

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA-BEJAIA

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique



MEMOIRE DE MAGISTER

En vue de l'obtention du diplôme de Magister en Electrotechnique

Option : Systèmes Electro-Energétiques

Présenté par

BELHOUL Talit

Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

Thème

Etude et Contrôle des Aérogénérateurs à base des Machines Asynchrones
Double Alimentées Connectées à un Réseau Electrique Autonome

Soutenu le 28 /05/2013, devant le jury composé de :

Dr. R. ALKAMA	MCA à l'université de Bejaia	Président
Dr. K. GHEDAMSI	MCA à l'université de Bejaia	Rapporteur
Dr. S. BERRAH	MCA à l'université de Bejaia	Examineur
Dr. K. IDJDARENE	MCA à l'université de Bejaia	Examineur
Dr. D. AOUZELLAG	MCA à l'université de Bejaia	Invité

Remerciements

Je veux remercier tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réussite de ce travail. Qu'ils trouvent dans ce mémoire une trace de ma reconnaissance.

J'adresse ma profonde reconnaissance à Monsieur Kaci GHEDAMSI, pour m'avoir honoré de sa confiance en me proposant ce sujet et en acceptant la direction scientifique de ces travaux de mémoire et pour son aide et ses encouragements réguliers. Ses qualités scientifiques et humaines ont toujours été une source de motivation.

J'adresse des remerciements tout particuliers à Monsieur Djamel AOUZELLAG, maître de conférences à l'université de Bejaïa, pour avoir bien voulu co-diriger ces travaux, et pour son aide significative, sa disponibilité, sa gentillesse, ses idées, critiques et conseils m'ont été d'une aide précieuse.

Je remercie Monsieur Rezak ALKAMA, maître de conférences à l'université de Bejaïa, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

J'exprime ma profonde reconnaissance à Monsieur Kassa IDJDARENE, maître de conférences à l'université de Bejaïa, pour sa présence dans le jury de mémoire, l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail.

Je tiens à remercier Monsieur Smaïl BERRAH, maître de conférences à l'université de Béjaïa, qui m'a honoré en acceptant d'être examinateur de ce jury et pour l'intérêt qu'il a manifesté pour ce travail.

Enfin, je remercie mes parents pour tout ce qu'ils ont fait pour moi. Leur soutenance morale et matérielle m'a permis d'atteindre tous les buts de ma vie. Ma gratitude envers eux est incommensurable.

Pour leur soutien et leurs encouragements, je remercie toute ma famille; frères, sœurs et belles sœurs.

Une grande reconnaissance pour Mourad mon cher époux, toujours près de moi et toujours compatissant.

Toute ma reconnaissance et mes remerciements à ma deuxième maman. Ma reconnaissance envers elle est inexprimable.

Sommaire

SOMMAIRE

Nomenclature

Liste des figures

Introduction générale	1
------------------------------------	----------

CHAPITRE I

ETAT DE L'ART DES AEROGENERATEURS

I.1 Introduction	3
I. 2 Différentes sources de production d'énergie électrique	3
I.3 Chiffres clés de l'éolien dans le monde	4
I.4 Manières d'utilisation de l'énergie éolienne	5
I.5 Production d'énergie éolienne.....	5
I.5.1 Production reliés au réseau (parcs éoliens)	6
I.5.2 Production décentralisée	6
I.6 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	6
I.6.1 Avantages	6
I.6.2 inconvénients.....	7
I.7 Application des éoliennes.....	8
I.7.1 Systèmes isolés.....	8
I.7.2 Systèmes hybrides	8
I.7.3 Systèmes liés au réseau	9
I.8 Principe de fonctionnement d'une éolienne	6
I.9 Différents types d'aérogénérateurs	9
I.9.1 Aérogénérateurs à axe vertical	10
I.9.2 Aérogénérateurs à axe horizontal	10
I.10 Mode de fonctionnement	11
I.10.1 Fonctionnement à vitesse fixe	11
I.10.2 Fonctionnement à vitesse variable	11
I. 10. 2. 1 Intérêt de la vitesse variable	11

I. 11 Etude comparative des machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne.....	12
I. 11. 1 Machine synchrone.....	12
I. 11. 1. 1 La machine synchrone à aimant permanent (MSAP).....	13
I. 11. 1. 2 Machine synchrone à rotor bobiné (MSRB).....	13
I. 11. 1. 3 Machines à reluctance variable (MRV)	14
I.11.2 Machine asynchrone.....	14
I.11.2.1 Machines asynchrones à cage d'écureuil	14
I.11.2.2 Machines asynchrones à double alimentation.....	15
I. 11. 2. 2. 1 Machine asynchrone à double alimentation à	
Energie rotorique dissipée	16
I. 11. 2. 2. 2 Structure de Kramer	17
I. 11. 2. 2. 3 Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.....	17
I. 11. 2. 2. 3 C. Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.....	18
I. 12 Différents modes de fonctionnement de la MADA	19
I.13 Avantages de la MADA	19
I.14 Domaines d'application de la MADA	20
I.15 Conclusion.....	21

CHAPITRE II

MODELISATION ET SIMULATION D'AEROGENERATEUR CONNECTE AU RESEAU

II.1 Introduction.....	22
II.2 Description du système étudié	22
II.3 Modélisation du système éolien.....	23
II. 3. 1 Génération du couple éolien	23
II. 3. 2 Modélisation et principe de contrôle de la turbine.....	23
II. 3. 3 Modèle du multiplicateur.....	25
II.3.4 Equation dynamique de l'arbre.....	25
II.4 Description de la machine asynchrone double alimentée	27
II.5 Hypothèses simplificatrices	29
II.6 Modèle de la machine asynchrone à double alimentation	29

II.6.1 Equations électriques	29
II.6.2 Expression du couple électromagnétique.....	30
II.6.3 Equation mécanique	31
II.7 Modèle biphasé de la MADA	31
II.7.1 Transformation de Park	31
II.7.2 Modèle de la MADA selon le système d'axes (d, q)	31
II.7.2.1 Choix du référentiel	32
II.7.2.1.1 Référentiel lié au stator	32
II.7.2.1.2 Référentiel lié au rotor	33
II.7.2.1.3 Référentiel lié au champ tournant	33
II.7.3 Application de la transformation de Park à la MADA	33
II.7.3.1 Equations électriques	33
II.7.3.2 Equations magnétiques	34
II.7.3.3 Expression du couple électromagnétique	34
II.8 Stratégie de commande de la MADA	34
II. 8. 1 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques	35
II. 8. 2 Relations entre tensions et courants rotoriques.....	35
II. 8. 3 Expressions des puissances active et réactive du l'aérogénérateur	37
II. 8. 4 Expressions des puissances active et réactive à réguler.....	37
II. 9 Commande vectorielle en puissance de la MADA	37
II. 9. 1 Principe général	37
II. 9. 2 Objectifs du contrôle.....	39
II. 10 Alimentation de la MADA par onduleurs de tension à commande MLI	39
II. 10. 1 Modélisation de l'onduleur de tension à MLI coté machine	39
II.10.1.1 Convertisseurs à commutation forcée.....	39
II.10.1.2 Commande vectorielle du convertisseur à commutation forcée.....	41
II. 10. 2 Modélisation du convertisseur à MLI coté réseau	43
II.10.2.1 Régulation des courants	44
II.10.2.2 Modélisation dans le repère de Park	44
II. 10. 2. 3 Calcul des courants de références côté réseau	46
II. 11 Régulation de la tension du bus continu	47
II. 12 Connexion au réseau.....	48
II.13 Simulation et interprétation des résultats.....	49
II. 14 Conclusion	52

CHAPITRE III**CONTRÔLE D'UN AEROGENERATEUR CONNECTE
A UN RESEAU AUTONOME**

III. 1 Introduction	53
III. 2 Description du système étudié	53
III. 3 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation liée à une charge autonome	54
III. 4 Modèle du système complet	55
III. 5 Stratégie de commande de l'aérogénérateur connectée à une charge autonome	56
III. 6 Caractéristiques des éléments simulés.....	58
III. 7 Simulation du système proposé	59
III. 7. 1 Vitesse fixe avec une tension de référence fixe et une charge variable	59
III. 7. 1. 1 Résultats et interprétations	59
III. 7. 2 Vitesse fixe, charge fixe et une tension variable	62
III. 7. 2. 1 Résultats et interprétations	62
III. 7. 3 Charge nominale, tension de référence fixe et une vitesse variable.....	63
III. 7. 3. 1 Résultats et interprétations	63
III. 10 Conclusion	66
Conclusion générale	67

Références bibliographiques**Annexes**

Annexe A : Dimensionnement du bus continu

Annexe B : Principaux paramètres utilisés dans les systèmes étudiés

Nomenclature

NOTATIONS

C_p	Coefficient de puissance
$C_{p \max}$	Coefficient de puissance maximal
β	Angle de calage des pales de la turbine [°]
λ	Rapport de vitesse
λ_{opt}	Rapport de vitesse optimale
v_{vent}	Vitesse du vent [m/s]
S	Surface balayée par la turbine [m ²]
ρ	Densité volumique de l'air 1.225 kg/m ³
R	Rayon de la turbine éolienne [m]
G	Multiplicateur de vitesse
C_{em}	Couple électromagnétique [N.m]
$C_{em \text{ ref}}$	Couple électromagnétique de référence [N.m]
C_r	Couple mécanique résistant de la turbine [N.m]
C_{mec}	Couple mécanique [N.m]
C_{aero}	Couple aérodynamique [N.m]
C_{arbre}	Couple sur l'arbre issue du multiplicateur [N.m]
C_{visq}	Couple des frottements visqueux [N.m]
E	Tension continue [V]
f	Fréquence de la tension de référence [Hz]
f_p	Fréquence de la porteuse [Hz]
f_s	Fréquence statorique [Hz]
f_r	Fréquence rotorique [Hz]
g	Glissement de la machine
Ω_t	Vitesse de rotation de la turbine [rd/s]
$\Omega_{méc}$	Vitesse mécanique de la génératrice [rd/s]
$\Omega_{méc \text{ ref}}$	Vitesse mécanique de référence [rd/s]
V_{dc}	Tension du bus continu [V]
$u_d(t)$	Tension redressée [V]
J	Moment d'inertie [kg. m ²]
k_f	Coefficient de frottement visqueux [Nms/rd]
k_i	Gain intégral
k_p	Gain proportionnel
ω_s	Pulsation électrique fondamental des grandeurs statorique [rd/s]
ω_r	Pulsation électrique fondamental des grandeurs rotorique [rd/s]
τ_r	Constante de temps rotorique [s]
N	Vitesse de rotation de la machine [tr/mn]
p	Nombre de paires de pôles de la MADA

η	Rendement de l'ensemble machine-convertisseurs statique
T_p	Période de la porteuse [s]
r	Coefficient de réglage de l'onduleur
m	Indice de modulation de l'onduleur
t	Temps [s]
s	Opérateur de Laplace
P_{vent}	Puissance éolienne [W]
P_{aero}	Puissance aérodynamique [W]
P_{mec}	Puissance mécanique [W]
P_{mec_opt}	Puissance mécanique optimale [W]
P_{ref}	Puissance de référence de l'aérogénérateur [W]
P_{dc}	Puissance du bus continu [W]
P_n	Puissance nominale de la génératrice [W]
P_g, Q_g	Puissances active et réactive du réseau [W]
P_s, Q_s	Puissances active et réactive statoriques [W]
P_r, Q_r	Puissances active et réactive rotoriques [W]
P_{rr}, Q_{rr}	Puissances active et réactive rotoriques coté réseau [W]
R_s, R_r	Résistances par phase statorique et rotorique [Ω]
l_s, l_r	Inductances de fuites du stator et du rotor [H]
L_s, L_r	Inductances cycliques du stator et du rotor [H]
L_m	Inductance de magnétisation [H]
M	Maximum d'inductance mutuelle cyclique entre stator-rotor [H]
$v_{ds}, v_{dr}, v_{qs}, v_{qr}$	Tension statorique et rotorique directes et quadratiques respectivement [V]
V_s	Amplitude de la tension statorique [V]
$v_{a,b,c s}$	Tensions triphasées statoriques [V]
$v_{a,b,c r}$	Tensions triphasées rotoriques [V]
$\phi_{ds}, \phi_{dr}, \phi_{qs}, \phi_{qr}$	Flux statoriques et rotoriques directs et quadratiques respectivement [Wb]
$i_{ds}, i_{dr}, i_{qs}, i_{qr}$	Courants statoriques et rotoriques directs et quadratiques respectivement [A]
i_{dc}	Courant du bus continu [A]
$[i_s], [i_r]$	Vecteurs des courants statoriques et rotoriques [A]
θ	Ecart angulaire entre deux phases, statorique et rotorique correspondant [°]
R_{ch}	Résistance de charge [Ω]
R_t	Résistance du filtre [Ω]
L_{ch}	Inductance de charge [H]
L_t	Inductance du filtre [H]

ABREVIATIONS

AC	Source du courant alternatif
DC	Source du courant continu
CV	Commande vectorielle
GADA	Génératrice Asynchrone à Double Alimentation
MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
MARB	Machine Asynchrone à rotor bobiné
MAS	Machine Asynchrone
MS	Machine Synchrone
MSAP	Machine Synchrone à Aimants Permanents
MSRB	Machine synchrone à rotor bobiné
MRV	Machine à reluctance variable
MCC	Machine à Courant Continu
M.L.I	Modulation par Largeur d'Impulsion
PI	Proportionnel-Intégrale
MPPT	Maximum Power Point Tracking
P	Puissance active
Q	Puissance réactive

Liste des figures

LISTE DES FIGURES

Fig. I.1	Fig I.1 Capacité (puissance en MW) éolienne installée de 1995 à 2012 dans le monde	4
Fig. I.2	Principe de la conversion d'énergie d'un aérogénérateur	9
Fig. I.3	Eoliennes à axe vertical	10
Fig. I.4	Eoliennes à axe horizontal	10
Fig. I.5	Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donnée	12
Fig. I.6	MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée	16
Fig. I.7	MADA - Structure de Kramer	17
Fig.I.8	MADA, structure de Scherbius avec un cycloconvertisseur	18
Fig.I.9	Eolienne à base de MADA raccordée au réseau	18
Fig.II.1	Schéma global de la structure	22
Fig II.2	Profil aérodynamique d'une pale	23
Fig.II.3	Schéma de la turbine éolienne	24
Fig.II.4	Coefficient de puissance C_p en fonction de rapport de vitesse λ	25
Fig.II.5	Schéma bloc fonctionnel du modèle de turbine	26
Fig.II.6	Schéma bloc fonctionnel avec asservissement de la vitesse mécanique	27
Fig.II.7	Schéma de la machine asynchrone à rotor bobiné avec des bagues collectrices	28
Fig.II.8	Représentation schématique de la MADA	28
Fig.II.9	Différents systèmes d'axes utilisés	32
Fig II.10	Schéma-bloc du système à réguler	36
Fig.II.11	Principe de régulation des puissances	37
Fig II.12	Principe générale de la commande vectorielle en puissance de la MADA	38
Fig.II.13	Schéma de la commande vectorielle en puissance de la MADA	39

Fig.II.14	Convertisseur AC-DC triphasé à commutation forcée côté machine	40
Fig.II.15	Schéma bloc du convertisseur coté machine, triphasé commandé en courant par la technique de MLI à hystérésis	42
Fig.II.16	Représentation schématique de l'onduleur côté réseau	42
Fig.II.17	Représentation schématique du bloc de contrôle des courants	46
Fig.II.18	Schéma de contrôle de la liaison au réseau	48
Fig.II.19	Vitesse de rotation de la MADA	50
Fig.II.20	Glissement de la MADA	50
Fig. II. 21	Puissances active et réactive statoriques	50
Fig. II. 22	Puissances active et réactive rotoriques	50
Fig .II. 23	Tension et courant rotoriques	50
Fig.II.23a	Tension et courant rotoriques pour $g=0$	50
Fig.II.23b	Tension et courant rotoriques pour $g>0$	51
Fig.II.23c	Tension et courant rotoriques pour $g<0$	51
Fig.II.24	Tension et courant statoriques	51
Fig.II.24a	Zoom tension et courant statoriques	51
Fig.II.25	Tension du bus continu et sa référence	51
Fig.III.1	Structure étudiée	53
Fig.III.2	Commande détaillée de la tension du stator de la MADA en schéma bloc	58
Fig.III.3	Schéma global de la structure étudiée	59
Fig.III.4	Courant et tension statorique (phase a) de la MADA	60
Fig.III.5	Zoom courant et tension statorique (phase a) de la MADA	60
Fig.III.6	Tension efficace statorique référence et mesurée de la MADA	61
Fig.III.7	Tension et courant rotorique de la MADA	61
Fig.III.8	Composantes directe et quadratique du flux statorique	61
Fig.III.9	Composantes directe et quadratique du flux rotorique	61
Fig.III.10	Puissance active et réactive absorbée par la charge	61
Fig.III.11	Courant et tension statorique de la MADA	62
Fig.III.12	Tension efficace statorique de référence et mesurée	62

Fig.III.13	Tension et courant rotorique de la MADA	63
Fig.III.14	Composantes directe et quadratique du flux statorique	63
Fig.III.15	Composantes directe et quadratique du flux rotorique	63
Fig.III.16	Puissance active et réactive absorbée par la charge	63
Fig.III.17	Vitesse de rotation de la MADA	64
Fig.III.18	Glissement de la MADA	64
Fig.III.19	Courant et tension statorique de la MADA	65
Fig. III.20	Tension efficace statorique de référence et mesurée	65
Fig.III.21	Tension et courant rotorique de la MADA	65
Fig. III.21a	Zoom de tension et courant rotorique pour $g=0$	65
Fig. III.21b	Zoom de tension et courant rotorique pour $g>0$	65
Fig. III.21c	Zoom de tension et courant rotorique pour $g<0$	66
Fig. III.22	Puissance active et réactive absorbée par la charge	66
Fig. III.23	Composantes directe et quadratique du flux statoriques	66

Introduction
générale

INTRODUCTION GENERALE

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 [Aim04].

Une éolienne est une installation qui convertit la puissance du vent en énergie électrique, donc le maximum d'énergie émis ne dépend pas seulement de l'aérogénérateur mais aussi des limites de la vitesse du vent.

L'électricité produite par les éoliennes est utilisée pour les circuits de charge de batterie, les systèmes de production d'énergie résidentiels, les systèmes de production distribuée, et les grands réseaux de services publics. Les différents éléments des éoliennes sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique; d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques (couple/vitesse) de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable [Has10].

Dans la plupart des régions isolées et ventées, l'énergie éolienne constitue la principale source potentielle d'énergie électrique. La baisse continue des prix des aérogénérateurs et les développements technologiques de l'électronique de puissance, conjugués aux incitations gouvernementales, conduisent à une utilisation d'éoliennes autonomes de plus en plus courante dans ces régions isolées. La variabilité et les fluctuations des ressources (vent) ainsi que les fluctuations de la charge selon les périodes annuelles ou journalières, qui ne sont pas forcément corrélées avec les ressources, constituent encore des limitations à une exploitation plus large.

Notre objectif dans ce travail consiste à l'étude et contrôle des aérogénérateurs à base des machines asynchrone double alimentées connectées à un réseau électrique autonome ainsi que l'apport que pourrait apporter l'emploi de cette dernière associée à un convertisseur (onduleur MLI – redresseur MLI). Ce mémoire est alors divisé en trois chapitres:

Le premier chapitre sera consacré à la présentation d'un état de l'art des aérogénérateurs, des généralités sur les systèmes de production d'énergie éolienne et une étude comparative des machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne dans un réseau autonome. Ce chapitre nous permettra de faire le choix de la structure à étudier.

Au second chapitre, nous aborderons la modélisation de la MADA, de sa commande et celle du convertisseur associé, notamment, l'ensemble « redresseur MLI – onduleur MLI et bus continu ». Ensuite la simulation de la MADA connectée sur un réseau électrique sera représentée en utilisant une commande vectorielle pour pouvoir contrôler les transferts de puissances afin de préserver la qualité de l'énergie.

Dans le dernier chapitre, nous allons étudier les performances de la conversion éolienne dans le cas du système connecté à une charge triphasée en étoile et nous présenterons le contrôle de la MADA pour un fonctionnement autonome.

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

Chapitre I

Etat de l'art des aérogénérateurs

CHAPITRE I**ETAT DE L'ART DES AEROGENERATEURS****I. 1 Introduction**

L'énergie éolienne est une des formes d'énergie renouvelable, elle est directement tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent. Les petites éoliennes sont principalement utilisées dans le cadre d'installation électrique autonome, c'est-à-dire d'installations qui ne sont pas raccordées sur le réseau de distribution d'électricité.

Ces systèmes autonomes conviennent particulièrement pour les aménagements dont le besoin en électricité est réduit ou pour les sites dont le raccordement au réseau est impossible, difficile à réaliser ou trop cher.

A travers le développement des éoliennes, celles de dernière génération fonctionnent à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de baisser les charges mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite par rapport aux éoliennes à vitesse fixe.

Dans ce chapitre nous présentons un état de l'art sur l'énergie éolienne, les différents types d'éoliennes avec leurs principes de fonctionnement. Nous proposons, par suite, une étude comparative des machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne dans un réseau autonome.

Nous finirons ce chapitre par la présentation des différents modes de fonctionnement de la MADA, son principe de fonctionnement, ses applications et ses avantages.

I. 2 Différentes sources de production d'énergie électrique

Les centrales électriques transforment diverses sources d'énergie primaire en énergie électrique afin d'alimenter en électricité, au moyen du réseau électrique, les consommateurs particuliers ou industriels éloignés de la centrale [IERN].

Il existe cinq principaux types de centrales électriques :

- les centrales à combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) dites centrales thermiques classiques ;
- les centrales nucléaires qui utilisent la fission nucléaire de matières fissiles pour produire de la chaleur dont une partie est transformée en électricité ;

- les centrales hydroélectriques qui transforment l'énergie sauvage d'une chute d'eau en énergie mécanique grâce à une turbine, puis en énergie électrique grâce à un générateur ;
- les centrales solaires ou photovoltaïques qui transforment l'énergie lumineuse en chaleur, laquelle sert ensuite à produire de l'électricité ;
- les centrales éoliennes, qui utilisent la force du vent sur les pales d'une éolienne. Lorsque le vent se met à souffler, les forces qui s'appliquent sur les pales des hélices induisent la mise en rotation du rotor. L'énergie électrique ainsi produite peut être distribuée sur le réseau électrique grâce à un transformateur.

Le contexte du présent travail s'inscrit dans l'étude d'une génératrice asynchrone, utilisée dans les systèmes éoliens.

I. 3 Chiffres clés de l'éolien dans le monde

D'après le Global Wind Energy Council, la capacité installée du parc éolien mondial a été multipliée par 3 entre fin 2007 et fin 2012 Fig (I.1).

En 2012, elle atteint près de 282 GW, l'équivalent de la puissance cumulée de près de 280 réacteurs nucléaires. Près de 44,7 GW de nouvelles capacités éoliennes ont été installés dans le monde. L'éolien a produit près de 460 TWh en 2011, soit approximativement 2,1% de la production totale d'électricité dans le monde [ENE] [EUR]. Les experts du conseil mondial de l'énergie éolienne (GWEC) prévoient le maintien d'une croissance soutenue de l'éolien qui va atteindre environ 3 000 TWh à l'horizon de 2020.

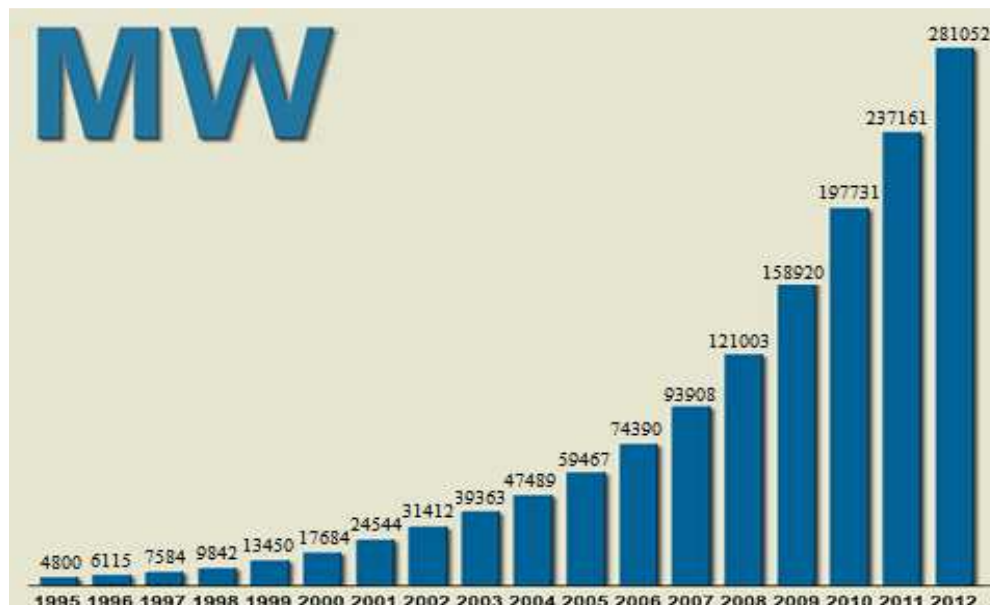


Fig I.1 Capacité (puissance en MW) éolienne installée de 1995 à 2012 dans le monde

Actuellement, environ 75 pays dans le monde possèdent des installations éoliennes d'ordre commerciales, dont 22 dépassent déjà le seuil de 1 GW. De fait, les capacités installées croissent en permanence mais à des rythmes différents selon les pays, et classer les États-Unis par puissance installée donne un résultat mouvant d'une année à l'autre. Néanmoins, il ressort des chiffres actuels que les plus gros pays investisseurs sont la Chine et les pays occidentaux (Amérique et Europe). D'autres puissances économiques émergentes, comme le Brésil, l'Inde et le Mexique commencent à investir lourdement dans l'énergie éolienne.

De nouvelles fermes éoliennes en mer (éolien offshore) sont envisagées partout dans le monde [WIP]. Le Danemark est l'un des acteurs les plus importants, avec son laboratoire très renommé ; le pays produit environ 20 % de son électricité avec des éoliennes. Ces dernières produisent 2 % de la production de l'électricité dans le monde. La taille la plus rentable et la plus pratique pour les éoliennes actuellement commercialisées semble être autour de 600 kW à 3 MW, groupées dans de grandes fermes éoliennes. Les nouvelles technologies en cours de développement cherchent à produire des systèmes beaucoup plus souples en termes de « puissance rentable ».

I.4 Manières d'utilisation de l'énergie éolienne

- Conservation de l'énergie mécanique ; le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin ;
- Transformation en force motrice (pompage de liquides, compression de fluides...) ;
- Production d'énergie électrique ; l'éolienne est alors couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Celui là est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

I.5 Production d'énergie éolienne

L'électricité produite par l'éolienne peut soit être instantanément consommée, soit stockée dans des accumulateurs ou injectée sur le réseau de distribution public [Bru 12].

I.5.1 Production reliés au réseau (parcs éoliens)

Les éoliennes raccordées au réseau électrique sont le plus souvent regroupées dans un parc éolien d'environ 5 à 50 machines.

Le courant électrique doit avoir une fréquence de 50 Hz dans de nombreux pays à travers le monde. Une éolienne raccordée au réseau doit fournir cette fréquence, quelle que soit la vitesse du vent et cela se fait par la régulation d'orientation des pales. Mais il est également possible de faire fonctionner une éolienne à vitesse de rotation variable en utilisant un convertisseur de fréquence.

Dans ce cas d'installation raccordée au réseau, l'énergie électrique non consommée directement peut être réinjectée sur le réseau de distribution publique [Bru 12].

I.5.2 Production décentralisée

L'énergie éolienne est aussi utilisée pour fournir de l'énergie à des sites isolés non raccordés au réseau (petite puissance), par exemple pour produire de l'électricité dans les îles, pour le pompage de l'eau dans des champs, ou encore pour alimenter en électricité des voiliers, des phares et des balises. Ces éoliennes de petite puissance sont dites appartenir au petit éolien, par opposition au grand éolien ou à l'éolien industriel.

Dans ce cas de production, l'énergie produite est directement consommée sur place ; son excédent est soit stocké dans des batteries, soit perdu.

I. 6 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

I.6. 1 Avantages

- L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement [Vid 04] [Poi 03], elle ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels;
- L'énergie éolienne produit de l'électricité éolienne : sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux (pas de rejet dans le milieu aquatique, pas de pollution thermique), sans polluer les sols (ni suies, ni cendres).

- Les autres activités agricoles et industrielles peuvent continuer autour d'un parc éolien.
 - C'est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier;
 - Les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plus part des centrales thermiques et des centrales nucléaires;
 - Un parc éolien prend peu de temps à construire, et son démantèlement garantit la remise en état du site original.
 - C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi, les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres.
 - C'est l'énergie la moins chère des énergies renouvelables après l'énergie hydraulique;
- Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà [Vid 04] [WIP];
- La période de haute productivité se situe en hiver (vent plus forts), ce qui correspond à la période de l'année où la demande est plus forte.
 - Démarrage par vent faible.
 - C'est une énergie propre, inépuisable, disponible 24h/24h et gratuite, pour bateau, bungalow, et c'est un système fiable pour être autonome sur des sites isolés ;
 - Investissement rentable idéal en autonomie, car le raccordement au réseau électrique s'avère souvent être très coûteux pour un kW de moins en moins bon marché.
 - Ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs car une éolienne est entièrement en métal et plastique.
 - Devient de plus en plus économique à produire à mesure que des économies d'échelle sont réalisées et que le prix de l'électricité augmente.

I. 6. 2 Inconvénients

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolienne a quelques désavantages [Vid 04]:

- L'impact visuel, ça reste néanmoins un thème subjectif ;
- Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée ;
- La qualité de la puissance électrique ; la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante.
- Le coût de l'énergie éolienne reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés;

- Lorsque la production dépasse la consommation, le stockage est encore onéreux, mais en cas de raccordement de l'éolienne au réseau électrique, le stockage n'est pas nécessaire.
- L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement.

I. 7 Application des éoliennes

Un système éolien peut être utilisé en trois applications distinctes:

- Systèmes isolés;
- Systèmes hybrides;
- Systèmes reliés au réseau.

Les systèmes obéissent à une configuration de base: ils ont besoin d'une unité de contrôle de puissance et, dans certains cas, d'une unité de stockage

I. 7. 1 Systèmes isolés

L'énergie éolienne est aussi utilisée pour fournir de l'énergie à des sites isolés, par exemple pour produire de l'électricité dans les îles, pour le pompage de l'eau dans des champs, ou encore pour alimenter en électricité des voiliers, des phares et des balises, [Sid 07].

Les systèmes isolés en général, utilisent quelque forme de stockage d'énergie. Ce stockage peut être fait par des batteries: il faut alors un dispositif pour contrôler la charge et la décharge de la batterie. Le contrôleur de charge a comme principal objectif d'éviter qu'il y ait des dommages au système de batterie par des surcharges ou des décharges profondes.

Pour l'alimentation d'équipements qui opèrent avec un réseau alternatif (AC), il est nécessaire d'utiliser un onduleur.

I. 7. 2 Systèmes hybrides

Les systèmes hybrides sont ceux qui présentent plus d'une source d'énergie comme, par exemple, turbines éoliennes, groupes diesel, modules photovoltaïques, connectés entre eux. L'utilisation de plusieurs formes de génération d'énergie électrique augmente la complexité du système et exige l'optimisation de l'utilisation de chacune des sources. Dans ces systèmes, il faut réaliser un contrôle de toutes les sources pour maximiser la livraison de l'énergie à l'utilisateur.

En général, les systèmes hybrides sont employés dans des petits systèmes destinés à desservir un nombre plus grand d'utilisateurs. Pour travailler avec des charges à courant alternatif, le système hybride aussi a besoin d'un onduleur.

I. 7. 3 Systèmes liés au réseau

Les systèmes liés au réseau n'ont pas besoin de systèmes de stockage d'énergie; par conséquent, toute la génération est livrée directement au réseau électrique. Les systèmes éoliens liés au réseau nécessitent un convertisseur statique.

I. 8 Principe de fonctionnement d'une éolienne

Le principe de fonctionnement de l'énergie éolienne est relativement simple:

Une éolienne est constituée d'un mât qui soutient à son sommet une nacelle équipée de trois pales mises en rotation par le vent ; l'énergie cinétique du vent est transformée en énergie mécanique [SOL]. Les pales font tourner le générateur de l'éolienne, qui à son tour transforme l'énergie mécanique en énergie électrique (Fig. I. 2). Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système autonome [ENE].

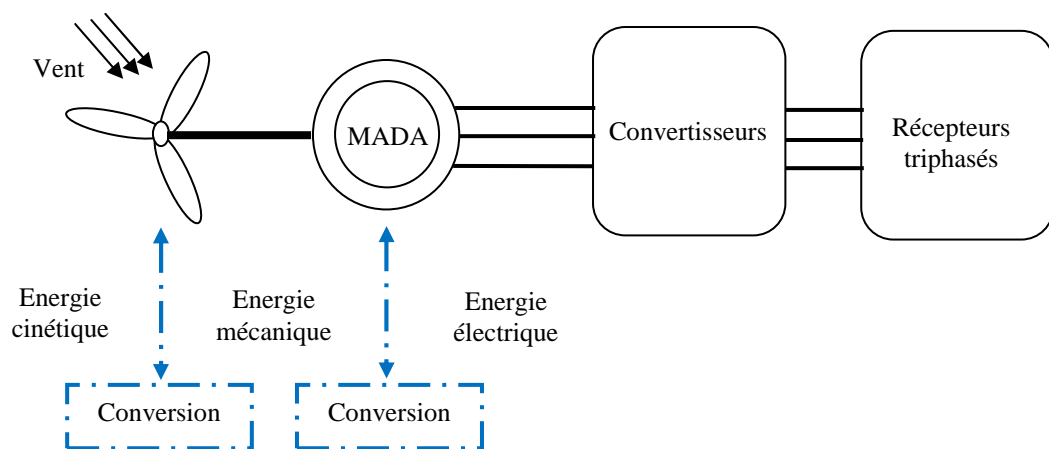


Fig. I. 2 Principe de la conversion d'énergie d'un aérogénérateur

I. 9 Différents types d'aérogénérateurs

On classe les éoliennes suivant la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux types de turbines éoliennes:

- Turbines à axe horizontal;
- Turbines à axe vertical.

I. 9.1 Aérogénérateurs à axe vertical

Ce type d'éoliennes est très peu répandu et assez mal connu. Cependant, il peut avoir un intérêt dans certains secteurs d'application [Che 11]. Il existe principalement trois technologies: les turbines Darrieus classiques ou à pales droites (H-type) et la turbine de type Savonius. Toutes ces voilures sont à deux ou plusieurs pales (Fig. I. 3).



Fig. I. 3 Eoliennes à axe vertical

I. 9.2 Aérogénérateurs à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont les descendantes directes des moulins à vent sur lesquels les ailes, faites de voiles tendues sur une structure habituellement en bois, ont été remplacées par des éléments ressemblant fortement à des ailes d'avion (Fig. I. 4) [Lec 04].



Fig. I. 4 Eoliennes à axe horizontal

I. 10 Mode de fonctionnement

Les éoliennes sont conçues pour fonctionner soit à vitesse fixe ou variable [Mir 05].

I. 10. 1 Fonctionnement à vitesse fixe

- ✓ Système électrique plus simple;
- ✓ Système de commande électrique non nécessaire;
- ✓ Système moins cher;
- ✓ Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments d'éolienne.

I. 10. 2 Fonctionnement à vitesse variable

- ✓ Meilleur rendement énergétique;
- ✓ Meilleure qualité d'énergie électrique;
- ✓ Moins d'efforts mécaniques subis par le train de puissance.

I. 10. 2. 1 Intérêt de la vitesse variable

Les développements technologiques des dernières années ont favorisé la mise en place d'éoliennes à vitesse variable. L'éolienne à vitesse variable possède plusieurs avantages tels que: une meilleure extraction de l'énergie du vent, un niveau de bruit inférieur à bas régime éolien et un meilleur transfert de puissance vers le réseau électrique. La vitesse variable représente l'avenir des éoliennes. En effet si la génératrice fonctionne à vitesse fixe, par exemple 1600 tr/mn, les maxima théoriques des courbes ne sont pas exploités (Fig. I. 5). Mais on voit clairement quand la génératrice fonctionne à vitesse variable, par exemple de 1100 tr/mn à 1900tr/mn sur la même Figure, les maximums théoriques sont atteints pour chaque vitesse du vent.

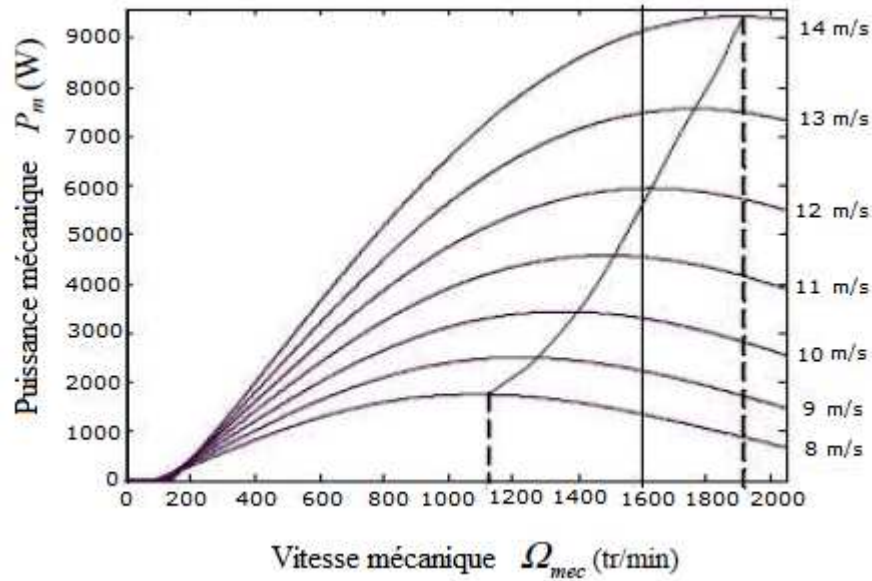


Fig. I. 5 Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donnée

I. 11 Etude comparative des machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne

Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques [Che 10].

On décrit dans cette étude, les deux types de machines électriques les plus utilisées dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et asynchrones.

I. 11. 1 Machine synchrone

Les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes (sans multiplicateur mécanique), pour minimiser la maintenance et accroître la fiabilité [Mek 04].

Dans cette catégorie, on trouve plusieurs sortes de configurations dont nous citons les plus fréquentes.

I. 11. 1. 1 La machine synchrone à aimant permanent (MSAP)

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs [Mek 04].

Il semble à plus d'un titre une solution adaptée pour ses performances techniques et en particulier, sa compacité et son rendement. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables.

L'excitation dans ce cas est créée par les aimants permanents.

Les avantages dont disposent ces machines sont les valeurs élevées des rapports (couple/masse) et (puissance/masse) ainsi que leur bon rendement [Nou 08]. Cependant le prix des aimants est élevé et ne permet pas, à ce jour, de satisfaire la contrainte sur le prix de vente.

Le fonctionnement en défluxage dans la zone de fonctionnement à puissance constante est difficile (commande de la machine complexe, risque de désaimantation et pertes électriques supplémentaires à l'augmentation du courant statorique).

I. 11. 1. 2 Machine synchrone à rotor bobiné (MSRB)

Elle ressemble au moteur à courant continu, la différence entre eux réside dans la manière de commuter le courant (commutation mécanique pour la machine à courant continu et commutation électronique pour la machine synchrone à rotor bobiné) [Mek 04]. Elle fait appel, le plus souvent, à une excitatrice associée à un redresseur tournant, pour éliminer tout contact glissant. Le rotor peut être à pôles lisses ou saillants et est généralement équipé de circuits amortisseurs. Pour certaines applications à forte puissance et à grande vitesse, on utilise un rotor cylindrique massif.

La machine synchrone à rotor bobiné offre un fonctionnement en survitesse aisé à mettre en œuvre. De plus, il est possible de choisir le point de fonctionnement de la machine afin de minimiser les pertes Joules dans l'ensemble (convertisseur - machine). Il donne facilement la possibilité de défluxage que l'on peut effectuer par simple réduction du courant d'excitation [Nou 08].

Ainsi cette structure offre un domaine d'exploitation plus étendu que celui des machines à aimants permanents mais elle offre aussi la possibilité d'adaptation des lois de commande permettant l'optimisation de rendement. Par contre, le rotor nécessite des bagues pour l'alimenter, et les bobines d'excitation sont difficiles à refroidir, cependant, la densité de courant peut être choisie faible pour diminuer les pertes.

Les courants glissants (balais - bagues) limitent le fonctionnement à très haute vitesse de ce type de machine à cause de l'usure des balais. Le rendement et le rapport à ceux des machines à aimants permanents et cela à cause des pertes au rotor.

I. 11. 1. 3 Machines à reluctance variable (MRV)

La structure de la machine à reluctance variable est très simple et composée d'un rotor passif et d'enroulements concentriques au stator [Mek 04].

Le rotor de ce type de moteur ne contient ni aimant, ni bobinage d'excitation. Le couple est créé seulement grâce à l'effet reluctance. Le stator est semblable à celui de la majorité des machines à courant alternatif [Nou 08].

Le rotor est construit de manière à ce que le rapport entre l'inductance dans l'axe direct et en quadrature soit le plus important possible. La plage de fonctionnement en vitesse à puissance constante est directement liée à ce rapport.

L'obtention d'un rapport élevé induit des contraintes au niveau de la fabrication, qui se répercutent négativement sur le coût.

I. 11. 2 Machine asynchrone

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses [Mek 04]. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé.

La machine asynchrone est constituée d'un stator et d'un rotor séparés par un entrefer [Ben 05]:

- Le stator est analogue à celui des machines synchrones. Il porte un bobinage triphasé relié à la source d'alimentation ;
- Le rotor est cylindrique, il est formé par un empilage de disques de tôles encochées sur leur périphérie. Dans les encoches, on place un bobinage polyphasé en court-circuit.
- L'entrefer est plus étroit que dans les autres machines car il n'y a pas d'inducteur. La création du flux dans l'entrefer nécessite la consommation de puissance réactive prise à la source alimentant le stator.

La machine asynchrone est le candidat le plus adapté pour les éoliennes.

I. 11. 2. 1 Machine asynchrone à cage d'écureuil

Elle est robuste, assez bon marché et facilement industrialisable. Elle a une puissance massique assez élevée, ce qui conduit à un bon rendement.

Cependant, la principale difficulté reste son pilotage. L'excitation étant induite par les courants statoriques, la commande séparée du couple et du flux est difficile à faire. [Nou 08]

Une topologie consiste à relier directement la machine à cage d'écureuil au réseau. Un multiplicateur est associé à la machine et un banc de condensateurs assure sa magnétisation. La vitesse de rotation peut alors être faiblement variable, limitée par le glissement maximum de la machine. Son principal inconvénient est d'une part l'impossibilité de fonctionnement à vitesse variable, ce qui réduit la puissance pouvant être puisée du vent et d'autre part les problèmes d'accrochage / décrochage au réseau [Mek 04].

En utilisant des techniques de commande vectorielle et un convertisseur bidirectionnel on assure la génération à la fréquence et tension du réseau en présence de n'importe quelle vitesse du rotor. Le problème principal c'est que le dimensionnement du convertisseur doit être de la même puissance que celle de l'alternateur [Lob 03]. En même temps la distorsion harmonique générée pour le convertisseur doit être éliminée par un système de filtres de la même puissance. L'avantage de cette technique de conversion réside dans une plage de vitesses de rotor très large.

De plus, la présence des capacités est indispensable pour fournir l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine. Cette énergie ne peut pas être fournie par le réseau car le redresseur est unidirectionnel. Ces inconvénients ont freiné le développement industriel de cette structure [Mek 04].

I. 11. 2. 2 Machine asynchrone à double alimentation

Egalement appelée machine asynchrone à rotor bobiné et bagues (MARB), cette topologie est, actuellement, le meilleur choix des fabricants. Le stator est directement relié au réseau tandis que les grandeurs rotoriques sont commandées par un convertisseur statique. La maîtrise de l'état électromagnétique de la machine par le rotor permet de fonctionner à la fréquence et l'amplitude nominales du réseau même si le rotor s'éloigne de la vitesse de synchronisme. Le dimensionnement du convertisseur est proportionnel au glissement maximal du rotor, autrement dit, il dépend de l'écart maximal entre la vitesse de synchronisme et la vitesse réelle du rotor.

La diminution de puissance du convertisseur statique permet la minimisation des composants de filtrage et de conversion, l'accroissement de la fiabilité de l'électronique, la

diminution du coût de l'ensemble et l'amélioration de la qualité d'onde générée (grâce à la diminution de l'amplitude des courants commutés par le convertisseur et l'augmentation de la fréquence de hachage).

Par contre, l'adoption d'un rotor bobiné limite la capacité de surcharge et introduit des modes d'oscillation supplémentaires par rapport au rotor à cage, plus rigide dans sa construction. Pour une puissance nominale donnée, la machine à rotor bobiné sera plus encombrante et plus lourde que l'équivalent à cage. Pour finir, la présence des balais oblige des interventions de maintenance fréquentes [Lob 03].

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants utilisent ce type de machines [Mek 04].

I. 11. 2. 2. 1 Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée

L'utilisation d'une résistance rotorique variable (Fig. I. 6) permet une variation limitée de la vitesse à environ 10% autour de la vitesse de synchronisme. L'inconvénient de cette solution est la diminution du rendement du système de conversion à cause de la dissipation de la puissance rotorique dans les éléments résistifs.

Au lieu de dissiper la puissance disponible au rotor par effet joule, on peut récupérer cette puissance en la renvoyant sur le réseau électrique. Ceci améliore le rendement du système.

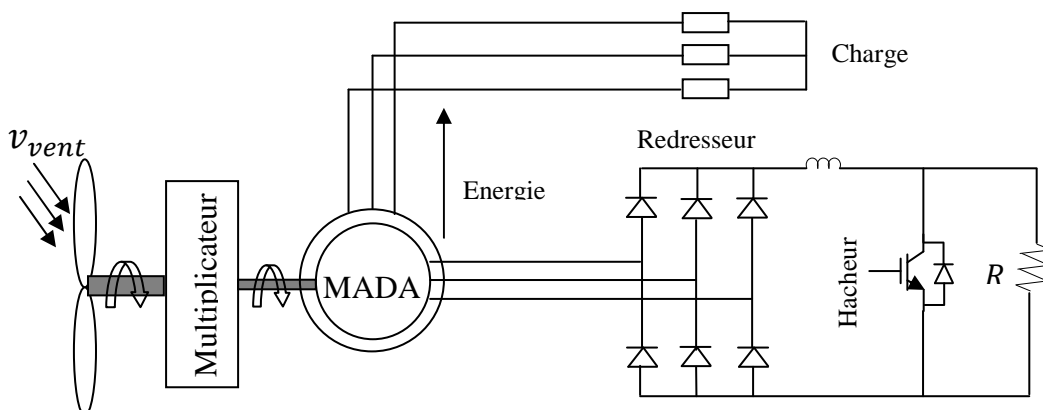


Fig. I. 6 MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée

I. 11. 2. 2 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer

L'ensemble redresseur onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Ce dispositif permet de faire varier la plage de conduction des diodes, de rendre variable la puissance extraite du circuit rotorique et donc le glissement de la génératrice asynchrone (Fig. I. 7). L'utilisation de thyristors 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) donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme.

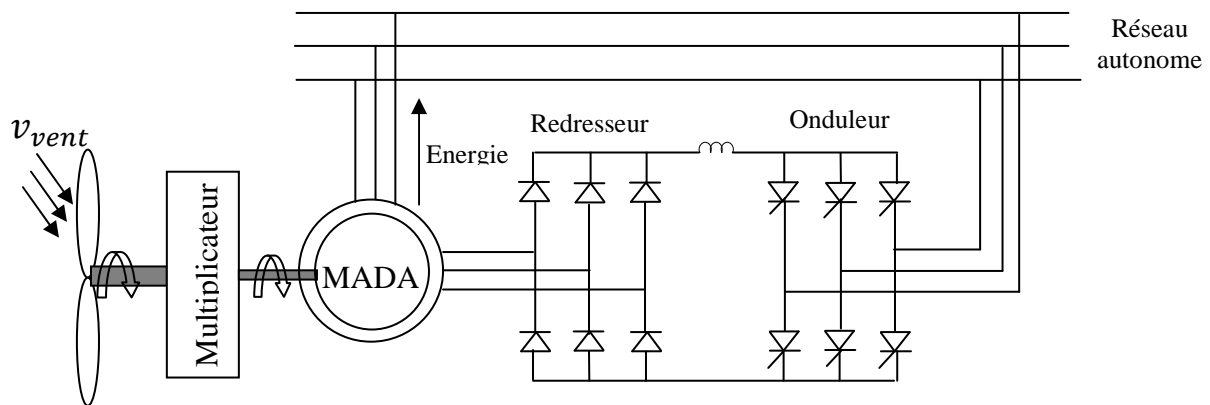


Fig. I. 7 MADA - Structure de Kramer

I. 11. 2. 3 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association redresseur onduleur peut être remplacée par un cycloconvertisseur (Fig. I. 8), l'ensemble est alors appelé structure de *Scherbius*. Comme le flux de la puissance est bidirectionnel, il est possible d'augmenter ou de diminuer l'énergie de glissement et ainsi faire fonctionner la machine en génératrice ou en moteur. 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 en MLI.

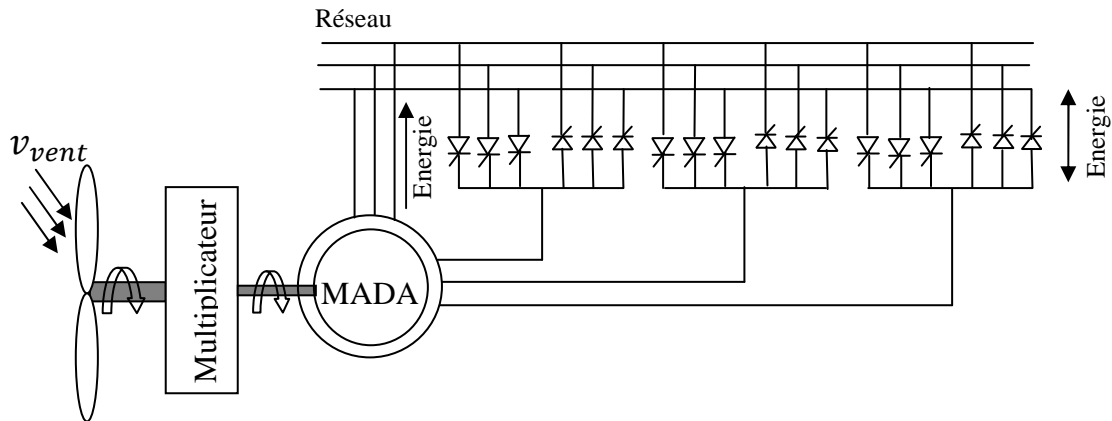


Fig. I. 8 MADA, structure de Scherbius avec un cycloconvertisseur

I. 11. 2. 2. 4 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Dans cette structure, le stator de la génératrice est directement lié au réseau alors que l'enroulement rotorique est connecté à ce même réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance, constituée de deux convertisseurs à MLI, et généralement d'un transformateur selon la plage de vitesses souhaitées (figure I. 9). Cette structure est actuellement en fort développement chez plusieurs constructeurs d'éoliennes de grandes puissances [Abn 11].

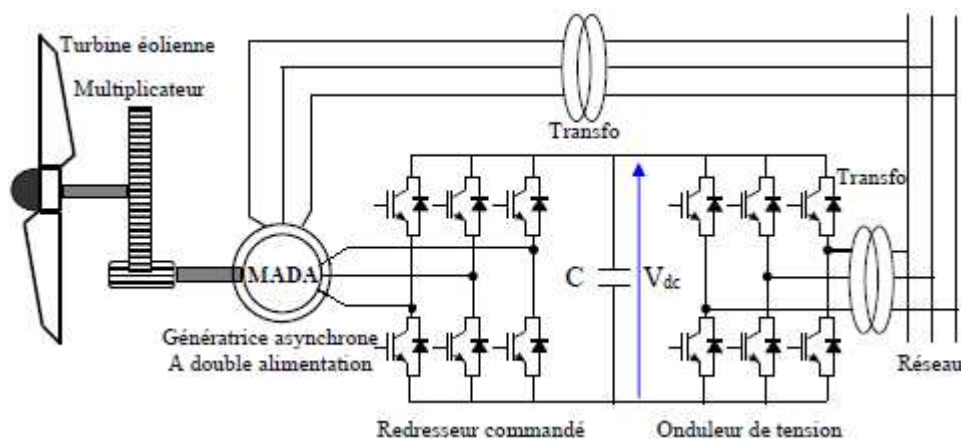


Fig. I. 9 Eolienne à base de MADA raccordée au réseau [Idj 10]

Cette structure permet un fonctionnement à vitesse variable sur une plage spécifique de fonctionnement, permettant ainsi l'optimisation de la puissance extraite pour les vents faibles et moyens.

En effet, même si la vitesse de synchronisme est imposée par la fréquence des tensions du réseau, sa caractéristique (couple – vitesse) est bien différente d'une machine asynchrone à rotor à cage. La MADA peut fonctionner aussi bien comme moteur ou générateur en mode hypo et hyper synchrone.

Contrairement aux autres architectures éoliennes où la machine est complètement isolée du réseau par les convertisseurs statiques, la structure proposée a son stator directement connecté au réseau, ce qui ne permet pas de réduire le flux de la machine.

I. 12 Différents modes de fonctionnement de la MADA

Les modes de fonctionnement de la MADA peuvent être présentés en fonction de glissement g comme suit [Tar 08]:

I. 12. 1 Stationnaire ($g=1$) le stator est alimenté directement par le réseau avec une fréquence f_s , le circuit rotorique est le siège d'une force électromotrice induite de fréquence f_r égale à celle du stator. Dans ce cas là la MADA se comporte comme un transformateur.

I. 12. 2 Hyposynchrone ($0 < g < 1$) on fait tourner le rotor dans la même direction du flux statorique, la fréquence du rotor commence à décroître. Plus la vitesse du rotor croît, plus la fréquence f_r décroît, par conséquent la tension induite diminue linéairement et la valeur minimale à la vitesse du synchronisme.

I. 12. 3 Synchrone ($g=0$) dans ce cas la vitesse mécanique du rotor est égale à celle du champ tournant. Par conséquent la fréquence f_r du rotor est nulle, et il n'y a aucune tension induite dans les enroulements du rotor.

I. 12. 4 Hypersynchrone ($g < 0$) par davantage d'accélération, la vitesse du rotor s'élève par rapport à celle du champ tournant, par conséquent la fréquence f_r devient négative, ce qui signifie que l'ordre de phase du rotor (a_r, b_r, c_r) s'inverse, ce qui engendre l'augmentation de la tension induite du rotor.

I.13 Avantages de la MADA

Comme les autres machines, la MADA présente quelques avantages qui sont liés à plusieurs facteurs, sa structure, sa stratégie de commande et ses applications; on peut citer comme avantages de la MADA :

– L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance avec toutes les

possibilités de récupération ou l'injection d'énergie dans les enroulements de la machine [WIP].

– La capacité de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse autour de la vitesse de synchronisme. De plus, l'application de la commande vectorielle associée à une technique de commande moderne permet d'obtenir un couple nominal jusqu'à deux fois sa vitesse nominale et avec un défluxage de trois fois pour la même vitesse.

– Dans la MADA, le circuit rotorique peut être piloté par un convertisseur de fréquence de puissance relativement faible par rapport au stator. Ce convertisseur rotorique de haute commutation est utilisé pour réaliser de hautes performances dynamiques en termes de temps de réponse, de minimisation des harmoniques et d'amélioration de rendement [WIP].

– L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille des convertisseurs d'environ 70 % en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques. Cette machine est économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur.

– En fonctionnement générateur, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée.

Son utilisation est préférée pour ses propriétés de réglage de vitesse par action sur des résistances placées dans le circuit rotorique, et encore sa possibilité de démarrer sans demander un courant important du réseau [Kat 01].

Néanmoins cette machine a quelques inconvénients à savoir:

- Elle est volumineuse qu'une machine asynchrone (MAS) à cage;
- Le marché traditionnel est conquis par la MAS à cage, très étudié et très connue;
- Usure du système (bagues-balais) et jaillissement d'étincelles lors du frottement des balais sur les bagues.

I.14 Domaines d'application de la MADA

Actuellement la machine asynchrone à double alimentation occupe une large place dans les applications industrielles, grâce à ces nombreux avantages. En effet, la MADA est très utilisée en mode générateur dans les applications d'énergie renouvelable notamment dans les systèmes éoliens [Abd 07]. De plus, le fonctionnement en générateur présente la

MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée telles que:

- Les générateurs des réseaux de bord des navires ou des avions;
- Les centrales hydrauliques à vitesse variable;
- Les groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

La MADA peut être utilisée aussi dans d'autres applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage, telles que **[Aim 04]**:

- La métallurgie avec les enrouleuses et les dérouleuses de bobines ;
- La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime;
- L'application de levage, les ascenseurs, les monte-charges... etc.

On note que les applications de la MADA en moteur sont relativement très limitées, parmi celles-ci on trouve principalement, la traction électrique et les systèmes de pompage.

I.15 Conclusion

L'énergie électrique est l'énergie la plus importante et la plus noble parmi toutes les autres formes d'énergies. Ainsi la proportion électrique par rapport à l'énergie totale consommée, ne cesse pas de croître, il faudrait pour cela pouvoir développer suffisamment les énergies renouvelables pour pouvoir diminuer la consommation absolue (et non relative) d'énergies fossiles; les énergies renouvelables sont aussi parfois présentées comme une solution au problème de l'environnement.

Dans ce chapitre nous avons cité les applications, les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne. Une fois les différents types d'aérogénérateurs et leurs modes de fonctionnement présentés, nous avons accédé à l'étude comparative des machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne pour un réseau autonome

A partir de là, on a choisi la machine asynchrone à double alimentation et on a montré ses avantages et ses domaines d'application.

Cette dernière consiste à élaborer un modèle de la structure qui soit le plus simple et le plus précis possible. C'est l'objet du deuxième chapitre de ce mémoire.

Chapitre II

Modélisation et simulation d'aérogénérateur connecté au réseau

CHAPITRE II

**MODELISATION ET SIMULATION D'AEROGENERATEUR
CONNECTE AU RESEAU**

II. 1 Introduction

La modélisation d'un système quelconque s'impose pour l'application d'une commande particulière. Dans le présent chapitre, on s'intéressera à la modélisation de la turbine, de la machine asynchrone à rotor bobiné et des convertisseurs statiques. De nombreux phénomènes compliqués interviennent dans le fonctionnement de la MADA, tel que la répartition des enroulements, la saturation, l'effet de peau, etc.

Cependant, certaines hypothèses simplificatrices permettent de contourner cette difficulté. Le modèle de la machine asynchrone à rotor bobiné est un système à des équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, pour résoudre un tel système, l'utilisation de l'outil informatique s'avère déficient; dès lors, l'utilisation de la transformation de Park est indispensable.

Pour simuler le comportement dynamique de la machine asynchrone à double alimentation, on utilisera l'interface SIMULINK de MATLAB.

Enfin, des résultats de simulation seront présentés pour le cas de l'alimentation de la MADA avec une structure partiellement interfacée avec le réseau.

II. 2 Description du système étudié

La structure proposée est constituée d'une turbine éolienne, une machine asynchrone à double alimentation et d'un convertisseur d'électronique de puissance. Ce dernier est une cascade (Redresseur, Filtre et Onduleur), l'ensemble est représenté dans la figure II.1.

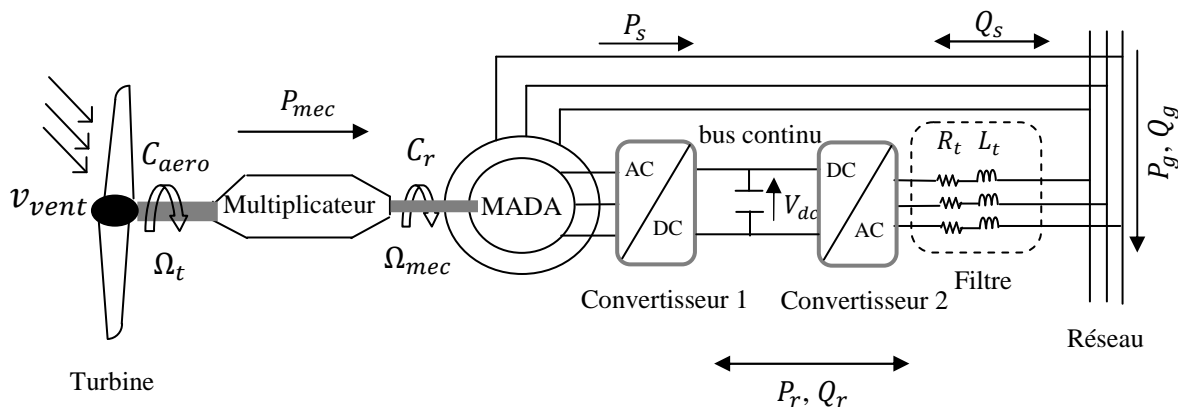


Fig. II.1 Schéma global de la structure étudiée

II. 3 Modélisation du système éolien

Le modèle de la turbine permet de déterminer la puissance extraite par la turbine en fonction de la vitesse (incidente) du vent, de sa vitesse de rotation et de la position de l'angle de calage des pales. Il sera ainsi possible de déduire le couple appliqué par la turbine sur l'arbre lent de l'éolienne. Il s'attache donc à décrire le coefficient de puissance de la turbine C_p .

L'aéro-turbine transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, ce qui est assuré par un multiplicateur de vitesse de gain G qui permet à la fois de diminuer le couple et d'augmenter la vitesse de rotation liée à un générateur électrique qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

II. 3. 1 Génération du couple éolien

Le principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique a été présenté au chapitre I. On présente sur la figure II.2 le profil aérodynamique d'une pale d'une turbine à axe horizontal ainsi que le profil des pales. On notera également que la turbine modélisée dans cette étude dispose d'un angle de calage nul.

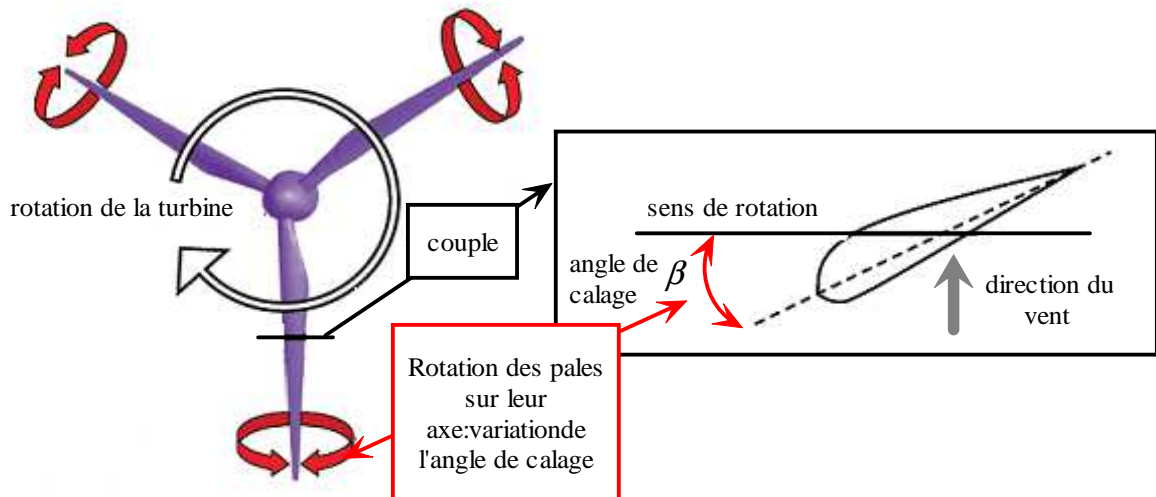


Fig. II. 2 Profil aérodynamique d'une pale

II. 3. 2 Modélisation et principe de contrôle de la turbine

Le dispositif, qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G (figure II. 3).

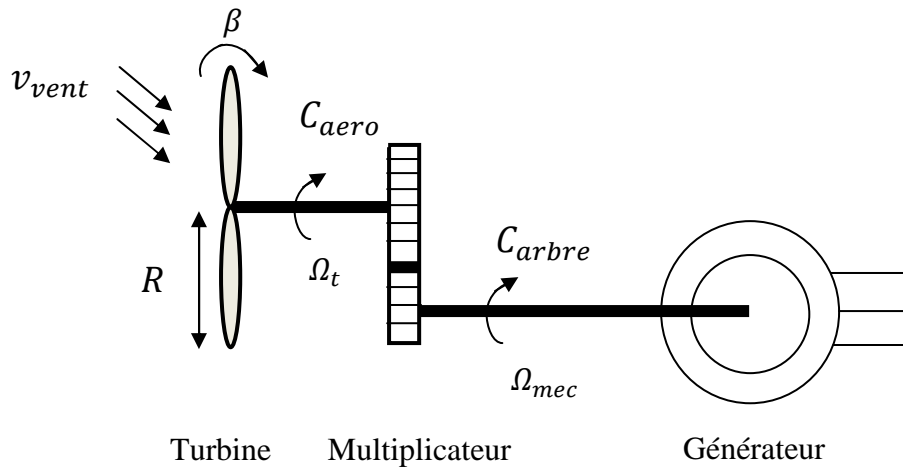


Fig. II. 3 Schéma de la turbine éolienne

La puissance du vent ou la puissance éolienne est définie de la manière suivante [Nay 87]:

$$P_{vent} = \frac{\rho}{2} \cdot S \cdot v_{vent}^3 \quad (\text{II.1})$$

Avec:

ρ : Densité de l'air qui est égale à 1.22 kg/m^3 à la pression atmosphérique à 15°C ;

S : Surface balayée par la turbine;

v_{vent} : Vitesse du vent;

La puissance du vent n'est pas totalement captée par les pales, d'où la puissance aérodynamique est inférieure à celle du vent, dans le cas où l'angle de calage des pâles $\beta = 0$, les deux puissances sont liées par l'expression suivante :

$$P_{aero} = C_p(\lambda) P_{vent} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

C_p : Coefficient de performance ou coefficient de puissance, représente le rapport de la puissance récupérée sur la puissance récupérable [Poi 03].

Le coefficient de puissance C_p dépend de la vitesse du vent, du nombre de pales, de leur rayon et de leur vitesse de rotation. Pour les éoliennes actuelles, on atteint des valeurs de 0.45 à 0.5 [Ghe 08]. La figure II. 4 représente la variation de C_p en fonction du rapport de vitesse λ pour une éolienne tripale avec un angle de calage des pales nul.

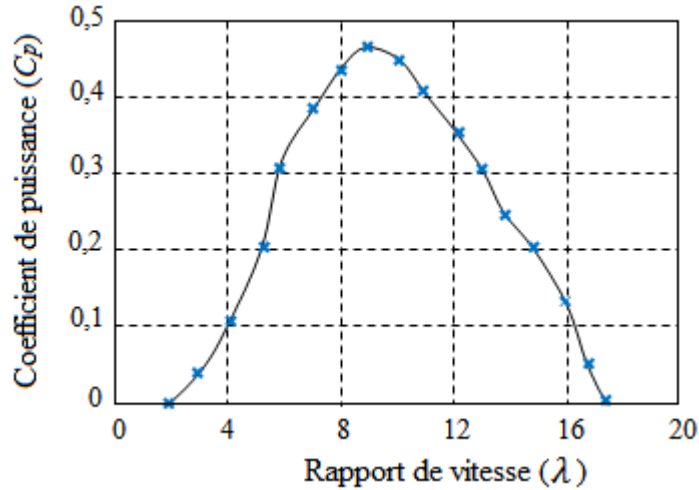


Fig. II. 4 Coefficient de puissance C_p en fonction de rapport de vitesse λ

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

$$\lambda = \frac{R\Omega_t}{v_{vent}} \quad (\text{II.3})$$

Où: Ω_t : Vitesse angulaire de la turbine;

R : Rayon des pales.

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique (éolien) est déterminé par la relation suivante :

$$C_{aero} = \frac{P_{aero}}{\Omega_t} = C_p(\lambda) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot S \cdot v_{vent}^3 \cdot \frac{1}{\Omega_t} \quad (\text{II.4})$$

II. 3. 3 Modèle du multiplicateur

Les vitesses mécaniques de la turbine et celle de la génératrice sont liées par le gain du multiplicateur comme suit :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{II.5})$$

Les couples sur l'arbre lent $C_{aéro}$ et sur l'arbre rapide C_{arbre} sont exprimés par la relation suivante :

$$C_{arbre} = \frac{C_{aero}}{G} \quad (\text{II.6})$$

II.3.4 Equation dynamique de l'arbre

Les masses des différents éléments de la turbine sont représentées par l'inertie $J_{turbine}$. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine ramenée sur l'axe rapide et celle de la génératrice J_g , et on suppose que le

multiplicateur de vitesse est idéal. L'inertie totale J est donnée par l'expression suivante:

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \tag{II.7}$$

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

$$J \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = \Sigma C = C_{méc} \tag{II.8}$$

Le couple mécanique $C_{méc}$ est fonction du couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, du couple des frottements visqueux C_{visq} , et du couple sur l'arbre rapide C_{arbre} .

$$C_{méc} = C_{arbre} - C_{em} - C_{visq} \tag{II.9}$$

Le couple visqueux est donné par l'expression suivante:

$$C_{visq} = f \cdot \Omega_{méc} \tag{II.10}$$

Avec:

f : Coefficient des frottements visqueux.

On établit à partir des équations précédentes, un schéma bloc fonctionnel du modèle de la turbine (figure II. 5). Il nous montre que la vitesse de rotation de la turbine est contrôlée, par action sur le couple électromagnétique de la génératrice. La vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système.

La vitesse du vent est variable dans le temps, et pour garantir un captage maximal de l'énergie éolienne incidente, il faut ajuster en permanence la vitesse de rotation de la turbine à celle du vent, ceci est réalisé en utilisant la technique (MPPT).

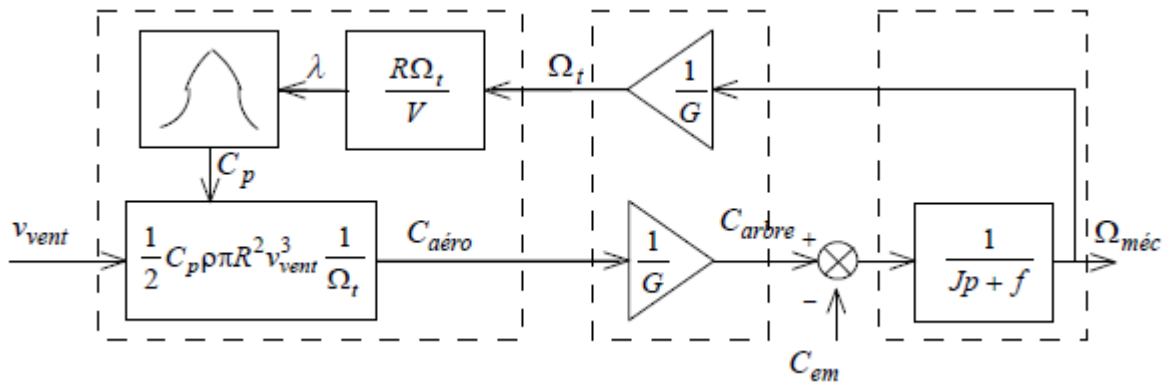


Fig. II. 5 Schéma bloc fonctionnel du modèle de turbine

A partir de la vitesse du vent mesurée, on détermine la vitesse mécanique optimale de la turbine (correspondant à λ_{opt} et $\beta=0^\circ$, voir fig. II. 4), en multipliant cette dernière par la valeur du gain du multiplicateur on obtient la vitesse mécanique du rotor de la MADA, qui est utilisée comme grandeur de référence pour un régulateur; ce dernier élabore une consigne de commande, convenant au couple électromagnétique que devrait développer la machine pour passer à la vitesse optimale. Le couple issu de l'asservissement de vitesse, sera utilisé comme grandeur de référence du couple dans la structure fonctionnelle du modèle de la turbine (fig. II. 5). L'ensemble est représenté par la figure II. 6.

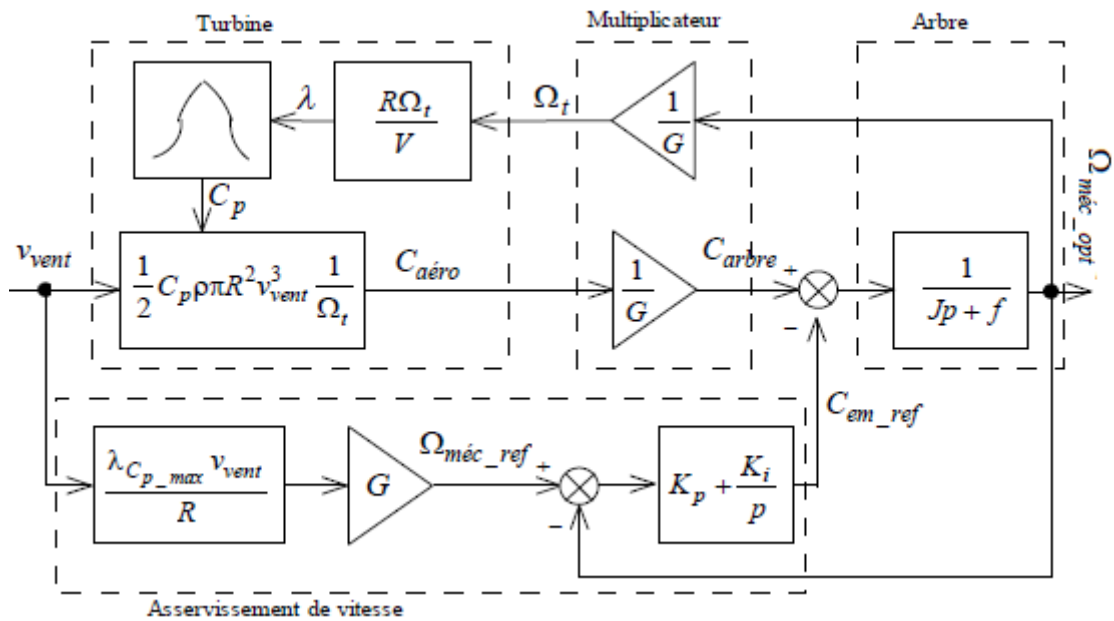


Fig. II. 6 Schéma bloc fonctionnel avec asservissement de la vitesse mécanique

Le correcteur de vitesse utilisé est de type proportionnel intégral (PI), le calcul des paramètres du correcteur est donné en Annexe A.

En remplaçant, le coefficient de puissance C_p par $C_{p_{max}}$ et λ par λ_{opt} , dans l'expression de la puissance aérodynamique (II. 2), en négligeant les pertes, on obtient l'expression de la puissance mécanique optimale suivante :

$$P_{méc\ opt} = -\frac{1}{2} C_{p\ max} \frac{\rho \pi R^5}{G^3 \lambda_{opt}^3} \Omega_{méc}^3 \quad (II. 11)$$

Le signe (-) dans l'expression (II. 11) est utilisé pour désigner une puissance générée.

II. 4 Description de la machine asynchrone double alimentée

Une machine asynchrone à double alimentation est une machine à courant alternatif dont la vitesse varie en fonction de la charge. Elle se compose d'un primaire dit stator qui est

fixe, et d'un secondaire qui est le rotor de forme cylindrique qui est mobile. Le stator a trois enroulements couplés en étoile ou en triangle qui sont alimentés par un système triphasé de tension [Ghe08]. Les enroulements statoriques sont alimentés par le réseau et les enroulements rotoriques sont alimentés à travers un convertisseur de fréquence, ou bien les deux enroulements sont alimentés par deux onduleurs autonomes en général. La figure (II. 7) représente la structure de la machine asynchrone à double alimentation.

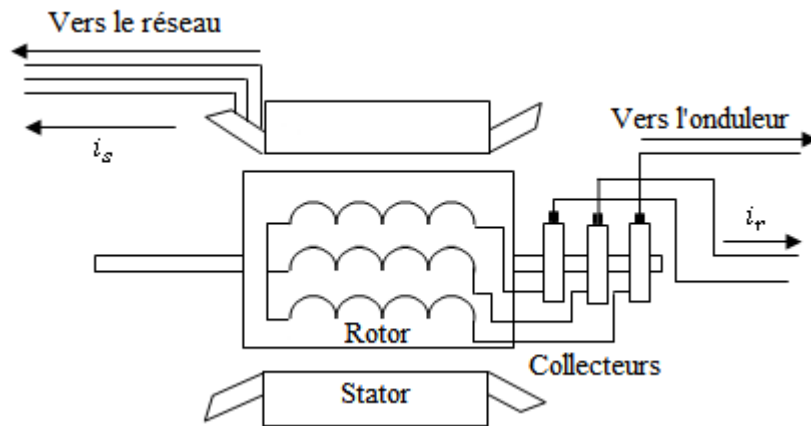


Fig. II. 7 Schéma de la machine asynchrone à rotor bobiné avec des bagues collectrices

Il en résulte la création d'un champ magnétique glissant dans l'entrefer de la machine, où sa vitesse est $\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$, où ω_s désigne la pulsation du réseau d'alimentation triphasé, et p est le nombre de paire de pôles du champ magnétique qui apparaît au niveau du stator. Le rotor de la machine, supporte un bobinage triphasé avec un même nombre de pôles que celui du stator.

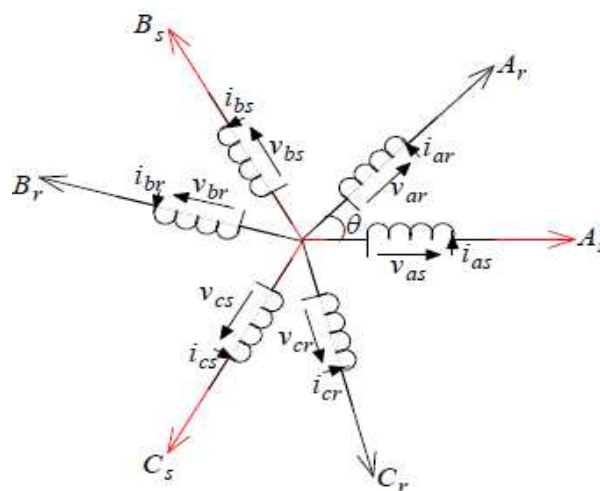


Fig. II. 8 Représentation schématique de la MADA

Le rotor tourne à la vitesse $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ par rapport au stator, avec θ l'angle entre le repère statorique et le repère rotorique. La représentation schématique de la machine asynchrone à double alimentation est montrée sur la figure II.8.

II. 5 Hypothèses simplificatrices

Pour notre étude, nous considérons les hypothèses suivantes:

- Le circuit magnétique est non saturé;
- Les pertes (par hystérésis et courant de Foucault) sont négligées;
- Les forces magnétomotrices créées par chacune des phases des deux armatures sont à répartition sinusoïdale, la f.m.m est variable, les inductances propres sont des constantes et que les inductances mutuelles entre deux enroulements sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre leurs axes magnétiques;
- Les résistances ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de Peau.

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

II. 6 Modèle de la machine asynchrone à double alimentation

II. 6. 1 Equations électriques

La loi de Faraday et la loi d'Ohm permettent de relier les tensions sur les enroulements aux flux totalisés et aux courants dans ces bobinages. Avec les conventions utilisées, les équations matricielles suivantes expriment les tensions sur les différents enroulements:

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] [i_s] + \frac{d}{dt} [\phi_s] \\ [V_r] = [R_r] [i_r] + \frac{d}{dt} [\phi_r] \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

Les flux sont donnés par:

$$\begin{cases} [\phi_s] = [L_{ss}] [i_s] + [M_{sr}] [i_r] \\ [\phi_r] = [L_{rr}] [i_r] + [M_{sr}] [i_s] \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

En appliquant la transformée de Laplace, et en remplaçant (II.13) dans (II.12), on obtient:

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] [i_s] + p([L_{ss}] [i_s] + [M_{sr}] [i_r]) \\ [V_r] = [R_r] [i_r] + p([L_{rr}] [i_r] + [M_{sr}] [i_s]) \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Avec:

$$[V_s] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}; [i_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}; [\phi_s] = \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix}; [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

$$[V_r] = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix}; [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}; [\phi_r] = \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

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

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

Où:

$[V_s]$, $[V_r]$: vecteurs de tensions statorique et rotorique;

$[i_s]$, $[i_r]$: vecteurs de courant statorique et rotorique;

$[\phi_s]$, $[\phi_r]$: vecteurs de flux statorique et rotorique;

$[R_s]$, $[R_r]$: vecteurs de résistances statorique et rotorique;

$[L_{ss}]$, $[L_{rr}]$: vecteurs d'inductances statorique et rotorique;

$[M_{sr}]$: matrice des inductances mutuelles stator-rotor, $[M_{sr}]^t = [M_{rs}]$;

l_s , l_r : inductances propres d'une phase statorique et rotorique;

$L_s = l_s - M_s$, $L_r = l_r - M_r$: inductances cyclique d'une phase statorique et rotorique;

M_s , M_r : inductances mutuelles entre deux phases respectivement statorique et rotorique;

M : maximum d'inductance mutuelle entre une phase statorique et rotorique (les axes des deux phases coïncident);

p : opérateur de Laplace ;

θ : Ecart angulaire entre deux phases, statorique et rotorique correspondant.

II. 6. 2 Expression du couple électromagnétique

L'expression générale du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_{em} = \frac{1}{2} p [i]^T \frac{d[L]}{dt} [i] \quad (\text{II.15})$$

Avec:

$$[i] : \text{Matrice de courant total, } [i] = \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix};$$

$$[L] : \text{Matrice inductance totale, } [L] = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}] & [L_{rr}] \end{bmatrix};$$

Compte tenu que tous les termes des sous matrices $[L_{ss}]$ et $[L_{rr}]$ sont à coefficients constants, on aura:

$$C_{em} = \frac{1}{2} p [i]^T \left(\frac{d}{d\theta} [M_{sr}] [i_r] \right) \quad (\text{II.16})$$

II. 6. 3 Equation mécanique

D'après la loi fondamentale de la dynamique nous pouvons écrire :

$$J \frac{d}{dt} \Omega_{méc} = C_{arbre} - C_{em} - C_{vis} \quad (\text{II.17})$$

II. 7 Modèle biphasé de la MADA

II. 7. 1 Transformation de Park

Le principe de la transformation de Park consiste à remplacer les grandeurs (courant, tension et flux) d'indices réelles a, b, c par des grandeurs d'indices d, q, o (direct, en quadrature et homopolaire) à l'aide de la matrice de Park $[P(\theta)]$. On transforme le système triphasé en un système biphasé tournant.

La transformation de Park définie par la matrice de rotation $[P(\theta)]$ est donnée sous la forme suivante:

$$[x_{dqo}] = [P(\theta)] [x_{abc}] \quad (\text{II.18})$$

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

II. 7. 2 Modèle de la MADA selon le système d'axes (d, q)

Afin de rechercher les lois de contrôle d'une machine à courant alternatif, nous pouvons la modéliser dans un repère (d, q) tournant dont l'orientation est à priori arbitraire (Fig. II. 9). Ce modèle est obtenu après transformation virtuelle de la machine triphasée en machine diphasée équivalente.

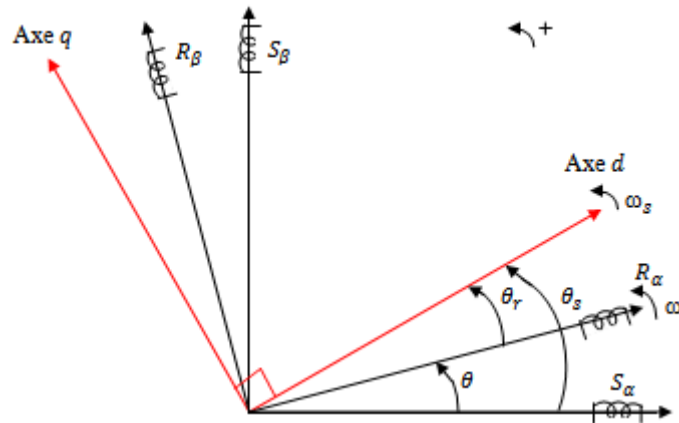


Fig. II. 9 Différents systèmes d'axes utilisés

Ainsi dans ce repère, (S_α, S_β) sont les enroulements diphasés équivalents statoriques et (R_α, R_β) les enroulements diphasés équivalents rotoriques. Dans les repères fixes (S_α, S_β) et (R_α, R_β) toutes les variables du modèle sont alternatives, alors que le repère tournant (d, q) , elles sont constantes. Les enroulements statoriques sont stationnaires, alors que les enroulements rotoriques sont repérés par un angle variable θ . Il représente la position angulaire électrique du rotor par rapport à l'armature du stator [Vid 04].

II. 7. 2. 1 Choix du référentiel

Trois types de référentiels existent dans la pratique, le choix se fait selon le problème à étudier.

II. 7. 2. 1. 1 Référentiel lié au stator

Dans ce référentiel, on a :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \quad \text{or} \quad \theta_s = \theta_r + \theta$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 = \frac{d\theta_r}{dt} + \frac{d\theta}{dt}$$

D'où :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -p\Omega$$

Ce référentiel est utilisé dans le régime transitoire avec une variation importante de la vitesse de rotation.

Telque :

θ_s est la position angulaire relative de l'axe d du repère tournant (d, q) par rapport à la bobine diphasée équivalente du stator notée S_α .

θ_r est la position angulaire relative de l'axe d du repère tournant (d, q) par rapport à la bobine diphasée équivalente du rotor notée R_α .

II. 7. 2. 1. 2 Référentiel lié au rotor

Dans ce référentiel, on a :

$$\begin{aligned}\frac{d\theta_r}{dt} &= 0 \\ \frac{d\theta_s}{dt} &= \frac{d\theta}{dt} = p\Omega\end{aligned}$$

Ce référentiel est utilisé dans le régime transitoire où la vitesse de rotation est considérée constante.

II. 7. 2. 1. 3 Référentiel lié au champ tournant

Dans celui-ci, on a :

$$\begin{aligned}\frac{d\theta}{dt} &= \omega_s \\ \frac{d\theta_r}{dt} &= \omega_s - p\Omega\end{aligned}$$

Ce référentiel n'introduit pas des simplifications dans la transformation des équations électriques.

Dans notre étude le modèle a été exprimé dans le repère (d, q) lié au champ tournant.

II. 7. 3 Application de la transformation de Park à la MADA

En appliquant la transformée de Park pour chaque vecteur défini précédemment (tension, courant, flux), en remplaçant dans la matrice de Park θ par θ_s pour les équations du stator et θ par θ_r pour celles du rotor, on obtient :

II. 7. 3. 1 Equations électriques

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_s \cdot \Phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega_s \cdot \Phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (\omega_s - \omega) \cdot \Phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (\omega_s - \omega) \cdot \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

Où : $\omega_r = \omega_s - \omega$.

$$\text{Avec:} \begin{cases} \omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \\ \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

II. 7. 3. 2 Equations magnétiques

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

II. 7. 3. 3 Expression du couple électromagnétique

L'expression du couple électromagnétique en fonction des flux statoriques et courants rotoriques est comme suit :

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_s} \cdot (\Phi_{ds} \cdot i_{qr} - \Phi_{qs} \cdot i_{dr}) \quad (\text{II.22})$$

Avec :

p : Nombre de paires de pôles.

II. 8 Stratégie de commande de la MADA

Les différentes stratégies de commande de la MADA reposent sur deux approches à savoir:

- ♦ Une approche basée sur un contrôle du flux en boucle fermée, cette approche est nécessaire lorsque le réseau est instable (tension et flux variables).
- ♦ Une approche basée sur un contrôle du flux en boucle ouverte, cette approche est utilisée quand le réseau est stable (tension et fréquence constantes).

Dans ce deuxième chapitre, on considère que le réseau est stable, c'est pourquoi on a opté pour la deuxième approche.

En choisissant un référentiel diphasé (d, q) lié au champ tournant, et en alignant le vecteur flux statorique Φ_s avec l'axe 'd' (afin de réaliser un découplage), nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = \Phi_s \\ \Phi_{qs} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

L'expression du couple électromagnétique devient :

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_s} \cdot (\Phi_s \cdot i_{qr}) \quad (\text{II.24})$$

Dans la production éolienne, on utilise les machines de moyenne, et de forte puissance, sur ce on peut négliger la résistance statorique, et dans la deuxième approche suscitée (flux statorique constant), on peut écrire les expressions des tensions et des flux statoriques comme suit :

$$\begin{cases} v_{ds} = 0 \\ v_{qs} = V_s = \omega_s \cdot \Phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = \Phi_s = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ \Phi_{qs} = 0 = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

A partir du système d'équations (II.21), nous pouvons exprimer les courants statoriques i_{ds} et i_{qs} en fonction des courants rotoriques i_{dr} et i_{qr} comme suit:

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{1}{L_s} \cdot \Phi_s - \frac{M}{L_s} \cdot i_{dr} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_s} \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

II. 8. 1 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques

Les puissances actives et réactives de la MADA, sont exprimées par les relations suivantes:

$$\begin{cases} P_s = v_{ds} \cdot i_{ds} + v_{qs} \cdot i_{qs} \\ Q_s = v_{qs} \cdot i_{ds} - v_{ds} \cdot i_{qs} \\ P_r = v_{dr} \cdot i_{dr} + v_{qr} \cdot i_{qr} \\ Q_r = v_{qr} \cdot i_{dr} - v_{dr} \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

En remplaçant les courants i_{ds} et i_{qs} par leurs expressions données (équation II.27), dans les relations de puissances statoriques on obtient :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q_s = V_s \cdot \frac{\Phi_s}{L_s} - V_s \cdot \frac{M}{L_s} i_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

Avec $\Phi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$ est constant pour toute vitesse de rotation, et la relation de la puissance réactive devient alors :

$$Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s \cdot L_s} - \frac{V_s \cdot M}{L_s} i_{dr} \quad (\text{II.30})$$

II. 8. 2 Relations entre tensions et courants rotoriques

En remplaçant les courants statoriques par leurs expressions dans les relations (II.21), on obtient le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} \phi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{dr} + \frac{V_s \cdot M}{\omega_s \cdot L_s} \\ \phi_{qs} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

Ces expressions des flux d'axes 'd' et 'q' sont alors portées dans les expressions des tensions rotoriques (II.20), nous obtenons alors :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{d}{dt} i_{dr} - g \cdot \omega_s \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{d}{dt} i_{qr} + g \cdot \omega_s \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{dr} - g \cdot \left(\frac{V_s \cdot M}{L_s} \right) \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

En régime permanent, le système d'équations (II.32), s'écrit :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} - g \cdot \omega_s \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + g \cdot \omega_s \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{dr} - g \cdot \left(\frac{V_s M}{L_s} \right) \end{cases} \quad (II.33)$$

Avec v_{dr} et v_{qr} sont les tensions à imposer au rotor pour obtenir les courants voulus et par conséquent les puissances désirées.

Les équations (II.29), (II.30) et (II.33) permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler (Figure II. 10).

Ce dernier fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances active et réactive statoriques. Il montre également que nous pouvons mettre en place une commande vectorielle étant donné qu'à l'influence des couplages près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec son propre régulateur. Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront: la puissance réactive pour l'axe 'q' rotorique et la puissance active pour l'axe 'd' rotorique. La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal.

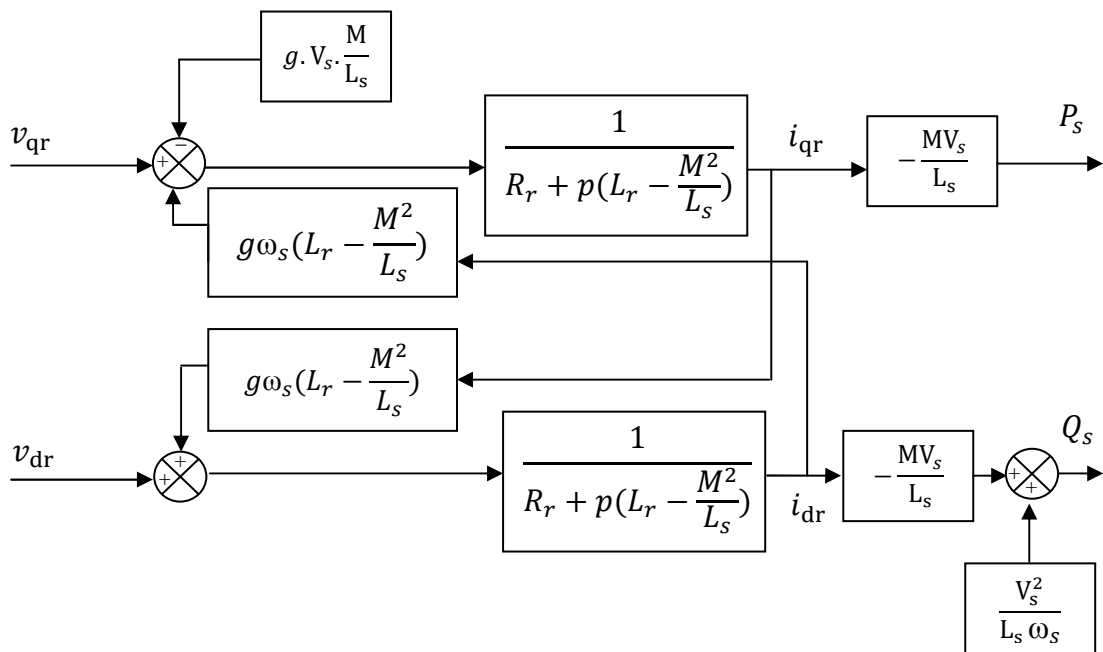


Fig. II. 10 Schéma-bloc du système à réguler

II. 8. 3 Expressions des puissances active et réactive de l'aérogénérateur

Les puissances active et réactive de l'aérogénérateur s'écrivent comme suit:

$$\begin{cases} P_g = P_s + P_{rr} \\ Q_g = Q_s + Q_{rr} \end{cases} \quad (II.34)$$

II. 8. 4 Expressions des puissances active et réactive à réguler

En négligeant certains termes, on trouve les équations des puissances active et réactive de l'aérogénérateur comme suit :

$$\begin{cases} P_g = (g - 1) \cdot V_s \cdot \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q_g = \frac{V_s^2}{\omega_s \cdot L_s} - V_s \cdot \frac{M}{L_s} i_{dr} \end{cases} \quad (II.35)$$

Le contrôle des grandeurs rotoriques de la MADA permet la gestion des puissances mise en jeu par l'aérogénérateur (Fig. II.11).

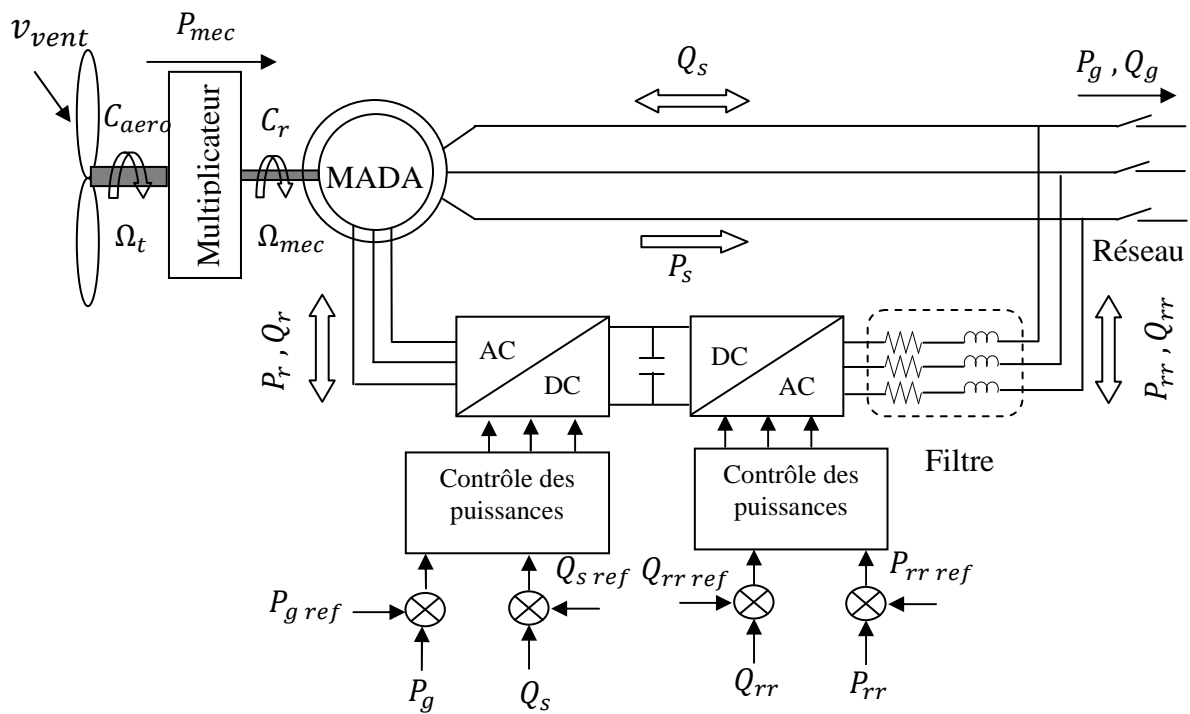


Fig. II. 11 Principe de régulation des puissances

II. 9 Commande vectorielle en puissance de la MADA

II. 9. 1 Principe général

Le principe général de la commande vectorielle en puissances active et réactive de la MADA est donné sur la figure II.12. La consigne de puissance réactive est maintenue nulle et la consigne de puissance active est produite par l'aérogénérateur.

Les blocs PI_i et PI'_i représentent les régulateurs des puissances active et réactive. Le but de ces régulateurs est d'obtenir des performances dynamiques élevées et une bonne robustesse. Pour atteindre ces objectifs, on a utilisé des régulateurs proportionnels intégraux (Annexe A).

Nous pouvons constater la présence de deux régulateurs sur chaque axe (PI_1 et PI_2) pour l'axe d et (PI'_1 et PI'_2) pour l'axe q.

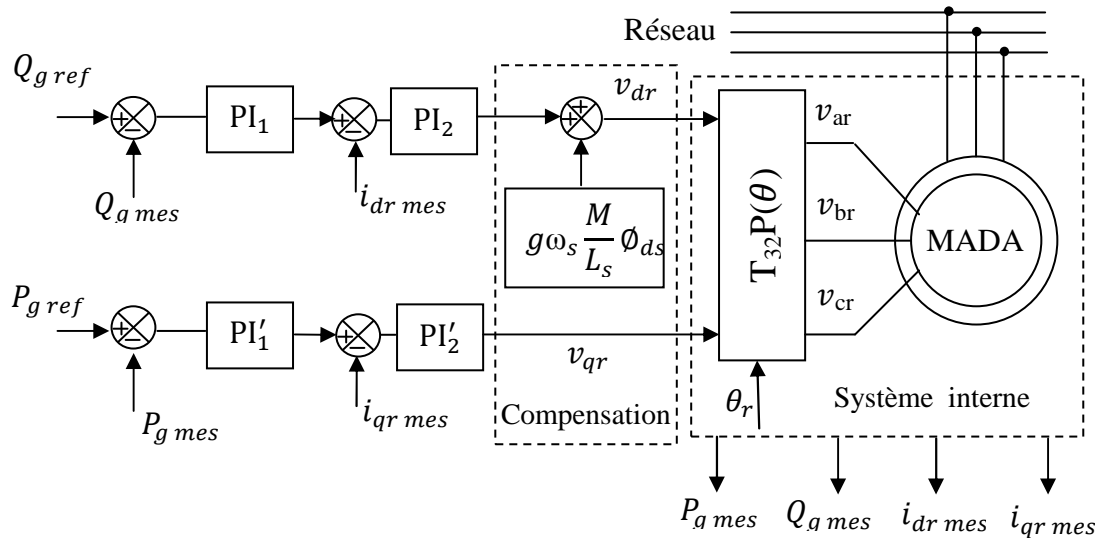


Fig. II. 12 Principe générale de la commande vectorielle en puissance de la MADA

Dans ce chapitre, nous considérons que la machine est connectée sur un réseau stable, la tension V_s est par conséquent constante et les régulateurs PI_2 et PI'_2 sont inutiles. Chaque axe comporte donc un seul régulateur comme indiqué sur la figure II.13.

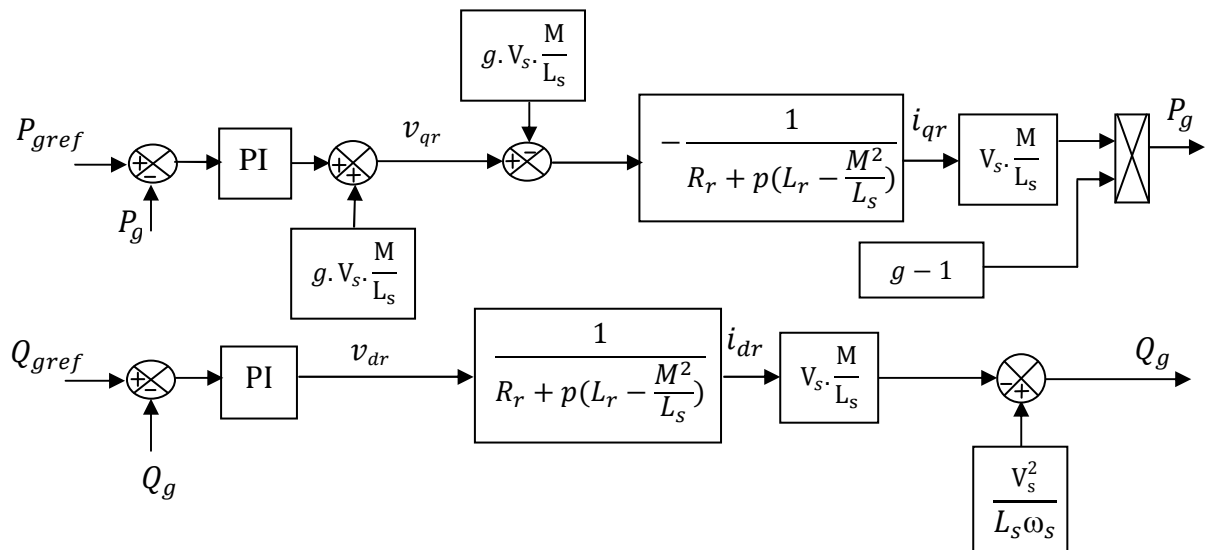


Fig. II. 13 Schéma de la commande vectorielle en puissance de la MADA

II. 9. 2 Objectifs du contrôle

Bien que la dynamique du dispositif éolien soit relativement lente par rapport à l'évolution des grandeurs électriques, les régulateurs de la commande vectorielle seront calculés de façon à obtenir les performances les plus élevées possibles tant au niveau de la dynamique qu'à celui de la robustesse et du rejet de perturbations. Ainsi, au cours de la synthèse de ces régulateurs, nous ferons en sorte d'obtenir une dynamique électrique du système aussi rapide que l'autorise la fréquence de la MLI du convertisseur rotorique, ceci dans l'optique de l'insertion du dispositif dans un système éolien à vitesse variable ou dans un autre système utilisant la MADA en génératrice.

Les lois de commande élaborées doivent autoriser cette dynamique sans engendrer des dépassements qui peuvent nuire à la durée de vie de la machine et des convertisseurs. Elles devront également opérer un bon rejet des perturbations qui peuvent être nombreuses sur un tel système étant donnés la complexité et le nombre important de capteurs mis en jeu. Enfin, elles devront satisfaire aux exigences de robustesse face aux variations de paramètres qui peuvent intervenir dans les machines électriques notamment à cause des variations de température. La consigne de puissance réactive statorique sera maintenue nulle de façon à garder un facteur de puissance unitaire côté stator. La consigne de puissance active permettra à la machine de fonctionner à la puissance maximale conférant le meilleur rendement possible au système éolien.

Un essai en boucle ouverte sera préalablement réalisé en simulation afin de déterminer la caractéristique donnant la vitesse de rotation de la machine en fonction de la puissance de référence imposée par la régulation.

II. 10 Alimentation de la MADA par onduleurs de tension à commande MLI

II. 10. 1 Modélisation de l'onduleur de tension à MLI côté machine

II. 10. 1. 1 Convertisseurs à commutation forcée

Un onduleur autonome (à commande adjacente ou à M.L.I) est un convertisseur statique qui assure la transformation de l'énergie d'une source continue en une énergie alternative, qui peut être à fréquence fixe ou variable [Ney88].

Le contrôle de la vitesse et du couple de la MADA se réalise par action simultanée sur la fréquence et sur l'amplitude de la tension rotorique, à base d'onduleurs de tension à fréquence variable. Le rotor de la MADA est connecté à un onduleur triphasé à commutations commandées.

Ces convertisseurs sont commandés par modulation de largeur d'impulsions (MLI) et possédant comme objectif principal la bidirectionnalité du passage de la puissance permettant à la machine le fonctionnement en deux régimes hypo-synchrone et hypersynchrone. Aussi, avec la technique de commande à MLI facilite l'opération de filtrage et réduire la taille des éléments du filtre associé.

Ce convertisseur est constitué de trois branches (ou bras), chacune est composée de deux paires d'interrupteurs supposés parfaits, à commutation instantanée et à chute de tension négligeable aux bornes, avec des commandes complémentaires. Chaque interrupteur k_{ij} , où i est le numéro de bras (1,2,3) et j le numéro de l'interrupteur (1,2) est composé par un transistor et une diode de récupération et modélisé par deux états complémentaires.

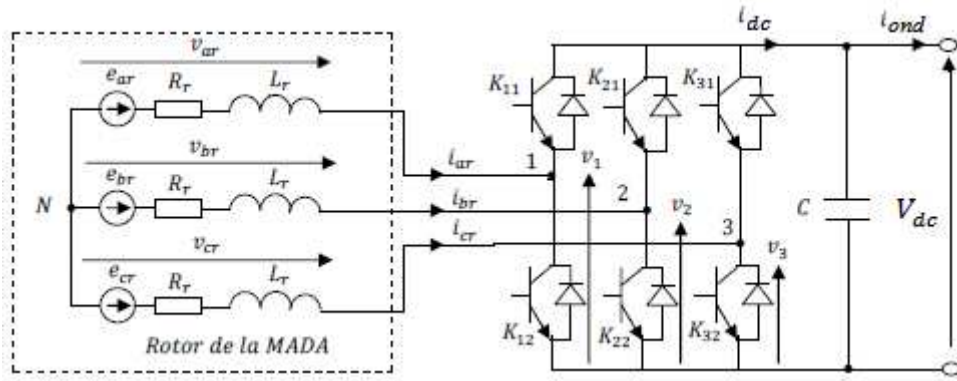


Fig. II. 14 Convertisseur AC-DC triphasé à commutation forcée côté machine

A partir de ce schéma, on peut déduire les relations suivantes :

$$\begin{cases} v_1 - v_{ar} + v_{br} - v_2 = 0 \\ v_1 - v_{ar} + v_{cr} - v_3 = 0 \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

En additionnant ces équations, on obtient :

$$2v_1 - 2v_{ar} + v_{br} + v_{cr} - v_2 - v_3 = 0 \quad (\text{II.37})$$

Les tensions simples v_{as}, v_{bs}, v_{cs} forment un système triphasé équilibré, tel que:

$$v_{ar} + v_{br} + v_{cr} = 0 \quad (\text{II.38})$$

Dans la relation (II.37), on peut remplacer $v_{br} + v_{cr}$ par $-v_{ar}$ et on tire :

$$\begin{cases} v_{ar} = \frac{1}{3} (2v_1 - v_2 - v_3) \\ v_{br} = \frac{1}{3} (-v_1 + 2v_2 - v_3) \\ v_{cr} = \frac{1}{3} (-v_1 - v_2 + 2v_3) \end{cases} \quad (\text{II.39})$$

Selon la fermeture ou l'ouverture des interrupteurs k_{ij} , les tensions de branche v_i peuvent être égales à V_{dc} ou à 0.

On introduit d'autres variables S_{11} , S_{21} ou S_{31} qui prennent 1 si l'interrupteur k_{i1} est fermé ou 0 s'il est bloqué. L'équation (II.39) peut être réécrite comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{11} \\ S_{21} \\ S_{31} \end{bmatrix} \quad (\text{II.40})$$

Le courant redressé peut s'écrire :

$$i_{dc} = S_{11}i_{ar} + S_{21}i_{br} + S_{31}i_{cr} \quad (\text{II.41})$$

Ces variables de commande S_{i1} présentent des signaux logiques déduits de l'application de la technique de commande à MLI. Celle-ci permet de déterminer les intervalles de conduction des interrupteurs et de régler d'une manière indépendante les valeurs moyennes de chacune des tensions v_i sur chaque période de commutation. Dans ce cas, les instants de commutation sont déterminés par une comparaison à hystérésis entre les courants d'entrée $i_{abc r}$ et les courants de référence $i_{abc r ref}$.

Les états des interrupteurs dans ce cas sont déduits selon les règles suivantes :

Si $i_{ar ref} - i_{ar} \geq \Delta i$ alors $S_{11}=0$ et si $i_{ar ref} - i_{ar} \leq -\Delta i$ $S_{11}=1$;

Si $i_{br ref} - i_{br} \geq \Delta i$ alors $S_{21}=0$ et si $i_{br ref} - i_{br} \leq -\Delta i$ $S_{21}=1$;

Si $i_{rc ref} - i_{cr} \geq \Delta i$ alors $S_{31}=0$ et si $i_{cr ref} - i_{cr} \leq -\Delta i$ $S_{31}=1$.

Les courants rotoriques de la machine $i_{abc r}$ sont déduits à partir des équations suivantes :

$$\begin{cases} L_r \frac{d i_{ar}}{dt} = e_{ar} - v_{ar} - R_r i_{ar} = e_{ar} - V_{dc} \frac{2S_{11} - S_{21} - S_{31}}{3} - R_r i_{ar} \\ L_r \frac{d i_{br}}{dt} = e_{br} - v_{br} - R_r i_{br} = e_{br} - V_{dc} \frac{-S_{11} + 2S_{21} - S_{31}}{3} - R_r i_{br} \\ L_r \frac{d i_{cr}}{dt} = e_{cr} - v_{cr} - R_r i_{cr} = e_{cr} - V_{dc} \frac{-S_{11} - S_{21} + 2S_{31}}{3} - R_r i_{cr} \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

Tandis que le courant i_c qui traverse le condensateur est calculé par la relation :

$$C \frac{d V_{dc}}{dt} = (S_{11}i_{ar} + S_{21}i_{br} + S_{31}i_{cr}) - i_{ond} \quad (\text{II.43})$$

II. 10. 1. 2 Commande vectorielle du convertisseur à commutation forcée

Pour la commande de ce convertisseur, on fait un asservissement de la tension de sortie V_{dc} et des courants d'entrée $i_{abc r}$. Ces courants sont reportés au système de référence lié à la tension de la machine. Ce système de référence qui correspond aux axes (d, q) permet de découpler les expressions de la puissance active et la puissance réactive échangées entre le réseau et le rotor. On va contrôler la puissance active et par conséquent la tension dans l'étage continu par l'intermédiaire du courant i_d et la puissance réactive par l'intermédiaire de i_q .

Le schéma bloc de cette commande est illustré par la figure II. 15 suivante :

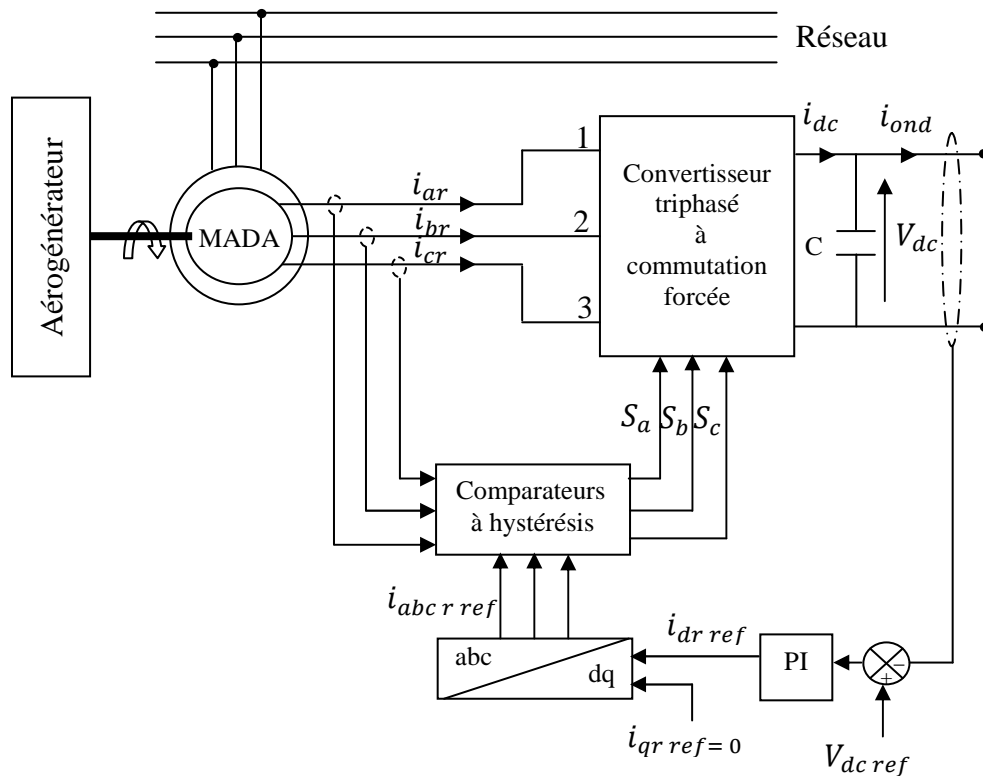


Fig. II. 15 Schéma bloc du convertisseur coté machine, triphasé commandé en courant par la technique de MLI à hystérésis

Ici, on a commandé ce convertisseur en choisissant convenablement les deux courants de référence pour l'axe d et l'axe q comme suit :

- Pour un fonctionnement à facteur de puissance unitaire caractérisé par une puissance réactive nulle et des distorsions harmoniques des courants très faibles, la référence de la composante du courant sur l'axe q est choisie égale à zéro ;
- La composante du courant sur l'axe d dépend de la différence entre la tension de référence et celle réelle de l'étage continu à la sortie du redresseur, et l'appel de puissance par la machine. Un régulateur de type PI ayant pour entrée l'erreur de tension de l'étage continu par rapport à sa référence peut répondre à cette exigence.

On a opté pour ce convertisseur à MLI qui forme avec le convertisseur coté réseau une alimentation électrique en double pont à MLI permettant la bidirectionnalité de l'écoulement de puissance et la réduction de la pollution harmonique.

II. 10. 2 Modélisation du convertisseur à MLI coté réseau

Le but de cet onduleur est d'assurer le bon fonctionnement de l'électronique de puissance, en régulant le bus continu à une valeur suffisamment élevée.

Cet onduleur à commutations commandées est constitué de trois branches disposées de la même manière que dans le redresseur commandé (voir figure II.16) :

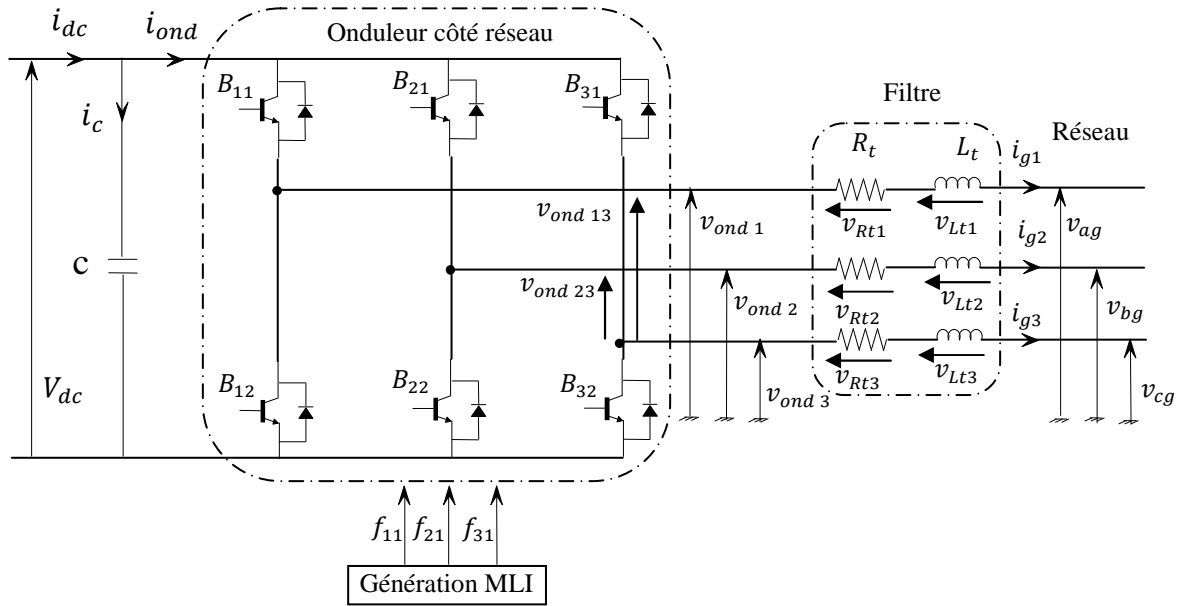


Fig. II.16 Représentation schématique de l'onduleur côté réseau

De la même manière que pour le redresseur à commutation forcée, on introduit d'autres variables caractérisant l'état des interrupteurs qui prennent 1 si l'interrupteur B_{i1} est fermé ou 0 s'il est bloqué, et on déduit l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} v_{ond1} \\ v_{ond2} \\ v_{ond3} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{21} \\ f_{31} \end{bmatrix} \quad (II.44)$$

Le courant filtré peut s'écrire :

$$i_{ond} = f_{11}i_{t1} + f_{21}i_{t2} + f_{31}i_{t3} \quad (II.45)$$

Ces variables de commande f_{i1} présentent aussi des signaux logiques déduits de l'application de la technique de commande à MLI. Dans ce cas, les instants de commutation sont déterminés comme pour le redresseur commandé en courant par une comparaison à hystérésis entre les courants de sortie $i_{g\ 123}$ et les courants de référence $i_{g\ 123\ ref}$.

Les états des interrupteurs sont déduits selon les règles suivantes :

Si $i_{g1\text{ref}} - i_{g1} \geq \Delta i$ alors $f_{11}=0$ et si $i_{g1\text{ref}} - i_{g1} \leq -\Delta i$ $f_{11}=1$;

Si $i_{g2\text{ref}} - i_{g2} \geq \Delta i$ alors $f_{21}=0$ et si $i_{g2\text{ref}} - i_{g2} \leq -\Delta i$ $f_{21}=1$;

Si $i_{g3\text{ref}} - i_{g3} \geq \Delta i$ alors $f_{31}=0$ et si $i_{g3\text{ref}} - i_{g3} \leq -\Delta i$ $f_{31}=1$.

II. 10. 2. 1 Régulation des courants

$$\begin{cases} v_{ag} = V_m \sin(\omega_s t) \\ v_{bg} = V_m \sin\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{cg} = V_m \sin\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

Avec :

$$\omega_s = 2\pi f_s ;$$

$$V_m = \sqrt{2}V_{eff}.$$

$$\begin{cases} v_{ond1} = v_{t1} + v_{ag} \\ v_{ond2} = v_{t2} + v_{bg} \\ v_{ond3} = v_{t3} + v_{cg} \end{cases} \quad (\text{II.47})$$

Où :

$$\begin{cases} v_{t1} = R_t i_{g1} + L_t \frac{di_{g1}}{dt} \\ v_{t2} = R_t i_{g2} + L_t \frac{di_{g2}}{dt} \\ v_{t3} = R_t i_{g3} + L_t \frac{di_{g3}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.48})$$

On considère un système de tensions triphasé côté réseau équilibré, par conséquent on trouve :

$$i_{g1} + i_{g2} + i_{g3} = 0 \quad (\text{II.49})$$

En regroupant l'ensemble des équations déterminées précédemment, on trouve les équations différentielles suivantes :

$$\begin{pmatrix} v_{ond1} \\ v_{ond2} \\ v_{ond3} \end{pmatrix} = R_t \begin{pmatrix} i_{g1} \\ i_{g2} \\ i_{g3} \end{pmatrix} + L_t \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{g1} \\ i_{g2} \\ i_{g3} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_{ag} \\ v_{bg} \\ v_{cg} \end{pmatrix} \quad (\text{II.50})$$

II. 10. 2. 2 Modélisation dans le repère de Park

$$\begin{bmatrix} v_{d\text{ond}} \\ v_{q\text{ond}} \\ v_{o\text{ond}} \end{bmatrix} = P[\theta_s]^{-1} \begin{bmatrix} v_{ond1} \\ v_{ond2} \\ v_{ond3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.51})$$

$$\begin{bmatrix} v_{dg} \\ v_{qg} \\ v_{og} \end{bmatrix} = P[\theta_s]^{-1} \begin{bmatrix} v_{t1} \\ v_{t2} \\ v_{t3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.52})$$

$$\begin{bmatrix} v_{dg} \\ v_{qg} \\ v_{og} \end{bmatrix} = P[\theta_s]^{-1} \begin{bmatrix} v_{ag} \\ v_{bg} \\ v_{cg} \end{bmatrix} \quad (\text{II.53})$$

En appliquant la transformation de Park, l'équation (II.50) devient :

$$\begin{cases} v_{d\ ond} = v_{dg} + R_t i_{dg} + L_t \frac{di_{dg}}{dt} - L_t \omega_s i_{qg} \\ v_{q\ ond} = v_{qg} + R_t i_{qg} + L_t \frac{di_{qg}}{dt} + L_t \omega_s i_{dg} \end{cases} \quad (\text{II.54})$$

En appliquant la transformée de Laplace sur les équations précédentes, on fait apparaître deux courants de réseau :

$$\begin{cases} i_{dg} = \frac{1}{(R_t + L_t s)} (v_{d\ ond} - v_{dg} + L_t \omega_s i_{qg}) \\ i_{qg} = \frac{1}{(R_t + L_t s)} (v_{q\ ond} - v_{qg} - L_t \omega_s i_{dg}) \end{cases} \quad (\text{II.55})$$

Les tensions modulées sont obtenues à partir de la tension du bus continu et des fonctions de conversion selon :

$$\begin{cases} U_{ond\ 13} = m_1 V_{dc} \\ U_{ond\ 23} = m_2 V_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.56})$$

Les fonctions m_1 et m_2 sont appelées fonctions de conversion. L'onduleur ayant une structure matricielle, les fonctions de conversion dépendent elles-mêmes des fonctions de connexion selon :

$$m_1 = f_{11} - f_{31}$$

$$m_2 = f_{21} - f_{31}$$

m_1 et m_2 : Fonctions de conversion.

Les tensions simples modulées peuvent être exprimées comme suit :

$$\begin{cases} v_{ond1} = \frac{2}{3} U_{ond\ 13} - \frac{1}{3} U_{ond\ 23} \\ v_{ond2} = \frac{1}{3} U_{ond\ 23} - \frac{2}{3} U_{ond\ 13} \end{cases} \quad (\text{II.57})$$

Les courants modulés sont obtenus à partir des courants du filtre et des fonctions du convertisseur selon :

$$i_{ond} = m_1 i_{g1} + m_2 i_{g2} \quad (\text{II.58})$$

Les tensions simples de références pour le réseau exprimées dans le repère de Park sont données par les relations suivantes :

$$\begin{cases} v_{d\ ond\ ref} = v_{dt\ ref} + v_{dg} - \omega_s L_t i_{qg} \\ v_{q\ ond\ ref} = v_{qt\ ref} + v_{qg} - \omega_s L_t i_{dg} \end{cases} \quad (\text{II.59})$$

Avec :

$$\begin{cases} v_{dt\ ref} = PI(s)(i_{dg\ ref} - i_{dg}) \\ v_{qt\ ref} = PI(s)(i_{qg\ ref} - i_{qg}) \end{cases} \quad (II.60)$$

La figure II.17 montre une représentation sous forme de schéma-blocs des lois de commande.

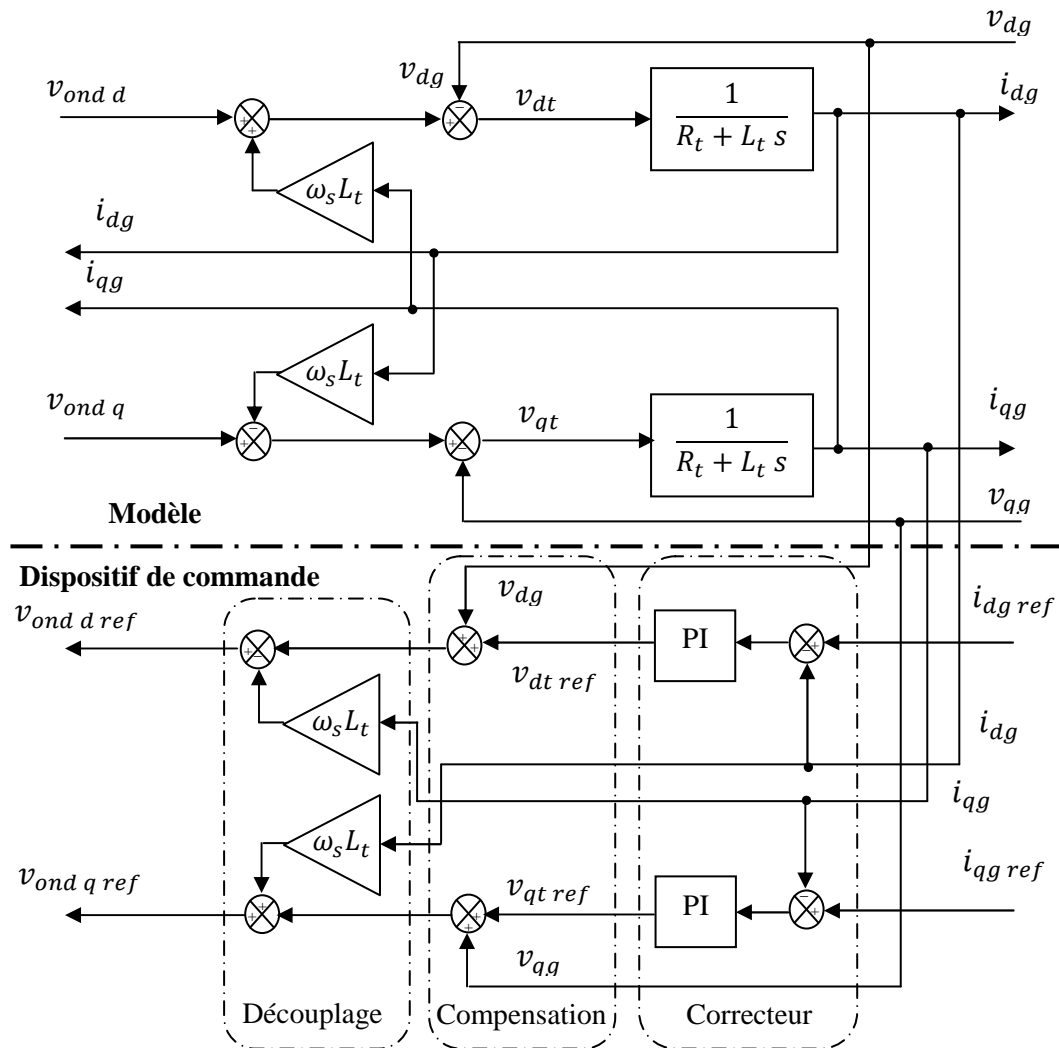


Fig. II.17 Représentation schématique du bloc de contrôle des courants

II. 10. 2. 3 Calcul des courants de références côté réseau

Les puissances active et réactive rotoriques côté réseau sont données par la relation suivante :

$$\begin{cases} P_{rr\ ref} = v_{dg} i_{dg\ ref} + v_{qg} i_{qg\ ref} \\ Q_{rr\ ref} = v_{qg} i_{qg\ ref} - v_{dg} i_{dg\ ref} \end{cases} \quad (II.61)$$

La puissance réactive rotorique de référence coté réseau est imposée nulle, le facteur de puissance coté réseau électrique est unitaire.

$$Q_{rr\ ref} = 0 \quad (II.62)$$

La puissance active rotorique de référence injectée au réseau électrique est donnée par la relation suivante :

$$P_{rr\ ref} = V_{dc} \cdot i_{dc} - V_{dc\ ref} \cdot i_{c\ ref} \quad (II.63)$$

Avec :

$$i_{c\ ref} = PI(s)(V_{dc\ ref} - V_{dc})$$

D'après l'équation (II.64) on calcul les courants de référence du réseau électrique, exprimés dans le référentiel de Park :

$$\begin{cases} i_{dg\ ref} = \frac{P_{rr\ ref} \cdot v_{dg} + Q_{rr\ ref} \cdot v_{qg}}{v_{dg}^2 + v_{qg}^2} \\ i_{qg\ ref} = \frac{P_{rr\ ref} \cdot v_{qg} - Q_{rr\ ref} \cdot v_{dg}}{v_{dg}^2 + v_{qg}^2} \end{cases} \quad (II.64)$$

La composante directe du courant est utilisée pour réguler la tension du bus continu. Ce dernier est contrôlé à l'aide d'un régulateur (PI) (Annexe A). La composante en quadrature est utilisée pour réguler la puissance réactive transitée.

Le système de commande doit permettre de maintenir constante la tension du bus continu, et d'obtenir des courants sinusoïdaux au primaire du transformateur d'amplitude et de fréquence identiques à celles du réseau.

II. 11 Régulation de la tension du bus continu

Le bus continu est composé d'une capacité, qui a pour but le lissage de la tension. L'évolution de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif :

$$V_{dc} = \frac{1}{C} \int i_c dt \quad (II.65)$$

Le courant du condensateur est issu d'un nœud où circulent deux courants modulés par chaque convertisseur :

$$i_c = i_{dc} - i_{ond} \quad (II.66)$$

Avec :

$$i_{ond} = f_{11} i_{g1} + f_{21} i_{g2} + f_{31} i_{g3} \quad (II.67)$$

D'après les équations (II.65) et (II.66) on détermine le courant $i_{ond\ ref}$ de référence:

$$i_{ond\ ref} = i_{dc} - PI(s)(V_{dc\ ref} - V_{dc}) \tag{II.68}$$

La puissance active du bus continu est donnée par l'expression suivante :

$$P_{dc} = V_{dc} \cdot i_{dc} \tag{II.69}$$

II. 12 Connexion au réseau

Le réglage du bus continu est alors réalisé au moyen d'une boucle de régulation, permettant de maintenir une tension constante du bus continu, avec un correcteur Proportionnel Intégral générant la référence du courant à injecter dans le condensateur.

Il est à noter que le réglage du bus continu est donc réalisé par une boucle externe de régulation (les courants transités sont eux réglés par une boucle interne) et par réglage des puissances transitées.

A partir de toutes les régulations, on a aboutit à la représentation sous forme d'un schéma bloc du dispositif de commande est donnée sur la figure II.18.

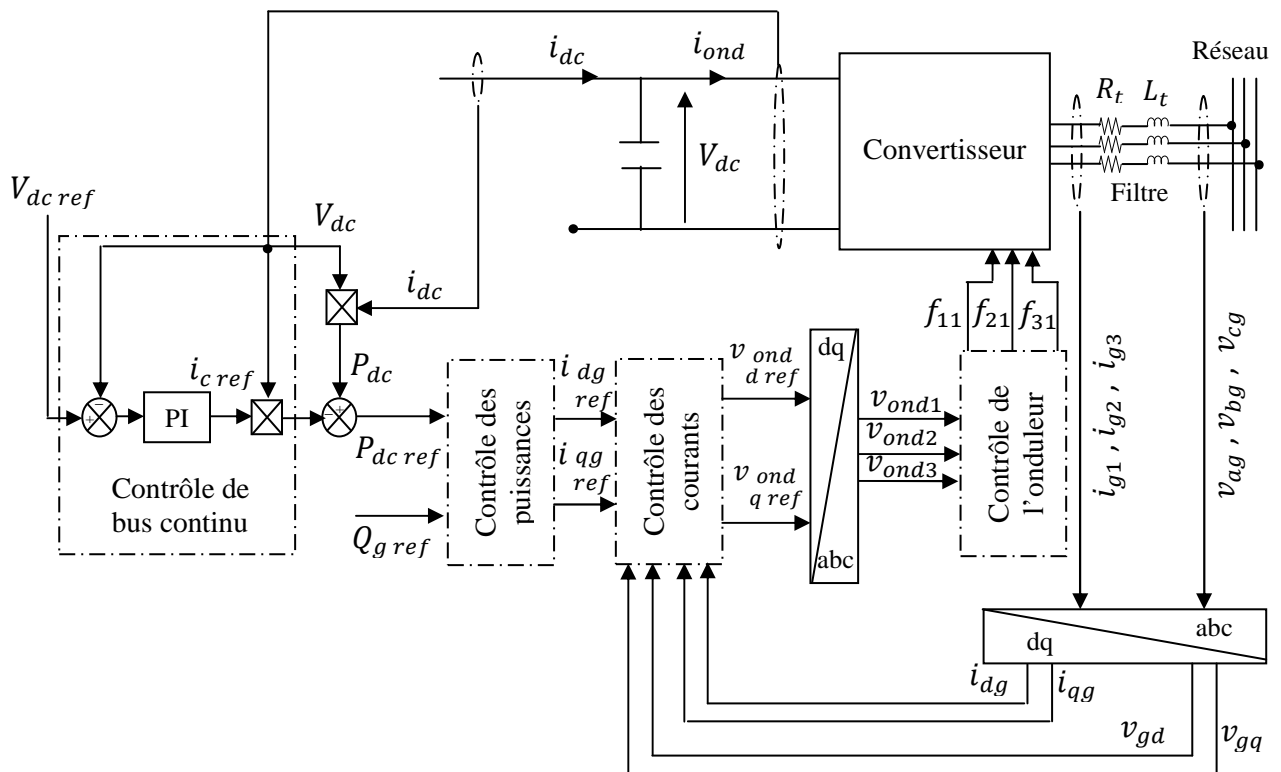


Fig. II.18 Schéma de contrôle de la liaison au réseau

II.13 Simulation et interprétation des résultats

Dans cette partie, quelques résultats de simulation d'une éolienne à vitesse variable reposant sur la machine asynchrone à double alimentation (dont les paramètres sont fournis en annexe B), obtenus sous (MATLAB/SIMULINK).

La puissance active de référence du réseau, $P_{g\ ref}$ est fixée à la valeur de 1.5 MW et $Q_{g\ ref}$ maintenue nulle.

La vitesse de rotation de la MADA est représentée par la figure (II.19), et comme la fréquence des grandeurs statoriques de la MADA est imposée par le réseau (fixée dans notre cas à 50 Hz) on trouve le glissement illustré par la figure (II.20) variable, passant par des valeurs nulles. Il est à noter que le profil du vent est choisi de façon à obtenir justement ces différentes valeurs du glissement, c'est-à-dire différents modes de fonctionnement (hypersynchrone, hyposynchrone et synchrone) de la MADA.

La figure II.21 représente les allures des puissances active et réactive statoriques. La figure II.22 montre les puissances active et réactive rotoriques, cette relation s'établit directement du fait que le convertisseur ne contient aucun élément de stockage intermédiaire, leurs sens d'écoulement dépend du signe du glissement: pour ($g < 0$) les puissances sont transmises du rotor au réseau (mode génératrice hypersynchrone), pour ($g > 0$) les puissances sont transmises du réseau au rotor (mode génératrice hyposynchrone) et pour un glissement nul le rotor absorbe une puissance active qui représente les pertes Joule rotorique.

La figure II.23 illustre la tension et le courant rotorique, la figure II.23.c montre que le courant est en avance de la tension et ceci sur une période correspondant à un glissement négatif où la MADA fonctionne en régime hypersynchrone; et sur la période où le glissement est positif est montré sur la figure II.23.b où la MADA fonctionne en régime hyporsynchrone et pour les valeurs de glissement nul est montré sur la figure II.20.a, ces grandeurs rotoriques sont continues, on retrouve le cas d'une machine asynchrone synchronisée de la MADA.

La figure II.24 représente les allures de la tension et du courant statoriques, ils sont en opposition de phase avec une fréquence de 50 Hz. La figure II.25 montre que la tension du bus continu suit sa référence.

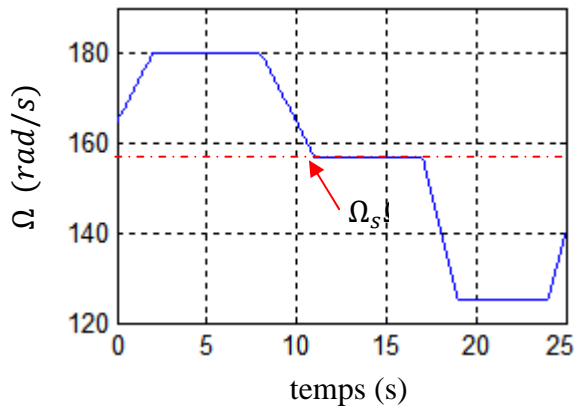


Fig. II. 19 Vitesse de rotation de la MADA

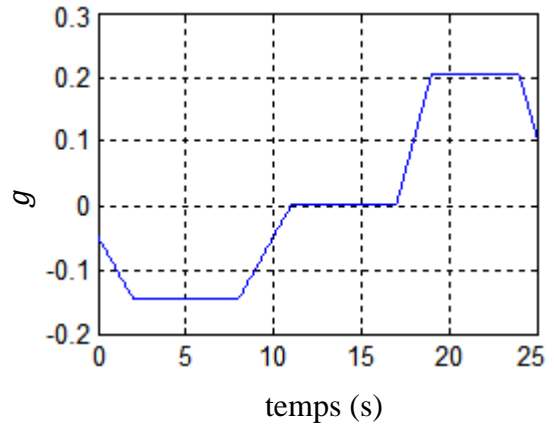


Fig. II. 20 Glissement de la MADA

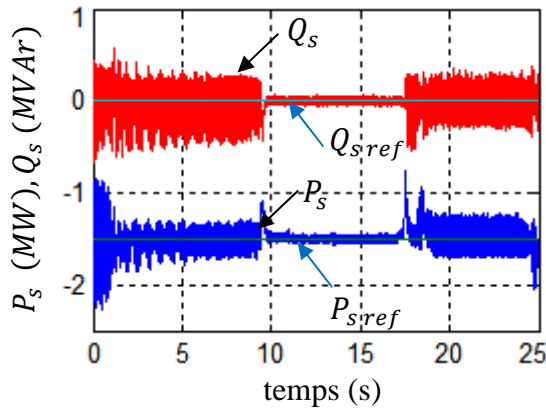


Fig. II. 21 Puissances active et réactive statoriques

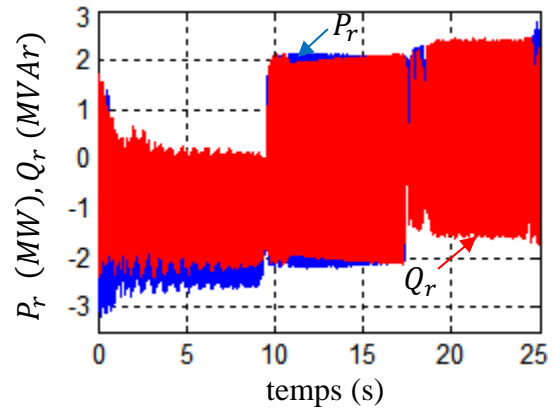


Fig. II. 22 Puissances active et réactive rotoriques

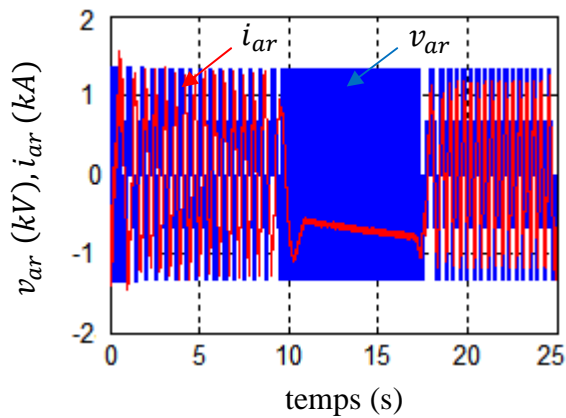


Fig. II. 23 Tension et courant rotoriques

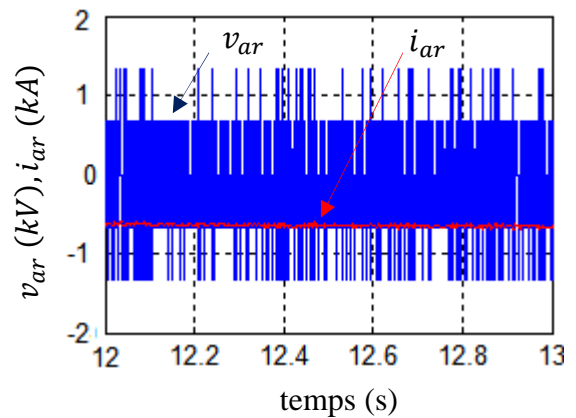


Fig. II. 23. a Tension et courant rotoriques pour $g=0$

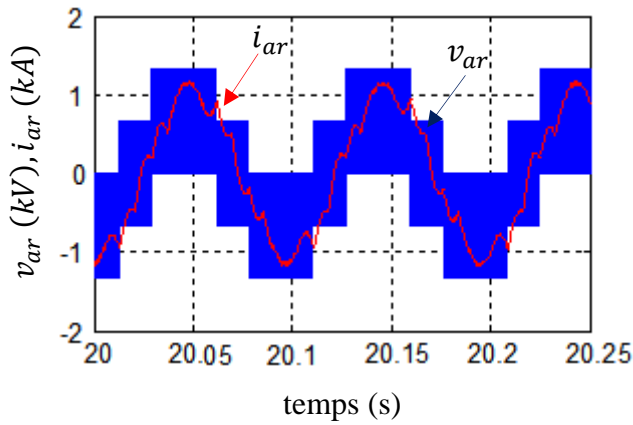


Fig. II. 23. b Tension et courant rotoriques pour $g > 0$

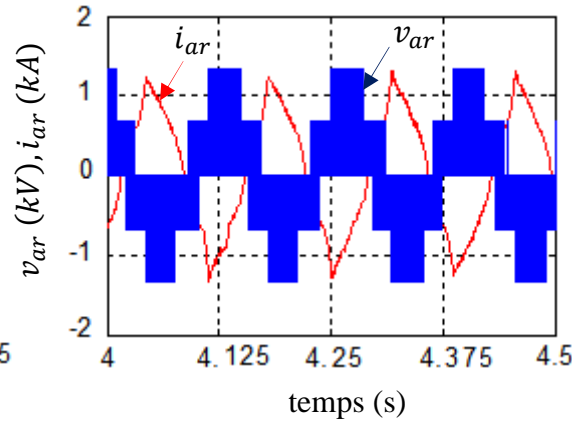


Fig. II. 23. c Tension et courant rotoriques pour $g < 0$

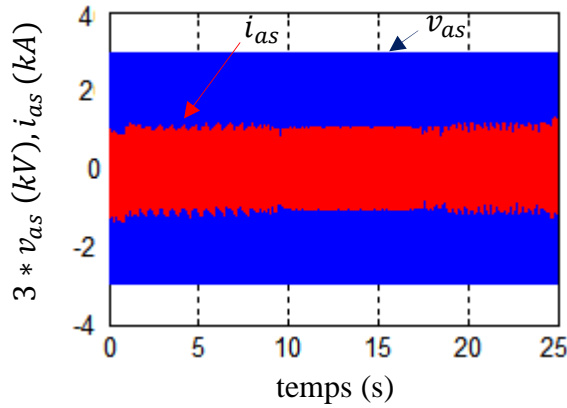


Fig. II. 24 Tension et courant statoriques

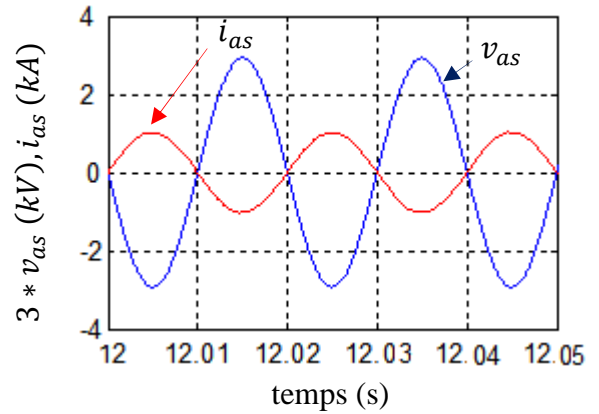


Fig. II. 24.a Zoom tension et courant statoriques

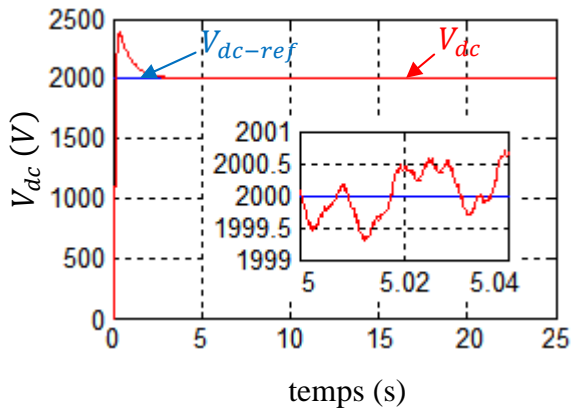


Fig.II.25 Tension du bus continu et sa référence

II. 14 Conclusion

Ce chapitre a été dédié à la modélisation de la turbine ainsi que la MADA dont la complexité a été réduite en utilisant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices et en effectuant un changement de repère par l'application de la transformation de Park.

L'étude des caractéristiques de la MADA alimentée par des convertisseurs de fréquences à commande MLI. La simulation a été réalisée sous le logiciel Matlab/Simulink.

A partir de là, on peut extraire les résultats suivants :

La MADA peut fonctionner dans les deux quadrants couple-vitesse. Pour $g > 0$ la MADA fonctionne en mode génératrice hyposynchrone, pour $g < 0$ la MADA fonctionne en mode génératrice hypersynchrone et pour $g = 0$, la MADA fonctionne en mode génératrice synchrone-synchronisée.

Dans le chapitre suivant, nous étudierons le fonctionnement d'une chaîne de conversion éolienne reliée au réseau autonome basée sur la génératrice asynchrone double alimentation (MADA).

Chapitre III

Contrôle d'aérogénérateur connecté à un réseau autonome

CHAPITRE III

CONTRÔLE D'UN AÉROGÉNÉRATEUR CONNECTÉ À UN RÉSEAU AUTONOME

III.1 Introduction

Pour les régions isolées, l'éolienne est utilisée pour alimenter une certaine charge. Pour ce type de centrale, la tension de sortie n'est pas imposée par le réseau, c'est pourquoi il faut maintenir son amplitude et sa fréquence constantes pour une utilisation domestique, et ce, quelle que soit la charge et la vitesse de rotation de la turbine.

Elles sont utilisées pour l'alimentation en énergie électrique les bateaux, les campings, les stations météo et l'éclairage des chalets isolés ou encore des villages [Roi 03].

Ces éoliennes sont associées à des unités de stockage d'énergie, généralement constituée de batteries d'accumulateur. Ces dernières se chargent par l'aérogénérateur soit directement par une génératrice à courant continu pour les faibles puissances, ou bien par une génératrice synchrone à aimants permanents ou bobinée par l'intermédiaire d'un pont redresseur. La tension continue des batteries est utilisée soit directement ou alors mise en forme par onduleur pour obtenir une alimentation triphasée sinusoïdale de fréquence 50Hz.

Dans ce chapitre, on va baser sur l'influence de la variation de la charge autonome et de la vitesse d'entraînement sur la tension statorique de la génératrice. Les résultats de simulation, seront présentés.

III. 2 Description du système étudié

La structure choisie est représentée par la figure III.1, elle est composée d'une machine asynchrone double alimentation (MADA) associée à une éolienne à vitesse variable, convertisseur MLI, source de tension continue et un réseau autonome. Le stator est connecté directement à la charge autonome et le rotor est connecté à une source de tension continue via un onduleur.

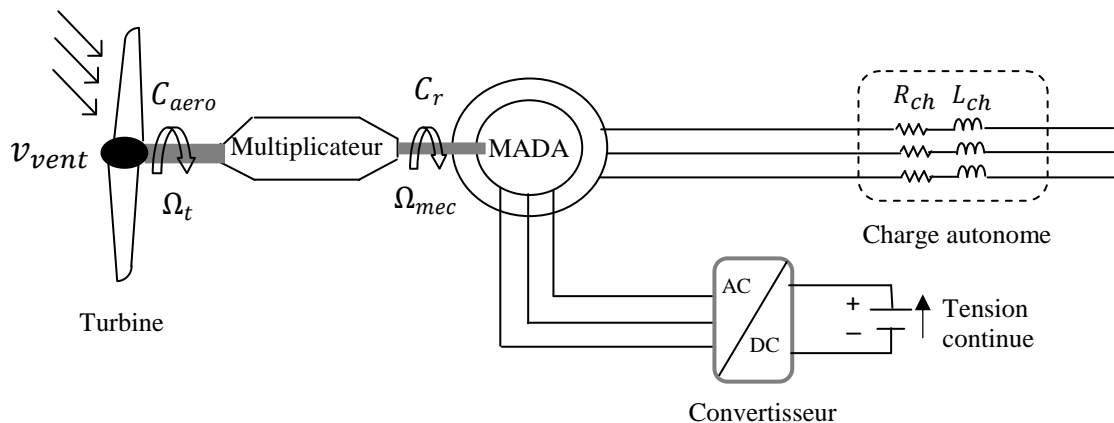


Fig. III.1 Structure étudiée

III. 3 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation liée à une charge autonome

La modélisation de la MADA a été déjà représentée dans le chapitre II, en rappelant que les équations des tensions statoriques et rotoriques dans les repères d et q sont données par l'expression (II.19), de même, les expressions des flux Φ_{ds} , Φ_{qs} , Φ_{dr} et Φ_{qr} ont été déjà données en (II.21).

Une machine électrique, en fonctionnement génératrice, peut être considérée comme une source du courant en raison de sa nature inductive. Puisque la MADA doit fournir une puissance électrique aux charges inductives, un conflit apparaît entre les dispositifs inductifs des deux composants, basés sur la loi physique d'alternance de source, par conséquent la MADA ne devrait pas être considérée comme une source de tension. Pour résoudre ce problème, on propose une approche intermédiaire. Elle consiste à considérer la MADA comme source des forces électromotrices [Nas 11].

À partir de (II.20), on peut écrire:

$$\begin{cases} i_{dr} = \frac{1}{L_r}(\Phi_{dr} - Mi_{ds}) \\ i_{qr} = \frac{1}{L_r}(\Phi_{qr} - Mi_{qs}) \end{cases} \quad (\text{III. 1})$$

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = \sigma L_s i_{ds} + \frac{M}{L_r} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qs} = \sigma L_s i_{qs} + \frac{M}{L_r} \Phi_{qr} \end{cases} \quad (\text{III. 2})$$

Où

$\sigma = 1 - \frac{L_s L_r}{M^2}$, est le coefficient de dispersion de la MADA.

En accord avec (III.2) les équations de (II.19) deviennent:

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \sigma L_s \frac{di_{ds}}{dt} + \left[\frac{M}{L_r} \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \right] \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \sigma L_s \frac{di_{qs}}{dt} + \left[\frac{M}{L_r} \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} \right] \end{cases} \quad (\text{III. 3})$$

Puis, les f.é.m e_{ds} et e_{qs} sur l'axe d et q peuvent être définies:

$$\begin{cases} e_{ds} = \frac{M}{L_r} \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \\ e_{qs} = \frac{M}{L_r} \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{III. 4})$$

Ceci mène à changer (III.3) comme suit:

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \sigma L_s \frac{di_{ds}}{dt} + e_{ds} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \sigma L_s \frac{di_{qs}}{dt} + e_{qs} \end{cases} \quad (\text{III. 5})$$

Par conséquent, la MADA est alors considérée comme une source de tension (e_{ds} et e_{qs}) alimentant sa propre impédance du stator et l'impédance de la charge autonome. Ce choix est approprié pour modéliser la machine et également pour la commande vectorielle de celle-ci.

De la même manière, on peut établir les nouvelles expressions pour les tensions du rotor:

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{di_{dr}}{dt} + e_{dr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{di_{qr}}{dt} + e_{qr} \\ e_{dr} = \frac{M}{L_s} \frac{d\phi_{ds}}{dt} - (\omega_s - \omega) \phi_{qr} \\ e_{qr} = \frac{M}{L_s} \frac{d\phi_{qs}}{dt} + (\omega_s - \omega) \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III. 6})$$

L'expression de couple produit par la MADA a été donnée en (II. 21).

III. 4 Modèle du système complet

L'expression (III. 5) prouve que la commande de tension du stator de MADA implique les f.é.m. L'expression (III.4) souligne que les flux rotoriques de la MADA, participeront nécessairement au processus de commande.

Nous proposons de la modifier afin d'améliorer le modèle de la MADA en ajoutant les flux du rotor. Dans notre cas, la commande de flux du rotor est considérée. En fait la présence du flux implique naturellement le couplage magnétique.

Pour effectuer cette amélioration les équations des flux rotoriques peuvent être modifiées comme suit:

$$\begin{cases} \frac{1}{L_r} \phi_{dr} = i_{dr} + \left(\frac{M}{L_r}\right) i_{ds} \\ \frac{1}{L_r} \phi_{qr} = i_{qr} + \left(\frac{M}{L_r}\right) i_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

En effet, comme $\left(\frac{M}{L_r}\right)$ est le rapport des courants de la MADA, $\left(\frac{\phi_{dr}}{L_r}\right)$ et $\left(\frac{\phi_{qr}}{L_r}\right)$ sont le courant magnétisant direct et en quadrature rotoriques appelés respectivement i_{drm} et i_{qrm} , alors les f.é.m. du stator peuvent être exprimées en fonctions de ces courants à l'aide de (III.2):

$$\begin{cases} e_{ds} = M \frac{di_{drm}}{dt} - \omega_s M i_{qrm} - \omega_s \sigma L_s i_{qs} \\ e_{qs} = M \frac{di_{qrm}}{dt} + \omega_s M i_{drm} + \omega_s \sigma L_s i_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Elles peuvent être exprimées aussi en fonction des flux rotoriques:

$$\begin{cases} e_{ds} = \frac{M}{L_r} \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \omega_s \frac{M}{L_r} \left(\phi_{qr} + \sigma \frac{L_s L_r}{M} i_{qs} \right) \\ e_{qs} = \frac{M}{L_r} \frac{d\phi_{qr}}{dt} + \omega_s \frac{M}{L_r} \left(\phi_{dr} + \sigma \frac{L_s L_r}{M} i_{ds} \right) \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

III. 5 Stratégie de commande de l'aérogénérateur connectée à une charge autonome

On procèdera à la commande du convertisseur MLI afin de piloter la MADA par le rotor avec orientation du flux rotorique. La structure étudiée alimente une charge autonome dont la valeur efficace de la tension est de 220V et une fréquence de 50 Hertz. En conséquence, la commande du système doit réguler ces deux grandeurs pour les garder aux valeurs souhaitées quelle que soit la charge et la vitesse, ceci est assuré par le convertisseur bidirectionnel à commande MLI. La tension du bus continu doit être constante pour assurer le bilan énergétique. On peut noter que la détermination de la stratégie de commande est effectuée en supposant que le système a atteint le régime permanent. Ceci implique que $\frac{d}{dt} \Phi_{dr}$ et $\frac{d}{dt} \Phi_{qr}$ sont considérés nuls dans l'équation (III. 9). Pour déterminer la stratégie générale de commande, on suppose que toutes les grandeurs peuvent être mesurées ou estimées.

On peut noter que la loi causale implique que la tension V_s ne soit pas un résultat mais une entrée qui doit être régulée. L'action sur les courants statoriques de la MADA serait une solution théorique valable, mais, ces courants sont imposés par la charge autonome. La seule possibilité qui reste est de commander la f.é.m. du stator, considérant les courants statoriques comme perturbations.

L'équation (III.5) montre qu'en régime permanent, la différence de la f.é.m. entre e_s et la tension V_s est uniquement due à la chute de tension de la résistance d'enroulement du stator. En conséquence, un PI est choisi comme correcteur de cette boucle extérieure.

La régulation de la f.é.m. du stator est obtenue par la commande vectorielle de flux (CVF) qui permet de déterminer le flux de référence rotorique. Par conséquent, le flux statorique est orienté sur l'axe direct d du repère de Park. Les flux de référence rotoriques sont obtenus à l'aide de (II. 21) qui mène aux équations suivantes:

$$\begin{cases} \Phi_{qs\ ref} = 0, \quad \Phi_{qr\ ref} = -\sigma \frac{L_s L_r}{M} i_{qs} \\ i_{qr} = -\left(\frac{L_s}{M}\right) i_{qs} \end{cases} \quad (III.10)$$

Si le champ de stator est correctement orienté c'est-à-dire $\Phi_{qr\ ref} = -\sigma \frac{L_s L_r}{M} i_{qs}$, alors, d'après les expressions de v_{ds} et v_{dr} respectivement dans les équations (III. 5) et (III. 6), e_{ds} est nulle en régime permanent, $v_{ds} \approx 0$ si on néglige la chute de tension ohmique. Par conséquent, d'après l'expression de v_{qs} de l'équation (III. 5) la f.é.m. du stator e_{qs} est régulée par Φ_{dr} dont la valeur de référence est donnée par l'équation (III. 11).

$$\Phi_{dr\ ref} = \frac{L_r}{\omega_s M} e_{qs\ ref} - \sigma \frac{L_s L_r}{M} i_{ds} \quad (III.11)$$

Les flux du rotor peuvent être régulés par les tensions rotoriques v_{dr} et v_{qr} . L'équation (II.19) peut être modifiée comme suit à l'aide de l'équation (III.1):

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = \left(\frac{T_r}{1+T_r s} \right) (v_{dr} + C_{dr}) \\ \Phi_{qr} = \left(\frac{T_r}{1+T_r s} \right) (v_{qr} + C_{qr}) \end{cases} \quad (III.12)$$

s : Opérateur de Laplace,

$T_r = \left(\frac{L_r}{R_r} \right)$: Constante de temps du rotor de la MADA.

$$\begin{cases} C_{dr} = \frac{M R_r}{L_r} i_{ds} + (\omega_s - \omega) \Phi_{qr} \\ C_{qr} = \frac{M R_r}{L_r} i_{qs} - (\omega_s - \omega) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (III.13)$$

C_{dr} et C_{qr} représentent la somme de chute de tension produite par les courants i_{ds} et i_{qs} statoriques et les f.é.m. dû au couplage d'axe d et q du repère de Park. Dans les boucles de commande, ces termes doivent être compensés. La commande en modulation de largeur d'impulsion du convertisseur MLI permet l'application des tensions calculées (v_{dr} et v_{qr}) aux enroulements de rotor. La figure III.2 récapitule cette commande présentée sous forme de schéma bloc. Dans ce schéma, $C_d(\Phi)$, $C_q(\Phi)$, $C(v)$ sont des correcteurs consacrés respectivement à Φ_{dr} , Φ_{qr} et v_{qs} , ils permettent de contrôler l'orientation des axes.

D'une part, la commande de Φ_{qr} est dédiée à l'orientation de flux du stator, pour assurer partiellement le découplage des axes d et q; d'autre part la commande de Φ_{dr} est dédiée à la f.e.m. de l'axe q (e_{qs}) et par conséquent la régulation de tension V_s du stator.

ω_s est la pulsation du courants du rotor.

La figure III.2 présente la commande de la tension du stator de la MADA sous forme de schéma bloc.

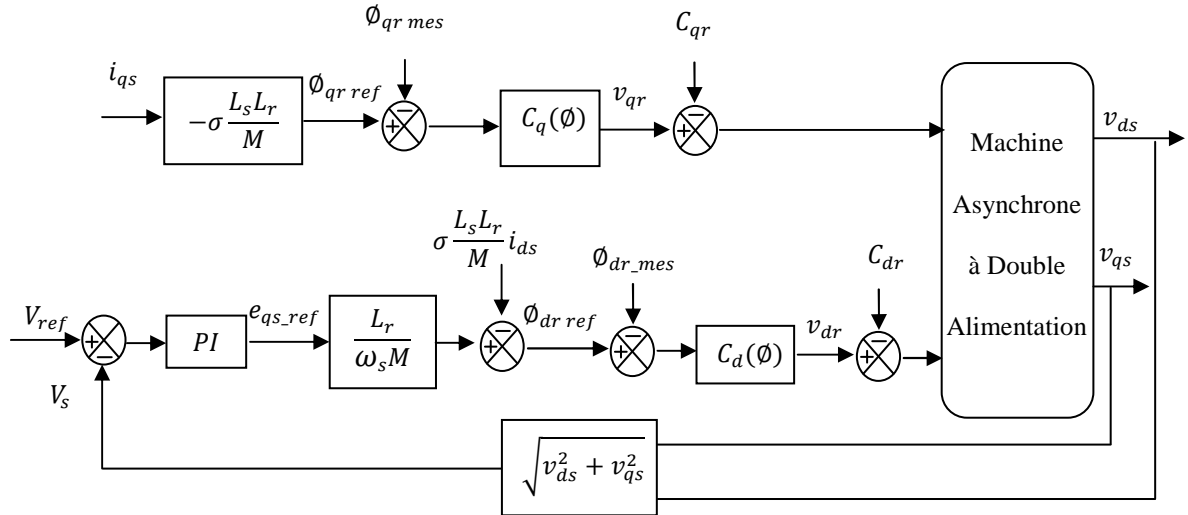


Fig. III.2 Commande détaillée de la tension du stator de la MADA en schéma bloc

Pour une machine à double alimentation, la fréquence du stator f_s doit être maintenue à la valeur de 50Hz malgré toute variation d'autres grandeurs, elle est liée à la fréquence du rotor f_r et la vitesse de rotation Ω par la relation suivante:

$$f_r = \left| f_s - \frac{p \Omega}{2\pi} \right| \tag{III.14}$$

p : Nombre de paires de pôles de la MADA

III. 6 Caractéristiques des éléments simulés

Le système de générateur éolien en mode autonome est simulé en utilisant les deux logiciels Matlab pour la simulation de la partie commande (commande MLI et la commande vectorielle) et PSIM pour la partie puissance (Machine Asynchrone, Convertisseur et Charge). Le schéma de simulation est montré sur la figure III.1. L'entrée à l'onduleur est une source de tension continue de 400V. La machine asynchrone à rotor bobiné utilisée dans cette étude est de 7,5kW à 2 paires de pôles dont la vitesse nominale est de 1500 tr/min ($\Omega_s = 157$ rad/s), alimentant une charge autonome résistive triphasée connectée en étoile de valeur nominale $R_{ch} = 20 \Omega$. Les paramètres de la machine utilisée dans la simulation sont donnés dans l'annexe B (Tableau B.3).

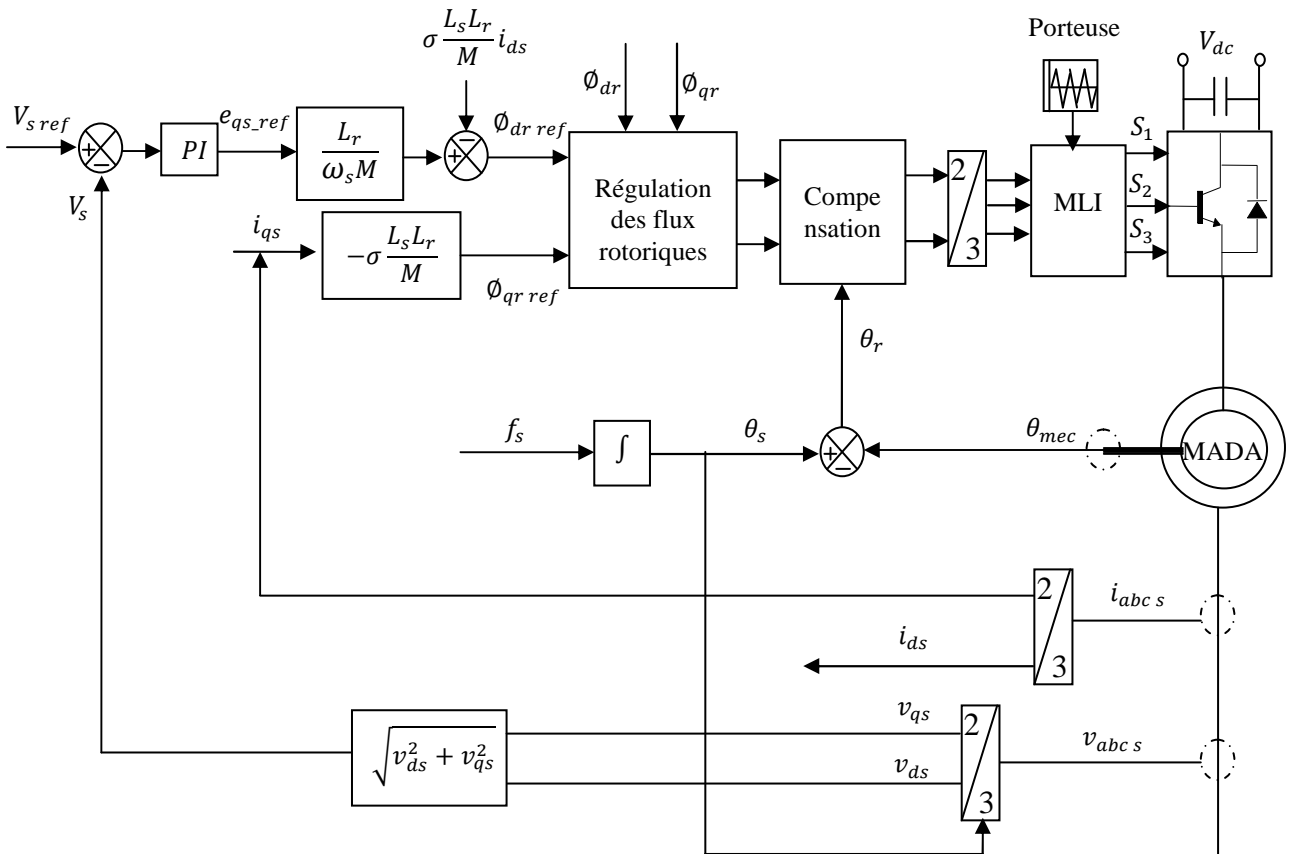


Fig. III.3 Schéma global de la structure étudiée

III. 7 Simulation du système proposé

III. 7. 1 Vitesse fixe avec une tension de référence fixe et une charge variable

Au début, le système alimente une charge à sa valeur nominale $R_n = 20\Omega$, à $t=2s$, en insert une autre charge résistive de même valeur en parallèle avec la précédente, pour avoir enfin une résistance totale de valeur de 10Ω . On fixe la vitesse à $N=1200$ tr/mn et la tension de référence à $V_{sref} = 220$ V. Les courbes présentées de la figure III.4 à la figure III.10 correspondent aux résultats de simulation.

III. 7. 1. 1 Résultats et interprétations

La figure III.4 illustre la tension d'une phase statorique et elle montre l'évolution du courant injecté à ce réseau autonome. Nous pouvons noter que ces grandeurs ont une fréquence fixe 50 Hz, l'amplitude de la tension est fixe et celui du courant augmente avec la diminution de la charge. Afin de bien visualiser ces grandeurs, un zoom sur deux périodes est montré sur la figure III.5 où nous pouvons noter la finesse des sinusoides de

courant et le contrôle parfait du facteur de puissance, puisque les deux grandeurs sont en opposition de phase sur toute la durée de simulation.

La figure III.6 montre que malgré la variation de la charge, la tension statorique mesurée en module suit exactement sa référence dans le régime permanent, sachant que v_{ds} est nulle et v_{qs} est régulée.

Le même comportement que celui du courant et de la tension statoriques est obtenu pour les mêmes grandeurs rotoriques, et celui là est montré sur la figure III.7.

L'analyse de courbes des figures III.8 et III.9 permet de noter que flux statorique d'axe d reste à sa valeur nominale, et le découplage nous assure un flux statorique de l'axe q pratiquement nul quelque soit la variation, donc une bonne orientation du flux statorique selon l'axe d. Par conséquent on retrouve la composante q du flux rotorique varie avec la variation de la charge.

Les puissances active et réactive échangées entre l'aérogénérateur et le réseau électrique sont montrées sur la figure III.10. La puissance réactive est maintenue nulle, confirmant ainsi un fonctionnement du facteur de puissance unitaire au point de connexion de l'aérogénérateur. La puissance active générée est variable en fonction de la charge alimentée, elle atteint environ 7,5 kW avec une charge nominale, et sa valeur est doublée avec la division de la charge nominale sur deux.

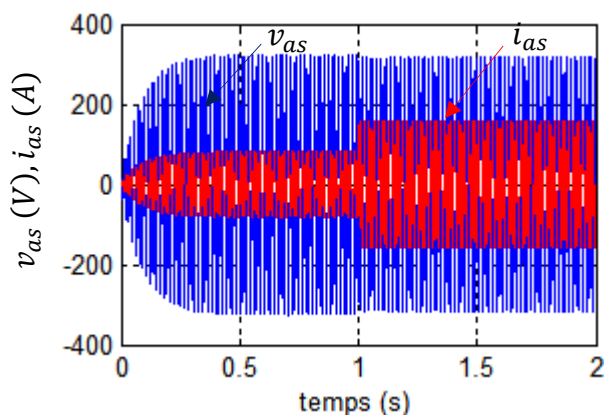


Fig. III.4 Courant et tension statorique (phase a) de la MADA

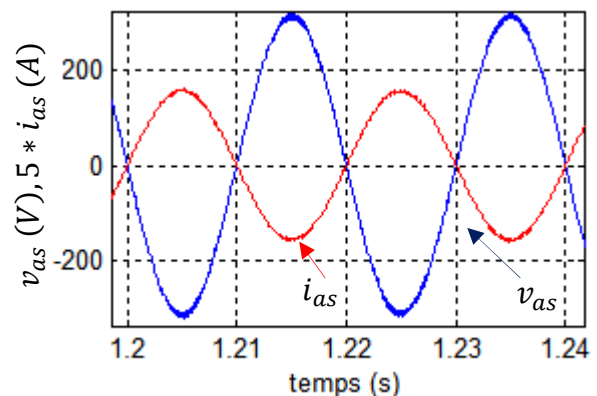


Fig. III.5 Zoom courant et tension statorique (phase a) de la MADA

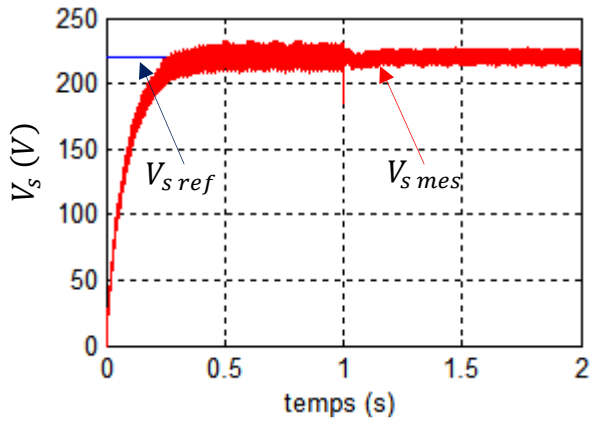


Fig. III.6 Tension efficace statorique référence et mesurée de la MADA

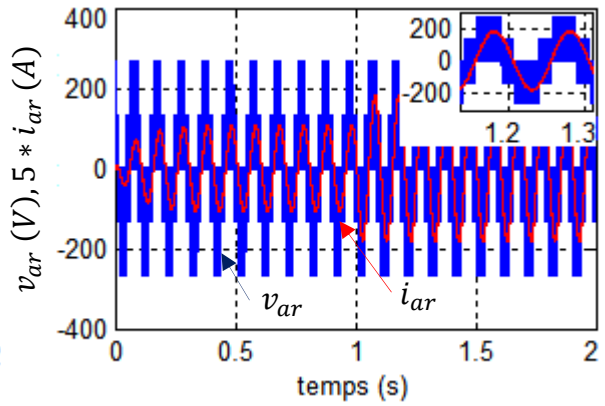


Fig. III.7 Tension et courant rotorique de la MADA

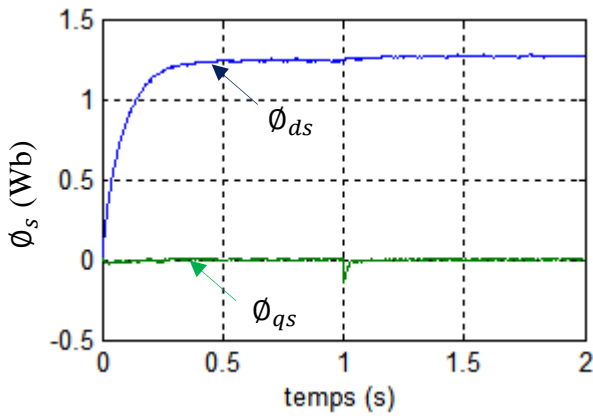


Fig. III.8 Composantes directe et quadratique du flux statorique

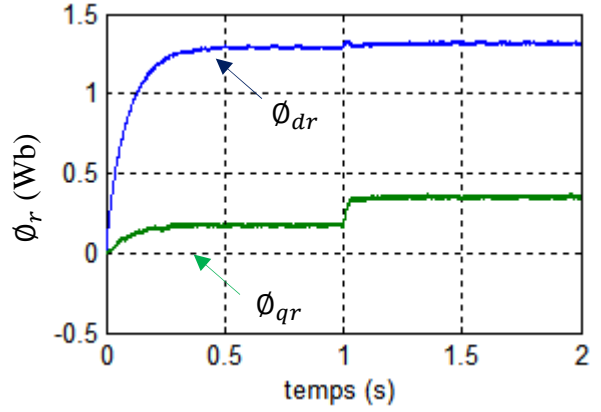


Fig. III.9 Composantes directe et quadratique du flux rotorique

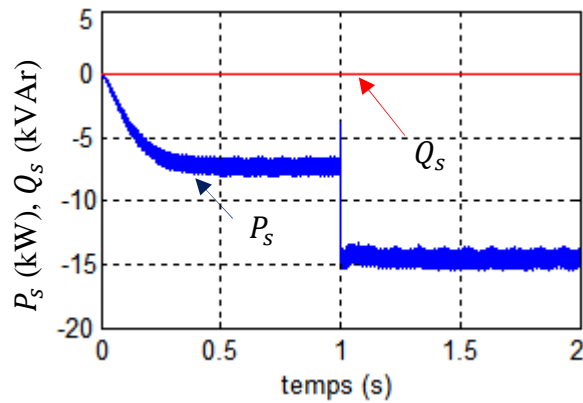


Fig. III.10 Puissance active et réactive absorbée par la charge

III. 7. 2 Vitesse fixe, charge fixe et une tension variable

Dans cette deuxième étape, on garde la vitesse de rotation fixe sur toute la durée de simulation $N=1200$ tr /mn, ainsi la charge est fixée à sa valeur nominale $R_n = 20\Omega$.

Le scénario simulé est le suivant : $0 < t < 1s$, $V_{s ref} = 100V$; $1 < t < 2s$, $V_{s ref} = 220V$

III. 7. 2. 1 Résultats et interprétation

Le courant et la tension statoriques de la première phase sont en opposition de phase comme il est montré sur la figure III.11, cela valide le contrôle parfait du facteur de puissance de l'aérogénérateur. Ces deux grandeurs ainsi que le courant et les flux rotoriques (Fig III.13, III.14 et III.15) se comportent proportionnellement avec la variation de la tension de référence appliquée, par contre le flux statoriques d'axe q est maintenue nul.

La figure III.16 montre les puissances active et réactive misent en jeu entre le rotor et le réseau. La puissance réactive est maintenue fixe, à sa consigne nulle, et la puissance active est variable en fonction de la valeur de la tension appliquée. Cette puissance a une valeur nominale, si toutes les grandeurs appliquées sont nominales.

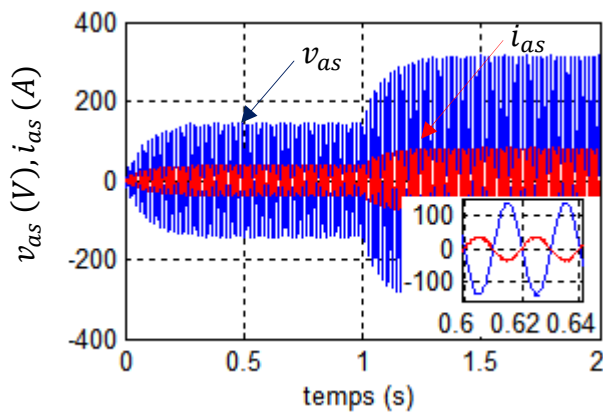


Fig. III.11 Courant et tension statorique de la MADA

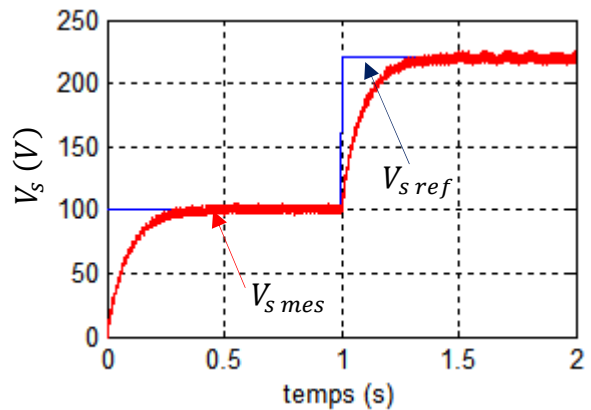


Fig. III.12 Tension efficace statorique de référence et mesurée

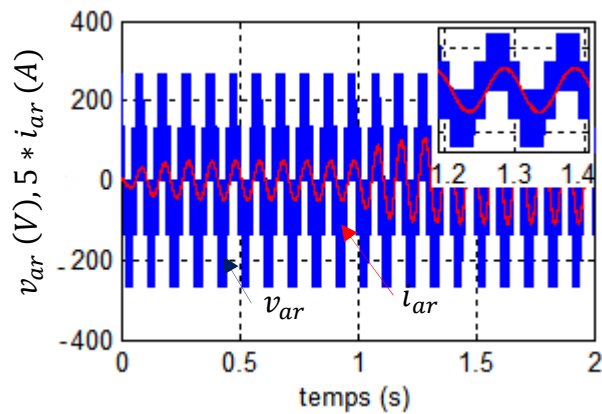


Fig. III.13 Tension et courant rotorique de la MADA

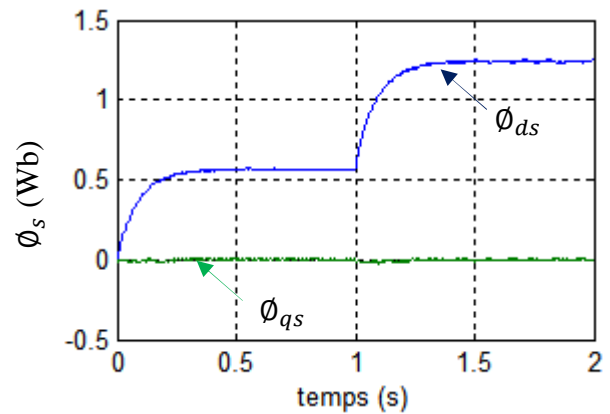


Fig. III.14 Composantes directe et quadratique du flux statorique

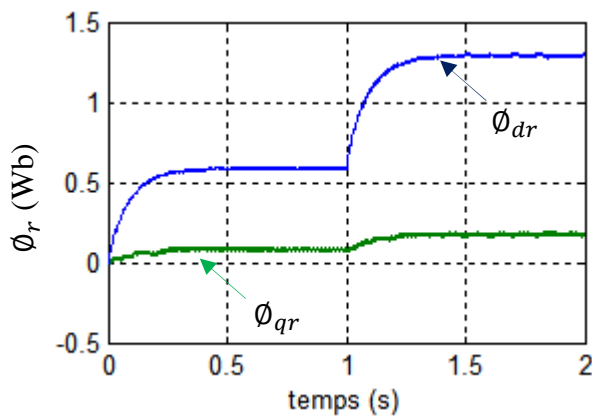


Fig. III.15 Composantes directe et quadratique du flux rotorique

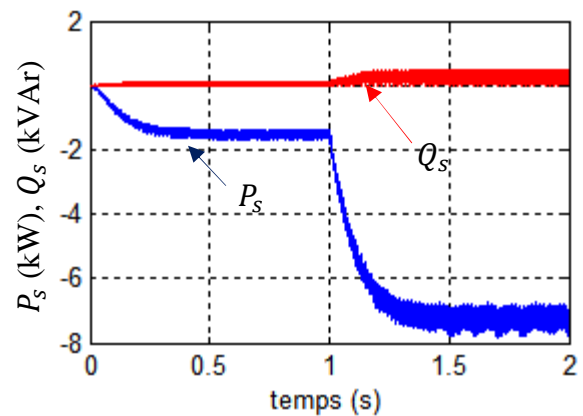


Fig. III.16 Puissance active et réactive absorbée par la charge

III. 7. 3 Charge nominale avec une tension de référence fixe et une vitesse variable

Dans ce cas, on s'intéresse au changement de la vitesse et l'étude des différents modes de fonctionnement de la MADA, l'évolution de ce dernier est montrée sur la figure III.17, sachant que sa valeur nominale est 1500 tr/mn.

Dans toute la durée de simulation, on garde la charge fixe à sa valeur nominale $R_n = 20\Omega$, ainsi que la tension de référence est fixée à 220V.

III. 7. 3. 1 Résultats et interprétation

La figure III.17 montre l'évolution de la vitesse de rotation, on trouve le glissement illustré par la figure III.18. La figure III.19 montre le courant et la tension statoriques restent constants dans tous les modes de changement de vitesse. La même remarque qu'on

peut tirer dans la figure III.20, qui prouve que l'amplitude tension statorique demeure constante et elle suit la référence.

L'évolution de la tension et le courant d'une phase rotorique est montré sur la figure III.21. On peut remarquer des changements de phase et de pulsation. Sur des périodes où le glissement est positif, la figure III.21b $g > 0$ (sa vitesse de rotation inférieure à 1500 tr/min), montre que la tension est en avance du courant, cela signifie que rotor absorbe de la puissance active et réactive à partir du convertisseur, (mode génératrice hyposynchrone).

Sur des périodes où le glissement est négatif, la figure III.21c $g < 0$ (la vitesse de la turbine dépasse 1500 tr/min), montre que le courant est en avance de phase par rapport à la tension, dans ce cas le rotor fournit de la puissance active et réactive, (mode génératrice hypersynchrone). Pour des glissements nuls, la figure III.21a $g = 0$ (la vitesse de rotation de la turbine est égale à la vitesse nominale 157 rad/s), montre que ces grandeurs sont continues, c'est un fonctionnement en génératrice asynchrone synchronisé.

La figure III.22 le réglage des puissances active et réactive apparaît bien découplé. La puissance réactive est pratiquement nulle, ceci malgré des variations importantes de la vitesse de rotation. Il est aussi important de noter que la puissance active est bien limitée à sa valeur nominale 7.5 kW.

Il est à noter que cette même remarque concerne aussi le flux rotorique d'axe q (figure III.24) et on retrouve la composante d du flux rotorique qu'est proportionnelle au flux statorique désiré.

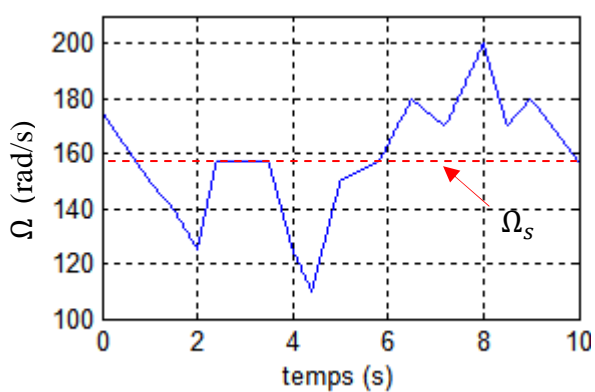


Fig. III.17 Vitesse de rotation de la MADA

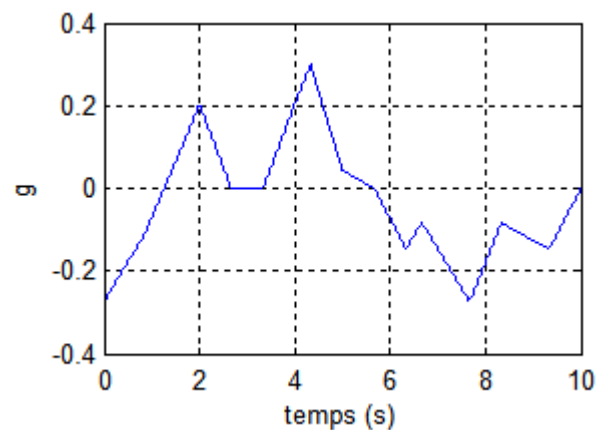


Fig. III.18 Glissement de la MADA

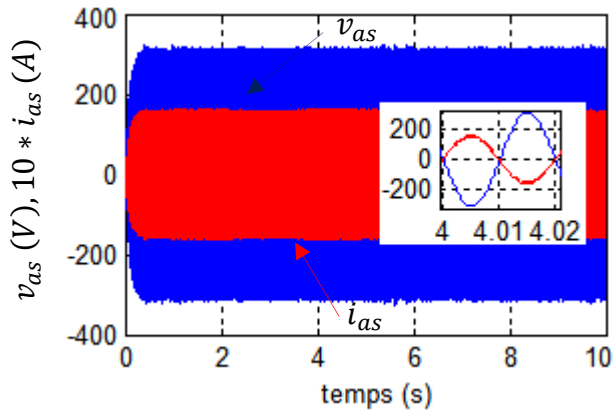


Fig. III.19 Courant et tension statorique de la MADA

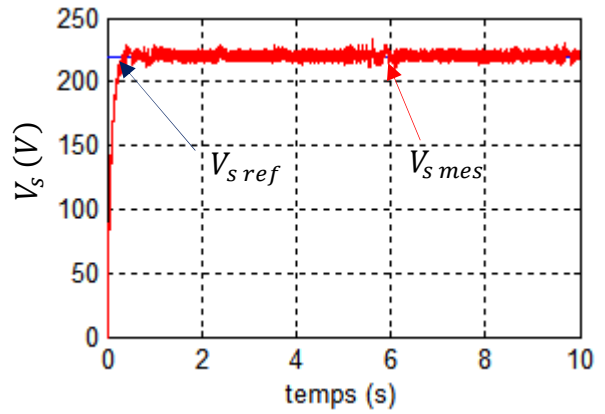


Fig. III.20 Tension efficace statorique de référence et mesurée

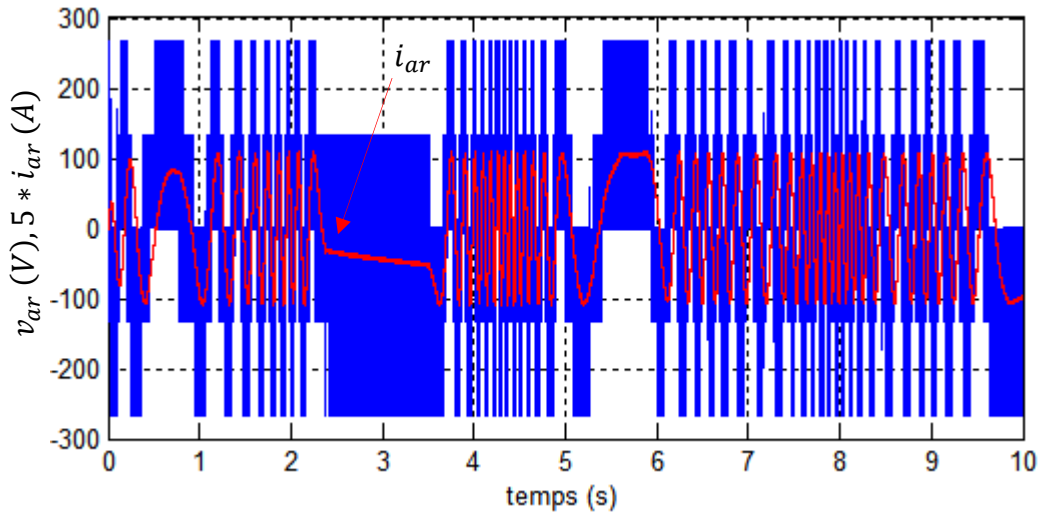


Fig. III.21 Tension et courant rotorique de la MADA

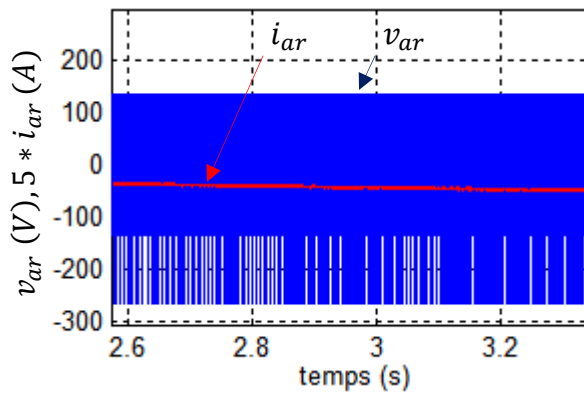


Fig. III.21a Zoom de tension et courant rotorique pour $g=0$

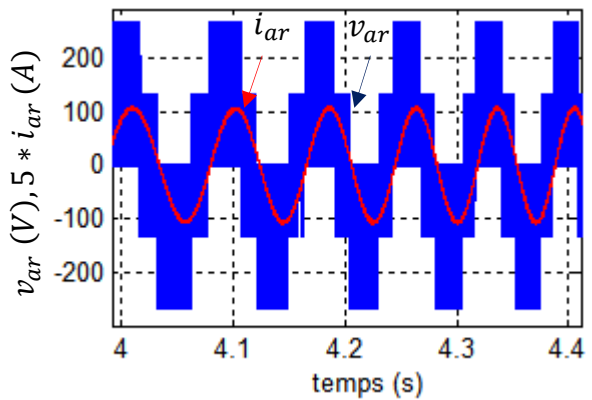


Fig. III.21b Zoom de tension et courant rotorique pour $g>0$

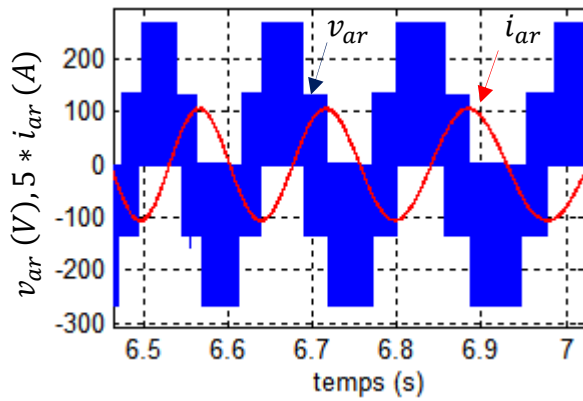


Fig. III.21c Zoom de tension et courant rotorique pour $g < 0$

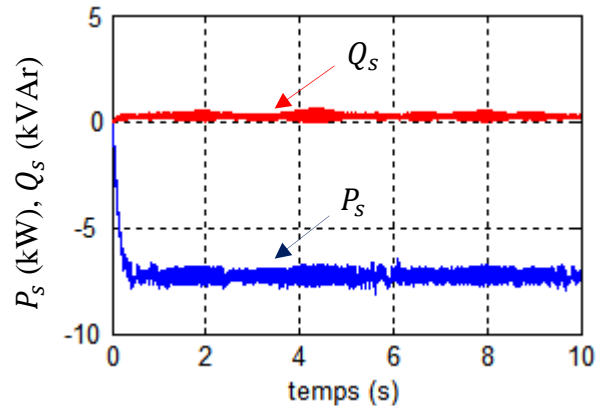


Fig. III.22 Puissance active et réactive absorbée par la charge

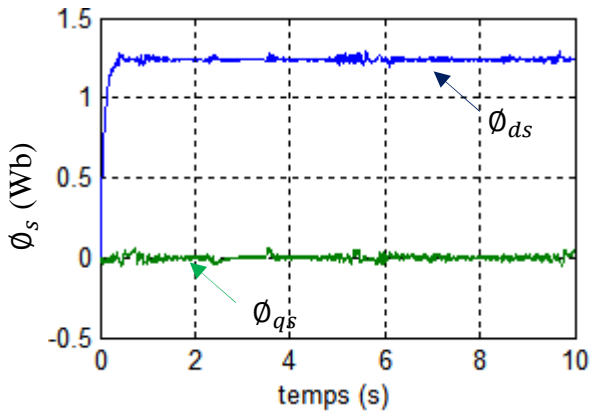


Fig. III.23 Composantes directe et quadratique du flux statoriques

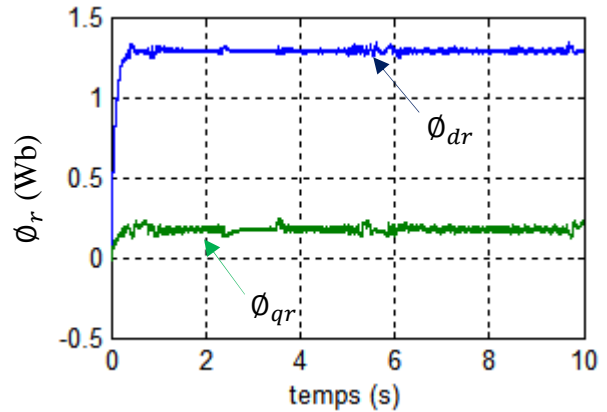


Fig. III.24 Composantes directe et quadratique du flux rotoriques

III. 10 Conclusion

Au cours de ce chapitre, le contrôle d'aérogénérateur connecté à un réseau autonome a été développé, en vue d'une exploitation par le logiciel MATLAB/Simulink et PSIM. Les simulations réalisées ont montré le fonctionnement complet et les performances de la structure d'aérogénérateur au réglage des puissances active et réactive générées.

Pour une application avec stator directement lié au réseau autonome, la MADA offre l'avantage de fonctionner dans les deux quadrants couple-vitesse en mode génératrice hyposynchrone et hypersynchrone et pour des glissements nuls, la MADA fonctionne en génératrice asynchrone synchronisée. Enfin, nous évaluons le comportement et l'efficacité de la commande élaborée à partir des résultats de simulation. Ces derniers confirment la capacité, de l'aérogénérateur de fonctionner à vitesse et à charge variable.

*Conclusion
générale*

CONCLUSION GENERALE

Le travail effectué dans ce mémoire nous a permis d'évaluer les performances de l'aérogénérateur à base de la machine asynchrone double alimentation connecté au réseau électrique et à un réseau autonome. On a abouti à plusieurs résultats.

Dans le premier chapitre nous avons abordé l'aspect général d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne, ainsi nous avons présenté quelques chaînes de conversion d'énergie éolienne en énergie électrique connectées au réseau puis les chaînes exploitées dans les stations autonomes. Enfin, nous avons retenu le système utilisant la machine asynchrone à double alimentation pour effectuer son étude dans le cas d'un système éolien autonome.

Au deuxième chapitre, nous avons présenté le modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans le repère de PARK et sa commande vectorielle en puissance par orientation du flux statoriques, ainsi que celui des convertisseurs (redresseur MLI – onduleur MLI).

Ce chapitre a été dédié à la modélisation de la turbine ainsi que la MADA dont la complexité a été réduite en utilisant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices et en effectuant un changement de repère par l'application de la transformation de Park.

L'étude des caractéristiques de la MADA alimentée par des convertisseurs de fréquences à commande MLI. La simulation a été réalisée sous le logiciel Matlab/Simulink.

Dans le dernier chapitre, nous avons étudiée le fonctionnement d'une chaîne de conversion éolienne reliée au réseau autonome basée sur la génératrice asynchrone double alimentation (MADA), ce modèle a été utilisé pour étudier les performances de cette machine en charge.

Notre travail nous a permis de réaliser une modélisation complète et simulation d'une éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation

(MADA). Ces résultats ont mis en évidence l'influence de la charge résistive, de la vitesse d'entraînement sur la valeur de la tension de la génératrice.

Des tests sur la génératrice débitant sur une charge résistive confirment la nécessité de réguler le transit de puissance réactive d'où la nécessité d'une commande afin de maintenir une tension constante, c'est l'objectif du système autonome.

La MADA peut fonctionner dans les deux quadrants couple-vitesse. Cette dernière fonctionne en mode génératrice hyposynchrone pour des glissements positifs, elle fonctionne en mode génératrice hypersynchrone pour des glissements négatifs et pour un glissement nul, la MADA fonctionne en mode génératrice asynchrone-synchronisée. Les simulations réalisées ont montré le fonctionnement complet et les performances de chaque structure d'aérogénérateur au réglage des puissances active et réactive générées.

PERSPECTIVES

Dans ce mémoire, nous n'avons étudié que certains points d'un sujet d'étude très vaste qui nécessitera une investigation plus poussée et une meilleure compréhension des phénomènes physiques mis en jeu avec l'utilisation d'outils appropriés. Dans ce constat, on peut envisager de nombreuses suites à partir de ce travail:

- Intégration d'un système de stockage dans une éolienne à vitesse variable en vue d'un fonctionnement sur réseau ou sur charges isolées, permettant d'avoir une réserve supplémentaire d'énergie. Pour assurer l'équilibre production / consommation, un système de stockage de type chimique est envisagé ainsi qu'un groupe électrogène. Afin de constituer un ensemble capable de fournir des services systèmes: réglage de la tension, réglage de la fréquence et réglage de la puissance réactive.
- Il serait aussi intéressant de faire une réalisation d'une plateforme expérimentale permettant d'expérimenter en temps réel le comportement d'un générateur éolien à vitesse variable débitant sur une charge isolée et par la même valider les résultats de simulation présentés dans ce mémoire.

Les perspectives du travail de recherche de ce sujet sont toujours ouvertes quand on parle des sources d'énergie renouvelable. Elles peuvent viser prochainement l'association d'une source d'énergie solaire (panneaux photovoltaïques) avec plusieurs centrales éoliennes (ferme éolienne) connectées à une charge isolée pour former un système hybride et autonome.

Annexe

ANNEXE A

A.1 Dimensionnement du bus continu

A.1.1 Limitation du bus continu

Pour montrer les limitations au niveau du bus continu, on considère le modèle équivalent monophasé de la figure A.1 en sortie de l'onduleur avec i , le courant total dans la ligne. E la valeur crête de la tension du réseau, U_m , la valeur crête du fondamental de la tension modulée par l'onduleur.

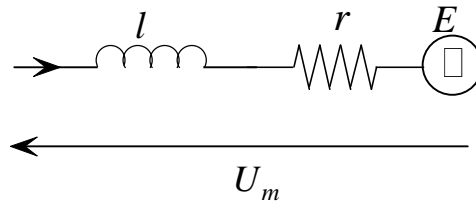


Fig. A.1 Schéma monophasé de la liaison réseau

Le diagramme vectoriel correspondant (figure A.2.a) permet d'écrire :

$$(E + ri)^2 + (l\omega_s i)^2 = U_m^2 \quad (\text{A.1})$$

Un fonctionnement à facteur unitaire n'est possible que si $U_m < u$ (figure A.2.a) c'est à dire pour une valeur efficace du courant telle que :

$$i^2 < \frac{1}{r^2 + (l\omega_s)^2} (u^2 - E^2) \quad (\text{A.2})$$

u est la valeur de la tension du bus continu. Compte tenu de la valeur importante du courant $i = i_{m_mac} + i_{m_mac2} + i_{m_mac3}$, il est nécessaire d'augmenter significativement la valeur du bus continu u pour pouvoir maintenir un facteur de puissance unitaire.

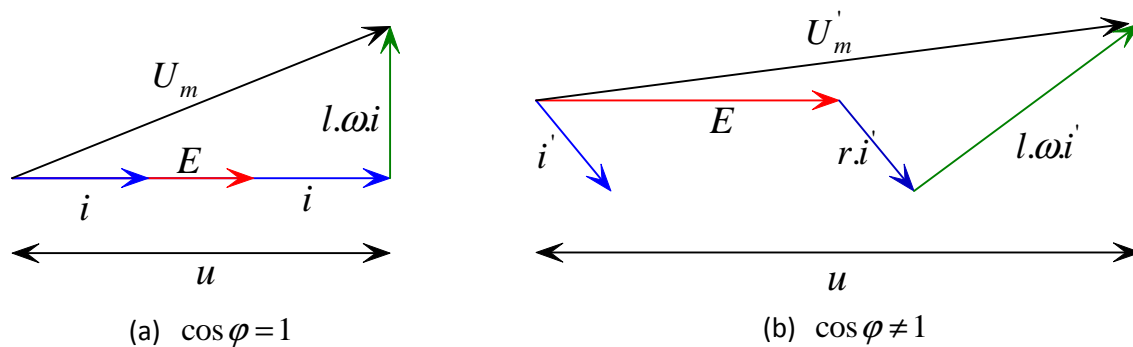


Fig. A.2. Diagramme vectoriel de la liaison réseau en valeur crête

A.1.2 Calcul de la tension du bus continu

Pour déterminer la valeur de la tension du bus continu nécessaire pour transiter une puissance donnée, on utilise un schéma équivalent monophasé simplifié de la liaison entre le bus continu, l'onduleur et le réseau (en négligeant la résistance du filtre d'entrée). Pour cela, l'onduleur et le réseau sont considérés comme des sources de tension monophasées (figure A.3).

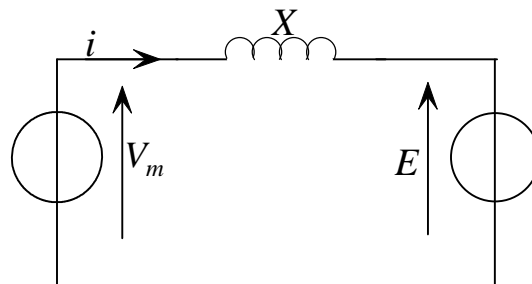


Fig. A.3. Schéma monophasé simplifié de la liaison réseau

V_m est la valeur efficace du fondamental de la tension modulée par l'onduleur, E est la valeur efficace de la tension simple à l'entrée du transformateur. X est l'impédance monophasée de la self de lissage. On a représenté sur la figure A.4 le diagramme vectoriel correspondant.

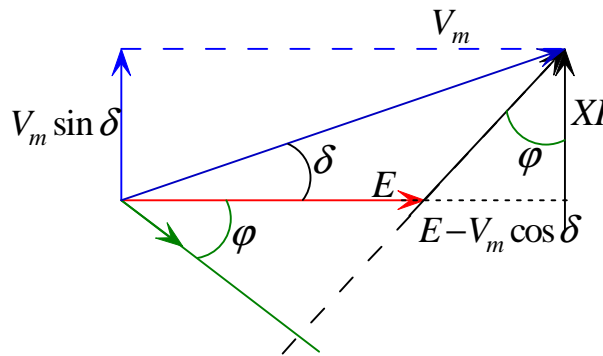


Fig. A.4. Schéma monophasé simplifié de la liaison réseau

On peut donc exprimer, les puissances actives et réactives consommées du côté de l'onduleur et au primaire du transformateur, en triphasé. La puissance réactive envoyée sur le réseau (au primaire du transformateur), on a :

$$Q = 3EI \sin \varphi \quad (\text{A.3})$$

Cette quantité peut être écrite en fonction du déphasage entre E et XI . On considère la projection du vecteur XI sur l'axe porté par E : $XI \cos \varphi$. Cette dernière est équivalente à la quantité $E - V_m \cos \delta$. D'où

$$Q = \frac{3E(E - V_m \cos \delta)}{X} \quad (\text{A.4})$$

La puissance active s'exprime par :

$$P = 3EI \cos \varphi \quad (\text{A.5})$$

Or, la projection de XI sur l'axe perpendiculaire à celui porté par E : $XI \sin \varphi$ s'écrit aussi sous la forme $V_m \sin \delta$ d'où :

$$P = \frac{3EV_m \sin \delta}{X} \quad (\text{A.6})$$

Pour l'application considérée, la vitesse de la machine est asservie de manière à obtenir un maximum de puissance extraite du vent. On définit le paramètre r , appelé taux de modulation, qui permet de caractériser la valeur efficace du fondamental de la tension modulée par l'onduleur :

$$V_m = \frac{r.u}{2\sqrt{2}} \quad (\text{A.7})$$

Pour dimensionner la tension du bus continu u , on introduit le paramètre :

$$u = \alpha.E.2\sqrt{2} \quad (\text{A.8})$$

De (A.7) et (A.8) on déduit :

$$V_m = r\alpha E \quad (\text{A.9})$$

Les puissances sont alors exprimées en fonction de ce paramètre selon :

$$Q = \frac{3E^2(1-r\alpha \cos \delta)}{X} \quad (\text{A.10})$$

$$P = \frac{3.E^2.\sin \delta.r.\alpha}{X} \quad (\text{A.11})$$

Or, pour un fonctionnement souhaité à puissance réactive nulle (qui est le cas souhaité dans notre étude), on obtient à partir de $Q = 0$:

$$r.\alpha.\cos \delta = 1$$

Autrement dit, à partir de (A.11) :

$$P = \frac{3.E^2.\sqrt{r^2.\alpha^2 - 1}}{X} \quad (\text{A.12})$$

Afin de transférer le maximum de puissance sur le réseau, le taux de modulation est unitaire. Donc, la relation A.12 devient :

$$r = 1 \Rightarrow |P| = \frac{3.E^2.\sqrt{\alpha^2 - 1}}{X} \quad (\text{A.13})$$

Connaissant la puissance maximale fournie par notre éolienne, on peut déterminer le paramètre α à partir de ce paramètre et de la valeur efficace des tensions du réseau, on fixe la valeur de la tension du bus continu correspondante en utilisant l'équation (A.8).

$$\alpha^2 = \frac{P_{\max} \cdot X^2}{9.E^4} + 1 = 1.35$$

Où :

$$\alpha = \sqrt{\frac{P_{\max} \cdot X^2}{9 \cdot E^4} + 1}$$

Et donc, en utilisant l'équation (A.8), on détermine la tension du bus continu

$$u = \alpha \cdot E \cdot 2 \cdot \sqrt{2}$$

A.2 Calcul d'un régulateur PI avec compensation

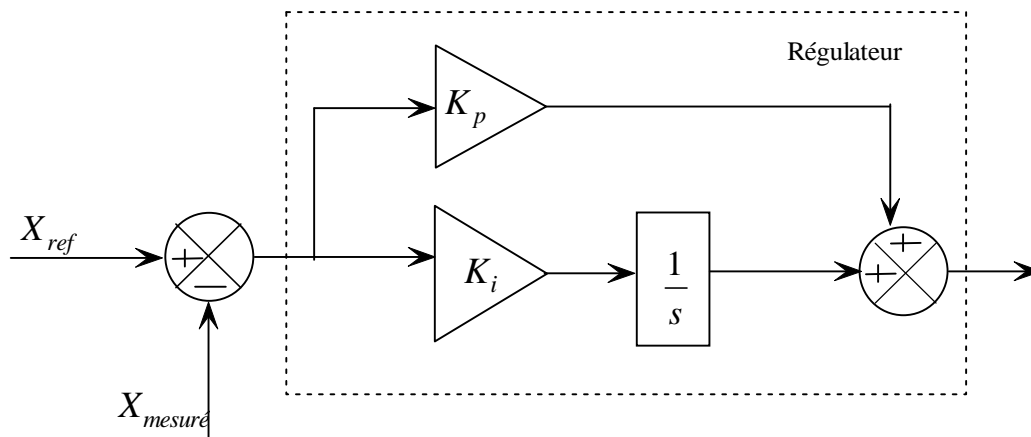


Fig. A.5. Schéma bloc du correcteur PI avec compensation de la constante de temps

La forme du correcteur est la suivante :

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (\text{A.14})$$

Avec :

K_p : Gain proportionnel du correcteur ;

K_i : Gain intégral du correcteur.

Pour une fonction de transfert d'un processus associée à ce correcteur :

$$H(s) = \frac{k}{1 + \tau \cdot s} \quad (\text{A.15})$$

La fonction de transfert en boucle ouverte s'écrit :

$$H_{bo}(s) = \frac{k(K_p + \frac{K_i}{s})}{1 + \tau \cdot s} = \frac{k(K_p s + K_i)}{s(1 + \tau \cdot s)} = K_i \cdot k \frac{1 + \frac{K_p \cdot s}{K_i}}{s \cdot (1 + \tau \cdot s)} \quad (\text{A.16})$$

Si on pose $\frac{K_p}{K_i} = \tau$ on aura

$$H_{bo}(s) = \frac{K_i \cdot k}{s} \quad (\text{A.17})$$

La fonction de transfert en boucle fermée s'écrit :

$$H_{bo}(s) = \frac{K_i \cdot k}{K_i \cdot k + s} = \frac{1}{1 + \frac{1}{K_i \cdot k} \cdot s} \quad (\text{A.18})$$

Le temps de réponse t_r du système bouclé pour atteindre 95% de la consigne

$$t_r = 3 \frac{1}{K_i k} \quad (\text{A.19})$$

$$K_i = \frac{K_p}{\tau} \quad (\text{A.20})$$

Alors on trouve :

$$t_r = 3 \cdot \frac{\tau}{K_p \cdot k} \quad (\text{A.21})$$

$$\text{D'où } \begin{cases} K_p = \frac{3\tau}{t_r \cdot k} \\ K_i = \frac{3}{t_r \cdot k} \end{cases} \quad (\text{A.22})$$

ANNEXE B

B.1 Paramètres de la MADA ($P_n=1.5MW$)

Les paramètres de la MADA utilisée pour (Chapitre II) sont donnés dans le tableau(B.1)

Tableau B.1 : Paramètres de la MADA

Puissance nominale	$P_n = 1.5MW$
Tension nominale	$V_n = 220V$
Vitesse nominale	$\Omega_n = 157rd/s$
Fréquence nominale	$f_s = 50Hz$
Résistance d'une phase statoriques	$R_s = 0.012 \Omega$
Resistance d'une phase rotorique	$R_r = 0.021 \Omega$
Inductance cyclique d'une phase statorique	$L_s = 0.0137H$
Inductance cyclique d'une phase rotorique	$L_r = 0.0136H$
Inductance mutuelle cyclique stators-rotor	$M = 0.0135H$
Moment d'inertie	$J = 10kg .m^2$
Nombre de paires de pôles	$p = 2$

B.2 Paramètres de la turbine éolienne

Paramètres de la turbine éolienne traités dans ce travail sont donnés dans le tableau (B.2)

Tableau B.2: Paramètres de la turbine éolienne

Rayon de la turbine	$R = 36m$
Moment d'inertie	$J = 30kg . m^2$
Multiplicateur de vitesse	$G = 90$
Coefficient de puissance maximal	$C_{p_max} = 0.5$
Vitesse spécifique optimale	$\lambda_{opt} = 4.8$
Vitesse nominale du vent	$v_{vent} = 12.5m/s$
Nombre de pales	3

B.3 Paramètres de la MADA ($P_n=7.5kW$)

Les paramètres de la MADA utilisée pour (Chapitre III) sont donnés dans le tableau(B.3)

Tableau B.3 : Paramètres de la MADA

Puissance nominale	$P_n=7.5kW$
Tension nominale	$V_n=220V$
Vitesse nominale	$\Omega_n =157rd/s$
Fréquence nominale	$f_s=50Hz$
Résistance d'une phase statoriques	$R_s=0.455 \Omega$
Resistance d'une phase rotorique	$R_r=0.62 \Omega$
Inductance cyclique d'une phase statorique	$L_s=0.084H$
Inductance cyclique d'une phase rotorique	$L_r=0.081H$
Inductance mutuelle cyclique stators-rotor	$M=0.078H$
Moment d'inertie	$J=0.005 kg .m^2$
Nombre de paires de pôles	$p=2$

Bibliographie

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [Abd 07] A. Abdelli, «Optimisation Multicritère d'une Chaîne éolienne passive», Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 2007.
- [Abn 11] F. Abdoune, «Etude et Contrôle des Aérogénérateurs Basés sur les Machines Asynchrones à Rotor Bobiné», Mémoire de magister, Université de Bejaïa, Algérie, 2011.
- [Aim 04] S. El Aimani, «Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension», Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 2004.
- [Ben 05] M. Bensoam, Cours génie électrique, master instrumentation, 2005.
- [Bru 12] Bruno Claessens et al, «Vade-Mecum pour l'implantation d'éolienne de faibles puissances en Wallonie», Document, Compagnons d'Eole, APERE, Vents d'Houyet et E.R.B.E. pour le SPW – DGO4, Août 2012.
- [Che 11] S. Chekkal, «Evaluation des Performances de l'Aérogénérateur à base de la Machine Asynchrone Double Etoile Connecté au Réseau Electrique», Mémoire de magister, Université de Bejaïa, Algérie, Octobre 2011.
- [Che 10] N. Cherfia, «Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens», Mémoire de magister de l'université de Constantine, Algérie, 2010.
- [ENE] La croissance du parc éolien en 2012 sur le site www.energies-renouvelables.org, www.energies-renouvelables.eu mars 2013.
- [EUR] Euroserv'ER, Energy - Yearly statistics 2008 (Eurostat) pages 12-13 pour l'Europe et 152-153 pour la France, www.Wind powerBarometer.org, 2013.
- [Ghe 08] K. Ghedamsi, «Contribution à la Modélisation et la commande d'un convertisseur direct de fréquence Application à la conduite de la machine asynchrone», Thèse de Doctorat de l'ENP, 2008.
- [GWEC] Global Wind Energy Council, www.outils solaires.com.
- [Has 10] Y.Hasni, M.Chaaben, «Réseau électrique hybride autonome, supervision et gestion des sources», International Renewable Energy Congress Sousse, Tunisia, Novembre 2010.
- [Idj 10] K. Idjdarene, «Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices

- Asynchrones à Cage dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes», Thèse de doctorat de l'Université Lille 1, France, 2010.
- [IERN]** International Energy Regulation Network - IERN, archive, sur le site iern.net
- [Kat 01]** S. Kato, N. Hoshi, K. Oguchi, «A Low Cost System of Variable-Speed Cascaded Induction Generators for Small Hydroelectricity», Conference Record of the IEEE Industrial Applications Conference, pp. 1419–1425, 2001.
- [Lec 04]** L. Leclercq, «Apport du Stockage Inertiel Associé à des Eoliennes dans un Réseau Electrique en vue d'Assurer des Services Systèmes», Thèse de doctorat Université de Lille, France, 2004.
- [Lob 03]** F.Poza Lobo, «Modélisation, Conception et Commande d'une Machine Asynchrone sans Balais Doublement Alimentée pour la Génération à Vitesse Variable», Thèse de doctorat Université de Grenoble, France, 2003.
- [Mek 04]** N. Mekkaoui, «Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée», Mémoire de Magister, Université Batna, Algérie, 2004.
- [Mir 05]** A. Mirecki, «Etude Comparative de Chaines de Conversion d'Energie Dédiées à une Eolienne de Petite Puissance», Thèse de Doctorat, INPT, France, 2005.
- [Nas 11]** M. Nasser, «Supervision de Sources de Production d'Electricité Hybrides Eolien/Hydraulique Dans les Réseaux d'Energie Interconnectés ou Isolés», Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, France, Décembre 2003.
- [Nay 87]** C.V. Nayar, S.M. Islam, H. Dehbonei, K.Tan, «Power Electronics for Renewable Energy Source», Department of Electrical and Computer Engineering, Curtin University of Technology, GPO Box U1987, Perth, Western Australia 6845, Australia, second edition.
- [Ney 88]** H. Ney, «Equipements de Puissance», Editions Fernand Nathan, Paris, 1988.
- [Nou 08]** A. NOUH, «Contribution au Développement d'un Simulateur pour les Véhicules Electriques Routiers», Thèse de Doctorat, Université de Belford-Montbéliard, France, 2008
- [Poi 03]** F. Poitiers, «Etude et Commande de Génératrices Asynchrone pour

- l'Utilisation de l'Energie Eolienne», Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, France, Décembre 2003.
- [Roi 03]** H.Roisse¹, G.Peset², «Wind Turbines Equiped With Self-Excited. Induction Machine in Autonomous Mode: Analytical and Numerical Starting Studies», ICREP'03, 2003.
- [Sid 07]** M. Siddo Abdoulaziz, «Etude du Générateur Asynchrone pour l'Utilisation dans la Production de L'Energie Eolienne», mémoire d'ingénieur d'école nationale polytechnique, 2007.
- [SOL]** www.solar-kit.com
- [Tar 08]** S. Taraft, «Etude du Stockage Inertiel d'Energie dans une Chaîne de Conversion Eolienne à Vitesse Variable Basée sur une Machine Asynchrone à Double Alimentation», mémoire de magister d'Université de Béjaia, 2008.
- [Vid 04]** P. Vidal, «Commande Non-Linéaire d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation», Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, France, Décembre 2004.
- [WIP]** Danish wind industry association, www.windpower.org. 2012 European statistics, EWEA, fevrier 2013

Résumé

Le travail a essentiellement porté sur la modélisation et la commande d'une éolienne à base d'une machine double alimentée utilisée une connexion sur un réseau puissant et pour un site isolé.

Dans le contexte des énergies renouvelables, un survol sur les systèmes éoliens a été donné avec une présentation des principes fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne. Différentes associations machine-éolienne ont été examinées.

Une importance particulière fût accordée à la modélisation de la génératrice asynchrone double alimentée et de la turbine, suivie par celle des convertisseurs statiques. Pour cela, une technique de commande a été traitée, à savoir, le contrôle vectoriel. Le principe de contrôle à facteur de puissance unitaire a été intégré dans la partie de la régulation du bus continu.

Ce qui nous a intéressés par la suite, c'était la modélisation de l'aéroturbine d'une éolienne à base de cette génératrice destinée à alimenter un consommateur isolé. Les variations de la charge et de la vitesse ont un impact important sur la tension qui devient variable. Afin de résoudre ce problème, une méthode de régulation par un simple contrôle de la tension aux bornes du stator de la MADA a été proposée. Cette méthode est basée sur la compensation de la puissance réactive en utilisant un compensateur de tension.

Mots clés: *Machine asynchrone double alimentée, auto amorçage, réseau électrique, convertisseurs de fréquence, turbine éolienne à vitesse variable, contrôle de puissances, réglage de tension, réglage de fréquence, réseau autonome, commande vectorielle, Algorithme MPPT, site isolé.*

Abstract

The work has focused on the modeling and control of a wind turbine based on a double machine powered connection used on a powerful network and a remote site. In the context of renewable energy, an overview of wind energy systems has been given a presentation of the fundamental principles of the string conversion of wind energy. Different associations wind machine were examined.

Particular emphasis was given to the modeling of double-fed asynchronous generator and turbine, followed by the static converters. For this, a control technique has been processed, the vector control. The principle of power factor control unit has been incorporated in the regulation of the DC bus.

What was interested us later; it was AeroTurbine modeling of a wind turbine based on this generator for supplying a consumer alone. Variations in load and speed have a significant impact on the tension becomes variable. To solve this problem, a method of control by a single control voltage at the stator of the DFIG has been proposed. This method is based on the reactive power compensation using a tension compensator.

Key words: *Doubly fed induction generator, self-feeding, electrical supply network, frequency converters, wind turbine at variable speed, controls powers, adjustment of tension, adjustment of frequency, autonomous network, vectol control, MPPT Algorithm, isolated areas.*

ملخص

ركز العمل على نمذجة و سيطرة توربينات هوائية على أساس اتصال آلة تعمل بالطاقة المزدوجة المستخدمة في شبكة قوية و موقع بعيد. في سياق الطاقة المتجددة, قد أعطيت لمحة عامة عن نظم طاقة الرياح عرضا للمبادئ الأساسية لتحويل سلسلة من طاقة الرياح.

وتم التركيز خاصة على نمذجة مولد تزامن مزدوج و التوربينات التي تغذيها محولات ثابتة. ما يهمنا في وقت لاحق هو نمذجة الناعورة الهوائية على أساس هذه المولدات لتزويد مستهلك منفرد.

التغير في السرعة و التحميل يكون لها تأثير كبير على التوتر و هذا الأخير يصبح متغير. لحل هذه المشكلة, قد اقترحت وسيلة لسيطرة الجهد بالتحكم في الجزء الثابت من الآلة. و يسند هذا الأسلوب على تعويض الطاقة التفاعلية باستخدام معوض التوتر.

كلمات مفتاحية

آلة غير متزامنة ذات تغذية مضاعفة, نظام طاقة الرياح, الشبكة الكهربائية, الموقع المنفرد, الطاقة المتجددة.