

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique



CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED
UT DES SCIENCES ET DE TECHNOLOGIES
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



Filière : Génie Electrique et Electronique
Spécialité: Réseaux Electriques

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
EN VUE DE LA PREPARATION DU DIPLOME:

MASTER ACADEMIQUE

Thème :

*Réglage des puissances active et réactive de la
génératrice asynchrone à double alimentation
sans balais par des régulateurs PIs*

Présenté par :

+ BELAID Brahim

+ SALHI Soufiane

Proposé et Dirigé Par:

Dr.BENATTOUS Djilani

Promotion : 2011/2012

REMERCIEMENTS

REMERCIEMENTS

AVANT TOUT, NOUS REMERCIONS DIEU LE TOUT PUISSANT DE 'AVOIR DONNE LE COURAGE, LA VOLONTE, LA PATIENCE ET LA SANTE DURANT TOUTES CES ANNEES D'ETUDE ET QUE GRACE A LUI CE TRAVAIL A PU ETRE REALISE.

NOUS TENONS A EXPRIMER NOTRE REMERCIEMENT ET GRATITUDE A NOTRE ENCADREURS :

DR. BENATTOUS DJILANI ET MR. BEKAKRA YOUSEF QUI NOUS A AIDE POUR RENDRE CE TRAVAIL EFFECTIF.

DES REMERCIEMENTS VONT EGALEMENT A TOUS CEUX ET CELLES QUI NOUS ONT APPORTE, DE PRES OU DE LOIN, ORIENTATION, SOUTIEN ET AIDE DANS LA REALISATION ET LA CONCRETISATION DE CE TRAVAIL, PLUS PARTICULIEREMENT

Y.BEKAKRA, Z.TIR

NOTRE REMERCIEMENT AUSSI AU DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE DE LA CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED ET A TOUS LES ENSEIGNANTS QUI 'ENSEIGNES DURANT LES ANNEES DU CURSUS.

NOTRE REMERCIEMENT EST EGALEMENT AUSSI AUX MEMBRES DE JURY QUI ONT ACCEPTE DE JUGER CE TRAVAIL.

ENFIN NOUS REMERCIONS AUSSI TOUTES LES PERSONNES QUI NOUS ONT AIDES DE PRES OU DE LOIN A LA REDACTION DE CE TRAVAIL.

MERCI.

Notations

MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
GACE	Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil
MAS	Machine Asynchrone à cage
MASDS	Machine asynchrone à double stator
MADASB	Machine Asynchrone à Double Alimentation sans Balais
MADAC	Machine Asynchrone à double alimentation en cascade
BC	Bobinage de Commande
BP	Bobinage de Puissance
FTBO	Fonction de Transfert en Boucle Ouverte
FTBF	Fonction de Transfert en Boucle Fermée
PI	Proportionnel Intégral
MPPT	Maximum Power Point Tracking

Liste des Figures

Figure I.1: Quelques exemples des machines à axe horizontal.....	7
Figure I.2: schéma d'une éolienne- N 60 (1300KW)	8
Figure I.3: Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles.	9
Figure I.4: Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau.....	10
Figure I.5: Générateur asynchrone à double stator	11
Figure I.6: Connexion indirecte d'une machine asynchrone sur le réseau.....	11
Figure I.7: Générateur asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de deux onduleurs	12
Figure I.8: schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor.....	13
Figure I.9: Principe de fonctionnement de deux machines asynchrones en cascade.	14
Figure I.10: machine en cascade avec une carcasse unique et un rotor à cage d'écureuil croisé.....	15
Figure I.11: machine asynchrone à double alimentation sans balais avec rotor à cage ou réluctant.	15
Figure I.12: Rotor de la MADAB: (a) Rotor sans conducteur; (b) Rotor Bobiné.....	16
Figure II.1: Système mécanique de l'éolienne	21
Figure II.2: Modèle mécanique simplifié de la turbine.....	22
Figure II.3: Schéma de la turbine éolienne	22
Figure II.4: Fonctionnement optimal de la turbine.	24
Figure II.5: Modèle d'une turbine éolienne	26
Figure II.6: Schéma électrique équivalent de la turbine d'une éolienne.....	26
Figure II.7: Schéma bloc du modèle de la turbine.	26
Figure II.8: Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne.....	27
Figure II.9: Stratégies de commande de la turbine	28
Figure II.10: Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.	29
Figure II.11: Vitesse de vent.....	31
Figure II.12: Coefficient de puissance avec un zoom.....	31
Figure II.13: Vitesse mécanique développée par la turbine.....	31
Figure II.14: Couple et Puissance électrique produite	32
Figure II.15: Représentation de la machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique ..	34
Figure II.16: montre alors la disposition des systèmes d'axes dans l'espace électrique.	36

Liste des figures

Figure II.17: donne alors une représentation interprétée de la machine de Park dans l'espace électrique	39
Figure II.18: Les tensions statorique de la MADA n°1	44
Figure II.19: Les courants statoriques de la MADA n°1	44
Figure II.20: Les tensions statoriques de la MADA n°2.....	44
Figure II.21: Les courants statoriques de la MADA n°2	45
Figure II.22: Les courants rotoriques de la MADASB.	45
Figure II.23: Les flux statoriques de la MADA n°1	45
Figure II.24: Les flux statoriques de la MADA n°2	46
Figure II.25: Les flux rotoriques de la MADASB	46
Figure II.26: Les puissances actives et réactives statoriques de la MADAB	46
Figure II.27: Représentation schématique d'un onduleur.	47
Figure II.28: schéma de principe de calcul de M.L.I	48
Figure III. 1: Position du référentiel par rapport au flux	51
Figure III. 2: Schéma du principe de découplage pour la machine de puissance par analogie avec la machine à C.C.	52
Figure III. 3: Schéma bloc de la MADASB	56
Figure III. 4: Schéma bloc de la commande indirecte sans boucle de puissance.	57
Figure III. 5: Schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance.....	58
Figure III. 6: Système régulé par un PI.....	59
Figure III. 7: : Modèle de la chaine éolienne avec la Command en MATLAB/SIMULINK	60
Figure III. 8: Profil du vent appliqué	61
Figure III. 9: Coefficient de puissance de la turbine.....	61
Figure III. 10: Vitesse de rotor (rd/s).....	62
Figure III. 11: Tension statorique de la machine de puissance.....	62
Figure III. 12: Puissance active et réactive avec sa référence (d,q).....	63
Figure III. 13: Courant statorique de la machine de puissance.....	63
Figure III. 14: Courant statorique de la machine de commande.....	63
Figure III. 15: Courant rotorique de MADASB.	64
Figure III. 16: Puissance active et réactive avec sa référence (d,q).....	64
Figure. III. 17: Courant statorique de la machine de puissance.....	64
Figure. III. 18: Courant statorique de la machine de commande.....	65
Figure. III. 19: Courant rotorique de MADASB.	65

Liste des symboles

Liste des symboles

ρ	Densité de l'air à 15°C
m	masse d'air
R	Rayon de la turbine
S	Surface balayée par le rotor de l'éolienne
P_{aer}	Puissance extraite par le rotor éolien (aérodynamique)
P_v	Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé
C_p	Coefficient de puissance de l'éolienne
λ	Vitesse relative de l'éolienne
β	Angle de calage des pales de la turbine
$\Omega_{turbine}$	Vitesse de la turbine
$\Omega_{turbine} - estim\acute{e}$	Vitesse mécanique estimée de la turbine
$\Omega_{méc}$	Vitesse mécanique
$v_{estim\acute{e}}$	Vitesse du vent estimée
v	La vitesse du vent
G	Rapport de multiplication
$J_{turbine} (kg. m^2)$	Moment d'inertie de la turbine
$J_g (kg. m^2)$	Moment d'inertie du rotor de la génératrice
$J (kg. m^2)$	Moment d'inertie totale
$J_{pale} (kg. m^2)$	Moment d'inertie de pale
$J_h (kg. m^2)$	Moment d'inertie de l'arbre
K_b	Elasticité de pale

Liste des symboles

K_h	Elasticité de l'arbre
D_h	Coefficient de frottement de l'arbre par rapport au Multiplicateur
D_g	Coefficient de frottement du rotor de la génératrice
f_{pale}	Coefficient de frottement par rapport au support
f	Coefficient de frottement visqueux
D_b	Coefficient de frottement de pale par rapport à l'air
$\dot{\beta}_{b1}, \dot{\beta}_{b2}, \dot{\beta}_{b3}$	Les vitesses d'orientation de chaque pale
T_{b1}, T_{b2}, T_{b3}	La force de pale dépend de la vitesse de vent appliquée
$E_v [J]$	L'énergie cinétique de vent
$C_{aer} [N. m]$	Couple aérodynamique de l'éolienne
$C_{mec} [N. m]$	Couple mécanique total appliqué au rotor de l'éolienne
$C_{vis} [N. m]$	Couple des frottements visqueux
$C_{em} [N. m]$	Couple électromagnétique
$C_{em-ref} [N. m]$	Couple électromagnétique référence
$C_{aer-estim\acute{e}} [N. m]$	Couple aérodynamique estimé
W_s	Pulsation électrique statorique
$\frac{3M_{max}}{2}$	Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.
l_s	Inductance propre des enroulements statoriques
m_s	Inductance mutuelle des enroulements statoriques
l_r	Inductance propre des enroulements rotoriques
m_r	Inductance mutuelle des enroulements rotoriques
v_{sdq0}	Le vecteur de tension statorique dans le repère de Park

Liste des symboles

v_{rdq0}	Le vecteur de tension rotoriques dans le repère de Park
i_{sdq0}	Le vecteur de courant statorique dans le repère de Park
i_{rdq0}	Le vecteur de courant rotoriques dans le repère de Park
ψ_{sdq0}	Le vecteur de flux statorique dans le repère de Park
ψ_{rdq0}	Le vecteur de flux rotoriques dans le repère de Park
$P(\theta)$	matrice de Park
C_{em}	Couple électromagnétique
L_{mp}, L_{mc}	Inductances mutuelles cycliques entre stator et rotor de deux MADA
L_{sp}, L_{sc}	Inductances cycliques de deux MADA.
p	Nombre de paires de pôles de la cascade
R_{sp}, R_{sc}	Résistances statoriques de deux MADA
R_{rp}, R_{rc}	Résistances rotoriques de deux MADA.
R_{s1}	Résistance statorique de la machine de puissance
R_{s2}	Résistance statorique de la de la machine de commande
R_{r1}	Résistance rotorique de machine de puissance
R_{r2}	Résistance rotorique de la machine de commande
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	Courants réels dans les phases statoriques.
i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}	Courants réels dans les phases rotoriques.
v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}	Les tensions simples triphasées au stator de la machine
v_{ra}, v_{rb}, v_{rc}	Les tensions simples triphasées au rotor de la machine
$\psi_{sa}, \psi_{sb}, \psi_{sc}$	Les flux propres circulants au stator de la machine
$\psi_{ra}, \psi_{rb}, \psi_{rc}$	Les flux propres circulants au rotor de la machine

Liste des symboles

ω	Pulsation mécanique
ω_p	pulsation statorique de la puissance
ω_c	pulsation statorique de la commande
ω_r	pulsation rotorique
p_1	nombre de paire de pole de lala machine de puissance
p_2	nombre de paire de pole de la machine de commande
P_s	la puissance active statorique.
Q_s	la puissance réactive statorique.
K_p	gain proportionnel du régulateur
K_i	gain integral du régulateur
τ_r	Temps de réponse du système que l'on se fixe de l'ordre.

Table des Matières

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I

Généralité sur l'énergie éolienne

I.1. Introduction :	3
I.2. Définition de l'énergie éolienne	4
I.3. La production d'énergie électrique à partir des éoliennes:	4
I.4. Avantages et désavantages de l'énergie éolienne :	5
I.4.1. Les avantages :	5
I.4.2. Les désavantages :	6
I.5. Spécificités liées à la technologie des aérogénérateurs :	7
I.5.1. Constitution d'un aérogénérateur :	7
I.6. État de l'art sur la conversion électromécanique:	8
I.6.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone:	9
I.6.1.1 Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil (GACE):	9
I.6.1.2. Générateur asynchrone à double stator (MASDS):	10
I.6.1.3. Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance:	11
I.6.1.4. Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné":	13
I.6.1.5. Machine Asynchrone à double alimentation en cascade (MADAC):	14
I.6.1.6. Machine Asynchrone à double alimentation sans balais:	15
I.6.1.6.1 Comparaison des topologies et choix de la MADAB:	17
I.9. Conclusion	18

Chapitre II

Modélisation du système éolien

II.1. Introduction.....	19
II.2. Modèle du vent	20
II.3. Modélisation d'une turbine éolienne à axe horizontal:	20
II.3.1. Hypothèse simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine:.....	21
II.3.2 Modélisation de la turbine :.....	22
II.3.3. Modèle du multiplicateur	25
II.3.4. Equation dynamique de l'arbre [5]	25
II.4. Stratégie de commande de la turbine:.....	27
II.5. Maximisation de la puissance extraite:.....	28
II.5.1 Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse	28
II.6. Résultats obtenus	30
II.7. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation	32
II.7.1. Modèle généralisé de la machine asynchrone dans le repère naturel.....	33
II.7.2. Mise en équation de la partie électrique dans le plan a,b,c	34
II.7.3. Modèle généralisé de la machine asynchrone dans le repère de Park.....	36
II.7.4. Calcul du couple électromagnétique :	39
II.7.5. Choix du référentiel.....	40
II.8. Modélisation de la cascade de deux MADA.....	41
II.8.1. Modèle de la MADA sans bague balais	42
II.9. Résultat de simulation:.....	43
II.10. Modélisation de l'onduleur triphasé à MLI :	47
II.11 Fonction de connexion :	48
II.11.1. La technique M.L.I	48
II.11 Conclusion.....	49

Chapitre III

Commande vectorielle de la MADASB

III.1 Introduction.....	50
III.2 Généralités sur la commande vectorielle :	50
III.2.1 Principe du contrôle vectoriel à flux orienté :.....	51
III.2.2 Contrôle vectoriel découplé des puissances active et réactive :	52
III.3 Commande indirecte de la MADASB:	56
III.3.1 Commande sans boucle de puissance :	57
III.3.2 Commande avec boucle de puissance :.....	57
III.4 Synthèse de la régulation PI:	58
III.5 Schéma complet de simulation:	60
III.6 Résultats de simulations :.....	60
III.6.1 Indirect sans boucle de puissance:	62
III.6.2 Indirect avec boucle de puissance:.....	64
III.7 Interprétations des Résultats :	66
III.8 Conclusion	66
Conclusion générale.....	67

INTRODUCTION GENERALE

Vu l'ampleur de l'industrialisation ces dernières décennies, la demande en énergie électrique est devenue très importante, ce qui a pour conséquence la diminution du stock mondial en hydrocarbure. Face à cela et au défi du réchauffement climatique de la terre causé par les émissions des gaz à effet de serre liées à la consommation excessive d'énergie d'origine matières fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel, etc.), il s'avère nécessaire de faire appel à des sources d'énergie nouvelles qui seront sans conséquence pour l'homme et l'environnement.

C'est ainsi que les pays industrialisés se sont lancés dans le développement et l'utilisation des sources d'énergies renouvelables comme le solaire, la biomasse, la géothermie, la marémotrice, l'hydraulique, ...

Parmi ces sources d'énergie, l'éolienne représente un potentiel assez important non pas pour remplacer les énergies existantes, mais pour palier à l'amortissement de la demande de plus en plus galopante. Après des siècles d'évolution et des recherches plus poussées depuis quelques décennies, plusieurs pays se sont, aujourd'hui résolument tournés vers l'énergie éolienne [1].

L'un des axes actuels de recherche est la génération d'énergie électrique à l'aide de machine asynchrone à double alimentation, utilisant comme moyen d'entraînement l'énergie éolienne. Intégrée dans un système éolien, la MADA permet de fonctionner sur une large plage de vitesse de vent, et d'en tirer le maximum de puissance possible pour chaque vitesse de vent. Son circuit statorique est connecté directement au réseau électrique. Un second circuit placé au rotor est également relié au réseau, mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance [2]. Etant donné que la puissance rotorique transitée est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance.

C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette machine pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion de cette machine.

Plusieurs méthodes de commande des MADASB sont apparues, parmi elles, la commande vectorielle. Son principe de base est de rendre ces machines semblables du point de vue commande à une machine à courant continu à excitation séparée. Ces dernières années, un grand intérêt est donné à l'utilisation des réseaux de neurones en identification et commande des systèmes non linéaires, ceci est dû principalement à leurs capacités d'apprentissage et de généralisation [3].

Structure du mémoire :

Ce mémoire est réparti en trois chapitres :

Dans le premier chapitre on présente généralité sur le système d'énergie éolienne et leur influence dans les différents types des machines électriques, ainsi les aérogénérateurs.

Dans le deuxième chapitre consacré aux modélisations des éléments de système éolien, qui sont la turbine, la machine asynchrone à double alimentation sans balais et son convertisseur.

Dans le troisième chapitre, on présente la stratégie de commande réalisée pour contrôler les puissances active et réactive entre la machine et le réseau. Ainsi les résultats de simulation de cette commande.

Chapitre I: Généralité sur l'énergie éolienne

I.1. Introduction :

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation d'énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne, [04]. Les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones ou asynchrones.

Les éoliennes de la 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, ce sont les algorithmes de commande qui permettent de contrôler la vitesse de rotation des éoliennes à chaque instant. [05].

Dans ce chapitre, on va présente un survol sur les systèmes de conversion éoliens de manière générale puis les différents générateurs asynchrones utilisés dans les systèmes éoliens. Ainsi que survol des structures à double alimentation. Ce chapitre sera clôturé par une conclusion.

I.2. Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [06]

I.3. La production d'énergie électrique à partir des éoliennes:

Bien que connue et exploitée depuis longtemps, l'énergie éolienne fut complètement négligée pendant l'ère industrielle, au profit quasi exclusif, si l'on excepte l'hydroélectricité des énergies fossiles. L'énergie cinétique du vent peut être convertie directement en énergie mécanique et être utilisable par exemple dans les anciens moulins à vent ou, pour actionner des pompes. Mais de nos jours, on la transforma en énergie électrique par l'emploi d'aérogénérateurs. Le nouvel intérêt porté à l'énergie éolienne depuis la moitié des années 70, résulte de deux préoccupations : d'une part la protection de l'environnement et l'économie des combustibles fossiles qui en résulte. D'autre part l'évolution des technologies rend la conversion de cette énergie de plus en plus rentable et donc son utilisation devient économiquement compétitive par rapport aux sources traditionnelles de même puissance [07].

Bien que les aérogénérateurs aient une certaine maturité technique, la technologie des aérogénérateurs évolue. Les éoliennes de la dernière génération fonctionnent à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de diminuer les efforts mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe. C'est le développement des variateurs électroniques qui permet de contrôler la vitesse de rotation des éoliennes à chaque instant. Le vent est une grandeur stochastique, de nature très fluctuante. Par conséquent, les variations de la puissance résultante des fluctuations du vent, qui constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne. [05].

De ce fait, les éoliennes sont considérées comme des génératrices de puissance variable connectées au réseau électrique, les générateurs éoliens n'imposent pas la tension et ne règlent pas le rapport puissance- fréquence. Autrement dit, elles ne participent pas aux services systèmes, donc, elles perturbent d'autant plus la stabilité des réseaux que leur taux de pénétration est important. Avec l'utilisation de l'électronique de puissance, de nouvelles technologies sont apparues pour optimiser cette génération d'énergie.

Les éoliennes actuellement installées peuvent être classées selon deux catégories : les éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable. La technologie inhérente à la première catégorie d'éolienne est bien maîtrisée. En effet, c'est une technologie qui a fait preuve d'une simplicité d'implantation, une fiabilité, et un faible coût, ce qui permet une installation rapide de centaines de kW de génération éolienne. Cependant, avec la mise en place très progressive de projets d'éoliennes dont la puissance est supérieure au MW, se sont les éoliennes à vitesse variable qui se développeront à l'avenir pour cette gamme de puissance générée. En effet ces dernières présentent plusieurs avantages, notamment une meilleure exploitation de l'énergie du vent, la réduction des oscillations du couple et des efforts mécaniques, ainsi que une grande souplesse quant à la connexion au réseau grâce à l'emploi des convertisseurs de puissance totalement commandables.

I.4. Avantages et désavantages de l'énergie éolienne :

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

I.4.1. Les avantages :[07]

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement:

- L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas directement de CO₂. [07].
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est-à-dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supprime une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles .Ainsi l'exploitation de l'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6.3millions de tonnes de CO₂, 21 milles tonnes de SO₂ et 17.5 milles tonnes de NO_x .ces émissions sont les principaux responsables des pluies acides.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.

- 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. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Ainsi, que le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles.

I.4.2. Les désavantages :[07]

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- L'impact visuel : ça reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.
- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéroturbines.
- La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance n'est pas donc toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau est faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent. Ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suite, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classique : bien qu'en terme de coût, l'éolien puisse sur les meilleurs sites (c'est à dire là où il y a le plus de vent) concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classique sur les sites moins ventés [07].

I.5. Spécificités liées à la technologie des aérogénérateurs :

Un aérogénérateur (couramment appelé « éolienne ») est une machine qui utilise l'énergie éolienne pour produire de l'énergie électrique. La technologie des aérogénérateurs a énormément évolué ces 20 dernières années entraînant une spécialisation de différents types d'éoliennes. Certains concepts de base permettent de classer les diverses sortes d'aérogénérateurs.

I.5.1. Constitution d'un aérogénérateur :

Bien qu'il existe des turbines à axe vertical (Darius, savonius...), les machines à axes horizontal dominent très largement le marché des petites puissances (quelque 10 W jusqu'aux plus élevés, de quelques MW). Les turbines sont toujours bipales ou, le plus souvent, tripales [08], la figure (I.1) montre quelques exemples des machines à axe horizontal :



Tripale	bipales	tripale
Excel : 7m-10 KW	Ge 220 :220KW	E 66 : 65m-1.8Mw

Figure I.1: Quelques exemples des machines à axe horizontal.

Dans les chaînes de conversions électromécaniques conventionnelles, on intercale entre la turbine et la génératrice un multiplicateur mécanique à engrenages, la génératrice est alors très souvent une machine asynchrone à cage voire à rotor bobiné et à double alimentation pour un fonctionnement à vitesse variable économique. La figure (I.2) montre un exemple typique de chaîne de conversion à multiplicateur.

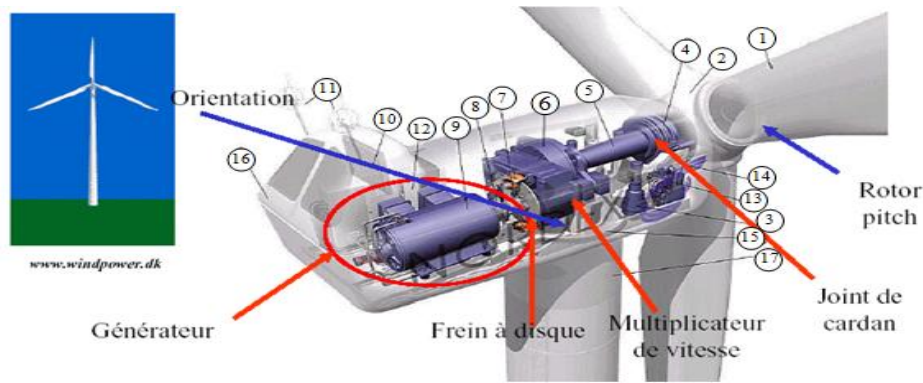


Figure I.2: schéma d'une éolienne- N 60 (1300KW)

1 : pales, 2 : moyeu rotor, 3 : nacelle, 4 : cadran, 5 : transmission, 6 : multiplicateur de vitesse, 7 : frein à disque, 8 : accouplement, 9 : génératrice, 10 : radiateur, 11 : centrale de mesures du vent, 12 : contrôle, 13 : centrale hydraulique, 14 : mécanisme d'orientation face au vent, 15 : pâlies du système d'orientation équipés d'un frein à disque, 16 : capot, 17 : mât.

Mais les multiplicateurs mécaniques ont leurs inconvénients, ils nécessitent une maintenance accrue et nuisent à la fiabilité surtout dans les grandes puissances. C'est la raison pour laquelle la tendance est à l'entraînement direct. La génératrice est alors une machine synchrone (rotor bobiné ou aimants) à très grand nombre de pôles et donc à fort couple massique. [07], La figure (I.2) montre le schéma de la nacelle d'une telle machine, le diamètre de la nacelle est plus élevé mais sa longueur est plus courte. Ces génératrices, dont la vitesse de rotation et le nombre de pôles rendent impossible une connexion directe au 50 Hz, sont nécessairement alimentées par un convertisseur statique qui offre la possibilité d'un fonctionnement à vitesse variable. [08].

Depuis les années 80, les puissances moyennes unitaires des aérogénérateurs sont passées de 50 kW, à 200 kW (1990), 500 kW (1998) à plus de 1 MW en 2002 (1,4 MW en Allemagne), l'accroissement des puissances permet des réductions de coût au kW, les aérogénérateurs les plus puissants en 2003 frôlent les 5 MW avec des diamètres de turbine proches de 120 m.

I.6. État de l'art sur la conversion électromécanique:

L'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique par l'éolienne. Ensuite, la vitesse de rotation de l'éolienne est adaptée à celle de la génératrice classique (typiquement de 750 à 3000 tr/min) avec un multiplicateur de vitesse. La génératrice a pour rôle de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. Le générateur peut ensuite être lié directement ou indirectement au réseau.

I.6.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone:

I.6.1.1 Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil (GACE): [31]

La machine asynchrone à cage d'écureuil en fonctionnement génératrice équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde, [06]. La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), [09], [06].

Les machines asynchrones à cage sont connues par leur construction extrêmement simple, leurs robustesse, leurs sécurité de fonctionnement, l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissant sur des bagues ainsi leur coût très compétitif. Elles ont aussi l'avantage d'être fabriquées en grande quantité et dans une très grande quantité d'échelle des puissances, moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé, [09].

La caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la Figure I.3, [06].

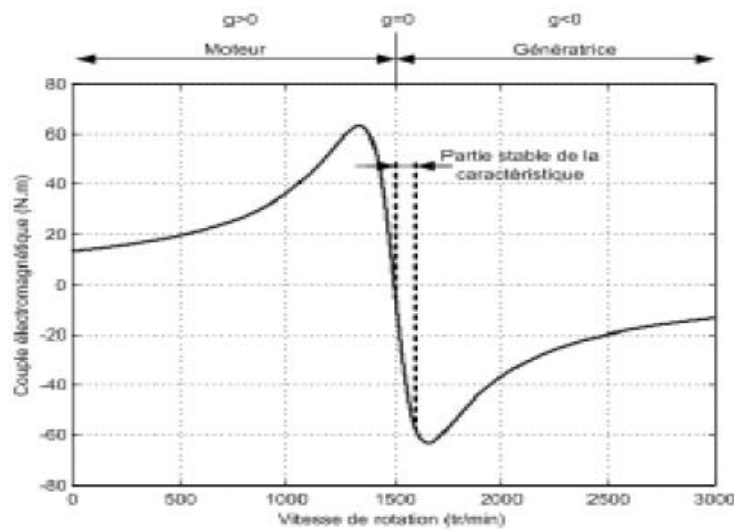


Figure I.3:Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles.

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme (point $g=0$), dans le cas de la caractéristique ci-dessus, la génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500 et 1600 tr/min, [06].

La majorité des applications en éolien (85%) sont à vitesse de rotation constante et à connexion directe au réseau. La Figure I.4 représente la configuration la plus simple utilisant une machine asynchrone à cage, [09]. La machine a un nombre de paires de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant

imposée par le réseau. La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine, [06]. Nous remarquons l'insertion en parallèle des condensateurs avec les enroulements statoriques, qui ont pour objectif de magnétiser la machine durant sa production de l'énergie, [09].

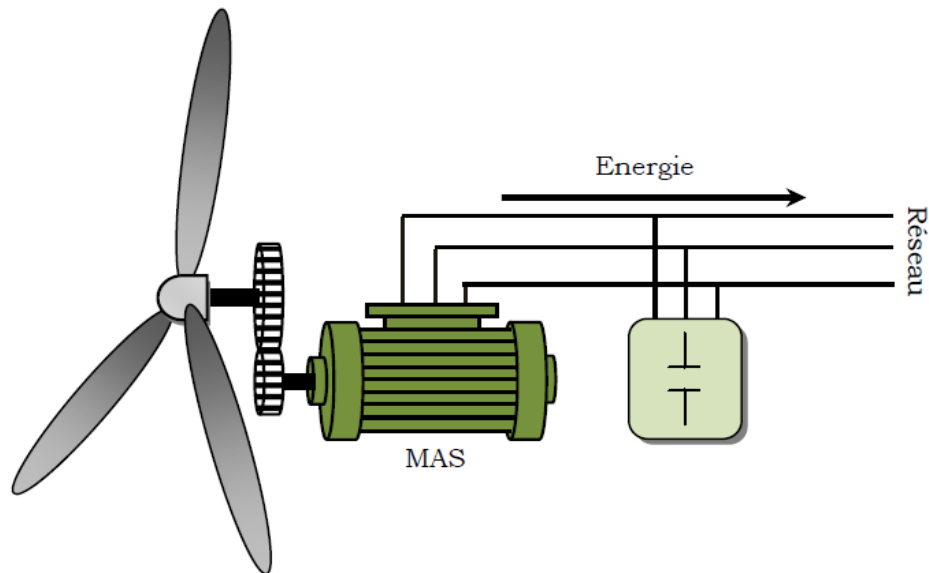


Figure I.4: Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau

Par contre, cette configuration représente quelques inconvénients :

- il n'y a pas d'accès pour récupérer l'énergie induit dans le rotor ;
- elle ne permet pas une vitesse variable ;
- le courant débité au réseau est perturbé à cause la variation brusque du Couple ;
- elle ne fonctionne en régime autonome qu'en présence des condensateurs ;

I.6.1.2. Générateur asynchrone à double stator (MASDS): [31]

Pour exploiter plus d'énergie de vent par le dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator (Figure I.5) :

Cette machine présente deux enroulements au stator, l'un de forte puissance à petit nombre de paires de pôles pour les vitesses de vent les plus élevées, l'autre de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les vitesses les plus faibles. Ce système reste intrinsèquement un dispositif à vitesse fixe mais possède deux points de fonctionnement différents. [06], [09].

Le bruit ainsi engendré par l'éolienne est alors plus faible pour les petites vitesses de vent car l'angle de calage nécessaire à l'orientation des pales atteint des valeurs moins élevées. La présence

d'un deuxième stator rend la conception de la machine particulière et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble. [06], [09].

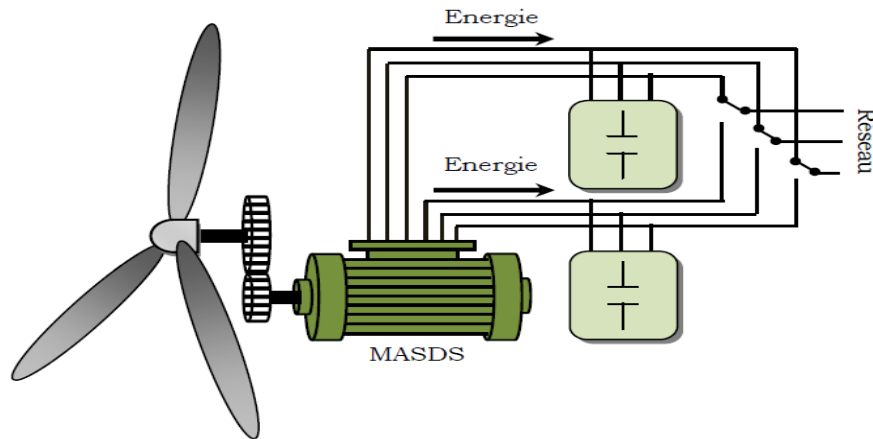


Figure I.5: Générateur asynchrone à double stator

I.6.1.3. Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance: [31]

Cette configuration est présentée dans la figure suivante (Figure I.6). Elle est composée d'une machine asynchrone à cage avec un seul stator, d'un multiplicateur, un redresseur et un onduleur inséré entre le stator de la machine et le réseau. Ceci augmente considérablement le coût et les pertes qui peuvent avoir une valeur de 3% de la puissance nominale de la machine.

Puisque le redresseur est unidirectionnel, pour la magnétisation de la machine, on a besoin des condensateurs en parallèle au stator, [09].

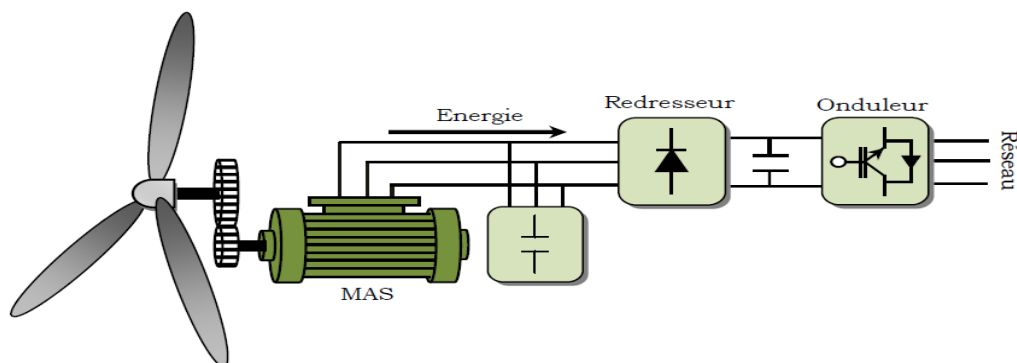


Figure I.6: Connexion indirecte d'une machine asynchrone sur le réseau

Cette configuration permet un fonctionnement de l'éolienne à une vitesse variable du vent, et la commande MLI vectorielle de l'onduleur adapte la fréquence de la puissance fournie de la machine à la fréquence du réseau en présence de n'importe quelle vitesse du rotor.

Avec cette configuration, la puissance nominale de la génératrice détermine la puissance maximale de l'éolienne.

Toutefois, le redresseur peut être remplacé par un onduleur, ce qui permet le transfert de la puissance réactive dans les deux sens (Figure I.7) et ainsi fournir la puissance réactive à la machine asynchrone et éviter les condensateurs du montage précédent.

Une autre structure consiste à utiliser un variateur de fréquence, mais cette solution est globalement coûteuse (variateur de fréquence dimensionné pour la puissance transitoire, et multiplicateur de vitesse) et donc très rarement exploitée

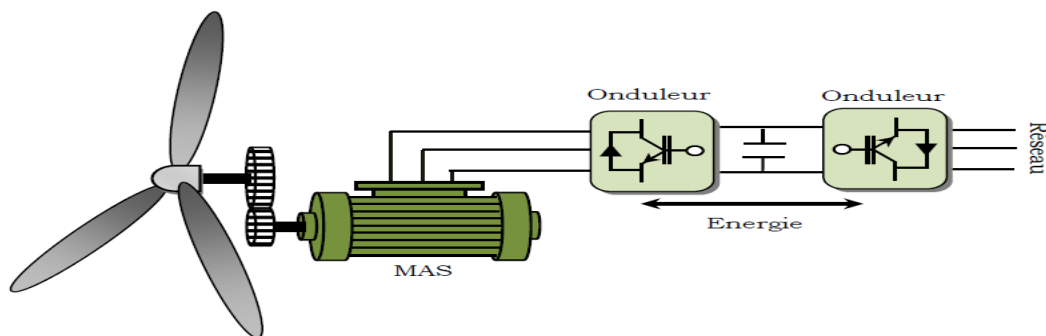


Figure I.7: Générateur asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de deux onduleurs

Néanmoins, ces deux solutions présentent plusieurs inconvénients : l'augmentation considérable du coût et la complexité de mise en œuvre [06].

Ces deux configurations ne sont pas appliquées en pratique, pour les inconvénients cités ci-dessus. En plus, la puissance réelle extraite est beaucoup plus faible à cause de l'association du multiplicateur, la génératrice et les convertisseurs.

I.6.1.4. Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné":

La machine à double alimentation à rotor bobiné ou standard, est une machine asynchrone occupée par un système balais-bague qui alimente l'enroulement

du rotor. La figure (I.8) illustre le schéma de principe de ce type de machines, tel que le stator est alimenté directement par le réseau, alors que le rotor est alimenté au moyen d'un convertisseur alternatif-alternatif de telle sorte que le glissement de cette machine devient une grandeur contrôlable. Il faut noter que le convertisseur bidirectionnel indiqué dans la figure peut être un convertisseur indirect (AC/DC/AC) composé d'un redresseur et d'un onduleur ou bien un convertisseur direct (AC/AC): cyclo-convertisseur ou convertisseur matriciel [30].

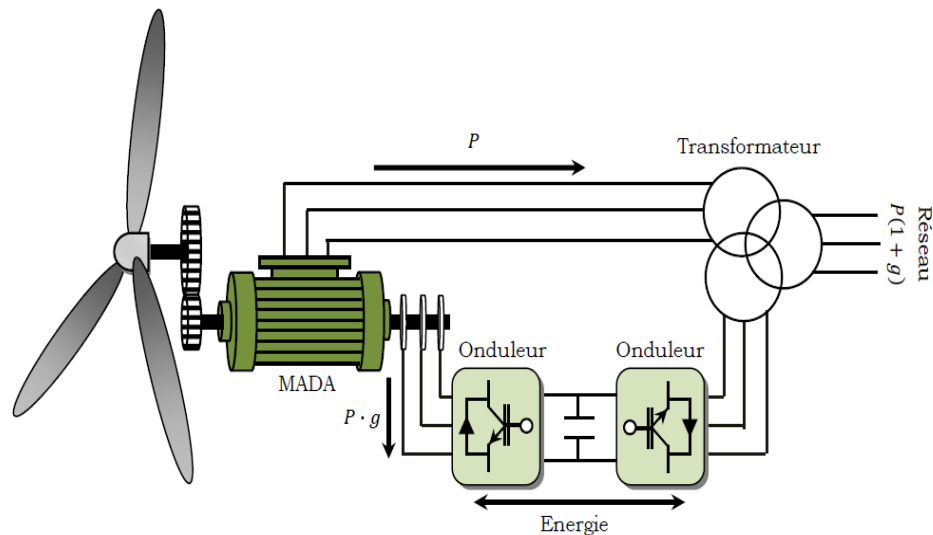


Figure I.8: schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor

Le résumé des points forts de la MADA sont, [12]. :

- Sa capacité de commander la puissance réactive et, de cette façon, de découpler la commande des puissances active et réactive.
- Il peut se magnétiser à partir du rotor sans prélever au réseau la puissance réactive nécessaire.
- Il est capable d'échanger de la puissance réactive avec le réseau pour faire la commande de tension.

- La taille du convertisseur n'est pas simplement en rapport avec la puissance totale du générateur, mais aussi avec la gamme de vitesse choisie. En fait, le coût du convertisseur augmente avec la gamme de vitesse autour de la vitesse de synchronisme. Son inconvénient réside dans la présence obligatoire de bagues et balais.

I.6.1.5. Machine Asynchrone à double alimentation en cascade (MADAC): [30]

Les travaux de recherche [11], [15] ont été effectués sur le couplage de deux générateurs. Cette machine fera l'objet d'une étude détaillée dans les chapitres suivants.

Cette configuration de machine essaie d'allier les avantages de la MAS et de la MADA. Elle peut être considérée comme la première réalisation pratique d'une machine tournante sans balais doublement alimentée [16]. Un des bobinages du stator, appelé Bobinage de Puissance (BP), est directement relié au réseau, tandis que l'autre, appelé Bobinage de Commande (BC), est alimenté par un convertisseur bidirectionnel (figure I.9). La puissance à travers l'ensemble convertisseur/BC est proportionnelle au glissement du rotor (BP). La maîtrise de l'état électromagnétique de la machine est assurée par le bobinage de commande, ce qui permet de générer dans le bobinage de puissance une tension à la fréquence et amplitude nominales du réseau même si le rotor s'éloigne de la vitesse synchronique, [11].

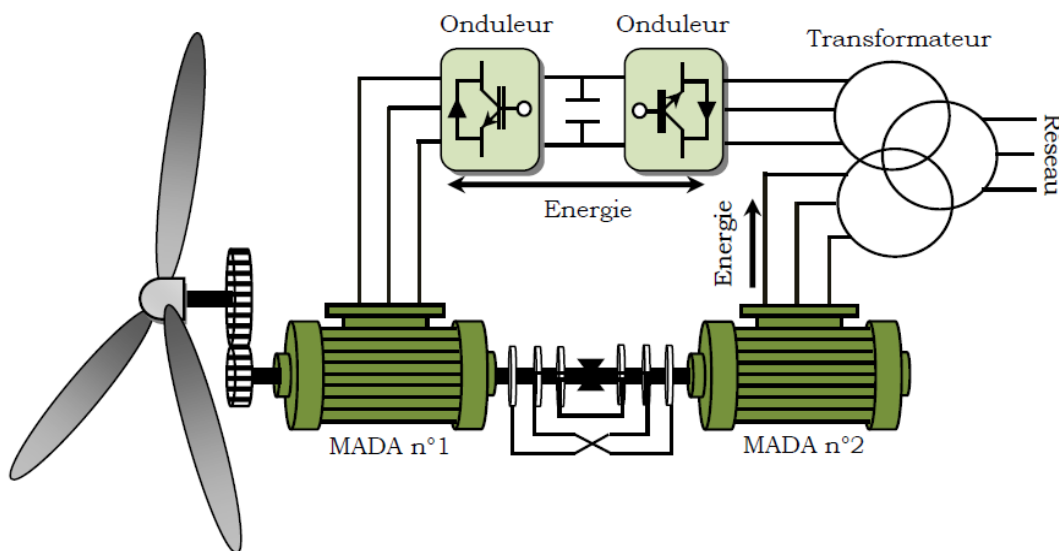


Figure I.9: Principe de fonctionnement de deux machines asynchrones en cascade.

En partant du concept initial, on peut essayer d'optimiser des aspects telles que l'encombrement, la robustesse, etc. Les deux stators peuvent être inclus dans la même

carcasse et le rotor peut adopter une structure à cage (Figure I.10) [16], [11]. Les barres rotoriques sont croisées entre les deux machines, [17].

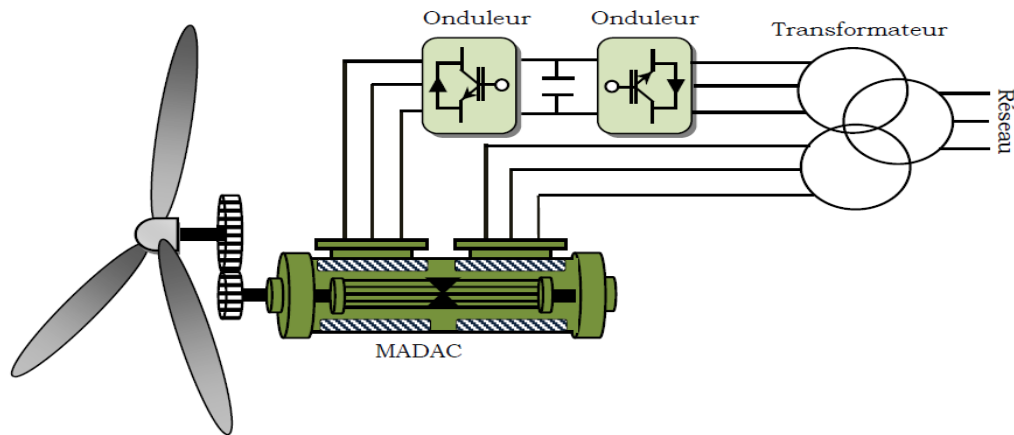


Figure I.10: machine en cascade avec une carcasse unique et un rotor à cage d'écureuil croisé.

I.6.1.6. Machine Asynchrone à double alimentation sans balais:

C'est une machine asynchrone avec deux enroulements ayant des nombres de paires de pôles différents logés dans la même armature du stator. L'un des deux enroulements est alimenté directement par le réseau et l'autre est alimenté au moyen d'un convertisseur AC/AC (fig. I.11). Le rotor de cette machine possède un nombre de paires de pôles égal à la somme des deux nombres de paires de pôles des deux enroulements statoriques.

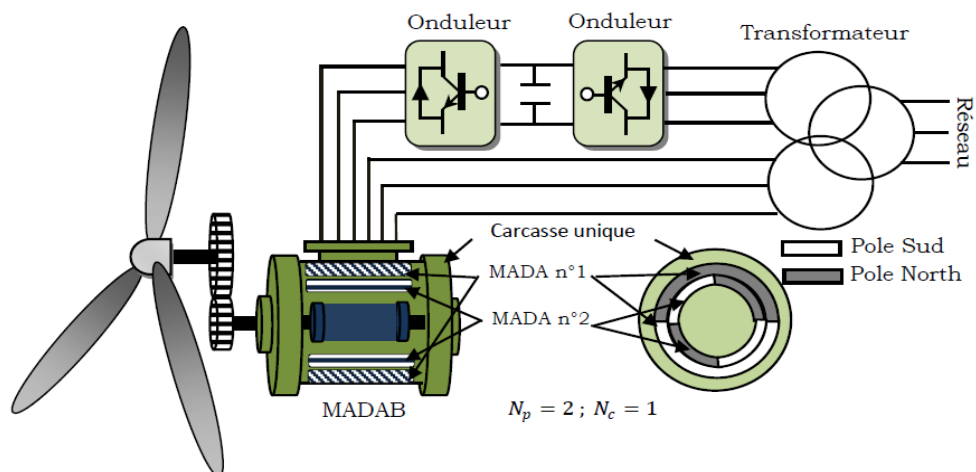


Figure I.11: machine asynchrone à double alimentation sans balais avec rotor à cage ou réluctant.[31]

Parmi les types les plus connus de machines à double alimentation sans balais, on trouve la machine à double alimentation à réluctance variable qui consiste en un stator identique à celui de la machine à double alimentation sans balais et un rotor basé sur le principe de la réluctance [13]

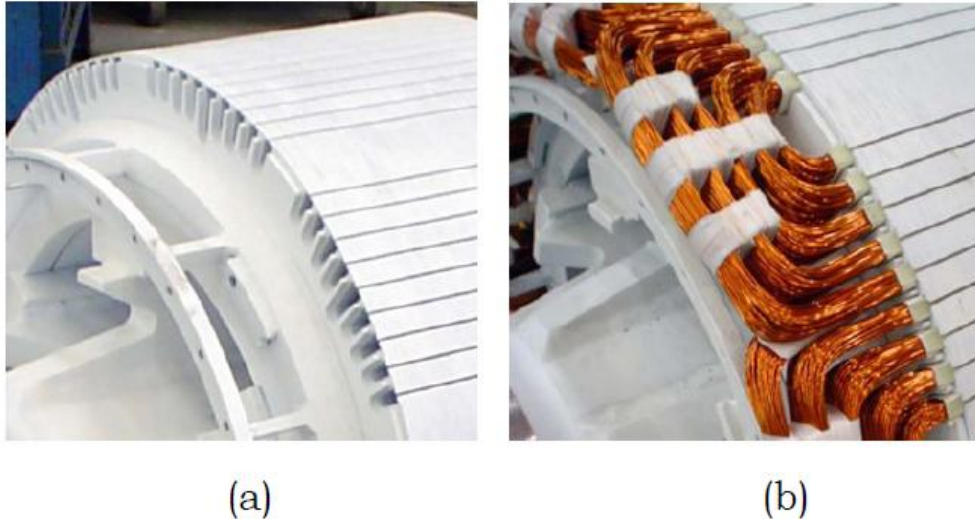


Figure I.12: Rotor de la MADAB: (a) Rotor sans conducteur; (b) Rotor Bobiné [18].

Les avantages potentiels de cette structure sont, [11] :

- ✓ Dimensionnement du convertisseur à une puissance plus petite que la puissance nominale de génération (avantage équivalent à celui de la MADA).
- ✓ Machine robuste avec une capacité de surcharge grande et une facilité d'installation dans des environnements hostiles (avantage équivalent à celui de la MAS).
- ✓ Coûts d'installation et de maintenance réduits par rapport à la topologie MADA.
- ✓ Élimination des oscillations produites par le rotor bobiné.

I.6.1.6.1 Comparaison des topologies et choix de la MADAB:

Le tableau suivant synthétise les caractéristiques principales de chaque structure de conversion :

	1ère génération Machine Asynchrone à Cage MAC	2ème génération Machine Asynchrone à Double Alimentation MADA	3ème génération Machine Asynchrone à Double Alimentation sans Balais MADAB
Limitation de la plage de vitesse	Non	oui	oui
Puissance du convertisseur	100% de la Pe	25% de la Pe	25% de la Pe
Distorsion harmonique	Haute	Basse	Basse
Cout de maintenance	Bas	Moyen/Haut	Bas
Cout de l'ensemble machine-convertisseur	Moyen/Haut	Moyen	Moyen/Bas
Robustesse, fiabilité	Haute	Moyenne	Haute

Tab. I. 1 : Comparaison de différentes machines utilisées dans le SCE, [11].

La MADAB fut proposé par René Spée (et autres) de l'Oregon State University (USA). A partir des premiers résultats de leur recherche ils ont réalisé un brevet sur la conception de la machine et du modèle en régime permanent. Pendant la décade des années 90 ils ont publié des études diverses comprenant la conception, la modélisation et la commande de la machine, [11].

I.9. Conclusion:

Dans le contexte des énergies renouvelables, la production de l'énergie éolienne est de plus en plus importante et de nouvelles constructions apparaissent. Cette évolution dynamique est surtout visible dans le domaine du grand éolien grâce au développement des nouvelles technologies dans le champ des matériaux de construction et de l'électronique de puissance.

Dans la première partie de ce chapitre, nous nous sommes concentrés sur l'énergie éolienne. Dans la deuxième partie, nous avons fait une classification des machines selon la présence ou non des contacts glissants. Nous avons montré l'intérêt que présentent les machines ne disposant pas de contacts glissants (absence des contacts bague-balais). Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation de la chaîne de conversion.

Chapitre II: Modélisation du système éolien

II.1. Introduction

Dans cette partie, nous allons établir le modèle de la turbine, puis on modélise la machine asynchrone à double alimentation (MADA) et puis on fera une association de deux MADA au niveau de rotor (électriquement et mécaniquement). Nous présenterons dans un premier temps le modèle de la machine asynchrone dans le repère naturel, puis dans le repère de Park. Ensuite nous étudierons la connexion de la cascade de deux MADA. Cette dernière sera modélisée dans le repère de Park. Puis on présentera les simulations de celle-ci, en fonctionnement générateur avec le deuxième stator en court circuit. Finalement on modélisera un onduleur de tension.

II.2. Modèle du vent

La ressource en vent, du point de vue de sa distribution statistique, est primordiale dans un projet éolien et donc déterminante pour le calcul de la production de l'électricité et de la rentabilité. Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, évolue au cube de la vitesse du vent. La vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. Néanmoins, la direction du vecteur de vitesse du vent considéré dans ce modèle se limite à une dimension, [19].

La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps

$$V_v = f(t)$$

La vitesse du vent sera modélisée, dans cette partie, sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques [19] :

$$V(t) = A + \sum_{n=1}^i (a_n \cdot \sin(b_n \cdot \omega_n \cdot t)) \quad (\text{II. 1})$$

$$V_v(t) = 6.5 + 0.02\sin(0.1047t) + 0.2\sin(0.2665t) + 0.1\sin(1.2930t) + 0.02\sin(3.6645t) \quad (\text{II. 2})$$

Il est à signaler que ce profil de vent particulier correspond à des mesures effectuées par EDF sur le site du canal des dunes [19].

II.3. Modélisation d'une turbine éolienne à axe horizontal:

La modélisation de la turbine consiste à exprimer la puissance extractible en fonction de la vitesse incidente du vent et des conditions de fonctionnement, sa vitesse de rotation en particulier. Cela permettra de connaître le couple éolien appliquée sur l'arbre lent de l'éolienne.

On obtient alors un modèle global composé de trois sous-systèmes [20]:

- La turbine.
- Le multiplicateur.
- L'arbre.

II.3.1. Hypothèse simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine:

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée comprend trois pales orientables et de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement, tournant à une vitesse Ω_{turbine} , relié à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique

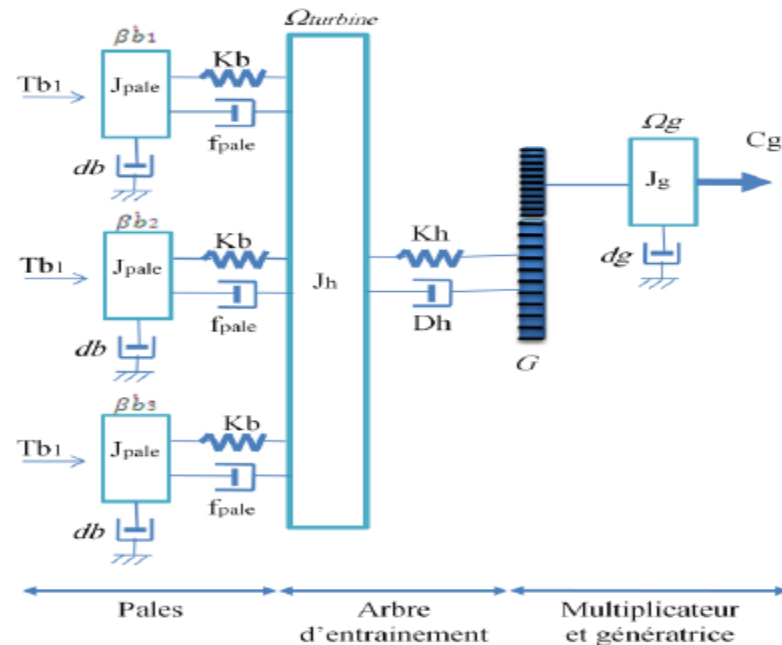


Figure II.1 Système mécanique de l'éolienne

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

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

Ces pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support f_{pale} . Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées $\beta b_1, \beta b_2, \beta b_3$. Chaque pale reçoit une force Tb_1, Tb_2, Tb_3 qui dépend de la vitesse de vent qui lui est appliquée.

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

- son inertie J_h
- son élasticité K_h
- son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur Dh

Le rotor de la génératrice possède :

- une inertie J_g
- un coefficient de frottement dg

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

Si l'on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales, et donc une égalité de toutes les forces de poussée ($T_{b1} = T_{b2} = T_{b3}$) alors on peut considérer l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De part la conception aérodynamique des pales, leur coefficient de frottement par rapport à l'air (δ_b) est très faible et peut être ignoré. De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement de la cote de la génératrice.

On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses (Figure II.2) dont la validité (par rapport au modèle complet) a déjà été vérifiée. [5]

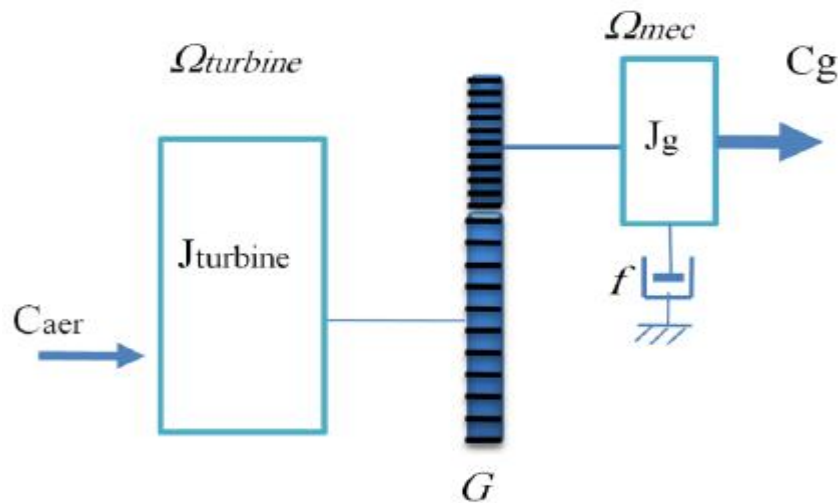


Figure II.2 Modèle mécanique simplifié de la turbine

II.3.2 Modélisation 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 .

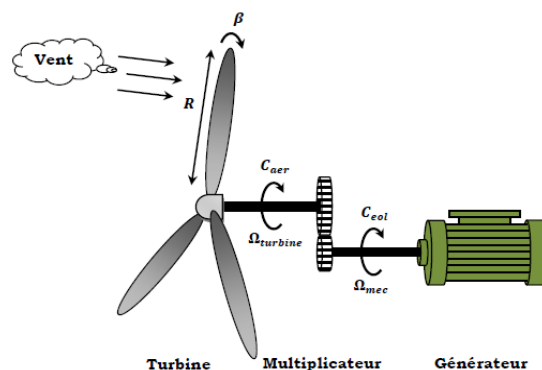


Figure II.3: Schéma de la turbine éolienne

L'énergie cinétique d'une masse d'air m (V) qui se déplace avec la vitesse v , est:

$$E_v = \frac{1}{2} m v^2 \quad (\text{II. 3})$$

On connaît la puissance disponible par dérivation de l'énergie cinétique [21]

$$P_v = \frac{dE}{dt} \quad (\text{II. 4})$$

Si cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'un dispositif ayant la surface S ($S = \pi \cdot R^2$), situé perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance du vent ou puissance éolienne instantanée serait alors :

$$P_v = \frac{dE}{dt} \left[\frac{1}{2} \rho V v \right] \quad (\text{II. 5})$$

$$P_v = \frac{dE}{dt} \left[\frac{1}{2} \rho (S \cdot x) v^2 \right] = \frac{1}{2} \rho \left(S \cdot \frac{dx}{dt} \right) v^2 \quad (\text{II. 6})$$

$\frac{dx}{dt}$: la vitesse de vent v

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (\text{II. 7})$$

Où

En réalité, le dispositif de conversion (la turbine éolienne) extrait une puissance aérodynamique P_{aer} inférieure à la puissance disponible. P_v .

$$P_{aer} = C_p P_v = C_p(\beta, \lambda) \cdot \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (\text{II. 8})$$

Le coefficient de puissance, représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne ($\frac{P_{aer}}{P_v}$). Il dépend de la caractéristique de la turbine. [5]

Ce coefficient varie avec l'angle d'orientation des pales (β) et le ratio de vitesse (λ)

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

$$\lambda = \frac{R \Omega_{turbine}}{v} \quad (\text{II. 9})$$

Où $\Omega_{turbine}$ est la vitesse de la turbine.

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

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \frac{1}{2} \rho S v^3 \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (\text{II. 10})$$

❖ Coefficient de puissance C_p :

Généralement le coefficient C_p présente par des graphiques. Le coefficient C_p est différent d'une turbine à l'autre, qui est généralement fourni par le fabricant et peuvent être utilisées, pour définir une approximation mathématique. En effet, celle-ci a été développée dans la littérature pour calculer le coefficient C_p . La modélisation peut se faire avec une approximation polynomiale d'ordre N

$$C_p(\lambda) = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i \lambda_i \quad (\text{II.11})$$

Dans ce sens, nous avons donc choisi de modéliser une éolienne de 4 KW, d'où, le coefficient C_p est donné par la formule suivante [22]:

$$C_p = 7.95$$

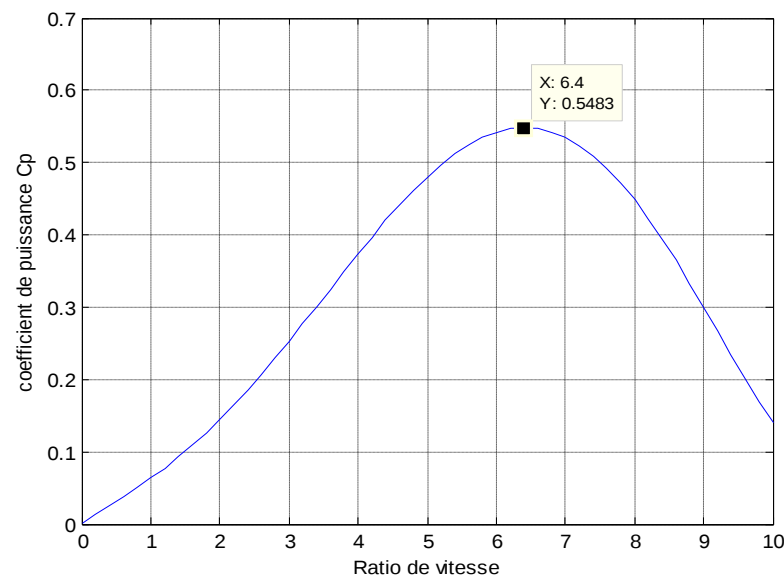


Figure II.4: Fonctionnement optimal de la turbine, [5].

On peut remarquer sur la (Figure. II.4) que le coefficient de puissance passe par un maximum pour une valeur particulière du rapport de vitesse que l'on appelle λ_{opt} . Pour laquelle on a coefficient de puissance C_p maximale, et par voie de conséquence une puissance captée maximale. Il est alors possible d'élaborer des lois de commande qui permettent de capter la puissance maximale quelque soit la vitesse du vent jusqu'à la puissance nominale de la génératrice où la puissance extraite est limitée à cette valeur. [23]

La valeur maximale du coefficient C_p est 0,5483 correspond à $\lambda = 6,4$.

II.3.3. Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice (Figure II.1).

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aér}}{G} \quad (II. 13)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{méc}}{G} \quad (II. 14)$$

II.3.4. Equation dynamique de l'arbre [5]

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

$$J = \frac{J_T}{G^2} + J_g \quad (II. 15)$$

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

$$J \cdot \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_{méc} \quad (II. 16)$$

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

Le couple résistant au frottement est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f :

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{méc} \quad (II. 17)$$

En prenant en compte l'inertie et les frottements de paliers la voilure peut être présentée comme dans la figure. II.5

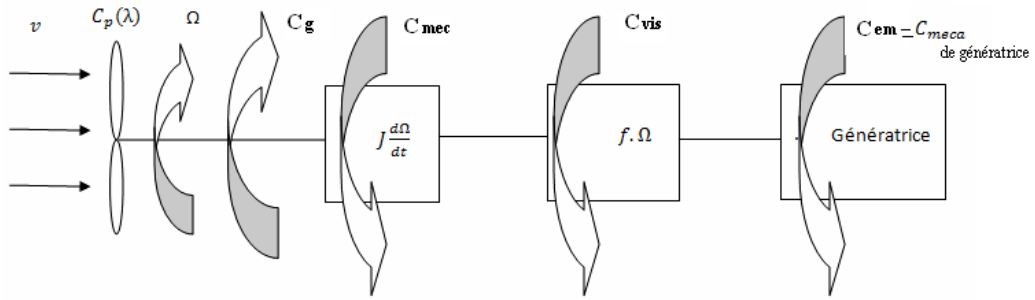


Figure II.5 Modèle d'une turbine éolienne

L'équivalent électrique d'un tel système inertiel est présenté dans la figure. II.6.

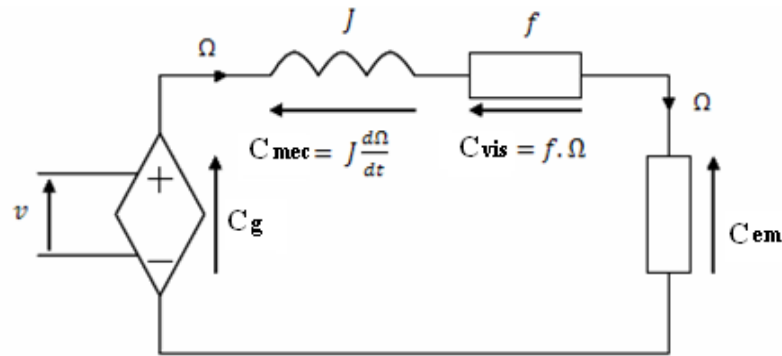


Figure II.6 Schéma électrique équivalent de la turbine d'une éolienne

L'équation mécanique qui gère un tel ensemble est donnée par :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (II. 18)$$

$$C_g - C_{em} = J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f \cdot \Omega_{mec} \quad (II. 19)$$

D'où en transfert de LAPLACE on peut obtenir la vitesse :

$$\Omega_{mec} = \frac{1}{Js + f} (C_g - C_{em}) \quad (II. 20)$$

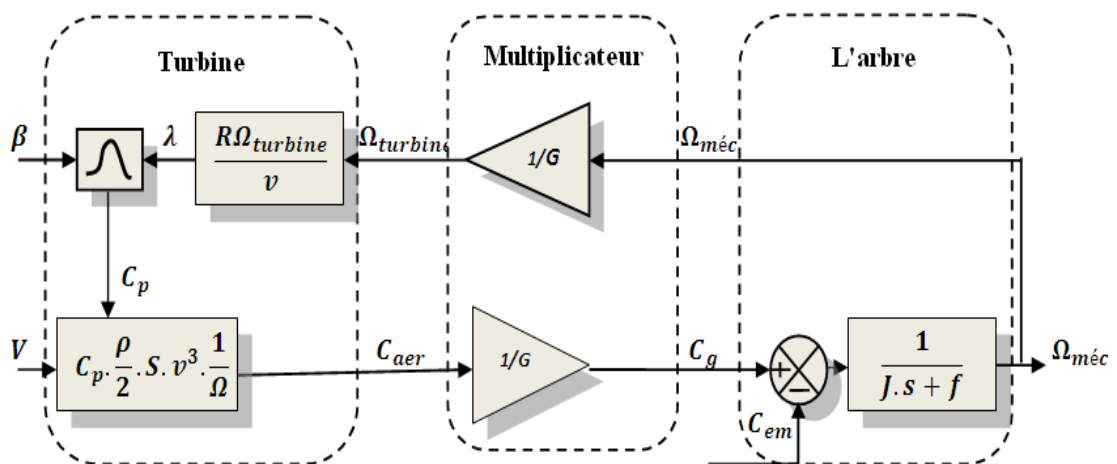


Figure II.7: Schéma bloc du modèle de la turbine, [5].

II.4. Stratégie de commande de la turbine:

Comme il est illustré sur la figure. II.8, on distingue quatre (IV) zones principales de fonctionnement.

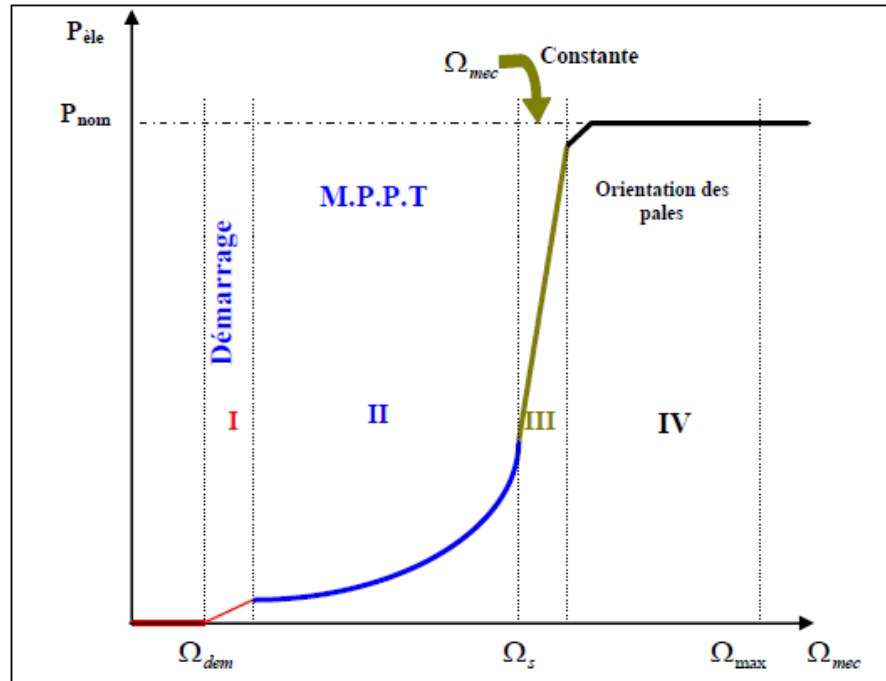


Figure II.8 Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne

La phase (zones I) de démarrage de la machine. La production électrique commence lorsque la vitesse mécanique atteint environ 70% de la vitesse de synchronisme de la génératrice. La puissance électrique reste assez faible.

- La phase d'extraction de la puissance maximale (zones II) ou phase MPPT (Maximum Power Point Tracking). Dans cette zone, la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale. La puissance électrique augmente rapidement. Dans cette zone, l'angle de calage des pales β reste constant à sa valeur minimale afin d'obtenir un C_p maximal. La puissance maximale est ainsi obtenue pour chaque valeur de la vitesse mécanique et pour des vitesses de vent moyennes (7-13 m/s environ).
- La phase à vitesse mécanique quasi constante (zones III). L'angle β de calage des pales varie afin d'obtenir une puissance électrique maximale pour différentes valeurs de vent. C'est le pitch control. La puissance électrique augmente très rapidement jusqu'à sa valeur nominale.[4]

- La phase à puissance constante (zones IV). Lorsque la vitesse du vent augmente encore, l'angle de calage des pales devient important afin de conserver la puissance électrique constante et nominale.

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

II.5. Maximisation de la puissance extraite:

En pratique, la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique, de manière à maximiser la puissance électrique générée, c'est le principe de MPPT. On distingue deux structures de commande [4]:

- Le contrôle par asservissement de la vitesse mécanique;
- Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.

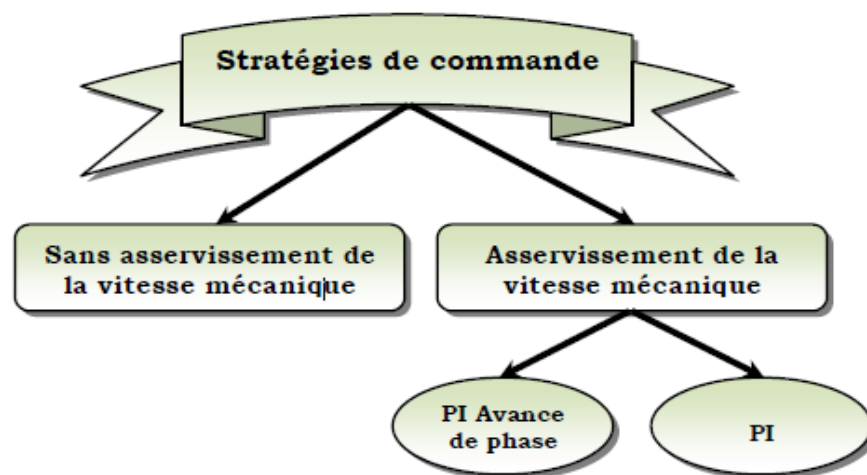


Figure II.9 Stratégies de commande de la turbine

Il est difficile de mesurer précisément la vitesse du vent qui est de nature une grandeur très fluctuante. Une mesure erronée de la vitesse conduit donc à une dégradation de la puissance captée selon la technique MPPT. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse [4], [5].

II.5.1 Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse

En pratique, une mesure précise de la vitesse du vent est difficile à réaliser. Ceci pour deux raisons, [5] :

- L'anémomètre est situé derrière le rotor de la turbine, ce qui rend la lecture de la vitesse du vent erronée, [5].

- Ensuite, le diamètre de la surface balayée par les pales étant important (typiquement 70 m pour une éolienne de 1.5 MW), une variation sensible du vent apparaît selon la hauteur où se trouve l'anémomètre. L'utilisation d'un seul anémomètre conduit donc à n'utiliser qu'une mesure locale de la vitesse du vent qui n'est donc pas suffisamment représentative de sa valeur moyenne apparaissant sur l'ensemble des pales, [5].

Une mesure erronée de la vitesse conduit donc forcément à une dégradation de la puissance captée selon la technique d'extraction précédente. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse [5].

Cette seconde structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine, [5]. :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_{méc} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (II. 21)$$

Ceci revient à considérer le couple mécanique $C_{méc}$ développé comme étant nul. Donc, en négligeant l'effet du couple des frottements visqueux ($C_{vis} \approx 0$), on obtient, [5].

$$C_g = C_{em}$$

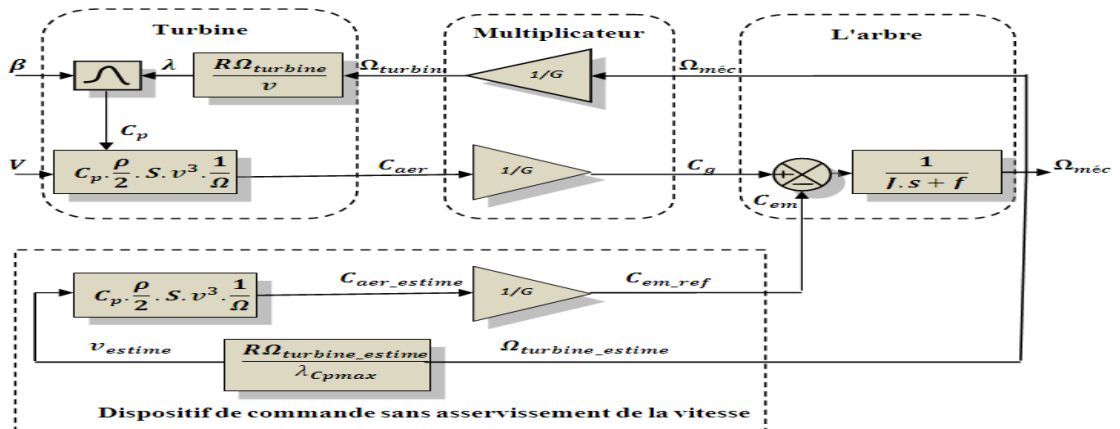


Figure II.10 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse, [5].

Le couple électromagnétique de réglage est déterminé à partir d'une estimation du couple éolien, [5]. :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{aer-estim}}{G} \quad (II. 22)$$

Le couple éolien peut être déterminé à partir de la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent et de la mesure de la vitesse mécanique en utilisant l'équation (II. 10), [5]. :

$$C_{aer-estim} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine-estim}} \cdot v^3 \quad (II. 23)$$

Une estimation de la vitesse de la turbine $\Omega_{\text{turbine-estimé}}$ est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique, [5]. :

$$\Omega_{\text{turbine-estimé}} = \frac{\Omega_{\text{méc}}}{G} \quad (\text{II. 24})$$

La mesure de la vitesse du vent apparaissant au niveau de la turbine étant délicate, une estimation de sa valeur peut être obtenue à partir de l'équation (II. 25), [5].

$$V_{\text{estimé}} = \frac{R \Omega_{\text{turbine-estimé}}}{\lambda} \quad (\text{II. 25})$$

En regroupant ces quatre équations (II. 22), (II. 23), (II. 24) et (II. 25) on obtient une relation globale de contrôle, [5]. :

$$C_{\text{em-ref}} = \frac{C_p}{\lambda^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{\Omega_{\text{méc}}^2}{G^3} \quad (\text{II. 26})$$

Pour extraire le maximum de la puissance générée, il faut fixer le ratio de vitesse à la valeur $= \lambda_{\text{cpmax}}$ qui correspond au maximum du coefficient de puissance $= C_{\text{pmax}}$ (fig. III.13). Le couple électromagnétique de référence doit alors être réglé à la valeur suivante, [5]. :

$$C_{\text{em-ref}} = \frac{C_p}{\lambda_{\text{cpmax}}^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{\Omega_{\text{méc}}^2}{G^3} \quad (\text{II. 27})$$

L'expression du couple de référence devient alors proportionnelle au carré de la vitesse de la génératrice, [5]. :

$$C_{\text{em-ref}} = A \cdot \Omega_{\text{méc}}^2 \quad (\text{II. 28})$$

Avec

$$A = \frac{C_p}{\lambda_{\text{cpmax}}^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{1}{G^3} \quad (\text{II. 29})$$

La représentation sous forme de schéma-blocs est montrée à la figure II.10, [5].

II.6. Résultats obtenus

Nous présentons la simulation du fonctionnement de la partie mécanique de l'éolienne. Les simulations sont faites dans l'environnement MATLAB/SIMULINK. Ces résultats obtenus basées sur la structure de commande sans asservissement de la vitesse.

Nous n'allons pas raccorder l'hélice et le multiplicateur à une génératrice mais tout simplement observer la vitesse, le couple et la puissance produits à la sortie du multiplicateur en fonction de l'évolution du vent mais aussi l'angle de calage sera constant le long de simulation à la valeur 2° .

On remarque que le couple et la puissance de référence suivent les évolutions du vent. Ils sont négatifs pour respecter la convention réceptrice de l'ensemble.[31]

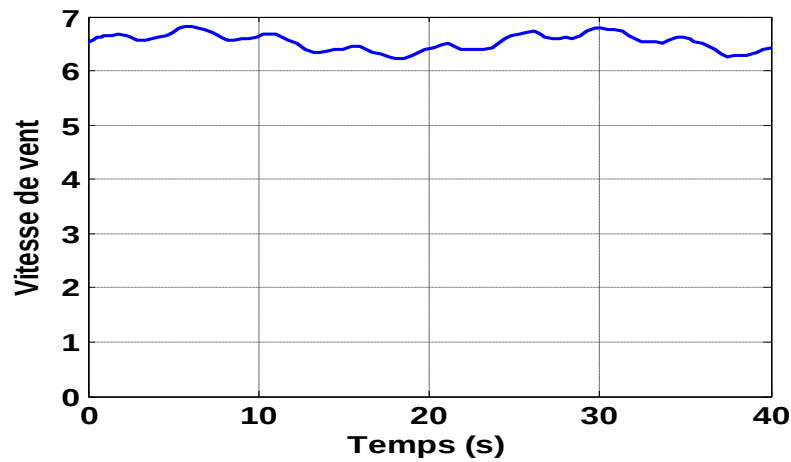


Figure II.11 Vitesse de vent

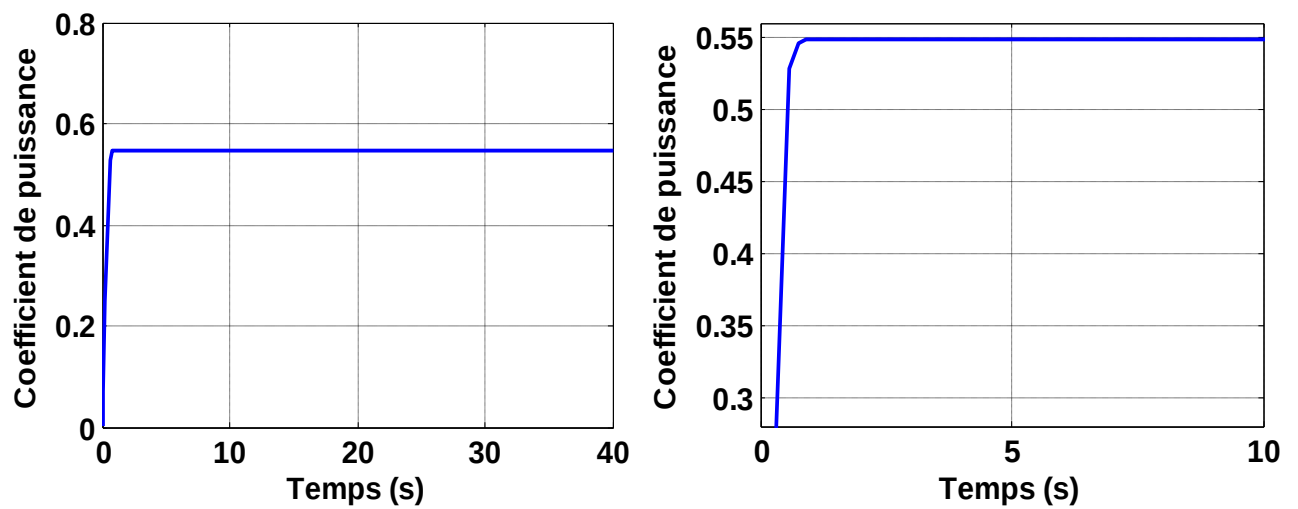


Figure II.12 Coefficient de puissance avec un zoom

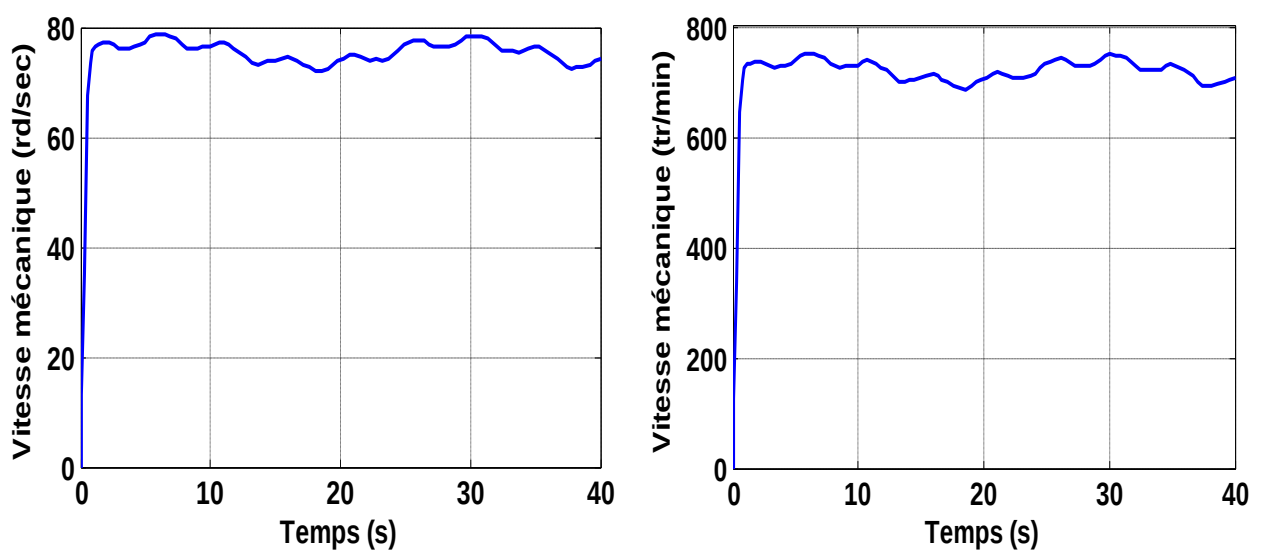


Figure II.13 Vitesse mécanique développée par la turbine

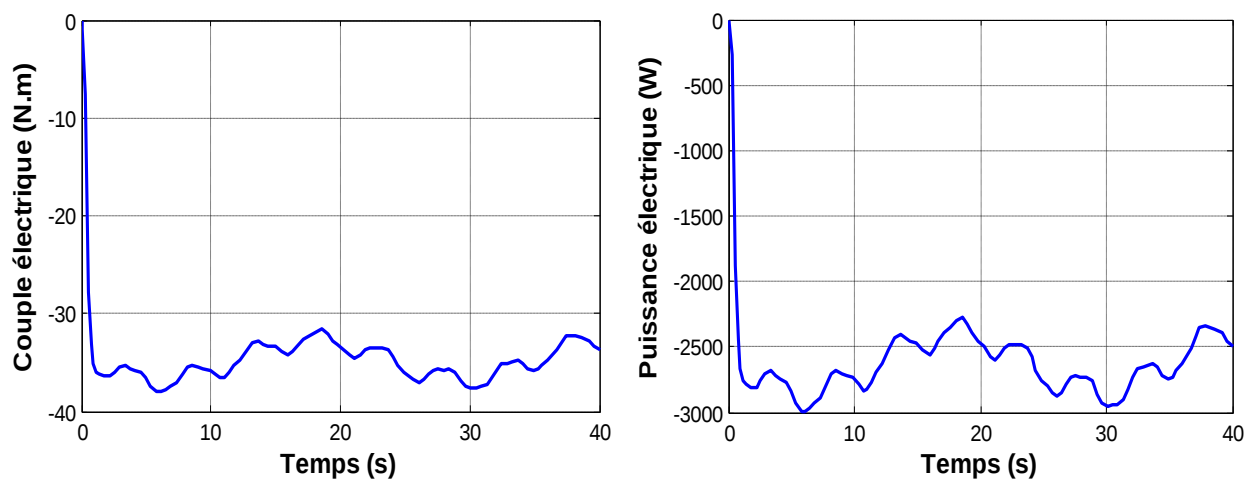


Figure II.14 Couple et Puissance électrique produite

II.7. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation [31]

Pour commander la machine asynchrone à double alimentation, comme bien d'autres procédés, il nous faut disposer de son modèle avec une connaissance plus ou moins précise des éléments le constituant. Mathématiquement [24], à partir de ce modèle, on peut faire la conception et la simulation des algorithmes de commande ; ainsi que l'étude et l'analyse des régimes transitoires. De ce fait, il est réaliste de poser des conditions et des hypothèses pour écrire le modèle comportemental. Une première difficulté réside dans la commande de cette machine à cause du couplage du flux magnétique et du couple électromagnétique ; la deuxième est liée à l'identification des paramètres [24].

Dans la littérature, on discerne principalement trois approches concernant la modélisation des machines électriques [24] :

- La modélisation de Park ;
- La modélisation par réseaux de perméances ;
- La modélisation par éléments finis.

Dans notre travail on s'intéresse à la modélisation de Park à cause de sa simplicité. Cette dernière est établie à partir des équations électriques de la machine [24].

Avant d'établir le modèle de la machine asynchrone à double alimentation en vue de sa commande, nous rappelons brièvement le contexte habituel d'hypothèses simplificatrices, désormais classiques, qui sont [24]:

- L'entrefer est constant, les effets des encoches et les pertes ferromagnétiques sont négligeables ;

- Le circuit magnétique est non saturé, c'est à dire à perméabilité constante ;
 - Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligeable ;
 - La FMM créée par chacune des phases des deux armatures est supposée à répartition sinusoïdale ;
 - La symétrie de construction est parfaite ;
- Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer [24]:
- L'additivité des flux ;
 - La constance des inductances propres ;
 - La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles.

II.7.1. Modèle généralisé de la machine asynchrone dans le repère naturel [31]

La machine asynchrone à double alimentation est formée d'un stator fixe, et d'un rotor cylindrique mobile. Le stator a trois enroulements couplés en étoile ou en triangle et qui sont alimentés par un système triphasé de tensions, il en résulte alors la création d'un champ magnétique glissant dans l'entrefer de la machine, (THEOREME DE FERRARIS). La vitesse de glissement de ce champ par rapport au stator est

$\Omega_s = \omega_s/p$, où ω_s désigne la pulsation de réseau d'alimentation statorique triphasée et p le nombre de paires de pôles. Le rotor de la machine supporte un bobinage triphasé avec un même nombre de paires de pôles que celui du stator couplé en étoile.

Ce type de rotor est dit bobiné mais on peut envisager un rotor plus sommaire constitué de barres conductrices court-circuitées par un anneau conducteur à chaque extrémité (rotor cage). Le rotor tourne par rapport au stator à la vitesse $\Omega_{mec} = \frac{d\theta}{dt}$, étant l'angle entre le repère statorique et le repère rotorique [5].

La figure III.18 rappelle la position des axes des phases statoriques et rotoriques dans l'espace électrique (l'angle électrique est égal à l'angle réel multiplié par le nombre p de paires de pôles par phase) [5].

Le sens des enroulements de phase est conventionnellement repéré par un point (.) ; un courant positif i entrant par ce point crée un flux ψ compté positivement selon l'orientation de l'axe de l'enroulement [5].

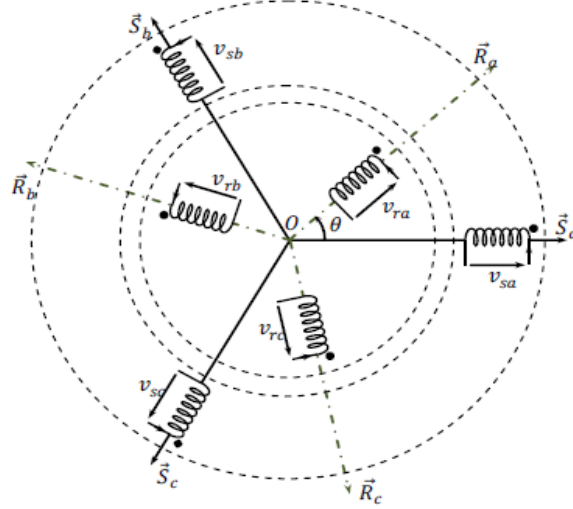


Figure II.15 Représentation de la machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique

II.7.2. Mise en équation de la partie électrique dans le plan a,b,c [31]

A partir de la loi de Faraday qui donne la relation entre la tension V aux bornes d'une bobine de résistance R , d'inductance L , le courant i , et les variations de flux

Pour le stator :

$$\left(\frac{d}{dt}\right) \begin{pmatrix} \psi_{sa} \\ \psi_{sb} \\ \psi_{sc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{pmatrix} \quad (\text{II. 30})$$

Pour le rotor:

$$\left(\frac{d}{dt}\right) \begin{pmatrix} \psi_{ra} \\ \psi_{rb} \\ \psi_{rc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{pmatrix} \quad (\text{II. 31})$$

v_{sa}, v_{sb}, v_{sc} , sont les tensions simples triphasées au stator de la machine

- i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} , sont les courants au stator de la machine ;
- $\psi_{sa}, \psi_{sb}, \psi_{sc}$, sont les flux propres circulants au stator de la machine ;
- v_{ra}, v_{rb}, v_{rc} , sont les tensions simples triphasées au rotor de la machine ;
- i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} , sont les courants au rotor de la machine ;
- $\psi_{ra}, \psi_{rb}, \psi_{rc}$, sont les flux propres circulants au rotor de la machine ;
- R_s est la résistance des enroulements statoriques ;
- R_r est la résistance des enroulements rotoriques

On définit les vecteurs flux suivant :

$$\psi_s = [\psi_{sabc}] = \begin{pmatrix} \psi_{sa} \\ \psi_{sb} \\ \psi_{sc} \end{pmatrix} \quad \psi_r = [\psi_{rabc}] = \begin{pmatrix} \psi_{ra} \\ \psi_{rb} \\ \psi_{rc} \end{pmatrix}$$

Ainsi que les vecteurs courants :

$$i_s = [i_{sabc}] = \begin{pmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{pmatrix} \quad i_r = [i_{rabc}] = \begin{pmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{pmatrix}$$

Les flux sont exprimés également d'une façon matricielle

$$\begin{pmatrix} \psi_{sabc} \\ \psi_{rabc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}] & [L_r] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{sabc} \\ i_{rabc} \end{pmatrix} \quad (\text{II. 32})$$

Où

$$[L_s] = \begin{pmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{pmatrix} = l_s \begin{pmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ \frac{-1}{2} & 1 & \frac{-1}{2} \\ \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{II. 33})$$

Avec

- l_s : Inductance propre des enroulements statoriques ;
- m_s : Inductance mutuelle des enroulements statoriques $m_s = -\frac{l_s}{2}$

Et

$$[L_r] = \begin{pmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{pmatrix} = l_r \begin{pmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ \frac{-1}{2} & 1 & \frac{-1}{2} \\ \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{II. 34})$$

Avec :

- l_r : Inductance propre des enroulements rotoriques ;
- m_r : Inductance mutuelle des enroulements rotoriques

$$m_r = -\frac{l_r}{2}$$

Et finalement

$$[M_{sr}] = M_{max} \cdot \begin{pmatrix} \cos(p\theta) & \cos(p\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(p\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(p\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(p\theta) & \cos(p\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(p\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(p\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(p\theta) \end{pmatrix} \quad (\text{II. 35})$$

Où M_{max} représente la valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle Stator-Rotor obtenue lorsque les bobinages sont en regard l'un de l'autre.

Sous forme matricielle, les équations de la machine deviennent

$$\frac{d}{dt}[\psi_{sabc}] = [v_{sabc}] - [R_s][i_{sabc}] \quad (\text{II. 36})$$

$$\frac{d}{dt}[\psi_{rabc}] = [v_{rabc}] - [R_r][i_{rabc}] \quad (\text{II. 37})$$

Où,

$$V_s = [v_{sabc}] = \begin{pmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad V_r = [v_{rabc}] = \begin{pmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{pmatrix}$$

$$[R_s] = R_s \cdot [I], \quad [R_r] = R_r \cdot [I] \quad \text{et} \quad [I] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

II.7.3. Modèle généralisé de la machine asynchrone dans le repère de Park:[31]

La transformation de Park définie par la matrice de rotation $[P(\theta)]$ permet de ramener les variables du repère triphasé (a, b, c) sur les axes d'un repère diphasé tournant (d, q, o) . Les grandeurs statoriques et rotoriques sont alors exprimées dans un même repère. Le produit matriciel définissant la transformation de Park est donné par [5] :

$$[x_{dqp}] = [P(\theta)] \cdot [x_{abc}] \quad (\text{II. 38})$$

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(p \cdot \theta) & \cos\left(p \cdot \theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(p \cdot \theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(p \cdot \theta) & -\sin\left(p \cdot \theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(p \cdot \theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (\text{II. 39})$$

Avec

- $\theta = \theta_s$ pour les grandeurs statoriques ;

- $\theta = \theta_r$ pour les grandeurs rotoriques.

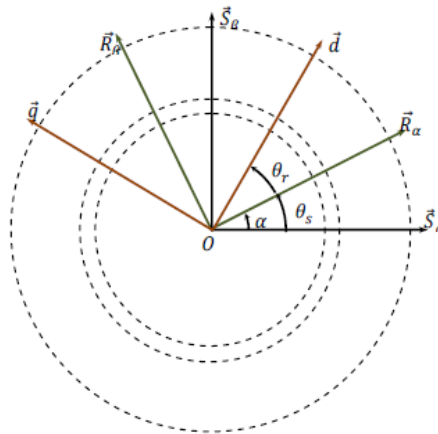


Figure II.16 montre alors la disposition des systèmes d'axes dans l'espace électrique.

$O_{s\alpha}$ et $O_{s\beta}$ (respectivement $O_{s\alpha}$ et $O_{s\beta}$) sont les axes du repère diphasé obtenu avec la transformation de Concordia correspondant aux tensions statoriques (respectivement rotoriques) [5].

Le rotor et le stator de la machine, alors désignée machine de Park, tournent à la même vitesse de sorte que les flux et les courants sont liés par une expression indépendante du temps. En appliquant la transformation de Park aux équations de la machine asynchrone dans le repère naturel (équations II.30 et II.31), un modèle de la machine est obtenu en tenant compte des composantes homopolaires [5] :

$$\frac{d}{dt}[\psi_{sdq0}] = [v_{sdq0}] - [R_s][i_{sdq0}] - [\lambda][\psi_{sdq0}] \frac{d\theta_s}{dt} \quad (\text{II. 40})$$

$$\frac{d}{dt}[\psi_{rdq0}] = [v_{rdq0}] - [R_s][i_{rdq0}] - [\lambda][\psi_{rdq0}] \frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{II. 41})$$

Avec

$$[\lambda] = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{II. 42})$$

Où

- $[v_{sdq0}]$ est le vecteur tension statorique dans le repère de Park ;
- $[i_{sdq0}]$ est le vecteur courant statorique dans le repère de Park ;
- $[\psi_{sdq0}]$ est le vecteur flux statorique dans le repère de Park ;
- $[v_{rdq0}]$ est le vecteur tension rotorique dans le repère de Park ;
- $[i_{rdq0}]$ est le vecteur courant rotorique dans le repère de Park ;
- $[\psi_{rdq0}]$ est le vecteur flux rotorique dans le repère de Park .

Dans le repère de Park, les flux et les courants sont liés par :

$$\begin{pmatrix} \psi_{sdq0} \\ \psi_{rdq0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [L_{sp}] & [M_{srp}] \\ [M_{srp}] & [L_{rp}] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{sdq0} \\ i_{rdq0} \end{pmatrix} \quad (\text{II. 43})$$

Avec

$$[L_{sp}] = \begin{pmatrix} l_s - m_s & 0 & 0 \\ 0 & l_s - m_s & 0 \\ 0 & 0 & l_s - m_s \end{pmatrix} \quad (\text{II. 44})$$

$$\begin{aligned}
[L_{rp}] &= \begin{pmatrix} l_r - m_r & 0 & 0 \\ 0 & l_r - m_r & 0 \\ 0 & 0 & l_r - m_r \end{pmatrix} \\
[M_{srp}] &= \begin{pmatrix} \frac{3M_{max}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3M_{max}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3M_{max}}{2} \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{II. 45}$$

Dans la suite, on notera

$$\frac{3M_{max}}{2} = M$$

Si les grandeurs électriques triphasées sont équilibrées, alors les grandeurs homopolaires sont égales à zéro. Dès lors, les transformées de Park induisent des vecteurs comportant seulement les deux composantes directe **d** et quadrature **q** [5].

On écrit Alors les équations matricielles précédentes (II. 40) et (II. 41) comme suivant :

Pour les équations électriques :

$$\begin{aligned}
v_{sd} &= R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \psi_{sq} \cdot \omega_e \\
v_{sq} &= R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \psi_{sd} \cdot \omega_e \\
v_{rd} &= R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - \psi_{rq} \cdot (\omega_e - \omega_r) \\
v_{rq} &= R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + \psi_{rd} \cdot (\omega_e - \omega_r)
\end{aligned} \tag{II. 46}$$

$$\begin{cases} \omega_e = \frac{d\theta_e}{dt} \\ \omega = \frac{d\theta}{dt} \end{cases} \text{ avec } \theta_e = \theta_s = \theta + \theta_s \tag{II. 47}$$

ω_e : est la vitesse angulaire arbitraire

Pour les équations du flux :

$$\begin{aligned}
\psi_{sq} &= L_s \cdot i_{sq} + M \cdot i_{rq} \\
\psi_{sd} &= L_s \cdot i_{sd} + M \cdot i_{rd} \\
\psi_{rq} &= L_r \cdot i_{rq} + M \cdot i_{sq} \\
\psi_{rd} &= L_r \cdot i_{rd} + M \cdot i_{sd}
\end{aligned} \tag{II. 48}$$

$L_s = l_s - m_s$: est l'inductance cyclique du stator ;

$L_r = l_r - m_r$: est l'inductance cyclique du rotor

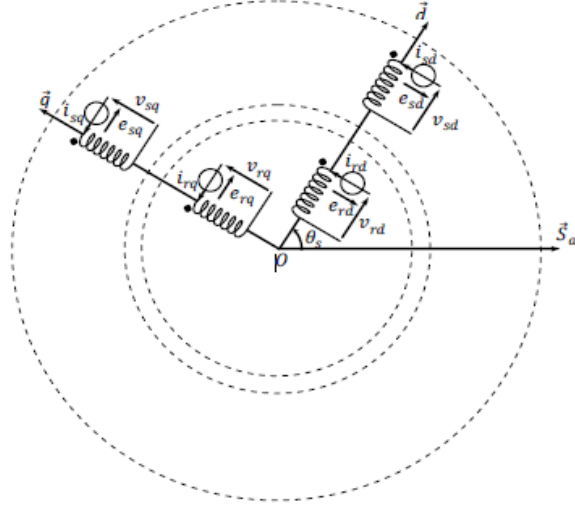


Figure II.17 donne alors une représentation interprétée de la machine de Park dans l'espace électrique

II.7.4. Calcul du couple électromagnétique :[31]

On obtient la puissance instantanée absorbée par la machine en calculant la somme des produits de chaque f.é.m. avec son courant [5] :

$$P_m = (e_{sd} \cdot i_{sd} + e_{sq} \cdot i_{sq}) + (e_{rd} \cdot i_{rd} + e_{rq} \cdot i_{rq}) \quad (\text{II. 49})$$

En exprimant les f.é.m et en factorisant par rapport aux vitesses angulaires, on obtient :

$$P_m = (\psi_{sd} \cdot i_{sq} + \psi_{sq} \cdot i_{sd}) \omega_s + (\psi_{rd} i_{rq} + \psi_{rq} \cdot i_{rd}) \omega_r \quad (\text{II. 50})$$

En exprimant les flux en fonction des courants à partir des équations II. 8, on constate que :

$$\psi_{sd} \cdot i_{sq} - \psi_{sq} \cdot i_{sd} = -(\psi_{rd} i_{rq} - \psi_{rq} \cdot i_{rd}) \quad (\text{II. 51})$$

Dans ces conditions, on obtient deux expressions pour le couple électromagnétique :

$$C_{em} = p \cdot (\psi_{sd} \cdot i_{sq} - \psi_{sq} \cdot i_{sd}) \text{ ou } C_{em} = p \cdot (\psi_{rd} i_{rq} - \psi_{rq} \cdot i_{rd}) \quad (\text{II. 52})$$

Si l'on s'intéresse à l'expression utilisant les grandeurs au rotor on obtient :

On pose :

$$C_{em} = p \cdot (\psi_{rd} i_{rq} - \psi_{rq} \cdot i_{rd}) \quad (\text{II. 53})$$

$$C_{rd} = p \cdot \psi_{rd} i_{rq} \quad (\text{II. 54})$$

$$C_{rq} = -p \cdot \psi_{rq} \cdot i_{rd}$$

On écrit alors

$$C_{em} = C_{rd} + C_{rq}$$

Si l'on utilise les grandeurs statoriques, l'expression du couple devient :

$$C_{em} = p \cdot (\psi_{sd} \cdot i_{sq} - \psi_{sq} \cdot i_{sd}) \quad (\text{II. 55})$$

On pose :

$$\begin{aligned} C_{sd} &= p \cdot \psi_{sd} i_{sq} \\ C_{sq} &= -p \cdot \psi_{sq} i_{sd} \end{aligned} \quad (\text{II. 56})$$

On écrit alors :

$$C_{em} = C_{sd} + C_{sq} \quad (\text{II. 57})$$

La première expression du couple conduit à la commande vectorielle de la machine dite « à flux rotorique orienté », alors que la seconde expression sera utilisée pour la commande dite « à flux statorique orienté » [5].

En dérivant la relation reliant l'angle statorique à celui du rotor suivante :

$$\theta_s = \theta_r + \alpha \quad (\text{II. 58})$$

On retrouve alors la relation entre la pulsation statoriques ω_s et la pulsation rotorique ω_r :

$$\omega_r = \omega_s - p \cdot \Omega_{méc} \quad (\text{II. 59})$$

$\Omega_{méc}$: est la vitesse de rotation de la machine.

Pour la machine polyphasée (m phases) ramenée à la machine biphasée. Il faut multiplier toutes les expressions du couple électromagnétique par le coefficient

$K = m/2$ [19]; par exemple l'expression du couple s'écrit comme suivant :

$$C_{em} = \frac{mp}{2} \cdot (\psi_{sd} \cdot i_{sq} - \psi_{sq} \cdot i_{sd}) \quad (\text{II. 60})$$

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

$$J \frac{d}{dt} \omega = C_r - C_{em} - C_{vis} \quad (\text{II. 61})$$

Où

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{méc} \quad (\text{II. 62})$$

II.7.5. Choix du référentiel

A) Référentiel lié au stator

$$\frac{d\theta_e}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega \quad (\text{II. 63})$$

Ce référentiel est mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées.

B) Référentiel lié au rotor

Ce référentiel est caractérisé par $\omega_e = \omega$. Il est intéressant dans l'étude des régimes transitoires où la vitesse est supposée constante.

Il se traduit par la condition :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_e}{dt} = \omega \quad (\text{II. 64})$$

C) Référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel est caractérisé par $\omega_e = \omega_s$. Dans ce cas les grandeurs statoriques et rotoriques sont connues en régime permanent. Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors d'une étude de la commande des machines.

Le modèle de la machine asynchrone à double alimentation s'écrit dans le repère de PARK lié au champ tournant comme suit :

$$\begin{aligned} v_{sd} &= R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \psi_{sq} \cdot \omega_s \\ v_{sq} &= R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \psi_{sd} \cdot \omega_s \\ v_{rd} &= R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - \psi_{rq} \cdot \omega_r \\ v_{rq} &= R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + \psi_{rd} \cdot \omega_r \end{aligned} \quad (\text{II. 65})$$

Avec :

$$C_{em} = \frac{mp}{2} \cdot (\psi_{sd} \cdot i_{sq} - \psi_{sq} \cdot i_{sd}) \quad (\text{II. 66})$$

$$J \frac{d}{dt} \omega = C_r - C_{em} - C_{vis} \quad (\text{II. 67})$$

II.8. Modélisation de la cascade de deux MADA

Dans ce près suit, on va modéliser la cascade de deux MADA en exploitant le modèle précédent de la MADA, on va coupler les deux MADA électriquement et mécaniquement au niveau du rotor. Ce coulage est modélisé ici en supposant qu'il n'y a pas de défaut tel qu'une coupure de ligne et qu'il n'y a ni perte ni stockage d'énergie dans les connexions [25]. Les grandeurs et paramètres associés à chaque machine seront identifiés par les indices 1 et 2 correspondants respectivement à la MADA n°1 et à la MADA n°2.[31]

II.8.1. Modèle de la MADA sans bague balais

Le modèle mathématique de la MADASB dans le référentiel d-q liée au champ

Tournant est donné par :

Le équations électriques :

$$\begin{aligned}
 v_{s1}^d &= R_{s1} \cdot i_{s1}^d + \frac{d\psi_{s1}^d}{dt} - \psi_{s1}^q \omega_{s1} \\
 v_{s1}^q &= R_{s1} \cdot i_{s1}^q + \frac{d\psi_{s1}^q}{dt} + \psi_{s1}^d \omega_{s1} \\
 0_r^d &= (R_{r1} + R_{r2}) \cdot i_r^d + \frac{d\psi_r^d}{dt} - \psi_r^q \omega_r \\
 0_r^q &= (R_{r1} + R_{r2}) \cdot i_r^q + \frac{d\psi_r^q}{dt} + \psi_r^d \omega_r \\
 v_{s2}^d &= R_{s2} \cdot i_{s2}^d + \frac{d\psi_{s2}^d}{dt} - \psi_{s2}^q \omega_{s2} \\
 v_{s2}^q &= R_{s2} \cdot i_{s2}^q + \frac{d\psi_{s2}^q}{dt} + \psi_{s2}^d \omega_{s2}
 \end{aligned} \tag{II. 68}$$

Les équations du flux :

$$\begin{aligned}
 \psi_{s1}^d &= L_{s1} \cdot i_{s1}^d + L_{m1} \cdot i_r^d \\
 \psi_{s1}^q &= L_{s1} \cdot i_{s1}^q + L_{m1} \cdot i_r^q \\
 \psi_r^q &= (L_{r1} + L_{r2}) \cdot i_r^q + L_{m2} \cdot i_{s2}^q + L_{m1} \cdot i_{s1}^q \\
 \psi_r^d &= (L_{r1} + L_{r2}) \cdot i_r^d + L_{m2} \cdot i_{s2}^d + L_{m1} \cdot i_{s1}^d \\
 \psi_{s2}^d &= L_{s2} \cdot i_{s2}^d + L_{m2} \cdot i_r^d \\
 \psi_{s2}^q &= L_{s2} \cdot i_{s2}^q + L_{m2} \cdot i_r^q
 \end{aligned} \tag{II. 69}$$

Les équations sous Forme Matricielle :

$$\begin{bmatrix} v_{sp}^q \\ v_{sp}^d \\ 0 \\ 0 \\ v_{sc}^q \\ v_{sc}^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{sp} & \omega_p L_{sp} & 0 & \omega_p L_{mp} & 0 & 0 \\ -\omega_p L_{sp} & R_{sp} & -\omega_p L_{mp} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_r L_{mp} & R_r & \omega_r L_r & 0 & \omega_r L_{mc} \\ -\omega_r L_{mc} & 0 & -\omega_r L_r & R_r & -\omega_r L_{mc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega_c L_{mc} & R_{sc} & \omega_c L_{sc} \\ 0 & 0 & -\omega_c L_{mc} & 0 & -\omega_c L_{sc} & R_{sc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sp}^q \\ I_{sp}^d \\ I_r^d \\ I_r^q \\ I_{sc}^q \\ I_{sc}^d \end{bmatrix}$$

$$[V] = \left[[R][I] + [X][I] + \omega_r[A][I] + \omega_c[B][I] + \omega_p[C][I] + [D][I] \right]$$

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{mp} & 0 & L_r & 0 & L_{mc} \\ -L_{mp} & 0 & -L_r & 0 & -L_{mc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, [B] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{mc} & 0 & L_{sc} \\ 0 & 0 & -L_{mc} & 0 & -L_{sc} & 0 \end{bmatrix},$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 0 & L_{sp} & 0 & L_{mp} & 0 & 0 \\ -L_{sp} & 0 & -L_{mp} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, [D] = \begin{bmatrix} L_{sp} & 0 & L_{mp} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{sp} & 0 & L_{mp} & 0 & 0 \\ L_{mp} & 0 & L_r & 0 & L_{mc} & 0 \\ 0 & L_{mp} & 0 & L_r & 0 & L_{mc} \\ 0 & 0 & L_{mc} & 0 & L_{sc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{mc} & 0 & L_{sc} \end{bmatrix}$$

Les équations mécaniques :

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot (p_1 \cdot (\psi_{s1}^d \cdot i_{s1}^q - \psi_{s1}^q \cdot i_{s1}^d) + p_2 \cdot (\psi_{s2}^d \cdot i_{s2}^q - \psi_{s2}^q \cdot i_{s2}^d)) \quad (\text{II. 70})$$

II.9. Résultat de simulation:

A l'aide de logiciel MATLAB, on va simuler aussi la cascade de deux MADA en fonctionnement générateur. Son modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de Park. (Plan (d, q)) lié aux champs tournant. Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus par le modèle de deux machines de puissance de 2×2.65 kW donnée.

Les figures ci dessous sont ceux obtenus pour le modèle de la cascade de deux MADA, entraînée à une vitesse fixe égale à 716 tr/min, alimentée directement par une source de tension

triphasée parfaite au niveau du stator de la MADA commande avec une fréquence du réseau qui est 50Hz et d'amplitude de 220V.

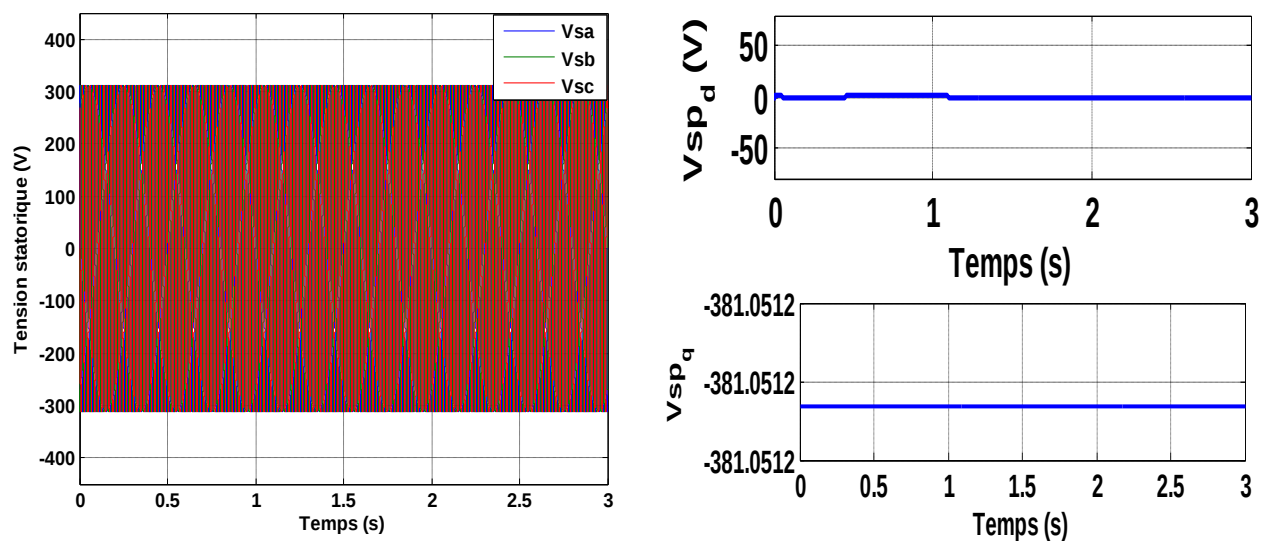


Figure II.18: Les tensions statorique de la MADA puissance

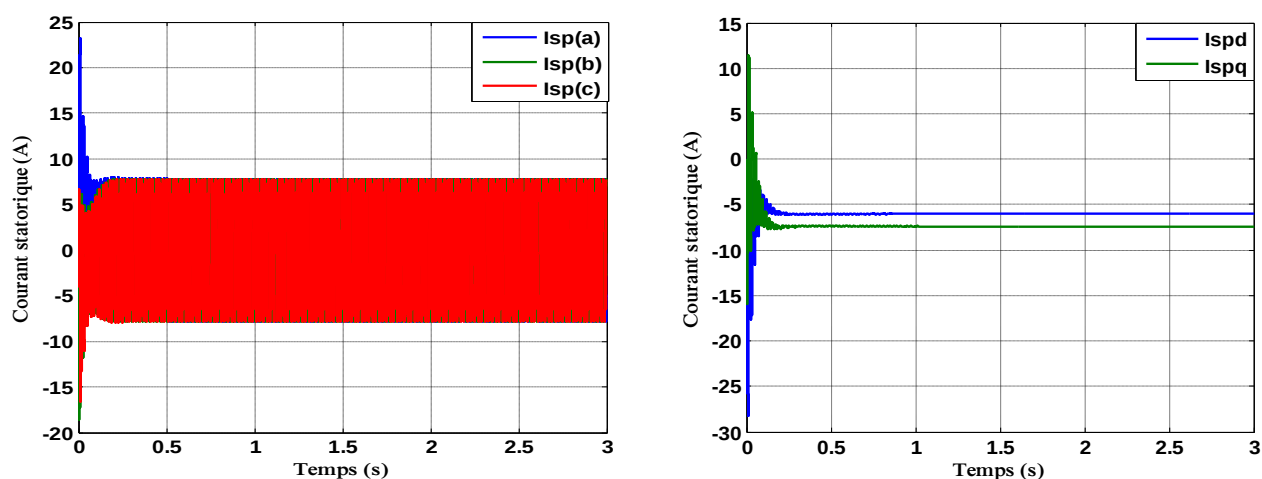


Figure II.19: Les courants statoriques de la MADA puissance

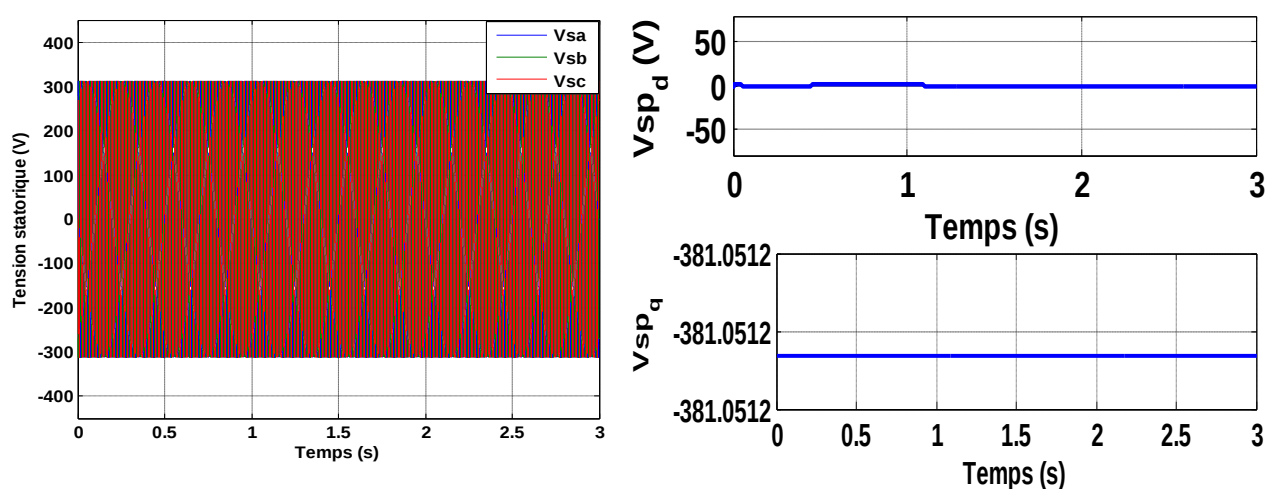


Figure II.20 Les tensions statoriques de la MADA commande

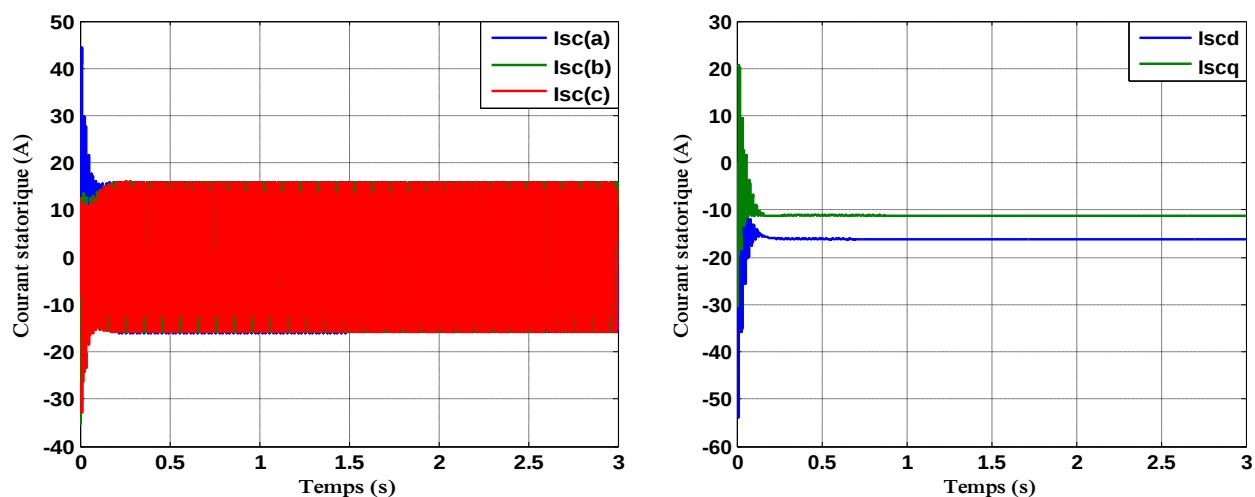


Figure II.21 Les courants statoriques de la MADA commande

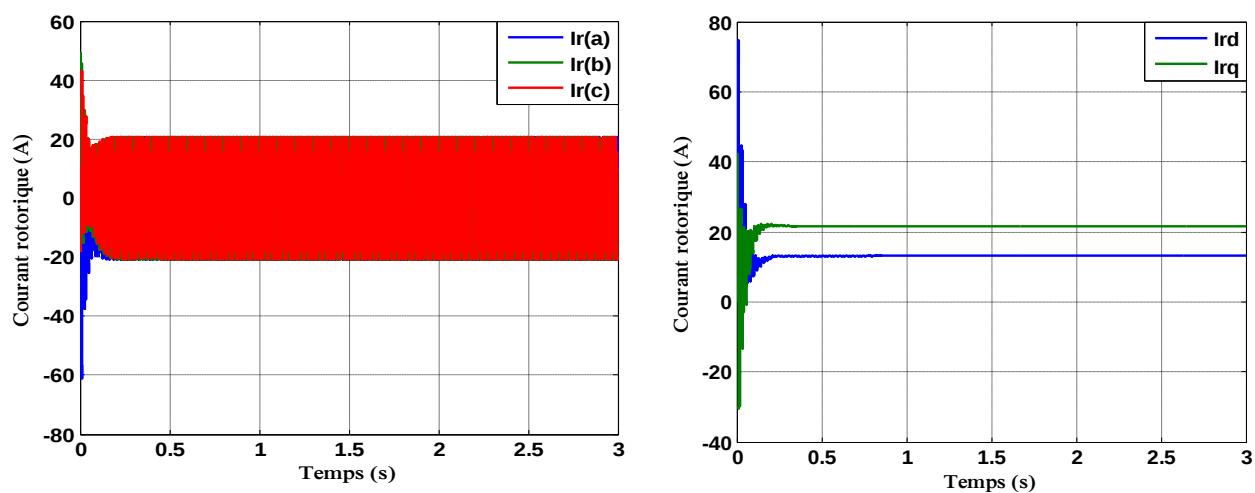


Figure II.22 Les courants rotoriques de la MADASB.

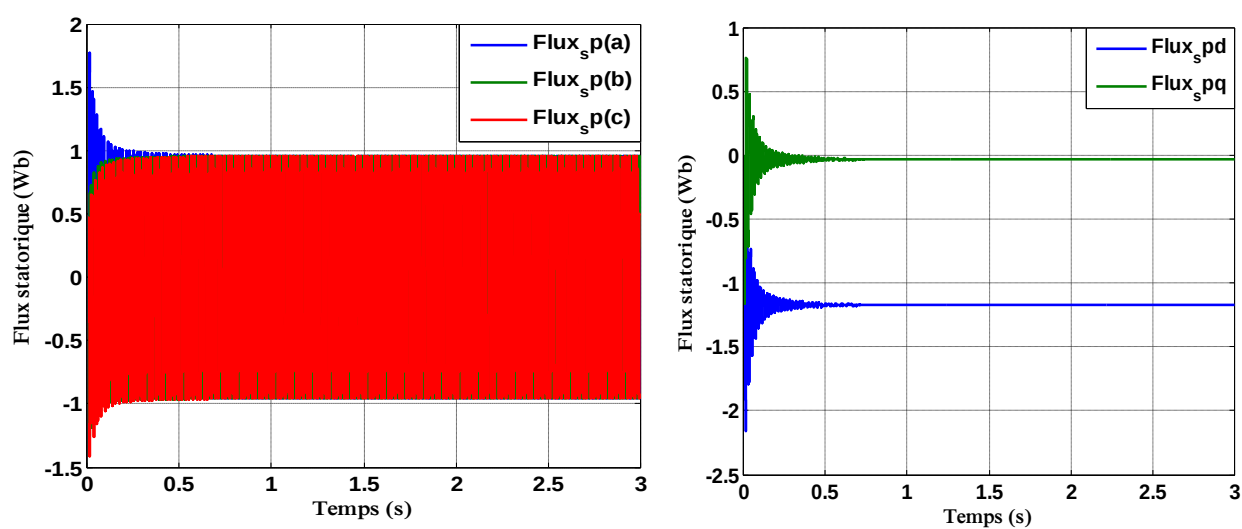


Figure II.23 Les flux statoriques de la MADA puissance

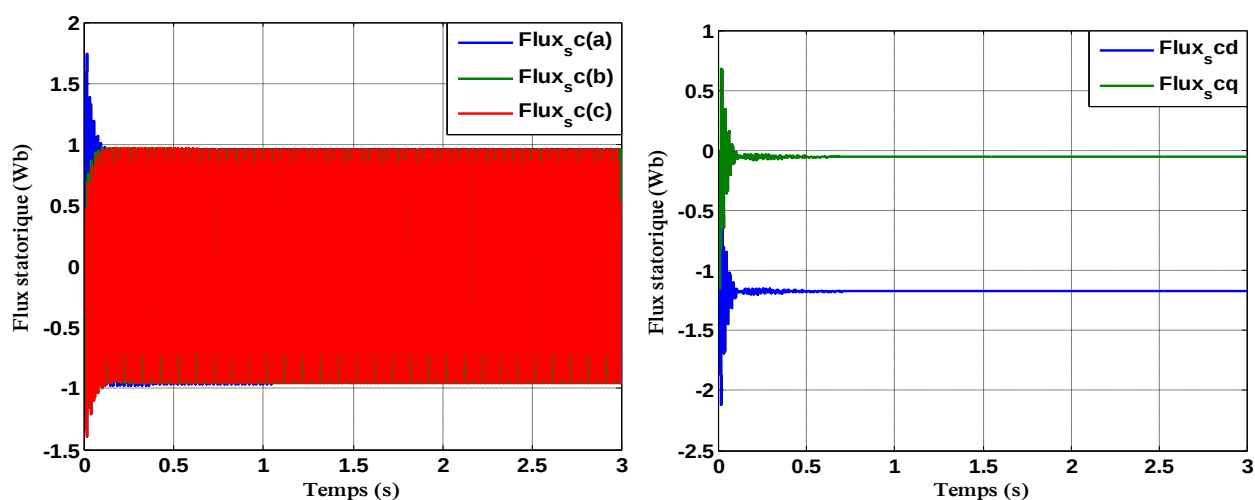


Figure II.24 Les flux statoriques de la MADA commande

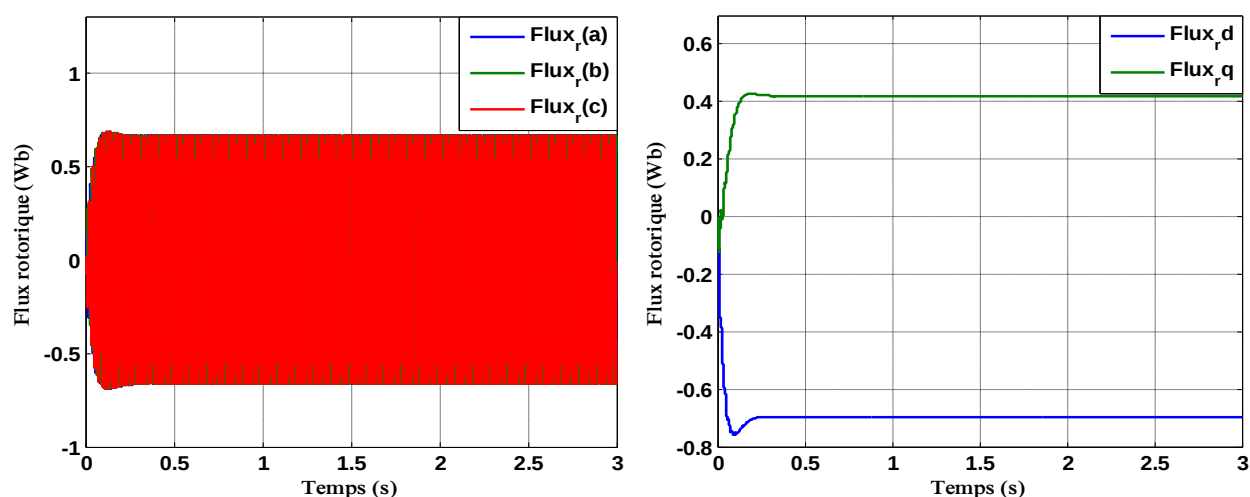


Figure II.25 Les flux rotoriques de la MADASB

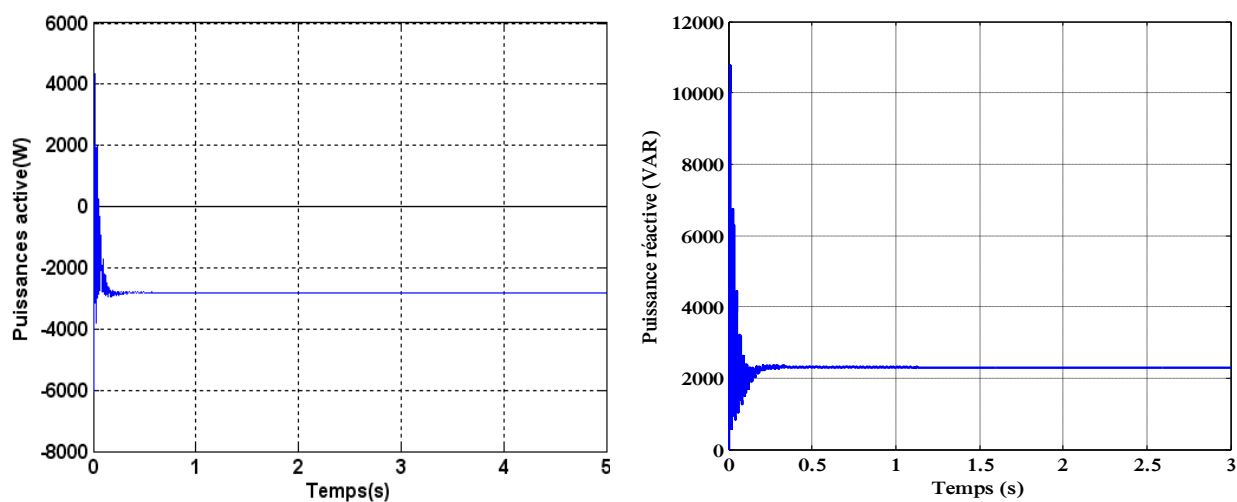


Figure II.26 Les puissances actives et réactives statoriques de la MADAB

Les résultats de simulation montrent que pendant le régime dynamique, la puissance délivrée au réseau est négatif atteint au démarrage une valeur maximale -4.52kW . On constate ainsi l'importance des courants statoriques (de puissance et de commande) et rotoriques pendant le démarrage, après un temps égal à environs $0,0148\text{s}$, ils se stabilisent et prennent leurs formes sinusoïdales avec une fréquence de 50Hz pour les courants statoriques de la machine de commande. [32]

II.10. Modélisation de l'onduleur triphasé à MLI : [24]

L'onduleur de tension est un convertisseur statique constitué des cellules de commutation généralement à transistor ou thyristor pour les grandes puissances.

Le principe de fonctionnement s'exprime par le séquençement imposé à l'interrupteur statique qui réalise la modulation de la largeur des impulsions des tensions appliquées aux enroulements rotoriques ou statoriques de la machine.

Les trois cellules de commutation formant un onduleur triphasé sont bidirectionnelles en courant.

Dans l'hypothèse de la conduction continue, on montre que chaque groupe transistor diode, assemblé en parallèle, forme un interrupteur (demi-bras) bicommandable (commandé à l'ouverture et à la fermeture), Ainsi que chaque demi-bras possède son complémentaire, figure (II.27).

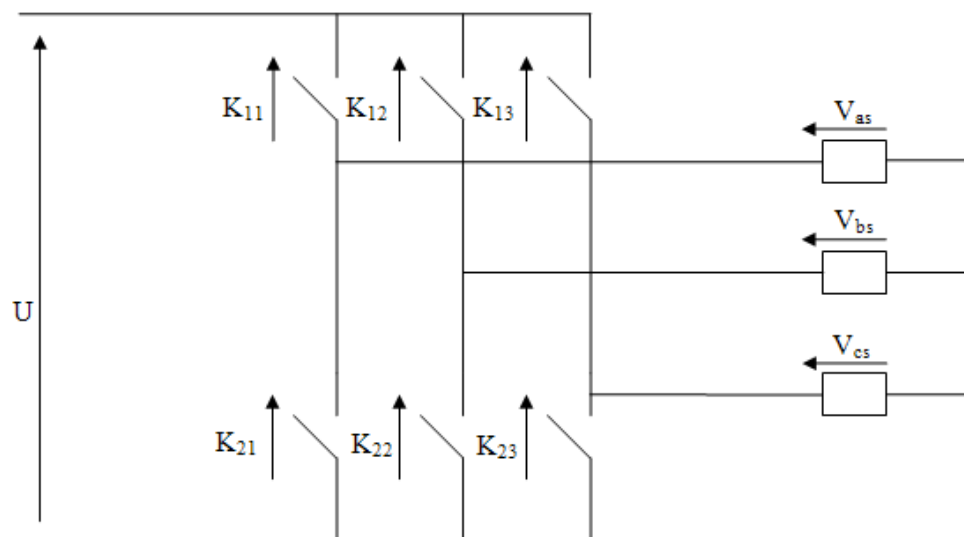


Figure II.27: Représentation schématique d'un onduleur

II.11 Fonction de connexion :

Pour assurer la continuité des courants alternatifs I_{ci} les interrupteurs K_{ci} doivent être contrôlés des manières complémentaires, chaque interrupteur K_{ci} ($c \in \{1, 2, 3\}$, $i \in \{1, 2\}$) supposé idéalisé introduit une fonction de connexion f_{ci} , le courant i_{ci} qui le traverse et la tension à ses bornes s'écrivent respectivement :

II.11.1 La technique M.L.I

Pour déterminer les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs on fait appelle à la technique de M.L.I (modulation de largeur d'impulsion) qui consiste à calculer les intersections d'une tension de référence sinusoïdale et une tension de modulation triangulaire appelée porteuse. Les signaux de références sont donnés par l'équation suivante

$$V_{ref} = r \cdot \sin [(2\pi f) t - 2(j-1) \pi/3] ; j=1, 2, 3$$

Lorsque la référence est sinusoïdale, dans ce cas deux paramètres caractérisent la commande :

- L'indice de modulation « m » égale au rapport de la fréquence de modulation sur celle de référence.
- Le coefficient de réglage en tension « r » égale au rapport entre l'amplitude de la tension de référence et la valeur crête de l'onde de modulation.

Le schéma d'élaboration de la M.L.I est donné par la figure suivante :

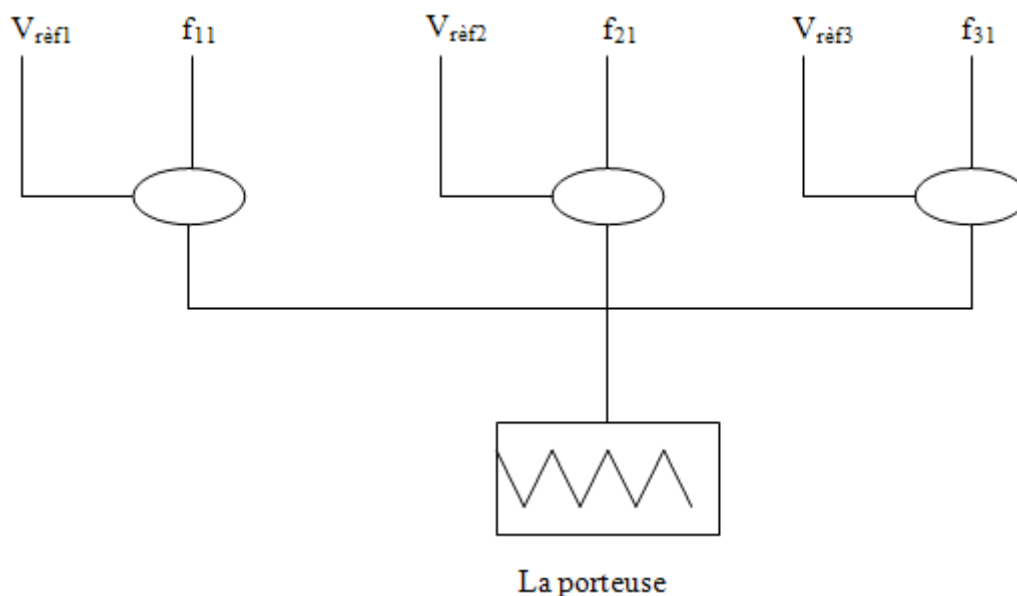


Figure II.28: schéma de principe de calcul de M.L.I

II.11 Conclusion :

Dans ce chapitre, Dans ce chapitre, nous avons modélisé l'ensemble de la chaîne de conversion, nous avons représenté la partie mécanique qui contient la turbine, le multiplicateur et l'arbre de MADASB. En suite, nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation, fonctionnement génératrice. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi, dont la complexité a été réduite. Nous avons constaté que le modèle de la machine asynchrone à double alimentation est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle. Des résultats de simulation sont présentés.

Dans la dernière partie nous avons présenté le modèle de l'onduleur, son principe de fonctionnement et la technique de commande MLI.

Dans le chapitre suivant, nous allons étudier la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation sans balais afin d'optimiser la puissance délivrée au réseau électrique.

Chapitre III: Commande vectorielle de la MADASB

III.1 Introduction

La commande vectorielle par orientation du flux de la machine asynchrone à double alimentation est une solution plus attractive pour des applications à haute performance comme l'entraînement à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone à double alimentation sans balais aussi bien en fonctionnement générateur que moteur.

En général la commande vectorielle peut être présentée selon deux méthodes, l'une est appelée directe est due à Blaschke, et l'autre appelée méthode indirecte a été développée par Hasse [26], nos études sont basées sur cette dernière méthode à cause de sa facilité à réaliser avec un simple contrôle, ainsi sa robustesse

Le but de ce chapitre est d'introduire une loi de commande pour un réglage découplant les puissances active et réactive de la MADASB, avec des régulateurs PI. Ainsi d'introduire un algorithme robuste de commande pour contrôler l'écoulement des puissances active et réactive entre la MADASB et le réseau .

III.2 Généralités sur la commande vectorielle :

Les origines de la commande vectorielle contrairement aux idées reçues, remontent à la fin du siècle dernier et aux travaux de Blondel sur la théorie de la réaction des deux axes. Toutefois, compte tenu de la technologie utilisée à cette époque, il n'était pas question de transposer cette théorie au contrôle des machines électriques [27]. Ce n'est que vers les années cinquante, grâce à l'utilisation dans l'Europe de l'Est, et plus particulièrement en Allemagne et en Hongrie, de la méthode de phaseur temporel que germa l'idée de la commande vectorielle appelée également contrôle par flux orienté [27]. En 1969, les principes de cette commande ont été définis par Hasse et la première publication internationale au sujet de ce type de commande appliquée aux machines à induction est certainement celle de Blaschke en 1971 [27]. Le but de la commande vectorielle est d'arriver à commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu à excitation indépendante où il y

a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux (le courant d'excitation) et celle liée au couple (le courant d'induit). Ce découplage permet d'obtenir une réponse très rapide du couple, une grande plage de commande de vitesse et une haute efficacité pour une grande plage de charge en régime permanent [28].

III.2.1 Principe du contrôle vectoriel à flux orienté :

Le contrôle vectoriel permet de modéliser la 'MADASB' comme une machine à courant continu, c'est-à-dire réaliser un contrôle similaire à celui des machines à courant continu à excitation séparée figure. III. 1, où nous retrouvons un découplage naturel entre le courant d'excitation qui crée le flux et le courant d'induit qui fournit le couple électromagnétique. A cet effet, il est nécessaire d'orienter le flux en quadrature avec le couple. La méthode du flux orienté consiste à choisir un système d'axes (d,q), repère tournant biphasé orienté flux statorique et un type de commande qui permettent de découpler le couple et le flux.

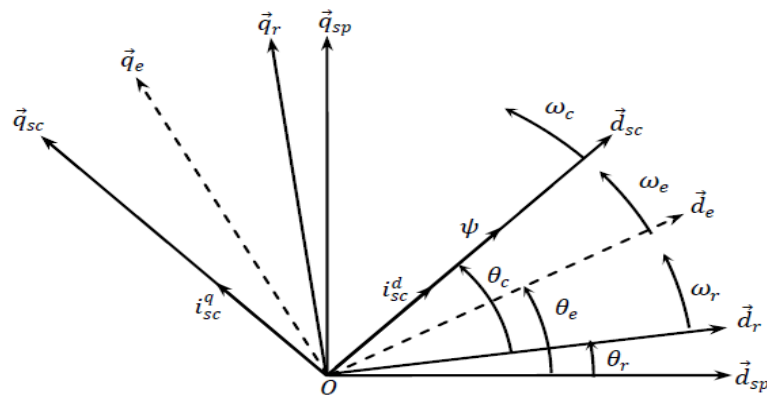


Figure III. 1: Position du référentiel par rapport au flux

La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone double alimentée sans balais aussi bien en fonctionnement générateur que moteur.

Lors de la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation sans balais dans un repère lié au champ tournant, les champs statoriques et rotoriques et d'entrefer de la machine tournent à la vitesse du référentiel (d, q) par rapport au stator.

L'orientation de l'un de ces trois champs suivant l'axe « d » du référentiel constitue le principe de base de la commande vectorielle. Grâce à la transformée de PARK, on obtient un modèle similaire à la MCC à excitation séparée.

De nombreuses variantes de la commande vectorielle ont été présentées

Dans la littérature, et que l'on peut classer suivant la source d'énergie :

- Commande en tension (voltage source inverter-VSI)
- Commande en courant (current controlled inverter-CCI).

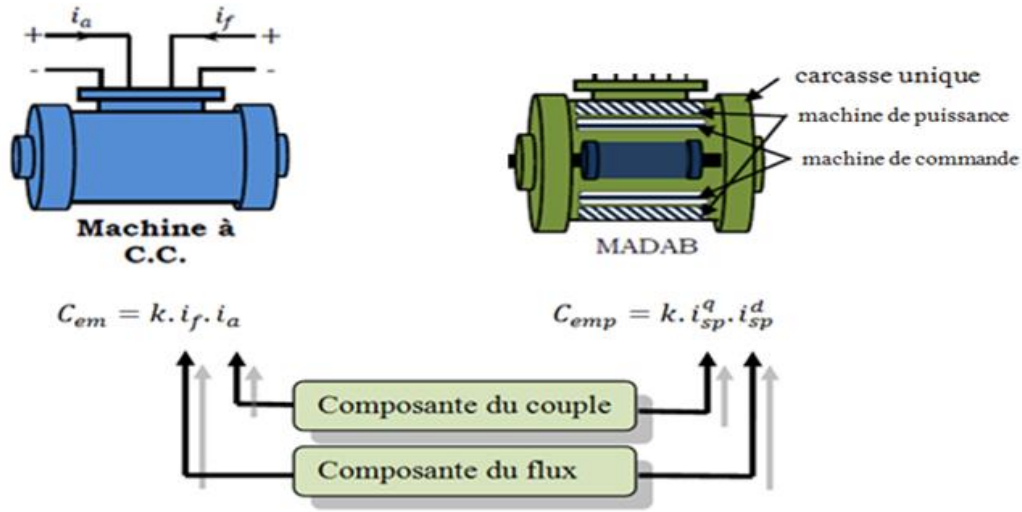


Figure III. 2 : Schéma du principe de découplage pour la machine de puissance par analogie avec la machine à C.C.

Couple électromagnétique de la machine à courant continu :

$$C_{em} = K \cdot \psi_f \cdot i_a \quad (III. 1)$$

$$\psi_f = K' \cdot i_f \quad (III. 2)$$

Couple électromagnétique de la machine de puissance qui nous allons l'examiner :

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot (p_p \cdot (\psi_{sp}^d \cdot i_{sp}^q - \psi_{sp}^q \cdot i_{sp}^d)) \quad (III. 3)$$

En se basant sur cette équation, on peut réaliser un découplage de telle façon à ce que le couple soit commandé uniquement par le courant statorique en quadrature i_{sp}^q (l'axe q doit être dépourvu de flux ($\psi_{sp}^q = 0$), et le flux par le courant statorique de la machine de commande i_{sc}^d .

La relation finale du couple est:

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot \psi_{sp}^d \cdot i_{sp}^q \quad (III. 4)$$

III.2.2 Contrôle vectoriel découplé des puissances active et réactive :

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'énergie électrique de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactive en établissant les

équations qui lient les valeurs des tensions statoriques de la machine de commande (MADA n°1), générées par un onduleur, aux puissances active et réactive statorique de la machine de puissance (MADA n°2).

Nous utilisons la modélisation diphasée de la machine. On oriente le repère d,q afin que l'axe d soit aligné sur le flux statorique de la machine de puissance ψ_{sp} .

Ainsi

$$\psi_{sp}^d = \quad \text{et} \quad \psi_{sp}^q = 0 \quad (\text{III. 5})$$

Et l'équation des flux statoriques de la machine de puissance devient :

$$\begin{aligned} 0 &= L_{sp} \cdot i_{sp}^q + L_{mp} \cdot i_{rp}^q \\ \psi_{sp}^d &= L_{sp} \cdot i_{sp}^d + L_{mp} \cdot i_{rp}^d \end{aligned} \quad (\text{III. 6})$$

Si on suppose le réseau électrique stable, ayant pour tension simple V_{sp} , cela conduit à un flux statorique ψ_{sp} constant.

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

$$\begin{aligned} v_{sp}^d &= \frac{d\psi_{sp}^d}{dt} \\ v_{sp}^q &= \psi_{sp}^d \cdot \omega_{sp} \end{aligned} \quad (\text{III. 7})$$

Avec ω_{sp} la pulsation électrique des grandeurs statoriques de la machine de puissance. Avec l'hypothèse du flux statorique constant, on obtient :

$$\begin{aligned} v_{sp}^d &= 0 \\ v_{sp}^q &= v_{sp} \end{aligned} \quad (\text{III. 8})$$

A l'aide de l'équation (III. 6) et du flux, on peut établir le lien entre les courants statoriques de la machine de puissance et les courants statoriques de la machine de commande

On a:

$$\begin{aligned}
i_{sp}^q &= -\frac{L_{mp}}{L_{sp}} \cdot i_r^q ; \quad i_{sp}^d = \frac{\psi_{sp}^d - L_{mp} \cdot i_r^d}{L_{sp}} \\
i_r^q &= \frac{\psi_r^q - L_{mp} \cdot i_{sp}^q - L_{mc} \cdot i_{sc}^q}{L_{sp}} \\
i_r^d &= \frac{\psi_r^d - L_{mp} \cdot i_{sp}^d - L_{mc} \cdot i_{sc}^d}{L_{sp}}
\end{aligned} \tag{III. 9}$$

En suite:

$$\begin{aligned}
i_{sp}^q &= -\frac{L_{mp}}{L_{sp} \cdot L_r - L_{mp}^2} \psi_r^q + \frac{L_{mp} \cdot L_{mc}}{L_{sp} \cdot L_r - L_{mp}^2} i_{sc}^q \\
i_{sp}^d &= \frac{L_r}{L_{sp} \cdot L_r - L_{mp}^2} \psi_{sp}^d - \frac{L_{mp}}{L_{sp} \cdot L_r - L_{mp}^2} \psi_r^d + \frac{L_{mp} \cdot L_{mc}}{L_{sp} \cdot L_r - L_{mp}^2} i_{sc}^d
\end{aligned} \tag{III. 10}$$

Les équations de puissance :

$$\begin{aligned}
P_p &= v_{sp}^q \cdot i_{sp}^q + v_{sp}^d \cdot i_{sp}^d \\
Q_p &= v_{sp}^q \cdot i_{sp}^d - v_{sp}^d \cdot i_{sp}^q
\end{aligned} \tag{III. 11}$$

Ou bien encore, d'après l'équation III. 8

$$\begin{aligned}
P_{sp} &= v_{sp} \cdot i_{sp}^q \\
Q_{sp} &= v_{sp} \cdot i_{sp}^d
\end{aligned} \tag{III. 12}$$

Pour obtenir l'expression des puissances de la machine de puissance en fonction des courants statoriques de la machine de commande, on remplace dans l'équation précédente les courants par l'équation III. 10:

$$\begin{aligned}
P_{sp} &= v_{sp} \cdot \left(-\frac{L_{mp}}{L_{sp} \cdot L_r - L_{mp}^2} \psi_r^q + \frac{L_{mp} \cdot L_{mc}}{L_{sp} \cdot L_r - L_{mp}^2} i_{sc}^q \right) \\
Q_{sp} &= v_{sp} \cdot \left(\frac{L_r}{L_{sp} \cdot L_r - L_{mp}^2} \psi_{sp}^d - \frac{L_{mp}}{L_{sp} \cdot L_r - L_{mp}^2} \psi_r^d + \frac{L_{mp} \cdot L_{mc}}{L_{sp} \cdot L_r - L_{mp}^2} i_{sc}^d \right)
\end{aligned} \tag{III. 13}$$

On remarque que l'équation III. 13 fait apparaitre que la puissance active statorique de la machine de puissance P_s est directement proportionnelle au courant statorique en quadrature i_{sc}^q de la machine de commande. De plus, la puissance réactive Q_s est proportionnelle au courant statorique direct i_{sc}^d de la machine de commande.

Afin de pouvoir contrôler correctement la machine, il nous faut alors établir la relation entre les courants et les tensions statoriques de la machine de commande qui seront appliqués à la MADASB.

En remplaçant dans l'équation des flux (III. 2) statoriques de la machine de commande les courants statoriques de la machine de puissance par l'expression III. 10 on obtient :

$$\begin{aligned}\psi_{sc}^q &= \frac{L_{sp} \cdot L_r - L_{mc}^2}{L_r} i_{sc}^q + \frac{L_{mc}}{L_r} \psi_r^q - \frac{L_{mp} \cdot L_{mc}}{L_r} i_{sp}^q \\ \psi_{sc}^d &= \frac{L_{sp} \cdot L_r - L_{mc}^2}{L_r} i_{sc}^d + \frac{L_{mc}}{L_r} \psi_r^d - \frac{L_{mp} \cdot L_{mc}}{L_r} i_{sp}^d\end{aligned}\quad (III. 14)$$

En remplaçant l'expression des flux précédente III. 14 par leurs expressions dans les équations des tensions statoriques de la machine de commande (III. 1) on obtient

$$\begin{aligned}v_{sc}^q &= R_s \cdot i_{sc}^q + \frac{d}{dt} (\delta_3 \cdot i_{sc}^q + \delta_2 \cdot \psi_r^q) + \omega_p \cdot g (\delta_3 \cdot i_{sc}^d + \delta_2 \cdot \psi_r^d - \delta_1 \cdot \psi_{sp}^d) \\ v_{sc}^d &= R_s \cdot i_{sc}^d + \frac{d}{dt} (\delta_3 \cdot i_{sc}^d + \delta_2 \cdot \psi_r^d - \delta_1 \cdot \psi_{sp}^d) - \omega_p \cdot g (\delta_3 \cdot i_{sc}^q + \delta_2 \cdot \psi_r^q)\end{aligned}\quad (III. 15)$$

Les facteurs de dispersion s'écrivent comme suit :

$$\begin{aligned}\delta_1 &= \frac{L_{mc} \cdot L_{mp}}{L_{sp} \cdot L_r - L_{mp}^2}, \delta_2 = \frac{L_{mc} \cdot L_{sp}}{L_{sp} \cdot L_r - L_{mp}^2}, \delta_3 = L_{sc} - \frac{L_{mc}^2 \cdot L_{sp}}{L_{sp} \cdot L_r - L_{mp}^2}, \\ \delta_4 &= \frac{L_{mp}}{L_{sp} \cdot L_r - L_{mp}^2}, \delta_5 = \frac{L_r}{L_{sp} \cdot L_r - L_{mp}^2}\end{aligned}$$

A partir des équations que nous venons de mettre en place, nous pouvons établir les relations entre les tensions appliquées au stator de la machine de commande et les puissances statoriques de la machine de commande que cela engendre. Il est donc possible maintenant de décrire le schéma bloc de la MADASB qui sera le bloc à réguler par la suite.

En examinant les équations III. 13 et III. 15 , on peut établir le schéma bloc de la figure III. 3 qui comporte en entrées les tensions statoriques de la machine de commande et en sorties les puissances active et réactive statoriques de la machines de puissance.

On remarque que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. De plus, du fait de la faible valeur du glissement g , il sera possible d'établir sans difficulté une commande vectorielle car les influences des couplages resteront faibles et les axes d et q pourront donc être commandés séparément avec leurs propres régulateurs.

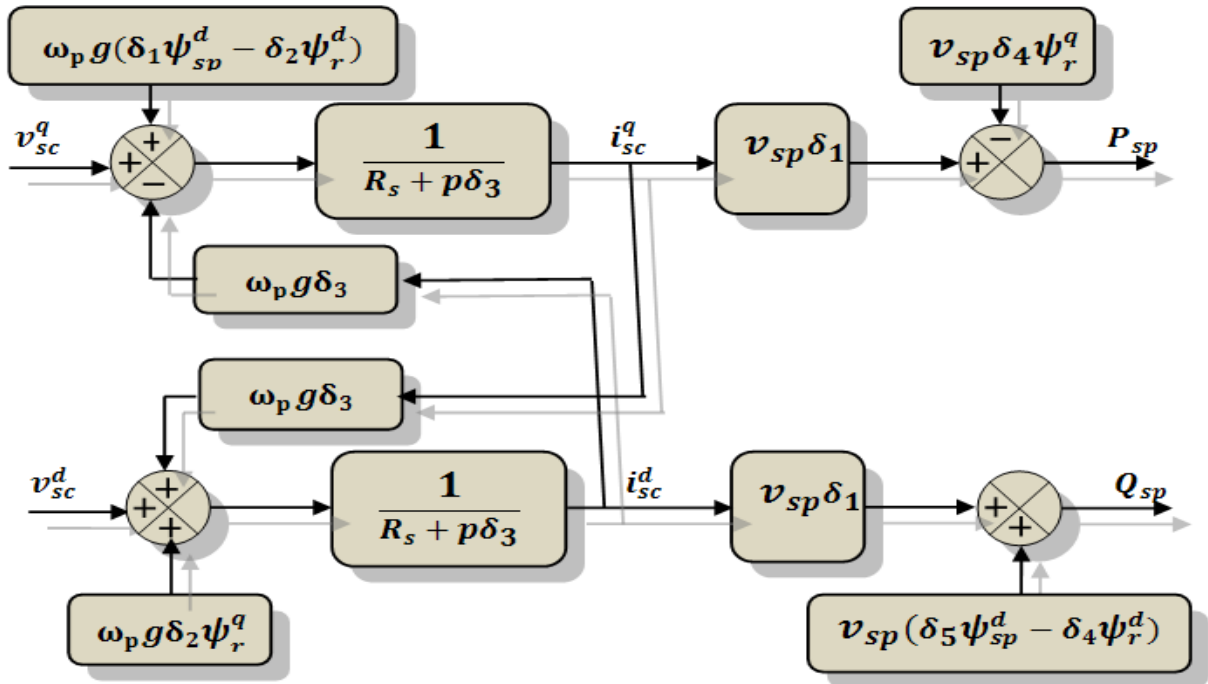


Figure III. 3: Schéma bloc de la MADASB

Ainsi, la méthode de la commande qui sera appliquée à la machine est appelée méthode indirecte ; celle-ci est consistée à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants statoriques de la machine de commande. Tout ça découle directement des équations III. 13 et III. 15.

Cette méthode va être étudiée et simulée dans la suite de ce chapitre. La méthode indirecte a l'avantage de contrôler les courants statoriques de la machine de commande ce qui permettra de faire une protection de la machine en limitant ces courants ou de rajouter une référence de courant harmonique pour faire fonctionner la machine en filtre actif, mais elle est plus complexe à mettre en œuvre [10].

III.3 Commande indirecte de la MADASB:

Elle se base sur les équations régissant le fonctionnement de la machine défini dans la modélisation au paragraphe (II.8.1) ; tout en gardant les mêmes hypothèses. En combinant les différentes équations des flux, des tensions rotoriques, des courants et des puissances, nous pouvons exprimer les tensions en fonction des puissances. On reproduit ainsi le schéma bloc du système en sens inverse en aboutissant à un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans l'autre sens et qui contient tous les éléments du schéma bloc de la MADASB. On

part donc de la puissance statorique en fonction des courants statoriques de la machine de commande et des expressions des tensions statoriques en fonction des courants statoriques de la machine de commande et on trouve :

$$v_{sc}^q = R_s \cdot i_{sc}^q + \frac{d}{dt} (\delta_3 \cdot i_{sc}^q + \delta_2 \cdot \psi_r^q) + \omega_p \cdot g (\delta_3 \cdot i_{sc}^d + \delta_2 \cdot \psi_r^d - \delta_1 \cdot \psi_{sp}^d)$$

$$v_{sc}^d = R_s \cdot i_{sc}^d + \frac{d}{dt} (\delta_3 \cdot i_{sc}^d + \delta_2 \cdot \psi_r^d - \delta_1 \cdot \psi_{sp}^d) - \omega_p \cdot g (\delta_3 \cdot i_{sc}^q + \delta_2 \cdot \psi_r^q)$$

III.3.1 Commande sans boucle de puissance :

Dans le souci de garantir une bonne stabilité du système nous introduisons une boucle de régulation des courants statorique dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la machine. On établit ainsi le système de régulation de la

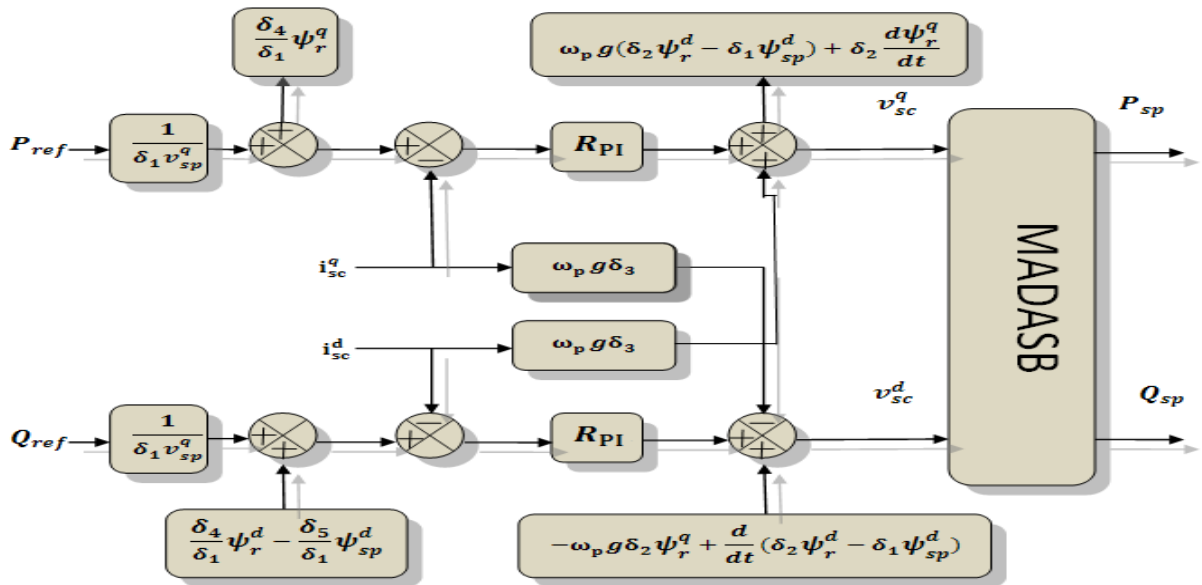


Figure III. 4: Schéma bloc de la commande indirecte sans boucle de puissance.

III.3.2 Commande avec boucle de puissance :

Dans le but d'améliorer la commande précédente, nous allons introduire une boucle de régulation supplémentaire au niveau des puissances afin éliminer l'erreur statique tout en préservant la dynamique du système. Nous aboutissons au schéma bloc présenté en figure III.5. sur lequel on distingue bien les deux boucles de régulation pour chaque axe, l'une contrôlant le courant et l'autre la puissance. Ce type de régulation donne une dynamique satisfaisante et une erreur statique nulle.

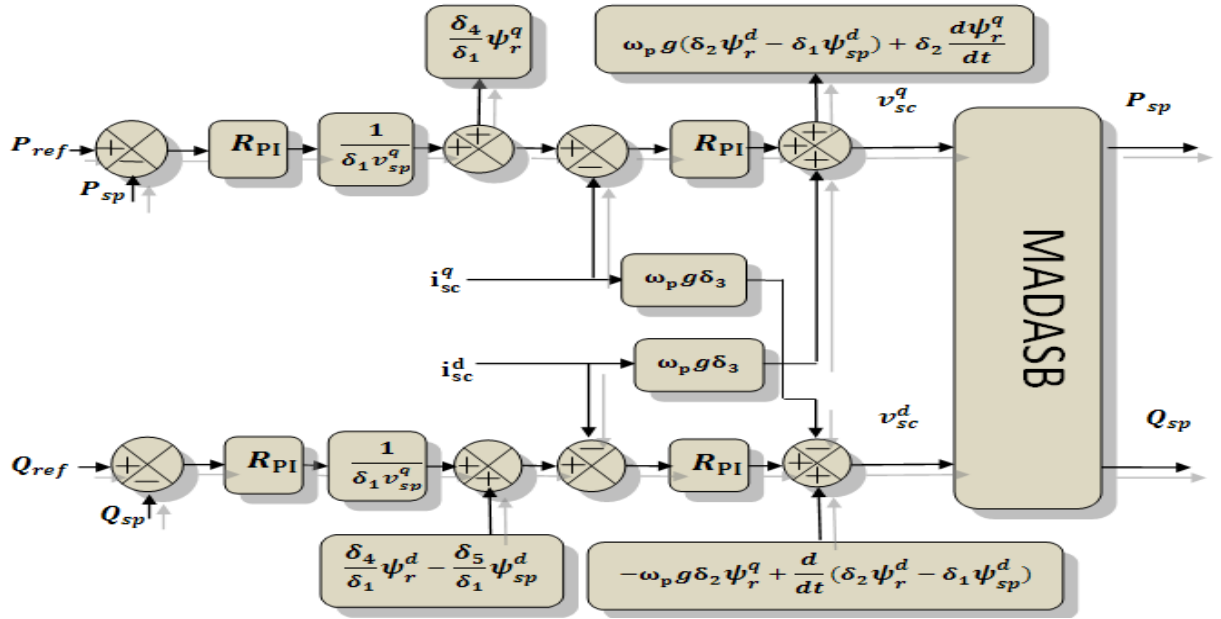


Figure III. 5: Schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance

Cette commande est donc plus performante que la commande directe qui présente plus de perturbations entre les deux puissances. La commande indirecte avec bouclage des puissances nécessite six capteurs de courant, trois pour contrôler les courants statoriques de la machine de commande et trois associés à trois capteurs de tension pour mesurer les puissances statoriques. Ces puissances seront aussi utilisées pour le contrôle général de l'éolienne afin de déterminer les références de puissance.

III.4 Synthèse de la régulation PI:

Le régulateur Proportionnel Intégral (PI), utilisé pour commander la cascade de deux MADA en génératrice, est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables. C'est pour cela qu'il a retenu notre attention pour une étude globale de système de génération éolien.

La figure III.6 montre une partie de notre système bouclé et corrigé par un régulateur PI dont la fonction de transfert est de la forme $K_p + \frac{K_i}{p}$, correspondant aux deux régulateurs utilisés dans la figure III.4

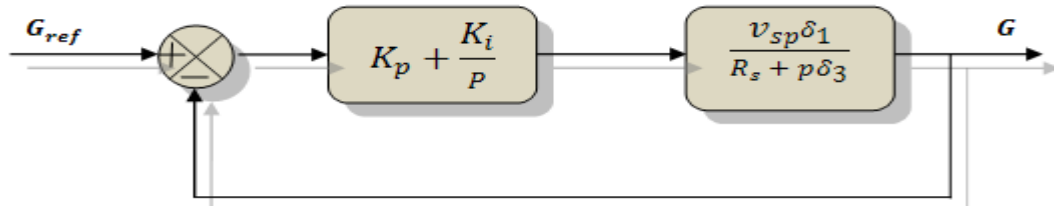


Figure III. 6: Système régulé par un PI.

La Fonction de Transfert en Boucle Ouverte (FTBO) avec les régulateurs s'écrit de la manière suivante:

$$FTBO = \frac{p + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{p}{K_p}} \cdot \frac{\frac{v_{sp} \delta_1}{\delta_3}}{p + \frac{R_s}{\delta_3}}$$

Nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert. Ceci nous conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_s}{\delta_3}$$

Notons toutefois ici que la compensation des pôles n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision car les gains des correcteurs dépendent de ces paramètres. Si tel n'est pas le cas, la compensation est moins performante.

Si on effectue la compensation, on obtient la FTBO suivante :

$$FTBO = \frac{K_p \frac{v_{sp} \delta_1}{\delta_3}}{p}$$

Cela nous donne en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_r p} \quad \text{avec} \quad \tau_r = \frac{1}{K_p} \cdot \frac{\delta_3}{v_{sp} \delta_1}$$

Avec τ_r le temps de réponse du système que l'on se fixe de l'ordre de 10ms, correspondant à une valeur suffisamment rapide pour l'utilisation faite sur l'éolienne où les variations de vent sont peu rapides et les constantes de temps mécanique sont importantes.

S'imposer une valeur plus faible n'améliorerait probablement pas les performances de l'ensemble, mais risquerait d'engendrer des perturbations lors des régimes transitoires en provoquant des dépassements et des instabilités indésirables.

On peut désormais exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

$$K_p = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{\delta_3}{v_{sp} \delta_1} \text{ et } K_i = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{R_s}{v_{sp} \delta_1}$$

Nous avons utilisé ici la méthode de compensation des pôles pour sa rapidité ; il est évident qu'elle n'est pas la seule méthode valable pour la synthèse du régulateur PI.

III.5 Schéma complet de simulation :

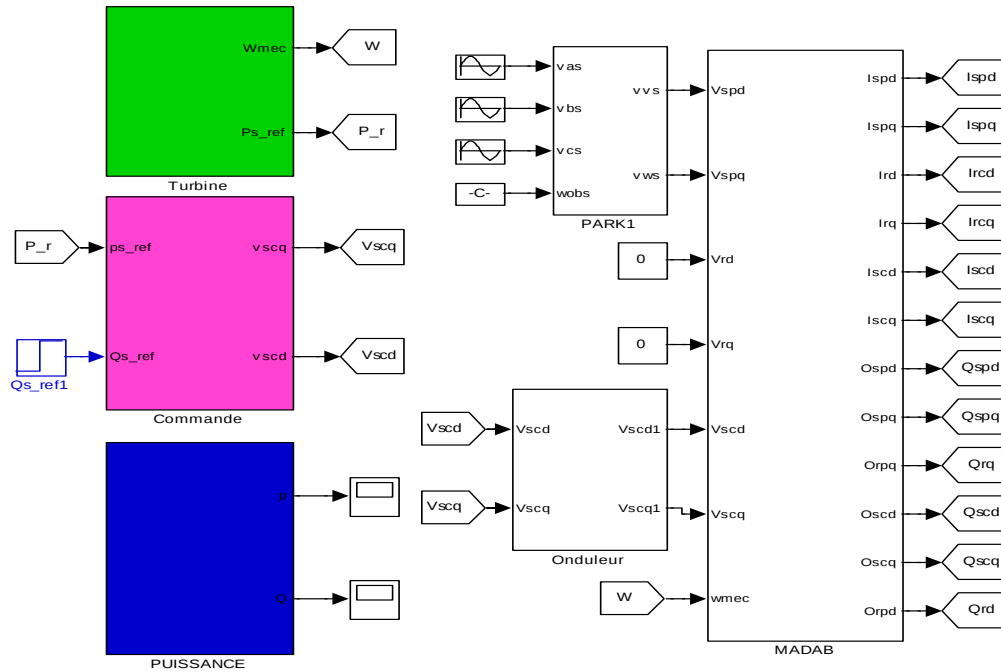


Figure. III.7: Modèle de la chaîne éolienne avec la Command en MATLAB/SIMULINK

III.6 Résultats de simulations :

La modélisation de la machine, de la partie mécanique et de la commande indirecte que nous avons proposé a été implantée dans l'environnement MATLAB-Simulink afin d'effectuer des tests de la régulation.

Les résultats de simulation présentés sur les figures ci-dessous, nous permettent de présenter les performances de la conduite de la cascade de deux MADA alimentée par un onduleur à deux niveaux commandée par la stratégie triangulo-sinusoïdal, Dans ce qui suit,

nous avons utilisé la technique MLI avec la fréquence de la porteuse (dents de scie) choisie entre 500Hz et 2 KHz.

A. Profil du vent :

La figure (III. 8) présente le profil du vent supposé et appliqué à la turbine éolienne.

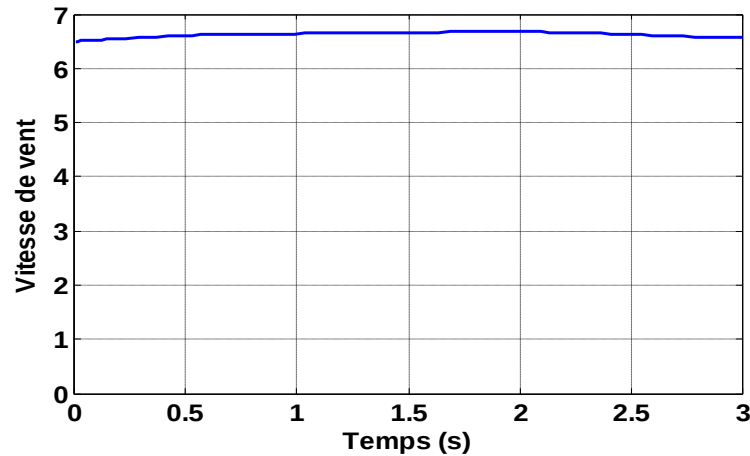


Figure III. 8: Profil du vent appliqué

B. Coefficient de puissance:

A travers l'évolution du coefficient de puissance (Figures. III. 9), nous pouvons remarquer que celui-ci est dans le voisinage de sa valeur maximale théorique.

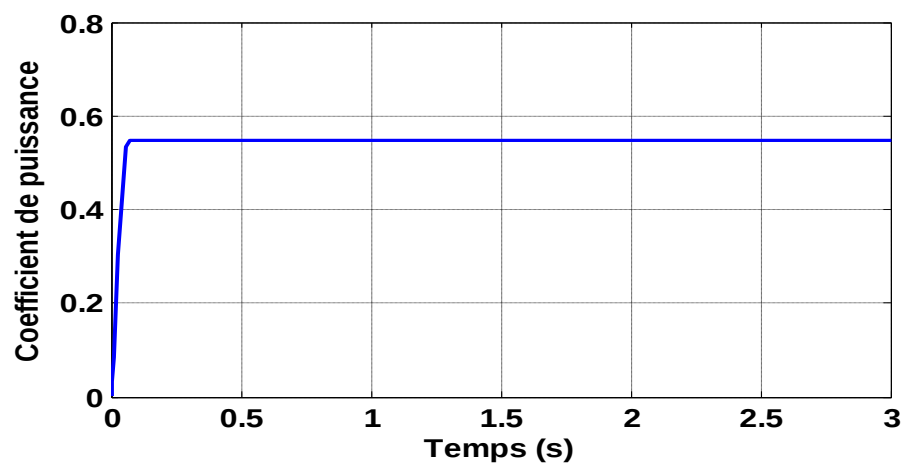


Figure III. 9: Coefficient de puissance de la turbine

C. Vitesse de rotation de la MADASB:

En ce qui concerne la vitesse de rotation de la machine, il est constaté que celle-ci reste dans des proportions acceptables (Figures III.10). Car, mis à part la période de démarrage.

Les variations de la vitesse de la génératrice sont adaptées à la variation de la vitesse du vent, Figures (III. 8).

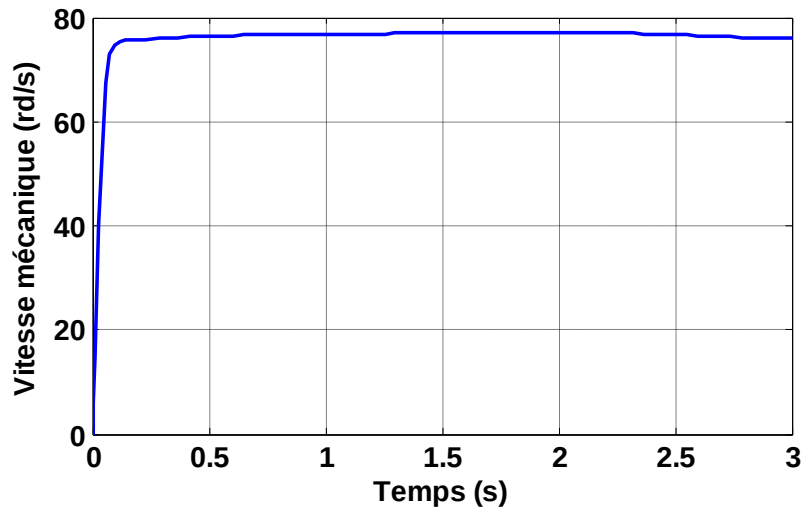


Figure III. 10: Vitesse de rotor (rd/s)

III.6.1 Indirect sans boucle de puissance:

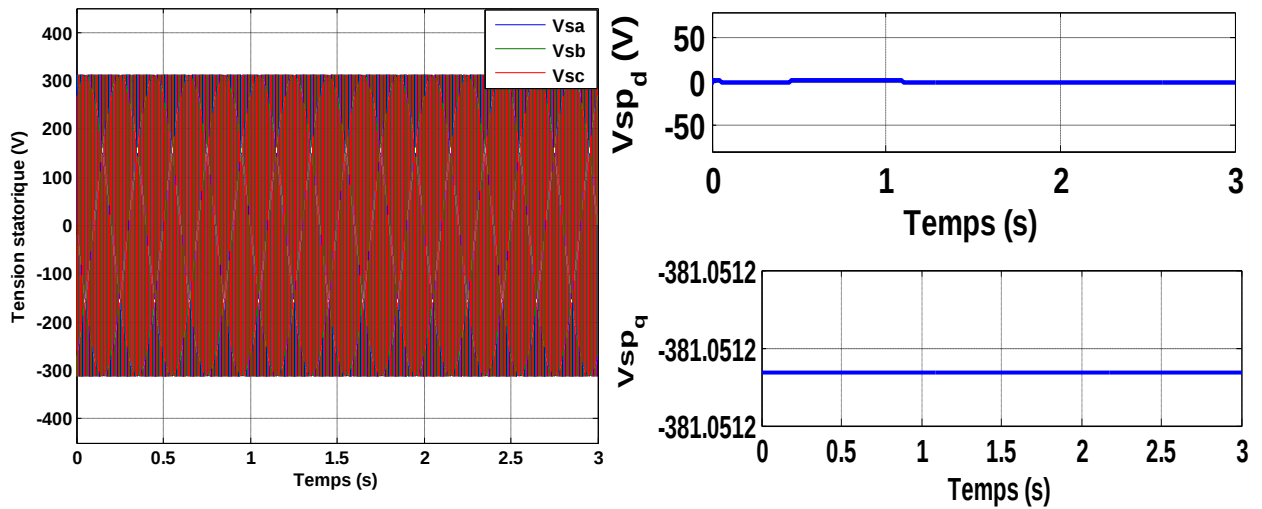


Figure III. 11: Tension statorique de la machine de puissance.

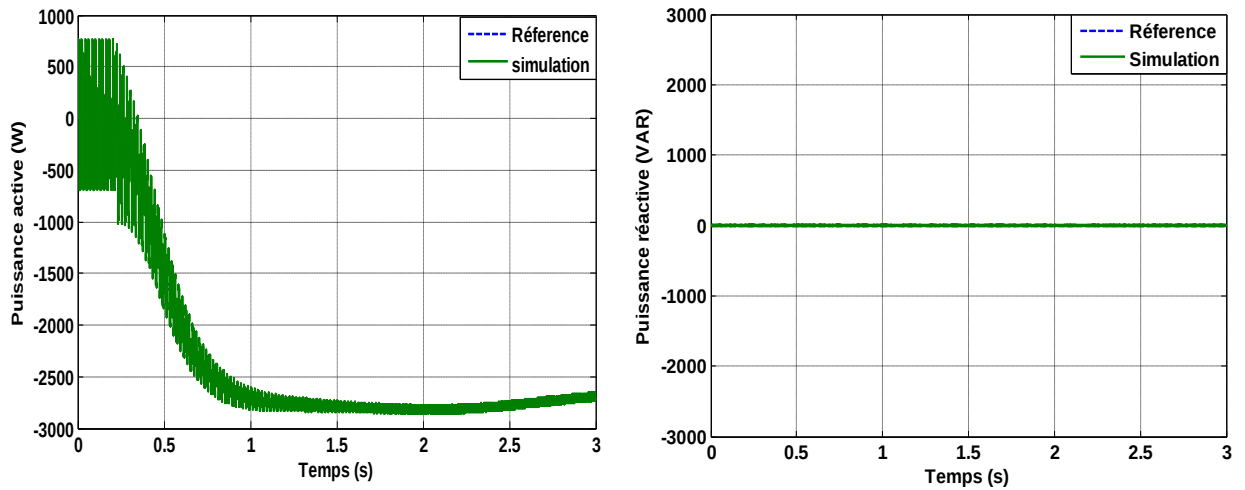
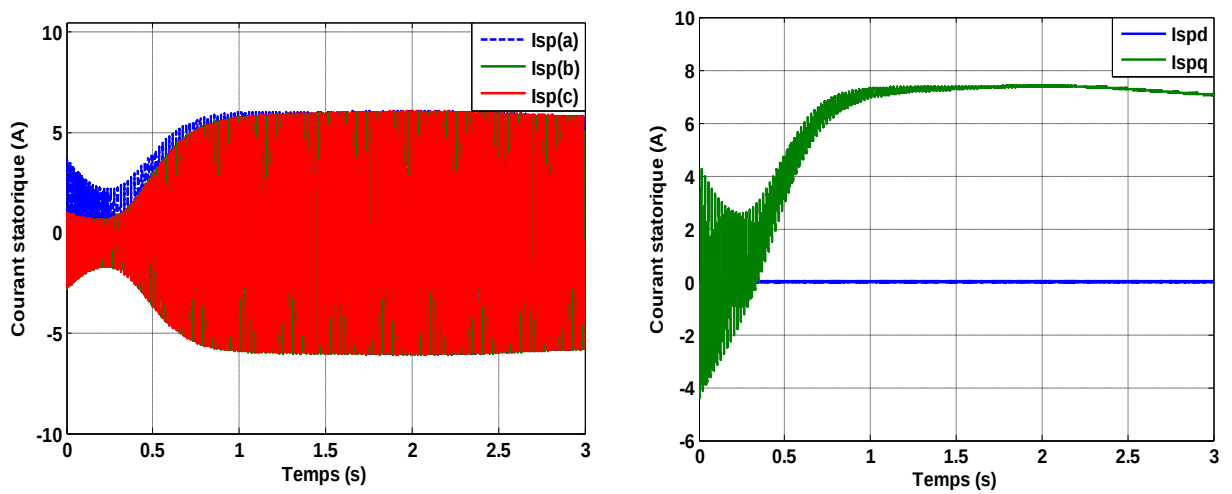
Figure III. 12: Puissance active et réactive avec sa référence (d,q)

Figure III. 13: Courant statorique de la machine de puissance.

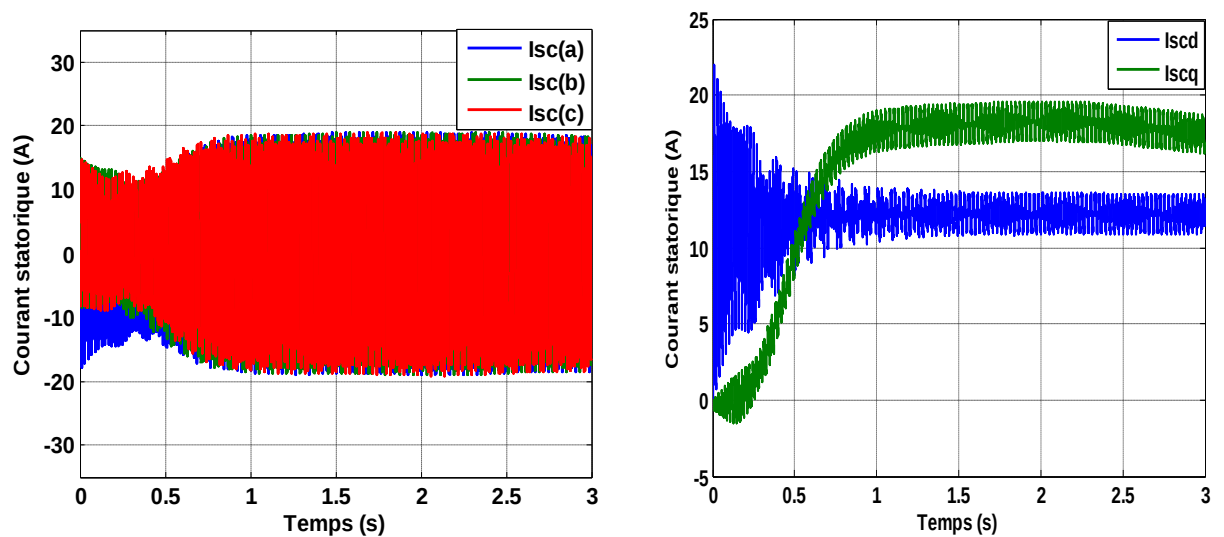


Figure III. 14: Courant statorique de la machine de commande.

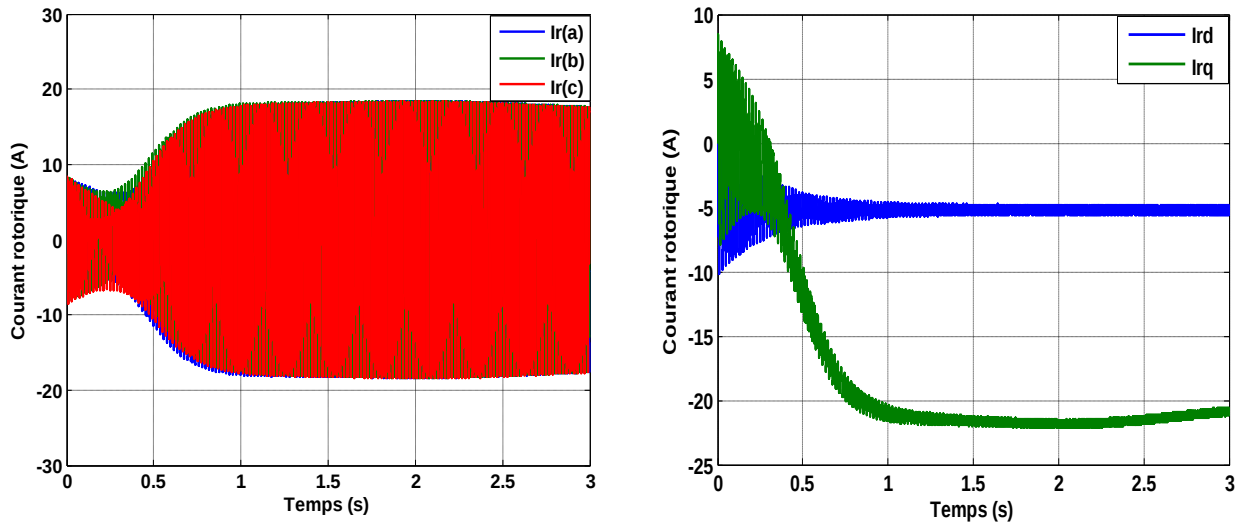


Figure III. 15: Courant rotorique de MADASB.

III.6.2 Indirect avec boucle de puissance:

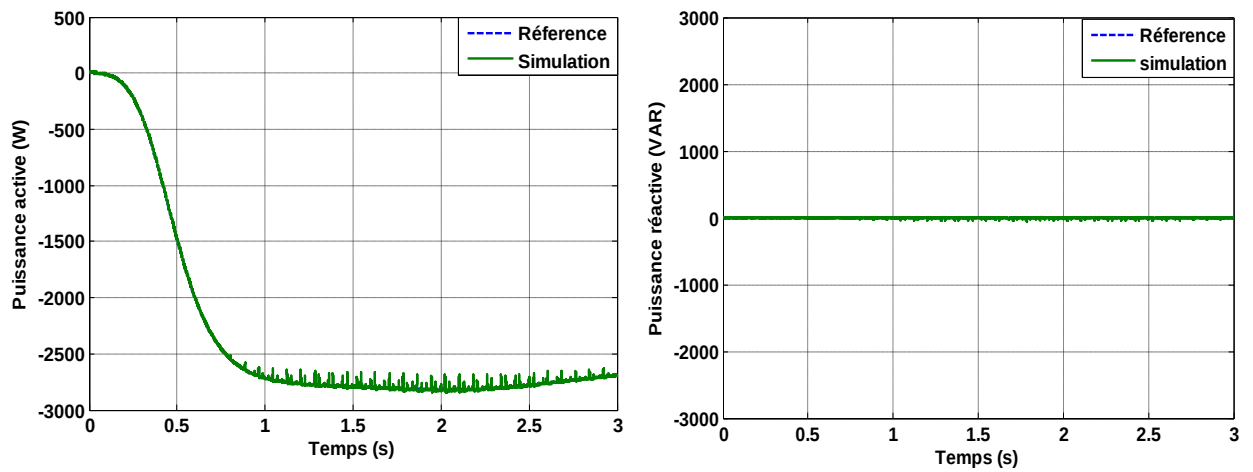
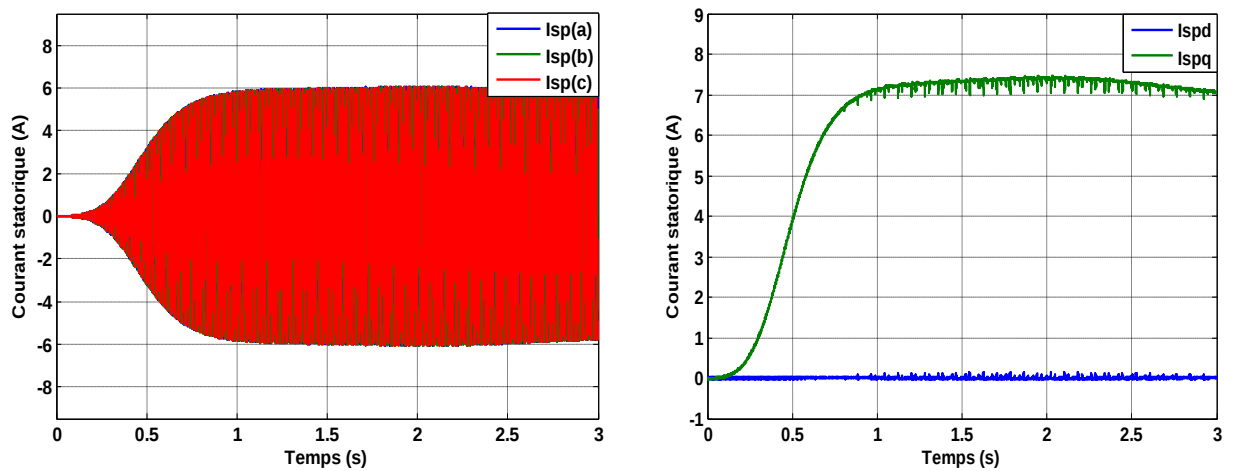
Figure III. 16: Puissance active et réactive avec sa référence (d,q)

Figure III. 17: Courant statorique de la machine de puissance.

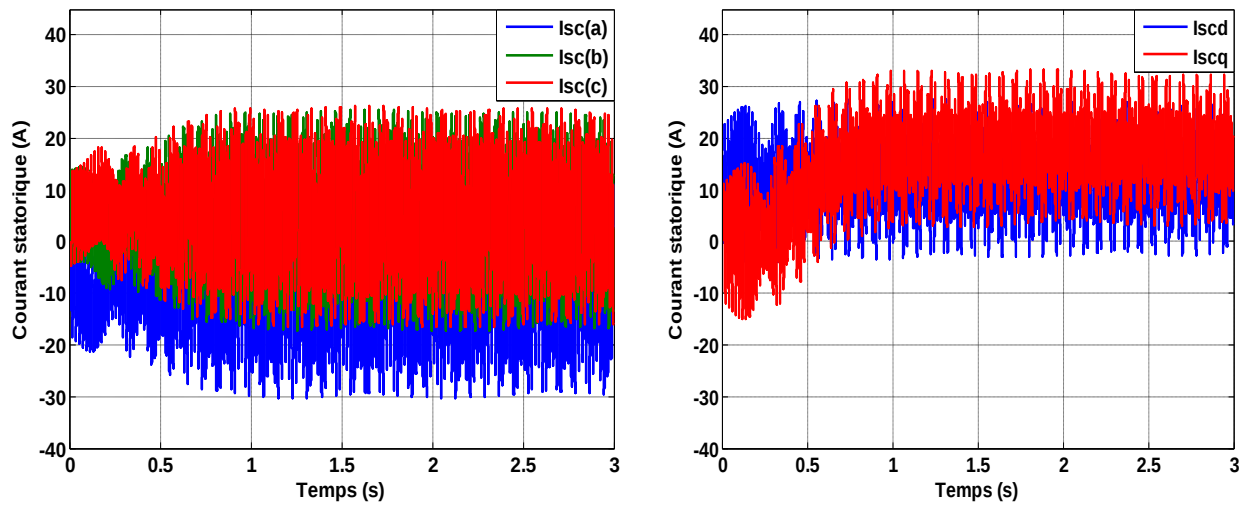


Figure III. 18: Courant statorique de la machine de commande

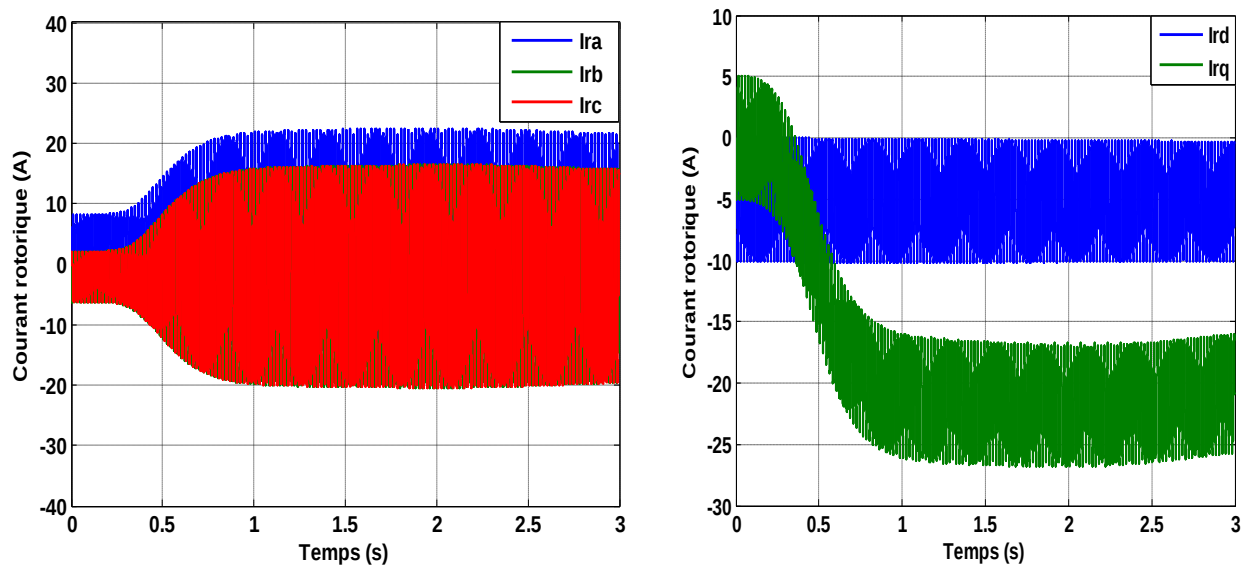


Figure III. 19: Courant rotorique de MADASB.

III.7 Interprétations des Résultats :

Les résultats obtenus par la méthode indirect en boucle ouverte et en boucle fermée, qui sont illustrés dans les figures (III.11, III.15), sont bien régulés en régime permanent, et les oscillations de forte amplitude en régime transitoire sont réduites.

- Les figures (III.13 et III.17) montrent respectivement le courant statorique de la machine de commande en boucle ouverte et en boucle fermée. On constate que les courants statorique i_{sc}^q, i_{sc}^d , suivent leur références sans dépassement avec faibles oscillations en régime transitoire.
- Les résultats obtenus montrent bien les grandes performances de réglage par des régulateurs PI, ils présentent un bon découplage au réglage des puissances active et réactive et au niveau du stator ou d'autre manier celle du flux et du couple, ainsi qu'un meilleur suivi des courants statoriques de la commande par rapport à leurs références, dont la puissance active et réactive (P_s, Q_s) sont proportionnelles à la composante en quadrature et directe du courant statorique de la commande ($i_{sc}^q, et i_{sc}^d$) respectivement.

Finalement, on conclut que la commande indirect en boucle fermée donne les bons résultats.

III.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié et appliqué la commande vectorielle de la MADASB pour un fonctionnement en générateur pour une vitesse de rotation quelconque, comprise dans une plage de $\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme.

A partir de la simulation dans des conditions proches de celles d'un système éolien réel, on a constaté qu'effectivement la technique d'orientation du flux statorique permet de découpler le flux et les puissances de sorte que la composante directe du courant statorique de la machine de commande contrôle la puissance active, et la composante en quadrature contrôle la puissance réactive. Ceci nous permet d'obtenir des performances dynamiques élevées similaires à celle de la MCC.

Conclusion générale: [31]

Le but de ce mémoire, consiste à étudier la machine asynchrone double alimentation sans balais à fin de l'exploiter dans des applications à vitesse variable. Pour cela on a traité tous les aspects qui englobent le développement d'un tel système, sa modélisation, l'analyse de son fonctionnement et sa commande.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté un état de l'ait sur l'énergie éolienne puis nous avons fait une classification des machines électriques selon un critère de fabrication sans contacts glissants (bague balais).

Dans le deuxième chapitre, nous avons décrit les trois parties essentielles du système de conversion éolienne. La première, qui représente la partie mécanique contient la turbine, le multiplicateur et l'arbre. Nous avons ensuite établi les modèles de ces derniers. Et après nous avons construit un dispositif de commande de l'ensemble afin de faire fonctionner l'éolienne de manière à extraire le maximum de puissance de l'énergie du vent. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation, fonctionnant en génératrice. En le basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi dont la complexité a été réduite. Nous avons constaté que le modèle de la machine asynchrone à double alimentation est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous a permis de le simplifier. Ainsi, la modélisation et les résultats de simulation de la MADASB ont été présentés et discutés.

Dans la dernière partie, nous avons présenté le modèle de l'onduleur et son principe de fonctionnement, de même que la technique de commande MLI.

Dans le dernier chapitre, nous avons étudié et appliqué la commande vectorielle de la MADASB pour un fonctionnement en générateur pour une vitesse de rotation quelconque, comprise dans une plage de $\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme

A partir de la simulation dans des conditions proches de celles d'un système éolien réel, on a constaté qu'effectivement la technique d'orientation du flux statorique permet de découpler le flux et les puissances de sorte que la composante directe du courant statorique de la machine de commande contrôle la puissance active, et la composante en quadrature contrôle la puissance réactive. Ceci nous permet d'obtenir des performances dynamiques élevées similaires à celle de la MCC.

Conclusion générale

Des résultats de simulation ont été présentés dans le cas de l'association de la MADASB à un système de conversion d'énergie et d'un convertisseur d'électronique de puissance.

Difficultés rencontrées

Au cours de notre travail nous n'avons pas échappés à quelques problèmes :
Le choix des paramètres du correcteur de type proportionnel-intégral à été fait par plusieurs essais, ceci réside dans le fait de chercher les paramètres qui donnent le réglage le plus optimal, tout en simulant pour avoir réponse plus rapide sans qu'il y ait de dépassement.

Suggestions et perspectives

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

- Etablissement d'un modèle de la MADA prenant en compte la résistance de phase statorique et la saturation magnétique.
- Utilisation d'autres types de régulateurs plus performants dans la commande du dispositif.
- Utilisation d'un algorithme de maximisation de la puissance captée par différentes techniques : Logique floue, réseau de neurones.
- L'étude des perturbations de la production de l'énergie éolienne vis à vis des déséquilibres du réseau.

- [1]. Rapport, 'Le Baromètre Eolien; Systèmes Solaires, Journal des Energies Renouvelables', N°183, Union Européen, Février 2008.
- [2]. F. Poitiers, 'Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'Utilisation de l'Energie Eolienne', Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, Décembre 2003.
- [3]. G. Dreyfus, J. Martinez, M. Samuelides, M.B. Gordon, F. Badran et S. Thiria, "Réseaux de Neurones: Méthodologie et Applications', Editions Eyrolles, 2002.
- [4]. F. MERRAHI, «Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation -Application à l'énergie éolienne- » Thèse de Magister, ENP d'Alger, 2007.
- [5]. S. EL Aimani, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de doctorat « Ecole Centrale de Lille », 2004.
- [6].F. PITIERS. « Etude Et Commande De Génératrices Asynchrones Pour L'utilisation De L'énergie Eolienne » Thèse de doctorat, Université de NANTES, 2003.
- [7].H.Camblong, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers « Centre de Bordeaux »,2003».
- [8]. B.MLTON, G.ROBIN, O.GERGAUD, H.BEN AHMED. « Le Génie électrique dans le vent, état de l'art et recherches dans le domaine de la génération éolienne» JCGE'03. Saint Nazaire,2003.
- [9]. CH. BELFEDAL « Commande d'une machine asynchrone à double Alimentation en vue de son application dans le domaine de l'énergie Eolienne Étude et expérimentation » Thèse de doctorat, Université d'Oran, 2007.
- [10]. A. BOYETTE « Contrôle commande d'un générateur asynchrone à double Alimentation avec système de stockage pour la production éolienne » Thèse de Doctorat, GREE de Nancy, 2006.
- [11]. F. J. POZA LOBO « Modélisation, conception et commande d'une machine asynchrone sans balais doublement alimentée pour la génération à vitesse variable » These de Doctorant. Ins Nat. Poly Grenoble.2003.

- [12]. M. LOPEZ « contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée » Thèse de Doctorat , Ecole Doctorale STITS, 2006.
- [13]. A. PETERSSON "analysis, modeling and control of doubly fed induction generators for wind turbines" PHD, University of CHALMERS, 2003.
- [14]. A. MIRECKI «Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat, INPT de France, 2005.
- [15]. J. Poza, E. Oyarbide, D. Roye and M. Rodriguez "Unified reference frame dq model of the brushless doubly fed machine" IEE Proc. Elec. Powe. Appl, Vol. 153, No. Sem 2006. P 726-734.
- [16]. B.Hopfensperger, D.J.Atkinson and R.A.Lakin "Combined magnetising flux Vol. oriented control of the cascaded doubly-fed induction machine " IEE Proc, Elec Appl, 148, No, 4 July 2001, p 354-362.
- [17]. P.E. VIDAL. « Commande non linéaire d'une machine asynchrone a Double alimentation » Thèse de doctorat, INP de TOULOUSE, 2004.
- [18]. F. Runcos, R. Carlson, N. Sadowski, P. Kuo-Peng, H. Voltolini "performance and Vibration Analysis of a 75 kW Brushless Double Fed Induction Generator Prototype" IAS, Vol. 5, 2006, P 2395-2402.
- [19]. A. ABDELLI, «Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive», Thèses de Doctorat, octobre 2007.
- [20]. Y. A. BENCHERIF. «Modélisation et commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la production de l'énergie éolienne», Projet de Fin d'Etude, Ecole Nationale Polytechnique, Département du Génie Electrique, El Harrach, Alger, 2008.
- [21]. N. LAVERDURE, «Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires», Thèses de Doctorat, INPG, Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, 2005.
- [22]. 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 » Thèse de Magister, Université de BATNA, 2004.

- [23]. A. DAVIGNY. «Participation aux Services Système de Fermes d'éoliennes à Vitesse Variable Intégrant du Stockage Inertiel d'énergie», Thèse de Doctorat, Département de formation doctorale en génie électrique, Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille, 2007.
- [24]. G. Nacer. « Réglade des puissances active et réactive de la génératrice asynchrone double alimentation par des régulateur PIS » DIPLOME D'INGENIEUR D'ETAT EN GÉNIE ELECTROTECHNIQUE, Université de M'SILA, 2005.
- [25]. N. Patin « analyse d'architecture, modélisation et commande de générateurs pour réseaux autonomes et puissants » These de doctorat, Uiv Cachan. 2006.
- [26]. N. Goléa, « Commande vectorielle » Cours, Université de Batna, 2004.
- [27]. G. A. Capolino, H. Hénao et V. T. Nguyen Phuoc, "Méthode de Conception d'une Commande Vectorielle pour Machine à Induction", SEE, Journée d'Etudes, Organisée par le Groupe Nord, le Club 13, Lille, France, Décembre 1992.
- [28]. L. Baghli, "Contribution à la Commande de la Machine Asynchrone, Utilisation de Logique Floue, des Réseaux de Neurones et des Algorithmes Génétiques", Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université Henri Poincaré, Nancy 1, France, 1999.
- [29]. M. ABBAS, M. MECHENTEL « Modélisation et Commande d'une MADA Alimentée Par une Cascade à Trois Niveaux Application à l'Energie Eolienne » Thèse D'Ingénieur d'Etat, ENP, El-Harrach, Algérie, 2006.
- [30]. Salloum G., " Contribution a la commande robuste de la machine asynchrone a double alimentation", Thèse de doctorat, I.N.P de Toulouse 2007, France
- [31]. T. Zoheir , " Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade" Thèse de Magister, Université de Setif, 2010.
- [32]. H. Ihssen, "Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur" Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2008.

Annexe

Annexe A :

A.1. Paramètres de la Machine Asynchrone à Double Alimentation

Dans cette annexe on va développer les paramètres de deux MADA qui sont traitées dans le chapitre II:

Paramètres	MADA N°1	MADA N°2
Puissance nominale (kW)	2.65	
Tension simple et complexe (V)	220/380	
Fréquence (Hz)	50	
Nombre de paire de pole	1	3
Vitesse nominale (rpm)	750	
Résistance statorique (Ω)	1.732	1.079
Résistance rotorique (Ω)	0.473	
Inductance cyclique statorique (mH)	714.8	121.7
Inductance cyclique rotorique (mH)	132.6	
Mutuelle de Park (mH)	242.1	59.8
Moment d'inertie (Kg.m^2)	0.2	
Coefficient de frottement (N.ms/rd)	0.001	

A.2. Paramètres de la turbine éolienne utilisée :

- Nombre de pales = 3.
- Rayon de la surface balayée par les pales : $R = 3\text{m}$.
- Gain du multiplicateur : $G = 5.4$.
- Densité de l'air à 15°C : $\rho = 1.225 \text{ kg.m}^{-3}$

A.3. Constantes mécaniques :

- Moment d'inertie de la turbine = 0.2 kg.m^2 . turbine J
- Coefficient de frottement visqueux : $f = 0.001 \text{ N.m.s/rd}$

Annexe .B : Paramètres des régulateurs

Régulation de la commande PI

- Commande indirecte sans boucle de puissance

$$\begin{cases} K_p = 1.079 \cdot 10^4 (\text{boucle courant}) \\ K_i = 1217 (\text{boucle courant}) \end{cases}$$

- Commande indirecte avec boucle de puissance

$$\begin{cases} K_p = 1079 (\text{boucle courant}) \\ K_i = 121.7 (\text{boucle courant}) \end{cases} \quad \begin{cases} K_p = 107.9 (\text{boucle puissance}) \\ K_i = 12 (\text{boucle puissance}) \end{cases}$$

Résumé

Résumé

Dans le domaine de production de l'énergie électrique à vitesse variable ou constante, il existe une nouvelle solution et originale utilisant une génératrice asynchrone à double alimentation sans balais (MADASB). Le schéma de raccordement typique de cette génératrice consiste à connecter un enroulement est alimenté directement par le réseau et l'autre est alimenté au moyen d'un convertisseur AC/AC.

Pour obtenir des hautes performances et une meilleure maîtrise des puissances active et réactive générées par la MADASB, il faut concevoir une commande robuste et adéquate. Dans notre cas nous nous intéressons au réglage de ces puissances par des régulateurs PIs.

Mots Clés : Génératrice asynchrone à double alimentation sans balais, Réglage par Régulateurs PIs, puissance active et réactive.