

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf : 923/2018



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER Académique**

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux électriques

Par : (TAIBI Abdelhalim et ZAOUI Alla Eddine)

Thème

Commande d'une éolienne utilisant une MADA reliée au réseau électrique

Soutenu publiquement, le 25/06/2018, devant le jury composé de :

M. BOULOUH Messaoud	MCA	Univ. Guelma	Président
M. MENDACI Sofiane	MCA	Univ. Guelma	Encadreur
M. LADJIMI Abdelaziz	MCA	Univ. Guelma	Examineur
M. BOUZIT Ali	MCB	Univ. Guelma	Examineur

Année Universitaire : 2017/2018

18/3192

Remerciement

REMERCEMENT

En premier nous remercions lieu Dieu qui nos avoir donné la force, la patience, la volonté et le courage pour terminer ce travail modeste.

Nous tenons à exprimer nos remerciements à notre encadreur M. MENADCI Sofiane qui a proposé et a dirigé ce travail.

Nous tenons à remercier monsieur le président de jury, ainsi que les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Nous tenons à remercier les responsables et tout le personnel du département de Génie Electrotechnique et Automatique de Guelma pour les facilités qu'ils m'ont accordés pour terminer ce travail.

Enfin, Nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à notre formation et à l'élaboration de ce modeste mémoire.

Dédicace

Au terme de ce très modeste travail, je tiens à exprimer ma gratitude aux personnes qui m'ont soutenue durant la réalisation de ce mémoire.

Mes très chers parents :

Mon père, vous avez toute ma gratitude, car c'est grâce à toi que j'ai atteint mon but....

Ma très chère mère, je vous remercie pour votre soutien moral, vos encouragements et vos conseils qui m'ont guidés durant mon parcours.

A mes très chers frères et mes très chères sœurs.

A tous mes tantes, mes oncles et leurs familles.

A tous mes cousins et cousines.

Tous mes amis intimes, et à toute personne qui me connaît.

A tous les enseignants de ma formation à partir du primaire au master et particulièrement mes profs de génie électrique au lycée.

A tous mes collègues de l'Etude et particulièrement la promotion de BAC 2013 et la promotion de master Réseaux électriques 2017/2018 surtout Aouissi Immad.

Abdelhalim

Dédicace

Au terme de ce très modeste travail, je tiens à exprimer ma gratitude aux personnes qui m'ont soutenue durant la réalisation de ce mémoire.

Mes très chers parents :

Mon père, vous avez toute ma gratitude, car c'est grâce à toi que j'ai atteint mon but....

Ma très chère mère, je vous remercie pour votre soutien moral, vos encouragements et vos conseils qui mon guidés durant mon parcours.

A mes très chers frères et mes très chères sœurs.

A tous mes tantes, mes oncles et leurs familles.

A tous mes cousin et cousines.

Tous mes amies intimes, et à toute personne qui me connaît.

A tous les enseignants de ma formation à partir du primaire au master.

A tous mes collègues de l'Etude et particulièrement la promotion de master Réseaux électriques 2017/2018 surtout Aouissi Immad.

ALLA EDDINE

Commande d'une éolienne utilisant une MADA reliée au réseau électrique

Résumé

Dans ce mémoire, nous exposons l'étude d'une commande de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) qui peut être introduite dans un système éolien. Le premier chapitre présente l'état de l'art sur les éoliennes, nous avons opté pour la machine asynchrone à double alimentation pilotée à travers les variables rotoriques. La modélisation de la partie mécanique de l'éolienne et de la machine asynchrone à double alimentation est détaillée dans le deuxième chapitre. Dans le troisième chapitre, nous avons présenté la commande vectorielle par orientation du flux statorique de la MADA pour assurer un contrôle découplé des puissances actives et réactives injectées au réseau électrique.

Mots clés :

- ✓ Energie renouvelable.
- ✓ Energie éolienne.
- ✓ Générateur éolien.
- ✓ Machines électriques.
- ✓ Machine asynchrone à double alimentation.
- ✓ Commande vectorielle.

Sommaire

SOMMAIRE

Introduction générale 1

CHAPITRE I ETAT DE L'ART DES SYSTEME DE CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE

I.1. Introduction 3

I.2. Energie éolienne 3

 I.2.1. Définition 3

 I.2.2. L'historique de l'éolien 3

I.3. Différents types d'éoliennes 4

 I.3.1. Les éoliennes à axe horizontal 4

 I.3.2. Les éoliennes à axe verticale 5

I.4. Principe et les éléments constitutifs d'une éolienne 6

 I.4.1. Les éléments constitutifs d'une éolienne 6

 I.4.1.1. Le mât 6

 I.4.1.2. La nacelle 6

 I.4.1.3. Le rotor 7

 I.4.2. Principe et théorie d'une éolienne 7

 I.4.2.1. Loi de BETZ 7

I.5. Différents technologies d'éoliennes 10

 I.5.1. Fonctionnement à vitesse fixe 10

 I.5.1.1. Les avantages de la vitesse fixe 10

 I.5.1.2. Les inconvénients de la vitesse fixe 10

 I.5.2. Fonctionnement à vitesse variable 10

 I.5.2.1. Les avantages de la vitesse variable 10

 I.5.2.2. Les inconvénients de la vitesse variable 11

I.6. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne 11

 I.6.1. Avantages de l'énergie éolienne 11

 I.6.2. Inconvénients de l'énergie éolienne 11

I.7. Application des systèmes de conversion aérodynamique 12

1.7.1. Système isolée (autonome)	12
1.7.2. Système connectée au réseau	12
1.8. Génératrices utilisées dans les éoliennes	12
1.8.1. Systèmes utilisant la machine synchrone	12
1.8.2. Systèmes utilisant la machine asynchrone	13
1.9. Génératrice asynchrone à double alimentation	13
1.9.1. Structure de la MADA	13
1.9.2. Mode de fonctionnement de MADA	14
1.9.2.1. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone	14
1.9.2.2. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone	14
1.9.2.3 Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone	15
1.9.2.4 Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone	15
1.10. Utilisation de la MADA dans la conversion d'énergie éolienne	15
1.11. Avantages et inconvénients de la GADA	17
1.11.1. Avantages de la MADA	17
1.11.2. Inconvénients de la MADA	18
1.12. Conclusion	18

CHAPITRE II

MODELISATION DU SYSTEME DE CONVERSION

II.1. Introduction	19
II.2. Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne	19
II.2.1. Modélisation du vent	19
II.2.2. Modélisation de la turbine	20
II.2.3. Modèle du multiplicateur de vitesse	21
II.2.4. Equation dynamique de l'arbre	22
II.3. Modélisation de la MADA dans le plan (abc)	23
II.3.1. Equations électriques de la machine	24
II.3.2. Equations magnétiques de la machine	24
II.4. Modèle de la MADA dans le plan (dq)	25
II.4.1. Transformation de Park	25

Sommaire

II.4.2. Relation entre les flux et les courants	26
II.4.3. Equations des tensions	27
II.4.4. Le choix du référentiel	27
II.4.5. Expressions du couple électromagnétique	28
II.4.6. Mise sous forme d'équations d'état	29
II.5. Modélisation de réseau électrique	31
II.5.1. Lignes	31
II.5.2. Model du transformateur	34
II.5.3 Modélisation du filtre.....	36
II.6. Conclusion	38

CHAPITRE III

Commande vectorielle et simulation de la Gada

III.1. Introduction.....	39
III.2. Commande vectorielle de la MADA	39
III.2.1. Expressions des puissances actives et réactives	39
III.2.2. Réglage directe des puissances active et réactive de la MADA	42
III.3. Simulation de l'ensemble MADA-Turbine.....	45
III.4. Commandes MPPT de l'éolienne	47
III.5 Conclusion	49
Conclusion générale.....	51
Bibliographie	52

Table de figure

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I.1 deux types des éoliennes.....	4
Figure I.2 Eoliennes à axe horizontal.....	5
Figure I.3 éoliennes à axe vertical de type Savonius.....	5
Figure I.4 éoliennes à axe vertical de type Darrieus.....	6
Figure I.5 Chaîne de conversion d'une éolienne.....	7
Figure I.6 courant d'aire autour d'un aérogénérateur.....	8
Figure I.7 Coefficient de puissance.....	9
Figure I.8 Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.....	9
Figure I.9 Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.....	13
Figure I.10 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.....	14
Figure I.11 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.....	14
Figure I.12 Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone.....	15
Figure I.13 Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone.....	15
Figure I.14 schéma de principe de la double alimentation.....	16
Figure I.15 Comparaison de zone de fonctionnement en survitesse entre la machine à cage et la MADA.....	18

Chapitre II

Figure II.1 Vitesse de vent - modèle analytique.....	19
Figure II.2 Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative de la turbine.....	21
Figure II.3 Modèle mécanique du multiplicateur.....	21
Figure II.4 Modèle d'une turbine éolienne.....	22
Figure II.5 Schéma bloc du modèle de la turbine.....	23
Figure II.6 Passage du triphasé au biphasé.....	25
Figure II.7 Modélisation d'une ligne par constantes réparties.....	31
Figure II.8 Modélisation d'une ligne par un schéma en π	32
Figure II.9 Modélisation simplifiée d'une ligne par un schéma en π	33
Figure II.10 Schéma monophasé d'une ligne alimentant une charge RL.....	33
Figure II.11 Tension aux extrémités de la ligne a) Ligne de 100km, b) Ligne de 200km.....	34
Figure II.12 Schéma équivalent du transformateur ramené au primaire.....	34
Figure II.13 Schéma équivalent simplifié du transformateur ramené au primaire.....	35

Figure II.14 Schéma équivalent simplifié du transformateur ramené au secondaire.....	35
Figure II.15 Schéma électrique du filtre.....	36
Figure II.16 Circuits équivalents du filtre dans le repère de Park44.....	37

Chapitre III

Figure III.1 Schéma bloc de la MADA.....	41
Figure III.2 Schéma bloc de réglage direct des puissances statoriques de la MADA.....	42
Figure III.3 Schéma bloc de réglage d'une MADA dans l'environnement SIMULINK.....	43
Figure III.4 Schéma bloc du régulateur IP.....	43
Figure III.5 variation des puissances active et réactives.....	44
Figure III.6 Association MADA-Turbine.....	45
Figure III.7 Puissance de la turbine et puissance fournie au réseau.....	46
Figure III.8 Courbe de puissance d'une éolienne de 5 MW pour différents vitesses de vent.....	47
Figure III.9 schéma bloc de la MPPT de la turbine sans MADA.....	48
Figure III.10 Réglage MPPT de l'éolienne.....	48

Liste des symboles

LISTE DES SYMBOLES

ρ	Densité de l'air à 15°C
m	Masse d'air traversant le rotor éolien en 1 seconde
S	Surface balayée par le rotor de l'éolienne
V	Volume balayée par le rotor de l'éolienne
C_p	Coefficient de puissance de l'aérogénérateur
$P_{aér}$	Puissance extraite par le rotor éolien (aérodynamique)
P_v	Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé
λ	Vitesse relative de l'éolienne
β	Angle de calage des pales de la turbine
$\Omega_{turbine}$	Vitesse de la turbine
Ω_{mec}	Vitesse mécanique
Ω_r	Vitesse du rotor mécanique.
v	Vitesse du vent
G	Rapport de multiplication
$J_{turbine}$	Moment d'inertie de la turbine
J	Moment d'inertie
C_{mec}	Couple mécanique total appliqué au rotor de l'éolienne
C_g	Couple du multiplicateur
C_{vis}	Couple des frottements visqueux
C_{em}	Couple électromagnétique
C_r	Couple de charge
θ	Angle entre l'axe de la phase du premier enroulement statorique et l'axe du rotor.
θ_s	Angle entre l'axe de la première phase de l'enroulement statorique et l'axe d
θ_r	Angle entre l'axe de la première phase du rotor et l'axe d.
ω	Vitesse de rotation électrique ($\omega = p\Omega$)
ω_s, ω_r	Pulsation électrique statorique et rotorique
V	Tension

I	Courant
φ	Flux
L	Inductance
M	Inductance mutuelle maximale lorsque l'axe A coïncide avec L'axe a ($\theta=0$)
I_{dr}, I_{qr}	Courant rotorique selon l'axe d,q
I_{ds}, I_{qs}	Courant statorique selon l'axe d,q
V_{dr}, V_{qr}	Tension rotorique selon l'axe d,q
V_{ds}, V_{qs}	Tension statorique selon l'axe d,q
$\varphi_{ds}, \varphi_{qs}$	Flux statorique selon l'axe d,q
$\varphi_{qr}, \varphi_{dr}$	Flux rotorique selon l'axe d,q
[P(θ)]	Matrice de transformation de Park
L_s	Inductance de chaque enroulement du stator
L_r	Inductance de chaque enroulement du rotor
R_r	Résistance de chaque enroulement du rotor
R_s	Résistance de chaque enroulement du stator
M_s	Inductance mutuelle entre deux phases statorique
M_r	Inductance mutuelle entre deux phases rotorique
g	Glissement
P_s	La puissance active statorique
Q_s	La puissance réactive rotorique
C	capacité
G	conductance
t	temps
γ	Constante de propagation
Z_c	Impédance caractéristique
e_d, e_q	tensions de couplage

GADA	Générateur Asynchrone à Double Alimentation
MAS	Machine Asynchrone
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PI	Action proportionnelle et intégrale

Introduction générale

Introduction générale

La consommation mondiale d'énergie ne cesse de croître, posant des questions cruciales sur le problème du réchauffement climatique, dû aux gaz à effet de serre, et sur l'épuisement prochain des ressources fossiles. Suite à cette prise de conscience, un développement économique respectueux de l'environnement s'avère absolument nécessaire [1] [9].

Les énergies renouvelables sont propres et constituent une solution alternative pour subvenir aux besoins de la société actuelle. Longtemps négligées ces énergies reprennent la place qui leurs est dû, grâce aux recherches et études qui se font de plus en plus diversifiées et pluridisciplinaires.

L'option du recours aux énergies renouvelables a pris aussi un essor certain en Algérie, elle reste à être matérialisée par des projets importants et concrets.

C'est dans ce contexte général que vient s'inscrire notre étude qui porte sur l'une des énergies renouvelables en développement actuellement qui est l'énergie éolienne.

La littérature atteste du grand intérêt accordé aujourd'hui à la machine doublement alimentée (MADA) pour diverses applications : en tant que génératrice pour les énergies éoliennes ou en tant que moteur pour certaines applications industrielles comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime. Cet intérêt est dû essentiellement aux degrés de liberté qu'elle offre du fait de l'accessibilité de son rotor et donc de la possibilité de l'alimenter par un convertisseur aussi bien du côté du stator que du côté du rotor [1] [4].

Le premier chapitre est un état de l'art des énergies éoliennes, dans le monde. Aussi une description sommaire des différents éléments d'un aérogénérateur sera présentée.

Le second chapitre est consacré à la modélisation mathématique de l'ensemble des éléments qui constituent une chaîne de conversion éolienne à base d'une MADA. En effet, nous avons développé le modèle mathématique de la partie mécanique, de la MADA au sens de Park (très utilisé pour les problèmes de réglage des machines alternatives) et du réseau électrique avec un filtre de lissage de l'énergie injectée dans le réseau.

Dans le dernier chapitre, nous présenterons une technique de réglage découplé des puissances active et réactive de la MADA connectée directement au réseau et pilotée par les tensions de son rotor. Cette technique vectorielle est basée sur l'orientation du flux statorique suivant le repère de PARK, cela permet de découpler la commande des puissances active et réactive tout en réduisant la relation entre les puissances et les tensions rotoriques à un premier ordre très simple à manipuler.

Dans ce dernier chapitre aussi, nous présenterons le principe et le rôle de la technique MPPT très utilisée dans les éoliennes.

Pour valider les approches théoriques présentées, plusieurs simulations sous l'environnement Matlab /Simulink seront présentées et discutées.

Nous terminerons ce travail par une conclusion générale et des perspectives pour les futurs travaux sur cet axe important.

Chapitre I

Etat de l'art sur l'énergie éolienne

I.1. Introduction

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des aérogénérateurs n'a cessé d'évoluer surtout au cours des dernières décennies. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (turbine à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des turbines sont de plus en plus performantes [1]. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Ainsi dans ce chapitre nous allons énoncer en première partie une généralité sur les différents types d'éoliennes.

La dernière partie de ce chapitre illustre le principe de fonctionnement de différentes structures de machines utilisées dans les éoliennes, à savoir : machine synchrone, machine asynchrone (à cage ou à double alimentation).

I.2. Energie éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est directement lié 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 été oublié, cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, connaît depuis environ 30 ans un développement sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers [2] [12].

I.2.1. Définition

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

I.2.2. L'historique de l'éolien

Dès l'aube de l'humanité, le vent a été exploité pour en extraire de l'énergie mécanique, en effet depuis 3000ans environ, il fût utilisé pour la propulsion des navires, pour les moulins à blé, ainsi que pour le pompage, Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait dans ce domaine conçu un projet d'irrigation à partir de la puissance du vent [2][3].

L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poule La Cour en 1891, qui fut sans doute le pionnier dans ce domaine, d'associer une turbine éolienne à une génératrice.

Dès lors les recherches allèrent bon train, et les aérogénérateurs firent une apparition massive, avec près de 1 million dans le monde vers les années 60.

La crise pétrolière de 1973, relança les études et les expériences cette fois-ci à grande échelle.

Actuellement, l'éveil et la prise de conscience du danger du réchauffement climatique dû aux gaz à effet de serre vont de nouveau relancer la recherche dans le domaine des énergies renouvelables en général et de l'énergie éolienne en particulier.

II.3. Différents types d'éoliennes

Il existe deux grandes familles d'éoliennes certaines ont un axe horizontal, parallèle au sol, et d'autres ont un axe vertical, perpendiculaire au sol [2] [9].

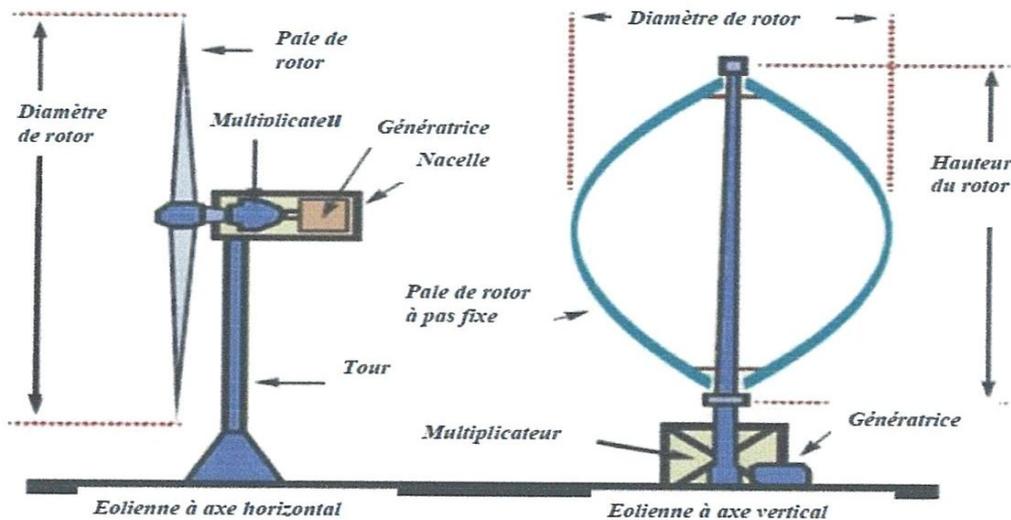


Figure I.1: Deux types des éoliennes [6]

I.3.1. Les éoliennes à axe horizontal

Elles sont souvent appelées "éolienne à hélices" et sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles s'orientent suivant la direction du vent. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent des voilures à deux, trois (les plus courantes) ou plusieurs 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. Elles sont implantées dans les zones rurales ou en mer car elles nécessitent de la place.

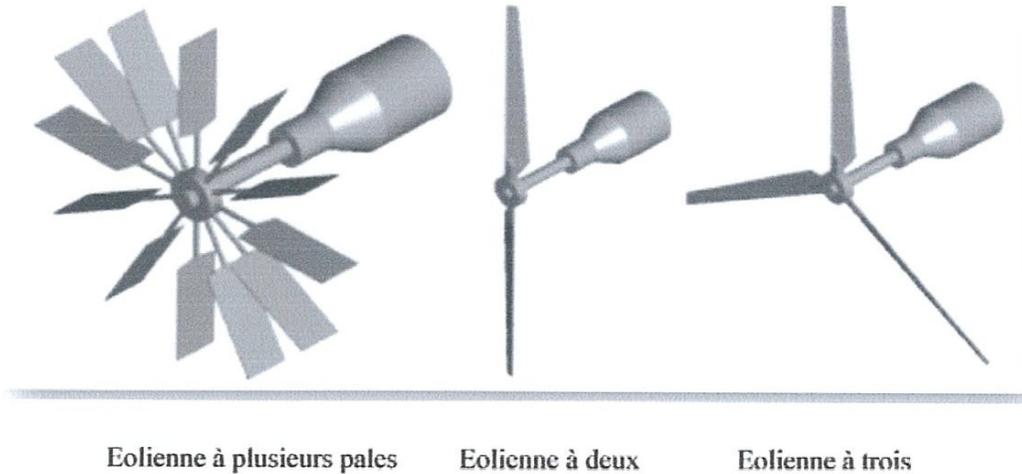


Figure I.2: Eoliennes à axe horizontal [6]

I.3.2. Les éoliennes à axe verticale

Elles ont été les premières structures utilisées pour produire de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir des organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessible.

Il existe deux types d'éolienne verticale, les éoliennes Savonius (inventée par le finlandais Sigurd Savonius en 1924), elles sont basées sur le principe de la traînée différentielle qui stipule qu'un couple moteur peut être obtenu par une pression différente exercée par le vent sur les parties concaves et convexes de la structure [9].

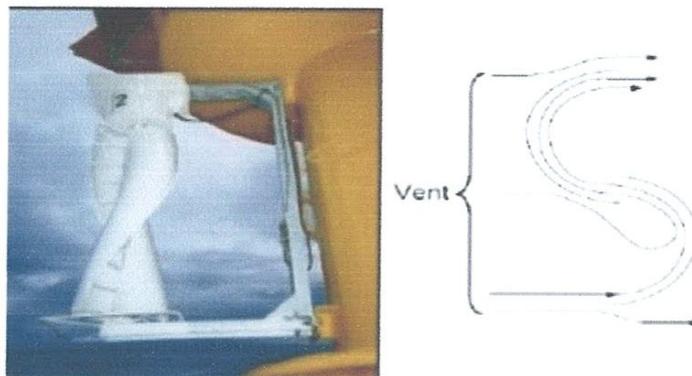


Figure I.3: Eolienne à axe vertical de type Savonius [2]

La deuxième catégorie est les éoliennes de type Darrieus (conçues par l'ingénieur français George Darrieus) [8]. Ce type d'aérogénérateur est basé sur le fait qu'un profil placé dans la direction de l'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensité variables selon l'orientation de ce profil (Figure. I.5). La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif [9].

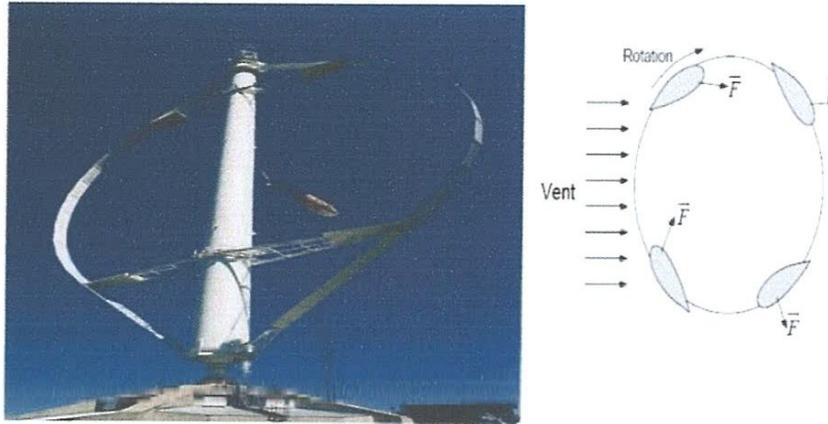


Figure I.4: Eoliennes à axe vertical de type Darrieus [8]

I.4. Principe et les éléments constitutifs d'une éolienne

I.4.1. Les éléments constitutifs d'une éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne « classique » est généralement constituée de trois éléments principaux [2] [11].

I.4.1.1. Le mât

Généralement un tube d'acier doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations au niveau du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW : diamètre de 90 m, mât de 80 m de hauteur).

I.4.1.2. La nacelle

Comprend arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Tous ces éléments mécaniques permettent de coupler le rotor éolien au générateur électrique. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes

hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). En plus, un système de refroidissement par air ou par eau est souvent utilisé, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.

I.4.1.3. Le rotor

Formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire et le bruit [11].

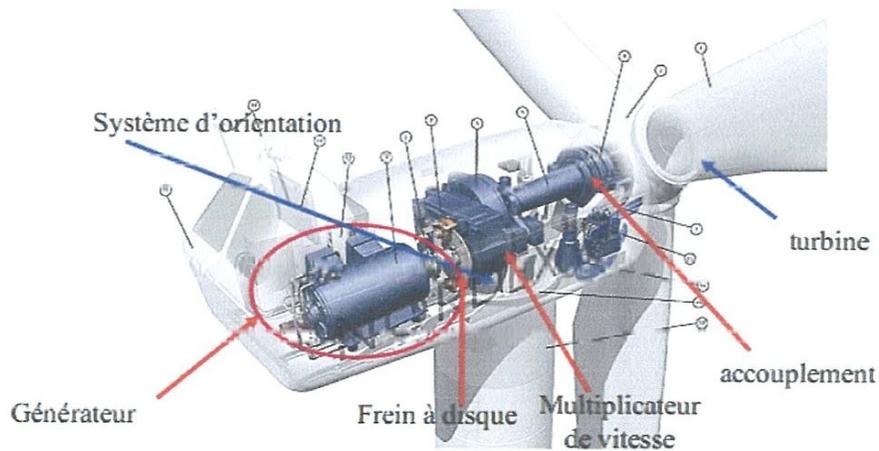


Figure I.5: Chaîne de conversion d'une éolienne [12]

I.4.2. Principe et théorie d'une éolienne

I.4.2.1. Loi de BETZ

Le vent est caractérisé par trois grandeurs variables pendant le temps [5] [13] : Sa direction ; sa vitesse et son intensité.

L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent, elle est fonction de la masse et de la vitesse du volume d'air. Dans l'hypothèse que la masse volumique de l'air est constante on peut dire que :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (I.1)$$

Considérons le système à axe horizontal où v_1 et v_2 sont la vitesse du vent en amont et en aval de l'aérogénérateur, or la vitesse du vent qui traverse le rotor est égale à la moyenne de ces deux vitesses.

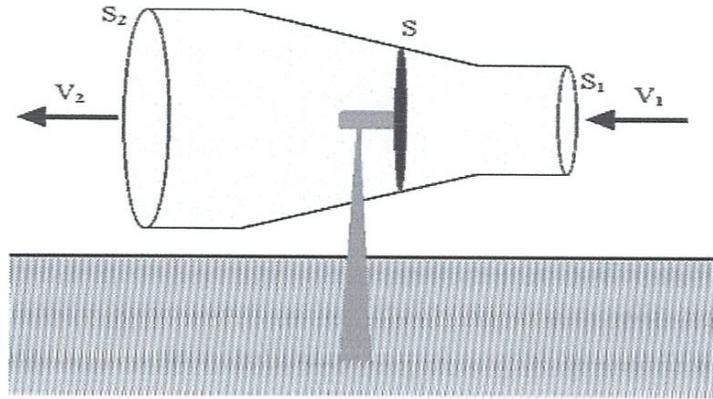


Figure I.6: Courant d'air autour d'un aérogénérateur

Dans ce cas, la masse d'air en mouvement qui traverse S en une seconde est :

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

La puissance extraite en une seconde est donnée par :

$$P_{a\acute{e}r} = \frac{m(v_1^2 - v_2^2)}{2} \quad (I.3)$$

En utilisant (I.2) et (I.3), on trouve :

$$P_{a\acute{e}r} = \frac{\rho S(v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2)}{4} \quad (I.4)$$

Pour un vent supposé non perturbé, traversant une surface S à une vitesse v_1 , pendant 1 seconde, la puissance théorique disponible du vent égale à :

$$P_V = \frac{\rho S v_1^3}{2} \quad (I.5)$$

Où ρ est la masse volumique de l'air.

S représente la surface des pales balayée par la masse d'air en mouvement.

Cependant, le dispositif de conversion extrait une puissance $P_{aér}$ inférieure à la puissance théoriquement récupérable P_V à cause de la vitesse non nulle des masses d'air en amont de la turbine, le coefficient de puissance de l'aérogénérateur est défini par :

$$C_p = \frac{P_{aér}}{P_V} \tag{I.6}$$

Donc, on aura :

$$\frac{P_{aér}}{P_V} = \frac{\left(1 + \frac{v_1}{v_2}\right)\left(1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2\right)}{2} \tag{I.7}$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus on remarque que ce ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance théorique présente une limite théorique appelée limite de Betz égale à $16/27$ soit 0,59.

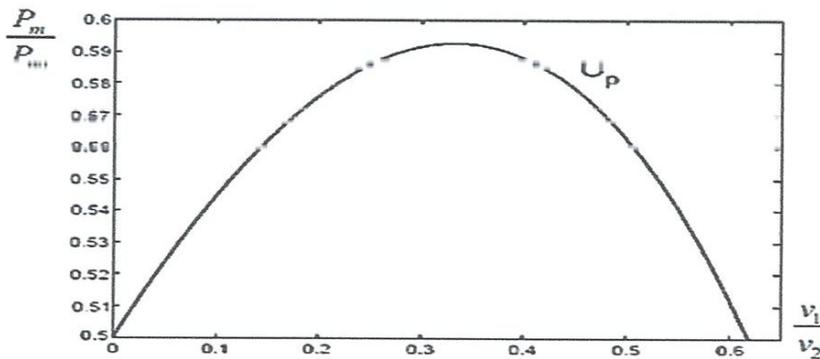


Figure I.7: Coefficient de puissance

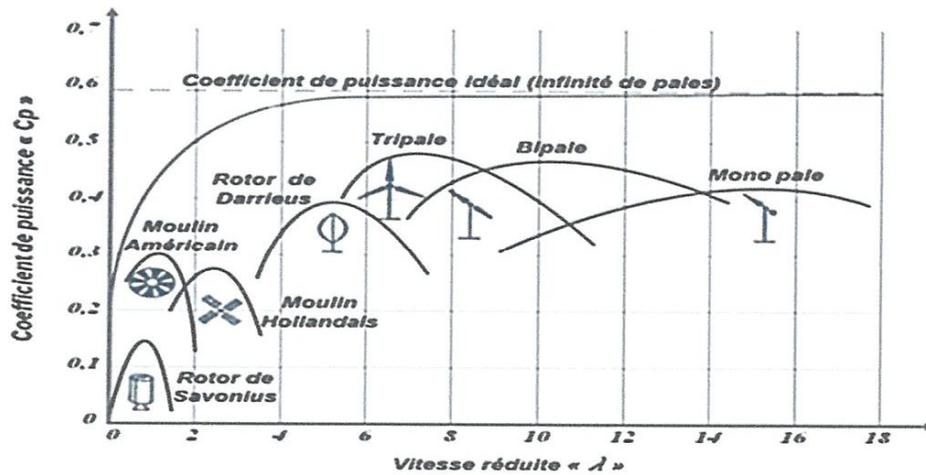


Figure I.8: Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes

I.5. Différents technologies d'éoliennes

Il existe essentiellement deux technologies d'éoliennes, celles dont la vitesse est constante et celles dont la vitesse variable.

I.5.1. Fonctionnement à vitesse fixe

Le générateur tourne à vitesse fixe ou varie très légèrement en jouant sur le glissement de la machine (seules les génératrices asynchrones sont utilisées dans ce cas). Deux génératrices asynchrones sont souvent utilisées dans ce type d'éoliennes.

Un générateur dimensionné pour des faibles puissances correspondant à des vitesses de vent faibles et un générateur dimensionné pour des fortes puissances correspondant à des vitesses de vent plus élevés. Le problème majeur de cette solution est la complexité du montage qui augmente la masse embarquée. Une autre solution consiste à utiliser un câblage du stator qui peut être modifié afin de faire varier le nombre de pôles. Cette disposition permet également de proposer deux régimes de rotation l'un rapide en journée et l'autre plus lent la nuit permettant de diminuer le bruit [18].

I.5.1.1. Les avantages de la vitesse fixe

- ✓ Simplicité d'implantation [15].
- ✓ Technologie maîtrisée et moins cher que les technologies modernes [15].
- ✓ Pas besoin de système d'électronique de puissance et de commande complexe [16].

I.5.1.2. Les inconvénients de la vitesse fixe

- ✓ En vitesse fixe le maximum théorique de puissance n'est pas atteint [19].

I.5.2. Fonctionnement à vitesse variable

Une interface de puissance adapte la fréquence des courants du générateur à celle du réseau et permet ainsi de fonctionner à vitesse variable. Autrement dit, l'introduction des convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique [18].

I.5.2.1. Les avantages de la vitesse variable

- ✓ Une meilleure exploitation de l'énergie du vent [15].
- ✓ La réduction des oscillations du couple et des efforts mécaniques [15].

I.5.2.2. Les inconvénients de la vitesse variable

- ✓ L'inconvénient principal du raccordement indirect au réseau est son coût.
- ✓ Convertisseur de puissance « complexe » [19].
- ✓ Perte énergétique lors du processus de conversion CA-CC-CA.

II.6. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

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

I.6.1. Avantages de l'énergie éolienne

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, écologique, fiable, économique, et inépuisable, c'est une énergie qui respecte l'environnement [20].
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas des déchets toxiques ou radioactifs [16].
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires [16].
- La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à des nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles [21].
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [16].
- Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique déjà existant [16].

I.6.2. Inconvénients de l'énergie éolienne

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques dés avantages :

- L'impact visuel : Ça reste néanmoins un thème subjectif [16].
- Les bruits mécaniques ou aérodynamiques [21].
- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux.

- La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante [16].
- Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes de production classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien [16].

Il a fallu plusieurs décennies pour réaliser des éoliennes silencieuses, esthétiques et résistantes aux conditions météorologiques très capricieuses.

I.7. Application des systèmes de conversion aérodynamique

Dans la littérature, il existe deux catégories d'éoliennes telles que les éoliennes isolées (autonomes), les éoliennes connectées au réseau.

I.7.1. Système isolée (autonome)

Les éoliennes autonomes sont utilisées dans des gammes de puissances de quelques dizaines de Watts à quelques dizaines de kW pour l'alimentation d'appareils électriques d'instrumentation ou d'éclairage. Les plus petites éoliennes sont utilisées pour les bateaux, le camping ou les stations météo. Les éoliennes de plus grande puissance sont utilisées pour la production destinée à alimenter en énergie électrique des villages isolés [2].

Les points communs entre toutes ces éoliennes sont leur faible puissance et leur association à une unité de stockage d'énergie, généralement constituée de batteries d'accumulateurs [2].

I.7.2. Système connectée au réseau

Les systèmes liés au réseau n'ont pas besoin de systèmes de stockage d'énergie ; par conséquent, toute la génération est livrée directement au réseau électrique.

I.8. Génératrices utilisées dans les éoliennes

A travers la littérature spécialisée nous avons rencontré plusieurs types de génératrices adaptées aux éoliennes. Les deux types les plus utilisés sont cités ci-dessous :

I.8.1. Systèmes utilisant la machine synchrone

Ce type de machine est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 kW à 2 MW sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille. De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est

fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéroturbine se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau. Elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance. Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplées [14].

I.8.2. Systèmes utilisant la machine asynchrone

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé.

La constitution du stator est la même que pour la machine synchrone et le rotor comporte soit un système d'enroulements triphasés (si le stator est triphasé lui aussi) ou une cage d'écureuil en court-circuit.

Dans le paragraphe suivant, nous donnons plus de détails sur les systèmes utilisant la génératrice asynchrone à rotor bobiné appelée aussi à double alimentation (GADA).

I.9. Génératrice asynchrone à double alimentation

I.9.1. Structure de la MADA

L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor est constitué de trois bobines en étoile et dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne, figure I.10.

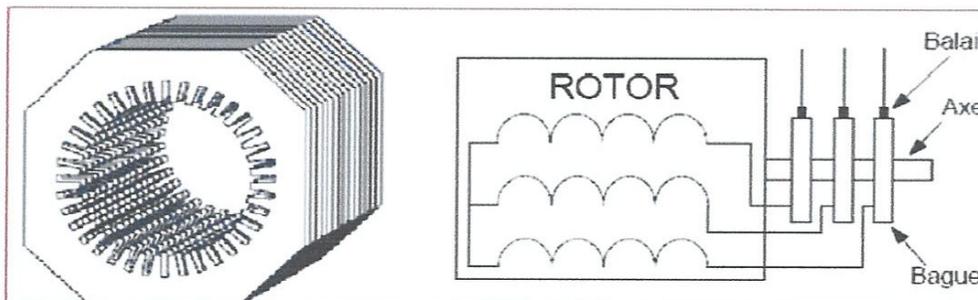


Figure I.9 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

I.9.2. Mode de fonctionnement de MADA

En générale, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, mais la différence avec les autres types de machine réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. En effet, nous savons qu'une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur. Par contre dans le cas de la MADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper synchronisme ou en hypo synchronisme dans les deux modes (moteur, générateur) [21].

I.9.2.1. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

- La puissance est fournie par le réseau au stator et
- La puissance de glissement est renvoyée au réseau.
- La vitesse de rotation est inférieure au synchronisme.
- La machine asynchrone à cage peut être fonctionné ainsi mais la puissance de glissant est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor.

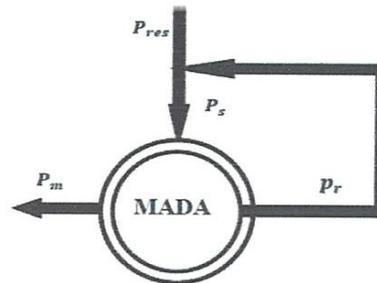


Figure I.10: Le fonctionnement en mode moteur hypo synchrone [21].

I.9.2.2. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

- La puissance fournie par le réseau va au rotor et stator.
- La vitesse de la machine au-dessus de la vitesse de synchronisme,
- La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce fonctionnement.

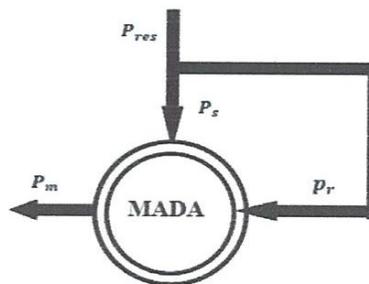


Figure I.11: Le fonctionnement en mode moteur hyper synchrone [21].

I.9.2.3. Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone

- La puissance est fournie au réseau par le stator.
- Une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.
- La vitesse de rotation en dessous de la vitesse de synchronisme.
- La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce fonctionnement.

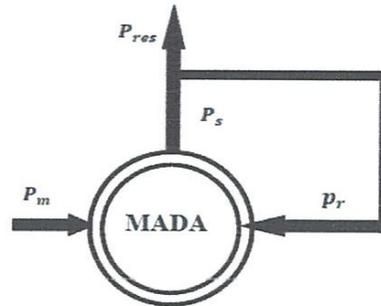


Figure I.12: Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone [21].

I.9.2.4. Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone

- La puissance est fournie au réseau par le stator.
- La puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau.
- La vitesse de la machine au-dessus de la vitesse de synchronisme.
- La machine asynchrone à cage peut être fonctionnée ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor.

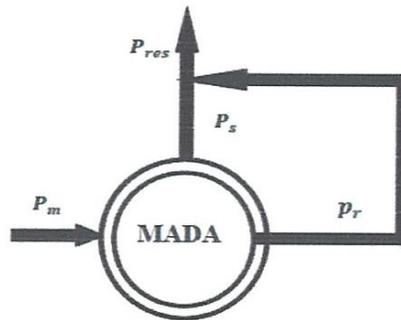


Figure I.13. Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone [21].

I.10. Utilisation de la MADA dans la conversion d'énergie éolienne

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. Cette caractéristique intéressante a permis à la MADA de connaître un succès grandissant dans le domaine de la conversion électromécanique [13].

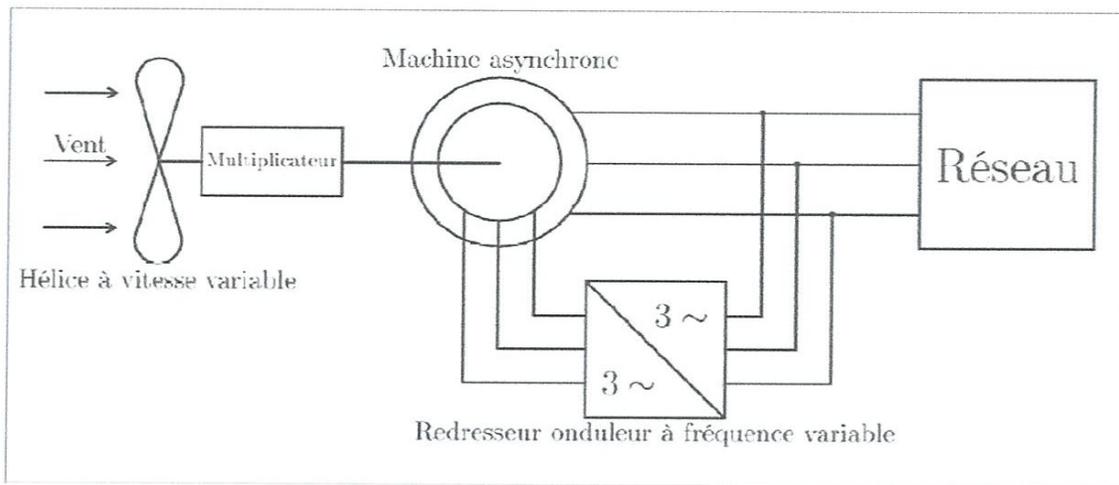


Figure I.14. schéma de principe de la double alimentation [8]

On connecte toujours le stator au réseau mais ici au lieu de court-circuiter les enroulements rotoriques, on les alimente en alternatif à fréquence variable à partir de réseau via un onduleur des tailles réduite. La puissance à fournir au rotor est faible devant la puissance produite par le stator.

De cette manière, il est possible de produire de l'énergie avec des vitesses de rotation d'un rotor variant dans une large plage. En effet, la fréquence des tensions de sortie d'une machine asynchrone dépend de sa vitesse de rotation et donc du glissement g ;

$$g = 100 \cdot \frac{\Omega_{\text{synchroisme}} - \Omega_{\text{rotor}}}{\Omega_{\text{synchroisme}}} \quad (I.8)$$

Comme la fréquence des courants rotoriques dépend du glissement :

$$\omega_{\text{rotor}} = g \cdot \omega_{\text{synchroisme}} \quad (I.9)$$

Avec :

$$\omega_{\text{synchroisme}} = \frac{\omega_{\text{synchroisme}}}{P} \quad (I.10)$$

Avec : P nombre de paires de pôles de la machine.

On peut ainsi obtenir une fréquence de sortie de 50Hz quelle que soit la vitesse de rotation de l'éolienne à condition d'injecter au rotor des tensions à une fréquence qui compense cette différence de vitesse.

Il faut réguler l'amplitude des tensions rotoriques pour contrôler la production d'énergie. On obtient une éolienne plus complexe que précédemment mais qui permet de

mieux capter le vent car la production s'effectue quelle que soit la vitesse du vent avec une puissance variable. De plus, si l'on installe une hélice à pas variable pour capter les faibles vents et limiter la vitesse en cas de fort vent, on aboutit à un système très performant. Il est aussi envisageable de concevoir une telle machine avec un grand nombre de pôles pour une liaison mécanique directe à l'hélice.

L'inconvénient de cette machine est la présence de bagues collectrices pour alimenter du rotor. Ces contacts s'usent et demandent donc de l'entretien. Pour remédier à ce problème, des machines asynchrones à double stator sont à l'étude pour des fonctionnements en MADA bushes. On envisage même l'utilisation de deux machines sur le même arbre, l'une servant à la production électrique et l'autre alimentation des enroulements rotoriques.

Ce type d'aérogénérateur s'est développé récemment car la double alimentation de machine asynchrone permet une meilleure exploitation du potentiel de l'éolienne. Avec un onduleur de taille réduite et une commande appropriée, on obtient une qualité de tension similaire à celle de la machine asynchrone classique [8].

I.11. Avantages et inconvénients de la GADA

I.11.1. Avantages de la MADA

- 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 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 [22].
- La MADA réunit les avantages de la machine synchrone et de la machine asynchrone, à savoir :
 - ✓ Fonctionnement à vitesse de rotation variable.
 - ✓ Régulation découplée des puissances active et réactive.

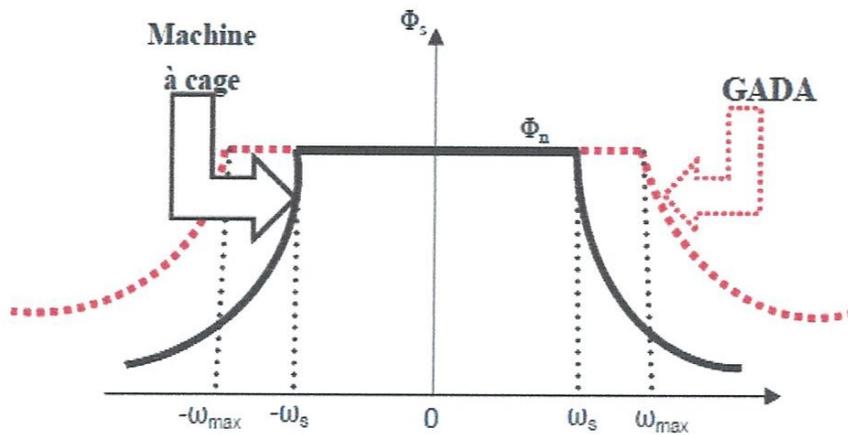


Figure I.15: Comparaison de zone de fonctionnement en survitesse entre la machine à cage et la MADA [22]

I.11.2. 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 [22].

I.12. Conclusion

L'énergie électrique est l'énergie la plus importante et la plus noble parmi toutes les autres formes d'énergies. Ainsi la proportion électrique par rapport à l'énergie totale consommée, ne cesse pas de croître, il faudrait pour cela pouvoir développer suffisamment les énergies renouvelables pour pouvoir diminuer la consommation des énergies fossiles ; les énergies renouvelables sont aussi parfois présentées comme une solution au problème de l'environnement.

Dans ce chapitre nous avons mentionné que les énergies renouvelables peuvent être issues de ressource hydraulique, solaire, géothermie, biomasse et éolienne, et nous avons mis l'accent sur les éoliennes utilisant des MADA en précisant leurs avantages et inconvénients.

Chapitre II
Modélisation du Système de Conversion
d'Énergie Éolienne

II.1. Introduction

Dans la chaîne de conversion de l'énergie éolienne, la turbine et la génératrice sont les éléments les plus importants, puisque la turbine assure une transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique qui permet de faire tourner le rotor de la génératrice et cette dernière est la composante qui assure la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. Le système turbine-génératrice est intégré avec des convertisseurs, nécessaires pour la conversion (alternatif /continu) ou inversement. Dans ce chapitre, on va essayer de modéliser les deux composantes essentielles de notre système éolien (Turbine et GADA).

II.2. Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne

II.2.1. Modélisation du vent

L'évolution de la vitesse de vent en fonction du temps est modélisée généralement par une fonction analytique ou générée par une loi statistique à partir des données de mesure pour un site donné. Dans la phase de modélisation du vent, on doit satisfaire 2critères :

- La durée du profil doit être limitée pour réduire le temps de simulation.
- Le profil de vent doit être représentatif des caractéristiques du gisement (intensité, variabilité, distribution statistique...).

Dans cette étude, nous avons représenté l'évolution de la vitesse de vent de façon déterministe, par une somme de plusieurs harmoniques, conformément à [30] :

$$V_v = 10 + 0.5\sin(0.1047t) + 2\sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2\sin(3.6645t) \quad (\text{II.1})$$

L'évolution temporelle du vent est tracée dans la figure. II. 1.

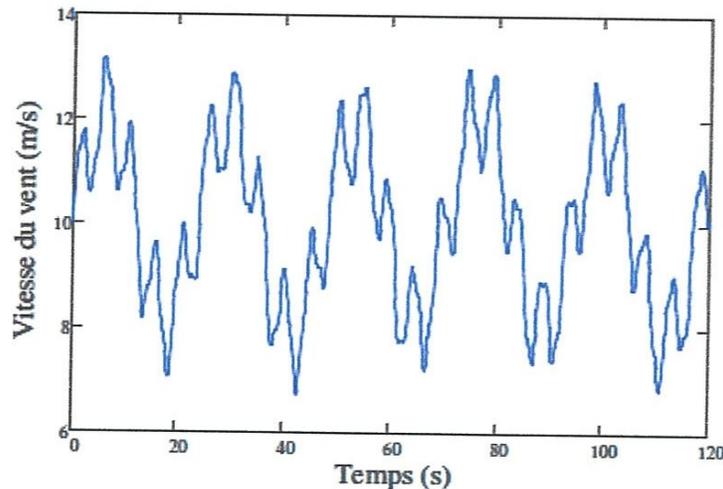


Figure. II.1: Vitesse de vent - modèle analytique

II.2.2. Modélisation de la turbine

La vitesse du vent ou puissance éolienne est définie de la manière suivante [15].

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

- P_V est la puissance totale théoriquement disponible.
- ρ est la densité de l'air (1.225 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 .

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

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 [15].

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 :

$$\lambda = \frac{R \Omega_{turbine}}{v} \quad (\text{II.4})$$

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

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

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \frac{1}{2} \rho S v^3 \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (\text{II.5})$$

- **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 .

A titre d'exemple, l'expression du coefficient de puissance d'une turbine éolienne de 5 MW est approximé par l'équation [26].

$$C_p(\beta, \lambda) = 0.7 \left(\frac{151}{A_i} - 0.58 \beta - 0.02 \beta^{2.14} - 13.2 \right) e^{-\frac{18.4}{A_i}} \text{ avec: } A_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda - 0.02 \beta} \frac{0.003}{\beta^3 - 1}} \quad (\text{II.6})$$

Ainsi comme il est illustré dans la figure (II.3), il est possible de constater que le coefficient de puissance évolue en forme de cloche. On constate que pour chaque vitesse du vent il y a une vitesse de la turbine qui donne un C_p max.

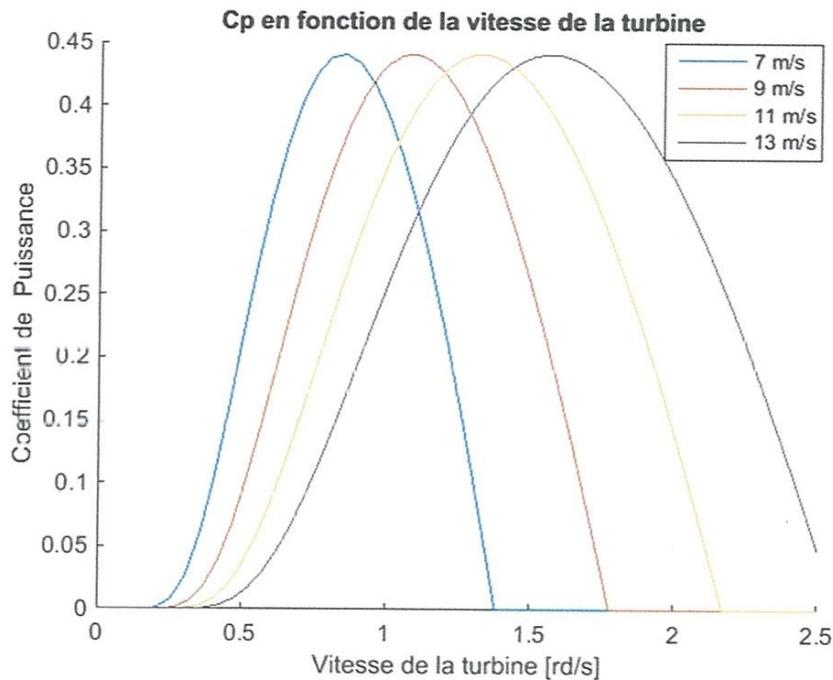


Figure II.2 : Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse de la turbine

II.2.3. 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 Ω_{turbine} , lente, à celle que nécessite la génératrice Ω_g [24].

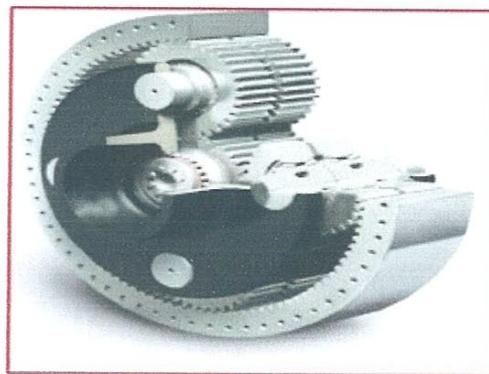


Figure II.3: Modèle mécanique du multiplicateur [24]

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes [15]:

$$C_g = \frac{C_{turbine}}{G} \tag{II.7}$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_g}{G} \tag{II.8}$$

II.2.4. Equation 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 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.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \tag{II.9}$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple total (C_{tot}) appliqué au rotor :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{tot} \tag{II.10}$$

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

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

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \tag{II.11}$$

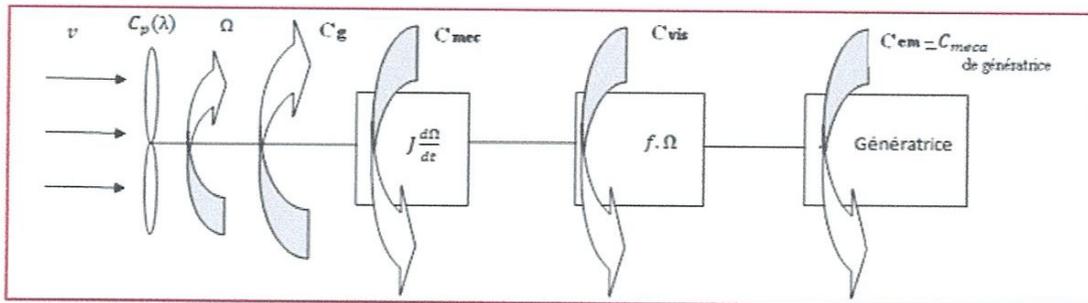


Figure II.4: Modèle d'une turbine éolienne [25]

L'équation mécanique qui gère un tel ensemble, figure II.5, est donnée par :

$$C_{mec} = C_{turbine} - C_{em} - C_{vis} \quad (II.12)$$

$$C_{turbine} - C_{em} = J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f \cdot \Omega_{mec} \quad (II.13)$$

$$\Omega_{mec} = \frac{1}{Js+f} (C_{turbine} - C_{em}) \quad (II.14)$$

Le schéma bloc (Figure II.6) correspondant à cette modélisation de la turbine se déduit aisément des équations précédentes.

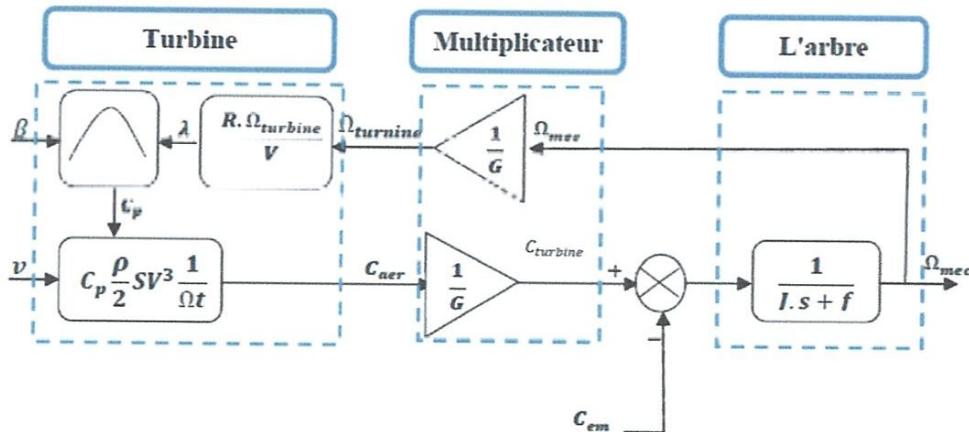


Figure II.5: Schéma bloc du modèle de la turbine

II.3. Modélisation de la MADA dans le plan (abc)

A cause de la répartition des enroulements de la MADA et sa géométrie complexe, on prend généralement quelques hypothèses pour faciliter la modélisation [4] [5] [13] :

- La machine est symétrique et à entrefer constant.
- Le circuit magnétique n'est pas saturé et parfaitement feuilleté ; il en résulte que les pertes fer sont négligeables et que seuls les enroulements sont parcourus par des courants.
- La f.m.m créée, est à répartition sinusoïdale le long de l'entrefer.
- L'influence de l'effet de la température n'est pas prise en compte,

Il en résulte que les résistances et tous les coefficients d'inductances propres sont constants et les coefficients d'inductances mutuelles sont fonction de la position de leurs axes magnétique.

II.3.1. Equations électriques de la machine

En tenant compte des hypothèses ci-dessus, le modèle de la MADA comporte : Trois équations statorique et trois équations rotoriques comme le montre le système matriciel suivant :

$$\begin{cases} [V_s] = R_s \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\phi_s] \\ [V_r] = R_r \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\phi_r] \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}, \quad [V_r] = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix}, \quad [I_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}, \quad [I_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}$$

Où R_s et R_r sont respectivement les Résistances statoriques et rotoriques.

II.3.2. Equations magnétiques de la machine

Les équations des flux statoriques et rotoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} [\phi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] [I_r] \\ [\phi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] [I_s] \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

Avec :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}; \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

Où l_s, l_r sont respectivement les inductances propres statoriques et rotorique. M_s, M_r sont respectivement les inductances mutuelles statoriques et rotoriques.

La matrice des inductances mutuelles (ou la matrice de couplage rotor-stator) est donnée par :

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

En remplaçant (II.15) dans (II.16), on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} ([L_{ss}] \cdot [I_s]) + \frac{d}{dt} ([M_{sr}] \cdot [I_r]) \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} ([L_{rr}] \cdot [I_r]) + \frac{d}{dt} ([M_{rs}] \cdot [I_s]) \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

Cette mise en équation aboutit à des équations différentielles à coefficients variables. L'étude analytique du comportement du système est alors relativement laborieuse, vu le grand nombre de variables. On utilise alors des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement de la machine à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants.

II.4. Modèle de la MADA dans le plan (dq)

II.4.1. Transformation de Park

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée – biphasée fixe, suivie d'une rotation. En effet, elle permet de passer du repère (abc) vers le repère ($\alpha\beta$), puis vers le repère (dq). Le repère ($\alpha\beta$) est toujours fixe par rapport au repère (abc) ; par contre le repère (dq) est mobile ; il forme avec le repère fixe ($\alpha\beta$) un angle, appelé angle de la transformation de Park ou angle de Park [4].

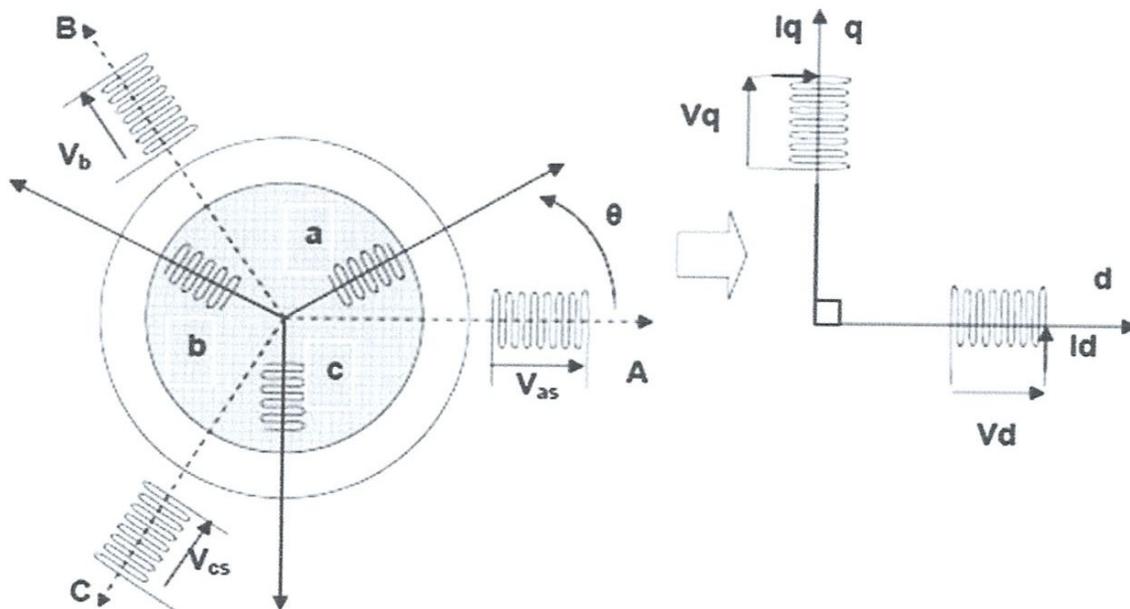


Figure II.6: Passage du triphasé au biphasé

La matrice de transformation de Park est définie comme suit :

$$P(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Cette matrice permet le passage des composantes X_{abc} du système triphasé aux composantes biphasées X_{dq} ; avec X_{abc} peut être : un vecteur tension, courant ou flux. Ainsi, les grandeurs statoriques et rotoriques sont transformées comme suit :

- Tensions :

$$\begin{cases} [V_{sdq}] = [P(\theta_s)] \cdot [V_{sabc}] \\ [V_{rdq}] = [P(\theta_s - \theta)] \cdot [V_{rABC}] \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

- Courants :

$$\begin{cases} [I_{sdq}] = [P(\theta_s)] \cdot [I_{sabc}] \\ [I_{rdq}] = [P(\theta_s - \theta)] \cdot [I_{rABC}] \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

- Flux :

$$\begin{cases} [\varphi_{sdq}] = [P(\theta_s)] \cdot [\varphi_{sabc}] \\ [\varphi_{rdq}] = [P(\theta_s - \theta)] \cdot [\varphi_{rABC}] \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

Notons que θ représente le déphasage entre le stator et le rotor.

II.4.2. Relation entre les flux et les courants

L'application de la transformation de Park sur la relation entre les flux et les courants, donnée par l'équation (II.16), donne le système linéaire suivant :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s I_{qs} + M \cdot I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + M \cdot I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_s I_{qr} + M \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

Avec :

$$L_s = I_s - M_s \quad : \text{Inductance cyclique statorique.}$$

$$L_r = I_r - M_r \quad : \text{Inductance cyclique rotorique.}$$

$$M = \frac{3}{2} M_{sr} = \frac{3}{2} M_{rs} \quad : \text{Mutuelle cyclique entre stator et rotor.}$$

II.4.3. Equations des tensions

Les équations des tensions statoriques et rotoriques, écrites dans le repère de Park, sont données par les systèmes ci-dessous :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega_s \cdot \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega_s \cdot \varphi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - (\omega_s - \omega) \cdot \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + (\omega_s - \omega) \cdot \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

Avec :

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}, \quad \text{est la vitesse du champ tournant.}$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}, \quad \text{est la vitesse du rotor.}$$

$$\theta_s = \theta + \theta_r \quad \text{L'équation d'autopilotage.}$$

II.4.4. Le choix du référentiel

Cependant, nous pouvons simplifier les équations (II.24) et (II.25) en choisissant un référentiel particulier pour dq. En effet, deux autres repères peuvent être choisis en plus le repère lié au champ tournant présenté précédemment. Le modèle de la MADA pour ces repères est présenté dans les paragraphes suivants.

- **Référentiel lié au stator**

Caractérisé par $\theta_s = 0$, et par conséquent, le système d'équations en tensions devient:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} + \omega \cdot \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} - \omega \cdot \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

- **Référentiel lié au rotor**

Caractérisé par $\theta_r = \theta_s$, et par conséquent, le système devient alors :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega_r \cdot \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega_r \cdot \varphi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

Remarque

- Les relations linéaires entre les flux et les courants données par le système (II.23) ne changent pas quel que soit le repère de Park choisi.
- Le repère lié au stator est souvent utilisé pour les simulations, l'étude des observateurs et les commandes directes du couple.
- Le repère lié au champ tournant est utilisé pour la commande vectorielle à flux orienté.

II.4.5. Expressions du couple électromagnétique

Le couple instantané d'une machine peut être calculé par deux méthodes :

- Par un bilan de puissance instantanée.
- Par la méthode dite "des travaux virtuels".

Nous allons utiliser la première méthode pour notre cas puisqu'elle est plus simple. La puissance électrique instantanée fournie aux enroulements statoriques et rotoriques en fonction des grandeurs d'axes d, q est donnée par l'expression suivante :

$$P_e = V_{ds}I_{ds} + V_{qs}I_{qs} + V_{dr}I_{dr} + V_{qr}I_{qr} \quad (\text{II.30})$$

En développant cette dernière expression, nous trouvons que la puissance instantanée se décompose en trois termes : puissance dissipée en pertes Joule, puissance représentant les échanges d'énergie électromagnétique avec la source, et puissance mécanique :

$$P_e = P_j + P_{em} + P_{mec} \quad (\text{II.31})$$

Où

$$P_j = R_s(I_{ds}^2 + I_{qs}^2) + R_r(I_{dr}^2 + I_{qr}^2) \quad (\text{II.32})$$

$$P_{em} = I_{ds} \frac{d\Phi_{ds}}{dt} + I_{qs} \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + I_{dr} \frac{d\Phi_{dr}}{dt} + I_{qr} \frac{d\Phi_{qr}}{dt} \quad (\text{II.33})$$

$$P_{mec} = \omega(I_{dr}\Phi_{qr} - I_{qr}\Phi_{dr}) \quad (\text{II.34})$$

Or la puissance mécanique est reliée au couple électromagnétique par :

$$C_e = \frac{P_{mec}}{\Omega} = P \frac{P_{mec}}{\omega} \quad (\text{II.35})$$

En tenant compte des expressions des flux (II.23) et des équations (II.35) et (II.34), nous pouvons avoir plusieurs expressions du couple électromagnétique toutes égales :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_e = P(\Phi_{qr}I_{qr} - \Phi_{dr}I_{dr}) \\ C_e = P(\Phi_{ds}I_{qs} - \Phi_{qs}I_{ds}) \\ C_e = PM(I_{dr}I_{qs} - I_{ds}I_{qr}) \\ C_e = P \frac{M}{L_r} (\Phi_{dr}I_{qs} - \Phi_{dr}I_{ds}) \\ C_e = P \frac{M}{L_r} (\varphi_{qs} \cdot I_{dr} - \varphi_{ds} \cdot I_{qr}) \end{array} \right. \quad (\text{II.36})$$

II.4.6. Mise sous forme d'équations d'état

On peut mettre le système d'équations en tensions sous forme d'un système d'équations d'état par l'équation générale suivante :

$$\begin{cases} \dot{X} = A.X + B.U \\ Y = C.X + D.U \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

Avec : X : vecteur d'état

U : vecteur d'entrée

Y : vecteur de sortie

Le choix du vecteur d'état X se fait de plusieurs façons. Dans le cas de la MADA modélisée en vue de la commander par les tensions rotoriques, nous avons choisi :

$X = (\varphi_{ds}, \varphi_{qs}, I_{dr}, I_{qr}, \Omega_r)^t$, et les grandeurs V_{dr} et V_{qr} comme des variables de commande.

Après transformations des flux et courants, on aboutit au système (II.38) :

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{ds}}{dt} = -\alpha_s \cdot \varphi_{ds} + \omega_s \cdot \varphi_{qs} + \alpha_s \cdot M \cdot I_{dr} + V_{ds} \\ \frac{d\varphi_{qs}}{dt} = -\alpha_s \cdot \varphi_{qs} + \omega_s \cdot \varphi_{ds} + \alpha_s \cdot M \cdot I_{qr} + V_{qs} \\ \frac{dI_{dr}}{dt} = -\gamma_r \cdot I_{dr} + (\omega_s - \omega_r) \cdot I_{qr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \varphi_{qs} - \beta \cdot V_{ds} + \frac{1}{\sigma_r} V_{dr} \\ \frac{dI_{qr}}{dt} = -\gamma_r \cdot I_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \cdot I_{dr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \varphi_{ds} - \beta \cdot V_{qs} + \frac{1}{\sigma_r} V_{qr} \\ \frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{P \cdot M}{J \cdot L_r} (\varphi_{qs} \cdot I_{dr} - \varphi_{ds} \cdot I_{qr}) - \frac{1}{J} C_r - \frac{K_f}{J} \Omega_r \end{cases} \quad (\text{II.38})$$

On rappelle que :

$$\begin{cases} \alpha_s = \frac{R_s}{L_s} \\ \sigma_r = L_r \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r}\right) \\ \gamma_r = \left(\frac{R_r}{\sigma_r} + \frac{R_s M^2}{\sigma_r L_s^2}\right) \\ \beta = \frac{M}{\sigma_r L_s} \end{cases} \quad (\text{II.39})$$

K_f : représente le coefficient de frottements visqueux.

J : représente le moment d'inertie.

C_r : est le couple de charge

Ω_r : vitesse du rotor mécanique.

II.5. Modélisation de réseau électrique

II.5.1. Lignes

Considérons une ligne de transport d'énergie électrique parfaitement symétrique, et fonctionnant en régime équilibré. Son comportement peut être étudié en se limitant à un schéma monophasé équivalent, figure II.9.

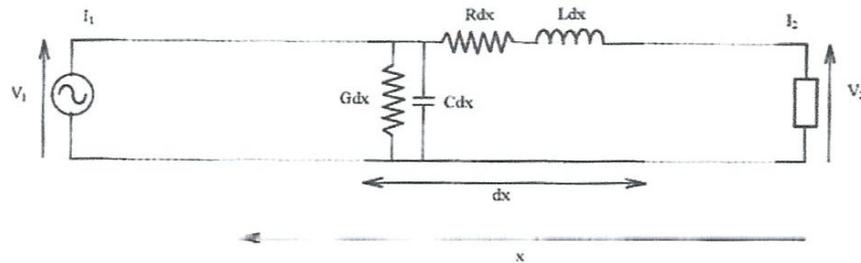


Figure II.7: Modélisation d'une ligne par constantes réparties [28]

Par ailleurs, cette ligne se caractérise par des grandeurs *linéiques* résistance R et inductance L (directes) en série, capacité C et conductance G (directes) en parallèle. Ces grandeurs sont réparties le long de la ligne et s'expriment par unité de longueur :

$$ZS = R + jL\omega \text{ (en } \Omega/\text{km)} \quad (\text{II.40})$$

$$Yp = G + jC\omega \text{ (en } \Omega/\text{km)} \quad (\text{II.41})$$

La mise en équation liée au schéma ci-dessus fait intervenir des dérivées partielles de la tension et du courant par rapport à x (position le long de la ligne) et au temps t . La résolution de ces équations dans le cas particulier du régime permanent sinusoïdal conduit à :

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{ch}\gamma x & Z_c \text{sh}\gamma x \\ \frac{1}{Z_c} \text{sh}\gamma x & \text{ch}\gamma x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.42})$$

$\gamma = \sqrt{Z_s Y_p}$ (γ est un nombre complexe, appelé "constante de propagation" : $\gamma = a + jb$)

$Z_c = \sqrt{\frac{Z_s}{Y_p}}$ (Z_c est un nombre complexe, appelé "impédance caractéristique")

Si on ne s'intéresse qu'au comportement de la ligne vue de ses extrémités, ce système devient

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{ch}\gamma X & Z_c \text{sh}\gamma X \\ \frac{1}{Z_c} \text{sh}\gamma X & \text{ch}\gamma X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.43})$$

Où X désigne la longueur totale de la ligne. Considérons maintenant un modèle quadripolaire

de la ligne sous la forme dite "schéma en π " :

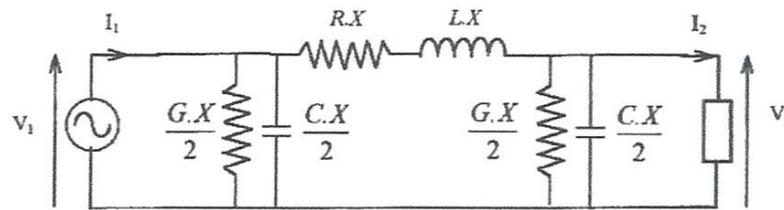


Figure II.8. Modélisation d'une ligne par un schéma en π

RLC et G représentent les constantes linéiques de la ligne

Nous noterons : $Z_{tot} = Zs X$ et $Y_{tot} = Yp X$

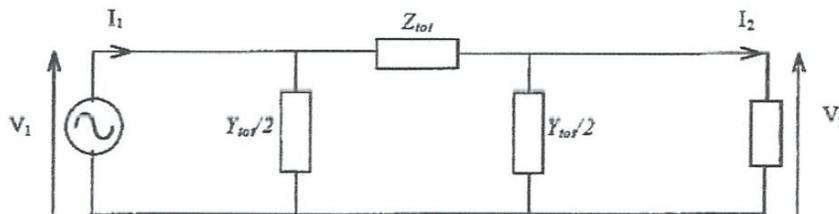


Figure II.9 : Modélisation simplifiée d'une ligne par un schéma en π

Le schéma ci-dessus se résume alors à :

Dont les équations sont :

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z_{tot} Y_{tot}}{2} & Z_{tot} \\ Y_{tot} + \frac{Z_{tot} Y_{tot}^2}{4} & 1 + \frac{Z_{tot} Y_{tot}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (II.44)$$

Le modèle à constantes concentrées de la figure II.10 ne représentera bien le comportement de la ligne vue de ses extrémités que si les équations matricielles (II.43) et (II.44) conduisent à des résultats similaires.

En d'autres termes, à quelles conditions les matrices carrées intervenant dans (II.43) et (II.44) sont-elles "quasiment" identiques ?

Il est possible de développer les ch. et sh de (II.43) en série :

$$chyX = 1 + \frac{(\gamma X)^2}{2} + \dots = 1 + \frac{Z_s Y_p X^2}{2} + \dots = 1 + \frac{Z_{tot} Y_{tot}}{2} + \dots$$

$$Z_c \text{shy} X = \sqrt{\frac{Z_s}{Y_p}} (\gamma X + \dots) = \sqrt{\frac{Z_s}{Y_p}} \sqrt{Z_s Y_p} X = Z_{tot} + + \dots$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{Z_c} \text{shy} X &= \frac{1}{Z_c} \left(rX + \frac{(rx)^3}{3!} \dots \right) = \sqrt{\frac{Y_p}{Z_s}} \sqrt{Z_s Y_p} X + \sqrt{\frac{Y_p}{Z_s}} \frac{\sqrt{Z_s Y_p} Z_s Y_p}{6} X^3 + \dots \\ &= Y_{tot} + \frac{Y_{tot} Z_{tot}}{6} + \dots \end{aligned}$$

On retrouve (presque...) dans les premiers termes de ces développements en série les termes de la matrice (II.44). On peut par ailleurs montrer que les termes résiduels (notés +) sont d'autant plus faibles que la ligne est courte.

Le schéma en π constitue donc une approximation du modèle de ligne à constantes réparties. Cette approximation reste très correcte tant que la ligne n'est pas trop longue. Pour préciser l'ordre de grandeur, étudions un exemple concret [28].

Exemple :

Considérons une ligne triphasée 225 kV, dont les caractéristiques linéaires sont, en régime direct :

$$Z_{série} = 0.04 + j0.4 \Omega/KM ; C_{shunt} = 15nF/KM$$

On suppose que cette ligne admet un courant maximal de 770 A (soit une charge de 270 MW pour un facteur de puissance $\cos\phi = 0,9$).

Le schéma monophasé permettant de simuler le fonctionnement en régime permanent, quasiment en pleine charge, de la ligne est représenté par la figure I.17.

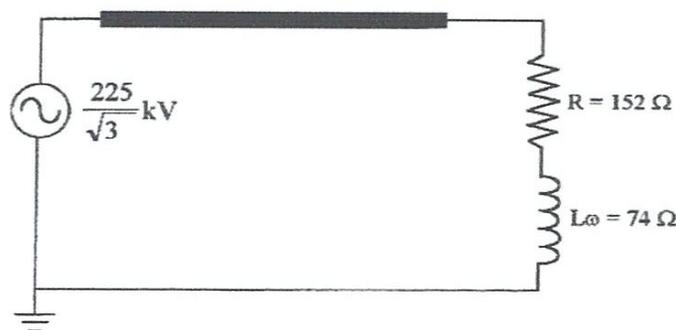


Figure II.10: Schéma monophasé d'une ligne alimentant une charge RL

Les calculs exposés ci-dessus conduisent aux résultats suivants :

a) Longueur de la ligne = 100 km

b) Longueur de la ligne = 200 km

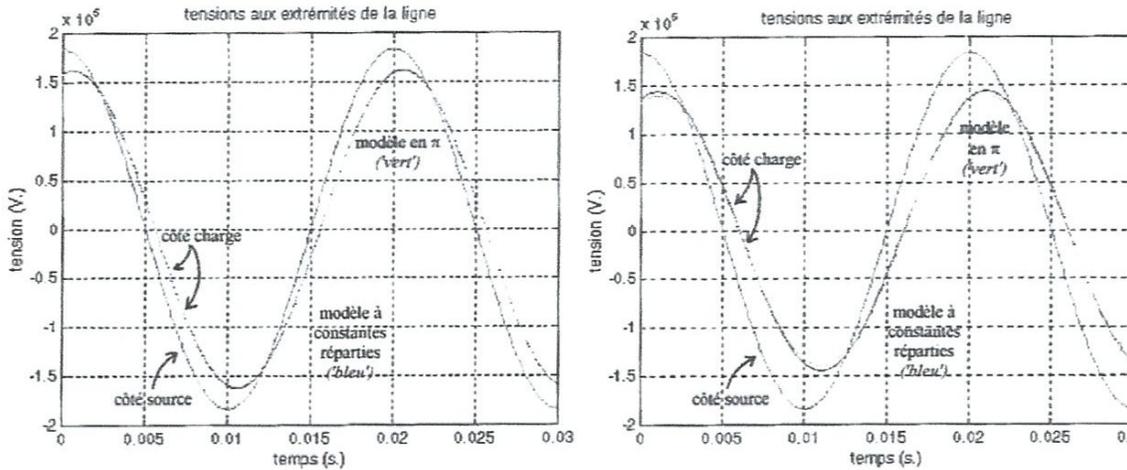


Figure II.11: Tension aux extrémités de la ligne a) Ligne de 100km, b) Ligne de 200km

Il est important de garder à l'esprit qu'un schéma en π peut être un modèle très précis du comportement d'une ligne aérienne en régime permanent (50 Hz) équilibré, tout en étant un modèle très mauvais pour étudier le comportement de cette même ligne dans d'autres conditions de fonctionnement, par exemple en régime transitoire hautes fréquences. En effet, un tel modèle ne peut pas, par nature, représenter les phénomènes de propagation le long de la ligne, tels que ceux apparaissant par exemple lors de la mise sous tension de la ligne ou lors d'un choc de foudre. Le modèle en π est bien adapté au calcul de répartition des puissances dans un réseau de transport d'énergie [28].

II.5.2. Model du transformateur

- **Modélisation du transformateur dans le repère naturel**

Le model du transformateur ramené au primaire est basé sur le circuit équivalent d'une seule phase représentée sur la figure II.14.

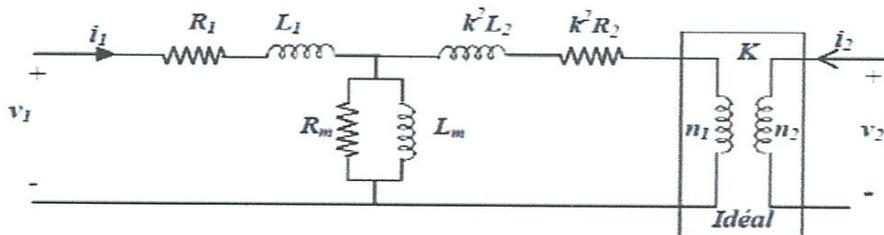


Figure II.12: Schéma équivalent du transformateur ramené au primaire [27]

Dans ce modèle, les pertes fer sont modélisées par une résistance en parallèle avec l'inductance de magnétisation. En négligeant le courant de magnétisation, le modèle peut se réduire à celui représenté sur la figure II.15 et donné par l'équation suivante :

$$R = R_1 + K^2 R_2, L = L_1 + K^2 L_2 \text{ et } K = \frac{n_1}{n_2} \quad (\text{II.45})$$

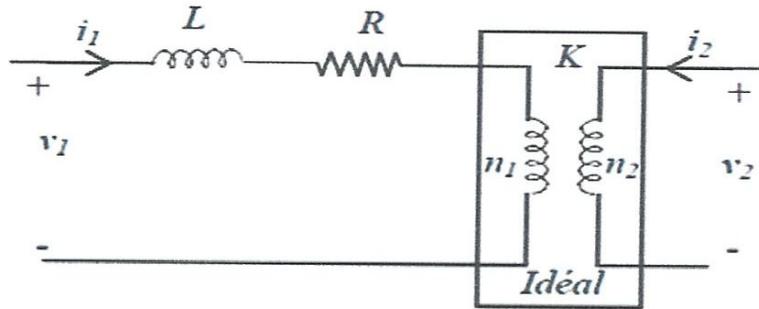


Figure II.13 : Schéma équivalent simplifié du transformateur ramené au primaire [27]

Les équations du circuit triphasé équivalent sont les suivantes :

$$\begin{pmatrix} v_{1a} \\ v_{1b} \\ v_{1c} \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{pmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{pmatrix} + K \begin{pmatrix} v_{2a} \\ v_{2b} \\ v_{2c} \end{pmatrix} \quad (\text{II.46})$$

Le modèle simplifié du transformateur ramené au secondaire est basé sur le circuit équivalent d'une seule phase, représentée sur la figure (II.16) [27].

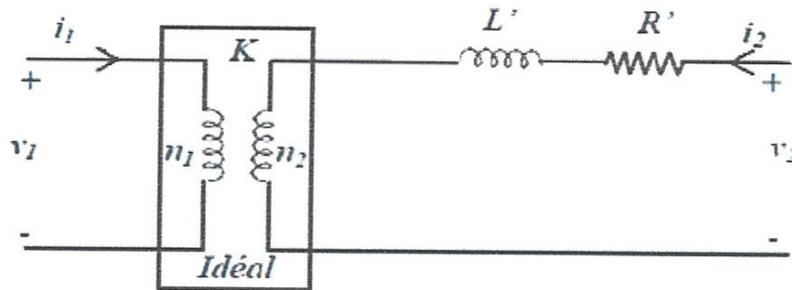


Figure II.14: Schéma équivalent simplifié du transformateur ramené au secondaire [27]

Où :

$$R' = R_2 + \frac{R_1}{K^2}, L' = L_2 + \frac{L_1}{K^2} \quad (\text{II.47})$$

Les équations du circuit triphasé équivalent sont les suivantes :

$$\begin{pmatrix} v_{2a} \\ v_{2b} \\ v_{2c} \end{pmatrix} = R' \begin{pmatrix} i_{2a} \\ i_{2b} \\ i_{2c} \end{pmatrix} + L' \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{2a} \\ i_{2b} \\ i_{2c} \end{pmatrix} + \frac{1}{K} \begin{pmatrix} v_{1a} \\ v_{1b} \\ v_{1c} \end{pmatrix}$$

• **Modélisation du transformateur dans le repère de Park**

L'application de la transformation de Park sur les équations (II.48) donne :

$$\begin{cases} v_{1d} = R \cdot i_{1d} + L \cdot \frac{di_{1d}}{dt} - L \cdot \omega_S \cdot i_{1q} + K \cdot v_{2d} \\ v_{1q} = R \cdot i_{1q} + L \cdot \frac{di_{1q}}{dt} - L \cdot \omega_S \cdot i_{1d} + K \cdot v_{2q} \end{cases} \quad (II.48)$$

L'application de la transformation de Park sur l'équation (II.49) donne :

$$\begin{cases} v_{2d} = R' \cdot i_{2d} + L' \cdot \frac{di_{2d}}{dt} - L' \cdot \omega_S \cdot i_{1q} + K \cdot v_{1d} \\ v_{2q} = R' \cdot i_{2q} + L' \cdot \frac{di_{2q}}{dt} - L' \cdot \omega_S \cdot i_{1d} + K \cdot v_{1q} \end{cases} \quad (II.49)$$

II.5.3 Modélisation du filtre

• **Modélisation du filtre dans le repère naturel**

Pour réduire la propagation des harmoniques dans le réseau électrique, un filtre passif série (R_t, L_t) est raccordé entre le convertisseur de puissance et le réseau [27].

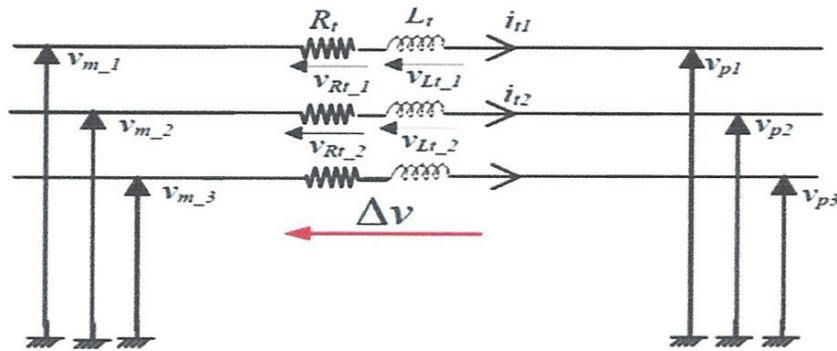


Figure II.15: Schéma électrique du filtre

Les courants sont obtenus par intégration des tensions aux bornes des bobines de filtrage :

$$\begin{cases} i_{t1}(t) = \int \frac{1}{L_t} \cdot v_{Lt-1} + i_1(t_0) \\ i_{t2}(t) = \int \frac{1}{L_t} \cdot v_{Lt-2} + i_2(t_0) \end{cases} \quad (II.50)$$

$i_1(t_0)$ et $i_2(t_0)$ sont respectivement les courants i_1 et i_2 à l'instant initial

Le courant dans la troisième phase est déduit à partir des deux premiers :

$$i_{t3} = -(i_{t1} + i_{t2}) \quad (II.51)$$

Les tensions aux bornes des résistances sont :

$$v_{Rt1} = R_t i_{t1} \quad (II.52)$$

$$v_{Rt2} = R_t i_{t2} \tag{II.53}$$

Les tensions aux bornes des inductances sont données par :

$$v_{Lt1} = \Delta v_1 - v_{Rt1} \tag{II.54}$$

$$v_{Lt2} = \Delta v_2 - v_{Rt2} \tag{II.55}$$

Les tensions aux bornes des bobines peuvent être calculées en appliquant la loi des mailles :

$$\Delta v_1 = v_{m-1} - v_{p1} \tag{II.56}$$

$$\Delta v_2 = v_{m-2} - v_{p2} \tag{II.57}$$

• **Modélisation du filtre dans le repère de Park**

Les équations différentielles définissant le filtre peuvent être obtenues en regroupant les équations précédentes :

$$\begin{pmatrix} v_{m-1} \\ v_{m-2} \\ v_{m-3} \end{pmatrix} = R_t \begin{pmatrix} i_{t1} \\ i_{t2} \\ i_{t3} \end{pmatrix} + L_t \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{t1} \\ i_{t2} \\ i_{t3} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_{p1} \\ v_{p2} \\ v_{p3} \end{pmatrix} \tag{II.58}$$

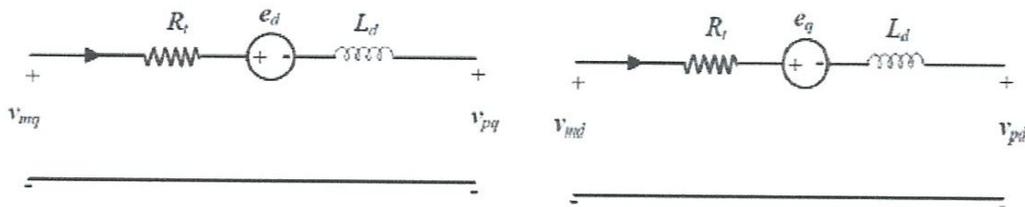
L'application de la transformation de Park sur le système d'équations (II.59) donne :

$$\frac{du}{dt} = \frac{1}{c} i_c \tag{II.59}$$

$$v_{md} = R_t \cdot i_{td} + L_t \frac{di_{td}}{dt} - L_t \cdot \omega_S \cdot i_{tq} + v_{pd} \tag{II.60}$$

$$v_{mq} = R_t \cdot i_{tq} + L_t \frac{di_{tq}}{dt} - L_t \cdot \omega_S \cdot i_{td} + v_{pq} \tag{II.61}$$

Les circuits équivalents correspondant



(a) Circuit équivalent selon l'axe « d »

(b) Circuit équivalent selon l'axe « q »

Figure II.16. Circuits équivalents du filtre dans le repère de Park

Où :

e_d et e_q sont les tensions de couplage:

$$e_d = L_t \cdot \omega_s \cdot i_{td} \quad (\text{II.62})$$

$$e_q = -L_t \cdot \omega_s \cdot i_{tq} \quad (\text{II.63})$$

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les parties essentielles d'un système de conversion éolienne, la première représente la partie mécanique qui contient la turbine, le multiplicateur et l'arbre de la GADA.

Dans la deuxième partie, nous avons étudié par la suite la modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique, adapté aux problèmes de commandes, a été établi au sens de Park. En effet, nous avons constaté que le modèle de la machine asynchrone à double alimentation est un système à équations différentielles. Cependant, la transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle.

Chapitre III

Commande vectorielle et simulation de la Gada

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter le principe de la commande vectorielle par orientation du flux statorique d'une MADA reliée à un réseau de puissance parfait (tension et fréquence stables). Cette solution permet de contrôler séparément les deux puissances active et réactive générées par la MADA et injectées dans le réseau.

A la fin de ce chapitre, nous présentons la technique de commande MPPT d'une éolienne de 5 MW. Des résultats de simulation seront présentés aussi pour montrer l'efficacité de cette commande.

III.2. Commande vectorielle de la MADA

La commande vectorielle est l'une des méthodes de commande appliquée aux machines électriques. Elle nous permet d'établir un mode de fonctionnement découplé en positionnant d'une manière optimale les vecteurs flux. En effet, elle nous permet d'assimiler le comportement d'une machine asynchrone à celui d'une machine à courant continu, où le couple électromagnétique est proportionnel au courant d'induit.

Pour le cas de la génération de l'énergie électrique avec un aérogénérateur utilisant une MADA, le contrôle découplé des puissances actives et réactives par orientation du flux statorique est très utilisé. En effet, cette orientation permet un contrôle facile des puissances par les courants et par conséquent par les tensions rotoriques [2] [4].

III. 2.1. Expressions des puissances actives et réactives

Les puissances active et réactive au niveau du stator s'écrivent de la manière suivante [2] :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} \cdot I_{ds} + V_{qs} \cdot I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} \cdot I_{ds} - V_{ds} \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Si on suppose le réseau électrique stable, ayant pour tension simple V_s , cela conduit à un flux statorique constant dans le plan de Park. Donc sa dérivée est nulle.

Aussi, l'orientation du repère d_q suivant le flux statorique, conduit aux équations :

$$\begin{aligned}\varphi_{ds} &= \varphi_s \\ \varphi_{qs} &= 0\end{aligned}\quad (\text{III.2})$$

D'autre part, si on néglige la résistance statorique, et en prenant en compte les remarques précédentes, les équations des tensions statorique (II.24) se réduisent à :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \cdot \varphi_{ds} \end{cases}\quad (\text{III.3})$$

Dans ces conditions aussi, l'expression des flux devient :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M \cdot I_{qr} \end{cases}\quad (\text{III.4})$$

A partir de l'équation précédente, on peut rétablir le lien entre les courants statoriques et rotoriques, équation (II.5) :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\left(\frac{V_s}{\omega_s} - M \cdot I_{dr}\right)}{L_s} \\ I_{qs} = -\frac{M \cdot I_{qr}}{L_s} \end{cases}\quad (\text{III.5})$$

En tenant compte de (II.5) et de (II.4) dans l'équation des puissances (II.1), on trouve :

$$\begin{aligned} P_s &= -\frac{M}{L_s} V_s I_{qr} \\ Q_s &= -\frac{M}{L_s} V_s I_{dr} + \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} \end{aligned}\quad (\text{III.6})$$

Si on considère que, l'inductance mutuelle M , l'inductance L_s est la tension V_s sont constants, on remarque d'après l'équation (II.6) que la puissance active P_s est directement proportionnelle au courant rotorique en quadrature I_{qr} , alors que la puissance réactive Q_s est proportionnelle au courant rotorique direct I_{dr} , à une constante près $\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$.

Pour pouvoir contrôler la machine par les tensions rotoriques, il nous faut alors établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui seront appliqués à la machine.

D'après les expressions des flux rotoriques suivantes :

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

Et en utilisant l'équation des courants (III.5), nous trouverons la relation entre les tensions et les courants rotoriques, donnée par :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + L_r \sigma \frac{d}{dt} I_{dr} - L_r \sigma \omega \cdot I_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + L_r \sigma \frac{d}{dt} I_{qr} + L_r \sigma \omega \cdot I_{dr} + \omega \frac{M V_s^2}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (III.8)$$

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

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 de décrire le schéma bloc de machine asynchrone à double alimentation qui sera le bloc à réguler par la suite.

Un schéma bloc pour la simulation de la MADA reliée au réseau est donné par la figure III.1. On voit clairement que les entrées sont les tensions rotoriques et les sorties les puissances statoriques. On voit aussi, qu'ils sont liés par une fonction de transfert du premier ordre. De plus du fait de la faible valeur de L_r , σ et le glissement, on peut négliger, sans problème, les couplages entre les deux axes. Donc, une commande séparée des puissances peut être envisagée.

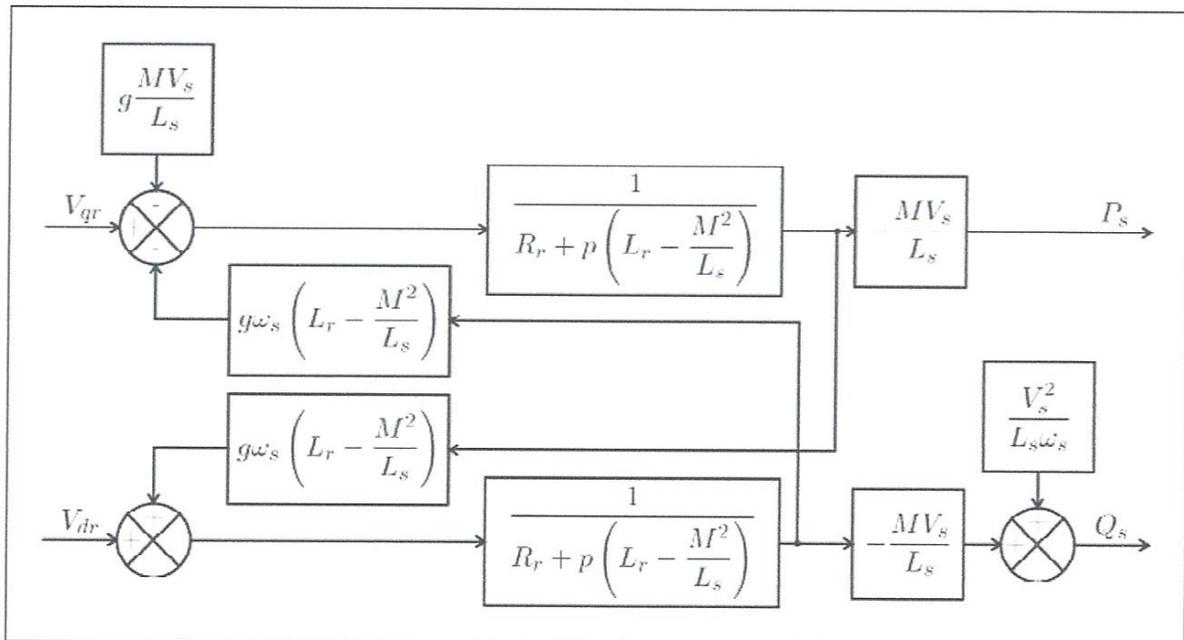


Figure III.1: Schéma bloc de la MADA

Ainsi, il apparaît deux solutions pour effectuer la commande en puissance [4] :

- La première consiste à négliger les termes de couplage et commander directement et indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode est appelée aussi méthode directe car les régulateurs des puissances donnent directement les références des tensions rotoriques à l'onduleur.
- La deuxième tient en compte le couplage et elle utilise deux régulateurs de courant pour le compenser. Donc, on utilise deux régulateurs pour chaque axe, un pour le courant et l'autre pour la puissance. Cette méthode est appelée : *méthode indirecte*.

Pour notre étude nous allons utiliser uniquement la méthode directe.

III.2.2. Réglage directe des puissances active et réactive de la MADA

Dans ce qui suit, nous présentons la régulation indépendante des puissances active et réactive au niveau du stator de la MADA en utilisant un seul régulateur PI (Proportionnel Intégral) pour chaque puissance (chaque axe).

Si l'on regarde la relation qui lie les courants rotoriques aux puissances statoriques, on voit apparaître le terme $\frac{MV_s}{L_s}$. Dans notre étude, nous avons considéré que la génératrice est reliée à un réseau de puissance stable, donc ce terme est stable.

D'après les considérations précédentes, pour réguler les puissances, il suffit de mettre des régulateurs indépendants tout en compensant les termes de couplage entre les deux axes (figure III.1). Dans ces conditions nous obtenant le schéma de réglage suivant :

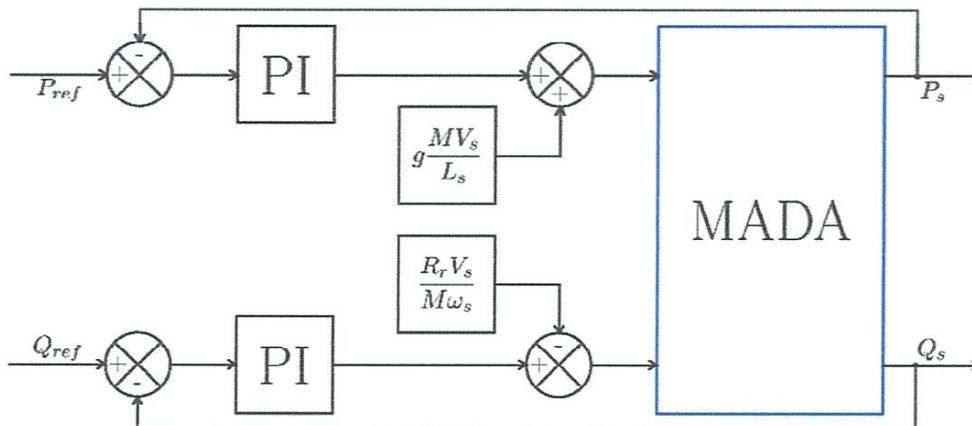


Figure III.2: Schéma bloc de réglage direct des puissances statoriques de la MADA

- Les paramètres du régulateur IP

$$K1=20; K=20; t_i=0;$$

- Les paramètres de la MADA

$$R_s=0.455; R_r=0.19; L_s=0.07; L_r=0.0213; M=0.034; p=2; J_g=10; f_g=0.01;$$

D'après les résultats obtenus, on constate que le contrôle direct utilisant des régulateurs PI présente un bon découplage au réglage des puissances actives et réactive au niveau du stator et une bonne poursuite à leurs valeurs de références imposées (figure III.5). En plus, le test de la variation du glissement de 0 à 0.1 après 3 secondes, fait apparaître un pic très petit en un temps court au niveau de la puissance réactive mais la puissance active reste insensible.

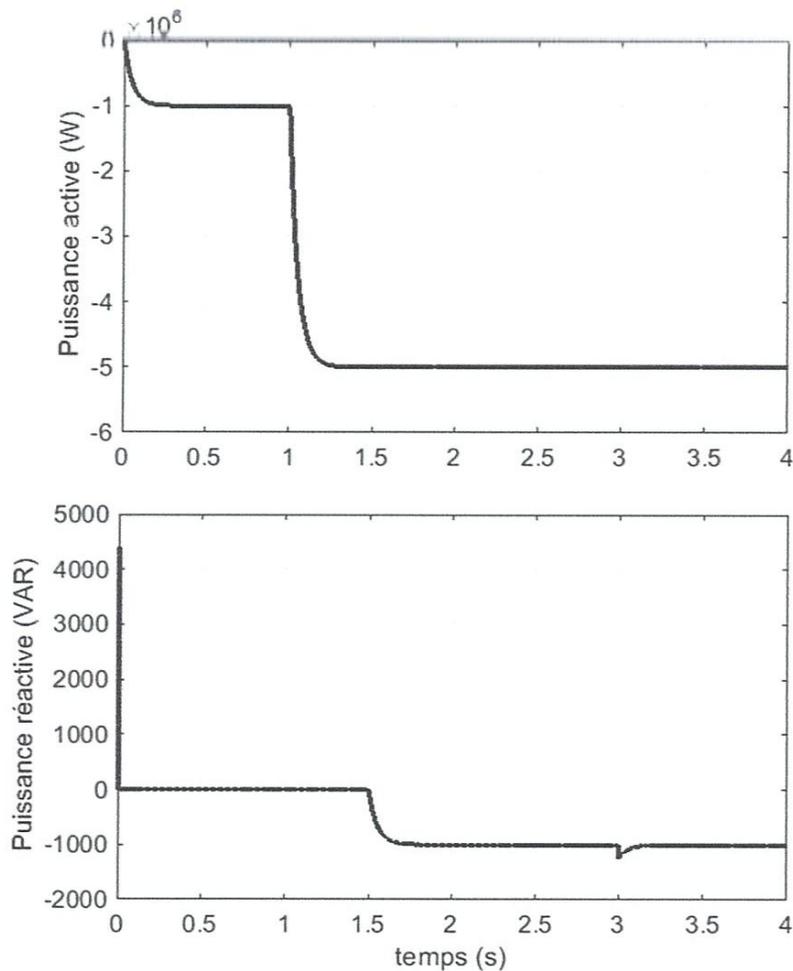


Figure III.5: variation des puissances active et réactives

III.3. Simulation de l'ensemble MADA-Turbine

La figure III.6, montre le schéma SIMULINK de l'association MADA-Turbine sans commande MPPT de la turbine. Nous avons fait ce schéma de simulation pour tester le réglage des puissances active et réactive débitées par la MADA au niveau du réseau électrique.

Le réseau est supposé parfait avec une tension et fréquence stable.

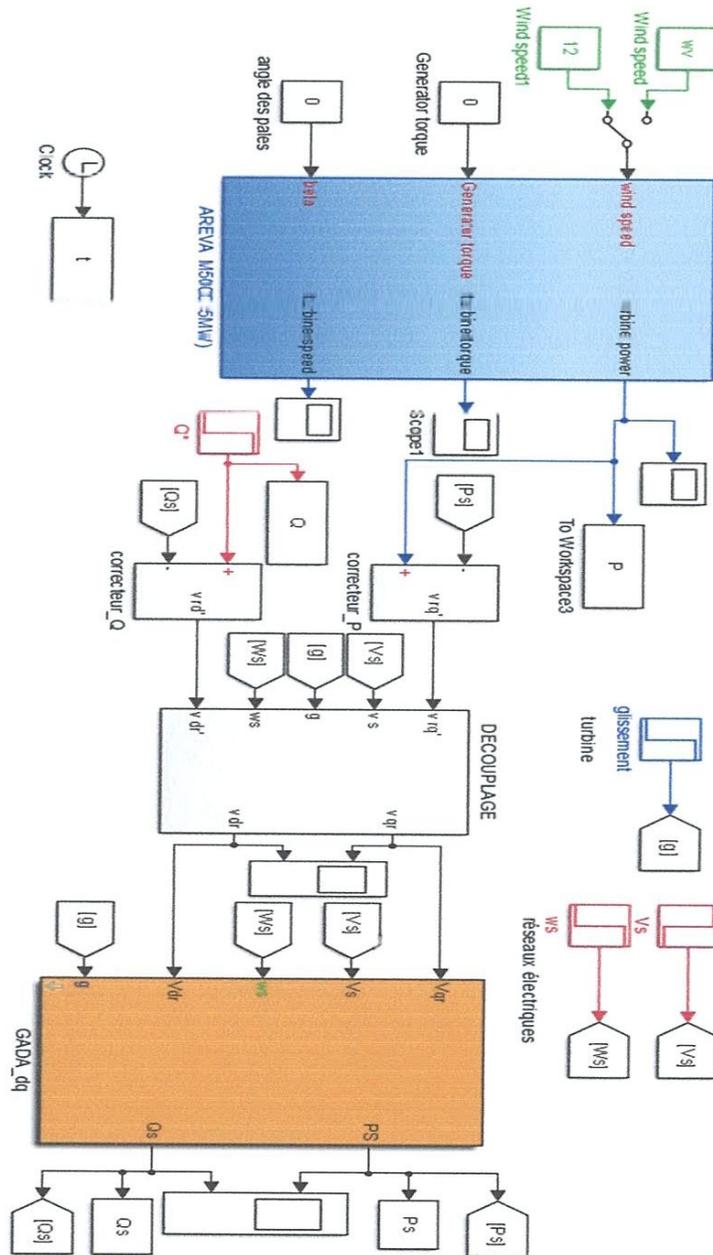


Figure III.6 : Association MADA-Turbine

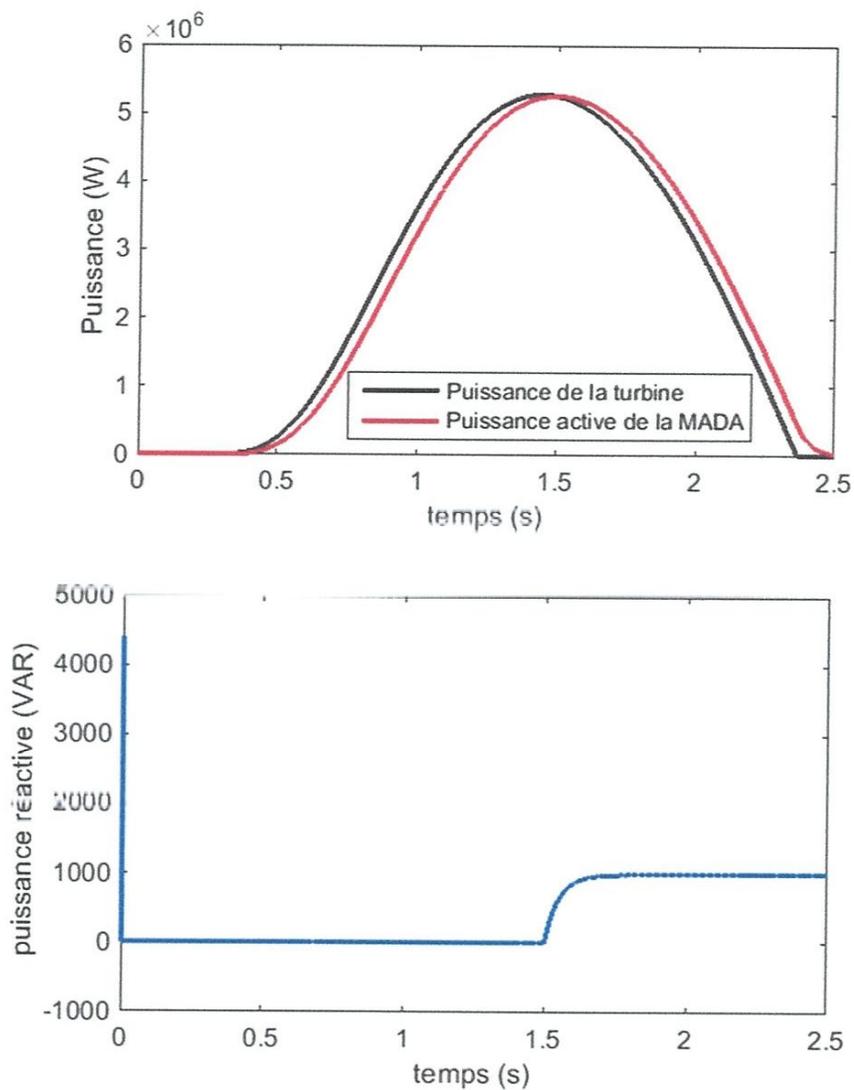


Figure III.7: Puissance de la turbine et puissance fournie au réseau

➤ Les paramètres de l'éolienne sont :

Puissance : 5 MW

Rayon de l'éolienne : $R = 60 \text{ m}$

Inertie de la turbine : $J_t = 5000 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$

Coefficient de frottement visqueux de la turbine : $f_t = 0.001$

D'après les résultats obtenus, on constate toujours un bon réglage des puissances actives et réactives. La petite différence est due à cause de la nature du correcteur qui est conçu pour assurer un réglage et non une poursuite.

III.4. Commandes MPPT de l'éolienne

Nous avons dans le deuxième chapitre le modèle de la turbine qui permet de calculer la puissance, le couple et la vitesse de la turbine en fonction de la vitesse du vent et du coefficient de puissance.

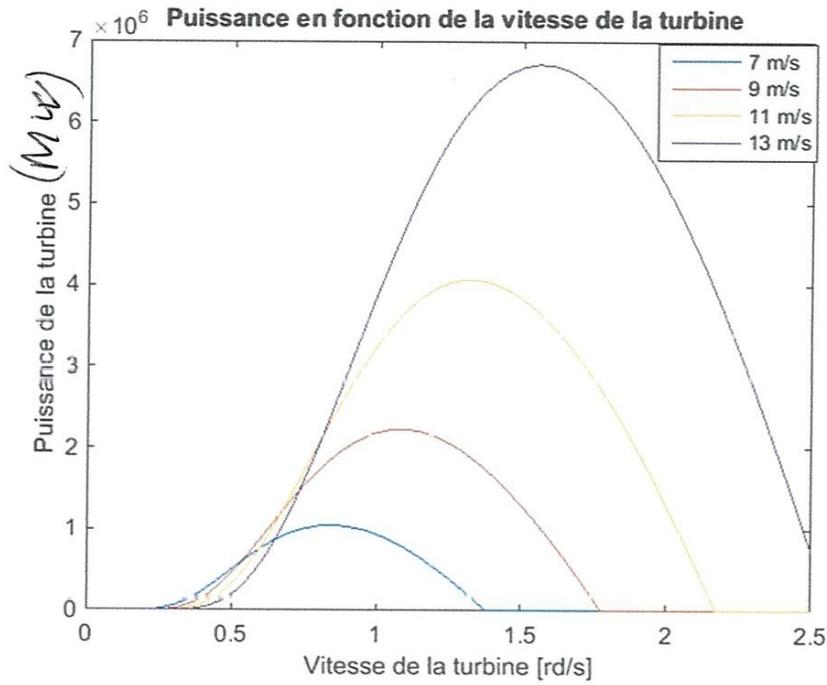


Figure III.8 : Courbe de puissance d'une éolienne de 5 MW pour différentes vitesses de vent

Pour chaque vitesse du vent, il existe une seule vitesse du rotor permettant d'avoir le maximum de puissance. A première vue, un calculateur de maximisation de la puissance pour notre système de conversion d'énergie éolienne nécessitera des capteurs (de vent, de vitesse rotorique) afin de pouvoir déterminer la puissance maximale disponible au niveau de la turbine (sommets de la courbe).

La commande qui permet d'assurer le fonctionnement au point de fonctionnement maximal pour toute vitesse du vent est appelée **Maximum Power Point Tracking** (abrégée **MPPT**, litt. suivi du **point maximal** de puissance - SPMP).

La figure suivante montre un schéma bloc de la commande MPPT de la turbine sans MADA pour tester l'efficacité de la poursuite.

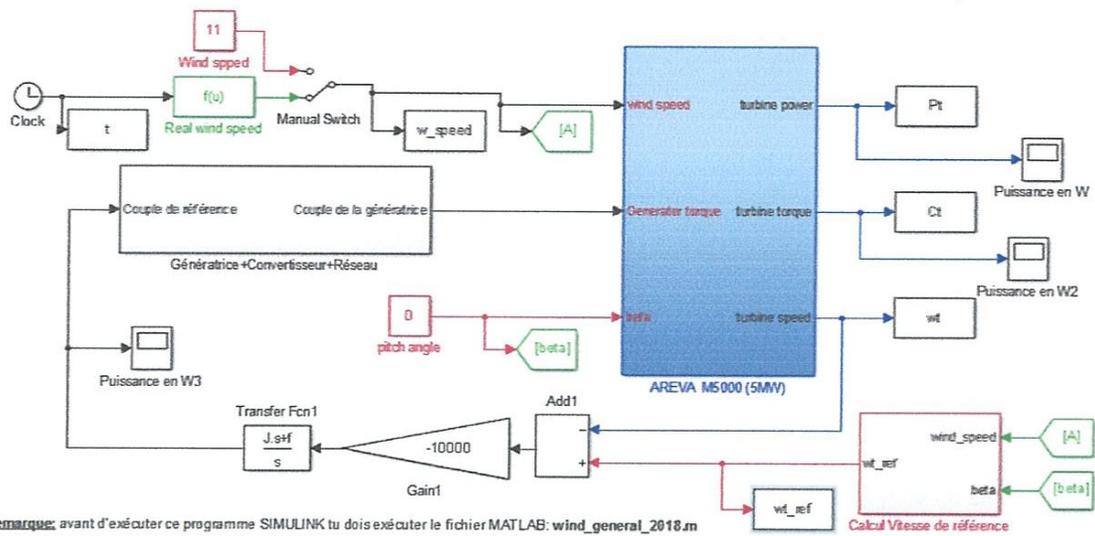


Figure III.9: schéma bloc de la MPPT de la turbine sans MADA

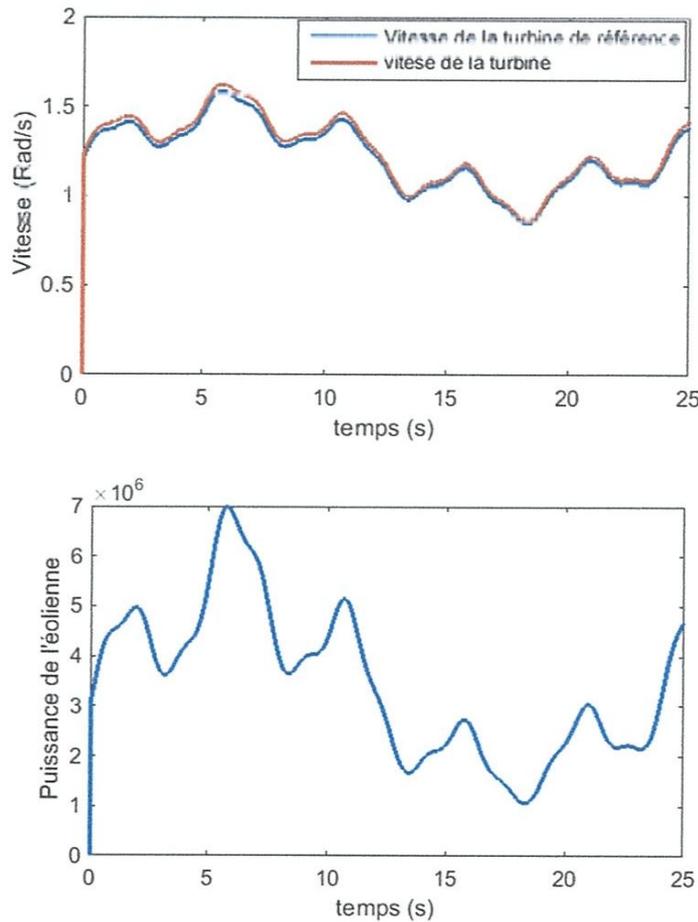


Figure III.10 : Réglage MPPT de l'éolienne

La figure III.10, montre un bon suivi de la vitesse de référence qui donne à chaque instant la puissance maximale disponible.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une brève étude sur la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation. Ensuite, nous avons modélisé le système global d'une éolienne de 5 MW de puissance à vitesse variable et nous avons simulé le système complet (turbine + MADA).

Les simulations nous ont permis de mieux comprendre le fonctionnement de la MADA en mode génératrice et aussi le principe du contrôle MPPT indispensable pour les éoliennes de grandes puissances.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail nous avons présenté une chaîne de conversion éolienne utilisant une machine asynchrone à double alimentation (MADA).

Pour bien mener ce travail, nous avons commencé dans le premier chapitre par une étude, non exhaustive, concernant l'énergie renouvelable. Nous avons vu que le développement et l'exploitation des sources d'énergie renouvelable, particulièrement l'énergie éolienne et solaire, constituent un grand défi pour assurer la sécurité énergétique dans la future.

A la fin du premier chapitre, nous avons présenté la structure de base des éoliennes les plus utilisées actuellement. Ensuite, nous nous sommes intéressés beaucoup plus à la présentation des différentes chaînes de conversion dont la structure dépend du générateur utilisé. A l'issue de cette étude, nous constatons que la machine asynchrone à double alimentation (MADA) est préférée pour les puissances élevées à cause de l'utilisation d'un convertisseur de faible puissance et sa capacité à travailler à faible vitesses.

Dans le deuxième chapitre, nous avons modélisé l'ensemble des éléments qui constituent une chaîne de conversion éolienne à base d'une MADA. En effet, nous avons développé le modèle mathématique de la partie mécanique, de la MADA au sens de Park et du réseau électrique avec un filtre de lissage.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté la commande vectorielle par orientation du flux statorique de la MADA pour assurer un contrôle découplé des puissances actives et réactives injectées au réseau électrique, supposé parfait dans cette étude. Des résultats de simulation de l'association Turbine-MADA-Réseau montrent un bon contrôle des puissances pour différents régimes de fonctionnement.

La technique MPPT a été brièvement expliquée à la fin de ce chapitre. Les résultats de simulation montrent l'importance de cette commande pour exploiter au maximum les éoliennes notamment celles de grandes puissances.

Parmi les perspectives de ce travail, on peut citer :

- Développer un modèle de simulation complet contenant tous les éléments de l'éolienne (turbine, MADA, convertisseur, réseau de puissance).
- Intégrer toutes les commandes possibles de la chaîne : MPPT, contrôle des puissances, contrôle de la tension continue du condensateur en amont du convertisseur raccordé au réseau.
- Intégrer un contrôle de l'angle de calage des pales pour assurer la protection de l'éolienne contre les vents forts.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] **BERNARD MULTON et al.**, « Etat de l'art dans les aérogénérateurs électriques », Extrait du rapport de synthèse ECRIN « L'Electronique de Puissance Vecteur d'Optimisation Pour les Energies Renouvelables », Mai 2002.
- [2] **A. BOYETTE** « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne » Thèse de doctorat, université de Henri Poincaré, Nancy, France ,2006.
- [3] **PASCAL KRAFCZYK**, « Modélisation et mise en œuvre d'une chaîne de production éolienne à base de la MADA », mémoire d'ingénieur C.N.A.M, 2013.
- [4] **J. TOUAL BELKACEM**, " Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable", mémoire de Magister En Electrotechnique de l'Université de BATNA, 2010.
- [5] **YACINE ABDERRAHMANE BENCHERIF**, "Modélisation et commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la production de l'énergie éolienne", mémoire d'Ingénieur d'État en Électrotechnique de l'Ecole Nationale Polytechnique, 1999.
- [6] **S. BENZEGHADI** « Etude et simulation d'une éolienne (turbine + MADA) à vitesse variable suivant les deux modes de fonctionnement hypo et hyper synchrone, thèse de master, université Abou Bakr Belkaid-Tlemcen,2013.
- [7] **M. KASSA IDJDARENE** « Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonome » thèse de doctorat, 2010.
- [8] **Z. TIR**, "Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif. 06 /07 /2010.
- [9] **T. GHENAM**, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation », 2011.
- [10] **S. NOUHOU**, Étude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne, Thèse (2007), École Nationale Polytechnique, Algérie.
- [11] **N. LA VERDURE**, L'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires, Thèse (2005), Institut national polytechnique de Grenoble, France.

- [12] **H. BEN AHMED**, "Généralités sur l'énergie éolienne et convertisseurs associés Exemple du site de Ker Lann", Travaux issus de l'équipe de Ker Lann du laboratoire SATIE, 2004.
- [13] **NAOUEL HAMDI**, " Modélisation et commande des génératrices éoliennes ", Thèse de Magister, Université de Constantine, 2008.
- [14] **DOUADI TAREK**, "Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Génératrice Asynchrone ", mémoire d'Ingénieur d'État en Électrotechnique de l'Université de BATNA.
- [15] **S. EL AIMANI**, "Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension", Thèse de Doctorat de L'Université des Sciences et Technologies de Lille 2004.
- [16] **H. CAMBLONG**, "Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable", Thèse de doctorat, 18 décembre 2003, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux.
- [17] **H. L. NAQRA, B. DUBÉ**, "Slip power recovery induction generators for large vertical axis wind turbine", IEEE Transactions on energy conversion, Vol. 3, No. 4, December 1988, pp.733-737.
- [18] **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 de Doctorat de l'université de Bretagne occidentale le 6 juillet 2010.
- [19] **M. MACHMOUM, F. POITIERS, L. MOREAU, M.E. ZAÏM, R. LE DOEUFF**, "Etude d'éoliennes à vitesse variable basées sur des machines asynchrones (MAS-MADA) ", Large-GE44, Pole Atlantique De Génie Electrique, Ecole polytechnique de l'université de Nantes.
- [20] **R. RAMAKUMAR, A. NAETER**, "Role of Renewable Energy in the Development and Electrification of Remote and Rural Areas", Power Engineering Society General Meeting IEEE, 6-12 June 2004, Vol.2, PP. 2103 – 2105.
- [21] **M.A HASSAD**, "Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques", Mémoire de Magister, université Sétif 1 (Algérie).2012.
- [22] **BEN AMAR ASMA**, "Etude de la commande d'un système éolien base sur une GADA", Mémoire de Magister, Université Hadj Lakhdar – Batna (2016).
- [23] **F. KENDOULI**, "Centrale éolienne et qualité de l'énergie électrique", Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine. 2012.
- [24] **F. BOUMARAF**, "Commande D'un Aérogénérateur- Apport Des Techniques de L'intelligence Artificielle", thèse de doctorat, université de Batna. 24/06/2014.

- [25] 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.
- [26] DJAMEL LKNI, M.B. CAMARA, A. PAYMAN, BRAYIMA DAKYO, "Dynamic Control of Wind Energy Conversion System", 2013, Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER).
- [27] LOUAR FATEH, "Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent" thèse de doctorat 3ème cycle l'Université Badji Mokhtar Annaba ,2016.
- [28] ATHMANE BOUZIDI, « Modélisation et simulation des réseaux électriques », Cours, Université A/MIRA-BEJAIA
- [29] DENDOUGA Abdellakim, " contrôle des puissances active et réactive de la machine à double alimentation (dfim)", thèse de doctorat En Electrotechnique de l'Université de BATNA, 2010.
- [30] Duc-Hoan TRAN, "Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne « passive » : Analyse de robustesse, validation expérimentale ", thèse de doctorat en l'Université de Toulouse, le 27 septembre 2010.

