

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université A. MIRA – BEJAIA
Faculté de Technologie
Département de Génie électrique



Mémoire de Fin de Cycle

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electrotechnique

Option : Commande électrique

Thème

Commande d'un aérogénérateur a base d'une
GADA par DPC

Présenté par :

Réaliser Par :

ALEM Yacine

AZOUZI Nidal

Encadreur par :

M^r TAMALOUZT S

M^r SAHRI Y

Année universitaire 2018/2019

Remerciements

*Nous tenons à remercier tout premièrement le bon Dieu
Tout Puissant pour la volonté, la santé et le courage
pour accomplir ce modeste travail.*

*Nous exprimons notre respect et notre gratitude à
M^r Tamalouzt et M^r Sahri, pour avoir accepté de
nous encadrer et pour avoir suivi notre travail avec
une extrême bienveillance.*

*Sans oublier de remercier tous les membres du jury
pour leur évaluation. Nous tenons à remercier
également tous ceux qui ont attribué de près ou de loin
à la réalisation de ce travail.*

Dédicace

C'est avec un grand plaisir que je dédie ce modeste travail à celle qui a été toujours à mes cotés et à la personne la plus chère au monde à toi ma mère

« Que dieu tu gardes et tu accordes longue vie »

A la mémoire de celui qui a combattu toute sa vie pour procurer tout ce dont j'avais besoin, à toi mon père.

A mes très chers frères (Youcef, Yamine, Abderrahmane).

*A Ma chère belle sœur et mes deux chère neveux
(abedenour et abderraouf)*

A tout mes amis et spécialement Ryad et Farines

*A tous mes amis de ma section (Amina, Rachida, Nora, hicham
fafa, kiki, Mariem , ...)*

A toutes la famille Alem

A mon cher binôme (Nidal)

*A Tous ceux qui nous ont prêté main forte pour la
réalisation de ce travail*

A. Yacine

Dédicace

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le

Respect, la reconnaissance, c'est tout simplement que : Je dédie ce travail :

A Mes chers parents :

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail et le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation le long de ces années.

Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.

A mes très chers frères et sœurs :

MONIA, RADOUANE, IBTESSAM, HIND, RAOUF, et SEIF EDINE

Pour leurs soutient moral qui m'a permis de réussir mes études. Ce travail soit témoignage de ma reconnaissance et de mon amour sincère et fidèle.

Et à mes fidèle amis et mes collègues :

MOUMEN, RACHIDA, ACFRAE, MOHAMMED, BADIO et ABDE ABRAHMANE

*Et spécialement à ma cher copine **LJAM***

Qui n'ont cessé pas de m'encourager et me conseillée.

Ils vont trouver ici le témoignage d'une fidélité et d'une amitié infinie.

*A mon binôme **YACINE** et*

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.

NIDAL

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I : Avantages et inconvénients des différentes machines	19
Tableau II : Table de sélection des vecteurs optimaux (puissance active et réactive).	43

Liste des figures

Figure 1 : Capacité (puissance en GW) éolienne installée de 2002 à 2017 dans le monde	4
Figure 2 : Conversion de l'énergie cinétique du vent	5
Figure 3 : Constitution d'une éolienne.	6
Figure 4 : Principe de la conversion d'énergie d'un aérogénérateur	10
Figure 5 : Eoliennes à axe vertical	11
Figure 6 : Eoliennes à axe horizontal	11
Figure 7 : Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donnée	12
Figure 8 : MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée	16
Figure 9 : MADA - Structure de Kramer	17
Figure 10 : MADA, structure de Scherbius avec un cycloconvertisseur	17
Figure 11 : Eolienne à base de MADA raccordée au réseau	18
Figure 12 : Schéma de la turbine éolienne	23
Figure 13 : la variation de ce coefficient en fonction du ratio de vitesse et de l'angle de l'orientation des pales	24
Figure 14 : Modèle mécaniques simplifié du multiplicateur	24
Figure 15 : Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne	26
Figure 16 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse	28
Figure 17 : Les quatre zones de fonctionnement de la turbine	28
Figure 18 : Schéma bloc de système d'orientation des pales	30
Figure 19 : Représentation simplifié de la MADA	31
Figure 20 : Passage du triphasé au biphasé	33
Figure 21 : Schéma d'un onduleur de tension triphasé	36
Figure 22 : Configuration de la DPC de la MADA	39
Figure 23 : Décomposition du vecteur flux rotorique dans le plan (α - β)	41
Figure 24 : Compérateurs à hystérésis : (a) puissance active, (b) puissance réactive	41
Figure 25 : présentation des vecteurs de commutation.	42
Figure 26 : Allure de la de la vitesse du vent	44
Figure 27 : Allure de la puissance active statorique	44
Figure 28 : Allure de puissance réactive statorique Q_s réf=0	44
Figure 29 : Allure de puissance réactive statorique Q_s réf=-1000	45
Figure 30 : Allure de puissance réactive statorique Q_s réf= 1000	45
Figure 31 : Allure de puissance réactive statorique Q_s réf=-3000	45
Figure 32 : Allure des courants statoriques	46

Liste des figures

Figure 33 : Schéma de la structure générale du commande directe du couple..	48
Figure 34 : Profil du vent.	49
Figure 35 : vitesse turbine	49
Figure 36 : Allure du couple électromagnétique.	49
Figure 37 : Trajectoire du flux rotorique estimé	50
Figure 38 : Evolution du flux rotorique estimé par rapport à sa référence.	50
Figure 39 : Allure de la puissance active statorique DPC	51
Figure 40 : Allure de la puissance active statorique DTC	51
Figure 41 : Allure de la puissance réactive statorique DPC	52
Figure 42 : Allure de la puissance réactive statorique DTC	52
Figure 43 : Allure des courants statoriques DPC	53
Figure 44 : Allure des courants statoriques DTC	53

Nomenclature

Nomenclature

1. La turbine

- P_v : La puissance fournie par le vent (W).
 P_t : La puissance de la turbine éolienne (W).
 ρ : Masse volumique de l'air (kg/m^3).
 S_t : La surface balayée par la turbine éolienne (m^2).
 R : Rayon de la turbine éolienne (m).
 V_v : La vitesse du vent (m/s).
 Ω_t : La vitesse de la turbine éolienne (rad/s).
 C_p : Le coefficient de puissance.
 λ : Le rapport de la vitesse réduite au bout des pales.
 λ_{opt} : Le rapport optimal de la vitesse réduite au bout des pales.
 C_t : Couple de la turbine éolienne (N.m).
 β : L'angle de calage des pales (rad).

2. La machine

Grandeurs statoriques

Machine réelle

- V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : Tensions d'alimentation des enroulements statorique.
 i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} : Courants statorique.
 R_s : Résistance d'une phase statorique.
 L_s : Inductance propre d'une phase statorique (H).
 ω_s : Pulsation du champ statorique (rad/s).
 $[V_s]$: Matrice des tensions statorique (V).
 $[i_s]$: Matrice des courants statoriques.
 $[\Phi_s]$: Matrice des flux statoriques.
 $[R_s]$: Matrice des résistances statoriques.
 $[L_{ss}]$: Matrice d'inductance statorique.

Machine modélisée

- V_{sd}, V_{sq} : Tensions statoriques dans le repère de Park (d, q) (V).
 i_{sd}, i_{sq} : Courants statoriques dans le repère de Park (d, q) (A).
 Φ_{sd}, Φ_{sq} : Flux statoriques dans le repère de Park (d, q) (Wb).

Nomenclature

θ_s : Angle électrique entre la première phase statorique de la machine et l'axe (d) du repère de Park (rad).

Grandeurs rotoriques

Machine réelle

V_{ra}, V_{rb}, V_{rc} : Tensions d'alimentation des enroulements rotoriques (a, b, c) (V).

I_{ra}, I_{rb}, I_{rc} : Courants rotoriques(A).

R_r : Résistance d'une phase rotorique (Ohm).

L_r : Inductance propre d'une phase rotorique (H).

ω_r : Pulsation du champ rotorique (rad/s).

$[V_r]$: Matrice des tensions rotorique (V).

$[i_r]$: Matrice des courants rotoriques.

$[\Phi_r]$: Matrice des flux rotoriques.

$[R_r]$: Matrice des résistances rotoriques.

$[L_{rr}]$: Matrice d'inductance rotorique.

Machine modélisée

V_{rd}, V_{rq} : Tensions rotoriques dans le repère de Park (d, q) (V).

i_{rd}, i_{rq} : Courants rotoriques dans le repère de Park (d, q) (A).

Φ_{rd}, Φ_{rq} : Flux rotoriques dans le repère de Park (d, q) (Wb).

θ_r : Angle électrique entre la première phase rotorique de la machine et l'axe (d) du repère de Park (rad).

Grandeurs communes stator/rotor

Machine réelle

L_m : Inductance mutuelle entre stator et rotor (H).

ω : Vitesse électrique de la machine (rad/s).

P : Nombre de paires de pôles de la machine.

θ : Angle électrique de position de la machine (rad).

g : Glissement de la machine.

$[M_{sr}]$: Matrice d'inductance mutuelle.

Machine modélisée

L_m : Inductance mutuelle entre stator et rotor (H).

Grandeurs mécaniques

J : Inertie totale ramenée à l'arbre de moteur.

f_v : Coefficient de frottement visqueux.

Nomenclature

Ω_{mec} : Vitesse mécanique de la génératrice (rad/s).

C_{visq} : Couple de frottements visqueux.

G : Gain du multiplicateur.

3. Les convertisseurs

L'onduleur

V_a, V_b, V_c : Tensions à la sortie de l'onduleur (V).

$i_{ach}, i_{bch}, i_{cch}$: Courants de sortie (A).

S_a, S_b, S_c : Fonctions logiques correspondantes à l'état de l'interrupteur.

4. Convention et abréviations

MAS : Machine asynchrone.

MADA : Machines asynchrones à double alimentation.

GADA : Génératrice asynchrone à double alimentation.

AC : Réseau à courant alternatif.

DC : Réseau à courant continu.

DTC : Commande direct du couple.

DPC : Commande direct de puissance.

Liste des tableaux

Liste des figures

Nomenclature

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I : Etat de l'art de aérogénérateurs	
I.1. Introduction	3
I.2. Différentes sources de production d'énergie électrique	3
I.3. Chiffres clés de l'éolien dans le monde	3
I.4. Définition de l'énergie éolienne	5
I.4.1. Constitutions d'une éolienne.....	5
I.5. Production d'énergie éolienne	6
I.5.1. Production reliés au réseau (parcs éoliens).....	6
I.5.2. Production décentralisée.....	6
I.6. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	7
I.6.1. Avantages.....	7
I.6.2. Inconvénients.....	8
I.7. Application des éoliennes	8
I.7.1. Systèmes isolés.....	8
I.7.2. Systèmes hybrides.....	9
I.7.3. Systèmes liés au réseau.....	9
I.8. Principe de fonctionnement d'une éolienne	9
I.9. Accouplement mécanique	10
I.9.1. Eolienne à attaque directe.....	10
I.9.2. Eolienne à attaque indirecte.....	10
I.10. Différents types d'aérogénérateurs	10
I.10.1. Aérogénérateurs à axe vertical.....	10
I.10.2. Aérogénérateurs à axe horizontal.....	11
I.11. Mode de fonctionnement	11
I.11.1. Fonctionnement à vitesse fixe.....	11
I.11.2. Fonctionnement à vitesse variable.....	12
I.11.2.1. Intérêt de la vitesse variable.....	12

I.12. Etude comparative des machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne	12
I.12.1. Machine synchrone.....	13
I.12.1.1 La machine synchrone à aimant permanent (MSAP).....	13
I.12.1.2. Machine synchrone à rotor bobiné (MSRB).....	13
I.12.1.3. Machines à reluctance variable (MRV).....	14
I.12.2. Machine asynchrone.....	14
I.12.2.1. Machine asynchrone à cage d'écureuil.....	15
I.12.2.2. Machine asynchrone à double alimentation.....	15
I.12.2.2.a. Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée.....	16
I.12.2.2.b. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer.....	16
I.12.2.2.c. Machine asynchrone à double alimentation –structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.....	17
I.12.2.2.d. Machine asynchrone à double alimentation –structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.....	18
I.13. Différents modes de fonctionnement de la MADA	18
I.13.1. Fonctionnement en moteur hypo-synchrone $g > 0$	18
I.13.2. Fonctionnement en moteur hyper-synchrone $g < 0$	19
I.13.3 : Fonctionnement en génératrice hypo-synchrone $g > 0$	19
I.13.4. Fonctionnement en génératrice hyper-synchrone $g < 0$	19
I.14. Avantages et inconvénients de différentes machines utilisées dans le système éolien	19
I.15. Pourquoi la MADA ?	20
I.16. Domaines d'application de la MADA	20
I.17. Conclusion	21

Chapitre II : Modalisation d'un system éolien

II.1. Introduction	22
II.2. Modélisation du système éolien	22
II.2.1. Partie mécanique.....	22
II.3. Techniques d'extraction du maximum de la puissance	26
II.3.1. Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse.....	26

II.3.2. Différentes phases de fonctionnement.....	28
II.3.3. Système d'orientation des pales.....	29
II.4. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.....	30
II.4.1. Hypothèses simplificatrices.....	30
II.4.2 Modèle mathématique de la MADA dans le repère triphasé.....	31
II.4.3. Modèle de la MADA dans le plan (d q).....	33
II.5. Modélisation de l'onduleur de tension MLI.....	35
II.6. Conclusion.....	37

Chapitre III : Commande direct de puissance (DPC) d'une éolienne à base d'une MADA

III.1. Introduction.....	38
III.2. Structure principale de la DPC appliqué à la MADA.....	38
III.2.1 Avantages de la commande DPC.....	39
III.3. Application de la DPC à MADA.....	39
III.3.1. Estimation de la puissance active et réactive.....	39
III.3.2. Choix des comparateurs à hystérésis.....	41
III.3.3. Elaboration de la table de commutation.....	42
III.4. Interprétation des résultats.....	43
III.4.1. Fonctionnement à vitesse du vent variable.....	43
III.5. Conclusion.....	46

Chapitre IV : Comparaison entre la (DPC) et la (DTC)

IV.1. Introduction.....	47
IV.2. Caractéristiques générales d'une commande directe de couple.....	47
IV.3. Avantages et les inconvénients de la DTC.....	47
IV.3.1. Avantages.....	47
IV.3.2. Inconvénients.....	48
IV.4. Principe de la commande DTC.....	48
IV.5. Simulation et interprétation des résultats.....	49

IV.6. Comparaison entre les deux commande DPC et DTC	51
IV.6.1. Comparaison dés puissance active et réactive.....	51
IV.6.2. Comparaison des courants statorique.....	53

IV.7. Conclusion	53
-------------------------------	----

Conclusion générale	54
----------------------------------	----

Références bibliographiques

Introduction générale

Introduction Générale

L'électricité est devenue de plus en plus primordiale pour l'humanité. En effet, l'accès à l'électricité, est la garantie de meilleures conditions de vie (hygiène, santé, éducation... etc.) et un facteur essentiel pour un développement économique. L'industrialisation très forte des dernières décennies et la prolifération des appareils domestiques électriques (chauffage, climatisation, lavage, médicale, informatique, ...etc.) ont mené à des besoins planétaires immenses en énergie électrique. Aujourd'hui, plus de 2 milliards d'êtres humains n'ont pas l'accès à l'électricité pour cause d'économie fragile, d'infrastructures lourdes et coûteuses, de zones difficiles d'accès et d'habitat dispersé. Face à cela et avec la diminution du stock mondial en hydrocarbures, et loin de l'utilisation des énergies fossiles polluantes (pétrole, gaz et charbon) de plus en plus envahissantes et destructives pour l'environnement, plusieurs pays se sont tournés vers les énergies renouvelables. En effet, un véritable challenge mondial est pris au sérieux aujourd'hui, aussi bien sur la politique de réduction des émissions de gaz à effet de serre (principalement le CO₂), en les ramenant à leur niveau de 1990, que sur celui de l'exploitation des ressources d'énergie renouvelables. Ceci a été recommandé à la 3ème Conférence des Parties de la Convention – Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques qui s'est tenue à Kyoto (Japon) en décembre 1997 (**ulg.ac.be, 2018**).

La demande énergétique mondiale est en constante augmentation, l'instabilité et l'incertitude du prix des énergies fossiles et une conscience environnementale renforcée durant ces dernières années ont renouvelé l'intérêt du développement des énergies renouvelables. Parmi elles, l'énergie éolienne détient une situation privilégiée grâce à son progrès technologique et à ses coûts associés comparativement faibles (**Hamecha, 2013**).

L'éolienne à machine asynchrone à double alimentation (MADA) est très populaire puisqu'elle bénéficie de certains avantages par rapport à tous les autres types à vitesse variable. En effet, le convertisseur d'énergie utilisé afin de redresser - onduler les courants alternatifs du rotor a une puissance nominale fractionnaire de celle du générateur. Ceci implique moins de pertes par commutations, un coût de production du convertisseur moins élevé et une réduction de la taille des filtres passifs impliquant ainsi une réduction des coûts et des pertes additionnelles. Il existe déjà plusieurs techniques de commande de la MADA dans la littérature. Malheureusement, elles sont complexes et dépendent largement des paramètres (ou d'observateurs des paramètres) de la machine (**MJABBER, 2013**).

Introduction générale

Notre mémoire est dédié à l'étude d'une technique de commande de la machine asynchrone à double alimentation en conversion d'énergie éolienne. Il s'agit d'une commande directe en puissance (DPC) basée sur la table de commutation.

Le travail est divisé en trois parties. Dans la première, on donne tout d'abord quelques notions sur les éoliennes ; à savoir les différents types, leurs compositions, leurs avantages et inconvénients. Puis on représente l'état d'art la conversion électromécanique ou on cite les différentes machines génératrices utilisées pour exploiter l'énergie éolienne.

Dans le deuxième chapitre on présente la modélisation des différentes parties de l'éolienne ; turbine, le multiplicateur de vitesse, la génératrice et l'électronique de puissance associée.

Dans le troisième chapitre, nous abordons le sujet de la commande directe de puissance (Direct Power Control ou DPC) et son application à la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans le système éolien. Le système global a été simulé moyennant le logiciel MATLAB SIMULINK.

Dans le quatrième chapitre nous présentons la commande directe de couple (DTC) et son application sur la MADA, ensuite nous effectuons une comparaison la commande (DPC).

Ce mémoire est clôturé par une conclusion générale où l'objectif et la finalité du travail ainsi que les résultats obtenus sont mis en valeur. Après cela, des perspectives intéressantes ont été mentionnés vers la fin pour l'amélioration de ce travail.

I.1. Introduction

L'énergie éolienne est une des formes d'énergie reconvertible, elle est instantanément tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent.

Les petites éoliennes sont principalement utilisées dans le cadre d'installation électrique autonome, c'est-à-dire d'installations qui ne sont pas connectées sur le réseau de distribution d'électricité.

Ces systèmes autonomes conviennent particulièrement pour les aménagements dont l'exigence en électricité est réduite ou pour les sites dont la transition au réseau est irréalisable, difficile à réaliser ou trop cher (Belhoul, 2013).

I.2. Différentes sources de production d'énergie électrique

Les centrales électriques changent diverses sources d'énergie primaire en énergie électrique afin d'alimenter en électricité, au moyen du réseau électrique, les clients spécifiques ou industriels éloignés de la centrale (www.iern.net).

Il existe cinq principaux types de centrales électriques :

- les centrales à combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) informées centrales thermiques classiques ;
- les centrales nucléaires qui utilisent la transmutation nucléaire de matières fissiles pour créer 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 de la présente tâche s'inscrit dans l'étude d'une génératrice asynchrone, usée dans les systèmes éoliens.

I.3. Chiffres clés de l'éolien dans le monde

D'après le (Global Wind Energy Council), la capacité installée du parc éolien mondial a été multipliée par 3 entre fin 2007 et fin 2012 (Fig. 1).

En 2012, elle atteint près de 282 GW, l'équivalent de la puissance cumulée de près de 280 réacteurs nucléaires. Près de 44,7 GW de nouvelles capacités éoliennes ont été placés dans le monde. L'éolien a produit près de 460 TWh en 2011, soit approximativement 2,1% de la production totale d'électricité dans le monde (www.energies-renouvelables.eu, 2013). Les experts du conseil mondial de l'énergie éolienne (www.outils-solaires.com) prévoient le maintien d'une croissance soutenue de l'éolien qui va atteindre environ 3 000 TWh à l'horizon de 2020.

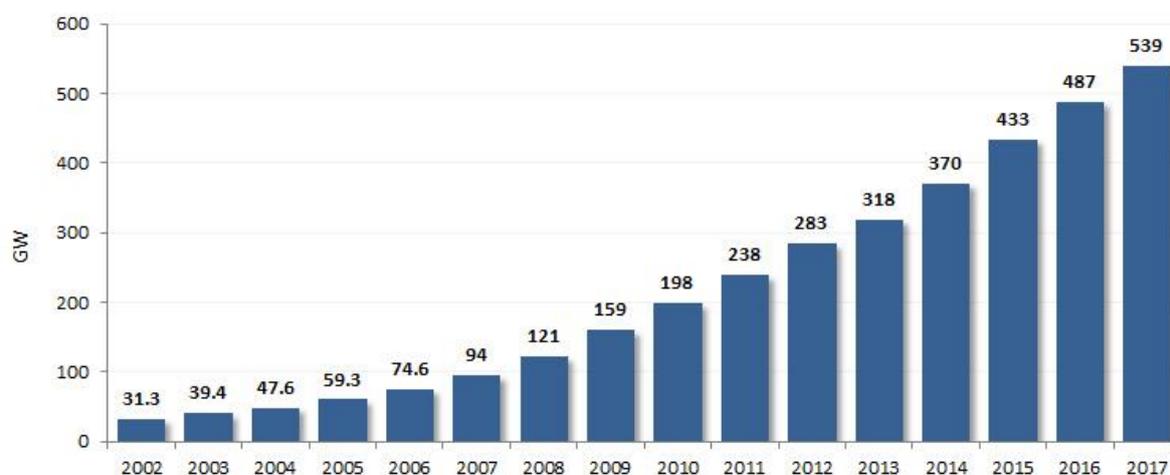


Figure 1 : Capacité (puissance en GW) éolienne installée de 2002 à 2017 dans le monde (www.eniscuola.net)

Actuellement, environ 75 pays dans le monde détiennent des installations éoliennes d'ordre commerciales, dont 22 dépassent déjà le seuil de 1 GW. De fait, les capacités installées croissent en permanence mais à des mesures différentes selon les pays, et classer les États-Unis par puissance installée donne un résultat mouvant d'une année à l'autre. Néanmoins, il ressort des chiffres actuels que les plus gros pays investisseurs sont la Chine et les pays occidentaux (Amérique et Europe). D'autres puissances économiques apparaissant, comme le Brésil, l'Inde et le Mexique commencent à investir brutalement dans l'énergie éolienne.

De nouvelles fermes éoliennes en mer (éolien offshore) sont envisagées partout dans le monde (www.windpower.org, 2013). Le Danemark est l'un des acteurs les plus importants, avec son laboratoire très renommé ; le pays produit environ 20 % de son électricité avec des éoliennes. Ces dernières produisent 2 % de la production de l'électricité dans le monde. La taille la plus rentable et la plus pratique pour les éoliennes actuellement commercialisées semble être

autour de 600 kW à 3 MW, groupées dans de grandes fermes éoliennes. Les nouvelles technologies en cours de développement cherchent à produire des systèmes beaucoup plus souples en termes de « puissance rentable ».

I.4. Définition de l'énergie éolienne

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

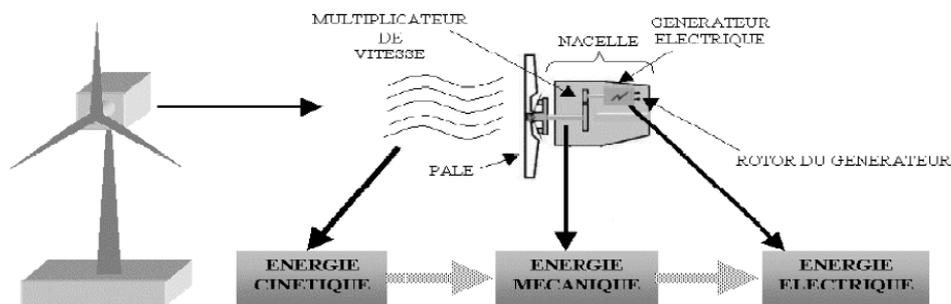


Figure 2 : Conversion de l'énergie cinétique du vent (Poitier, 2003).

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non abaissée, géographiquement diffusée, 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 (Martin, 1997).

I.4.1. Constitutions d'une éolienne

Un mât : permettant d'élever l'hélice à une altitude adéquate, où la vitesse du vent est plus élevée et ne rencontre pas autant d'obstacles qu'au niveau du sol.

Une hélice : de trois pales généralement, montée sur l'axe horizontal de l'éolienne

Une nacelle : montée au sommet du mât et constituée des composants essentiels à la conversion

Une cabine : située au pied de l'éolienne et qui permet de se connecter au réseau domestique dans le cas d'une utilisation individuelle.

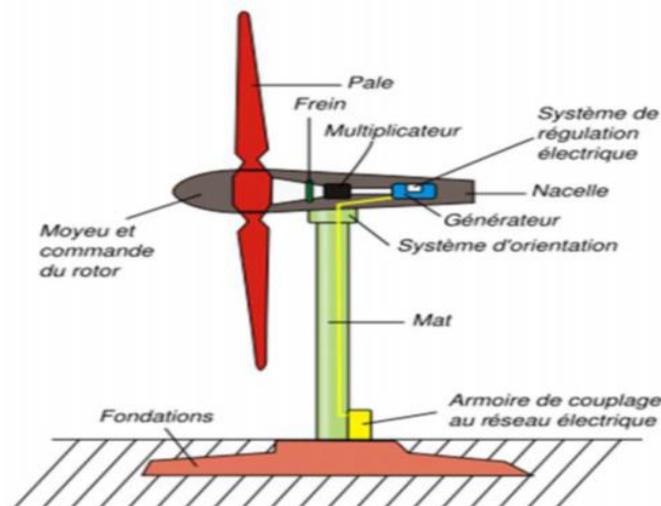


Figure 3 : Constitution d'une éolienne.

I.5. Production d'énergie éolienne

L'électricité produite par l'éolienne peut soit être instantanément consommée, soit stockée dans des accumulateurs ou injectée sur le réseau de distribution public (Claessens, 2012).

I.5.1. Production reliés au réseau (parcs éoliens)

Les éoliennes raccordées au réseau électrique sont le plus souvent regroupées dans un parc éolien d'environ 5 à 50 machines.

Le courant électrique doit avoir une fréquence de 50 Hz dans de nombreux pays à travers le monde. Une éolienne raccordée au réseau doit fournir cette fréquence, quelle que soit la vitesse du vent et cela se fait par la régulation d'orientation des pales. Mais il est également possible de faire fonctionner une éolienne à vitesse de rotation variable en utilisant un convertisseur de fréquence.

Dans ce cas d'installation raccordée au réseau, l'énergie électrique non consommée directement peut être réinjectée sur le réseau de distribution publique (Claessens, 2012).

I.5.2. Production décentralisée

L'énergie éolienne est aussi utilisée pour fournir de l'énergie à des sites isolés non raccordés au réseau (petite puissance), par exemple pour produire de l'électricité dans les îles, pour le pompage de l'eau dans des champs, ou encore pour alimenter en électricité des voiliers, des phares et des balises. Ces éoliennes de petite puissance sont dites appartenir au petit éolien, par opposition au grand éolien ou à l'éolien industriel.

Dans ce cas de production, l'énergie produite est directement consommée sur place ; son excédent est soit stocké dans des batteries, soit perdu.

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

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

I.6.1. Avantages

- L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement (**Poitier, 2003 ; Vidal,2004**), elle ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels;
 - L'énergie éolienne produit de l'électricité éolienne : sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux (pas de rejet dans le milieu aquatique, pas de pollution thermique), sans polluer les sols (ni suies, ni cendres).
 - Les autres activités agricoles et industrielles peuvent continuer autour d'un parc éolien.
 - C'est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier;
 - Les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires;
 - Un parc éolien prend peu de temps à construire, et son démantèlement garantit la remise en état du site original.
 - C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi, les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres.
 - C'est l'énergie la moins chère des énergies renouvelables après l'énergie hydraulique;
- Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà(**Vidal, 2004 ; www.windpower.org,2013**).
- La période de haute productivité se situe en hiver (vent plus forts), ce qui correspond à la période de l'année où la demande est plus forte.
 - Démarrage par vent faible.
 - C'est une énergie propre, inépuisable, disponible 24h/24h et gratuite, pour bateau, bungalow, et c'est un système fiable pour être autonome sur des sites isolés ;
 - Investissement rentable idéal en autonomie, car le raccordement au réseau électrique s'avère souvent être très coûteux pour un kW de moins en moins bon marché.

- Ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs car une éolienne est entièrement en métal et plastique.
- Devient de plus en plus économique à produire à mesure que des économies d'échelle sont réalisées et que le prix de l'électricité augmente.

I.6.2. Inconvénients

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolienne a quelques désavantages (**Vidal, 2004**):

- L'impact visuel, ça reste néanmoins un thème subjectif ;
- Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée ;
- La qualité de la puissance électrique ; la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante.
- Le coût de l'énergie éolienne reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés;
- Lorsque la production dépasse la consommation, le stockage est encore onéreux, mais en cas de raccordement de l'éolienne au réseau électrique, le stockage n'est pas nécessaire.
- L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement.

I.7. Application des éoliennes

Un système éolien peut être utilisé en trois applications distinctes:

- _ Systèmes autonome/isolés;
- _ Systèmes hybrides;
- _ Systèmes reliés au réseau.

Les systèmes obéissent à une configuration de base: ils ont besoin d'une unité de contrôle de puissance et, dans certains cas, d'une unité de stockage

I.7.1. Systèmes isolés

L'énergie éolienne est aussi utilisée pour fournir de l'énergie à des sites isolés, par exemple pour produire de l'électricité dans les îles, pour le pompage de l'eau dans des champs, ou encore pour alimenter en électricité des voiliers, des phares et des balises, (**Siddo Abdoulaziz, 2007**).

Les systèmes isolés en général, utilisent quelque forme de stockage d'énergie. Ce stockage peut être fait par des batteries: il faut alors un dispositif pour contrôler la charge et la décharge de la batterie. Le contrôleur de charge a comme principal objectif d'éviter qu'il y ait des dommages au système de batterie par des surcharges ou des décharges profondes.

Pour l'alimentation d'équipements qui opèrent avec un réseau alternatif (AC), il est nécessaire d'utiliser un onduleur.

I.7.2. Systèmes hybrides

Les systèmes hybrides sont ceux qui présentent plus d'une source d'énergie comme, par exemple, turbines éoliennes, groupes diesel, modules photovoltaïques, connectés entre eux.

L'utilisation de plusieurs formes de génération d'énergie électrique augmente la complexité du système et exige l'optimisation de l'utilisation de chacune des sources. Dans ces systèmes, il faut réaliser un contrôle de toutes les sources pour maximiser la livraison de l'énergie à l'utilisateur.

En général, les systèmes hybrides sont employés dans des petits systèmes destinés à desservir un nombre plus grand d'utilisateurs. Pour travailler avec des charges à courant alternatif, le système hybride aussi a besoin d'un onduleur.

I.7.3. Systèmes liés au réseau

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

I.8. Principe de fonctionnement d'une éolienne

Le principe de fonctionnement de l'énergie éolienne est relativement simple:

Une éolienne est constituée d'un mât qui soutient à son sommet une nacelle équipée de trois pales mises en rotation par le vent ; l'énergie cinétique du vent est transformée en énergie mécanique (www.solar-kit.com).

. Les pales font tourner le générateur de l'éolienne, qui à son tour transforme l'énergie mécanique en énergie électrique (**Fig. 2**). Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système autonome (www.energies-renouvelables.eu, 2013).

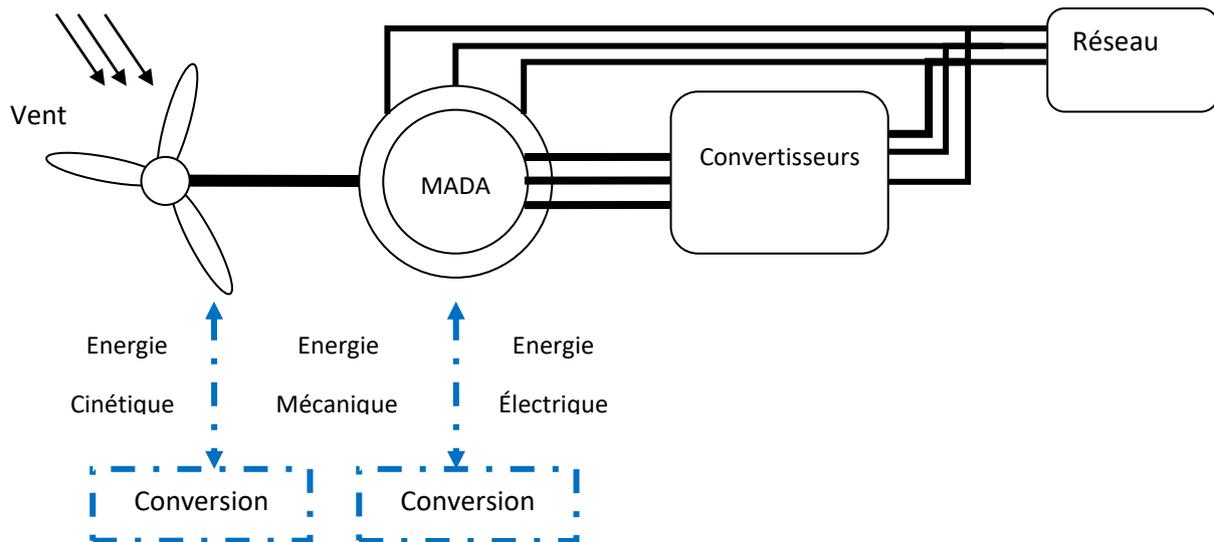


Figure 4 : Principe de la conversion d'énergie d'un aérogénérateur

I.9. Accouplement mécanique

I.9.1. Eolienne à attaque directe

Le principe de l'attaque directe est d'avoir la génératrice directement sur l'hélice.

Cette dernière fonctionne à la vitesse basse du rotor, ce qui permet de supprimer le multiplicateur, qui est le siège de perte de puissance et source de bruit. Ce type de génératrice doit tourner à des vitesses comprises entre 18 et 50 tr/min ; pour produire de l'électricité avec ce type de machine il faut que la génératrice possède un grand nombre de pôles permettant d'obtenir une fréquence de l'ordre de 50Hz. Toutes les éoliennes à attaque directe sont équipées de machines synchrones multipolaires à aimants permanents.

I.9.2. Eolienne à attaque indirecte

Dans ce type d'éolienne, la vitesse de rotation de la turbine est relativement faible, et le couple mécanique est élevé en sortie d'arbre de la turbine. Les machines électriques sont dimensionnées en couple, et on cherche à les faire tourner rapidement pour atteindre des puissances massiques satisfaisantes (Taraf, 2008).

I.10. Différents types d'aérogénérateurs

On classe les éoliennes suivant la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux types de turbines éoliennes:

- _ Turbines à axe horizontal;
- _ Turbines à axe vertical.

I.10.1. Aérogénérateurs à axe vertical

Ce type d'éoliennes est très peu répandu et assez mal connu. Cependant, il peut avoir un intérêt dans certains secteurs d'application (**Chekkal, 2011**). Il existe principalement trois technologies: les turbines Darrieus classiques ou à pales droites (H-type) et la turbine de type Savonius. Toutes ces voilures sont à deux ou plusieurs pales (**Fig. 5**).



Figure 5 : Eoliennes à axe vertical

I.10.2. Aérogénérateurs à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal 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 (**Leclercq, 2004**).



Figure 6 : Eoliennes à axe horizontal

I.11. Mode de fonctionnement

Les éoliennes sont conçues pour fonctionner soit à vitesse fixe ou variable (**Merecki, 2005**).

I.11.1. Fonctionnement à vitesse fixe

- _ Système électrique plus simple;
- _ Système de commande électrique non nécessaire;

- _ Système moins cher;
- _ Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments d'éolienne.

I.11.2. Fonctionnement à vitesse variable

- _ Meilleur rendement énergétique;
- _ Meilleure qualité d'énergie électrique;
- _ Moins d'efforts mécaniques subis par le train de puissance.

I.11.2.1. Intérêt de la vitesse variable

Les développements technologiques des dernières années ont favorisé la mise en place d'éoliennes à vitesse variable. L'éolienne à vitesse variable possède plusieurs avantages tels que: une meilleure extraction de l'énergie du vent, un niveau de bruit inférieur à bas régime éolien et un meilleur transfert de puissance vers le réseau électrique. La vitesse variable représente l'avenir des éoliennes. En effet si la génératrice fonctionne à vitesse fixe, par exemple 1600 tr/mn, les maxima théoriques des courbes ne sont pas exploités (**Fig. 7**). Mais on voit clairement quand la génératrice fonctionne à vitesse variable, par exemple de 1100 tr/mn à 1900tr/mn sur la même Figure, les maximums théoriques sont atteints pour chaque vitesse du vent.

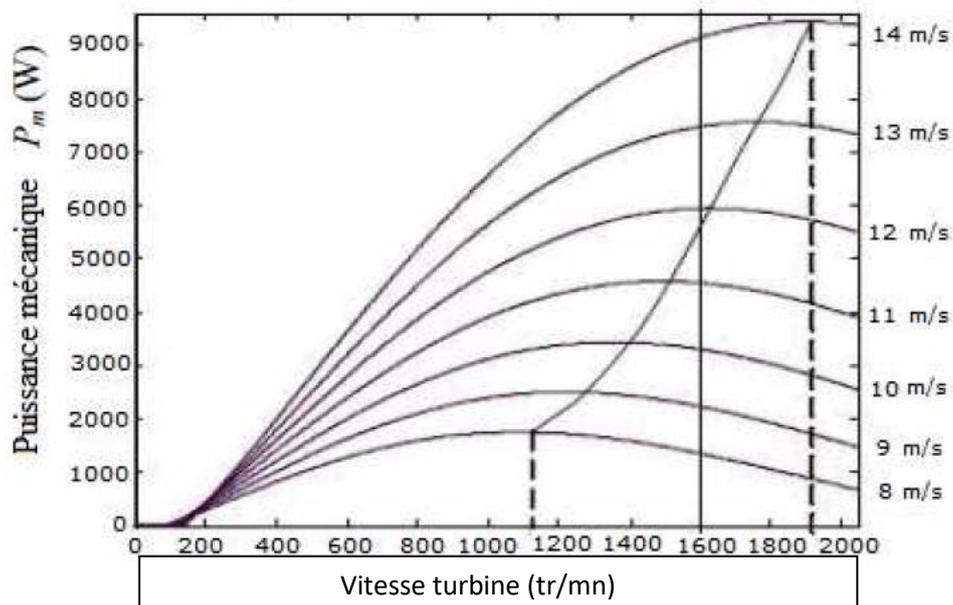


Figure 7 : Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donnée

I.12. Etude comparative des machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne

Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques (Cherfia, 2010).

On décrit dans cette étude, les deux types de machines électriques les plus utilisées dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et asynchrones.

I.12.1. Machine synchrone

Les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes (sans multiplicateur mécanique), pour minimiser la maintenance et accroître la fiabilité (Mekkaoui, 2004).

Dans cette catégorie, on trouve plusieurs sortes de configurations dont nous citons les plus fréquentes.

I.12.1.1. machine synchrone à aimant permanent (MSAP)

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs (Mekkaoui, 2004).

Il semble à plus d'un titre une solution adaptée pour ses performances techniques et en particulier, sa compacité et son rendement. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables.

L'excitation dans ce cas est créée par les aimants permanents.

Les avantages dont disposent ces machines sont les valeurs élevées des rapports (couple/masse) et (puissance/masse) ainsi que leur bon rendement (Nouh, 2008). Cependant le prix des aimants est élevé et ne permet pas, à ce jour, de satisfaire la contrainte sur le prix de vente.

Le fonctionnement en défluxage dans la zone de fonctionnement à puissance constante est difficile (commande de la machine complexe, risque de désaimantation et pertes électriques supplémentaires à l'augmentation du courant statorique).

I.12.1.2. Machine synchrone à rotor bobiné (MSRB)

Elle ressemble au moteur à courant continu, la différence entre eux réside dans la manière de commuter le courant (commutation mécanique pour la machine à courant continu et commutation électronique pour la machine synchrone à rotor bobiné) (Mekkaoui, 2004). Elle fait appel, le plus souvent, à une excitatrice associée à un redresseur tournant, pour éliminer tout contact glissant. Le rotor peut être à pôles lisses ou saillants et est généralement équipé de circuits amortisseurs. Pour certaines applications à forte puissance et à grande vitesse, on utilise un rotor cylindrique massif.

La machine synchrone à rotor bobiné offre un fonctionnement en survitesse aisé à mettre en œuvre. De plus, il est possible de choisir le point de fonctionnement de la machine afin de minimiser les pertes Joules dans l'ensemble (convertisseur - machine). Il donne facilement la possibilité de défluxage que l'on peut effectuer par simple réduction du courant d'excitation **(Nouh, 2008)**.

Ainsi cette structure offre un domaine d'exploitation plus étendu que celui des machines à aimants permanents mais elle offre aussi la possibilité d'adaptation des lois de commande permettant l'optimisation de rendement. Par contre, le rotor nécessite des bagues pour l'alimenter, et les bobines d'excitation sont difficiles à refroidir, cependant, la densité de courant peut être choisie faible pour diminuer les pertes.

Les courants glissants (balais - bagues) limitent le fonctionnement à très haute vitesse de ce type de machine à cause de l'usure des balais. Le rendement et le rapport à ceux des machines à aimants permanents et cela à cause des pertes au rotor.

I.12.1.3. Machines à reluctance variable (MRV)

La structure de la machine à reluctance variable est très simple et composée d'un rotor passif et d'enroulements concentriques au stator **(Mekkaoui, 2004)**.

Le rotor de ce type de moteur ne contient ni aimant, ni bobinage d'excitation. Le couple est créé seulement grâce à l'effet reluctance. Le stator est semblable à celui de la majorité des machines à courant alternatif **(Nouh, 2008)**.

Le rotor est construit de manière à ce que le rapport entre l'inductance dans l'axe direct et en quadrature soit le plus important possible. La plage de fonctionnement en vitesse à puissance constante est directement liée à ce rapport.

L'obtention d'un rapport élevé induit des contraintes au niveau de la fabrication, qui se répercutent négativement sur le coût.

I.12.2. Machine asynchrone

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses **(Mekkaoui, 2004)**. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé.

La machine asynchrone est constituée d'un stator et d'un rotor séparés par un entrefer **(Bensoam, 2005)**:

- Le stator est analogue à celui des machines synchrones. Il porte un bobinage triphasé relié à la source d'alimentation ;

- Le rotor est cylindrique, il est formé par un empilage de disques de tôles encochées sur leur périphérie. Dans les encoches, on place un bobinage polyphasé en court-circuit.
- L'entrefer est plus étroit que dans les autres machines car il n'y a pas d'inducteur. La création du flux dans l'entrefer nécessite la consommation de puissance réactive prise à la source alimentant le stator.

La machine asynchrone est le candidat le plus adapté pour les éoliennes.

I.12.2.1. Machine asynchrone à cage d'écureuil

Elle est robuste, assez bon marché et facilement industrialisable. Elle a une puissance massique assez élevée, ce qui conduit à un bon rendement.

Cependant, la principale difficulté reste son pilotage. L'excitation étant induite par les courants statoriques, la commande séparée du couple et du flux est difficile à faire (**Nouh, 2008**).

Une topologie consiste à relier directement la machine à cage d'écureuil au réseau. Un multiplicateur est associé à la machine et un banc de condensateurs assure sa magnétisation. La vitesse de rotation peut alors être faiblement variable, limitée par le glissement maximum de la machine. Son principal inconvénient est d'une part l'impossibilité de fonctionnement à vitesse variable, ce qui réduit la puissance pouvant être puisée du vent et d'autre part les problèmes d'accrochage / décrochage au réseau (**Mekkaoui, 2004**).

En utilisant des techniques de commande vectorielle et un convertisseur bidirectionnel on assure la génération à la fréquence et tension du réseau en présence de n'importe quelle vitesse du rotor. Le problème principal c'est que le dimensionnement du convertisseur doit être de la même puissance que celle de l'alternateur (**Poza Labo, 2003**). En même temps la distorsion harmonique générée pour le convertisseur doit être éliminée par un système de filtres de la même puissance. L'avantage de cette technique de conversion réside dans une plage de vitesses de rotor très large.

De plus, la présence des capacités est indispensable pour fournir l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine. Cette énergie ne peut pas être fournie par le réseau car le redresseur est unidirectionnel. Ces inconvénients ont freiné le développement industriel de cette structure (**Mekkaoui, 2004**).

I.12.2.2. Machine asynchrone à double alimentation

Egalement appelée machine asynchrone à rotor bobiné et bagues (MARB), cette topologie est, actuellement, le meilleur choix des fabricants. Le stator est directement relié au réseau tandis que les grandeurs rotoriques sont commandées par un convertisseur statique. La maîtrise de l'état électromagnétique de la machine par le rotor permet de fonctionner à la fréquence et

l'amplitude nominales du réseau même si le rotor s'éloigne de la vitesse de synchronisme. Le dimensionnement du convertisseur est proportionnel au glissement maximal du rotor, autrement dit, il dépend de l'écart maximal entre la vitesse de synchronisme et la vitesse réelle du rotor.

La diminution de puissance du convertisseur statique permet la minimisation des composants de filtrage et de conversion, l'accroissement de la fiabilité de l'électronique, la diminution du coût de l'ensemble et l'amélioration de la qualité d'onde générée (grâce à la diminution de l'amplitude des courants commutés par le convertisseur et l'augmentation de la fréquence de hachage).

Par contre, l'adoption d'un rotor bobiné limite la capacité de surcharge et introduit des modes d'oscillation supplémentaires par rapport au rotor à cage, plus rigide dans sa construction. Pour une puissance nominale donnée, la machine à rotor bobiné sera plus encombrante et plus lourde que l'équivalent à cage. Pour finir, la présence des balais oblige des interventions de maintenance fréquentes (**Poza Labo, 2003**).

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 pour que de très nombreux fabricants utilisent ce type de machines (**Mekkaoui, 2004**).

I.12.2.2.1. Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée dédié a une système autonome

L'utilisation d'une résistance rotorique variable (**Fig. 8**) 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.

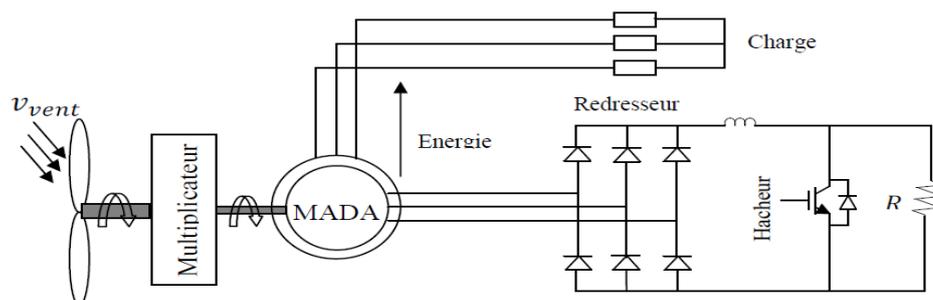


Figure 8 : MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée

I.12.2.2.2. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer

L'ensemble redresseur onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Ce dispositif permet de faire varier la plage de conduction des diodes, de rendre variable la puissance extraite du circuit rotorique et donc le glissement de la génératrice asynchrone (**Fig. 9**). L'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance, de plus le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau) donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme.

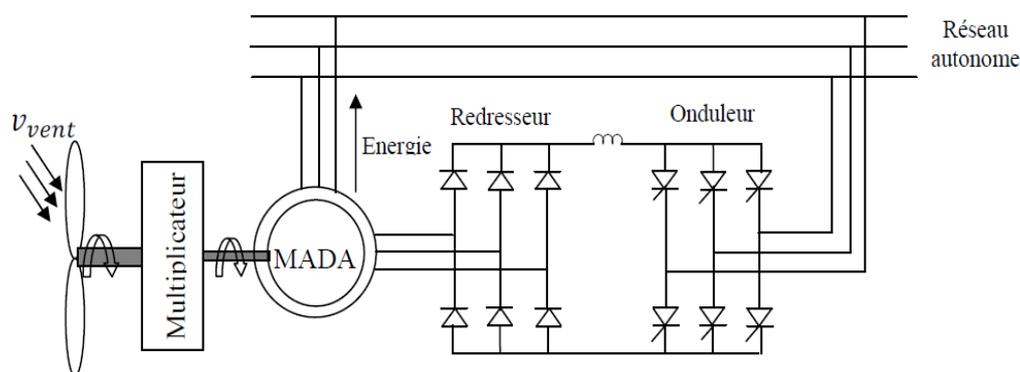


Figure9 : MADA - Structure de Kramer

I.12.2.2.3. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association redresseur onduleur peut être remplacé par un cycloconvertisseur (**Fig. 10**), l'ensemble est alors appelé structure de *Scherbius*. Comme le flux de la puissance est bidirectionnel, il est possible d'augmenter ou de diminuer l'énergie de glissement et ainsi faire fonctionner la machine en génératrice ou en moteur. Son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif.

Les progrès de l'électronique de puissance ont conduit au remplacement du cycloconvertisseur par une structure à deux convertisseurs à IGBT commandés en MLI.

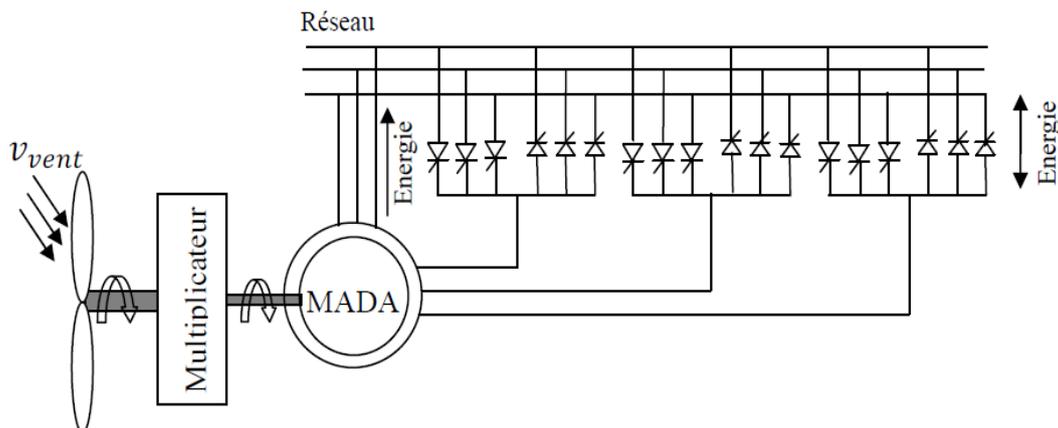


Figure10 : MADA, structure de Scherbius avec un cycloconvertisseur

I.12.2.2.4. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Dans cette structure, le stator de la génératrice est directement lié au réseau alors que l'enroulement rotorique est connecté à ce même réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance, constituée de deux convertisseurs à MLI, et généralement d'un transformateur selon la plage de vitesses souhaitées (**fig. 11**). Cette structure est actuellement en fort développement chez plusieurs constructeurs d'éoliennes de grandes puissances (**Abdoune, 2011**).

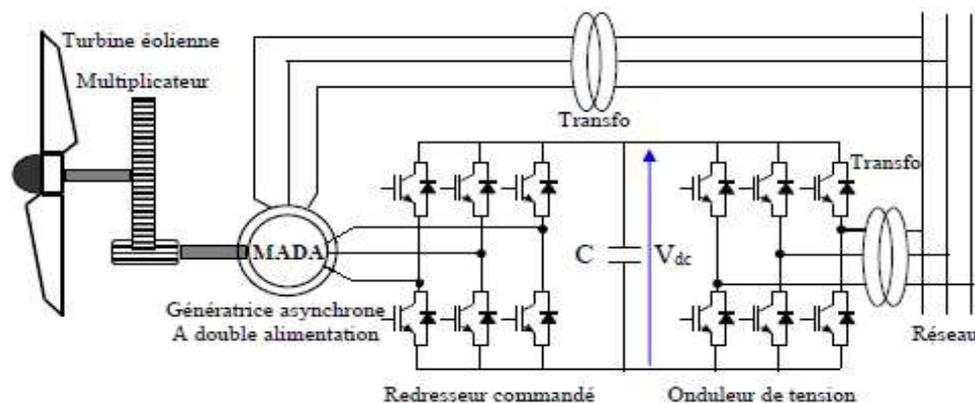


Figure 11 : Eolienne à base de MADA raccordée au réseau (**Idjdarene, 2010**).

Cette structure permet un fonctionnement à vitesse variable sur une plage spécifique de fonctionnement, permettant ainsi l'optimisation de la puissance extraite pour les vents faibles et moyens.

En effet, même si la vitesse de synchronisme est imposée par la fréquence des tensions du réseau, sa caractéristique (couple – vitesse) est bien différente d'une machine asynchrone à

rotor à cage. La MADA peut fonctionner aussi bien comme moteur ou générateur en mode hypo et hyper synchrone.

Contrairement aux autres architectures éoliennes où la machine est complètement isolée du réseau par les convertisseurs statiques, la structure proposée à son stator directement connecté au réseau, ce qui ne permet pas de réduire le flux de la machine.

I.13. Différents modes de fonctionnement de la MADA

Les modes de fonctionnement de la MADA peuvent être présentés en fonction de glissement (g) comme suit (Taraft, 2008):

I.13.1. Fonctionnement en moteur hypo-synchrone $g > 0$

L'énergie absorbée du réseau est transformée partiellement en énergie mécanique. L'autre partie est injecté au réseau à travers les contacts glissants du rotor. Pour les moteurs a cage, l'énergie de glissement est dissipée en pertes joule dans le rotor.

I.13.2. Fonctionnement en moteur hyper-synchrone $g < 0$

La puissance statorique est fournie par le réseau ainsi que la puissance de glissement. Les machines à cage ne peuvent avoir ce type de fonctionnement car celui-ci ne peut être obtenu qu'à l'aide d'un accès au rotor via un circuit électronique.

I.13.3 : Fonctionnement en génératrice hypo-synchrone $g > 0$

L'énergie mécanique est transmise à l'arbre de la machine, celui-ci la fournit au stator, lequel la transmet au réseau. Afin de permettre un fonctionnement hypo synchrone, l'énergie de glissement provenant du réseau doit être transmise au rotor. Ainsi pour le fonctionnement générateur hypo-synchrone, une alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de la vitesse de rotation.

I.13.4. Fonctionnement en génératrice hyper-synchrone $g < 0$

La totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à $g \cdot P_m$ est transmise par l'intermédiaire du rotor. Dans ce mode du fonctionnement nous nous limitons au stator connecté directement au réseau (Salloum, 2007).

I.14. Avantages et inconvénients de différentes machines utilisée dans le système éolien

Tableau I : Avantages et inconvénients des différentes machines (Davigny, 2007).

Type d'éolienne	Avantages	Inconvénients
MAS Vitesse fixe	<ul style="list-style-type: none"> - Machine robuste. - Faible coût. - Pas d'électronique de puissance. 	<ul style="list-style-type: none"> - Puissance extraite non optimisée. - Maintenance boîte de vitesse. - Pas de contrôle de l'énergie réactive. - Magnétisation de la machine imposée par le réseau.
MADA Vitesse Variable	<ul style="list-style-type: none"> - Fonctionnement à vitesse variable - Puissance extraite optimisée. - Electronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominale. - Machine standard. - connexion de la machine plus facile à gérer. - Une magnétisation machine gérée en cas de défaut sur le réseau. 	<ul style="list-style-type: none"> - Maintenance boîte de vitesse. - Prix de l'électronique de puissance. - Contrôle - commande complexe. - Contact glissant bagues – balais.
MSAP Vitesse Variable	<ul style="list-style-type: none"> - Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse. - Puissance extraite optimisée pour les vents faibles. - Connexion de la machine facile à gérer - possibilité d'absence de boîte de vitesse 	<ul style="list-style-type: none"> - Prix de l'électronique de puissance. - Machine spécifique. - Grand diamètre de machine. - Electronique de puissance. - Dimensionnée pour la puissance nominale de la génératrice.

I.15. Pourquoi la MADA ?

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) est très populaire puisqu'elle bénéficie de certains avantages par rapport à tous les autres types de génératrice à vitesse variable, son utilisation dans la chaîne de conversion électromécanique en tant qu'aérogénérateur ou moteur a connu une croissance spectaculaire au cours des dernières années. En effet, le convertisseur d'énergie utilisé afin de redresser-onduler les courants

alternatifs du rotor a une puissance nominale fractionnaire de celle du générateur, ce qui réduit son cout par rapport aux topologies concurrentes (**Martin,1997**).

I.16. Domaines d'application de la MADA

Actuellement la machine asynchrone à double alimentation occupe une large place dans les applications industrielles, grâce à ces nombreux avantages. En effet, la MADA est très utilisée en mode générateur dans les applications d'énergie renouvelable notamment dans les systèmes éoliens (**Abdelli, 2007**). De plus, le fonctionnement en générateur présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée telles que:

- Les générateurs des réseaux de bord des navires ou des avions;
- Les centrales hydrauliques à vitesse variable;
- Les groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

La MADA peut être utilisée aussi dans d'autres applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage, telles que (**El Aimani, 2004**):

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

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

I.17. Conclusion

Au fil de ce chapitre, nous avons opéré une exposition de différentes issues électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après une esquisse sur les concepts élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, les divers types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement. Le second parti de ce chapitre nous a permis de montrer les avantages et les inconvénients des différentes machines ajustées à un système éolien.

II.1. Introduction

Un système physique est un ensemble de sous-systèmes ce qui permet de s'intéresser à chaque partie séparément afin de simplifier l'étude avant de faire une synthèse de toutes les parties constituant le système global. C'est pour cette raison que nous allons s'intéresser essentiellement dans ce chapitre à la modélisation de chaque partie du système de la chaîne de conversion éolienne (**Hamecha, 2013**).

La première partie est consacrée à la modélisation du vent, de la turbine choisie ainsi qu'à l'utilisation de la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) sans asservissement de vitesse dans le but de contrôler la puissance mécanique délivrée par la turbine de sorte à extraire le maximum de puissance et ce quel que soit le vent qui lui est appliqué.

La deuxième partie va traiter la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation ainsi que les différents convertisseurs électroniques et le bus continu pour exploiter au mieux l'énergie disponible dans le vent.

II.2. Modélisation du système éolien

II.2.1. Partie mécanique

➤ Modélisation du vent

Le vent est l'énergie primaire des aérogénérateurs. L'énergie cinétique contenue dans le vent est transformée en partie en énergie mécanique par la turbine, puis en énergie électrique par le générateur. C'est donc une variable importante à modéliser car la précision des simulations dépendra de la qualité de son modèle (**Maghsel 2012**).

La vitesse de vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps.

$$V_v = f(t) \text{ (II.01)}$$

➤ Modélisation de la turbine éolienne

Le dispositif, qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G (**Fig. 12**)

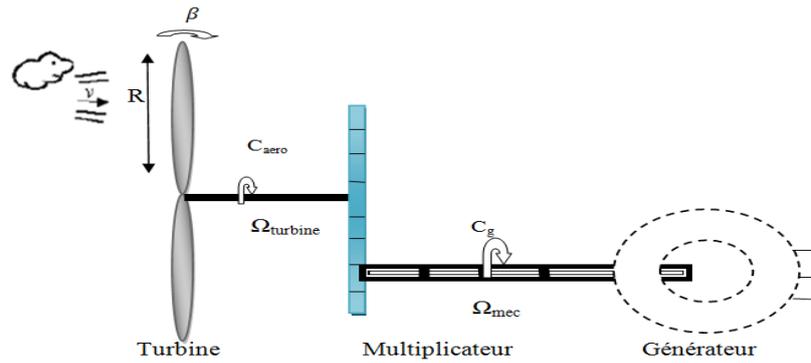


Figure 12: Schéma de la turbine éolienne

La puissance fournie par le vent est définie par l'expression suivante :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S V_v^3 \text{ (II.02)}$$

La puissance du vent n'est pas totalement captée par les pales, d'où la puissance aérodynamique est inférieure à celle du vent, dans le cas où l'angle de calage des pales est nul, les deux puissances sont liées par l'expression suivante (Belhoul, 2013).

$$P_{turbine} = C_p(\lambda).P_{vent} \text{ (II.3)}$$

Avec :

$C_p(\lambda)$ est appelé le coefficient de puissance, qui exprime le rendement aérodynamique de l'éolienne. Il dépend du λ , qui exprime le rapport entre la vitesse à l'extrémité des pales et la vitesse du vent, et de l'angle d'orientation des pales β .

C_p est donné par la relation suivante [37].

$$C_p(\lambda, \beta) = \left(\frac{c1}{c2} - c3\beta - c4\right) \cdot e^{c5/\lambda} + c6\lambda \text{ (II.04)}$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \text{ (II.05)}$$

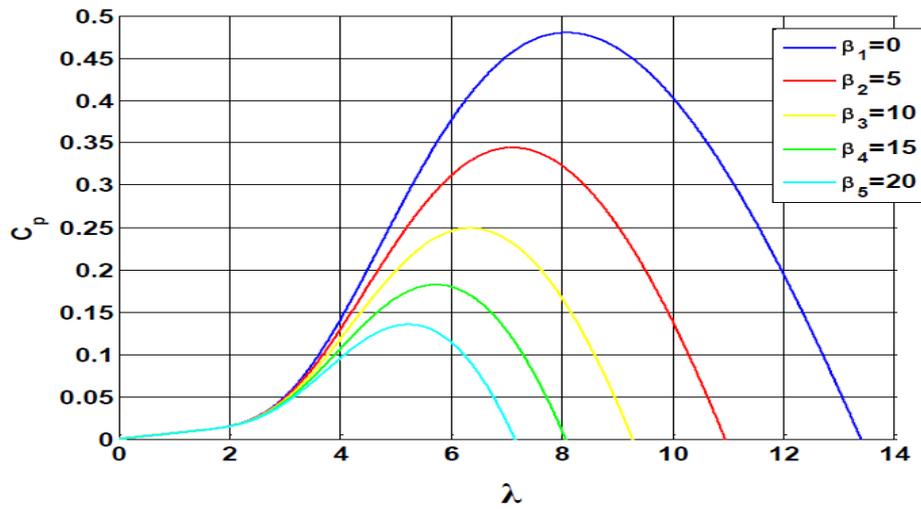


Figure 13 : la variation de ce coefficient en fonction du ratio de vitesse et de l'angle de l'orientation des pales

Le rapport de vitesse en bout des pâles est donné par :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_t}{v} \text{ (II.06)}$$

La couple de la turbine éolienne est donnée par :

$$C = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_p(\lambda, \beta) \rho S V v^3}{\Omega_t} \text{ (II.07)}$$

➤ Modélisation du multiplicateur de vitesse

Son rôle est d'adapter la vitesse lente de l'aérogénérateur Ω_{aero} à celle de la génératrice Ω_{mec}

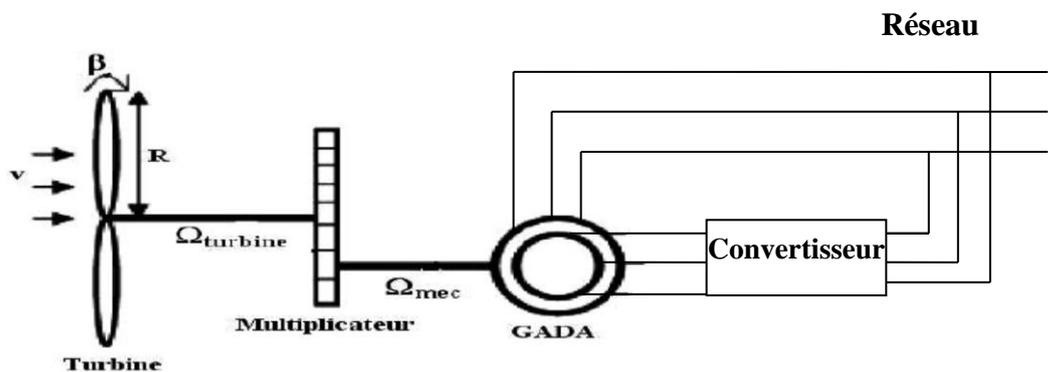


Figure 14 :Modèle mécaniques simplifié du multiplicateur

Il est modélisé par les deux équations suivantes :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \text{ (II.8)}$$

Les couples sur l'arbre lent et sur l'arbre rapide sont exprimés par la relation suivante:

$$C_{\text{arbre}} = \frac{C_{\text{turbine}}}{G} \quad (\text{II.9})$$

➤ Modélisation de l'arbre

Les masses des différents éléments de la turbine sont représentées par l'inertie J_{turbine} , le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine ramenée sur l'axe rapide à celle de la génératrice J_g , et on suppose que le multiplicateur de vitesse est idéal. L'inertie totale J est donnée par l'expression suivante (**Belhoul, 2013**) :

$$J = \frac{J_{\text{turbine}}}{G^2} + J_g \quad (\text{II.10})$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet d'établir l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total C_{mec} appliqué au rotor :

$$J \frac{d\Omega_{\text{méc}}}{dt} = \sum C = C_{\text{méc}} \quad (\text{II.11})$$

Le couple mécanique $C_{\text{méc}}$ est en fonction du couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, du couple des frottements visqueux C_{visq} , et du couple sur l'arbre rapide C_{arbre} .

$$C_{\text{méc}} = C_{\text{arbre}} - C_{\text{em}} - C_{\text{visq}} \quad (\text{II.12})$$

Le couple visqueux est donné par l'expression suivante :

$$C_{\text{visq}} = \Omega_{\text{méc}} \quad (\text{II.13})$$

Le schéma bloc représenté sur la figure ci-dessous correspond à la modélisation de la turbine :

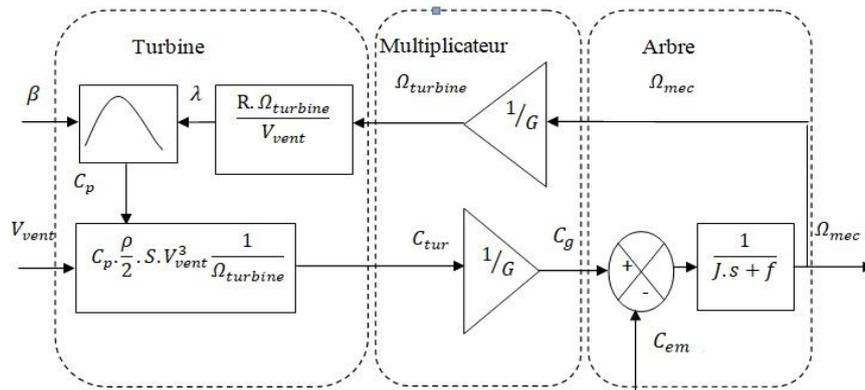


Figure 15 : Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne

II.3. Techniques d'extraction du maximum de la puissance

Il existe deux techniques d'extraction du maximum de puissance

1. Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse
2. Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse

Dans notre cas, la seconde structure est la méthode utilisée.

II.3.1. Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse

En pratique, une mesure précise de la vitesse du vent est difficile à réaliser. Ceci pour deux raisons :

- ✓ L'anémomètre est située derrière le rotor de la turbine, ce qui erroné la lecture de la vitesse du vent.
- ✓ Le diamètre de la surface balayée par les pales étant important (typiquement 70 m pour une éolienne de 7.5 KW), une variation sensible du vent apparait selon la hauteur où se trouve l'anémomètre.

Une mesure erronée de la vitesse conduit forcément a une dégradation de la puissance captée, c'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse (**Boyette, 2006**).

Cette structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (\text{II.14})$$

Le couple électromagnétique de référence est déterminé à partir d'une estimation du couple aérodynamique :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{aer-est}}{G} \quad (\text{II.15})$$

Le couple aérodynamique estimé est déterminé par l'expression :

$$C_{turbine-est} = C_{p-max} \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine-est}} V_{vent-est}^3 \quad (\text{II.16})$$

$\Omega_{turbine-est}$: est la vitesse estimée de la turbine, elle est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique.

$$\Omega_{turbine-est} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{II.17})$$

La mesure de la vitesse du vent apparaissant au niveau de la turbine étant délicate, une estimation de sa valeur peut être obtenue à partir de l'équation :

$$V_{vent-est} = \frac{\Omega_{turbine-est} R}{\lambda_{opt}} \quad (\text{II.18})$$

L'expression globale du couple électromagnétique de référence est : (Barambone et Alkorta, 2010)

$$C_{em-ref} = \frac{C_p}{\lambda_{Cp-max}^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2G} \Omega_t \quad (\text{II.19})$$

Pour extraire le maximum de la puissance générée, il faut fixer le ratio de vitesse à la valeur λ_{max} qui correspond au maximum du coefficient de puissance C_{pmax}

Le couple électromagnétique de référence doit alors être réglé à la valeur suivante :

$$C_{em-ref} = \frac{C_p}{\lambda_{Cpmax}^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (\text{II.20})$$

La représentation sous forme de schéma-blocs est montrée dans la **figure 16** :

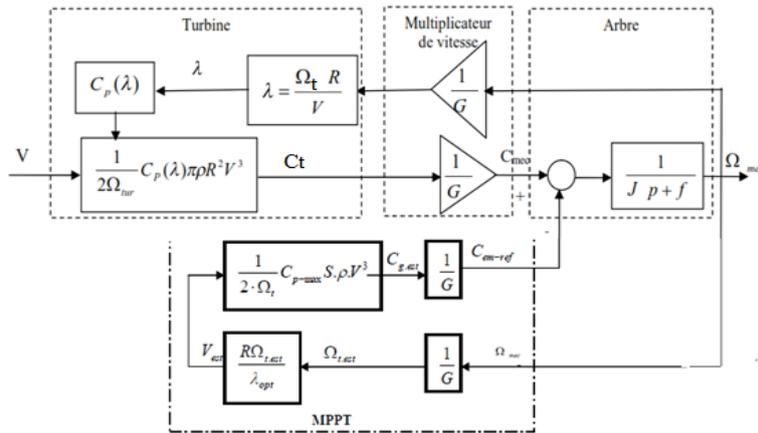


Figure 16 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse (Barambone et Alkorta, 2010).

II.3.2. Différentes phases de fonctionnement

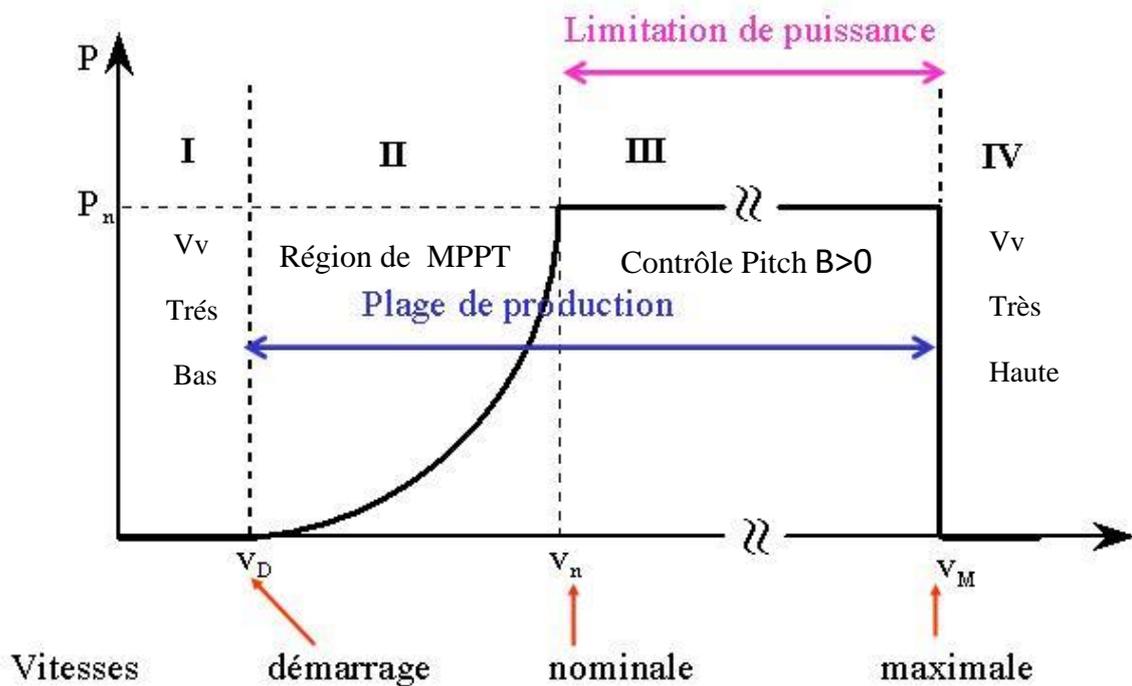


Figure 17: Les quatre zones de fonctionnement de la turbine

Il y a quatre phases (zones) de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable

1. La phase de démarrage

La production électrique commence lorsque la vitesse mécanique atteint environ 70% de la vitesse de synchronisme de la génératrice, la puissance électrique reste assez faible.

2. La phase d'extraction de la puissance maximale (phase M.P.P.T)

Dans cette zone, la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale de la génératrice. La puissance électrique augmente rapidement. Dans cette zone, l'angle de calage des pales β est maintenu constant à sa valeur nominale afin d'obtenir un C_p maximal. La puissance maximale est ainsi obtenue pour chaque valeur de vitesse mécanique et pour des vitesses de vent moyennes.

3. Phase à vitesse mécanique quasi constante

L'angle de calage des pales β varie afin d'obtenir une puissance électrique maximale pour différentes valeurs de vent, C'est le pitch control La puissance électrique augmente jusqu'à sa vitesse nominale.

4. Phase à puissance constante

Lorsque la vitesse du vent augmente encore, l'angle de calage des pales devient important afin de conserver la puissance électrique constante et nominale. Par sécurité, si la vitesse du vent devient très importante, il y a risque d'endommager l'éolienne, l'angle de calage des pales se fixe à 90° , c'est la mise en drapeau qui met fin au fonctionnement de l'éolienne jusqu'à ce que la vitesse du vent devient moins importante.

Le système d'orientation des pâles à une dynamique mécanique bien plus lente que la dynamique électrique de la génératrice. Ainsi une lenteur de la régulation de l'angle de calage peut entraîner un dépassement de la vitesse de rotation limite lors d'une rafale de vent se produisant pendant un fonctionnement en zone III. Il est dans ce cas intéressant de concevoir une procédure permettant d'anticiper l'action du dispositif d'orientation en réglant le couple électromagnétique de manière à contrôler la vitesse de rotation

II.3.3.Système d'orientation des pales

Les éoliennes à vitesse variable utilisent un système d'orientation des pales. Le système d'orientation des pales sert essentiellement à limiter la puissance générée. Avec un tel système, la pale est tournée par un dispositif de commande appelé 'pitch control'. En réglant l'angle d'orientation des pales, on modifie les performances de la turbine et plus exactement le coefficient de puissance. Les pales sont face au vent en basses vitesses, puis, pour les fortes

vitesse de vent, s'inclinent pour dégrader le coefficient de puissance. Elles atteignent la position en drapeau à vitesse maximale.

Afin d'obtenir un système de conversion d'énergie le plus efficace possible, l'angle de calage des pales $\beta = 0$ est adapté en permanence afin de maximiser le rendement de l'hélice.

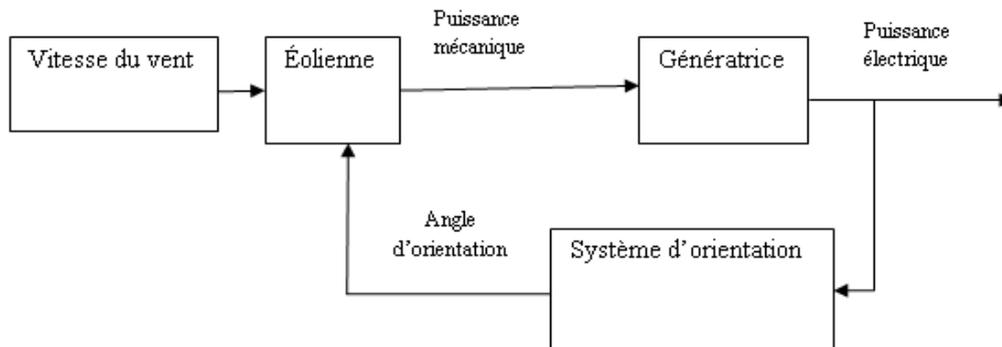


Figure 18 : Schéma bloc de système d'orientation des pales

Dans notre travail, nous nous limitons à phase d'extraction de la puissance maximale, donc on maintient l'angle de calage à sa valeur minimale $\beta=0$ afin d'obtenir un C_p maximal.

II.4. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

II.4.1. Hypothèses simplificatrices

La théorie de la machine asynchrone à double alimentation se base sur la transformation de Park qui rapporte les axes statoriques et rotoriques triphasés à deux axes perpendiculaires (biphasés) appelés l'axe direct d et l'axe quadratique q .

Pour la modélisation de la MADA, on tient compte des hypothèses simplificatrices suivantes :

- L'entrefer constant.
- L'effet des encoches négligé.
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement n'est pas prise en compte.
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- Les pertes ferromagnétiques négligeables.
- De ce fait, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements (Abou Tabak, 2008).

La figure (II-6) rappelle la position des axes des phases statoriques et rotoriques dans l'espace électrique (l'angle électrique est égal à l'angle réel multiplié par le nombre (P) de paires de pôles par phase).

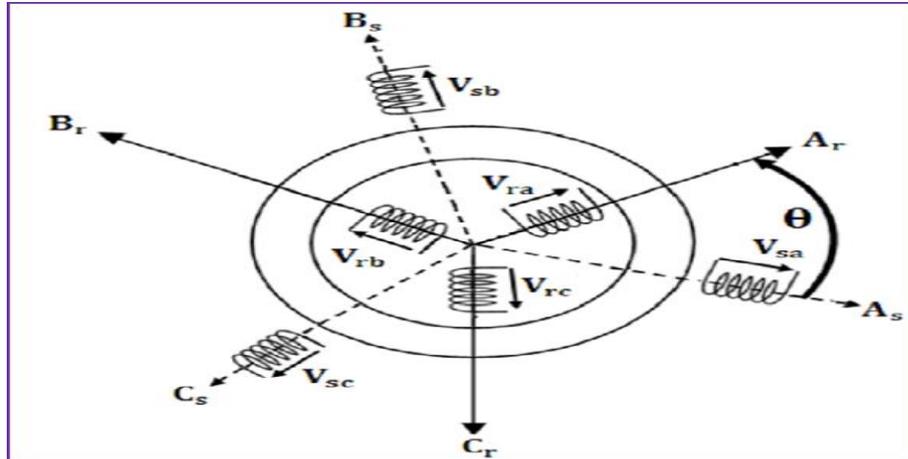


Figure 19: Représentation simplifiée de la MADA

II.4.2 Modèle mathématique de la MADA dans le repère triphasé

➤ **Equation électrique**

Les équations électriques des phases statoriques et rotoriques qui décrivent le fonctionnement de la machine s'écrivent comme suit :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\phi_s] \quad (II.21)$$

$$[V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\phi_r] \quad (II.22)$$

Avec :

$$\text{Grandeurs statoriques : } [V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} ; [i_s] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} ; [\phi_s] = \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix}$$

$$\text{Grandeurs rotoriques : } [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} ; [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} ; [\phi_r] = \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} ;$$

$$\text{La matrice des résistances des phases statoriques : } [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

La matrice des résistance des phases rotoriques : $[R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$

$[VasVbsVcs]$: Les tensions des phases statoriques.

$[isaisbisc]$: Les courants des phases statoriques.

$[\varphi_{sa}\varphi_{sb}\varphi_{sc}]$: Flux totaux à travers les bobines statoriques

➤ **Equation magnétique**

Les équations magnétiques sont données par les expressions suivantes :

$$[\varphi_s] = [L_{ss}][i_s] + [M_{sr}][i_r] \text{ (II.23)}$$

$$[\varphi_r] = [L_{rr}][i_r] + [M_{rs}][i_s] \text{ (II.24)}$$

Avec: est la matrice d'inductances statoriques donnée par : $[L_{ss}] = \begin{bmatrix} I_s & M_s & M_s \\ M_s & I_s & M_s \\ M_s & M_s & I_s \end{bmatrix}$

Est la matrice d'inductances rotoriques donnée par : $[L_{rr}] = \begin{bmatrix} I_r & M_r & M_r \\ M_r & I_r & M_r \\ M_r & M_r & I_r \end{bmatrix}$

I_s, I_r : Inductances propres d'une phase statorique et rotorique respectivement

M_s, M_r : Inductances mutuelles entre deux phases statoriques et rotoriques respectivement

M_{sr} : est la matrice d'inductances mutuelles du couplage stator-rotor. Elle est donnée par :

$$[M_{rs}] = M_{max} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \text{ (II.25)}$$

M_{max} : est le maximum d'inductance mutuelle entre une phase statorique et entre une phase rotorique pour $\theta = 0$

En remplaçant les relations (II.23) et (II.24) respectivement dans les relations (II.23) et (II.22), nous obtenons les deux expressions suivantes :

$$[V_s] = [R_s].[i_s] + \frac{d}{dt}([L_{ss}][i_s] + \frac{d}{dt}[M_{sr}][i_r]) \text{ (II.26)}$$

$$[V_r] = [R_r].[i_r] + \frac{d}{dt}([L_{rr}][i_r] + \frac{d}{dt}[M_{rs}][i_s]) \text{ (II.27)}$$

➤ Equation mécanique

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

$$C_{em} = C_r + f_r \cdot \Omega + J \frac{d\Omega}{dt} \quad (II.28)$$

II.4.3. Modèle de la MADA dans le plan (d q)

La complexité et la non linéarité des équations précédentes rendent leur résolution très difficile, alors il est indispensable d'appliquer la transformation de Park afin d'avoir un système d'équations différentielles à coefficients constants ce qui va faciliter sa résolution. La transformation de Park consiste à transformer les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système (Hamdi, 2008).

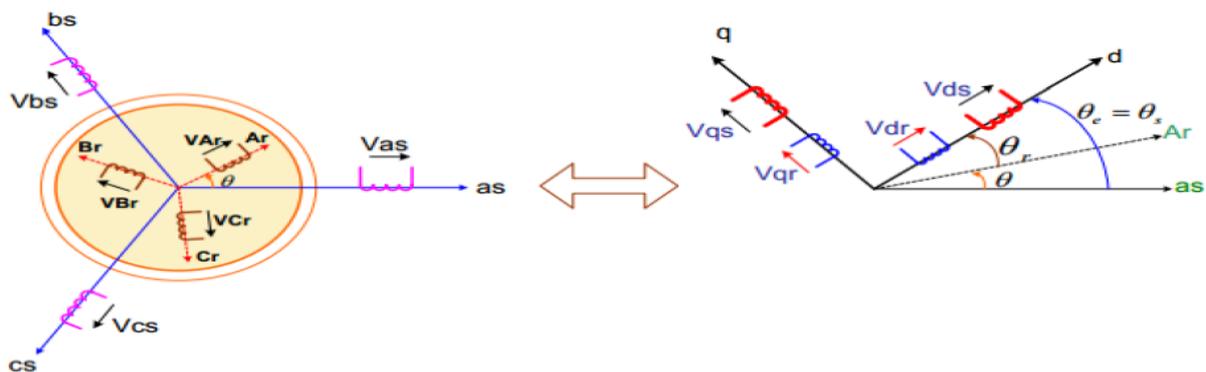


Figure 20 : Passage du triphasé au biphasé

Les deux bobines d et q, produisent le même effet que les trois bobines réelles fixes.

Avec :

d : axe direct stator et rotor.

q : axe en quadrature stator et rotor.

En faisant coïncider les axes directs et quadratures du stator et du rotor, les calculs seront simplifiés.

- La matrice de Park est donnée sous la forme suivante :

On a : $[X_{dqo}] = [p(\Theta)][X_{abc}]$ (II.29)

$$[p(\Theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\Theta) & \cos(\Theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\Theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\Theta) & -\sin(\Theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\Theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

En appliquant cette transformation dans un repère liée au champs tournant on obtient :

➤ Les expressions des tensions :

Pour le stator :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

Pour le rotor :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - \omega_r \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

Car on a $(\omega_r = \omega_s - \omega)$, avec: $\omega_s = \left(\frac{d\Theta_s}{dt}\right)$, $\omega = \left(\frac{d\theta}{dt}\right)$

Avec respectivement :

V_{ds}, V_{qs}, V_{dr} et V_{qr} sont les tensions statoriques et rotoriques directe et en quadrature du système diphasé ;

ω_s et ω_r sont les pulsations des grandeurs électriques statoriques et rotoriques.

➤ Les expressions des flux totalisés sont :

➤ Pour le stator

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

➤ Pour le rotor

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \varphi_{qs} = L_r i_{qs} + M i_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

Avec :

$L_s = L_s - M_s$: inductance cyclique propre du stator.

$L_r = L_r - M_r$: inductance cyclique propre du rotor.

$M = \frac{3}{2} M_{\max}$: inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

➤ L'équation du couple électromagnétique

Pour le couple électromagnétique, son expression générale est donnée par :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (\varphi_{qs} I_{dr} - \varphi_{ds} I_{qr}) \quad (\text{II.35})$$

➤ Les puissances actives et réactives statorique et rotorique de la MADA sont respectivement

$$\begin{cases} P = V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs} \\ Q = V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

II.5. Modélisation de l'onduleur de tension MLI :

➤ L'onduleur

Afin de générer un courant alternatif sur le réseau électrique on est appelé à utiliser un onduleur, qui est un convertisseur statique capable de transformer l'énergie d'une source à tension continue en une énergie à tension alternative. Il existe plusieurs structures d'onduleurs, dont chacun correspond à un type d'application déterminée permettant des performances recherchées comme la structure de Kärmer qui utilise un pont à diode et un pont à thyristors, ainsi que la structure qui consiste à remplacer les onduleurs à commutation naturelle composés de thyristors, par des onduleurs à commutations forcées. L'apparition de nouveaux composants d'électronique de puissance a permis de développer de nouvelles structures d'une grande performance par rapport aux structures classiques, en l'occurrence, l'onduleur triphasé à trois niveaux (Mdjabber, 2013).

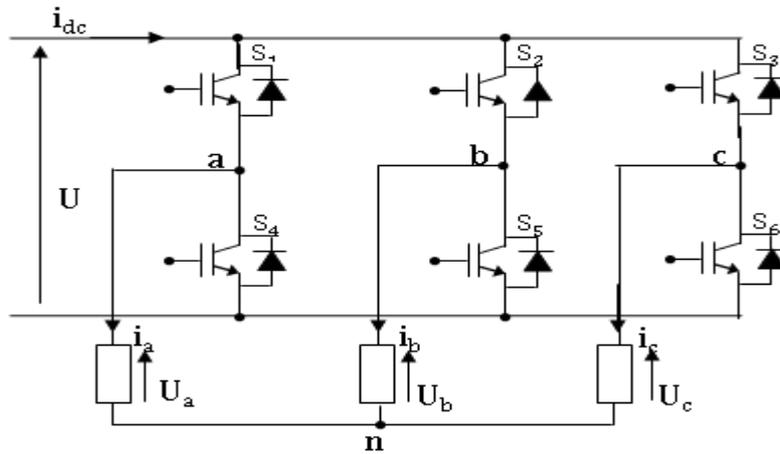


Figure 21: Schéma d'un onduleur de tension triphasé.

Les tensions composée sont obtenues à partir des sorties de l'onduleur :

$$\begin{cases} U_{ab} = U_{an} - U_{no} \\ U_{bc} = U_{bn} - U_{no} \\ U_{ca} = U_{cn} - U_{no} \end{cases} \text{(II.37)}$$

Les tensions simples des phases de la charge issue des tensions composées ont une somme nulle, donc :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \text{(II.38)}$$

Elles peuvent s'écrire à partir des tensions de sorties de l'onduleur en introduisant la tension du neutre de la charge par apport au point de référence

$$\begin{cases} V_{an} + V_{nn0} = V_{an0} \\ V_{bn} + V_{nn0} = V_{bn0} \\ V_{cn} + V_{nn0} = V_{cn0} \end{cases} \text{(II.39)}$$

Donc, on peut déduire que :

$$V_{nn0} = \frac{1}{3}[V_{an0} + V_{bn0} + V_{cn0}] \text{(II.40)}$$

L'état des interrupteurs supposés parfaits \Leftrightarrow Si (i=a, b, c), on a :

$$V_{in0} = S_i \cdot U_{dc} - \frac{U_{dc}}{2} = (S_i - 0.5)U_{dc} \quad \text{(II.41)}$$

On trouve donc :

$$\begin{cases} V_{an0} = (S_a - 0.5)U_{dc} \\ V_{bn0} = (S_b - 0.5)U_{dc} \\ V_{cn0} = (S_c - 0.5)U_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

En remplaçant l'équation (II.41) dans l'équation (II.42), on obtient

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{an0} - \frac{1}{3}V_{bn0} - \frac{1}{3}V_{cn0} \\ V_{bn} = \frac{1}{3}V_{an0} + \frac{2}{3}V_{bn0} - \frac{1}{3}V_{cn0} \\ V_{cn} = \frac{1}{3}V_{an0} - \frac{1}{3}V_{bn0} + \frac{2}{3}V_{cn0} \end{cases} \quad (\text{II.43})$$

En remplace l'équation (II.42), dans l'équation (II.43), on trouve :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}U_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.44})$$

Il suffit d'appliquer la transformation de Park pour passer d'un système triphasé au système biphasé.

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne constituée d'une machine asynchrone à double alimentation en mode générateur, En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices

Un modèle flexible de la MADA est un système d'équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps. Le modèle est représenté sous un formalisme très compact, général et facilement implantable dans des environnements de calcul numérique.

III.1. Introduction

La grande similitude entre une machine électrique, alimentée par un onduleur de tension triphasé, et le redresseur à MLI triphasé connecté au réseau, a permis l'émergence d'une technique de contrôle analogue au DTC, appelée contrôle direct de puissance (DPC : Direct Power Control en anglais). La première configuration de ce type de contrôle a été proposée par T. Neghouchi en 1998 (**Marin, 2009**), pour le contrôle direct des puissances instantanées actives et réactive du redresseur à MLI triphasé sans capteurs de tension du réseau. Le but commun de ce contrôle était d'assurer le prélèvement de courants sinusoïdaux tout en garantissant un facteur de puissance unitaire avec un contrôle découplé des puissances active et réactive.

Dans ce chapitre la technique DPC est proposée pour le contrôle des puissances actives et réactives statoriques d'une MADA entraîné par une éolienne. Cette stratégie est basée sur la sélection d'un vecteur de tension de telle manière que les erreurs entre les grandeurs mesurées et de référence sont réduites et maintenues entre les limites des bandes d'hystérésis (**Marin, 2009 ; Gaillard, 2010**).

Ce type de commande considère le convertisseur associé à la machine « CCM » comme un ensemble où le vecteur de commande est constitué par les états de commutation. Ses principaux avantages sont la rapidité de la réponse dynamique de couple et la faible dépendance vis-à-vis des paramètres de la machine. Cependant, l'inconvénient majeur de cette stratégie de contrôle, sont les oscillations des puissances et les harmoniques des courants générés par la MADA à cause de la fréquence de commutation variable.

III.2. Structure principale de la DPC appliqué à la MADA

La structure globale de la DPC, utilisant une table de commutation prédéfinie, appliqué au convertisseur triphasé coté machine « CCM » est montrée à la **figure 21**. Elle est analogue à celle du contrôle direct de couple (DTC) ; au lieu du couple et du flux rotorique, ce sont la puissance active et réactive statoriques qui sont les grandeurs contrôlées. Son principe consiste à sélectionner une séquence des ordres de commutation (S_a , S_b , S_c) des semi-conducteurs constituant le CCM à partir d'une table de commutation. La sélection s'effectue sur la base des erreurs (ϵ_{PS} et ϵ_{QS}) entre les références des puissances active et réactive (P_s^* et Q_s^*) et les valeurs réelles (P_s et Q_s), fournies par deux comparateurs à hystérésis de sorties numérisées HP et HQ respectivement, ainsi que sur le secteur (zone) dans lequel se trouve le vecteur flux rotorique (**Hamecha, 2013**).

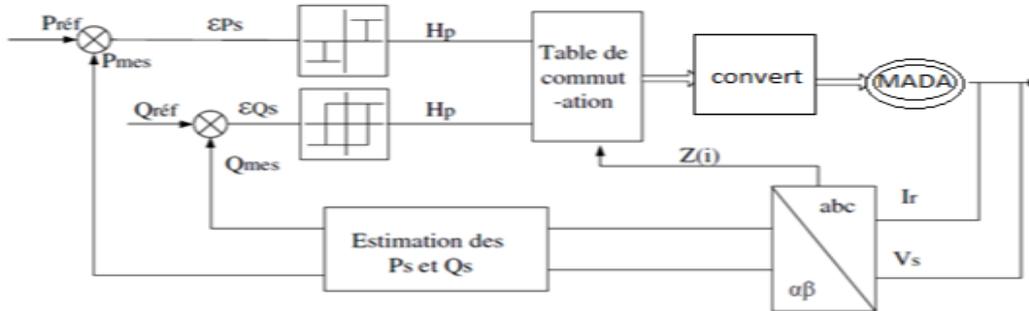


Figure 22 : Configuration de la DPC de la MADA

III.2.1 Avantages de la commande DPC

- Le calcul rapide des puissances instantanées permet l'obtention d'une dynamique très élevée.
- La simplicité, c'est-à-dire, la non utilisation de boucles imbriquées, ni des transformations de coordonnées ni de modulateur (Hamecha, 2013).

III.3. Application de la DPC à MADA

Afin d'aboutir à une table de commutation assurant un contrôle simultané des puissances active et réactive, sur tous les secteurs, il est indispensable d'étudier les variations provoquées par l'application de chacun des vecteurs de commande sur ces dernières, et cela au cours d'une période complète de la tension rotorique. Les vecteurs de commande sélectionnés dans cette table de commutation doivent assurer la restriction de l'erreur de suivi des références des deux puissances active et réactive (Ouchen, 2017).

III.3.1. Estimation de la puissance active et réactive

Il y a trois méthodes pour calculer la puissance active et réactive ;

- a) Par la mesure des courants et des tensions,
- b) Par estimation des tensions du réseau et mesure des courants,
- c) Par estimation du flux virtuel et mesure des courants.

Pour estimer les deux grandeurs P_s et Q_s , on met la commande directe de puissance (DPC) ou (direct power control) au niveau du rotor de la MADA, sachant que le modèle de la MADA est celui qui est simplifié à partir de la transformé du Park. Nous pouvons trouver les relations de P_s et Q_s en fonction des deux composantes du flux rotorique dans le référentiel $(\alpha-\beta)$. Ce référentiel tourne avec l'angle de rotation constant. Les puissances active et réactive sont

contrôlées par deux comparateurs à hystérésis, les valeurs mesurées des puissances étant estimées à partir des relations suivantes (Ouchen, 2017) :

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} V_s \phi_{ra} \\ Q_s = -\frac{3}{2} \left(\frac{V_s}{\sigma L_s} \Psi_s - \frac{V_s L_m}{\sigma L_s L_r} \phi_{ra} \right) \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

D'ou :

$$\begin{cases} \phi_{ra} = \sigma L_r i_{ra} + \frac{L_m}{L_s} \Psi_s \\ \Psi_{r\beta} = \sigma L_r i_{r\beta} \\ |\bar{\Psi}| = \frac{|\bar{v}_s|}{\omega_s} \\ \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Si, en introduisant l'angle δ qui se trouve entre le vecteur flux statorique et rotorique, P_s et Q_s deviennent :

$$P_s = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega_s |\Psi_s| |\Psi| \sin \delta \quad (\text{III.3})$$

$$Q_s = \frac{3}{2} \frac{\omega_s}{\sigma L_s} |\Psi_s| \left(\frac{L_m}{L_r} |\Psi_r| \cos \delta - |\Psi_s| \right)$$

La dérivée des deux équations donne :

$$\frac{dP_s}{dt} = -\frac{3}{2} \frac{L_m \omega_s}{\sigma L_s L_r} |\Psi_s| d\left(\frac{|\Psi_r| \sin \delta}{dt}\right) \quad (\text{III.4})$$

$$\frac{dQ_s}{dt} = \frac{3}{2} \frac{L_m \omega_s}{\sigma L_s L_r} |\Psi_s| d\left(\frac{|\Psi_r| \cos \delta}{dt}\right)$$

Comme on le voit dans (III.4), ces deux dernières expressions montrent que les puissances actives et réactives statoriques peuvent être contrôlées par la modification de l'angle relatif δ entre les vecteurs flux statorique et rotorique et de leurs amplitudes (**fig. 23**).

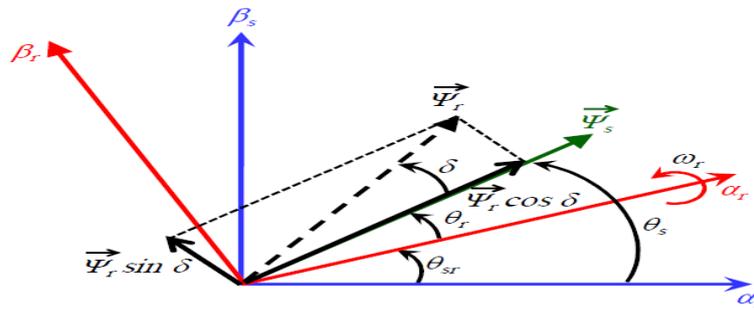


Figure 23: Décomposition du vecteur flux rotorique dans le plan (α - β).

III.3.2. Choix des comparateurs à hystérésis

De manière à obtenir de très bonnes performances dynamiques, le choix d'un correcteur à hystérésis à deux niveaux semble être la solution la plus simple et la mieux adaptée à la commande de la puissance active et réactive. Ces comparateurs (figure III.3) doivent permettre de contrôler l'échange de la puissance active et réactive entre la MADA et le réseau électrique dans les deux sens et avec les deux modes de fonctionnement hypo et hyper synchronede la MADA.

Similairement à la DTC, la DPC pour la ϵ ADA est basée sur la sélection d'un vecteur de tension rotorique de telle manière que les erreurs entre les grandeurs mesurées et de référence soient réduites et maintenues entre les limites des bandes d'hystérésis(Ouchen, 2017).

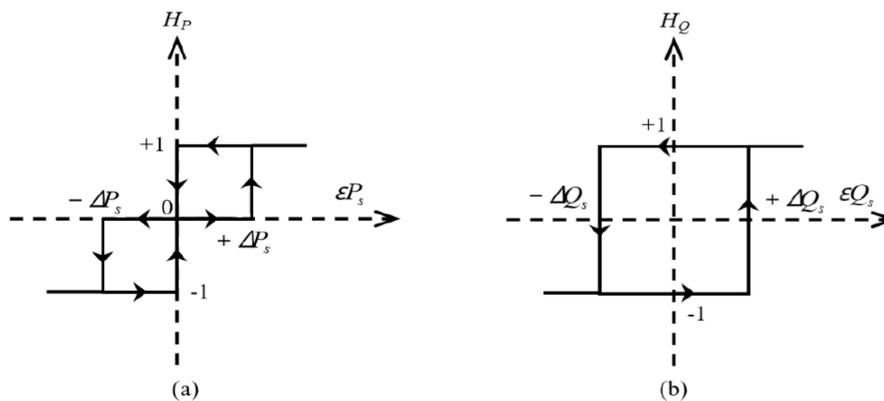


Figure 24 : Comparateurs à hystérésis : (a) puissance active, (b) puissance réactive

Ces comparateurs à hystérésis, appliqués sur la puissance active et réactive, permettent de détecter les dépassements de la zone de contrôle et de respecter les relations suivantes:

$$\text{Si } \epsilon Q_s \geq \Delta Q_s \rightarrow H_Q = +1 \text{ (III.5)}$$

$$\text{Si } \epsilon Q_s \leq -\Delta Q_s \rightarrow H_Q = -1$$

$$\text{Si } \varepsilon P_s \geq \Delta P_s \rightarrow H_p = +1$$

$$\text{Si } -\Delta P_s \leq \varepsilon P_s \leq \Delta P_s \rightarrow H_p = 0$$

$$\text{Si } \varepsilon P_s \leq -\Delta P_s \rightarrow H_p = -1$$

Les comparateurs analogiques ont un désavantage notable : la fréquence d'échantillonnage est variable. Mais, ce problème peut être éliminé si on utilise des comparateurs discrets. Par cela, les variations des puissances ne sont pas maintenues exactement dans la bande d'hystérésis, mais on fonctionne à temps d'échantillonnage fixe (Ouchen, 2017).

III.3.3. Elaboration de la table de commutation

Il est mentionné précédemment (III.2) que le traitement de la puissance active et réactive est identique en tous points à celui du couple et de flux dans la commande DTC. Donc, un apport en flux rotorique contribue au redressement du facteur de puissance au stator, c'est-à-dire à une diminution de la puissance réactive consommée (positive) par la machine. Cette relation est toujours vraie, quel que soit le mode d'opération de la machine. Pour sélectionner le vecteur de tension rotorique optimum, il faut connaître la position relative du flux rotorique.

Un onduleur triphasé à deux niveaux de tension peut produire huit combinaisons différentes, ces huit combinaisons engendrent huit vecteurs de tension qui peuvent être appliqués aux bornes rotoriques de la MADA. Il y a six vecteurs actifs et deux vecteurs nuls. Les positions spatiales dans le plan $(\alpha_r - \beta_r)$ des vecteurs actifs de tensions sont montrées dans la figure 25 suivante (Ouchen, 2017) :

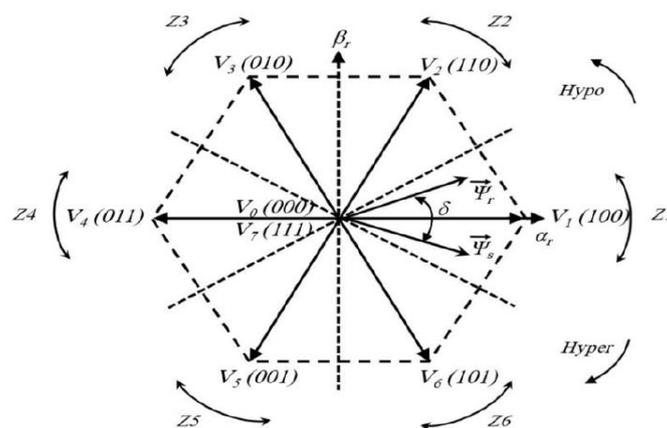


Figure 25 : Présentation des vecteurs de commutation.

Le partage du plan complexe en six zones angulaires Z ($i=1, \dots, 6$) peut être déterminé par la relation suivante :

$$-\frac{\pi}{6}(i-1)\frac{\pi}{2} \leq Z(i) < \frac{\pi}{6} + (i-1)\frac{\pi}{3} \quad (\text{III.5})$$

Il en découle que le **tableau II** des vecteurs optimaux est dérivé de la même manière en donnant priorité au contrôle de la puissance active sur la puissance réactive. Les signaux HP et HQ ainsi la position de vecteur flux rotorique δ , représentent les entrées de cette table de vérité, alors que les états de commutation S_a, S_b, S_c représentent sa sortie (Ouchen, 2017).

Tableau II: Table de sélection des vecteurs optimaux (puissance active et réactive) (Ouchen, 2017).

		Hq	1			-1		
		Hp	1	0	-1	1	0	-1
Secteur vis-à-vis de l'angle δ	1	(330°, 30°)	V5	V7	V3	V6	V0	V2
	2	(30°, 90°)	V6	V0	V4	V1	V7	V3
	3	(90°, 150°)	V1	V7	V5	V2	V0	V4
	4	(150°, 210°)	V2	V0	V6	V3	V7	V5
	5	(210°, 270°)	V3	V7	V1	V4	V0	V6
	6	(270°, 330°)	V4	V0	V2	V5	V7	V1

En fait, cette table de commutation (**Tab. II**) n'est pas la seule table utilisée par la DPC.

Néanmoins, la réalité fondamentale sur laquelle s'appuie la commande DPC est que le déplacement du flux rotorique dans la machine suit une progression continue dans le temps et qu'il semblera traverser chaque secteur un à un s'il est échantillonné suffisamment. L'étude du **tableau II** nous indique que si le flux rotorique était par exemple dans le secteur 2 et que le vecteur V3 venait tout juste d'être appliqué, la variation de la puissance réactive mesurée au stator doit inévitablement être négative puisque le vecteur V3 diminue la puissance réactive au stator. S'il n'en avait pas été ainsi, nous serions contraints d'admettre que notre estimation du secteur n'est plus juste et que le flux serait plutôt dans le secteur 1 ou 5. Compte tenu qu'il était précédemment dans le secteur 2, il serait peu probable qu'il soit maintenant dans le secteur 5, puisqu'il aurait « sauté » par-dessus deux autres secteurs.

III.4. Interprétation des résultats

Dans notre travail, nous avons étudié la commande directe de puissance de la MADA avec deux méthodes moyennent le logiciel MATLAB/ SIMULINK

-A vitesse du vent variable (avec contrôle MPPT).

III.4.1. Fonctionnement à vitesse du vent variable.

La vitesse du vent est de nature aléatoire et pour cela on utilise un profil de vent variable pour obtenir une vitesse du vent variable. On met en évidence les deux fonctionnements hyposynchrone et hyper synchrone.

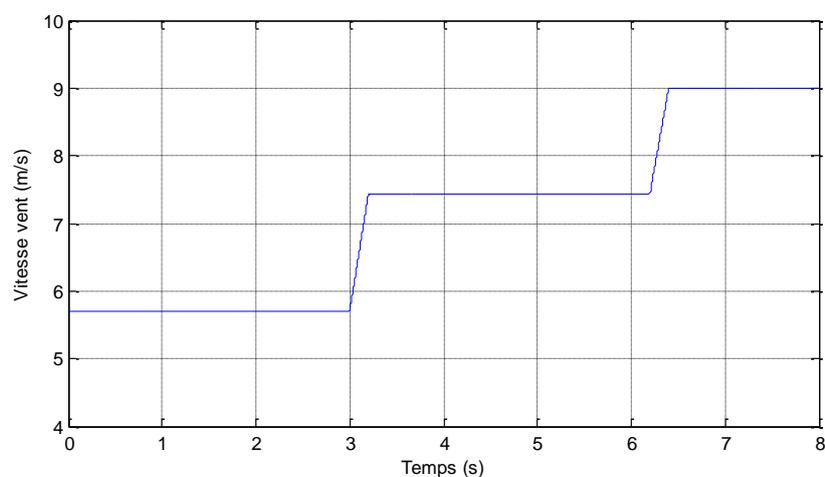


Figure 26 : Allure de la vitesse du vent.

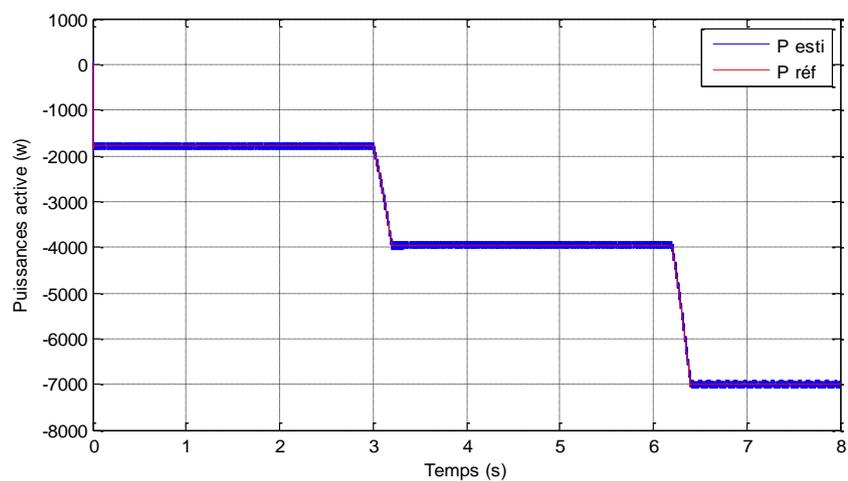


Figure 27 : Allure de la puissance active statorique.

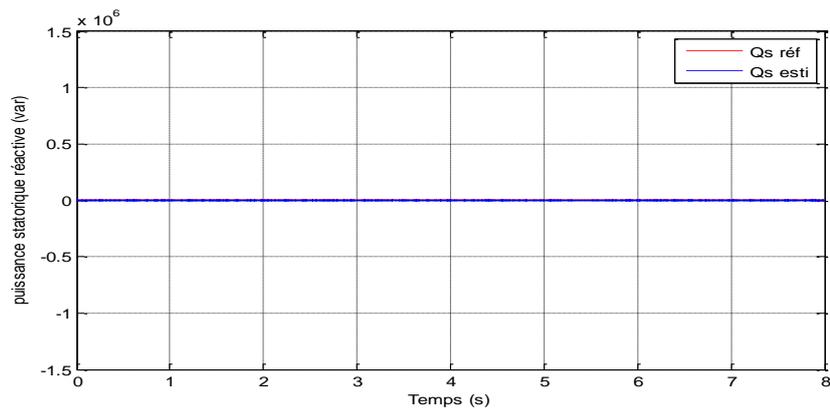


Figure 28: Allure de puissance réactive statorique $Q_s \text{ réf}=0$

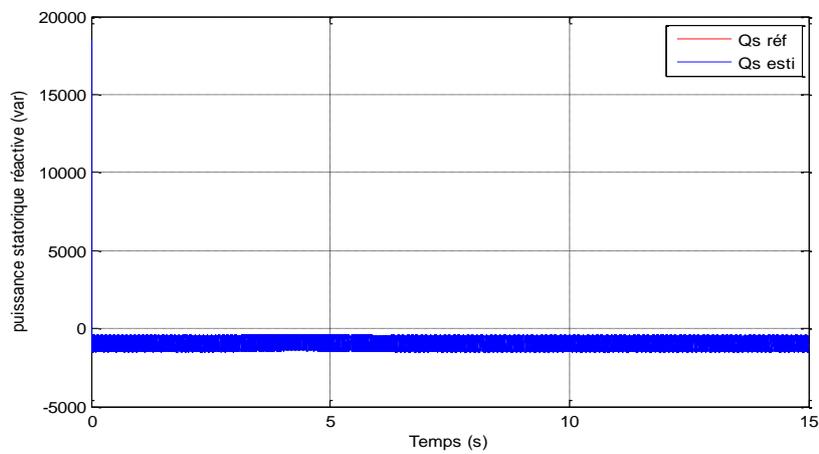


Figure 29 : Allure de puissance réactive statorique $Q_s \text{ réf}=-1000$

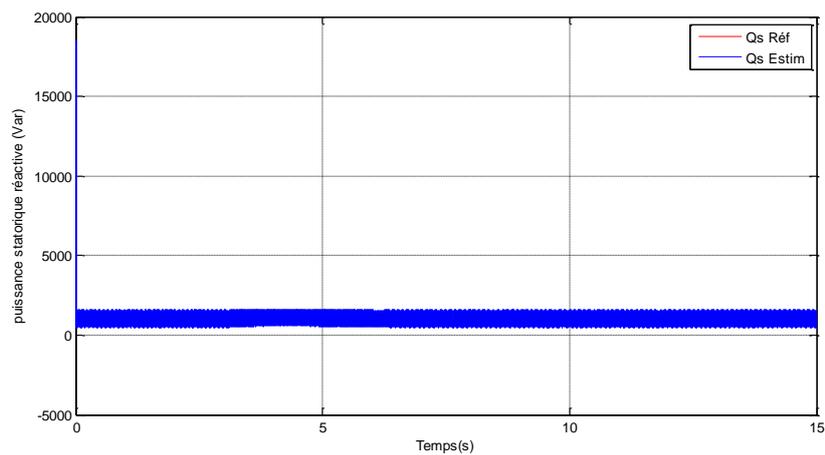


Figure 30 : Allure de puissance réactive statorique $Q_s \text{ réf}=1000$

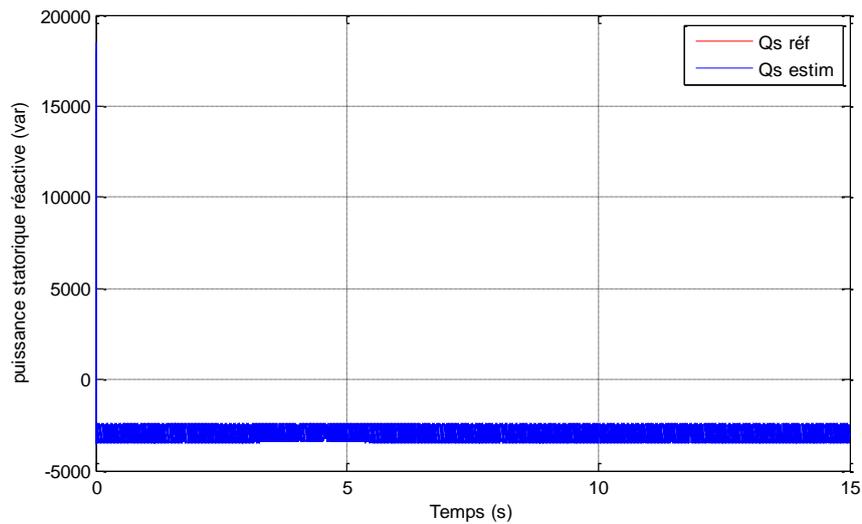


Figure 31 : Allure de puissance réactive statorique $Q_s \text{ réf} = -3000$

La puissance active de la MADA varie selon la puissance mécanique injectée par la turbine éolienne qui est la puissance de référence, la puissance réactive est nulle pour avoir un facteur de puissance unitaire (**Fig. 27**), (**Fig. 28**), (**Fig. 29**), (**Fig. 30**) et (**Fig. 31**).

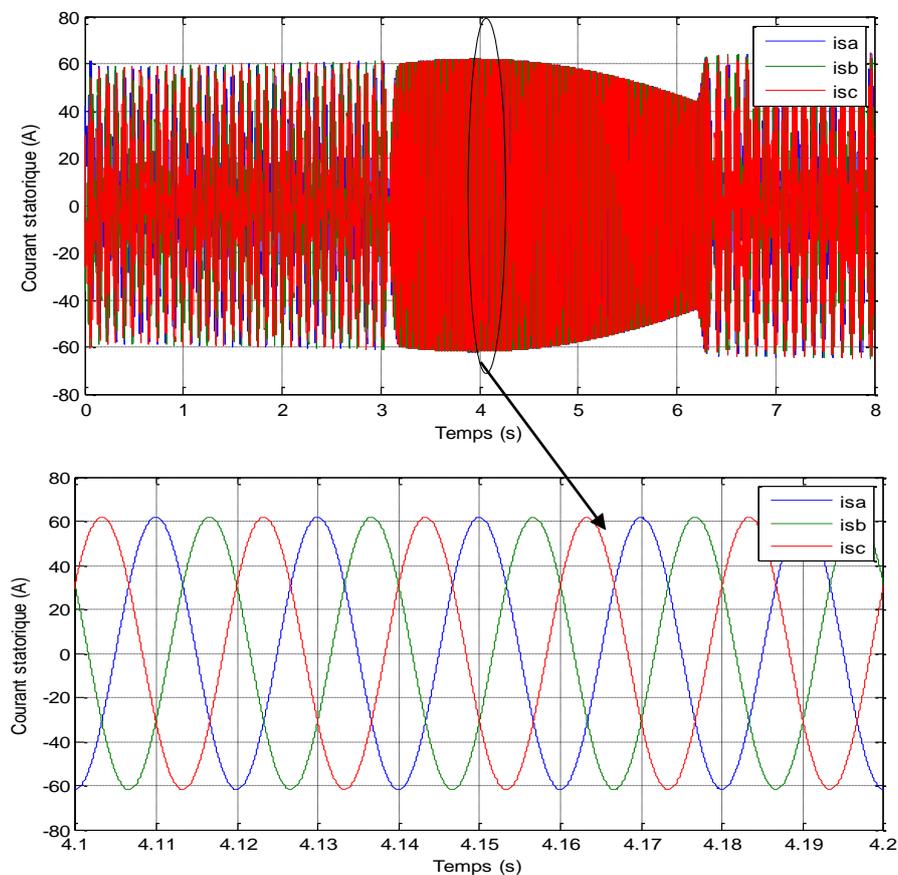


Figure 32: Allure des courants statoriques

Les **figures 32** montrent que les courants statoriques évoluent en fonction de la puissance active, la nature des courants est sinusoïdale sans perturbation.

III.5. Conclusion

Nous avons montré dans ce chapitre le découplage entre la puissance active et réactive de la MADA en utilisant la commande DPC. La commande directe de puissance (DPC) permet d'obtenir de hautes performances dynamiques avec une structure simple. Elle apporte une solution concrète aux problèmes de robustesse et de dynamique rencontrés dans les structures de commande vectorielles.

IV.1. Introduction

La composition de contrôle direct de couple DTC (direct torque control) des machines asynchrones sont initiées dans la deuxième moitié des années 80 par Takahashi et Depenbrock comme concurrentielles des méthodes classiques (**Tamassoute et Belbessai, 2007**).

La commande DTC est un type de commande vectorielle pour un onduleur de tension alimentant une machine asynchrone. Son objectif est de réguler le flux rotorique et le couple électromagnétique sans disposer de mesures de vitesse, de flux ou de couple. Les seules mesures utilisées sont les tensions et les courants de la machine. Le flux et le couple sont entièrement estimés à partir de ces mesures.

La DTC consiste à commander directement la fermeture et l'ouverture des interrupteurs de l'onduleur selon l'évolution des valeurs du flux rotorique et du couple électromagnétique de la machine ainsi dans ce chapitre on va procéder à la comparaison des deux commandes directes de puissance DPC et couple DTC appliquées sur une éolienne à base d'une MADA .

IV.2. Caractéristiques générales d'une commande directe de couple

- La DTC est basée sur la sélection des vecteurs optimaux de commutation de l'onduleur.
- La commande indirecte des intensités et tensions rotoriques de la machine.
- L'obtention des flux et des courants rotoriques proches des formes sinusoïdales.
- La réponse dynamique du couple de la machine est très rapide.
- L'existence des oscillations de couple qui dépend de la largeur des bandes des comparateurs à hystérésis.
- La fréquence de commutation de l'onduleur dépend de l'amplitude des bandes d'hystérésis (**Bouzera et Hachemi Ammaoui, 2007 ; Zekkour et al., 2013**).

IV.3. Avantages et les inconvénients de la DTC

IV.3.1. Avantages

- Une très bonne dynamique du couple qui peut se caractériser par des faibles temps de réponse ;
- Absence de bloc de calcul de modulation de tension MLI ;
- Il n'est pas nécessaire de faire un découplage des courants par rapport aux tensions de commande comme dans le cas de la commande vectorielle ;

- Pas d'obligation de connaître avec une grande précision la position statorique, car seule l'information sur le secteur dans lequel se trouve le vecteur flux rotorique est nécessaire ;
- Robustesse vis-à-vis des variations paramétriques ;
- Possibilité d'appliquer les algorithmes du système avec des cartes d'acquisition.

IV.3.2. Inconvénients

- Problèmes de commande à basse vitesse.
- Nécessité de disposer d'estimateurs du flux rotorique et du couple.
- Existence d'oscillations de couple.
- Fréquences de commutation non constantes (utilisation de régulateurs à hystérésis).

Cela conduit à un contenu harmonique riche augmentant les pertes, les bruit acoustiques et les oscillations du couple qui peuvent exciter des résonances mécaniques.

IV.4. Principe de la commande DTC

La commande directe du couple (DTC) a pour objectif la régulation directe du couple de la machine par l'application des différents vecteurs de tensions de l'onduleur.

Les variables contrôlées sont le flux rotorique et le couple électromagnétique qui sont habituellement commandés par des régulateurs à hystérésis. Il s'agit de maintenir ces deux grandeurs instantanées à l'intérieur d'une bande autour de la valeur désirée.

La sortie de ces régulateurs détermine le vecteur optimal de tension de l'onduleur à appliquer à chaque instant de commutation (**Bouzera et Hachemi Ammaoui, 2007 ; Zekkour et al.,2013**).

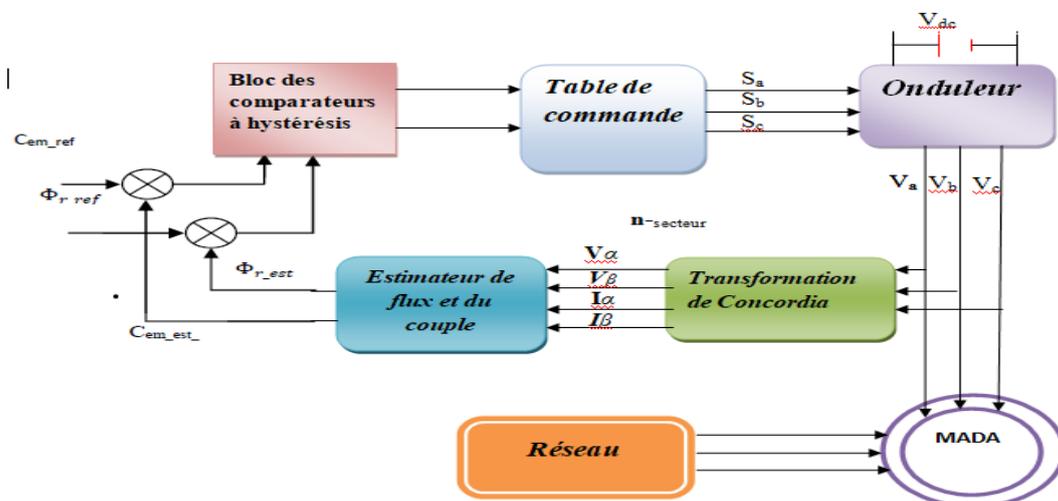


Figure 33: Schéma de la structure générale de la commande directe du couple.

IV.5.Simulation et interprétation des résultats

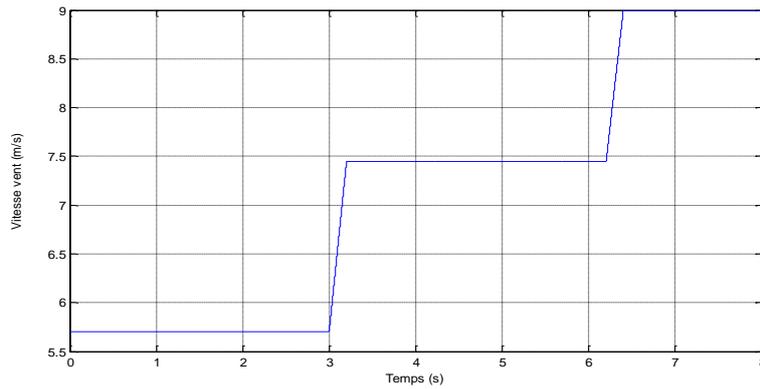


Figure 34: Profil du vent.

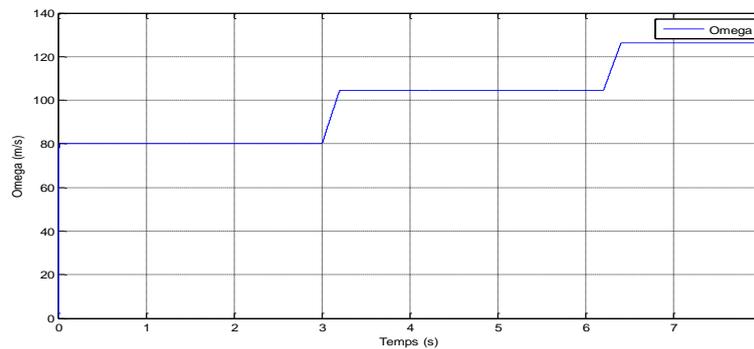


Figure 35: vitesse turbine

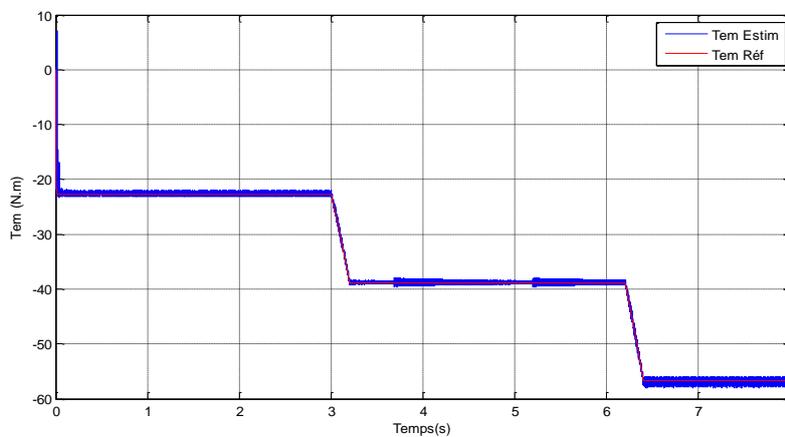


Figure 36 : Allure du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique suit parfaitement sa consigne et varie en fonction de la vitesse du vent de manière à maximiser le coefficient de puissance.

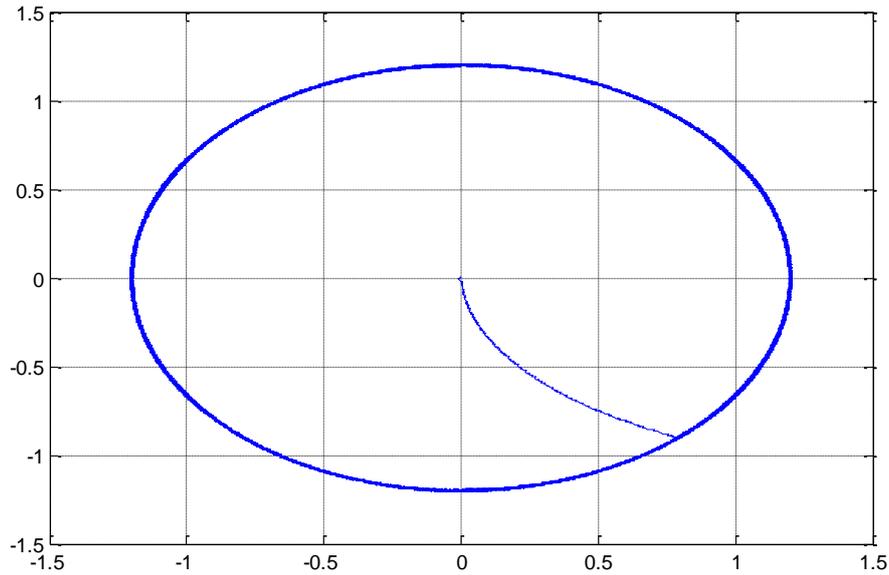


Figure 37 : Trajectoire du flux rotorique estimé

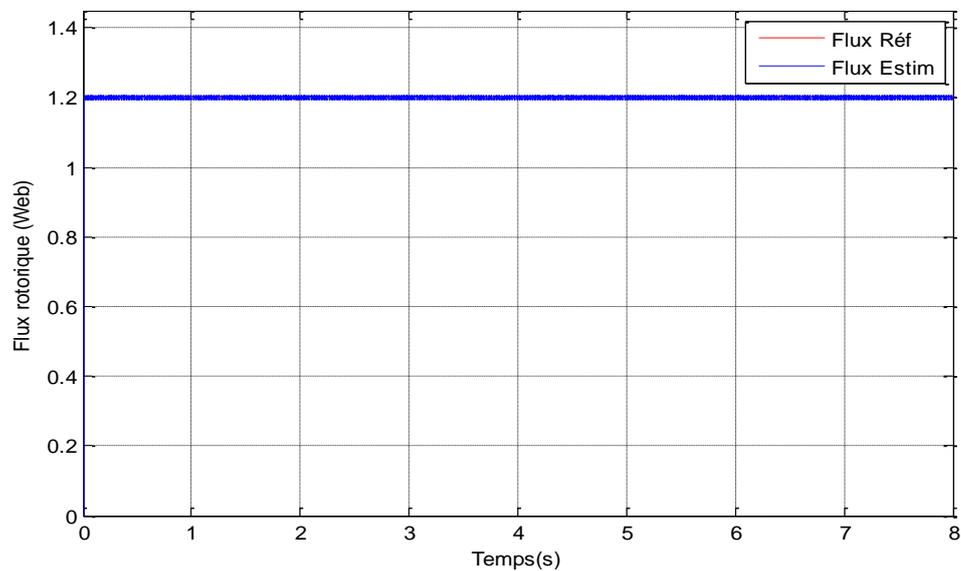


Figure 38: Evolution du flux rotorique estimé par rapport à sa référence.

L'allure du flux est parfaitement circulaire **Figure 37**, ce qui justifie que son module est toujours constant **Figure 38** malgré la variation du couple électromagnétique ce qui vérifie la notion du découplage.

IV.6.Comparaison entre les deux commande DPC et DTC

IV.6.1. Comparaison des puissance active et réactive

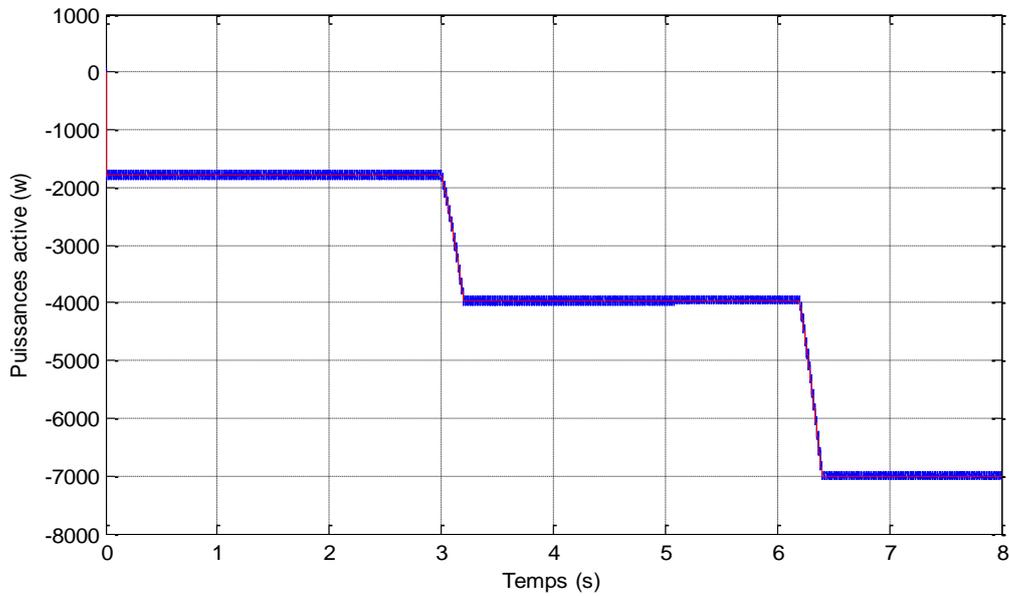


Figure 39 : Allure de la puissance active statorique DPC

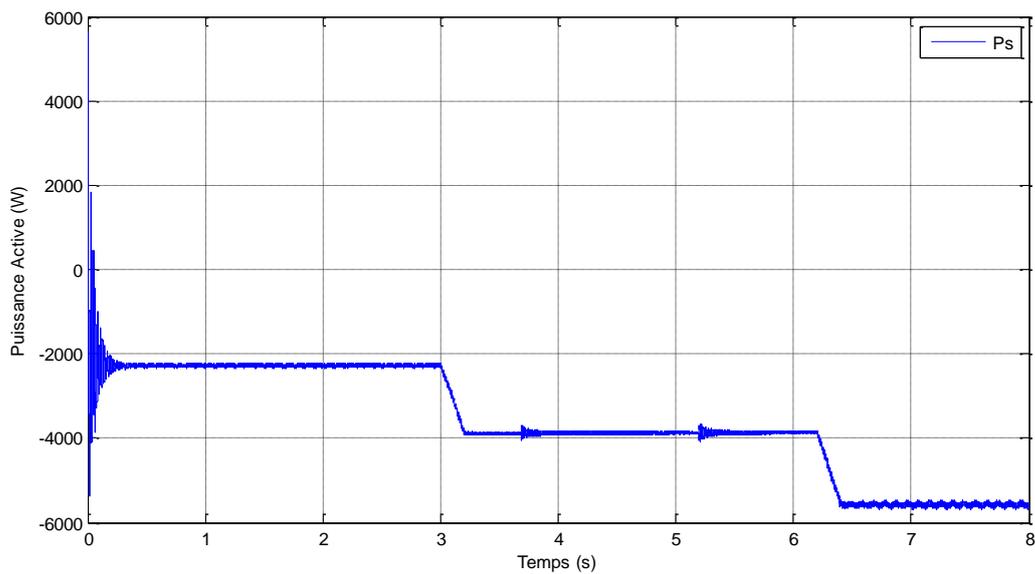


Figure 40 : Allure de la puissance active statorique DTC

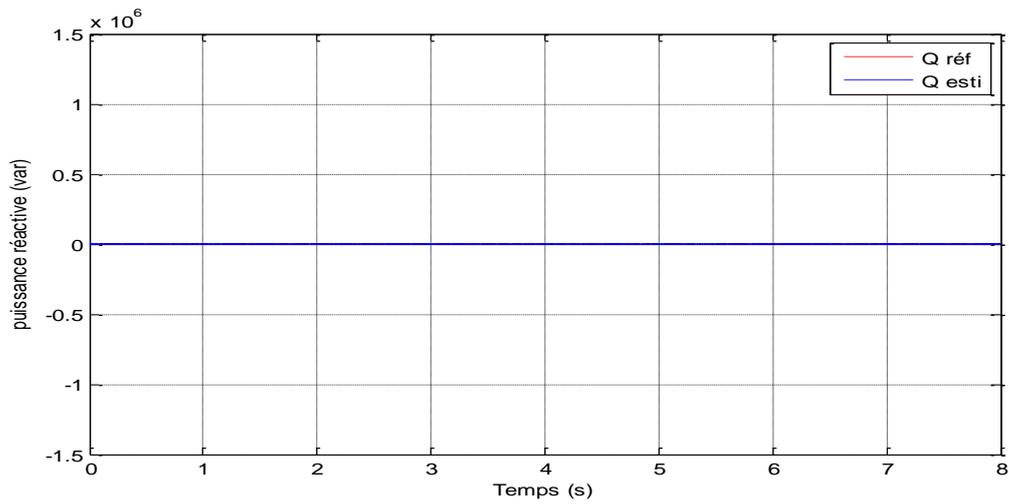


Figure 41 : Allure de la puissance réactive statorique DPC

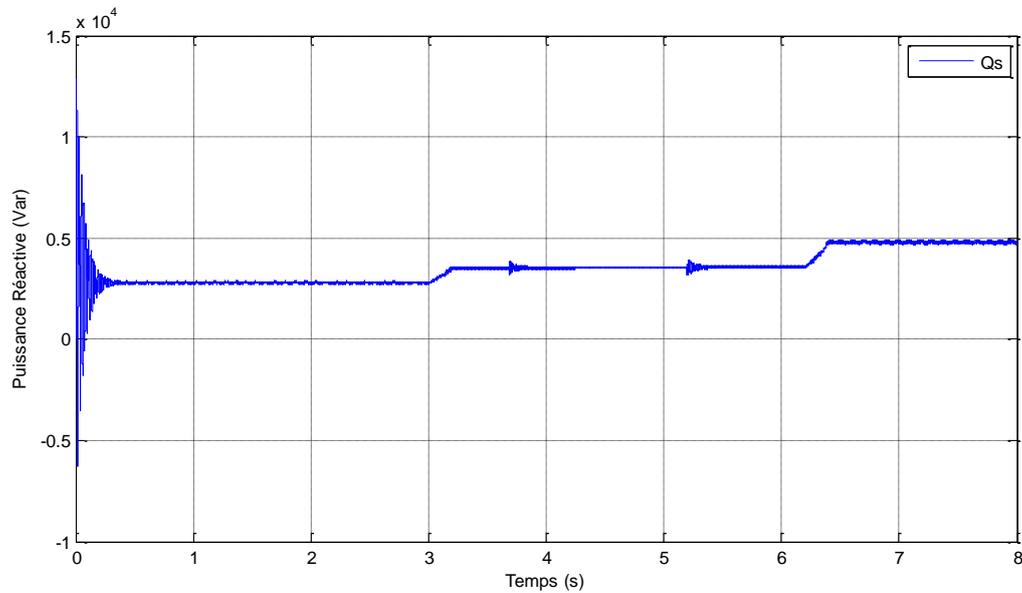


Figure 42 :Allure de la puissance réactive statorique DTC

A partir de la **figure 41** et **figure 43** pendant l'évolution des puissance statorique on remarque que Q_s et P_s estimé par rapport à sa référence est suit parfaitement sans perturbation dans la commande DPC par contre dans les **figure 42**, **figure 44** les puissances Q_s et P_s dans la commande DTC le résultat reçu on remarque des perturbations qui n'est pas favorable a notre système.

IV.6.2. Comparaison des courants statorique

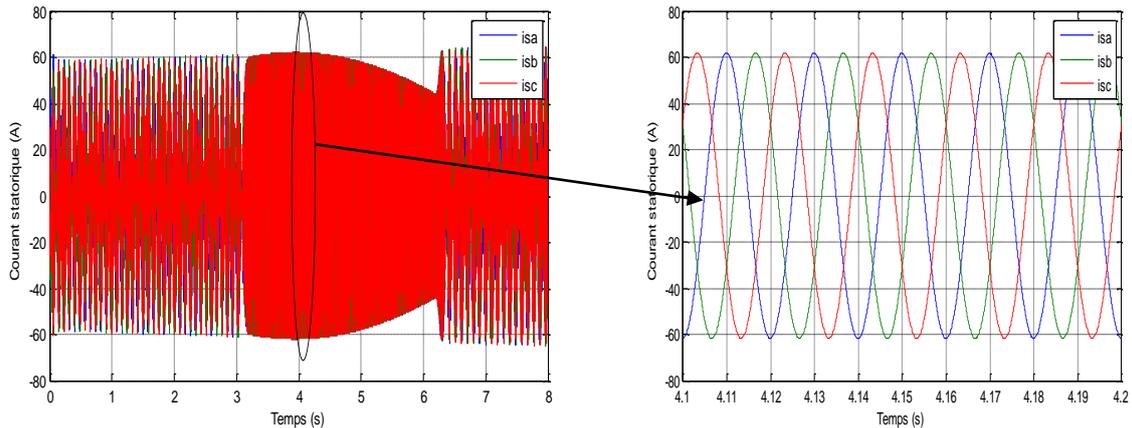


Figure 43: Allure des courants statoriques DPC

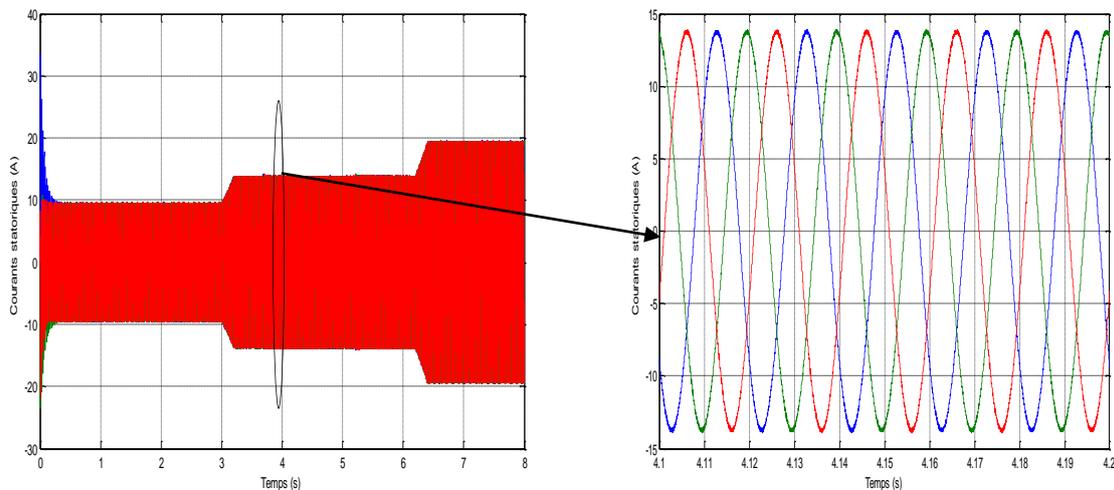


Figure 44: Allure des courants statoriques DTC

D'après la **figure 45** l'évolution de l'Allure des courants statorique dans la DPC sont de nature sinusoïdale sans perturbation par contre l'Allure des courants statorique dans la DTC on remarque une léger perturbation (**Fig. 46**).

IV.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté de la commande directe de couple (DTC) applique sur une éolienne à base d'une MADA avec les résultats ensuite nous avons faits la comparaison entre cette dernière et la commande direct de puissance (DPC) applique sur une éolienne à base d'une MADA et nous avons conclu que cette dernier offres un fournissement des puissance active et réactive dans tous les régimes mais elle pose des problèmes par apport a

la qualité d'énergie qui nécessite l'utilisation des filtres, par contre la commande DTC offre une bonne qualité d'énergie, sans fournir la puissance réactive dans tout le régime.

Conclusion Générale

Notre ouvrage porte sur la commande d'un aérogénérateur à base d'une GADA par une commande DPC. Ainsi, nous avons dans un premier temps présenté une modélisation complète d'une éolienne basée sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA).

Après cela une étude par simulation de la commande de cette machine par la technique DPC basée sur la table de commutation a été abordée. Nous avons, tout d'abord, présenté des généralités sur les systèmes aérogénérateurs. Dans ce contexte, quelques notions principales au sujet de la technologie utilisée dans les systèmes éoliens ont été données comme les différents types et leur mode de fonctionnement. De plus, on a fait une étude générale de la machine asynchrone à double alimentation (MADA), ses applications, ses modes de fonctionnement et ses avantages et inconvénients.

Nous avons, ensuite, abordé la modélisation complète et globale du système de conversion d'énergie éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation. On a vu l'intérêt de la transformation de Park qui permet d'avoir un système d'équations différentielles à coefficients constants pour faciliter la commande

Ensuite, nous avons élaboré une stratégie de contrôle commande DPC (direct power control). Cette stratégie propose de contrôler directement la puissance active et réactive de la MADA à l'aide d'une table de commutation similaire à celle de la DTC. Cette stratégie de contrôle est plus simple et plus robuste que le contrôle à axe orienté à cause de la moindre dépendance de paramètres de la MADA.

Enfin nous avons élaboré la tactique de control direct du couple (DTC), dans le but de faire une comparaison avec la commande directe de puissance (DPC).

En perspectives nous pouvons envisager les points suivants :

- Etude des perturbations inhérentes au couplage du système éolien avec le réseau électrique
- Utiliser d'autres techniques de l'intelligence artificielle (IA) pour l'amélioration des performances des stratégies de contrôle classiques DTC et DPC, tels que : la logique floue et neuro-floue.

Références bibliographiques

Référence bibliographique

-A-

Abdelli, A., (2007), Optimisation Multicritère d'une Chaîne éolienne passive, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France.

Abdoune, F., (2011), Etude et Contrôle des Aérogénérateurs Basés sur les Machines Asynchrones à Rotor Bobiné, Mémoire de magister, Université de Bejaïa, Algérie.

Abu-tabak, N., (2008), Stabilité dynamique des systèmes électriques multi machines : modélisation, commande, observation et simulation, Thèse de Doctorat, École Centrale de Lyon.

-B-

Barambones, O., Alkorta, P., (2010), Wind turbine output power maximization based on sliding mode control strategy», IEEE, pp.364-369.

Belhoul, T., (2013), étude et contrôle des aérogénérateurs a base des machines asynchrones double alimentation connectés à un réseau électrique autonome, mémoire de magister.

Belhoul, T., (2013), Etude et Contrôle des Aérogénérateurs à base des Machines Asynchrones Double Alimentées Connectées à un Réseau Electrique Autonome l'université de Bejaia.

Bensoam, M. (2005), Cours génie électrique, master instrumentation.

Bouzera, El.M., Hachemi Ammaoui, Kr., (2007), Etude de la commande directe du couple d'une machine asynchrone avec optimisation énergétique, Mémoire d'ingénieur, Université A. Mira de Béjaia, Algérie.

Boyette, A., (2006), Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne, Thèse doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I.

-C-

Chekkal, S., (2011), Evaluation des Performances de l'Aérogénérateur à base de la Machine Asynchrone Double Etoile Connecté au Réseau Electrique, Mémoire de magister, Université de Bejaïa, Algérie.

Cherfia, N., (2010), Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens, Mémoire de magister de l'université de Constantine, Algérie.

Claessens, B., (2012), Vade-Mecum pour l'implantation d'éolienne de faibles puissances en Wallonie, Document, Compagnons d'Eole, APERE, Vents d'Houyet et E.R.B.E. pour le SPW – DGO4.

Références bibliographiques

-D-

Davigny, A., (2007), Participation aux services système de fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie, Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, France, Décembre.

-E-

El Aimani, S., (2004), Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension, Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, France.

-G-

Gaillard, (2010), Système éolien base sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service, Thèse de Doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy I, France.

-H-

Hamdi, N., (2008), Modélisation et Commande des Génératrices Eoliennes, Mémoire de Magister Université Mentouri de Constantine.

Hamecha, S., (2013), étude et commande d'une éolienne a base d'une machine asynchrone a aimant permanent, thèse doctorat.

Hamecha, S., (2013), Etude et Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents » Mémoire de Magister Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Hamecha, S., (2013), étude et commande d'une éolienne à base d'une machine asynchrone a aimant permanent, thèse doctorat.

-I-

Idjdarene, K., (2010), Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes, Thèse de doctorat de l'Université Lille 1, France.

-K-

Kato, S., Hoshi, N., Oguchi, K., (2001), A Low Cost System of Variable-Speed Cascaded Induction Generators for Small Hydroelectricity», Conference Record of the IEEE Industrial Applications Conference, pp. 1419–1425.

Références bibliographiques

-L-

Leclercq, L., (2004), Apport du Stockage Inertiel Associé à des Eoliennes dans un Réseau Electrique en vue d'Assurer des Services Systèmes, Thèse de doctorat Université de Lille, France.

-M-

Maghsel, S., (2012), contribution à la modélisation et la commande d'une turbine éolienne, université de 20 aout 1965 Skikda.

Marin, (2009), Intégration des éoliennes dans les réseaux électriques insulaires, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, France.

Martin, J., (1997), énergies éoliennes, Techniques de l'ingénieur, traité de génie énergétique, vol, b 8 585 1- b 8 585 21.

Mekkaoui, N., (2004), Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée, Mémoire de Magister, Université Batna, Algérie.

Mirecki, A., (2005), Etude Comparative de Chaines de Conversion d'Energie Dédiées à une Eolienne de Petite Puissance, Thèse de Doctorat, INPT, France.

Mjabber, E., (2013), modalisation et la commande de la MADA pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne » thème master en électrotechnique université sidi Mohammed ben Abdallah.

Mjabber, E., (2013), Modélisation et commande de la MADA pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne, thème master en électrotechnique université sidi Mohammed ben Abdallah.

-N-

Nouh, A., (2008), Contribution au Développement d'un Simulateur pour les Véhicules Electriques Routiers, Thèse de Doctorat, Université de Belford-Montbéliard, France.

-O-

Ouchen, S., (2017), contribution à la commande directe de puissance dédiée au filtrage actif, associé à une source photovoltaïque, thèse de doctorat, université Mouhemed KHIDER Beskra.

Références bibliographiques

-P-

Poitier, P.F., (2003), étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne - machine asynchrone à cage autonome ; machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau, thèse de doctorat, université de Nantes, France.

Poza Lobo, F. (2003), Modélisation, Conception et Commande d'une Machine Asynchrone sans Balais Doublement Alimentée pour la Génération à Vitesse Variable, Thèse de doctorat, Université de Grenoble, France.

-S-

Salloum, G., (2007), contribution à la commande robuste de la machine asynchrone a double alimentation, Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse.

Siddo Abdoulaziz, M., (2007), Etude du Générateur Asynchrone pour l'Utilisation dans la Production de L'Energie Eolienne, mémoire d'ingénieur d'école nationale polytechnique.

-T-

Tamassaout, K., Belbessai, S., (2007), Contrôle directe modulé du couple d'une génératrice asynchrone dédiée à une éolienne, Mémoire de master, Université A. mira de Bejaia, Algérie.

Taraft, S., (2008), Etude du Stockage Inertiel d'Energie dans une Chaîne de Conversion Eolienne à Vitesse Variable Basée sur une Machine Asynchrone à Double Alimentation, mémoire de magister d'Université de Béjaia.

Taraft, S., (2008), 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 en électrotechnique, Université Abderrahmane MIRA – Béjaia (Algérie).

-V-

Vidal, P., (2004), Commande Non-Linéaire d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation, Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, France.

-Z-

Zekkour, A., Abdessemed, D., Nacéri, F., (2013), Contrôle direct de couple (DTC) de la machine à induction, Mémoire de magister, Université de Batna, Algérie.

Références bibliographiques

Références sur le site

www.energies-renouvelables.eu, consulté le 2013.

www.energiesrenouvelables.org, consulté le 2012.

www.iern.net

www.outils-solaires.com.

www.ulg.ac.be. Consulté le 2018.

www.windpower.org, consulté le 2013.

Annexes

Annexe 01 : Paramètres de la MADA et de la Turbine

- **La MADA**
 - Tension d'alimentation : $V_s = 440V$ 50 Hz
 - Puissance nominale : $P_n = 7.5$ KW
 - Resistance d'enroulement statorique : $R_s = 1.02\Omega$
 - Resistance d'enroulement rotorique : $R_r = 0.8\Omega$
 - Inductance cyclique statorique : $l_s = 0.0930H$
 - Inductance cyclique rotorique: $l_r = 0.0810H$
 - Inductance magnétisante: $M = 0.0664H$
 - Nombre de paire de pôles : $P = 3$
- **La turbine**
 - Rayon de l'hélice : $R = 3.24m$
 - Gain de multiplicateur de vitesse : $G = 5.065$
 - Inertie totale : $J = 0.00075$ Kg/m²
 - Coefficient de frottement visqueux : $f = 3.1 * 10^{-3}N$ ms/rd
 - Masse volumique de l'air : $\rho = 1.225Kg/$

Annexe 02 : Figures de systèmes sous Simulink

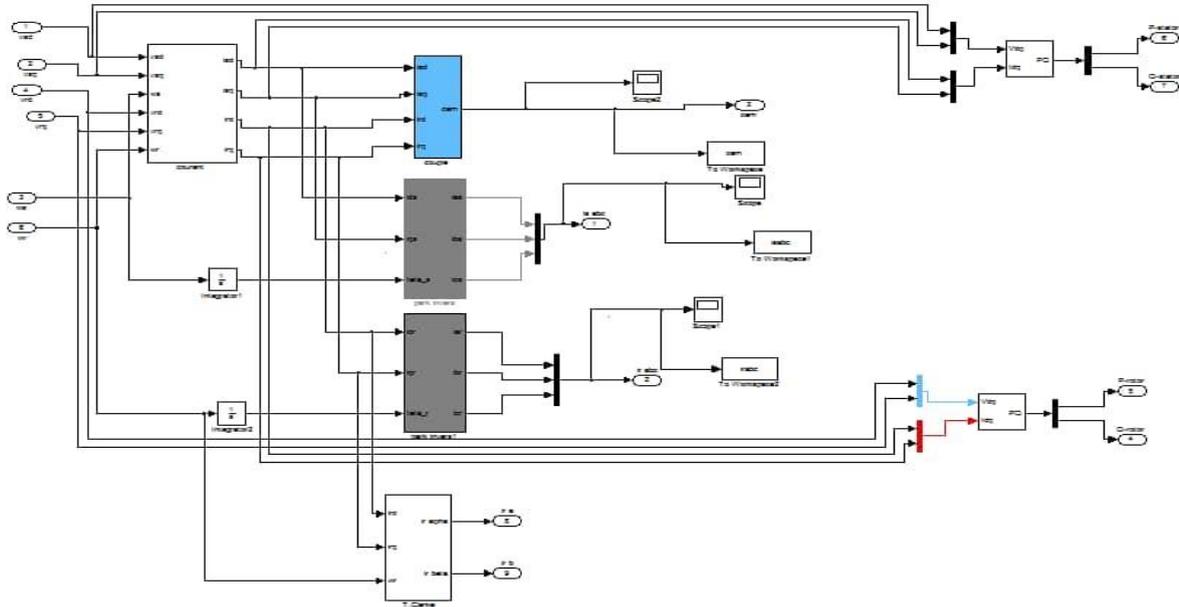


Figure 1 : MADA (Azouzi et Alem, 2019)

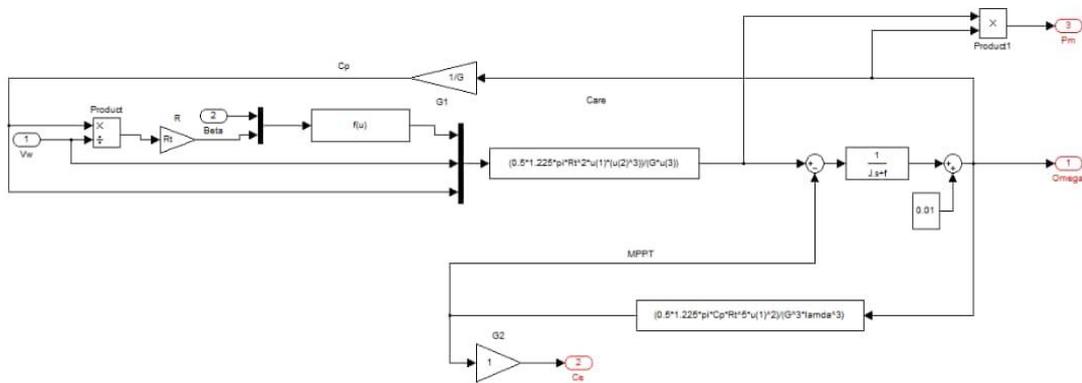


Figure 2 : Turbine (Azouzi et Alem, 2019)

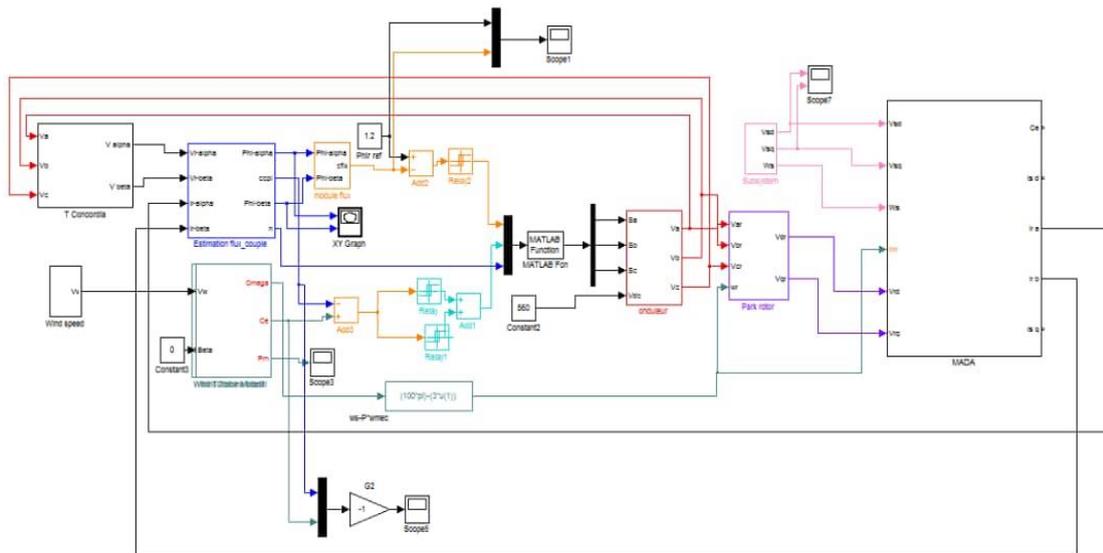


Figure 3 : Commande DTC (Azouzi et Alem, 2019)

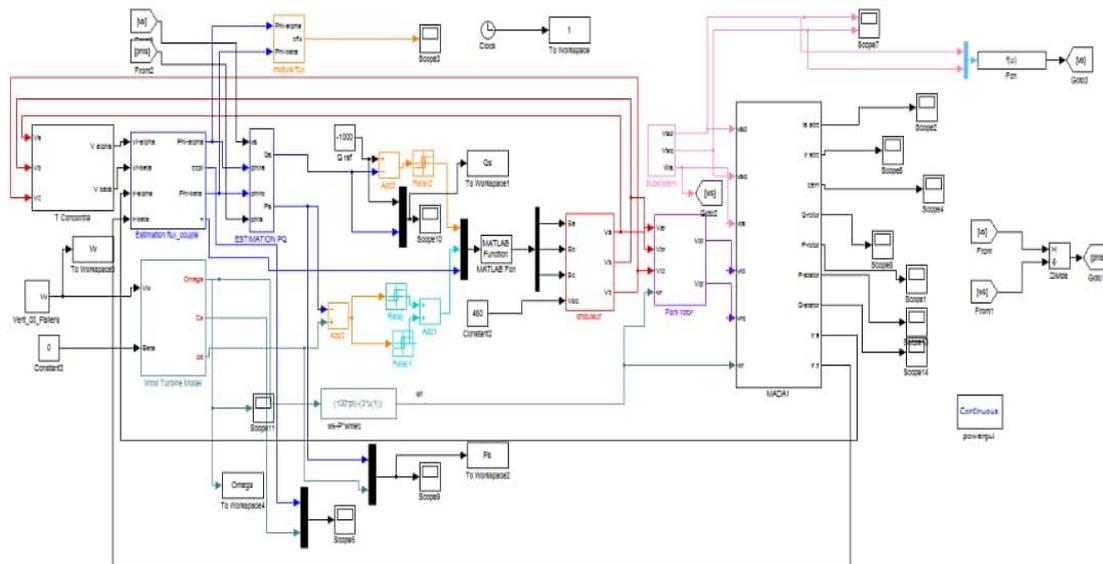


Figure 4 : Commande DPC (Azouzi et Alem, 2019)

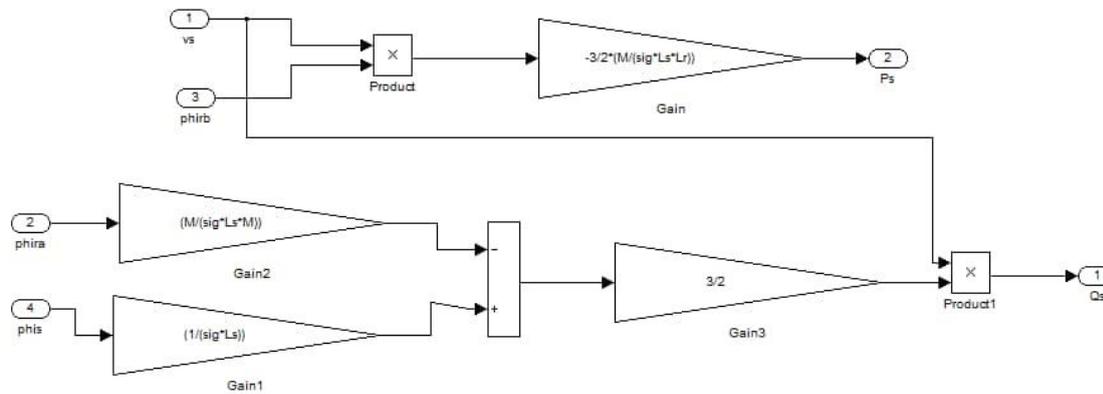


Figure 5 : Estimation puissance active et réactive (Azouzi et Alem, 2019)

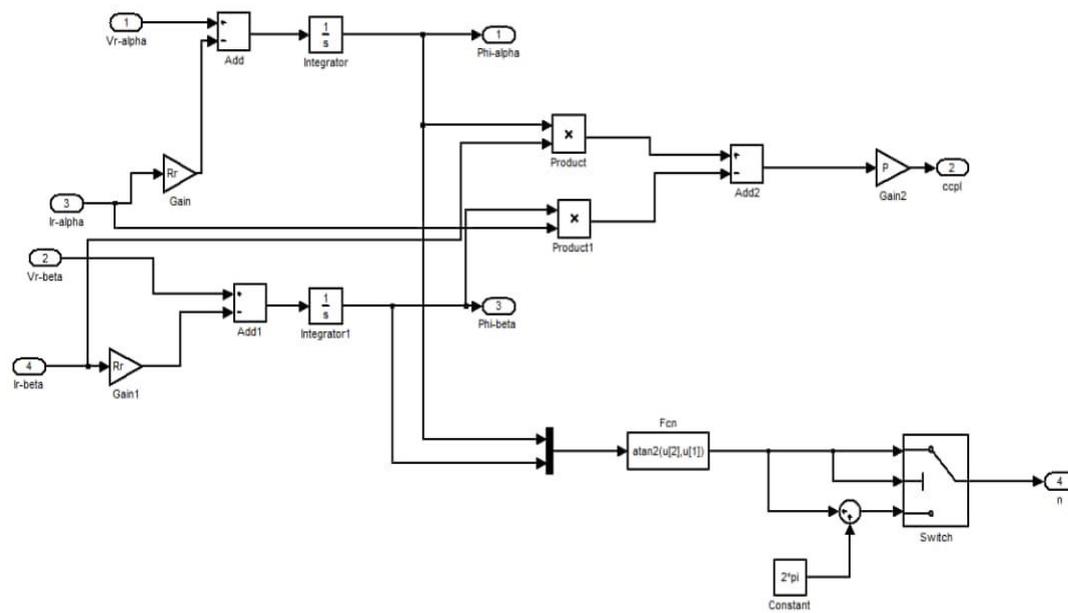


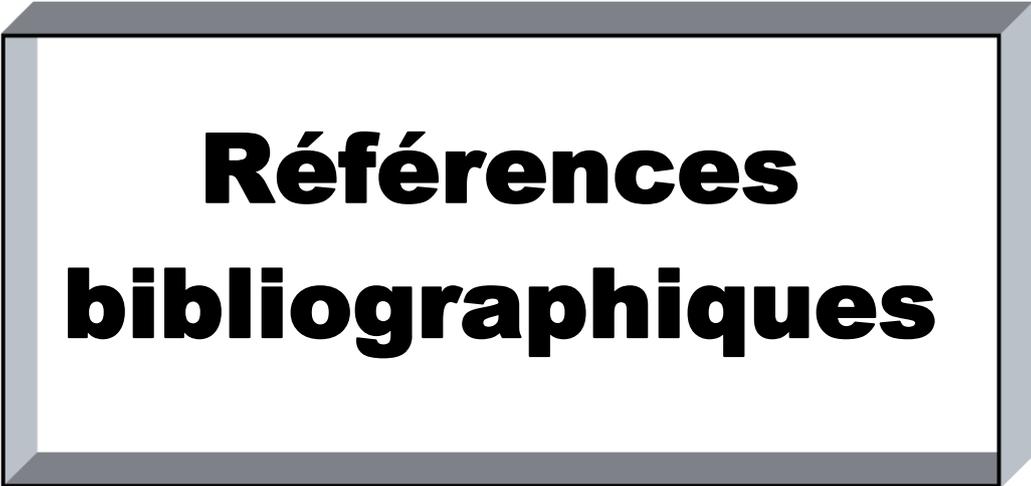
Figure 6 : Estimation flux et couple (Azouzi et Alem, 2019)

Annexes

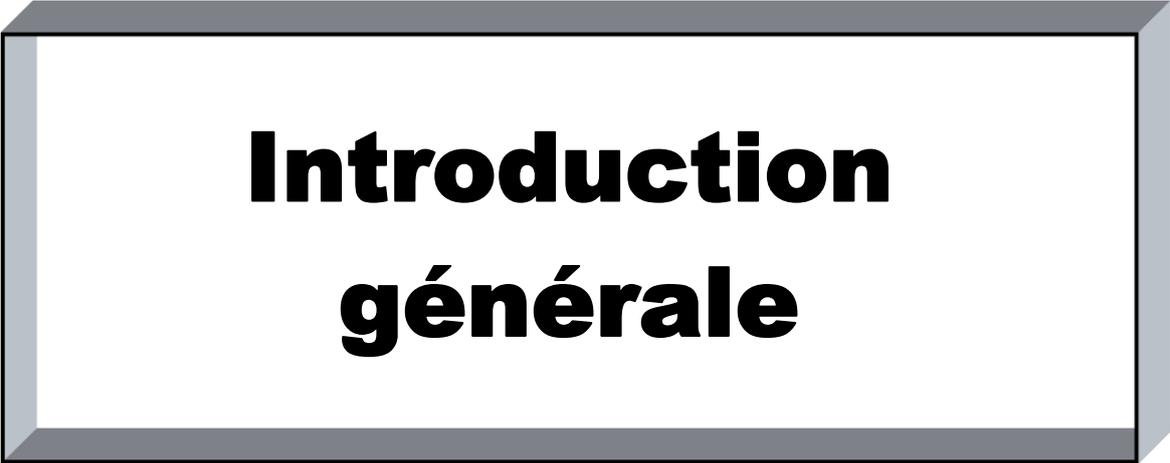
Résumé : L'énergie éolienne est une des formes d'énergie reconductible, elle est instantanément tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent.

Le travail réalisé dans le cadre de cette étude consiste à faire une étude sur la commande d'un aérogénérateur à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation par (DPC). Premièrement on a donné une généralité sur la production d'énergies éolien, puis les différentes machines synchrones et asynchrones qui servent à ce système, ensuite on a utilisé le logiciel MATLAB-SIMULINK pour réaliser notre travail qui représente les différentes parties du système étudié. On a appliqué deux commandes sur notre système, la première est la commande directe de puissance (DPC) qui est une commande applicable sur la puissance active P et la puissance réactive Q . Après on a appliqué la commande directe de couple (DTC) qui est une commande applicable sur le couple et le flux. Enfin on a fait une comparaison entre les deux commandes en comparant les résultats de simulation. On a conclu que la commande directe de puissance donne de hautes performances dans le domaine des puissances mais sans inclure que la commande directe de couple donne aussi de bons résultats dans le domaine de couple.

Mots clés : Commande directe de puissance, Puissance active, Puissance réactive, Commande directe de couple, flux, couple.



**Références
bibliographiques**



**Introduction
générale**



**Conclusion
générale**



Chapitre I :
Etat de l'art de
aérogénérateurs

Chapitre II :
Modalisation d'un
systeme éolien

Chapitre IV :
Comparaison entre
(DPC) et la (DTC)

Chapitre III :
Commande direct
de puissance (DPC)



Annexe