

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



*Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou
Faculté de Génie Electrique et D'informatique
Département d'électrotechnique*

Mémoire de fin d'études

En Vue d'Obtention Du Diplôme Master en Electrotechnique

Option : Machine Electrique

Thème :
Thème :

**Modelisation et Commande vectorielle de la
Machine Asynchrone a Double Alimentation**

Proposé par :

M^{elle} : N. KECILI

Réalisé par :

M^r : NAIT AMARA Sofiane

M^r : HADDADI Ali

Année Universitaire 2011/2012

Remerciements

Nos remerciements vont tout premièrement, à Dieu le tout puissant qui nous à donné la foi, le courage et la patience de parvenir à finir ce travail.

Nous exprimons nos sincères remerciements à notre encadreur : Mademoiselle KECILI Nadia pour sa rigueur scientifique et ses qualités humaines, ses conseils ses explications et ses éclaircissements et ses critiques.

Nos remerciements s'adressent également aux membres de jury pour avoir accepté de lire, de critiquer et d'enrichir ce travail.

Nos remerciements aussi tous les enseignants et les responsables du Département d'Electrotechnique de l'Université de Tizi-Ouzou pour leurs aides et leurs encouragements sans oublier nos amies .

Nous remercions aussi tous les étudiants qui nous ont aidés avec des très importants conseilles pour le bon déroulement de ce travail.

Nous remercions nos parents, pour tout ce qu'ils font pour nous. Ils se sont beaucoup sacrifiés pour nous offrir toutes les conditions nécessaires afin que nous puissions devenir ce que nous sommes.

Nous tenons enfin à remercier vivement toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Dédicace

A ma chère mère, la personne qui a beaucoup sacrifié pour moi sans elle je

N'aurais eu la volonté d'atteindre ce niveau :

A mon cher père sens de responsabilité

A mes sœurs:

A toute ma famille :

A mes neveux et nièces:

A tous mes amis:

A tous mes collègues:

A tous ceux que j'ai connu durant toutes mes études:

A tous ceux pour qui je compte et qui comptent pour moi:

Je dédie ce travail.

N.A. SOFFRANE

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail A mes chers parents,
mon père « mohamed » qui ne cesse de m'encourager.*

Ma mère « saadia » symbole de Sacrifice.

Sans eux je ne serais pas ce que je suis

Aujourd'hui.

A mes chères sœurs et frère

A ma grand-mère

A toute la famille

A tous mes amis

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

A la mémoire de mes grands-parents.

GLOSSAIRE

E_c	énergie cinétique
m	masse d'air (Kg)
v	la vitesse du vent (m/s)
S	la surface balayée par une hélice (m^2)
V_1	la vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur
V_2	la vitesse du vent en aval de l'aérogénérateur
P_v	la puissance théorique disponible dans le vent
ρ	la masse volumique de l'air
C_p	le coefficient de puissance du générateur éolien
P_e	la puissance extraite du vent
R	le rayon de la turbine
β	l'angle d'inclinaison des pâles
λ	vitesse relative de la turbine
P_n	la vitesse de vent nominale
v_m	la vitesse maximale
v_D	la vitesse minimale
v_n	la vitesse nominale
P_n	la puissance mécanique
Ω_n	la vitesse nominale de la MADA
N_s	la vitesse de synchronisme
g	glissement
V_s	valeur efficace des tensions simples statoriques (V)
V_r	valeur efficace des tensions simples rotoriques (V)
R_r	résistance du bobinage rotorique de la MADA (Ω)
R_s	résistance du bobinage statorique de la MADA (Ω)
I_r	valeur efficace des courants rotoriques de la MADA (A)
I_s	valeur efficace des courants statoriques de la MADA (A)
φ_s	valeur efficace du flux statorique de la MADA (Wb)

φ_r	valeur efficace du flux rotorique de la MADA (Wb)
j_m	le flux magnétisant [2] [2]
V_{as}	la tension d'une phase (a) statorique (V)
V_{bs}	la tension d'une phase (b) statorique (V)
V_{cs}	la tension d'une phase (c) statorique (V)
V_{ar}	la tension d'une phase (a) rotorique (V)
V_{br}	la tension d'une phase (b) rotorique (V)
V_{cr}	la tension d'une phase (c) rotorique (V)
i_{as}	le courant d'une phase (a) statorique (A)
i_{bs}	le courant d'une phase (b) statorique (A)
i_{cs}	le courant d'une phase (c) statorique (A)
i_{ar}	le courant d'une phase (a) rotorique (A)
i_{br}	le courant d'une phase (b) rotorique (A)
i_{cr}	le courant d'une phase (c) rotorique (A)
V_{ds}, V_{qs}	les tension statorique d'une phase de la MADA dans le repère de Park (V)
V_{dr}, V_{qr}	les tension rotorique d'une phase de la MADA dans le repère de Park (V)
i_{dr}, i_{qr}	les courants rotoriques de la MADA dans le repère de Park (A)
i_{ds}, i_{qs}	les courants statoriques de la MADA dans le repère de Park (A)
$\varphi_{ds}, \varphi_{qs}$	les flux statorique de la MADA dans le repère de Park
$\varphi_{dr}, \varphi_{qr}$	les flux rotorique de la MADA dans le repère de Park
L_{as}	inductance propre d'une phase statorique (H)
L_{ar}	inductance propre d'une phase rotorique (H)
M_{as}	inductance mutuelle entre deux phases du stator (H)
M_{ar}	inductance mutuelle entre deux phases du rotor (H)
M_{rs}, M_{sr}	inductance mutuelle maximale entre une phase du stator et une autre du rotor (H)
f	fréquence imposée par le réseau électrique (Hz)
P	nombre de paires de pôles
C_{em}	couple électromagnétique de la MADA (Nm)

θ_s	l'angle entre les axes des phases statoriques et les axes d et q
θ_r	l'angle entre les axes des phases rotoriques et les axes d et q
q	l'angle entre les axes des phases statorique et les axes des phases rotoriques
J	moment d'inertie de la MADA
W	vitesse de rotation de la MADA
P_t	puissance transmise du stator au rotor
ω_s	pulsation statorique de la MADA rad/s
ω_r	pulsation rotorique de la MADA rad/s
w	vitesse électrique du rotor
C_r	Couple résistant
X	le vecteur d'état
T_s	constante de temps statorique
T_r	constante de temps rotorique
σ	coefficient de dispersion
P_s	Puissance absorbée au stator
P_{js}	pertes Joule statoriques
P_{fs}	pertes fer statoriques
P_r	Puissance transmise au rotor
P_{jr}	pertes Joule rotoriques
P_{fr}	pertes fer rotoriques
P_v	pertes par ventilation
P_m	Puissance mécanique développée
P_{mec}	Puissance mécanique transmise à la charge
N_r	nombre de spires des bobinages rotoriques.
N_s	nombre de spires des bobinages statoriques.
m	le rapport de transformation rotor /stator

Glossaire

S_r	la puissance apparente du rotor
S_s	la puissance apparente du stator
FTBO	la fonction de transfert en boucle ouverte
FTBF	La fonction de transfert en boucle fermée
K_p	le gain proportionnel du régulateur
K_i	le gain intégrateur du régulateur
τ_r	le temps de repense

SOMMAIRE

GLOSSAIRE

INTRODUCTION GENERALE..... 1

Chapitre I : généralité sur les systèmes éoliens

I. Introduction.....	3
I.1 L'énergie renouvelable.....	3
I.2 Principe de fonctionnement.....	4
I.3 Principaux composants d'une éolienne	5
I.4 Différents types des turbines éoliennes.....	7
I.4.1 Eolienne à axe vertical	7
I.4.1-a La trainée différentielle	8
I.4.1-b La variation cyclique d'incidence	8
I.4.2 Eolienne à axe horizontal.....	9
I.5 Conversion énergie cinétique-mécanique.....	10
I.5.1 Loi de BETZ	10
I.5.2 Modèle de La turbine	13
I.5.2.a Les éoliennes lentes	14
I.5.2.b Les éoliennes rapides	14
I.5.3 Description d'une pôle éolienne	15
I.5.4 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne	16
I.5.4.1 Le système « pitch »	17
I.5.4.2 Le système « stall »	18
I.5.4.3 Le système « stall actif ».....	20
I.6 Chaîne de conversion électrique des éoliennes de grande puissance.....	20
I.7 Les différentes classes et Synthèse d'un système éolien... ;;	21
I.7.1 Eolienne à vitesse fixe.....	21
I.7.1.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil	21
I.7.1.2 Machine asynchrone à double stator	23

I.7.2 Eolienne à vitesse variable	24
I.7.2.1 Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance	26
I.7.2.2 Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné".....	27
I.7.2.2-a Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée.....	28
I.7.2.2-b Machine asynchrone à double alimentation-structure de Kramer...29	
I.7.2.2-c Machine asynchrone à double alimentation structure de Scherbius avec convertisseurs MLI	30
I.7.2.3 Machine synchrone à rotor bobiné ou à aimants	31
Conclusion.....	33

Chapitre II : Modélisation de la MADA

II. Introduction	34
II.1 Hypothèses simplificatrices de la modélisation	35
II.2 Equations électriques dans les axes a,b,c	35
II.3 Equations magnétiques	36
II.4 Equation mécanique de la machine.....	37
II.5 Modèle de la MADA dans le plan (dq)	38
II.5.1 La transformation de Park	38
II.5.1 La transformation inverse de Park	39
II.5.3 Equations magnétiques dans les axes d et q.....	40
II.5.4 Equations électriques dans les axes d et q.....	41
II.5.5 Expression du couple électromagnétique dans les axes d et q	41
II.5.6 Choix du référentiel du travail	43
II.5.6 .a Référentiel lié au stator.....	44
II.5.6 .b Référentiel lié au rotor.....	44
II.5.6 .a Référentiel lié au champ tournant.....	44
II.5.7 Mise sous forme d'équations d'états.....	45
II.6 Bilan des puissances dans un moteur asynchrone à rotor bobiné	46

II.7 Bilan des puissances dans une machine asynchrone à double alimentation48
Conclusion 50

Chapitre III : Commande en puissance de la MADA

III. Introduction..... 51
III.1 Principe du contrôle vectoriel à flux orienté 51
III.2 Commande vectorielle de la MADA 53
 III.2-a Procédé d'orientation du flux 53
 III.2-b Orientation du flux statorique 54
 III.2-c Relation entre puissances statoriques et courants rotoriques55
 III.2-d Relation entre tension rotorique et courant rotorique56
III.3 Types de commande vectorielle.....58
 Commande vectorielle directe59
 Commande vectorielle indirecte59
III.4 Synthèse du régulateur proportionnel intégral (PI) 61
 Régulateur de puissance61
 Régulateur de courant...62
III.5 Conclusion.....64

Chapitre IV : simulation du système global

IV.1 Analyse des performances de la MADA en boucle ouverte.....65
IV.1.1. Les résultats de simulation.....67
IV.1.2. Interprétation des résultats.....69
IV.2.Analyse des performances de la MADA en utilisant la commande vectorielle.....69
IV.2.1.Les résultats de simulation..... 71
IV.2.2.Interprétation des résultats.....72

CONCLUSION GENERALE..... 74

Bibliographie

ANNEXE

INTRODUCTION GENERAL

Introduction Générale

L'homme utilise l'énergie sous forme de chaleur, de lumière ou de mouvement. La maîtrise de l'énergie est donc le moteur de l'activité humaine. Ainsi elle est au cœur de l'avenir de notre société. Autant elle fut un facteur de construction et de création de richesse. D'une part, l'évolution démographique de la planète, implique une progression durable des besoins énergétiques. De plus, la consommation d'énergie, toujours en augmentation, fait réduire les réserves en énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) et rapproche l'échéance de leur épuisement.

Cette situation, ajoutée à la conviction grandissante que le changement climatique d'origine humaine est réel et que les émissions de dioxyde de carbone à effet de serre y contribuent grandement. On suscite un nouvel intérêt dans les sources d'énergie renouvelables sans carbone. Il existe plusieurs ressources en énergies renouvelables : l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie solaire thermique et photovoltaïque, l'énergie produite par les vagues ainsi que les courants marins, la géothermie et la biomasse. Ces ressources en énergie sont pratiquement inépuisables et propres.

L'énergie éolienne est, parmi les énergies renouvelables, celle qui connaît la croissance la plus rapide au monde. Elle est presque universellement reconnue comme une source d'énergie la plus prometteuse pour produire de l'électricité propre à court et à moyen termes. Et elle contribue à la préservation de l'environnement.

La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromagnétique et la qualité d'énergie fournie. Dans ce contexte, notre mémoire mène une étude sur la machine asynchrone à double alimentation dans un système éolien.

Le présent travail est structuré comme suit :

- Le premier chapitre quelques généralités sur la production d'énergie éolienne sera présente. Il s'agit d'une étude assez détaillée du système éolien et des différentes structures existantes leur fonctionnement. On abordera la définition de la vitesse du vent à travers les équations et les concepts physiques, ainsi que les différents types des génératrices utilisées (les éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable et leur constitution) dans la chaîne de conversion d'énergie les différentes architectures possibles. Et les convertisseurs qui leur sont associés.

- Le deuxième chapitre nous allons présenter les modèles mathématiques de la machine asynchrone à double alimentation en utilisant le model de Park avec le bilan des puissances et nous terminerons ce chapitre par quelque mode de fonctionnement de la MADA,
- le troisième chapitre présente la commande vectorielle en puissance appliquée à la MADA, en utilisant la méthode d'orientation du flux statorique, a l'aide du logiciel Matlab.
Le logiciel Matlab est un moyen efficace et économique pour faire des études préliminaires et comparatives, tant au stade du développement (conception), qu'au stade du fonctionnement normal des systèmes.
- Le quatrième chapitre, concerne les résultats de simulation obtenus d'abords de la MADA en boucle ouverte, puis de la MADA avec la commande vectorielle en puissance. Il s'achève par une analyse des résultats de simulation du système.

Enfin une conclusion générale synthétisera les principaux résultats obtenus, et pour clôturer notre travail en proposera des éventuelles études en perspective.

CHAPITRE I

I Introduction

L'énergie éolienne est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie directement tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur. Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes ; [P.WCa].

Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes. L'énergie éolienne est une des formes d'énergie renouvelable.

I.1.L'énergie renouvelable

Une source d'énergie est dite renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. Beaucoup plus accessibles et très adaptées à la production décentralisée, les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires. Aujourd'hui, après l'hydraulique, le grand éolien devient compétitif en termes de coûts de production. Plusieurs pays sont déjà résolument tournés vers l'énergie éolienne (utilisant la force du vent pour produire de l'électricité). C'est le cas de l'Allemagne, leader mondial avec une puissance éolienne installée de 23,903 GW, l'Espagne, numéro deux de l'Union Européenne avec 16,740 GW et citons également le Danemark, qui produit près de 20 % de sa consommation d'électricité grâce à ses 3,180 GW installés à la fin de l'année 2008. Dans ce contexte général, notre étude s'intéresse à la filière éolienne qui semble une des plus prometteuses avec un taux de croissance européen et mondial très élevé [N Lav], [Ph Le].

I.2.Principe de fonctionnement

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

*Au niveau de la turbine (*rotor*), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) disponible pour la convertir en énergie mécanique.

*Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique transmet par le rotor et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique [N Lav].

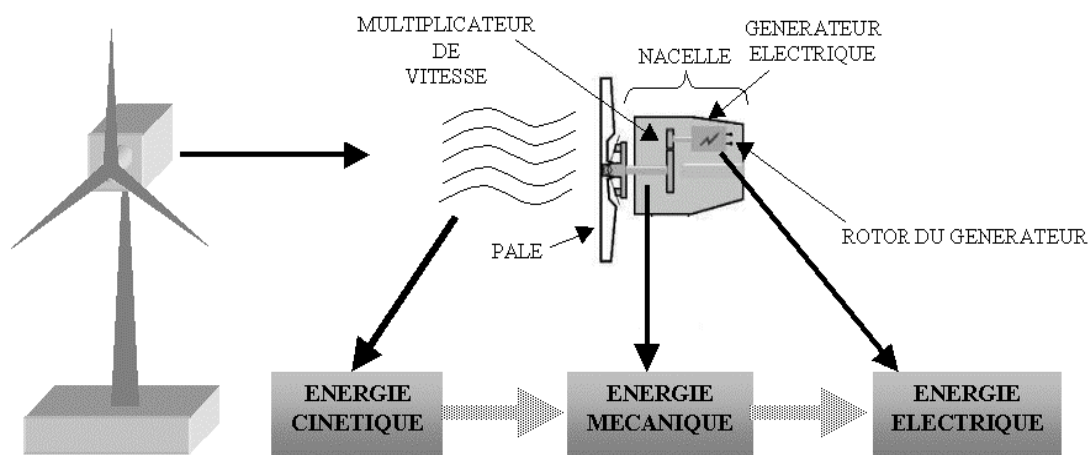


Figure I-1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

Les impacts des éoliennes sur l'environnement est réduit. Une éolienne ne couvre qu'un pourcentage très réduit de la surface totale du site sur laquelle elle est implantée, permettant alors à la plupart des sites de conserver leurs activités industrielles ou agricoles. Leurs nuisances sonores sont de plus relativement faibles. Dans la plupart des cas, le bruit du vent est supérieur à celui engendré par l'éolienne. Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale :

- Eoliennes de petite puissance : délivre une puissance inférieure à 40 kW avec une hélice de 12 m de diamètre.
- Eoliennes de moyenne puissance : délivre une puissance de 40 à 1MW avec une hélice de 12 m à 45 m de diamètre
- Eoliennes de forte puissance : délivre une puissance supérieure à 1 MW une hélice plus de 45 m de diamètre.

I.3. Principaux composants d'une éolienne

Une éolienne est composée de plusieurs éléments présentés sur la Figure (I-2).

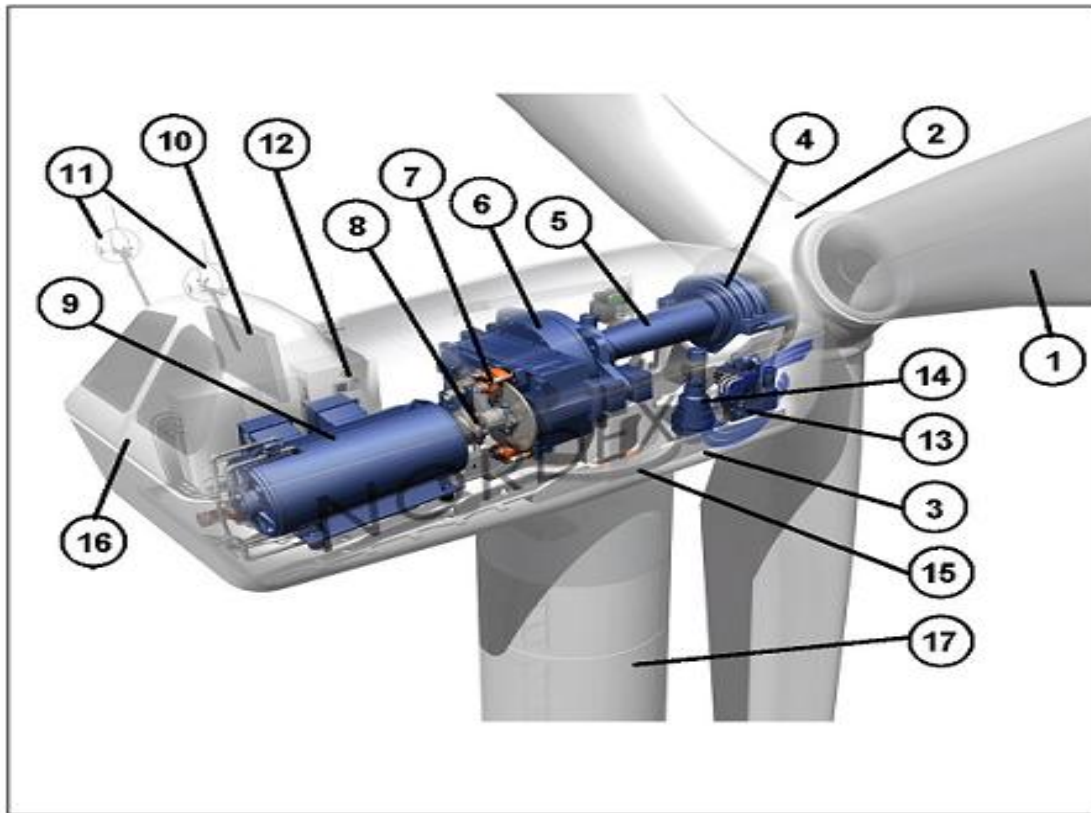


Figure I-2 : Principaux composants d'une éolienne

1- Pales en composite fibre de verre(en général 3). Pas fixe, profil de type stall (décrochage aérodynamique). Freins aérodynamiques d'extrémité pivotants, leur rayon peut atteindre 75 m. La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pâles (un cercle), donc au carré de son diamètre rotor.

2- Moyeu du rotor en fonte est le nez de l'éolienne.

3- Une nacelle Structure de la turbine en fonte ductile ou en acier soudé galvanisé à chaud, montée au sommet du mât et abritant les composants mécaniques et pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine. Le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électriques descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne.

4- Cardon paliers du rotor à double rangée de billes.

5-Transmission arbre principal en acier haute résistance qui tourne lentement et transmet une très grande force de rotation au multiplicateur

6- Multiplicateur de vitesse constitué d'un grand nombre de roues dentées et placées dans un engrenage. Celui-ci transforme la force lente de l'arbre principal en rotation rapide pour la génératrice.

7- Frein à disque mécanique sur l'arbre rapide qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine avec témoin d'usure.

8-système d'accouplement reliant l'arbre rapide avec la génératrice de type flexible.

9- Génératrice qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique asynchrone refroidie à l'eau ou à l'huile.

10- Radiateur de refroidissement intégré au système multiplicateur - génératrice qui fonctionne comme un ventilateur ou un radiateur d'eau ou d'huile.

11- L'anémomètre système de mesure du vent qui informe le système de commande quand le vent souffle assez fort pour produire de l'électricité de manière efficace et La girouette qui informe le système de contrôle de la direction du vent.

12- Système de contrôle chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble « rotor plus nacelle » face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par l'anémomètre (vitesse du vent) et la girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle.

13- Système hydraulique pour les freins d'extrémité de pale et le système d'orientation.

14- Entraînement d'orientation de la tourelle à deux trains d'engrenages planétaires entraînés par des moteurs alimentés à fréquence variable.

15- Paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque.

16- Capot de la nacelle en structure acier recouverte de composite fibre de verre.

17- Le mât (*tour*), en acier tubulaire généralement en métal, supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle plus rotor). Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure la stabilité de l'éolienne. Le mât des éoliennes atteint aujourd'hui 80 m de haut pour les plus puissantes (exceptionnellement jusqu'à 100 m). Si les éoliennes sont-elles si haut perchées, c'est parce que le vent souffle plus fort à quelques dizaines de mètres de hauteur, où il n'est pas perturbé par l'effet des obstacles : relief, arbres, maisons..., et la puissance fournie par une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent.

18. Une *fondation* pour empêcher l'éolienne de basculer par grands vents la tour doit être suffisamment solide pour supporter non seulement la nacelle et le rotor, mais aussi les charges puissantes provoquées par le vent : d'une part la puissance exercée par le vent directement sur la tour, d'autre part la puissance transmise par le rotor, [R Rad].

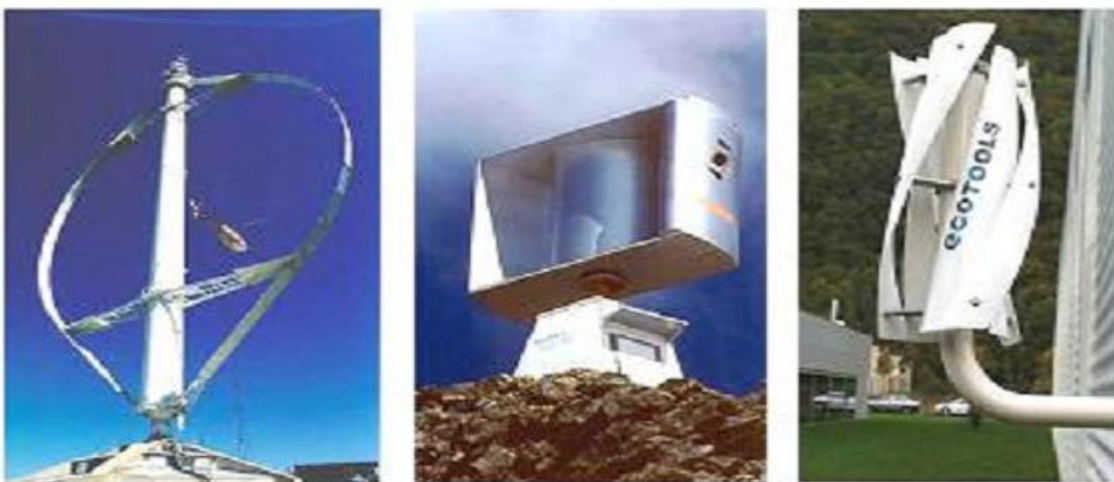
I.4. Différents types des turbines éoliennes

Une turbine éolienne est une turbine entraînée par le vent. Elles se divisent en deux grandes familles: celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

I.4.1.Éolienne à axe vertical

Elles ont été les premières structures développées pour la production de l'énergie électrique, Ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il a l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et d'avoir une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance . En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage à cause des gabarits de leur mat qui subit de fortes contraintes mécaniques poussant,

La conception verticale impose que les éoliennes fonctionnent avec le vent proche du sol, moins fort qu'en hauteur, et en raison de leur petite taille l'énergie produite reste faible. Ces inconvénients alliés à la faible efficacité de la conversion d'énergie ont limité leur développement est laissant place a celle à axe horizontal.



Rotor de Darrieus

Rotor de Savonius

Figure I-3 : Eolienne à axe vertical

Pour ce type d'éoliennes on utilise deux principes différents : la traînée différentielle ou la variation cyclique d'incidence.

I.4.1.a. La traînée différentielle

Le fonctionnement de ce type de machines est basé sur : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble, et la circulation de l'air rendue possible entre les deux demi-cylindres augmente le couple moteur, l'illustration de ce genre d'éolienne est le rotor de Savonius (un ingénieur finlandais qui l'a breveté en 1925) [N mek].

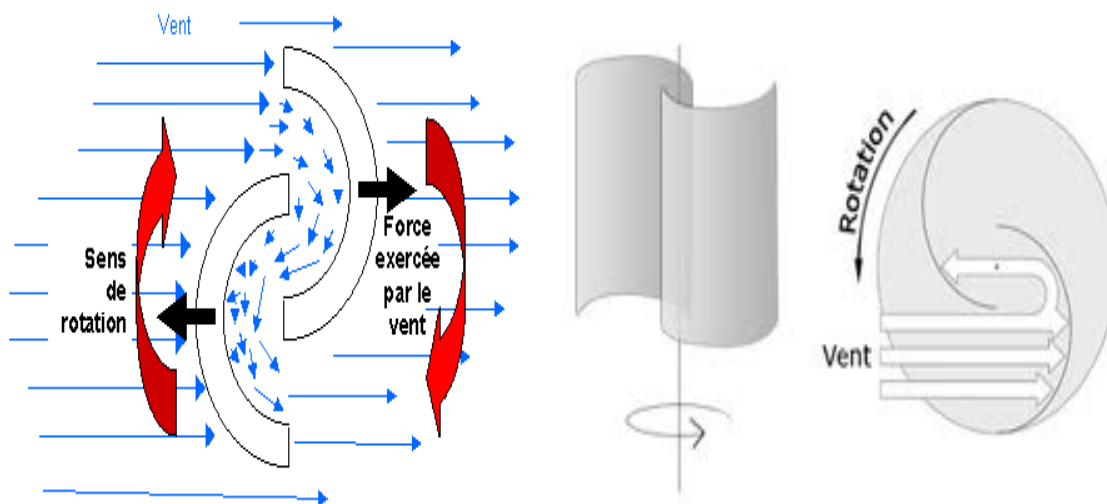
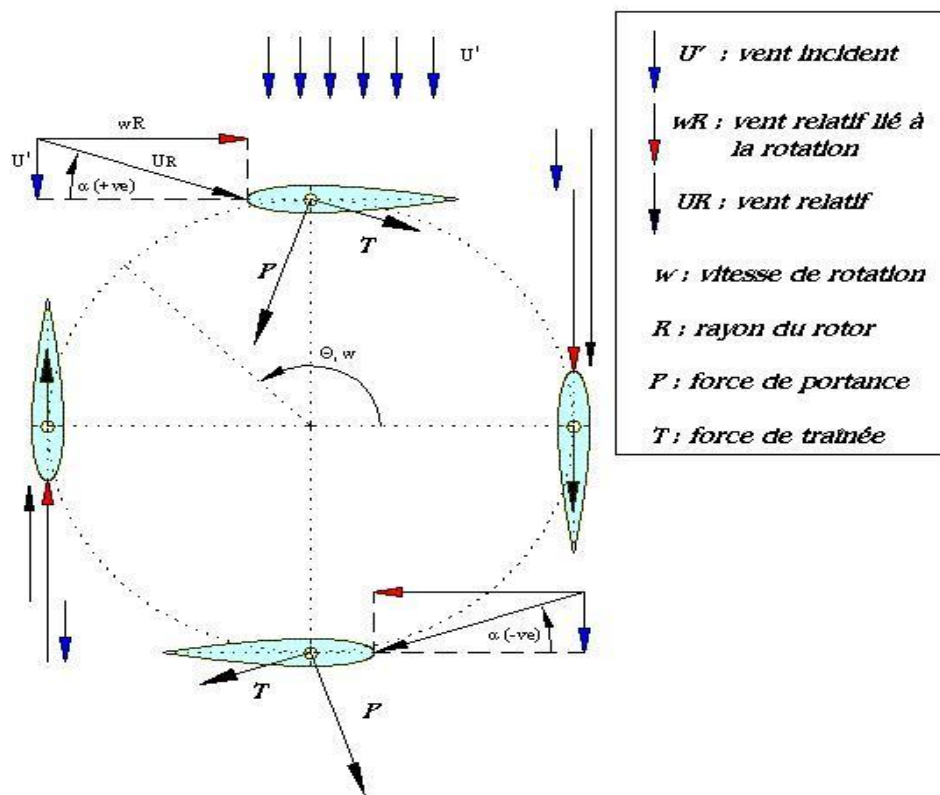


Figure I-4 : Principe de fonctionnement d'un rotor Savonius (traînée différentielle)

I.4.1.b. La variation cyclique d'incidence :

Le fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensité et de direction variable. La combinaison de ces forces génère alors un couple moteur faisant tourner le dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent, cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur). Ce modèle a été breveté par

l'ingénieur français Georges Darrius en 1931, elle se caractérise avec ses 2 ou 3 pales en forme de C [Ph Le].



**Figure I-5:Principe de fonctionnement du rotor Darrieus
(Variation cyclique d'incidence)**

Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées. En effet la présence du capteur d'énergie près du sol l'expose aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité. Elles sont de plus exposées à des problèmes d'aéroélasticité dus aux fortes contraintes qu'elles subissent. Enfin la surface qu'elles occupent au sol est très importante pour les puissances élevées

I.4.2. Eolienne à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus

utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [O.DeV].

Elles représentent un coût moins important que celle à axe vertical et sont moins exposées aux contraintes mécaniques, de plus la position en hauteur privilégie l'efficacité [J.L.Me]. Aujourd'hui, pratiquement les seules éoliennes commerciales sont à axe horizontales. Les éoliennes à axe vertical ont été prometteuses dans les années 80 et au début des années 90, mais leur faible rendement aérodynamique ainsi que les fluctuations élevées de la puissance électrique générée les ont écartées du marché

Les plus grandes éoliennes mesurent jusqu'à 180m en bout de pale avec un moyeu à 120m pour une puissance de 5MW.



Eolienne bipâle

Eolienne tripâle

Eolienne multipâle

Figure I-6 : Eolienne à axe horizontal

I.5. Conversion énergie cinétique –mécanique :

1.5.1 Loi de BETZ

Les pales d'une éolienne tire l'écoulement d'énergie à partir du vent, qui convertit cette dernière en énergie de rotation et la fournit par l'intermédiaire d'une unité mécanique d'entraînement au rotor d'un générateur électrique.

Si on considère une masse d'air, m (kg), qui se déplace avec la vitesse v (m/s), l'énergie cinétique de cette masse est :

$$E_c = \frac{1}{2} . m . v^2 \quad (\text{I.1})$$

La masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est:

$$m = \frac{1}{2} \rho . S . (v_1 + v_2) \quad (\text{I.2})$$

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) : $P_e = \frac{1}{2} . m . (v_1^2 - v_2^2)$ (I.3)



Figure I-7 : Tube de courant autour d'une éolienne.

La vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

Si pendant une unité de temps, cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'une hélice qui balaie une surface S (m^2), située perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent sans diminution, la puissance instantanée fournie serait alors :

$$P_v = \frac{1}{2} . \rho . S . v^3 \quad (\text{I.4})$$

P_v : puissance théorique disponible dans le vent.

v : égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la

vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit $\frac{V_1 + V_2}{2}$

ρ : masse volumique de l'air. Elle varie avec la pression de l'air et la température.

Cependant on ne peut pas extraire la totalité de la puissance. On introduit donc, le coefficient de puissance du générateur éolien par la relation :

$$C_p = \frac{P_e}{P_v} \quad (I.5)$$

P_e : puissance extraite du vent.

Ce coefficient caractérise l'aptitude du générateur éolien à capter l'énergie éolienne. La puissance correspondante est donc :

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 \quad (I.6)$$

R (m) : Rayon de la turbine.

La valeur du coefficient de puissance C_p va dépendre de la vitesse de rotation de la turbine (qui peut s'exprimer en fonction de la vitesse spécifique λ) et de l'angle d'inclinaison des pâles β .

$$C_p = C_p(\lambda, \beta) \quad (1.7)$$

$$C_p = \frac{c_e}{P_v} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{v_2}{v_1} \right)^2 \left(1 - \frac{v_2}{v_1} \right) \quad (1.8)$$

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.35 - 0.00167 \beta - 2 \sin \frac{\pi \lambda + 0.1}{14.34 - 0.3 \beta - 2} - 0.00184 \lambda - 3 (\beta - 2)$$

Avec :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{v} \quad (1.9)$$

Où $R \cdot \Omega$ est la vitesse linéaire périphérique en bout de pâles de l'hélice.

La valeur maximale idéale du coefficient de puissance donc la puissance maximale qui peut être récupérée avec une turbine éolienne se produit quand $\frac{v_1}{v_2} = \frac{1}{3}$ (voir la fig. 1.9), donc le C_p devient :

$$C_p = \frac{16}{27} = 0,593$$

Ceci a été dérivé la première fois par A. Betz, c'est pourquoi on l'appelle le " facteur de Betz " ou " limite de Betz ", Cette valeur est la valeur théorique maximale du coefficient de puissance, donc, l'efficacité théorique maximale qu'un convertisseur d'énergie éolienne peut

avoir est 59,3%. Il est bien de mentionner que cette valeur du coefficient de puissance a été obtenue pour un idéal convertisseur de flux sans frottement, [F Poi].

La (Figure I.8) montre l'évolution de C_p en fonction de λ

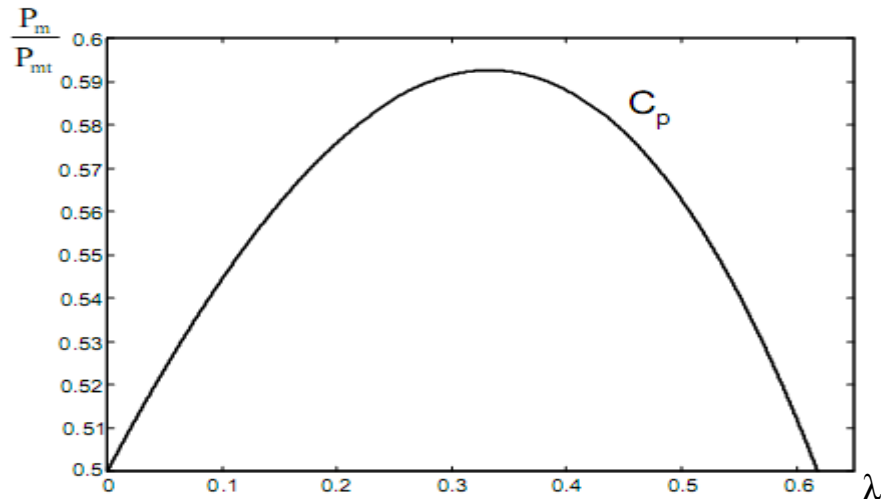


Figure 1-8 : Coefficient de puissance

I.5.2.Modèle de La turbine

Les variables d'entrée de la turbine éolienne peuvent se résumer comme suit :

- 1-la vitesse du vent qui détermine l'énergie primaire à l'admission de la turbine.
- 2-les quantités spécifiques de la machine, résultantes particulièrement de la géométrie du rotor et la surface balayée par les pales de la turbine.
- 3- la vitesse de la turbine, l'inclinaison des pales et l'angle de calage β

La figure ci-dessous présente une classification des turbines éoliennes selon leur puissance délivrée :

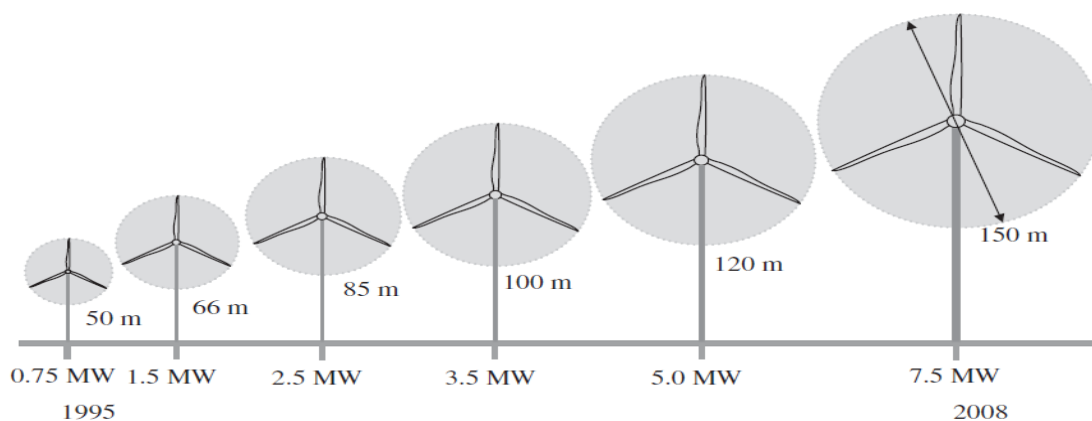


Figure I-9 : Evolution des turbines éoliennes selon leurs dimensions [O Ana]

Les quantités de sortie de la turbine éolienne sont la puissance ou le couple qui peuvent être contrôlés en variant les quantités d'entrée précédentes [A.Bou].

De là on peut déduire la valeur max du coefficient pour une valeur optimale de la vitesse spécifique. Pour des valeurs différentes de λ on peut classer les éoliennes en deux catégories :

I.5.2.a Les éoliennes lentes

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance (**Figure I-10**) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite.

I.5.2.b Les éoliennes rapides

Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et sont pratiquement toutes dédiées à la production de l'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts.

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance (**Figure I-10**) atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s. [F Poi]

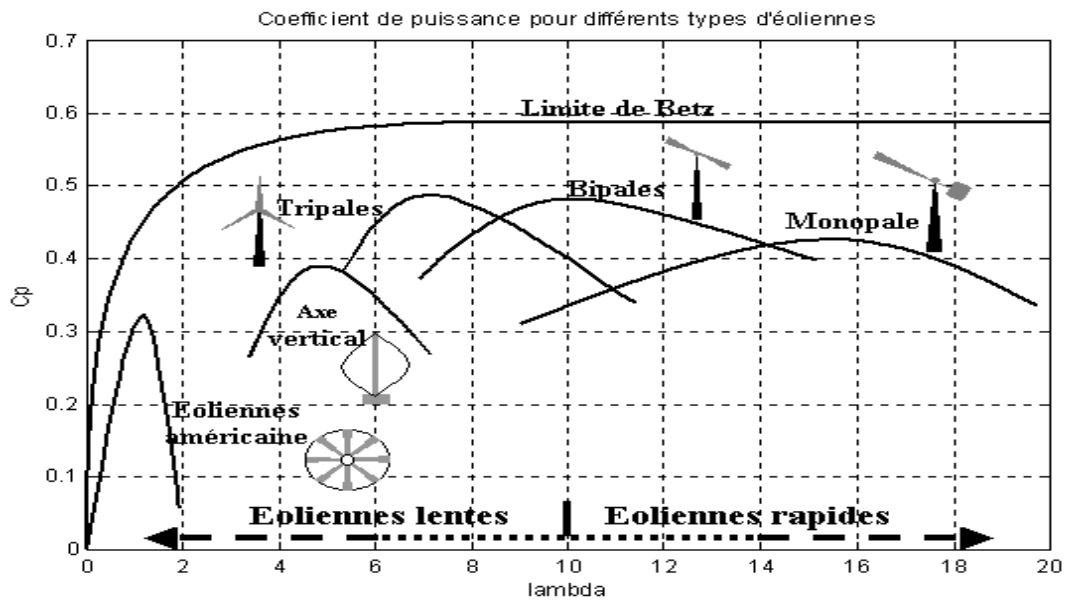


Figure 1-10 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes, [G OCI]

I.5.3. Description d'une pale éolienne :

Les pales de la turbine ont un profil aérodynamique présenté sur le schéma de la Figure (1-8) Leur longueur atteinte actuellement entre 30 et 75 mètres, soit un diamètre du rotor compris entre 60 et 150 mètres.

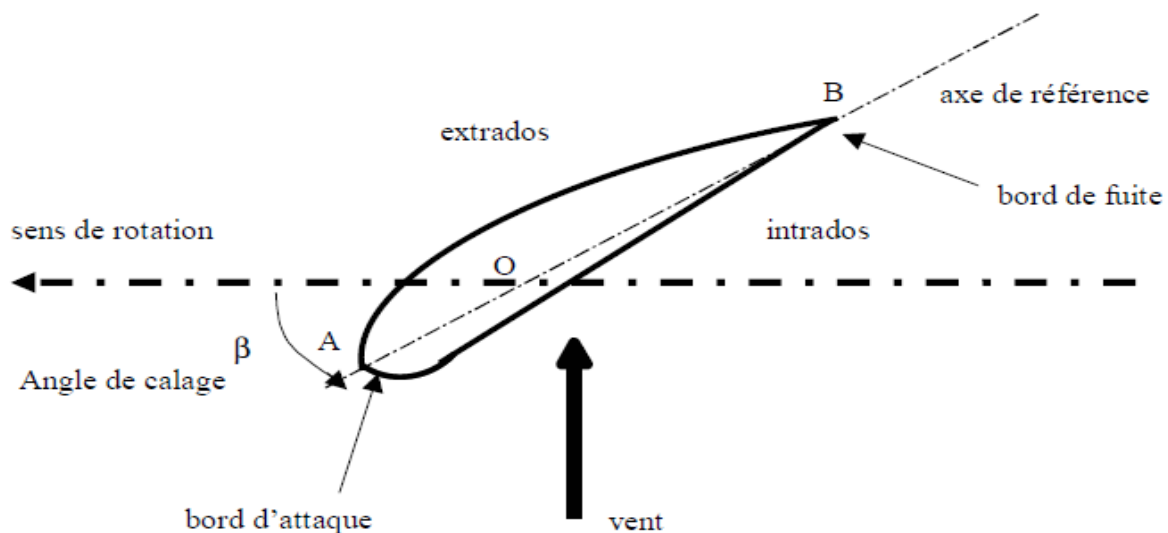


Figure I-11 : Éléments caractéristiques d'une pale

On remarque plus particulièrement les éléments suivants :

- corde : longueur l du profil du bord d'attaque au bord de fuite.
- angle de calage β (inclinaison de l'axe de référence par rapport au plan de rotation), [NLav] .

I.5.4. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

L'objectif de cette régulation est double, d'une part protéger l'éolienne par vent fort et d'autre part délimiter la puissance. En effet, la turbine éolienne est dimensionnée pour fournir une puissance nominale P_n à une vitesse de vent nominale v_n , au delà de cette vitesse les paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance nominale et de ne pas produire au delà d'une vitesse maximale v_m qui pourrait endommager la turbine.

On peut définir quatre zones de fonctionnement :

- **la zone I** : le vent n'est pas suffisant pour faire fonctionner la turbine.
- **la zone II** : le vent atteint une vitesse v_D minimale pour permettre le démarrage. Une fois ce démarrage effectué, l'éolienne va fonctionner de manière à extraire le maximum de puissance disponible pour avoir un fonctionnement optimal jusqu'à ce que le vent atteigne la vitesse nominale v_n correspondant aux valeurs nominales de la puissance mécanique P_n et de la vitesse de rotation Ω_n .
- **la zone III** : le vent atteint des vitesses élevées supérieures à la vitesse nominale, la vitesse de rotation et la puissance mécanique doivent être maintenues à leurs valeurs nominales par régulation de la vitesse et la puissance afin de ne pas détériorer l'éolienne. Ces limitations peuvent s'effectuer, par exemple, en orientant les pales de l'éolienne afin de dégrader le rendement de l'éolienne (augmentation de l'angle de calage des pales β).
- **la zone IV** : la vitesse du vent est trop importante, pour ne pas détériorer le générateur éolien, les pales de la turbine sont mises en drapeaux ($\beta=90^\circ$), [V cou].

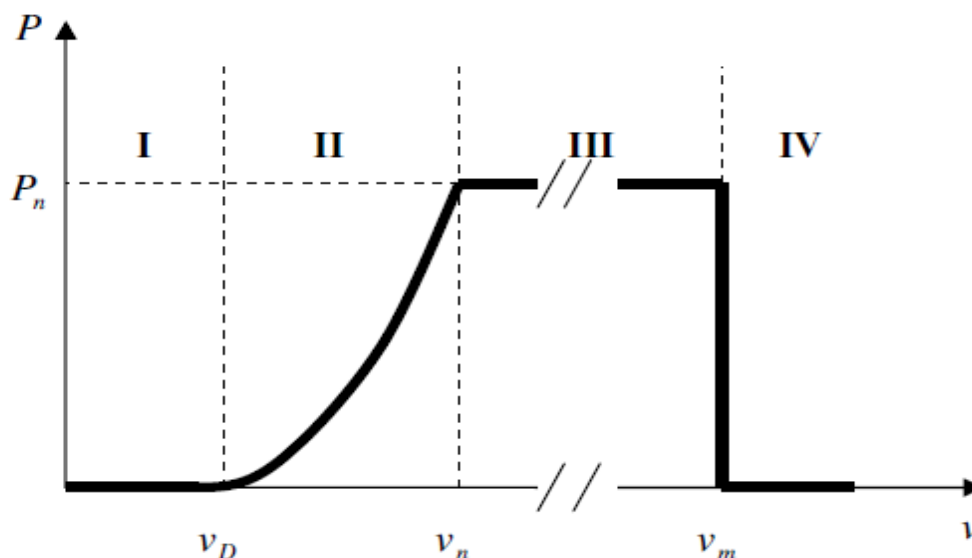


Figure I-12 : Zone de fonctionnement d'une éolienne

Ils existent plusieurs systèmes de régulation de vitesse pour la turbine, on va s'intéresser pour notre part aux systèmes les plus couramment utilisés à savoir :

- Le système à calage fixe (pas de calage variable) « pitch »
- Le système à décrochage aérodynamique « stall »
- Le système « stall actif », [V cou].

I.5.4.1. Le système « pitch » :

La caractéristique $C_p(\lambda)$ est directement liée à l'aérodynamisme des pâles. La Figure (I-13) montre l'évolution de la caractéristique d'une éolienne en fonction de β . Plus l'angle de calage sera important, moins la turbine captera l'énergie cinétique du vent. Les pâles sont face au vent pour des vents faibles afin d'en extraire le maximum de puissance puis lorsque le vent nominal v_n est atteint, elles s'inclinent pour atteindre la position « drapeau » à la vitesse de vent maximale, [V cou].

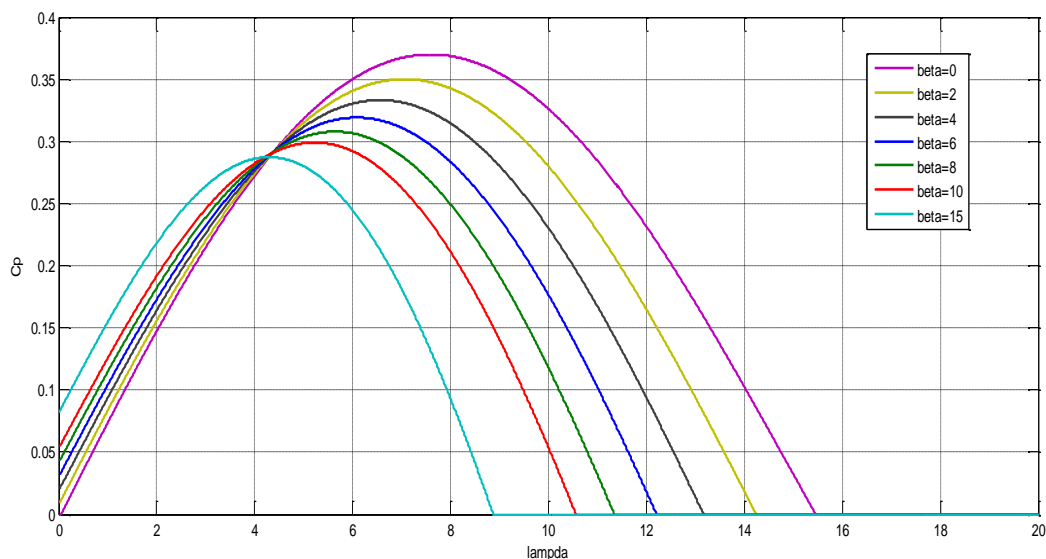


Figure I-13 : Influence de l'angle de calage sur le coefficient de couple

Le système « pitch » a pour avantage de permettre un contrôle actif de la puissance sous une large plage de vitesse du vent. L'angle de calage des pales peut être déterminé afin d'optimiser la conversion d'énergie quand le vent évolue entre v_D et v_n . Le contrôle de l'angle de calage permet également de réguler la vitesse lorsque $v > v_n$ et le démarrage à vitesse de vent faible est facilité par le changement de l'angle de calage [V cou]. Dans la zone III de vitesses (figure

I.12). C'est la régulation par mise en drapeaux, soit augmenter l'angle de calage, ce qui diminue l'angle d'incidence. Ce système permet également de freiner la turbine si nécessaire, [N Mek].

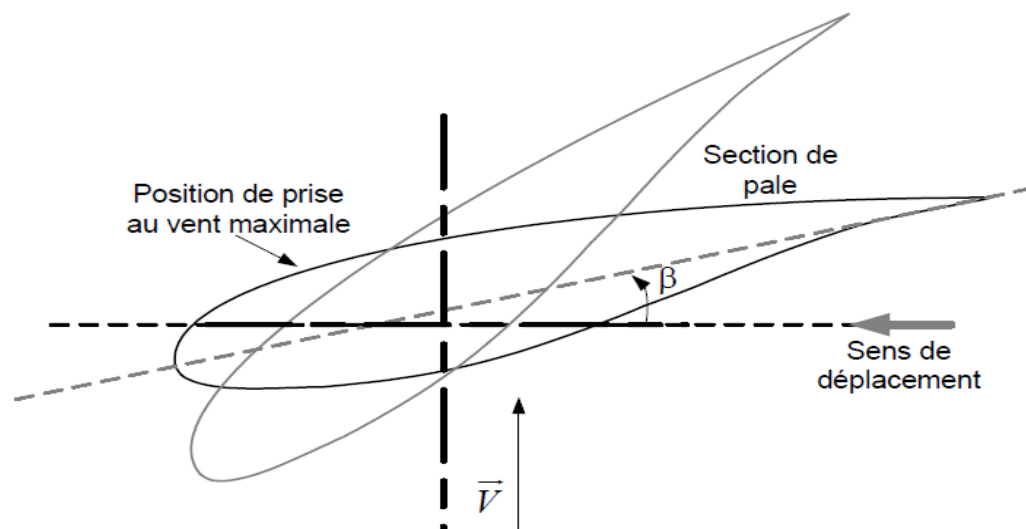


Figure I-14 : Variation de l'angle de calage d'une pale

I.5.4.2. Le système « stall » :

Le comportement aérodynamique des pales évolue également d'une manière passive selon le rapport entre la vitesse de rotation de la turbine et la vitesse du vent. En effet les pales peuvent être conçues de façon à ce qu'à partir d'une certaine vitesse de vent, la turbulence provoquée par le profil des pales entraîne un décrochage aérodynamique et par suite une décroissance du couple capté par chacune des pales. Ce décrochage dépend notamment de l'angle de calage des pales. Les pales sont fabriquées avec un pas variant suivant la position le long de la pale, permettant ainsi le décrochage aérodynamique qui se produit progressivement d'abord près du rayon du moyeu puis de plus en plus près du bout de la pale [N Mek], [F Poi].

Ce genre de contrôle passif de la puissance captée par les pales est appelé (stall-régulation) ou (régulation par décrochage aérodynamique).

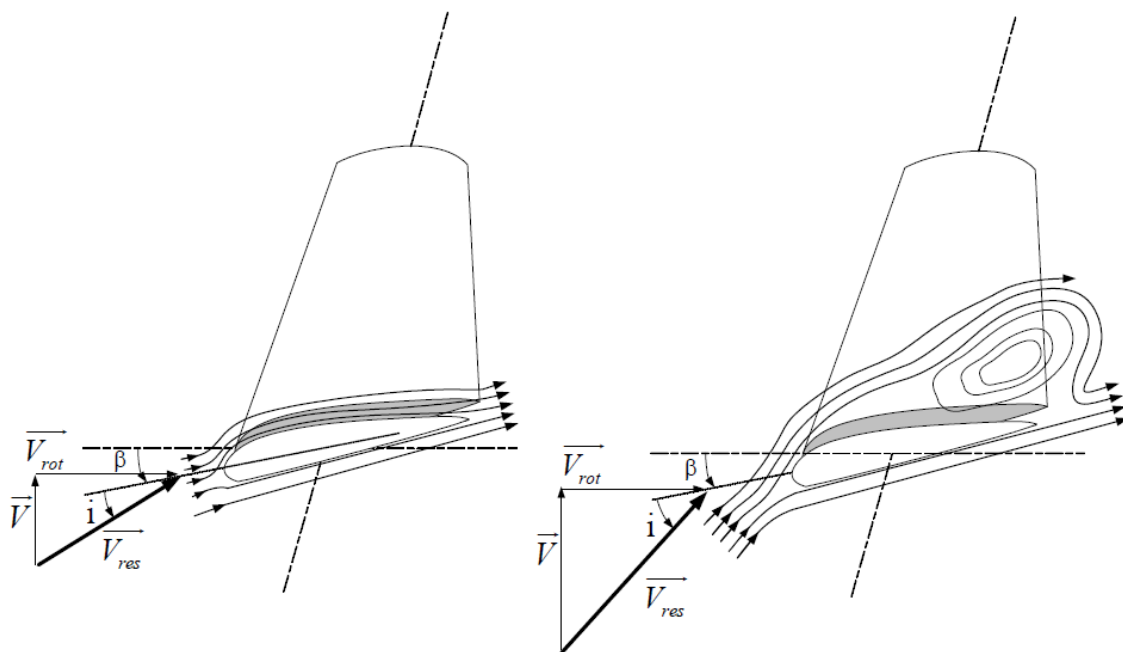


Figure I-15 : Flux d'air sur un profil de pale " stall "

Le système « stall » est beaucoup moins lourd et moins coûteux que le système décrit précédemment. En effet, c'est le profil des pâles établis lors de la construction qui fixe les caractéristiques aérodynamiques.. Les éoliennes munies du système stall génèrent une puissance électrique variable dont la valeur maximale correspond à la puissance nominale de la machine. En dessous de cette valeur, la puissance fournie croît avec la vitesse du vent. Au-delà, la puissance fournie décroît avec la vitesse du vent. [F Poi], [V cou].

Dans ce système pas de control de puissance le maximum sera lorsque la turbine atteint sa vitesse nominal la figure (I-16) montre l'évolution de cette puissance

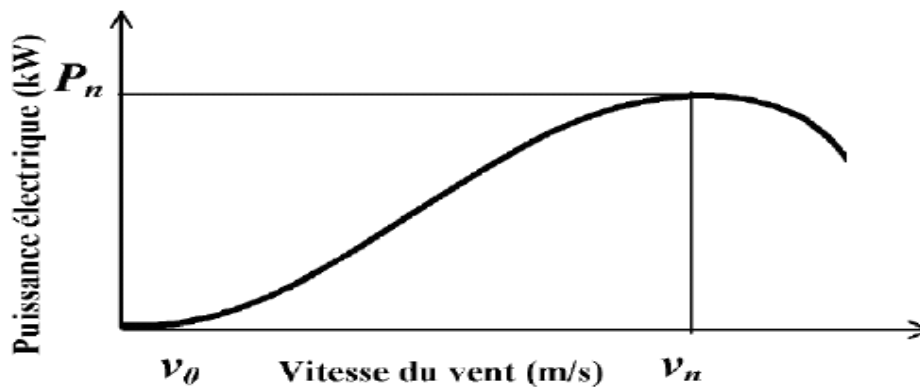


Figure I-16 : Puissance d'éolienne munie d'un système stall

En comparaison avec le pitch, le « stall » a pour avantage l'absence de système de contrôle d'angle de calage. La construction est donc plus simple et moins coûteuse, Par contre la puissance active n'est pas contrôlable, [V cou].

I.5.4.3. Le système « stall actif »

Le système stall actif est la combinaison des deux systèmes décrits précédemment, il est utilisé pour les machines de très forte puissance. Le décrochage aérodynamique est obtenu progressivement grâce à un dispositif permettant un débattement des pales contre le vent, les actionneurs électriques ou hydrauliques nécessaires, sont de taille réduite, les mouvements des pales restant de faible amplitude ainsi le dispositif mécanique est technologiquement plus simple et moins coûteux, [V cou].

I.6. Chaîne de conversion électrique des éoliennes de grande puissance

L'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique par l'éolienne, ensuite la vitesse de rotation de l'éolienne (de 10 à 200 tr/min) est adaptée à celle de la génératrice classique (typiquement de 750 à 3000 tr/min) avec un multiplicateur de vitesse.

La génératrice a pour rôle de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique, le générateur peut ensuite être lié directement ou indirectement au réseau, S'il est lié directement au réseau alors il tourne à vitesse «fixe» ou très faiblement variable en jouant sur le glissement de la machine asynchrone.

Si le générateur est lié indirectement au réseau, l'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique.

Ce convertisseur autorise le fonctionnement à vitesse variable de ce type de chaîne permettant d'utiliser une machine synchrone, asynchrone ou encore machine spéciale, Ceci entraîne une amélioration du rendement énergétique du système, [N mek].

I.7. Les différentes classes et Synthèse d'un système éolien :

On peut classer les systèmes éoliens à axe horizontal en deux différentes classes :

I.7.1. Eoliennes à vitesse fixe

Ce sont des systèmes qui fonctionnent pour des vitesses fixes et bien déterminées afin de produire de l'électricité selon les normes. Cette vitesse est définie selon le générateur électrique utilisé. Ce genre de système est destiné à travailler pour des vitesses nominales et cela si on admet que la vitesse nominale est celle qui donne au générateur électrique la possibilité de générer une puissance électrique à 50Hz (le cas de notre réseau).

I.7.1.1. Machine asynchrone à cage d'écureuil

Les premières éoliennes de grande puissance mises en œuvre reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée sur le réseau électrique figure (I-17).

Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pâles (pitch control). La machine fonctionne alors en hyper synchronisme c'est-à-dire à une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme ($N_s = 1500 \text{ trs.min}^{-1}$, pour $p=2$) pour un fonctionnement en génératrice, la rotation des pâles par des actionneurs hydrauliques ou électriques, permet l'augmentation de l'angle de calage β .

La puissance peut alors être limitée à la puissance nominale de la génératrice.

Lors de fort vent, cette technique permet la mise en drapeau des pâles ($\beta=90^\circ$), [A Dav] ;

Ce type d'éolienne a pour avantages un faible coût Pas d'interfaçage d'électronique de puissance ce sont des machine standard et robuste. et Pour inconvénients la puissance extraite non optimisée impossibilité de contrôle de l'énergie réactive, le réseau imposée la magnétisation de la machine intervalle de variation de vitesse très limitée Maintenance de la boîte a vitesse est régulière

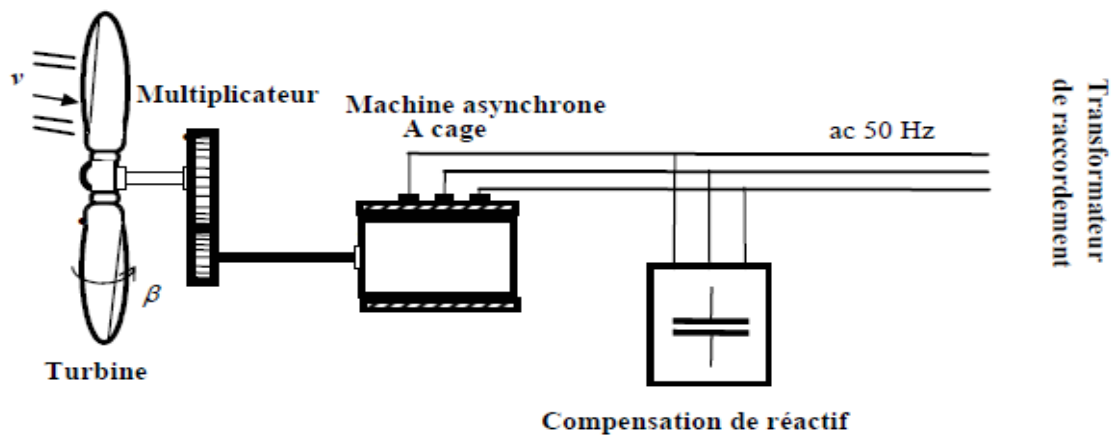


Figure I-17 : Eolienne à vitesse fixe utilisant une MAS

Les diverses qualités de cette machine comme la robustesse et le faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour son utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne.

La caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la Figure (1-18).

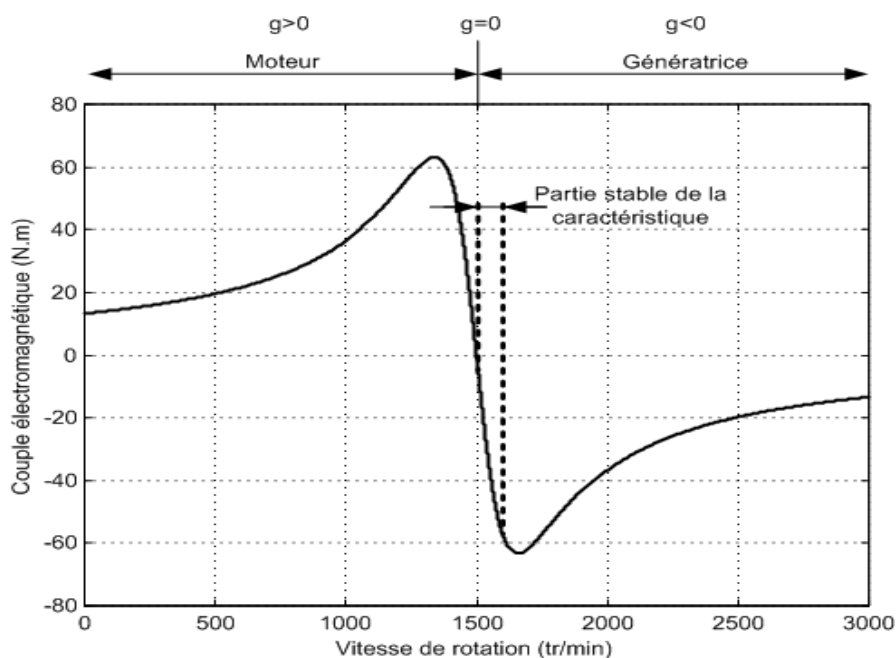


Figure I-18 : Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme (point $g=0$), dans le cas de la caractéristique ci-dessus, la génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500 et 1600 trs/min. La machine a un nombre de paire de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée

(glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs. La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine.

Ce type de convertisseur électromécanique est toute fois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau. Celui-ci peut-être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne.

Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales, et il n'exploite pas la totalité de la puissance théoriquement disponible pour les vitesses de vent élevées. De plus les variations du couple mécanique sont fréquentes à cause de la dynamique relativement lente du pitch control (plusieurs dizaines de secondes). Ces variations de couple produisent de brusques variations du courant débité sur le réseau entraînant ainsi des perturbations, [F Poi].

I.7.1.2.Machine asynchrone à double stator :

Pour améliorer le rendement du dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator (Figure I-19) :

- Un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent.
- Un stator de forte puissance à faible nombre de paires de pôles permettant de fonctionner aux vitesses de vent élevées.

Ce système reste intrinsèquement un dispositif à vitesse fixe mais possède deux points de fonctionnement différents. Le bruit ainsi engendré par l'éolienne est alors plus faible pour les petites vitesses de vent car l'angle de calage nécessaire à l'orientation des pales atteint des valeurs moins élevées. La présence d'un deuxième stator rend la conception de la machine particulière et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble [F Poi].

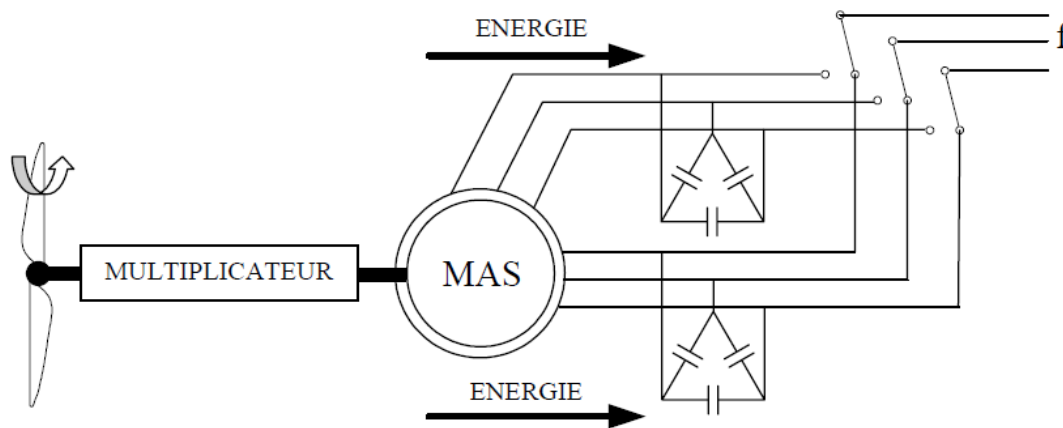


Figure I-19: Machine asynchrone à double stator

I.7.2 Eolienne à vitesse variable

Ce sont des systèmes aptes à travailler pour des vitesses égales ou différentes de la vitesse nominale (optimale), et cela pour produire la puissance max à partir de l'énergie cinétique du vent disponible.

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la figure (I.20).

Ce type d'éolienne a pour avantages un fonctionnement à vitesse variable, l'interface d'électronique de puissance est dimensionnée à 30% de la puissance nominale ce sont des machines standard, on peut gérer la connexion au réseau et la magnétisation de la machine en cas de problème sur le réseau. Pour les inconvénients le prix de l'interface de l'électronique de puissance, le contrôle et la commande sont très compliqués, la maintenance de la boîte à vitesse et les contacts glissants (bagues – balais) est régulière.

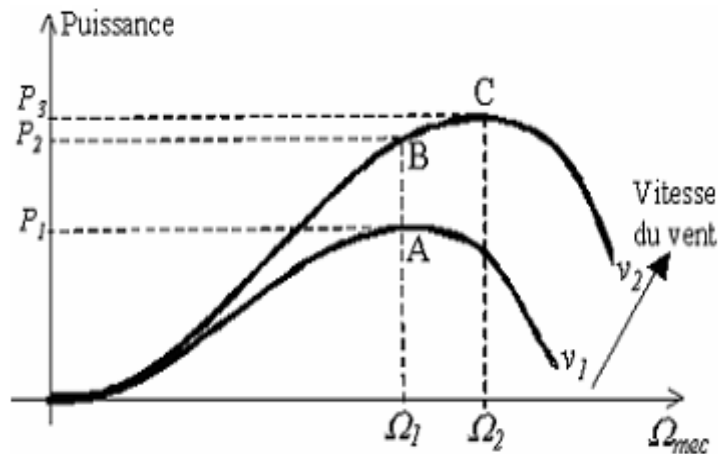


Figure I-20 : Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et de la vitesse du vent

Pour une vitesse de vent v_1 et une vitesse mécanique de la génératrice Ω_1 on obtient une puissance nominale P_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de v_1 à v_2 , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance P_2 se trouve sur la 2^{ème} caractéristique (point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure Ω_2 . Il faut donc rendre la vitesse mécanique de la génératrice variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée d'où l'intérêt de faire fonctionner les éoliennes de grande puissance à vitesse variable.

Les techniques d'extraction maximale de puissance consistent à ajuster le couple électromagnétique de la génératrice pour fixer la vitesse à une valeur de référence calculée pour maximiser la puissance extraite (représenté par la courbe en pointillés) sur la figure (I-18), [T Wil].

On peut citer d'autres avantages des éoliennes à vitesse variable comparées à celles fonctionnant à vitesse fixe comme suit :

- Pour des faibles vitesses de vent elles augmentent la plage de fonctionnement, la puissance générée du système figure (I-21).
- Le système d'orientation des pales étant simplifié puisque le contrôle de la vitesse du générateur via le couple électromagnétique permet de réduire le système d'orientation des pales.
- Elles réduisent les efforts mécaniques de par le fait que lors de variations du vent, la vitesse de la turbine est adaptée

- Elles réduisent le bruit lors des fonctionnements à faible puissance car la vitesse est petite, [A Dav].

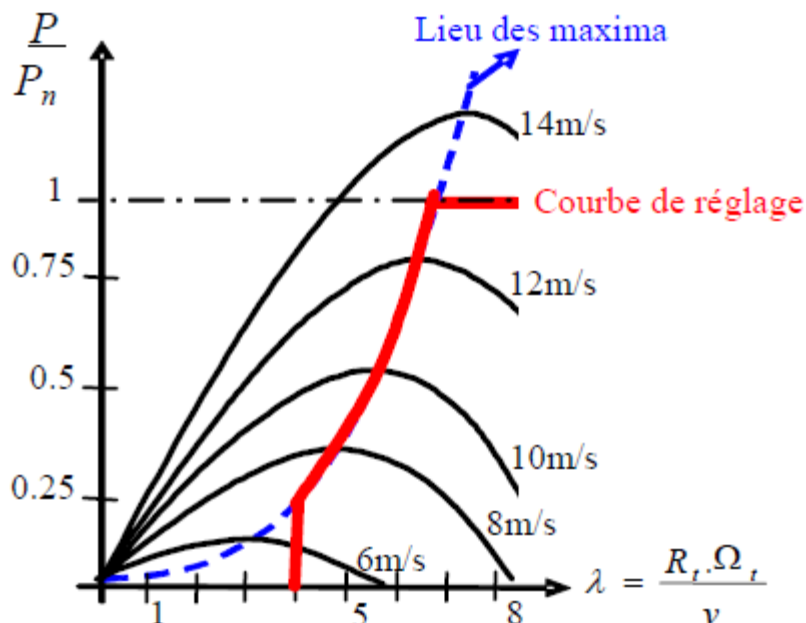


Figure I-21: Exemple de caractéristique de réglage de la vitesse

I.7.2.1. Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance :

Le dispositif de base est représenté sur la (Figure 1-22) quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, la tension produite est redressée et transformée en tension continue.

Le fonctionnement de l'onduleur est alors classique et une commande adéquate permet de délivrer une tension alternative de fréquence fixe correspondant à celle du réseau avec un facteur de puissance unitaire. La puissance nominale de la génératrice détermine alors la puissance maximale que peut fournir l'éolienne. Les convertisseurs utilisés sont dimensionnés pour la totalité de cette puissance échangée entre la machine et le réseau. Ils représentent donc un coût important, des pertes non négligeables (jusqu'à 3% de la puissance nominale de la machine) et entraînent des perturbations qui nuisent au rendement et à la qualité de l'énergie délivrée. De plus, la présence des capacités est indispensable pour fournir l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine. Cette énergie ne peut pas être fournie par le réseau

car le redresseur est unidirectionnel. Il peut être éventuellement remplacé par un redresseur MLI à base d'IGBT dont la structure est semblable à celle de l'onduleur. Dans ce cas, le transfert de puissance réactive est contrôlable et se fait du bus continu vers la machine et le transfert de puissance active est identique au cas du redresseur simple. Cette solution alourdit toutefois le dispositif en terme de coût et de complexité de mise en œuvre, de plus, les enroulements statoriques du moteur sont alors soumis à des variations brusques des tensions « dv/dt » importants qui peuvent réduire leur durée de vie. L'ensemble de ces inconvénients n'ont pas permis un développement industriel important de ce dispositif, [F Poi].

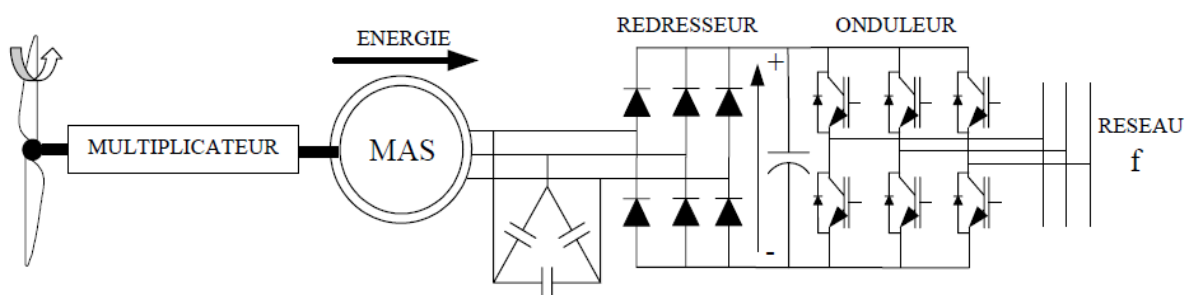


Figure 1-22:Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur – onduleur

I.7.2.2. Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné" :

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone) constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée, mais constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices munies de contacts glissants sur lesquelles viennent frotter des balais lors de la rotation de la machine, [F Poi].

Intégrée dans un système éolien, la machine a généralement son stator connecté au réseau et l'énergie rotorique varie selon différents systèmes. Les convertisseurs utilisés sont alors dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Le surcoût engendré

par la présence de bobinages au rotor est alors compensé par l'économie réalisée sur le convertisseur.

En comparaison avec la machine asynchrone à cage, la MADA permet d'avoir une plage de vitesse de rotation variable de $\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme.

I.7.2.2.a. Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée :

Le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur

Le glissement peut être rendu variable par extraction d'une fraction de puissance au circuit rotorique et dissipation dans une résistance placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur commandé (voir figure 1.23). Plus la pulsation rotorique est proche de la pulsation de synchronisme, plus la puissance extraite par le rotor est importante.

Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur [F Poi].

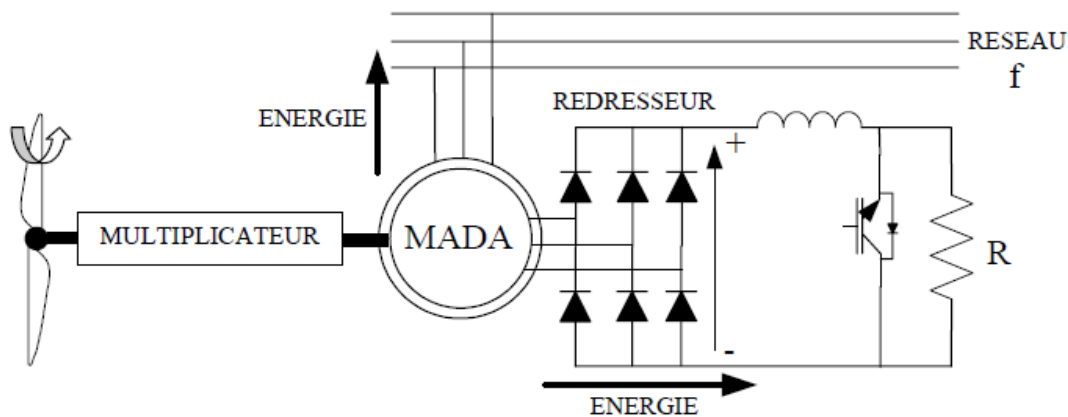


Figure I-23 : MADA avec contrôle de glissement par l'énergie dissipée

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R, ce qui nuit au rendement du système. De plus cela augmente la puissance transitant dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance. Cette solution n'apporte que très peu d'évolutions par rapport à la structure MAS (à cage). Elle conserve les mêmes inconvénients, on peut néanmoins la considérer comme le précurseur des technologies à vitesse variable modernes, [F Poi].

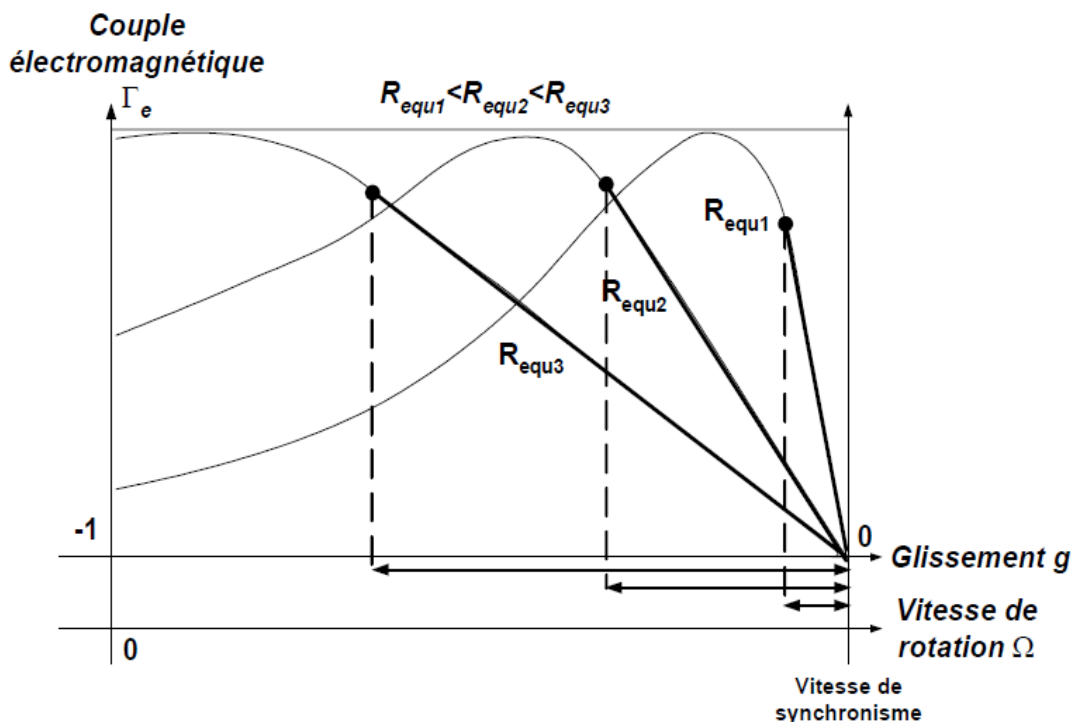


Figure I-24: Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique

I.7.2.2.b. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer :

Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau, l'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine, [R Aza].

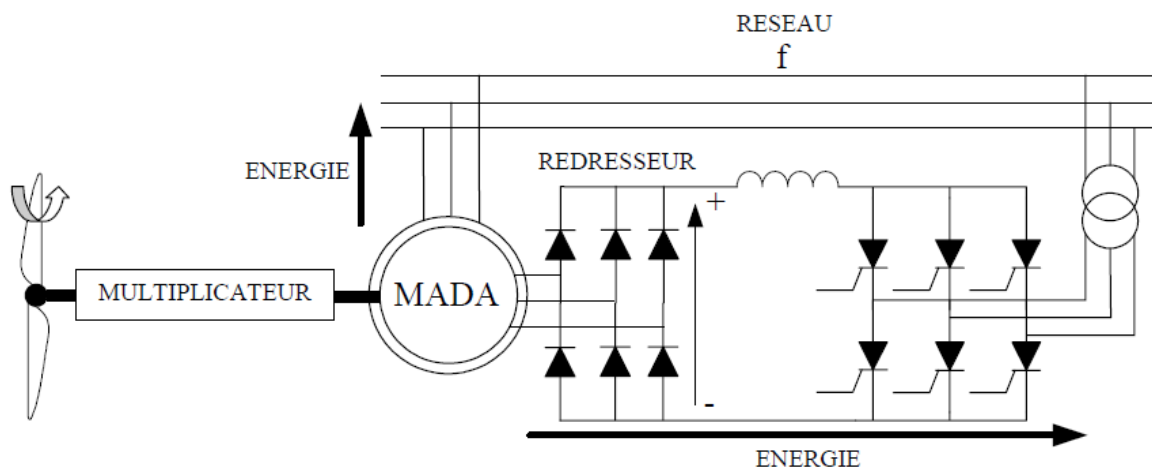


Figure I-25: MADA structure de Kramer

Ce système est avantageux s'il permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. Afin de respecter cette contrainte, le glissement est maintenu inférieur à 30%. L'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance, de plus le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau) donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme. Cette solution n'est plus utilisée au profit de la structure de Scherbius avec convertisseurs à IGBT, [F Poi],[H Sed].

I.7.2.2.c. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec convertisseurs MLI :

Les interrupteurs utilisés ici (transistors IGBT) peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO. L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'Impulsions dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées), [F Poi].

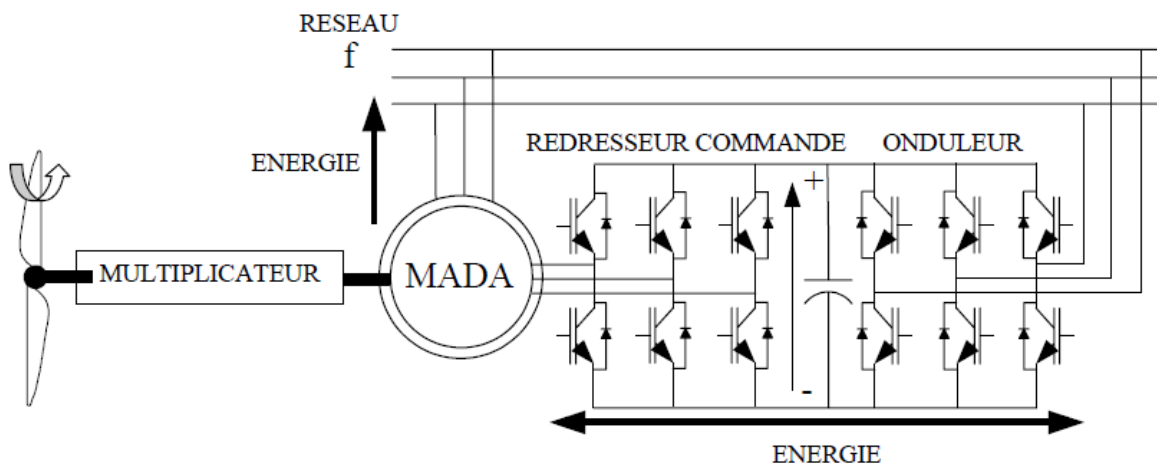


Figure I-26: Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Ce dispositif est viable dans un système éolien à vitesse variable. La bi-directionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hyposynchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau.

Si le glissement reste inférieur à $\pm 30\%$ autour du synchronisme, le convertisseur est alors dimensionné pour un tiers de la puissance nominale de la machine et ses pertes représentent moins de 1% de cette puissance. De plus, le fonctionnement hypersynchrone permet de produire de l'énergie du stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau, la puissance totale ainsi produite peut alors dépasser la puissance nominale de la machine et le facteur de puissance de l'ensemble peut être maintenu unitaire. La présence d'un convertisseur à MLI peut toutefois entraîner des dv/dt importants dans les enroulements rotoriques et faire circuler des courants de fréquences élevés dans ces mêmes enroulements, [P Bas].

I.7.2.3. Machine synchrone à rotor bobiné ou à aimants :

Les éoliennes basées sur une génératrice asynchrone à rotor bobiné présentent l'inconvénient de nécessiter un système de bagues et de balais et un multiplicateur, induisant des coûts significatifs de maintenance en particulier pour les projets. Pour limiter ces inconvénients, certains constructeurs ont développé des éoliennes basées sur des machines synchrones couplées directement à la turbine évitant ainsi le multiplicateur, si la génératrice est connectée au réseau, sa vitesse de rotation doit être un sous-multiple de la pulsation des courants statoriques. L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des problèmes pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion. Pour ces raisons, on place systématiquement une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau (figure I-27) ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation, [F Poi].

Dans la plupart des cas, le champ tournant rotorique est créé par un bobinage alimenté en courant continu (roue polaire) par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau. Ce mode d'excitation entraîne la présence de contacts glissants au rotor, c'est pourquoi on remplace souvent ce bobinage par des aimants permanents, dans ce cas le système de bagues et de balais est éliminé, et si les aimants permanents sont à grand nombre de paires de pôles (utilisation de la machine à faibles vitesses) le multiplicateur de vitesse peut être supprimé [M Kéi] ,[F Poi]. Ce type d'éolienne a pour avantages un fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesses, Puissance extraite optimisée pour les vents faibles en peut gérée la connexion aux réseau. et Pour inconvénients Prix couteaux de l'interface de l'électronique de puissance ce sont des machine spécifique énorme (grand diamètre).

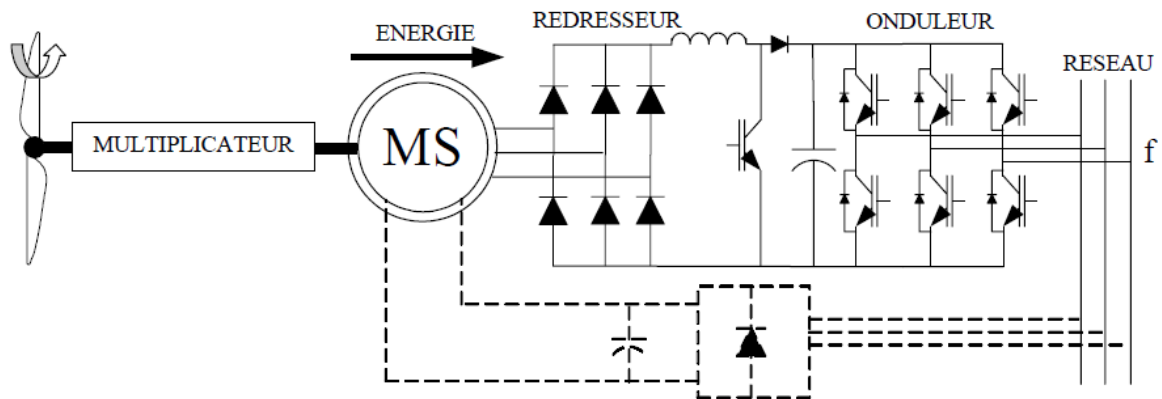


Figure I-27: Machine synchrone reliée au réseau par un dispositif redresseur – hacheur – onduleur MLI

Le convertisseur connecté au stator de la machine est un simple redresseur puisqu'elle n'absorbe pas de puissance réactive, ce qui permet d'éviter les dv/dt importants sur les enroulements statoriques. Ce redresseur est classiquement suivi d'un hacheur élévateur permettant de délivrer une tension suffisante à l'onduleur MLI pour les faibles vitesses de rotation. La présence de l'onduleur MLI permet de contrôler le facteur de puissance coté réseau. Ces convertisseurs sont toutefois dimensionnés pour la totalité de la puissance nominale de la machine et entraînent jusqu'à 3% de cette puissance de pertes, [P Bas] .

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une synthèse des différents types d'éoliennes utilisées dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique leur principe de fonctionnement ainsi que leurs principaux composants, et leurs capacités de réglage, Afin d'arriver à une compréhension du fonctionnement des turbines éoliennes, en partant de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine, nous avons décrit de façon explicite les différents éléments constitutifs de la turbine.

Nous avons constaté que les éoliennes à vitesse fixe permettent peu de réglage et fonctionnent comme des générateurs passifs, par contre les éoliennes à vitesse variable offrent plus de possibilités de réglage, mais ont un coût plus élevé.

Par la suite une étude aérodynamique en classant les différents types d'éoliennes selon leur coefficient de puissance, Nous avons parlé sur les différents générateurs électriques et les convertisseurs qui leurs sont associés et pour terminé ce chapitre une présentation de générateur le plus utilisé dans la conversion de l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique à savoir la machine asynchrone à double alimentation (MADA).

CHAPITRE II

II. Introduction

Considérons l'influence de l'utilisation d'une solution à vitesse fixe ou à vitesse variable. On peut montrer que la puissance transportée par le vent est d'autant plus importante que la vitesse du vent est grande. Mais la puissance transmise à l'arbre moteur de l'éolienne va dépendre de la vitesse de rotation de ce dernier

La Machine Asynchrone à rotor bobiné Doublement Alimentée (MADA) a fait l'objet de nombreuses recherches principalement dans son fonctionnement en génératrice, avec les répartitions de ses enroulements et sa géométrie propre elle est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte. Elle est constituée d'une armature fixe (stator) logeant trois enroulements identiques distribués sur la circonférence de la machine dont les axes sont décalés de 120° et constituant p paires de pôles, le rotor est aussi constitué de trois enroulements identiques constituant p paires de pôles. Elle est représentée sur la figure (II-1) dans un plan perpendiculaire à son axe de rotation, [H Sed].

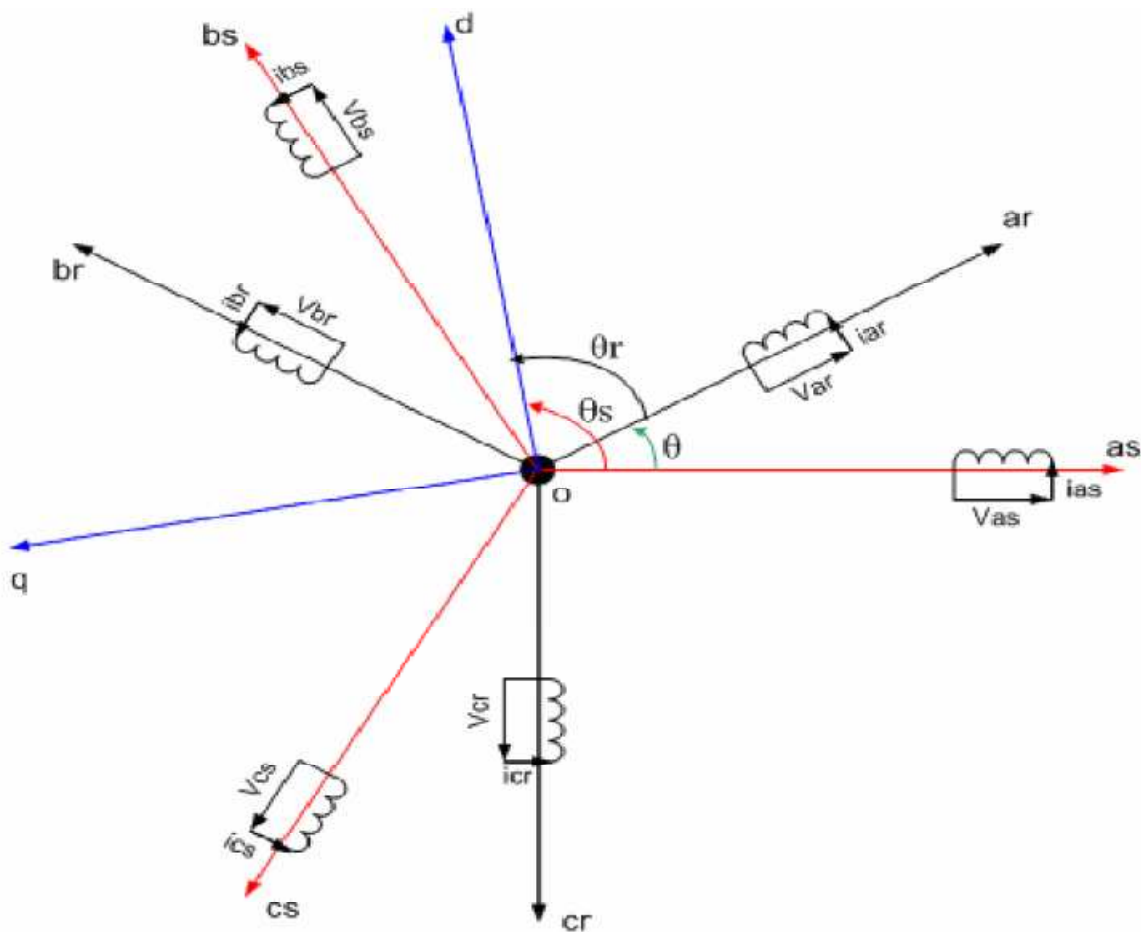


Figure II-1 : représentation schématique de la MADA dans le repère abc

II.1. Hypothèses simplificatrices de la modélisation

A cause de la répartition des enroulements de la MADA et la géométrie propre complexe et afin de faciliter les difficultés, on prend quelques hypothèses simplificatrices avancées pour modéliser les machines électriques en vu de leur commande en général :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encochage est négligeable.
- La machine est symétrique.
- La force magnétomotrice a une répartition spatiale sinusoïdale.
- Le circuit magnétique n'est pas saturé et parfaitement feuilleté il en résulte que les pertes fer et les pertes par hystérésis (les courants de Foucault) sont négligeables et que seuls les enroulements sont parcourus par des courants.
- La f.m.m créée dans chaque phase au stator et au rotor, est à répartition sinusoïdale le long de l'entrefer.
- L'influence de l'effet de la température n'est pas prise en compte, il en résulte que tous les coefficients d'inductances propres sont constants et les coefficients d'inductances mutuelles sont fonction de la position de leurs axes magnétiques. [H Sed]

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer :

- L'additivité des flux.
- La constance d'inductances propres.
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements du stator et du rotor en fonction de l'angle de leurs axes magnétiques.

II.2. Equations électriques dans les axes a,b,c

Le modèle de la MADA comporte trois équations statoriques et trois équations rotoriques :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\varphi_s] \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\varphi_r] \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$$[V_s] = [V_{as} \ V_{bs} \ V_{cs}]^t$$

$$[V_r] = [V_{ar} \ V_{br} \ V_{cr}]^t$$

$$[I_s] = [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]^t$$

$$[I_r] = [i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}]^t$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

Où R_s : résistance d'une phase statorique

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

R_r : résistance d'une phase rotorique

II.3. Equations magnétiques

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s] \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Avec:

$$[\varphi_s] = [\varphi_{as} \ \varphi_{bs} \ \varphi_{cs}]^t$$

$$[I_s] = [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]^t$$

$$[\varphi_r] = [\varphi_{ar} \ \varphi_{br} \ \varphi_{cr}]^t$$

$$[I_r] = [i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}]^t$$

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_{as} & M_{as} & M_{as} \\ M_{as} & L_{as} & M_{as} \\ M_{as} & M_{as} & L_{as} \end{bmatrix}$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_{ar} & M_{ar} & M_{ar} \\ M_{ar} & L_{ar} & M_{ar} \\ M_{ar} & M_{ar} & L_{ar} \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = M_{rs} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$\text{Et : } [M_{rs}] = [M_{sr}]^t$$

- L_{as} : Inductance propre d'une phase statorique.
- L_{ar} : Inductance propre d'une phase rotorique.
- M_{as} : Inductance mutuelle entre deux phases du stator.
- M_{ar} : Inductance mutuelle entre deux phases du 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).

De (II.1) et (II.2) on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}([L_{ss}][I_{ss}]) + \frac{d}{dt}([M_{sr}][I_r]) \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}([L_{rr}][I_r]) + \frac{d}{dt}([M_{rs}][I_s]) \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

II.4. Equation mécanique de la machine

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f \Omega \quad (\text{II.4})$$

Le couple électromagnétique peut être obtenu à l'aide d'un bilan de puissance.

$$C_{em} = P[I_s] \frac{d}{d\theta} ([M_{sr}][I_r]) \quad (\text{II.5})$$

Le fonctionnement de la machine est régi par un système d'équations non linéaires, dépendant de $L(\theta)$, sa résolution analytique dans le repère (abc) est très difficile, ce problème se simplifie en adoptant une transformation qui permet le passage d'un système triphasé à un système biphasé équivalent, [R Aza].

II.5. Modèle de la MADA dans le plan (dq)

Après établissement du modèle électromagnétique de la machine dans le repère triphasé en tenant compte des hypothèses simplificatrices, on peut noter sa complexité, ce qui nous oblige à faire appel à des modèles plus simples dans des repères à nombre d'axes réduits permettant facilement la traduction mathématique de la machine, l'étude et l'analyse de son régime transitoire Parmi ces modèles, on cite celui le plus utilisé dit modèle de Park,[T Bel] .

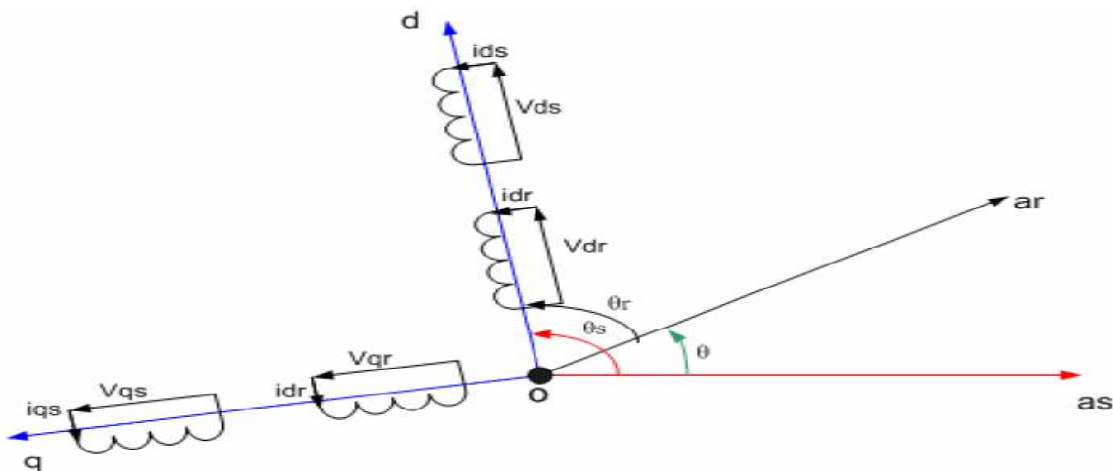


Figure II-2 : représentation schématique de la MADA dans le repère dq

II.5.1 La transformation de park

Ce modèle a la possibilité de faire une transformation d'un système triphasé (a,b,c) à un système équivalent biphasés généralisé (d,q) et inversement, avec la création des mêmes

forces magnétomotrices du champ électromagnétique tournant. Cette transformation est appelée la transformation de Park [T Bel]

Elle consiste à appliquer aux courants, tensions et flux, un changement de variable faisant intervenir l'angle entre les axes des phases et les axes d et q, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle du système précédent. Dans la matrice de Park, c'est l'angle θ_s qui intervient pour les grandeurs statoriques. et θ_r pour les grandeurs rotoriques,[H.Sed]

La matrice de transformation de Park est définie comme suit :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

II.5.2 La transformation inverse de Park

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

Ainsi les grandeurs statoriques et rotoriques sont transformées comme suit:

Les tensions :

$$\begin{cases} [V_{Sdq0}] = [P(\theta_s)] [V_{Sabc}] \\ [V_{rdq0}] = [P(\theta_r)] [V_{rabc}] \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Les courants :

$$\begin{cases} [i_{sdq0}] = [P(\theta_s)] [i_{sabc}] \\ [i_{rdq0}] = [P(\theta_r)] [i_{rabc}] \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Les flux :

$$\begin{cases} [\varphi_{sdq0}] = [P(\theta_s)] [\varphi_{sabc}] \\ [\varphi_{rdq0}] = [P(\theta_r)] [\varphi_{rabc}] \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

II.5.3 Equations magnétiques dans les axes d et q

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M \\ M & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{qs} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M \\ M & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

$$\varphi_{0s} = L_{0s} i_{0s} \quad \varphi_{0r} = L_{0r} i_{0r} \quad (\text{II.13})$$

En supposant que le système est symétrique, les grandeurs homopolaires sont nulles, [P Bar].

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
- ❖ $L_{0s} = L_{as} + 2M_{as}$
- ❖ $L_{0r} = L_{ar} + 2M_{ar}$

II.5.4 Equations électriques dans les axes d et q

$$\begin{cases} v_{ds} = \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \varphi_{qs} \frac{d\theta_s}{dt} + R_s i_{ds} \\ v_{qs} = \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \varphi_{ds} \frac{d\theta_s}{dt} + R_s i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

$$\begin{cases} v_{dr} = \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \varphi_{qr} \frac{d\theta_r}{dt} + R_r i_{dr} \\ v_{qr} = \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \varphi_{dr} \frac{d\theta_r}{dt} + R_s i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

II.5.5 Expression du couple électromagnétique dans les axes d et q

La transformation de Park conserve la puissance instantanée, donc elle s'écrit :

$$P_s = v_{as} i_{as} + v_{bs} i_{bs} + v_{cs} i_{cs} = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \quad (\text{II.16})$$

$$P_s = \left(\frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \varphi_{qs} \frac{d\theta_s}{dt} + R_s i_{ds} \right) i_{ds} + \left(\frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \varphi_{ds} \frac{d\theta_s}{dt} + R_s i_{qs} \right) i_{qs}$$

$$P_s = (R_s i_{ds}^2 + R_s i_{qs}^2) + \left(\frac{d\varphi_{ds}}{dt} i_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} i_{qs} \right) + (\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \frac{d\theta_s}{dt} \quad (\text{II.17})$$

Le premier terme : représente la puissance dissipée en pertes Joule dans les enroulements du stator.

Le second terme : représente l'échange d'énergie électromagnétique avec la source statorique (l'énergie magnétique emmagasinée par unité de temps).

Le troisième terme : représente la puissance électrique transformée en puissance mécanique. [J.Car] , Cette dernière peut se mettre sous la forme :

$$P_t = C_{em} \Omega_s = (\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \omega_s \quad (\text{II.18})$$

Où : $\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$ et $\omega_s = p \cdot \Omega_s$

P_t : puissance transmise du stator au rotor, et p : nombre de paire de pôle de la machine.

Alors le couple électromagnétique s'écrit :

$$C_{em} = p \cdot (\varphi_{ds} \cdot i_{qs} - \varphi_{qs} \cdot i_{ds}) \quad (\text{II.19})$$

Il est possible d'obtenir d'autres expressions du couple en utilisant les expressions des flux statoriques et rotorique, [J Car].

De (II.11), (II.12) et (II.19) on aura :

$$C_{em} = p \cdot [(L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr}) \cdot i_{qs} - (L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr}) \cdot i_{ds}]$$

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

De l'équation (II.11) on tire le courant i_{dr}

$$i_{dr} = \frac{1}{L_r} \cdot (\varphi_{dr} - M \cdot i_{ds}) \quad (\text{II.21})$$

De l'équation (II.12) on tire le courant i_{qr} ,

$$i_{qr} = \frac{1}{L_r} \cdot (\varphi_{qr} - M \cdot i_{qs}) \quad (\text{II.22})$$

On remplace (II.21) et (II.22) dans (II.20) le couple devient :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_r} [(\varphi_{dr} - M \cdot i_{ds}) \cdot i_{qs} - (\varphi_{qr} - M \cdot i_{qs}) \cdot i_{ds}]$$

$$C_{em} = p \frac{M}{L_r} (i_{qs} \varphi_{dr} - i_{ds} \varphi_{qr}) \quad (\text{II.23})$$

De l'équation (II.11) on tire le courant i_{ds} ,

$$i_{ds} = \frac{1}{L_s} \cdot (\varphi_{ds} - M \cdot i_{dr}) \quad (\text{II.24})$$

De l'équation (II.12) on tire le courant i_{qs} ,

$$i_{qs} = \frac{1}{L_s} \cdot (\varphi_{qs} - M \cdot i_{qr}) \quad (\text{II.25})$$

On remplace (II.24) et (II.25) dans (II.20) le couple devient :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} [i_{dr} \cdot (\varphi_{qs} - M \cdot i_{qr}) - i_{qr} \cdot (\varphi_{ds} - M \cdot i_{dr})]$$

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (I_{dr} \varphi_{qs} - I_{qr} \varphi_{ds}) \quad (\text{II.26})$$

Le couple électromagnétique résulte de l'interaction d'un terme de flux à ce lui de courant, ces expressions ressemblent à l'expression du couple de la machine à courant continu où le collecteur permet d'obtenir un découplage, le problème posé ici est de pouvoir contrôler indépendamment l'un de l'autre, le terme de flux et le terme de courant, d'où l'intérêt d'utiliser la commande vectorielle, [J Car].

II.5.6 Choix du référentiel du travail

Il existe trois choix importants. On peut fixer le repère dq au stator, au rotor ou au champ tournant. Il est symbolisé par le vecteur flux statorique, On parle de vecteur alors qu'en vérité on a tout un champ. Le vecteur permet de donner une idée visuelle de la phase et du module d'amplitude du flux .

Le flux rotorique, est représenté par un vecteur flux rotorique qui tourne également à la même vitesse, c'est-à-dire au synchronisme. En effet, c'est le rotor qui 'glisse' par rapport au champ tournant. Mais, en régime permanent, les deux flux, statorique et rotorique tournent à la même vitesse, au synchronisme

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, [P Bar].

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

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

θ_s : pulsation des courants statoriques.

ω : vitesse électrique du rotor.

$$g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} : \text{Glissement}$$

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

Il existe trois choix de référentiels intéressants :

II.5.6. a. 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 ;

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \quad \text{Donc} \quad \omega = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{d\theta_s}{dt}$$

II.5.6.b. 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 ; [P.Bar].

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \quad \text{Donc} \quad \omega_s = \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_r}{dt}$$

II.5.6.c. Référentiel lié au champ tournant

En général, le référentiel lié au champ tournant est utilisé pour réaliser le contrôle vectoriel du fait que les grandeurs deviennent continues. Ce référentiel tourne à la vitesse de synchronisme, dans ce cas les grandeurs statoriques et rotoriques sont connues en régime permanent, il est préférable de travailler dans ce repère lors de l'étude de la commande d'une machine, il se caractérise par ; [E S Ab], [P Bar].

$$\frac{d\theta_f}{dt} = g.\omega_s \quad , \quad \omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \quad \text{alors :}$$

$$\begin{cases} v_{ds} = \frac{\varphi_{ds}}{dt} - \varphi_{qs}.\omega_s + R_s.i_{ds} \\ v_{qs} = \frac{\varphi_{qs}}{dt} + \varphi_{ds}.\omega_s + R_s.i_{qs} \\ v_{dr} = \frac{\varphi_{dr}}{dt} - \varphi_{qr}.\omega_s + R_r.i_{dr} \\ v_{qr} = \frac{\varphi_{qr}}{dt} + \varphi_{dr}.\omega_s + R_r.i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Le modèle de la machine s'écrit dans le repère de Park lié au champ tournant

$$C_{em} - Cr = f \cdot \Omega + J \frac{d\Omega}{dt} \quad \text{où} \quad C_{em} = p \frac{M}{L_s} (I_{dr} \varphi_{qs} - I_{qr} \varphi_{ds})$$

II.5.7 Mise sous forme d'équations d'état

On met le système sous forme d'équations d'état :

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{U} \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{X} + \mathbf{D} \cdot \mathbf{U} \end{cases}$$

On choisit le vecteur d'état \mathbf{X} comme suit : $\mathbf{X} = \begin{pmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \\ \Omega \end{pmatrix}$

Les grandeurs v_{dr}, v_{qr} sont considérées comme variable de commande, [R Aza] .

Le modèle mathématique de la machine devient :

- $\frac{d\varphi_{ds}}{dt} = V_{ds} - \frac{1}{T_r} \cdot \varphi_{ds} + \frac{M}{T_s} \cdot i_{dr} - W_s \cdot \varphi_{qr}$
- $\frac{d\varphi_{qs}}{dt} = V_{qs} - \frac{1}{T_s} \cdot \varphi_{qs} + \frac{M}{T_s} \cdot i_{qr} - W_s \cdot \varphi_{dr}$ (II.28)
- $\frac{di_{dr}}{dt} = -\frac{M}{L_r L_s \sigma} \cdot v_{ds} + \frac{M}{L_s L_r \sigma T_r} \cdot \varphi_{qs} - \frac{M}{L_s L_r \sigma} w \cdot \varphi_{qs} - \left(\frac{R_r}{L_r \sigma} + \frac{M^2}{L_s L_r \sigma T_r} \right) i_{dr} - (W_s - w) i_{qr} + \frac{1}{L_r \sigma} v_{dr}$
- $\frac{di_{qr}}{dt} = -\frac{M}{L_r L_s \sigma} \cdot v_{qs} + \frac{M}{L_s L_r \sigma T_r} \cdot \varphi_{qs} + \frac{M}{L_s L_r \sigma} w \cdot \varphi_{ds} - \left(\frac{R_r}{L_r \sigma} + \frac{M^2}{L_s L_r \sigma T_r} \right) i_{dr} + (W_s - w) i_{dr} + \frac{1}{L_r \sigma} v_{qr}$
- $\frac{d\Omega}{dt} = \frac{P \cdot M}{J L_s} \left(\varphi_{qs} i_{dr} - \varphi_{ds} i_{qr} \right) - \frac{C_r}{J} - \frac{1}{J} f \cdot \Omega$

Avec : $T_s = \frac{L_s}{R_s}$ (constante de temps statorique) , $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$ (coefficient de dispersion).

II.6. Bilan des puissances dans un moteur asynchrone à rotor bobiné: [T Wil]

Avant d'introduire le bilan des puissances d'une MADA on commence d'abord par une machine asynchrone à rotor bobiné, en effet La MADA n'est qu'une machine asynchrone à rotor bobiné alimentée par le stator et le rotor.

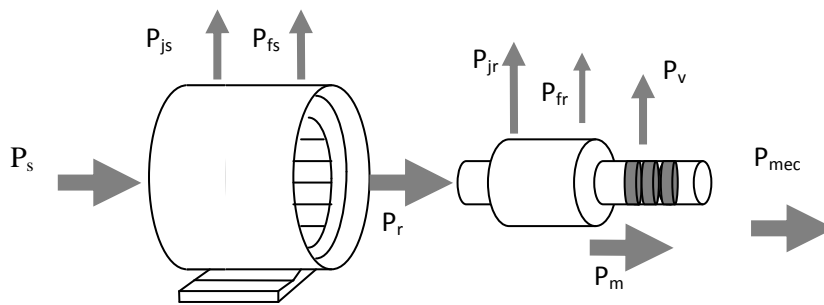


Figure II-3 : bilan des puissances dans un moteur asynchrone à rotor bobiné

P_s : Puissance absorbée au stator

P_{js} : pertes Joule statoriques

P_{fs} : pertes fer statoriques

P_r : Puissance transmise au rotor

P_{jr} : pertes Joule rotoriques

P_{fr} : pertes fer rotoriques

P_v : pertes par ventilation

P_m : Puissance mécanique développée

P_{mec} : Puissance mécanique transmise à la charge

Puissance absorbée au stator : [T Wil]

$$P_s = 3.V_s.I_s.\cos\varphi \quad (\text{II-29})$$

Où : V_s : Tension entre phase et neutre du stator.

I_s : courant dans une phase du stator.

φ : déphasage entre tension et courant statorique.

Puissance transmise au rotor :

$$P_r = P_s - P_{js} - P_{fs} \quad (\text{II-30})$$

Le rapport entre les fems créés au rotor et au stator est défini par ; [A Gai]

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r}{N_s} \cdot g = m \cdot g \quad (\text{II-31})$$

N_r : nombre de spires des bobinages rotoriques.

N_s : nombre de spires des bobinages statoriques.

m : le rapport de transformation rotor /stator équivalent au rapport des nombres de spires rotoriques et statoriques.

Les courants au stator et au rotor sont liés comme dans un transformateur parfait : [A Gai]

$$\frac{i_r}{i_s} = \frac{1}{m} \quad (\text{II-32})$$

Donc le rapport entre les puissances apparentes rotoriques S_r et statorique S_s s'écrit comme suit : [A .Gai]

$$\frac{S_r}{S_s} = \frac{i_r}{i_s} \cdot \frac{E_r}{E_s} = \cdot g \quad (\text{II-33})$$

$$S_r = g \cdot S_s$$

$$S_r = P_r + jQ_r \quad (\text{II 34})$$

$$S_s = P_s + jQ_s$$

On en déduit que :

$$P_r = g \cdot P_s \quad (\text{II-35})$$

$$Q_r = g \cdot Q_s$$

La pulsation au stator étant constante il est possible de contrôler la vitesse de la MADA en agissant sur la puissance apparente rotorique via le glissement g , ainsi il apparait bien que la puissance rotorique ne représente qu'une portion égale à g fois la puissance requise au stator, et pour des faibles glissements, le convertisseur coté rotor est dimensionné pour une fraction de (g %) de la puissance statorique, [A Gai].

Pertes Joule rotoriques : [T Wil]

$$P_{jr} = g \cdot P_r \quad (\text{II-36})$$

Puissance mécanique développée : [T Wil]

$$P_m = P_r \cdot (1 - g) \quad (\text{II-37})$$

Puissance mécanique transmise à la charge : [T Wil]

$$P_{mec} = P_m - P_v \quad (\text{II-38})$$

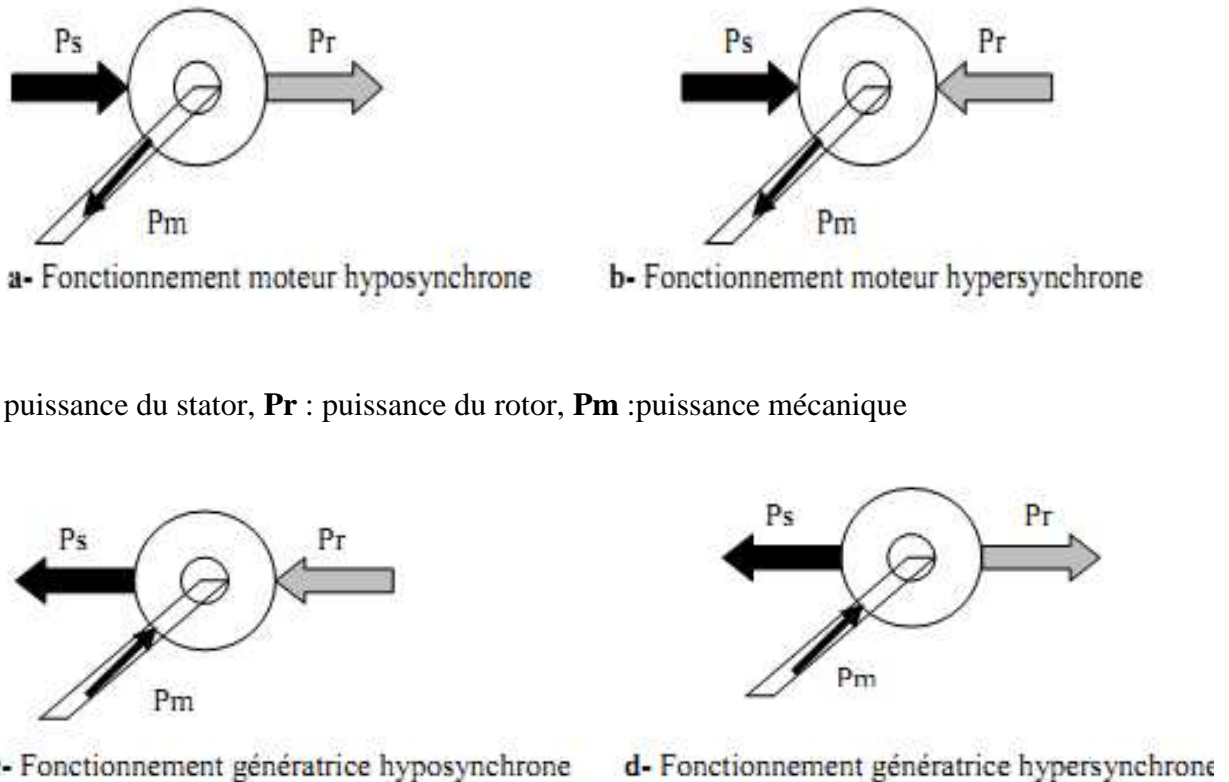
Les figures (II-4) montrent les configurations de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation dont le rotor est relié directement au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur.

II.7. Bilan des puissances dans une machine asynchrone à double alimentation:

Pour le fonctionnement de la MADA, elle est excitée simultanément au stator et au rotor respectivement, avec deux fréquences imposées par deux sources d'alimentations. Une certaine synchronisation entre les deux champs est exigée pour garantir une certaine stabilité de la machine. Le caractère synchrone de ce type de machine demeure dans la mesure où la vitesse du rotor ne sera ni synchronisée avec la vitesse du champ du stator ni avec celui du rotor, mais elle sera donnée par leur combinaison linéaire, soit fonctionnement hyper synchrone ou fonctionnement hypo synchrone.

Dans les modes de fonctionnement et par l'imposition des fréquences, la vitesse en régime permanent est constante pour n'importe quelle charge.

Comme la MADA peut fonctionner en moteur et en génératrice aux vitesses hyposynchrone et hypersynchrone, on peut distinguer quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine comme il est illustré par la figure (II-4) :



P_s : puissance du stator, P_r : puissance du rotor, P_m :puissance mécanique

Figure II-4 : type des fonctionnements de la MADA

La figure (II-4-a) montre fonctionnement moteur hyposynchrone, dont la puissance P_r est fournie par le rotor, ce régime est généralement connu comme un mode de récupération d'énergie de glissement. Dans le cas où la vitesse augmente de sorte que le moteur fonctionne en hypersynchrone , dans ce cas la puissance P_r devient absorbée par le rotor comme illustre la figure (II.4.b).

Dans le cas où la machine fonctionne en mode génératrice hyposynchrone comme nous montre la figure (II-4-c),la puissance P_r est absorbée par le rotor et si la vitesse augmente de sorte que la génératrice fonctionne en hypersynchrone dans ce cas là, la puissance P_r est fournie par le rotor comme illustré la figure (II.4.d) ,[F Poi].

Conclusion :

Le modèle de la machine asynchrone présenté traditionnellement est un modèle régime permanent, C'est-à-dire que la machine est supposée fonctionner en régime établi, qu'elle est alimentée sous un système triphasé de valeur efficace constante et qu'elle tourne à une vitesse constante.

Dans ce chapitre, nous avons rappelé la structure de la MADA, ainsi que son modèle mathématique dans le repère naturel (abc), on a fait appel à la transformation de Park pour transformer la machine triphasée en une machine biphasée équivalente, cette transformation permet une réduction notable de la complexité de la résolution des équations différentielles du système.

CHAPITRE III

III. Introduction :

Le but de la commande vectorielle est d'arriver à commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu à excitation indépendante où il y a un découplage naturel entre les grandeurs commandant le flux (le courant d'excitation) et celle liée au couple (le courant d'induit), par conséquent toute variation du couple induite par augmentation ou diminution du courant statorique se traduit par une évolution du flux induit dans le rotor. donc pour contrôler le couple. Il faut donc réaliser un découplage des grandeurs du couple et du flux par un système de commande externe à la machine, et cela en appliquant la commande vectorielle. Ce découplage permet d'obtenir une réponse très rapide du couple, une grande plage de commande de vitesse et une haute efficacité pour une grande plage de charge en régime permanent.

Pour établir la commande vectorielle de la génératrice, on considère l'hypothèse simplificatrice que les enroulements statoriques ou rotoriques de la machine sont supposés triphasés équilibrés, donc toutes les composantes homopolaire sont nulles.

Ensuite, on calcule le régulateur nécessaire pour la commande, et enfin on termine par la simulation qui signifie la validation de commande

III.1 Principe du contrôle vectoriel à flux orienté

La commande d'une machine à courant alternatif est effectuée en général par deux techniques, l'une classique (commande scalaire), et l'autre moderne (commande vectorielle, commande directe du couple (DTC)). Dans les applications nécessitant des performances dynamiques importantes, il faut pouvoir agir directement sur le couple instantané. C'est facile pour la machine à courant continu, où la force magnétomotrice de l'induit établit un angle droit avec l'axe du flux inducteur, et ceci quelque soit la vitesse de rotation, ainsi le couple est proportionnel au produit du flux inducteur et du courant d'induit. Si la machine est excitée séparément, et l'on maintient le flux inducteur constant, le couple est directement proportionnel au courant d'induit, on obtient donc de bonnes performances dynamiques puisque le couple peut être contrôlé aussi rapidement que le courant d'induit peut l'être [Ph Le],[D P.V]. Par contre, dans une machine asynchrone, l'angle entre le champ tournant du stator et celui du rotor varie avec la charge, il en résulte des interactions complexes et des réponses dynamiques oscillatoires. Pour obtenir une situation équivalente à celle de la machine à courant continu, on introduit la technique de la commande vectorielle. Le principe de cette dernière consiste à

transformer le modèle de la machine asynchrone à une structure similaire à celle de la machine à courant continu à excitation séparée et compensée. [A L.Ne].

En effet, en absence de la saturation et de la réaction magnétique d'induit, le flux principal de l'inducteur est proportionnel au courant d'excitation. Il n'est pas affecté par le courant d'induit à cause de l'orientation perpendiculaire des flux statoriques et rotoriques. C'est pourquoi, le couple électromagnétique d'une machine à courant continu à excitation séparée est directement proportionnel au courant de l'induit pour une valeur constante du flux, ce qui présente un réglage rapide du couple. Et pour la machine asynchrone, l'angle entre les deux champs statoriques et rotoriques est différent de 90 degré. L'idée proposée par Blaschke et Hasse c'est de décomposer le vecteur des courants statoriques ou rotoriques en deux composantes, l'une produit le flux, et l'autre produit le couple. Ce qui permet d'avoir un angle de 90° entre les deux flux de la machine, et on obtient une caractéristique similaire à celle de la machine à courant continu à excitation séparée

Il faut que i_{rd} soit analogue au courant d'excitation, tandis que le courant i_{rq} soit analogue au courant d'induit. Par conséquent, les deux composantes i_{rd} et i_{rq} sont mutuellement découplées.

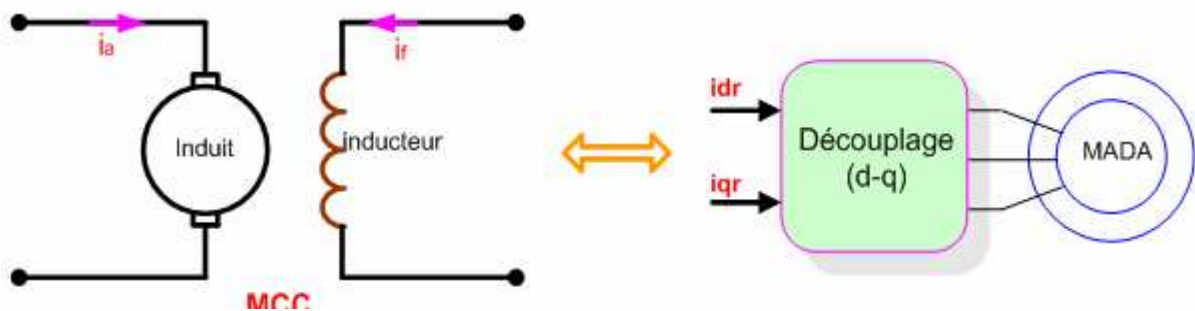


Figure III-1: Principe de la commande vectorielle

Le couple électromagnétique de la machine à courant continu :

$$\begin{cases} C_{em} = K \cdot \varphi_f \cdot I_a \\ \varphi_f = K' \cdot I_f \end{cases} \quad (\text{III-1})$$

III.2 Commande vectorielle de la MADA

III.2-a Procédé d'orientation du flux

La commande à flux orienté appliquée aux moteurs électriques est utilisée pour obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants. De nombreuses variantes de ce principe de commande ont été présentées dans la littérature

La méthode du flux orienté est basée sur le choix du repère de référence. En choisissant le repère lié au champ tournant, il découle que le flux à orienter (statorique, rotorique ou d'entrefer) doit coïncider avec l'axe (d).

Afin d'obtenir un couple maximal il faut imposer l'une des conditions suivantes :

Orientation du flux rotorique :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \varphi_r \\ \varphi_{qr} = 0 \end{cases}$$

Avec φ_r : flux rotorique

Orientation du flux statorique :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \varphi_s \\ \varphi_{qs} = 0 \end{cases}$$

Avec φ_s : flux statorique

Orientation du flux magnétisant

$$\begin{cases} \varphi_{dm} = \varphi_m \\ \varphi_{qm} = 0 \end{cases}$$

Avec φ_m : flux magnétisant

III.2-b Orientation du flux statorique

On choisit un référentiel diphasé (dq) lié au champ tournant statorique et on aligne le vecteur flux statorique avec l'axe (d).

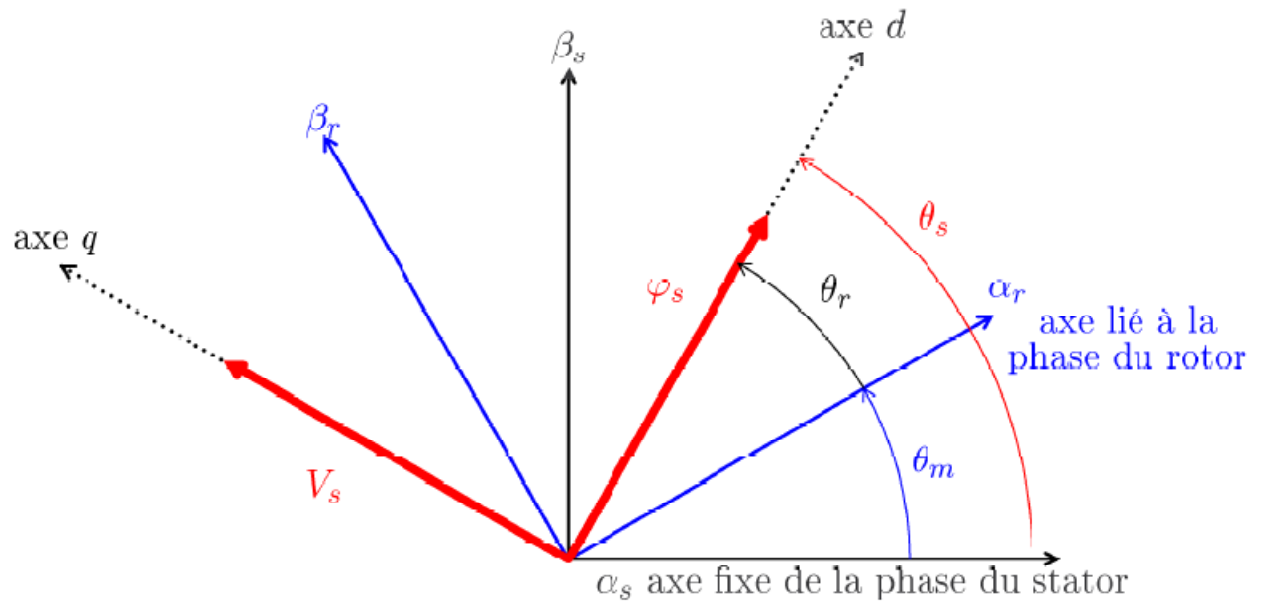


Figure III-2 : Orientation de flux statorique suivant l'axe d

D'après la figure (III-2).

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \varphi_s \\ \varphi_{qs} = 0 \end{cases}$$

Le couple électromagnétique devient :

$$C_{em} = -p \frac{M}{L_s} I_{qr} \varphi_{ds} \tag{III-4}$$

Si on considère que l'alimentation est triphasé équilibrés, le flux φ_{ds} sera constant, il en résulte que le couple et la puissance active dépendent uniquement de I_{qr} .

Les équations électriques au stator dans les axes a,b,c s'écrivent comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \tag{III-5}$$

Dans le cas des machines de moyenne et forte puissance utilisées dans l'énergie éolienne on peut négliger la chute de tension aux bornes de R_s devant la fem de rotation.

Ce qui montre que le vecteur tension statorique est en avance de $\pi/2$ par rapport au flux, on peut écrire :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \cdot \varphi_{ds} = \omega_s \cdot \varphi_s \end{cases} \quad (\text{III-6})$$

Des équations magnétiques statoriques on tire les expressions des courants statoriques :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} = \varphi_s \\ \varphi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} = 0 \end{cases} \quad (\text{III-7})$$

Donc :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III-8})$$

III.2-c Relation entre puissances statoriques et courants rotoriques

Les équations des puissances actives et réactives statoriques d'une machine asynchrone dans un repère diphasé d.q s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} \cdot I_{ds} + V_{qs} \cdot I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} \cdot I_{ds} - V_{ds} \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (\text{III-9})$$

Suite aux hypothèses simplificatrices ces équations ont adopté pour

$$(V_{ds} = 0 \quad ; \quad V_{qs} = V_s)$$

$$\begin{cases} P_s = V_s \cdot I_{qs} \\ Q_s = V_s \cdot I_{ds} \end{cases} \quad (\text{III-10})$$

En remplace les expressions I_{ds} et I_{qs} dans celle des puissances actives et réactives :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot I_{qr} \\ Q_s = \frac{V_s \cdot \varphi_s}{L_s} - V_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot I_{dr} \end{cases} \quad (\text{III-11})$$

En approximant $\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$ on aura ;

$$\begin{cases} P_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot I_{qr} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s \cdot L_s} - V_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot I_{dr} \end{cases} \quad (\text{III-12})$$

Si on considère que l'inductance magnétisante M est constante, le système obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe q et la puissance réactive au

courant rotorique d'axe d à la constante $\frac{V_s^2}{\omega_s \cdot L_s}$ près imposée par le réseau.

III.2-d Relation entre tension rotorique et courant rotorique

D'après les équations (II-11) , (II-12) et (III-10) on tire :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{dr} + \frac{M \cdot V_s}{\omega_s \cdot L_s} \\ \varphi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III-13})$$

On remplace ces expressions dans les expressions des tensions rotoriques d'axe (d) et (q), en aboutira au système suivant :

$$\begin{cases} v_{dr} = \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \varphi_{qr} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} + R_r \cdot i_{dr} \\ v_{qr} = \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \varphi_{dr} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} + R_r \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III-14})$$

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + (L_r - M^2 / L_s) \cdot \frac{di_{dr}}{dt} - g \cdot \omega_s \cdot (L_r - M^2 / L_s) \cdot i_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + (L_r - M^2 / L_s) \cdot \frac{di_{qr}}{dt} + g \cdot \omega_s \cdot (L_r - M^2 / L_s) \cdot i_{dr} + g \cdot \omega_s \cdot \frac{M \cdot V_s}{\omega_s \cdot L_s} \end{cases} \quad (\text{III-15})$$

Finalement :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \sigma \cdot L_r \cdot \frac{di_{dr}}{dt} - g \cdot \omega_s \cdot \sigma \cdot L_r \cdot i_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \sigma \cdot L_r \cdot \frac{di_{qr}}{dt} + g \cdot \omega_s \cdot \sigma \cdot L_r \cdot i_{dr} + g \cdot \omega_s \cdot \frac{M \cdot V_s}{\omega_s \cdot L_s} \end{cases} \quad (\text{III-16})$$

Avec :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$$

En régime permanent les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent et on aura comme équations ;

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} - g \cdot \omega_s \cdot \sigma \cdot L_r \cdot i_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + g \cdot \omega_s \cdot \sigma \cdot L_r \cdot i_{dr} + g \cdot \omega_s \cdot \frac{M \cdot V_s}{\omega_s \cdot L_s} \end{cases} \quad (\text{III-17})$$

Les tensions V_{dr} et V_{qr} sont à imposer pour obtenir les courants voulus. L'influence des termes de couplage est faible, une commande adéquate permettra de les compenser. Le terme $g \cdot \omega_s \cdot \frac{M \cdot V_s}{\omega_s \cdot L_s}$ n'est par contre pas négligeable car il représente une fem dépendant de la vitesse de rotation. Sa présence entraîne une erreur de trainage et la commande devra la prendre en compte.

A partir des équations ;

$$\begin{cases} P = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot I_{qr} \\ Q = \frac{V_s^2}{\omega_s \cdot L_s} - V_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot I_{dr} \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} - g \cdot \omega_s \cdot \sigma \cdot L_r \cdot i_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + g \cdot \omega_s \cdot \sigma \cdot L_r \cdot i_{dr} + g \cdot \omega_s \cdot \frac{M \cdot V_s}{\omega_s \cdot L_s} \end{cases} \quad (\text{III-18})$$

D'où on peut élaborer le schéma bloc du système à réguler représenté sur la figure (III-3).

les tensions rotoriques aux puissances active et réactive statoriques sont lié avec des fonctions de transfert du 1^{er} suivant l'axe d et q. Ces axes pourront être commandés séparément chacun à son propre régulateur pour un faible glissement g (influences des couplages faibles). Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront la puissance active pour l'axe q rotorique et la puissance réactive pour l'axe d rotorique. En vas maintenir la consigne de puissance réactive nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée au le réseau.

puissances active et réactive, les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.

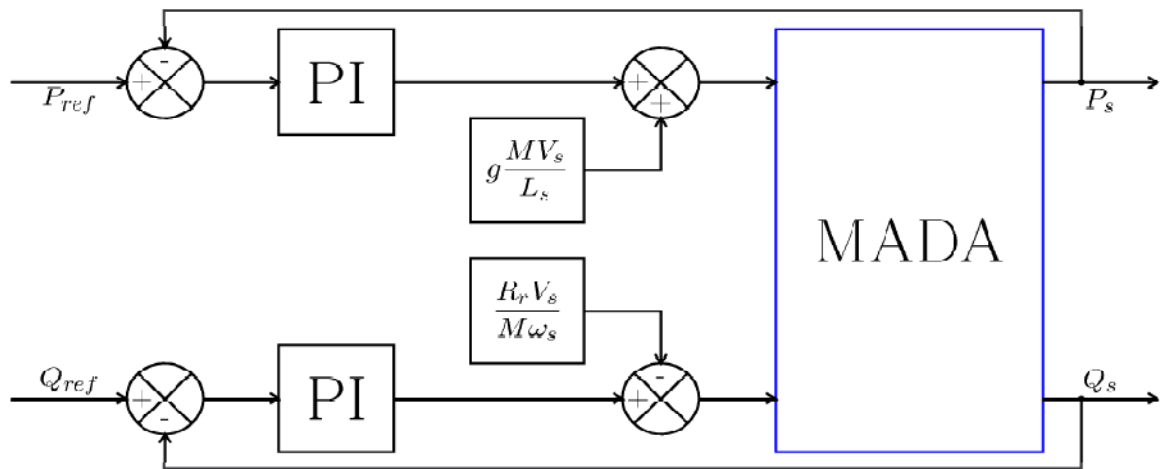


Fig III-4 : Schéma bloc de la commande directe

❖ Commande vectorielle indirecte :

Cette méthode a été favorisée par le développement des microprocesseurs, elle est très sensible aux variations paramétriques de la machine. Il est important de souligner que la méthode indirecte est la plus simple à réaliser et la plus utilisée que la méthode directe, elle consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances (active et réactive) et les courants rotoriques, cette méthode est appelée méthode indirecte.

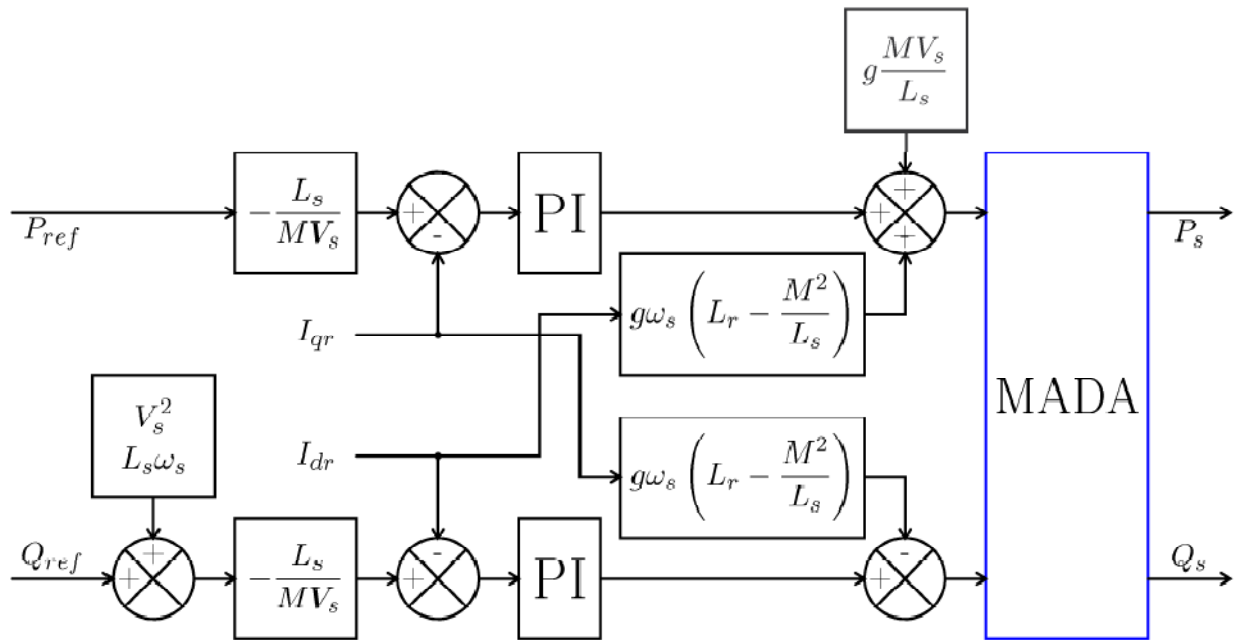


Figure III-5 : Schéma bloc de la commande indirecte

C'est la méthode directe qui va être étudiée et simulée, elle est plus simple à mettre en œuvre la méthode indirecte est complexe elle a l'avantage de contrôler en limitant les courants rotoriques.

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

III.4 Synthèse du régulateur proportionnel intégral (PI)

Les régulateurs proportionnel intégral PI sont les plus utilisés dans la commande de la MADA vu de leur rapidité et simplicité, la figure suivante montre la boucle de régulation du système corrigé par le régulateur (PI) dont la fonction de transfert est :

$$FT_{pi}(p) = K_p + \frac{K_i}{p}$$

Avec :

K_p le gain proportionnel du régulateur.

K_i le gain intégrateur du régulateur.

❖ Régulateur de puissance :

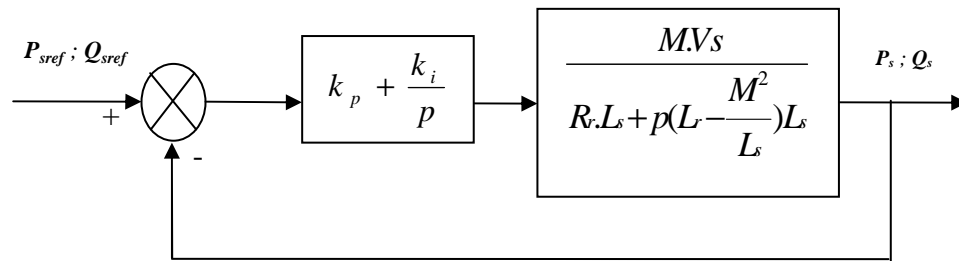


Figure III-6 :Schéma bloc du système régulé par PI

Pour les axes d et q, la fonction de transfert en boucle ouverte intégrant la présence des régulateurs est :

$$FTBO = \frac{p + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{P}{K_p}} \cdot \frac{\frac{MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{P + \frac{L_s R_r}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}} \quad (III.19)$$

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

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s R_r}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})} \quad (III.20)$$

Si les pôles sont parfaitement compensés, la fonction de transfert en boucle ouverte devient :

$$FTBO = \frac{K_p \frac{MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p} \quad (III.21)$$

La fonction de transfert en boucle fermée s'exprime par :

$$FTBF = \frac{FTBO}{1 + FTBO} \quad (III.22)$$

$$FTBF = \frac{\frac{K_p \frac{MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p}}{1 + \frac{K_p \frac{MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{K_p} \cdot \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{MV_s} \cdot P} \quad (III.23)$$

$$\text{FTBF} = \frac{1}{1 + \tau_r p} \quad \text{On déduit} \quad \tau_r = \frac{1}{K_p} \cdot \frac{L_S(L_r - \frac{M^2}{L_S})}{MV_S} \quad (\text{III.24})$$

τ_r Désigne le temps de repense du système, dans notre étude on va tenir compte de temps de réponse de la plus petite boucle dans le schéma de simulation correspondant à une valeur suffisamment rapide pour l'utilisation dans le système éolien.

Les variations de vent sont peu rapides et les constantes de temps mécanique sont importantes.

Donc les gains du régulateur K_p et K_i peuvent être exprimés en fonction de τ_r et des paramètres de la machine comme suit :

$$K_p = \frac{L_S(L_r - \frac{M^2}{L_S})}{MV_S \tau_r} \quad (\text{III.25})$$

$$K_i = \frac{L_S R_r}{MV_S \tau_r} \quad (\text{III.26})$$

❖ Régulateur de courant :

Il prend en entrée le courant $I_{rq\text{réf}}$ de référence et sa mesure. Il agit sur la tension de référence $V_{rq\text{réf}}$ pour ajuster le courant I_{rq} .

la figure (III-7) montre la régulation du courant avec un PI.

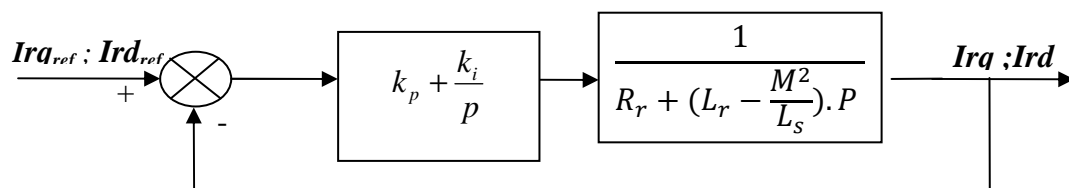


Figure III-7 :Schéma bloc du système régulé par PI

La fonction de transfert est donnée par l'équation suivant :

$$\frac{I_{rd}}{V_{rd}} = \frac{1}{R_r + (L_r - \frac{M^2}{L_S}).P} \quad (\text{III.27})$$

Pour les axes d et q, la fonction de transfert en boucle ouverte intégrant la présence des régulateurs est :

$$FTBO = \frac{p + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{P}{K_p}} \cdot \frac{1}{R_r + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \cdot P} \quad (III.28)$$

$$FTBO = \frac{p + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{P}{K_p}} \cdot \frac{\frac{1}{(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{\frac{R_r}{(L_r - \frac{M^2}{L_s})} + P} \quad (III.29)$$

Avec la méthode de la compensation des pôles on obtient :

$$p + \frac{K_i}{K_p} = \frac{R_r}{(L_r - \frac{M^2}{L_s})} + P \quad (III.30)$$

Alors on a :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_r}{(L_r - \frac{M^2}{L_s})} \quad (III.31)$$

Dou :

$$K_i = \frac{K_p}{T_r \cdot \sigma} \quad \text{Avec} \quad T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (III.32)$$

Si les pôles sont parfaitement compensés, la fonction de transfert en boucle ouverte devient :

$$FTBO = \frac{K_p \cdot \frac{1}{(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p} \quad (III.33)$$

La fonction de transfert en boucle fermée s'exprime par :

$$FTBF = \frac{FTBO}{1 + FTBO} \quad (III.34)$$

$$FTBF = \frac{\frac{K_p \cdot \frac{1}{(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p}}{1 + \frac{K_p \cdot \frac{1}{(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p}} \quad (III.35)$$

$$FTBF = \frac{1}{1 + \frac{(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{K_p} p} \quad (III.36)$$

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_r p} \quad \text{On déduit} \quad \tau_r = \frac{(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{K_p} \quad (III.37)$$

$$K_p = \frac{\sigma L_r}{\tau_r} \quad \text{et} \quad K_i = \frac{R_r}{\tau_r} \quad \text{Avec} \quad \sigma = (1 - \frac{M^2}{L_r L_s}) \quad (III.38)$$

III.6 Conclusion

D'après ce chapitre nous pouvons dire que la commande vectorielle en puissance avec orientation du flux statorique permet de traiter la MADA de façon semblable à celle de la machine à courant continu ; ce qui permet d'obtenir une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable.

Nous avons dans ce sens établi une relation liant les courants rotoriques d'axes d et q aux puissances statoriques réactive et active respectivement, ceci nous a permis de réaliser deux boucles de régulation de puissance en utilisant le régulateur PI, Cette commande a permis de découpler les grandeurs du couple et du flux pour un contrôle facile.

CHAPITRE IV

IV.1 Analyse des performances de la MADA en boucle ouverte.

Le premier essai, on fait tourner la machine asynchrone à double alimentation à vide et à $t=1s$ on charge la machine pour couple résistant $Cr=9.6Nm$ et une tension au rotor $Vr=12V$.

Le schéma de simulation est donné par la figure (IV-1) :

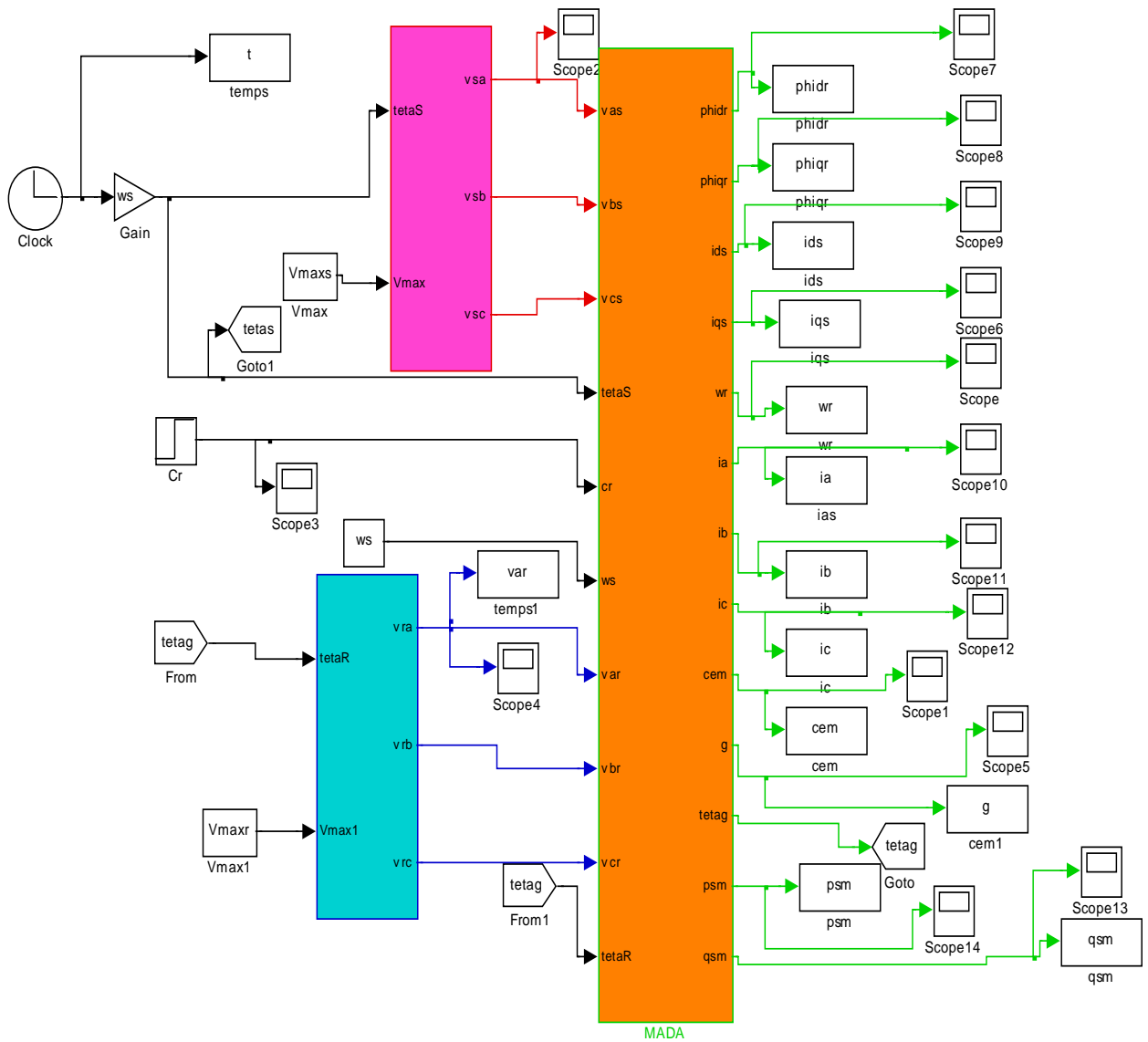


Figure IV-1 : Schéma de simulation pour l'essai sans asservissement.

IV.1.2. Interprétation des résultats

Tous les paramètres de la simulation dans l'environnement MATLAB Simulink sont récapitulés dans une annexe placée à la fin du présent mémoire.

D'après la simulation de la machine asynchrone double alimentée, on remarque que la vitesse prend la valeur de synchronisme dans un instant très court (le temps de réponse), puis elle se stabilise. À partir de 1s on applique une charge $C_r = 9.6 \text{ Nm}$, on constate que, la vitesse prend une valeur inférieure de 314 Rd/s ; le mode de fonctionnement est un mode hypo synchrone.

On remarque que les courants du stator augmentent lors de l'injection de couple résistant, le couple électromagnétique reste stable dans le régime établi.

IV.1.1. Les résultats de simulation

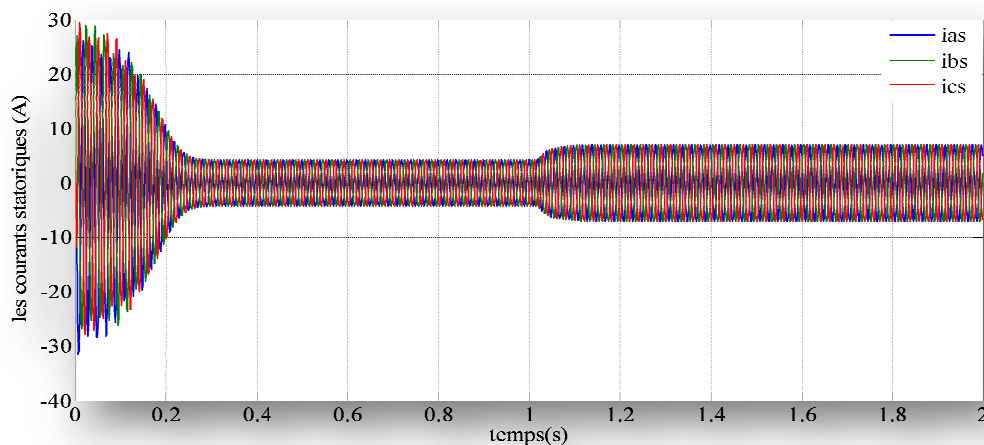


Figure IV-2-a : Résultats de simulation pour les courants statorique

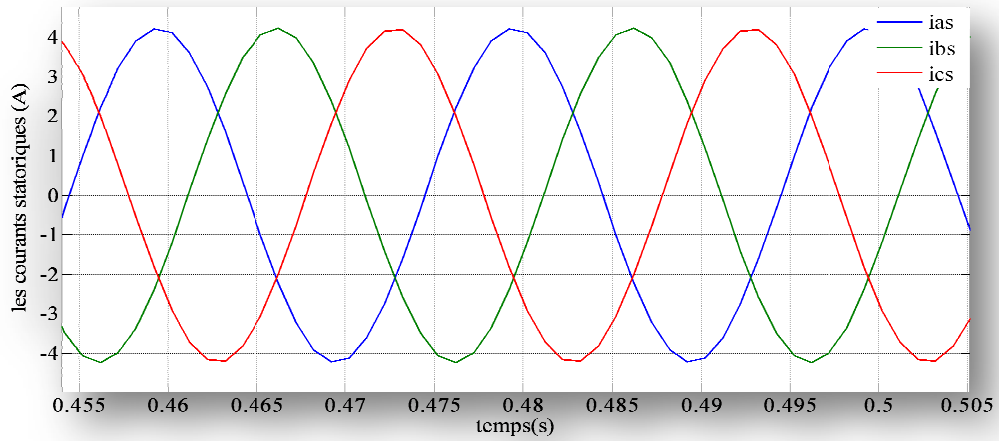


Figure IV-2-b : un zoom pour les courants statorique

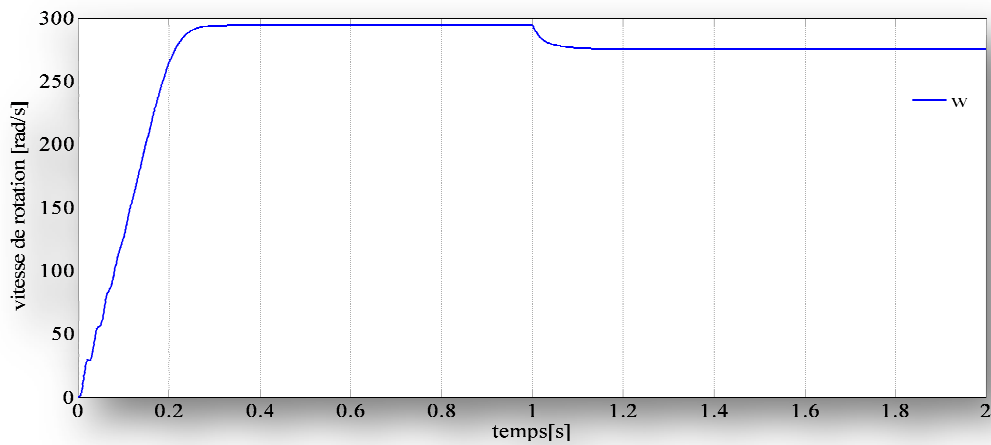


Figure IV-3 : Résultats de simulation pour la pulsation électrique.

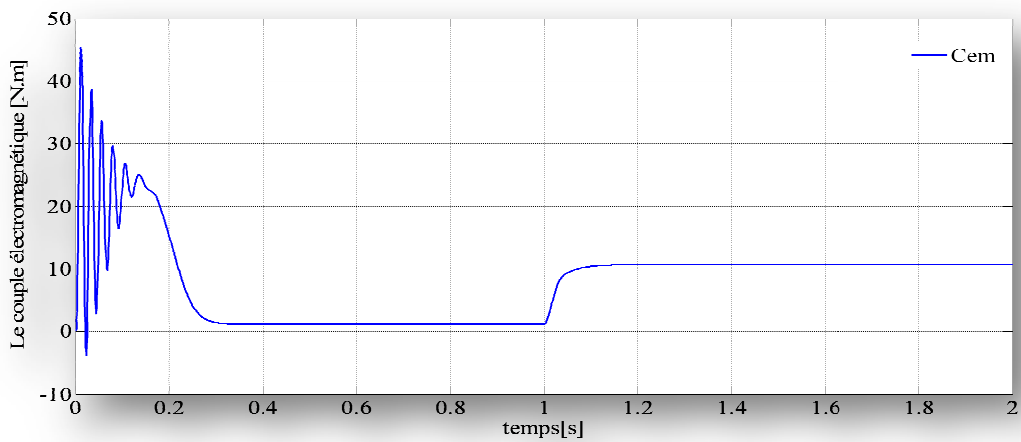


Figure IV-4 : Résultats de simulation pour le couple électromagnétique

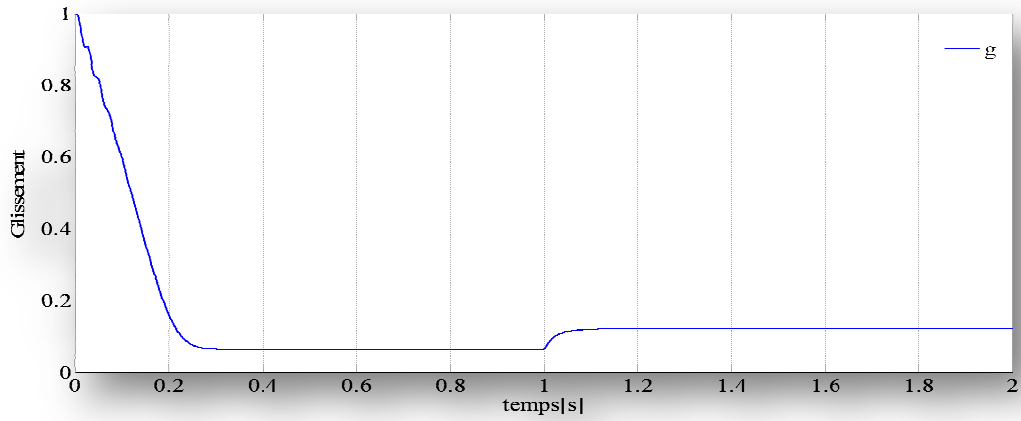


Figure IV-5 : la valeur de glissement

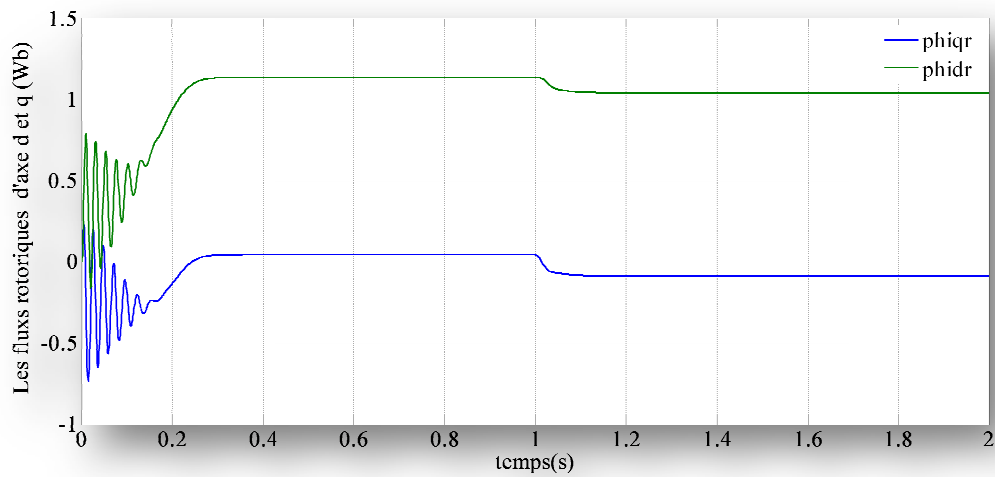


Figure IV-6 : Résultats de simulation pour les flux rotorique

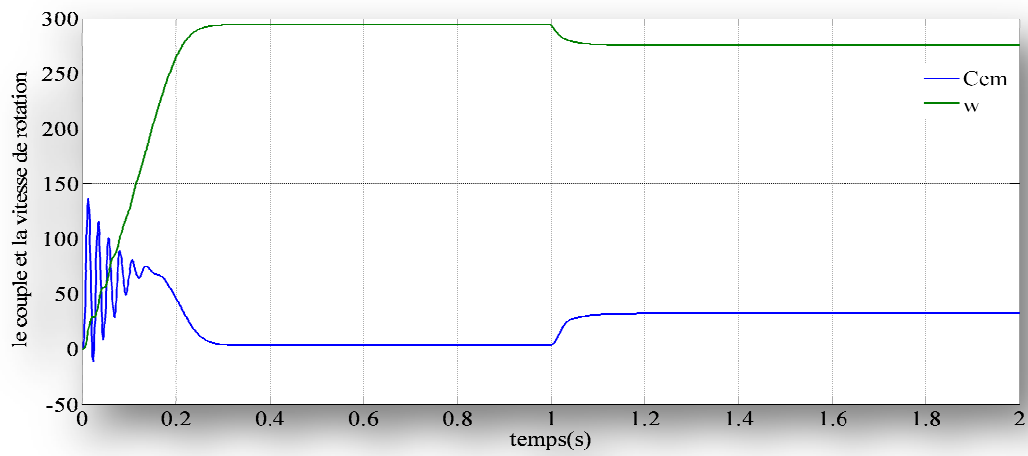


Figure IV-7 : rapport de vitesse et le couple

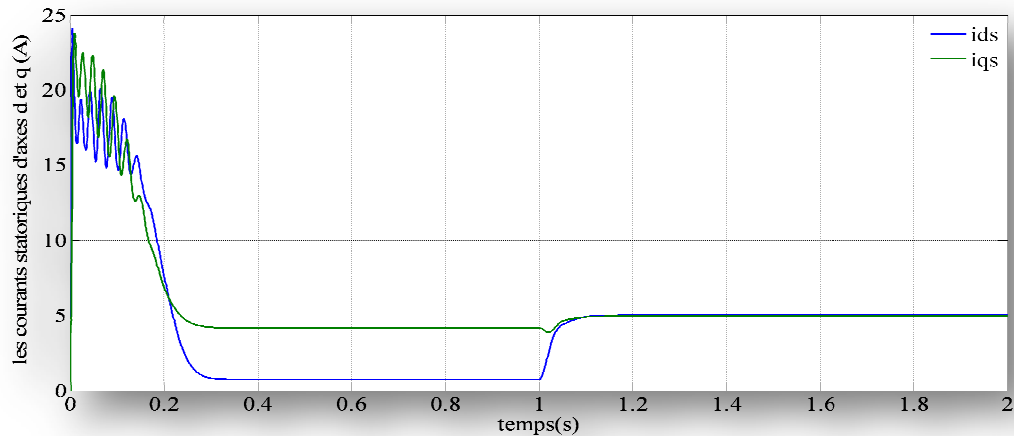


Figure IV-8 : Résultats de simulation pour les courants statorique biphasé

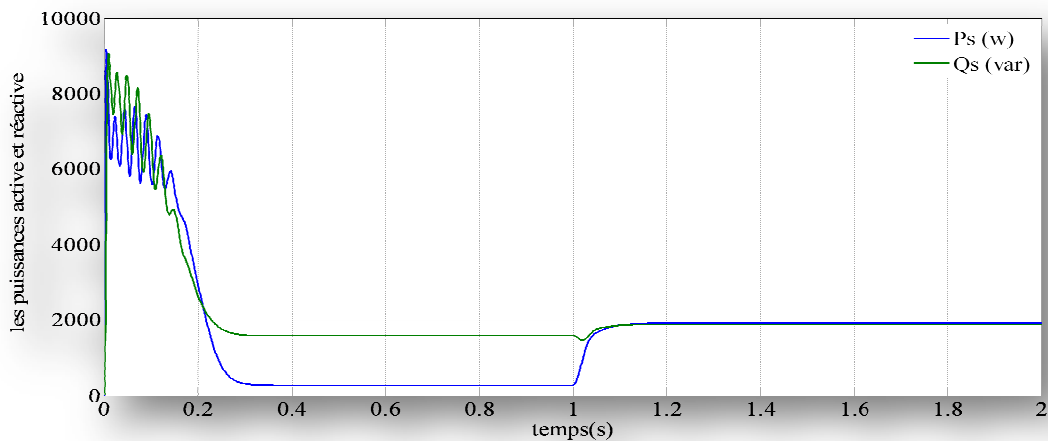


Figure IV-9 : Résultats de simulation pour les puissances mesurées

IV.2. Analyse des performances de la MADA en utilisant la commande vectorielle.

Le deuxième essai consiste à fixer des échelons de puissance active et réactive alors que la machine est entraînée à vitesse fixe.

Conditions de l'essai :

- à $t=1$ s : échelon de puissance active (P_{sref} passe de -200 à -600W).
- à $t=2$ s : échelon de puissance active (P_{sref} passe à +400W).
- à $t=3$ s : échelon de puissance active (P_{sref} passe à +700W).

- pour la puissance réactive ($Q_{sref}=0$ VAR) pour avoir un facteur de puissance égal a1

Le schéma de simulation est donné par la figure (IV-2)

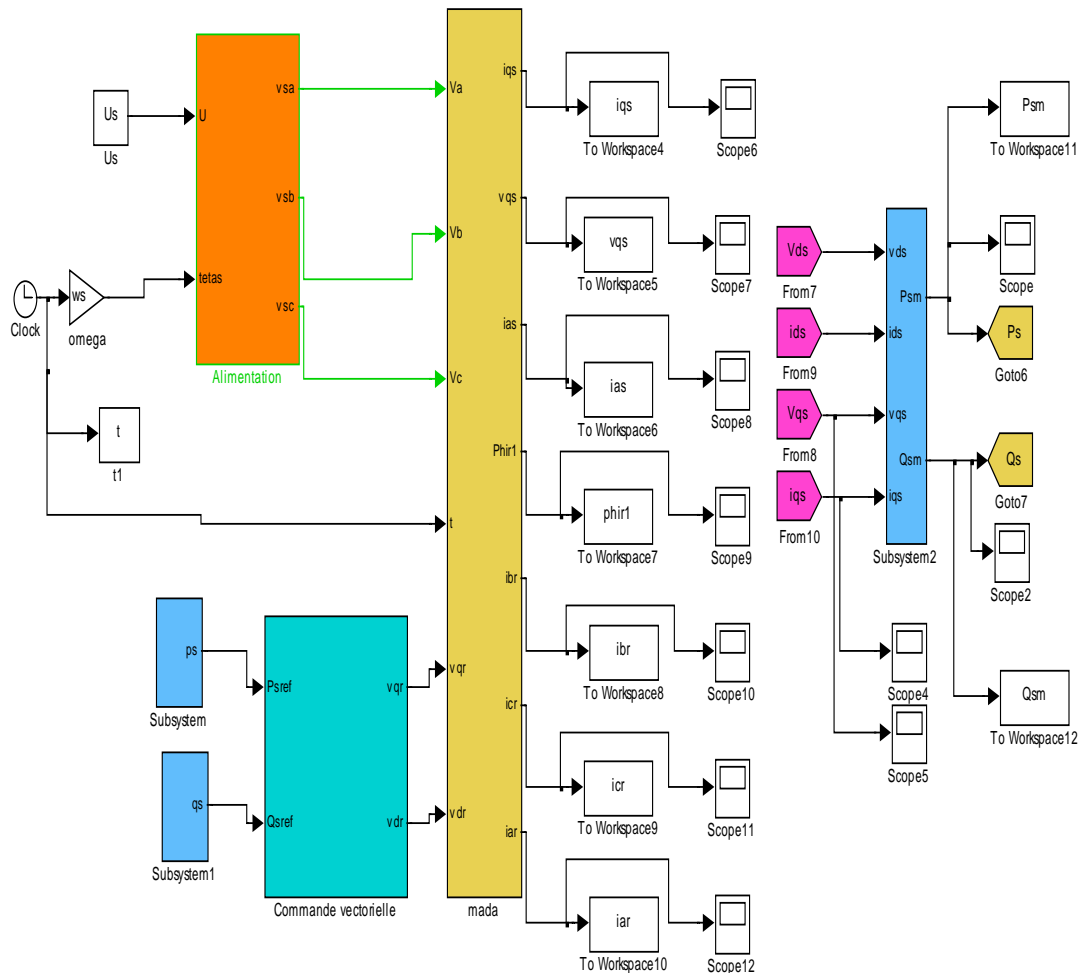


Figure IV-10 : Schéma de simulation pour l'essai de suivi de consigne

IV.2.2. Interprétation des résultats

Les notions théoriques présentées précédemment ont été exploitées pour établir un programme qui simule le comportement dynamique d'une machine asynchrone à double alimentation et à flux statorique orienté, munie d'une commande de courant et de puissance par un PI classique, et alimentée par le rotor avec tension triphasé équilibré

Afin d'illustrer les performances statiques et dynamiques de la commande vectorielle, le régime transitoire a été traité à savoir, un démarrage à vide, une insertion du couple de charge, un changement de consigne

Les figures (IV-12), (IV-13.a) montrent que la puissance active et réactive statoriques suivent bien leurs valeurs de référence imposée à la MADA, à l'instant d'application de l'échelon de puissance active à (t=1s), (t=2s) et (t=3s) une petite oscillation se produit sur la courbe de la puissance réactive, celle-ci apparaît également sur la courbe de la puissance active, cela est dû au couplage qui existe entre les tensions rotoriques d'axes d et q à travers le terme $g.w_s.\sigma.L_r$ (voir la relation (III-19) dans le chapitre III), l'action des régulateurs (PI) qui diminuent les amplitudes des tensions de commande v_{dr} , v_{qr} .

La consigne de puissance réactive est maintenue à zéro afin d'assurer un facteur de puissance unitaire coté statorique, et les figures ((IV-13-a) (IV-13-b) montrent que la puissance réactive reste nulle, ce qui indique un bon contrôle de la machine.

La figure (IV-11) montre les tensions statoriques triphasées dans les axes abc sinusoïdales délivrées par le stator.

D'autre part, l'allure du couple électromagnétique dans la figure (IV-14) présente même structure que la puissance active cela est dû à la relation entre les deux ;

$$p = C_{em} \cdot \Omega \text{ relation (II-18).}$$

IV.2.1. Les résultats de simulation

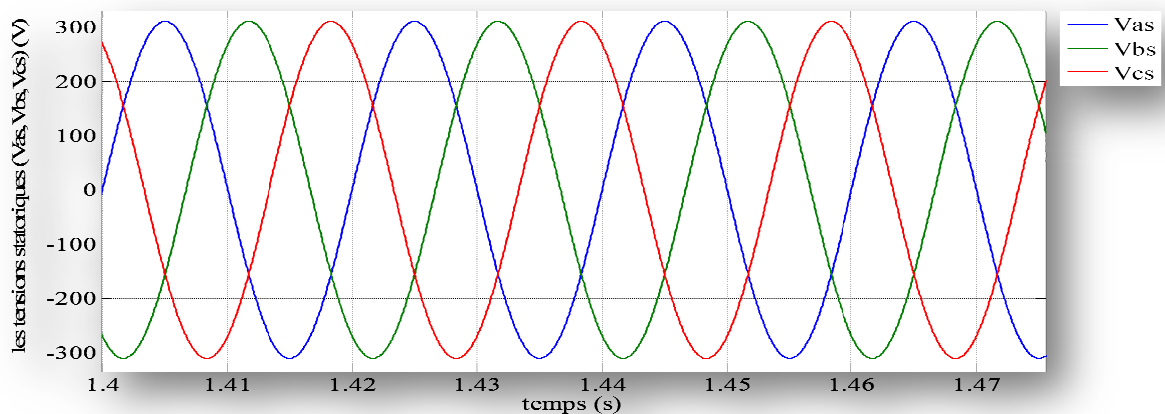


Figure IV-11: tension d'alimentation statorique

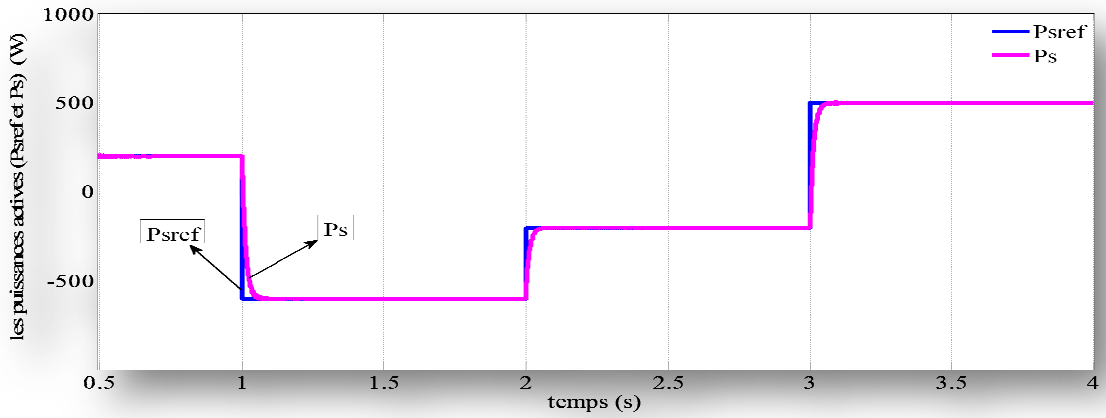


Figure IV-12 : Résultats de simulation pour l'essai de suivi de consigne de la puissance active

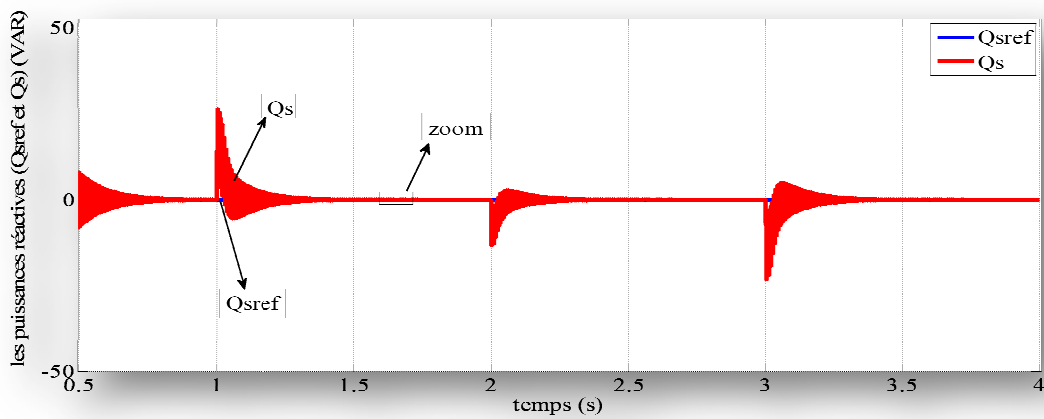


Figure IV-13-a : Résultats de simulation pour l'essai de suivi de consigne de la puissance réactive

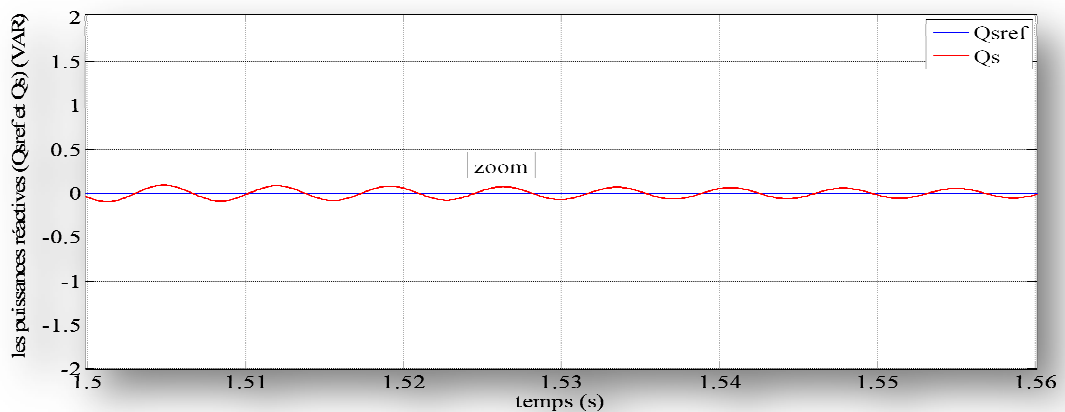


Figure IV-13-b : Un zoom pour l'essai de suivi de consigne de la puissance réactive

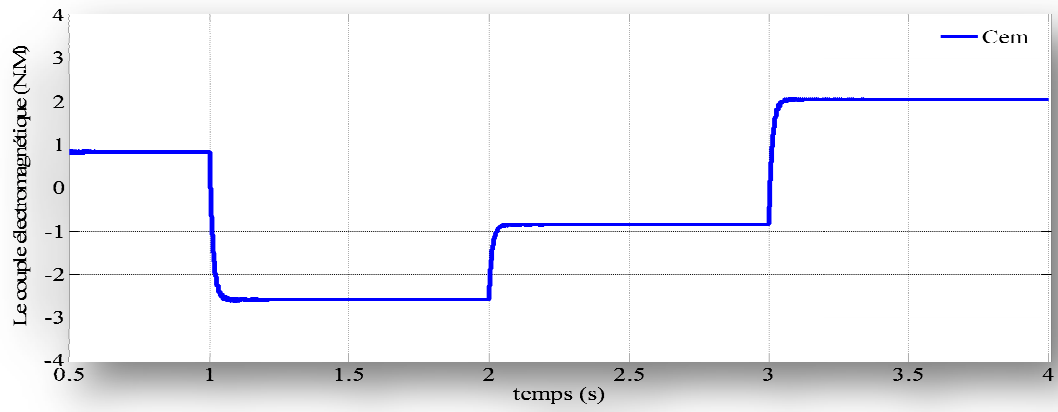


Figure IV-14: Résultats de simulation du couple électromagnétique (N.M)

CONCLUSION GENERAL

Conclusion générale :

Dans le contexte des énergies renouvelables, Le premier chapitre rappelle les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique et dresse un survol sur les systèmes éoliens les exemples d'architectures, qu'on a commencé par les différents capteurs (à axe horizontal, vertical) et les caractéristiques technologiques des éoliennes à axe horizontal ; un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. À la fin différentes associations machine électriques – convertisseur de puissance ont été examinées.

Au cours du deuxième chapitre une importance particulière fût accordée à la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation, son modèle de PARK diphasé lié au champ tournant, on a montré par la suite que les grandeurs statoriques sont directement influencées par la variation de la vitesse du rotor de l'éolienne.

Ce qui nous a intéressés par la suite dans le chapitre trois était la commande vectorielle de la MADA dans le but de contrôler l'échange de puissance active et réactive entre le stator et le réseau, des régulateurs de type proportionnel intégral (PI) ont été utilisés. Des tests de simulations ont été effectués afin d'analyser les performances de ces régulateurs par rapport au suivi de consigne moyennant un réglage classique, nous avons conclu également que ce réglage ne contrôlait pas de manière satisfaisante le régime transitoire.

Le quatrième chapitre avait comme objectif de simuler le modèle de la MADA avec la commande vectorielle alimentée au stator par des tensions sinusoïdales équilibrées et d'interpréter les résultats de simulations.

Nous avons traité la commande en puissance de la MADA par deux régulateurs (PI) externes de puissance et des régulateurs internes de courants. Il est à signaler que les résultats obtenus correspondaient à ceux attendus, ils ont été comparés avec ceux obtenus par d'autres travaux existants dans la littérature technique.

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

- Utilisation d'un convertisseur (redresseur+onduleur), autorisant la bidirectionnalité du transfert de puissance entre le rotor et le réseau
- Intégration d'un système de stockage dans une éolienne à vitesse variable en vue d'un fonctionnement sur réseau ou sur charges isolées. Afin de constituer un ensemble capable de fournir des services systèmes: réglage de la tension, réglage de la fréquence, réglage de la puissance réactive
- Etablissement d'un modèle de la MADA prenant notamment en compte la résistance de la phase statorique et la saturation magnétique.

- Intégration mixte de la MADA avec le photovoltaïque dans un parc éolien (système hybride).
- Réaction de la génératrice vis-à-vis des déséquilibres du réseau, des creux de tension et des fluctuations.
- Interaction avec les autres génératrices du réseau, supervision d'une ferme éolienne.
- L'application des méthodes d'intelligence artificielle pour son implantation en temps.;

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

[F Poi]: Frédéric Poitiers, « Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne », Thèse de doctorat de l'université de Nantes, 2003.

-Machine asynchrone à cage autonome

-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, France 2003

[T Bel]: TOUAL Belkacem ; Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable

[P.WCar]. P.W. Carlin, A.S. Laxson, E.B. Muljadi, "The History and State of Art of Variable-Speed Wind Turbine Technology", NREL/TP-500-28607, Février 2001

[D P.V]: Debiprasad P., Benedict E. L. Venkataramanan G. and Lipo T. A. "A Novel Control Strategy for the Rotor Side Control of a Doubly-Fed Induction Machine", Proceedings of Thirty-Sixth IAS Annual Meeting Conference IEEE, Vol.3, 30 Sept.-4Oct. 2001, pp. 1695-1702.

[A LNe] :A. L. Nemmour, "Contribution à la Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone à Double Alimentation", Mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie, 2002

[B Arm]: Boyette Armand, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone a double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.

[N Lav]: Nicolas Laverdure, « Intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires », Thèse de doctorat de l'université de Grenoble, 2005.

[R Rad]: Redjem Radia, « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », Mémoire de magister à l'université Mentouri de Constantine, 2009.

[Ph Le]: Philippe Leconte, Marc rapin, Edmond Szechenyi, « Eoliennes », document pédagogique technique de l'ingénieur « N° de la fiche doc : BM4640doc ».

[V cou] : Vincent Courtecuisse, « Supervision d'une centrale multi-sources à base d'éolienne et de stockage d'énergie connecté au réseau électrique », Thèse de doctorat de l'université d'Arts et Métiers, Paris, « N° : 2008-ENAM-0027 ».

[N mek] : Naïma Mekkaoui, « Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée », Mémoire de magister à l'université de Batna, 2004.

[A Dav] : Arnaud Davigny, « Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », Thèse de doctorat de l'université de Lille, 2007.

[H Sed] : H. Sediki : cours de commande II master ETH, « Chap1 : Modélisation et identification de la machine asynchrone triphasé », université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.

BIBLIOGRAPHIE

[R Aza] : Rachid Azaizia, « Etude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation alimentée par un convertisseur multi niveaux », Mémoire de magister à l'UMBB, 2008.

[T Wil] : Théodor Wildi, Gilbert Sybille, « Électrotechnique », édition de boeck, 4ème édition, 2005

[J Car] : JP CARON et JP HAUTIER, « Modélisation et commande de la machine asynchrone » Editions TECHNIP, 1992.

[A Gai] : Arnaud Gaillard, « Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service », Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy I, 2010.

[O Ana]: Olympe Anaya-Lara, « Wind energy generation: modeling and control », Edition John Wiley and Sons, 2009

[P Bar] : Philippe Barret, « Régimes transitoires des machines tournantes électriques », Editions Eyrolles, 2ème édition, Paris 1987.

[E S Ab] : E. S. Abdin, W. Xu, « Control design and dynamic performance analysis of a wind turbine-induction generator unit », IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 15, N° 1, March 2000.

[E Sel] : Elaimani Selma, « modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de doctorat de l'école centrale de Lille et de l'université des sciences et de la technologie de Lille ,2004.

[M Kéi] : Morissanda Kéita, « Techniques de commande des convertisseurs », projet d'application pour l'obtention de la maîtrise en technologie des systèmes, à l'école de technologie supérieure de Québec, 1999.

[P Bas] : Patrick Bastard, Daniel Fargue, Bernard Mathieu, Muriel Nicolas « Electricité voyage au cœur du système », Editions Eyrolles, 2000

[G OCi] : Gbriel O.Cimuca, « Système Inertiel de Stockage d'Energie Associe a des Générateur Éoliens », Thèse de Doctorat, Ecole national d'arts et Métiers Centre de Lille 2005, France.

[L Bag] : L. Baghli, « Contribution à la Commande de la Machine Asynchrone, Utilisation de la Logique floue, des Réseaux de Neurones et des Algorithmes Génétiques », Thèse de Doctorat, Nancy-I janvier 1999, France.

[A Mou] : Abbas Mourad et Mechentel Mohamed, « Modélisation et commande d'une MADA alimentée par une cascade à trois niveaux Application à l'énergie éolienne », Mémoire d'ingénieur, ENP, 2006.

ANNEXES

Paramètres du machine asynchrone doublement alimenté sans régulation

Nombre de paires de pôles

$$p=2$$

Résistance des enroulements statorique

$$R_s=4.85 \quad \Omega$$

Résistance rotorique

$$R_r=3.805 \quad \Omega$$

Inductance rotorique

$$L_r=0.274 \quad H$$

Inductance des enroulements statorique

$$L_s=0.274 \quad H, \quad K_f=0.008$$

Moment d'inertie

$$J=0.031 \quad \text{kg. m}^2$$

Couple résistant

$$C_r=0.4 \quad \text{Nm}$$

$$T_s=L_s/R_s$$

$$s$$

$$T_r=L_r/R_r$$

$$s$$

Inductance mutuelle

$$L_m=0.258 \quad H$$

Fréquence nominale

$$f=50 \quad \text{Hz}$$

Pulsation statorique

$$\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot f$$

Tension statorique

$$V_n=220 \quad V$$

Tension rotorique

$$V_{nr}=12 \quad V$$

Couple nominal

$$C_n=9.6 \quad \text{Nm}$$

Courant nominal d'une phase

$$I_s=3.64 \quad A$$

Courant nominal d'une ligne

$$I_s=6.31 \quad A$$

Puissance nominale

$$p_u=1.5 \quad \text{kw}$$

Vitesse nominale:

$$V_n=1430 \quad \text{Tr/min}$$