

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



**UNIVERSITE MOULLOUD MAMMERI DETIZI-OUZOU
FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE**

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Génie électrique
Spécialité : ELECTRONIQUE
Option : MICRO-ELECTRONIQUE

Présenté par
Khalfouni Hayet
Seddiki Ferroudja

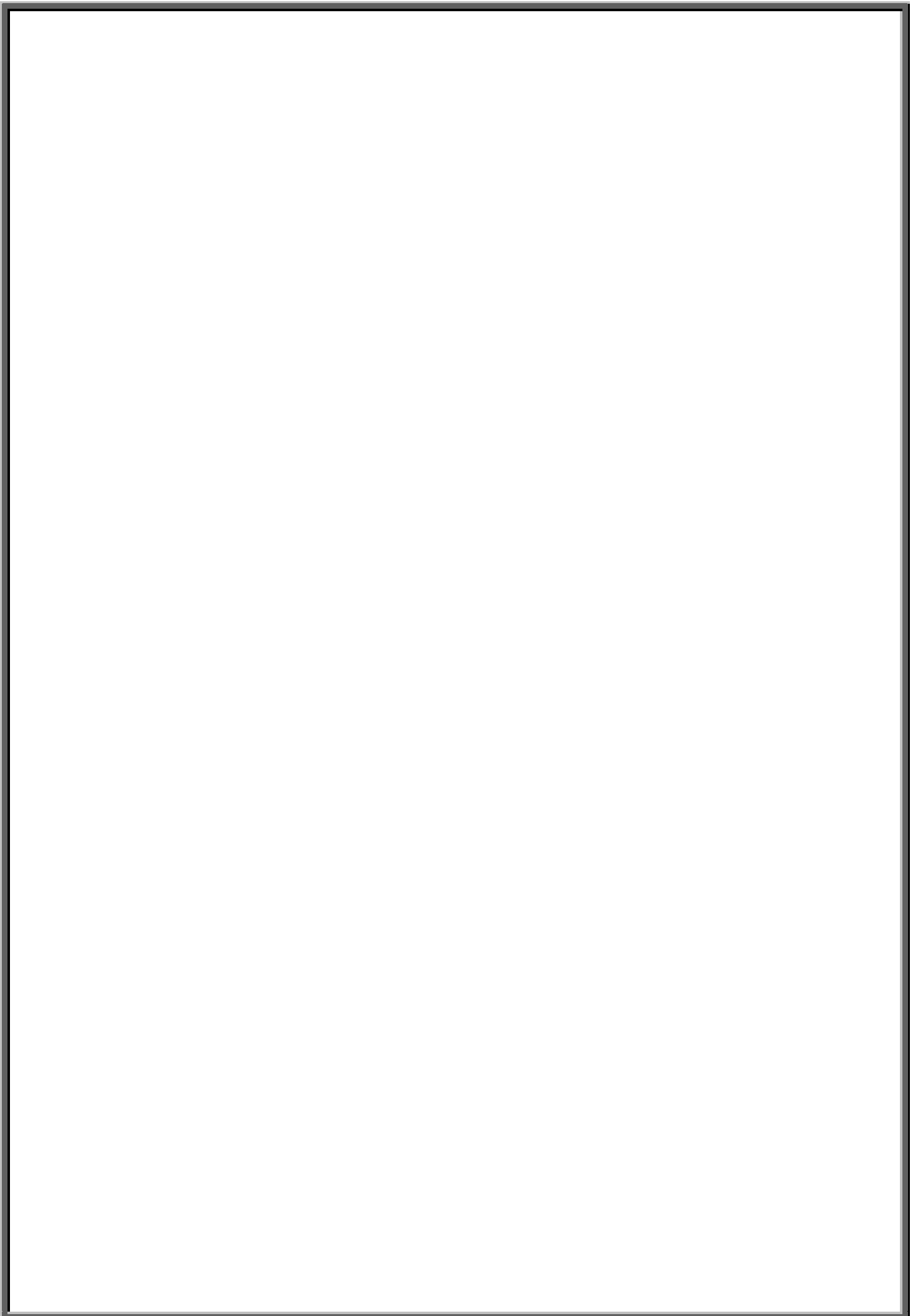
THEME

**ETUDE ET SIMULATION D'UNE INSTALLATION
EOLIENNE**

Devant le jury d'examen:

M^r	Djoudi Abdelhak	Encadreur	Maitre de Recherche	CDER
M^{elle}	Hocine Dalila	Co-encadreur	Maître de Conférence Classe A	UMMTO
M^{elle}	Hatem Djedjega	Examinatrice	Maître de Conférence Classe A	UMMTO
M^r	Zirmi Rachid	Président	Maître de Conférence Classe B	UMMTO
M^{eme}	Amara Karima	Doctorante	Invitée	UMMTO

Promotion 2017/2018



Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier profondément Dieu, le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté ainsi que la santé pour réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements et nos sincères reconnaissances à Mr. **Abdelhak DJOUDI**, pour sa disponibilité, ses conseils judicieux, ses directives et ses orientations concernant le travail proposé tout en nous accordant sa confiance et en nous faisant profiter de sa large expérience tout au long de la réalisation de ce projet de fin d'étude.

Nous tenons à remercier **M^{elle} Hocine.D.**

Nos remercions les membres du jury qui ont fait l'honneur de participer au jugement de ce travail.

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont directement contribué au bon déroulement de ce projet de fin d'étude.

A nos parents et à toute la famille Khalfouni et Seddiki

A nos frères et sœurs.

A tous nos amis particulièrement ceux qui nous ont aidé dans ce projet.

Et enfin nos remerciements à toutes les personnes qui ont eu la gentillesse et la gratitude de nous aider de près ou de loin dans la réalisation de ce projet.

Dédicace :

Je dédie ce travail a **ma mère** qui ma encouragée à aller de l'avant et
qui ma donne tout son amour pour reprendre mes études.

A la mémoire de **mon père** qui nous a quittés.

A mes chers frères : **Karim, Hakim, Mohamed, Messoud, Ali.**

Et mes chères sœurs **louiza, Nadia.**

Ainsi a toute **ma famille** : mes tentes, mes oncles, et mes cousins et
mes cousines.

A tout mes amis.

Et a mon cher binôme ferroudja.

Dédicace :

Je dédie ce travail a **ma mère** qui ma encouragée à aller de l'avant et
qui ma donne tout son amour pour reprendre mes études.

A **Mon très cher père** qui a fait beaucoup de sacrifices pour moi.

A mes chers frères : **Houcine, Lounes.**

Et mes chères sœurs **Nouara, Kenza.**

A mon cher fiancé **Ahmed** et sa famille.

Ainsi a toute **ma famille** : mes tentes, mes oncles, et mes cousins et
mes cousines.

A tout mes amis.

Et a mon cher binôme Hayet.

Liste des figures

Figure (I.1): Photographie de deux moulins à vent	3
Figure. I.2 : types d'anémomètres	4
Figure. I.3 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	4
Figure I.4. Constitution d'une nacelle	6
Figure. I.5 : Différentes parties de l'éolienne-NORDEX N60-1.3MW	6
Figure .I.6 Principe de la conversion d'énergie.....	8
Figure .I.7 Éoliennes à axe vertical : turbine Savonius. Turbine Darrieur et Darrieur en H.....	9
Figure .I.8 Éolienne en amont et en aval.....	10
Figure .I.9 Eolienne à vitesse fixe	12
Figure. I.10 éoliennes a vitesse variable.....	13
Figure. I.11 Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau	14
Figure. I.12 schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor.....	15
Figure. I.13 MADA - structure Kramer	15
Figure. I.14 MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée.....	16
Figure. I.15 Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.....	16
Figure .I.16 Parc éolien offshore	17
Figure. I.17 Parc éolien onshore.....	18
Figure(I.18) le schéma da la chaine éolienne	19
Figure .II.1 structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA	21
Figure .II.2 schéma de la turbine éolienne	22
Figure. II.3 passage du système triphasé au biphasé.....	30
Figure II.4 construction d'un signal de commande d'une M.L.I sinus-triangle.....	38
Figure. II.5 Schéma représentation d'un onduleur de tension triphasé	39
Figure. II.6 modèle simple de l'onduleur de tension triphasé	39

Figure III.1. Schéma globale illustrant le fonctionnement d'une éolienne à base d'une MADA commandée par un onduleur de tension	44
Figure III.2 les tensions statoriques triphasés (V).....	47
Figure III.3 la vitesse du vent (m/s)	47
Figure III.4 la vitesse de rotation (rad/s)	48
Figure III.5 la puissance active statorique de référence (watt)	48
Figure III.6 la puissance réactive statorique de référence (VAR).....	49
Figure III.7 la puissance active statorique (watt)	49
Figure III.8 la puissance réactive statorique (VAR).....	50
Figure III.9 les courants statoriques triphasés (A)	50
Figure III.10 les courants statoriques sur le repère dq(A).....	51
Figure III.11 les flux statoriques triphasé (Wb)	51
Figure III.12 les flux rotoriques triphasé (Wb)	52
Figure III.13 le coefficient de puissance	52
Figure III.14 le couple électromagnétique (Nm).....	53
Figure III.15 le couple résistant (Nm)	53

SOMMAIRE

Sommaire

NOMENCLATURE

Introduction Générale	1
CHAPITRE I: Généralités sur les éoliennes	
I.1 Introduction	2
I.2 Historique.....	2
I.3 Quelque notion sur le vent	3
I.4 Définition de l'énergie éolienne.....	4
I.5 Principaux composants d'une éolienne.....	5
I.6 Principe de fonctionnement d'une éolienne	7
I.7 Classification des éoliennes	8
I.7.1 Selon la conception mécanique	8
A/ Eolienne à axe verticale	8
A/1-Avantages	9
A/2- Inconvénients	9
B/ Eoliennes à axe horizontal	10
B/1- Avantages	10
B/2- Inconvénients	10
I.7.2. selon l'utilisation	11
A/éolienne raccordée au réseau	11
B/ éolienne autonome	11
I.8. les éoliennes à vitesse fixe	11
I.9. Les éoliennes à vitesse variable	12
I.10. Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA).....	14
I.11. Les différentes structures d'alimentation de la MADA	14
I.11.1. Machine Asynchrone à Double Alimentation Type "Brushless"	14
I.11.2 Machine Asynchrone à Double Alimentation Type « Rotor Bobiné »	15
I-11-3 MADA – structure de Kramer.....	15
I-11-4 MADA à énergie rotorique dissipée	16
I-11-5 MADA – structure de « Scherbius» avec cycloconvertisseur	16
I.12. Les différentes installations des éoliennes	17
I.12.a. L'éolienne offshore	17
I.12.b L'éolienne Onshore.....	18
I.13. la chaîne éolienne considérée dans notre travail	19

Sommaire

I.14. conclusion	20
------------------------	----

CHAPITRE II : Modélisation de la chaîne éolienne

II-1 Introduction	21
I-2 Modélisation de la turbine	22
II-3 Modélisation du multiplicateur de vitesse	23
II-4 L'équation dynamique de l'arbre	24
II-5 Modélisation de la MADA	24
II-5-1- hypothèses simplificatrices	25
II-5-2 modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentions (MADA).....	25
II-5-3 Les équations électriques dans le repère (a b c)	26
II-5-4 Les équations magnétiques dans le repère (a b c).....	27
II-5-5 L'équation mécanique de la MADA	29
II-6- Modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère de Park	30
II-6-1 La transformation de Park.....	30
II-6-2 Les équations électriques dans le repère (dq)	31
II-6-3 L'équation mécanique et le couple électromagnétique	32
II-7 Choix de référentiel	33
A/ Référentiel lié au stator.....	33
B/ Référentiel lié au rotor	34
C/ Référentiel lié au vecteur de tension de réseau électrique.....	34
II-7-1 Les équations électriques deviennent.....	35
II-7-2 Les équations magnétiques deviennent.....	35
I-7-3 Le couple électromagnétique	35
I-8 Modélisation de l'onduleur de tension	37
II-9 La commande M.L.I.....	38
II-10 conclusion	42

CHAPITRE III: Etude et simulation d'une chaîne éolienne à base d'une

MADA

III.1. Introduction	43
III.2. Description générale de la chaîne éolienne	43
III.1.La partie puissance	45
a. La turbine éolienne.....	45
b. La Machine asynchrone à double alimentation (MADA).....	45
c. L'onduleur de tension	45

Sommaire

d. . Les Transformateurs.....	45
e. . Les Capteurs	45
III.2.La partie commande	46
a. Le Block MPPT	46
b. Le Block command	46
c. La commande MLI	46
III.3. Les résultats de simulation	47
III.4. Conclusion.....	54
CONCLUSION GENERALE	55
ANNEXES	
BIBLIOGRAPHIQUES	

NOMENCLATURE

NOMONCLATURE

MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
p_v	La puissance du vent
ρ	Densité de l'air
S	Surface circulaire balayée par la turbine
V	Vitesse du vent
P_{aer}	Puissance aérodynamique
C_p	Le coefficient de puissance
λ	Ratio de la vitesse
β	Angle de calage
$\Omega_{turbine}$	Vitesse de rotation du la turbine
Ω_{mec}	Vitesse de rotation de la génératrice
R	Rayon de la turbine
C_g	Couple mécanique coté génératrice
C_{aer}	Couple aérodynamique
G	Gain du multiplicateur de vitesse
Ω_{mec}	Vitesse de rotation de la génératrice
J	L'inertie totale
$J_{turbine}$	L'inertiede la turbine
J_g	L'inertie de lagénératrice
C_{mec}	Couple mécanique
$C_{g.}$	Couple issu du multiplicateur
C_{em}	Couple électromagnétique
C_{vis}	Couple dû aux frottements visqueux
f_{rt}	Coefficient de frottements
θ	L'écart angulaire entre deux phases, statoriques et rotoriques
s, r	Indice du stator ,du rotor
d, q	Indice des composantes orthogonales directes et en quadrature
V_s, V_r	Tension simple respectivement statorique et rotorique

I_s, I_r	Courant simple respectivement statorique et rotorique
φ_s, φ_r	Flux statorique et rotorique
R_s, R_r	Résistances statorique et rotorique
L_{ss}, L_{rr}	Inductances cyclique statorique et rotorique de la machine
M_{sr}	Inductances mutuelle stator-rotor
l_s, l_r	Inductances propres statoriques et rotoriques de la machine
C_m	Couple moteur fournie par l'éolienne
Ω_r	Vitesse angulaire de rotation du rotor de la machine
θ_s, θ_r	Angle des grandeurs statoriques et rotoriques
$[P(\alpha)]$	Matrice de transformation de Parck
$[P(\alpha)]^{-1}$	Matrice de transformation de Pack inverse

α orresponde à θ_s , si on a fait transformation de Park des grandeurs Statorique
Corresponde à θ_r , si on a fait transformation de Park des grandeurs rotorique

ω_s, ω_r	Pulsation statorique ,rotorique
ω	Pulsation mécanique
p	Nombre de paires de pôles de la machine
δ	Coefficient de dispersion
g	Glissement de machine asynchrone
L_m	Inductance mutuelle maximum entre les enroulements du stator et rotor
u_p	Amplitude du signal modulant (onde sinusoïdale)
u_r	Amplitude du signal porteuse (onde triangulaire)
f_p	Fréquence du signal modulant
f_r	Fréquence du signal porteuse
M.L.I	Modulation de Largeur d'Impulsions
MPPT	Maximum Power Trackin (Point de puissance maximum Poursuite)

Introduction

Générale

Introduction générale

L'énergie électrique est un élément crucial pour tout développement socio-économique. Il est nécessaire de faire appel à des sources d'énergie nouvelles qui seront sans conséquence pour l'homme et l'environnement. C'est ainsi que les pays industrialisés se sont lancés dans le développement et l'utilisation des sources d'énergie renouvelables.

Les énergies renouvelables (eau, vent, soleil) sont aujourd'hui de plus en plus utilisées dans la production de l'électricité. Ces énergies propres et gratuites représentent une bonne alternative aux ressources fossiles. Parmi ces énergies alternatives renouvelables, nous sommes intéressés dans notre travail l'énergie d'origine éolienne qui est aujourd'hui en plein essor dans le monde.

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique. Il y a Plusieurs technologies utilisées pour capter l'énergie du vent (à axe vertical ou axe horizontal). Il existe aussi différentes configurations d'un système éolien (à vitesse fixe et à vitesse variable).

Les éoliennes de dernière génération fonctionnent 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 énergétique comparativement aux éoliennes à vitesse fixe.

Dans notre étude, nous nous sommes intéressés à la modélisation des différentes composantes d'un système éolien fonctionnant à vitesse variable en se basant sur une génératrice asynchrone à double alimentation(MADA). Pour cela, notre manuscrit est subdivisé comme suit :

- Dans le premier chapitre, nous allons commencer par la définition de l'énergie éolienne puis nous présentons les différents types d'éoliennes avec leurs constituants et principe de fonctionnement. Nous présentons également les différentes installations des éoliennes et nous exposons la chaîne éolienne de notre projet.
- Le deuxième chapitre se compose de trois parties :

La première partie est consacrée à la modélisation de la turbine, du multiplicateur de vitesse en présentant l'équation dynamique de l'arbre.

La deuxième partie sera dédiée à l'étude de la partie de conversion mécanique/électrique qui est la machine asynchrone à double alimentation (MADA) en présentant le modèle mathématique permettant de traduire son comportement.

Introduction générale

- La troisième partie concernera la modélisation de l'onduleur qui sera suivie d'une explication détaillée de la méthode M.L.I.

Le troisième chapitre sera consacré à la simulation de la chaîne éolienne en utilisant le logiciel MATLAB. Les résultats de simulation seront présentés et interprétés.

Nous terminons notre mémoire par une conclusion générale et quelques perspectives.

CHAPITRE I

Généralités

sur les éoliennes

I.1 Introduction :

Ces dernières années, l'intérêt dans l'utilisation des énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux.

Les énergies non renouvelables sont les énergies fossiles comme le pétrole, le charbon et le gaz dont les gisements limites peuvent être épuisés et en plus de ça sont responsables de l'effet de serre à l'origine du réchauffement climatique qui menace notre planète et les générations futures.

Une énergie renouvelable est une énergie qui se renouvelle pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique) [1].

Parmi ces sources d'énergie, l'éolienne représente un potentiel assez important non pas pour remplacer les énergies existantes mais pour palier à l'accroissement de la demande de plus en plus galopante.

Le fonctionnement d'une éolienne se fait en deux étapes. La première étape sert la conversion de l'énergie du vent en énergie mécanique sous forme d'une rotation via une turbine éolienne. La deuxième étape est la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique via une génératrice électrique. Cette dernière peut être connectée au réseau électrique ou fonctionne d'une manière autonome.

Dans ce chapitre, nous allons présenter des rappels sur les systèmes éoliens, les principaux composants et le principe de fonctionnement d'une éolienne, suivi d'un rappel des différents types des éoliennes, ainsi que les différentes machines utilisées.

I.2 Historique :

Depuis l'Antiquité, les « moulins à vent » convertissent l'énergie éolienne en énergie mécanique, généralement utilisée pour moulin du grain (Figure I.1). De nos jours, on trouve encore des éoliennes couplées à des pompes à eau, souvent utilisées pour irriguer des zones sèches, assécher des zones humides ou abreuver le bétail. L'arrivée de l'électricité donne l'idée à « **Poul La Cour** » en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pût être « redécouverte » et de nouveau utilisé (dans les années 40 au Danemark, 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont

fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnait dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. Cette technologie a été quelque peu délaissée par la suite et il faudra attendre la crise pétrolière de 1974 qui a relancé les études et les expériences sur les éoliennes [2].



Figure (I.1): Photographie de deux moulins à vent

I.3 Quelques notions sur le vent :

Le soleil chauffe inégalement la Terre, ce qui crée des zones d'air chaud et d'autre d'air froid qui possèdent également des différences de pressions atmosphérique.

Ces différences de pressions engendrent des mouvements d'air nommés **vent**.

Le vent constitue une source d'énergie qui est continuellement renouvelée par des phénomènes naturels. On mesure la vitesse du vent au moyen d'un instrument appelé anémomètre (figure. I.2) qui tourne d'autant plus vite que le vent souffle fort.



Figure. I.2 : types d'anémomètres

Le vent est caractérisé par deux grandeurs variables par rapport au temps :

- la direction.
- La vitesse.

I.4 Définition de l'énergie éolienne :

Un aérogénérateur, plus communément 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 (Figure. I.3).

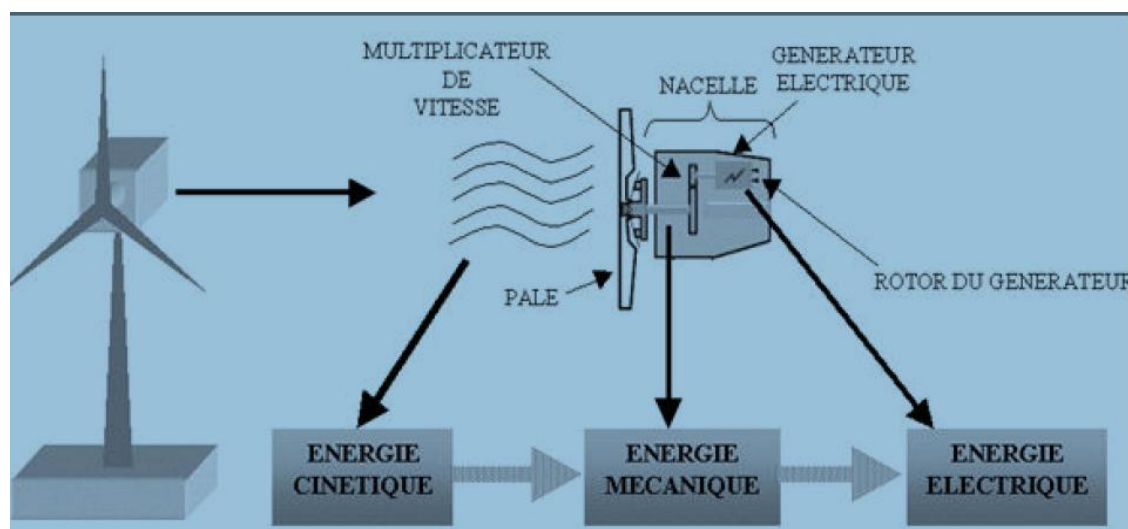


Figure. I.3 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffusée et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. L'éolienne se compose d'une nacelle, d'un mât, de pâles et d'un multiplicateur de vitesse. La fabrication de ces différents éléments est d'une technologie avancée, ce qui les rend par conséquent onéreux.

Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également en mer où la présence du vent est plus régulière [3].

I.5 Principaux composants d'une éolienne :

Une éolienne est généralement constituée de trois éléments principaux (figure. I.5)

1. le mât.
2. la nacelle.
3. le moyeu.

Le mât : généralement en métal, qui supporte la nacelle et le rotor de la turbine. Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne, le mât est plus au moins haut (dépend de la machine et de la vitesse du vent). Il peut faire en générale de 10 à 100m de hauteur.

La nacelle : est montée au sommet du mât ; et abritant les composants mécanique et pneumatique et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine, le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électrique descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne.

La nacelle, comporte aussi le multiplicateur de vitesse sert à élever la vitesse de rotation de l'arbre qui entraîne la génératrice électrique. Cet arbre 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.

Les principaux éléments de la nacelle sont illustrés dans la figure(I.4).

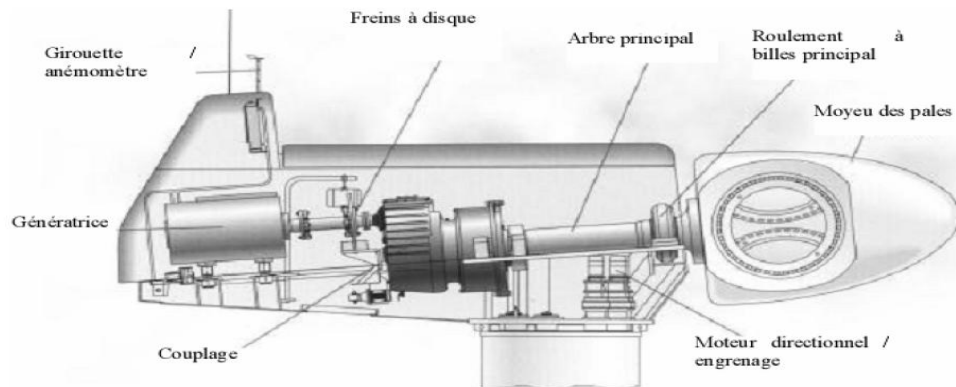


Figure I.4. Constitution d'une nacelle

Le moyeu : il permet la fixation des pâles .l'ensemble est relié de l'éolienne.

La (Figure. I.5) représente les différentes parties d'une éolienne tripale à axe horizontal de type Nordex N60 (1.3MW) [4].

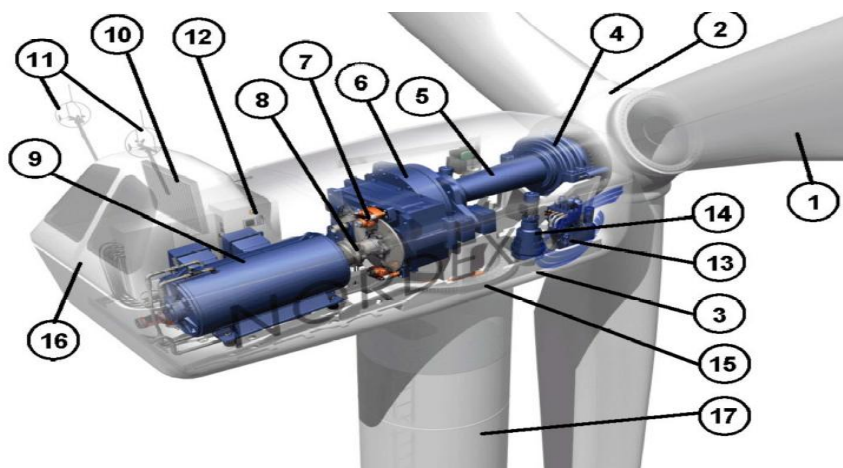


Figure. I.5 : Différentes parties de l'éolienne-NORDEX N60-1.3MW.

Elle est constituée d'une tour (17), supporte la nacelle (3) et le moyeu de la turbine (2) sur lequel sont fixées les pâles (1). Il est important qu'il soit haut du fait de l'augmentation de la

vitesse du vent avec la hauteur et aussi du diamètre des pâles.

La nacelle (3) partiellement accueille la génératrice (9) et son système de refroidissement (10), le multiplicateur de vitesse (6) et différents équipements électroniques de contrôle (12) qui permettent de commander les différents mécanismes d'orientation (13), (14), (15) ainsi que le fonctionnement global de l'éolienne. Le multiplicateur de vitesse comporte un arbre lent (5) muni d'un palier à billes, et un arbre à grande vitesse. Il est équipé d'un frein mécanique à disque (7) et un accouplement flexible (8) avec le générateur (9). Le tout est protégé par un capot en acier (16).

Un anémomètre et une girouette (11) situés sur le toit de la nacelle fournissent les données nécessaires au système de contrôle du système éolien.

I.6 Principe de fonctionnement d'une éolienne :

Dans une centrale éolienne c'est le mouvement du vent qui fournit l'énergie pour la production de l'électricité, la turbine éolienne comporte généralement 3 pâles qui tourne avec une vitesse variable, comprise généralement pour les grandes machines entre 12 et 18 tr/mn.

Cette dernière est entonnée par l'énergie du vent et par conséquence entraîne le rotor. La nacelle implique tous les composants nécessaires pour la production de l'électricité.

Pour augmenter l'efficacité de l'éolienne, la nacelle s'oriente pour être toujours face au vent, si le vent est trop faible les pâles pivote de manière à captée le maximum du vent, si le vent est trop fort il se met au drapeau par mesure de sécurité, et l'éolienne s'arrête. Dans la nacelle le mouvement de rotation est transmis à l'arbre lent, la vitesse de rotation de l'arbre lent est augmentée par un multiplicateur de vitesse de l'éolienne. L'énergie mécanique transmise par le multiplicateur est transformée en énergie électrique par un générateur.

Les systèmes éoliens de grande échelle sont connectés au réseau électrique d'une tension d'environ 690 volts.

L'éolienne permet de convertir l'énergie cinétique 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. I.6) [5].

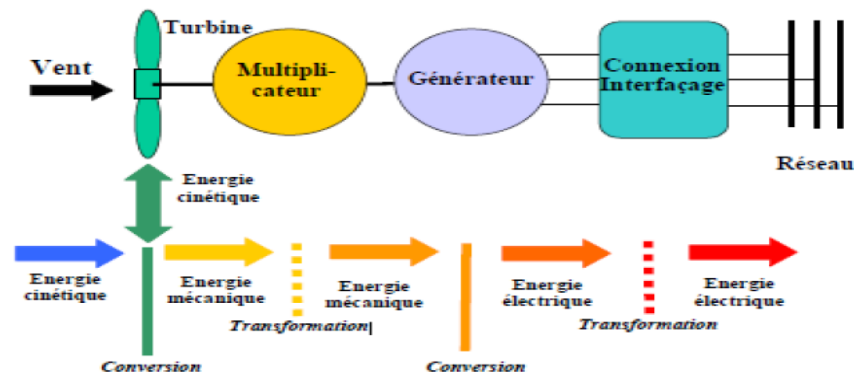


Figure .I.6 Principe de la conversion d'énergie

I.7 Classification des éoliennes :

I.7.1 Selon la conception mécanique :

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui se différencient essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir la turbine éolienne. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient une éolienne à axe vertical ou à axe horizontal [6].

A/ Eolienne à axe verticale :

Les principaux capteurs à axe vertical sont le rotor de Savonius, le rotor de Darrieux classique et Darrieux en forme de H (Figure .I.7) .

Elles sont très peu mises en jeu dans nos jours car elles sont moins performantes que celles à axe horizontal. Elles fonctionnent sur le même principe que les roues hydraulique avec une direction de vent perpendiculaire à l'axe de rotation. La conception verticale offre l'avantage de mettre la machine au sol (accès plus facile à la génératrice et au multiplicateur) mais cela impose que l'éolienne fonctionne avec des vents proches du sol, moins forts qu'en hauteurs. De par son axe vertical, il y'a Symétrie de révolution et le vent peut provenir de toutes les directions sans avoir à orienter le rotor. Par contre ce type d'éolienne ne peut pas démarrer automatiquement, il faut la lancer dès l'apparition d'un vent suffisamment fort pour permettre la production [7].

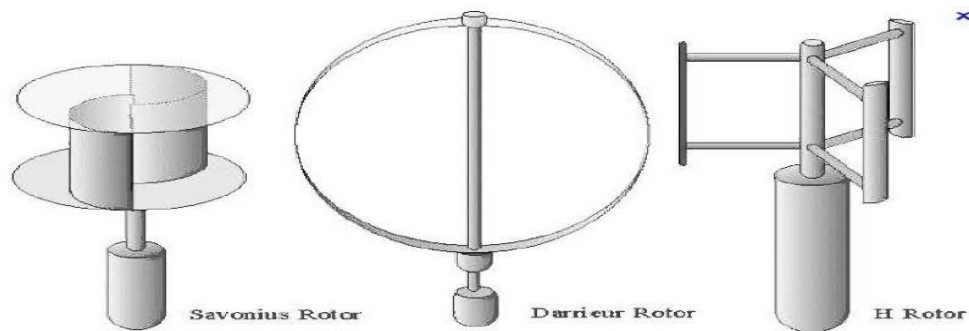


Figure .I.7 Éoliennes à axe vertical : turbine Savonius. Turbine Darrieux et Darrieux en H.

A/1-Avantages :

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

A/2- Inconvénients :

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

B/- Eolienne à axe horizontal :

De par leur rendement aérodynamique élevé, les éoliennes à axe horizontal sont les plus utilisées pour la conversion de l'énergie éolienne à une grande échelle. Les dimensions des pâles et celles du mât sont dépendantes de la puissance maximale qu'on voudrait extraire [8].

Deux types de configuration peuvent être rencontrés : les éoliennes « amont », les éoliennes « aval » (figure I.8).

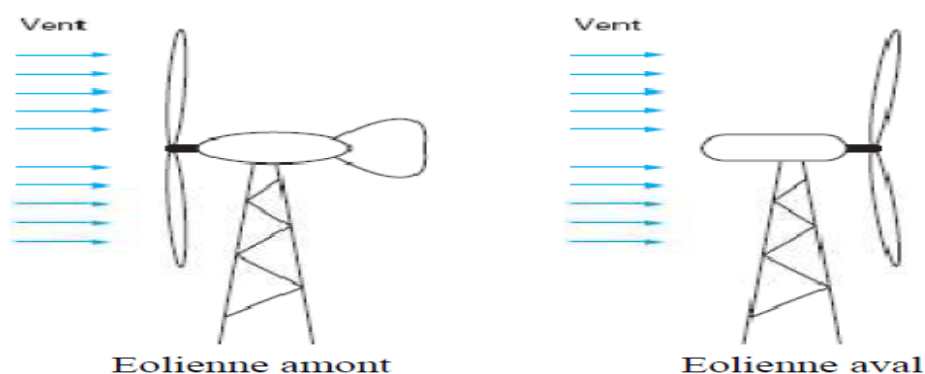


Figure .I.8 Éolienne en amont et en aval

B/1- Avantages :

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

B/2- Inconvénients :

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

I.7.2. selon l'utilisation :**A/éolienne raccordée au réseau :**

Plus de 95% de la capacité mondiale d'énergie éolienne est raccordée à de grands réseaux de puissance. Le raccordement à un réseau permet :

1. D'implanter les éoliennes au cœur de la ressource et non au plus près de la demande ;
2. D'amortir les fluctuations de production ;
3. De disposer de sources d'excitation permettant d'utiliser comme générateurs des machines asynchrones.

B/ éolienne autonome :

Les systèmes autonomes sont installés aux endroits bien ventés où le raccordement au réseau électrique est impossible, difficiles à réaliser ou trop cher, ces petites éoliennes sont généralement associées à des groupes électrogènes et/ou des systèmes de stockage.

Les éoliennes autonomes sont utilisées dans les gammes de puissances varie de quelques dizaines de watts à quelques dizaines de kilowatts(KW) pour l'alimentation d'appareils électriques d'instrumentation ou d'éclairage. Les plus petites éoliennes sont utilisées pour les bateaux, le camping ou des stations météo.

Un système éolien autonome type est composé d'un aérogénérateur d'une batterie, d'un régulateur qui assure le contrôle du chargement et du déchargement de la batterie.

Il composé éventuellement de convertisseurs qui transforment le courant continu(CC) en courant alternatif(CA) pour les appareils qui en ont besoin.

I.8. les éoliennes à vitesse fixe :

Les premières éoliennes de grande puissance mises en œuvre reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil directement couplée au réseau électrique (Figure 1.9).

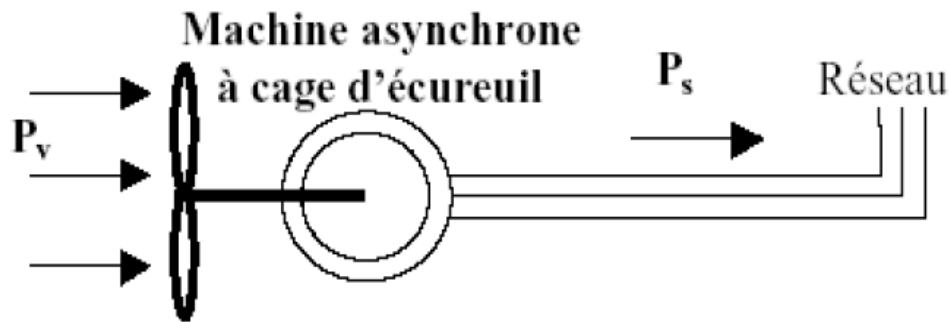


Figure .I.9 Eolienne à vitesse fixe.

Parmi ses avantages :

1. Elles possèdent un système électrique plus simple, car elles n'ont pas besoin de système électronique de commande.
2. Elles ont une très grande fiabilité.
3. Moins cher [9].

I.9. Les éoliennes 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 [10].

Les deux structures existantes des éoliennes à vitesse variable sont présentées sur la (figure I.9). La configuration de (la figure I.-10-a), est basée sur une machine asynchrone à cage, pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques.

La configuration de (la figure I.10-b), est basée sur une machine asynchrone à double alimentation et à rotor bobiné, la vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance, situés au circuit rotorique [11].

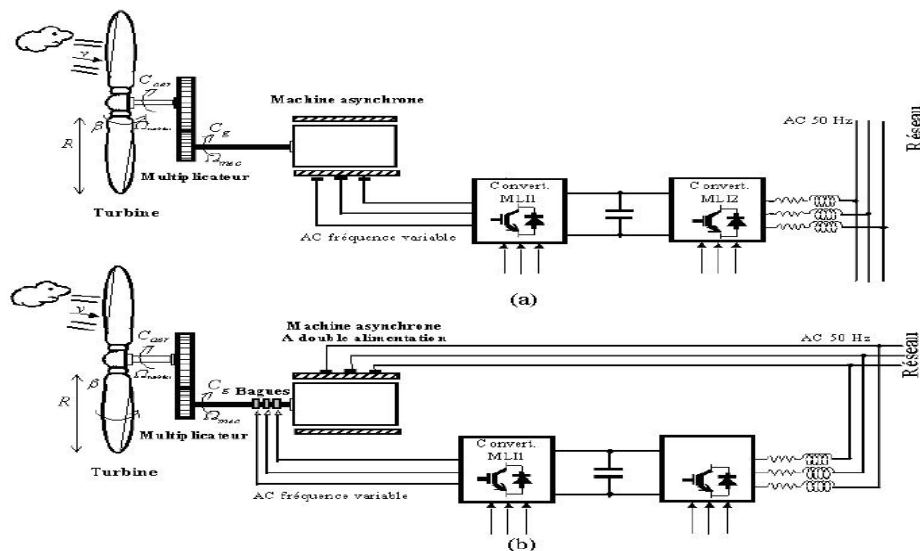


Figure. I.10 éoliennes a vitesse variable

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

1. Elles génèrent une puissance électrique d'une meilleure qualité.
2. Elles augmentent la plage de fonctionnement, notamment pour les faibles vitesses de vent.
3. Elles nécessitent un système d'orientation des pales simplifié. En effet, la possibilité de contrôler la vitesse de générateur via le couple électromagnétique permet de réduire le rôle du système d'orientation des pâles, qui interviendra essentiellement pour limiter la vitesse de la turbine et la puissance générée en présence de vitesse de vent élevés. En conséquence, pour de faibles vitesses de vent, l'angle d'orientation des pales devient fixe.
4. Elles réduisent le bruit lors de fonctionnement à faible puissance car la vitesse est lente.
5. Elles permettent une meilleure intégration de l'éolienne dans le réseau électrique.
6. Elles sont les moins exigeantes en termes d'entretien [12].

I.10. Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA):

La machine asynchrone à double alimentation est un générateur à induction. Les enroulements du stator sont connectés directement au réseau triphasé. Les enroulements du rotor sont reliés à des convertisseurs de puissance bidirectionnels en courant. Le condensateur entre ces deux convertisseurs représente le bus continu. Le transformateur élévateur de tension permet le raccordement au réseau de distribution. Contrairement à certaines machines synchrones qui ont des convertisseurs traversés par 100% de la puissance nominale, les convertisseurs de la MADA sont dimensionnés pour laisser passer 25% de la puissance nominale seulement. Ils coûtent moins chers et sont moins encombrants. Ils permettent de piloter la MADA par le rotor en réglant sa vitesse de rotation mécanique ou sa puissance active statorique [13].

I.11. Les différentes structures d'alimentation de la MADA :

I.11.1. Machine Asynchrone à Double Alimentation Type "Brushless" :

Cette machine est constituée de deux bobinages triphasés au stator. Un des bobinages est directement connecté au réseau et est destiné au transfert de puissance. Le second bobinage, dont la section des conducteurs est moins élevée, permet de faire varier les courants d'excitation de la machine. Le stator de forte puissance est connecté directement sur le réseau et le convertisseur est placé entre le stator de faible puissance et le réseau (Figure .I.11) [14].

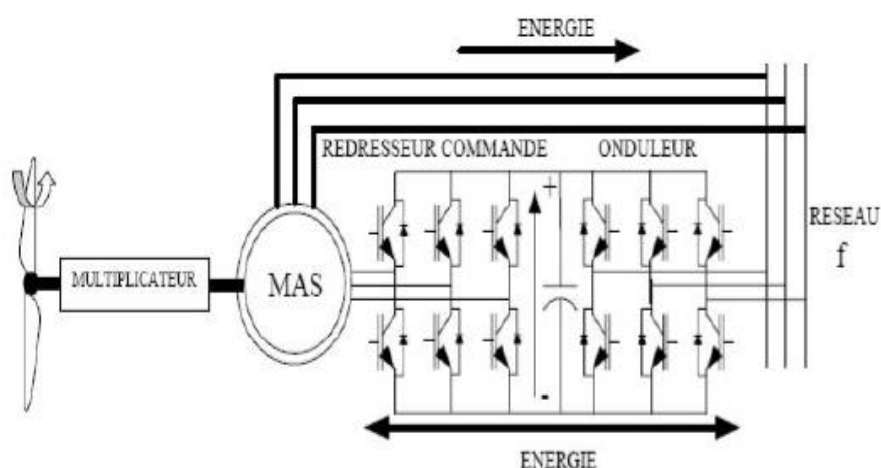


Figure. I.11 Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau.

I.11.2 Machine Asynchrone à Double Alimentation Type « Rotor Bobiné » :

Malgré la présence des contacts glissants, la majorité des projets éoliens reposent sur l'utilisation de la machine asynchrone pilotée par le rotor. (La figure .I.12) montre le schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobine pilotée par le rotor [15].

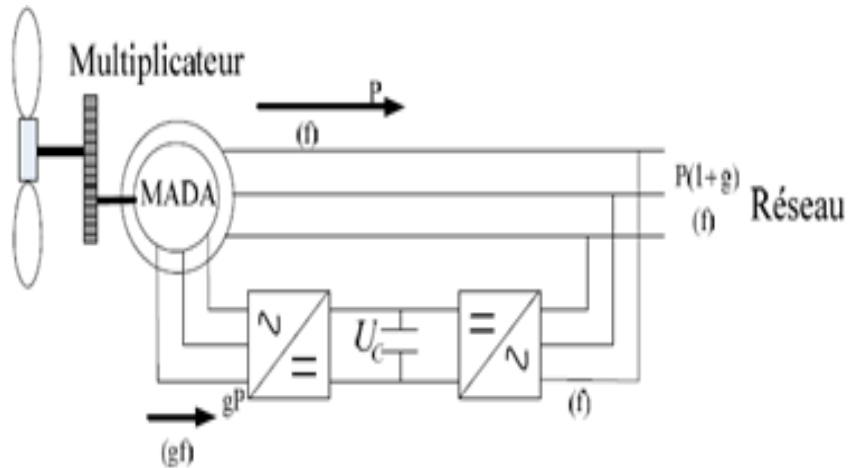


Figure. I.12 schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor.

I-11-3 MADA – structure de Kramer :

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la (Figure. I.13), le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur et un onduleur est placé en sortie du redresseur. L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine [16].

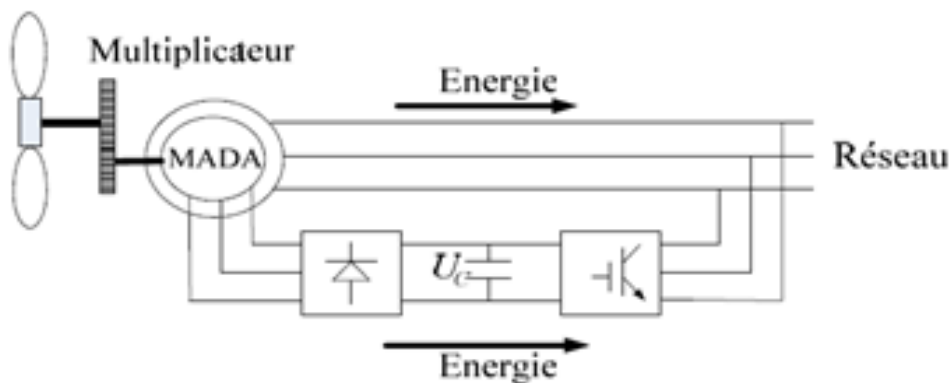


Figure. I.13 MADA - structure Kramer .

I-11-4 MADA à énergie rotorique dissipée :

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la (figure I.14), le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur [17].

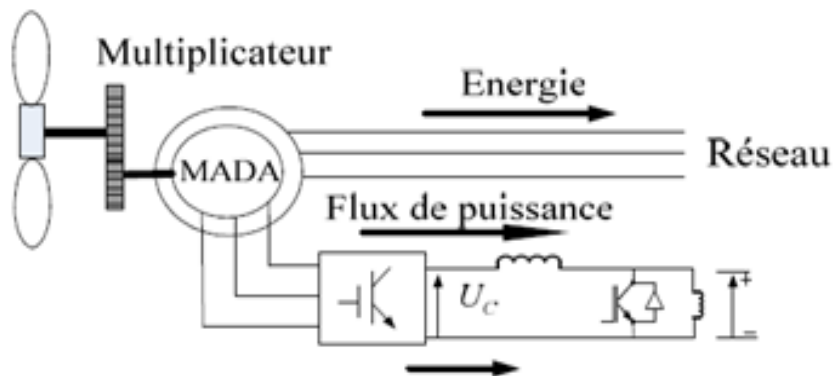


Figure. I.14 MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée.

I-11-5 MADA – structure de « Scherbius » avec cycloconvertisseur :

L'association (redresseur, onduleur) peut être remplacée par un cycloconvertisseur (figure I.15), cette configuration possède les mêmes caractéristiques que la précédente, sauf que l'énergie de glissement peut être transférée dans les deux sens [18].

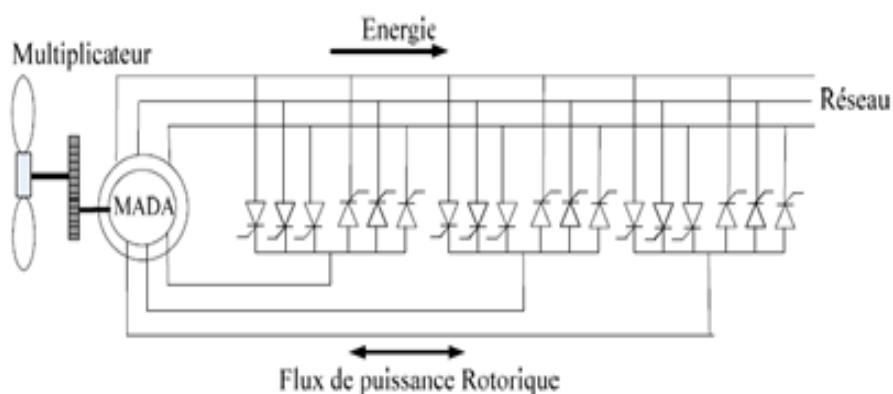


Figure. I.15 Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur .

I.12. Les différentes installations des éoliennes :

I.12.a. L'éolienne offshore :

Le « offshore » consiste à implanter les aérogénérateurs en mer, à proximité des côtes. Ainsi ; l'impact sur le paysage est modère et il n'y a plus de nuisance sonore (figure. I.16).

Cependant, l'installation d'éoliennes en mer est beaucoup plus couteuse qu'à terre, les mats doivent-être étudiés pour résister à la force des vagues et du courant, la protection contre la corrosion doit être renforcée.

L'implantation en mer nécessite des engins spécialisés, le raccordement électrique implique des câbles sous-marins couteux et fragiles, et la moindre opération de maintenance peut nécessiter de gros moyens.

En revanche, les éoliennes « offshore » bénéficient d'un vent plus fort et plus régulier, leur puissance nominale est donc plus importante ainsi que leurs rendements.

L'énergie éolienne offshore présente plusieurs avantages, parmi ces avantages on cite :

1. L'énorme potentiel inhérent à la surface couverte par les océans et les mers.
2. Elle est abondante, son impact environnemental est minimal.
3. Les vitesses de vent sont généralement plus élevées en mer que sur terre.
4. La turbulence étant plus faible en mer.



Figure .I.16 Parc éolien offshore

I.12.b L'éolienne Onshore :

Une éolienne terrestre ou onshore, est par définition installée sur la terre ferme (figure I.17).

Les deux modes d'exploitation de l'énergie éolienne terrestre :

1. Utilisation industrielle dans le cadre d'un parc éolien, un ensemble d'aérogénérateur est regroupé sur un même site qui est relié au réseau électrique.
2. Utilisation domestique dans le cadre du « petit éolien », des éoliennes terrestres de plus petite envergure peuvent également répondre aux besoins de particuliers.

Il existe d'autres concepts d'éoliennes terrestres, classés selon leur axe soit horizontale ou vertical, les éoliennes terrestres sont moins coûteuses à installer et plus faciles à entretenir que les éoliennes offshore, qui doivent répondre à des défis techniques plus importants liés aux conditions du milieu marin. Le rendement potentiel est toutefois moins important sur terre qu'au large.

Les plus grands parcs éoliens terrestres installés dans le monde sont principalement situés aux États-Unis.

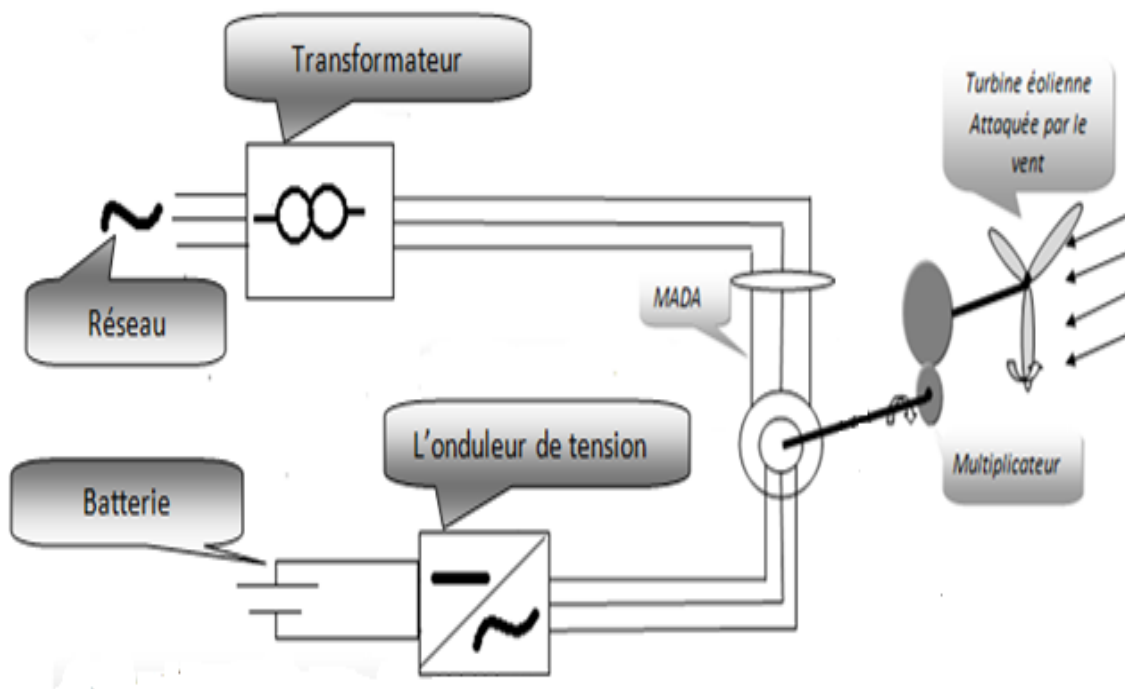


Figure. I.17 Parc éolien onshore

I.13. la chaine éolienne considérée dans notre travail :

Dans notre mémoire de fin d'étude, nous avons intéressons à l'étude d'une éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) où le stator est connecté au réseau électrique, et le rotor connecté à une batterie à travers un onduleur de tension. cet onduleur permettra le pilotage de l'éolienne.

Le schéma de la chaine éolienne considéré est donné par la figure(I.18).



Figure(I.18) le schéma da la chaine éolienne

I.14. conclusion :

Dans ce chapitre nous avons dressé une brève description de l'énergie éolienne, et qui concerne les différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnements.

Ensuite nous avons présenté les éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable. Nous avons cité le type de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) et son intérêt dans les applications requérant de la vitesse variable.

A la fin de ce chapitre nous avons donné les différentes installations des éoliennes.

Dans le chapitre suivant, nous allons étudier la modélisation de la chaîne éolienne, basée sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA).

CHAPITRE II

Modélisation

de la chaîne éolienne

II-1 Introduction :

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

La plus part des génératrices utiliser par les éoliennes sont des génératrices asynchrones triphasées cette dernière avait plus d'avantages : meilleures performances, leur coût est faible

Il existe deux types de la machine asynchrone : la machine asynchrone à cage d'écureuil et la machine asynchrone à rotor bobiné.

Dans ce chapitre nous nous intéressons à la machine asynchrone à rotor bobiné, la plus utilisé dans les éoliennes tournant à vitesse variable (figure. II.1).

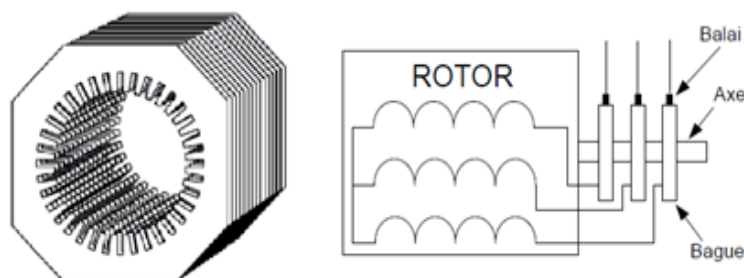


Figure .II.1 structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.

Dans ce chapitre, Nous allons établir un modèle mathématique qui permettra de traduire le comportement de la chaîne éolienne à base d'une MADA à puissance rotorique dissipée, en considérant certaines hypothèses simplificatrices.

Ce chapitre est composé de quatre parties :

- Une première partie est consacrée à la modélisation de la turbine.
- La deuxième partie est consacrée à la modélisation du multiplicateur de vitesse et l'équation dynamique de l'arbre.

- La troisième partie est consacrée à la modélisation de la MADA.
- Dans la dernière partie nous présenterons la modélisation du convertisseur (modélisation de l'onduleur de tension) et le principe de la commande **M.L.I.**

II-2 Modélisation de la turbine :

Le dispositif, qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pâles de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain(G) (figure.II.2) [8].

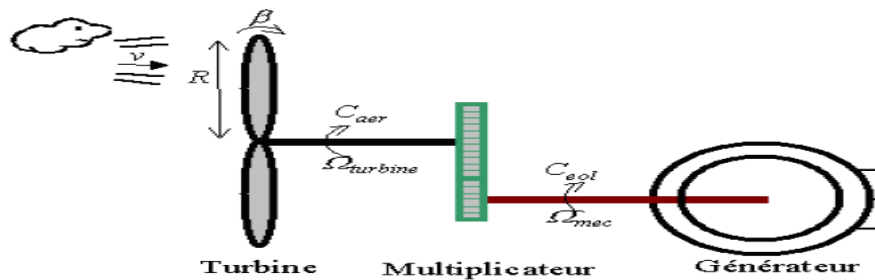


Figure .II.2 schéma de la turbine éolienne.

On rappelle que la turbine est un dispositif qui permettant de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, La puissance du vent ou puissance p_v éolienne est déterminée par :

$$p_v = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (II.1)$$

Où,

- ρ est la densité de l'air.
- S est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pôle.
- v est la vitesse du vent

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau de la turbine s'écrit alors :

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

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. Cette dernière dépend du ratio de la vitesse λ et de l'angle de l'orientation des pâles β .

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

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{v} \quad (II.3)$$

Où :

- $\Omega_{turbine}$: est la vitesse de rotation de la turbine.

II-3 Modélisation du multiplicateur de vitesse :

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice (figure.II.2). Dans l'hypothèse des pertes mécaniques négligeables, le multiplicateur peut être modélisé mathématiquement par les relations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (II.4)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II.5)$$

Où :

- C_{aer} : Le couple aérodynamique.
- C_g : Couple mécanique coté génératrice.
- Ω_{mec} : La vitesse de rotation de la génératrice.
- G : le gain du multiplicateur de vitesse.

II-4 L'équation dynamique de l'arbre :

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 présenté considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine $J_{turbine}$ reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice J_g d'où :

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (II.6)$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice J_g est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe ($\frac{J_{turbine}}{G^2}$), 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 :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (II.7)$$

Où :

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

$$C_{mec} = C_g + C_{em} - C_{vis} \quad (II.8)$$

Le couple dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f_{rt} :

$$C_{vis} = f_{rt} \cdot \Omega_{mec} \quad (II.9)$$

II-5 Modélisation de la MADA :

II-5-1- hypothèses simplificatrices :

Pour la modélisation de la MADA, on considère les hypothèses simplificatrices suivantes [9]:

- Les circuits magnétiques non saturés et les relations entre les flux et les courants sont d'ordre linéaire.
- La densité de courant uniforme dans la section des conducteurs élémentaires, l'effet de peau est donc négligée.
- Le phénomène d'hystérésis et les courants de Foucault sont négligés.
- Les enroulements statoriques et rotoriques sont symétriques et la force magnétomotrice est distribuée sinusoïdalement le long de la périphérie des deux armatures.
- Le premier harmonique d'espace de distribution de la force magnétomotrice de chaque phase du stator et du rotor.
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme (constant), les inductances propres sont constantes.
- Les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes des enroulements rotoriques et statoriques.
- Les résistances ne varient pas avec la température.

Donc, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements.

II-5-2 modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentations (MADA):

Les enroulements des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques dans l'espace peuvent être représentées comme il est indiqué dans la (figure .II.3). Les phases rotoriques sont aussi alimentées.

Où,

- θ : est l'écart angulaire entre deux phases, statoriques et rotoriques correspondantes.

La machine asynchrone à double alimentation(MADA) peut être traduite par trois types d'équations :

- Equations électriques.
- Equations magnétiques.
- Equation mécanique.

II-5-3 Les équations électriques dans le repère (a b c) :

Au stator :

$$\begin{cases} V_{as} = R_s I_{as} + \frac{d}{dt} \varphi_{as} \\ V_{bs} = R_s I_{bs} + \frac{d}{dt} \varphi_{bs} \\ V_{cs} = R_s I_{cs} + \frac{d}{dt} \varphi_{cs} \end{cases} \quad (II.10)$$

Au rotor :

$$\begin{cases} V_{ar} = R_r I_{ar} + \frac{d}{dt} \varphi_{ar} \\ V_{br} = R_r I_{br} + \frac{d}{dt} \varphi_{br} \\ V_{cr} = R_r I_{cr} + \frac{d}{dt} \varphi_{cr} \end{cases} \quad (II.11)$$

Ecriture sous forme matricielle

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\varphi_s] \quad (II.12)$$

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\varphi_r] \quad (II.13)$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad (II.14)$$

$$[V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \quad (II.15)$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (II.16)$$

Les équations électriques en notation matricielle deviennent :

Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad (II.17)$$

Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \quad (II.18)$$

Où :

- $[V_s]$, $[V_r]$: sont les vecteurs de tensions statoriques et rotoriques.
- $[I_s]$, $[I_r]$: sont les vecteurs de courants statoriques et rotoriques.
- $[\varphi_s]$, $[\varphi_r]$: sont les vecteurs de flux statoriques et rotoriques.
- $[R_s]$, $[R_r]$: sont les matrices des résistances statoriques et rotoriques.

II-5-4 Les équations magnétiques dans le repère (a b c):

Dans la machine asynchrone à double alimentation, il ya six bobines couplées magnétiquement. Chacune d'entre-elle va influencer ses voisines. Les tensions que l'on retrouve aux bornes de ces bobines vont donc être marquées par les mutuelles inductances des autres.

$$[\varphi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \quad (II.19)$$

$$[\varphi_r] = [L_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s] \quad (II.20)$$

Les équations sont représentées comme suit :

Pour le stator :

$$\begin{cases} \varphi_{as} = L_{ss}I_{as} + M_{sr}I_{ar} \\ \varphi_{bs} = L_{ss}I_{bs} + M_{sr}I_{br} \\ \varphi_{cs} = L_{ss}I_{cs} + M_{sr}I_{cr} \end{cases} \quad (II.21)$$

Pour le rotor :

$$\begin{cases} \varphi_{ar} = L_{rr}I_{ar} + M_{rs}I_{as} \\ \varphi_{br} = L_{rr}I_{br} + M_{rs}I_{bs} \\ \varphi_{cr} = L_{rr}I_{cr} + M_{rs}I_{cs} \end{cases} \quad (II.22)$$

Les équations en notation matricielles :

Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} = [L_{ss}] \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \quad (II.23)$$

Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} = [L_{rr}] \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + [M_{rs}] \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} \quad (II.24)$$

Où,

➤ $[L_{ss}]$, $[L_{rr}]$: matrices d'inductances cycliques statorique et rotorique.

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad (II.25)$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (II.26)$$

Où,

- l_s : Inductance propre de la phase statorique
- l_r : Inductance propre de la phase rotorique.
- $[M_{sr}]$: Matrice inductances mutuelles (stator-rotor) dépend de deux paramètres
 - inductance mutuelle maximum entre phase statorique et rotorique M_{sr} .

$$[M_{sr}] = [M_{rs}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

Avec :

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^t$$

II-5-5 L'équation mécanique de la MADA :

L'équation mécanique de la MADA en mode génératrice est :

$$C_m + C_{em} =$$

Où ;

- J : moment d'inertie ($K_g.m^2$) ;
- f_{rt} : Coefficient de frottement;
- C_{em} : Couple électromagnétique de la MADA en (Nm) ;
- C_m : Couple moteur fournie par l'éolienne.
- Ω_r : vitesse angulaire de rotation du rotor.

II-6-Modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère de Park :

II-6-1 La transformation de Park :

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasé-biphasé suivie d'une rotation. Qui permet le passage d'un système de trois phases (a,b,c) décalées respectivement les unes par rapport aux autres d'un angle électrique égale à $\frac{2\pi}{3}$ rad, en un système à trois axes (d,q,0).

Ainsi, la transformation de Park permet de transformer les enroulements statoriques et rotoriques triphasée en enroulements statoriques et rotoriques biphasés orthogonaux, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système précédent.

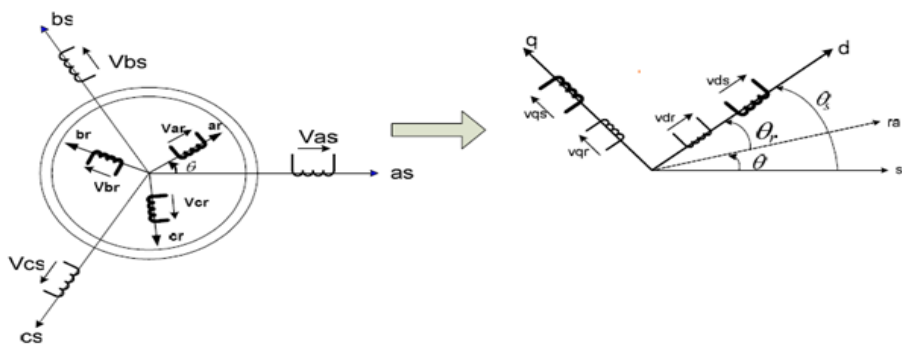


Figure. II.3 passage du système triphasé au biphasé

D'après le schéma de représentation de la machine asynchrone en (figure .II.3), on définit les angles : θ_s, θ_r et comme suit :

- θ_s : angle des grandeurs statoriques.
- θ_r : angle des grandeurs rotoriques.

La matrice de Park donnée par :

$$[P(\alpha)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\alpha) & -\sin\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

Le changement de variables relatif aux courants, tensions et flux est donné par les deux relations suivantes :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = [P(\alpha)] \cdot \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [P(\alpha)]^{-1} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix}$$

X : Représente l'une des grandeurs : tension, courant ou flux.

Où ;

α : Correspond à θ_s , si on a fait transformation de Park des grandeurs statoriques.

α : Correspond à θ_r , si on a fait transformation de Park des grandeurs rotoriques.

II-6-2 Les équations électriques dans le repère (dq) :

En appliquant la transformation de Park dans les équations précédentes, on obtient les équations dynamiques de la machine (la MADA) dans le repère diphasé, on a alors :

$$\omega_r + \omega = \omega_s, \quad \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s, \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r, \quad \frac{d\theta}{dt} = \omega, \quad \theta_s = \theta_r + \theta, \quad \omega = p \cdot \Omega_r$$

Où,

ω_s : Pulsation des grandeurs statoriques.

ω_r : Pulsation des grandeurs rotoriques.

ω : Pulsation mécanique.

p : Nombre de paires de pôles de la machine.

Au stator :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \end{cases} \quad (II.30)$$

Au rotor :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_r \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad (II.31)$$

$\varphi_{ds}, \varphi_{qs}, \varphi_{dr}, \varphi_{qr}$, Sont les composantes directs et en quadratures des flux statoriques et rotoriques :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_{sr} \\ M_{sr} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{dr} \end{bmatrix} \quad (II.32)$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{qs} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_{sr} \\ M_{sr} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{qs} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (II.33)$$

II-6-3 L'équation mécanique et le couple électromagnétique :

- L'équation mécanique reste inchangée dans le repère de Park.
- le couple électromagnétique est :

$$C_{em} = -p(\varphi_{dr} \cdot I_{qr} - \varphi_{qr} \cdot I_{dr}) = p(\varphi_{ds} \cdot I_{qs} - \varphi_{qs} \cdot I_{ds}) \quad (II.34)$$

II-7 Choix de référentiel :

On a exprimé les équations et les grandeurs de la machine (MADA) dans un repère (dq) qui fait un angle électrique θ_s avec le stator et qui fait également un angle électrique θ_r avec le rotor, mais qui n'est pas défini ailleurs, c'est-à-dire qu'il est libre.

Il existe trois choix importants : on peut fixer le repère (dq) :

A/Au stator.

B/Au rotor.

C/Au champ tournant.

A/Référentiel lié au stator :

Etant donné que les angles θ_s et θ_r sont liés par la relation suivante :

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

Se type de référentiel se traduit par les conditions :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \qquad \frac{d\theta_r}{dt} = -\omega_r$$

Les équations deviennent :

Au stator :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \end{cases} \quad (II.35)$$

Au rotor :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} + \omega_r \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} - \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad (II.36)$$

B/Référentiel lié au rotor :

Il se traduit par les conditions :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \qquad \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_r$$

Les équations deviennent :

Au stator :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_r \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_r \varphi_{ds} \end{cases} \quad (II.37)$$

Au rotor :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (II.38)$$

C/Référentiel lié au vecteur de tension de réseau électrique :

Il se traduit par les conditions suivantes :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \quad , \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega_r = g \cdot \omega_s \text{ (d'après la relation du glissement)}$$

➤ g : glissement de machine asynchrone.

II-7-1 Les équations électriques deviennent:

Au stator:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \end{cases} \quad (II.39)$$

Au rotor :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (II.40)$$

II-7-2 Les équations magnétiques deviennent :

Au stator :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + L_m I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s I_{qs} + L_m I_{qr} \end{cases} \quad (II.41)$$

Au rotor :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + L_m I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r I_{qr} + L_m I_{qs} \end{cases} \quad (II.42)$$

Où ;

L_m : Inductance mutuelle maximum entre les enroulements du stator et rotor.

II-7-3 Le couple électromagnétique :

$$C_{em} = p(\varphi_{qs} I_{dr} - \varphi_{ds} I_{qr}) \quad (II.43)$$

On tire de l'équation (II.38) et (II.39) les courants rotoriques et statoriques.

Au stator :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{1}{L_s} (\varphi_{ds} - L_m I_{dr}) \\ I_{qs} = \frac{1}{L_s} (\varphi_{qs} - L_m I_{qr}) \end{cases} \quad (II.44)$$

Au rotor :

$$\begin{cases} I_{dr} = \frac{1}{L_r} (\varphi_{dr} - L_m I_{ds}) \\ I_{qr} = \frac{1}{L_r} (\varphi_{qr} - L_m I_{qs}) \end{cases} \quad (II.45)$$

Dans notre travail on considère que le repère dq est lié au vecteur de tension de réseau électrique de telle sorte que le vecteur de tension est lié à l'axe q.

Le modèle de la MADA est donné par le système des équations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\varphi_{ds}}{dt} = V_{ds} - R_s I_{ds} + \omega_s \varphi_{qs} \\ \frac{d\varphi_{qs}}{dt} = V_{qs} - R_s I_{qs} - \omega_s \varphi_{ds} \\ \frac{d\varphi_{dr}}{dt} = V_{dr} - R_r I_{dr} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} \\ \frac{d\varphi_{qr}}{dt} = V_{qr} - R_r I_{qr} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{dr} \\ \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + L_m I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s I_{qs} + L_m I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + L_m I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r I_{qr} + L_m I_{qs} \\ C_{em} = p (\varphi_{qs} I_{dr} - \varphi_{ds} I_{qr}) \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (C_{em} + C_m - f_{rt} \cdot \frac{\omega}{p}) \end{array} \right.$$

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{L_r \varphi_{ds} - L_m \varphi_{dr}}{L_r L_s - L_m^2} \\ I_{dr} = \frac{L_s \varphi_{dr} - L_m \varphi_{ds}}{L_r L_s - L_m^2} \\ I_{qs} = \frac{L_r \varphi_{qs} - L_m \varphi_{qr}}{L_r L_s - L_m^2} \\ I_{qr} = \frac{L_s \varphi_{qr} - L_m \varphi_{qs}}{L_r L_s - L_m^2} \end{cases}$$

On pose :

$$\delta = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$$

Où :

δ : Coefficient de dispersion

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{1}{L_s \delta} \varphi_{ds} - \frac{L_m}{L_r L_s \delta} \varphi_{dr} \\ I_{dr} = \frac{1}{L_r \delta} \varphi_{dr} - \frac{L_m}{L_r L_s \delta} \varphi_{ds} \\ I_{qs} = \frac{1}{L_s \delta} \varphi_{qs} - \frac{L_m}{L_r L_s \delta} \varphi_{qr} \\ I_{qr} = \frac{1}{L_r \delta} \varphi_{qr} - \frac{L_m}{L_r L_s \delta} \varphi_{qs} \end{cases}$$

II-8 Modélisation de l'onduleur de tension :

Un onduleur de tension est un convertisseur statique qui permet de transformer une tension continue en une tension alternative.

Comme le montre la figure ci-dessous (II.5), l'onduleur utilisé dans ce système est un onduleur de tension triphasé à six interrupteurs commandés à l'ouverture et la fermeture ; ce sont des transistors aux quels sont placées des diodes en antiparallèle .L'onduleur est alors

constitué par trois bras dont les deux interrupteurs de chaque bras conduisent de manière complémentaire. Les séquences de commutation des interrupteurs sont fonction de la commande à utiliser (commande en pleine onde, commande en **M.L.I** «Modulation Largeur d'Impulsion », la modulation vectorielle).

II-9 La commande M.L.I :

Le principe de la technique de modulation de largeur d'impulsion est basé sur la comparaison d'un signal dit la modulation et un autre dit la porteuse.

La technique choisie pour la commande de notre convertisseur est la **M.L.I** sinus-triangle. Elle est basé sur la comparaison d'un signal triangulaire de grande fréquence et d'un signal sinusoïdal de la même fréquence que le signal de référence que l'on souhaite obtenir. Le signal triangulaire est appelé **la porteuse** et le signal sinusoïdal est appelé **la modulante** figure(II.4) [10].

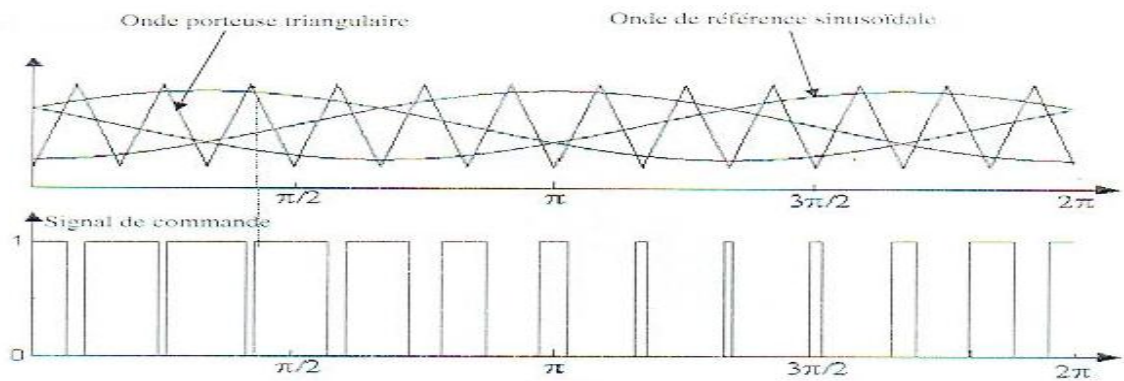


Figure II.4 construction d'un signal de commande d'une M.L.I sinus-triangle.

Ces signaux ont les propriétés suivantes :

- la modulante est une onde sinusoïdale $v_{ref}(t)$ d'amplitude u_r et de fréquence f_r .
- La porteuse est une onde triangulaire $v_p(t)$, d'amplitude $|u_p| \geq |u_r|$, et d'une fréquence $f_p \gg f_r$.

Le principe de cette commande est :

$$\text{si} \begin{cases} u_r > u_p \Rightarrow 1 \\ u_r < u_p \Rightarrow 0 \end{cases}$$

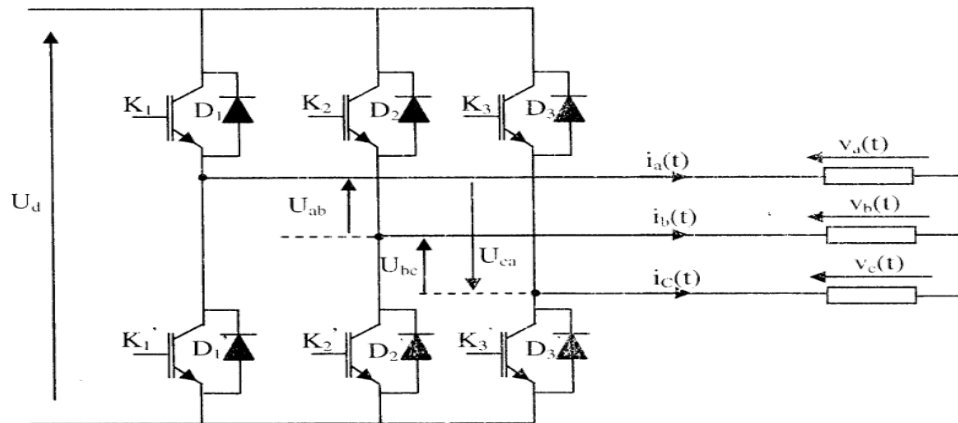


Figure. II.5 Schéma représentation d'un onduleur de tension triphasé.

a) Modèle de l'onduleur de tension :

Pour simplifier l'étude, on suppose que :

- La commutation des interrupteurs est instantanée.
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.
- La charge triphasée, est équilibrée, couplée en étoilé avec un neutre isolé.

En s'appuyant sur ces hypothèses, on aboutit au schéma simplifié de la figue (II.6) ;

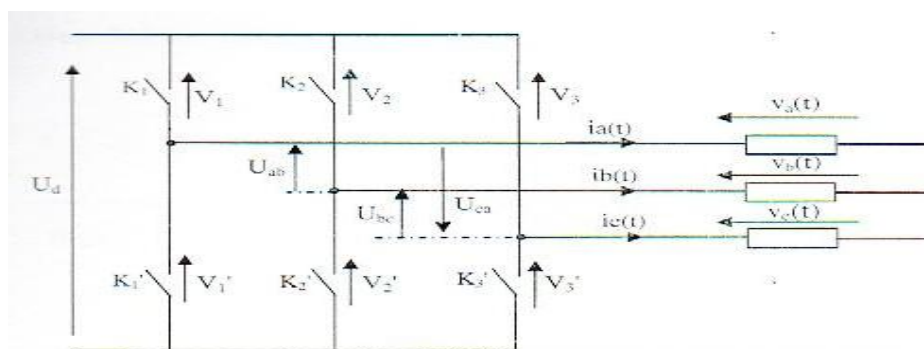


Figure. II.6 modèle simple de l'onduleur de tension triphasé.

$v_a(t), v_b(t), v_c(t)$: les tensions simples de lvr ès par l'ondeur.

$U_{ab}(t), U_{bc}(t), U_{ca}(t)$: les tension composès dèrivès par l'ondeur.

Les expressions des tensions composées sont données par les relations suivantes :

$$\begin{cases} U_{ab} = v_a - v_b \\ U_{bc} = v_b - v_c \\ U_{ca} = v_c - v_a \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

D'autre part, on a les relations entre les tensions simples et composées comme suite :

$$\begin{cases} v_a = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ v_b = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ v_c = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (\text{II.47})$$

L'hypothèse d'un système de tension équilibré implique :

$$v_a + v_b + v_c = 0 \quad (\text{II.48})$$

Les interrupteurs $K_j, K'_j (j=1, 2, 3)$ sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant.

On associe à chaque bras de l'onduleur une fonction logique $F_j (j=1, 2, 3)$ correspondant aux signaux de commande des interrupteurs.

$F_j (j=1, 2, 3)$ est définie comme suit :

$$F_j = \begin{cases} 1 & \text{si } F_j \text{ fermé} \\ 0 & \text{si } F_j \text{ ouvert} \end{cases} \quad (j=1, 2, 3) \quad (\text{II.49})$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{si } F_1 = 1 \Rightarrow V_1 = 0 \\ \text{si } F_1 = 0 \Rightarrow V_1 = U_d \end{array} \right\} \Rightarrow V_1 = -(F_1 - 1)U_d \quad (\text{II.50})$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{si } F_2 = 1 \Rightarrow V_2 = 0 \\ \text{si } F_2 = 0 \Rightarrow V_2 = U_d \end{array} \right\} \Rightarrow V_2 = -(F_2 - 1)U_d \quad (\text{II.51})$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{si } F_3 = 1 \Rightarrow V_3 = 0 \\ \text{si } F_3 = 0 \Rightarrow V_3 = U_d \end{array} \right\} \Rightarrow V_3 = -(F_3 - 1)U_d \quad (\text{II.52})$$

Exprimons les tensions composées des états logiques des interrupteurs :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_2 - V_1 \Rightarrow U_{ab} = (F_1 - F_2) \cdot U_d \\ U_{bc} = V_3 - V_2 \Rightarrow U_{bc} = (F_2 - F_3) \cdot U_d \\ U_{ca} = V_1 - V_3 \Rightarrow U_{ca} = (F_3 - F_1) \cdot U_d \end{cases} \quad (\text{II.53})$$

Ce qui donne la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix} = U_d \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.54})$$

Et :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix} \quad (\text{II.55})$$

En remplaçant (II.51) dans(II.52), on aura le système matriciel (II.53) comme suite :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_d \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.56})$$

II-10 conclusion :

Dans ce chapitre ; nous avons présenté en premier lieu la modélisation des différentes parties d'une chaîne éolienne (la turbine, le multiplicateur, la MADA). La modélisation nous a permis de présenter le comportement de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) sous forme d'équations (électrique, magnétique, mécanique).

Dans la dernière partie ; nous avons présenté le modèle du l'onduleur de tension, son principe de fonctionnement et la technique de commande M.L.I.

Dans le chapitre suivant ; nous allons faire la simulation d'une chaîne éolienne à l'aide du logiciel Matlab.

CHAPITRE III

Etude et simulation

d'une chaîne éolienne à base d'une MADA

III.1 Introduction :

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique d'une manière générale. En bonne adéquation, une éolienne doit comporter un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des pales de l'éolienne, orientation de la nacelle) ainsi qu'un système qui permet de la contrôler électriquement (Machine à double alimentation MADA).

Dans ce chapitre on présentera une description générale des différentes parties (partie puissance et partie commande) et le principe de fonctionnement de chaque composants du système éolien.

On finira ce chapitre par une simulation de la chaîne éolienne en utilisant le logiciel MATLAB pour visualiser les résultats de simulation de la turbine et la MADA.

III.2. Description générale de la chaîne éolienne :

Ce paragraphe sera dédié à la description générale de la chaîne éolienne, en représentant un schéma récapitulatif qui peut mieux illustrer l'architecture de cette chaîne. On présentera également le principe de fonctionnement de l'aérogénérateur.

La figure (III.1) présente un schéma illustrant le fonctionnement d'une éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation commandée par un onduleur de tension (commande de M.L.I).

La chaîne éolienne peut être vue par ses deux principales parties qui sont la partie commande et la partie puissance.

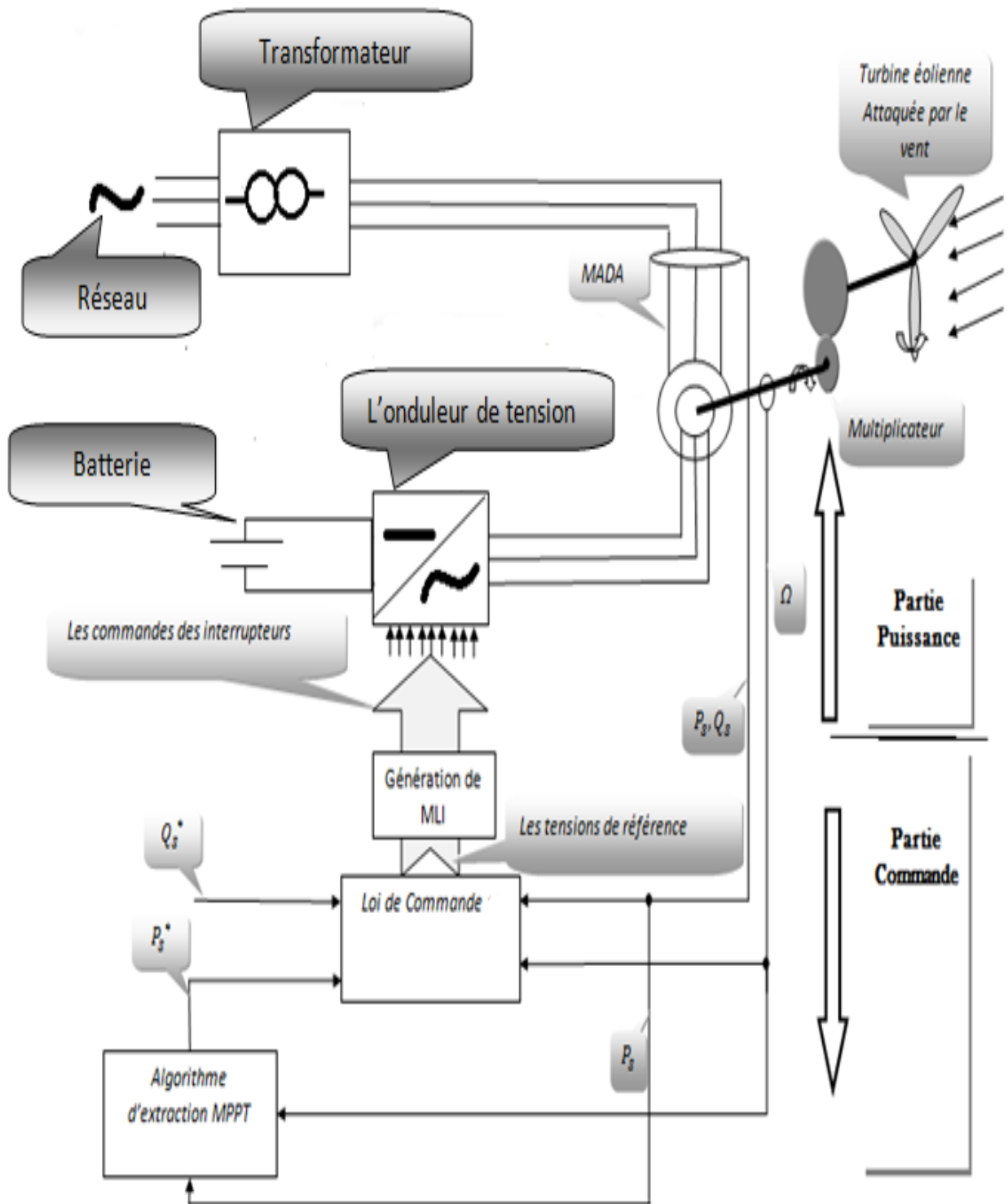


Figure III.1. Schéma global illustrant le fonctionnement d'une éolienne à base d'une MADA commandée par un onduleur de tension

III.2.1. La partie puissance : Cette partie contient ;**a. La turbine éolienne :**

C'est l'organe chargé de convertir l'énergie cinétique sous forme du vent en énergie mécanique. Comme il est mentionné dans le premier chapitre, il existe deux grandes classes de turbines, à axe vertical et à axe horizontal, et dans notre application on s'intéresse à celles d'axe horizontal à trois pales.

b. La Machine asynchrone à double alimentation (MADA):

Avec l'utilisation des machines asynchrones à double alimentation pilotées par le rotor, la plus grande partie de la puissance est directement distribuée au réseau par le stator et une partie de cette puissance (moins de 30% généralement) passe par l'onduleur de tension à travers le rotor. La présence de ce convertisseur permet de contrôler la puissance à la sortie du générateur et de faire varier la vitesse.

c. L'onduleur de tension :

L'onduleur de tension est un convertisseur statique constitué de cellules de commutation généralement à base de transistors.

Le séquençage imposé aux interrupteurs statiques permet de réaliser un choix précis du vecteur de tension à appliquer à la charge. Il est constitué de trois bras, de deux interrupteurs pour chacun. Pour assurer la continuité en courants, chaque interrupteur est monté en antiparallèle avec une diode de récupération.

d. Les Transformateurs :

Une telle chaîne nécessite deux transformateurs abaisseurs, l'un au niveau du réseau (15KV/690V) pour alimenter directement le stator de la MADA.

e. Les Capteurs :

L'observateur robuste par mode de glissement et l'algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking) proposés nous ont permis de réduire le nombre de capteurs utilisés à trois capteurs seulement (capteur de vitesse, de puissances active et réactive) au lieu de six dont les capteurs qui sont omis sont celui de la vitesse du vent, et deux autres pour les flux.

III.2.2 La partie commande :

Est un circuit électronique programmé de telle manière à donner des impulsions aux transistors (qui sont considérés comme des interrupteurs) à partir des mesures de puissances active et réactive et de vitesse de rotation venant des capteurs installés au niveau de la chaîne afin de produire des tensions de sortie du convertisseur désirées. Le programme chargé dans le circuit électronique traduit la partie de commande illustrée dans la figure (III.1), on a trois blocs en série qui sont :

a. Le Bloc MPPT :

C'est un algorithme qui permet de déterminer la puissance statorique de référence à partir des mesures de la vitesse de rotation et de la puissance active statorique afin de maximiser la puissance extraite du vent(C_p).

b. Le Bloc commande :

Ce bloc va permettre de déterminer les commandes ou bien les tensions qu'on doit appliquer au rotor pour suivre les références en puissances active et réactive désirées dont la référence active est celle donnée par le bloc MPPT. La loi de commande qu'on a utilisée dans notre chaîne éolienne est la loi de commande par les modes de glissement[22].

c. La commande MLI :

Cette méthode consiste à comparer trois tensions de références sinusoïdales (Modulatrices) propres à chaque phase à un signal triangulaire (porteuse) commun pour les trois phases.

III.3 Résultats de la simulation :

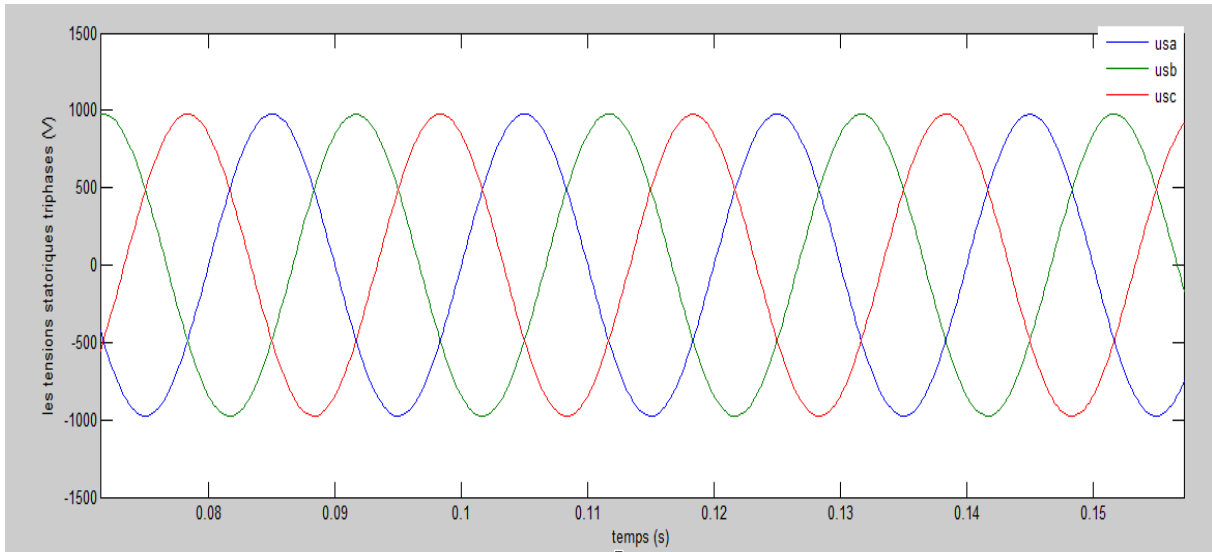


Figure III.2 les tensions statoriques triphasées (V)

La figure (III.2) représente le graphe d'évolutions des tensions statoriques de phase dans les axes (a.b.c) en fonction du temps. Ces tensions atteignent des pics de 1000 V.

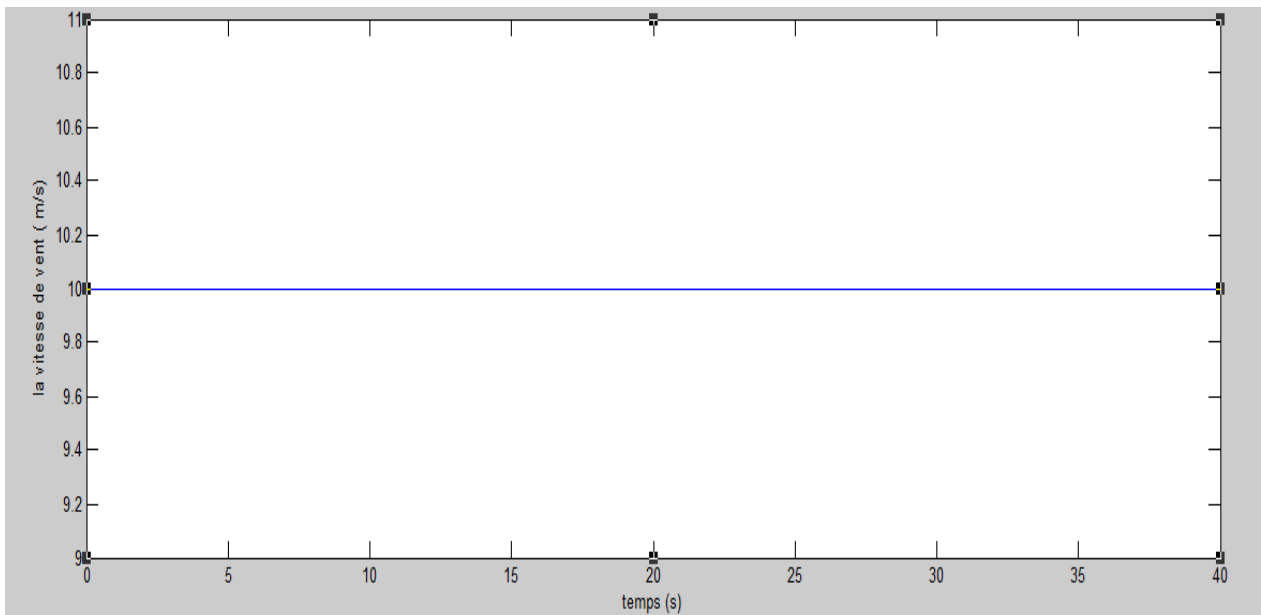


Figure III.3 la vitesse du vent (m/s)

La figure(III.3) représente la vitesse du vent en fonction du temps. Cette vitesse est constante (La vitesse du vent est fixée à 10m/s dans notre chaîne).

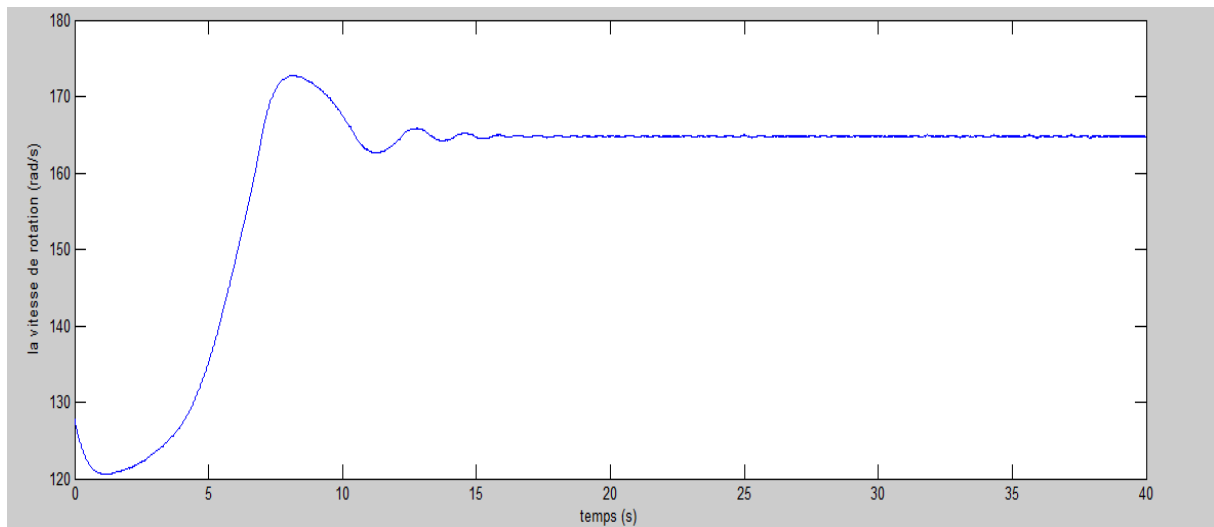


Figure III.4 la vitesse de rotation (rad/s)

La figure (III.4) représente le graphe d'évolution de la vitesse de rotation en fonction du temps, suite à la variation du vent.

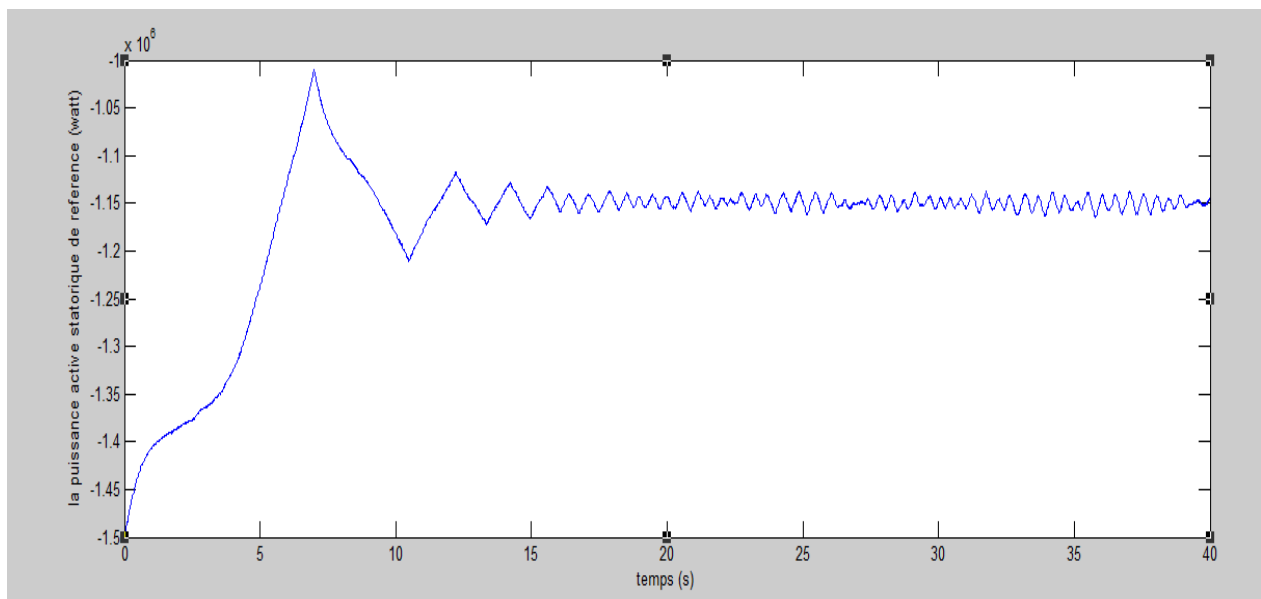


Figure III.5 la puissance active statorique de référence (watt) en fonction du temps

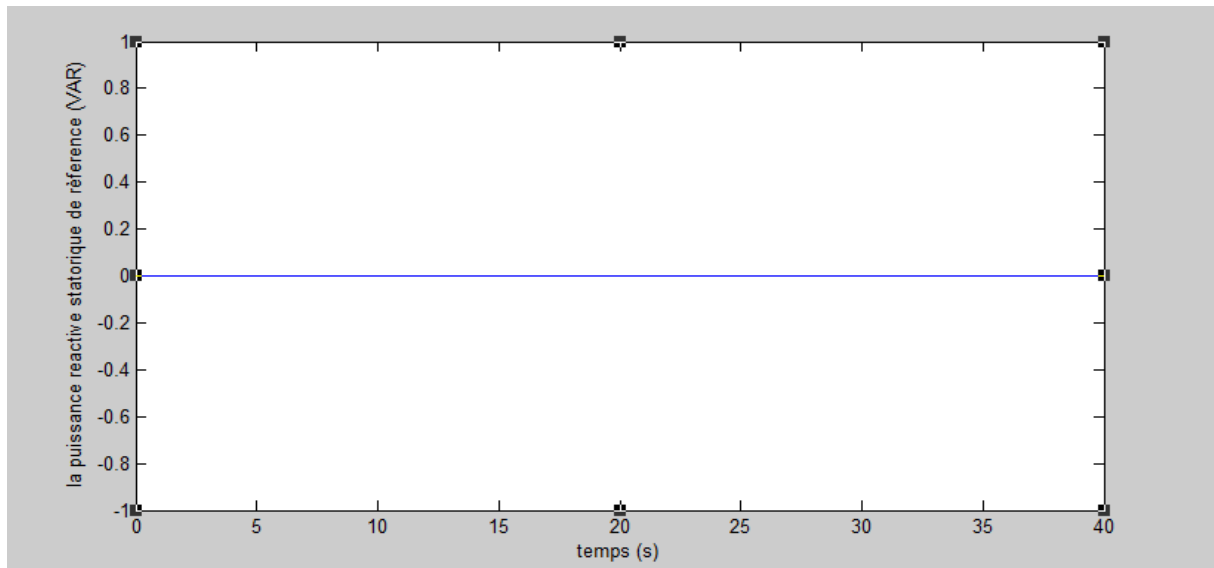


Figure III.6 la puissance réactive statorique de référence (VAR) en fonction du temps

Les figures (III.5) et (III.6) ; représentent les évolutions de la puissance active et réactive statorique en fonction du temps, ainsi que leurs valeurs de référence calculées par le MPPT pour la puissance active (P_{sref}) et une valeur nulle pour la puissance réactive (Q_{sref}).

La puissance active (P_{sref}) est donnée par l'algorithme MPPT afin de maximiser C_p (coefficient de puissance du vent).

La puissance réactive (Q_{sref}) dépend des besoins du réseau électrique. Dans notre cas, on considère que : $Q_{sref}=0$.

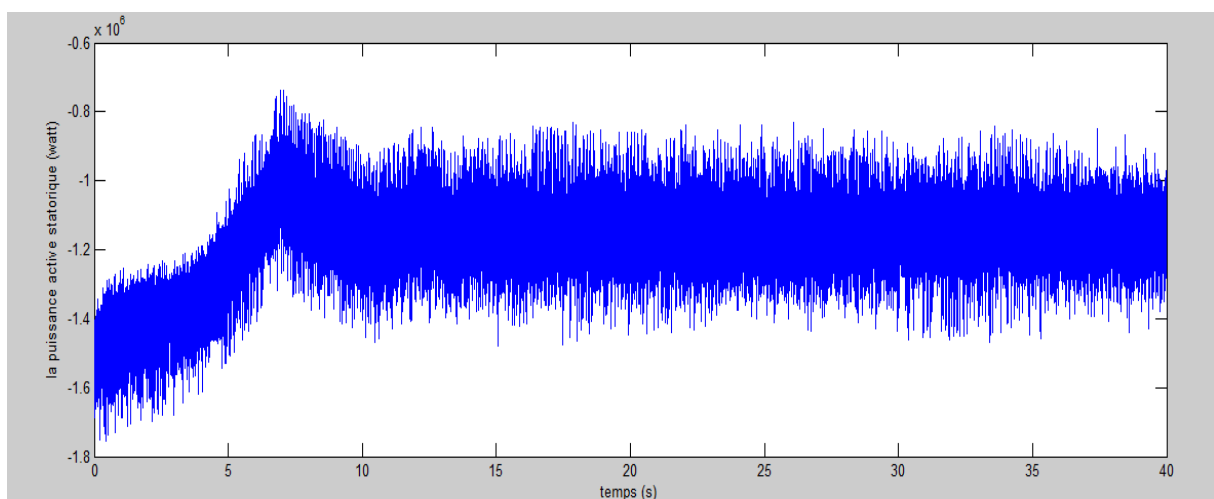


Figure III.7 la puissance active statorique (watt) en fonction du temps

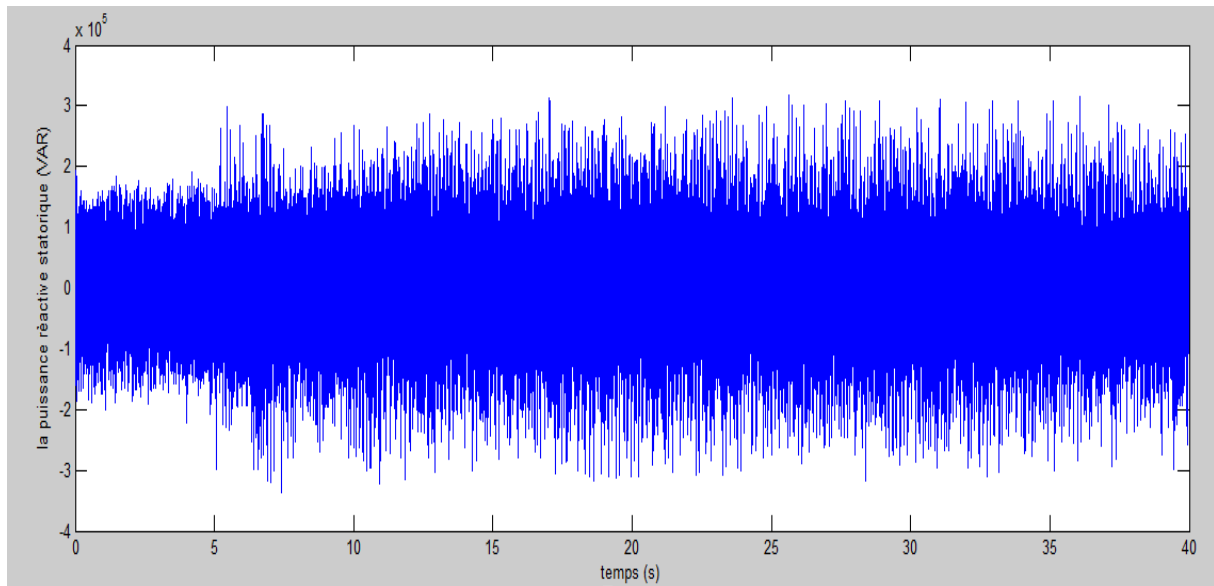


Figure III.8 la puissance réactive statorique (VAR) en fonction du temps

Les figures (III.7) et (III.8) ; représentent les évolutions des puissances active et réactive statorique en fonction du temps. La puissance réactive est nulle alors que la puissance active est constante .

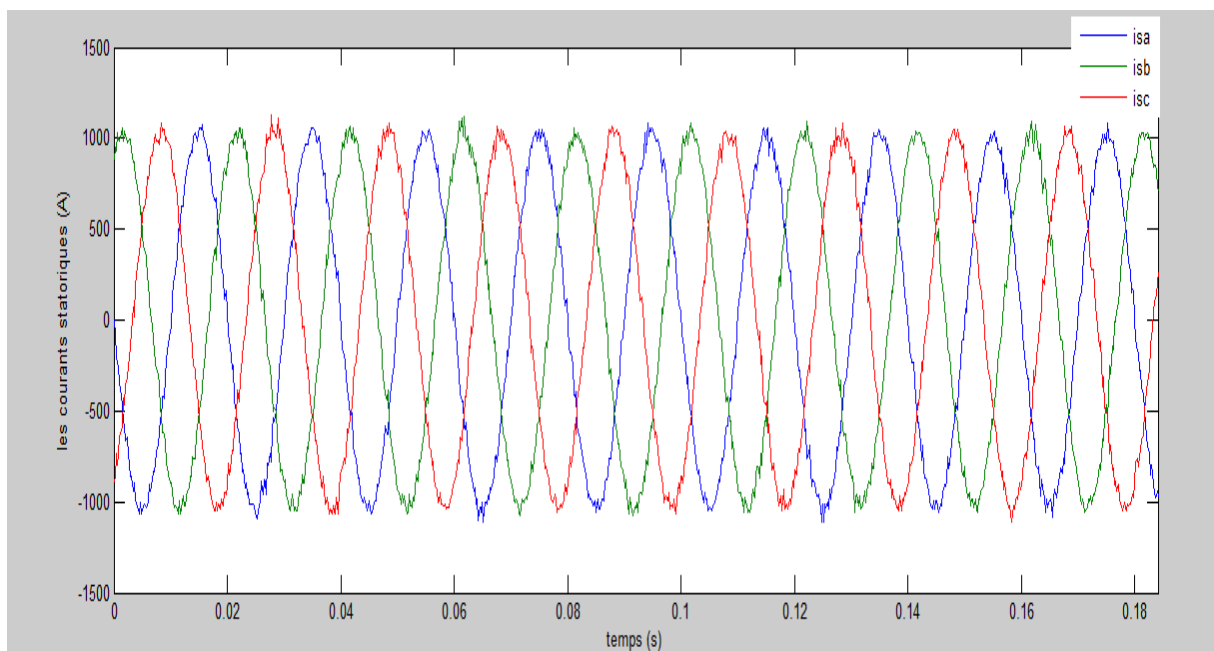


Figure III.9 les courants statoriques triphasés (A).

La figure(III.9) représente le graphe d'évolution des courants statoriques de phase dans les axes (a,b,c). Ces courants sont sinusoïdaux de pulsation et amplitude variables selon la vitesse de rotation de la génératrice. Ces courants atteignent des pics de 1000A.

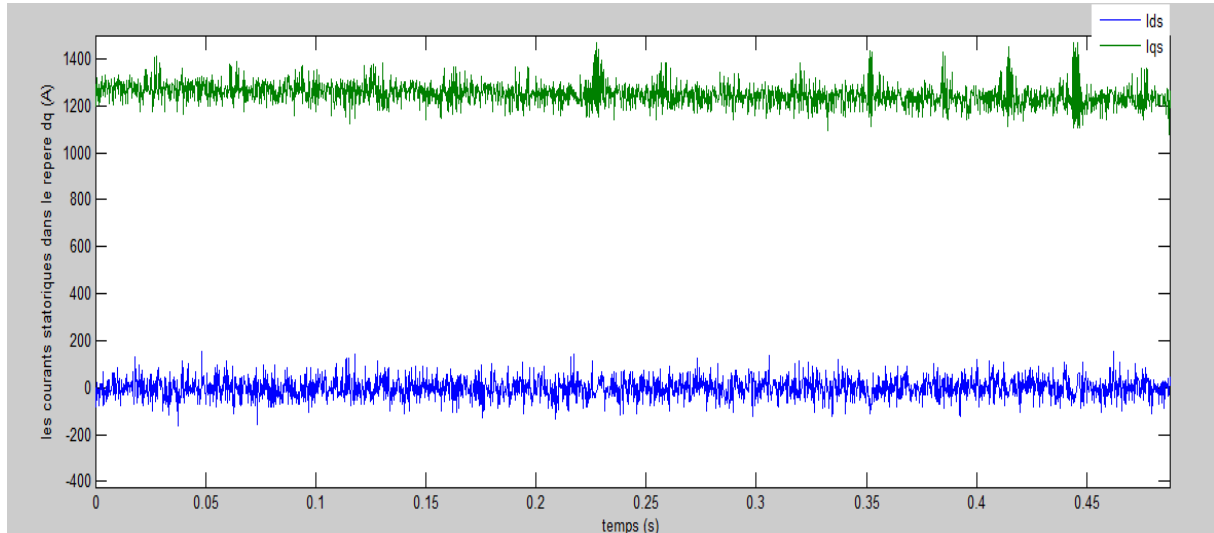


Figure III.10 les courants statoriques sur le repère (dq) (A)

La figure (III.10) représente le graphe d'évolution des courants statoriques sur le repère (dq). Le courant selon l'axe (d) est nul alors que le courant selon l'axe (q) est constant.

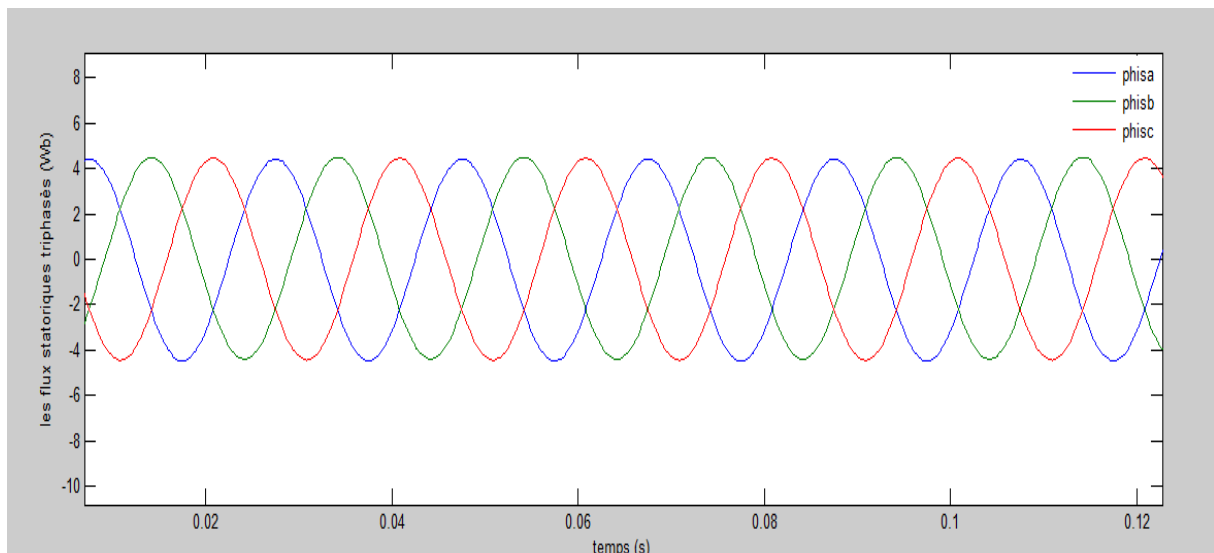


Figure III.11 les flux statoriques triphasés (Wb)

La figure (III.11) représente l'évolution des flux statoriques triphasés en fonction du temps dans les axes (a,b,c). Ces flux sont sinusoïdaux.

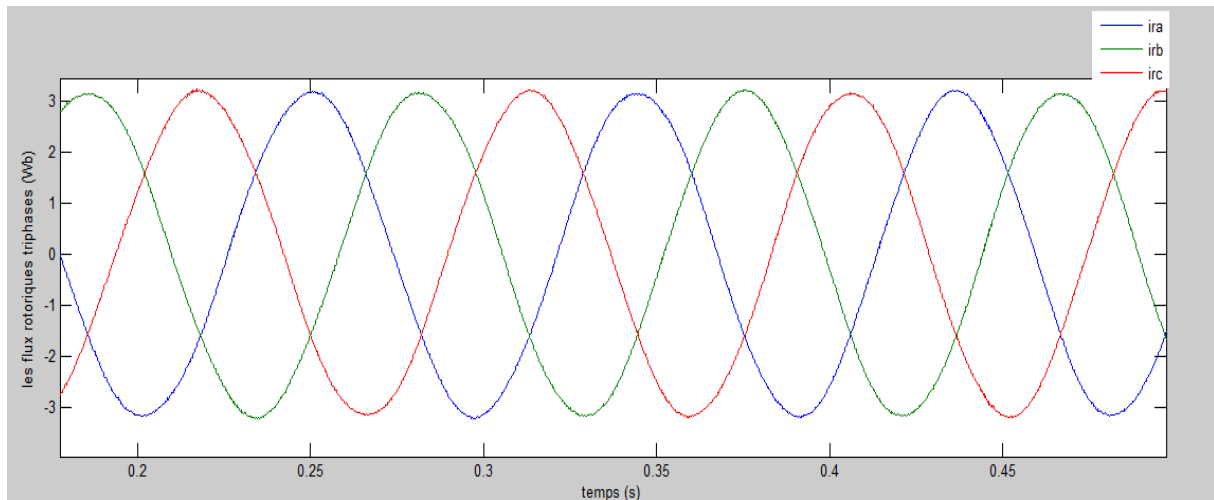


Figure III.12 les flux rotoriques triphasés (Wb)

La figure (III.12) représente l'évolution des flux rotoriques triphasés en fonction du temps ,dans les axes (a,b,c) . Ces flux sont sinusoïdaux.

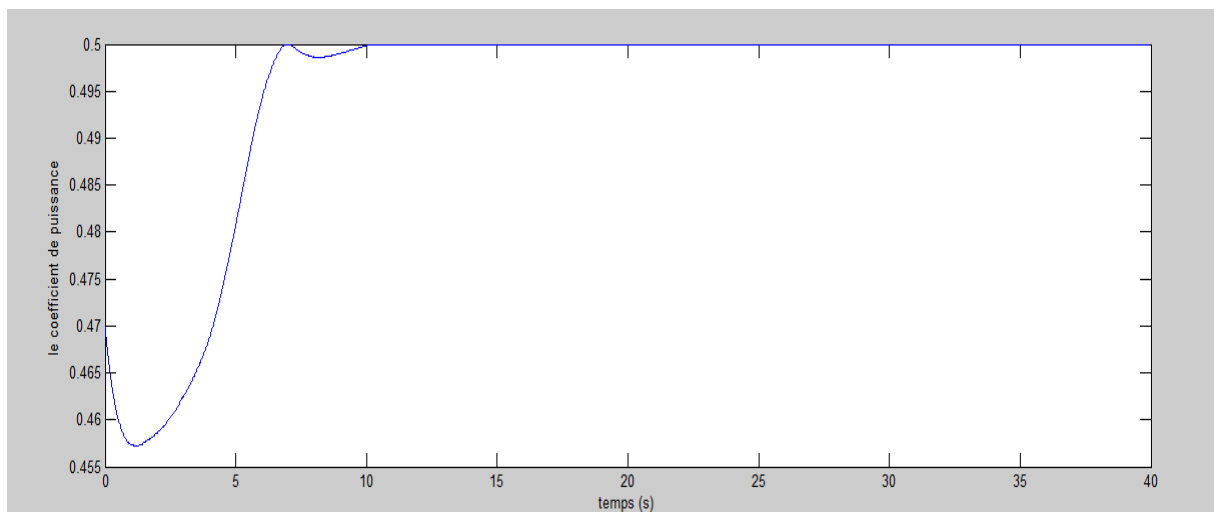


Figure III.13 le coefficient de puissance

La figure (III.13) représente le graphe d'évolution du coefficient de puissance C_p en fonction de temps. Le coefficient de puissance dépend de la caractéristique de la turbine. Cette dernière dépend du ratio de la vitesse λ et de l'angle de l'orientation des pâles β .

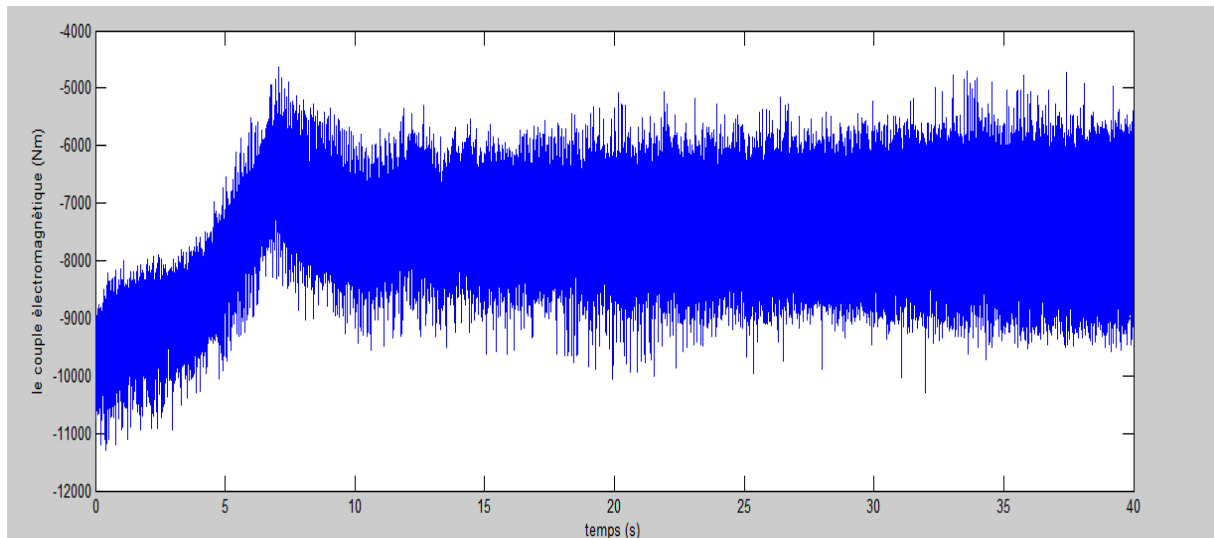


Figure III.14 le couple électromagnétique (Nm).

La figure (III.14) représente le couple électromagnétique en fonction du temps.

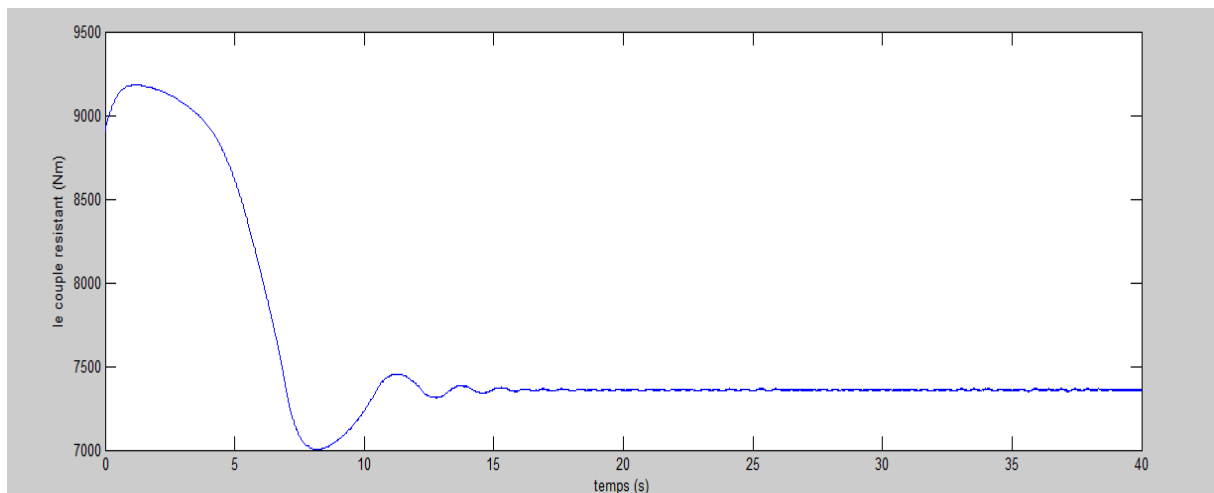


Figure III.15 le couple résistant (Nm).

La figure (III.15) représente le couple résistant, et ce coefficient dépend la vitesse de rotation de la turbine $\Omega_{turbine}$.

III.5 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté, en première partie, une brève description de la chaîne éolienne vue de ses deux principales parties qui sont la partie de commande et la partie de puissance.

Dans la dernière partie, nous avons visualisé et interprété les résultats des simulations effectuées sur notre système.

CONCLUSION

GENERALE

Conclusion générale

Dans notre travail, nous avons étudié la machine asynchrone à double alimentation (MADA), destinée à la production d'énergie éolienne par conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

Nous avons abordé quelques notions théoriques concernant le système éolien, ses principaux composants et principe de fonctionnement. Nous avons aussi étudié les différents types des éoliennes et présenté les différentes machines utilisées.

Nous avons présenté également une modélisation mathématique de la machine asynchrone à double alimentation, où nous avons commencé par la modélisation du repère triphasé, ensuite le repère de PARK.

Une simulation de la chaîne éolienne a été effectuée en utilisant le logiciel MATLAB. Notre programme porte sur le fonctionnement du système éolien, composé d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) commandé par un onduleur de tension.

Il est à noter que l'utilisation de la MADA dans les éoliennes connaît une évolution très rapide grâce à ses performances vis-à-vis des autres machines, et aussi grâce aux progrès technologiques. Néanmoins, il en demeure quelques problèmes liés notamment aux contacts mécaniques (bagues). La majeure partie des éoliennes modernes industrielles est constituée de génératrice asynchrone à double alimentation car elle apporte non seulement des solutions aux variations incessantes du vent, mais permet aussi un transfert optimal de la puissance au réseau.

BIBLIOGRAPHIE

[1]**Redjem Radia**: « Étude d'une Chaîne de Conversion d'Énergie Éolienne », Mémoire de Magister Université Mentouri de Constantine, Faculté des Sciences de L'ingénieur Département d'Electrotechnique, 2009.

[2] **Khaled Ferkous** : «Etude d'une Chaîne de Conversion d'Énergie Éolienne»,Mémoire de Magistère Université Mentouri Constantine ,Faculté Des Sciences Exactes Département De Physique, 2009.

[3]**Naouel Hamdi** : «Modélisation et Commande des Génératrices Éoliennes », Mémoire de Magister Université Mentouri de Constantine, Faculté des Sciences de l'Ingénieur Département d'Electrotechnique, 2008.

[4]**LatrecheMohammed Tahar** :«Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) Utilisée dans un Système Éolien»,Mémoire de Magister Université Ferhat Abbas de Setif UFAS –ALGERIE Département d'Electrotechnique, 2012.

[5]**Kelkoul Bahia** « Etude et Commande d'une Turbine Éolienne Utilisant uneMachine Asynchrone à Double Alimentation », Mémoire de Magister Université de Tlemcen Faculté de Technologie Département de Génie Electrique et Electronique 2011.

[6]**Mokrane Smaili** «Modélisation Et Commande D'un Aéro-générateur àMachine Asynchrone à Double Alimentation En Vue De Simulation Des Problèmes De Cogénération », Mémoire de Ingénierie Université du Quebec En Abitibi-Temiscamingue 2013.

[7] **Abdelhak Djoudi** «Contribution à la Conduite Robuste d'une Eolienne Basée sur une Machine Asynchrone à Double Alimentation, Connectée au Réseau Electrique», Docteur En Sciences Ecole Nationale Polytechnique 2016.

[8] **Salma El Aimani** « Modélisation De Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées Dans Un Réseau De Moyenne Tension » , Docteur Ecole Centrale De Lilie Université Des Sciences Et Technologies De Lilie 2004.

[9] **Abdelhak Djoudi** «Commande non Linière d'une Eolienne à Base d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Pilotée par un Convertisseur Matriciel», Mémoire de Magister Ecole Nationale Polytechnique 2010.

[10] **Hamecha Samira** «Etude Et Commande D'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents», Mémoire de Magister Faculté de Génie Electrique et d'Informatique Département d'Électrotechnique 2013.

[11] **Brendan Fox et Coll** «Energie Eolienne et Intégration au Réseau»,2007.

[12] **Marc Rapin, Jean-Marc Noel**, «Energie Eolienne (Principes Etude de Cas»,2010.

[13] [http:// Energie .Wallonie. be.](http://Energie.Wallonie.be)

ANNEXES

Annexe A

Paramètres de la Chaîne Eolienne

Données de la MADA

Puissance nominale $P_N = 1,5MW$;

Nombre de paires de pôles $P = 2$;

$f = 50Hz$;

Résistance statorique $R_s = 0,012\Omega$;

Résistance rotorique $R_r = 0,021\Omega$;

Inductance statorique $L_s = 0,0137H$;

Inductance rotorique $L_r = 0,0136H$;

Mutuelle $L_m = 0,0135H$;

Coefficient de viscosité $f = 7,1e - 3$.

Inertie de l'ensemble vu du côté MADA $J = 50Kg.m^2$

Données du réseau

La tension du réseau $690V, 50Hz$.

Données de la turbine

Nombre de pale = 3 ;

Diamètre d'une pale : $R = 35.5m$;

La caractéristique de la turbine éolienne est : $C_p = 0.5 \sin (\pi(\lambda + 0.1)/18,2)$

Données du multiplicateur

Gain du multiplicateur : $G = 65$

Résumé

Dans notre travail, nous avons étudié la machine asynchrone à double alimentation (MADA), destinée à la production d'énergie éolienne par conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

Il est à noter que l'utilisation de la MADA dans les éoliennes connaît une évolution très rapide grâce à ses performances vis-à-vis des autres machines, et aussi grâce aux progrès technologiques. Néanmoins, il en demeure quelques problèmes liés notamment aux contacts mécaniques (bagues). La majeure partie des éoliennes modernes industrielles est constituée de génératrice asynchrone à double alimentation car elle apporte non seulement des solutions aux variations incessantes du vent, mais permet aussi un transfert optimal de la puissance au réseau.

Les mots clés :

MLI : Modulation Largeur d'Impulsion, MADA : machine asynchrone à double alimentation

MPPT : maximum power trackin, CC : courant continu

L'éolienne, le vent, les pâles ; turbine