

*République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique*

Université Echahid Hamma

Lakhdar- El-Oued

Faculté des Sciences et de la Technologie



Mémoire de Fin d'Etude

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Option: Génie Électrique

Spécialité: Réseaux Électriques

Thème

*Modélisation et commande d'un système éolien par
régulateur PI base de la MADA pour fournir de
puissance au réseau électrique*

Encadré par :

Dr. Gudiri Abd-Elkarim

Réalisé par :

Belkhir yacine

Ghrissi tedjani

Promotion 2017/2018

*République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique*

Université Echahid Hamma

Lakhdar- El-Oued

Faculté des Sciences et de la Technologie



Mémoire de Fin d'Etude

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Option: Génie Électrique

Spécialité: Réseaux Électriques

Thème

*Modélisation et commande d'un système éolien par
régulateur PI base de la MADA pour fournir de
puissance au réseau électrique*

Encadré par :

Dr. Gudiri Abd-Elkarim

Réalisé par :

Belkhir yacine

Ghrissi tedjani

Promotion 2017/2018

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu Le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience, et la santé durant cette étude.

*Nous adressons mes sincères remerciements à tous les enseignants de L'université d'EL OUED, faculté d'électrotechnique, notamment à notre encadreur **Dr.Gudiri***

Abd-elkarim

d'avoir proposé le sujet sur lequel nous avons travaillé, et qui a assuré la direction et l'encadrement du travail présenté dans ce

Enfin, mes remerciements vont à tous ceux qui m'ont soutenu

de près ou de loin à réussir ce travail.

Dédicace

Je dédie ce travail :

*A mes chers parents qui me sont les plus chers
dans tout l'univers pour leurs sacrifices et les Encouragements*

Et je demande de dieu les gardés heureux.

A ma cher épouse et mes enfants « abd-elmoése, alla »

Qui sont les bougies de ma vie

A toute la famille « soit les grands ou les petits ».

A tout ma grand famille « belkhir, rokh , dhif , salouba et ben moussa ».

A tous ceux qui me sont chers.

A tous mes amis.

Yacine

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

*Aux êtres les plus chers à mon cœur, ma mère et mon père, qui m'ont
beaucoup*

*Soutenu durant mon cursus d'étude et à qui je serai éternellement
reconnaisant ;*

- A mes chères sœurs ;

- A mon frère ;

Tedjani

Résumé

Résumé

L'éolienne à vitesse variable permet d'augmenter le rendement énergétique et d'améliorer la qualité de l'énergie produit par rapport à celle qui fonctionnant à vitesse fixe.

Dans le domaine de production de l'énergie électrique à vitesse variable ou constante, il existe une solution nouvelle et originale utilisant une la machine asynchrone à double alimentation (MADA). Le schéma de raccordement typique de cette générateur (GADA) consiste à connecter le stator directement au réseau, alors que le rotor est alimenté à travers un convertisseur électrique (DC/AC).

Pour maximiser la puissance captée, la technique d'extraction du maximum de puissance (MPPT) est appliquée.

Pour obtenir des hautes performances et une meilleure maîtrise des puissances active et réactive générées par la GADA, nous cherchons à déterminer les coefficients des régulateurs PI utilisés pour la commande vectorielle du générateur asynchrone à double alimentation.

Mots Clés :

Machine «Générateur» asynchrone à double alimentation, commande vectorielle, puissances active et réactive, régulateurs PI, (MPPT)

يعمل توربينات الرياح ذات السرعة المتغيرة على زيادة كفاءة الطاقة ويحسن من جودة الطاقة المنتجة مقارنة بتلك التي تعمل بسرعة ثابتة.

في مجال توليد الطاقة الكهربائية ذات السرعة المتغيرة أو الثابتة ، هناك حل جديد ومبتكر باستخدام الآلة اللامتزامنة ثنائية التغذية (MADA). مخطط التوصيل التطبيقي لهذه الأخيرة يتمحور حول توصيل الجزء الثابت مباشرة بالشبكة، والجزء المتحرك يتغذى عن طريق محول (DC/AC) .

لتعظيم الطاقة التي تم يتم تطبيق تقنية الحد الأقصى من استخراج الطاقة (MPPT).

للحصول على أداء عالي وتحكم أفضل في الاستطاعة الفعالة والردية التي تولدها GADA، نسعى لتحديد معاملات منظمات PI المستعملة في التحكم الشعاعي للمولد اللاتزامني مزدوج التغذية بدون الاعتماد على الطرق التحليلية التقليدية لحساب هذه الأخيرة.

كلمات مفتاحية :

آلة لا تزامنية (مولد) مزدوج التغذية، التحكم الشعاعي، الاستطاعة الفعالة والردية، متحكمات PI، تقنية الحد الأقصى من استخراج الطاقة (MPPT) .

Sommaire

Sommaire

Résumé	
Sommaire	
Listes des figures	
Listes des tableaux	
Abréviations	
Introduction générale	1
<i>Chapitre I Générateurs électriques utilisés dans les réseaux électriques</i>	
I.1 Introduction:	3
I.2 Prédiction optimale de l'énergie	3
I.2.1 Fonctionnement a vitesse fixe	3
I.2.2 Fonctionnement à vitesse variable	4
I.3 Machine utilisées dans les systèmes éolienne	6
I.3.1 Système utilisant une génératrice synchrone	6
I.3.1.1 Machine synchrone à rotor bobiné	6
I.3.1.2 Machines synchrones à aimants permanents	7
I.3.2 Système utilisant une génératrice asynchrone	9
I.3.2.1 Machine asynchrone à double stator	10
I.3.2.2 Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance	10
I.3.2.3 Machine asynchrone à cage	11
I.3.2.4 Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobine"	12
I.4 Configuration du mode de fonctionnement et stratégie de commande de la MADA	16
I.4.1 Fonctionnement en moteur avec un seul convertisseur	16
I.4.2 Fonctionnement en moteur avec deux convertisseurs	17
I.5 Conclusion	21
I.6 Références bibliographiques	22
<i>Chapitre II Modélisation d'une turbine éolienne</i>	
II.1 Introduction	26
II.2 Historique	26
II.3 Généralités sur l'énergie éolienne	27
II.3.1 Origine du vent	27
II.3.2 L'aérogénérateur	28
II.3.3 Principe de l'énergie éolienne	28
II.3.4 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	29
II.3.4.1 Avantages	29
II.3.4.2 Inconvénients	30
II.3.5 Différents types des turbines éoliennes	30
II.3.5.1 Les éoliennes à axe vertical	30
II.3.5.2 Les éoliennes à axe horizontal	32
II.3.6 Architecture d'une éolienne à axe horizontal	33
II.4 Énergie cinétique du vent–conversion en énergie mécanique	35
II.5 Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne	37
II.5.1 Modélisation de la turbine	38
II.5.2 Coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$	39
II.5.3 Modèle du multiplicateur de vitesse	40

II.5.4 Equation dynamique de l'arbre	40
II.5.5 Stratégie de commande de la turbine	42
II.5.6 Maximisation de la puissance extraite:	43
II.6 Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne	45
II.6.1 Système à décrochage aérodynamique "stall"	45
II.6.2 Système d'orientation des pales "pitch"	46
II.7 Résultats de Simulation et interprétations	46
II.8 Conclusion :	50
II.9 Références bibliographiques	51

Chapitre III Modélisation et simulation de la MADA

III.1 Introduction :	54
III.2 Présentation de MADA :	54
III.2.1 Construction d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation	54
III.2.2 Description des composants de la MADA	55
III.3 La double alimentation	55
III.4 Avantages et inconvénients de la MADA	56
III.4.1 Avantages de la MADA	56
III.4.2 Inconvénients de la MADA	56
III.5 Application des machines asynchrones à double alimentation	56
III.5.1 Application moteur	57
III.5.2 Application génératrice	57
III.6 Modes de fonctionnement de la MADA	57
III.7 Principe de fonctionnement de la MADA	60
III.8 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation	62
III.8.1 Hypothèses simplificatrices	62
III.8.2 Modèle naturel triphasé de la MADA	62
III.8.3 Passage de triphasé au biphasé (Transformation de Park)	63
III.8.4 Choix du référentiel	64
III.8.4.1 Référentiel lié au stator	64
III.8.4.2 Référentiel lié au rotor	64
III.8.4.3 Référentiel lié au champ tournant	64
III.8.5 Application de la transformation de Park à la MADA	64
III.8.6 Expression du couple électromagnétique	68
III.8.7 Expression de la puissance active et réactive	69
III.9 Résultats de la Simulation	69
III.10 Conclusion	74
III.11 Références bibliographiques	76

Chapitre IV Commande de puissance active et réactive de la MADA

IV.1 Introduction	78
IV.2 Commande vectorielle de la machine	78
IV.2.1 Principe de la commande vectorielle de la MADA	78
IV.2.2 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique	79
IV.2.3 Expressions des puissances active et réactive statoriques	81
IV.2.4 Expressions des tensions rotoriques	82
IV.3 Contrôle indépendant de puissance active et réactive	83
IV.3.1 Commande directe	83
IV.3.2 Commande indirecte	84
IV.3.2.1 Commande en boucle ouvert	85
IV.3.2.2 Commande en boucle fermé	85
IV.3.3 Synthèse des régulateurs PI	87
IV.4 Alimentation de la MADA	88
IV.4.1 Modélisation de convertisseur	91
IV.4.2 Régulateur de tension de bus continue	91

IV.5 Calcul des régulateurs des courants rotoriques	93
IV.6 Résultats de simulations	94
IV.9 Tests de robustesse	98
IV.10 Conclusion	99
IV.11 Références bibliographique	100
Conclusion générale	102

Liste des figures

Figure I.1: Eolienne a vitesse fixe	4
Figure I.2 : Éolienne à vitesse variable utilisant une génératrice asynchrone à cage et un convertisseur pleine puissance	5
Figure I.3 : Schéma de l'alimentation de la MADA pour une application génératrice	5
Figure I.4: Système éolien à base d'une machine synchrone et un convertisseur électronique	7
Figure I.5 : Machine synchrone avec redresseur à diodes	8
Figure I.6: Machine synchrone connectée à un redresseur à diodes et hacheur dévolteur.	8
Figure I.7: Machine synchrone avec convertisseur à diodes et hacheur en pont	9
Figure I.8: Machine synchrone connectée à un redresseur à MLI	9
Figure I.9: Générateur asynchrone à double stator	10
Figure I.10: Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur – onduleur	11
Figure I.11: Machine asynchrone avec liaison directe au réseau	12
Figure I.12: Machine asynchrone a rotor bobiné	13
Figure I.13: MADA avec contrôle de glissement par l'énergie dissipée	13
Figure I.14: Structure de KRAMER pour la MADA	14
Figure I.15 : Structure de SCHERBIUS avec cyclo-convertisseur.	14
Figure I.16: Structure de SCHERBIUS avec convertisseur MLI.	15
Figure I.17: Schéma d'un système utilisant une MADA en moteur alimenté par un seul convertisseur	16
Figure I.18: Schéma d'un système utilisant une MADA en moteur alimenté par deux convertisseurs	17
Figure I.19: Schéma d'un système utilisant une MADA en alternateur alimenté par un seul convertisseur	19
Figure II.1 : La naissance du vent	27
Figure II.2 : Correspondance taille et puissance des éoliennes	28
Figure II.3 : Principe de la conversion d'énergie	29
Figure II.4 : Turbine éolienne type Darrieus	31
Figure II.5 : Turbine éolienne type Savonius	32
Figure II.6 : éolienne à axe horizontal	33
Figure II.7 : Principaux composants d'une éolienne.	33
Figure II.9 : Tube de courant autour d'une éolienne	36
Figure II.10: Coefficient de puissance	37
Figure II.11 : Schéma de la turbine éolienne	37
Figure II.12 : Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative de la turbine	39
Figure II.13 : Modèle mécanique du multiplicateur	40
Figure II.14 : Modèle d'une turbine éolienne	41
Figure II.15 : Schéma électrique équivalent de la turbine d'une éolienne	41
Figure II.16: Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne	42
Figure II.17 Stratégies de commande de la turbine	43
Figure II.18 Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse	44
Figure II.19 : Flux d'air sur un profil de pale " stall "	45
Figure II.20 : Variation de l'angle de calage d'une pale	46
Figure II.21 : Modèle de la turbine avec la Commande en MATLAB/SIMULINK	47

Figure II.22 : Schéma synoptique du modèle dynamique de la turbine éolienne	47
Figure II.23 : Profil du vent	48
Figure II.24 : Coefficient de puissance avec un zoom	48
Figure II.25 : Vitesse mécanique	49
Figure II.26 : Couple et Puissance électrique produite	49
Figure III.1 : Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.	54
Figure III.2 : Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.	58
Figure III.3 : Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.	59
Figure III.4 : Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone.	59
Figure III.5 : Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone	60
Figure III.6 : Machine à induction à rotor bobiné	61
Figure III.7 : Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA.	64
Figure. III.8 Schéma bloque de la modèle de MADA	70
Figure. III.9 Courbe du courant statorique avec zoom	71
Figure. III.10 Courbe du courant rotorique avec zoom	71
Figure. III.11 Courbe de la tension statorique avec zoom	72
Figure. III.12 Courbe de la tension rotorique	72
Figure. III.13 Courbe de la puissance active statorique avec zoom	73
Figure. III.14 Courbe de la puissance réactive statorique avec zoom	73
Figure. III.15 Courbe de la couple avec zoom	74
Figure IV.1 : Analogie entre MCC à excitation séparée et MADA.	79
Figure V.2 : Orientation du flux statorique.	80
Figure IV.3 : Schéma bloc du système à réguler.	83
Figure IV.4 : Schéma bloc de la commande directe	84
Figure IV.5 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouvert.	85
Figure IV.6 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermé.	86
Figure IV.7 : Schéma bloc d'un système régulé par un PI	86
Figure IV.8 : Association redresseur-filtre-onduleur de tension à MLI	88
Figure IV.9 : Principe de la commande MLI et enveloppes de tensions	89
Figure IV.10 : Onduleur de tension avec onde porteuse	89
Figure IV.11 : Explication pour l'obtention du modèle continu équivalent du convertisseur	90
Figure IV.12 : Structure d'un redresseur triphasé à deux niveaux	91
Figure IV.13 : Modèle de la boucle de tension.	92
Figure IV.14 : Modèle en boucle fermé de la boucle de tension du bus continu.	92
Figure IV.15 : Schéma fonctionnel de régulation du courant i_{dr}	93
Figure IV.16 : Schéma bloc global de la commande vectorielle de la GADA	94
Figure IV.17 : Tension du bus continu (V)	96
Figure IV.18 : Couple électromagnétique	96
Figure IV.19 : Les courants directs et quadrature rotoriques.	96
Figure IV.20 : Les courants direct et quadrature statorique .	97
Figure IV.21 : Puissance active (W) et Puissance réactive (VAR) statorique	97
Figure IV.22 : Le courant et la tension statorique	97
Figure IV.23 : Zoom sur le courant et la tension statorique	98
Figure IV.24 : Couple électromagnétique	98
Figure IV.25 : Zoom sur le courant et la tension statoriques	99

Liste des Tableaux

Tableau. III.1 Quadrants de fonctionnement de la MADA

58

Abréviations

MAS	machines asynchrones
C_p	le coefficient de puissance
CC	courant continu
P_{mec}	puissance mécanique
MADA	machines asynchrones à double alimentation
DFIG	Doubly-Fed Induction Generators
GADA	générateur synchrone à double alimentation
GSAP	générateurs synchrones à aimants permanents
MSAP	machine synchrones à aimants permanents
M.P.P.T	Maximum Power Point Tracking «Poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale »
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
MASDS	machines asynchrones à double stator
$[P(\theta)]$	Transformation de Park inverse
$[P(\theta)]^{-1}$	Transformation de Park directe
λ	Vitesse spécifique
β	Angle de calage des pales
Ω	vitesse de rotation mécanique du rotor
Ω_{mec}	Vitesse de rotation mécanique
$\Omega_{turbine}$	Vitesse de la turbine
$C_{aér}$	Couple aérodynamique de la turbine
C_{mec}	Couple électromagnétique de la turbine
C_{vis}	Couple de frottement visqueux
f	coefficient de frottement
τ_r	le temps de réponse du système
V_h	est la tension homopolaire
V_{ref}	l'onde modulatrice
V_p	le signal dents de scie ou l'onde porteuse.
V_{dc}	tension du bus continu
i_{dc}	courant du bus continu
T_n	Constante de temps du correcteur PI.
T_i	Constante de temps intégrale du correcteur PI.
P_v	Puissance portée par le vent
FTBF	Fonction de Transfert en Boucle Fermée
FTBO	Fonction de Transfert en Boucle Ouverte
S	Constante de Laplace
k_p, k_i	Gains du régulateur PI classique
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine
Q_s	puissance réactive du stator
Q_r	puissance réactive du rotor
P_s	puissance du stator
P_r	puissance du rotor
P_{res}	puissance du récepteur
g	glissement

f.e.m	forces électromagnétiques
$[X_r]_{abc}$	Grandeurs rotorique
$[X_s]_{abc}$	Grandeurs statorique
L_s	inductances propres statorique
L_r	inductances propres rotorique
R_s	résistances statorique
R_r	résistances rotorique
M_{sr}	inductances mutuelles entre le stator et le rotor
M_s	inductances mutuelles entre deux phases du stator
M_r	inductances mutuelles entre deux phases du rotor
M_0	Maximum de l'inductance mutuelle enter une phase du stator et la phase du rotor
$[x_{dq0}]$	Grandeurs dans le repère Park
$[\varphi_{dq0}]_s$	flux statoriques dans le repère de Park
$[\varphi_{dq0}]_r$	flux rotoriques dans le repère de Park
$[I_{dq0}]_s$	Courants statoriques dans le repère de Park
$[I_{dq0}]_r$	Courants rotoriques dans le repère de Park
$[V_{dq0}]_s$	tensions statoriques dans le repère de Park
$[V_{dq0}]_r$	tensions rotoriques dans le repère de Park
ω_s	Pulsation statorique
ω_e	Pulsation électrique
N_r	le nombre de spires des bobinages rotorique
N_s	le nombre de spires des bobinages statorique
P	le nombre de pair de pôle
r	nombres de spires rotorique et statorique
I_r	le courant au rotor
I_s	le courant au stator
S_s	la puissance apparente statorique
S_r	la puissance apparente rotorique
θ_s	Angle de stator
θ_r	Angle de rotor
C_{em}	Couple électromagnétique
C_r	Couple résistant
J	Moment d'inertie
$J_{turbine}$	inertie de turbine
F	Coefficient de frottement
σ	Coefficient de dispersion

Introduction Générale

Introduction Générale

Face à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles et aux problèmes environnementaux causés par l'émission des gaz à effet de serre lors de l'exploitation de ces ressources. Les énergies renouvelables sont propres et constituent une solution alternative pour subvenir aux besoins de la société actuelle. Ces énergies offrent des avantages du fait qu'elles sont durables et réduisent. Parmi ces énergies, on retrouve l'énergie dite « éolienne ». Cette énergie représente un potentiel assez important non pas pour remplacer les énergies existantes mais pour palier à l'amortissement de la demande de plus en plus galopante. Après des siècles d'évolution et des recherches plus poussées depuis quelques décennies, plusieurs pays se sont aujourd'hui résolument tournés vers l'énergie éolienne.

Les éoliennes de dernière génération fonctionnant à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet de diminuer le coût de production d'électricité par des aérogénérateurs et d'améliorer la qualité de la puissance électrique générée ainsi que le rendement de la production d'énergie, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe.

Les premières machines électriques qui furent utilisées dans le domaine éolien étaient des machines asynchrones. En effet, ces machines présentent plusieurs avantages tels que leur moindre coût, leur robustesse et leur entretien réduit. L'éolienne à vitesse variable permet d'augmenter le rendement énergétique et d'améliorer la qualité de l'énergie produite par rapport à celle fonctionnant à vitesse fixe. Pour maximiser la puissance captée, la technique d'extraction du maximum de puissance (MPPT) est appliquée.

Le présent mémoire décrit une étude sur l'utilisation d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA). Le stator de la MADA est directement relié au réseau, par contre son rotor est connecté à ce dernier via une cascade (redresseur-DC Link-onduleur).

Dans ce cadre, le présent mémoire a pour objectif de concevoir la Modélisation et commande d'un système éolien utilisant la machine asynchrone à double alimentation. Par régulateur PI. Les stratégies de commande de ces machines doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible afin d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

Le premier chapitre est consacré à la description et la définition pour les Générateurs électriques utilisés dans les réseaux électriques et des notions principales sur cette technologie.

Le second chapitre présente généralités sur l'énergie éolienne, la convention de l'énergie mécanique de la turbine éolienne et en fin la Modélisation d'une turbine éolienne pour maximiser la puissance extraite.

Le troisième chapitre présente une étude sur la machine asynchrone à double alimentation et son fonctionnement et en fin la modélisation dans un repère diphasé lié au champ tournant et leurs équations.

Le quatrième chapitre met en œuvre la commande vectorielle de la puissance active et réactive basée sur le régulateur PI. Les résultats obtenus dans ces investigations sont présentés, ils nous permettront de conclure cette méthode.

Chapitre -I-

*Générateurs électriques utilisés dans les réseaux
électriques*

I.1 Introduction:

La recherche dans le domaine des énergies renouvelables est en plein développement depuis quelques années partout à travers le monde, que ce soit l'énergie marémotrice, ou l'énergie éolienne. De par son caractère pseudo aléatoire, l'énergie éolienne pose beaucoup de défis afin d'avoir une production de puissance électrique constante, et un facteur de puissance aussi proche de l'unité que possible. Deux approches sont possibles : un entraînement à vitesse constante et un entraînement à vitesse variable. La production d'énergie électrique à vitesse fixe est peu souhaitable, car le comportement dynamique en cas de défaut est potentiellement dangereux [1].

Le raccordement des générateurs éoliens au réseau existant pose plusieurs problèmes. Car la modélisation des phénomènes mécaniques entrant en jeu dans la puissance transmise au rotor du moteur d'une éolienne a permis de conclure que le couple électromagnétique du moteur n'était pas constant mais périodique à cause de l'effet d'ombre de la tour. La conséquence du raccordement au réseau électrique, les oscillations sont plus importantes dans le cas d'un réseau faible. De plus l'utilisation de machines asynchrones (MAS) comme générateur entraîne une dégradation du facteur de puissance, à cause de la nécessité de fournir de la puissance réactive à la machine.

I.2 Prédiction optimale de l'énergie:

On peut classer les éoliennes en deux catégories suivant le mode de fonctionnement : des éoliennes fonctionnant à vitesse fixe et celles fonctionnant à vitesse variable.

I.2.1. Fonctionnement à vitesse fixe:

Une éolienne à vitesse fixe désigne le fait que le rotor de celle-ci possède toujours la même vitesse angulaire d'opération, peu importe la vitesse du vent. Cette vitesse de fonctionnement dépend du design de la turbine elle-même et de la fréquence du réseau électrique.

Depuis le début des années 1970, soit lors de l'arrivée de la machine asynchrone dans le domaine de l'éolien, la presque totalité des turbines éoliennes à vitesse fixe utilise la machine asynchrone à cage [2]. Pour cette configuration, le stator de la machine asynchrone est connecté directement au réseau via un transformateur (Figure I.1). De plus, cette configuration couple le rotor de l'éolienne au rotor de la machine asynchrone via une boîte de vitesse. Cette dernière, jumelée à un nombre de paires de pôles de la génératrice électrique, permet de déterminer une vitesse fixe d'opération.

Étant donné que l'éolienne est à vitesse fixe, et ce, indépendamment de la vitesse du vent, l'efficacité de la turbine, représentée par le coefficient de puissance C_P est optimale uniquement pour une vitesse de vent unique.

Les éoliennes à vitesse fixe possèdent tout de même quelques avantages, soit la simplicité, l'utilisation d'une technologie peu coûteuse et le faible besoin de maintenance.

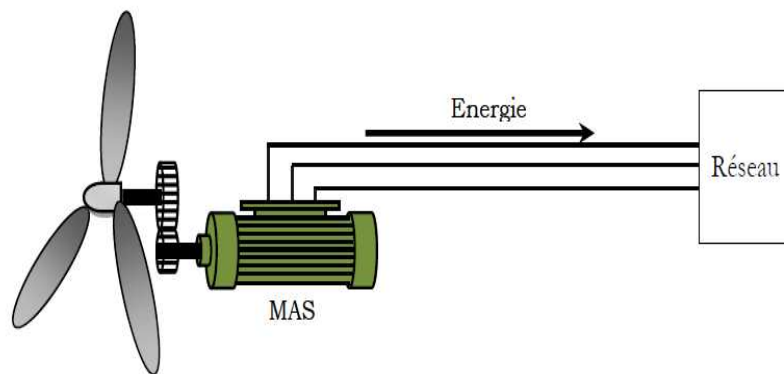


Figure I.1: Eolienne a vitesse fixe

I.2.2 Fonctionnement à vitesse variable :

Les éoliennes à vitesse variable sont actuellement les plus utilisées dans l'industrie. Le terme vitesse variable désigne le fait que la vitesse de la turbine est indépendante de la fréquence du réseau électrique. L'avantage principal d'opérer la turbine à vitesse variable est de maximiser la capture de l'énergie disponible dans le vent. Selon la référence [3], une éolienne à vitesse variable peut aller chercher de 8 à 15 % plus d'énergie dans le vent annuellement qu'une éolienne à vitesse fixe.

On peut classer les éoliennes à vitesse variable à l'intérieur de deux catégories, soit les éoliennes avec convertisseur pleine puissance ou les éoliennes avec convertisseur de puissance partiel.

- ✓ La configuration la plus simple est celle présentant des éoliennes avec convertisseur pleine puissance. Le principe est de découpler le stator de la génératrice électrique de la fréquence du réseau via le convertisseur de puissance. De cette façon, l'ensemble de la puissance électrique produite par la génératrice passe par le convertisseur de puissance. Typiquement, ce convertisseur de puissance est composé de deux convertisseurs dos à dos reliés par un lien à courant continu (Figure I.2). L'un est appelé le convertisseur de puissance côté génératrice (redresseur) et l'autre le convertisseur de puissance côté réseau (onduleur).

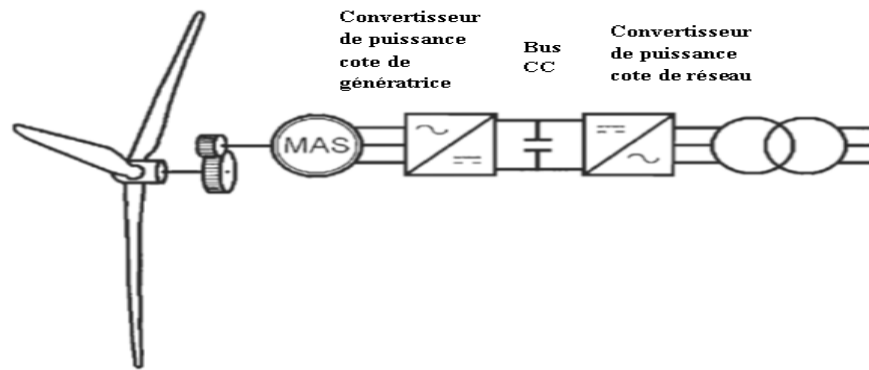


Figure I.2 : Éolienne à vitesse variable utilisant une génératrice asynchrone à cage et un convertisseur pleine puissance

Les génératrices utilisées pour ce type de configuration sont la machine asynchrone à cage, la machine synchrone avec un nombre élevé de pôles et la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) avec nombre élevé de pôles.

- ✓ Les éoliennes à vitesse variable avec convertisseur de puissance partiel sont composées de génératrices asynchrones à double alimentation (MADA). Cette configuration est également reconnue sous l'expression « Doubly-Fed Induction Generators (DFIG) ». Cette technologie a vu le jour dans le domaine de l'éolien au début des années 1990 avec la compagnie " Vestas Wind Systems ". Elle est maintenant la technologie la plus répandue pour les éoliennes de grande puissance [2]. Le principe est de jouer sur le glissement de la génératrice en injectant ou en retirant de la puissance active. Ceci permet d'avoir une vitesse variable autour de la vitesse de synchronisme de la génératrice. Pour ce faire, le stator de la machine est connecté directement au réseau tandis que le rotor est connecté via un convertisseur de puissance au réseau (Figure I.3). Une boîte de vitesse sert de couplage entre la vitesse du rotor de la turbine et le rotor de la machine asynchrone.

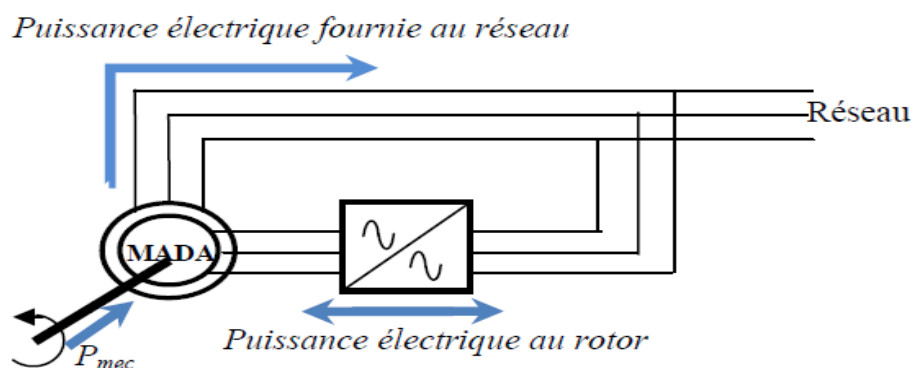


Figure I.3 : Schéma de l'alimentation de la MADA pour une application génératrice

Le fonctionnement à vitesse variable est caractérisé par :

- Augmentation du rendement énergétique ;
- Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance ;
- Réduction des efforts subis par le train de puissance ;
- Génération d'une puissance d'une meilleure qualité [4].

I.3 Machine utilisées dans les systèmes éolienne :

La technologie des aérogénérateurs a énormément évolué ces 20 dernières années entraînant une spécialisation des différents types d'éolienne [5]. Différents types de machines électriques peuvent être utilisés pour la génération de puissance éolienne. Des facteurs techniques et économiques fixent le type de machine pour chaque application. Pour les petites puissances (< 20 kW), la simplicité et le coût réduit des générateurs synchrones à aimants permanents (GSAP) expliquent leur prédominance. Dans les applications de plus forte puissance, jusqu'à 2 MW environ [6] le générateur asynchrone est plus courant et économique [6] [7]. Les générateurs habituellement rencontrés dans les éoliennes sont présentés dans les paragraphes suivants :

I.3.1 Système utilisant une génératrice synchrone [8] :

Le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Autrement dit, si la génératrice est connectée au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement un sous-multiple de la pulsation des courants statoriques.

L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des problèmes pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion. Pour ces raisons, on place systématiquement une interface électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation. L'utilisation de génératrices synchrones dans les applications éoliennes à grande puissance est récente.

Deux types de génératrices sont utilisés, à bobinage inducteur ou à aimants permanents.

I.3.1.1 Machine synchrone à rotor bobiné :

Ce type de machines fait appel, le plus souvent, à une excitation au niveau de l'inducteur ce qui nécessite la présence d'une alimentation pour ce dernier. Par conséquent, les sites

isolés ne sont adaptés à ces génératrices qu'en présence d'une batterie ou d'une source de tension indépendante [9].

Les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau, et nécessitent une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau (Figure I.4) ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation [10].

Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier du système de contacts glissants au rotor. Le circuit d'excitation est assuré par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau.

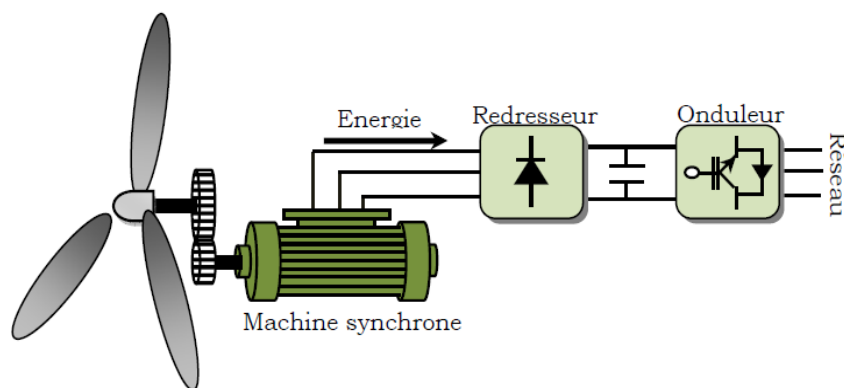


Figure I.4: Système éolien à base d'une machine synchrone et un convertisseur électronique

I.3.1.2 Machines synchrones à aimants permanents :

La machine synchrone à aimants permanents est une solution très intéressante dans les applications éoliennes isolées et autonomes vu ses avantages cités précédemment (un bon rendement et un bon couple massique) et la non nécessité d'une source d'alimentation pour le circuit d'excitation. Ces qualités sont contrebalancées par un coût plus élevé que les machines asynchrones. Toutefois, différentes structures de machines synchrones à aimants permanents alimentant des charges autonomes à travers des dispositifs d'électronique de puissance existent.

A. Structure avec redresseur à diodes :

Cette configuration est la plus simple et trouve ses applications dans le cas de très petites puissances [11]. Elle est basée sur l'association directe d'une batterie en aval du pont redresseur à diodes comme illustré sur la figure (I.5). Dans ce cas, il n'y a aucun composant commandé, pas ou peu de capteurs et le coût de l'équipement est alors minimal.

Le fonctionnement est « naturel » mais nécessite un choix très précis de tous les paramètres (paramètres machine et tension continue) par une conception système dédiée [9].

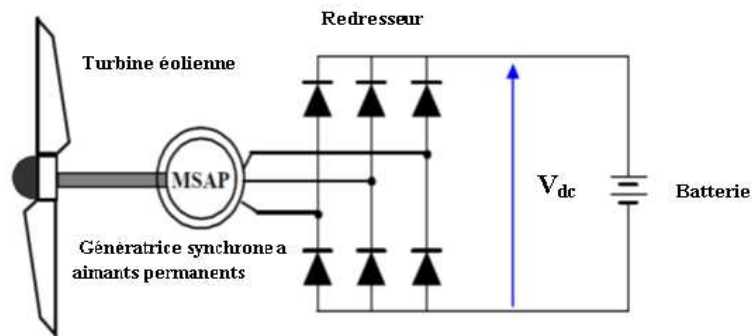


Figure I.5 : Machine synchronisée avec redresseur à diodes

B. Structure avec redresseur à diodes et hacheur dévolteur :

Le système de conversion d'énergie dédié à l'éolien doit permettre le fonctionnement à une puissance électrique maximale de façon à optimiser le rendement énergétique quel que soit le régime de vent. C'est le principe du « Maximum Power Point Tracking » (M.P.P.T). L'association d'un pont redresseur à diodes avec une génératrice synchronisée à aimants permanents comporte cependant quelques limitations ne permettant pas toujours d'atteindre ce but. Afin de pouvoir y remédier, un hacheur dévolteur, débitant sur une batterie de stockage, est disposé à la suite du pont de diodes (figure I.6) [9], [11].

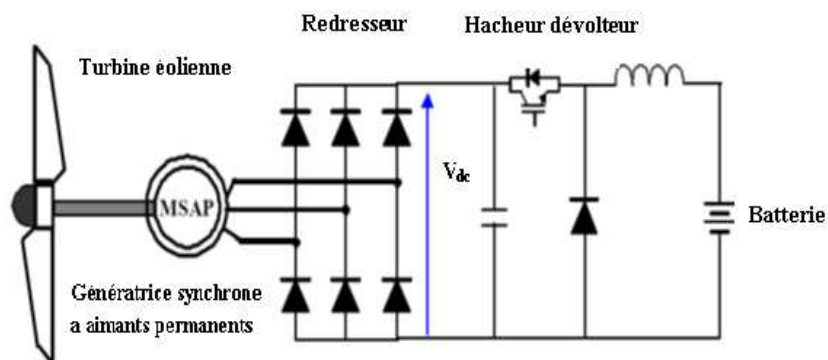


Figure I.6: Machine synchronisée connectée à un redresseur à diodes et hacheur dévolteur.

C. Structure avec redresseur à diodes et hacheur en pont :

Toujours dans la même optique d'optimisation du rendement énergétique, une structure en pont à commande différentielle permet de fonctionner avec un rapport cyclique proche de 0,5

en commandant les deux interrupteurs T1 et T2. Cette configuration est avantageuse en termes de sûreté de fonctionnement mais nécessite deux fois plus de composants, d'où un coût conséquent et des pertes plus élevées [9].

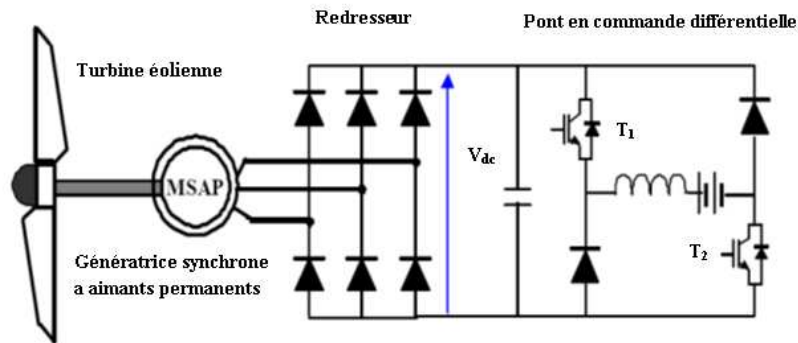


Figure I.7: Machine synchronisée avec convertisseur à diodes et hacheur en pont

D. Structure avec redresseur à MLI :

La configuration de référence est évidemment celle mettant en œuvre un redresseur triphasé à MLI. Dans le cas du montage de la figure (I.8), il est possible d'effectuer un contrôle dynamique et fiable en vitesse ou en couple de la génératrice synchrone ce qui permet facilement de déplacer le point de fonctionnement sur toute la plage des vitesses de rotation [12]. Par contre, elle nécessite un montage plus complexe, trois bras complets donc six interrupteurs, et une commande qui requiert généralement un capteur mécanique de position.

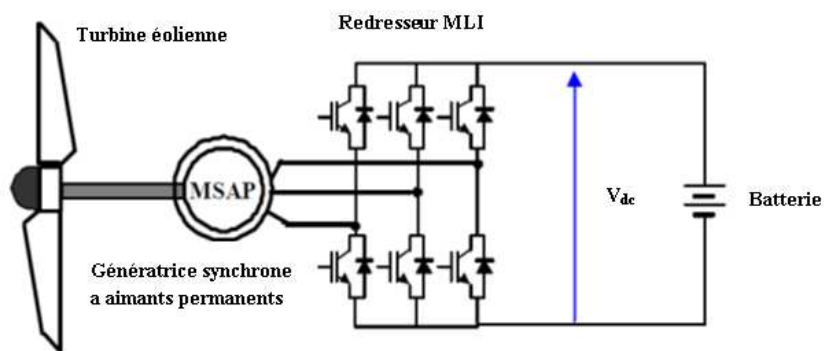


Figure I.8: Machine synchronisée connectée à un redresseur à MLI

I.3.2 Système utilisant une génératrice asynchrone [11] :

L'éolienne dans cette configuration entraîne une génératrice asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance situé sur le circuit statorique.

Contrairement à une éolienne à vitesse fixe, les tensions et les fréquences à la sortie de la génératrice ne sont plus imposées par le réseau, ce qui permet de réguler la vitesse de l'éolienne. La commande de l'onduleur permet de garder constante la tension du bus continu.

I.3.2.1 Machine asynchrone à double stator :

Pour améliorer le rendement du dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator (Figure I.9) :

- ✓ Un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent.
- ✓ Un stator de forte puissance à faible nombre de paires de pôles permettant de fonctionner aux vitesses de vent élevées [12].

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

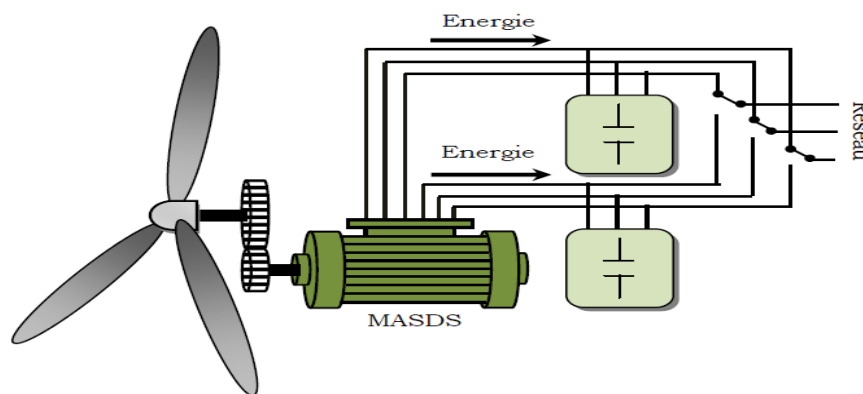


Figure I.9: Générateur asynchrone à double stator

I.3.2.2 Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance :

Le dispositif de base est représenté sur la Figure (I.10). Cette configuration autorise un fonctionnement à vitesse variable sans limite physique théorique. En effet, quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, la tension produite est redressée et transformée en tension continue. Le fonctionnement de l'onduleur est alors classique et une commande adéquate permet de délivrer une tension alternative de fréquence fixe correspondant à celle du réseau

avec un facteur de puissance unitaire. La puissance nominale de la génératrice détermine alors la puissance maximale que peut fournir l'éolienne. Les convertisseurs utilisés sont dimensionnés pour la totalité de cette puissance échangée entre la machine et le réseau. Ils représentent donc un coût important, des pertes non négligeables (jusqu'à 3% de la puissance nominale de la machine) et entraînent des perturbations qui nuisent au rendement et à la qualité de l'énergie délivrée. De plus, la présence des capacités est indispensable pour fournir l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine. Cette énergie ne peut pas être fournie par le réseau car le redresseur est unidirectionnel. Il peut être éventuellement remplacé par un redresseur MLI à base d'IGBT dont la structure est semblable à celle de l'onduleur. Dans ce cas, le transfert de puissance réactive est contrôlable et se fait du bus continu vers la machine et le transfert de puissance active est identique au cas du redresseur simple. Cette solution alourdit toutefois le dispositif en terme de coût et de complexité de mise en œuvre, de plus, les enroulements statoriques du moteur sont alors soumis à des (dv/dt) importants qui peuvent réduire leur durée de vie [13]. L'ensemble de ces inconvénients n'ont pas permis un développement industriel important de ce dispositif.

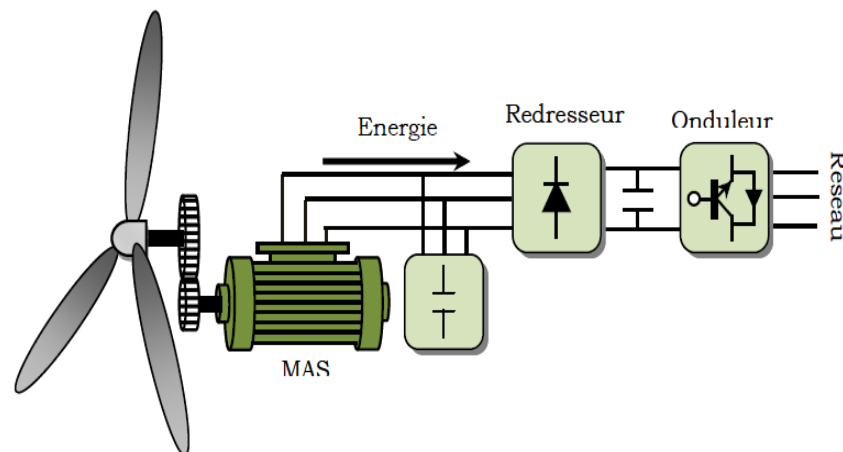


Figure I.10: Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur – onduleur

I.3.2.3 Machine asynchrone à cage :

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde.

Ainsi pour les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Or il n'est pas envisageable de

concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse.

La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais et collecteur ou de contacts glissants sur des bagues, la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne.

Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau, celui-ci peut être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la figure (I.11), qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne

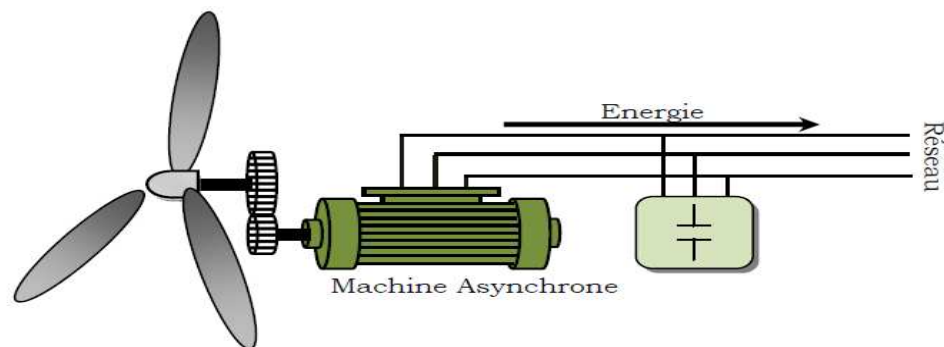


Figure I.11: Machine asynchrone avec liaison directe au réseau

I.3.2.4 Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobine" :

Ce type d'aérogénérateur s'est développé récemment car la double alimentation de machine asynchrone permet une meilleure exploitation du potentiel de l'éolienne [14]. Le stator est directement relié au réseau et les grandeurs rotoriques sont commandées par un convertisseur statique (Figure I.12). La MADA à rotor bobine présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants utilisent ce type de machines.

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage [15].

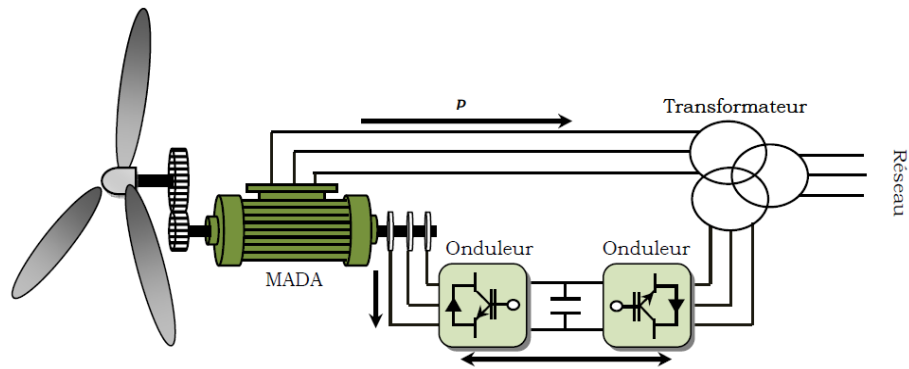


Figure I.12: Machine asynchrone a rotor bobiné

a. Structure a énergie rotorique dissipée

Cette configuration a vitesse variable est représentée sur la (figure I.13) Le stator est connecte directement au réseau et le rotor est connecte à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO [16].

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 de la machine.

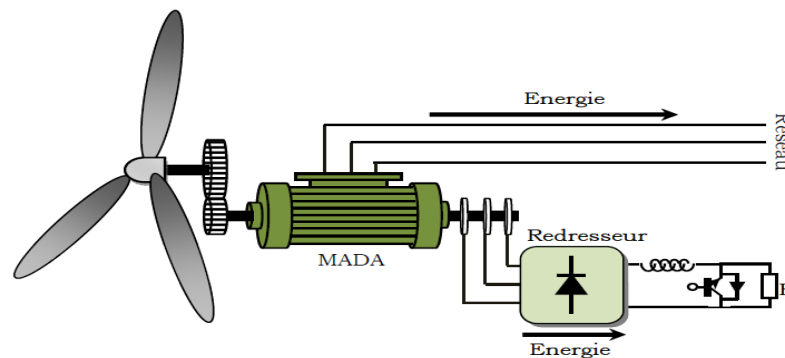


Figure I.13: MADA avec contrôle de glissement par l'énergie dissipée

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R , ce qui nuit au rendement du système.

De plus, cela augmente la puissance transmise dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance [17].

b. Structure de KRAMER :

Cette structure est appelée structure a base de pont a diode et pont a thyristors. Les tensions entre bagues sont redressées par un pont à diodes. Un onduleur à thyristors applique

à ce redresseur une tension qui varie par action sur l'angle d'amorçage des thyristors. Ce dispositif permet de faire varier la plage de conduction des diodes, de rendre variable la puissance extraite du circuit rotorique et donc le glissement de la génératrice asynchrone (Figure I.14).

Le principal avantage est que l'onduleur est assez classique, et moins coûteux, puisqu'il s'agit d'un onduleur non autonome dont les commutations sont assurées par le réseau [18].

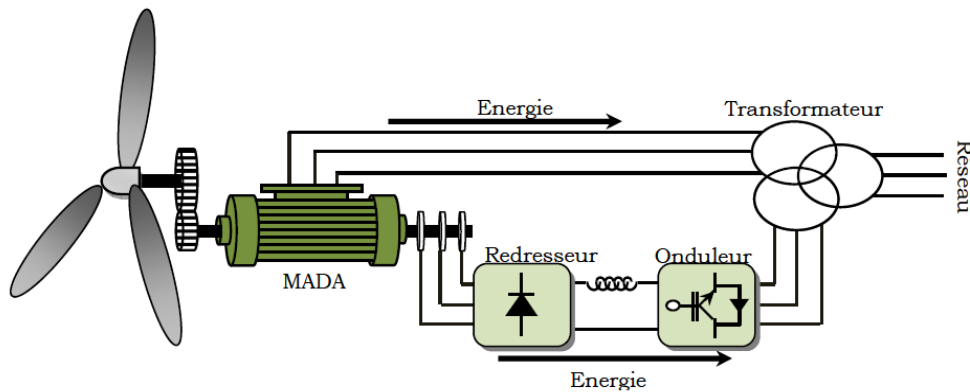


Figure I.14: Structure de KRAMER pour la MADA

c. Structure de SCHERBIUS avec cyclo-convertisseur :

L'association redresseur-onduleur peut être remplacée par un cyclo-convertisseur afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau (Figure I.15). L'ensemble est alors appelé : structure de SCHERBIUS [19]. Ce montage est aussi connu sous la dénomination "topologie statique de SCHERBIUS".

Formellement, le principe de SCHERBIUS est basé sur l'utilisation de la machine tournante au lieu des convertisseurs de puissance.

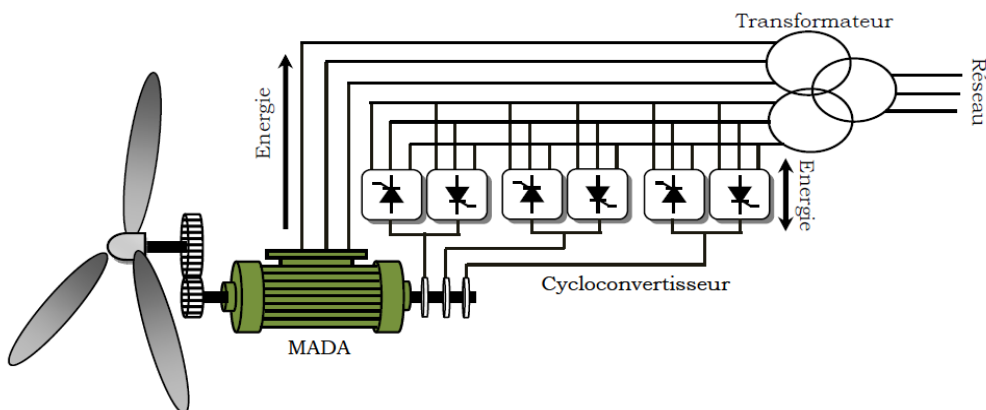


Figure I.15 : Structure de SCHERBIUS avec cyclo-convertisseur.

Dans cette configuration, le principe de SCHERBIUS est reproduit à l'aide d'un cyclo-convertisseur. Son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif. Les progrès de l'électronique de puissance ont conduit au remplacement du cyclo-convertisseur par une structure à deux convertisseurs à IGBT commandés en MLI [20].

d. Structure de SCHERBIUS avec convertisseurs MLI :

Une autre structure intéressante (Figure I.16) utilise deux ponts triphasés d'IGBT commandables à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO. L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en modulation de largeur d'impulsions, dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal [21].

Ce choix permet un contrôle du flux et de la vitesse de rotation de la génératrice asynchrone du côté de la machine et un contrôle des puissances active et réactive transitées du côté réseau. Cette configuration hérite des mêmes caractéristiques que la structure précédente. La puissance rotorique est bidirectionnelle. La bidirectionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hypo synchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau. Il est à noter cependant que le fonctionnement en MLI de l'onduleur du côté réseau permet un prélèvement des courants de meilleure qualité [22].

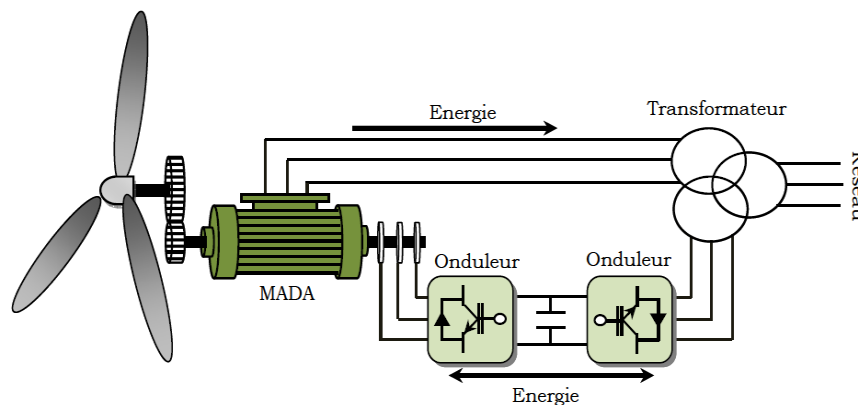


Figure I.16: Structure de SCHERBIUS avec convertisseur MLI.

C'est pour cette raison que nous nous sommes particulièrement intéressés à cette dernière configuration de la génératrice asynchrone à double alimentation à cause de ses bonnes caractéristiques intrinsèques telles que :

- Le fonctionnement à vitesse variable ;
- Le convertisseur de puissance de petite dimension ;

- Le niveau bas de fluctuations mécaniques ;
- La possibilité de fonctionnement en hypo et hypersynchronisme, ce qui permet de produire de l'énergie du stator vers le réseau et aussi du rotor vers le réseau ;
- Le contrôle simultané de la puissance active et réactive.

I.4 Configuration du mode de fonctionnement et stratégie de commande de la MADA :

Les principales études ont été dédiées aux stratégies de commande linéaire ou non linéaire avec ou sans capteur de vitesse ou de position de la MADA. La stratégie de commande la plus utilisée mentionnée par la bibliographie est le contrôle vectoriel par orientation du flux. Les convertisseurs utilisés pour alimenter la MADA sont soit les cyclo-convertisseurs, soit des onduleurs à base d'IGBT.

I.4.1 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 un onduleur. Cette solution permet de réduire fortement la puissance du convertisseur. La figure (I.17) présente le schéma de principe de cette catégorie de MADA.

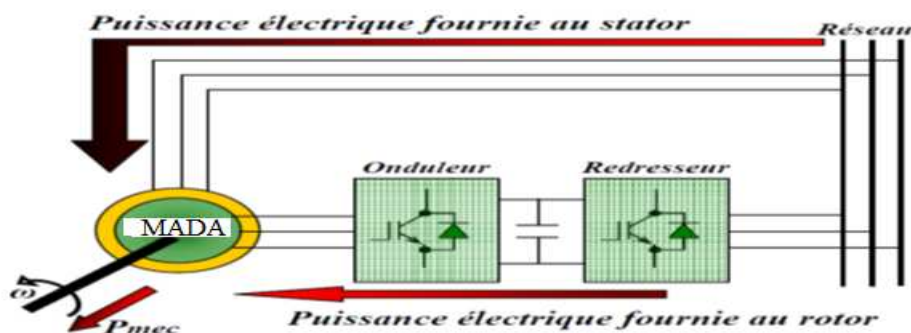


Figure I.17: Schéma d'un système utilisant une MADA en moteur alimenté par un seul convertisseur

Dans, « HELLER » présente la MADA comme étant la solution du futur pour les industries de pompage. Il évalue la stabilité de la MADA à l'aide de la méthode des petites variations autour d'un point de fonctionnement. Cette approche lui permet de tracer le lieu des pôles du système [23].

Le mode de fonctionnement retenu est un fonctionnement moteur (figure I.14) dont le stator est connecté au réseau et le rotor relié à un onduleur dont le contrôle est assuré par l'orientation du flux statorique. Il présente ensuite des résultats expérimentaux réalisés avec une machine de 33 kW.

Dans, « MOREL » assure que le fait de relier le stator au réseau et d'alimenter le rotor à travers un onduleur permet de dimensionner la puissance du convertisseur utilisé au rotor à 20% de la puissance mécanique maximale. Il effectue un contrôle du type champ orienté. Afin d'obtenir un moteur ou un générateur à vitesse variable, il propose de passer par trois étapes : mode 1, démarrer le moteur avec les enroulements statoriques en court-circuit ; mode 2, connecter le stator au réseau ; mode 3, alimenter la MADA à tension et fréquence fixes au stator et par un convertisseur au rotor. Le fonctionnement du système durant les différents modes est démontré avec validation par les résultats expérimentaux [24].

Dans, « HOPFENSBERGER » propose l'étude d'une MADA dans un fonctionnement en mode moteur et vise des applications nécessitant une variation de la vitesse de rotation. Dans le cas de l'absence du capteur de position, il propose deux façons pour déterminer l'angle de rotation du repère tournant (orienté suivant le flux au stator) : une première basée sur la mesure et l'expression des courants statoriques dans le repère tournant, la seconde nécessite la mesure des puissances actives et réactive statoriques [25]. Son étude est validée par des résultats expérimentaux.

Dans [26], l'auteur reprend la même étude mais en appliquant, cette fois-ci, la théorie du champ orienté au flux rotorique commun. Des nouveaux résultats expérimentaux sont présentés.

I.4.2 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 (I.18);
- Deux onduleurs alimentés en parallèle par un redresseur commun;
- Deux cyclo-convertisseurs.

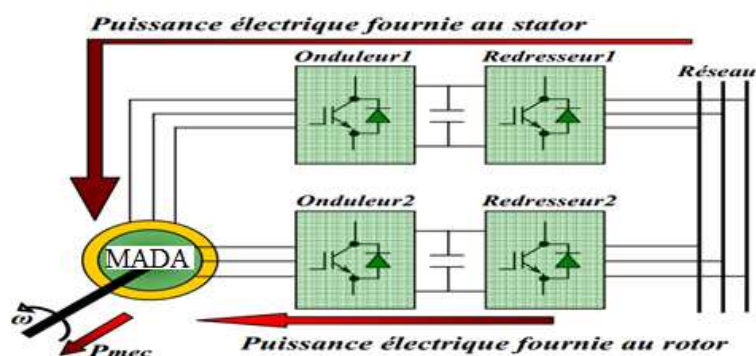


Figure I.18: Schéma d'un système utilisant une MADA en moteur alimenté par deux convertisseurs

Dans, l'étude que présente « LECOCQ » concerne le cas où le rotor et le stator sont connectés à deux onduleurs indépendants (Figure I.15). Il préfère la théorie du champ orienté appliqué au flux statorique et impose la vitesse, le flux, le facteur de puissance et le glissement [27].

Dans [28], l'auteur part du principe que la MADA offre quatre degrés de liberté : le flux, le couple, la fréquence et le facteur de puissance et procède à un contrôle indirect du flux d'entrefer en introduisant un courant magnétisant. La régulation des courants est effectuée par la suite. Il présente par la suite les résultats expérimentaux de cette étude.

Dans, « VIDAL » reprend la commande vectorielle présentée par « LECOCQ ».

Il essaie d'élaborer de nouvelles lois de commande linéaire et non linéaire à partir d'un modèle d'état basé tout d'abord sur les courants puis sur les flux.

L'alimentation de la MADA est assurée par un onduleur à MLI. En analysant le comportement de la MADA en régime permanent, il parvient à déterminer les couplages mis en jeu dans la modélisation choisie. Il adopte une loi de répartition de puissance et impose une fréquence minimale de fonctionnement. Pour la commande linéaire, il conclue que la modélisation par flux présente de meilleurs résultats. Quant au cas non linéaire, il opte pour la commande par modes glissants. En conclusion, il affirme que cette stratégie donne de très bons résultats vis-à-vis de la commande linéaire [29].

« MASMOUDI » dans son article, considère une MADA avec deux alimentations variables et indépendantes : l'une au stator, l'autre au rotor. Il centre son intérêt aux échanges énergétiques entre les enroulements rotoriques et statoriques dans l'entrefer. Il en fait un bilan pour les fonctionnements en moteur, en générateur ou en frein. L'auteur propose enfin une étude de la stabilité en analysant les valeurs propres de la matrice dynamique en fonction des variations des paramètres électriques [30].

Dans, « DRID » présente une nouvelle approche pour contrôler une MADA alimentée par deux onduleurs de tension au stator comme au rotor. Son approche est basée sur un contrôle à double orientation du flux statorique et rotorique. L'orthogonalité entre les deux flux, qui doit être impérativement observée, conduit à une commande linéaire et découplée de la machine avec une optimisation du couple. Par la suite l'auteur présente les résultats de simulations de son étude [31].

« RAMUZ » dans sa thèse, propose d'utiliser une configuration de la MADA pour un fonctionnement moteur dans des applications telles que la traction où la "première

transformation de l'acier". Les enroulements statoriques et rotoriques de la MADA sont alimentés par deux onduleurs indépendants. Il utilise un contrôle vectoriel à orientation de flux. Dans un premier temps, il présente des résultats expérimentaux avec un contrôle basé sur un repère tournant lié au flux statorique; dans un deuxième temps, le contrôle est basé sur une orientation du repère suivant le flux d'entrefer [32].

Dans ce type de fonctionnement, le stator est relié au réseau et un convertisseur alimente le rotor comme nous le montre la figure (I.19). Cette solution permet de fournir une tension et une fréquence fixes même lors d'une fluctuation de la vitesse. Dans ce cas la plus grande partie de la puissance est directement distribuée au réseau par le stator et moins de 30% de la puissance totale passe par le convertisseur de puissance à travers le rotor. Ceci donne l'occasion d'utiliser des convertisseurs plus petits et donc moins coûteux, [33-34].

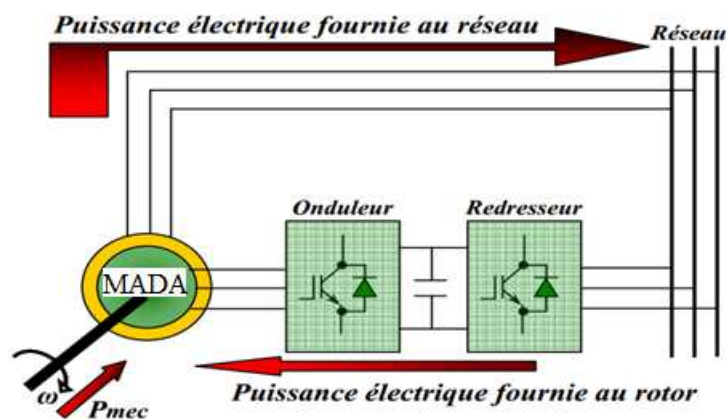


Figure I.19: Schéma d'un système utilisant une MADA en alternateur alimenté par un seul convertisseur

Dans, « PERESADA » place son étude dans le contexte d'un fonctionnement en mode générateur de la MADA. Les enroulements statoriques sont reliés au réseau, le rotor est connecté à un onduleur de tension. Il propose de faire une régulation "asymptotique" des puissances active et réactive statoriques par le biais d'une régulation des courants actif et magnétisant statoriques. Il se place dans un repère tournant lié à la tension statorique. Pour rester dans le cas le plus général possible, il précise qu'il ne négligera pas les termes résistifs. Il démontre à travers des tests expérimentaux et des simulations que le système est robuste face à des variations paramétriques et face à une erreur de la mesure de la position mécanique du rotor [34].

« PENA », présente l'étude de la MADA en fonctionnant génératrice associée à une éolienne. Les enroulements statoriques sont reliés à un réseau triphasé, une association

redresseur MLI- onduleur MLI au rotor. L'avantage d'une telle structure est qu'elle permet le réglage indépendant des puissances fournies par l'alimentation et le fonctionnement dans une grande plage de vitesse [25-26-27].

Dans, « HOFMANN » propose une application éolienne de la MADA en fonctionnement générateur dont les enroulements statoriques sont connectés au réseau tandis que les enroulements rotoriques sont reliés à un onduleur. Il présente une courbe de couple mécanique en fonction de la vitesse. Il part de l'hypothèse que sa machine est pilotée par un contrôle vectoriel basé sur l'orientation du flux statorique. Il analyse par les simulations des variations des courants, des pertes et des flux. Il démontre que son contrôle, qui doit minimiser les pertes, est performant [26].

« KELBER », dans son article étudie le fonctionnement de la MADA en génératrice entraînée par une turbine hydraulique et en moteur, entraînant une pompe. Il présente une étude de la stabilité de la machine ainsi que le principe de commande en courant des deux onduleurs. L'auteur conclut que la MADA en génératrice possède des pôles à faible amortissement avec une pulsation propre proche de la fréquence du réseau, toutefois le choix d'une faible bande passante pour les boucles de courant élimine ce problème. Il montre qu'avec la MADA en génératrice, il est possible de travailler dans les quatre quadrants avec une commande découplée de la vitesse et des puissances. Des résultats expérimentaux sont présentés [27-28].

Dans un second article, l'auteur présente les différentes structures adoptées pour la génération de l'énergie électrique avec un entraînement éolien ou hydraulique. Cette comparaison l'amène à opter pour la MADA comme solution optimale [30].

« POITIERS » dans sa thèse étudie une MADA où le stator est connecté au réseau et le rotor relié à un onduleur. Il établit une commande du type vectorielle avec un référentiel tournant lié au flux statorique. L'étude porte sur la comparaison entre un correcteur PI classique et un correcteur adaptatif type RST. Ces correcteurs visent les régulations du flux statorique et du couple. Les réponses temporelles données par les deux types de correcteurs sont ensuite comparées. Les critères sont la recherche de la puissance active optimale, l'adaptation face à une variation de vitesse brutale et la robustesse face aux variations des paramètres.

Les conclusions prouvent que le régulateur RST donne des résultats meilleurs en terme de robustesse vis-à-vis des variations paramétriques.

Le travail effectué le long de cette thèse est consacré à la commande de la MADA en fonctionnement génératrice non autonome alimentée par un onduleur de tension au rotor, alors que le stator est directement connecté au réseau. Le facteur de puissance est contrôlé de sorte qu'il soit unitaire en régime permanent du côté statorique. En premier lieu la stratégie de commande par orientation du flux statorique sera appliquée à la MADA.

C'est une commande basée sur la poursuite du couple (torque tracking control). Le couple électromagnétique de référence est imposé négatif pour avoir le mode générateur, et par conséquence le flux de référence est une fonction de ce couple de référence. Par la suite des techniques de l'intelligence artificielle seront appliquées [35].

I.5 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté la MADA sous toutes ses configurations et les performances qui lui permettent d'occuper un large domaine d'application, soit dans les entraînements à vitesse variables (fonctionnement moteur), ou dans les applications à vitesse variable et à fréquence constante (fonctionnement générateur).

Au cours de notre recherche bibliographique nous avons balayé un grand nombre d'études et de travaux effectués sur la MADA. Ces études portent principalement sur son fonctionnement en génératrice, dans le domaine des énergies renouvelables, ou sur son fonctionnement en moteur avec une grande variété de modes d'alimentation et de contrôle.

Nous avons orienté notre étude sur l'utilisation d'une MADA en fonctionnement génératrice non autonome. Il s'agit d'une configuration utilisant un onduleur au rotor, le stator est connecté directement au réseau.

Pour bien exploiter la machine à double alimentation dans un tel domaine d'application, la modélisation et la commande sont nécessaires. Le prochain chapitre est consacré à la modélisation et étude du système de conversion de la MADA.

I.6 Références bibliographiques :

- [1] Poitiers. F, “Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l’Utilisation de l’Energie Eolienne’’, Thèse de l’Ecole Polytechnique de l’Université de Nantes, Nantes, France, 2003.
- [2] V. Akhmatov, *Induction Generators for Wind Power*, Multi-Science Publishing Co. Ltd., 2005.
- [3] S. Kelouwani et K. Agbossou, Nonlinear model identification of wind turbine with a neural network, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 19, nO 3, pp. 607- 612,2004.
- [4] Morel. L, Godfroid. M, Kauffmann. J.M, “Application and Optimal Design of Double Fed Induction Machines in Generator and Motor Operating, Cigre , Moscou, Russia, 1995.
- [5] Haritza Camblong «Minimisation de l’impact des perturbations d’origine éolienne dans la génération d’électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable » thèse de doctorat de l’école nationale supérieure d’arts et métiers, 2003.
- [6] **M. LOPEZ** «contribution à l’optimisation d’un système de conversion éolien pour une unité de production isolée» Thèse de Doctorat de l’Université de Paris-sud11.
- [7] F. POITIERS «Etude et commande de génératrices asynchrones pour l’utilisation de l’énergie éolienne-Machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau» Thèse de Doctorat Université de Nantes, 2003.
- [08] B. Beltran, "Contribution à la Commande Robuste des Eoliennes à Base de Génératrices Asynchrones Double Alimentation : Du Mode Glissant Classique au Mode Glissant D'ordre Supérieur " Thèse de Doctorat Université de Bretagne Occidentale, 2010.
- [09] A. Mirecki – « Etude comparative de chaînes de conversion d’énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 2005.
- [10] HARITZA CAMBLONG «Minimisation de l’impact des perturbations d’origine éolienne dans la génération d’électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable » thèse de doctorat de l’école nationale supérieure d’arts et métiers, 2003.
- [11] A. Schmidhofer, H. Weiss – « Optimization of Power Electronics for small stand alone wind power stations », 10th European Conference on Power Electronics and Applications EPE’03, Toulouse, France, 2003, pp. 1-6.

- [12] A. Tounzi, "Utilisation de l'Energie Eolienne dans la Production de l'Electricité", Revue 3EI, Mars 2000, pp. 24-38.
- [13] D. Schreiber, "State of art of variable speed wind turbines", 11th International symposium on power electronics – Ee 2001, Novi Sad, Oct.-Nov. 2001, CDROM proceedings.
- [14] Morel. L, Godfroid. M, Mirzaian. A, Kauffmann. J.M, "Double-Fed Induction Machine: Converter Optimization and Field Oriented Control without Position Sensor", IEEE Proc. Electric Power Appl. 145, No. 4, pp. 360-368, July 1998.
- [15] Hopfensperger. B, Atkinson. D. J, "Stator Flux Oriented Control of a Doubly-Fed Induction Machine With and Without Position Encoder", IEE Proc. Electric Power Appl. Vol. 147, No 4, p. 241-250, July 2000.
- [16] Hopfensperger. B, Atkinson. D. J, "Combined Magnetizing Flux Oriented Control of the Cascaded Doubly Fed Induction Machine", IEEE Proc. Electric Power Appl. Vol. 148, No. 4, p. 354-362, 2001.
- [17] Lecocq. D, Lataire. P.H, Wymeersch. W, "Application of the Double Fed Asynchronous Motor (DFAM) in Variable Speed Drives", EPE Conference, Brighton, Vol. 5, pp. 419-423, 13-16 September. 1993.
- [18] Lecocq. D, "Contribution à l'Etude des Moteurs Alternatifs à Double Alimentation par Convertisseurs Statiques pour Entraînements de Forte Puissance", Thèse de Doctorat, Faculteit Toegepaste Wetenschappen, Vrije Universiteit, Brussel, 1994.
- [19] Lecocq. D, Lataire. P.H, "The Indirect Controlled Double Fed Asynchronous Motor for Variable Speed Drives", EPE Conference, Vol. 3, pp. 405-410, Sevilla, 19-21 September. 1995.
- [20] Lecocq. D, Lataire. P.H, "Study of a Variable Speed, Double Fed Induction Motor Drive System with Both Stator and Rotor Voltages", Controllable Proc. EPE, pp. 337-339, Firenze, 1991.
- [21] Vidal. P. E, "Commande non Linéaire d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation", Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.
- [22] Masmoudi. A, Toumi. A, Kamoun. M, "Power on Analysis and Efficiency Optimization of a Doubly Fed Synchronous Machine", Proceedings Electric Machines and Power Systems 21, pp. 473-491, 1993.

- [23] F. POITIERS, "Etude et commande de Génératrices Asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne", thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, Décembre 2003.
- [24] Pena. R.S, Clare. J.C, Asher. G.M, "Doubly Fed Induction Generator Using Back-to-Back PWM Converters and its Applications to Variable Speed Wind-Energy Generation", IEE Proceedings, Electrical Power Applications, Vol. 143, N° 3, pp. 231-241, May 1996.
- [25] Pena. R.S, Clare. J. C, Asher. G. M, "A Doubly Fed Induction Generator Using Back-to-Back PWM Converters Supplying an Isolated Load from a Variable Speed Wind Turbine", IEE Proceedings, Electrical Power Applications, Vol. 143, N° 5, pp. 380-387, September. 1996.
- [26] Pena. R.S, Clare. J.C, Asher. G. M, "Vector Control of a Variable Speed Doubly-Fed Induction Machine for Wind Generation Systems", EPE Journal, Vol. 6, N° 3-4, pp. 60-67, December. 1996.
- [27] Hofmann. W and F. Okafor, "Doubly fed full controlled induction wind generator for optimal power utilization", Proc. PEDS'01, International conference on Power Electronics and Drives Systems (Bali Indonesia), oct. 2001.
- [28] Kelber. C, Schumacher. W "Adjustable Speed Constant Frequency Energy Generation with Doubly-Fed Induction Machine", Proc. VSSH European Conference on Variable Speed in Small Hydro, Grenoble, January. 2000.
- [29] Kelber. C, Schumacher. W, "Control of Doubly-Fed Induction Machines as an Adjustable Speed Motor/Generator", Proc. VSSH European Conference on Variable Speed in Small Hydro, Grenoble, January. 2000.
- [30] Khelfa. S, "Commande vectorielle d'une machine à induction ; impacts de la saturation de la machine et la modulation du convertisseur", thèse de magister, Batna 2001.
- [31] Poitiers. F, Machoum. M, Le Doeuff. R, zaim. M. E, "control of doubly fed induction generator for wind energy conversion systems", international journal of renewable energy engineering, Vol. 3, N° 3, pp. 373-378, December 2001.
- [32] Chaiba. A, R. Abdessemed, M. L. Bendaas and A. Dendouga, "Control of Torque and Unity stator Side Power Factor of the Doubly-Fed Induction Generator", Conférence sur le Génie Electrique "CGE'04", l'Ecole militaires polytechnique, proc, 12-13 avril, 2005.

- [33] Ramuz. D, “Machine généralisée alimentée par deux convertisseurs”, Thèse, Institut de Génie Energétique de Belfort, UFR des Sciences, Techniques et Gestion de l'Industrie de l'Université de Franche Comté 90000 Belfort (France), mai 2000.
- [34] L. Xu and C. Wei, “Torque and reactive power control of a doubly fed induction machine by position sensor less scheme”, IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 31, no. 3, pp. 636-642, May/June. 1995.
- [35] Peresada. S, A. Tilli and A. Tonielli, “Robust output feedback control of a doubly fed induction machine”, Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics ISIE'99 (Bled Slovenia), p.1256-1260, 1999.

Chapitre -II-

Modélisation d'une turbine éolienne

II.1 Introduction:

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. A l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an. En Europe, principalement sous l'impulsion Allemande, Scandinave et Espagnole, on comptait en 2000 environ 17 GW de puissance installée. Ce chiffre a presque doublé en 2003, soit environ 40 GW de puissance éolienne installée dans le monde. En prévision, pour l'année 2010, on peut espérer une puissance éolienne installée qui dépassera les 160 GW [1].

Ce chapitre est une description générale sur l'énergie éolienne, les différents types d'aérogénérateur (éoliennes à axe vertical, et éoliennes à axe horizontal) et en cité la modélisation de turbine éolienne.

Avant d'entrer dans les détails de notre mémoire, nous allons parler brièvement de la principale source de l'énergie éolienne.

II.2 Historique :

Tirée du nom donné au dieu du vent dans la Grèce antique : Éole, c'est l'une des premières formes d'énergie employée par l'homme ; Elle fut utilisée pour la propulsion des navires ensuite pour les moulins à céréales. La première utilisation connue de l'énergie éolienne remonte à 2000 ans. Les Babyloniens avaient conçu à cette époque tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie en faisant usage de la puissance du vent. Ce n'est qu'au moyen âge que les moulins à vent furent introduits en Europe pour moulinier le blé et assécher les terres inondées au Pays-Bas.

L'idée d'associer une turbine éolienne à une génératrice est mise au point par Poul La Cour En 1890. Cette application a évolué en termes de puissance et de rendement durant tout le 20ème siècle et jusqu'au début du 21ème. Elle fut utilisée à travers le monde notamment dans les zones isolées telles que les îles du pacifique. Les Pays-Bas se sont avérés les leaders incontestés dans les domaines de la construction des éoliennes (50% des éoliennes dans le monde sont de fabrication Hollandaise) [2]. La crise pétrolière de 1973 a alerté les états

producteurs d'énergie fossile sur la nécessité du développement de l'énergie éolienne. En 2006 l'Algérie a décidé de se doter de la technologie éolienne en implantant la première ferme éolienne à Tindouf, pour une puissance de 50 MW et, d'ici 2015, 5% des besoins algériens en électricité seront assurés par les énergies renouvelables dont l'énergie éolienne [3].

II.3 Généralités sur l'énergie éolienne :

II.3.1 Origine du vent:

Le vent naît sous l'effet des différences de températures et de pression. Le grand responsable de ce phénomène c'est le soleil (Figure II.1.A). Il chauffe les mers et les continents mais pas au même rythme (Figure II.1.B). Une fois réchauffés, ces derniers chauffent à leur tour les masses d'air qui les surplombent. L'air augmente de volume lorsqu'il est chauffé (Figure II.1.C), ce qui crée un déplacement des particules de l'air (Figure II.1.D) et c'est en capturant leur énergie cinétique que les éoliennes se mettent à fonctionner.



Figure II.1.A

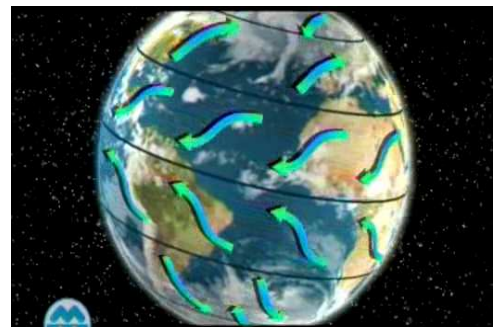


Figure II.1. B

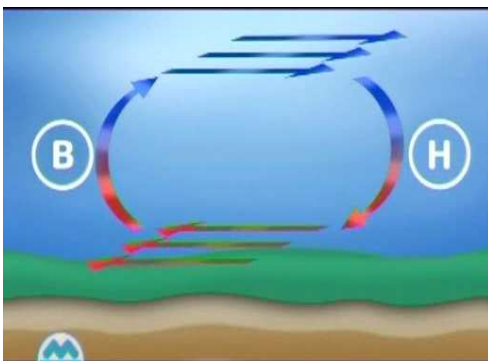


Figure II.1. C



Figure II.1. D

Figure II.1 : La naissance du vent

II.3.2 L'aérogénérateur :

Un aérogénérateur, plus couramment appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Selon leur puissance nominale, les éoliennes sont divisées en trois catégories [4] :

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

La figure (II.2) illustre la correspondance taille, puissance des éoliennes.

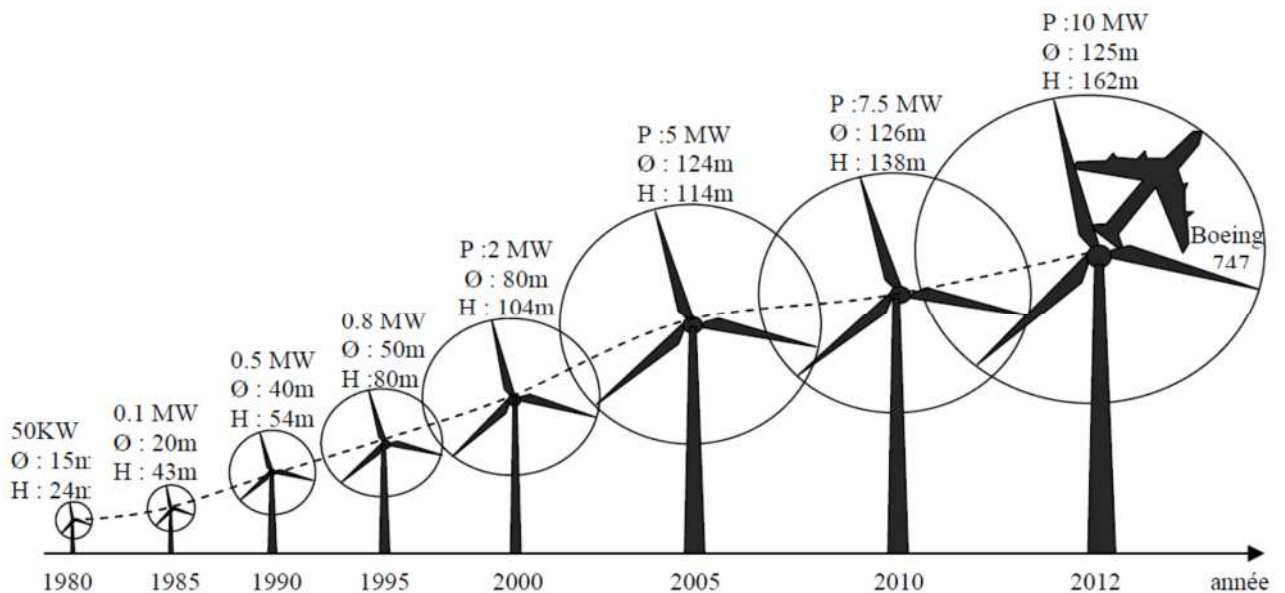


Figure II.2 : Correspondance taille et puissance des éoliennes [5]

II.3.3 Principe de l'énergie éolienne :

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

- ✓ Au niveau de la turbine, qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour

la convertir en énergie mécanique.

- ✓ Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

Le fonctionnement général est illustré par la Figure (II.3). L'ensemble de la chaîne de Conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques ou d'automatique [6], [7].

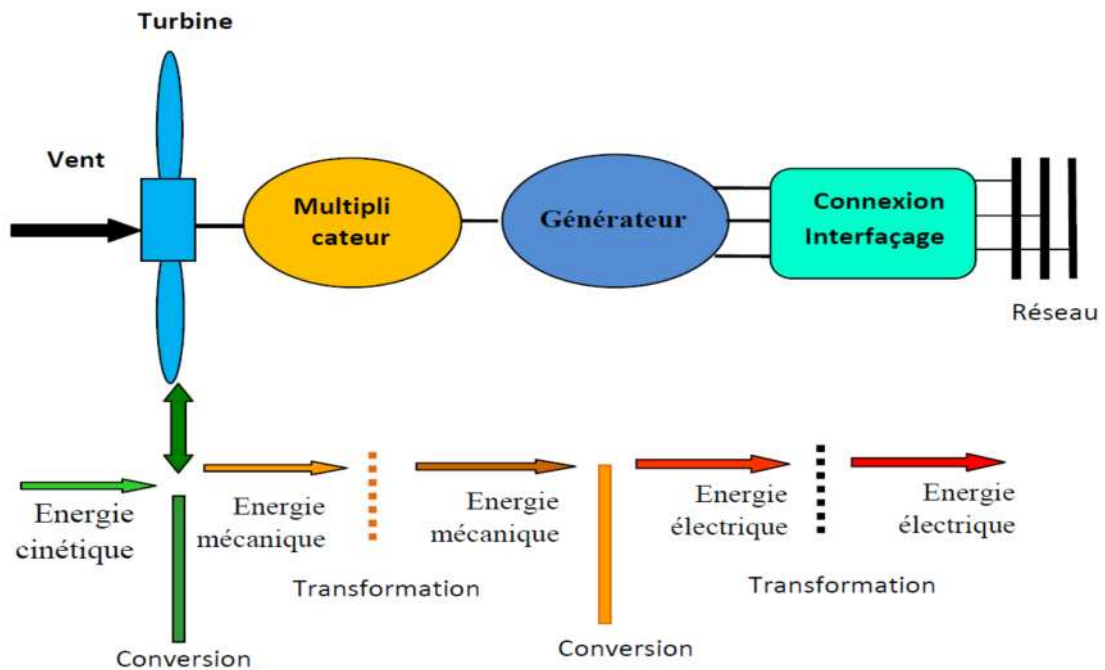


Figure II.3 : Principe de la conversion d'énergie

II.3.4 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

La croissance de l'utilisation de l'énergie éolienne est fortement liée aux avantages de cette énergie. Afin de palier toute frein à son développement nous devrions étudier les éventuels inconvénients.

II.3.4.1 Avantages :

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement [8], [9] :

- ✓ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement à l'énergie fossile, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- ✓ L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie de risque comme l' énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs.
- ✓ Les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plus part des centrales thermiques et des centrales nucléaires.
- ✓ Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.

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

II.3.4.2 Inconvénients :

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolienne à quelques désavantages:

- ✓ L'impact visuel, ça reste néanmoins un thème subjectif et L'impact sur les oiseaux
- ✓ Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.
- ✓ Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources de l'énergie classique : bien qu'en terme de coût, l'éolien puisse sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés.

II.3.5 Différents types des turbines éoliennes :

Les éoliennes peuvent être classées selon deux catégories : celles à axe vertical et celles à axe horizontal :

II.3.5.1 Les éoliennes à axe vertical :

Cette technologie d'éoliennes est bien adaptée aux zones de vents perturbés par des habitations et le relief de la végétation. Elles peuvent aisément s'intégrer à l'architecture des bâtiments et sont d'une conception très simple (roue montée sur un axe qui entraîne directement une génératrice). Le principe aérodynamique permet de bons rendements pour des vitesses de vent faible, une autorégulation en vitesse pour les vents forts et un niveau sonore très faible voir inaudible. Par contre, elles ne conviennent pas pour la conversion de grandes puissances. Suite aux recommandations récentes en matière de production de l'énergie électrique par des sources renouvelables, ces structures connaissent un fort regain d'intérêt depuis une dizaine d'années pour des applications, à petite et moyenne puissances, en milieu urbain [10], [11].

Il existe principalement technologies VAWT (Vertical Axis Wind Turbine) : les turbines Darrieus classiques, à pales droites (H-type) et la turbine de type Savonius. Dans tous les cas, les voilures sont à deux ou plusieurs pales [12].

Outre le caractère vertical de leur axe de rotation, ces aérogénérateurs peuvent être classés selon leur principe de fonctionnement aérodynamique. Ainsi, contrairement aux éoliennes à axe horizontal qui utilisent uniquement la force de portance, les éoliennes à axe vertical de type Savonius utilisent la force de trainée et celles de type Darrieus reposent sur l'effet de portance subi par un profil soumis à l'action d'un vent relatif ; cet effet est similaire aux forces qui s'exercent sur l'aile d'un avion.

➤ **Eolienne à axe vertical de type Darrieus :**

Encore méconnues, les éoliennes à axe vertical de type Darrieus sont plus adaptées à des secteurs nécessitant l'intégration aux bâtiments, les zones extrêmes (observatoires ...) ...etc. Ayant souvent un rendement moins important que les éoliennes "classiques", ce type d'aérogénérateurs permet en revanche de s'affranchir des limites introduites par la taille des pales et leur vitesse de rotation. L'encombrement total est plus faible, et dans la plupart des cas, le générateur est situé à la base de l'éolienne, ce qui est intéressant pour l'installation et la maintenance. Le principe est celui d'un rotor d'axe vertical qui tourne au centre d'un stator à ailettes. Cette solution réduit considérablement le bruit tout en autorisant le fonctionnement avec des vents supérieurs à 220 km/h et ce, quelle que soit leur direction. Le principal défaut de ce type d'éoliennes est leur démarrage difficile dû aux frottements générés par le poids du rotor qui pèse sur son socle [13].



Figure II.4 : Turbine éolienne type Darrieus

➤ **Eolienne à axe vertical de type Savonius :**

L'éolienne de modèle Savonius utilise la traînée différentielle entre les aubes constituées de parties cylindriques en opposition. Un couple se crée mettant alors le générateur en mouvement. La vitesse de démarrage de ces machines est plutôt basse, autour de 2 m/s. Les éoliennes à axe vertical s'adaptent particulièrement bien aux effets de la turbulence et leur conception induit de bruit. Elles conviennent donc tout à fait bien au milieu urbain. En revanche, ce concept est fortement pénalisé par son coefficient de puissance ($C_{P \text{ max}} \sim 0.2$) [10].



Figure II.5 : Turbine éolienne type Savonius [14]

II.3.5.2 Les éoliennes à axe horizontal :

Les turbines à axe horizontal sont de loin les plus utilisées. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent des voilures à deux, trois ou plusieurs pales [12]. Toutefois, les structures les plus courantes sont à trois pales. Une éolienne à axe horizontal est constituée donc d'une hélice perpendiculaire au vent montée sur un mat dont les pales sont profilées aérodynamiquement à la manière d'une aile d'avion. Par conséquent, ce type de turbines doit toujours être orienté face au vent [15]. Par comparaison à la turbine à axe vertical, pour la même vitesse de vent, les éoliennes à axe horizontal sont capables de produire plus d'énergie grâce à un meilleur coefficient de puissance. Par ailleurs, elles ont un coût moindre et une efficacité accrue due à leur position à plusieurs dizaines de mètres du sol [16].



Figure II.6 : éolienne à axe horizontal [17]

II.3.6 Architecture d'une éolienne à axe horizontal :

❖ 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 :

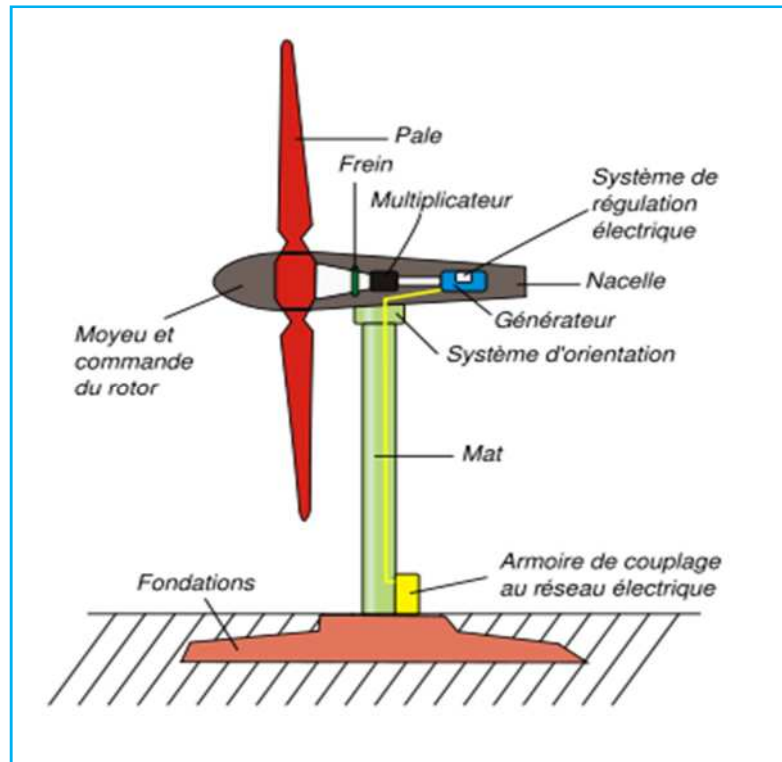


Figure II.7 : Principaux composants d'une éolienne.

Le mat, 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 mat des éoliennes atteint aujourd'hui 80m de haut pour les plus puissantes (exceptionnellement jusqu'à 100 m).les éoliennes sont-elles si haut perchées c'est parce que le vent souffle plus fort à quelques dizaines de mètres de hauteur, où il n'est pas perturbé par l'effet des obstacles : relief, arbre, maisons...Et la puissance fournie par une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent [18]

La tour doit être suffisamment solide pour supporter non seulement la nacelle et le rotor, mais aussi les charges puissantes provoquées par le vent : d'une part la puissance exercée par le vent directement sur la tour, d'autre part la puissance transmise par le rotor. [19]

Un rotor, composé de plusieurs pales (en général 3) et du nez de l'éolienne. Les pales sont aujourd'hui faites de matériaux composites à la fois légers et assurant une rigidité et une résistance suffisantes : polyester renforcé de fibre de verre et/ou fibre de carbone. Leur longueur atteinte 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 rotor [20]

Un rotor balaye un disque circulaire au cours d'une rotation et peut donc récolter l'énergie des molécules d'air traversant ce disque .la surface A d'un disque circulaire est égale à :

$$A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (\text{II.1})$$

Ou r est le rayon du disque circulaire, d est le diamètre

Le rotor est relié à la nacelle par le moyeu, Elle transforme l'énergie cinétique du vent énergie mécanique [20]

Une nacelle montée au sommet du mat et abritant les composants mécaniques et pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine [20]. Le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électrique descendant à l'intérieur du mat de l'éolienne Les différents composants d'une nacelle [21]

- **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.
- **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.
- **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 5m/s), gérer la pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble « rotor plus nacelle » face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle.

Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir.

- **Divers dispositifs de refroidissement** (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau ou d'huile.

Grace à un système de supervision et contrôle d'une éolienne peut être arrêtée automatiquement et très rapidement en cas de nécessité. La sécurité du fonctionnement des éoliennes est ainsi assurées continu.

Dans le cas des éoliennes produisant de l'électricité, un poste de livraison situé à proximité du parc éolien permet de relier ce parc au réseau électrique pour y injecter l'intégralité de l'énergie produite.

II.4 Énergie cinétique du vent–conversion en énergie mécanique :

- **Loi de Betz :**

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure (II.9) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à

travers le rotor V_2 soit $\frac{V_1+V_2}{2}$, la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est:

$$m = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{II.2})$$

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

$$P_{\text{aer}} = \frac{m \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{II.3})$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (II.3):

$$P_{\text{aer}} = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (\text{II.4})$$

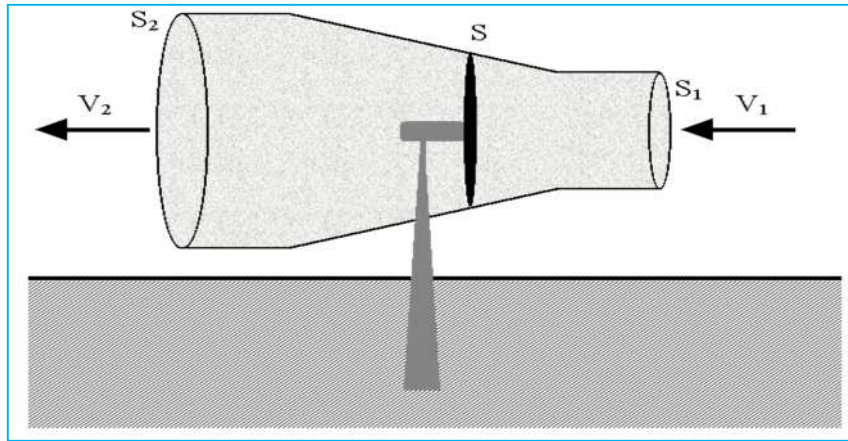


Figure II.9 : Tube de courant autour d'une éolienne

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_{aer} correspondante serait alors :

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot V_1^3}{2} \quad (\text{II.5})$$

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

$$\frac{P_{\text{aer}}}{P_v} = \frac{1}{2} \left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \right) = C_p \quad (\text{II.6})$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus Figure (II.10), on s'aperçoit que le ratio P_{aer}/P_v appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maximal de $16/27$ soit $0,59$. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance

maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

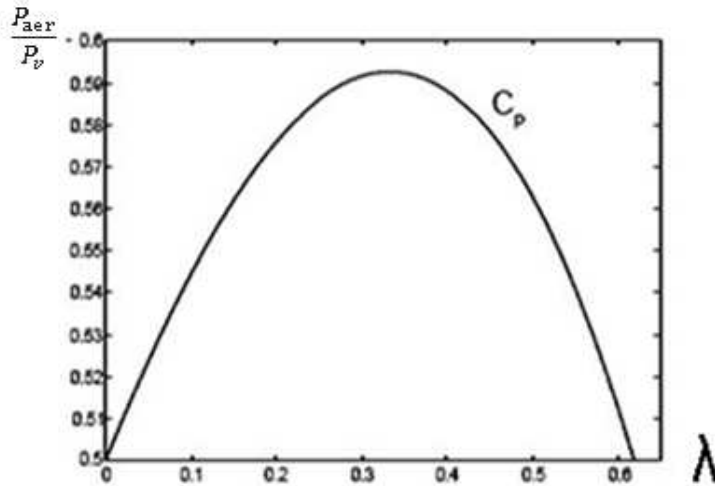


Figure II.10: Coefficient de puissance

II.5 Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne :

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée comprend trois pales et de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement, tournant à une vitesse Ω_{turbine} , relié à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique (Figure II.11) [22].

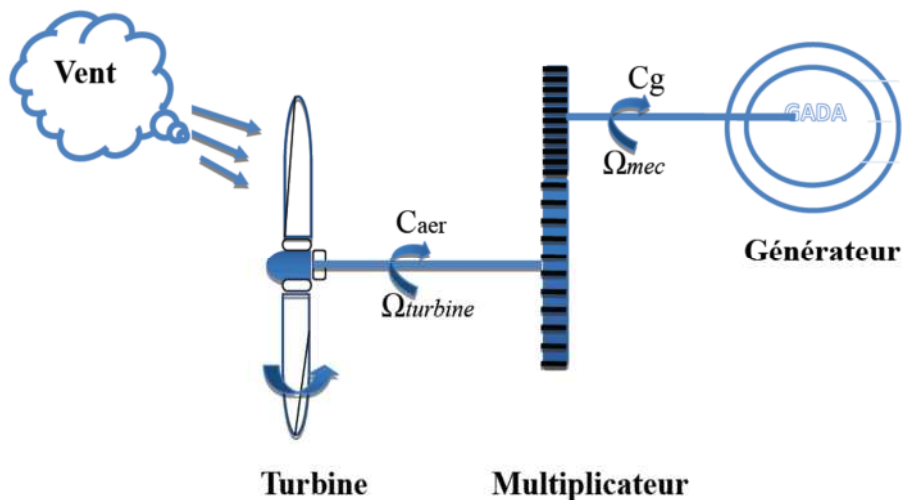


Figure II.11 : Schéma de la turbine éolienne [22].

II.5.1 Modélisation de la turbine :

La modélisation de la turbine consiste à exprimer la puissance extractible en fonction de la vitesse du vent et des conditions de fonctionnement, cela permettra de connaître le couple éolien appliquée sur l'arbre lent de l'éolienne. Cette modélisation s'appuie sur des recoupements bibliographiques ou des informations extraites de brochures des différents constructeurs.

La vitesse du vent ou puissance éolienne est définie de la manière suivante [22]:

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad \text{II.7}$$

Où

P_v est la puissance totale théoriquement disponible.

ρ est la densité de l'air (1.22 kg/m³ à la pression atmosphérique à 15°C).

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

V est la vitesse du vent.

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

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

Le coefficient de puissance C_p , représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne ($\frac{P_{aer}}{P_v}$). Il dépend de la caractéristique de la turbine [22].

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

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

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{V} \quad \text{II.9}$$

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

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

$$P_{ear} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad \text{II.10}$$

II.5.2 Coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$:

La turbine éolienne peut seulement convertir juste un certain pourcentage de la puissance capturée du vent. On présente ce pourcentage par $C_p(\lambda, \beta)$ qui est en fonction de ratio de vitesse λ et l'angle d'orientation de pale β [23].

Nous avons donc choisi de modéliser une éolienne de 1.5 MW pour notre simulation. C'est un modèle tripale dont la longueur d'une pale est de 3 m. L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne. Et dépend de la vitesse spécifique λ (fonction de la vitesse du vent) et de l'angle d'orientation des pales β . A titre d'exemple, l'expression du coefficient de puissance d'une turbine éolienne de 1.5 MW est approximé par l'équation [24]:

$$C_p(\beta, \lambda) = (0.5 - 0.0167 * (\beta - 2)) * \sin\left[\frac{\pi * (\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3 * (\beta - 2)}\right] - 0.00184 * (\lambda - 3) * (\beta - 2) \quad \text{II.11}$$

Ainsi comme il est illustré dans la figure (II.12), il est possible de constater que le coefficient de puissance évolue en forme de cloche, le maximum de celle-ci ($C_p = 0.5$) est atteint pour une $\lambda = 9$, et de l'angle d'orientation des pales $\beta = 2$. Avec cette valeur la turbine fonctionne avec le rendement maximum théorique. Dans la suite de notre travail une commande adaptée sera élaborée pour atteindre ce point de fonctionnement [24].

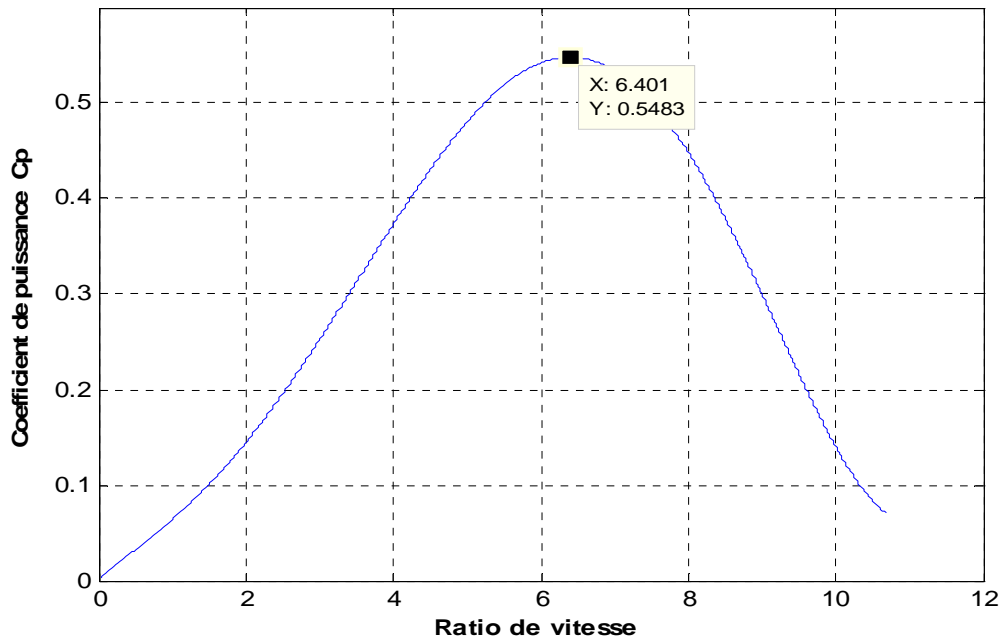


Figure II.12 : Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative de la turbine [24].

Et on observe que la valeur maximale de la courbe ne dépassera jamais la limite théorique de Betz (0,59).

II.5.3 Modèle du multiplicateur de vitesse :

Le multiplicateur de vitesse est la liaison entre la turbine et le générateur. Il a pour but d'adapter la vitesse de la turbine $\Omega_{turbine}$, assez lente à celle que nécessite la génératrice Ω_g [25].



Figure II.13 : Modèle mécanique du multiplicateur [25].

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes [22]:

$$C_g = \frac{C_{ear}}{G} \quad \text{II.12}$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad \text{II.13}$$

II.5.4 Equation dynamique de l'arbre [22] :

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

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad \text{II.14}$$

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 total (C_{mec}) appliqué au rotor :

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

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_{vis} , et le couple issu du multiplicateur C_g .

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f :

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \tag{II.16}$$

En prenant en compte l'inertie et les frottements de paliers la voilure peut être présentée comme dans la figure (II.14)

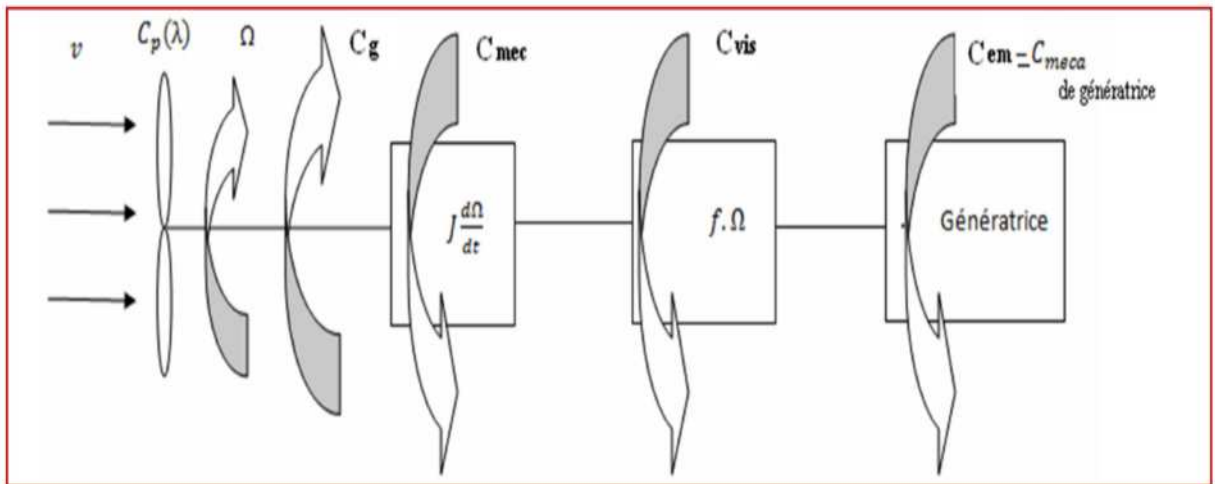


Figure II.14 : Modèle d'une turbine éolienne [26].

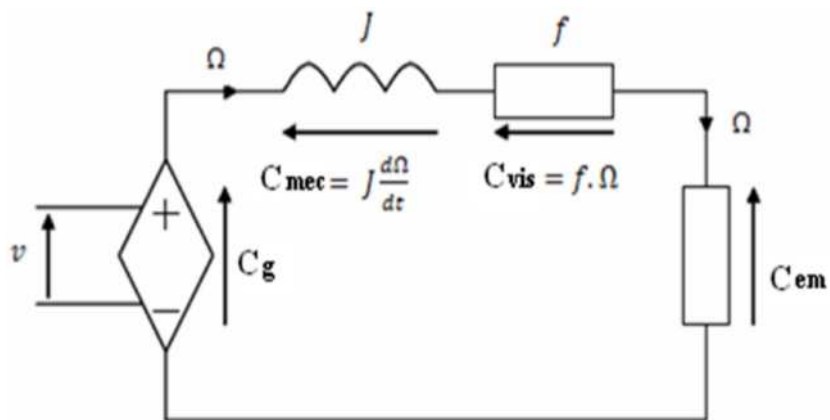


Figure II.15 : Schéma électrique équivalent de la turbine d'une éolienne [26].

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

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad \text{II.17}$$

$$C_g - C_{em} = J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f \cdot \Omega_{mec} \quad \text{II.18}$$

D'où en Transfer de la PLACE on peut obtenir la vitesse :

$$\Omega_{mec} = \frac{1}{J_s + f} (C_g - C_{em}) \quad \text{II.19}$$

II.5.5 Stratégie de commande de la turbine:

Comme il est illustré sur la figure.(II.16), on distingue quatre (04) zones principales de fonctionnement.

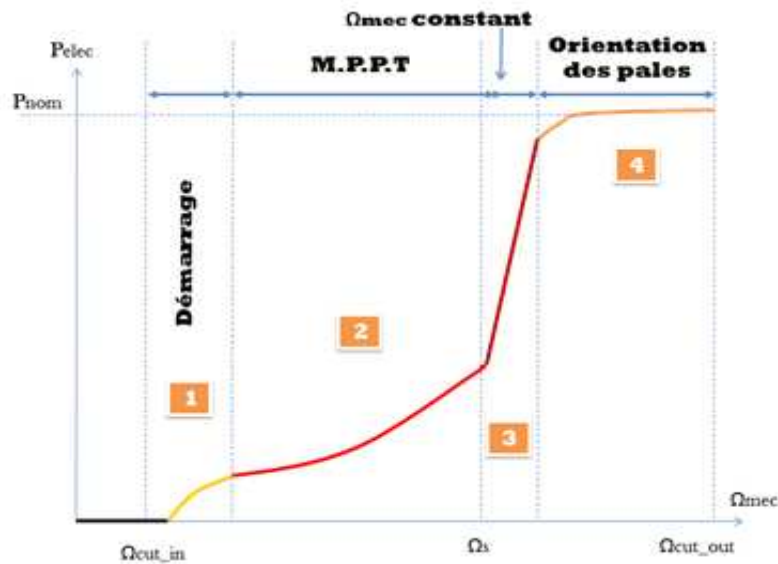


Figure II.16: Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne [22].

-Zone1 : A partir d'une certaine vitesse minimale nécessaire à l'entraînement de l'aérogénérateur l'éolienne commence à tourner ;

-Zone2 : A partir d'une certaine vitesse seuil de la génératrice (correspondant à un glissement de 30%), un algorithme de commande permettant l'extraction du maximum de puissance du vent (MPPT) est appliqué. On maintient l'angle de calage à sa valeur minimale qui correspond au maximum du coefficient de puissance ;

-Zone3 : Au-delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone la puissance atteint jusqu'à 90% de sa valeur nominale ;

-**Zone4** : arrivée à la puissance nominale, la vitesse doit être limitée, c'est la phase où intervient la limitation de vitesse par orientation des pales (angle de calage), c'est le «Pitch Control» [27].

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

II.5.6 Maximisation de la puissance extraite:

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

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



Figure II.17 Stratégies de commande de la turbine

Il est difficile de mesurer précisément la vitesse du vent qui est de nature une grandeur très fluctuante. Une mesure erronée de la vitesse conduit donc à une dégradation de la puissance captée selon la technique MPPT. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse [28].

➤ Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse

Cette structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas on obtient :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad \text{II.20}$$

Si on néglige l'effet du couple des frottements visqueux, on obtient :

$$C_{em} = C_g \quad \text{II.21}$$

A partir de la mesure de la vitesse mécanique et la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent, on obtient:

$$C_{aer} = C_p \frac{1}{2} \rho S \frac{1}{\Omega_{turbine_estimée}} v^3_{estimée} \quad \text{II.22}$$

Avec:

$$v_{estimée} = \frac{\Omega_{turbine_estimée} \cdot R}{\lambda} \quad \text{II.23}$$

On fixe le ratio de vitesse à la valeur $\lambda_{Cp\ max}$, qui correspond au maximum du coefficient de puissance $C_{p\ max}$ et, en regroupant les équations précédentes, on aura l'expression du couple de référence qui est proportionnel au carré de la vitesse de la génératrice.

$$C_{em_ref} = \frac{\rho \pi R^5}{2G^3} \frac{C_p}{\lambda^3 C_{p\ max}} \Omega^2_{mec} \quad \text{II.24}$$

La figure (II.18) représente le schéma bloc et le modèle de maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.

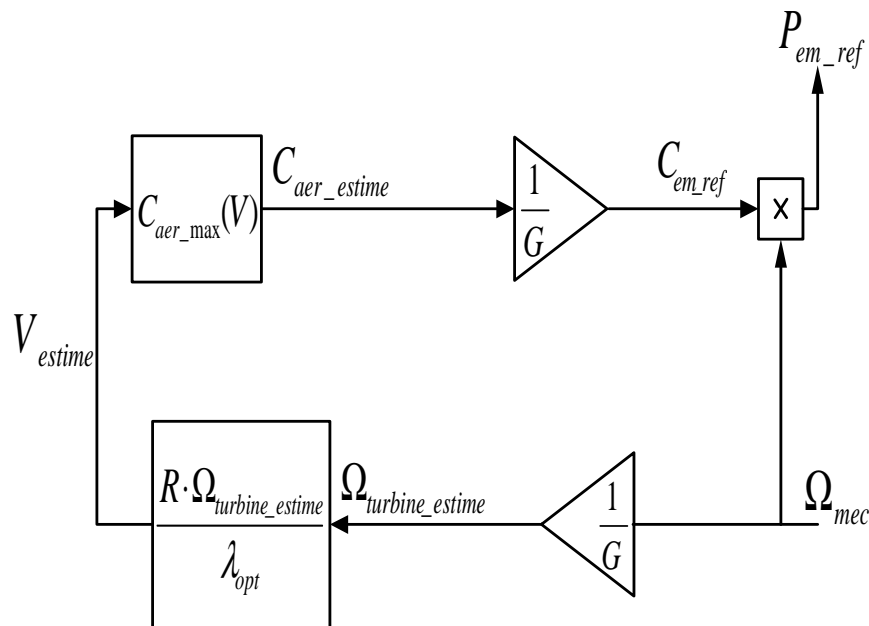


Figure II.18 Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse

II.6 Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne :

La vitesse de rotation des pales de l'aérogénérateur ne doit pas dépasser une vitesse maximale car cela pourrait endommager le dispositif de conversion. Différentes méthodes de régulation de la vitesse existent, parmi lesquelles certaines sont basées sur le principe de l'orientation des pales, d'autres sont plus simples et utilisent le principe de décrochage aérodynamique afin de réguler la vitesse.

II.6.1 Système à décrochage aérodynamique "stall" :

La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessitent une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau. Le système de limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux est un système de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence i devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale V_n , l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale Figure (II.19) et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation.

Ce système est simple et relativement fiable mais il manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales donc de leur état de propreté. Il peut, dans certains cas, être amélioré en autorisant une légère rotation de la pale sur elle-même (système "stall actif") permettant ainsi de maximiser l'énergie captée pour les faibles vitesses de vent. Pour les fortes vitesses de vent, la pale est inclinée de façon à diminuer l'angle de calage β et renforcer ainsi l'effet "stall" de la pale. La répercussion des variations de vitesse de vent sur le couple mécanique fournie par l'éolienne est ainsi moins importante [29].

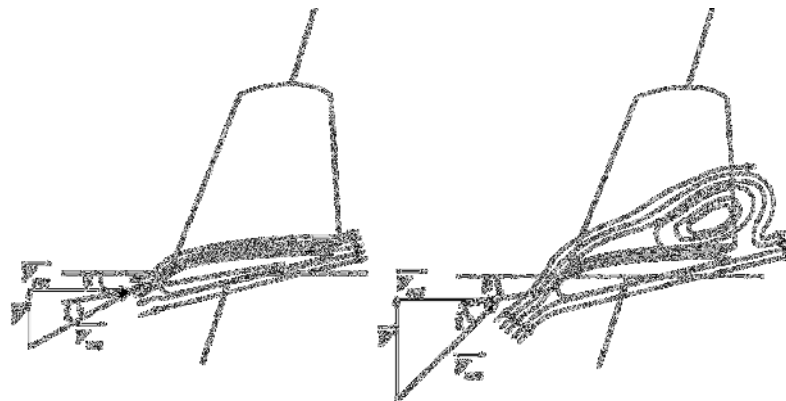


Figure II.19 : Flux d'air sur un profil de pale " stall "

II.6.2 Système d'orientation des pales "pitch" :

Le système de réglage aérodynamique se base sur le principe de l'augmentation de l'angle de calage Figure (II.20) ce qui diminue la valeur du facteur de puissance d'où une diminution du rendement de la turbine, ceci empêche l'augmentation de la vitesse de rotation de l'aérogénérateur.

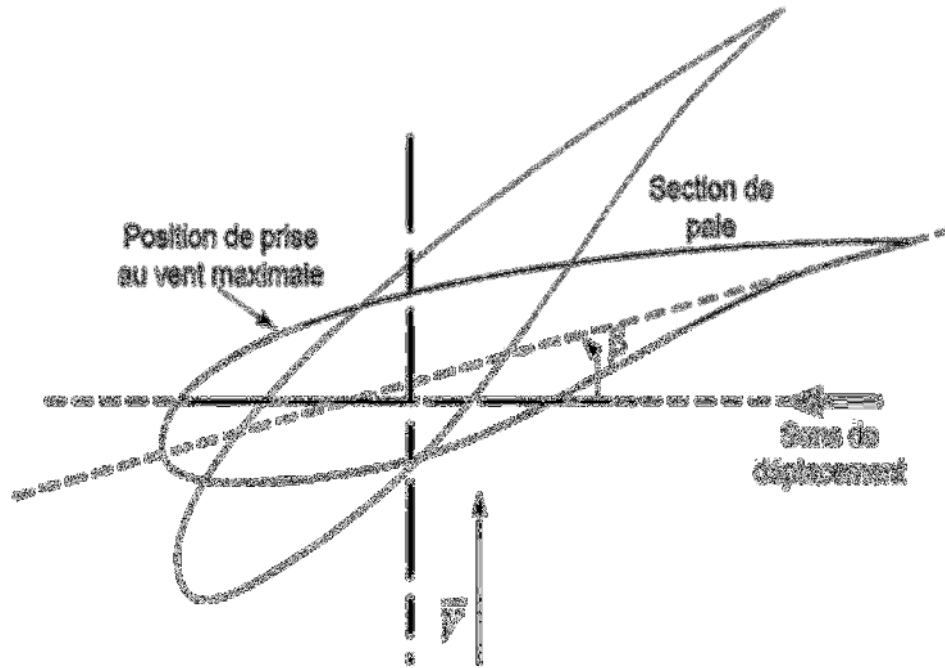


Figure II.20 : Variation de l'angle de calage d'une pale

II.7 Résultats de Simulation et interprétations :

Nous présenterons la Simulation du fonctionnement de la partie mécanique de l'éolienne. Les Simulations sont faites dans l'environnement MATLAB/SIMULINK. Cet environnement nous permet de développer les schémas blocs de régulation et de les associer aux modèles de machine.

Nous n'allons pas raccorder l'hélice et le multiplicateur à une génératrice mais simplement observer le couple produit à la sortie du multiplicateur en fonction de l'évolution du vent. Pour ce faire, Nous avons besoin de la valeur du couple électromagnétique de multiplicateur, couple qui serait imposée par la génératrice en fonction de la puissance qu'elle produit.

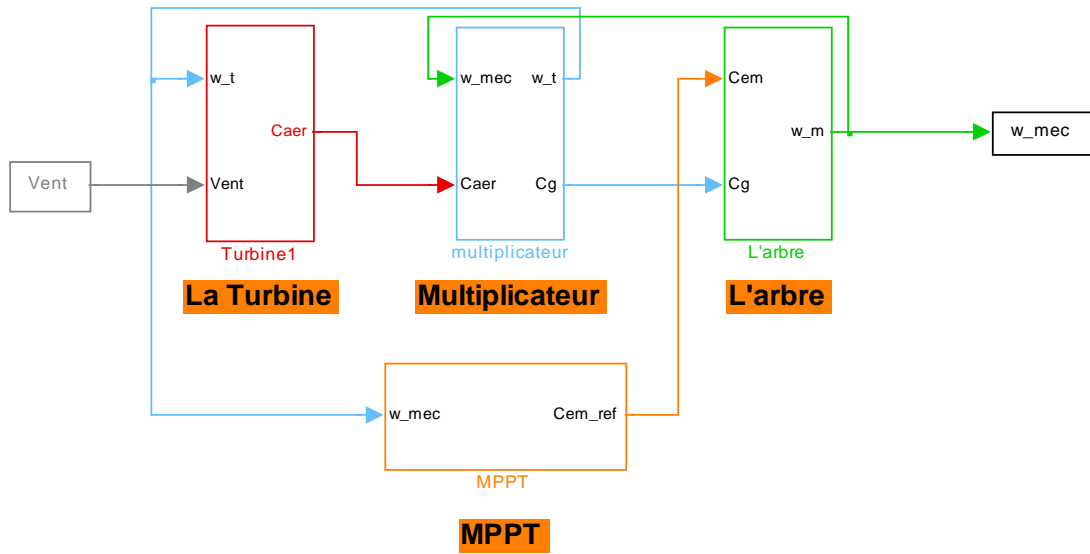


Figure II.21 : Modèle de la turbine avec la Commande en MATLAB/SIMULINK

Nous allons donc nous fixer une couple référence et utiliser le profil de vent de la figure. (II.2) pour valider le modèle établi précédemment. Nous observerons l'allure de la Vitesse mécanique et de la puissance de référence en fonction de l'évolution du vent.

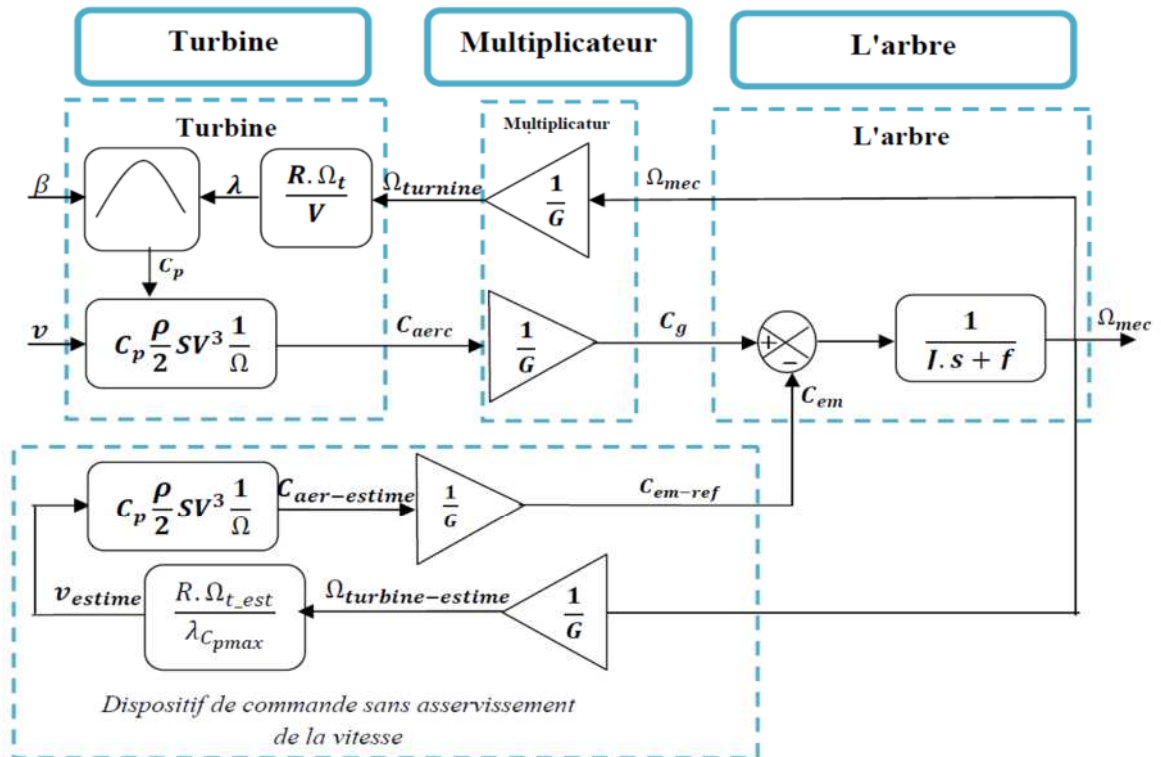


Figure II.22 : Schéma synoptique du modèle dynamique de la turbine éolienne

A. Profil du vent :

La figure (II.23) présente le profil du vent qui sera appliqué pour la turbine éolienne.

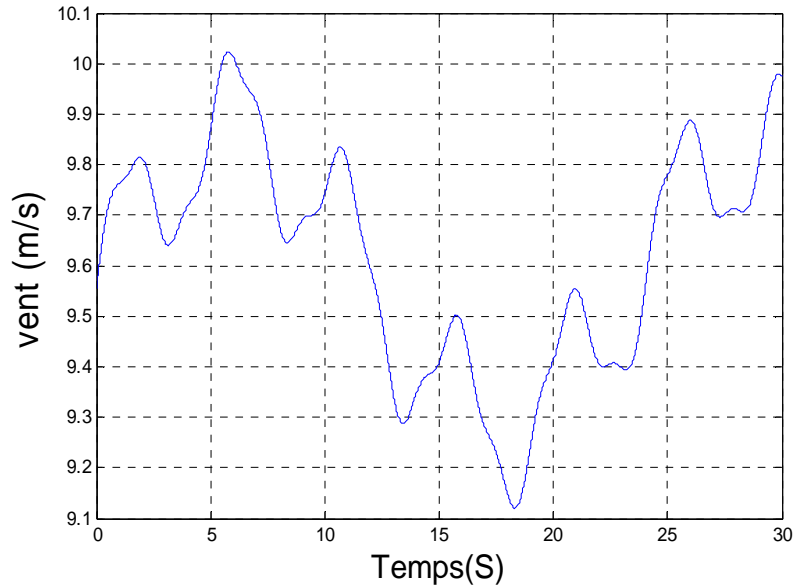


Figure II.23 : Profil du vent

B. Le coefficient de puissance :

La figure (II.24) montre le coefficient de puissance obtenu par le profil du vent présenté sur la figure (II.23).

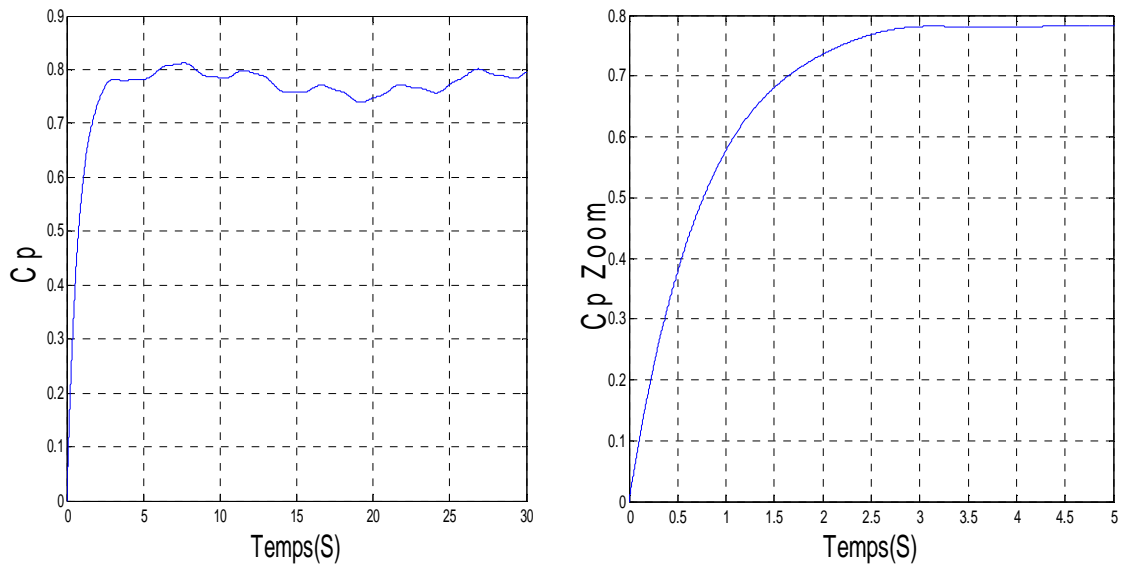


Figure II.24 : Coefficient de puissance avec un zoom

Ce coefficient de puissance est obtenu pour un angle de calage β fixe ($\beta=2^\circ$), qui nous donne un $\lambda_{optimale}$.

On remarque que le C_p atteint une valeur moyenne de 0,78 il cherche à être gardé au maximum possible pour but de maximiser la production, et varie légèrement selon la variation de la vitesse du vent.

C. La puissance électrique et la Vitesse mécanique :

En négligeant les pertes d'origine électrique, la puissance électrique devient égale à la puissance électromagnétique définie par : $(\Omega_{mec} \cdot C_{em})$. Cette puissance -puissance de référence- sera comptabilisée négativement car elle s'oppose à la puissance aérodynamique "pour respecter la convention récepteur de l'ensemble". Lorsque ces deux puissances sont égales, l'éolienne tourne à vitesse constante.

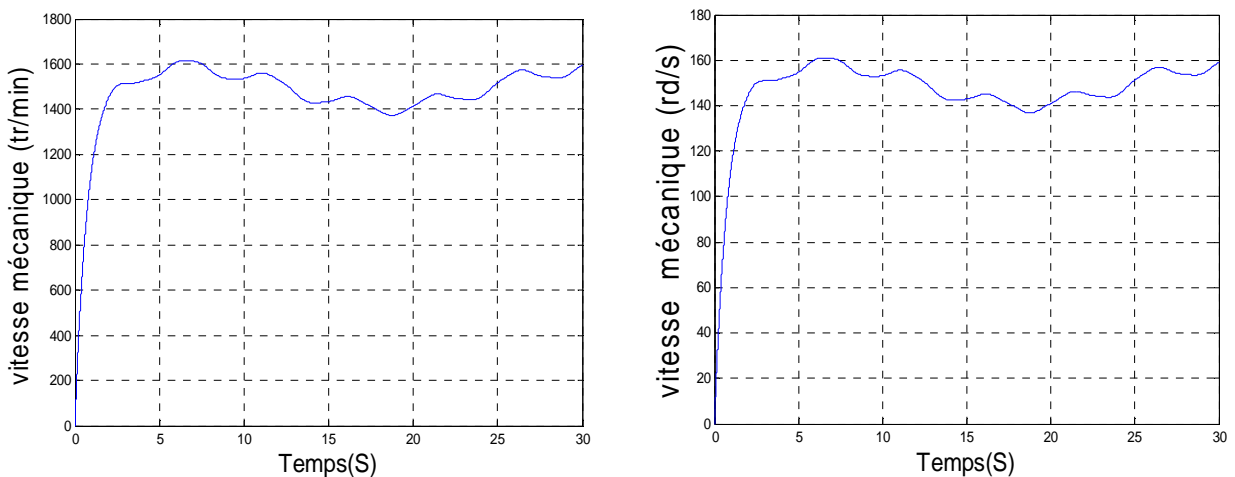


Figure II.25 : Vitesse mécanique

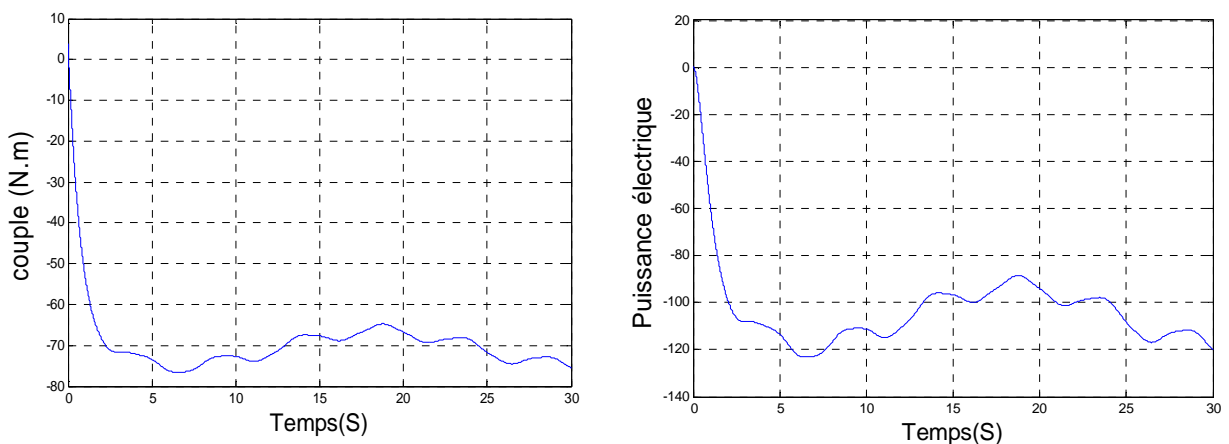


Figure II.26 : Couple et Puissance électrique produite

II.8 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons donné une vue d'ensemble sur les différentes turbines éoliennes utilisées dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique. Afin d'arriver à une meilleure compréhension du fonctionnement des turbines éoliennes, et après un rappel des notions nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique (loi de Betz), nous avons décrit les différents éléments constitutifs de la turbine (type axe horizontale) ainsi que le mode de régulation de la vitesse de rotation.

Dans le chapitre suivant, nous allons examiner la modélisation de la turbine à axe horizontale qui est utilisé dans la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

II.9 Références bibliographiques :

- [1] Global Wind Energy Council, « Global Wind 2008 Report. », disponible sur le site: <http://www.gwec.net.01/2010>.
- [2] A. MIRCKI, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat De L'Institut national polytechnique de Toulouse.04/2005.
- [3] N. K. MERZOUK, « Quel avenir pour l'Energie Eolienne en Algérie ? », Bulletin des Energies Renouvelables N°14, CDER, 12/2008.
- [4] B. MULTON, Equipe SETE, « Energies. Energie électrique : les enjeux». Ecole Normale Supérieure de Cachan.11/2008.
- [5] By B. Wu, Y. Lang, N. Zargari, and S. Kouro «Power conversion and control of wind energy systems ». © 2011 the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Published 2011 by John Wiley & Sons, Inc.
- [6] F. Poitier, « étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne ». Thèse de Doctorat de l'université de NANTE, 2003.
- [7] N. Laverdure, « l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires ». Thèse de doctorat de l'Université Grenoble.
- [8] Thèse R .BAÏLE «Analyse et modélisation multifractales de vitesses de vent. Application à la prévision de la ressource éolienne.» université de Corse le 18 Octobre 2010.
- [9] K.GHEDAMSI, Contribution à la modélisation et la commande d'un convertisseur direct de fréquence. Application à la conduite de la machine asynchrone, Thèse de Doctorat, ENP Alger (Algérie), 2008.
- [10] A. Abdelli – « Optimisation multicritère d'une chine éolienne passive », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 2007.
- [11] site: www.cap-nrj.fr – « Le principe de fonctionnement de l'éolien », consulté décembre 2009.
- [12] A. Mirecki – « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 2005.

- [13] site: www.Domsweb.org – « L'énergie éolienne », consulté juin 2009.
- [14] site: www.lares-et-penates.fr – « LARES ET PENATES, Energie renouvelable », consulté décembre 2009.
- [15] L. Leclercq – « Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2004.
- [16] F. Poitiers – « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne : Machine asynchrone à cage autonome, Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de doctorat, Université de Nantes, Nantes, France, 2003.
- [17] site: www.diebrennstoffzelle.de – « Wind kraftanlage », consulté décembre 2009.
- [18] F. Kendouli, K. Nabti, K. Abed et 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.
- [19] Rachid AZAIZIA «Etude Et commande d'une Machine Asynchrone a Double Alimentation », Algérie, 2008
- [20] REDJEM Radia « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne » Soutenu le: 04 /07/2009, Magister, République Algérienne,
- [21] S. Elaimani «Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension», Thèse de doctorat à l'école centrale de Lille et l'université des sciences et de la technologie de Lille, 2004.
- [22] : S. AIMANI, "Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension", Thèse de Doctorat, université des sciences et technologies de Lille. 06/12/2004.
- [23] : Y. BEKAKRA, "Contribution à l'Etude et à la Commande Robuste d'un Aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation", Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra. 21/10/2014.
- [24] : F. KENDOULI, "centrale éolienne et qualité de l'énergie électrique", Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine. 2012.

- [25] : F. BOUMARAF, "Commande D'un Aérogénérateur- Apport Des Techniques de L'intelligence Artificielle", thèse de doctorat, université de Batna. 24/06/2014.
- [26] : F.Z. TRIA, "Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une MADA Par différentes techniques", mémoire de magister, Université d'El- oued. 2013.
- [27] Petersson.A and S. Lundberg, "Energy efficiency comparison of electrical systems for wind turbines", in IEEE Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics (NORpie/2002), Stockholm, Sweden, 12-14 Aug. 2002.
- [28] Peresada. S, A. Tilli and A. Tonielli, "Robust output feedback control of a doubly fed induction machine", Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics ISIE'99 (Bled Slovenia), p.1256-1260, 1999.
- [29] S. Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems" , Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998.

Chapitre -III-

Modélisation et simulation de la MADA

III.1 Introduction :

Contrairement aux machines asynchrones à cage ou aux machines synchrones qui sont contraintes à fonctionner à la vitesse du synchronisme ou dans son voisinage, la MADA est une machine dont la vitesse de fonctionnement est située sur une grande plage de variation. Par cette caractéristique intéressante, la MADA connaît un succès grandissant dans le domaine de la conversion électromécanique.

Nous verrons dans ce chapitre la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA). En tenant compte des considérations du certain nombre d'hypothèses simplificatrices et ou on va constate que le modèle de la MADA est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques dans le temps, aussi la transformation de Park qui permet la simplification du modèle. A la fin on expose les résultats de la simulation.

III.2 Présentation de MADA :

III.2.1 Construction d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation :

La machine asynchrone à double alimentation présente un **stator** analogue à celui des machines triphasés classiques (asynchrone à cage ou synchrone), constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées, munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements [1].

L'originalité de cette machine provient du fait que le **rotor** n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne (figure III.1)

Cette machine peut fonctionner comme générateur ou moteur. Le stator de la MADA est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un convertisseur.

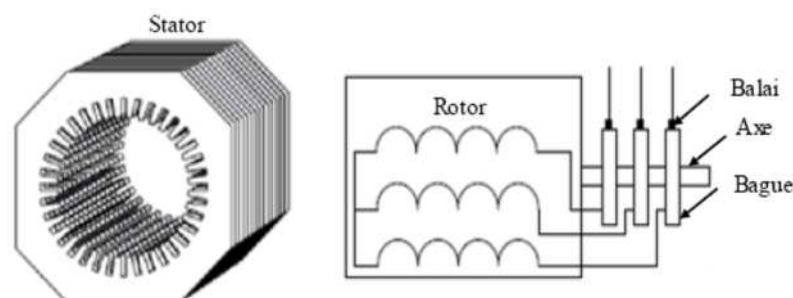


Figure III.1 : Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.

III.2.2 Description des composants de la MADA :

Le circuit statorique est directement connecté au réseau. Le circuit rotorique est quant à lui relié au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance.

La partie convertisseurs de puissance est principalement constituée par :

- Un redresseur : C'est le convertisseur côté rotor qui permet de contrôler le couple électromagnétique T_g et la puissance réactive Q_s échangée entre le stator et le réseau ;
- Un bus continu.
- Un onduleur : C'est le convertisseur côté réseau qui contrôle la tension (bus continu) et la puissance réactive Q_r échangée entre le rotor et le réseau.

Les convertisseurs sont bien évidemment commandés en MLI (PWM). [2]

III.3 La double alimentation :

L'une des solutions associant le convertisseur statique et la machine pour obtenir des vitesses variables est la machine asynchrone double alimentée (machine à induction double alimentée), (de l'anglais, DFIM : Doubly Fed Induction Machine), où le stator est connecté au réseau (50 HZ) et le rotor est alimenté à travers un convertisseur de fréquence. Elle apparaît comme une solution intéressante. Le système est réversible en vitesse et en couple, dans tous les cas, les vitesses hypo-synchrones et hyper-synchrones sont possibles et le système peut être utilisé dans le fonctionnement moteur et générateur. Ces caractéristiques favorisent l'utilisation de cette machine dans les processus industriels spéciaux demandant une haute performance dynamique. Elle a été déjà utilisée dans applications générales de haute puissance comme les laminoirs d'acier ou de fer, aussi bien que dans les applications de production d'énergie électrique où elle a donné des résultats satisfaisants [3].

La double alimentation concerne les machines à courant alternatif ayant des enroulements statoriques et rotoriques biphasés ou triphasés. On utilise généralement le moteur asynchrone à rotor bobiné [4].

Dans les moteurs à double alimentation est appliquée (recueillie) au niveau des enroulements du stator et du rotor. Les enroulements statorique sont directement alimentés par le réseau, alors que ceux du rotor sont alimentés à travers un régulateur de fréquence [4].

III.4 Avantages et inconvénients de la MADA :

Il est clair que la machine asynchrone à double alimentation réunit les avantages de la machine synchrone et de la machine asynchrone en plus les avantages envisagés grâce à sa double alimentation. D'autre part, comme toutes les autres machines électriques, la MADA a des inconvénients qu'on va les citer ci-dessous.

III.4.1 Avantages de la MADA : [5]

- L'accès au rotor offre la possibilité de contrôler les grandeurs électriques du rotor (courant et tension), ce qui donne une grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique ;
- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse de synchronisme
- La configuration dont les deux convertisseurs alimentant la machine permettent de fonctionner en régime dégradé (l'un des deux onduleurs tombe en panne) ;
- En fonctionnement moteur, la solution avec deux convertisseurs alimentant la machine nous permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge ;
- La double alimentation permet de réduire les dimensions des convertisseurs statiques, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement ;
- Transfert bidirectionnel de la puissance rotorique ;
- Le fonctionnement en hypo ou hyper synchronisme offre une large plage de variation de la vitesse ;

III.4.2 Inconvénients de la MADA :

- Machine plus volumineuse que celle de la machine asynchrone classique, généralement elle est plus longue à cause des balais ;
- Utilisation d'un nombre de convertisseurs statiques plus que celle de la machine classique ;
- Le coût total de la machine est plus important par rapport aux autres machines électriques.

III.5 Application des machines asynchrones à double alimentation :

La machine asynchrone doublement alimentée est utilisée dans diverses applications soit en mode moteur ou en mode générateur. Nous citerons, dans ce qui suit, les applications plus envisagées dans l'industrie.

III.5.1 Application moteur :

La MADA représente une nouvelle solution dans le domaine des entraînements de forte puissance, notamment ceux exigeant un large domaine de fonctionnement étendu à puissance constante et une grande plage de variation de la vitesse [6] comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime.

III.5.2 Application génératrice :

Grâce à sa capacité de fonctionner dans une large gamme de vitesses, la MADA est devenue la solution adaptée pour l'énergie éolienne. L'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet d'avoir des tensions statoriques à fréquence et amplitude fixes quelque soit la vitesse de rotation de son arbre. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée

- ✓ Génération des réseaux de bord des navires ou des avions [7] ;
- ✓ Centrales hydrauliques à débit et vitesse variable ;
- ✓ Eoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable ;
- ✓ Groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

III.6 Modes de fonctionnement de la MADA :

La MADA est parfaitement commandable si toutefois le flux des puissances est bien contrôlé dans les enroulements du rotor. Puisque la MADA peut fonctionner en moteur comme générateur aux vitesses hypo-synchrones et hyper-synchrones, il y a à distinguer quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine. Dans cette dernière, P_s , P_r et P_{mec} , P_{res} désignent respectivement les puissances du stator, du rotor, mécanique et récepteur [8]. en négligeant les pertes, on peut généraliser le transfert des puissances comme suit :

$$P_r = g \cdot P_s$$

$$P_{res} = P_{mec} = P_s - P_r = 1 - P_s$$

Moteur ($P_{\text{mec}} > 0$)	Générateur ($P_{\text{mec}} < 0$)
<p>hypo-synchrone $g > 0$</p> <p>$P_s > 0$</p> <p>$P_r > 0$</p> <p>$P_s > P_{\text{res}}$</p>	<p>hypo-synchrone $g > 0$</p> <p>$P_s < 0$</p> <p>$P_r < 0$</p> <p>$P_s > P_{\text{res}}$</p>
<p>hyper-synchrone $g < 0$</p> <p>$P_s > 0$</p> <p>$P_r < 0$</p> <p>$P_s < P_{\text{res}}$</p>	<p>hyper-synchrone $g < 0$</p> <p>$P_s < 0$</p> <p>$P_r > 0$</p> <p>$P_s < P_{\text{res}}$</p>

Tableau. III.1 Quadrants de fonctionnement de la MADA

Lorsque la machine fonctionne en **moteur** :

❖ En mode **hypo-synchrone** :

Lorsque la machine tourne en dessous de la vitesse de synchronisme, "la puissance de glissement" la puissance électrique du stator (P_s) est transformée en partie en puissance mécanique (P_{mec}) et le reste peut être réinjectée au réseau à travers le rotor (P_r). La Machine asynchrone à cage peut fonctionner dans les mêmes conditions, sauf que cette puissance est dissipée dans le rotor sous formes de pertes joules [9].

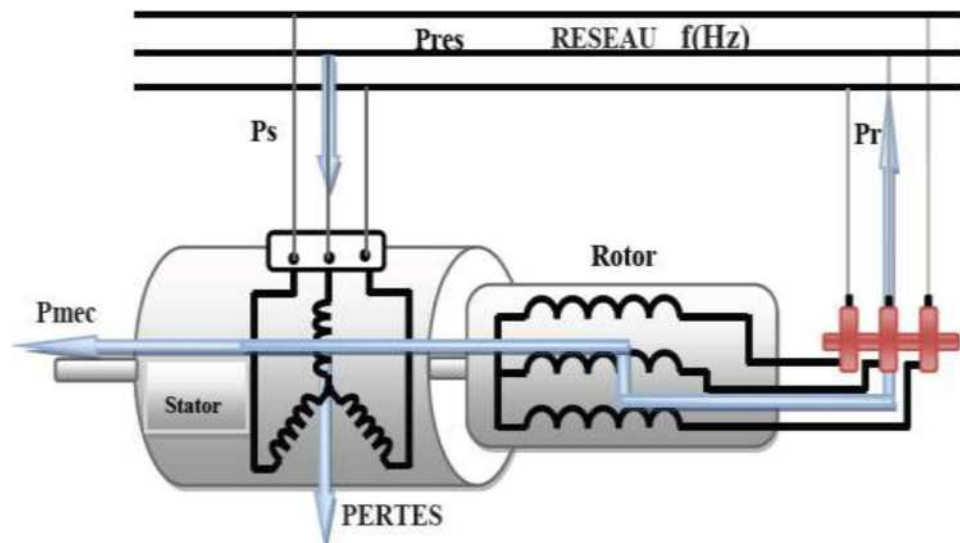


Figure III.2 : Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.

❖ En mode **hyper-synchrone** :

Le fonctionnement en mode hyper-synchrone du moteur est réalisé lorsque la vitesse de la machine peut varier au-delà de la vitesse de synchronisme. Elle peut recevoir de la puissance électrique du côté stator et du rotor. La machine asynchrone à cage ne peut pas fonctionner dans ce mode [9].

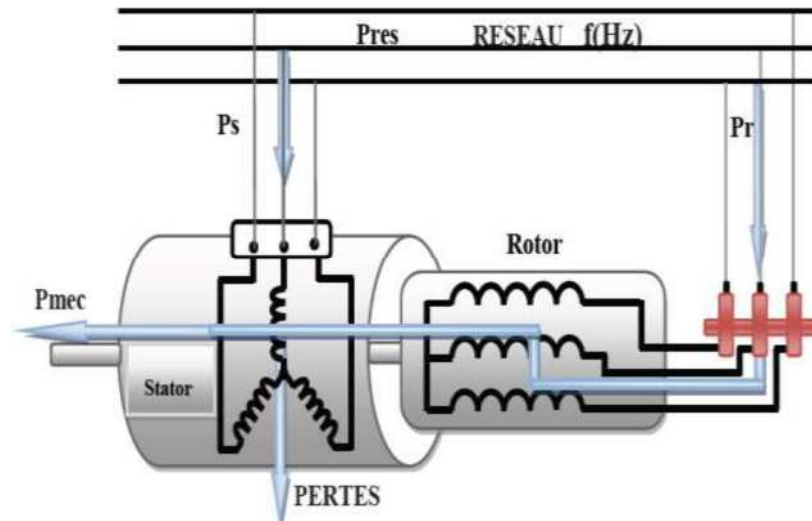


Figure III.3 : Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.

Lorsque la machine fonctionne en **génératrice** :

❖ En mode **hypo-synchrone** :

La puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. Le rotor absorbe la puissance du glissement et la direction du champ magnétique est identique à celle du champ du stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut fonctionner dans ce régime.

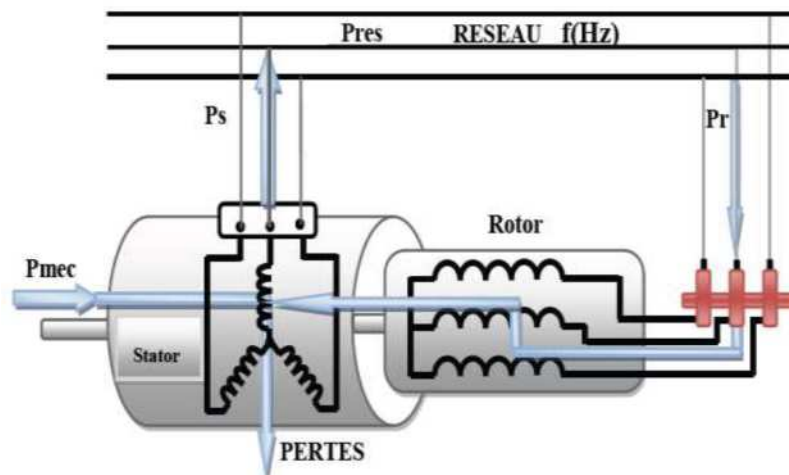


Figure III.4 : Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone.

❖ En mode **hyper-synchrone** :

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 à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement, mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor, [10-11].

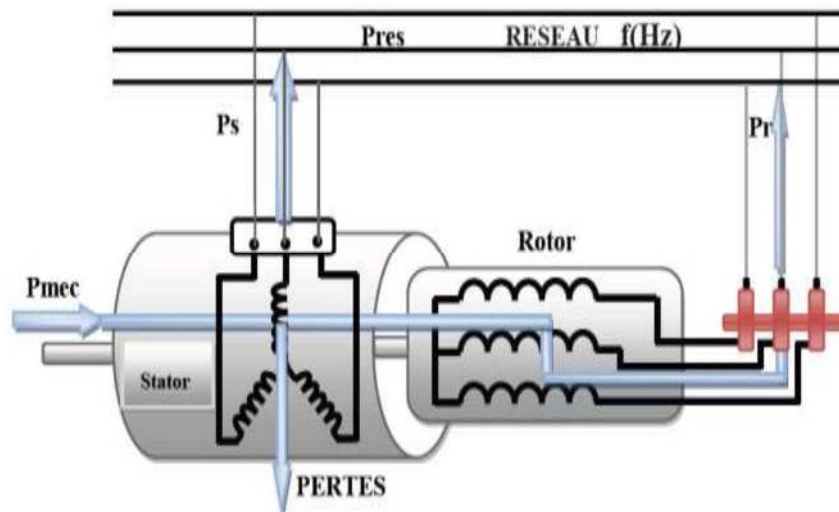


Figure III.5 : Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone.

III.7 Principe de fonctionnement de la MADA :

La MADA présente un stator triphasé identique à celui d'une machine asynchrone classique dite à cage d'écureuil et un rotor constitué d'un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants (balais). Sa robustesse est légèrement diminuée par rapport à une machine asynchrone classique à cause de ce système bague/balais. Une fois le stator de la machine connecté au réseau électrique, un flux magnétique apparaît au stator. Ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique, du nombre de paires de pôles dans le bobinage et du courant statorique. Lors de la rotation, le flux magnétique généré par le stator crée des forces électromagnétiques (f.e.m) dans les enroulements rotoriques. Le rapport entre les (f e.m) créée au rotor et au stator est défini par [12]:

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r \omega_s - P\Omega}{N_s \omega_s} = r \frac{\omega_s - \omega_e}{\omega_s} \quad \text{III.1}$$

Avec:

N_r et N_s respectivement le nombre de spires des bobinages rotorique et statorique.

P :le nombre de pair de pôle.

r : le rapport de transformation rotor/stator équivalent au rapport des nombres de spires rotorique et statorique.

ω_s et ω_e : respectivement les pulsations statorique et électrique de la MADA. En définissant le glissement par:

$$g = \frac{\omega_s - \omega_e}{\omega_s} \quad \text{III.2}$$

L'équation (III.1) devient alors :

$$\frac{E_r}{E_s} = g \cdot r \quad \text{III.3}$$

Les courants au stator et au rotor sont alors liés comme dans un transformateur parfait:

$$\frac{I_r}{I_s} = \frac{1}{r} \quad \text{III.4}$$

Donc, le rapport entre les puissances apparentes rotorique S_r et statorique S_s s'exprime par :

$$\frac{S_r}{S_s} = \frac{E_r}{E_s} \frac{I_r}{I_s} = g \quad \text{III.5}$$

La pulsation au stator (imposée par le réseau) étant supposée constante, il est donc possible de contrôler la vitesse en agissant sur la puissance apparente rotorique via le glissement g .

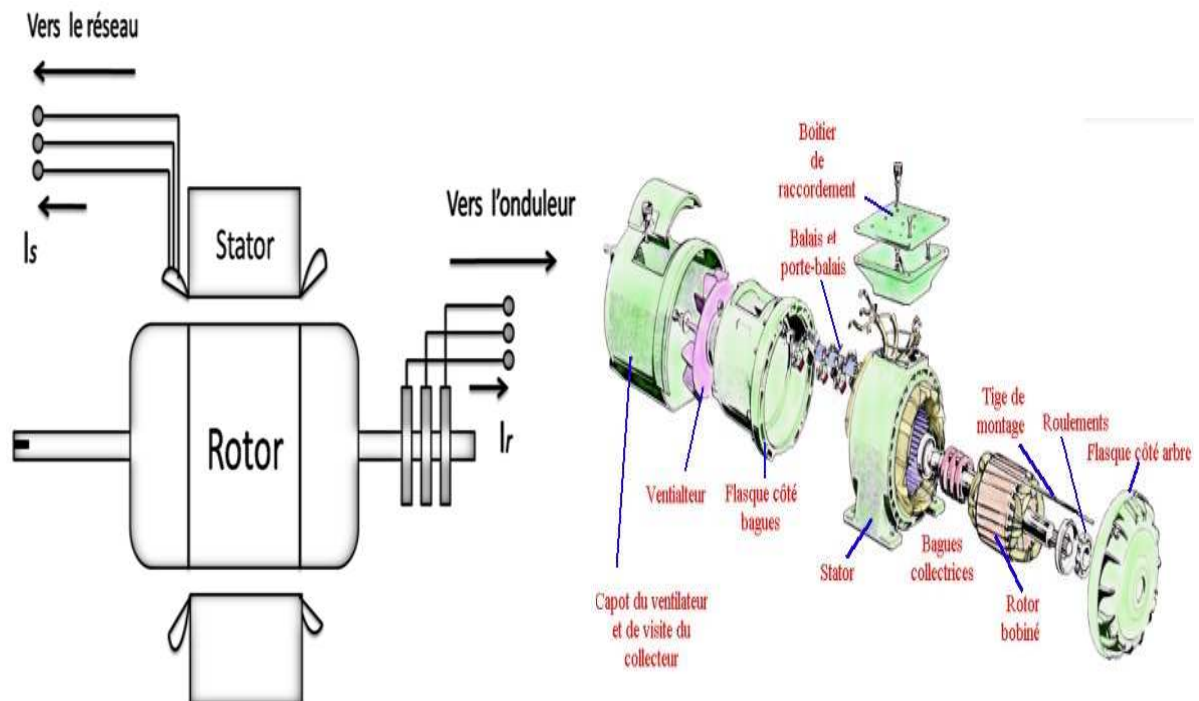


Figure III.6 : Machine à induction à rotor bobiné

III.8 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation :

La modélisation d'une machine asynchrone était basée sur l'élaboration de schémas équivalents dérivés de la théorie du champ tournant. La simplicité de conception et d'entretien de cette machine à la faveur des industries, s'accompagne toutefois d'une grande complexité physique, liée aux interactions électromagnétiques entre le stator et le rotor. Les méthodes matricielles sont développées et sont devenues les bases pour une approche de modélisation, de simulation, d'identification et de commande. Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la modélisation et à la simulation de la machine asynchrone à double alimentation.

III.8.1 Hypothèses simplificatrices :

La machine asynchrone à double alimentation (MADA), avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte. De ce fait, la mise en équations nous impose certaines hypothèses simplificatrices, dans le but d'établir un modèle simple, qui sont : [13]

- La machine est de constitution symétrique.
- On suppose que le circuit magnétique est parfaitement feuilleté au stator et au rotor (seuls les enroulements sont parcourus par des courants) et que la densité de courant peut être considérée comme uniforme dans la section des conducteurs élémentaire (absence d'effet pelliculaire)
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.
- On suppose que le circuit magnétique n'est pas saturé, condition nécessaire pour considérer les flux comme fonction linéaire des courants.
- On considère que la force magnétique créée par chacune des phases statorique et rotorique est à répartition sinusoïdale.
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encochage est négligé, les inductances propres sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes rotorique et statorique.

III.8.2 Modèle naturel triphasé de la MADA :

Comme toutes les autres machines, la machine asynchrone double alimentée (MADA) est une machine réversible qui peut fonctionner en mode génératrice (GADA). En cas ou en inverse, son couple est injectant un couple moteur au lieu d'un couple résistant au niveau de son arbre, elle garde toujours son propre modèle. En prenant en compte les hypothèses simplificatrices citées précédemment, on peut exprimer le modèle de cette machine sur les relations suivantes:

$$\text{Grandeurs statorique : } \begin{cases} [V_s] = [v_{as} \ v_{bs} \ v_{cs}]^T \\ [I_s] = [I_{as} \ I_{bs} \ I_{cs}]^T \\ [\varphi_s] = [\varphi_{as} \ \varphi_{bs} \ \varphi_{cs}]^T \end{cases} \quad \text{III.6}$$

$$\text{Grandeurs rotoriques : } \begin{cases} [V_r] = [v_{ar} \ v_{br} \ v_{cr}]^T \\ [I_r] = [I_{ar} \ I_{br} \ I_{cr}]^T \\ [\varphi_r] = [\varphi_{ar} \ \varphi_{br} \ \varphi_{cr}]^T \end{cases} \quad \text{III.7}$$

Voici alors les équations des tensions statoriques et rotoriques :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad \text{III.8}$$

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \quad \text{III.9}$$

Les flux statoriques et rotoriques en fonction des courants, des inductances propres et des inductances mutuelles, sont exprimés par les équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} \quad \text{III.10}$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \quad \text{III.11}$$

Où :

R_s , R_r : sont respectivement la résistances statorique et rotorique ;

L_s , L_r : inductances propres statorique et rotorique ;

M_{sr} : inductances mutuelles entre le stator et le rotor ;

M_s : inductances mutuelles entre les phases statoriques

M_r : inductances mutuelles entre les phases rotoriques ;

Avec :

$$[M_{sr}] = M_0 \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad \text{III.12}$$

M_0 : Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et la phase correspondante du rotor.

III.8.3 Passage de triphasé au biphasé (Transformation de Park) :

La transformation de Park est un outil mathématique qui a permis la simplification des équations des machines électriques triphasées. Elle permet de passer d'un système triphasé alternatif à un système biphasé (repère d, q, o) continu, donc elle permet d'obtenir un système d'équation à coefficients constants ce qui simplifie sa résolution [14]. Cette transformation peut être appliquée sur le courant, tension et flux. La transformée de Park appelée souvent transformation des deux axes, fait correspondre aux variables réels leurs composantes :

- Direct selon l'axe (d) .
- Quadrature (transversal) selon l'axe (q).
- Homopolaire(o).

Les grandeurs statoriques et rotoriques seront alors exprimées dans un même repère (axe direct **d** et axe en quadrature **q**) [15].

La transformation de Park définie par la matrice de rotation $[(\theta)]$ est donnée sous la forme suivante :

$$[x_{dq0}] = [P(\theta)][x_{abc}] \quad \text{III.13}$$

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

$$[P(\theta)]^{-1} = [P(\theta)]^T \quad \text{III.14}$$

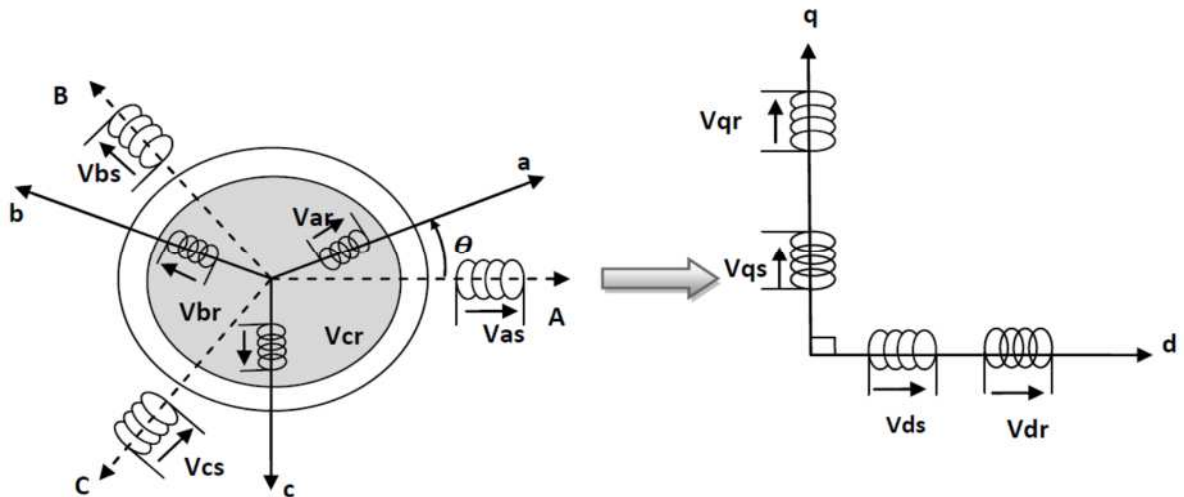


Figure III.7 : Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA.

III.8.4 Choix du référentiel [16] :

En général, l'étude du comportement dynamique des machines électriques peut se faire suivant la transformation de Park pour différents référentiels. Le choix du référentiel s'effectue suivant le phénomène à étudier et les simplifications offertes par ce choix. Trois types de référentiels sont intéressants en pratique :

III.8.4.1 Référentiel lié au stator :

Ce référentiel est appelé aussi système d'axes (α, β) . Dans ce cas, $(\omega_{coord} = 0)$. Ce système est utilisé pour étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines électriques.

III.8.4.2 Référentiel lié au rotor :

Dans ce cas, le système d'axes (d, q) est immobile par rapport au rotor et tourne avec la vitesse $(\omega_{coord} = \omega = p\Omega)$. Ce système d'axes est utilisé pour étudier les processus transitoires dans les machines synchrones et asynchrones avec une connexion non symétrique des circuits du rotor.

III.8.4.3 Référentiel lié au champ tournant :

Ce référentiel est appelé aussi système d'axes (X, Y) , il tourne avec la vitesse du champ électromagnétique, c'est-à-dire $(\omega_{coord} = \omega_s)$. Dans notre travail, on utilise le référentiel lié au champs tournant $(\omega_{coord} = \omega_s)$ pour la modélisation et commande de la MADA .

III.8.5 Application de la transformation de Park à la MADA :

Les grandeurs statorique et rotorique sont transformées comme suit :

On choisit comme référence le repère de Park liée au champ tournant dont

$$\omega_{coord} = \omega_s$$

- **Tensions:**

$$\begin{cases} [V_{dq0}]_s = [P(\theta_s)][V_s] \\ [V_{dq0}]_r = [P(\theta_s - \theta)][V_r] \end{cases} ; \begin{cases} [V_s] = [P(\theta_s)]^{-1}[V_{dq0}]_s \\ [V_r] = [P(\theta_s - \theta)]^{-1}[V_{dq0}]_r \end{cases}$$

- **Courants :**

$$\begin{cases} [i_{dq0}]_s = [P(\theta_s)][I_s] \\ [i_{dq0}]_r = [P(\theta_s - \theta)][I_r] \end{cases} ; \begin{cases} [I_s] = [P(\theta_s)]^{-1}[i_{dq0}]_s \\ [I_r] = [P(\theta_s - \theta)]^{-1}[i_{dq0}]_r \end{cases}$$

- **Flux:**

$$\begin{cases} [\varphi_{dq0}]_s = [P(\theta_s)][\varphi_s] \\ [\varphi_{dq0}]_r = [P(\theta_s - \theta)][\varphi_r] \end{cases} ; \begin{cases} [\varphi_s] = [P(\theta_s)]^{-1}[\varphi_{dq0}]_s \\ [\varphi_r] = [P(\theta_s - \theta)]^{-1}[\varphi_{dq0}]_r \end{cases}$$

❖ Equations électriques

En multipliant les systèmes des équations (III.8) et (III.9) par la matrice de Park, on obtient :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{dr} \end{cases} \quad \text{III.15}$$

Avec :

ω_{coord} : pulsation du référentiel d'axe (d, q).

ω : pulsation mécanique du rotor.

Sous forme vectorielle cela donne

$$\begin{cases} \bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + \frac{d\varphi_s}{dt} + J\omega_s \bar{\varphi}_s \\ \bar{V}_r = R_r \bar{I}_r + \frac{d\varphi_r}{dt} + J(\omega_s - \omega) \bar{\varphi}_r \end{cases} \quad \text{III.16}$$

Avec :

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad J: \text{appelée matrice de rotation}$$

❖ Equation du flux " Magnétique "

On applique la transformation de Park sur les équations des flux statorique et rotorique on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad \text{III.17}$$

❖ Equation mécanique

L'équation mécanique de la machine est décrite sous la forme :

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + F\Omega \quad \text{III.18}$$

Où

C_{em} : Le couple électromagnétique.

C_r : Le couple résistant.

J : Moment d'inertie des parties tournantes.

Ω : Vitesse de rotation du rotor de la MADA.

F : Coefficient de frottement visqueux de la MADA.

P : Nombre de paires de pôles.

❖ Equations électriques sous forme matricielle

Les deux systèmes des équations (III.15) et (III.17) s'écrivent :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{ds} + L_s \frac{dI_{ds}}{dt} + M \frac{dI_{dr}}{dt} - \omega_s L_s I_{qs} - \omega_s M I_{qr} \\ V_{sq} = R_s I_{qs} + L_s \frac{dI_{qs}}{dt} + M \frac{dI_{qr}}{dt} + \omega_s L_s I_{ds} + \omega_s M I_{dr} \\ V_{rd} = R_r I_{dr} + L_r \frac{dI_{dr}}{dt} + M \frac{dI_{ds}}{dt} - \omega_s L_r I_{qr} - \omega_s M I_{qs} + \omega L_r I_{qr} + \omega M I_{qs} \\ V_{rq} = R_r I_{qr} + L_r \frac{dI_{qr}}{dt} + M \frac{dI_{qs}}{dt} + \omega_s L_r I_{dr} + \omega_s M I_{ds} - \omega L_r I_{dr} - \omega M I_{ds} \end{cases} \quad \text{III.19}$$

Ce système d'équation (III.19) se traduit sous la forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \\ + \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -L_s & 0 & -M \\ L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -M & 0 & -L_r \\ M & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \quad \text{III.20}$$

$$\longrightarrow [V] = [A][I] + [B] \frac{d}{dt} [I] + \omega_s [C][I] + \omega [D][I] \quad \text{III.21}$$

Et la matrice, ce qui représente les équations magnétiques

$$[\varphi] = [B][I] \quad \text{III.22}$$

$$\text{Dont : } [V] = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} ; [I] = \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} ; [\varphi] = \begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix}$$

$$[A] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} ; [B] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} ; [C] = \begin{bmatrix} 0 & -L_s & 0 & -M \\ L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -M & 0 & -L_r \\ M & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix} ;$$

$$[D] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix}$$

III.8.6 Expression du couple électromagnétique

Nous avons exprimé les équations de la machine, mais il reste également le couple électromagnétique. Ce dernier peut être obtenu à l'aide d'un bilan de puissance. La puissance électrique instantanée fournie aux enroulements statoriques et rotoriques en fonction des grandeurs d'axes (dq) est donnée par l'expression suivante :

$$P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs}$$

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

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

Elle se décompose en trois termes :

- 1) Puissance dissipée en pertes joules

$$R_s(I_{ds}^2 + I_{qs}^2)$$

- 2) Puissance représentant les échanges d'énergie électromagnétique avec la source

$$\frac{d\varphi_{ds}}{dt} I_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} I_{qs}$$

- 3) Puissance mécanique

$$\omega_s(\varphi_{ds} I_{qs} - \varphi_{qs} I_{ds})$$

Et d'autre part on a :

$$C_{em} = \frac{P_m}{\Omega_s} \quad ; \quad \Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad ; \quad C_{em} = p \frac{P_m}{\omega_s}$$

$$C_e = p(\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{qs} I_{sd}) \quad \text{III.23}$$

III.8.7 Expression de la puissance active et réactive :

La puissance active et réactive au stator est définie comme:

$$\text{On a: } \begin{cases} V_s = V_{ds} + j V_{qs} \\ V_r = V_{dr} + j V_{qr} \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} P_s = \text{Re} ([V_s][I_s]) \\ Q_s = \text{Im} ([V_s][I_s]) \end{cases}$$

Avec la multiplication et tout les calculs il en résulte:

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad \text{III.24}$$

Le même pour les puissances active et réactive rotorique

$$\begin{cases} P_r = V_{dr} I_{dr} + V_{qr} I_{qr} \\ Q_r = V_{qr} I_{dr} - V_{dr} I_{qr} \end{cases} \quad \text{III.25}$$

III.9 Résultats de la Simulation :

Les théories et les équations citées seront modélisées pour permettre un traitement avec MATLAB/SIMULINK. Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus par le modèle d'une machine de puissance 4 KW.

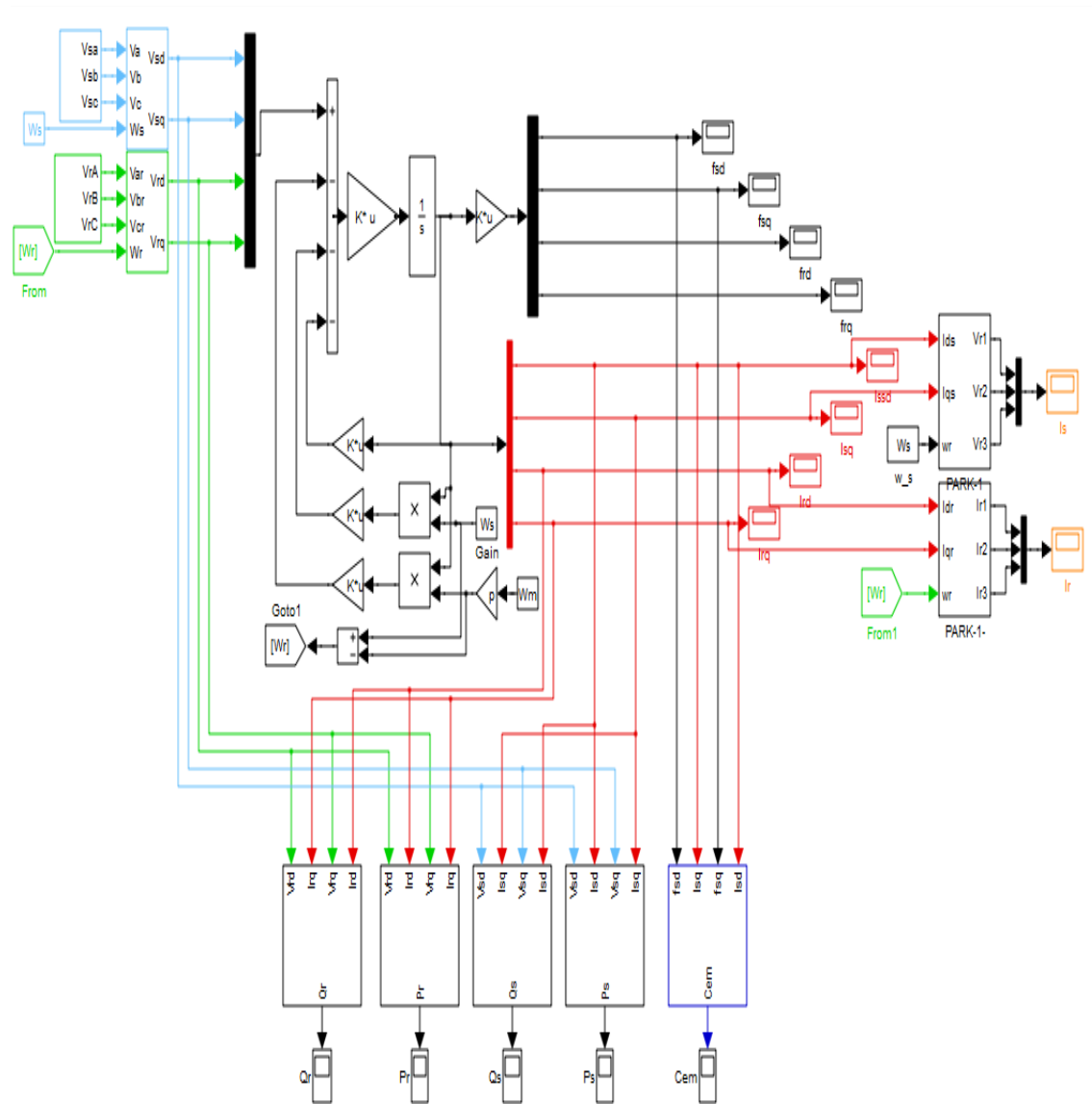


Figure. III.8 Schéma bloqué de la modèle de MADA

Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus pour le modèle d'une machine asynchrone à double alimentation, de puissance 4KW, alimentée directement par deux sources de tension triphasées parfaites, l'une au niveau du stator avec une fréquence du réseau qui est 50Hz et d'amplitude de $220\sqrt{2}$ V, et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de $12\sqrt{2}$ V et une fréquence égale à 2 Hz.

Le rotor de la machine est entraîné à une vitesse fixe proche de la vitesse de synchronisme égale à 1455 tr/min. Les résultats obtenus montrent que:

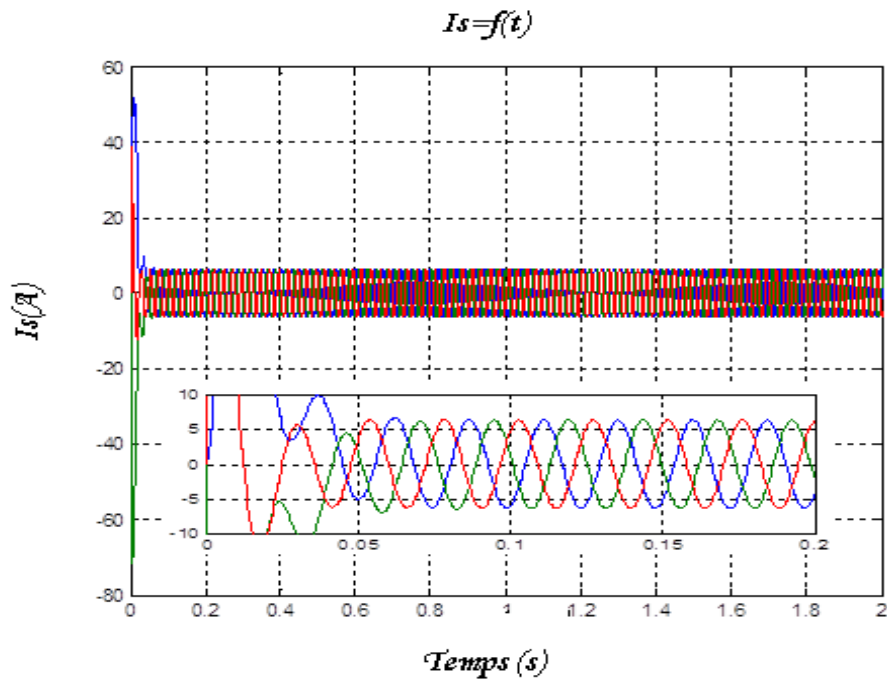


Figure. III.9 Courbe du courant statorique avec zoom

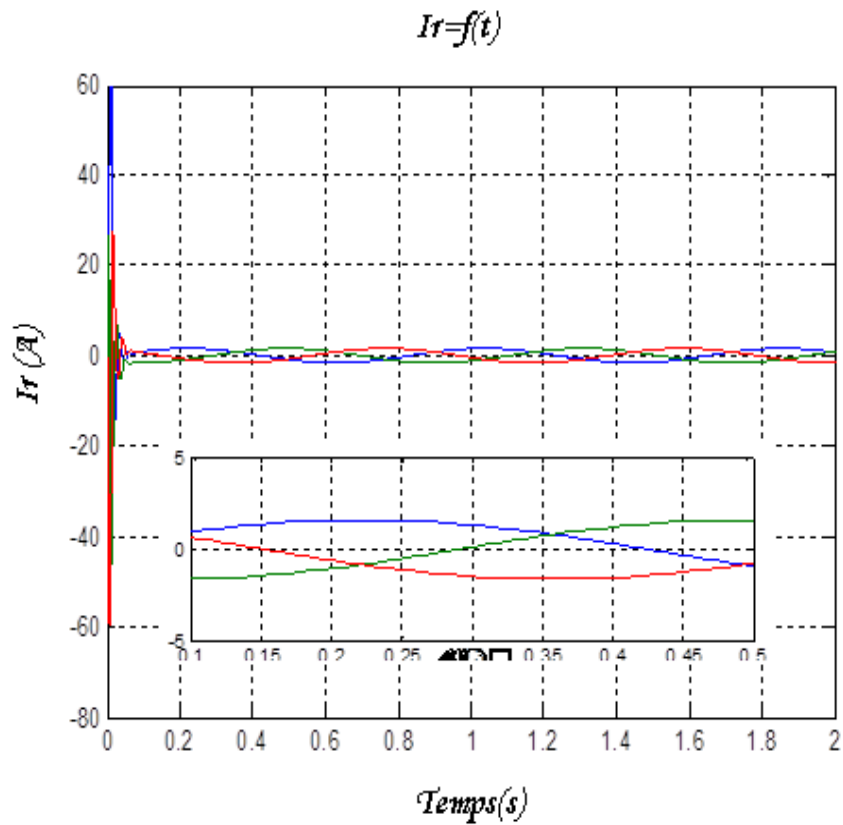


Figure. III.10 Courbe du courant rotorique avec zoom

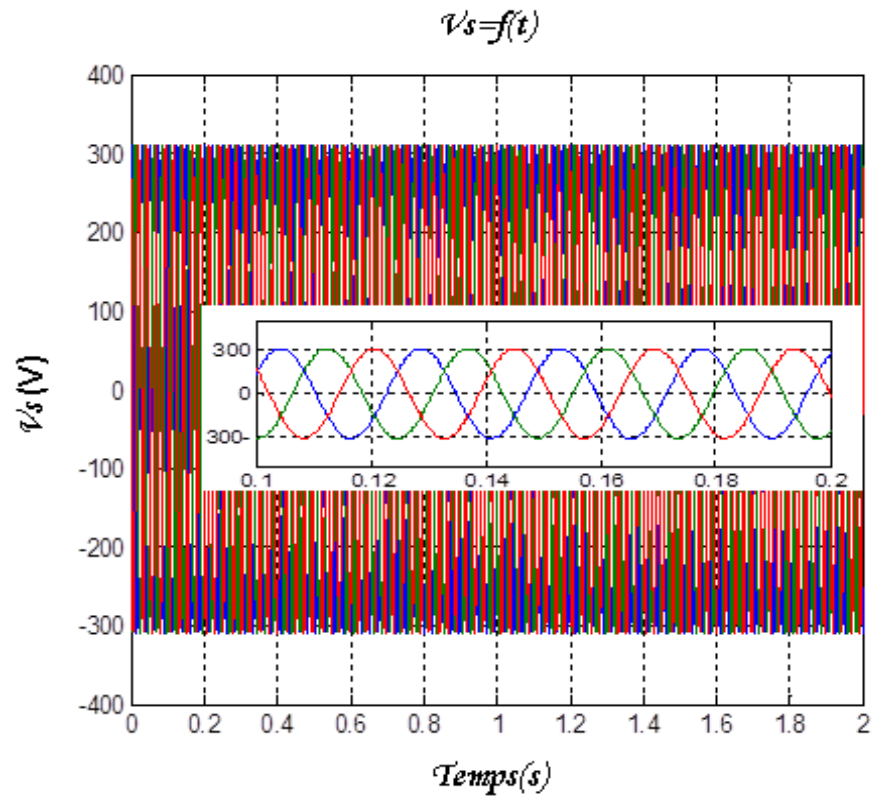


Figure. III.11 Courbe de la tension statorique avec zoom

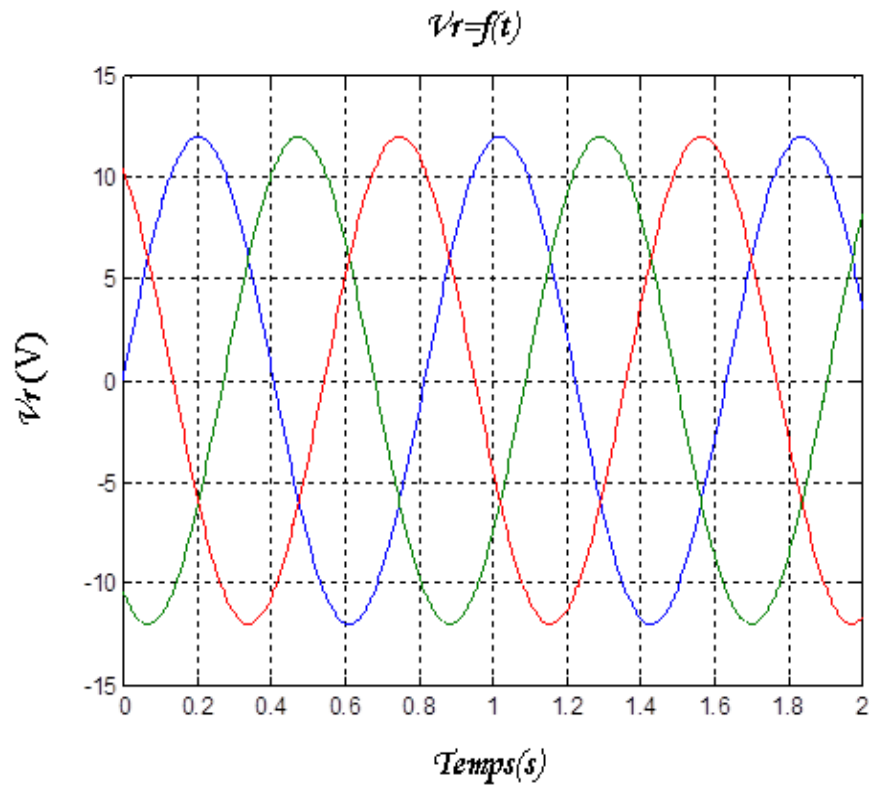


Figure. III.12 Courbe de la tension rotorique

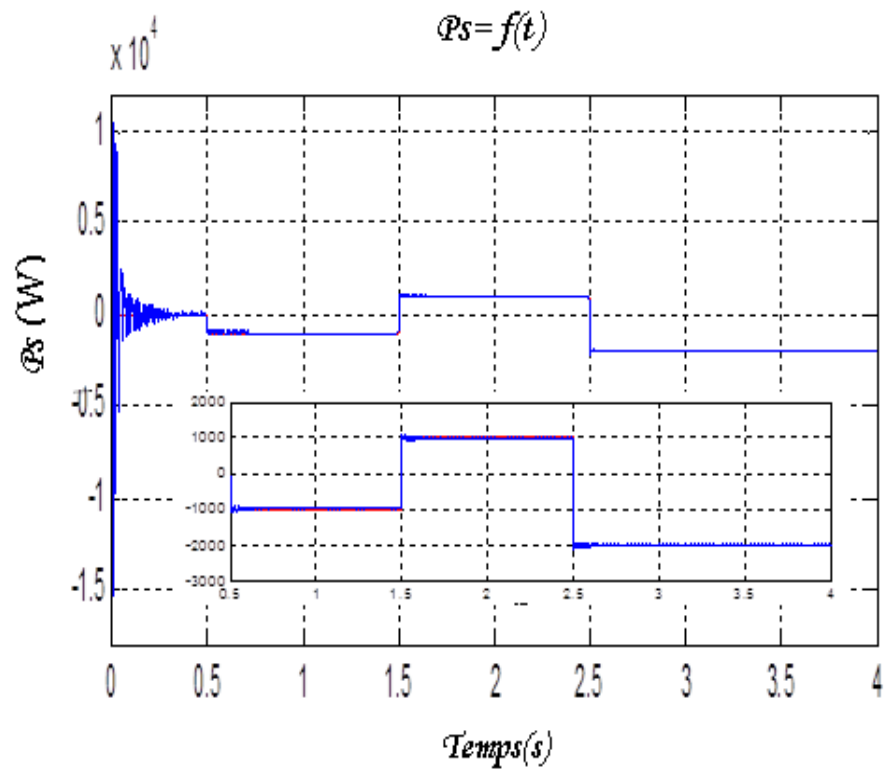


Figure. III.13 Courbe de la puissance active statorique avec zoom

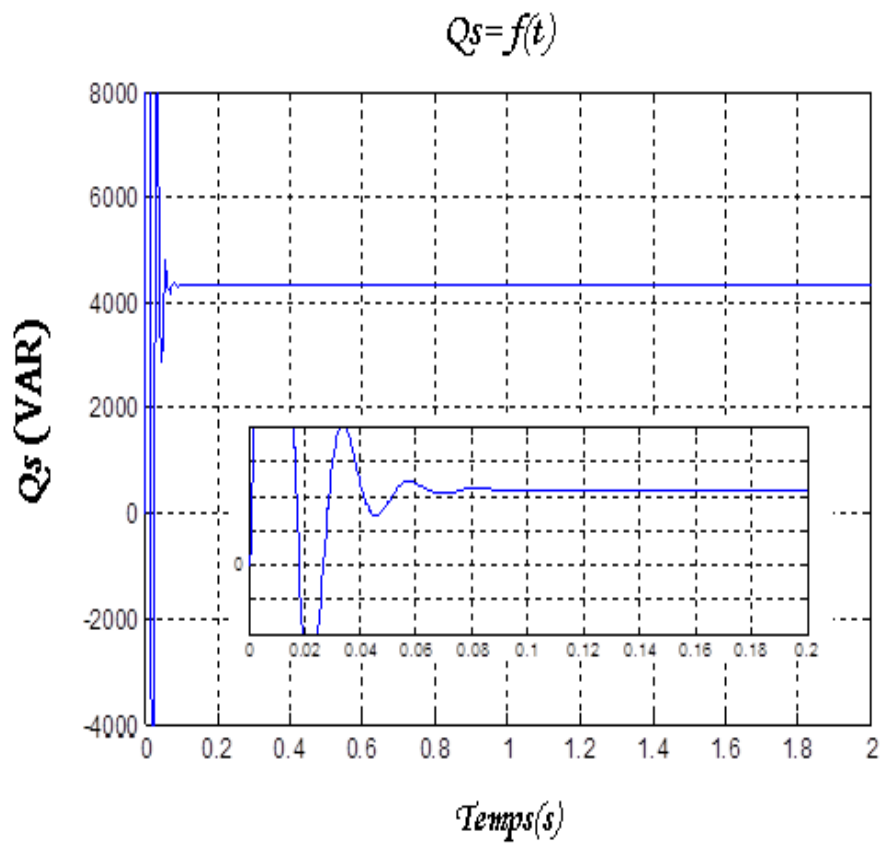


Figure. III.14 Courbe de la puissance réactive statorique avec zoom

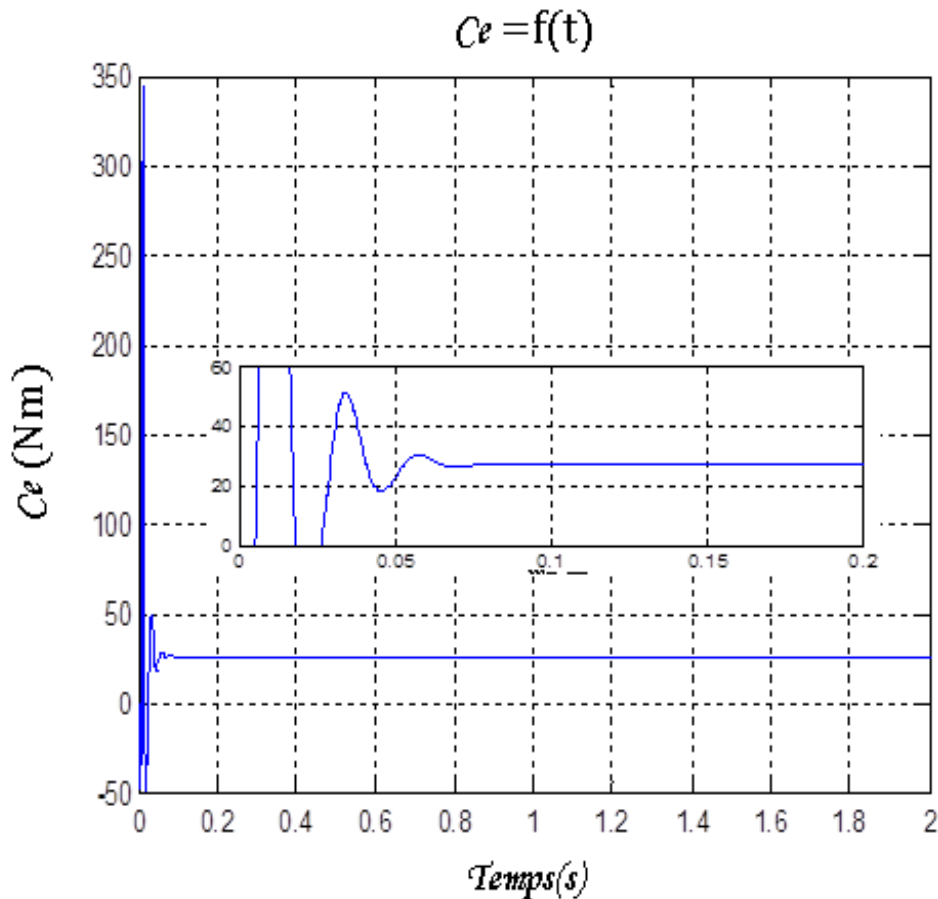


Figure. III.15 Courbe de la couple avec zoom

✓ **Interprétation des résultats :**

Les figures III.9 et III.10 représentent l'évolution du courant statorique et rotorique de la GADA. Au démarrage, le courant générés croient d'une façon exponentielle, puis ils se stabilisent respectivement à en régimes totalement établis avec des amplitudes constantes sachant que la fréquence est maintenue constante.

La figure III .11 montre la valeur de la tension dans le stator, notez qu'elle est constante à environ 300v et reste constante tandis que la figure III .12 la tension dans le rotor, notez qu'elle est constante à environ 12v et reste constante.

les figures III .13 et III .14 montre la valeur de la puissance active et réactive.

La figure III.15 montre la valeur du couple au moment où nous notons qu'il est stable à 25 (N.m).

III.10 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation, fonctionnement génératrice. En basant sur quelques hypothèses simplificatrices,

un modèle mathématique à été établi, dont la complexité a été réduite. Nous avons constaté que le modèle de la machine asynchrone à double alimentation est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous à permis de simplifier ce modèle. Ainsi, les résultats de simulation ont été présentés.

III.11 Références bibliographiques :

- [1] Milutin G. Jovanovid* and Robert E. Betz « Slip power recovery systems based on brushless doubly fed reluctance machines »University of Northumbria at Newcastle, School of Engineering Ellison Building, Newcastle upon Tyne NE1 8ST, UK. Tel: +44-191-2273016,
- [2] **B. BELTRAN** «Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation : Du mode glissant classique au mode glissant d'ordre Supérieur» Thèse Doctorat de Université De Bretagne Occidentale ; soutenue le 6 juillet 2010
- [3] A. Chaiba, “Commande par logique floue de la machine asynchrone à double alimentation en tension,” Thèse de magister de l’université de Batna, 2004.
- [4] R. Abdessamed, M. Kadjoudj, “Modélisation des machines électriques,” Presses de l’Université de Batna, 1997.
- [5] Global Wind Energy Council, « *Global Wind 2008 Report.* », disponible sur le site: <http://www.gwec.net.01/2010>.
- [6] Sejir KHOJET EL KHIL, « Commande vectorielle d’une machine asynchrone doublement alimentée (MADA) ». Thèse doctorat, L’institut National Polytechnique de Toulouse 2006.
- [7] F. KHATOUNIAN', E. MONMASSON, F. BERTHEREAU, E. DELALEAU, J.P. LOUIS, « *Control of a Doubly Fed Induction Generator for Aircraft Application* ». Univenité de Cergy, France.
- [8] Y. Djeriri , " Commande Par Réseaux de Neurones d’une MADA Intégrée à un Système Eolien " , Mémoire de Magister Université Djillali Liabes de Sidi Bel-Abbés ,2009.
- [9] **C. BELFEDAL**, " Commande d’une Machine Asynchrone à Double Alimentation en vue de son application dans le domaine de l’énergie éolienne " , thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d’Oran, Décembre 2007.
- [10] Drid. S, “Contribution à la Modélisation et à la Commande Robuste d’une Machine à Induction Double Alimentée à Flux Orienté avec Optimisation de la Structure d’Alimentation: Théorie & Expérimentation’’, thèse de doctorat en sciences, université de Batna, 2005
- [11] Panda. D, Benedict. E. L. Venkataramanan. G and Lipo. T. A, “A Novel Control Strategy for the Rotor Side Control of a Doubly-Fed Induction Machine’’, Proceedings of Thirty-Sixth IAS Annual Meeting Conference IEEE, Vol.3, pp. 1695-1702, Oct 2001.

- [12] J. Lesenne, F. Notelet, G. Séguier, « Introduction à l'électrotechnique approfondie», Technique et documentation, Paris, ISBN 2-85206-089-2, 1981.
- [13] **Armand BOYETTE** ,« Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne » 'Thèse de doctorat l'Université Henri Poincaré, Nancy 2009I
- [14] F.Merrahi , "Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne) ",Mémoire de Magister en Automatique, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
- [15] L.Abdelhamid , "Contribution à l'Etude des Performances des Générateurs Electromagnétiques Utilisés dans les Systèmes Eoliens ", Mémoire de Magister Université de Batna , 2008 .
- [16] Y. Djeriri , " Commande Par Réseaux de Neurones d'une MADA Intégrée à un Système Eolien " , Mémoire de Magister Université Djillali Liabes de Sidi Bel-Abbés ,2009.

Chapitre -IV-

*Commande de puissance active et réactive de la
MADA*

IV.1 Introduction :

De nos jours, l'énergie éolienne est devenue une solution viable pour la production d'énergie, en complément des autres sources d'énergie renouvelables. Alors que la majorité des éoliennes installées sont à vitesse fixe, le nombre des éoliennes à vitesse variable ne cesse d'augmenter [1]. La génératrice asynchrone à double alimentation avec une commande vectorielle est une machine qui présente d'excellentes performances et elle est couramment utilisée dans l'industrie des éoliennes [2-3]. Il existe de nombreuses raisons pour l'utilisation d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) pour une éolienne à vitesse variable, comme la réduction des efforts sur les parties mécaniques, la réduction du bruit et la possibilité du contrôle des puissances active et réactive [4]. Le système éolien utilisant une MADA et un convertisseur « back-to-back » qui relie le rotor de la génératrice et le réseau, présente de nombreux atouts. L'un des avantages de cette structure est que les convertisseurs de puissance utilisés, sont dimensionnés pour faire transiter une fraction de la puissance totale du système [5-6]. Ce qui permet la réduction des pertes dans les composants d'électronique de puissance. Les performances et la production de puissance ne dépendent pas uniquement de la MADA, mais aussi de la manière avec laquelle les deux parties du convertisseur « back-to-back » sont contrôlées.

Dans cette optique, nous avons proposé une loi de commande pour la MADA basée sur l'orientation du flux statorique, utilisée pour la faire fonctionner en génératrice. Cette dernière met en évidence les relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques. Ces relations vont permettre d'agir sur les signaux rotoriques en vue de contrôler l'échange de puissance active et réactive entre le stator de la machine et le réseau [4].

IV.2 Commande vectorielle de la machine :

IV 2.1 Principe de la commande vectorielle de la MADA :

L'objectif principal de la commande vectorielle des machines à courant alternatif est d'améliorer leur comportement statique et dynamique, grâce à une structure de contrôle similaire à celle d'une machine à courant continu.

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

La méthode du flux orienté consiste à choisir un système d'axes (d, q) où l'un de ces axes coïncide avec la direction désirée du flux qui peut être rotorique, statorique ou d'entrefer.

Ce repère nous permet d'avoir deux composantes directe et en quadrature, l'une de flux statorique et l'autre de courant rotorique.

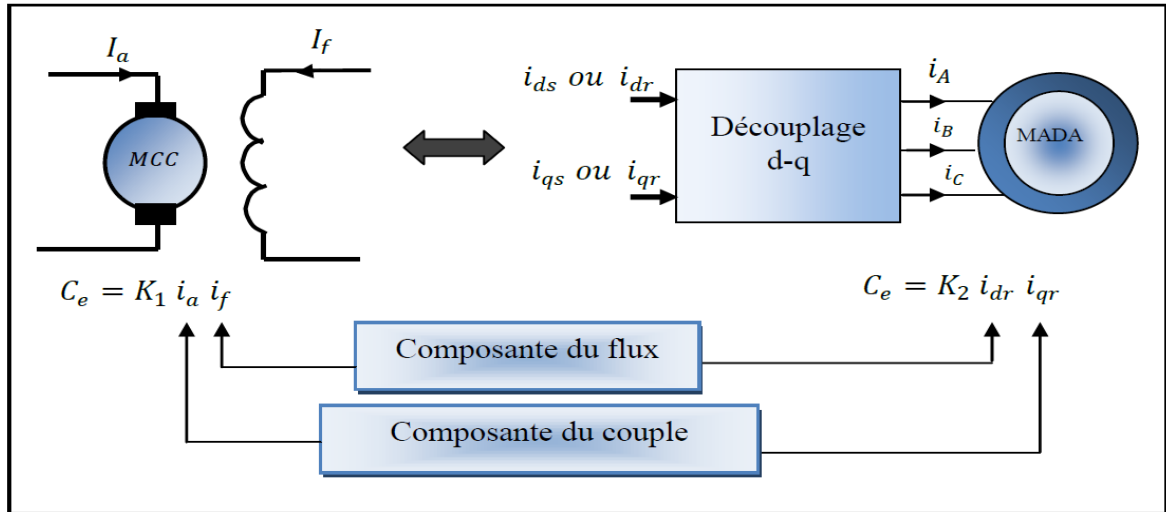


Figure IV.1 : Analogie entre MCC à excitation séparée et MADA.

IV.2.2 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique :

Dans ce travail, on choisit l'orientation du flux statorique suivant l'axe d du repère de Park est orienté suivant le flux statorique. Ce choix n'est pas au hasard mais il se justifie par le fait que la machine est souvent couplée à un réseau puissant de tension et de fréquence constante, ce qui entraîne un flux constant au stator de la machine [7- 8- 9].

Rappelant le système d'équations différentielles (III.22), décrivant la machine asynchrone dans un repère lié au champ tournant qui est donné par :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{dr} \end{cases} \quad \text{IV.1}$$

✓ Choix du référentiel pour le modèle diphasé :

En appliquant la technique d'orientation du flux statorique sur le modèle de la machine (orientant le repère de Park pour que le flux statorique suivant l'axe q soit constamment nul).

Nous pouvons écrire : $\varphi_{ds} = \varphi_s$, $\varphi_{qs} = 0$

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{dr} \end{cases} \quad \text{IV.2}$$

Dans le repère triphasé (a, b, c), la tension aux bornes d'une phase n du stator s'exprime par la relation générale :

$$V_{ns} = R_s I_{ns} + \frac{d\varphi_{ns}}{dt} \quad \text{IV.3}$$

De plus, si on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse réaliste pour les machines de forte puissance utilisées pour la production éolienne, les équations des tensions statoriques de la machine se réduisent à [10] :

$$V_{ns} = \frac{d\varphi_{ns}}{dt} \quad \text{IV.4}$$

Cette relation montre que le repère lié au flux statorique tourne alors à la même vitesse angulaire que le vecteur de tension statorique et qu'il est en avance de $(\pi/2)$ sur ce même vecteur. Toujours dans l'hypothèse d'un flux statorique constant, on peut écrire :

$$V_{ds} = 0, V_{qs} = V_s$$

Le principe d'orientation de la tension et du flux statorique est illustré sur la figure (II.8)

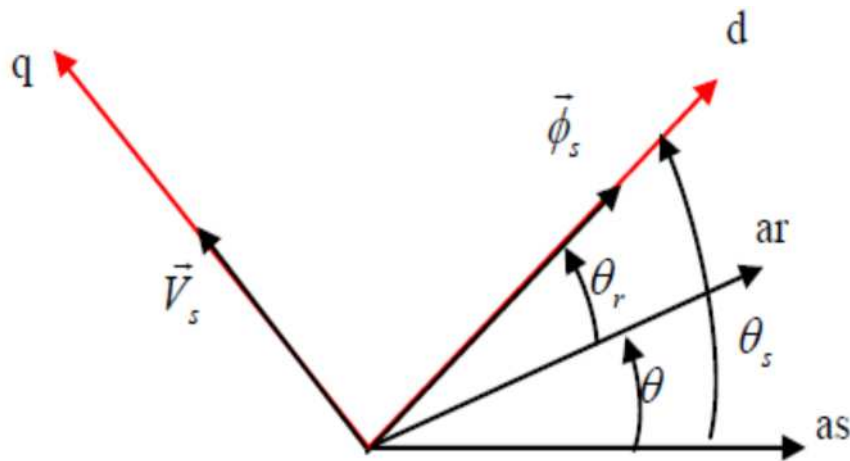


Figure V.2 : Orientation du flux statorique.

Dans l'hypothèse où le φ_{ds} flux est maintenu constant (ce qui est assuré par la présence d'un réseau stable connecté au stator). Le choix de ce repère rend le couple électromagnétique produit par la machine et par conséquent la puissance active uniquement dépendant du courant rotorique d'axe q. L'expression du couple électromagnétique devient alors :

$$C_{em} = np \frac{M}{L_s} \varphi_{ds} I_{qr} \quad \text{IV.5}$$

En utilisant les simplifications ci-dessus, nous pouvons simplifier les équations des tensions et des flux statoriques comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds} = \frac{d\varphi_{ds}}{dt} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \varphi_{ds} = \omega_s \varphi_s \end{cases} \quad \text{IV.6}$$

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \varphi_s = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \varphi_{sq} = 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad \text{IV.7}$$

A partir des équations (V.7), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques:

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad \text{IV.8}$$

IV.2.3 Expressions des puissances active et réactive statoriques :

Dans un repère diphasé quelconque, les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent:

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad \text{IV.9}$$

L'adaptation de ces équations au système d'axes choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas ($V_{ds} = 0$) donne:

$$\begin{cases} P_s = V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} \end{cases} \quad \text{IV.10}$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs valeurs de l'équation (IV.8) dans l'équation (IV.10), nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive :

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

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

Les équations des flux rotorique :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad \text{IV.13}$$

IV.2.4 Expressions des tensions rotoriques :

En remplaçant les courants statoriques par leurs expressions de l'équation (IV.13), on aura :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{dr} + \frac{M.V_s}{L_s \omega_s} \\ \varphi_{rq} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{qr} \end{cases} \quad \text{IV.14}$$

En remplaçant (IV.13) dans les expressions des tensions rotoriques dans le système d'équations (IV.1) on a :

$$\text{avec } g\omega_s = (\omega_s - \omega)$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt}(L_r I_{dr} + M I_{ds}) - g\omega_s \cdot (L_r I_{qr} + M I_{qs}) \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt}(L_r I_{qr} + M I_{qs}) + g\omega_s \cdot (L_r I_{dr} + M I_{ds}) \end{cases} \quad \text{IV.15}$$

En remplace les valeurs du courant de l'équation (IV.8) dans (IV.15) pour obtenir la relation suivant :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{dI_{dr}}{dt} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{dI_{qr}}{dt} + g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{dr} + g\omega_s \frac{M \cdot \varphi_s}{L_s} \end{cases} \quad \text{IV.16}$$

Après la transformation de la place des équations (IV.16) deviennent:

$$\begin{cases} V_{dr} = \left(R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)s\right) I_{dr} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{qr} \\ V_{qr} = \left(R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)s\right) I_{qr} + g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{dr} + g\omega_s \frac{M \cdot \varphi_s}{L_s} \end{cases} \quad \text{IV.17}$$

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

$$\begin{cases} V_{dr} = \left(R_r I_{dr} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{qr}\right) \\ V_{qr} = \left(R_r I_{qr} + g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{dr} + g \frac{M \cdot V_s}{L_s}\right) \end{cases} \quad \text{IV.18}$$

A partir des équations que nous venons de mettre en place, nous pouvons établir les relations entre les tensions appliquées au rotor de la machine et les puissances statoriques que

cela engendre. Il est donc possible maintenant de décrire le schéma bloc de la machine asynchrone à double alimentation qui sera le bloc à réguler par la suite [11].

✓ Schéma bloc réduit de la MADA

En examinant les équations (IV.11) et (IV.16), on peut établir le schéma bloc de la figure (IV.3) qui comporte en entrées les tensions rotoriques et en sorties les puissances actives réactives statoriques.

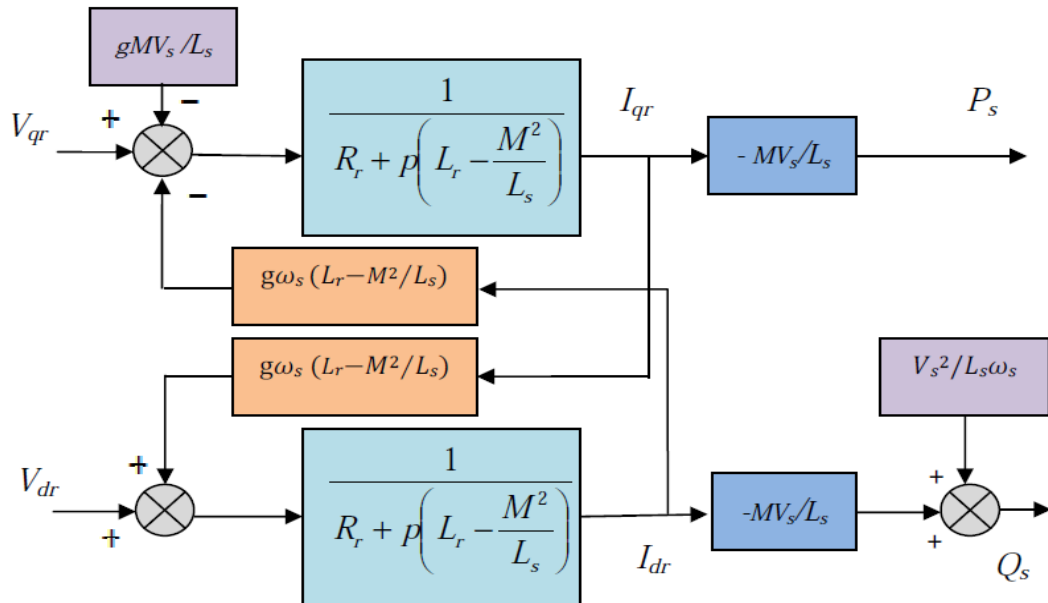


Figure IV.3 : Schéma bloc du système à réguler.

On remarque que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. De plus, du fait de la faible valeur du glissement g , il sera possible d'établir sans difficulté une commande vectorielle car les influences des couplages resteront faibles et les axes d et q pourront donc être commandés séparément avec leurs propres régulateurs [12].

IV.3 Contrôle indépendant de puissance active et réactive :

Après avoir élaboré le modèle pour le contrôle indépendant des puissances de la MADA il suffit maintenant d'inverser ses blocs pour déduire les tensions de référence de l'onduleur à partir des puissances active et réactive de références.

IV.3.1 Commande directe :

la première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour assurer une commande découplée des puissance de la génératrice. Cette méthode sera appelée méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine [13].

Si l'on observe les équations (IV.12), on s'aperçoit que les courants rotoriques sont liés aux puissances actives et réactives par le terme $\frac{M.V_s}{L_s}$. De plus, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés dans le système (IV.16) disparaissent en régime permanent. Nous pouvons donc écrire : équation (IV.18)

$$\begin{cases} V_{dr} = (R_r I_{dr} - g\omega_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})I_{qr}) \\ V_{qr} = (R_r I_{qr} + g\omega_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})I_{dr} + g\frac{M.V_s}{L_s}) \end{cases}$$

V_{dr} et V_{qr} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus [14].

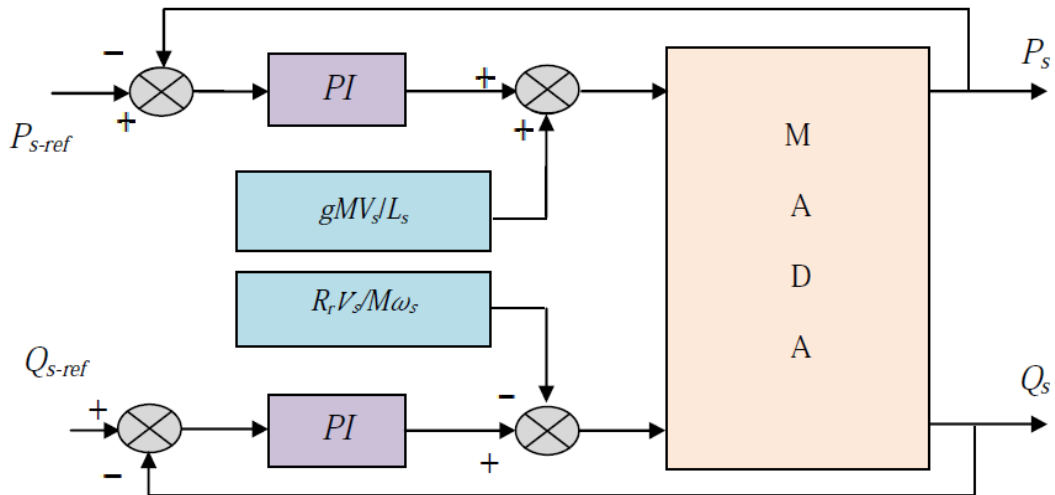


Figure IV.4 : Schéma bloc de la commande directe

L'effet du terme de couplage $g\omega_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})$ est minime pour des faibles glissements et peut être compensé par une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande. En revanche, le terme $g\frac{M.V_s}{L_s}$ représente une force électromotrice dont l'influence n'est pas négligeable, le système de contrôle devra donc compenser cette perturbation. Ainsi, on obtient un modèle plus simple permettant le contrôle direct et indépendant des puissances active et réactive en utilisant un seul, régulateur sur chaque axe [14].

IV.3.2 Commande indirecte :

La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode appelée méthode indirecte [13].

IV.3.2.1 Commande en boucle ouvert [14] :

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

A partir des expressions de la puissance active et réactive statoriques du système(IV.12), on déduit les références des courants rotoriques direct et quadrature suivant les relations :

$$\begin{cases} I_{qr_ref} = -\frac{L_s}{M.V_s} \cdot P_{s_ref} \\ I_{dr_ref} = \frac{L_s}{M.V_s} \cdot Q_{s_ref} - \frac{V_s}{\omega_s M} \end{cases} \quad \text{IV.19}$$

Ces courants seront utilisés comme références à la place des références sur les puissances active et réactive, on aboutit alors au schéma bloc ci-dessous

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.

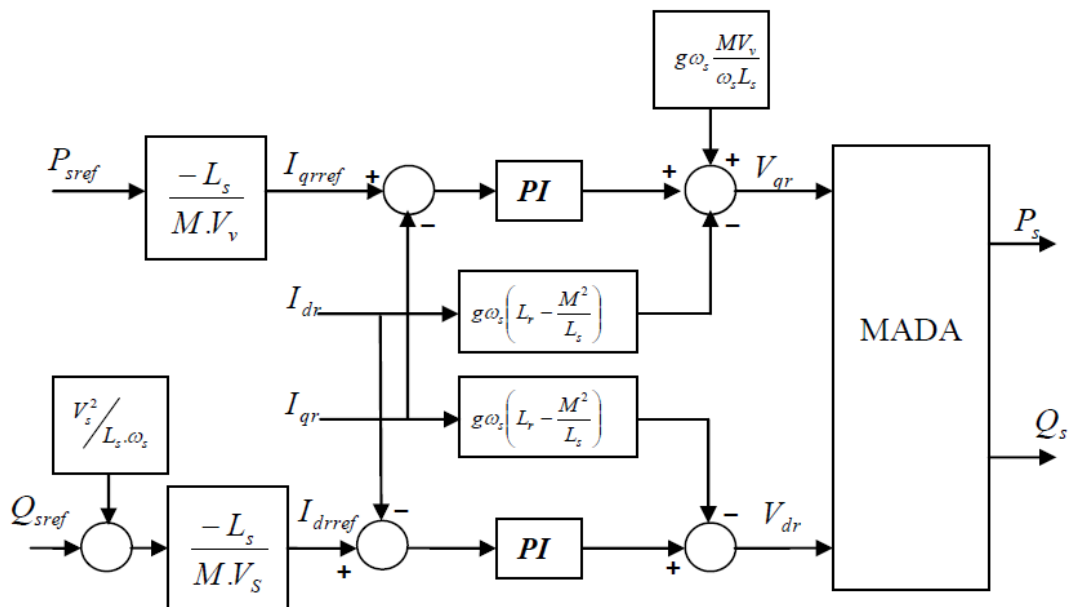


Figure IV.5 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouvert.

IV.3.2.2 Commande en boucle fermé :

Dans cette méthode, le découplage se fait au niveau des sorties des régulateurs en courant rotorique avec un retour du système. Qui permet le réglage des puissances, on distingue donc, une commande par boucle en cascade de la puissance et du courant rotorique pour chaque

axe, puisqu'elle permet de contrôler séparément les courants I_{dr} et I_{qr} et les puissances P_s et Q_s en boucle fermée. Le schéma simplifié de l'ensemble commande-bloc découplage-machine est illustré sur la figure (IV.6) [15].

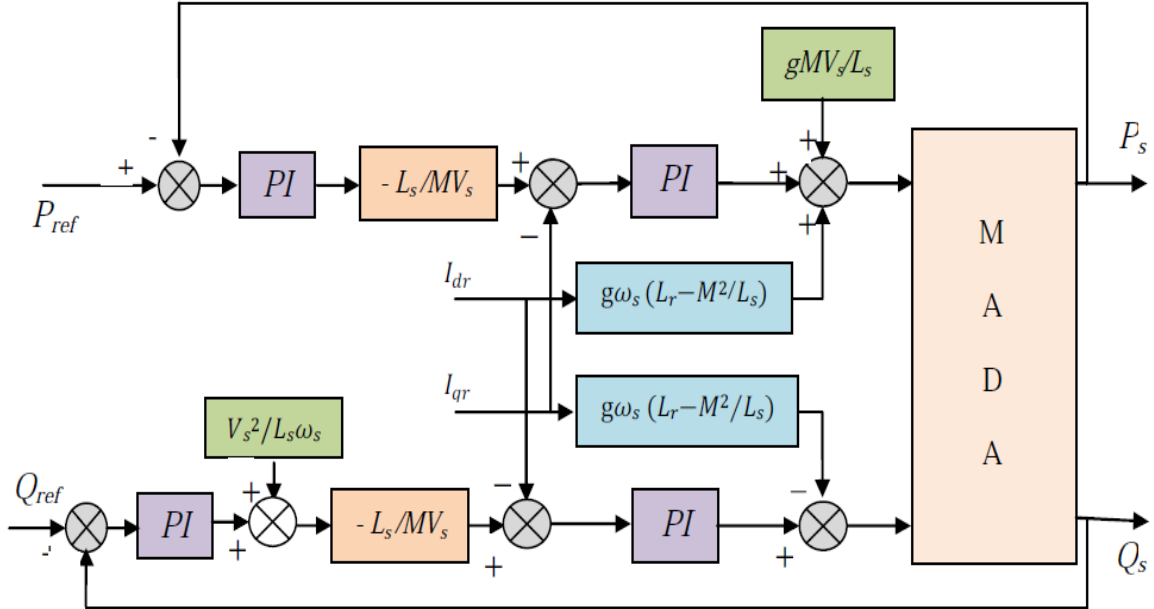


Figure IV.6 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermée.

IV.3.3 Synthèse des régulateurs PI :

Pour réaliser la commande bouclée, on utilise des régulateurs classiques de type PI. Ce type de régulateur assure une erreur statique nulle grâce à l'action intégrale tandis que la rapidité de la réponse est établie par l'action proportionnelle.

Le schéma de la figure (IV.7) montre une partie de notre système bouclé par un régulateur PI dont la fonction de transfert est de la forme $k_p + \frac{k_i}{s}$. Correspondant aux deux régulateurs utilisés dans la figure (IV.4).

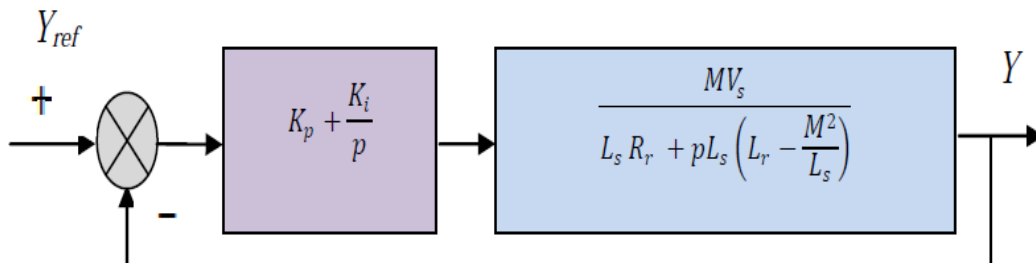


Figure IV.7 : Schéma bloc d'un système régulé par un PI

La fonction de transfert en boucle ouverte ($FTBO$) avec les régulateurs s'écrit de la manière suivante :

$$FTBO = \frac{s + \frac{k_i}{k_p}}{\frac{s}{k_p}} \cdot \frac{V_s M}{\frac{L_s(L_r - M^2/L_s)}{R_r} s + \frac{R_r}{(L_r - M^2/L_s)}} \quad \text{IV.20}$$

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

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{R_r}{(L_r - M^2/L_s)} \quad \text{IV.21}$$

Fonction de transfert en boucle ouverte devient alors:

$$FTBO = F_o(t) = \frac{\frac{V_s M}{L_s(L_r - M^2/L_s)}}{\frac{s}{k_p}} \quad \text{IV.22}$$

Notons toutefois que la compensation de constantes de temps n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision car les gains des correcteurs dépendent directement de ces paramètres. Si tel n'est pas le cas la compensation est moins performant [16].

En boucle fermée, on obtient la fonction de transfert suivante :

$$FTBF = \frac{F_o(t)}{1 + F_o(t)} = \frac{1}{1 + \tau_r s} \quad \text{avec} \quad \tau_r = \frac{1}{k_p} \frac{L_s(L_r - M^2/L_s)}{V_s M} \quad \text{IV.23}$$

τ_r C'est le temps de réponse du système, correspondant à une valeur suffisamment rapide pour l'utilisation faite sur l'éolienne où les variations de vent sont peu rapides et les constantes de temps mécanique sont importantes.

S'imposer une valeur plus faible n'améliorerait probablement pas les performances de l'ensemble, mais risquerait d'engendrer des perturbations lors des régimes transitoires en provoquant des dépassements et des instabilités indésirables [17].

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

$$\begin{cases} k_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{V_s M}{L_s(L_r - M^2/L_s)} \\ k_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{R_r L_s}{V_s M} \end{cases} \quad \text{IV.24}$$

IV.4 Alimentation de la MADA :

Le long de tout notre travail, les différentes structures de commande sont constituées de l'association d'une machine asynchrone à double alimentation avec un onduleur de tension. La tension de sortie de ce dernier est contrôlée par une technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI).

L'association redresseur-filtre-onduleur de tension est représentée dans la figure (IV.8).

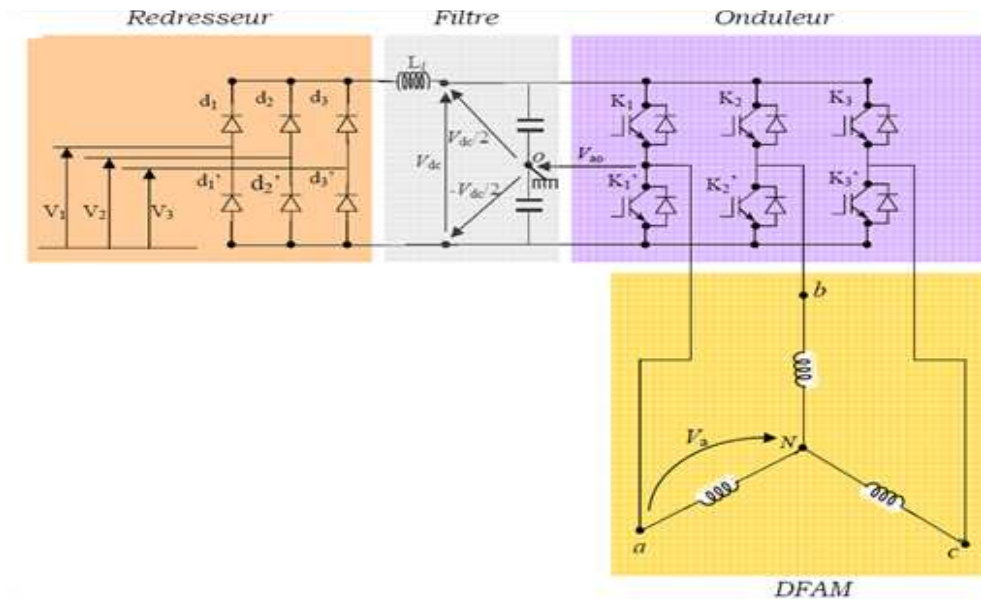


Figure IV.8 : Association redresseur-filtre-onduleur de tension à MLI

Les machines électriques sont alimentées par l'intermédiaire des convertisseurs électroniques de puissance Figure (IV.8). L'onduleur de tension avec onde porteuse est utilisé pour la commande vectorielle des machines électriques. [18]

Le bloc de commande du convertisseur reçoit les tensions de référence pour les trois phases. Ces tensions sont comparées avec un signal dents de scie, et en fonction du signal d'erreur, on commande les semi-conducteurs de l'onduleur. Le mode de fonctionnement est très simple :

- si $V_{ref} > V_p$ - le transistor supérieur du bras de pont conduit,
- si $V_{ref} < V_p$ - le transistor inférieur du bras de pont conduit.

Où V_{ref} représente une des trois tensions de référence et V_p représente le signal dents de scie ou l'onde porteuse.

Ce type de commande est appelé commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) ou (PWM en anglais).

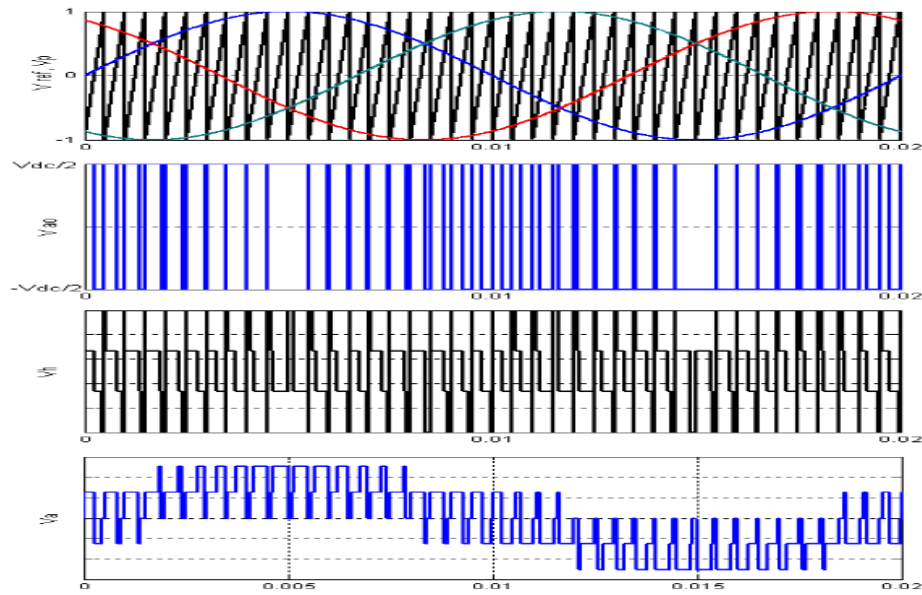


Figure IV.9 : Principe de la commande MLI et enveloppes de tensions

La Figure (IV.9) représente le principe de la commande MLI et quelques enveloppes des tensions. Sur cette figure, V_h est la tension homopolaire qui peut s’exprimer par :

$$V_h = V_{No} = \frac{1}{3}(V_{a0} + V_{b0} + V_{c0}) \tag{IV.25}$$

La commande MLI présente l’avantage d’une fréquence constante de commutation, qui est fixée par la fréquence de l’onde porteuse. Le schéma Simulink pour ce type d’onduleur est présenté dans la Figure (IV.10).

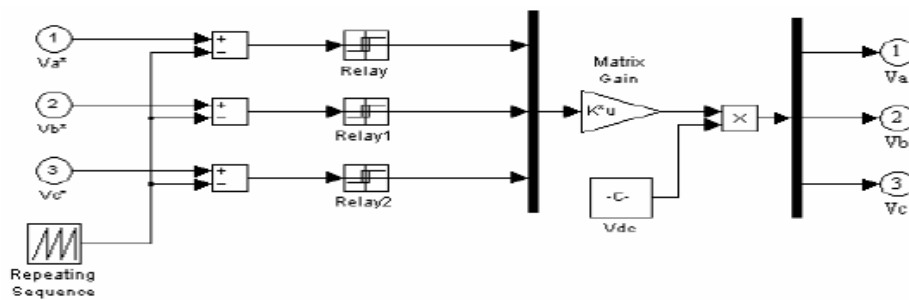


Figure IV.10 : Onduleur de tension avec onde porteuse

La MADA et le réseau électrique sont des systèmes continus, mais le convertisseur électronique est un système discret. Comme on le voit dans la figure (IV.10), le schéma Simulink du convertisseur est assez compliqué et il s’avère gourmand en temps de calcul, surtout à cause des relais, [19].

Dans ce travail, le rapport de modulation est égal à 1, et la fréquence de la porteuse est égale 2 KHz.

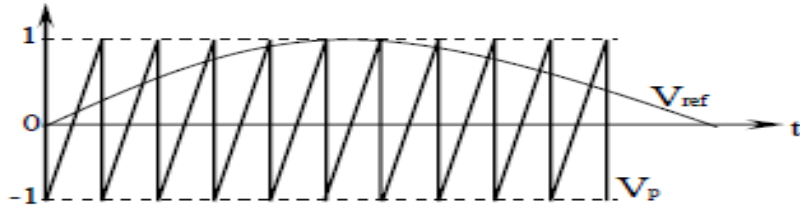


Figure IV.11 : Explication pour l'obtention du modèle continu équivalent du convertisseur

Dans la Figure (IV.11) on voit que l'amplitude de V_p est unitaire. L'amplitude de l'onde de référence V_{ref} (ou l'onde modulatrice) peut prendre des valeurs comprises entre (0,1). Sachant que les tensions polaires de l'onduleur peuvent prendre seulement deux valeurs qui sont différentes de zéro ($\pm V_{dc} / 2$) et en supposant que la fréquence de l'onde porteuse est infinie, on peut écrire la relation suivante entre les composantes utiles des tensions polaires et les signaux de référence :

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{b0} \\ V_{c0} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{2} \begin{bmatrix} V_{aref} \\ V_{bref} \\ V_{cref} \end{bmatrix} \quad \text{IV.26}$$

Les convertisseurs d'aujourd'hui peuvent fonctionner à des fréquences de commutation de quelques kHz, beaucoup plus grandes que les fréquences des signaux de référence. On peut donc considérer que la relation (IV.26) est vraie aussi pour un convertisseur réel, [19-20]. En appliquant la transformation directe de Park à la relation (IV.26), on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{2} \begin{bmatrix} V_{dref} \\ V_{qref} \end{bmatrix} \quad \text{IV.27}$$

Pour déterminer l'évolution de la tension V_{dc} du bus continu, il est nécessaire de déterminer le courant circulant dans le condensateur du bus continu. Ce courant dépend des courants introduits dans le bus continu. Ces courants peuvent être déterminés à partir du bilan de puissances aux deux extrémités du convertisseur. Pour le convertisseur de la Figure (IV.11), on peut écrire [20]:

$$V_{dc} \cdot i_{dc} = V_a \cdot i_a + V_b \cdot i_b + V_c \cdot i_c = \frac{V_{dc}}{2} (V_{aref} \cdot i_a + V_{bref} \cdot i_b + V_{cref} \cdot i_c) \quad \text{IV.28}$$

Ou :

$$V_{dc} \cdot i_{dc} = V_d \cdot i_d + V_q \cdot i_q = \frac{V_{dc}}{2} (V_{dref} \cdot i_d + V_{qref} \cdot i_q) \quad \text{IV.29}$$

A partir de (IV.42), on déduit facilement :

$$i_{dc} = \frac{1}{2} (V_{dref} \cdot i_d + V_{qref} \cdot i_q) \quad \text{IV.30}$$

IV.4.1 Modélisation de convertisseur :

À noter que la tension de sortie du redresseur doit être toujours supérieure à la tension d'entrée.

Le redresseur est commandé par l'algorithme suivant :

$$\begin{cases} (V_a > V_b) \text{ et } (V_a > V_c) \rightarrow U_{M'} = F_{11} V_a \\ (V_b > V_a) \text{ et } (V_b > V_c) \rightarrow U_{M'} = F_{21} V_b \\ (V_c > V_a) \text{ et } (V_c > V_b) \rightarrow U_{M'} = F_{31} V_a \end{cases} \quad \text{IV.31}$$

$$\begin{cases} (V_a < V_b) \text{ et } (V_a < V_c) \rightarrow U_M = F_{12} V_a \\ (V_b < V_a) \text{ et } (V_b < V_c) \rightarrow U_M = F_{22} V_b \\ (V_c < V_a) \text{ et } (V_c < V_b) \rightarrow U_M = F_{32} V_a \end{cases} \quad \text{IV.32}$$

Avec F_{sk} : fonction de commutation de l'interrupteur k du bras s . $k=\{1,2\}$ et $s=\{1,2,3\}$.

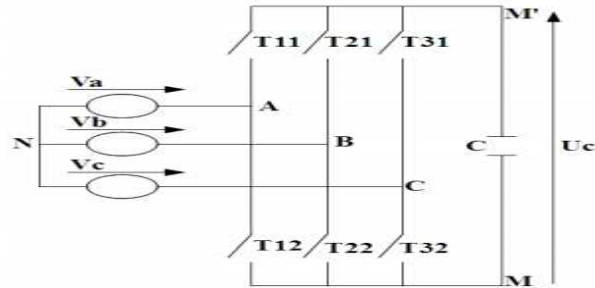


Figure IV.12 : Structure d'un redresseur triphasé à deux niveaux

IV.4.2 Régulateur de tension de bus continu :

Le rôle de la boucle de régulation de la tension du bus continu est de maintenir cette tension à une valeur de référence constante, en contrôlant le processus de chargement et de déchargement du condensateur, un contrôleur PI est utilisé pour réguler cette tension, il est défini par la formule suivante [21]:

$$G_c(p) = k_p + \frac{k_i}{p} \quad \text{IV.33}$$

En négligeant les pertes actives dans le convertisseur et dans les inductances de couplage, l'application du principe de conservation de la puissance donne la relation entre la puissance active débitée par le système éolien et celle reçue à la sortie du pont. Elle s'écrit sous la forme suivante :

$$P_{dc} = P_g \quad \text{IV.34}$$

$$U_{dc} i_{dc} = 3v \cdot i = 3v \cdot \frac{I}{\sqrt{2}} \quad \text{IV.35}$$

$$i_{dc} = i_c + i_{ch} \tag{IV.36}$$

Avec:

$$\begin{cases} i_c = c \frac{dU_{dc}}{dt} \\ i_{ch} = \frac{U_{dc}}{R_{ch}} \end{cases} \tag{IV.37}$$

Donc, on peut établir le modèle suivant :

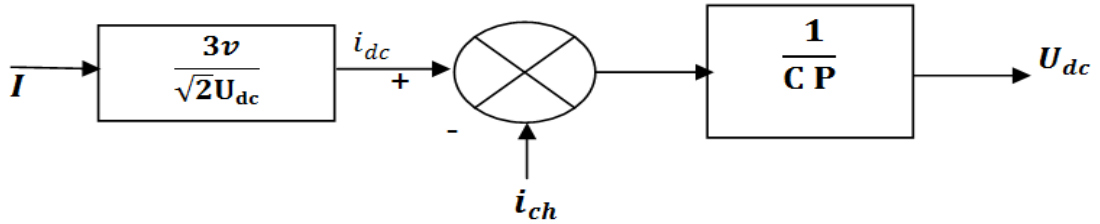


Figure IV.13 : Modèle de la boucle de tension.

Ainsi, la structure du système en boucle fermée est représentée :

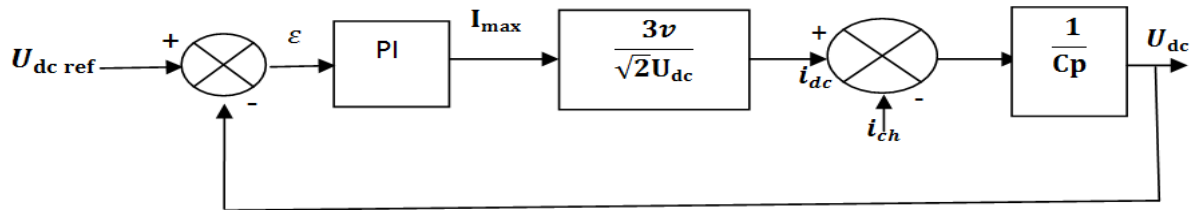


Figure IV.14 : Modèle en boucle fermée de la boucle de tension du bus continu.

La fonction de transfert en boucle ouverte du système vaut :

$$FTBO(P) = \left(k_p + \frac{k_i}{p}\right) \cdot \frac{3v}{\sqrt{2}U_{dc}} \cdot \frac{1}{c_p} \tag{IV.38}$$

La fonction de transfert en boucle fermée du système est :

$$FTBF(P) = \frac{FTBO(P)}{1+FTBO(P)} \tag{IV.39}$$

D'autre part :

$$FTBF(P) = \frac{1+k_p.P}{\frac{1}{w_n^2}.P^2 + \frac{2.\epsilon}{w_n}.P + 1} \tag{IV.40}$$

Donc:

$$k_i = 2c \frac{U_{dc}}{3v} w_n \tag{IV.41}$$

Et:

$$k_p = \frac{2 \cdot \varepsilon}{\omega_n} \quad \text{IV.42}$$

$$T_n = \frac{k_p}{k_i}, T_i = \frac{1}{k_i} \quad \text{IV.43}$$

T_n : Constante de temps du correcteur PI.

T_i : Constante de temps intégrale du correcteur PI.

IV.5 Calcul des régulateurs des courants rotoriques :

En supposant que le découplage est réalisé, on aura :

$$\frac{i_{dr}^*(s)}{V_{dr}^*(s)} = \frac{1}{\gamma_r + s} \quad \text{IV.44}$$

La boucle de régulation du courant i_{dr}^* est représentée par le schéma bloc de la figure (IV.15) :

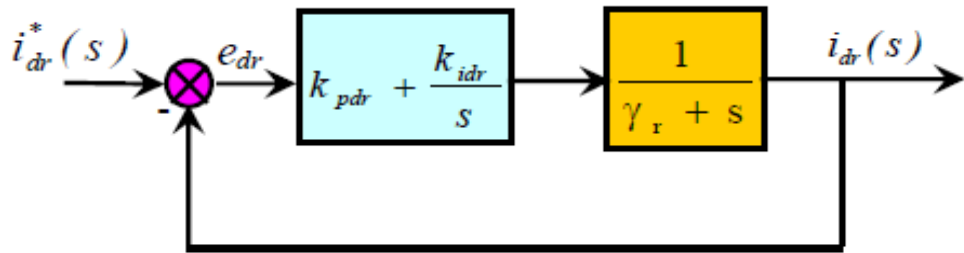


Figure IV.15 : Schéma fonctionnel de régulation du courant i_{dr}

La fonction de transfert en boucle fermée (BF) est la suivante :

$$\frac{i_{dr}(s)}{i_{dr}^*(s)} = \frac{k_{pdr} \cdot s + k_{idr}}{s^2 + (\gamma_r + k_{pdr}) \cdot s + k_{idr}} \quad \text{IV.45}$$

Pour que le système en BF puisse avoir un comportement d'un système du premier ordre dont

la fonction de transfert est $\frac{1}{1 + \tau \cdot s}$; Il faut que :

$$\frac{k_{pdr} \cdot s + k_{idr}}{s^2 + (\gamma_r + k_{pdr}) \cdot s + k_{idr}} = \frac{1}{1 + \tau \cdot s} \quad \text{IV.46}$$

Après simplification on aura :

$$k_{pdr} = \frac{1}{\tau}, k_{idr} = \frac{\gamma_r}{\tau}$$

Avec : $\tau < \tau_e$

τ_e : la constante de temps électrique du système.

Dans notre cas $\tau_e = \frac{Lr}{Rr} = 0.13 \text{ s}$.

Nous avons choisi $\tau = 0.002 \text{ s}$, pour avoir une dynamique du processus plus rapide. L'application numérique nous donne : $k_{pdr} = 500, k_{idr} = 62040$.

Pour déterminer les deux coefficients k_{pqr}, k_{iqr} , il sera procédé de la même façon que pour le courant i_{dr} , $k_{pqr} = 500, k_{iqr} = 62040$.

Le schéma de commande complet est illustré dans la figure (IV.16) :

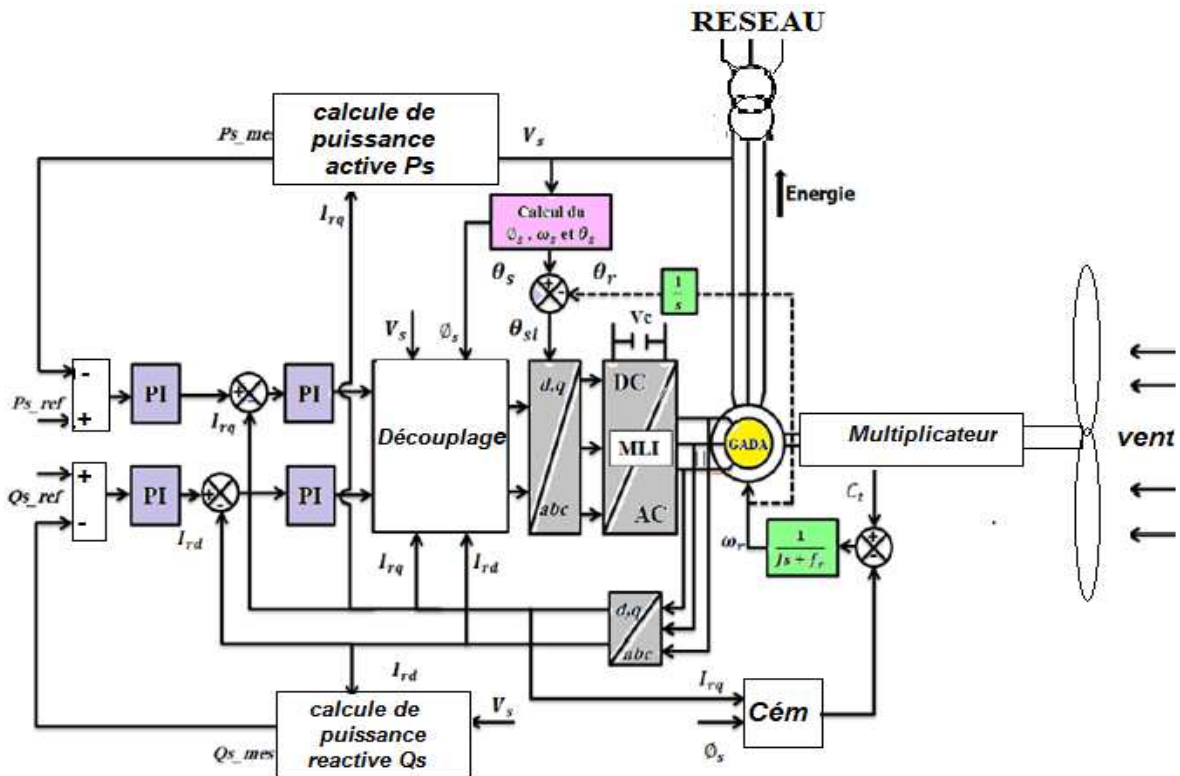


Figure IV.16 : Schéma bloc global de la commande vectorielle de la GADA

IV.6 Résultats de simulations :

Les résultats de simulation de notre système éolien (Turbine + GADA) contrôlé par des régulateur PI. De ce fait, nous reteindrons la commande indirecte pour la suite de nos travaux.

Les résultats présentent les différentes courbes obtenus par la commande des puissances actives et réactives générées au niveau du stator de la GADA, cette commande permet de découpler les expressions de la puissance actives est réactives du générateur ou encoure celle du flux et du couple.

Le démarrage est à vide puis on applique une puissance active de référence :

- ❖ Entre $t=0$ s et $t=0.2$ s ($P_{\text{réf}} = 0$ W);
- ❖ Entre $t=0.2$ s et $t=0.6$ s échelon négative ($P_{\text{réf}} = -20000$ W);
- ❖ Entre $t=0.6$ s et $t=1$ s ($P_{\text{réf}} = -10000$ W);

La puissance réactive :

- ❖ Entre $t=0$ s et $t=1$ s ($Q_{\text{réf}} = 0$ var);

Les figures ci-dessous montrent les performances de la commande vectorielle en puissance actives et réactives statorique appliquée à la GADA.

La figure (IV.17) représente l'évolution de la tension du bus continu, qui fait montrer que :

- La tension du bus continu atteint sa consigne qui est 514.6V à un temps de réponse plus petit, sans dépassement .
- La forme de la tension du bus continu est plus douce, qui présente une supériorité lors des variations de la vitesse du vent.

Le figure (IV.18) montrent que le couple électromagnétique de la machine asynchrone double alimentation .

Les figures (IV.19), (IV.20) montrent que les performances de poursuite des courants rotoriques et statoriques sont satisfaisantes; cependant on remarque un dépassement au régime transitoire (au démarrage et au changement de consigne), ce qui signifie que le régulateur PI ne maîtrise pas le régime transitoire.

La figure (IV.21) montre que la puissance active du côté du stator est négative ce qui signifie que le réseau dans ce cas est un récepteur d'énergie fournie par la DFAM. La puissance réactive est toujours nulle, c'est une condition de fonctionnement de la DFAM pour avoir un facteur de puissance unitaire.

La figure (IV.22) montre que la tension de phase statorique est en phase avec le courant de phase statorique.

La figure (IV.23) montre : Zoom sur le courant et la tension statorique.

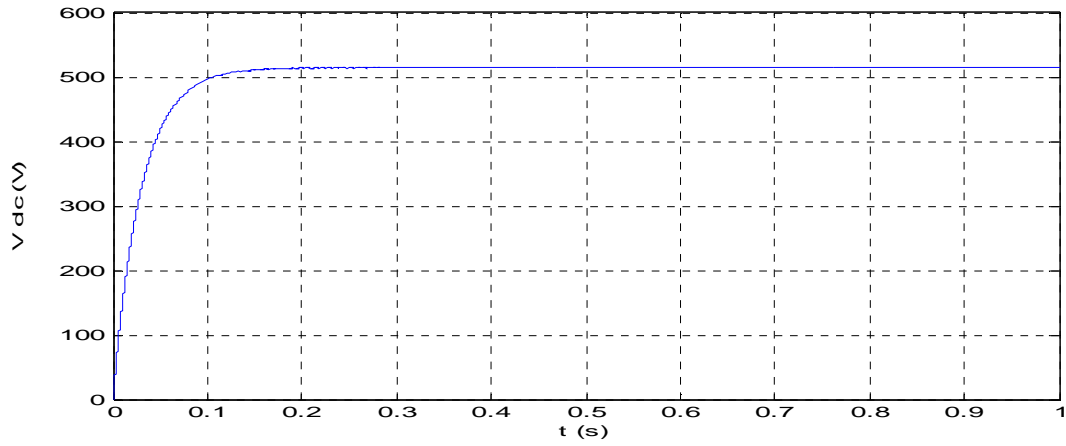


Figure IV.17 : Tension du bus continu (V)

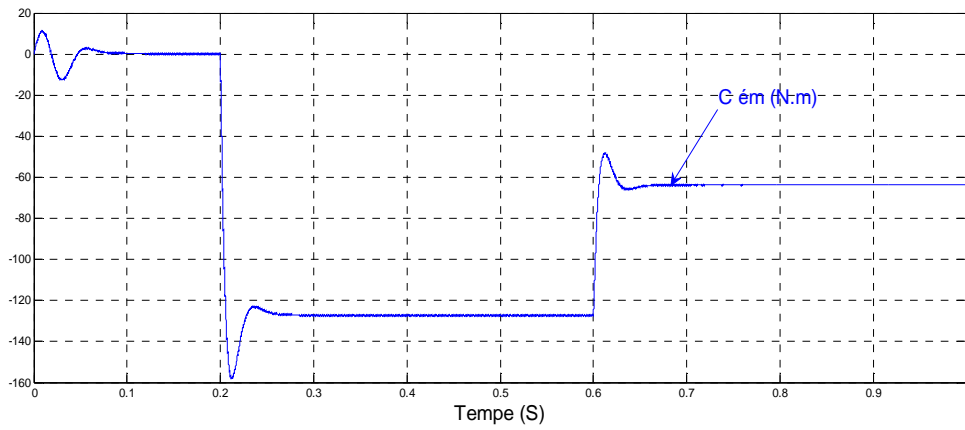


Figure IV.18 : Couple électromagnétique

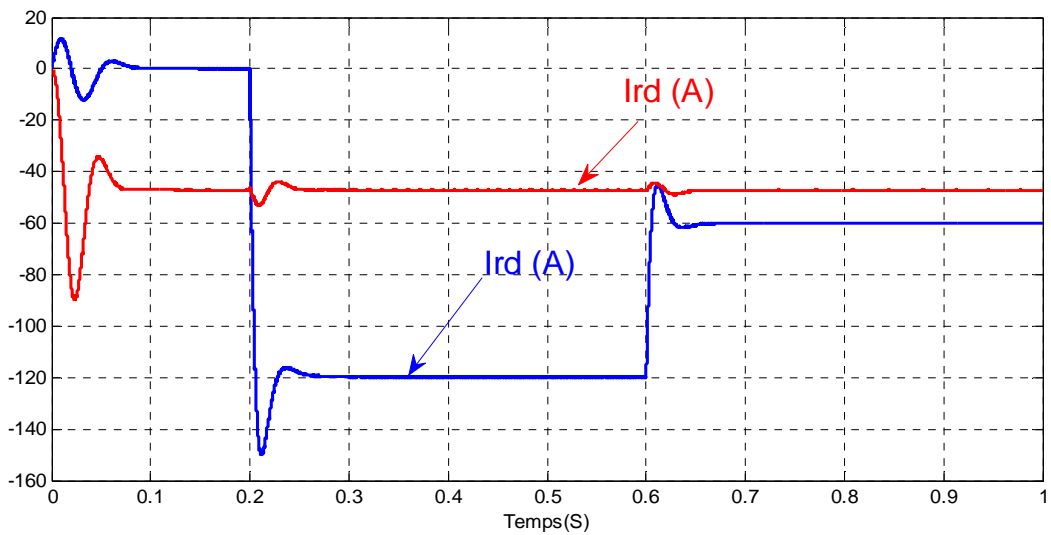


Figure IV.19 : Les courants directs et quadrature rotoriques.

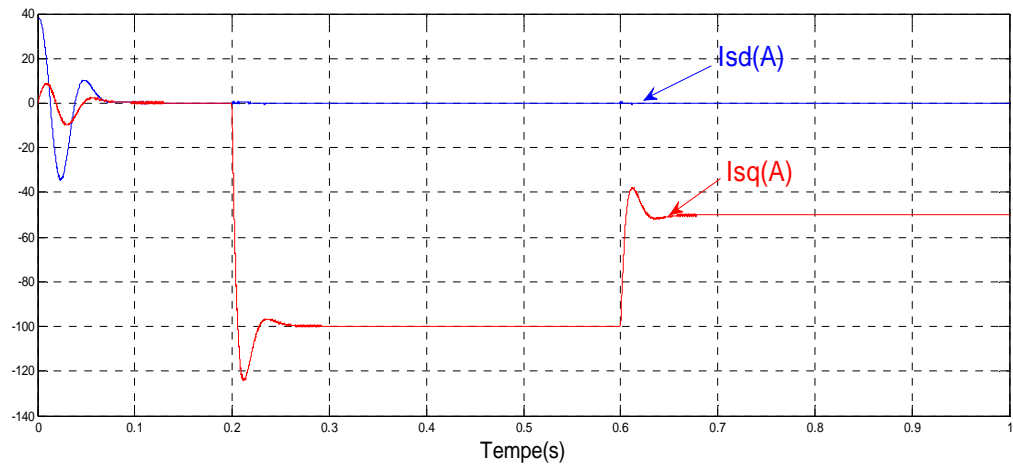


Figure IV.20 : Les courants direct et quadrature statorique .

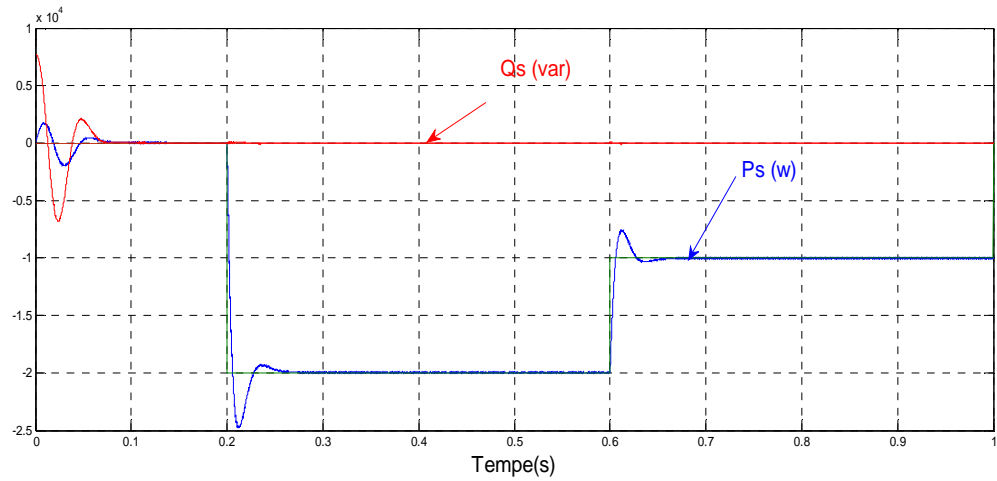


Figure IV.21 : Puissance active (W) et Puissance réactive (VAR) statorique

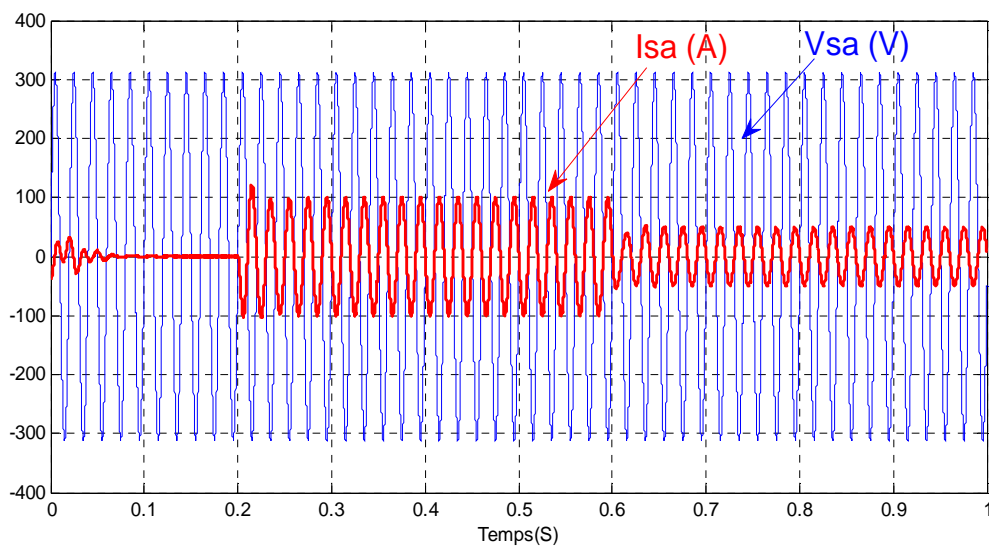


Figure IV.22 : Le courant et la tension statorique

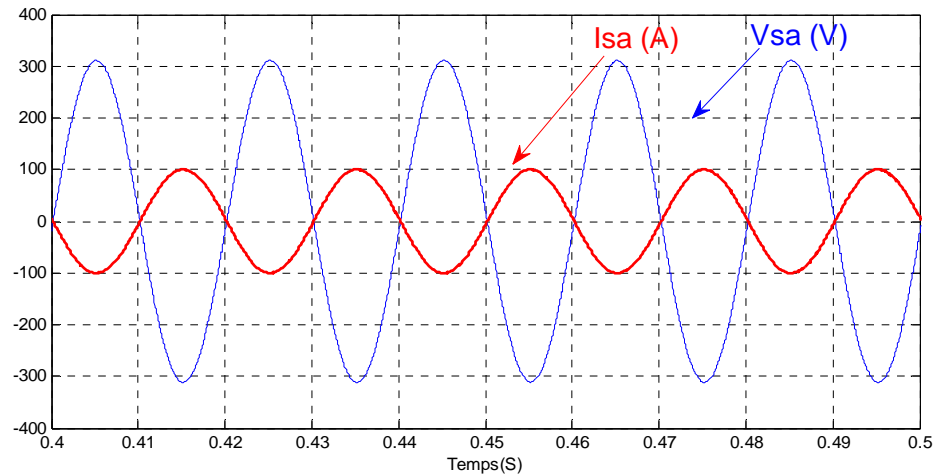


Figure IV.23 : Zoom sur le courant et la tension statorique

IV.9 Tests de robustesse :

Dans le but de tester la robustesse de la commande par les régulateurs **PI**, nous avons également étudié l'influence de la variation de la résistance rotorique, inductance et mutuelle sur le découplage entre le flux et le couple.

Pour cela nous avons simulé le système pour une augmentation de 50% de la résistance rotorique (R_r) introduite à $t = 0.3s$, aussi une diminution de 25% des inductances propres et mutuelle (L_r , L_s et M) introduite à $t = 0.3s$.

Les figures (IV.24, IV.25) illustrent les résultats du test de simulation.

A partir des résultats obtenus, nous pouvons conclure que la commande par les régulateurs **PI** présente une faible robustesse dans le cas de variations paramétriques de la machine. La dynamique de poursuite de la consigne est affectée par la variation paramétrique introduite sur le système.

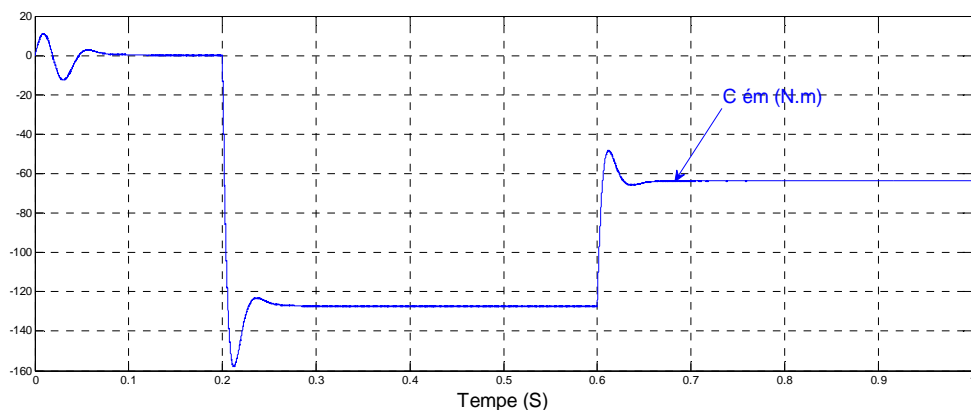


Figure IV.24 : Couple électromagnétique

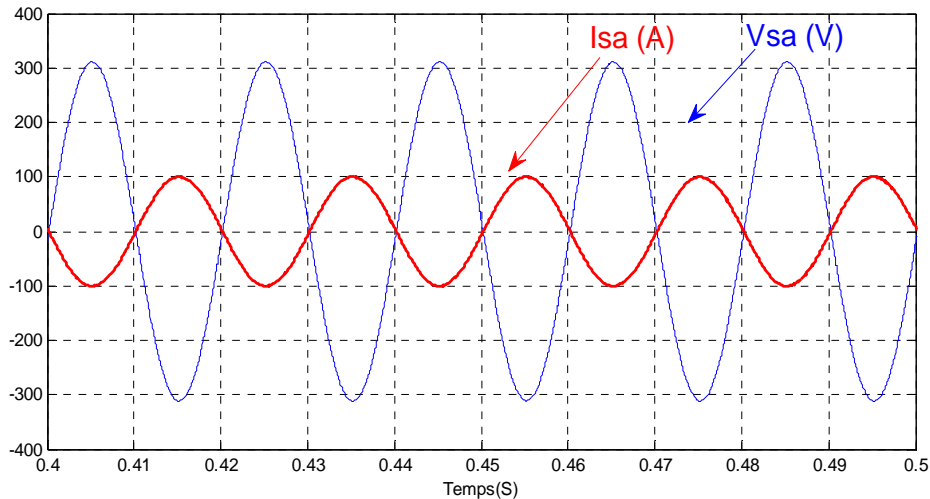


Figure IV.25 : Zoom sur le courant et la tension statoriques

IV.10 Conclusion :

Ce chapitre nous a permis d'étudier et d'appliquer la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la génératrice asynchrone à double alimentation. Le choix de l'orientation du flux a été pris en orientant le flux statorique selon l'axe d. La méthode du flux orienté est appliquée depuis quelques années à la MADA reste la méthode la plus répandue. En effet, celle-ci nous permet non seulement de simplifier le modèle de la machine mais aussi de découpler la régulation du couple et celle du flux. A partir de la simulation numérique, on a constaté qu'effectivement la technique d'orientation du flux statorique permet de découpler le flux et les puissances de sorte que la composante directe du courant rotorique contrôle la puissance réactive, et la composante en quadrature contrôle la puissance active. Ceci nous permet d'obtenir des performances dynamiques élevées similaires à celle de la MCC.

IV.11 References bibliographique:

- [1] Bose B. K, "Power Electronics and AC Drives", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1987.
- [2] Hirofumi A. and Hikaru S., "Control and Performance of a Doubly-Fed Induction Machine Intended for a Flywheel Energy Storage System", IEEE Transactions on Power Electronics, vol.17, N°:1, pp.109-116, January 2002.
- [3] Leonhard W., "Control Electrical", Springer verlag Berlin Heidelberg printed in Germany, 1985.
- [4] Drid. S, "Contribution à la Modélisation et à la Commande Robuste d'une Machine à Induction Double Alimentée à Flux Orienté avec ptimisation de la Structure d'Alimentation," thèse de doctorat en sciences de l'université de Batna, 2005.
- [5] Zidani. F, "Contribution au contrôle et au diagnostique de la machine asynchrone par la logique floue", thèse de doctorat, Batna, 2002.
- [6] R. Abdessemed et M. Kadjouj, "Modélisation des machines électriques", Presse de université de Batna, 1997.
- [7] A. Boyette, "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne," Thèse de doctorat de l'université de Henri Poincaré, Nancy I, Décembre 2006.
- [8] Omar BOUHALI, « Contribution des convertisseurs multi niveaux au raccordement d'origine éolienne sur un réseau électrique ». Thèse doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger 2008.
- [9]. N. P. QUANG, J.-A. DITTRICH. « Vector control of three-phase ac machines » Springer, 2008.
- [10] E. Mamdani, "An Exprimment in Linguistic Synthesis with Fuzzy Logic Controller," International Journal on Man-Machine Studies, Vol. 7, pp. 311-323, 1975.
- [11] Khelfa. S, "Commande vectorielle d'une machine à induction ; impacts de la saturation de la machine et la modulation du convertisseur", thèse de magister, Batna 2001.
- [12] Poitiers. F, Machoum. M, Le Doeuff. R, zaim. M. E, "control of doubly fed induction generator for wind energy conversion systems", international journal of renewable energy engeneering, Vol. 3, N° 3, pp.373-378, December 2001.

- [13] F.Akel , "Etude et Realisation d'un Emulateur de Turbine Eolienne " , Mémoire de magister Ecole Nationale polytechnique,2009.
- [14] S. Metatla," Optimisation et Régulation des Puissances d'une Eolienne à Base d'une MADA " , Mémoire de magister Ecole Nationale polytechnique.2009.
- 15** [15] 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 ". Mémoire de Magister Université de Batna ,2004 .
- 16** [16] Chaiba. A, R. Abdessemed, and M. L. Bendaas, "A Torque Tracking Control Algorithm for Doubly-Fed Induction Generator ", Journal of Electrical Engineering Elektrotechnický časopis, JEEEC, Vol.59, No.3, pp. 165-168, Slovakia, 2008.
- [17] Tnani. S, "Contribution à l'étude et la commande de la machine généralisée", thèse de doctorat de l'université de Franch-Comté, octobre 1995.
- [18] Robyns. B, Nasser. M, Berthereau. F, Labrique. F, "Equivalent continuous dynamic odel of a variable speed wind generator", Proceedings of the 4th International Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems, ELECTROMOTION2001, Bologna, Italia, 2001.
- [19] Labrique. F, H. Buyse, G. Séguier, R. Bausière, "Les convertisseurs de l'électronique de puissance, Commande et comportement dynamique", Tome 5, Technique et Documentation – Lavoisier, 1998.
- [20] Hautier. J.P, Caron. J.P, "Convertisseurs statiques, méthodologie causale de modélisation et de commande", Edition Technip, 1999.
- [21] Chaiba. A, R. Abdessemed, M. L. Bendaas and A. Dendouga,"Performances of Torque Tracking Control for Doubly Fed Asynchronous Motor using PI and Fuzzy Logic ontrollers", Journal of Electrical Engineering, JEE, Vol.5, N°2, pp. 25-30, Romania, 2005.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de ce mémoire était la modélisation et la commande PI d'une génératrice asynchrone à double alimentation, ainsi que l'apport qu'elle pourrait apporter dans un système éolien à vitesse variable. Pour ce faire, on a présenté brièvement les différents types d'éoliennes existantes, les différentes génératrices utilisées et les avantages justifiant le choix de la machine asynchrone à double alimentation. De plus, on a établi le modèle mathématique des éléments principaux constituant la chaîne de conversion électromécanique dans l'éolienne.

En suite, afin de mieux commander la puissance active et réactive statorique de l'aérogénérateur asynchrone à double alimentation, on a appliqué la technique de la commande vectorielle à la GADA pour maîtriser la difficulté de son réglage. On a associé à cette technique de commande vectorielle un régulateur de puissance et de courant de type PI, ce qui a permis au système éolien d'obtenir une bonne performance en terme de poursuite du point de fonctionnement optimal à maximum de puissance. D'autre part, la structure choisie pour alimenter le rotor de la GADA constituée par deux convertisseurs électroniques réversibles, a été d'une grande importance dans le fonctionnement de la GADA à facteur de puissance unitaire, et a permis la bidirectionnalité de la conversion énergétique rotorique.

Les résultats obtenus par la simulation montrent bien que le réglage par des régulateurs PI optimisés par Essaim de Particules apporte des hautes performances et robustesse au réglage de puissance active et réactive. De plus, cette technique de commande a permis d'obtenir un découplage parfait entre les deux puissances en tout instant. Ainsi que, l'utilisation de la stratégie de commande MLI pour le contrôle de l'onduleur a permis d'obtenir des courants parfaitement sinusoïdaux sans harmoniques au niveau du stator, ce qui implique une énergie propre fournie au réseau.

Finalement, il va sans dire que la GADA a un pouvoir d'application très vaste dans les applications de production de l'énergie électrique, notamment dans les systèmes éoliens.