

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE ABDE RAHMANE MIRA BEJAIA
FACULTE DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



Spécialité : Electronique

Option : Automatique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Pour l'obtention du diplôme Master en Automatique

Thème :

*Commande d'une machine asynchrone
alimentée par énergie éolienne à l'aide
des réseaux de neurones*

Proposé et dirigé par :

Mr. LADJOUZI Samir

Réalisé par :

Mr: IDIR Karim

Promotion: 2011-2012

Dédicaces

*Je tiens à dédier ce modeste travail à ceux qui me sont les plus chers
au monde, mes parents LAID et HAMOUDI Salih
Et à mes chères grand-mère IAMARENE Djida et HAMOUDI Takfit*

À mes chères sœurs Wahiba, Noura et Farida

À mes chers frères Mouhamed, Massinissa et Nassim

À tous mes oncles maternels et paternels et leurs familles

À toutes mes tantes et leur famille

À toute les personnes que j'aime et que je n'ai pas citées.

Et à toute la promotion 2011/2012

REMERCIEMENTS

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

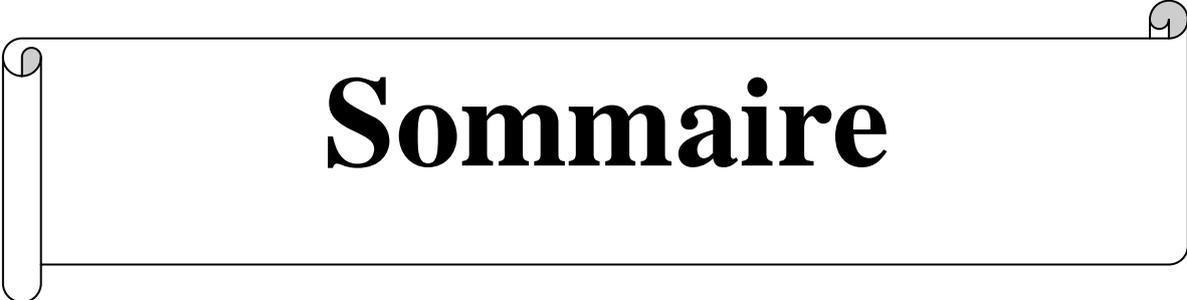
Avant tout, je remercie le Dieu le Tout Puissant de m'avoir donné la volonté et surtout le courage de mener dans des bonnes conditions ce travail

Je tiens bien sûr à remercier mes parents qui mon soutenues psychiquement durant toutes mes études.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et ma reconnaissance envers mon promoteur Mr. S. LADJOUZI, pour la confiance qu'il m'a prodigué et pour leur encouragement continu, pour le suivi et la direction de mon travail

Mon remerciement est également aussi aux membres de jury d'avoir accepté d'évaluer mon travail.

Enfin je remercie aussi toutes les personnes qui m'aidée de près ou de loin à la rédaction de ce travail.



Sommaire

Notations

Introduction générale..... 1

Chapitre I

Généralités sur les systèmes éoliens

I.1. Introduction..... 2

I.2. Principe de fonctionnement..... 2

I.3. La puissance éolienne dans le monde..... 2

I.4. Les différents types d'éoliennes..... 3

I.4.1. Les éoliennes à axe vertical..... 3

I.4.2. Eoliennes à axe horizontal..... 4

I.5. Constitution d'une éolienne..... 5

I.6. Fonctionnement d'une centrale éolienne..... 7

I.7. Type de machines électriques..... 9

I.8. Machine asynchrone double alimentation..... 12

I.9. Les différentes structures d'alimentation et de commande de la MADA..... 12

I.9.1. Structure du rotor des machines asynchrones à double alimentation (à rotor bobiné)..... 12

I.9.2. Machines à double stator..... 13

I.9.3. Double alimentation par le stator et le rotor..... 14

I.10. Application des machines asynchrones à double alimentation..... 16

I.11. Intérêt de la MADA..... 16

I.12. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne..... 17

I.13. Conclusion..... 19

Chapitre II

Modélisation de la chaîne de conversion éolienne basée sur la MADA

II.1. Introduction.....	20
II.2. Modélisation de la partie mécanique.....	20
II.2.1. Modélisation de la turbine éolienne.....	20
II.2.2. Modèle du multiplicateur.....	22
II.2.3. Modèle de l'arbre.....	22
II.2.4. Stratégie de commande de la turbine.....	23
II.2.5. Maximisation de la puissance extraite.....	24
II.2.6. Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse.....	24
II.3. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.....	26
II.4. Hypothèses simplificatrices.....	26
II.5. Modèle de la MADA dans le repère abc.....	27
II.5.1. Equations électriques de la MADA.....	27
II.5.2. Equations des flux de la MADA.....	28
II.5.3. Equations mécaniques de la MADA.....	28
II.5.4. Changement de repère.....	29
II.5.5. Transformation de Park.....	29
II.5.6. Expression du couple électromagnétique.....	30
II.5.7. Modèle de la Machine asynchrone à double alimentation avec orientation du flux.....	31
II.6. Commande directe de puissance de la MADA.....	34
II.7. Modélisation de l'onduleur de tension.....	35

II.8. La commande MLI.....	37
II.9. Conclusion.....	38

Chapitre III

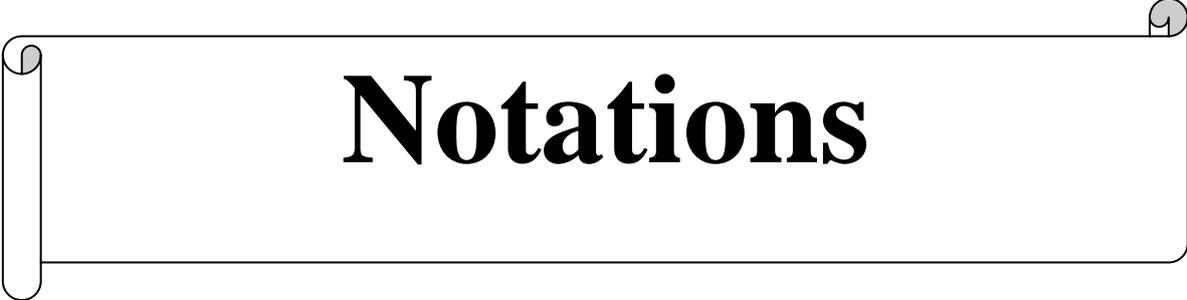
Commande de la MADA par les réseaux de neurones

III.1. Introduction.....	39
III.2. Neurone biologique.....	39
III.3. Modèle d'un neurone artificiel.....	40
III.4. Fonction d'activation.....	41
III.5. Réseaux Neuronaux Statiques.....	42
III.5.1. Réseaux Neuronaux Multi- couche.....	42
III.5.2. algorithme de la Rétro- Propagation.....	42
III.6. Structures de Commande Neuronale.....	43
III.6.1. Apprentissage supervisé.....	43
III.6.2. Apprentissage par renforcement.....	43
III.6.3. Structure de commande indépendante du modèle.....	44
III.7. Commande adaptative neuronale.....	45
III.7.1. Introduction a la commande adaptative.....	45
III.7.2. Commande Neuronale Auto-ajustable.....	45
III.7.3. Commande adaptative par modèle de référence.....	46
III.8. Applications des réseaux de neurones.....	47
III.9. Commande par réseaux de neurones de la MADA.....	47

III.10. Résultats de simulation et interprétations.....	48
III.10.1. Simulation de la MADA sans la connectée à la turbine.....	48
III.10.2. Simulation de la commande en puissance.....	49
III.10.3. Simulation de la MADA connecte à la turbine	49
III.11. Conclusion.....	53
<u>Conclusion générale.....</u>	<u>54</u>

Annexes

Bibliographie



Notations

Notations

P_{vent} : Puissance du vent

ρ : Masse volumique du vent

V_{vent} : Vitesse du vent

C_p : Coefficient de puissance

β : Angle de calage

P_t : puissance de la turbine

S_t : Surface balayée par la turbine

λ : Facteur d'avance

Ω_t : Vitesse de la turbine

Ω_r : Vitesse du rotor de la génératrice

K_g : Multiplicateur mécanique

C_m : Coefficient du couple

C_{vis} : Couple des frottements visqueux

C_g : couple issu du multiplicateur

R : Rayon de la turbine

$V_{\text{estimé}}$: Vitesse estimé du vent

J_t : Inertie totale

g : Glissement

N_r : Nombre de spire rotorique

N_s : Nombre de spire statorique

M.P.P.T: Maximum Power Point Tracking

MADA: machine asynchrone à double alimentation.

GADA: génératrice asynchrone double alimentée

ω_s : Pulsation statorique

ω_r : Pulsation rotorique

ω_m : Pulsation mécanique

θ_s : Angle électrique statorique

θ_r : Angle électrique rotorique

p : Nombre de paires de pôle

P_e : puissance d'entrée

V_s, V_r : Tension simple respectivement statorique et rotorique

V_{ds}, V_{qs} : Tensions statorique exprimées dans le repère de Park respectivement sur les axes d et q

V_{dr}, V_{qr} : Tensions rotorique exprimées dans le repère de Park respectivement sur les axes d et q

i_{ds}, i_{qs} : Courants statorique exprimées dans le repère de Park respectivement sur les axes d et q

i_{dr}, i_{qr} : Courants rotorique exprimées dans le repère de Park respectivement sur les axes d et q

R_s : Résistance de chaque enroulement du stator

R_r : Résistance de chaque enroulement du rotor

L_s : Inductance propre de chaque enroulement statorique

L_r : Inductance propre de chaque enroulement rotorique

M_s : Inductance mutuelle entre les enroulements du stator

M_r : Inductance mutuelle entre les enroulements du rotor

C_{em} : Couple électromagnétique

C_{aer} : Couple aérodynamique

f : Coefficient de frottement visqueux

J : Inertie de la machine

ϕ_s, ϕ_r : Respectivement flux statorique et rotorique

$\phi_{ds}, \phi_{qs}, \phi_{dr}, \phi_{qr}$: Respectivement flux statorique et flux rotorique sur les axes d et q

P_s : Puissance active statorique

Q_s : Puissance réactive statorique

Introduction générale

Introduction générale

L'intense industrialisation des dernières décennies et la multiplication des appareils domestiques électriques ont conduit à des besoins planétaires en énergie électrique considérables. Face à cette demande, toujours croissante de nos jours, les pays industrialisés ont massivement fait appel aux centrales nucléaires. Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques, mais le risque d'accident nucléaire, le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures. Sans oublier, les événements climatiques récents ont soulevé de nouvelles interrogations sur la viabilité du nucléaire, notamment à cause du réchauffement local de la température de l'eau des fleuves utilisée pour refroidir les réacteurs.

Face à ces problèmes, et de façon à limiter l'emploi de centrales nucléaires, certains pays, aidés par la déréglementation, se sont tournés vers de nouvelles formes d'énergie dites "renouvelables" faisant appel, de façon directe ou indirecte, à l'énergie solaire. Parmi celles ci, l'éolien apparaît clairement en bonne place, non pas en remplacement des sources conventionnelles, sinon comme énergie d'appoint complémentaire à l'énergie nucléaire. En effet l'énergie potentielle des masses d'air en mouvement représente, au niveau mondial, un gisement considérable. [1]

Plusieurs méthodes de commande des machines asynchrones sont apparues, parmi elles, la commande vectorielle. Son principe de base est de rendre ces machines semblables du point de vue commande à une machine à courant continu à excitation séparée. Ces dernières années, un grand intérêt est donné à l'utilisation des réseaux de neurones en identification et commande des systèmes non linéaires, ceci est dû principalement à leurs capacités d'apprentissage et de généralisation. [2]

Dans le cadre de notre travail, nous avons étudié un système éolien basé sur le générateur asynchrone à double alimentation (MADA) à vitesse variable commandé par les réseaux de neurones. Ce mémoire est donc constitué d'une introduction générale, et de trois chapitres. Dans le premier chapitre, nous passerons en revue, les systèmes éoliens. Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de l'ensemble de blocs constituant la chaîne de conversion éolienne. Le troisième chapitre traite les notions fondamentales du domaine des réseaux de neurones. On représente aussi Les résultats de simulation du système étudié dans environnement Matlab/simulink et une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur les systèmes éoliens

I.1. Introduction

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation d'énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne. Le développement de la technologie des aérogénérateurs a permis à celle-ci de devenir une alternative aux sources traditionnelles. L'énergie éolienne est véhiculée par le vent, celle-ci est due indirectement à l'énergie solaire qui, en créant des différences de température entre les régions chaudes et les régions froides, provoque des vents. Un aérogénérateur (couramment appelé "éolienne") est une machine qui utilise l'énergie éolienne (l'énergie cinétique du vent) pour produire de l'énergie électrique. Le vent est une ressource propre et inépuisable qui peut produire de l'électricité pratiquement sans l'émission des gaz polluants [3].

I.2. Principe de fonctionnement

L'énergie cinétique contenue dans le vent est captée par les pales aérodynamiques de l'éolienne qui freinent le vent. En effet, en freinant le vent les pales de l'éolienne sont soumises au dessus et en dessous à un système de pressions qui génère la rotation de rotor. Cette rotation crée une énergie mécanique qui est transmise à l'arbre de la génératrice afin de produire une électricité utilisable. [4]

I.3. La puissance éolienne dans le monde

Comme il est montré sur la figure I.1, la production de l'énergie éolienne connaît depuis quelques années le taux de croissance le plus important de l'industrie de la production d'électricité [5]. Avec une croissance de 30% en 2003, la capacité de production d'énergie éolienne dans le monde a atteint 39,4 GW durant la même année. L'électricité éolienne est utilisée principalement en Europe (74% de la puissance mondiale installée en 2003), dont plus de 98% dans les pays de l'union européenne. L'énergie éolienne est la source d'énergie qui croît le plus vite dans le monde. Cette progression est énorme par rapport à d'autres types d'énergie plus traditionnelle, telle que l'énergie nucléaire avec une croissance de 1% ou le charbon qui n'a pas du tout augmenté dans les années 90.

Les perspectives sont toutes spectaculaires. L'EWEA, l'association européenne pour l'énergie du vent estime que 12% de l'électricité mondiale sera d'origine éolienne en 2020 et plus de 20% pour 2040 [6].

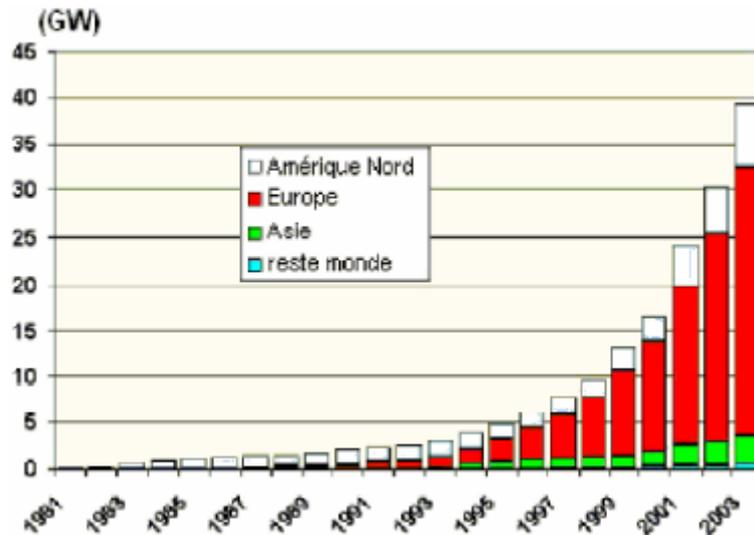


Figure -I.1. Evolution de la puissance éolienne installée dans le monde.

I.4. Les différents types d'éoliennes

On distingue deux grands types d'éoliennes

I.4.1. Les éoliennes à axe vertical

Ce type d'éoliennes a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mat, souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) figure I.2.



Figure-I.2. Éolienne à axe vertical [1]

I.4.2. Eoliennes à axe horizontal

Ce sont les éoliennes dont l'axe de rotation de l'hélice est horizontal. Elles sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Les hélices sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement de manière à générer un couple moteur entraînant la rotation.



Figure-I.3. Éolienne à axe horizontal [1]

Ces éoliennes sont beaucoup plus largement employées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et occupent une faible emprise au niveau du sol.

On peut distinguer deux types de configurations des éoliennes à axe horizontal : les éoliennes dont l'hélice est en amont de la machine par rapport au vent 'au vent' et les éoliennes dont l'hélice est en aval de la machine par rapport au vent 'sous le vent'.

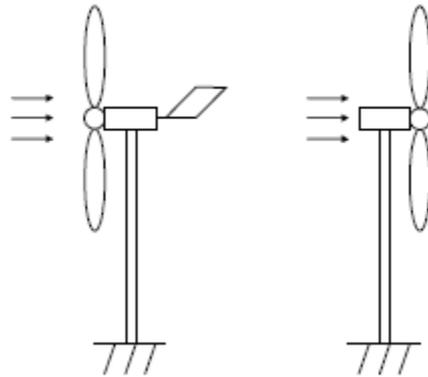


Figure-I.4. Configurations des éoliennes à axe horizontal [4]

I.5. Constitution d'une éolienne

Une centrale éolienne classique est composée essentiellement des parties suivantes [4] :

- **Le mat**, qui supporte la nacelle et le rotor de la turbine. Il est important que le mat soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent en hauteur. A titre d'exemple le mat d'une éolienne de 500KW a une

hauteur de 40 à 60m, il peut être plein ou tubulaire. Ce dernier est plus coûteux mais il a l'avantage de permettre un accès aisé à la nacelle pour la maintenance ;

- **Les pales**, qui permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Les premières éoliennes étaient munies de deux pales. Cette solution, même si elle permet des vitesses de rotation plus élevées, présente quelques inconvénients qui sont principalement les vibrations, les bruits et une fatigue accrue du rotor. Actuellement, la majorité des installations sont dotées de système tripale.

- **La fondation**, une fondation solide assurant la résistance de l'ensemble par grand vent et/ou dans des conditions de givrage.

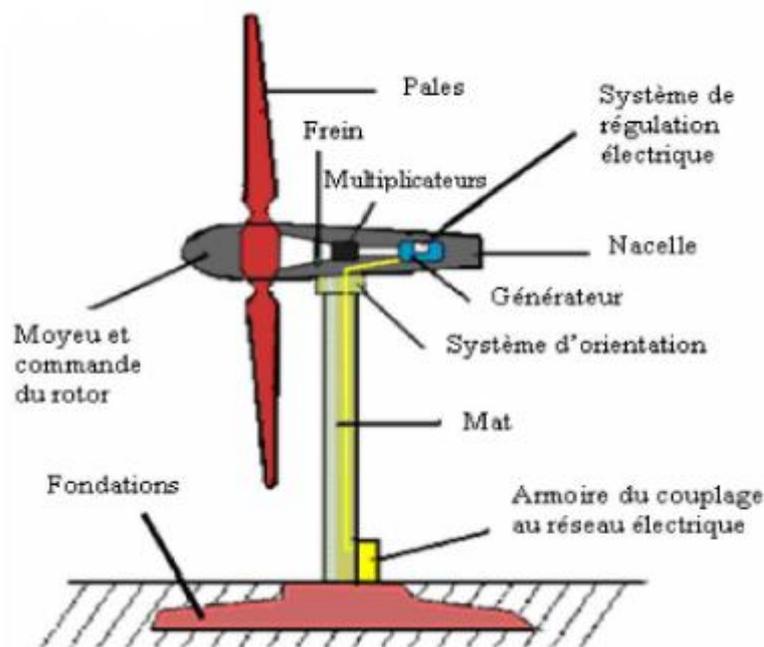


Figure-I.5. Constitution d'une éolienne [4]

- **La nacelle**, qui regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbre, multiplicateur, roulement, le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge, le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela vient s'ajouter le système électronique de gestion de l'éolienne comme le montre la figure I.6.

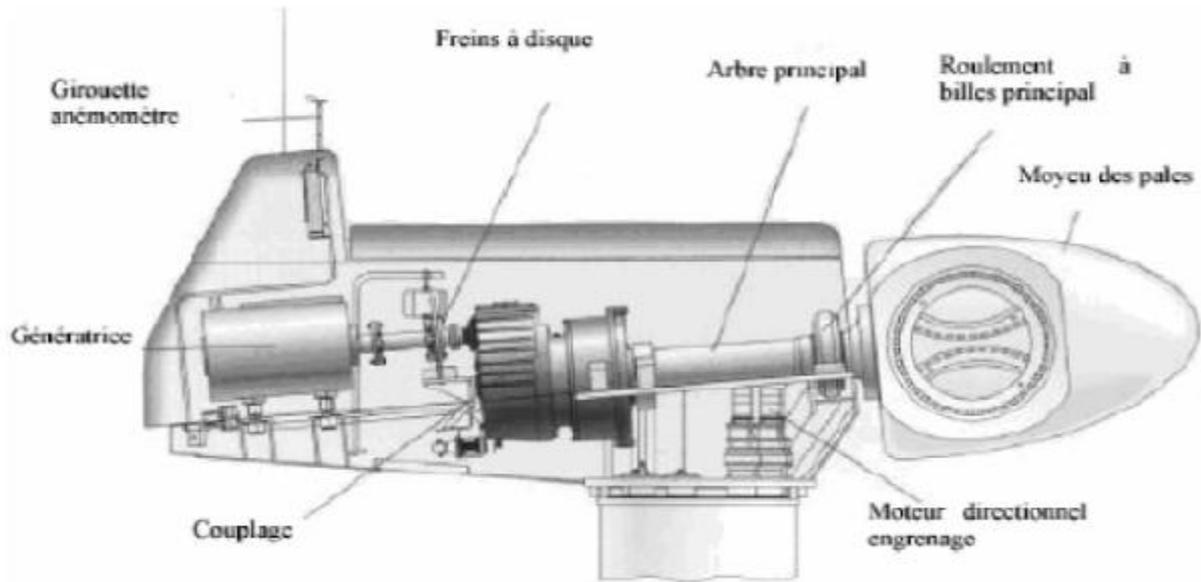


Figure-I.6. Constitution de la nacelle

I.6. Fonctionnement d'une centrale éolienne

a- Principe

A la hauteur de la nacelle souffle un vent de vitesse V_{vent} . Tant que cette vitesse est en dessous de la vitesse seuil, les pales sont en drapeau (la surface de ces dernières est perpendiculaire à la direction du vent) et le système est à l'arrêt.

A la vitesse seuil détectée par l'anémomètre, un signal est donné par le système de commande pour la mise en fonctionnement, le mécanisme d'orientation fait tourner la nacelle face au vent, les pales sont ensuite placées avec l'angle de calage éolien et commence à tourner. Une puissance P_{vent} est alors captée est transmise à l'arbre avec un coefficient de performance. Au rendement du multiplicateur près, cette même puissance est retransmise à l'arbre de la génératrice à une vitesse plus élevée. Cette puissance mécanique va enfin être transformée en puissance électrique débitée par la machine. On distingue alors deux cas, soit l'éolienne est reliée au réseau de distribution (directement ou à travers des convertisseurs statiques), soit elle alimente en autonome une charge isolée à travers ou sans les convertisseurs statiques [3].

La puissance cinétique du vent à travers un disque éolien de rayon R (en.m), est donnée par la relation suivante :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_{vent}^3 \quad (I.1)$$

Avec :

- R : correspond pratiquement à la longueur de la pale
- ρ : masse volumique de l'air (celle-ci est de 1,25kg/m en atmosphère normale) ;
- V_{vent} : est la vitesse du vent.

Cette puissance ne peut être totalement captée, cela voudrait dire que la vitesse du vent est nulle en aval des pales, on exprime alors la puissance captée par une éolienne [4].

$$P_{vent} = C_p(\lambda)P_{vent} \quad (I.2)$$

- C_p : est le coefficient de performance ou coefficient de puissance.

b- Le coefficient de puissance

Le C_p représente le rapport de la puissance récupérée sur la puissance récupérable. Ce coefficient qui ne peut dépasser la valeur limite, appelée limite de **Betz** qui est 16/27 soit 0,5926 [7] c'est cette valeur qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Sa relation s'exprime comme suit :

$$C_p = \frac{P_t}{\frac{1}{2}\rho S_t V^3} \quad (I.3)$$

Avec :

- P_t : puissance de la turbine éolienne.

$S_t = \pi R_t^2$, surface balayée par la turbine éolienne.

Le C_p est en fonction du rapport entre la vitesse linéaire des extrémités des pales sur la vitesse du vent, il est donné par :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V_{vent}}$$

Où Ω_t (en rad/s) est la vitesse du rotor à faible vitesse, sachant que la vitesse Ω_r du rotor de la génératrice est liée à celle du rotor lent par :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_r}{K_g}$$

Où K_g représente le rapport de la vitesse du multiplicateur.

On peut donc exprimer le rapport λ en fonction de la vitesse de la machine par :

$$\lambda = \frac{\Omega_r R}{K_g V_{vent}} \quad (I.4)$$

Ce rapport λ s'appelle rapport de vitesse en bout de pales ou rapport d'avance. La puissance mécanique transmise au rotor égale à la puissance captée, et s'écrit :

$$P_t = P_{cap} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_{vent}^3 \quad (I.5)$$

L'allure de la variation du C_p en fonction du rapport de vitesse est illustrée sur la figure I.7 [4].

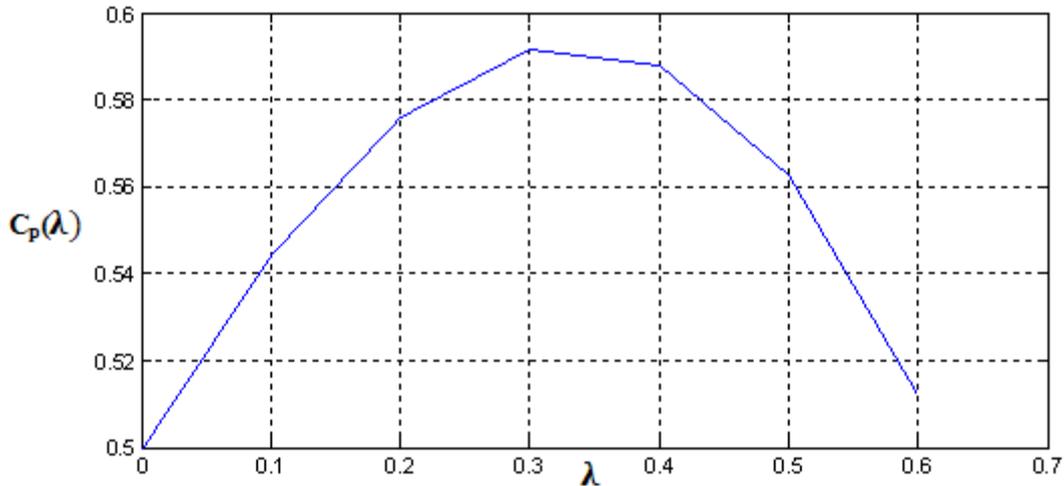


Figure-I.7. Variation du C_p en fonction du rapport de vitesse

I.7. Type de machines électriques

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une influence sur son fonctionnement, le fait qu'une éolienne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration.

Les avantages principaux des deux types de fonctionnement sont les suivants [4] :

• Fonctionnement à vitesse fixe :

- Système électrique plus simple ;
- Plus grande fiabilité ;
- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne ;
- Pas besoin de système électrique de commande ;
- Moins cher.

• Fonctionnement à vitesse variable :

- Augmentation du rendement énergétique ;
- Réduction des oscillations du couple ;

- Réduction des efforts subis par le convertisseur de puissance ;
- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

Il y a encore quelques années, pratiquement toutes les éoliennes fonctionnaient à vitesse fixe.

Elles contenaient pour la plupart un générateur asynchrone double alimentation [1].

C'est en grande partie les progrès technologiques réalisés sur les composants d'électronique de puissance et la réduction des prix correspondant qui ont rendu leur utilisation dans les nouveaux aérogénérateurs possibles. L'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique.

Comme il est illustré sur la figure I.8, ceci entraîne une amélioration du rendement énergétique du système, la vitesse variable permet également d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite, en introduisant de la souplesse dans la réaction du système face aux fluctuations brusques de la vitesse du vent. Ainsi, l'intérêt de la vitesse variable est de pouvoir garder le maximum de coefficient de puissance quelque soit la vitesse du vent et aussi optimiser le fonctionnement de la turbine [7]. L'inconvénient principal de ce genre de système est le surcoût introduit par l'incorporation des convertisseurs de puissance. Ce coût dépendant de la taille de ces convertisseurs, il devient relativement important pour les éoliennes de grande taille. De plus, les performances des transistors IGBT diminuent à partir d'une certaine puissance.

Avec l'utilisation des machines asynchrones à rotor bobiné, la plus grande partie de la puissance est directement distribuée au réseau par le stator et moins de 25% de la puissance totale passe par les convertisseurs de puissance à travers le rotor. Ceci donne l'occasion d'utiliser des convertisseurs plus petits et donc moins coûteux [4]. L'inconvénient de ce système est la présence de balais en rotor, ce qui demande un travail de maintenance plus important.

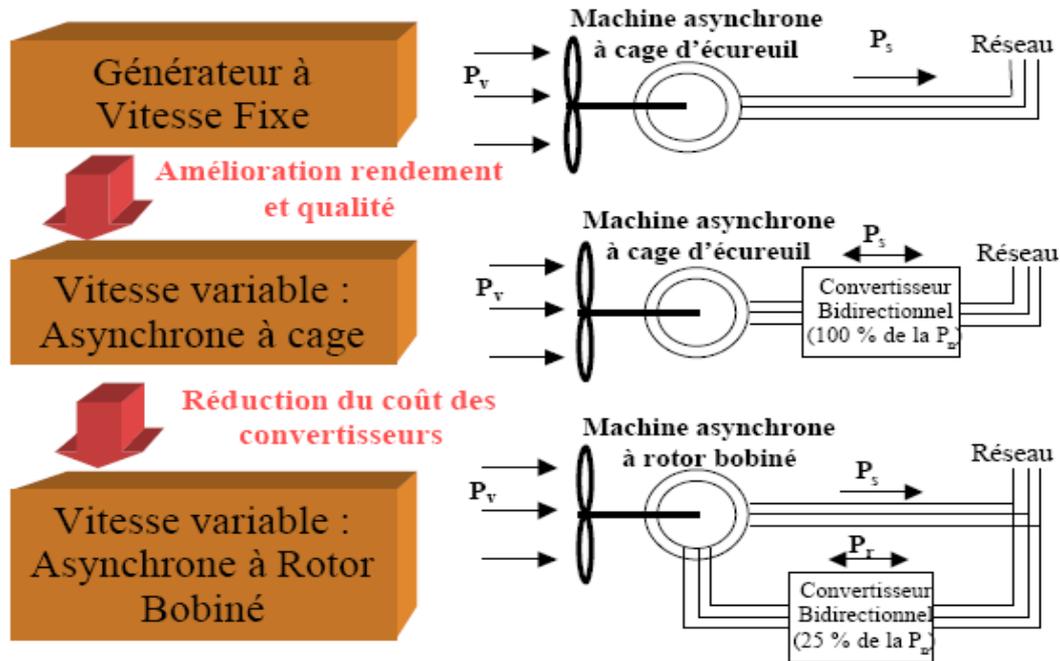


Figure-I.8. Evolution de la configuration électrique

a- L'accouplement mécanique

La vitesse de la turbine est inférieure à la vitesse de la génératrice, par conséquent, dans un système conventionnel de conversion de l'énergie éolienne, la transmission mécanique se fait par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse dont le rôle principal est d'adapter la vitesse de rotation de la turbine à celle de la génératrice. Des problèmes de vibrations, de bruits et de coûts de maintenance sont liés à la présence de ces multiplicateurs.

Les éoliennes à attaque directe sont constituées d'une génératrice directement connectée à l'axe de la turbine. Il y a deux raisons principales pour l'usage des générateurs à attaque directe dans une chaîne de conversion de l'énergie éolienne. Le coût de l'énergie électrique produite et le bruit du multiplicateur de vitesse sont tous les deux réduits. Les raisons pour lesquelles les générateurs à attaque directe peuvent diminuer le coût d'énergie électrique produite sont les suivantes [4] :

- Ils peuvent diminuer le coût des éléments de transmission ;
- Ils peuvent diminuer les pertes de la conversion d'énergie ;
- Ils peuvent améliorer la disponibilité du convertisseur d'énergie éolienne.

I.8. Machine asynchrone double alimentation

Avec les générateurs synchrones, c'est actuellement l'une des deux solutions concurrentes en éolien à vitesse variable.

Le stator de la génératrice est directement couplé au réseau, le plus souvent par un transformateur.

A la place du rotor à cage d'écureuil ces machines ont un rotor bobiné dont le réglage électrique assure la variation du glissement [8].

Actuellement, la majorité des projets éoliens supérieurs à 1 MW repose sur l'utilisation de la machine asynchrone pilotée par le rotor. Son circuit statorique est connecté directement au réseau électrique. Un second circuit placé au rotor est également relié au réseau mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance.

Etant donné que la puissance rotorique qui transite est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance.

C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion où est injectée cette génératrice [9].

I.9. Les différentes structures d'alimentation et de commande de la MADA

I.9.1. Structure du rotor des machines asynchrones à double alimentation (à rotor bobiné)

La figure I.9, montre la structure du rotor et des contacts rotoriques de la MADA [9].

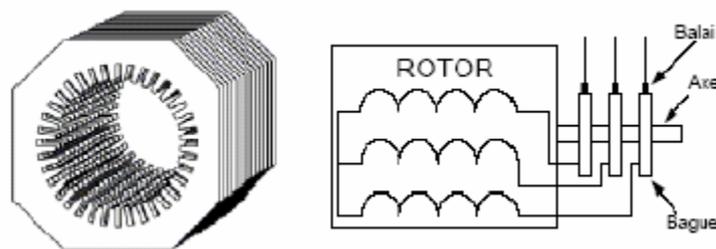


Figure-I.9 Structure du rotor et des contacts rotorique de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques, constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. Le rotor de cette machine est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent se frotter des balais lorsque la machine tourne.

En fonctionnement moteur, le premier intérêt de la machine asynchrone à rotor bobiné a été de pouvoir modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine, notamment en y connectant des rhéostats afin de limiter le courant et d'augmenter le couple durant le démarrage, ainsi que de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse.

I.9.2. Machines à double stator

Cette machine est munie de deux bobinages statoriques distincts comme elle est montrée sur la figure I.10.

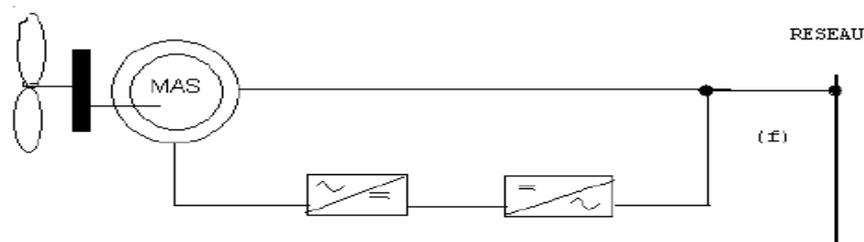


Figure-I.10. Machine asynchrone à double bobinage statorique

Un bobinage statorique de la génératrice est directement connecté au réseau et constitue le principal support de transmission de l'énergie générée. En agissant sur les tensions appliquées au second bobinage statorique, la vitesse de la génératrice est contrôlée autour d'un point de fonctionnement. Ce second enroulement sera appelé enroulement d'excitation.

Ce dernier possède un autre nombre de paire de pôles que celui du premier bobinage.

L'enroulement d'excitation a donc une masse de cuivre généralement inférieure, car seule une partie du courant nominal de la génératrice y circule. Cet enroulement est connecté à des convertisseurs électroniques de puissance qui sont dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la turbine, le coût s'en trouve réduit.

I.9.3. Double alimentation par le stator et le rotor

La figure -I.11 montre le schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné pilotée par le rotor.

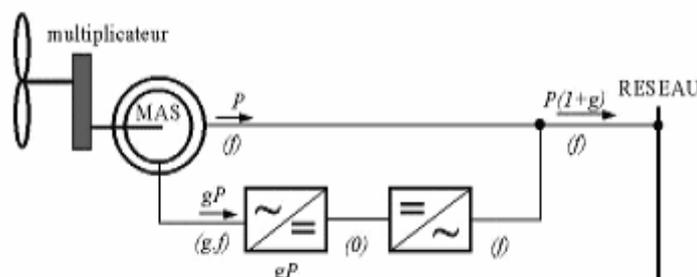


Figure-I.11. Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné pilotée par le rotor

En négligeant toutes les pertes, on peut expliquer son principe de fonctionnement. En prenant en compte cette hypothèse, la puissance P est fournie au stator et traverse l'entrefer : une partie de cette puissance fournie, $(1-g)P$, est retrouvée sous forme de puissance mécanique ; le reste, gP sort par les balais sous forme de grandeur alternatives de fréquence gf . Ces grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que celle du réseau électrique, auquel elle est renvoyée, par l'intermédiaire du deuxième convertisseur, donc le réseau reçoit $(1+g)P$. Les bobinages du rotor sont accessibles grâce à un système de balais et de collecteurs comme il est illustré sur la figure I.12. Une fois la machine est connectée au réseau, un flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator qui dépend du courant statorique.

Quand la machine tourne, le flux magnétique générer par le stator crée des f.e.m dans le bobinage du rotor. Le rapport entre les f.e.m créés au rotor et au stator est donné par [4] :

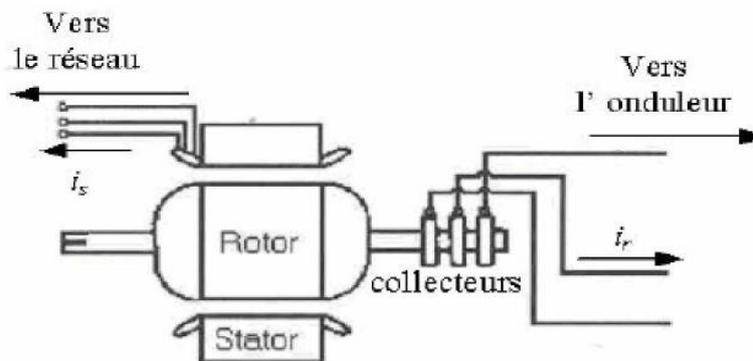


Figure-I.12. Machine asynchrone à rotor bobiné avec des bagues collectrices

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r w_s - w_{mec}}{N_s w_s} \quad (I.6)$$

N_r et N_s : sont respectivement le nombre de spire des bobinages rotorique et statoriques ;
 w_s et w_{mec} : Sont respectivement les pulsations de synchronisme et mécanique de la machine.

Le glissement est défini par :

$$g = \frac{w_s - w_{mec}}{w_s} \quad (I.7)$$

On définit les courants au stator et au rotor comme dans le cas d'un transformateur parfait :

$$\frac{i_r}{i_s} = \frac{N_s}{N_r} \quad (I.8)$$

Donc, on aura le rapport des puissances :

$$\frac{S_r}{S_s} = \frac{i_r E_r}{i_s E_s} = g \quad (I.9)$$

Cette équation montre que pour une puissance constante transmise au stator, plus on transmet de la puissance par le rotor et, plus on augmente le glissement. La pulsation au stator (imposée par le réseau) étant supposée constante, il est donc possible de contrôler la vitesse de la génératrice en agissant simplement sur la puissance transmise au rotor via le glissement g comme le montre l'équation (I.7).

I.10. Application des machines asynchrones à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation a été conçue pour fonctionner en moteur sur une grande plage de variation de vitesse comme première application. L'utilisation d'une MADA permet de varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques, ce dispositif sera donc économique quand on place les convertisseurs entre le rotor et le réseau en réduisant leurs tailles d'environ 70% [4].

Pour le fonctionnement de la MADA en génératrice, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines asynchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée [3] :

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

I.11. Intérêt de la MADA

Le principal avantage de la MADA est la possibilité de fonctionner à vitesse variable. Les machines asynchrones à vitesse fixe doivent fonctionner au voisinage de la vitesse de synchronisme car la fréquence est imposée par le réseau. La vitesse du rotor est quasi constante. Le système de la MADA permet de régler la vitesse de rotation du rotor en fonction de la vitesse du vent. En effet la MADA permet un fonctionnement en génératrice hypo synchrone et hyper synchrone. On arrive ainsi à extraire le maximum de puissance possible. L'intérêt de la vitesse variable pour une éolienne est de pouvoir fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, et de pouvoir en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent [3].

I. 12. 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.

A. Avantages

– L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement [4] :

- La concentration du CO₂ est augmenté de 25% depuis l'ère préindustrielle et on augure qu'elle doublera pour 2050. Ceci a déjà provoqué une augmentation de la température de 0,3 à 0,6°C depuis 1900 et les scientifiques prévoient que la température moyenne augmentera de 1 à 3,5°C d'ici l'an 2100, ce qui constituerait le taux de réchauffement le plus grand des 10000 dernières années.

Toutes les conséquences de ce réchauffement ne sont pas prévisibles, mais ils ont par exemple annoncé qu'il provoquera une augmentation de niveau de la mer de 15 à 95 cm d'ici l'an 2100.

– L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas d'émission de CO₂ :

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier ;

- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie de risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs ;

- Les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plus part des centrales thermiques et des centrales nucléaires ;

- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.

- L'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains :

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

- C'est l'énergie la moins chère des énergies renouvelables ;

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

L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement est faible par rapport à celui des centrales à énergies plus traditionnelles. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà [4] ;

b- Inconvénients

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolienne a quelques désavantages [4] :

- L'impact visuel, ça reste néanmoins un thème subjectif ;
- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée ;
- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs.

D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéro turbines ;

- La qualité de la puissance électrique : La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs notamment dans les régions à fort potentiel de vent est augmentée ;
- 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

I.13. Conclusion

Dans ce chapitre une synthèse bibliographique a été présentée et qui concerne les différents types éoliens avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnements. Après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, on a présenté les machines électriques et leurs applications ainsi que leur adaptation à un système éolien.

A la fin de ce chapitre on a présenté la structure de la machine asynchrone à double alimentation, son application et son intérêt.

Chapitre II

Modélisation de la chaîne de conversion éolienne basé sur la MADA

II.1. Introduction

La modélisation d'un système quelconque est indispensable pour l'étude et la maîtrise de son fonctionnement et lorsqu'on souhaite lui appliquer une commande particulière.

Dans ce chapitre nous allons présenter les modèles mathématiques des différents blocs d'une chaîne de conversion éolienne basée sur une machine asynchrone double alimentation à vitesse variable.

II.2. Modélisation de la partie mécanique

Sur l'arbre de l'éolienne il y a la turbine éolienne, le multiplicateur de vitesse et le rotor du générateur. La turbine éolienne se compose de plusieurs pales fixes ou orientables.

80% des fabricants fabriquent des turbines tripales pour des raisons de stabilité, de poids et de fluctuations mécaniques [3]. La turbine éolienne, en général, tourne à une vitesse nominale de 25 à 40 (tr / mn). Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique qui tourne à environ 1500 (tr / mn). Avec les mêmes simplifications citées dans [3], le modèle de la partie mécanique peut être obtenu. L'élasticité et le frottement des pales avec l'air sont ignorés.

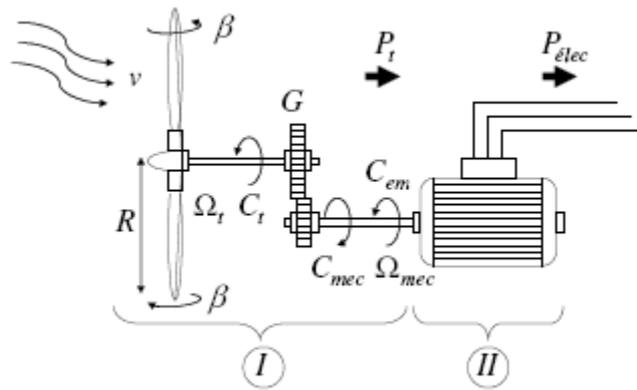


Figure-II.1. Configuration d'une turbine éolienne

II.2.1. Modélisation de la turbine éolienne

La turbine qui sera modélisée comporte trois pales de longueur R, fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse $\Omega_{turbine}$, qui entraînera une génératrice (MADA) à travers un multiplicateur de vitesse de gain G.

La puissance du vent est définie comme suit [7] :

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

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors [3] :

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

Avec :

C_p : est le coefficient de performance ou coefficient de puissance.

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

λ : est le ratio de vitesse défini par :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V} \quad (II.4)$$

β : est l'angle d'orientation des pales

Ω_t : vitesse angulaire mécanique (rad /s mécanique) de la turbine.

V : vitesse du vent (m/s).

ρ : Densité de l'air $1.22 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$ à la pression atmosphérique a 15°C .

R : rayon de la turbine = longueur de pale en (m).

La figure 2.2 illustre les courbes de $C_p(\lambda)$ pour plusieurs valeurs de β (deg) obtenues par la relation (II.3). Nous remarquons que l'augmentation de β permet de dégrader le coefficient C_p , et par conséquence, provoque la diminution de la puissance mécanique récupérée sur l'axe de la turbine éolienne.

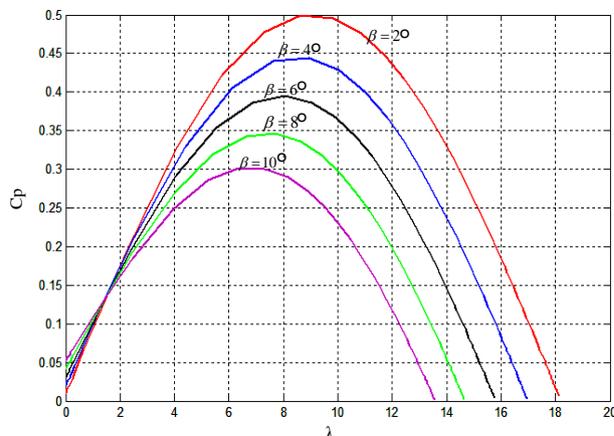


Figure-II.2. Courbes de coefficient $C_p(\lambda, \beta)$

II.2.2. Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont négligés. Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur, [3].

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (II.5)$$

Avec :

C_g : Couple issu du multiplicateur.

C_{aer} : Couple aérodynamique.

G : Gain du multiplicateur.

Pour la vitesse, on aura :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II.6)$$

II.2.3. Modèle de l'arbre

Le multiplicateur est modélisé mathématiquement comme suit [7]:

$$J_t \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f_{mec} = \sum \text{des couples} \quad (II.7)$$

J_t : Inertie totale comprenant l'inertie de la génératrice et celle de la turbine.

f : coefficient de frottement visqueux.

La figure-2-3 montre le schéma bloc du modèle de la turbine.

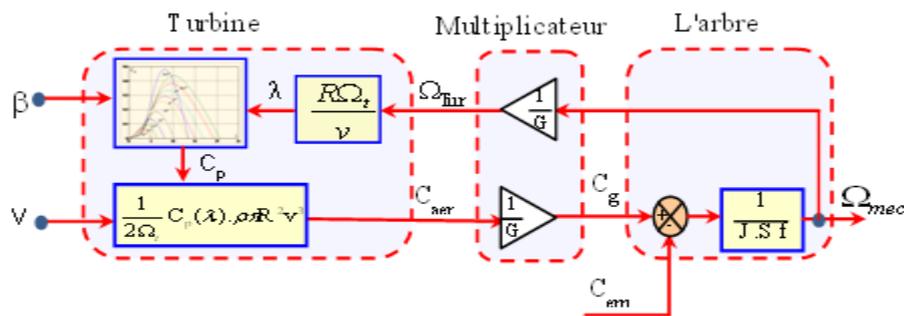


Figure-II.3. Le schéma bloc du modèle de la turbine

II.2.4. Stratégie de commande de la turbine

Comme il est illustré sur la figure II.4, on distingue quatre (04) zones principales de fonctionnement [4].

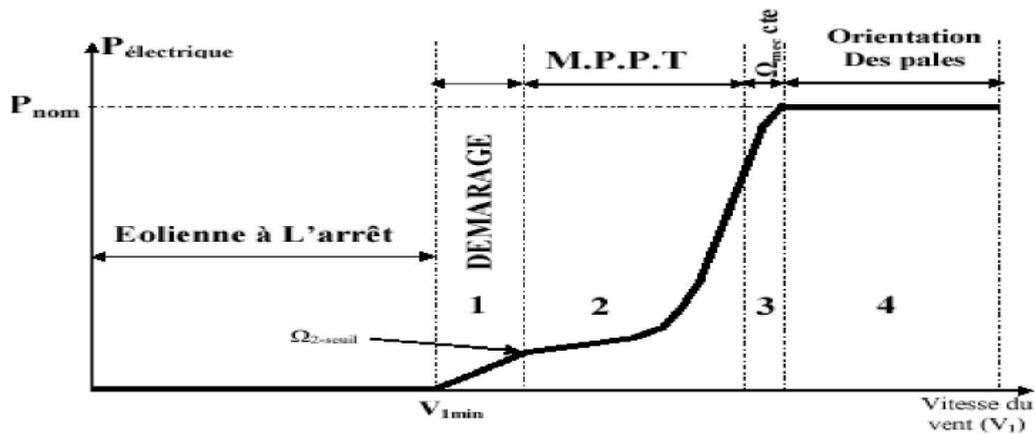


Figure-II.4. Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne

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

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

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

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

II.2.5. Maximisation de la puissance extraite

En pratique, la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique, de manière à maximiser la puissance électrique générée, c'est le principe de MPPT. On distingue deux structures de commande [3] :

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

Il est difficile de mesurer précisément la vitesse du vent qui est de nature une grandeur très fluctuante. Une mesure erronée de la vitesse conduit donc à une dégradation de la puissance captée selon la technique MPPT. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse [3].

II.2.6. Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse

Le principe de cette stratégie consiste à supposer que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Ce qui revient à négliger l'effet du couple des frottements visqueux $C_{vis} \approx 0$. Dans ces conditions, on aura:

$$C_{em} = C_{turbine} \quad (II.8)$$

Le couple électromagnétique de réglage est déterminé à partir du couple éolien estimé, tel que:

$$C_{em-ref} = \frac{C_{turbine-estimé}}{G} \quad (II.9)$$

Le couple éolien peut être déterminé à partir de la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent et de la mesure de la vitesse mécanique:

$$C_{aer} = \frac{1}{2\Omega_{turbine-estimé}} C_p \rho S V_{estimé}^3 \quad (II.10)$$

La vitesse estimée de la turbine est donnée par la relation:

$$\Omega_{turbine-estimé} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II.11)$$

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 (I.20), tel que:

$$V_{estimé} = \frac{R\Omega_{turbine}}{\lambda} \quad (II.12)$$

En regroupant ces quatre dernières équations ; on obtient une relation de contrôle:

$$C_{em-ref} = \frac{1}{2} \frac{\rho \pi R^5 C_p}{\lambda^3 G^3} \Omega_{mec}^2 \quad (II.13)$$

Pour extraire le maximum de la puissance générée, il faut fixer le ratio de la vitesse à sa valeur nominale λ_{nom} , de manière à obtenir le coefficient de puissance maximale C_{pmax} . Le couple électromagnétique doit être réglé à la valeur du couple de référence suivantes:

$$C_{em-ref} = \frac{1}{2} \frac{\rho \pi R^5 C_{pmax}}{\lambda_{nom}^3 G^3} \Omega_{mec}^2 \quad (II.14)$$

Cette expression montre que le couple de référence est proportionnelle au carré de la vitesse de la génératrice. Le schéma bloc de cette stratégie est donné par la figure II.5. [4]

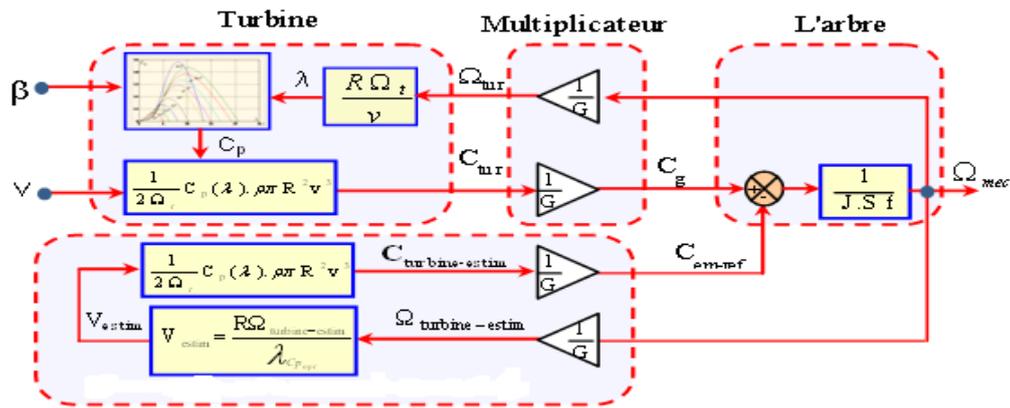


Figure-II.5. Schéma bloc de maximisation de la puissance extraite sans asservissement de vitesse.

II.3. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

Une machine asynchrone à double alimentation est une machine à courant alternatif dont la vitesse varie en fonction de la charge. Elle se compose comme une machine asynchrone d'un primaire dit stator qui est fixe, et d'un secondaire qui est le rotor de forme cylindrique qui est mobile. Le stator a trois (03) enroulements couplés en étoile ou en triangle qui sont alimentés par un système triphasé de tension. Il en résulte la création d'un champ magnétique glissant dans l'entrefer de la machine, où sa vitesse $\Omega_s = \frac{Ws}{p}$, où Ws désigne la pulsation du réseau d'alimentation triphasé, et p est le nombre de paire de pôles du champ magnétique qui apparaît au niveau du stator.

Le rotor qui est exécuté comme le stator, supporte un bobinage triphasé avec un même nombre de pôle, couplé en étoile. Le rotor tourne à la vitesse $\Omega_r = \frac{d\theta}{dt}$ par rapport au stator, avec θ est l'angle entre le repère statorique et le repère rotorique. La représentation schématique de la machine asynchrone à double alimentation est montrée sur la figure-II.6.

II.4. Hypothèses simplificatrices

Pour l'étude de la génératrice asynchrone à double alimentation idéalisée, on introduit les hypothèses simplificatrices suivantes [1]:

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable.
- La saturation de circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau.
- On admet de plus que la f.m.m créée par chacune des armatures est à répartition sinusoïdale.

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer :

- L'additivité des flux.

- La constance d'inductances propres.
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements du stator et du rotor en fonction de l'angle de leurs axes magnétiques.

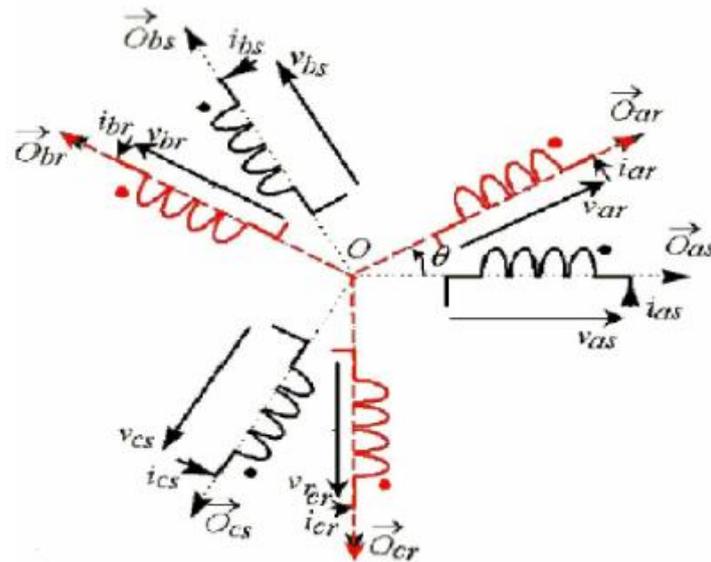


Figure-II.6. Représentation schématique de la MADA

II.5. Modèle de la MADA dans le repère abc

Soit une machine asynchrone à double alimentation dont les armatures magnétiques du stator et du rotor sont toutes deux cylindriques. Munies chacune d'enroulement triphasé, les trois enroulements de phases du stator sont notés a_s , b_s et c_s décalés l'un par rapport à l'autre de $(2\pi/3)$ ainsi que les trois enroulements du rotor a_r , b_r et c_r .

II.5.1. Equations électriques de la MADA

Les équations générales de la machine asynchrone à double alimentation dans un repère triphasé s'écrivent sous forme matricielle :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [i_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \\ [V_r] = [R_r] \cdot [i_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

Tel que

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}, \quad [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}, \quad [i_s] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}, \quad [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}, \quad [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix}$$

$$[\phi_r] = \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix}, \quad [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}, \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix},$$

Avec :

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

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

$[\phi_s], [\phi_r]$: Vecteurs de flux statorique et rotorique.

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

II.5.2. Equations des flux de la MADA

Une matrice des inductances établit la relation entre les flux et les courants.

Les équations sous forme matricielle seront représentées comme suit [9]

$$\begin{cases} [\phi_s] = [L_s][i_s] + [M_{sr}][i_r] \\ [\phi_r] = [L_r][i_r] + [M_{sr}][i_s] \end{cases} \quad (\text{II. 16})$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad [L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

Et :

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

Tel que :

L_s, L_r : Inductances propres d'une phase statorique et rotorique.

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

M_{sr} : matrice inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

II.5.3. Equations mécaniques de la MADA

L'expression générale du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_e = \frac{1}{2} P [i]^T \frac{d[L]}{dt} [i] \quad (\text{II. 17})$$

Avec :

$[i]$: Matrice de courant total.

$[L]$: Matrice inductance totale.

P : est le nombre de paire de pôle.

$$[i] = \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix}, \quad [L] = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}] & [L_r] \end{bmatrix}$$

Compte tenu que tous les termes des sous matrices $[L_s]$ et $[L_r]$ sont à coefficients constants, on aura :

$$C_e = P[i_s]^T \left(\frac{d}{d\theta} [M_{sr}] \right) [i_r] \quad (\text{II.18})$$

$$J \frac{d}{dt} \Omega = C_e - C_r - K_f \Omega \quad (\text{II.19})$$

Nous constatons la complexité des équations électriques et l'équation mécanique de la machine asynchrone qui ne peuvent être facilement exploitées à cause des dimensions des matrices entrant dans les calculs et de la dépendance de la matrice inductance vis à vis de la position de l'axe rotoriques par rapport à l'axe statorique, qui est variable dans le temps.

II.5.4. Changement de repère

Le but d'un changement de repère est de rendre l'écriture des équations électriques et mécanique plus simple à exploiter.

II.5.5. Transformation de Park

La complexité et le non linéarité des équations précédentes rendent leurs résolutions très difficiles, alors il est indispensable de transformer le système triphasé équilibré (abc) en un système biphasé tournant qui rapporte les équations électriques statoriques et rotoriques à deux axes perpendiculaires (dq). Cela est possible grâce à la transformation de Park, cette transformation permet la conservation des puissances instantanées [10].

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

$$[X]_{dq} = P(\theta) \cdot [X]_{abc}$$

Tel que :

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

La transformation inverse de Park est définie par le produit suivant :

$$[X]_{abc} = P^{-1}(\theta) \cdot [X]_{dq}$$

Les tensions s'écrivent alors sous la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_r \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

Et les flux :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = l_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \varphi_{qs} = l_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \varphi_{dr} = l_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \varphi_{qr} = l_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Avec : $\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$ la pulsation statorique.

Et $\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$, la pulsation rotorique.

II.5.6. Expression du couple électromagnétique

On obtient la puissance instantanée absorbée par la machine en calculant la somme des produits de chaque F.E.M avec son courant :

$$P_e = (\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd}) \omega_s + (\varphi_{rd} I_{rq} - \varphi_{rq} I_{rd}) \omega_r \quad (\text{II.22})$$

$$P_e = -p \frac{M \Omega_m}{l_s} (\varphi_{sq} I_{rd} - \varphi_{sd} I_{rq}) \quad (\text{II.23})$$

Avec :

$\Omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \frac{\omega_s - \omega_r}{dt}$: Vitesse de rotation de l'arbre de la machine.

Où : p est le nombre de pole de la MADA.

Le couple électromagnétique s'exprime en fonction de la puissance suivant cette relation :

$$C_{em} = \frac{P_e}{\Omega_m} \quad (\text{II.24})$$

En fin le couple électromagnétique est donné en fonction des courants et des flux par :

$$C_{em} = -p \frac{M}{l_s} (\varphi_{sq} I_{rd} - \varphi_{sd} I_{rq}) \quad (\text{II.25})$$

II.5.7. Modèle de la Machine asynchrone à double alimentation avec orientation du flux

Le modèle de la MADA s'écrit dans le repère de Park lié au champ tournant comme suit:

➤ **Equation du flux statorique**

$$\begin{cases} \varphi_s = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

➤ **Equation du couple électromagnétique**

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} I_{qr} \varphi_{ds} \quad (\text{II.27})$$

Le courant i_{qr} sera rendu variable par action sur la tension V_{qr} , le flux peut être contrôlé par le réglage du courant i_{dr} . Ce dernier est rendu variable par action sur la tension V_{dr} .

Si l'on néglige la résistance du bobinage statorique R_s , ce qui est une hypothèse assez réaliste pour les machines de moyenne et forte puissance utilisées dans l'énergie éolienne, les équations des tensions statoriques deviennent [1] :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \varphi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

A partir de l'équation (II.28), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques:

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = \frac{-M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

➤ **Relations entre les puissances statoriques et les courants rotoriques**

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

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} + V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

En appliquant les hypothèses simplificatrices à l'équation (II.30) on obtient:

$$\begin{cases} P_s = V_s I_{qs} \\ Q_s = V_s I_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs valeurs de l'équation (II.30) dans l'équation (II.31), nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive:

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = \frac{V_s \phi_s}{L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

➤ **Relations entre les tensions rotoriques et les courants rotoriques**

Compte tenu du repère choisi et des approximations faites et si l'on considère l'inductance magnétisante L_m comme constante, le système obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe q et la puissance réactive au courant rotorique d'axe d à la constante $(V_s^2 / \omega_s L_s)$ réimposée par le réseau.

Pour pouvoir contrôler convenablement la machine, il faudra établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques appliqués à la machine. En remplaçant dans l'équation (II.21) les courants par leur valeur dans les équations (II.28) on obtient :

$$\begin{cases} \phi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \phi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

Et en remplaçant les flux dans les formules (II.20) on obtient :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{qr}}{dt} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir la dérivée des courants rotorique diphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

Où g est le glissement de la machine asynchrone et $\omega_r = g \omega_s$

A partir des équations mises en place, un lien peut être établi entre les tensions appliquées au rotor et les puissances statoriques engendrées, en effet les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre, ainsi en négligeant le glissement g , nous pouvons établir une commande vectorielle

et pouvoir commander séparément les axes d et q vu que les couplages resteront faibles pour ainsi contrôler séparément les puissances actives et réactives (méthode directe), sinon si on tient compte des termes de couplage on devra les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courant rotoriques (méthode indirecte).

Ainsi le schéma bloc qui pourra représenter en entrées les tensions rotoriques et en sorties les puissances active et réactive statoriques est présenté dans la figure suivante : [11]

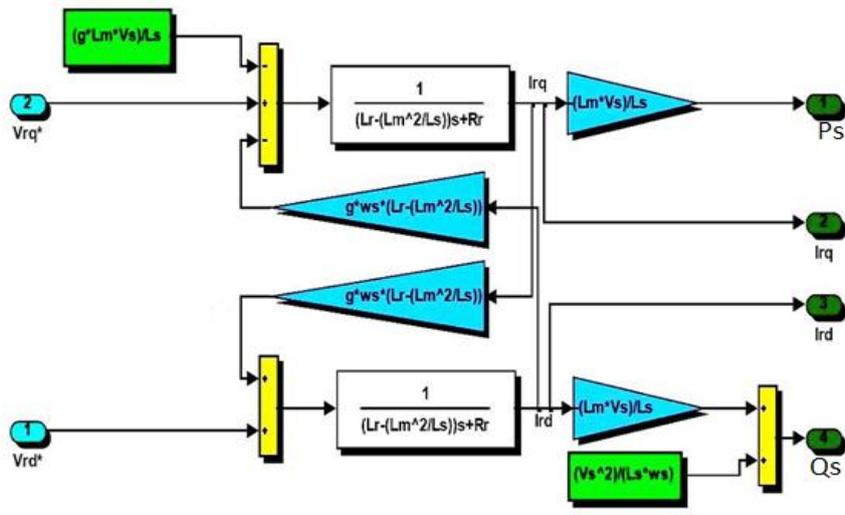


Figure-II.7. Schéma bloc de la MADA

II.6. Commande directe de puissance de la MADA

Cette méthode consiste à négliger les termes de couplage et de mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive figure II.8. Cette méthode est dite méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.

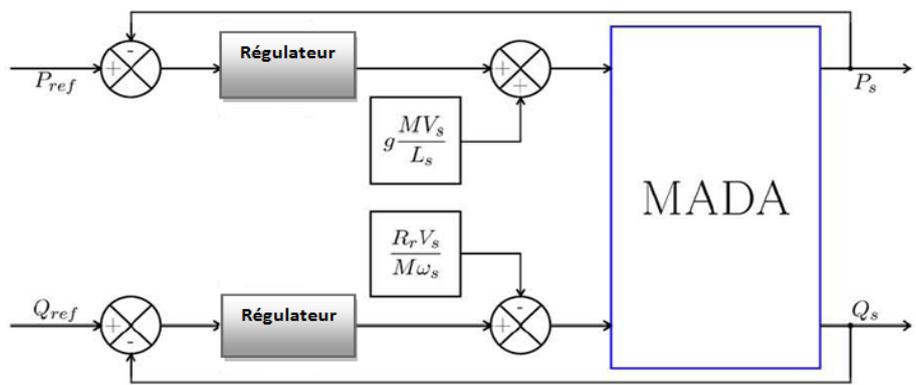


Figure-II.8. Schéma bloc de la commande directe de puissance

Dans la littérature classique on retrouve essentiellement des régulateurs de type PI mais pour notre travail nous avons décidé d'utiliser des régulateurs neuronaux.

II.7. Modélisation de l'onduleur de tension

Il existe plusieurs structures de conversion utilisées dans la machine à double alimentation comme la structure de Kramer qui utilise un pont à diodes 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.

Une autre structure intéressante est celle avec convertisseur MLI, qui consiste en l'utilisation de deux ponts triphasés d'IGBT commandables par la modulation de largeur d'impulsions [9].

Pour simplifier l'étude supposons que [9] :

- La commutation des interrupteurs est instantanée,
- la chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable, c.-à-d.

$$K_{ci} \quad (c \in [1,2,3], i \in [1,2])$$

- la charge est équilibrée couplée en étoile avec neutre isolé.

Un onduleur de tension est donné par la figure II.9.

On a, donc :

$$I_{Kci} = 0, V_{Kci} \neq 0 \quad \text{Interrupteur ouvert.}$$

$$I_{Kci} \neq 0, V_{Kci} = 0 \quad \text{Interrupteur fermé.}$$

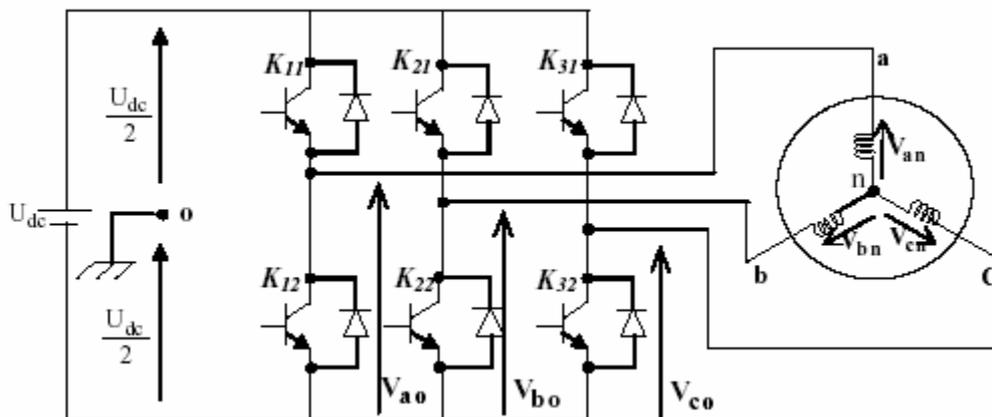


Figure-II.9. schéma d'un onduleur de tension

Les tensions composées V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} sont obtenues à partir de ces relations :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{a0} + V_{0b} = V_{a0} - V_{b0} \\ V_{bc} = V_{b0} + V_{0c} = V_{b0} - V_{c0} \\ V_{ca} = V_{c0} + V_{0a} = V_{c0} - V_{a0} \end{cases} \quad (\text{II. 36})$$

V_{a0} , V_{b0} et V_{c0} sont les tensions d'entrées de l'onduleur ou tensions continues.

Elles sont référencées par rapport à un point milieu « o » d'un diviseur fictif d'entrée.

On peut écrire les relations de Charles, comme suit :

$$\begin{cases} V_{a0} = V_{an} + V_{n0} \\ V_{b0} = V_{bn} + V_{n0} \\ V_{c0} = V_{cn} + V_{n0} \end{cases} \quad (\text{II. 37})$$

V_{an} , V_{bn} et V_{cn} sont les tensions des phases de la charge (valeurs alternatives),

V_{n0} est la tension de neutre de la charge par rapport au point fictif « o ».

Du système $[V_{an}, V_{bn}, V_{cn}]$ équilibré découle la relation suivante :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II. 38})$$

La substitution de (II.31) dans (II.30) aboutit à :

$$V_{n0} = \frac{1}{3}(V_{a0} + V_{b0} + V_{c0}) \quad (\text{II. 39})$$

En remplaçant (II.32) dans (II.30), on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{a0} - \frac{1}{3}V_{b0} - \frac{1}{3}V_{c0} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{a0} + \frac{2}{3}V_{b0} - \frac{1}{3}V_{c0} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{a0} - \frac{1}{3}V_{b0} + \frac{2}{3}V_{c0} \end{cases} \quad (\text{II. 40})$$

Donc, l'onduleur de tension peut être modélisé par une matrice $[T]$ assurant le passage continu- alternatif.

$$[V_{AC}] = [T] \cdot [V_{dc}] \quad (\text{II. 41})$$

Tel que :

$$\begin{cases} [V_{AC}] = [V_{an} \ V_{bn} \ V_{cn}]^T \\ [V_{dc}] = [V_{a0} \ V_{b0} \ V_{c0}]^T \\ [V_{dc}] = U_{dc} [S_1 \ S_2 \ S_3]^T \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

Donc, pour chaque bras il y a deux états indépendants. Ces deux états peuvent être considérés comme des grandeurs booléennes.

Commutation supposée idéale : $S_i = (1 \text{ ou } 0) \ \{i = 1, 2, 3\}$.

La matrice de transfert est la suivante :

$$[T] = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.43})$$

II.8. La commande MLI

Pour déterminer les instants de fermeture et d'ouverture (instants de commutation) des interrupteurs, on utilise la technique MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion), qui consiste à comparer le signal de référence onde (modulante) de forme sinusoïdale à faible fréquence, à un signal triangulaire onde (porteuse) de fréquence élevée. Le signal modulé est au niveau haut lorsque la modulante est supérieure à la porteuse et est au niveau bas lorsque la modulante est inférieure à la porteuse.

Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante, figure II.10.

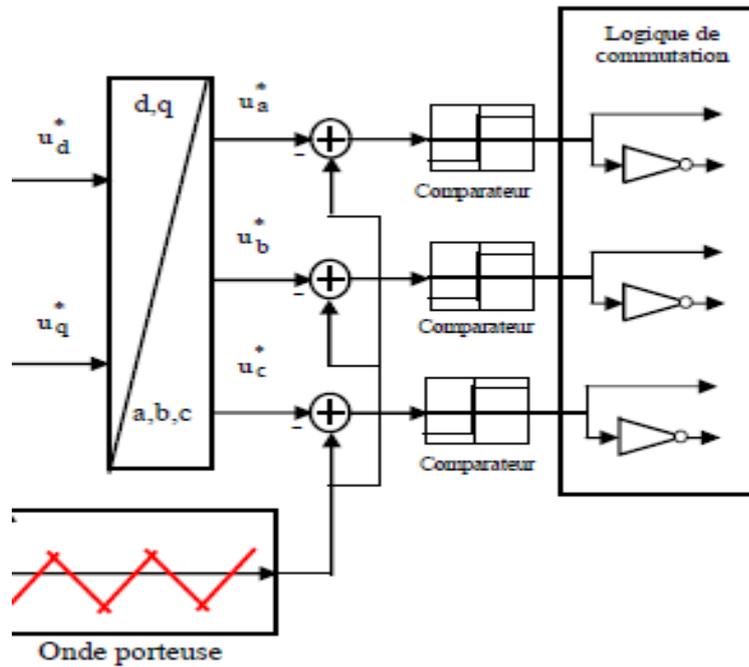


Figure-II.10. Schéma de la commande MLI de l'onduleur

II.9. Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'avoir le modèle mathématique de chaque élément de la chaîne de conversion (modèle de la turbine à vitesse variable, modèle de la Génératrice asynchrone à double alimentation et modèle de l'onduleur MLI).

L'étude théorique des différentes parties aussi bien mécanique qu'électrique a été établie. Nous avons aussi développé deux méthodes de commande vectorielle en puissance de la machine à savoir : la commande directe et la commande indirecte. Effectivement nous avons pu voir que la commande directe est la plus simple à mettre en œuvre, mais pas la plus performante.

Chapitre III

Commande de la MADA par les réseaux de neurones

III.1. Introduction

Reproduire l'intelligence de l'être humain constitue sans aucun doute le rêve le plus passionnant de notre siècle. Le cerveau est l'organe clé de cette intelligence. C'est en son sein que s'élabore la pensée ; reste à savoir comment s'articule son anatomie. L'une des premières approches est celle issue de la neurologie. Son idée de base consiste à modéliser le premier niveau de l'intelligence humaine : le neurone biologique. En 1948, deux chercheurs américains, **Mac Culloch** et **Pitts**, ont donné naissance au premier modèle mathématique de neurone biologique, qu'ils ont appelé : neurone formel.

On pense, aujourd'hui, que le système nerveux compte mille milliards de neurones interconnectés. Bien que les neurones ne soient pas tous identiques, leur forme et certaines caractéristiques permettent de les répartir en quelques grandes classes. En effet, il est aussi important de savoir, que les neurones n'ont pas tous un comportement similaire en fonction de leur position dans le cerveau.

L'idée principale des réseaux de neurones est la suivante : on se donne une unité simple, un neurone, qui est capable de réaliser quelques calculs élémentaires. On relie ensuite un nombre de ces unités sous forme d'un réseau capable de résoudre un certain problème d'émulation ou de classification. La structure et la taille du réseau ainsi que le mécanisme d'apprentissage utilisé dépend de type et de la complexité de l'application.

III.2. Neurone biologique

De point de vue biologique, un neurone biologique est constitué d'un corps cellulaire appelé **soma**, de plusieurs prolongements d'entrée de l'ordre de $0.01\ \mu\text{m}$ appelés **dendrites** et un prolongement de sortie appelé **axone**. A l'intérieur et autour du soma, on trouve des ions de sodium (Na^+), de calcium (Ca^{++}), de potassium (K^+) et de chlorure (Cl^-). Lorsque la membrane du soma est stimulée électriquement, elle permet le passage des ions tels que Na^+ et Ca^{++} . Ce qui change l'état interne du soma. [11]

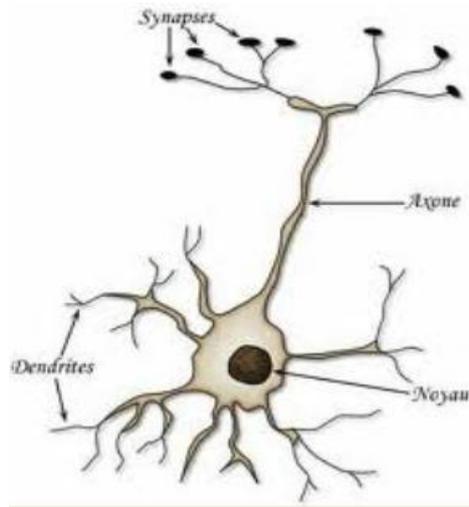


Figure.3.1. Modèle du neurone biologique

Durant notre jeunesse, de meilleures connexions s'établissent et les substances chimiques qui font les jonctions entre les neurones sont libérées en grande quantité. L'utilisation prolongée du cerveau fortifie les connexions et la capacité d'apprentissage augmente.

Le cerveau est constitué de plusieurs neurones. La sortie de chaque neurone est liée à des milliers d'autres neurones. Chaque neurone effectue un traitement local. Il collecte les signaux issus des dendrites et leur fait la somme. Si l'amplitude résultante dépasse un certain seuil interne, un signal est envoyé à travers l'axone vers d'autres neurones. Les interactions entre les neurones se font au niveau du corps cellulaire ou dans les dendrites à des points de jonction appelés synapses

III.3. Modèle d'un neurone artificiel

Conceptuellement, le fonctionnement des neurones biologique peut être représenté par le modèle de la figure.3.2. Ce neurone formel peut être considéré comme un opérateur (ou comme un élément processeur) qui collecte les entrées et fournit une sortie seulement quand la somme dépasse un certain seuil interne. L'évaluation de la sortie se fait typiquement par la somme pondérée des entrées, soustraction du seuil et le passage du résultat à travers une non linéarité. Mathématiquement, ceci peut être modélisé par les équations suivantes : [12]

$$S = \sum_{i=1}^n W_i \cdot X_i - W_0 \cdot X_0 \quad (\text{III. 1})$$

$$y = f(S) \quad (\text{III. 2})$$

X_i : composantes du vecteur d'entrée.

W_i : composantes du vecteur des poids synaptique.

S : somme pondérée appelée potentiel.

n: nombre d'entrée.

f: fonction d'activation.

Le terme $(X_0.W_0$ avec $X_0=1$) représente la valeur du seuil interne qui doit être dépassée pour l'activation de la sortie du neurone. La non linéarité $f(.)$ est appelée fonction d'activation. Du fait que les signes et les valeurs optimales des poids synaptiques, en particulier W_0 , sont définis par l'algorithme d'apprentissage, la somme pondérée peut se réécrire sous la forme simple suivante [12]

$$S = \sum_{i=1}^n W_i \cdot X_i \quad (\text{III. 3})$$

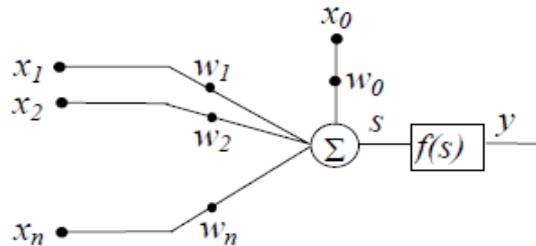


Figure.3.2. Bloc-diagramme du modèle d'un neurone formel

III.4. Fonction d'activation

Plusieurs fonctions d'activation peuvent être utilisées. Ce vaste choix de fonction permet aux modèles neuronaux de posséder des caractéristiques très variées. Cependant certaines fonctions sont les plus utilisées, telles que : [12]

a- Fonction tout /rien :

Principalement utilisée dans les réseaux de classification.

b- Fonction sigmoïdale :

Plus connue et plus populaire. L'un de ses avantages est sa dérivabilité. Historiquement, cette propriété a eu un impact important ; du fait qu'elle a permis de développer des algorithmes d'apprentissage à base du gradient pour les réseaux multicouche. La sigmoïde est connue aussi bien pour d'autres raisons. Par exemple, plusieurs applications exigent une sortie continue plutôt qu'une sortie de type tout/rien.

III.5. Réseaux Neuronaux Statiques

III.5.1. Réseaux Neuronaux Multi- couche

Les neurones sont arrangés par couche. Il n'y a pas de connexion entre neurones d'une même couche, et les connexions ne se font qu'avec les neurones de couches avales. Habituellement, chaque neurone d'une couche est connecté à tous les neurones de la couche suivante et celle-ci seulement. Ceci nous permet d'introduire la notion de sens de parcours de l'information (de l'activation) au sein d'un réseau et donc définir les concepts de

neurone d'entrée, neurone de sortie. Par extension, on appelle couche d'entrée l'ensemble des neurones d'entrée, couche de sortie l'ensemble des neurones de sortie. Les couches intermédiaires n'ayant aucun contact avec l'extérieur sont appelées couches cachées. figure-3.3 [7]

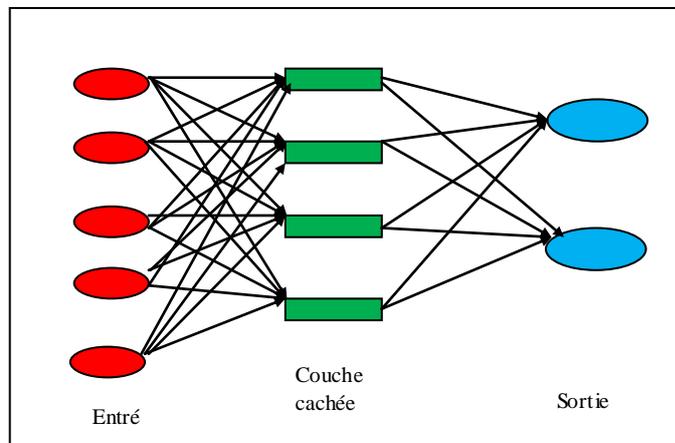


Figure-3.3. Réseau multicouche

III.5.2. algorithme de la Rétro- Propagation

Plusieurs variantes de cet algorithme ont été développées par des chercheurs travaillant dans des domaines différents. La première formulation de la version actuelle a été faite par **Werbos** en 1974 dans le cadre de sa thèse doctorat concernant les statistiques [13]. L'application de cet algorithme pour les réseaux multi- couche, en 1986 **Rumlehart** et **McClelland**, a relancé la recherche dans le domaine des réseaux de neurones qui a été abandonnée, depuis 1969, suite a la publication par **M. Minsky** et **S. Papert** d'un ouvrage qui met en exergue les limitations théoriques du perceptron.

L'algorithme de la rétro- propagation altère les coefficients synaptiques du réseau dans le sens inverse du gradient du critère d'erreur J_N , en utilisant seulement les données d'entrée/sortie. En effet l'erreur a la sortie du réseau est le résultat de fausses valeurs de plusieurs poids synaptique. Ainsi, l'objectif principal d'un algorithme d'apprentissage est d'assigner le crédit pour chaque poids synaptique dans le réseau et de corriger sa valeur. L'algorithme de la rétro- propagation effectue ceci en propageant les erreurs de la sortie vers l'entrée à travers le réseau [12].

III.6. Structures de Commande Neuronale [14]

Dans le cas ou un contrôleur neuronal est envisagée pour implémenter une loi de commande, le problème revient alors à trouver une meilleure manière pour l'ajustement des poids de ce réseau. La difficulté principale

est celle de l'assignation du crédit. C'est-à-dire, comment utiliser l'erreur sur la sortie du système pour modifier les paramètres du contrôleur ; du fait que le système physique est interposé entre la grandeur commandée et le signal de commande. Plusieurs stratégies d'apprentissage ont été proposées pour surmonter ce problème.

III.6.1. Apprentissage supervisé

La solution la plus simple consiste à entraîner le contrôleur pour imiter un expert (i.e., un professeur) ayant déjà appris la conduite du système. Ce superviseur peut être un expert humain ou artificiel (e.g. une base de règles).

L'avantage de cette technique est la possibilité de remplacer un opérateur humain lorsque la présence humaine est impossible. Dans de telles situations, l'entraînement du contrôleur s'effectue pendant une phase de simulation. Néanmoins, cette solution n'est pas souvent possible.

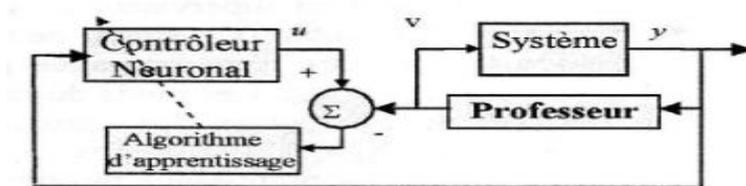


Figure-3.4. Structure d'apprentissage supervisé

III.6.2. Apprentissage par renforcement

La commande à base de l'apprentissage par renforcement est basée sur le fait que la tendance de reproduire une action qui conduit à un état satisfaisant ou une amélioration de performances doit être renforcée. Cette idée joue le rôle principal dans la théorie d'apprentissage des animaux. Cette approche utilise deux réseaux de neurones : un réseau d'action (i.e., contrôleur) et un réseau d'évaluation ou critique qui joue le rôle de superviseur et qui génère un signal d'avertissement à chaque fois que les actions prises sont mauvaises. Ce signal peut être considéré comme une mesure d'erreur à la sortie du réseau d'action et peut être rétro-propagé par l'algorithme de la rétro-propagation à travers le réseau pour l'adaptation des poids. Les poids du réseau d'évaluation sont altérés dans le sens de renforcer les bonnes actions et de sanctionner les mauvaises. Et comme l'apprentissage par renforcement ne fait référence qu'à des informations du type « vrai » ou « faux » pour guider le processus d'entraînement, les performances exigées ne sont pas du même niveau que celles résultantes d'un apprentissage supervisé.

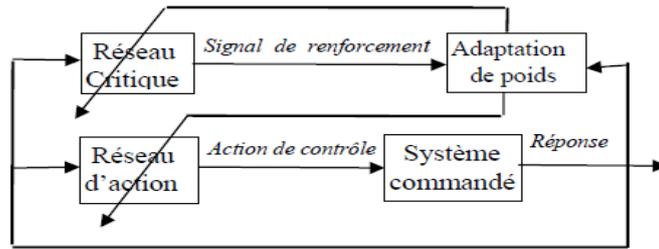


Figure-3.5. Apprentissage par renforcement

III.6.3. Structure de commande indépendante du modèle

La difficulté principale de la commande neuronale est celle de l'assignation du crédit. On a vu que les approches citées utilisent un professeur ou un deuxième réseau neuronal pour résoudre ce problème. Le principe de la structure indépendante du modèle consiste à évaluer les erreurs de sortie (i.e., l'écart entre la sortie du système et sa valeur désirée) à l'entrée de contrôleur et à les faire propager directement, de l'entrée vers la sortie, pour avoir les erreurs des couches cachées et celles de la couche de sortie. Ceci peut être réalisé par l'algorithme FEP confectionné spécialement pour cet objectif ; ce qui permet un calcul direct et rapide des erreurs des couches consécutives exigées pour l'ajustement des paramètres du contrôleur.

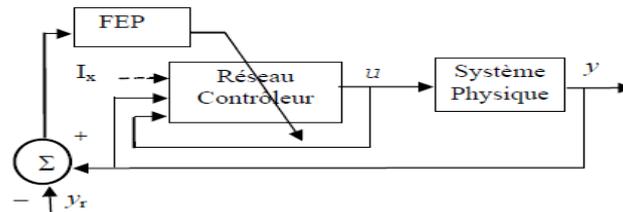


Figure-3.6. Structure de commande indépendante du modèle

III.7. Commande adaptative neuronale [14]

III.7.1. Introduction à la commande adaptative

La commande des systèmes non stationnaires exige des contrôleurs pouvant répondre d'une manière adaptative aux perturbations et aux changements dans la dynamique du système.

Dans un système adaptatif, on distingue deux boucles :

- 1- Une boucle interne constituée du contrôleur et du système commandé montés en boucle fermée ordinaire.
- 2- Une boucle externe servant à l'adaptation des paramètres du contrôleur.

Cette dernière caractérise les propriétés de convergence et la complexité du procédé d'apprentissage. Le problème essentiel revient alors à trouver le meilleur moyen pour entraîner le contrôleur de telle sorte que le comportement du système en boucle fermée satisfasse les spécifications exigées (e.g. stabilisation autour d'un point de fonctionnement, poursuite de trajectoire désirée ou d'un modèle de référence).

III.7.2. Commande Neuronale Auto-ajustable

Le principe de la commande neuronale auto-ajustable est illustré par la figure-3.7 L'objectif est d'entraîner le contrôleur neuronal afin que la fonction de transfert du système en boucle fermée soit unitaire et que la sortie du système suit parfaitement la trajectoire désirée. Il convient aussi de noter que cette approche est désignée dans la littérature par d'autres vocables. Tels que : contrôle par modèle inverse par apprentissage spécialisé ou La modélisation directe.

Dans la structure indirecte de la figure-3.7, l'erreur de sortie $e_c(k) = [y(k) - y_d(k)]$ est rétro propagée à travers le modèle neuronal afin d'ajuster les paramètres du contrôleur. La présence d'un système non stationnaire exige un entraînement en ligne des deux réseaux en même temps (le contrôleur a base de $e_c(k)$ et l'émulateur a base de l'erreur d'identification $e_i(k) = [y_n(k) - y(k)]$, ou $y_n(k)$ désigne la sortie du réseau neuronal). Ceci complique l'implémentation temps réel de cette approche.

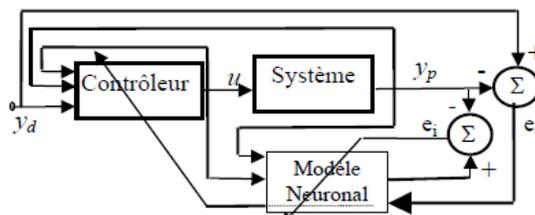


Figure-3.7. Structure de commande STR a base de la rétro-propagation

III.7.3. Commande adaptative par modèle de référence

Dans le cas de la commande adaptative par modèle de référence, les spécifications sont exprimées en termes d'un modèle de référence. Ce dernier reçoit l'entrée de référence $r(k)$ et produit la réponse désirée $y_m(k)$. Le contrôleur est entraîné de telle façon que $\lim_{k \rightarrow \infty} y_m(k) - y(k) = 0$.

Les auteurs dans [15] ont proposé des méthodes efficaces pour la commande adaptative des systèmes non linéaires. Dans plusieurs situations, il est possible d'identifier les différentes parties du système. Ces

dernières peuvent être combinées pour générer les signaux de commande. Cependant, ceci exige la connaissance de la structure interne du système.

Le principe de la méthode est indiqué par la figure-3.8. Le contrôleur est entraîné par la boucle externe. Un émulateur neuronal est utilisé pour retro-propager l'erreur,

$e_c(k) = (y(k) - y_m(k))$, de la sortie du système vers la sortie du contrôleur.

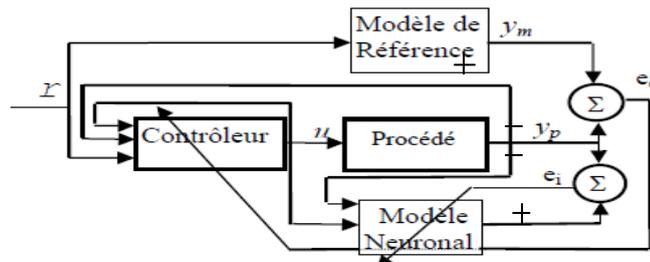


Figure-3.8. Structure MRAC indirecte a base de la retro-propagation

III.8. Applications des réseaux de neurones

- Aérospatial : pilotage automatique, simulation du vol...
- Automobile : système de guidage automatique,...
- Défense : guidage de missile, suivi de cible, reconnaissance du visage, radar, sonar, lidar, traitement du signal, compression de données, suppression du bruit...
- Electronique : prédiction de la séquence d'un code, vision machine, synthétiseur vocal, modèle non linéaire,...
- Finance : Prévission du coût de la vie
- Secteur médical : Analyse EEC et ECG
- Télécommunications : Compression de données ...

III.9. Commande par réseaux de neurones de la MADA

L'idée consiste à remplacer les deux régulateurs de la commande directe par des régulateurs neuronaux (RN) simples. [2]

La figure-3.9 est un schéma simplifié de la commande neuronale

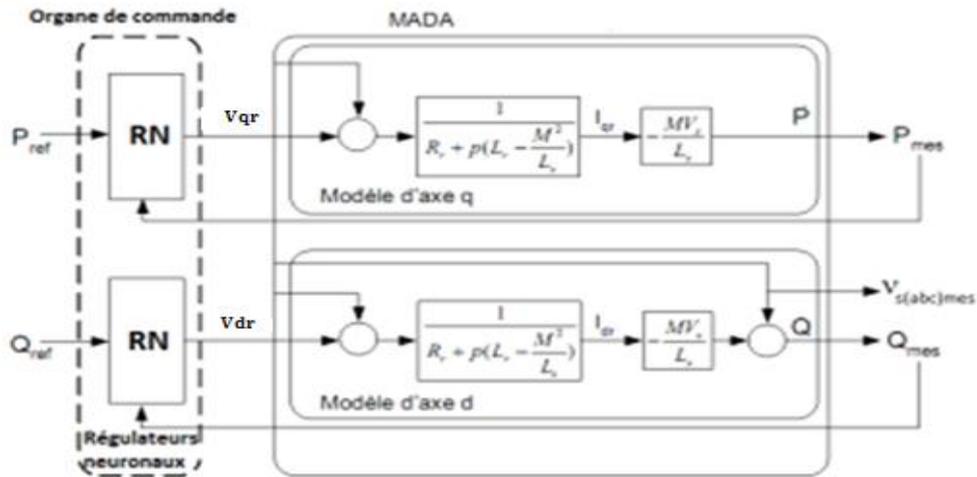


Figure-3.9. Commande directe d'une MADA avec des réseaux de neurones

On utilise 2 régulateurs neuronaux l'un pour la commande en puissance active et l'autre pour la commande en puissance réactive. Les deux réseaux possèdent une seule entrée qui est la différence entre la sortie de référence et la sortie mesurée. Les sorties des deux réseaux représentent la commande à appliquer à la MADA qui est V_{qr} (pour le premier réseau) et V_{dr} pour le deuxième réseau.

III.10. Résultats de simulation et interprétations

III.10.1. Simulation de la MADA sans la connecter à la turbine

A l'aide du logiciel MATLAB, la simulation de la MADA a été faite. Son modèle est basé sur les équations obtenues dans le chapitre 2. Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus pour le modèle d'une machine asynchrone à double alimentation, alimentée directement par deux sources de tension triphasées parfaites, l'une au niveau du stator avec une fréquence du réseau qui est 50Hz et d'amplitude de $220\sqrt{2}$, et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de 20V et une fréquence égale à la fréquence rotorique.

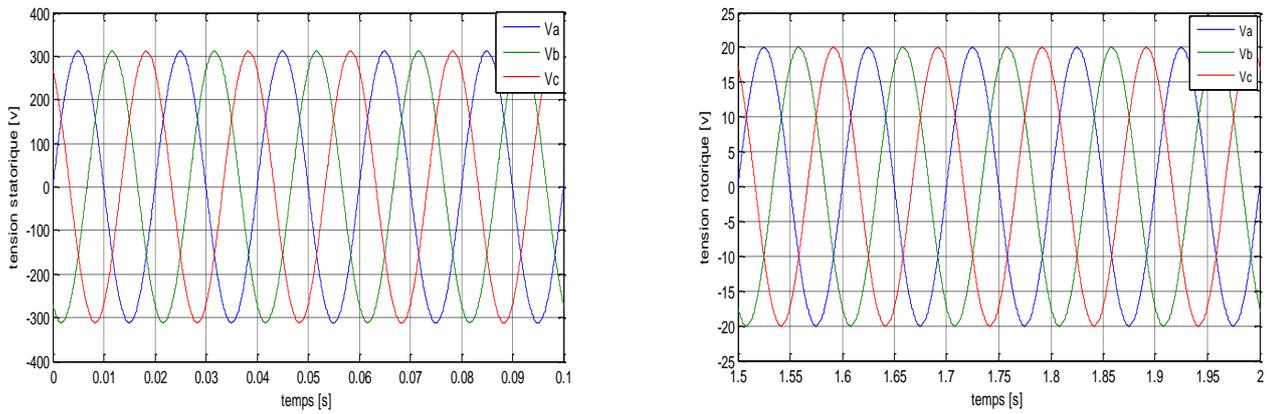


Figure-III.10. La tension triphasée appliquée au stator et celle appliquée au rotor de la MAD

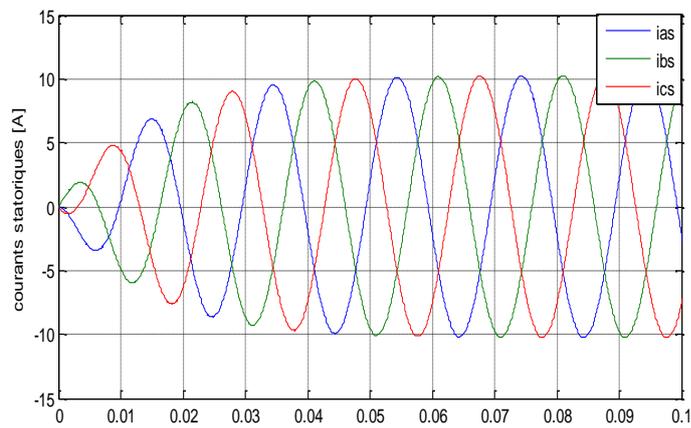


Figure-III.11. Les courants statoriques avec un zoom

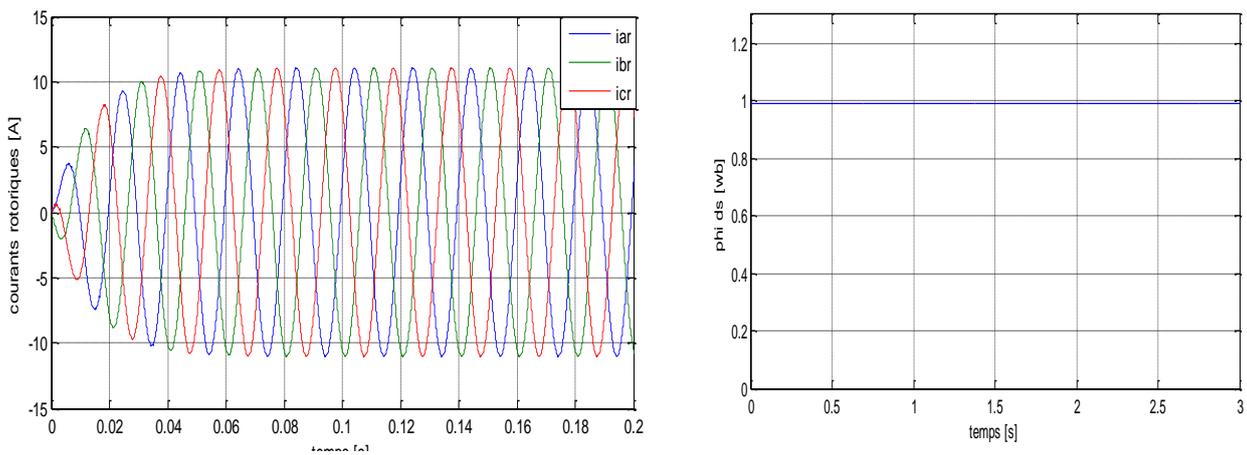


Figure-III.12. Les courants rotoriques avec un zoom et le flux statorique selon l'axe d

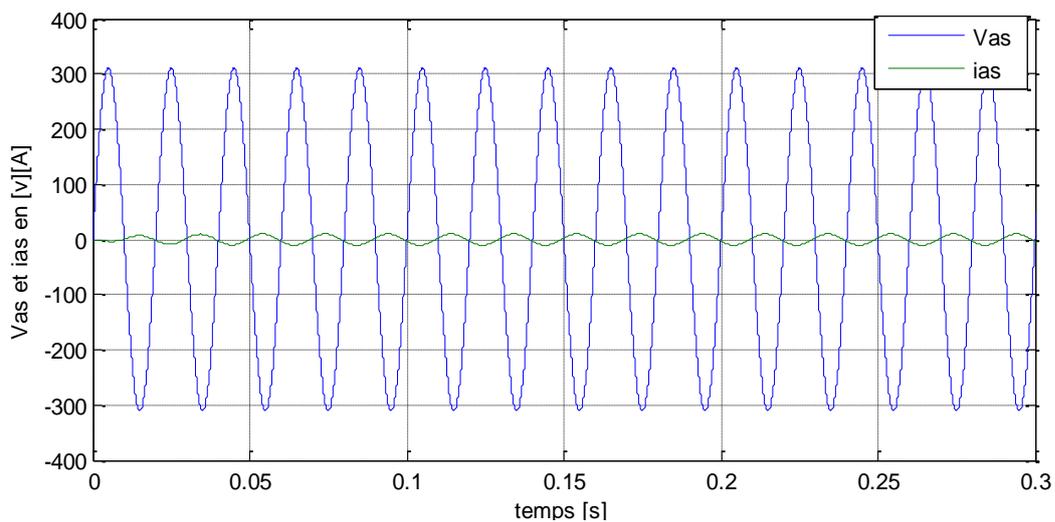


Figure-III.13. Variation instantanée de la tension et de courant de la phase a du stator

On remarque que l'allure de la tension et de courant d'une phase (A) du stator sont en opposition de phase, ce qui confirme que la machine fonctionne en mode générateur.

III.10.2. Simulation de la commande en puissance

Dans cette partie on va simuler la MADA connecté à la turbine, et une commande directe des puissances active et réactive à base des réseaux de neurones. On à utiliser un RN a une seule couche cachée avec 05 neurones entraînés par l'algorithme Levenberg-Marquard

III.10.3. Simulation de la MADA connecte à la turbine

Dans ce cas on a relié la machine a la turbine éolienne supposant que cette dernière est attaquée par un profile de vent fixe dans le temps (7m/s).

On a pris comme référence

$$P_{\text{réf}} = 5000\text{w.}$$

$$Q_{\text{réf}} = 0\text{VAR.}$$

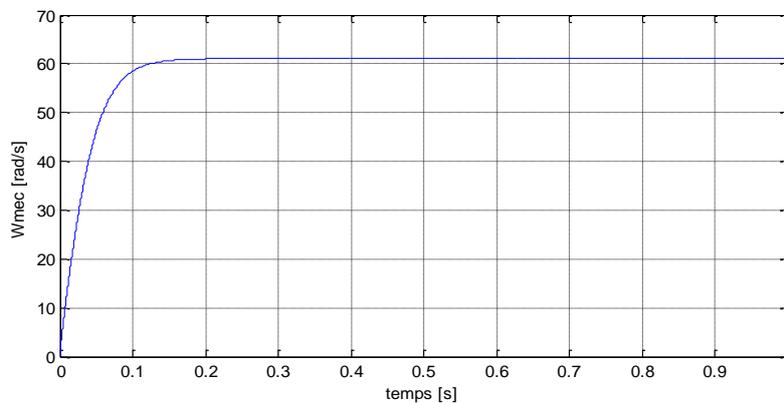


Figure-III.14. La variation instantanée de la vitesse mécanique de la turbine éolienne (W_{mec})

On observe que l'allure de la vitesse mécanique se stabilise à la valeur $W_{\text{mec}} = 61$ rad/s après un temps de réponse de 0.2s.

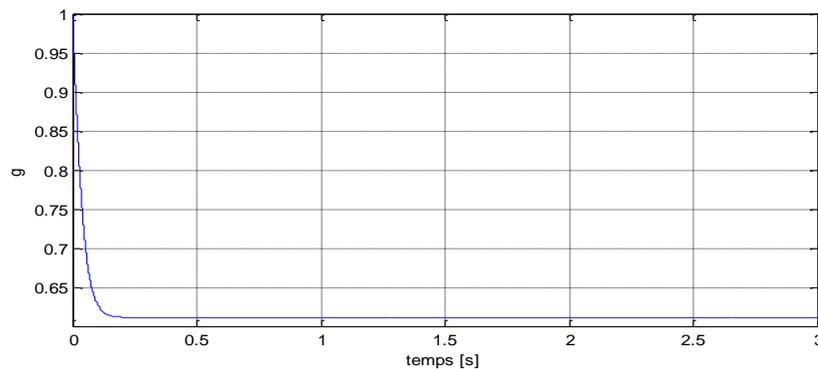


Figure-III.15. Variation instantanée de glissement (g)

On remarque que le glissement se stabilise à la valeur $g = 0.61$ qui est supérieur à zéro d'où la machine fonction en mode générateur hypo synchrone.

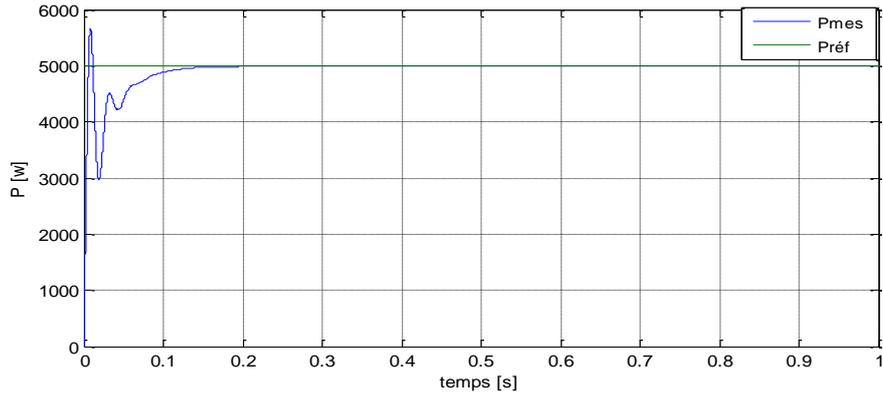


Figure-III.16. Variation instantanée de puissance active

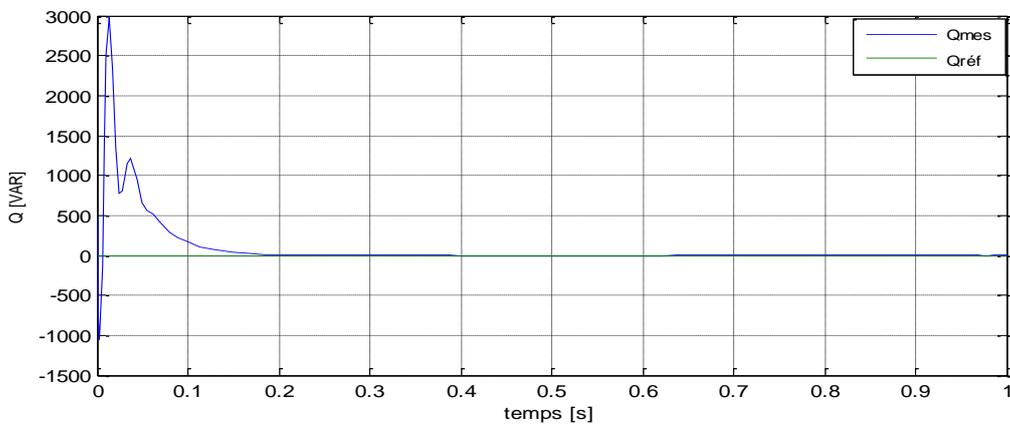


Figure-III.17. Variation instantanée de puissance réactive

D'après les résultats des figures (III.16) et (III.17), la puissance active et réactive mesurés suit exactement leurs références après le régime transitoire ou la machine est à l'état de démarrage.

La figure III-18, présente le profil du vent qui sera appliqué pour la turbine éolienne ainsi que l'allure de la vitesse mécanique

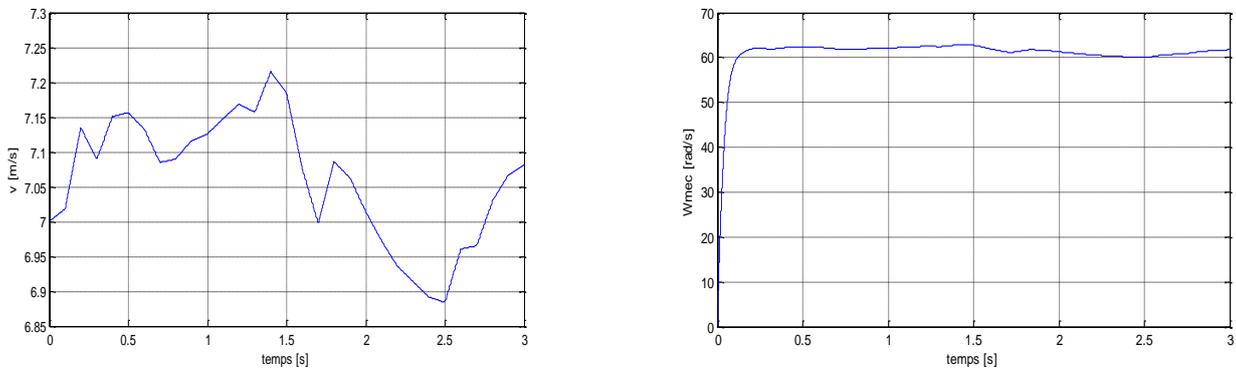


Figure-III.18. Profil du vent et la vitesse mécanique

La variation instantanée de la vitesse mécanique de la turbine suit toujours la valeur et la vitesse du vent et marque au démarrage un temps de réponse bref qui peut être justifié par le régime transitoire.

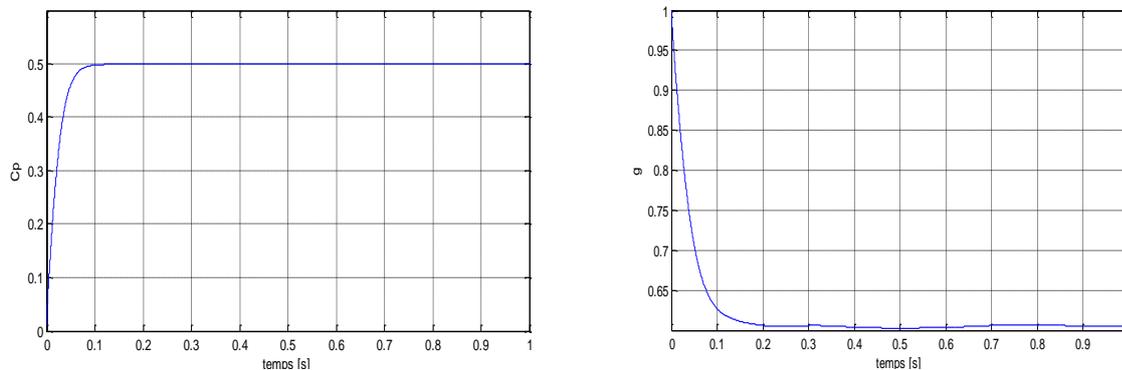


Figure-III.19. Coefficient de puissance et le glissement

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

On remarque que le C_p atteint une valeur moyenne de 0,5, il cherche à être gardé au maximum possible pour but de maximiser la production, et varie légèrement selon la variation de la vitesse du vent.

- On remarque que le glissement suit les variations du profil du vent et garde ces valeurs supérieures à zéro d'où la machine fonctionne toujours en mode générateur hypo synchrone.

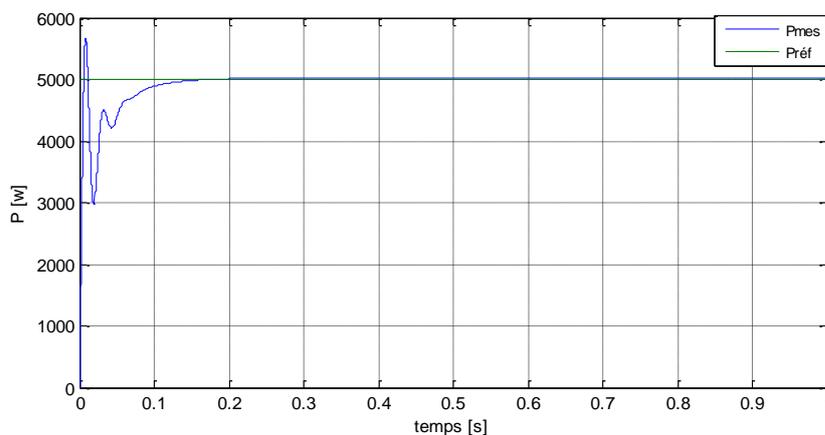


Figure-III.20. La puissance active

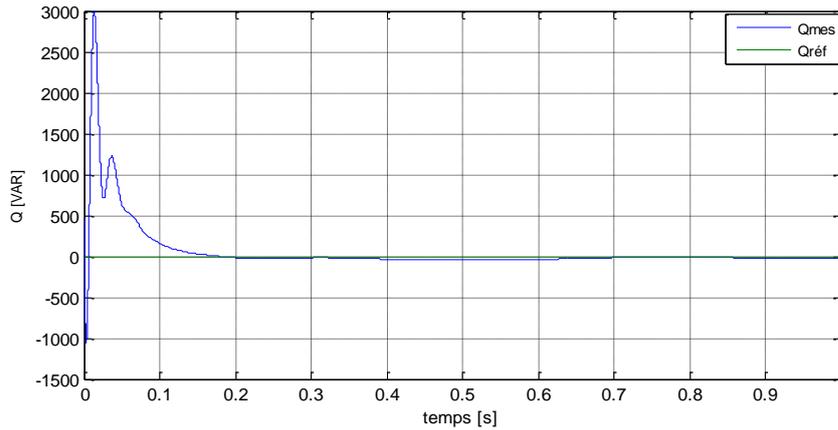


Figure-III.21. La puissance réactive

D'après les résultats des figures (III.20) et (III.21), les puissances actives et réactives mesurées suivent exactement leurs valeurs de références après un temps de réponse égal à 0.15s

On remarque que les courbes de puissances montrent un intervalle de temps bref entre [0 0.15] c'est le régime transitoire ou la machine est à l'état instable qui est le temps nécessaire pour le démarrage, après ce temps on observe que les puissances mesurées convergent vers leurs référentiels.

III.11. Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'étudier la commande neuronale en puissance active et réactive statorique et rotorique de la machine asynchrone à double alimentation utilisé en génératrice. On a simulé le système global constitué de la MADA et la turbine d'une éolienne entraînée par une vitesse de vent fixe puis variable. La MADA est contrôlée à l'aide de régulateur neuronale.

Nous avons construit un dispositif de commande de la **MADA** à l'aide des réseaux de neurones dans l'objectif d'améliorer les performances statiques et dynamiques de la chaîne

A decorative horizontal border with rounded corners and a scroll-like effect on the left and right sides, containing the text.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de ce mémoire est l'étude d'une machine asynchrone à double alimentation (Alimentation et commande), ainsi que l'apport qu'elle pourrait apporter et son application dans une chaîne de production d'énergie éolienne.

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

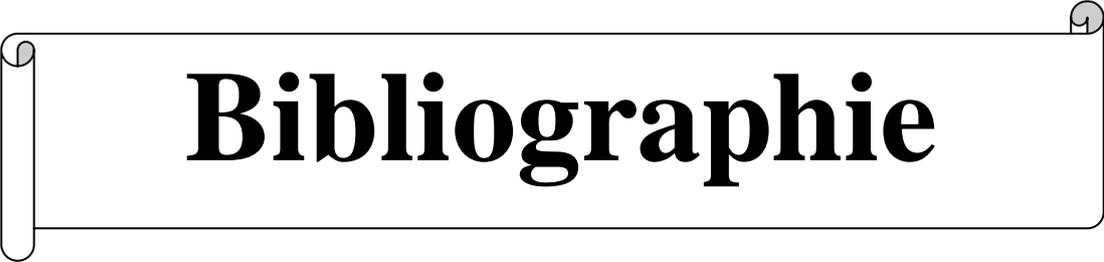
Dans le contexte des énergies renouvelables, un état de l'art de la génératrice éolienne est présenté dans le premier chapitre, on a rappelé les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique et les différents types d'éoliennes avec les machines électriques utilisées dans cette conversion d'énergie. Ce qui nous a amené à choisir la machine asynchrone à double alimentation de par ces qualités de fonctionnement.

Dans le deuxième chapitre, nous avons modélisé la machine asynchrone à double alimentation (MADA). Nous avons pu établir un modèle mathématique simplifié de la MADA et leur commande vectorielle.

Pour ce qui concerne le troisième chapitre, nous avons étudié la commande de la machine asynchrone à double alimentation par les réseaux de neurones qui permettent de contrôler indépendamment les puissances actives et réactive.

Après la simulation du système global on a observé le bon suivi des consignes pour les deux puissances actives et réactives de la machine ce qui a montré l'efficacité de la commande appliquée.

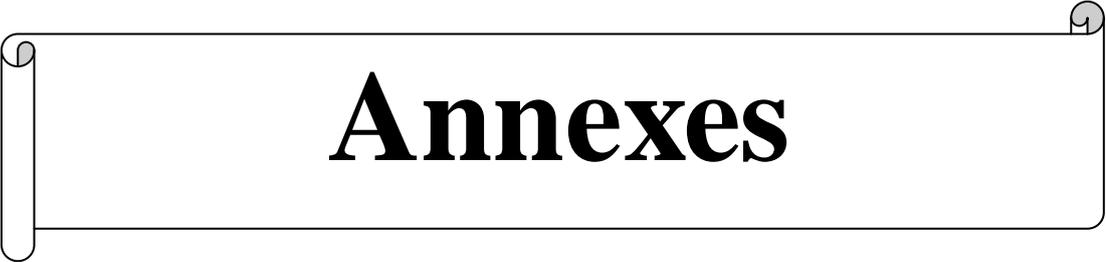
On espère que ce travail sera repris et amélioré en intégrant d'autres techniques de l'intelligence artificielle (algorithme génétique, logique floue) et utiliser d'autres machines.



Bibliographie

Bibliographie

- [1] L. BOUCHAFAA, S. ACHACHA « Etude d'une chaîne éolienne à base d'une MADA commandée par la logique floue », Mémoire de Master 2 USTHB .2011.
- [2] A. MEROUFEL, Y. DJERIRI, A.MASSOUM et A. HAMOUMI « Commande vectorielle par les réseaux de neurones artificiels de l'énergie d'une MADA intégrée a un système éolienne », Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°4, 2010.
- [3] S.EL-AIMANI « Modélisation de différentes technologies intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique. Ecole Centrale de Lille (ECL). 2005.
- [4] F. MERRAHI « Alimentation et commande d'une machine asynchrone a double alimentation (application a l'énergie éolienne) », Mémoire de Magister à l'Ecole Nationale Polytechnique. 2007.
- [5] <http://www.observ er .org>. Le baromètre des énergies renouvelables.
- [6] <http://www.ewea.org>. Wind Energy. European Wind Energy Association.
- [7] L. LECLERCQ « Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes », Ecole Doctorat Sciences pour l'Ingénieur, Université des Sciences et Technologie de Lille. 2004.
- [8] A. MIRECKI « Etude comparative de chaîne de conversion d'énergie dédiées a une éolienne de partie puissance », Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [9] N. HAMDI « Modélisation et commande des génératrices éoliennes », Mémoire de Magister à Université Mentouri de Constantine. 2008.
- [10] H.ABOUD, R. TAMENDJARI « Introduction d'une commande non linéaire a une machine asynchrone double alimentée dédiée a une éolienne », Mémoire d'Ingénieur à l'Université de Bejaia. 2008.
- [11] M. BEDDOUR « Contribution d'un réseau de neurones dans une commande d'une chaîne de conversion éolienne », Mémoire d'Ingénieur à l'Université de Bejaia. 2011.
- [12] P. K. SIMPSON «Artificial neural systems », Pergmon Press Elmsford, New York. 1989.
- [13] J. M. RABAEY « Digital integrated circuits, a design perspective », Prentice-Hall. 1996.
- [14] B. MENDIL « Outils structurels et algorithmiques pour la commande intelligente », Thèse de Doctorat à l'Université Farhat Abbas de setif. 2002.
- [15] K. S. NARENDRA and K. PARTHASARATHY « Identification and control of dynamical systems using neural networks », IEEE Trans.neural net, vol. 1, no.1, pp.4-26. Mar. 1990

A decorative horizontal border with a scroll-like appearance, featuring rounded ends and a slight shadow effect.

Annexes

Les paramètres de la MADA sont :

$$P_n : 5 \text{ kw ;}$$

$$P = 2 ;$$

$$R_s = 0.435 \Omega ;$$

$$R_r = 0.62 \Omega ;$$

$$M = 0.078 \text{ H;}$$

$$L_s = 0.084 \text{ H;}$$

$$L_r = 0.081 \text{ H;}$$

$$V = 220\sqrt{2} \text{ V; avec une fréquence de 50 Hz}$$

Les paramètres de la turbine éolienne :

$$\text{Nombre de pale} = 3 ;$$

$$R = 3.24 \text{ m ;}$$

$$G = 3.1475 ;$$

$$J = 0.075 \text{ kg.m}^2 ;$$

$$f = 0.006 ;$$

Résumé :

Le présent travail est consacré à une commande vectorielle de l'énergie active et réactive par les réseaux de neurones d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) et l'apport qu'elle pourra porter dans une chaîne de conversion éolienne. Nous avons présenté un état de l'art sur les éoliennes, les différentes structures d'alimentation et le type de génératrice utilisée, nous avons opté pour la machine asynchrone à double alimentation comme génératrice.

La modélisation de la machine asynchrone à double alimentation a été présentée, ainsi nous avons appliqué la commande neuronale en puissance active et réactive statoriques. Les résultats de simulation obtenus ont permis l'évaluation des performances de l'application de la machine asynchrone à double alimentation dans le domaine éolien.

Mots Clés : éolienne, modélisation, machine asynchrone double alimentation, onduleur, Réseaux de neurones.