



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان

Université Aboubekr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

Filière : Electrotechnique
Spécialité: commande des machines

Par :
BRAHIMI OUSSAMA
MECHERNENE MOHAMMED WALID

Sujet

**Commandes d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA)
utilisée dans une chaine éolienne**

Mémoire soutenu publiquement le 06 /07/2017 devant le Jury composée de :

Président	M.YACOUBI BOUMEDIENE	MAA	Univ. Tlemcen
Encadreur	M. CHABANE MOHAMED	MAA	Univ. Tlemcen
Examineur	M.BENARIBA HASSAN	MAA	Univ. Tlemcen

Année Universitaire : 2016 – 2017

REMERCIEMENTS

Nous tenons à présenter notre reconnaissance et nos remerciements à notre encadreur, Mr CHABANE Mohamed , pour le temps consacré à la lecture et aux réunions qui ont rythmé les différentes étapes de notre mémoire. Nous le remercions aussi pour sa disponibilité à encadrer ce travail à travers ces critiques et ses propositions d'améliorations.

Nous remercions également Mr Yadoubi Boumediene , d'avoir accepté de présider le jury de notre projet de fin d'études.

Nous remercions Mr Benariba Hassan d'avoir bien voulu examiner notre projet.

Nous adressons notre profonde gratitude à tous les professeurs, en particulier ceux de l'électrotechnique de l'université Abou-Bekr Belkaid.

Enfin, un grand merci à toutes les personnes qui ont contribué à réaliser ce mémoire

Résumé,

Mots clés: Le travail réalisé dans ce mémoire concerne l'étude et la commande du système éolien à base d'une machine asynchrone à double alimentation entraînée par une turbine à calage pilotée à travers les variables rotoriques par deux convertisseurs bidirectionnels. On a commencé, dans une première partie, à présenter un état de l'art sur l'énergie éolienne. On a ensuite donné une modélisation mécanique de l'éolienne en précisant les systèmes de conversion utilisés (les types des génératrices, les configurations les plus utilisés, etc...). On a par la suite modélisé la chaîne éolienne qui a été adoptée à partir de l'étude théorique. Dans la troisième et la quatrième partie, on a présenté et développé les commandes nécessaires pour contrôler les puissances active et réactive produites par ce système. Enfin, on s'est intéressé à l'étude comparative entre les commandes proposées. Les résultats de simulation obtenus ont permis l'évaluation des performances à travers l'application de ces commandes sur la meilleure architecture de la chaîne utilisée pour obtenir un rendement élevé et une qualité de production optimale dans ce domaine.

Mots clés:

Energie éolienne - Turbine - MADA - Convertisseurs bidirectionnels - Modélisation - Commande – MPPT - Vectorielle - Backstepping.

Abstract

The aim of the work presented in this thesis is the study and the control of a wind power system based on a doubly-fed induction generator driven by variable pitch turbine blades and controlled by the rotor variables using two bidirectional converters. In the first part we present the state of the art of wind energy and the used conversion systems (types of generators, most commonly used configurations, etc...) and then the overall wind system adopted after theoretical study is modeled. In the third and the fourth parts it is presented and developed the necessary control algorithms to control the active and reactive powers produced by the studied system. Finally, comparison study of the performances of the proposed control algorithms is carried out. The obtained simulation results have allowed the performance evaluation of the best implemented control technique to achieve high efficiency and optimum quality energy production in wind energy generation based system.

Key words:

Wind energy - Turbine - DFIG - bidirectional converter - Modelling - Control -MPPT- Vector

ملخص

العمل المنجز في هذه الأطروحة هو الدراسة والتحكم في نظام طاقة الرياح الذي يعتمد على مولد لامتماز من مزدوج التغذية مقاد بواسطة حنفة ذات الشفرة المتغيرة و المتحكم فيه من خلال متغيرات الدوار من قبل محولين ثنائي الاتجاه. في الجزء الأول قدمنا الحالة الوصفية للطاقة الهوائية و النظم المستخدمة في تحويل هذه الطاقة (أنواع المولدات، والتشكيلات الأكثر شيوعا.. الخ). في الجزء التالي قدمنا نمذجة لسلسلة الرياح التي تم اختيارها من الدراسة النظرية. في الجزئين الثالث والرابع قدمنا أنواع خطط التحكم اللازمة للتحكم في الطاقة الفعالة و الطاقة الارتكاسية اللتان تنتجا من هذا النظام. في الأخير قدمنا دراسة مقارنة لكل خطط التحكم المقترحة. نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها سمحت لنا بتقييم أداء هذه الخطط على أفضل تصميم للسلسلة التي تم استخدامها لتحقيق كفاءة عالية وجودة إنتاج الأمثل في هذا المجال.

كلمات مفتاحية:

طاقة هوائية - ناصورة - مكنة لا تزامنية ثنائية التغذية - محول ثنائية الاتجاه - محاكاة - تحكم - شعاعي - بالانزلاق - بالمنطق الغامض - بالرجوع المرحلي.

SOMMAIRE

Remerciements.....	
Résumé.....	
Sommaire.....	
Liste des figures.....	
Notations et symboles	
Introduction générale.....	1

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES EOLIENNES

I.1 HISTORIQUE	7
I.2 PRINCIPE D'UNE EOLIENNE.....	
I.3 TYPES D'EOLIENNE.....	
I.3.1 EOLINNE A AXE VERTICAL.....	
A.LE ROTOR DE SAVONIUS	
B.LE ROTOR DE DARRIEUS.....	
I.3.2 EOLINNE A AXE HORIZONTAL.....	
A.AMONT.....	
B.AVAL.....	
I.4 SITUATION DE L'EOLIEN EN ALGERIE.....	
I.5 DESCRIPTION D'UNE EOLINNE.....	
I.6 CONCLUSION	

CHAPITRE II

STRUCTURE ET CONVERSION DE L'ENERGIE

II.1 INTRODUCTION	20
II.2 DESCRIPTION D'UNE EOLIENNE.....	20
II.3 EXTRACTION DE L'ENERGIE APPORTEE PAR LE VENT.....	23
II.3.1 ENERGIE CINETIQUE D'UNE COLONNE D'AIR - PUISSANCE DISPONIBLE.....	23
II.3.2 PUISSANCE DE VENT RECUPERABLE – LIMITE DE BETZ.....	24
II.4 REGULATION DE PUISSANCE.....	27
II.4.1 CONTROLE A CALAGE VARIABLE DE PALES (PITCH CONTROL).....	27
II.4.2 REGULATION PASSIVE PAR DECROCHAGE AERODYNAMIQUE (STALL CONTROL).....	29
II.4.3 REGULATION ACTIVE PAR DECROCHAGE AERODYNAMIQUE.....	30
II.5 TYPES DE GENERATEURS ELECTRIQUES.....	31
II. 5. 1 GENERATRICE SYNCHRONE.....	32
II. 5. 2 GENERATRICE ASYNCHRONE.....	34
II.5.2.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE GENERATRICE ASYNCHRONE.....	38
II.5.2.2 FONCTIONNEMENT D'UN MOTEUR ASYNCHRONE.....	41
II.6 GENERATEUR A BASE DE MACHINE ASYNCHRONE A DOUBL ALIMENTATION (MADA) - SYSTEME EOLIEN A VITESSE VARIABLE.....	43
II-6.1 INTRODUCTION.....	44
II.6.2 PHASES DE FONCTIONNEMENT D'UNE EOLIENNE A BASE DE MADA.....	45
II.7 CONCLUSION.....	48

CHAPITRE III

MODELISATION ELECTROMECHANIQUE D'UNE CHAÎNE EOLIENNE A BASE DE MADA

III.1 INTRODUCTION GENERALE.....	50
III.2 MODELISATION MECANIQUE DE L'EOLIENNE.....	52
III.2.1 MODELISATION DU CONVERTISSEUR EOLIENNE.....	52
III.2.1.1 MODILISATION DE LA TURBINE.....	54
III.2.1.2 MODILISATION DE MULTIPLICATEUR.....	54
III.2.1.3 MODILISATION DE L'ARBRE.....	55
III.2.2 EXTRACION DU MAXIMUM DE LA PUISSANCE.....	56
III.2.3 RESULTATS OBTENUS.....	58
III.3 MODELISATION ELECTRIQUE DE LA MADA.....	60
III.3.1 EQUATIONS TRIPHASEES DE LA MACHINE.....	61
III.3.1.1 LOI DES MAILLES MATRICIELLE.....	61
III.3.1.2 EQUATION DES FLUX.....	62
III.3.2 MODELISTION ELECTRIQUE EN REGIME QUELQUONQUE	64
III.3.3 PASSAGE DU TRIPHASEE AU BIPHASE: TRANSFORMATION DU PARK...67	
III.3.4 EQUATION ELECTRIQUE DE LA GADA DANS LE REPERE (dq).....	70
III.3.4.1 CHOIX DE REFERENTIEL.....	70
III.3.4.2 APPLICATION DE TRANSFORMATION DE PARKLE REPERE (dq).....	71
III.3.4.3 EQUATION ELECTRIQUE DE LA GADA DANS LE REPERE (dq)	71
III.5.3 PUISSANCE ACTIVE ET PUISSANCE REACTIVE.....	73
III.4 MODELISATION DE L'ONDULEUR.....	74
III.4.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEM.NT.....	74
III.4.2 COMMANDE PAR MODULATION DE LARGEUR D'IMPULTION(MLI).....	77
III.5 CONCLUSION.....	80

CHAPITRE IV

COMMANDE VECTORIELLE ET COMMANDE BACKSTEPPING DE LA MADA

IV.1 COMMANDE VECTORIELLE DE LA GADA	82
IV.1.1 PRINCIPE DE LA COMMANDE.....	82
IV.1.2 COMMANDE DE PUISSANCE.....	84
IV.1.3 CONTROLE INDEPENDANT DES PUISSANCE ACTIVE ET REACTIVE PAR LA COMMANDE DIRECTE.....	86
IV.1.3.1 SYNTHÈSE DE REGULATEUR CLASSIQUE UTILISÉE.....	89
IV.1.4 COMMANDE VECTORIELLE DIRECTE AVEC UN SEUL REGULATEUR...	91
IV.1.5 COMMANDE INDIRECTE EN BOUCLE OUVERTE.....	93
IV.2 COMMANDE BACKSTEPPING.....	95
IV.2.1 GÉNÉRALITÉ SUR LA COMMANDE BACKSTEPPING.....	95
IV.2.2 PRINCIPE DE L'APPROCHE BACKSTEPPING.....	97
IV.2.3 APPLICATION BACKSTEPPING POUR LES SYSTÈME D'ORDRE N.....	97
IV.2.4 APPLICATION DE LA COMMANDE PAR BACKSTEPPING A LA MADA...	99
IV.2.4.1 MODÈLE DE LA GÉNÉRATRICE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTATION.....	99
IV.2.4.2 SYNTHÈSE DE LA LOI DE COMMANDE.....	100
IV.3 RESULTAT DE LA SIMULATION DE LA GADA POUR UNE VITESSE FIXE....	102
IV.3.1 RESULTAT DE SIMULATION NUMÉRIQUE DES SYSTÈME POUR UNE VITESSE FIXE PAR LA COMMANDE VECTORIELLE INDIRECTE.....	103
IV.3.2 RESULTAT NUMÉRIQUE POUR UNE VITESSE FIXE PAR LA COMMANDE BACKSTEPPING.....	105
IV.4 COMPARISON ENTRE LES DEUX TECHNIQUE PROPOSÉE.....	107
IV.4.1 COMPARAISON DE LA ROBUSTESSE.....	109
IV.5 CONCLUSION.....	112

Liste des figures

Figure. I.1	Photographie d'un moulin à vent à voile	8
Figure. I.2	Photographie d'un moulin à vent à voile.....	8
Figure. I.3	Moulin à vent (Allemagne du Nord).....	8
Figure. I.4	Eolienne moderne	9
Figure. I.5	Photographie d'une ferme éolienne terrestre.....	10
Figure. I.6	Photographie d'une ferme éolienne offshore.....	10
Figure. I.7	Schéma du rotor de Savonius.....	12
Figure. I.8	Photographie d'une ferme éolienne de Darrieus et schéma du rotor de Darrieus	12
Figure. I.9	Eolienne amont et éolienne aval.....	14
Figure I. 10	Composantes d'une éolienne.....	17
Figure. II.1	Composantes d'une éolienne.....	21
Figure. II.2	schéma d'une éolienne	22
Figure II.3	Représentation d'une colonne d'air.....	24
Figure II.4	Tube de courant sur la turbine d'un aérogénérateur.....	24
Figure. II.5	Variation de C_p en fonction de x	26
Figure. II.6	Variation de l'angle de calage d'une pale.....	28
Figure. II.7	Variation de C_p en fonction de la vitesse relative λ pour différentes valeurs du l'angle β	29
Figure. II.8	conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique.....	32
Figure. II.9	structure d'une éolienne intégrant une machine synchrone	33

Figure. II.10	structure d'une éolienne intégrant une machine asynchrone.....	36
Figure. II.11	représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée	38
Figure. II.12	couple moteur en fonction du glissement.....	40
Figure II.13	Stator bobiné.....	44
Figure II.14	rotor bobiné.....	44
Figure II. 15	Etapes de fonctionnement d'une éolienne à base de MADA.....	47
FIGURE III.1	schéma de l'alimentation de la MADA pour éolienne.....	51
FIGURE III.2	modèle de la chaine éolienne.....	53
FIGURE III.3	modèle mécanique de la turbine + MADA.....	53
FIGURE III.4	schéma bloc du modèle de convertisseur eolienne.....	56
FIGURE III.5	schéma bloc de maximisation de puissance extraite.....	58
FIGURE III.6	profile de vitesse du vent.....	59
FIGURE III.7	vitesse mecanique de l'arbre.....	59
FIGURE III.8	puissance mecanique produite par la turbine.....	59
FIGURE III.9	vitesse de la turbine.....	59
FIGURE III.10	couple électromagnétique de référence.....	59
FIGURE III.11	représentation symbolique de la MADA et détail de la phase statorique.....	62
FIGURE III.12	changement de repère dans une transformation de Park.....	69
FIGURE III.13	modèle de Park de la MADA.....	70
FIGURE III.14	onduleur de tension triphasée à deux niveaux.....	75
FIGURE III.15	principe de la commande MLI.....	78
FIGURE IV.1	schéma commande vectoriel.....	83
FIGURE IV.2	orientation de la tension flux statorique.....	84
FIGURE IV.3	schémas block de la GADA.....	86
FIGURE IV.4	théorie de la commande vectorielle.....	87
FIGURE IV.5	schéma block de système a réguler.....	88
FIGURE IV.6	schémas block d'un régulateur[PI].....	90

FIGURE IV.7	block d'onduleur et commande MLI.....	92
FIGURE IV.8.a	schéma block de la commande vectorielle directe.....	92
FIGURE IV.8.b	schéma block de la commande avec les régulateur PI.....	92
FIGURE IV.9	commande vectorielle directe en boucle ouvert.....	94
FIGURE IV.10	schéma block du control backstepping sur matlab	102
FIGURE IV.11	Puissance active statorique pour la commande vectorielle indirecte en boucle ouverte avec zoom autour de l'instant $t=3s$	104
FIGURE IV.12	Puissance réactive statorique pour la commande vectorielle indirecte en boucle ouverte avec zoom autour de l'instant $t=2s$	104
FIGURE IV.13	Puissance active statorique pour la commande Backstepping	105
FIGURE IV.14	Puissance réactive statorique pour la commande Backstepping.....	106
FIGURE IV.15	simulation des puissance active et reactive dans les deux technique de commande (CV) et (BC).....	108
FIGURE IV.16	puissance réactive statorique pour les deux commandes avec zoom.....	110
FIGURE IV.17	puissance active statorique pour les deux commandes avec zoom.....	111

Notations et symboles

Turbine

dx	longueur de colonne d'aire
V_v	vitesse du vent
ρ	Masse volumique de l'air
m_c	
S	Surface balayée par la turbine
E_{cc}	Énergie cinétique
P_c	Puissance apporté par le vent
C_p	Coefficient de puissance
P_r	Puissance récupérable au niveau de la turbine
D	débit volumique de l'air
F_r	Force de la turbine de l'éolienne
λ	vitesse relative de l'éolienne
R	rayon de la turbine
Ω_t	vitesse de rotation de la turbine
Ω_{opt}	vitesse de rotation optimale
λ_{opt}	vitesse relative optimal
P_{aero}	Puissance aérodynamique

Γ_{aero}	couple aérodynamique
Γ_g	couple issu de multiplicateur
G	gain du multiplicateur
J	Inertie de la turbine
$J_{turbine}$	Inertie de la turbine
Γ_{mec}	Inertie mécanique de la turbine
$\Omega_{mécanique}$	vitesse de rotation de l'arbre de la turbine
Γ_{em}	Couple électromécanique
Γ_{vis}	Couple de frottement visqueux
f	coefficient de frottement visqueux

MADA

MADA	Machine asynchrone a double alimentation
GADA	Génératrice asynchrone a double alimentation
J	Inertie ramené sur l'arbre de la MADA
Ω_{MADA}	La vitesse de rotation de la MADA
f	fréquence de réseaux électrique
f_v	Coefficient de frottement visqueux
Γ_{mec}	Couple mécanique de la turbine
$\Gamma_{em \text{ MADA}}$	Couple électromagnétique de la MADA
θ_e	Angle entre l'axe statorique et l'axe rotorique
φ_{sa}	flux de l'enroulement
θ_m	angle mécanique
$[U_{s \text{ abc}}]$	Vecteur des tensions statorique

$[U_r \text{ abc}]$	Vecteur des tensions rotorique
$[I_s \text{ abc}]$	Vecteur des courants statorique
$[I_r \text{ abc}]$	Vecteur des courants rotorique
$[\Phi_s \text{ abc}]$	vecteur des flux statorique
$[\Phi_r \text{ abc}]$	vecteur des flux rotorique
R_s	Résistance d'un enroulement statorique
R_r	Résistance d'un enroulement rotorique
l_s	Inductance propre d'un enroulement statorique
m_s	Inductance mutuelle entre deux enroulements statoriques
l_r	Inductance propre d'un enroulement rotorique
m_r	Inductance mutuelle entre deux enroulements rotoriques
m_{sr}	maximum de l'inductance mutuelle entre stator-rotor ou rotor-stator
$[P(\theta)]$	Matrice de transformation directe de PARK
$[U_{dq0}]_s [U_{dq0}]_r$	composantes de tension statorique et rotorique dans le repère de PARK
$[I_{dq0}]_s [I_{dq0}]_r$	composantes de courant statorique et rotorique dans le repère de PARK
$[\Phi_{dq0}]_s [\Phi_{dq0}]_r$	composantes de flux statorique et rotorique dans le repère de PARK
U_{ds}	Tension statorique sur l'axe d
U_{qs}	Tension statorique sur l'axe q
U_{os}	Tension statorique sue l'axe o
U_{dr}	Tension rotorique sur l'axe d
U_{qr}	Tension rotorique sur l'axe q
U_{or}	Tension rotorique sue l'axe o

ω_s	Pulsation électrique statorique
g	glissement
ω_r	Pulsation électrique rotorique
L_s, L_r	inductance électrique statorique et rotorique
M	Inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor
σ	coefficient de dispersion Blondel
$[R_s]$	Matrice des résistances statorique
$[R_r]$	Matrice des résistances rotorique
p	nombre de paire de poles

INTRODUCTION GENERALE

De nos jours l'énergie électrique est au cœur de notre société moderne qui ne peut plus s'en passer. Son transport facile et sa transformation en toutes les diverses autres formes d'énergie font d'elle un élément indispensable. Cette énergie qui joue un rôle central dans notre vie est dorénavant présente dans tout ce que nous faisons et aucune autre source d'énergie n'a eu des répercussions plus importantes sur l'économie et sur notre qualité de vie. C'est pour toutes ces raisons que la production de l'énergie électrique est importante et qu'il devient par conséquent impératif de penser à chercher des solutions afin d'accroître la production mais de manière plus propre et plus durable. Des solutions alternatives aux énergies fossiles que sont le charbon, le pétrole et l'uranium sont donc des voies vers lesquelles notre société toute entière doit s'engager. De plus, la consommation d'énergie, qui ne cesse d'augmenter, fait réduire les réserves en énergies fossiles et rapproche l'échéance de leur épuisement.

C'est dans cet objectif que vient s'insérer notre étude qui porte sur une des énergies renouvelables en développement en ce moment qui est l'énergie éolienne.

L'énergie éolienne est devenue un producteur majeure d'énergies renouvelables électriques. Elle est produite par des aérogénérateurs qui captent à travers leurs pales l'énergie cinétique du vent et entraînent elles mêmes un générateur qui produit de l'électricité d'origine renouvelable. Elle ambitionne de fournir à l'horizon 2020 de 14 à 18 % de l'électricité qui sera consommée en Europe.

L'énergie éolienne est l'énergie propre par excellence. Sans rejet ni déchet d'aucune sorte, elle permet avec un bon coefficient de performance d'assurer une bonne indépendance énergétique. Sur terre ou off-shore, les éoliennes démontrent d'excellentes capacités de production et sont une

alternative viable pour les territoires les plus reculés dont l'accès à l'électricité est difficile.

Une grande partie des éoliennes installées de nos jours sont équipées de machines asynchrones à double alimentation (MADA). Cette génératrice permet une production d'électricité à vitesse variable, ceci permet alors de mieux exploiter les ressources éoliennes pour différentes conditions de vent. Ces éoliennes sont aussi équipées d'hélices à angle de calage de pale variable pour s'adapter aux conditions de vent. L'ensemble de l'éolienne est contrôlée de manière à maximiser en permanence la puissance produite en recherchant le point de fonctionnement à puissance maximum communément appelé :MPPT.

Il en découle que la puissance produite par l'éolienne varie énormément tout au long de la journée car, du fait de la commande MPPT, la puissance produite suit la puissance disponible dans le vent et présente donc les mêmes variations que ce dernier. C'est un aspect gênant de la production électrique et il est donc très difficile pour un gestionnaire de réseau de contrôler ses différentes sources d'énergie en ne pouvant compter que sur une énergie éolienne fluctuante et aléatoire. Ainsi nous allons développer la modélisation d'une éolienne en proposant une étude de la partie électrique (MADA et convertisseur statique) mais aussi de la partie mécanique (hélice et contrôle de l'angle des pales) pour étudier la faisabilité et l'intérêt d'y associer une unité de stockage d'énergie permettant à l'ensemble de maintenir constante la puissance fournie au réseau.

De plus, Si l'on arrive à faire en sorte que les éoliennes puissent fournir des services systèmes au réseau, tels que, la fourniture de puissance réactive pour la Correction du facteur de puissance et l'amélioration de la qualité de l'énergie par le filtrage des harmoniques de courant alors son insertion dans les réseaux sera surement plus simple. Elle ne sera plus considérée comme une simple source aléatoire et délicate à gérer mais plus comme une aide à la gestion du réseau avec des services assurés et une puissance fournie constante.

L'objectif de notre travail est de présenter une étude théorique sur les différentes structures des systèmes de production d'énergie éolienne afin de choisir la plus performante. Cette structure composée d'une machine asynchrone à double alimentation entraînée par une turbine à calage variable des pales pour contrôler la capture d'énergie du vent pendant ses faibles et ses fortes vitesses sera étudiée. Cette machine est couplée directement au réseau par le stator et pilotée par les grandeurs rotoriques à travers deux convertisseurs bidirectionnelles MLI (modulation de largeur d'impulsion). La fonction principale de ces convertisseurs dans le système considéré est la connexion de la génératrice éolienne au réseau électrique de deux façons différentes : l'une sur le convertisseur côté réseau qui permettra le contrôle de bus continu et améliorer le facteur de puissance côté réseau ; l'autre, sur le convertisseur côté rotor qui permettra le contrôle et l'optimisation du flux énergétique généré par le stator pendant les périodes de fonctionnement de ce système. Pour ce faire, plusieurs techniques de commandes seront développées dans ce travail afin d'assurer un rendement et une qualité de production optimaux.

Ce travail comprend quatre cinq chapitres et est organisé de la manière suivante. Dans le premier chapitre, nous allons présenter l'état de l'art de l'énergie éolienne (son historique, l'évolution de son exploitation dans le monde en quelques chiffres ainsi que ses avantages et ses inconvénients. Une description détaillée de l'aérogénérateur à axe horizontal qui est l'objet de notre étude, de la technologie de son fonctionnement.

Le deuxième chapitre sera consacré à la structure et la conversion de l'énergie éolienne. On donnera une description détaillée de la structure de l'éolienne à axe horizontal puis nous développerons la modélisation de la partie mécanique de l'éolienne. Elle concerne essentiellement l'hélice pour laquelle nous proposons une approche assez originale basée sur le calcul des efforts, sur les pales, résultant du passage de l'air sur le profil des pales. Cette modélisation prend en compte les caractéristiques aérodynamiques des pales et gère l'angle de calage

de celles-ci en permanence. Un contrôle de l'angle de calage des pales est mis en place afin de maximiser le rendement de l'hélice et permettre ainsi une extraction maximale de la puissance disponible dans le vent. L'hélice fournit donc un couple maximum en permanence en s'adaptant aux différentes conditions de vent grâce au contrôle de l'angle qui recherche le point de puissance maximale (MPPT). Nous terminerons ce chapitre en donnant **une** description détaillée sur les machines synchrones et asynchrones utilisées pour la production électrique dans une éolienne. Ceci nous permet de nous positionner quant au choix du type de génératrice et de technicité utilisée pour l'éolienne. Nous y verrons donc l'intérêt que présente la machine asynchrone à double alimentation par rapport aux autres machines utilisées ainsi que l'intérêt de mettre en place une hélice à angle de calage des pales variable afin de pouvoir fonctionner à vitesse variable pour mieux capter la puissance des faibles vents.

Le troisième chapitre sera consacré à la modélisation individuelle de la chaîne de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable. . Notre choix s'est porté sur une machine asynchrone à double alimentation MADA car elle va nous permettre, en association avec l'hélice à pas variable, de fonctionner quelles que soient les conditions de vent et de vitesse de rotation. En effet, le contrôle de cette machine se fait par les tensions rotoriques et l'on peut alors la contrôler pour produire de l'énergie électrique lorsque la vitesse est à $\pm 30\%$ de la vitesse de synchronisme. Ainsi il est possible de produire de la puissance tout en maintenant la fréquence de 50 Hz constante au réseau. De plus, la commande en double alimentation va nous permettre de réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives de la MADA. Nous commencerons par la modélisation de cette machine asynchrone à double alimentation dans le repère de Park lié au champ tournant et son alimentation rotorique (onduleur à deux niveaux) qui permettra l'application des commandes destinées au contrôle des puissances générées par le stator. On passera par la suite à la modélisation de la

turbine et ses commandes pour maximiser et limiter la capture de la puissance pendant les faibles et les fortes vitesses du vent.

Au quatrième chapitre, nous développerons deux techniques de commandes qui Permettront de garder instantanément un bon rendement et un découplage parfait du contrôle entre les puissances générées par la MADA. Dans une première étape, on considérera la commande vectorielle (à flux statorique orienté) indirecte sans boucle de puissance afin d'améliorer les qualités de poursuite et d'assurer la robustesse du système. On développera, en second, la commande par backstepping basée sur les erreurs et la théorie de stabilité de *Lyapunov* afin de faire converger ces erreurs vers zéro et d'assurer ainsi la stabilité et l'équilibre du système instantanément. Les performances de ces deux techniques de commandes seront justifiées par des résultats obtenus par simulation et une étude comparative est faite entre ces deux lois de commande afin de mettre en évidence l'efficacité et la robustesse de chacune d'elles. Le cinquième et dernier chapitre sera consacré à l'étude comparative entre les différentes lois de commandes proposées dans ce travail de thèse afin de mettre en évidence l'efficacité et la robustesse de chacune d'elles.

Ce travail sera clôturé par une conclusion générale

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES EOLIENNES

I.1 HISTORIQUE

L'idée d'exploiter la puissance du vent n'est pas nouvelle. Dès les origines de l'humanité, l'homme a souhaité pouvoir tirer parti de cette énergie que ce soit pour faire avancer des embarcations maritimes ou pour mécaniser des tâches laborieuses. Les premières mentions d'éoliennes ont plus 3000 ans. En 1700 avant Jésus-Christ, Hammourabi, prestigieux roi de Babylone (actuelle République d'Irak) aurait fait appel à des éoliennes à axe vertical pour l'irrigation et le pompage de l'eau. Au 1er siècle, Héron d'Alexandrie, ingénieur et mathématicien grec, invente un prototype d'orgue à air comprimé mû par une turbine éolienne à axe vertical. Mais c'est finalement au royaume Perse (Actuel Est de l'Iran et Afghanistan) entre 600 et 700 de notre ère que l'on doit la première conception documentée d'éolienne. Il s'agissait d'un moulin à vent, le panémone, composé de voiles verticales faites de roseaux ou de bois montés sur un châssis à axe vertical. Le panémone permettait de moudre le grain et de pomper l'eau. [ABD 14]

L'éolienne a pour ancêtre le moulin à vent (Fig I.1) qui a fait son apparition en Europe au Moyen-Age. Il a commencé à fonctionner à axe vertical dans les premiers temps, puis a commencé à s'orienter vers le sens du vent en étant muni de voiles pour mieux capter l'énergie du vent (Fig I.2). Une éolienne a donc la forme contemporaine du moulin à vent. Il s'agit d'un ensemble de dispositifs qui transforment l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, laquelle est ensuite le plus souvent transformée en énergie électrique. Les éoliennes produisant de l'électricité sont appelées aérogénérateurs,

Le premier moulin à pales profilées, qui était le fruit d'une première recherche aérodynamique, est apparu au douzième siècle. Il était utilisé essentiellement



Figure I.1: Photographie de deux moulins à vent

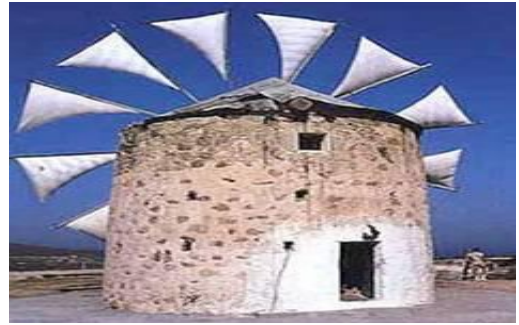


Figure I.2 :Photographie d'un moulin à vent à voile

pour pomper l'eau ou moudre le grain. Des grands inventeurs de la renaissance, comme Léonard de Vinci, se sont intéressés fortement au moulin à vent, ce qui conduit à de nombreuses innovations si bien que les moulins se multiplient en Europe. La Révolution Industrielle offre un nouveau départ aux moulins par l'apparition de nouveaux matériaux. En effet, l'utilisation de métal permet de modifier les formes des tours et augmente considérablement le rendement des machines que l'on nomme désormais « éoliennes ». (Fig I.3).



Figure I.3 :Moulin à vent (Allemagne du Nord)

L'avènement de l'électricité au XXème siècle fait place aux premiers modèles d'éoliennes modernes.(Fig I.4). Le profil des pales est étudié et les ingénieurs s'inspirent des profils des ailes d'avion.



Figure I.4: Eolienne moderne

De nos jours, les éoliennes sont quasiment toutes à axe horizontal à l'exception de modèles à axe vertical tels que le rotor de Savonius et de Darrieus qui sont encore utilisés mais qui tendent à disparaître.

Les dernières innovations permettent aux éoliennes de fonctionner à vitesse variable, c'est-à-dire de régler la vitesse de la turbine éolienne par rapport à la vitesse du vent. Une éolienne occupe une faible surface au sol. Ceci est un énorme avantage pour son installation qui perturbe peu les sites et permet de conserver des activités industrielles ou agricoles à proximité.

On retrouve l' éolienne dite individuelle installée en site isolé. L'éolienne n'est pas raccordée au réseau, elle n'est pas reliée à d'autres éoliennes. Sinon les éoliennes sont regroupées sous forme de fermes éoliennes (Fig I.5). Les installations peuvent être réalisées sur terre ou de plus en plus en mer avec les fermes éoliennes offshore (Fig I.6) où la présence du vent est plus régulière. Avec ce dernier type d'installation, on réduit les nuisances sonores et on améliore l'esthétique.



Figure I.5: Photographie d'une ferme éolienne terrestre



Figure I.6: Photographie d'une ferme éolienne offshore

I.2 PRINCIPE D'UNE EOLIENNE

Une centrale éolienne ou aérogénérateur produit de l'électricité grâce à la force du vent, une source d'énergie renouvelable inépuisable et gratuite. son rôle est donc de réaliser la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Il existe 2 sortes d'éoliennes: le parc terrestre et le parc implanté en mer à plusieurs kilomètres au large des cotes.

L'énergie d'origine éolienne fait partie des énergies renouvelables. L'aérogénérateur (éolienne) utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor :celle-ci est alors convertie en énergie mécanique elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique accouplée à la turbine éolienne.

ce couplage mécanique peut être soit direct si turbine et génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire. Enfin, il existe plusieurs types d'utilisation de l'énergie électrique produite : soit elle est stockée dans des accumulateurs, soit elle est distribuée par le biais d'un réseau électrique ou soit elle alimente

des charges isolées. Le système de conversion éolien produit également des pertes. Ainsi, on peut indiquer un rendement de 59 % au rotor de l'éolienne, 96% au multiplicateur. Il faut de plus prendre en compte les pertes de la génératrice et des éventuels systèmes de conversion.

I.3 TYPES D'EOLIENNES

On distingue deux grands types d'éolienne : les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal. Dans les deux cas, il s'agit de générer un couple moteur pour entraîner la génératrice. [ABD 13]

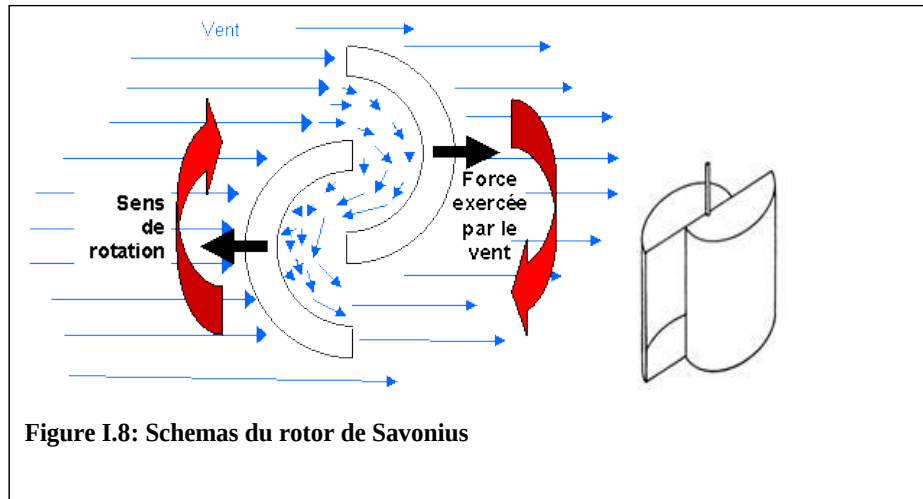
I.3.1 EOLIENNE A AXE VERTICAL

Les pylônes des éoliennes à axe vertical sont courts, entre 0,1 et 0,5 fois la hauteur du rotor. Cela permet de placer tout le dispositif de conversion de l'énergie (génératrice, multiplicateur, etc.) au pied de l'éolienne, facilitant ainsi les opérations de maintenance. De plus, il n'est pas nécessaire d'utiliser un dispositif d'orientation du rotor comme pour les éoliennes à axe horizontal. Cependant, les vents sont faibles à proximité du sol, ce qui induit un moins bon rendement car l'éolienne subit les turbulences du vent. De plus, ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât subit de fortes contraintes mécaniques. Pour ces raisons, de nos jours, les constructeurs d'éoliennes privilégient les éoliennes à axe horizontal.

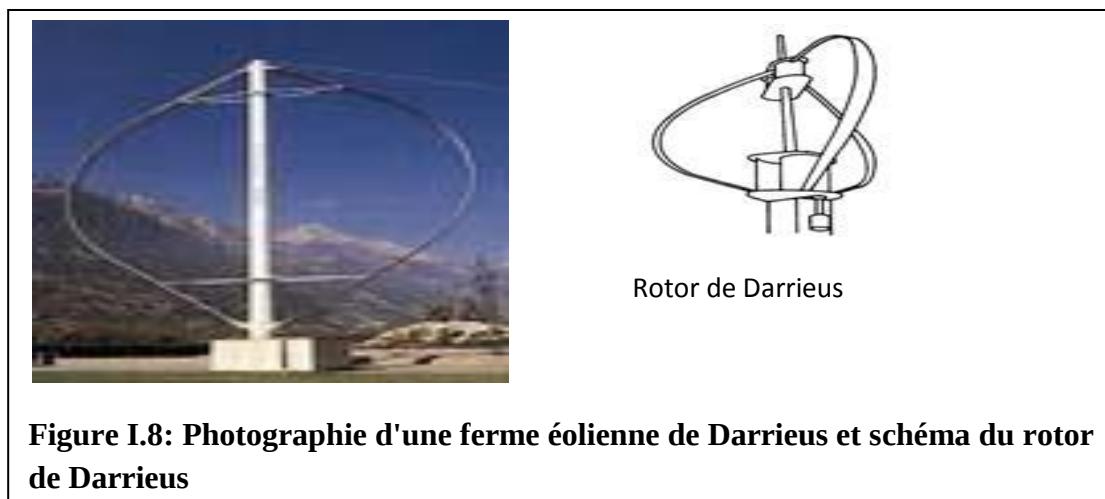
Les deux types de structures d'éoliennes à axe vertical les plus répandues.

reposent sur les principes de traînée différentielle ou de la variation cyclique d'incidence :

- **Le rotor de Savonius** (fig I.7) dont le fonctionnement est basé sur le principe de la traînée différentielle. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes. Il en résulte un couple entraînant la rotation de l'ensemble[ABD 12].



- **Le rotor de Darrieus** (fig I.8) est basé sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif.



I.3.2 EOLIENNE A AXE HORIZONTAL

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles sont constituées d'une à trois pales profilées aérodynamiquement. Le plus

souvent le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales. Les éoliennes à axe horizontal beaucoup plus largement employées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol. Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal (fig I.9):

- **Amont:** le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.
- **Aval:** le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto-orientable.

La disposition turbine en amont est la plus utilisée car plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité. Les pales des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction. Aujourd'hui, l'éolienne à axe horizontal avec un rotor du type hélice, présente un réel intérêt pour la production d'électricité à grande échelle.

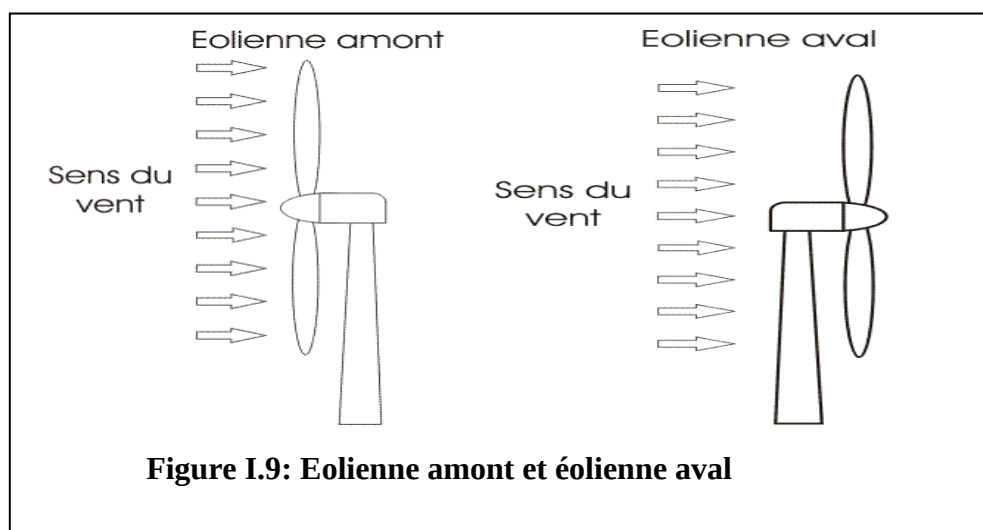


Figure I.9: Eolienne amont et éolienne aval

I.4 SITUATION DE L'EOLIEN EN ALGERIE

En Algérie, la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger). Conçu par l'ingénieur français ANDREAU, ce prototype avait été installé initialement à St-Alban en Angleterre. Ce bipale de type pneumatique à pas variable de 30 m de haut avec un diamètre de 25 m fut rachetée par Électricité et Gaz d'Algérie puis démontée et installée en Algérie. De nombreux autres aérogénérateurs ont été installés sur différents sites, notamment pour l'alimentation énergétique des localités isolées ou d'accès difficiles, telles que les installations de relais de télécommunications. Cependant, la technologie des éoliennes n'étant pas encore mature, ces expériences n'étaient pas toujours concluantes. Ce constat était également valable même à l'échelle internationale. Mais après le premier choc pétrolier, d'importants investissements ont été consacrés à la recherche et au développement des éoliennes. L'exploitation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité a alors pris un essor considérable, notamment depuis la fin des années 80. Les éoliennes actuelles sont de plus en plus fiables, plus

performantes et, de plus en plus grandes. Ainsi, la taille du plus grand aérogénérateur qui était de 50 kW avec un diamètre de 15 m en 1989 est aujourd'hui de 7.5 MW, avec un diamètre de 127 m environ (ENERCON). La hauteur du mât a augmenté en conséquence pour atteindre dans certaines installations, plus de 135 mètres. La puissance éolienne totale installée dans le monde qui était de l'ordre de 6 GW en 1996, est passée à 215 GW en juin 2011. Actuellement, la puissance éolienne totale installée en Algérie est insignifiante. Cependant, une première ferme éolienne de 10 MW de puissance sera implantée à Adrar. Cette ferme devrait être fonctionnelle en 2012. Par ailleurs, le ministère de l'énergie et des mines a projeté, dans son programme de développement des Énergies Renouvelables, d'installer sept autres centrales éoliennes d'une puissance totale de 260 MW à moyen terme, pour atteindre 1700 MW à l'horizon 2030. Ce programme prévoit aussi de lancer l'industrialisation de certains éléments ou composants d'aérogénérateurs, tels que les pales. Ceci étant pour la production d'électricité, qu'en est-il de l'une des premières applications de l'énergie éolienne, à savoir le pompage de l'eau? La plus grande éolienne de pompage a été installée en 1953 à Adrar par les services de la colonisation et de l'hydraulique. Montée sur un mât de 25 mètres de hauteur, cette machine à trois pales de 15 mètres de diamètre a fonctionné pendant près de 10 ans. Plus récemment, le Haut Commissariat au Développement de la Steppe a installé 77 éoliennes de pompage de l'eau sur les Hauts plateaux . Les éoliennes de pompage de l'eau sont-elles mécaniques ou électriques? On peut trouver les deux types. Mais suite aux incidents mécaniques rencontrés avec les éoliennes de pompage mécanique, il est généralement admis que pour les forages de grandes profondeurs, le système aérogénérateur couplé à une pompe électrique est plus fiable. Cependant, pour qu'une telle installation soit performante, la vitesse moyenne du vent doit être supérieure à 4 m/s. Pour les installations de grandes puissances, les vitesses du vent moyennes mesurées à 10 mètres d'altitude, doivent être supérieures à 6 m/s. Cependant, avoir de grandes vitesses

ne suffit pas. En effet, la disponibilité de cette ressource éolienne doit être régulière. En d'autres termes, le nombre d'heures pendant lesquelles la vitesse du vent est élevée doit être important, sur l'année. [AOU 09]

I.5 DESCRIPTION D'UNE EOLIENNE

Pour le principe de fonctionnement de l'éolienne on voit qu'elle est composée de différentes parties (fig I.10). On a tout d'abord des pales qui sont similaires à des ailes d'avion et qui sont entraînées par le vent.

Tout le système de pales va donc tourner autour du moyeu qui est une grosse tige métallique qui traverse la nacelle portée sur un mât d'une dizaine de mètres. Le mât est fixé à des fondations qui permettent à l'éolienne de rester debout. La nacelle qui est l'élément central de l'éolienne est composée de deux pièces principales qui sont le multiplicateur et la génératrice. Le multiplicateur mécanique de vitesse permet de transformer une puissance à couple élevé et à vitesse lente en une puissance à couple faible et vitesse rapide. En effet, la rotation des pales est trop lente et le couple est trop important pour être utilisé par la génératrice. Le multiplicateur relie l'arbre (primaire) de la turbine éolienne à l'arbre (secondaire) de la génératrice électrique.

Le mouvement du rotor est transmis à l'arbre lent dont la vitesse de rotation est augmentée par le multiplicateur qui constitue la boîte de vitesse de l'éolienne. La tige du moyeu rentre dans le multiplicateur en entraînant tout un système d'engrenage afin de multiplier le mouvement du vent. La génératrice génère le courant électrique qui sera distribué sur le réseau.

Pour augmenter l'efficacité de l'éolienne la nacelle s'oriente pour être toujours face au vent. Le système d'orientation de la nacelle est une couronne dentée (crémaillère) équipée d'un moteur. Il permet d'orienter l'éolienne et de la « verrouiller » dans l'axe du vent grâce à un frein.

Si le vent est trop faible, les pales pivotent de façon à capter le maximum de vent. Si celui ci est trop fort, elles se mettent en drapeau par mesure de sécurité et l'éolienne s'arrête.

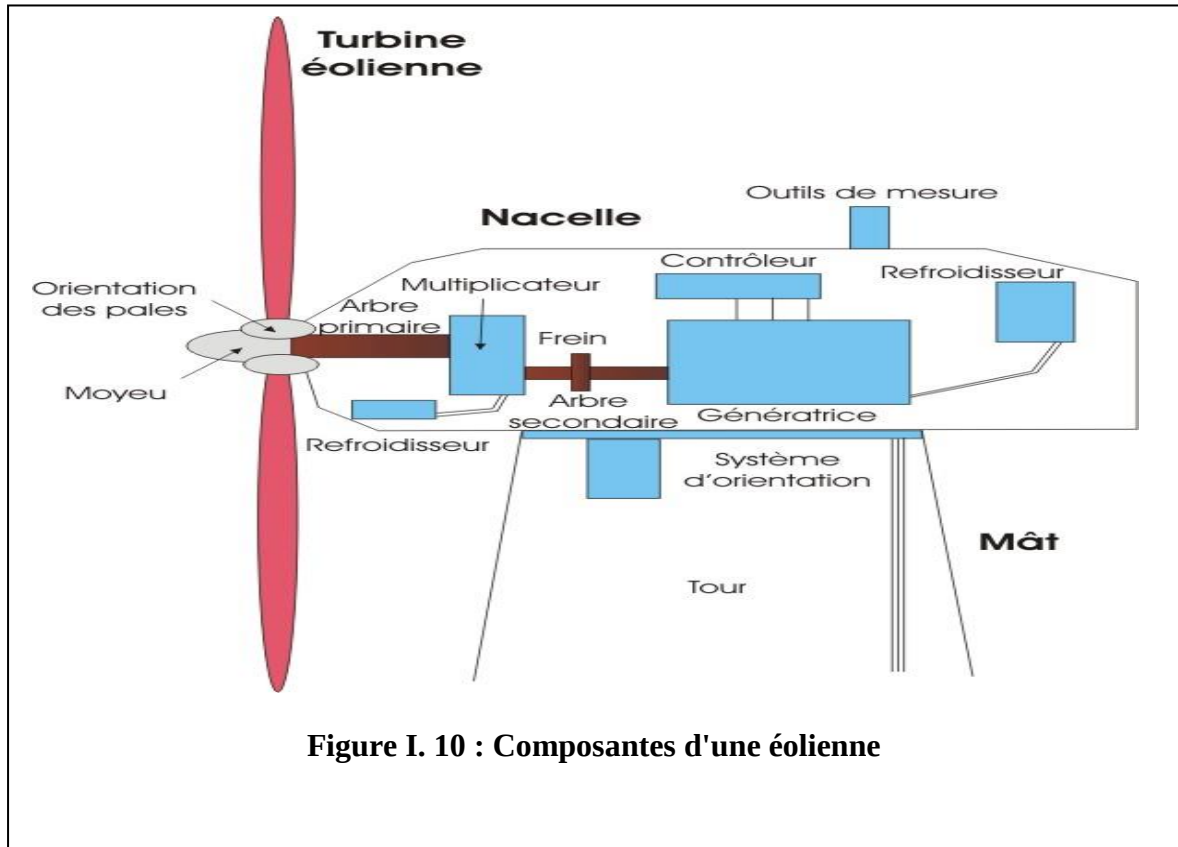


Figure I. 10 : Composantes d'une éolienne

Le générateur fonctionne sur le principe de la dynamo; il transforme l'énergie du vent en électricité. Le frein permet de stopper le mouvement de rotation du rotor et il n'est utilisé qu'en cas d'urgence. Le système de refroidissement comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à huile pour le multiplicateur[BEL 09].

Sur le toit se trouvent les capteurs pour le pilotage de l'éolienne. Les feux d'obstacle est un moyen de sécurité qui permet au trafic aérien de repérer l'éolienne à distance. Le paratonnerre protège l'éolienne contre la foudre. Les

anémomètres mesurent la vitesse du vent et permettent donc d'arrêter ou de mettre en route l'éolienne. La girouette indique la direction du vent et permet à la nacelle de rester orientée face au vent. Quatre puissants moteurs font pivoter la nacelle pour s'orienter dans la direction du vent. Le courant est transporté en bas du mât, il passe par le convertisseur qui synchronise l'électricité produite par l'éolienne à celle présente sur le réseau électrique. Le courant est transformé en électricité haute tension et passe ainsi de quelques centaines de volts à quelques dizaines de milliers de volts grâce au transformateur. L'électricité ainsi produite est envoyée vers le poste source composé d'un transformateur et d'un disjoncteur. Le transformateur sert à élever la tension à quelques centaines de milliers de volts. Le disjoncteur sert à protéger le réseau des surtensions. Le poste source permet de distribuer l'électricité sur l'ensemble du réseau électrique. [BOU 14]

I.6 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. Un point très important abordé dans ce chapitre a été la présentation des différentes Structures utilisées pour la conversion électromécanique et les différentes génératrices Utilisées.

Donner les avantages et les inconvénients de chacune de ces structures était dans L'intérêt de trouver une meilleure solution qui convient au critère d'exploiter un maximum de Puissance quel que soit la vitesse du vent. Cette recherche s'est conclue par le choix de la Machine asynchrone à double alimentation qui va être étudiée en détail dans le chapitre Suivant.

CHAPITRE II
STRUCTURE ET CONVERSION DE L'ENERGIE

II-1 INTRODUCTION

Nous ne traiterons pas ici des aérogénérateurs à axe vertical, étant donné que la majorité des éoliennes installées dans le monde sont à axe horizontal.

L'énergie éolienne consiste à exploiter l'énergie cinétique du vent. L'énergie électrique ou mécanique produite par une éolienne dépend de 3 paramètres : la forme et la longueur des pales, la vitesse du vent et la température qui influe sur la densité de l'air.

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire : les rayons solaires absorbés dans l'atmosphère entraînent des différences de température et de pression. De ce fait les masses d'air se mettent en mouvement et accumulent de l'énergie cinétique. Celle-ci peut être transformée et utilisée à plusieurs fins.

II.2 DESCRIPTION D'UNE EOLIENNE

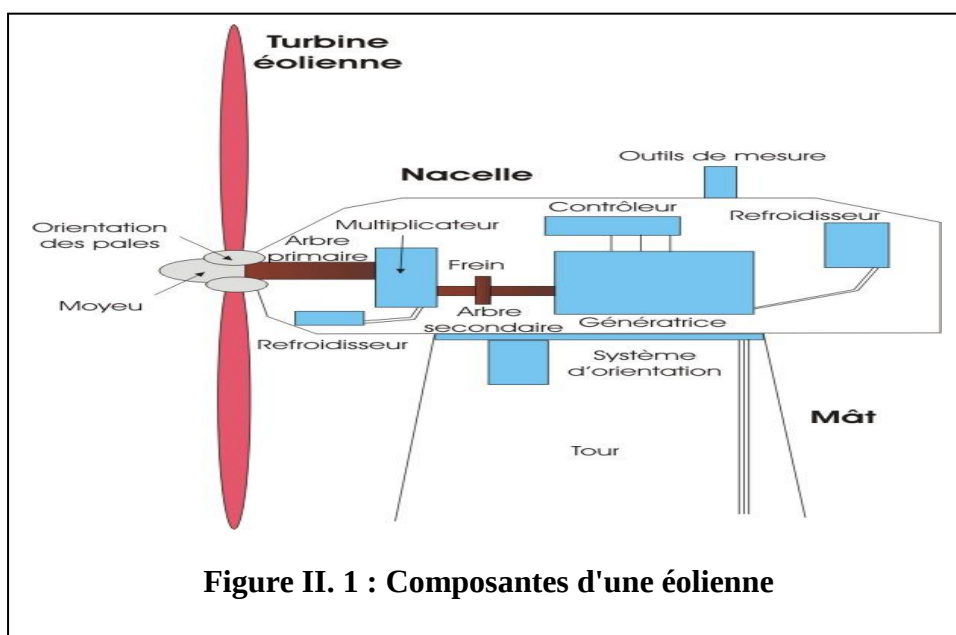
Pour le principe de fonctionnement de l'éolienne on voit qu'elle est composée de différentes parties (fig II.1). On a tout d'abord des pales qui sont similaires à des ailes d'avion et qui sont entraînées par le vent.

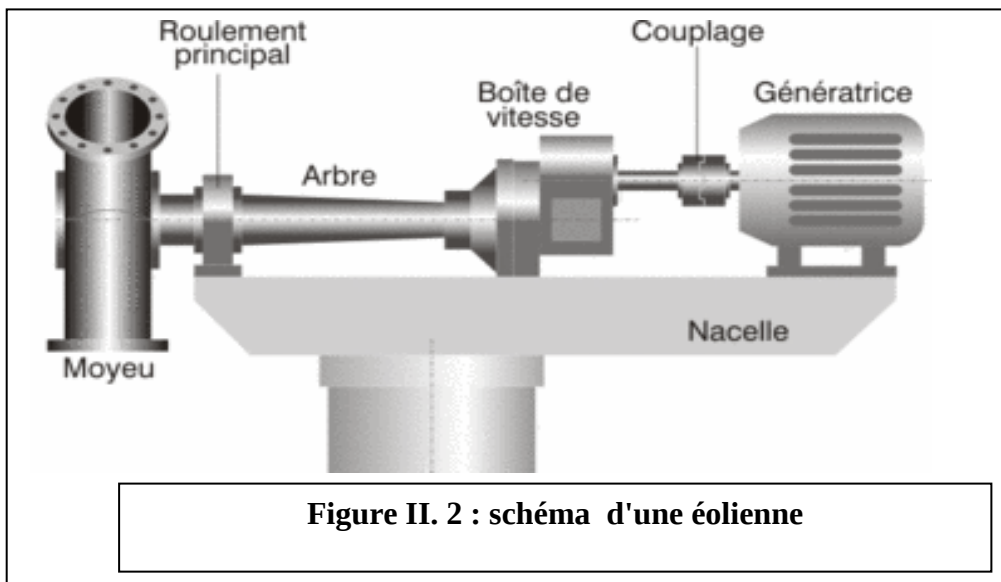
Tout le système de pales va donc tourner autour du moyeu encore appelé "nez", est en général une pièce d'acier moulée. Il supporte les pales du rotor et se monte sur l'arbre lent d'entrée du multiplicateur. Il est pourvu d'un système de régulation qui permet la modification du pas des pales ("Pitch"). Le mât est fixé à des fondations qui permettent à l'éolienne de rester debout. La nacelle qui est l'élément central de l'éolienne est composée de deux pièces principales qui sont le multiplicateur et la génératrice. Le multiplicateur

mécanique de vitesse permet de transformer une puissance à couple élevé et à vitesse lente en une puissance à couple faible et vitesse rapide. En effet, la rotation des pales est trop lente et le couple est trop important pour être utilisé par la génératrice. Le multiplicateur relie l'arbre (primaire) de la turbine éolienne à l'arbre (secondaire) de la génératrice électrique.

Le mouvement du rotor est transmis à l'arbre lent dont la vitesse de rotation est augmentée par le multiplicateur qui constitue la boîte de vitesse de l'éolienne. La tige du moyeu rentre dans le multiplicateur en entraînant tout un système d'engrenage afin de multiplier le mouvement du vent. La génératrice produit la puissance électrique qui sera consommée par une charge ou stockée dans des accumulateurs ou distribuée sur le réseau de transport.

Pour augmenter l'efficacité de l'éolienne la nacelle s'oriente à l'aide de moteurs hydrauliques ou électriques pour être toujours face au vent. Le système d'orientation de la nacelle est une couronne dentée (crémaillère) équipée d'un moteur. Il permet d'orienter l'éolienne et de la « verrouiller » dans l'axe du vent grâce à un frein.





Si le vent est trop faible, les pales pivotent de façon à capter le maximum de vent. Si celui-ci est trop fort, elles se mettent en drapeau par mesure de sécurité et l'éolienne s'arrête.

Le générateur fonctionne sur le principe de la dynamo; il transforme l'énergie du vent en électricité. Le frein permet de stopper le mouvement de rotation du rotor mais il n'est utilisé qu'en cas d'urgence. Le système de refroidissement comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à huile pour le multiplicateur.

Sur le toit se trouvent les capteurs pour le pilotage de l'éolienne. Les feux d'obstacle est un moyen de sécurité qui permet au trafic aérien de repérer l'éolienne à distance. Le paratonnerre protège l'éolienne contre la foudre. Les

anémomètres mesurent la vitesse du vent et permettent donc d'arrêter ou de mettre en route l'éolienne. La girouette indique la direction du vent et permet à la nacelle de rester orientée face au vent. Quatre puissants moteurs font pivoter la nacelle pour s'orienter dans la direction du vent. Le courant est transporté en bas du mât, il passe par le convertisseur qui permet d'ajuster l'amplitude la fréquence et l'ordre des phases du système de tension produit par l'éolienne à celle présente sur le réseau de transport électrique. La tension est transformée en électricité haute tension et passe ainsi de quelques centaines de volts à quelques dizaines de milliers de volts grâce au transformateur. L'électricité ainsi produite est envoyée vers le poste source composé d'un transformateur et d'un disjoncteur. Le transformateur sert à élever la tension à quelques centaines de milliers de volts. Le disjoncteur sert à protéger le réseau des surtensions. Le poste source permet de distribuer l'électricité sur l'ensemble du réseau électrique.

II.3 EXTRACTION DE L'ENERGIE APPORTEE PAR LE VENT

II.3.1 ENERGIE CINETIQUE D'UNE COLONNE D'AIR - PUISSANCE DISPONIBLE.

Considérons une colonne d'air de section S et de longueur $dx = V_v dt$ contenant une quantité d'air de masse volumique ρ se déplaçant à une vitesse V_v constante arrivant face aux pales de l'hélice (fig II.3). La masse de cette quantité d'air est:

$$m_c = S \cdot \rho \cdot dx \quad \text{II.1}$$

Cette colonne d'air qui est animée d'un mouvement de translation de vitesse V_v possède une énergie cinétique E_{cc} telle que:

$$E_{cc} = \frac{1}{2} m_c V_v^2 = \frac{1}{2} S \rho \cdot dx \cdot V_v^2 \quad \text{II.2}$$

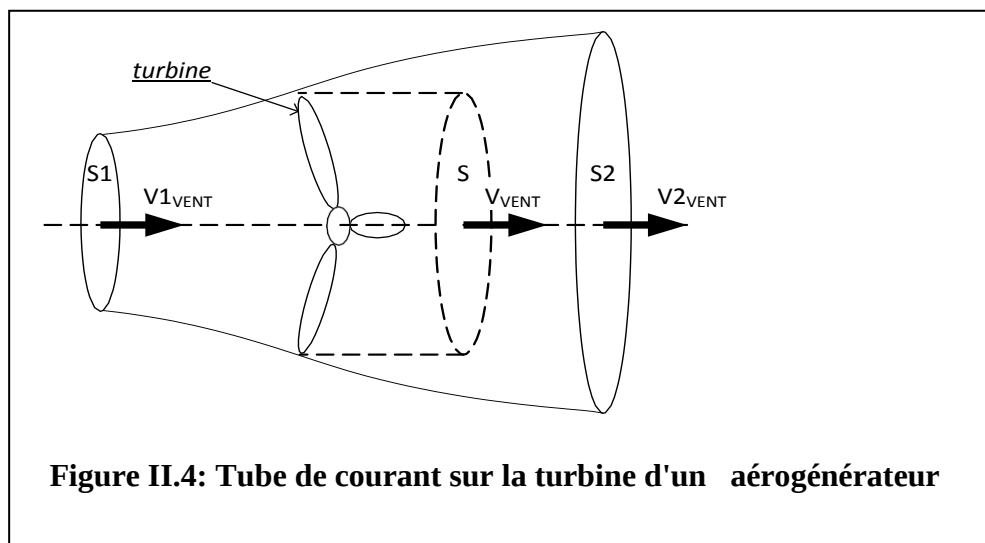
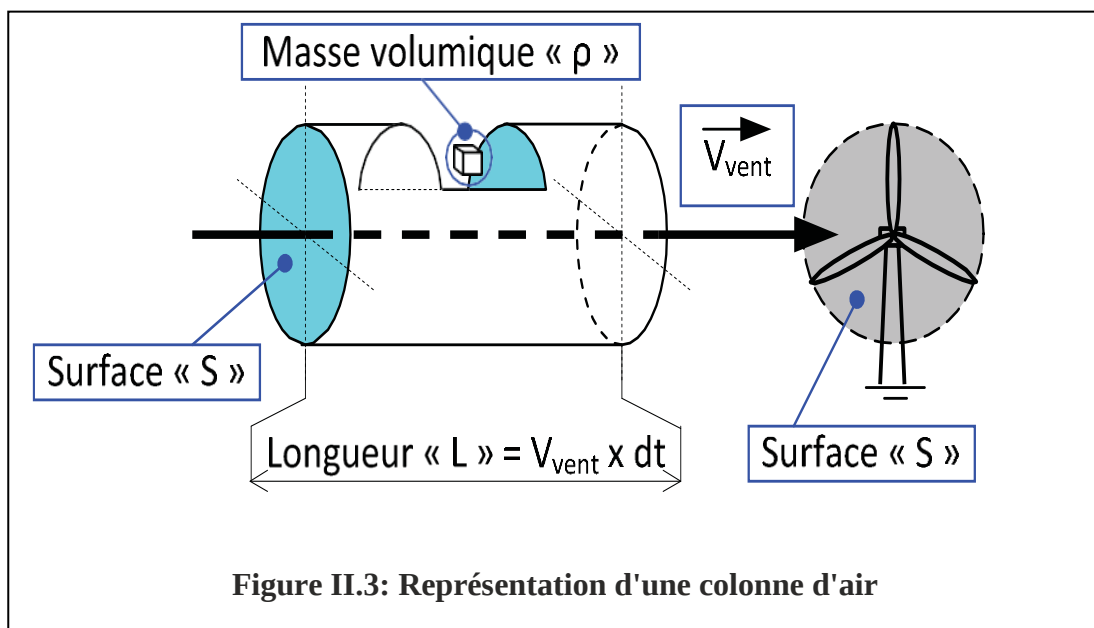
Or cette colonne d'air est aussi la quantité d'air qui traverse la section pendant un temps de durée dt . Par conséquent la puissance P_c apportée par

le vent est:

$$P_c = \frac{E_{cc}}{dt} = \frac{1}{2} S \rho \cdot \frac{dx}{dt} \cdot v_v^2 = \frac{1}{2} S \rho \cdot V_v^3 \quad \text{II.3}$$

II.3.2 PUISSANCE DE VENT RECUPERABLE – LIMITE DE BETZ

La masse d'air qui arrive sur l'éolienne est ralentie en transmettant une partie de son énergie cinétique à la turbine et continue sa propagation en aval de cette dernière.



On définit ainsi un coefficient C_p traduisant le rapport entre la puissance P_c de la colonne d'air et la puissance P_r récupérable au niveau de la turbine:

$$C_p = \frac{P_r}{P_c} = \frac{P_r}{\frac{1}{2}\rho S V_v^3} \quad \text{II.4}$$

En faisant l'hypothèse que l'air se comporte comme un fluide incompressible c-à-d que la masse se conserve et en considérant un tube de courant s'appuyant sur la turbine de l'éolienne (fig II.4), le débit volumique D de l'air, orienté dans le sens du courant, de S_1 vers S_2 , a la même valeur sur toutes les sections du tube de courant (loi de conservation de la masse). On peut donc conclure:

$$D = S_1 V_{v1} = S V_v = S_2 V_{v2} \quad \text{II.5}$$

Par ailleurs sachant que la vitesse du vent, V_{v2} , en aval de la turbine est inférieure à sa vitesse, V_{v1} , en amont, la section S_1 en amont doit être inférieure à la section S_2 . En utilisant le théorème d'Euler traduisant le bilan énergétique, on obtient l'expression de la force F_r que doit exercer la turbine sur le vent nécessaire à la récupération de l'énergie par l'éolienne.

$$F_r = \rho S V_v (V_{v1} - V_{v2}) \quad \text{II.6}$$

Ainsi la turbine récupère la puissance mécanique P_r donnée par:

$$P_r = F_r V_v = \rho S V_v^2 (V_{v1} - V_{v2}) \quad \text{II.7}$$

Par ailleurs le théorème de l'énergie cinétique nous permet d'exprimer la puissance P_r autrement:

$$P_r = \frac{1}{2} \rho S V_v (V_{v1}^2 - V_{v2}^2) \quad \text{II.8}$$

En égalisant les équations II.7 et II.8, on obtient la vitesse du vent au niveau de la turbine:

$$V_v = \frac{1}{2}(V_{v1} + V_{v2}) \quad \text{II.9}$$

En utilisant cette équation on peut réécrire l'expression du coefficient C_p sous la forme:

$$C_p = \frac{P_r}{P_c} = \frac{1}{2}(1 - x^2)(1 + x) \quad \text{II.10}$$

avec $x = \frac{V_{v2}}{V_{v1}}$. la variation du coefficient C_p en fonction du rapport x est représentée sur la figure II.5 qui montre l'existence d'un maximum $C_{pm} = 16/27 = 0.593$ pour $x = 1/3$. Cette valeur qui ne pourra jamais être atteinte en pratique, vu qu'on a pris des hypothèses idéales pour l'air, est appelée limite de Betz.

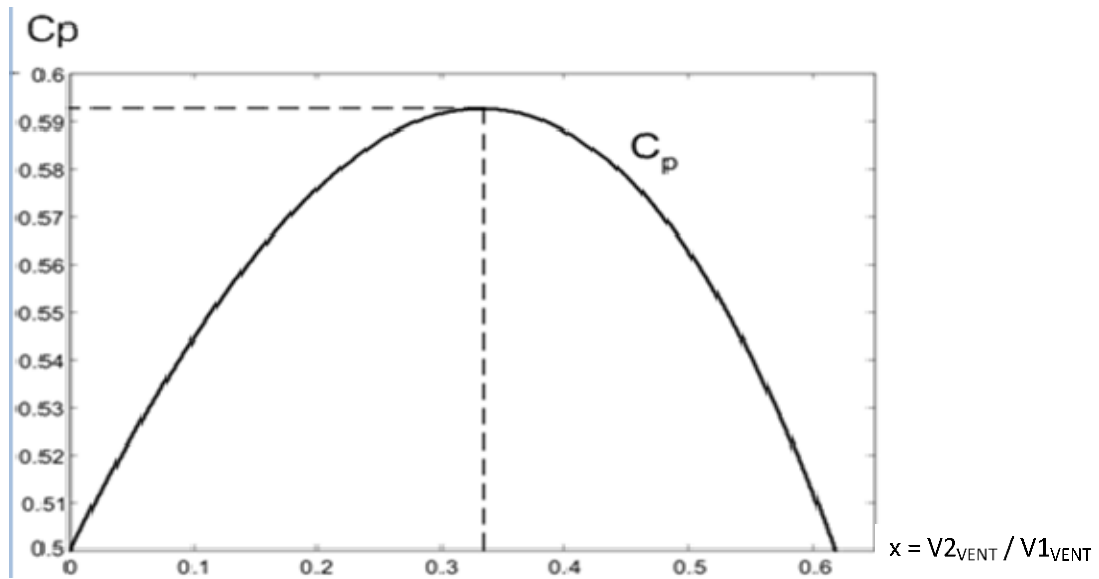


Figure II.5: Variation de C_p en fonction de x

Pour montrer l'effet du type d'éolienne sur le coefficient C_p , on introduit la variable λ appelée vitesse relative et définie par:

$$\lambda = \frac{R\Omega_t}{V_v} \quad \text{II.11}$$

Ω_t : vitesse de rotation de la turbine, R : rayon de la turbine (connu), V_v : vitesse du vent (mesuré par un anémomètre). Le tracé de $C_p(\lambda)$ en fonction de λ montre la présence d'un maximum pour une valeur λ_{opt} dépendant du type d'éolienne.

A titre d'exemple une éolienne tripale classique présente un $C_{pmax} = 0.48$ pour une valeur λ_{opt} de l'ordre de 7.

II.4 REGULATION DE PUISSANCE

Les éoliennes sont conçues pour produire de l'électricité à un prix aussi bas que possible. Par conséquent, les éoliennes sont en général construites de manière à atteindre leur performance maximale à une vitesse de vent d'environ 15 m/s. Il est en fait inutile de concevoir des éoliennes qui maximisent leur rendement à des vitesses de vent encore plus élevées, celles-ci étant peu fréquentes. En cas de vitesses de vent supérieures à 15 m/s, il est nécessaire de perdre une partie de l'énergie supplémentaire contenue dans le vent afin d'éviter tout endommagement de l'éolienne. Toutes les éoliennes sont donc conçues avec un système de régulation de la puissance.

Précédemment, nous avons fait état d'une courbe Fig.II.7 $C_p = f(\lambda)$ propre à chaque type d'éolienne. Pour permettre de faire varier C_p , agir sur la variable λ (la vitesse relative) n'est pas le seul moyen. En effet, les pales peuvent être pourvues de dispositifs actifs ou passifs afin de pouvoir dégrader le coefficient de puissance C_p . Il est ainsi possible de réguler la puissance mais aussi d'empêcher l'emballement du rotor pour de fortes vitesses de vent (en complément du frein de sécurité). En résumé il y a deux manières différentes de contrôler en toute sécurité la puissance d'une éolienne moderne :

II.4.1 CONTROLE A CALAGE VARIABLE DE PALES (PITCH CONTROL)

Sur une éolienne contrôlée à calage variable (appelée aussi une éolienne à pas variable), le contrôleur électronique vérifie plusieurs fois par seconde la puissance de sortie de l'éolienne. En cas de puissance de sortie trop élevée, le

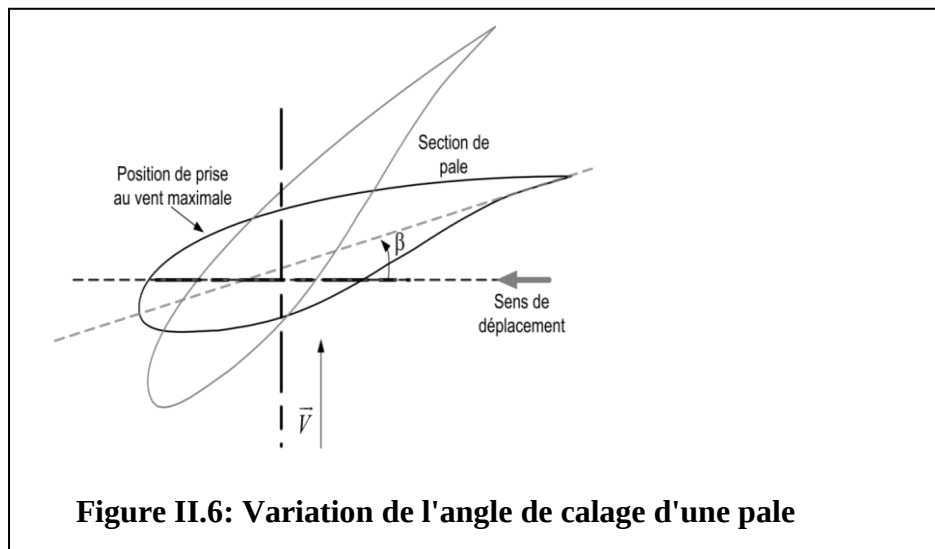
contrôleur électronique de l'éolienne envoie une commande au dispositif de calage d'angle qui pivote immédiatement les pales légèrement sur le côté, hors du vent. Inversement, les pales seront pivotées de manière à pouvoir mieux capter de nouveau l'énergie du vent, dès que le vent aura baissé d'intensité.

Le calage d'angle des pales est donc un dispositif qui consiste à orienter les pales suivant un angle β choisi. Pour une pale qui est dirigée face au vent, cet angle de positionnement est nul (figure II.6). Ainsi pour un vent de vitesse faible jusqu'à nominale, on garde un angle de calage minimal pour récolter un maximum de puissance au niveau de la turbine. Au delà, pour des vents forts, il est préférable d'augmenter cet angle, ce qui conduit à la dégradation du coefficient de puissance $C_p(\lambda)$. Une expression approchée du coefficient de

de puissance $C_p = f(\lambda, \beta)$ est :

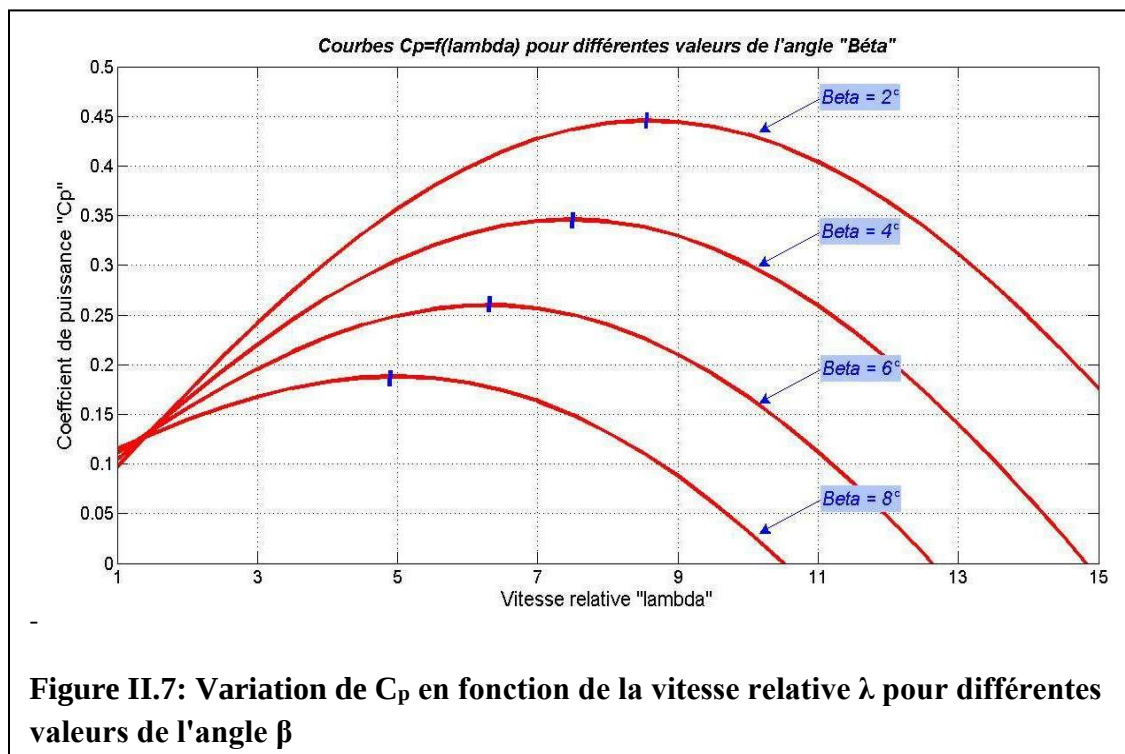
$$C_p = [(0.5 - 0.0167)(\beta - 2)] \sin\left(\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)}\right) - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad \text{II.12}$$

Les variations du coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ en fonction de la vitesse relative λ , pour différentes valeurs de l'angle de calage, sont représentées sur la figure II.7 qui laisse voir clairement que la vitesse relative optimale λ_{opt} , donnant une puissance maximale, dépend de l'angle de calage.



II.4.2 REGULATION PASSIVE PAR DECROCHAGE AERODYNAMIQUE (STALL CONTROL)

Sur une éolienne à régulation (passive) par décrochage aérodynamique (appelée aussi une éolienne à pas fixe), les pales sont fixées au moyeu de façon rigide. Cependant, la géométrie de la pale a été conçue de façon à mettre à profit, en cas de vitesses de vent trop élevées, le décrochage aérodynamique en provoquant de la turbulence sur la partie de la pale qui n'est pas face au vent. Ce décrochage empêche la portance d'agir sur le rotor. Lorsque la vitesse du vent augmente, l'angle d'attaque des pales augmentera également jusqu'à arriver au point de



décrochage. La pale d'une éolienne à pas fixe, est légèrement vrillée autour de son axe longitudinal. En concevant la pale ainsi, on assure que le décrochage a lieu graduellement lorsque la vitesse du vent atteint sa valeur critique.

La régulation par décrochage aérodynamique a avant tout l'avantage d'éviter l'installation de pièces mobiles dans le rotor même, ainsi qu'un système de contrôle très complexe. L'inconvénient est qu'une telle régulation ne pose pas seulement de grands défis à la conception aérodynamique des pales, mais également à la conception de l'éolienne entière afin d'éviter l'apparition de vibrations par le décrochage. Environ deux tiers des éoliennes qui sont installées actuellement dans le monde sont à pas fixe.

II.4.3 REGULATION ACTIVE PAR DECROCHAGE AERODYNAMIQUE

Un nombre croissant des grandes éoliennes (1 MW et plus) sont conçues avec un mécanisme dit de régulation active par décrochage aérodynamique. Du point de vue technique, ayant des pales mobiles, ces machines ressemblent à celles contrôlées à calage variable. Afin d'avoir un couple relativement élevé à des vitesses de vent faibles, ces éoliennes sont normalement programmées pour pivoter leurs pales de la même façon que les éoliennes à pas variable. (Souvent on utilise seulement un nombre limité de pas fixes, dépendant de la vitesse du vent.). Cependant, lorsque l'éolienne atteint sa **puissance nominale** une grande différence par rapport aux éoliennes à pas variable est à noter : si la génératrice est sur le point d'être surchargée, l'éolienne pivotera ses pales dans la direction opposée à celle dans laquelle une éolienne à pas variable l'aurait fait. En d'autres mots, au lieu de le réduire, elle augmentera l'angle d'attaque des pales du rotor pour faire décrocher les pales encore plus, perdant ainsi l'excès d'énergie du vent.

Un des atouts d'un tel système de régulation est qu'il est possible de contrôler la puissance de sortie de façon plus précise que par la régulation passive par décrochage aérodynamique, ce qui permet d'éviter une surévaluation de la puissance nominale de l'éolienne au début d'une rafale. Un autre avantage est le fait que l'éolienne peut fonctionner presque exactement à sa puissance nominale

à toutes les vitesses du vent. Une éolienne à pas fixe normale, par contre, enregistre une chute de la production de puissance électrique à des vitesses de vent élevées, au fur et à mesure que les pales décrochent de plus en plus. Le mécanisme de calage est normalement opéré à l'aide de systèmes hydrauliques ou de moteurs électriques pas à pas.

II.5 TYPES DE GENERATEURS ELECTRIQUES

Le générateur électrique ou générateur transforme, à l'intérieur de la nacelle, le couple mécanique en courant électrique. Il transforme l'énergie cinétique du vent disponible sur le moyeu tournant en énergie électrique grâce à un générateur électromagnétique (fig. II.8). Il adapte également le courant électrique fourni par le générateur aux normes du réseau (couplage direct et couplage indirect). Le générateur peut être soit une dynamo (production de courant continu) soit un alternateur (production de courant alternatif). Pour des raisons de coût et de rendement, l'alternateur est désormais quasi exclusivement utilisé. L'alternateur est une machine synchrone ou asynchrone, utilisée en vitesse fixe ou en vitesse variable. Dans l'alternateur l'interaction entre les électroaimants du rotor, partie mobile, et les bobines de fil de cuivre du stator, partie fixe, produit un courant électrique.

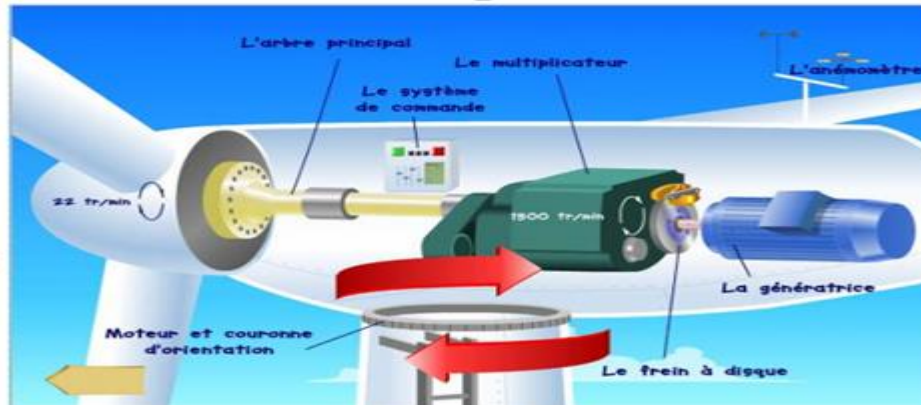


Figure II.8: Conversion de l'énergie éolienne en énergie

Pour convertir l'énergie éolienne en énergie électrique, le générateur, qu'il soit synchrone ou asynchrone, peut fournir du courant directement au réseau. Cela implique que la turbine tourne à vitesse fixe. Pour augmenter le rendement du générateur, la vitesse de l'éolienne doit être variable afin de s'adapter à celle du vent. Deux circuits de base sont alors utilisés qui s'appuient sur l'un ou l'autre des générateurs.

II. 5. 1 GENERATRICE SYNCHRONE

La machine synchrone se compose d'une partie tournante, le rotor, et d'une partie fixe, le stator. Le rotor peut se composer d'aimants permanents ou être constitué d'un bobinage alimenté en courant continu et d'un circuit magnétique (électro-aimant).

Pour produire du courant, on utilise une force extérieure pour faire tourner le rotor : son champ magnétique, en tournant, induit un courant électrique alternatif dans les bobines du stator. La vitesse de ce champ tournant est appelée « vitesse de synchronisme ».

Il n'est pas possible de faire démarrer correctement, sans aide extérieure, une machine synchrone en mode moteur en connectant ses enroulements statoriques directement sur un réseau alternatif. Mais si on n'entraîne pas le rotor par une

force extérieure, il est possible de la faire tourner en alimentant ses enroulements statoriques par un courant alternatif dont la fréquence augmente progressivement de zéro à la fréquence de synchronisme et en faisant en sorte que la tension aux bornes des enroulements soit proportionnelle à la fréquence. Sa vitesse de synchronisme sera directement liée à la fréquence de l'alimentation électrique[ABD 07].

Un autre moyen est de réaliser l'autopilotage de la machine, c'est-à-dire de maintenir l'orthogonalité du flux magnétique rotorique par rapport au flux statorique, par exemple, en disposant sur son axe un capteur qui délivre une information de la position du rotor. Cette information est traitée par un convertisseur électronique qui fournit le courant statorique à la machine, en phase avec sa force contre-électromotrice

le générateur synchrone (figure II.9) produit du courant de fréquence variable selon la vitesse de rotation des pales en fonction de la force du vent. Les machines synchrones sont plus onéreuses que les machines asynchrones mais possèdent un rendement supérieur. Le rotor (partie excitation) peut être de type bobiné ou à base d'aimants permanents.

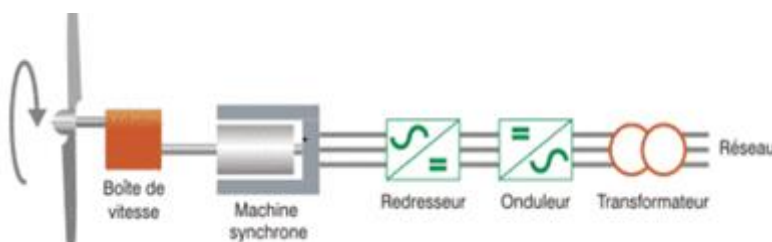


Figure II.9: Structure d'une éolienne intégrant une machine synchrone

La 2ème solution présente des avantages indéniables en terme de compacité, réduction des pertes et maintenance, car ne nécessitant pas de contacts glissants et ne présentant pas de bobinage. La génératrice synchrone ou Machine

Synchrone (MS) est généralement utilisée dans une éolienne à couplage indirect. Sur ce type de machines, le moyeu de l'hélice est relié directement au rotor du générateur synchrone. Cette génératrice peut donc être utilisée dans le cas d'entraînement direct, c'est-à-dire lorsque la liaison mécanique entre la turbine éolienne et la génératrice est directe, sans utiliser de multiplicateur. Ce type d'éolienne avec peu de pièces en mouvement ne requiert que peu d'entretien. Il est donc adapté aux éoliennes off-shore.

Il faut cependant que cette génératrice soit nécessairement raccordée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de fréquence (redresseur et onduleur) qui transforment le courant, à fréquence et tension variables, en un courant adapté à la fréquence et la tension du réseau. Si la génératrice est à aimants permanents, elle peut fonctionner en mode autonome car elle n'a pas besoin d'excitation extérieure.

II. 5. 2 GENERATRICE ASYNCHRONE

La **machine asynchrone**, connue également sous le terme anglo-saxon de **machine à induction**, est une machine électrique à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor. Comme les autres machines électriques (machine à courant continu, machine synchrone), la machine asynchrone est un convertisseur électromécanique basé sur l'électromagnétisme permettant la conversion bidirectionnelle d'énergie entre une installation électrique parcourue par un courant électrique (ici alternatif) et un dispositif mécanique.

Cette machine est réversible et susceptible de se comporter, selon la source d'énergie, soit en « moteur » soit en « générateur », dans les quatre quadrants du plan couple-vitesse:

- en fonctionnement « moteur », dans deux quadrants du plan couple-vitesse, l'énergie électrique apportée par la source est transformée en énergie mécanique vers la charge;
- en fonctionnement « générateur », dans les deux autres quadrants, l'énergie mécanique de la charge est transformée en énergie électrique vers la source (la machine se comporte comme un frein).

Comme ce fonctionnement est sans discontinuité et ne dépend pas de la machine elle-même mais de *l'ensemble source d'alimentation/machine/charge*, la distinction moteur/générateur est « communément » faite par rapport à la finalité d'usage de la machine. C'est ainsi que dans le langage commun l'utilisation de « moteur asynchrone » pour désigner cette machine est fréquent.

Les machines possédant un rotor « en cage d'écureuil » sont aussi connues sous le nom de machines à cage ou machines à cage d'écureuil. Le terme **asynchrone** provient du fait que la vitesse de rotation du rotor de ces machines n'est pas exactement déterminée par la fréquence des courants qui traversent leur stator (glissement d'une machine asynchrone).

La machine asynchrone a longtemps été fortement concurrencée par la machine synchrone dans les domaines de forte puissance, jusqu'à l'avènement de l'électronique de puissance. Elle est utilisée dans de nombreuses applications, notamment dans le transport (métro, trains, propulsion des navires, automobiles électriques), dans l'industrie (machines-outils), dans l'électroménager. Elle était à l'origine uniquement utilisée en « moteur » mais, toujours grâce à l'électronique de puissance, elle est de plus en plus souvent utilisée en « génératrice » dans les éoliennes (fig II.10).

Pour les applications de puissance, au-delà de quelques kilowatts, les machines asynchrones sont uniquement alimentées par des systèmes de courants triphasés.

Le moteur asynchrone est actuellement le moteur électrique dont l'usage est le plus répandu dans l'industrie. Son principal avantage réside dans l'absence de contacts électriques glissants, ce qui conduit à une structure simple, robuste et facile à construire, leur stator est relié directement au réseau industriel à tension et fréquence constante, il tourne à vitesse peu différente de la vitesse de synchronisme; c'est lui qui est utilisé pour la réalisation de la quasi-totalité des entraînements à vitesse constante. Il permet aussi la réalisation d'entraînements à vitesse variable et la place qu'il occupe dans ce domaine ne cesse de croître. Le générateur asynchrone nécessite de tourner à une certaine vitesse (quelques centaines de tours/minute) pour produire du courant, ce qui implique la nécessité pour une éolienne d'y adjoindre un démultiplicateur (boîte de vitesse automatique) afin de démultiplier le nombre de tours de l'axe des pales par vent faible avant de transmettre le mouvement à l'axe du générateur. Si la fréquence du courant est stable et ne requiert pas de régulateur de fréquence, c'est la boîte de vitesses qui requiert une maintenance. La plupart des génératrices utilisées par les éoliennes sont des génératrices asynchrones triphasées. Celles-ci ont plusieurs avantages : elles sont robustes, leur coût est faible, ont une simplicité mécanique et ne comportent pas de pièces qui peuvent s'user, réduisant ainsi les coûts de maintenance. Par ailleurs, leurs inconvénients se trouvent au niveau de la consommation d'énergie réactive, qu'elles tirent soit du réseau, soit elles

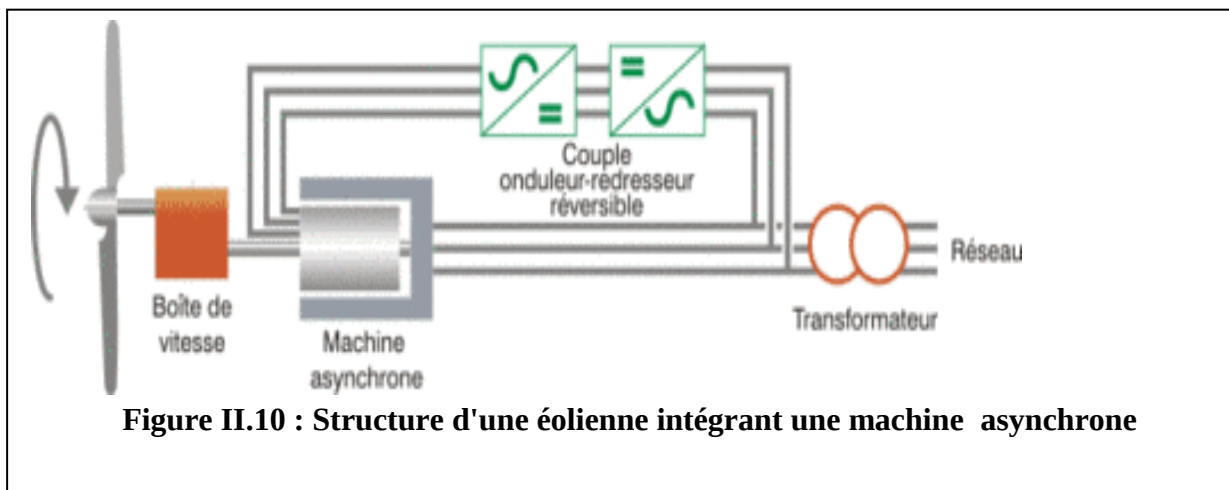


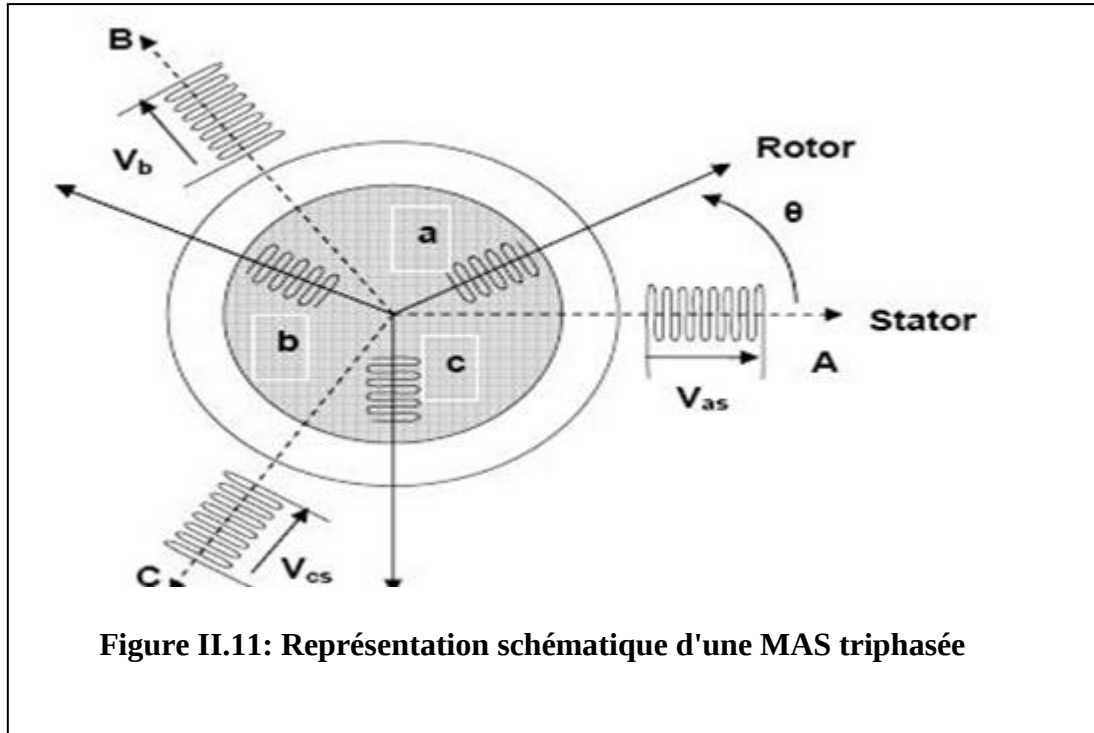
Figure II.10 : Structure d'une éolienne intégrant une machine asynchrone

sont compensées par une batterie de condensateurs, d'où la possibilité de fonctionner autonome. Dans ce type de machine, le stator est directement relié au réseau réduisant ainsi l'équipement électronique.

la Machine Asynchrone (MAS) est très utilisée car la génératrice est capable de supporter de légères variations de vitesse, ce qui est un atout majeur pour des applications du type éolien où la vitesse du vent peut évoluer rapidement notamment lors de rafales. Ces dernières engendrent des sollicitations mécaniques importantes pour le système qui sont ainsi plus réduites avec une machine asynchrone qu'avec une génératrice synchrone fonctionnant normalement à vitesse fixe. L'éolienne est dite dans ce cas à couplage direct: un multiplicateur de vitesse est installé entre l'arbre de l'hélice et l'arbre du générateur asynchrone. Cette technologie oblige l'hélice à fonctionner à vitesse constante. Le rapport de multiplication est choisi en fonction du nombre de paires de pôles de la génératrice dont le fonctionnement commence dès que sa vitesse dépasse le synchronisme (mode hypersynchrone). On peut ainsi établir le couplage du stator au réseau qui va lui imposer sa tension et sa pulsation ω_s .

Le moteur asynchrone représentée (fig II.11) est constituée par:

- **Le stator:** Le stator d'un moteur asynchrone est identique à celle d'un moteur synchrone (MS), 3 enroulements couplés en étoile ou en triangle et décalés entre eux de $2\pi/3$ qui sont alimentés par un système de tensions équilibrées.
- **Le rotor:** Le rotor du moteur supporte un bobinage semblable à celle du stator du MS, bobinage triphasé décalés de $2\pi/3$ à même nombre de pôles que celle du stator du MS.



Ces 3 bobinages sont couplés en étoile et court-circuités sur eux-mêmes. 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.

II.5.2.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE GENERATRICE ASYNCHRONE

Pour que la machine fonctionne en génératrice, il faut que le rotor tourne dans le sens du champ tournant à une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme (vitesse du champ tournant) exprimée par l'équation suivante :

$$\Omega_s = \frac{60f}{p} \quad \text{II.13}$$

f est la fréquence du champ tournant et p est le nombre de pôles du rotor de la génératrice.

Le rotor développe ainsi son propre champ magnétique. Lorsque cette génératrice est connectée au réseau, il se met à tourner à une vitesse légèrement inférieure à la vitesse de rotation du champ magnétique dans le stator (fonctionnement de type « moteur »). Si la vitesse de rotation du rotor devient égale (synchrone) à celle du champ magnétique, aucune induction n'apparaît dans le rotor, et donc aucune interaction avec le stator. Enfin, si la vitesse de rotation du rotor est légèrement supérieure à celle du champ magnétique du stator, il se développe alors une force électromagnétique similaire à celle obtenue avec un générateur synchrone. La différence (adimensionnée) entre la vitesse de rotation du rotor et la vitesse de rotation du champ magnétique est appelée glissement, sa valeur ne dépassant pas en pratique quelques pour-cent. Pour une augmentation limitée de la vitesse de rotation de l'éolienne, le couple et donc la puissance fournie sont proportionnels au glissement défini par:

$$g = \frac{\Omega_r - \omega_s}{\omega_s} \quad \text{II.14}$$

où Ω_r est la vitesse de rotation du rotor et ω_s est la vitesse de rotation du champ magnétique au niveau du stator.

On peut ainsi établir le couplage du stator au réseau qui va lui imposer sa tension et sa pulsation ω_s

Pour ce type de génératrice, la vitesse possède une gamme de variation relativement limitée autour de la vitesse de rotation synchrone ω_s comme montré sur la figure II.12 traduisant le type du couple moteur en fonction du glissement. La vitesse est régulée soit en agissant sur l'angle de calage des pales (*pitch control*) soit par un dispositif de décrochement (*stall*) quand les vents sont violents.

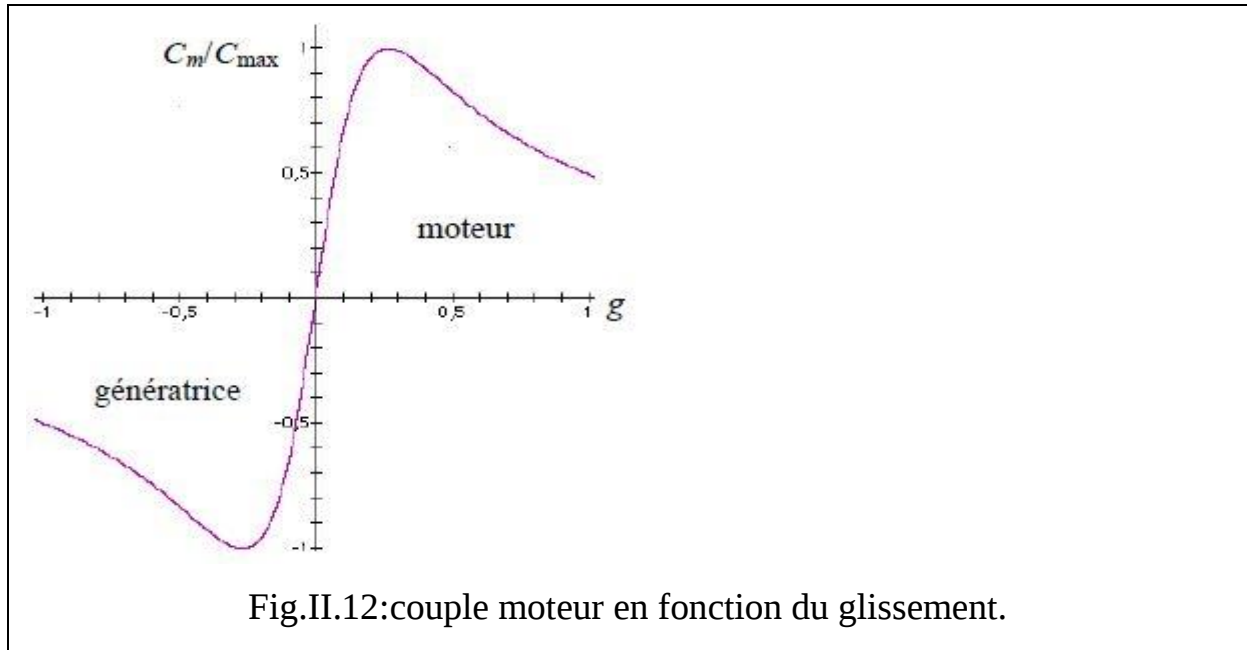


Fig.II.12:couple moteur en fonction du glissement.

le transfert de puissance peut aussi être optimisé en ajustant le nombre p de pôles de la machine. Ainsi pour une vitesse de vent faible et donc de rotation de la turbine faible, on fonctionne avec le maximum de paires de pôles. Lorsque le vent atteint une vitesse plus élevée, il est possible de diminuer afin de travailler avec une vitesse synchrone plus appropriée avec la vitesse de rotation de la turbine. Il existe deux types de machine asynchrone : la machine asynchrone à cage d'écureuil et la machine asynchrone à rotor bobiné.

- **Génératrice asynchrone à rotor bobiné ou à bagues.** Les enroulements du rotor couplés en étoile sont reliés à un système de bagues/balais permettant ainsi l'accès à leurs bornes pour la connexion d'un convertisseur statique dans le cas d'un pilotage de la machine par le rotor. [AMI 10]

- **Génératrice asynchrone à cage d'écureuil.** La plupart des éoliennes du monde utilisent une génératrice asynchrone triphasée à cage (d'écureuil), appelée aussi une génératrice à induction, pour produire du courant alternatif. Ce type de génératrice n'est en fait que très rarement utilisé, sauf dans l'industrie éolienne et dans les petites centrales éoliennes.

Le rotor est constitué de barres court-circuitées par des anneaux aux deux extrémités de l'armature. Les enroulements rotoriques ne sont alors pas accessibles. cette génératrice est la plus utilisée dans les éoliennes tournant à vitesse constante.

II.5.2.2 FONCTIONNEMENT D'UN MOTEUR ASYNCHRONE

Lorsque le courant est connecté, la machine commence à tourner comme un moteur, à une vitesse légèrement au-dessous de la vitesse synchrone du champ magnétique tournant produit par le stator.

Le champ magnétique tournant qui se meut par rapport au rotor induit un courant fort dans les enroulements du rotor qui n'offrent que très peu de résistance au courant.

Le rotor crée ainsi ses propres pôles magnétiques qui tour à tour sont entraînés par la force électromagnétique issue du champ magnétique tournant du stator.

- Fonctionnement de la génératrice

Si le rotor tournera à une vitesse supérieure à celle du champ magnétique tournant, le stator commence à induire un courant fort dans le rotor. Plus nous faisons tourner vite le rotor, plus grande sera la puissance transférée comme une force électromagnétique au stator et ensuite convertie en électricité.

- Glissement de la génératrice

La vitesse d'une génératrice asynchrone varie en fonction du couple de rotation qui lui est appliqué. Dans la pratique, la différence entre la vitesse de rotation à la puissance maximale et celle à vide est très petite, d'environ 1 %. Cette différence exprimée en pourcentage de la vitesse synchrone est également appelée le glissement de la génératrice. Ainsi, une génératrice tétrapolaire fera 1.500 tours par minute à vide si elle est raccordée à un réseau électrique à 50 Hz.

Si la génératrice fonctionne à sa puissance maximale, elle tournera à 1.515 tours par minute.

Le fait que la génératrice augmente ou diminue légèrement sa vitesse en fonction des variations du couple, est une caractéristique mécanique très utile, avant tout parce que cela réduit l'usure du multiplicateur (à cause d'une réduction du couple maximal). C'est un des atouts les plus importants liés au choix d'une génératrice asynchrone au lieu d'une génératrice synchrone pour une éolienne raccordée directement au réseau électrique.

- Ajustement automatique des pôles du rotor

Ce qui donne au rotor à cage sa finesse, c'est qu'il s'adapte automatiquement au nombre de pôles du stator. Le même rotor peut donc être utilisé avec une grande variété de nombre de pôles.

- Nécessité d'un raccordement au réseau

Alors qu'une génératrice synchrone peut fonctionner sans être raccordée au réseau électrique, il n'en est pas de même pour la génératrice asynchrone car son stator a besoin d'être alimenté en puissance réactive afin de créer le champ magnétique nécessaire pour le fonctionnement de la génératrice.

Il est cependant possible de faire fonctionner une génératrice asynchrone dans un système autonome, si elle a été munie de condensateurs fournissant la puissance réactive nécessaire pour la magnétisation. Cette solution exige également une certaine rémanence dans le fer du rotor, c'est à dire. un certain magnétisme restant, utilisé pour le démarrage de l'éolienne. Sinon il faudra une batterie et de l'électronique de puissance -ou bien une petite génératrice diesel pour la mise en marche du système.

II.6 GENERATEUR A BASE DE MACHINE ASYNCHRONE ADOUBLE ALIMENTATION (MADA) - SYSTEME EOLIEN A VITESSE VARIABLE

II-6.1 INTRODUCTION

Une éolienne utilisant une MADA permet d'extraire une puissance maximale à partir d'une vitesse de vent donnée en optimisant la vitesse spécifique λ , et en minimisant les contraintes mécaniques sur la turbine lors des rafales de vent.

La machine asynchrone double alimentée se compose principalement de deux parties, *stator* (Fig II.13) et *rotor* (Fig II.14). Dans cette structure, le générateur est à induction à rotor bobiné. Le stator est analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone) constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. Le rotor tourne à l'intérieur de la cavité de la machine et est séparé du stator par *un entrefer*. En principe les circuits électriques du stator et du rotor sont constitués de trois enroulements identiques couplés en étoile (ou en triangle) à la seule différence est que celui du rotor relié à des bagues sur lesquelles glissent des balais. Les trois enroulements du stator (*A*, *B* et *C*) sont parallèles aux enroulements du rotor et sont distribués sinusoïdalement, décalés de 120 degrés l'un par rapport à l'autre. [AMI 12]

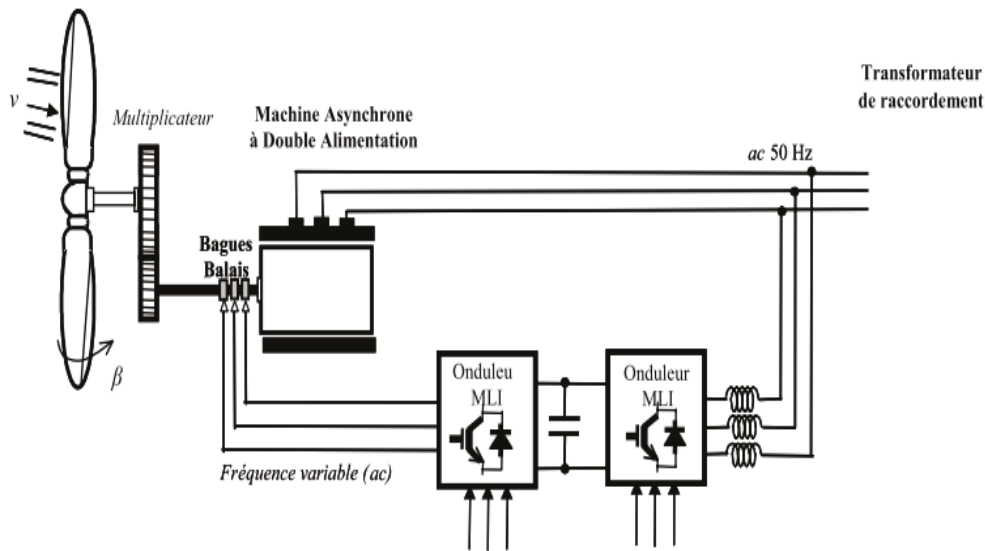


Fig II.13 Stator bobiné

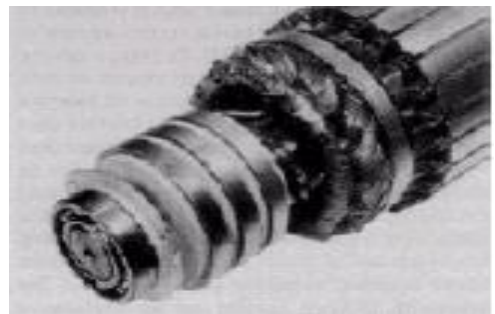


Fig II.14 Rotor bobiné

Les enroulements du stator sont connectés directement au réseau triphasé de distribution qui va lui imposer sa tension et sa pulsation ω_s alors que les enroulements accessibles du rotor sont reliés à deux convertisseurs (IGBT) bidirectionnels en courant permettant de transiter la puissance entre le rotor et le réseau: la puissance traversant ces convertisseurs peut alors être absorbée ou produite par la machine, selon le mode de fonctionnement. Le condensateur

entre les deux convertisseurs représente le bus continu. Le transformateur élévateur de tension permet le raccordement au réseau de distribution[ASU 13]. Les machines asynchrones à vitesse fixe doivent fonctionner au voisinage de la vitesse de synchronisme car la fréquence est imposée par le réseau : la vitesse du rotor est presque constante. Le système de la MADA permet de régler la vitesse de rotation du rotor en fonction de la vitesse du vent, en effet la MADA permet un fonctionnement en génératrice hyposynchrone et hypersynchrone. On arrive ainsi faire varier la pulsation rotorique ω_r (pulsation de glissement), ce qui permet à l'éolienne de fonctionner sur une plus large plage de vitesses de vent et de pouvoir tirer le maximum de puissance possible pour chaque vitesse de vent: A la différence de certaines machines synchrones, qui utilisent des convertisseurs traversés par la totalité de la puissance nominale, les convertisseurs de la MADA sont dimensionnés pour laisser passer 25% de la puissance nominale seulement. Ils coûtent donc moins chers, sont moins encombrants et permettent également de piloter la MADA par le rotor en réglant sa vitesse de rotation mécanique. C'est un convertisseur statique qui se compose d'un redresseur, d'un bus continu et d'un onduleur, il est réversible en courant (Pr traverse le convertisseur dans un sens pour un fonctionnement hypersynchrone, et dans le sens opposé pour un fonctionnement hyposynchrone), l'onduleur devient alors redresseur et le redresseur devient onduleur.

II.6.2 PHASES DE FONCTIONNEMENT D'UNE EOLIENNE A BASE DE MADA

Dans une éolienne intégrant une MADA il y a cinq phases de fonctionnement: - **Phase de démarrage:** Dans cette phase de démarrage de la machine, la production électrique commence lorsque la vitesse mécanique atteint environ 70% de la vitesse de synchronisme de la génératrice avec une puissance électrique restant assez faible

- **Phase MPPT** (*Maximum Power Point Tracking*): C'est la phase d'extraction de la puissance maximale: Dans cette phase, la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale et la puissance électrique augmente rapidement. L'angle de calage des pales β reste à sa valeur minimale afin d'obtenir un coefficient de puissance 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). En d'autres termes, le principe du M.P.P.T. consiste (pour un angle de pale donné) à ajuster, en fonction de la vitesse du vent v_v , la vitesse de rotation de la turbine éolienne à une valeur de référence Ω_{ref} pour maintenir une vitesse relative optimale λ_{opt} et donc un coefficient de puissance maximal C_{pmax} .

$$\Omega_{turb} = \frac{\lambda_{opt}.v_v}{R} \quad \text{III.1}$$

- **Phase à vitesse mécanique quasi constante**: l'angle β de calage des pales varie afin d'obtenir une puissance électrique maximale pour différentes valeurs de vent (pitch control) et la puissance électrique augmente très rapidement jusqu'à sa valeur nominale.

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

- **Arrêt de l'éolienne** : lorsque la vitesse du vent devient trop importante et risque d'endommager l'éolienne, l'angle de calage des pales se fixe à 90° (mise en drapeau) jusqu'à ce que la vitesse du vent devienne moins importante.

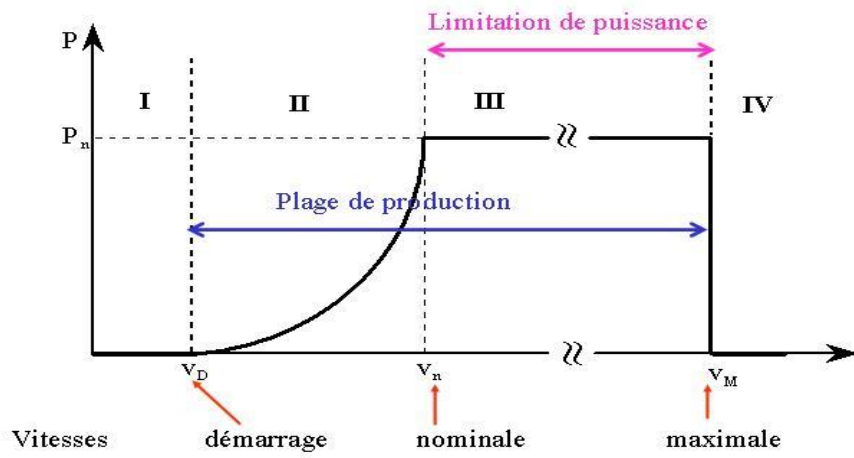


Figure II. 15 : Etapes de fonctionnement d'une éolienne à base de MADA

II.7 CONCLUSION

Nous avons entamé notre travail par la modélisation de la turbine éolienne et ses deux commandes, la MPPT indirecte pour maximiser le capteur de puissance pendant les faibles vitesses du vent et le "pitch control" pour limiter et nominaliser la puissance convertie pendant les fortes vitesses du vent.

Nous avons ensuite présenté la modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable séparément. Cette chaîne qui est constituée d'une machine asynchrone à double alimentation entraînée par une turbine à calage variable et pilotée par le rotor via deux convertisseurs de puissances bidirectionnelles fonctionnant en MLI et reliés au réseau.

Nous avons terminé ce chapitre en donnant une description des générateurs électriques utilisés pour la production de l'énergie électrique dans une éolienne. Une attention particulière a été donnée à la machine asynchrone à double alimentation (MADA) comme machine qui sera utilisée dans la conversion de l'énergie éolienne. Une description détaillée est faite sur la MADA en développant sa structure et son fonctionnement.

CHAPITRE III

**MODELISATION ELECTROMECHANIQUE D'UNE
CHAÎNE EOLIENNE A BASE DE MADA**

III-1 INTRODUCTION

La machine à courant continu a régné en maître jusqu'à ces dernières années car bien que le coût de fabrication soit assez élevé, les possibilités de réglage (découplage naturel entre le courant dans l'induit et le flux) sont simples à mettre en œuvre et faisaient la différence même si la maintenance pose problème (balais, collecteur). Depuis quelques années, grâce à la mise au point de calculateurs « temps réel » rapides, on exploite de plus en plus les machines asynchrones. Ces machines sont de fabrication simple et ne posent pas de problèmes de maintenance. Par contre, on ne savait pas réaliser le découplage courant-flux car on ne peut jouer que sur les caractéristiques de la tension du moteur : il n'y a pas d'excitation, C'est maintenant chose faite.

Par ailleurs, pour étudier une machine électrique, le but est d'élaborer un modèle aussi fin que possible qui puisse rendre compte de la réalité. On sait que le dimensionnement d'une motorisation se fait en tenant compte des régimes transitoires (mise en vitesse) qui sont plus contraignants que les régimes établis. Il importe donc que les modèles soient utilisables aussi bien en régime statique que dynamique. C'est facile à faire pour le moteur à courant continu, ça l'est beaucoup moins pour le moteur asynchrone.

De nombreuses applications industrielles nécessitent un contrôle de vitesse ou de position. La relation fondamentale de la dynamique permet d'écrire :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = \Gamma_e - \Gamma_r \quad \text{III.1}$$

où Γ_e représente la somme des couples moteurs appliqués, Γ_r la somme des couples résistants et J le moment d'inertie de l'ensemble des parties tournantes.

On obtient ainsi la vitesse par :

$$\Omega = \Omega_0 + \frac{1}{J} \int_0^t (\Gamma_e - \Gamma_r) dt \quad \text{III.2}$$

ce qui montre que le contrôle de la vitesse (ou de la position qui est la primitive de la vitesse) passe par le contrôle du couple.

La machine à courant continu à excitation séparée est bien adaptée à un contrôle du couple car il suffit de contrôler son courant induit. Le but à atteindre est de faire la même chose avec la machine asynchrone. [AGU 10]

Une éolienne utilisant une MADA permet d'extraire une puissance maximale à partir d'une vitesse de vent donnée en optimisant la vitesse spécifique λ , et en minimisant les contraintes mécaniques sur la turbine lors des rafales de vent.

L'utilisation de la MADA pour la production de l'énergie électrique à partir de l'énergie éolienne est très répandue. En effet, avec le regain d'intérêt pour les énergies renouvelables, les systèmes éoliens à vitesse variable avec la MADA connaissent un grand essor. La configuration, couramment dans les systèmes éoliens à vitesse variable avec MADA consiste à alimenter le rotor par un convertisseur et à lier le stator directement au réseau (fig III.1).

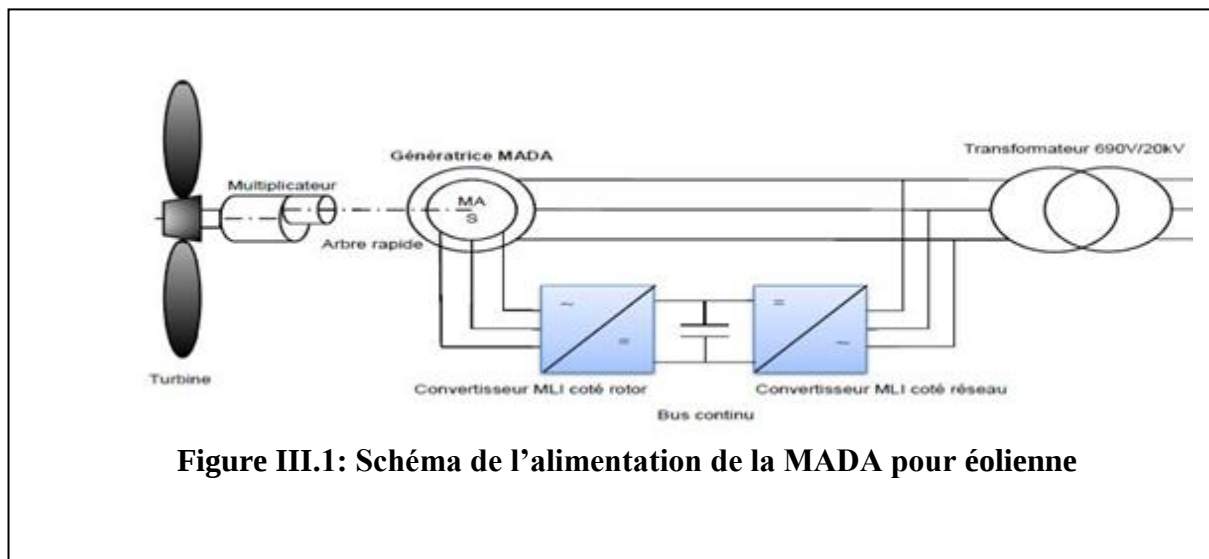


Figure III.1: Schéma de l'alimentation de la MADA pour éolienne

Lors de son fonctionnement à vitesse variable, la machine asynchrone à double alimentation (MADA) présente plusieurs avantages tels que:

- La mesure des courants au stator et rotor donne une grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- Le partage des fréquences entre le stator et le rotor : en effet, dans le cas d'une double alimentation, il est possible et recommandé de partager la vitesse de

rotation du rotor entre les deux convertisseurs alimentant la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentent son rendement.

- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale.
- La MADA se comporte comme une machine synchrone et l'on peut pratiquer des rapports de démagnétisation très importants.
- Un fonctionnement en régime dégradé plus souple que la machine à simple alimentation, quand un onduleur tombe en panne.

III.2 MODELISATION MECANIQUE DE L'EOLIENNE

La mesure exacte du vent à la hauteur des turbines est assez complexe. Cependant, le vent peut être représenté par une grandeur aléatoire définie par des paramètres statistiques[ABU 08].

De nombreux travaux sur la modélisation du vent ont été réalisés. L'un des principes retenus consiste à générer l'allure temporelle du vent à partir d'un bruit blanc sur lequel est appliquée une fonction de transfert à déterminer. Les paramètres de cette fonction de transfert dépendent de grandeurs caractéristiques du site et de la nature de vent.

III.2.1 MODELISATION DU CONVERTISSEUR EOLIEN

La turbine étudiée comprend trois pales identiques. Elles sont fixées à un arbre d'entraînement qui est relié à un multiplicateur de rapport G . Le multiplicateur entraîne le générateur électrique à travers un arbre moteur.

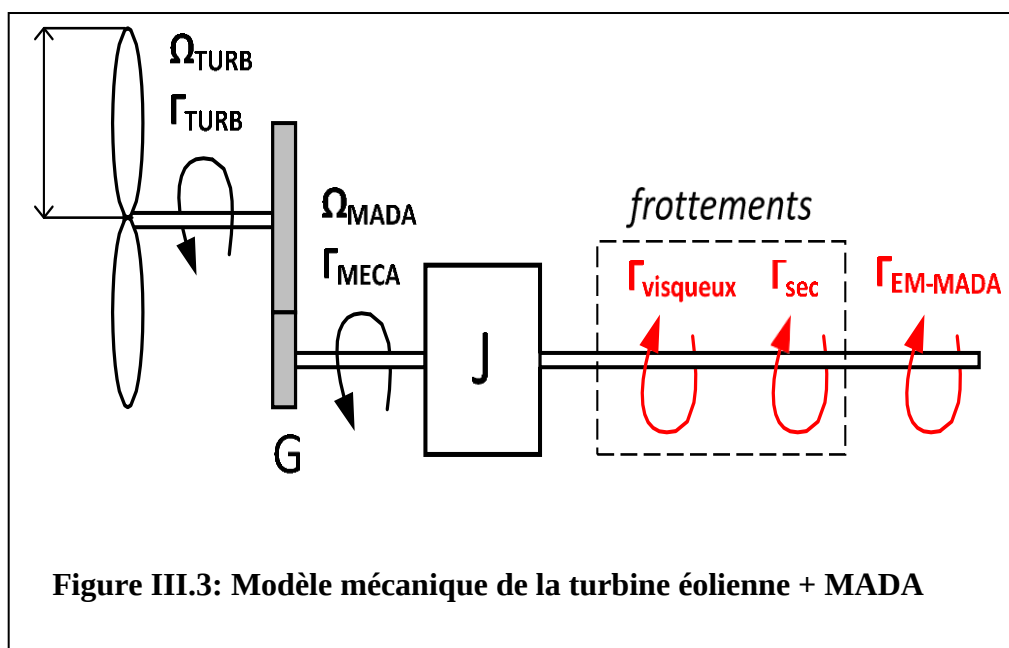
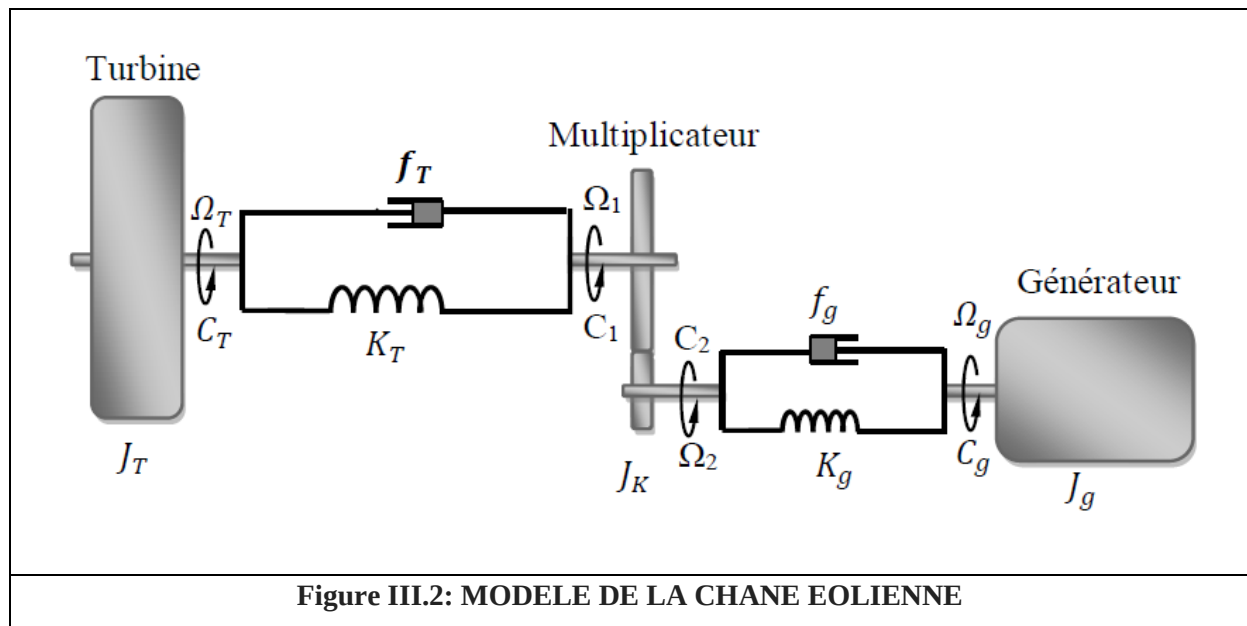
En faisant l'hypothèse d'un angle de pale fixe et sachant que la puissance disponible donnée par la turbine est connue, tout en considérant le système turbine + réducteur comme parfait, alors l'ensemble « turbine-réducteur-arbre de la génératrice » peut être schématisé comme indiqué sur la Figure III.3. Un seul moment d'inertie J ramené sur l'arbre de la MADA est considéré pour rester en adéquation avec la structure de notre banc éolien. Le couple

électromagnétique produit par la MADA, viendra s'opposer au couple imposé par la turbine.

En considérant que la vitesse du vent est uniforme sur toutes les pales d'où une égalité des forces d'entraînement, nous pouvons remplacer les pales par un même système mécanique.

Celui-ci comprend la somme des caractéristiques mécaniques des trois pales.

On obtient alors un modèle global composé de trois sous-systèmes (fig III.3):



- La turbine
- Le Multiplicateur
- L'arbre moteur

- MODELISATION DE LA TURBINE

L'étude dynamique précédemment établie dans le premier chapitre montre que pour une vitesse de vent «V» traversant la turbine nous obtenons une puissance aérodynamique P_{aero} donnée par:

$$P_{aero} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_v^3 \quad \text{III.3}$$

V_v étant la vitesse du vent. C_p représente le rendement aérodynamique, sa valeur dépend de celle de la vitesse relative de l'éolienne (λ). Son expression est donnée par l'équation II.3. L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne.

Les expressions de la puissance et la vitesse étant connues, il est aisé ainsi de déduire l'expression du couple aérodynamique :

$$\Gamma_{aero} = \frac{P_{aero}}{\Omega_{turb}} = \frac{C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_v^3}{2\Omega_{turb}} \quad \text{III.4}$$

- MODELISATION DU MULTIPLICATEUR

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice (rapide). Il est mathématiquement modélisé par les équations suivantes :

$$\Gamma_g = \frac{\Gamma_{aero}}{G} \quad \text{III.5}$$

$$\Omega_{turb} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad \text{III.6}$$

Γ_g est le couple issu du multiplicateur et G est le gain du multiplicateur.

- MODELISATION DE L'ARBRE

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie J_{turb} 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.

$$J = \frac{J_{turb}}{G^2} + J_{mach} \quad \text{III.7}$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total Γ_{mec} appliqué au rotor. La modélisation de la transmission mécanique se résume donc comme suit:

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \sum \text{couples} = \Gamma_{mec} = \Gamma_g - \Gamma_{em} - \Gamma_{vis} \quad \text{III.8}$$

Γ_{em} est le couple électromagnétique et Γ_{vis} est le couple de frottement visqueux qui est proportionnel à la vitesse:

$$\Gamma_{vis} = f \Omega_{mec} \quad \text{III.9}$$

Notons que l'inertie du couple du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe [BIA 07].

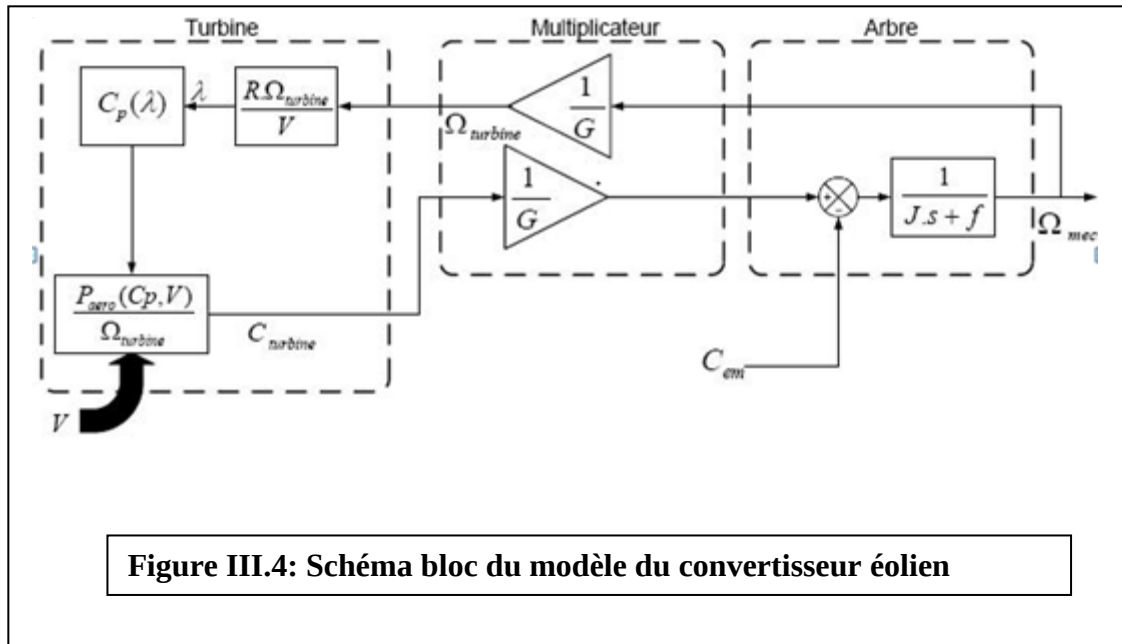
En posant $\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = s$, on obtient l'équation mécanique qui gère l'ensemble:

$$\Omega_{mec} = \frac{1}{Js+f} (\Gamma_g - \Gamma_{em}) \quad \text{III.10}$$

Le schéma bloc qui correspond à la modélisation de cette machine se déduit facilement des équations précédentes.

La turbine génère un couple aérodynamique transmis au multiplicateur (fig III.4). Les entrées de la turbine sont la vitesse du vent V , l'angle d'orientation des pales β , et la vitesse de rotation de la turbine Ω_{turb} . Ce couple peut être calculé à partir des valeurs de la vitesse du vent et la vitesse de rotation de la turbine. Le multiplicateur transforme la vitesse de la turbine et le couple aérodynamique respectivement en vitesse mécanique et couple du multiplicateur. Le modèle de l'arbre qui décrit la dynamique de la vitesse mécanique Ω_{mec} , possède donc deux entrées : le couple du multiplicateur Γ_g et le

couple électromagnétique Γ_{em} fourni par la génératrice. Le schéma montre que la vitesse de la turbine peut être contrôlée par action sur deux entrées : l'angle de la pale β et le couple électromagnétique de la génératrice Γ_g . La vitesse du vent V est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système,



III.2.2 EXTRACTION DU MAXIMUM DE LA PUISSANCE

Le contrôle de la puissance électromagnétique convertie, qui se fait indirectement par le contrôle du couple électromagnétique, nécessite certaines stratégies afin de régler la vitesse mécanique de façon à tirer un maximum de puissance. Cette stratégie est connue sous le nom de MPPT pour Maximum Power Point Tracking et correspond à l'étape 2 du fonctionnement d'une éolienne. Il existe 2 structures de commande pour la vitesse mécanique: contrôle avec asservissement et contrôle sans asservissement. La vitesse du vent est imprécise et est souvent difficile à mesurer. la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse car une mesure erronée de la vitesse conduit donc forcément à une dégradation de la puissance captée selon la technique d'extraction avec asservissement de la vitesse.

La technique de contrôle sans asservissement de la vitesse 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:

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \Gamma_{mec} = \Gamma_g - \Gamma_{em} - \Gamma_{vis} = 0 \quad \text{III.11}$$

Cette hypothèse permet de dire que le couple Γ_{mec} développé est nul et on peut écrire, en négligeant le couple de frottement visqueux:

$$\Gamma_g = \Gamma_{em} \quad \text{III.12}$$

Le couple électromagnétique de réglage Γ_{em-reg} est déterminé à partir d'une estimation du couple éolien $\Gamma_{aero-est}$:

$$\Gamma_{em-reg} = \frac{\Gamma_{aero-est}}{G} \quad \text{III.13}$$

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 III.3:

$$\Gamma_{aero-est} = \frac{C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_{vest}^3}{2\Omega_{turb-est}} \quad \text{III.14}$$

$\Omega_{turb-est}$ est calculé à partir de la mesure de la vitesse mécanique:

$$\Omega_{turb-est} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad \text{III.15}$$

Une valeur estimée de la vitesse du vent peut être obtenue à partir de l'équation II.11:

$$v_{est} = \frac{R\Omega_{turb-est}}{\lambda} \quad \text{III.16}$$

En combinant les 4 dernières équations on obtient:

$$\Gamma_{em} = \frac{C_p}{\lambda^3 C_p} \cdot \frac{\rho \cdot \pi R^5}{2} \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad \text{III.17}$$

Pour extraire le maximum de la puissance générée, il faut fixer le ratio de vitesse à la valeur λ_{cpmax} qui correspond au maximum du coefficient de puissance C_{pmax} . Le couple électromagnétique de référence doit alors être réglé à la valeur suivante:

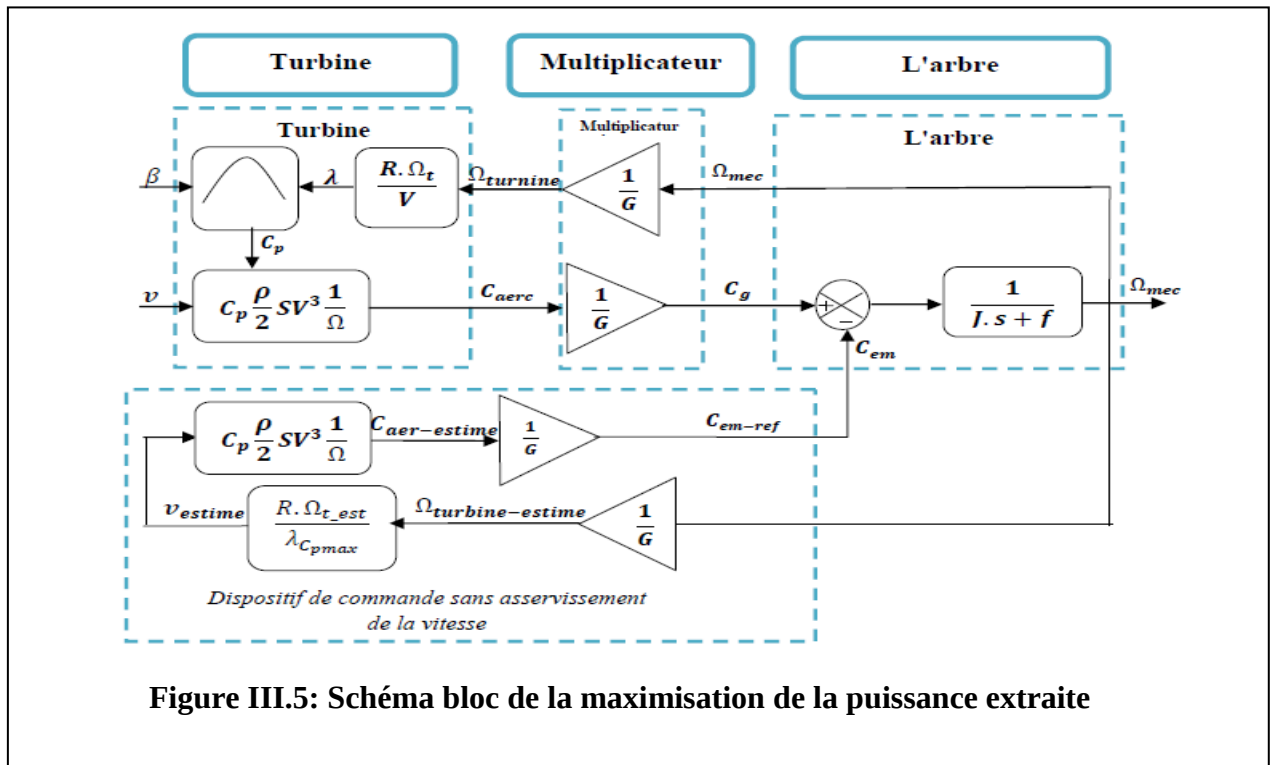
$$\Gamma_{em-reg} = \frac{C_p}{\lambda^3 C_{pmax}} \cdot \frac{\rho \cdot \pi R^5}{2} \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad \text{III.18}$$

L'expression du couple de référence devient alors proportionnelle au carré de la vitesse de la génératrice:

$$\Gamma_{em-reg} = A \Omega_{mec}^2 \quad \text{III.19}$$

$$\text{avec } A = \frac{C_p}{\lambda^3 C_{pmax}} \cdot \frac{\rho \cdot \pi R^5}{2 G^3}. \quad \text{III.20}$$

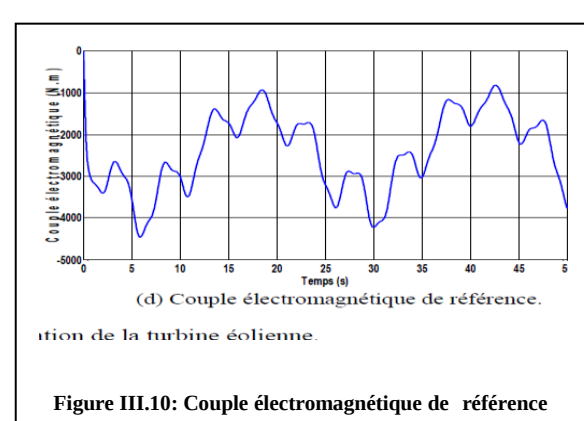
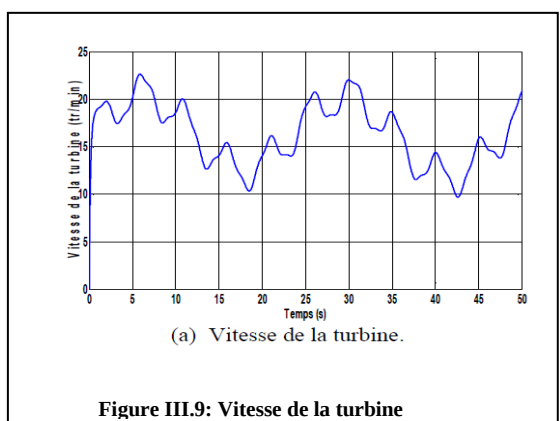
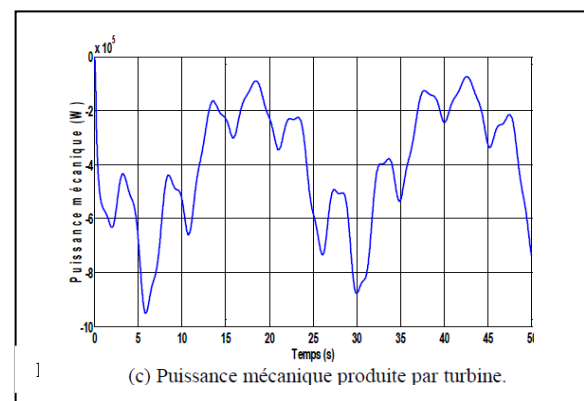
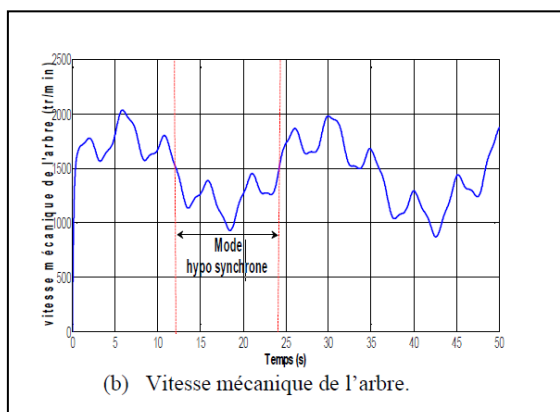
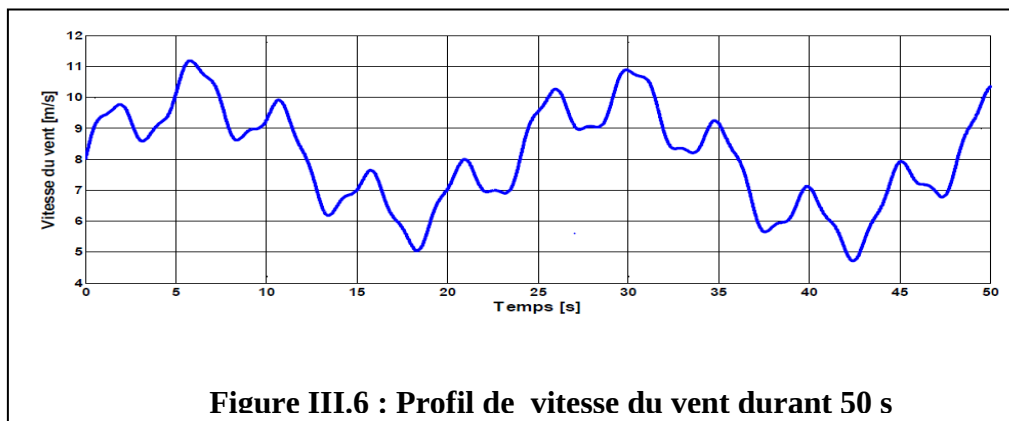
Le schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse est donné sur la figure III.5 où le couple est désigné par C et non Γ .



III.2.3 RESULTATS OBTENUS

Des calculs de simulation sur une éolienne de 1.5MW ont été effectués sur le fonctionnement de la partie mécanique de cette dernière en utilisant le profil de vitesse du vent montré sur la figure III.6. C'est un modèle tripale dont la

longueur d'une pale est de 3 m. Ces essais de simulation sont effectués en se basant sur la structure de commande sans asservissement de la vitesse et l'angle de calage est fixé à 2^0 . Nous avons donc choisi de modéliser une éolienne de 1.5 MW pour notre simulation. Les figures III.7, III.8, III.9, III.10 traduisent les variations temporelles de la vitesse mécanique de l'arbre, de la puissance mécanique produite par la turbine, de la vitesse de la turbine et du couple électromagnétique de référence respectivement. Les courbes montrent clairement, pendant la durée de 50 s, le système éolien passe par les deux modes de fonctionnement hypo et hyper synchrone.



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

III.3 MODELISATION ELECTRIQUE DE LA MADA.

La modélisation de la machine électrique est une phase primordiale de son développement, les progrès de l'informatique et du génie des logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes et d'envisager l'optimisation des machines électriques. Ainsi la modélisation permet de guider les développements par une quantification des phénomènes. En outre elle est d'un apport précieux en permettant d'une part de restituer une image de ce que l'on peut observer expérimentalement et d'autre part de prévoir des comportements de la machine. Pour obtenir le modèle d'un système ; trois tâches doivent être accomplies : choisir le modèle, déterminer ses paramètres et enfin vérifier sa validité. Mathématiquement, les machines électriques sont représentées par des modèles entrées/sorties sous forme de fonction de transfert ou encore sous forme standard d'équations en variable d'état. Ce modèle mathématique à pour but de simplifier l'étude de la machine, il est basé sur la transformation des enroulements de la machine originale en des enroulements équivalents du point de vue électrique et magnétique disposés selon des axes fictifs. Cette transformation a pour effet de rendre les inductances propres et mutuelles du modèle indépendantes de la rotation. La machine asynchrone à double alimentation doit être représentée dans le système triphasé par la figure III.11.

Pour faciliter la modélisation de la génératrice MADA, nous posons les hypothèses simplificatrices suivantes:

- Aucune saturation dans les matériaux magnétiques, perméabilité constante
- Entrefer constant (effet d'encoche négligé)

- Répartition spatiale sinusoïdale du champ dans l'entrefer
- Stator et rotor couplés en étoile sans connexion du neutre

Ces hypothèses nous permettent d'affirmer que les flux magnétiques sont additifs, que les inductances propres sont constantes et que la variation des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques est une fonction sinusoïdale de l'angle électrique θ_e suivant les axes considérés.

La MADA est schématiquement présentée par la figure III.11 où les indices s, r, a, b et c désignent le stator, le rotor et les trois enroulements (phases) respectivement. On a pris les mêmes indices a, b, c aussi bien pour les enroulements du stator que pour ceux du rotor.

III.3.1 EQUATIONS TRIPHASEES DE LA MACHINE.

III.3.1.1 LOI DES MAILLES MATRICIELLE

Il est possible d'exprimer la loi des mailles (Kirchhoff) pour chaque enroulement de la machine (voir médaillon de la Figure III.11). Ainsi, pour la phase « a » statorique, la tension V_{sa} aux bornes d'un enroulement est la somme de la tension $R_s I_{sa}$ aux bornes de la résistance R_s propre à l'enroulement et de la f.e.m. E_{sa} induite par la variation du flux φ_{sa} dans l'enroulement (Loi de Faraday).

θ_e est l'angle électrique, produit de l'angle mécanique θ_m par le nombre de paires de pôles p et θ_m est l'angle mécanique dont la dérivée par rapport au temps donne la vitesse angulaire mécanique du rotor Ω_{MADA} (vitesse de rotation de l'arbre moteur).

La machine possède 6 enroulements (3 au stator et 3 au rotor) couplés magnétiquement.

Pour chacun d'eux on peut écrire une équation tirée de la figure III.6 du type :

$$V = RI + e = RI - \frac{d\varphi}{dt} \quad \text{III.21}$$

où φ représente le flux total à travers l'enroulement.

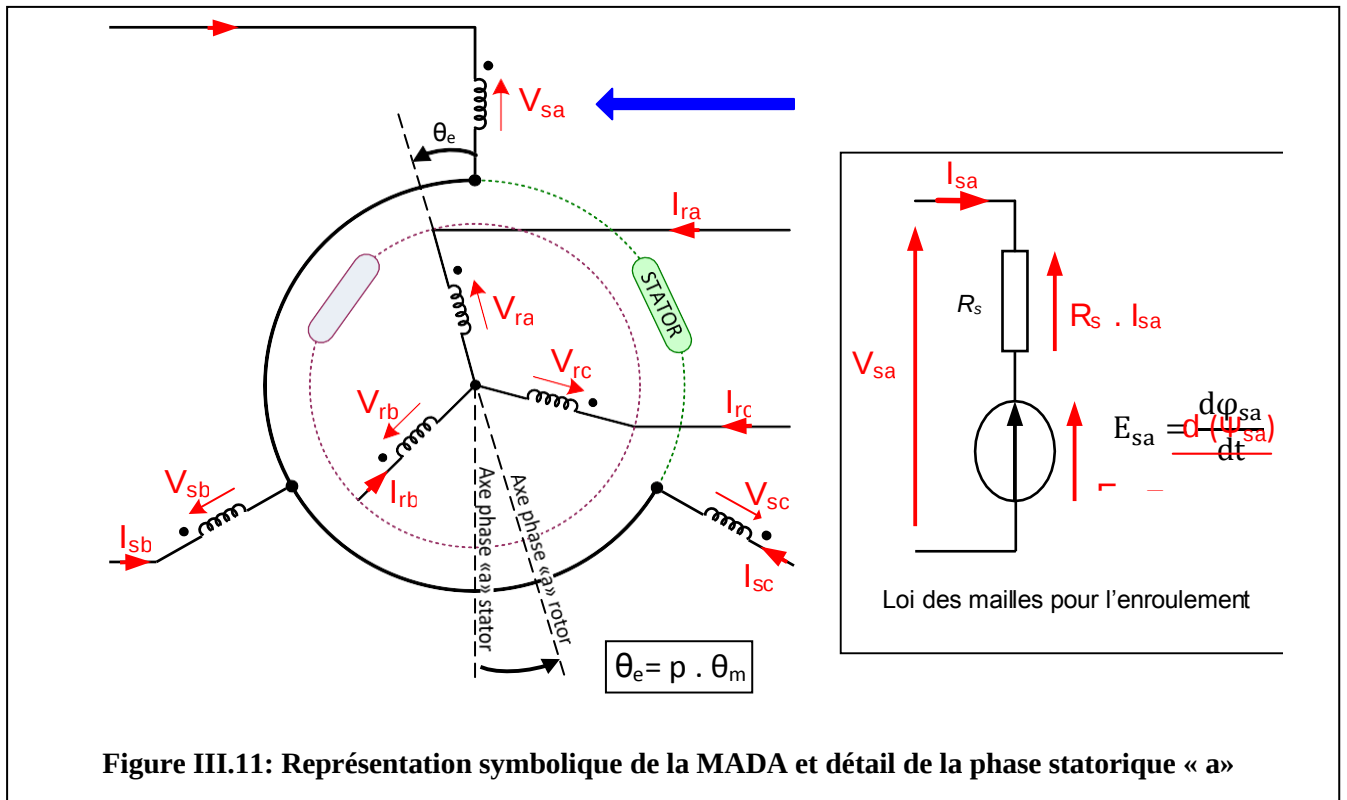
Pour l'ensemble des enroulements statoriques, on écrira en notation matricielle:

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{III.22}$$

Pour l'ensemble des enroulements rotoriques, on écrira en notation matricielle:

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} \quad \text{III.23}$$

III.3. 1.2 EQUATIONS DES FLUX



Désignons, pour le stator, par:

l_s : le coefficient d'inductance propre d'un enroulement statorique, m_s : le coefficient d'inductance mutuelle avec chacun des 2 autres bobinages statoriques et m_1, m_2, m_3 les coefficients d'inductance mutuelle avec les 3 bobinages rotoriques.

Désignons, pour le rotor, par:

l_r : le coefficient d'inductance propre d'un enroulement rotorique, m_r : le coefficient d'inductance mutuelle avec chacun des 2 autres bobinages rotoriques. Les coefficients d'inductance mutuelle avec les 3 bobinages statoriques sont les mêmes que celles d'un enroulement statorique avec les 3 bobinages rotoriques en raison de la symétrie électrique de la machine

Compte tenu de la figure III.11, on écrira:

$$m_1 = m_{sr} \cos(\theta_e), \quad m_2 = m_{sr} \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}), \quad m_3 = m_{sr} \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}). \quad \text{III.24}$$

où m_{sr} représente la valeur *maximale* des coefficients d'inductance mutuelle stator-rotor obtenue lorsque les bobinages en question sont en regard l'un de l'autre, c'est à dire lorsque $\theta_e = 0$.

Les hypothèses que nous avons présentées conduisent à des relations linéaires entre le flux et les courants.

L'expression du flux total à travers le bobinage statorique a est:

$$\varphi_{sa} = l_s I_{sa} + m_s (I_{sb} + I_{sc}) + m_1 I_{ra} + m_2 I_{rb} + m_3 I_{rc} \quad \text{III.25}$$

L'écriture matricielle ci dessous résume les 3 équations des flux statoriques:

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_{sr} \cos \theta_e & m_{sr} \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) & m_{sr} \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \\ m_{sr} \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & m_{sr} \cos \theta_e & m_{sr} \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \\ m_{sr} \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) & m_{sr} \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & m_{sr} \cos \theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \quad \text{III.26}$$

Cette écriture matricielle se met sous forme condensée suivante:

$$[\varphi_s] = [L_s][I_s] + [M_{sr}][I_r] \quad \text{III.27}$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix} \quad \text{III.28}$$

est appelée matrice inductance du stator et

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} m_{sr} \cos \theta_e & m_{sr} \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) & m_{sr} \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \\ m_{sr} \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & m_{sr} \cos \theta_e & m_{sr} \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \\ m_{sr} \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) & m_{sr} \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & m_{sr} \cos \theta_e \end{bmatrix} \quad \text{III.29}$$

est appelée matrice inductance mutuelle entre stator-rotor.

De façon similaire on aura pour le rotor:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} m_{sr} \cos \theta_e & m_{sr} \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & m_{sr} \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \\ m_{sr} \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) & m_{sr} \cos \theta_e & m_{sr} \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \\ m_{sr} \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & m_{sr} \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) & m_{sr} \cos \theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad \text{III.30}$$

ou sous forme condensée:

$$[\varphi_r] = [L_r][I_r] + [M_{rs}][I_s] \quad \text{III.31}$$

$[L_r]$ est la matrice inductance du rotor et $[M_{rs}]$ est la matrice inductance mutuelle entre le rotor et le stator.

Notons que la matrice des mutuelles du rotor s'obtiennent en transposant celle du

III.3.2 MODELISATION ELECTRIQUE EN REGIME QUELCONQUE.

stator La matrice « résistance » est simple : elle est diagonale car elle n'a de composantes non nulles que sur sa première diagonale. Par contre, les matrices « inductance » et « inductance mutuelle » sont plus complexes. Le but d'un changement de base est de rendre leur écriture plus simple dans la nouvelle base. Cela consiste en pratique à les rendre diagonales.

Considérons une matrice inductance statorique ou rotorique en omettant l'indice.

$$[L] = \begin{bmatrix} l & m & m \\ m & l & m \\ m & m & l \end{bmatrix} \quad \text{III.32}$$

Cette matrice est symétrique par rapport à sa première diagonale: Elle est donc diagonalisable et la démarche consiste à trouver les valeurs propres de cette matrice des inductances.

Les trois valeurs propres $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ de la matrice inductance sont déterminés en écrivant que le déterminant de la matrice $([L] - \lambda[I])$, où $[I]$ est la matrice unité, est nul:

$$\det([L] - \lambda[I]) = 0 \quad \text{III.33}$$

En développant le déterminant sur la première ligne de la matrice inductance, on obtient une équation du second degré en m du deuxième facteur:

$$(l - \lambda - m)[(l - \lambda) - 2m^2] = 0 \quad \text{III.34}$$

Les trois valeurs propres sont donc:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = l - m \text{ et } \lambda_3 = l + 2m \quad \text{III.35}$$

La matrice diagonale peut donc s'écrire:

$$[L_{diag}] = \begin{bmatrix} l - m & 0 & 0 \\ 0 & l - m & 0 \\ 0 & 0 & l + 2m \end{bmatrix} \quad \text{III.36}$$

Déterminons maintenant la matrice de changement de base qui pourra s'écrire:

$$[P] = [(V_{\lambda_1}), (V_{\lambda_2}), (V_{\lambda_3})] \quad \text{III.37}$$

où V_λ représente le vecteur propre associé à la valeur propre λ . Pour la valeur propre λ_1 on a:

$$\begin{bmatrix} l & m & m \\ m & l & m \\ m & m & l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = (l - m) \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} \quad \text{III.38}$$

où α , β et γ sont les coordonnées du vecteur propre V_{λ_1} associé à la valeur propre λ_1 . En effectuant le produit des matrices, on obtient pour la première ligne:

$$l\alpha + m\beta + n\gamma = l\alpha - m\alpha \quad \text{soit} \quad \alpha + \beta + \gamma = 0 \quad \text{III.39}$$

On vérifiera que pour les 2 autres lignes on obtient le même résultat. Par conséquent tout vecteur dont les composantes forment un système triphasé équilibré est un vecteur propre. On peut donc choisir avec θ quelconque:

$$(V_{\lambda_1}) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad \text{III.40}$$

La 2ème valeur propre étant identique à la première, on doit choisir un vecteur propre qui soit indépendant. Un choix possible est :

$$(V_{\lambda_2}) = \begin{bmatrix} -(\sin\theta) \\ -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad \text{III.41}$$

On montrera facilement que pour la valeur propre λ_3 , la solution est un vecteur dont les 3 composantes sont égales :

$$(V_{\lambda_3}) = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{III.42}$$

Une matrice de changement de base possible (elle n'est pas unique) est donc:

$$[P(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad \text{III.43}$$

L'intérêt de ce changement de base est qu'il rend la matrice inductance de départ $[L]$ (seulement symétrique) diagonale.

III.3.3 PASSAGE DU TRIPHASÉ AU BIPHASÉ: TRANSFORMATION DE PARK

La **transformation de PARK** est ancienne (1929), si elle redevient à l'ordre du jour, c'est tout simplement parce que les progrès de la technologie des composants permettent maintenant de la réaliser en temps réel.

Soit (V_s) le vecteur tension appliqué aux 3 phases statoriques de la machine :

$$V(s) = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{III.44}$$

Ce vecteur constitué des 3 tensions est à priori quelconque car on ne se limite pas dans cette partie à un régime sinusoïdal.

La transformée de PARK correspond tout simplement au changement de base précédemment exposé qui permet de diagonaliser une matrice « inductance ».

La matrice de changement de base est $[P(\theta_s)]$ définie par :

$$[P(\theta_s)] = \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & -\sin(\theta_s) & 1 \\ \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad \text{III.45}$$

l'indice « s » étant ici rajouté pour signifier que l'on est au stator. Le paramètre θ_s est au choix de l'utilisateur. Il doit donc être choisi judicieusement et peut dépendre du temps. On écrira alors:

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & -\sin(\theta_s) & 1 \\ \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{s0} \end{bmatrix} \quad \text{III.46}$$

ce qui représente le changement de coordonnées suivant:

- V_{sd} est appelée composante directe de PARK
- V_{sq} est appelée composante en quadrature (ou encore transversale)
- V_{s0} s'apparente à la composante homopolaire.

Le changement de base donne alors:
$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{s0} \end{bmatrix} = [P(\theta_s)]^{-1} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{III.47}$$

où $[P(\theta_s)]^{-1}$ est la matrice inverse de $[P(\theta_s)]$. On obtient donc:

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{s0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{III.48}$$

$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{s0} \end{bmatrix}$ représente les coordonnées de Park du vecteur initial $\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}$ lors du changement de base.

Il est alors facile de remarquer que les 3 vecteurs qui constituent la matrice de changement de base $[P(\theta_s)]$ ne sont pas normés. Par contre, on constate qu'ils sont orthogonaux 2 à 2 (produit scalaire nul). On préfère définir un changement de base qui soit orthonormé en définissant la matrice de passage $P_1(\theta_s)$ normée. En prenant changement de base $[P_1(\theta_s)]$ orthonormée, le calcul de sa matrice inverse est très simple, on obtient:

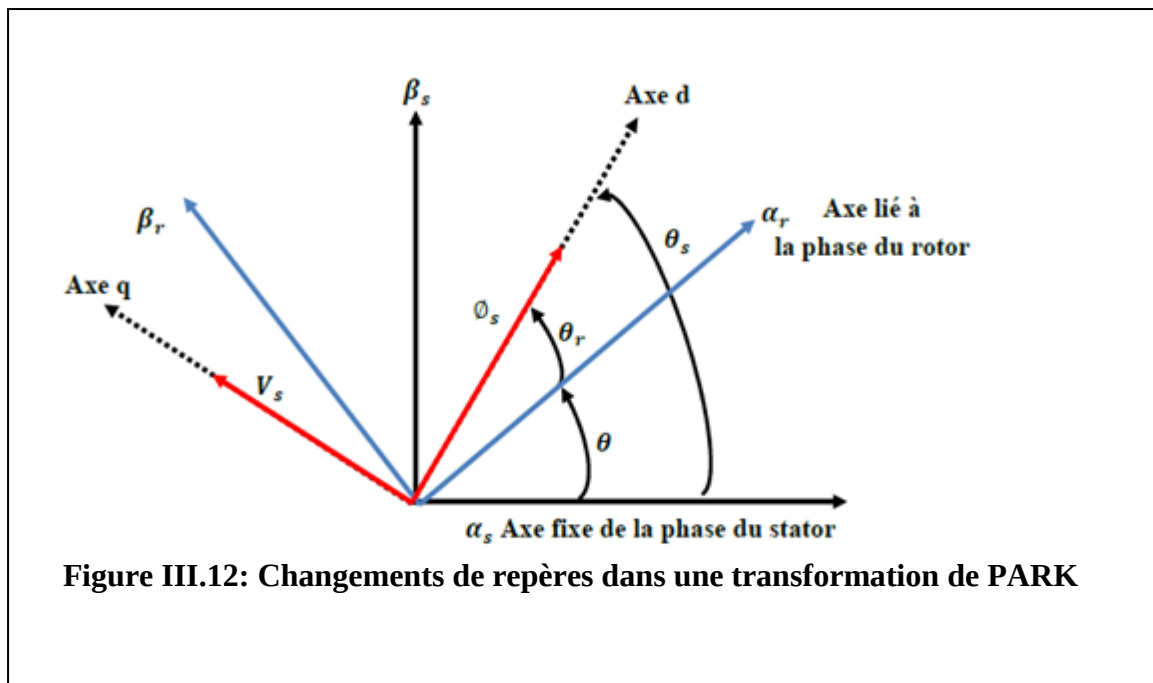
$$[P_1(\theta_s)]^{-1} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad \text{III.49}$$

Ainsi la transformation de PARK est l'association de la transformation de CONCORDIA et de la matrice de rotation $P(\theta)$ (Figure III.12). Cette transformation permettra de conserver les expressions des puissances, mais pas celles des amplitudes des tensions et des courants. La transformation de CONCORDIA permet de passer d'un système triphasé à un système biphasé en quadrature associé à une composante homopolaire (celle-ci sera nulle si le neutre n'est pas raccordé, notre hypothèse). Elle permet de décorréler la matrice de couplage inductif entre phase (couples l_s - m_s ou l_r - m_r) mais ne permet pas de

supprimer la dépendance des inductances mutuelles $m_{sr} \cos(\theta_e + x)$ à l'angle électrique θ . Il subsiste encore 2 référentiels tournants l'un par rapport à l'autre.

La transformation de Park est ancienne découle de la diagonalisation des matrices inductances statoriques et rotoriques.

Elle permet de passer du repère (abc) vers le repère ($\alpha\beta$), puis vers le repère (dq). Le repère ($\alpha\beta$) est toujours fixe par rapport au repère (abc); par contre le repère (dq) est mobile; il forme avec le repère fixe ($\alpha\beta$) un angle, appelé angle de la transformation de Park ou angle de Park (figure III.12).

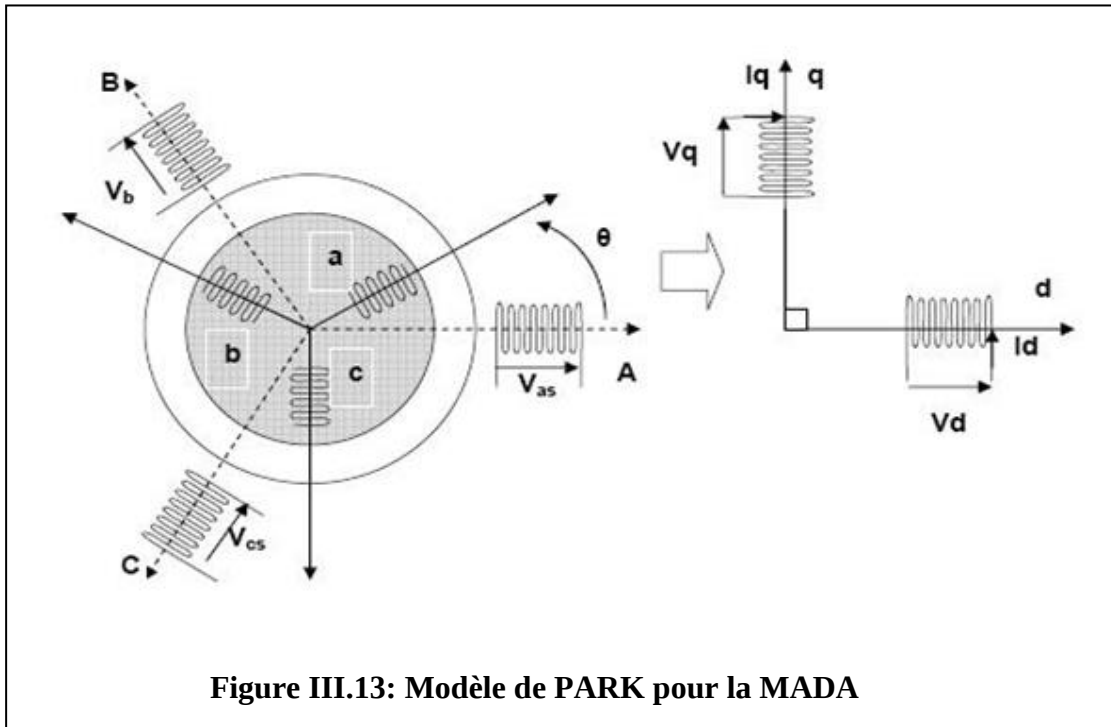


Ainsi, la transformation de Park permet de transformer les enroulements statoriques et rotoriques triphasés en des enroulements statorique et rotorique biphasés orthogonaux, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système précédent (figure III.13)

La matrice de transformation de Park $P(\theta)$ est définie comme suit:

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad \text{III.50}$$

Cette matrice permet le passage des composantes du système triphasé à celles du système biphasé. Ces composantes peuvent être des tensions, des courants ou des flux.



III.3.4 EQUATIONS ELECTRIQUES DE LA GADA DANS LE REPERE (dq)

III.3.4. 1 CHOIX DU REFERENTIEL

Le repère (dq) obtenu par rotation d'angle θ du repère (a, b, c) qui fait un angle θ_s avec le stator et un angle θ_r avec le rotor, n'est pas défini et est donc libre.

Trois choix importants s'offrent: Le référentiel (dq) peut être fixé au stator, au rotor ou au champ tournant. Il est préférable de travailler dans le repère fixé au champ tournant du moment qu'on s'intéresse à l'étude de la commande d'une machine. Dans ce cas on a $\omega_{\text{coord}} = \omega_s$.

III.3.4. 2 APPLICATION DE LA TRANSFORMATION DE PARK A LA GADA

Les équations reliant les composantes des grandeurs électriques dans les deux référentiels, nouveau (dq) et ancien (a, b, c) s'écrivent sous forme matricielle suivante:

- **Pour les tensions:**

$$\left. \begin{aligned} [V_{dq}]_s &= [P(\theta_s)]^{-1}[V_s] \quad , \quad [V_{dq}]_r = [P(\theta_s)]^{-1}[V_r] \\ [V_s] &= [P(\theta_s)][V_{dq}]_s \quad , \quad [V_r] = [P(\theta_s)][V_{dq}]_r \end{aligned} \right\} \quad \text{III.51}$$

- **Pour les courants:**

$$\left. \begin{aligned} [I_{dq}]_s &= [P(\theta_s)]^{-1}[I_s] \quad , \quad [I_{dq}]_r = [P(\theta_s)]^{-1}[I_r] \\ [I_s] &= [P(\theta_s - \theta)][I_{dq}]_s \quad , \quad [I_r] = [P(\theta_s - \theta)][I_{dq}]_r \end{aligned} \right\} \quad \text{III.52}$$

Notons qu'avec ce choix des coordonnées $\theta_r = \theta_s - \theta$

- **Pour les flux**

$$\left. \begin{aligned} [\varphi_{dq}]_s &= [P(\theta_s)]^{-1}[\varphi_s] \quad , \quad [\varphi_{dq}]_r = [P(\theta_s)]^{-1}[\varphi_r] \\ [\varphi_s] &= [P(\theta_s - \theta)][\varphi_{dq}]_s \quad , \quad [\varphi_r] = [P(\theta_s - \theta)][\varphi_{dq}]_r \end{aligned} \right\} \quad \text{III.53}$$

III.3.4.3 EQUATIONS ELECTRIQUES DE LA GADA DANS LE REPERE (dq)

En multipliant les équations III.44 et III.48 par la matrice de Park inverse

$P(\theta)^{-1}$, on obtient les équations électriques de la GADA , dans le référentiel (dq):

$$\left. \begin{aligned} V_{ds} &= R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} &= R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} &= R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} + g \omega_s \varphi_{qr} \\ V_{qr} &= R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} - g \omega_s \varphi_{dr} \end{aligned} \right\} \quad \text{III.54}$$

g étant le glissement défini par $g = \frac{\omega - \omega_s}{\omega_s}$

En exprimant les flux en fonction des courants et en multipliant les équations obtenues par la matrice de Park, on obtient les équations électriques suivantes:

$$\left. \begin{aligned} V_{ds} &= R_s I_{ds} + l_s \frac{dI_{ds}}{dt} + m \frac{dI_{dr}}{dt} - \omega_s l_s I_{qs} - \omega_s m I_{qr} \\ V_{qs} &= R_s I_{qs} + l_s \frac{dI_{qs}}{dt} + m \frac{dI_{qr}}{dt} + \omega_s l_s I_{ds} + \omega_s m I_{dr} \\ V_{dr} &= R_r I_{dr} + l_r \frac{dI_{dr}}{dt} + m \frac{dI_{ds}}{dt} + g\omega_s l_r I_{qr} + g\omega_s m I_{qs} \\ V_{qr} &= R_r I_{qr} + l_r \frac{dI_{qr}}{dt} + m \frac{dI_{qs}}{dt} - g\omega_s l_r I_{dr} - g\omega_s m I_{ds} \end{aligned} \right\} \quad \text{III.55}$$

Ce système d'équations peut se mettre sous forme matricielle comme suit:

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_s & 0 & m & 0 \\ 0 & l_s & 0 & m \\ m & 0 & l_r & 0 \\ 0 & m & 0 & l_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -l_s & 0 & -m \\ l_s & 0 & m & 0 \\ 0 & gm & 0 & gl_r \\ -gm & 0 & -gl_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad \text{III.56}$$

La représentation d'états correspondant à ce système d'équations se met sous forme matricielle suivante:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s/\sigma l_s & R_s k^2/\sigma m & \omega_s & 0 \\ -\omega_s & -R_s/\sigma l_s & 0 & R_s k^2/\sigma m \\ R_r k^2/\sigma m & 0 & -R_r/\sigma l_r & g\omega_s \\ 0 & R_r k^2/\sigma m & -g\omega_s & -R_r/\sigma l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} \quad \text{III.57}$$

avec $\sigma = 1 - k^2$ et $k = \sqrt{\frac{m}{l_s l_r}}$. σ est appelé coefficient de dispersion de

Blondel. Le coefficient de dispersion de Blondel permet de simplifier nos équations. σ est défini comme étant le rapport du flux total de fuites sur le flux total global entre bobines couplées et permet de quantifier les pertes de flux.

Ainsi une machine parfaite n'ayant aucune perte de flux aura un coefficient de dispersion nul. De manière générale, pour une machine asynchrone, σ est largement inférieur à 1 [BEN 13].

III.3.5 PUISSANCE ACTIVE ET PUISSANCE REACTIVE

A partir de la définition de la puissance active P et réactive Q :

$$P = \text{Re}[V][I] \quad , \quad Q = \text{Im}[V][I], \quad \text{III.58}$$

et en utilisant les équations:

$$V_s = V_{ds} + jV_{qs} \quad \text{et} \quad V_r = V_{dr} + jV_{qr} \quad \text{III.59}$$

on déduit les expressions des puissances statoriques, active P_s et réactive Q_s .

$$P_s = \text{Re}[V_s][I_s] = V_{ds}I_{ds} + V_{qs}I_{qs} \quad \text{III.60}$$

$$Q_s = \text{Im}[V_s][I_s] = V_{qs}I_{ds} - V_{ds}I_{qs} \quad \text{III.61}$$

De façon analogue on tire les expressions des puissances rotoriques, active P_r et réactive Q_r :

$$P_r = \text{Re}[V_r][I_r] = V_{dr}I_{dr} + V_{qr}I_{qr} \quad \text{III.62}$$

$$Q_r = \text{Im}[V_r][I_r] = V_{qr}I_{dr} - V_{dr}I_{qr}$$

Dans l'espace (dq), les enroulements statoriques reçoivent une puissance électrique instantanée donnée par l'expression suivante :

$$P_s = R_s(I_{ds}^2 + I_{qs}^2) + \left(\frac{d\varphi_{ds}}{dt} I_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} I_{qs} \right) + \omega_s(\varphi_{ds}I_{qs} - \varphi_{qs}I_{ds}) \quad \text{III.63}$$

Le premier terme représente la puissance dissipée par effet joule, le deuxième terme représente la puissance électromagnétique échangée avec la source et le dernier terme est la puissance mécanique P_m .

Le couple électromagnétique Γ_{em} défini par $\Gamma_{em} = \frac{P_m}{\Omega_s}$ où $\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$, (p étant le nombre de pôles) a pour expression:

$$\Gamma_{em} = \frac{pm}{l_s}(\varphi_{qs}I_{dr} - \varphi_{ds}I_{qr}) \quad \text{III.64}$$

La fréquence de la tension statorique étant imposée par le réseau électrique, la pulsation des courants rotoriques est donnée par:

$$\omega_r = \omega_s - p\Omega \quad \text{III.65}$$

III. 4 Modélisation de l'onduleur

Dans notre étude, nous considérons le cas d'un onduleur triphasé idéal à deux niveaux de tension, à Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI), modélisé par des interrupteurs parfaits à commutation instantanée. Le point milieu de la source de tension est fictif.

Un onduleur de tension est un convertisseur statique assurant la conversion continu-alternatif de la tension [24].

Il est constitué de cellules de commutation généralement à transistors ou à thyristors GTO pour les grandes puissances. Il permet d'imposer à la machine des ondes à amplitudes et fréquences variables à partir d'un réseau standard 220/380 V-50 Hz [25].

III.4.1 Principe de fonctionnement

Le montage onduleur est constitué de six interrupteurs bidirectionnels, chaque interrupteur est constitué d'un transistor (T) et d'une diode (D) montés en tête-bêche Figure 2.7 Les couples d'interrupteurs (K_{11} , K_{21}), (K_{12} , K_{22}), (K_{13} , K_{23}) sont commandés d'une manière complémentaire, pour assurer la continuité des courants dans la charge d'une part, et d'éviter le court-circuit de la source d'autre part [2]. Pour se prémunir d'un court-circuit intempestif, il est nécessaire laisser un petit intervalle de temps entre la commande à la fermeture de T_{21} (ou

T_{22} ou T_{23}) et la commande à l'ouverture de T_{11} (ou T_{12} ou T_{13}) et inversement [24].

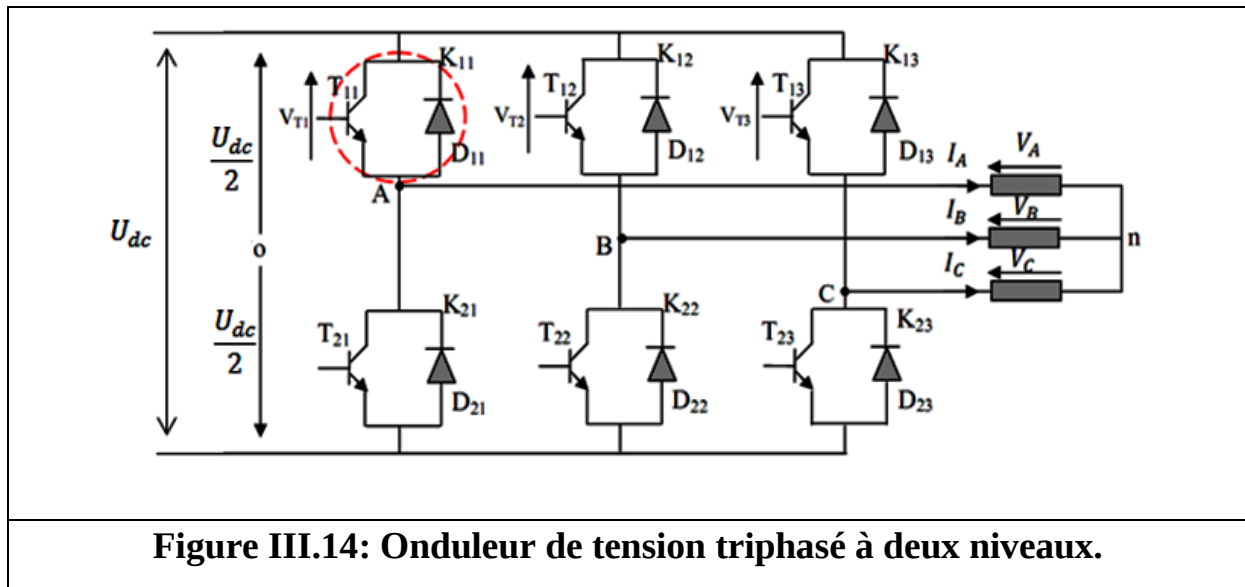
Les diodes $D_{ij}(i \in [1,2], j \in [1,2,3])$ sont des diodes à roue libre assurant la protection des thyristors [47].

L'état des interrupteurs, supposés parfaits peuvent être défini par trois grandeurs booléennes de commande $S_j (j = 1,2,3)$ [26]:

- $S_j = 1$ le cas où l'interrupteur de haut est fermé et celui d'en bas ouvert.
- $S_j = 0$ le cas où l'interrupteur de haut est ouvert et celui d'en bas fermé.

On peut écrire les tensions $V_{ko}(k = A, B, C)$ en fonction des signaux de commande S_j et en tenant compte du point fictif "o" représenté sur la Figure 2.7 :

$$V_{ko} = U_{dc} \left(S_j - \frac{1}{2} \right) \quad (\text{III.66})$$



Pour simplifier l'étude nous supposons que [35]:

- ✓ La commutation des interrupteurs est instantanée.

- ✓ La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable c'est-à-dire l'interrupteur supposé idéalisé.
- ✓ La charge est équilibrée couplée en étoile avec neutre isolé.

Les trois tensions composées : V_{AB} , V_{BC} , et V_{CA} sont définies par les relations suivantes :

$$\begin{cases} V_{AB} = V_{An} - V_{Bn} \\ V_{BC} = V_{Bn} - V_{Cn} \\ V_{CA} = V_{Cn} - V_{An} \end{cases} \quad (\text{III.67})$$

Le système V_A , V_B et V_C étant équilibré ($V_{An} + V_{Bn} + V_{Cn} = 0$), on aura donc:

$$\begin{cases} V_{An} = \frac{1}{3}(V_{AB} - V_{CA}) \\ V_{Bn} = \frac{1}{3}(V_{BC} - V_{AB}) \\ V_{Cn} = \frac{1}{3}(V_{CA} - V_{BC}) \end{cases} \quad (\text{III.68})$$

En faisant apparaître le point "o", les tensions entre phases peuvent aussi s'écrire:

$$\begin{cases} V_{AB} = V_{Ao} - V_{Bo} \\ V_{BC} = V_{Bo} - V_{Co} \\ V_{CA} = V_{Co} - V_{Ao} \end{cases} \quad (\text{III.69})$$

En remplaçant (III.69) dans (III.68) on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Ao} \\ V_{Bo} \\ V_{Co} \end{bmatrix} \quad (\text{III.70})$$

Des relations suivantes:

$$\begin{cases} V_{Ao} = V_A + V_{no} \\ V_{Bo} = V_B + V_{no} \\ V_{Co} = V_C + V_{no} \end{cases} \quad (\text{III.71})$$

On peut déduire le potentiel entre les points **n** et **o** :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{Ao} + V_{Bo} + V_{Co}) \quad (\text{III.72})$$

L'utilisation de l'expression (III.66) permet d'établir les équations instantanées des tensions simples en fonction des grandeurs de commande :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{U_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III.73})$$

Le système (III.73) représente le modèle mathématique de l'onduleur triphasé à MLI.

III. 4.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Dans notre travail, nous nous sommes intéressés à la technique d'origine analogique dite sinus-triangle.

La modulation triangulo-sinusoïdale est appelée également modulation de largeur d'impulsion intersectée puisque son principe repose sur l'intersection d'une onde modulante basse fréquence, dite tension de référence, généralement sinusoïdale avec une onde porteuse haute fréquence de forme généralement triangulaire d'où l'appellation triangulo-sinusoïdale. Le résultat de la comparaison de ces deux signaux sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance [23].

Le schéma de principe est donné par la figure III.14 :

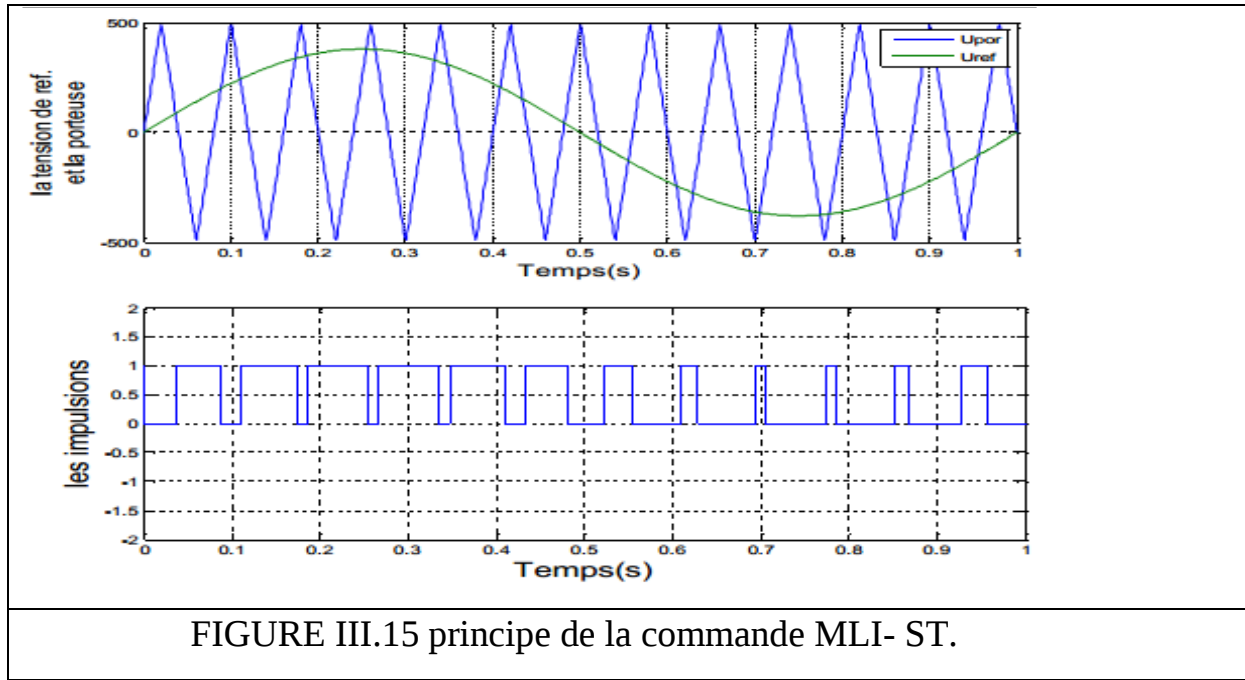


FIGURE III.15 principe de la commande MLI- ST.

Equation de la porteuse :

La porteuse est un signal triangulaire caractérisé par sa fréquence f_p et sa valeur de crête V_p .

On définit l'équation de la porteuse dans sa période $[0, T_p]$ par [23]:

$$\begin{cases} x_1(t) = V_p \left(-1 + 4 \frac{t}{T_p} \right) & \text{si } t \in \left[0, \frac{T_p}{2} \right] \\ x_2(t) = V_p \left(3 - 4 \frac{t}{T_p} \right) & \text{si } t \in \left[\frac{T_p}{2}, T_p \right] \end{cases} \quad (\text{III.74})$$

Equation de la référence :

La référence est un signal sinusoïdal d'amplitude V_r et de fréquence f_r . En triphasé, les trois tensions sinusoïdales de référence sont données par [23]:

$$\begin{cases} v_{rA}(t) = V_r \sin(2\pi f_r t) \\ v_{rB}(t) = V_r \sin\left(2\pi f_r t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{rC}(t) = V_r \sin\left(2\pi f_r t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{III.75})$$

La fonction logique S_j associée au signal de commande est définie par :

$$S_{123} = \begin{cases} 1 & \text{si } (v_{rABC} - x(t)) \geq 0 \\ 0 & \text{si } (v_{rABC} - x(t)) < 0 \end{cases} \quad (\text{III.76})$$

Caractéristiques de la MLI :

Deux paramètres caractérisent cette commande si la référence est sinusoïdale [23].

L'indice de modulation m qui définit le rapport entre la fréquence f_p de la porteuse et la fréquence f_r de la référence : $m = f_p/f_r$

Le taux de modulation r (ou coefficient de réglage en tension ou encore rapport cyclique) qui donne le rapport de l'amplitude de la modulante V_r à la valeur crête V_p de la porteuse : $r = V_r/V_p$

III.5 CONCLUSION

Nous avons décrit, dans ce chapitre, les parties essentielles de système de conversion éolienne, la première représente la partie mécanique qui contient la turbine, le multiplicateur et l'arbre de la GADA. Dans la deuxième nous avons investi la modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation. 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, la transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle.

CHAPITRE IV

COMMANDE VECTORIELLE ET COMMANDE BACKSTEPPING DE LA MADA

IV.1 COMMANDE VECTORIELLE DE LA GADA

IV.1.1 PRINCIPE DE LA COMMANDE

Le principe du pilotage vectoriel des machines électriques est déduit de la machine à courant continu qui était dominante dans le marché industriel des machines à vitesse variable à cause de son caractère spécial lié au contrôle séparé du flux par le courant d'excitation et du couple par le courant d'induit.

La commande vectorielle, aussi appelée commande à flux orienté (*field-oriented control* en anglais), est une méthode de commande des variateurs de vitesse électrique dans laquelle les courants statoriques triphasés d'un moteur électrique à courants alternatifs sont transformés en deux composantes orthogonales qui peuvent être considérées comme étant des vecteurs (fig IV.1). Le premier vecteur permet le réglage du flux magnétique du moteur, tandis que le second règle le couple. Ils sont alors découplés et le fonctionnement devient alors similaire à celui d'un moteur à courant continu.

Le calculateur calcule alors à partir de la consigne de vitesse du moteur, le flux et le couple nécessaire, desquels on déduit les courants requis. Typiquement, un régulateur PI sert à maintenir le courant à la valeur demandée. La modulation de largeur d'impulsion (MLI) gère ensuite la commutation des transistors du variateur de vitesse électrique en fonction de la consigne de tension qui lui parvient. Un régulateur PI est placé après les consignes de courant afin de stabiliser l'ensemble.

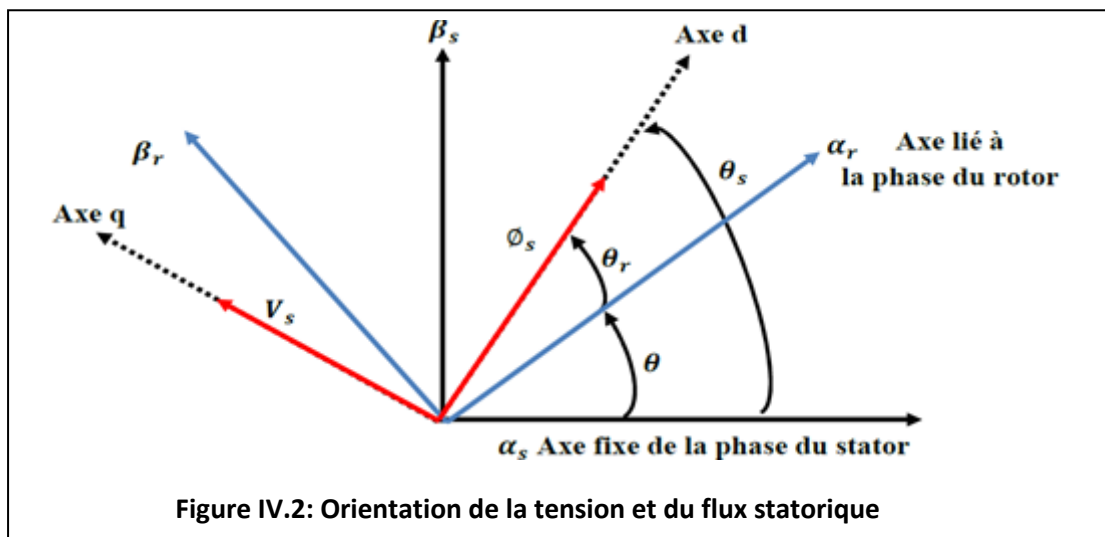
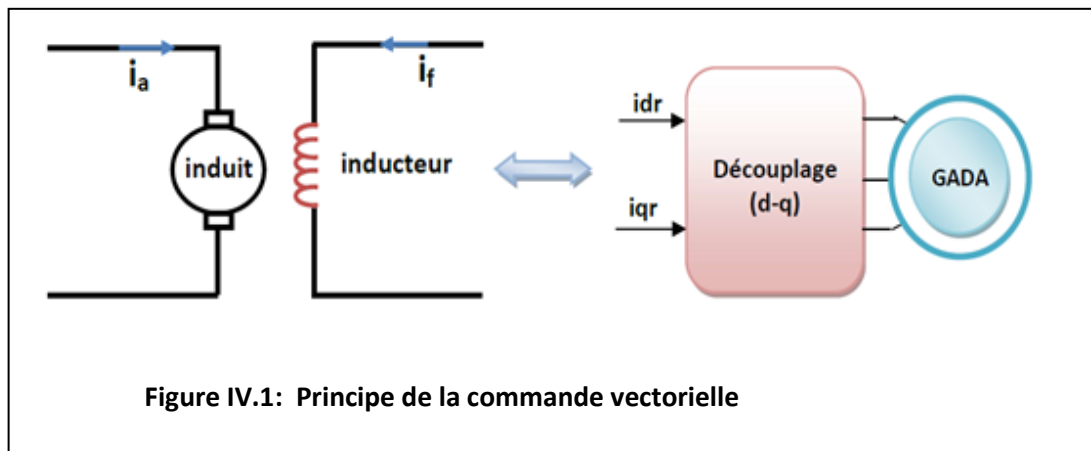
La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone à double alimentation aussi bien en fonctionnement générateur que moteur.

La commande à flux orienté est une expression qui apparaît de nos jours dans la littérature traitant les techniques de contrôle des machines électriques à courant alternatif, dont le principe de base nous ramène à une notion élémentaire et importante de l'électromagnétisme. À savoir; la force exercée sur un conducteur,

parcouru par un courant et soumis à un champ magnétique, est égale au produit vectoriel du vecteur courant par le vecteur champ. Il en résulte, évidemment, que l'amplitude de cette force sera maximale lorsque le vecteur courant est perpendiculaire au vecteur champ[BOU 07].

Il s'agira donc de retrouver la quadrature entre le courant et le flux, naturellement découplés pour une machine à courant continu (courant producteur de flux et le courant producteur de couple). Dans notre cas le découplage se fait entre la puissance active et réactive du stator.

La méthode du flux orienté consiste à choisir un système d'axes (d, q) où l'un de ces axes coïncide avec la direction désirée du flux qui peut être rotorique, statorique ou d'entrefer. Ce repère nous permet d'avoir deux composantes directe et en quadrature, l'une de flux statorique et l'autre de courant rotorique (fig IV.2).



IV.1.2 COMMANDE DE PUISSANCE

L'utilisation de la GADA consiste dans la plupart des cas d'amener le glissement à la valeur désirée, avec le meilleur rendement possible en alimentant les enroulements rotoriques par un convertisseur électronique de puissance. Le modèle de la machine est considéré pour appliquer un contrôle vectoriel. Ainsi, l'analyse des équations en régime permanent détermine la dépendance des variables d'action et les objectifs de commande (orientation du repère tournant (dq) suivant le flux statorique). On obtient ainsi:

$$\varphi_{ds} = \varphi_s \text{ et } \varphi_{qs} = 0 \quad \text{IV.1}$$

Le couple électromagnétique devient alors:

$$\Gamma_{em} = p \frac{m}{l_s} \varphi_s I_{qr} \quad (p \text{ étant le nombre de pôles}) \quad \text{IV.2}$$

et l'équation des flux devient:

$$\varphi_{ds} = l_s I_{ds} + m I_{dr} \text{ et } 0 = l_s I_{qs} + m I_{qr} \quad \text{IV.3}$$

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

En négligeant la résistance statorique, ce qui est généralement vérifié pour les machines de forte puissance utilisées dans les systèmes éoliens, on obtient aisément les équations suivantes:

$$V_{ds} = \frac{d\varphi_s}{dt} \quad , \quad V_{qs} = \omega_s \varphi_s \quad \text{IV.4}$$

ω_s étant la pulsation électrique des grandeurs statoriques. Le flux statorique étant constant, ces équations deviennent:

$$V_{ds} = 0 \quad , \quad V_{qs} = V_s \quad \text{IV.5}$$

Les relations entre les courants statoriques et rotoriques s'établissent à partir des équations IV.4

$$I_{ds} = -\frac{m}{l_s} I_{dr} + \frac{\varphi_s}{l_s} \quad , \quad I_{qs} = -\frac{m}{l_s} I_{qr} \quad \text{IV.6}$$

On déduit ainsi les puissances statoriques, active et réactive en faisant appel aux équations IV.5

$$P_s = V_s I_{qs} \quad , \quad Q_s = V_s I_{ds} \quad \text{IV.7}$$

En combinant les équations IV.6 et IV.7, on obtient:

$$P_s = -V_s \frac{m}{l_s} I_{qr} \quad , \quad Q_s = -V_s \frac{m}{l_s} I_{dr} + V_s \frac{\varphi_s}{l_s} \quad \text{IV.8}$$

$$\text{Les équations IV.4 et IV.5 donnent: } \varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad \text{IV.9}$$

Les puissances qui se simplifient s'écrivent donc:

$$P_s = -V_s \frac{m}{l_s} I_{qr} \quad , \quad Q_s = -V_s \frac{m}{l_s} I_{dr} + \frac{V_s^2}{\omega_s} \quad \text{IV.10}$$

Si l'on considère l'inductance magnétisante m constante, on remarque que l'équation IV.10 fait apparaître que la puissance active P_s statorique est directement proportionnelle au courant rotorique en quadrature I_{qr} . De plus, la puissance réactive Q_s est proportionnelle au courant rotorique direct I_{dr} , à une constante près $\frac{V_s^2}{\omega_s}$. Pour un contrôle correct de la machine, il faut établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui seront appliqués à la machine. En remplaçant dans l'équation générale des flux, les courants rotoriques par leurs expressions données par les équations IV.6, puis en les introduisant dans les équations III.54, des tensions rotoriques, on obtient:

$$\left. \begin{aligned} V_{dr} &= R_r I_{dr} + \left(l_r - \frac{m^2}{l_s} \right) \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(l_r - \frac{m^2}{l_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} &= R_r I_{qr} + \left(l_r - \frac{m^2}{l_s} \right) \frac{dI_{qr}}{dt} - g \omega_s \left(l_r - \frac{m^2}{l_s} \right) I_{dr} + g \frac{m V_s}{l_s} \end{aligned} \right\} \quad \text{IV.11}$$

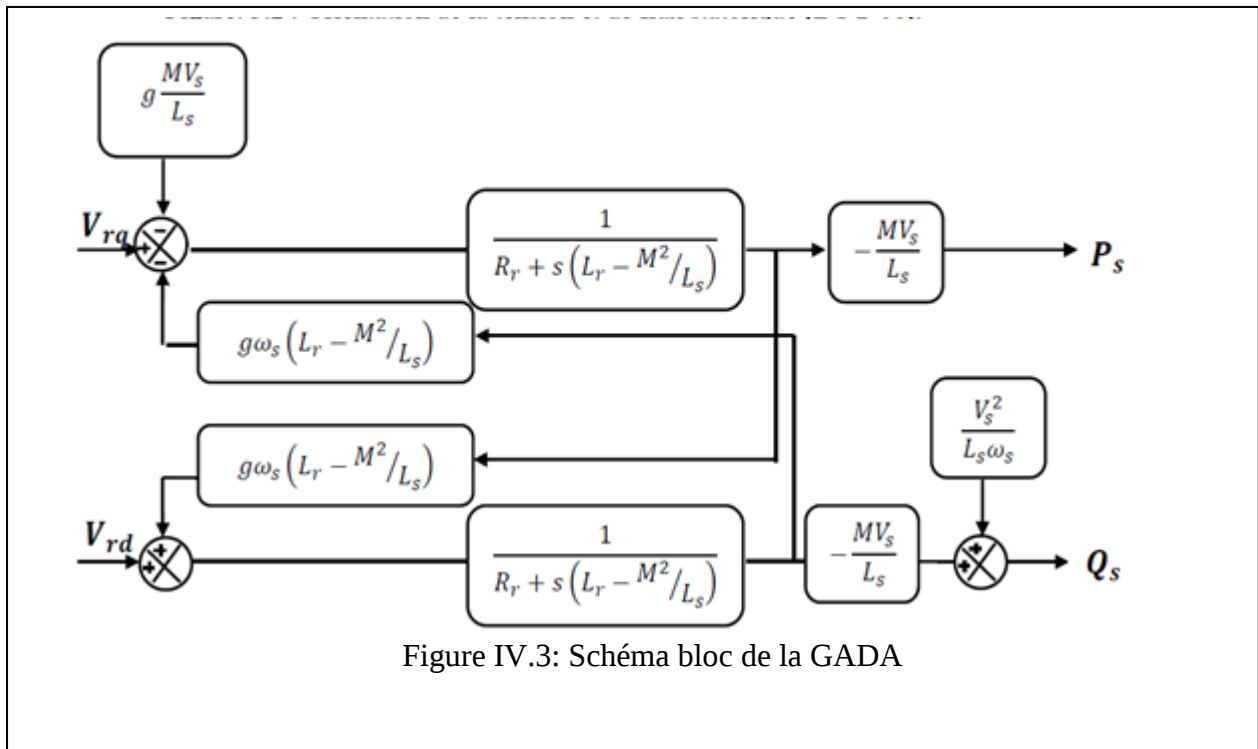
Les équations qu'on vient d'établir nous permettent à présent de formuler les relations entre les tensions appliquées au rotor de la machine et les puissances statoriques qui en découlent. Il est donc possible maintenant de décrire le schéma bloc de la génératrice asynchrone à double alimentation qui sera le bloc à réguler par la suite. L'examen des équations établies montre que le schéma bloc doit comporter les tensions rotoriques en entrée et les puissances active et réactive en sortie (figure IV.3).

Ces équations montrent par ailleurs que les puissances et les tensions sont liées par une fonction du premier ordre. La valeur du glissement étant généralement faible, il sera alors possible d'établir facilement une commande vectorielle vu que les influences des couplages resteront faibles et que par conséquent les axes d et q pourront donc être commandés séparément avec leurs propres régulateurs.

A la lumière de ce qui précède, il apparait deux solutions possibles pour effectuer la commande en puissance de cette machine: commande directe, que nous considérons ici, et commande indirecte.

IV.1.3 CONTROLE INDEPENDANT DES PUISSANCE ACTIVE ET REACTIVE PAR LA COMMANDE DIRECE

Dans cette méthode, le couplage est négligé et un régulateur indépendant est installé sur chaque axe afin d'avoir le contrôle des puissances active et réactive de façon indépendante.



Cette méthode de commande est nommée directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la génératrice (fig IV.4).

Les équations IV.10 montrent que les puissances active et réactive sont liés au courant rotorique par le terme $V_s \frac{m}{l_s}$. De plus les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés dans le système d'équations (IV.11) disparaissent en régime permanent et nous pouvons donc écrire :

$$\left. \begin{aligned} V_{dr} &= R_r I_{dr} - g \omega_s \left(l_r - \frac{m^2}{l_s} \right) I_{qr} \quad \text{IV.3} \\ V_{qr} &= R_r I_{qr} + g \omega_s \left(l_r - \frac{m^2}{l_s} \right) I_{dr} + g \frac{m V_s}{l_s} \end{aligned} \right\} \quad \text{IV.12}$$

On peut de même écrire les équations des flux en régime permanent:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{dr} &= R_r I_{qr} + \left(l_r - \frac{m^2}{l_s} \right) I_{dr} + \frac{m V_s}{\omega_s l_s} \\ \varphi_{qr} &= \left(l_r - \frac{m^2}{l_s} \right) I_{qr} \end{aligned} \right\} \quad \text{IV.13}$$

V_{dr} et V_{qr} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la génératrice pour obtenir les courants rotoriques voulus. La figure IV.4 montre le schéma bloc de la commande vectorielle tandis que la figure IV.5 donne le schéma bloc détaillé du système à réguler.

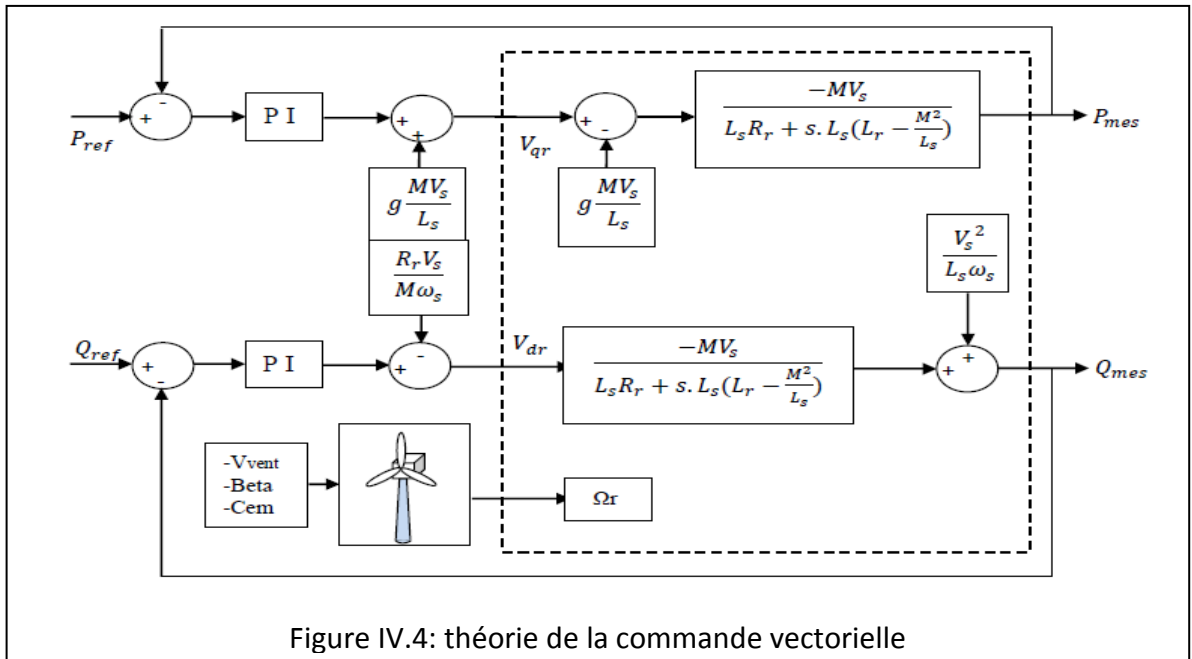


Figure IV.4: théorie de la commande vectorielle

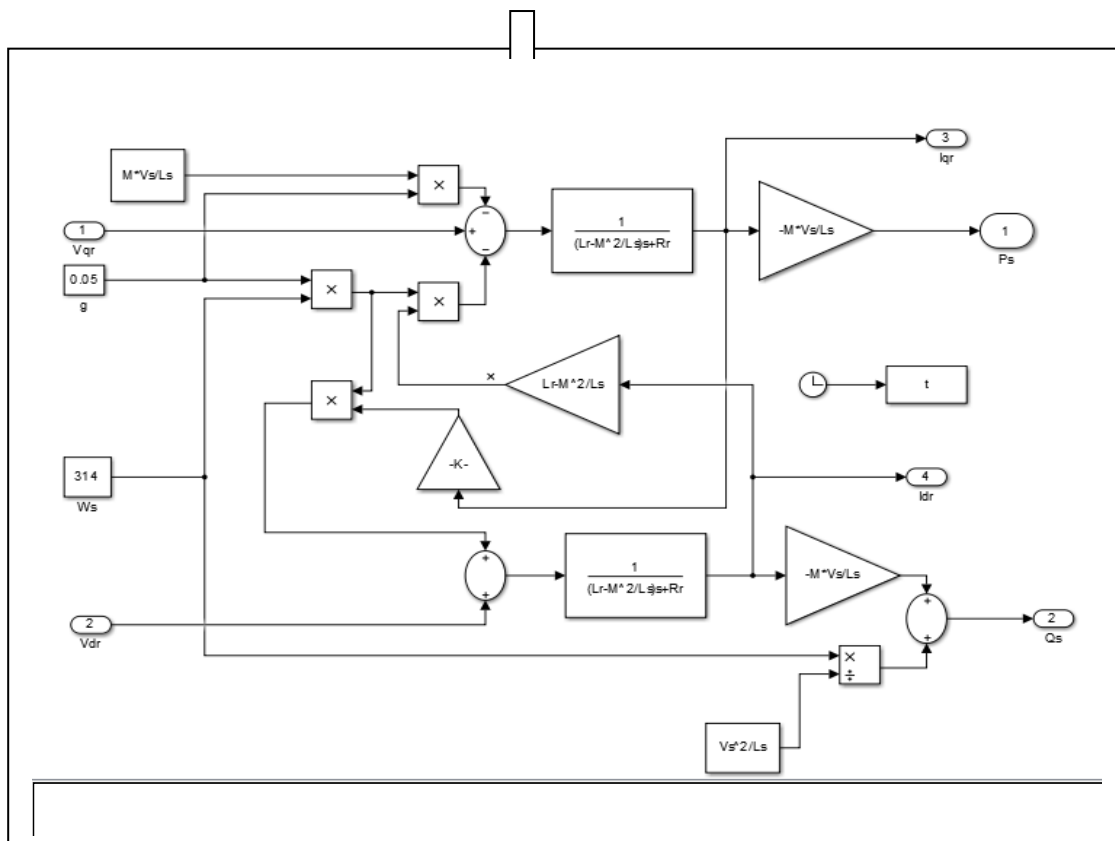
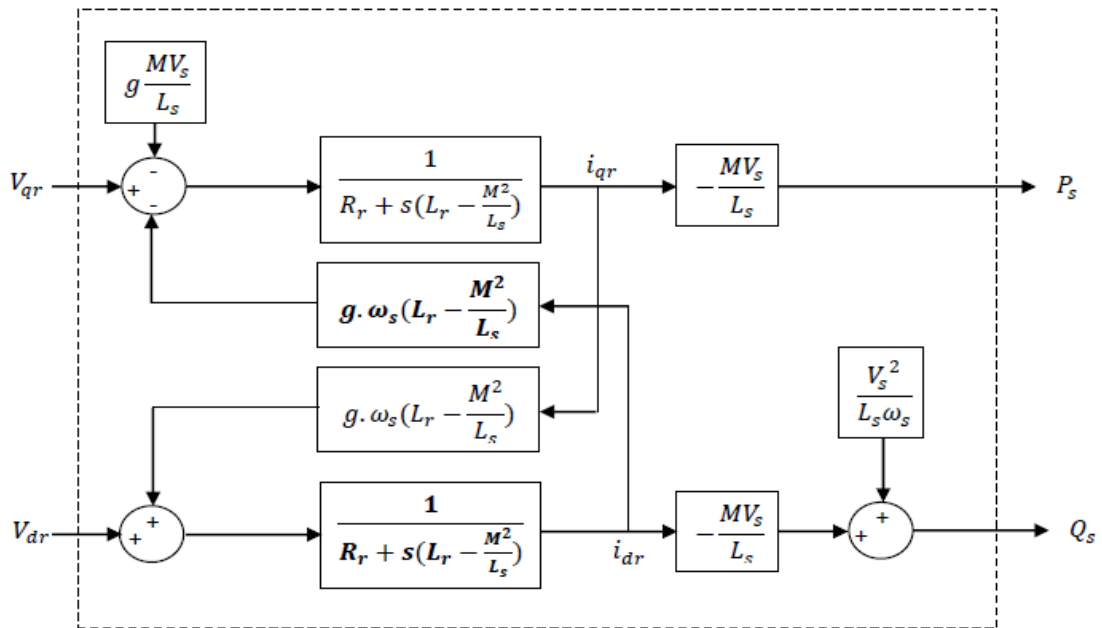


Figure IV.5: Schéma bloc du système à réguler

L'effet du terme de couplage $g\omega_s \left(l_r - \frac{m^2}{l_s}\right)$ est minime pour des faibles glissements et peut être compensé par une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande. En revanche, le terme $g \frac{mV_s}{l_s}$ représente une force électromotrice dont l'influence n'est pas négligeable, le système de contrôle devra donc compenser cette perturbation. Ainsi, on obtient un modèle plus simple permettant le contrôle direct et indépendant des puissances active et réactive en utilisant un seul régulateur sur chaque axe.

Une deuxième méthode consiste 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 rotoriques.

IV.1.3.1 SYNTHÈSE DU RÉGULATEUR CLASSIQUE UTILISÉ

Le régulateur Proportionnel Intégral (PI), utilisé pour commander la MADA en génératrice, est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables et c'est pour cela qu'il a retenu notre attention pour une étude globale du système de générateur éolien. La commande PI n'est pas la plus performante des commandes mais c'est la plus répandue. P et I sont les initiales de Proportionnel et Intégral. P dépend de l'erreur présente à annuler $e(t)$ et I de l'accumulation des erreurs du passé. La figure (IV.6) montre une partie de notre système bouclé et corrigé par un régulateur « **PI** » dont la fonction de transfert du régulateur PI est de la forme:

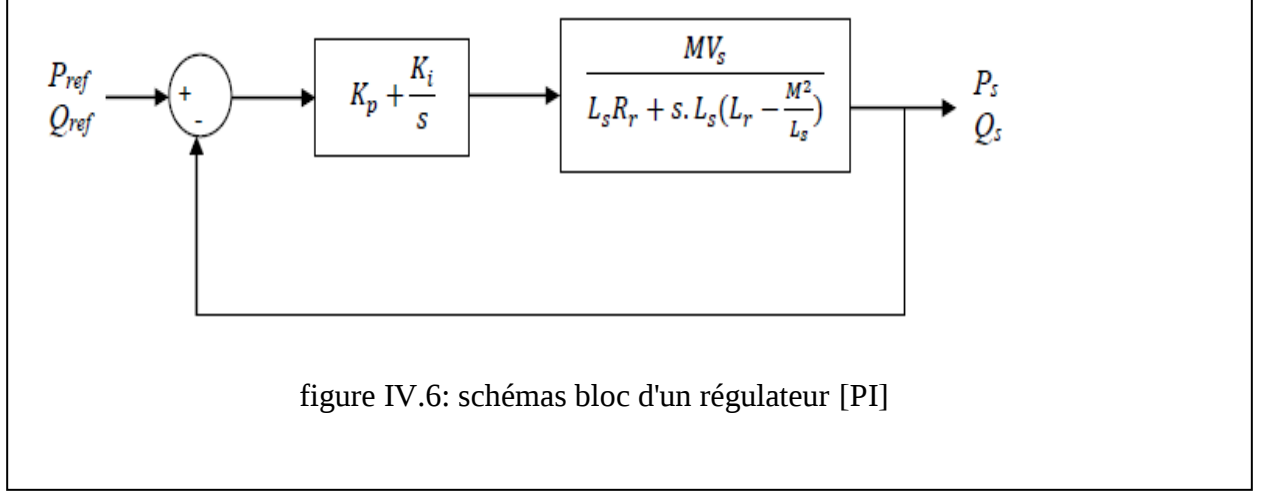
$$FT_{BO} = K_P + \frac{K_I}{s} \quad \text{IV.14}$$

correspondant aux deux régulateurs P et I.

K_P est le gain défini par: $K_P = \frac{100}{s}$ avec $s = \frac{100}{\text{Gain}}$; $u(t) = K_P e(t)$

K_I est défini par: $\frac{1}{\text{reset}} = \frac{1}{K_I} = \frac{\text{repeats}}{\text{time}}$; $u(t) = K_I \int_0^t e(\tau) d\tau$.

En général, une large valeur du gain proportionnel K_p génère une réponse rapide mais aussi un risque d'instabilité et d'oscillation du système. Une large valeur de K_i entraîne une élimination rapide de l'erreur.



En boucle ouverte, la FT_{BO} s'écrit de manière suivante:

$$FT_{BO} = (K_p + \frac{K_i}{s}) \frac{mV_s}{l_s R_r + s l_s (l_r - \frac{m^2}{l_s})} \quad \text{IV.15}$$

ou sous une autre forme:

$$FT_{BO} = \frac{s + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{s}{K_p}} \cdot \frac{\frac{mV_s}{l_s (l_r - \frac{m^2}{l_s})}}{s + \frac{l_s R_r}{l_s (l_r - \frac{m^2}{l_s})}} \quad \text{IV.16}$$

Afin d'éliminer le zéro présent dans la fonction de transfert, nous choisissons la méthode de compensation des pôles pour la synthèse du régulateur, ce qui se traduit par l'égalité suivante:

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{l_s R_r}{l_s (l_r - \frac{m^2}{l_s})} \quad \text{IV.17}$$

Nous notons ici que l'intérêt de la compensation des pôles ne se manifeste uniquement que si les paramètres de la machine sont identifiés avec précision puisque les gains K_p et K_i sont établis en fonction de ces mêmes paramètres. Si

les paramètres réels sont différents de ceux utilisés dans la synthèse, la compensation est inefficace. Si les pôles sont parfaitement compensés, la fonction de transfert en boucle ouverte devient:

$$FT_{BO} = \frac{1}{s \cdot \tau_r} \quad \text{IV.18}$$

$$\text{avec } \tau_r = \frac{1}{K_p} * \frac{l_s(l_r - \frac{m^2}{l_s})}{m * V_s} \quad \text{IV.19}$$

notre gain est en fonction des paramètres de la machine

IV.1.4 COMMANDE VECTORIELLE DIRECTE AVEC UN SEUL REGULATEUR

- OBJECTIFS DU CONTROLE

la dynamique d'éolien est relativement lente par rapport à l'évolution des grandeurs électriques; les régulateurs de la commande vectorielle sont calculés afin d'obtenir des performances les plus élevées possibles aussi bien au niveau de la dynamique qu'au niveau de la robustesse et du rejet de perturbations. Ainsi, au cours de la synthèse de ces régulateurs, nous ferons en sorte d'obtenir une dynamique électrique du système aussi rapide que l'autorise la fréquence de la MLI du convertisseur rotorique, ceci dans l'optique de l'insertion du dispositif dans un système éolien à vitesse variable ou dans un autre système utilisant la GADA[DEN 10].

Avant d'insérer des régulateurs il faut d'abord rajouter au GADA, représentée par la figure IV.7, le block d'onduleur et commande MLI en appliquant PARK et PARK inverse pour convertir les tensions. Les tensions V_q et V_d sont les entrées de la GADA avec la commande vectorielle Dans notre cas, nous considérons que la machine est connectée a un réseau stable, la tension V_s est constante et par conséquent on n'a pas besoin de deux régulateurs. Chaque axe doit comporter un seul régulateur comme indiqué sur les figures IV.8a et IV.8b.

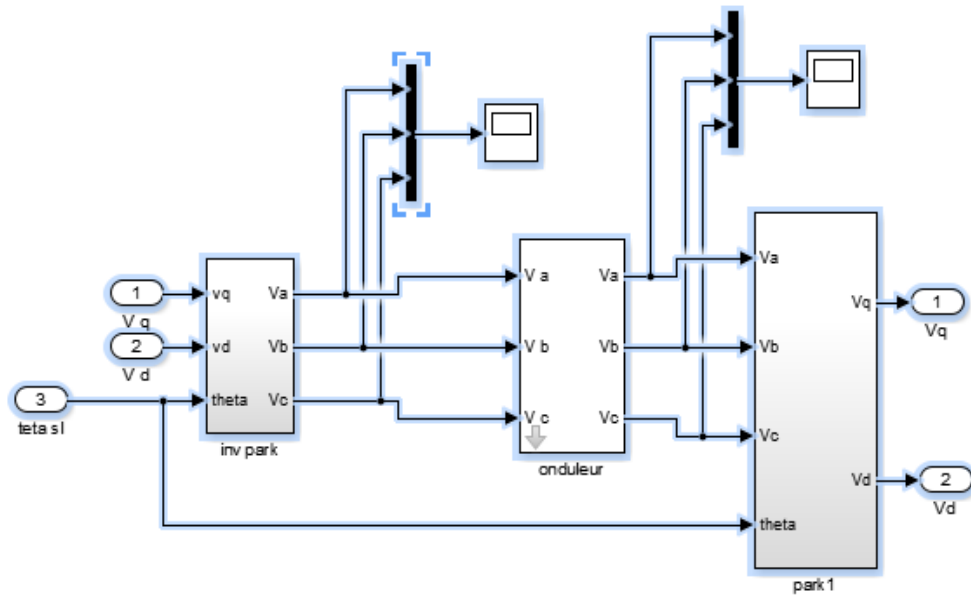


Figure IV.7: block d'onduleur et commande MLI

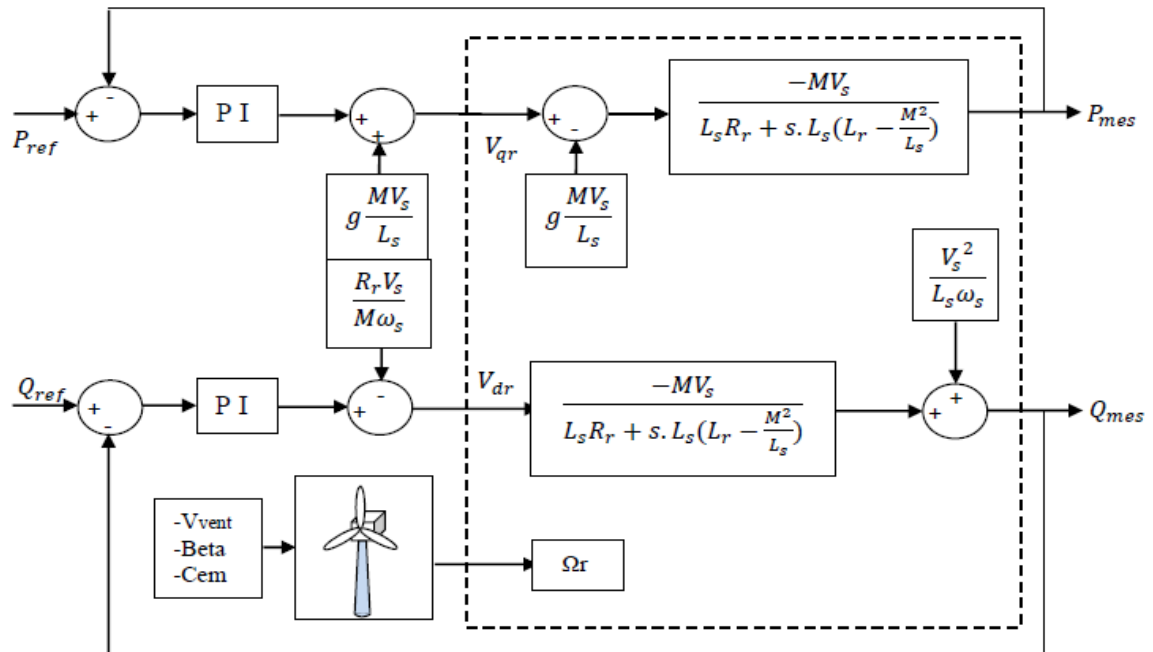


figure IV.8a: Schéma block de la commande vectorielle directe

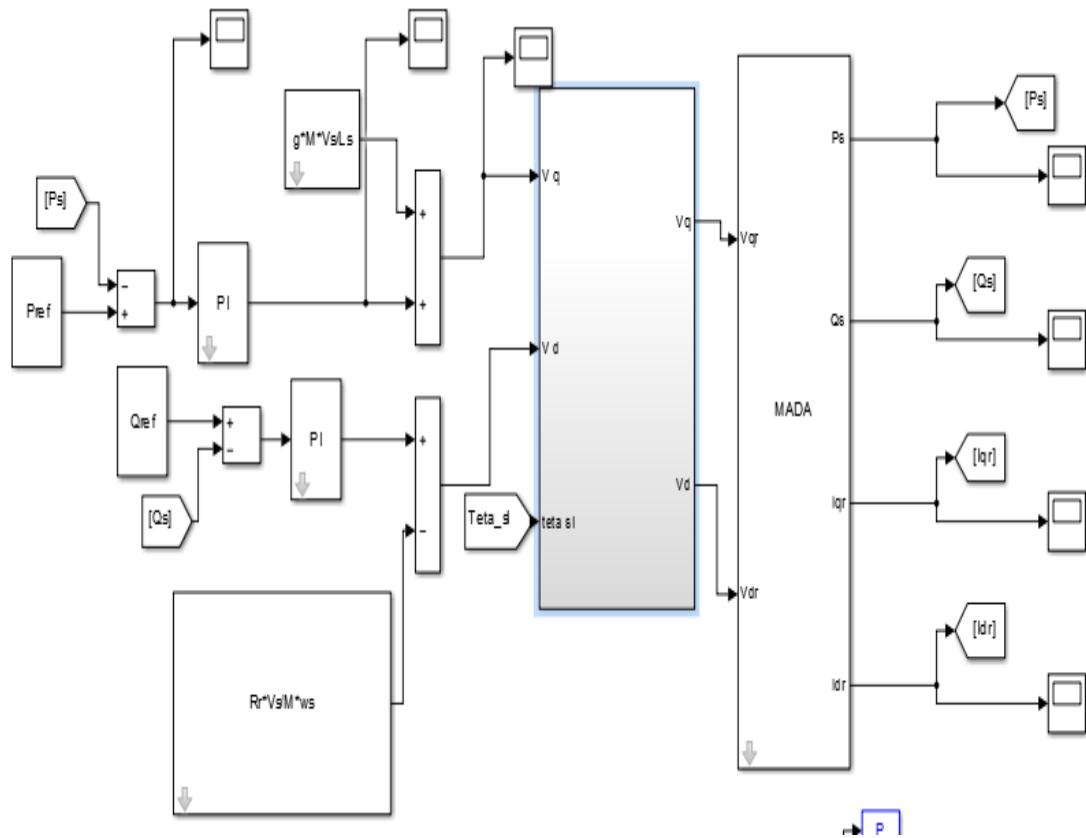


Figure IV.8b: Schéma bloc de la commande vectorielle directe avec les régulateurs PI

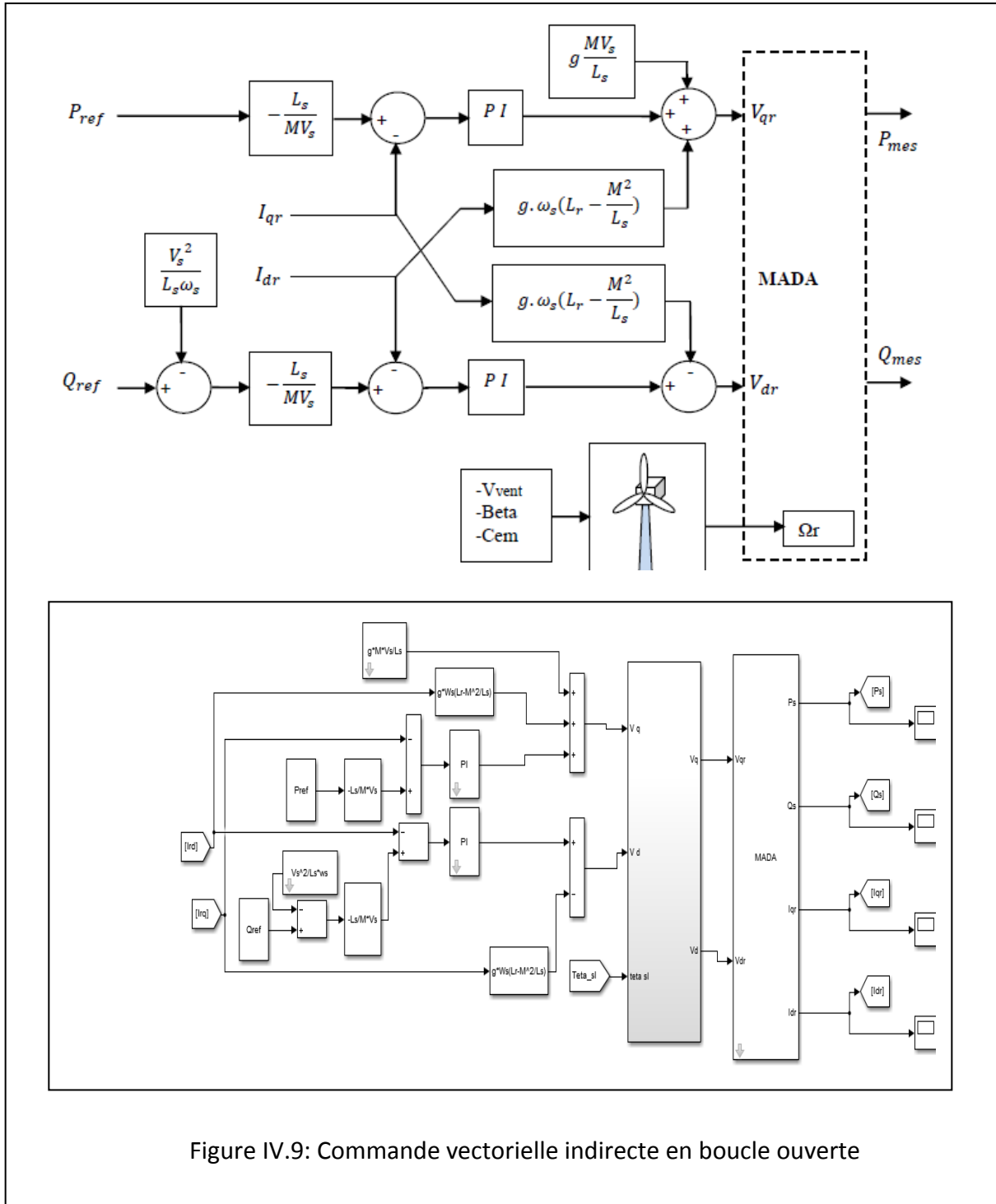
IV.1.5 COMMANDE INDIRECTE EN BOUCLE OUVERTE

Dans cette méthode les termes de couplage ne sont plus négligés et ils sont compensés en installant un système comportant deux boucles permettant le contrôle des puissances et des courants rotoriques. Cette commande en boucle ouverte qui est essentiellement utilisée dans le cas d'un réseau stable en tension et en fréquence, consiste à asservir plutôt indirectement les courants rotoriques en n'utilisant non plus les puissances mesurées comme retour sur le comparateur mais les courants rotoriques d'axe d et q. A partir des expressions de la puissance active et réactive statoriques du système, on déduit les références des courants rotoriques direct et quadrature suivant:

$$I_{qr-r} = -\frac{l_s}{mV_s} P_{s-ref} \quad \text{IV.20}$$

$$I_{dr-r} = -\frac{l_s}{mV_s} Q_{s-ref} + \frac{V_s}{m\omega_s} \quad \text{IV.21}$$

Ces courants seront utilisés comme références à la place des références sur les puissances active et réactive, on aboutit alors au schéma bloc donné en figure IV.9. Cette configuration reste fiable tant que le réseau électrique reste stable en tension et en fréquence. Une instabilité du réseau va donc provoquer une erreur sur le suivi des consignes des puissances active et réactive.



On peut à présent déterminer les expressions des puissances active, P , et réactive, Q , dans le système (dq) de Park, définies par:

$$P = V_{dr}I_{dr} + V_{qr}I_{qr} \quad , \quad Q = V_{qr}I_{dr} - V_{dr}I_{qr} \quad \text{IV.22}$$

Un calcul simple donne:

$$P = -\frac{m}{l_s} V_s I_{qr} \quad ; \quad Q = \frac{V_s^2}{l_s \omega_s} - \frac{m}{l_s} V_s I_{dr} \quad \text{IV.23}$$

IV.2 COMMANDE BACKSTEPPING

IV.2.1 GENERALITES SUR LA COMMANDE BACKSTEPPING

La technique du Backstepping est une méthode de commande relativement récente des systèmes non linéaires. Elle permet, de manière séquentielle et systématique, par le choix d'une fonction de Lyapunov, de déterminer la loi de commande du système. Son principe est d'établir d'une manière constructive la loi de commande du système non linéaire en considérant quelques variables d'état comme étant des commandes virtuelles et leurs concevoir des lois de commande intermédiaires. Le terme backstepping signifie que l'on remonte la chaîne d'intégrateurs jusqu'à la commande, en construisant pas à pas la fonction de Lyapunov et la commande par retour d'état. Cette méthode de backstepping est donc une méthodologie de synthèse récursive conjointe d'une fonction de Lyapunov et de la loi de commande associée. Elle met à profit les relations causales successives pour les construire de manière itérative et systématique. Avec cette méthodologie, la construction de la loi de commande de type retour d'état et de la fonction de Lyapunov associée se fait de façon systématique et en même temps. Elle transforme un problème de conception de la commande d'un système complet en une séquence de problème de conception pour des systèmes d'ordre inférieur (la plupart du temps scalaire). En exploitant la simplicité et la flexibilité apportées par les systèmes scalaires, le backstepping peut souvent

résoudre les problèmes de stabilisation, de poursuite, et les problèmes de commande robuste dans des conditions moins restrictives que celles d'autres méthodes. Ainsi, alors que la méthode de linéarisation entrée-sortie exige des modèles définis et compense souvent des non-linéarités utiles, la méthode backstepping offre un choix d'outils de synthèse permettant de s'accommoder d'incertitudes et peut éviter des éliminations des non-linéarités utiles pour la performance et la robustesse de la commande. Pour que la technique backstepping puisse s'appliquer, le système non-linéaire doit être sous forme « strict feedback » (rétroaction stricte), ce qui constitue une restriction de l'approche : la dérivée de chaque composante du vecteur d'état doit être une fonction des composantes précédentes et dépendre additivement de la composante suivante[BEN 00].

La commande Backstepping permet de déterminer les composantes des tensions de commande d'alimentation de la machine en assurant la stabilité globale par la théorie de Lyapunov. La commande hybride ainsi obtenue permet d'assurer le suivi de consigne et le contrôle indépendamment de puissances active et réactive générées, en assurant à chaque fois des dynamiques stables pour les erreurs entre les grandeurs de références et celles réelles des puissances.

Le contrôle du backstepping est un outil très efficace qui permet de construire la loi de commande, la dynamique d'adaptation et la fonction de Lyapunov qui assurent la stabilité de la boucle. De plus, et contrairement au bouclage linéarisant, le backstepping offre la possibilité de conserver dans le bouclage les non-linéarités stabilisantes. Dans ce chapitre, il sera question d'exposer le principe de la technique du Backstepping avec application aux systèmes du second et du troisième ordre afin de se familiariser avec cette technique en vue de l'appliquer à la commande de la machine à induction.

IV.2.2 PRINCIPE DE L'APPROCHE DU BACKSTEPPING

L'idée de base du Backstepping est de stabiliser au départ le premier sous système par une fonction stabilisante connue via une fonction de Lyapunov choisie, ensuite d'ajouter à son entrée un intégrateur. On procède de même pour le prochain sous système augmenté et ainsi de suite pour les sous-systèmes successifs pour aboutir enfin à une fonction de Lyapunov globale donnant la loi de commande globale qui stabilise le système.

Le principe consiste donc à commencer par définir une variable d'erreur, puis définir une fonction de Lyapunov à partir de cette erreur et la dériver. On détermine ensuite une variable de commande "virtuelle" avant de remonter d'un intégrateur et poursuivre jusqu' à l'apparition des variables de commande réelles. La commande basée sur la théorie de Lyapunov est souvent utilisée en robotique.

IV.2.3 APPLICATION DU BACKSTEPPING POUR LES SYSTEMES D'ORDRE n

Soit le système suivant d'ordre n suivant:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 + f_1(x_1)\varepsilon_1 \\ \dot{x}_2 &= x_3 + f_2(x_1, x_2)\varepsilon_2 \\ \\ \dot{x}_{n-1} &= x_n + f_{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1})\varepsilon_{n-1} \\ \dot{x}_n &= f_n(x_1, x_2, \dots, x_n)\varepsilon_n + g(x_1, x_2, \dots, x_n)u \end{aligned} \right\} \quad \text{IV.24}$$

où $x \in R^n$, $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_k$ sont des scalaires, $f_n(x_1, x_2, \dots, x_n)$: vecteur de fonction non linéaire avec:

$$f_n(0, 0, \dots, 0) = 0 \text{ et } g(x_1, x_2, \dots, x_n) \neq 0. \quad \text{IV.25}$$

Nous supposons par ailleurs que le système admet l'origine comme état d'équilibre. Il s'agit d'un retour strict du fait que les fonctions f_i , dans l'équation dynamique de x_i ($i=1, \dots, n$) dépendent seulement de $x_1, x_2, \dots, x_n$.

En général, la conception, par le principe du Backstepping, de la loi de commande u est exécutée en n étapes. A la i ème étape, un sous système du i ème ordre est stabilisé par rapport à une fonction de Lyapunov v_i par la conception d'une fonction stabilisante. La loi de commande est alors établie à l'étape finale. Le sous système x vérifie l'hypothèse suivante :

en considérant que ε_1 est son entrée de commande u (commande virtuelle), le système:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad \text{avec } x \in R^n, u \in R, f(0) = 0. \quad \text{IV.26}$$

admet un retour d'état stabilisant $u = \alpha(x)$ tel que:

$$\frac{dv(x)}{dx} = [f(x) + g(x)\alpha(x)] \leq -W(x) \leq 0 \quad \text{IV.27}$$

pour une fonction de Lyapunov v et une fonction définie positive W .

L'algorithme global du Backstepping est donné par :

Par convention, on définit: $e_0 = 0, \quad \alpha_0 = 0, \quad e_1 = x_1 - y_r$

$$e_i = x_i - \alpha_{i-1} - y_r^{i-1}$$

$$\alpha_i = -e_{i-1} - k_i e_i - \beta_i$$

$$\text{où } \beta_1 = w_1, \quad \beta_i = w_i - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial x_j} x_{j+1} - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial y_r^{j-1}} y_r^j \quad 2 \leq i \leq n$$

$$w_1 = f_1 \varepsilon_1, \quad w_i = f_i \varepsilon_i - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial x_j} (f_j \varepsilon_j) \quad 2 \leq i \leq n$$

$$u = \frac{1}{g} (\alpha_n + y_r^n)$$

$\dot{E} = AE$ avec

$$A = \begin{bmatrix} -k_1 & 1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ -1 & -k_2 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -1 & -k_3 & 1 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -k_4 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & -k_n \end{bmatrix}, \quad E = [e_1 \quad e_2 \quad e_3 \quad e_4 \quad \cdots \quad e_n]^T$$

IV.2.4 APPLICATION DE LA COMMANDE PAR BACKSTEPPING A LA MADA

Ce dernier chapitre consiste à l'application de la commande « backstepping » à notre génératrice asynchrone (mada). il s'agit de combiner deux principes de commandes différentes pour avoir une commande hybride via le Backstepping et le contrôle vectoriel. Cette approche nous permet de déterminer les composantes des tensions de commande d'alimentation de la machine en assurant la stabilité globale par la théorie de Lyapunov. La commande hybride ainsi obtenue permet d'assurer le suivi et le contrôle indépendamment de puissances active et réactive générées, en assurant à chaque fois des dynamiques stables pour les erreurs entre les grandeurs de références et celles réelles des puissances

IV.2.4.1 MODELE DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTATION

La théorie du backstepping appliquée pour la commande de la machine asynchrone double alimentation, est basée sur le principe du contrôle vectoriel dans le repère (d, q) avec l'orientation du flux statorique suivant :

$$\left. \begin{array}{l} \varphi_{ds} = \varphi_s \\ \varphi_{qs} = \end{array} \right\} \quad \text{IV.28}$$

Réécrivons les équations électriques du modèle de la MADA, basée sur le principe du contrôle vectoriel dans le repère (d, q) , obtenues dans le chapitre III:

$$\left. \begin{array}{l} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} + g\omega_s \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} - g\omega_s \varphi_{dr} \end{array} \right\} \quad \text{IV. 29}$$

Les équations reliant les puissances statoriques au courants rotoriques sont:

$$P(ref) = -\frac{m}{l_s} V_s I_{qr(ref)} ; \quad Q(ref) = \frac{V_s^2}{l_s \omega_s} - \frac{m}{L_s} V_s I_{dr(ref)} \quad \text{IV. 30}$$

alors:

$$\left. \begin{aligned} I_{qr(ref)} &= -\frac{l_s}{mV_s} P(ref) \\ I_{dr(ref)} &= \frac{V_s}{\omega_s m} - \frac{l_s}{V_s m} Q(ref) \end{aligned} \right\} \quad \text{IV.31}$$

En dérivant ces équations des courants rotoriques, on obtient:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} I_{qr(ref)} &= -\frac{L_s}{mV_s} * \frac{d}{dt} P(ref) \\ \frac{d}{dt} I_{dr(ref)} &= -\frac{L_s}{V_s m} * \frac{d}{dt} Q(ref) \end{aligned} \right\} \quad \text{IV.32}$$

En combinant les équations IV.30, IV.31 et IV.32, On obtient:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} I_{dr} &= (V_{dr} - R_r I_{dr} + g\omega_s I_{qr} l_r \sigma) \cdot \frac{1}{l_r \sigma} \\ \frac{d}{dt} I_{qr} &= (V_{qr} - R_r I_{qr} - (g\omega_s I_{dr} l_r \sigma) - g\omega_s \frac{mV_s}{L_s \omega_s}) \cdot \frac{1}{l_r \sigma} \end{aligned} \right\} \quad \text{IV.33}$$

g et σ étant le glissement et le facteur de dispersion de Blondel définis dans le chapitre précédent.

IV.2.4.2 SYNTHÈSE DE LA LOI DE COMMANDE

La combinaison entre la commande vectorielle et la commande backstepping permet de négliger les régulateurs PI dans le contrôle vectoriel par un algorithme de contrôle. Le calcul des grandeurs de références des courants et des tensions de commande se fait sur la base des fonctions de Lyapunov. Cette commande est basée sur l'identification des erreurs " E_1 " et " E_2 ", qui représentent respectivement l'erreur entre la puissance active statorique réelle " P_s " et la puissance " P_{sref} " qui sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe q , ainsi que la puissance réelle " Q_s " et celle de référence " Q_{sref} " qui sera proportionnelle au courant rotorique d'axe d [ADH 13].

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= (I_{qrref} - I_{rq}) \\ E_2 &= (I_{drref} - I_{rd}) \end{aligned} \right\} \quad \text{IV.34}$$

La dérivée de cette erreur est donnée par :

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_1 &= (\dot{i}_{rqref} - \dot{i}_{rq}) \\ \dot{E}_2 &= (\dot{i}_{rdref} - \dot{i}_{rd}) \end{aligned} \right\} \quad \text{IV.35}$$

La première fonction de Lyapunov est définie par :

$$v = 1/2(E_1^2 + E_2^2) \quad \text{IV.36}$$

Pour avoir la dérivée de la fonction de Lyapunov nulle, il faut choisir les erreurs comme suit :

$$\dot{E}_1 = -K_1 E_1 \quad \text{et} \quad \dot{E}_2 = -K_2 E_2 \quad \text{IV.37}$$

La dérivée de la fonction de Lyapunov devient alors :

$$\dot{v} = K_1 E_1^2 + K_2 E_2^2 \quad K_1 > 0 \text{ et } K_2 > 0 \quad \text{IV.38}$$

A partir des équations (IV.4) et (IV.9), les dérivées des erreurs " E_1 ", " E_2 " donnent:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_1 &= ((-\frac{l_s}{V_s m} \dot{P}_{sref}) - \frac{1}{l_r \sigma} (V_{rq} - R_r \cdot I_{rq} - g \cdot w_s \cdot l_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} - g \cdot m \cdot V_s / l_s)) \\ \dot{E}_2 &= ((-\frac{l_s}{V_s m} \dot{Q}_{sref}) - \frac{1}{l_r \sigma} (V_{rd} - R_r \cdot I_{rd} + g \cdot w_s \cdot l_r \cdot \sigma \cdot I_{rq})) \end{aligned} \right\} \quad \text{IV.39}$$

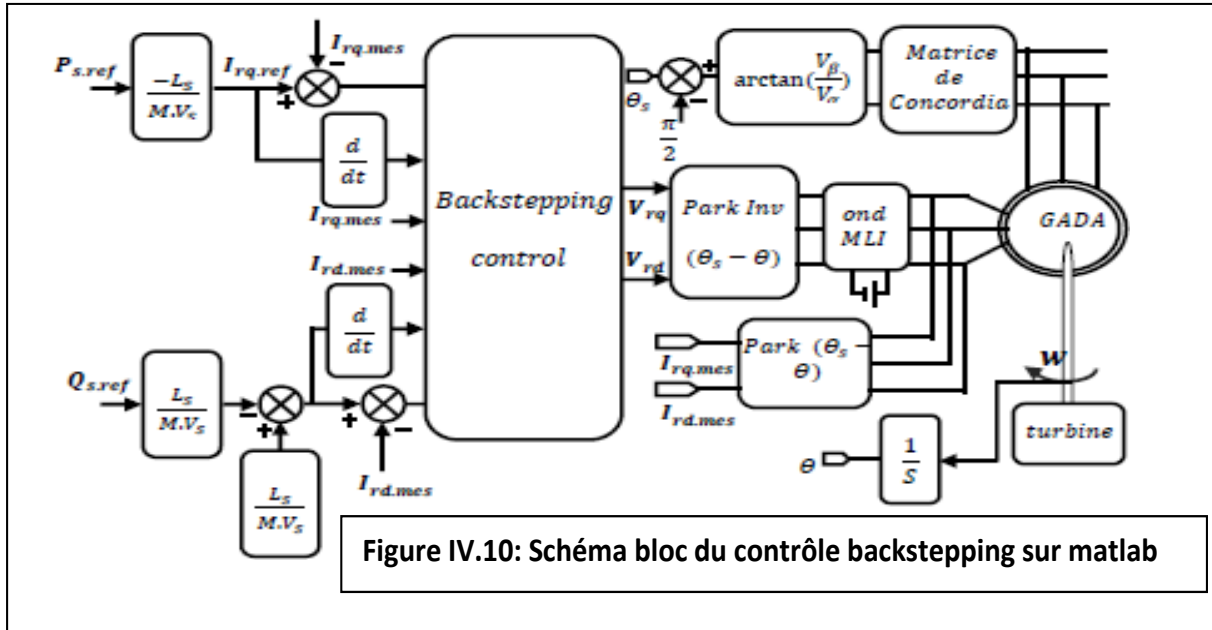
alors:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_1 &= ((-\frac{l_s}{V_s m} \cdot m \cdot \dot{P}_{sref}) - \frac{1}{l_r \sigma} V_{rq} - \frac{1}{l_r \sigma} (-R_r \cdot I_{rq} - g \cdot w_s \cdot l_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} - g \cdot m \cdot V_s / l_s)) \\ \dot{E}_2 &= ((-\frac{l_s}{V_s m} \cdot m \cdot \dot{Q}_{sref}) - \frac{1}{l_r \sigma} V_{rd} - \frac{1}{l_r \sigma} (-R_r \cdot I_{rd} + g \cdot w_s \cdot l_r \cdot \sigma \cdot I_{rq})) \end{aligned} \right\} \quad \text{IV.40}$$

$$\left. \begin{aligned} -K_1 E_1 &= ((-\frac{l_s}{V_s m} \cdot \dot{P}_{sref}) - \frac{1}{l_r \sigma} V_{rq} - \frac{1}{l_r \sigma} (-R_r \cdot I_{rq} - g \cdot w_s \cdot l_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} - g \cdot m \cdot V_s / l_s)) \\ -K_2 E_2 &= ((-\frac{l_s}{V_s m} \cdot \dot{Q}_{sref}) - \frac{1}{l_r \sigma} V_{rd} - \frac{1}{l_r \sigma} (-R_r \cdot I_{rd} + g \cdot w_s \cdot l_r \cdot \sigma \cdot I_{rq})) \end{aligned} \right\} \quad \text{IV.41}$$

$$\left. \begin{aligned} V_{rq} &= (l_r \sigma (-\frac{l_s}{V_{sm}} \dot{P}_{sref} + K_1 E_1) + R_r . I_{rq} + g . w_s . l_r . \sigma . I_{rd} + g . m . V_s / l_s) \\ V_{rd} &= (L_r \sigma (-\frac{L_s}{V_{sm}} \dot{Q}_{sref} + K_2 E_2) + R_r . I_{rd} - g . w_s . l_r . \sigma . I_{rq}) \end{aligned} \right\} \quad \text{IV.42}$$

La figure IV.10 illustre la structure de la commande Backstepping



IV.3 RESULTATS DE SIMULATION DU MADA POUR UNE VITESSE FIXE

Tous les essais ont été réalisés dans les conditions suivantes :

- Machine connectée au réseau et sans convertisseur afin de mieux visualiser la différence entre les deux commande
- Machine entraînée à une vitesse fixe (1440 tr/mn).
- Entre les instants t=1s et t=3s: échelon négatif pour la puissance active (P_{sref} passe de 0 à -3000W).
- Entre les instants t=2s et t=4s: échelon positif pour la puissance réactive (Q_{sref} passe de 0 à 1000 VAR).

Dans ce système de conversion d'énergie éolienne basée sur la MADA à flux orienté, nous avons appliqué, en premier lieu, la commande vectorielle indirecte sans boucle de puissance basée sur les régulateurs classiques PI comme commande, et en deuxième lieu, une commande hybride basée sur les deux principes de récursivité et du modèle de flux orienté comme une commande par backstepping, pour des vitesses fixe et variable.

IV.3.1 RESULTATS DE SIMULATION NUMERIQUE DU SYSTEME POUR UNE VITESSE FIXE PAR LA COMMANDE VECTORIELLE INDIRECTE

Afin de mieux apprécier la commande proposée . Les consignes des puissances actives et réactives sont données sous formes d'échelons, alors que la machine est entraînée à vitesse fixe.

Les performances de commandes vectorielles (indirectes sans boucle de puissance) statoriques appliquées à la MADA sont montrées sur les figures IV.11 et IV.12 qui traduisent les variations des puissances statoriques active et réactive dans le temps respectivement. Notons au passage que tous les essais de simulation de ce travail sont effectués dans un système éolien ayant les paramètres dont les valeurs sont données en Annexe.

- *INTERPRETATION DES RESULTATS.* Les résultats de simulation représentés par les courbes des figures IV-11 et IV-12 montrent clairement que cette technique de commande permet bien un découplage parfait entre les deux composantes de la puissance statorique (active et réactive).

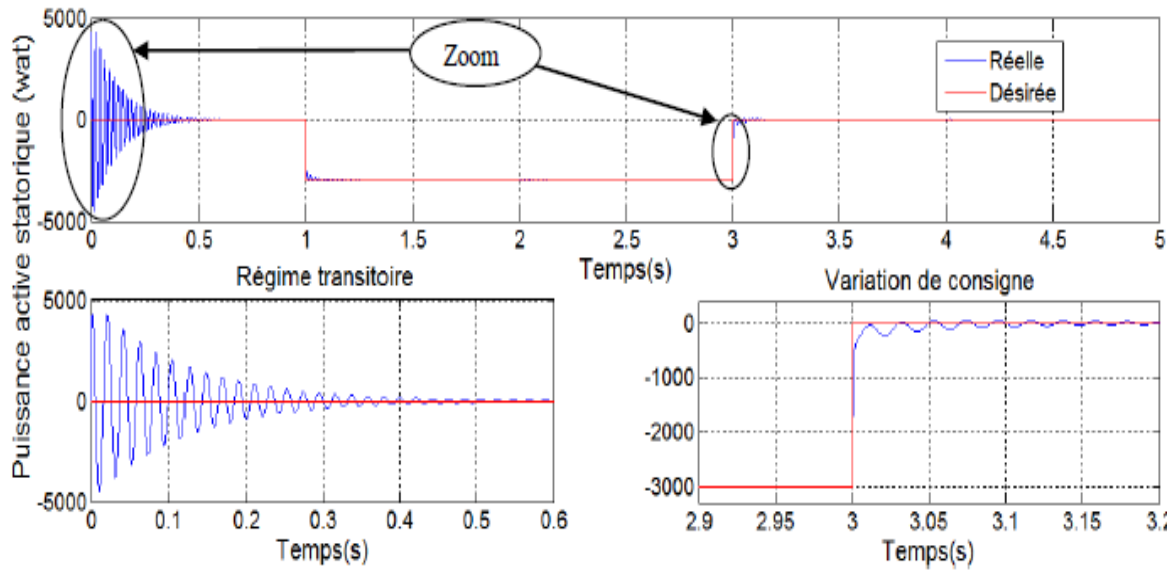


Figure IV.11: Puissance active statorique pour la commande vectorielle indirecte en boucle ouverte avec zoom autour de l'instant $t=3s$

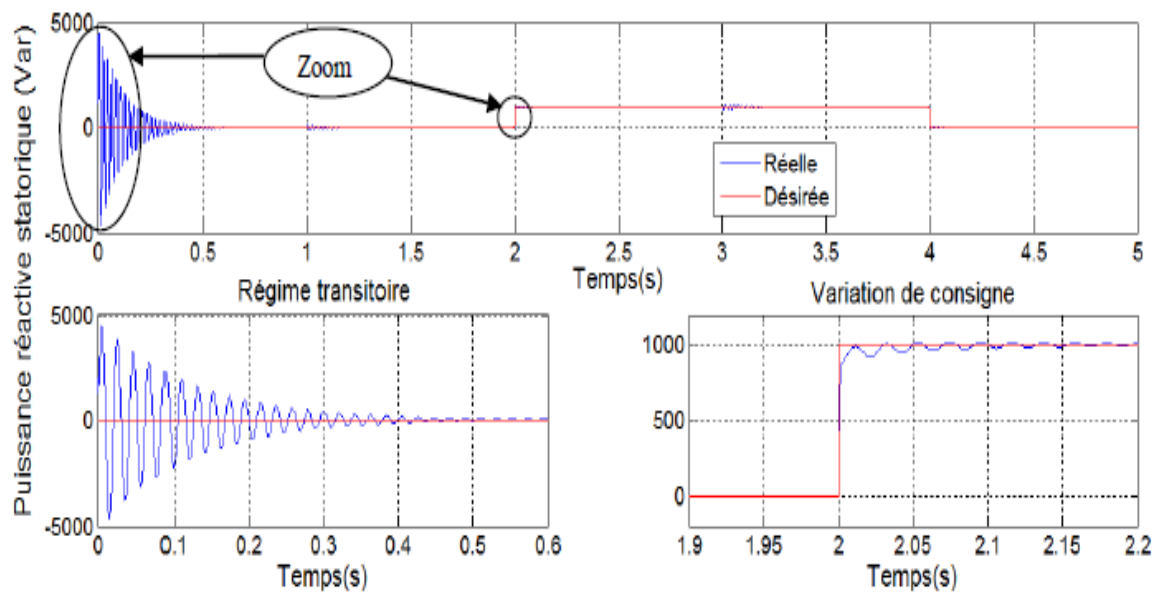


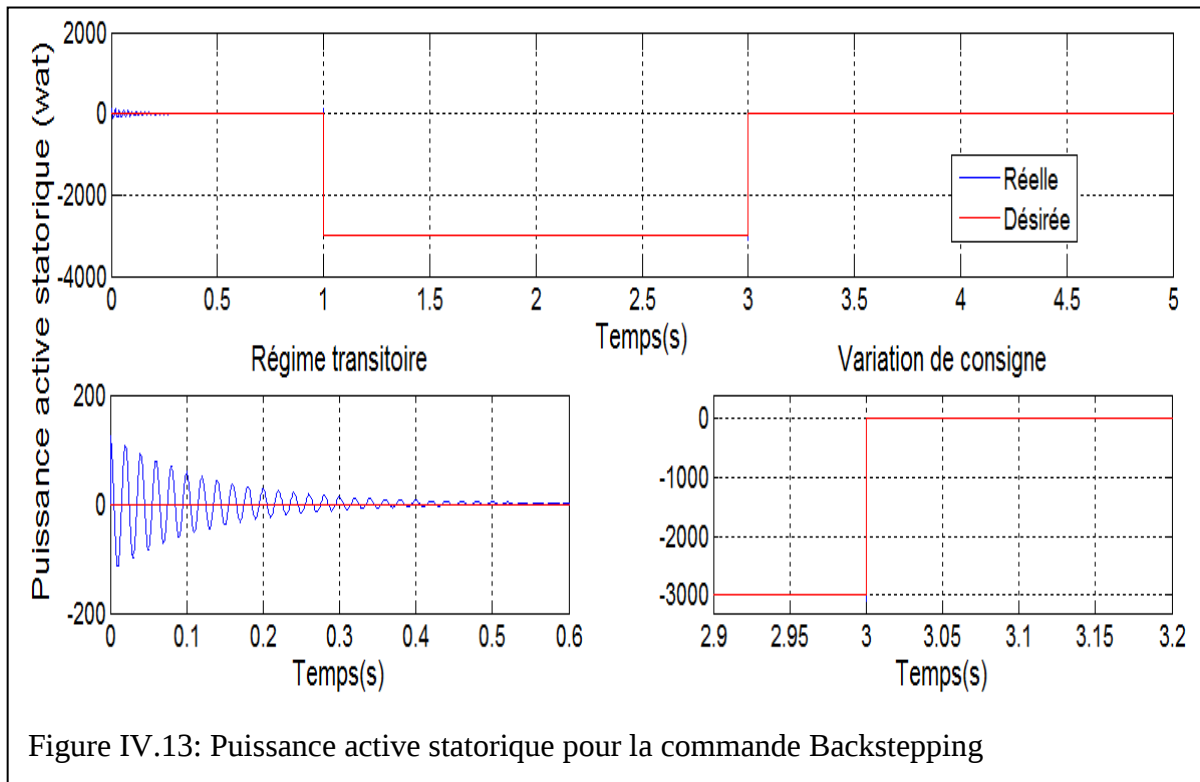
Figure IV.12: Puissance réactive statorique pour la commande vectorielle indirecte en boucle ouverte avec zoom autour de l'instant $t=2s$

de la commande vectorielle indirecte à boucle ouverte (BO) arrive à maintenir les puissances active et réactive à leurs valeurs désirées, mais avec des remarques essentielles suivantes:

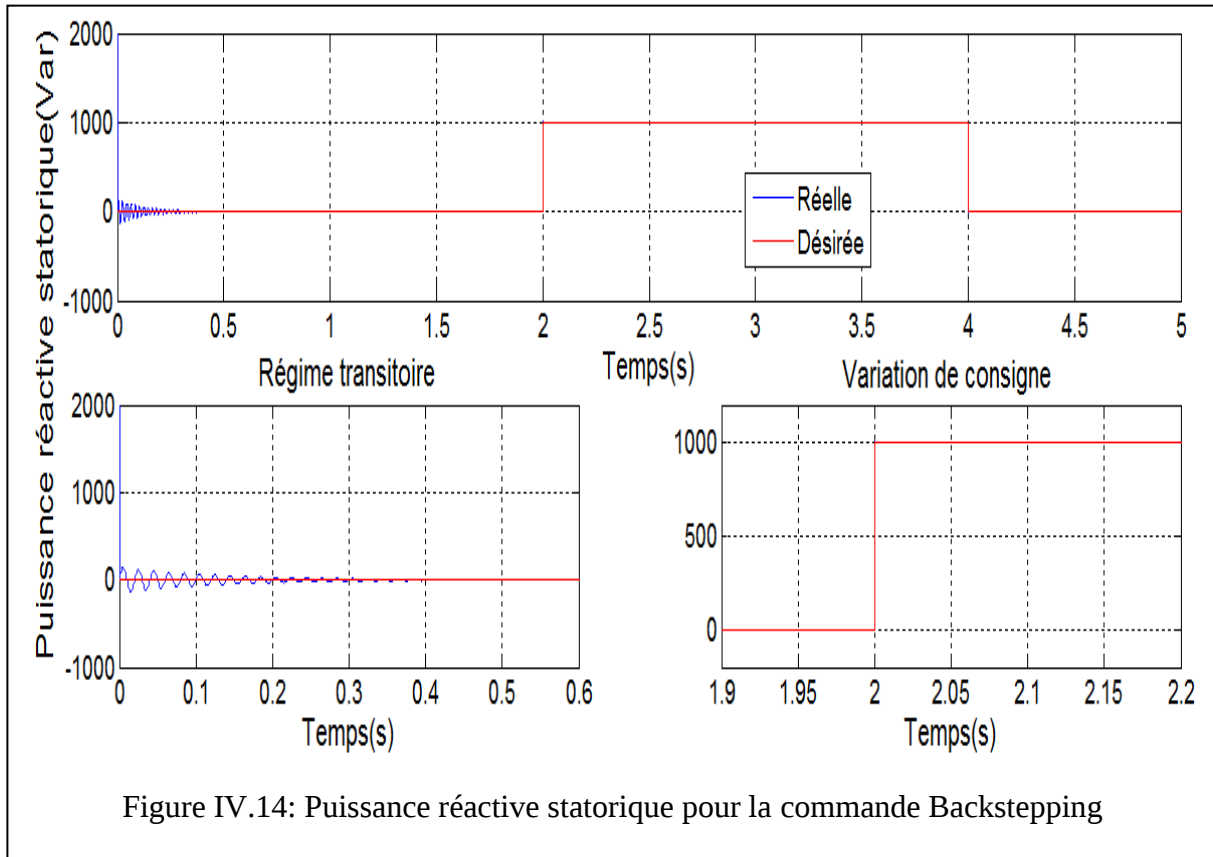
- existence d'oscillations importantes des puissances.
- un dépassement remarquable
- un temps de réponse qui est un peu lent de l'ordre de 0.5s pour le régime transitoire et pour le changement de consigne.
- il reste toujours des petites erreurs de puissance sur le régime transitoire mais sinon la puissance suit bien la consigne

IV.3.2. RESULTATS DE SIMULATION NUMERIQUE DU SYSTEME POUR UNE VITESSE FIXE PAR LA COMMANDE BACKSTEPPING

Afin de mieux apprécier la commande proposée . Les consignes des puissances actives et réactives sont données sous formes d'échelons, alors que la machine est entraînée à vitesse fixe.



Les performances de commandes backsteeping appliquées à la MADA sont montrées sur les figures IV.13 et IV.14 qui traduisant les variations des puissances statoriques active et réactive respectivement.



- INTERPRETATIONS DES RESULTATS

Nous pouvons observer que la commande permet, là aussi comme dans la commande vectorielle, un découplage parfait entre les deux composantes de la puissance statorique active et réactive. D'après ces résultats de simulation montrés sur ces figures (IV.13), (IV.14), il apparaît clairement qu'on a une amélioration par rapport à la commande vectorielle, à savoir :

- les erreurs de poursuite sont faibles
- des dépassements acceptables,
- les temps de réponses qui caractérisent le régime transitoire est faible
- un dépassement plus faible pour le régime transitoire.

- un temps de réponse rapide pour le régime transitoire (0,2s) même pour le temps de changement des consignes.
- une convergence exponentielle des erreurs vers zéro entre les valeurs de consignes et celles mesurées.
- des petites oscillations remarquables

IV.4. COMPARAISON ENTRE LES TECHNIQUES DE COMMANDE PROPOSEES:

Le but dans cette partie est de faire une comparaison entre les deux commandes que nous avons présentées dans ce chapitre. Cette comparaison est basée sur l'observation des résultats de simulations obtenus par l'application des différentes techniques de commandes classiques et développées sur le système. Les consignes des puissances active et réactive proposées sont données sous formes d'échelons alors que la machine est entraînée à vitesse fixe. Cet essai est réalisé dans les mêmes conditions à savoir:

- Machine entraînée à une vitesse fixe 1440 tr/min .
- Introduction d'un échelon de puissance active de $P_{sref} = -3000W$ entre les instants: $t = 1s$ et $t = 3s$.
- Introduction d'un échelon positif de puissance réactive $Q_{sref} = 1000 \text{ VAR}$ entre les instants: $t = 2s$ et $t = 4s$.
- la période d'échantillonnage et le temps de simulation sont fixes.

La figure IV.15 présente une comparaison qualitative des résultats de simulation des variations des puissances statoriques active et réactive, entre les deux commandes, vectorielle à boucle ouverte (CV) et backstepping (CB) proposés dans notre travail.

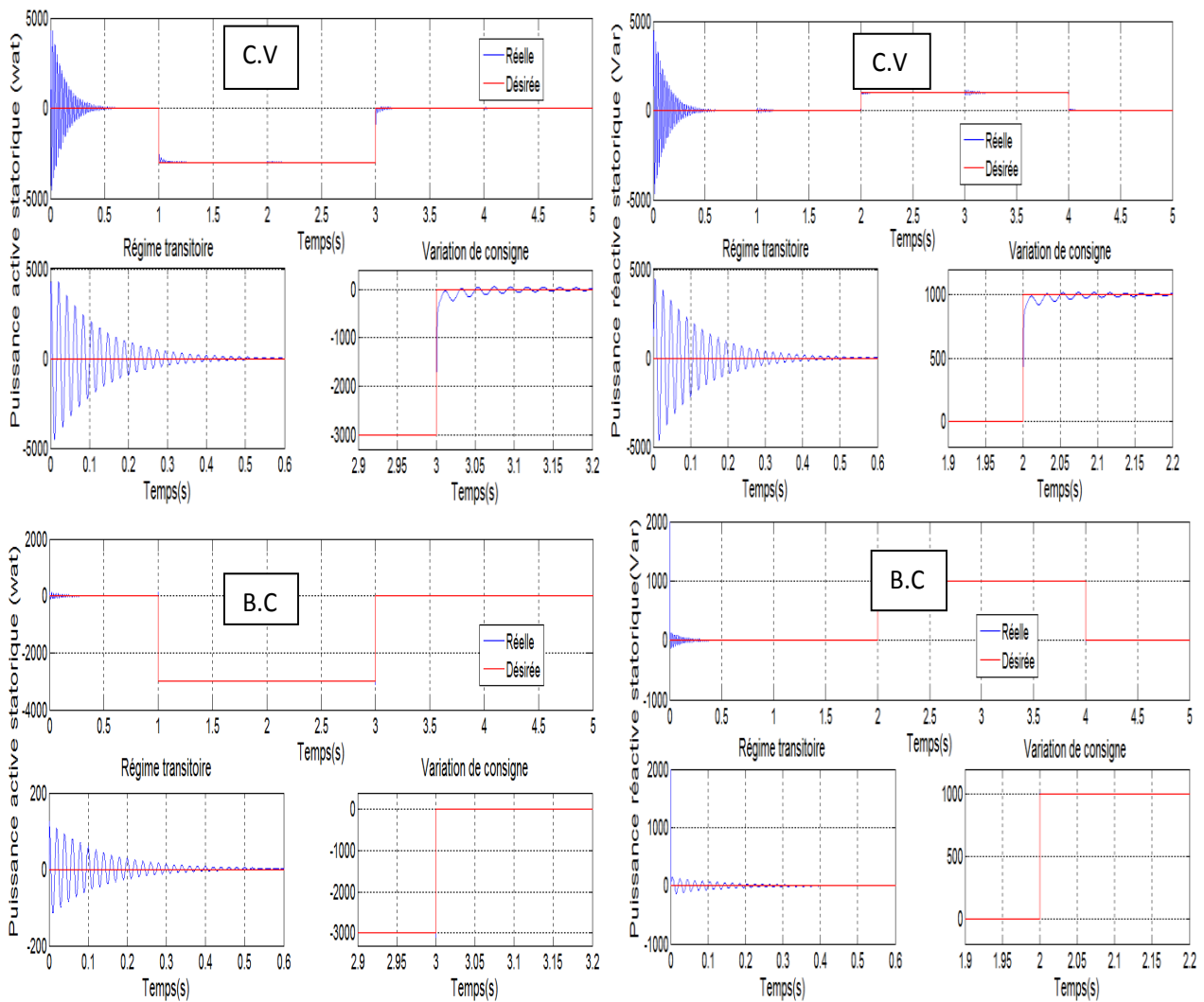


Figure IV.15: Simulation des puissances active et réactive dans les deux techniques de commandes (CV) et (BC).

On voit clairement l'évolution temporelle des résultats de simulation obtenus pour la variation des puissances générées avec une vitesse constante. Cela nous permet alors d'effectuer une comparaison entre ces deux commandes.

L'observation des résultats de simulation montre que les puissances active et réactive suivent leurs nouvelles références dans les deux types de commandes; cependant, le temps de réponse, le dépassement et les oscillations des grandeurs réglées, ainsi que la convergence exponentielle des erreurs pour le régime transitoire et le changement des consignes sont différents. On observe que les

meilleures valeurs sont celles obtenues par l'application de la commande par backstepping, qu'on peut considérer comme la commande la plus performante et la plus efficace par rapport à la commande classique vectorielle. Il apparaît clairement que cette nouvelle commande (backstepping) présente des performances positives par rapport à la commande précédente (vectorielle) à savoir :

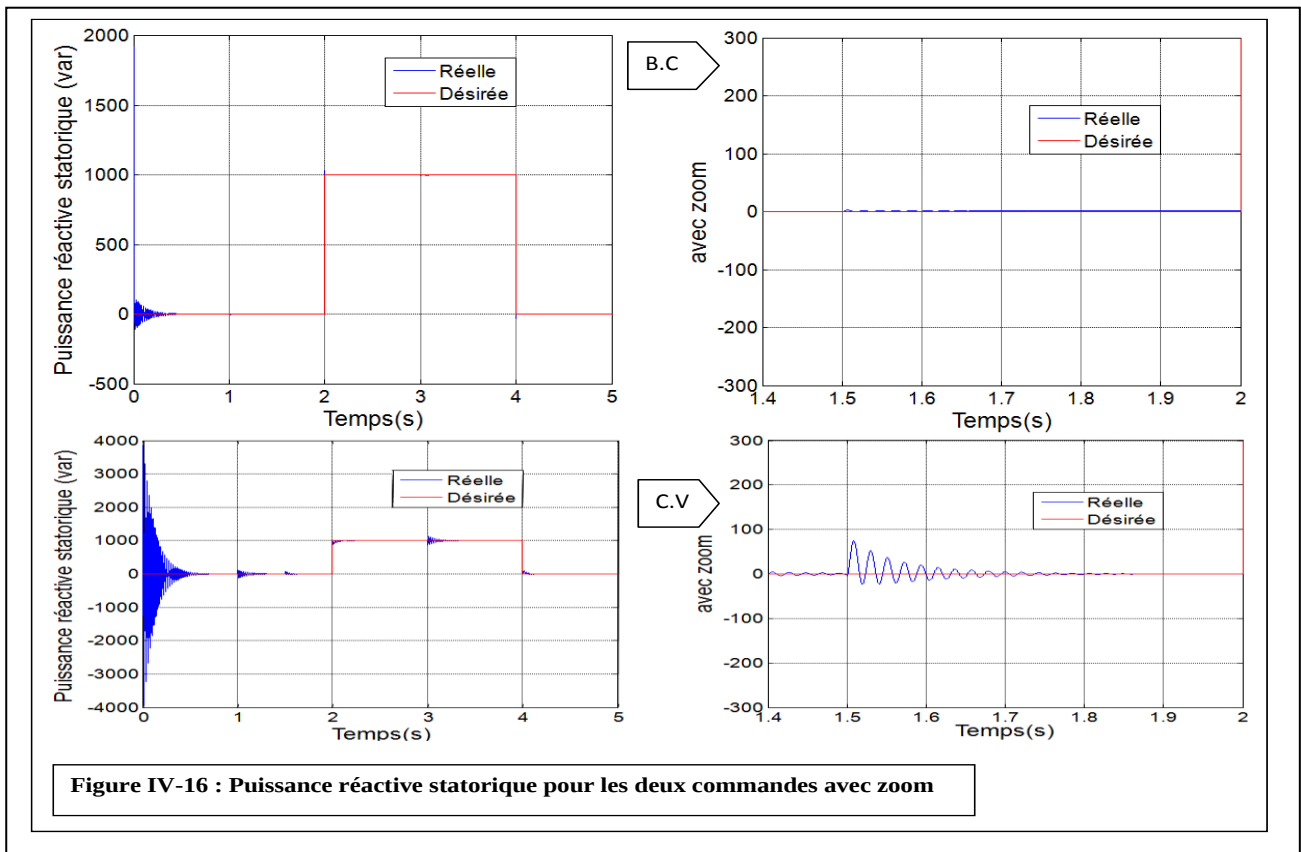
- les erreurs de poursuite sont faibles avec des dépassements acceptables
- un dépassement plus faible pour le régime transitoire
- des erreurs de poursuite faibles avec des dépassements acceptables
- des temps de réponses caractérisant le régime transitoire faibles (0,2 pour le backstepping contre 0,5 pour le vectoriel); pareil pour le temps de changement des consignes.
- une convergence exponentielle des erreurs vers zéro entre les valeurs de consignes et celles mesurées.
- une minimisation remarquable d'oscillations des grandeurs régulées et une regagne rapide.

IV.5 COMPARAISON DE LA ROBUSTESSE

On a effectué un test basé sur l'essai de robustesse des deux commandes proposées où une étude de l'influence des variations paramétriques de la MADA sur les performances de celles-ci est menée (fig IV.16 et IV.17). Sachant que dans un système réel, ces paramètres sont soumis à des variations entraînées par différents phénomènes physiques (saturation des inductances, échauffement des résistances, etc ...). Dans cet essai, on a fait varier les paramètres suivants:

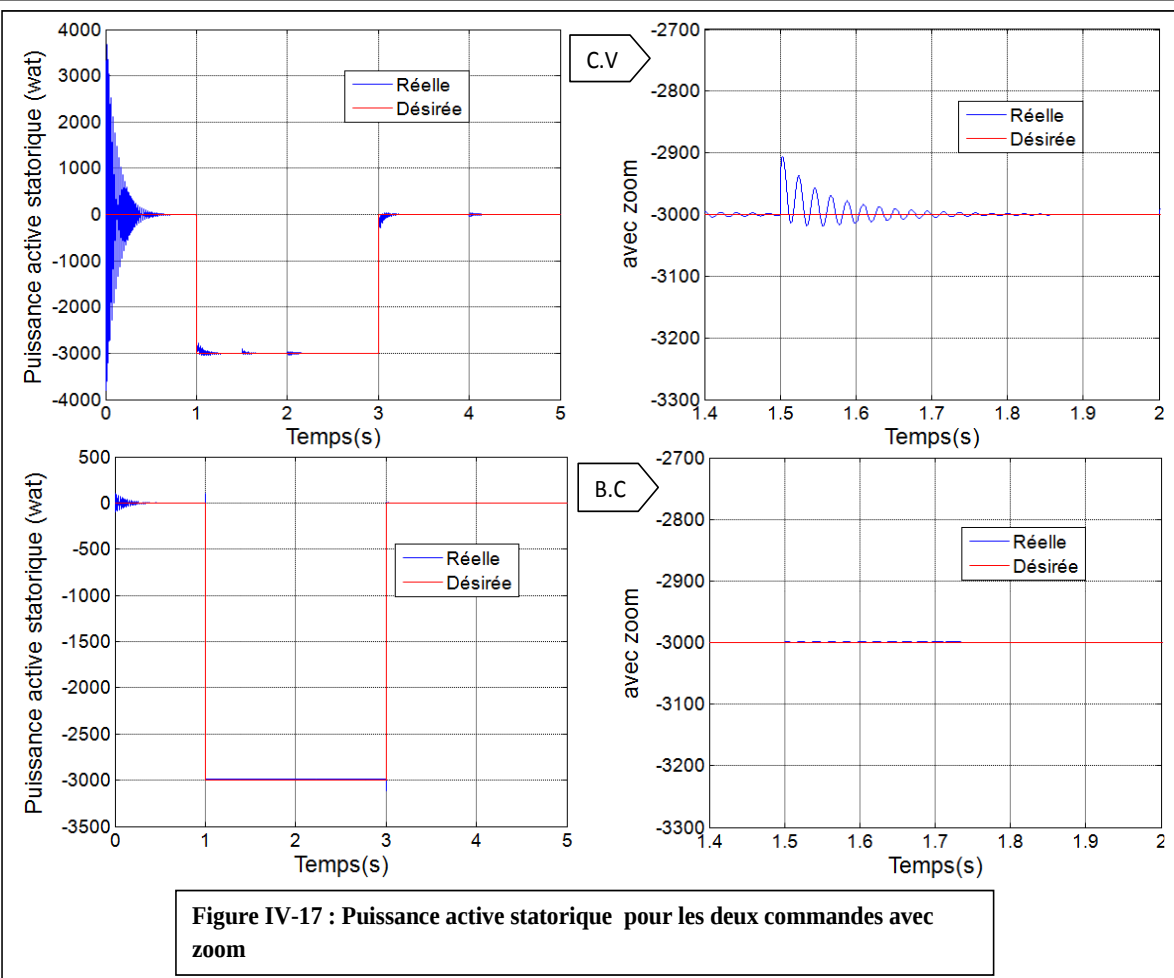
- Résistances R_s et R_r multipliées par 2.
- Inductances l_s , l_r , et m_{sr} divisées par 2.

- machine entraînée à 1440 tr/min .
- On introduit un échelon de puissance active de $P_{sref} = -3000W$ entre les instants $t = 1s$ et $t = 3s$.
- On introduit un échelon positif de puissance réactive $Q_{sref} = 1000 \text{ VAR}$ entre les instants $t = 2s$ et $t = 4s$.
- La variation des paramètres sera appliquée entre les instants $t = 1.5s$ et $t = 3.5s$.



Dans cet essai, nous avons visualisé la forme des deux puissances active et réactive pour une durée de simulation $T_s = 5s$. Les deux commandes proposées présentent une forte robustesse et assurent des bonnes performances même en présence des petites variations paramétriques avec des perturbations externes; cependant, la commande par backstepping se présente comme la meilleur commande ayant des allures des puissances presque lisses et un bon suivi des

allures des consignes, par contre la commande à base des régulateurs PI nous donne des ondulations remarquables par rapport à la commande backstepping.



IV.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre, deux techniques de commande différentes pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive générées par la MADA dans un système de production d'énergie éolienne couplée au réseau ont été établies. Ces commandes mettent en évidence le fait d'agir sur les tensions rotoriques afin d'obtenir des puissances générées aux bornes du stator de la MADA désirées.

En premier lieu, nous avons présenté l'étude et l'application de la commande vectorielle sur ce système en utilisant un régulateur proportionnel intégral. Cette commande est basée sur l'orientation du flux statorique pour simplifier le modèle de la machine et découpler la régulation des puissances générées. Par la suite, on a défini la technique de backstepping comme autre technique de commande et qui est aussi largement utilisée pour contrôler les puissances active et réactive générées. La commande vectorielle a été choisie indirecte sans boucle de puissance par sa simplicité de mise en œuvre.

Les résultats de simulation numérique obtenus lors de l'application des deux commandes précédentes sur le système entraîné une vitesse fixe montrent l'efficacité de ces deux commandes implémentées. On a remarqué que les résultats obtenus par la technique de backstepping sont meilleurs et plus performants que ceux obtenus par la technique vectorielle (dépassement, temps de réponse, et précision de poursuite, ...); de plus, la commande par backstepping garantit à l'utilisateur de la MADA, une bonne robustesse et une fiabilité élevée, ainsi qu'une insensibilité aux perturbations et aux incertitudes paramétriques.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail porte sur l'étude, la modélisation et la commande d'un système de production d'énergie éolienne. A et effet, une modélisation des différents composants de ce système a été investie. Ces modèles ont été utilisés pour l'élaboration de deux techniques de commandes dans le but de garantir un contrôle précis et continu des puissances statoriques générées tout en garantissant une stabilité et une rapidité de poursuite avec une erreur statique la plus faible possible. Cela permet d'obtenir un rendement élevé du système et une qualité de production optimale.

Dans le premier chapitre, nous avons abordé ce travail par des généralités sur les éoliennes en rappelant l'énergie éolienne et les systèmes utilisées pour produire cette énergie.

Dans le deuxième chapitre, on a présenté une description générale de l'ensemble des éléments constituant du système choisi pour notre étude. Les divers composants, le mode de fonctionnement ainsi que la modélisation mécanique de notre éolienne sont présentés et décrits de façon détaillée. Une étude sur les génératrices utilisées pour la production de l'énergie électrique dans le système éolien est menée et une attention particulière est donnée à la machine asynchrone double alimentée (MADA). On a mené une modélisation globale des éléments de cette MADA en mode connecté au réseau, et entraînée par une turbine à calage variable pour la maximisation et la limitation de la puissance extraite, qui est pilotée par le rotor via un onduleur et un bus continu placé en aval de ce convertisseur, dont la liaison au réseau est réalisée par un redresseur MLI qui permet le contrôle de bus continu avec régulation de facteur de puissance côté réseau. La troisième partie concerne la modélisation électrique de la MADA. Les équations électriques des puissances actives et réactives, des courants statoriques et rotoriques, des tensions et des flux sont établies dans les trois repères, $(a \ b \ c)$, $(\alpha \ \beta)$ et $(d \ q)$ qui a permis de simplifier ces équations en les rendant découplées et donc faciles à résoudre

Dans le quatrième et dernier chapitre, on a appliqué, sur ce modèle global, deux techniques de commandes pour contrôler indépendamment l'échange des puissances statoriques produites vers le réseau. La première technique est la commande vectorielle indirecte à boucle ouverte où on a exprimé les grandeurs statoriques de la MADA en fonction des grandeurs rotoriques pour assurer le pilotage de la machine par le rotor. l'autre c'est la commande backstepping basée sur le principe de stabilité en minimisant l'erreur sur une grandeur mesurée par rapport à sa valeur désirée. L'aspect théorique de cette deuxième commande est menée pour l'appliquer ensuite sur le système. Les résultats de simulations numériques obtenus pendant l'application de ces deux commandes sur le système montrent leurs efficacités.

Pour améliorer ces résultats, on s'est intéressé à une deuxième technique qui est la commande par backstepping, où nous avons donné quelques définitions de cette technique, puis nous avons calculé à partir de deux étapes un algorithme de commande backstepping qu'on a appliqué sur le système. L'objectif de ces deux techniques de commande est le même; il permet de contrôler indépendamment les puissances active et réactive générées par la machine asynchrone découplée par orientation du flux. Les performances de ces deux commandes ont été présentées est discutées deux autres techniques de commandes qui ont été présentées dans le quatrième chapitre. En premier lieu, on a donné un rappel sur les notions de base de la théorie de la commande par la logique floue, puis on a appliqué cette commande sur la même structure de celle de la commande vectorielle avec un remplacement des régulateurs PI par des régulateurs flous. En deuxième lieu, on s'est intéressé à la commande par backstepping, où nous avons donné quelques définitions de cette technique, puis nous avons calculé à partir de deux étapes un algorithme de commande backstepping qu'on a appliqué sur le système. L'objectif de ces deux nouvelles techniques de commande est identique à celui des deux commandes précédentes; c'est à dire de contrôler indépendamment les puissances active et réactive générées par la

machine asynchrone découplée par orientation du flux. Les performances de ces deux dernières commandes ont été justifiées par la simulation. Nous avons terminé notre travail par une étude comparative entre les deux commandes proposées. Les résultats de cette étude ont affirmé ceux de la simulation de l'asservissement des puissances.

En résumé, ce modeste travail de recherche sur les systèmes de conversion d'énergie éolienne, nous a permis d'avancer que l'application du backstepping a montré de hautes performances et s'est avéré le plus adapté au type de système éolien choisi.

ANNEXE

1- Les paramètres de la machine asynchrone double alimentée:

Valeurs nominales :

Puissance nominale : $P_n = 3KW$.

Tension nominale : $v/U = 220/380V - 50Hz$.

Courant nominale : $i/I = 15/8.6A$.

La vitesse nominale : $\Omega_n = 1440 \text{ tr/min}$.

Nombre de paires de pôles : $P = 2$.

Paramètres :

Résistance du stator: $R_s = 1.2\Omega$.

Résistance du rotor: $R_r = 1.8 \Omega$.

Inductance stator : $L_s = 0.1554H$.

Inductance du rotor: $L_r = 0.1568H$.

Inductance Mutuelle : $M = 0.15H$.

Constantes mécaniques :

Moment d'inertie: $J = 0.2 \text{ Kg. m}^2$.

Coefficient de frottement: $f = 0.001N. m. s/rd$.

2- Les paramètres de la turbine éolienne utilisée :

Nombre de pale: $N_p = 3$.

Diamètre d'une pale : $R_T = 3m$.

Gain du multiplicateur : $G = 5.4$.

Inertie: $J = 315 \text{ Kg. m}^2$.

Coefficient: $f = 0.0024 \text{ N. m. s/rd}$.

3- Paramètres du filtre :

Résistance du filtre : $R_f = 0.25\Omega$.

Inductance du filtre : $L_f = 0.005H$.

4- Capacité du condensateur de lissage de la tension du bus continu :

$C = 4400 \mu F$.

BIBLIOGRAPHIE

[ABD 14] S.Abdeddaim, A.Betka, S Drid, M Becherif, « Implementation of MRAC controller of a DFIG based variable speed grid connected wind turbine». *Energy Convers Manage.* 79 (2014), pp. 281–288.

[ABD 13] S. Abdeddaim, A. Betka, « Optimal tracking and robust power control of the DFIG wind turbine ». *Int J Electr Power Energy Syst* 2013; 49(01), pp.: 234–242.

[ABD 12] L. Abdelhamid, « Contribution à l'Amélioration des Performances des Générateurs Eoliens -Evaluation de l'Impact des Energies Renouvelables sur l'Environnement ». Thèse doctorat, Université de Batna,Alger,Le 26 Avril 2012.

[ABD 07] A. Abdelli, « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive ». L'institut national polytechnique de Toulouse, 2007.

[ABU 08]. N. Abu-tabak, « Stabilité dynamique des systèmes électriques multimachines : modélisation, commande, observation et simulation ». Thèse de Doctorat, École Centrale de Lyon 2008.

[ADH 13] Nabanita Adhikary, Chitralekha Mahanta, « Integral backstepping sliding mode control for underactuated systems: Swing-up and stabilization of the Cart–Pendulum System ». *ISA Transactions*, Vol. 52, 2013, pp. 870-880.

[AGU 10] D. Aguglia, « Conception globale des générateurs asynchrones à double alimentation pour éoliennes». Thèse doctorat, Université Laval Québec, 2010.

[AMI 10] Amimeur H, Abdessemed R, Aouzellag D, Merabet E, Hamoudi F. A, « sliding mode control associated to the field-oriented control of dual-stator induction motor drives ». *J Electr Eng* 2010; 10(3) [Art. 2]

[AMI 12] Amimeur H, Aouzellag D, Abdessemed R, Ghedamsi K, « Sliding mode control of a dual-stator induction generator for wind energy conversion systems ». *Int J Electr Power Energy Syst* 12; 42(01), pp: 60–70.

[AMI 12] H. Amimeur, « Contribution au contrôle de la machine asynchrone double étoile ». Thèse doctorat, Université de Batna, Alger, 27/06/2012.

- [ASU 13] Abdullah Asuhaimi B.Mohd Zin, Mahmoud Pesaran H.A, Azhar B, Khairuddin, Leila Jahanshaloo, Omid Shariati, « An overview on doubly fed induction generators' controls and contributions to wind based electricity generation ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27(20), pp. 692–708.
- [AOU 09] D. Aouzellag, K. Ghedamsi, E.M. Berkouk, « Network power flux control of a wind generator ». *Renewable Energy*, Volume 34, Issue 3, pp 615-622, Elsevier 2009.
- [BEL 14] K. Belmokhtar, M.L. Doumbia , K. Agbossou, « Novel fuzzy logic based sensorless maximum power point tracking strategy for wind turbine systems driven DFIG (doubly-fed induction generator) ». *Energy*, Vol.76, 2012, pp. 679-693.
- [BEL 09] Endusa Billy Muhando, Member, IEEE, Tomonobu Senjyu, Senior Member, IEEE, « LQG Design for Megawatt-Class WECS With DFIG Based on Functional Models' Fidelity Prerequisites ». *IEEE transactions on énergie conversion*, vol. 24, no. 4, december 2009.
- [BEN 00] A. Benaskeur, « Aspects de l'application du Backstepping adaptatif à la commande décentralisée des systèmes nonlinéaires ». Thèse Doctorat, Université du Laval, février 2000.
- [BEN 13] A. BENLAMOUDI, « Contribution a la commande de la génératrice asynchrone a cage entraînée par une turbine éolienne ». Thèse doctorat, Université de Batna, Alger, Le 1 Juillet 2013.
- [DEN 10] A. Dendouga, « Contrôle des puissances active et réactive de la machine a double alimentation (DFIM) ». Thèse doctorat, Université de Batna, Alger, Le 10/02/2010.
- [BIA 07] F.D. Bianchi, H. De Battista, R.J. Mantz, « Wind turbine control Systems, principles, Modelling and Gain Scheduling Design ». Springer 2007.
- [BOU 14] F. Boumaraf, « Commande D'un Aérogénérateur- Apport Des Techniques de L'intelligence Artificielle ». Thèse doctorat, Université de Batna, Alger, Le 24 Juin 2014.

[BOU 07] T. Bouaouiche, « Commande à Structure Variable et Etude de l'Intégration d'Eolienne à base de Machine Asynchrone à Double Alimentation sur le Réseau Electrique ». Thèse doctorat, Au Centre de Recherches et de Transfert de Technologie de Saint-Nazaire, Le 7 Mai 2007.