



République **A**lgérienne **D**émocratique et **P**opulaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane MIRA- BEJAIA
Faculté De Technologie
Département de Génie Electrique
Spécialité : Electrotechnique

En vue de l'obtention du diplôme master en électrotechnique
Options : commandes électriques

Thème

Commande d'une MADA totalement interfacée dédiée à un système éolien

Réalisé par :

- ❖ M^{elle} HADJI Sarah
- ❖ Mr. BENKERROU Samah

Encadré par :

- Mr. S .TAMALOUZT
- Mr. Y.SAHRI

Promotion 2018/2019

Remerciements

*N*ous remercions **DIEU**, le tout-puissant de nous avoir donné le foie qui nous a guidée jusqu'à la réalisation et l'aboutissement de ce travail.

Nous tenons à remercier notre encadreur Mr **Saleh TAMALOUST** pour son orientation, ses conseils, ses encouragements, son aide précieux, et le temps qu'il nous a accordé tout au long de notre travail, nous exprimons notre profond remerciement et respect.

Nous remercions aussi notre co-promoteur **Mr SAHRI Younes**, pour son aide et sa disponibilité durant la réalisation de notre travail.

Nos sincère remerciement vont aussi

Nous adressons nos plus sincères remerciements aux membre de jury d'avoir accordé de leur temps et d'avoir accepté de juger notre travail.

Nos remerciements les plus sincères vont à tous les professeurs du département d'**Electrotechnique** de l'université de **Bejaïa** qui n'ont pas hésité un instant pour nous orienter, et d'être à notre disposition à tout moment pour la réussite et la réalisation de notre travail.

Nos chères **parents**, pour leurs patiences et leurs sacrifices pour voir ce jour. Ils ont tout donné pour notre réussite.

Nos fidèles **amis(es)**, tous nos remerciements pour vous, pour avoir participé soit de près soit de loin à la réalisation de ce travail.

Mr. SAMAH BENKERROU

Mlle. SARAH HADJI

Dédicaces

Je dédie ce travail

A ma chère maman, la personne qui a beaucoup sacrifié pour moi sans elle Je n'aurais eu la volonté d'atteindre ce niveau .Que Dieu puisse la garder éternellement heureuse .Merci du fond du cœur Mama.

A mon cher Papa qui m'a toujours aidé et soutenu dans les moments les plus difficiles que dieu le garde toujours pour moi,

A la mémoire de mes grands-parents, qu'Allah le tout puissant, ait pitié de leurs âmes

A mes très chères frères : Mazigh, Ghilass, Youva

A ma très chère sœur Lydia

A mes chère tentes : Rachida, zouina , Horia

A Toute ma famille

A Tout mes Amis

A mon binôme Samah

HADJI Sarah

Dédicaces

*Je dédie mon travail avant tout A mes chers
parent, Mon père qui ne cesse pas de
M'encourager, et qui ma Toujours soutenu, Ma
jolie Mère*

*Symbole de sacrifice et qui est tout pour Moi,
Pour sa Tendresse profonde qui « Qui dieu me les
protègent*

Toute la famille Benkerrou.

A mes frères et sœur.

Karima Rachid Dalila Hamimi Hamida Nadir

Nawel Djafar Nabil

A mon oncle et sa Famille

Nos proches Houria et hedjila Massaade

A tous mes amis

A ma binôme hadji Sarah

Benkerrou samah

Sommaire

Introduction générale.....	01
Chapitre I	
I.1 Introduction.....	03
I.2 Différentes sources de production d'énergie électrique	03
I.3 Historique de l'énergie éolienne	04
I.4 Définition De l'énergie éolienne	05
I.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	05
I.5.1 Avantages	05
I.5.2 Inconvénients	06
I.6 Définition d'une éolienne	06
I.6.1 Principaux composants d'une éolienne.....	06
I.7 Principe de fonctionnement d'une éolienne	08
I.8 Différents types d'éoliennes	08
I.8.1 Selon l'axe	08
I.8.1.1 Éolienne à axe horizontal (HAWT)	08
I.8.1.2 Éolienne à axe vertical (VAWT)	09
I.8.2 Selon la taille et la puissance nominale	11
I.8.3 Selon le mode de fonctionnement	11
I.8.3.1 Éolienne à vitesse fixe	11
I.8.3.2 Éolienne à vitesse variable	12
I.9 Production d'électricité par l'éolienne	12

I.9.1 Éolienne autonome	13
I.9.2 Éolienne raccordée au réseau	13
I.10 Zones de fonctionnement d'une éolienne	13
I.11 Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne	14
I.11.1 Machines Synchrones	14
I.11.1.1 Machines synchrones à aimants permanents	14
I.11.1.2 Machines synchrones à rotor bobiné	14
I.11.2 Machines Asynchrones	15
I.11.2.1 Machines Asynchrones à cage d'écureuil	15
I.11.2.2 Machines asynchrones à double alimentation	15
I.11.2.2.1. Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée	16
I.11.2.2.2. Machine asynchrone à double alimentation structure de Kramer	16
I.11.2.3 MADA- structure de Scherbius avec cyclo convertisseur	17
I.12 Description de la machine asynchrone à double alimentation	17
I.12.1 Structure de la MADA	17
I.12.2 Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA	18
I.13 Avantages et inconvénients de la MADA	18
I.13.1 Avantages	18
I.13.2 Inconvénients	19
I.14 Conclusion	19

Chapitre II

II.1 Introduction	20
II.2 Présentation du système à étudier	20
II.3 Modélisation de la partie mécanique	21
II.3.1 Hypothèses simplificatrices	21
II.3.2 Modélisation du vent	21
II.3.3 Modélisation de la turbine	21
II.3.4 Modélisation du multiplicateur	23
II.3.5 Modélisation de l'arbre de transmission	23
II.4 Modélisation de la partie électrique	25
II.4.1 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation	25
II.4.2 Modélisation de la MADA dans le repère abc	25
II.4.2.1. Equations électriques	26
II.4.2.2. Equations magnétiques.....	26
II.4.2.3. Équation mécanique	27
II.5 Transformation de Park	27
II.5.1 Application de la transformation de Park à la MADA	28
II.5.1.1 Équations électriques	28
II.5.1.2 Équations magnétiques	29
II.5.1.3 Expression du couple électromagnétique.....	29
II.5.2 Choix du référentiel	29
II.6 Modélisation des convertisseurs de puissance	30

II.6.1 Modélisation de l'onduleur MLI	30
II.6.2 Modélisation Du redresseur MLI	31
II.7 Modélisation du bus continu	32
II.8 Conclusion.....	32

Chapitre III

III .1 Introduction	33
III.2. Principe de la commande vectorielle	33
III.3. Stratégie de la commande vectorielle de la MADA	34
III.3.1.Modèle de la MADA en vue de la commande	34
III.3.2. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique	35
III.3.3. Contrôle des courants de la MADA.....	37
III.4.Stratégie de commande de la turbine éolienne	38
III.5 Commande MLI du convertisseur d'électronique de puissance	40
III.6 Simulation et interprétation des résultats	41
III.7 Conclusion.....	45
Conclusion générale	46

Références bibliographiques

Annexes

Abréviations

MADA	Machine Asynchrone A double Alimentation
MPPT	Maximum Power Point Traking
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine
MLI	Modulation de Largeur d'impulsion
MAS	Machine Asynchrone
GADA	Génératrice Asynchrone A double Alimentation
FTBF	Fonction de transfert en boucle fermée
FTBO	Fonction de transfert en boucle ouverte

Liste des symboles

Ω_t	Vitesse de rotation de la turbine;
$\Omega_{\text{méc}}$	Vitesse mécanique de la génératrice ;
V_v	Vitesse du vent ;
P_v	Puissance issue du vent ;
S_t	Surface balayée par la turbine ;
λ	Coefficient de vitesse relative ;
λ_{opt}	Coefficient de vitesse relative optimale
ρ	Densité volumique de l'air ;
β	Angle de calage des pales de la turbine ;
P_{tur}	Puissance mécanique sur l'arbre de la turbine ;
R_t	Rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale ;
C_p	Coefficient de puissance ;
C_t	Couple de la turbine ;
C_g	Couple électromagnétique de la génératrice ;
G	Le gain du multiplicateur ;;
J_t	Inertie de la turbine ;
J_g	Inertie de la génératrice ;
J	Inertie totale ;
$C_{\text{méc}}$	Couple mécanique ;
C_{vis}	Couple des frottements visqueux ;
C_{em}	Couple électromagnétique de la MADA ;
f	Coefficient de frottement visqueux ;
$\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$	Flux créés par les enroulements statoriques ;
$\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}$	Flux créés par les enroulements rotoriques ;
$[V_s], [V_r]$	Vecteurs de tensions statorique et rotorique ;
$[i_s], [i_r]$	Vecteurs de courant statorique et rotorique ;

$[\Phi_s], [\Phi_r]$	Vecteurs de flux statorique et rotorique ;
$[R_s], [R_r]$	Vecteurs de résistances statorique et rotorique ;
$[L_s], [L_r]$	Vecteurs de résistances statorique et rotorique ;
l_s, l_r	Inductances propres d'une phase statorique et rotorique ;
L_s, L_r	Inductances cycliques d'une phase statorique et rotorique ;
M_s, M_r	Inductances mutuelles entre deux phases respectivement statorique et rotorique ;
M_{sr}	Maximum d'inductance mutuelle entre une phase statorique et rotorique ;
Θ	Position angulaire de la phase rotorique par rapport à la phase statorique ;
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	Courants des enroulements statoriques dans le plan abc ;
i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}	Courants des enroulements rotoriques dans le plan abc ;
V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}	Tensions simples aux bornes des enroulements statoriques dans le plan abc ;
V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}	Tensions simples aux bornes des enroulements rotoriques abc ;
ω_r	Pulsations des courants rotoriques ;
ω_s	Pulsations des courants statoriques ;
θ_s	Positions angulaire du vecteur du champ tournant par rapport au stator ;
θ_r	Positions angulaire du vecteur du champ tournant par rapport au rotor ;
V_{sd}, V_{sq}	Tensions simples aux bornes des enroulements statorique dans le plan dq ;
V_{rd}, V_{rq}	Tensions simples aux bornes des enroulements rotoriques dans le plan dq ;
i_{sq}, i_{sd}	Courants des enroulements statoriques dans le plan dq ;
i_{rq}, i_{rd}	Courants des enroulements rotoriques dans le plan dq ;
$\Phi_{sd}, \Phi_{rd}, \Phi_{sq}, \Phi_{rq}$	Flux statoriques et rotoriques Dans le plan dq ;
P_s, P_r	Puissances actives statoriques et rotoriques ;
Q_s, Q_r	Puissances réactives statoriques et rotoriques ;
P	Nombre de paires de pôles ;
V_a, V_b, V_c	Tensions simples modulée par l'onduleur ;
F_1, F_2, F_3	Fonction logique correspondant à l'état de l'interrupteur ;

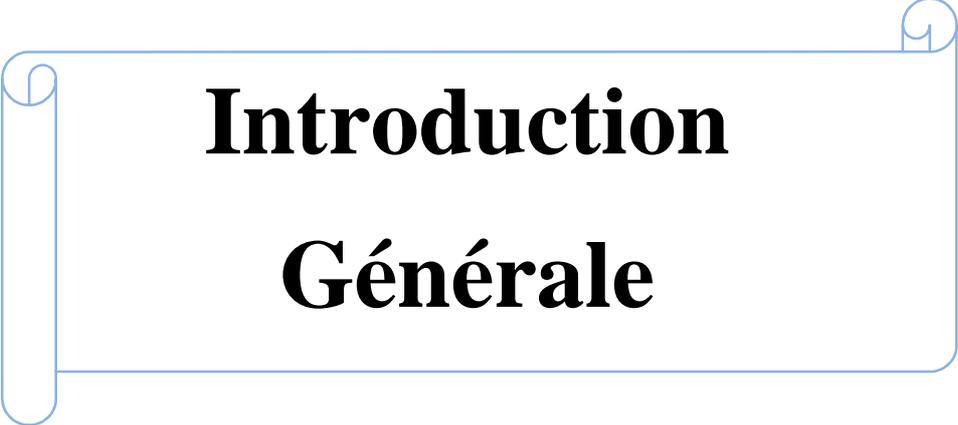
V_{dc}	Tension redressée ;
i_{dc}	Courant redressé ;
U_{dc}	Tension du bus continu ;
V_{sd}^*, V_{sq}^*	Tensions intermédiaires statoriques dans le plan dq ;
V_{rd}^*, V_{rq}^*	Tensions intermédiaires rotoriques dans le plan dq ;
T_s, T_r	Constantes de temps électriques statorique et rotorique ;
σ	Coefficient de dispersion ;
Φ_{sn}	Flux nominale ;
i_{sd}^*, i_{sq}^*	Courants de références des enroulements statoriques dans le plan dq ;
i_{rd}^*, i_{rq}^*	Courants de références des enroulements rotoriques dans le plan dq ;
Ω_{t-est}	Vitesse estimée de la turbine ;
V_{v-est}	Vitesse estimée du vent ;

Liste des figures

Figure I.1 : Moulin à vent (à gauche) Eolienne actuelle (à droite).....	04
Figure I.2 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	06
Figure I.3 : Constitution d'une éolienne à axe horizontal.....	07
Figure I.4 : Principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.....	08
Figure I.5 : Eolienne à axe Horizontal.....	09
Figure I.6 : Eolienne Savonius.....	10
Figure I.7 : Eolienne à axe vertical type Darrieus.....	10
Figure I.8 : Zones de fonctionnement d'une éolienne.....	14
Figure I.9 : MADA à énergie rotorique dissipée.....	16
Figure I.10 : MADA avec structure de Kramer.....	16
Figure I.11 : Structure de Scherbuis avec cycloconvertisseur.....	17
Figure I.12 : Structure du rotor de la MADA.....	17
Figure I.13 Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA.....	18
Figure II.1 : schéma de la structure choisie.....	20
Figure II.2 : Schéma de la turbine éolienne	21
Figure II.3 : Modèle mécanique simplifié de la turbine.	24
Figure II.4 : Schéma bloc de la partie mécanique	24
Figure II .5 : Représentation schématique de la MADA.	25
Figure II.6 : Représentation de la MADA dans le repère biphasé.	28
Figure II.7. Représentation d'un onduleur MLI	31
Figure II.8 : Schéma du bus continu	32

Liste des figures

Figure III. 1 : Principe de la commande vectorielle.	33
Figure III. 2 : Orientation du flux statorique sur l'axe d	36
Figure III. 3 : Schéma bloc des courants de références	37
Figure III. 4 : Schéma bloc de mode électrique d'axe d	38
Figure III.5 : Schéma bloc de mode électrique d'axe q	38
Figure III. 6 : Schéma de la turbine avec la commande MPPT	40
Figure. III-7 Schéma de principe de la commande MLI (sinus-triangle)	41
Figure III.8 Allure du profil de la vitesse du vent	41
Figure III.9 Allure de la vitesse de la vitesse mécanique	42
Figure III.10 Allures du couple électromagnétique et couple de référence	42
Figure III.11 Des allures des puissances de stator, rotor de la GADA	42
Figure III.12 Allure de flux statorique d'axe direct	43
Figure III.13 Allure de flux statorique d'axe direct.....	43
Figure III.14. Allures des pulsations statoriques et rotoriques.....	44
Figure III.15. Zoom de l'allure de la tension de l'onduleur deux niveaux.....	44

A decorative border resembling a scroll, with a blue outline and rounded corners. The top-left and top-right corners feature small circular motifs that look like the ends of rolled-up paper.

Introduction Générale

Introduction générale

La croissance constante de la consommation d'énergie sous toutes ses formes et les effets polluants associés, principalement causés par la combustion des énergies fossiles, sont au cœur de la problématique du développement durable et du soin de l'environnement dans une discussion pour l'avenir de la planète [1].

Alors pour résoudre cette problématique l'homme à chercher d'autres solutions alternatives aux énergies fossiles afin de produire l'électricité avec des sources renouvelables non polluantes et plus économiques en exploitant bien les différents éléments de la nature comme l'eau , soleil et le vent.

Parmi celles-ci, l'énergie éolienne apparaît clairement en première place. Cette énergie est en train de se développer en conséquence des problèmes environnementaux posés par les sources d'énergie traditionnelles et du progrès technologique des aérogénérateurs. La part de ce type d'énergie dans le réseau est de plus en plus importante dans les régions ventées. Par suite, l'impact sur le réseau électrique, de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente. D'autre part, le coût de l'énergie éolienne est encore trop élevé pour concurrencer les sources traditionnelles sur des sites moins ventés [2].

Actuellement un intérêt de plus en plus croissant est accordé aux éoliennes à base de machines asynchrone à rotor bobiné. Cet intérêt est dû aux degrés de liberté qu'elle offre cette catégorie de machine, du fait de l'accessibilité de son rotor et donc la possibilité de l'alimenter par un convertisseur aussi bien du coté stator que du coté rotor [3].

Notre objectif dans ce travail est l'étude et contrôle d'une éolienne à base d'une machine asynchrone

C'est dans ce cadre que nous allons développer notre étude sur un système de conversion éolien, basé sur une machine asynchrone à double alimentation.

Notre travail sera réparti en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous passerons en revue sur les connaissances de base de l'énergie éolienne, l'historique, principe de fonctionnement, les différents types d'éoliennes ainsi que les avantages et les inconvénients de cette énergie. Par la suite on présentera un état de l'art sur différentes chaines de conversion électromécanique, Plus particulièrement celle avec la machine asynchrone à double alimentation.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation de la chaîne de conversion éolienne, la modélisation de la partie mécanique de l'éolienne sera traitée dans la première partie, puis dans la deuxième nous passerons à la modélisation de la chaîne de conversion électrique constituée de la MADA, convertisseur statique et du bus continu.

Le dernier chapitre fera l'objet de la commande de la chaîne de conversion éolienne, la première partie étalera sur la commande vectorielle de la MADA basé sur l'orientation de flux statorique puis on passe à la commande MPPT de la turbine.

Nous finirons ce travail par une conclusion générale qui résumera l'ensemble des résultats obtenus.



Chapitre I

Généralités sur le système de conversion
éolien

I.1 Introduction

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, ces différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion électrique.

Une éolienne doit comporter :

- Un système électrique (La machine associée à l'électronique de puissance et sa commande).
- Un système mécanique (Orientation des pâles et de la nacelle).

Au cours de ce chapitre, nous présentons la constitution générale d'un système éolien, puis un état de l'art sur les différents types d'éoliennes et leur principe de fonctionnement dans le cadre de la conversion de l'énergie éolienne, Ensuite une description des génératrices électriques les plus utilisées seront présentées. Différentes structures utilisant la génératrice asynchrone à double alimentation seront décrites.

I.2 Différentes sources de production d'énergie électrique

Les centrales électriques transforment diverses sources d'énergie primaire en énergie électrique afin d'alimenter en électricité, au moyen du réseau électrique, les consommateurs particuliers ou industriels éloignés de la centrale [4].

Il existe cinq principaux types de centrales électriques :

- Les centrales à combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) dites centrales Thermiques classiques ;
- Les centrales nucléaires qui utilisent la fission nucléaire de matières fissiles pour produire de la chaleur dont une partie est transformée en électricité ;
- Les centrales hydroélectriques qui transforment l'énergie sauvage d'une chute d'eau en énergie mécanique grâce à une turbine, puis en énergie électrique grâce à un générateur ;
- Les centrales solaires ou photovoltaïques qui transforment l'énergie lumineuse en chaleur, laquelle sert ensuite à produire de l'électricité ;
- Les centrales éoliennes, qui utilisent la force du vent sur les pales d'une éolienne. Lorsque le vent se met à souffler, les forces qui s'appliquent sur les pales des hélices induisent la mise en rotation du rotor. L'énergie électrique ainsi produite peut être distribuée sur le réseau électrique grâce à un transformateur.

Le contexte du présent travail se rédige sur l'étude d'une génératrice asynchrone à double alimentation (MADA), utilisée Dans les systèmes éoliens.

I.3 Historique de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne a déjà été utilisée par Hamourabi (fondateur de Babylone) afin d'asperger la Mésopotamie vers l'an 2000 avant J-C. Les chinois ont également exploité la puissance du vent pour des systèmes de pompage de l'eau [5].

Le début du Moyen-âge a vu l'apparition des moulins en Europe avec comme application l'assèchement des lacs et terrains inondés au Pays- Bas ainsi que la moudre de grains. La génération d'énergie électrique par le vent a débuté à la fin du XIXème siècle. Parmi les pionniers on peut citer Paul La Cour au Danemark qui a associé une dynamo à une éolienne 1891. Dans les années 1950, Johannes Juul (élève de Paul La Cour) devint aussi un pionnier dans l'utilisation de l'énergie éolienne en construisant les premières éoliennes produisant du courant alternatif [5].

Depuis les années 1990, l'amélioration technologique des éoliennes a permis de construire des aérogénérateurs de plus de 5MW et le développement d'éoliennes de 10MW est en cours. Ces unités se sont démocratisées et on en retrouve aujourd'hui dans plusieurs pays. Ces éoliennes servent aujourd'hui à produire du courant alternatif pour les réseaux électriques, au même titre qu'un réacteur nucléaire, ou une centrale thermique au charbon. Cependant, les puissances générées et les impacts sur l'environnement ne sont pas les mêmes [6].



Figure I.1 : Moulin à vent (à gauche) Éolienne actuelle (à droite)

I.4 Définition De l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement autour du globe, c'est une forme indirecte de l'énergie calorifique de soleil ; les rayons solaires entraînent des différences de température et de pression. De ce fait, les masses d'air se mettent en mouvement et accumulent de l'énergie cinétique [7]. C'est une énergie renouvelable non dégradée, et surtout en relation saisonnière. De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [8].

I.5 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 inconvénients qu'il faut étudier, afin que Ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement [8] [9].

I.5.1 Avantages

- L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement ;
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement à l'énergie fossile, les générations futures pourront toujours en bénéficier ;
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie de risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs car elle est entièrement en métal ;
- Les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et nucléaires ;
- C'est une énergie locale, mis à part le coût de l'éolienne on n'en a pas besoin d'acheter les centaines de kilomètre de câble ;
- C'est l'énergie la moins chère des énergies renouvelables ;
- Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2% sol environ est requis pour les éoliennes. la surface restante est disponible pour l'exploitation ;
- Une éolienne est en grande partie recyclable car construite en acier. Après son temps de fonctionnement (environ 20 ans) elle est entièrement démontable ;

- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement, Elle répond au besoin urgent d'énergie dans ces pays pour se développer ;

I.5.2 Inconvénients

- L'impact visuel, ça reste néanmoins un thème subjectif ;
- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée ;
- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études montrent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aérogénérateurs ;
- La qualité de la puissance électrique produite, la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance produite n'est toujours pas constante
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources de l'énergie classique, c'est-à-dire son coût est plus élevé que celui de l'énergie classique sur les sites moins ventés.

I.6 Définition d'une éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [10].

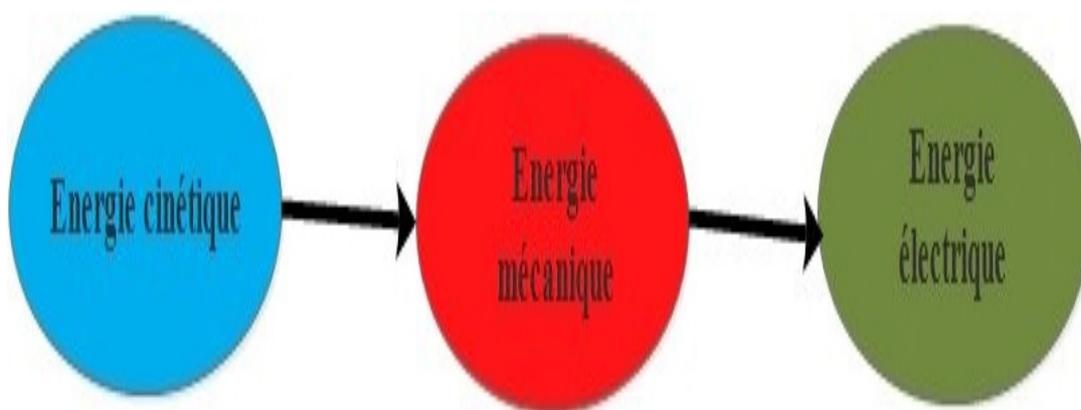


Figure I.2. Conversion de l'énergie cinétique du vent [11]

I.6.1 Principaux composants d'une éolienne

Une éolienne est composée de plusieurs éléments :

- 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 (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit [12].
- La nacelle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. 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). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne [12].
- Tour : c'est un dispositif porteur, habituellement un tube en aluminium ou un treillis en métal. Elle a une apparence cylindrique, à l'intérieur sont placés les câbles qui transportent l'énergie électrique, les équipements de contrôle, l'appareillage de connexion au réseau et l'échelle d'accès à la nacelle [13].

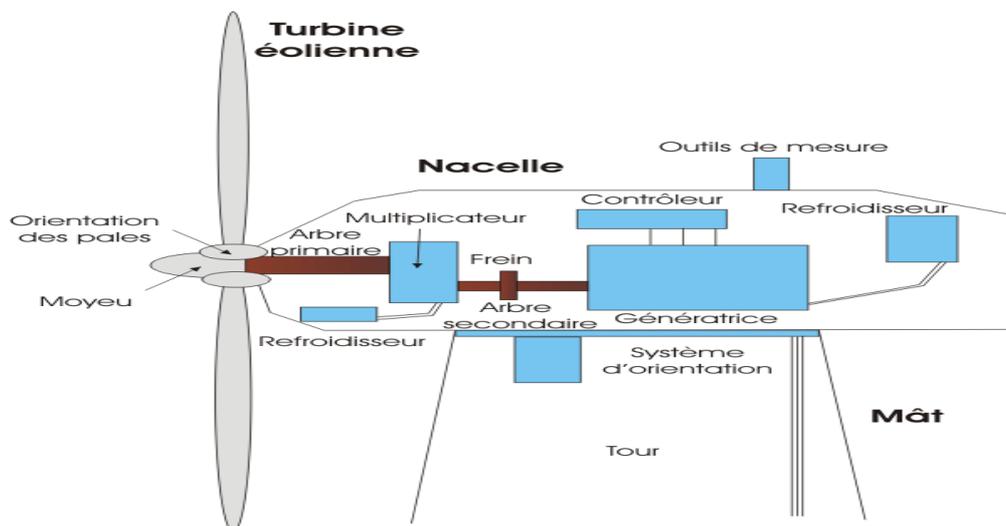


Figure I. 3 Constitution d'une éolienne à axe horizontal [14]

- Pales : elles servent à capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Leur nombre est de trois dans la plupart des éoliennes, car ce nombre constitue un compromis entre les performances de la génératrice [13].

- Moyeu : c'est le composant qui prend en charge les pales. Il devrait résister à des coups violents notamment au cours du départ de l'aérogénérateur ou durant les variations brusques de vitesse du vent [13].

I.7 Principe de fonctionnement d'une éolienne

C'est un système qui capte de l'énergie éolienne (énergie cinétique du vent) et la convertit en énergie électrique. Dans la plupart des cas, un tel système de conversion est constitué d'une turbine (T), d'un multiplicateur de vitesse (M), d'une génératrice électrique (GE), généralement triphasée et un circuit d'électronique de puissance (EP). Suivant l'utilisation visée, l'éolienne est alors connectée au réseau électrique ou alimente une charge autonome Figure (I.4) [14].

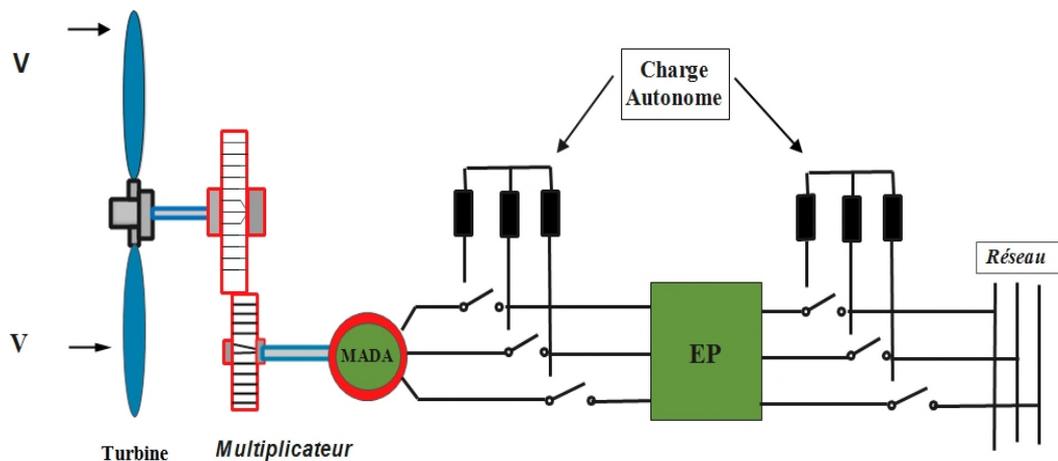


Figure I.4 Principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

Cette conversion se fait en deux étapes : [11]

- Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

I.8 Différents types d'éoliennes :

I.8.1 Selon l'axe :

Il existe Deux principaux types d'éoliennes, les éoliennes à axe horizontal et les éoliennes à axe vertical :

I.8.1.1 Éolienne à axe horizontal (HAWT)

Ces éoliennes sont les descendantes directes des moulins à vent sur lesquels les ailes, faites de voiles tendues sur une structure habituellement en bois, ont été remplacées par des éléments ressemblant fortement à des ailes d'avion La portance de ces ailes placées dans

le vent ne sert pas ici à sustenter un aéronef mais à générer le couple moteur destiné à entraîner un dispositif mécanique tel qu'une génératrice électrique, une pompe [15].

Actuellement Les turbines à axe horizontal sont les plus utilisées comparées à celles à axe vertical puisqu'elles présentent un coût moins important, en plus elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques. Le nombre des pales varie entre 1 et 3, le rotor tripal est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [10].



Figure I.5 Éolienne à axe Horizontal [16]

I.8.1.2 Éolienne à axe vertical (VAWT)

Ces aérogénérateurs sont conçus de manière à ce qu'ils puissent fonctionner à tout vent. N'ayant pas besoin d'être orientés, grâce à la symétrie de leurs pales, ils permettent de profiter du vent dans n'importe quelle direction. En plus, l'emplacement du générateur électrique au niveau du sol présente un grand avantage quant aux opérations de maintenance. Néanmoins, les aérogénérateurs à axe vertical présentent quelques inconvénients, un modèle à axe vertical produit à peu près la moitié de l'énergie électrique produite par un modèle à axe horizontal. Ceci est l'une des raisons principales pour lesquelles la demande sur ce type de machines est quasiment faible [17].

On en différencie deux types d'éoliennes à axe vertical :

- ❖ Éolienne à axe vertical de type Savonius :

Ils sont basés 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 figure (I.6) [10].

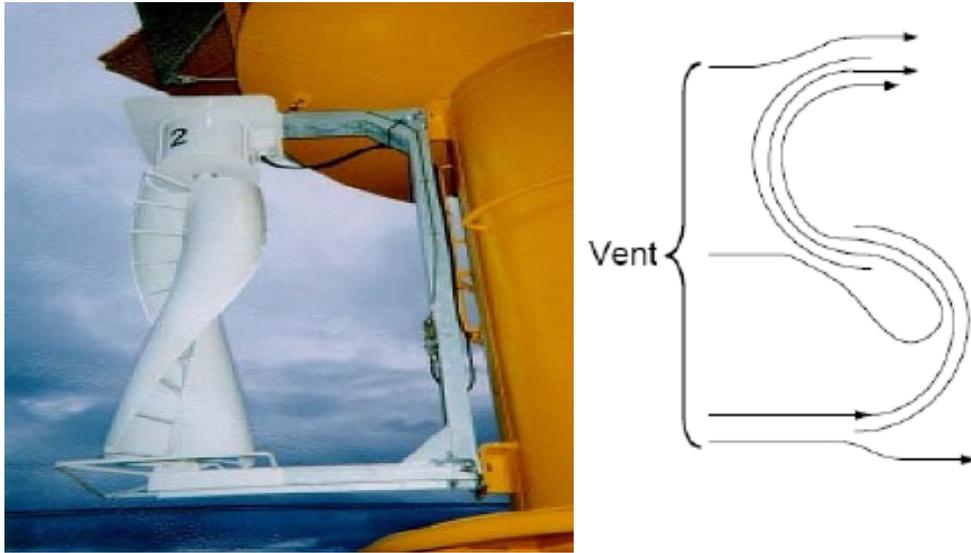


Figure I.6 Éolienne Savonius

❖ Éolienne à axe vertical de type Darrieus :

Le rotor de Darrieus fonctionne grâce à la portance et se base sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Le couple de démarrage de ce type d'éoliennes est proche de zéro [18].

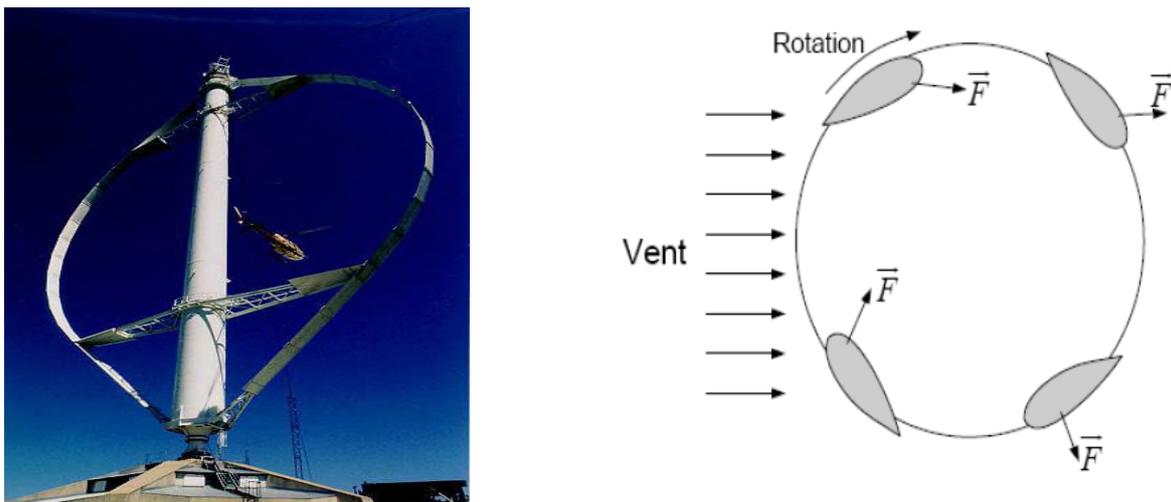


Figure I.7 Eolienne à axe vertical type Darrieus [10]

Le tableau (I.1) résume les avantages et les inconvénients de chaque type d'éolienne :

Type d'éolienne	Avantages	Inconvénients
HAWT	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grande efficacité de conversion d'énergie éolienne. ▪ Exploite plus de vent. ▪ Possibilité de régulations de la puissance. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Coût d'installation élevée (à cause de la longueur de la tour et la longueur des câbles électriques). ▪ La nécessité d'un système d'orientation. ▪ L'entretien est trop compliqué à cause de la hauteur.
VAWT	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Coût de l'installation faible et son entretien n'est pas compliqué. ▪ Fonctionnement non lié à la direction du vent. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Faible rendement. ▪ Le démarrage de l'éolienne n'est pas automatique. ▪ Occupe plus de terrain au sol.

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients de chaque type d'éolienne [19]

I.8.2 Selon la taille et la puissance nominale

Il existe trois catégories d'éoliennes selon la taille [15] :

- Les grandes éoliennes de forte puissance, dont la puissance dépasse 250 kW.
- Les éoliennes moyennes dont la puissance est comprise entre 36 kW et 250 kW.
- Les petites éoliennes de puissance inférieure à 36 kW.

I.8.3 Selon le mode de fonctionnement

I.8.3.1 Éolienne à vitesse fixe

Elles sont les premières à avoir été développées. Dans cette topologie, la génératrice utilisée fonctionne avec une vitesse rotorique limitée aux voisinages d'une vitesse constante. Cette génératrice peut être directement couplée au réseau électrique dont sa vitesse de rotation est imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles [20].

I.8.3.2 Éolienne à vitesse variable :

Les éoliennes à vitesse variable sont actuellement les plus utilisées dans l'industrie, le terme vitesse variable désigne le fait que la vitesse de la turbine est indépendante de la fréquence du réseau électrique. L'avantage principal d'opérer la turbine à vitesse variable est de maximiser la capture de l'énergie disponible dans le vent [21]. Ce type d'éolienne nécessite une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau. Le tableau suivant (I.2) résume les avantages et les inconvénients de chacun de ces modes de vitesse.

Mode de vitesse	Avantages	Inconvénients
Vitesse fixe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Plus grande fiabilité. ▪ Pas besoin d'interface d'électronique de puissance. ▪ Moins cher. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rendement de conversion d'énergie faible ▪ Grande fluctuation de puissance vers le réseau.
Vitesse variable	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Augmentation du rendement énergétique ▪ Puissance électrique d'une meilleure qualité. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Coût et pertes supplémentaires à cause des convertisseurs de puissances. ▪ Le contrôle de système est plus complexe.

Tableau I.2 : Avantages des éoliennes à vitesse fixe-variable [19] [2]

I.9 Production d'électricité par l'éolienne

L'énergie éolienne résulte de la force exercée par le vent sur les pales d'une hélice montée sur un arbre rotatif, lui-même est relié à une génératrice qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Cette dernière est en fonction de la surface balayée.

Selon l'utilisation et technologie d'éolienne, on distingue deux grandes familles d'éoliennes [22].

- Les éoliennes autonomes.
- Les éoliennes raccordées au réseau.

I.9.1 Éolienne autonome

Elles sont utilisées dans des gammes de puissances de quelques dizaines de Watt à quelques dizaines de KW pour l'alimentation d'appareils électriques d'instrumentation ou d'éclairage [16].

Elles sont aussi utilisées pour l'alimentation en énergie électrique les bateaux, le camping, les stations météo et l'éclairage des chalets isolés ou encore des villages.

Ces éoliennes sont associées à des unités de stockage d'énergie, généralement constituée de batteries d'accumulateur. Ces dernières se chargent par l'aérogénérateur soit directement par une génératrice à courant continu pour les faibles puissances, ou bien par une génératrice synchrone à aimants permanents ou bobinée par l'intermédiaire d'un pont redresseur. La tension continue des batteries est utilisée soit directement ou alors mise en forme par onduleur pour obtenir une alimentation triphasée sinusoïdale de fréquence 50 Hz [22].

I.9.2 Éolienne raccordée au réseau

Les éoliennes isolées connectées au réseau de distribution sont souvent en fonctionnement pour tester le potentiel éolien du site considéré, ou appartiennent à des industriels ou des privés qui produisent leur propre électricité et revendent l'excédent au distributeur local [16].

Ce type de production décentralisée se rencontre de plus en plus avec le développement des primes et autres aides à la production d'énergie électrique propre .

Les puissances de ces éoliennes varient de 50 kW à 6 MW. Ces dernières fonctionnent en permanence et la puissance produite change beaucoup au gré du vent [22].

I.10 Zones de fonctionnement d'une éolienne :

La courbe de puissance convertie d'une éolienne, généralement fournie par les structures permet de définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent [11].

Zone I : La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.

Zone II : Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.

Zone III : La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de (P_n). Cette zone correspond au fonctionnement à plein charge.

Zone IV : La vitesse du vent devient trop forte. La turbine est arrêtée et la puissance extraite est nulle.



Figure I.8. Zones de fonctionnement d'une éolienne.

I.11 Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne

L'application la plus fréquente des turbines éoliennes est aujourd'hui la production d'électricité. Pour cela, l'utilisation d'une machine électrique est indispensable. Les machines habituellement rencontrées dans les éoliennes sont [1] :

I.11.1 Machines Synchrones

I.11.1.1 Machines synchrones à aimants permanents

La machine synchrone à aimants permanents est une solution très intéressante dans les applications éoliennes isolées et autonomes vu ses avantages (un bon rendement et un bon couple massique) et le non nécessité d'une source d'alimentation pour le circuit d'excitation. Ces qualités sont contrebalancées par un coût plus élevé que les machines asynchrones. Toutefois, différentes structures de machines synchrones à aimants permanents alimentant des charges autonomes à travers des dispositifs d'électronique de puissance existent [14].

I.11.1.2 Machines synchrones à rotor bobiné

Les générateurs à inducteur bobiné nécessitent un système de bagues et balais ou un système Brushless avec un redresseur tournant afin de transmettre le courant continu créant le champ magnétique rotorique qui constitue un paramètre de réglage utile pour l'optimisation énergétique. Cependant, le fonctionnement direct sans engrenages de la machine synchrone à

Rotor bobiné multipolaire à vitesse variable implique l'utilisation d'un générateur surdimensionné et d'un convertisseur de puissance dimensionné pour la puissance totale du système [20].

I.11.2 Machines Asynchrones

On retrouve deux types de machines asynchrones généralement utilisés dans la conversion de l'énergie éolienne :

I.11.2.1 Machines Asynchrones à cage d'écureuil

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde [12].

Grâce à ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne. Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales [23], Elles sont souvent associées à une batterie de condensateurs de compensation de la puissance réactive [24].

I.11.2.2 Machines asynchrones à double alimentation

La Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA) a suscité un intérêt particulier surtout en tant que génératrice dans le domaine de l'énergie éolienne, le stator de la MADA est directement couplé au réseau alors que son rotor est connecté au réseau à travers une interface composée de deux convertisseurs statiques (convertisseur coté MADA et convertisseur coté réseau) [10].

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant [24].

Une des solutions très intéressantes et permettant d'obtenir une variation de la vitesse de rotation d'environ 30% autour de la vitesse de synchronisme consiste à coupler le rotor de la génératrice à double alimentation au rotor à travers deux onduleurs MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en onduleur réseau [24].

I.11.2.2.1. Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée :

L'utilisation d'une résistance rotorique variable (Figure I.9) permet une variation limitée de la vitesse à environ 10% autour de la vitesse de synchronisme. L'inconvénient de cette solution est la diminution du rendement du système de conversion à cause de la dissipation de la puissance rotorique dans les éléments résistifs. Au lieu de dissiper la puissance disponible au rotor par effet joule, on peut récupérer cette puissance en la renvoyant sur le réseau électrique. Ceci améliore le rendement du système [4].

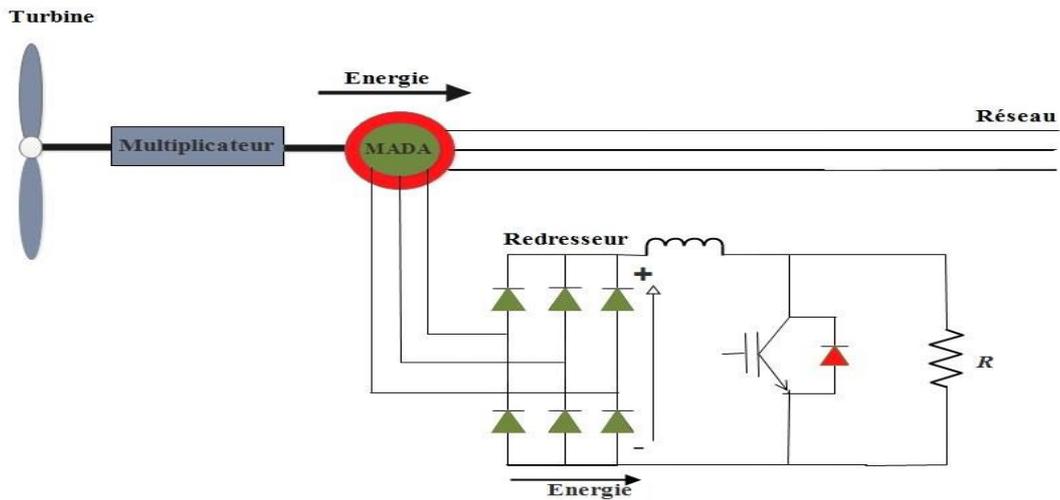


Figure I.9. MADA à énergie rotorique dissipée

I.11.2.2.2. Machine asynchrone à double alimentation structure de Kramer :

Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure précédente, au lieu de dissiper la puissance disponible au rotor par effet Joule, on peut la récupérer et la renvoyer sur le réseau à travers un onduleur et un transformateur, conformément à la figure suivante [7] :

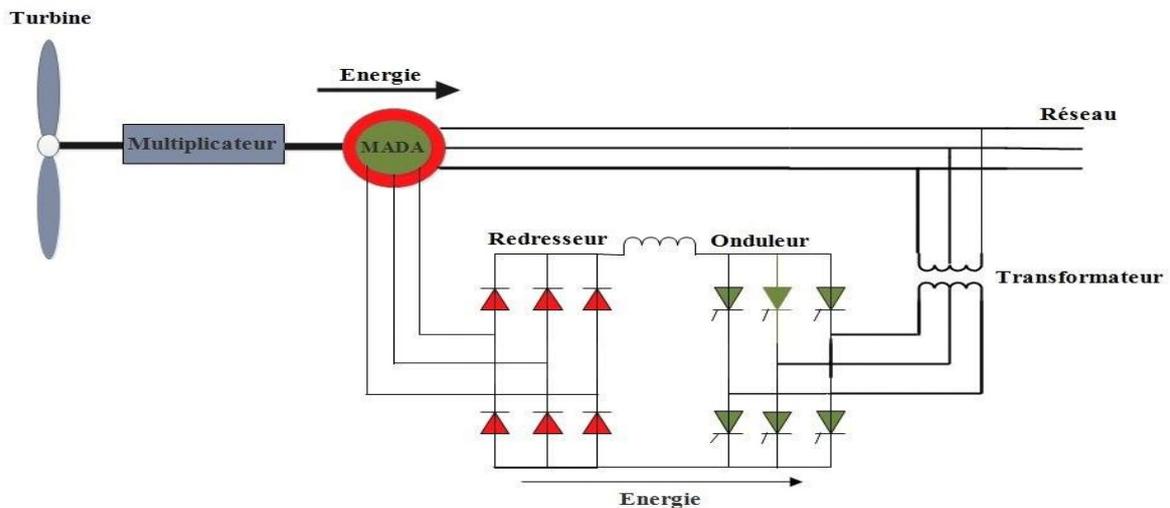


Figure I.10. MADA avec structure de Kramer

L'ensemble de redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de puissance nominale de la machine, ce qui permet de réduire la taille de convertisseur. Afin de respecter cette contrainte, le glissement est maintenu inférieur à 30%.

I.11.2.3 MADA- structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur

Le remplacement de redresseur-bus-continu-onduleur de la structure précédente par un cyclo convertisseur figure (I.11), autorise un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, et ainsi la plage de variation de vitesse est doublée [7].

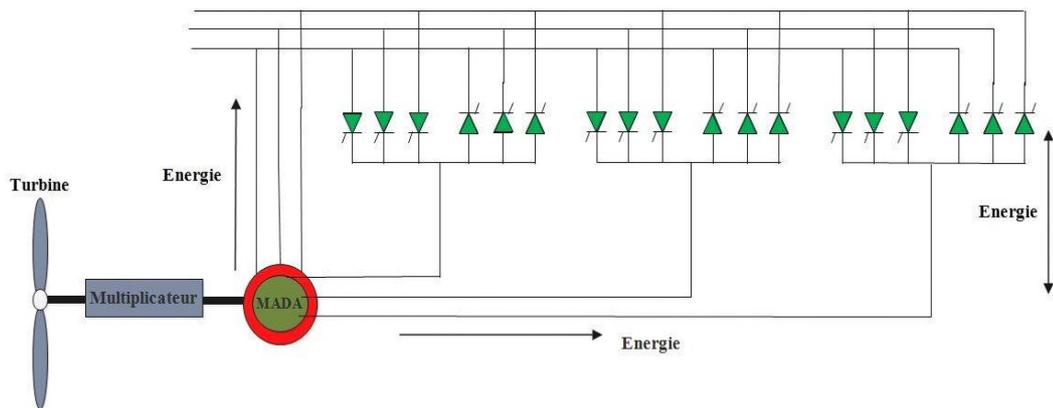


Figure I.11 Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur

Pour maintenir l'efficacité du système, la variation de glissement qui peut être positive ou négative doit être inférieure à 30%.

I.12 Description de la machine asynchrone à double alimentation

I.12.1 Structure de la MADA

La machine asynchrone à rotor bobiné présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont accessibles de l'extérieur par l'intermédiaire de bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais [25].

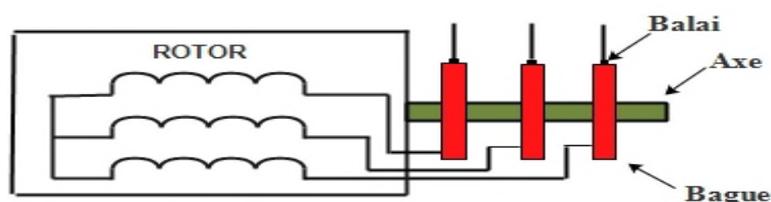


Figure I.12 Structure du rotor de la MADA.

I.12.2 Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA :

La MADA peut fonctionner en moteur comme générateur, en mode hypo synchrone et hyper synchrone. Ces modes de fonctionnement sont illustrés sur (figure I.13), avec P_r , P_m et P_s désignent les puissances du rotor, mécanique et du stator [22].

❖ Fonctionnement moteur :

➤ Mode hypo synchrone : dans ce mode la puissance P_r est fournie par le rotor et P_s est constante.

➤ Mode hyper synchrone : ce mode la puissance P_r est absorbé par le rotor, le glissement est alors négatif lorsqu'on augmente la vitesse au-delà de la vitesse de synchronisme.

❖ Fonctionnement générateur :

➤ Mode hypo synchrone : dans ce mode la puissance P_s est fournie par le stator et P_r est fournie par le rotor.

➤ Mode hyper synchrone : dans ce mode la puissance P_r est absorbée par le rotor.

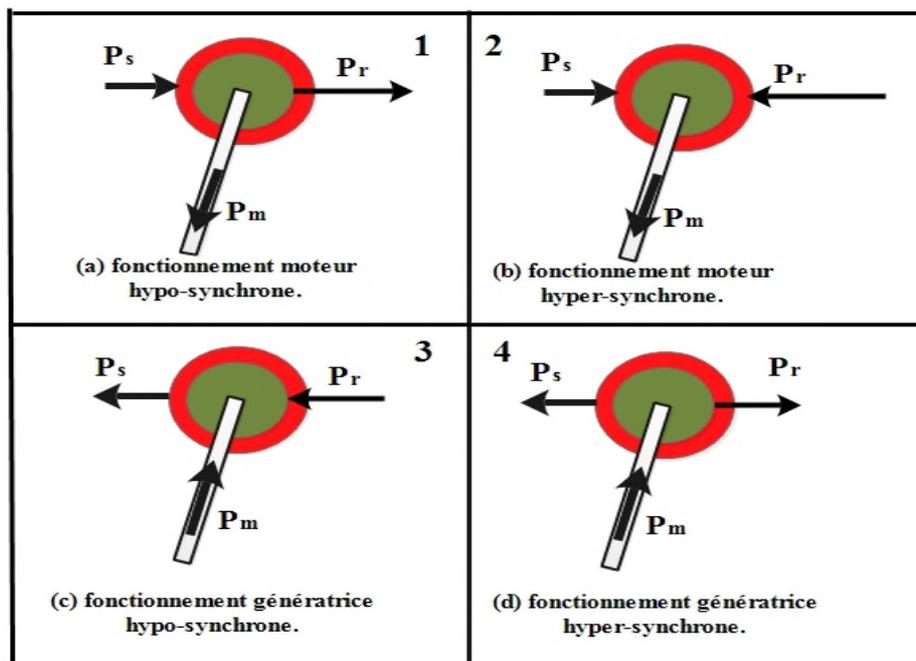


Figure I.13 Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA

I.13 Avantages et inconvénients de la MADA

I.13.1 Avantages

➤ Les convertisseurs statiques utilisés sont moins volumineux, moins coûteux, nécessitant ainsi un système de refroidissement moins lourd. Ils génèrent moins de

perturbations comparativement aux convertisseurs utilisés pour les éoliennes à base de machine asynchrone à cage ou à aimant permanent [10].

- L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir une grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique, et par conséquent pour bien contrôler le transfert des puissances active et réactive [26].
- La solution avec deux convertisseurs alimentant la machine nous permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge [27].
- La partage des fréquences entre le stator et le rotor : en effet, dans le cas d'une double alimentation, il est possible et recommandé de partager la fréquence de rotation du rotor entre les deux convertisseurs alimentant la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement [27].

I.13.2 Inconvénients

- Elle est plus volumineuse qu'une MAS à cage de puissance équivalente grâce à la présence du système bagues-balais [26].
- Nous utilisons un nombre des convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (un redresseur et un onduleur) [27].
- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage [27].

I.14 Conclusion

Une description générale de l'énergie éolienne à été dévoilée dans ce chapitre, historique, principe de fonctionnement, différents types d'éoliennes ainsi que les avantages et les inconvénients de cette énergie. Par la suite on a présenté un état de l'art sur différentes chaînes de conversion électromécanique, Plus particulièrement celle avec la machine asynchrone à double alimentation.

Une modélisation de tous les éléments constitutifs de notre chaîne de conversion sera présentée dans le chapitre qui suit.



Chapitre II

Modélisation de la chaîne de conversion
éolienne

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à la modélisation des différentes parties de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, pour ce faire on a réparti le travail comme suit :

- Une partie mécanique contiendra la modélisation aérodynamique de la turbine éolienne (turbine, multiplicateur et l'arbre de transmission)
- Une partie électrique où on présente le modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation dans son repère naturel (abc) puis dans le repère biphasé (dq)
- Modélisation du reste d'éléments de la chaîne éolienne (convertisseur d'électronique de puissance, bus continu).

II.2 Présentation du système à étudier

Le système étudié est constitué d'une turbine éolienne entraînant une machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau électrique dont les deux côtés, rotor et stator sont alimentés par deux convertisseurs MLI, dans cette structure on utilise un seul convertisseur coté réseau, Ces trois convertisseurs sont alors couplés par un bus continu commun, le schéma global de la structure choisie est représenté sur la figure (II.1)

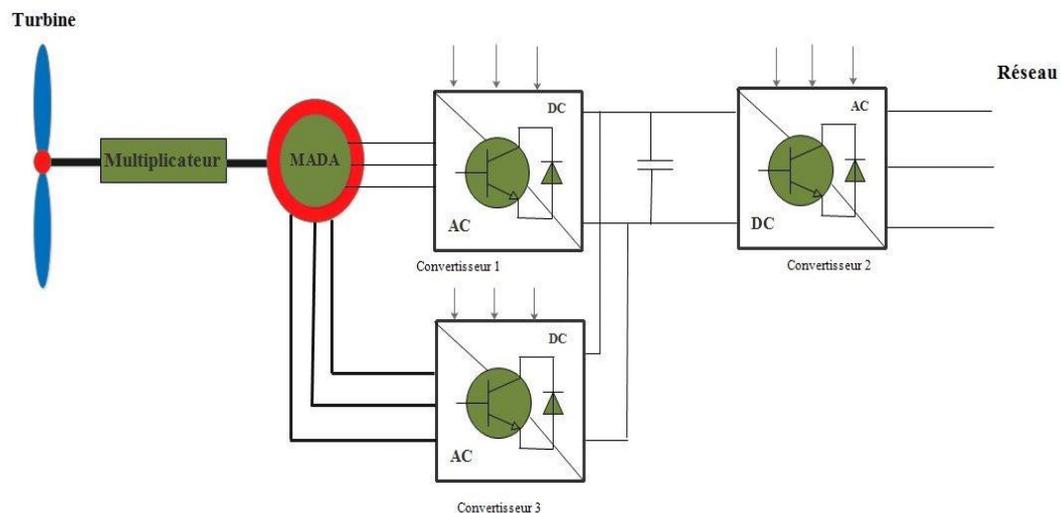


Figure II.1 : schéma de la structure choisie

II.3 Modélisation de la partie mécanique

II.3.1 Hypothèses simplificatrices

Pour modéliser la turbine éolienne on adopte les hypothèses suivantes [28]:

- Les pales sont considérées de conception identique ;
- On considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales, et donc une égalité de toutes les forces de poussée, alors nous pouvons considérer l'ensemble des pales comme un seul système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques.
- De part la conception aérodynamique des pales, leurs coefficients de frottement par rapport à l'air est très faible et peut être ignoré ;
- De même la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du coté de la génératrice.

II.3.2 Modélisation du vent

De nombreux travaux sur la modélisation du vent ont été réalisés [2]. Dans cette étude, nous avons représenté l'évolution de la vitesse de vent par une somme de plusieurs harmoniques [18]

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

II.3.3 Modélisation de la turbine

Le dispositif, étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R_t Entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G (figure II.2)

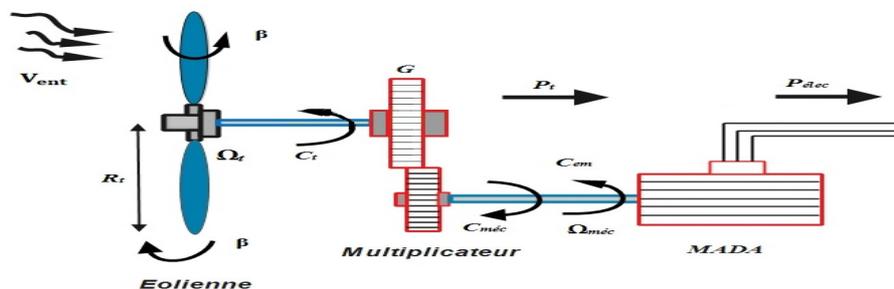


Figure II.2 : Schéma de la turbine éolienne

La puissance P_v issue de l'énergie cinétique d'un vent incident d'une vitesse V_v , traversant une surface S_t , s'exprime par la relation suivante [14] :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \cdot S_t \cdot V_v^3 \quad (\text{II-2})$$

Avec : $S_t = \pi R_t^2$

Le vent de vitesse v , appliqué sur les pales de l'éolienne, entraîne sa mise en rotation et crée une puissance mécanique sur l'arbre de la turbine, notée P_{tur} , s'exprimant par [29] :

$$P_{\text{tur}} = \frac{1}{2} c_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot S_t \cdot V_v^3 \quad (\text{II-3})$$

Avec :

λ : La vitesse relative représentant le rapport entre la vitesse linéaire à l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

ρ : La masse volumique de l'air (approximativement 1,225 kg/m³ à la pression atmosphérique et à 15°C).

S_t : La surface circulaire balayée par la turbine.

Ω_t : La vitesse de rotation de la turbine.

R_t : Le rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale.

Le coefficient de puissance est défini par le ratio de la puissance capté par la turbine sur la puissance de vent [30], il présente un maxima de $16/27=0,59$. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz [12].

$$C_p = \frac{P_{\text{tur}}}{P_v} \quad (\text{II.4})$$

L'évolution du C_p dépend de l'angle d'orientation des pales β et de la vitesse spécifique :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V_v} \quad (\text{II.5})$$

L'expression utilisée est donné par [7] :

$$C_p = (0.44 - 0.0167\beta) \sin \left[\frac{\pi(\lambda-3)}{15-0.3\beta} \right] - 0.00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot \beta \quad (\text{II.6})$$

L'expression du couple de la turbine est donnée par :

$$C_t = \frac{P_{tur}}{\Omega_t} = \frac{1}{2\Omega_t} C_p(\lambda, \beta) \rho \cdot S_t \cdot V_v^3 \quad (\text{II-7})$$

II.3.4 Modélisation du multiplicateur

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et la génératrice. Le couple électromagnétique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplicateur pour obtenir le couple électromagnétique de la génératrice [31].

$$C_g = \frac{1}{G} C_t \quad (\text{II-8})$$

Où :

G : le gain du multiplicateur.

C_g : Couple électromagnétique développé par la génératrice (N.m).

C_t : Le couple développé par la turbine.

Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine à celle de la génératrice comme suivant :

$$\Omega_t = \frac{1}{G} \Omega_{méc} \quad (\text{II-9})$$

Où :

$\Omega_{méc}$: La vitesse mécanique de la génératrice.

Ω_t : La vitesse de la turbine.

II.3.5 Modélisation de l'arbre de transmission [28]

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

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_g \quad (\text{II-10})$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total $C_{méc}$:

$$J \cdot \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_{méc} \quad (\text{II-11})$$

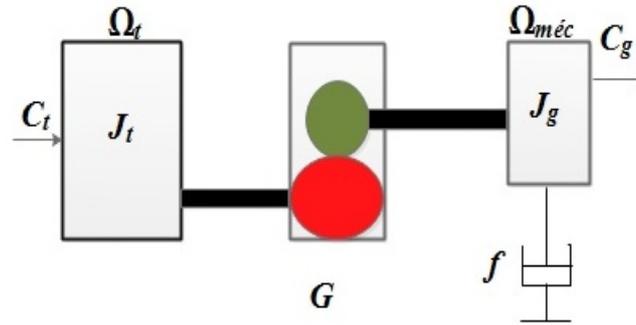


Figure II.3 : Modèle mécanique simplifié de la turbine.

Ce couple mécanique prend en compte le couple électromagnétique C_{em} produit la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} , et le couple issu du multiplicateur C_g .

$$C_{méc} = C_g - C_{vis} - C_{em} \tag{II-12}$$

Le couple des frottements visqueux C_{vis} est donné par l'expression suivante :

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{méc} \tag{II-13}$$

Avec :

f : Coefficient de frottement visqueux.

A partir des équations précédentes nous obtenons le schéma bloc de la partie mécanique ci-dessous :

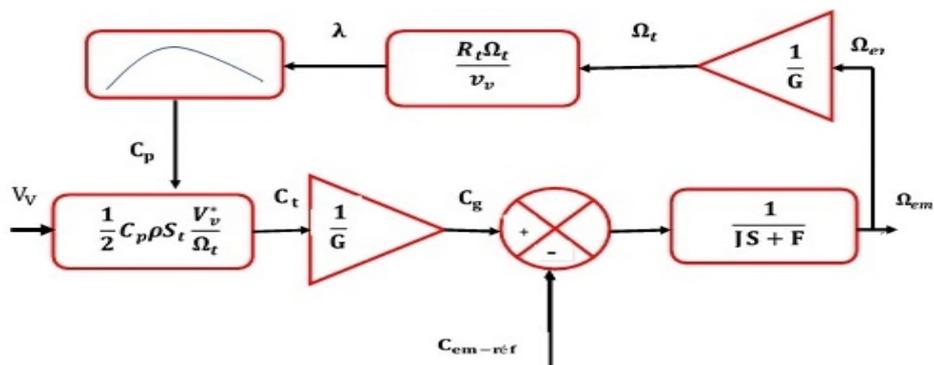


Figure II.4 Schéma bloc de la partie mécanique

II.4 Modélisation de la partie électrique

II.4.1 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

En raison de sa géométrie et la répartition de ses enroulements, l'étude de la MADA est plus complexe si on tient compte de sa configuration exacte. Il est alors nécessaire d'établir quelques hypothèses simplificatrices [23] [4] :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable ;
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables ;
- On admet, de plus, que la fmm créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdal ;
- Les résistances ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de Peau [4].

II.4.2 Modélisation de la MADA dans le repère abc

Le schéma de la machine à double alimentation dans le repère abc est représenté sur la figure (II .5), les trois enroulements statoriques et les trois enroulements rotoriques sont déphasé l'un par rapport à l'autre de $\frac{2\pi}{3}$.

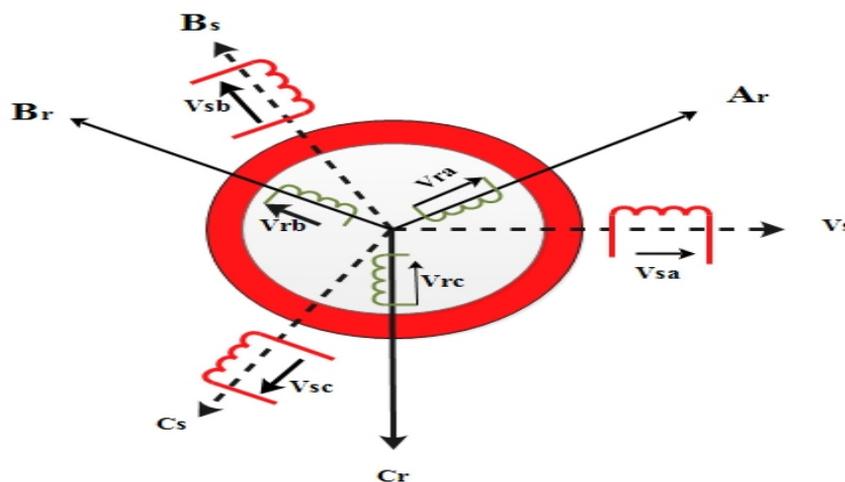


Figure II .5 : Représentation schématique de la MADA.

II.4.2.1. Equation électriques [32]

En tenant compte des hypothèses citées ci-dessus, on peut écrire les tensions statoriques et rotoriques comme suit :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt}[\varphi_s] \\ [V_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt}[\varphi_r] \end{cases} \quad (\text{II-14})$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}; [i_s] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}; [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix}; [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

$$[V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}; [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}; [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

II.4.2.2. Équation magnétique

Les équations des flux statoriques et rotoriques sont données par les équations suivantes :

$$\begin{cases} [\Phi_s] = [L_s][i_s] + [M_{sr}][i_r] \\ [\Phi_r] = [L_r][i_r] + [M_{sr}][i_s] \end{cases} \quad (\text{II-15})$$

En appliquant la transformée de Laplace, et en remplaçant les équations de flux (II.15) dans les équations statoriques et rotoriques (II.14), on obtient :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][i_s] + P([L_s][i_s] + [M_{sr}][i_r]) \\ [V_r] = [R_r][i_r] + P([L_r][i_r] + [M_{sr}][i_s]) \end{cases} \quad (\text{II-16})$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}; [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

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

Où :

$[V_s], [V_r]$: Vecteurs de tensions statorique et rotorique

$[i_s], [i_r]$: Vecteurs de courant statorique et rotorique

$[\Phi_s], [\Phi_r]$: Vecteurs de flux statorique et rotorique ;

$[R_s], [R_r]$: Vecteurs de résistances statorique et rotorique ;

$[L_s], [L_r]$: Vecteurs d'inductances statorique et rotorique ;

l_s, l_r : Inductances propres d'une phase statorique et rotorique ;

$L_s = l_s - M_s, L_r = l_r - M_r$: Inductances cycliques d'une phase statorique et rotorique ;

M_s, M_r : Inductances mutuelles entre deux phases respectivement statorique et rotorique ;

M_{sr} : Maximum d'inductance mutuelle entre une phase statorique et rotorique ;

P : opération de Laplace.

θ ; Ecart angulaire entre deux phases, statorique et rotorique correspondant.

II.4.2.3. Équation mécanique

D'après la loi fondamentale de la dynamique nous pouvons écrire :

$$J \frac{d}{dt} \Omega_{méc} = C_{arbre} - C_{em} - C_{vis} \quad (II-18)$$

II.5 Transformation de Park :

La transformer de Park consiste à transformer le système triphasé équilibré (abc) en un système d'axe biphasé (d q), afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple.

L'équation matricielle de la transformée de Park est la suivante :

$$P[(\theta)] = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II-19)$$

La transformation inverse de PARK et donnée par :

$$P[(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II-20})$$

II.5.1 Application de la transformation de Park à la MADA

La schématisation de la MADA dans le repère de Park est représentée sur la figure ci-dessous (figure II .6)

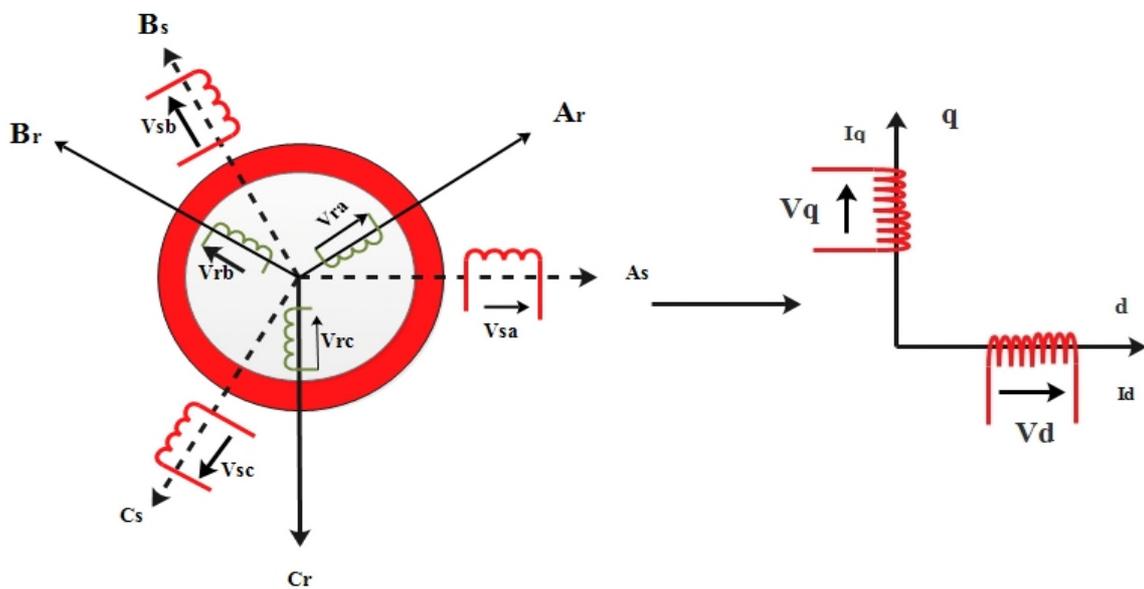


Figure II.6 : Représentation de la MADA dans le repère biphasé.

En appliquant la transformée de Park aux équations de la machine on aura les équations suivantes [4] :

II.5.1.1 Équations électriques

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \phi_{sd} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \phi_{sq} + \omega_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \phi_{rd} - \omega_r \cdot \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} \phi_{rq} + \omega_r \cdot \phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II-21})$$

Ou : $\omega_r = \omega_s - \omega$

$$\text{Avec : } \begin{cases} \omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \\ \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \end{cases}$$

II.5.1.2 Équations magnétiques

Les équations magnétiques de la MADA sont données comme suit :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II-22})$$

II.5.1.3 Expression du couple électromagnétique

L'expression du couple électromagnétique en fonction des flux statoriques et courants rotoriques est comme suit :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} \cdot (\phi_{sd} \cdot i_{rq} - \phi_{sq} \cdot i_{rd}) \quad (\text{II-23})$$

Avec :

P : Nombre de paires de pôles.

Les expressions des puissances sont :

Puissances statoriques :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} I_{sd} + I_{sq} V_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} - I_{sq} V_{sd} \end{cases} \quad (\text{II-24})$$

Puissance rotorique :

$$\begin{cases} P_r = V_{rd} I_{rd} + I_{rq} V_{rq} \\ Q_r = V_{rq} I_{rd} + I_{rq} V_{rd} \end{cases} \quad (\text{II-25})$$

II.5.2 Choix du référentiel

Il existe essentiellement trois référentiels :

➤ Référentiel lié au stator :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0, \quad \theta_s = \theta_r + \theta$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 = \frac{d\theta_r}{dt} + \frac{d\theta}{dt}$$

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

➤ Référentiel lié au rotor :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt} = p\Omega$$

Ce référentiel est utilisé dans le régime transitoire où la vitesse de rotation est considérée constante.

➤ Référentiel lié au champ tournant :

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_s$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - p\Omega$$

Ce référentiel n'introduit pas des simplifications dans la transformation des équations électriques.

II.6 Modélisation des convertisseurs de puissance

II.6.1 Modélisation de l'onduleur MLI

La figure (II.7) montre un onduleur MLI à deux niveaux composés de six interrupteurs répartis d'une façon symétrique sur ces trois bras commandés à l'ouverture et à la fermeture.

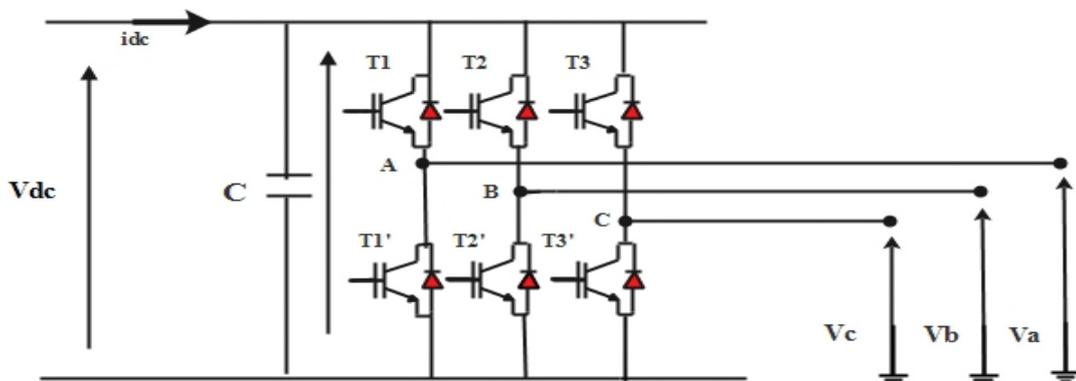


Figure II.7. Représentation de l'onduleur

$$\begin{cases} S_i = 1 \text{ si } T_i \text{ est fermé} \\ S_i = 1 \text{ si } T_i \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (\text{II-26})$$

$$\begin{cases} S'_i = 1 \text{ si } T'_i \text{ est fermé} \\ S'_i = 1 \text{ si } T'_i \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

L'onduleur est modélisé en associant chaque bras une fonction F_i , avec ($i=1,2,3$) tel que

$$F_i = (S_i - S'_i) = \begin{cases} +1 & \text{si } S_i = 1 (S'_i = 0) \\ -1 & \text{si } S_i = 0 (S'_i = 1) \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

Les tensions V_a, V_b, V_c sont exprimées par la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II-29})$$

Avec F_1, F_2, F_3 fonction logique correspondant à l'état de l'interrupteur.

II.6.2 Modélisation Du redresseur MLI

Les redresseur MLI sont des onduleurs utilisés à l'envers permettant de produire une tension continue à partir d'une tension alternative.

La matrice du redresseur est donnée par l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F'_1 \\ F'_2 \\ F'_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II-30})$$

$$i_{dc} = F'_1 I_a + F'_2 I_b + F'_3 I_c \quad (\text{II-31})$$

Avec :

V_{dc} : Tension redressée.

i_{dc} : Courant redressé.

II.7 Modélisation du bus continu

La MADA et le réseau sont reliés via un bus continu, la figure (II.8) illustre la connexion des deux convertisseurs à travers le bus continu.

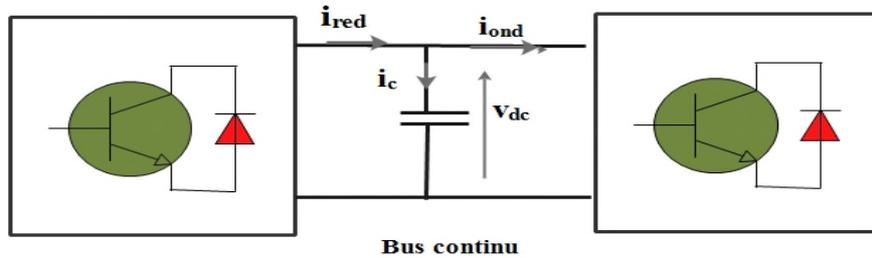


Figure II.8 : Schéma du bus continu

La tension du bus continu peut être exprimée comme suit [33] :

$$U_{dc} = \int \frac{1}{C} i_c(t) dt \quad (II-32)$$

C : la capacité du bus et V_{dc} la tension du bus continu.

$$i_c = i_{red} - i_{ond} \quad (II-33)$$

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé la chaîne de conversion éolienne qui intègre une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA).

Dans un premier lieu on a présenté la modélisation des différentes parties de l'éolienne. Dans un second lieu, un modèle mathématique de la MADA dans son repère naturel (a, b, c) et dans le repère de Park ont été établis, dans un dernier lieu on a donné la modélisation de l'onduleur MLI et du bus continu.

Le prochain chapitre sera consacré à la commande de la chaîne de conversion d'énergie éolienne.

A decorative horizontal scroll frame with a light blue border and rounded ends, containing the chapter title.

Chapitre III

Commande et simulation de la chaîne de
conversion proposée

III.1 Introduction

La commande des machines électriques a fait l'objet de plusieurs recherches et travaux pendant longtemps, différentes commandes ont été développées pour contrôler ces machines.

Ce dernier chapitre sera consacré à la commande d'une chaîne de conversion qui est composée d'une éolienne contrôlée par la technique MPPT, d'une MADA dont la stratégie de commande qui sera appliquée est basée sur la commande vectorielle avec orientation de flux statorique, une loi de répartition des pulsations statoriques et rotoriques sera aussi appliquée.

On terminera ce chapitre par une simulation globale du système étudié ainsi que l'interprétation des résultats.

III.2. Principe de la commande vectorielle

Contrairement à la machine asynchrone à cage, où nous avons accès seulement à la mesure des courants statoriques, la machine asynchrone double alimentée possède l'avantage de nous offrir la possibilité de mesurer les courants des deux côtés et par conséquent de pouvoir les contrôler, ce qui donne une meilleure flexibilité à la commande de cette dernière [27].

Les principes de cette commande ont été élaborés dès 1972 par Blaschke. Son objectif est d'arriver à commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu à excitation indépendante ou il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux, et celle liée au couple [34]. Ce qui permet de contrôler indépendamment ces deux dernières grandeurs l'une par rapport à l'autre.

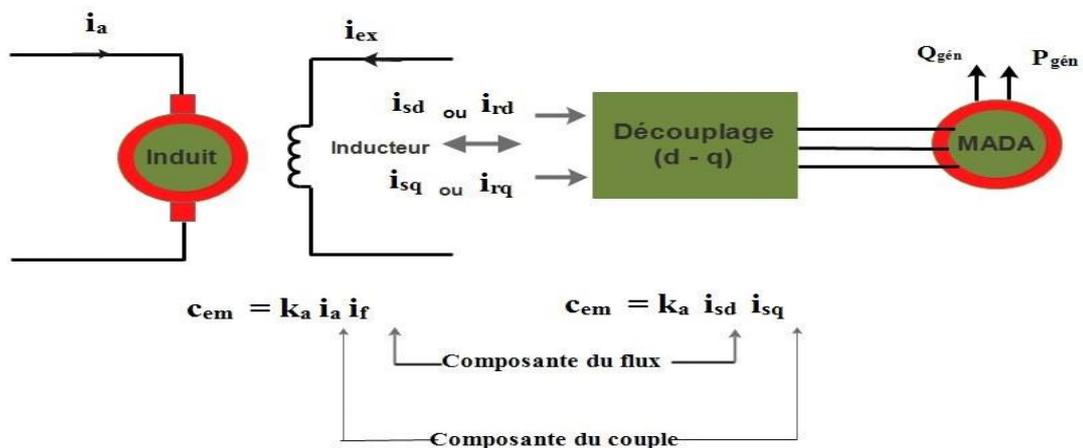


Figure III. 1 : Principe de la commande vectorielle.

III.3. Stratégie de la commande vectorielle de la MADA

III.3.1. Modèle de la MADA en vue de la commande

Afin d'appliquer la commande vectorielle à la machine à double alimentation, il est recommandé de choisir un référentiel d'axe ce qui va permettre d'aboutir à un système différentiel plus simple.

Dans ce qui suit nous allons fixer notre référentiel par rapport au champ tournant, les expressions des tensions statorique et rotorique sont alors :

$$\begin{cases} \frac{d\theta}{dt} = \omega_s \\ \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - p\Omega \end{cases} \quad \begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \phi_{sd} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \phi_{sq} + \omega_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \phi_{rd} - (\omega_s - \omega) \cdot \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} \phi_{rq} + (\omega_s - \omega) \cdot \phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III-1})$$

Dans le but d'obtenir un bon découplage entre les grandeurs suivant l'axe d et q nous définissons de nouvelles tensions intermédiaires, tel que [3] :

$$\begin{cases} V_{sd} - \frac{M}{L_r} V_{rd} = V_{sd}^* \\ V_{rd} - \frac{M}{L_s} V_{sd} = V_{rd}^* \\ V_{sq} - \frac{M}{L_r} V_{rq} = V_{sq}^* \\ V_{rq} - \frac{M}{L_s} V_{sq} = V_{rq}^* \end{cases} \quad (\text{III-2})$$

Des termes de couplage à compenser apparaissent, P_{ds} , P_{qs} , P_{dr} , P_{qr} , ces expressions nous permettent d'obtenir des relations entre les tensions intermédiaires et les courants statoriques et rotoriques dans les axes d ou q [7]

Il vient :

$$\begin{cases} V_{sd}^* = R_s(1 + sT_s\sigma)I_{sd} + p_{ds} \\ V_{sq}^* = R_s(1 + sT_s\sigma)I_{sq} + p_{qs} \\ V_{rd}^* = R_r(1 + sT_r\sigma)I_{rd} + p_{dr} \\ V_{rq}^* = R_r(1 + sT_r\sigma)I_{rq} + p_{qr} \end{cases} \quad (\text{III-3})$$

Avec:

$T_s = \frac{L_s}{R_s}$: Constante de temps électrique statorique.

$T_r = \frac{L_r}{R_r}$: Constante de temps électrique rotorique.

$\sigma = (1 - \frac{M^2}{L_s L_r})$: Coefficient de dispersion.

Dans ce cas les termes de couplage sont :

$$\begin{cases} p_{ds} = -\frac{M}{L_r} R_r I_{rd} - \omega_s \phi_{sq} + \omega \frac{M}{L_r} \phi_{rq} \\ p_{qs} = -\frac{M}{L_r} R_r I_{rq} - \omega_s \phi_{sd} + \omega \frac{M}{L_r} \phi_{rd} \\ p_{dr} = -\frac{M}{L_s} R_s I_{sd} - \omega_s \frac{M}{L_s} \phi_{sq} - \omega \phi_{rq} \\ p_{qr} = -\frac{M}{L_s} R_s I_{sq} - \omega_s \frac{M}{L_s} \phi_{sd} + \omega \phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III-4})$$

Des fonctions de transfert peuvent être définies, elles sont communes du côté de la machine [3] :

$$\begin{cases} F^s(s) = \frac{1}{(R_s + \sigma L_s s)} \\ F^r(s) = \frac{1}{(R_r + \sigma L_r s)} \end{cases} \quad (\text{III-5})$$

III.3.2. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

La commande vectorielle de la machine asynchrone consiste à orienter l'un des flux de la machine suivant l'axe d ou q. Dans notre cas on choisit l'orientation de repère (dq) suivant le vecteur flux statorique directe ϕ_{sd} , ce qui conduit à :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = \phi_s \\ \phi_{sq} = 0 \end{cases} \quad (\text{III-6})$$

En négligeant la résistance R_s ce qui constitue une hypothèse réaliste pour les génératrices de fortes puissances utilisées dans les systèmes éoliens [29], les équations des tensions deviennent :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = \omega_s \phi_s = V_s \\ V_{rd} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{rd} - \omega_r \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} \phi_{rq} + \omega_r \phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III-7})$$

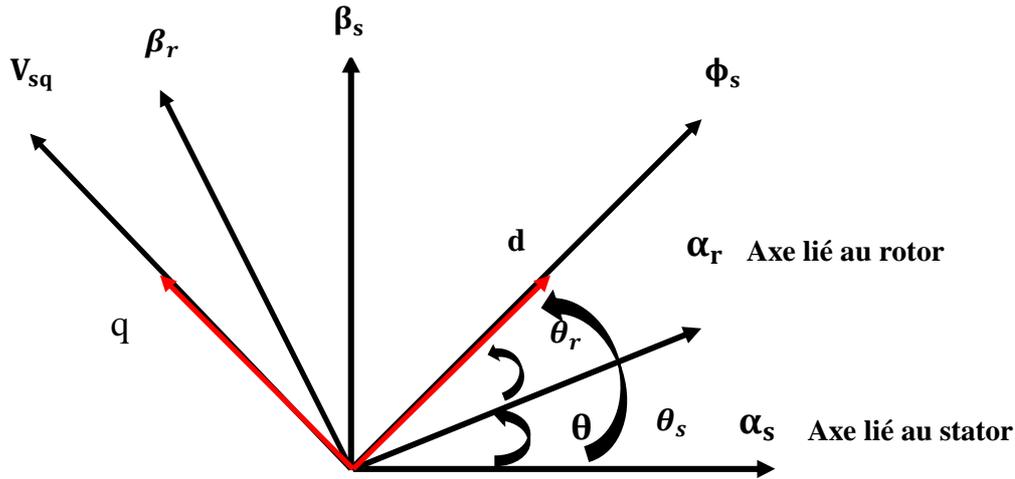


Figure III. 2 : Orientation du flux statorique sur l'axe d

Les équations magnétiques deviennent aussi :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ 0 = L_s i_{sq} + M i_{rq} \\ \Phi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \end{cases} \quad (\text{III-8})$$

Le couple électromagnétique est alors :

$$C_{em} = P(I_{sq} \Phi_s) \quad (\text{III-9})$$

Comme nous avons opté pour une orientation du flux statorique, les courants de références en quadrature peuvent être déterminés à partir de l'équation du couple électromagnétique et la relation de proportionnalité qui existe entre les deux courants d'axe q [3] :

$$i_{sq}^* = \frac{C_{em}^*}{p \Phi_s^*}, i_{rq}^* = \frac{-L_s}{M} i_{sq}^* \quad (\text{III-10})$$

La magnétisation de la MADA est assurée par les courants de l'axe direct d, plusieurs choix peuvent être faits, dans ce travail nous avons choisi de la répartir à égalité, donc les courants statoriques et rotoriques de l'axe direct ont la même expression :

$$i_{rd}^* = i_{sd}^* = \frac{\Phi_s^*}{M + L_s} \quad (\text{III-11})$$

à partir des deux équations (III.10) et (III.11), on a réalisé le schéma-bloc de la figure ci-dessous :

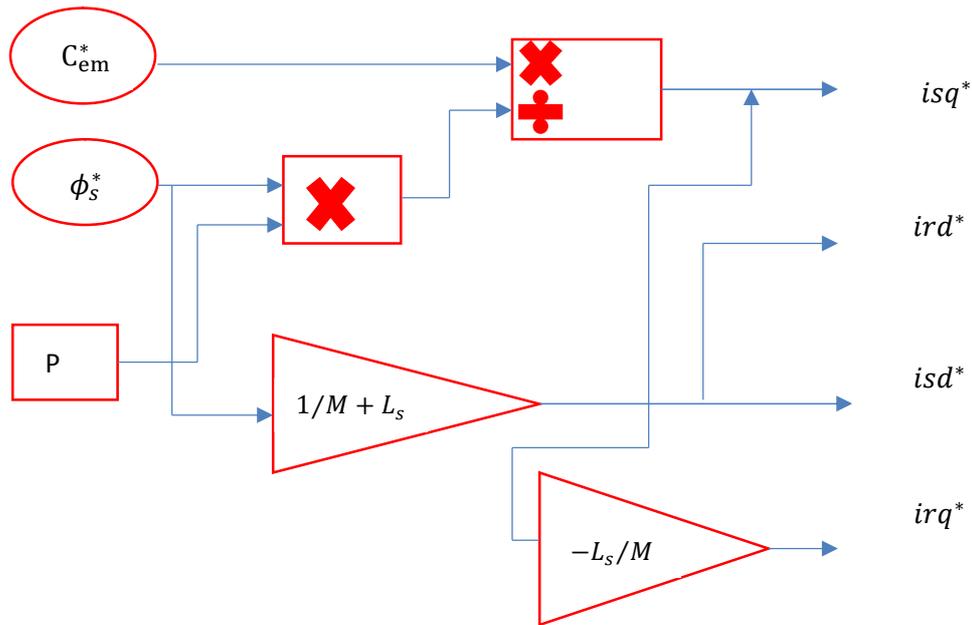


Figure III. 3 : Schéma bloc des courants de références

La répartition des puissances actives entre le stator et le rotor est une exigence dans la stratégie de contrôle à adopter, en effet dans notre travail on a choisi de faire fonctionner la MADA avec un glissement égale à -1, donc en négligeant les termes résistifs de la machine [7]:

$$\frac{p_s}{p_r} = \frac{\omega_s}{-\omega_r} = 1 \Rightarrow \omega_s = -\omega_r \quad (\text{III-12})$$

Et d'après la loi d'autopilotage ;

$$\Omega_r = \omega_s - \omega_r = 2\omega_s = -2\omega_r \quad (\text{III-13})$$

La relation (III.12) montre que la répartition des puissances actives et réactives permet de faire fonctionner la MADA avec une vitesse de rotation mécanique égale à deux fois la valeur absolue des pulsations des courants statoriques et rotoriques.

III.3.3. Contrôle des courants de la MADA

Pour contrôler le couple de la machine, il est nécessaire de contrôler ses courants. Un schéma bloc de révélant les interactions entre les axes et les cotés de la machines est présenté sur les deux figures (III.4) et (III.5).

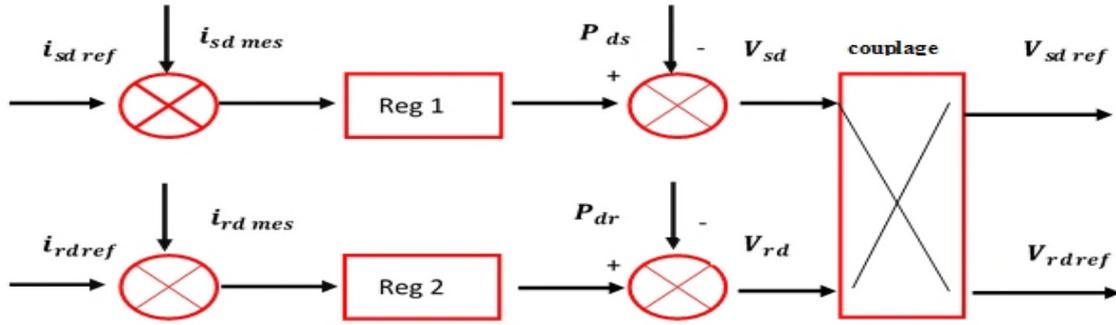


Figure III. 4 : Schéma bloc de mode électrique d'axe d

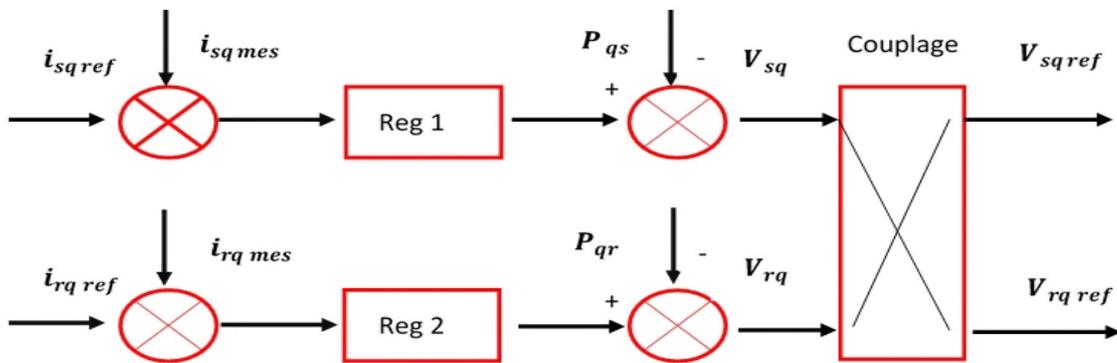


Figure III.5 : Schéma bloc de mode électrique d'axe q

III.4.Stratégie de commande de la turbine éolienne

Il existe différentes stratégies pour contrôler le couple électromagnétique afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée. Ce principe est connu sous le nom Maximum Power Traking (MPPT), et correspond à la zone (II) de la de la courbe de fonctionnement de l'éolienne [8] :

Dans notre travail, on a choisi la stratégie sans asservissement de vitesse

- **Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse :**

Cette stratégie se repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent, Dans ce cas l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine est comme suit [27] :

$$J \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_{méc} = 0 = C_{em} - C_G - C_{vis} \tag{III-14}$$

Une estimation de la vitesse de rotation de la turbine, notée Ω_{t-est} , est obtenue à partir de la mesure de la vitesse de rotation de la MADA [29] :

$$\Omega_{t-est} = \frac{\Omega_{méc}}{G} \quad (\text{III-15})$$

Une estimation de la vitesse du vent est obtenu à partir de l'estimation de la vitesse de la turbine :

$$V_{v-est} = \frac{\Omega_{t-est} \cdot R}{\lambda} \quad (\text{III-16})$$

A partir de l'estimation de la vitesse du vent et celle de celle de la turbine on obtient le couple de la turbine :

$$C_{t-est} = C_p \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{t-est}} \cdot V_{v-est}^3 \quad (\text{III-17})$$

Le couple électromagnétique de référence est :

$$C_{em \text{ réf}} = \frac{C_{t-est}}{G} \quad (\text{III-18})$$

Afin d'extraire le maximum de puissance il faut fixer la vitesse relative à sa valeur optimal λ_{opt} afin d'obtenir le coefficient de puissance maximum C_{pmax} , le couple électromagnétique de référence s'exprime donc par :

$$C_{em \text{ réf}} = \frac{C_{pmax} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5}{2 \cdot G^3 \lambda_{opt}^3} \cdot \Omega_t^2 \quad (\text{III-19})$$

Le schéma global de la turbine avec maximisation de la puissance est montré sur la figure ci-dessous :

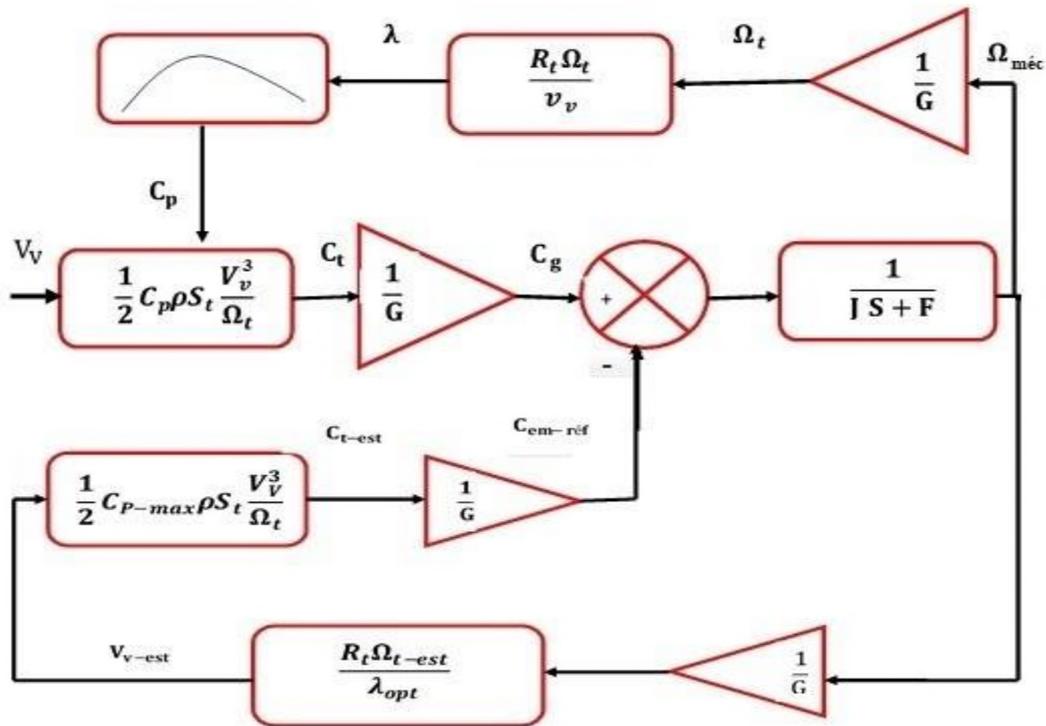


Figure III. 6 : Schéma de la turbine avec la commande MPPT

III.5 Commande MLI du convertisseur d'électronique de puissance

L'objectif de la commande à MLI est de diminuer les harmoniques présents dans les courants générés par le convertisseur. Le principe est de comparer un signal triangulaire appelé porteuse qui détermine la période de découpage à une modulante dont le fondamental est à la fréquence de la référence. Le résultat de cette comparaison est le signal MLI qui est utilisé comme fonction de commutation pour commander les interrupteurs du convertisseur. Cette méthode permet d'obtenir, de façon simple, les temps de conduction de chaque interrupteur [36].

La figure ci-dessous illustre le schéma bloc de la commande MLI utilisé dans notre travail (Figure III.7)

Dans le cas d'une référence sinusoïdale, les caractéristiques sont [35] :

- ❖ L'indice de modulation m égal au rapport de la fréquence f_p de la porteuse à la fréquence f_m de la référence : $m = f_p/f_m$
- ❖ Le coefficient de réglage r égal au rapport de l'amplitude A_m de la référence à l'amplitude crête de la porteuse : $r = A_m/A_p$

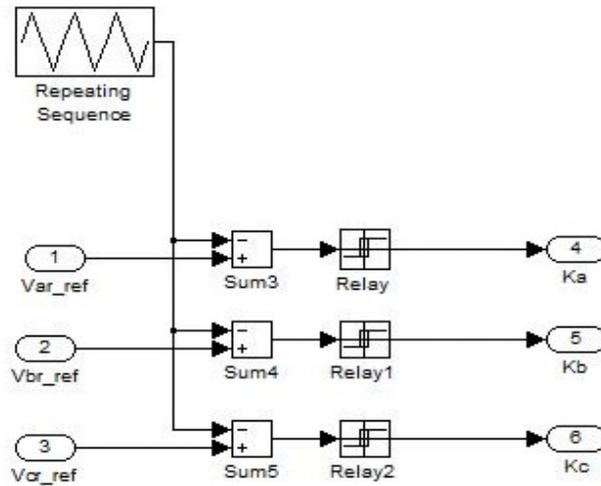


Figure. III-7 Schéma de principe de la commande MLI (sinus-triangle)

III.6 Simulation et interprétation des résultats

Pour assurer la commande de la MADA nous avons opté pour une commande à flux statorique orienté suivant l'axe direct, dont le couple de référence est généré par l'algorithme MPPT appliquée à l'éolienne.

La simulation du système global étudié est effectuée sur l'environnement MATLAB/SIMULINK, les paramètres de simulation sont donnés dans les annexes A et B, les résultats nécessaires sont présentés comme suit :

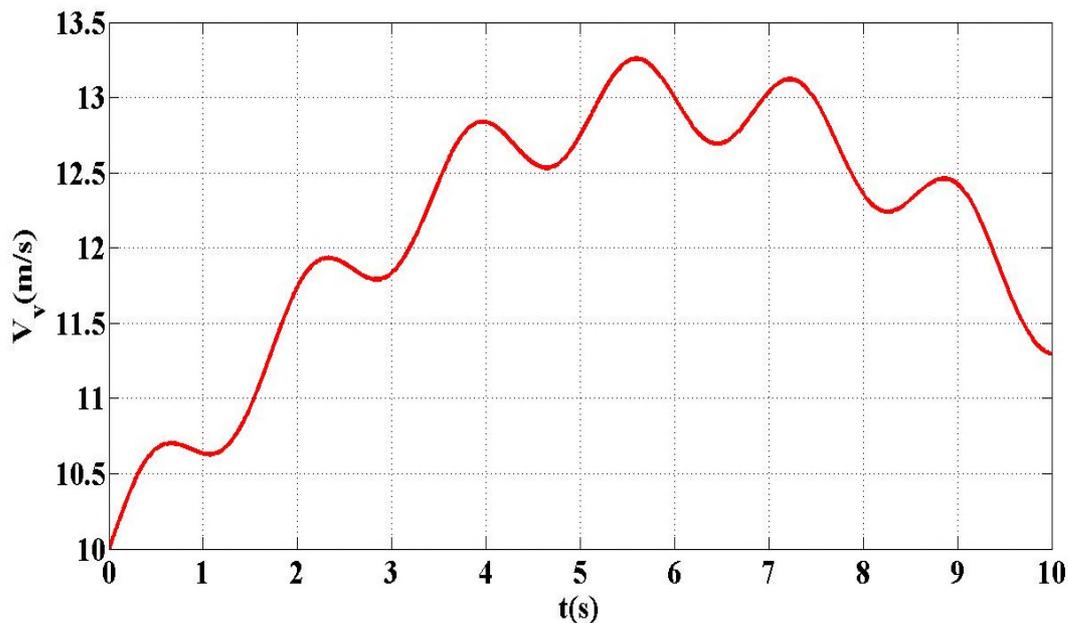


Figure III.8 Allure du profil de la vitesse du vent

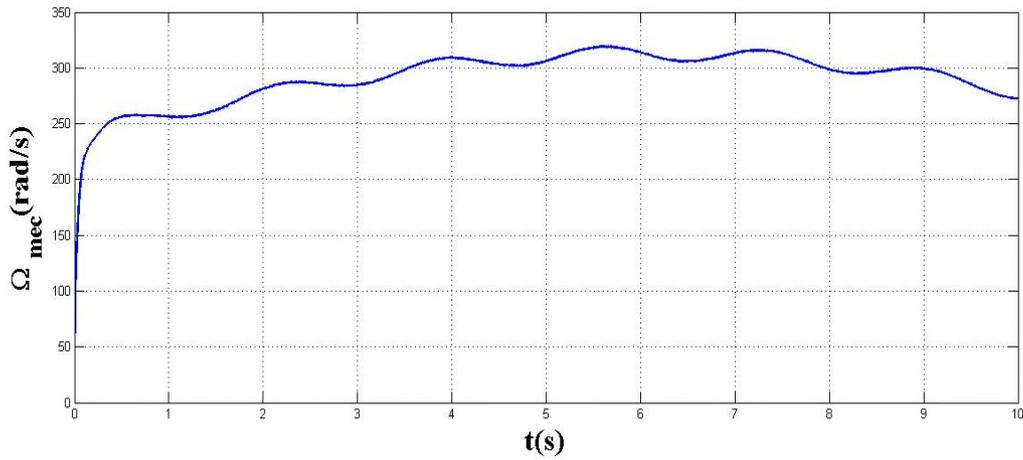


Figure III.9 Allure de la vitesse de la vitesse mécanique

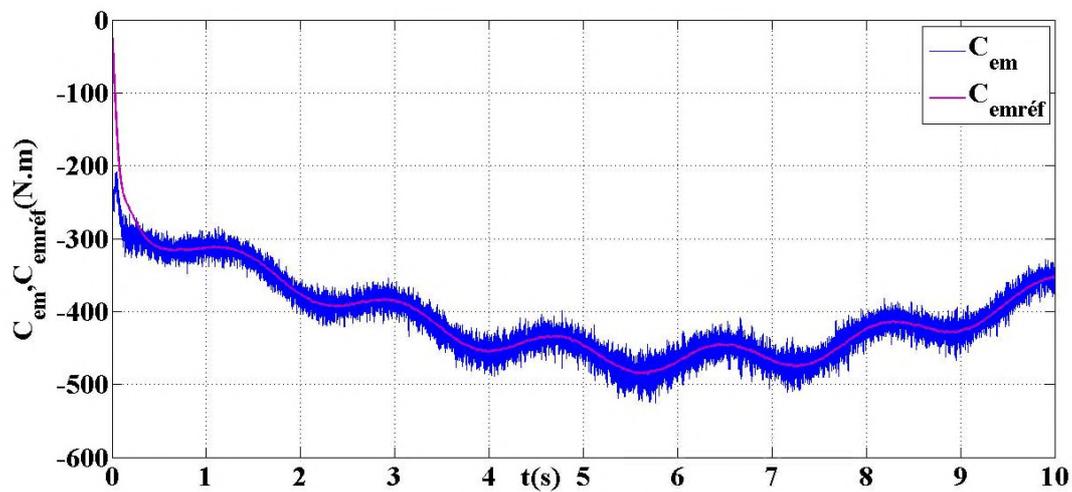


Figure III.10 Allures du couple électromagnétique et couple de référence.

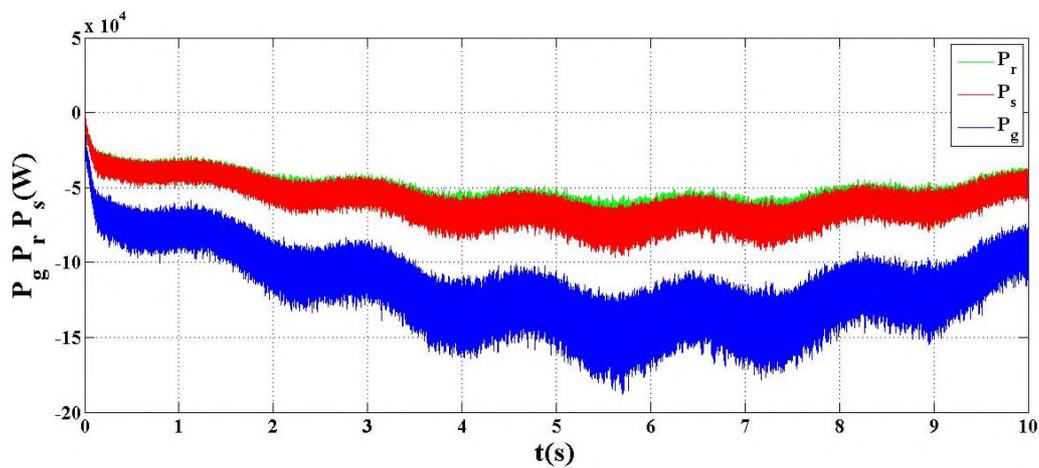


Figure (III.11) Allures des puissances de statorique, rotorique de la GADA

La figure (III.10), représente le couple électromagnétique de la GADA et il apparaît clairement qu'il suit sa référence issue de l'algorithme MPPT.

On remarque sur la figure (III-11) que la puissance générée par la GADA égale à la somme des puissances statoriques et rotoriques. Et la puissance de ce dernier est inférieur à la puissance générée par la turbine, cela est dû aux pertes dans les différents éléments de l'aérogénérateur.

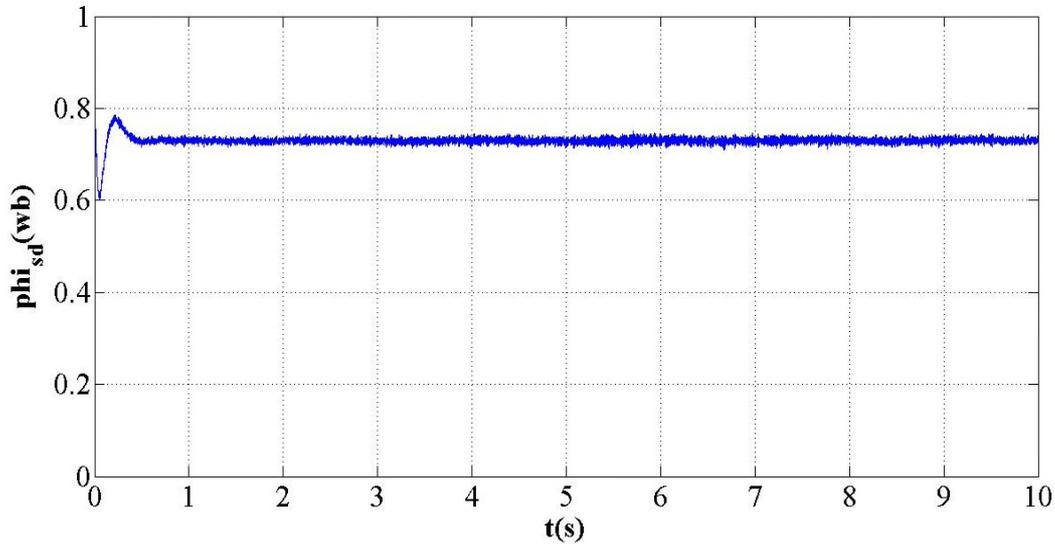


Figure III.12 allure du flux statorique d'axe direct

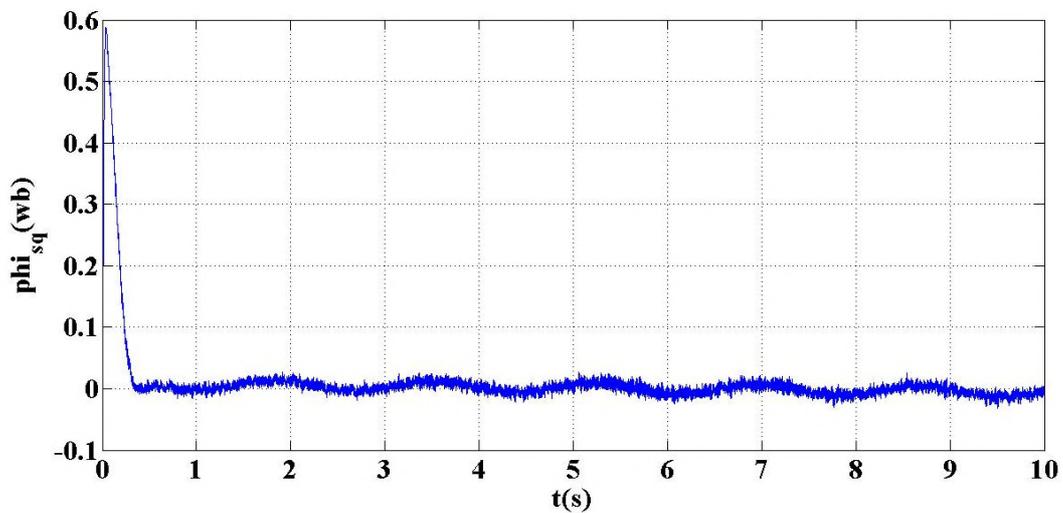


Figure III.13 Allure du flux statorique d'axe direct

Les figures (III.12 et III.13) représentent les allures des flux statoriques direct et quadrature. On peut constater que l'orientation du flux selon l'axe direct et le découplage de la machine sont réalisés et cela apparaît clairement sur la valeur de flux statorique d'axe direct qui est nulle.

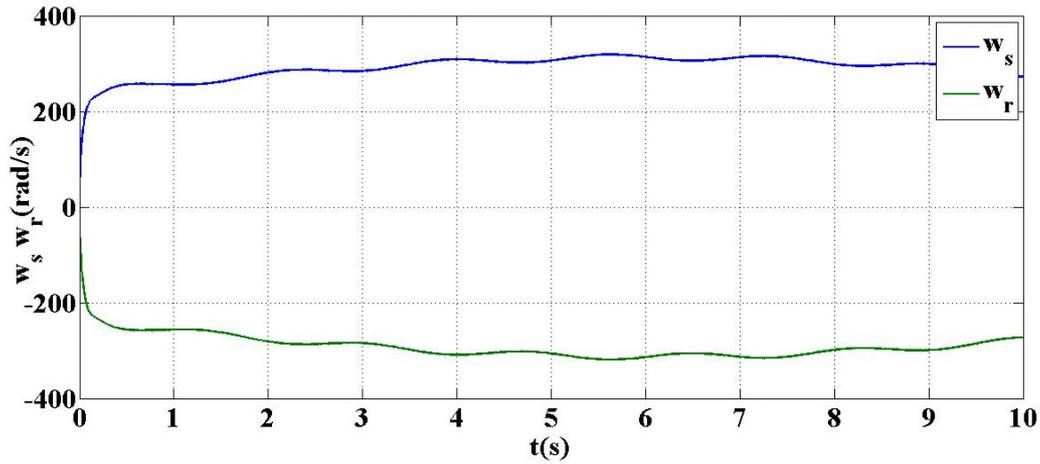


Figure III.14. Allures des pulsations statoriques et rotoriques

La répartition des pulsations statoriques et rotoriques figure (III-14), nous a conduit à la répartition des puissances active de la GADA, telles que pour des pulsations statoriques et rotoriques nominales, le rotor et le stator fournissent une puissance égale à la puissance nominale de la GADA, donc leurs somme égale à deux fois la puissance nominale. La stratégie de commande adoptée à permet d'extraire le maximum de puissance sur une large plage de variation de vitesse, avec limitation de vitesse de rotation et de la puissance produite pour des fortes vitesses du vent.

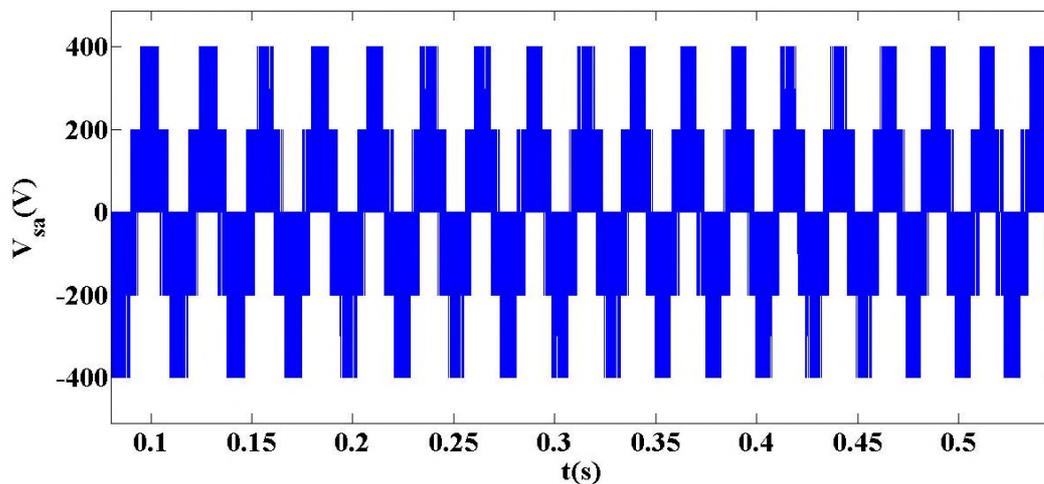


Figure III.15 Zoom de l'allure de la tension de l'onduleur deux niveaux

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposés le principe de la commande vectorielle à flux statorique orienté de la machine asynchrone double alimentée au stator et au rotor via deux convertisseurs d'électronique de puissance à commande MLI visant à contrôler de manière indépendante le flux par rapport au couple, ainsi qu'une stratégie de commande MPPT à été appliqué à l'éolienne permettant d'extraire le maximum de puissance.

Une simulation de tout le système a été également faite à l'aide de logiciel MATLAB/SIMULINK, les résultats obtenus pour un profil du vent variable ont montré un bon suivi de consigne qu'on a appliqué.

Les résultats obtenus de la vitesse de rotation de la MADA et la puissance, extraite tel que pour une vitesse de rotation égale à deux fois la vitesse nominale, la puissance extraite égale aussi à deux fois la puissance nominale (150 kW), sont pratiquement bon, cela grâce à la loi de répartition des pulsations appliquée.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail effectué dans ce mémoire porte sur l'étude et contrôle d'une éolienne basée sur la machine asynchrone à double alimentation totalement interfacée, alimentée par deux convertisseurs à commande MLI l'un au stator et l'autre au rotor.

L'objectif principal de ce travail, est de trouver une meilleure stratégie de commande afin d'élargir la plage de variation de la vitesse de la MADA.

Dans le premier chapitre, nous avons présentés une brève description des systèmes éoliens, et les différentes machines utilisées, plus particulièrement la machine asynchrone à double alimentation.

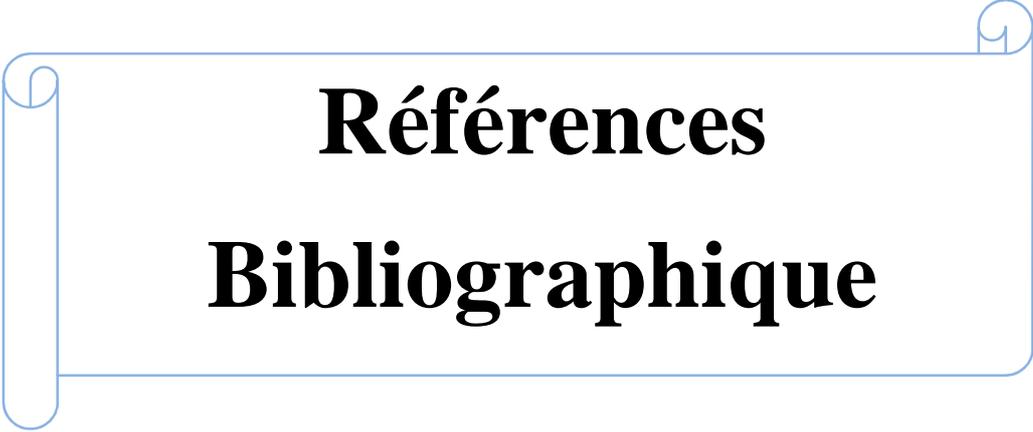
Dans le deuxième, nous avons abordés la modélisation des différents constituants du système que nous avons étudié, à savoir, la turbine, la MADA, le convertisseur statique et le bus continu.

La commande vectorielle avec une orientation de flux statorique avec la loi de répartition et la technique d'extraction de maximum de puissance (MPPT) ont été dévoilées dans le troisième chapitre.

La stratégie de commande appliquée, et la loi de répartition de pulsations associée, nous permet de faire fonctionner la génératrice jusqu'à deux fois sa vitesse nominale, ainsi la commande MPPT associée à l'éolienne permet d'extraire le maximum de puissance sur une large plage de variation de vitesse et cela afin de garder le fonctionnement avec une puissance égale deux fois la puissance nominale(150kW).

Enfin ce travail est un prolongement des études réalisés sur la MADA et a besoin d'une continuation dans plusieurs directions. D'après les résultats obtenus, il serait intéressant d'envisager les perspectives suivantes :

- Etudier la MADA en appliquant d'autres stratégies de commande non linéaires, tel que la commande en mode glissant.
- Utilisation de la configuration proposée pour alimenter un système autonome équipée d'un système de stockage d'énergie.



Références
Bibliographique

- [1] M. Lopez, « Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée », Thèse de Doctorat, Université Paris Sud 11, Déc 2008.
- [2] H. Camblong, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éoliennes dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de Doctorat, Ecole National Supérieur d'Arts et Métiers, Centre Bordeaux, France, 18 Déc 2003.
- [3] F. Abdoune, « Etude et contrôle des aérogénérateurs basés sur les machines asynchrones à rotor bobiné », Mémoire de Magister, Université de Bejaia, 2011.
- [4] T. Belhoul, « Etude et contrôle des aérogénérateurs à base des machines asynchrones double alimentées connectées à un réseau électrique autonome », Mémoire de Magister, Université de Bejaia, 2013.
- [5] L. Moreau, « Modélisation, Conception et commande de génératrices à réluctance variable basse vitesse », Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 2005.
- [6] <https://energie-eolienne.jimdo.com>
- [7] R. Babouri, « Amélioration des performances des convertisseurs électromécaniques basés sur les machines asynchrones doublement alimentées », Thèse de Doctorat, Université de Bejaia, 2016.
- [8] Y. Mokhtari, « Etude de la machine asynchrone double alimentée (MADA) dédiée à l'éolien », Mémoire de Magister, Université de Bejaia, 2009.
- [9] M. Smaili, « Modélisation et commande d'un aérogénérateur à machine asynchrone double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération », Mémoire de la maîtrise en ingénierie, Université de Québec en Abitibi-Témiscaminque, Aout 2013.
- [10] T. Ghennam, « 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 », Thèse de Doctorat, De l'école centrale de Lille et l'école militaire polytechnique d'Alger, Soutenu le 29/09/2011.
- [11] N. Laverdure, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles et insulaires », Thèse de Doctorat, Institut National polytechnique de Grenoble, Déc 2005.
- [12] F. Poitiers, « Etude et commande des génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne –Machine asynchrone à cage autonome- Machine asynchrone à double alimentation relié au réseau », Thèse de Doctorat, de l'Université de Nantes, 2003.
- [13] B. Hamane, « Commande robuste d'un aérogénérateur à base de machine asynchrone à double alimentation pilotée par un convertisseur matriciel », Thèse de Doctorat, Université de Québec à Trois-Rivières, Mai 2018.

[14] K. Idjdarene, « Contribution à l'étude et la commande de génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonomes », Thèse de Doctorat, Université de Bejaia, 2010.

[15] R. Aubrée, « Stratégies de commande sans capteurs et de gestion de l'énergie pour les aérogénérateurs de petite puissance », Thèse de Doctorat, Université de Nantes, Angers, Novembre 2014.

[16] A. Boyette, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de Doctorat, Université Henri-Poincaré, Nancy, Décembre 2006.

[17] H. Nfaoui, « Caractéristiques du gisement éolien marocain et optimisation d'un système aérogénérateur/groupe électrogène pour l'électrification des villages isolés », Thèse de Doctorat, Université Mohammed V Agdal, Rabat, Maroc, Déc 2004.

[18] A. Mirecki, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de Doctorat, de L'institut National Polytechnique de Toulouse, Avril 2005.

[19] S. Chikha, « Contribution à l'optimisation de la commande prédictive des convertisseurs statiques intégrés dans les chaînes de conversions d'énergie éolienne », Thèse de Doctorat, Université Larbi Ben Mhidi- Oum El Bouaghi, 2017.

[20] I. Attoui, « Contribution au diagnostic de défauts d'une génératrice asynchrone dans une chaîne de conversion d'énergie éolienne », Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar de Annaba, 2015.

[21] D. Guérette, « Asservissement d'une éolienne à vitesse variable et à pas fixe dans le cadre d'une système de jumelage éolien-diesel à haute pénétration », Mémoire pour Maîtrise en ingénierie, Université de Québec à Rimouski, Novembre 2010.

[22] S. Taraft, « Etude du stockage inertiel d'énergie dans une chaîne de conversion éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation », Mémoire de Magister, Université de Bejaia, 2008.

[23] F. Kendouli, « Centrale éolienne et qualité de l'énergie électrique », Thèse de Doctorat, Université de Mentouri, Constantine, 2012.

[24] A. Abdelli, « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive », Thèse de Doctorat, Institut National polytechnique de Toulouse, Octobre 2007.

- [25] H. Bennani, « Machine asynchrone à double alimentation, les lois de commande en régime permanent », Mémoire d'ingénieur, Université de Laval, Québec, 2011.
- [26] Y. Djeriri, « Commande direct du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle », Thèse de Doctorat, Université Djillali Abes de Sidi-Bel-Abbès, 2015
- [27] G. Salloum, « Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007.
- [28] S.El.Aimani, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2004.
- [29] A. Gaillard, « Système éolien basé sur une MADA, Contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, Avril 2010.
- [30] K.Bedoud, R.Lakel, M. Ali-Rachedi, S. Lekhchine, T. Bahi, « Modélisation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation », 21^{ème} Congrès Français de Mécanique, Bordeaux, France, 26 au 30 Août 2013.
- [31] N. Abu-Tabak, « Stabilité dynamique des systèmes électriques multi machines, Commande, Observation et Simulation », Thèse de Doctorat, de L'école Centrale de Lyon, 2008.
- [32] A. Boukhriiss, « Commande robuste par ADRC de l'éolienne à base de la machine asynchrone double alimentation », Thèse de Doctorat, Université de Mohammed-V de Rabat, Maroc, Déc 2015.
- [33] K. Belmokhtar, « Contribution à l'intégration d'un Parc éolien à un réseau électrique autonome avec stockage d'énergie sous forme d'hydrogène », Thèse de Doctorat, Université du Québec à Trois Rivières , Avril 2015.
- [34] L. Baghli, « Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue des réseaux de neurones, et des algorithmes génétiques », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy, 1999.
- [35] V.G. Agelidis, H. c. Goh, « low Distortion variable level PWM Technique », IEEE Proc-électro. Power appl Vol 145, N°2 ; pp .73-78 , March 1998.
- [36] C .Gombert, « Simulation temps-réel de disposition d'électronique de puissance dédiés aux réseaux d'énergie électrique », thèse de Doctorat, institut national polytechnique de Grenoble, 2005.

[37] K. BEDOUD^{a, b}, R. LAKEL^b, M. ALI-RACHED^c, S. LEKHCHINE^d, T.BAHID

« Modélisation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne Basée sur une machine asynchrone à double alimentation » 21^{ème} Congrès Français de Mécanique Bordeaux, 26 au 30 août 2013 »

a. Unité de Recherche en Technologies Industrielles URTI/CSC, BP1037, Annaba, Algérie.

b. Laboratoire d'Automatique et Signaux-Annaba, Université Badji Mokhtar, Annaba.

c. Ecole Préparatoire aux Sciences et Techniques -Annaba-

d. Département d'électrotechnique, Université Badji Mokhtar. Annaba



Annexes

Annexe A : Paramètres des systèmes étudiés (MADA ET Turbine)

Paramètres de la MADA :

La puissance nominale	(P_n)	75 KW
La tension statorique nominale	(U_{sn})	380 V
La tension rotorique nominale	(U_{rn})	380 V
La résistance statorique	(R_s)	0.03552 Ω
La résistance rotorique	(R_r)	0.02092 Ω
L'inductance statorique	(L_s)	0.01545 H
L'inductance rotorique	(L_r)	0.01545 H
L'inductance mutuelle	(M)	0.0151 H
Moment d'inertie	(J)	0.25 kg. m ²
Frottement	(F)	0.0394 N.m/rad.s ⁻¹
Nombre de paires de pôles	(P)	2

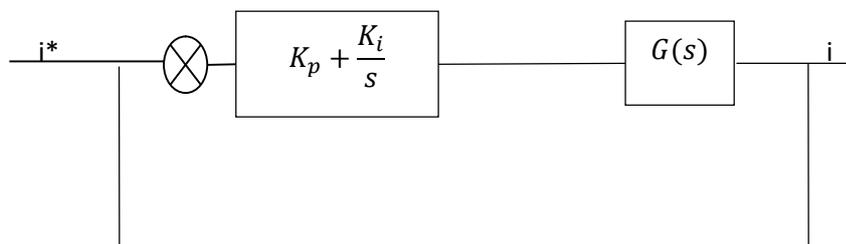
Paramètres de la Turbine :

La puissance nominale	(P_n)	150 kW
Rayon de la turbine	(R_t)	8 m
Moment d'inertie de la turbine	(J_t)	100 kg.m ²
Coefficient de puissance	(C_{pmax})	0.44
la vitesse spécifique	(λ_{opt})	8.5
La densité d'air	(ρ_{air})	1.225 kg/m

Annexe B : Synthèse des régulateur PI des courant de la MADA

La fonction de transfert des courants de la MADA est de la forme suivante :

$$G(s) = \frac{G}{1 + \tau s} \quad (I - 1)$$



Où : G est le gain statique et τ est la constante du temps statprique ou rotorique de la MADA. La régulation des courants de la MADA est assurée par des régulateurs PI avec compensation des pôles.

La fonction de transfert en boucle ouverte s'écrit :

$$F_{BO} = \left(K_P + \frac{K_i}{s} \right) \left(\frac{G}{1 + \tau s} \right) \quad (I - 2)$$

$$F_{BO} = G \frac{K_P + \frac{K_i}{s}}{1 + \tau_s} = \frac{K_P s + K_i}{s(1 + \tau_s)} = G K_i \frac{1 + \frac{K_P s}{K_i}}{s(1 + \tau_s)} \quad (I - 3)$$

Afin d'éliminer le zéro dans la fonction de transfert en boucle ouverte, nous introduisant l'égalité suivante :

$$\tau = \frac{K_P}{K_i} \quad (I - 4)$$

Ainsi :

$$F_{BO} = \frac{G K_i}{s} \quad (I - 6)$$

La fonction de transfert en boucle fermée s'écrit :

$$F_{BO} = \frac{G K_i}{G K_i + s} \quad (I - 7)$$

Le temps de réponse t_r du système boucle pour atteindre 95% de la consigne est donnée par :

$$t_r = 3 \cdot \frac{1}{G K_i} \quad (I - 8)$$

A partir des expressions et , on déduit les gains de correcteur en fonction des paramètres de la MADA et du temps de repense choisi :

$$K_i = 3 \cdot \frac{1}{G t_r}$$

$$K_P = 3 \cdot \frac{\tau}{G t_r}$$