

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



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

Mémoire de Fin d'Etude de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : **Sciences et Thecnologies**

Filière : **Génie Electrique**

Spécialité : **Machine Electrique**

Présenté par

ZAHER Mohamed
SAIDANI Mahmoud

Thème

MODELISATION ET COMMANDE VECTORIELLE DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION

Mémoire soutenu publiquement le 25 septembre 2017 devant le jury composé de :

M^r Belkacem MOULA

M^{elle} Nadia Kecili

M^{elle} Nadia RADJA

M^{elle} Malika LOUANCHI

MCCB, UMMTO, Président

MACB, UMMTO, Encadreur

MACA, UMMTO, Examinatrice

MACA, UMMTO, Examinatrice

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu Le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience, et la santé durant toutes ces longues années d'étude. Nous adressons nos sincères remerciements à tous nos enseignants de L'université de MOULOU D MAMMERI, notamment à notre promotrice M^{elle} KECILI Nadia d'avoir proposé le sujet sur lequel on a travaillé, et qui a assuré la direction et l'encadrement du travail présenté dans ce mémoire. Nous adressons l'expression de nos sincères reconnaissances aux membres du jury examinateurs, pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

Enfin nous remercions tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce travail, à mes parents, à mes frères, à tous mes amis, à tous mes collègues, et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.

ZAHER Mohamed

Dédicaces

- A toute ma famille.
- A tous mes amis.
- A tous les enseignants et les éducateurs qui ont contribué à ma formation Durant tout le parcours de mes études jusqu'à ce jour

➤ A tous ceux qui me sont chers.

Je dédie ce modeste travail

SAIDANI Mahmoud

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralité sur les systèmes éoliens	
I-1 Introduction.....	3
I-2 Historique de l'éolienne.....	3
I-3 Constitution d'une éolienne.....	3
I-3-1 Définition de l'énergie éolienne	3
I-3-2 Les différents types d'éoliennes	4
I.3.2.1. Eoliennes à axe vertical	4
I-3.2.2. Eoliennes à axe horizontal.....	5
I-4 Principaux composants d'une éolienne	6
I-4-1. Le mât	7
I-4-2. La nacelle	7
I-4-2-1. Les différents composants d'une nacelle	7
I-4-3. Le rotor	8
I-5 Le principe de fonctionnement d'une éolienne. [5], [6], [7].....	9
I-6 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	9
I-6-1 .Les avantages.....	9
I-6-2. Les inconvénients	10
7 Conversion d'énergie aérodynamique en énergie électrique	11
I-7-1 Le coefficient de vitesse réduite (tip-speed ratio)	12
I-7-2 Le coefficient de puissance (power coefficient)	12

I-7-3 Le coefficient de couple (torque coefficient).....	13
I-7-4 MPPT (Maximal power point tracking).....	14
I.8 Modélisation de la turbine éolienne	14
I.8.1 Modélisation de la turbine	14
I.8.2 Modèle du multiplicateur de vitesse.....	16
I.8.3 Modélisation de l'arbre mécanique.....	16
I.9 Stratégie de commande de la turbine éolienne.....	17
I.9.1 Caractéristique puissance vitesse d'une éolienne de grande puissance	17
I-10 Conclusion	18

Chapitre II : modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

II-1 Introduction	19
II-2 Structure des machines asynchrones à double alimentation.....	19
II-3 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone a doublé alimentation.....	20
II-4 Classification des machines à double alimentation	21
II.5 Domaine d'application de la MADA	24
II.5.1 Fonctionnement moteur dans les applications industrielles.....	24
II.5.2 Fonctionnement en moteur avec deux convertisseurs	24
II.5.3 Fonctionnement en moteur avec un seul convertisseur	25
II.6 Mode de fonctionnement de la MADA	26
II.6.1 Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone	26
II.6.2 Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone	26
II.6.3 Fonctionnement en mode générateur hyposynchrone.....	27

II.6.4 Fonctionnement en mode générateur hypersynchrone.....	27
II-7 Les avantages et les inconvénients de la MADA [2], [22]......	28
II.7.1. Les avantages de la MADA.....	28
II.7.2. Les inconvénients de la MADA.....	29
II.8 Mode de variation de vitesse.....	29
II.8.1 Action sur le glissement.....	29
II.8.2 Variation de la fréquence	29
II.8.3 Action sur le nombre de pôles	29
II.9 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation	30
II.9.1 Référentiels de travail	30
II.9.2. : référentiel lié au stator	30
II.9.3 référentiel lié au rotor	30
II.9.4 référentiel lié au champ tournant	31
II.10 Modèle de la MADA dans le repère (a b c)	31
II.10.1 Equations électriques dans le repère (a b c)	32
II.10.2 : Equations magnétiques dans le repère (a b c)	32
II.10.3 : Equation mécanique de la MADA	33
II.11 Modèle de la MADA dans le plan (dq)	33
II.11.1 Application de la transformation de Park	34
II.11.2 Equations électriques dans le plan (dq)	34
II.11.3 Equation du couple électromagnétique dans le plan (dq)	35
II.12 Simulation de la machine asynchrone a doublé alimentation	36
III.1.4 Interprétation des résultats.....	37

II-11 Conclusion.....	37
-----------------------	----

Chapitre III : Modélisation de la commande vectorielle de la MADA

III.1 Introduction	38
III.2 Commande vectorielle de la machine asynchrone a doublé alimentation.....	38
III-3 Principe de la commande vectorielle	39
III-4 Commande en puissance de la machine asynchrone à double alimentation	40
III.4.1 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques	42
III.4.2 Relations entre les tensions rotoriques et les courants rotoriques	43
III.5 Commande vectorielle directe et indirecte	44
III.5.1 Commande vectorielle directe	45
III.5.2 Commande vectorielle indirecte	45
III-6 Synthèse du régulateur PI.....	47
III-7 Simulation et interprétation des résultats	49
III.8 Interprétation des résultats.....	50
III.9. Modélisation de l'onduleur de tension à deux niveaux	50
III.9.1 Définition	50
III.9.2 Principe de la MLI	53
III.13 Résultats de simulation.....	54
III-14 Conclusion	55
Conclusion générale	56

Bibliographie

Annexes

Liste des figures

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES SYSTEMES EOLIENS .

- Figure I-1** Conversion de l'énergie cinétique du vent
- Figure I-2** Éoliennes a axe vertical
- Figure I-3** Eoliennes à axe horizontal
- Figure I-4** différents composants d'une nacelle
- Figure I-5** Rotor d'une turbine
- Figure I-6** Conversion aérodynamique en énergie électrique
- Figure I-7** Vitesse du vent V_v et vitesse tangentielle ($v \Omega R$)
- Figure I-8** Coefficient de puissance pour différents types de turbine
- Figure I-9** Points de MPPT d'une éolienne tripale avec la vitesse de vent

CHAPITRE II : ETUDE ET MODÉLISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE

A DOUBLE ALIMENTATION

- Figure II-1** Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA
- Figure II-2** MADA avec contrôle du glissement par dissipation de l'énergie rotorique
- Figure II-3** MADA structure de kramer
- Figure II-4** Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur
- Figure II-5** Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Figure II-6 Schéma d'un system utilisant une MADA en moteur alimenté par deux convertisseurs

Figure II-7 Schéma d'un système utilisant une MADA en moteur alimenté par un seul convertisseur

Figure II-8 Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone

Figure II.9 Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone

Figure II-10 Fonctionnement en mode générateur hyposynchrone

Figure II-11 Fonctionnement en mode générateur hypersynchrone

Figure II-12 Représentation de la MADA dans le repère (a b c)

Figure II-13 Représentation de la MADA dans le repère (dq)

CHAPITRE III : MODELISATION DE LA MADA AVEC LA COMMANDE

VICTORIELLE

Figure III-1 Principe du pilotage découplé du couple d'une MCC.

Figure III-2 Schéma bloc du système à réguler

Figure III-3 Schéma bloc de la commande directe

Figure III-4 Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouvert.

Figure III-5 Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermée

Figure III-6 Système régulé par un PI

Figure III-7 Puissances active et réactive statoriques en commande direct

Figure III-8 Puissances active et réactive statoriques en commande indirect avec boucle de puissance

Figure III-9 Puissances active et réactive statoriques en commande indirect sans boucle de puissance

Figure III-10 Onduleur de tension à deux niveaux

Figure III-11 Puissances active et réactive statoriques en commande indirect avec boucle de puissance

NOTATIONS SYMBOLIQUES

Symbole	Signification	Unité
C_p	Coefficient de puissance	
C_e	Couple électromagnétique	$N.m$
C_{em}	Couple mécanique	$N.m$
C_r	Couple résistant	$N.m$
$C_{aéro}$	Couple aérodynamique de la turbine	$N.m$
J	Moment d'inertie des parties tournantes	$K.g.m^2$
f	Coefficient de frottement visqueux de la MADA	$N.m.s/rad$
G	Rapport de vitesse du multiplicateur	
g	Glissement	
K_i	Gains du régulateur PI classique	
M_{sr}	Inductances mutuelles entre le stator et le rotor	H
M_s	Inductances mutuelles entre les phases statoriques	H
M_r	Inductances mutuelles entre les phases rotoriques	H
P_{mec}	Puissance mécanique sur l'arbre de la machine	W
P_r	Puissance active rotorique	W
P_s	Puissance active statorique	W
V_v	Puissance portée par le vent	W
Q_s	Puissance réactive statorique	VAR
R	Rayon de la turbine	m
R_s	Résistances statorique	Ω
R_r	Résistances rotorique	Ω
L_s	Inductances propres statorique	H
L_r	Inductances propres rotorique	H
S	Surface balayée par le rotor de la turbine	m
$C_{aér}$	Couple aérodynamique de la turbine	W
p	Nombre de paires de pôles	
s	Opérateur de Laplace	
β	Angle de calage des pales	$^\circ$
Ω	vitesse de rotation mécanique du rotor	rd/sec
Ω_{mec}	Vitesse de rotation mécanique rd/sec	
Ω_{ref}	vitesse mécanique de la génératrice de référence	rd/sec
θ	Angle entre l'axe rotorique A et l'axe statorique	rd
θ_s	Position de stator	rd
θ_r	Position électrique de rotor	rd
λ	Vitesse spécifique	
ω	Vitesse angulaire de rotation du rotor	rd/sec
ω_s	Pulsation des courants statoriques	rd/sec
PI	Proportionnelle intégrale	

$P \theta^{-1}$	Transformation de Park inverse	
$P \theta$	Transformation de Park directe	
MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation	
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsions	
MPPT	Poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale	
K_i	Paramètre intégrateur	
K_p	Paramètre proportionnel	
I_{ch}	courant de la charge non-linéaire	
C_{vis}	couple des frottements visqueux	
C_T	couple de la turbine	N.m
m	Indice de modulation	
d, q	composant de PARK direct et on cadrature	
λ_{opt}	vitesse spécifique optimale	
J_g	Moment d'inertie de l'arbre de la génératrice	
J_t	Moment d'inertie de l'arbre de la turbine	
M	Gain du multiplicateur	
N	Vitesse de rotation	(tr /min)
T	temps	s
$V_{ds} \text{ et } V_{qs}$	les tensions statoriques dans le repère de Park,	
$V_{dr} \text{ et } V_{qr}$	les tensions rotoriques dans le repère de Park,	
$I_{ds} \text{ et } I_{qs}$	les courants statoriques dans le repère de Park,	
$I_{dr} \text{ et } I_{qr}$	les courants rotoriques dans le repère de Park,	
$\varphi_{ds} \text{ et } \varphi_{qs}$	les flux statoriques dans le repère de Park.	

Introduction
générale

Le problème de tous les jours et dans le monde entier est de répondre à la demande énergétique qui augmente de plus en plus. L'augmentation rapide de l'activité industrielle dans les pays développés et l'investissement des entreprises dans les pays qui assurent un coût de production moins élevé a accru très rapidement la demande mondiale d'énergie.

Face à cette demande, toujours croissante de nos jours, les pays industrialisés ont massivement fait appel aux centrales nucléaires. Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques, mais le risque d'accident nucléaire, le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures. Sans oublier que cette ressource d'énergie n'est pas disponible pour tout le monde pour des raisons politiques ou financières, son installation coûte cher et elle peut être dangereuse au niveau écologique.

Tous ces inconvénients ont poussé les chercheurs de réduire leur exploitation pour pallier à leurs problèmes, en faisant appel aux énergies dites renouvelables (éolienne et solaire). Ces dernières s'inscrivent parfaitement dans l'effort global de réduction des émissions de CO₂.

L'énergie éolienne apparaît clairement en bonne place, non pas en remplacement des sources conventionnelles, mais comme énergie d'appoint complémentaire à l'énergie nucléaire. Plusieurs pays sont déjà résolument tournés vers l'énergie éolienne.

Aujourd'hui, le marché des générateurs éoliens à vitesse variable s'est orienté vers des puissances supérieures à 1 MW. Ces générateurs utilisent souvent la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) comme génératrice étant donné ses avantages.

En effet, cette dernière permet un fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable ce qui donne la possibilité de produire le maximum de puissance possible sur une large plage de variation de la vitesse du vent.

Notre mémoire est composé de trois chapitres :

Le premier chapitre sera consacré à des généralités sur les énergies éoliennes. Les éléments constituant l'éolienne ainsi que ses avantages et ses inconvénients seront brièvement présentés.

INTRODUCTION GENERALE

Dans le deuxième chapitre nous dressons une modélisation de la MADA, ainsi qu'un bilan de ses avantages et de ses inconvénients. Nous présenterons le modèle mathématique biphasé de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) alimentée par des tensions sinusoïdales au stator et au rotor. Les simulations seront présentées avec une interprétation.

Ensuite, nous avons consacré le troisième chapitre à la modélisation d'une commande vectorielle à orientation du flux statorique en vue de contrôler séparément les puissances actives et réactives fournie au réseau. Les simulations seront présentées avec une avec des tension constants et interprétation .

En fin nous terminons le travail par une conclusion générale.

Chapitre I
Généralité sur les
systemes éoliens

I-1 Introduction

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation d'énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne [3],[17].

Les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante.

Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones ou asynchrones. Les 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. [1].

I-2 Historique de l'éolienne :

La génération d'énergie électrique par le vent a débuté à la fin du XIXème siècle. Parmi les pionniers, on peut citer Paul La Cour au Danemark qui a associé une dynamo à une éolienne en 1891.

La première crise pétrolière en 1973 contribua à éveiller l'intérêt pour l'énergie éolienne dans plusieurs pays. Ils commencèrent à investir de l'argent pour améliorer notamment la technologie des aérogénérateurs. L'industrie espagnole de l'énergie éolienne a remporté des victoires remarquables tant dans la conception que dans la fabrication des aérogénérateurs. Les USA ont notamment lancé en Californie une opération à grande échelle au début des années 1980 [6].

Aujourd'hui, les études portent sur l'amélioration de l'aérogénérateur ainsi que sur la chaîne de conversion de l'énergie du vent en énergie électrique exploitable par le réseau. [7].

I-3 Constitution d'une éolienne.**I-3-1 : Définition de l'énergie éolienne**

Un aérogénérateur, ou éolienne est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure I-1).

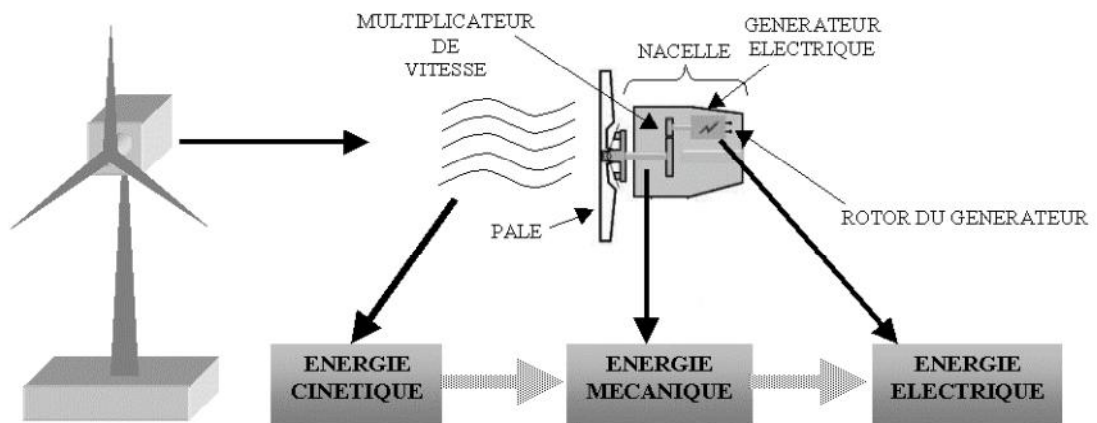


Figure I-1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

I-3-2 : Les différents types d'éoliennes :

Il existe deux types d'éoliennes modernes ; celles à axe horizontal dont le rotor ressemble à une hélice d'avion, et éoliennes à axe vertical [3], [2].

I.3.2.1. Eoliennes à axe vertical :

Elles ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologiques ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Savonius et le rotor de Darrieus (figure (I-2)). De nos jours, ce type d'éolienne est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue. Elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme suit ; [3], [17].

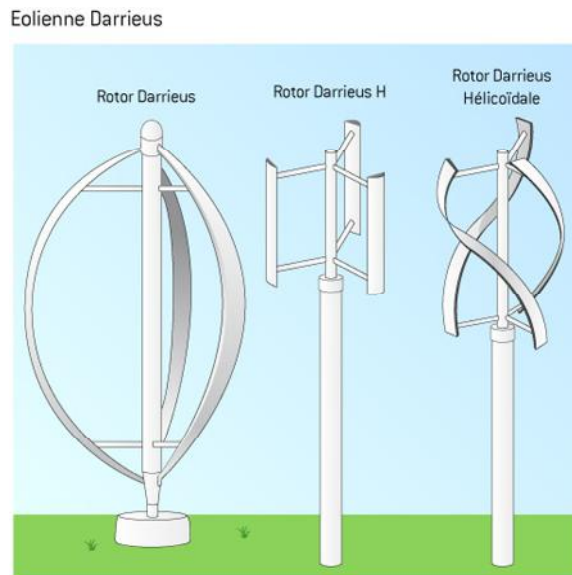


Figure I-2 : Éoliennes à axe vertical

- **Avantages**

- 1- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol. Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- 2- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.
- 3- Les avantages de cette configuration sont que l'éolienne est toujours bien positionnée par rapport au vent.

- **Inconvénients :**

- 1- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- 2- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elles fonctionnent avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- 3- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour.

I-3.2.2. Eoliennes à axe horizontal :

Elles sont actuellement les plus répandues, sans doute à cause de leurs avantages remarquables. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent. [5], [3].

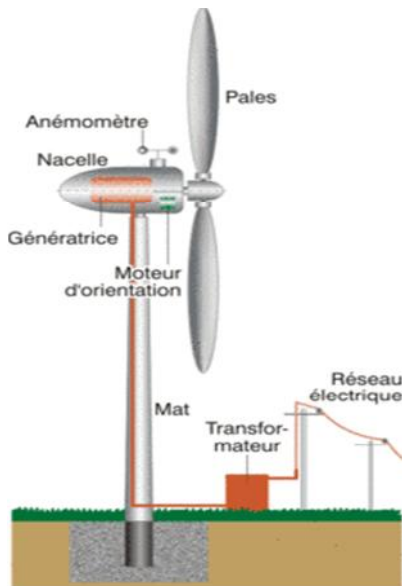


Figure I-3 : Eoliennes à axe horizontal

- **Avantage :**
 - 1- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
 - 2- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
 - 3- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.
- **Inconvénient :**
 - 1- Coût de construction très élevé.
 - 2- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical sont encore utilisées pour la production d'électricité dans les zones isolées. Elles sont de faible puissance destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple.

I-4 Principaux composants d'une éolienne :

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux :

I-4-1. Le mât

Généralement en métal, supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle + rotor) Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et 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). Le mât abrite généralement une partie des composants électriques et électroniques (modulateur, commande, multiplicateur, générateur, etc.).

I-4-2. La nacelle

Montée au sommet du mât, elle abrite les composants mécaniques, pneumatiques, certains composants électriques et électroniques, nécessaires au fonctionnement de la machine. La nacelle peut tourner pour orienter la machine dans la bonne direction ou la mettre en position de repos. La transformation de l'énergie mécanique, fournit par les pâles, en énergie électrique a lieu dans la nacelle.

I-4-2-1. Les différents composants d'une nacelle :

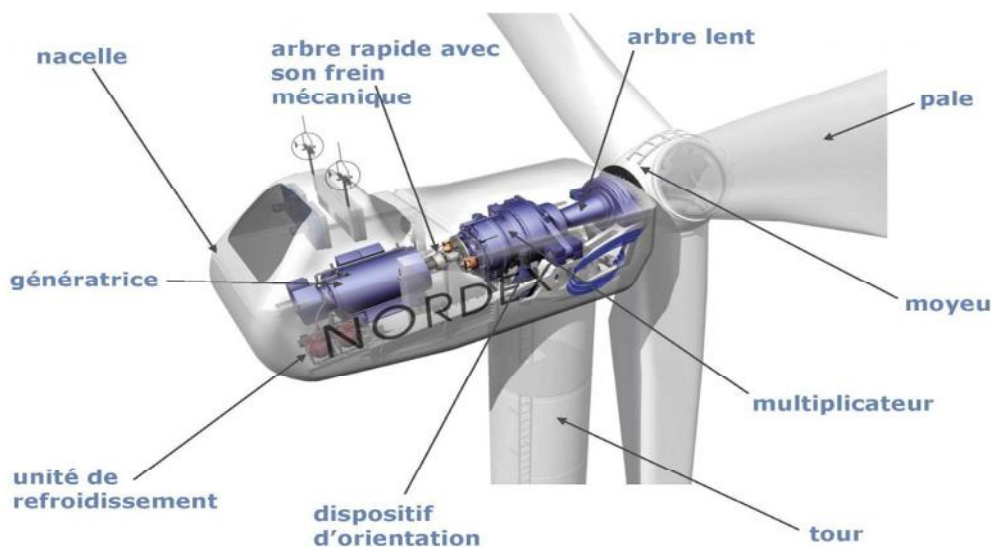


Figure I-4 : différents composants d'une nacelle

- **Mécanisme d'orientation :**

Utilisé pour tourner la turbine contre le vent. On dit que l'éolienne possède une erreur d'orientation lorsqu'elle n'est pas tournée perpendiculairement au sens du vent.

- **L'arbre secondaire :**

Comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.

- **Anémomètre et girouette :**

La mesure de la vitesse du vent est habituellement effectuée à l'aide d'un anémomètre et une girouette permettant de déterminer la direction du vent, les informations récoltées sont transmises au mécanisme d'orientation pour placer l'éolienne dans la meilleure position.

- **Système de refroidissement:**

Les générateurs nécessitent la mise en place d'un système de refroidissement pour leur bon fonctionnement. Dans la plupart des éoliennes, le refroidissement se fait en plaçant le générateur dans un conduit d'air.

- **La génératrice :**

C'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

- **Un contrôleur électronique :**

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.

- **Le multiplicateur de vitesse :**

Il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.

I-4-3. Le rotor :

Composé de plusieurs pales (en général 3) et du nez de l'éolienne. Leur longueur atteint actuellement entre 30 et 55 mètres, soit un diamètre du rotor compris entre 60 et 110 mètres. La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pales (un cercle), donc au carré de son diamètre.



Figure I-5: Rotor d'une turbine.

I-5 Le principe de fonctionnement d'une éolienne. [5], [6],[7]

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un générateur qui produit l'électricité. La vitesse de rotation du rotor (de 12 à 15 tours/minute) doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tours/minute. Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée (50 Hz), tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent. La tension de l'électricité produite par le générateur est de l'ordre de 600 à 1000 volts, est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mât, jusqu'à un niveau de 20 ou 30 KV. Pour pouvoir démarrer, une éolienne a besoin d'une vitesse de vent minimale, de l'ordre de 10 à 15 km/h. Et au-delà de 90 km/h, les turbines s'arrêtent de tourner.

I-6 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

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

I-6-1 .Les avantages

- 1-L'énergie éolienne, propre, fiable, économique et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement. [2], [3]
- 2-Bien que ne pouvoir envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et

renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO₂, et aussi c'est une énergie renouvelable gratuite et inépuisable.

3-Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace

4-C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.

5-La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles [14].

I-7-2. Les inconvénients :

1. L'impact visuel ça reste néanmoins un thème subjectif [Des images de synthèse sont élaborées pour montrer l'impact visuel. Dans la plus grande majorité des cas, les enquêtes réalisées montrent une réelle acceptation des populations voisines ou visitant un site éolien.
2. Les bruits mécaniques ou aérodynamiques ont été réduits par l'utilisation de nouveaux profils extrémités de pale, mécanismes de transmission etc. et ne sont plus une gêne, même proche des machines (50-60 dB équivalent à une conversation). Une distance d'environ huit fois le diamètre permet de ne plus distinguer aucun bruit lié à cette activité (< 40 dB). De plus, il faut souligner que le bruit naturel du vent, pour des vitesses supérieures à 8 m/s, a tendance à masquer le bruit rayonné par l'éolienne
3. Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci. Plus le parc éolien est dense plus ce risque est grand. Des lumières sur les pales peuvent réduire ce danger. Cependant, aucune étude sérieuse ne semble actuellement avoir démontré la réalité du danger pour les oiseaux
4. La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi,

l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suit, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.

5. Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent

I-7 Conversion d'énergie aérodynamique en énergie électrique :

Les systèmes de conversion d'énergie éolienne transforment l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique sur la turbine éolienne puis en énergie électrique via un aérogénérateur. L'énergie dE d'une colonne d'air de longueur dl , de section S , de masse volumique ρ animée d'une vitesse V_v

$$dE = \frac{1}{2} S dl \rho V_v^2 \tag{I.1}$$

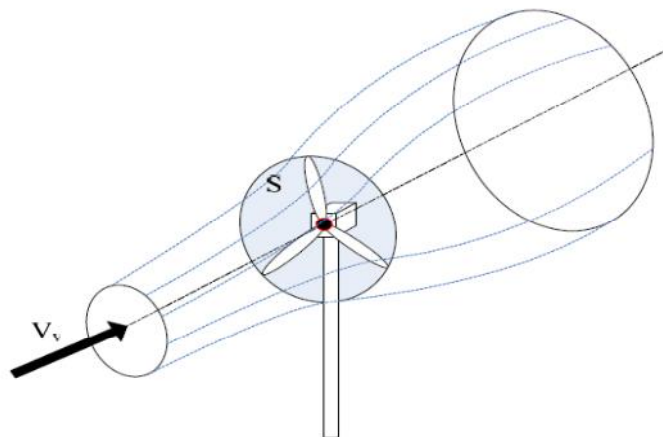


Figure I-6 : Conversion aérodynamique en énergie électrique

En supposant que dl , V_v et dt , on tire l'expression de la puissance P de la masse d'air traversant la section S et se déplaçant à la vitesse V_v

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \rho S V_v^3 \tag{I.2}$$

En réalité, la puissance récupérée par une voilure éolienne est seulement un pourcentage de cette puissance. Pour cela, nous allons présenter des notions fondamentales sur la conversion aérodynamique dans les parties suivantes.

I-7-1 : Le coefficient de vitesse réduite (tip-speed ratio)

Le coefficient de vitesse réduite λ est un facteur spécifique des aérogénérateurs, il est défini comme le rapport de la vitesse tangentielle en bout de pales ΩR sur la vitesse instantanée du vent V_v (voir Figure I-7).

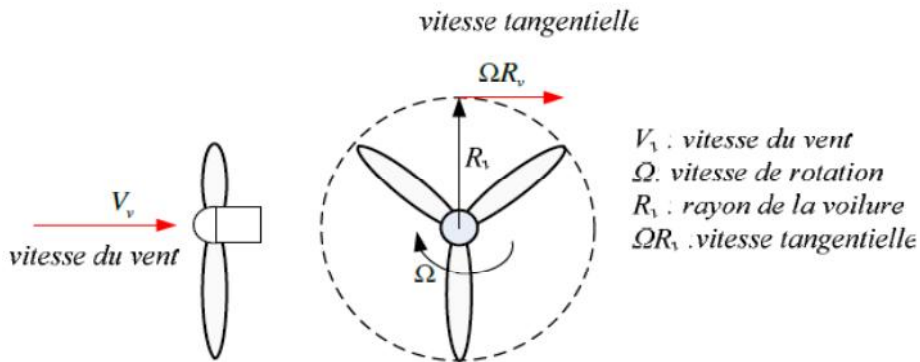


Figure I-7 : Vitesse du vent V_v et vitesse tangentielle ($v \Omega R$)

I-7-2 : Le coefficient de puissance (power coefficient)

Comme nous l'avons souligné précédemment, on ne peut pas capter en totalité la Puissance fournie par la masse d'air (P), cela supposerait une vitesse de vent nulle après l'organe capteur. On définit le coefficient de puissance comme suit :

$$C_p = \frac{P_{\acute{e}ol}}{P} = \frac{P_{\acute{e}ol}}{\frac{1}{2}\rho S V_v^3} \tag{I.3}$$

avec :

P : Puissance captée par la turbine éolienne (W)

S : Surface balayée par la turbine éolienne (m^2)

ρ : Masse volumique de l'air (Kgm^3), dont la valeur dépend de la hauteur où est installée la turbine.

Ainsi, la puissance éolienne est déterminée analytiquement par formule suivante:

$$P_{\acute{e}ol} = \frac{1}{2}\rho C_p S V_v^3 \tag{I.4}$$

Le coefficient C_p est une grandeur variable en fonction de λ , la valeur maximale théorique possible du coefficient de puissance, appelée limite de Betz est de :

$$\frac{16}{27} = 0.5926 \tag{I.5}$$

Avec λ est le ratio de vitesse

Le coefficient de puissance est différent pour chaque type de turbine comme indiqué sur la Figure I-8

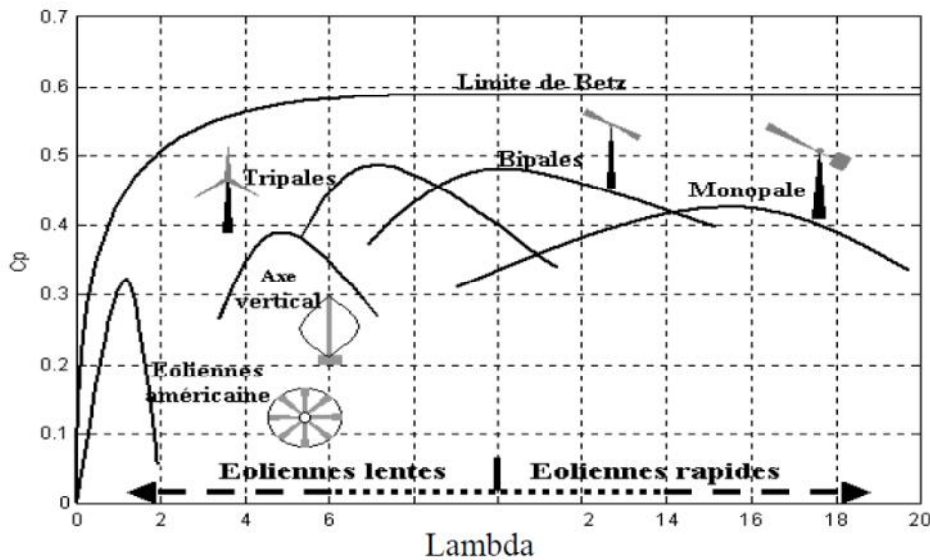


Figure I-8 : Coefficient de puissance pour différents types de turbine

I-7-3 : Le coefficient de couple (torque coefficient).

Le coefficient de couple est fort utile afin de calculer la valeur des couples produits pour différents points de fonctionnement notamment à vitesse de rotation _ nulle. En effet, au démarrage, il y a bien un couple sur l'arbre dû à la force du vent sur les pales tandis que la puissance est nulle, ce qui correspond à une valeur de C_p nulle. L'expression du couple est la suivante :

$$C_{\acute{e}ol} = \frac{P_{\acute{e}ol}}{\Omega} = \frac{RvP_{\acute{e}ol}}{\lambda} = \frac{C_p}{\lambda} \frac{1}{2} \rho \pi R^3 V_v^2 \tag{I.6}$$

Et alors, la valeur du coefficient de couple C_T est déterminée par la formule suivant :

$$C_T = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{C_{\acute{e}ol}}{\frac{1}{2} \rho \pi R^3 V_v^2} \tag{I.7}$$

Le coefficient C_T s'exprime, comme le coefficient C_p , en fonction de la vitesse du vent V_v , et de la vitesse de rotation de la turbine Ω donc en fonction du ratio de vitesse λ

I-7-4 : MPPT (Maximal power point tracking).

Dispositif « MPPT », de l'anglais Maximum Power Point Tracking correspond à une stratégie de gestion permettant de suivre le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs éoliens à travers une électronique de puissance permettant de maximiser l'efficacité énergétique du système à travers la variation de la vitesse du vent.

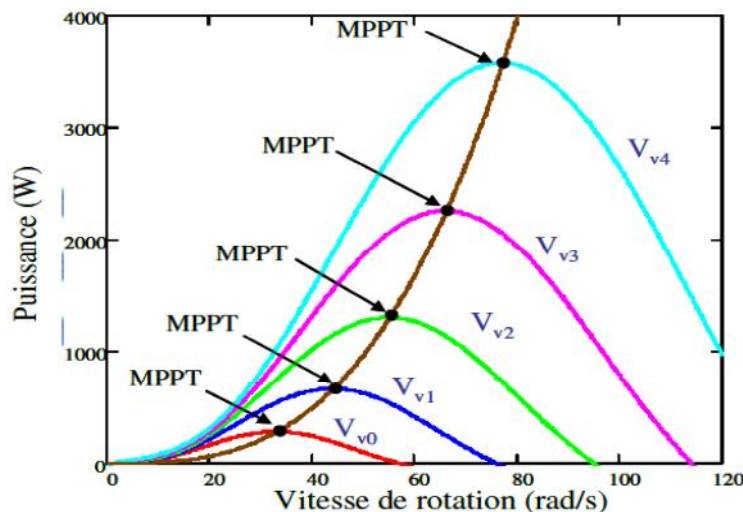


Figure I-9 : Points de MPPT d'une éolienne tri-pale avec la vitesse de vent

La MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une méthode de contrôle très fiable, robuste et simple à implanter. Elle consiste à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée.

Par exemple, la Figure I-9 montre les extrema que poursuit la MPPT d'une éolienne de type tri-pale à vitesse du vent variable : la courbe de puissance en forme de cloche, typique des éoliennes et donnée pour chaque vitesse du vent, présente un point de puissance maximale.

De plus en plus souvent, les génératrices sont donc reliées à un convertisseur électronique de puissance contrôlé qui permet de réaliser cette fonction. De nombreux concepts ont été introduits pour parvenir à poursuivre efficacement le point de puissance maximum pour le « grand éolien ».

I.8 Modélisation de la turbine éolienne

I.8.1 Modélisation de la turbine

Le modèle de la turbine éolienne doit représenter l'ensemble des éléments du système aérogénérateur éolien Figure I-10. Les éoliennes installées sont généralement constituées de trois pales qui pivotent sur leur axe d'un angle β , contrôlé par un système électromagnétique.

Le dispositif, qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G [9], [10], [11].

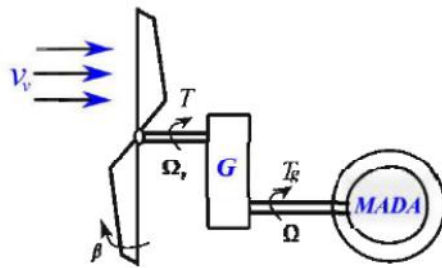


Figure I-10 : Schéma de la turbine éolienne

La turbine est un dispositif permettant de convertir l'énergie du vent en énergie mécanique. Elle est caractérisée par son couple aérodynamique donné par :

$$T = \frac{1}{2} C_p S v^3 \tag{I.8}$$

Ω_t : est la vitesse de la turbine.

ρ : est la densité de l'air (approximativement $1.22 \text{ kg} / \text{m}^3$ à la pression atmosphérique à 15°C)

S : est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est la longueur de la pale.

v : est la vitesse de vent.

C_p : représente le rendement aérodynamique de la turbine. Il dépend du dimensionnement de la pale, du coefficient de vitesse λ (speed ratio) et de l'angle d'orientation de la pale β .

Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse de la pale et la vitesse du vent comme :

$$\lambda = \frac{R\Omega_t}{v} \tag{I.9}$$

Pour cette étude, la formule suivante a été utilisée pour la turbine. [12] :

$$C_p = (0,5 - 0,167)(\lambda - 2) \sin\left[\frac{\pi(\lambda+0,1)}{18,5-0,3(\beta-2)}\right] - 0,00184(\lambda - 3)(\lambda - 2) \tag{I.11}$$

La figure montre les courbes du coefficient de puissance en fonction de λ pour différentes valeurs de β . On obtient un coefficient de puissance maximum de 0.44 pour un ratio de vitesse λ qui vaut 7.2 (λ_{opt}). En fixant β et λ respectivement à leurs valeurs optimales, le système éolien fournira une puissance électrique optimale.

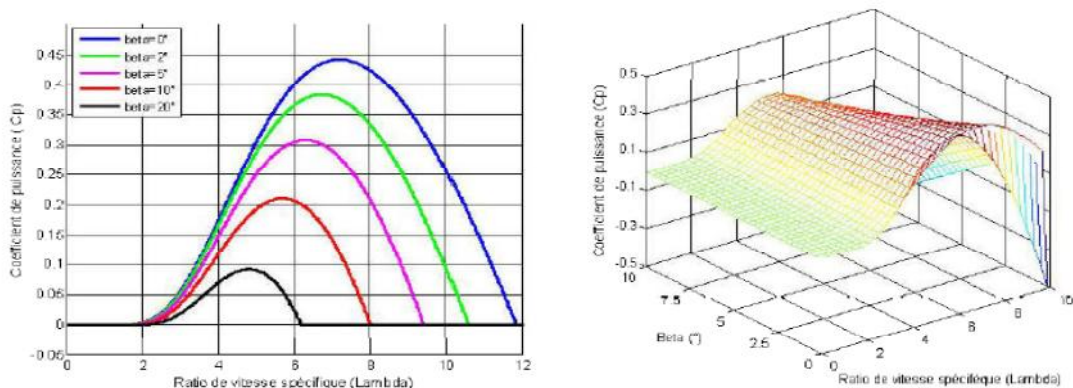


Figure I-11 : coefficient de puissance en fonction de λ et β .

1.8.2 Modèle du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur de vitesse transforme l'énergie aérodynamique de l'arbre mécanique de l'éolienne (vitesse lente) à l'arbre mécanique du rotor de la génératrice (vitesse rapide Ω) avec un rapport de vitesse G. Cela se traduit mathématiquement par les équations :

$$\Omega = G\Omega_t \tag{I.12}$$

$$C_g = G C_{em} \tag{I.13}$$

1.8.3 Modélisation de l'arbre mécanique

La transmission de puissance est composée de l'inertie du rotor de la turbine et de l'inertie de la génératrice. Le modèle mécanique équivalent proposé intègre ces deux inerties.

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_g \tag{I.14}$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe.

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique (T_{mec}) appliqué au rotor:

$$J = \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \tag{I.15}$$

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

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f \tag{I.16}$$

C_f est exprimé comme :

$$C_f = f\Omega_{mec} \tag{I.17}$$

F est le coefficient de frottement équivalent de l'arbre égale $f = \frac{f_t}{G^2} + f_g$ Ou f_t et f_g sont les coefficients de frottement de la turbine et du générateur respectivement. Le schéma bloc correspondant à l'ensemble de ces modélisations se traduit sur la Figure I-12.

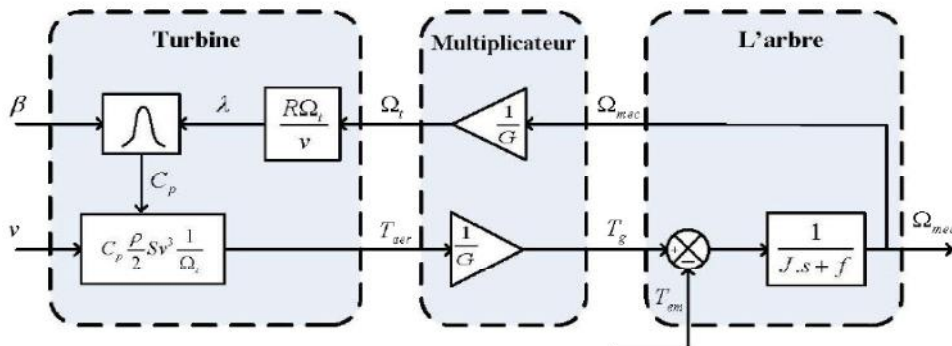


Figure I-12 : Schéma bloc du modèle de la turbine

I.9 Stratégie de commande de la turbine éolienne

I.9.1 Caractéristique puissance vitesse d'une éolienne de grande puissance

La Figure I-13 représente la caractéristique Puissance-vitesse d'une éolienne qui peut se décomposer en quatre zones.

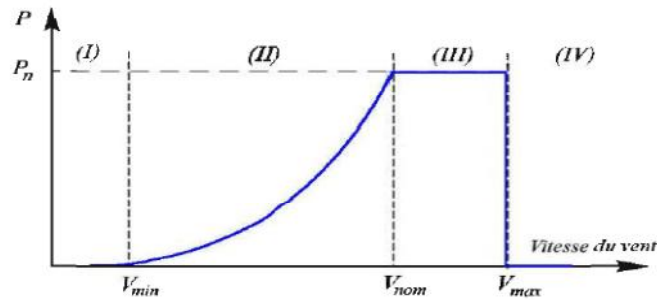


Figure I-13 : La caractéristique puissance vitesse typique d'une éolienne de grande puissance

Zone I : la vitesse de vent est faible, insuffisante pour permettre le démarrage de l'éolienne; la vitesse de rotation et la puissance mécanique sont alors égales à zéro.

Zone II : le vent atteint une vitesse minimale V_{min} 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_{nom} correspondant aux valeurs nominales de la puissance mécanique p_n et de la vitesse de rotation Ω_{nom} .

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 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).

Zone IV : Dès que le vent atteint sa valeur maximale V_{max} , une procédure d'arrêt de l'éolienne est effectuée afin d'éviter toute destruction de celle-ci, les pales de la turbine sont mises en drapeaux ($\beta = 90^\circ$).

I-10 Conclusion

Une brève description sur les systèmes éoliens a été présentée dans ce chapitre. Comme beaucoup d'énergies renouvelables, le gisement éolien mondial est considérable puisqu'il est très supérieur à la consommation énergétique actuelle de l'humanité.

Ce chapitre représente un état de l'art sur les systèmes de conversion éolien qu'on a essayé de les présenter d'une façon générale les différentes structures existantes : les

éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal, et leurs avantages et inconvénients les uns par rapport aux autres.

Vue l'importance de l'énergie éolienne on s'intéressera dans les chapitres suivants à la conception et la simulation d'un modèle pédagogique d'une éolienne avec une machine asynchrone a doublé alimentation.

Chapitre II

Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

II-1 Introduction

La modélisation de la machine électrique est une étape primordiale de son développement. Les progrès de l'informatique et du génie des logiciels, permettant de réaliser des modélisations performantes et d'envisager l'optimisation des machines électriques. Le modèle classique de la machine asynchrone correspondant au schéma monophasé équivalent, n'est valable qu'en régime sinusoïdale à fréquence fixe au stator, pour étudier son comportement à une fréquence variable et avec des signaux fournis par les convertisseurs statiques qui ne sont pas sinusoïdaux, il faut faire appel à un modèle plus compliqué; on considère que chaque armature triphasée statorique et rotorique peut être représentée par une armature diphasée équivalente à l'aide de la transformation de PARK.

Cependant, il faut signaler l'impact de la précision des méthodes d'identification paramétrique sur la signification et la portée des modèles des machines électriques. En effet une identification correcte et précise confère à la modélisation toute son utilité pratique en permettant de généraliser une validité expérimentale et donne le moyen d'agir sur le système.

Dans ce chapitre, on représente le modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation, cette machine fonctionne en moteur.

II-2 Structure des machines asynchrones à double alimentation

Une MADA a un stator identique à celui (d'une machine asynchrone à cage ou d'une machine synchrone). C'est le rotor qui diffère radicalement car il n'est pas composé d'aimants ou d'une cage d'écureuil mais d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques.

On peut voir sur la figure (II-1) que les enroulements rotoriques sont connectés en étoile et les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants (balais-bagues collectrices) permettant d'avoir accès aux tensions et courants du rotor. [14].

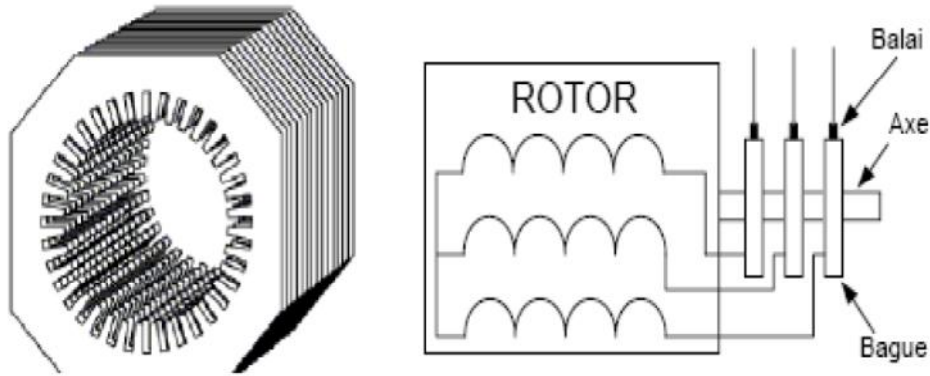


Figure II-1 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

II-3 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone a double alimentation

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Et du moment que le vecteur résultant de f_{mms} des enroulements statoriques tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire $\omega_s = 2\pi f_s$, et le rotor tourne avec la vitesse ω_r , alors pour que cette condition soit vérifiée, il faut que le vecteur des f_{mms} des enroulements rotoriques tourne par rapport au rotor avec une vitesse ω_{gl} telle que :

$$\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r = \omega_s \cdot g \quad (\text{II.1})$$

Où : g est le glissement et ω_{gl} est la vitesse angulaire de glissement.

Si la vitesse de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme, les sens de rotation des deux vecteurs sont identiques, dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à la vitesse de synchronisme les sens seront opposés.

Pour que la rotation du vecteur résultant des f_{mms} par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement rotorique doit avoir une fréquence f_r , définie à partir de

$$\omega_{gl} = 2\pi f_r; \quad (\text{II.2})$$

C'est à dire :

$$f_r = g \cdot f_s \quad (\text{II.3})$$

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

II-4 Classification des machines à double alimentation

A . Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la figure II-2, le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO [28].

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.

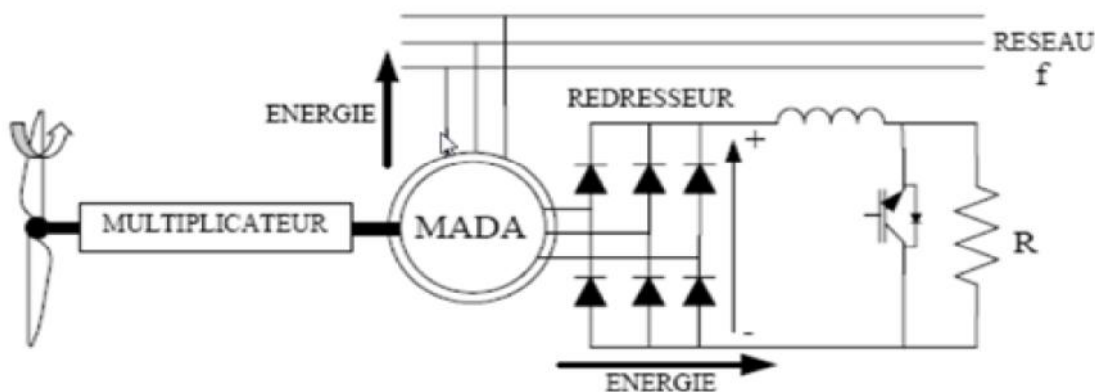


Figure II-2 MADA avec contrôle du glissement par dissipation de l'énergie rotorique

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 transmise dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance.

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 (structure de Kramer) (Figure II-3) [29].

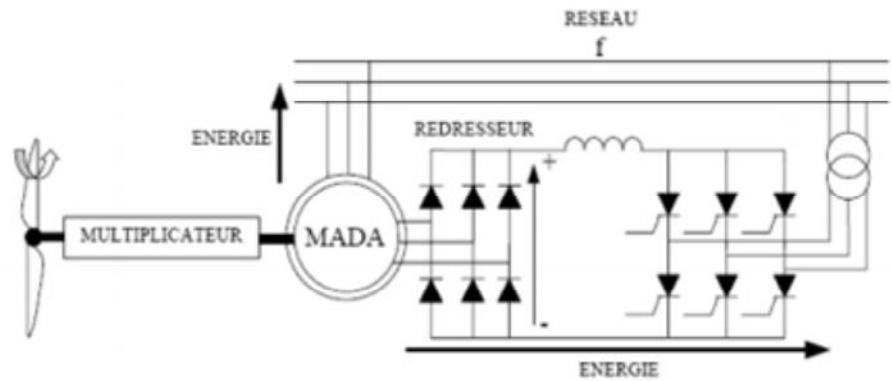


Figure II-3 : MADA structure de kramer

L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Ce système est avantageux et 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 à celle du synchronisme. Cette solution n'est plus utilisée, au profit de la structure de Schrbius avec convertisseur à IGBT

C. Machine asynchrone à double alimentation: structure de Scherbius avec cyclo convertisseur

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association redresseur-onduleur peut être remplacée par un cycloconvertisseur (figure II-4), l'ensemble est alors appelé structure de Schrbius.[30] [28]

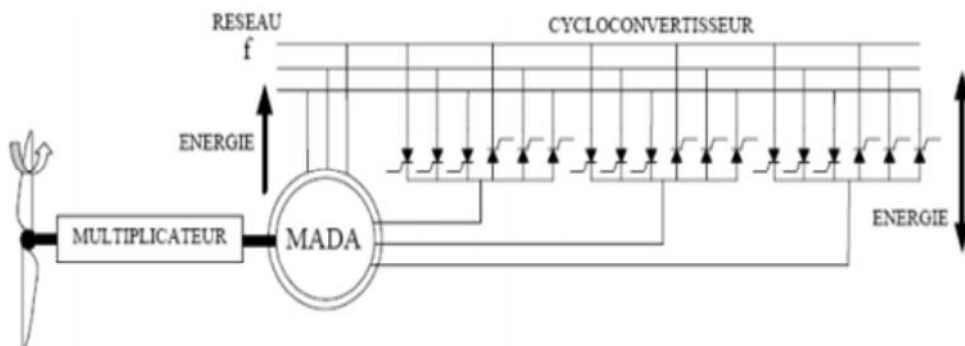


Figure II-4 Structure de Schrbius avec cycloconvertisseur

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

D. Machine asynchrone à double alimentation : structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Cette configuration Figure (II-5) a les mêmes caractéristiques que la structure de Scherbius avec cyclo convertisseur. Toutefois 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 [31]. L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'impulsions (MLI) dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmonique non nuls vers les fréquence élevées). [28]

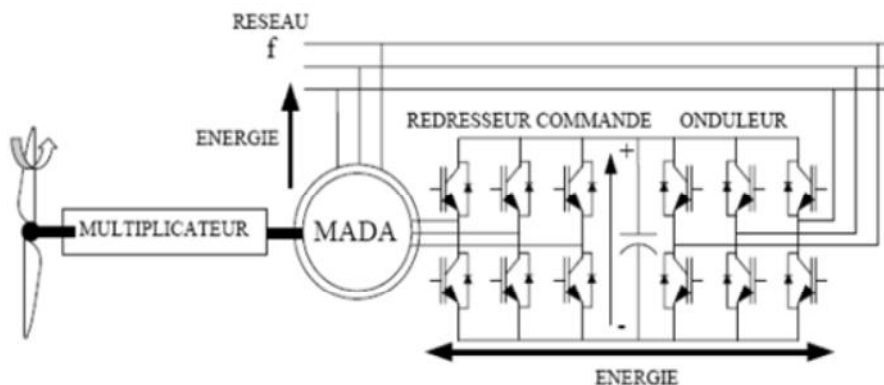


Figure II-5 : structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Toutefois, malgré la présence de contacts glissants qui doivent être entretenus et remplacés périodiquement, la conception de cette machine est plus conventionnelle et plus simple que les autres types de MADA. Plusieurs études récentes, confirmées par des relations industrielles, montrent la viabilité de ce dispositif 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 coté réseau. Si le glissement reste inférieur à 30% autour du synchronisme, le convertisseur est alors dimensionné pour un tiers de la puissance nominale de la machine et ses pertes représente 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 [28]. 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 MLI peut toutefois

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

entraîner des dv/dt importants dans les enroulements rotoriques et faire circuler des courants de fréquences élevés dans ces mêmes enroulements [15].

II.5 Domaine d'application de la MADA :

La littérature atteste du grand intérêt accordé aujourd'hui à la machine doublement alimentée pour diverses applications : en tant que génératrice pour les énergies renouvelables ou en tant que moteur pour certaines applications industrielles comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime [16].

II.5.1 Fonctionnement moteur dans les applications industriels.

La machine asynchrone à double alimentation été conçue pour fonctionner en moteur sur une grande plage de variation de vitesse comme première application. L'utilisation d'une MADA permet de varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques, ce dispositif sera donc économique quand on place les convertisseurs entre le rotor et le réseau en réduisant leurs tailles d'environ 70%. [17].

La MADA peut être utilisée aussi dans d'autres applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage, telles que [18]. :

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

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

II.5.2 Fonctionnement en moteur avec deux convertisseurs :

Ce type d'alimentation peut prendre différentes formes :

- Deux onduleurs alimentés par leurs propres redresseurs conformément à la figure II-12,
- Deux onduleurs alimentés en parallèle par un redresseur commun,
- Deux cyclo-convertisseurs.

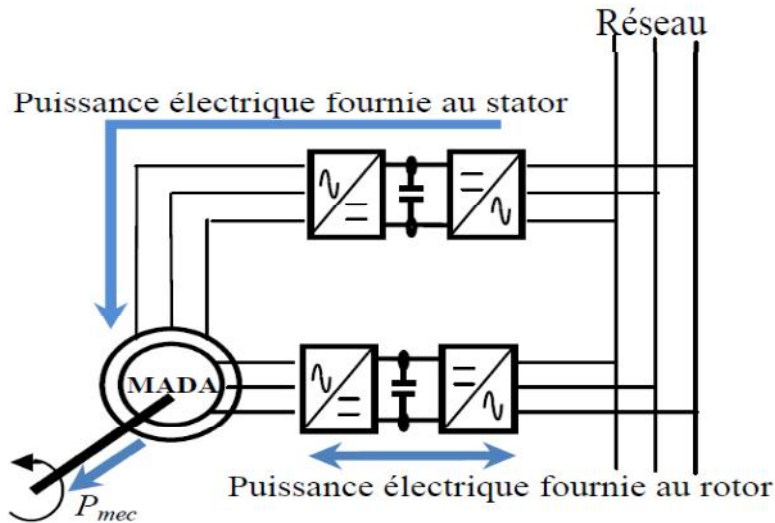


Figure II-6 : Schéma d'un system utilisant une MADA en moteur alimenté par deux convertisseurs

II.5.3 Fonctionnement en moteur avec un seul convertisseur :

Dans ce type de fonctionnement, le stator est relié au réseau à fréquence et tension constantes, tandis que le rotor est relié à son propre convertisseur qui peut être un cyclo-convertisseur ou une association redresseur-onduleur. Cette solution permet de réduire fortement la puissance du convertisseur. La figure II-7 présente le schéma de principe de cette catégorie. [19].

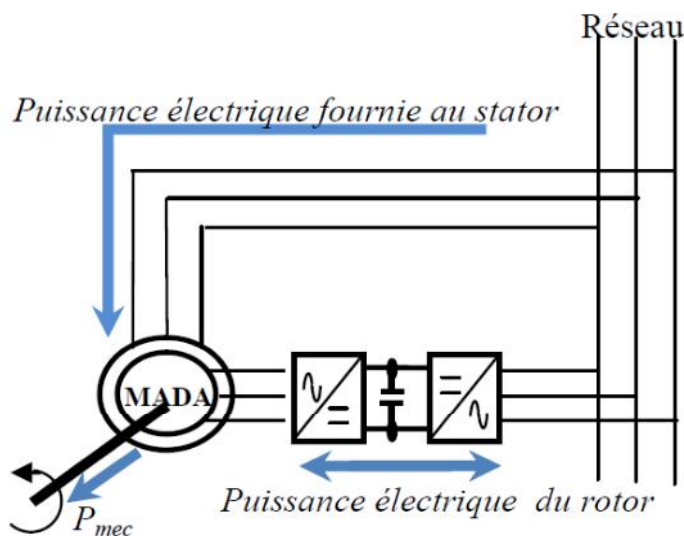


Figure II-7 : Schéma d'un système utilisant une MADA en moteur alimenté par un seul convertisseur

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

II.6 Mode de fonctionnement de la MADA:

Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur mais la grande différence réside dans le fait que la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. Effectivement, une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et en dessus pour être en générateur.

Ici, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper ou hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement : [20].

II.6.1 Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone :

La figure (II-8) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjecter au réseau. On a donc un fonctionnement moteur au-dessous de la vitesse de synchronisme. Ce régime est généralement connu comme mode de récupération de l'énergie de glissement.

La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes joule dans le rotor.

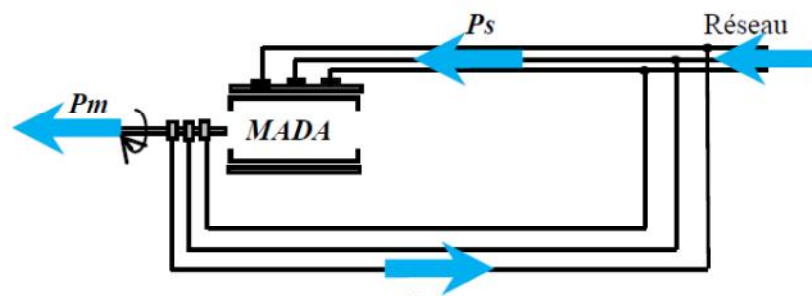


Figure II-8 : Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone

II.6.2 Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone:

La figure (II-9) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator, la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor, on a donc un fonctionnement

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.

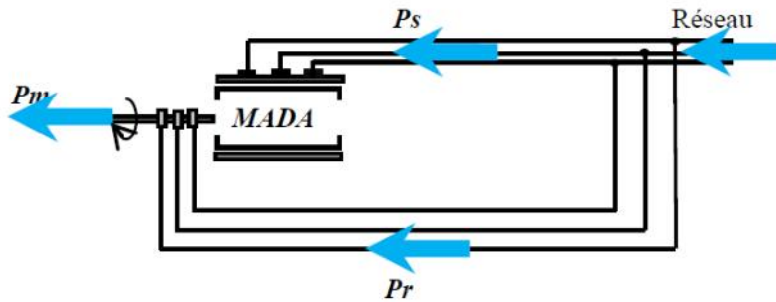


Figure II-9 : Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone

II.6.3 Fonctionnement en mode générateur hyposynchrone :

La figure (II-10) montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.

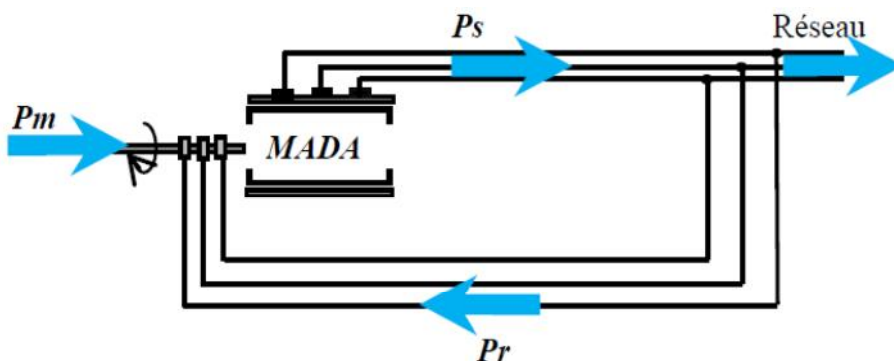


Figure II-10 : Fonctionnement en mode générateur hyposynchrone

II.6.4 Fonctionnement en mode générateur hypersynchrone :

La figure (II-11) montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée comme des pertes joule dans le rotor.

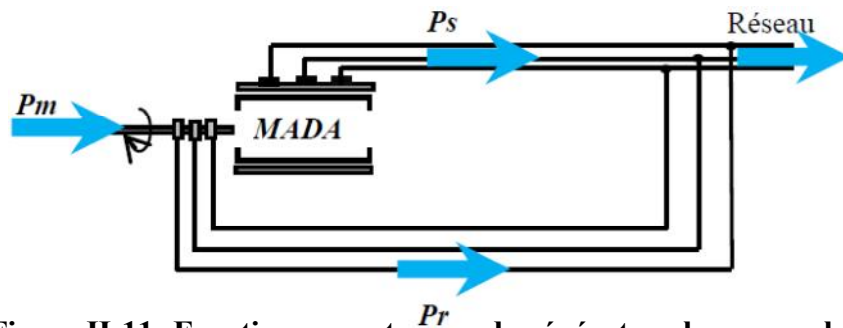


Figure II-11: Fonctionnement en mode générateur hypersynchrone

II-7 Les avantages et les inconvénients de la MADA [2], [22].

II.7.1. Les avantages de la MADA

La MADA présente plusieurs avantages à savoir :

- ❖ La mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- ❖ Le partage des fréquences entre le stator et le rotor : en effet, dans le cas d'une double alimentation il est possible et recommandé de partager la vitesse de rotation du rotor entre les deux convertisseurs alimentant la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentent son rendement.

De plus, l'alimentation de la machine par deux onduleurs permet de travailler à des fréquences relativement élevées évitant ainsi un déclassement des convertisseurs tout en maintenant un couple à l'arrêt. Cette même propriété assure un contrôle quasi insensible aux variations résistives de la machine.

- ❖ La solution avec deux convertisseurs alimentant la machine assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge.
- ❖ La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale.
- ❖ La MADA se comporte comme une machine synchrone et l'on peut pratiquer des rapports de démagnétisation très importants (de l'ordre de 1 à 6).
- ❖ Un fonctionnement en régime dégradé plus souple que la machine à simple alimentation, quand un onduleur tombe en panne.

II.7.2. Les inconvénients de la MADA :

Contrairement à ses avantages, la MADA présente aussi des inconvénients tels que :

- ❖ Un nombre important de convertisseurs est utilisé (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) que celui utilisé pour la machine à cage. Nous soulignons que des études récentes, tenant compte de la chute du prix du silicium, donnent maintenant un petit avantage à la MADA.
- ❖ La MADA présente une puissance massique légèrement plus élevée que les autres machines de grande puissance.

II.8 Mode de variation de vitesse

L'examen de la formule de la vitesse donné par : $\Omega = \frac{2\pi}{p} f_s (1 - g)$ fait sortir trois modes de variations :

II.8.1 Action sur le glissement

Pour régler la vitesse, lorsqu'on utilise ce principe, on place entre le réseau et le moteur un gradateur pour chacune des phases. On fait varier la vitesse par action sur l'angle de passage des courants durant chaque alternance. Ce mode affecte directement le rendement $\eta = (1 - g)$.

Techniquement on réalise ce type par action sur la tension d'alimentation pour le moteur à rotor à cage et avec une résistance rotorique pour le moteur à rotor bobiné

II.8.1 Variation de la fréquence

Pour faire varier la vitesse dans de bonnes conditions, il faut faire varier sa fréquence d'alimentation en utilisant des convertisseurs (onduleur MLI ou plein ondecycloconvertisseur).

II.8.3 Action sur le nombre de pôles

C'est un mode constructif par action sur le nombre de pôles, cette technique de bobinage consistant à changer la polarité de la machine par un changement des sens de courant. La vitesse Ω varie du simple au double et inversement ce qui implique une variation discontinue.

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

II.9 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

II.9.1 Référentiels de travail

Un référentiel de travail est un système d'axe associé à sa vitesse de rotation. Ce changement de repère de travail a pour but de simplifier les équations, en rendant notamment la matrice inductance à coefficients constants.

Concernant la machine asynchrone, de par sa construction symétrique, plusieurs référentiels peuvent lui convenir et réalisant tous les objectifs cités précédemment. Dans la pratique, trois référentiels sont communément utilisés : il peut être lié soit au stator, au rotor, ou au champ tournant. Seule l'application permet de choisir le référentiel de travail.

On définit :

ω_s : vitesse du champ tournant ou pulsation des courants statoriques.

ω_r : vitesse électrique du rotor (rd/s).

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

$g \cdot \omega_s$: pulsations des courants rotoriques.

On pose:
$$\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{II.4})$$

II.9.2. : référentiel lié au stator

Ce référentiel est utilisé pour étudier les variations importantes de la vitesse rotation.

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \quad ; \quad \frac{d\theta_r}{dt} = -\omega_r \quad (\text{II.5})$$

II.9.3 référentiel lié au rotor

Ce référentiel est lié au rotor, donc il tourne à la même vitesse que lui. Un observateur placé sur ce référentiel verrait la vitesse de rotation constante. Ce référentiel est donc préférable pour l'étude des systèmes où la vitesse de rotation peut être considérée comme constante.

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \quad ; \quad \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_r \quad (\text{II.6})$$

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

II.9.4 référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel est lié au champ tournant, donc il tourne à la vitesse de synchronisme. Il est préférable pour l'étude des systèmes où la fréquence d'alimentation est constante. Il est aussi utilisé dans l'alimentation des moteurs à fréquence variable, lorsque l'on désire étudier sa fonction de transfert vis-à-vis des petites perturbations.

$$\frac{d\theta_r}{dt} = g\omega_s \quad ; \quad \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \quad (II.7)$$

Afin d'élaborer un modèle simple de la GADA. Il est nécessaire de tenir compte des mêmes hypothèses simplificatrices

II.10 Modèle de la MADA dans le repère (a b c)

La machine asynchrone à double alimentation peut être modélisée par six équations électriques et une seule équation mécanique qui concerne la dynamique du rotor.

Elle peut être électriquement schématisée par la figure II-12 suivante :

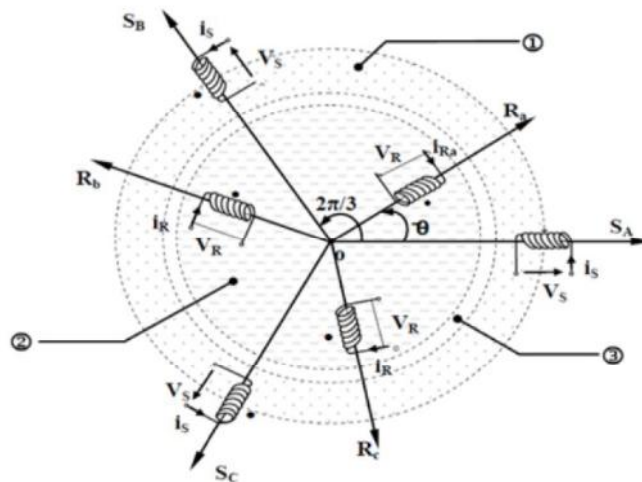


Figure II-12 : Représentation de la MADA dans le repère (a b c)

Notons ici que nous adoptons la convention récepteur au stator comme au rotor même si la machine travaille en génératrice. Il suffit d'imposer des consignes de puissance négatives.

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

II.10.1 Equations électriques dans le repère (a b c)

Les enroulements illustrés par la figure précédente obéissent aux équations électriques qui s'écrivent sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{cases} V_s = R_s I_s + \frac{d\varphi_s}{dt} \\ V_r = R_r I_r + \frac{d\varphi_r}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

$$R_s = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{pmatrix} \quad ; \quad R_r = \begin{pmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{pmatrix}$$

$$V_s = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad ; \quad V_r = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}$$

$$I_s = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad ; \quad I_r = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix}$$

$$\varphi_s = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad ; \quad \varphi_r = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix}$$

II.10.2 : Equations magnétiques dans le repère (a b c)

Les équations magnétiques sont données par les expressions suivantes :

$$\begin{cases} \varphi_s = L_s \cdot I_s + M_s \cdot I_r \\ \varphi_r = L_r \cdot I_r + M_r \cdot I_s \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

$$\varphi_s = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad ; \quad \varphi_r = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix}$$

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

$$L_s = \begin{pmatrix} L_{sa} & M_s & M_s \\ M_s & L_{sa} & M_s \\ M_s & M_s & L_{sa} \end{pmatrix} ; \quad L_r = \begin{pmatrix} L_{ra} & M_r & M_r \\ M_r & L_{ra} & M_r \\ M_r & M_r & L_{ra} \end{pmatrix}$$

$$[M_{rs}] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \cos(\theta) \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

Avec : $[M_{rs}] = [M_{rs}]^T$

II.10.3 : Equation mécanique de la MADA

L'équation du mouvement peut s'exprimer sous la forme suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + K_f \Omega = C_{em} - C_r \quad (\text{II.11})$$

J : moment d'inertie des masses tournantes (Kg.m^2)

K_f : Coefficient de frottement en (Nm.s/rad) ;

C_{em} : Couple électromagnétique de la MADA en (Nm) ;

C_m : Couple moteur fourni par l'organe d'entraînement en (Nm) ;

Ω : vitesse angulaire de rotation du rotor.

II.11 Modèle de la MADA dans le plan (dq)

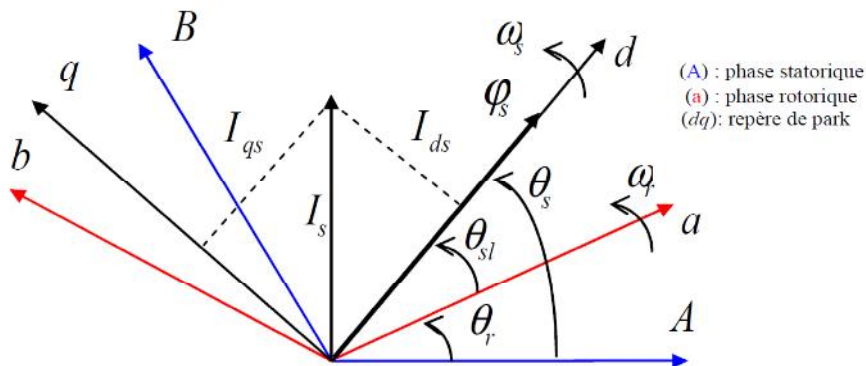


Figure II-13 : Représentation de la MADA dans le repère (dq)

II.11.1 Application de la transformation de Park

L'application de la transformation de Park, s'avère nécessaire, cette transformation appliquée aux courants, tensions et flux permet d'obtenir des équations différentielles à coefficients constants.

La matrice de Park est donnée par : [16]

$$p(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Son inverse est donnée par :

$$p(\theta)^{-1} = p(\theta)^t \quad (\text{II.13})$$

II.11.2 Equations électriques dans le plan (dq)

En appliquant la transformation de Park pour le système d'équations électriques du stator, on aura :

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

En procédant d'une façon analogue à celle du stator, on trouve pour le rotor :

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

Avec :

V_{ds} et V_{qs} : les tensions statoriques dans le repère de Park,

V_{dr} et V_{qr} : les tensions rotoriques dans le repère de Park,

I_{ds} et I_{qs} : les courants statoriques dans le repère de Park,

I_{dr} et I_{qr} : les courants rotoriques dans le repère de Park,

φ_{ds} et φ_{qs} : les flux statoriques dans le repère de Park.

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

φ_{dr} et φ_{qr} : les flux rotoriques dans le repère de Park.

R_s et R_r : les résistances respectives des bobinages statorique et rotorique.

θ_s et θ_r : les angles de Park respectifs des grandeurs statoriques et rotoriques.

Les relations entre les flux et les courants sont exprimées par les équations suivantes :

$$\text{Flux coté stator : } \begin{cases} \varphi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

$$\text{Flux coté rotor : } \begin{cases} \varphi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

Après développement des calculs et en choisissant les courants statoriques et rotoriques comme variables d'état, nous obtenons les équations suivants :

$$\frac{dI_{dr}}{dt} = -\gamma_r I_{dr} + \omega_r I_{qr} + \alpha_s \beta \varphi_{ds} - \beta p \omega \varphi_{qs} - \beta V_{ds} + \frac{1}{\sigma_r} V_{dr} \quad (\text{II.18})$$

$$\frac{dI_{qr}}{dt} = -\gamma_r I_{qr} - \omega_r I_{dr} + \alpha_s \beta \varphi_{qs} - \beta p \omega \varphi_{ds} - \beta V_{qs} + \frac{1}{\sigma_r} V_{qr} \quad (\text{II.19})$$

$$\frac{d\varphi_{ds}}{dt} = -\alpha_s \varphi_{ds} + \omega_s \varphi_{qs} + \alpha_s M i_{dr} + V_{ds} \quad (\text{II.20})$$

$$\frac{d\varphi_{qs}}{dt} = -\alpha_s \varphi_{qs} - \omega_s \varphi_{ds} + \alpha_s M i_{qr} + V_{qs} \quad (\text{II.21})$$

Avec :

$$\alpha_s = \frac{R_s}{L_s}; \sigma_r = L_r(1 - M^2/L_s L_r); \beta = (M/L_s \sigma_r); \gamma_r = \frac{R_r}{\sigma_r} + (R_s M^2)/L_s^2 \sigma_r;$$

p : nombre de paires de pôles.

II.11.3 Equation du couple électromagnétique dans le plan (dq)

On peut l'écrire comme suit :

$$C_{em} = -p(\varphi_{dr} I_{qr} - \varphi_{qr} I_{dr})$$

$$C_{em} = p(\varphi_{ds} I_{qs} - \varphi_{qs} I_{ds}) \quad (\text{II.22})$$

Autres expression du couple électromagnétique

$$C_{em} = -pL_m(I_{dr}I_{qs} - I_{qr}I_{ds}) \quad (\text{II.23})$$

II.12 Simulation de la machine asynchrone à double alimentation :

L'utilisation du logiciel MATLAB, conçu pour la manipulation des matrices, pour la simulation de la MADA en fonctionnement moteur permet d'utiliser le modèle décrit par l'équation sous sa forme matricielle (II.18), (II.19), (II.20), (II.21).

Les figures ci-dessous présentent les résultats de simulation d'une MADA de 3KW. La machine est alimentée directement par deux sources de tension triphasées sinusoïdale, l'une au niveau du stator avec une fréquence de 50Hz et d'amplitude $V = 690$ V. les figure (II-14), (II-15) concernant respectivement le couple et la vitesse, les composante du courant rotoriques et son résultante.

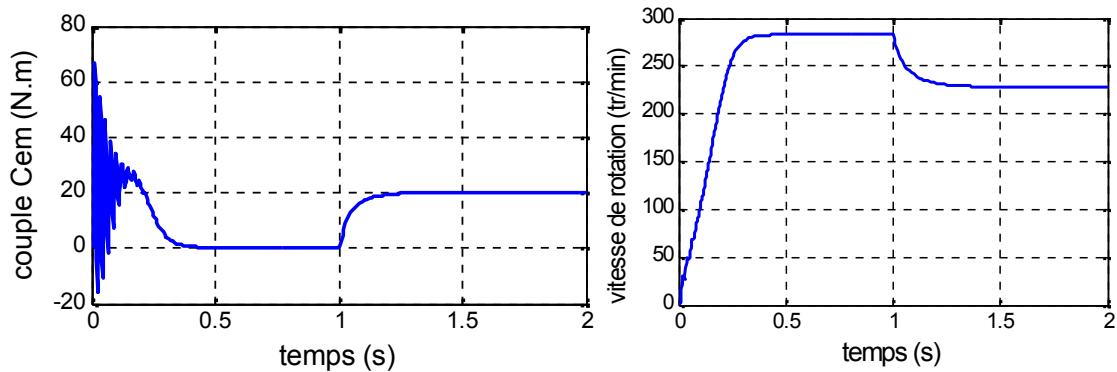


Figure II-14 : le couple électromagnétique et la vitesse de rotation

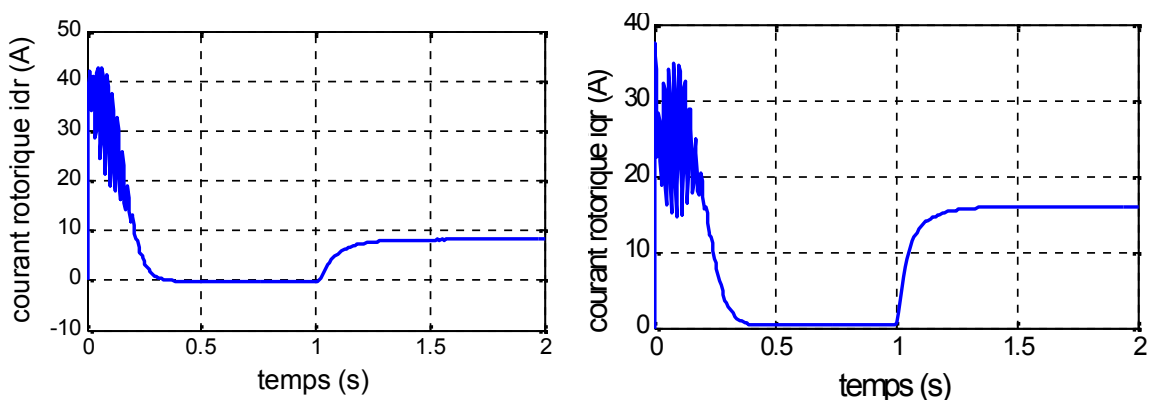


Figure II-15 : Les courants rotoriques directe et en quadrature dans le repère de PARK

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

III.1.4 Interprétation des résultats

Les figures (II-14), (II-15) montre les résultats de la simulation s'effectue au départ, d'un démarrage à vide. Nous remarquons que le régime transitoire est oscillatoire pour toutes les grandeurs de la machine. Après que le régime permanent s'établi, nous appliquons à l'instant $t=1s$, un couple de charge à la machine $C_r=+20Nm$ nous remarquons une augmentation du couple électromagnétique et de courant i_{dr} et i_{qr} et une diminution de la vitesse à cause de glissement (fonctionnement hypo synchrone)

II-11 Conclusion:

Dans ce chapitre, on a présenté une brève étude sur la machine asynchrone à double alimentation, sa structure, son principe de fonctionnement ainsi que ses domaines d'application. On a aussi présenté le modèle de la machine dans le repère (a, b,c) auquel on a appliqué la transformation de Park pour le rendre linéaire et plus adapté à la commande.

La modélisation de la MADA et de son système d'alimentation a pour but de faciliter la mise en œuvre de la commande. La commande vectorielle sera le sujet du chapitre suivant.

Chapitre III

Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

III.1 Introduction

Une bonne commande des machines à courant alternatif à vitesse variable est assurée si nous garantissons un bon découplage entre ses grandeurs électromagnétiques. Ceci est réalisé par orientation de ces derniers dans un repère (d,q) tournant à la vitesse de rotation du champ tournant.

Si cela est réalisé, nous pouvons rapprocher son comportement de celle d'un moteur à courant continu à excitation indépendante où nous retrouvons un découplage naturel entre le courant d'excitation qui crée le flux et le courant d'induit fournissant le couple électromagnétique nécessaire pour la faire tourner [32].

La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone double alimentée aussi bien en fonctionnement générateur que moteur [19].

Nous nous proposons dans ce chapitre d'étudier le comportement de la machine asynchrone à double alimentation en commande vectorielle. Dans ce chapitre, nous avons proposé une loi de commande pour la MADA alimentée par deux onduleurs de tension basée sur l'orientation du flux statorique, utilisée pour la faire fonctionner en moteur. Cette dernière met en évidence les relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques.

III.2 Commande vectorielle de la machine asynchrone a doublé alimentation

Dans le but de faire translater les performances de la machine à courant continu à excitation séparée à la machine asynchrone, Blaschke et Hasse ont proposé une méthode du contrôle vectoriel de la machine asynchrone. La commande vectorielle dite aussi 'commande à flux orienté' est d'une importance majeure puisqu'elle résout les problèmes du couplage des variables de la machine.

Dans ce type de commande, le flux et le couple sont deux variables qui sont découplées et commandées indépendamment.

Tous les travaux de recherches effectués sur ce sujet utilisent deux méthodes principales :

- ❖ Méthode directe développée par Blaschke.
- ❖ Méthode indirect développée par Hasse.

Plusieurs techniques ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer :

Suivant la source d'énergie :

- Commande en tension ;
- Commande en courant.

Suivant l'orientation du repère (d,q) :

- Le flux rotorique ;
- Le flux statorique ;
- le flux de l'entrefer.

Suivant la détermination de la position du flux :

- Directe par mesure ou observation de vecteur flux (module, phase)
- Indirecte par contrôle de la fréquence de glissement.

Dans notre cas, nous nous intéressons à une commande en tension avec orientation du repère (d-q) suivant le flux statorique.

III-3 Principe de la commande vectorielle

Le principe du pilotage vectoriel des machines électriques est déduit de la machine à courant continu qui était dominante dans le marché industriel des machines à vitesse variable à cause de son caractère spécial lié au contrôle séparé du flux par le courant d'excitation et du couple par le courant d'induit [33].

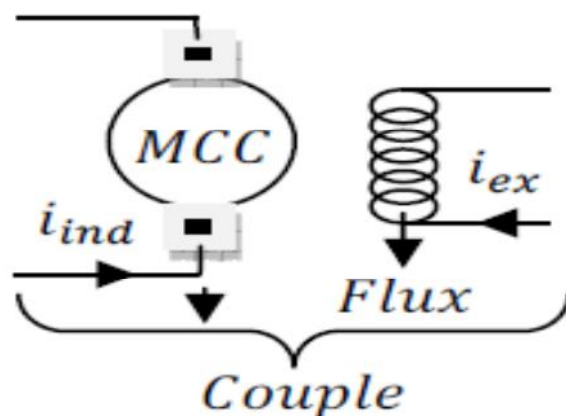


Figure III-1 : Principe du pilotage découplé du couple d'une MCC.

Cette méthode se base sur la transformation des variables électriques de la machine vers un référentiel qui tourne avec le vecteur du flux. Afin d'obtenir un contrôle analogue à celui de la machine à courant continu à excitation séparée, I_{ds} est analogue au courant d'excitation, tandis que le courant I_{qs} est analogue au courant d'induit. Par conséquent, les deux composantes I_{ds} et I_{qs} sont mutuellement découplées.[34]

III-4 Commande en puissance de la machine asynchrone à double alimentation

Une bonne commande des machines à courant alternatif à vitesse variable est assurée si nous garantissons un bon découplage entre ses grandeurs électromagnétiques. Ceci est réalisé par une orientation adéquate du repère (d q). Si cela est réalisé, nous obtiendrons un comportement proche de celui d'un moteur à courant continu à excitation indépendante où nous retrouvons un découplage naturel entre le courant d'excitation qui crée le flux et le courant d'induit fournissant le couple électromagnétique.

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

Dans cette optique, nous développerons des lois de commande en puissance exprimées dans un référentiel tournant à la vitesse du flux statorique donc du champ tournant et orienté suivant le flux statorique d'axe direct.

Cela implique les relations suivantes :

Si le repère (d,q) tourne à ω_s ;

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \quad \text{et} \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta}{dt} = \omega_s - \omega_r = g\omega_s \quad (III.1)$$

Si le repère (d,q) est orienté suivant le flux statorique d'axe d, nous obtiendrons :

$$\varphi_{ds} = \varphi_s \quad \text{et} \quad \varphi_{qs} = 0 \quad (III.2)$$

Dans ce qui suit et à partir des simplifications précédentes, nous exprimerons les puissances actives et réactives statoriques et rotoriques en fonction des courants rotoriques.

Chapitre III : Modélisation de la commande vectorielle de la MADA

Finalement, en exprimant les relations entre les tensions et les courants rotoriques nous montrerons que la MADA est commandable en puissance par ses tensions rotoriques. Nous établirons en conséquence les schémas bloc de commande en puissance de la MADA.

$$\text{Tensions statoriques} \begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \end{cases} \quad (III.3)$$

$$\text{Tensions rotoriques} \begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - g \omega_s \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + g \omega_s \varphi_{dr} \end{cases} \quad (III.4)$$

Avec un flux statorique constant et orienté, $\varphi_{ds} = \varphi_s$ et $\varphi_{qs} = 0$ ces équations peuvent se simplifier sous la forme suivante :

$$\text{Tensions statoriques} \begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \end{cases} \quad (III.5)$$

$$\text{Tensions rotoriques} \begin{cases} V_{dr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} - g \omega_s \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} + g \omega_s \varphi_{dr} \end{cases} \quad (III.6)$$

Pour les machines de moyenne et forte puissances utilisées dans l'énergie éolienne, on néglige la résistance du bobinage statorique ($R_s = 0$), les équations (III.5) deviennent :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \varphi_{ds} = \omega_s \varphi_s \end{cases} \quad (III.7)$$

La relation (III.7) montre que sous l'hypothèse d'une résistance statorique négligeable, orienter le repère (d, q) sur l'axe d du flux statorique, revient à l'orienter suivant l'axe q de la tension statorique. Pratiquement cela nous évite à voir recours à un capteur de flux.

De la même manière que pour les tensions, les équations des flux deviennent :

$$\text{Flux coté rotor} \begin{cases} \varphi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (III.8)$$

$$\text{Flux coté stator} \begin{cases} \varphi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ 0 = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (III.9)$$

A partir des équations des composantes directes et en quadrature du flux statoriques (équations (III.9)), Nous pouvons écrire les relations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} = \frac{1}{L_s} (\varphi_s - M \cdot I_{dr}) \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (III.10)$$

III.4.1 : Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques

Les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (III.11)$$

Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, ce système d'équations peut se simplifier sous la forme :

$$\begin{cases} P_s = V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} \end{cases} \quad (III.12)$$

En remplaçant les courants statoriques direct et en quadrature par leurs expressions dans les équations des puissances active et réactive, on trouve :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = \frac{V_s \varphi_s}{L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (III.13)$$

En approximant φ_s par $\frac{V_s}{\omega_s}$, l'expression de la puissance réactive Q_s devient alors :

$$Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} \quad (III.14)$$

Les puissances active et réactive rotoriques peuvent s'écrire :

$$\left. \begin{aligned} P_r &= -gV_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_r &= g \left(\frac{V_s \varphi_s}{L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} \right) \end{aligned} \right\} \quad (III.15)$$

III.4.2 : Relations entre les tensions rotoriques et les courants rotoriques

A partir du système d'équation (III.10), les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\left\{ \begin{aligned} \varphi_{dr} &= \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + \frac{MV_s}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{qr} &= \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + \frac{M}{L_s} \varphi_{qs} \end{aligned} \right. \quad (III.16)$$

Comme $\varphi_{qs} = 0$ on obtient :

$$\left\{ \begin{aligned} \varphi_{dr} &= \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + \frac{MV_s}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{qr} &= \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} \end{aligned} \right. \quad (III.17)$$

On pose : $\sigma L_r = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$

On obtient donc le système d'équations suivant :

$$\left\{ \begin{aligned} V_{dr} &= R_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{di_{dr}}{dt} - g\omega_s \sigma L_r i_{qr} \\ V_{qr} &= R_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{di_{qr}}{dt} + g\omega_s \sigma L_r i_{dr} + g \frac{MV_s}{L_s} \end{aligned} \right. \quad (III.18)$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire :

$$\left\{ \begin{aligned} V_{dr} &= R_r i_{dr} - g\omega_s \sigma L_r i_{qr} \\ V_{qr} &= R_r i_{qr} + g\omega_s \sigma L_r i_{dr} + g \frac{MV_s}{L_s} \end{aligned} \right. \quad (III.19)$$

V_{dr} et V_{qr} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus. L'influence des termes de couplage

Chapitre III : Modélisation de la commande vectorielle de la MADA

(σL_r) entre les deux axes est minime. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser.

En revanche, le terme $g \frac{MV_s}{L_s}$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car elle entraîne une erreur de traînage. Le contrôle du système devra donc prendre en compte cette erreur.

Les équations (III.13), (III.4) et (III.19) permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler **Figure III-2**.

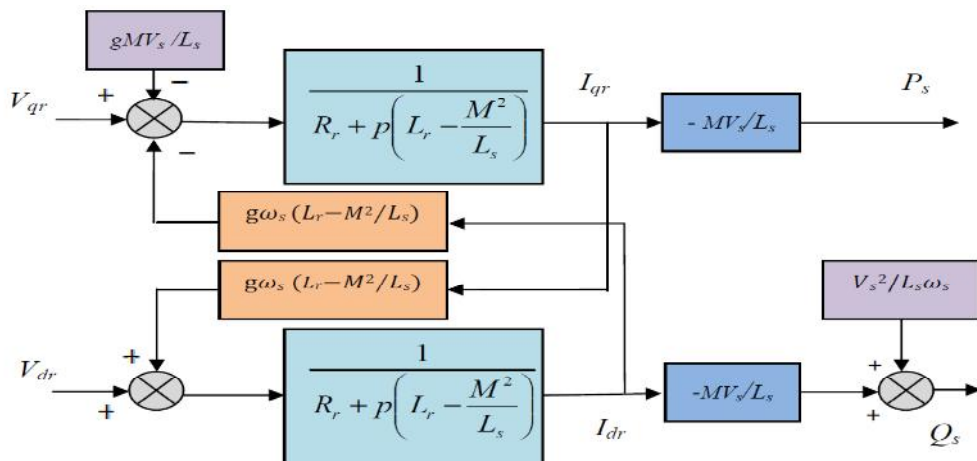


Figure III-2 : Schéma bloc du système à réguler

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. La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire coté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal.

III.5 : Commande vectorielle directe et indirecte

La commande vectorielle à flux rotorique orienté, est dite directe ou indirecte selon la méthode d'estimation du vecteur flux rotorique.

III.5.1 : Commande vectorielle directe

Cette méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. L'appellation commande directe vient du fait que les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine. L'intérêt que présente cette méthode est que sa mise en œuvre est simple.

Pour réguler la MADA, nous avons mis en place une boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur de type PI **Figure III-3**.

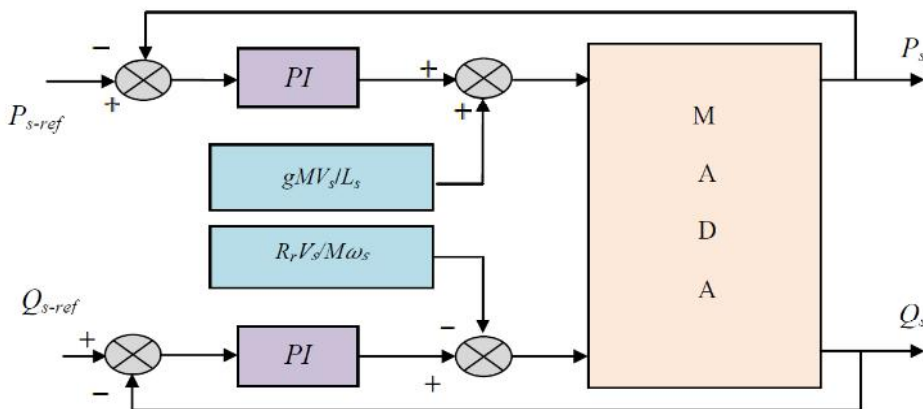


Figure III-3 : Schéma bloc de la commande directe

III.5.2 : Commande vectorielle indirecte

Commande en boucle ouverte :

La commande en boucle ouverte est essentiellement basée sur l'hypothèse d'un réseau stable en tension et en fréquence. Elle consiste à asservir pas les puissances mais plutôt indirectement les courants rotoriques en n'utilisant non pas les puissances mesurées comme retour sur le comparateur mais les courants rotoriques d'axe d et q.

A partir des expressions des puissances active et réactive statoriques du système (III.13), on déduit les références des courants rotoriques direct et en quadrature suivant les relations.

$$\begin{cases} I_{dr-ref} = \frac{V_s}{\omega_s M} - \frac{L_s}{M V_s} Q_{s-ref} \\ I_{qr-ref} = -\frac{L_s}{M V_s} P_{s-ref} \end{cases} \quad (III.20)$$

Chapitre III : Modélisation de la commande vectorielle de la MADA

Ces courants seront utilisés comme références à la place des références sur les puissances active et réactive, on aboutit alors au schéma bloc de la Figure III-4.

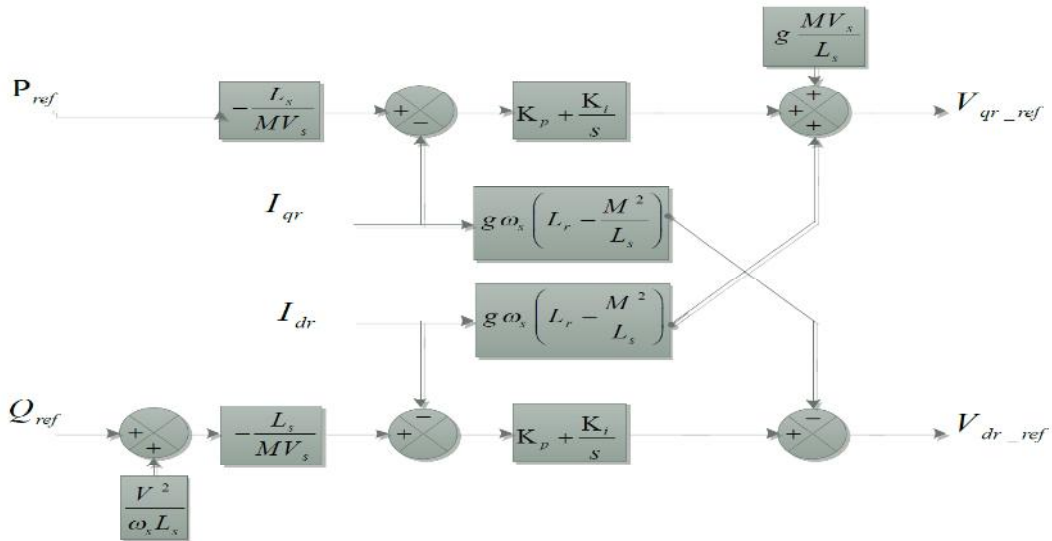


Figure III-4 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouverte.

Cette configuration reste fiable tant que le réseau électrique reste stable en tension et en fréquence. Une instabilité du réseau va donc provoquer une erreur sur le suivi des consignes des puissances active et réactive.

Commande en boucle fermée :

Pour réguler les puissances de manière optimale, nous allons mettre en place deux boucles de régulation sur chaque axe avec un régulateur proportionnel intégral pour chacune, une boucle sur la puissance et l'autre sur le courant correspondant tout en compensant les termes de perturbations et de couplages apparaissant sur le schéma bloc du modèle de la MADA. Nous obtenons ainsi la structure de commande présentée sur la Figure III-5 suivante :

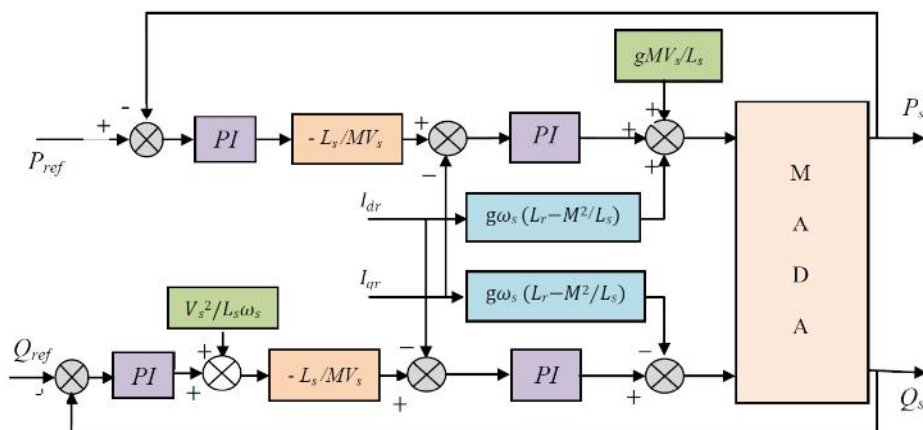


Figure III-5 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermée

Cette structure aboutit à un système de régulation plus complexe. Tout fois, elle offre une meilleure robustesse face aux éventuelles instabilités sur le réseau électrique. Le régulateur proportionnel intégral utilisé pour l'asservissement des courants et des puissances est simple et facile à mettre en place tout en offrant des performances acceptables pour l'utilisation en génératrice de la MADA.

De plus, la symétrie du système après compensation mène à calculer les régulateurs pour un seul axe, les deux autres seront identiques aux premiers. C'est cette structure que nous allons traiter dans notre travail.

II-6 : Synthèse du régulateur PI

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

La (Figure III-6) montre une partie du système bouclé et corrigé par un régulateur PI dont la fonction de transfert est de la forme $K_p + \frac{K_i}{p}$ correspondant aux régulateurs utilisés dans la (Figure III-4) et (Figure III-5).

Avec :

K_p : Coefficient de proportionnalité ;

K_i : Coefficient d'intégration

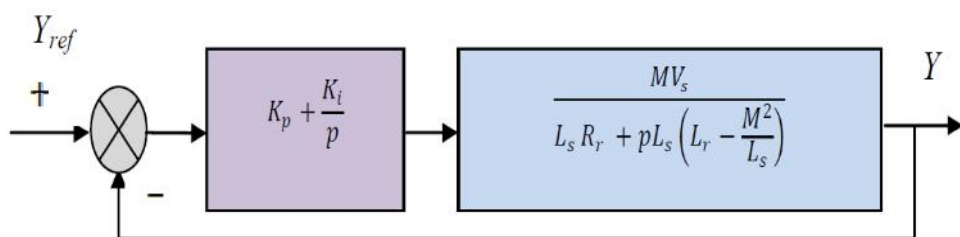


Figure III-6 : Système régulé par un PI

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

$$F.T.B.O = \frac{p + \frac{k_i}{k_p} \frac{MV_s}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{\frac{p}{k_p} p + \frac{L_s R_r}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}} \quad (III.21)$$

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

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{L_s R_r}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad (III.22)$$

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

$$F.T.B.O = \frac{k_p \frac{MV_s}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{p} \quad (III.23)$$

Ce qui nous donne en boucle fermée :

$$F.T.B.F = \frac{1}{1 + \tau_r p} \quad (III.24)$$

Avec
$$\tau_r = \frac{1}{k_p} \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{MV_s}$$

Pour un temps de réponse τ_r (5%) = 1ms, on obtient :

$$k_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{MV_s} \quad ; \quad k_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s R_r}{MV_s} \quad (III.25)$$

III-7 : Simulation et interprétation des résultats

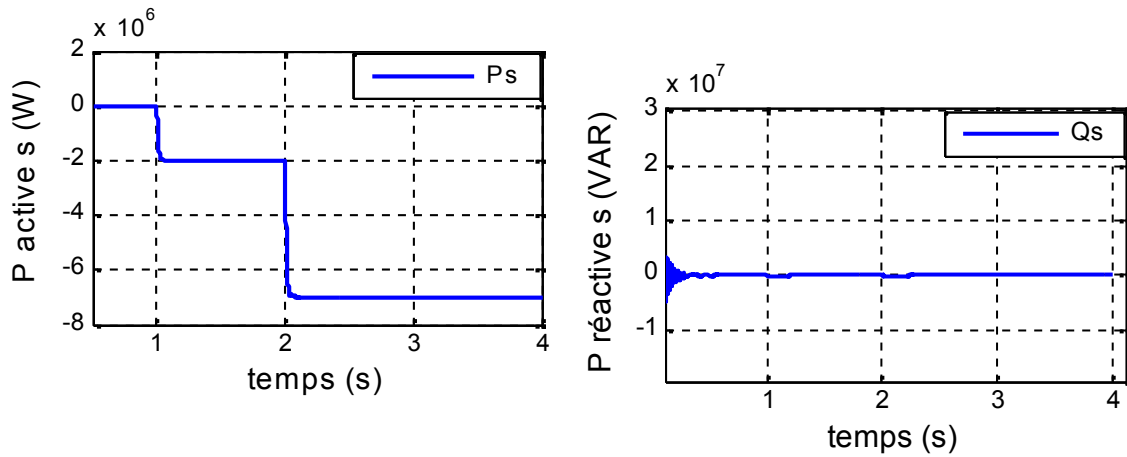


Figure III-7: Puissances active et réactive statoriques en commande direct

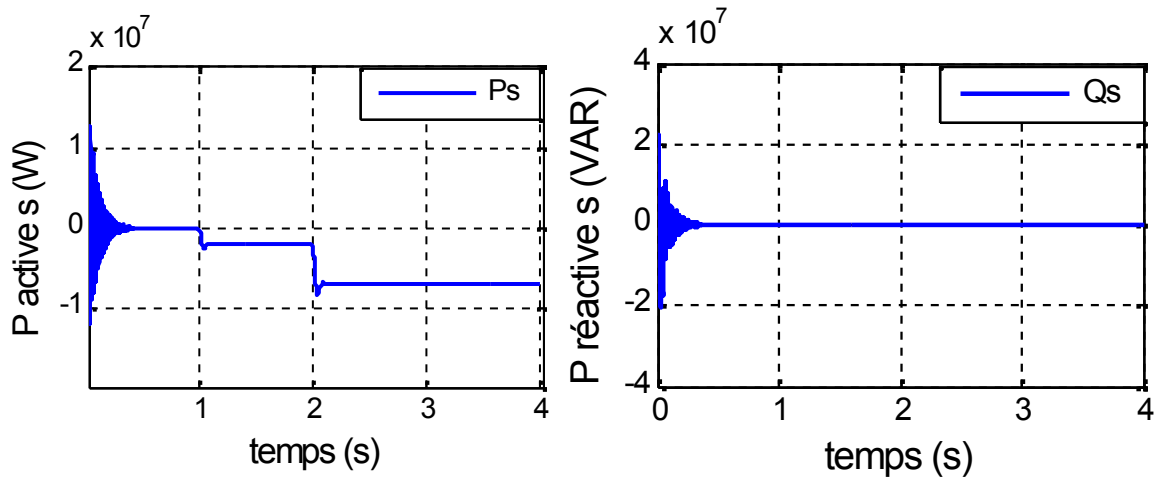


Figure III-8: Puissances active et réactive statoriques en commande indirect avec boucle de puissance.

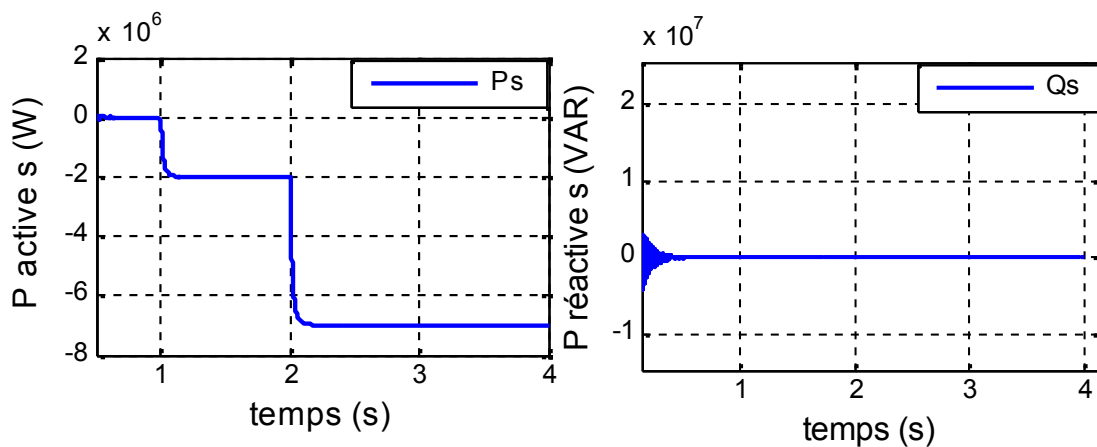


Figure III-9: Puissances active et réactive statoriques en commande indirect sans boucle de puissance

III.8 Interprétation des résultats

Les résultats de simulation ci-dessus montrent l'efficacité de la commande en puissances de la MADA pour les trois méthodes étudiées. En effet, les échelons de puissance active sont bien suivis par la génératrice surtout la commande indirecte en boucle fermée (sans dépassement ou perturbation) (Figure III.7), et la puissance active et réactive suivant la référence (Figure (III.6), (III.7), (III.8)).

Cependant, on remarque des oscillations aux instants d'application des échelons de puissance dues au couplage entre les deux axes de la machine et des fluctuations de puissance pour la méthode en boucle ouverte, particulièrement la puissance active et réactive (Figure III.9) dues à l'absence d'une boucle de régulation sur les puissances pour cette méthode, ces oscillations et ces fluctuations de puissances sont bien compensées pour les méthodes en boucle fermée (directe et indirecte en boucle fermée) (Figure III.15,III.17).

III.9. Modélisation de l'onduleur de tension à deux niveaux

III.9.1 Définition

L'onduleur est un convertisseur d'électronique de puissance qui permet la conversion continue alternative. Il fonctionne en commutation forcée et conçu généralement à base de transistors (IGBT, GTO, MOSFET...). Sa commande peut être réalisée par la technique classique ou par la technique de Modulation de Largeurs d'Impulsions(MLI). Dans ce travail, on commande l'onduleur de tension par la technique à MLI.

L'onduleur est le cœur du système d'alimentation. Il est formé de trois bras indépendants portant chacun deux interrupteurs. Un interrupteur est composé d'un transistor et d'une diode en antiparallèle. Il permet d'imposer à la machine des tensions ou des courants à amplitude et fréquence variables [9].

La (Figure III-10), représente le schéma de principe d'un onduleur triphasé qui alimente la machine.

Le rotor de la MADA est alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux équipé avec des dispositifs semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. Pour faciliter la modélisation du convertisseur de puissance, on suppose que les interrupteurs semi-conducteurs sont parfaits [26].

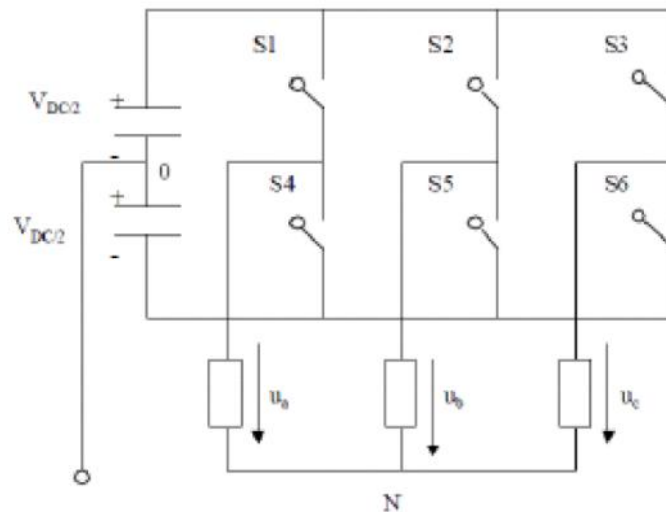


Figure III-10. Onduleur de tension à deux niveaux

On peut exprimer les tensions en ligne en fonction de la tension dans l'étape continue et de l'état des commutateurs. On définit pour ça les variables (S_a, S_b, S_c) en fonction de l'état des commutations dans les trois branches du convertisseur.

- **Branche 1** Onduleur de tension à deux niveaux

$S_a = 0$ si S_1 est en position off et S_4 est à on.

$S_a = 1$ si S_1 est en position on et S_4 est à off.

- **Branche 2**

$S_b = 0$ si S_2 est en position off et S_5 est à on.

$S_b = 1$ si S_2 est en position on et S_5 est à off.

- **Branche 3**

$S_c = 0$ si S_3 est en position off et S_6 est à on.

$S_c = 1$ si S_3 est en position on et S_6 est à off.

Les tensions composées à la sortie du convertisseur s'expriment alors par :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{dc}(S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{dc}(S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{dc}(S_c - S_a) \end{cases} \quad (\text{III.26})$$

Si on prend en compte l'équilibre des tensions :

$$u_a + u_b + u_c = 0 \quad (\text{III.27})$$

On en déduit les expressions des tensions simples par rapport aux tensions composées comme suit :

$$\begin{aligned} u_a &= \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ u_b &= \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ u_c &= \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{aligned} \quad (\text{III.28})$$

D'où on obtient :

$$\begin{aligned} u_a &= \frac{V_{dc}}{3}(2S_a - S_b - S_c) \\ u_b &= \frac{V_{dc}}{3}(2S_b - S_a - S_c) \\ u_c &= \frac{V_{dc}}{3}(2S_c - S_b - S_a) \end{aligned} \quad (\text{III.29})$$

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3}V_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.29})$$

La tension de sortie de l'onduleur est contrôlée par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) triangulo-sinusoïdale qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la valeur efficace de tension de sortie [26].

III.9.2 Principe de la MLI

La MLI consiste à former chaque alternance de la tension de sortie de l'onduleur par un ensemble d'impulsions sous forme de créneaux rectangulaires de largeurs modulées de telle sorte à rapprocher cette tension vers la sinusoïde. En effet, la MLI permet de reconstituer ces tensions (ou courants) à partir d'une source à fréquence et à tension fixe (en général une

Chapitre III : Modélisation de la commande vectorielle de la MADA

tension continue). Le réglage est effectué par les durées d'ouverture et de fermeture des interrupteurs et par les séquences de fonctionnement [9]. Le principe de la MLI sinus-triangle repose sur la comparaison entre un signal triangulaire de haute fréquence appelé la modulante et un signal de référence appelé la porteuse. La valeur du rapport de fréquence entre la porteuse et la modulante procède d'un compromis entre une bonne neutralisation des harmoniques et un bon rendement de l'onduleur [12].

La (Figure III-10) représente un onduleur triphasé de tension commandé par MLI. Celui-ci alimente une charge triphasée à partir d'un générateur de tension continue.

En contrôlant les états des interrupteurs de chaque bras de l'onduleur, on fixe les valeurs des tensions de sortie de l'onduleur U_{ao}, U_{bo}, U_{co} .

L'emploi de la technique MLI pour déterminer les intervalles de conduction des interrupteurs permet de régler de manière indépendante les valeurs moyennes de chacune des tensions sur chaque période de commutation. Dans ce cas, les instants de commutation sont déterminés par la comparaison de trois ondes de référence avec une onde porteuse qui fixe la fréquence de commutation. Cette comparaison fournit trois signaux logiques f_a, f_b et f_c équivalent 1 quand les interrupteurs du côté haut sont en conduction et ceux de côté bas sont bloqués et valent 0 dans le cas contraire. A partir de ces signaux l'électronique de commande élabore les signaux de commande des interrupteurs.

Si les références forment un système triphasé équilibré de grandeurs sinusoïdales on obtient à la sortie de l'onduleur des ondes de tensions dont les valeurs moyenne forment elle aussi un système triphasé équilibré. On parle dans ce cas-ci d'une modulation sinus triangle, par les phases du récepteur ne sont pas directement égales à celles fournies à la sortie de l'onduleur et se déduisent de celles-ci par la relation suivante, si on admet que la somme des tensions aux bornes des phases du récepteur est nulle

Cette relation est valable tant au niveau des valeurs instantanées des tensions que de leurs valeurs moyennes sur une période MLI. Il suffit de prendre comme valeurs de référence pour les valeurs de référence souhaitées pour que ces tensions suivent en moyenne leurs références sur chaque période MLI.

Cette stratégie est caractérisée par deux paramètres :

L'indice de modulation (m) qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse f_p sur la fréquence de la tension de référence f :

$$m = \frac{f_p}{f} \quad (\text{III.30})$$

Taux de modulation (r) qui est le rapport de l'amplitude de la tension de Référence (V_{ref}) et celle de la porteuse (U_p) :

$$r = \frac{V_{ref}}{U_p} \quad (\text{III. 31})$$

III.13 Résultats de simulation.

La figure III-11 (A) et (B) montre les résultats de simulation de la commande vectorielle indirect en boucle fermée. Les puissances actives et réactives sont présentées comme suit:

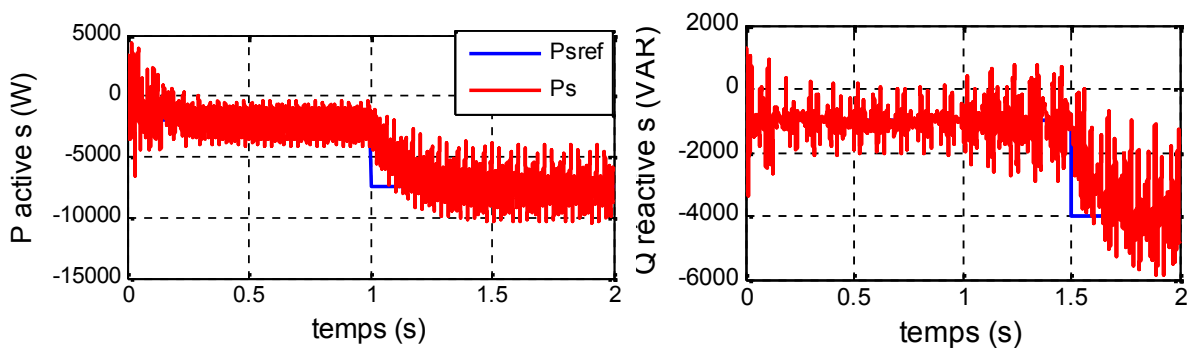


Figure III-11 Puissances active et réactive statoriques en commande indirect avec boucle de puissance

Interprétation des résultats

Les résultats de simulation montrent que toutes les grandeurs et similaires à ceux trouvés avec une alimentation continue parfaite. Un bon suivi de consigne pour les puissances actives et réactives statoriques est constaté. Les courants du réseau suivent parfaitement leurs références. La tension à la sortie du convertisseur côté réseau est à deux niveaux ou son amplitude dépend de la valeur de la tension du bus continu qui est 600V.

III-14 Conclusion :

Dans ce chapitre on a aussi étudié le principe de la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique. Ainsi, on a représenté deux modes de contrôle réalisés. Un mode direct et un autre indirect (avec boucle de courant) où les courants rotoriques sont utilisés pour commander les puissances. Et (sans boucle de courant avec boucle de puissance) a pour rôle

Chapitre III : Modélisation de la commande vectorielle de la MADA

d'améliorer le suivi de consigne de la commande précédente en y ajoutant une boucle de puissance. Les résultats de la simulation en mode de régulation des puissances, nous conduisent à dire que la MADA commandée vectoriellement. A la fin de ce chapitre on a présenté les résultats de simulation, sans et avec utilisation un onduleur de tension a deux niveaux. La modélisation et l'application du redresseur à MLI nous a permis la régulation de la tension du bus continu qui est utilisée pour alimenter l'onduleur connecté au rotor de la MADA. D'après les résultats de simulation on a constaté que cette méthode de commande nous permet de fixer la tension du bus continu d'une part, et d'autre part elle nous permettre de bien contrôler le facteur de puissance coté réseau.

Conclusion générale

Conclusion générale

Parmi les sources d'énergies renouvelables, l'énergie éolienne est celle qui a le potentiel énergétique le plus important. La puissance des éoliennes installées dans le monde augmentent de plus en plus tous les ans.

Actuellement, le système éolien à vitesse variable basé sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA) est le plus utilisé dans les fermes éoliennes.

L'objectif principal de ce mémoire est l'étude de la commande vectorielle d'une machine asynchrone à double Alimentation.

Pour ce faire, dans le premier chapitre, nous avons donné une brève description des systèmes éoliens et les différents types d'éoliennes et leurs utilisations. Nous avons aussi présenté ses avantages et ses inconvénients.

Ensuite dans le deuxième chapitre, dans un premier temps, une étude théorique sur la machine asynchrone à double alimentation concernant ses modes de fonctionnement, ses avantages et inconvénients ont été présentés. Afin de mieux maîtriser la machine, le deuxième point a été consacré à la modélisation de cette dernière, en se basant sur le modèle équivalent de Park tout en tenant en compte des hypothèses simplificatrices, Ce modèle a été validé en simulation en utilisant Matlab /Simulink.

Au troisième chapitre, nous avons appliqué à la MADA, la commande vectorielle à orientation du flux statorique pour pouvoir contrôler les puissances actives et réactives fournie au réseau. Nous avons développé deux méthodes de commande vectorielle en puissance de la MADA, à savoir la commande directe et la commande indirecte.

Effectivement nous avons pu voir que la commande directe est la plus facile à mettre en œuvre. Cependant la deuxième méthode donne des résultats satisfaisant, en association avec le bouclage des puissances. La synthèse du régulateur PI est utilisé pour stabiliser le système à cause de sa rapidité et de sa simplicité.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **F. POTIERS** « Etude Et Commande De Génératrices Asynchrones Pour l'utilisation de l'énergie éolienne » Thèse de doctorat, Université de NANTES, 2003
- [2] **N. MEKKAOUI** « Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée » Thèses de Magister, UNIV DE BATNA 2004.
- [3] **I. HAMZAOU** « Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur » Thèse de Magister, ENP d'Alger, 2008.
- [5] **E. HAU.** « Wind turbines ». 2nd Ed Springer 2006.
- [6] **L. KHETTACHE** « Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique double alimenter » Thèse de Magister université de Batna,
- [7] **MUKUND R. PATEL** « Wind and Solar Power Systems » Second Edition 2006 by Taylor & Francis Group, LLC CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group.
- [8] **BOUSCAROL A, DAVAT B, DE FORNEL B,** et al. « Multimachine Multiconverter System: application for electromechanical drives ». European Physics Journal -Applied Physics, 2000, 10(2): 131-147.
- [9] **M. SMAILI** « Grid integration of wind energy conversion system » -Siegfried Heier- Second Edition
- [10] **S. EL AIMANI** « Modeling and Control Structures for Variable Speed Wind Turbine ».. Ibn Zohr University. Ploydisciplinary Faculty of Ouarzazate. (April 2011). Multimedia Computing and Systems (ICMCS), 2011 International Conference (**Mokrane-Smaili**)
- [11] **BABAIELAJIMI, S. ASGHAR GHOLAMIAN AND M. SHAHABI.** « Modeling and Control of a DFIG-Based Wind Turbine during a Grid Voltage Drop. Engineering, Technology & Applied Science Research. 2011.
- [12] **G. ABAD, J. LÓPEZ, M. RODRIGUEZ, L. MARROYO,** « Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation. Grzegorz Iwanski. October 2011, Wiley-IEEE Press
- [21] **G. SALLOUM** « Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation », Thèse doctorat, L'institut National Polytechnique de Toulouse 2007.
- [14] **A. BOYETTE,** « contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », thèse de doctorat, université de Nancy, 2006.
- [15] **P-E. VIDAL,** « commande non-linéaire d'une machine asynchrone a doublé alimentation », thèses de doctorat, Institut polytechnique de Toulouse, 2004.
- [16] **S.KHOJET ELKHIL,** « commande vectorielle d'une machine asynchrone doublement alimentée (MADA) », thèses de doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, 2006.
- [17] **F. MERRAHI,** « alimentation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation (application à l'énergie éolienne) » mémoire de magister, école nationale polytechnique, 2007.

BIBLIOGRAPHIE

- [18] **Y. ELBIA**, «commande floue optimisée d'une machine asynchrone à double alimentation et à flux orienté», Mémoire de magistère, université de Batna, 2009.
- [19] **A. CAIBA** «commande de la machine asynchrone à double alimentation par des techniques de l'intelligence artificielle », thèse de doctorat, université de Batna, 2010.
- [20] **A. TAMARAT**, «modélisation d'une chaine de conversion basée sur une machine asynchrone à double alimentation » mémoire de magister, université de Biskra, 2009.
- [21] **A. BOULAHIA**, «étude des convertisseurs statiques destinés à la qualité de l'énergie électrique», mémoire de magister, université de Constantine, 2009.
- [22] **G. SEGUIER**, «électronique de puissance : les fonctions de base et leurs principales applications», 7eme édition, Dunod, paris, 1999.
- [23] **H. TEDJINI, Y. MESLEM and M. RAHLI**, «contrôle non linéaire avancé du redresseur MLI triphasé en absorption sinusoïdale de courant», ACTA ELECTROTEHNICA, Volume 49, NuvembeYr 3, 2008.
- [24] **Y. ELBIA**, «commande floue optimisée d'une machine asynchrone à double alimentation et a flux oriente », Mémoire de magistère, université de Batna, 2009.
- [25] **B. TOUAL**, «modélisation et commande floue optimisée d'une génératrice asynchrone à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable», mémoire de magister, université de Batna, 2010.
- [26] **A. MEROUFEL, Y. DJERIRI, A. MASSOUM ET A. HAMMOUMI**, «commande vectorielle par les réseaux de neurones artificiels de l'énergie d'une MADA intégrée à un système éolien» Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°4 (2010) 669 – 682, 2010.
- [27] **N. AKKARI**, « contribution à l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine asynchrone à double alimentation » thèse de doctorat, Université de Batna, 2010.
- [18] **C. BELFEDAL** « Commande d'une machine asynchrone à double alimentation en vue de son application dans le domaine de l'énergie éolienne- Etude et Expérimentation -> Thèse de doctorat, Université d'Oran Mohamed BOUDIAF, 2007.
- [28] **J. MARTIN**, « Energies éoliennes », techniques de l'ingénieur, traite de génie énergétique, pp. B 8 585 1-B 8 585 21.
- [29] **T. ACKERMANN** «Wind Power in Power Systems, Royal Institute of Technology Stockholm, » Sweden, 2005.
- [30] **F. KENDOULI, K. NABTI, K. ABED, H. BENALLA** « Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation » IEEE, Revue des Energies Renouvelables Vol. 14 N°1, 2011, 109 – 120
- [31] **K. BELMOKHTAR, M. L. DOUMBIA** «Modélisation et commande d'un système éolien à base de machine asynchrone à double alimentation pour la fourniture de puissances au réseau électrique » Quatrième Conférence Internationale sur le Génie Electrique CIGE'10, 03-04 Novembre 2010, Université de Bechar, Algérie, IEEE.

BIBLIOGRAPHIE

[32] **C. BENNOUR** « Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation », Mémoire de magister, université de Biskra, 2012.

[33] **L. BENALIA**, « Commande en tension des moteurs à Induction Double Alimentation », Thèse de doctorat, université de Batna, 2010.

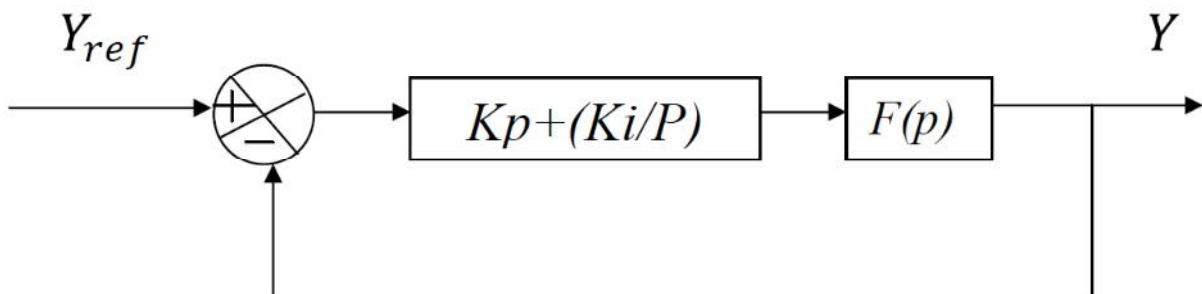
[34] **D. HADIOUCHE, H. RAZIK, A. REZZOUG**, « Steady and simulation of space vector PWM control of Double-Star Induction Motors», 2000 IEEE-CIEP, Acapulco, Mexico, pp 42-47.

[35] **A. 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, Université de Nancy, 30 Avril 2010.

Annexes

Les paramètres du moteur asynchrone à double alimentation, sont donnés dans le tableau 1 Valeurs nominales : 3MW ; 690V- 50Hz ; 1050 tr/min.[35]

Valeur numérique du paramètre	Signification
R _s (Résistance du stator)	2.97 10 ⁻³ Ω
R _r (Résistance du rotor)	3.83 10 ⁻³ Ω
l _s (Inductance de fuite au stator)	121 10 ⁻⁶ (H)
l _r (Inductance de fuite au rotor)	57.3 10 ⁻⁶ (H)
M (Inductance Mutuelle)	12.12 10 ⁻³ (H)
J (Moment d'inertie)	114 Kg.m ²
f (Coefficient de frottement)	0.001N.m.s/rd
P nombre de pole	2



La figure (A.1) montre un système en boucle fermée corrigé par un régulateur PI.

La forme du correcteur est la suivante :

$$C_p = k_p + \left(\frac{k_i}{p}\right)$$

Avec

k_p : est le gain proportionnel du régulateur ;

k_i : est le gain intégral du régulateur.

Annexes

Si on considère la fonction de transfert suivante :

$$F(p) = \frac{k}{1 + \tau_r p}$$

En boucle ouverte on aura la fonction de transfert suivante :

$$F_{BO}(p) = \frac{k_p + \left(\frac{k_i}{p}\right)}{1 + \tau p} = \frac{K (pk_p + k_i)}{p (1 + \tau p)} = K \cdot k_i \frac{\frac{pk_p}{k_i}}{p (1 + \tau p)}$$

On prend

$$\tau = \frac{k_p}{k_i}$$

En boucle fermée, la fonction de transfert s'écrit comme suit :

$$F_{BF}(p) = \frac{k_i K}{k_i K + P} = \frac{1}{1 + \frac{1}{k_i K} P}$$

Pour attendre 95% de la consigne, le temps de réponse t_r du système bouclé vaut :

$$k_i = \frac{k_p}{\tau} \quad ; \quad \tau_r = 3 \frac{1}{k_p K} \text{ d'où } \quad k_p = 3 \frac{\tau}{\tau_r K} \quad ; \quad k_i = \frac{3}{\tau_r K}$$