

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Machines électriques

Présenté par

Mahdi DAHMANI

Hocine YAKOUBI

Thème

Commande d'un système de produit de l'énergie éolienne

Mémoire soutenu publiquement le/07/ 2016 devant le jury composé de :

M Prénom NOM

Grade, Lieu d'exercice, Président

M Rachid MANSOURI

Professeur, UMMTO, Encadreur

M Prénom NOM

Grade, Lieu d'exercice, Co-Encadreur

M Prénom NOM

Grade, Lieu d'exercice, Examineur

M Prénom NOM

Grade, Lieu d'exercice, Examineur

*Nous remercions **Dieu** le tout puissant de nous avoir donnés courage, patience, santé et force durant toutes ces années d'étude.*

Nous remercions vivement Monsieur MANSOURI Rachid, Professeur à l'UMMTO d'avoir accepté de diriger ce travail et pour l'intérêt qu'il nous a porté, mais surtout pour la confiance qu'il nous a accordée, pour ses conseils, son positivisme et son aide précieuse

Nous adressons nos vifs remerciements à Monsieur ARDJAL Aghiles, doctorant à l'UMMTO pour son soutien tout au long de cette thèse qui nous a été une aide précieuse. Nous le remercions également pour sa disponibilité et pour ses conseils éclairés, qu'il trouve ici nos sincères gratitude.

Nous tenons à remercier tous les membres de jury pour le temps qu'ils ont consacré à l'évaluation de cette thèse :

- Monsieur HADDAD Salah, professeur à l'UMMTO, pour nous avoir fait l'honneur d'accepter la présidence de notre jury*
- Madame IMADOUCHE Malika, maître assistant classe (A) à l'UMMTO, pour nous avoir fait l'honneur d'accepter de participer à ce jury.*
- Monsieur SI BRAHIM Madjid, maître assistant classe (B) à l'UMMTO, pour nous avoir fait l'honneur d'accepter de participer à ce jury.*

Nous sommes également reconnaissants envers ceux qui ont contribués de loin ou de prés dans la réussite de ce travail.

Un grand merci à tous les enseignants qui nous ont enseignés l'ELECTROTECHNIQUE, ainsi aux responsables de la FGEI qui veillent sur le bien être des étudiants et sur le bon déroulement de la pédagogie.

Dédicaces

*A Ma chère Mère, pour son soutien
inconditionnel, ses encouragements, et bien sur
pour m'avoir permis de réaliser mes études dans
des meilleurs conditions ;*

A la mémoire de mon cher père

A la mémoire de mon cher ami MOULOUD DJEFFEL

A Mon grand-père et ma grande-mère

A Mes chers frères et sœur

A Mes belles sœurs et mon beau frère

A Mes oncles et tantes

A Mes cousins et cousines

*A Mes neveux et nièces : elyes, houda ,samy
,meriem, Lina ,anaïs....*

Et à toute ma famille

A Mes chers amis et aux anciens d'130

A Mes enfants et à ma futur femme

...Je dédie ce modeste travail.

Je dédie ce travail à mes parents qui me sont chers, mes frères, ma belle sœur, et tous mes amis

Mahdi...

Introduction générale	1
<i>Chapitre I: Etat de l'art sur les systèmes éoliens</i>	
I.1. Introduction	3
I.2. Chiffres de l'énergie éolienne	3
I.3. Les Aérogénérateurs	7
I.3.1. principe	7
I.3.2. Types d'aérogénérateurs	7
I.3.3. Eléments constitutifs d'une éolienne moderne	11
I.3.4. Force des vents	12
I.4. Stratégies de fonctionnement d'une éolienne	13
I.4.1. Bilan des forces sur une pale	14
I.4.2. Méthode de contrôle de l'aéroturbine	14
I.4.3. Phases de fonctionnement d'une éolienne	17
I.5. Conversion de l'énergie éolienne en énergie mécanique	18
I.5.1. Limite de Betz	18
I.5.2. Production de l'énergie mécanique	21
I.5.3. Optimisation de l'énergie	22
I.6. Différents systèmes utilisés pour la conversion électromécanique	22
I.6.1. Fonctionnement à vitesse fixe	23
I.6.2. Fonctionnement à vitesse variable	23
I.6.2.1. Eolienne à machine asynchrone à cage	24
I.6.2.2. Eolienne à machine asynchrone à double alimentation	25
I.6.2.3. Autres machines	25
I.7. Gestion de l'énergie électrique et nécessité de stockage	26
I.7.1. Gestion du réseau électrique	26
I.7.2. Nécessité de stockage	27
I.8. Modélisation du système éolien	27
I.8.1. Vent source primaire	28
I.8.2. Modèle de la partie mécanique	30
I.8.3. Equation dynamique de l'arbre	32
I.9. Conclusion	33

Chapitre II: Généralités sur la machine asynchrone à double alimentation

MADA

II.1. Introduction	34
II.2. Description et structure de la machine asynchrone à double alimentation	34
II.3. Régimes de fonctionnement de la MADA	35
II.4. Principe et mode de fonctionnement de la MADA	37
II.4.1. Fonctionnement en mode moteur en hypo synchronisme	38
II.4.2. Fonctionnement en mode moteur en hyper synchronisme	38
II.4.3. Fonctionnement en mode génératrice en hypo synchronisme	38
II.4.4. Fonctionnement en mode génératrice en hyper synchronisme	39
II.5. Notions hypo et hyper-synchrone de la MADA	39
II.6. Domaine d'application de la MADA	41
II.7. Avantages et inconvénients de la MADA	42
II.8. Conclusion	44

Chapitre III: Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

MADA

III.1. Introduction	45
III.2. Modèle et identification des paramètres de la machine	45
III.2.1. Hypothèses simplificatrices pour la modélisation de la MADA	45
III.2.2. Rappel sur la loi de Faraday	46
III.2.3. Modélisation de la MADA dans le plan (a, b, c)	47
III.2.4. Transformation de Park	49
III.2.5. Modélisation de la MADA dans le plan (d, q)	51
III.3. Choix du référentiel de travail	52
III.4. Bilan de puissance dans la MADA	55
III.4.1. Bilan de puissance en tenant compte des résistances rotoriques et statoriques	55
III.4.2. Bilan de puissance sans prise en compte des résistances rotoriques et statoriques	56
III.5. Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation	56
III.6. Principe de la commande vectorielle	57
III.7. Variantes de la commande vectorielle	57
III.8. Commande vectorielle par orientation du flux statorique	57

III.9. Commande vectorielle directe et indirecte	60
III.9.1. Commande vectorielle directe	60
III.9.2. Commande vectorielle indirecte	60
III.10. Conclusion	61

Chapitre IV: Commande par modèle interne (CMI)

IV.1. Introduction	62
IV.2. Schémas de commande des systèmes linéaires	62
IV.3. Méthode de synthèse directe	63
IV.3.1. Conditions de stabilité du contrôleur	64
IV.3.2. Conditions de causalité du contrôleur	66
IV.4. Synthèse du régulateur $C(p)$ en se basant sur le principe de la commande par modèle interne	66
IV.4.1. Principe de base	67
IV.4.2. Calcul du contrôleur $C(p)$ sur la base du contrôleur $C_{IMC}(p)$	68
IV.5. Exemple d'application	70
IV.5.1. Synthèse du régulateur en considérant comme modèle de référence un modèle du premier ordre	71
IV.5.2. Synthèse du régulateur en considérant comme modèle de référence un modèle du premier ordre	72
IV.6. Conclusion	74

Chapitre V: Simulation et résultats du système éolien

V.1. Introduction	75
V.2. Résultats de simulation de la turbine seule	76
V.3. Résultat de simulation de la MADA seule	80
V.3.1. Essais à vitesse fixe	81
V.3.2. Essai à vitesse variable	84
V.3.3. Essai de robustesse	86
V.3.3.1. Variation de la résistance rotorique	86
V.3.3.2. Variation de l'inductance mutuelle	88
V.4. Résultats de simulation du système global	90
V.5. Conclusion	93
Conclusion générale	94

Abréviations

<i>MADA</i>	Machine asynchrone à double alimentation
<i>DFIM</i>	Doubly fed induction machine
<i>MAS</i>	Machine asynchrone
<i>MS</i>	Machine synchrone
<i>MLI</i>	Modulation de la largeur d'impulsion
<i>f_{em}</i>	Force électromotrice
<i>f_{mm}</i>	Force magnétomotrice
<i>CMI</i>	Commande par modèle interne
<i>IMC</i>	Internal model control
<i>PI</i>	Proportionnel-intégral

Notations

<i>V</i>	Vecteur de la vitesse du vent arrivant face à la pale
<i>V_{rot}</i>	Vecteur de la composante du vent due à la rotation de l'aérogénérateur
<i>V_{res}</i>	Résultante de ces deux vecteurs
<i>F_{ax}</i>	Poussée axiale
<i>F_{rot}</i>	Poussée en direction de la rotation
<i>F_{res}</i>	Force résultante
<i>α</i>	Angle d'incidence
<i>β</i>	Angle de calage
<i>V_e</i>	Vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur
<i>V_s</i>	Vitesse du vent en aval de l'aérogénérateur
<i>m</i>	Masse d'air en mouvement
<i>S</i>	Surface des pales
<i>ρ</i>	Densité de la masse d'air
<i>P_m</i>	Puissance mécanique extraite du vent
<i>P_{mt}</i>	Puissance totale théorique
<i>C_p</i>	Coefficient de puissance
<i>λ</i>	Vitesse relative ou ratio de vitesse
<i>Ω_t</i>	Vitesse de rotation de la turbine
<i>Ω₁</i>	Vitesse de rotation avant le multiplicateur
<i>Ω₂</i>	Vitesse de rotation après le multiplicateur
<i>R</i>	Rayon de l'aérogénérateur
<i>K</i>	Rapport du multiplicateur de vitesse
<i>P_{mg}</i>	Puissance mécanique disponible sur l'arbre du générateur électrique
<i>λ_{opt}</i>	Vitesse relative optimale
<i>Ω_{opt}</i>	Vitesse de rotation optimale résultante
<i>V_v</i>	Vitesse du vent
<i>a_n, b_n, ω_v</i>	Amplitudes et la pulsation de l'échantillon du vent respectivement
<i>P_m</i>	Puissance mécanique
<i>C_t</i>	Couple mécanique
<i>G</i>	Gain de vitesse

J_t	Moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne
f_t	Coefficient du aux frottements visqueux de la turbine
C_t	Couple mécanique de la turbine éolienne
J_m	Moment d'inertie de la MADA
f_m	Coefficient du aux frottements visqueux de la MADA
C_m	Couple mécanique sur l'arbre de la MADA
J	Inertie de la turbine ramenée du coté de l'arbre rapide
f	Coefficient de frottement externe de la turbine ramené du coté de l'arbre rapide
C	Couple aérodynamique de la turbine ramené du coté de l'arbre rapide
f_r	Fréquence des courants rotoriques
f_s	Fréquence du réseau
f_m	Fréquence de rotation du rotor
g	Glissement
Ω_m	Vitesse mécanique du rotor
ω_s, ω_r	Pulsations statoriques et rotoriques respectivement
p	Nombre de paires de pôle
n_s	Vitesse de synchronisme
(N)	Pôle nord
(S)	Pôle sud
n	Vitesse du rotor
S_a, S_b, S_c	Bobines statoriques
R_a, R_b, R_c	Bobines rotoriques
v	Tension aux bornes d'une bobine
R_B, L_B	Résistance et inductance d'une bobine respectivement
i	Courant électrique
$\varphi_t, \varphi_c, \varphi$	Flux total, le flux de couplage magnétique avec d'autres enroulements et le flux propre de l'enroulement respectivement
V_s, V_r	Tensions statorique et rotorique
i_s, i_r	Courants statorique et rotorique
φ_s, φ_r	Flux statorique et rotorique
R_s, R_r	Résistances du stator et du rotor
L_s, L_r	Inductances cycliques ou de fuites
L_{as}, L_{ar}	Inductance propre d'une phase statorique et rotorique
M_{as}, M_{ar}	Inductance mutuelle entre deux phases du stator et du rotor
M_{sr}	Inductances mutuelles du couplage stator-rotor
f	Coefficient de frottements visqueux
J	Moment d'inertie de la partie tournante
C_r	Couple résistant
C_{em}	Couple électromagnétique
θ_s, θ_r	Angle électrique statorique, rotorique
$P(\theta_s)$	Transformation de Park
$P(\theta_s)^{-1}$	Transformation inverse de Park

d	Indice de la composante directe
q	Indice de la composante en quadrature
V_{as}, V_{bs}, V_{cs}	Tensions statorique sur le plan (a, b, c)
V_{ar}, V_{br}, V_{cr}	Tensions rotorique sur le plan (a, b, c)
V_{ds}, V_{qs}	Tensions statorique sur les axes d et q
V_{dr}, V_{qr}	Tensions rotorique sur les axes d et q
i_{as}, i_{bs}, i_{cs}	Courants statorique sur le plan (a, b, c)
i_{ar}, i_{br}, i_{cr}	Courants rotorique sur le plan (a, b, c)
i_{ds}, i_{qs}	Courants statorique sur les axes d et q
i_{dr}, i_{qr}	Courants rotorique sur les axes d et q
$\varphi_{as}, \varphi_{bs}, \varphi_{cs}$	Flux statorique sur le plan (a, b, c)
$\varphi_{ar}, \varphi_{br}, \varphi_{cr}$	Flux rotorique sur le plan (a, b, c)
$\varphi_{ds}, \varphi_{qs}$	Flux statorique sur les axes d et q
$\varphi_{dr}, \varphi_{qr}$	Flux rotorique sur les axes d et q
P_s, P_r	Puissances actives statorique et rotorique respectivement
Q_s, Q_r	Puissances réactives statorique et rotorique respectivement
$P_{réf}$	Puissance active de référence
$Q_{réf}$	Puissance réactive de référence
$C(p), G(p)$	Contrôleur et la fonction de transfert du système respectivement
$u(p)$	Grandeur de commande
$y_{réf}(p)$	Grandeur de référence
$y(p)$	Grandeur de sortie à contrôler
$q(p)$	Perturbation
$H(p)$	Modèle de référence
$N_c(p)$	Numérateur de la fonction de transfert du contrôleur
$D_c(p)$	Dénominateur de la fonction de transfert du contrôleur
$N_\Sigma(p)$	Numérateur de la fonction de transfert du système
$D_\Sigma(p)$	Dénominateur de la fonction de transfert du système
$N_H(p)$	Numérateur de la fonction de transfert du modèle de référence
$D_H(p)$	Dénominateur de la fonction de transfert du modèle de référence
T, τ	Temps de repense
G_0	Gain statique
$C_{IMC}(p)$	Contrôleur de commande par modèle interne
$C_m(p)$	Fonction de transfert du modèle
K	Gain du régulateur
τ_i	Constante de temps d'intégration

Le problème de tous les jours et dans le monde entier est de répondre à la demande énergétique qui augmente de plus en plus. L'augmentation rapide de l'activité industrielle dans les pays développés et l'investissement des entreprises dans les pays qui assurent un coût de production moins élevé a accru très rapidement la demande mondiale d'énergie. Face à cette demande, toujours croissante de nos jours, les pays industrialisés ont massivement fait appel aux centrales nucléaires. Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques, mais le risque d'accident nucléaire, le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures. Sans oublier que cette ressource d'énergie n'est pas disponible pour tout le monde pour des raisons politiques ou financières, son installation coûte cher et elle peut être dangereuse au niveau écologique [28].

La croissance constante de la consommation d'énergie sous toutes ses formes et les effets polluants, principalement causés par la combustion des énergies fossiles, sont au cœur de la problématique du développement durable et du soin de l'environnement dans une discussion pour l'avenir de la planète.

Le secteur de la génération électrique est le premier consommateur d'énergie primaire et les deux tiers de ses sources sont des carburants fossiles. Il est techniquement et économiquement capable de faire des efforts importants pour réduire les atteintes de l'activité humaine sur le climat et l'environnement. Une des possibilités est d'accroître le taux de production d'électricité à partir de ressources de type non-fossiles et renouvelables qui sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités. L'eau des rivières faisant tourner les turbines d'un barrage hydroélectrique, le vent embrassant les pales d'une éolienne, la lumière solaire excitant les photopiles ces sources d'énergie sont peu ou pas polluantes, ne rejettent aucune pollution lorsqu'elles produisent de l'énergie.

Dans ce contexte, les nouvelles énergies vertes dite 'renouvelables' sont réapparues et prennent peu à peu une place indéniable dans le marché d'électricité. Parmi elles, l'éolien apparaît actuellement en bonne place comme énergie d'appoint complémentaire à l'énergie fossile et nucléaire puisque l'énergie potentielle des masses d'air en mouvement représente, au niveau mondial, un gisement considérable.

Il y a lieu de signaler que l'intérêt qu'a donné l'université algérienne au secteur des énergies renouvelables fait que plusieurs recherches sont orientées dans ce sens. C'est dans ce cadre que nous allons développer notre étude, sur un système de production d'énergie éolienne. Pour atteindre notre objectif qui consiste à commander une turbine éolienne pour optimiser la génération d'énergie électrique, nous avons réparti notre travail sur cinq chapitres :

Le premier chapitre est consacré à des rappels sur les systèmes éoliens à travers les équations et les concepts physiques régissant leur fonctionnement. Ces

rappels sont suivis par un état de l'art sur la conversion électromécanique à travers les différents types de génératrices utilisées et par une modélisation de la turbine (partie aérodynamique).

Le second chapitre présente une étude sur la machine asynchrone à double alimentation et son fonctionnement en génératrice pour l'exploitation de l'énergie éolienne.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation de la MADA dans le repère réel puis dans le repère diphasé lié au champ tournant, et une stratégie linéaire de commande (commande vectorielle) en puissances active et réactive statorique seront détaillées.

Le quatrième chapitre met en œuvre la commande vectorielle basée sur la synthèse de commande par modèle interne.

Afin de valider le modèle et les performances de la stratégie de commande réalisée pour cette chaîne de conversion, **le cinquième chapitre** présente les résultats obtenus, qui vont nous permettre de conclure et d'envisager les perspectives et les suites à donner à ce travail.

Chapitre I

Etat de l'art sur les systèmes éoliens

I.1. Introduction

L'énergie éolienne est utilisée par l'homme depuis très longtemps déjà. Elle a remplacé les rames pour faire avancer les navires, elle a également été utilisée pour actionner les meules des moulins pour moudre du grain, elle permet encore le pompage d'eau dans les champs. A cette époque, l'énergie cinétique du vent était uniquement transformée en énergie mécanique.

C'est en 1891 que le Danois Paul Lacour a construit pour la première fois une turbine à vent générant de l'électricité [28], ensuite c'est au début des années 1940 que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité [41].

Cependant, elle connaît depuis environ 40 ans un essor sans précédent notamment après la crise pétrolière de 1973 qui a alerté les états industrialisés non producteurs d'énergie fossile. En effet, après l'an 2000, le contexte fluctuant des énergies fossiles, l'explosion de la demande mondiale en électricité et les prises de conscience environnementale, ont accentué le besoin d'une énergie propre et durable où l'éolien occupe une place privilégiée. Fort de son potentiel mondial, celui-ci a ainsi attiré différents acteurs du monde économique et surtout de l'énergie. Ceci s'est traduit par une profonde réorganisation et mutation du marché de l'éolien pour lequel les aérogénérateurs ont atteint une certaine maturité technique. Ces aérogénérateurs, généralement à axe horizontal, fonctionnent à vitesse variable permettant l'augmentation de la puissance produite. Le développement des convertisseurs statiques et leur commande a permis le contrôle des puissances produites par ces aérogénérateurs [22].

Dans ce chapitre nous allons présenter un état de l'art sur les systèmes éoliens et donner quelques définitions sur ces systèmes à travers les équations et les concepts physiques régissant leur fonctionnement.

I.2. Chiffres de l'énergie éolienne

La demande croissante en énergie électrique dans le monde, le problème du réchauffement climatique et les émissions de gaz à effet de serre sont les facteurs qui ont fait de l'énergie éolienne une source d'énergie alternative et durable, la comparant avec d'autre source d'énergie, l'énergie éolienne est renouvelable et produit une énergie propre. Elle est devenue un moyen très important de production d'énergie électrique dans plusieurs pays [12].

Le parc mondial s'élève à 432 419 MW à la fin 2015 contre 369 695 en 2014, enregistrant une croissance de 17%. Pour rappel, il y a 11 ans, en 2005, la puissance du parc était de 59 084 MW. Les investissements mondiaux dans le secteur s'élèvent à 109 milliards de dollars contre 99 milliards de dollars en 2014 [24].

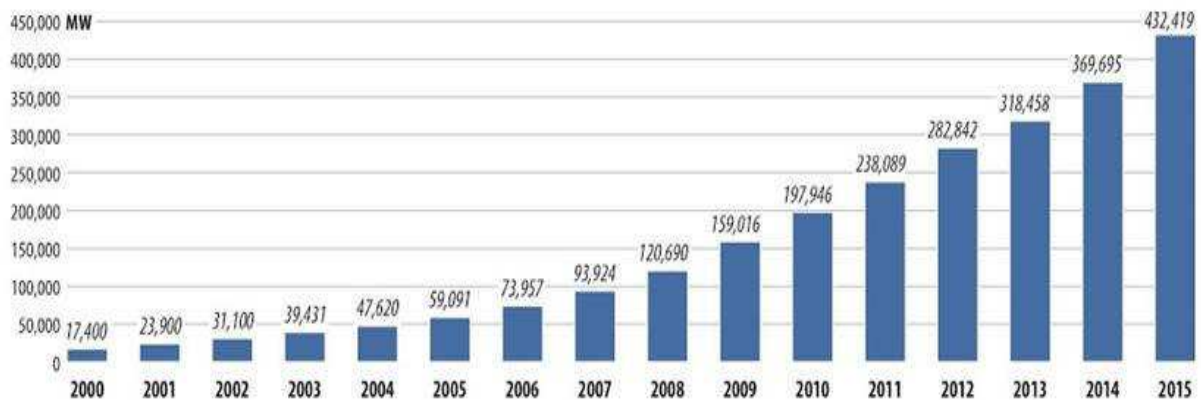


Fig. I.1 : Evolution de la capacité installée dans le monde depuis 2000

Le marché mondial est tiré par l'Asie : la Chine a installé 30 500 MW en 2015, soit la moitié de la progression mondiale. Son parc, qui a progressé de plus de 22% en un an, celui de l'Inde à 25 088 MW, avec 2 623 installés en 2015.

Aux Etats-Unis, 8 598 MW ont été raccordés en 2015, le parc compte désormais 74 500 MW. En Amérique du Sud, la dynamique du marché repose sur le Brésil qui a vu son parc augmenter de 2 754 MW en un an et représente aujourd'hui un total de 8 715 MW, contre 5 962 MW fin 2014.

En Europe l'Allemagne a enregistré une année record, avec 6 013 MW de nouvelles installations, dont 2 300 MW d'éolien en mer. Son parc s'élève à 45 000 MW. La Pologne se situe en deuxième position pour les nouvelles installations avec 1 266 MW raccordés. Fin 2015, le parc polonais affiche une puissance de 5 100 MW [24].

La troisième nation européenne est la France, avec 1073 MW raccordés l'année dernière, elle dispose, au 31 décembre 2014 d'un parc de 10 312 MW. La Grande-Bretagne a, de son côté, installé 975 MW et la puissance de son parc se monte à 13 600 MW. Le total des nouvelles capacités en Europe atteint 12 800 MW et l'ensemble du parc éolien européen représente une puissance de 142 000 MW. Les investissements dans le secteur se sont élevés à 26,4 milliards d'euros. Avec une puissance de plus de 10 300 MW, la France dispose du 4^{ème} parc européen derrière l'Allemagne, l'Espagne et la Grande-Bretagne.

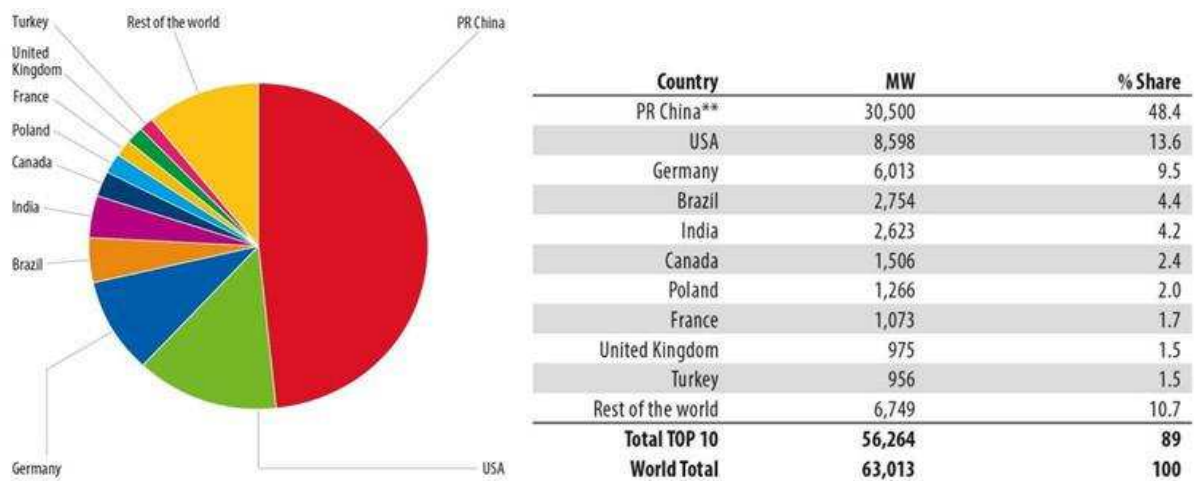


Fig. I.2 : Capacités éolienne installées par pays au 31/12/2015

En Afrique La puissance installée a progressé de 30 % en 2015, passant de 1 612 MW fin 2013 à 2 536 MW fin 2014 et 3 289 MW fin 2015. L'Afrique du sud a contribué pour 64 % à la progression du parc africain avec +483 MW, de ce fait elle est le leader africain avec 1 053 MW installés fin 2015 contre 570 MW fin 2014; après avoir mis une décennie pour installer ces premières éoliennes, le plan directeur énergétique prévoit 9 000 MW éoliens d'ici 2030.

Le Maroc n'était qu'au deuxième rang en Afrique avec 787 MW fin 2015, sans nouvelle mise en service en 2015. Il prévoit pour 2020 des parcs éoliens fournissant 12 % de sa consommation d'électricité, soit environ 2 000 MW. Après le Maroc se trouve l'Égypte avec 610 MW fin 2015 ; au 4^{ème} rang arrive l'Éthiopie avec 324 MW, suivie de la Tunisie avec 245 MW.

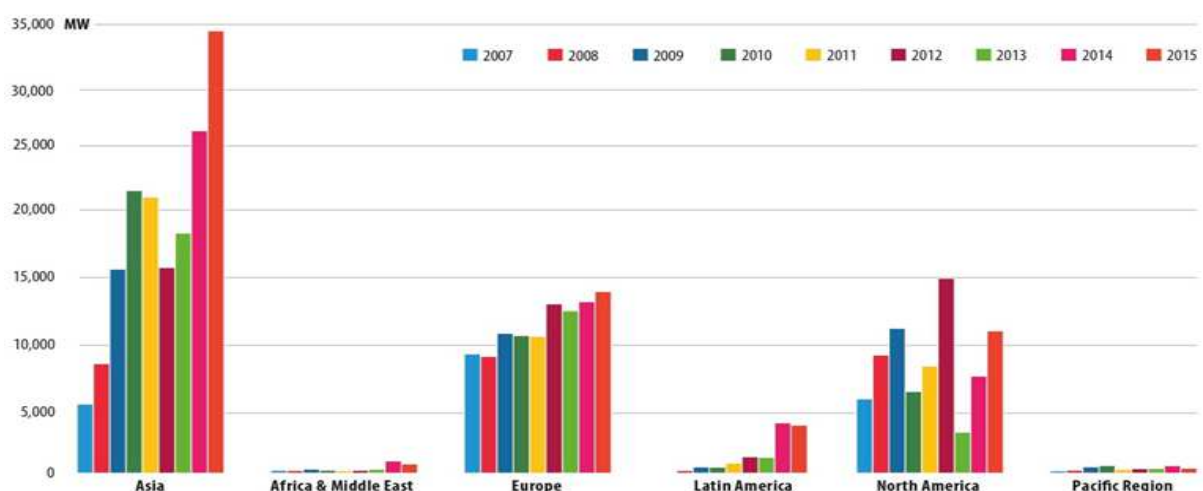


Fig. I.3 : Capacités éolienne installées par région entre 2007 et 2015

L'Algérie avait réceptionné la première ferme éolienne pilote d'Adrar le 4 juillet 2014, pour un coût total de 2,8 milliards de dinars. Elle se déploie sur 30 hectares et a une capacité de 10 mégawatts.

Le potentiel qu'a l'algérien est particulièrement important si l'on s'intéresse au solaire et à l'éolien. Le gouvernement a estimé que le potentiel solaire était le plus représentatif, et le programme national est donc axé essentiellement sur l'énergie solaire. L'éolien, la biomasse et la géothermie représentent une partie plus marginale du projet de développement des énergies renouvelables. Dans l'ensemble, le programme table sur la production de 40% des besoins d'électricité du pays à partir des énergies renouvelables d'ici 2030 (37% pour le solaire, 3% pour l'éolien) [16].

Le gisement éolien en Algérie est très diversifié. Il varie d'une zone à une autre selon la cartographie et le climat de cette dernière. La carte représentée à la figure (I.4), montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement le Sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar. Concernant le Nord, il est à noter que la vitesse moyenne est globalement peu élevée. Cependant, les sites côtiers d'Oran, Bejaïa et Annaba, et les hauts plateaux de Tiaret et El Kheiter ainsi que la région délimitée par Bejaïa au Nord et Biskra au sud, sont prometteurs en termes de production si la hauteur des éoliennes choisies est élevée [22].

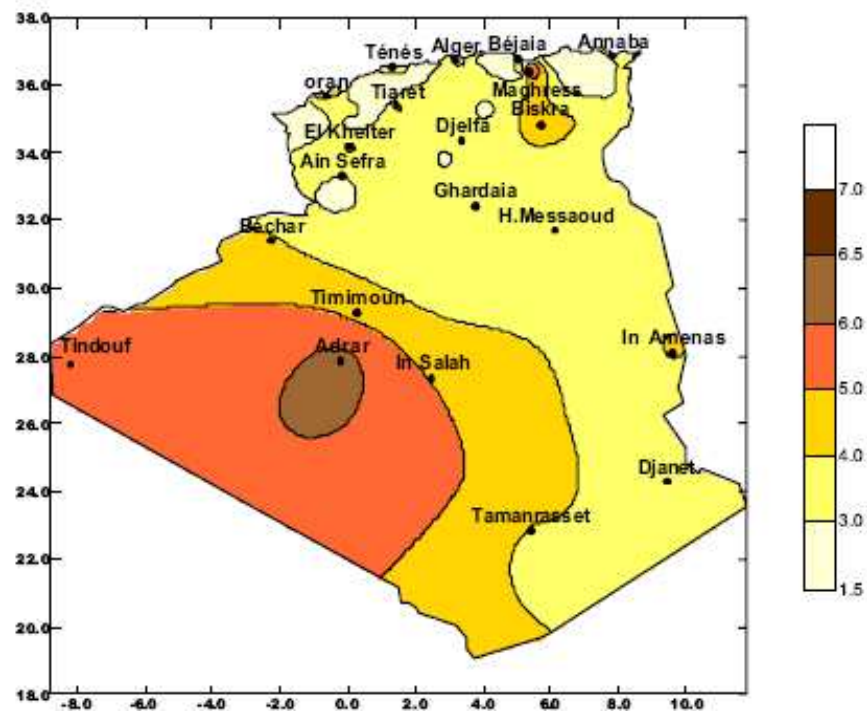


Fig. I.4 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s)

I.3. Les Aérogénérateurs

I.3.1. principe

Un aérogénérateur, plus couramment appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

Les éoliennes fonctionnent pour des vitesses du vent (à hauteur de nacelle) généralement comprises entre 14 et 90 km/h. selon leur puissance nominale, les éoliennes sont divisées en trois catégories [22]:

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

La figure (I.5) illustre la correspondance taille-puissance des éoliennes.

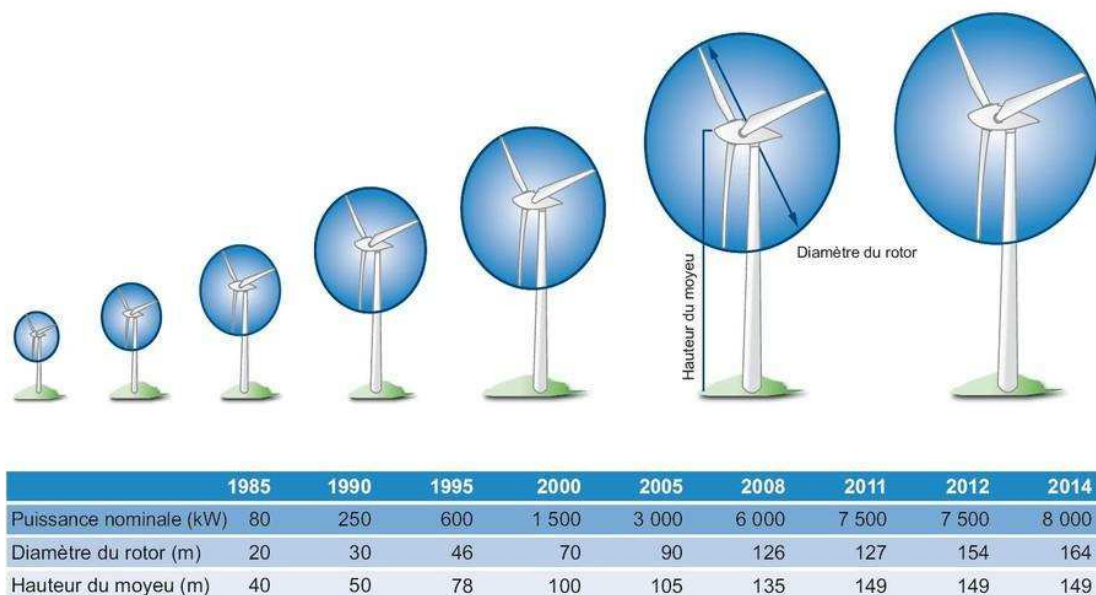


Fig. I.5 : Correspondance taille-puissance des éoliennes

I.3.2. Types d'aérogénérateurs

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. En effet, les turbines éoliennes sont classées selon la disposition géométrique de leur arbre sur lequel est montée l'hélice, en deux types : les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal [22].

- **Aérogénérateurs à axe vertical**

Les aérogénérateurs à axe vertical ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. Plusieurs prototypes ont vu le jour mais rares sont ceux qui ont atteint le stade de l'industrialisation.

Ils sont classés selon leur caractéristique aérodynamique en deux familles ; les aérogénérateurs conçus sur la base de la portance (Aérogénérateurs à rotor de Darrius : conçu par l'ingénieur français George Darrius) et ceux basés sur la traînée (Aérogénérateurs à rotor de Savonius : inventé par le finlandais Sigurd Savonius en 1924).

Les générateurs à rotor de Darrius, ont vu le jour en 1920. Leur principe est basé sur le fait qu'un profil placé dans la direction d'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensité variables selon l'orientation de ce profil. La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif. La figure (I.6) montre ce type d'aérogénérateur.

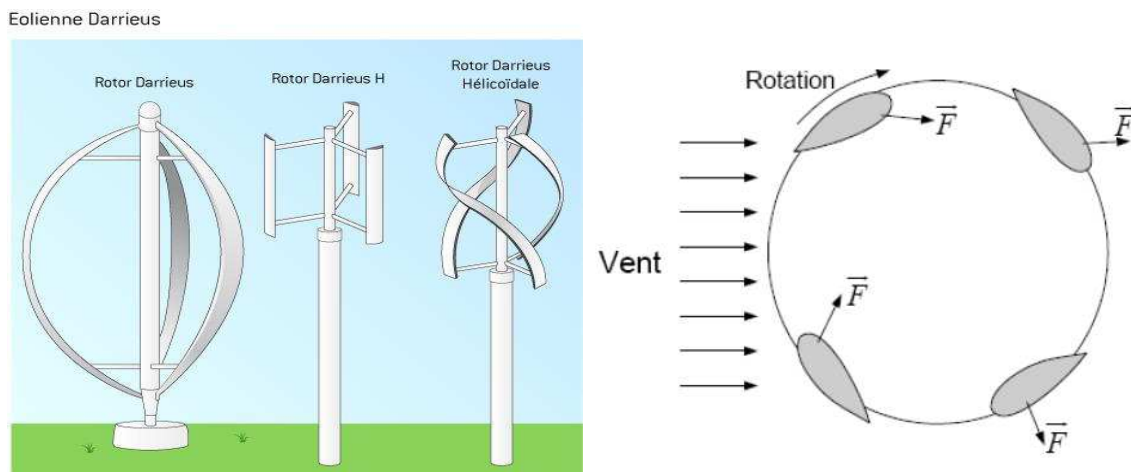


Fig. I.6 : Aérogénérateur à axe vertical (structure de Darrius)

Les aérogénérateurs à rotor de Savonius sont basés sur le principe de la traînée différentielle qui stipule qu'un couple moteur peut être obtenu par une pression différente exercée par le vent sur les parties concaves et convexes de la structure. Comme le montre la figure (I.7).

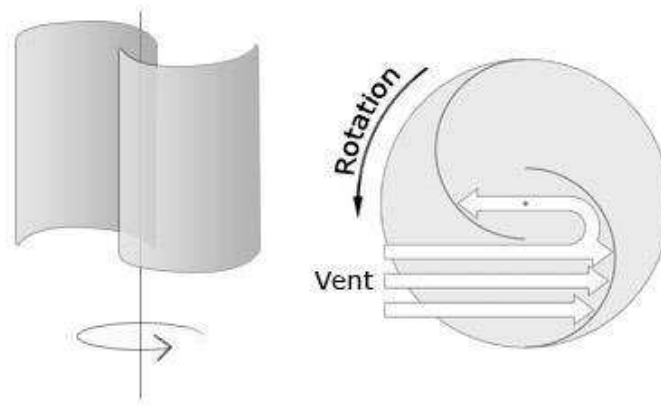


Fig. I.7 : Aérogénérateur a axe vertical (structure de Savonius)

Les principaux avantages des éoliennes à axe vertical sont:

- Accessibilité de la génératrice et du multiplicateur mis directement au sol, ce qui facilite la maintenance et l'entretien.
- La non nécessité d'un système d'orientation du rotor car le vent peut faire tourner la structure quelque soit sa direction.

Cependant elles ont comme inconvénients les points suivants:

- Faible rendement et fluctuations importantes de puissance.
- Occupation importante du terrain pour les puissances élevées.
- Faible vitesse du vent à proximité du sol.

• **Aérogénérateurs à axe horizontal**

Ce sont les éoliennes actuellement les plus répandues sans doute à cause de leurs avantages remarquables, elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent [36].

Les principaux avantages des éoliennes à axe vertical sont:

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

Elles ont comme inconvénient

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.



Fig. I.8 : Eolienne à axe horizontale

Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Dans le reste de notre étude nous nous intéressons à la structure la plus répandue et la plus efficace à savoir celle à axe horizontal et à trois pales à pas variable.

Il existe plusieurs modèles de turbines éoliennes offertes sur le marché mondial [17] :

Modèle	Puissance [MW]	Diamètre turbine	Type de générateur
Enercon 126	6	127	MS
REpower 5M	5	126	MADA
Darwind VM	5	122	MS
Enercon E112	4.5/6	114	MS
Vestas V120-4,5	4.5	120	MADA
Siemens SWT 3.6-107	3.6	107	MADA
GE Energy 3.6 sl	3.6	111	MADA
Scanwind 90-3500 DL	3.5	91	MS
Scanwind 100-3500 DL	3.5	100	MS
Vestas V 90 - 3	3	90	MADA
Vestas V 112 - 3	3	112	MADA
Ecotecnia (Alstom)100	3	100	MADA
GE Energy 3 s	3	90	MADA
GE Energy 3 sl	3	94	MADA
GE Energy 3000	3	104	MADA
NegMicon NM92/2750	2.75	92	MADA
Vestas V100- 2.75	2.75	100	MADA

Tab. I.1 : Modèles de turbines éoliennes offertes sur le marché actuel -
Puissances nominales supérieures à 2.5 MW

I.3.3. Eléments constitutifs d'une éolienne moderne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, Une éolienne moderne est constituée principalement de trois éléments principaux : les pales, la nacelle et la tour qui sont illustrés sur la figure (I.9) [28].

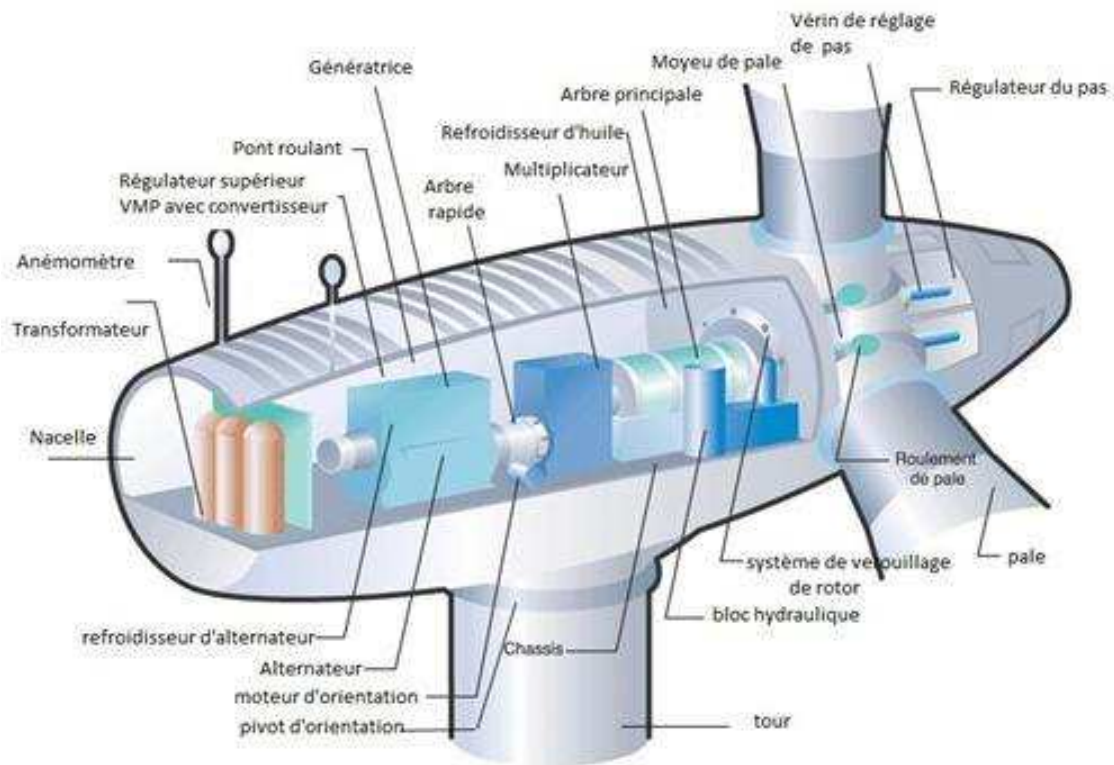


Fig. I.9 : Eléments constituant une éolienne

Comme le montre la figure (I.9) les parties essentielles constituant l'éolienne sont [22] :

- **Le mat ou la tour:** c'est un tube d'acier, il doit être le plus haut possible pour bénéficier du maximum de l'énergie cinétique du vent et d'éviter les perturbations près du sol. Au sommet du mat se trouve la nacelle.
- **La nacelle:** regroupe les éléments mécaniques et électriques permettant de coupler la génératrice électrique à l'arbre de l'éolienne.
- **Le multiplicateur:** sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle de la génératrice.
- **Le système de refroidissement:** se compose généralement d'un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice, et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.

- **La génératrice:** c'est l'élément principal de la conversion électromécanique qui est généralement une machine synchrone, asynchrone à cage ou à rotor bobiné. La puissance électrique de cette génératrice peut varier entre quelque kW à 10 MW [13].
- **Le système de commande:** qui contrôle en permanence le bon fonctionnement de l'éolienne et qui intervient automatiquement, en cas de défaillance pour l'arrêter.
- **L'arbre:** on distingue deux arbres, l'un est principal et lent relie le moyeu au multiplicateur, il contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin. L'autre est rapide, permet de relier le multiplicateur à la génératrice.
- **Le système d'orientation des pâles:** il est composé de plusieurs éléments (roulements de pâles, moyeu de pâles, vérin de réglage de pas et le régulateur de pas) qui sert à la régulation de la puissance (réglage aérodynamique).
- **La girouette :**
La girouette indique la direction du vent et permet à la nacelle de rester orientée face au vent, elle actionne quatre puissants moteurs qui vont piloter la nacelle, pour s'orienter dans la direction du vent.
- **L'anémomètre :**
Il mesure la vitesse du vent et permet donc d'arrêter ou mettre en route l'éolienne.

Chacun de ces éléments doit être soigneusement étudié et modélisé de façon à obtenir un meilleur rendement et une bonne fiabilité du système avec un faible coût d'investissement [28].

I.3.4. Force des vents

Les vents sont généralement classifiés selon leur ampleur spatiale, leur vitesse (ex : échelle de beaufort) [25], leur localisation géographique, le type de force qui les produit et leurs effets. L'échelle de Beaufort divisée les vents en fonction de leur vitesse en 12 catégories :

Force (Bf)	Termes	Vitesse en Km/h	Effet à terre
0	Calme	< 1	La fumée monte verticalement
1	Très légère brise	1-5	La fumée indique la direction du vent
2	Légère brise	6-11	On sent le vent sur le visage, les feuilles bougent
3	Vent faible	12-19	Les drapeaux flottent bien, les feuilles bougent sans cesse
4	Vent modéré	20-28	Les poussières s'envolent, les petites branches plient
5	Vent assez fort	29-38	Les petits arbres balancent
6	Vent fort	39-49	On entend siffler le vent
7	Vent très fort	50-61	Effort pour marcher contre le vent
8	Coup de vent (vent tempétueux)	62-74	La marche contre le vent est difficile
9	Fort coup de vent	75-88	Le vent peut endommager les bâtiments
10	Tempête	89-102	Gros dégâts
11	Violente tempête	103-117	Très rare sur terre, très gros dégâts
12	Ouragan	> 117	Dégâts très importants, très rare sur terre

Tab. I.2 : Force des vents suivant l'échelle de beaufort

I.4. Stratégies de fonctionnement d'une éolienne

Les éoliennes sont conçues pour produire de l'électricité à un prix aussi bas que possible. Leurs conditions de fonctionnement dépendent essentiellement des conditions de vent sur lesquelles aucune action n'est possible. Par conséquent, on ne peut agir qu'en limitant, de manière optimale dans certaines conditions, et toujours de manière stricte dans d'autres conditions, l'énergie effectivement convertie par la turbine puis par le générateur électrique, avant transfert vers le réseau [36].

I.4.1. Bilan des forces sur une pale

La figure (I.10) représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur. La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représentée par le vecteur \vec{V} . Le vecteur \vec{V}_{rot} représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée $\vec{V}_{rés}$. L'action du vent sur la pale produit une force $F_{rés}$ qui se décompose en une poussée axiale F_{ax} directement compensée par la résistance mécanique du mat et une poussée en direction de la rotation F_{rot} qui produit effectivement le déplacement. Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse de vent nominale donnée. Lorsque la vitesse de vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale.

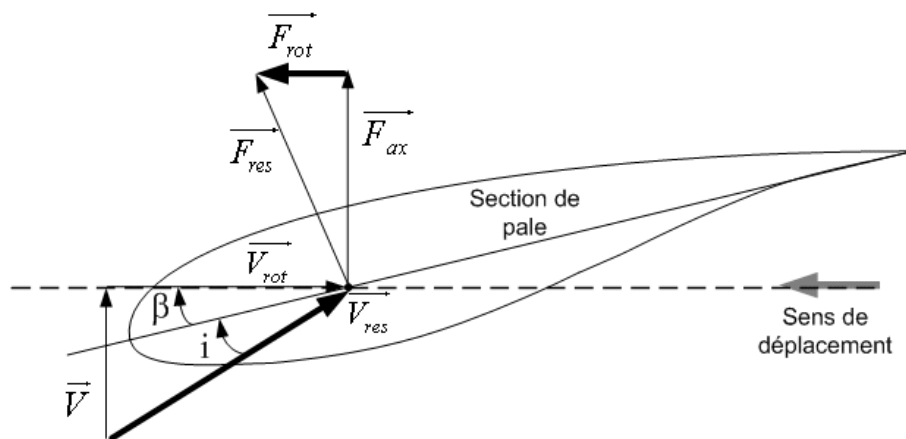


Fig. I.10 : Action du vent sur une pale

I.4.2. Méthode de contrôle de l'aéroturbine

Il est clair qu'à un certain moment, pour des vents forts, il faut limiter la puissance convertie par la turbine pour empêcher sa destruction. Le réglage de la puissance captée par la turbine se fait essentiellement par action sur la portance qui dépend principalement de l'angle d'incidence α . La figure(I.11) illustre les différentes techniques utilisées pour le contrôle des turbines éoliennes [30].

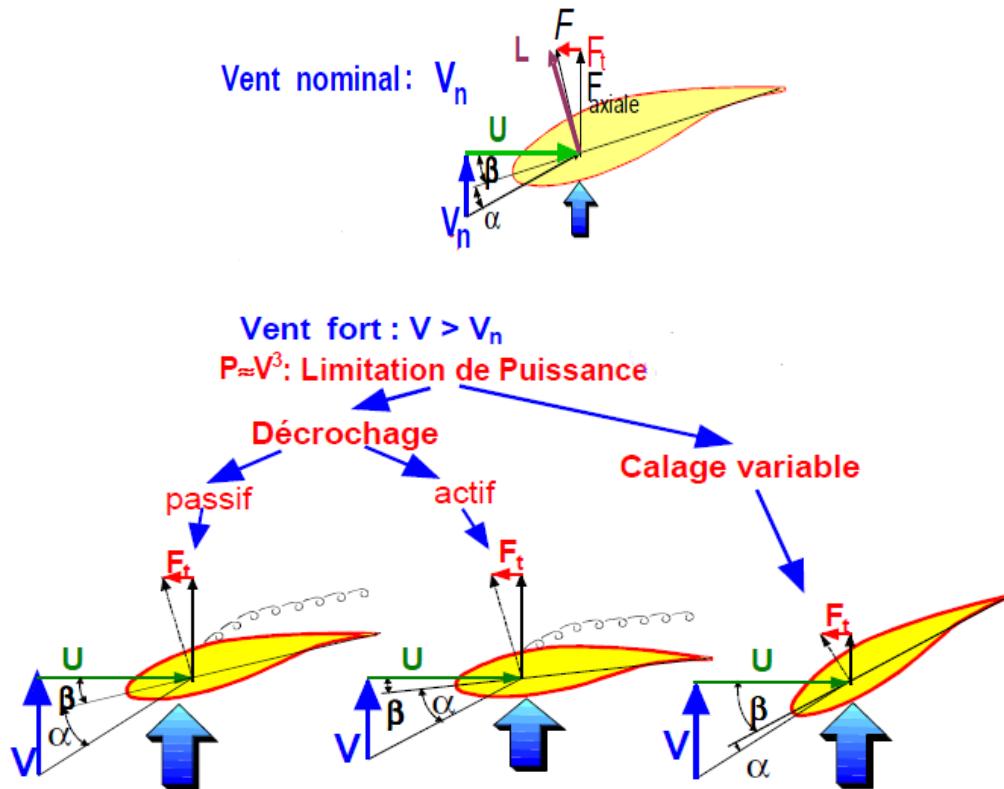


Fig. I.11 : Différentes techniques de contrôle des aéroturbines

- **Contrôle par décrochage aérodynamique passif (passive stall)**

Cette technique est la forme la plus simple de commande de puissance des aéroturbines [10]. L'angle de calage β est fixe, alors que l'angle d'incidence α augmente naturellement avec la vitesse du vent incident ; la Figure (I.12) illustre cette méthode de contrôle. Cette augmentation provoque une augmentation de la traînée (coefficient C_D) et un décrochage progressif de la pale. Le couple est maintenu constant jusqu'au décrochage total ($\alpha_3 < \alpha$) (chute brutale de C_L et accroissement de C_D) où il chute rapidement

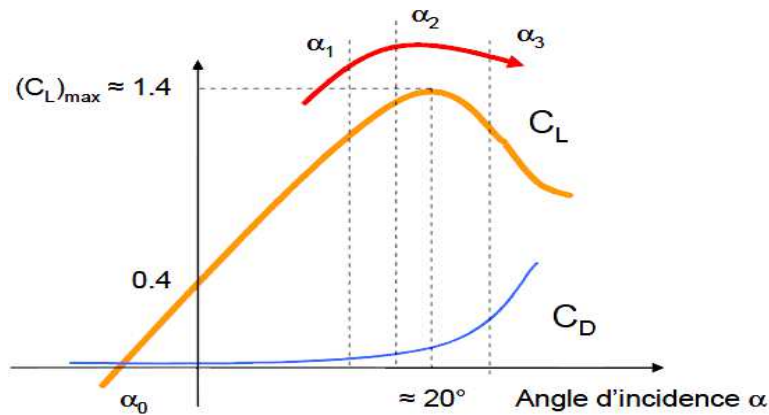


Fig. I.12 : Décrochage aérodynamique passif

Ce concept simple et robuste ne fait intervenir aucun système mécanique ou électrique auxiliaire. Cependant, l'utilisation de cette technique exige une conception rigoureuse de la géométrie des pales et un choix très précis de la vitesse de rotation de la turbine pour s'assurer, à une certaine vitesse du vent, que l'augmentation de la puissance soit effectivement empêchée. En plus il faut disposer de freins dimensionnés pour absorber l'énergie cinétique de la turbine en cas de panne empêchant la transmission de la puissance générée au réseau électrique.

- **Contrôle par décrochage aérodynamique actif (active stall)**

Cette technique est basée sur le même principe que le décrochage, mais dans ce cas le décrochage est assuré en diminuant légèrement (augmentant) l'angle de calage β de quelque degré (3° à 5° généralement) pour augmenter (diminuer) l'angle d'incidence α . Ainsi, le décrochage peut être légèrement avancé ou retardé ; figure(I.13) illustre cette méthode [4].

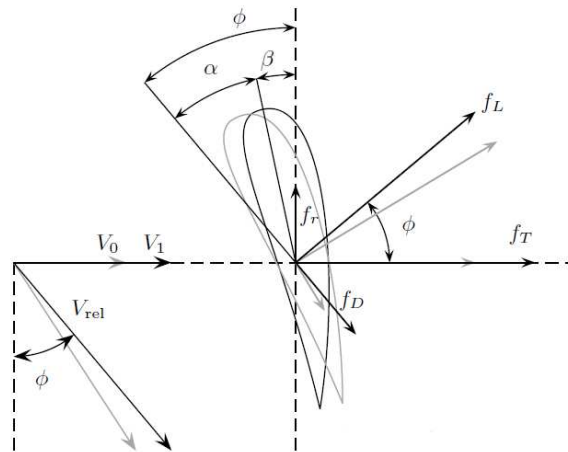


Fig. I.13 : Principe du décrochage aérodynamique actif

Comme pour le décrochage passif, l'utilisation de la technique du décrochage actif nécessite une grande précision sur la géométrie et la vitesse de rotation de la turbine pour assurer le décrochage à la vitesse du vent voulue. En plus, il est nécessaire d'ajouter un système électrique ou hydraulique pour orienter les pales lorsque la vitesse de rotation nominale de la machine est atteinte [36].

- **Contrôle par angle de calage variable des pales (pitch contrôle)**

Cette technique consiste à varier l'angle de calage des pales β , donc l'angle d'incidence α , jusqu'à quelques dizaines de degrés en fonction de la vitesse du vent. Ainsi, les forces aérodynamiques s'exerçants sur les pales seront réduites, figure (I.14), tout en maintenant un couple pratiquement constant qu'on peut annuler par mise en drapeau des pales ($\beta=90^\circ$). La puissance est donc bien limitée [30].

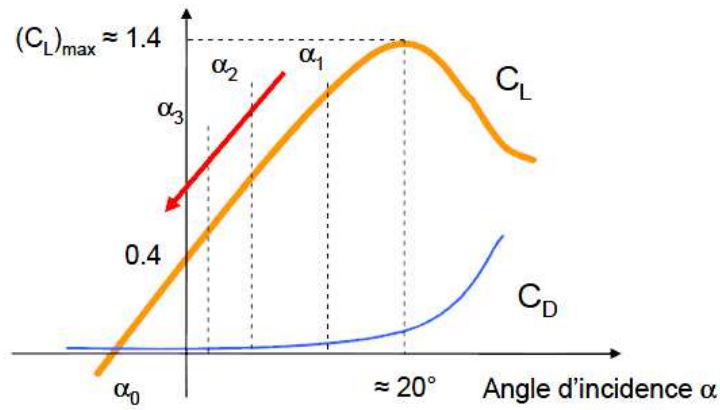


Fig. I.14 : Contrôle par calage variable des pales

La diminution de l'angle d'incidence α jusqu'à une valeur nulle ou négative réduit considérablement et de manière efficace tous les efforts sur les pales et la tour de l'éolienne (pratiquement nuls en position de drapeau). Rappelant que ces efforts doivent être supportés par les turbines à décrochage aérodynamique. Cet avantage majeur est une raison suffisante pour que cette technique soit la plus utilisée de nos jours.

I.4.3. Phases de fonctionnement d'une éolienne

La figure (I.16) montre les zones de fonctionnement caractéristiques d'une éolienne [17] [28] :

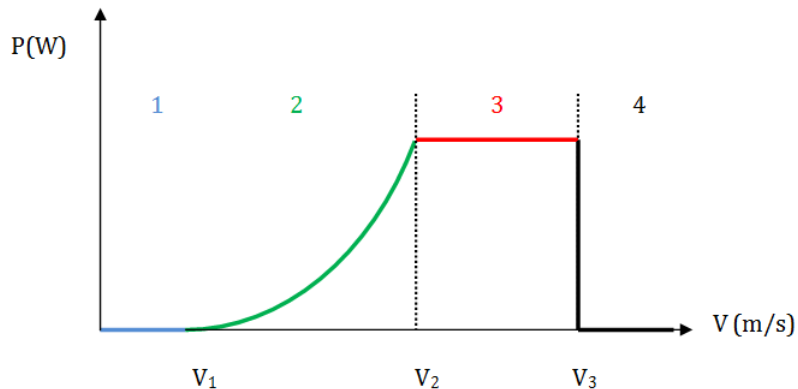


Fig. I.15 : Zone de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable

Les zones de fonctionnement des éoliennes sont définies en fonction de la vitesse du vent:

- **Zone 1 ($V < V_1$):** c'est la zone de démarrage de la machine. La vitesse du vent est trop faible, la turbine peut tourner mais l'énergie à capter reste faible. V_1 : étant la vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine, elle varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance.

- **Zone 2** ($V_1 < V < V_2$) : C'est la zone d'extraction maximale de la puissance. Elle correspond au **fonctionnement à Charge Partielle (CP)**. Dans cette zone l'angle de calage des pales β reste constant afin d'obtenir un C_p maximal, ainsi la puissance maximale est captée pour chaque vitesse de vent. V_2 : est la vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice, elle varie entre 11.5m/s et 15m/s.

- **Zone 3** ($V_2 < V < V_3$) : Elle correspond à une vitesse mécanique quasiment constante. L'angle de calage des pales varie. La puissance électrique augmente très rapidement jusqu'à sa valeur nominale. Cette zone correspond au **fonctionnement à Pleine Charge (PC)**. V_3 : est la vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. Pour la grande majorité des éoliennes, V_3 vaut 25m/s.

- **Zone 4** ($V > V_3$) : La vitesse du vent devient trop forte, les pales sont en position drapeau (arrêt) et la puissance extraite devient nulle.

I.5. Conversion de l'énergie éolienne en énergie mécanique

I.5.1. Limite de Betz

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté par la figure (I.16) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_e en amont de l'aérogénérateur et sa vitesse V_s en aval [41].

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_e et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_s soit $\frac{V_e + V_s}{2}$, la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est:

$$m = \rho S \left(\frac{V_e + V_s}{2} \right) \quad (I.1)$$

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

$$P_m = m \left(\frac{V_e^2 - V_s^2}{2} \right) \quad (I.2)$$

En remplaçant (I.1) par sa valeur dans l'équation (I.2) on trouve :

$$P_m = \rho S \frac{(V_e + V_s)(V_e^2 - V_s^2)}{4} \quad (I.3)$$

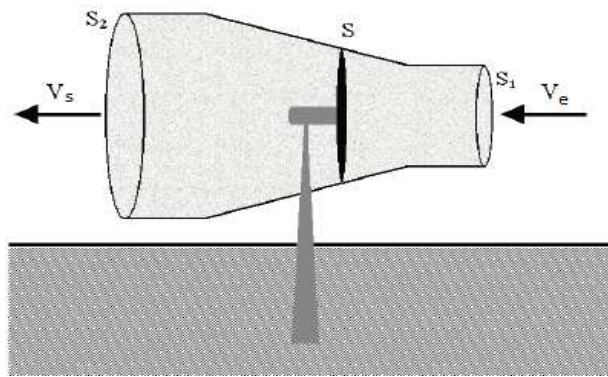


Fig. I.16 : le courant d'air au tour d'une éolienne

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

$$P_{mt} = \rho S \frac{V_e^3}{2} \quad (I.4)$$

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

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_e}{V_s}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{V_e}{V_s}\right)^2\right)}{2} \quad (I.5)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation (I.5), comme le montre la figure (I.17), on s'aperçoit que le ratio $\frac{P_m}{P_{mt}}$, appelé aussi coefficient de puissance C_p , a une allure d'une parabole, qui présente un maximum de $\frac{16}{27}$ soit 0,59 pour une valeur de $\frac{V_e}{V_s} = \frac{1}{3}$

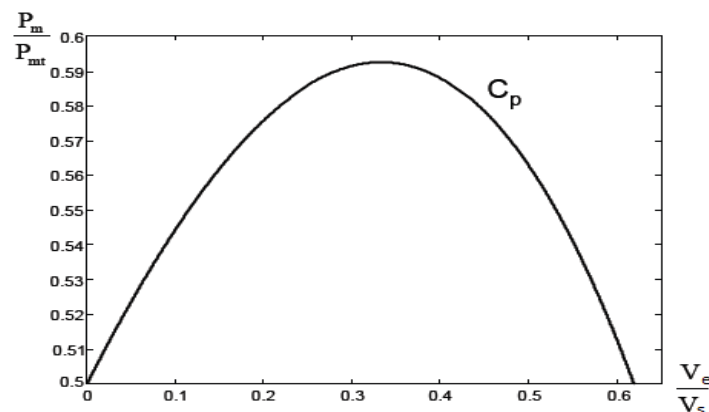


Fig. I.17 : Coefficient de puissance

Cette limite théorique, qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée, est appelée limite de **Betz**.

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse de rotation de la turbine Ω_t . En fait, le coefficient de puissance dépend de λ (tip speed ratio) qui se définit comme le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse de vent. λ , qui est donné par:

$$\lambda = \frac{R\Omega_t}{V_e} \tag{I.6}$$

La figure (I.18) montre le coefficient de puissance λ pour différents types d'éoliennes :

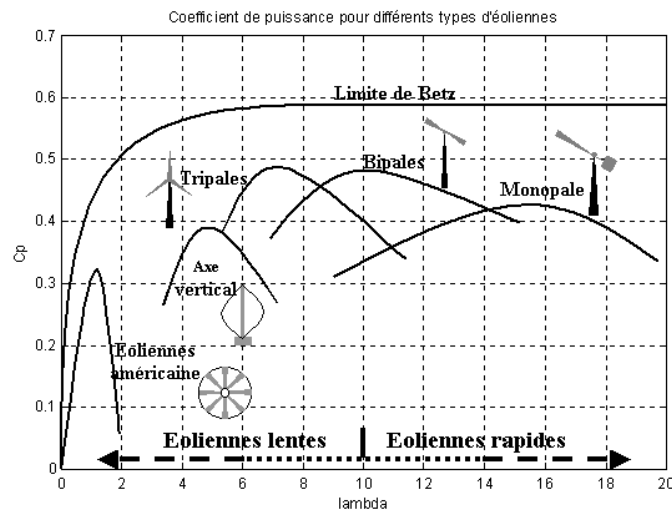


Fig. I.18 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes

L'angle de calage β est un paramètre qui influe aussi sur le coefficient de puissance C_p . La figure (I.19) montre la variation de C_p en fonction de λ pour différentes valeurs de β [36].

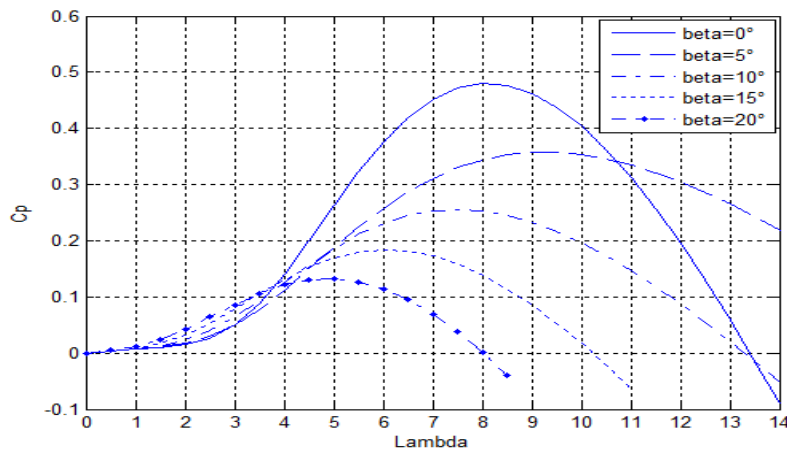


Fig. I.19 : Influence de l'angle de calage β sur le coefficient de puissance C_p

I.5.2. Production de l'énergie mécanique

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

$$P_m = C_p P_{mt} = \frac{1}{2} C_p (\lambda, \beta) \rho \pi R^2 V_e^3 \quad (I.7)$$

Avec : $\lambda = \frac{R \Omega_1}{V_e}$

Ω_1 : Vitesse de rotation avant le multiplicateur

R : Rayon de l'aérogénérateur.

K : Rapport du multiplicateur de vitesse

La puissance mécanique P_{mg} disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_{mg} = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{R \Omega_2}{K V_1} \right) \rho \pi R^2 V_e^3 \quad (I.8)$$

Ω_2 : vitesse de rotation après multiplicateur.

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent [3].

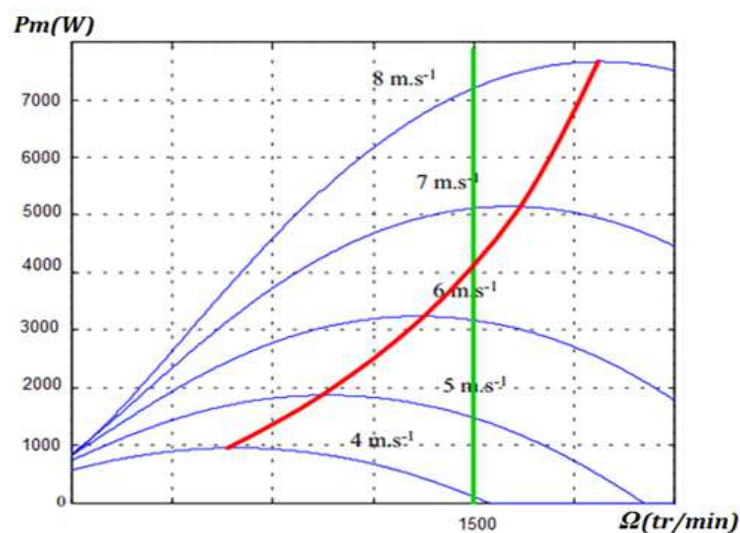


Fig. I.20 : Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1500 tr/min sur la figure (I.20)), les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités (ne sont pas atteints).

I.5.3. Optimisation de l'énergie

Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine doit fonctionner en vitesse variable (régulation de λ optimal pour avoir C_p maximum) et pour se faire une stratégie de gestion (**MPPT**) permet de suivre le point de puissance maximale afin de maximiser l'efficacité énergétique du système à travers la variation de la vitesse du vent [32].

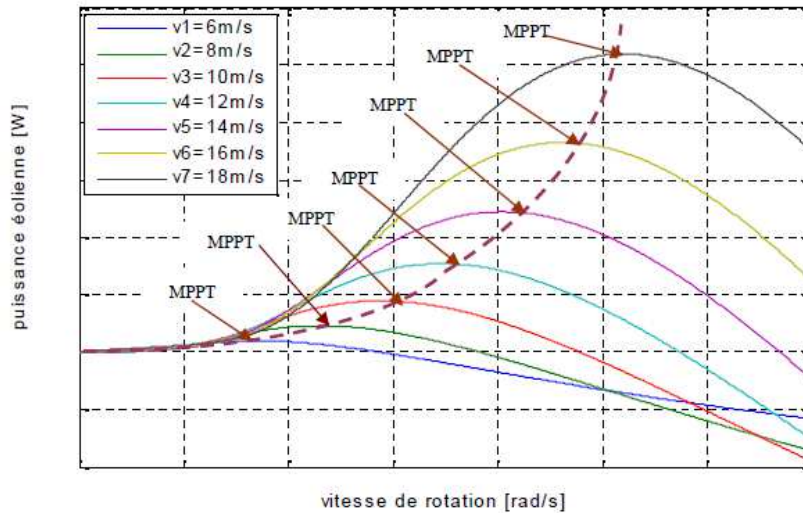


Fig. I.21 : Poursuite du point de maximum de puissance

Dans un système de production d'énergie par éolienne fonctionnant à vitesse variable, on cherchera systématiquement le régime optimal en exploitant les maxima du réseau de courbes de la Figure(I.21), Ce qui signifie que pour un régime de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe) on souhaite que la puissance fournie soit maximale ce qui correspond à une valeur de λ donnée appelée λ_{opt} . La vitesse de rotation optimale Ω_{opt} résultante est alors donnée par [21] :

$$\Omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt}}{R} v \quad (I.9)$$

La caractéristique correspondant à cette relation est donnée sur la zone II de la figure (I.15).

I.6. Différents systèmes utilisés pour la conversion électromécanique

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration [28].

I.6.1. Fonctionnement à vitesse fixe

Les premières éoliennes de grande puissance mises en œuvre reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écurie directement couplée sur le réseau électrique, comme le montre la figure (I.21). Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales (pitch control).

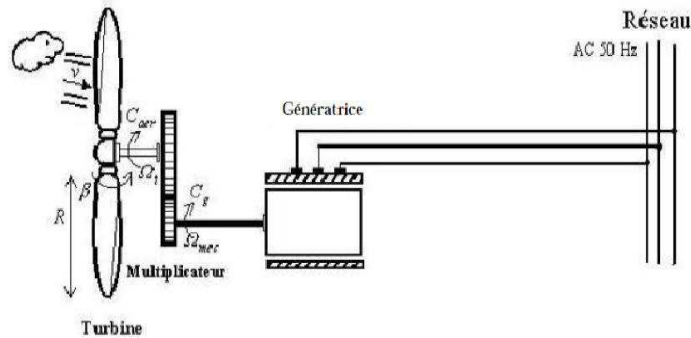


Fig. I.21 : éolienne à vitesse fixe

Cette structure présente les avantages suivants :

- ✓ Elles possèdent un système électrique plus simple, car elles n'ont pas besoin de système électronique de commande.
- ✓ Elles ont une très grande fiabilité.
- ✓ Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- ✓ Moins cher.

I.6.2. Fonctionnement à vitesse variable

L'éolienne à vitesse variable connectée au réseau est composée d'une turbine, un multiplicateur, un générateur et un convertisseur de puissance. La partie électrique de l'éolienne, en général, consiste en un générateur électrique **synchrone** ou **asynchrone**.

Les machines **synchrone** : sont utilisées dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 kW à 2 MW sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille.

La deuxième catégorie d'éolienne repose sur des machines **asynchrones**. Elles sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Ces machines tournent à une vitesse beaucoup plus importante que celle de la turbine éolienne d'où la nécessité d'utiliser un multiplicateur de vitesse. Cette technologie est utilisée pour les fortes puissances. La machine asynchrone peut être alimentée par le stator (machine à cage) ou par le stator et le rotor à la fois (machine à rotor bobiné).

Les principaux avantages des éoliennes à vitesses variables comparées aux éoliennes à vitesses fixes sont:

- ✓ Elles génèrent une puissance électrique d'une meilleure qualité.
- ✓ Elles augmentent la plage de fonctionnement, notamment pour les faibles vitesses de vent (Augmentation du rendement énergétique).
- ✓ Elles nécessitent un système d'orientation des pales simplifié. En effet, la possibilité de contrôler la vitesse de générateur via le couple électromagnétique permet de réduire le rôle du système d'orientation des pales, qui interviendra essentiellement pour limiter la vitesse de la turbine et la puissance générée en présence de vitesse de vent élevés. En conséquence, pour de faibles vitesses de vent, l'angle d'orientation des pales devient fixe.
- ✓ Elles réduisent le bruit lors du fonctionnement à faible puissance car la vitesse est alors lente.
- ✓ Elles permettent une meilleure intégration de l'éolienne dans le réseau électrique.
- ✓ Elles sont les moins exigeantes en termes d'entretien

I.6.2.1. Eolienne à machine asynchrone à cage

Dans cette configuration l'éolienne entraîne une machine asynchrone à cage connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance situé au circuit statorique.

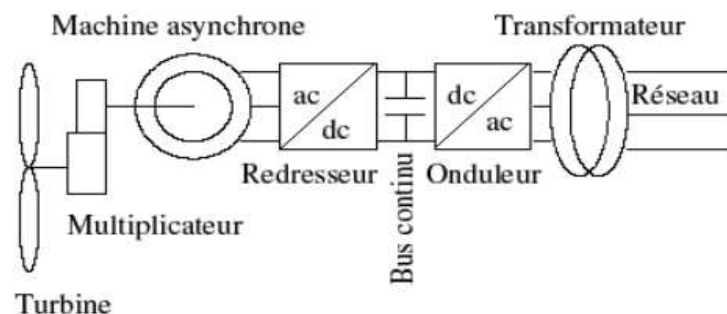


Fig. I.22 : Eolienne à MAS pilotée au stator

Le redresseur assure des tensions et des fréquences variables à la sortie du générateur ce qui permet de conduire la vitesse de l'éolienne. Il reçoit ses consignes de tension et de fréquence du processus de la commande. L'onduleur est contrôlé pour garder constante la tension de bus continu représenté par une capacité sur la figure(I.22). Les pales de la turbine éolienne sont orientables (commandable) pour permettre de limiter la puissance électrique produite constante et égale à sa valeur nominale lors des vitesses du vent très importantes.

I.6.2.2. Eolienne à machine asynchrone à double alimentation

Dans cette conception le stator de la machine asynchrone est connecté directement au réseau. Le convertisseur de puissance se trouve au circuit rotorique, la figure(I.23) illustre cette configuration.

Le redresseur alimente les enroulements rotoriques par les tensions et la fréquence de consigne qu'il reçoit de la procédure de commande. L'onduleur est contrôlé d'une manière à garder la tension du bus continu constante. Cette configuration a l'avantage de réaliser des économies sur les convertisseurs de puissance car la puissance transitée par le circuit rotorique est faible par rapport à la puissance statorique dans la 1^{ère} configuration.

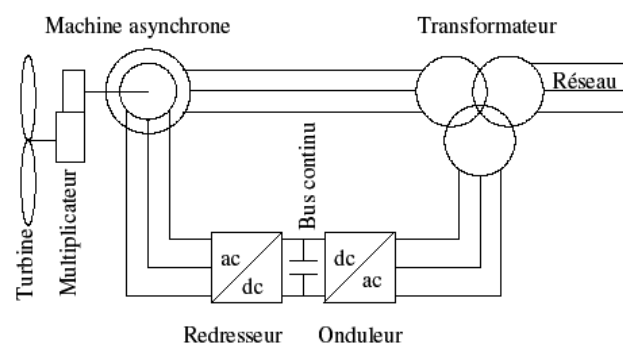


Fig. I.23 : Eolienne à MADA pilotée au rotor

I.6.2.3. Autres machines

D'autres types de machines auraient techniquement la possibilité d'être utilisées notamment dans les aérogénérateurs à vitesse variable. Les **machines à courant continu** présentent une excellente marge de variation de la vitesse de rotation, une bonne réponse dynamique et une excellente capacité de surcharge, mais elles sont chères et ont un grand poids.

Les générateurs à **réductances variables** sont des machines mécaniquement robustes, ils ont de plus un bon rendement à toutes vitesses et une large marge de variation de la vitesse de rotation et leur commande est simple mais la puissance produite par ces éoliennes est généralement faible. Ce type de machine pourrait être un candidat des futures éoliennes.

La technologie des aérogénérateurs s'est diversifiée en même temps quelle progressait. Ainsi, de nos jours, il existe de nombreuses sortes d'aérogénérateur, un intérêt de plus en plus croissant est accordé à la machine asynchrone à double alimentation. Cet intérêt est dû aux degrés de liberté qu'elle offre du fait de l'accessibilité de son rotor et donc de la possibilité de l'alimenter par un convertisseur aussi bien du côté du stator que du côté du rotor. Certaines études font d'elle une

sérieuse concurrente à plusieurs autres machines électriques, particulièrement la machine asynchrone à cage classique.

I.7. Gestion de l'énergie électrique et nécessité de stockage

I.7.1. Gestion du réseau électrique

Pour pouvoir fonctionner correctement et produire de l'énergie électrique, la majorité des éoliennes ont besoin d'un réseau puissant qui impose la fréquence et la tension. De plus ce réseau doit aussi pouvoir fournir la puissance réactive nécessaire aux génératrices asynchrones et pouvoir absorber en permanence toute la puissance produite par les éoliennes [13].

Cela est très complexe à gérer car la puissance produite par les éoliennes est très fluctuante à cause des aléas de vent, une éolienne de 1MW ne peut pas produire en permanence cette puissance nominale ; on ne peut compter que sur 20 à 30% de cette puissance en moyenne. C'est pour cela qu'il est intéressant d'interconnecter un grand nombre d'éoliennes sur plusieurs sites entre elles afin d'avoir une production qui puisse se stabiliser.

Par contre, de par leur électronique et le réglage possible de l'angle de calage des pales, il est possible de régler la puissance produite en modifiant le pas des pales de l'hélice. Si pendant une période de fort vent il y a un excédent d'énergie électrique au niveau du réseau, pouvant conduire à une déstabilisation de la fréquence, il est possible de limiter la puissance produite par les éoliennes. Ceci est effectué par l'action sur la commande de la partie électronique et sur l'angle de calage des pales afin de diminuer le rendement de l'hélice. Cet axe de recherche est actuellement bien étudié et de nombreux laboratoires apportent leurs contributions pour des solutions innovantes et performantes.

De plus, en intervenant sur la commande des onduleurs de la génératrice, on peut faire varier la valeur de la puissance réactive produite par un parc éolien. Ainsi, en fonction de la chaîne de conversion choisie, il est possible d'absorber ou fournir une puissance réactive donnée et de contrôler le plan de tension du réseau.

Le gestionnaire de réseau peut alors compter sur l'éolienne pour aider à la correction du facteur de puissance du réseau. Cette option est désormais incorporée à la plupart des éoliennes utilisant des machines asynchrones à double alimentation.

Cependant, il y a une période sans vent, on ne peut rien faire et l'exploitant du réseau électrique ne peut donc pas compter sur les éoliennes comme source de production fiable. On peut cependant prédire les conditions de vent et donc de production d'énergie électrique avec quelques jours d'avance. Ceci reste de la prédiction météo et ne change rien lorsque le vent tombe.

Pour avoir une plus grande souplesse d'utilisation et une meilleure efficacité du système, il faudrait stocker l'énergie durant les périodes de fort vent pour pouvoir la restituer quand il n'y a plus de vent.

I.7.2. Nécessité de stockage

On a vu dans la section précédente que le stockage permettrait d'obtenir un service réseau appréciable. Une des caractéristiques essentielles de l'énergie du vent est son intermittence, il est donc nécessaire de disposer d'un dispositif de stockage de l'énergie excédentaire produite pour permettre son utilisation pendant les périodes d'absence de vent. Les accumulateurs peuvent être utilisés pour des installations isolées et de petite taille (quelques kW).

Seules les batteries au plomb, bien qu'encombrantes, sont bien adaptées aux fluctuations propres aux éoliennes. Pour des puissances plus importantes, des retenues hydrauliques peuvent être envisagées quand la topologie s'y prête. Dans ce cas on installe une turbine entre deux réservoirs haut et bas. L'énergie éolienne en excès sert alors à remplir le réservoir supérieur dont l'eau sera turbinée pour fournir du courant en pointe. Cette méthode ne peut être envisagée que dans des sites très particuliers et est limitée en puissance par la capacité des réservoirs et la hauteur entre les deux réservoirs.

Il reste le stockage que l'on pourrait appeler virtuel qui consiste à mettre au crédit de l'énergie éolienne l'hydraulique des barrages à laquelle on n'a pas fait appel pendant des périodes de production éolienne.

Cette conception ne s'applique que très partiellement au cas français où les barrages sont en réserve pour assurer principalement les pointes de consommation. À terme, un programme massif de l'éolien nécessiterait donc le développement de nouvelles technologies de stockage ; mais celles-ci n'existent pas aujourd'hui. En particulier, la production d'hydrogène n'apparaît pas être à considérer à l'échelle de temps des programmes éoliens envisagés actuellement. La production d'hydrogène nécessite par ailleurs des investissements lourds, techniquement et économiquement mal adaptés à un fonctionnement intermittent et aléatoire.

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

I.8. Modélisation du système éolien

L'énergie éolienne utilise la turbine pour convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique [28], Cette dernière est couplée avec une génératrice électrique pour convertir l'énergie mécanique produite par la turbine en énergie électrique, Ce couplage

mécanique peut être soit direct si la turbine et la génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire. Plusieurs machines sont disponibles sur le marché éolien [8].

La figure (I.24) illustre le modèle global du système éolien à base de machine asynchrone à double alimentation pour la fourniture de puissance au réseau électrique. Ce modèle comprend : la turbine éolienne, la génératrice asynchrone double alimentée et deux convertisseurs de puissances qui permettent de relier le rotor au réseau électrique.

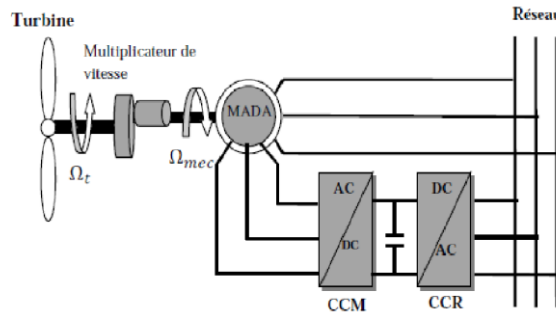


Fig. I.24 : Structure générale du système à étudier

Dans cette partie nous allons nous intéresser uniquement à la modélisation de la turbine éolienne.

La modélisation de la turbine consiste à exprimer la puissance extractible en fonction de la vitesse du vent et des conditions de fonctionnement, cela permettra de connaître le couple éolien appliqué sur l'arbre lent de l'éolienne [36].

I.8.1. Vent source primaire

Le vent est la raison d'être des aérogénérateurs, son énergie cinétique constitue la source primaire d'énergie. Le vent est en fait un champ de vitesses de déplacement de masses d'air caractérisé par sa vitesse et sa direction qui sont affectées par plusieurs facteurs, en particulier le phénomène de cisaillement et l'effet d'obstacle de la tour.

Ces phénomènes modélisables correspondent à la partie déterministe de la variation spatiale du champ de vitesses. Les turbulences provoquées par les obstacles en amont (bâtiments, arbres, autre éoliennes, ...) correspondent à la partie stochastique de la variation spatiale du champ de vitesse.

La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps, elle peut être décomposée en une somme d'une composante moyenne (lentement constante) et d'une composante variable représentant les harmoniques :

$$V_v(t) = A + \sum_{i=0}^n (a_n \sin(b_n \omega_v t)) \quad (I.10)$$

Avec :

A : est une constante

a_n, b_n, ω_n : Représentent respectivement : l'amplitude et la pulsation de l'échantillon du vent [8].

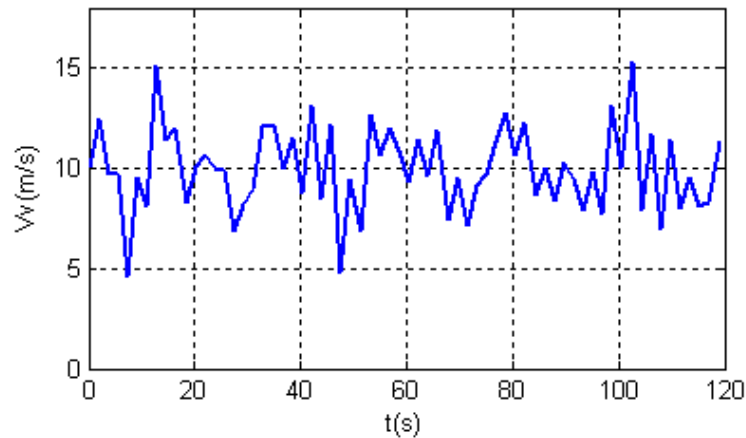


Fig. I.25 : Profil de la vitesse du vent

L'expression mathématique très souvent utilisée pour modéliser la vitesse du vent qui embrasse les pales de la turbine est donnée par :

$$V_v = 10 + 0.2 \sin(0.1047t) + 2 \sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2 \sin(3.6645t) \quad (\text{I.11})$$

Nous avons vu dans la section précédente que la puissance mécanique s'exprime par :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 V_e^3 \quad (\text{I.12})$$

Le couple mécanique développé par cette éolienne est donnée par :

$$C_t = \frac{P_m}{\Omega_t} = \frac{1}{2\Omega_t} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 V_e^3 \quad (\text{I.13})$$

Ω_t : Vitesse de rotation de la turbine

R : Rayon de l'aérogénérateur

ρ : Densité de la masse d'air

V_e : Vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur

L'expression du coefficient de puissance est donnée par :

$$C_p = (0.5 - 0.167(\beta - 2)) \sin \frac{\pi(\lambda + 0.1)}{(18.5 - 0.3(\beta - 2))} - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (\text{I.14})$$

I.8.2. Modèle de la partie mécanique

L'énergie captée par la turbine est transmise à la génératrice. Dans le cas où cette génératrice est une machine asynchrone à double alimentation, un multiplicateur de vitesse est inséré dans la transmission afin d'effectuer l'adaptation de vitesse.

Le système mécanique complet comprend donc les éléments suivants :

- ✓ Un moyeu sur lequel sont reliées les pales.
- ✓ L'axe lent.
- ✓ Le multiplicateur de vitesse.
- ✓ L'axe rapide (rotor de la génératrice).

Un tel système peut être représenté comme sur la figure (I.26).

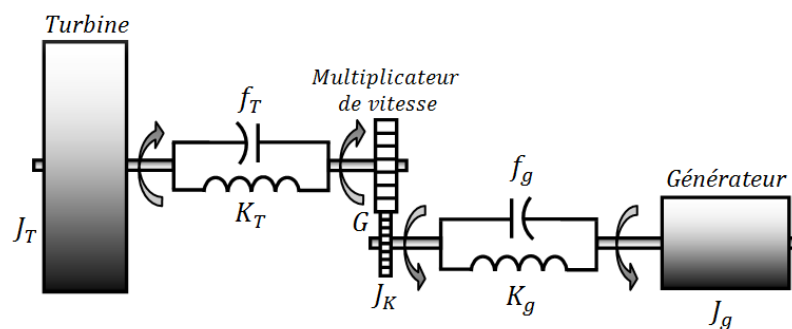


Fig. I.26: Modèle de la turbine

Ce modèle est très complexe et sa modélisation exige la connaissance de plusieurs paramètres difficile à obtenir. Néanmoins, des hypothèses réalistes et qui sont acceptées dans divers ouvrages peuvent être posées pour simplifier la modélisation. En effet, Le moment d'inertie de l'ensemble moyeu-pales représente à lui seul, en prenant comme exemple les éoliennes à base de machines asynchrones, 90% du moment d'inertie global, alors que celui de la génératrice est de l'ordre de 6 à 8%. Le reste (2 à 4%) correspond au moment d'inertie du multiplicateur de vitesse. Les hypothèses simplificatrices sont :

- ✓ La voilure de la turbine comprend trois pales de longueur R_t chacune, supposées identiques, attachées au moyeu. L'ensemble peut être considéré comme une seule masse d'une inertie J_T .
- ✓ L'inertie du multiplicateur de vitesse est négligeable devant celle de la turbine et celle du générateur, ce qui nous permet de le considérer comme un gain de vitesse égale à G ou un gain de couple égale à $1/G$.
- ✓ les arbres de transmission sont parfaitement rigides.

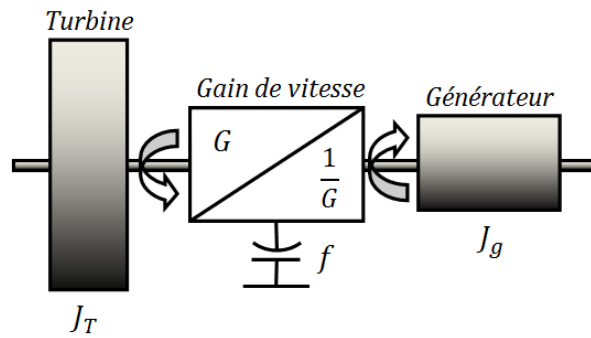


Fig. I.27 : Modèle simplifié de la turbine

Ces hypothèses permettent ainsi de considérer le modèle simplifié à deux masses suivant [4] :

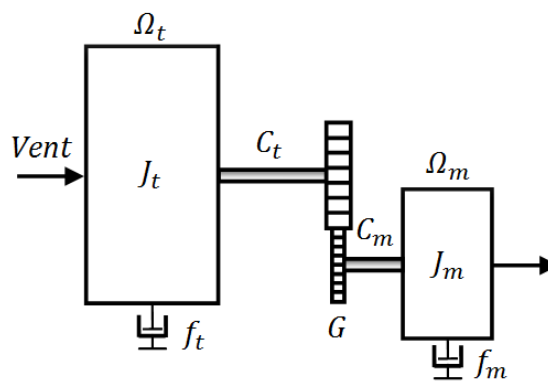


Fig. I.28 : Modèle simplifié à deux masses de la turbine éolienne

Avec :

J_t : Le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne [$kg \cdot m^2$].

f_t : Le coefficient du aux frottements visqueux de la turbine [$Nm / rad \cdot s$].

C_t : Le couple mécanique de la turbine éolienne [Nm].

J_m : Le moment d'inertie de la MADA [$kg \cdot m^2$].

f_m : Le coefficient du aux frottements visqueux de la MADA [$Nm / rad \cdot s$].

C_m : Le couple mécanique sur l'arbre de la MADA.

En considérant que le multiplicateur est idéal, c'est-à-dire que les pertes mécaniques sont négligeables, il est alors modélisé par un simple gain constant :

$$C_m = \frac{C_t}{G} \quad , \quad \Omega_m = G \cdot \Omega_t \quad (I.15)$$

I.8.3. Equation dynamique de l'arbre

Dans cette partie on considère que l'inertie totale est constituée de l'inertie de la turbine et l'inertie de la génératrice rapportées sur l'arbre rapide [4], comme présenté sur la figure (I.29).

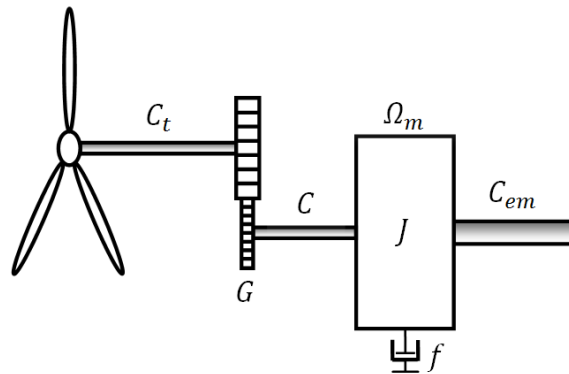


Fig. I.29 : Modèle simplifié de la turbine rapportée à une masse

À partir de cette simplification on obtient :

$$\frac{J_t}{G} \frac{d\Omega_m}{dt} = C_t - \frac{f_t}{K} \Omega_m \quad (\text{I.16})$$

$$J_m \frac{d\Omega_m}{dt} = C_m - C_{em} - f \Omega_m \quad (\text{I.17})$$

En divisant l'équation (I.16) sur G et en additionnant membre à membre avec l'équation (I.17)

L'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la MADA s'écrit :

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} = C_m - C_{em} - f \Omega_m \quad (\text{I.18})$$

Avec

$$J = J_m + \frac{J_t}{G^2}, \quad f = f_m - \frac{f_t}{G^2}, \quad C = \frac{C_t}{G}$$

J, f, C : sont l'inertie, le coefficient de frottement externe de la turbine et le couple aérodynamique ramenés du côté de l'arbre rapide. L'inertie de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine.

Ce qui nous a permis d'établir le schéma bloc fonctionnel du modèle de la turbine de la figure (I.30) :

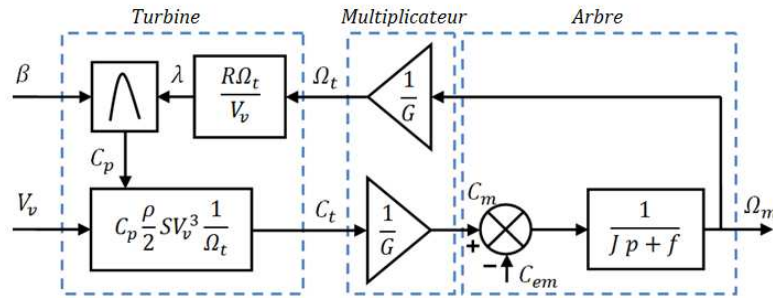


Fig. I.30 : Schéma bloc fonctionnel de la turbine

Le schéma de la figure (I.30), correspond à la modélisation aérodynamique et mécanique de la turbine, cette modélisation montre que la vitesse de rotation Ω_t de la turbine, donc de la MADA (Ω_{mec}) peut être contrôlée par l'action soit sur l'angle de calage des pales soit sur le couple électromagnétique C_{em} de la MADA. la vitesse du vent est considérée comme une perturbation au système.

I.9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les notions fondamentales de l'énergie éolienne.

Dans un premier lieu nous avons donné des généralités sur les éoliennes suivies d'un bref aperçu sur l'histoire et sur la situation actuelle de l'éolienne, ainsi que la politique suivie par différentes nations afin de diminuer le rejet des gaz à effet de serre.

Ensuite nous avons décrit les types d'aérogénérateurs, ainsi les différents constituants d'une éolienne à axe horizontal à vitesse variable et la stratégie de fonctionnement de l'éolienne, ainsi que les systèmes mis en œuvre pour la conversion électromécanique. L'objectif de projet consiste en l'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation.

En dernier, ce chapitre a décrit la modélisation du système éolien, en passant par l'expression de la vitesse du vent au modèle de la partie mécanique qui nous ont permis d'établir l'équation dynamique de l'arbre en utilisant des hypothèses simplificatrices.

Chapitre II

Généralités sur la machine asynchrone à double alimentation MADA

II.1. Introduction

Plusieurs technologies de génératrices éoliennes sont actuellement proposées sur le marché : La structure à base de machine asynchrone à cage connectée directement au réseau qui est solution simple et robuste, c'est la structure la plus ancienne (Éoliennes à vitesse fixe), la structure à base de machine synchrone à aimants permanents ou à inducteur, connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance dimensionnée à environ 100% de la puissance nominale et la structure à base de machine asynchrone à double alimentation(MADA), à laquelle nous allons nous intéresser dans ce qui suit.

La machine à double alimentation possède une caractéristique qui lui permet d'occuper un large domaine d'application que ce soit dans les entraînements à vitesses variables (fonctionnement moteur), que ce soit dans les applications à vitesse variables et à fréquence constante (fonctionnement générateur). L'objectif de ce chapitre est de mener une étude théorique sur l'état de l'art de la machine asynchrone à double alimentation concernant son principe de fonctionnement, ses applications, ses variantes de fonctionnement et ses avantages afin d'évaluer les performances apportées par cette machine.

II.2. Description et structure de la machine asynchrone à double alimentation

La première apparition de la machine asynchrone à double alimentation "*doubly-fed induction machine* (DFIM) ", date de l'année 1899; il ne s'agit pas d'une nouvelle structure mais d'un nouveau mode d'alimentation [6] [20].

Une machine asynchrone à double alimentation (MADA) est constituée d'un stator fixe équipé de trois enroulements identiques répartis d'une manière symétrique dans les encoches au stator, et d'un rotor tournant autour de l'axe de la machine équipé lui aussi le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. Contrairement au rotor d'une machine synchrone à aimants ou à une machine asynchrone à cage d'écureuil, il est composé d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques. Les enroulements rotoriques sont connectés en étoile et reliés à un collecteur constitué de trois ou quatre bagues. Leurs extrémités sont accessibles de l'extérieur par l'intermédiaire de bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des ballais, ce qui permet d'accéder aux grandeurs rotoriques (tensions et courants du rotor). La figure (II.1) l'illustre la construction générale de la MADA [9] [13] [22].

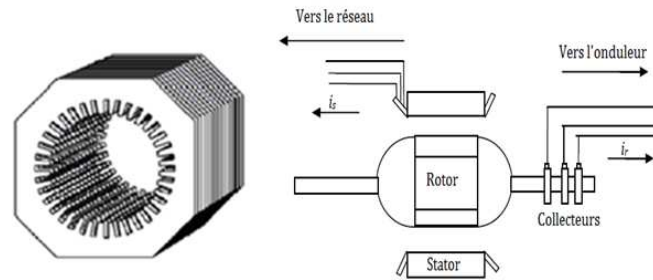


Fig. II.1 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la machine asynchrone [36]

La MADA a une double accessibilité au stator et au rotor. Dans son fonctionnement, elle s'apparente au fonctionnement de la machine synchrone avec une vitesse constante du fait de l'imposition des fréquences aux deux armatures et le caractère asynchrone est lié à la différence de vitesse entre le champ statorique et le rotor. Sa magnétisation est assurée par la contribution des deux armatures alimentées par des sources à courant alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de "machine synchrone à excitation alternative" [33] [44].

Pour la structure de commande, il faut intégrer un onduleur de tension au niveau des bobines du rotor qui est contrôlé par une technique de modulation de la largeur d'impulsion (MLI), qui permet le réglage simultanément de la fréquence et la tension. L'objectif de l'utilisation de la commande MLI est de réduire ou de minimiser l'oscillation de la vitesse, du couple et des courants [18] [27].

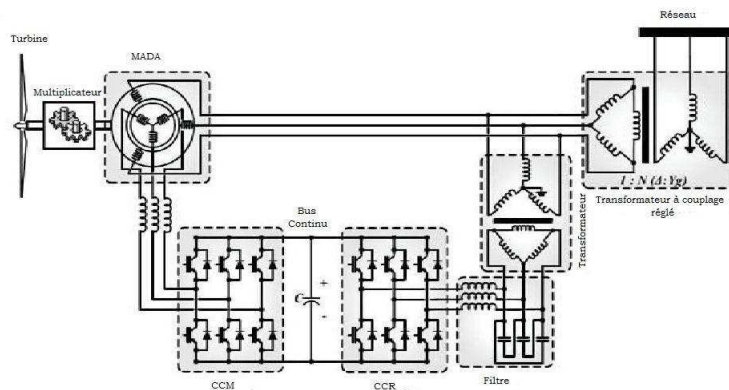


Fig. II.2 : Schéma de l'alimentation de la MADA pour une application de production éolienne [4]

II.3. Régimes de fonctionnement de la MADA

Le fonctionnement de la MADA se base sur le principe du contrôle de l'écoulement de la puissance de glissement. Au lieu de dépenser en pertes Joule la puissance rotorique on peut la récupérer et l'injecter dans le réseau. La difficulté étant que la fréquence des courants rotoriques f_r est égale à g fois la fréquence du réseau f_s [31].

Dans le cas où le nombre de paires de pôles du stator et du rotor sont identiques, la vitesse angulaire de rotation du rotor est définie par:

$$\omega_m = \omega_s \pm \omega_r = p \cdot \Omega_m \quad (\text{II.1})$$

Avec:

Ω_m : est la vitesse mécanique du rotor

ω_s et ω_r : désignent les pulsations statoriques et rotoriques respectivement

p : est le nombre de paires de pôle

Le signe moins (–) dans l'équation (II.1) signifie que le champ tournant créé par les enroulements du stator tourne dans le même sens que celui créé par les enroulements du rotor, c'est-à-dire que la machine fonctionne en régime hypo-synchrone ($\omega_m < \omega_s$).

Le signe plus (+) signifie que le champ tournant créé par les enroulements du stator et du rotor tourne dans le sens opposé; c'est-à-dire que la machine fonctionne en régime hyper synchrone ($\omega_m > \omega_s$).

D'autre part, la relation qui relie la fréquence du stator et celle du rotor est donnée par:

$$f_s = f_r + p \cdot f_m \quad (\text{II.2})$$

Avec f_m : fréquence de rotation du rotor

Dans ce cas, le glissement est défini par :

$$g = \frac{f_r}{f_s} = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \quad (\text{II.3})$$

D'après l'équation (II.3) on peut distinguer quatre régimes de fonctionnement de la MADA, ils peuvent être divisés en fonction de glissement comme suit [21]:

➤ **Stationnaire ($g = 1$)**

Le stator est alimenté directement par le réseau avec une fréquence f_s , par conséquent, le rotor siège d'une f_{em} induite avec une fréquence f_r identique à f_s . Dans ce cas, la MADA se comporte simplement comme un transformateur.

➤ **Hypo-synchrone ($0 < g < 1$)**

En tournant le rotor dans la direction du flux statorique, la fréquence f_r du rotor va commencer à décroître. Plus la vitesse du rotor s'approche de celle de synchronisme, plus f_r tend vers 0. De même, la tension induite dans le rotor décroît linéairement et prend une valeur très faible pour une vitesse du synchronisme.

➤ **Synchrone ($g = 0$)**

Lorsque la vitesse mécanique du rotor atteint la vitesse de synchronisme, la fréquence f_r du rotor s'annule. Dans ce cas, le rotor tourne avec la même vitesse que celle du flux statorique; donc le rotor ne voit aucun mouvement relatif par rapport à ce dernier. Par conséquent, il n'y a aucune tension induite dans les enroulements rotoriques. On constate que la puissance du stator est égale à celle du réseau, alors que celle du rotor est nulle (l'écoulement de puissance entre le réseau et le rotor s'arrête).

➤ **Hyper synchrone ($g < 0$)**

Par avantage d'accélération, le flux rotorique rattrape le flux statorique et la fréquence du rotor devient négative selon les équations (II.2) et (II.3). Cette valeur négative signifie que l'ordre de succession de phase du rotor « a_r, b_r, c_r » s'inverse. L'augmentation de la vitesse relative du rotor par rapport à celle du flux statorique mène à une augmentation de la tension induite du rotor.

II.4. Principe et mode de fonctionnement de la MADA

Comme son nom l'indique, la MADA est une machine doublement alimentée. Elle a le surnom de «machine généralisée» vu sa flexibilité de fonctionnement. Grâce à l'accès au rotor et via une interface d'électronique de puissance, il est possible de contrôler la vitesse de rotation ainsi que le facteur de puissance. Une fois le stator de la machine connecté au réseau électrique, un flux magnétique apparaît au stator, ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et du courant statorique. Lors de la rotation, le flux magnétique généré par le stator crée des forces électromotrices fem dans les enroulements rotoriques [27] [46]. Bien qu'une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et en dessus pour être en générateur. Ici, c'est la commande des tensions qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper ou hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur [13].

Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement dans ce qui suit :

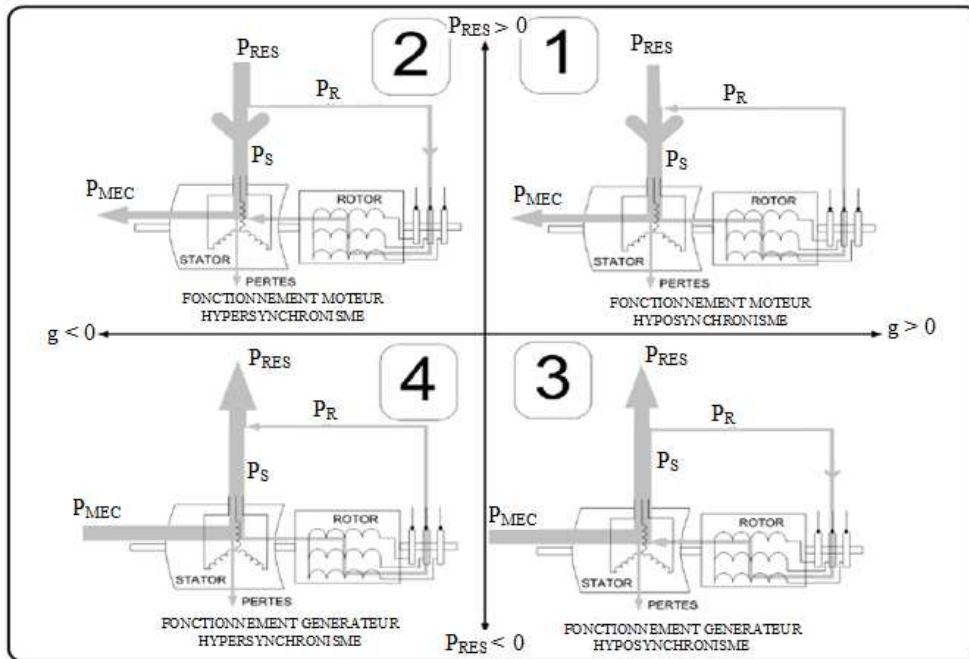


Fig. II.3 : Différents quadrants de fonctionnement de la MADA [36]

II.4.1. Fonctionnement en mode moteur en hypo synchronisme

La figure (II.3.1) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur au dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes joule dans le rotor [43] [45].

II.4.2. Fonctionnement en mode moteur en hyper synchronisme

La figure (II.3.2) montre que le stator est alimenté par le réseau et la puissance de glissement est fournie par le réseau au rotor via les convertisseurs statiques afin de la convertir en puissance mécanique. Le champ tournant induit par les enroulements rotoriques est en opposition de phase avec celui du stator car la vitesse devient plus grande que la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement [43] [45].

II.4.3. Fonctionnement en mode génératrice en hypo synchronisme

La figure (II.3.3) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. On a donc un fonctionnement générateur au dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement [43] [45].

II.4.4. Fonctionnement en mode génératrice en hyper synchronisme

La figure (II.3.4) montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes joule dans le rotor [43] [45].

II.5. Notions hypo et hyper-synchrone de la MADA

Sachant que pour le moteur à rotor bobiné classique, le stator est branché à une source alternative de fréquence égale à 50Hz. Cependant, au lieu de brancher au rotor une charge résistive triphasée à travers un ensemble de bagues et balais [23], on relie plutôt le rotor à une deuxième source ayant une fréquence de 14 Hz par exemple, voir la figure (II.4).

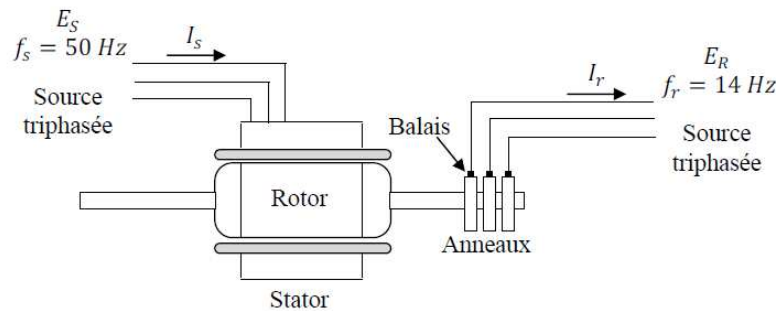


Fig. II.4 : Moteur à rotor bobiné à double alimentation connecté à deux sources triphasées [6]

Supposons que les enroulements triphasés du stator et du rotor de notre machine aient chacun 4 pôles et que le stator soit branché à une source à 50 Hz. Le flux créé par le stator tourne à la vitesse synchrone :

$$n_s = \frac{60 \times f_s}{p} = \frac{60 \times 50}{2} = 1500 \text{ tr/min}$$

Supposons de plus que ce flux tourne dans le sens horaire. Un observateur externe « voit » ce flux statorique tourner dans le sens horaire à 1500 tr/min. Puisque le rotor est branché à une source à 14 Hz, celui-ci produit un flux tournant à une vitesse par rapport au rotor aussi dans le sens horaire de :

$$n_{2s} = \frac{60 \times f_r}{p} = \frac{60 \times 14}{2} = 420 \text{ tr/min}$$

Pour que les pôles nord (N) du stator restent alignés aux pôles sud (S) du rotor, il faut que l'observateur externe voie les pôles du rotor tourner à la même vitesse que les pôles du stator. Il s'ensuit que le flux rotorique doit tourner dans le sens horaire à 1500 tr/min . Cela implique que le rotor doit lui-même tourner à une vitesse de :

$$1500 - 420 = 1080 \text{ tr/min}$$

Toute autre vitesse produirait en effet un glissement continu des pôles du rotor par rapport aux pôles du stator. Le couple moyen serait alors nul et le moteur s'arrêterait. On constate donc que cette machine peut fonctionner en moteur si, et seulement si, sa vitesse est exactement de 1080 tr/min . On dit alors qu'elle fonctionne à une vitesse **sous synchrone** ou **hypo-synchrone**.

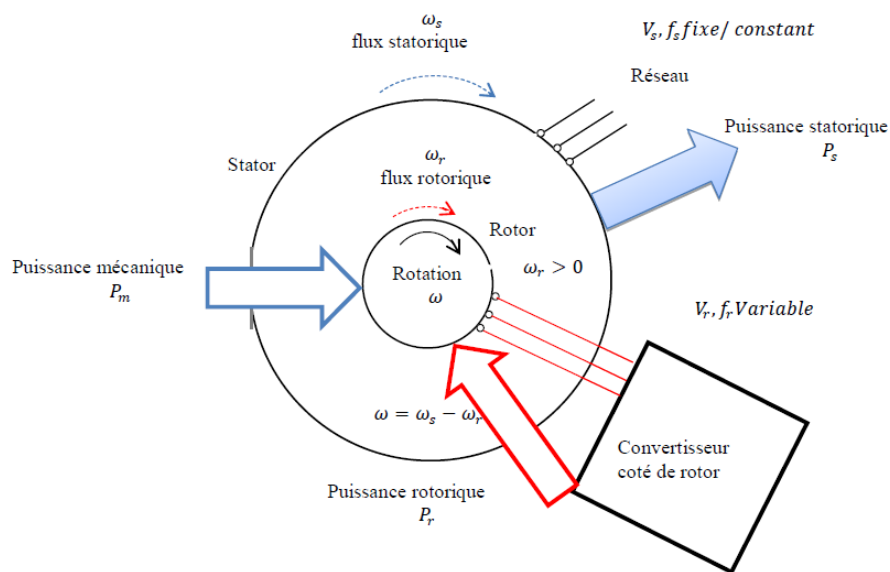


Fig. II.5 : Fonctionnement génératrice hypo-synchrone [5]

En permutant deux des trois fils de la source à 14 Hz reliée aux balais, on force le flux tournant produit par le rotor à changer de sens par rapport au rotor (sens anti horaire). Dans ces conditions, pour que les pôles N du stator restent alignés avec les pôles S du rotor, il faut que le rotor tourne maintenant à une vitesse de :

$$1500 + 420 = 1920 \text{ tr/min}$$

On dit alors que le moteur fonctionne à une vitesse **hyper-synchrone**.

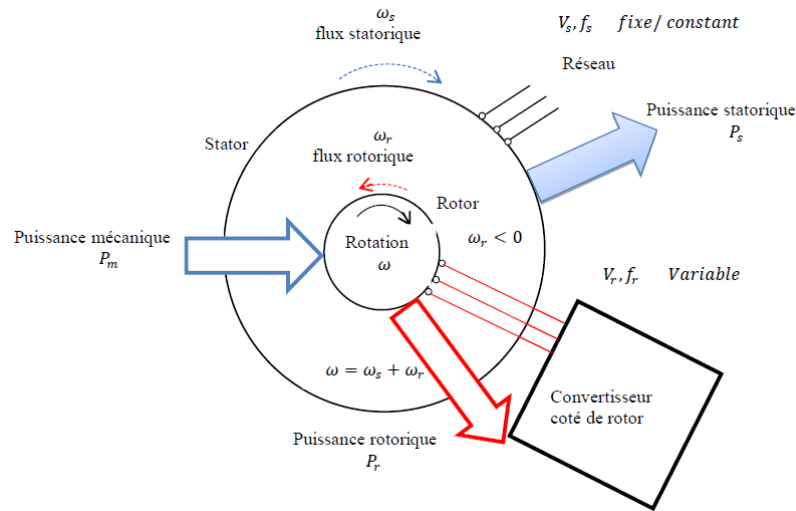


Fig. II.6 : Fonctionnement génératrice hyper-synchrone [5]

A partir de cet exemple, on peut généraliser et montrer que lorsqu'un moteur à rotor bobiné est alimenté par deux sources, il doit tourner à une des deux vitesses suivantes :

$$n = \frac{120}{N_p} (f_s - f_r) \quad (\text{Hypo-synchrone}) \quad (\text{II.4})$$

Ou bien

$$n = \frac{120}{N_p} (f_s + f_r) \quad (\text{Hyper-synchrone}) \quad (\text{II.5})$$

Où

n : Vitesse du rotor [tr/min].

f_s : Fréquence appliquée au stator [Hz].

f_r : Fréquence appliquée au rotor [Hz].

N_p : Nombre de paire de pôles de la machine.

Pour une fréquence f_r donnée, la vitesse n dépend de la séquence des phases de la tension triphasée appliquée au rotor. Une séquence directe produit une vitesse sous-synchrone (équation II.4), alors qu'une séquence inverse produit une vitesse hyper-synchrone (équation II.5).

II.6. Domaine d'application de la MADA

La littérature atteste du grand intérêt accordé aujourd'hui à la machine doublement alimentée pour diverses applications : en tant que génératrice pour les énergies renouvelables ou en tant que moteur pour certaines applications industrielles.

Le fonctionnement en générateur présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de

production d'énergie décentralisée et grâce à sa capacité de fonctionner dans une large gamme de vitesses, la MADA est devenue la solution adaptée pour l'énergie éolienne. L'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet d'avoir des tensions statoriques à fréquence et amplitude fixes quelque soit la vitesse de rotation de son arbre [42].

On peut citer des exemples de la MADA tel que [6] :

- Générateurs des réseaux de bord des navires ou des avions ;
- Centrales hydrauliques à débit et vitesse variable ;
- Eoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable [42] ;
- Groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

La MADA peut aussi être utilisée dans d'autres applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage, tel que [6] [27] :

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

Les applications de la MADA en moteur sont souvent très limitées, et on cite parmi celles-ci, la traction électrique et les systèmes de pompage.

II.7. Avantages et inconvénients de la MADA

Comme les autres machines, la MADA présente quelques avantages et inconvénients qui sont liés à plusieurs facteurs, sa structure, sa stratégie de commande et ses applications lors de son fonctionnement à vitesse variable.

Comme avantages de la MADA, on peut citer :

- L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance avec toutes les possibilités de récupération ou l'injection d'énergie dans les enroulements de la machine [18]; aussi offre la possibilité de mesurer et de contrôler les grandeurs électriques (courant et tension), contrairement à la machine à cage, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique [23] [42];
- Le fonctionnement en hypo ou hyper synchronisme offre une large plage de variation de la vitesse sur laquelle l'application de la commande vectorielle associée à une technique de commande moderne permet d'obtenir un couple nominal [18] [23] ;

- En fonctionnement moteur, la solution avec deux convertisseurs alimentant la machine nous permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge [23] [42];
- En fonctionnement générateur, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée ;
- Dans la MADA, le circuit rotorique peut être piloté par un convertisseur de fréquence de puissance relativement faible par rapport au stator. Ce convertisseur rotorique de haute commutation est utilisé pour réaliser de hautes performances dynamiques en termes de temps de réponse, de minimisation des harmoniques et d'amélioration de rendement ;
- L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille des convertisseurs d'environ 70 % en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement. Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur [18] ;
- Son utilisation est préférée pour ses propriétés de réglage de vitesse par action sur des résistances placées dans le circuit rotorique, et encore sa possibilité de démarrer sans demander un courant important du réseau.
- Transfert bidirectionnel de la puissance rotorique [23];
- La MADA se comporte comme une machine synchrone et l'on peut pratiquer des rapports de démagnétisation très importants (de l'ordre de 1 à 6) [42].
- La MADA réunit les avantages de la machine synchrone et de la machine asynchrone, à savoir [23] :
 - Fonctionnement à vitesse de rotation variable ;
 - Régulation découplée des puissances active et réactive.

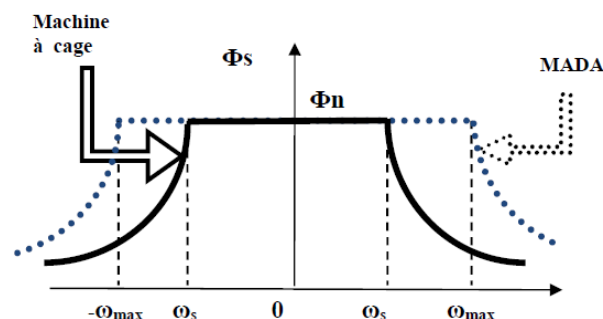


Fig. II.7 : Comparaison de zone de fonctionnement en survitesse entre la machine à cage et la MADA [23]

Comme la MADA est une machine asynchrone, alors le premier inconvénient est que sa structure est non linéaire, ce qui complique sa commande [18]. En plus de ça, on peut citer les inconvénients suivants :

- Le marché traditionnel est conquis par la MAS à cage, très étudiée et très connue, la nouveauté peut effrayer [18] ;
- Machine plus volumineuse que celle de la machine asynchrone classique de puissance équivalente, généralement elle est plus longue à cause des balais ; L'aspect multi-convertisseurs, augmente le nombre de convertisseurs et par conséquent le prix [18] [23] ;
- Un nombre important de convertisseurs est utilisé (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) que celui utilisé pour la machine à cage. Nous soulignons que des études récentes, tenant compte de la chute du prix du silicium, donnent maintenant un petit avantage à la MADA [42] ;
- Nécessite une maintenance périodique, le coût total de la machine est plus important par rapport aux autres machines électriques [23] [45].

II.8. Conclusion

L'intérêt porté à la MADA ne cesse de croître pour diverses applications : en tant que génératrice pour les énergies renouvelables ou en tant que moteur pour certaines applications industrielles. Nous concluons que les intérêts majeurs de l'utilisation de cette machine sont :

- Le convertisseur lié à l'armature rotorique est dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine ;
- Possibilité de fonctionner sur une grande plage de vitesse en hypo et hyper synchronisme ;
- Possibilité de contrôler à la fois le couple et le facteur de puissance ;
- Rendement élevé.

Pour bien exploiter la machine à double alimentation dans un tel domaine d'application, la modélisation et la commande sont nécessaires. Le prochain chapitre est consacré à la modélisation de la machine et détaille la stratégie de commande afin de réguler la puissance débitée sur le réseau.

Chapitre III

***Modélisation de la machine asynchrone à
double alimentation***

MADA

III.1. Introduction

La MADA est très populaire puisqu'elle bénéficie de certains avantages par rapport à toutes les autres machines utilisées dans les éoliennes à vitesse variable. Son utilisation dans la chaîne de conversion électromécanique en tant que aérogénérateur a connu une croissance spectaculaire au cours des dernières années. En effet, le convertisseur d'énergie utilisé afin de redresser-onduler les courants alternatifs du rotor a une puissance nominale fractionnaire de celle du générateur, ce qui réduit son coût par rapport aux topologies concurrentes [6].

Dans ce chapitre, l'objectif est la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation dans laquelle le rotor est connecté au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance dimensionnée à environ 30% de la puissance nominale. Le stator quant à lui, est connecté directement au réseau (éoliennes à vitesse variable). Généralement, ces modèles sont définis dans un référentiel diphasé, soit tournant (d, q) , soit fixe au stator (α, β) . Ces référentiels sont définis à partir du référentiel triphasé naturel de la MADA à l'aide de transformations mathématiques adaptées.

Ce chapitre est composé de deux principales parties : Une première partie est consacrée à la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation. La deuxième partie qui est consacrée à la commande vectorielle.

III.2. Modèle de la machine asynchrone à double alimentation

De façon à représenter au mieux le comportement de la MADA, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis mais suffisamment simple pour que les temps de calcul du simulateur ne soient pas prohibitifs.

III.2.1. Hypothèses simplificatrices pour la modélisation de la MADA

Afin d'élaborer un modèle simple de la MADA, il est nécessaire de tenir compte des hypothèses simplificatrices suivantes qui tout en permettant de simplifier notablement les calculs, conduisent à des résultats suffisamment précis pour la plupart des applications [9] [38] :

- la machine est symétrique et à entrefer constant ;
- le circuit magnétique n'est pas saturé et il est parfaitement feuilleté et à perméabilité constante ;
- les pertes fer et par hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables ;
- les forces magnétomotrices (f_{mm}) créées dans une phase du stator et du rotor sont à répartitions sinusoïdales le long de l'entrefer ;
- L'effet des encoches négligé ;
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement n'est pas prise en compte ;

- Tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements.

La machine asynchrone à double alimentation comporte :

- ✓ trois bobines statoriques (S_a, S_b, S_c) décalées entre elles par un angle de $\frac{2\pi}{3}$
- ✓ trois bobines rotoriques identique de répartition et similaire à celles du stator, (R_a, R_b, R_c)

La figure III.1 rappelle la position des axes des phases statoriques et rotoriques dans l'espace électrique (l'angle électrique est égal à l'angle réel multiplié par le nombre p de paires de pôles par phase).

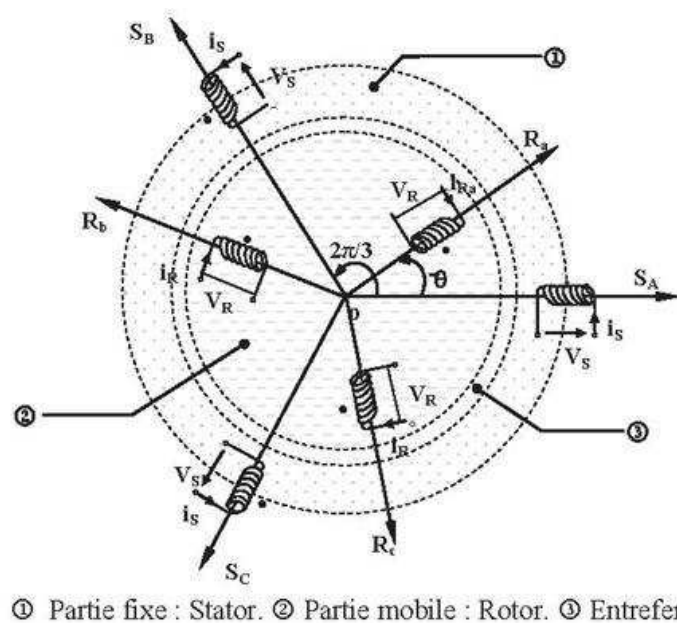


Fig. III.1 : Représentation simplifiée de la MADA [26]

III.2.2. Rappel sur la loi de Faraday

La loi de Faraday exprime la relation entre la tension (v) aux bornes d'une bobine, de résistance (R_B) d'inductance (L_B), le courant i , et la variation du flux totalisé φ_t [29]:

$$\frac{d\varphi_t}{dt} = v - R_B \cdot i \quad (\text{III.1})$$

Avec : $\varphi_t = \varphi + \varphi_c$ où φ_c est un flux de couplage magnétique avec d'autres enroulements, et φ est le flux propre de l'enroulement.

III.2.3. Modélisation de la MADA dans le plan (a, b, c)

- **Equations électriques**

En prenant en compte les hypothèses simplificatrices citées précédemment, on peut exprimer le modèle de cette machine en se basant sur les relations suivantes [7] :

- **Grandeurs statoriques**

$$[V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt}[\varphi_s] \quad (\text{III.2})$$

Avec

$[V_s] = [v_{as} v_{bs} v_{cs}]^T$: Vecteur tension statorique

$[i_s] = [i_{as} i_{bs} i_{cs}]^T$: Vecteur courant statorique

$[\varphi_s] = [\varphi_{as} \varphi_{bs} \varphi_{cs}]^T$: Vecteur flux statorique

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} : \text{Matrice des résistances du stator}$$

- **Grandeurs rotoriques**

$$[V_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt}[\varphi_r] \quad (\text{III.3})$$

Avec

$[V_r] = [v_{ar} v_{br} v_{cr}]^T$: Vecteur tension rotorique

$[i_r] = [i_{ar} i_{br} i_{cr}]^T$: Vecteur courant rotorique

$[\varphi_r] = [\varphi_{ar} \varphi_{br} \varphi_{cr}]^T$: Vecteur flux rotorique

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} : \text{Matrice des résistances du rotor}$$

- **Equations magnétiques**

Les équations magnétiques de la MADA sont données par :

- **Grandeurs statoriques**

$$[\varphi_s] = [L_{ss}][i_s] + [M_{sr}][i_r] \quad (\text{III.4})$$

Dont

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_{as} & M_{as} & M_{as} \\ M_{as} & L_{as} & M_{as} \\ M_{as} & M_{as} & L_{as} \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

Avec

$[L_{ss}]$: Matrice d'inductances statoriques

L_{as} : Inductance propre d'une phase statorique

M_{as} : Inductance mutuelle entre deux phases du stator

➤ **Grandeurs rotoriques**

$$[\varphi_r] = [L_{rr}][i_r] + [M_{rs}][i_s] \quad (\text{III.6})$$

Dont

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_{ar} & M_{ar} & M_{ar} \\ M_{ar} & L_{ar} & M_{ar} \\ M_{ar} & M_{ar} & L_{ar} \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

$[L_{rr}]$: Matrice d'inductances rotoriques

L_{ar} : Inductance propre d'une phase rotorique

M_{ar} : Inductance mutuelle entre deux phases du rotor

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M_{rs} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

$[M_{sr}]$: Matrice d'inductances mutuelles du couplage stator-rotor

M_{rs} : Inductance mutuelle maximale entre une phase du stator et une autre du rotor

(Obtenue quand les axes magnétiques des deux phases sont alignés)

Les équations (III.4) et (III.6) peuvent être formulées en blocs de matrices comme suit :

$$\begin{bmatrix} [\varphi_s] \\ [\varphi_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix} \quad (\text{III.9})$$

En remplaçant dans (III.2) et (III.3), les vecteurs flux par leurs expressions obtenues dans (III.4) et (III.6), on aboutit à :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [i_s] + [L_{ss}] \cdot \frac{d}{dt} [i_s] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}] \cdot [i_r]) \quad (\text{III.10})$$

$$[V_r] = [R_r] \cdot [i_r] + [L_{rr}] \cdot \frac{d}{dt} [i_r] + \frac{d}{dt} ([M_{rs}] \cdot [i_s]) \quad (\text{III.11})$$

- **Équation mécanique**

$$C_{em} = C_r + f\Omega_m + J \frac{d\Omega_m}{dt} \quad (\text{III.13})$$

f : Coefficient de frottement visqueux

J : Moment d'inertie de la partie tournante

C_r : Couple résistant

C_{em} : Couple électromagnétique

III.2.4. Transformation de Park

La transformation de Park, appelée souvent transformation à deux axes, fait correspondre aux variables réelles leurs composantes **[38]**:

- ✓ D'axe direct
- ✓ D'axe en quadrature
- ✓ D'axe homopolaire

d : Indice de la composante directe

q : Indice de la composante en quadrature

0 : Indice de la composante homopolaire

La transformation du modèle d'un enroulement triphasé en un modèle d'un enroulement biphasé, en prenant en compte la conservation des puissances est permis par la matrice de Park donnée par l'équation (III.14) **[1]**. Elle consiste à appliquer aux courants, tensions et flux, un changement de variables faisant intervenir l'angle entre les axes des phases et les axes d et q .

Dans la matrice de Park, c'est l'angle θ_s qui intervient pour les grandeurs statoriques et θ_r pour les grandeurs rotoriques.

On définit donc la matrice de Park et la matrice inverse de Park comme suit :

$$P(\theta_s) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta_s & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin\theta_s & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.14})$$

$$P(\theta_s)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta_s & -\sin\theta_s & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.15})$$

La transformation de Park pour les tensions, les courants et les flux se présente comme suit :

$$(V_{Sdq0}) = P(\theta_s) \cdot (V_{Sabc}) \Rightarrow (V_{Sabc}) = P(\theta_s)^{-1} \cdot (V_{Sdq0})$$

$$(i_{Sdq0}) = P(\theta_s) \cdot (i_{Sabc}) \Rightarrow (i_{Sabc}) = P(\theta_s)^{-1} \cdot (i_{Sdq0})$$

$$(\varphi_{Sdq0}) = P(\theta_s) \cdot (\varphi_{Sabc}) \Rightarrow (\varphi_{Sabc}) = P(\theta_s)^{-1} \cdot (\varphi_{Sdq0})$$

Avec

$(V_{Sdq0}) = (v_{ds} \ v_{qs} \ v_{0s})^t$: Composantes de la tension statorique dans le plan $(d, q, 0)$

$(V_{Sabc}) = (v_{as} \ v_{bs} \ v_{cs})^t$: Composantes de la tension statorique dans le plan (a, b, c)

$(i_{Sdq0}) = (i_{ds} \ i_{qs} \ i_{0s})^t$: Composantes du courant statorique dans le plan $(d, q, 0)$

$(i_{Sabc}) = (i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs})^t$: Composantes du courant statorique dans le plan (a, b, c)

$(\varphi_{Sdq0}) = (\varphi_{ds} \ \varphi_{qs} \ \varphi_{0s})^t$: Composantes du flux statorique dans le plan $(d, q, 0)$

$(\varphi_{Sabc}) = (\varphi_{as} \ \varphi_{bs} \ \varphi_{cs})^t$: Composantes du flux statorique dans le plan (a, b, c)

Pour les grandeurs rotoriques, il suffit de remplacer l'indice « s » par l'indice « r »

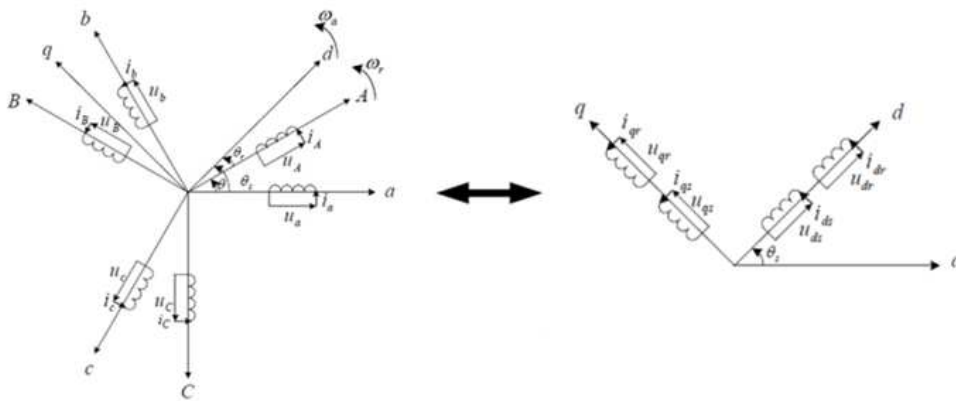


Fig. III.2 : Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA [9]

III.2.5. Modélisation de la MADA dans le plan (d, q)

- **Equations électriques**

L'expression des tensions statoriques suivant les axes d et q est :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_r \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

- **Equations magnétiques**

L'expression des flux statoriques suivant les axes d et q est [47]:

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

$$\begin{cases} \varphi_{0s} = L_{0s} \cdot i_{0s} \\ \varphi_{0r} = L_{0r} \cdot i_{0r} \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

En supposant que le système est symétrique, les grandeurs homopolaires sont nulles,

Avec

$L_s = L_{as} - M_{as}$: Inductance propre cyclique du stator

$L_r = L_{ar} - M_{ar}$: Inductance propre cyclique du rotor

$M = \frac{3}{2} M_{rs}$: Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor

$L_{0s} = L_{as} + 2M_{as}$: Inductance homolaire du stator

$L_{0r} = L_{ar} + 2M_{ar}$: Inductance homolaire du rotor

- **Equation mécanique**

L'équation mécanique est donnée par [33]:

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f \cdot \Omega \quad (\text{III.19})$$

Avec

$$\Omega = \frac{\omega_r}{p} \quad \text{et} \quad \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$$

- **Couple électromagnétique**

L'expression du couple électromagnétique en fonction des flux statoriques et des courants rotoriques est donnée par [33]:

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (\varphi_{ds} \cdot i_{qr} - \varphi_{qs} \cdot i_{dr}) \quad (\text{III.20})$$

III.3. Choix du référentiel de travail

Le référentiel de travail est le système d'axes od et oq associé à la vitesse de rotation choisie pour lui. Ce repère fait un angle θ_s avec le stator et un angle θ_r avec le rotor.

$$\text{Soit : } \omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} ; \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} ; \omega = \frac{d\theta}{dt}$$

$$\theta = \theta_s - \theta_r \quad \text{donc} \quad \omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega_r$$

ω_s : Pulsation des courants statoriques

ω_r : Vitesse électrique du rotor

$g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$: Le glissement

$\omega_r = g \cdot \omega_s$: Pulsation des courants rotoriques

Il existe trois choix de référentiels intéressants :

➤ **Référentiel lié au stator**

Ce référentiel est préférable pour étudier les variations importantes de la vitesse de rotation donc il est adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées, il se caractérise par :

$$\theta_s = 0$$

$$\theta_s = \theta + \theta_r \Rightarrow \theta_r = -\theta$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \quad , \quad \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega_r$$

Et la figure (III.3), montre les repères (d, q) liés au stator :

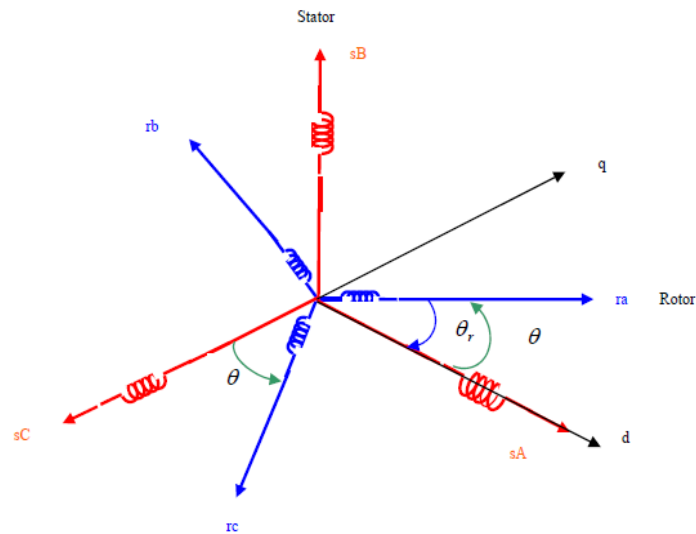


Fig. III.3 : Repères (d, q) liés au stator

➤ Référentiel lié au rotor

Ce référentiel tourne à la même vitesse que le rotor, il est préférable pour étudier les régimes transitoires où la vitesse de rotation peut être considérée constante, il se caractérise par :

$$\theta_r = 0$$

$$\theta_s = \theta + \theta_r \Rightarrow \theta_s = \theta$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \quad , \quad \frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt} = \omega_s$$

La figure (III.4) montre les repères (d, q) liés au rotor :

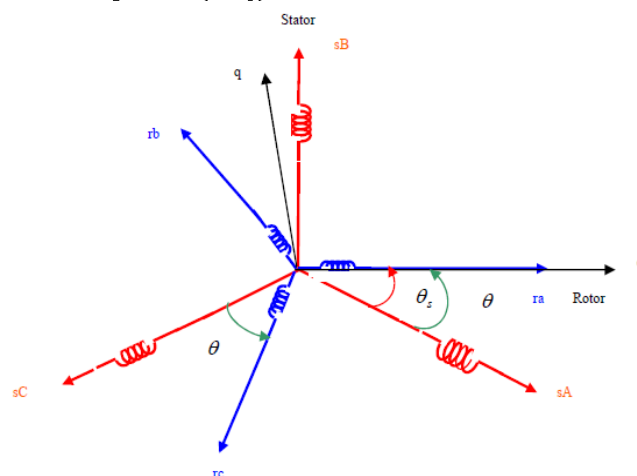


Fig. III.4 : Repères (d, q) liés au rotor

➤ Référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel tourne à la vitesse de synchronisme, dans ce cas les grandeurs statoriques et rotoriques sont connues en régimes permanent. Il est préférable de travailler dans ce repère lorsqu'il s'agit de la commande de la machine, il se caractérise par :

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$$

$$\theta_s = \theta + \theta_r \Rightarrow \theta_r = \theta_s - \theta$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta}{dt} = \omega_s - \omega = g \cdot \omega_s$$

La figure (III.5), montre les repères (d, q) liés au champ tournant :

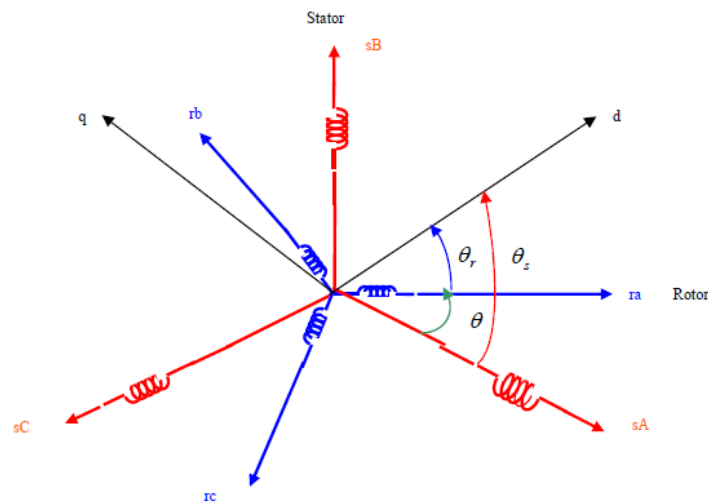


Fig. III.5 : Repères (d, q) liés au champ tournant

Nous pouvons alors écrire :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - g \omega_s \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + g \omega_s \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.21})$$

III.4. Bilan de puissance dans la MADA

Tout d'abord, nous présentons le calcul des puissances active et réactive côté rotor et côté stator en tenant compte des termes résistifs et ensuite en les négligeant [29].

En régime permanent les équations de la machine s'écrivent :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} - \omega_r \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.23})$$

III.4.1. Bilan de puissance en tenant compte des résistances rotoriques et statoriques

Le bilan de puissance côté stator et rotor en tenant compte des termes résistifs est :

- **Côté stator**

$$\begin{aligned} P_s &= V_{ds} \cdot i_{ds} + V_{qs} \cdot i_{qs} = \frac{R_s}{M_{sr}^2} \cdot (\varphi_{dr}^2 + L_r^2 \cdot i_{qr}^2) - \omega_s \cdot i_{qr} \cdot \varphi_{dr} \\ Q_s &= V_{qs} \cdot i_{ds} - V_{ds} \cdot i_{qs} \approx (\varphi_{ds} \cdot i_{ds} + \varphi_{qs} \cdot i_{qs}) \cdot \omega_s = \left(\frac{L_s}{M_{sr}^2} \cdot \varphi_{dr}^2 + \sigma \cdot L_s \cdot \frac{L_r^2}{M_{sr}^2} \cdot i_{qr} \right) \cdot \omega_s \end{aligned} \quad (\text{III.24})$$

- **Côté rotor**

$$\begin{aligned} P_r &= V_{dr} \cdot i_{dr} + V_{qr} \cdot i_{qr} \approx V_{qr} \cdot i_{qr} = R_r \cdot i_{qr}^2 + \omega_r \cdot i_{qr} \cdot \varphi_{dr} \\ Q_r &= V_{qr} \cdot i_{dr} - V_{dr} \cdot i_{qr} \approx 0 \end{aligned} \quad (\text{III.25})$$

Les puissances actives, contiennent des termes relatifs aux pertes par effet Joule (de nature résistives) et un autre terme représentant l'énergie transmise. Ce second terme est fonction des pulsations du stator et du rotor ainsi que de la valeur du couple. Nous avons choisi de fonctionner à facteur de puissance unitaire au rotor. En imposant un courant $i_{dr} = 0$, la tension V_{dr} s'annule aussi d'où $Q_r = 0$.

III.4.2. Bilan de puissance sans prise en compte des résistances rotoriques et statoriques

En négligeant les termes résistifs, les équations des tensions de la machine en régime permanent sont :

$$\begin{cases} V_{ds} \approx -\omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} \approx +\omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} \approx -\omega_r \varphi_{qr} \\ V_{qr} \approx +\omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.26})$$

- **Côté stator**

$$\begin{aligned} P_s &= V_{ds} \cdot i_{ds} + V_{qs} \cdot i_{qs} = -\omega_s \cdot i_{dr} \cdot \varphi_{qr} + \omega_s \cdot i_{qr} \cdot \varphi_{dr} \\ Q_s &= V_{qs} \cdot i_{ds} - V_{ds} \cdot i_{qs} \approx (\varphi_{ds} \cdot i_{ds} + \varphi_{qs} \cdot i_{qs}) \cdot \omega_s = \left(\frac{L_s}{M_{sr}^2} \cdot \varphi_{dr}^2 + \sigma \cdot L_s \cdot \frac{L_r^2}{M_{sr}^2} \cdot i_{qr} \right) \cdot \omega_s \end{aligned} \quad (\text{III.27})$$

- **Côté rotor**

$$\begin{aligned} P_r &= V_{dr} \cdot i_{dr} + V_{qr} \cdot i_{qr} \approx V_{qr} \cdot i_{qr} \approx \omega_r \cdot i_{qr} \cdot \varphi_{dr} \\ Q_r &= V_{qr} \cdot i_{dr} - V_{dr} \cdot i_{qr} \approx 0 \end{aligned} \quad (\text{III.28})$$

Les puissances actives du stator P_s et du rotor P_r dépendent de la composante directe du flux rotorique, du courant i_{qr} ainsi que des pulsations ω_s et ω_r . La puissance réactive au stator Q_s dépend de même de φ_{dr} , i_{qr} , ω_s ainsi que des paramètres inductifs de la MADA. L'énergie réactive sera toujours fournie à la machine par le stator et ceci quel que soit le signe de ω_s .

En négligeant les termes résistifs, il est possible de trouver une relation simple entre les puissances actives du rotor et du stator d'un côté et des pulsations correspondantes d'un autre côté. Il est donc possible de répartir la puissance active entre le stator et le rotor à partir d'une répartition des pulsations ω_s et ω_r .

III.5. Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation

Plusieurs méthodes de commande de la MADA sont apparues, parmi elles, la commande vectorielle. Le principe de cette technique a été développé par BLASCHKE au début des années 70. Cette commande basée sur les régulateurs classiques (réglage à action proportionnelle, intégrale et dérivée). L'application de la commande vectorielle nécessite une très bonne connaissance de la MADA et suppose que [47] :

- ✓ Les enroulements de la machine sont équilibrés,
- ✓ Que la distribution du flux est sinusoïdale,
- ✓ Que les pertes fer sont nulles,
- ✓ Et que le circuit magnétique n'est pas saturé.

III.6. Principe de la commande vectorielle

La commande vectorielle est une technique de commande classique pour l'entraînement des machines asynchrones. L'idée fondamentale de cette méthode de commande est de ramener le comportement de la machine asynchrone à celui d'une machine à courant continu. La méthode se base sur la transformation des variables électriques de la machine vers un référentiel qui tourne avec le vecteur du flux afin d'obtenir un contrôle analogue à celui de la machine à courant continu à excitation séparée, i_{dr} est analogue au courant d'excitation, tandis que le courant i_{qr} est analogue au courant d'induit. Par conséquent, les deux composantes i_{dr} et i_{qr} sont mutuellement découplées [11].

III.7. Variantes de la commande vectorielle

De nombreuses variantes de ce principe de commande ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer suivant :

- La source d'énergie :
 - ✓ Commande en tension
 - ✓ Commande en courant

- L'orientation du repère (d, q) sur :
 - ✓ Le flux rotorique
 - ✓ Le flux statorique
 - ✓ Le flux d'entrefer

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

III.8. Commande vectorielle par orientation du flux statorique

Elle consiste à orienter le vecteur flux afin de rendre cette machine semblable du point de vue commande à une machine à courant continu à excitation séparée, en alignant le flux statorique suivant l'axe d du référentiel tournant, figure (III.6).

On a donc: $\varphi_{ds} = \varphi_s$ et par suite $\varphi_{qs} = 0$

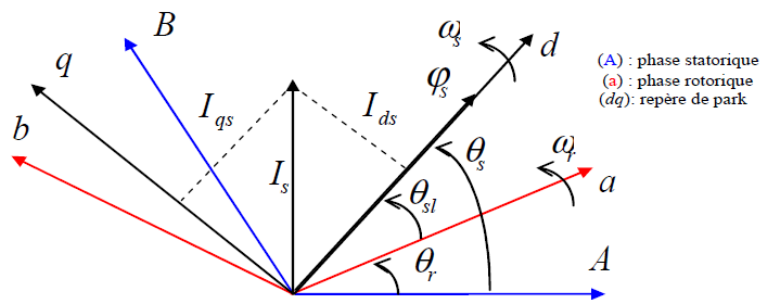


Fig. III.6 : Orientation de l'axe d sur le flux statorique

Le couple électromagnétique de l'équation (III.20) s'écrit alors :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} \varphi_{ds} \cdot i_{qr} \quad (\text{III.29})$$

Et l'équation (III.17) des flux devient :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ 0 = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.30})$$

Si l'on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse réaliste pour les machines de forte puissance utilisées pour la production éolienne, les équations (III.16) des tensions statoriques de la machine se réduisent à :

$$\begin{cases} V_{ds} = \frac{d\varphi_s}{dt} \\ V_{qs} = \omega_s \varphi_s \end{cases} \quad (\text{III.31})$$

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

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s \end{cases} \quad (\text{III.32})$$

A l'aide de l'équation (III.30), on peut établir le lien entre les courants statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases} i_{ds} = -\frac{M}{L_s} i_{dr} + \frac{\varphi_s}{L_s} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_s} i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.33})$$

Les puissances actives et réactives statoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs} \\ Q_s = V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.34})$$

Ou bien encore, d'après l'équation (III.32) :

$$\begin{cases} P_s = V_s i_{qs} \\ Q_s = V_s i_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.35})$$

Pour obtenir l'expression des puissances en fonction des courants rotoriques, on remplace dans l'équation (III.34), les courants de l'équation (III.33):

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{dr} + V_s \frac{\varphi_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III.36})$$

A partir des équations (III.31) et (III.32), nous obtenons, pour le flux statorique, l'expression suivante :

$$\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (\text{III.37})$$

L'expression des puissances peut donc se simplifier de la manière suivante :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{dr} + \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (III.38)$$

En remplaçant dans l'équation (III.17) des flux, les courants statoriques par l'expression (III.33) on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + \frac{M V_s}{L_s \omega_s} \\ \varphi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \end{cases} \quad (III.39)$$

Pour le contrôle de la génératrice, des expressions sont établies montrant la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui lui seront appliquées.

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{di_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{di_{qr}}{dt} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (III.40)$$

Les équations précédentes permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler donné par la figure (III.7).

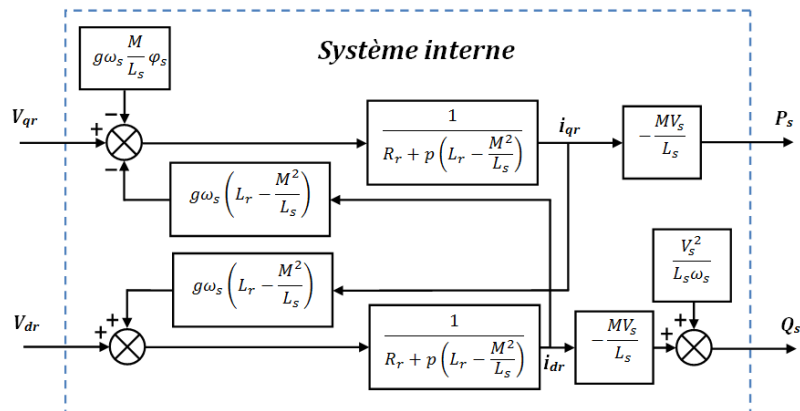


Fig. III.7 : Schéma bloc de la commande de la MADA

Remarque

Les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. De plus, du fait de la faible valeur du glissement g , il sera possible d'établir sans difficulté une commande vectorielle, car les influences des couplages resteront faibles et les axes d et q , pourront donc être commandés séparément avec leurs propres régulateurs [38].

III.9. Commande vectorielle directe et indirecte

III.9.1. Commande vectorielle directe

Il a été mis en évidence le lien entre, d'une part la puissance active et la tension V_{qr} et d'autre part la puissance réactive et la tension V_{dr} . Elle consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive. Cette méthode sera appelée méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine, figure (III.8) [38].

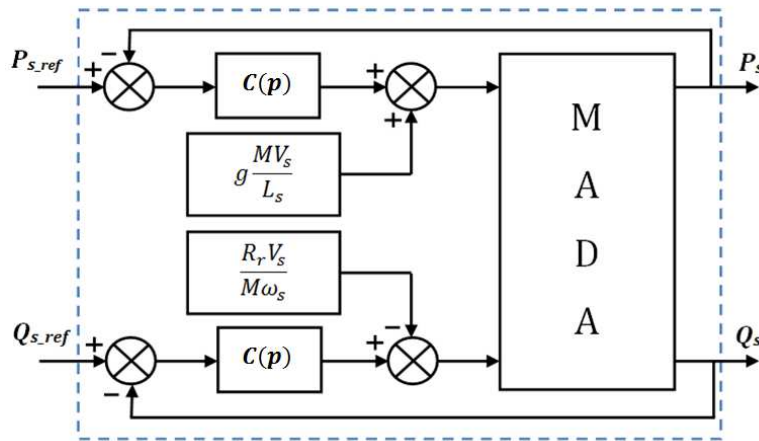


Fig. III.8 : Schéma bloc de la commande directe

III.9.2. Commande vectorielle indirecte

Nous aboutissons au schéma bloc présenté dans la figure (III.9) sur lequel on tient compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles de régulation pour chaque axe, permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode appelée méthode indirecte découle directement des équations (III.38) et (III.40) [38].

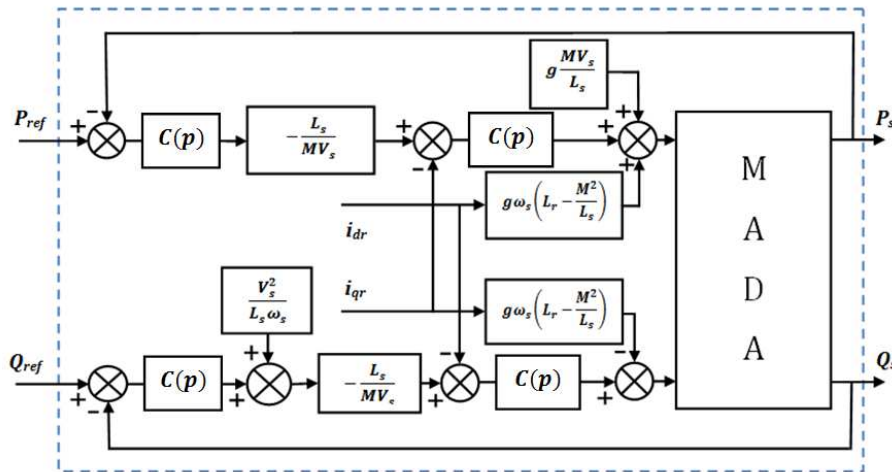


Fig. III.9 : Schéma bloc de la commande indirecte

III.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé la structure de la MADA, ainsi que son modèle mathématique, dans le repère naturel (a, b, c) , ensuite, en passant du système réel triphasé au système diphasé linéaire à l'aide de la transformation de Park. Le modèle dynamique de la machine est écrit dans le repère de Park en se basant sur quelques hypothèses simplificatrices qui nous ont permis de réduire sa complexité.

Nous avons présenté également la commande vectorielle nécessaire à la commande des puissances active et réactive.

Le prochain chapitre sera à son tour consacré aux généralités sur le contrôle des systèmes linéaires. Nous y présenterons deux méthodes de synthèse des contrôleurs linéaire : la synthèse directe et la synthèse basée sur le principe de la commande par modèle interne. C'est cette seconde méthode que nous utiliserons pour la commande de la MADA du système éolien.

Chapitre IV

Commande par modèle interne (IMC)

IV.1. Introduction

A la fin des années 70 et au début des années 80 s'est développé un algorithme de commande connu sous le nom de commande par modèle interne [37]. Le développement de cet algorithme avait pour objectif d'un côté, de tirer l'avantage des régulateurs fonctionnant en boucle ouverte, qui sont la facilité de la synthèse du contrôleur, la possibilité de tenir compte de la facilité systématique de la robustesse et de pouvoir traiter les procédés avec retard. D'un autre côté, cette méthode de commande permet de tirer les avantages de la boucle fermée qui sont la possibilité d'obtenir une erreur nulle en régime permanent à des échelons de consigne ou à des perturbations de moyenne non nulle, ainsi que les erreurs de modélisation du procédé à contrôler.

L'objectif de ce chapitre est de donner un aperçu général sur la commande par modèle interne.

IV.2. Schémas de commande des systèmes linéaires

Lorsqu'il n'y a pas de perturbations qui agissent sur le système à commander, on utilise souvent un schéma de commande en boucle ouverte illustrée par la figure (IV.1) en raison de sa facilité et son efficacité de calcul. $C(p)$ et $G(p)$ représentent respectivement le contrôleur et le système à contrôler, $y_{ref}(p)$ est la grandeur de référence, $u(p)$ est la grandeur de commande à injecter au système et $y(p)$ est la grandeur de sortie à contrôler.

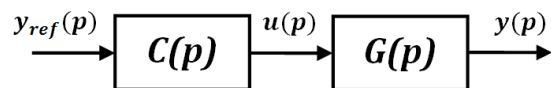


Fig. IV.1 : Schéma d'un système de commande fonctionnant en boucle ouverte

Ce régulateur est utilisé afin d'imposer au système des performances que l'on souhaite obtenir, qui sont généralement : la stabilité, la rapidité et la précision. Néanmoins ce système de commande présente un inconvénient majeur lorsque le système est soumis à des perturbations. C'est la raison pour laquelle on a recourt à la commande en boucle fermée. La figure (IV.2) illustre le schéma d'un système de commande fonctionnant en boucle fermée.

En effet, dans ce cas le régulateur ne calcule plus la grandeur de commande $u(p)$ en fonction de la référence $y_{ref}(p)$, comme dans le schéma de commande en boucle ouverte, mais en fonction de l'écart entre $y_{ref}(p)$ et $y(p)$. Il suffit alors de synthétiser le contrôleur de sorte que cet écart soit nul pour que l'effet de la perturbation sur la sortie soit nul.

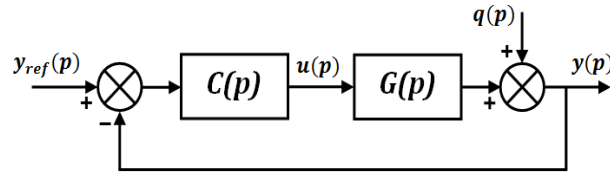


Fig. IV.2 : Schéma d'un système fonctionnant en boucle fermée

Remarque

- Un système est stable, si seulement si, les racines de son dénominateur sont à parties réelles négatives.
- Un système est causal, si seulement si, le degré du numérateur de sa fonction de transfert est inférieur ou égal au degré de son dénominateur.

Il existe plusieurs méthodes de synthèse des régulateurs. Nous présentons dans ce qui suit une méthode simple basée sur la connaissance d'un modèle du système à commander, communément connue, méthode de synthèse directe. Elle peut être appliquée aussi bien lorsqu'on utilise une commande en boucle ouverte ou bien une commande en boucle fermée.

IV.3. Méthode de synthèse directe

En général, le principe est de déterminer un modèle de référence noté $H(p)$ qui vérifie les performances de stabilité, rapidité et précision à imposer au système muni de son régulateur en boucle ouverte ou en boucle fermée. Ce modèle est généralement du premier ou du second ordre. Ensuite, il faut calculer la fonction de transfert réelle du système muni de son régulateur et qui dépend des fonctions de transfert du système $G(p)$ et du régulateur $C(p)$. Il suffit ensuite d'égaliser cette dernière au modèle de référence $H(p)$.

Lorsqu'on utilise le schéma de commande en boucle ouverte, la relation entre la grandeur de référence $y_{réf}(p)$ et la sortie $y(p)$ est donnée par :

$$\frac{y(p)}{y_{réf}(p)} = C(p).G(p) \quad (\text{IV.1})$$

Pour que cette relation vérifie les conditions imposées par $H(p)$, on doit résoudre l'équation $C(p).G(p) = H(p)$ d'où l'expression du régulateur :

$$C(p) = \frac{1}{G(p)}H(p) \quad (\text{IV.2})$$

Lorsqu'on utilise le schéma de commande fonctionnant en boucle fermée, la fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$G_{BF}(p) = \frac{y(p)}{y_{réf}(p)} = \frac{C(p) G(p)}{1 + C(p) G(p)} \quad (IV.3)$$

Lorsqu'on impose que cette fonction de transfert soit égale à la fonction de transfert de référence $H(p)$, on doit résoudre l'équation :

$$\frac{C(p) G(p)}{1 + C(p) G(p)} = H(p) \quad (IV.4)$$

Dans ce cas l'expression du régulateur est donnée par :

$$C(p) = \frac{1}{G(p)} \frac{H(p)}{1 - H(p)} \quad (IV.5)$$

Pour que les régulateurs calculés par les expressions (IV.2) et (IV.5) soient valables, deux conditions doivent être vérifiées par la fonction de transfert $C(p)$ du régulateur ainsi calculée, la stabilité et la causalité.

IV.3.1. Conditions de stabilité du contrôleur

Pour montrer quelles sont les conditions de stabilité du contrôleur $C(p)$ et proposer une solution pour sa synthèse lorsque ces conditions ne sont pas vérifiées, supposons que :

$$C(p) = \frac{N_c(p)}{D_c(p)} \quad (IV.6)$$

$$G(p) = \frac{N_\Sigma(p)}{D_\Sigma(p)} \quad (IV.7)$$

$$H(p) = \frac{N_H(p)}{D_H(p)} \quad (IV.8)$$

avec

$N_c(p)$: Numérateur de la fonction de transfert du contrôleur

$D_c(p)$: Dénominateur de la fonction de transfert du contrôleur

$N_\Sigma(p)$: Numérateur de la fonction de transfert du système

$D_\Sigma(p)$: Dénominateur de la fonction de transfert du système

$N_H(p)$: Numérateur de la fonction de transfert du modèle de référence

$D_H(p)$: Dénominateur de la fonction de transfert du modèle de référence

En remplaçant les expressions (IV.6), (IV.7) et (IV.8) dans l'expression (IV.2), on aura :

$$C(p) = \frac{D_{\Sigma}(p)}{N_{\Sigma}(p)} \cdot \frac{N_H(p)}{D_H(p)} = \frac{N_c(p)}{D_c(p)} \quad (\text{IV.9})$$

D'après l'équation (IV.9), $C(p)$ sera stable si seulement si les racines de son dénominateur $D_c(p)$ sont à partie réelle négative. Et puisque $D_c(p) = N_{\Sigma}(p) \cdot D_H(p)$, et comme $D_H(p)$ a des racines à parties réelles négatives, vu qu'il est choisi stable, $C(p)$ est stable si seulement si $N_{\Sigma}(p)$ a des racines à partie réelle négative.

Par conséquent, lorsque la fonction de transfert du système à commander présente des zéros instables (racines de son numérateur) si on utilise la relation (IV.9) pour calculer le régulateur, il ne vérifiera pas la condition de stabilité.

Pour éviter ce problème, on décompose le numérateur de $G(p)$ en deux membres : la partie stable, notée $N_s(p)$, et la partie instable, notée $N_I(p)$, (contient le retard et les zéros instables).

$$G(p) = \frac{N_{\Sigma}(p)}{D_{\Sigma}(p)} = \frac{N_s(p) \cdot N_I(p)}{D_{\Sigma}(p)} \quad (\text{IV.10})$$

Pour garantir la précision en régime permanent, il faut que $N_I(0) = 1$, ainsi le gain statique de $G(p)$ est $G(0) = \frac{N_s(0)}{D_{\Sigma}(0)}$.

Pour calculer $C(p)$, on pose alors :

$$G(p) \approx \frac{N_s(p)}{D_{\Sigma}(p)}$$

Et en remplaçant cette approximation dans l'expression (IV.1), on obtient :

$$C(p) = \frac{D_{\Sigma}(p)}{N_s(p)} H(p) \quad (\text{IV.11})$$

Le correcteur ainsi calculé est maintenant stable et précis, mais il se peut que le régime transitoire ne corresponde pas à celui imposé dans $H(p)$. En effet, si on remplace les expressions (IV.10) et (IV.11) dans (IV.1), on obtient :

$$\frac{y(p)}{y_{réf}(p)} = \frac{N_s(p) \cdot N_I(p)}{D_{\Sigma}(p)} \cdot \frac{D_{\Sigma}(p)}{N_s(p)} H(p) = N_I(p) \cdot H(p) \quad (\text{IV.12})$$

Cette relation montre que le rapport entre $y_{réf}(p)$ et $y(p)$ n'est plus égal au transfert $H(p)$ imposé. La partie $N_I(p)$ non utilisée dans le calcul de $C(p)$ agit sur le transfert finalement obtenu. Néanmoins, celui-ci n'a aucun effet ni sur la stabilité ni sur l'erreur statique, par contre il peut agir sur le régime transitoire.

Lorsqu'on utilise le système de commande en boucle fermée, on utilise la relation (IV.3) pour calculer le contrôleur $C(p)$. On constate que dans ce cas aussi, l'inverse de $G(p)$ intervient également. Par conséquent, le même raisonnement permet de trouver la même condition de stabilité du contrôleur et donc la même solution peut être utilisée pour éviter ce problème.

IV.3.2. Conditions de causalité du contrôleur

D'après les expressions (IV.5) et (IV.10), et sachant que $N_I(p)$ contient le retard et les zéros instables, on obtient :

$$C(p) = \frac{D_\Sigma(p)}{N_S(p) \cdot N_I(p)} \cdot H(p) \quad (IV.13)$$

et afin d'assurer la causalité du contrôleur $C(p)$, on ignore $N_I(p)$ dans le calcul et on multiplie l'expression (IV.13) par le terme $\frac{1}{(1+Tp)^r}$ en respectant les conditions suivantes :

- $N_I(0) = 1$, ainsi le gain statique de $G(p)$ soit $G(0) = \frac{N_S(0)}{D_\Sigma(0)}$
- T doit être très petite devant la constante de temps équivalente caractérisant le régime transitoire de $H(p)$
- " r " sera choisi de telle sorte que : $(\deg(N_\Sigma(p)) \leq \deg(D_\Sigma(p)))$

On obtient alors l'expression (IV.14) :

$$G(p) = \frac{D_\Sigma(p)}{N_S(p)} \cdot H(p) \cdot \frac{1}{(1+Tp)^r} \quad (IV.14)$$

Sachant que :

$$H(p) \cdot \frac{1}{(1+Tp)^r} \approx H(p)$$

Remarque

La même procédure et conditions seront appliquées dans le cas de la boucle fermée pour le calcul du contrôleur $C(p)$.

IV.4. Synthèse du régulateur $C(p)$ en se basant sur le principe de la commande par modèle interne

La notion de commande par modèle interne (*IMC en anglais*) est apparue de manière structurée, sous cette forme, depuis les travaux de RICHALET et MORARI. Mais l'idée est plus ancienne puisqu'on la trouve dans les travaux de PROPOI en 1963, notamment pour la commande prédictive [19].

IV.4.1. Principe de base

Le schéma de commande par modèle interne est celui de la figure (IV.3). Dans ce schéma, le système à commander de fonction de transfert réelle $G(p)$, génère la grandeur à contrôler $y(p)$ en réponse à la grandeur de commande $u(p)$ calculée par le contrôleur de transfert $C_{IMC}(p)$. Cette commande est également injectée au modèle du système, dont la fonction de transfert est $G_m(p)$, afin de générer la grandeur $y_m(p)$. Par modélisation ou identification, on obtient la fonction de transfert $G_m(p)$ du modèle qui correspond à une image approchée de la fonction de transfert $G(p)$ du système [40].

Les caractéristiques des deux fonctions de transfert $G(p)$ et $G_m(p)$ ne sont pas égales, plutôt proches, car le modèle idéal du système à commander est complexe pour être utilisé dans la synthèse du contrôleur.

Les grandeurs $y(p)$ et $y_m(p)$ sont à leurs tours comparées pour donner une grandeur $w(p)$ qui sera comparée ensuite à la grandeur de référence $y_{réf}(p)$. La différence entre ces deux grandeurs est utilisée par le contrôleur $C_{IMC}(p)$ afin d'obtenir la grandeur de commande qui sera injectée au système à commander et à son modèle, figure (IV.3).

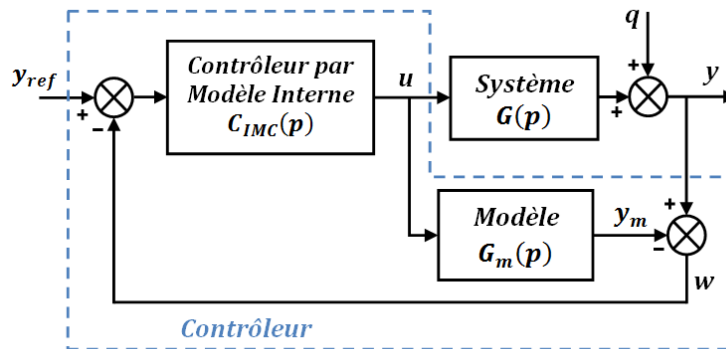


Fig. IV.3 : Structure de la commande par modèle interne

Avantage

- Lorsque il y'a absence de perturbation $q(p) = 0$ et que la sortie du modèle $G_m(p)$ est identique à la sortie du système. Dans ce cas, $w(p) = 0$, le contrôleur fonctionne en boucle ouverte.
- Lorsque $w(p) \neq 0$, c'est-à-dire que $y(p) \neq y_m(p)$, à cause d'un changement de la grandeur de référence $y_{réf}(p)$, ou bien encore de la présence d'une perturbation externe $q(p)$ qui affecte la sortie du système $y(p)$, ou bien encore à cause des erreurs de modélisation ($G_m(p) \neq G(p)$), le contrôleur $C_{IMC}(p)$ fonctionne en boucle fermée lui permettant ainsi de réajuster la valeur de la grandeur de commande $u(p)$ afin de ramener la grandeur $y(p)$ égale à grandeur de référence $y_{réf}(p)$.

La structure de commande par modèle interne permet d'associer la simplicité de la commande en boucle ouverte pour calculer la fonction de transfert du contrôleur et l'efficacité de la boucle fermée pour la régulation de la grandeur de sortie, ainsi l'intérêt de l'approche IMC est de montrer comment on peut réaliser un compromis performances-robustesse en fonction de l'incertitude des paramètres du modèle.

IV.4.2. Calcul du contrôleur $C(p)$ sur la base du contrôleur $C_{IMC}(p)$

L'objectif est de calculer la fonction de transfert $C(p)$ du contrôleur utilisant la structure standard à l'aide des équations régissant la structure de commande par modèle interne en fonction du contrôleur par modèle interne $C_{IMC}(p)$ et du modèle $G_m(p)$. On décompose la fonction de transfert $G_m(p)$ du modèle selon la relation

$$G_m(p) = G_m^s(p) \cdot G_m^l(p) \quad (IV.15)$$

Où la fonction de transfert $G_m^l(p)$ contient tous les zéros instables et éventuellement l'élément de retard ($e^{-\tau p}$) de $G_m(p)$. $G_m^l(p)$ doit néanmoins avoir un gain statique égal à 1. $G_m^s(p)$ est la partie contenant les zéros stables et le dénominateur de $G_m(p)$. C'est cette fonction de transfert qui est utilisée pour la synthèse du contrôleur.

- **Calcul du contrôleur $C_{IMC}(p)$**

Pour calculer $C_{IMC}(p)$, on suppose que :

$$\begin{cases} q(p) = 0 \\ G(p) \approx G_m(p) \end{cases} \quad (IV.16)$$

Et la condition $G_m(0) = G(0)$ doit être vérifiée et que $G_m(p)$ soit stable.

En utilisant les relations de la structure de commande en boucle ouverte, on obtient :

$$C_{IMC}(p) = \frac{1}{G_m^s(p)} \cdot H(p) \quad (IV.17)$$

D'après la structure classique en boucle fermée, figure (IV.2) :

$$\frac{y(p)}{y_{ref}(p)} = \frac{C(p) \cdot G(p)}{1 + C(p) \cdot G(p)} \quad (IV.18)$$

Et d'après la figure (IV.3), on a :

$$y(p) = G(p) \cdot u(p) \quad (IV.19)$$

$$y_{ref}(p) = G_m(p) \cdot u(p) \quad (IV.20)$$

$$w(p) = y(p) - y_m(p) \quad (IV.21)$$

On remplace les expressions (IV.19) et (IV.20) dans l'expression (IV.21), on obtient :

$$w(p) = u(p) \cdot [G(p) - G_m(p)] \quad (IV.22)$$

$$u(p) = C_{IMC}(p) \cdot [y_{ref}(p) - w(p)] \quad (IV.23)$$

On remplace ensuite l'expression (IV.22) dans (IV.23) :

$$u(p) = C_{IMC}(p) \cdot y_{ref}(p) - C_{IMC}(p) \cdot [G(p) - G_m(p)] \cdot u(p) \quad (IV.24)$$

Et comme

$$u(p) = \frac{1}{G(p)} \cdot y(p) \quad (IV.25)$$

L'expression (IV.24) devient donc :

$$(1 + C_{IMC}(p) \cdot [G(p) - G_m(p)]) \cdot \frac{1}{G(p)} \cdot y(p) = C_{IMC}(p) \cdot y_{ref}(p) \quad (IV.26)$$

Finalement :

$$\frac{y(p)}{y_{ref}(p)} = \frac{C_{IMC}(p) \cdot G(p)}{1 + C_{IMC}(p) \cdot [G(p) - G_m(p)]} \quad (IV.27)$$

En égalisant l'expression (IV.18) à (IV.27), on obtient :

$$\frac{C_{IMC}(p) \cdot G(p)}{1 + C_{IMC}(p) \cdot [G(p) - G_m(p)]} = \frac{C(p) \cdot G(p)}{1 + C(p) \cdot G(p)} \quad (IV.28)$$

Et en supposant que $G(p) = G_m(p)$, l'expression (IV.28) devient :

$$C_{IMC}(p) \cdot G_m(p) = \frac{C(p) \cdot G_m(p)}{1 + C(p) \cdot G_m(p)} \quad (IV.29)$$

Donc

$$C_{IMC}(p) = \frac{C(p)}{1 + C(p) \cdot G_m(p)} \quad (IV.30)$$

D'après l'expression (IV.30), on déduit :

$$C(p) = \frac{C_{IMC}(p)}{1 - C_{IMC}(p) \cdot G_m(p)} \quad (IV.31)$$

IV.5. Exemple d'application

Pour illustrer cette méthode de synthèse basée sur le principe de la commande par modèle interne, soit à contrôler un système dont la fonction de transfert est donnée

$$\text{par } G(p) = \frac{2}{(10p+1)^8}.$$

Il est clair, que cette expression ne peut pas être utilisée pour calculer l'expression $C(p)$ du contrôleur. Afin de simplifier le problème, on cherche alors un modèle $G_m(p)$ plus simple qui permet de représenter le système à commander. Pour ce faire, on injecte un échelon au système $G(p)$ afin de récupérer la forme de sa grandeur de sortie grâce à la quelle on va choisir le modèle $G_m(p)$. La figure (IV.4) montre cette réponse indicielle.

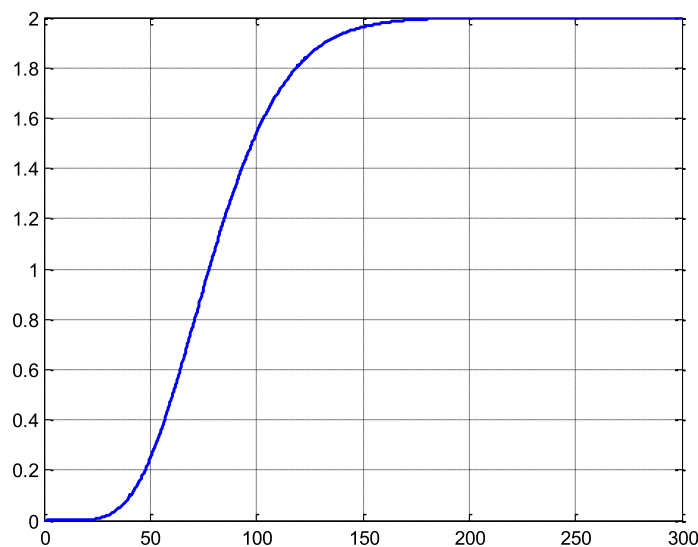


Fig. IV.4 : Tracé de la réponse du système $G(p)$

En faisant des lectures sur la figure(IV.4), et en utilisant un modèle du premier ordre à retard comme approximation, on obtient :

$$G_m(p) = \frac{2 \cdot e^{-15p}}{1 + 87p} \quad (IV.32)$$

IV.5.1. Synthèse du régulateur en considérant comme modèle de référence un modèle du premier ordre

On souhaite obtenir le modèle de référence $H(p)$ du premier ordre caractérisé par un gain statique unitaire pour annuler l'erreur statique et une constante de temps arbitrairement égale à 100 donné par :

$$H(p) = \frac{1}{1 + 100p} \quad (\text{IV.33})$$

Dans ce cas, le régulateur $C_{IMC}(p)$ est :

$$C_{IMC}(p) = \frac{1 + 87p}{2 + 200p} \quad (\text{IV.34})$$

D'après l'expression (IV.31), le régulateur de la structure classique s'exprime par :

$$C(p) = \frac{\frac{1+87p}{2+200p}}{1 - \frac{1+87p}{2+200p} \cdot \frac{2 \cdot e^{-15p}}{1+87p}} = \frac{1+87p}{2[1+100p - e^{-15p}]} \quad (\text{IV.35})$$

On constate que le retard du modèle intervient dans le dénominateur de $C(p)$. Plusieurs méthodes peuvent alors être utilisées pour éliminer le terme e^{-15p} , selon la valeur du retard par rapport à la constante de temps de la boucle fermée. Lorsqu'on néglige le retard (on suppose que $15 \ll 200$), on trouve :

$$C(p) = \frac{87p + 1}{200p} \quad (\text{IV.36})$$

qui peut être mis sous la forme d'un régulateur PI :

$$C(p) = K \left(1 + \frac{1}{\tau_i p} \right) \quad (\text{IV.37})$$

avec

$K = \frac{87}{200}$: Gain du régulateur

$\tau_i = 87$: Constante de temps d'intégration qui permet d'annuler l'erreur statique

Pour montrer l'efficacité du régulateur ainsi calculé nous avons effectué une simulation du système en boucle fermée associant le modèle $G(p)$ du système et le régulateur $C(p)$ ainsi calculé. La figure (IV.5) illustre les résultats obtenus où la courbe 1 (en bleu) représente la sortie du système à commander, la courbe 2 (en vert) représente la sortie du modèle de référence $H(p)$ que l'on souhaite obtenir. On constate qu'en régime permanent l'erreur statique est nulle, signifiant ainsi que cet objectif est atteint. La

figure montre également que le système en boucle fermée est stable malgré que le régulateur soit dimensionné sur la base du modèle approximé $G_m(p)$ et non sur la base du modèle exacte du système $G(p)$. Néanmoins, comme cela était prévisible la forme du régime transitoire de la sortie du système n'est pas exactement la même que celle du modèle $H(p)$ que l'on désirait obtenir parce que au lieu d'utiliser le régulateur de l'équation (IV.35) nous avons utilisé le régulateur simplifié de l'équation (IV.36) où l'élément de retard est ignoré.

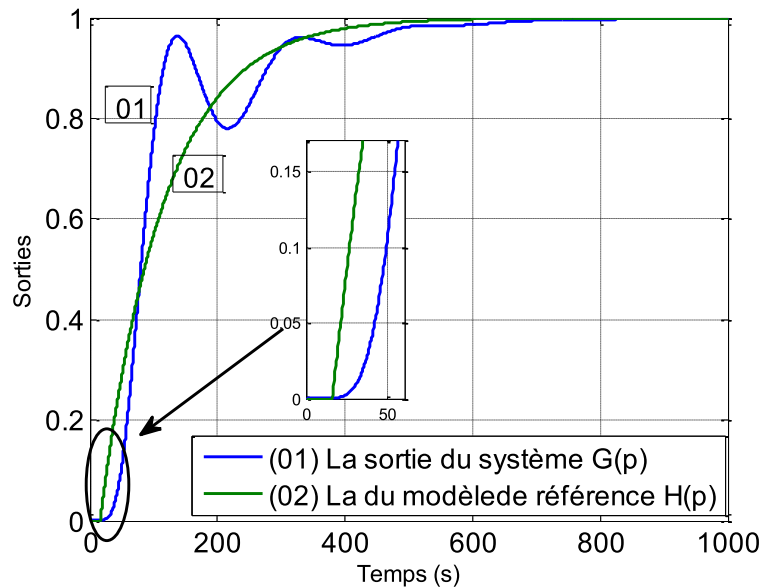


Fig. IV.5 : Tracés des réponses des sorties du système et du modèle de référence

IV.5.2. Synthèse du régulateur en considérant comme modèle de référence un modèle de référence du second ordre

Dans ce cas, on souhaite obtenir le modèle de référence $H(p)$ du second ordre donné par :

$$H(p) = \frac{1}{(1 + 150p)(1 + 10p)} \quad (\text{IV.38})$$

Le contrôleur de la structure *IMC* est donné par :

$$C_{IMC}(p) = \frac{1 + 87p}{2} \cdot \frac{1}{(1 + 150p)(1 + 10p)} \quad (\text{IV.39})$$

$$C_{IMC}(p) = \frac{1 + 87p}{2 + 320p + 3000p^2} \quad (\text{IV.40})$$

D'après l'expression (IV.31), le régulateur de la structure classique s'exprime sous la forme :

$$C(p) = \frac{\frac{1+87p}{2} \cdot \frac{1}{(1+150p)(1+10p)}}{1 - \frac{1+87p}{2} \cdot \frac{1}{(1+150p)(1+10p)} \cdot \frac{2}{1+87p} e^{-15p}} = \frac{1+87p}{2[(1+150p)(1+10p) - e^{-15p}]} \quad (\text{IV.41})$$

Dans ce cas aussi, si on néglige le retard on trouve :

$$C(p) = \frac{1+87p}{320p + 3000p^2} \quad (\text{IV.42})$$

qui peut être mis sous la forme d'un régulateur *PI* en cascade avec un filtre du premier ordre:

$$C(p) = K \left(1 + \frac{1}{\tau_i p} \right) \frac{1}{(\tau p + 1)} \quad (\text{IV.43})$$

avec

$$K = \frac{68}{320} : \text{Gain du régulateur}$$

$$\tau_i = 68 : \text{Constante de temps d'intégration qui permet d'annuler l'erreur statique}$$

$$\tau = \frac{150}{16} : \text{Constante de temps du filtre}$$

Pour montrer l'efficacité du régulateur calculé dans ce cas, nous avons effectué une simulation du système en boucle fermée. La figure (IV.6) illustre les résultats obtenus où la courbe 1 (en bleu) représente la sortie du système à commander, la courbe 2 (en vert) représente la sortie du modèle de référence $H(p)$ que l'on souhaite obtenir. On constate qu'en régime permanent l'erreur statique est aussi nulle, signifiant ainsi que cet objectif est atteint. La figure montre aussi que le système en boucle fermée est stable malgré que le régulateur soit dimensionné sur la base du modèle approximé $G_m(p)$ et non sur la base du modèle exacte du système $G(p)$. De plus, comme cela était prévisible la forme du régime transitoire de la sortie du système n'est pas exactement la même que celle du modèle de référence $H(p)$ que l'on désirait obtenir parce que au lieu d'utiliser le régulateur de l'équation (IV.41) nous avons utilisé le régulateur simplifié de l'équation (IV.42) où l'élément de retard est ignoré.

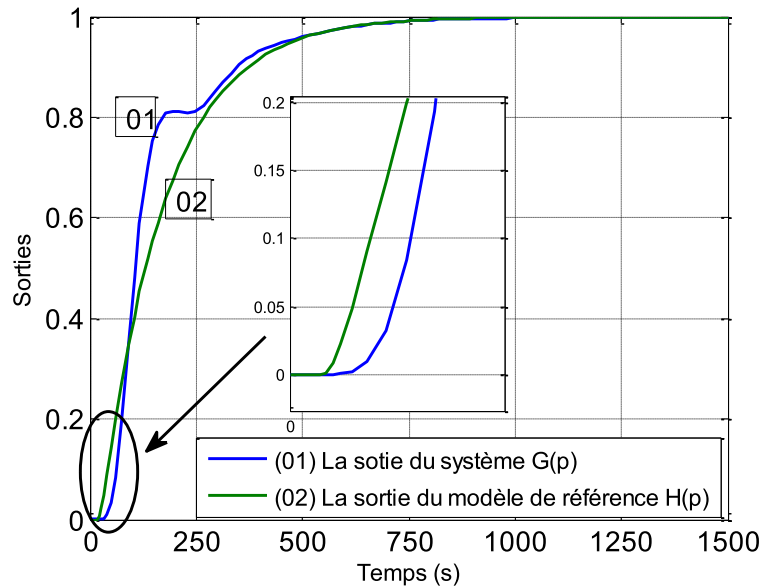


Fig. IV.6 : Tracés des réponses du système et du modèle de référence

En comparant la figure (IV.5) et (IV.6), on voit que le régulateur PI en cascade avec un filtre du premier ordre de l'équation (IV.43) lorsque le modèle de référence est du second ordre, donne un régime transitoire meilleur que le régulateur PI obtenu lorsque le modèle de référence est du premier ordre.

IV.6. Conclusion

La commande par modèle interne s'interprète de façon naturelle comme une généralisation de la commande en boucle ouverte classique. Elle permet de traiter des procédés stables ou stabilisés. Elle est caractérisée essentiellement par la construction d'une commande de modèle et une modification de la consigne en fonction de l'écart entre la sortie du procédé et de son modèle. Ce chapitre nous a permis d'expliquer et de montrer d'une manière générale sa structure et son principe de base. Nous avons également traité deux exemples d'applications de premier et de second ordre afin de maîtriser cette méthode de synthèse basée sur le principe de la commande par modèle interne.

Chapitre V

Simulation et résultats du système éolien

V.1. Introduction

Dans les chapitres précédents, la mise en équation de la MADA nécessaire à la commande en puissances active et réactive a été mise en œuvre. La synthèse des régulateurs basée sur le principe de la commande par modèle interne a également été développée. Dans ce présent chapitre, des simulations ont été réalisées pour montrer les performances de la commande de l'ensemble du système de production de l'énergie éolienne utilisant une turbine et une MADA, en termes de poursuite, de sensibilité aux perturbations (rejet) et robustesse vis à vis des variations paramétriques.

Une série d'essais est réalisée avec le simulateur de turbine seule, en suite le simulateur de la MADA seule et enfin la simulation du système éolien global.

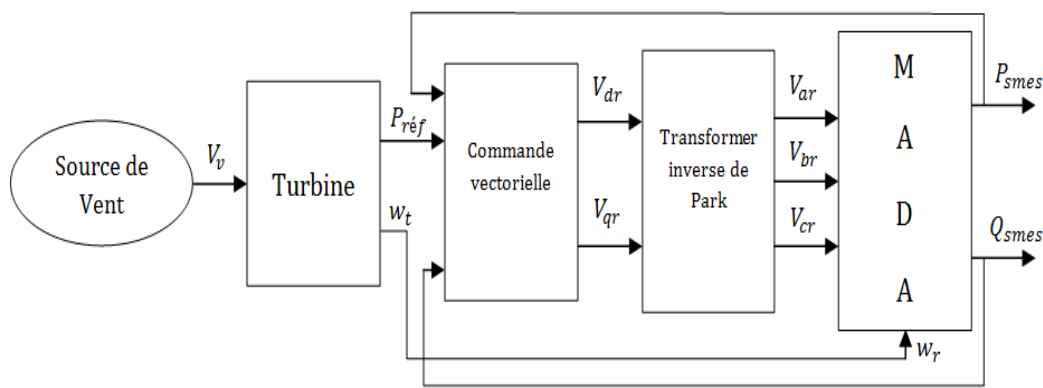


Fig. V.1 : Schéma synoptique du dispositif global

La figure (V.1) illustre le schéma global du système éolien, dont la vitesse de la source de vent V_v entraîne la turbine commandée pour extraire un maximum de puissance, qui sera une puissance de référence $P_{sréf}$ pour la commande vectorielle. Cette dernière donne la relation entre les puissances active et réactive et les tensions de commande V_{dr} , V_{qr} . En appliquant la transformée de Park inverse, on récupère ainsi les tensions rotoriques V_{ar} , V_{br} et V_{cr} dans le plan (a, b, c). Ces tensions seront à leurs tours injectées dans la MADA afin de commander les puissances active P_{smes} et réactive Q_{smes} du système. Les tests des performances de la chaîne éolienne seront faits en supposant que l'électronique de puissance mis en œuvre pour alimenter le rotor avec les grandeurs de commande est parfaite.

Pour réaliser la simulation du système, nous avons utilisé le logiciel MATLAB et à l'aide de sa bibliothèque Simulink, on a pu modéliser toutes les parties constituantes de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

V.2. Résultats de simulation de la turbine seule

La figure (V.2) représente le schéma synoptique de la turbine, où V_v est l'entrée du système, elle représente la vitesse du vent et $P_{sréf}$ et w_t sont respectivement la puissance générée par la turbine et la vitesse de rotation, elles représentent les sorties du système. Cette structure de commande a été simulée en considérant un profil de vent moyen autour de 10 m/s comme le montre la figure (V.4).

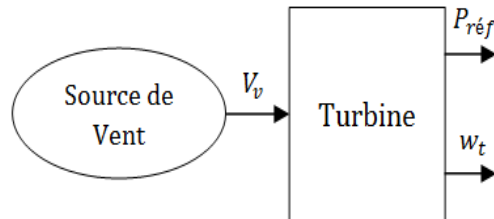


Fig. V.2 : Schéma synoptique de la turbine

Afin de capter le maximum de puissance de l'énergie éolienne incidente, il faut ajuster en permanence la vitesse de rotation de la turbine à celle du vent. La vitesse mécanique optimale de la turbine correspond à un angle de calage des pales qui doit être maintenu à sa valeur optimale, pour notre cas $\beta = 2^\circ$ (Angle de calage), et λ_{opt} qui est obtenu par la régulation de la vitesse. L'obtention des deux paramètres nous permet d'avoir un coefficient de puissance C_{pmax} maximal.

Un régulateur utilise la vitesse de la MADA comme grandeur de référence, pour déterminer la consigne de commande qui est le couple électromagnétique qui doit être appliqué à la machine, pour faire tourner la génératrice à sa valeur optimale, comme le montre la figure (I.30).

Le schéma de régulation de la vitesse de la turbine est illustré sur la figure (V.3) :

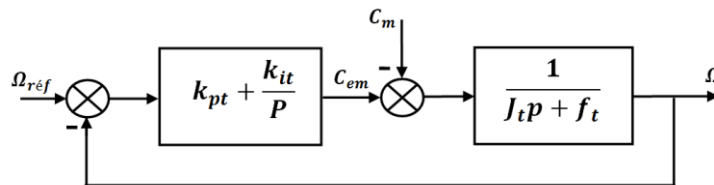


Fig. V.3 : Schéma de régulateur de la vitesse de la turbine

La fonction de transfert du système à réguler est donc du premier ordre caractérisé par un gain statique et une constante de temps respectivement égaux à $G_0 = \frac{1}{f_t}$ et $T = \frac{J_t}{f_t}$. Le régulateur utilisé est un régulateur *PI* ou k_{pt} est le gain proportionnel, k_{it} est le gain intégral.

$$C_{em_ref} = \left(k_{pt} + \frac{k_{it}}{P} \right) (\Omega_{ref} - \Omega)$$

Les valeurs numériques des paramètres du régulateur sont :

$$\begin{cases} k_{pt} = 931.7458 \\ k_{it} = 46822 \end{cases}$$

La turbine est soumise au vent dont le profil est donné par la figure (V.4). Les résultats de simulation de cette partie sont illustrés sur les figures (V.5) à (V.10):

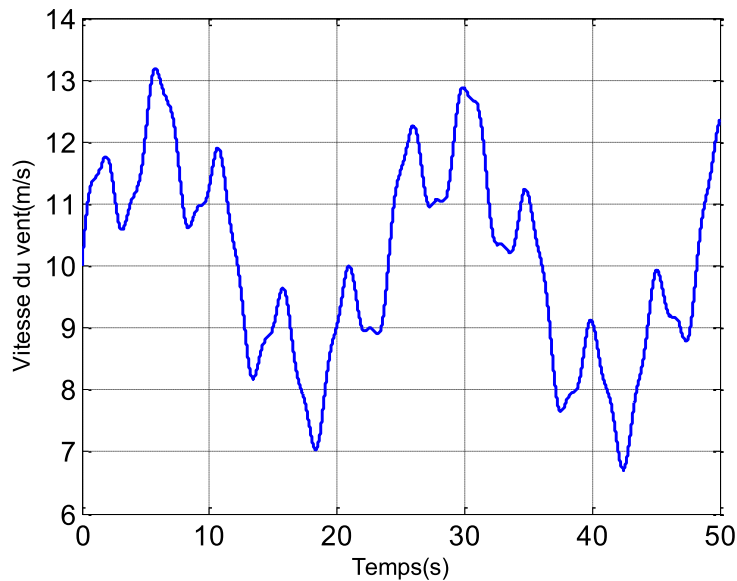


Fig. V.4 : Profil du vent

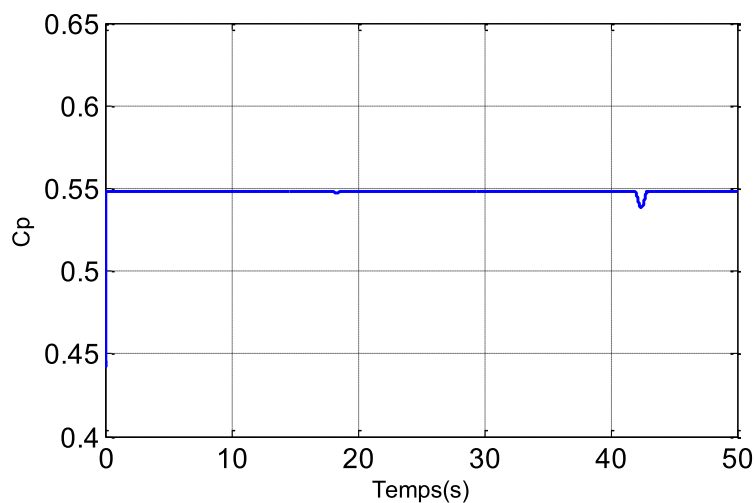


Fig. V.5 : Allure du Coefficient de puissance

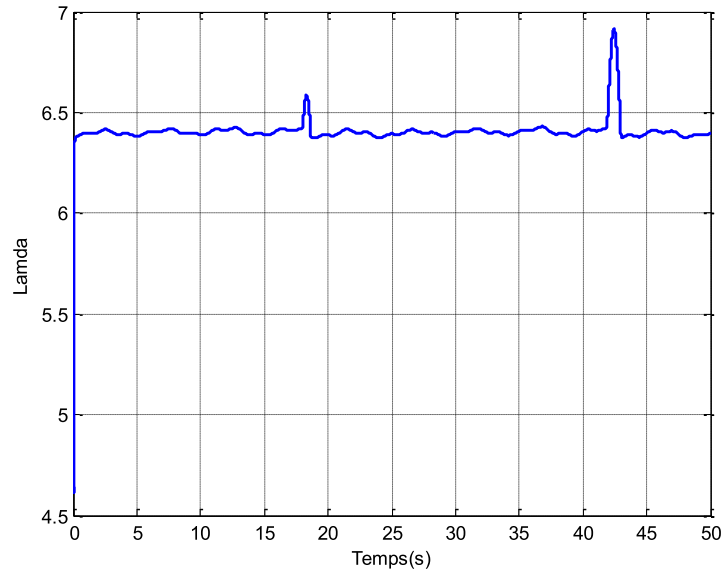


Fig. V.6 : Coefficient lamda

D'après les figures (V.5) et (V.6), il est clair que l'extraction du maximum de puissance du vent est réalisée, en imposant un rapport optimal de λ_{opt} .

Pour des valeurs de vitesse du vent faible (7m/s) obtenu pour les instants $t = 18s$ et $t = 43s$, comme le montre la figure (V.4), le coefficient de puissance ainsi que le coefficient lamda ne sont pas bien maintenus à leur valeur optimale, cela est dû à la vitesse du vent. On peut dire qu'il y a une limite pour ces deux coefficients.

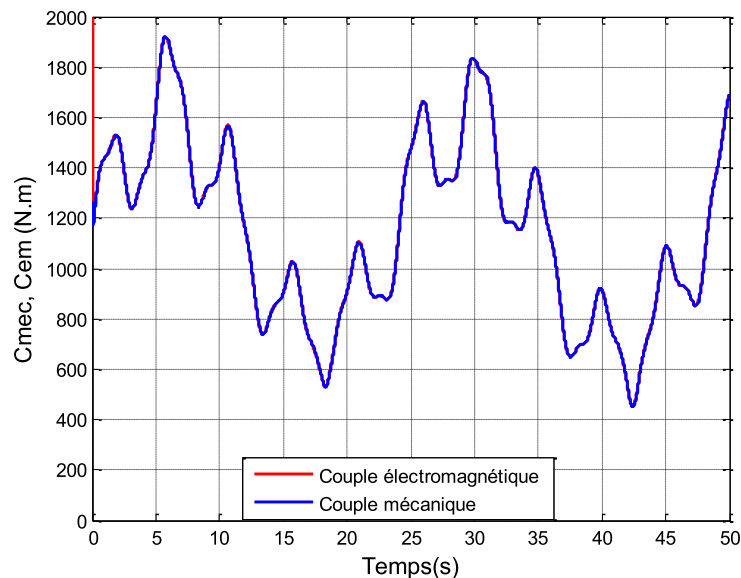


Fig. V.7: Couple électromagnétique, et Couple mécanique

La figure (V.7) montre que le couple électromagnétique est bien asservi à sa grandeur de référence, pour avoir une puissance de référence optimale.

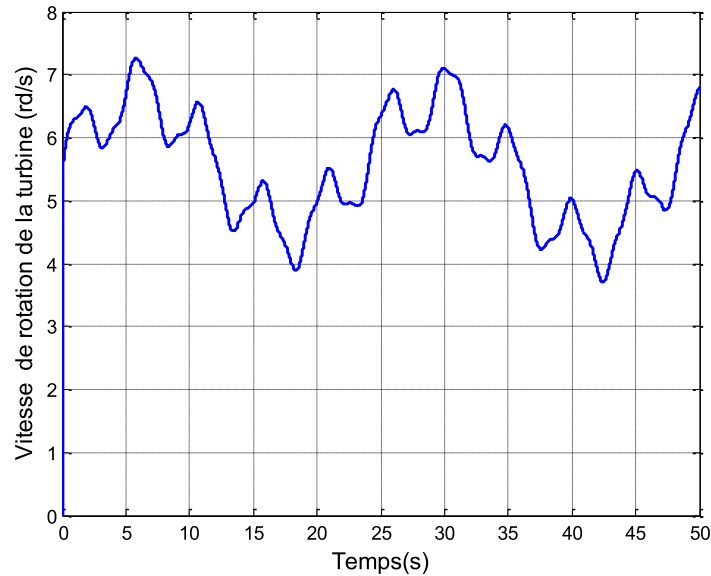


Fig. V.8 : Vitesse de rotation de l'arbre lent

La vitesse du vent dont le profil est donné par la figure (V.4), entraîne l'arbre de la turbine avec une vitesse moyenne de 6 rd/s comme le montre la figure (V.8). Cette vitesse est trop faible pour la génération de l'énergie électrique. C'est pour cette raison qu'on utilise un multiplicateur qui augmente le nombre de rotation par unité du temps. Par conséquent, la vitesse transmise à la MADA (arbre rapide) devient importante, comme le montre la figure (V.9).

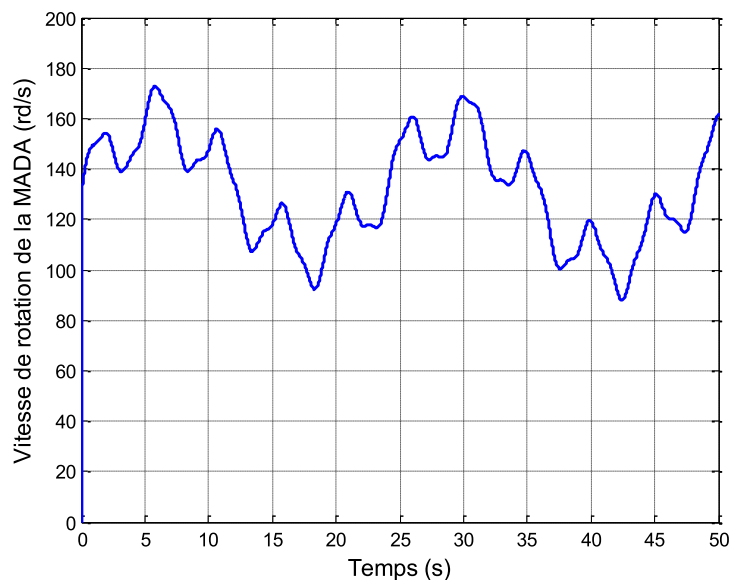


Fig. V.9 : Vitesse de rotation de l'arbre rapide

La puissance de référence montrée sur la figure (V.10) est finalement extraite de la turbine, après avoir fait toute une technicité pour optimiser le rendement énergétique du système. Par la suite cette puissance est considérée comme une référence pour la production d'énergie éolienne.

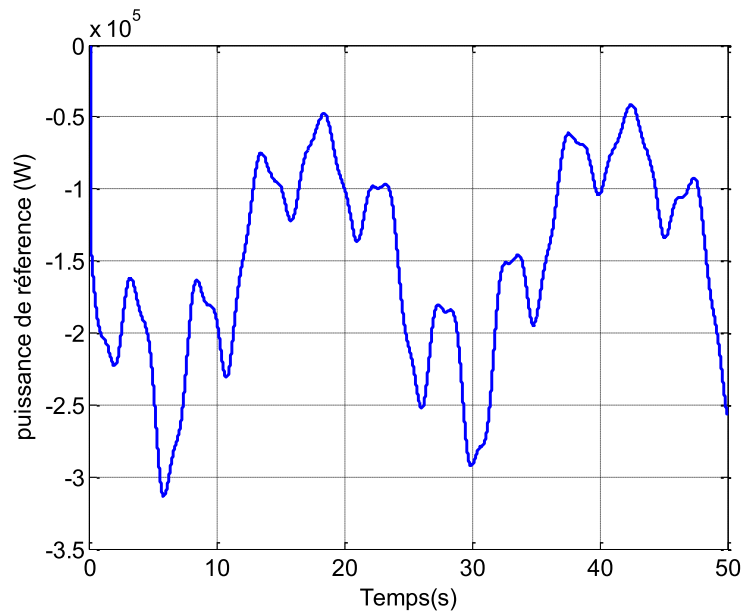


Fig. V.10 : Puissance de référence

V.3. Résultat de simulation de la MADA seule

La figure (V.11) montre le schéma synoptique de la commande de la machine asynchrone à double alimentation, dont V_{ar} , V_{br} et V_{cr} sont les grandeurs de commande et P_{smes} et Q_{smes} sont les grandeurs désirées.

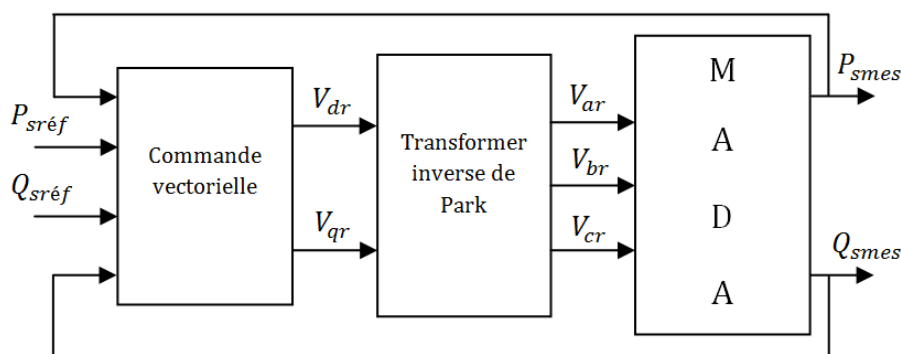


Fig. V.11 : Schéma synoptique de la commande de la MADA

Pour évaluer les performances apportées par la synthèse de commande par modèle interne, intégrée à la commande vectorielle et appliquée à la MADA, une étude par simulation numérique sous l'environnement MATLAB a été également réalisée. La figure (V.12) montre le détail du bloc de la commande.

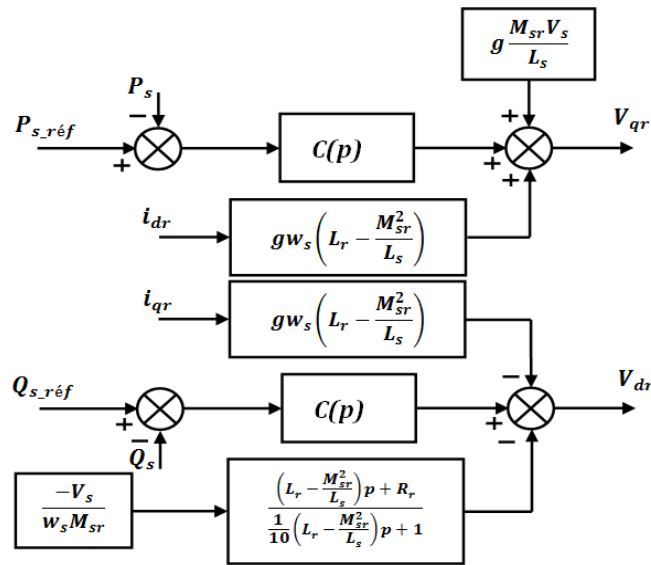


Fig. V.12 : Bloc détaillé de la commande vectorielle

Les valeurs numériques des paramètres des régulateurs de puissances active et réactive utilisés dans cette partie sont respectivement :

$$\begin{cases} K_i = -0.1832 \\ K_p = -0.0024 \end{cases} ; \begin{cases} K_i = -0.1832 \\ K_p = -0.0025 \end{cases}$$

V.3.1. Essais à vitesse fixe

Afin de tester la poursuite de la MADA, ce premier essai consiste à appliquer aux entrées de référence des échelons de puissance active et réactive d'amplitudes variables, alors que la machine est entraînée à vitesse fixe de 110 *rd/s*.

Premier test

Ce test consiste à appliquer des échelons de puissance active d'amplitude variable de -2500 W , -7000 W et -2000 W respectivement entre les intervalles de temps $t = [0, 3]$ $[3, 6]$ $[6, 10]$ en imposant que la puissance réactive est nulle.

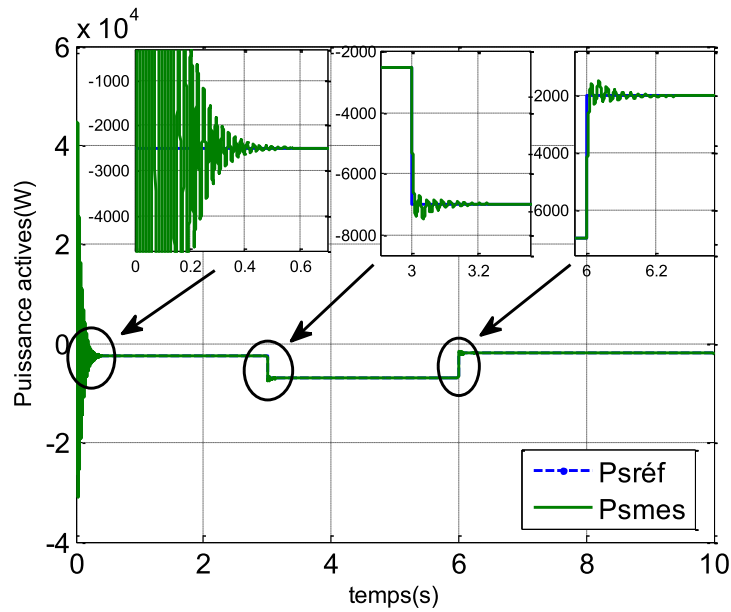


Fig. V.13 : Suivre de consigne de puissance active statorique

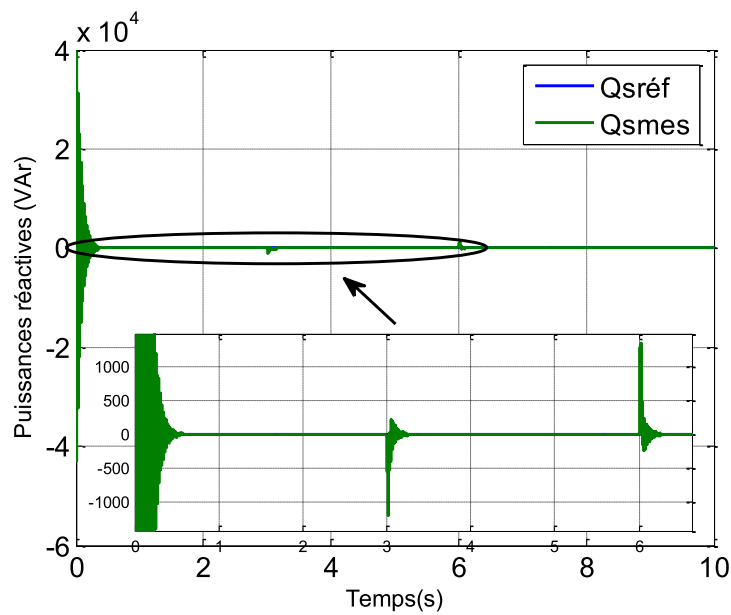


Fig. V.14: Suivre de consigne de puissance réactive statorique

Deuxième test

Pour ce deuxième test nous allons injecter des échelons de puissance active de $-2000W$ et $-7000W$ pour des intervalles de temps $t = [0,1] [1,3]$, à l’instant $t = 2s$ on injecte une quantité d’énergie réactive de $-4000Var$.

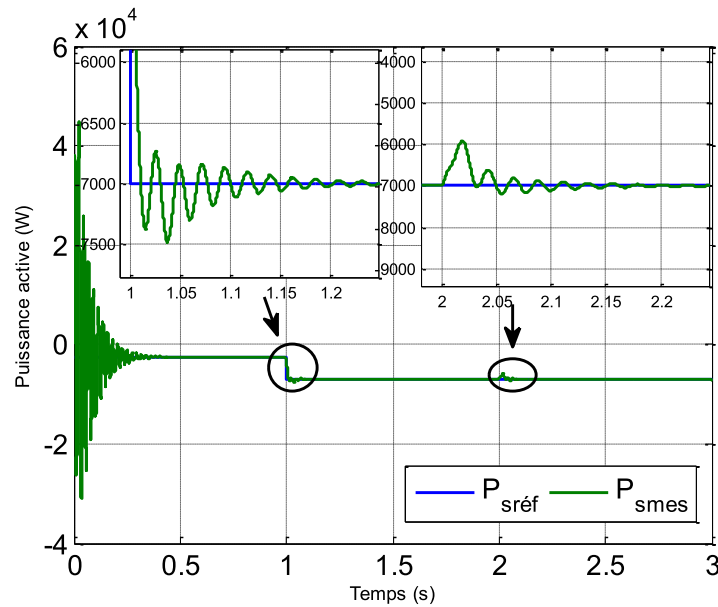


Fig. V.15: Suivre de consigne de puissance active statorique

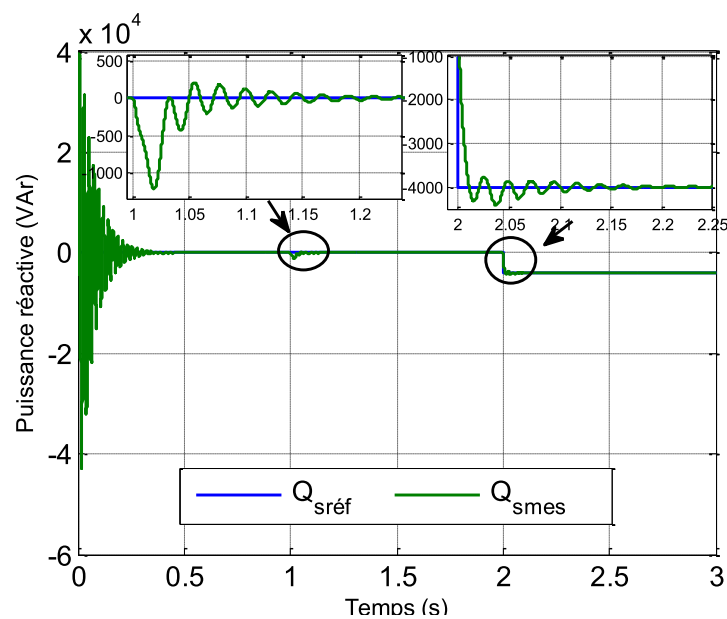


Fig. V.16: Suivre de consigne de puissance réactive statorique

Les résultats de ces deux essais montrent l'efficacité de la commande en puissance de la MADA pour la méthode étudiée. En effet, les échelons de puissance sont bien suivis par la génératrice aussi bien pour la puissance active que pour la puissance réactive. Cependant, on remarque des oscillations aux instants d'application des échelons de puissance dues au couplage entre les deux axes de la machine.

Suite à l'application d'un l'échelon de l'énergie réactive on remarque aussi des oscillations qui apparaissent sur l'énergie active et vis vers ça, cela est due au rapport qu'il y'a entre ces deux puissances.

V.3.2. Essai à vitesse variable

Dans le but de vérifier la capacité du système à rejeter des perturbations, on procède avec un essai qui consiste à appliquer aux entrées de référence des échelons de puissance active de -2500 W et -7000 W respectivement entre les intervalles de temps $t = [0,0.5]$ $[0.5, 2]$, en imposant que la puissance réactive est nulle, alors que la machine est entraînée à vitesse variable qui passe de 110 rd/s à 204 rd/s à l'instant $t = 1.5\text{ s}$, comme le montre la figure (V.17)

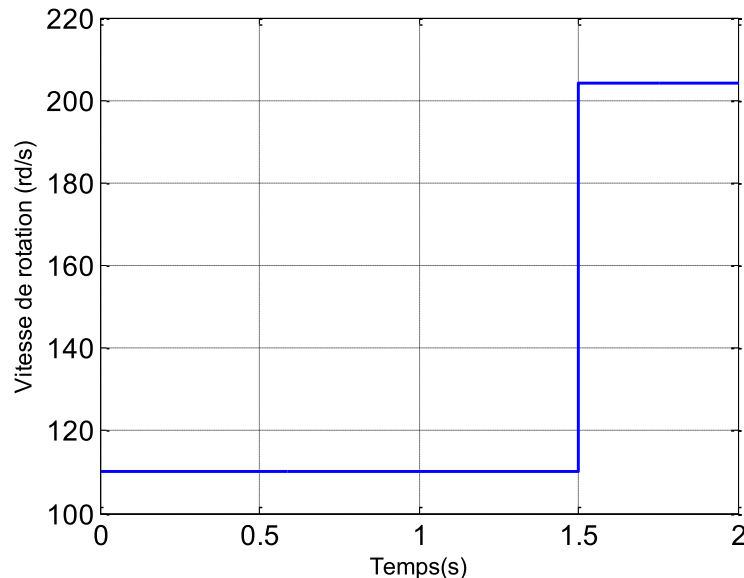


Fig. V. 17 : Variation de la vitesse rotorique

Les résultats de simulation sont montrés par les figures (V.18), (V.19) et (V.20).

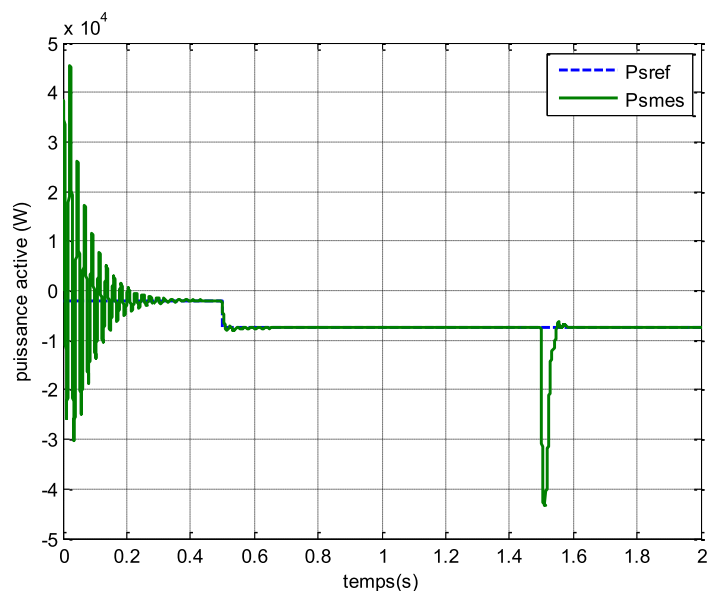


Fig. V.18: Evolution de la puissance active statorique

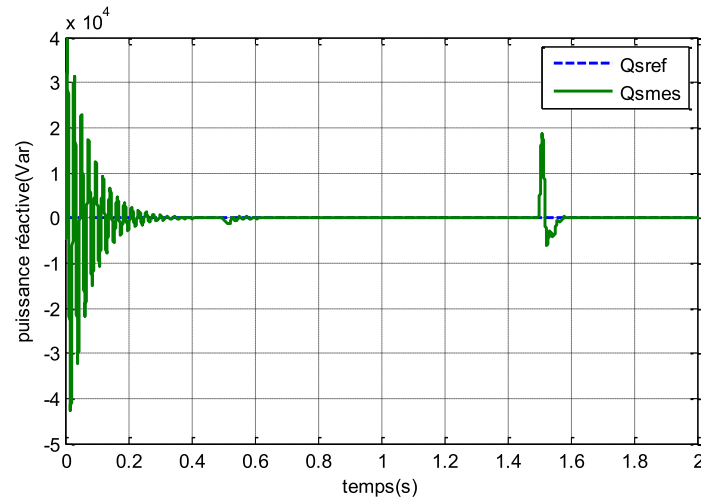


Fig. V.19: Evolution de la puissance réactive statorique

Les figures (V.18) et (V.19) montrent l'effet de la variation de la vitesse sur la puissance active et réactive de la machine, elle crée un écart important entre les puissances mesurées et celles de références, mais le temps de retour à l'état initial est rapide, ce qui permet de dire que le régulateur est performant vis à vis de cette perturbation.

Ces deux figures illustrent une propriété particulière de La MADA, qui est sa grande plage de variation de vitesse qui est estimée entre 110 rd/s et 204 rd/s ($1500 \pm 30\% \text{ tr/min}$), cela permet de passer du fonctionnement hyposynchrone au fonctionnement hypersynchrone où on récupère aussi une quantité d'énergie du rotor, comme le montre la figure (V.20)

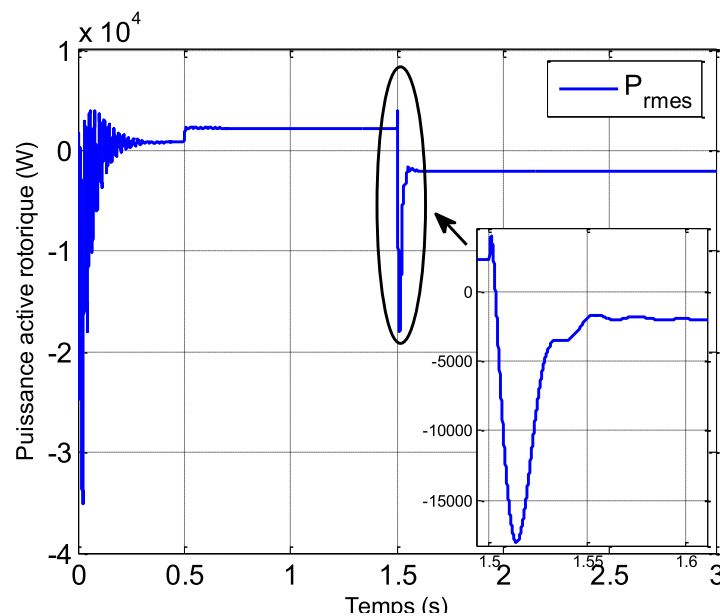


Fig. V.20 : Puissance active rotorique

V.3.3. Essai de robustesse

Plusieurs phénomènes physiques provoquent des variations des paramètres du modèle de la machine asynchrone. Une élévation de température fait augmenter les valeurs des résistances, ainsi que le phénomène de saturation fait baisser les valeurs des inductances. Il arrive aussi que les valeurs numériques des paramètres utilisés pour la synthèse des régulateurs ne correspondent pas aux valeurs réelles à cause de mauvaises mesures.

Afin de tester la robustesse de la commande vectorielle directe, on fait varier les paramètres du modèle de la MADA, et des régulateurs. Deux tests de robustesse seront effectués, le premier concerne une variation de la résistance rotorique, l'autre concerne une variation de l'inductance mutuelle.

V.3.3.1. Variation de la résistance rotorique

Dans ce test, on augmente la valeur de la résistance rotorique R_r de 20% ($1.2 \times R_r$), puis de 50% ($1.5 \times R_r$) de sa valeur réelle. Les figures (V.21) à (V.23) illustrent les résultats obtenus pour les différents modes de fonctionnement.

- On applique des échelons de puissance active, en imposant que la puissance réactive est nulle et on maintient la vitesse constante.

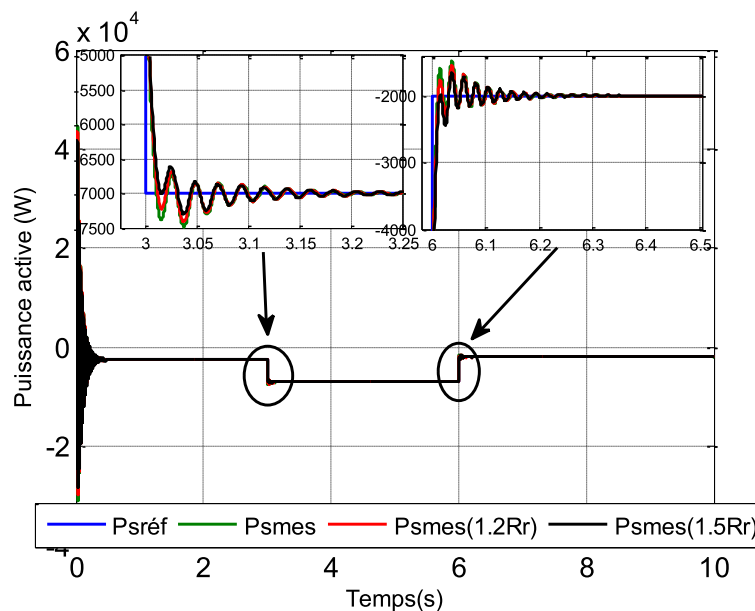


Fig. V.21: Effet de la variation de la résistance rotorique sur la puissance active

- On applique un échelon de puissance active et réactive et on maintient la vitesse constante.

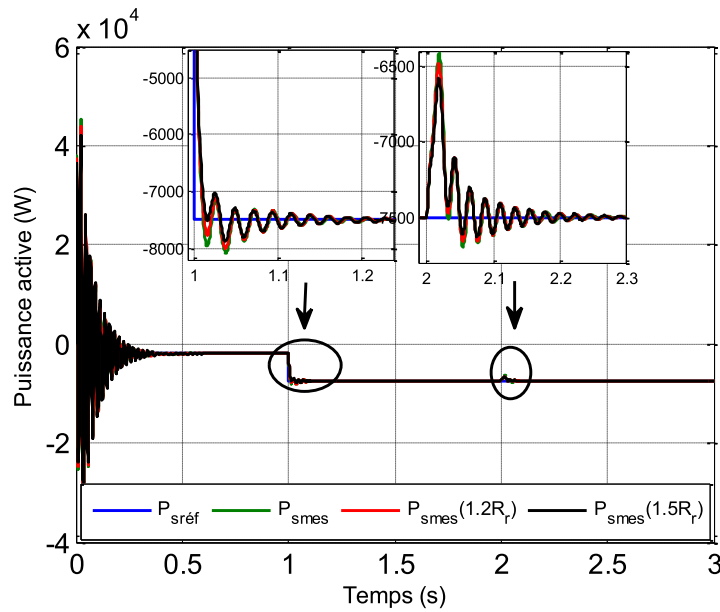


Fig. V.22 : Effet de la variation de la résistance rotorique sur la puissance active

- On applique un échelon de puissance active de référence et un échelon de vitesse qui passe de l'hypo synchrone à l'hyper synchrone, en imposant que la puissance réactive est nulle.

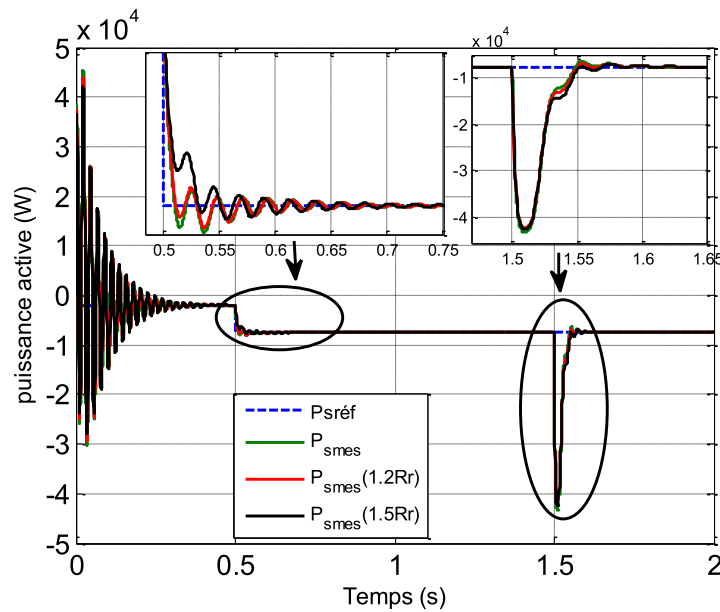


Fig. V.23 : Effet de la variation de la résistance rotorique sur la puissance active

Les résultats obtenus dans cette section, confirment les hautes performances du système de réglage adopté, ceci est traduit par les bonnes poursuites obtenues de la puissance active statorique à sa référence imposée, ainsi que par sa grande capacité à rejeter les perturbations lors de changement de vitesse ou lors de l'injection de l'énergie réactive.

En faisant augmenter la résistance rotorique, le contrôleur aura moins de dépassement, mais avec un temps de réponse faible (rapide).

On peut conclure que la variation de la résistance rotorique n'a pratiquement aucune influence sur le fonctionnement du système de conversion. Cela montre que la commande a été bien conçue.

V.3.3.2. Variation de l'inductance mutuelle

Pour une évaluation plus juste de la méthode de contrôle on fait appel à un autre test de robustesse. Celui-ci consiste à diminuer l'inductance mutuelle M_{sr} de 25% de sa valeur réelle par raison de saturation.

Les figures (V.24) à (V.26) illustrent les résultats obtenus pour les différents modes de fonctionnement (vitesse constante ou variable).

- On applique un échelon de puissance active, tout en imposant que la puissance réactive est nulle et en maintenant la vitesse constante.

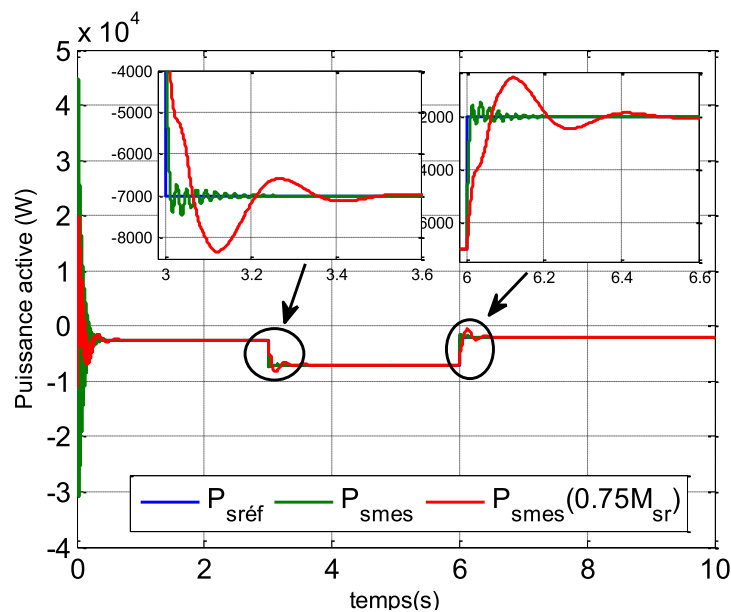


Fig. V.24 : Effet de la variation de l'inductance mutuelle entre stator et rotor sur la puissance active

- On applique un échelon de puissance active et réactive et on maintient la vitesse constante.

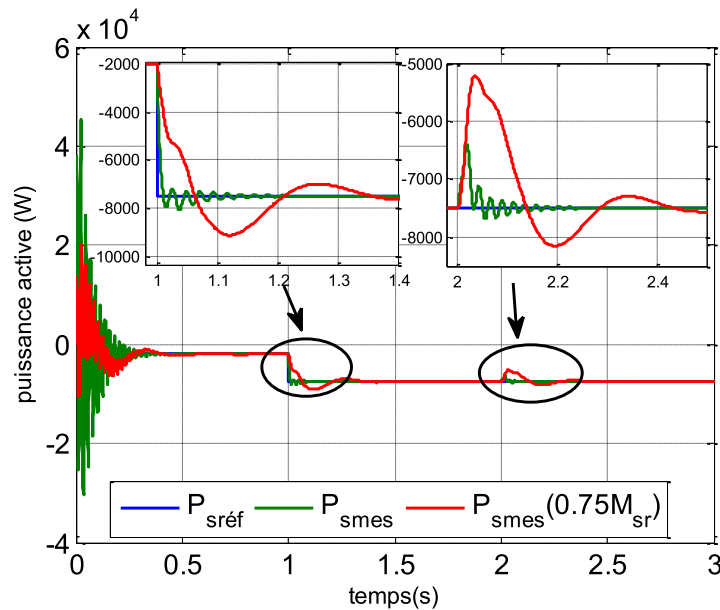


Fig. V.25 : Effet de la variation de l'inductance mutuelle entre stator et rotor sur les puissances

- On applique un échelon de puissance active de référence et un échelon de vitesse qui passe de l'hyposynchrone à l'hypersynchrone.

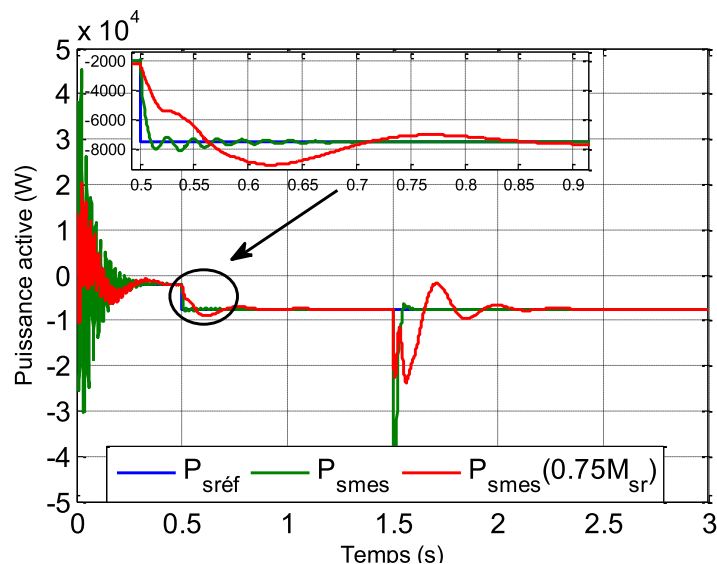


Fig. V.26 : Effet de la variation de l'inductance mutuelle entre stator et rotor sur la puissance active

D'après les résultats obtenus des figures (V.23) à (V.26), il est clair qu'une fois que les paramètres de la machine sont changés et qu'on soumet le système à des perturbations que se soit par l'injection de l'énergie réactive ou par la variation brusque de la vitesse,

le système demeure stable et l'erreur statique au régime permanent est maintenue égale à zéro. Par contre dans ce cas sa capacité à éliminer ces perturbations diminue et contiennent plus de dépassement. Néanmoins, cela ne peut pas remettre en cause les performances des régulateurs.

On conclue que la variation de l'inductance mutuelle entre le stator et le rotor n'a pas vraiment une influence sur le bon fonctionnement du système de conversion.

Les résultats obtenus par ces tests de robustesse attestent de la haute performance du régulateur *PI* utilisé pour contrôler le rendement énergétique de la MADA, même lorsque les paramètres de cette dernière changent.

V.4. Résultats de simulation du système global

Dans la section précédente, nous avons évalué et examiné les performances et la robustesse des différents systèmes de régulation de puissances active et réactive au niveau du rotor de la MADA.

Dans cette section nous allons finaliser notre simulation par un essai global, en combinant la turbine avec la MADA, après avoir bien conçue sa commande pour qu'elle puisse fonctionner dans la zone 2 de la figure (I.15) car c'est la zone d'extraction maximale de la puissance. Cette commande permet d'avoir une meilleure poursuite de la vitesse de rotation optimale, et donc d'obtenir un meilleur rendement aérodynamique qui est le rendement énergétique au niveau de la MADA.

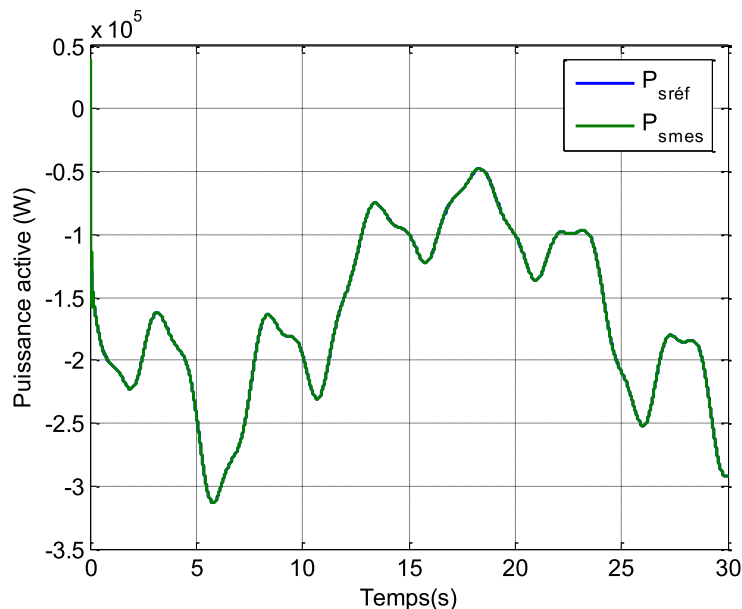


Fig. V.31 : Puissance active statorique

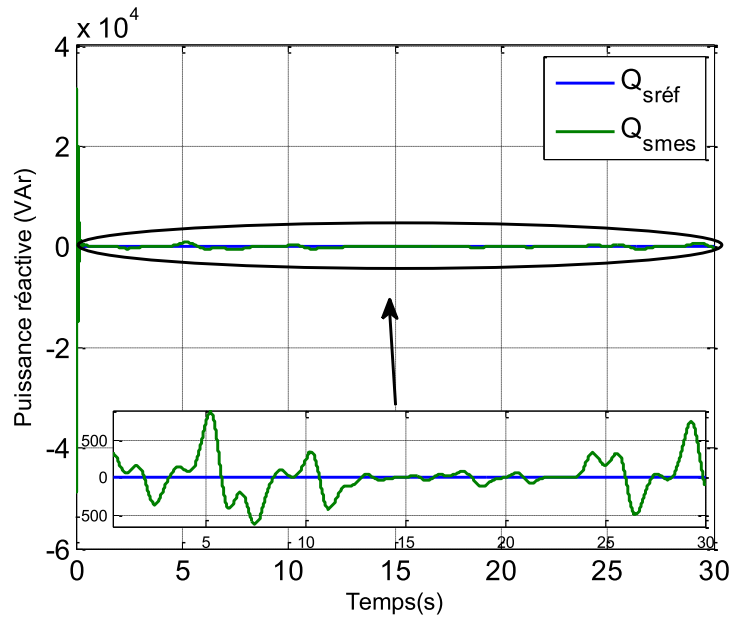


Fig. V.32 : Zoom sur la puissance réactive statorique

On remarque dans les figures (V.31) et (V.32) que les grandeurs de référence ont été bien suivies par la MADA pour les deux puissances statoriques active et réactive, la puissance active a la même allure que celle de référence, la puissance réactive est nulle avec quelques fluctuations tolérables qui sont dues à la variation de la puissance active, comme le montre la figure (V.31).

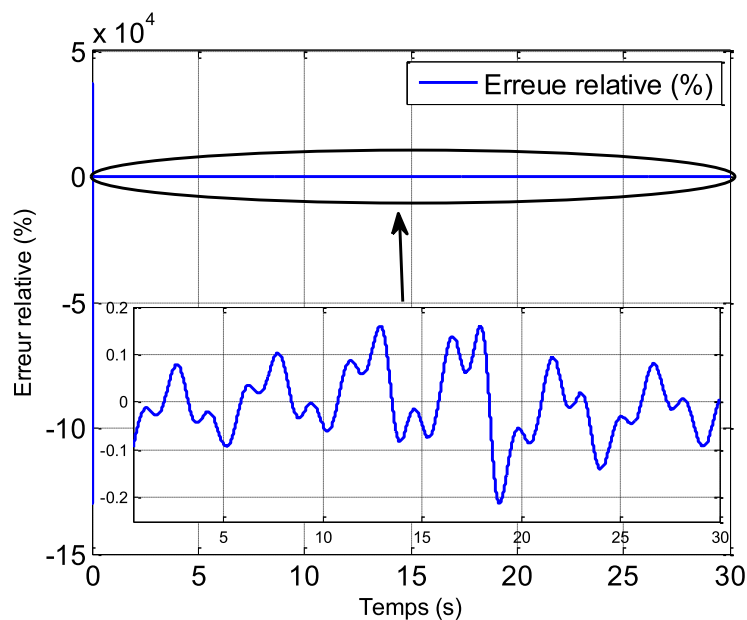


Fig. V.33: Erreur relative en puissance

Le régulateur utilisé dans la commande vectorielle de la MADA donne de bons résultats comme le montre la figure (V.33), puisque l'erreur relative en puissance est de l'ordre de 0,2%.

Les figures (V.27) et (V.28) montrent les tensions et les courants rotoriques de commande :

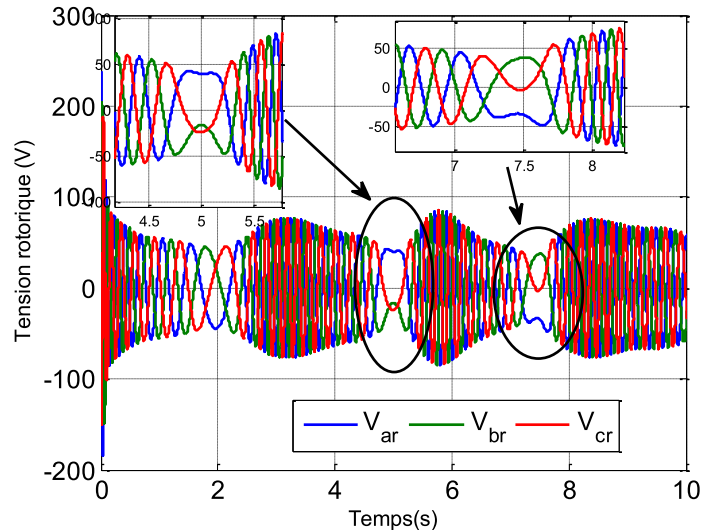


Fig. V.27 : Tensions rotoriques

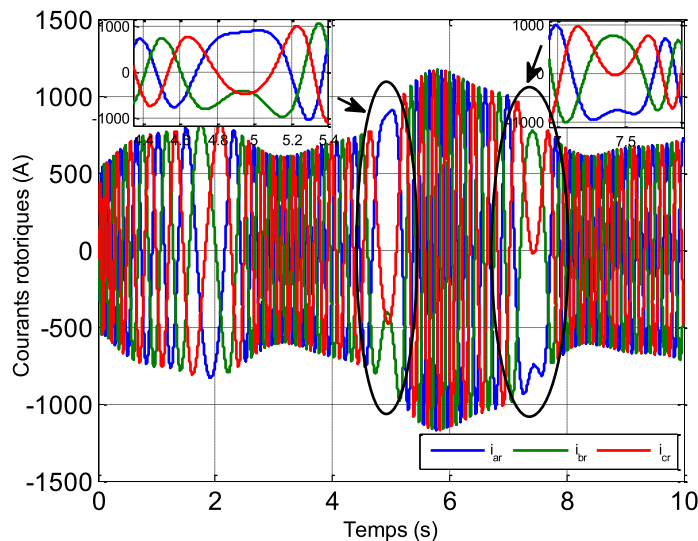


Fig. V.28 : Courants rotoriques

Les figures (V.27) et (V.28) montrent que les tensions et les courants rotoriques de la MADA ont une fréquence et une amplitude variable, on peut expliquer ce changement d'amplitude des tensions et des courants rotoriques par :

Lorsque la puissance statorique change, le régulateur doit agir sur des tensions de commande v_{dr} , v_{qr} afin de ramener la puissance active statorique P_{smes} à sa valeur de référence et comme v_{dr} , v_{qr} sont liées aux courants rotoriques, donc ils changent d'amplitude aussi.

Les figures (V.29) et (V.30) illustrent les courants et les tensions rotoriques et statoriques :

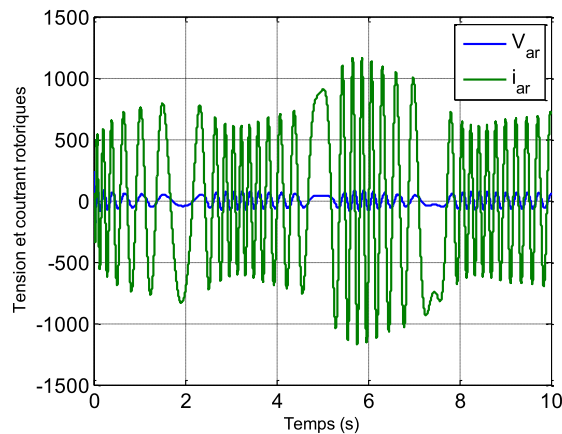


Fig. V. 29: Tension et courant rotoriques

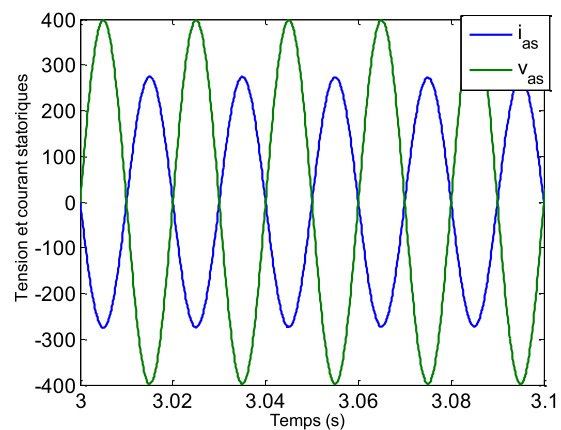


Fig. V.30 : Tension et courant statoriques

D'après la figure (V.30), on remarque que la tension statorique est en avance de 180° sur le courant statorique, ce qui montre aussi que nous avons un facteur de puissance unitaire, et que la puissance statorique active est négative (ce qui confirme que la MADA produit de l'énergie électrique fournie au réseau), comme le montre la figure (V.31).

La figure (V.29) montre qu'en fonctionnement hyposynchrone, le courant et la tension sont en phase mais dès qu'on passe vers le mode hypersynchrone un déphasage se crée entre ses grandeurs.

V.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation après avoir appliqué la commande vectorielle de la MADA au système global. D'après les résultats obtenus il est clair que cette méthode présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable. Elle a permis, non seulement, de simplifier le modèle mathématique, mais aussi elle assure un découplage entre le couple et le flux. Nous avons vu également que la composante directe de la tension rotorique contrôle la puissance réactive et la composante en quadrature contrôle la puissance active, chose qui permet d'avoir des performances dynamiques similaires à une machine à courant continu.

Dans le cadre de la réalisation du mémoire de master, nous avons choisi de travailler sur le thème de la production et conversion de l'énergie éolienne. Pour cela, nous avons pris pour objectif l'étude, la commande puis la simulation d'une chaîne de conversion éolienne constituée d'une turbine (0.18 MW) associée à une machine asynchrone à double alimentation dont on a commandé ses puissances statoriques active et réactive grâce à ses grandeurs rotoriques. Cet ensemble de conversion de l'énergie éolienne est complété par un dispositif d'électronique de puissance afin de transmettre l'énergie électrique produite vers le réseau ou la charge alimentée.

Le premier chapitre a traité des généralités sur les systèmes éoliens en rendant compte de l'état actuel de l'exploitation mondiale de ce créneau énergétique. Puis nous avons parlé des différents types d'éoliennes existant avec leurs différentes structures à savoir les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal. Nous avons également traité les lois fondamentales permettant la conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis en énergie électrique. Une comparaison a été effectuée entre les éoliennes à vitesse variable et les éoliennes à vitesse fixe nous a permis de choisir un système à vitesse variable et élaborer sa modélisation, puis une autre comparaison entre les différentes génératrices utilisées dans ce domaine nous permis de se fixer sur l'étude d'un système basé sur la machine asynchrone à double alimentation MADA.

Dans **le deuxième chapitre**, Nous avons présenté des généralités sur la machine asynchrone à double alimentation en donnant sa description et sa structure. On a aussi présenté ses différents régimes et modes de fonctionnement. Ensuite, on a expliqué la notion hypo et hyper synchrone. Pour terminer, on a cité quelques avantages et inconvénients de cette machine.

Le troisième chapitre a été consacré à la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en donnant les équations électriques, magnétiques et mécanique régissant la MADA. L'écriture de ces équations dans le repère de Park a été exploitée pour effectuer la commande vectorielle qui a permis d'assimiler la MADA à une machine à courant continu à excitation séparée afin de concevoir un modèle simplifié pour faciliter son étude et notamment sa simulation sous Matlab-Simulink. Cette génératrice été destinée pour la production d'énergie dans le domaine éolien, il est donc très utile de raisonner en terme de puissance. Pour cela, la commande vectorielle élaborée dans ce chapitre est en puissance active et réactive statoriques. Dans cette partie, on a présenté aussi l'étude théorique de la commande vectorielle, où on a exprimé les grandeurs statoriques de la MADA en fonction des grandeurs rotoriques ayant pour but le pilotage de la MADA par le rotor.

Dans ce sens, notre contribution est de proposer une méthodologie de commande robuste, dont le but est de palier aux inconvénients des commandes classiques. Le travail présenté dans **le quatrième chapitre** porte sur l'étude de la structure de commande par modèle interne (CMI) où nous avons présenté ces principales propriétés après avoir rappelé la structure classique de synthèse directe.

Enfin, **le cinquième chapitre** est consacré à la simulation du système sous le logiciel Matlab-Simulink à travers plusieurs essais afin de tester les performances des régulateurs qui sont la poursuite, le rejet des perturbations, l'hypo et l'hyper synchronisme et enfin la robustesse. Nous avons abordé le problème lié à la puissance électrique produite par la génératrice grâce à son entraînement par le vent, ensuite nous avons élaboré des stratégies de commande permettant d'atteindre plusieurs objectifs concernant la puissance active et réactive à savoir une commande de la puissance active constante, puis variable, et une commande de la puissance réactive nulle.

Sur le plan des perspectives, il serait souhaitable d'améliorer :

- ❖ L'étude des perturbations inhérentes au couplage du dispositif avec le réseau :
 - Réactions de la génératrice vis à vis des déséquilibres du réseau, des creux de tensions et des fluctuations.
 - Réactions du réseau vis à vis de l'intermittence et l'irrégularité de la production de l'énergie.
 - Interactions avec les autres génératrices du réseau.
- ❖ L'intégration de la MADA dans un parc éolien mixte avec ou sans stockage.
- ❖ L'implémentation expérimentale des différents algorithmes de commande de la MADA.

Les paramètres de la turbine [4]

Paramètres de la turbine	Valeurs
Puissance nominale	0.18 MW
Rayon de la turbine R	11.6 m
Rapport du multiplicateur de vitesse k	23.75
Coefficient d'inertie de la turbine J_t (ramené sur l'arbre rapide)	4.6822 N.m
Coefficient dû au frottement visqueux de la turbine f_t	0.012 N.m
Masse volumique de l'air ρ	1.225 Kg/m ³

Les paramètres de la MADA [39]

Paramètres de la MADA	Valeurs
Tension nominale	400 V 3~
Fréquence nominale	50 Hz
Nombre de paires de pôles	2
Résistance statorique R_s	0.6 Ω
Résistance rotorique R_r	0.164 Ω
Inductance statorique L_s	0.097 H
Inductance rotorique L_r	0.0218 H
Inductance mutuelle M_{sr}	0.0436 H

- [1] **ABBAS M. MECHENTEL M.** “Modélisation et commande d’une MADA alimentée par une cascade à trois niveaux : Application à l’énergie éolienne”, Mémoire d’Ingénieur, Ecole Nationale Polytechnique, 2006.
- [2] **ABU-TABAK N.** “Stabilité dynamique des systèmes électriques multimachines : Modélisation, commande, observation et simulation”, Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatique de Lyon, 2008.
- [3] **AGUGLIA D.** “Conception globale des générateurs asynchrones à double alimentation pour éoliennes”, Thèse pour l’obtention du grade de Philosophias Doctor (Ph.D.), Université Laval Québec, 2010.
- [4] **AIT REMADANE N.** “Commande robuste d’une génératrice asynchrone à double alimentation pour la conversion de l’énergie éolienne”, Mémoire de Magister, UMMTO, 2012.
- [5] **AMAR BENABDELLAH A. YOUNI Y.** “Etude et réalisation d’un banc de simulation d’éolienne à base de MADA commandée et couplée au réseau triphasé”, Mémoire de Master, Université de Tlemcen, 2012.
- [6] **ARDJOUN S.** “Commande en vitesse par mode glissant d’une Machine Asynchrone à Double Alimentation”, Mémoire de Magister, Université de Sidi Bel Abbes, 2010.
- [7] **BARRET Ph.** “Régimes transitoires des machines tournantes électriques”, Edition Eyrolles, 1982.
- [8] **BELLARBI S.** “Comportement Electrique et Mécanique d’un Système Eolien à base de Machine Asynchrone à Double Alimentation Connecté au Réseau Electrique”, Publication, 16èmes Journées Internationales de Thermique, Marrakech (Maroc), du 13 au 15 Novembre, 2013.
- [9] **BENNANI H.** “Machine asynchrone à double alimentation : Les lois de commande en régime permanent”, Mémoire pour l’obtention du grade de Maître ès sciences (M. Sc.), Université de Laval Québec, 2011.
- [10] **BIANCHI F.D. De BATTISTA H. MANTZ R.J.** “Wind turbine control systems, principles, Modelling and Gain Scheduling Design”, Springer 2007.
- [11] **BOUADDOU O. LAHOUI S.** “Commande vectorielle en puissance d’une GADA”, Mémoire d’ingénieur, UMMTO, 2013.
- [12] **BOUARAKI M.** “Etude d’un entraînement à double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable : Application sur site à TINDOUF”, Mémoire de Magister, Université de Boumerdes, 2012.

- [13] **BOYETTE A.** “Contrôle-commande d’un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne”, Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy1, 2006.
- [14] **CAMBLONG H.** “Minimisation de l’impact des perturbations d’origine éolienne dans la génération d’électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable”, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d’Arts et Métiers, Centre de Bordeaux, 2003.
- [15] **CHAIBA A.** “Commande de la MADA par des techniques de l’intelligence artificielle”, Thèse de Doctorat, Université de Batna, 2010.
- [16] **CDER** “Centre de développement des énergies renouvelables”, Algérie.
- [17] **DAVIGNY A.** “Participation aux services système de fermes d’éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d’énergie”, Thèse de Doctorat, Université des sciences et Technologies de Lille, 2007.
- [18] **DJERIRI Y.** “Commande vectorielle d’une MADA intégrée à un système éolien”, Mémoire de magister, Université de Sidi Bel Abbes, 2009.
- [19] **DOS SANTOS MARTINS V.** “Contrôle frontière par modèle interne de systèmes hyperboliques : application à la régulation de canaux d’irrigation”, Thèse de Doctorat, Université d’Orléans, 2004.
- [20] **ELBIA Y.** “Commande floue optimisée d’une machine asynchrone a double alimentation et a flux orienté”, Mémoire de Magister, Université de Batna, 2009.
- [21] **FENNI A.** “Commande non linéaire par des régulateurs en mode glissant d’une machine asynchrone à double alimentation (MADA)”, Mémoire de magister, Université de Biskra, 2013.
- [22] **GHENNAM T.** “Supervision d’une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d’un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation”, Thèse de Doctorat, l’Ecole Centrale de Lille et l’Ecole Militaire Polytechnique d’Alger, 2011.
- [23] **GHOUELBOURK S.** “Modélisation et commande d’une éolienne à machine asynchrone à double alimentation alimentée par un onduleur multiniveaux”, Mémoire de Magister, Université de Skikda, 2012.
- [24] **GWEC** “Global Wind Energy Council”, Bilan annuel.
- [25] Confédération Suisse, Office fédéral de météorologie et de climatologie Météo Suisse.
- [26] **HASSAD M. A.** “Influence de la commande d’une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques”, Mémoire de Magister, Université de Sétif1, 2012.

- [27] **HIBER W.** “Analyse harmonique dans un réseau électrique avec une production d’énergie éolienne”, Mémoire de Magister, Université de Sétif1, 2013.
- [28] **KELKOUL B.** “Etude et commande d’une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation”, Mémoire de Magister API, Université de Tlemcen, 2011.
- [29] **KHOJET EL KHIL S.** “Commande Vectorielle d’une Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA)”, Thèse de Doctorat, ENI de Tunis, 2006.
- [30] **LAVERDURE N.** “Intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires”, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique du Grenoble, 2005.
- [31] **LEMMOUCHIA Z.** “Commande robuste de la machine asynchrone doublement alimentée MADA avec et sans capteur de vitesse”, Mémoire de magister, Université d’EL Oued, 2013.
- [32] **MAGHSEL S.** “Contribution à la modélisation et la commande d’une turbine éolienne”, Mémoire de Magister, Université de Skikda, 2012.
- [33] **MEKKAOUI N.** “Contribution à la Modélisation et à la Commande d’une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée”, Mémoire de Magister, Université de Batna, 2004.
- [34] **MELLOUL A.** “Simulation et diagnostic d’une machine asynchrone à double alimentation d’une éolienne”, Mémoire de Magister, Université de Sétif, 2011.
- [36] **METATLA S.** “Optimisation et régulation des puissances d’une éolienne à base d’une MADA”, Mémoire de Magister, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique d’Alger, 2009.
- [37] **MISSOUM N. KHEFOUNE W.** “Commande par modèle interne des systèmes linéaires continus”, Mémoire d’Ingénieur, UMMTO, 2011.
- [38] **MOHAMED A. et al.**, Journal of Advanced Research in Science and Technology, 2014, 1(2), 88-100.
- [39] **MOHAMMEDI A. KHERROUFACHE S.** “Etude de la commande en puissance d’une GADA alimenté par un convertisseur multi-niveaux”, Mémoire de Master, UMMTO, 2013.
- [40] **MORARI M. ZAFIRIOU E.** “Robust Process Control”, Ed. Prentice Hall, Engelwood cliffs, N.J, 1989.
- [41] **POITIERS F.** “Etude et commande de génératrices asynchrones pour l’utilisation de l’énergie éolienne”, Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique de l’Université de Nantes, 2003.

[42] ROUABHI R. “Étude et commande d’une machine asynchrone à double alimentation application : Energie éolienne”, Mémoire de Magister, Université de Sétif, 2012.

[43] TAMAARAT A. “Modélisation et commande d’un système de conversion d’énergie éolienne à base d’une MADA”, Thèse de Doctorat, Université de Biskra, 2015.

[44] TOUAL B. “Modélisation et Commande Floue Optimisée d’une Génératrice à Double Alimentation : Application à un Système Eolien à Vitesse Variable”, Mémoire de Magister, Université de Batna, 2010.

[45] TELLI A. “Etude et commande d’une éolienne à vitesse variable intégrée au réseau MT”, Mémoire de Magister, Université d’Oran, 2012.

[46] SYLLA A. M. “Modélisation d’un émulateur éolien à base de machine asynchrone à double alimentation”, Mémoire de maitrise en génie électrique, Université de Québec, 2013.

[47] SOW T. L. “Commande non linéaire de l’éolienne à MADA pour une participation au réglage de la fréquence du réseau Montréal”, Mémoire présenté à l’École de technologie supérieure comme exigence partielle à l’obtention de la maîtrise en génie électrique M. Ing, Université de Québec, 2012.