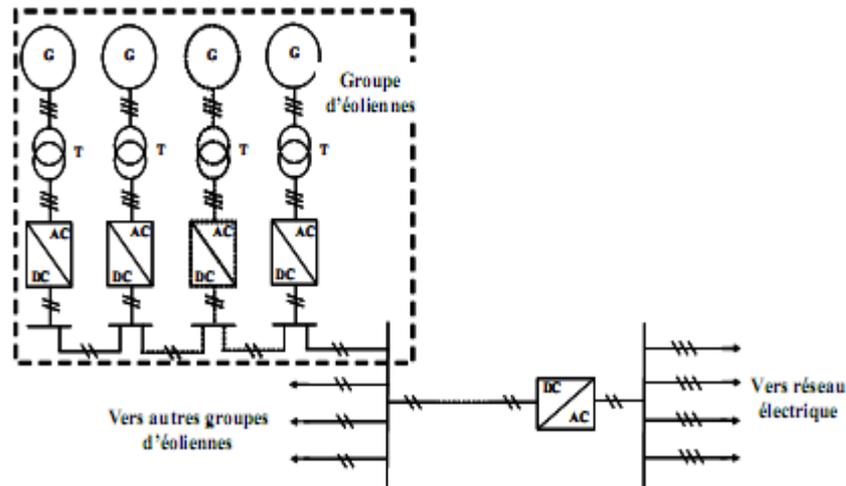


Figure VI.2 : Exemple d'architecture d'une ferme d'éoliennes à vitesse variable avec des liaisons en tensions continues.

Du fait que les éoliennes dans une ferme sont positionnées sur un certain espace (par exemple la distance entre deux éoliennes de 300 kW, placées l'une derrière l'autre, doit être au moins de 168 m), ces éoliennes sont soumises à des vents ayant des vitesses sensiblement différentes. Ce foisonnement induit que la puissance générée sur le réseau par la ferme apparaît plus lissée que celle générée par une seule éolienne. A partir de l'enregistrement réalisé pour une éolienne de 300 kW (présenté à la Figure VI.3), les puissances générées par des groupes de 3 et 10 éoliennes ont été reconstituées et sont présentées respectivement aux Figure (VI.4) et Figure (VI.5) La comparaison des figures (VI.4) et Figure (VI.5) montre un lissage significatif de la puissance générée (au moins en valeur relative) lorsque le nombre d'éolienne de la ferme augmente[32].

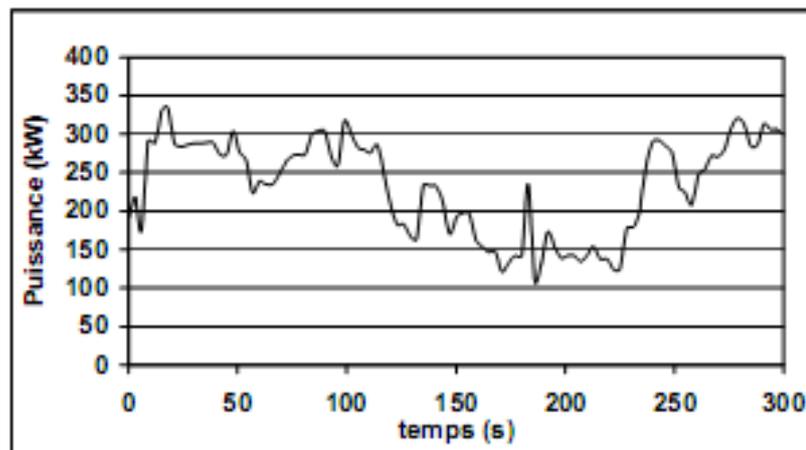


Figure VI.3 Exemple de puissance générée par une éolienne à vitesse fixe de 300kW.

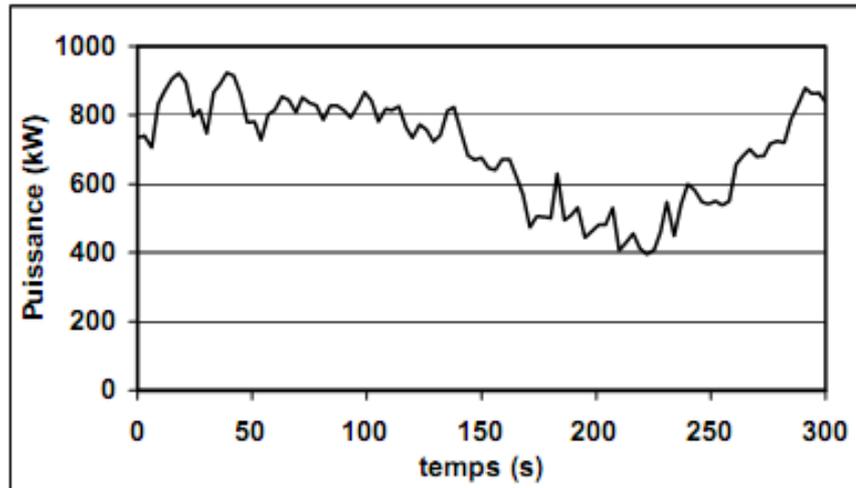


Figure VI.4 : Puissance totale générée par une ferme de trois éoliennes de 300 kW.

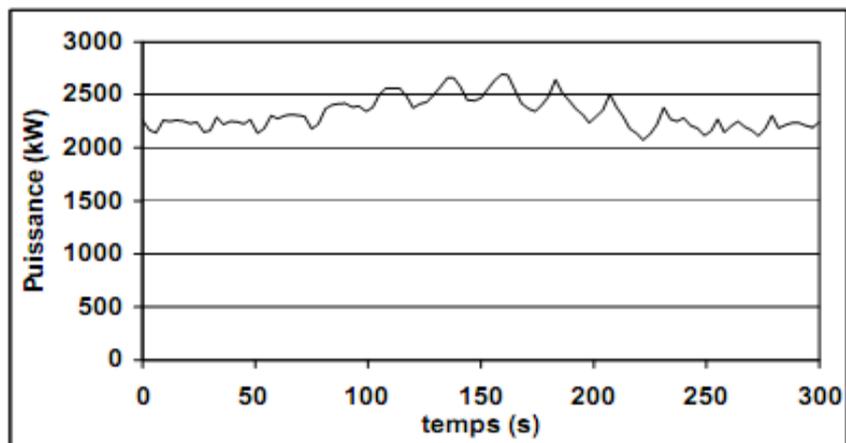


Figure VI.5 : Puissance totale générée par une ferme de dix éoliennes de 300 kW.

VI.1 Raccordement au réseau de distribution

Une fois l'énergie électrique produite par l'éolienne, il s'agit en suite de la transmettre au réseau de distribution. Typiquement, pour les machines d'une puissance supérieure à 100 kW, la tension en sortie de l'éolienne est de l'ordre de quelques centaines de volts. Il est donc souvent nécessaire de disposer sur le site de production d'un transformateur élévateur de tension qui permet de se raccorder à un réseau de distribution (10000V ou 15000V).

Cependant, le raccordement au réseau doit prendre en Compte certaines particularités de l'éolienne .Il s'agit notamment de toutes les phases transitoires du fonctionnement (démarrage arrête, absorption des rafales) qui du fait de la nature fluctuante du vent, peuvent occasionner des variations de puissance.

Il existe des conditions de raccordement et des réglementations à prendre en considération. Il s'agit notamment de l'arrêté de 17 mars 2003 (4 juillet 2003) relatif aux prescriptions techniques de conception et de fonctionnement pour le raccordement d'une installation de production d'énergie électrique à un réseau public de distribution.

VI.1.1 Tension de raccordement

Les modalités de raccordement au réseau électrique des installations de production, et notamment les contraintes techniques, sont définies par des textes réglementaires tels que décrets et arrêtés. Les contraintes techniques dépendent principalement de la puissance à raccorder qui définit le réseau de connexion. Le tableau 1 donne les niveaux de tension de raccordement des installations en fonction de leur puissance [32].

Type de réseau	Plage de tension	Niveaux de tension	puissance
BT	BT monophasé	230V	$S \leq 18 \text{KVA}$
BT	BT triphasé	400V	$S \leq 250 \text{KVA}$
MT	$1 \text{Kv} < U \leq 50 \text{KV}$	15KV, 20KV	$P \leq 12 \text{MW}$
HT(HTB1)	$50 \text{Kv} < U \leq 130 \text{KV}$	63KV, 90KV	$P \leq 50 \text{MW}$
HT(HTB2)	$130 \text{Kv} < U \leq 350 \text{KV}$	150KV, 225KV	$P \leq 250 \text{MW}$
HT(HTB3)	$350 \text{Kv} < U \leq 500 \text{KV}$	400KV	$P > 250 \text{MW}$

Tableau VI. 1 : Niveaux de tension de raccordement des installations en fonction de leur puissance.

Les installations de production relèvent donc :

- du réseau public de transport si la puissance installée est supérieure à 12 MW, le raccordement s'effectue alors à un niveau de tension supérieur ou égal à 63 kV (domaine de la HT) ;
- du réseau public de distribution si la puissance installée est inférieure ou égale à 12 MW, le raccordement s'effectue alors à un niveau de tension inférieur ou égal à 20 kV [34].

VI.2 Contraintes de raccordement de l'éolien au réseau de distribution

On présente quelques considérations générales sur ces contraintes de raccordement :

- a) En fonction de leur type, de leur puissance et de leur tension de raccordement, les installations de production doivent être conçues pour pouvoir contribuer, pour des durées

limitées, au soutien du système électrique lorsqu'il est en régime exceptionnel ou en situation de défaut d'isolement.

b) En fonction de leur type, de leur puissance et de leur tension de raccordement, les installations de production doivent avoir des capacités constructives de fourniture de services auxiliaires nécessaires pour que le fonctionnement du système électrique soit sûr. Ces services comprennent :

- . Les réglages primaire et secondaire de la tension ;
- . Les réglages primaire et secondaire de la fréquence ;
- . Le fonctionnement en réseau séparé ;
- . Le renvoi de tension et la participation à la reconstitution du réseau.

c) les installations de production doivent être équipées d'un dispositif qui permet de les coupler au réseau public de transport. Les installations doivent en outre être conçues pour que la stabilité de leur fonctionnement soit assurée compte tenu des caractéristiques de leur raccordement au réseau et doivent être équipées des régulations de tension et de fréquence (c'est-à-dire de la vitesse pour les groupes tournants) qui sont nécessaires pour atteindre cet objectif. Des pertes de stabilité ne doivent pas être à l'origine d'une dégradation de la qualité de l'électricité sur le réseau public de transport ou de la perturbation des conditions de son exploitation.

d) Les installations de production doivent être capables de recevoir et d'exécuter, dans les délais appropriés précisés dans la convention d'exploitation, les ordres de conduite et de sauvegarde en provenance du gestionnaire du réseau de transport.

Les contraintes de raccordement en fonction du type d'installation. Sans prétendre être exhaustifs, nous allons évoquer quelques unes de ces contraintes dans la suite de cette section et dans la section suivante.

VI.2.1 Réglage de la tension

Toutes les unités de production, y compris les éoliennes, doivent pouvoir fonctionner dans un domaine de fonctionnement déterminé par un graphique avec en ordonnée la tension (U) et en abscisse le rapport entre la puissance réactive et la puissance active maximale (Q/P_{max}). Un exemple de domaine de fonctionnement dénommé trapèze [U,Q] est représenté à la Figure (VI.6) .

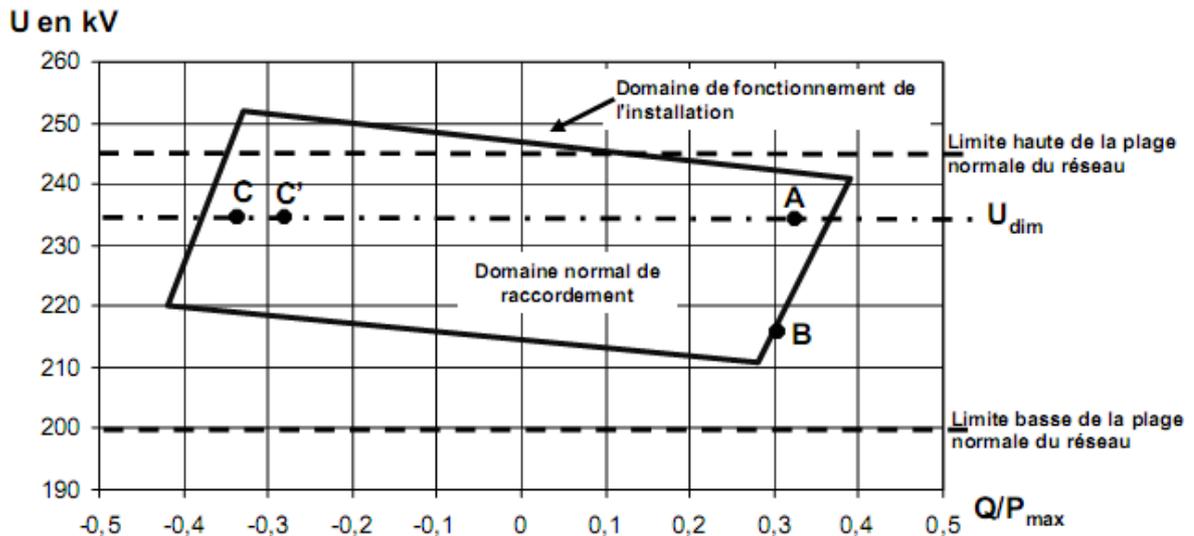


Figure VI.6 : Exemple de domaine normal de fonctionnement d'une installation de production.

Les unités de production doivent assurer un contrôle de la tension et/ou de la puissance réactive au point de livraison.

Trois types de réglage primaire sont possibles :

- Type 1 : réglage à puissance réactive constante ;
- Type 2 : réglage de la tension à une valeur variant linéairement en fonction de la puissance réactive avec une pente ajustable ;
- Type 3 : réglage de la tension selon une consigne asservie aux ordres provenant du réglage secondaire de la tension.

VI.2.2 Réglage de la fréquence

La participation au réglage de la fréquence n'est pas exigée pour des installations de production mettant en œuvre de l'énergie fatale telles que les fermes éoliennes. Il est néanmoins intéressant de noter les contraintes imposées aux autres installations :

- Les installations d'une puissance supérieure ou égale à 40MW doivent participer au réglage primaire de fréquence ;
- Les installations d'une puissance supérieure ou égale à 120MW doivent participer au réglage secondaire de fréquence. Le fait de ne pas participer au réglage de fréquence limitera à terme le taux de pénétration de l'éolien, car ce réglage est reporté sur les groupes traditionnels. En cas de forte pénétration de l'éolien, les exigences en terme de participation au réglage de fréquence de l'éolien pourraient donc évoluer. Le problème étant évidemment l'existence d'une réserve primaire associée à l'éolien.

Il en est de même pour le fonctionnement en réseau séparé et pour la participation à la reconstitution du réseau qui ne sont actuellement pas exigées pour les fermes éoliennes [31].

VI.2.3 Couplage et perturbations

Le couplage de l'installation au réseau doit respecter des contraintes sur la fréquence, l'amplitude et la phase de la tension et ne doit pas affecter la stabilité du réseau [36].

Les perturbations produites par l'installation au point de raccordement doivent être limitées en ce qui concerne les à-coups de tension, le flicker, les déséquilibres et les harmoniques.

Un système de communication entre le producteur et le gestionnaire du réseau est à prévoir.

VI.3 Problèmes induits par l'intégration de l'éolien dans le réseau de transport

Afin d'assurer la sécurité du réseau, le gestionnaire de ce réseau doit veiller à éviter la surcharge thermique des lignes et la rupture de synchronisme, assurer la stabilité de la fréquence (c'est-à-dire assurer l'équilibre production - consommation) et la stabilité de la tension.

VI.3.1 Prévision de la production

Le problème majeur de l'éolien est l'incertitude sur les prévisions de la vitesse du vent sur les sites éoliens induisant une incertitude sur la production des fermes éoliennes. On trouve des exemples de mauvaises prévisions, Concernant le Danemark, sont illustrés. Les erreurs de prévisions à 24 h peuvent atteindre des valeurs de plus de 50% en négatif (sous-production) ou en positif (sur-production) avec des changements de signe rapides en cours de journée. Des capacités de production de réserves contrôlables sont alors nécessaires pour pallier ces incertitudes, en particulier pour satisfaire la demande en période de pointe. L'opérateur ELTRA, gérant le réseau à l'ouest du Danemark intégrant une forte capacité éolienne (2400 MW en 2003), a connu des situations critiques dues à une sur-production éolienne dont l'évacuation vers le réseau nordique (Nordel) ou vers le réseau UCTE (via l'Allemagne) posait problème du fait que les lignes d'interconnexion étaient déjà aux limites de leur capacité.

La prévision est globalement bonne en ce qui concerne l'amplitude mais présente une incertitude sur le moment où ce niveau de production sera atteint [35].

VI.3.2 Capacité d'accueil du réseau

La capacité des lignes et des postes est limitée. Cette limitation peut constituer dans le cas de l'éolien un problème aigu, car les lieux de production (sites ventés) sont souvent éloignés des lieux de consommation. L'adaptation et le renforcement des postes peuvent concerner les postes MT/HT suite au développement de l'éolien dans le réseau de distribution (modification des protections, augmentation de la puissance de court-circuit,...).

Afin d'éviter la congestion des lignes de transport et d'assurer la sécurité du réseau, de nouvelles lignes devraient être construites en particulier aux interconnexions entre les réseaux gérés par des opérateurs différents.

VI.3.3 Déconnexions intempestives

Les générateurs éoliens, tout comme la majorité des générateurs décentralisés, sont très sensibles aux perturbations du réseau et ont tendance à se déconnecter rapidement lors d'un creux de tension (dès que la valeur de la tension est inférieure à 80% de la tension nominale) ou lors d'une variation de la fréquence.

VI.3.4 Qualité de l'électricité

VI.3.4.1 La tension

Pour le cas très simple d'une charge alimentée à travers une ligne par une source de tension constante (Figure VI.7), on peut écrire de façon approchée que la chute de tension dans la ligne

($\Delta V = V_1 - V_2$) est égale à

$$\Delta V = \frac{rP + xQ}{V_2} \quad (VI.1)$$

avec r la résistance des conducteurs en Ω , x la réactance de la ligne en Ω , P et Q respectivement les puissances active et réactive transitant dans la ligne.

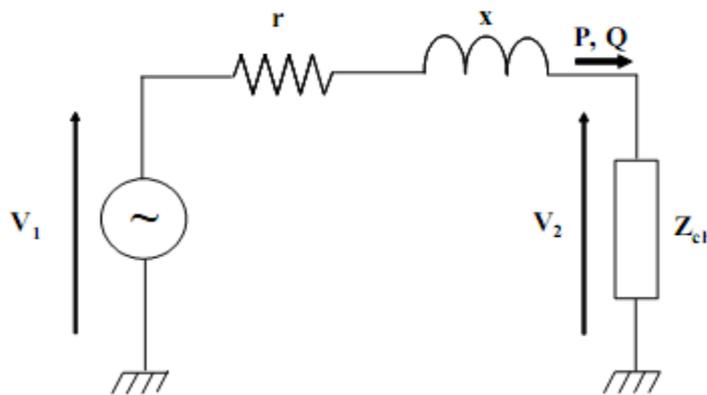


Figure VI.7 : Schéma équivalent simplifié d'une ligne.

Pour les lignes de Très Haute tension (THT), $x \geq 10r$;

L'expression (1) peut donc se simplifier :

$$\Delta V = \frac{xQ}{V_2} \quad (VI.2)$$

La puissance active générée par les éoliennes est par nature fluctuante, ce qui tend d'après l'expression (1) à induire des fluctuations de tension dans la zone du réseau proche du point

de connexion de ces éoliennes. Dans le réseau de transport constitué de ligne HT et THT, l'expression (2) montre que les variations de tension sont essentiellement induites par les transits de puissance réactive, contrairement aux réseaux de distribution. C'est pourquoi, il est demandé aux éoliennes actuellement connectées au réseau de transport de participer au réglage de la tension via un réglage de la puissance réactive. Ce réglage est possible avec les éoliennes connectées au réseau via de l'électronique de puissance, mais pas avec les éoliennes à vitesse fixe dont la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau.

Cette dernière consommant une puissance réactive significative, nécessite l'ajout de condensateurs de compensation.

Les variations régulières de tension sont appelées flicker. Dans le cas des éoliennes, ces variations sont dues aux fluctuations de la vitesse du vent, aux limites mécaniques de l'éolienne (par exemple du pitch control) et à l'effet d'ombre causé par le passage des pales devant le mât. A nouveau, ce sont les éoliennes à vitesse fixe qui sont les plus défavorables du point de vue de ces phénomènes. La technologie d'éolienne la mieux adaptée pour limiter l'impact sur le réseau de ces variations est celle complètement interfacée avec le réseau via de l'électronique de puissance permettant ainsi un certain découplage entre la turbine et le réseau. Les éoliennes, interfacées au réseau via des convertisseurs d'électronique de puissance, génèrent cependant des harmoniques. Les convertisseurs totalement commandés équipés de transistors IGBT, actuellement les plus utilisés, génèrent des harmoniques hautes fréquences (plusieurs kHz), mais ces harmoniques peuvent être assez aisément limités contrairement aux convertisseurs partiellement commandés, équipés de thyristors, générant des harmoniques de basse fréquence nécessitant des filtres conséquents pour les éliminer.

VI.3.4.2 La fréquence

Le réglage primaire de la fréquence est basé sur le constat qu'un déséquilibre entre la production et la consommation induit une variation de fréquence due à la variation de vitesse des groupes alternateurs classiques. Le réglage primaire de fréquence est réalisé automatiquement au niveau des groupes de production. Il assure une correction rapide, en quelques secondes, et décentralisée des écarts offre-demande. Ce réglage suit une relation linéaire entre la fréquence (imposée par la vitesse des groupes tournants) et la puissance, (la Figure VI.8) [27].

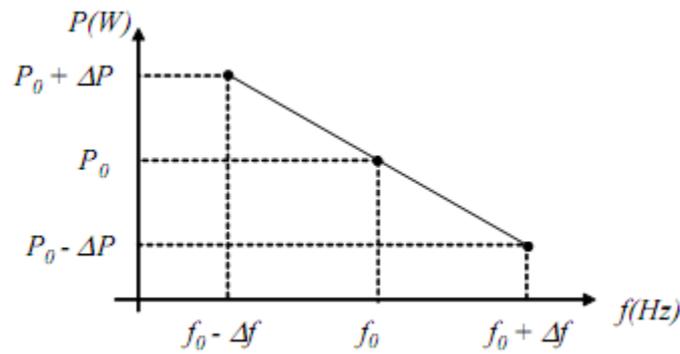


Figure VI.8 : Réglage primaire de fréquence.

P_0 est la puissance de consigne à la fréquence de référence f_0 , et ΔP la variation de puissance induite par la variation de fréquence Δf . L'adaptation rapide de la production à la consommation faite par le réglage primaire laisse, en fin d'action, un écart de fréquence. De plus, comme la fréquence est commune aux réseaux, le rôle du réglage secondaire est alors, en quelques minutes, de ramener la fréquence à sa valeur nominale et de ramener les échanges entre partenaires à leurs valeurs contractuelles. C'est l'expression du principe de « responsabilité » : la correction de l'aléa étant du ressort du réseau qui en a été le siège.

Les variations rapides de la puissance générée par les éoliennes (pouvant atteindre quelques centaines de kW en quelques dizaines de seconde), tout comme les variations de charge, peuvent donc induire des fluctuations de la fréquence du réseau et activer le réglage primaire des groupes tournants.

Cependant, tant que le taux de pénétration de l'éolien reste faible, cette influence peut être considérée comme négligeable.

Dans le cas contraire, afin d'assurer la stabilité du réseau, une participation au réglage primaire des éoliennes sera à envisager avec des solutions qui restent à imaginer. Déjà actuellement, lorsque la production est supérieure à la consommation, donc lorsque la fréquence est supérieure à 50Hz, il peut être demandé aux éoliennes de réduire leur production.

VI.4 Les principaux types de défauts dans les réseaux électriques

Un " défaut " est, physiquement, un court-circuit se produisant quelque part dans le réseau, un creux de tension étant la répercussion de ce défaut sur la tension. Un creux de tension est une diminution brusque de la tension de fourniture V à une valeur inférieure à une valeur de seuil. L'amplitude du creux de tension est conditionnée par la structure du réseau, notamment la puissance de court-circuit et la distance entre le point de défaut et le point où est situé l'utilisateur sur le réseau. Ainsi, plus la puissance de court-circuit en amont de l'utilisateur est élevée ou plus le défaut est éloigné du point de raccordement de l'utilisateur,

moins l'amplitude du creux de tension ressentie est importante, ou plus la profondeur est faible (Figure VI.9) [5], [37], [33].

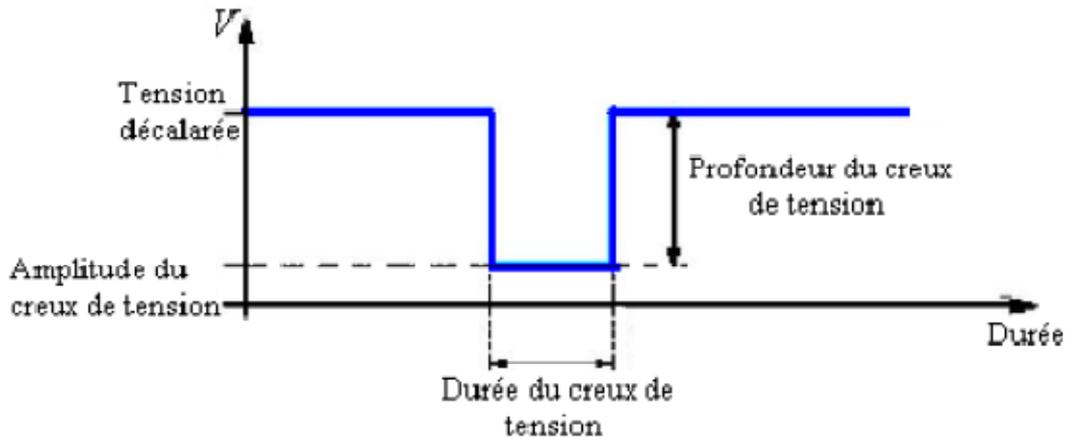


Figure VI.9: Caractérisation du creux de tension

Les principaux types de creux de tensions suivent :

- Creux de tension de type A appelé creux de tension triphasé équilibré
- Creux de tension de type B appelé creux de tension monophasé
- Creux de tension de type C appelé creux de tension biphasé avec saut de phase

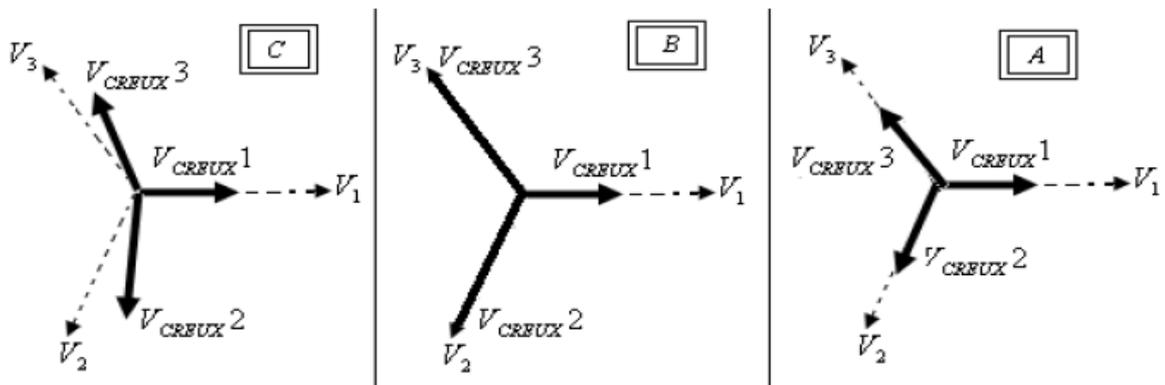


Figure VI.10: Classification des creux de tension

VI.5 Types de réseaux

Il existe deux types de réseau :

VI.5.1 Les réseaux de transport et de répartition en régime "bouclé"

Ils fonctionnent en système maillé et ont le neutre mis à la terre. Le principe de détection des défauts est basé essentiellement sur la mesure de l'impédance, donc de la distance, ce qui

permet d'assurer une sélectivité de déclenchement des disjoncteurs en fonction de la forme et de la localisation du défaut.

Le système de protection vise :

- pour chaque forme et position de défaut, à limiter le nombre de disjoncteurs à ouvrir.
- Notons que pour les réseaux à très haute tension, les défauts étant essentiellement entre une phase et la terre, les ouvertures de disjoncteurs sont limitées à la phase atteinte par le défaut ;
- à tenter, chaque fois que cela est possible, une remise automatique en service afin de limiter l'impact sur la clientèle des coupures pouvant résulter des déclenchements.

La Figure (VI.11) montre une portion d'un réseau maillé.

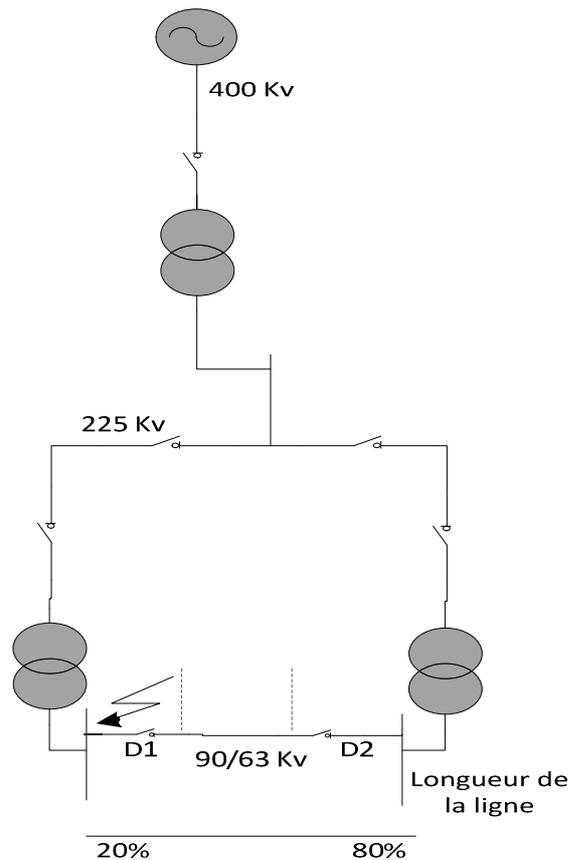


Figure VI.11: Exemple d'un réseau maillé (HTB > 50 kV)

VI.5.2 Les réseaux de distribution radiale

Ils fonctionnent en système radial et ont le neutre aujourd'hui mis à la terre par l'intermédiaire d'une impédance de limitation du courant de défaut. Le principe de détection des défauts est basé essentiellement sur la mesure du courant. De plus, le nombre de défauts atteignant plusieurs phases étant relativement important, les déclenchements sont toujours triphasés. La reprise automatique du service utilise un dispositif de réenclenchement triphasé.

Après un premier déclenchement, trois tentatives de réenclenchement sont effectuées : la première, au terme d'une temporisation courte (quelques centaines de ms) et les deux suivantes avec des temporisations plus longues (plusieurs dizaines de secondes).

En conséquence, pendant un cycle d'élimination d'un défaut, un utilisateur raccordé en moyenne tension (MT) sur un départ voisin du départ aérien en défaut peut ressentir quatre creux de tension successifs, tandis que celui raccordé directement sur le départ en défaut est soumis d'abord à un creux de tension, puis trois coupures brèves et enfin une coupure longue (Figure VI.12).

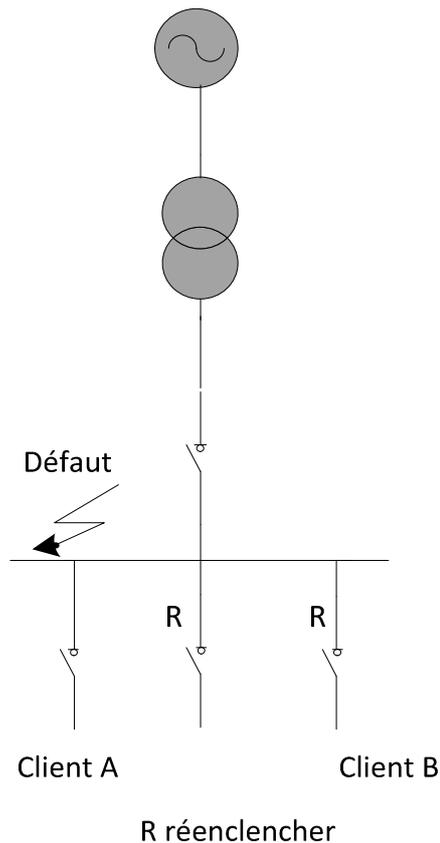


Figure VI.12: Exemple d'un réseau radial (HTA 1 à 50 kV)

VI.6 application

La Figure (VI.13) montre le réseau test utilisé pour la validation de notre modèle développé et son système de commande. Il comporte : 1 source d'alimentation ; 3 jeux de barres ; 2 charges statiques ; une ferme éolienne de 6 éoliennes de 1.5 MW chacune.

La génératrice éolienne est connectée à un transformateur 575V/15kV, situé à 3km du transformateur du réseau HT (70kV/15kV).

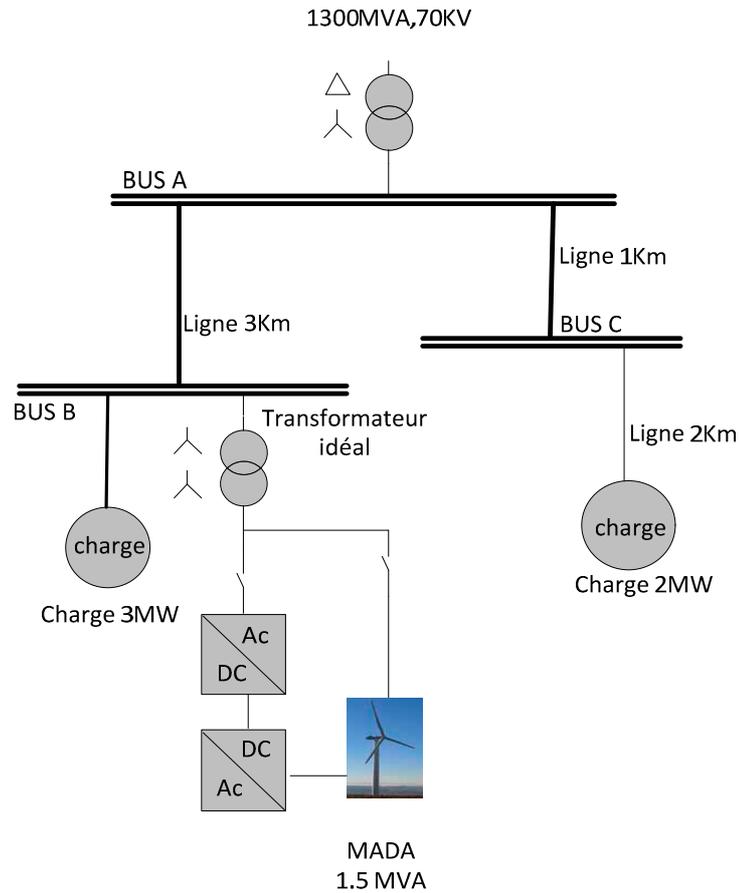


Figure VI.13: Intégration de la génératrice asynchrone à double alimentation dans le réseau de distribution

VI.6.1 Résultats de simulation

Les évolutions temporelles des tensions et des courants ainsi que les puissances sont montrées dans différents endroits de ce réseau de distribution. Afin d'illustrer des fluctuations assez lentes de la vitesse du vent sur les grandeurs du réseau, nous avons appliqué au système éolien un vent variable autour de 13 m/s sur une durée de 60 s.

On constate que la variation de la vitesse du vent affecte la vitesse mécanique de la MADA (figure VI.14).

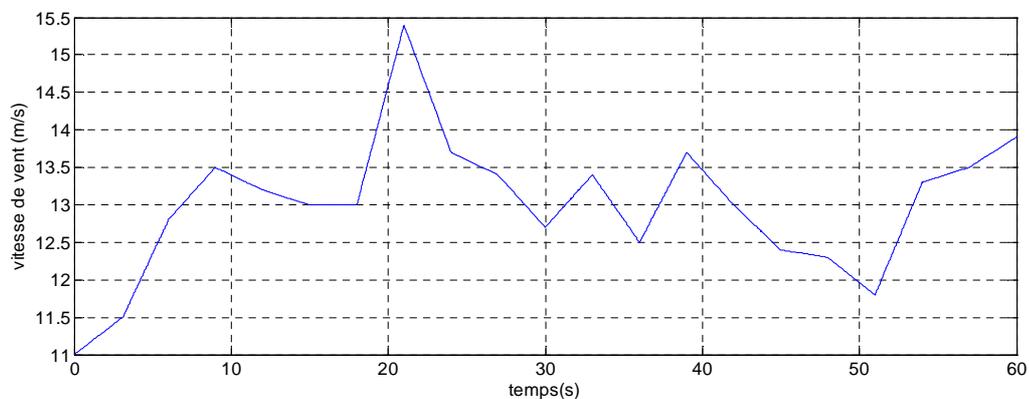


Figure VI.14: Profile du vent appliqué à l'éolienne

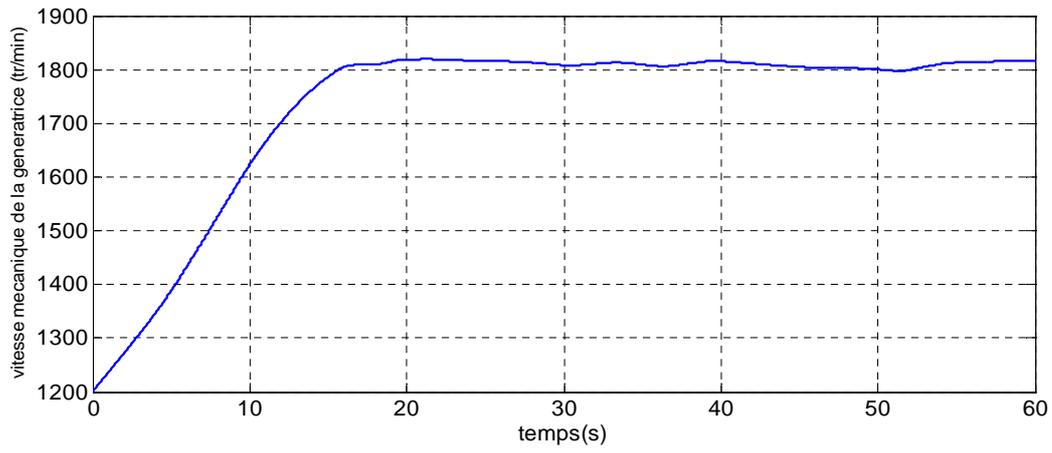


Figure VI.15: Vitesse mécanique de la génératrice

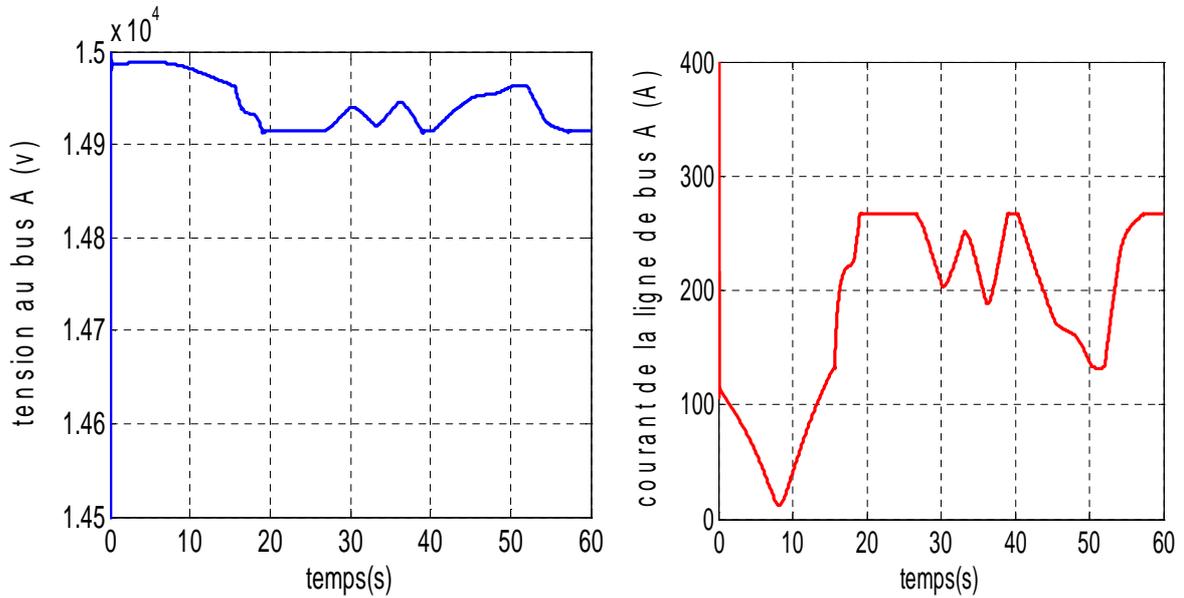


Figure VI.16: Tension et courant au niveau de bus A

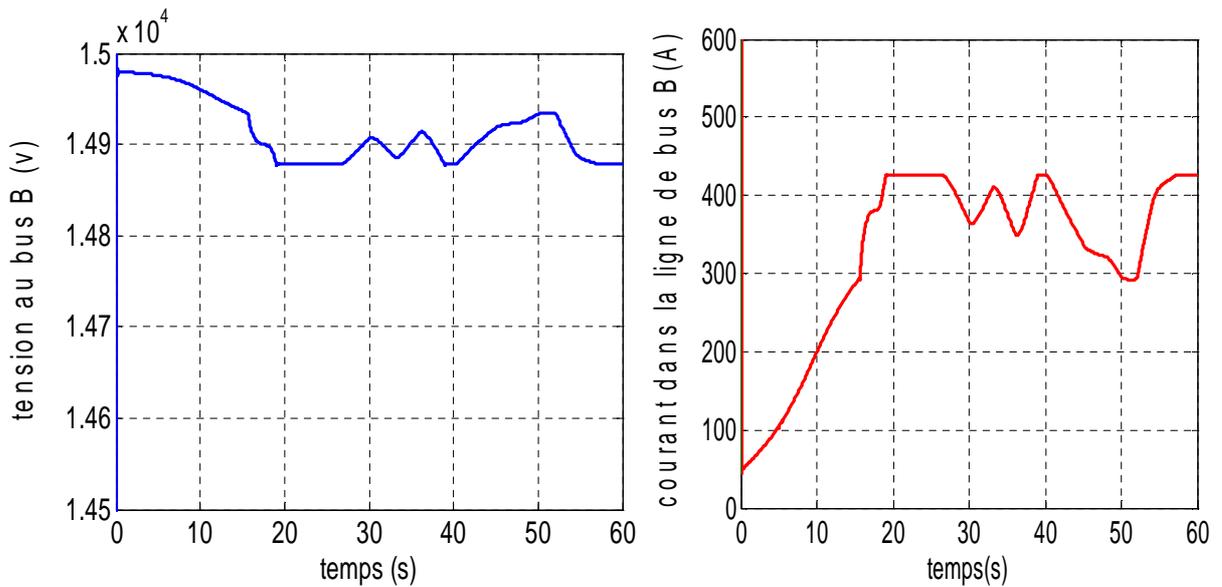


Figure VI.17: Tension et courant au niveau de bus B

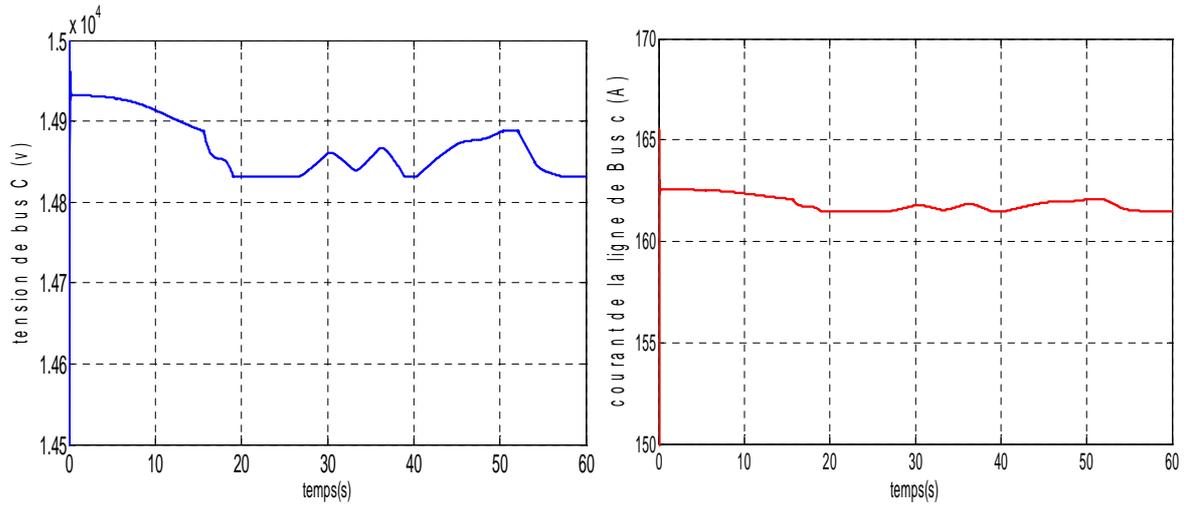


Figure VI.18: Tension et courant au niveau de bus C

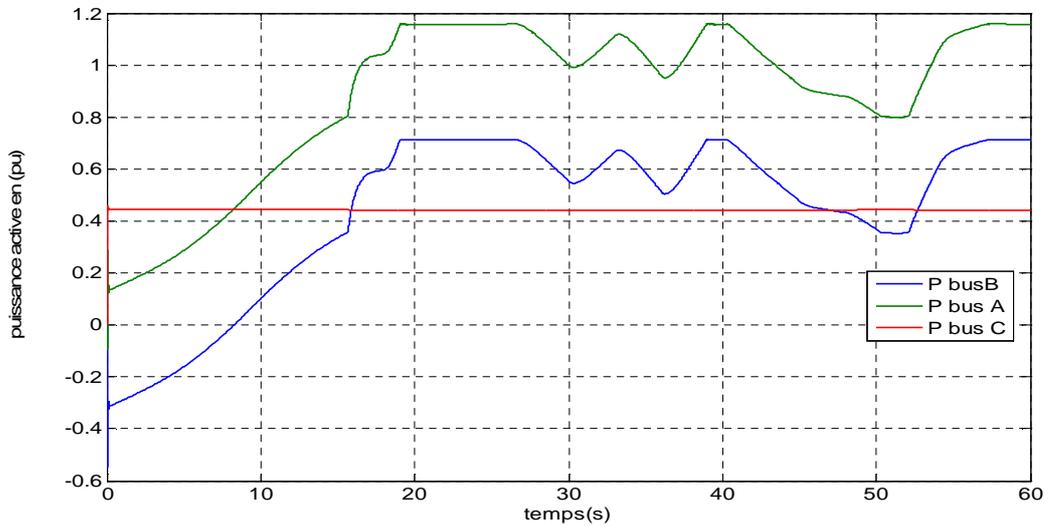


Figure VI.19: Puissance active dans le réseau de distribution

VI.7 Etude des défauts

VI.7.1 Présentation du réseau étudié

Afin d'étudier l'interaction de cette unité de production avec le réseau électrique et ses constituants

On a proposé l'architecture simplifiée d'un réseau de distribution (Figure VI.20).

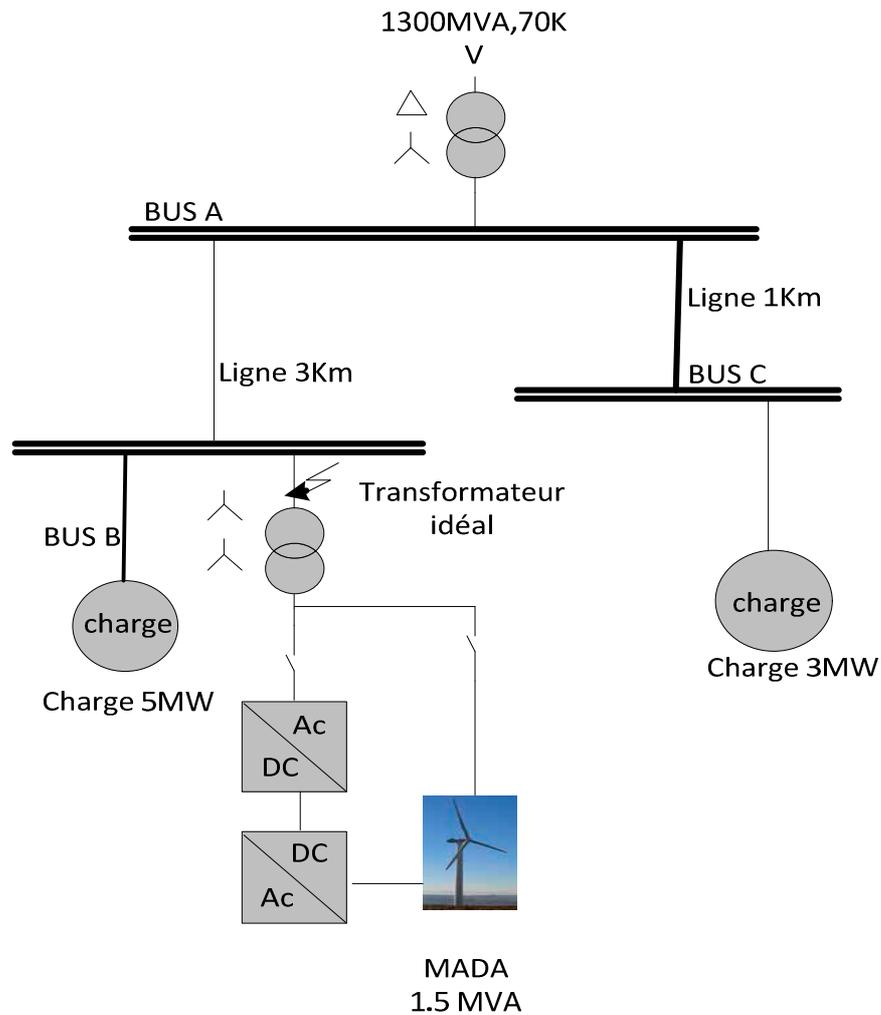


Figure VI.20: Schéma synoptique du réseau étudié

Le réseau est composé des éléments suivants :

- Une source triphasée de puissance de court-circuit 1300 MVA représentant le réseau HT amont.
- Un transformateur de puissance nominale 20 MVA et de rapport de transformation 70/15 kV
- Deux charges (charge 1 et 2) connectées à un bus bar B et C.
- Le défaut étudié est un défaut apparaissant en dehors de ce réseau de distribution, en amont du transformateur de distribution MT. L'éolienne ainsi que l'ensemble du réseau est affecté par le creux de tension qui en résulte sans subir de perte de charges.

VI.7.2 Résultat de simulation :

Les figures (VI.22), (VI.22), (VI.22) montre l'évolution de la tension au (bus A,B,C). Suite au creux de tension, la tension subissent une chute d'environ 20% et d'une durée de 100 ms.

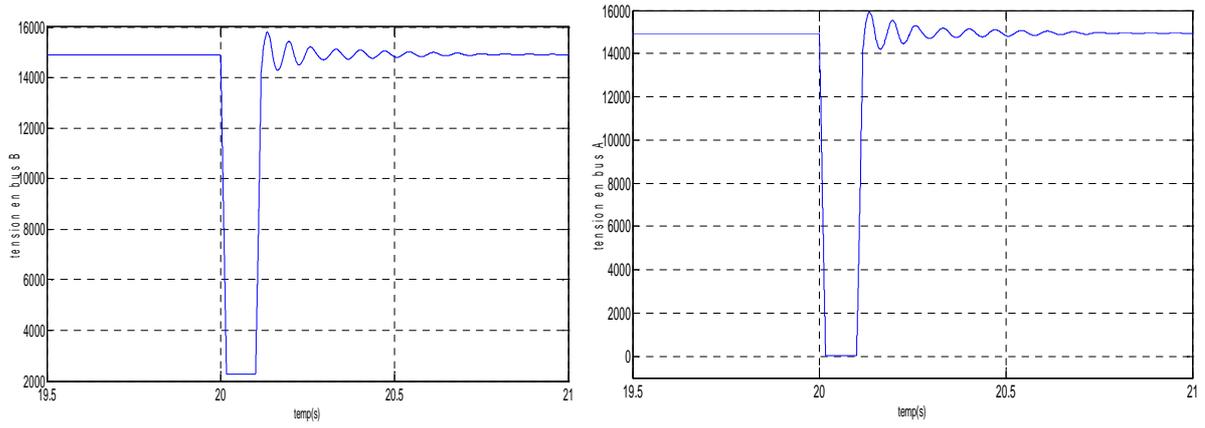


Figure VI.21 : Tension au bus B et A

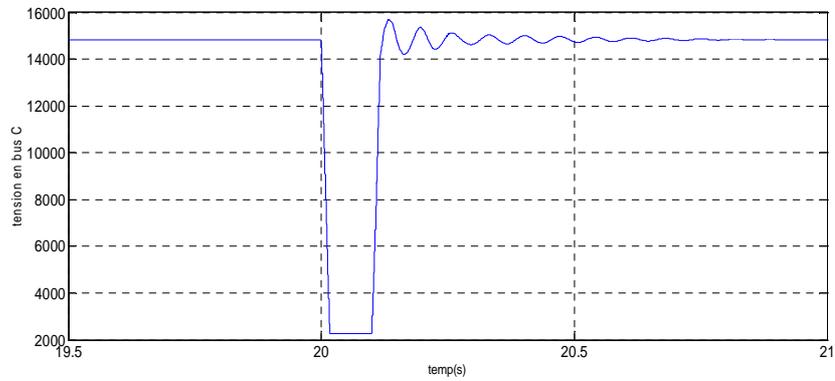


Figure VI.22 : Tension au bus C

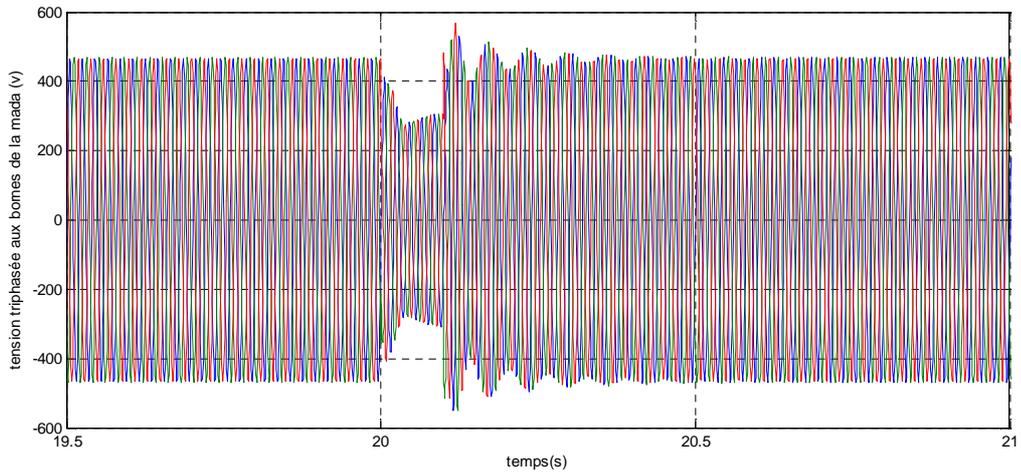


Figure VI.23 : Tensions triphasées aux bornes de la MADA

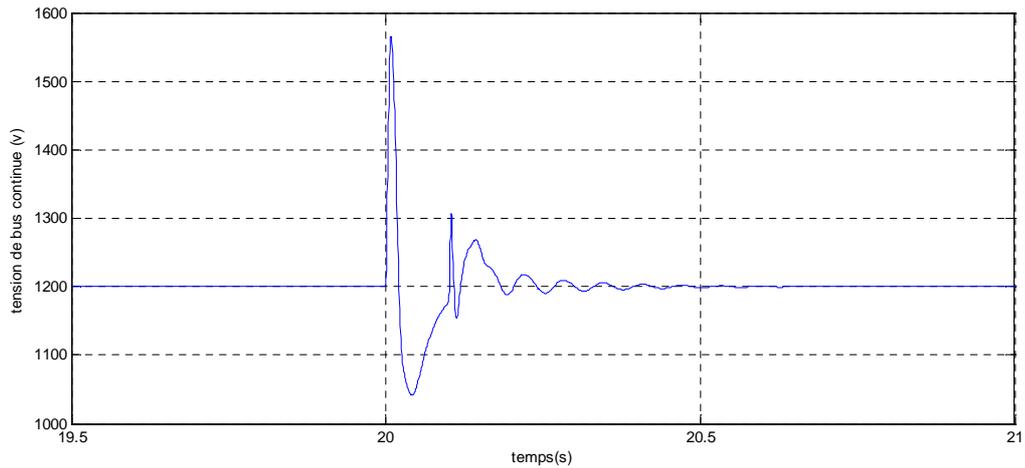


Figure VI.24 : Tension de bus continue

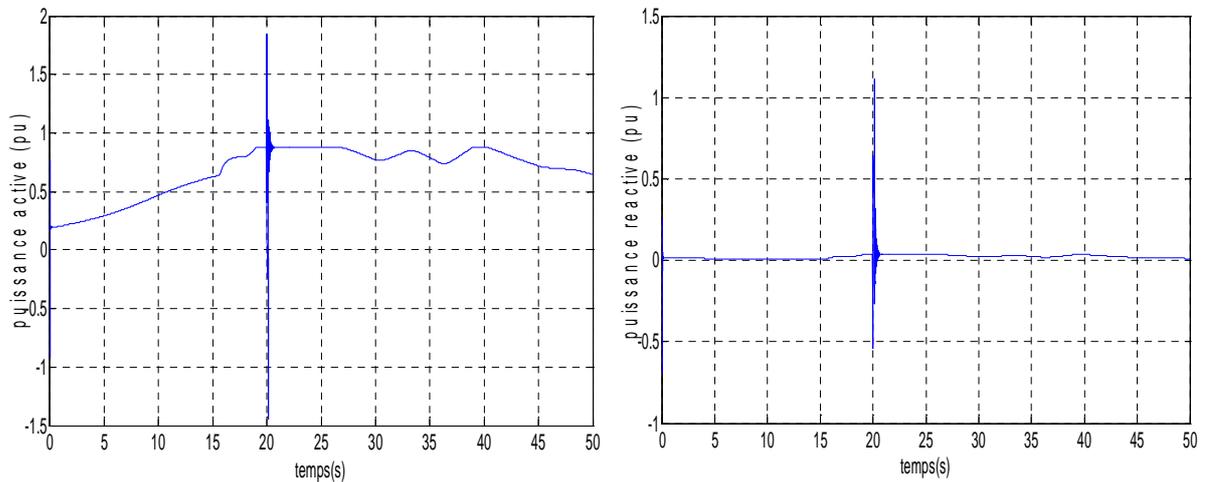


Figure VI.25 : puissance active et réactive au bus B

Interprétation des résultats :

D'après les résultats de simulations, on constate que pendant le défaut, un creux de tension de profondeur importante apparaît aux bornes des jeux de barres de connexion.

On constate pendant le défaut que les machines des éoliennes consomment alors une grande quantité de puissance réactive injectée par le réseau durant le défaut. Ceci peut perturber la restauration des plans de tension.

VI.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons validé le modèle de la génératrice en l'intégrant dans un réseau de distribution MT réseau réalisé sous la boîte à outils Sim Power System. Dans cette partie d'étude, on a testé l'influence de la production éolienne selon les vitesses du vent sur la puissance générée. D'après les résultats de simulation obtenus, on a montré que la puissance générée par la MADA pilotée par le rotor est constante dans le cas de la vitesse de vent à 12 m/s.

Le système de production éolienne est très sensible à la perturbation provenant du réseau, même le défaut très loin de la génératrice peut avoir des perturbations sur la tension, qui peuvent mener à la déconnexion du système éolienne.

Conclusion général

L'objectif principal de ce mémoire est l'étude d'une machine asynchrone à double alimentation « alimentation et commande », et l'étude de l'interaction de ces machines avec le réseau de distribution. Pour ce faire, dans le premier chapitre, on a présenté l'état de l'art sur l'éolienne et l'étude de vent plus les différents types d'éolienne et leurs utilisations.

La modélisation de la machine asynchrone à double alimentation était l'objectif du troisième chapitre. La mise en équation des différentes grandeurs caractérisant la machine asynchrone double alimentation étudiées nous a permis d'établir un modèle mathématique équivalent dont la complexité a été réduite en se basant sur certaines hypothèses simplificatrices.

Les résultats de simulation de ce modèle sous Matlab/Simulink nous confirment la validité du modèle linéaire pour l'application envisagée de la machine plus les résultats de simulation très validité.

Pour une gestion efficace de la production d'énergie éolienne, il était pratique de raisonner en termes de puissances pour la commande de la MADA. Pour ce la, on applique le contrôle indépendant des puissances active et réactive statoriques en partant de la commande vectorielle de la MADA à flux statorique orienté. Dans cette partie, nous avons présenté une étude théorique dans la quelle nous avons exprimé les puissances active et réactive statoriques en fonction des tensions rotoriques afin d'envisager un pilotage de la machine par le rotor. Suivant la prise en compte des couplages entre les axes ou non, trois méthodes ont étaient considérées. La comparaison des résultats de simulation de ces trois méthodes en termes de suivi de consigne et de robustesse a permis de dévoiler la méthode qui sera retenue.

Dans Le quatrième chapitre, on a présenté la modélisation des éléments de la chaîne éolienne en mode connecté au réseau constitué d'une machine asynchrone à double alimentation, pilotée par le rotor via le convertisseur MLI et un bus continu placé en aval de ce convertisseur a été élaborée. La liaison au réseau est ensuite réalisée par un redresseur à MLI. et dans le chapitre suivant on intégrée la MADA dans un système éolien, la modélisation de la turbine a été présentée. Un algorithme de maximisation de la puissance captée du vent a été mis en ouvre, ou on a supposé que la vitesse du vent varie légèrement au régime permanent. Le fonctionnement de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent été illustrée et la puissance est effectivement maximisé.

Dans Le dernier chapitre, nous avons validé le modèle de la MADA en l'intégrant dans un réseau de distribution MT, réseau simulé sous la boîte à outils (Sim Power System). Ainsi, l'influence de la production électrique selon la vitesse du vent sur les puissances et les tensions à différents endroits du réseau a été mise en évidence. Ce modèle permet ainsi de vérifier la conformité de ce moyen de production avec les normes de raccordement standard existantes dans un réseau de distribution MT (Dimensionnement des lignes, variation du plan de tension).

A la lecture des résultats obtenus, il serait intéressant d'envisager quelques perspectives pour la continuation de ce travail telle que :

- L'adaptation d'autres techniques de commande pour la MADA.
- concevoir un contrôle local en tension de cette éolienne respectant la sensibilité ampérométrique des protections ainsi que la coordination avec la régulation du bus continu.
- L'intégration éventuelle d'un système de stockage d'énergie pour le lissage de la puissance fournie au réseau.

Annexe A

Les paramètres de la génératrice asynchrone à double alimentation, sont donnés dans le tableau 1
Valeurs nominales : 4KW ; 220/380V- 50Hz ; 15/8.6A ; 1440 tr/min.

Valeur numérique du paramètre	signification
Rs (Résistance du stator)	1.2Ω
Rr (Résistance du rotor)	1.8Ω
Ls (Inductance stator)	0.1554H
Lr (Inductance du rotor)	0.1568H
M (Inductance Mutuelle)	0.15H
J (Moment d'inertie)	0.2 Kg.m ²
f (Coefficient de frottement)	0.001N.m.s/rd

Les paramètres mécaniques de la turbine éolienne de 1.5MW basée sur une machine asynchrone à double alimentation, sont illustrés dans le tableau 2

Valeur numérique du paramètre	Signification
R =35.25 (m)	Rayon de l'éolienne
G =90	Gain du multiplicateur de vitesse
Rs =0.012 (Ω)	Résistance statorique
Rr =0.021 (Ω)	Résistance rotorique
M= 0 : 0135	Mutuelle Inductance (H)
Ls = 0.0137	Inductance statorique (H)
Lr = 0.0137	Inductance rotorique (H)
J=1000	Inertie de l'arbre (kg/m ²)
f=0.0024	coefficient de frottement de la MADA
P = 2	Nombre de paires de pôles
$T_s = \frac{L_s}{R_s}$	Constante de temps statorique (s)
$T_r = \frac{L_r}{R_r}$	Constante de temps rotorique (s)

Annexe B

Dimensionnement du régulateur PI

La figure (1.1) montre un système en boucle fermée corrigé par un régulateur PI.

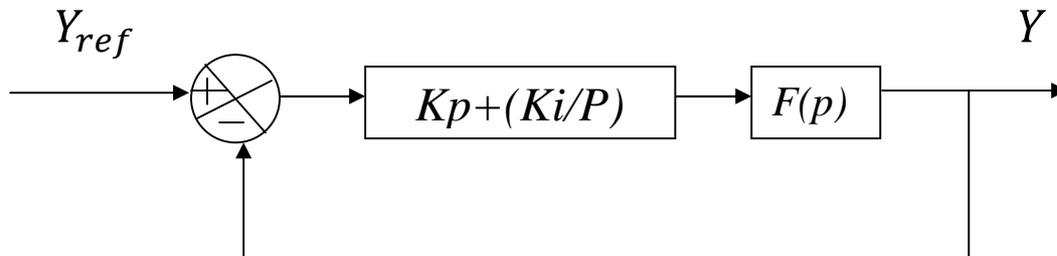


Fig.1 : Schéma bloc d'un système réglé par un PI

La forme du correcteur est la suivante :

$$Cp = k_p + \left(\frac{k_i}{P}\right)$$

Avec

K_p : est le gain proportionnel du régulateur ;

K_i : est le gain intégral du régulateur.

Si on considère la fonction de transfert suivante :

$$F(p) = \frac{K}{1 + \tau p}$$

En boucle ouverte on aura la fonction de transfert suivante :

$$F_{Bo}(P) = \frac{k_p + \left(\frac{k_i}{P}\right)}{1 + \tau p} = \frac{K(k_p P + k_i)}{P(1 + \tau p)} = K \cdot k_i \frac{1 + \frac{k_p P}{k_i}}{P(1 + \tau p)}$$

On prend $\tau = \frac{k_p}{k_i}$

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

$$F_{BF}(P) = \frac{k_i K}{k_i \cdot K + P} = \frac{1}{1 + \frac{1}{k_i \cdot K} P}$$

Pour attendre 95% de la consigne, le temps de repense t_r du système bouclé vaut : $t_r = 3 \frac{1}{k_i K}$

Au $k_i = \frac{k_p}{\tau}$; $t_r = 3 \frac{1}{k_p K}$ d'où $Kp = 3 \frac{\tau}{t_r K}$ et $k_i = \frac{3}{t_r K}$

Bibliographie

- [1] H. CAMBLONG, « Minimisation de l'impact des perturbations d'Origine Eolienne dans la Génération d'Electricité par des Aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de Doctorat d'Etat en Automatique. Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2003.
- [2] FREDERIC POITIERS, « Etude et commande des génératrices asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne : machine asynchrone à cage autonome et machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de Nantes 19-12 -2003.
- [3] IHSEN HAMZAOU, « Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur », Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger2008.
- [4] OMAR BOUHALI, « Contribution des convertisseurs multiniveaux au raccordement d'origine éolienne sur un réseau électrique », Thèse doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger 2008.
- [5] S.EL-AIMANI. « Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension», Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique. Ecole Centrale de Lille (ECL), 2005.
- [6] S.EL-AIMANI. « Modélisation d'une éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation couplée à un réseau Moyenne Tension », sixième conférence des jeunes chercheurs en génie électrique JCGE'03, Saint-Nazaire, 5 et 6 juin 2003.
- [7] F. POITIERS, « Etude d'un système éolien basé sur une machine asynchrone a double alimentation », sixième conférence des jeunes chercheurs en génie électrique JCGE'03, Saint-Nazaire, 5 et 6 juin 2003.
- [8] A. BOYETTE, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de doctorat en génie électrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, 11 Décembre 2006.
- [9] BELFEDAL CHEIKH, « Commande d'une machine a double alimentation en vue de son application dans le domaine de l'énergie éolienne ». Thèse de Doctorat, Université Mohamed Boudiaf des Sciences et de la Technologie, Oran Algérie 2007.
- [10] A. MIRCKI, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat De L'Institut national polytechnique de Toulouse.04/2005.
- [11] S. KHOJET EL KHIL, « Commande vectorielle d'une machine asynchrone à double alimentée », Thèse de doctorat, l'Institut National Polytechnique de Toulouse & de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis. 12/2006.

[12] FURAT ABDAL ,RASSUL ABBAS,MOHAMMED ABDULLA ABDULSADA , « Simulation of Wind-Turbine Speed Control by MATLAB», International Journal of Computer and Electrical Engineering, Vol. 2, No. 5, October, 2010

[13] P-E. VIDAL, « Commande non linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation », Thèse de doctorat, l'Institut National Polytechnique de Toulouse. 12/2004.

[14] F. AKEL, « Etude et réalisation d'un émulateur de turbine éolienne ». Mémoire de magister, Ecole Militaire Polytechnique d'Alger 2009.

[15] GEORGES SALLOUM « Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation », Thèse doctorat, L'institut National Polytechnique de Toulouse 2007.

[16] K. GHEDAMSI, D. AOUZELLAG « Improvement of the performances for wind energy conversions systems », Electrical Power and Energy Systems (2010) 936–945.

[17] T. GHENAM, E.M.BERKOUK, B.FRANÇOIS, L.BELHADJI, K.MEROUANI, « Les concepts fondamentaux d'une chaîne de conversion éolienne » , UER-ELT, EMP,2007.

[18] SAID DRID, « Contribution à la modélisation et à la commande robuste d'une machine à induction double alimentée à flux orienté avec optimisation de la structure d'alimentation : Théorie et Expérimentation », Thèse doctorat, l'Université de Batna, Algérie 2005.

[19] V. ROGEZ, « Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire ». Thèse de Doctorat, Université D'Artois 2004.

[20] LIUCHEN CHANG. « Systèmes de conversion de l'énergie éolienne », IEEE Canadian Review - Summer / Été 2002 .

[21] F. WU, X.-P. ZHANG, P. JU « Small signal stability analysis and control of the wind turbine with the direct-drive permanent magnet generator integrated to the grid », Electric Power Systems Research 79 (2009) 1661–1667

[22] Guy SEGUIER, Francis NOTELET, « Electrotechnique industrielle », Edition Lavoisier, 2006.

[23] KARIM BELMOKHTAR, MAMADOU LAMINE DOUMBIA, IEEE MEMBER, KODJO AGBOSSOU, IEEE SENIOR MEMBER « Modélisation et commande d'un système éolien à base de machine asynchrone à double alimentation pour la fourniture de puissances au réseau électrique », Quatrième Conférence Internationale sur le Génie Electrique CIGE'10, 03-04 Novembre 2010, Université de Bechar, Algérie .

[24] M. BEN KHELIL Ehlal « Simulation Dynamique des Fermes Éoliennes Intégrées dans un Réseau Électrique Multimachine », Mémoire de magister Université ferhat abbas - setif,2010 .

- [25] KLEBER F. DA SILVA, M.A. SAIDEL « Digital control and integration of a 192MW wind farm with doubly fed induction generator into the Brazilian power system », *Electric Power Systems Research* 80 (2010) 108–114.
- [26] F. POITIERS , T. BOUAOUICHE, M. MACHMOUM « Advanced control of a doubly-fed induction generator for wind energy conversion Electric », *Power Systems Research* 79 (2009) 1085–1096 .
- [27] ARNAUD DAVINGNY « Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie »,Thèse de doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille 11-12-2007.
- [28] CHEN WANG « Control, stability analysis and grid integration of wind turbines »,These de doctorat Control & Power Research Group Department of Electrical and Electronic Engineering Imperial College London mars 2008.
- [29] GABRIEL-OCTAVIAN CIMUCA « Système inertiel de stockage d'énergie associe à des générateurs éoliens », Thèse de doctorat l'école nationale supérieure d'arts et métiers 2005.
- [30] B. FRANCOIS « Intégration de l'énergie éolienne au réseau électrique », Séminaire “Le développement des Energies éoliennes en Tunisie” 19 novembre 2009.
- [31] B. ROBYNS, A. DAVIGNY, C. SAUDEMONT , A. ANSEL, V. COURTECUISSÉ B. FRANÇOIS, S. PLUMEL, J. DEUSE «Impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie », *j3eA-Vol.5 – Série 1*(2006) .
- [32] VICENT COURTECUISSÉ, « Supervision d'une centrale multisources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique », Thèse de doctorat l'école nationale supérieure d'arts et métiers 2008.
- [33] JULIÁN SOSA-RUIZ, EDGAR MORENO-GOYTIA, « Impact of a Series-Connected Multilevel VSC on DFIG- based Wind Farms Performance », *EVRE MONACO* 26-29 MARS 2009.
- [34] B. ROBYNS, P. BASTARD, « Production décentralisée d'électricité : contexte et enjeux techniques », *Revue 3EI*, n°39, décembre 2004, pp.5-13.
- [35] HANNELE HOLTTINEN, « The impact of large scale wind power production on the Nordic electrical system », *VTT Processes*, Finlande , Décembre2004.
- [36] BRIAN KEITH PARSONS, YIH-HUEI WAN, BRENDAN KIRBY, « wind farm power fluctuations, ancillary services, and system operating impact analysis activities in the united states », *NREL/CP – 500 – 30547*.
- [37] Nadir GHANEMI, « Etude de la tenue aux courant de court-circuit pour le raccordement d'une production décentralisée au réseau MT », Mémoire de magister, Université MENTOURI de CONSTANTINE,2008

Thème

Etude et commande d'une éolienne à vitesse variable intégrée au réseau MT

Résumé :

La libéralisation du marché de l'électricité et le développement de la production décentralisée amènent, dans le domaine du Génie Electrique, de nombreux problèmes scientifiques et techniques nouveaux. Ces problèmes sont principalement induits par l'impact des nouveaux types de sources d'énergie dans les réseaux, non conçus a priori pour les accueillir, et par la gestion globale du système de distribution.

L'objectif principal de recherche dans ce mémoire est de modéliser et commande d'éolienne introduit dans les réseaux électriques de moyenne tension. Cette mémoire traite de l'étude la modélisation et simulation d'un système de conversion d'énergie éolienne, permettant de fournir au réseau une puissance, basé sue la machine asynchrone à double alimentation (MADA).

Cette éolienne à axe horizontale fournie au réseau une puissance active quelles que soient les conditions de vent.

L'originalité de cette machine, utilisée dans un système éolien, est de pouvoir contrôler l'échange de puissance entre le stator et le réseau en agissant sur les signaux rotoriques via un convertisseur bidirectionnel. Dans cette optique une commande vectorielle est mise en œuvre qui permet de commander indépendamment la puissance active et réactive. Cette commande est élaborée et testée en synthétisant deux types de régulateurs: Proportionnel- Intégral (PI).

Enfin, une étude de l'intégration d'éoliennes dans un réseau de distribution MT est présentée.

Cette étude a permet de définir des lois de commande pour la participation de la production éolienne.

Mots clés :

Éolienne, Machine Asynchrone à Double Alimentation, Réseau de distribution, convertisseur