

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

Université MENTOURI de CONSTANTINE

Faculté des Sciences de L'ingénieur
Département d'Electrotechnique

N^o d'ordre : í í í í í í í

Série : í í í í í í í í í

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de magister
en Electrotechnique

Option : Machines électriques dans leurs environnements.

Par

Naouel HAMDI

Modélisation et commande des génératrices éoliennes

Soutenu le :24 /01/2008

Devant le jury :

<i>Président :</i>	Mohamed EL – Hadi LATRECHE	Prof.	L'Université de Constantine
<i>Rapporteur :</i>	BOUZID AISSA	Prof.	L'Université de Constantine
<i>Examineurs :</i>	BENALLA HOCINE	Prof.	L'Université de Constantine
<i>Examineurs :</i>	Mohamed BOUCHERMA	MC.	L'Université de Constantine

Sommaire

<i>INTRODUCTION GÉNÉRALE</i>	Page 1
 <i>Chapitre 1 : état de l'art des génératrices éoliennes</i>	
1-1. Introduction	9
1-2. production éolienne	10
1-3 .définition de l'énergie éolienne	
1-4. principe de fonctionnement d'une éolienne .	11
1-5. les différents types des turbines éoliennes	
1-5-1 .les éoliennes à axe verticale	
1-5-2.les éoliennes à axe horizontal	12
1-6. principaux composants d'une éolienne	13
a- le mat	
b- la nacelle	14
c- le rotor	
c-1. les rotors à vitesse fixe	
c-2. les rotors à vitesse variable	
1-7 protection contre la corrosion	15
1-8 l'énergie cinétique du vent	
1-9 l'étude comparative entre les machines électriques utilisées dans l'énergie éolienne	18
1-9-1 types des machins électriques	
1-9-1-1 générateur synchrone	19
1-9-1-2 générateur asynchrone	20
1-9-1-2-a machine asynchrone à cage d'écurieil	
1-9-1-2-b machine asynchrone à double alimentation	23
a- structure des machins asynchrones à double alimentation	
a-1 double alimentation par le stator	24
a-2 double alimentation par le stator et le rotor	26

b- application des machines asynchrones à double alimentation	27
c- fonctionnement en génératrice a vitesse variable	
d- fonctionnement a vitesse fixe	29
e- Intérêt de la MADA	
1-10 conclusion	30

Chapitre 2 : Modélisation et étude du système de conversion

2-1. Introduction	32
2.2 Hypothèses simplificatrices	
2.3 Modélisation des machines asynchrones à double alimentation	
2.3.1 Modèle et Identification des paramètres de la machine	33
a- Equations électriques	
b- Equations des flux	34
c- L'équation mécanique	
2.4 Changement de repère	35
2.5 La transformation de Park	
2.6 Modélisation de l'onduleur	37
2.7 Modélisation de la turbine éolienne	41
2.7.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine	
2.7.2 Modélisation de la turbine	43
2.7.3 Modèle du multiplicateur	45
2.7.4 Equation dynamique de l'arbre	
2.8 Schéma de simulation	47
2.9 Résultats de la simulation	48
2.10 Interprétation	51
2.11 Conclusion	

Chapitre 3 : Les différentes méthodes de commande de la MADA

3-1 Introduction	53
3-2 études bibliographiques	54
3-3 quelques méthode de commande utiliser dans la MADA	63
3-3-1. la commande de la machine asynchrone à double alimentation avec quatre boucles de régulation	64
3-3-2 . la commande de la machine asynchrone à double alimentation avec des Convertisseurs statorique rotorique	65
3-3-3. la commande par logique floue de MADA	67
3-3-4 la commande scalaire de la MADA	70
3-4 conclusion	70
<i>Chapitre 4 : la commande Vectorielle à flux statorique oriente</i>	
4 -1 introduction	72
4-2.types de commande vectorielle	73
4-2-1 commande vectorielle directe	
4-2-2 commande vectorielle indirecte	
4-3 contrôles par orientation de flux	
4-3-1 choix de la position du référentiel	
4-4 commande vectorielle par orientation du flux statorique	74
4-5 relations entre puissance statorique et courants rotoriques	78
4-6 calcules des régulateurs	80
4-7 Schéma de simulation	83
4-8 les résultats de la simulation	
4-9 interprétation des courbes	87
4-10 conclusion	
<i>CONCLUSION GENERALE</i>	88
<i>BIBLIOGRAPHIE</i>	90
<i>ANNEXE</i>	103

Chapitre 1

État de l'art des génératrices éoliennes

1.1 Introduction :

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique ; d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable.

Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes.

Une éolienne doit comporter :

- un système qui permet de la contrôler électriquement (machine électrique associée à la commande).
- Un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des paliers de l'éolienne, orientation de la nacelle).

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement aux différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement, ainsi qu'à l'étude de l'énergie cinétique du vent et les différents types de génératrices.

La dernière partie de ce chapitre illustre les différentes structures des machines asynchrones à double alimentation, leur principe de fonctionnement, leurs applications et leur intérêt.

1.2 La production éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est directement lié à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps été oubliée, cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, connaît depuis environ 30 ans un développement sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers.

1.3 Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [1].

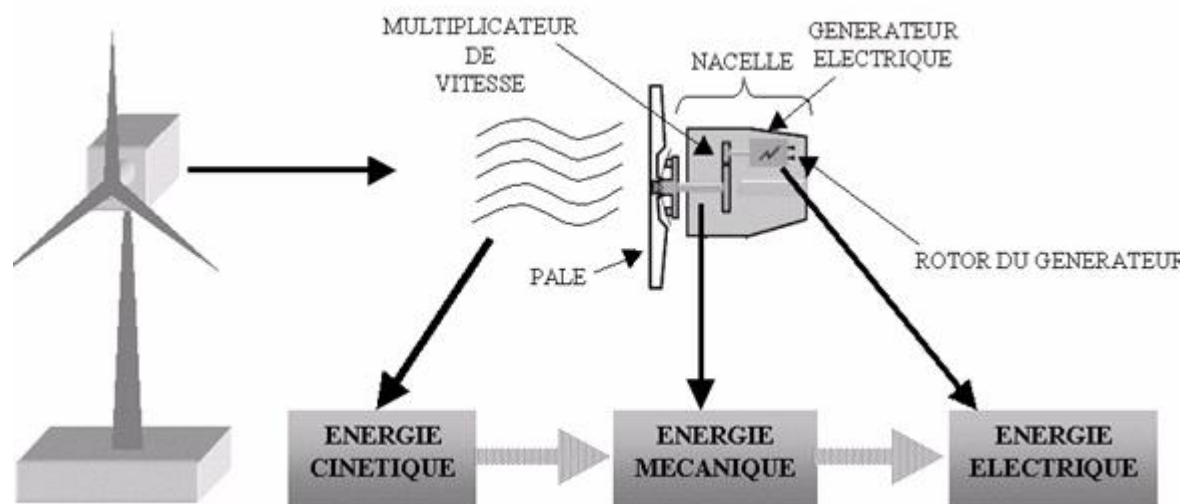


Figure 1.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [1]

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffusée et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). de plus c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif ; elle est

toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mats et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes des plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement de turbulences [5].

L'éolienne se compose d'une nacelle, d'un mât, de pales et d'un multiplicateur de vitesse. La fabrication de ces différents éléments est d'une technologie avancée, ce qui les rend par conséquent onéreux.

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produit étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également en mer où la présence du vent est plus régulière.

1.4 Principe de fonctionnement d'une éolienne

Une éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor, qui transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite. La puissance mécanique est ensuite transformée soit en puissance hydraulique par une pompe, soit en puissance électrique par une génératrice.

1.5 Les différents types des turbines éoliennes

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. On peut diviser les éoliennes en deux grandes familles[20],[1] :

- les éoliennes à axe vertical
- les éoliennes à axe horizontal

1.5.1 Les éoliennes à axe vertical

Ce type d'éolienne (figure 1.2) 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 (multiplication 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 mât, souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal [6].



Figure 1.2 : éolienne à axe vertical [7]

1.5.2 Les éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal (figure 1.3) beaucoup plus largement employées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrant de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol [7].

Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à deux, trois pales (les plus courantes) et les multi-pales.



Figure 1.3 : éolienne à axe horizontal [7]

Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale.

- Eoliennes de petite puissance : inférieur à 40 W.
- Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.
- Eoliennes de forte puissance : supérieur à 1 MW.

A titre de comparaison, le tableau ci dessous propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice [7].

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 kW
Moyenne	12 m à 45 m	De 40 kW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1 MW et plus

1.6 Principaux composants d'une éolienne

Une éolienne est généralement constituée de trois éléments principaux (figure 1.4).

- le mât
- la nacelle
- le rotor

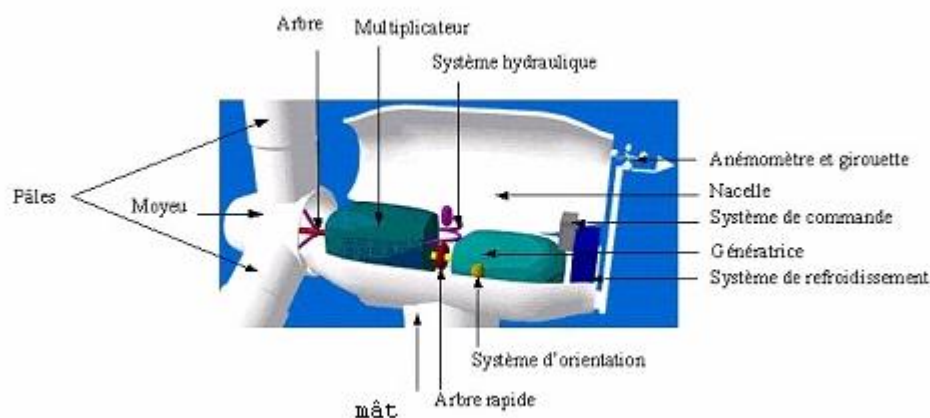


Figure 1.4 : éléments constituant une éolienne

a- Le mât

Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique. Il doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol [1].

b- La nacelle

Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur, système de commande, système de refroidissement, frein à disque différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.

Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent).

A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.

c- Le rotor

Le rotor, formé par les pales assemblées dans leur moyeu.

Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un

bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit [8].

Il existe deux types de rotor, les rotors à vitesse fixe et les rotors à vitesse variable.

c-1 Les rotors à vitesse fixe

Sont souvent munis d'un système d'orientation de pales permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écuriel) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance.

Ce système allie ainsi simplicité et faible coût [1].

c-2 Les rotors à vitesse variable

Sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié.

Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites, la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique) [1].

1.7 Protection contre la corrosion

Les différentes parties de l'éolienne sont protégées contre la corrosion par un revêtement spécial à plusieurs couches. Les éléments particulièrement exposés aux intempéries, comme par exemple le moyeu du rotor, sont galvanisés.

1.8 Energie cinétique du vent

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passent par la surface active S de la voilure[3].

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure 1.5 sur lequel on a représenté la vitesse du V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval en supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit

$\frac{V_1 + V_2}{2}$, la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est :

$$m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)}{2} \quad (1-1)$$

La puissance P_m alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton).

$$P_m = \frac{m (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (1-2)$$

Soit en remplaçant m par son expression

$$P_m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (1-3)$$

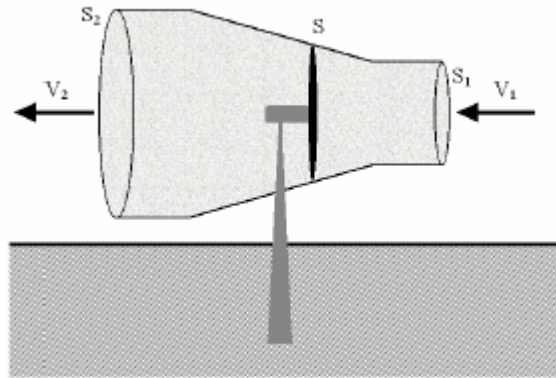


Figure 1.5 : tube de courant autour d'une éolienne [3].

Le vent théorique non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_{mt} correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (1-4)$$

La relation entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible et alors :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \quad (1-5)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (figure 1.6), on s'aperçoit que la ratio $\frac{P_m}{P_{mt}}$ appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maximum de $\left(\frac{16}{27}\right)$ soit 0.59 ; c'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée .

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

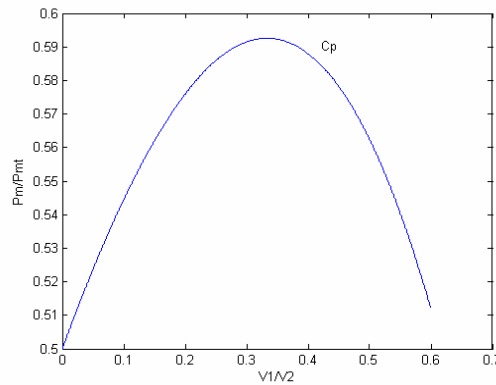


Figure 1.6 : coefficient de puissance

La figure 1.7 donne un aperçu sur les coefficients de puissance C_p habituels en fonction de la vitesse réduite λ pour différents types d'éoliennes.

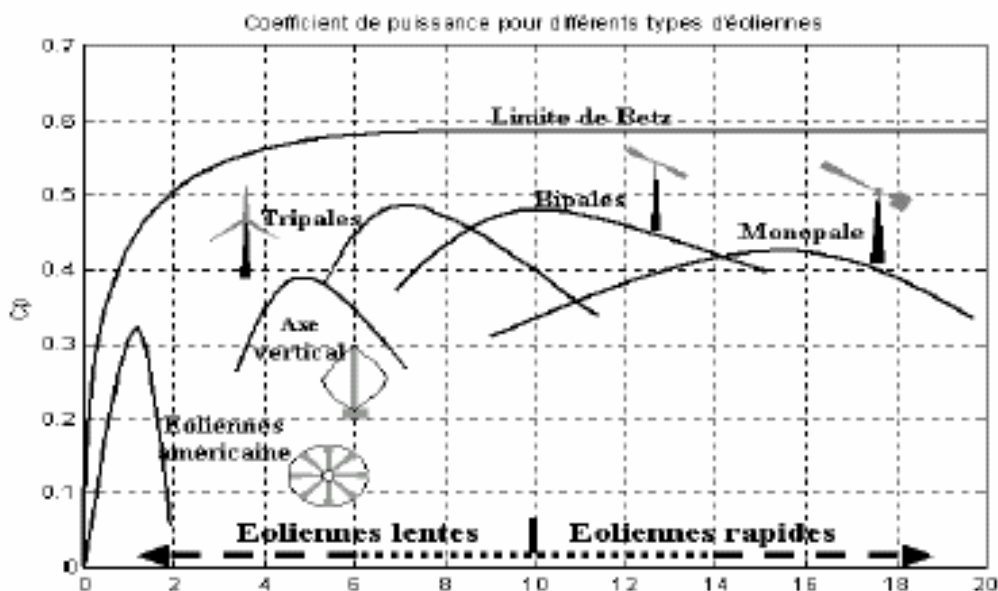


Figure 1.7 : coefficient de puissance pour les différents types d'éoliennes [3]

Selon la loi de Betz, la puissance maximale est :

$$P_{\max} = \frac{16}{27} P_{mt} = 0.59 P_{mt} \quad (1-6)$$

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde ; de cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est défini [3] :

$$C_p^{opt} = \frac{P_{\max}}{P_{mt}} = \frac{2 P_{\max}}{\rho S V_1^3} = 0.59 \quad (1-7)$$

En combinant les équations (1-1), (1-4) et (1-5), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} P_{mt} = C_p P_{mt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (1-8)$$

La figure 1.8 présente la puissance mécanique disponible en fonction de la vitesse du générateur pour différentes vitesses de vent.

Avec : $\lambda = \frac{\Omega_1 R}{V_1}$

Ω_1 : Vitesse de rotation avant multiplicateur de vitesse K

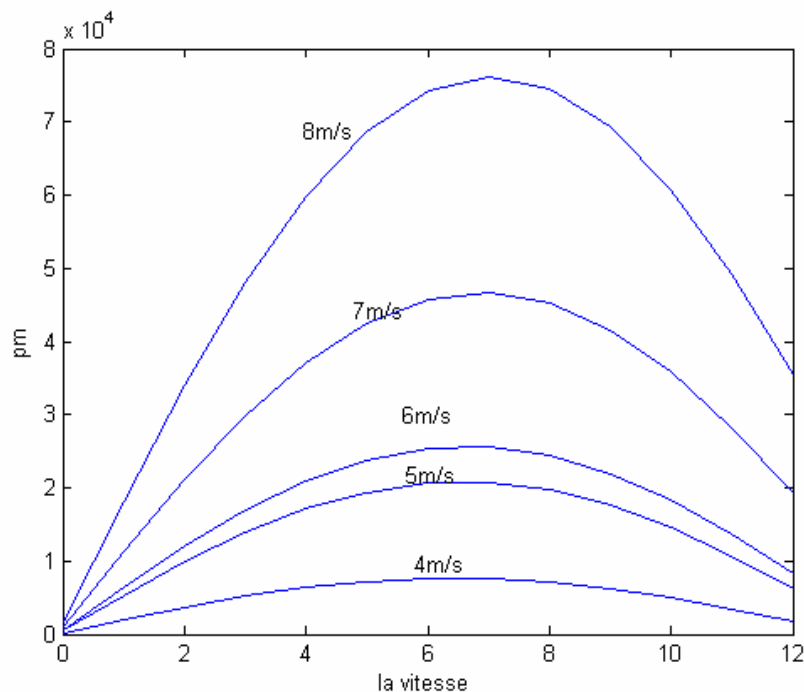


Figure 1.8 : Puissance mécanique disponible en fonction de la vitesse du générateur pour différentes vitesses de vent.

La puissance mécanique P_{mg} disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_{mg} = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\Omega_2 R}{K V_1} \right) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (1-9)$$

Avec Ω_2 : vitesse de rotation après multiplicateur [1] [14] [3].

1.9 - Etude comparative des machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne

Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques [9].

On décrit dans cette étude, les principales caractéristiques technologiques et concepts liés aux aérogénérateurs.

1.9.1 Types de machines électriques

Les deux types de machines électriques les plus utilisées dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et asynchrones.

1.9.1.1 Générateur synchrone

C'est ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grandes puissances (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones de 500 kW à 2 MW utilisés dans le domaine éolien, sont bien plus chers que les générateur à induction de la même taille.

De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau (figure1.8), sa vitesse de rotation fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéroturbine se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite.

C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés du réseau ; elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance (figure1.9).

Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplés. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple dans le train de puissance. Certaines variantes de machines synchrones peuvent fonctionner à de faibles vitesses de rotation et donc être directement couplées à l'aéroturbine. Elles permettent ainsi de se passer du multiplicateur, élément présent sur la plupart des aérogénérateurs et demande un important travail de maintenance [4].

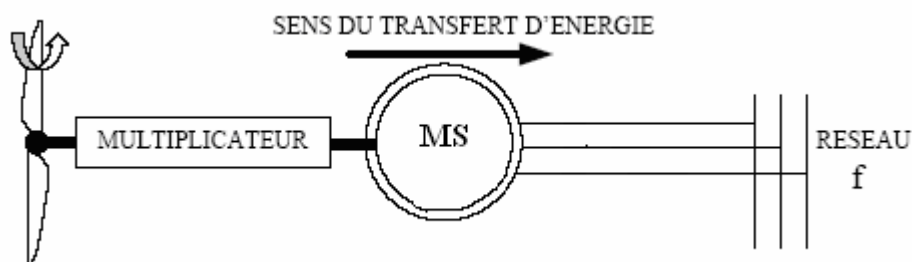


Figure 1.8 : Machine synchrone connectée directement au réseau

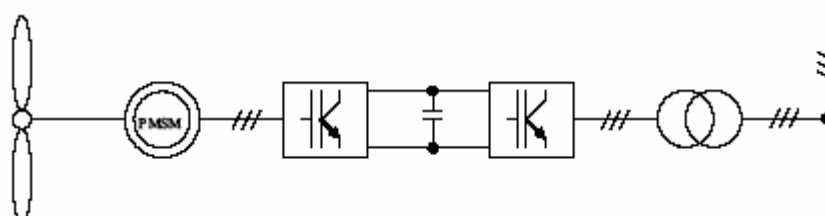


Figure 1.9 : Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance

1.9.1.2 Générateur asynchrone

La connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor.

Ceci explique pourquoi pratiquement toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines à induction.

Il existe deux catégories de machine asynchrone: les machines asynchrones à cage d'écureuil et les machines asynchrones à rotor bobiné.

1.9.1.2.a Machine asynchrone à cage d'écureuil

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

Ainsi pour les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important) , la vitesse de rotation est peu élevée. Or il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct .

Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse.

La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais et collecteur ou de contacts glissants sur des bagues, la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne.

A titre d'exemple, la caractéristique couple-vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la figure (1.10) [1].

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme (point $g=0$), dans le cas de la caractéristique suivante (Fig.1.10), la génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500 et 1600 tr/min.

Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau (figure 1.11).

La machine a un nombre de paire de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important, les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs.

La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine.

Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau, celui-ci peut être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la figure (1.11), qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne.

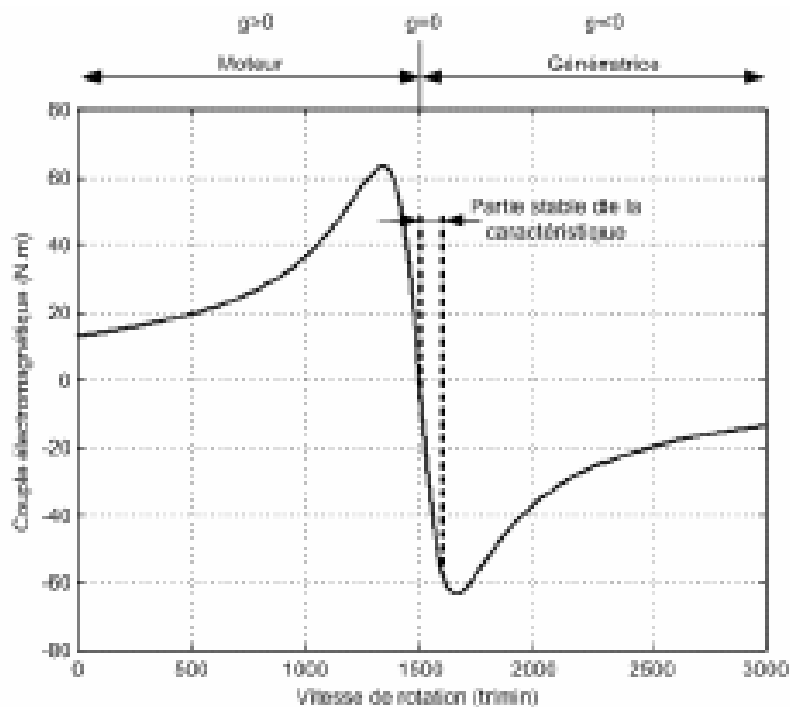


Figure 1.10 : Caractéristique couple- vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles[2]

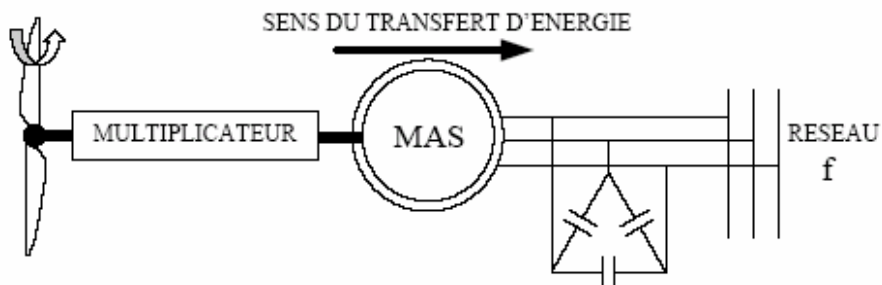


Figure 1.11: Connexion directe d'un machine asynchrone sur le réseau[2]

Une autre solution consiste à utiliser la génératrice asynchrone triphasée car la connexion de l'éolienne au réseau se fait par l'intermédiaire d'un dispositif électronique de puissance (figure 1.12).

L'éolienne fonctionne à vitesse variable, le générateur produit un courant alternatif de fréquence variable. L'emploi de deux convertisseurs de puissance permet de découpler la fréquence du réseau de la fréquence variable des courants de la machine par création d'un bus continu intermédiaire.

Avec une telle structure, les fluctuations rapides de la puissance générée peuvent être filtrées par le condensateur en autorisant une variation de la tension du bus continu sur une plage donnée [2].

Les différents inconvénients de ce système sont le coût, la fiabilité de l'électronique de puissance et les pertes dans les convertisseurs de puissance. Ces convertisseurs sont dimensionnés pour 100% de la puissance nominale de la génératrice, ceci augmente significativement le coût de l'installation et les pertes. Une étude économique approfondie est nécessaire avant d'adopter ce type d'installation.

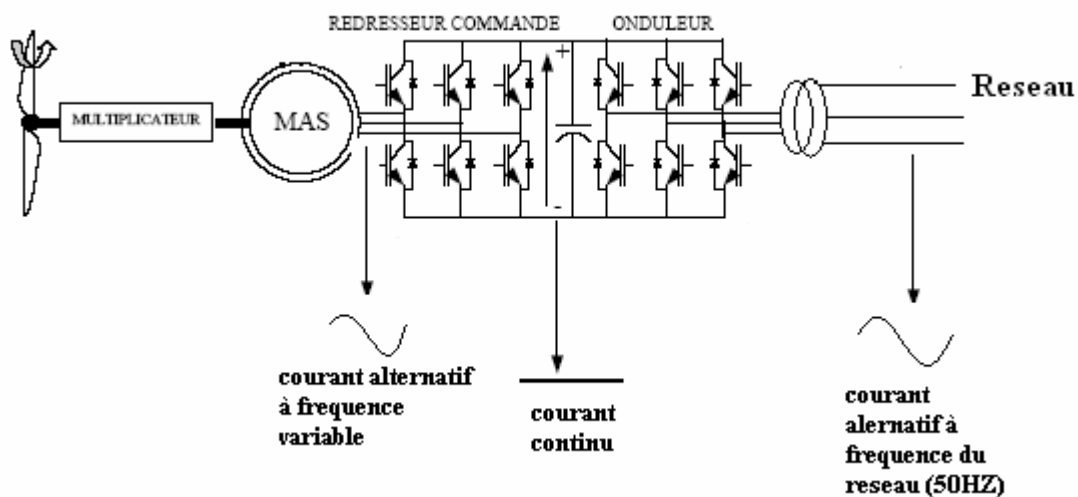


Figure 1.12 : Eolienne connectée au réseau par l'intermédiaire de deux convertisseurs de puissance [2]

Malgré sa simplicité et ses qualités de robustesse et son coût, la machine asynchrone à cage reste uniquement pour l'utilisation dans un système éolien, lorsque elle est directement connectée au réseau, la vitesse de rotation doit rester pratiquement constante de façon à ce que la machine reste proche de la vitesse de synchronisme. Cette restriction entraîne une efficacité réduite de l'éolienne aux vitesses de vent élevées.

Partant de ce constat, nous pouvons utiliser la machine asynchrone à double alimentation (MADA) comme alternative à la machine à cage.

1.9.1.2.b Machine asynchrone à double alimentation

Avec les générateurs synchrones, c'est actuellement l'une des deux solutions concurrentes en éolien à vitesse variable [18].

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

A la place du rotor à cage décureuil ces machines ont un rotor bobiné dont le réglage électrique assure la variation du glissement [3] [23].

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 se 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 [2].

a - Structure des machines asynchrones à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasés classiques (asynchrone à cage ou synchrone), constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées, munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements [21].

L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écuriel coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne (figure 1.13)

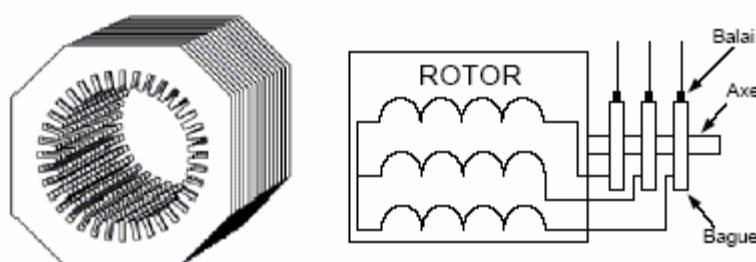


Figure 1.13 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA [2]

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.

Plutôt que de dissiper l'énergie rotorique dans des résistances, l'adjonction d'un convertisseur entre le bobinage rotorique et le réseau permet de renvoyer cette énergie sur le réseau (énergie qui est normalement dissipée par effet joule dans les barres si la machine est à cage), le rendement de la machine est ainsi amélioré, c'est le principe de la cascade hypo synchrone [1].

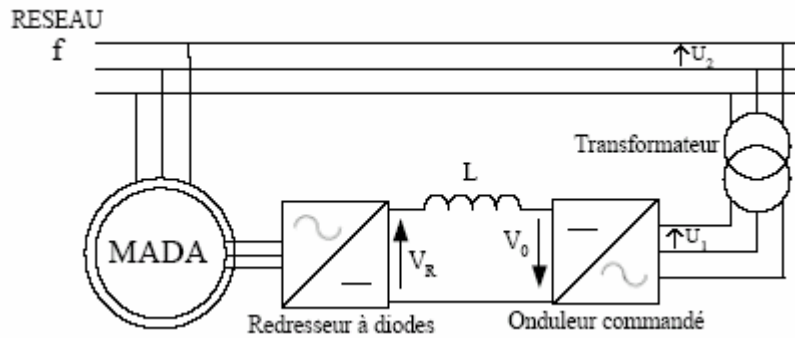


Figure 1.14 : Cascade hypo synchrone

Il existe plusieurs technologies de la machine asynchrone à double alimentation et plusieurs dispositifs d'alimentation sont envisageables. Chaque structure a ses inconvénients et ses avantages.

a.1- Double alimentation par le stator

Pour réaliser une double alimentation par le stator, la machine asynchrone est munie de deux bobinages statoriques distincts (figure 1.15)

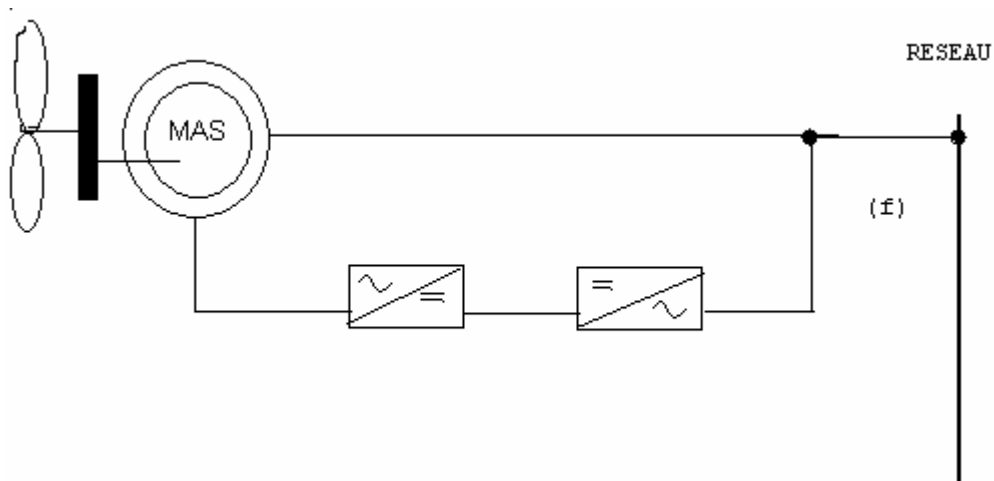


Figure 1.15 : Machine asynchrone à double bobinage statorique

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.

Le convertisseur de puissance connecté à l'enroulement d'excitation permet de contrôler le flux statorique de la machine ; le glissement peut être ainsi contrôlé et donc la vitesse de la génératrice. En augmentant le flux, les pertes au rotor augmentent, le glissement aussi. En diminuant le flux, les pertes diminuent et le glissement également. Un second convertisseur est nécessaire pour créer le bus continu.

Comme les machines asynchrones ont un facteur de puissance faible à cause de l'inductance magnétisante, le convertisseur relié au réseau peut être commandé de manière à minimiser la puissance réactive. Comme pour toutes les machines asynchrones à double alimentation, la puissance nominale du convertisseur de puissance est proportionnelle au glissement maximum. Il a été vérifié que cette structure génère des puissances fluctuantes sur le réseau induisant ce qu'on appelle des flickers.

a.2- Double alimentation par le stator et le rotor

La structure de conversion est constituée d'une génératrice asynchrone à rotor bobiné entraînée par une turbine éolienne (figure1-16).

Pour expliquer le principe de fonctionnement, on néglige toutes les pertes. 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 grandeurs alternatives de fréquence $g.f$. Ces grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elle est renvoyée, par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Ce réseau reçoit donc $(1+g)p$; les bobinages du rotor sont donc accessibles grâce à un

système de balais et de collecteurs (figure1.17). Une fois connecté au réseau, un flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la reluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et donc du courant statorique.

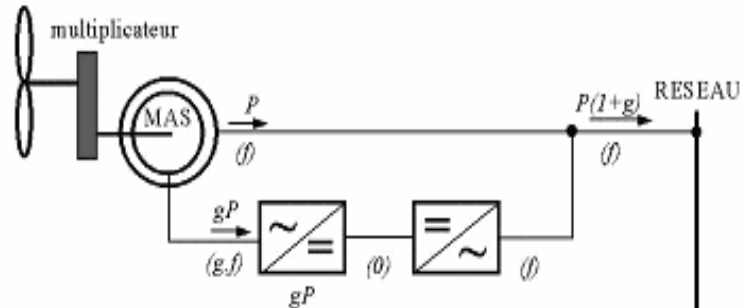


Figure1.16 : Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné pilotée par le rotor

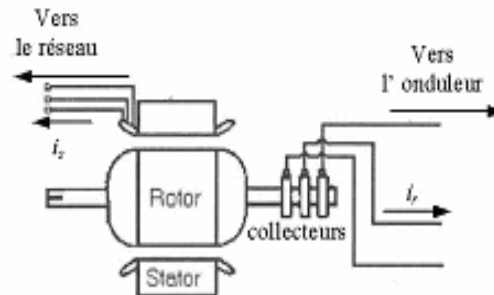


Figure1.17 : Schéma de la machine asynchrone à rotor bobiné avec des bagues collectrices

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement.

Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou vitesse variable dépend par exemple de cette configuration. Les avantages principaux des deux types de fonctionnement sont les suivants :

b- Applications des machines asynchrones à double alimentation

La première application de la MADA et le fonctionnement moteur sur une grande plage de variation de la vitesse.

Dans les machines synchrones classiques et asynchrones à cage, la vitesse de rotation est directement dépendante de la fréquence des courants des bobinages statoriques. La solution classique permettant alors le fonctionnement à vitesse variable consiste à faire varier la

fréquence d'alimentation de la machine. Ceci est généralement réalisé par l'intermédiaire d'un redresseur puis d'un onduleur commande.

Ces deux convertisseurs sont alors dimensionnés pour faire transiter la puissance nominale de la machine.

L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille de ces convertisseurs d'environ 70% en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques [1].

Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur.

La même philosophie peut être appliquée au fonctionnement en génératrice dans lequel l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse.

c- Fonctionnement en génératrice à vitesse variable

La figure (1.18) donne la configuration de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation dont le stator est relié directement au réseau et dont le rotor est relié au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur (structure de Scherbius *PWM*), P_{RES} est la puissance délivrée au réseau ou fournie par le réseau, P_S La puissance transitant par le stator, P_R la puissance transitant par le rotor, et P_{MEC} la puissance mécanique [1].

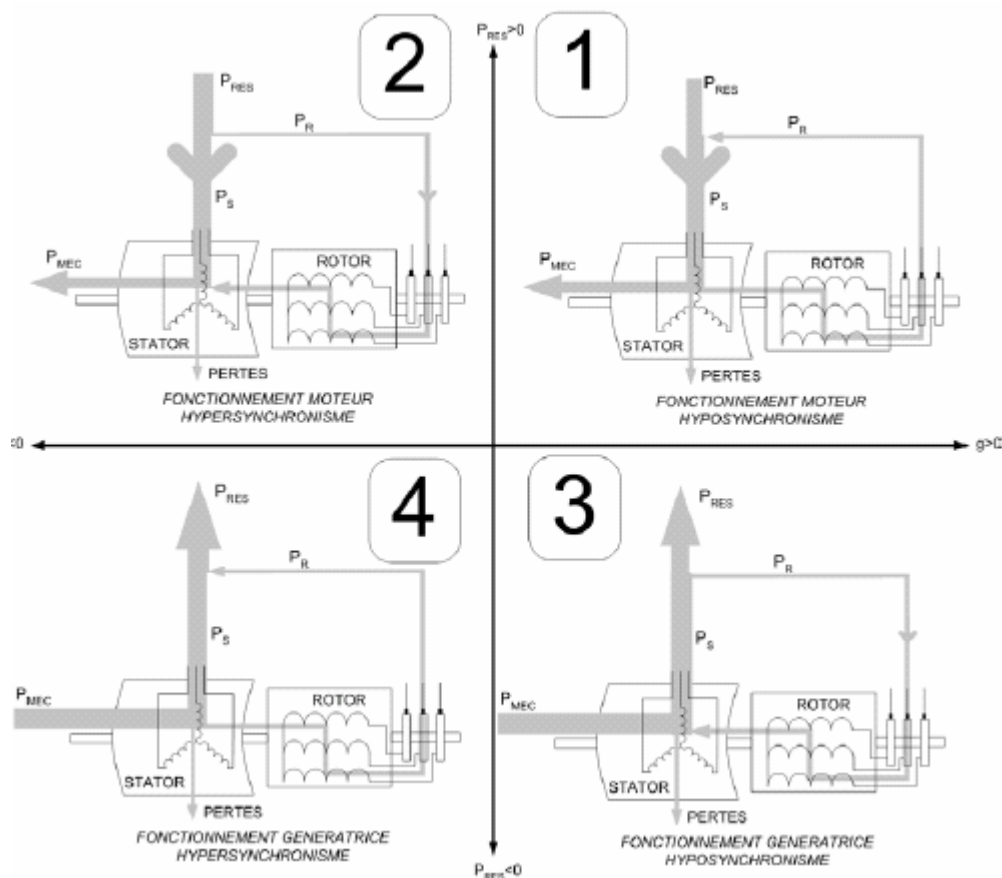


Figure 1.18 : Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation [1]

Lorsque la machine fonctionne en moteur, la puissance est fournie par le réseau. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, la puissance de glissement est renvoyée sur le réseau, c'est la cascade hypo synchrone.

En mode moteur hyper synchrone, une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et est convertie en puissance mécanique.

En fonctionnement générateur, le comportement est similaire, la puissance fournie à la machine par le dispositif qui la entraîne est une puissance mécanique.

En mode hypo synchrone, une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.

En mode hyper synchrone, la totalité de la puissance mécanique fournir à la machine est transmise au réseau aux pertes près.

Une partie de cette puissance correspondant à $g.P_{MEC}$ est transmise par l'intermédiaire du rotor.

Pour une utilisation dans un système éolien, les quadrants 3 et 4 sont intéressants. En effet si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas $\pm 30\%$ en deçà ou au delà de la vitesse de

synchronisme (ce qui représente un compromis entre la taille du convertisseur et la plage de variation de vitesse) , la machine est capable de débiter une puissance allant de 0,7 à 1,3 fois la puissance nominale ; le convertisseur est alors dimensionné pour faire transiter uniquement la puissance de glissement c'est-à-dire au maximum 0,3 fois la puissance nominale de la machine [28].

Il est alors moins volumineux, moins coûteux, nécessite un système de refroidissement moins lourd et génère moins de perturbation que s'il est placé entre le réseau et le stator d'une machine à cage.

d- 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.

Il existe plusieurs types de génératrices utilisées dans le fonctionnement à vitesse variable représentés par le tableau suivant [15]:

Génératrices utilisées	Caractéristiques
Machine asynchrone en autonome	Nécessité de capacités d'auto excitation pour magnétiser la machine.
Machine asynchrone à cage débitant sur un réseau	Obligation de fonctionner au voisinage du synchronisme.
Machine à double alimentation ou MADA	Autorise le fonctionnement à vitesse variable
Machine synchrone à aimants permanents (MSAP)	Bon rendement, faibles puissances, adaptée aux faibles vitesses mais prix élevé.
Machine à réluctance variable (MRV)	Permettant de supprimer totalement ou partiellement le multiplicateur de vitesse.

e- 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 [24] [2].

1.10 Conclusion

Dans ce chapitre une synthèse bibliographique a été présentée et qui concerne les différents types éoliennes 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 présente les machines électriques et leurs applications ainsi que leur adaptation à un système éolien.

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

Chapitre 2

Modélisation et étude du système de conversion

2.1 Introduction

La modélisation de la chaîne de conversion éolienne est une étape primordiale dans la compréhension du système éolien. Cette étape permet de premier lieu d'abord de comprendre le comportement dynamique et l'interaction électromécanique de la génératrice. Avec le modèle approprié, nous pouvons nous orienter facilement à une commande optimale.

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à la modélisation de la turbine éolienne. Notre choix se porte sur la génératrice asynchrone à double alimentation de part sa robustesse, qui a été justifiée dans le premier chapitre. Nous modéliserons la chaîne de conversion éolienne à vide.

Nous verrons ensuite la modélisation et la commande en MLI de l'onduleur en tension ainsi que la turbine.

Des résultats de simulation permettront de juger l'efficacité de ce modèle.

2.2 Hypothèses simplificatrices

Pour l'étude de la génératrice asynchrone à double alimentation idéalisée, on introduit les hypothèses simplificatrices suivantes [12]:

- 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.

2.3 Modélisation des machines asynchrones à double alimentation

La machine est représentée par six enroulements dans l'espace électrique ; l'angle θ_e repère l'axe d'une des phases rotoriques par rapport à l'axe fixe de la phase statorique. Les flux sont

comptés positivement selon les axes des phases ; Les sens des enroulements sont repérés conventionnellement par un point (•), un courant de signe positif entrant par ce point crée un flux positif dans l'enroulement. (Voire figure2.1)

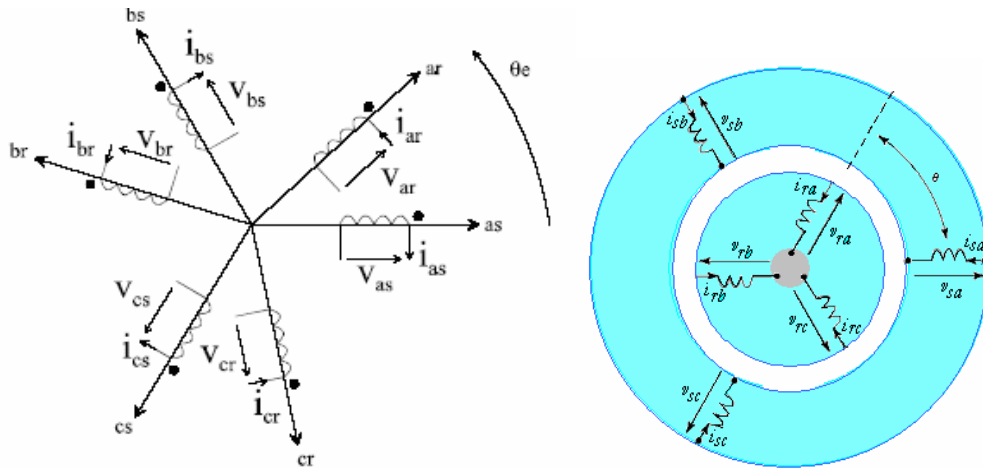


Figure 2.1 : Représentation de la machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique

2.3.1 Modèle et Identification des paramètres de la machine

Le modèle de la MADA est équivalent au modèle de la machine asynchrone à cage d'écurueil. A cet effet, lors de cette modélisation, on assimile la cage d'écurueil à un bobinage triphasé (voir figure (2-2)). La seule différence réside dans le fait que ces enroulements ne sont plus systématiquement en court-circuit, par conséquent les tensions triphasées rotoriques du modèle que l'on rappelle ci-après, ne sont pas nulles.

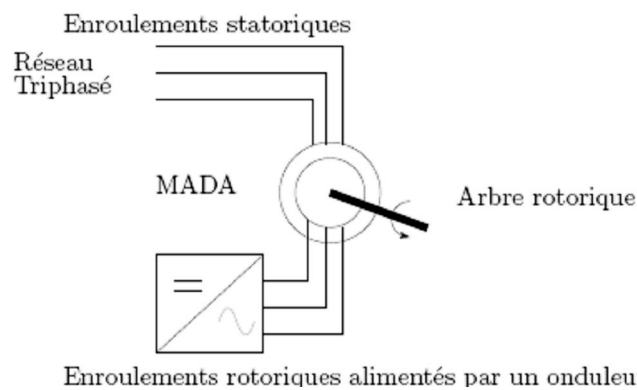


Figure 2-2 : Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné.

Rappel du modèle triphasé de la MADA

a- Equations électriques :

Les équations électriques en notation matricielle [16], [22], [27] sont :

Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

b- Equations des flux :

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

Les équations sous forme matricielle seront représentées comme suit [25], [30] :

$$\begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} = [L_s] \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

De façon similaire on aura au rotor :

$$\begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} = [L_r] \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + [M_{rs}] \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

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

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

c- L'équation mécanique :

L'expression générale du couple est :

$$\Gamma_e = \frac{1}{2} [i]^t \left[\frac{\delta}{\delta \theta} [L] \right] [i] \quad (2-5)$$

Avec : $[i] = [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc} \ i_{ra} \ i_{rb} \ i_{rc}]^t$

Et $[L] = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}] & [L_r] \end{bmatrix}$

L'équation mécanique découle : $J \frac{d\Omega}{dt} = \Gamma_e - \Gamma_c$ (2-6)

Et

$$\Omega = \frac{\omega_r}{p}$$

Nous constatons la complexités 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 dépendances 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.

2.4 Changement de repère

Le but d'un changement de repère est de rendre l'écriture des équations électriques et mécanique plus simple à exploiter. Dans notre étude nous avons utilisé la transformation de Park

2.5 La transformation de Park

La modélisation de la machine asynchrone s'effectue en partant du système à trois axes dit réel, difficilement identifiable expérimentalement vers celui de Park (à deux axes). (Voir figure 2.3)

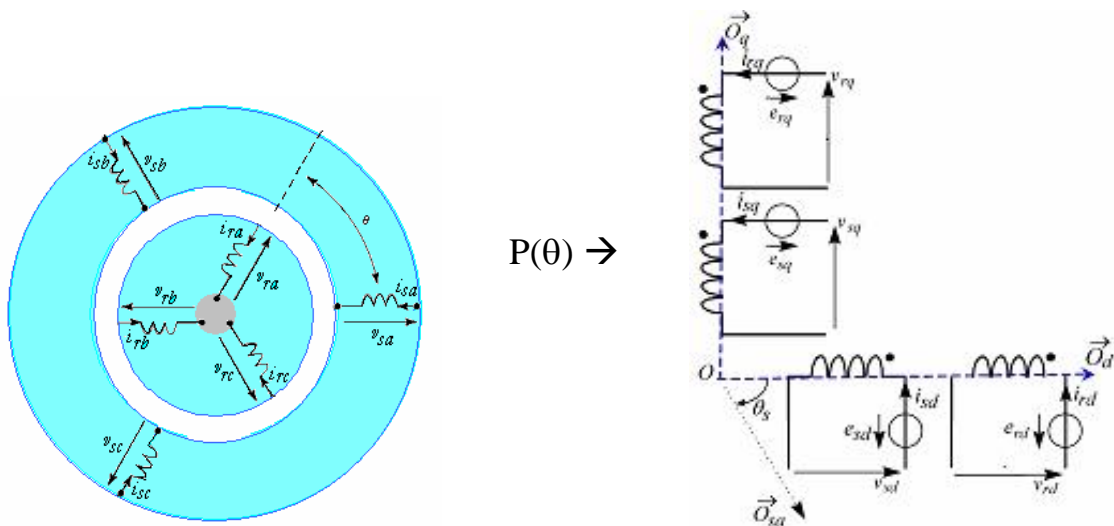


Figure 2.3 : Représentation de la machine asynchrone triphasée dans le repère de Park.

Les tensions rotorique $V_{ran}, V_{rbn}, V_{rcn}$ et les tensions statoriques $V_{san}, V_{sbn}, V_{scn}$ sont transformées en composantes directes et en quadratures $V_{rd}, V_{rq}, V_{sd}, V_{sq}$.

Les tensions de rotor et stator sont :

$$\begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = [P(\theta_r)]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{ran} \\ V_{rbn} \\ V_{rcn} \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = [P(\theta_s)]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{san} \\ V_{sbn} \\ V_{scn} \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

$P(\theta)$ est la matrice de Park modifiée définie par :

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

Les équations dynamiques de la machine sont exprimées par :

$$\begin{aligned} V_{sd} &= R_s i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} &= R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \phi_{sd} \end{aligned} \quad (2-9)$$

$$\begin{aligned} V_{rd} &= R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \phi_{rq} \\ V_{rq} &= R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \omega_r \phi_{rd} \end{aligned} \quad (2-10)$$

R_s et R_r sont respectivement les résistances des bobinages statoriques et rotoriques,

L_s , L_r et M_{sr} sont respectivement les inductances propres statoriques, rotoriques et la mutuelle inductance entre les deux bobinages.

$\phi_{sd}, \phi_{sq}, \phi_{rd}, \phi_{rq}$ sont les composantes directes et en quadratures des flux statoriques et rotoriques :

$$\begin{bmatrix} \phi_{sq} \\ \phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & MSr \\ MSr & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

$$\begin{bmatrix} \phi_{sd} \\ \phi_{rd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & MSr \\ MSr & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{rd} \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

Le couple électromagnétique développé par la machine est :

$$C_{em} = p \frac{M_{sr}}{L_s} (\phi_{sd} i_{rq} - \phi_{sq} i_{rd}) \quad (2-13)$$

2.6 Modélisation de l'onduleur

Il existe plusieurs structures de conversion utilisées dans la machine à double alimentation comme la structure de Kramer qui a utilisé un pont à diodes et un pont à thyristors [14], 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 utilisée dans les travaux de Salma El Aimani [2], qui consiste en l'utilisation de deux ponts triphasés de IGBT commandables par la modulation de largeur d'impulsions.

Pour simplifier l'étude supposons que [81] :

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

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

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

Un onduleur de tension est donné par la figure (2-4).

On a, donc :

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

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

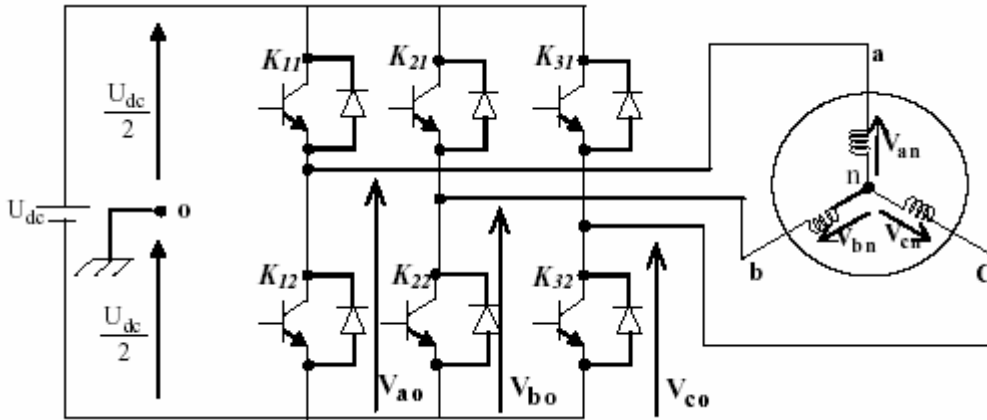


Figure 2.4 : Schéma d'un onduleur de tension

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

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (2-14)$$

V_{ao}, V_{bo} et V_{co} 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 suites :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (2-15)$$

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

V_{no} 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 :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (2-16)$$

La substitution de (2-16) dans (2-15) aboutit à :

$$V_{no} = \frac{1}{3} \cdot (V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (2-17)$$

En remplaçant (2-17) dans (2-15), on obtient :

$$\begin{aligned}
 V_{an} &= \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\
 V_{bn} &= -\frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\
 V_{cn} &= -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co}
 \end{aligned}
 \tag{2-18}$$

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

$$[V_{AC}] = [T] \cdot [V_{dc}] \tag{2-19}$$

Tel que :

$$\begin{aligned}
 [V_{AC}] &= [V_{an} \quad V_{bn} \quad V_{cn}]^T \\
 [V_{dc}] &= [V_{ao} \quad V_{bo} \quad V_{co}]^T \\
 [V_{dc}] &= U_{dc} [S_1 \quad S_2 \quad S_3]^T
 \end{aligned}
 \tag{2-20}$$

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

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

La matrice de transfert est la suivante :

$$[T] = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix}
 \tag{2-21}$$

Dans notre travail, la commande des interrupteurs de l'onduleur est réalisée par l'utilisation de la commande MLI (modulation par largeur d'impulsion) (figure (2-5)).

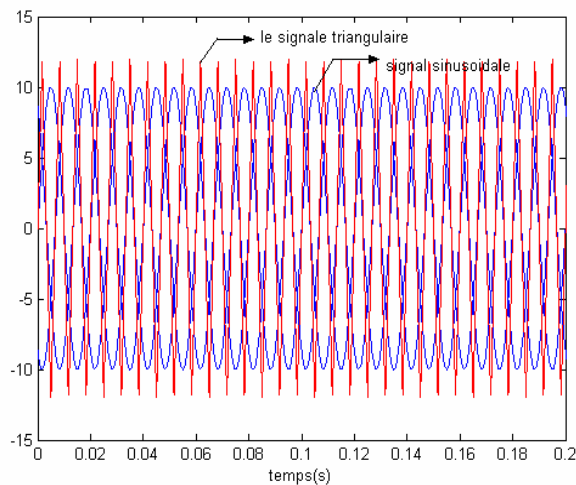


Figure 2.5 : Représentation les signaux de l'entrée du commande MLI

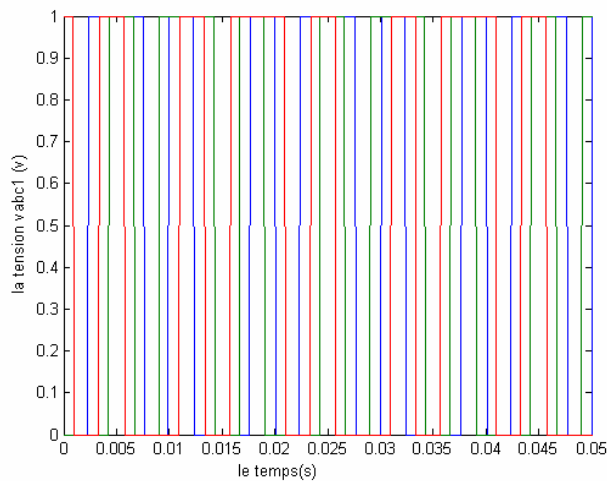


Figure2.6 : Représentation les signaux de sortie du commande MLI

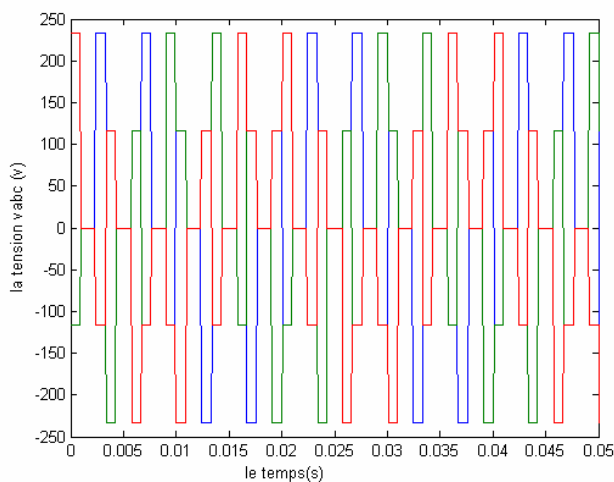
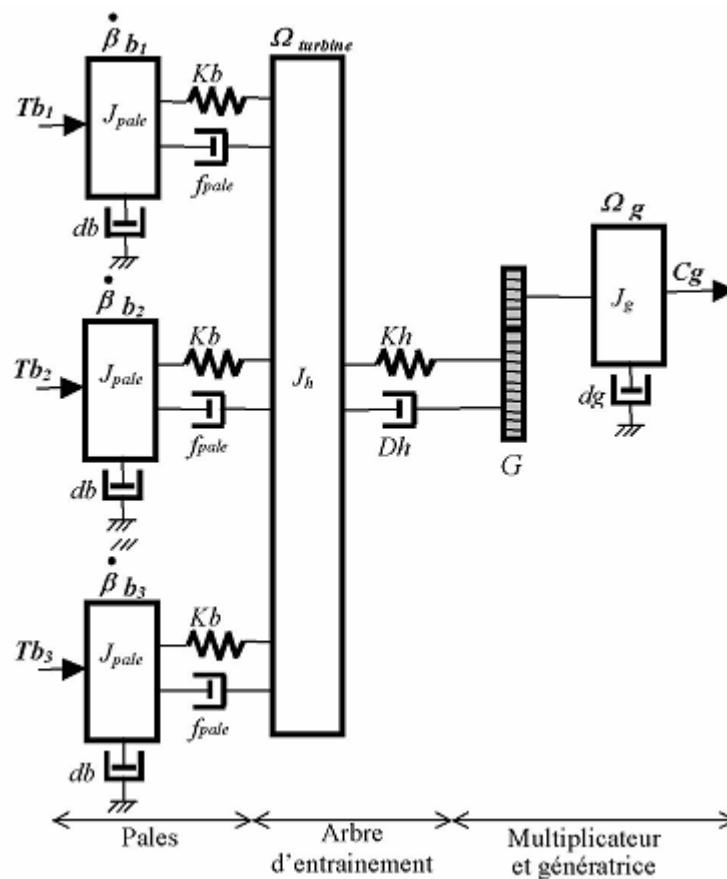


Figure2.7 : Représentation la tension de l'onduleur

2.7 Modélisation de la turbine éolienne

2.7.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée, comprend trois pales orientables et de longueur R , fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse $\Omega_{turbine}$ qui est relié à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique (figure (2-8)).



Figuer2.8 : Système mécanique de l'éolienne

Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc :

- la même inertie J_{pale}
- la même élasticité K_b
- le même coefficient de frottement par rapport à l'air db

Ces pales sont orientables et possèdent un même coefficient de frottement par rapport au support f_{pale} . Les vitesses d'orientations de chaque pale sont notées $\dot{\beta}b_1, \dot{\beta}b_2, \dot{\beta}b_3$. Chaque pale reçoit une force Tb_1, Tb_2, Tb_3 qui dépend de la vitesse du vent, qui lui est appliquée [80].

L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :

- son inertie J_h
- son élasticité K_h
- son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur D_h

Le rotor de la génératrice possède :

- une inertie
- un coefficient de frottement dg

Ce rotor transmet un couple (Cg) entraînant la génératrice électrique qui tourne à une vitesse Ω_{mec} .

Si on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales, on aura une égalité des forces de poussées ($Tb_1 = Tb_2 = Tb_3$).

On peut simplifier l'ensemble des trois pales comme un seul système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. La conception aérodynamique des pales et leurs coefficients de frottement par rapport à l'air (db) est très faible, donc on peut l'ignorer.

De même, la vitesse de la turbine est très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice.

On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses (figure (2-9)) dont la validité (par rapport au modèle complet) a déjà été vérifiée [75].

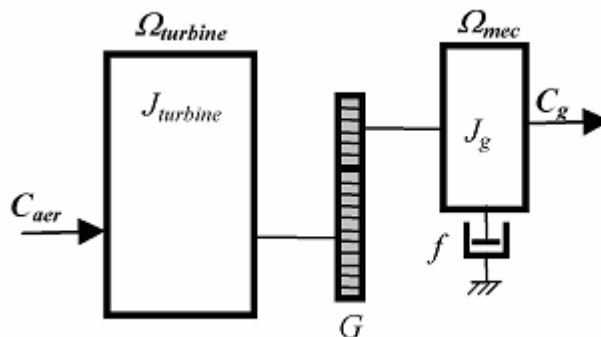


Figure 2.9 : Modèle mécanique simplifiée de la turbine

2.7.2 Modélisation de la turbine

Le dispositif étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G (figure (2-10)).

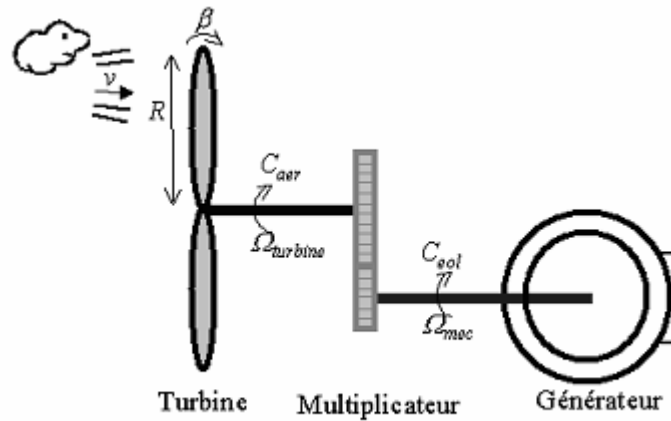


Figure 2. 10 : Schéma de la turbine éolienne

La puissance du vent ou la puissance éolienne est définie de la manière suivante [74] :

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2}$$

avec :

- ρ : densité de l'air (approxim. $1,22 \text{ kg} / \text{m}^3$ à la pression atmosphérique à 15°C)
- S : surface circulaire balayée par la turbine (le rayon du cercle est déterminé par la longueur de pale).
- v : vitesse du vent.

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

$$P_{aer} = C_p P_v = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (2-22)$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne.

Il dépend de la caractéristique de la turbine [74], [79].

La figure (2-11) représente la variation de ce coefficient en fonction du rapport de vitesse λ et de l'angle de l'orientation des pales β .

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

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{v} \quad (2-23)$$

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

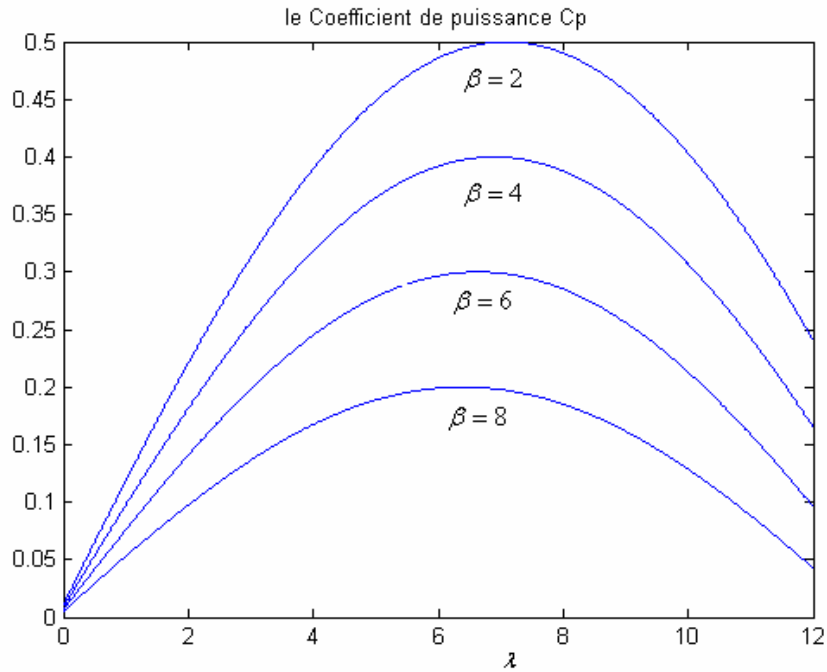


Figure 2.11: Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine

A partir de relevés réalisés sur une éolienne de 1.5 MW [2], l'expression du coefficient de puissance a été approchée pour ce type turbine, par l'équation suivante [78] :

$$C_p = (0.5 - 0.167)(\beta - 2) \cdot \sin \left[\frac{\pi \cdot (\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)} \right] - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (2-24)$$

β : L'angle de l'orientation des pales.

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

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (2-25)$$

2.7.3 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice (figure (2-10)). Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (2-26)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (2-27)$$

2.7.4 Equation dynamique de l'arbre

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

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (2-28)$$

Il est noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. A titre illustratif, pour une éolienne « Vestas » de 2 MW, une pale a une longueur de 39 m et pèse 6.5 tonnes [77].

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

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (2-29)$$

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

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (2-30)$$

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

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (2-31)$$

Le schéma synoptique du modèle dynamique de la turbine basé sur ces équations, est donné par la figure suivante :

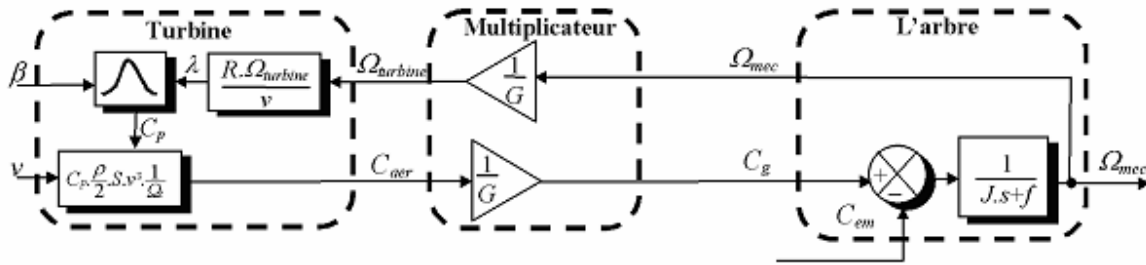


Figure 2.12: Schéma bloc du modèle de la turbine

L'entraînement d'une machine électrique par un système éolien constitue une chaîne de conversion complexe dans laquelle le couple mécanique présent sur l'arbre de transmission, dépend uniquement de la vitesse du vent et de l'éventuelle présence d'un dispositif d'orientation des pales. Le vent étant par nature imprévisible et présentant des variations importantes, le couple résultant présente des ondulations dont il est nécessaire de tenir compte dans l'étude de la génération d'électricité par éolienne.

Partant de ce constat, la machine à courant continu est destinée à reproduire le comportement d'une éolienne à vitesse variable [1].

Par cette corrélation on remplace dans notre étude le modèle de la turbine par le modèle de la MCC.

2.8 Schéma de simulation

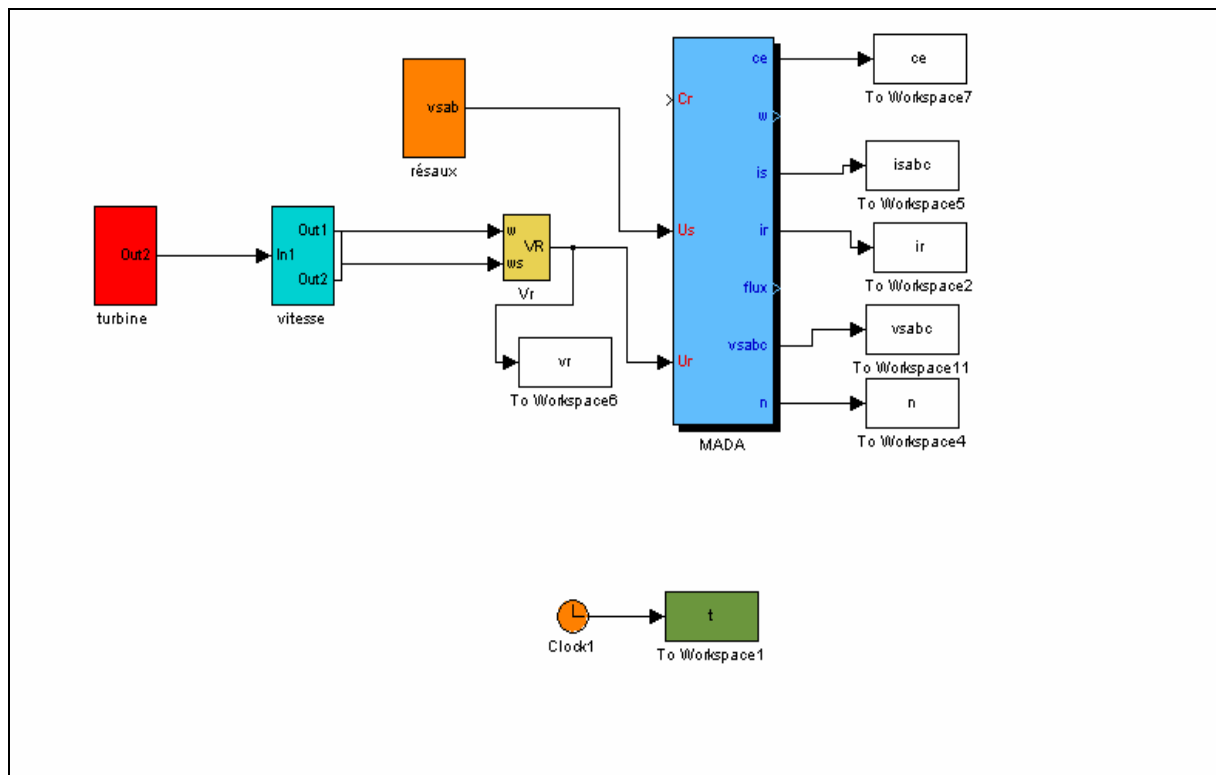


Figure2.13 : schéma de simulation, en SIMULINK sous MATLAB, du modèle de la MADA dans le repaire lie au stator

2.9 Résultats de la simulation

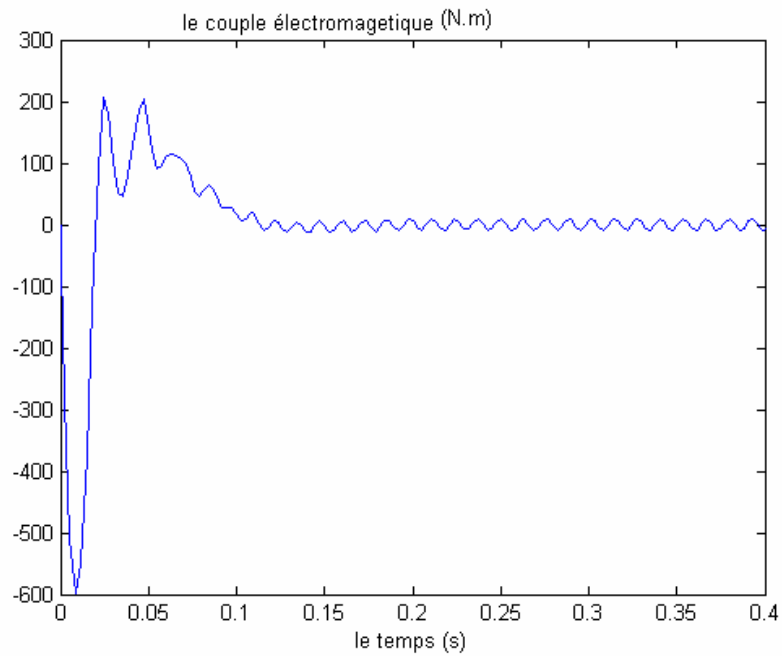


Figure 2.14 : Evolution du couple électromagnétique en fonction du temps ($c_e=6.4N/m$)

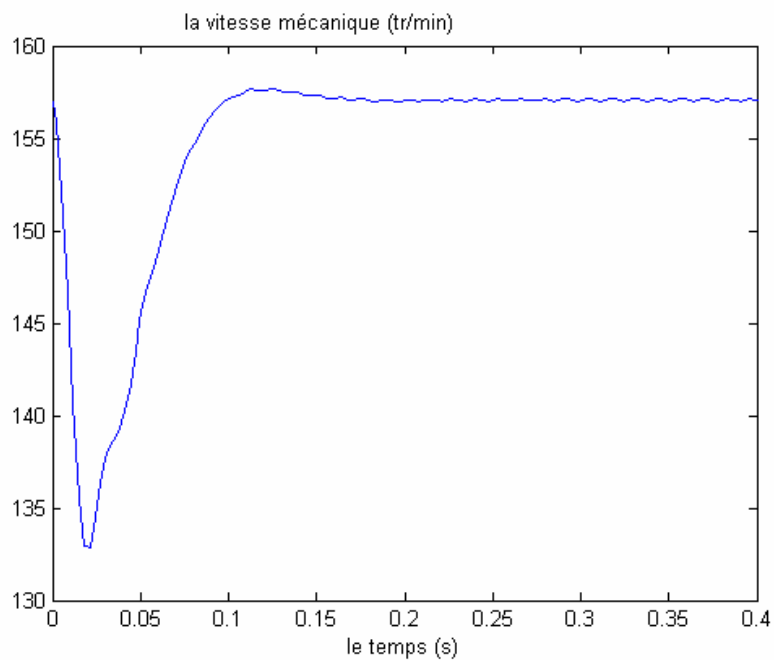


Figure 2.15 : Evolution de la vitesse en fonction du temps

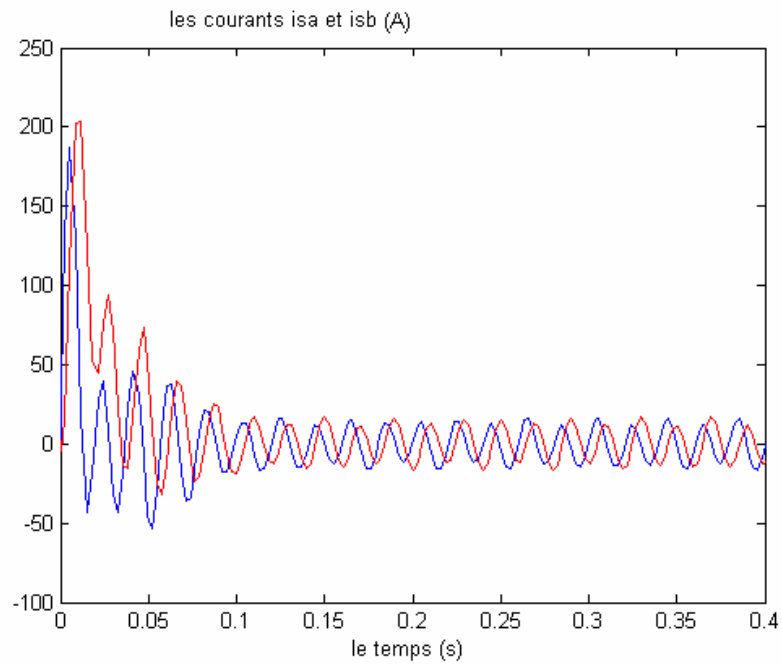


Figure 2.16 : Courants statoriques à la sortie de la génératrice dans le référence lié au stator

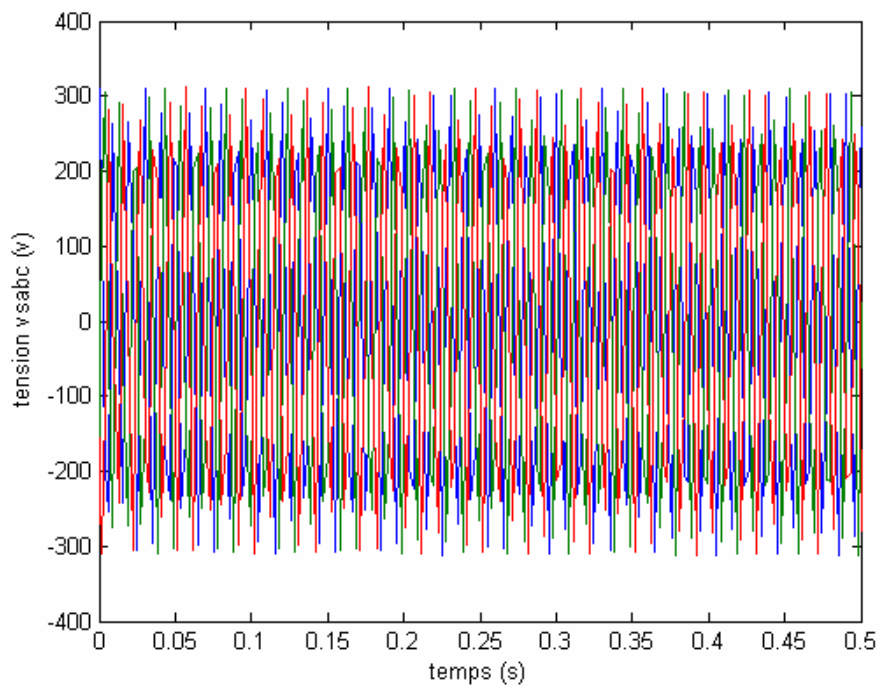


Figure 2.17 : Tensions statoriques à la sortie de la génératrice dans le référence liée au stator

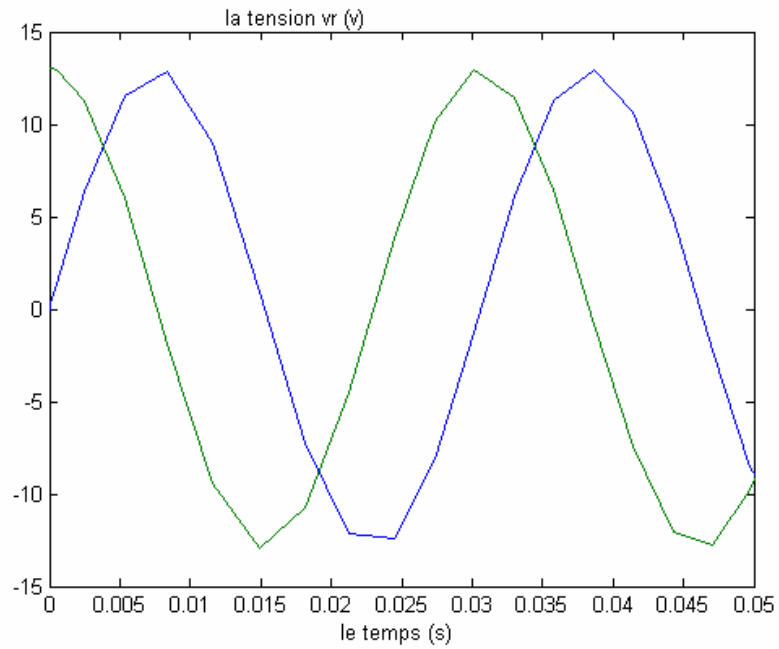


Figure 2.18 : tensions rotoriques de la génératrice dans le référentiel lié au stator

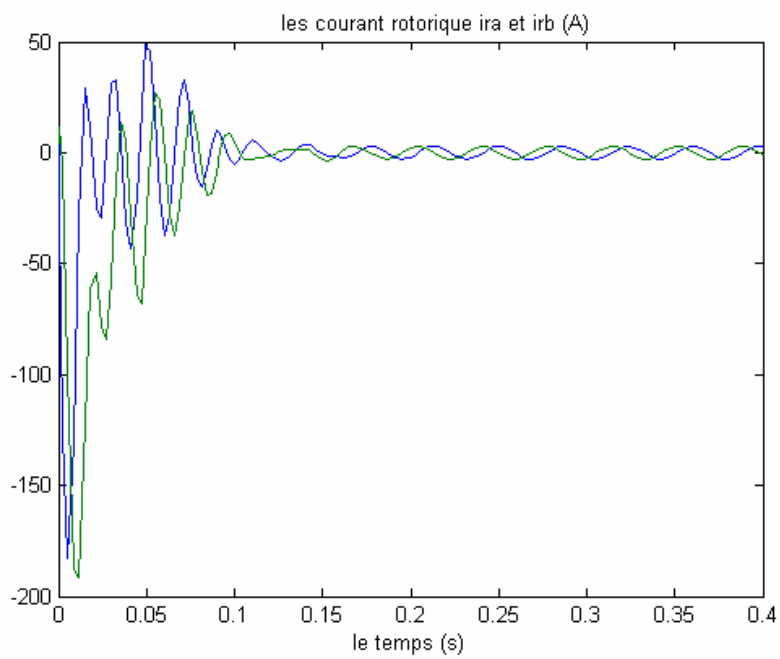


Figure 2.18 : courants rotoriques de la génératrice dans le référentiel lié au stator

2.10 Interprétation

Pour le fonctionnement en charge de la génératrice, les résultats de la simulation enregistrés montrent la délicatesse de la modélisation de la MADA, en outre, les différentes figures (2-14), (2-15) certifient la présence de plusieurs modulations (oscillations) en régime permanent due à la mauvaise estimation de la position de l'angle de charge.

Les figure (2-18) ,(2-17) concernent respectivement les tensions statoriques apparaissant aux bornes du stator de la MADA qui certifient la présence de plusieurs modulations (oscillation avec différentes fréquences)

Les tensions rotoriques apparaissant aux bornes du rotor de la MADA sont alternatives de pulsation ω_r .

2.11 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons d'abord modélisé la MADA, puis présenter et modéliser l'onduleur ainsi que la turbine éolienne, avec ses différents éléments utilisant un multiplicateur.

Ce modèle a été élaboré sous MATLAB, afin de voir son efficacité.

Après la validation de ce modèle, il est possible maintenant d'élaborer et réaliser la commande de système. C'est le but du prochain chapitre.

*MàJ du *

Free software for Windows 32bits platforms

1 PRESENTATION

Le programme **MARC.exe** permet de traduire un fichier de notices au format **UNIMARC** ou **USMARC** ou **MARC21** en fichier texte suivant les usages pour la présentation des données.

MARC.exe est un programme GRATUIT pour windows 32bits, éventuellement prévu pour fonctionner en mode « *shell* » c'est à dire dans une fenêtre MS-DOS.

Vous pouvez télécharger la dernière version [ICI](#)

2 LANCEMENT DU PROGRAMME MARC.exe

Supposons un fichier de notices MARC21: *demo.marc21*

2.1 LANCEMENT EN MODE COMMANDE

Dans une fenêtre *shell* lancer la commande:

MARC demo.marc21

La commande s'exécute et le logiciel crée un fichier dont le nom est identique à celui de la ligne de commande, avec l'extension supplémentaire *.txt*

Pour l'exemple précédent, le fichier se nomme: *demo.marc21.txt* (que vous pouvez ouvrir depuis l'explorateur de windows en double-cliquant sur le nom). Il contient les notices au format générique; voir l'extrait ci-après.

```
008 020103s2001 sz a 000 0dfre d
020 $a2882953313 (br.) : $cCHF 40.-
035 $a1304-69660
039 $b0033
040 $aSLB $cSLB
100 1 $aClade, Jean-Louis
245 10 $aSi la comté m'était contée : $b[histoire de la Franche-Comté] / $cJean-Louis Clade
260 $aYens sur Morges [etc.] : $bEditions Cabédita, $c2001
300 $a189 p. : $bill. ; $c24 cm
490 1 $aCollection Archives vivantes
504 $aBibliogr.
830 0 $aArchives vivantes
990 $a0003-62060
999 $asb $b2002/02 $c940
949 $a1901252397 $b000110 $cN 253967
```

2.2 LANCEMENT DEPUIS L'EXPLORATEUR DE WINDOWS

Depuis l'explorateur de windows vous avez maintenant 2 possibilités d'utilisation du logiciel

MARC.exe.

- Vous pouvez lancer **MARC.exe** automatiquement lors de la consultation d'un fichier *MARC* en associant le programme aux différentes extensions des fichiers qui vous intéressent (voir §2.2.1 ci-après). Cette méthode vous permet de créer un fichier texte contenant tous les notices du fichier *MARC* et ainsi de consulter les notices avec un simple éditeur de texte.
- A partir de la version 2 du logiciel, vous pouvez aussi utiliser le programme en mode interactif.
Comme avec le mode décrit précédemment, vous pouvez créer un fichier texte contenant les notices. Ce mode vous permet aussi de consulter une à une les notices d'un fichier *MARC* et d'extraire des notices vers un autre fichier *MARC* (voir §2.2.2 ci-après).

2.2.1 LANCEMENT PAR UN FICHIER MARC DEPUIS L'EXPLORATEUR DE WINDOWS

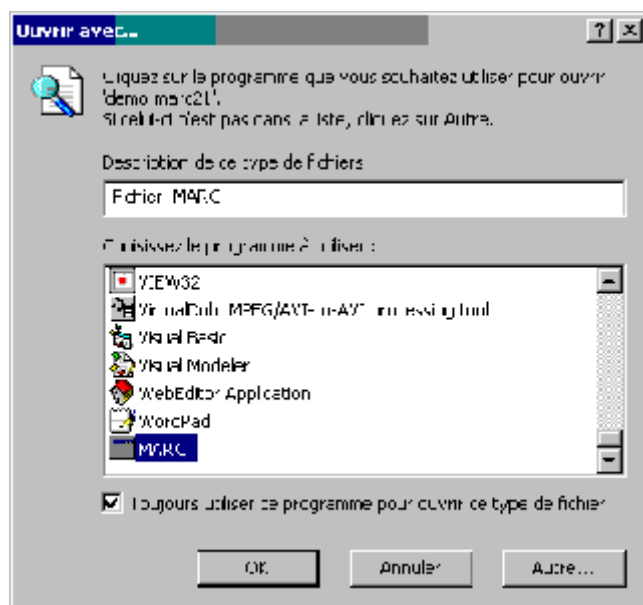
Avant de pouvoir lancer automatiquement le programme **MARC.exe** depuis l'explorateur de windows lors de la sélection d'un fichier *MARC*, il est nécessaire d'inscrire le programme dans les registres pour les extensions des fichiers *MARC* que vous utilisez.

L'inscription dans les registres doit être effectuée par des personnes qualifiées.

Placer le programme **MARC.EXE** dans le répertoire de votre choix. Vous devez prévoir que le programme devra rester dans un endroit « *fiable* » du système. Il faut le placer dans un répertoire du genre *C:\WINDOWS* ou *C:\Program Files*.

Depuis l'explorateur de windows double-cliquer sur un fichier UNIMARC ou MARC21 de votre choix.

L'explorateur de windows vous demande: Ouvrir avec...



Vous devez alors donner la description du type de fichier:

« *Fichier MARC* » convient très bien.

Puis vous devez sélectionner le programme qui permettra cette action, en l'occurrence **MARC.exe**.

Si c'est la première association avec le programme en question, vous devez utiliser le bouton [**Autre...**] pour spécifier le programme en le cherchant avec l'explorateur.

N'oubliez pas de cocher « *Toujours utiliser ce programme pour ouvrir ce type de fichier* ».

Vous devez alors valider votre sélection avec le bouton [**OK**].

L'explorateur de windows est maintenant prêt à exécuter vos commandes.

Lorsque vous double-cliquez depuis l'explorateur de windows sur un fichier dont le nom est terminé par l'extension sélectionnée, le programme **MARC.exe** est lancé. Il crée, dans le répertoire courant, un fichier dont le nom est le même que celui qui a été sélectionné suivi de l'extension **.TXT**

Par exemple: Depuis l'explorateur de windows, si vous double-cliquez sur le fichier **demo.marc21** et que l'extension **.marc21** ait été préparée, le programme **MARC.exe** va créer le fichier **demo.marc21.txt**. Ce fichier est un fichier texte, vous pouvez le consulter avec tous les traitements de texte (Wordpad par exemple).

L'opération d'assignation des extensions doit être répétée pour toutes les extensions possibles des fichiers **MARC** que vous utilisez.

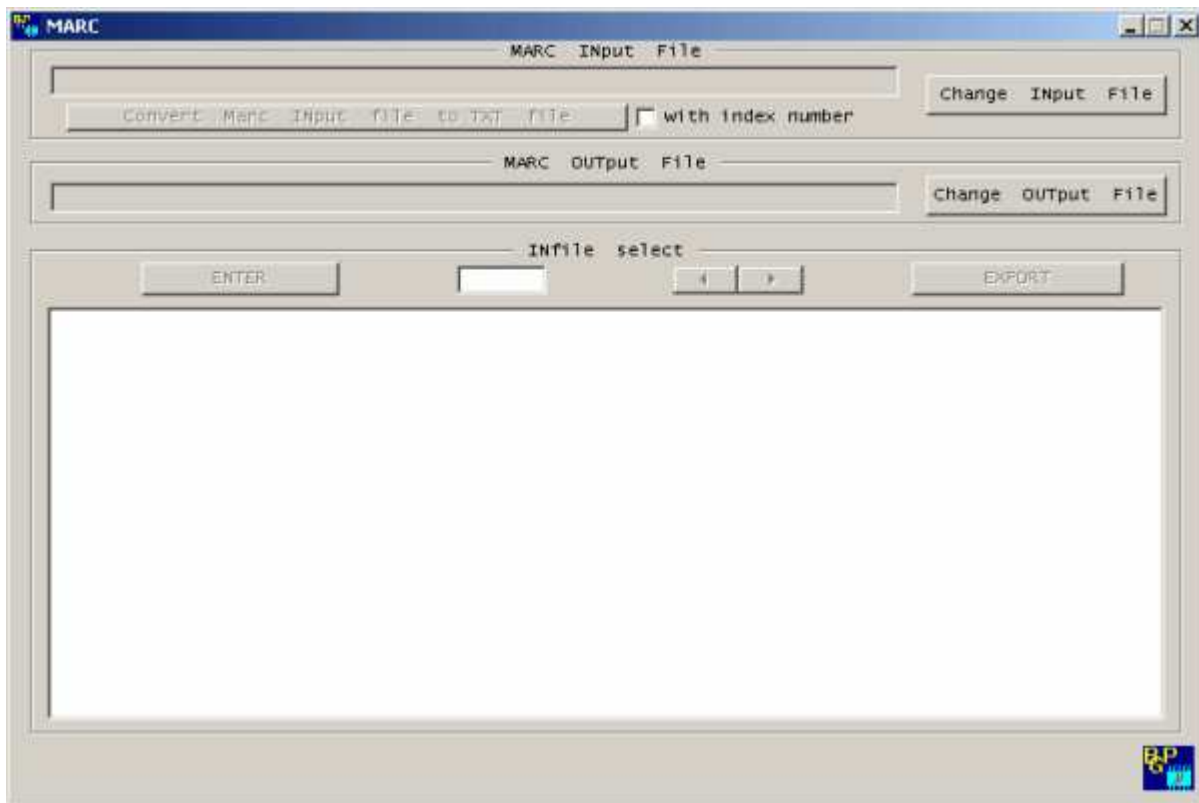
L'extension **MARC21** des fichiers du programme **BIBLIOTHEQUE** est **.marc21**

L'extension **UNIMARC** des fichiers du programme **BIBLIOTHEQUE** est **.unimarc**

**En assignant les extensions des fichiers supportés par MARC.exe dans l'explorateur de windows,
vous pouvez traduire les fichiers et les consulter par simple clic de souris.**

2.2.2 LANCEMENT DE MARC.EXE DEPUIS L'EXPLORATEUR DE WINDOWS

Depuis l'explorateur de windows ou depuis un raccourci, lancer le programme **MARC.exe** sans aucune option.



Fenêtre principale (et unique) du programme **MARC.exe**

Dans la fenêtre affichée, vous devez sélectionner un des boutons "**Change ... File**", puis depuis l'explorateur de windows, vous sélectionnez un fichier *MARC* et vous le glissez sur la fenêtre du programme **MARC.exe**.

Une fois le fichier en entrée identifié ("**Input File**"), vous pouvez convertir ce fichier en fichier texte avec ou sans index (numérotation), le numéro d'index vous permet de reconnaître les notices recherchées pour l'exportation.

Si vous souhaitez exporter des notices en format *MARC*, il est nécessaire de sélectionner un fichier en sortie ("**Output File**").

Vous devez sélectionner une notice du fichier en entrée: en cliquant sur une des flèches de direction, ou en sélectionnant une valeur numérique dans la zone prévue à cet effet. Après validation avec la touche [Entrée] du clavier (si vous avez saisi une valeur numérique), la notice est affichée dans la fenêtre.

Un clic sur le bouton [EXPORT] et la notice est ajoutée en format *MARC* en fin du fichier en sortie.

Vous pouvez "à volonté" changer le fichier en entrée et/ou le fichier en sortie.

[Télécharger le programme MARC.exe](#)

Docs sur UNIMARC & MARC21 "récupérées" sur internet (format PDF).

[Unimarc Abrégé](#) [Unimarc en anglais](#) [Unimarc décriptage](#) [Unimarc 995](#) [MARC21 concise formats](#)

*Tout en étant parfaitement opérationnels, les programmes évoluent toujours.
N'hésitez pas à me contacter en cas de bug important.*



[Retour](#)



Chapitre 3

Les différentes méthodes de commande de la MADA

3-1-Introduction

L'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation a fait l'objet de nombreuses investigations, tant en fonctionnement moteur qu'en fonctionnement générateur.

Le but de ces dispositifs est dans la plupart des cas d'amener le glissement à la valeur désirée avec le meilleur rendement possible en alimentant les enroulements rotoriques par un dispositif redresseur onduleur [29].

Dans ce chapitre nous allons présenter l'état de l'art du domaine en regroupant l'ensemble des articles ou contenus d'ouvrages, que nous avons choisi pour commencer notre étude. A chaque fois, nous tâcherons de présenter dans quelle configuration de commande l'auteur s'est placé, quelle a été sa thématique de recherche et si il y a eu validation expérimentale ou non.

Dans le bilan que nous présenterons ensuite, nous donnerons quelques méthodes de commande utilisées dans la machine asynchrone à double alimentation.

3.2 Etude bibliographique

Cette catégorie d'études est la plus riche au regard de notre mémoire. Effectivement, comme nous devons développer une stratégie de commande, nous avons été particulièrement attentif à leurs contenus.

D. Arsudis [45] étudie une MADA dont le stator est relié au réseau triphasés et le rotor à un onduleur de tension à GTO, lui même alimenté par un redresseur de tension. Cet article propose l'étude de la MADA en tant que générateur à vitesse variable. L'auteur propose de contrôler les puissances actives et réactives statoriques à la fois en régimes permanent et transitoire. La méthode de contrôle adoptée est celle du champ orienté.

L'auteur introduit un courant magnétisant statorique, l'orientation du champ est ensuite choisie de façon à caler la rotation du repère sur ce courant magnétisant défini.

Les courbes expérimentales présentent les puissances actives et réactives. Ces résultats attestent des performances du contrôle proposé. Ces courbes ont été obtenues sur un moteur de 22 kW.

J. Bendl [46] étudie le contrôle d'une MADA dont le stator est relié au réseau et le rotor à un onduleur indépendant. Il vise des applications destinées à la génération d'électricité à travers l'hydraulique ou l'éolien.

L'auteur propose dans cette étude une nouvelle stratégie permettant un contrôle indépendant des séquences positives et négatives des courants statoriques. Cela a pour conséquence une immunité accrue du facteur de puissance face aux perturbations du réseau et un contrôle plus flexible pour chacun des trois courants statoriques. Seuls des résultats de simulation des courants, tensions et puissances statoriques et rotoriques sont donnés. Ils attestent des bonnes performances du contrôle adopté.

R. Datta [47], fait une comparaison des performances d'une MADA utilisée en génératrice. Cette étude concerne une MADA dont les enroulements statoriques sont reliés à un réseau triphasé tandis que les enroulements rotoriques sont connectés à un onduleur de tension. Cette étude se place dans le contexte de la génération électrique dans les systèmes éoliens.

L'auteur compare cette solution aux deux autres envisageables :

1. solution à vitesse variable avec une machine asynchrone à rotor bobiné ,

2. solution à vitesse fixe avec une machine à cage.

La comparaison est effectuée sur les critères suivants : complexité du système à mettre en oeuvre, zones de fonctionnement, et quantité d'énergie disponible à la sortie.

La conclusion de cet article est que le système le plus simple à mettre en oeuvre est le système à vitesse variable utilisant une MADA.

L'auteur constate qu'en matière de récupération d'énergie, la MADA est meilleure que les deux autres solutions grâce au maintien de son couple maximal sur une plus grande plage de vitesse. Un autre avantage mis en relief est la réduction de la puissance donc du prix des convertisseurs à mettre en oeuvre.

D. Forchetti [48], considère une MADA dont le rotor est connecté à un onduleur. Le stator est par conséquent relié au réseau triphasé. L'étude se focalise sur un fonctionnement en mode générateur de la MADA. Il propose un contrôle vectoriel basé sur l'orientation du flux statorique. Les deux variables de contrôle sont les deux courants rotoriques (direct et en quadrature), et les variables de sortie sont la fréquence et l'amplitude de la tension statorique. Des résultats expérimentaux sont ensuite présentés. Les courbes des tensions et courants statoriques sont présentées et commentées. Les tests expérimentaux ont été réalisés sur une machine de 5,5 kW.

R. Ghosn [49], [50] considère le cas d'une MADA fonctionnant en mode moteur dont le stator et le rotor sont reliés à deux onduleurs différents. Ils sont eux mêmes reliés à un redresseur commun. Dans son mémoire de thèse, il se fixe deux objectifs :

- assurer une répartition des puissances entre le stator et le rotor,
- mettre en oeuvre une stratégie de contrôle à orientation de flux statorique.

Afin de parvenir à son deuxième objectif, il introduit un courant magnétisant, fruit de l'addition d'un courant rotorique et d'un courant statorique.

Compte tenu du fait que cette fois ci les deux cotés de la machine sont alimentés par deux alimentations indépendantes, les équations de transfert résultantes pour les courants sont du type "deuxième ordre". Les termes de couplage, indispensables à compenser, sont simples et définis à partir du fonctionnement en régime permanent.

Afin de pouvoir valider l'ensemble de sa stratégie, il applique le principe de répartition des puissances aux modèles de contrôle proposés par Morel,[51], et par Lecocq, [52], et compare ainsi les résultats de simulation obtenus.

La deuxième partie de son mémoire propose une nouvelle stratégie d'observation de la vitesse basée sur la méthode MRAS (Model Référence Adaptive System). Il présente enfin en dernière partie une étude expérimentale de son travail réalisé sur une maquette de 1,5 kW de la société ALSTHOM de Belfort.

W. Hofmann [53] fait une étude des variables de la MADA dont les enroulements statoriques sont connectés au réseau tandis que les enroulements rotoriques sont reliés à un onduleur. Il propose une application éolienne (fonctionnement générateur de la MADA) et par conséquent une courbe de couple mécanique disponible en fonction de la vitesse. Il part de l'hypothèse que sa machine est pilotée par un contrôle vectoriel basé sur l'orientation du flux statorique. Il analyse par les simulations des variations des courants, des pertes et des flux. Il démontre que son contrôle, qui doit minimiser les pertes, est performant.

B. Hopfensperger [54], propose l'étude d'une MADA dont les enroulements statoriques sont reliés à un réseau triphasé, le rotor est alimenté par un onduleur. Il se place dans un fonctionnement en mode moteur et vise des applications nécessitant une variation de vitesse de rotation. Il adopte une stratégie de contrôle de type champ orienté. L'orientation du repère est choisie suivant le flux statorique.

Il se propose ensuite de montrer quelques résultats expérimentaux avec et sans capteur de position. Il est particulièrement intéressant de constater que l'auteur propose deux façons de déterminer l'angle de rotation du repère tournant :

- la première est basée sur la mesure et l'expression des courants statoriques dans un repère tournant,
- la deuxième nécessite la mesure des puissances active et réactive statoriques.

Il propose l'étude de deux machines asynchrones à rotor bobiné dont les axes rotoriques sont couplés à la fois mécaniquement et électriquement entre eux (principe de la cascade hypo ou hyper synchrone) [55]. Dans cet article, l'auteur explore une façon de contrôler ce système en essayant de satisfaire les principes généraux du contrôle vectoriel : référence de couple, de vitesse, de puissance active et de puissance réactive.

Des résultats expérimentaux peuvent être consultés. Il s'agit des courbes expérimentales des variations de vitesse, des courants statoriques et des puissances active et réactive statoriques. Dans un autre article [56], l'auteur reprend l'étude précédente mais en appliquant cette fois ci la théorie du champ orienté au flux commun rotorique alors que dans l'étude précédente il avait choisi un flux statorique. A nouveau, des résultats expérimentaux sont présentés. Il s'agit

des courbes expérimentales des variations de vitesse, des courants statoriques et des puissances active et réactive statoriques.

L'étude de **Y. Kawabata** [57] est très proche de la configuration que nous souhaitons étudier ; le stator et le rotor de sa MADA sont connectés à deux onduleurs indépendants. Les deux onduleurs de tension sont alimentés par deux redresseurs indépendants. Le modèle global dans l'espace d'état de la machine dans un référentiel quelconque est donné. Les courants sont les variables d'état et les tensions d'alimentation composent le vecteur de commande.

Ce qui est ensuite remarquable, c'est que l'auteur va simplifier son modèle d'état de façon à faire apparaître des termes couplés et d'autres découplés. Pour cela il arrive à exprimer son premier modèle d'état en plusieurs vecteurs facteurs de deux matrices particulières : la matrice unité et une matrice appelée J , matrice unité anti-diagonale.

Il en déduit que tous les éléments multipliés par la première matrice ne font pas apparaître de couplage entre les axes de son repère tournant, alors que ceux multipliés par la deuxième (J) présentent des couplages entre axes. Par un jeu de simplification basé sur l'analyse précédente, il établit un modèle d'état où un courant magnétisant et un courant contrôlant le couple apparaissent pour chaque côté de la machine et peuvent être contrôlés indépendamment.

Des courbes expérimentales de l'asservissement réalisé à partir de cette modélisation viennent appuyer ces démonstrations. L'auteur présente les courbes de réponse de la consigne de vitesse appliquée et des courants. La validation expérimentale a été menée sur une machine de 0,75 kW.

Z. Krzeminski [58] présente une méthode de contrôle d'une MADA sans capteurs. Nous sommes encore dans le cas où les enroulements statoriques de la machine sont reliés à un réseau triphasé tandis que le rotor est relié à un onduleur. L'auteur s'affranchit de la mesure par capteurs des courants rotoriques car il utilise la méthode PLL (Phase Locked Loop) qui lui permet de synchroniser la phase des courants rotoriques sur celle des tensions statoriques. Deux types différents de contrôles sont ensuite appliqués, il s'agit d'abord d'un contrôle des courants rotoriques par hystérésis et ensuite de l'utilisation d'un régulateur de courant de type prédictif.

Il compare ensuite les résultats de ces deux méthodes de contrôle par simulation et expérimentation. Les résultats expérimentaux présentés sont les courbes de réponses des puissances actives statoriques et rotoriques. Les résultats sont bien entendu très satisfaisants

pour les deux types de contrôle avec tout de même des résultats sensiblement meilleurs pour le contrôle prédictif des courants.

D. Lecocq [59] [60] présente des résultats de simulations d'une MADA dont le stator et le rotor sont connectés à des onduleurs indépendants. Il propose d'adopter la théorie du champ orienté appliqué au flux statorique. Il choisit donc d'imposer la vitesse, le flux, le facteur de puissance et le glissement. Il prétend pouvoir les contrôler à la fois, en régimes permanent et transitoire.

Dans [61] l'auteur explique comment procéder à un contrôle indirect du flux du même système. Il part du principe que la MADA offre quatre degrés de liberté : le flux, le couple, la fréquence rotorique, et le facteur de puissance. Il choisit alors le flux d'entrefer et introduit un courant magnétisant. Celui ci est proportionnel au flux d'entrefer. Ensuite, il formule les trois autres relations liant les courants avec une des grandeurs à contrôler. Il définit les quatre régulateurs de courant à mettre en oeuvre. Des résultats expérimentaux sont présentés, il s'agit des réponses du flux statorique, de la vitesse, et des tensions et courants statoriques.

M. Machmoum [62] propose une étude des performances d'une MADA en régime permanent. Son étude s'inscrit dans le cadre des applications à vitesse variable, que le fonctionnement soit en moteur ou en générateur. Il s'agit d'une MADA dont le stator est relié au réseau et le rotor à un cycloconvertisseur considéré comme une source de courant. Pour la stratégie de commande, l'auteur choisit d'aligner l'axe d de son repère tournant avec le courant rotorique. Il souhaite ensuite contrôler les courants rotoriques et l'angle de déphasage de la tension stator par rapport à son repère, il le nomme angle de charge.

L'expression analytique du couple peut alors être scindée en deux parties, une partie due au courant rotorique et l'autre due à l'interaction entre les alimentations stator et rotor. Les résultats expérimentaux qui présentent les réponses du courant rotorique en fonction de l'angle de décalage en régime permanent, permettent de conclure qu'une alimentation en courant est préférable pour le contrôle de la MADA.

Dans une autre étude très proche [63], l'auteur se focalise sur une alimentation en tension au rotor. Le modèle ainsi obtenu est simple d'utilisation et minimise le nombre de paramètres ayant une influence sur l'état en régime permanent de la MADA, par rapport à une alimentation en tension. Cette fois, le repère tournant est associé au vecteur tension statorique. Une analyse de l'expression analytique du couple en régime permanent permet de constater

que le couple dépend de trois paramètres : le glissement, le rapport entre les amplitudes des tensions statoriques et rotoriques et le déphasage entre les deux sources de tensions.

Des résultats de simulations sont présentés. Il s'agit des courbes de variation du couple, des courants statoriques et rotoriques en fonction des différentes valeurs que peuvent avoir les paramètres définis : le rapport des tensions, l'angle de déphasage entre le vecteur tension statorique et le vecteur tension rotorique, etc...

L. Morel [64] fait l'étude d'une MADA dont le stator est relié au réseau et le rotor à un onduleur. Il assure qu'une telle disposition permet de dimensionner la puissance du convertisseur utilisé au rotor à 20% de la puissance mécanique maximale. Il propose d'effectuer un contrôle de type champ orienté. Afin d'obtenir un moteur ou un générateur à vitesse variable, il propose de passer par trois phases différentes pour amener la vitesse du moteur de zéro à sa vitesse nominale :

- mode I, on démarre le moteur avec les enroulements statoriques en court-circuit,
- mode II, on connecte le stator sur le réseau,
- mode III, la MADA est alimentée à tension et fréquence fixe au stator et par un convertisseur au rotor.

Le fonctionnement du système durant les différents modes est démontré avec validation par des résultats expérimentaux. Il s'agit des réponses en vitesse de la MADA, des courbes de réponse des courants et des tensions rotoriques.

R. Pena [65] étudie une MADA fonctionnant en générateur dont les enroulements statoriques sont reliés à un réseau triphasé et dont les enroulements rotoriques sont reliés à un onduleur. La charge mécanique entraînant le rotor est un moteur diesel.

Il propose d'adopter un contrôle indirect du flux statorique via un courant magnétisant lui-même régulé par les courants rotoriques. L'originalité de l'étude réside dans le fait que l'auteur tente d'utiliser le moins de carburant possible en régulant la vitesse de l'ensemble suivant une courbe optimale de vitesse en fonction de la charge. Une régulation de type "floue" est alors utilisée pour la boucle de régulation de vitesse. Des résultats de simulation qui présentent les réponses de la vitesse, des courants ou de la consommation de carburant, attestent du bon comportement de l'ensemble. Cet article s'inscrit dans la notion de contrôle en vue d'optimisation globale du système.

S. Peresada [66], [67] présente ses travaux de recherche portant sur une MADA dont les enroulements statoriques sont reliés au réseau, le rotor est quant à lui connecté à un onduleur de tension. L'auteur place son étude dans le contexte d'un fonctionnement en mode générateur. Il propose de faire une régulation "asymptotique" des puissances active et réactive statoriques par le biais d'une régulation des courants actif et magnétisant statoriques. Il se place dans un repère tournant lié à la tension statorique. Pour rester dans le cas le plus général possible, il précise qu'il ne négligera pas les termes résistifs.

Il démontre à travers des tests expérimentaux et des simulations que le système est robuste face à des variations paramétriques et face à une erreur de la mesure de la position mécanique du rotor. Il conclut en précisant que pour lui ce système est aussi bon dans la génération d'énergie que pour la traction à condition que les domaines de vitesse soient très proches de la vitesse de synchronisme.

G. Poddar [68] effectue une étude très similaire celle que nous pensons mener: il considère un système dont le stator et le rotor sont connectés à des onduleurs indépendants, le fonctionnement moteur est d'abord envisagé. Il propose de contrôler deux courants statoriques avec la méthode du champ orienté, tandis qu'une loi statique (V/f) sera implantée au rotor permettant ainsi de contrôler le flux et la pulsation rotorique. Il présente aussi une nouvelle loi de fréquence permettant une indépendance de la réponse du système vis à vis des variations paramétriques. Il conclut en démontrant que le double de la puissance nominale du moteur est atteint pour une vitesse de rotation de la machine valant le double de la vitesse nominale.

Des résultats expérimentaux sont présentés. Nous pourrions ainsi consulter les courbes de réponse des flux statoriques, des courants statoriques et rotoriques ainsi que de la vitesse pour différents couples de charge.

F. Poitiers [1], étudia une MADA en vue de l'appliquer à des systèmes de type éolien. Les enroulements statoriques sont donc connectés sur le réseau triphasé tandis que le rotor est relié à un onduleur. Afin d'établir une commande de type vectorielle, l'auteur propose d'utiliser un référentiel tournant lié au flux statorique. L'étude porte ensuite sur la comparaison entre un correcteur de type PI classique et un correcteur de type RST. Ces correcteurs sont mis en oeuvre de façon à contrôler les variables essentielles du système à savoir : le flux statorique et le couple.

Les simulations effectuées permettent d'analyser les réponses temporelles des variables. Les critères qui permettent d'analyser ces réponses sont la recherche de la puissance active

optimale, l'adaptation face à une variation de vitesse brutale, la robustesse face aux variations des paramètres électriques. Les réponses données par les deux régulateurs sont ainsi comparés. Les conclusions dévoilent que les deux types de régulations conduisent à des résultats équivalents. Le régulateur RST donne des meilleurs résultats en terme de robustesse vis à vis des variations paramétriques, que celles-ci soient mécaniques ou électriques.

L'étude que présente **D. Ramuz** [69] porte sur une MADA dont les enroulements statoriques et rotoriques sont alimentés par deux onduleurs indépendants. L'auteur propose d'utiliser cette configuration pour un fonctionnement moteur dans des applications telles que la traction ou la "première transformation de l'acier". Afin de contrôler sa MADA, l'auteur utilise un contrôle vectoriel à orientation de flux.

Dans un premier temps il présente des résultats expérimentaux avec un contrôle basé sur un repère tournant lié au flux statorique, dans un deuxième temps, le contrôle est basé sur une orientation du repère suivant le flux d'entrefer. Les résultats présentés sont la vitesse, les courants statoriques et rotoriques. Ces résultats expérimentaux ont été obtenus sur une maquette dont le moteur a une puissance de 1,5 kW.

A. Sapin, [70], utilise un onduleur trois niveaux du côté rotorique de la MADA dont les enroulements statoriques sont reliés au réseau. L'onduleur multi niveaux (NPC) va piloter la machine en vue de l'appliquer aux usines de pompage et d'extraction. Les principaux avantages que présente l'auteur pour valider sa proposition sont :

- la réduction du nombre de transformateurs à utiliser,
- l'utilisation d'un onduleur à trois niveaux avec un facteur de puissance unitaire ($\cos(\varphi) = 1$).

Les résultats de simulations des régimes transitoires montrant les courants, les tensions, le couple et la vitesse appuient ces conclusions.

A. M Walczyna, [71], étudie une MADA dont les enroulements statoriques sont connectés à un réseau triphasée et le côté rotorique à un onduleur de tension contrôlé en courant. L'auteur s'intéresse à des applications pour la génération d'énergie électrique. Il présente les résultats de simulations des dynamiques des courants d'une MADA. Il adopte un contrôle de type champ orienté, le repère étant lié à la tension statorique. L'auteur choisit de travailler dans l'espace d'état en adoptant le flux stator et le courant rotor comme variables d'état. Les variables à contrôler sont le couple, et la puissance réactive statorique.

Pour l'auteur, l'intérêt principal d'un control en courant de la MADA réside dans le fait que le couple ne dépend plus de la vitesse ou du glissement mais dépend uniquement de l'amplitude et de la fréquence des courants rotoriques.

Quelques exemples expérimentaux viennent confirmer la simulation. Il s'agit des réponses de la vitesse, des flux statoriques, rotoriques et d'entrefer ainsi que des courants.

Dans une autre étude [72], l'auteur reprend l'étude précédente en modélisant la machine dans un repère tournant lié à la tension rotorique. Il affirme que la structure à commander est ainsi plus simple. Afin d'améliorer les performances dynamiques et statiques de la MADA, l'auteur propose l'analyse de l'influence du couplage dû aux courants de l'axe opposé, au sein des termes de compensation relatifs aux équations rotoriques. Une comparaison est ensuite faite par rapport à ses précédents travaux.

S. Wang [73], présente les résultats de simulation d'une MADA dont les enroulements statoriques sont connectés à un réseau triphasé. Le bobinage rotorique est alimenté par un onduleur de tension. L'auteur envisage d'appliquer son étude à un fonctionnement moteur ou générateur à vitesse variable. La stratégie de contrôle retenue pour cette étude est de type champ orienté, le repère tournant étant orienté suivant le flux d'entrefer. Un courant magnétisant à contrôler est ainsi introduit. L'auteur propose une méthode de compensation des oscillations de flux permettant d'améliorer les performances dynamiques du système. Il définit une relation liant la dérivée du flux d'entrefer au courant rotorique dans l'axe d . Il constate que la dynamique de ce courant influence la dynamique du flux, il propose donc d'agir là dessus afin de compenser les oscillations de flux observées.

L. Xu [74], fait l'étude d'une MADA dont seul le côté rotorique est relié à un onduleur indépendant. Le coté statorique est relié au réseau triphasé. Il propose une stratégie de commande originale sans capteur de position mécanique du rotor. L'auteur effectue un contrôle des courants rotoriques. La stratégie de commande retenue est de type champ orienté, le repère tournant est choisi de façon à être lié au flux d'entrefer. La position angulaire du rotor est obtenue par une expression faisant intervenir les courants et tensions rotoriques mesurées.

Des courbes expérimentales viennent corroborer les résultats de simulations présentes. Il s'agit des courbes de vitesse, de puissance réactive et bien entendu une courbe de comparaison entre l'angle mécanique estimé et mesuré.

Dans ce panel d'articles traitant de stratégies de commande pour toutes les configurations de MADA, il nous semble important de retenir les articles [22], [31], [36] et [38]. Ils traitent d'une configuration de MADA à deux onduleurs de tension. Les stratégies de commande sont, dans trois cas, des contrôles vectoriels et dans le dernier cas un retour d'état.

En plus de cette étude, nous allons définir quelques méthodes de commandes utilisées pour la MADA pour nous permettre de nous positionner afin de spécifier la commande choisie lors de notre travail.

3.3 Quelques méthodes de commande utilisées dans la MADA

3.3.1 la commande de la machine asynchrone à double alimentation avec quatre boucles de régulation

Les grandeurs de commande sont, dans le cas d'une commande vectorielle classique, le plus souvent la vitesse et le flux (entraînant le classique problème de l'estimation du flux). Mais certains modes de fonctionnement spécifiques amènent à choisir d'autres grandeurs. C'est le cas du dispositif de la Figure (3-1) où la vitesse Ω , la tension du bus DC U_{DC} , le facteur de puissance, côté stator k_s et côté ligne k_l , sont contrôlés [37][38]. Cette structure permet de contrôler le facteur de puissance de l'installation sur les quatre quadrants de fonctionnement. En revanche, une telle commande nécessite une boucle interne de régulation du couple et par conséquent une mesure ou une bonne estimation de celui-ci. Cette boucle de régulation peut éventuellement être remplacée par le coefficient de proportionnalité liant le couple au courant rotorique d'axe d. Cette solution est plus simple à mettre en oeuvre mais nécessite une bonne précision du coefficient liant les deux grandeurs.

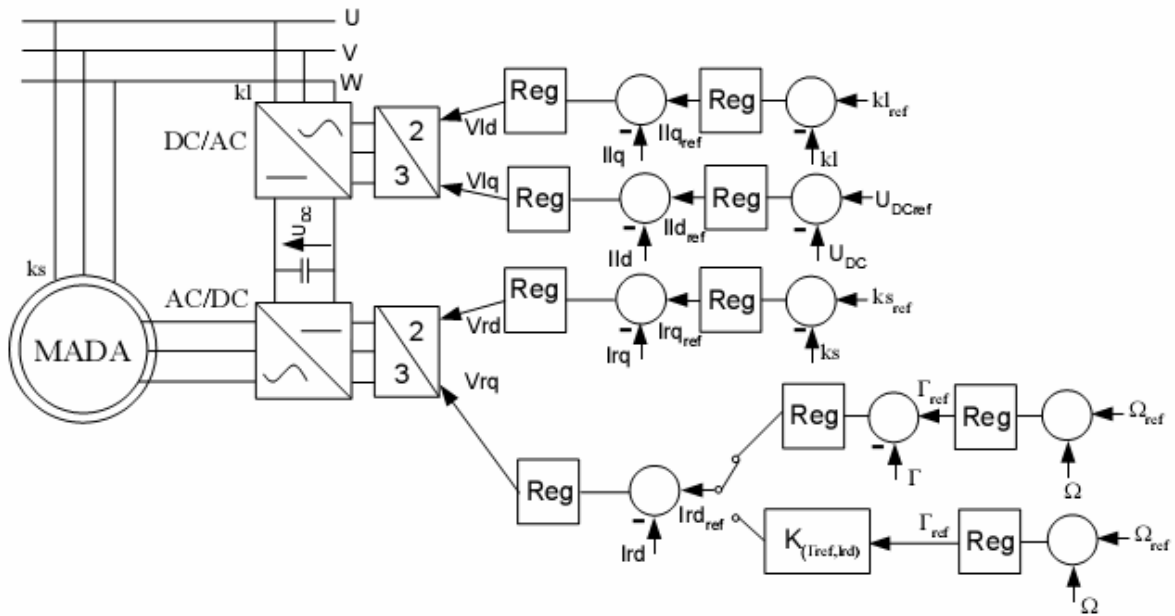


Figure 3.1 : MADA avec quatre boucles de régulation

3.3.2 la commande de la machine asynchrone à double alimentation avec des convertisseurs statorique et rotorique

La présence d'un convertisseur placé entre le stator et le réseau en plus du convertisseur rotorique a également été envisagée [39]. Cette structure permet d'obtenir une plage de variation de vitesse plus élevée que dans le cas d'un convertisseur unique au rotor (jusqu'à $\pm 1,7$ fois la vitesse nominale). La taille des convertisseurs est limitée grâce à une optimisation des puissances qui traversent chacun de ces convertisseurs [40]. La configuration de ce dispositif est présentée sur la Figure (3-2).

Malgré l'avantage de pouvoir faire varier facilement la vitesse sur une large plage, ce système nécessite un nombre d'interrupteurs statiques important. La commande de ces interrupteurs, les capteurs de mesure et les cartes d'entrées / sorties en font un système assez lourd à concevoir. De plus, la puissance dissipée par le convertisseur statorique est importante, ce qui augmente son coût et la taille des radiateurs des semi-conducteurs.

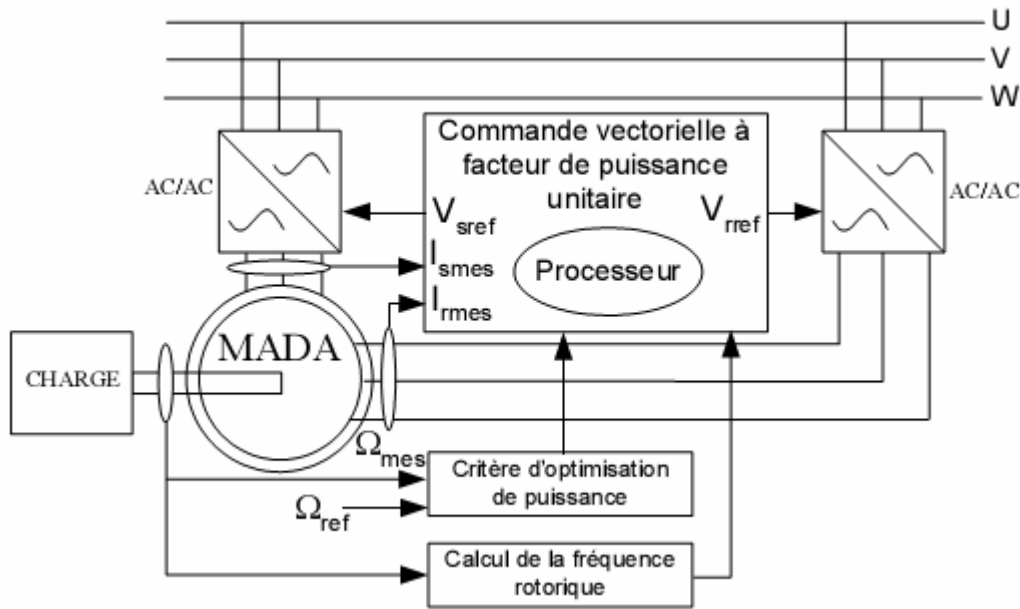


Figure 3.2 : MADA avec convertisseurs statorique et rotorique

3.3.3 Commande par la logique floue de la machine asynchrone à double alimentation

Cette technique de commande est appliquée au réglage de vitesse de la machine asynchrone à double alimentation MADA.

En 1974, *E. H. MAMDANI* a présenté pour la première fois, la technique de réglage par la logique floue et conçoit le premier contrôleur flou. Ce contrôleur est construit autour d'un organe de décision manipulant des règles subjectives et imprécises comme celles du langage courant qui, appliquées au système, peuvent le contrôler. L'obtention de ces règles auprès des experts qui connaissent bien le système est facile.

MACVICAR et *WHELAN* ont fait une analyse sur les bases de règles de *KING* et de *MAMDANI* et ont proposé une matrice des règles qui possède deux entrées, l'erreur et sa variation, en se basant sur les deux principes suivants [41],[42] :

- Si la sortie à régler est égale à la valeur désirée et la variation de l'erreur est nulle, la commande sera maintenue constante,
- Si la sortie à régler diverge de la valeur désirée, l'action sera dépendante du signe et de la valeur de l'erreur et de sa variation.

Ces méthodes permettent de formuler un ensemble de décisions en termes linguistiques, utilisant les ensembles flous pour décrire les amplitudes de l'erreur, de sa variation et de la commande appropriée. En combinant ces règles, nous pouvons tracer des tables de décision

permettant de donner les valeurs de la sortie du contrôleur correspondant aux situations d'intérêt [44].

Dans le cas du réglage par la logique floue, sont utilisées en général, des formes trapézoïdales et triangulaires pour les fonctions d'appartenance. Bien qu'ils n'existent pas de règles précises pour la définition des fonctions d'appartenance, quelques directives générales sont données, afin de conduire à un choix convenable [45].

- En ce qui concerne les variables d'entrée, il faut éviter des lacunes ou un chevauchement insuffisant entre les fonctions d'appartenance de deux ensembles voisins. En effet, cela provoque des zones de non-intervention du régulateur (zones mortes), ce qui conduit le plus souvent à une instabilité du régulateur.
- Pour la variable de sortie, la présence des lacunes entre les fonctions d'appartenance admissibles, même souhaitées, cela aboutit à une simplification notable de la détermination de l'abscisse du centre de gravité.

La figure (3-3) présente la structure globale du réglage de la vitesse en quatre régulateur flous de la MADA ; s sont des régulateurs flous .

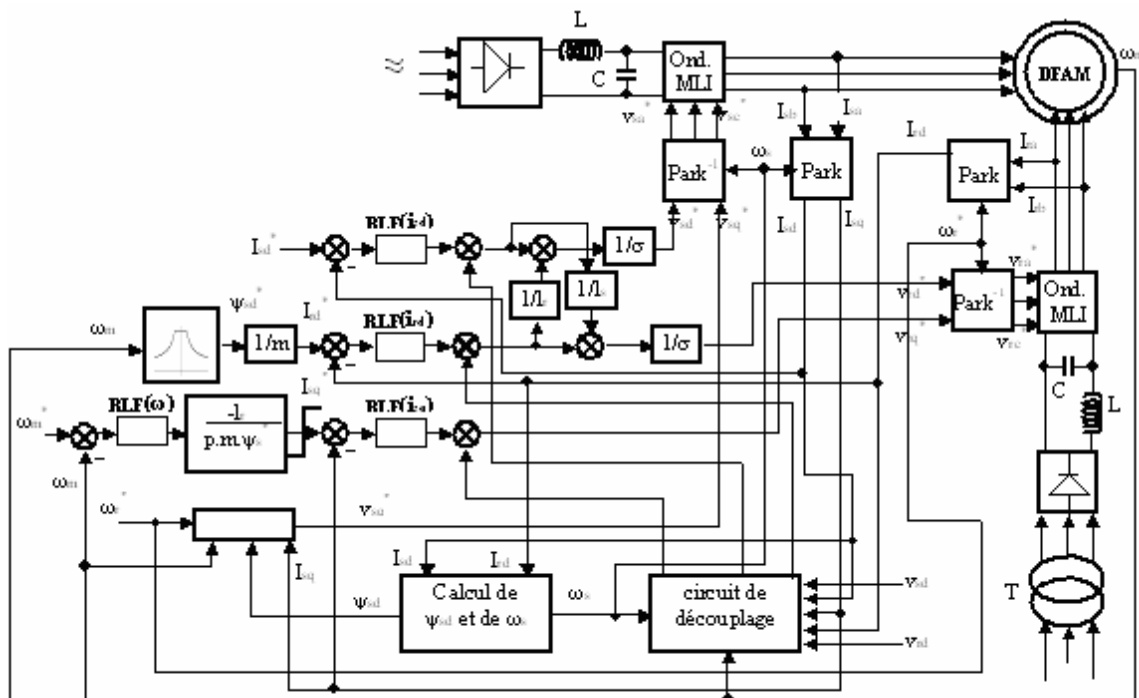


Figure 3.3 : Structure globale du réglage de la vitesse par la logique floue de la MADA

Tous les régulateurs sont du même type (régulateur de type MAMDANI à trois classes), et possèdent les mêmes fonctions d'appartenance. La différence réside seulement dans les gains de normalisation (facteurs d'échelle).

La commande par la logique floue de la MADA :

Ce choix a été justifié par la capacité de la logique floue à traiter l'imprécis, l'incertain et le vague. En effet, pour le contrôleur flou, l'imprécision des paramètres du système est contrée par le fait de manipuler des labels (variables linguistiques), dont les bornes ne sont pas rigides, et permet aux entrées dans les intervalles déterminés par ces derniers. De plus, les liens entre ces labels, effectués par le biais de règles, sont souples et autorisent des changements suivant le comportement du système. Une caractéristique très importante des systèmes flous, est l'emploi de différents types d'inférences permettant de diversifier les moyens pour contrôler le système. Ces qualités de robustesse, de simplicité et de souplesse les placent parmi les commandes les plus convoitées par l'industrie, en vue d'une implémentation rapide et peu coûteuse.

3.3.4 La commande scalaire de la MADA

Pour qu'une installation puisse fonctionner dans des bonnes conditions, il est indispensable de maintenir sa tension et sa fréquence dans les limites tolérées définies par le concepteur ($\pm 5\%$ par exemple) . Dans ce qui va suivre nous allons fixer la fréquence à 50 Hz pour des vitesses variables d'entraînement, conséquence de la variation de la vitesse du vent.

L'équation de tension du stator est la suivante :

$$\bar{u}_s = R_s \bar{i}_s + L_s \frac{d\bar{i}_s}{dt} + \bar{E}_s \quad (3-1)$$

Où \bar{E}_s est la *fem* (force électromotrice) dépendante du courant injecté dans le rotor, elle est exprimée comme suit :

$$\bar{E}_s = M_{sr} \frac{d\bar{i}_r}{dt} e^{j\theta} + jM_{sr} \cdot \omega \cdot \bar{i}_r \cdot e^{j\theta} \quad (3-2)$$

De (3-5), nous pouvons également présenter l'équation tension du rotor comme suit :

$$\bar{v}_r = \bar{u}_r - \bar{E}_r = R_r \bar{i}_r + L_r \frac{d\bar{i}_r}{dt} \quad (3-3)$$

où \bar{E}_r est la *fem* du rotor dépendant du courant du stator en charge exprimée par :

$$\bar{E}_r = M_{sr} \frac{d\bar{i}_s}{dt} e^{-j\theta} - jM_{sr} \cdot \omega \cdot \bar{i}_s \cdot e^{-j\theta} \quad (3-4)$$

Nous considérons que cette *fem* induite \bar{E}_r au rotor comme une perturbation car elle dépend du courant statorique \bar{i}_s qui est un courant de charge et de la vitesse de rotation (vitesse du vent). En conséquence la stratégie de commande doit être conçue de telle façon à rejeter cette perturbation et la tension du stator est doit être maintenue ou réglée à sa valeur nominale. En utilisant (3-2) et (3-3), nous pouvons écrire la fonction de transfert complexe cause à effet entre la tension du rotor et celle du stator comme suit :

$$\frac{\bar{E}_s}{\underbrace{\bar{v}_r e^{j\theta}}_{\bar{v}_v}} = \left(\frac{M_{sr}}{R_r} \right) \frac{s + j\omega}{T_r s + 1} \quad (3-5)$$

s : indique l'opérateur de dérivation $\left(\frac{d}{dt} \right) = s$

Comme mentionné ci-dessus, la tension du stator doit être maintenue constante pour n'importe quelle charge.

Ainsi la régulation est réalisée telle que :

$$\begin{aligned} \bar{v}_s &= \bar{u}_s \cong \bar{E}_s \\ \text{ou} \quad \bar{v}_s &= \bar{u}_s - \Delta \bar{u}_s(\bar{i}_s) = \bar{E}_s \end{aligned} \quad (3-6)$$

$$\text{Avec, } \Delta \bar{u}_s(\bar{i}_s) = \left(R_s \bar{i}_s + L_s \frac{d\bar{i}_s}{dt} \right) = D_L = \text{perturbation charge} \quad (3-7)$$

$\Delta \bar{u}_s(\bar{i}_s)$ est une chute de tension de stator due à la charge (perturbation) avec les hypothèses de régulation précédentes, (3-5) devient simplifiée

$$\frac{\bar{v}_s}{\bar{v}_r} = \left(\frac{M_{sr}}{R_r} \right) \frac{s + j\omega}{T_r s + 1} \quad (3-8)$$

Si l'opérateur s du numérateur dans (3-8) est remplacé par calcul direct de la dérivée du courant du rotor de (3-2), alors nous pouvons donner un autre schéma bloc de la même fonction de transfert (3-8), appelée fonction de transfert complexe de la MADA (en anglais, DFIG-CF, ou MADA complex transfer function), ce qui est illustré par la figure (3-5)

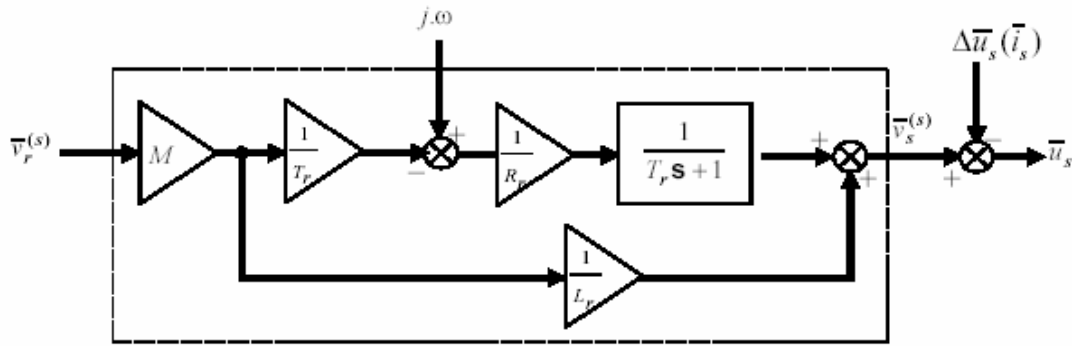


Figure 3.5 : la fonction de transfert complexe de la GADA

La figure (3-5) montre que la chute de tension et la dérivée de la fréquence du stator sont provoquées par le courant du stator et la vitesse de rotation, qui sont considérés comme des perturbations. Par conséquent nous pouvons voir clairement qu'on peut contrôler la tension du stator par celle du rotor.

En régime harmonique, on peut prendre $s = j\omega_r$, dans ce cas (3-8) sera réécrite comme suit :

$$\frac{\bar{v}_s}{\bar{v}_r} = \left(\frac{M}{R_r} \right) \frac{j\omega_s}{j\omega_r T_r + 1} \quad (3-9)$$

$$\text{Ou } \omega_s = \omega_r + \omega \quad (3-10)$$

Comme exposé ci-dessus, la tension du stator peut être contrôlée par la tension injectée au rotor, pour qu'elle soit maintenue constante.

La valeur de la tension du stator est directement mesurée par :

$$\hat{U}_s = \sqrt{\hat{U}_{s\alpha}^2 + \hat{U}_{s\beta}^2} \quad (3-11)$$

$U_{s\alpha}, U_{s\beta}$ Les tensions dans le repaire lié au stator

De la position du vecteur tension de stator dans le plan de Concordia, on déduit

$\hat{\theta}_s = \arccos\left(\frac{\hat{u}_{s\alpha}}{\hat{U}_s}\right)$ et donc la fréquence du stator peut être estimée par

$$\hat{\omega}_s = \left| \frac{d\hat{\theta}_s}{dt} \right| \quad (3-12)$$

Les expressions (3-11) et (3-12) fournissent les deux variables à contrôler. La figure (3-6) présente la commande scalaire de la MADA ou deux contrôleurs PI sont employés.

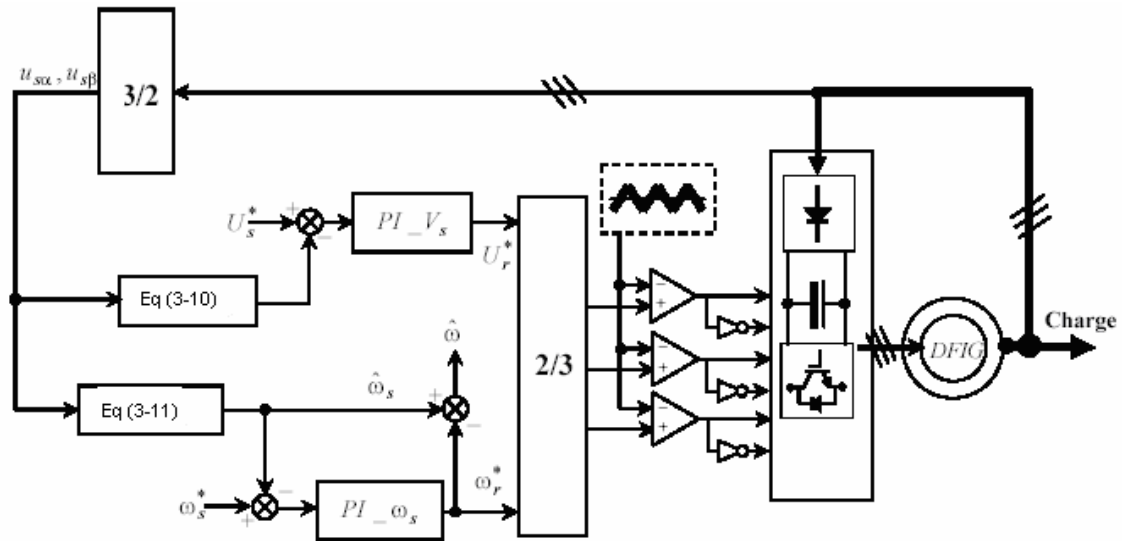


Figure 3.6 : Implémentation de la commande scalaire de tension de la MADA

Conclusion :

Ce chapitre a permis de présenter les différentes méthodes de commande de la machine asynchrone à double alimentation. Afin de mieux comprendre les avantages que peut présenter ces méthodes, nous avons analysé les possibilités qu'elle offrait à la commande de la MADA.

Des méthodes de commande de la MADA présentées dans la littérature ont été présentées et analysées afin de montrer les points forts et les points faibles de chaque méthode.

La méthode finalement choisie pour l'utilisation de la MADA dans un système éolien dans notre étude, est une commande vectorielle en puissances active et réactive statoriques.

Chapitre 4

Commande vectorielle à flux statorique orienté

4.1 Introduction

Dans cette partie, nous expliquons la commande vectorielle d'un MADA à rotor bobiné alimenté par un onduleur de tension, lequel dans notre étude est supposé idéal.

De nombreuses variantes de ce principe de commande seront présentées dans ce chapitre. Ces variantes peuvent être classifiées suivant l'orientation du repère (d-q) sur :

- Le flux rotorique.
- Le flux statorique.
- Le flux d'entrefer.

Dans le cadre de ce chapitre, nous développons la commande vectorielle de la génératrice asynchrone à double alimentation (MADA) avec orientation du repère (d-q) suivant le flux statorique. Cette commande se décompose en deux parties :

- Le contrôle des courants rotoriques.
- Le découplage ou compensation.

Pour établir la commande vectorielle de la génératrice, on considère l'hypothèse simplificatrice que les enroulements statoriques ou rotoriques de la machine sont supposés triphasés équilibrés, donc toutes les composantes homopolaire sont nulles.

Ensuite, on calcule le régulateur nécessaire pour la commande, et enfin on termine par les résultats de la simulation qui signifient la validation de commande.

4.2 Types de commande vectorielle

L'utilisation de la commande vectorielle des machines asynchrones à double alimentation dans les applications dans l'énergie éolienne nécessite une haute performance dynamique concernant la commande du couple et de la vitesse. .

Pour cela, nous devons connaître, avec exactitude, le vecteur flux statorique (amplitude et phase).

Deux méthodes ont été développées soit :

- La commande vectorielle directe.
- La commande vectorielle indirecte.

4.2.1 Commande vectorielle directe

Le flux rotorique est mesuré à partir de capteurs à effet Hall placés sous les dents du stator. Ces capteurs donnent des valeurs locales du flux. Il faut ensuite traiter ces valeurs pour obtenir le flux global.

Cette méthode présente des inconvénients au niveau de la fiabilité de la mesure soit :

- Le problème de filtrage du signal mesuré.
- La mesure varie en fonction de la température.
- Le coût de production est élevé. (Capteurs, conditionneurs, filtre, etc.).

Cette commande n'est donc pas optimale.

4.2.2 Commande vectorielle indirecte

A cause des inconvénients vus dans la précédente commande, la commande vectorielle indirecte est considérée comme plus pratique.

Dans cette commande, les courants rotorique sont estimés à partir de la mesure des puissances active et réactive. .

Cette méthode représente pourtant un inconvénient qui est la sensibilité de l'estimation aux variations des paramètres de la machine due à la saturation du circuit magnétique et la variation de la température.

4.3 Contrôle par orientation de flux

4.3.1 Choix de la position du référentiel

Les expressions suivantes représentent le couple électromécanique instantané

$$\begin{aligned}
 Ce &= P [\phi_{rq} i_{rd} - \phi_{rd} i_{iq}] & ; & & \vec{Ce} &= \left(\frac{3}{2}\right) P \left(\vec{I}_r \wedge \vec{\phi}_r \right) \\
 Ce &= PM [i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}] & ; & & \vec{Ce} &= \left(\frac{3}{2}\right) PM \left(\vec{I}_r \wedge \vec{I}_s \right) \\
 Ce &= P \left(\frac{M}{L_s} \right) [\phi_{sq} i_{rd} - \phi_{sd} i_{rq}] & ; & & \vec{Ce} &= \left(\frac{3}{2}\right) P \left(\frac{M}{L_s} \right) \left(\vec{I}_r \wedge \vec{\phi}_s \right) \\
 Ce &= P \left(\frac{M}{L_r} \right) [\phi_{rd} i_{sq} - \phi_{rq} i_{sd}] & ; & & \vec{Ce} &= \left(\frac{3}{2}\right) P \left(\frac{M}{L_r} \right) \left(\vec{\phi}_r \wedge \vec{I}_s \right) \\
 Ce &= \left(\frac{P(1-\sigma)}{\sigma M} \right) [\phi_{rd} \phi_{sq} - \phi_{rq} \phi_{sd}] & ; & & \vec{Ce} &= \left(\frac{3P(1-\sigma)}{2\sigma M} \right) \left(\vec{\phi}_r \wedge \vec{\phi}_s \right)
 \end{aligned}$$

Ces équations conduisent à la même diversité dans le choix de la position du référentiel qui, dans tous les cas, doit être mis à profit pour réduire la commandabilité et retrouver ainsi un réglage se identifiant à celui du moteur à courant continu.

Ainsi, l'observation des équations prouve que le choix d'orientations qui consiste à aligner l'un des flux (statorique ou rotorique) sur un axe du repère, annule la composante de ce même flux sur l'autre axe, donc la f.é.m de rotation induite correspondante; l'équation associée peut donc devenir linéaire et faciliter ainsi l'élaboration de la loi de commande.

Toutefois, la commande est une opération complexe car le référentiel tourne à la vitesse du champ et il apparaît des f.é.m de rotation donnant à la machine son caractère de processus multi variable à couplage non linéaire.

Il est possible d'orienter les différents flux de la machine comme suit :

- Flux rotorique $\phi_{rd} = \phi_r$, $\phi_{rq} = 0$
- Flux statorique $\phi_{sd} = \phi_s$, $\phi_{sq} = 0$
- Flux d'entrefer $\phi_{gd} = \phi_g$, $\phi_{gq} = 0$

On peut conclure que la conception du contrôle vectoriel par orientation du flux nécessite un choix du référentiel judicieux.

4.4 La commande vectorielle par orientation du flux statorique

La particularité de la MADA est qu'elle possède deux courants à contrôler directement à savoir i_{rd}, i_{rq} et deux courants contrôlés indirectement i_{sd}, i_{sq} .

En s'alignant sur le repère lié au champs tournant, nous pouvons écrire les équations des tensions statorique et rotoriques de la machine comme suit, [31], [32],[33] :

$$\begin{aligned} V_{sd} &= R_s i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} &= R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \phi_{sd} \end{aligned} \quad (4-1)$$

$$\begin{aligned} V_{rd} &= R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \phi_{rq} \\ V_{rq} &= R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \omega_r \phi_{rd} \end{aligned} \quad (4-2)$$

En orientant un des flux, le modèle obtenu de la MADA se simplifie et le dispositif de commande qui en résulte l'est également. Un contrôle vectoriel de cette machine a été conçu en orientant le repère de Park pour le flux statorique suivant l'axe q soit constamment nul :

$$\phi_{sq} = 0$$

Une simplification des équations de la machine est obtenue alors :

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + L_s \frac{d\phi_{sd}}{dt} \quad (4-3)$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_s \phi_{sd}$$

$$V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \phi_{rq} \quad (4-4)$$

$$V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \omega_r \phi_{rd}$$

A partir des équations des composantes direct et quadrature du flux statorique (voir chapitre2), on obtient les expressions suivantes des courants statoriques :

$$i_{sd} = \frac{\phi_s}{L_s} - \frac{M_{sr}}{L_s} i_{rd} \quad (4-5)$$

$$i_{sq} = -\frac{M_{sr}}{L_s} i_{rq}$$

Ces courants statoriques sont remplacés dans les équations des composantes direct et en quadrature des flux rotoriques (voir chapitre2) :

$$\phi_{rd} = \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s}\right) i_{rd} + \frac{M_{sr}}{L_s} \phi_{sd} = L_r \cdot \sigma \cdot i_{rd} + \frac{M_{sr}}{L_s} \phi_{sd} \quad (4-6)$$

$$\phi_{rq} = L_r \cdot i_{rq} - \frac{M_{sr}^2}{L_s} i_{rq} = L_r \cdot \sigma \cdot i_{rq} \quad (4-7)$$

σ est le coefficient de dispersion entre les enroulements d et q :

$$\sigma = 1 - \frac{M_{sr}^2}{L_s \cdot L_r}$$

En remplaçant les expressions des composantes directe et quadrature des courants statoriques (4-5) dans l'équation(4-3), puis les expressions des composantes directe et quadrature des flux rotoriques (4-6) et(4-7) dans les équations(4-4), on obtient :

$$\begin{aligned} V_{sd} &= \frac{R_s}{L_s} \phi_{sd} - \frac{R_s}{L_s} M_{sr} i_{rd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} \\ V_{sq} &= -\frac{R_s}{L_s} M_{sr} i_{rq} + \omega_s \phi_{sd} \end{aligned} \quad (4-8)$$

$$\begin{aligned} V_{rd} &= R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} + \frac{M_{sr}}{L_s} \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_r L_r \sigma i_{rq} \\ V_{rq} &= R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + \omega_r L_r \sigma i_{rd} + \omega_r \frac{M_{sr}}{L_s} \phi_{sd} \end{aligned} \quad (4-9)$$

En notant les f.é.m suivantes :

$$e_q = -L_r \omega_r \sigma i_{rq} + \frac{M_{sr}}{L_s} \frac{d\phi_{sd}}{dt} \quad (4-10)$$

$$e_d = L_r \omega_r \sigma i_{rd} \quad (4-11)$$

$$e\phi = \omega_r \frac{M_{sr}}{L_s} \phi_{sd} \quad (4-12)$$

Les équations (4-9) deviennent alors :

$$\begin{aligned} V_{rd} &= R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} + e_q \\ V_{rq} &= R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + e_d + e\phi \end{aligned} \quad (4-13)$$

Le couple a pour expression :

$$C_{em} = p \cdot (\phi_{sd} i_{sq} - \phi_{sq} i_{sd}) \quad (4-14)$$

Avec une orientation du flux statorique telle que $\phi_{sq} = 0$, on obtient une expression simplifiée :

$$C_{em} = p \cdot \phi_{sd} i_{sq} \quad (4-15)$$

Le courant i_{sq} ne pouvant être directement contrôlé, en utilisant l'équation (4-5), on fait apparaître la composante en quadrature du courant rotorique dans l'expression du couple électromagnétique :

$$C_{em} = -p \frac{M_{sr}}{L_s} (\phi_{sd} i_{rq}) \quad (4-16)$$

On voit que le couple électromagnétique est proportionnel au courant i_{rq} si le flux est maintenu constant. Le courant i_{rq} sera variable par action sur la tension V_{rq} . Le flux peut être contrôlé le réglage du courant i_{rd} . Ce dernier est devenu variable par action sur la tension V_{rd} . On peut déduire i_{rq} , i_{rd} à partir de V_{rq} , V_{rd} si en considérant le convertisseur parfaitement commandé $V_{rd} = V_{rd-ref}$ et $V_{rq} = V_{rq-ref}$.

La figure (4-1) donne la représentation simplifiée sous forme de schéma de bloc du réglage de courant.

Il existe d'autres stratégies de commande vectorielle dont les grandeurs à contrôler sont la vitesse, la tension du bus continu et le facteur de puissance coté stator [83]. Ces structures permettent de contrôler le facteur de puissance de l'installation sur les quatre quadrants de fonctionnement. En revanche, une telle commande nécessite une boucle de régulation interne du couple et donc une bonne estimation de celui-ci.

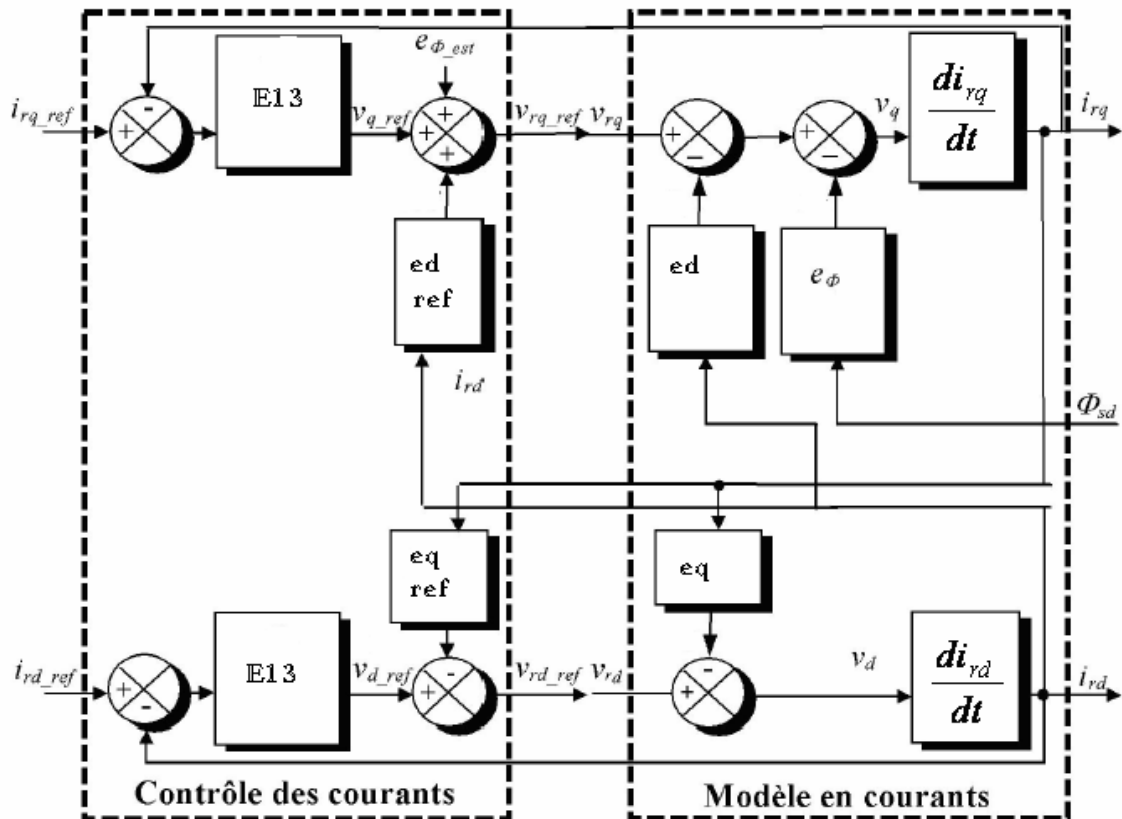


Figure 4.1 : Régulation des courants rotoriques

Dans notre cas d'étude, nous avons considéré comme grandeurs à contrôler, les courants rotoriques. Afin de déterminer la référence de la composante directe et en quadrature du courant rotorique, nous pouvons les déterminer à partir des puissances active et réactive.

4.5 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques

Dans un repère diphasé quelconque, les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent [31], [34],[35] :

$$\begin{aligned} p &= V_{sd}i_{sd} + V_{sq}i_{sq} \\ Q &= V_{sq}i_{sd} - V_{sd}i_{sq} \end{aligned} \quad (4-17)$$

En écrira l'équation (4-17) sous la forme matricielle.

$$\begin{bmatrix} p \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{sd} & V_{sq} \\ V_{sq} & -V_{sd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \quad (4-18)$$

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{sd} & V_{sq} \\ V_{sq} & -V_{sd} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ Q \end{bmatrix} \quad (4-19)$$

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V_{sd}}{V_s^2} & \frac{V_{sq}}{V_s^2} \\ \frac{V_{sq}}{V_s^2} & -\frac{V_{sd}}{V_s^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ Q \end{bmatrix} \quad (4-20)$$

Donc a partir de (4-20) en peut déduire les courants statoriques.

$$\begin{aligned} i_{sd} &= \frac{V_{sd}}{V_s^2} p + \frac{V_{sq}}{V_s^2} Q \\ i_{sq} &= \frac{V_{sq}}{V_s^2} p - \frac{V_{sd}}{V_s^2} Q \end{aligned} \quad (4-21)$$

Les composants directe et en quadrature du courants rotoriques peuvent être déterminées à partir des composantes du courant statorique .

En remplaçant les expressions des composantes directe et quadrature des courants statoriques (4-21) dans l'équation (4-5) , on obtient :

$$i_{rd} = \left(\left(\frac{V_{sd}}{V_s^2} p + \frac{V_{sq}}{V_s^2} Q \right) - \frac{\phi_s}{L_s} \right) \cdot \frac{L_s}{M_{sr}} \quad (4-22)$$

$$i_{sq} = - \left(\frac{V_{sq}}{V_s^2} p - \frac{V_{sd}}{V_s^2} Q \right) \cdot \frac{L_s}{M_{sr}}$$

La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle de façon à garder un facteur de puissance unitaire côté stator. La consigne de puissance active permettra à la machine de fonctionner à la puissance maximale conférant le meilleur rendement possible au système éolien. Un essai en boucle ouverte sera préalablement réalisé en simulation afin de déterminer la caractéristique donnant la vitesse de rotation de la machine en fonction de la puissance de référence imposée par la régulation.

La figure (4-2) donne la représentation sous forme de schéma bloc de la commande vectorielle à flux statorique orienté de la MADA.

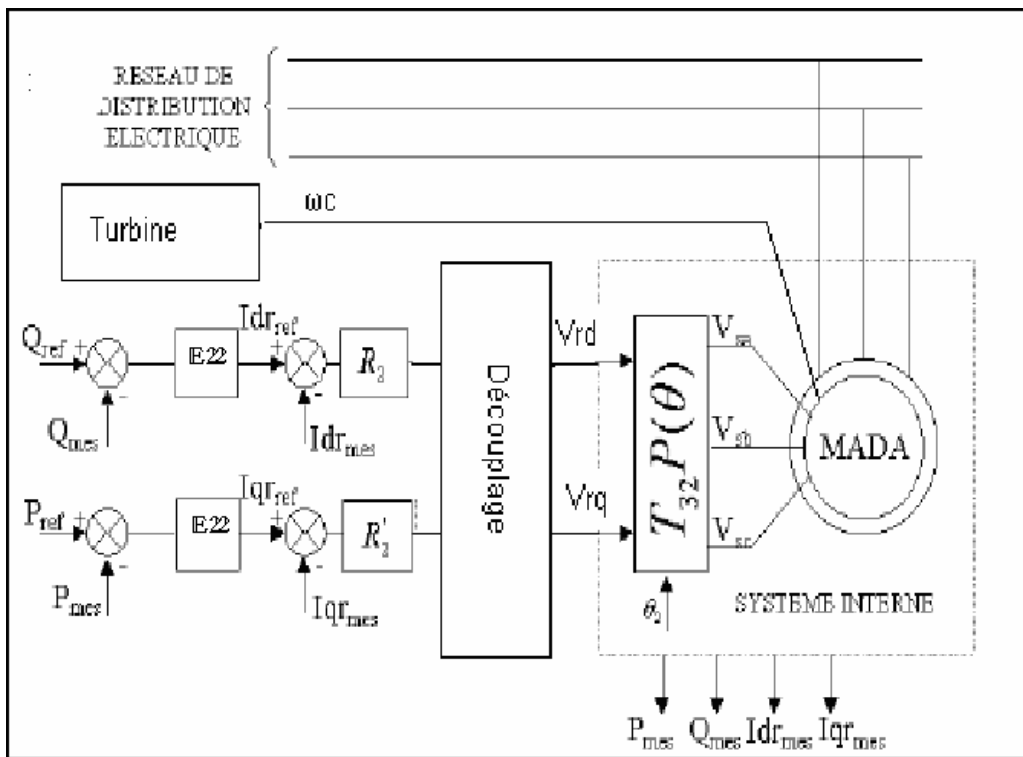


Figure 4.2 : Schéma bloc de la commande vectorielle à flux statorique orienté de la MADA

4.6 Calcul des régulateurs

Le rôle des régulateurs de chaque axe est d'annuler l'écart entre les courants direct et en quadrature de référence et les courants active et réactive mesurés. Rappelons que la synthèse des régulateurs sera effectuée sur la base du modèle simplifié de la Figure (4-3)

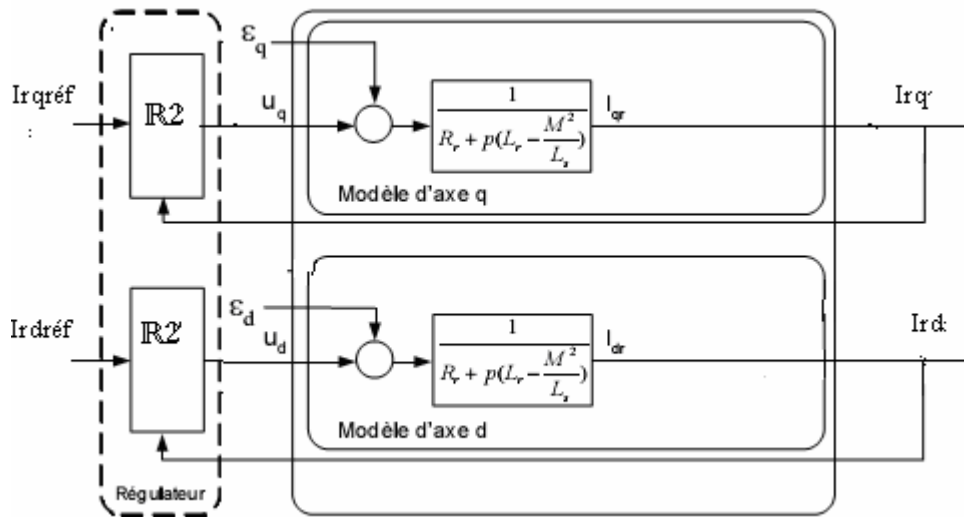


Figure 4.3: Commande vectorielle directe de la machine asynchrone à double alimentation

La méthode d'approche de simulation simple pour analyse de la stabilité et des performances dynamiques du système est d'introduire un régulateur PI en boucle fermée.

Dans notre cas la fonction de transfert correspond aux régulateurs R2 et R2⁰ (figure (4-4)) est :

$$C(p) = k_p + \frac{k_i}{p} \quad (4-23)$$

avec : k_p le gain proportionnel du régulateur

k_i le gain intégrateur du régulateur

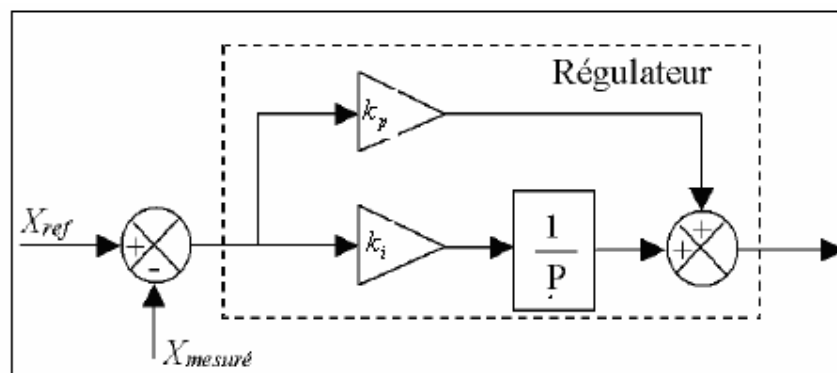


Figure 4.4 : Schéma bloc du correcteur PI

D'après l'équation (4-13) la fonction de transfert du processus associée à ce correcteur et la suivante (figure (4-5)) :

$$f_t(p) = \frac{k}{1 + \tau p} = \frac{1}{R_r(1 + \sigma T_r p)} \quad (4-24)$$

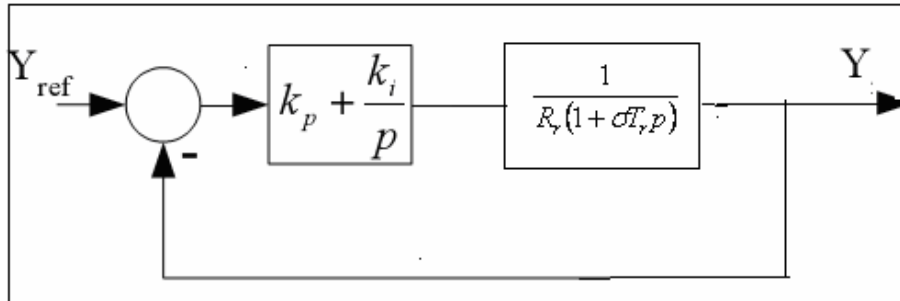


Figure 4.5 : Schéma fonctionnel de contrôle des courants

La fonction de transfert en boucle ouverte s'écrit :

$$ftbo = \frac{k(k_p + \frac{k_i}{p})}{1 + \tau p} \quad (4-25)$$

$$ftbo = k_i k \frac{1 + \frac{k_p p}{k_i}}{p(1 + \tau p)} \quad (4-26)$$

Si on pose $\frac{k_i}{k_p} = \tau$, la fonction de transfert en boucle ouverte devient :

$$ftbo = \frac{k_i k}{p} \quad (4-27)$$

La fonction de transfert en boucle fermée s'exprime alors par :

$$ftbf = \frac{\frac{k_i k}{p}}{\frac{k_i k}{p} + 1} = \frac{1}{1 + p T_r} \quad (4-28)$$

$$ftbf = \frac{1}{1 + \frac{p}{k_i k_p}} \quad (4-29)$$

Le terme τ désigne ici le temps de réponse du système. Nous choisissons de fixer celui-ci à 10 ms, ce qui représente une valeur suffisamment rapide pour l'application de production d'énergie sur le réseau avec la MADA de 10 kW de notre banc d'essais.

k_p et k_i sont alors exprimés en fonction de ce temps de réponse et des paramètres de la machine :

$$T_r = \frac{1}{k_i k} \quad (4-30)$$

donc
$$k_i = \frac{1}{k T_r} \quad (4-31)$$

Alors :
$$k_p = \frac{1}{\tau \cdot k \cdot T_r} \quad (4-32)$$

4.7 Schéma de simulation

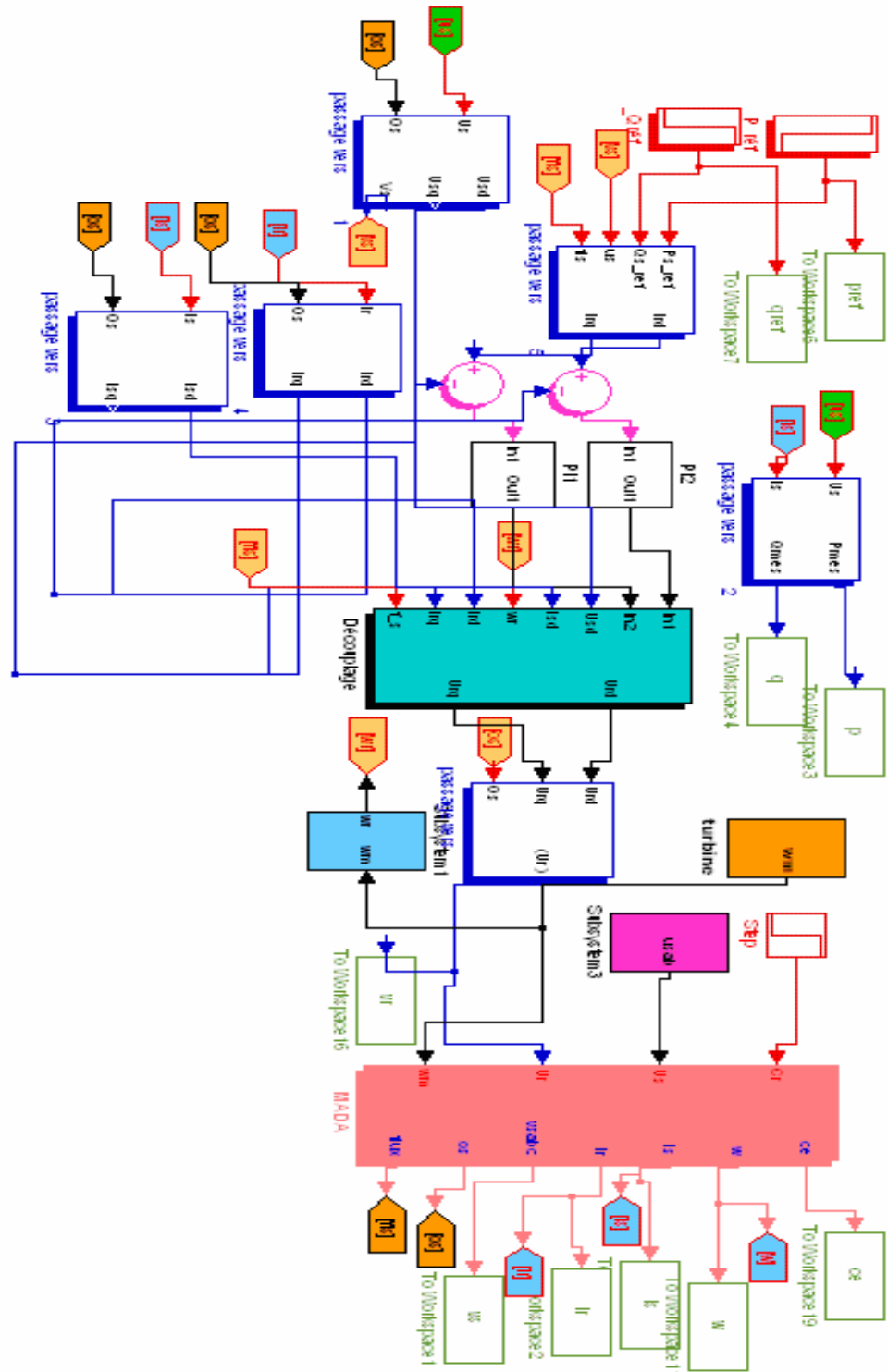


Figure 4.6 : schéma de simulation, en SIMULINK sous MATLAB, de la commande la MADA dans le repaire lie au stator

4.8 Les résultats de la simulation

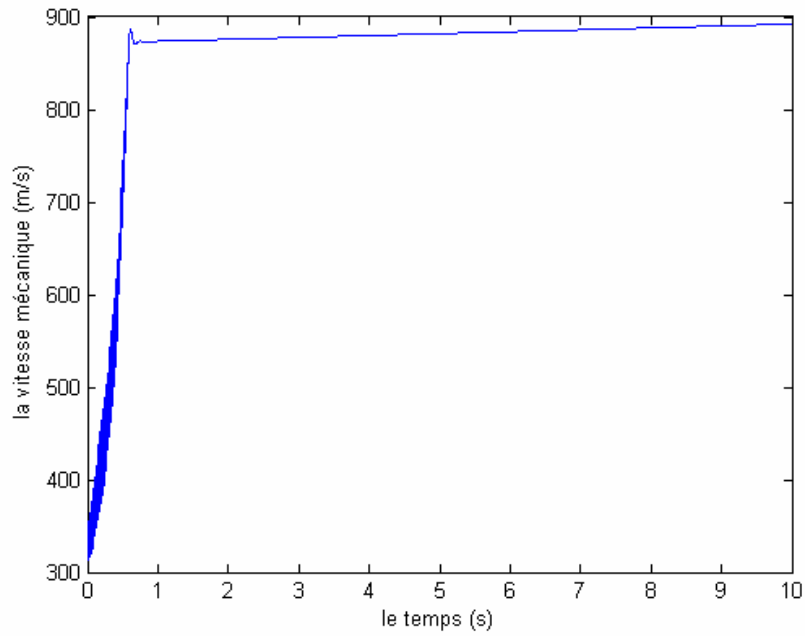


Figure 4.7 : Vitesse mécanique de la génératrice au démarrage

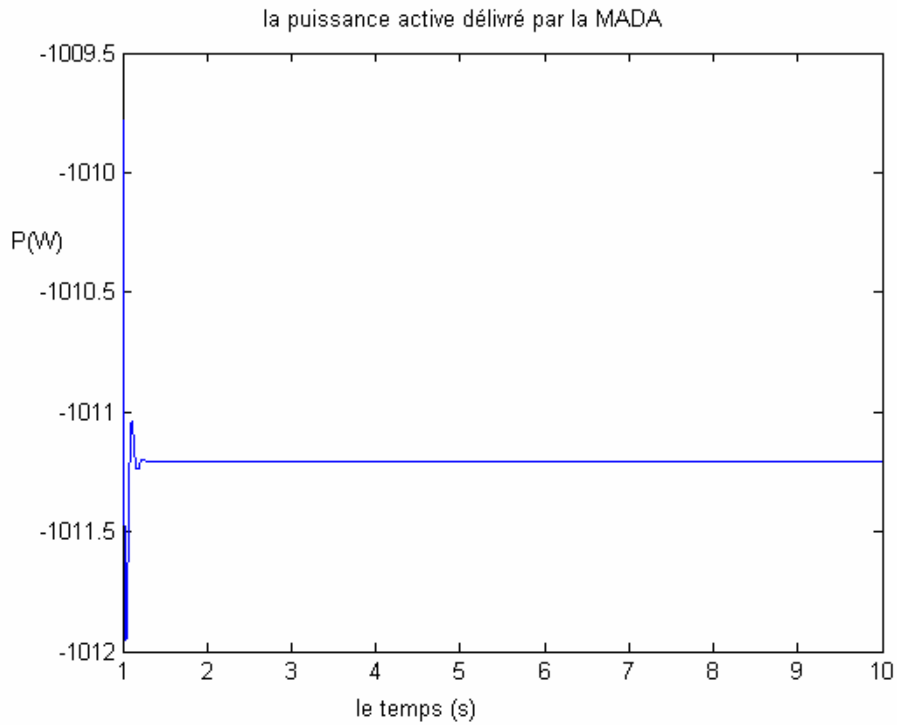


Figure 4.8 : Puissance active délivrée par la MADA

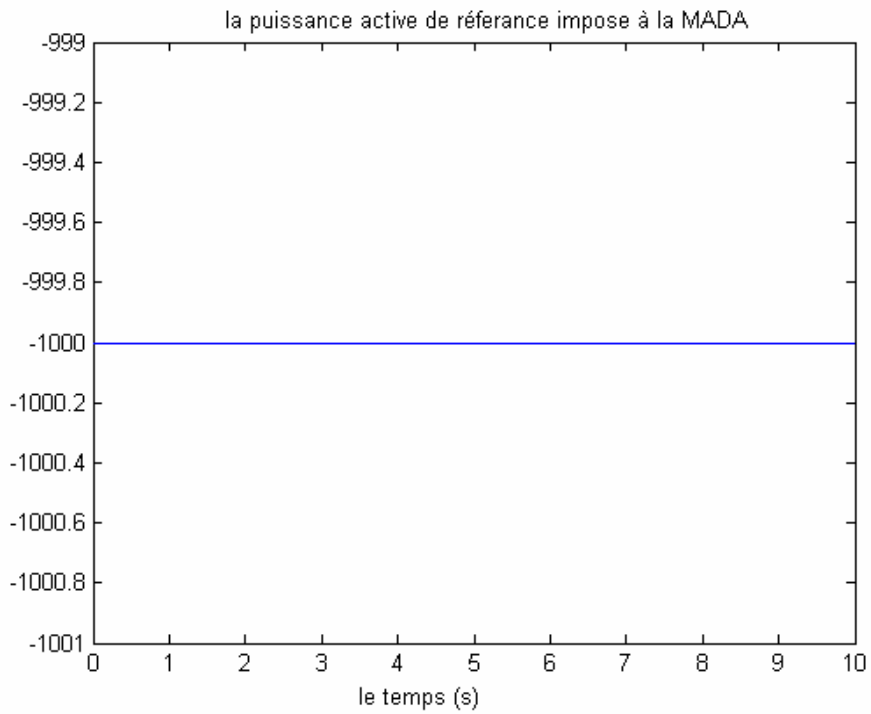


Figure 4.9 : puissance active imposée à la MADA

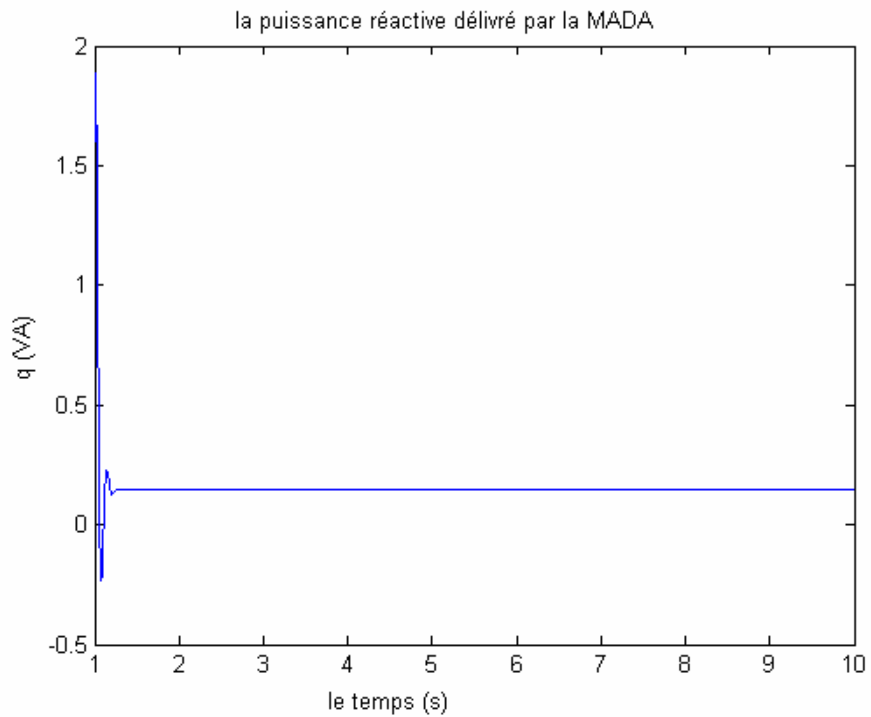


Figure 4.10 : puissance réactive délivrée par la MADA

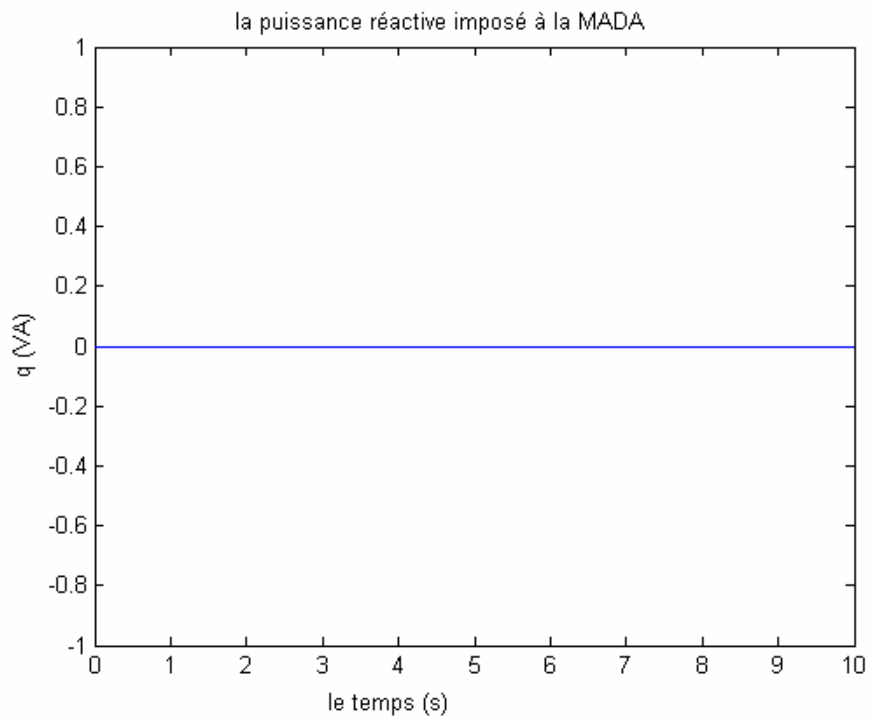


Figure 4.11 : Puissance réactive imposée à la MADA

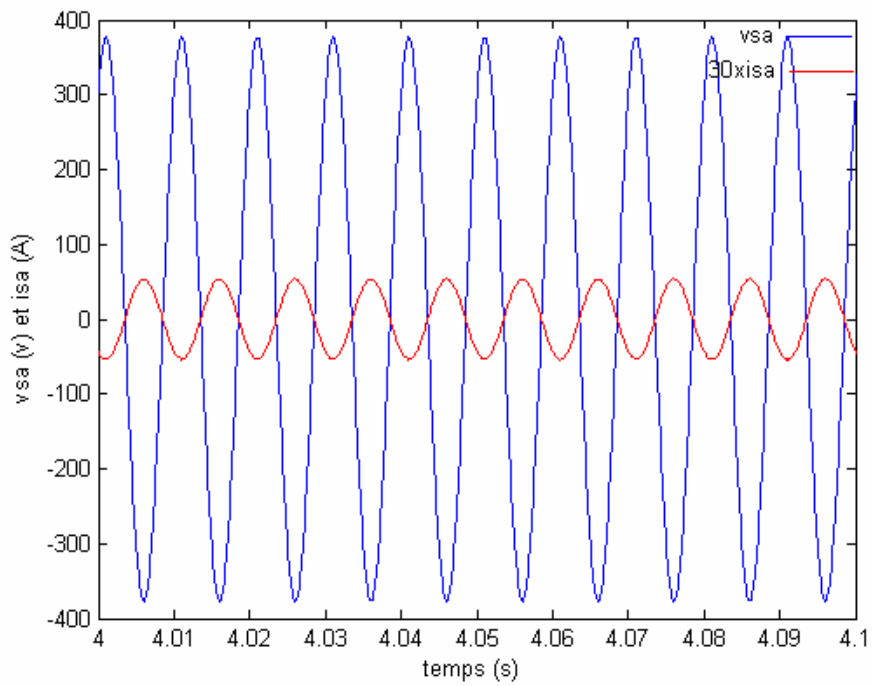


Figure 4.12 : Tension et courant statorique

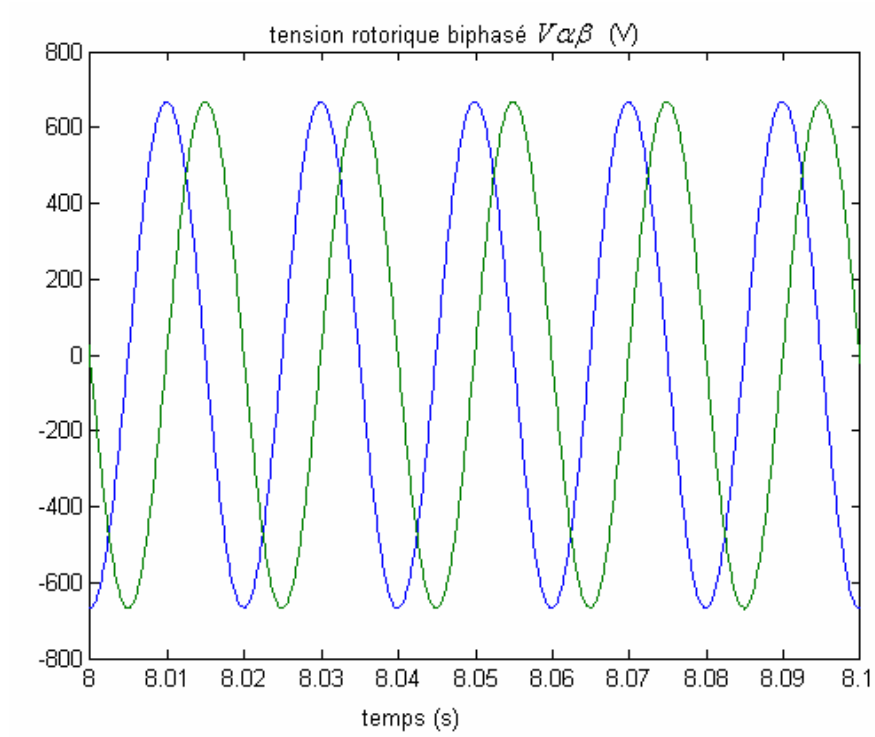


Figure 4.13 : Tensions rotoriques

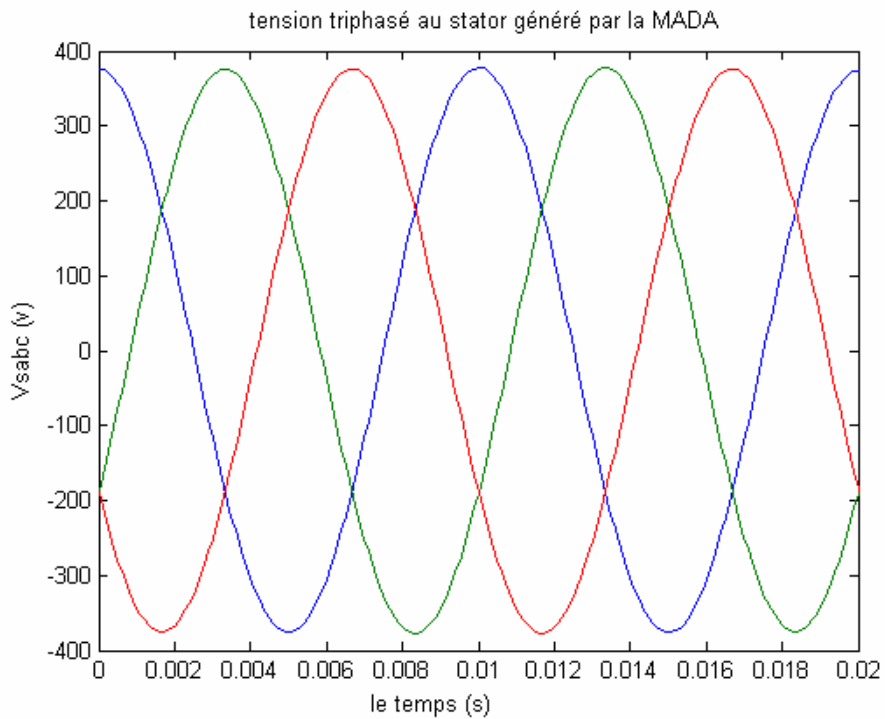


Figure 4.14 : tensions triphasées au stator

4.9 Interprétation des courbes

La figure (4-7) montre l'évolution temporelle de la vitesse mécanique de la génératrice.

La figure (4-9) et la figure (4-11) représente les puissances de référence active et réactive imposée à la MADA . La consigne de puissance réactive est maintenue à zéro afin d'assurer un facteur de puissance unitaire coté statorique.

On observe dans la figure (4-8) que la puissance active s'approche de la puissance de référence et la figure (4-10) montre que la puissance réactive reste nulle ; ce qui indique un bon contrôle de la machine.

Si maintenant, on analyse les signaux statoriques de la figure (4-12) , on remarque que la tension et le courant sont en opposition de phase; ce qui correspond bien à un facteur de puissance unitaire et à une puissance active négative c'est-à-dire produite par la MADA et envoyée sur le réseau.

La figure (4 -13) montre les tensions rotoriques dans les axes α, β , sinusoïdale de pulsation ω_r

La figure(4 -14) montre les tensions triphasées sinusoïdales délivrées par le stator, de pulsation ω_s

4.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons établi les différents types de commande vectorielle et les différents contrôles par l'orientation du flux et introduit ensuite une étude détaillée de la commande vectorielle par orientation du flux statorique.

Cette étude a montrée la possibilité de contrôle de la machine par les courants rotoriques, afin de déterminer la référence de la composante directe et en quadrature du courant rotorique à partir des puissances active et réactive.

La seconde partie de ce chapitre présente un calcul complet des régulateurs de type PI qui a servi de référence de comparaison, et enfin des résultats de simulation ont été présentés et montrent qu'il y a concordance avec ceux rencontrés dans de la littérature.

Cette étape montre bien la validité de notre commande.

Conclusion générale et perspectives

L'objectif préalablement défini de ce travail consistait à la modélisation et la commande des génératrices éoliennes. A la lumière de l'étude effectuée, nous avons vu les étapes successives permettons d'élaborer une stratégie de commande pour une génératrice éolienne jusqu'à sa mise en òuvre.

Dans le contexte des énergies renouvelables, un état de l'art de la génératrice éolienne est présenté dans le premier chapitre, on rappelle 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 amener à choisir la machine asynchrone à double alimentation de par ces qualités de fonctionnement.

La modélisation d'un système de génération d'énergie éolienne basé sur une machine asynchrone à double alimentation a été effectuée. La transformation de Park a été utilisée pour modéliser la génératrice et pour concevoir les différentes fonctions de sa commande. Ensuite, on a modélisé la turbine et l'onduleur ; ce qui nous a permis d'obtenir les courbes de variations des paramètres électriques et mécaniques pour les différents régimes de fonctionnement de la MADA.

Dans le troisième chapitre est consacré à une étude bibliographique des différentes stratégies de commande de la machine asynchrone à double alimentation. On en déduit que la stratégie de pilotage très majoritairement utilisée sur ce type de machine électrique est le contrôle vectoriel. Ce dernier est basé sur le principe d'orientation d'un champ.

De cette manière, les tensions, les courants et les divers flux ont été pris comme axe de liaison avec le repère tournant nécessaire. Nous avons concentré notre recherche sur l'utilisation d'une commande vectorielle à orientation du flux statorique. Nous avons développé ensuite le control vectoriel par orientation du flux statorique d'une machine asynchrone à double alimentation. Cette dernière est réalisée avec corrélation par des puissances de références afin de contrôler l'échange de puissances active et réactive entre le stator et le réseau.

La plupart des articles traitant de la MADA, aborde le fonctionnement en générateur comme pour la génération d'énergie éolienne. Parmi les avantages de ces générateurs, l'utilisation d'un seul convertisseur de puissance réduite au rotor associé à une commande vectorielle simple par laquelle on peut contrôler le facteur de puissance et le flux d'énergie.

La capacité de produire de l'électricité avec des facteurs de puissance proche de l'unité (par l'utilisation de condensateurs), réduirait les coûts et serait particulièrement avantageuse pour les distributeurs d'énergie électrique.

L'ensemble de ces travaux peut être poursuivi et complet par des perspectives pouvant contribuer à l'amélioration de l'ensemble chaîne de conversion éolienne réseau de distribution parmi les perspectives envisageables

-établissement d'un modèle de la MADA prenant en compte la saturation magnétique.

-pour la présente étude, la MADA était contrôlée de manière à ce que son coefficient de puissance soit unitaire .il serait judicieux d'évaluer le fonctionnement de cette dernière lorsqu'elle participe au contrôle de la tension du réseau en absence ou en présence de défauts

Pour assurer une plus grande disponibilité en énergie, plusieurs ressources renouvelables peuvent être interconnectées ensemble (éolienne photovoltaïque piles à combustibles) des études sont en cours sur ce sujet.

A mes parents,
pour leur amour
et leur soutien

REMERCIEMENTS

Le travail développé dans ce mémoire a été réalisé au sein du laboratoire d'Electrotechnique Mentouri de Constantine.

Je voudrais exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur Monsieur **Bouzid Aissa**, Professeur à l'Université Mentouri de Constantine, pour ses encouragements, son suivi continuél ainsi que sa rigueur et ses précieux conseils. Sans sa perspicacité et son appui, il aurait été impossible de mener à bien ce travail. Ses connaissances et son expérience resteront pour moi une source constante de savoir. J'ai une dette de reconnaissance envers lui.

Je suis particulièrement sensible à l'honneur que me fait Monsieur **Latreche Mohamed El-Hadi**, Professeur à l'Université Mentouri de Constantine d'avoir bien voulu présider mon travail.

Mes remerciements vont aussi à l'endroit de Messieurs **Boucherma Mohamed**, Chargé de cours à l'Université Mentouri de constantine, et **Benalla Houcine**, Professeur à l'Université constantine de m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être les examinateurs de ce mémoire.

Sur un plan plus personnel, J'aimerais maintenant remercier mes proches et en premier lieu mes parents à qui je dédie ce mémoire.

Et mon époux Nabil pour le soutien qu'il m'a apporté.

Je remercie mes sœurs et mes frère qui m'ont encouragé et conseillé, qui m'ont lu et fait part de leurs observations. Son oublié ma chère amie et sœur Fatima pour leur aide et encouragement.

Je remercie également mes meilleurs amie Wassilla ,Hagira , Hakima et son

oublié la plus douce femme dans notre
société Naftal Nacira.

Nombreux sont celles et ceux qui m'ont
apporté aide et encouragements au cours
de la préparation de ce mémoire. Qu'ils
en soient tous chaleureusement
remerciés.

Introduction générale

Aujourd'hui plus de 85% de l'énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou de l'énergie nucléaire.

Les formes de production d'énergie non renouvelables engendrent une forte pollution environnementale par rejet des gaz à effet de serre qui provoque un changement climatique irréversible ou dans le cas du nucléaire une pollution par radiations de longue durée qui pose, aujourd'hui, le problème du stockage des déchets radioactifs qui est encore non résolu.

La production énergétique est alors centralisée et mise en réseau entre plusieurs sites de production et de consommation. Cependant, le caractère capricieux des sources renouvelables pose le problème de la disponibilité énergétique et du stockage de masse, assuré actuellement principalement par l'hydraulique.

L'autre argument qui milite à l'avantage des sources renouvelables est lié à la pérennité de ces ressources d'énergie.

Une des propriétés qui limite l'utilisation de l'énergie renouvelable est liée au fait que la matière première (source de l'énergie) n'est pas transportable dans la majorité des cas contrairement aux sources traditionnelles comme le pétrole ou l'uranium qui sont extrait des gisements respectifs et acheminés « sans gros problèmes » vers les distributeurs ou les usines qui peuvent être éloignées des milliers de kilomètres ; par contre, le lieu de « l'extraction » de l'énergie renouvelable est déterminant. Pour le lieu de transformation seule la biomasse semble avoir les propriétés les moins restrictives par exemple un site éolien doit être précisément déterminé en choisissant les lieux géographiques les plus régulièrement ventés. Les panneaux solaires doivent évidemment être placés dans les zones bien ensoleillées.

Dans les zones où le réseau existe, il est donc pratique et, dans la majorité des cas, nécessaire de transformer l'énergie renouvelable sous la forme électrique qui est transportable via les lignes électriques.

Parmi les énergies renouvelables, trois grandes familles émergent : l'énergie d'origine mécanique (houle, éolienne), l'énergie électrique (panneaux photovoltaïques) et l'énergie sous forme de la chaleur (géothermie, solaire thermique), en sachant qu'à la base de toutes ces

énergies, il y a l'énergie en provenance du soleil transformée ensuite par l'environnement terrestre.

Etant donné que l'énergie mécanique est très difficilement transportable, elle n'est utilisable directement que ponctuellement (pompage direct de l'eau, moulins, etc.). Cette énergie est donc majoritairement transformée en énergie électrique.

A l'exception de la biomasse et de l'hydraulique, l'autre inconvénient majeur des énergies renouvelables vient de la non régularité de ces ressources, les fluctuations de demande en puissance, selon les périodes annuelles ou journalières, ne sont pas forcément en phase avec les ressources.

Face à la croissance de la consommation d'électricité et aux problèmes d'environnement planétaires (renforcement de l'effet de serre du fait des émissions de gaz polluants issus des ressources fossiles, pluies acides, développement de l'énergie nucléaire), l'éolien est une solution si l'on veut penser et agir localement. Cette énergie éolienne a l'avantage d'être non polluante à l'utilisation.

Un état de l'art de l'énergie renouvelable éolienne sera présenté dans le premier chapitre de ce mémoire. Il s'agit d'une étude assez détaillée du système éolien et des différentes structures existantes (les éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable et leur constitution).

Ensuite on aborde la définition de la vitesse du vent à travers les équations et les concepts physiques, ainsi que les différents types des génératrices utilisées dans la chaîne de conversion et les différentes architectures possibles.

Dans notre travail, on s'est intéressé à la génératrice à double alimentation.

Le second chapitre introduit la modélisation d'une chaîne de conversion éolienne basée sur une génératrice à double alimentation ; il est effectuée dans un repère diphasé lié au champ statorique, ensuite une modélisation d'un onduleur de tension contrôlé par MLI est effectuée et enfin une modélisation détaillée de la turbine éolienne.

La dernière partie de ce chapitre présente les résultats de simulation qui nous permettront de passer à la commande.

Le troisième chapitre présente une étude bibliographique assez poussée où un certain nombre d'articles de revues et de conférences est présenté.

On introduit aussi quelques stratégies de commande utilisées dans la machine à double alimentation.

Dans le quatrième et dernier chapitre de ce mémoire, on utilisera la commande vectorielle à flux statorique orienté, puis on présentera le calcul de régulateurs de type PI.

On validera la commande choisie par les résultats de simulation qui seront commentés.

Références Bibliographiques

- [1] Frédéric Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », thèse de doctorat de l'université de Nantes , soutenue le 19/12/2003,
- [2] Salama et Aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat de l'université des sciences et technologies de Lille1 (USTL),
- [3] Adam MIRECKI, « étude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse,
- [4] Haritza camblong « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable » thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers , soutenue le 18 /12/2003.
- [5] J. Martin, « Energies éoliennes », techniques de l'ingénieur, traite de génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21.
- [6] P. Leconte, M. Rapin, E. Széchenyi, « Eoliennes» , techniques de l'ingénieur, traité de Génie mécanique, pp. BM 4 640 21.
- [7] MENY IVAN, « Modélisation et réalisation d'une chaîne de conversion éolienne petite puissance» laboratoire d'électronique de Montpellier (LEM), soutenue le 14/12/2004.
- [8] Site Internet de l'Association Danoise de l'industrie éolienne,
<http://www.windpower.org/fr/core.htm>.
- [9] A.H. Al-Bahrani, « Analysis of Self-excited induction generators under unbalanced conditions», Electric Machines and power systems, 24, 1996, pp.117-129.

[10] F. ZIDANI, « Etude comparative par simulation numérique d'un pilotage vectoriel et scalaire d'une machine à induction alimentée par un onduleur à modulation de la largeur d'impulsion », Thèse de magister en électricité industrielle, Université de BATNA, 1996.

[11] J. P. CARON et J. P. HAUTIER, « Modélisations et commande de la machine asynchrone », Edition TECHNIP, 1995.

[12] B. Robyns, M.Esselin, «Power control of an inverter. Transformer association in a wind generator», Electromotion, vol.6, No. 1-2, 1999, pp.3-7.

[13] : B. MULTON, G. ROBIN, O. GERGAUD, H. BEN AHMED, « Le génie électrique dans le vent : état de l'art et recherches dans le domaine de la génération éolienne », JCGE03, Saint-Nazaire, 5 et 6 juin 2003.

[14] M. Machmoum , F. Poitiers, L. Moreau et M.E. .Zaim, R. le Doeuff, « Etude d'éoliennes à vitesse variable basées sur des machines asynchrones (MAS-MADA) » LARGE-GE44, Bd de l'université, Bp 406, 44602 Saint Nazaire Cedex. E-mail : mohamed.Machmoum@polytech.uni-nantes.fr.

[15] J.G. Slootweg, H. Polinder Member IEEE, W.L. Kling, Member, IEEE, « Dynamic Modelling of a Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator », Electrical Power Systems, 2Electncat Power Processing, Faculty of Information Technology and Systems, Delft University of Technology, P.O. Box 5031, 2600 GA Delft, The Netherlands
Phone: +31 152786219, Fax: +31 152781182, e-mail: j.g.slootweg@its.tudelft.nl

[16] Srinivas R. chellapilla , Badrul H. CVhowdhury, Senior Member, IEEE « A Dynamic model of Induction Generators for Wind power studies » [0-7803-7989-6/03/\\$17.00@2003](https://doi.org/10.7803-7989-6/03/$17.00@2003) IEEE.

[17] W.Hofmann , A.Thieme « Control of a Double- fed Induction Generator for Wind-power plants » Lehrstuhl elektrisch Maschinen und antriebe technische universitat Chemnitz reichenhainer Str. 70 D-09126 Chemnitz

- [18] Paul Gipe, collaborateur régulier des revues Independent Energy et Windstats. Et l'auteur des ouvrages Wind Power for Home & Business et Wind energy comes of age. « À l'étape de la maturité : L'énergie éolienne », <http://WWW.ilr.Tu-berlin.de/WKA/aletape.html>
- [19] Clebson Wagner Pereira, «L'énergie éolienne : Principe de fonctionnement, développement viable » revue 3EI, Mai - 2006
- [20] Krishna Vasudevan and P.Sasidhara Rao « A Modular Approach to the Simulation of Doubly Fed Induction Machine Systems » Department of Electrical Engineering Indian Institute of Technology Madras 600036, INDIA
- [21] Milutin G. Jovanovic* and Robert E. Betz « Slip power recovery systems based on brushless doubly fed reluctance machines » University of Northumbria at Newcastle, School of Engineering Ellison Building, Newcastle upon Tyne NE1 8ST, UK. Tel: +44-191-2273016,
Fax: +44-191-2273684 ,Email: milutin.jovanovic@unn.ac.uk University of Newcastle, NSW 2308, Australia
- [22] S. MÜLLER, M. DEICKE, & RIK W. DE DONCKER « Doubly FED Induction Generator systems for wind Turbines » IEEE Industry Applications Magazine. MAY/June 2002 , email WWW.IEEE.ORG/IAS
- [23] H.S. VICTORS , J.A TEGOPOULOS , Fellow IEEE « Study state Analysis of A Doubly FED induction generator under synchronous operation » National Technical University of Athens, Department of Electrical Engineering 106 82. Athens .GREECE .IEEE .Transactions on Energy conversion, Vol .4, NO.3, September 1989.
- [24] H.S. VICTORS , J.A TEGOPOULOS , Fellow IEEE « Transient State Analysis of A Doubly FED induction generator under Three Phase short circuit » IEEE National Technical University of Athens, Department of Electrical Engineering 106 82. Athens .GREECE .IEEE .Transactions on Energy conversion, Vol. 6, NO. 1, March 1991.
- [25] FAN LIAO, J I SHENG , AND THOMAS A. LIPO , fellow IEEE « A New energy recovery scheme for Doubly Fed A Justable Speed Induction Motor Drives » IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, NO. 4 , July / August 1991
- [26] M. Machmoum, M. Cherkaoui , R. Le Doeuff and F.M. Sargos « Steady state Analysis and Experimental investigation of DOUBLY FED induction machine supplied by a

«courant source» cycloconverter in the rotor» groupe de recherches en électrotechnique et électronique de NANCY .FRANCE .

[27] GERALD.M.BROWN, BARNA. BZABO DOS, senior member,IEEE,GERARD J . HOOLBOOM senior .member IEEE, and MIHEL .E POLOUJADOFF, fellow IEEE « High power cycloconverter drive for Double Fed induction Motors » IEEE transactions on Industrial electronics vol 39 N° 3 , june 1992 .

[28] G.M BROWN « Hybrid control of a cycloconverter for Double Fed motors in traction drivers » M.eng thesis , McMaster university , Hamilton , ontario 1984 en VIANT

[29] E. BOGALECKA , Z. KRZEMINSKI « control systems of doubly Fed induction machine supplied by current controlled voltage source inverter » Merchant Marine academy , Poland , the électrotechnical Institute.

[30] E. BOGALECHA « power control of double fed induction generator without speed or position sensor» brighton 13 16,9 .1993

[31] E . BOGALECHA, Z. KRZEMINSKI , and M. WEIRZEJESKI .1991 « control systems of the DFM working as a generator » PCIM conference , number 1 , GERMANY.

[32] D. ARSUDIS , W. VOLLSTEDT 1990 «sensor less power control of the DFM AC machine with nearly sinusoidal line current » EPE conference , Aachen , GERMANY.

[33] E. BOGALECHA «Dynamics of the power control of a double Fed induction generator connected to the soft power grid » Marchant Marine Academy Morska 83,81-225 GDYNIA , POLAND .

[34] WEI .CHENG , XU LONGYA « torque and reactive power control of a doubly fed induction machine by position sensorless scheme » the ohio state university department of electrical engineering 2015 Neil Avenue COLUMBUS ohio 43210.

[35] Buerhing, "Control policies for wind energy conversion systems", IEE-Proc, c 128, 5 .1981.

[36]:H. Overseth Rostoen, T. M. Undeland, T. Gjengedal, "Doubly Fed Induction Generator in a Wind Turbine", Wind Power and The Impacts on Power Systems, IEEE Workshop Oslo 17-18 june 2002.

[37] W. Hofmann, A. Thieme, : "Control of a double-fed induction generator for wind-power plants" PCIM'98 May 1998 Nürnberg. Power Quality Proceedings, pp. 275-282.

- [38] F.N. Okafor, W. Hofmann, B. Rabelo, "Modelling of a Doubly-Fed Wind-Powered Induction Generator Feeding a DC Load", EPE 2001 Conference, Aug 27-29, Graz, Austria. CD-ROM proceedings.
- [39] R. Ghosn, C. Asmar, M. Pietrzak-David, B. De Fornel, "Vector Control and Power Optimization of a Doubly Fed Induction Machine in Variable Speed Drives" EPE-PEMC '2000, Kosice, Slovak Republic, 5-7 September 2000, pp. 7-97 - 7-102.
- [40] S. Tzafestas, N. P. Papanikolopoulos, "Incremental fuzzy expert PID control", *IEEE Trans. On Indus. Elect. Vol.37, N°5, pp.365-371, October1990.*
- [41] S. Ghozzi, M. Gossa, M. Boussak, A. Ghaari, M. Jemli, "Application de la logique floue pour la commande vectorielle des machines électriques", *Journées Tunisiennes d'Electrotechnique et d'Automatique, JTEA, 1996.*
- [42] E. H. Mamdani, "Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis", *IEEE Trans. Computer, Vol. 26, N°12, pp.1182-1191, December1977.*
- [43] P. Borne, J. Rozinoer, J. Y. Dieulot, "Introduction à la commande floue", *Edition Technip, 1998.*
- [44] H. Bühler, «Le réglage par la logique floue », *Presses Polytechniques Romandes, 1994.*
- [45] D. Arsudis «Microprocessor control of a double-fed ac machine with a voltage source gto inverter in the rotor circuit »,ans Proc. EPE (Grenoble (France)), vol. 2, 1987, p. 899- 904.
- [46] J. Bendl, M. Chomat & L. Schreier ò Independent control of positive and negative sequence current components in doubly fed machine ò, dans Proc. ICEM (Brugge), août 25-28, 2002.
- [47] R. Datta & V.-T. Ranganathan òVariable speed wind power generation using doubly fed wound rotor induction machine, a comparison with alternative scheme ò, *IEEE Trans. Energy Conversion 17 (2002), no. 3, p. 414-421, sept. 2002.*
- [48] D. Forchetti, G. Garcia & M. Valla ò Vector control strategy for a double stand alone induction generator ò, dans Proc. IECON (Sevilla (Spain)), nov.5-8 2002.

- [49] R. Ghosn « Contrôle vectoriel de la machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation », Thèse , institut National Polytechnique de Toulouse, ENSEEIHT, Toulouse, 2001.
- [50] R. Ghosn, C. Asmar, M. Pietrzak-David & B. D. Fornel « A mras sensorless speed control of a doubly fed induction machine », dans Proc. ICEM (Brugge), août 25-28 2002.
- [51] L. Morel, H. Godfroid, A. Mirzaian & J. Kaufman «Double-fed induction machine : converter optimisation and field oriented control without position sensor », IEEE Proc.-Electr. Power Appl. 145 (1998), no. 4, p. 360{368, juil. 1998.
- [52] D. Lecocq & P. Lataire « Study of a variable speed, double fed induction motor drive system with both stator and rotor voltages controllable», dans Proc. EPE (Firenze), 1991, p. 337{339.
- [53] W. Hofmann & F. Okafor «Doubly fed full controlled induction wind generator for optimal power utilisation», dans Proc. PEDS'01, International conference on Power Electronics and Drives Systems (Bali Indonesia), oct. 2001.
- [54] , «Stator-flux-oriented control of a doubly-fed induction machine with and without position encoder» , IEE Proc.-Electr. Power Appl. 147 (2000), no. 4, p. 241{250, juil. 2000.
- [55] B. Hopfensperger, D. J. Atkinson & R. A. Lakin «Stator flux oriented control of a cascaded doubly-fed induction machine», IEE Proc.-Electr. Power Appl. 146 (1999), no. 6, p. 597-605, 1999.
- [56] « Combined magnetising flux-oriented control of the cascaded doubly fed induction machine », IEE Proc.-Electr. Power Appl. 148 (2001), no. 4,p. 354{362, 2001.

- [57] Y. Kawabata, E. Ejiogu & T. Kawabata δ Vector controlled double inverter fed wound rotor induction motor suitable for high power drives δ , IEEE Trans. Industry Applications 35 (1999), no. 5, p. 1058{1066, sept./oct. 1999.
- [58] Z. Krzeminski, A. Popenda, M. Melcer & P. Ladach δ Sensorless control system of double fed induction machine with predictive current controller « , dans Proc. EPE (Graz), août 2001.
- [59] D. Lecocq & P. Lataire δ Study of a variable speed, double fed induction motor drive system with both stator and rotor voltages controllable δ , dans Proc. EPE (Firenze), 1991, p. 337-339.
- [60] D. Lecocq, P. Lataire & W. Wymeersch δ Application of the double fed asynchronous motor (dfam) in variable-speed drives δ , dans Proc. EPE (Brighton), sept. 1993, p. 419{423.
- [61] δ The indirect-controlled double fed asynchronous motor for variable speed Drives δ , dans Proc. EPE (Sevilla), vol. 3, 1995, p. 405-410.
- [62] M. Machmoum, M. Cherkaoui, R. L. Doeuff & F. Sargos δ Steady state analysis and experimental investigation of a doubly-fed induction machine supplied by a (current-source) cycloconverter in the rotor δ , Proc. IEEE 139 (1992), no. 2, p. 81{86, mar. 1992.
- [63] M. Machmoum, M. Cherkaoui, F. Sargos & A. Rezzoug δ Modelling of doubly-fed asynchronous machines, application to a voltage supply, modelling and control of electrical machines : New trends δ , p. 71{76, Elsevier Science Publishers B.V., North Holland, 1991.
- [64] L. Morel, H. Godfroid, A. Mirzaian & J. Kaufman δ Double-fed induction machine : converter optimisation and field oriented control without position sensor δ , IEEE Proc.-Electr. Power Appl. 145 (1998), no. 4, p. 360{368, juil. 1998.
- [65] R. Pena, R. Cardenas, G. Asher & P. C. JC. Clare, J. Rodriguez δ Vector control of a diesel-driven doubly fed induction machine for stand alone variable speed energy system δ , dans Proc. IECON'02 (Sevilla (Spain)), nov.5{8 2002.

- [66] S. Peresada, A. Tilli & A. Tonielli ÷ Robust output feedback control of a doubly fed induction machine ÷, dans Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics ISIE'99 (Bled Slovenia), 1999, p. 1256{1260.
- [67] ÷ Power control of a doubly fed induction machine via output feedback ÷, avr. 2003.
- [68] G. Poddar & V. Ranganathan ÷ Sensorless field oriented control of double fed inverter wound rotor induction motor drive ÷, dans Proc. IECON'02 (Sevilla (Spain)), nov.5{8 2002.
- [69] D. Ramuz « Machine généralisée alimenté par deux convertisseurs », Thèse, Institut de Génie Energétique de Belfort, UFR des Sciences, Techniques et Gestion de l'Industrie de l' Université de Franche Comté 90000 Belfort (France), mai 2000.
- [70] A. Sapin, A. Hodder, J.-J. Simond & D. Schafer ÷ Doubly fed asynchronous machine with 3-level vsi for variable speed pump storage ÷, dans Proc. ICEM 2000 (Espoo Finland), aout 28-30 2000.
- [71] A. M. Walczyna ÷ Simulation study of dynamics of current-controlled doubly-fed induction machine ÷, dans Proc. EPE (Aachen), vol. 2, 1989, p. 876-88.
- [72] ÷ Comparison of dynamics of doubly-fed induction machine controlled in _eld and rotor-oriented axes Ø, dans Proc. EPE (Firenze), vol. 2, 1991, p. 231{236.
- [73] S. Wang & Y. Ding ÷ Stability analysis of _eld oriented boubly-fed machine drive based on computer simulation ÷, Electric Machines and Power System 21 (1993), p. 11{24, 1993.
- [74] L. Xu & W. Cheng ÷ Torque and reactive power control of a doubly fed induction machine by position sensorless schem ÷, IEEE trans. On Industry Application 31 (1995), no. 3, p. 636{642, mai/juin 1995.
- [75]C.saget , « la variation électronique de vitesse au service de la production d'ènergie électrique par éolienne » .REE , n° 7, juiullet 1998, pp. 42-48.

- [76] J. Usaola, P. Ledesma, J.M. Rodríguez, J.L. Fernández, D. Beato, R. Iturbe, J.R. Wihelimi, « transient stability studies in grids with great wind power penetration. modelling issues and operation requirements », 2003 IEEE PES. Transmission and distribution conference and exposition, September 7-12, 2003, Dallas (USA), CD.
- [77] E. De Vries, « wind turbines technology trends » vol 6, N°4, Jarnes et Jarnes (science publishers), renewable energy world, July-August 2003.
- [78] E.S. Abdin, W. Xu « control design and dynamic performance analysis of a wind turbine induction generator unit » IEEE Trans, on energy conversion, vol 15, N° 1, March 2000.
- [79] R. Mukand Patel, « wind and solar power systems » CRC .press, 1999.
- [80] J. Wilkie, W.E. Leithead, C Anderson, « modelling of wind turbines by simple models wind engineering » vol 14, N° 4, 1990, pp 247-274.
- [81] H. Tamrabet « robustesse d'un contrôle vectoriel de structure minimale d'une MAS » mémoire de magister option électronique de puissance univ de Batna soutenu le 20/05/2006
- [82] S. Drid « contribution à la modélisation et à la commande robuste d'une machine à induction double alimentation à flux orienté avec optimisation de la structure d'alimentation » thèse de doctorat option électrotechnique univ de Batna soutenu 2005

ملخص

هذه الدراسة تشمل كل من التمثيل والتحكم في المولدات الهوائية، وقد اختارنا في دراستنا المولدة ثنائية التغذية بإسعمال التحكم الإشعاعي يتدفق الأساكن الموجه لكي يتمكن من مراقبة التبادل الاستطاعة بين الساكن والشبكة الكهربائية بتأثر على إشارات الدوار عن طريق المبدلات ثنائي الاتجاه.

Résumé

Cette étude élabore la modélisation et la commande des génératrices éoliennes, nous avons choisi dans notre étude la génératrice à double alimentation avec commande vectorielle à flux statorique orienté, pour pouvoir contrôler l'échange de puissance entre le stator et le réseau en agissant sur les signaux rotoriques via un convertisseur bidirectionnel. Cette commande est élaborée et testée en synthétisant un type de régulateur linéaires : proportionnel intégrateur.

Abstract

This study presented the wind generators modeling and control, we have choose the double supplied generator with direct stator oriented vectorial control, the control of power exchange between the machine stator and the network is given by the acting on the rotor signals via a bidirectional converter. This control is tested by using a linear PI controller

Les notations utilisé dans le chapitre1	
MADA	Machine à double alimentation
V_1	Vitesse du vent en amont
V_2	Vitesse du vent en aval
ρ	La densité d'air
S	La surface active de la voile
m	La masse d'air en mouvement
P_m	La puissance extraite du vent
P_{mt}	La puissance totale théorique
C_p	Le coefficient de puissance
λ	La vitesse relative
P_{max}	La puissance maximale
R	Le rayon de la voile
Ω_1	La vitesse de rotation avant multiplicateur
Ω_2	La vitesse de rotation après multiplicateur
P_{mg}	La puissance mécanique disponible sur l'arbre du générateur
g	Le glissement
P	La puissance transmise entre le stator et le rotor
Les notations utilisé dans le chapitre2	
fmm	La force magnétomotrice
V_{sa}	La tension à la phase statorique a
V_{sb}	La tension à la phase statorique b
V_{sc}	La tension à la phase statorique c
V_{ra}	La tension à la phase rotorique a
V_{rb}	La tension à la phase rotorique b
V_{rc}	La tension à la phase rotorique c
R_s	La résistance statorique
R_r	La résistance rotorique
I_{sa}	L'intensité de courant à la phase statorique a
I_{sb}	L'intensité de courant à la phase statorique b
I_{sc}	L'intensité de courant à la phase statorique c
Erreur ! Des objets ne peuvent pas être créés à partir des codes de champs de mise en forme.	L'intensité de courant à la phase rotorique a
Erreur ! Des objets ne peuvent pas être créés à partir des codes de champs de mise en forme.	L'intensité de courant à la phase rotorique b
Erreur ! Des objets ne peuvent pas être créés à partir des codes de champs de mise en forme.	L'intensité de courant à la phase rotorique c
ϕ_{sa}	Le flux statorique à la phase a
ϕ_{sb}	Le flux statorique à la phase b
ϕ_{sc}	Le flux statorique à la phase c
ϕ_{ra}	Le flux rotorique à la phase a

ϕ_{rb}	Le flux rotorique à la phase b
ϕ_{rc}	Le flux rotorique à la phase c
$[L_s]$	La matrice de l'inductance propres statorique
$[L_r]$	La matrice de l'inductance propres rotorique
$[M_{sr}]$	Mutuelle inductance entre les deux bobes
Γ_e	Le couple électromagnétique
Γ_c	Le couple résistant
J	L'inertie
Ω	La vitesse mécanique du rotor
ω_r	Pulsation des courants rotorique
P	Le nombre de paire de pole
V_{sd}, V_{sq}	Les tensions statorique en composante directs et en quadrature
V_{rd}, V_{rq}	Les tensions rotorique en composante directs et en quadrature
$[p(\theta)]$	La matrice de park. modifie
$[p(\theta)]^{-1}$	La matrice de park modifie inverse
ϕ_{sd}, ϕ_{sq}	Le flux statorique en composante directs et en quadrature
ϕ_{rd}, ϕ_{rq}	Le flux rotorique en composante directs et en quadrature
R	Longueur d'une pales
$\Omega_{turbine}$	La vitesse de la turbine
G	Gain du multiplicateur
K_b	Coefficient d'élasticité
f_{pale}	Le coefficient de frottement des pales
D_h	Le coefficient de frottement des pales par rapport au multiplicateur
C_g	Le couple transmis par le rotor
T_{b1}	Forces de poussées
β	L'angle de l'orientation des pales
C_{aer}	Le couple aérodynamique
P_{aer}	La puissance aérodynamique
Ω_{mec}	La vitesse mécanique
J_g	L'inertie de la génératrice
$J_{turbine}$	L'inertie de la turbine
C_{mec}	Le couple mécanique
C_{vis}	Le couple des frottements visqueux
f	Le coefficient de frottement
Les notations utilisé dans le chapitre 3	

PI	Proportionnel intégrateur
NPC	Onduleur multi niveaux
Ω	La vitesse mécanique du rotor
\bar{u}_s	La tension complexe statorique
R_s	La résistance statorique
\bar{i}_s	L'intensité du courant complexe du stator
\bar{E}_s	La force électromotrice complexe
M_{sr}	Inductance cyclique propre stator, rotor
$\omega_{s,r}$	Pulsation des courant statorique, rotorique
T_r	Constant de temps rotorique ($T_r = L_r / R_r$)
s	L'opérateur de dérivation
J	Moment d'inertie
Les notations utilisé dans le chapitre 4	
C_e	Le couple électromagnétique
p	Le nombre de paire de pole
σ	Le coefficient de dispersion
$V_{sd,sq}$	La tension directe et en quadrature du stator
$V_{rd,rq}$	La tension directe et en quadrature du rotor
$i_{sd,sq}$	Courant directe et en quadrature du stator
$i_{rd,rq}$	Courant directe et en quadrature du rotor
P	Puissance active
Q	Puissance réactive
k_p	Le gain proportionnel du correcteur
k_i	Le gain intégrateur du correcteur
f_t	La fonction de transfert
f_{tbo}	La fonction de transfert en boucle ouvert
f_{tbf}	La fonction de transfert en boucle fermée
τ	Le temps de réponse
T_r	Le constant de temps rotorique

Annéxe1

Les paramètres de la machine asynchrone à double alimentation :

**$R_s=0,455 \text{ .}$; $R_r=0,62 \text{ .}$; $L_s=0,084 \text{ H}$; $L_r=0,081 \text{ H}$; $M= 0.078 \text{ H}$; $J=0.3125 \text{ kg.m}^2$;
 $f=6,73.10^{-3} \text{ N.m.s}^{-1}$; $n_p=2$;**

Les paramètres de la machine à courant continue :

$R_a=0.6$; $L_a=0.03$; $J_{an}=0.6$; $B_m=1e-5$; $K_v=1.85$;

Annéxe 2

I-Stratégies de fonctionnement d'une éolienne

I. 1- Bilan des forces sur une pale :

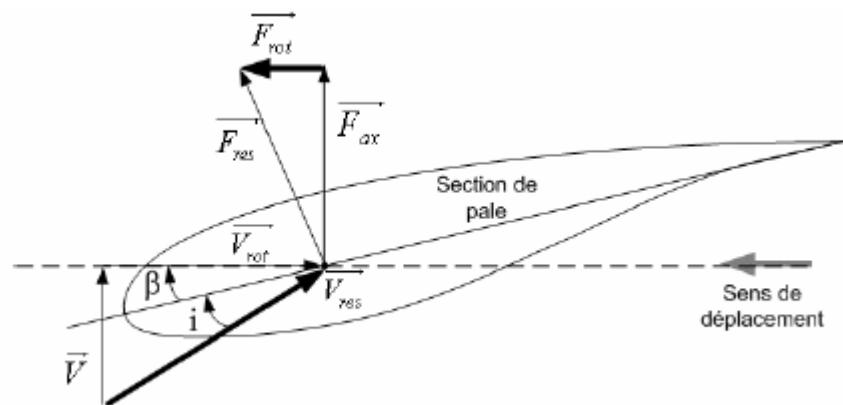


Figure 1-1 bilan des forces sur une pale

Figure 1-1 représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur. La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représenté par le vecteur \vec{v} . Le vecteur \vec{v}_{rot} représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée \vec{v}_{res} . L'action du vent sur la pale produit une force \vec{F}_{res} qui se décompose en une poussée axiale \vec{F}_{ax} directement compensée par la résistance mécanique du mat et une poussée en direction de la rotation \vec{F}_{rot} qui produit effectivement le déplacement. Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse de vent nominale donnée. Lorsque la vitesse de vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale.

II- Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne

II. 1- Système à décrochage aérodynamique "stall"

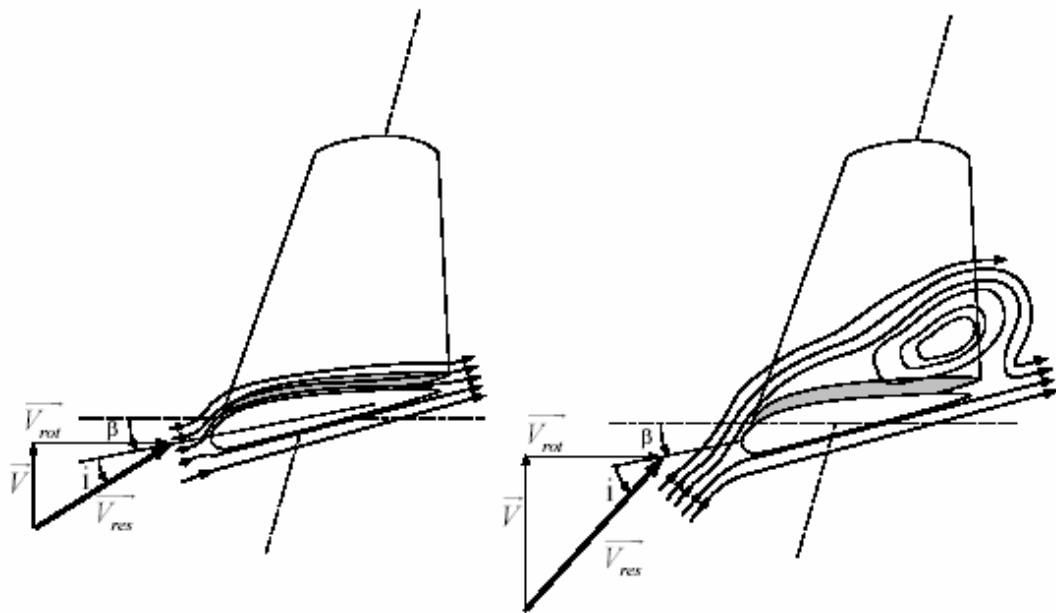


Figure 1-2 : Flux d'air sur un profil de pale " stall "

La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessitent une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau. Le système de limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux est un système de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence i devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale V_n , l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale (Figure 1-2) et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation.

Ce système est simple et relativement fiable mais il manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales donc de leur état de propreté. Il peut, dans certains cas, être amélioré en autorisant une légère rotation de la pale sur elle-même (système "stall actif") permettant ainsi de maximiser l'énergie captée pour les faibles vitesses de vent. Pour les fortes vitesses de vent, la pale est inclinée de façon à diminuer l'angle de calage et renforcer ainsi l'effet "stall" de la pale. La répercussion des variations de vitesse de vent sur le couple mécanique fournie par l'éolienne est ainsi moins importante.

II.2- Système d'orientation des pales "pitch"

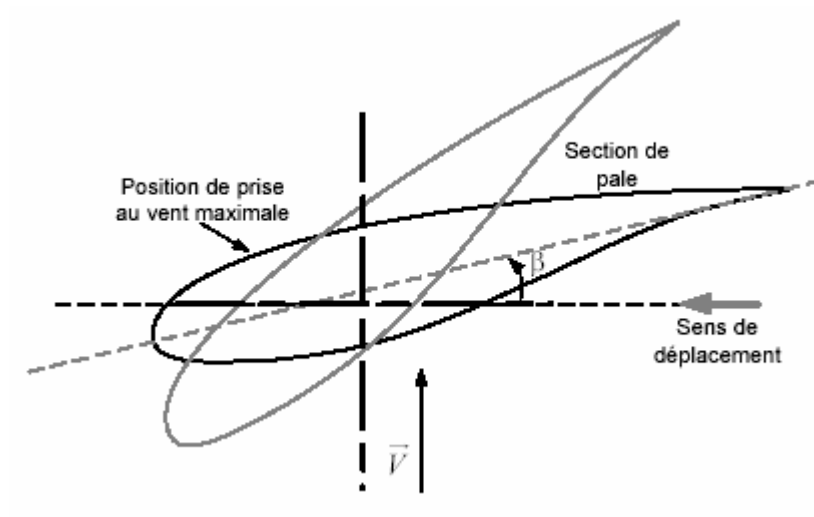


Figure 1-3 : Variation de l'angle de calage d'une pale